

人間－熱環境系快適性数値シミュレータの開発

(課題番号 12355022)

平成 12～15 年度科学研究費補助金（基盤研究(A)(2)）

研 究 成 果 報 告 書

平 成 1 6 年 3 月

研究代表者 田 辺 新 一

(早稲田大学理工学部建築学科)

平成 12～15 年度科学研究費補助金（基盤研究(A)(2)）

研究課題 人間—熱環境系快適性数値シミュレータの開発
課題番号 12355022

研究組織

研究代表者 田辺 新一（早稲田大学理工学部・教授）

研究分担者 木村 建一（早稲田大学理工学部・名誉教授）

永井 正則（山梨県環境科学研究所・室長）

尾関 義一（旭硝子(株)・主席研究員）

中野 淳太（早稲田大学理工学部・助手）

西原 直枝（日本学術振興会・特別研究員）

研究協力者 小西正哲、平松徹也、有城朗子、桂川涼子（旭硝子(株)）

成田千恵、高木理佐、山本ゆう子（お茶の水女子大学大学院（当時））

奥田 篤、小林弘造、江森 豊、小川一晃、後藤邦彦、田丸英司、

田中幸治、野口真史、佐藤孝弘、徐 莉、下田利崇、白井良太、藤井浩史、

森井健志（早稲田大学大学院（当時））

堤 仁美（早稲田大学理工学総合研究センター）

研究経費 平成 12 年度 7, 6 0 0 千円
平成 13 年度 6, 1 0 0 千円
平成 14 年度 5, 5 0 0 千円
平成 15 年度 3, 8 0 0 千円

研究発表

I 論文

- Y.Ozeki, M.Konishi, C.Narita, S.Tanabe : Angle Factors Between Human Body and Rectangular Planes Calculated by a Numerical Model, ASHRAE Trans., Vo 1 .106(2), pp.551-520, 2000
- S.Tanabe, C.Narita, Y.Ozeki, M.Konishi : Effective radiation area of human body calculated by a numerical simulation, Energy and Buildings, Vol.32, pp.205-215, 2000
- 田辺新一, 中野淳太, 小林弘造 : 温熱環境評価のための 65 分割体温調節モデルに関する研究, 日本建築学会計画系論文報告集, No.541, pp.9-16, 2001
- 中野淳太, 李晟在, 田辺新一, 木村健一 : 多国籍の執務者が混在する高密度熱負荷オフィスにおける温熱、空気環境及び居住快適性実測調査, 日本建築学会計画系論文集, No.545, pp.45-50, 2001
- 成田千恵, 田辺新一, 尾関義一, 小西正哲 : 日射の波長特性が温熱感に与える影響に関する研究—人工太陽灯と光学フィルタによる可視域・近赤外域・中赤外域放射が—対比較照射により手背の感覚量に与える影響—, 日本建築学会計画系論文集, No.545, pp.29-35, 2001
- 尾関義一, 平松徹也, 小西正哲, 中野淳太, 田辺新一 : 日射環境下におけるサーマルマネキ

ン周りの対流熱伝達率の評価, 日本建築学会計画系論文集, No.555, pp.29-36, 2002

- J.Nakano, S.Tanabe, K.Kimura : Differences in perception of indoor environment between Japanese and non-Japanese workers, Energy and Buildings, No.34, pp.615-621, 2002
- S.Tanabe, K.Kobayashi, J.Nakano, Y.Ozeki, M.Konishi : Evaluation of thermal comfort using combined multi-node thermoregulation (65MN) and radiation models and computational fluid dynamics (CFD), Energy and Buildings, No.34, pp.637-646, 2002
- 中野淳太, 田辺新一 : 緩衝空間が歩行移動後の熱的快適性に与える影響に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, No.565, pp.33-40, 2003
- 尾関義一, 平松徹也, 田辺新一 : 人体に対する放射熱授受を表現する全身の重み係数の数値計算による算出, 日本建築学会環境系論文集, No.566, pp.47-50, 2003
- M.Nagai, M.Wada, Y.Kobayashi, S.Togawa : Effects of lumbar skin warming on gastric motility and blood pressure in humans, Japanese Journal of Physiology, Vol. 53(1), pp.45-51, 2003

II 海外発表

- K.Kobayashi, J.Nakano and S.Tanabe : Development of 65-node Thermoregulation Model for Evaluation of Thermal Environment, Proceedings of Healthy Buildings 2000, Vol.2, pp.563-568, 2000
- S.Tanabe, K.Kobayashi, J.Nakano, Y.Ozeki, M.Konishi : A comprehensive combined analysis with multi-node thermoregulation model (65MN), radiation model and CFD for evaluation of thermal comfort, Moving Thermal Comfort Standards into the 21st Century Conference Proceedings, pp.122-134, 2001.4
- J.Nakano, S.Tanabe, and K.Kimura : Differences in perception of indoor environment between Japanese and non-domestic workers, Moving Thermal Comfort Standards into the 21st Century Conference Proceedings, pp.273-281, 2001.4
- C.Narita, S.Tanabe, Y.Ozeki, M.Konishi : Effects of spectral property of solar radiation on thermal sensation at back of hands, Moving Thermal Comfort Standards into the 21st Century Conference Proceedings, pp.393-400, 2001.4
- S.Tanabe, Y.Ozeki, T.Takabayashi : Numerical Prediction of Thermal Comfort in a Vehicle with Solar Reflection Glass, ROOMVENT 2002, pp.653-656, 2002
- J.Nakano, K.Goto, M.Noguchi, H.Fujii, T.Shimoda, and S.Tanabe : Seasonal Field Survey on Thermal Comfort Conditions in Semi-Outdoor Spaces, Proc. of Indoor Air 2002, Vol.IV, pp.1107-1112, 2002
- J.Nakano, S.Tanabe : Thermal comfort conditions in semi-outdoor environments for short-term occupancy, Proceedings of Healthy Buildings 2003, pp.755-760, 2003
- J.Nakano, S.Tanabe : Behavioural adaptation in semi-outdoor environment, Proceedings of Healthy Buildings 2003, pp.816-821, 2003
- T.Shimoda, M.Noguchi, J.Nakano, S.Tanabe : Thermal environment and behavioural adaptation in semi-outdoor cafeteria, Proceedings of Healthy Buildings 2003, pp. 822-827, 2003
- T.Sato, L.Xu, K.Ogawa, S.Tanabe : Development of human thermoregulation model JOS applicable to different types of human body, Proceedings of Healthy Buildings 2003, pp. 828-834, 2003
- S.Watanabe, S.Tanabe : Numerical calculation of angle factor and effective radiation area for humans

and animals using hemi-cube method, Proceedings of Healthy Buildings 2003, pp.19-24, 2003

- Y.Ozeki, T.Takabayashi, S.Tanabe : Effects of Spectral Properties of Glass on Thermal Comfort of Car Occupants, SAE Technical paper series, 2003-01-1074, 2003

III 国内発表

(日本建築学会学術講演梗概集)

- 田辺新一：人間－熱環境系快適性数値シミュレータ（その 1）シミュレータの構成と概要, pp.389-390, 2000
- 小川一晃, 小林弘造, 田辺新一：人間－熱環境系快適性数値シミュレータ（その 2）体内温度分布を考慮した数値体温調節モデル-3DM, pp.391-392, 2000
- 小林弘造, 小川一晃, 田辺新一：人間－熱環境系快適性数値シミュレータ（その 3）改良版 Fu モデル-3DM による不均一温熱環境評価, pp.393-394, 2000
- 中野淳太, 奥田篤, 後藤邦彦, 田丸英司, 田辺新一：人間－熱環境系快適性数値シミュレータ（その 4）非定常温熱環境測定に関する考察, pp.395-396, 2000
- 田丸英司, 中野淳太, 奥田篤, 後藤邦彦, 尾関一義, 小西正哲, 田辺新一：人間－熱環境系快適性数値シミュレータ（その 5）車室内温熱環境の実測, pp.397-398, 2000
- 後藤邦彦, 中野淳太, 奥田篤, 田丸英司, 尾関一義, 小西正哲, 田辺新一：人間－熱環境系快適性数値シミュレータ（その 6）車室内クールダウン被験者実験, pp.399-400, 2000
- 江森豊, 成田千恵, 尾関一義, 小西正哲, 田辺新一：人間－熱環境系快適性数値シミュレータ（その 7）日射の波長特性が感覚量に与える影響に関する研究, pp.401-402, 2000
- 成田千恵, 江森豊, 尾関一義, 小西正哲, 田辺新一：人間－熱環境系快適性数値シミュレータ（その 8）異なる波長帯放射による痛さ感への影響, pp.403-404, 2000
- 小西正哲, 尾関一義, 成田千恵, 江森豊, 田辺新一：人間－熱環境系快適性数値シミュレータ（その 9）皮膚マイクロモデル（感覚量数学モデル）による温覚閾値の検討, pp.405-406, 2000
- 尾関一義, 小西正哲, 平松徹也, 田辺新一：人間－熱環境系快適性数値シミュレータ（その 10）体温調節 65MN モデルと CFD・放射との総合連成解析, pp.407-408, 2000
- 平松徹也, 尾関一義, 小西正哲, 田辺新一：人間－熱環境系快適性数値シミュレータ（その 11）窓ガラス特性が人体快適性に与える効果, pp.409-410, 2000
- 小林弘造, 小川一晃, 田辺新一：人間－熱環境系快適性数値シミュレータ（その 12）四肢血管系の対向流熱交換を考慮した人体熱モデル COM の開発, pp.339-340, 2001
- 小川一晃, 小林弘造, 田辺新一：人間－熱環境系快適性数値シミュレータ（その 13）人体熱モデル COM による温熱環境評価, pp.341-342, 2001
- 江森豊, 成田千恵, 尾関一義, 小西正哲, 田辺新一：人間－熱環境系快適性数値シミュレータ（その 14）日射の波長特性が異なる人体部位の感覚量に与える影響に関する研究, pp.343-344, 2001
- 野口真史, 中野淳太, 後藤邦彦, 田中幸治, 田辺新一：人間－熱環境系快適性数値シミュレータ（その 15）緩衝空間が歩行移動後の熱的快適性に与える影響 実験概要、心理量に関する考察, pp.345-346, 2001
- 田中幸治, 中野淳太, 後藤邦彦, 野口真史, 田辺新一：人間－熱環境系快適性数値シミュレータ（そ

- の 16) 緩衝空間が歩行移動後の熱的快適性に与える影響 生理量・心理量の相関及び男女差, pp.347-348, 2001
- ・ 後藤邦彦, 中野淳太, 田中幸治, 野口真史, 田辺新一: 人間-熱環境系快適性数値シミュレータ (その 17) 緩衝空間が歩行移動後の熱的快適性に与える影響 同実験条件下における夏季と冬季の比較, pp.349-350, 2001
 - ・ 中野淳太, 後藤邦彦, 野口真史, 田中幸治, 田辺新一: 人間-熱環境系快適性数値シミュレータ (その 18) 緩衝空間が歩行移動後の熱的快適性に与える影響 滞在時間と設定温度の影響, pp.351-352, 2001
 - ・ 平松徹也, 尾関義一, 小西正哲, 中野淳太, 田辺新一: 人間-熱環境系快適性数値シミュレータ (その 19) 体温調節モデル妥当性検討のためのアトリウム実験, pp.353-354, 2001
 - ・ 尾関義一, 小西正哲, 平松徹也, 中野淳太, 田辺新一: 人間-熱環境系快適性数値シミュレータ (その 20) 日射環境におけるサーマルマネキン周りの対流熱伝達率の算出, pp.355-356, 2001
 - ・ 成田千恵, 尾関義一, 小西正哲, 田辺新一: 人間-熱環境系快適性数値シミュレータ (その 21) 数値解析による日射の体感影響の評価, pp.357-358, 2001
 - ・ 徐莉, 佐藤孝広, 小川一晃, 田辺新一: 人間-熱環境系快適性数値シミュレータ (その 22) 体温調節モデル JOS の開発-AVA を含む血管系の考慮, pp.361-362, 2002
 - ・ 佐藤孝広, 徐莉, 小川一晃, 田辺新一: 人間-熱環境系快適性数値シミュレータ (その 23) 体温調節モデル JOS の開発-体躯・年齢・性別の考慮, pp.363-364, 2002
 - ・ 尾関義一, 平松徹也, 田辺新一: 人間-熱環境系快適性数値シミュレータ (その 24) 数値計算による人体に対する熱放射を表現する重み係数の評価, pp.365-366, 2002
 - ・ 尾関義一, 桂川涼子, 田辺新一: 人間-熱環境系快適性数値シミュレータ (その 25) 日射環境下における拡張体温調節 65MN モデルの予測結果と被験者実験結果との比較, pp.497-498, 2003
 - ・ 佐藤孝広, 中野淳太, 田辺新一: 人間-熱環境系快適性数値シミュレータ (その 26) 人体熱モデル JOS による非定常温熱環境の生理量に関する考察, pp.499-500, 2003
 - ・ 徐莉, 田辺新一: 人間-熱環境系快適性数値シミュレータ (その 27) 体温調節モデル JOS を用いた UTCL 算出の試み, pp.501-502, 2003
 - ・ 後藤邦彦, 中野淳太, 野口真史, 藤井浩史, 下田利崇, 田辺新一: 半屋外空間における熱的快適性実測調査 その 1: 実測調査概要, pp.383-384, 2002
 - ・ 下田利崇, 中野淳太, 後藤邦彦, 野口真史, 藤井浩史, 田辺新一: 半屋外空間における熱的快適性実測調査 その 2: 実測調査地の利用状況, pp.385-386, 2002
 - ・ 藤井浩史, 中野淳太, 後藤邦彦, 野口真史, 下田利崇, 田辺新一: 半屋外空間における熱的快適性実測調査 その 3: 滞在者の着衣量と適応行動, pp.387-388, 2002
 - ・ 野口真史, 中野淳太, 後藤邦彦, 下田利崇, 藤井浩史, 田辺新一: 半屋外空間における熱的快適性実測調査 その 4: 物理環境および快適要素申告結果, pp.389-390, 2002
 - ・ 中野淳太, 後藤邦彦, 野口真史, 藤井浩史, 下田利崇, 田辺新一: 半屋外空間における熱的快適性実測調査 その 5: 温冷感と物理環境の相関, pp.391-392, 2002
 - ・ 下田利崇, 中野淳太, 野口真史, 藤井浩史, 森井健志, 田辺新一: 半屋外空間における熱的快適性実測調査 その 6 四季を通じた環境適応行動の特性, pp.523-524, 2003

- ・ 中野淳太, 野口真史, 藤井浩史, 下田利崇, 森井健志, 田辺新一: 半屋外空間における熱的快適性実測調査 その7 四季を通じた熱的快適性の特性, pp.525-526, 2003
- ・ 野口真史, 下田利崇, 中野淳太, 森井健志, 藤井浩史, 田辺新一: 半屋外空間における熱的快適性実測調査 その8 室内併設空間における環境適応実測調査概要, pp.527-528, 2003
- ・ 森井健志, 下田利崇, 中野淳太, 野口真史, 藤井浩史, 田辺新一: 半屋外空間における熱的快適性実測調査 その9 室内併設空間における滞在状況と物理環境の相関, pp.529-530, 2003
- ・ 藤井浩史, 田辺新一, 中野淳太, 野口真史, 下田利崇, 森井健志: 半屋外空間における熱的快適性実測調査 その10 室内併設空間における快適要素申告結果, pp.531-532, 2003

(空気調和・衛生工学会 学術講演論文集)

- ・ 高木理佐, 成田千恵, 江森豊, 田辺新一, 尾関義一, 小西正哲: 日射の体感影響に関する研究 (その5) -可視域、近赤外域、中赤外域放射の皮膚温上昇、熱さ・痛さ感に与える影響-, pp.1237-1240, 2000
- ・ 成田千恵, 高木理佐, 江森豊, 田辺新一, 尾関義一, 小西正哲: 日射の体感影響に関する研究 (その6) -異なる波長帯放射を用いた3つの被験者実験の比較-, pp.1241-1244, 2000
- ・ 尾関義一, 小西正哲, 平松徹也, 田辺新一: 日射の体感影響に関する研究 (その7) -体温調節 65MN モデルと CFD・放射との総合連成解析-, pp.1245-1248, 2000
- ・ 田辺新一, 成田千恵, 江森豊, 尾関義一, 小西正哲: 日射の体感影響に関する研究 (その8) 部位による感覚量の違いに関する検討, pp.1361-1364, 2001
- ・ 田辺新一, 平松徹也, 尾関義一, 小西正哲, 有城朗子, 中野淳太: 日射の体感影響に関する研究 (その9) 体温調節モデル妥当性検討のためのアトリウム実験, pp.1365-1368, 2001
- ・ 尾関義一, 平松徹也, 小西正哲, 有城朗子, 中野淳太, 田辺新一: 日射の体感影響に関する研究 (その10) 日射環境におけるサーマルマネキン周りの対流熱伝達率の算出, pp. 1369-1372, 2001
- ・ 尾関義一, 平松徹也, 田辺新一: 日射の体感影響に関する研究 (その11) 数値計算による人体に対する熱放射を表現する重み係数の評価, pp.1741-1744, 2002
- ・ 尾関義一, 桂川涼子, 平松徹也, 田辺新一: 日射の体感影響に関する研究 (その12) 日射環境下における拡張体温調節 65MN モデルの予測結果と被験者実験結果との比較, pp.117-120, 2003
- ・ 田辺新一, 山本ゆう子, 小林弘造, 小川一晃: 体内温度分布を考慮した数値体温調節モデル-3DM, pp.1221-1224, 2000
- ・ 徐莉, 佐藤孝広, 田辺新一: 温熱環境評価のための体温調節モデル JOS の開発 (その1) 血管系及び体躯・性別・年齢の考慮, pp.1729-1732, 2002
- ・ 佐藤孝広, 徐莉, 田辺新一: 温熱環境評価のための体温調節モデル JOS の開発 (その2) 被験者実験結果との比較, pp.1733-1736, 2002
- ・ 野口真史, 中野淳太, 田辺新一: Adaptation を考慮した熱的快適性実測調査 (第1報) 実測概要と滞在状況, pp.1681-1684, 2002
- ・ 中野淳太, 野口真史, 田辺新一: Adaptation を考慮した熱的快適性実測調査 (第2報) 着衣調節行動と温冷感申告結果, pp.1685-1688, 2002

- ・ 田辺新一, 中野淳太, 野口真史, 藤井浩史, 森井健志: Adaptation を考慮した熱的快適性実測調査 (第 3 報) 年間実測調査結果, pp.77-80, 2003
- ・ 田辺新一, 中野淳太, 野口真史, 藤井浩史, 森井健志: 寒冷季の半屋外・室内併設空間における環境適応実測調査, pp.73-76, 2003

目 次

『人間-熱環境系快適性数値シミュレータの開発』
 平成 12～15 年度科学研究費補助金（基盤研究(A)(2)） 研究成果報告書

目 次

第 1 章	温熱環境評価のための 65 分割体温調節モデルに関する研究	1
1-1	はじめに	3
1-2	計算モデル	3
1-3	各部の熱平衡式	4
1-4	制御系	6
1-5	体温制御方法	6
1-6	65MN 分割体温調節モデルによる SET*の算出	7
1-7	2 node-model との比較	7
1-8	定常被験者実験結果との比較	7
1-9	Stolwijk モデル・被験者実験結果との比較	8
1-10	まとめ	9
	【参考文献】	
第 2 章	温熱環境評価のための人体熱数値計算モデル COM の開発	11
2-1	はじめに	13
2-2	被制御系のモデル	13
2-3	各部の熱平衡式	14
2-4	制御系	16
2-5	体温制御方法	17
2-6	COM による SET*の算出	17
2-7	2 node-model との比較	18
2-8	体内温度分布予測	18
2-9	床暖房空間に暴露された人間のシミュレーション	19
2-10	まとめ	19
	【参考文献】	
第 3 章	温熱環境評価のための人体熱モデル JOS の開発	21
3-1	はじめに	23
3-2	モデルの概要	23
3-3	被制御系のモデル	25
3-4	制御系	27
3-5	2 node-model との比較	28
3-6	定常状態における被験者実験結果との比較	28
3-7	非定常状態における被験者実験結果との比較	29
3-8	まとめ	30
	【参考文献】	
第 4 章	緩衝空間が歩行移動後の熱的快適性に与える影響に関する研究	33
4-1	はじめに	35
4-2	従来の研究	35
4-3	実験概要	37
4-4	実験結果	37
4-5	考察	40
4-6	結論	41
	【参考文献】	

第 5 章	人工太陽灯と光学フィルタによる可視域・近赤外域・中赤外域放射が 一対比較照射により手背の感覚量に与える影響	43
5-1	はじめに	45
5-2	人体皮膚及び感覚量の波長特性に関する既往の研究	45
5-3	被験者実験	46
5-4	実験結果・考察	48
5-5	まとめ	50
	【参考文献】	
第 6 章	半屋外環境における熱的快適性に関する実測調査	53
6-1	はじめに	55
6-2	実測調査概要	55
6-3	結果	57
6-4	結論	59
	【参考文献】	
第 7 章	人体に対する放射熱授受を表現する全身の重み係数の数値計算による算出	61
7-1	はじめに	63
7-2	重み係数の算出方法	63
7-3	大空間から住空間における重み係数の算出	63
7-4	まとめ	65
	【参考文献】	
第 8 章	日射環境下におけるサーマルマネキン周りの対流熱伝達率の評価	67
8-1	はじめに	69
8-2	サーマルマネキン周りの対流熱伝達率算出に関する既往の研究	69
8-3	サーマルマネキン周りの対流熱伝達率の算出方法	69
8-4	実験用アトリウムにおける計測	70
8-5	実験用アトリウムにおけるサーマルマネキン周りの滞留熱伝達率の算出	73
8-6	まとめ	75
	【参考文献】	
第 9 章	日射環境下における体温調節 65MN モデルの皮膚温予測値と 被験者実験結果との比較	77
9-1	はじめに	79
9-2	体温調節モデル及び CFD・放射との総合連成解析に関する既往の研究	79
9-3	日射環境下における被験者実験	79
9-4	日射環境下における拡張体温調節 65MN モデルによる皮膚温予測と 被験者実験結果との対比	81
9-5	まとめ	83
	【参考文献】	
第 10 章	腰背部皮膚温の変化が胃腸運動へ与える影響	87
10-1	研究目的	89
10-2	研究方法	89
10-3	実験結果	91
10-4	考察	92
10-5	まとめ	94
	【参考文献】	
第 11 章	総括	95

第 1 章

温熱環境評価のための 65 分割体温調節モデルに関する研究

第1章 温熱環境評価のための65分割体温調節モデルに関する研究

DEVELOPMENT OF 65-NODE THERMOREGULATION-MODEL FOR EVALUATION OF THERMAL ENVIRONMENT

The 65-Node Thermoregulation-Model was developed, based on Stolwijk model. The model has 16 body parts. Each body part consists of core, muscle, fat and skin. In addition, the model has a central blood compartment. Convective and radiative heat transfer coefficients were derived from the thermal manikin experiments. Under steady state condition, mean skin temperature, skin wettedness and SET* agreed well with those by 2 node-model. This model can predict fairly well for skin temperature distribution under thermal neutrality. Under transient condition, trends of mean skin temperature and evaporative heat loss were similar to the subject experiment by Stolwijk.

Keywords: *Thermal comfort, Numerical model, Simulation, Non-uniform, Unsteady state*
熱的快適性, 数値計算, シミュレーション, 不均一, 非定常状態

1-1. はじめに

過去50年以上にわたる温熱環境指標に関する研究の中で、PMV (Predicted Mean Vote)¹⁾及びSET*(Standard New Effective Temperature)²⁾は、温熱環境指標として広く使用されている。いずれの指標も人体を均一な発熱体とし、着衣を人体表面上の均一な熱抵抗としてモデル化しており、その適用は分布の少ない均一或いは均一に近い環境に限られる。しかし、人間が曝露される温熱環境は不均一であることが多い。また、人体の各部位はそれぞれ形態的・生理的な部位特性を持ち、着衣による熱抵抗も、部位により異なる。一方、車室内、パーソナル空調空間、半屋外空間などの不均一な温熱環境が生じ易い空間の評価が望まれており、不均一を考慮できる体温調節モデルが必要とされている。さらに、温熱環境変化に対する非定常応答を予測できることが望ましい。

数値計算によって、不均一かつ非定常状態の温熱環境が人間に与える影響を精度よくシミュレートすることが可能となれば、被験者実験や現場環境実測に要する労力を少なくして熱的快適性評価ができ、実測・実験が困難である様な極限状態の環境評価や、設計段階での建築物やその周辺環境の事前評価が可能になる。

人体の体温調節系モデルの研究は1960～1970年代前半に多く行われ、Atkinsモデル³⁾、Wisslerモデル⁴⁾、Gaggeらの2 node-model⁵⁾、Stolwijk & Hardyのモデル⁶⁾、Stolwijkのモデル⁶⁾⁾などが提案されている。また、最近ではSmithによるモデル⁸⁾が提案

されている。Smithのモデルでは、生体内伝熱を有限要素法を用いて解いている。Smithのモデルを発展させたものが、竹森らのモデル⁹⁾で、体温調節において重要性が指摘されている動静脈吻合血管(AVA)を考慮している。また、Fuのモデル¹⁰⁾はSmithのモデルを改良し、着衣の非定常熱伝達を考慮したものである。カンサス州立大学のJonesはSET*の2 node-modelを元に人体を分割したtrans-mod¹¹⁾モデルを提案し、着衣の非定常熱伝達を取り扱っている。日本では、川島による人体制御モデル研究¹²⁾、横山による生体内熱移動に関する研究¹³⁾が行われている。

我々の研究グループは、Stolwijkのモデルをもととして、皮膚温可変型サーマルマネキン¹⁴⁾と同様に人体を16部位分割した「65分割体温調節モデル 65MN(Multi Nodes)」を開発した。本モデルでは、サーマルマネキン測定による人体各部位別着衣量、代謝量、及び各部位別の温熱環境4要素と、各環境条件下の曝露時間を入力することによって、生理・心理量を数値計算により推定する。本論文では、本モデルについて定数・係数を含めて示すと共に、本モデルとSET*の2 node-model、Stolwijkモデルとの計算結果の比較、及び既存の被験者実験結果との比較を行った。

1-2. 計算モデル

65分割モデルでは、体重74.430kg、体表面積1.870m²(注1)の男性を想定し、部位分割は皮膚温可変型サーマルマネキン¹⁴⁾と

同様な16部位分割(Head, Chest, Back, Pelvis, Left Shoulder, Right Shoulder, Left Arm, Right Arm, Left Hand, Right Hand, Left Thigh, Right Thigh, Left Leg, Right Leg, Left Foot, Right Foot)とした。表1-1に分割部位及び部位表面積 $A_{Du}(i)[m^2]$ 、部位重量を示す^(注2)。以下の式で分割部位は $i(1 \sim 16)$ で示す。各部位はCore, Muscle, Fat, Skinの4層に分割されている。層方向の分割を $j(1 \sim 4)$ で表す。計64Nodesとなるが、65番目のNodeとして中央血液溜まりを考える。モデルの概念図を図1-1に示す。同じ部位内の4層は伝導によって熱交換し、Skin層は外部環境と対流、放射、蒸発によって熱交換を行う。また、すべてのNodeは中央血液溜まりと血流輸送による熱交換を行う。

表1-1 分割部位及び部位表面積、部位重量

i	部位	$A_{Du}(i)[m^2]$	Weight[kg]
1	Head	0.140	4.020
2	Chest	0.175	12.400
3	Back	0.161	11.030
4	Pelvis	0.221	17.570
5	L-Shoulder	0.096	2.163
6	R-Shoulder	0.096	2.163
7	L-Arm	0.063	1.373
8	R-Arm	0.063	1.373
9	L-Hand	0.050	0.335
10	R-Hand	0.050	0.335
11	L-Thigh	0.209	7.013
12	R-Thigh	0.209	7.013
13	L-Leg	0.112	3.343
14	R-Leg	0.112	3.343
15	L-Foot	0.056	0.480
16	R-Foot	0.056	0.480
-	全身	1.870	74.430

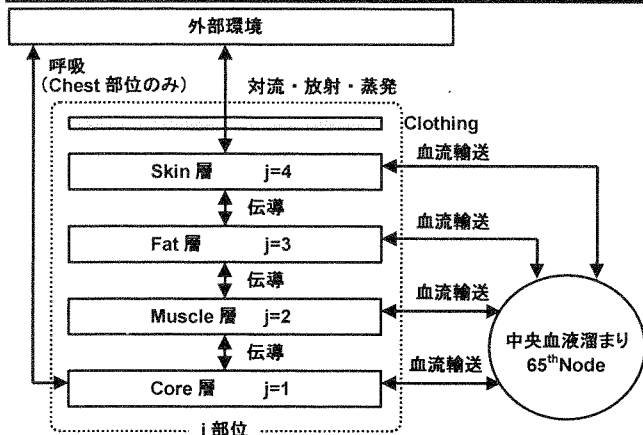


図1-1 65分割モデル概念図

1-3. 各部の熱平衡式

各部における熱平衡式は式(1)～(5)のように表される^(注3)。熱平衡式中の各々の項に関しては、1-3-1から順に述べる。

・Core層における熱平衡式

$$C(i,1) \frac{dT(i,1)}{dt} = Q(i,1) - B(i,1) - D(i,1) - RES(i,1) \quad \dots(1)$$

・Muscle層における熱平衡式

$$C(i,2) \frac{dT(i,2)}{dt} = Q(i,2) - B(i,2) + D(i,1) - D(i,2) \quad \dots(2)$$

・Fat層における熱平衡式

$$C(i,3) \frac{dT(i,3)}{dt} = Q(i,3) - B(i,3) + D(i,2) - D(i,3) \quad \dots(3)$$

・Skin層における熱平衡式

$$C(i,4) \frac{dT(i,4)}{dt} = Q(i,4) - B(i,4) + D(i,3) - Q_c(i,4) - E(i,4) \quad \dots(4)$$

・中央血液溜まりにおける熱平衡式

$$C(65) \frac{dT(65)}{dt} = \sum_{i=1}^{16} \sum_{j=1}^4 B(i,j) \quad \dots(5)$$

1-3-1 熱容量

$C(i,j)[kJ/K]$ は各Nodeの熱容量、 $T(i,j)[^\circ C]$ は温度である。表1-2に各Nodeを構成する組織の比熱から算出した熱容量を示す。各組織の比熱は、骨2.088kJ/kgK、皮下脂肪2.506kJ/kgK、その他3.758kJ/kgKとした。中央血液溜まりには、Stolwijkモデルと同様に2.500Lの血液があるとした。中央血液溜まりの比熱3.758kJ/kgKと乗じられ、中央血液溜まりの熱容量は9.396kJ/Kとなる。この分の熱容量はChest部位およびBack部位のCore層から均等に差し引いた^(注4)。すなわち、重量と比熱から求めたChest部位とBack部位のCore層の熱容量はそれぞれ、15.192kJ/K、13.594kJ/Kであるが、中央血液溜まりの熱容量としてそれぞれから4.698kJ/Kを引いた結果、10.494kJ/K、8.895kJ/Kとしている。

表1-2 各Node熱容量[kJ/K]

i	部位	Core	Muscle	Fat	Skin
1	Head	9.275	1.391	0.927	1.015
2	Chest	10.494	20.408	5.387	1.503
3	Back	8.895	18.078	4.761	1.391
4	Pelvis	21.661	28.789	7.567	2.180
5	L-Shoulder	1.811	3.881	0.745	0.545
6	R-Shoulder	1.811	3.881	0.745	0.545
7	L-Arm	1.156	2.452	0.470	0.357
8	R-Arm	1.156	2.452	0.470	0.357
9	L-Hand	0.296	0.132	0.188	0.357
10	R-Hand	0.296	0.132	0.188	0.357
11	L-Thigh	5.993	12.976	2.017	1.522
12	R-Thigh	5.993	12.976	2.017	1.522
13	L-Leg	2.856	6.173	0.965	0.733
14	R-Leg	2.856	6.173	0.965	0.733
15	L-Foot	0.499	0.132	0.276	0.451
16	R-Foot	0.499	0.132	0.276	0.451
-	中央血液溜まり				9.396

1-3-2 産熱量

$Q(i,j)[W]$ は産熱量であり、(6)式で表現される。産熱量は、基礎代謝量 $Q_b(i,j)[W]$ 、外部仕事による熱産生量 $W(i,j)[W]$ 、ふるえ熱産生量 $Ch(i,j)[W]$ の和である^(注5)。表1-3に各Nodeの基礎代謝量を示す。外部仕事とふるえによる熱産生は、Muscle層でのみ発生し、 $W(i,2)$ 、 $Ch(i,2)$ のみ非0の値を持ち得るものとする。

$$Q(i,j) = Q_b(i,j) + W(i,j) + Ch(i,j) \quad \dots(6)$$

$$W(i,2) = 58.2(met - Q_b)A_{Du}Metf(i) \quad \dots(7)$$

式(7)の $met[met]$ は活動の種類より推定される全身の代謝量、 $Q_b[met]$ は全身の基礎代謝量、 $A_{Du}[m^2]$ は全身の体表面積である。 Q_b は表1-3に示した各Node基礎代謝量の合計から得られ0.778metである。 met がこれを下回ることはないとしている。すなわち、 $W(i,2)$ が負値となる場合は0Wとする。 $Metf(i)[-]$ は仕事熱産生についての各部位Muscle層の全身に対する分布係数である^(注6)。これを表1-3に示す。ふるえ熱産生量 $Ch(i,2)$ の算出式については後述する。

表1-3 各Node基礎代謝量[W]と各部位のMetf値[-]

i	部位	Core	Muscle	Fat	Skin	Metf(i)
1	Head	16.843	0.217	0.109	0.131	0.000
2	Chest	21.182	2.537	0.568	0.179	0.091
3	Back	18.699	2.537	0.501	0.158	0.080
4	Pelvis	8.050	4.067	0.804	0.254	0.129
5	L-Shoulder	0.181	0.423	0.610	0.050	0.026
6	R-Shoulder	0.181	0.423	0.610	0.050	0.026
7	L-Arm	0.094	0.220	0.031	0.026	0.014
8	R-Arm	0.094	0.220	0.031	0.026	0.014
9	L-Hand	0.045	0.022	0.023	0.050	0.005
10	R-Hand	0.045	0.022	0.023	0.050	0.005
11	L-Thigh	0.343	0.824	0.151	0.122	0.201
12	R-Thigh	0.343	0.824	0.151	0.122	0.201
13	L-Leg	0.102	0.220	0.035	0.023	0.099
14	R-Leg	0.102	0.220	0.035	0.023	0.099
15	L-Foot	0.122	0.035	0.056	0.100	0.005
16	R-Foot	0.122	0.035	0.056	0.100	0.005
-	Total				84.652	1.000

1-3-3 血液による熱輸送

$B(i,j)$ [W] は中央血液溜まりと各Nodeとの熱交換であり(8)式にて表現される。 α [-] は血液の対向流熱交換効率、 ρC [J/mLK] は血液の体積比熱 (密度と比熱の積)、 $BF(i,j)$ [mL/s] は血流量である。また、 $T(65)[^{\circ}\text{C}]$ は中央血液溜まりの温度である。

$$B(i,j) = \alpha \rho C \cdot BF(i,j)(T(i,j) - T(65)) \quad \cdots(8)$$

本論文では $\alpha = 1.000$ 、 $\rho C = 3.842 \text{ J/mLK}$ とした。

(9)式はSkin層を除く各層の血流量を表す。 $BFB(i,j)$ [mL/s] は基礎血流量であり表1-4に本計算で用いた値を示す。各Nodeの血流量増加は産熱量増加に依存すると考えている。すなわち、1.000Wの産熱のために、0.239mL/sの血流量が必要であるという仮定をした⁷⁾。Muscle層 ($j=2$) を除いたCore層・Fat層においては $W(i,j)$ 及び $Ch(i,j)$ は0Wであるから血流量は体温調節制御や代謝量変化にかかわらず常に基礎血流量に等しいものとした。

$$BF(i,j) = BFB(i,j) + 0.239(W(i,j) + Ch(i,j)) \quad \cdots(9)$$

表1-4 各Node基礎血流量 [mL/s]

i	部位	Core	Muscle	Fat	Skin
1	Head	12.500	0.242	0.094	0.622
2	Chest	21.625	2.128	0.372	0.500
3	Back	21.206	2.128	0.372	0.375
4	Pelvis	5.053	3.411	0.600	0.578
5	L-Shoulder	0.089	0.356	0.044	0.239
6	R-Shoulder	0.089	0.356	0.044	0.239
7	L-Arm	0.044	0.186	0.024	0.125
8	R-Arm	0.044	0.186	0.024	0.125
9	L-Hand	0.025	0.022	0.012	0.253
10	R-Hand	0.025	0.022	0.012	0.253
11	L-Thigh	0.101	0.238	0.042	0.106
12	R-Thigh	0.101	0.238	0.042	0.106
13	L-Leg	0.020	0.019	0.005	0.031
14	R-Leg	0.020	0.019	0.005	0.031
15	L-Foot	0.014	0.003	0.005	0.125
16	R-Foot	0.014	0.003	0.005	0.125
-	Total				76.057

1-3-4 伝導による熱交換

$D(i,j)$ [W] は、同じ部位内の隣接する層との伝導による熱交換で、(10)式にて表現される。 $Cd(i,j)$ [W/°C] は隣接する層との間の熱コンダクタンスであり本計算で用いた値を表1-5に示す。

$$D(i,j) = Cd(i,j)(T(i,j) - T(i,j+1)) \quad \cdots(10)$$

表1-5 各Node間の熱コンダクタンス [W/°C]

i	部位	Core-Muscle	Muscle-Fat	Fat-Skin
1	Head	1.601	13.224	16.008
2	Chest	0.616	2.100	9.164
3	Back	0.594	2.018	8.700
4	Pelvis	0.379	1.276	5.104
5	L-Shoulder	0.441	2.946	7.308
6	R-Shoulder	0.441	2.946	7.308
7	L-Arm	0.244	2.227	7.888
8	R-Arm	0.244	2.227	7.888
9	L-Hand	2.181	6.484	5.858
10	R-Hand	2.181	6.484	5.858
11	L-Thigh	2.401	4.536	30.160
12	R-Thigh	2.401	4.536	30.160
13	L-Leg	1.891	2.656	7.540
14	R-Leg	1.891	2.656	7.540
15	L-Foot	8.120	10.266	8.178
16	R-Foot	8.120	10.266	8.178

1-3-5 呼吸による熱損失

呼吸による熱損失はChest部位Core層で考慮する。すなわち $RES(2,1)$ [W] は(11)式⁸⁾で表される。

$$RES(2,1) = \{0.0014(34 - t_a(i)) + 0.017(5.867 - p_a(i))\} \cdot \sum_{j=1}^{16} \sum_{j=1}^4 Q(i,j) \quad \cdots(11)$$

ここで、 $t_a(i)[^{\circ}\text{C}]$ 、 $p_a(i)$ [kPa] はそれぞれHead部位での空気温度、水蒸気圧である。

1-3-6 蒸発熱損失

$E(i,4)$ [W] はSkin層における蒸発熱損失量であり、(12)式のように表現される。 $E_{sk}(i,4)$ [W] は不感蒸泄による熱損失量であり、(13)式で示される。また、 $E_{sw}(i,4)$ [W] は発汗による蒸発熱損失量である。

$$E(i,4) = E_{sk}(i,4) + E_{sw}(i,4) \quad \cdots(12)$$

$$E_{sk}(i,4) = 0.06(1 - E_{sw}(i,4)/E_{max}(i)) \cdot E_{max}(i) \quad \cdots(13)$$

ここで、 $E_{max}(i)$ [W] は最大蒸発熱損失量であり、(14)式から求められる。Stolwijkモデル⁶⁾では、不感蒸泄に関しては定数を与えているが、この値は $E_{max}(i)$ のおよそ3~4%に相当するものである。本研究では、各部位Skin層における不感蒸泄として、発汗がなくとも最大蒸発熱損失量の6%の熱損失があるという仮定をした。

$$E_{max}(i) = h_e(i) (p_{sk,s}(i) - p_a(i)) A_{Du}(i) \quad \cdots(14)$$

ここで、 $h_e(i)$ [W/m²kPa] は皮膚表面から環境までの潜熱伝達率、 $p_{sk,s}(i)$ [kPa] は皮膚表面での飽和水蒸気圧、 $p_a(i)$ [kPa] は環境の水蒸気圧、 $A_{Du}(i)$ [m²] は各部位表面積である。

皮膚表面から環境までの潜熱伝達率 $h_e(i)$ は着衣の透湿係数 $i_{cl}(i)$ [-] を用いた表現とし(15)式で求められる。

$$h_e(i) = LR \cdot i_{cl}(i) / \left(0.155 I_{cl}(i) + \frac{i_{cl}(i)}{h_c(i) \cdot f_{cl}(i)} \right) \quad \cdots(15)$$

Stolwijk⁶⁾モデルでは着衣熱抵抗が考慮されていないが、65分割モデルではサーマルマネキン測定による各部位別の着衣熱抵抗 $I_{cl}(i)$ [clo] を考慮するものとした。 $h_c(i)$ [W/m²°C] は人体の対流熱伝達率、 $f_{cl}(i)$ [-] は着衣面積比である。 LR [°C/kPa] はルイス係数であり、 $LR = 16.5^{\circ}\text{C/kPa}$ である。また、全身各部位について $i_{cl}(i) = 0.45$ を仮定する¹⁵⁾。本論文では着衣は顕熱・潜熱抵抗としてのみ取り扱っており、熱容量、吸放湿に関しては考えていない。

1-3-7 皮膚表面の顕熱交換

$Q_e(i,4)$ [W] は皮膚表面と環境の対流および放射熱交換であり、(16)式のように総合熱伝達率を用いた表現とした。 $h_r(i)$ [W/m²°C] は皮膚から環境までの総合熱伝達率、 $t_o(i)[^{\circ}\text{C}]$ は作用温度である。

$$Q_e(i,4) = h_r(i) (T(i,4) - t_o(i)) A_{Du}(i) \quad \cdots(16)$$

$h_r(i)$ は clo 値を用いると(17)式のように表現される。すなわちその逆数は、着衣量 $I_{cl}(i)$ [clo] と着衣外表面における表面空気層の熱抵抗の和として表現できる。 $h_r(i)$ [W/m²°C] は有効放射面積率を考慮した線形放射熱伝達率である。

$$\frac{1}{h_r(i)} = 0.155 I_{cl}(i) + \frac{1}{(h_c(i) + h_e(i)) f_{cl}(i)} \quad \cdots(17)$$

65分割モデルの部位分割は皮膚温可変型サーマルマネキン¹⁴⁾に対応しているため、 $h_c(i)$ 、 $h_e(i)$ の値には、サーマルマネキンによる測定値¹⁶⁾を用いることができる。本論文では、部位別測定値(対流熱伝達率については airflow 条件毎の測定値)に、(18)~(20)式で示される Mod_c 、 Mod_e 係数を乗じて熱伝達率を算出するものとした¹⁰⁾。 Mod_c は(18)式による値と(19)式による値の大きい方とした。 v [m/s]、 h_c [W/m²°C]、

表1-6 静穏気流下 (0.13m/s 以下) の $h_c(i)$ と $h_r(i)$

i	部位	$h_c(i)$ [W/m²°C]	$h_r(i)$ [W/m²°C]
1	Head	4.5	4.9
2	Chest	3.0	4.3
3	Back	2.9	4.1
4	Pelvis	2.9	4.3
5	L-Shoulder	3.6	4.5
6	R-Shoulder	3.6	4.5
7	L-Arm	3.6	4.4
8	R-Arm	3.6	4.4
9	L-Hand	3.7	4.2
10	R-Hand	3.7	4.2
11	L-Thigh	2.8	4.8
12	R-Thigh	2.8	4.8
13	L-Leg	2.0	5.3
14	R-Leg	2.0	5.3
15	L-Foot	2.0	6.1
16	R-Foot	2.0	6.1
-	全身	3.0	4.7

h_a [W/m²°C] はそれぞれ、面積重み付け平均した全身の相対気流速度、対流熱伝達率の測定値、線形放射熱伝達率の測定値である。表1-6に立位サーマルマネキン測定値に基づいて算出した静穏気流下 (0.13m/s 以下) の $h_c(i)$ と $h_r(i)$ を示す。

$$Mod_c = 8.6v^{0.53}/h_c \quad \dots (18)$$

$$Mod_c = 3.0/h_c \quad \dots (19)$$

$$Mod_r = 4.7/h_r \quad \dots (20)$$

SET*の2 node-model²⁾では、対流熱伝達率を代謝量の関数として、作業時の相対気流速度増加を考慮しているが、本論文では考慮しない。

また、サーマルマネキンの等価温度¹⁴⁾を計算に用いることも可能である。この場合は、 $h_c(i)$ を標準状態に固定し、作用温度の代わりに各部位等価温度を入力することによって $Q_{f,i,4}$ を求める。

1-4. 制御系

1-4-1 センサー信号

エラーシグナル $Err(i,j)$ [°C] は、式 (21) に示す通り、各Nodeの温度 $T(i,j)$ [°C] とセットポイント温度との差、及び受容器の非定常特性の和とした。本論文で用いた各Nodeのセットポイント温度及び計算の初期温度である $T_{set}(i,j)$ [°C] を表1-7に示す。このうちセットポイント温度として機能するのはHead部位Core層、各部位Skin層のみである。

$$Err(i,j) = (T(i,j) - T_{set}(i,j)) + RATE(i,j) \cdot F(i,j) \quad \dots (21)$$

ここで、 $RATE(i,j)$ [s] は温度受容器の動的感度、 $F(i,j)$ [°C/s] は微小温度変化量である。 $T_{set}(i,j)$ と $RATE(i,j)$ は制御系の特性であり、定数として与えられる。 $RATE(i,j)$ はこれまでの研究では定量的に明らかになっていないので、本論文では0とした。これに関してはSET*の2 node-model²⁾でも同様の取り扱いとしている。今後、 $RATE(i,j)$ が定量的に明らかになった時点で非0の数値を与えることができる。

温・冷温度受容器に対応して、Warmシグナル ($Wrm(i,j)$ [°C]) とColdシグナル ($Cld(i,j)$ [°C]) を (22)、(23) 式で定義する。

$$Err(i,j) \text{ が正の値のとき温受容器が動作中とし、} \\ Wrm(i,j) = Err(i,j), \quad Cld(i,j) = 0 \quad \dots (22)$$

$$Err(i,j) \text{ が負の値のとき冷受容器が動作中とし、} \\ Cld(i,j) = -Err(i,j), \quad Wrm(i,j) = 0 \quad \dots (23)$$

表1-7 各Nodeセットポイント温度および初期温度 [°C]

i	部位	Core	Muscle	Fat	Skin
1	Head	36.9	36.1	35.8	35.6
2	Chest	36.5	36.2	34.5	33.6
3	Back	36.5	35.8	34.4	33.2
4	Pelvis	36.3	35.6	34.5	33.4
5	L-Shoulder	35.8	34.6	33.8	33.4
6	R-Shoulder	35.8	34.6	33.8	33.4
7	L-Arm	35.5	34.8	34.7	34.6
8	R-Arm	35.5	34.8	34.7	34.6
9	L-Hand	35.4	35.3	35.3	35.2
10	R-Hand	35.4	35.3	35.3	35.2
11	L-Thigh	35.8	35.2	34.4	33.8
12	R-Thigh	35.8	35.2	34.4	33.8
13	L-Leg	35.6	34.4	33.9	33.4
14	R-Leg	35.6	34.4	33.9	33.4
15	L-Foot	35.1	34.9	34.4	33.9
16	R-Foot	35.1	34.9	34.4	33.9
-	中央血液溜まり				36.7

1-4-2 統合信号

皮膚からのセンサーシグナルは、中枢にて統合されると考える。皮膚温受容器からの重み付け出力 ($Wrms$ [°C])、皮膚冷受容器からの重み付け出力 ($Clds$ [°C]) は (24)、(25) 式のように示される。 $SKINR(i)$ [-] は皮膚からのセンサーシグナルを統合するための部位別重み付け係数であり、表1-8に示す。

$$Wrms = \sum_{i=1}^{16} (SKINR(i) \cdot Wrm(i,4)) \quad \dots (24)$$

$$Clds = \sum_{i=1}^{16} (SKINR(i) \cdot Cld(i,4)) \quad \dots (25)$$

表1-8 各部位Skin層の全身に対する重み付け係数 [-] および分布係数 [-] と各部位Chilf値 [-]

i	部位	SKINR(i)	SKINS(i)	SKINV(i)	SKINC(i)	Chilf(i)
1	Head	0.070	0.081	0.132	0.022	0.020
2	Chest	0.149	0.146	0.098	0.065	0.258
3	Back	0.132	0.129	0.086	0.065	0.227
4	Pelvis	0.212	0.206	0.138	0.065	0.365
5	L-Shoulder	0.023	0.051	0.031	0.022	0.004
6	R-Shoulder	0.023	0.051	0.031	0.022	0.004
7	L-Arm	0.012	0.026	0.016	0.022	0.026
8	R-Arm	0.012	0.026	0.016	0.022	0.026
9	L-Hand	0.092	0.016	0.061	0.152	0.000
10	R-Hand	0.092	0.016	0.061	0.152	0.000
11	L-Thigh	0.050	0.073	0.092	0.022	0.023
12	R-Thigh	0.050	0.073	0.092	0.022	0.023
13	L-Leg	0.025	0.036	0.023	0.022	0.012
14	R-Leg	0.025	0.036	0.023	0.022	0.012
15	L-Foot	0.017	0.018	0.050	0.152	0.000
16	R-Foot	0.017	0.018	0.050	0.152	0.000
-	Total	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

1-5. 体温制御方法

制御系の式は全て、制御係数とHead部位Core層からのセンサーシグナルの結果から成る項、制御係数と各部位Skin層からの統合シグナルの結果から成る項、制御係数とHead部位Core層からのセンサーシグナル及び各部位Skin層からの統合シグナルの結果から成る項を持つ¹¹⁾。制御方法には、血管運動 (皮膚血管拡張・収縮)、発汗、ふるえ熱産生がある。各体温制御反応に関する各部位Skin層の全身に対する分布係数は、表1-8に示す値を用いて計算を行った。また各体温制御反応の制御係数を表1-9に示す¹²⁾。以下に示す各制御式から求められる DL 、 ST 、 $E_{sw}(i,4)$ 、 $Ch(i,2)$ は、ある環境のもとでは負値となることがあるが、その時は0とする。

表1-9 各体温制御反応の制御係数

	Core(C)	Skin(S)	Core × Skin(P)
発汗(sw)	371.2 (W/°C)	33.6 (W/°C)	0.0 (W/°C ²)
ふるえ熱産生(ch)	0.0 (W/°C)	0.0 (W/°C)	24.4 (W/°C ²)
血管拡張(d)	32.5 (mL/s/°C)	2.1 (mL/s/°C)	0.0 (mL/s/°C ²)
血管収縮(st)	11.5 (1/°C)	11.5 (1/°C)	0.0 (1/°C ²)

1-5-1 血管運動

Skin層の血流量 $BF(i,4)$ [mL/s] は (26) 式で表される。 DL [mL/s] は血管拡張に関するシグナル、 ST [-] は血管収縮に関するシグナルで各々 (27)、(28) 式のように表現される。 $SKINV(i)$ [-]、 $SKINC(i)$ [-]¹³⁾ は DL 、 ST についての各部位Skin層の全身に対する分布係数である。

$$BF(i,4) = \frac{BFB(i,4) + SKINV(i) \cdot DL}{1 + SKINC(i) \cdot ST} \cdot km(i,4) \quad \dots (26)$$

$$DL = CdlErr(1,1) + Sdl(Wrms - Clds) + PdlWrm(1,1)Wrms \quad \dots (27)$$

$$ST = -CstErr(1,1) - Sst(Wrms - Clds) + PstCld(1,1)Clds \quad \dots (28)$$

ここで、 Cdl [mL/s/°C]、 Sdl [mL/s/°C]、 Pdl [mL/s/°C²] はそれぞれHead部位Core層、各部位Skin層、Head部位Core層と各部位Skin層からの血管拡張制御係数、 Cst [1/°C]、 Sst [1/°C]、 Pst [1/°C²] も、それぞれ同様に、血管収縮制御係数である。

(26) 式の $km(i,4)$ [-] はイフェクター動作量と呼ばれ (29) 式で表される。 $Err(i,4)$ [°C] は各部位Skin層におけるエラーシグナル、 $RT(i,4)$ [°C] はイフェクター動作量が2となるための必要温度幅である。本論文では、全身各部位について $RT(i,4) = 10^\circ\text{C}$ を仮定した¹⁴⁾。

$$km(i,4) = 2 \cdot 0^{Err(i,4)/RT(i,4)} \quad \dots (29)$$

1-5-2 発汗

発汗による蒸発熱損失量 $E_{sw}(i,4)$ [W] は、(30) 式で示される。 $SKINS(i)$ [-] は、発汗についての各部位Skin層の全身に対する分布係数である。

$$E_{sw}(i,4) = \{CswErr(1,1) + Ssw(Wrms - Clds) + PswWrm(1,1)Wrms\} \cdot SKINS(i) \cdot km(i,4) \quad \dots (30)$$

ここで、 $C_{sw}[W/^{\circ}C]$ 、 $S_{sw}[W/^{\circ}C]$ 、 $P_{sw}[W/^{\circ}C^2]$ はそれぞれHead部位Core層、各部位Skin層、Head部位Core層と各部位Skin層からの発汗制御係数である。

1-5-3 ふるえ熱産生

ふるえ熱産生量 $Ch(i,2)[W]$ は(31)式で表される。

$$Ch(i,2) = \{-CchErr(1,1) - Sch(Wrms - Clds) + PchCld(1,1)Clds\} \cdot Chilf(i) \quad \dots(31)$$

ここで、 $Cch[W/^{\circ}C]$ 、 $Sch[W/^{\circ}C]$ 、 $Pch[W/^{\circ}C^2]$ はそれぞれHead部位Core層、各部位Skin層、Head部位Core層と各部位Skin層からのふるえ制御係数である。 $Chilf(i)[-]$ はふるえ熱産生についての各部位Muscle層の全身に対する分布係数であり、表1-8に示す。

1-6. 65分割体温調節モデルによるSET*の算出

65分割モデルでは、各部位皮膚温を面積重み付けした平均皮膚温 $t_{sk}[^{\circ}C]$ 、全身のぬれ率 $w[-]$ 、皮膚表面からの熱損失量 $Q_{sk}[W/m^2]$ を用いて、 $65MNSET^*[^{\circ}C]$ を算出するものとした。その基礎式は(32)式である^{注15)}。 $p_{sk,s}$ 、 $p_{65MNSET^*,s}[kPa]$ は、それぞれ $t_{sk}[^{\circ}C]$ 、 $65MNSET^*[^{\circ}C]$ における飽和水蒸気圧である。

$$Q_{sk} = h_{cs}(t_{sk} - 65MNSET^*) + h_{rs} \cdot w(p_{sk,s} - 0.5p_{65MNSET^*,s}) \quad \dots(32)$$

$h_{cs}[W/m^2/^{\circ}C]$ は標準化した総合熱伝達率であり、(33)式で示される。

$$\frac{1}{h_{cs}} = 0.155I_{cls} + \frac{1}{(h_{cs} + h_{rs})f_{cls}} \quad \dots(33)$$

ここで、 $I_{cls}[clo]$ 、 $h_{cs}[W/m^2/^{\circ}C]$ 、 $h_{rs}[W/m^2/^{\circ}C]$ 、 $f_{cls}[-]$ はそれぞれ標準化した着衣量、対流熱伝達率、線形放射熱伝達率、着衣面積比である。 I_{cls} は代謝量により修正され、(34)式で示される。

$$I_{cls} = \frac{1.3264}{(met + 0.7383)} - 0.0953 \quad \dots(34)$$

h_{cs} は代謝量増加による相対気流速度の増加を考慮して(35)式で求められる。

$$h_{cs} = 5.66(met - 0.85)^{0.39} \quad \dots(35)$$

$met < 0.85met$ の場合と、(35)式の結果 $h_{cs} < 3.0W/m^2/^{\circ}C$ の場合は、 $h_{cs} = 3.0W/m^2/^{\circ}C$ とした。また、 $h_{rs} = 4.7W/m^2/^{\circ}C$ とした。 f_{cls} は(36)式で示される。

$$f_{cls} = 1 + 0.3I_{cls} \quad \dots(36)$$

また(32)式の $h_{rs}[W/m^2/kPa]$ は標準化した皮膚から環境までの潜熱伝達率であり、(37)式で示される。

$$h_{rs} = i_{ms} \cdot LR \cdot h_{ls} \quad \dots(37)$$

ここで、 $i_{ms}[-]$ は標準 i_m 係数であり、 $i_{ms} = 0.45$ である^{注16)}。

(32)式～(37)式を用いることによって、65分割モデルで算出した結果から部位分割・不均一温熱環境を考慮したSET*値を計算することが可能となる。

1-7. 2 node-model との比較

1-7-1 計算条件

Gaggeの2 node-model²⁾との比較をおこなった。2 node-modelはSET*算出のための体温調節人体熱モデルであり、これまで多くの被験者実験結果との比較がなされている。表1-10に計算条件を示す。作用温度10.0 $^{\circ}C$ ～40.0 $^{\circ}C$ まで2.0 $^{\circ}C$ おきに、立位姿勢にて全身一様の温熱環境に曝露するシミュレーションを行った。

表1-10 計算条件

曝露時間	60min.
空気温度Ta	Ta=Trとして10.0～40.0 $^{\circ}C$ (2.0 $^{\circ}C$ きざみ)
平均放射温度Tr	
相対湿度	50%
気流速度	0.10m/s
着衣量	0.00clo
代謝量	1.0met

1-7-2 計算結果・考察

図1-2に、65分割モデルと2 node-modelによって算出した平均皮膚温、ぬれ率、SET*の比較を示す。平均皮膚温は、快適

域より低い作用温度で1 $^{\circ}C$ 程度の差がみられる。65分割モデルは2 node-modelに比べ、発汗開始温度が高い。これは発汗の制御式の違いによるものである^{注17)}。65分割モデルでは、発汗制御は頭部コア温の影響が大きい。そこで36.9 $^{\circ}C$ である頭部コア・セットポイント温度 $T_{set}(1,1)$ を36.4 $^{\circ}C$ として計算すると、発汗開始温度は、ほぼ2 node-modelに一致した。 $T_{set}(1,1)$ を変更することで発汗特性の修正ができることを示した。65MNSET*と2 node-modelによるSET*は各温度条件で良い一致が得られた。均一温熱環境下では従来のSET*と対応させて、65MNSET*を用いて温冷感予測が可能である。

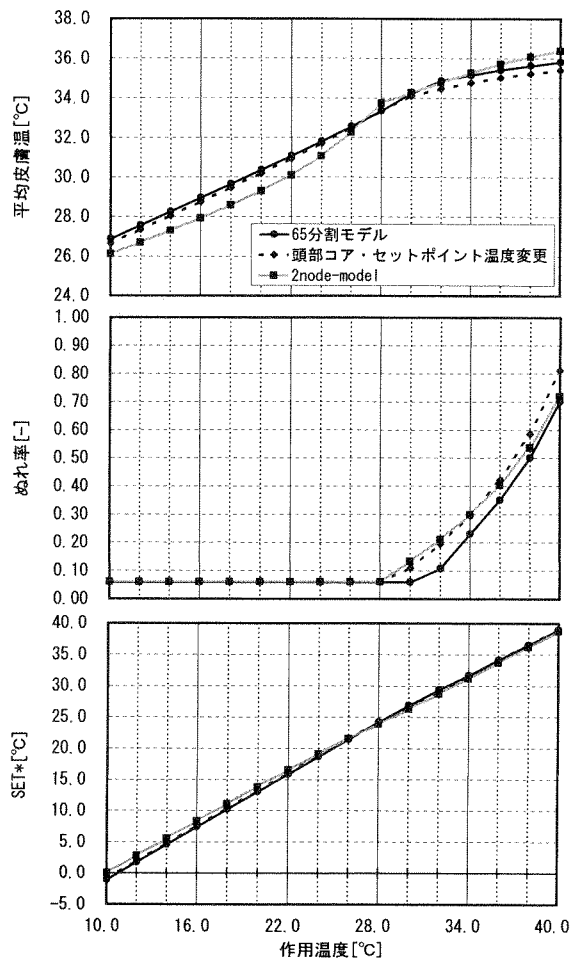


図1-2 平均皮膚温・ぬれ率・SET*値の比較

1-8. 定常被験者実験結果との比較

1-8-1 計算条件

定常状態における65分割モデルの皮膚温分布予測値の精度を検証するため、田村による被験者実験結果¹⁷⁾との比較を行った。実験はサーモグラフィを用いて皮膚温を非接触的に測定し、温熱環境変化に伴う皮膚温分布の変化について検討している。被験者は19歳から20歳の日本人女子27名、平均体重50.05kg、平均体表面積1.44m²である。田村は、28 $^{\circ}C$ 条件が被験者測定時のほぼ温熱中立環境であるとしており、その時の被験者の代謝量は、0.7metであった。本論

表1-11 実験及び計算条件

	初期条件	実験条件
曝露時間[min.]	60	120
空気温度Ta[°C]	28.5(Ta=Tr)	22, 25, 28, 31, 34(Ta=Tr)
平均放射温度Tr[°C]		
気流速度[m/s]	0.25	0.15
相対湿度[%]	50	50
着衣量[clo]	0.00	0.00
代謝量[met]	0.778	0.778

文では65分割モデルの体躯を変更することせず、表1-1に示した体躯を用い、表1-3に示した各Nodeの基礎代謝量の合計から得られる0.778metを計算時のモデルの代謝量とした。実験では被験者はチャンバー内で必要曝露時間、椅座静位を保った後、皮膚温測定時には立位姿勢をとった。シミュレーションでは実験中常に立位姿勢を仮定した。表1-11に実験及び計算条件を示す。

1-8-2 計算結果・考察

各温度条件下の120分間曝露終了時の測定値と計算値の比較を行った。図1-3に各温度条件下の平均皮膚温の比較を、図1-4に22℃、28℃、34℃の各条件下の皮膚温分布の比較を示す。平均皮膚温は28℃、31℃条件で良い一致が見られる。温熱中

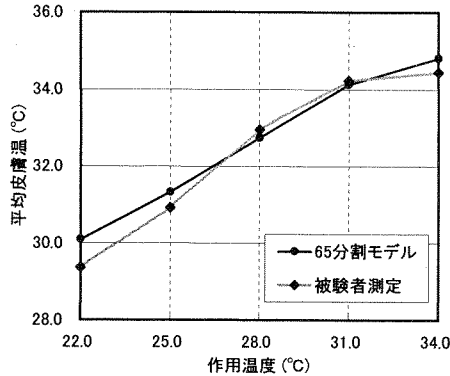


図1-3 各温度条件下の平均皮膚温の比較

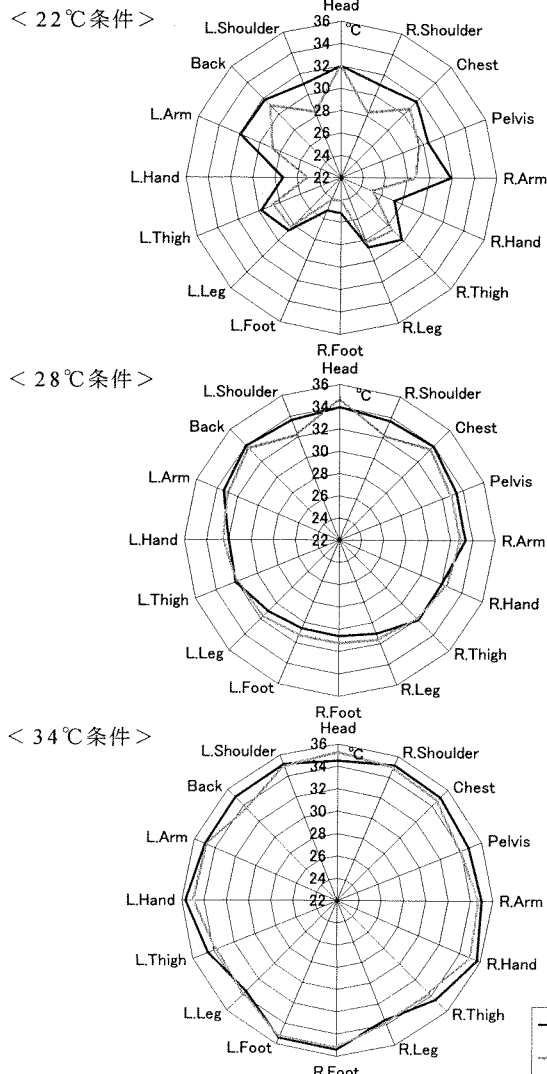


図1-4 各条件下の皮膚温分布の比較

立環境を外れるにつれて測定値と計算値の差が大きくなる傾向があり22℃条件で測定値と計算値の平均皮膚温差は0.7℃となった。これは、65分割モデルが、22℃条件で30.0W/m²、28℃条件で3.1W/m²のふるえ産熱量を算出したのに対して、実験では、ふるえ産熱量はほとんど測定されず、22℃条件でも2～3W/m²であったことによる。65分割モデルは血流輸送による熱移動を中央血液溜まりによる1次元熱移動としてモデル化している。血流輸送による隣接部位間の熱移動等を考慮することによって低い温度条件下の皮膚温分布予測値は改善できるものと考えられる。しかし、定性的には、ここで検討した各温度条件下で65分割モデルは被験者の皮膚温分布の傾向を概ね予測できている。

1-9. Stolwijk モデル・被験者実験結果との比較

1-9-1 計算条件

65分割モデルの代謝量が変化する場合の計算精度の検証を行うために平均皮膚温と潜熱損失量の推移を、Stolwijk の行った被験者実験結果および65分割モデルの原型であるStolwijkモデル⁷⁾と比較した。実験では、自転車エルゴメータを使い、被験者は30分おきに休息—運動を繰り返した。代謝量の変化を図1-5に、実験及び計算条件を表1-12に示す。各部位の熱伝達率は簡便のため、立位姿勢のものを用いた。被験者実験のシミュレーションに先立って、シミュレーション開始後30分間と同じ温熱環境条件（作用温度30.0℃、相対湿度30%、気流速度0.10m/s、着衣量0.00clo、代謝量45.7W/m²）への60分間曝露の計算を行い、モデルの各Node温度の初期値とした。

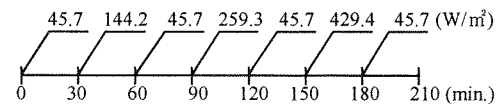


図1-5 代謝量の変化

表1-12 実験及び計算条件

空気温度[℃]	30.0(Ta=Tr)
放射温度[℃]	30.0(Ta=Tr)
相対湿度[%]	30
気流速度[m/s]	0.10
着衣量[clo]	0.00
代謝量[W/m ²]	45.7, 144.2, 259.3, 429.4

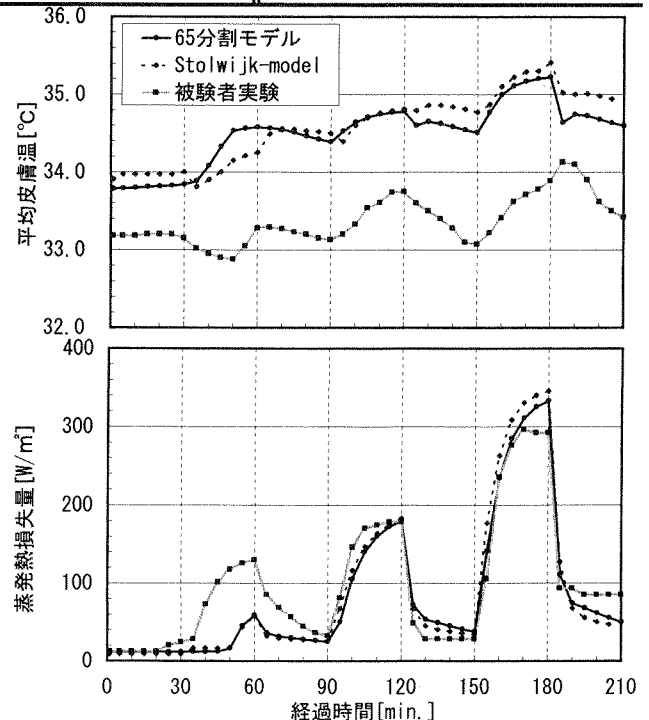


図1-6 平均皮膚温と蒸発熱損失量の推移

1-9-2 計算結果・考察

平均皮膚温、蒸発熱損失量の推移を図1-6に示す。平均皮膚温については、65分割モデルとStolwijkモデルは被験者実験に比べ1.0～1.3℃程度高い結果となったが、144.2W/m²運動時を除いて、65分割モデル、Stolwijkモデル、被験者実験の変化傾向は良く一致している。蒸発熱損失量についても、144.2W/m²運動時のみ一致が見られず、65分割モデル及びStolwijkモデルは被験者実験に比べ発汗開始が遅いが、他は良い一致が見られた。運動終了直後に平均皮膚温が大きく低下するのは、計算上、体内での熱産生量がステップチェンジをするのに対して、発汗量・皮膚血流量・皮膚からの熱損失量が、なだらかに変化するためである。本計算では、運動時の相対気流速の増加を考慮していない。65分割モデルはStolwijkモデルを拡張し部位分割を増やしているの、運動時の部位別対流熱伝達率のデータが得られれば、体幹部の前後や四肢での対流熱損失の違いを考慮できると考える。

1-10. まとめ

1)Stolwijkのモデルを拡張し、「65分割体温調節モデル」を開発した。部位分割は皮膚温可変型サーマルマネキンと同様の16部位分割とした。サーマルマネキン測定による着衣量と熱伝達率を用いて、着衣層を含めた皮膚表面での伝熱の定式化を行った。定数・係数を含めた計算モデル・各熱平衡式などを示した。さらに、計算結果を用いて部位分割・不均一温熱環境を考慮した65MNSET*を算出する方法を示した。

2)Gaggeの2 node-modelとの計算結果の比較を行った。その結果、定常状態での平均皮膚温、ぬれ率共に良い一致が見られた。また、65MNSET*は2 node-modelによるSET*と良く一致した。

3)田村による被験者実験結果との比較を行った。平均皮膚温は温熱中立環境で良い一致が見られ、それを外れるにつれて計算値と測定値の差が大きくなる傾向が見られた。しかし、定性的には、ここで検討した各温度条件で、65分割モデルは被験者の皮膚温分布の傾向を概ね予測できた。

4)Stolwijkの行った被験者実験のシミュレーションを行い、Stolwijkモデルおよび被験者実験結果との比較を行った。65分割モデルとStolwijkモデルの平均皮膚温は、被験者実験結果に比較して1.0～1.3℃程度高く算出された。蒸発熱損失量については65分割モデル及びStolwijkモデルは、144.2W/m²運動時に被験者実験に比べ発汗開始が遅いが、他は良い一致が見られた。

今後は、65分割体温調節モデルと数値流体解析(CFD)や、精密人体放射計算との連成システムの開発を行う予定である。

【注釈】

注1) 文献2)の2 node-modelでは、体重70.0kg、体表面積1.8m²を“average man”としている。ここでの設定は、これにほぼ準ずる。65分割モデルでは、脂肪層の熱容量及び熱コンダクタンス、体表面積等の変更により体躯の違いを考慮できる。

注2) 各分割部位に定数として与えられる物理量は、基本的に表面積比を用いて、Stolwijkモデルのものをさらに分割し修正した。

注3) (1)～(5)式の常微分方程式の解法はオイラー法を用いた。

注4) 血液循環による熱交換は、全て中央血液溜まりとの対流による1次元熱交換として簡略化している。Chest部位およびBack部位と中央血液溜まりとの間の熱伝導による熱交換は考えない。

注5) 65分割モデルではシミュレーションにあたって、活動の種類により推定される代謝量を入力する。そのうち、基礎代謝量を上回る分をMetf値を用いて各部位に分配する。さらに、センサー信号を用いた算出式からふるえ熱産生が生ずる場合、Chilf値で各部位に分配する。

注6) 表3に示したMetf値は、自転車エルゴメータ運動時の評価値である。本論文では簡便のため全ての計算でこの値を用いた。

注7) Stolwijkモデルと同様。

注8) SET*、PMVに用いられている算出式。本論文ではSET*の2 node-modelとの比較を行っているため、この式を用いた。

注9) 文献15)の「A median value of i_{cl} of 0.45 was found for typical fabrics used in everyday clothing.」との記述を受け、本論文では全身各部位で0.45という値を仮定した。

注10) 熱伝達率の測定値、特に静穏気流下での対流熱伝達率の測定値は、測定者により大きな差異があり、文献16)では、測定方法によって静穏気流下の対流熱伝達率がやや大きめの値となっていると考えられる。SET*値の算出にあたり、65分割モデルによるものと、2 node-modelによるものの整合性を高める目的で熱伝達率に修正を施すものとした。

注11) 制御系の式は文献6)と文献7)で異なるが、65分割モデルでは、文献7)を用いている。一例として、(27)式に示した血管拡張に関するシグナルDLの算出式は、文献6)では(27')式のようになる。

$$DL = Cdl + Wrm(1,1) + Sdl + Wrms + Pdl + Wrm(1,1)Wrms \quad \cdots(27')$$

制御式におけるこのような各シグナルの扱いの違いは、4つの体温制御方法全てにおいてである。

注12) 文献7)のStolwijkモデルで用いられた制御係数。ただし、血管収縮の制御係数CstおよびSstは、(26)式にて算出される各部位での血管収縮効果が、対応するStolwijkモデル各部位でのものと等しくなるよう修正した。

注13) 対応するStolwijkモデル各部位のSKINC(i)の値を各部位に与え、全身で計1.000となるよう修正した。SKINC(i)は(26)式分母にて各部位の血管収縮効果を表現するものであるため、部位分割数が増加すると血管収縮効果が減少することになる。そこで血管収縮に関するシグナルSTの算出を注12)に示したように改めた。

注14) $km(i,4)$ を用いて、分割部位単位での血流量と発汗量の局所的な増減を表現した。 $RT(i,4)=10^{\circ}\text{C}$ を仮定するということは、各部位Skin層の温度が、セットポイント温度より10℃高くなったときに、血流量と発汗量が2倍となるということを示す。

注15) 65MNSET*は、椅座静位、着衣量0.6clo、標準 i_{cl} 係数0.45、静穏気流、相対湿度50%、平均放射温度=空気温度という標準状態において定義する。 I_{cl} と h_{cl} を代謝量の関数として定義を考えることで、異なる代謝量における温冷感評価を可能としている。これはGaggeらのSET*の算出方法に準ずるものである。

注16) (15)式で示される潜熱伝達率 $h_{cl}(i)$ の算出では、 i_{cl} 係数を用いて定式化を行ったが、ここでは i_{cl} 係数を用いた表現としている。 i_{cl} 係数と i_{cl} 係数の関係は(i)式で表現される。

$$i_m = (R_{cl} + R_{acl}) / [(R_{cl} / i_{cl}) + (R_{acl} / i_o)] \quad \cdots(i)$$

ここで、 R_{cl} 、 R_{acl} [m²C/W]はそれぞれ着衣、着衣外表面の熱抵抗である。 i_{cl} [-]は着衣外表面の空気層の透湿係数であり、対流熱伝達率 h_{cl} [W/m²C]と線形放射熱伝達率 h_{rl} [W/m²C]を用いて(ii)式で表される。

$$i_o = h_{cl} / (h_{cl} + h_{rl}) \quad \cdots(ii)$$

注17) 2 node-modelでは、体温と皮膚温を温度情報として発汗量を算出している。文献2)では、体温と皮膚温のセットポイント温度をそれぞれ、36.49℃、33.7℃としている。なお、本論文では2 node-modelの計算に、次の係数を用いた。発汗制御係数(C_{sw}) = 170 [g/m²hK]、血管拡張制御係数(C_{ad}) = 200 [L/m²hK]、血管収縮制御係数(S_{cr}) = 0.5 [-]。

【記号一覧】

i	分割部位 (1～16)
j	層方向の分割 (1～4)
65MNSET* [°C]	65分割体温調節モデルによるSET*値
A_{Du} [m ²]	全身の体表面積
$A_{Du}(i)$ [m ²]	各部位表面積
$B(i,j)$ [W]	中央血液溜まりと各Nodeとの熱交換量
$BF(i,j)$ [mL/s]	血流量
$BFB(i,j)$ [mL/s]	基礎血流量
$C(i,j)$ [kJ/K]	熱容量
Cch [W/°C]	Head部位Core層からのふるえ制御係数
$Cd(i,j)$ [W/°C]	隣接する層との間の熱コンダクタンス
Cdl [mL/s°C]	Head部位Core層からの血管拡張制御係数
$Ch(i,j)$ [W]	ふるえ熱産生量
$Chilf(i)$ [-]	ふるえ熱産生についての各部位Muscle層の全身に対する分布係数
$Cld(i,j)$ [°C]	皮膚冷受容器からのColdシグナル
$Clds$ [°C]	皮膚冷受容器からの重み付け出力
Cst [1/°C]	Head部位Core層からの血管収縮制御係数
Csw [W/°C]	Head部位Core層からの発汗制御係数
$D(i,j)$ [W]	隣接する層との伝導による熱交換量
DL [mL/s]	血管拡張に関するシグナル

$E(i,4)$ [W]	Skin層における蒸発熱損失量	h_n [W/m ² °C]	標準化した皮膚表面から環境までの総合熱伝達率
$E_b(i,4)$ [W]	不感蒸泄による熱損失量	$i_{cl}(i)$ [-]	着衣の透湿係数
$E_{max}(i)$ [W]	最大蒸発熱損失量	i_{ms} [-]	標準 i_m 係数 (皮膚表面から環境までの透湿係数)
$E_{sw}(i,4)$ [W]	発汗による蒸発熱損失量	$km(i,4)$ [-]	イフェクター動作量
$Err(i,j)$ [°C]	エラーシグナル	met [met]	活動の種類より推定される全身の代謝量
$F(i,j)$ [°C/s]	微小温度変化量	$p_{65MNSET*}$ [kPa]	65MNSET*[°C]における飽和水蒸気圧
$I_{cl}(i)$ [clo]	サーマルマネキン測定による各部位別の着衣熱抵抗	$p_a(l)$ [kPa]	Head部位での水蒸気圧
I_{cls} [clo]	標準化した着衣熱抵抗	$p_a(i)$ [kPa]	環境の水蒸気圧
LR [°C/kPa]	ルイス係数	$p_{sk,s}$ [kPa]	t_{sk} [°C]における飽和水蒸気圧
$Metf(i)$ [-]	仕事熱産生についての各部位 Muscle 層の全身に対する分布係数	$p_{sk,s}(i)$ [kPa]	各部位皮膚表面での飽和水蒸気圧
Mod_c [-]	対流熱伝達率の修正係数	$t_a(l)$ [°C]	Head部位での空気温度
Mod_r [-]	線形放射熱伝達率の修正係数	$t_o(i)$ [°C]	作用温度
Pch [W/°C ²]	Head部位Core層と各部位Skin層からのふるえ制御係数	t_{sk} [°C]	各部位皮膚温を面積重み付けした平均皮膚温
Pdl [mL/s°C ²]	Head部位Core層と各部位Skin層からの血管拡張制御係数	v [m/s]	面積重み付け平均した全身の相対気流速度
Pst [1/°C ²]	Head部位Core層と各部位Skin層からの血管収縮制御係数	w [-]	全身のぬれ率
Psw [W/°C ²]	Head部位Core層と各部位Skin層からの発汗制御係数	α [-]	血液の対向流熱交換効率
$Q(i,j)$ [W]	産熱量	ρC [J/mLK]	血液の体積比熱(密度と比熱の積)
Q_b [met]	全身の基礎代謝量		
$Q_b(i,j)$ [W]	各部位基礎代謝量		
Q_{sk} [W/m ²]	全身の皮膚表面からの熱損失量		
$Q_{f(i,4)}$ [W]	各部位の皮膚表面と環境の対流および放射熱交換量		
$RATE(i,j)$ [s]	温度受容体の動的感度		
$RES(2,1)$ [W]	呼吸による熱損失(Chest部位Core層で考慮)		
$RT(i,4)$ [°C]	イフェクター動作量が2となるための必要温度幅		
Sch [W/°C]	各部位Skin層からのふるえ制御係数		
Sdl [mL/s°C]	各部位Skin層からの血管拡張制御係数		
$SKINC(i)$ [-]	STについての各部位Skin層の全身に対する分布係数		
$SKINR(i)$ [-]	皮膚からのセンシングシグナルを統合するための部位別重み付け係数		
$SKINS(i)$ [-]	発汗についての各部位Skin層の全身に対する分布係数		
$SKINV(i)$ [-]	DLについての各部位Skin層の全身に対する分布係数		
Sst [1/°C]	各部位Skin層からの血管収縮制御係数		
Ssw [W/°C]	各部位Skin層からの発汗制御係数		
ST [-]	血管収縮に関するシグナル		
$T(65)$ [°C]	中央血液溜まりの温度		
$T(i,j)$ [°C]	温度		
$T_{set}(i,j)$ [°C]	セットポイント温度及び計算の初期温度		
$W(i,j)$ [W]	外部仕事による熱産生量		
$Wrm(i,j)$ [°C]	皮膚温受容器からのWarmシグナル		
$Wrms$ [°C]	皮膚温受容器からの重み付け出力		
$f_{cl}(i)$ [-]	着衣面積比		
f_{cls} [-]	標準化した着衣面積比		
h_c [W/m ² °C]	対流熱伝達率の測定値		
$h_c(i)$ [W/m ² °C]	対流熱伝達率		
h_{cs} [W/m ² °C]	標準化した対流熱伝達率		
$h_{cs}(i)$ [W/m ² kPa]	皮膚表面から環境までの潜熱伝達率		
h_{es} [W/m ² kPa]	標準化した皮膚表面から環境までの潜熱伝達率		
h_r [W/m ² °C]	線形放射熱伝達率の測定値		
$h_r(i)$ [W/m ² °C]	線形放射熱伝達率		
h_{rs} [W/m ² °C]	標準化した線形放射熱伝達率		
$h_{f(i)}$ [W/m ² °C]	皮膚表面から環境までの総合熱伝達率		

【ソフトウェアの公開】

本プログラムのウィンドウズ版ソフトウェアは、下記 web サイトでダウンロード可能である。
<http://www.tanabe.arch.waseda.ac.jp/model/>

【参考文献】

- 1) P.O.Fanger : Thermal Comfort, Danish Tech. Press, 1970
- 2) A.P.Gagge, A.P.Fobelets, L.G.Berglund : A Standard Predictive Index of Human Response to the Thermal Environment, ASHRAE Transactions, Vol.92, Part 2, pp.709-731, 1986
- 3) C.H.Wyndham, A.R.Atkins : An Approach to the Solution of the Human Biothermal Problem with the Aid of an Analogue Computer, Proceedings of the Third International Conference on Medical Electyronics, London, pp.32-38, 1960
- 4) E.H.Wissler : A Mathematical Model of the Human Thermal System, Bulletin of Mathematical Biophysics, Vol.26, pp.147-166, 1964
- 5) J.A.J.Stolwijk, J.D.Hardy : Temperature Regulation in Man -A Theoretical Study, Pflugers Arch., Vol.291, No.2, pp.129-162, 1966
- 6) J.A.J.Stolwijk : Mathematical Model of Thermoregulation, Physiological and Behavioral Temperature Regulation, Chapter 48, Charles C. Thomas Pub., pp.703-721, 1970
- 7) J.A.J.Stolwijk : A Mathematical Model of Physiological Temperature Regulation in Man, NASA, CR-1855, 1971
- 8) C.E.Smith : A Transient, Three-Dimensional Model of the Human Thermal System, KSU, Dissertation, 1993
- 9) 竹森 利和, 中島 健, 庄司 裕子, 平田 耕造, 西村 和久, 道広 和美 : 熱環境評価手法に関する研究—人体熱モデルによる皮膚温度予測結果—, 第17回人間-生活環境系シンポジウム報告集, pp.193-196, 1993
- 10) G.Fu : A Transient, 3-D Mathematical Thermal Model for the Clothed Human, KSU, Dissertation, 1995
- 11) B.W.Jones : personal communication
- 12) 川島 美勝 (南雲 仁一編集) : 生体システム, 日刊工業新聞社, 1971
- 13) 横山 真太郎 : 生体内熱移動現象, 北海道大学図書刊行会, 1993
- 14) 田辺 新一, 長谷部 ヤエ : 皮膚温度可変型サーマルマネキンによる室内環境評価法に関する研究, 日本建築学会計画系論文報告集, 第448号, pp.1-8, 1993.6
- 15) T.Oohori, L.G.Berglund, A.P.Gagge : Comparison of Current Two-Parameter Indices of Vapor Permeation of Clothing - As Factors Governing Thermal Equilibrium and Human Comfort, ASHRAE Transactions, Vol.90, Part 2, pp.85-101, 1985
- 16) 市原 真希, 斎藤 正文, 西村 美加, 田辺 新一 : サーマルマネキンを用いた立位・座位人体各部位の放射・対流熱伝達率の測定, 日本建築学会計画系論文集, 第501号, pp.45-51, 1997.11
- 17) 田村照子 : 裸体健康成人女子の皮膚温分布, お茶の水医学雑誌, 第31巻, 第4号, pp.225-241, 1983

第 2 章

温熱環境評価のための人体熱数値計算モデル COM の開発

第2章 温熱環境評価のための人体熱数値計算モデルCOMの開発

DEVELOPMENT OF NUMERICAL THERMOREGULATION-MODEL COM FOR EVALUATION OF THERMAL ENVIRONMENT

The human thermoregulation model COM (Complex Thermal Environment Comfort Model) was developed, incorporating the blood flow model for extremities and the conductive heat transfer model at contacting skin surfaces. The whole body model has 17 body segments, each consisting of 2 compartments for core and skin. Each core compartment of extremities has artery and vein blood pool in its center. The central blood compartment exchanges heat with blood pools and the tissues except extremities. The heat balance equations for each tissue are described. The current model is able to predict fairly well for the body temperature distribution under steady state conditions. As an example of calculation, the effect of floor heating on thermal comfort was shown.

Keywords: Thermal comfort, Numerical model, Blood flow of extremities, Counter-current heat exchange, Floor heating
熱的快適性, 数値計算, 四肢血流, 対向流熱交換, 床暖房

2-1. はじめに

過去の温熱環境指標に関する研究の中で広く使用されてきたPMV (Predicted Mean Vote)¹⁾及びSET*(Standard New Effective Temperature)²⁾は、均一で定常な温熱環境を評価するための指標である。しかし、実際の温熱環境は不均一かつ非定常である場合が多く、そのような環境の評価が望まれている。

我々の研究グループは、非定常・不均一な温熱環境の評価を目的として人体熱数値計算モデル65MN³⁾および3DM⁵⁾の開発を行ってきた。65MNは、血管系の簡易なモデル化等により、寒冷環境下で数値解析の結果が実際の人間の皮膚温分布から外れてしまうケースがあった。一方、血管系および呼吸器系等を詳細に取り扱っている3DMでは、詳細モデルの作成のために膨大なデータの取得が必要となるため、人体熱モデルによる解析には目的に応じた使い分けが必要である。

本研究では、実在温熱環境の評価への適用が容易で、精度良く皮膚温分布を予測可能な人体熱数値計算モデルCOM(Complex Thermal Environment Comfort Model)を開発した。COMは、四肢血流モデルと外部物体との熱伝導モデルを含み、人体をコア層と皮膚層からなる17部位に分割しモデル化している。人体部位別の温熱環境6要素、外部物体との接触条件および曝露時間を入力することによって、不均一かつ非定常状態にある温熱環境に曝露された人間の生理・心理量を予測する。本論文では、COMの概要と予測精度を示すと共に、モデルの適用例として、床暖房を想定し足部皮膚と床面との熱伝導を考慮したシミュレーションを行い、人体への熱的影響を推定した。なお、本論文では不均一環境の評価については述べておらず、別報として発表の予定である。

2-2. 被制御系のモデル

2-2-1 人体の分割

本モデルの人体は体表面積 1.87m^2 、体重 74.43kg の標準的な男性の体躯を基としている。人体のモデルは、図2-1に示すように全身を17部位に分割するものとした。各部位の体表面積を表2-1に示す^{註1)}。従来から得られている生理量および熱物性値データを利用できるように^{註2)}、各部位はコア層と皮膚層の2層に分割するものとした。同部位のコア層と皮膚層は熱伝導により熱交換を行い、皮膚層は外部環境と、対流、放射、蒸発、熱伝導に

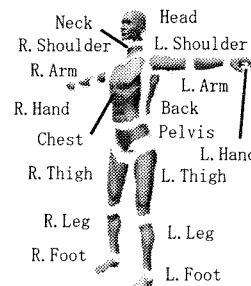


図2-1 部位分割

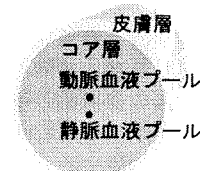


図2-2 四肢部位のモデル

表2-1 分割部位体表面積

部位	体表面積[m]
Head	0.110
Neck	0.029
Chest	0.175
Back	0.161
Pelvis	0.221
L.Shoulder	0.096
L.Arm	0.063
L.Hand	0.050
R.Shoulder	0.096
R.Arm	0.063
R.Hand	0.050
L.Thigh	0.209
L.Leg	0.112
L.Foot	0.056
R.Thigh	0.209
R.Leg	0.112
R.Foot	0.056
全身	1.870

より熱交換を行う。また、呼吸による熱損失がChest部位コア層で考慮される。四肢の12部位においては、コア層の中心に動脈血液プールと静脈血液プールを置き、血流を介しての熱交換が行われる。図2-2に四肢のモデル概念図を示す。四肢を除く部位の血流輸送による熱交換は、中央血液溜まりとの熱交換として簡易にモデル化した。

2-2-2 血流のモデル化方法

四肢を除く部位での熱交換を図2-3に示す。四肢部位以外ではStolwijkのモデル⁷⁾⁸⁾を採用している。各部位のコア層および皮膚層はそれぞれ中央血液溜まりとの熱交換を行う。すなわち、主要な生体内熱移動経路である血流循環による熱移動は、中央血液溜まりを介しての部位間の熱交換としてモデル化される。この中央血液溜まりとは、心臓および四肢を除く部位の動静脈の血管系および血液を指すものである。

しかし、四肢部位においては、各層に流入する動脈血温度を全身一様と仮定するStolwijkのモデルは精度よい解析結果を与えないことがある。特に寒冷環境や極めて不均一な温熱環境下で精度良く体内温度分布を予測するためには、動脈血温度分布を精度良く予測できる血流循環のモデル化が必要となる⁹⁾。

そこで、四肢部位については、各部位コア層の中心に動脈を表す動脈血液プールと静脈を表す静脈血液プールを配したモデルを作成した¹³⁾。図2-4に四肢部位での熱交換を示す。動脈血液プールは血流の前部位動脈血液プールから血液が流入し、完全混合の後、一部は同部位コア層および皮膚層へ、残りは次部位動脈血液プールに流出する。また、静脈血液プールは同部位コア層および皮膚層と、血流の前部位静脈血液プールから血液が流入し、完全混合の後、次部位静脈血液プールに流出する。動静脈血液プールとコア層との熱交換として、血管系と周囲組織との熱交換が考慮される。また、動脈血液プールと静脈血液プールとの熱交換として、血管系同士の対向流熱交換¹³⁾が考慮される。

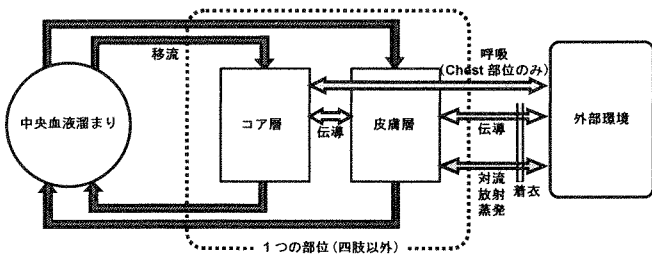


図2-3 四肢を除く部位での熱交換

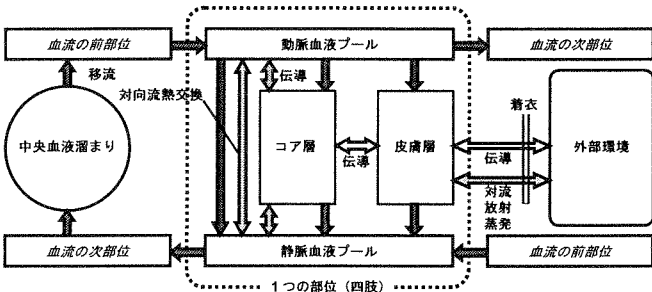


図2-4 四肢部位での熱交換

2-2-3 外部物体との接触による熱交換

実際の温熱環境の評価では、人間が外部物体と接触し、熱伝導により熱交換が起こる場面も想定される。物体の接触による熱的影響は、定常状態の解析では各部位の着衣熱抵抗の増加として考慮することができる。しかし、非定常状態の解析では外部物体の熱容量の考慮が必要となる。これを表現するため、本モデルCOMでは各部位皮膚層を接触部と非接触部に分割し、接

触部に熱伝導による熱流経路を設けた。

これによって、外部物体の接触による局所的な加熱や断熱を考慮することが可能となった。例えば、冷たいあるいは温かい床面との接触や、自動車室内のシートやハンドルとの接触等の評価が可能となった。

接触部では、対流・放射・蒸発による熱交換はないものとし、また、生体内の熱移動、つまり血流による熱輸送およびコア層との熱伝導は、接触部と非接触部で各々評価される。計算では、人体側の条件として各部位皮膚の接触面積比、接触する外部物体側の条件として初期温度、熱伝導率、体積比熱および厚さが必要となり、また境界条件として、接触物体が熱交換する外部参照温度と有効熱コンダクタンスを与える。

2-3. 各部の熱平衡式

各部の熱平衡式は(1)～(6)式のように表される^(注4)注5)。熱平衡式中の各々の項に関しては、2-3-1以降に述べる。

・Core層の熱平衡式

$$C_{cr} \frac{dT_{cr}}{dt} = M_{cr} + \rho c V_{cr} (T_{ar} - T_{cr}) - K(T_{cr} - T_{sk}) + K_V(T_{ar} - T_{cr}) + K_V(T_{ve} - T_{cr}) - Q_{res} \quad \dots(1)$$

・Skin層の熱平衡式

$$C_{sk} \frac{dT_{sk}}{dt} = M_{sk} + \rho c V_{sk} (T_{ar} - T_{sk}) + K(T_{cr} - T_{sk}) - Q_{mt} - E_{sk} - Q_l \quad \dots(2)$$

・動脈血液プールの熱平衡式

$$C_{ar} \frac{dT_{ar}}{dt} = \rho c V_{ar} (T_{ar} - T_{ar}) - K_V(T_{ar} - T_{cr}) - K_{AV}(T_{ar} - T_{ve}) \quad \dots(3)$$

・静脈血液プールの熱平衡式

$$C_{ve} \frac{dT_{ve}}{dt} = \rho c V_{cr} (T_{cr} - T_{ve}) + \rho c V_{sk} (T_{sk} - T_{ve}) + \rho c V_{ve} (T_{ve} - T_{ve}) - K_V(T_{ve} - T_{cr}) + K_{AV}(T_{ar} - T_{ve}) \quad \dots(4)$$

・中央血液溜まりの熱平衡式

$$C_{cb} \frac{dT_{cb}}{dt} = \sum_{\text{四肢を除く各部位}} \{ \rho c V_{cr} (T_{cr} - T_{cb}) + \rho c V_{sk} (T_{sk} - T_{cb}) \} + \sum_{\text{左右のShoulder部位およびThigh部位}} \{ \rho c V_{ve} (T_{ve} - T_{cb}) \} \quad \dots(5)$$

・接触物体の熱平衡式

$$C_{mt} \frac{dT_{mt}}{dt} = Q_{mt} - H(T_{mt} - T_{ff}) \quad \dots(6)$$

表2-2 各部の熱容量[kJ/K]

部位	Core	Skin	動脈プール	静脈プール
Head	9.140	0.792		
Neck	2.426	0.209		
Chest	34.246	1.588		
Back	30.837	1.462		
Pelvis	53.752	2.002		
L.Shoulder	6.028	0.544	0.067	0.256
L.Arm	3.981	0.356	0.033	0.140
L.Hand	0.514	0.356	0.016	0.075
R.Shoulder	6.028	0.544	0.067	0.256
R.Arm	3.981	0.356	0.033	0.140
R.Hand	0.514	0.356	0.016	0.075
L.Thigh	18.858	1.469	0.293	1.009
L.Leg	10.146	0.788	0.144	0.536
L.Foot	0.680	0.461	0.037	0.161
R.Thigh	18.858	1.469	0.293	1.009
R.Leg	10.146	0.788	0.144	0.536
R.Foot	0.680	0.461	0.037	0.161
中央血液溜まり				16.762

2-3-1 熱容量

$C[\text{Wh}/^\circ\text{C}]$ は各部の熱容量、 $T[^\circ\text{C}]$ は温度を表す。表2-2に計算に用いた各部の熱容量を示す。この熱容量は、各組織の比熱を骨2.088kJ/kgK、皮下脂肪2.506kJ/kgK、その他3.758kJ/kgK、血液の体積比熱を4.186kJ/LKとして算出した。各部位の動静脈血液プールの熱容量はその部位のCore層から、中央血液溜まりの熱容量はChest部位およびBack部位のCore層から均等に差し引いた。

2-3-2 産熱量

$M_{cr}[\text{W}]$ 、 $M_{sk}[\text{W}]$ はそれぞれ各部位のコア層、皮膚層における産熱量であり、(7)式で表現される。 $M_b[\text{W}]$ 、 $W[\text{W}]$ 、 $M_{div}[\text{W}]$ はそれぞれ各部位の基礎代謝量、外部仕事による熱産生量、ふるえ熱産生量である。表2-3に各部の基礎代謝量を示す。外部仕事とふるえによる熱産生はコア層でのみ発生するものとした。

$$M_{cr}=M_{b,cr}+W+M_{div} \quad M_{sk}=M_{b,sk} \quad \dots(7)$$

$$W=58.2(met-M_{b,total})A_{Du,total}Metf \quad \dots(8)$$

式(8)の $met[\text{met}]$ は活動の種類により推定される全身の代謝量、 $M_{b,total}[\text{met}]$ は全身の基礎代謝量、 $A_{Du,total}[\text{m}^2]$ は全身の体表面積である。 $M_{b,total}$ は表2-3に示した各部の基礎代謝量の合計から得られ本研究では0.778metとなる。 met がこれを下回ることはないとしている。すなわち、 W が負値となる場合は0とする。 $Metf[-]$ は仕事熱産生についての各部位筋肉層の全身に対する相対比である。これを表2-3に示す。ふるえ熱産生量 M_{div} の算出式については後述する。

表2-3 各部の基礎代謝量[W]とMetf値

部位	Core	Skin	Metf
Head	16.896	0.104	0.000
Neck	0.274	0.028	0.000
Chest	24.287	0.179	0.091
Back	21.737	0.158	0.080
Pelvis	12.921	0.254	0.129
L.Shoulder	1.215	0.050	0.026
L.Arm	0.346	0.026	0.014
L.Hand	0.090	0.050	0.005
R.Shoulder	1.215	0.050	0.026
R.Arm	0.346	0.026	0.014
R.Hand	0.090	0.050	0.005
L.Thigh	1.318	0.122	0.201
L.Leg	0.357	0.023	0.099
L.Foot	0.212	0.100	0.005
R.Thigh	1.318	0.122	0.201
R.Leg	0.357	0.023	0.099
R.Foot	0.212	0.100	0.005
Total		84.656	1.000

2-3-3 血液による熱輸送

(1)式右辺第2項および(2)式右辺第2項は、血流によって組織へ輸送される熱量を表す。 T_{ar} と表記される動脈血温度は、四肢を除く部位では中央血液溜まり温度と考える。本モデルでは、移流による熱移動については、流入する動脈血液と組織の熱交換が完全に行われるという仮定をした。 $V[\text{L}/\text{h}]$ は各部の血流量、 $\rho C[\text{kJ}/\text{L}/\text{K}]$ は血液の体積比熱(密度と比熱の積)である。本モデルでは $\rho C=4.186\text{kJ}/\text{L}/\text{K}$ とした。(9)式はコア層の血流量を表す。 $V_b[\text{L}/\text{h}]$ は基礎血流量であり表2-4に本計算で用いた値を示す。コア層の血流量増加は産熱量増加に依存すると考えている。すなわち、3600kJの産熱のために、0.860Lの血流が必要であるという仮定をした⁷⁾⁽⁸⁾。

$$V_{cr}=V_{b,cr}+0.860(W+M_{div}) \quad \dots(9)$$

(3)式右辺第1項および(4)式右辺第3項は、血流により前部位から輸送される熱量を表す。 T_{ar*} と表記される血流の前部位の動脈血温度は、躯幹部から四肢への血液流入点となるShoulder部位およびThigh部位の動脈血液プールの熱平衡式においては中央血液溜まり温度と考える。また、Shoulder部位およびThigh部位の静脈血は、(5)式に示されるように中央血液溜まりに熱を輸送する。こうして、四肢血流は中央血液溜まりを起点として往復する。

表2-4 各部の基礎血流量[L/h]

部位	Core	Skin
Head	32.228	5.725
Neck	15.240	0.325
Chest	89.214	1.967
Back	87.663	1.475
Pelvis	33.518	2.272
L.Shoulder	1.808	0.910
L.Arm	0.940	0.508
L.Hand	0.217	1.114
R.Shoulder	1.808	0.910
R.Arm	0.940	0.508
R.Hand	0.217	1.114
L.Thigh	1.406	1.456
L.Leg	0.164	0.651
L.Foot	0.080	0.934
R.Thigh	1.406	1.456
R.Leg	0.164	0.651
R.Foot	0.080	0.934
全身		290.003

2-3-4 組織間の伝導による熱交換

(1)式右辺第3項および(2)式右辺第3項は、コア層と皮膚層との間の伝導による熱交換を表す。コア層と皮膚層との間には、筋肉内側表面から脂肪を通り皮膚までの熱コンダクタンスが与えられた¹⁴⁾。(1)式右辺第4項および第5項はコア層と動静脈との熱交換を表し、COMでは四肢部位のみで考慮するものと四肢を除く部位では値を持たないものとした。(3)式右辺第3項および(4)式右辺第5項は、血管系同士の対向流熱交換を表す。表5に計算に用いた各Node間の熱コンダクタンスを示す。

表2-5 各Node間の熱コンダクタンス[W/°C]

部位	Core-Skin	Core-動脈プール	動脈プール-静脈プール
Head	3.422		
Neck	0.909		
Chest	1.782		
Back	1.640		
Pelvis	2.247		
L.Shoulder	1.501	0.586	0.537
L.Arm	0.982	0.383	0.351
L.Hand	2.183	1.534	0.762
R.Shoulder	1.501	0.586	0.537
R.Arm	0.982	0.383	0.351
R.Hand	2.183	1.534	0.762
L.Thigh	2.468	0.810	0.826
L.Leg	1.326	0.435	0.444
L.Foot	3.370	1.816	0.992
R.Thigh	2.468	0.810	0.826
R.Leg	1.326	0.435	0.444
R.Foot	3.370	1.816	0.992

2-3-5 呼吸による熱損失

呼吸による熱損失 Q_{res} はChest部位コア層のみで発生することとした¹⁵⁾。 Q_{res} は(10)式で表される。

$$Q_{res}=58.2met \cdot (0.0014(34-t_{a,head})+0.0173(5.87-p_{a,head})) A_{Du,total} \quad \dots(10)$$

$t_{a,head}[^\circ\text{C}]$ 、 $p_{a,head}[\text{kPa}]$ はそれぞれHead部位での空気温度、水蒸気圧である。

2-3-6 蒸発熱損失

(2)式の $E_{sk}[\text{W}]$ は各部位の皮膚層における蒸発熱損失量であり、(11)式のように表現される。 $E_{dif}[\text{W}]$ は各部位の不感蒸泄による熱損失量であり、(12)式で示される。また、 $E_{sw}[\text{W}]$ は各部位の発汗による蒸発熱損失量である。

$$E_{sk}=E_{dif}+E_{sw} \quad \dots(11)$$

$$E_{dif}=0.06(1-E_{sw}/E_{max}) \cdot E_{max} \quad \dots(12)$$

ここで、 $E_{max}[\text{W}]$ は各部位の最大蒸発熱損失量であり、(13)式から求められる。Stolwijkモデル⁷⁾⁽⁸⁾では、不感蒸泄に関しては定数を与えているが、この値は E_{max} の3~4%に相当する値となっている。本モデルでは、各部位の不感蒸泄を、発汗の無い面積率についての最大蒸発熱損失量の6%として計算を行っ

ている。

$$E_{\text{met}} = h_e (p_{s,sk,unc} - p_a) A_{Du} (1 - CSF) \quad \cdots (13)$$

ここで、 h_e [W/m²kPa] は各部位の皮膚表面から環境までの潜熱伝達率、 $p_{s,sk,unc}$ [kPa] は外部物体と接触していない皮膚表面での飽和水蒸気圧、 p_a [kPa] は環境の水蒸気圧、 A_{Du} [m²] は各部位表面積である。CSF [-] は各部位の外部物体との接触面積率である。外部物体との接触がある場合、接触部では蒸発熱損失はないものとした。

皮膚表面から環境までの潜熱伝達率 h_e は i_{cl} 係数を用いた表現とし (14) 式で求められる。

$$h_e = LR \cdot i_{cl} / \left(0.155 I_{cl} + \frac{i_{cl}}{h_c \cdot f_{cl}} \right) \quad \cdots (14)$$

Stolwijkモデル⁷⁸⁾では着衣熱抵抗が考慮されていないが、COMではサーマルマネキン測定による各部位別の着衣熱抵抗 I_{cl} [clo] を考慮するものとした。 h_c [W/m²°C] は人体の対流熱伝達率、 f_{cl} [-] は着衣面積比である。 LR [°C/kPa] はルイス係数であり、 $LR=16.5$ °C/kPa である。また、全身各部位について $i_{cl}=0.45$ とする。本モデルでは着衣は顕熱・潜熱抵抗としてのみ取り扱っており、熱容量、吸放湿に関しては考慮していない⁷⁹⁾。

2-3-7 皮膚表面の顕熱交換

Q_{cl} [W] は皮膚表面と環境の対流および放射熱交換であり、(15) 式のように総合熱伝達率を用いた表現とした。 h [W/m²°C] は各部位の皮膚から環境までの総合熱伝達率、 $T_{sk,con}$ [°C] は外部物体と接触していない皮膚表面の温度、 t_a [°C] は作用温度である。外部物体との接触がある場合、接触部では対流および放射による熱交換はないものとした。

$$Q_{cl} = h_i (T_{sk,unc} - t_a) A_{Du} (1 - CSF) \quad \cdots (15)$$

h_i は clo 値を用いると (16) 式のように表現される。すなわちその逆数は、着衣量 I_{cl} [clo] と着衣外表面における表面空気層の熱抵抗の和として表現できる。 h_r [W/m²°C] は線形放射熱伝達率である。

$$\frac{1}{h_i} = 0.155 I_{cl} + \frac{1}{(h_c + h_r) f_{cl}} \quad \cdots (16)$$

COMの部位分割は皮膚温可変型サーマルマネキン¹⁵⁾にほぼ対応しているため、 h_c 、 h_r の値には、サーマルマネキンによる測定値¹⁶⁾を用いることができる⁷⁸⁾。本モデルでは、部位別測定値 (対流熱伝達率については気流条件毎の測定値) に、(17)～(19) 式で示される Mod_c 、 Mod_r 係数を乗じて熱伝達率を算出するものとした。 Mod_c は (18) 式による値と (19) 式による値の大きい方とした。この取り扱い方法は65MN³⁴⁾と比較のため同様とした。 v_{ave} [m/s]、 $h_{c,ave}$ [W/m²°C]、 $h_{r,ave}$ [W/m²°C] はそれぞれ、面積重み付け平均した全身の相対気流速度、対流熱伝達率の測定値、線形放射熱伝達率の測定値である。表2-6に静穏気流下 (0.13m/s 以下) の h_c と h_r を示す⁷⁹⁾。なお、表2-6に示した熱伝達率は立位のものであるため、本モデルは立位への対応が可能である。ただし、表6の値を姿勢に従って変更すれば、他の姿勢にも対応可能である。

$$Mod_c = 8.6 v_{ave}^{0.53} / h_{c,ave} \quad \cdots (17)$$

$$Mod_c = 3.0 / h_{c,ave} \quad \cdots (18)$$

$$Mod_r = 4.7 / h_{r,ave} \quad \cdots (19)$$

SET*の2 node-model²⁾では、対流熱伝達率を代謝量の関数として、作業時の相対気流速度増加を考慮しているが、本モデルでは考慮していない。動作による相対気流速度増加に関しては、対流熱伝達率そのものを変更することとした。また、サーマルマネキンの等価温度¹⁵⁾を計算に用いることも可能である。この場合は、 h_c を標準状態に固定し、作用温度の代わりに各部位等価温度を代入することによって Q_{cl} を求める。

2-3-8 接触物体との伝導による熱交換

(2) 式および (6) 式の Q_{mt} [W] は皮膚層と接触物体との伝導による熱交換であり、(20) 式のように表現される。 K_{cl} [W/°C] は皮膚と接触物体と

表2-6 静穏気流下 (0.13m/s 以下) の $h_c(i)$ と $h_r(i)$

部位	h_c [W/m ² °C]	h_r [W/m ² °C]
Head	4.5	4.9
Neck	4.5	4.9
Chest	3.0	4.3
Back	2.9	4.1
Pelvis	2.9	4.3
L.Shoulder	3.6	4.5
L.Arm	3.6	4.4
L.Hand	3.7	4.2
R.Shoulder	3.6	4.5
R.Arm	3.6	4.4
R.Hand	3.7	4.2
L.Thigh	2.8	4.8
L.Leg	2.0	5.3
L.Foot	2.0	6.1
R.Thigh	2.8	4.8
R.Leg	2.0	5.3
R.Foot	2.0	6.1
全身	3.0	4.7

の間の熱コンダクタンス、 $T_{sk,con}$ [°C] は外部物体と接触している皮膚表面の温度である。

$$Q_{mt} = K_{cl} (T_{sk,con} - T_{mt}) \quad \cdots (20)$$

2-4. 制御系

COMの体温調節の制御式は基本的にStolwijkモデル⁷⁸⁾のものを用いた。

2-4-1 センサー信号

各部のエラーシグナル Err [°C] は、(21) 式に示す通り、各部の温度 T [°C] とセットポイント温度 T_{set} [°C] との差、および受容器の非定常特性の和とした。各部の制御目標温度としての T_{set} の値は非常に重要である。本モデルで用いたセットポイント温度および計算の初期温度である、各部の設定温度を表2-7に示す⁷⁹⁾。

$$Err = (T - T_{set}) + RATE \cdot F \quad \cdots (21)$$

ここで、 $RATE$ [h] は温度受容器の動的感度、 F [°C/h] は微小温度変化量である。 T_{set} と $RATE$ は制御系の特性であり、定数として与えられる。 $RATE$ はこれまでの研究では定量的に明らかになっていないので、本モデルでは0とした。これに関しては、SET*の2node-model²⁾でも同様の取り扱いとしている。今後、 $RATE$ が定量的に明らかになった時点で非0の数値を与える。

温・冷温度受容器に対応して、各部のWarmシグナル (Wrm [°C]) とColdシグナル (Cld [°C]) を (22)、(23) 式で定義する⁷⁹⁾。

Err が正の値のとき温受容器が動作中とし、

$$Wrm = Err, \quad Cld = 0 \quad \cdots (22)$$

Err が負の値のとき冷受容器が動作中とし、

表2-7 各部の設定温度 [°C]

部位	Core	Skin	動脈プール	静脈プール
Head	37.14	35.99		
Neck	36.72	35.06		
Chest	36.93	34.62		
Back	36.98	34.52		
Pelvis	37.04	34.62		
L.Shoulder	36.25	34.30	36.68	35.62
L.Arm	35.77	33.95	36.49	35.27
L.Hand	35.01	34.43	35.62	34.94
R.Shoulder	36.25	34.30	36.68	35.62
R.Arm	35.77	33.95	36.49	35.27
R.Hand	35.01	34.43	35.62	34.94
L.Thigh	36.69	34.21	36.75	36.09
L.Leg	36.41	34.05	36.64	35.71
L.Foot	34.73	34.26	35.34	34.75
R.Thigh	36.69	34.21	36.75	36.09
R.Leg	36.41	34.05	36.64	35.71
R.Foot	34.73	34.26	35.34	34.75
中央血液溜まり				36.79

$$Cld = -Err, \quad Wrm = 0 \quad \dots(23)$$

2-4-2 統合信号

各部位の皮膚からのセンサー信号は、中枢にて統合されると考える。皮膚温受容器からの重み付け出力 ($Wrm[^\circ\text{C}]$)、皮膚冷受容器からの重み付け出力 ($Cld[^\circ\text{C}]$) は(24)、(25)式のように示される。SKINRは皮膚からのセンサー信号を統合するための部位別重み付け係数であり、表2-8に示す。

$$Wrms = \sum_{\text{各部位}} (SKINR \cdot Wrm_{sk}) \quad \dots(24)$$

$$Clds = \sum_{\text{各部位}} (SKINR \cdot Cld_{sk}) \quad \dots(25)$$

表2-8 各部位皮膚層の全身に対する相対比[-]と各部位 Shifv 値[-]

部位	SKINR	SKINS	SKINV	SKINC	Shifv
Head	0.0549	0.0640	0.1043	0.0500	0.0339
Neck	0.0146	0.0170	0.0277	0.0500	0.0436
Chest	0.1492	0.1460	0.0980	0.1500	0.2739
Back	0.1321	0.1290	0.0860	0.1500	0.2410
Pelvis	0.2122	0.2060	0.1380	0.1500	0.3875
L.Shoulder	0.0227	0.0510	0.0313	0.0500	0.0024
L.Arm	0.0117	0.0260	0.0163	0.0500	0.0014
L.Hand	0.0923	0.0155	0.0605	0.3500	0.0002
R.Shoulder	0.0227	0.0510	0.0313	0.0500	0.0024
R.Arm	0.0117	0.0260	0.0163	0.0500	0.0014
R.Hand	0.0923	0.0155	0.0605	0.3500	0.0002
L.Thigh	0.0501	0.0730	0.0920	0.0500	0.0039
L.Leg	0.0251	0.0360	0.0230	0.0500	0.0018
L.Foot	0.0167	0.0175	0.0500	0.3500	0.0004
R.Thigh	0.0501	0.0730	0.0920	0.0500	0.0039
R.Leg	0.0251	0.0360	0.0230	0.0500	0.0018
R.Foot	0.0167	0.0175	0.0500	0.3500	0.0004

2-5. 体温制御方法

制御系の式は、制御係数と頭部コアからのセンサー信号の結果から成る項、制御係数と皮膚からの統合信号の結果から成る項、制御係数と頭部コアからのセンサー信号・皮膚からの統合信号の結果から成る項を持つ。制御方法には、血管運動（皮膚血管拡張・収縮）、発汗、ふるえ熱産生がある。各体温制御反応に関する全身に対する相対比は、表2-8に示す値を用いて計算を行った。また、各体温制御反応の制御係数を表2-9に示す。以下に示す各制御式から求められる DL 、 ST 、 E_{sw} 、 M_{shiv} は、負値になることがあるが、その時は0とする。

表2-9 各体温制御反応の制御係数

	Core(C)	Skin(S)	Core × Skin(P)
発汗(sw)	371.2(W/°C)	33.6(W/°C)	0.0(W/°C ²)
ふるえ熱産生($shiv$)	0.0(W/°C)	0.0(W/°C)	24.4(W/°C ²)
血管拡張(dl)	117.0(L/h°C)	7.5(L/h°C)	0.0(L/h°C ²)
血管収縮(st)	10.8(1/°C)	10.8(1/°C)	0.0(1/°C ²)

2-5-1 血管運動

各部位の皮膚血流量 $V_{sk}[L/h]$ は(26)式で表される。 $DL[L/h]$ は血管拡張に関する信号、 $ST[-]$ は血管収縮に関する信号で各々(27)、(28)式のように表現される。 $SKINV[-]$ 、 $SKINC[-]$ は DL 、 ST についての各部位皮膚層の全身に対する相対比である。また、 $Err_{cr,head}$ 、 $Wrm_{cr,head}$ 、 $Cld_{cr,head}$ はそれぞれ頭部コアにおけるエラー信号、Warm信号、Cold信号である。

$$V_{sk} = \frac{V_{b,sk} + SKINV \cdot DL}{1 + SKINC \cdot ST} \cdot km_{bf} \quad \dots(26)$$

$$DL = CdlErr_{cr,head} + Sdl(Wrms - Clds) + PdlWrm_{cr,head}Wrms \quad \dots(27)$$

$$ST = -CstErr_{cr,head} - Sst(Wrms - Clds) + PstCld_{cr,head}Clds \quad \dots(28)$$

ここで、 $Cdl[L/h \cdot ^\circ\text{C}]$ 、 $Sdl[L/h \cdot ^\circ\text{C}]$ 、 $Pdl[L/h \cdot ^\circ\text{C}^2]$ はそれぞれ頭部コア、皮膚、頭部コアと皮膚からの血管拡張制御係数、 $Cst[1/^\circ\text{C}]$ 、 $Sst[1/^\circ\text{C}]$ 、 $Pst[1/^\circ\text{C}^2]$ はそれぞれ頭部コア、皮膚、頭部コアと皮膚からの血管収縮制御係数である。

(26) 式の $km_{bf}[-]$ は皮膚血流量に関するイフェクター動作量と呼ばれ(29)式で表される。 $Err_{sk}[^\circ\text{C}]$ は各部位皮膚におけるエラー信号、 $RT_{bf}[^\circ\text{C}]$ は皮膚血流に関するイフェクター動作量が2となるための必要温度幅である。本論文では、全身各部位について $RT_{bf}=6^\circ\text{C}$ とした⁷⁾⁸⁾。

$$km_{bf} = 2.0^{Err_{sk}/RT_{bf}} \quad \dots(29)$$

2-5-2 発汗

各部位の発汗による蒸発熱損失量 $E_{sw}[W]$ は、(30)式で示される。外部物体との接触がある場合、接触部では発汗による蒸発熱損失はないものとした。 $SKINS[-]$ は、発汗についての各部位皮膚層の全身に対する相対比である。

$$E_{sw} = \{CswErr_{cr,head} + Ssw(Wrms - Clds) + PswWrm_{cr,head}Wrms\} \cdot SKINS \cdot (1 - CSF) \cdot km_{sw} \quad \dots(30)$$

ここで、 $Csw[W/^\circ\text{C}]$ 、 $Ssw[W/^\circ\text{C}]$ 、 $Psw[W/^\circ\text{C}^2]$ はそれぞれ頭部コア、皮膚、頭部コアと皮膚からの発汗制御係数である。

$km_{sw}[-]$ は発汗に関するイフェクター動作量とであり、(31)式で表される。 $Err_{sk,unc}[^\circ\text{C}]$ は各部位皮膚の外部物体と接触していない部分におけるエラー信号、 $RT_{sw}[^\circ\text{C}]$ は発汗に関するイフェクター動作量が2となるための必要温度幅である。本論文では、全身各部位について $RT_{sw}=10^\circ\text{C}$ とした⁷⁾⁸⁾。

$$km_{sw} = 2.0^{Err_{sk,unc}/RT_{sw}} \quad \dots(31)$$

2-5-3 ふるえ熱産生

各部位のふるえ熱産生量 $M_{shiv}[W]$ は(32)式で表される。

$$M_{shiv} = \{-CshivErr_{cr,head} - Sshiv(Wrms - Clds) + PshivCld_{cr,head}Clds\} \cdot Shifv \quad \dots(32)$$

ここで、 $Cshiv[W/^\circ\text{C}]$ 、 $Sshiv[W/^\circ\text{C}]$ 、 $Pshiv[W/^\circ\text{C}^2]$ はそれぞれ頭部コア、皮膚、頭部コアと皮膚からのふるえ制御係数である。 $Shifv[-]$ はふるえ熱産生についての各部位コア層の全身に対する相対比であり、表8に示す。

2-6. COMによるSET*の算出

COMでは、各部位皮膚温を面積重み付けした平均皮膚温 $t_{sk}[^\circ\text{C}]$ 、全身のぬれ率 $w[-]$ 、皮膚表面からの熱損失量 $Q_{sk}[W/m^2]$ を用いて、 $COMSET^*[^\circ\text{C}]$ を算出するものとした。その基礎式は(33)式である。 $P_{s,sk}$ 、 $P_{s,COMSET^*}[kPa]$ は、それぞれ $t_{sk}[^\circ\text{C}]$ 、 $COMSET^*[^\circ\text{C}]$ における飽和水蒸気圧である。

$$Q_{sk} = h_{ts}(t_{sk} - COMSET^*) + h_{ts} \cdot w(P_{s,sk} - 0.5P_{s,COMSET^*}) \quad \dots(33)$$

$h_{ts}[W/m^2 \cdot ^\circ\text{C}]$ は標準化した総合熱伝達率であり、(34)式で示される。

$$\frac{1}{h_{ts}} = 0.155I_{cls} + \frac{1}{(h_{cs} + h_{rs})f_{cls}} \quad \dots(34)$$

ここで、 $I_{cls}[\text{clo}]$ 、 $h_{cs}[W/m^2 \cdot ^\circ\text{C}]$ 、 $h_{rs}[W/m^2 \cdot ^\circ\text{C}]$ 、 $f_{cls}[W/m^2 \cdot ^\circ\text{C}]$ は標準化した着衣量、対流熱伝達率、線形放射熱伝達率、着衣面積比である。 I_{cls} は代謝量により修正され、(35)式で示される。

$$I_{cls} = \frac{1.3264}{met + 0.7383} - 0.0953 \quad \dots(35)$$

h_{cs} は代謝量増加による相対気流速度の増加を考慮して(36)式で求められる。

$$h_{cs} = 5.66(met - 0.85)^{0.39} \quad \dots(36)$$

$met < 0.85met$ の場合と、(36)式の結果 $h_{cs} < 3.0W/m^2 \cdot ^\circ\text{C}$ の場合は、 $h_{cs} = 3.0W/m^2 \cdot ^\circ\text{C}$ とした。また、 $h_{rs} = 4.7W/m^2 \cdot ^\circ\text{C}$ とした。また f_{cls} は(37)式で示される。

$$f_{cls} = 1 + 0.3I_{cls} \quad \dots(37)$$

また(33)式の $h_{sk}[W/m^2 \cdot kPa]$ は皮膚から環境までの潜熱伝達率であり、(38)式で示される。

$$h_{sk} = i_{ms} \cdot LR \cdot h_{is} \quad \dots(38)$$

ここで $i_{ms}[-]$ は標準 i_m 係数であり、 $i_{ms} = 0.45$ である¹²⁾。

(33)式～(38)式を用いることによって、COMで算出した結

果から分割・分布を考慮したSET* 値を計算することが可能となる^{注13)}。

2-7. 2node-modelとの比較

COMの基本特性や熱伝達率を確認するため、Gaggeの2node-model²⁾との比較を行った^{注14)}。2node-modelはSET*算出のための人体熱モデルであり、これまで多くの被験者実験との比較がなされている。表2-10に計算条件を示す。図2-5にCOM、65MNおよび2node-modelによって算出された平均皮膚温、ぬれ率、SET*値の比較を示す。各値とも良い一致が見られた。均一あるいは均一に近い温熱環境下では、従来のSET*と対応させて、COMSET*により温冷感予測が可能である。

表2-10 計算条件

曝露時間	60min.
作用温度	10.0~40.0℃ (2.0℃きざみ)
相対湿度	50%
気流速度	0.10m/s
着衣量	0.00clo
代謝量	58.2W/m ²

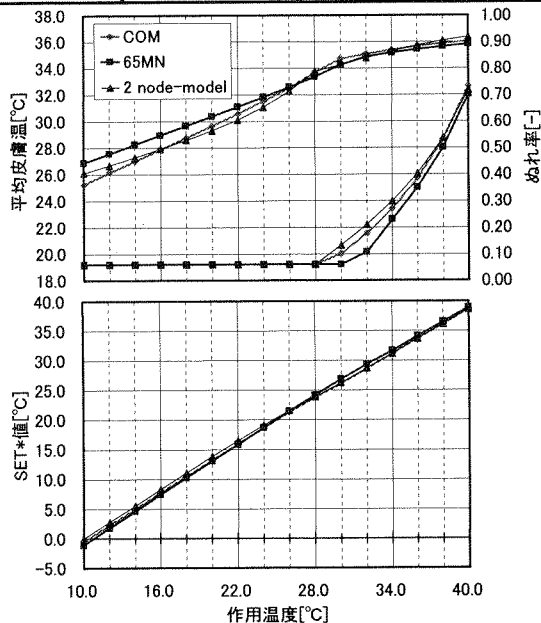


図2-5 平均皮膚温・ぬれ率・SET*の比較

2-8. 体内温度分布予測

2-8-1 計算条件

定常状態での皮膚温分布予測値の精度を検証するため、Wernerの被験者実験結果¹⁸⁾との比較を行った。被験者は、21歳~27歳の男性6名、平均体重74.2kg、平均身長1.806mである。実験および計算条件を表2-11に示す^{注15)}。被験者は実験の前に60min.標準環境条件に曝露された。

表2-11 実験および計算条件

	初期条件	実験条件
曝露時間	60min.	120min.(10℃条件では90min.)
作用温度	30℃	10,20,30,35,40,45,50℃
相対湿度		40%
気流速度		0.10m/s
着衣量		0.00clo
代謝量		45.3W/m ²

2-8-2 計算結果・考察

90min.あるいは120min.の曝露実験終了時の各部位温度について比較した。図2-6に各温度条件での各部位温度の予測値を示す。対応する部位の被験者測定値を共に示す。予測値と測定値は概ね良い一致を得た。図2-7に10℃条件下の皮膚温分布の

比較を示す^{注16)}。皮膚温分布の傾向を見るために対応する部位と共に示した。65MNはArm部位皮膚温をShoulder部位より高く算出し、測定値と異なる皮膚温分布傾向となった。一方、COMにより予測された皮膚温分布は測定値と似た傾向となった。四肢の末端であるHand部位およびFoot部位においては、極めて寒冷な環境のため皮膚血流が極めて少なくなり、65MNとの皮膚温の差異は小さなものとなった。

図2-8に10℃条件下の皮膚温およびコア温の分布を、図2-9に動静脈血液プールの分布を示す。四肢の血流モデルの効果を確認するため、血管系と周囲組織との熱交換および対向流熱交

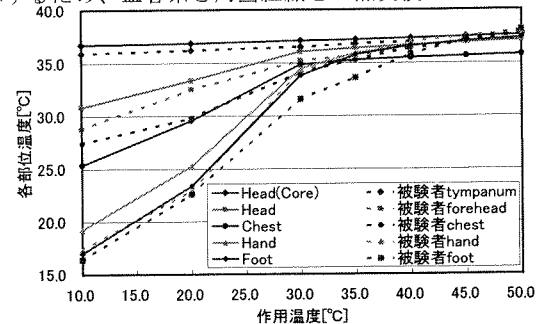


図2-6 各温度条件での各部位温度の比較

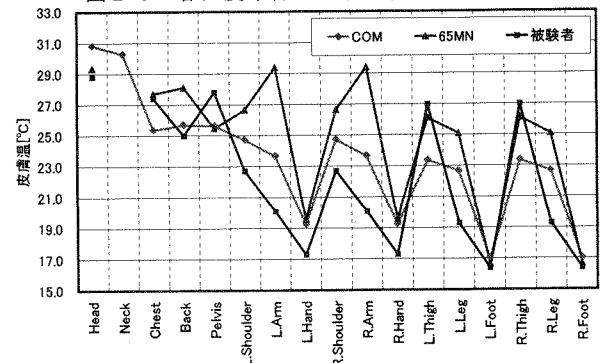


図2-7 10℃条件下の皮膚温分布の比較

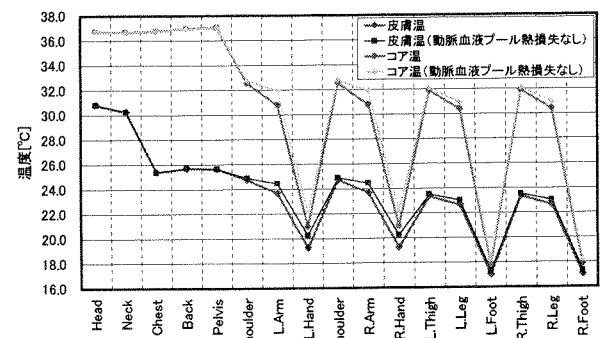


図2-8 10℃条件下の皮膚温およびコア温の分布

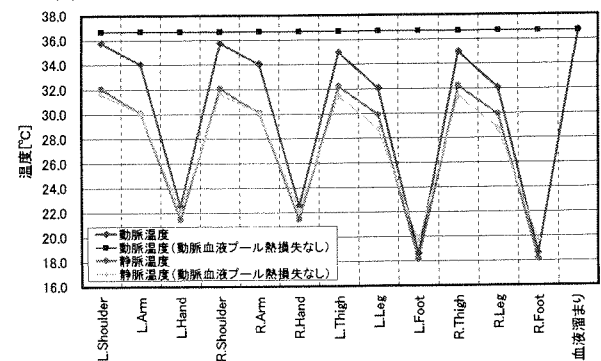


図2-9 10℃条件下の動静脈血液プール温度の分布

換を行わないモデルを作成し、計算結果を「動脈血液プール熱損失なし」として共に示した。四肢の血流モデルを組み入れることにより、四肢の皮膚温およびコア温が低下すること、静脈血液プール温度はHand部位およびFoot部位ではより低く算出される一方で、Shoulder部位およびThigh部位ではより高く算出されることが確認された。

2-9. 床暖房空間に曝露された人間のシミュレーション

例として、床暖房が人体に与える熱的影響を予測するためのシミュレーションを行った。下記の3つのケースを想定した。

ケース1: 空気温度および平均放射温度20.0℃、相対湿度50%、気流速度0.10m/s、着衣量0.59clo、代謝量1.0metの温熱環境に120min. 曝露する。各部位の着衣量を表2-12に示す^{注17)}。

ケース2: 上記の条件に加えて、床暖房設備によって設定温度30.0℃として加熱した床面とFoot部位皮膚層接触部(足裏部)の接触がシミュレーション開始60min. 後から起こる。接触面積比は0.25 (0.014m²)とした。ただし、加熱面は充分小さく平均放射温度への影響を無視できるものとする。

ケース3: 上記の条件と同様に接触が起こるが、加熱面が平均放射温度に影響を与える。シミュレーション開始60min. 後からは、人体各部位を取り巻く閉空間の1/6の面積を加熱面(表面温度30.0℃)が占めることを仮定してケース1の条件のうち平均放射温度のみ21.7℃と変更した^{注18)}。

床は木質フローリング材(厚さ15.0mm、熱伝導率0.13W/m℃、体積比熱250Wh/m³℃)の下に温水パネルを敷設したものを想定し、深さ方向の一次元熱伝導モデルとした。温水温度は60.0℃で不変とした。図2-10のように、床面は150W/m²の放熱量があるものと仮定して、温水温度から木質フローリング材までの熱コンダクタンスを11.8W/m²℃と算出した^{注19)}。木質フローリング材は簡易に1質点とし、接触開始時30.0℃と仮定した。

図2-11に各ケースでの平均皮膚温と足裏部皮膚温の推移を示す^{注20)}。足裏部皮膚温は、60min.の床面との接触後、ケース2でおよそ32.5℃、ケース3でおよそ32.9℃に上昇した。図12に皮膚からの熱損失量の推移を示す^{注21)}。熱伝導による熱損失量が負値であるのは、人体が受熱側であることを表す。熱伝導による受熱量は最大で4W程度であった。ケース2の対流・放射・蒸発による熱損失は93min. 経過時にケース1を上回る結果となった。これは、足裏部への局所的な加熱が体温調節反応量に影響を及ぼし、足裏部以外の皮膚温が上昇したことによる。表2-13に各ケースのシミュレーション終了時のCOMSET*を示す。COMSET*は、加熱した床面との接触により0.6℃(ケース1とケース2の差)上昇し、一方、接触と平均放射温度の考慮により1.6℃(ケース1とケース3の差)上昇した。さらに、実際の環境では空気温度の上昇と室内での相互放射によって、より大きな暖房効果が得られるものと考えられる。

表2-12 各部位着衣量[clo]

Head	0.00
Neck	0.00
Chest	1.04
Back	0.88
Pelvis	1.10
L.Shoulder	0.59
L.Arm	0.62
L.Hand	0.16
R.Shoulder	0.77
R.Arm	0.53
R.Hand	0.00
L.Thigh	0.54
L.Leg	0.60
L.Foot	0.00
R.Thigh	0.41
R.Leg	0.48
R.Foot	0.00

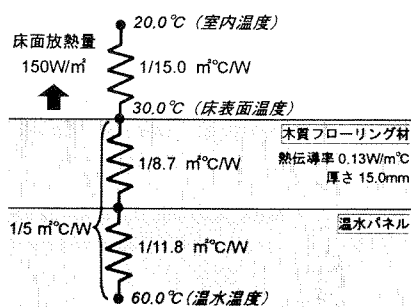


図2-10 熱コンダクタンスの算出

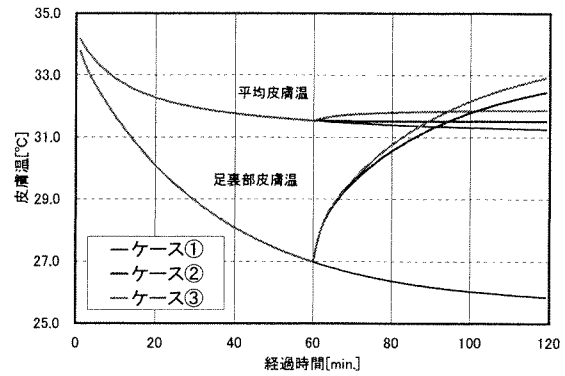


図2-11 平均皮膚温と足裏部皮膚温の推移

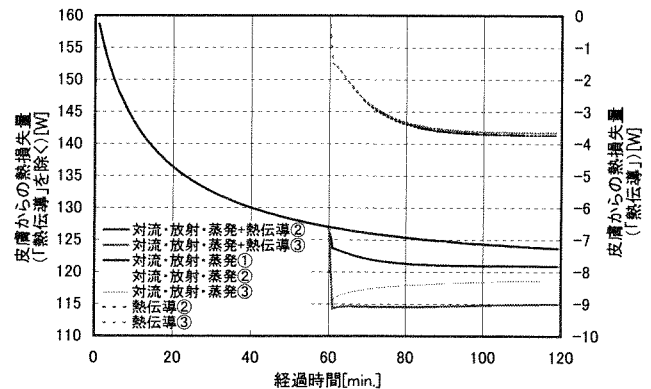


図2-12 皮膚からの熱損失量の推移

表2-13 COMSET*の比較

	ケース①	ケース②	ケース③
COMSET*	18.6	19.2	20.2

2-10. まとめ

- 1) 四肢の血流モデルと外部物体との熱伝導を含めた人体モデルCOMを開発した。定数・係数を含めた計算モデル・熱平衡式などを示した。さらに、COMSET*の算出方法を示した。
- 2) Gaggeの2 node-modelと計算結果の比較を行った。平均皮膚温、ぬれ率、SET*値は、2node-modelによるものと良い一致が得られた。
- 3) Wernerの被験者実験結果との比較を行った。各温度条件下で予測された各部位温度は概ね測定値と一致した。
- 4) 作用温度10℃条件下のシミュレーションにて、四肢の血流モデルの効果を確認した。
- 5) 床暖房を想定し、足部皮膚と床面との熱伝導を考慮したシミュレーションを行い、人体への熱的影響を推定した。

【注釈】

注1)COMの人体のモデルはStolwijkの6円柱モデル⁷⁸⁾をもととしている。

StolwijkのモデルはHead部位を表す1つの球とTorso、Arms、Hands、Legs、Feetの各部位を表す5円柱からなる。各部位の寸法は以下に示す通りである。Head: 半径9.88cm、Torso: 半径14.70cm、長さ60cm、Arms: 半径5.02cm、長さ112cm、Hands: 半径1.49cm、長さ96cm、Legs: 半径6.42cm、長さ160cm、Feet: 半径1.57cm、長さ125cm

注2)生体内の個々の生理量および熱物性値は、文献7)～13)を参考に分割した人体各部に与えられた。今後、より精度の高いデータを収集しモデルの精度向上を行うことが必要である。

注3)図4に示すように、特に四肢の末端においては動脈血液プールと静脈血液プールを直接つなぐ血流経路が考えられる。しかし、血流と周囲組織との間の熱交換率および流量制御モデルがこれまでの研究で明らかとなっていないので、本モデルではこの血流経路には流量を与えないものとした。

注4)(1)～(6)式の常微分方程式の解法はオイラー法を用いた。(1)～(6)式で用いられた記号については記号一覧を示した。

注5)部位間の温度差が小さいため、隣り合う部位間の伝導による熱移動は血流による熱輸送に比較的小さいと考えられる。そこで、COMでは部位間の熱移動は血流によるもののみを考慮した。

注6)呼吸による熱損失については運動生理学の分野で議論されており、未だ明確になっていない。本研究では計算上Chest部位コア層のみで呼吸による熱損失が発生するものとした。

注7)着衣の熱容量については吸放湿に比較すると温冷感への影響が小さいことが知られている。着衣の吸放湿は非定常を扱う際には重要な要素であるが、本研究で計算を行っているような裸体の場合や、発汗のない環境では影響が小さいと考えられる。着衣を含む人体周辺のモデル化については別途行い、人体のモデルと連成させる予定である。

注8)Neck 部位の熱伝達率はHead 部位と等しいものと仮定した。

注9)気流速度0.15m/sの自然対流時にサーマルマネキンの皮膚温と室内温度との差が5～20℃の範囲では対流熱伝達率は大きく変化しない。

注10) いずれの体温調節モデルも組み込まない被制御系のモデルを用いて、作用温度28.8℃、相対湿度50%、気流速度0.10m/s、着衣量0.00clo、代謝量1.0met(PMV=±0条件)での定常計算を行い、得られた各部温度を設定温度とした。すなわち「生理的温熱中立環境=心理的温熱中立環境」を仮定した。COMでは、設定温度を解析毎に算出可能な構成とした。

注11)外部物体との接触がある場合には圧力の影響でセンシング信号が変化すると考えられるが、本研究では圧力の影響に関しては考慮していない。

注12)(14)式で示される潜熱伝達率 h_e の算出では、 i_{cl} 係数を用いて定式化を行ったが、ここでは i_{cl} 係数を用いた表現としている。

i_m 係数と i_{cl} 係数の関係は(i)式で表現される。

$$i_m = (R_{cl} + R_{a,cl}) / [(R_{cl}/i_{cl} + (R_{a,cl}/i_j)] \quad \dots (i)$$

ここで、 R_{cl} 、 $R_{a,cl}$ はそれぞれ着衣、着衣外表面の熱抵抗である。 i_{cl} は着衣外表面の空気層の透湿係数であり、対流熱伝達率 h_e [W/m²℃]と線形放射熱伝達率 h_r [W/m²℃]を用いて(ii)式で表される。

$$i_{cl} = h_e / (h_e + h_r) \quad \dots (ii)$$

注13) 不均一放射環境においては、温冷感が特異な反応を示すことが堀越らによって明らかにされている¹⁷⁾が、COMSET*ではその特徴は考慮していない。

注14) 2 node-modelの計算には、次の係数を用いた。発汗制御係数(Csw)=170[g/m²hK]、血管拡張制御係数(Cdil)=200[L/m²hK]、血管収縮制御係数(Str)=0.5[-]。

注15)実験では被験者はハンモック上に横たわっていた。計算ではモデルの基礎代謝量45.3W/m²を与えた。

注16)被験者の皮膚温測定位置は文献18)に次のように表記されている。Head部位：forehead、Pelvis部位：abdomen、leg部位：calf、等。温度測定には熱電対が用いられた。

注17)各部位の着衣量はサーマルマネキンによる測定値である。各部位の面積重み付け平均値が0.59cloである。

注18)今後、詳細人体形状モデルを用いて、人体各部位での平均放射温度を定義する手法の開発が望まれる。

注19)温水パネルについては、送湯管や伝熱板等の熱容量を考慮せず、熱抵抗として取り扱う簡単なモデル化を行った。

注20)便宜上、ケース2およびケース3の60min.後までとケース1では、足裏部と床面との接触はなく、周囲環境と熱交換を行うものとした。

注21)皮膚からの熱損失量の総和は、ケース1において「対流・放射・蒸発」、ケース2およびケース3において「対流・放射・蒸発+熱伝導」である。

【記号一覧】

C [kJ/K]	熱容量
E_{sk} [W]	皮膚よりの蒸発熱損失量
H [W/°C]	接触物体と外部参照温度との間の有効熱コンダクタンス
K [W/°C]	コア層と皮膚層の間の有効熱コンダクタンス
K_{art} [W/°C]	動脈血液プールと静脈血液プールの間の有効熱コンダクタンス
K_{sk} [W/°C]	皮膚と接触物体との間の有効熱コンダクタンス
K_v [W/°C]	動静脈血液プールとコア層の間の有効熱コンダクタンス
M [W]	産熱量
Q_{m1} [W]	皮膚から接触物体へ伝導により移動する熱量
Q_{res} [W]	呼吸による熱損失量
Q [W]	皮膚からの対流・放射熱損失量
t [h]	時間

T [°C]	温度
T_{ref} [°C]	接触に関する外部物体参照温度
V [L/h]	血流量
ρc [kJ/LK]	血液の体積比熱 (密度と比熱の積)

以下添字

ar	動脈血液プール
ar^*	血流の前部位の動脈血液プール
cb	中央血液溜まり
cr	コア層
mt	接触物体
sk	皮膚層
ve	静脈血液プール
ve^*	血流の前部位の静脈血液プール

【参考文献】

- 1) P.O.Fanger, F Thermal Comfort, Danish Tech. Press, 1970
- 2) A.P.Gagge, A.P.Fobelets and L.G.Berglund, F A Standard Predictive Index of Human Response to the Thermal Environment, ASHRAE Transactions, Vol.92, Part 2, pp.709-731, 1986
- 3) 田辺 新一, 中野 淳太, 小林 弘造: 温熱環境評価のための65分割体温調節モデルに関する研究, 日本建築学会計画系論文報告集, 第541号, pp.9-16, 2001.3
- 4) K.Kobayashi, J.Nakano, S.Tanabe: Development of 65-node Termoregulation Model for Evaluation of Thermal Environment, Proceedings of Healthy Buildings, Vol.2, pp.563-568, 2000
- 5) 小林 弘造, 小川 一晃, 田辺 新一: 人間一快適性シミュレータ(その2-3), 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), pp.391-394, 2000
- 6) 山本 ゆう子, 田辺 新一, 小林 弘造, 小川 一晃: 体内温度分布を考慮した数値体温調節モデルー3DM, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, pp.1221-1224, 2000
- 7) J.A.J.Stolwijk, F A Mathematical Model of Physiological Temperature Regulation in Man, NASA, CR-1855, 1971
- 8) J.A.J.Stolwijk, J.D.Hardy, FControl of Body Temperature, Handbook of Physiology, section 9, Reaction to Environmental Agents (ed. Douglas, Amer., Physiol. Soc., pp.45-68, 1977
- 9) C.E.Smith, FA Transient, Three-Dimensional Model of the Human Thermal System, KSU, Dissertation, 1993
- 10) 横山 真太郎: 生体内熱移動現象, 北海道大学図書刊行会, 1993
- 11) 横山 真太郎, 角田 直人, 富樫 貴子, 濱田 靖弘, 中村 真人, 落藤 澄: 部位別特性を考慮した生体内温度予測プログラムの開発 第1報一生体内熱移動方程式とその解法, 空気調和・衛生工学会論文集, No.77, pp.1-12, 2000.4
- 12) R.G.Gordon, R.B.Roemer, S.M.Horvath, F A Mathematical Model of the Human Temperature Regulatory System - Transient Cold Exposure Response, IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol.BME-23, No.6, pp.434-444, 1976.11
- 13) J.W.Mitchell, G.E.Myers, F An Analytical Model of the Counter-current Heat Exchange Phenomena, Biophysical Journal, Vol.8, pp.897-911, 1968
- 14) 片岡 拓也, 房田 泰治: 人体熱モデルを用いた自動車室内温熱環境評価, 日本機械学会論文集(B編), 64巻, 628号, pp.331-336, 1998.12
- 15) 田辺 新一, 長谷部 ヤエ: 皮膚温可変型サーマルマネキンによる室内環境評価法に関する研究, 日本建築学会計画系論文報告集, 第448号, pp.1-8, 1993
- 16) 市原 真希, 斎藤 正文, 西村 美加, 田辺 新一: サーマルマネキンを用いた立位・座位人体各部位の放射・対流熱伝達率の測定, 日本建築学会計画系論文集, 第501号, pp.45-51, 1997
- 17) 渡邊 慎一, 堀越 哲美, 三好 結城, 宮本 征一: 矩健使用時における人体の熱的快適性の検討とその温熱効果の定量化, 日本建築学会計画系論文集, 第497号, pp.47, 1997
- 18) J.Werner, T.Reents: A Contribution to the Topography of Temperature Regulation in Man, European Journal of Applied Physiology, 45, pp.87-94, 1980

第 3 章

温熱環境評価のための人体熱モデル JOS の開発

第3章 温熱環境評価のための人体熱モデルJOSの開発

DEVELOPMENT OF NUMERICAL THERMOREGULATION-MODEL JOS FOR EVALUATION OF THERMAL ENVIRONMENT

The numerical thermoregulation model JOS was developed. The whole body model has 17 body segments, each consisting of two layers for core and skin. In addition, it is possible to alter its height, weight, sex, age, body fat percentage, basal metabolic rate and cardiac index. In the limbs of this model, the detailed vascular system was considered, including deep artery and vein, superficial vein and arteriovenous anastomoses (AVA). Under steady state and transient conditions, the validity of the calculation results was confirmed by comparing with the subjective experiments of females and the elderly. This model is able to predict fairly well for the skin temperature distribution, especially in the limbs under cold environments.

Keywords: Thermal comfort, Numerical model, arteriovenous anastomoses (AVA), Different types of human body, sex and age
熱的快適性, 数値計算, AVA 血流, 体躯・性別・年齢可変

3-1. はじめに

PMV(Predicted Mean Vote)¹⁾やSET*(Standard New Effective Temperature)²⁾等の従来の温熱環境指標が広く使用されており、これらはオフィスの執務空間のような定常で均一な温熱環境に対し非常に有効である。しかし、実際人間は熱的に非定常・不均一な空間に曝露されることが多い。現在、省エネルギーの観点から自動車車室内、パーソナル空調空間、半屋外空間等に関して、人体に有効な空調制御を行うための快適性の定量評価が求められているが、上記の理由で従来の指標では対応できない。このような非定常・不均一温熱環境の評価に対しては、コンピュータにより人体と環境との熱収支をモデル化した人体熱モデルを用いることが有効である。

我々の研究グループは、非定常・不均一な温熱環境の評価を目的として人体熱モデル65MN³⁾⁴⁾、3DM⁵⁾⁶⁾およびCOM⁷⁾の開発を行ってきた。これらのモデルでは、簡易な血管系のモデル化により予測結果が実際の人間の皮膚温分布から外れてしまうケースがある、詳細なモデル作成のため膨大なデータ量が必要となる等の課題があった。また、従来のモデルの多くは標準的な男性の体躯を対象としており、女性や高齢者等は対象とされていない。これらの人体では、体躯、性別、年齢等の影響により従来のモデルで扱われてきた人体とは異なる生理反応が起こるものと考えられる。

本研究では、これらの課題を解決することを目的として、詳細な血管系のモデルを含む体躯可変型人体熱モデルJOS(Joint System Thermoregulation Model)を開発した。JOSは、人体をコ

ア層と皮膚層からなる17部位に分割し、AVA血流等を考慮した詳細な血管系を組み込み、女性、高齢者にも適用可能である。人体部位別の温熱環境6要素、外部物体との接触条件および曝露時間、また、人体データ(身長、体重、年齢、性別等)を入力することによって、不均一かつ非定常状態にある温熱環境に曝露された人間の生理・心理量を予測する。本論文では、JOSの概要と共に、被験者実験データと比較しその予測精度の妥当性を検証した。

3-2. モデルの概要

3-2-1 人体の分割

対象とする人体はStolwijkモデル⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾を基にモデル化した。体表面積1.87[m²]、体重74.43[[kg]の健康な成人男性を想定し図3-1に示すように全身を17部位(Head, Neck, Chest, Back, Pelvis, 左右Shoulder, 左右Arm, 左右Hand, 左右Thigh, 左右Leg, 左右Foot)に分割するものとした。Stolwijkモデル、および65MN³⁾⁴⁾では、各部位をコア層、筋肉層、脂肪層、皮膚層の4層に分割しているが、COM⁷⁾、そして本モデルJOSでは従来から得られている生理量および熱物性値データに基づいて構築可能なように¹¹⁾、各部位は簡単にコア層と皮膚層の2層に分割している。さらに血液循環系を再現するため、コア層の中心に動脈血液プールと静脈血液プールを配し、血流を介しての熱交換が行われる。加えて四肢部位においては、AVA血流を通すための皮膚表面静脈プールを皮膚層の内側に、計算上の厚さを持たない形で設けた。図3-2に四肢部位のモデルを示す。

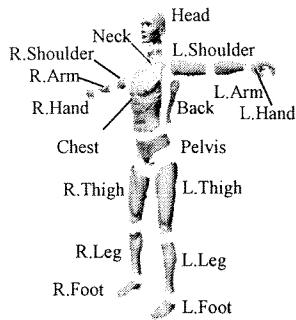


図 3-1 部位分割

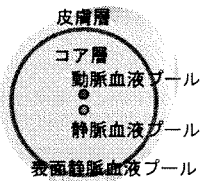


図 3-2 四肢部位のモデル

3-2-2 血流のモデル化方法

血管系モデルは、Stolwijk のモデル⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾を基に作成しているが、各層に流入する動脈血温度を全身一様と仮定する Stolwijk のモデルは精度よい解析結果を与えないことがある。特に寒冷環境や極めて不均一な温熱環境下で精度良く体内温度分布を予測するためには、動脈血温度分布を精度良く予測できる血流循環のモデル化が必要となる¹¹⁾。そこで、各部位のコア層の中心には、それぞれ大動脈・大静脈に相当する動・静脈血液プールを設けた¹²⁾。部位間の熱交換は血液プール間の血流による熱輸送によって行われる。また、動脈血液プールと静脈血液プールとの熱交換として、血管系同士の対向流熱交換¹⁵⁾が考慮される。各動脈血液プールでは、血流の前部位から血液が流入し、完全混合の後、その一部は各組織へ、残りは次部位の動脈血液プールへ流出する。また、各静脈血液プールでは、血流の前部位および各組織から血液が流入し、完全混合の後、次部位の静脈血液プールへ流出する。図 3-3 に四肢部位以外での熱交換を示す。

しかし、四肢部位では外部環境により血流経路が異なることが知られている¹⁶⁾。動脈を通して流入する血液の大部分は、寒冷環境では深部の静脈を通して戻るが、暑熱環境では表面静脈を通して戻る。竹森のモデル¹⁶⁾では、四肢の隣接する部位同士を大動脈、大静脈、表面静脈によって接続し、それぞれの血流量を調節する制御式を用いている。JOS では皮膚層直下に表面静脈血液プールを設けることにより、これらの生理現象を再現した。さらに、手掌部・足底部には図 3-4 に示すような AVA 血管が多く存在する¹⁷⁾。AVA 血管は暑熱環境で開大し、動脈から直接表面静脈へ大量の血液を輸送することにより、四肢からの放熱量に大きな影響を及ぼす。JOS では、動脈血液プールと表面静脈血液プールとを直接結ぶ血流による熱輸送経路を設け、AVA 血管をモデル化した。表面静脈血液プールでは、前部位の表面静脈血液プールからの血流および AVA 血流が流入し、完全混合の後、次部位の表面静脈血液プールへ流出する。胴部と隣接する部位（左右の Shoulder 部位、Thigh 部位）では、流入した血液は次部位の静脈血液プールへ流出する。図 3-5 に四肢部位での熱交換図を示す。ただし、AVA 血流は Hand 部位及び Foot 部位のみで考慮される。

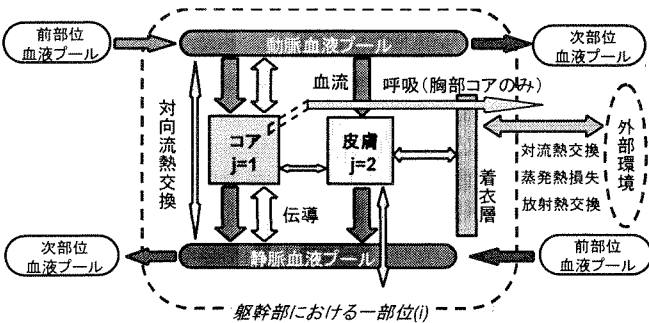


図 3-3 四肢を除く部位での熱交換

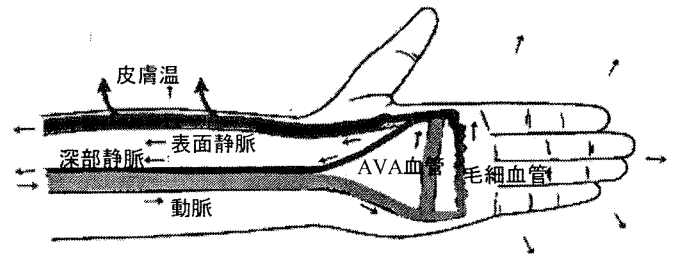


図 3-4 手の血管系模式図

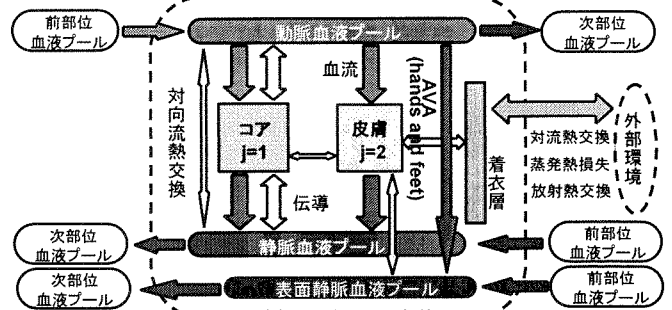


図 3-5 四肢部位での熱交換

3-2-3 各部の熱平衡式

各部の熱平衡式は(1)～(7)式で表される¹³⁾¹⁴⁾。血液の移流による熱移動については、流入する動脈血液と組織の熱交換が完全に行われるという仮定をしている。(1)式右辺第 5 および 6 項はコア層と動静脈との伝導による熱交換を表している。コア層と皮膚層の間の熱伝導に関しては、筋肉内側表面から脂肪層を経て皮膚層質点位置までの分の熱コンダクタンスを与えている。また、(4)式右辺第 1 項で、 T_{ar} と表記される血流の前部位の動脈血温度は、躯幹部から四肢への血液流入点となる左右 Shoulder 部位、Pelvis 部位、Neck 部位、躯幹部の Chest 部位、Back 部位の動脈血液プールの熱平衡式においては中央血液溜まりと考える。左右 Shoulder 部位の静脈血は中央血液溜まりに、左右 Thigh 部位の静脈血は Pelvis 部位に熱を輸送する。こうして、四肢血流は中央血液溜まりを起点として往復を行うことになる。(3)式右辺第 3 項および(4)式右辺第 5 項が血管系同士の対向流熱交換を表す。AVA 血管を通過した血液は表面静脈プールを経由するものとする。AVA の開大により Hand 部位、Foot 部位で流れた血流量は、四肢部位において一定のままとした。Hand 部位での AVA 血流は Arm 部位、Shoulder 部位の表面静脈プールを経て中央血液溜まりへ、Foot 部位での AVA 血流は、Leg 部位、Thigh 部位を経て、Pelvis 部位の静脈プールに移流するものとした。

・Core 層の熱平衡式

$$C_{cr} \frac{dT_{cr}}{dt} = M_{cr} + M_{shiv} + \rho c V_{ar-cr} (T_{ar} - T_{cr}) - K_{cr-sk} (T_{cr} - T_{sk}) + K_{ar-cr} (T_{ar} - T_{cr}) + K_{ve-ar} (T_{ve} - T_{ar}) - Q_{res, Chest部位のみ} \quad \dots(1)$$

・Skin 層の熱平衡式

$$C_{sk} \frac{dT_{sk}}{dt} = M_{sk} + \rho c V_{ar-sk} (T_{ar} - T_{sk}) + K_{cr-sk} (T_{cr} - T_{sk}) + K_{sv-sk} (T_{sv} - T_{sk}) - Q_{sk} \quad \dots(2)$$

・動脈血液プールの熱平衡式

$$C_{ar} \frac{dT_{ar}}{dt} = \rho c V_{ar*ar} (T_{ar*} - T_{ar}) - K_{ar-cr} (T_{ar} - T_{cr}) - K_{ar-ve} (T_{ar} - T_{ve}) \quad \dots(3)$$

・静脈血液プールの熱平衡式

$$C_{ve} \frac{dT_{ve}}{dt} = \rho c V_{cr-ve} (T_{cr} - T_{ve}) + \rho c V_{sk-ve} (T_{sk} - T_{ve}) + \rho c V_{ve*ve} (T_{ve*} - T_{ve}) - K_{ve-cr} (T_{ve} - T_{cr}) + K_{ar-ve} (T_{ar} - T_{ve}) \quad \cdots(4)$$

・表面静脈血液プールの熱平衡式

$$C_{sv} \frac{dT_{sv}}{dt} = \rho c V_{AVA} (T_{ar} - T_{sv}) + \rho c V_{sv*sv} (T_{sv*} - T_{sv}) - K_{sv-sk} (T_{sv} - T_{sk}) \quad \cdots(5)$$

・中央血液溜まりの熱平衡式

$$C_{cb} \frac{dT_{ve}}{dt} = \sum_{\text{血流の前部位}} \rho c V_{ve*cb} (T_{ve*} - T_{cb}) \quad \cdots(6)$$

・接触物体の熱平衡式

$$C_{mt} \frac{dT_{mt}}{dt} = Q_{mt} - H(T_{mt} - T_{\theta}) \quad \cdots(7)$$

3-2-4 体躯の変更

様々な人体の生理・心理量を評価するにあたり、計算式における物性値の検討が必要となる。そのため高齢者等の身体特性に関する文献調査を行い、人体熱モデルに用いる物性値と体温調節反応の制御式における各数値・係数を検討した。人体の各物性値は、体躯、性別、年齢等の要因により決定され、(8)式が成り立つものとした。

$$X = X_{st} \cdot f_b \cdot g_{se} \cdot h_a \cdot j_o \quad \cdots(8)$$

ここで X は体躯、年齢、性別等を考慮した場合の物性値、 X_{st} は従来型標準体型の物性値、 f_b は体躯による要因、 g_{se} は性差による要因、 h_a は加齢による要因、 j_o はその他の要因をそれぞれ示している。本研究では特に体躯および加齢による要因についての検討を行った。体躯、年齢、性別の要因が等しい場合でもいわゆる個人差が存在し、その個人差に当たる”その他の要因”による影響はないものとし、 $j_o = 1$ とした。

3-3. 被制御系のモデル

3-3-1 体表面積と重量

体表面積は産熱量、基礎血流量、蒸発熱損失、皮膚表面の熱交換の各計算において反映される。標準体型における各部位の体表面積と重量を表3-1に示す^(注5)。体躯を可変とするにあたり標準体型（体表面積1.87[m²、体重74.43[kg]）との比を用

表3-1 標準体型における各部位の体表面積[m²]と重量[kg] (9)、(10)式よりそれぞれ各部位の表面積、重量を算出した。以下、各分割部位において部位番号 i (1~17) で表すものとする。

i	部位	表面積[m ²]	重量[kg]
1	Head	0.110	3.18
2	Neck	0.029	0.84
3	Chest	0.175	12.40
4	Back	0.161	11.03
5	Pelvis	0.221	17.57
6	L.Shoulder	0.096	2.16
7	L.Arm	0.063	1.37
8	L.Hand	0.050	0.34
9	R.Shoulder	0.096	2.16
10	R.Arm	0.063	1.37
11	R.Hand	0.050	0.34
12	L.Thigh	0.209	7.01
13	L.Leg	0.112	3.34
14	L.Foot	0.056	0.48
15	R.Thigh	0.209	7.01
16	R.Leg	0.112	3.34
17	R.Foot	0.056	0.48
Whole Body		1.870	74.43

3-3-2 熱容量

Stolwijk モデルを基に全身を分配し、コア層においては動静脈血液プール分の熱容量を、皮膚層においては表面静脈プール分の熱容量を減じた。さらにChest部位、Back部位においては中央血液溜まり分の熱容量を等分し減じた。各部位の重量比、各層の組織の構成比および各組織の比熱はJOSと等しいものと

仮定した。標準体型の各部位、動・静脈血液プール、中央血液溜まりの熱容量を表3-2に示す。対象とする人体の標準体型との体重比から(11)式により熱容量を算出するものとした。

$$TC(i) = TC(i)_{st} \cdot Wtra \quad \cdots(11)$$

$TC(i)$: 各部位の熱容量[Wh/°C], $Wtra$: 標準体型との体重比[-]

$TC(i)_{st}$: 標準体型における各部位の熱容量[Wh/°C]

四肢部位に配した動・静脈血液プール、中央血液溜まりに関しても(11)式と同様に体重比を乗じ算出した。

表3-2 標準体型における各部位の熱容量[Wh/°C]

i	部位	コア	皮膚	血液プール		
				動脈	静脈	表面静脈
1	Head	2.1220	0.2200	0.0960	0.3210	—
2	Neck	0.5640	0.0580	0.0250	0.0850	
3	Chest	10.2975	0.4410	0.1200	0.4240	
4	Back	9.3935	0.4060	0.1110	0.3900	
5	Pelvis	13.8340	0.5560	0.2650	0.8320	
6	L.Shoulder	1.6994	0.1260	0.0186	0.0460	
7	L.Arm	1.1209	0.0840	0.0091	0.0240	
8	L.Hand	0.1536	0.0880	0.0044	0.0100	
9	R.Shoulder	1.6994	0.1260	0.0186	0.0460	
10	R.Arm	1.1209	0.0840	0.0091	0.0240	
11	R.Hand	0.1536	0.0880	0.0044	0.0100	
12	L.Thigh	5.3117	0.3340	0.0813	0.2070	
13	L.Leg	2.8670	0.1690	0.0400	0.1000	
14	L.Foot	0.2097	0.1070	0.0103	0.0240	
15	R.Thigh	5.3117	0.3340	0.0813	0.2070	
16	R.Leg	2.8670	0.1690	0.0400	0.1000	
17	R.Foot	0.2097	0.1070	0.0103	0.0240	
中央血液溜まり						1.9990

3-3-3 基礎代謝量

基礎代謝量については年齢別の基準値が明らかにされている⁽¹⁸⁾ことから、該当する数値を入力することによって基礎代謝量を得るものとした。同年齢における体躯の相違による基礎代謝量の変化については、単位体表面積あたりの代謝量が等しいものとして算出した。ふるえ熱産生は筋肉層を含むコア層において発生するものとした。 $Metf$ は産熱量に対して基礎代謝量を減じた分を全身に対して部位ごとに振り分けるための係数である。表3-3の基礎代謝量基準値[W/m²]を用い(12)式により全身の基礎代謝量を算出し、(13)式により各部位の基礎代謝量を算出した。

$$Metball = (\text{基礎代謝量基準値}) \cdot A_{Du} \cdot Mbsra \quad \cdots(12)$$

$Metball$: 全身の基礎代謝量[W], A_{Du} : 体表面積[m²]

$Metra$: 標準体型との基礎代謝量比[-],

$Mbsra$: 基礎代謝量基準値の男女比[-]

$$Metb(i) = Metb(i)_{st} \cdot Metballra \quad \cdots(13)$$

$Metb(i)$: 各部位の基礎代謝量[W],

$Metballra$: 標準体型との基礎代謝量比[-]

$Metb(i)_{st}$: 標準体型における各部位の基礎代謝量[W]

表3-3 標準体型における各部位の基礎代謝量[W]と $Metf$ 値[-]

i	部位	コア	皮膚	$Metf(i)$
1	Head	16.896	0.104	0.000
2	Neck	0.274	0.028	0.000
3	Chest	24.287	0.179	0.091
4	Back	21.737	0.158	0.080
5	Pelvis	12.921	0.254	0.129
6	L.Shoulder	1.215	0.050	0.026
7	L.Arm	0.346	0.026	0.014
8	L.Hand	0.090	0.050	0.005
9	R.Shoulder	1.215	0.050	0.026
10	R.Arm	0.346	0.026	0.014
11	R.Hand	0.090	0.050	0.005
12	L.Thigh	1.318	0.122	0.201
13	L.Leg	0.357	0.023	0.099
14	L.Foot	0.212	0.100	0.005
15	R.Thigh	1.318	0.122	0.201
16	R.Leg	0.357	0.023	0.099
17	R.Foot	0.212	0.100	0.005

3-3-4 基礎血流量

表 3-4 に、標準体型における各部位の基礎血流量を示す。体軀を可変とするにあたり、心係数[L/min/m²] (= 心拍量[L/min] ÷ 表面積[m²]) の式を適用した。また、加齢による心係数の低下¹⁹⁾を考慮し、(14)式により全身の基礎血流量を算出し、(15)式により各部位の基礎血流量を算出した。

$$BFB_{all} = CI \cdot 60 \cdot A_{Du} \cdot Clagera \quad \dots(14)$$

BFB_{all} : 全身の基礎血流量[L/h], CI : 心係数[L/min/m²]

A_{Du} : 体表面積[m²], $Clagera$: 加齢による心係数比[-]

$$BFB(i) = BFB(i)_{st} \cdot BFB_{allra} \quad \dots(15)$$

$BFB(i)$: 各部位の基礎血流量[L/h],

BFB_{allra} : 標準体型との基礎血流量比[-]

$BFB(i)_{st}$: 標準体型における各部位の基礎血流量[L/h]

表 3-4 標準体型における各部位の基礎血流量[L/h]

i	部位	コア	皮膚
1	Head	32.228	5.725
2	Neck	15.24	0.325
3	Chest	89.214	1.967
4	Back	87.663	1.475
5	Pelvis	33.518	2.272
6	L.Shoulder	1.808	0.91
7	L.Arm	0.94	0.508
8	L.Hand	0.217	1.114
9	R.Shoulder	1.808	0.91
10	R.Arm	0.94	0.508
11	R.Hand	0.217	1.114
12	L.Thigh	1.406	1.456
13	L.Leg	0.164	0.651
14	L.Foot	0.08	0.934
15	R.Thigh	1.406	1.456
16	R.Leg	0.164	0.651
17	R.Foot	0.08	0.934

3-3-5 組織間の伝導による熱交換

表 3-5 に、標準体軀における各層間の熱コンダクタンスを示す。本モデルにおいて考慮される伝導は、動・静脈血液プール-コア間、コア-皮膚間、表面静脈血液プール-皮膚間、動脈静脈血液プール間の対向流熱交換であり、式(16)のように表現できる。

$$D = Cd_{M-N}(T_M - T_N) \cdot A_{Du} \quad \dots(16)$$

D : M - N 間の伝導による熱量[W]

Cd_{M-N} : M - N 間の熱コンダクタンス[W/m²°C]

T_M : M 部の温度[°C], T_N : N 部の温度[°C]

表 3-5 標準体型における各層間の熱コンダクタンス[W/°C]

i	部位	コア-皮膚	血管-コア	表面静脈-皮膚	対向流熱交換
1	Head	3.422			
2	Neck	0.909			
3	Chest	1.785	—	—	—
4	Back	1.643			
5	Pelvis	2.251			
6	L.Shoulder	1.501	0.586	57.735	0.537
7	L.Arm	0.982	0.383	37.768	0.351
8	L.Hand	2.183	1.534	16.634	0.762
9	R.Shoulder	1.501	0.586	57.735	0.537
10	R.Arm	0.982	0.383	37.768	0.351
11	R.Hand	2.183	1.534	16.634	0.762
12	L.Thigh	2.468	0.81	102.012	0.826
13	L.Leg	1.326	0.435	54.784	0.444
14	L.Foot	3.37	1.816	24.277	0.992
15	R.Thigh	2.468	0.81	102.012	0.826
16	R.Leg	1.326	0.435	54.784	0.444
17	R.Foot	3.37	1.816	24.277	0.992

3-3-6 呼吸による熱損失

呼吸による熱交換は、Chest 部位コア層のみで考慮する^{注6)}。顕熱、潜熱項を含めた以下の(17)式により算出される。PMV、SET* においても呼吸による熱交換に関して次式が用いられている。吸気に関しては、Head 部位での空気温度、水蒸気分圧

を用いて算出している。

$$RES = \{0.0014(34 - T_a(1)) + 0.017(5.867 - p_a(1))\} \cdot (met + Mshiv) \dots(17)$$

RES : 呼吸による熱交換 (顕熱・潜熱含む)

$T_a(1)$: Head 部位における空気温度[°C]

$p_a(1)$: Head 部位における水蒸気分圧[kPa]

met : 全身の産熱量 (代謝量)[W]

$Mshiv$: 全身のふるえ熱産生[W]

3-3-7 蒸発熱損失

皮膚からの蒸発熱損失は(18)式で表される。 $E_b(i)$ は不感蒸泄による熱損失量であり、(19)式で表される。 $E_{max}(i)$ は最大蒸発熱損失量であり、(20)式から求められる。Stolwijk⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾モデルでは、不感蒸泄に関して定数を与えているが、この $E_{max}(i)$ のよそ3~4%に相当するものである。本研究では、我々研究グループの65MN³⁾⁴⁾以降のモデルと等しく、各部位 Skin 層における不感蒸泄として、発汗がなくとも最大蒸発熱損失量の6%の熱損失があるという仮定をした。また、着衣は顕熱・潜熱抵抗としてのみ取り扱っており、熱容量、吸放湿に関しては本モデルでは考慮していない^{注7)}。

$$E_{sk}(i) = E_b(i) + E_{sw}(i) \quad \dots(18)$$

$$E_b(i) = 0.06(1 - E_{sw}(i)/E_{max}(i)) \cdot E_{max}(i) \quad \dots(19)$$

$$E_{max}(i) = h_e(i)(p_{sk,s}(i) - p_a(i))A_{Du}(i) \quad \dots(20)$$

$E_{sk}(i)$: 皮膚表面からの蒸発熱損失量[W], $E_b(i)$: 不感蒸泄[W]

$E_{sw}(i)$: 発汗による蒸発熱損失量[W]

$E_{max}(i)$: 最大蒸発熱損失量[W]

$h_e(i)$: 皮膚表面から環境までの潜熱伝達率[W/m²kPa]

$p_{sk,s}(i)$: 皮膚表面での飽和水蒸気圧[kPa]

$p_a(i)$: 環境の水蒸気圧[kPa]

皮膚表面から環境までの潜熱伝達率 $h_e(i)$ [W/m²kPa]は着衣の透湿係数 $i_{cl}(i)$ [-]を用いた表現とし(21)式で求められる。

$$h_e(i) = LR \cdot i_{cl}(i) / \left\{ 0.155 I_{cl}(i) \frac{i_{cl}(i)}{h_c(i)} \frac{1}{f_{cl}(i)} \right\} \quad \dots(21)$$

LR : ルイス係数[°C/kPa](=16.5)

$i_{cl}(i)$: 着衣の透湿係数[-](=0.45)

$I_{cl}(i)$: 部位別 clo 値[clo], $h_c(i)$: 対流熱伝達率[W/m²°C]

$f_{cl}(i)$: 着衣面積率[-]

3-3-8 皮膚表面の顕熱交換

$Q_{cl}(i)$ [W]は各部位における皮膚表面と環境の対流および放射熱交換であり、(22)式のように総合熱伝達率を用いた表現とした。外部物体との接触がある場合、接触部では対流および放射による熱交換はないものとした。

$$Q_{cl}(i) = h_c(i) (T_{sk,unc}(i) - t_o(i)) A_{Du}(i) (1 - CSF(i)) \quad \dots(22)$$

$h_c(i)$: 各部位の皮膚から環境までの総合熱伝達率[W/m²°C],

$T_{sk,unc}(i)$: 外部物体と接触していない皮膚表面の温度[°C],

$t_o(i)$: 作用温度[°C], $A_{Du}(i)$: 各部位体表面積[m²]

$CSF(i)$: 各部位の接触面積率[-]

$h_c(i)$ は clo 値を用いると(23)式のように表現される。すなわちその逆数は、部位別着衣量と着衣外表面における表面空気層の熱抵抗の和として表現できる。

$$\frac{1}{h_c(i)} = 0.155 I_{cl}(i) \frac{1}{(h_e(i) + h_r(i)) f_{cl}(i)} \quad \dots(23)$$

$I_{cl}(i)$: 部位別 clo 値[clo], $h_e(i)$: 対流熱伝達率[W/m²°C],

$h_r(i)$: 線形放射熱伝達率[W/m²°C], $f_{cl}(i)$: 着衣面積率[-]

本モデルの部位分割は皮膚温可変型サーマルマネキン²⁰⁾にほぼ対応しているため、 h_e 、 h_r の値には、サーマルマネキンによる測定値²¹⁾を用いることができる^{注8)}。サーマルマネキン測定値ではやや高めの値が測定されており、補正することにより実用性の向上を行っている。補正方法に関しては、65MN³⁾⁴⁾

以来の方法に準ずる。表3-6に補正後の各部位の放射熱伝達率と、静穏気流下における対流熱伝達率を示す^{注9)}。本モデルにおいては、立位のみならず座位サーマルマネキンによる測定値を導入することにより、座位のシミュレーションに関して、より正確な熱伝達率を与えた。

表3-6 各部位の放射熱伝達率[W/m²°C]と対流熱伝達率[W/m²°C]

i	部位	$h_r(i)$		$h_c(i)$ (静穏気流下)	
		立位	座位	立位	座位
1	Head	4.89	4.96	4.48	4.75
2	Neck	4.89	4.96	4.48	4.75
3	Chest	4.32	3.99	2.97	3.12
4	Back	4.09	4.64	2.91	2.48
5	Pelvis	4.32	4.21	2.85	1.84
6	L.Shoulder	4.55	4.96	3.61	3.76
7	L.Arm	4.43	4.21	3.55	3.62
8	L.Hand	4.21	4.74	3.67	2.06
9	R.Shoulder	4.55	4.96	3.61	3.76
10	R.Arm	4.43	4.21	3.55	3.62
11	R.Hand	4.21	4.74	3.67	2.06
12	L.Thigh	4.77	4.10	2.80	2.98
13	L.Leg	5.34	4.74	2.04	2.98
14	L.Foot	6.14	6.36	2.04	2.62
15	R.Thigh	4.77	4.10	2.80	2.98
16	R.Leg	5.34	4.74	2.04	2.98
17	R.Foot	6.14	6.36	2.04	2.62
Whole Body		4.70	4.56	3.00	3.00

3-3-9 接触物体との伝導による熱交換

$Q_{m,i}(i)[W]$ は皮膚層と接触物体との伝導による熱交換であり、(24)式のように表現される。 $K_M(i)[W/°C]$ は皮膚と接触物体との間の熱コンダクタンス、 $T_{sk,con}(i)[°C]$ は外部物体と接触している皮膚表面の温度である。

$$Q_{m,i}(i) = K_M(i) (T_{sk,con}(i) - T_{m,i}(i)) \quad \cdots(24)$$

$K_M(i)$: 各部位の皮膚と接触物体との間の熱コンダクタンス [W/°C],

$T_{sk,con}(i)$: 各部位の外部物体と接触している皮膚表面温度[°C]

$T_{m,i}(i)$: 各部位に接触している外部物体の表面温度[°C]

3-4. 制御系

JOSの体温調節の制御式は、基本的に Stolwijk モデル⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾のものを用いたCOM⁷⁾と同様である。

3-4-1 セットポイント

頭部コア温および全身各部位の皮膚温を温度信号として各体温調節反応量が算出される。ここで、体温調節反応の制御目標温度となる各部位のセットポイント温度が必要となる^{注10)}。表3-7に標準体躯における各部位のセットポイント温度および各血液プール、中央血液溜まりの初期値を示す。

表3-7 標準体躯における各部の設定温度[°C]

i	部位	コア	皮膚	血液プール		
				動脈	静脈	表面静脈
1	Head	37.14	35.99	36.79	36.97	—
2	Neck	36.72	35.06	36.79	36.88	
3	Chest	36.93	34.62	36.79	36.88	
4	Back	36.98	34.52	36.79	36.94	
5	Pelvis	37.04	34.62	36.79	36.60	
6	L.Shoulder	36.25	34.30	36.68	35.62	34.30
7	L.Arm	35.77	33.95	36.49	35.27	33.95
8	L.Hand	35.01	34.43	35.62	34.94	34.43
9	R.Shoulder	36.25	34.30	36.68	35.62	34.30
10	R.Arm	35.77	33.95	36.49	35.27	33.95
11	R.Hand	35.01	34.43	35.62	34.94	34.43
12	L.Thigh	36.69	34.21	36.75	36.09	34.21
13	L.Leg	36.41	34.05	36.64	35.71	34.05
14	L.Foot	34.73	34.25	35.34	34.75	34.25
15	R.Thigh	36.69	34.21	36.75	36.09	34.21
16	R.Leg	36.41	34.05	36.64	35.71	34.05
17	R.Foot	34.73	34.25	35.34	34.75	34.25
中央血液溜まり						36.79

3-4-2 皮膚血管運動、発汗、ふるえ熱産生

COM⁷⁾と同様、各部位について、瞬時温度とセットポイント

温度との差をエラーシグナルとして算出し、それらを体温調節反応の制御式に用いている。人間は温・冷温度受容器を持つので、これに対応してエラーシグナルはウォームシグナルおよびコールドシグナルに変換される。皮膚からのセンサーシグナルは中枢にて統合されると考える。

各部位の皮膚血流量は(25)式のように血管拡張に関するシグナル $DILAT(i)$ と血管収縮に関するシグナル $STRIC(i)$ から決定される。 $DILAT(i)$, $STRIC(i)$ は、それぞれ(26)式、(27)式で表される。

$$V_{sk}(i) = \frac{V_{b,sk}(i) + SKINV(i) \cdot DILAT(i)}{1 + SKINC(i) \cdot STRIC(i)} \times 2^{Err_{sa}(i)/6} \quad \cdots(25)$$

$$DILAT(i) = 117.0 \cdot Err_{cr}(1) + 7.5(Wrms - Clds) \quad \cdots(26)$$

$$STRIC(i) = -10.8 \cdot Err_{cr}(1) - 10.8(Wrms - Clds) \quad \cdots(27)$$

発汗シグナルは(28)式で、発汗による蒸発熱損失量は(29)式で表される。

$$SWEAT(i) = 371.2 \cdot Err_{cr}(1) + 33.64 \cdot (Wrms - Clds) \quad \cdots(28)$$

$$E_{sw}(i) = SWEAT(i) \cdot SKINS(i) \cdot 2^{Err_{sa}(i)/10} \quad \cdots(29)$$

ふるえ熱産生シグナルは(30)式で、ふるえ熱産生量は(31)式で表される。

$$SHIV(i) = 24.36 \cdot Cld_{cr}(1) \cdot Clds \quad \cdots(30)$$

$$M_{shv}(i) = SHIV(i) \cdot Shivf(i) \quad \cdots(31)$$

各体温調節反応の制御式中の $SKINV(i)$, $SKINC(i)$, $SKINS(i)$, $Shivf(i)$ は各体温調節反応量についての各部位の全身に対する相対比である^{注11)}。表3-8にそれぞれの値を示す。

表3-8 体温調節反応量についての各部位の

全身に対する相対比[-]

i	部位	$SKINV(i)$	$SKINC(i)$	$SKINS(i)$	$Shivf(i)$
1	Head	0.1043	0.0500	0.0640	0.0339
2	Neck	0.0277	0.0500	0.0170	0.0436
3	Chest	0.0980	0.1500	0.1460	0.2739
4	Back	0.0860	0.1500	0.1290	0.2410
5	Pelvis	0.1380	0.1500	0.2060	0.3875
6	L.Shoulder	0.0313	0.0500	0.0510	0.0024
7	L.Arm	0.0163	0.0500	0.0260	0.0014
8	L.Hand	0.0605	0.3500	0.0155	0.0002
9	R.Shoulder	0.0313	0.0500	0.0510	0.0024
10	R.Arm	0.0163	0.0500	0.0260	0.0014
11	R.Hand	0.0605	0.3500	0.0155	0.0002
12	L.Thigh	0.0920	0.0500	0.0730	0.0039
13	L.Leg	0.0230	0.0500	0.0360	0.0018
14	L.Foot	0.0500	0.3500	0.0175	0.0004
15	R.Thigh	0.0920	0.0500	0.0730	0.0039
16	R.Leg	0.0230	0.0500	0.0360	0.0018
17	R.Foot	0.0500	0.3500	0.0175	0.0004

体躯を変更する場合は、体躯に応じた体温調節量の変更が求められる。そこで、体温調節量を決定するシグナル（発汗($SWEAT$)、ふるえ($SHIV$)、血管拡張($DILAT$)、血管収縮($STRIC$))をそれぞれ(32)～(35)式により算出した。また、加齢による体温調節機能の低下に伴い、部位別に各種シグナルの変更を可能とした。

$$SWEAT(i) = SWEAT(i)_{st} \cdot Adura \cdot Swa(i) \quad \cdots(32)$$

$SWEAT(i)$: 発汗シグナル,

$SWEAT(i)_{st}$: 標準体型の発汗シグナル

$Adura$: 標準体型に対する体表面積比

Swa : 加齢による発汗機能低下係数

$$SHIV(i) = SHIV(i)_{st} \cdot Adura \cdot Sva(i) \quad \cdots(33)$$

$SHIV(i)$: ふるえシグナル,

$SHIV(i)_{st}$: 標準体型のふるえシグナル

$Adura$: 標準体型に対する体表面積比

Sva : 加齢によるふるえ機能低下係数

$$DILAT(i) = DILAT_{st} \cdot BFBallra \cdot Dla(i) \quad \cdots(34)$$

$DILAT(i)$: 血管拡張シグナル

$DILAT_{st}(i)$: 標準体型の血管拡張シグナル

BFB_{allra} : 標準体型に対する基礎血流量比

$Dla(i)$: 加齢による血管拡張機能低下係数

$STRIC(i) = STRIC(i)_{st} \cdot Sta(i)$ …(35)

$STRIC(i)$: 血管収縮シグナル

$STRIC(i)_{st}$: 標準体型の血管収縮シグナル

$Sta(i)$: 加齢による血管収縮機能低下係数

3-4-3 AVA 血管反応

左右 Hand 部位および左右 Foot 部位では、動脈血液プールと表面静脈血液プールを結ぶ血流による熱輸送経路を設け、AVA 血管をモデル化した。AVA 血流の制御には、(36)式～(39)式に示す竹森の AVA モデル¹⁶⁾の制御式を用いた^{注12)}。

$$V_{AVA} = Vmax_{sk} \cdot O_{AVA} \quad \dots(36)$$

$$Vmax = Ms \cdot f_{sk}/100 \quad \dots(37)$$

$Vmax$: 手部または足部の最大皮膚血流量[ml/min]

O_{AVA} : AVA 開度 (0 ~ 1)[-]

M_s : 手部または足部の体積[cm³]

f_{sk} : 最大皮膚血流量[ml/min 100ml tissue]

(=30 ml/min 100ml tissue)

(36)式における AVA 血流の開度度は、Hand 部位、Foot 部位において異なり、それぞれ以下の式で表される。

・ Hand 部位

$$O_{AVA} = 0.265(T_{sk} \cdot (T_{set} \cdot 0.43)) + 0.953(T_{bcr} \cdot (T_{bcrn} \cdot 0.1905)) + 0.9126 \quad \dots(38)$$

・ Foot 部位

$$O_{AVA} = 0.265(T_{sk} \cdot (T_{set} + 0.97)) + 0.953(T_{bcr} \cdot (T_{bcrn} + 0.0095)) + 0.9126 \quad \dots(39)$$

3-5. 2node-model との比較

Gagge の 2node-model による SET*²⁾の算出方法に基づき、JOS による計算結果から JOSSET* を算出した^{注13)}。そして、定常状態の全身に関する生理量および SET* の予測精度を検証するため、2node-model の計算結果との比較を行った。表 3-9 に計算条件を示す。本モデル、COM、65MN、および 2node-model によって算出された平均皮膚温、SET* 値の比較をそれぞれ図 3-6、図 3-7 に示す。各値ともよい一致が見られた。このことから、定常・均一と仮定できる温熱環境下において本モデルで算出される SET* による温熱環境評価が可能であるといえる。

表 3-9 計算条件

曝露時間[min.]	60
空気温度Ta[°C]	Ta=Trとして10.0～40.0°C (2.0°Cきざみ)
平均放射温度Tr[°C]	
気流速度[m/s]	0.1
相対湿度[%]	50
着衣量[clo]	0
代謝量[met]	1

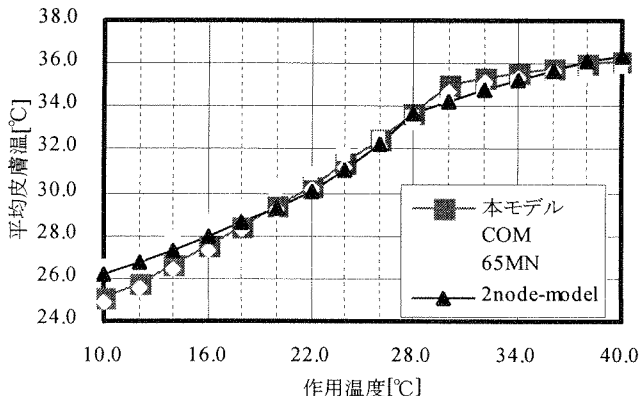


図 3-6 平均皮膚温の比較

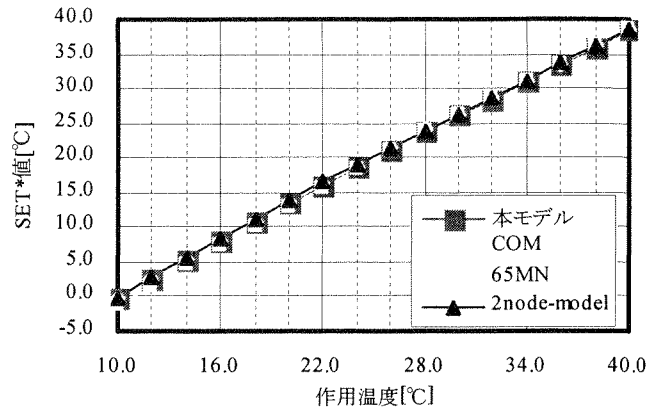


図 3-7 SET* の比較

3-6. 定常状態における被験者実験結果との比較

3-6-1 AVA モデルの効果の検討

本モデルの皮膚温分布の予測精度を検証し、AVA モデルの効果を検討するため、田村による被験者実験結果²²⁾との比較を行った。田村の実験は、サーモグラフィーを用いて皮膚温を非接触的に測定し、温熱環境変化に伴う皮膚温分布の変化について研究することを目的として実施されたものである。被験者は19歳から20歳の日本人女子27名、平均体重50.05kg、平均体表面積1.44m²である。表3-10に実験および計算条件を示す。

各温度条件下の120分曝露終了時の測定値と計算値との比較を行った。図3-8に、34°C条件（暑熱環境）下における各部位の皮膚温分布の比較を示す。田村の被験者実験では被験者が女性であり代謝量が低いため、モデルの皮膚温予測値が全体的に高くなったが、特にAVA血管反応が発現する暑熱環境下において、本モデルでは皮膚温が末梢部ほど高くなり、躯幹部より四肢部位の方が高くなった。皮膚温分布の傾向は被験者実験結果と非常によく一致しており、AVAモデルの効果が確認された。

表 3-10 実験および計算条件

	初期条件	実験条件
曝露時間[min.]	60	120
空気温度Ta[°C]	28.5 (Ta=Tr)	22,25,28,31,34 (Ta=Tr)
平均放射温度Tr[°C]		
気流速度[m/s]	0.25	0.15
相対湿度[%]	50	50
着衣量[clo]	0.00	0.00
代謝量[met]	1.0	1.0

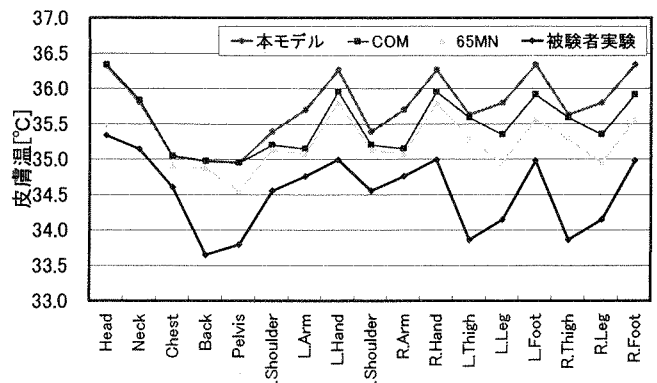


図 3-8 34°C条件下の皮膚温分布の比較

3-6-2 体躯可変の効果の検討

体躯可変の効果を検討するため、計算条件を変更し、田村による被験者実験結果²²⁾との比較を行った。JOSにおいて体躯データは被験者の平均値を用いた。また、体躯を変更したことによる効果を確認するため標準体躯のJOSとの比較も行っ

た。表3-11に実験および計算条件を示す。実験中被験者は椅座静位を保っているため、代謝量は、女性体躯モデルでは実験で明らかにされた温熱中立条件下の被験者の代謝量 ($39.4\text{W}/\text{m}^2$)、標準体躯モデルでは 1.0met ($58.2\text{W}/\text{m}^2$) とした。

各温度条件下の120分曝露終了時の測定値と計算値との比較を行った。図3-9に各温度条件下の女性体躯JOS、標準体躯JOSおよび被験者実験結果の平均皮膚温の比較を示す。体躯を変更した場合の計算結果は、標準体躯での計算結果と比較して被験者実験結果とのより良い一致が見られた。また、図3-10に代表して 22°C 条件 (寒冷環境) 下における各部位の皮膚温分布の比較を示す。躯幹部では標準体躯の場合との有意差は見られなかったが、特に寒冷環境下において四肢部位の皮膚温は被験者実験結果により近い予測値が算出された。体躯を変更したことにより、女性に多く見られる寒冷環境下における末梢部の皮膚温の低下が再現されたものと考えられる。

表3-11 実験および計算条件

	初期条件	実験条件
曝露時間[min.]	60	120
空気温度 T_a [$^\circ\text{C}$]	28.5 ($T_a=T_r$)	22, 25, 28, 31, 34 ($T_a=T_r$)
平均放射温度 T_{r1} [$^\circ\text{C}$]		
気流速度[m/s]	0.25	0.15
相対湿度[%]	50	50
着衣量[clo]	0.00	0.00
代謝量 W/m^2	39.4または58.2	39.4または58.2

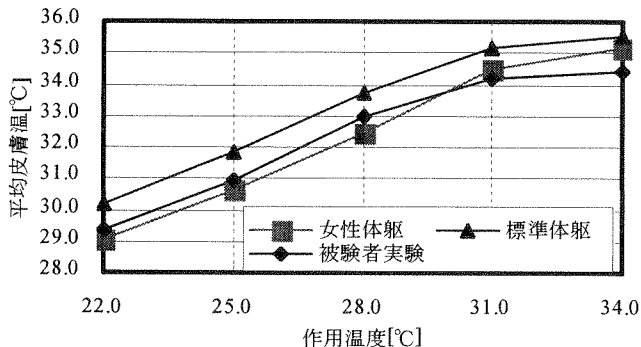
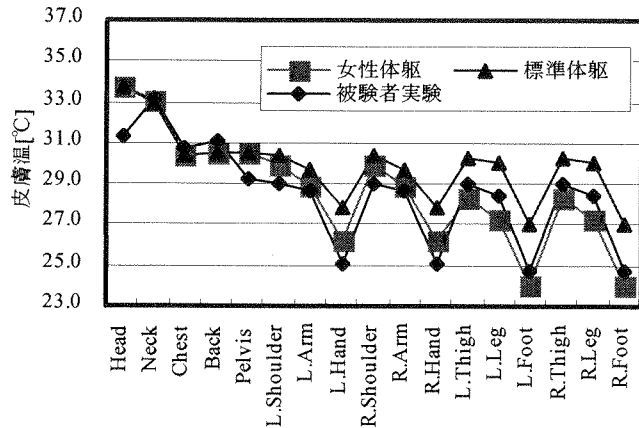


図3-9 各温度条件下の平均皮膚温の比較

図3-10 22°C 条件下の皮膚温分布の比較

3-7. 非定常状態における被験者実験結果との比較

3-7-1 計算条件

非定常状態におけるJOSの予測精度を検証するため、栃原らによる被験者実験結果²³⁾との比較を行った。この実験は、夏冬に遭遇するような暑熱と寒冷条件ならびに温度差が、高齢者の生理心理反応に及ぼす影響を明らかにすることを目的として実施されたものである。被験者として、寒冷実験では66～79歳の10名の高齢女子と20～22歳の10名的女子学生、暑熱実験では62～72歳の9名の高齢女子と21～26歳の12名の

女子学生を対象としている。表12に被験者の体躯の平均値を示す。JOSにおいて各郡の体躯データはそれぞれ平均値を用いた。体躯を変更したことによる効果を確認するため、標準体躯のJOSとも計算結果を比較した。表3-13に実験および計算条件を示す。実験中被験者は椅座静位を保ち、常温室に60分間滞在した後、寒冷または暑熱室に49分間滞在し、再び常温室に戻って47分間滞在した。

表3-12 被験者の体躯の平均値

	寒冷実験		暑熱実験	
	高齢群(n=10)	若年群(n=10)	高齢群(n=9)	若年群(n=12)
年齢[歳]	72	21.4	67.8	22.1
身長[cm]	150.2	159.7	148.7	157.8
体重[kg]	51.9	51.7	50.6	50.6

表3-13 実験および計算条件

	常温室	寒冷室・暑熱室
曝露時間[min.]	60寒冷室・暑熱室入室前: 60寒冷室・暑熱室退室	120
空気温度 T_a [$^\circ\text{C}$]	25	10または35
平均放射温度 T_{r1} [$^\circ\text{C}$]		
気流速度[m/s]	0.2	0.2
相対湿度[%]	60	60
着衣量[clo]	0.63	0.63
代謝量[met]	1.0	1.0

3-7-2 寒冷実験結果

平均皮膚温の推移を図3-11に示す。被験者実験結果と比較すると、常温室においてモデルの計算値の方が約 $1.0 \sim 1.5^\circ\text{C}$ 高くなったが、傾向は概ね一致した。また、実験結果、モデルの計算結果とも高齢群と若年群の間に有意差は見られなかった。胸部皮膚温の推移を図3-12に示す。胸部では、寒冷室において実測値のほうがモデルの計算値よりも約 0.8°C 高くなったが、概ねよい一致が得られた。測定値、計算値ともに寒冷室入室後の胸部皮膚温の低下は、高齢群よりも若年群の方が緩やかであった。

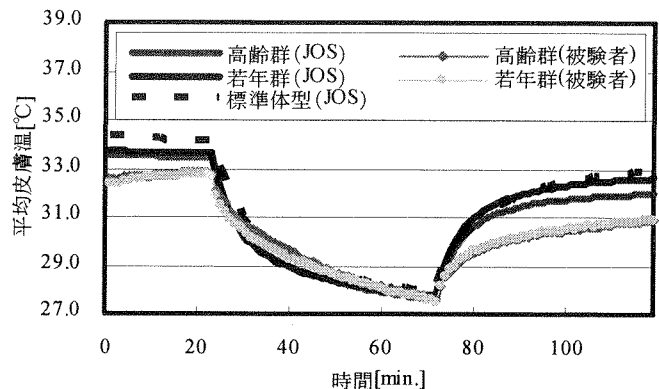


図3-11 平均皮膚温の推移

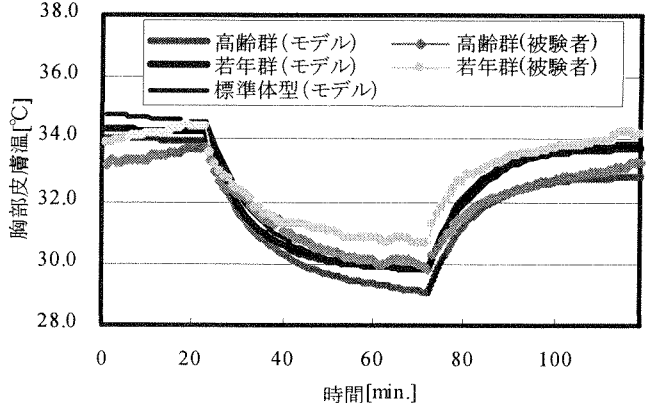


図3-12 胸部皮膚温の推移

3-7-3 暑熱実験結果

図3-13に平均皮膚温の推移を示す。モデルの計算値は、体躯の変更により実測値に近づいたが、暑熱室入室後の上昇傾向は再現されなかった。これは、本モデルでは着衣を顕熱・潜熱抵抗として簡易にモデル化しており、着衣の熱容量および湿気容量を考慮していないため、発汗が起こるような環境下において非定常での計算結果が実験結果と異なったものと推測される。今後、着衣についての詳細なモデル化を行う必要があるものと考えられた。胸部皮膚温の推移を図3-14に示す。着衣に覆われている胸部では、平均皮膚温と同様、モデルの予測結果は実験結果の傾向と異なった。

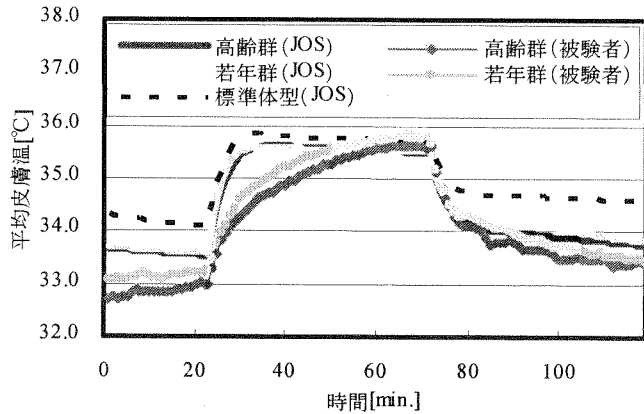


図3-13 平均皮膚温の推移

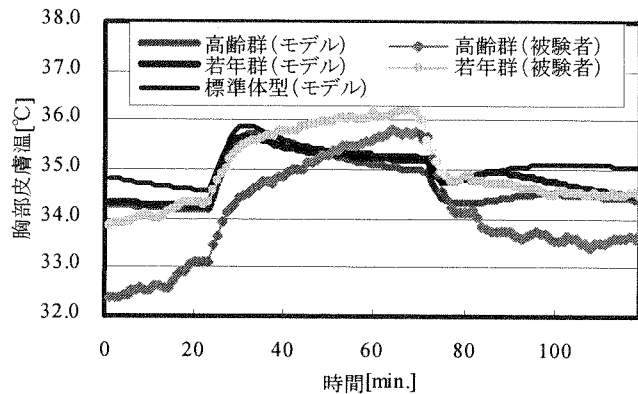


図3-14 胸部皮膚温の推移

3-7-4 ふるえ熱産生量と発汗量

体躯の変更および加齢による体温調節機能の低下を考慮したことによる効果を確認するため、寒冷実験におけるふるえ熱産生量と暑熱実験における発汗量について、それぞれ高齢群、若年群、標準体型の計算結果を比較した^{注14)}。ふるえ熱産生量を図3-15に、発汗量を図3-16に示す。ふるえ熱産生量は、高齢群では若年群、標準体型と比較して著しく少ない。また、寒冷室入室直後のふるえ熱産生量の増加も、高齢群では若年群、標準体型よりも緩やかである。一方、発汗量についても、高齢群では若年群、標準体型と比較して著しく少ない。また、高齢群では若年群に比べて暑熱室入室直後の発汗開始に遅れが見られた。同様に暑熱室退室後、発汗が収まるまでの時間にも5分の遅れが見られた。これらは、高齢者モデルが外部環境の変化に即応していないことを示している。以上のことから、体躯に応じた物性値および制御式の変更により、人体熱モデルにおいて、高齢者の身体特性である体温調節反応の遅れおよび機能低下を再現することが可能であることが確認された。

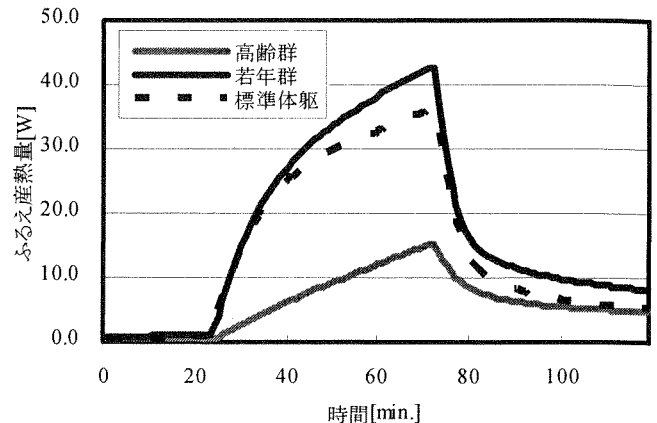


図3-15 寒冷実験におけるふるえ熱産生量の比較

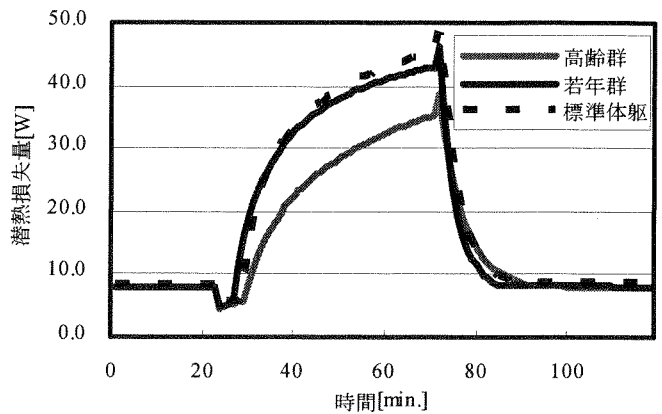


図3-16 暑熱実験における発汗量の比較

3-8. まとめ

- 1) 動静脈吻合 (AVA) 等を考慮した四肢の詳細血流モデルと、女性や高齢者にも適用可能な体躯可変を含めた人体熱モデルJOSを開発した。定数・係数を含めた計算モデル・熱平衡式などを示した。
- 2) Gaggeの2 node-modelと計算結果の比較を行った。平均皮膚温、SET*値は、2node-modelによるものと良い一致が得られた。
- 3) 定常状態における女性被験者実験結果との比較を行った。各温度条件下で予測された四肢部位での皮膚温分布は、AVAモデルを組み込んでいない従来のモデルと比べ予測精度の向上が見られた。また、体躯変更により、女性に多く見られる寒冷環境下での末梢部の皮膚温低下が再現された。
- 4) 非定常状態における高齢者を含めた被験者実験結果との比較を行った。寒冷実験結果では、平均皮膚温の予測値の傾向は実測値と概ね一致した。胸部における皮膚温の予測値は、実測値と同様に高齢者の緩やかな皮膚温推移を再現した。暑熱実験では、平均皮膚温と胸部皮膚温の予測値の傾向は、体躯を変更したことにより実測値に近づいたが、暑熱室入室後の上昇傾向は再現されなかった。
- 5) ふるえ熱産生量、発汗量の計算結果を、高齢群、若年群、標準体型で比較した。人体熱モデルにおいて、高齢者の身体特性である体温調節反応の遅れおよび機能低下を再現することが可能であることを確認した。

【注釈】

注1) 生体内の個々の生理量および熱物性値は、文献8)～15)を参考に分割した人体各部に与えられた。今後、より精度の高いデータを収集しモデルの精度向上を行うことが必要である。また、体躯変更を行う際に体脂肪率を考慮できるようコア層は脂肪層を含んでいる。

注2) 図3-4に示すように、特に四肢の末端においては動脈血液プールと静脈血液プールを直接つなぐ血流経路が考えられる。しかし、血流と周囲組織との間の熱交換率および流量制御モデルがこれまでの研究で明らかとなっていないので、本モデルではこの血流経路には流量を与えないものとした。

注3) (1)～(7)式の常微分方程式の解法はオイラー法を用いた。(1)～(7)式で用いられた記号については記号一覧を示した。

注4) 部位間の温度差が小さいため、隣り合う部位間の伝導による熱移動は血流による熱輸送に比較的小さいと考えられる。そこで、JOSでは部位間の熱移動は血流によるもののみを考慮した。

注5) JOSの人体のモデルはStolwijkの6円柱モデル⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾をもととしている。StolwijkのモデルはHead部位を表す1つの球とTorso、Arms、Hands、Legs、Feetの各部位を表す5円柱からなる。各部位の寸法は以下に示す通りである。Head：半径9.88cm、Torso：半径14.70cm、長さ60cm、Arms：半径5.02cm、長さ112cm、Hands：半径1.49cm、長さ96cm、Legs：半径6.42cm、長さ160cm、Feet：半径1.57cm、長さ125cm

注6) 呼吸による熱損失については運動生理学の分野で議論されており、未だ明確になっていない。本研究では計算上Chest部位コア層のみで呼吸による熱損失が発生するものとした。

注7) 着衣の熱容量については吸放湿に比較すると温冷感への影響が小さいことが知られている。着衣の吸放湿は非定常を扱う際には重要な要素であるが、本研究で計算を行っているような裸体の場合や、発汗のない環境では影響が小さいと考えられる。着衣を含む人体周辺のモデル化については別途行い、人体のモデルと連成させる予定である。

注8) Neck部位の熱伝達率はHead部位と等しいものと仮定した。

注9) 気流速度0.15m/sの自然対流時にサーマルマネキンの皮膚温と室内温度との差が5～20℃の範囲では対流熱伝達率は大きく変化しない。

注10) いずれの体温調節モデルも組み込まない被制御系のモデルを用いて、作用温度28.8℃、相対湿度50%、気流速度0.10m/s、着衣量0.00clo、代謝量1.0met(PMV=±0条件)での定常計算を行い、得られた各部温度を設定温度とした。すなわち「生理的温熱中立環境=心理的温熱中立環境」を仮定した。COMでは、設定温度を解析毎に算出可能な構成とした。

注11) これらの値はStolwijkモデル⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾およびSmithモデル¹¹⁾を参考に設定した。式中のその他の記号については記号一覧で述べる。

注12) これらの式は被験者1名の計測データから導出されたものであり、今後より多くの被験者実験データにより改良されるべきプロトタイプとされている。

注13) JOSSET*は、計算条件に与えた温熱環境下で予測される平均皮膚温とぬれ率において、皮膚からの熱損失量が等しくなる標準環境の気温と定義した。標準環境とは、空気温度が平均放射温度と等しく、相対湿度50%、静穏気流、着衣量0.60clo、 i_{cl} 係数0.45、椅座静位である。SET*の詳しい算出方法については、65MN³⁴⁾、COM⁷⁾を参照のこと。

注14) 計算で用いた加齢による体温調節機能の低下を表す係数は、平均皮膚温および各部の皮膚温をもとに感度分析から設定されたものである。今後、被験者実験データ等をもとに、より詳細な値を与える必要がある。

【記号一覧】

C	[Wh/°C]	熱容量
T	[°C]	温度
t	[h]	時間
M	[W]	基礎代謝量と外部仕事による熱産生量の和
M_{clav}	[W]	ふるえ熱産生
K	[W/°C]	コア層ー皮膚層間の有効熱コンダクタンス
K_{av}	[W/°C]	動脈血液プールと静脈血液プールの間の有効熱コンダクタンス
K_v	[W/°C]	動脈血液プールーコア層間の有効熱コンダクタンス
K_c	[W/°C]	皮膚層ー着衣層間の有効熱コンダクタンス
K_m	[W/°C]	皮膚表面ー接触物体間の有効熱コンダクタンス
H_m	[W/°C]	接触物体ー外部参照温度間の有効熱コンダクタンス

V	[L/h]	血流量
ρc	[Wh/L°C]	血液の体積比熱（密度と比熱の積）
Q_{res}	[W]	呼吸による熱損失量（顕熱および潜熱）
Q_d	[W]	着衣表面よりの対流・放射・蒸発熱損失量
Ab_{cl}	[W]	着衣の吸放湿による熱流
T_o	[°C]	作用温度
T_f	[°C]	接触に関する外部参照温度

以下添字

cr	コア層
sk	皮膚層
$sksurf$	皮膚表面
cl	着衣層
$clsurf$	着衣外表面
ar	動脈血液プール
ar^*	血流の前部位の血液プール
ve	静脈血液プール
ve^*	血流の前部位の静脈血液プール
sv	表面静脈血液プール
sv^*	血流の前部位の表面静脈血液プール
AVA	動静脈吻合（AVA）
cb	中央血液溜まり
mt	接触物体

【参考文献】

- 1) P.O.Fanger, Thermal Comfort, Danish Tech. Press, 1970
- 2) A.P.Gagge, A.P.Fobelets and L.G.Berglund, F A Standard Predictive Index of Human Response to the Thermal Environment, ASHRAE Transactions, Vol.92, Part 2, pp.709-731, 1986
- 3) 田辺 新一, 中野 淳太, 小林 弘造: 温熱環境評価のための65分割体温調節モデルに関する研究, 日本建築学会計画系論文報告集, 第541号, pp.9-16, 2001.3
- 4) K.Kobayashi, J.Nakano, S.Tanabe: Development of 65-node Thermoregulation Model for Evaluation of Thermal Environment, Proceedings of Healthy Buildings, Vol.2, pp.563-568, 2000
- 5) 小林 弘造, 小川 一晃, 田辺 新一: 人間一快適性シミュレータ(その2~3), 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), pp.391-394, 2000
- 6) 山本 ゆう子, 田辺 新一, 小林 弘造, 小川 一晃: 体内温度分布を考慮した数値体温調節モデルー3DM, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, pp.1221-1224, 2000
- 7) 小林弘造, 小川一晃, 田辺新一: 人間一熱環境系快適性数値シミュレータ(その12～13), 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), pp.339-342, 2001.9
- 8) J.A.J.Stolwijk: Mathematical Model of Thermoregulation, Physiological and Behavioral Temperature Regulation, Chapter 48, Charles C. Thomas Pub., pp.703-721, 1970
- 9) J.A.J.Stolwijk, F A Mathematical Model of Physiological Temperature Regulation in Man, NASA, CR-1855, 1971
- 10) J.A.J.Stolwijk, J.D.Hardy, FControl of Body Temperature, Handbook of Physiology, section 9, Reaction to Environmental Agents (ed. Douglas), Amer., Physiol. Soc., pp.45-68, 1977
- 11) C.E.Smith, F A Transient, Three-Dimensional Model of the Human Thermal System, KSU, Dissertation, 1993
- 12) 横山 真太郎: 生体内熱移動現象, 北海道大学図書刊行会, 1993
- 13) 横山 真太郎, 角田 直人, 富樫 貴子, 濱田 靖弘, 中村 真人, 落藤 澄: 部位別特性を考慮した生体内温度予測プログラムの開発 第1報一生体内熱移動方程式とその解法, 空気調和・衛生工学会論文集, No.77, pp.1-12, 2000.4
- 14) R.G.Gordon, R.B.Roemer, S.M.Horvath, F A Mathematical Model of the Human Temperature Regulatory System - Transient Cold Exposure Response, IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol.BME-23, No.6, pp.434-444, 1976.11
- 15) J.W.Mitchell, G.E.Myers, F An Analytical Model of the Counter-current Heat Exchange Phenomena, Biophysical Journal, Vol.8, pp.897-911, 1968
- 16) 竹森利和, 中島健, 庄司祐子: 人体モデルの開発, 日本機械学会論文集(B編), Vol.61, No.584 (1995), pp.297-304

第3章 温熱環境評価のための人体熱モデルJOSの開発

- 17) 平田耕造：運動時の四肢発汗量を促進する動静脈吻合(AVA)血流量，体育の科学，Vol.40,1990.11
- 18) 中山昭雄、入来正躬、新生理科学大系22、エネルギー代謝・体温調節の生理学、pp.56-62、1987.9
- 19) NHK出版、驚異の小宇宙・人体～別巻ビジュアル人体データブック、pp.114-117、1990.1
- 20) 田辺 新一、長谷部 ヤエ：皮膚温可変型サーマルマネキンによる室内環境評価法に関する研究，日本建築学会計画系論文報告集，第448号，pp.1-8, 1993
- 21) 市原 真希、斎藤 正文、西村 美加、田辺 新一：サーマルマネキンを用いた立位・座位人体各部位の放射・対流熱伝達率の測定，日本建築学会計画系論文集，第501号，pp.45-51, 1997
- 22) 田村照子、裸体健康成人女子の皮膚温分布－被服設計の為の温熱生理学的基礎研究－、お茶の水医学雑誌、第31巻4号、1983.12
- 23) 梶原裕、大中忠勝、徳田哲男、川島義勝、寒冷及び暑熱曝露時の高齢者の生理心理反応の特徴、第14回人間－熱環境系シンポジウム報告集、1990

第 4 章

緩衝空間が歩行移動後の 熱的快適性に与える影響に関する研究

第4章 緩衝空間が歩行移動後の熱的快適性に与える影響に関する研究

TRANSIENT THERMAL COMFORT SUCCEEDING A SHORT WALK IN A BUFFER SPACE FROM OUTDOOR TO INDOOR

Subjective experiment was conducted to investigate the effect of environmental setting of a buffer zone on thermal comfort in succeeding indoor environment. A climate chamber was divided into 3 rooms and controlled to represent indoor, buffer zone, and outdoor settings. Subjects dressed in typical office clothing moved from indoor to outdoor and back to indoor through the buffer zone. Environmental condition of the buffer space had a clear impact on physiological parameters, but not much for thermal and comfort sensations. Buffer zone was found to mitigate the drop in comfort sensation shortly after entering indoors from outdoors.

Keywords: Transient thermal comfort, Subjective experiment, Buffer zone
非定常温熱環境, 被験者実験, 緩衝空間

4-1. はじめに

夏季や冬季など屋内外の温度差が大きい季節には、人は建築物の出入りによって急激な環境変化を強いられる。このような環境変化の緩和やデザイン性を目的としてエントランスホール、アトリウムといった緩衝空間が設けられることが多いが、その内部の温熱環境の設定に関する明確な指針はない。しかし、中間に設けられる緩衝空間の環境条件が屋内外を移動する際の環境評価や、通過後の熱的快適性に与える影響は少なくなっていると思われる。そこで本研究では緩衝空間を通過空間としてとらえ、その環境設定が通過後の熱的快適性に与える影響を把握することを目的として被験者実験を行った。

4-2. 従来の研究

緩衝空間を経由した移動プロセスは、居住空間での長期滞在と緩衝空間での比較的短時間の通過が混じった、連続的なステップ変化とみなすことが可能であろう。非定常温熱環境における熱的快適性評価手法は確立されていないものの、環境のステップ変化に関する被験者実験は多数行われており、定常環境での心理反応との相違点が報告されている。Gagge^ら¹⁾は、熱的中立環境から寒冷または暑熱環境に移動し、もとの環境に戻るという被験者実験の結果について報告している。熱的中立から不快側への環境変化では、環境変化直後を除いては平均皮膚温や発汗状態といった生理量から温冷感・不快感の予測が可能であるが、不快側から熱的中立側への環境変化の場合は、生理量の変化よりも温冷感・快適感の変化が先行して中立、または快適に向かうという結果を得ている。また、Rohles^ら²⁾も同様の実験を行っており、最終的に戻ってきた熱的中立環境での温冷感・快適感はその前の環境の影響を受けず、短時間で初期の定常値と同じになったとしている。徐^ら³⁾は暑不快環境から変動

風のあるやや暑い環境に移動した際の心理反応を「涼暖スケール」と「寒暑スケール」を用いてKuno^ら⁴⁾の二次元温冷感モデル上で表現している。しかし、これらの実験は各環境での滞在時間が1時間を超えており、そのまま緩衝空間の通過状況に適用するのは不適切だと言える。一方、Knudsen^ら⁵⁾は基準の熱的中立環境に1時間滞在后、30分ごとに基準環境+2℃及び-2℃の環境を計4回移動させるという実験を行った。ステップアップ変化では即座に30分後の温冷感申告値と同じ申告をしていたのに対し、ステップダウン変化では環境変化直後に、30分後の申告値よりも涼しい側の申告をしており、正よりも負の温度変化に対して敏感であると報告している。通過空間に着目した研究としては、高橋^ら⁶⁾が夏季屋外から25℃に冷房された室内に移動する被験者実験を行い、木陰などの涼しい経路を通過してきた場合は炎天下を経由した場合に比べて入室時に「寒い」という申告が見られたことから、涼しい環境を経由した方が冷房設定温度を過度に低くする必要がないと考察している。

夏季は着衣量の少なさや発汗により環境変化が人体に及ぼす影響が大きいと考えられ、緩衝空間の効果を知るには滞在時間の短さや代謝量の変化といった通過空間としての要素を考慮した実験が必要だと考えられる。そこで、オフィス執務者が室内

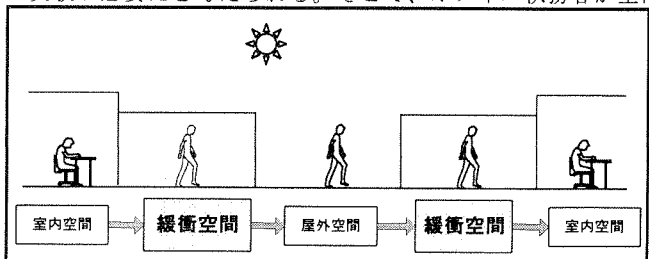


図4-1 実験概念図

から屋外に出て戻って来るというプロセスを想定し、緩衝空間の環境が熱的快適性に与える影響について検討を行った。実験概念図を図4-1に示す。

4-3. 実験概要

4-3-1 実験日時・場所

実験は2000年9月21日から10月21日の期間、開始時刻を9:00、13:00、17:00の3回に分けて早稲田大学理工学部61号館温熱環境室にて行った。各被験者の実験時間帯は全条件で固定とした。温熱環境室内を「室内空間」、「緩衝空間」、「屋外空間」の3室に分け、環境条件を任意に設定した。実験室平面図及び実験風景を図4-2に示す。

4-3-2 被験者

被験者は大学生年齢の男女6人ずつ、計12人とした。被験者の体軀を表4-1に示す。オフィスワーカーを想定し、男性は長袖Yシャツ、ネクタイ、ランニングシャツ、スラックス、下着、靴下、革靴、女性は長袖ブラウス、下着、スカート、ストッキング、革靴を身に付けた。着衣量はサマーマネキンを用いて測定を行い、男性は立位時0.72clo、座位時0.77clo（椅子含む）、女性は立位時0.58clo、座位時0.64clo（椅子含む）であった。

4-3-3 実験条件

屋外空間の環境設定は夏季を想定した32℃70%RH、室内空間は一般的オフィス空間を想定した25℃50～60%RHとした。緩衝空間は室温を22℃、25℃、28℃、通過時間を3分、5分、10分とし、それらの組み合わせ9通りと、緩衝空間がない場合として25℃0分の計10条件とした。相対湿度50～60%RH、静穏気流、平均放射温度は室温と同じになるよう制御した。表4-2に条件名称を、表4-3に各空間の代表点にて実験中2分間隔で測定した温湿度の結果を示す。

4-3-4 実験方法

3つに区切った実験室内を室内空間→緩衝空間→屋外空間→緩衝空間→室内空間の順で移動させた。1回の実験につき、被験者の参加は2人までとした。実験手順を図4-3に示す。

実験は室内空間に60分滞在後、緩衝空間では条件設定ごとの歩行時間、屋外空間では15分滞在し、往きと同条件の緩衝空間を経て室内空間で60分間滞在するという流れで行った。代謝量は、室内空間ではオフィスワークに準ずる1.2met、屋外

表4-1 被験者体軀

	年齢(歳)	身長(cm)	体重(kg)	体表面積 [*] (m ²)
	平均(S.D.)	平均(S.D.)	平均(S.D.)	平均(S.D.)
男性	22.7 (1.8)	174 (4.7)	60.2 (5.1)	1.73 (0.09)
女性	20.5 (2.6)	161 (6.3)	50.6 (5.6)	1.52 (0.11)

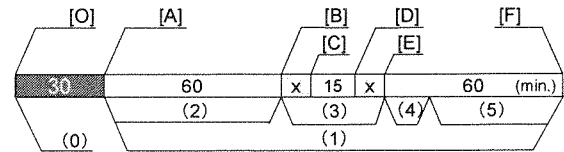
^{*}A_{Du}: DuBois体表面積

表4-2 緩衝空間設定条件名称

		通過時間			
		0分	3分	5分	10分
緩衝空間 設定温度	22℃		22-3	22-5	22-10
	25℃	25-0	25-3	25-5	25-10
	28℃		28-3	28-5	28-10

表4-3 環境制御結果

		室内空間		緩衝空間		屋外空間	
		設定	平均(S.D.)	設定	平均(S.D.)	設定	平均(S.D.)
空気温度 (°C)	25		25.0 (0.7)	28	28.1 (0.2)	32	32.2 (0.1)
			24.9 (0.5)	25	25.0 (0.2)		32.0 (0.2)
			24.9 (0.5)	22	21.9 (0.3)		32.1 (0.6)
相対湿度 (%)			53 (5)		56 (1)	70	70 (1)
			58 (3)		59 (1)		70 (2)
			53 (2)		58 (2)		68 (1)



※ Xの値は実験条件(0, 3, 5, 10)に対応

- [O] 前室入室 (0) 着替え、熱電対・温湿度計貼付
 [A] 実験開始 (1) 皮膚温・衣内温湿度計測: 10秒毎
 [B] 緩衝空間入室 (2) デスクワーク / 申告: 10分毎
 [C] 屋外空間入室 (3) 踏台昇降 / 申告: 入室直後・退室直前
 [D] 緩衝空間入室 (4) デスクワーク / 申告: 1分毎(入室後10分間)
 [E] 室内空間入室 (5) デスクワーク / 申告: 5分毎
 [F] 実験終了

図4-3 実験手順

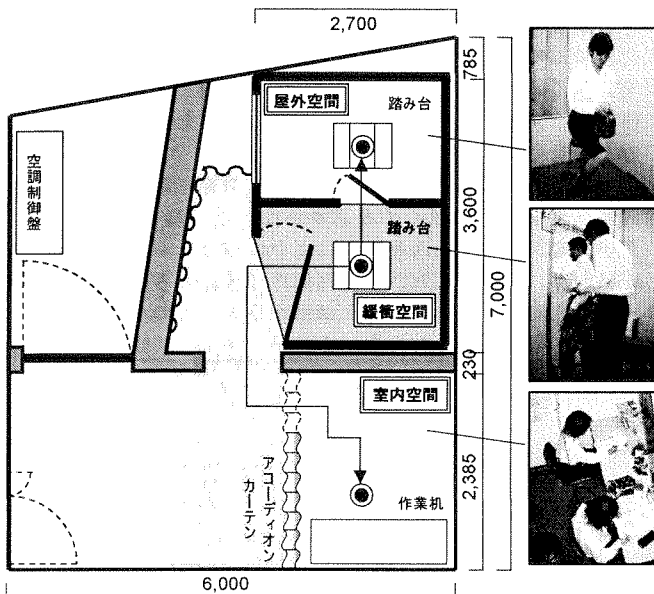


図4-2 実験室平面図及び実験風景

1. あなたはこの室内の熱環境をどう感じますか？

-3 -2 -1 0 +1 +2 +3

寒い 涼しい やや涼しい どちらでも やや暖かい 暖かい 暑い

2. あなた自身はいまどう感じますか？

-3 -2 -1 0 +1 +2 +3

寒い 涼しい やや涼しい どちらでも やや暖かい 暖かい 暑い

3. あなたはこの室内の環境を快適だと思いませんか？不快だと思いませんか？

-3 -2 -1 0 +1 +2 +3

非常に不快 不快 やや不快 どちらでも やや快適 快適 非常に快適

4. あなたは現在、汗をかいていますか？

0 +1 +2 +3

汗を 汗を 汗を 非常に汗を

かいていない かいている かいている かいている

5. あなたは汗による着衣の状態を受け入れられますか？受け入れられませんか？

-1 0 +1

受け入れられない どちらかという どちらかという 受け入れられる

6. あなたはどの部分が汗により濡れていると感じていますか？(複数可)

無し 腹 首 胸 背中 脇の下 大腿 膝裏 その他()

7. あなたはこの室内の熱環境を受け入れられますか？受け入れられませんか？

-1 0 +1

受け入れられない どちらかという どちらかという 受け入れられる

図4-4 申告用紙

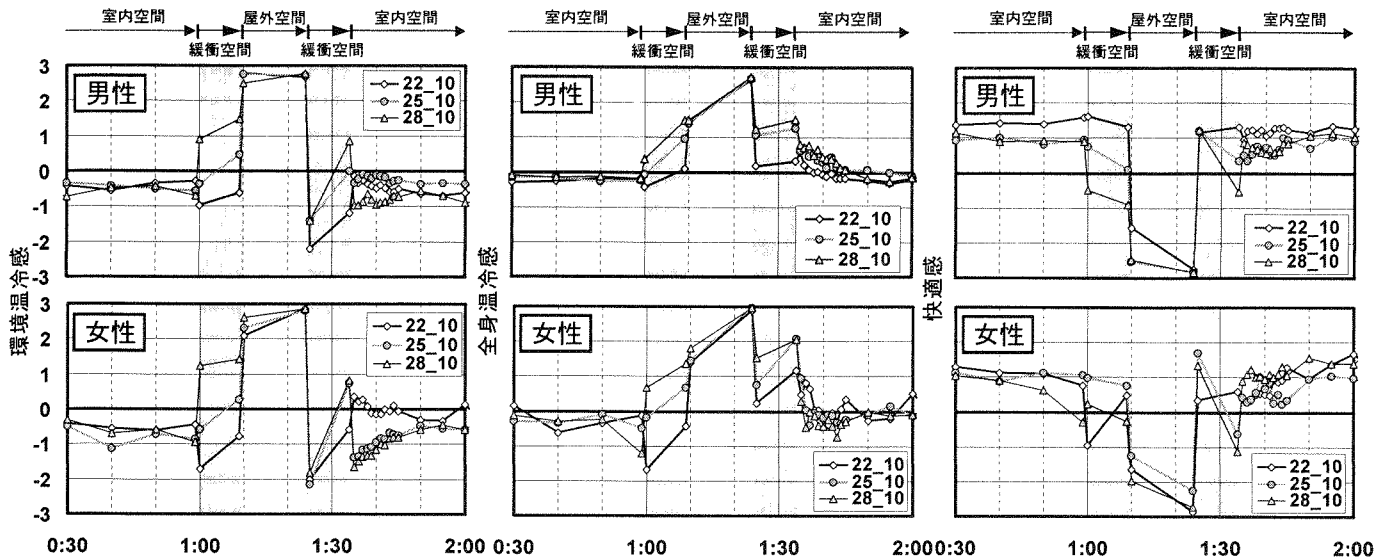


図4-5 空間遷移時の心理量経時変化(10分条件)

空間、緩衝空間では3.2km/h歩行の2.0metを想定し、屋外、緩衝空間では代謝量相応の踏み台昇降を行わせた⁷⁾。なお、25℃0分条件では、室内空間と同じ25℃に保った緩衝空間を素通りして、屋外空間と室内空間を移動させた。被験者には、心理量としてタイムスケジュールに準じて図4-4の申告用紙に挙げた7つの項目について、スケール上の該当する位置に縦線を引くことによって申告させた。上から順に、環境温冷感、全身温冷感、快適感、発汗感覚、着衣受容度、発汗部位、環境受容度とする。緩衝空間と屋外空間では入出の前後に一回ずつ、緩衝空間通過後に室内空間に戻った直後の10分間は、変化の過程を追うために1分間隔で申告させた。

従来の定常温熱環境指標は、任意の温熱環境における被験者自身の熱的状態を問うた「全身温冷感」をその対象としている。しかし、環境のステップ変化を伴う場合には環境変化そのものが強く意識され、暑い、寒いという申告に大きな影響を及ぼす可能性がある。深井ら⁸⁾は入室時の冷房環境を評価するのに「空気温冷感」という同様のスケールを用いているが、本研究では、自分が置かれている温熱環境と自分の熱的状態を意識的に区別させるために「環境温冷感」、「全身温冷感」という二つのスケールを用いて申告させた。

生理量としては、10秒毎に額、腹、左大腿、左下腿、左足甲、左上腕、左手甲の7点の皮膚温をφ0.2mm T型熱電対にて測定した。胸、背中の中衣内温湿度として温湿度センサをサージカルテープで皮膚に直接貼付し、皮膚から約3mm離れた位置の温湿度を測定した。また、実験開始前と終了後にそれぞれ腋下水温、体重を測定した。

本実験では歩行時の相対気流を再現することが困難であったため、生理量や心理量の絶対値は実際の緩衝空間歩行時とは異なる可能性があるが、緩衝空間の条件による相対的な違いに主眼をおいて検討を行った。

4-4. 実験結果

本研究では被験者の個人間の差が正規分布していると仮定し、男性・女性被験者6人ずつの平均値を用いて心理・生理量の解析を行った。また、申告スケールはいずれも間隔尺度として扱った^{注1)}。

4-4-1 心理量の特性

4-4-1-1 空間遷移時 空間遷移に伴う申告の変化として、図4-5に環境温冷感、全身温冷感、及び快適感の経時変化を示す。代表として、緩衝空間の影響が最も大きいと考えられる通過

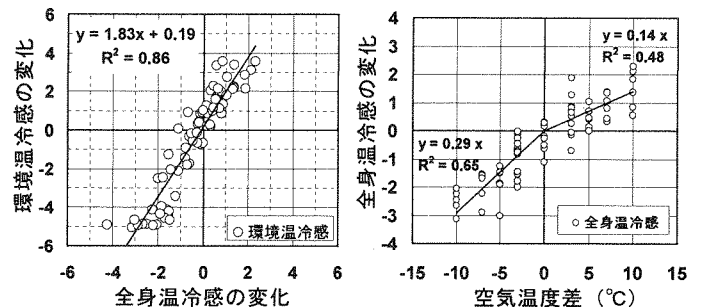


図4-6 全身温冷感の変化に対する 図4-7 空間の温度差に対する 環境温冷感の変化 (空間遷移時) 全身温冷感の変化 (空間遷移時)

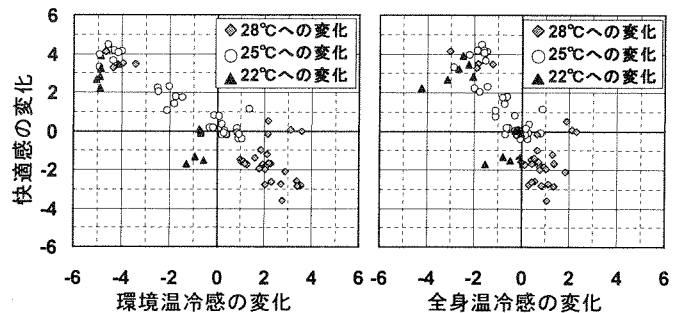


図4-8 温冷感の変化に対する快適感の変化 (空間遷移時)

表4-4 空間遷移前後の室内空間での平均申告値

	22-3	25-3	28-3	22-5	25-5	28-5	22-10	25-10	28-10	25-0
環境温冷感	男性 前	-0.3	-0.6	-0.8	-0.7	-0.7	-0.5	-0.4	-0.5	-0.7
	男性 後	-0.5	-0.6	-0.8	-0.7	-0.8	-0.6	-0.5	-0.6	-0.6
全身温冷感	女性 前	-0.8	-0.1	-0.5	-0.7	-0.5	-0.8	-0.5	-0.9	-0.7
	女性 後	-0.1	0.0	-0.4	-0.7	-0.4	-0.6	-0.2	-0.8	-0.2
快適感	男性 前	0.0	-0.1	-0.1	-0.2	-0.2	0.1	-0.2	-0.2	-0.1
	男性 後	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.2	-0.3	-0.3	-0.4
着衣量	女性 前	-0.4	0.2	0.0	-0.3	-0.5	-0.8	-0.4	-0.3	0.6
	女性 後	0.1	0.2	-0.3	-0.2	0.0	-0.4	0.0	-0.4	0.1
発汗量	男性 前	1.2	0.6	0.6	0.9	0.9	0.9	1.5	0.9	0.9
	男性 後	1.4	1.2	0.9	1.3	1.2	1.0	1.4	1.2	1.3
発汗部位	女性 前	1.0	1.4	1.1	0.7	1.1	1.0	1.0	1.0	0.4
	女性 後	1.2	1.7	1.0	0.7	1.2	1.4	1.6	0.9	1.6

時間10分条件を用い、申告の安定していた実験開始30分以降を示した。

実験開始1時間後に空間移動を開始させたが、一連の移動が終了するまでに各申告は大きく変動していた。全体的に男性よりも女性の申告の変化が大きく、着衣量の違いがその要因の一つとして考えられる。男女ともに空間遷移時の申告値の差が大きかったため、この点に注目して心理量の特性につい

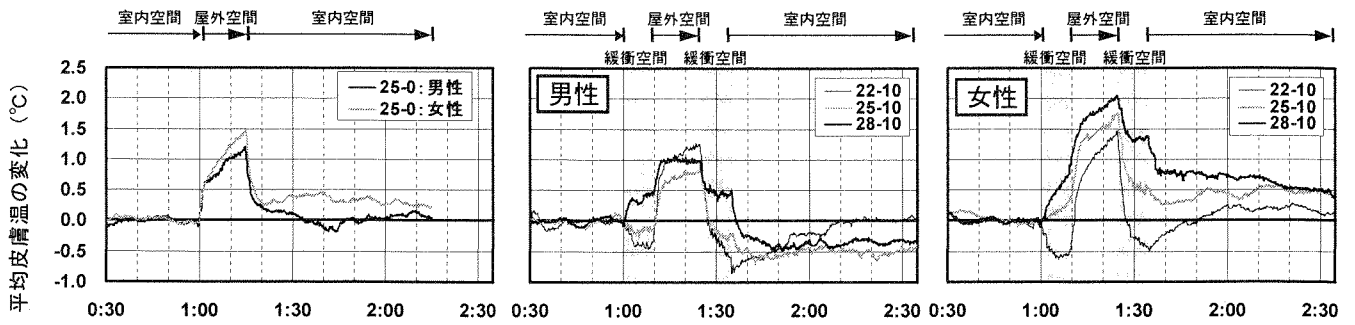


図4-9 初期値からの平均皮膚温の経時変化（25℃0分条件と10分条件）

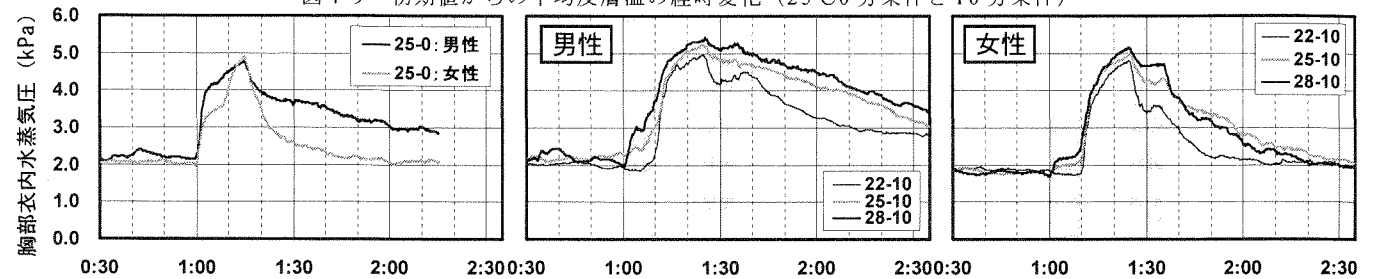


図4-10 衣内水蒸気圧経時変化（25℃0分条件と10分条件）

表4-5 空間遷移前後の室内空間及び屋外空間での平均皮膚温 (S.D.)

単位: [°C]	22-3	25-3	28-3	22-5	25-5	28-5	22-10	25-10	28-10	25-0
遷移前										
男性	34.2 (0.6)	34.2 (0.4)	34.1 (0.6)	34.1 (0.5)	34.6 (0.5)	34.5 (0.5)	34.0 (0.4)	34.3 (0.5)	34.1 (0.3)	34.4 (0.4)
女性	33.4 (0.3)	33.6 (0.5)	33.7 (0.5)	33.4 (0.5)	33.1 (0.6)	33.5 (0.8)	33.5 (0.6)	33.1 (0.7)	33.0 (0.8)	33.4 (0.7)
遷移後										
男性	34.4 (0.4)	34.2 (0.2)	34.3 (0.4)	34.3 (0.2)	34.4 (0.4)	34.0 (0.3)	33.9 (0.4)	34.0 (0.3)	33.8 (0.4)	34.5 (0.4)
女性	33.6 (0.4)	34.0 (0.4)	34.0 (0.6)	34.0 (0.1)	33.6 (0.5)	33.7 (0.4)	33.7 (0.6)	33.5 (0.7)	33.5 (0.8)	33.7 (0.7)
屋外空間										
男性	35.3 (0.4)	35.3 (0.2)	35.5 (0.4)	35.3 (0.4)	35.6 (0.3)	35.5 (0.3)	35.3 (0.3)	35.4 (0.3)	35.3 (0.1)	35.6 (0.3)
女性	34.9 (0.4)	35.1 (0.2)	35.2 (0.5)	34.6 (0.3)	34.9 (0.4)	34.6 (0.4)	35.0 (0.4)	34.8 (0.7)	35.0 (0.5)	34.9 (0.4)

表4-6 空間遷移前後の室内空間及び屋外空間での胸部衣内水蒸気圧 (S.D.)

単位: [kPa]	22-3	25-3	28-3	22-5	25-5	28-5	22-10	25-10	28-10	25-0
遷移前										
男性	2.1 (0.4)	2.3 (0.4)	2.0 (0.2)	2.3 (0.3)	2.2 (0.0)	2.1 (0.3)	2.1 (0.1)	2.2 (0.3)	2.2 (0.4)	2.2 (0.2)
女性	1.8 (0.1)	2.0 (0.2)	1.8 (0.1)	1.9 (0.1)	2.0 (0.2)	1.8 (0.1)	1.9 (0.1)	1.8 (0.1)	1.8 (0.2)	2.0 (0.1)
遷移後										
男性	2.7 (0.7)	3.1 (0.8)	3.2 (0.8)	2.9 (0.6)	3.5 (0.6)	3.9 (0.8)	3.0 (0.8)	3.9 (0.8)	4.1 (0.6)	2.9 (0.8)
女性	1.7 (0.1)	2.0 (0.2)	1.8 (0.1)	2.0 (0.1)	2.2 (0.3)	2.0 (0.2)	2.1 (0.1)	2.5 (0.3)	2.3 (0.2)	2.1 (0.1)
屋外空間										
男性	4.9 (0.5)	5.0 (0.4)	5.2 (0.7)	4.9 (0.4)	5.5 (0.3)	5.4 (0.5)	5.0 (0.5)	5.3 (0.5)	5.5 (0.4)	4.8 (0.7)
女性	4.4 (0.1)	4.9 (0.2)	4.9 (0.4)	4.8 (0.4)	4.9 (0.4)	4.9 (0.4)	4.8 (0.3)	5.0 (0.2)	5.2 (0.3)	4.9 (0.3)

て考察した。

環境温冷感と全身温冷感について、各空間を退室する直前と次の空間に入室した直後の申告値の差を全実験条件についてプロットしたものを図4-6に示す。環境温冷感の変化は全身温冷感よりも2倍ほど大きく、同じステップ変化に対して環境温冷感の方が感度が高かったと言える。また、図4-7に遷移前後の空間の温度差に対する全身温冷感の差を示すが、正よりも負の温度変化に対する温冷感変化が大きく、Knudsenら³⁾の結果と一致した。

温冷感と快適感の値に相関は見られなかったが、両温冷感と快適感の変化の大きさには一部高い相関が見られ、特に環境温冷感との相関が高かった。温冷感と快適感の関係を遷移後の環境温度に分けて図4-8に示す。熱的中立環境である25℃への環境変化では、温冷感の変化が大きいほど快適感の変化も大きくなっていった。本実験の設定条件のため全体的に負方向への温冷感変化で快適感が増す傾向が見られるものの、22℃、28℃条件では温冷感の変化が小さい時にばらつきが見られた。通過時間に伴う運動量の違いのため、環境変化の感じ方が異なっていたためと考えられるが、25℃条件ではそのような傾向は見られなかった。

4-4-1-2 室内空間滞在時 空間遷移の前後に室内空間にて1時間ずつの滞在があるが、申告値の安定していた後半20分間の平均値を表4-4に示す。対応ありのt検定を行った結果、空間遷移の前後で環境温冷感、全身温冷感共に有意差は見られなかった。28℃10分条件の快適感でのみ、男女ともに有意差(p<0.01)が認められた。緩衝空間の設定温度や通過時間は、空間遷移後40分以降の温冷感や快適感に与える影響は小さいと言える。また、滞在時の環境温冷感は全身温冷感よりも有意に

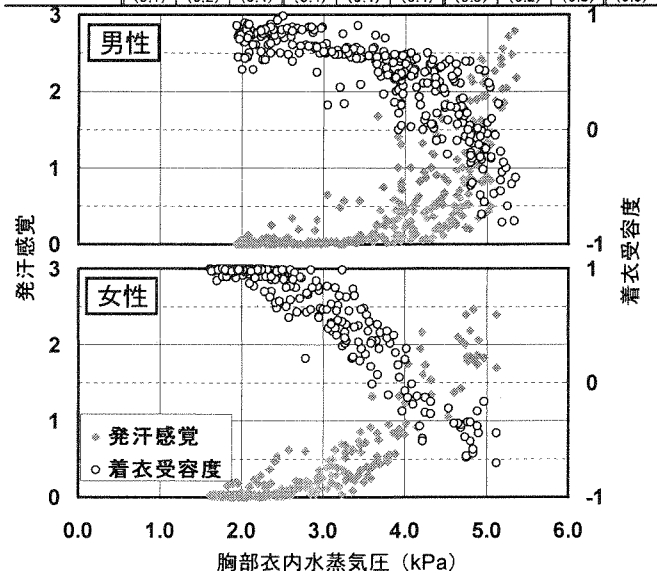


図4-11 衣内水蒸気圧に対する発汗感覚及び着衣受容度（全条件）

低く (p<0.01)、平均して男性で0.4、女性で0.3の差が見られた。

4-4-2 生理量の特性

4-4-2-1 平均皮膚温 空間遷移前後の室内空間後半20分平均値および屋外空間での最大値を表4-5に示す。全体的に男性よりも女性被験者の平均皮膚温が1℃程度有意に低く (p<0.01)、また、遷移前の値に条件間でばらつきが見られた。そこで、遷移前室内後半20分平均値を初期値とした平均皮膚温の経時変化を各被験者について求め、男女別に平均したものを緩衝空間のない条件と通過時間10分条件について図4-9に示す。実験開始後

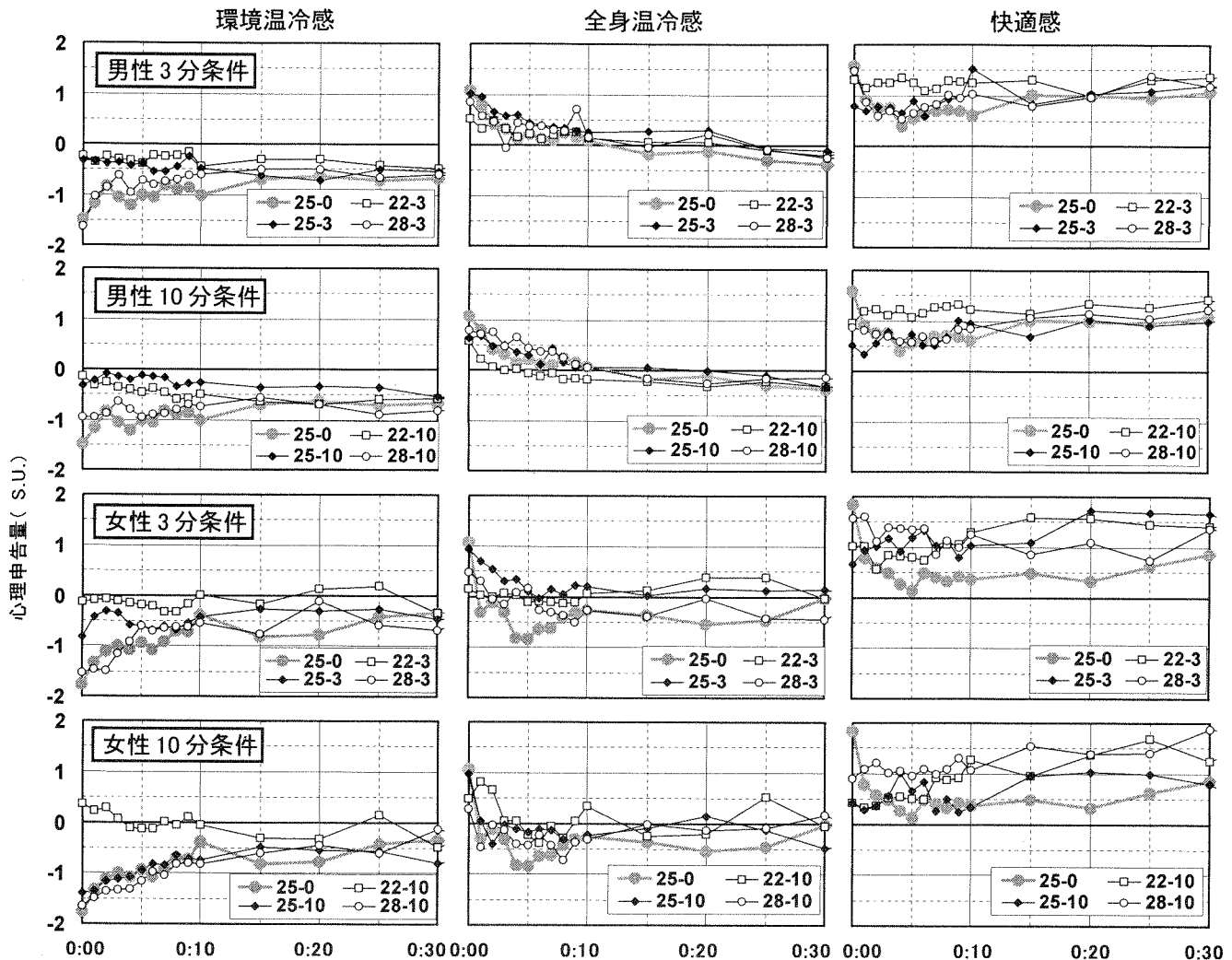


図 4-12 空間遷移後の室内空間での平均申告量経時変化（左列より環境温冷感、全身温冷感、快適感）

30 分のデータは不安定であったため、省略してある。22℃条件および男性の 25-10 条件以外では緩衝空間入室と共に皮膚温が上昇して屋外空間退室時に最大となり、緩衝空間再入室と共に皮膚温は 28、25、22℃条件の順に急激に下降、そして最終的に室内空間での初期値に近づいていった。平均皮膚温の最大値はいずれの条件でも同様の値を示し、男性が平均で 35.4℃、女性は 35.0℃であった。また、女性はいずれの条件でも空間遷移後の平均皮膚温が初期値よりも有意に高く ($p<0.01$)、部位としては大腿、下腿、足甲といった脚部の皮膚温上昇が顕著であった。踏み台運動に伴う体温上昇が要因として考えられる。

4-2-2-2 衣内水蒸気圧 表 4-6 に平均皮膚温と同様に求めた胸部衣内水蒸気圧の代表値、図 4-10 に 25-0 及び 10 分条件の経時変化を示す。遷移前定常値は条件にかかわらずほぼ一定であった。男性が平均 2.2 kPa、女性が 1.9 kPa で、両者には有意差 ($p<0.01$) が認められた。男女ともに移動開始と共に衣内湿度は上昇し始め、皮膚温同様、屋外空間退室直前にピークが見られた。屋外空間退室後の緩衝空間では環境の湿度変化に伴い一時は減少するものの、踏み台運動による発汗のため室内空間入室時まで再度上昇していた。この時の衣内湿度は緩衝空間設定温度の高い順と一致していた。室内空間では男性よりも女性の衣内湿度の減衰が早く、全条件について実験終了時には実験開始前とほぼ同じ値となっていた。男性は実験終了時でも開始時より 1kPa ほど高かった。男性被験者は下着として綿のランニングシャツを着ており、吸収された汗により衣内湿度がなか

なか下がらなかったと考えられる。

胸部衣内水蒸気圧と発汗感覚、着衣受容度に相関が見られ、その結果を図 4-11 に示す。女性は低湿度域では着衣受容度が高かったものの、4.0 kPa を越えると発汗感覚は 1 以上、着衣受容度は着衣の状態を受け入れられない側に申告していた。これに対し、男性は 4.5 kPa を越えても発汗感覚は 1 以下、着衣受容度は着衣の状態を受け入れられる側に申告しているケースが多かった。任意の発汗状態に対する発汗感覚や着衣受容度は、女性の方が敏感だといえる。また、男性は胸部衣内水蒸気圧、発汗感覚が共に低い状態でも着衣受容度が 1 とはならなかった。ネクタイの窮屈さなど、被験者衣服そのものに対する不快さが影響していたと考えられる。

4-4-3 緩衝空間の効果

いずれの条件でも屋外空間退出時の生理量及び心理量が最大/最小値となっており、その値にも大きな差が見られなかった。そこで、屋外空間退室時から室内空間に戻る経路での緩衝空間の効果について検討を行った。通過時間 3 分条件と 5 分条件にはほとんど差が見られなかったため、3 分条件と 10 分条件の結果を緩衝空間のない場合 (25-0) と比較することにより考察した。

4-4-3-1 心理量 図 4-12 に空間遷移後の室内空間入室時を 0 分とした環境温冷感、全身温冷感、快適感の経時変化を示す。

環境温冷感： 室内空間の温度が前空間よりも低くなる緩衝空間のない条件 (25-0) と 28℃条件で入室時の申告が低く、

徐々に0付近に近づいてゆく傾向が見られた一方で、女性の25-10を除いた25℃、28℃条件では入室時からほぼ一定で推移していた。対応ありのt検定を行った結果、女性の25-10以外の25℃条件、28℃条件で男女共に入室時の申告に25-0と有意差($p<0.01$)が認められた。同一温度条件下での通過時間による申告の差は有意でなく、環境温冷感には温度条件が支配的であったといえる。

全身温冷感： 男性の申告はいずれの条件でも入室後10分で熱的中立へとただらかに変化しており、条件間の差は有意でなかった。女性は22-3以外の条件で入室後5分程度で申告が下がった後に熱的中立へと回復する現象が見られた。男性よりも女性の衣内水蒸気圧の減衰が大きいため蒸発熱損失が促進されたと考えられ、入室後5分間で1.4kPaと最も減少量の多かった25-0の申告の変化が最も大きかった。女性の3分条件全てで、入室5分後の申告に25-0と有意差($p<0.05$)が見られた。

快適感： 入室後の申告は全条件、男女ともに常に快適側にあった。男女共に25-0と有意差の見られた条件はなかったが、①入室時は高いが、数分後には一時低下し、また回復するパターン、②入室時は低い徐徐に上昇していくパターン、③一定の水準で水平に推移していくパターンなどが見られた。いずれの条件でも入室後20分以降は変動が小さかった。

4-4-3-2 生理量 図4-13に3分条件の初期値からの平均皮膚温の変化、図4-14に衣内水蒸気圧の経時変化を示す。10分条件については図4-9および図4-10に示す。

平均皮膚温： 入室時の平均皮膚温を比較すると25-0、28℃条件、25℃条件、22℃条件の順に高くなっており、前の空間の温度(25-0は32℃)の順と一致していた。また通過時間が長いほど条件間の皮膚温の差は大きくなり、緩衝空間設定条件の影響が見られた。3分条件では男女全条件で入室20分後には一定になっていたが、10分条件では特に22℃の入室時皮膚温が低く、定常値に至るまでに40分近くを要していた。女性の全条件及び男性の3分条件の皮膚温偏差の定常値は25-0とほぼ一致していたが、男性の28-10、25-10は初期値を0.5℃近く下回っていた。発汗の影響が大きく、着衣に蓄積された発汗水分により蒸発熱損失が促進されて結果的に皮膚温の低下を招いたと考えられる。

衣内水蒸気圧： 入室時の衣内水蒸気圧は28℃、25℃、22℃条件の順に高かったが、平均皮膚温のように25-0が最大とはならなかった。同じ温度条件でも通過時間が長いと衣内水蒸気圧は高かった。一連の空間遷移の過程で、10分条件では3分条件よりも往復で14分多く歩行運動を行っていることになり、最終的に室内空間に至るまでの積算運動量が発汗に影響していたと考えられる。入室後の衣内湿度が実験終了時も減衰過程にあった男性に対して、女性の実験時間中に一定になっている条件が多かった。特に22℃条件では他の条件よりも早く一定になっていた。

4-5. 考察

4-5-1 環境温冷感と全身温冷感

本実験では、被験者が置かれている温熱環境の状態と被験者自身の熱的状态との混同を避けるために、両者を「環境温冷感」と「全身温冷感」の2つに分けて申告させた。空間遷移時の環境温冷感は全身温冷感よりも変化が大きく、また室内空間滞在時は環境温冷感が全身温冷感よりも有意に低かった。申告の特性に違いが見られたことから、被験者が意識的に両温冷感を区別して申告が可能であったといえる。急激な環境変化を伴うような被験者実験で温冷感を問う場合は、あえて両方を申告させる、または「環境の状態を表す感覚」「自分自身の状態を表す感覚」という両温冷感の違いを明確に説明した上で温冷感

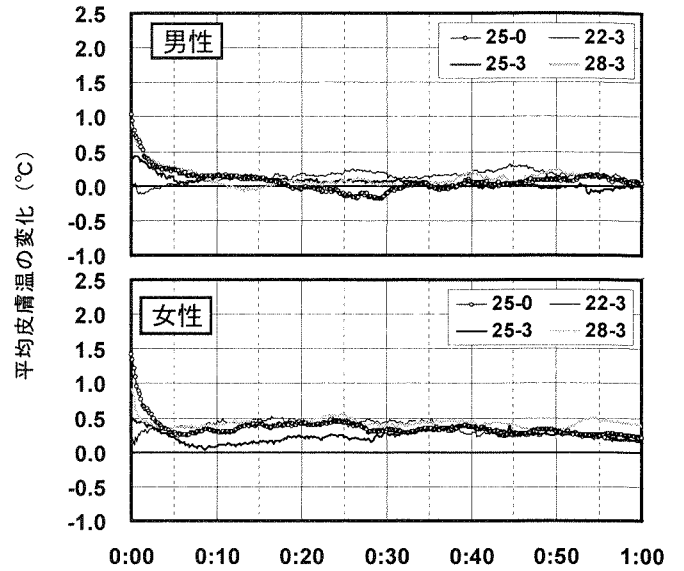


図4-13 空間遷移後室内空間での平均皮膚温経時変化(3分条件)

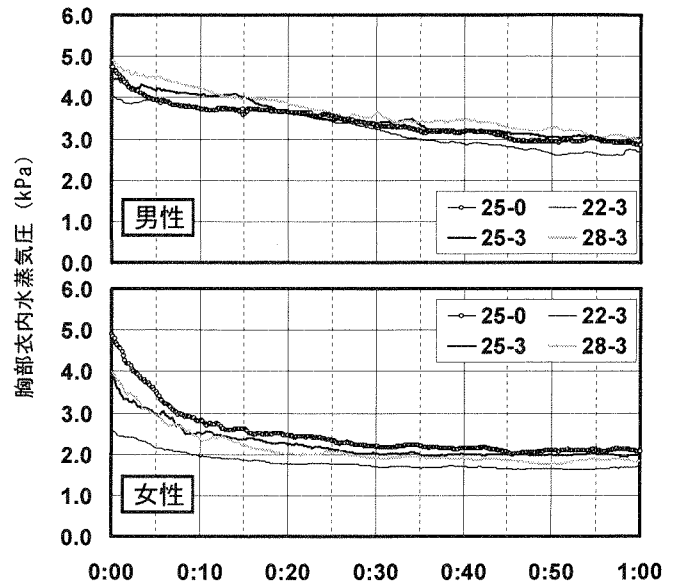


図4-14 空間遷移後室内空間での胸部衣内水蒸気圧経時変化(3分条件)

スケール上に申告させるなどしないと、概念の混同した温冷感の結果が得られてしまう可能性がある。

熱的中立に向かうステップ変化時の環境温冷感と快適感の変化には良い相関が見られ、環境の異なる空間に入室した際の印象評価に有効であると考えられる。

4-5-2 男女差

本研究では、オフィスワーカーを想定して男女の着衣状態を現実に近い形で再現したが、その結果、心理量と生理量に男女間の差が確認された。環境変化に対する申告値の変化は女性の方が大きく、またばらつきも多いのが女性の特徴であった。平均皮膚温および胸部衣内水蒸気圧も男性よりも有意に低かった。これらの差異が全て着衣量の違いに起因するわけではないが、緩衝空間の環境を決める上でこのような相違を考慮する必要がある。

4-5-3 快適感

Kunoら⁴⁾は、快適には消極的快と積極的快(プレザントネス)があると指摘している。消極的快とは熱ストレインのない状態

で、発汗やふるえの起こらない熱的に中立な感覚、そして積極的快とは不快状態から脱していく過程で得られる感覚だとしている。Gagge¹⁾は熱的不快環境から中立環境へステップチェンジを行ったときに快適感が生理量の変化に先行するとの解釈を示しているが、この実験でGaggeは"comfortable"を一端において不快の度合いを評価する片側の4段階不快尺度を用いている。ステップチェンジの過程で快適感が先行しているように見えるのは、不快を脱する過程でまず積極的快が得られ、その後に消極的快へと移行していく現象であるとの見解をKunoらは示している。

本研究では「どちらでもない」を挟んだ両側の7段階快適感尺度を用いたため、得られた結果は単純な先行現象ではなかった。熱的中立環境(25℃)へのステップ変化前後では、温冷感の変化が大きいほど快適感の変化も大きく、前空間での不快の度合いが大きいほど得られる快適感も大きいことが推測される。また、空間遷移後の室内空間では入室後20分間に「どちらでもない」よりも快適側で複数の推移傾向が見られた。①入室時は高いが、数分後には一時低下し、また回復するパターン、②入室時は低い徐徐に上昇していくパターン、③一定の水準で水平に推移していくパターンなどが見られたが、瞬時値ではなく任意の時間帯として評価する場合に、どのような推移過程が被験者にとって最適なのかを今回の実験結果から判断することはできなかった。積極的快の状態を評価するには、さらなる知見が必要だと思われる。

4-5-4 緩衝空間の設定条件

空間遷移後の室内空間に入室して40分以降の平均申告値は、快適感の一部条件を除いて初期室内空間の定常申告値と有意差が見られなかった。Rohlesら²⁾の結果とも一致しており、30分以上の長い時間帯で見ると緩衝空間が熱的快適性に与える影響は小さいといえる。

緩衝空間の設定条件は、そこを通過する人間の平均皮膚温と胸部衣内水蒸気圧に大きく作用していた。温度設定が高く、通過時間が長いほど入室時の皮膚温は高く、衣内水蒸気圧も高かった。また、定常に至るまでに、より長い時間を要した。このように生理量に見られた環境設定条件間の差は必ずしも心理量には現れず、入室時に緩衝空間のない条件と有意な差が見られたのは環境温冷感のみであった。過去の研究結果を踏まえると、屋外空間から緩衝空間を経由した室内空間への移動というのが熱的中立への環境変化にあたり、全身温冷感は生理量の変化に先行して熱的中立に向かったと推測される。快適感是用いたスケールが異なったために入室後20分間は単純な先行現象ではなく、複数の推移傾向が見られたが、緩衝空間のない条件と有意な差は認められなかった。

緩衝空間として最適な設定条件は、いつの時点でどのような評価を持って最適とするかによって変わってくるといえる。特に入室後20分間の最適条件の予測手法については、今後さらなる検討が必要である。

4-6. 結論

緩衝空間の環境設定条件が歩行移動後の熱的快適性に与える影響を把握することを目的として、オフィス執務者がオフィスから屋外に出て、戻って来るというプロセスを想定した被験者実験を行った。結果を以下にまとめる。

- 1) 環境のステップ変化が温冷感に及ぼす影響を見るため、「環境温冷感」「全身温冷感」という2つのスケールを用いた。両申告値の特性には違いが見られ、被験者が意識的に区別して申告することが可能であった。
- 2) 環境ステップ変化時に、環境温冷感は全身温冷感の約2倍

大きく変化していた。また、熱的中立に向かうステップ変化時の環境温冷感と快適感の変化には良い相関が見られた。室内空間滞在時には、環境温冷感が全身温冷感よりも0.3～0.4有意に低かった。

3) 発汗感覚および着衣受容度は胸部衣内水蒸気圧と相関が見られた。任意の胸部衣内水蒸気圧に対する発汗感覚、着衣受容度の反応は男性よりも女性の方が敏感であった。

4) 空間遷移後の室内空間に入室後40分以降の平均申告値は、快適感の一部条件を除いて初期室内空間の定常申告値と有意差が見られなかった。30分以上の長い時間帯で見ると緩衝空間が熱的快適性に与える影響は小さいといえる。

5) 緩衝空間の設定条件は、そこを通過する人間の平均皮膚温と胸部衣内水蒸気圧に大きく作用していた。温度設定が高く、通過時間が長いほど入室時の衣内水蒸気圧は高く、皮膚温も高かった。また、定常に至るまでに、より長い時間を要した。

6) 生理量に見られた環境設定条件間の差は必ずしも心理量には現れず、入室時に緩衝空間がない条件と有意な差が見られたのは環境温冷感のみであった。

7) 有意差は認められなかったものの、入室後20分間は快適感に複数の推移傾向が見られた。どのような快適感申告の推移過程を持って最適とみなすかは今後さらなる検討が必要である。

注1) 定常時の温冷感尺度は±2の範囲では間隔尺度として扱えると考えられている⁹⁾。知覚空気質のスケールとしての受容度尺度も、その平均値が不満足者率と比例関係にあることが示されている¹⁰⁾。快適感、発汗感覚スケールは本来順序尺度ではあるが、等間隔に区切られた数直線上に申告させることにより間隔尺度を仮定した。ただし、データ数が不十分であったため本実験結果からはこれらの尺度の等間隔性は確認できていない。

注2) 本論文は参考文献11)に加筆を行ったものである。

【参考文献】

- 1) Gagge, A.P., Stolwijk, J.A.J., Hardy, J.D.: Comfort and thermal sensations and associated physiological responses at various ambient temperature, *Environmental Research*, vol. 1, pp.1-20, 1967
- 2) Rohles, F.H., Wells, W.V.: The role of environmental antecedents on subsequent thermal environment, *AHRAE Trans.*, Vol.83(2), pp.21-29, 1977
- 3) 徐国海、久野覚、水谷慎吾、斉藤輝幸：変動風環境における生理・人体反応に関する研究 暑不快環境から気流のある中立環境へ移動した場合の温冷感実験、*日本建築学会計画系論文集*, Vol.519, pp.47-53, 1999
- 4) Kuno, S., Ohno, H., Nakahara, N.: A two-dimensional model expressing thermal sensation in transitional conditions, *ASHRAE Trans.* Vol.93(2), pp.396-406, 1987
- 5) Knudsen, H.N., Fanger, P.O.: The impact of temperature step-changes on thermal comfort, *Indoor Air '90*, Vol.1, pp.757-761, 1990
- 6) 高橋達、斉藤雅也、蟻川洋祐、杉岡弘朗、松岡弘幸、宿谷昌則：夏季における住まい手の熱環境調整の行動と温冷感に関する観察方法の研究、*日本建築学会計画系論文集*, Vol.531, pp.37-43, 2000
- 7) 田辺新一、小関敬子、今村寿子、鈴木孝佳：オフィスにおける湿度が熱的快適性に与える影響(その3)、*空気調和・衛生工学会学術講演会論文集*, pp.685-688, 1995
- 8) 深井一夫：冷房環境に関する実験的研究(その2)、*空気調和・衛生工学会学術講演会論文集*, pp.1513-1516, 1999
- 9) Rohles, F.H.: The measurement and prediction of thermal comfort, *ASHRAE Trans.* Vol.80(2), pp.98-113, 1974
- 10) Gunnarsen, L., Bro, C., Fanger, P.O.: The influence of adaptation on acceptability of indoor pollution, *Proceedings of CLIMA 2000*, Vol.271, pp.1-6, 1989
- 11) 中野淳太、後藤邦彦、野口真史、田中幸治、田辺新一：人間・熱環境系快適性数値シミュレータ(その15～18)、*日本建築学会学術講演梗概集*, D-2, pp.345-352, 2001

第 5 章

人工太陽灯と光学フィルタによる
可視域・近赤外域・中赤外域放射が
一対比較照射により手背の感覚量に与える影響

第5章 人工太陽灯と光学フィルタによる可視域・近赤外域・中赤外域放射が一对比較照射により手背の感覚量に与える影響

SUBJECTIVE EVALUATION ON BACK OF THE HANDS FOR VISIBLE, NEAR-INFRARED, MIDDLE-INFRARED RADIATION WITH ARTIFICIAL SOLAR RADIATION RAMPS AND SPECTRAL FILTERS

To investigate thermal sensation caused by the different wavelength of solar radiation, subjective experiments were carried out with 63 subjects, namely 30 males and 33 females. Three kinds of wavelength bands including almost visible (0.3-0.8 μm), near-infrared (0.8-1.35 μm) and middle-infrared (1.7-2.3 μm) were tested at radiant intensity of 1220 W/m². Those were irradiated on back of subjects' hand through a hole with 4cm diameter. Experimental results showed that subjects felt hotter and more painful for the visible and middle-infrared radiation than those caused by the near-infrared one. In addition, the ratio of stimulative sensitivity for the equivalent radiant intensity was calculated to be 1.43:1.00:1.67 for visible:near-infrared:middle-infrared.

Keywords: Thermal comfort, Spectral property, Solar radiation, Subjective experiments
熱的快適性, 波長特性, 日射, 被験者実験

5-1. はじめに

屋外、半屋外、建築空間、車室内などにおいて、直達日射が人体に不均一に照射し、温熱感、痛覚に刺激を与える。その影響は大きく、無視できない。しかし、従来用いられているPMV、SET*などの温冷感指標では、日射による影響に関し、感覚受容器に与える影響、及びその波長特性を評価しておらず、部分的に日射が照射しても面積重み付けにより処理している場合が多い¹⁾。

著者らの一連の研究²⁻⁸⁾の最終目的は、従来の熱的快適性評価に加え、日射の照射部位や照射面積、および人体皮膚が有する光学特性を考慮した日射による感覚量への影響を推測し、不均一な温熱環境においても有用な温冷感指標を開発することである。特に、異なる波長帯放射が感覚量に与える影響について明らかにすることは、従来の長波長放射の均一照射による温熱感評価と比較し、より現実に近い温冷感の予測を可能にすると考えられる。また、人体に強い熱さ感や痛さ感を与える波長帯のみをガラスで反射、吸収するなど、建築、車室設計段階における快適性向上、省エネルギー対策に寄与でき、適用範囲が大きいことが予想される。

既報²⁾³⁾では、人体形状に応じた日射受熱量、周囲空間との間の放射熱伝達量の予測精度を検討するために、人体の形態係数、及び有効放射面積を数値計算を用いてそれぞれ算出し、既往の測定結果と比較した。この数値シミュレーション手法による算出結果は既往の実測結果と良い相関関係を示し、種々の人体形状に対する全身、部位別の形態係数、有効放射面積、投影面積の予測が、工学的に十分な精度で可能となっ

た。文献4)では、実車空間において数値シミュレーション手法と被験者実験結果を組み合わせたときの、ガラス品種差による日射の体感影響を検討した。文献5)では、皮膚における分光特性を考慮し、受容器のインパルス発生頻度を算出することにより皮膚温冷感の日射波長感度を予測する皮膚温点モデルと、被験者実験結果との比較を試みた。

本報では、まず日射の波長特性が人体皮膚、及び温熱感に与える影響に関し、文献調査により明らかにした。さらに、日射波長域内の可視域 (0.30-0.84 μm)、近赤外域 (0.80-1.35 μm)、中赤外域 (1.70-2.30 μm)の異なる波長帯放射が手背の感覚量に与える影響について、一对比較法^{注1)}を用いた被験者実験により検討した。なお、本報は既報梗概集等⁶⁻⁸⁾に検討を加え、まとめたものである。

5-2. 人体皮膚及び感覚量の波長特性に関する既往の研究

5-2-1 人体皮膚の構造

皮膚は表皮と真皮の2層からなり、真皮の内側には脂肪の多い皮下組織がある。表皮は厚さ0.1mm程度で、上から角層・透明層・顆粒層・有棘層・基底層の5層、真皮は上から乳頭層・乳頭下層・網状層の3層からなる。

温度受容器である冷受容器は皮膚の表層近くにあり、深部にある温受容器よりも数が多いといわれている⁹⁾。温度刺激を与えてから感覚の起こるまでの時間の解析から、ヒトでは冷受容器は0.15-0.17mm、温受容器は0.3-0.6mmの深さの真皮内に存在し¹⁰⁾¹¹⁾、自由神経終末によって受容されると推定されている¹²⁾。

5-2-2 皮膚の光学特性

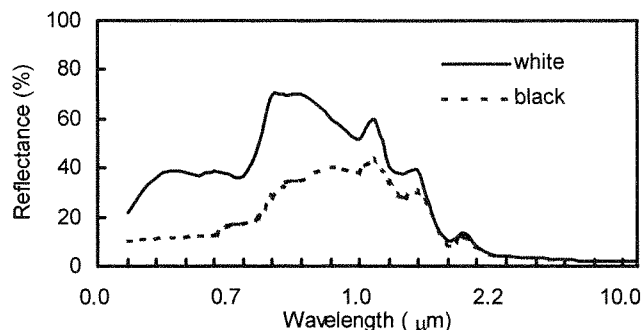
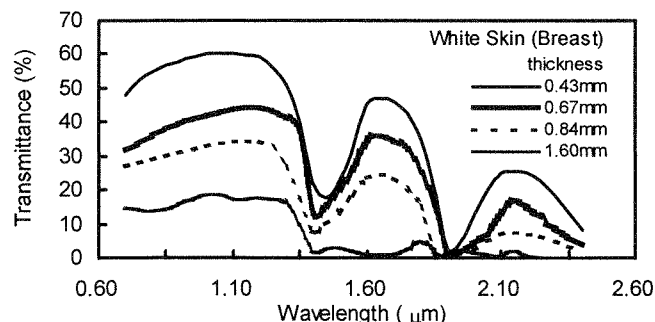
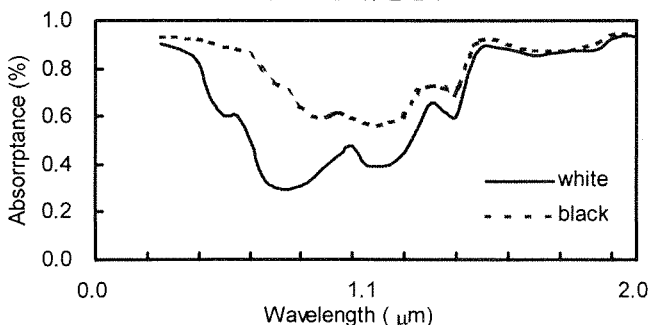
日射の波長が皮膚に照射されたとき、皮膚表面で一部は反射し、残りは皮膚組織内に透過・吸収される。人体皮膚表面での反射率や皮膚内部での透過・吸収特性は、照射波長によって大きく異なる。図5-1に白人と黒人の皮膚における分光反射率¹³⁾¹⁴⁾、図5-2に白人の皮膚の分光透過率¹⁴⁾、図5-3に白人・黒人の皮膚の分光吸収率¹⁵⁾¹⁷⁾を示す。また、Teradaら¹⁸⁾は、日本人（黄色人種）の皮膚で、波長域全般における生体（in vivo）条件下の測定を行った。

これらの報告により、次のことがわかっている。皮膚における分光反射率と分光透過率は、2mm以上の波長域においてはいずれも10%以下と低く、入射した赤外放射の長波長成分（遠赤外）の90%が表皮において吸収される。

2.0mm以下の波長では分光透過率が比較的高く、入射した可視（0.38-0.78mm）・近赤外（0.78-1.4mm）放射は皮膚組織内で徐々に吸収されて深部まで達する。可視域に関しては長波長ほど深部への到達率は大きい。最も透過率が高い波長は約1.2mmで、切り取られた黒人皮膚のサンプルからは1.4、1.9、2.4mmの波長が吸収されることが確認されている。少なくとも1.2-1.4mmの放射の50%が0.8mmの深さまで浸透し、神経終末を刺激する。0.4-2.0mmの波長域では反射率も高く、最大反射率は0.8-1.2mmで起こる。

5-2-3 照射による温冷感への影響

紫外線は人体皮膚に対しては日焼けの原因となり、紅斑現

図5-1 白人と黒人における皮膚反射率^{13), 14)}図5-2 白人の皮膚透過率¹⁴⁾図5-3 白人・黒人の皮膚の分光吸収率¹⁵⁾¹⁷⁾

象と色素沈着という二つの異なった現象を引き起こす。紫外線照射による温熱感に関して、皮膚に到達しても熱とはならないため、温受容器は影響を受けない¹⁹⁾。

可視光線（0.38-0.78mm）は日射エネルギーの中でも最も大きい熱エネルギーであり、長波長ほど深部への到達率は大きい（図5-2）が、可視域放射が皮膚や皮膚血管などの温熱効果に影響を及ぼす許容限界については報告がない²⁰⁾。

赤外線（0.78mm-）は反射したものを除いて表皮を透過し、温受容器が存在する深さまで十分に到達するといわれている。皮膚組織内において吸収された赤外線はその部位の温度を上昇させ、温受容器を刺激し温覚をもたらす。赤外線放射によって生じる温覚の強さは身体部位によって異なり、額、頬などの顔面は赤外線に対して敏感であり、身体下部の大腿、ふくらはぎは鈍い²¹⁾。

松井²²⁾は、赤外線領域の異なる波長帯放射による温熱感の影響について、同じ赤外線でも波長により温熱感が異なり、0.72-2.7mm、1.5-4.8mm、6-20mmの3種類の赤外線を手の甲と頬に照射したとき、短波長の赤外線に比べ長波長のものが皮膚に強い温熱感を与えると報告している。これは皮膚の波長特性によるものであり、2mm以上の中・遠赤外線は照射された波長の大部分が1mm以内の皮膚で熱に変わり、その部位にある温受容器を強く刺激するが、2mmより波長の短い赤外線は皮膚の反射率が高く、皮膚内に入射する量が少ないこと、また透過率が高いことから熱に変わるのが温受容器の位置より深く、温受容器への効果が少ないためであると考察している。

強度の強い赤外線放射による皮膚温の変化は、生きた人の皮膚の熱伝導率、比重、比熱に依存する²³⁾。脂肪の付いた皮膚は水分を含んだ皮膚や骨に比べて相対的に比熱が小さいので早く熱せられるため、皮膚温上昇が早く、人体皮膚の熱容量は組織の水分含有率に高く依存している。

既往の研究では、日射の波長特性が人体感覚量に与える影響についての報告は少なく、照射条件も比較的広範囲の波長域であり、より狭い波長帯放射による影響については不明な点が多く残されている。

5-3. 被験者実験

異なる波長帯放射が感覚量に与える影響を評価することを目的として、男女計63名の被験者を用いた実験を行った。照射熱量を等しくした可視域（0.30-0.84mm）、近赤外域（0.80-1.35mm）、中赤外域（1.70-2.30mm）の3波長帯放射のうち2つを組み合わせた計3条件を、直径4cmの円形照射口より被験者の左右の手背に照射し、一対比較により2つの波長帯放射に対する感覚を申告させた。また、各波長帯放射により受ける感覚量の感度比較（刺激の感じやすさの比較）を、照射熱量を調節することにより試みた。

5-3-1 実験装置・実験室概要

本実験では光源として人工太陽灯（セリック社製 SOLAX XC-500B）を用いた。この太陽灯に可視域（A）、近赤外域（B）、中赤外域（C）の波長帯のみを透過する光学フィルタを取り付け、直径4cmの照射口から被験者の手背に照射した。使用したフィルタの光学特性を表5-1に示す。実験装置はすべてステンレス板製で、被験者が装置内に手を入れ、照射に曝露されるよ

表5-1 フィルタ光学特性

フィルタ	透過波長域	波長*(μm)
A	可視域	0.30 - 0.84
B	近赤外域	0.80 - 1.35
C	中赤外域	1.70 - 2.30

* 分光測定を別途行い透過率1%以上を透過範囲とした

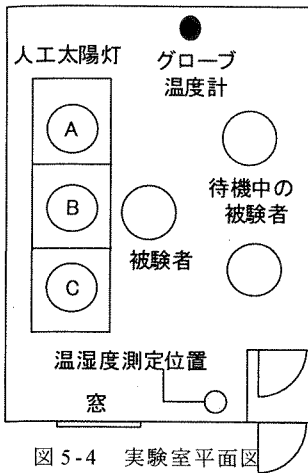


図 5-4 実験室平面図

3 波長同時照射実験

- A : 可視域フィルタ
- B : 近赤外域フィルタ
- C : 中赤外域フィルタ

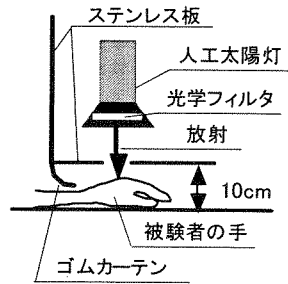


図 5-5 実験装置



図 5-6 実験装置



図 5-7 実験風景

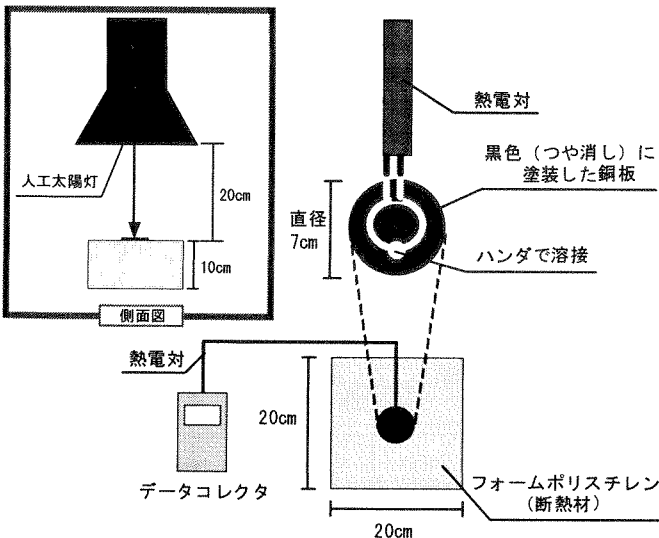


図 5-8 放射温度計概略

うにした。照射曝露される手の位置は固定した。実験は1998年7月、お茶の水女子大学・人間環境制御室において行われた。被験者は健康な大学生年齢の男性30名、女性33名の計63名とした。実験室平面図を図5-4に示す。また、実験装置を図5-5、5-6に、実験風景を図5-7に示す。1回の実験では3名の被験者が同時に実験室に入室したが、照射は1名ずつ行われた。

5-3-2 実験条件

照射条件の波長領域は0.38-2.30μmで、市販の放射計では測定が難しいと考えた。そこで、実験条件における全ての波長が測定可能であると考えられる放射温度計を作成した。その概略を図5-8に示す。放射温度計は20cm平方に切り取った厚さ10cmの断熱材（フォームポリスチレン）上に、銅-コンスタンタン熱電対を円状に這わせ、その上からつや消し黒色塗料を塗布した厚さ0.3mmの銅板を円状に切り取って貼り付け

表 5-2 照射条件

	照射位置における黒体受照面放射温度	環境放射温度	黒体受照面と環境との放射温度差	算出された放射熱量 ^(注2)
可視域	54.6 °C (0.85)	24.6 °C (1.11)	30.1 °C (1.11)	1214 W/m ²
近赤外域	54.6 °C (0.73)	24.6 °C (0.75)	30.0 °C (0.19)	1214 W/m ²
中赤外域	54.9 °C (0.81)	24.8 °C (0.74)	30.2 °C (0.27)	1220 W/m ²

(Standard Deviation)

た。

全照射条件において、被験者への照射直前に各波長帯照射強度をこの黒体放射温度計にて測定し、黒体受照面温度と環境の放射温度との差が30℃となるように、人工太陽灯の出力を調節した。黒体受照面温度、および後述の熱量算出式を用いて算出した照射熱量を表5-2に示す。

実験室内の空調は、被験者自身の着衣量を夏季の平均的な室内着衣量である0.5clo、実験の間の代謝量を1.0metと想定したとき、SET* = 25℃となるように制御した。実験室は終日運転をしていたため、実験室内の空気温度と周壁の温度はほぼ等しいと考えられた。環境条件の設定値と実測値を表5-3に示す。環境要素の測定方法に関して、空気温度は銅-コンスタンタン熱電対、平均放射温度は黒体グローブ球内に設置した銅-コンスタンタン熱電対、相対湿度はTDK製湿度センサーを用い、1分間隔でデータコレクタにて記録した。気流速度はB&K社製 Indoor Climate Analyzer 1213にて被験者退室後に測定した。また、測定位置は、空気温度、相対湿度、気流が床上0.6m、グローブ温度は床上1.1mとした。

5-3-3 被験者

被験者は健康な大学生年齢の男性30名、女性33名とし、実験内容に同意の上参加した。実験終了後には正当な報酬が支払われた。表5-4に被験者体躯を示す。身長、体重は申告値を用い、体表面積は高比良の式を用いて算出した。また、皮膚が日射や熱に弱い、あるいは日射アレルギーの被験者はいなかった。

5-3-4 測定項目・測定方法

被験者の健康状態を調べるため、実験開始前にテルモ社製体温計を用いて口腔温を測定した。口腔温が37℃以上の被験者は実験に参加しなかった。

表 5-3 環境条件

	設定値	実測値
空気温度 [°C]	25.7	24.7 (0.70)
放射温度 [°C]	25.7	25.5 (0.67)
気流速度[m/s]	0.15	0.06
相対湿度[%]	65	67 (4.1)
SET* [°C]	24.8	24.4

(Standard Deviation)

表 5-4 被験者体躯

Group	Sex	Average-Age	Number	Height [cm]	Weight [kg]	Body Surface Area [m ²]*
College-Age	Male	22.8 (1.19)	30	171.4 (5.43)	63.2 (7.17)	1.76 (0.11)
	Female	21.1 (1.96)	33	159.2 (4.72)	49.7 (6.38)	1.50 (1.10)
	Whole	21.9 (1.83)	63	165.0 (7.94)	56.1 (9.56)	1.62 (0.17)

(Standard Deviation)

*calculated by Takahira's Equation $A=0.007246 W^{0.425} \times H^{0.725}$

また、被験者は、照射前後の全身温冷感申告、および照射直後の照射による手背の感覚についての主観的申告を、申告用紙を用いて行った。申告が終了した用紙は、その都度実験室内に設置した用紙入れに入れることとし、前の申告は見ないよう配慮した。

全身の主観的申告項目は、実験室内の温熱環境に対する温冷感、快不快感、熱的許容度、寒暑感について、照射前と実験終了時の2回申告させた。用いた申告用紙を図5-9に示す。申告の尺度は、温熱感、寒暑感が-3から+3の7段階、快不快感が0から-3の4段階、熱的許容度は-1から+1の4段階である。熱的許容度を申告する際には、0への記入は許可せず、どちらかといえば受け入れられるのか、受け入れられないのかを明確に申告するよう被験者に注意した。熱的許容度申告値の集計は、プラス側の0に非常に近いものは+0.01、マイナス側の0近傍は-0.01として平均した。その他の中間値の申告は許可した。

照射に対する局所温熱感等申告に用いた尺度を図5-10に示す。照射直後の照射部位における主観的申告に関しては、照射による温熱感、快不快感、刺激感、熱的許容度について、それぞれ左右2つの照射を比較したときの感覚を申告させた。

5-3-5 実験方法・手順

本実験では、(1)等熱量の各波長帯放射を受けた場合の温熱感、刺激感を比較する実験、および(2)等感覚となるように各波長帯の放射強度を調節する実験、の2種類の実験を行っ

全身について

1. あなたはこの室内の熱環境をどう感じますか。

-3 -2 -1 0 +1 +2 +3

寒い 涼しい やや涼しい どちらでもない やや暖かい 暖かい 暑い

2. あなたはこの室内の熱環境を快適だと思いますか。不快だと思いますか。

0 -1 -2 -3

快適 やや不快 不快 非常に不快

3. あなたはこの室内の熱環境を受け入れられますか。受け入れられませんか。

-1 0 +1

あきらかに受け入れられない どちらかといえば受け入れられない どちらかといえば受け入れられる あきらかに受け入れられる

4. あなたはこの室内の熱環境をどう感じますか。

-3 -2 -1 0 +1 +2 +3

非常に寒い 寒い やや寒い どちらでもない やや暑い 暑い 非常に暑い

図5-9 全身温冷感等申告用紙

1. AとBの放射環境を比較して

1) あなたはどちらの放射環境が熱く感じられますか。

-3 -2 -1 0 +1 +2 +3

Aの方が非常に熱い Aの方が熱い Aの方がやや熱い どちらでもない Bの方がやや熱い Bの方が熱い Bの方が非常に熱い

2) あなたはどちらの放射環境の方が皮膚に刺激を感じますか。

-3 -2 -1 0 +1 +2 +3

Aの方が非常に痛い Aの方が痛い Aの方がやや痛い どちらでも感じない Bの方がやや痛い Bの方が痛い Bの方がとても痛い

3) あなたはどちらの放射環境の方が不快ですか。

-3 -2 -1 0 +1 +2 +3

Aの方が非常に不快 Aの方が不快 Aの方がやや不快 どちらでもない Bの方がやや不快 Bの方が不快 Bの方が非常に不快

4) あなたはどちらの放射環境の方を受け入れられますか。

-1 0 +1

あきらかにAの方が受け入れられる どちらかといえばAの方が受け入れられる どちらかといえばBの方が受け入れられる あきらかにBの方が受け入れられる

図5-10 局所温熱感等申告用紙

た。被験者は人間環境制御室に入室後45分間椅座静位で過ごした。入室45分後、全身の温冷感について申告を行った後、1名ずつ放射曝露実験を開始した。それぞれの波長帯放射に対して照射を受ける手の左右は限定せず、また照射時間も被験者の任意とした。まず実験(1)として、等熱量の3波長帯放射のうち2つを照射する一対比較実験を行い、照射直後に照射部位における温熱感、刺激感、放射に対する印象について、申告尺度を用いて申告を行った。各波長帯の照射熱量は、被験者への照射曝露直前に図5-8に示した黒体放射計を用いて測定、調節した。照射熱量を算出した結果、それら3波長帯放射強度は約1220W/m²となった。

その後、実験(2)として可視域と近赤外域、また中赤外域と近赤外域の組み合わせで2つの放射を比較し、等感覚に感じられるまで実験装置Bの位置に設置された近赤外域放射量を調節した。放射量の調節は実験者が太陽灯の調光ツマミを回す方法で行い、被験者が等感覚に感じると申告したときの近赤外域放射温度を、前述の放射温度計にて測定した。最後に再び全身温冷感について申告し、退室した。

5-4. 実験結果・考察

5-4-1 照射前後の全身温冷感申告

全身における照射曝露前後の温冷感申告結果を図5-11に、

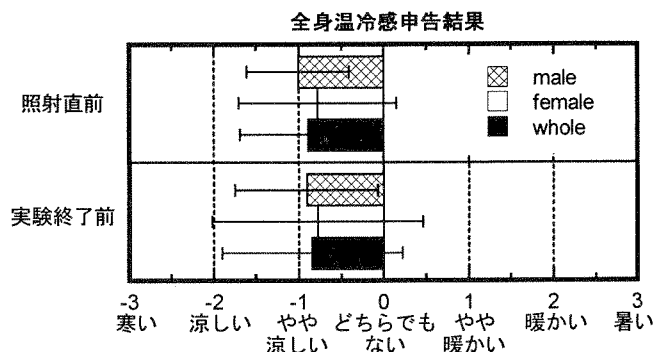


図5-11 照射直前と実験終了時の全身における温冷感申告の比較

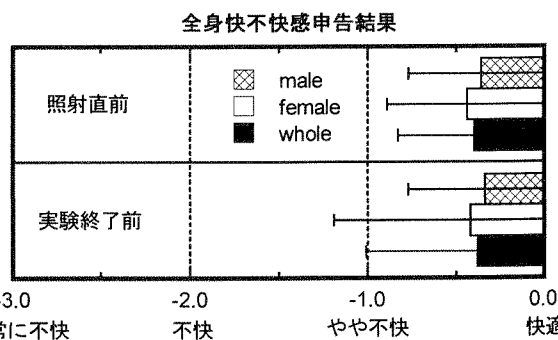


図5-12 照射直前と実験終了時の全身における快不快感申告の比較

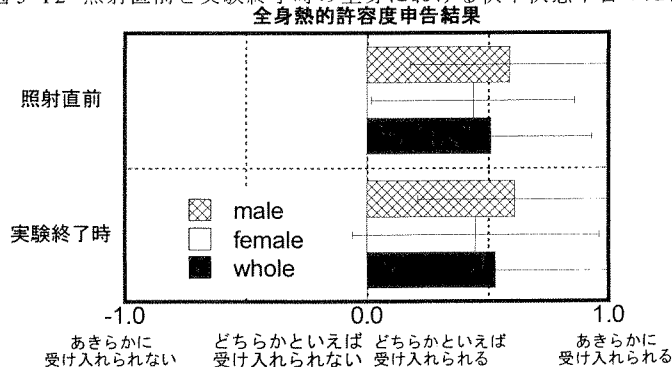


図5-13 照射直前と実験終了時の全身における熱的許容度申告の比較

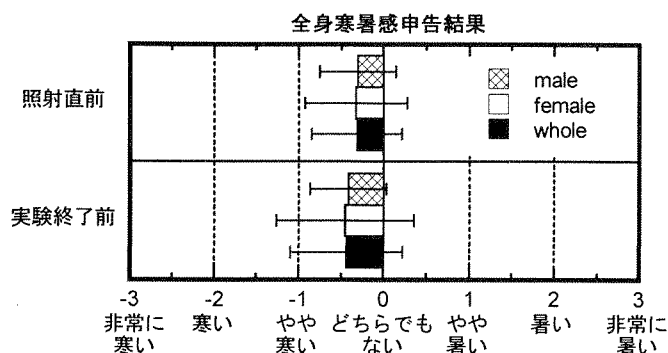


図 5-14 照射直前と実験終了時の全身における寒暑感申告の比較

快不快感申告結果を図 5-12 に、熱的許容度申告結果を図 5-13 に、寒暑感申告結果を図 5-14 に示す。図 5-11 の全身温冷感申告、図 5-14 の寒暑感申告結果より、被験者は実験室内の温熱環境に関して、やや涼しく感じていたものの、ほぼ中立状態であると感じている結果となった。また、図 5-12 の快不快感申告結果から、照射直前も実験終了時ともに、快不快感申告平均値は 0.5 以内 of 快適範囲内であった。図 5-13 の熱的許容度申告結果より、室内の温熱環境は受け入れられるものであり、これらの結果から、照射前後の申告値を比較しても有意な差はなく、今回の放射強度程度では、波長帯放射が被験者の曝露前後の全身温冷感、快不快感、熱的許容度、寒暑感には影響を与えていないと考えられる。

5-4-2 照射部位における主観的申告

実験 (1) において図 5-10 の申告用紙を用いて行った、2 つ

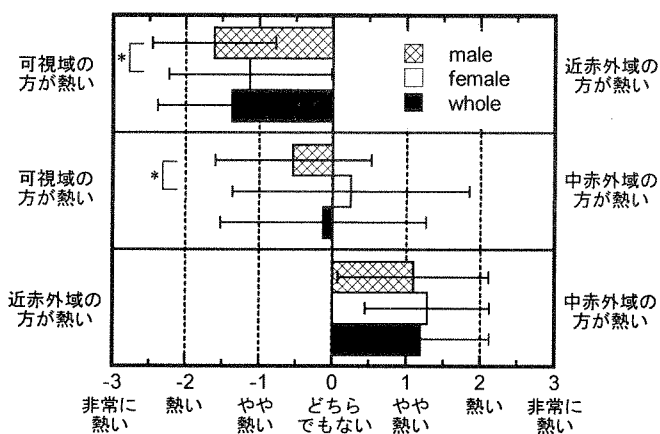


図 5-15 照射による温熱感申告結果 (* $p < 0.05$)

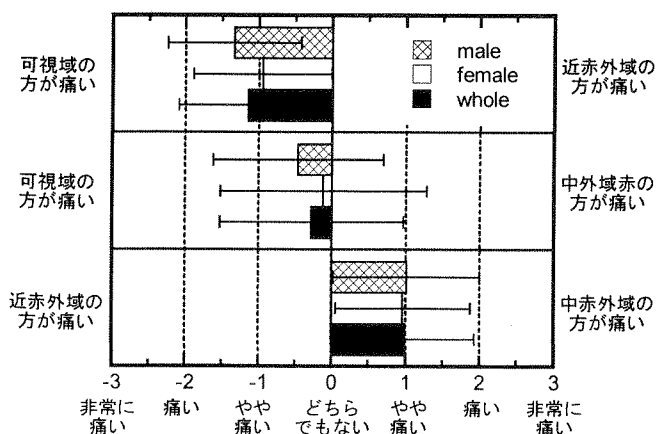


図 5-16 照射による刺激感申告結果

の放射を比較したときの照射部位における温熱感申告結果を図 5-15 に、刺激感申告結果を図 5-16 に示す。それぞれのグラフの Y 軸上部より、可視域放射と近赤外域放射を比較したとき、可視域放射と中赤外域放射を比較したとき、および近赤外域放射と中赤外域放射を比較したとき、の申告結果である。棒グラフがマイナス側になるほど、組み合わせた 2 つの波長帯放射のうち短波長側に熱さや痛さを感じ、一方、プラス側になるほど、長波長側に熱さや痛さを感じていることを表している。この 2 つのグラフより、可視域放射と近赤外域放射との比較では、可視域放射に熱さや痛さを感じていることがわかる。近赤外域放射と中赤外域放射の組み合わせでは、中赤外域放射に熱さや痛さを感じていた。可視域放射と中赤外域放射との比較では、感じ方に個人差が大きいものの、同程度に

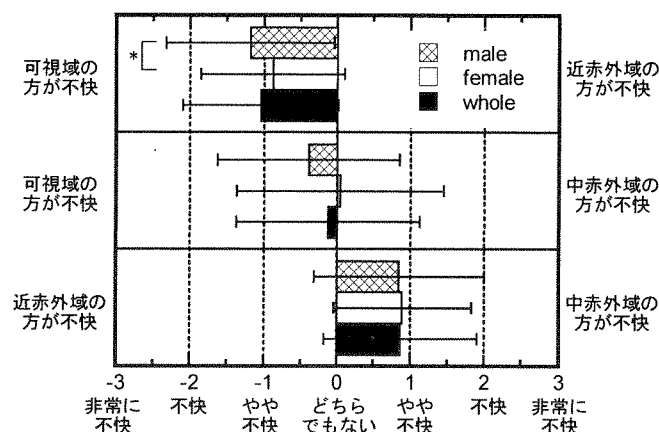


図 5-17 照射による快不快感申告結果 (* $p < 0.05$)

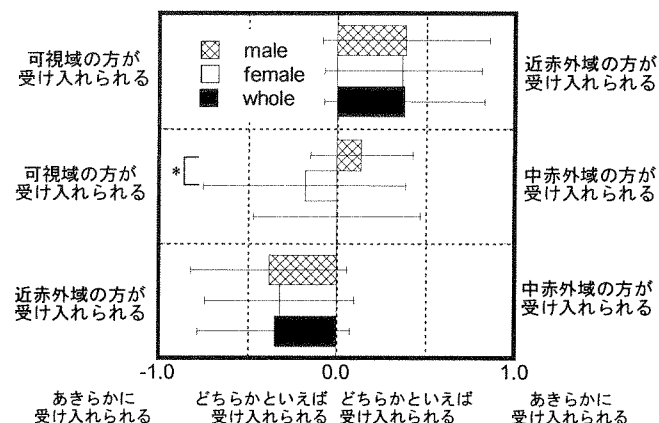


図 5-18 照射による熱的許容度申告結果 (* $p < 0.05$)

感じるという「0 どちらでもない」申告結果となった。

また、各組み合わせ照射に対する快不快感、熱的許容度申告結果をそれぞれ図 5-17、5-18 に示す。これら 2 つのグラフも前述と同様、上から順に可視域放射と近赤外域放射を比較したとき、可視域放射と中赤外域放射を比較したとき、および近赤外域放射と中赤外域放射を比較したとき、の申告結果を表している。照射部位における快不快感、熱的許容度申告ともに温熱感、刺激感申告を反映する傾向がみられ、図 5-17 より、近赤外域放射と比較したとき熱さや痛さを感じると申告された可視域放射、中赤外域放射に対しては「やや不快」に感じていた。可視域放射と中赤外域放射との比較では、快不快感申告においても有意な差は見られなかった。図 5-18 の熱的許容度申告結果からも、可視域放射、中赤外域放射と比較したとき、熱さ感、痛さ感を感じなかった近赤外域放射が、受

け入れられる結果となった。熱的許容度においても、可視域放射と中赤外域放射との比較では差はみられなかった。

男女差に関しては、温熱感申告の『可視域と近赤外域の比較』、『可視域と中赤外域の比較』、快不快感申告の『可視域と近赤外域の比較』、熱的許容度の『可視域と中赤外域の比較』において有意差が認められた ($p < 0.05$: 図5-15から18中の*印)。

照射による感覚量に関し、近赤外域放射と比較したときの可視域、及び中赤外域放射に対する温熱感、刺激感等、全ての申告値について検定を行った。その結果、どの申告結果においても有意差はみられなかった。

5-4-3 各波長帯放射に対する刺激の感じやすさ

申告尺度を用いた実験(1)により、等照射熱量であっても、可視域、中赤外域放射は近赤外域放射と比較して熱さや痛さを感じるという結果が得られた。この順序尺度を用いた申告結果からは、各波長帯放射に対する刺激の感じやすさを数値として検討することは難しい。そこで、温度調節法を用いて各波長帯放射に対する刺激の感じやすさの比について検討する、実験(2)を行った。

実験(2)では、可視域放射と近赤外域放射、中赤外域放射と近赤外域放射とを組み合わせ手背に照射曝露し比較したとき、各被験者が可視域放射、および中赤外域放射と等しい刺激に感じられるまで、近赤外域放射の照射強度を調節した。このときの近赤外域放射温度は、図5-8に示した放射温度計を用いて毎回測定した。表5-5に、放射温度計により測定された黒体受照面における可視域放射温度、中赤外域放射温度、等感覚に感じられたときの近赤外域放射温度と、環境の実測平均放射温度を差し引いた放射温度上昇値 ($Dt = t_s - T_e$) を示す。表中の() は標準偏差である。可視域放射と近赤外域放射との組み合わせ条件では、黒体受照面における可視域放射温度が55℃に対し、近赤外域放射温度が68℃のときに温熱感などの感覚を等しく感じていた。同様に、中赤外域放射温度が55℃に対し、近赤外域放射温度が74℃のとき、感覚量が等しくな

表5-5 等感覚に感じられたときの放射温度

波長帯放射の組み合わせ		可視域	近赤外域	中赤外域
可視域-近赤外域	male	54 [30]°C (0.4)	68 [44]°C (10.1)	
	female	55 [30]°C (0.9)	67 [42]°C (11.4)	
	whole	55 [30]°C (0.8)	68 [44]°C (10.7)	
近赤外域-中赤外域	male		72 [48]°C (12.1)	55 [31]°C (0.5)
	female		75 [50]°C (12.9)	55 [30]°C (1.0)
	whole		74 [49]°C (12.5)	55 [30]°C (0.8)
計算結果 ↓ (Standard Deviation)				
比		69	100	61

表中の[] は各放射温度上昇値。図8の放射温度計にて測定した黒体受照面温度 (t_s) より、環境の平均放射温度 ($T_e = t_a$) を差し引いて求めた、各波長帯放射の放射温度上昇値を表す。

表5-6 刺激感度比

可視域	近赤外域	中赤外域
1.43	1.00	1.67

ると感じている結果となった。

等感覚に感じられたときのこれらの各黒体受照面放射温度より、実測された環境の平均放射温度を差し引いた放射温度上昇値 ($= Dt$) について比を算出した。近赤外域放射を100としたとき、放射による刺激が等しいと感じられる可視域放射、および中赤外域放射温度の比は、可視域放射：近赤外域放射：中赤外域放射=69:100:61となった。この比を基に、最も刺激の感じ方が小さい近赤外域放射を1.00としたとき、それぞれの放射に対する刺激の感じやすさを比で表したものを刺激感度比として表5-6に示す。この刺激感度比は、等熱量の放射に対してどの程度刺激を感じるかを表すと考え、表5-5に示した放射温度上昇値の比の逆数とした。これより、これら3波長帯放射に関する等熱量照射時の刺激の感じやすさの比は、可視域放射：近赤外域放射：中赤外域放射=1.43:1.00:1.67と算出された。

図5-1から図5-3より、本実験で近赤外域放射条件とした0.80-1.35mmの波長帯では、他の波長帯放射と比較して反射率が最も高いため、皮膚表面でほとんどの近赤外域放射が反射し、皮膚の受容器に到達する放射量が少ないために、感覚量に与える影響が小さかったのではないかと考えられる。照射波長帯の相違が人体の温熱感に与える影響に関しては、可視域放射から中赤外域放射領域における比較的狭い波長帯条件での報告がなかったため、本実験結果と他研究との比較はできなかった。

5-5. まとめ

男女計63名の被験者を用い、可視域放射、近赤外域放射、中赤外域放射の3波長帯放射のうち2つを組み合わせ手背に照射し一对比較を行い、温熱感など感覚量に与える影響について調べた。その結果、以下のことがわかった。

- 1) 被験者の温熱感、刺激感等の申告より、放射熱量が等価であっても、近赤外域放射が可視域放射、中赤外域放射と比較して熱さや痛さを感じにくい放射である結果となった。これは人体皮膚が有する波長特性により、近赤外域放射は皮膚表面でほとんど反射し、受容器に到達する放射量が少ないためであると考えられた。
- 2) 各波長帯放射放射による刺激感が等しいと感じられる熱量の比は、可視域放射：近赤外域放射：中赤外域放射=69:100:61であった。この結果より、各波長帯放射による刺激の感じやすさの比は、可視域：近赤外域：中赤外域=1.43:1.00:1.67と算出された。

【注1】一对比較法について

刺激が対提示されている方法において、対にされた刺激が非常に近似している時に弁別できないことがある場合、これを閾下法 (subliminal method) により弁別する。Thurstone²⁴⁾の一对比較がこれに属する。また、この二つのものを比較して評価した結果を数値化するために、比較判断の法則^{24), 25)}も考えられている。この法則は尺度を仮定してその尺度上に各概念が位置しているものとして扱っている。

本論文で用いた一对比較法は、比較診断の法則²⁴⁾に基づくものである。このとき $P(s_i > s_j)$ の関係から s_i と s_j との間の相違が数値化される。この尺度は比例尺度ではないため、申告値より各照射条件に対する比を算出することができない。このため実験(2)を行った。

【注2】熱量の計算

図8に示した黒体放射温度計を用いて測定した放射温度より、以下の計算式を適用して照射熱量を算出した。

放射温度計の受照部分を面積割合を s とし、受照部分を除く受照面円銅板全体の面積を $1-s$ とする。受照面の温度が一定になったとき、受照面と

環境間の熱移動に関し以下の式が成り立つ。ここで、熱収支式は黒体を仮定する。また、伝導に関しては、黒体放射温度計の受照面以外の部分は断熱材で構成されており熱抵抗が大きいため、無視することとした。

$$sq_i + sT_a^4 = h_c(t_i - t_a) + sT_s^4 \quad \dots\dots\dots (I)$$

ここで、 T_s = 環境の放射温度[K]
 T_i = 受照面の表面温度[K]
 h_c = 対流熱伝達率[W/m²°C]
 t_a = 環境の空気温度[°C]
 t_i = 受照面の表面温度[°C]
 q_s = 受照面が受ける熱量[W]
 s = ステファン-ボルツマン定数
 (5.67 x 10⁻⁸ [W/m²K⁴])

(I)式で $T_s \approx T_a$
 s : 照射部分の面積割合 = 0.327[-]
 $q_s = al$ (a : 黒銅板の吸収率; = 1.0, l : 人工太陽灯の日射量[W])

とすると、 $sal + sT_a^4 = h_c(t_i - t_a) + sT_s^4$
 $I = \{h_c(t_i - t_a) + s(T_a^4 - T_s^4)\} / sa \quad \dots\dots\dots (II)$

受照面は自然対流で水平平板であるので、
 $h_c = 1.22 \times 1.16 (Dt/d)^{1/4} \quad \dots\dots\dots (III)$

Dt : 温度差, d : 代表長さ (受照面銅板の直径と考え 0.07m)
 式(II), (III)で、各波長域照射時の受照面の放射熱量を表2の実測値より求めると、以下になる。

・可視域放射の場合、実測値の平均より $t_i = 54.6$, $t_a = 24.6$, $Dt = 30.1$ であるので、

$$h_c = 1.22 \times 1.16 (30.1 / 0.07)^{1/4} \\ = 6.4 \text{ [W/m}^2\text{°C]}$$

よって、

$$I = [6.4 \times (54.6 - 24.6) + 4.88 \times 10^{-8} \times 1.16 \{(273 + 54.6)^4 - (273 + 24.6)^4\}] / 0.327 \\ = 1214 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

・近赤外域放射の場合、実測値の平均より $t_i = 54.6$, $t_a = 24.6$, $Dt = 30.0$ であるので、

$$h_c = 1.22 \times 1.16 (30.0 / 0.07)^{1/4} \\ = 6.4 \text{ [W/m}^2\text{°C]}$$

よって、

$$I = [6.4 \times (54.6 - 24.6) + 4.88 \times 10^{-8} \times 1.16 \{(273 + 54.6)^4 - (273 + 24.6)^4\}] / 0.327 \\ = 1214 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

・中赤外域放射の場合、実測値の平均より $t_i = 54.9$, $t_a = 24.8$, $Dt = 30.2$ であるので、

$$h_c = 1.22 \times 1.16 (30.2 / 0.07)^{1/4} \\ = 6.4 \text{ [W/m}^2\text{°C]}$$

よって、

$$I = [6.4 \times (54.9 - 24.8) + 4.88 \times 10^{-8} \times 1.16 \{(273 + 54.9)^4 - (273 + 24.8)^4\}] / 0.327 \\ = 1220 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

これより、黒体受照面が人工太陽灯から受ける熱量は、約 1220 W/m² であると算出される。

なお、本実験では装置に人工太陽灯と光学フィルタを用いており、人工太陽灯からの光の照射により光学フィルタの温度が上昇して再放射がおこる。本論文では、以下のような考えから再放射を無視した。

照射中の光学フィルタの温度は高くても 70°C と想定される。このとき、フィルタからの長波長放射は約 500 W/m² と算出される。手背が照射されている実験装置はすべて反射率が高い鏡面仕上げの金属板を用いた。また、照射されている手背から直径 4cm の照射口を通してフィルタを見たときの形態係数は 10% 以下となるので、フィルタ温度 70°C のときに手背の照射部分に到達する長波長放射は、約 50 W/m² と算出される。黒体受照面において測定された温度はこの長波長放射も含まれており、手背に到達する全照射熱量に占める長波長放射の割合は全体の 4% と小さいため、無視できると考えた。

【参考文献】

- 1) 木村建一 編：建築環境学1, 丸善株式会社, 1992年4月。
- 2) 尾関義一, 小西正哲, 成田千恵, 田辺新一: 数値計算による矩形面と全身との形態係数の評価, 日本建築学会計画系論文集, 第522号, pp.15-22, 1999年8月。
- 3) 尾関義一, 小西正哲, 成田千恵, 田辺新一: 数値計算による人体の有効放射面積の評価, 日本建築学会計画系論文集, 第525号, pp.45-51, 1999年11月。

- 4) 尾関義一, 小西正哲, 小野道夫, 成田千恵, 田辺新一: 車室内における日射波長特性を考慮したガラスの体感影響, 自動車技術会学術講演会前刷集(横浜), No.33-99, pp.13-16, 1999年。
- 5) 小西正哲, 尾関義一, 成田千恵, 田辺新一: 日射が温熱感に与える影響に関する研究(その6) - 感覚量数学モデルによる日射波長特性の検討 -, 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), pp.379-380, 1999年9月。
- 6) Narita C., Tanabe S., Ozeki Y., Konishi M., Ono M. and Sato K.: Effects of spectral properties of solar radiation on thermal comfort, 2nd International Conference on Human-Environment System Proceedings (Yokohama), pp.93-96, Dec 1998.
- 7) 成田千恵, 田辺新一, 尾関義一, 小西正哲: 日射が温熱感に与える影響に関する研究(その5) - 異なる波長帯放射の体感影響 -, 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), pp.377-378, 1999年9月。
- 8) Narita C., Tanabe S., Ozeki Y., Konishi M., Ono M. and Sato K.: Subjective experiments on the effects of spectral property of solar radiation on thermal comfort, Indoor Air 99 Proceedings (Edinburgh), Vol.1, pp.614-619, Aug 1999.
- 9) 中山昭雄: 新版生理学入門, 朝倉書店, pp.57, 1987。
- 10) Bazett H.C. and McGlone B.: Experiments on the mechanism of stimulation of endorgan for cold, American Journal of Physiology, Vol 93, pp.632, 1930.
- 11) Bazett, H.C., et al.: The temperature in the tissues which accompany temperature sensations, Journal of Physiology, Vol 69, pp.88-112, 1930.
- 12) 田崎京二, 小川哲朗編: 新生理科学体系 第9巻 感覚の生理学, 医学書院, pp.337, 1989。
- 13) Kuppenheim H.F. and Heer R.R.: Spectral reflectance of White and Negro skin between 440 and 1000nm, Journal of Applied Physiology, Vol. 4, pp. 800-806, 1952.
- 14) Hardy J.D., Hammel H.T. and Murgatroyd D.: Spectral transmittance and reflectance of excised human skin, Journal of Applied Physiology, Vol. 9, pp. 257-264, 1956.
- 15) Jacquez J.A., Kuppenheim H.F., Dimitroff J.M., McKeenan W., Huss J.: Spectral Reflectance of Human Skin in the Region 235-700nm, Journal of Applied Physiology, Vol. 8, pp.212-214, 1955.
- 16) Jacquez J.A., Huss J., McKeenan W., Dimitroff J.M., Kuppenheim H.F.: Spectral Reflectance of Human Skin in the Region 0.7-2.6m, Journal of Applied Physiology, Vol. 8, pp. 297-299, 1955.
- 17) Kerslake D.McK.: Chapter 3 Radiation, The stress of hot environments, Cambridge University Press (Great Britain), pp.47-74, 1972.
- 18) Terada N., Ohnishi K., Kobayashi M. and Kunitomo T.: Spectral Radiative properties of a living human body, International Journal of Thermophysics, Vol 7, pp.1101-1113, 1986.
- 19) 関 邦博, 坂本和義, 山崎昌廣編: 人間の許容限界ハンドブック 49. 紫外線, pp.499-506, 朝倉書店, 1990。
- 20) 関 邦博, 坂本和義, 山崎昌廣編: 人間の許容限界ハンドブック 47. 可視光線, pp.476-491, 朝倉書店, 1990。
- 21) 関 邦博, 坂本和義, 山崎昌廣編: 人間の許容限界ハンドブック 48. 赤外線, pp.492-498, 朝倉書店, 1990。
- 22) 松井松長: 赤外線放射に対する皮膚の温熱感覚の波長特性, 赤外線技術, 第12号, pp.18-26, 1987。
- 23) Lipkin M. and Hardy J.D.: Measurement of some thermal properties of human tissues, Journal of Applied Physiology, Vol. 7, pp. 212-217, 1954.
- 24) Thurstone L.L.: A law of comparative judgment, Psychol Rev, Vol. 34, pp. 273-286, 1927.
- 25) Thurstone L.L.: The measurement of values. Chicago Univ. Press. 1959.

第 6 章

半屋外環境における 熱的快適性に関する実測調査

第6章 半屋外環境における熱的快適性に関する実測調査

FIELD SURVEY OF THERMAL COMFORT IN SEMI-OUTDOOR ENVIRONMENT

Designing semi-outdoor environments such as atria or open-style cafes is a popular technique in modern architecture to provide occupants with natural outdoor elements in an artificial environment. Occupants are likely to expect thermal environment differing from indoors, and thermal adaptation is expected to play a major role in achieving comfort. Seasonal field surveys were conducted in four semi-outdoor environments for short-term occupancy with different levels of environmental control. Observations were made on occupancy conditions and clothing adjustments. Sets of 2248 questionnaires and corresponding thermal environmental data were also collected throughout the survey. Clothing adjustment was affected largely by outdoor temperature and less by the immediate thermal environment. Number of occupants and time of occupancy decreased following the daily mean air temperature decrease in non air-conditioned semi-outdoor environments. Occupants in semi-outdoor environments were more tolerant of wider range of environmental conditions compared to that predicted by PPD.

Keywords: Thermal Comfort, Adaptation, Occupancy Condition, Clothing, Field Survey

熱的快適性, 環境適応, 滞在状況, 着衣量, 実測調査

6-1. はじめに

近年、光、風、植栽等、自然の要素を建築環境に取り入れる計画手法としてアトリウムやテラスといった開放的な半屋外空間がオフィスビルや商業施設に多く採用されている。これらの空間には意匠的、視覚的要素以外にも、あえて室内とは異なる環境を提供する場としての役割があると考えられる。室内環境では温熱環境が居住者の快適性に合わせて調整されるのに対して、屋外環境では滞在者が自らを環境に適応させることが前提となる。半屋外環境はその中間に位置づけられ、従来とは異なる評価・計画手法が必要だと考えられる。

Humphreys et al. (1998)、de Dear et al. (1998)は、人間を熱環境に積極的に適応する動的な存在として扱う Adaptive Model という概念を提唱している。自由が大幅に制限される被験者実験の結果に対して、着衣・代謝量の調節、窓の開閉、滞在環境の選択といった居住者の Adaptation (環境適応) の自由度が高いほど快適環境範囲が広くなることをオフィス実測調査より示している。自然環境の導入を主目的とし、かつ長時間の滞在を目的としない半屋外環境においても同様のプロセスが存在し、熱的快適条件が従来の温熱環境基準とは異なると考えられる。そこで本研究では半屋外環境の主用途を短時間滞在として捉え、居住者の環境適応を考慮した熱的快適性評価を目的とした年間実測調査を行った。

6-2. 実測調査概要

実測調査対象空間は、屋外環境要素の導入を目的としてい

表 6-1 調査値概要

調査地	用途	測定対象	規模	空調
O	オフィス・店舗	アトリウム	830m ² ×16m	無
		サンクガーデン	650m ² (開放)	
T	デパート	ウットデッキ	1,500m ² (開放)	無
P	オフィス・店舗	アトリウム	1,600m ² ×18m	有
B	オフィス・店舗	アトリウム	4,200m ² ×40m	有

る建築環境であること、そして多種多様な人々の自由な滞在が可能であることを条件として都内4箇所を選定した。対象空間の概要を表6-1に示す。環境制御レベルに応じて、空調の行われていない調査地O及びT(以下、非空調空間)、そして空調運転が行われている調査地P及びB(以下、空調空間)の2群に分けた。通過者と滞在者を区分するために対象空間内で実際に座った人のみを滞者とし、利用状況・心理量・物理環境の把握を目的とした物理環境測定及びアンケート調査を行った。実測調査は2001年から2002年にかけて各箇所につき4日間、四季に渡って計64日間行った。一日の時間帯での変化を把握するため、実測は10:00～18:00で行った。なお調査地Tは屋根がなかったため、滞在できなくなる雨天時の実測は行わなかった。

a) 利用状況調査

半屋外空間の利用状況を把握するため、滞在時間、滞在者数及び滞在目的を調査した。滞在時間は調査地を見渡せる位置から無作為に滞者を選び、着席・離席時刻を記録した。ま

た、別途10分毎に滞在者数を記録し、1日の変動を調査した。滞在者の属性、滞在目的、利用頻度等に関しては、滞在者へのアンケート調査により行った。

b) アンケート調査

アンケートはA4表裏1枚のチェック方式の用紙を用い、実際の滞在者に回答を依頼した。回答者には謝礼を進呈した。心理量に関する項目は温冷感（ASHRAE 7点スケール）、快適感（7点スケール）、適温感（McIntyre スケール）、受容度などが含まれた。着衣に関しては回答時に着用している衣服をチェックリストの中から選択してもらった。回答者の記入ミスによる誤差を極力減らすため、調査者側でも観察できる範囲内で滞在者の属性・着衣量を記録し、入力時に修正した。

c) 環境測定

滞在者周辺の物理環境を、極力滞在者の近傍で時間のずれを少なくして測定するため、バッテリー駆動で自由に動き回れる移動計測カートを開発した。環境測定項目を表6-2に示す。放射環境は全波長放射量（0.3-40 μm ）と短波長放射量（0.4-1.1 μm ）を別々に上下左右前後の6面方向について計測し、測定時の方位も記録した。また、屋外環境を記録するために、別途代表地点において温湿度・日射量の経時変化を計測した。

まず調査者が滞在者にアンケート回答を依頼し、了承を得た後に別の調査者が移動計測カートを速やかに回答者近傍まで移動させ、物理環境を10分間計測するという手順で調査を行った。後半3分間の平均値を滞在者周辺の物理環境として解析に用いた。全実測期間を通じ、2248のアンケート回答及び対応する温熱環境データを得た。実測風景を図6-1に示す。

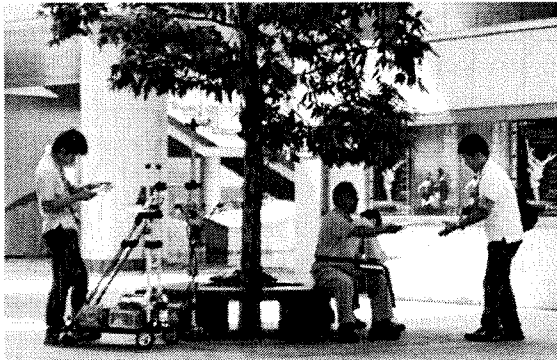


図6-1 実測風景

d) 平均放射温度

6方向の短波長及び全波長放射量計測値から平均放射温度を算出した。長波長放射量 $L_{dif,k}$ [W/m^2] は、各方向の全波長放射量 $R_{net,k}$ [W/m^2] から短波長放射量 $I_{net,k}$ [W/m^2] を差し引いて求めた。k は上下左右前後の各方向を示す。

$$L_{dif,k} = R_{net,k} - I_{net,k} \quad \dots(1)$$

直達日射が居住域にほとんど当たらなかった空調空間P,Bでは短波長放射量はすべて拡散日射と仮定した。非空調空間O,Tでは宇田川・木村の式（1978）により、上方向の日射量測定値 $I_{net,up}$ を水平面全天日射量として用いて直散分離を行い、法線面直達日射量 $I_{dir,n}$ を求めた。各センサの方位が既知なので各方向に入射する直達日射量 $I_{dir,k}$ [W/m^2] を導き、 $I_{net,k}$ から差し引くことによって各方向の拡散日射量 $I_{dif,k}$ [W/m^2] を求めた。

$$I_{dif,k} = I_{net,k} - I_{dir,k} \quad \dots(2)$$

長波長放射と拡散日射は人体の有効放射面積に寄与する。長波長吸収率を ε [-] (=1) 日射吸収率を a [-] (=0.66)、として方向別全波長拡散放射量 $R_{dif,k}$ [W/m^2] を求め、Olesen らの式（1989）

を用いて6面で重み付けした全波長拡散放射量 R_{dif} [W/m^2] を算出した。滞在者は全員座っているため、有効放射面積率 f_{eff} [-] は椅座位の0.696を用いた。 f_{cl} [-] は着衣面積比である。

$$R_{dif,k} = \varepsilon \cdot L_{dif,k} + a \cdot I_{dif,k} \quad \dots(3)$$

$$R_{dif} = f_{eff} \cdot f_{cl} \cdot [0.127(R_{dif,up} + R_{dif,down}) + 0.186(R_{dif,right} + R_{dif,left} + R_{dif,front} + R_{dif,back})] \quad \dots(4)$$

直達日射受熱量 R_{dir} [W/m^2] は、法線面直達日射量が投影面積に寄与する熱量とした。座位の投影面積率 γ_p [-] は太陽高度の影響をあまり受けないため（Breckenridge et al., 1972）一定値の0.2とした。同様に、裸体時の γ_p に対する着衣時の γ_p の比 f_a [-] も1.1で一定とした。拡散成分と直達成分の和より全放射熱量 R [W/m^2] を求める。よって、平均放射温度 MRT [$^{\circ}\text{C}$] は以下より求める。

$$R_{dir} = a \cdot f_a \cdot \gamma_p \cdot I_{dir,n} \quad \dots(5)$$

$$R = R_{dir} + R_{dif} \quad \dots(6)$$

$$MRT = \left(\frac{R}{f_{eff} \cdot f_{cl} \cdot \varepsilon \cdot \sigma} \right)^{0.25} - 273.15 \quad \dots(7)$$

表6-2 環境測定項目

	測定機器	測定高さ(m)
滞在者近傍 (カート)	空気温度	T型熱電対
	気流速度	KANOMAX1560 多点式熱線風速計
	湿度	KANOMAX1560 高分子式相対湿度計
	全波長放射	KANOMAX小型放射計 (0.3-40 μm)
	短波長放射	EKO ML020VM (0.4-1.1 μm)
	表面温度	T型熱電対
屋外	空気温度	TABAI ESPEC RS-12+
	湿度	通風筒
	水平面全天日射	MS-801

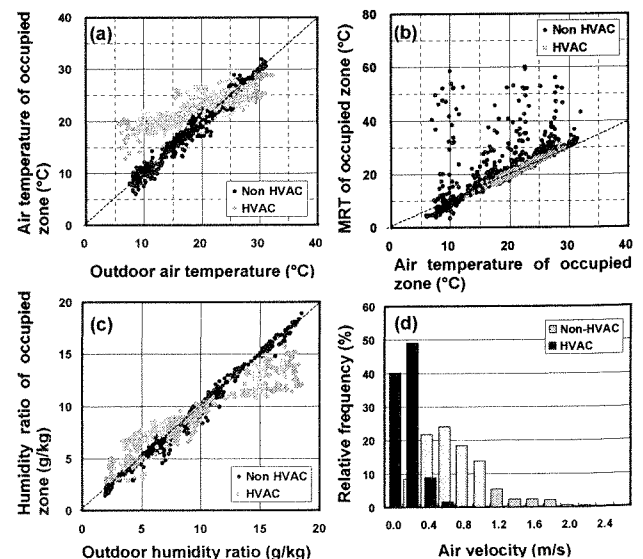


図6-2 滞在環境特性

6-3. 結果

6-3-1 滞在環境の特性

移動計測カートにて測定した滞在者近傍温熱環境の特性を非空調空間 O と T、空調空間 P と B の 2 グループに分けて図 6-2 に示す。まず外気温と滞在者近傍空気温度の相関を図 6-2(a) に示すが、非空調空間では空気温度と外気温がほぼ同等であった。一方、空調空間では外気温の影響を受けているものの、夏季：24~27℃、秋季：19~22℃、冬季：17~21℃、春季：19~22℃に保たれていた。図 6-2(b) に滞在環境の空気温度に対する平均放射温度を示す。平均放射温度と空気温度の差の平均は O：0.8℃、T：5.3℃、P：0.1℃、B：0.2℃であり、O、T は平均放射温度が高く、直達日射の影響を大きく受けていた。樹木やアーケードがあった O に比べ、何も覆うものが無い T の方が空気温度に対して平均放射温度が高かった。P、B では平均放射温度は空気温度と概ね等しかった。外気湿度と滞在環境の絶対湿度を図 6-2(c) に示すが、非空調空間では両者がほぼ一致していたのに対し、空調空間では湿度の高いときに除湿の影響が見られた。図 6-2(d) に気流速度分布を示す。非空調空間では広く分布しており最大 2.0m/s を超える場合もあったが、非空調空間では概ね 0.3m/s 以下であった。

6-3-2 滞在状況

非空調空間ではアンケート回答の男女比率がほぼ等しかったが、空調空間では女性が 60% と若干高かった。いずれの空間でも居住者全体の 80% 以上が滞在目的として「休憩」「食事」「喫煙」といった強制されない行動を挙げており、その環境における滞在条件を自分で選択できる状況にあったといえる。

一日の滞在人数の推移を見ると、オフィスビルの O、P、B で午前中は滞在者が少ないが 12 時前後に急激に増加してピークを向かえ 13 時頃には急激に減少する傾向が見られた。これは、近隣オフィスの勤務者が昼休みの時間帯に食事を目的に滞在していたためと考えられる。一方、調査地 T では午前中は少ないものの昼から夕方にかけて買い物客などの滞在が増え、18:00 を過ぎてもその数は減少しなかった。前者はオフィスビルに付随した、後者は商業施設に付随した半屋外空間の滞在者数推移傾向として考えられる。

空調空間 P での年間平均滞在時間は 21 分、B では 15 分であった。非空調空間 O は 9 分、T は 11 分であったが、季節により滞在時間が多少変化する傾向が見られたため、環境条件と滞在時間の関係を調べた。図 6-3 にその結果を示す。ここで用いた値は、各測定日のアンケート回答者近傍空気温度の平均値及び日平均滞在時間である。また、環境の影響を明確にするため、非空調空間の雨天日や空調空間のイベント開催日のデータは含まれていない。空調空間 B、P では相関が見られなかったものの非空調空間では線形の相関が見られ、空気温度が 3℃ 低下すると約 1 分滞在時間が減少するという関係が見られた。

同様に、日平均空気温度に対する延べ滞在人数を図 6-4 に示す。ここでも空調空間は無相関であったのに対し、非空調空間では空気温度の低下と共に滞在人数が減少する線形の相関が見られた。

滞在を強制されない場合、滞在するか否か、あるいはどこに滞在するかを選択は行動的環境適応と見なすことができる。非空調空間の滞在者は空調空間の滞在者よりも敏感に環境変化に対応しており、寒い環境よりも暖かい環境を好むという結果が得られた。比較的短時間の環境変化も滞在状況に影響を与える可能性はあるが、本調査では時間帯そのものが滞在人数に大きく影響していたため、一日というスパンで評価を行った。

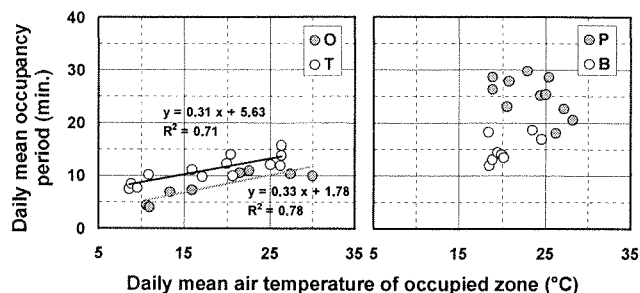


図 6-3 滞在環境空気温度と滞在時間

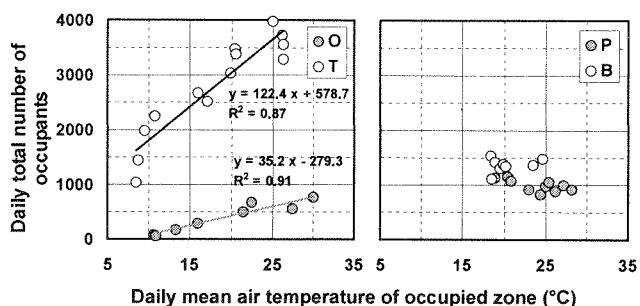


図 6-4 滞在環境空気温度と滞在人数

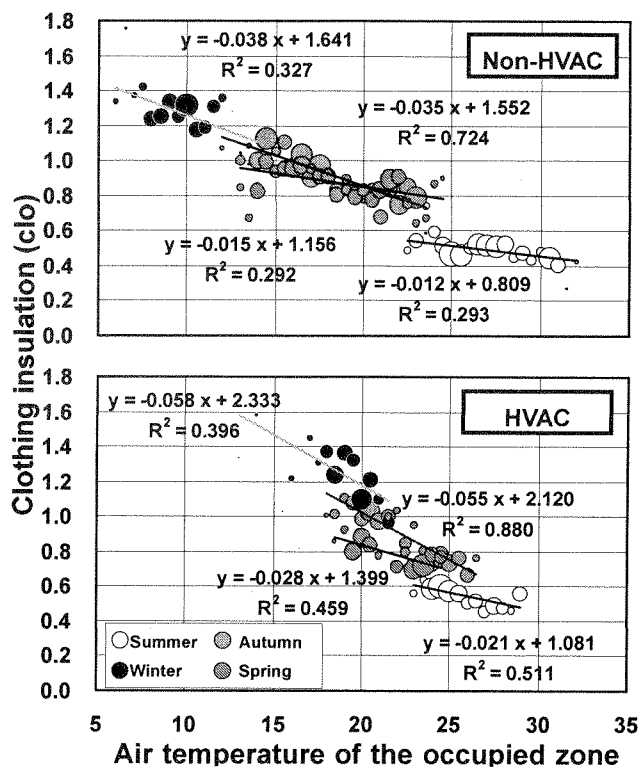


図 6-5 滞在環境空気温度と着衣量

6-3-3 着衣量の調節

着衣量の調節は人体の熱平衡を保つ上で、日常的かつ容易に行える環境適応手段であり、半屋外環境の滞在者もそれぞれの環境に応じて着衣量を調節していたと考えられる。アンケートのチェックリストにあげられた着衣アイテムに関して ISO 9920 (1995) を参照し、該当する clo 値を決定した。着用していた衣服すべての clo 値の合計をもって回答者の着衣量とした。

滞在者近傍空気温度を 0.5℃刻みに区分し、その区分に該当する平均着衣量を求めた。季節ごとにプロットした結果を図 6-5 に示す。プロットの大きさはデータ数を示している。すべての季節で空気温度と着衣量には有意な ($p < 0.01$) 線形の相関

が見られた。同じ季節で空調空間と非空調空間を比較すると、着衣量分布範囲はほぼ同様であるが、空調空間では空気温度がある範囲に制御されていたために、着衣量の変化量（回帰直線の傾き）が大きくなっていた。各季節を比較すると、春季と夏季、秋季と冬季で回帰直線の傾きがほぼ同程度であり、後者の方が着衣の変化量が大きかった。秋・冬季は空気温度が低下していく季節でもあり滞在者が寒さに敏感であったことが要因として考えられる。また、秋・冬季は、重ね着など着衣の組み合わせが多様で着衣の調節が容易だったことも考えられる。春・夏季はこれと逆に、着衣の組み合わせが単純であるために調節に限界があったものと推測される。各季節の回帰直線は同じ直線上には並ばず、同じ空気温度であっても季節によって着衣量の分布範囲が異なっていたが、これは気候の変化に伴って、冬服と夏服を入れ替えた事(衣替え)に起因するものと考えられる。この衣替えも、一種の環境適応行動と考えられる。

滞在者近傍空気温度に対する着衣量の変化は、比較的短時間での調節を表していると言えるが、より長い期間での着衣量調節を考察するため、年間を通じての外気温度と着衣量の日平均値の関係を図6-6に示した。図6-5と同様に、各プロットの大きさはアンケート回答数に比例している。外気温には東京管区気象台が発表する日平均値を使用した。通年の傾向は空調・非空調空間ともにほぼ一致することがわかった。回帰直線の傾きより、5℃の日平均外気温度の低下が、約0.2cloの日平均着衣量の増加に相当していた。外気温が等しい場合、空調の有無に関わらず、半屋外空間の滞在者の日平均着衣量は同程度になると言える。着衣量の調節に最も影響を与える要素は外気温であるということがHumphreys et al. (1977)により指摘されているが、矛盾しない結果である。特に本調査の対象となった半屋外環境の場合、滞在が短時間であることが

多いため、滞在環境に合わせたこまめな着衣調節が行われなかったと考えられる。

6-3-4 温冷感申告

解析に当たり、測定した物理環境とアンケート結果からASHRAE 温熱環境指標計算ツール、WinComf (Fountain et al., 1995) に準拠してPMV、SET*、ET*、作用温度を算出した。調査地Pに設置されていた布製ソファは着衣量として無視できないと判断したため、0.15clo 加算した上で快適性指標計算を行った。その他の堅い材質のベンチについては、座位姿勢に伴う着衣量減少とベンチによる付加的な着衣量増加が相殺されると仮定し、着衣量の加算は行わなかった (McCullough et al., 1994)。また、アンケート回答時の滞在者代謝量は主に歩行から椅座位安静に移行後、数分間が経過した状態であった。代謝量の非定常過程に関する研究例はまだ少ないため、本報では滞在者の代謝量は全員に対して1.1met を仮定した。各指標と温冷感の相関を表6-3に示す。今回測定した環境要素や温冷感指標の中で、滞在者の温冷感申告値と最も高い相関が得られたのはSET*であった。deDear et al. (1998)のオフィス実測調査では室内作用温度と温冷感申告値との相関が最も高かったとしているが、本研究で対象とした半屋外環境では室内よりも気流や日射の影響が大きかったため、単純な指標よりも要素の複雑さを考慮できるSET*の相関が高かったと考えられる。

各滞在者について求めたSET*を1℃刻みに丸めた後、各SET*値に該当する滞在者の平均温冷感申告値を導いた。重み付け直線回帰により温冷感申告値0に相当するSET*を中立SET*、 $Tn^* [^{\circ}C]$ とした。季節ごとの代表値と共に、回帰の結果を表6-4に示す。非空調空間の Tn^* は秋季 ($p<0.001$)、冬季 ($p<0.01$)、春季 ($p<0.001$) に空調空間よりも有意に低く、夏季には有意に高い結果となった ($p<0.001$)。空調空間の Tn^* よ

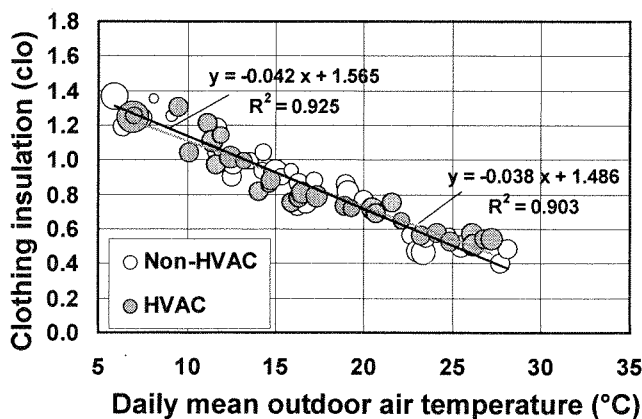


図6-6 日平均外気温と着衣量

表6-3 各種指標と温冷感申告の相関

	Non-HVAC	HVAC
Air temperature of occupied zone (°C)	0.3189 **	0.3795 **
Operative temperature of occupied zone (°C)	0.4864 **	0.3641 **
SET* of occupied zone (°C)	0.5088 **	0.4121 **
ET* of occupied zone (°C)	0.4639 **	0.3554 **
PMV of occupied zone (-)	0.4418 **	0.4182 **
Outdoor Temperature (°C)	0.2146 **	0.1932 **
Outdoor ET* (°C)	0.2129 **	0.1922 **

表6-4 季節ごとの代表値と回帰式

	Season	Mean TSV	Mean SET*	$Tn^* (^{\circ}C)$	Linear fit equation	r^2
Non-HVAC	Summer	-0.38	24.8	26.9	$TSV = 0.1845 \times SET^* - 4.9615$	0.88
	Autumn	-0.77	19.7	23.4	$TSV = 0.2078 \times SET^* - 4.8663$	0.80
	Winter	-1.34	15	24.9	$TSV = 0.1357 \times SET^* - 3.3848$	0.65
	Spring	-0.87	18.9	23.9	$TSV = 0.1741 \times SET^* - 4.1687$	0.83
HVAC	Summer	0.05	25.7	25.6	$TSV = 0.2527 \times SET^* - 6.4598$	0.81
	Autumn	-0.21	24.4	25.6	$TSV = 0.1789 \times SET^* - 4.5770$	0.89
	Winter	-0.48	23.2	28.4	$TSV = 0.0930 \times SET^* - 2.6434$	0.36
	Spring	-0.41	23.4	26.3	$TSV = 0.1396 \times SET^* - 3.6702$	0.82

りも広い範囲に分布していたと言える。空調空間では冬季をのぞき一年を通じて T_{n*} の変化は小さかったが、非空調空間では季節ごとに異なる結果となった。回帰式の傾きはいずれの空間でも夏季、秋季、春季、冬季の順に急になる傾向が見られ、これは滞在環境の平均 SET^* の高い順と一致していた。

季節ごとの回帰式の決定係数を見ると、空調、非空調空間共に冬季が低かった。着衣は回答者、調査者双方が別途記録したチェックリストを基に推定したが、冬季にコートを着ている場合、調査者が目視により着衣アイテムを記録することが困難になる。また、多様なコート類に限られたチェック項目により正確に記録することは困難であり、着衣量推定時の誤差につながったと推測される。寒冷環境滞在時の貧乏揺すりによる代謝量の増加も考えられるものの、測定事例が無いために SET^* 算出時には考慮されていない。着衣推定誤差と代謝量推定誤差が冬季回帰式の決定係数低下の要因として考えられる。しかし、他の季節に関しては平均温冷感申告値の80%以上が SET^* で説明できることが示された。

季節による温度の好みの違いを反映させた中立温度を算出するのに、適温感申告を基にプロビット分析から求める方法が知られている。本調査結果にも適用を試みたが、夏季調査では「今より暖かい方がよい」と申告した人は614人中22人で、冬季は「今より涼しい方がよい」と申告した人が419人中4人しかいなかった。季節による申告値の偏りが大きかったため、有意な結果は得られなかった。

6-3-5 Adaptive Model との比較

Adaptive Model では、着衣や代謝量の調節に代表される行動的適応や、環境に対する期待感の緩和などの心理的適応 (Brager et al., 1998) を個々のパラメータとしては扱っていない。与えられた状況の中で、環境適応が総合的に駆使されていることを前提とし、作用温度を用いて自然換気オフィスでの中立温度 T_{no} [°C] を導いている。そして、この中立温度を外気温に対してプロットすると線形の相関が見られ、外気温が下がると中立温度も下がることを示している。今回調査対象とした半屋外環境でも同様の傾向が見られるかを確認するため、比較を行った。

各季節・調査地ごとに T_{n*} と同様の手順で SET^* の代わりに作用温度を用いて T_{no} を求め、空調空間、非空調空間で8点ずつの値を得た。各々の実測期間である4日間の平均外気温に対してプロットした結果を de Dear et al. (2001)、Humphreys et al. (1976) の提案する Adaptive Model と共に図6-7に示す。

非空調空間の T_{no} の回帰式は他の Adaptive Model とは異なる傾向が見られたものの、空調空間では de Dear らの結果とほぼ一致していた。これは、空調されたアトリウムと自然換気オフィスの温熱環境が似ているためと考えられ、より環境変化の激しい非空調空間では T_{no} の変動も大きくなったと推測される。外気温が27°Cの時に中立作用温度は32.5°Cと大きな値となるが、日射や気流の大きい屋外に近い環境において、作用温度による中立環境の表現が適切かは検討の必要がある。

6-3-6 快適範囲

ASHRAE 55-92 (1992) では、任意の環境の不満足者率に基づいて快適範囲が推奨されている。不満足者率を測定するのに受容度 (acceptability) 申告が慣例的に用いられており、本調査のアンケート項目にも含まれていたが、いずれの季節、空間でも80%以上の滞在者が温熱環境を「受け入れられる」と回答していた。そこで熱的状態に限らない全般的な快適性について聞いた快適感申告結果を使用し、「どちらでもない」を挟んだ7点スケールの申告を「快適側」「中立」「不快側」の3グループに区分した。「不快側」申告と SET^* を用いて不満足

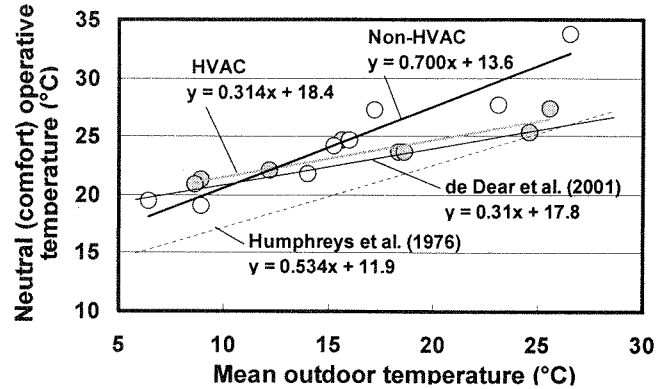


図6-7 Adaptive Model との比較

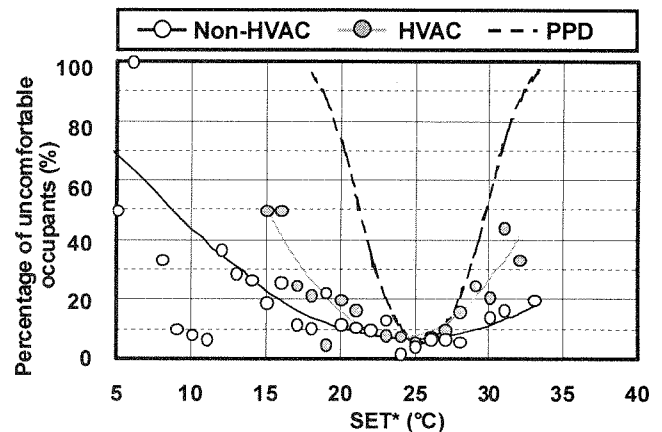


図6-8 不満足者率

者率の算出を試みた。データ数に応じて重み付けを行った回帰と共に結果を図6-8に示す。従来の温熱環境指標の予測値と比較するため、 SET^* の標準条件 ($t_a = t_r$, $v = 0.1 \text{ m/s}$, $rh = 50\%$, 0.6 clo , 1.0 met) をもとに計算した PPD もあわせて記載した。不快曲線の勾配は PPD、空調空間、非空調空間の順に急になっていた。熱的快適性基準の指針となっている20%不満足者率を見ると、PPDの許容範囲が約5°Cに対し、空調空間では10°C、非空調空間では18°Cであった。半屋外環境では、PPDの許容範囲の2~3倍広い範囲で温熱環境が許容されていることがわかった。

6-4. 結論

環境制御レベルの異なる都内4箇所の半屋外空間にて、滞在者の環境適応を考慮した熱的快適性の調査を行った。

結果を以下にまとめる。

- ・滞在者の80%以上が強制されることなく自らの意志で半屋外環境に滞在していた。非空調空間では滞在環境の空気温度が下がると滞在者数・滞在時間共に減少したが、空調空間では温熱環境との相関が見られなかった。
- ・滞在者の着衣量は主に外気温に依存しており、通年の着衣量変化傾向には非空調空間と空調空間の差が見られなかった。
- ・温熱環境指標では、 SET^* が滞在者の温冷感申告値と最も相関が高かった。
- ・空調空間の中立作用温度は外気温と相関が高く、deDear らの Adaptive Model とほぼ一致した。
- ・20%不満足者率を基準としたとき、非空調空間では PPD の約3倍広く、空調空間でも約2倍広い範囲で温熱環境を許容していた。

【参考文献】

- ASHRAE 1992: ANSI/ASHRAE Standard 55-1992, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating, and Air-conditioning Engineers, Inc.,
- Brager, G.S., de Dear, R.J. 1998: Thermal adaptation in the built environment - a literature review, Energy and Buildings, Volume 27, Issue 1, Pages 83-96
- Breckenridge, J.R. and Goldman, R.F. 1972: Human solar heat load, Proceedings of ASHRAE semiannual meeting, New Orleans, pp.110-119
- de Dear, R.J., Brager, G.S. 1998: Developing an adaptive model of thermal comfort and preference, ASHRAE Trans. Vol.104(1A) pp.145-167
- de Dear, R.J., Brager, G.S. 2001: The adaptive model of thermal comfort and energy conservation in the built environment, International Journal of Biometeorology, Vol.45, pp.100-108
- Fountain M.E, Huizenga, C. 1995: Using the ASHRAE thermal comfort model, An ASHRAE Special Publication
- Humphreys, M.A. 1976. Comfortable Indoor Temperatures Related to the Outdoor Air Temperature, Building Research and Practice(CIB)PD117/76
- Humphreys, M.A., 1977: Clothing and the outdoor microclimate in summer, Building and Environment, Vol.12, pp.137-142
- Humphreys, M.A., Nicol, J.F. 1998: Understanding the adaptive approach to thermal comfort, ASHRAE Trans., Vol.104, pp.991-1004
- ISO. 1995: ISO 9920, Ergonomics of the thermal environment - Estimation of the thermal insulation and evaporative resistance of a clothed ensemble, Geneva: International Organization for Standardization
- McCullough, E.A., Olesen, B.W., Hong, S. 1994: Thermal insulation provided by chairs, ASHRAE Trans., Vol.100(1), pp.795-802
- Olesen, B.W., Rosendahl, J. et al. 1989: Methods for measuring and evaluating the thermal radiation in a room, ASHRAE Transactions, Vol.95(1), pp.1028-1044
- 宇田川光弘, 木村建一. 1978: 水平面全天日射量観測値よりの直達日射量の推定, 日本建築学会論文報告集、第267号、pp.83-90

【謝辞】

実測調査を行うにあたり、ご尽力を頂きました関係者各位に心より感謝致します。

第 7 章

人体に対する放射熱授受を表現する
全身の重み係数の数値計算による算出

第7章 人体に対する放射熱授受を表現する 全身の重み係数の数値計算による算出 SURFACE WEIGHTING FACTORS OF THE WHOLE HUMAN BODY FOR EXPRESSING THE THERMAL RADIATION FIELD BY A NUMERICAL CALCULATION

Surface weighting factors of the whole human body for both standing and seated postures are calculated based on the numerical calculation of angle factors for the simple prediction of the thermal radiation field. To verify the validity of these factors, they are compared with previous results by Nakamura or Olesen. As a result, surface weighting factors are different from previous results which are always constant independent of the scale of indoor spaces. Especially, surface weighting factor to the under surface for a standing posture is approximately 4 times larger than that of Nakamura in the small indoor spaces. The position of human body and the scale of indoor spaces have influence on surface weighting factors. In addition, appropriate surface weighting factors are proposed corresponding to the scale of indoor spaces, which enables to the accurate prediction of the thermal radiation field.

Keywords: Thermal radiation, Surface weighting factor, Angle factor, Numerical calculation, Thermal comfort
放射, 重み係数, 形態係数, 数値計算, 熱的快適性

7-1. はじめに

人体全身に対する周囲壁面からの放射熱授受を評価するためには、一般に人体全身から周囲壁面に対する形態係数を求める必要がある。これは放射熱授受を精度良く評価するが、複雑な人体形状及び周囲空間との間の形態係数を求めるため、移動などにより人体の姿勢及び、人体の位置が変わることにより周囲の空間形状が相対的に変わる場合には実用的な手法でないと考えられる。

中村¹⁾、Olesen ら²⁾は、人体全身に対する周囲壁面からの放射熱授受を簡便に評価する方法として、体中心における微小立方体の各面に対する諸量を重み付けする方法を提案している。両者によって提案されている重み係数は、空間の大きさ、人体位置によらず一定とされている。その後中村ら³⁾は、人体形状に対応した微小立方体から見る等価形態係数を実測により算出し、人体と壁面との距離が短くなると方向による等価形態係数の値の違いが大きくなることを示している。大熊ら⁴⁾は、人体形状を考慮した部位別の作用温度を算出するため、サーマルマネキンの椅座位を対象として、1つの空間形状に対する全身及び13部位に分割された各部位別の重み係数を算出している。

本報では、立位、椅座位を対象として、数値計算⁵⁾により算出された人体全身から各壁面に対する形態係数を基に重み係数を算出し、中村¹⁾、Olesen ら²⁾の重み係数と比較した。さらに、人体に対する空間の大きさ、人体の位置が重み係数に与える影響を検討し、重み係数の最適化を検討した。本手法により様々な人体形状に対する重み係数の算出が可能となる。

7-2. 重み係数の算出方法

中村の算出手順を参考とし、全て数値計算により重み係数を算出した。まず人体及び解析空間を形状モデルで表し、人体全身から各壁面

に対する形態係数を別報⁶⁾に示す数値計算手法により算出する。次に体中心に微小立方体を設定し、微小立方体の各面から解析空間の各壁面に対する形態係数をそれぞれ算出する。最後に人体全身から各壁面に対する形態係数を微小立方体各面から壁面に対する形態係数及び重み係数により表し、これを解くことにより重み係数を算出した。計算式を APPENDIX に示す。

7-3. 大空間から住空間における重み係数の算出

7-3-1 人体形状

別報⁶⁾で検討した立位、椅座位の人体形状モデルを解析に用いた。人体形状モデルを図7-1に示す。人体の表面形状をすべて微小四角形で表し、これを最小計算単位とする。本モデルでは立位、椅座位ともに4396の微小四角形に分割した⁷⁾。微小立方体を設定するための体中心は、立位1.0m、椅座位0.6mとした⁸⁾。

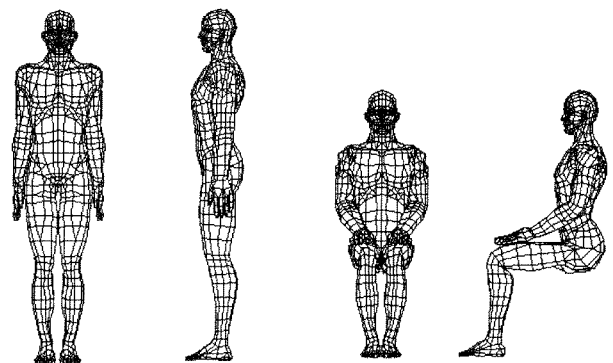


図7-1 解析に用いた人体形状モデル（立位、椅座位）

7-3-2 解析空間

空間の大きさが重み係数に与える影響を検討するため、人体を床面中央に設定した4種類の大きさの異なる空間を対象とした。ケース1は大規模アトリウム、ケース2は中規模アトリウム、ケース3は小規模アトリウム、ケース4は住宅の一室を想定した。またケース4を対象として、各鉛直壁面から0.6m離れた位置に人体を設定し、人体の位置が重み係数に与える影響を検討した。空間の大きさ、人体の設定位置などを表7-1に示す。立位を対象とした解析空間と人体の位置関係の例を図7-2に示す。

7-3-3 算出結果

(1) 人体全身から解析空間各壁面に対する形態係数

立位・椅座位の人体全身から解析空間の各壁面に対し、数値計算により得られた形態係数を図7-3に示す。人体に対し空間が相対的に大きいケース1～3では、立位・椅座位ともに床面に対する形態係数が最も大きく、天井面に対する形態係数が最も小さく算出されている。また椅座位では、正面に対する形態係数が、背面より30%程度大きく算出されている。空間が相対的に小さいケース4-1になると、立位・椅座位ともに床に対する形態係数が相対的に小さく天井が大きく算出される。ケース4-1～4-4を見ると立位・椅座位ともに、人体の位置に応じて各壁面に対する形態係数が大きく変化している。床面では椅座位の形態係数が、立位より30%程度大きく算出されている。

(2) 重み係数

各解析空間に対して得られた立位・椅座位の重み係数を図7-4に示す^{注2)注3)}。中村¹⁾、Olesen²⁾らが提案した重み係数も図7-4に合わせて示す^{注4)}。中村、Olesenらは、正面・背面、右・左壁面をそれぞれ区別せずに平均した重み係数も提案しているが、本報では正面・背面、右・左壁面をそれぞれ区別した重み係数で検討した^{注5)}。

立位では空間の大きさ及び人体位置によらず、正面・背面の重み係数が大きく、床・天井の重み係数が小さく算出されている。人体に対し空間が相対的に大きいケース1～3では、ケース間で重み係数にほとんど差がないが、空間が相対的に小さいケース4-1を見ると、正面・背面、右・左壁面の重み係数はケース1～3に比べ10%程度小さく、天井は約1.5倍、床は約2倍大きくなった。人体位置を変えたケース4-1～4-4を見ると、鉛直壁面の重み係数がケース4-1に対し±10%程度変化し、形態係数の大きい面に対する重み係数が小さくなる傾向が見られる。さらに床の重み係数は天井より約60%大きく算出されており、床と天井の重み係数は異なっている。

椅座位では正面の重み係数が大きく、床・天井の重み係数が小さく算出されている。正面の重み係数が背面より約50%大きく、正面と背面の重み係数が明らかに異なる。また、天井の重み係数も床より大きく算出されており、姿勢の影響が見られる。人体に対し空間が相対的に大きいケース1～3では、立位と同様にケース間で重み係数にほとんど差が見られないが、空間が相対的に小さいケース4-1を見ると、立位程大きくないが重み係数に変化が見られる。また立位と同様に人体位置に応じて重み係数に変化している様子が見られる。

立位で中村、Olesenらの重み係数と比較する。人体に対し空間が相対的に大きいケース1～3では本報で得られた重み係数は中村の結果に対応し、空間が相対的に小さいケース4-1～4-4ではOlesenの結果に近づく傾向が見られた。本報の床の重み係数は最大で中村より約4倍、Olesenらより約1.6倍大きい結果となった^{注6)}。

椅座位で中村、Olesenらの重み係数と比較する。右・左壁面では、中村の結果にほとんど一致したが、正面・背面、床・天井をそれぞれ同じ重み係数とする既往の結果とは大きく異なる。ただし、正面・背面、床・天井に関し、本報で得られた重み係数の平均値はそれぞれ中村の結果に近い^{注6)}。中村、Olesenらの重み係数との差異は、用いた形態係数の差異に起因する。

(3) 最適化された重み係数の提案

中村、Olesenらの重み係数は正面・背面、右・左壁面、床・天井で

表7-1 解析対象空間と人体位置

	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4-1	ケース4-2	ケース4-3	ケース4-4
空間の大きさ(m)	28×28×28	14×14×14	7×7×7	3.3×3.3×2.5	3.3×3.3×2.5	3.3×3.3×2.5	3.3×3.3×2.5
人体位置	床面中央	床面中央	床面中央	床面中央	正面0.6m手前	背面0.6m手前	左壁面0.6m手前

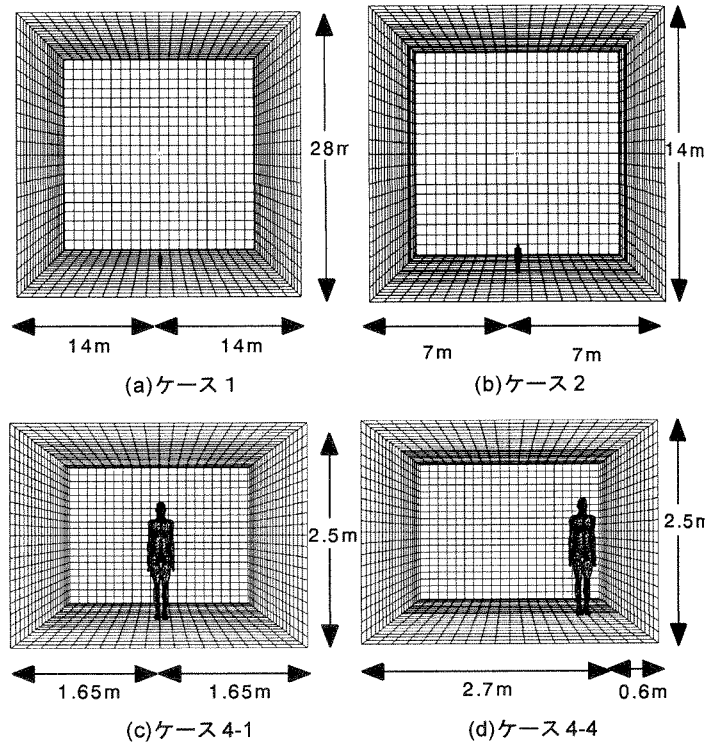


図7-2 解析空間と人体の位置関係の例（立位）

それぞれ一定とされているが、図7-4に示すように重み係数は空間の大きさ、人体位置により一般に異なる。ここでは空間の大きさに応じ重み係数の最適化を検討した。重み係数は、人体に対し空間が相対的に大きいケース1～3、空間が相対的に小さいケース4-1～4-4、全空間を対象として3種類算出した。重み係数の最適化は、対象とする全解析空間の全ての面で得られるAPPENDIX(1)式の残差 $(\sum_{i=1}^6 F_{i-w} \alpha_i - F_{p-w})$ の二乗和が最小となるように最小二乗法で検討した。得られた重み係数を表7-2に示す。また平均放射温度に対する誤差及び、面放射温度に対する最大誤差を表7-3に示す^{注7)注8)}。重み係数を全空間で最適化した場合、平均放射温度の予測精度に関し最大で立位4%、椅座位3%、面放射温度の予測精度に関し立位、椅座位ともに最大11%の差が生じている。空間の大きさにより重み係数を使い分けると、人体に対し空間が相対的に大きいケース1～3の場合、平均放射温度の予測精度に関し最大で立位・椅座位ともに1%、面放射温度の予測精度に関し立位で3%、椅座位で2%となり、人体に対し空間が相対的に小さいケース4-1～4-4を含め、平均放射温度、面放射温度ともに予測精度が向上している。このように、空間の大きさに応じ重み係数を使い分けることにより、平均放射温度、面放射温度ともに予測精度が向上し、放射熱授受を精度良く評価することが可能となる。

本報では全身の重み係数を検討したが、同じ手法により、各部位別の重み係数の検討、さらに形状をモデル化することが可能であれば、人体以外に対する応用も可能となる。

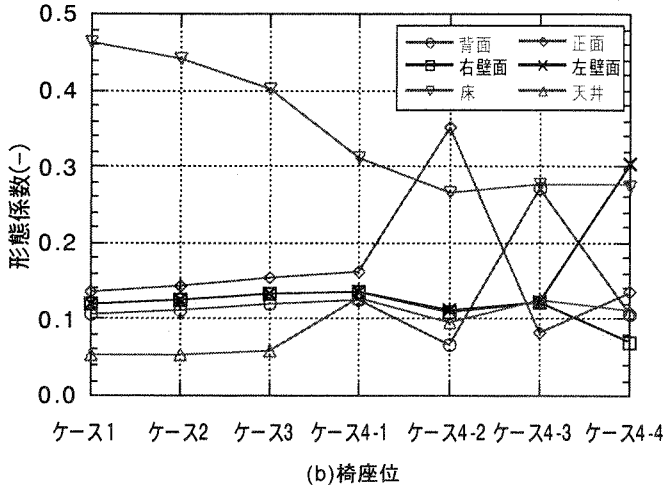
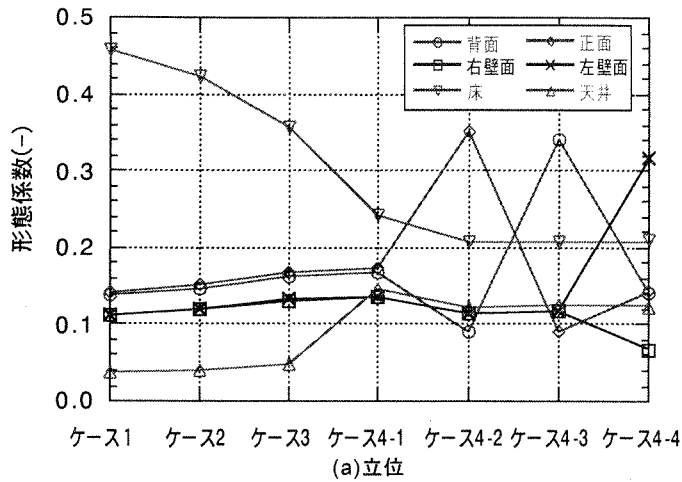


図 7-3 人体全身から解析空間各壁面に対する形態係数

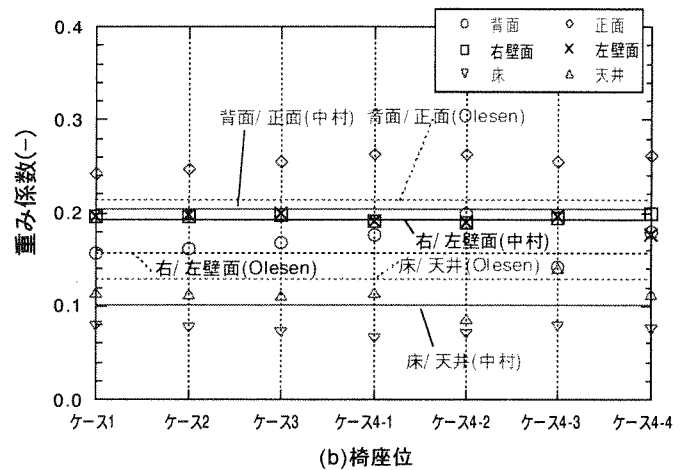
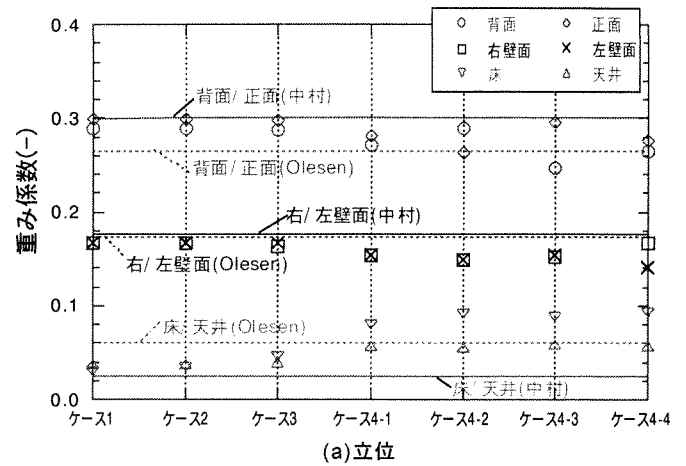


図 7-4 解析空間に対する重み係数

表 7-2 解析空間に対する最適化された重み係数

	ケース1～3		ケース4-1～ケース4-4		全ケース(1,2,3,4-1～4-4)	
	立位	椅座位	立位	椅座位	立位	椅座位
背面	0.286	0.164	0.258	0.164	0.264	0.163
右壁面	0.165	0.198	0.155	0.192	0.155	0.193
正面	0.296	0.249	0.270	0.254	0.276	0.253
左壁面	0.165	0.198	0.155	0.192	0.155	0.193
床	0.042	0.076	0.097	0.080	0.080	0.080
天井	0.045	0.114	0.065	0.118	0.068	0.117

表 7-3 平均放射温度に対する誤差と面放射温度に対する最大誤差

(a) ケース1～3					(b) ケース4-1～4-4 (単位:%)					
	平均放射温度			面放射温度最大		平均放射温度				面放射温度最大
	ケース1	ケース2	ケース3			ケース4-1	ケース4-2	ケース4-3	ケース4-4	
立位	0.5	0.9	0.9	2.9	立位	2.3	2.8	2.9	1.9	9.2
椅座位	0.1	0.8	0.9	1.8	椅座位	1.9	2.8	2.7	1.6	10.6

(c) 全ケース(ケース1,2,3,4-1～4-4)								
	平均放射温度							面放射温度最大
	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4-1	ケース4-2	ケース4-3	ケース4-4	
立位	3.7	3.6	3.4	1.8	3.7	3.6	2.7	10.7
椅座位	0.6	1.2	0.9	1.8	2.6	2.7	2.0	10.9

7-4. まとめ

- ①人体に対する周囲空間からの放射熱授受を簡便に評価する人体全身の重み係数を数値計算により算出した。
- ②空間の大きさが重み係数に与える影響を検討した。人体に対し空間が相対的に大きい場合、空間の大きさが重み係数に与える影響は小さい。空間が相対的に小さくなると重み係数に差が見られる。特に立位の天井、床に対し、それぞれ約1.5倍、約2倍の差が見られた。
- ③人体の位置が重み係数に与える影響を検討した。人体の位置に応じて重み係数は変化する。形態係数の大きい面に対する重み係数が小さくなる傾向が見られた。
- ④中村、Olesenらの提案する重み係数と比較した。本報で得られた重み係数は、立位で人体に対し空間が相対的に大きい場合を除き、正面・背面、右・左壁面、床・天井でそれぞれ一定とする既往の結果と

- 異なった。特に立位で人体に対し空間が相対的に小さい場合、床の重み係数は最大で中村より約4倍、Olesenらより約1.6倍大きくなった。これは用いた形態係数の差異に起因する。
- ⑤空間の大きさに応じ最適化された重み係数を算出した。重み係数を空間の大きさにより使い分けることにより、平均放射温度、面放射温度ともに予測精度が向上し、放射熱授受を精度良く評価することが可能となる。
 - ⑥本報では全身の重み係数を検討したが、同じ手法により、各部位別の重み係数の検討、さらに形状をモデル化することが可能であれば、人体以外に対する応用も可能となる。

【注釈】

- 1)身長は1.75m、体表面積は1.72 m²、有効放射面積は立位1.28 m²、椅座位1.18 m²である⁵⁾⁶⁾。
- 2)人体形状は着衣形状を無視した裸体としている。人体に対する放射熱授受の着衣の影響の評価方法として、例えば、重み係数を用いて裸体人体に入射する放射熱伝達量を算出し、着衣面積比で評価する方法が考えられる。
- 3)椅座位姿勢の場合、椅子の形状を無視している。人体に対する放射熱授受の椅子の影響の評価方法として、例えば、椅子も着衣の一部と考え、重み係数を用いて人体に入射する放射熱伝達量を算出し、着衣と同様に着衣面積比及び椅子の熱抵抗を考慮した着衣熱抵抗で評価する方法が考えられる。着衣及び椅座位姿勢における椅子が重み係数に与える影響は、今後の検討課題である。
- 4)中村、Olesen らは、人体全身から各壁面に対する形態係数として、Fanger による測定値(壁面の縦横各長さを人体壁面間の距離で無次元化)⁷⁾を用いている。人体と壁面の位置関係、空間の大きさは、おおよその重み係数を知ることを目的としているため明確に設定されていない。
- 5)Olesen らが提案した重み係数の総和は1となっていない。この意味については導出過程及びその解釈が明確に記述されていないため不明であるが、本報では正規化した重み係数で検討を進めた。
- 6)Fanger の床に対する形態係数は、別報で得た形態係数と大きな差が見られた⁹⁾。ただし、椅座位では前床、後床に対する形態係数の和はほとんど対応したため、重み係数に大きな差が生じなかったと考えられる。
- 7)平均放射温度に対する誤差は、各面における(1)式の残差を各面に対する全身の形態係数で重み付けした平均値、面放射温度に対する最大誤差は、対象空間における(1)式の残差の最大値とした。それぞれ平均放射温度、面放射温度の予測精度に与える影響を評価していると考えられる。
- 8)正面・背面、右・左壁面をそれぞれ区別した中村の重み係数では、平均放射温度の予測精度に関し最大で立位8%、椅座位10%、面放射温度の予測精度に関し最大で立位15%、椅座位18%であった。

【APPENDIX(重み係数の算出式)】

人体全身から壁面に対する形態係数 F_{p-w} は、体中心に設定された微小立方体の表面 i から壁面に対する形態係数 F_{i-w} 及び微小立方体の表面 i での重み係数 α_i を用いて(1)式で算出される。

$$\sum_{i=1}^6 F_{i-w} \alpha_i = F_{p-w} \quad (1)$$

これを解析対象空間の各壁面について構成することにより重み係数を算出する。

【参考文献】

- 1)中村泰人：建築都市空間内の人体に対する熱放射場の表現方法について、日本建築学会計画系論文報告集、No.376、pp.29-35、1987年6月
- 2)Olesen B.W., Rosendahl J., Kalisperis L.N., Summers L.H. and Steinman M. : Methods for Measuring and Evaluating the Thermal Radiation in a Room, ASHRAE Transactions, Vol.95- 1 , pp.1028-1044, 1989.
- 3)中村泰人、武田諭：人体形状に対応した微小立方体から見る等価形態係数(その1～その2)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.989-992、1992.
- 4)大熊涼子、石野久彌：人体形状を考慮した部位別作用温度に関する研究(第5報)、空調調和衛生工学会学術講演会講演論文集、pp.773-776、2001.
- 5)尾関義一、小西正哲、成田千恵、田辺新一：数値計算による矩形面と全身との形態係数の評価、日本建築学会計画系論文集、No.522、pp.15-22、1999年8月
- 6)尾関義一、小西正哲、成田千恵、田辺新一：数値計算による人体の有効放射面積の評価、日本建築学会計画系論文集、No.525、pp.45-51、1999年11月.
- 7)Fanger P.O., Angelius O. and Jensen P.K. : Radiation Data for the Human Body, ASHRAE Transactions, Vol.76- II , pp.338-373, 1970.

第 8 章

日射環境下における サーマルマネキン周りの対流熱伝達率の評価

第8章 日射環境下におけるサーマルマネキン周りの対流熱伝達率の評価

CONVECTIVE HEAT TRANSFER COEFFICIENT AT SKIN SURFACE OF THERMAL MANIKIN UNDER SOLAR RADIATION

A calculation method combined with measurements for predicting convective heat transfer coefficient at skin surface of thermal manikin under solar radiation is proposed. Present method is based on a calculation of steady state heat balance on skin surface of thermal manikin by the numerical simulation of solar radiation and thermal radiation combined with measurements of indoor climate and thermal manikin. Convective heat transfer coefficient at skin surface of thermal manikin is predicted in air-cooling conditions including the insulation effect of solar radiation on thermal manikin in an experimental atrium. As results, 1) it is considered convective heat transfer coefficient at each skin surface is affected by the velocity distribution of the thermal manikin. 2) No significant difference is found in convective heat transfer coefficient at each skin surface whether direct solar radiation reaches the thermal manikin or not. 3) Mean air velocity derived by convective heat transfer coefficient of whole body almost corresponds weighted mean measured velocity, and ratio of mean air velocity also corresponds to that of the supply air velocity in each case.

Keywords : Thermal manikin, Convective heat transfer coefficient, Solar radiation, Numerical simulation of solar radiation and thermal radiation, Experimental atrium, Thermal comfort

サーマルマネキン, 対流熱伝達率, 日射, 日射・放射の数値計算, 実験用アトリウム, 熱的快適性

8-1. はじめに

別報¹⁾では、体温調節65MN(Multi Nodes)モデルとCFD(Computational Fluid Dynamics)・放射との総合連成解析手法を構築し、建築や車室内環境下での人体温冷感解析の可能性を検討した。本研究では、この解析手法の妥当性を検証すること、ガラスを介した日射環境下の人体の熱的快適性を明らかにすることを主目的とし、種々の環境条件の測定が可能である実験用アトリウム²⁾を用いた被験者実験に着手している。第一段階として、サーマルマネキンを用いて発熱量、皮膚温分布の測定を被験者実験と併せて実施し、数値的に表わしたサーマルマネキンの形状モデル、日射・長波長放射数値計算を組み合わせ、定常熱収支を仮定することにより、日射環境下におけるサーマルマネキン周りの対流熱伝達率を算出した。

本報では、日射環境下におけるサーマルマネキン周りの対流熱伝達率を算出する方法を示す。次に、実験の概要及び、日射、室内環境の測定値を示し、測定環境の定常性を評価するために熱収支を分析する。さらに本手法を用いて、サーマルマネキン周りの対流熱伝達率を算出し、冷房吹出条件の差異及び日射がサーマルマネキン周りの対流熱伝達率に与える影響を検討する。

8-2. サーマルマネキン周りの対流熱伝達率算出に関する既往の研究

市原³⁾は、均一環境を対象として立位・椅座位姿勢、裸体時のサーマルマネキン周りの対流熱伝達率を算出し、各部位毎に風速に応じた実験式を提案している。de Dear⁴⁾は、立位・椅座位姿勢に対し、サーマルマネキンに対する風向及び風速に応じた部位別対流熱伝達率を算出している。片岡⁵⁾は、車室内の不均一環境を対象とし、椅座位姿勢、着衣時のサーマルマネキンの部位別対流熱伝達率を算出して

いる。桑原⁶⁾は、立位姿勢に対し中風速域で適用できるサーマルマネキン全身の対流熱伝達率の実験式を提案している。既往の研究における対流熱伝達率の算出では、周囲環境から人体に対する熱的影響を正確に評価することが可能、あるいは同一環境下で複数の条件に対する計測を可能とすることを前提としているため、いずれも人工気象室を対象としている。

鄭⁷⁾は、屋外環境において人体全身と周囲建物の各壁面との間の形態係数を写真法により算出し、熱放射を検討しているが、周囲建物あるいは建物構造部材による日射の遮蔽などが人体各部位に与える影響を詳細に評価することが難しい。村上⁸⁾は、CFDを用いて、サーマルマネキンの制御式を組み込み全熱放熱特性を解析することにより、対流熱伝達率を算出しているが、腕などの形状を省略した人体形状モデルを用いている。

8-3. サーマルマネキン周りの対流熱伝達率の算出方法

日射・長波長放射が混在する環境下で、人体各部位の対流熱伝達率を算出するためには、各部位における日射・長波長放射熱量を精度良く求める必要がある。そのために複雑な形状に対応する精度の良い日射・長波長放射計算手法、人体形状モデルが必要となる。本報では、各部位毎に測定されたサーマルマネキンの皮膚温、投入熱量及び壁表面温度、室内空気温度と数値的に表わしたサーマルマネキンの形状モデル、日射・長波長放射数値計算⁹⁾¹⁰⁾を組み合わせることによりサーマルマネキン周りの対流熱伝達率を算出した。

定常状態裸体でのサーマルマネキン各部位における皮膚表面での熱収支は、サーマルマネキン投入熱量 Q_{ti} 、室内空気から皮膚表面に伝

達される対流熱伝達量 Q_{ci} 、室内壁表面から皮膚表面に伝達されそこで吸収される放射吸収熱量 $Q_{r(net)}$ 、皮膚表面での日射吸収熱量 Q_{si} を用いて(1)式で表すことができる^(注1)。

$$Q_{ti} + Q_{ci} + Q_{r(net)} + Q_{si} = 0 \quad \cdots(1)$$

サーマルマネキン投入熱量 Q_{ti} は測定されるため既知であり、皮膚表面での放射吸収熱量 $Q_{r(net)}$ 、日射吸収熱量 Q_{si} は後述する日射量測定値(水平面全天日射量)周囲壁面温度分布により、算出することができる。対流熱伝達量 Q_{ci} は、サーマルマネキン各部位で測定された皮膚温 T_{ski} 、測定された代表空気温度 T_{in_i} 、未知の対流熱伝達率 α_{ci} により(2)式で評価できる。

$$Q_{ci} = \alpha_{ci} (T_{in_i} - T_{ski}) \quad \cdots(2)$$

(1)式に示す熱収支式をサーマルマネキンを表わす各表面要素で解くことにより、対流熱伝達率を(3)式で算出することができる^(注2)。

$$\alpha_{ci} = (Q_{ti} + Q_{r(net)} + Q_{si}) / (T_{ski} - T_{in_i}) \quad \cdots(3)$$

以下、日射吸収熱量、放射吸収熱量の算出手法の詳細を示す。

8-3-1 日射吸収熱量

別報²⁾に示す手法を用い、測定された水平面全天日射量から直散分離により、サーマルマネキン表面に到達する直達日射、天空日射、完全拡散反射を仮定した地面反射日射及び内部拡散反射日射量を算出する。サーマルマネキン皮膚表面での日射吸収率を乗じ皮膚表面での日射吸収熱量 Q_{si} を算出する。

8-3-2 放射吸収熱量

別報¹⁰⁾に示すラジオシティー法により、室内壁表面から皮膚表面に伝達され、そこで吸収される放射熱量 $Q_{r(net)}$ を算出する。すなわち、サーマルマネキンと壁表面間の形態係数及び測定された皮膚温、壁表面温度、放射率を与条件とし、サーマルマネキン表面での放射吸収熱量を算出する。なお、放射吸収熱量には、サーマルマネキン表面間の放射熱伝達も考慮される。

8-4. 実験用アトリウムにおける計測

8-4-1 実験用アトリウムの概要

実験用アトリウム²⁾は、神奈川県横浜市に南向きに建設され、その大きさは図8-1に示すように間口7.0m×奥行き4.3m×高さ4.5mであり、屋根面と東西南面の4面がガラスで覆われている。北壁、床は、押出ポリスチレンフォーム板により断熱されている。アトリウム周囲は南から西方向にかけて障害物はなく、日射を遮るものは無い。

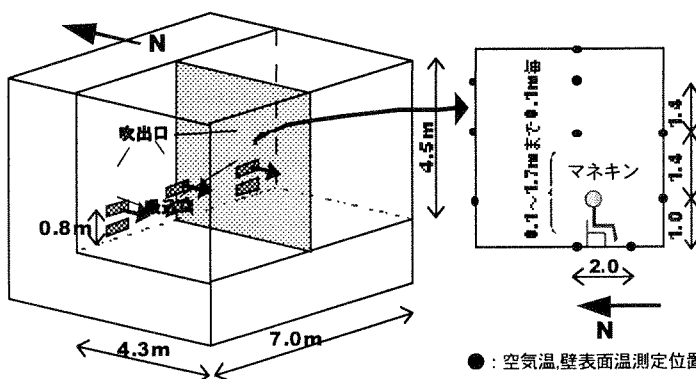


図8-1 実験用アトリウムの概要と温度測定位置(代表点)

各壁面材料及びサーマルマネキンの光学特性を表8-1に示す。

8-4-2 温熱環境の計測

(1) 測定方法、測定条件

図8-1に示すような3箇所の空調吹出口を用いた冷房条件下で、温熱環境及びサーマルマネキンの測定を行った。測定は表8-2に示す2001年4/11、4/13、4/23の3日を対象とし、14:00～15:00の間に実施した。日射がサーマルマネキン周りの対流熱伝達率に与える影響を調べるために、測定の前半(14:00～14:30)では南ガラス面に遮光暗幕を設置し、後半(14:30～15:00)では遮光暗幕を開けて日射が南ガラス面を通してサーマルマネキンに到達するようにした。冷房条件は表8-3に示すように、吹出速度を約4.2m/sとしたケース1、吹出速度を約3.5m/sとしたケース2及び吹出速度を約7m/sとしたケース3の3ケースを対象とし、吹出風速の差異がサーマルマネキン周りの対流熱伝達率に与える影響を検討した^(注3)。

気象条件として水平面全天日射量、外気温、隣室温度を測定した。室内温熱環境に関し、室内空気温(36点)、壁表面温度(12点)、空調吹出温度(3点)、室内気流などを測定した。空気温度、表面温度の測定では線径0.2mmのT型熱電対(接点ハンダ付け)を用いた。各測定項目は10秒毎に測定され1分間の平均値として解析に用いた。図8-1に温度測定位置の代表点を併せて示す。

(2) 測定結果

図8-2-1～図8-2-4に実験開始前から実験終了までの13:00～15:00における温熱環境測定結果を示す。ケース1は薄曇りのため気象的な日射の変化が大きく、ケース3は14:45頃から同様な日射の変化が見られるが、ケース2は快晴であり日射量は時間に対し安定的に変化している。14:00～14:30では日射遮光有り、14:30～15:00では日射遮光無しの条件であるが、その前後で空気温の顕著な変化は見られない。床平均温度が僅かに上昇している。また別報¹¹⁾の測定結果同様、今回の空調条件でも明確な温度成層が見られる。今回は室全体の詳細な気流分布の測定は実施していないが、別報¹¹⁾の3次元風向風速計の測定結果より、吹出口より高い位置では比較的静穏な環境と思われる。

表8-1 各壁面の光学特性

	南ガラス	東西、天井ガラス	北壁、床、暗幕、鉄骨	サーマルマネキン
日射透過率(-)	0.190	0.154	0.0	0.0
日射吸収率(-)	0.445	0.679	0.9	0.7
放射率(-)	0.3	0.5	0.9	0.9

* ガラス物性は垂直入射特性(カタログ値及び計算値)
 * 北壁(黒色塗装合板)、床(黒色塗装合板)の物性は分光光度計による測定値
 * 南ガラスは熱線反射ガラス(旭硝子 KFC 12mm)に熱線制御フィルムを貼ったもの。
 その他のガラスは高性能熱線反射ガラス(旭硝子 SS20 12mm)
 * 放射率は長波長放射に関する特性値

表8-2 測定ケース

	ケース1, 遮光あり	ケース1, 遮光なし	ケース2, 遮光あり	ケース2, 遮光なし	ケース3, 遮光あり	ケース3, 遮光なし
日時	2001 4/11 14:00~14:30	2001 4/11 14:30~15:00	2001 4/13 14:00~14:30	2001 4/13 14:30~15:00	2001 4/23 14:00~14:30	2001 4/23 14:30~15:00
暗幕の開閉	閉	開	閉	開	閉	開

表8-3 測定条件(実測値)

	ケース1, 遮光あり	ケース1, 遮光なし	ケース2, 遮光あり	ケース2, 遮光なし	ケース3, 遮光あり	ケース3, 遮光なし
空調吹出速度	4.2	4.2	3.5	3.5	7.0	7.0
空調吹出温度	15.3	15.6	14.2	14.3	21.5	21.7
外気温度	27.2	27.0	24.5	23.9	23.4	23.3

表中の数値は各測定時間における実測値の平均値、単位：速度(m/s)、温度(℃)

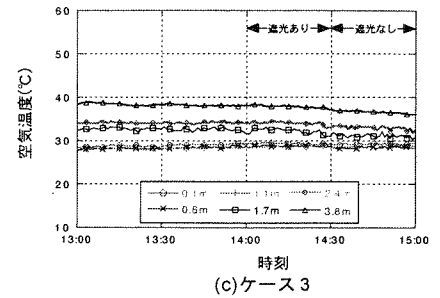
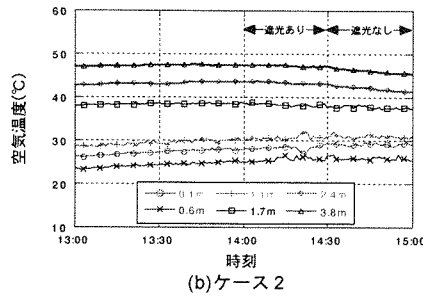
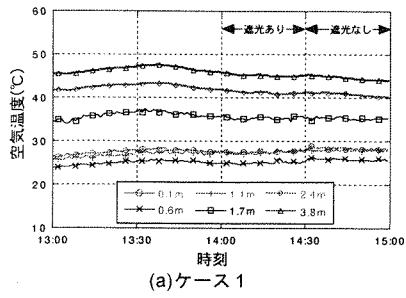


図8-2-1 温熱環境測定結果(空気温度)

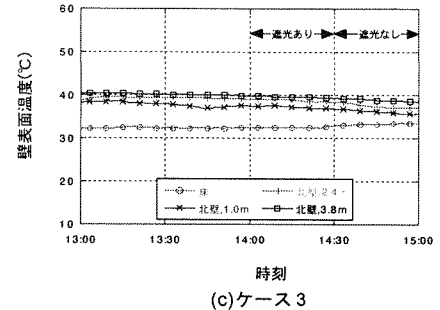
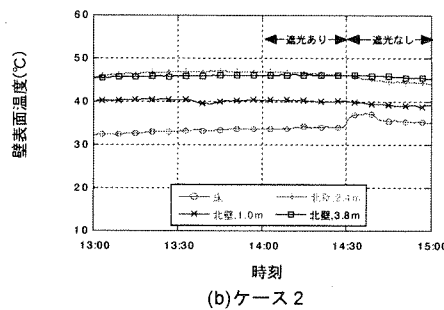
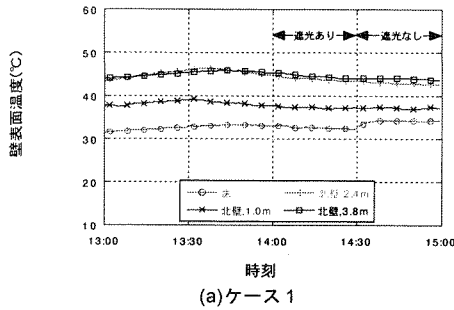


図8-2-2 温熱環境測定結果(壁表面温度)

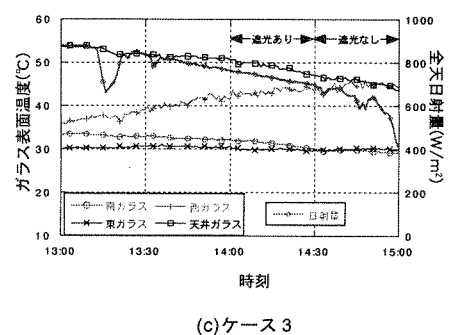
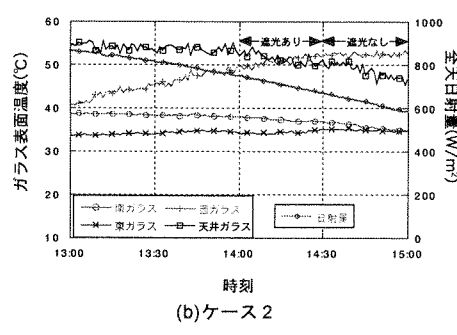
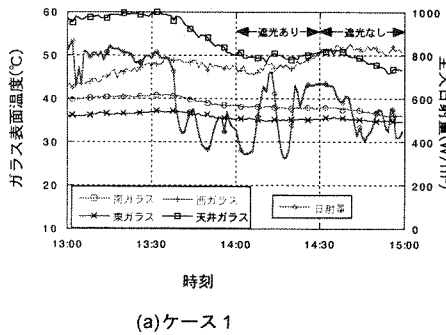


図8-2-3 温熱環境測定結果(ガラス表面温度,全日射量)

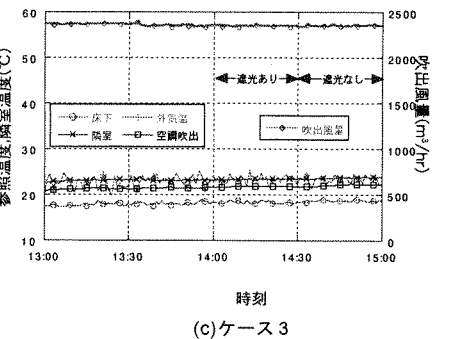
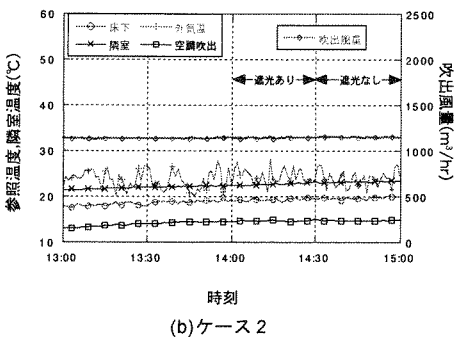
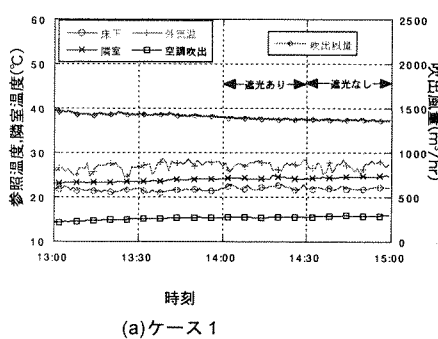


図8-2-4 温熱環境測定結果(参照温度,隣室温度,吹出風量)

(3) 定常性の検討

サーマルマネキン周りの対流熱伝達率を算出する際、皮膚表面での定常熱収支を仮定しているため、室内環境の定常性が必要となる。図8-2-1～図8-2-4の温度履歴で見られるように、空気温、壁面の温度変化は小さくほぼ定常状態と見なせるが、これを確認するために熱収支分析を行った⁴⁾。室内空気の収支、各壁面の収支を足し合わせた室全体の収支は定常状態ではそれぞれ(4)、(5)式で表される。

$$\sum \alpha_{ci}(T_{si} - T_{in})S_i + Q_G = Q_L \quad \dots(4)$$

$$\sum I_i S_i = \sum \alpha_{ci}(T_{si} - T_{in})S_i + \sum Q_{ri(net)}S_i + \sum K_i(T_{si} - T_{out})S_i \quad \dots(5)$$

(4)、(5)式の左辺、右辺に測定値を代入し、得られた値をそれぞれ横軸、縦軸にプロットすることにより熱収支の満足度を検討した⁵⁾。

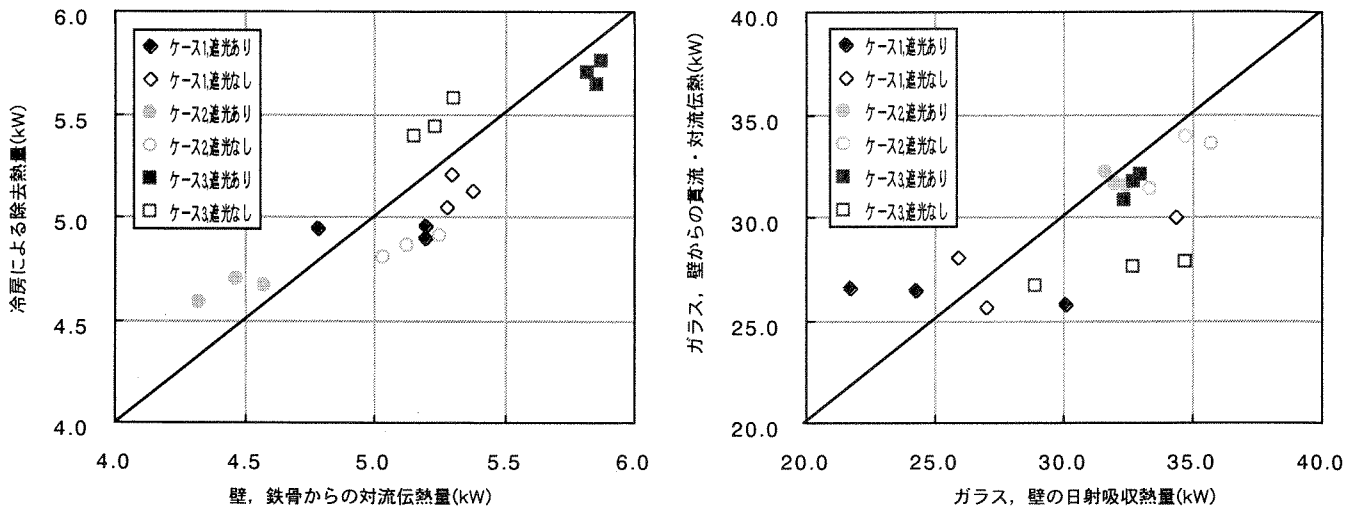


図8-3 室内空気((4)式)、室全体((5)式)に関する収支(10分毎の平均値を使った結果)

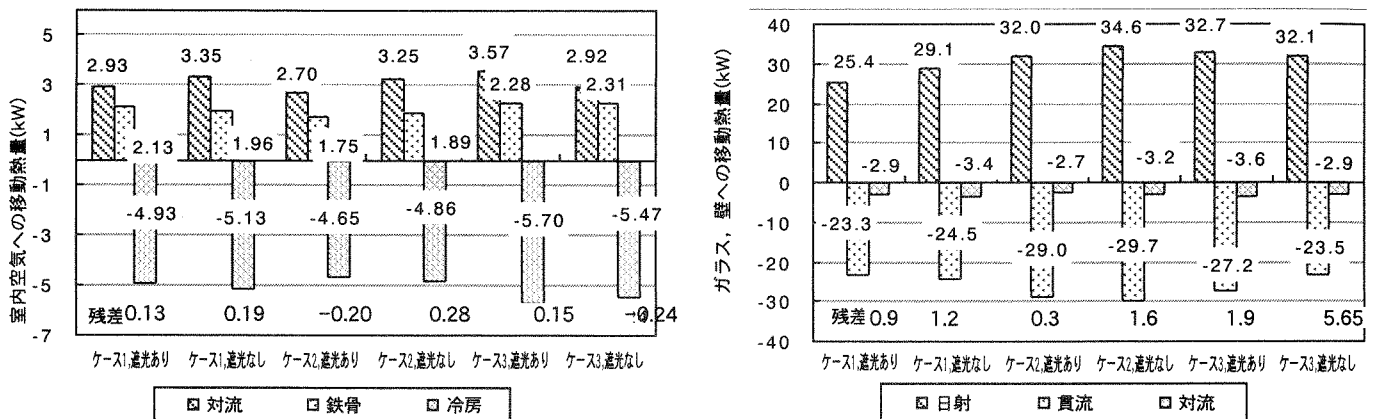


図8-4 室内空気((4)式)、室全体((5)式)に関する収支(30分平均値を使った結果)

結果を図8-3に示す。ここでは14:00～15:00の測定結果を10分毎の平均値にして評価した。(4)式に関しては全ケース、左辺(壁、鉄骨からの対流熱伝達)4.3～5.8kWに対し左辺、右辺の二乗平均残差は0.5kW(約10%程度)であり、室内空気に関する収支を概ね満足する。また(5)式の室全体の収支では、ケース1の測定結果は気象的な日射の変化が大きいため左辺、右辺の残差は大きくになっているが、ケース2の結果に限るとガラス、壁の総日射吸収熱量32～36kWに対し、二乗平均残差は1.3kW(約4%)であり収支をほぼ満足する。

合計6回の全実験条件について、測定期間30分の平均値を(4)、(5)式に当てはめた収支を図8-4に示す。30分の平均をとることで、気象的な日射の変化の大きい測定結果についても、(4)式で示される室全体の収支の残差は最大で0.28kW、(5)式で示される室全体の収支の残差はケース3遮光なしを除き^{注)}最大で1.9kW(総日射吸収熱量の6%以下)となり、ほぼ定常状態と見なすことができる。

8-4-3 サーマルマネキンによる計測

(1) サーマルマネキン

測定に用いたサーマルマネキンは別報¹⁴⁾に示す皮膚温可変型で、人体の放熱特性を模することができる。全身を16部位に分割し、熱的中立状態における人体の皮膚温と顕熱放熱量との関係により皮膚温、投入熱量を各部位で独立に制御している。用いたサーマルマネキンを図8-5に示す。

(2) 測定方法、測定条件

図8-1に示すように、実験用アトリウムの中央南寄りにサーマルマネキンを設置した。サーマルマネキンの姿勢は椅座位とし、着衣の影

響を取り除くため裸体とした。椅子の座面及び背面は簾で作られており、サーマルマネキン後方から吹き出される冷房気流がこれを通してサーマルマネキンに当たるようにした。床と足裏との接触による熱伝導の影響を取り除くため、両者の間に押出ポリスチレンフォームを挿入し断熱とした。屋外気象、冷房空調などの与条件、室内環境と同時に、16部位に分割されたサーマルマネキンの皮膚温、投入熱量を測



図8-5 実験に用いたサーマルマネキン(椅座位)

定した^{注7)}。

(3) 測定結果

ケース2の条件で測定された16部位の皮膚温及び投入熱量を代表として図8-6-1、図8-6-2に示す^{注8)}。冷房気流によりbackで皮膚温が低く、その影響を直接受けないchestで皮膚温が高く計測された。日射を遮光した場合の16部位の皮膚温差は、遮光しない場合に比べ小さい。日射遮光の有無で、直達日射を直接受けないback、L-hand、L-upperarmで皮膚温変化が小さい。投入熱量は熱的中立状態を保つように制御されているため、皮膚温が低い時に大きく、皮膚温が高い時に小さい。

(4) 定常性の検討

ケース2の条件で測定された16部位の皮膚温及び投入熱量に関する検討結果を表8-4に示す^{注9)}。日射遮光の有無に係わらず時系列データの標準偏差は、皮膚温に関し0.2℃程度、投入熱量に関し投入熱量の小さいhead、chestでやや大きいがいずれ以外は概ね7%程度である。表8-5に示す全身の結果^{注10)}でも、日射遮光の有無に係わらず標準偏差は、皮膚温では0.1℃程度、投入熱量では最大5%程度であり、サー

マルマネキンの測定データに関してもほとんど定常と見なすことができる。

8-5. 実験用アトリウムにおけるサーマルマネキン周りの対流熱伝達率の算出

8-5-1 形状モデル

実験用アトリウム壁表面要素及びサーマルマネキン表面要素を図8-7に示す。サーマルマネキンに到達する日射熱量を精度良く予測するため、アトリウム内部の鉄骨、サッシュなどの構造物を形状モデルに組み込み、これによる日射の遮蔽を考慮した。サーマルマネキンの姿勢、手を置く位置なども形状モデルに反映した^{注10)}。

8-5-2 算出条件

対流熱伝達率算出の与条件として、日射遮光の有無の各条件に対し、図8-8-1、図8-8-2、図8-9に示す30分間測定されたデータの平均値を代表値とした^{注11)}。放射吸収熱量の算出では、これまでの検討¹⁾から壁面を図8-8-1に示す部材に分け、それぞれ一定の表面温度を与えた。代表空気温度は、図8-1に示すサーマルマネキン後方0.5mの位置で、床から0.1m間隔で測定されたデータを用いて線形補間によ

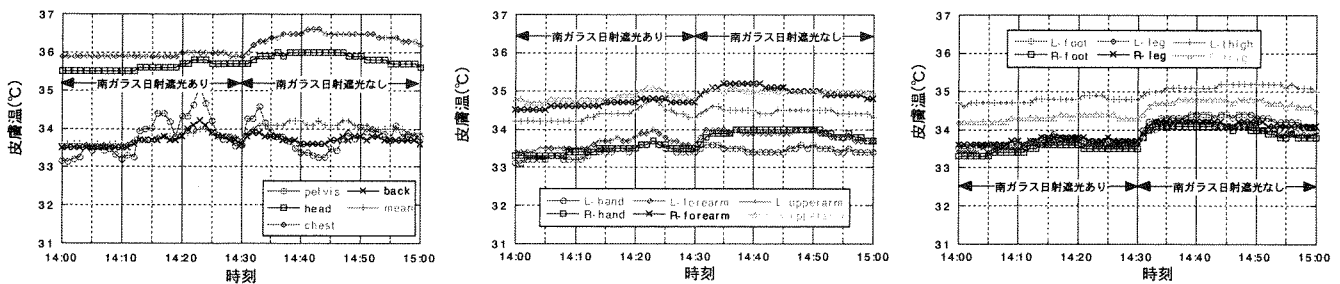


図8-6-1 サーマルマネキン測定結果(皮膚温, ケース2)

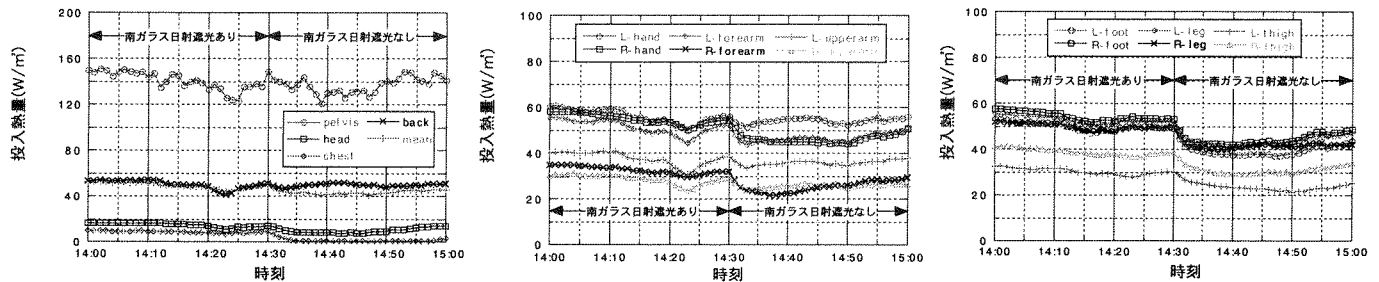


図8-6-2 サーマルマネキン測定結果(投入熱量, ケース2)

表8-4 サーマルマネキン測定データ定常性検討(部位, ケース2)

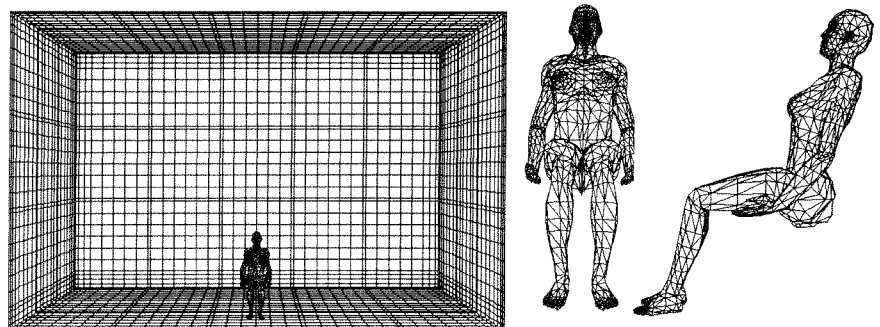
	平均皮膚温, 遮光あり	平均投入熱量, 遮光あり	平均皮膚温, 遮光なし	平均投入熱量, 遮光なし
head	35.6(0.1)	14.7(1.1)	35.9(0.1)	10.0(1.3)
chest	35.9(0.1)	8.7(0.8)	36.4(0.1)	1.6(1.8)
back	33.7(0.2)	50.2(3.7)	33.7(0.2)	49.6(1.3)
R-shoulder	34.8(0.1)	28.8(2.0)	35.0(0.1)	26.1(1.0)
L-shoulder	34.4(0.2)	37.7(2.9)	34.5(0.2)	35.9(1.1)
R-arm	34.6(0.1)	32.5(1.7)	35.0(0.1)	25.5(1.7)
L-arm	33.6(0.2)	51.4(3.1)	33.9(0.2)	46.8(2.0)
R-hand	33.4(0.1)	54.9(2.2)	33.9(0.1)	46.5(2.4)
L-hand	33.4(0.2)	56.2(3.0)	33.5(0.2)	54.2(1.2)
R-thigh	34.3(0.1)	39.0(1.4)	34.7(0.1)	31.5(2.1)
L-thigh	34.8(0.1)	30.3(1.3)	35.1(0.1)	23.8(2.0)
R-leg	33.7(0.1)	49.7(1.4)	34.1(0.1)	41.8(1.8)
L-leg	33.6(0.1)	52.6(1.6)	34.0(0.1)	43.9(2.5)
R-foot	33.5(0.1)	54.4(1.8)	34.0(0.1)	44.8(2.7)
L-foot	33.7(0.1)	50.2(1.8)	34.3(0.1)	39.8(2.7)

カッコ内: 標準偏差, 単位: 皮膚温(℃), 投入熱量(W/m²)

表8-5 サーマルマネキン測定データ定常性検討(全身)

	平均皮膚温, 遮光あり	平均投入熱量, 遮光あり	平均皮膚温, 遮光なし	平均投入熱量, 遮光なし
ケース1	32.7(0.1)	54.6(1.1)	33.3(0.1)	43.9(2.4)
ケース2	33.7(0.1)	35.2(1.4)	34.1(0.1)	29.5(2.0)
ケース3	33.0(0.1)	51.4(0.8)	33.0(0.1)	52.2(1.2)

カッコ内: 標準偏差, 単位: 皮膚温(℃), 投入熱量(W/m²)



全表面要素数: 9218(壁表面要素数: 5048)

表面要素数: 4170

(a) 壁、サーマルマネキン表面要素

(b) サーマルマネキン表面要素

図8-7 対流熱伝達率算出に用いた表面要素

り与えた^{注12)}。図8-8-2を見ると、ケース1、ケース2では、ケース3に比べ空調吹出温度が低く吹出速度も小さいため、サーマルマネキンの腰部から頭部にかけて、大きな上下温度分布が形成されている。ケース3では、ケース1、ケース2に比べ空調吹出温度が高く吹出速度も大きいため、サーマルマネキンの臀部から頭部にかけて空気温度はほぼ一定で、上下温度分布も小さい。

8-5-3 算出結果

各条件に対し得られた部位別の対流熱伝達量及び対流熱伝達率を算出するための温度差(皮膚温-代表空気温度)を図8-10に示す^{注9)注13)}。対流熱伝達量とサーマルマネキンに対する投入熱量の分布に関しては、どのケースにおいても大きな差異は見られない。サーマルマネキンに対する日射吸収、高温となった壁表面からの放射による熱吸収のため対流熱伝達量は投入熱量より大きく算出されている。

図8-10から得られた部位別の対流熱伝達率を図8-11^{注9)注13)}に示す。全ケースともに、冷房 airflow を直接受ける back で大きく、その影響を直接受けにくい chest で小さく算出された。ケース1、ケース2では冷房空調の吹出速度及び吹出温度の差異が小さいため、定性的な傾向は変わらない。ケース1、ケース2ではhand、leg、footにおいて四肢の他の部位に比べ大きく算出された。ケース3では、冷房空調の吹出速

度がケース1、ケース2に比べ大きいと、対流熱伝達率も全体的に大きく算出された。部位別に比較すると、forearm、hand、thighにおける対流熱伝達率が大きく算出されている。このことから全ケースともに、各部位の対流熱伝達率は、サーマルマネキン周りの気流分布に応じて変化している。

日射遮光の有無で比較すると、図8-11に示すように各部位の対流熱伝達率に大きな差異は見られなかった。表8-6に示すサーマルマネキン全身の熱収支を見るとケース3を除き^{注14)}、日射遮光ありでは日射遮光なしに比べ、日射吸収熱量が小さく算出され、投入熱量が大きく計測されているが、対流熱伝達量はほとんど同じである。さらに、図8-10に示すように、対流熱伝達率を算出する温度差に日射遮光の有無で大きな差異がないため、対流熱伝達率に大きな差異が生じなかったと考えられる。

表8-6に示す全身の対流熱伝達量^{注9)}から対流熱伝達率を算出し、石垣らの式^{注15)}により風速に換算すると、ケース1、ケース2では0.72m/s～0.89m/sとなり、別途代表部位で測定した風速値から得られた全身の平均風速値0.75m/sに概ね対応した^{注16)}。ケース3の換算値は1.75m/s～1.83m/sで、図8-12に示すようにケース1、ケース2の換算値の約2倍となり、風速換算値の比は空調吹出速度の比に概ね対応し

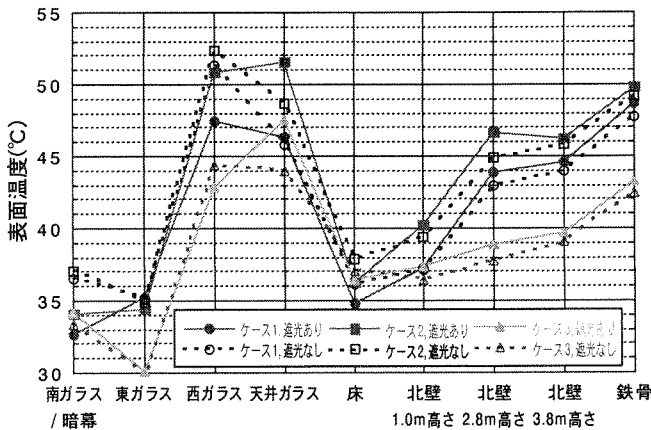


図8-8-1 壁面温度条件

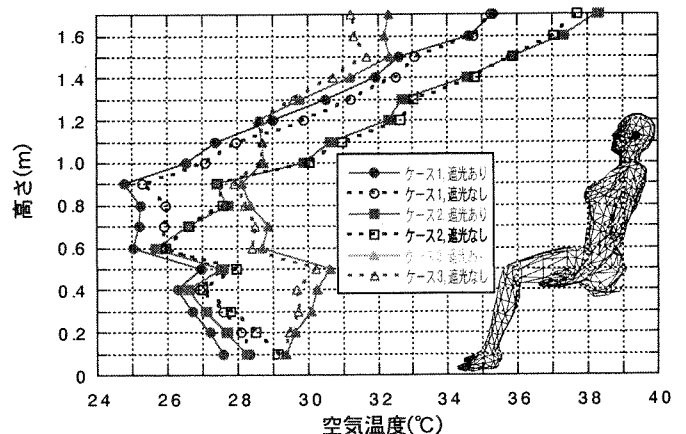


図8-8-2 サーマルマネキン0.5m 後方垂直空気温度分布(測定値)

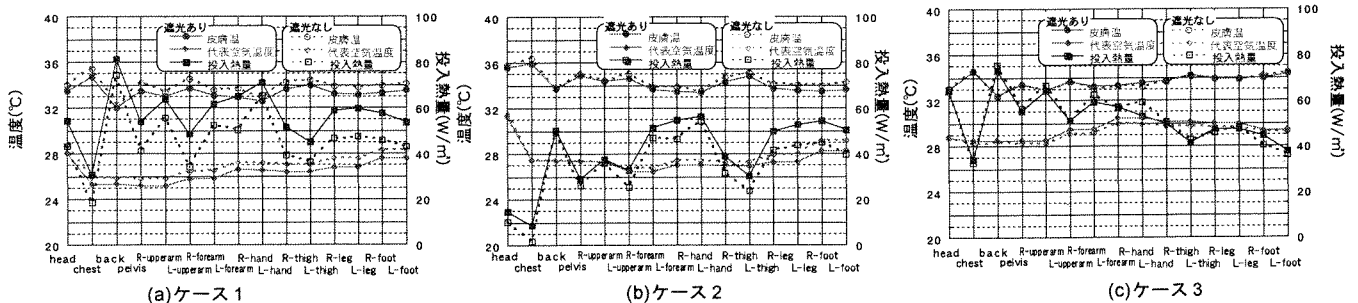


図8-9 サーマルマネキンと条件

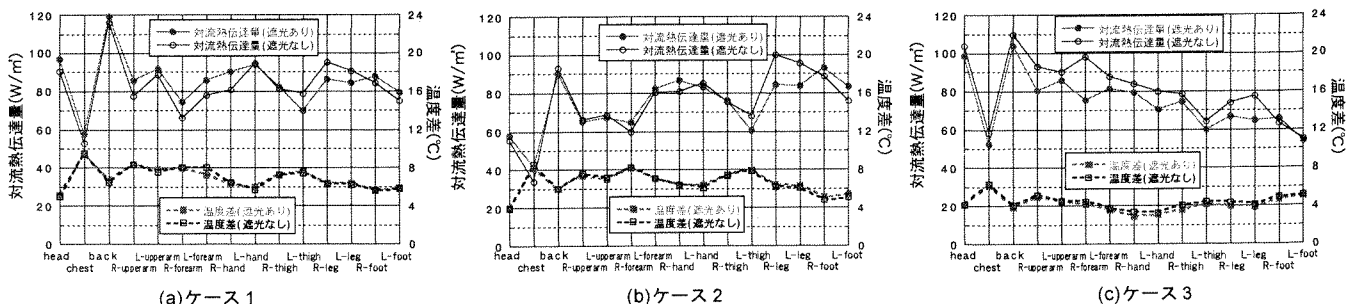


図8-10 サーマルマネキン各部位の対流熱伝達量及び対流熱伝達率を算出するための温度差

た。

対流熱伝達率の予測精度には、測定値の個々の信頼性及び誤差が大きな影響を与える^{注17)}。ここでは全身の対流熱伝達率の予測精度について検討する。熱電対による空気温度、壁表面温度の測定精度は約±0.5℃²⁾と考えられるため、表8-6に示す各熱量の予測精度は放射吸収熱量に関し約10%^{注18)}、日射吸収熱量に関し約10%^{注19)}、投入熱量に関し表7-5から約5%の差異を含むため、対流熱伝達率で約7%、対流熱伝達率でも約7%の差異を含むと考えられる。

8-6. まとめ

①日射環境下におけるサーマルマネキン周りの対流熱伝達率の算出方法を示した。

②実験用アトリウムでサーマルマネキン周りの対流熱伝達率を算出するため、室内環境を測定した。本報で示した熱収支分析により、各測定期間30分の平均値は熱収支をほぼ満足しており、測定された環境は定常と見なすことができる。またサーマルマネキンの測定結果も、時系列データの標準偏差からほとんど定常と見なすことができる。

③室内環境とサーマルマネキンの測定結果及び数値的に表わしたサーマルマネキンの形状モデル、日射・長波長放射数値計算を組み合わせ、サーマルマネキン周りの対流熱伝達率を算出した。

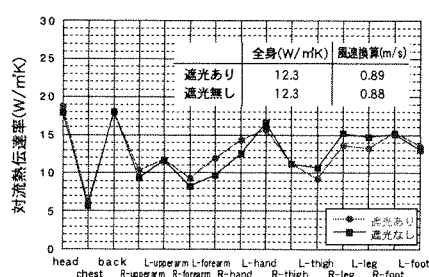
④サーマルマネキン各部位の対流熱伝達率は、サーマルマネキン周りの気流分布に応じて変化している。

⑤南ガラス面での日射遮光の有無で比較すると、各部位の対流熱伝達率及び対流熱伝達率に大きな差異は見られず、日射の影響をほとんど受けなかった。

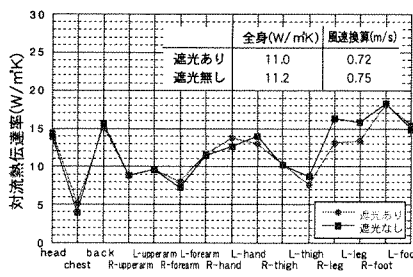
⑥全身の対流熱伝達率を風速値に換算したところ、ケース1、ケース2では測定した全身の平均風速値に概ね対応した。ケース3での換算値は、ケース1、ケース2の換算値の約2倍となり、風速換算値の比は空調吹出速度の比に概ね対応した。

【注釈】

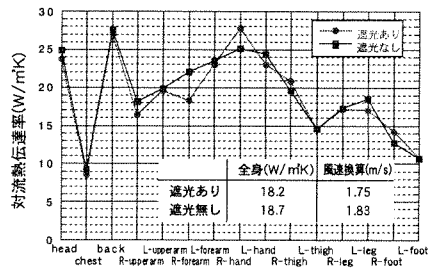
- 1) サーマルマネキンの皮膚温が36.4℃以上となる場合には投入熱量が0となり、この状態でも(1)式が成り立つと仮定する。
- 2) 着衣条件では、着衣熱抵抗を別途計測して既知とし、着衣表面で熱収支を構成することにより、サーマルマネキン周りの対流熱伝達率を算出することができる。
- 3) 全測定日において、10:00から南ガラスの遮光暗幕を閉じ、冷房を稼動させた。



(a) ケース 1



(b) ケース 2



(c) ケース 3

図 8-11 サーマルマネキン各部位の対流熱伝達率

表 8-6 サーマルマネキン皮膚表面での熱収支(全身)

	ケース1		ケース2		ケース3	
	遮光あり	遮光なし	遮光あり	遮光なし	遮光あり	遮光なし
対流熱伝達量	-84.7	-82.8	-69.9	-70.7	-74.6	-81.1
放射吸収熱量	26.4	28.0	32.4	30.7	20.9	18.7
日射吸収熱量	3.8	10.9	2.2	10.4	2.2	10.3
投入熱量	54.6	43.9	35.2	29.5	51.4	52.2

単位: W/m², 向き: サーマルマネキン皮膚表面に対する入熱量を正

4) 室、壁面を上中下3ブロックに分け、その寄与を検討した。

5) 各項の評価方法は以下の通り¹⁾。①各壁面の対流熱伝達率 α_{ci} : 冷房吹出風速に応じて設定した。ケース1、2では床面9.1 W/m²K、南ガラス4.5 W/m²K、東西ガラス3.4 W/m²K、天井(上昇流)4.5 W/m²K、ケース3では床面4.5 W/m²K、南ガラス下段9.1 W/m²K、南ガラス中上段4.5 W/m²K、東西ガラス3.4 W/m²K、天井(上昇流)4.5 W/m²Kとした。②室内鉄骨からの対流熱 Q_G : 鉄骨の対流熱伝達率は4.5 W/m²Kとした。また鉄骨表面積は上中下段にそれぞれ52、10、10 m²ずつ振り分けた。③壁表面での日射吸収熱量 Q_{si} : 直達日射、拡散日射の寄与を計算した。全天日射の直散分離は渡辺式¹²⁾を用いた。直達日射に関してはガラス光学特性の入射角度依存を考慮した。室内では完全拡散反射を仮定した。地物の日射反射率は0.2とした。④熱貫流率から室内側総合熱伝達の寄与を除いた熱伝達率 K_i : Rowley式¹³⁾に外気風速3m/sを代入した時の屋外総合熱伝達率19.8 W/m²Kから算出した。

6) 図8-2-3(c)を見ると日射の変化に対し南ガラス表面温度の低下が他のケースに比べやや大きい。この原因については明確でないが、屋外の風の影響を受けたものと思われる。本アトリウムの壁面熱収支は貫流支配であり¹⁾、外気に触れる面の熱伝達率の影響を大きく受けるが、これを全ケース同一に設定したため貫流熱量を過小評価したと考えられる。

7) サーマルマネキンの計測制御は1秒おき、記録は1分おきである。

8) pelvisでは装置の不調により、制御入力用皮膚温が実際の皮膚温に比べ低かったため、過大の投入熱量が発生した。このためpelvisでは、別途臀部に貼付した熱電対で測定した温度を皮膚温と見なし、これと過大に評価された投入熱量の測定値を用いて検討を進めた。なお、図8-6-1のpelvisの皮膚温は別途臀部に貼付した熱電対の測定値を示す。

9) 表8-4、図8-10、図8-11ではpelvisの結果を表示していない。また、表8-5、図8-11、表8-6の全身の評価ではpelvisの結果を除いている。

10) 別報¹⁹⁾に示す手法により得られた表面要素で表したサーマルマネキンの有効放射面積は1.258(m²)、有効放射面積率は0.734(-)であった。また、サーマルマネキン全身から各壁面に対する形態係数は、南ガラス0.235、東ガラス0.064、北壁0.123、西ガラス0.064、床0.373、天井ガラス0.079、鉄骨0.057であった。

11) 図8-9に示す代表空気温度は、サーマルマネキン各表面メッシュに対し図8-8-2から算出した代表空気温度を各部位で面積重み付けしたものである。

12) これまでの検討¹⁴⁾から、水平方向の空気温度分布は小さかったため、代表空気温度を高さ方向のデータにより与えたが、今後の検討課題である。

13) 対流熱伝達率、温度差、対流熱伝達率はサーマルマネキンの表面要素単位で算出されるが、図にはサーマルマネキンの計測部位毎に平均した値を示している。

14) ケース3では、日射遮蔽なしの後半の時間帯において日射量が急激に減少したため、壁表面温度、室温が日射遮蔽ありに比べ低下した(図8-8-1、図8-8-

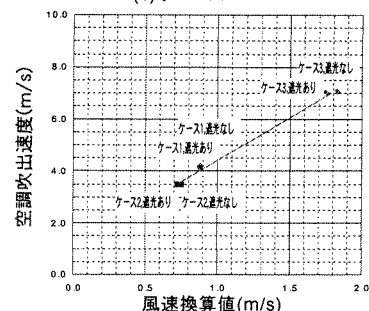


図 8-12 風速換算値と空調吹出速度

2)。このためサーマルマネキンに対する投入熱量が多くなり、表7-6に示す日射遮蔽なしの対流熱伝達量がやや大きくなったと考えられる。

15)気流が0.2m/s以上の強制対流域での椅座位全身対流熱伝達率 α_c と流速 V の関係式 $\alpha_c = 13.2V^{0.57}$ (W/㎡K)より逆算した。

16)高さ0.1m、0.45m、0.6m、0.85m、1.0m、1.2mで測定した風速の重み付け平均値。

17)部位別の対流熱伝達率は、各部位の面積割合、さらに同一部位でも他の部位に接触あるいは近接している部分の影響を少なからず受けるが、これは今後の検討課題である。

18)壁表面温度が全体で約0.5℃高くなったと想定して、放射熱伝達量を算出し評価した。

19)サーマルマネキンに到達する日射量の予測精度を、日射の遮光の有無で、南ガラス面とサーマルマネキンの間の床で測定した透過日射量と比較することにより検討した。ケース1の日射遮光ありでは、測定値10.5W/㎡、予測値11.1W/㎡(天空:9.5W/㎡、内部拡散反射:1.6W/㎡)、日射遮光なしでは、測定値53.9W/㎡、予測値58.7W/㎡(直達:39.0W/㎡、天空:16.1W/㎡、内部拡散反射:3.6W/㎡)であり、到達日射量を誤差10%以内で予測している。ケース2、ケース3でも同様の精度が得られている。

【参考文献】

- 1)尾関義一、小西正哲、平松徹也、田辺新一：日射の体感影響に関する研究（その7）、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp.1245-1248、2000。
- 2)平松徹也、原田剛、加藤信介、村上周三、吉野博：実験用実大アトリウム内の温熱環境解析(その1)、日本建築学会計画系論文集、No.498、pp.37-44、1997年8月。
- 3)市原真希、斎藤正文、西村美加、田辺新一：サーマルマネキンを用いた立位・椅座位人体各部位の放射・対流熱伝達率の測定、日本建築学会計画系論文集、No.501、pp.45-51、1997年11月。
- 4)Richard J. de Dear, Edward Arens, Zhang Hui and Masayuki Oguro: Convective and radiative heat transfer coefficients for individual human body segments, International Journal of Biometeorology, Vol.40, pp.141-156, 1997.
- 5)片岡拓也、房田泰治、郡逸平：サーマルマネキン—SET*法による車室内温感評価、自動車技術会論文集、Vol.26、No.4、pp.97-102、1995。
- 6)桑原浩平、近藤基、持田徹、松永和彦：人体に関する対流熱伝達率、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp.1309-1312、2000。
- 7)鄭相元、堀越哲美、梅村茂樹、宮本征一、水谷章夫：都市の街路および開放空間における熱放射環境が人体に及ぼす影響、日本建築学会計画系論文集、No.493、pp.77-84、1997年3月。
- 8)村上周三、加藤信介、曾潔：数値サーマルマネキンに関する研究(その3)、日本建築学会計画系論文集、No.515、pp.69-74、1999年1月。
- 9)尾関義一、尊田嘉之、平松徹也、斎藤恒洋、大柿聡：放射・対流連成解析のための複雑な内部形状、大規模メッシュに対応する日射熱取得計算手法に関する研究、空気調和・衛生工学会論文集、No.66、pp.1-11、1997。
- 10)尾関義一、斎藤恒洋、大柿聡：複雑な内部形状を有する大規模メッシュ対応型放射熱伝達計算手法に関する研究、空気調和・衛生工学会論文集、No.62、pp.101-110、1996。
- 11)平松徹也、原田剛、加藤信介、村上周三、吉野博：実験用実大アトリウム内の温熱環境解析(その3)、日本建築学会計画系論文集、No.513、pp.23-30、1998年11月。
- 12)渡辺俊行、浦野良美、林徹夫：水平面全天日射量の直散分離と傾斜面日射量の推定、日本建築学会論文報告集、No.330、pp.97-108、1983年8月。
- 13)渡辺要編：建築計画原論、丸善株式会社(1965)、東京。
- 14)田辺新一、長谷部ヤエ：皮膚温度可変型サーマルマネキンによる室内環境評価方法に関する研究、日本建築学会計画系論文集、No.448、pp.1-8、1993年6月。
- 15)尾関義一、小西正哲、成田千恵、田辺新一：数値計算による人体の有効放射面積の評価、日本建築学会計画系論文集、No.525、pp.45-51、1999年11月。
- 16)尾関義一、小西正哲、成田千恵、田辺新一：数値計算による矩形面と全身との形態係数の評価、日本建築学会計画系論文集、No.522、pp.15-22、1999年8月。
- 17)石垣秀圭、堀越哲美、持田徹、土川忠浩、磯田憲生、久保博子：人体の対流熱伝達と風速の生理心理反応に及ぼす影響、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp.865-868、1991。

【主な記号】

Q_i	: マネキン投入熱量(W/m ²)
Q_{ci}	: 室内空気から皮膚表面に伝達される対流熱伝達量(W/m ²)
$Q_{n(net)}$: 室内壁表面から皮膚表面または室内壁表面に伝達され、そこで吸収される放射吸収熱量(W/m ²)
Q_{si}	: 皮膚または壁表面での日射吸収熱量(W/m ²)
Q_G	: 暖房などによる取得熱(室内鉄骨からの対流伝熱を考えた ¹⁵⁾)(W)
Q_L	: 冷房による除去熱量(W)
α_{ci}	: 対流熱伝達率(W/m ² K)
K_i	: 熱貫流率から室内側総合熱伝達の寄与を除いた熱伝達率(W/m ² K)
T_{sk_i}	: サーマルマネキン各部位で測定された皮膚温(℃)
T_{in_i}	: 代表空気温度(℃)
T_{si}	: 表面温度(℃)
T_{out_i}	: 隣室温または外気温(℃)
S_i	: 面積(m ²)
添字	
i	: 部位または表面要素番号(-)

第 9 章

日射環境下における体温調節 65MN モデルの 皮膚温予測値と被験者実験結果との比較

第9章 日射環境下における体温調節 65MN モデルの皮膚温予測値と被験者実験結果との比較

COMPARISON OF SKIN SURFACE TEMPERATURES BETWEEN SUBJECTIVE EXPERIMENTS AND NUMERICAL PREDICTIONS BY USING A MODIFIED 65MN THERMOREGULATION MODEL UNDER SOLAR RADIATION

A modified 65MN(Multi-Nodes) thermoregulation model is tested for the evaluation of the skin temperature distribution in each body part under solar radiation. The present model can be also applicable for the coupled analysis of CFD and radiation. Skin surface temperature distributions predicted by this model are compared with those by subjective experiments in the real scale experimental atrium under solar radiation. Predicted each skin surface temperature almost corresponds to that of subjective experiment with the accuracy around 1 degree Celsius difference. However, the prediction accuracy on the legs and arms is poor by comparison with that on other body parts, which must be required the improvement of prediction accuracy on the legs and arms. As a whole, the present model is a useful tool for the prediction of skin surface temperature distribution under solar radiation.

Keywords : 65MN(Multi-Nodes) thermoregulation model, Skin temperature distribution, Coupled analysis of CFD and radiation, Real scale experimental atrium, Subjective experiments, Thermal comfort
体温調節 65MN モデル, 皮膚温分布, CFD・放射連成, 実験用実大アトリウム, 被験者実験, 熱的快適性

9-1. はじめに

居室、車室内など人体に対し比較的狭い空間のみならず、アトリウムに代表される大空間の内部でも、不均一な温熱環境が生じていることがある。実験や実測による評価とともに竣工や製造以前に、このような空間での人体の熱的快適性を事前に定量的に評価する数値シミュレーション手法や温冷感指標の開発が必要とされている。

別報¹⁾²⁾では、人体形状に応じた日射取得熱量、放射熱伝達量の予測精度を検討するために、立位・椅座位姿勢における有効放射面積、形態係数などを数値計算により算出し、既存の測定結果と十分な精度で対応することを示した。また、サーマネキンを用い日射環境下における対流熱伝達率を検討した³⁾。

本報では、別報⁴⁾で提案された体温調節 65MN モデルを、これまで検討した人体形状に適用し、日射などにより同一部位内で温度分布が生じる場合の評価に関する検討を試みる。このため実験用アトリウム⁵⁾を用い、日射環境下において被験者実験を実施し、皮膚温などの生理量を測定した。次に詳細な人体形状に対応し、同一部位内で温度分布が生じる場合の評価方法及びCFD・放射連成⁵⁾⁷⁾のための体温調節 65MN モデルの汎用的な拡張方法を示し、モデルの予測精度を被験者実験結果と比較することにより検討した。

9-2. 体温調節モデル及びCFD・放射との総合連成解析に関する既往の研究

詳細な人体形状に対応し、CFD・放射連成を可能とする体温調節モデルには、曾、富永、Sorensen、庄司、横山らの研究がある。曾ら⁸⁾

は、人体皮膚表面からの顕熱・潜熱放熱特性に関するCFD・放射・湿気輸送の連成解析法を提案している。ただし、腕などを省略した人体形状を用い、体温調節モデルとして人体全身で定義されたGaggeらの2 Node Model、Fangerの熱的中立モデルを人体各部位に適用している。その後富永ら⁹⁾は、精密人体形状を対象として、Stolwijkモデルをベースとした体温調節モデルとCFD・放射連成解析を実施しているが、生理量に関する部位内の分布は考慮されていない。Sorensen¹⁰⁾らは、形状を精密に表したサーマルマネキンを対象としてCFD・放射連成シミュレーションによりサーマルマネキン周辺の物理性状を評価し、測定結果と比較している。庄司ら¹¹⁾は、人体着衣熱モデルとCFD・放射・水分移動との連成モデルを提案し、静穏寒冷環境下における被験者実験結果と比較している。ただし、人体形状は円柱部位から形成されている。横山ら¹²⁾は、人間-温熱環境系をシミュレートするためのCFD・放射・体温調節解析モジュールをそれぞれ開発し、体温調節モデルに関し被験者実験結果と比較しているが、人体形状は庄司らと同様に円柱部位から形成されている。既往の研究では、人体形状は円柱部位から形成されている場合が多く、詳細な人体形状を対象とし、さらに日射環境下において被験者実験結果と比較した例はほとんど見られない。

9-3. 日射環境下における被験者実験

9-3-1 被験者実験方法

別報³⁾と同様に実験用アトリウムにて冷房条件を変えて被験者実験を実施した。実験用アトリウムは、神奈川県横浜市に南向きに建設さ

れ、その大きさは図9-1に示すように間口7.0m×奥行き4.3m×高さ4.5mであり、屋根面と東西南面の4面がガラスで覆われている。北壁、床は、押出ポリスチレンフォーム板により断熱扱いとしている。アトリウム周囲は南から西方向にかけて障害物はなく、日射を遮るものは無い。各壁面材料の光学特性を表9-1に示す。

被験者実験は表9-2に示す2002年3月6日、3月28日の2日を対象とし14:00～15:00の間に実施した³⁾。気象条件として水平面全天日射量、外気温、隣室温度を測定した。室内温熱環境に関し、室内空気温(36点)、壁表面温度(12点)、空調吹出温度(3点)、室内気流などを測定した。図9-1に温度測定位置の代表点を併せて示す。被験者は図9-2に示すように男子大学生²⁾、椅座位裸体とし、図9-3に示すように冷房気流を後方から受ける実験用アトリウムの中央南寄りで皮膚温などの生理量を測定した。床と足裏との間はポリスチレンフォームにより断熱扱いとした。被験者周りの部位別対流熱伝達率を測定するために、被験者と同じ環境が得られる別の位置で皮膚温可変型サーマルマネキン¹⁾による測定を同時に実施した。日射が被験者実験結果に与える影響を調べるために、測定の前半(14:00～14:30)では南ガラス面に遮光暗幕を設置して日射を遮光し、後半(14:30～15:00)では遮光暗幕を開けて日射が被験者に到達する条件とした。被験者の生理量として皮膚温を躯幹5点、四肢左側9点、合計14点測定した。同一部位で日射受熱の有無により皮膚温分布が生じるため、四肢では日射を受熱する表面、受熱しない裏面をそれぞれ測定対象とした。対流熱伝達を評価するための参照空気温度を皮膚温測定点に対応させて測定した³⁾。温度の測定では線径0.2mmのT型熱電対(接点ハンダ付け)を用いた。全測定項目に対し測定間隔を1分とした。

9-3-2 測定結果

(1) 実験用アトリウムの温熱環境

図9-4～図9-5-2に実験開始から実験終了までの温熱環境測定結果をまとめて示す。図9-4に示すように、水平面全天日射量の時間変化に関し、3/6条件、3/28条件ともに時刻において日射の変化が見られた。解析に使用する測定データの30分平均値を示した図9-5-1及び図9-5-2を見ると、室温に関し日射遮光の有無でそれぞれ約1℃の差が見られた。3/6条件の室温は3/28条件に比べ約4℃程高い。

(2) サーマルマネキン周りの対流熱伝達率

各測定ケースに対応するサーマルマネキン周りの対流熱伝達率 α_{ci} を(1)式に示す定常熱収支式より算出する³⁾⁵⁾⁶⁾。

$$\alpha_{ci} = (Q_{ti} + Q_{n(net)} + Q_{si}) / (T_{ski} - T_{ini}) \quad \cdots(1)$$

$Q_{n(net)}$ は室内壁表面から皮膚表面に伝達され、そこで吸収される放射吸収熱量、 Q_{si} は皮膚表面での日射吸収熱量である。(1)式の各項は、16部位に分割された各部位毎に測定されたサーマルマネキンの皮膚温 T_{ski} 、投入熱量 Q_{ti} 及び壁表面温度、参照空気温度 T_{ini} と図9-6に示す数値的に表わしたサーマルマネキンの形状モデル、日射・長波長放射数値計算を組み合わせることにより評価される。なお、サーマルマネキン周りの対流熱伝達率を算出する際には、皮膚表面での定常熱収支を仮定しているため、30分間測定された室内環境に関し定常性が必要となる。そこで前報³⁾と同様に室内空気熱収支分析により室内環境の定常性を検討した。定常状態における室内空気熱収支式は、壁面からの対流熱伝達量、室内鉄骨からの対流熱伝達量 Q_G 、冷房による除去熱量 Q_L を用いて(2)式で表わされる²⁾⁴⁾。

$$\sum \alpha_{ci} (T_{si} - T_{ini}) S_i + Q_G = Q_L \quad (2)$$

30分間測定された諸データの平均値を(2)式の左辺、右辺に代入し、熱収支の満足度を検討した結果を図9-7に示す。気象的な日射の変化の大きい測定結果でも、室全体の収支の残差は、最大で冷房による除去熱量の7%以下となり、30分間測定された諸データの平均値から得られる室内環境は、ほぼ定常状態と見なすことができる。

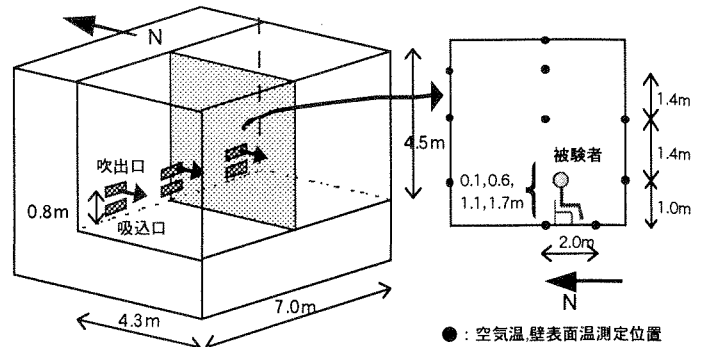


図9-1 実験用アトリウムの概要と温度測定位置(代表点)

表9-1 各壁面の光学特性

	南ガラス	東,西,天井ガラス	北壁,床,暗幕,鉄骨
日射透過率(-)	0.190	0.154	0.0
日射吸収率(-)	0.445	0.679	0.9
放射率(-)	0.3	0.5	0.9

* ガラス物性は垂直入射特性(カタログ値及び計算値)

* 北壁(黒色塗装合板)、床(黒色塗装合板)の物性は分光光度計による測定値

* 南ガラスは熱線反射ガラス(旭硝子 KFC 12mm)に熱線制御フィルムを貼ったもの。

その他のガラスは高性能熱線反射ガラス(旭硝子 SS20 12mm)

* 放射率は長波長放射に関する特性値



図9-2 被験者実験(椅座位)

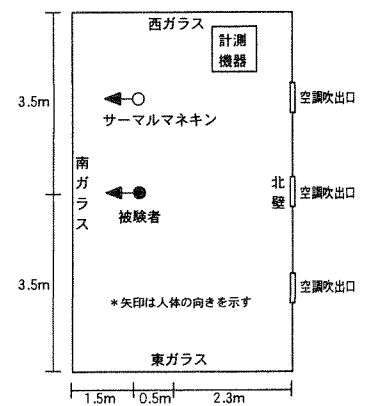


図9-3 被験者及びサーマルマネキン測定位置(平面図)

表9-2 測定ケース及び測定条件

測定ケース	1-1	1-2	2-1	2-2
日時	02/3/6 14:00～14:30	02/3/6 14:30～15:00	02/3/28 14:00～14:30	02/3/28 14:30～15:00
暗幕開閉	閉	開	閉	開
外気温度(℃)	23.1	23.9	19.2	19.7
空調吹出温度(℃)	22.0	22.7	16.7	17.0
空調吹出速度(m/s)	4.5	4.6	6.2	6.2

* 外気温度、空調吹出温度、空調吹出速度は30分間測定されたデータの平均値

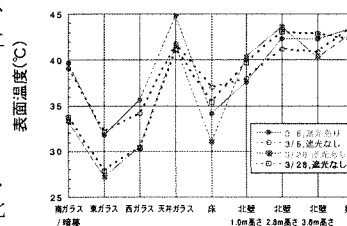


図9-5-1 壁表面温度の測定結果(30分平均値)

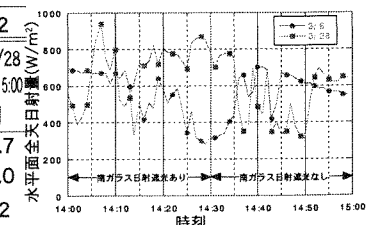


図9-4 水平面全天日射量の測定結果(瞬時値)

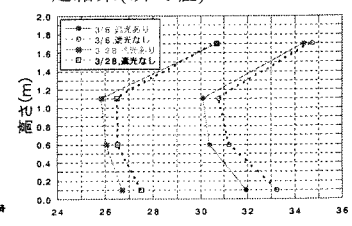


図9-5-2 被験者0.5m後方空気温度の測定結果(30分平均値)

この条件で得られた部位別の対流熱伝達率を図9-8に示す。冷房気流を直接受ける背中、左上腕などで大きく、気流速度が小さくなる左下腿、左足で小さく算出されている。日射遮光の有無で比較すると、表9-3に示すように前報³⁾同様、各部位の対流熱伝達率は日射の影響をほとんど受けない¹⁵⁾。被験者とサーマルマネキン周りの環境を測定された参照空気温度で比較したところ両者は約1℃以内であり¹⁶⁾、サーマルマネキンで得られた部位別の対流熱伝達率と被験者周りの対流熱伝達率もほぼ同じであると考えられる。

(3) 被験者皮膚温分布

図9-9-1及び図9-9-2に測定された皮膚温の時間変化を示す¹⁷⁾。冷房気流を直接受ける背中、四肢の裏面で皮膚温が低く、直接受けない胸、四肢の表面で皮膚温が高く測定された。環境温度が高い3/6条件の皮膚温は、3/28条件より全体的に高い。冷房気流を直接受ける部位と受けない部位での皮膚温の差が大きく測定された。日射を受熱する部位で日射遮光の有無による皮膚温の変化が見られる。日射が比較的安定していた3/6条件で顕著である。同一部位でも日射を受熱する表面と日射を受熱しない裏面で皮膚温は最大約3℃異なる様子が観察されている。

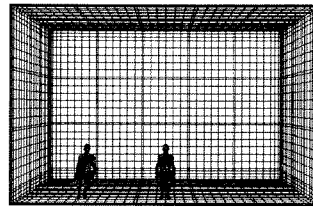
9-4. 日射環境下における拡張体温調節65MNモデルによる皮膚温予測と被験者実験結果との対比

9-4-1 体温調節65MNモデルの拡張方法

別報⁹⁾で提案されている体温調節65MNモデルは、16分割された人体の各部位を検討最小単位としているため、日射が局所的に当たるなど同一部位で分布を考慮することが困難である。そこで、同一部位で分布を考慮するために、これまでに検討してきた図9-10に示す人体詳細形状に対応させ、物理量及び生理量を表面要素単位で扱えるように体温調節モデルを拡張した。

(1) 拡張体温調節モデルの熱平衡式

拡張は、体温調節65MNモデルの16分割された各部位で定義される熱収支式を、表9-4-1及び表9-4-2に示すように人体形状の各部位を構成する表面要素に適用することによって。層方向の分割は体温調節65MNモデルと同じ4層とした。このため未知数は、表面要素数×4+1



全表面要素数：13219(壁表面要素数：5040)

図9-6 皮膚温及び対流熱伝達率算出に用いた表面要素

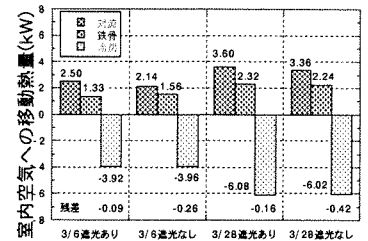
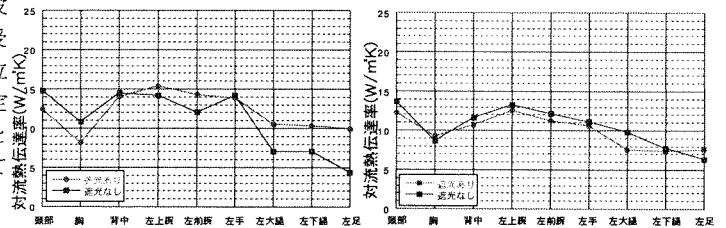


図9-7 室内空気に関する熱収支



(a)3/6条件

(b)3/28条件

図9-8 サーマルマネキン周りの対流熱伝達率

表9-3 サーマルマネキン全身の熱収支

	3/6条件		3/28条件	
	遮光あり	遮光なし	遮光あり	遮光なし
対流熱伝達量	-50.9	-47.0	-74.4	-74.4
放射吸収熱量	22.1	20.4	19.5	12.3
日射吸収熱量	3.4	14.8	12.5	22.6
投入熱量	25.4	11.9	42.4	39.5

熱量の単位：W/m², 向き：サーマルマネキン皮膚表面に対する入熱量を正

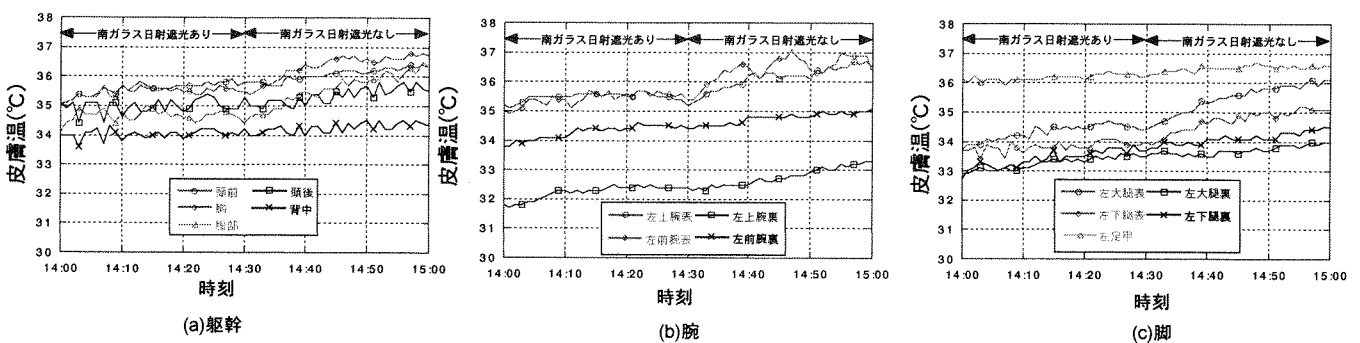


図9-9-1 皮膚温測定結果(3/6条件)

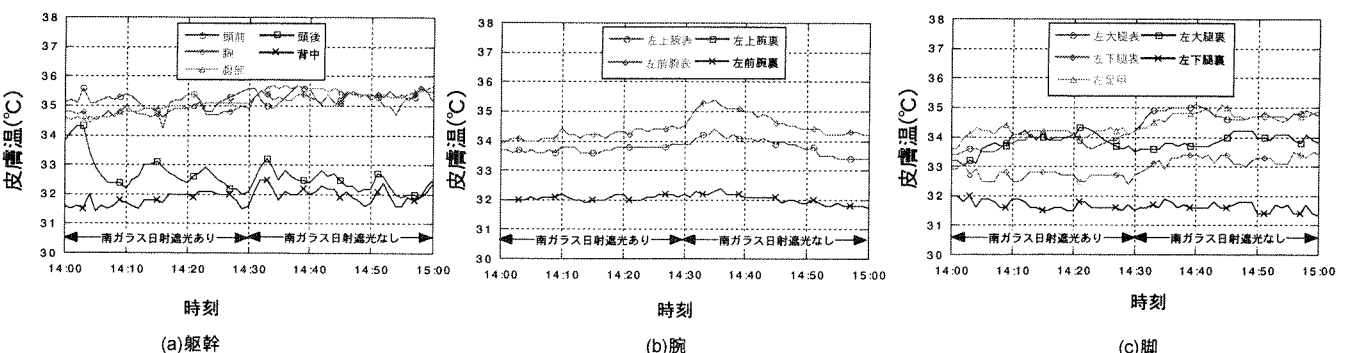


図9-9-2 皮膚温測定結果(3/28条件)

となる。

(2) 体温調節65MNの各物理量及び生理量の拡張方法

体温調節65MNの各物理量及び生理量は、表9-5(b)に示すように設定された部位別表面積に対して定義されている。ただし表9-5に示すように、これまで検討してきた人体形状モデルの任意の姿勢に対し16部位毎に合計した部位別表面積は、必ずしも体温調節65MNと対応しないことがある。このような場合には、体温調節65MNで定義された各物理量及び生理量をそのまま適用することができないと考えられる。そこで体温調節65MNで定義されている各物理量及び生理量を補正し、人体形状モデルに適用できるように拡張する方法を検討した。

本報では第一ステップとして、体温調節65MNで定義されている16分割された各部位と人体形状モデルの表面要素を16部位に統合した各部位に対し、”単位体積当たりの物理量及び生理量が変化しない”ように拡張する方法を検討した。すなわち、①人体形状モデルの各部位において、それぞれの表面積に対する体積変化率((人体形状モデルの各部位の表面積)/(対応する65MNの部位の表面積))¹⁵で補正する。さらに、②人体形状モデルの各部位を構成する表面要素に対し、部位毎に補正した物理量及び生理量を面積率に応じてそれぞれ配分する。ただし、③体温調節による皮膚での血流量 $BF_{i,4}$ 、発汗による放熱量

Esw_i に関しては、制御信号 $Err_{i,4}$ を表面要素毎に評価することにより局部の影響を考慮した。本論文で提案した拡張方法を表9-6にまとめて示す。これにより人体に関する物理量及び生理量を表面要素毎に算出することが可能となる¹⁹⁾。なお、拡張した体温調節65MNモデルとCFD・放射との連成手法をAppendixに示す。

9-4-2 実験用アトリウムにおける体温調節65MNモデルによる皮膚温予測の概要

サーマルマネキン周りの対流熱伝達率の算出方法と同様に、30分間測定された諸データの平均値と図9-6に示す被験者及び実験用アトリウムの形状モデル¹⁰⁾、日射・長波長放射数値計算を組み合わせ、拡張体温調節65MNモデルの境界条件を表面要素単位で与えることにより、各条件に対応する皮膚温を表面要素単位で予測した。

(1) 対流熱伝達率

図9-11-1、図9-11-2に示す部位毎に測定された参照空気温度、及び図9-8に示すサーマルマネキンから算出された対流熱伝達率を計算に用いた¹¹⁾。

(2) 放射熱伝達率

被験者と壁表面間の形態係数及び測定された壁表面温度、放射率を与条件とし、被験者表面での放射熱伝達率を算出した。

(3) 日射吸収熱量

測定された水平面全天日射量を用い、直散分離により被験者に到達する直達日射、天空日射、地面反射日射及び内部拡散反射日射量を算出した¹²⁾。

(4) 蒸発熱損失量

空間中央高さ1.1mで測定された絶対湿度が各部位においても均一と考え、発汗による熱損失を算出した¹³⁾。

(5) その他

被験者は短パンを着用しているため、形状モデルの短パン相当部に $0.3clo^{14)}$ を与え熱抵抗を評価した。床と足裏との間は、被験者実験の断熱扱いとは厳密に異なるが断熱条件を課した。代謝量は椅座静位の $1.0met^{14)}$ とした。

9-4-3 皮膚温予測結果と被験者実験結果との比較

3/6条件、3/28条件の日射遮光の有無に対し、30分間測定された諸データの平均値に対する皮膚温の予測結果及び30分間測定された皮膚温の平均値を図9-12-1、図9-12-2に示す¹⁴⁾。また皮膚温を予測する際に計算された対流熱伝達率、放射熱伝達率、日射吸収熱量を図9-13-1、図9-13-2に示す¹⁵⁾。皮膚温に関し測定結果と同様に、3/6条件では室温が3/28条件に比べ約4℃高いため、3/6条件の皮膚温が全体的に高く算出されている。日射遮光なしの予測結果は日射遮光有りに比べ

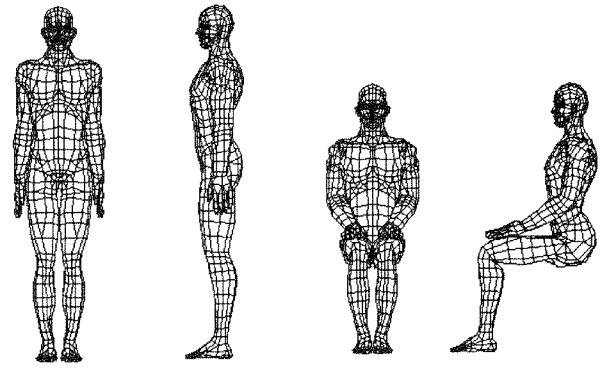


図9-10 解析に用いた人体形状モデル（立位、椅座位）

表9-4-1 各部位の熱平衡式(定常)

(core)	$Q_{i,1} - B_{i,1} - D_{i,1} - E_{i,1} = 0$
(muscle)	$Q_{i,2} - B_{i,2} + D_{i,1} - D_{i,2} = 0$
(fat)	$Q_{i,3} - B_{i,3} + D_{i,2} - D_{i,3} = 0$
(skin)	$Q_{i,4} - B_{i,4} + D_{i,3} - Q_{cli} - E_{i,4} = 0$
(clothing)	$Q_{cli} + (Q_{ci} + Q_{n(net)} + Q_{si}) A_i f_{cli} = 0$
(central blood)	$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^4 B_{i,j} = 0$

※ $E_{i,1}$ は胸で考慮する。 n は人体表面要素分割数。

表9-4-2 各物理量及び生理量の定義

1.産熱量	$Q_{i,j} = Qb_{i,j} + (W_{i,j} + Ch_{i,j}) \delta_{j,2}$
2.血流による熱輸送量	$B_{i,j} = \alpha \rho c \cdot BF_{i,j} (T_{i,j} - T_{cb})$
3.伝導熱量	$D_{i,j} = Cd_{i,j} (T_{i,j} - T_{i,j+1}), j = 1, 2, 3$
4.発汗による放熱量	$E_{i,4} = Eb_i + Esw_i$

表9-5 人体形状データ

(a)身長、表面積、有効放射面積

	身長(m)	表面積(m ²)	有効放射面積(m ²)
詳細モデル	1.75	1.72	1.28
65MN ³⁾	1.74	1.87	-

(b) 部位別表面積

単位: m²

	頭部	胸	背中	胴部	上腕	前腕	手	大腿	下腿	足
詳細モデル	0.138	0.213	0.141	0.169	0.178	0.119	0.104	0.330	0.224	0.102
65MN ³⁾	0.140	0.175	0.161	0.221	0.192	0.126	0.100	0.418	0.224	0.112

表9-6 各種物理量と生理量及び制御信号の拡張方法

$Qb_{i,j}, BF_{i,j}(j = 1, 2, 3), Cd_{i,j}(j = 1, 2, 3)$	物理量を直接、部位に関する面積率の1.5乗で補正し、表面要素に配分
$W_{i,2}, Ch_{i,2}$	重み係数を部位に関する面積率の1.5乗で補正し、表面要素に配分
$BF_{i,4}, Esw_i$	各項に含まれている制御信号 $ERR_{i,4}$ を各表面要素毎に評価することにより局部生理量として考慮
$Err_{i,1}, Cld_{i,1}, Wrm_{i,1}$	headの各表面要素で評価された制御信号を面積率に応じて平均化
$Clds, Wrms$	各部位で表面要素毎に評価された制御信号を面積率に応じてそれぞれ平均化したものを統合

高く、日射の受熱部でその差が大きい。四肢の予測結果において、同一部位でも日射を受熱する表面と受熱しない裏面で皮膚温の差が見られ、拡張体温調節65MNモデルにより日射環境下における皮膚温分布の傾向が捉えられている。上腕では、冷房気流を直接受ける裏面の対流熱伝達率が表面より大きいと考えられ、サーマルマネキンで得られた一定の対流熱伝達率を与えた予測結果は、裏面側で測定値より高く、表面側で測定値より低くなった。同一部位で大きな気流分布が存在する場合、対流熱伝達率の与え方は皮膚温の予測結果に大きな影響を与える。

対流熱伝達量、放射熱伝達量、日射吸収熱量に関し、日射遮光有りの条件では、アトリウム壁面からの放射熱伝達及び天空日射により人体は加熱され、対流熱伝達により放熱している。日射遮光無しの条件でも、日射遮光有りと同様の傾向を示すが、直達日射が到達する部位では日射吸収熱量が大きく、対流熱伝達による放熱量も相対的に大きくなり、皮膚温が高くなる。また3/6条件では3/28条件に比べ室温が約4℃高いため対流熱伝達量は全体的に小さく、皮膚温も高くなる。直達日射が到達する躯幹及び四肢において日射遮光の有無により、躯幹では皮膚温変化が小さいため対流熱伝達量の変化が小さく、四肢では皮膚温変化が大きいため対流熱伝達量の変化が大きくなる傾向が見られる。

図9-14-1、図9-14-2に示すように、皮膚温の予測結果と測定結果を比較すると、その差は全身でほぼ1℃となった^{注16)}。ただし、四肢の皮膚温の予測精度は躯幹より劣る傾向が見られた。人体の各部位及び各層に流入する動脈血温度を全身で一定としていることが原因の1つと考えられ、四肢の皮膚温の予測精度に関する改善の必要性が認められた^{注17)}。

9-5. まとめ

①実験用アトリウムを用い、日射環境下において被験者実験を実施し

皮膚温などの生理量を測定した。同一部位でも日射を受熱する表面と日射を受熱しない裏面で皮膚温は最大約3℃異なった。

②日射環境下における皮膚温分布などを予測するために、詳細な人体形状に対応する体温調節65MNモデルの汎用的な拡張方法を提案した。体温調節65MNモデルの熱収支式を、人体形状を構成する表面要素に各部位別表面積の差異を考慮して適用し、制御信号を表面要素毎に評価することにより体温調節による局所の生理量などを考慮する。これにより表面要素単位でCFD・放射連成による詳細評価が可能となった。

③日射環境下において、拡張体温調節65MNモデルにより人体皮膚温分布を算出し、被験者実験結果と対比した。同一部位における日射を受熱する表面と受熱しない裏面での皮膚温の差など、日射環境下における皮膚温分布の傾向を概ね捉えることができた。

④同一部位で大きな気流分布が存在する場合、対流熱伝達率の与え方は皮膚温の予測結果に大きな影響を与える。

⑤皮膚温の予測結果と測定結果を比較した結果、その差は全身でほぼ1℃となった。四肢の皮膚温の予測精度は躯幹より劣る傾向が見られた。四肢の皮膚温の65MNモデルによる予測精度に関する改善の必要性が認められた。

【注釈】

- 1) 10:00 から南ガラスの遮光暗幕を閉じ冷房を稼働させた。
- 2) 身長1.74m、体重65kg、年齢24才で表面積はDuBoisの式¹⁴⁾から1.78m²と推察される。
- 3) 各皮膚温測定位置の約3cm直上をそれぞれの参照空気温度とし合計14点測定した。
- 4) 壁面を上中下3ブロックに分け、その寄与を検討した。各項の評価方法は以下の通り。①各壁面の対流熱伝達率 α_c ：冷房吹出風速に応じて設定した。ケース1では床面9.1W/m²K、南ガラス4.5 W/m²K、東西ガラス3.4 W/m²K、天井（上

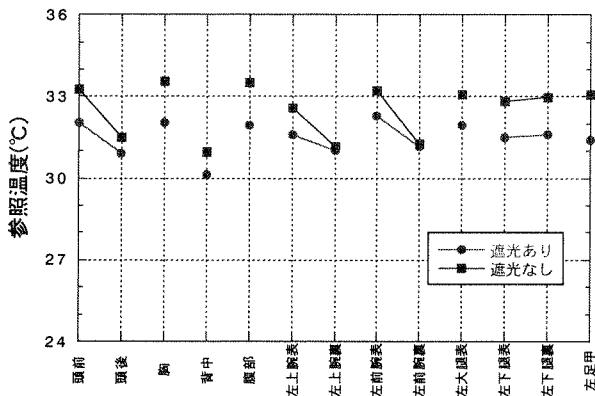


図9-11-1 被験者周りの参照温度測定結果(3/6条件)

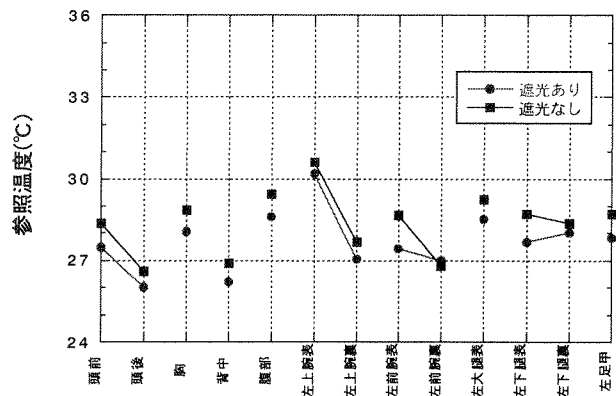


図9-11-2 被験者周りの参照温度測定結果(3/28条件)

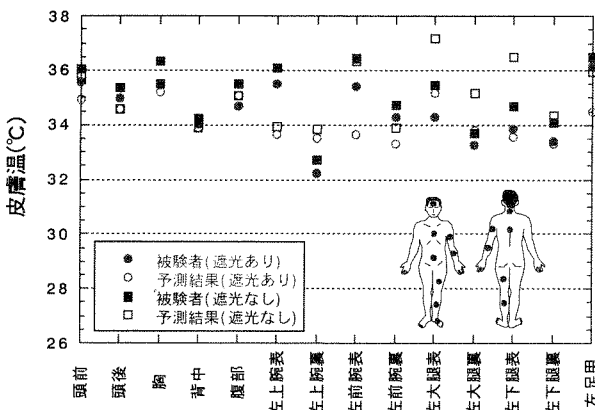


図9-12-1 皮膚温の予測結果と測定結果の比較(3/6条件)

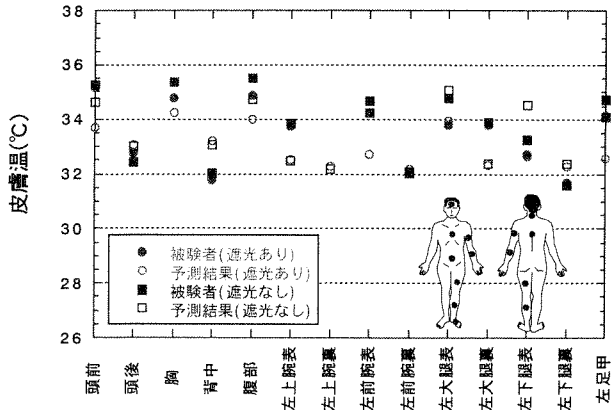


図9-12-2 皮膚温の予測結果と測定結果の比較(3/28条件)

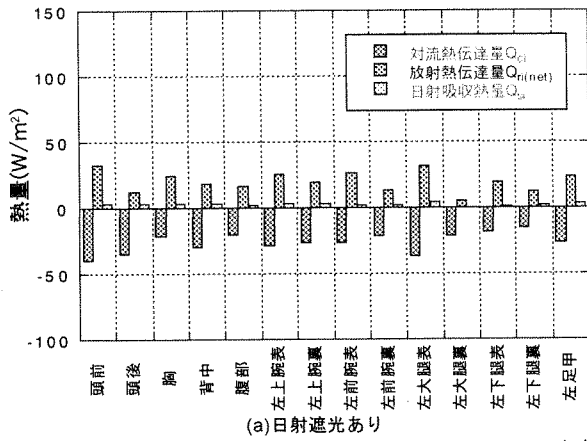


図 9-13-1 皮膚表面における各熱量(3/6 条件)

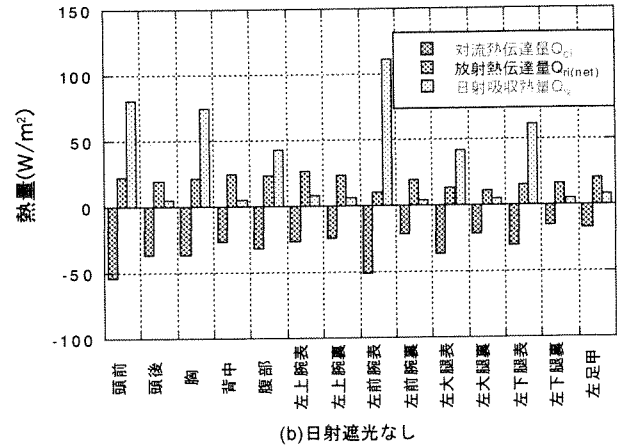


図 9-13-2 皮膚表面における各熱量(3/28 条件)

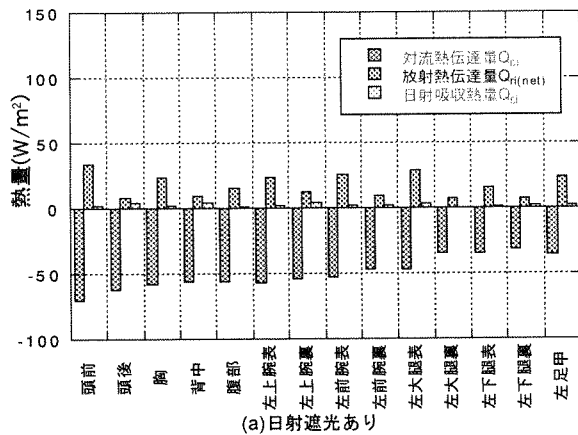


図 9-13-2 皮膚表面における各熱量(3/28 条件)

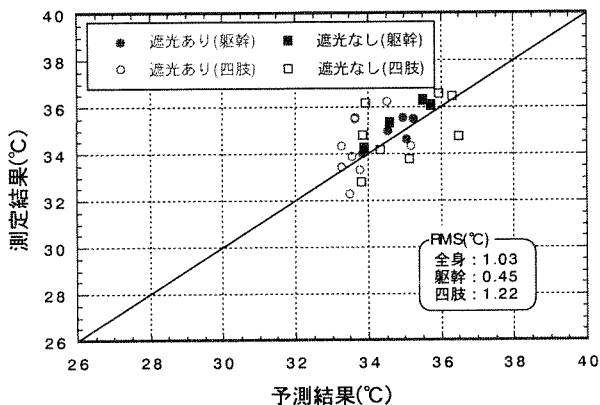
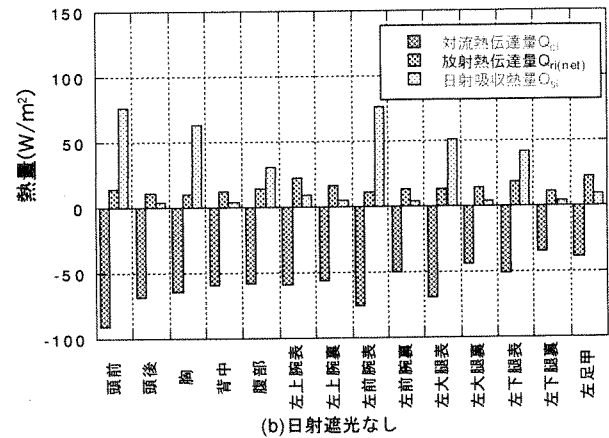


図 9-14-1 皮膚温の予測結果と測定結果の対応(3/6 条件)

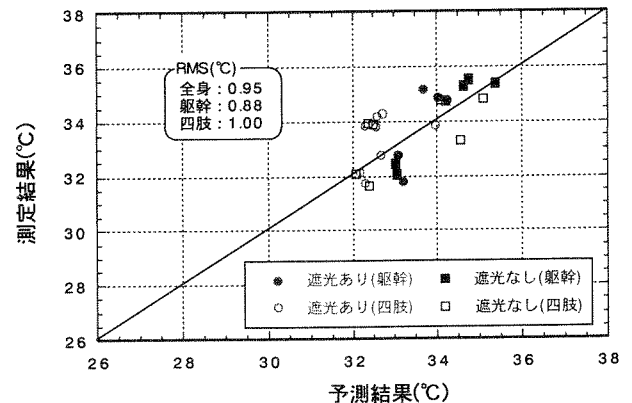


図 9-14-2 皮膚温の予測結果と測定結果の対応(3/28 条件)

昇流) 4.5 W/m²K、ケース 2 では床面 9.1 W/m²K、南ガラス下段 9.1 W/m²K、南ガラス中上段 4.5 W/m²K、東西ガラス 3.4 W/m²K、天井 (上昇流) 4.5 W/m²K とした。②室内鉄骨からの対流熱伝達 Q_G : 鉄骨の対流熱伝達率を 4.5 W/m²K とした。鉄骨表面積は上中下段にそれぞれ 52、10、10 m² ずつ振り分けた。

5) 3/6 条件の左大腿、左下腿、左足の対流熱伝達率に遮光あり、遮光なしで差異が見られる。この原因の 1 つとして、皮膚温と参照空気温度の差が他の部位に比べ小さくなったため、測定誤差が結果に大きく表れた可能性が考えられる。

6) 30 分間測定された 14 点の参照温度の平均値の差は、日射遮光の有無を含め RMS(Root Mean Square: 二乗平均値) で 3/6 条件 0.6°C、3/28 条件 1.1°C であった。

7) 3/28 条件の上腕裏の皮膚温は、参照温度とほとんど同じであったため検討から除いた。

8) 皮膚露出部位では、着衣表面-皮膚表面間の熱伝達率 K' を十分大きく設定することにより、汎用性をもたせている。

9) 人体形状モデルに対応する体温調節 65MN モデルの拡張方法の妥当性については、今後の検討課題である。

10) 被験者の姿勢、手を置く位置なども形状モデルに反映した。形状モデルの身長は 1.72m、表面積は 1.75m² であり、被験者の形状と 2% 以内で対応している。

11) 参照空気温度に関し四肢では左右対称を仮定した。皮膚温測定点以外の参照空気温度は、測定された合計 14 点の参照空気温度を基に線形補間により与えた。

12) 測定された水平面全日射量には時刻において変化が見られたため、被験者に到達する日射量を 5 分単位で算出し、これを平均した平均到達日射量で評価した。被験者皮膚表面での日射吸収率を 0.7 とした。また、アトリウム内部の鉄骨、サッシュなどの構造物を形状モデルに組み込み、これによる日射の遮蔽も考慮した。

13) 30 分間測定された湿度の平均値は相対湿度に換算して、3/6 日射遮光あり 23.9%、3/6 日射遮光なし 21.1%、3/28 日射遮光あり 10.0%、3/28 日射遮光なし 8.6% であった。

14) 皮膚温測定点に対応する人体モデルの表面要素が必ずしも 1 つに決まらな

いため、皮膚温の予測結果は測定点を中心とした半径1cmの円内に含まれる表面要素の予測結果の面積平均値とした。

15)裸体条件の場合、皮膚表面での定常熱収支は対流熱伝達量、放射熱伝達量、日射吸収熱量、蒸発損失熱量及び人体内部における生成・輸送熱量から構成される。ここでは周囲環境との顕熱放熱に関わる対流熱伝達量、放射熱伝達量及び日射吸収熱量を示したため、これらの総和は0にはならない。

16)本報で用いた体温調節65MNモデルは定常モデルであるため、皮膚温の予測結果と比較するためには、測定された皮膚温に定常性が要求される。本報では、30分間測定された皮膚温の平均値を定常データと仮定しているが、図9-9-1及び図9-9-2に示すように一部に非定常性が見られる。このため、測定された皮膚温に関し、定常性を仮定できるデータ、すなわち予測結果と比較することができるデータを検討の対象とする必要がある。皮膚温の予測値に関する精度は、横山らの研究¹⁹⁾を参考にして1.0℃以内が工学的妥当と判断できる要件の1つと考えた。この精度の検討を可能とするという観点から、付図1-1、付図1-2に示すように30分測定された皮膚温の標準偏差を計算し、これが0.5℃以内となる皮膚温を比較の対象とした。これを超える皮膚温、すなわち3/6遮光無しの条件の「腹部」及び「左大腿表」については検討から除いた。

17)四肢の皮膚温の予測精度が低下する要因として、体温調節モデルのモデル化に関する精度以外に、体温調節モデルの境界条件に関する精度が考えられる。ここでは、境界条件に関する精度として空間物理量の測定誤差を取り上げ、個々の測定値、予測精度の信頼性が皮膚温の予測精度に与える影響を検討した。別報³⁾の検討から、熱電対で測定した参照空気温度、壁表面温度の測定精度は約±0.5℃、一方日射吸収熱量の予測精度は約10%、サーマルマネキンから得られる対流熱伝達量の予測精度は約7%であると考えられる。この条件下で皮膚温の予測精度に与える影響を検討したところ、付表1に示すように全ての場合（測定誤差が人体に対し全て冷却側に働くとして仮定した場合、人体に対し全て加熱側に働くとして仮定した場合）において四肢の予測精度が躯幹より低下する結果が得られた。以上のことから、四肢の皮膚温の予測精度が低下する要因として、65MNモデルの体温調節方法のモデル化によるものが大きいと考えられる。

APPENDIX—拡張した体温調節65MNモデルとCFD・放射との連成方法

別報で示した放射・対流連成方法⁷⁾に基づき、拡張した体温調節65MNモデルとの総合連成シミュレーション方法について述べる。

(1)対流計算から放射計算

(3)式に示される壁面での熱収支式における放射熱平衡収束計算では、1ステップ前の室内側参照温度 T_{in} 、対流熱伝達率 α_{ci} 、及び予め計算された日射吸収熱量 Q_{si} 、外側参照温度 T_{ref} 、室内壁表面-外側参照温度間の熱伝達率 K' を与え、壁面温度 T_i 、放射熱伝達量 $Q_{r(net)}$ を求める。

$$\alpha_{ci}(T_{in} - T_i) + Q_{r(net)} + Q_{si} + K'(T_{ref} - T_i) = 0 \quad (3)$$

人体表面では、(3)式を着衣表面で構成し、外側参照温度 T_{ref} として1ステップ前の皮膚温、室内壁表面-外側参照温度間の熱伝達率 K' として着衣表面-皮膚表面間の(着衣)熱伝達率を与えることにより、放射熱平衡収束計算を行う^{注3)}。

(2)拡張した体温調節65MNモデルの収束計算

人体表面を構成する全要素に対し、得られた放射熱伝達量 $Q_{r(net)}$ 及び、放射熱平衡収束計算で用いた室内側参照温度 T_{in} 、対流熱伝達率 α_{ci} 、日射吸収熱量 Q_{si} をそれぞれ与え、拡張した体温調節65MNモデルの収束計算を行う。

(3)放射計算から対流計算

放射熱平衡収束計算で得られた壁面温度、着衣外表面温度 T_i 及び1ステップ前の室内側参照温度 T_{in} 、対流熱伝達率 α_{ci} を用い対流熱伝達量 $\alpha_{ci}(T_{in} - T_i)$ を算出し、対流計算を行う。これにより室内側参照温度 T_{in} などを更新する。

この一連の手続きをくり返すことにより連成計算を達成する。

【記号一覧】

A_i : 各部位表面積[m²]

$B_{i,j}$: 中央血液溜まりと各Nodeとの交換熱量[W]

$BF_{i,j}$: 血流量[mL/s]

$Cd_{i,j}$: 隣接する層との間の熱コンダクタンス[W/℃]

$Ch_{i,j}$: ふるえ熱産生量[W]

$Cld_{i,j}$: 皮膚冷受容器からのColdシグナル[℃]

$Clds$: 皮膚冷受容器からの重み付け出力[℃]

$D_{i,j}$: 隣接する層との熱伝導による交換熱量[W]

$E_{i,1}$: 呼吸による交換熱量[W]

$E_{i,4}$: Skin層における蒸発熱損失量[W]

Eb_i : 不感蒸泄による熱損失量[W]

$Err_{i,j}$: エラーシグナル[℃]

Esw_i : 発汗による蒸発熱損失量[W]

$Q_{i,j}$: 産熱量[W]

Q_{ai} : 皮膚表面から着衣表面までの熱伝達量[W/m²]

Q_{ci} : 皮膚または着衣表面での対流熱伝達量[W/m²]

$Q_{n(net)}$: 皮膚または着衣表面で吸収される放射熱伝達量[W/m²]

Q_{si} : 皮膚または着衣表面で吸収される日射熱量[W/m²]

$Qb_{i,j}$: 各部位基礎代謝量[W]

$T_{i,j}$: 温度[℃]

T_{cb} : 中央血液溜まりの温度[℃]

$W_{i,j}$: 外部仕事による熱産生量[W]

$Wrm_{i,j}$: 皮膚温受容器からのWarmシグナル[℃]

$Wrms$: 皮膚温受容器からの重み付け出力[℃]

fcl_i : 着衣面積比[-]

α : 血液の対向流熱交換効率[-]

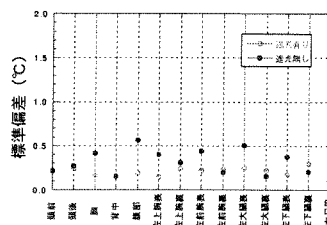
$\delta_{i,j}$: クロネッカーのデルタ記号($i=j$ で1、その他は0)[-]

ρc : 血液の体積比熱(密度と比熱の積)[J/mLK]

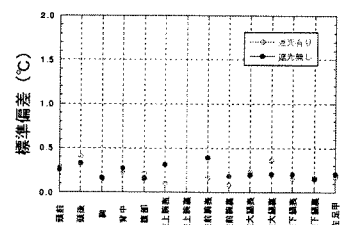
添字

i : 人体表面要素番号

j : 層方向の分割(1~4)



付図1-1. 30分測定された皮膚温の標準偏差(3/6条件)



付図1-2. 30分測定された皮膚温の標準偏差(3/28条件)

付表1 皮膚温の予測結果と測定結果の対応(RMS,℃)

	3/6条件(冷却側)	3/6条件(加熱側)	3/28条件(冷却側)	3/28条件(加熱側)
全身	1.08	1.01	1.15	0.91
躯幹	0.63	0.39	1.00	0.89
四肢	1.26	1.22	1.23	0.92

【参考文献】

- 1) 尾関義一、小西正哲、成田千恵、田辺新一：数値計算による矩形面と全身との形態係数の評価、日本建築学会計画系論文集、No.522、pp.15-22、1999年8月。
- 2) 尾関義一、小西正哲、成田千恵、田辺新一：数値計算による人体の有効放射面積の評価、日本建築学会計画系論文集、No.525、pp.45-51、1999年11月。
- 3) 尾関義一、平松徹也、小西正哲、中野淳太、田辺新一：日射環境下におけるサーマルマネキン周りの対流熱伝達率の評価、日本建築学会計画系論文集、No.555、pp.29-36、2002年4月。
- 4) 田辺新一、中野淳太、小林弘造：温熱環境評価のための65分割体温調節モデルに関する研究、日本建築学会計画系論文集、No.541、pp.9-16、2001年3月。
- 5) 尾関義一、尊田嘉之、平松徹也、斉藤恒洋、大柿聡：放射・対流連成解析のための複雑な内部形状、大規模メッシュに対応する日射熱取得計算手法に関する研究、空気調和・衛生工学会論文集、No.66、pp.1-11、1997。
- 6) 尾関義一、斉藤恒洋、大柿聡：複雑な内部形状を有する大規模メッシュ対応型放射伝熱計算手法に関する研究、空気調和・衛生工学会論文集、No.62、pp.101-110、1996。
- 7) 尾関義一、加藤信介、村上周三：実験用実大アトリウム内の熱伝達・気流性に関するCFD解析(第1報)ーCFD・2波長放射連成シミュレーションにおけるサッシュのモデリング、空気調和・衛生工学会論文集、No.68、pp.65-75、1998。
- 8) 曾潔、加藤信介、村上周三：人体皮膚全熱放熱特性に関するCFD・放射・湿気輸送連成解析、生産研究、pp.78-85、1998。
- 9) 富永正道、大森俊明、梁禎訓、加藤信介：非定常、不均一温熱環境場における人体熱モデルに関する研究(その2)、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp.1757-1760、2002。
- 10) Dan Nortoft Sorensen, Lars Kollgaard Voigt : Modelling flow and heat transfer around a seated human body by computational fluid dynamics, Building and Environment, Vol.38, No.6, pp.753-762, 2003。
- 11) 庄司祐子、竹森利和、中島健：人体着衣熱モデルとCFDの連成システムに関する研究、第37回日本伝熱シンポジウム講演論文集、pp.169-170、2000。
- 12) 横山真太郎、角田直人、富樫貴子、中村光良、正木辰明、濱田靖弘、中村真人、落藤澄：部位別特性を考慮した生体内温度予測プログラムの開発(第3報)、空気調和・衛生工学会論文集、No.84、pp.43-52、2002。
- 13) 田辺新一、長谷部ヤエ：皮膚温度可変型サーマルマネキンによる室内環境評価方法に関する研究、日本建築学会計画系論文集、No.448、pp.1-8、1993年6月。
- 14) 快適な温熱環境のメカニズム、空気調和・衛生工学会、丸善、1997。

第 10 章

腰背部皮膚温の変化が胃腸運動へ与える影響

第10章 腰背部皮膚温の変化が胃腸運動へ与える影響

EFFECTS OF LUMBAR SKIN TEMPERATURE ON GASTROINTESTINAL MOTILITY

Effects of lumbar skin warming on gastric motility, blood pressure, and diameters of the abdominal arteries were examined in healthy college students. A multiple bandpass filter analysis of the electrogastrogram (EGG) showed that lumbar skin warming (42°C, 20 min) increased the spectral power of interdigestive migrating motor complex (IMC) of the stomach, 2.55~3.05 cycles/min, by over twofold. Lumbar skin warming increased systolic blood pressure by 15%. However, a fast Fourier transform analysis of the cardiac intervals showed that neither sympathetic nor parasympathetic neurons innervating the heart induced blood pressure increase. A possibility is then raised that the increase in blood pressure by skin warming is due to vasoconstriction of the abdominal arteries as major resistant arteries. Therefore, it is hypothesized that changes in gastric blood flow due to vasoconstriction and following vasodilatation by lumbar skin warming activates IMC. An ultrasound imaging of the abdominal aorta and coeliac artery supplying blood to the stomach showed that the diameter of the coeliac artery increased by 13% by the skin warming. Vasodilatation of the coeliac artery coincided with the activation of IMC. These results support the hypothesis, although a possibility of vasoconstriction preceding vasodilatation is still to be explored.

Keywords: Lumbar skin temperature, Gastrointestinal motility, Blood pressure, Electrogastrogram

腰背部皮膚温, 胃腸運動, 血圧, 胃電図

10-1. 研究目的

現代はストレス社会と言われている。ストレスの構成が複雑化するばかりでなく、人々のストレス耐性も低下していることが指摘されている。循環型社会への移行などに代表される社会経済構造の変化も、必然的にライフスタイルの変更をともない、新たなストレスを生む可能性が高い。このような時代には、人々の健康度や生活への満足感などのQOL (quality of life)をどのように維持・向上させるかが大きな問題となるであろう。そのような場合、身近にある自然資源を再評価し、それを利用することに新たな価値を見いだしていくことがひとつの解決策であると考えられる。本研究は、身近な環境要因の中から温熱に着目し、そのストレス軽減効果を明らかにすることで、近未来社会のQOLの維持・向上のための科学的背景を提供することを目的としている。

従来、胃や腸などの消化器系に現れるストレス反応はほとんどが機能異常であり、検査によって器質的異常が認められないことから、医療の対象として軽視される傾向にあった。一方、古くから湯治の効用として、腰浴（腰湯）による胃腸機能改善効果があげられている。看護の現場においても、長期臥床患者や開腹手術後の患者の便秘や腹部膨満感の軽減に腰背部の加温が行われている。しかし、腰背部の加温が胃腸機能を改善するか否かについては、皮膚加温中の腸音聴取により腸運動を評価することを試みた実験例が若干報告されているのみである。そこで本研究では、胃電図を解析することで

腰背部の加温が胃運動に及ぼす影響を明らかにし、皮膚加温の影響が認められた場合には、さらにそのメカニズムを解析することを目指した。本研究により、胃運動に現れるストレス反応を軽減し、QOLの維持・向上につながる温熱の利用法のひとつが明らかになることが期待される。

10-2. 研究方法

10-2-1 腰背部皮膚加温が胃運動と血圧に及ぼす効果

(1) 被験者および実験倫理

被験者は、山梨県立看護大学短期大学部、山梨医科大学、富士吉田市立看護専門学校に所属する健康な女子学生18名とした（年齢20～38歳）。実験は、山梨県環境科学研究所倫理委員会の審査と承認を受けて行ない、実験に先立ち被験者のインフォームドコンセントを書面にて確認した。

(2) 胃電図および血圧の測定

胃電計（EGS1-RS, ニプロ）を用い、図10-1に示す電極配置で胃電図（EGG: electrogastrogram）を記録した。記録した胃電図をMultiple Bandpass Filter Analysis (MBFA)を用いて周波数解析し、優勢周波数と2.55～3.05 cpmの周波数帯パワーを求めた。一回のサンプリング間隔は0.17秒で、サンプルサイズは600ポイントとした。2.55～3.05 cpmの周波数帯パワーを求めた理由は、この周波数帯が空腹時の伝播性収縮運動（IMC: interdigestive migrating motor complex）を表わしているためである。空腹期の伝播性収縮運動の発生機序は、食後の蠕動運動

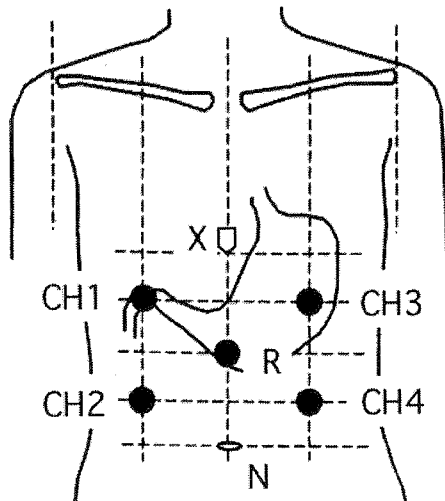


図10-1 胃電図(EGG)記録のための電極配置

(4チャンネル記録) R, 基準電極; N, 臍; X, 剣状突起

と同一であり、両運動とも胃内内容を輸送する機能を持っている。蠕動運動は食物を輸送するのに対し、空腹期の伝播性収縮運動は劣化した胃壁表面の内皮細胞を移送することで、新旧内皮細胞の交代を促進していると考えられている。

正中動脈の圧を、被験者の右手首で連続血圧計 (Jentow, 日本コーリン) を用いて記録した。収縮期圧および弛緩期圧、平均血圧、拍動間隔を連続記録した。実験後、拍動間隔を高速フーリエ解析を用いて周波数分析することにより、0.15~0.40 Hzの高周波数成分パワー(HF)と0.04~0.15 Hzの低周波数成分パワー(LF)および両者の比(LF/HF)を求めた。一般に、LFとLF/HFは心臓交感神経の活動を反映し、HFは心臓副交感神経の活動を反映すると言われている。高速フーリエ解析のためのサンプリング間隔は0.125秒とし、サンプルサイズは512ポイントとした。

(3) 実験手順

被験者は、実験を開始する2時間以上前に、朝食または昼食を済ませた。被験者は、実験準備室で実験の説明および健康状態の問診を受け、必要書類等に署名、捺印した後、室温24℃、相対湿度40%に設定された人工気象室に入室し、設置されたベッドに背もたれを6°起こした状態で仰臥位をとった。その後、腰背部加温の心理効果を調べるため、日本語版POMS (profile of mood states, 金子書房)により被験者の気分をスコア化した。POMSへの回答は、口頭で行なった。人工気象室に入室してPOMSへの回答を終了するまでに、30分をかけた。その後、胃電図記録用電極の装着と連続血圧計の設定を行ない、血圧センサー装着後血圧の値が安定するのを最低10分間待ってから、実験を開始した。

(4) 実験群における腰背部皮膚加温

市販のホットパック (幅30cm, 長さ40cm) を保温器中で62℃とし、綿タオルで覆うことで表面温度を42℃とした。このホットパックを、第11胸椎から第2仙椎をカバーするように皮膚に当て温度刺激とした。温度刺激の時間を5~30分間で変化させた予備実験の結果、20分が最も快適であるという結果が得られていたので、今回の刺激時間は20分とした。実験群では、胃電図と血圧を5分間記録し (安静期)、皮膚加温を20分行ない (加温期)、その後5分間記録を続け (回復期)、実験終了とした。回復期の直後に再度、POMSへの回答を求めた。実験群の被験者数は8名とした。

(5) 対照群

本実験では、胃電図に腹筋の活動が混入するのを防ぐため、

被験者は仰臥位をとった。立位または坐位から仰臥位になることで、重力の作用方向が変わり、胃腸の位置が変化することが知られている。このような位置の変化が胃運動に影響することが十分予想される。そこで、腰背部皮膚加温を行わず、実験群と同じ時間仰臥位をつづけた被験者10名を対照群として、実験群との差異を検討した。

(6) データのサンプリング

実験群では、皮膚加温開始前5分間を刺激前置とし、20分間の加温の最後の5分間を刺激値、加温終了後5分間を刺激後値とした。対照群においても、実験群と同様の時間でデータを採取した。

(7) 統計処理

POMSの結果は、対応のあるt検定により有意差検定を行った。生理指標については、ANOVAで検定した後、下位検定としてフィッシャー検定を用いた。すべての検定法において、0.05未満のp値をもって有意差ありと判定した。

10-2-2 腰背部皮膚加温が腹腔内動脈の血管径に及ぼす効果

(1) 被験者および実験倫理

被験者は、山梨県立看護大学短期大学部に所属する健康な女子学生19名とした (年齢20~24歳)。実験は、山梨県環境科学研究所倫理委員会の審査と承認を受けて行ない、実験に先立ち被験者のインフォームドコンセントを書面にて確認した。

(2) 腹腔内動脈の血管径の測定

超音波診断装置 (Sono Site 180 Plus, オリンパス) および腹部用プローブ (C60 convex, オリンパス) を用いて、腹腔内動脈の撮像を行なった。19名中16名の被験者で、腹部大動脈と腹腔動脈の分岐部の描出に成功した (図10-2)。これら16名の被験者で、腹部大動脈と腹腔動脈の血管径を測定した。腹部大動脈から分岐した腹腔動脈は、胃と十二指腸に血流を供給している。

(3) 実験手順

被験者は、実験を開始する2時間以上前に、朝食または昼食を済ませた。被験者は、実験準備室で実験の説明および健康状態の問診を受け、必要書類等に署名、捺印した後、室温24℃、相対湿度40%に設定された人工気象室に入室し、設置されたベッドに背もたれを6°起こした状態で仰臥位をとった。その後、腹腔内動脈の撮像を試み、腹部大動脈と腹腔動脈が同時に描出できる位置を皮膚上にマークした。腰背部皮膚にサーミスタ温度計のセンサーを貼付け、皮膚温が安定するのを待って実験を開始した。

(4) 実験群と対照群

腹部大動脈と腹腔動脈を、その分岐部で同時に描出できた被験者16名の内、9名を実験群とし7名を対照群とした。実験

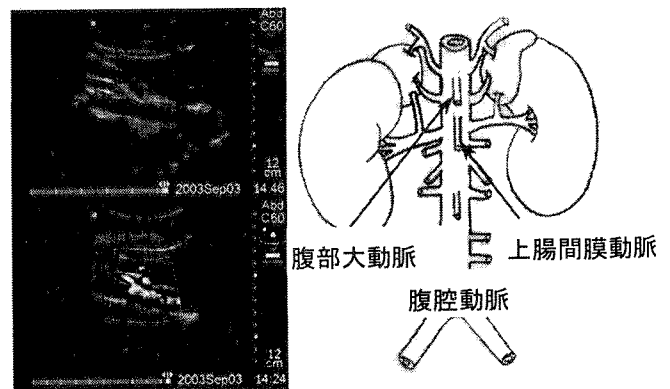


図10-2 超音波血管像

群では、10-2-1- (4) と同様の方法で、腰背部加温を行なった。対照群では、皮膚加温は行なわず、被験者は実験群と同じ時間仰臥位を続けた。実験群の加温期に相当する間は、被験者の腰背部に表面温度35℃のヒートパットをあてた。

(5) データの表現

血管径は絶対値で表示するとともに、刺激前置を100として、そこからの変化を%として算出した。

(6) 統計処理

加温10分と加温終了5分の値を、実験群と対照群でそれぞれ対応のあるt検定によって有意差検定した。0.05未満のp値をもって有意差ありと認めた。

10-3. 実験結果

10-3-1 腰背部皮膚加温が胃運動と血圧に及ぼす効果

(1) 腰背部皮膚加温の心理効果

腰背部皮膚加温の前後でPOMSによってスコア化された気分の変化を比較すると、皮膚加温により緊張・不安、怒り・敵意、疲労感、抑鬱感、混乱度がともに有意に低下していることがわかった(図10-3)。活力は増加する傾向にあったが、有意差は認められなかった。対照群でも仰臥を続けることで、緊張・不安、怒り・敵意、疲労感、抑鬱感が有意に低下した。混乱度の低下は認められず、活力の変化もなかった。

(2) 仰臥位が胃電図の優勢周波数に及ぼす効果

胃電図の優勢周波数は、安静期と比べそれ以降のデータでは高周波側に移行し、2.55~3.05 cpmの伝播性収縮運動の周波数帯に入ってきた。優勢周波数の上昇率は、実験群で22~32%(図10-4)、対照群で20~39%(図10-5)であり、両群でほぼ同様の上昇を示した。この結果から、仰臥位を続けることで、伝播性収縮運動が優勢になることが明らかとなった。

(3) 腰背部皮膚加温が伝播性収縮運動に及ぼす効果

実験群では、腰背部加温によって伝播性収縮運動の周波数帯パワーが増加した(図10-6)。特に、加温終了後の増加が大きく、安静期と比べ212~234%の増加であった。皮膚加温を行わない対照群では、安静期と比べそれ以後のデータでは、実験群とは逆に周波数帯パワーは減少していた(図10-7)。対照群のデータに示されるように、仰臥位を続けることで伝播性収縮運動が優勢にはなるが、仰臥位を続けるとその強度は小さくなると考えられる。

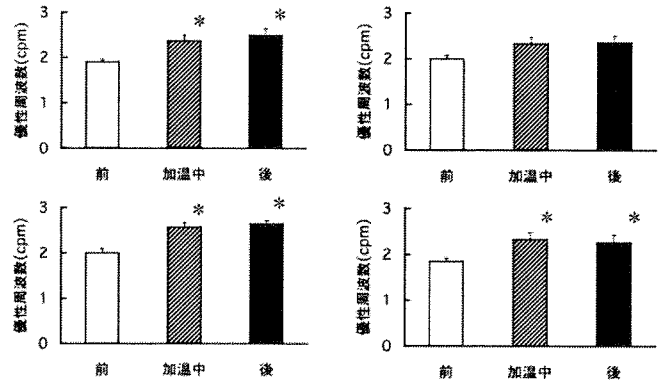


図10-4 腰背部皮膚加温が胃電図優勢周波数へ与える効果(実験群)
加温前5分(前)、加温終了直前5分(加温)、加温後5分(後)の値を示す。平均値と標準誤差(n=8, *:P<0.05)

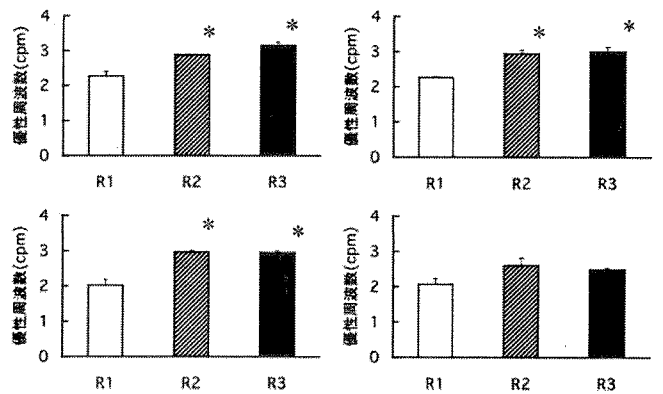


図10-5 胃電図優勢周波数の変化(対照群)
R1, R2, R3は実験群の加温前5分(前)、加温終了直前5分(加温)、加温後5分(後)にそれぞれ相当する。
平均値と標準誤差(n=10, *:P<0.05)

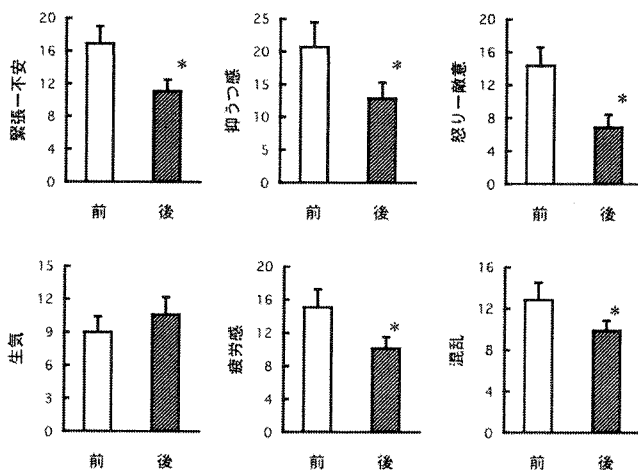


図10-3 腰背部皮膚加温の心理効果

加温前後のPOMSの得点を示す。平均値と標準誤差(n=8, *:P<0.05)

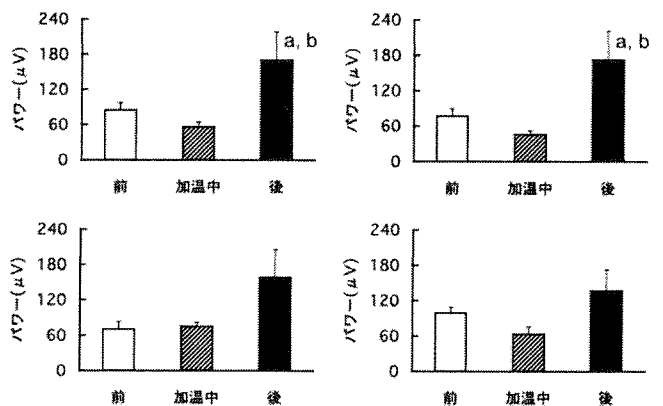


図10-6 腰背部皮膚加温が胃の伝播性収縮運動の周波数帯のパワー(2.55~3.05cpm)に与える効果(実験群)
加温前5分(前)、加温終了直前5分(加温)、加温後5分(後)の値を示す。平均値と標準誤差(n=8, a:前洛経i有意差, b:加温洛経i有意差, P<0.05)

(4) 腰背部皮膚加温が血圧と心拍数に及ぼす効果

実験群では、皮膚加温中に収縮期圧が15%、平均血圧が14%上昇した(図10-8)。弛緩期圧と脈圧には変化は認められなかった。対照群では、血圧パラメータの変化は観察されなかった。心臓の拍動間隔は、皮膚加温によって変化することはない。高速フーリエ解析により算出したLF、LF/HF、HFは皮膚加温の影響を受けなかった。

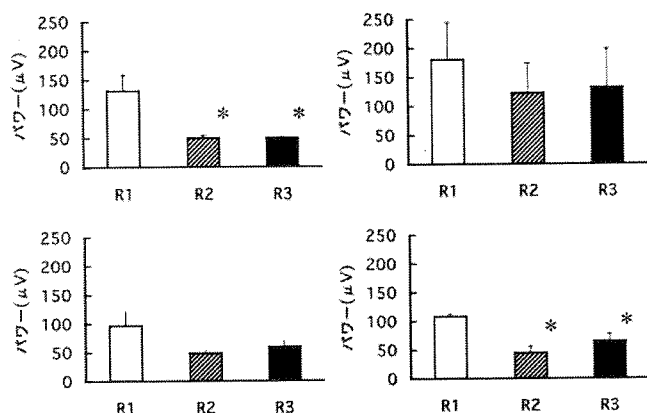


図10-7 胃の伝播性収縮運動の周波数帯のパワー(2.55～3.05cpm)の変化(対照群)

R1, R2, R3は実験群の加温前5分(前)、加温終了直前5分(加温)、加温後5分(後)にそれぞれ相当する。平均値と標準誤差(n=10, *:P<0.05)

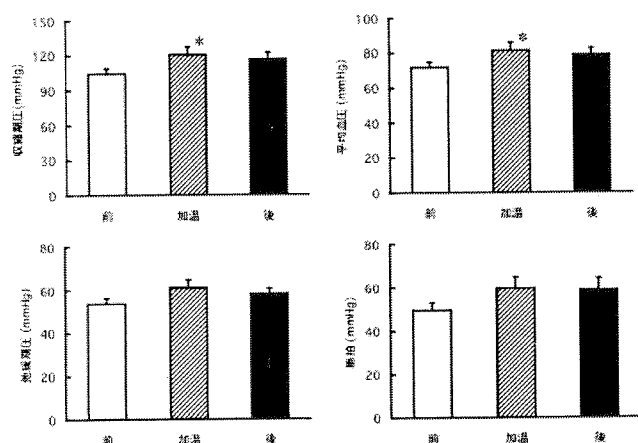


図10-8 腰背部加温が血圧に与える効果(実験群)

加温前5分(前)、加温終了直前5分(加温)、加温後5分(後)の値を示す。平均値と標準誤差(n=8, *:P<0.05)

10-3-2 腰背部皮膚加温が腹腔内動脈の血管径に及ぼす効果

(1) 安静時血管径

超音波診断装置により描出された安静時の腹部大動脈血管径は、実験群で 12.21 ± 0.45 mm (平均値±標準誤差、n=9)、対照群で 13.16 ± 0.90 mm (n=7)であった。腹腔動脈の安静時血管径は、実験群で 6.67 ± 0.62 mm、対照群で 7.81 ± 0.76 mmであった。安静時血管径に群間の差は見られなかった。

(2) 腰背部皮膚加温が腹腔内動脈の血管径へ及ぼす効果

実験群および対照群での腰背部皮膚温の変化を図10-9に示す。腰背部皮膚温は、加温により上昇し、加温終了後5分で4℃下降した。安静時血管径を100として、腰背部皮膚加温が血管径に与える効果を検討した。実験群の腹腔動脈血管径は加温中は減少傾向を示したが、加温後には増加し安静時血管径

の $113.2 \pm 8.3\%$ に達した(図10-10)。対照群の腹腔動脈径は減少傾向を示し、安静時血管径を超えることはなかった(図10-10)。両実験群での腹部大動脈径は、99.9%から104.5%の間で変動し、加温による効果は認められなかった。腰背部皮膚の加温によって腹腔動脈の血管径が変化しても、上流にある腹部大動脈の血管径は変化しないと考えられる。

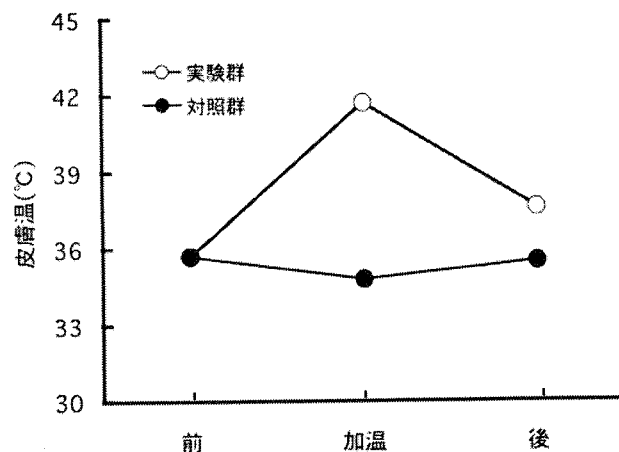


図10-9 腰背部皮膚温の変化

実験群(n=9)と対照群(n=7)での平均値と標準誤差を示す。

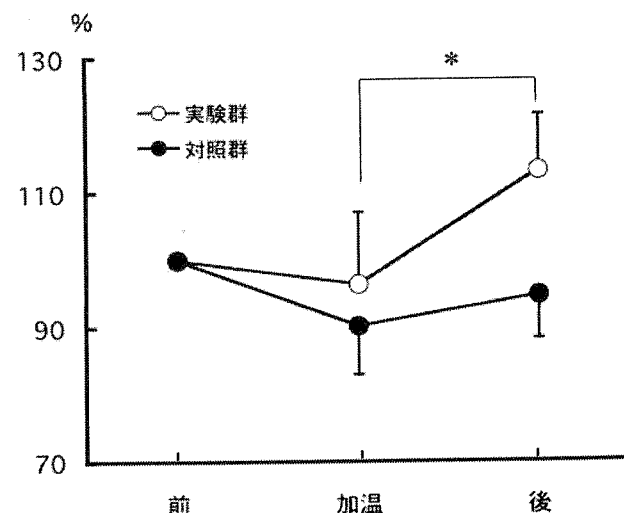


図10-10 腹腔動脈血管径の変化

安静時の値を100%とする。実験群(n=9)と対照群(n=7)での平均値と標準誤差を示す。(*:p<0.05)

10-4. 考察

(1) 姿勢の変化と胃運動

立位または坐位を保っていた人が仰臥位をとると、胃電図の優勢周波数が伝播性収縮運動の周波数帯に移行してくることが今回の実験で明らかになった(図10-4、10-5)。仰臥位をとることで胃が体軸の垂直方向にかかっていた重力から解放され、胸腔方向へ移動することが原因であると考えられる。

(2) 腰背部皮膚加温と伝播性収縮運動

腰背部加温を20分続けた後、伝播性収縮運動の周波数帯パワーが増加した(図10-6)。皮膚加温が刺激となって胃の伝播性収縮運動が強く起こったと解釈できる。図10-9に示すように、腰背部皮膚温は加温終了後も高いレベルを保っているので、ヒートパットを取り除いた後も持続する加温効果が胃運

動を惹起したと見るか、加温20分で最高レベルに達した皮膚温がゆっくりと下降してくることが胃運動亢進の原因なのか、今後の実験で確認する必要がある。腰背部や腹部の温電法が、胃腸運動を促進すると一般に言われ、看護現場でも長期臥床患者や開腹手術後の患者に盛んに温電法が行われている。しかし、温電法の効果を具体的に示した研究は少なく、温電法による腸音の増加が報告されているのみである¹⁾²⁾。今回の実験は、腰背部加温が胃の伝播性収縮運動を増強することを初めて示した³⁾。腹部温電法が、胃電図上に現れる6 cpmの成分を増強することも、今回の結果とほとんど同時に報告された⁴⁾。胃電図に現れる6 cpmの成分は、小腸の運動を反映すると言われている。

(3) 腰背部皮膚加温と血圧・心拍数

腰背部皮膚加温により心臓の拍動間隔は変化せず、収縮期圧と平均血圧が上昇した。この時、心臓交感神経の活動(LF, LF/HF)や心臓副交感神経の活動(HF)は変化しなかった。したがって、血圧上昇の原因を、心機能亢進による心拍出量の増加に帰することはできない。その代わり、血圧変動に関わる抵抗血管の収縮反応が起こっていたと考えざるを得ない。末梢や中枢の温度受容器を加温すると内臓交感神経活動の亢進によって、腸間膜動脈の血管収縮が起こり腸間膜動脈血流が減少することが知られている⁵⁾⁶⁾⁷⁾。腸間膜動脈を含む腹腔内動脈は、主要な抵抗血管として血圧調節⁸⁾や高血圧の発症⁹⁾に関わっている。これらのことから考えて、今回の腰背部皮膚加温による血圧の上昇は、内臓交感神経活動を介する腹腔内血管の収縮により説明できる可能性が高い。最近、麻酔下のラットを用いた実験で、背部皮膚の感覚神経の電気刺激が腸間膜動脈の毛細血管前細動脈の血管収縮が起こることが報告された¹⁰⁾。皮膚の加温によって腹腔内血管の収縮が起こる可能性が、動物実験によっても支持された。

(4) 腰背部皮膚加温と腹腔動脈血管径

胃と十二指腸に血液を供給している腹腔動脈の血管径は、加温終了後に増大していることがわかった(図10-10)。加温中の腹腔動脈径は安静時より低い値を示したが、統計的有意差は認められなかった。腹腔動脈血管径の加温中および加温後の変化量を図10-11に示す。

対照群ではいずれの時点でも血管径は減少しているのに対し、実験群では加温中に減少、加温後に増加という差異が顕

著に見える。腰背部皮膚加温の主な効果は、交感神経内臓枝の活動亢進による血管収縮であると推測していたが、今回は腹腔動脈のはっきりした収縮を捉えることができなかった。その理由として、空腹時の安静時血管径がすでに十分小さくなっていて、顕著な収縮反応が現れにくくなっていた可能性を考えることができる。また、今回の実験では加温10分後に血管の描出を行なっているため、血管収縮が加温初期に一過性に起こっているとすれば、今回の測定タイミングでは収縮反応を捉えきれなかった可能性もある。一方、図10-10の腹腔動脈血管径の変化と伝播性収縮運動の変化(図10-6、10-7)はよく一致した挙動を示している。腹腔動脈血管径の変化による血流量の増減が、胃運動とよく相関していることは確かと思える。

古くは1940年代に、ラットおよびネコの皮膚を加温することで小腸壁に分布する動脈径の増大が起こり、内臓交感神経を切除することによってこの血管拡張反応が消失することが報告されている¹¹⁾¹²⁾。しかし、これらの実験は、皮膚刺激の分節性の効果を見ることを意図したもので、そのため温度刺激部位が胸椎領域に限定されていることや、刺激時間が示されていないことなどから、これらの結果と今回の結果とを直接比較することは困難である。

(5) 腹腔内動脈血流と胃腸運動

腹腔内動脈血流と胃腸運動との関連についての先行研究は少ない。イヌの腹腔動脈を圧迫すると、胃運動の亢進と小腸内圧の軽度の上昇を起こすことが1950年代に報告されている¹³⁾。この反応は無麻酔時に限って見られ、麻酔により消失する。近年になって、麻酔ラットでも、腸間膜動脈を15分間結紮することで小腸の蠕動運動の振幅が増加することが報告された¹⁴⁾。いずれも臓器血流の減少が、胃腸運動を促進することを示している。これが、腰背部皮膚加温によって胃の伝播性収縮運動が促進される誘因として、腹腔内動脈の収縮を予想した仮説(図10-12)を提唱する理由となっている。

(6) 腰背部皮膚加温による胃運動促進のメカニズム

皮膚を加温すると皮膚交感神経活動は減少し、皮膚血管の拡張が起こる。同時に、内臓の交感神経活動は亢進する。このことは、交感神経地域性反応として一般化されている¹⁵⁾。内臓交感神経は胃腸運動に対しては抑制的に作用するので、腰背部加温が胃の伝播性収縮運動を促進するという今回の実験

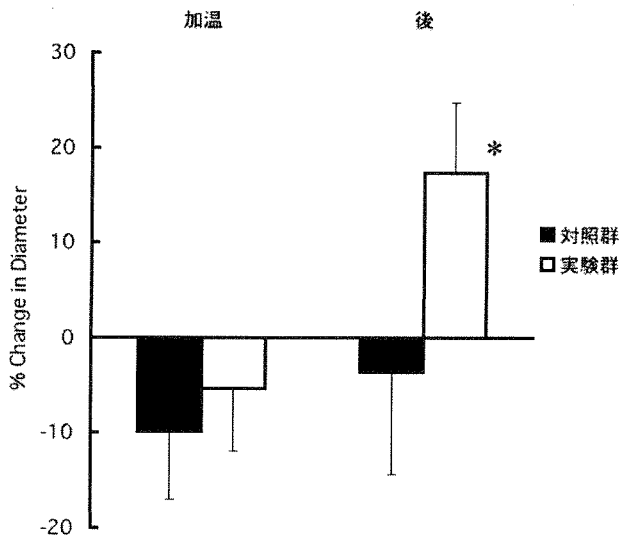


図10-11 腹腔動脈血管径の変化
変化量を%表示する。実験群(n=9)と対照群(n=7)での平均値と標準誤差を示す。(*:p<0.05)

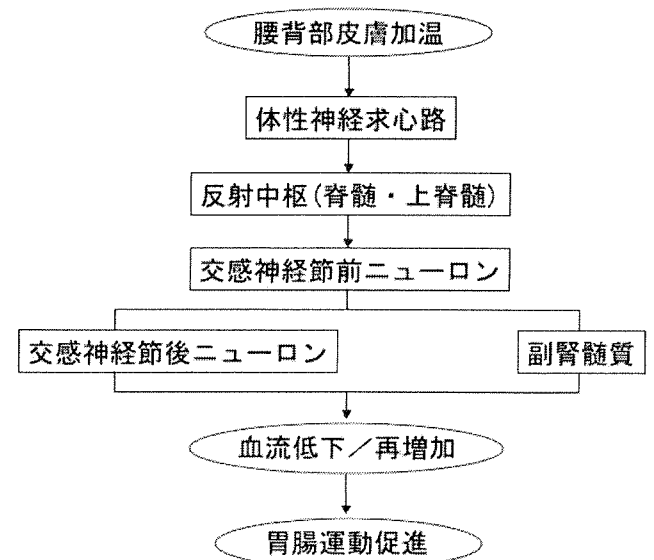


図10-12 腰背部皮膚加温による胃運動促進効果のメカニズム

結果を、胃腸壁に分布する交感神経活動から説明するのは困難である。しかし、内臓交感神経は、その分枝が胃腸壁に分布する割合より内臓血管に分布する割合の方が多い。したがって、皮膚加温が内臓交感神経を介して腹腔内動脈に作用する可能性は高い。実際、皮膚温度受容器の加温が上腸間膜動脈血流を減少させることや⁷⁾、皮膚の分節性の加温が小腸壁の動脈を拡張させることなどが報告されている¹¹⁾¹²⁾。これらのことから、腰背部皮膚加温により胃運動が促進されるメカニズムとして、図10-12に示すように内臓交感神経を介した腹腔動脈の収縮とそれに引き続く再拡張を仮説として提出した¹⁶⁾。今回の実験では、腰背部皮膚の加温10分後に腹腔動脈の血管径が増大していることが示された。腹腔動脈の収縮/再拡張、腹腔動脈血流の減少/再増加の内の、血管径の再拡張および血流の再増加の部分が証明できたと考えている。収縮/再拡張、血流減少/再増加の過程で胃運動が増強されることには、血流変化に伴って消長するNO¹⁷⁾やカルシトニン関連ペプチド¹⁸⁾のような局所因子が関与していると予想される。

(7) 胃のストレス反応と温熱の利用

今回の実験により、腰背部皮膚の加温が腹部膨満感や便秘を軽減するという、臨床現場における経験的知見を具体的に裏付ける根拠を得ることができた。腰背部皮膚の加温は、内容物を移送するという胃の機能的運動を促進することがわかった。一方、ストレス時の胃には、4～9 cpmの不規則な高周波数成分から構成される運動(tachyarrhythmia)が起ることが知られている¹⁹⁾。この運動は、交感神経活動の亢進を反映するとされている²⁰⁾。また、ストレス性胃潰瘍の形成には、迷走神経(副交感神経)を介する強力な胃の収縮が関与することも報告されている²¹⁾²²⁾。これらのストレス時の胃運動に対して、皮膚の加温がどのように影響するのか、ストレス反応を軽減して胃の正常な機能的運動を回復させる効果があるのかどうか、今後明らかにしていきたい。さらに、胃運動とともに胃内容物の排出時間や胃酸分泌など²³⁾、胃機能全体に対する皮膚加温の効果を検証することにより、身近な環境資源としての温熱を利用したQOLの維持・向上に資する知見を提供していきたい。

10-5. まとめ

- 1) 健康な女子学生を被験者として、腰背部皮膚の加温が胃の伝播性収縮運動を増強することを示した。従来、経験的な知見に基づき行われてきた腰背部温電法の胃腸運動への効果を、胃電図を解析することで初めて具体的に示すことができた。
- 2) 腰背部皮膚の加温により、胃に血流を供給している腹腔動脈の血管径が増加することがわかった。
- 3) 以上のことより、腰背部加温は腹腔動脈の血流変化を介して胃運動を増強する可能性が示された。

【参考文献】

- 1) 深井喜代子、阪本みどり、田中美穂：水または運動負荷と温電法の健康女性の腸音に及ぼす影響。川崎医療福祉学会誌6：99・06、1996。
- 2) 菱沼典子、平松則子、春日美香子ほか：熱布による腰背部温電法が腸音に及ぼす影響。日本看護科学会誌17：32・9、1997。
- 3) Nagai M., Wada M., Kobayashi Y. et al.: Effects of lumbar skin warming on gastric motility and blood pressure in humans. Jpn. J. Physiol. 53: 45・1, 2003.
- 4) 河内伸浩、岩瀬敏、高田宗樹ほか：腹部温電法が便秘を訴える若年女子の胃電図に及ぼす影響。自律神経39：433・37、2002。
- 5) Kullmann R., Sch. ung W., Simon E.: Antagonistic changes of blood flow and sympathetic activity in different vascular beds following central thermal stimulation. I. Blood flow in skin, muscle and intestine during spinal cord heating and cooling in anesthetized dogs. Pfl. ers Arch 319: 146・61, 1970.
- 6) Walther O.E., Iriki M., Simon E.: Antagonistic changes of blood flow and sympathetic

- activity in different vascular beds following central thermal stimulation. II. Cutaneous and visceral sympathetic activity during spinal cord heating and cooling in anesthetized rabbits and cats. Pfl. ers Arch 319: 162・84, 1970.
- 7) Riedel W., Iriki M., Simon E.: Regional differentiation of sympathetic activity during peripheral heating and cooling in anaesthetized rabbits. Pfl. ers Arch 332: 239・47, 1972.
- 8) Blessing W.W., Nalivaiko E.: Cutaneous vascular bed is not involved in arterial pressure changes elicited by increasing or decreasing the activity of inhibitory vasomotor neurons in caudal ventrolateral medulla in rabbits. Neurosci. Lett. 290: 141・44, 2000.
- 9) Girouard H., Chulak C., Lejossec M. et al.: Vasorelaxant effects of the chronic treatment with melatonin on mesenteric artery and aorta of spontaneously hypertensive rats. J. Hypertens. 19: 1369・377, 2001.
- 10) Yamaguchi S., Ito M., Ohshima N.: Effects of electrical stimulation of the dorsal skin on systemic and mesenteric microvascular hemodynamics in anesthetized rats. Jpn. J. Physiol. 52: 257・65, 2002.
- 11) Kuntz A.: Anatomic and physiologic properties of cutaneo-visceral vasomotor reflex arcs. J. Neurophysiol. 8: 421・29, 1945.
- 12) Kuntz A., Haselwood L.A.: Circulatory reactions in the gastrointestinal tract elicited by localized cutaneous stimulation. Am. Heart J. 20: 743・49, 1940.
- 13) 福原武、高木鉄男、山上松義：迷走神経刺激の腸管運動に及ぼす影響。日生理誌16：354・67、1954。
- 14) Pawlik W.W., Thor P., Sendur R. et al.: Myoelectric bowel activity in ischemia/reperfusion damage. Role of sensory neurons. J. Physiol. Pharmacol. 49: 543・51, 1998.
- 15) Iriki M., Nagai M.: Peripheral effector mechanism of temperature regulation 羊regulation by vascular activities・In: Advances in Physiological Sciences, ed. Szel. 駁. yi Z. and Sz. 植. kely M., Pergamon Press, New York, Vol. 32, pp. 365・74, 1981.
- 16) 永井正則：皮膚加温による胃腸運動促進のメカニズム。自律神経40：354・56、2003。
- 17) Pawlik W.W., Gustaw P., Thor P. et al.: Microcirculation and motor effects of endogenous nitric oxide in the rat gut. J. Physiol. Pharmacol. 44: 139・46, 1993.
- 18) Pawlik W.W., Obuchowicz R., Biernat J. et al.: Role of calcitonin gene related peptide in the modulation of intestinal circulatory, metabolic, and myoelectric activity during ischemia/reperfusion. J. Physiol. Pharmacol. 51: 933・42, 2000.
- 19) Muth E.R., Koch K.L., Stern R.M. et al.: Effect of autonomic nervous system manipulations on gastric myoelectrical activity and emotional responses in healthy human subjects. Psychosom. Med. 61: 297・03, 1999.
- 20) Uijtdehaage S.H., Stern R.M., Koch K.L.: Effects of eating on vection-induced motion sickness, cardiac vagal tone, and gastric myoelectric activity. Psychophysiol. 29: 193・01, 1992.
- 21) Garrick T., Buack S., Bass P.: Gastric motility is a major factor in cold restraint-induced lesion formation in rats. Am. J. Physiol. 250: G191 有199, 1986.
- 22) Ephgrave K.S., Cullen J.J., Broadhurst K. et al.: Gastric contractions, secretions and injury in cold restraint. Neurogastroenterol. Motil. 9: 187・92, 1997.
- 23) 永井正則、入来正躬：情動と自律機能。「セラピストのための基礎研究論文集4 人間行動と皮質下機能」、永井(編)、pp. 267・94、協同医書出版、東京、2002。

第 11 章

総 括

第11章 総括

CONCLUSIVE SUMMARY

The "Numerical comfort simulator for thermal environment" was developed through numerical modelling of human thermoregulation and thermal environment. Subjective experiments and field surveys were conducted to examine the actual human responses under different thermal environments. Detailed results obtained from each simulation model and experiment were described from Chapters 1 to 10. The results from each chapter are summarized.

Keywords: Numerical comfort simulator for thermal environment, Conclusive summary

人間 - 熱環境系快適性数値シミュレータ, 総括

本研究では、温熱環境評価を行うための人間 - 熱環境系快適性数値シミュレータを開発することを目的とした。

65分割体温調節モデル、COM、JOSといった体温調節モデルを開発した。開発した各モデルの精度を検証するため、既往の被験者実験結果や他のモデルによる計算結果との比較を行った。また、全身の重み係数の算出、日射環境下におけるサーマルマネキン周りの対流熱伝達率評価、日射環境下におけるモデルの予測値の被験者実験との比較を行い、シミュレーション精度を向上させた。

加えて、日射、半屋外空間、空間移動に伴う環境変化が快適性に及ぼす影響について被験者実験、実測調査を行い明らかにした。これらで得られたデータや知見は、モデルの境界条件として使用することが期待できる。

第1章「温熱環境評価のための65分割体温調節モデルに関する研究」では、不均一かつ非定常状態の温熱環境が人間に与える影響を精度よくシミュレートできるようにするため、Stolwijkのモデルを拡張し、65分割体温調節モデルを開発した。部位分割は皮膚温可変型サーマルマネキンと同様の16部位分割とし、サーマルマネキン測定による着衣量と熱伝達率を用いて、着衣層を含めた皮膚表面での伝熱の定式化を行った。また、計算結果を用いて部位分割・不均一温熱環境を考慮した65MNSET*を算出する方法を示した。

また、2 node-model、Stolwijkモデルとの計算結果の比較、既

往の被験者実験結果との比較を行い、予測精度の検証を行った。

第2章「温熱環境評価のための人体熱数値計算モデルCOMの開発」では、四肢血流モデルと外部物体との熱伝導を含めた人体モデルCOMを開発した。定数・係数を含めた計算モデル・熱平衡式などを示した。COMSET*の算出方法を示した。

COMの予測精度の確認のためGaggeの2 node-modelやWernerの被験者実験結果との比較を行った結果、良い一致が得られた。なお、作用温度10℃環境下のシミュレーションにて、四肢の血流モデルの効果を確認した。さらに、床暖房を想定し、足部皮膚と床面との熱伝導を考慮したシミュレーションを行い、人体への熱的影響を推定した。

第3章「温熱環境評価のための人体熱モデルJOSの開発」では、動静脈吻合(AVA)等を考慮した四肢の詳細血流モデルと、女性や高齢者にも適用可能な体躯可変を含めた人体熱モデルJOSを開発した。

JOSの予測精度確認のため、2 node-modelと計算結果の比較を行った。平均皮膚温、SET*値は、2node-modelによるものとの良い一致が得られた。定常状態における女性被験者実験結果との比較を行った結果、各温度条件下で予測された四肢部位での皮膚温分布は、AVAモデルを組み込んでいない従来のモデルと比べ予測精度の向上が見られた。また、体躯変更によ

り、女性に多く見られる寒冷環境下での末梢部の皮膚温低下が再現された。

非定常状態における高齢者を含めた被験者実験結果との比較を行った。寒冷実験結果では、平均皮膚温の予測値の傾向は実測値と概ね一致した。胸部における皮膚温の予測値は、実測値と同様に高齢者の緩やかな皮膚温推移を再現した。暑熱条件では、平均皮膚温と胸部皮膚温の予測値の傾向は、体躯を変更したことにより実測値に近づいたが、暑熱室入室後の上昇傾向は再現されなかった。ふるえ熱産生量、発汗量の計算結果を、高齢群、若年群、標準体躯で比較した結果、人体熱モデルにおいて、高齢者の身体特性である体温調節反応の遅れおよび機能低下を再現することが可能であることを確認した。

第4章「緩衝空間が歩行移動後の熱的快適性に与える影響に関する研究」では、緩衝空間の環境設定条件が歩行移動後の熱的快適性に与える影響を把握することを目的として、オフィス執務者がオフィスから屋外に出て、戻って来るというプロセスを想定した被験者実験を行った。

環境のステップ変化が温冷感に及ぼす影響を見るため、「環境温冷感」「全身温冷感」という2つのスケールを用いた。両申告値の特性には違いが見られ、被験者が意識的に区別して申告することが可能であった。

環境ステップ変化時に、環境温冷感は全身温冷感の約2倍大きく変化していた。また、熱的中立に向かうステップ変化時の環境温冷感と快適感の変化には良い相関が見られた。室内空間滞在時には、環境温冷感が全身温冷感よりも0.3～0.4有意に低かった。

発汗感覚および着衣受容度は胸部衣内水蒸気圧と相関が見られた。任意の胸部衣内水蒸気圧に対する発汗感覚、着衣受容度の反応は男性よりも女性の方が敏感であった。

空間遷移後の室内空間に入室後40分以降の平均申告値は、快適感の一部条件を除いて初期室内空間の定常申告値と有意差が見られなかった。30分以上の長い時間帯で見ると緩衝空間が熱的快適性に与える影響は小さいといえる。

緩衝空間の設定条件は、そこを通過する人間の平均皮膚温と胸部衣内水蒸気圧に大きく作用していた。温度設定が高く、通過時間が長いほど入室時の衣内水蒸気圧は高く、皮膚温も高かった。また、定常に至るまでに、より長い時間を要した。

生理量に見られた環境設定条件間の差は必ずしも心理量には現れず、入室時に緩衝空間がない条件と有意な差が見られたのは環境温冷感のみであった。

入室後20分間は快適感に複数の推移傾向が見られた。どのような快適感申告の推移過程を持って最適とみなすかは今後さらなる検討が必要である。

第5章「人工太陽灯と光学フィルタによる可視域・近赤外域・中赤外域放射が対比較照射により手背の感覚量に与える影響」では、日射波長域内の可視域(0.30-0.84 μm)、近赤外域(0.80-1.35 μm)、中赤外域(1.70-2.30 μm)の異なる波長帯放射が手背の感覚量に与える影響について、対比較法を用いた被験者実験により検討した。

その結果、被験者の温熱感、刺激感等の申告より、放射熱量が等価であっても、近赤外域放射が可視域放射、中赤外域放射と比較して熱さや痛みを感じにくい放射であることが分かった。これは人体皮膚が有する波長特性により、近赤外域放射は皮膚表面でほとんど反射し、受容器に到達する放射量が少ないためであると考えられた。

また、各波長帯放射による刺激感が等しいと感じられる熱量の比は、可視域放射：近赤外域放射：中赤外域放射＝69:100:61であった。この結果より、各波長帯放射による刺激の感じやすさの比は、可視域：近赤外域：中赤外域＝1.43:1.00:1.67と算出された。

第6章「半屋外環境における熱的快適性に関する実測調査」では、環境制御レベルの異なる都内4箇所の半屋外空間にて、滞在者の環境適応を考慮した熱的快適性の調査を行った。

滞在者の80%以上が強制されることなく自らの意志で半屋外環境に滞在していた。非空調空間では滞在環境の空気温度が下がると滞在者数・滞在時間共に減少したが、空調空間では温熱環境との相関が見られなかった。滞在者の着衣量は主に外気温に依存しており、通年の着衣量変化傾向には非空調空間と空調空間の差が見られなかった。温熱環境指標では、SET*が滞在者の温冷感申告値と最も相関が高かった。空調空間の中立作用温度は外気温と相関が高く、deDearらのAdaptive Modelとほぼ一致した。20%不満足者率を基準としたとき、非空調空間ではPPDの約3倍広く、空調空間でも約2倍広い範囲で温熱環境を許容していた。

第7章「人体に対する熱放射熱授受を表現する全身の重み係数の数値計算による算出」では、人体に対する周囲空間からの放射熱授受を簡便に評価する人体全身の重み係数を数値計算により算出した。

空間の大きさが重み係数に与える影響を検討した結果、人体に対し空間が相対的に大きい場合、空間の大きさが重み係数に与える影響は小さかった。空間が相対的に小さくなると重み係数に差が見られる。特に立位の天井、床に対し、それぞれ約1.5倍、約2倍の差が見られた。

人体の位置が重み係数に与える影響を検討した。人体の位置に応じて重み係数は変化する。形態係数の大きい面に対する重み係数が小さくなる傾向が見られた。

中村、Olesenらの提案する重み係数と比較した。本研究で得られた重み係数は、立位で人体に対し空間が相対的に大きい場合を除き、正面・背面、右・左壁面、床・天井でそれぞれ一定とする既往の結果と異なった。特に立位で人体に対し空間が相対的に小さい場合、床の重み係数は最大で中村より約4倍、Olesenらより約1.6倍大きくなった。これは用いた形態係数の差異に起因する。

空間の大きさに応じ最適化された重み係数を算出した。重み係数を空間の大きさにより使い分けることにより、平均放射温度、面放射温度ともに予測精度が向上し、放射熱授受を精度良く評価することが可能となる。

本章では全身の重み係数を検討したが、同じ手法により、各部位別の重み係数の検討、さらに形状をモデル化することが可能であれば、人体以外に対する応用も可能となる。

第8章「日射環境下におけるサーマルマネキン周りの対流熱伝達率の評価」では、日射環境下におけるサーマルマネキン周りの対流熱伝達率の算出方法を示した。室内環境とサーマルマネキンの測定結果及び数値的に表わしたサーマルマネキンの形状モデル、日射・長波長放射数値計算を組み合わせ、サーマルマネキン周りの対流熱伝達率を算出した。サーマルマネキン各部位の対流熱伝達率は、サーマルマネキン周りの気流分布に応じて変化している。南ガラス面での日射遮光の有無で比較すると、各部位の対流熱伝達量及び対流熱伝達率に大きな差異は見られず、日射の影響をほとんど受けなかつ

た。全身の対流熱伝達率を風速値に換算したところ、ケース1、ケース2では測定した全身の平均風速値に概ね対応した。ケース3での換算値は、ケース1、ケース2の換算値の約2倍となり、風速換算値の比は空調吹出速度の比に概ね対応した。

第9章「日射環境下における体温調節65MNモデルの皮膚温予測値と被験者実験結果との比較」では、実験用アトリウムを用い、日射環境下において被験者実験を実施し皮膚温などの生理量を測定した。同一部位でも日射を受熱する表面と日射を受熱しない裏面で皮膚温は最大約3℃異なった。また、日射環境下における皮膚温分布などを予測するために、詳細な人体形状に対応する体温調節65MNモデルの汎用的な拡張方法を提案した。体温調節65MNモデルの熱収支式を、人体形状を構成する表面要素に各部位別表面積の差異を考慮して適用し、制御信号を表面要素毎に評価することにより体温調節による局所の生理量などを考慮する。これにより表面要素単位でCFD・放射連成による詳細評価が可能となった。

日射環境下において、拡張体温調節65MNモデルにより人体皮膚温分布を算出し、被験者実験結果と対比した。同一部位における日射を受熱する表面と受熱しない裏面での皮膚温の差など、日射環境下における皮膚温分布の傾向を概ね捉えることができた。同一部位で大きな気流分布が存在する場合、対流熱伝達率の与え方は皮膚温の予測結果に大きな影響を与える。皮膚温の予測結果と測定結果を比較した結果、その差は全身でほぼ1℃となった。四肢の皮膚温の予測精度は躯幹より劣る傾向が見られた。四肢の皮膚温の65MNモデルによる予測精度に関する改善の必要性が認められた。

第10章「腰背部皮膚温の変化が胃腸運動へ与える影響」では、身近な環境要因の中から温熱に着目し、そのストレス軽減効果を明らかにすることで、近未来社会のQOLの維持・向上のための科学的背景を提供することを目的とした。健康な女子学生を被験者として、腰背部皮膚の加温が胃の伝播性収縮運動を増強することを示した。従来、経験的な知見に基づき行われてきた腰背部温罨法の胃腸運動への効果を、胃電図を解析することで初めて具体的に示すことができた。腰背部皮膚の加温により、胃に血流を供給している腹腔動脈の血管径が増加することがわかった。

以上のことより、腰背部加温は腹腔動脈の血流変化を介して胃運動を増強する可能性が示された。

第11章「総括」では、各章の結果をまとめた。

以上のように、温熱環境評価のための人間・熱環境系快適性数値シミュレータの開発を行い、有益な知見を得た。研究成果は、本報告書の他に、日本建築学会、空気調和・衛生工学会、国際会議等にて広く発表を行った。また、今後さらに成果の対外的発表を行う予定である。