

博士（人間科学）学位論文

航空機座席環境における下肢の血行動態の測定

Measurement of Blood Circulation in the Lower Limbs during
Prolonged Sitting in a Mock-up of an Aircraft Cabin

2005年1月

早稲田大学大学院 人間科学研究科

小山 秀紀

Oyama, Hideki

研究指導教員： 野呂 影勇 教授

目次

第 1 章 序論

1.1	本研究の目的	1
1.2	下肢静脈の解剖学的知識	5
1.2.1	下肢静脈	5
1.2.2	下肢の静脈還流	6
1.2.3	深部静脈血栓症の病態	8
1.3	航空機における血栓症の臨床例	11
1.3.1	疫学的知識	11
1.3.2	成田赤十字病院の臨床例	12
1.4	エコノミークラスシートの課題と対策	14
1.4.1	狭い座席環境による不動化の助長	14
1.4.2	座面高と奥行きの問題	14
1.4.3	DVT 予防座席の機能要求	16

第 2 章 測定手法と実験機材

2.1	血液循環の測定手法	17
2.2	本研究で用いた測定手法	18
2.2.1	近赤外線分光法 (NIRS) による組織血液量測定	18
2.2.2	超音波 Doppler 法による血流速度測定	20
2.2.3	下肢のむくみ測定	21
2.3	実験環境	26
2.3.1	客室環境モックアップ	26
2.3.2	実験用座席の製作経緯	26

第3章 フットレストと背もたれの動的機能の効果

3.1 本章の目的	30
3.2 実験の方法	30
3.2.1 実験日時と場所	30
3.2.2 被験者	30
3.2.3 実験環境	30
3.2.4 測定項目	31
3.2.5 実験条件	32
3.2.6 実験手順	33
3.2.7 結果の処理	34
3.3 実験の結果	35
3.3.1 下肢の血行動態について	35
3.3.2 自覚負担について	40
3.4 考察	41

第4章 背もたれの動的機能が下肢の血行動態に与える影響

4.1 本章の目的	42
4.2 実験の方法	42
4.2.1 実験日時と場所	42
4.2.2 被験者	42
4.2.3 実験環境	44
4.2.4 測定項目	45
4.2.5 実験条件	45
4.2.6 実験手順	46
4.2.7 結果の処理	47
4.3 実験の結果	48
4.3.1 組織血液量の相対的变化	48
4.3.2 下肢のむくみ	53
4.4.3 NIRSの測定値と下肢のむくみの関係	53
4.4 考察	55

第5章 背もたれの動的機能が大腿静脈血流に与える影響	
5.1 本章の目的	57
5.2 実験の方法	57
5.2.1 実験日時と場所	57
5.2.2 被験者	57
5.2.3 実験条件	58
5.2.4 実験手順	58
5.2.5 結果の処理	59
5.3 実験の結果	60
5.4 考察	61
第6章 結論	
6.1 本論文のまとめ	62
6.2 DVT 予防を考慮した航空機座席の諸機能と効果	64
6.3 今後の課題	65
謝辞	66
参考文献	67

第1章 序論

1.1 本研究の目的

本研究は、長時間座ることが多い航空機内座席環境を実験モデルとして、着座中の下肢の血行動態についてより良い理解を得るために行われた。その背景には、長時間着座姿勢の継続は下肢静脈に血栓ができることが指摘されている点にある。この病態は、深部静脈血栓症（deep vein thrombosis: 以下 DVT）と称され、致命的な肺動脈血栓塞栓症を併発する場合がある。近年、DVT の症例が航空機のエコノミークラスから報告が多数なされたことから、通称、エコノミークラス症候群、あるいは旅行者血栓症とも呼ばれ、社会的にも問題となっている。血栓形成の危険因子は、Virchow [1]の三主因として、血液凝固能の亢進、血流の停滞、血管壁の損傷、が古くから知られている。これを機内客室環境にあてはめた場合、低い湿度や不十分な水分摂取により、血液の粘性が上昇し、狭い座席に同じ姿勢で座り続けることにより、静脈血流の停滞が生じて、DVT のリスクが高まると考えられている。現状では血栓形成の危険因子と航空機環境との直接的な因果関係については不明な部分も多いことから、血栓形成に与える機内環境の影響や、有効な予防法に関する研究が望まれている。

このような背景から、本研究では DVT のリスク予防を視野にいれた航空機座席について、人間工学的観点から、実際の応用場面を想定した評価を行うことを目的とした。評価にあたっては、下肢の血行動態、とくに静脈血流の停滞と姿勢の不動化に着目し、着座中に軽運動を行った場合の影響について検討を行った。人間工学とは、健康と安全という側面から、機械や環境を最適化するための実践科学の総称である[2][3]。従来は作業環境の評価と改善を目的としていたが、最近では、生活に密接に関係しながらも実践かつ科学的な根拠に基づくモノ作りへの応用を想定した研究の重要性が指摘されている[4]。

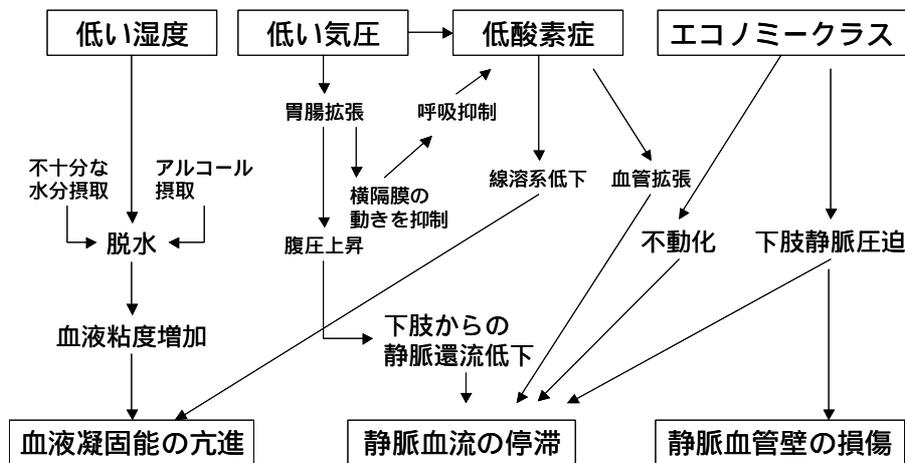


図 1.1 客室環境に関する危険因子 (文献 5, 6 より引用)

機内客室環境に関する DVT の危険因子を図 1.1 に示した。医学・生理学分野における実験的な研究では、実際の機内客室環境における長時間座位と血液凝固能の亢進の因果関係を調べた研究[7] [8] [9]、低湿度環境下が血液粘度に与える影響を調べた研究[10]、予防的な観点からは、水分補給には糖電解質飲料の摂取が有用であることを明らかにした研究[11]がある。工学分野では、機械的な下肢圧迫のマッサージによる支援研究[12]などが行われている。これに対して、本研究では、人体に密接な座席設計への応用を探る上での基礎的知見を得ることを目的とした。対象は、エコノミークラスの座席である。リスク予防という観点からは、狭い座席空間における姿勢の不動化と静脈血流の停滞に着目して、以下の側面について検討を行った。

- (1) 従来座席との比較による動的な座席機能の有用性
- (2) 動的な背もたれが中高年女性層の下肢の血行動態に与える影響
- (3) 動的な背もたれが大腿静脈血流に与える影響

ここで挙げた動的な座席機能とは、DVT の危険因子である座位の不動化を防止する

ことを意図して設計した，下肢の運動を促すフットレストならびに上体の背伸び（体幹後屈）を促す背もたれの機能を示す．本研究では，これらの座席機能を用いて，着座中に軽運動を行った場合に下肢の血行動態にどのような影響を与えるのか明らかにすることを検討課題とした．

これまでの椅子や着座姿勢の研究では，レントゲン撮影による脊柱彎曲形状の比較[13]，筋活動や椎間板内圧測定[14][15]，体圧分布測定[16][17]，官能検査[18][19]などの実験的な評価研究が数多くなされてきた．これに対して，本研究では長時間着座中の下肢の血行動態を測定し，DVT のリスク予防と静脈還流の観点からみた椅子の研究という点で，従来のものとはアプローチが異なる．また，従来椅子研究で用いられていた測定手法とは異なり，本研究では，非侵襲的な測定方法として，近赤外線分光法（near-infrared spectroscopy：NIRS）に基づく組織血液量の測定，超音波 Doppler 法による静脈血流の測定，下肢の周径囲と容積の測定が応用された．

以上のような今日的な課題に対して，新しい測定手法を導入し，DVT のリスク予防を視野にいれた座席と人間との関わりについて研究した結果をまとめたのが本論文である．本論文の構成は以下の通りである．

第1章 序論

本研究の目的，下肢静脈に関する基礎知識，航空機内環境における血栓症の調査研究，現状の航空機座席の課題について述べた．

第2章 測定手法と実験機材

従来の侵襲的・非侵襲的な血行動態測定法を述べたうえで，本研究で用いた測定手法と実験機材の特徴について述べた．

第3章 フットレストと背もたれの動的機能の効果

下肢と上体の軽運動を補助する改良座席を用い，長時間着座が下肢の血行動態に与える影響について検討した．ここでは，従来の航空機座席を対照とした．また，NIRS 法，Doppler 法，下肢のむくみ測定から得られるパラメータ間の相互関係を分析し，着座条件の違いによる下肢の血行動態を測定・評価が可能か検討した．

第4章 背もたれの動的機能が下肢の血行動態に与える影響

長時間着座中に背もたれを使って体幹後屈運動を挿入した場合に，中高年女性層の下肢の血行動態にどのような影響を与えるのか検討した．

第5章 背もたれの動的機能が大腿静脈血流に与える影響

4章の検証作業として，直立姿勢，後傾姿勢，背もたれを使って体幹を後屈させる条件，呼吸を組み合わせた場合に，大腿静脈血流がどのように変化するか検討した．

第6章 結論

本研究で行った評価実験から考察された知見についてまとめた．また，各章の実験結果より得られた知見に基づき，航空機座席環境において，DVT のリスク・ファクタを軽減する座席の諸機能とその効果についてまとめた．さらに，本研究の今後の課題について述べた．

1.2 下肢静脈の解剖学的知識

1.2.1 下肢静脈

下肢静脈は， 筋膜下にある深部静脈， 皮下にある表在静脈， 両者を連結する穿通枝（交通枝）の三つに分けられる[20][21]．主な静脈の経路を図 1.2 に示す．

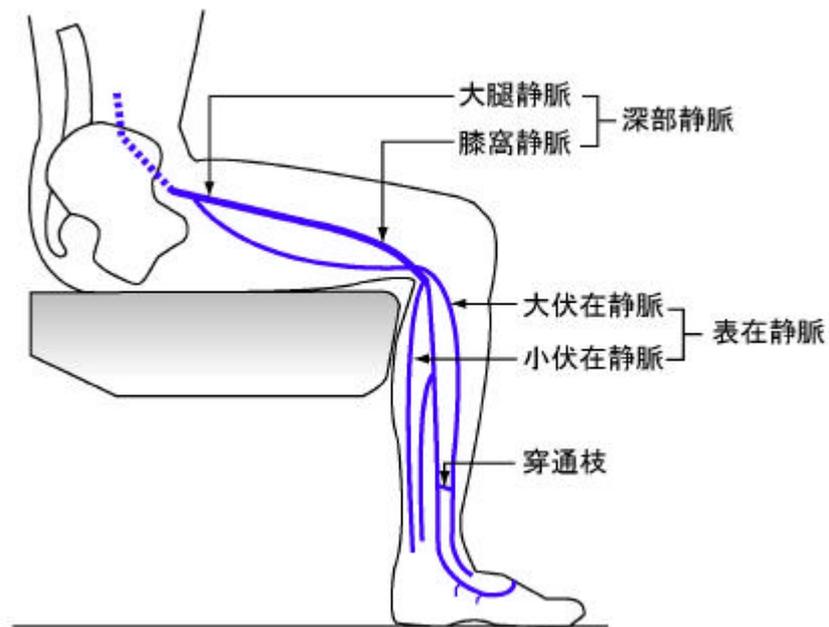


図 1.2 下肢の静脈

1) 深部静脈

深部静脈は同名の動脈に併走して，主に大腿静脈，膝窩静脈，前・後脛骨静脈からなり，下肢筋肉内を一本の柱のごとく上行する．これら導管としての静脈以外に，下腿には有対性の筋肉内静脈(腓骨静脈とヒラメ静脈)がある．腓骨静脈は膝窩静脈に，ヒラメ静脈は後脛骨静脈に注ぎ，後述する筋ポンプ作用における重要な役割を果たす．

2) 表在静脈

代表的な表在静脈は大伏在静脈と小伏在静脈である．大伏在静脈は鼠頸部で卵円窩

を通り大腿静脈に流入する。大腿部の大伏在静脈は深在筋膜と浅在筋膜の間を走行し、膝部近くで皮下に出てくる。小伏在静脈は典型的には膝窩のやや頭側で膝窩静脈に流入するが個体差が著しい。膝窩部に至らず下腿で大伏在静脈に注ぐ例、膝窩静脈に流入せず大腿部で深部静脈に注ぐ例、大腿部で内側に向う例などがある。

3) 穿通枝

深部静脈と表在静脈を連結するのが穿通枝であり、この静脈は交通枝とも呼ばれ厳密な用語の定義は統一されていない。一個の下肢には100本以上の穿通枝があると言われている。各穿通枝には弁が存在し、表在静脈から深部静脈への一方通行のみを許している。下肢における主要な穿通枝は、Dadd 穿通枝、Boyd 穿通枝、Cockett 穿通枝がある。

1.2.2 下肢の静脈還流

下肢の静脈血は、末梢から中枢、表在から深部へと還流する。末梢の静脈から心臓へ戻る静脈の流れを静脈還流と呼び、主に、筋ポンプ作用、呼吸ポンプ作用、心臓の吸引作用、の三つの駆動力に支配されている。

1) 筋ポンプ作用

下肢の筋肉が収縮すると深部静脈が圧迫されて内径が小さくなり、心臓への還流量が増加する。この時、静脈内には静脈弁があるため逆方向には流れない。これを筋ポンプという(図1.3)。一般的に立位の場合、下肢の静脈血は静水圧(重力)のために心臓へ戻りにくい。しかし下肢の静脈には弁が豊富にあるため、運動をすると心臓への還流量が増加する。下腿筋が第2の心臓といわれる所以である。

2) 呼吸ポンプ作用

胸腔内圧は陰圧(-3~-7 mmHg)であるため、胸腔内大静脈の壁内外圧差は大きく、ことに吸息時に静脈内腔は広くなる。このとき胸部内臓は前下方に押しやられるので前腹壁の張力は増加し、横隔膜の下降にあいまって腹腔内圧を高める。この腹腔内圧によって腹腔内の静脈は押され、中の血液は広がった胸腔内の静脈に流入する。下肢

方向へは逆流は弁でさえぎられる．このようにして吸息時には腹腔から胸腔への静脈血流は増加し，下肢から腹腔への血流は減少する．引き続き呼息時には，胸腔内圧が上昇し大気圧に近づき，横隔膜は上昇して腹圧は低下する．その結果，腹腔 胸腔の血流は減少し，下肢 腹腔の血流は増加する．このような呼吸運動に伴う静脈還流の促進作用を呼吸ポンプという[22]．

3) 心臓の吸引作用

静脈圧が15 mmHg にあるのに対し，右心房圧は3 mmHg である．すなわち両者の圧差 $P = 15 - 3 = 12 \text{ mmHg}$ が駆動力となり静脈還流が増加する．

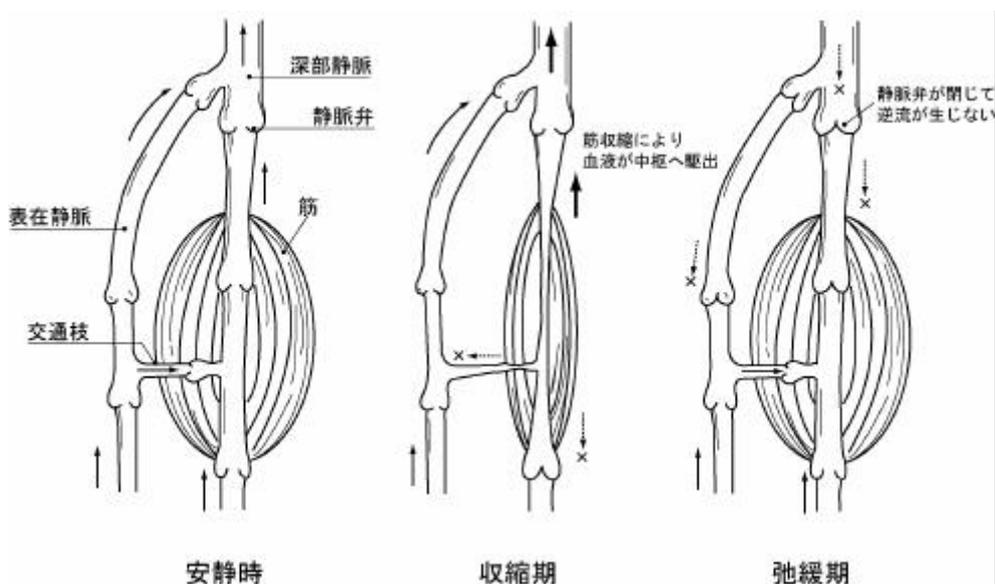


図 1.3 筋ポンプ作用 (文献 20 より引用作成・一部加筆)

1.2.3 深部静脈血栓症の病態

静脈還流障害がおこる病因は閉塞と逆流の二者である。このうち、閉塞に關与する代表的疾患が、深部静脈血栓症（DVT）である。血栓形成の三主因のうち、血流の停滞に起因する静脈血栓は、血流の停滞が起こりやすい部位、すなわち静脈弁のポケット、枝の分岐点、下肢静脈内に発生しやすいと考えられている。下肢では、下腿静脈、大腿静脈などの頻度が高く、筋肉内静脈（ヒラメ静脈、腓腹静脈）は時に DVT の発生源になる[20]。また、骨盤腔内にある左総腸骨静脈の上には右総腸骨動脈が騎乗していることや、左下腹部内の S 状結腸による圧迫により静脈還流が阻害されやすいため、右に比し、左下肢の DVT が多い理由と考えられている。

血栓が形成されると、急性期には、閉塞された部位から抹消側に痛みを伴って下肢の膨張が生じる。軽い場合には一過性の膨張のみで閉塞部位を回避するようにバイパスができ、次第に回復へと向かう。しかし、通常適切な処置を施さないと血栓はさらに広がっていく。この間に、静脈血栓が遊離して肺動脈内に流入し、肺血管床を閉塞することにより、致命的な肺動脈血栓塞栓症が発症する場合もある。

ここで、航空機旅行中に DVT が発生しやすい要因としては、航空機内の客室環境に起因する危険因子と個人の危険因子に分けられる。以下にその説明を加える

1) 客室環境に起因する危険因子

旅行に関連した血栓症は、航空機のみならず、電車や船・車での旅行でも起こりうるが、航空機に関連した報告が多い。その理由として航空機旅行が他の交通手段に比して長時間になることや、特殊な環境に起因する要因が考えられている。すなわち、低い湿度、低い気圧、エコノミークラスに代表される狭い座席である。

・低い湿度

航空機内は湿度が低く、20%程度にまで低下する。湿度 20% は砂漠と同程度であり、非常に乾燥した状態となっている。そのため、水分が失われやすく、航空機内では不十分な水分摂取や利尿作用が高いアルコールの摂取により脱水になりやすい。脱水は血液の粘性を増加させ、血液凝固能の亢進につながる。最近の研究では、唐木[10]は、長時間座位において湿度の違いが静脈容量、静脈流出量、アルブミン、ヘマトクリッ

トに与える影響を検討した結果、低湿度環境下では、局所的な血管内脱水や血液粘度の上昇が促進されやすいことを明らかにし、低湿度環境下における長時間座位は、血栓の発生を高める可能性が高くなることを指摘している。

・低い気圧

近年の飛行機は、およそ高度 10,000 m 付近を飛行しており、このときの外気の気圧は約 0.2 気圧である。客室内は与圧されているが、高度 10,000 m の客室内は 0.8 気圧程度にまでしか与圧されていない。低い気圧は腹圧上昇をもたらす、下肢からの静脈還流を低下させるため、静脈血流の停滞につながる。低い気圧による相対的な低酸素血症は線溶能を低下させ、さらに血管拡張物質の放出を促し、血管拡張をもたらすために血液凝固能の亢進および静脈血流の停滞につながると考えられている。

・狭い座席環境

本研究が対象とする部分である。エコノミークラスに代表される狭い座席は、座席の間隔（シートピッチ）が狭いため、姿勢の不動化を助長し、静脈血流の停滞を誘発する。また、座面先端が膝裏を並走する膝窩静脈や小伏在静脈を圧縮し、血流の障害に繋がると考えられている[7]。さらに、座位姿勢では、一般的に下肢の筋ポンプ作用が働きにくいため下肢のむくみやうっ血がおこりやすいこと、大腿部の 90 度屈曲は鼠径靭帯により大腿静脈が圧迫を受けて下肢から中枢への静脈還流は低下すると考えられている。同様に、膝関節屈曲でも静脈は圧迫されやすいため静脈還流が低下し、静脈血流の停滞に繋がることが指摘されている[23]。

2) 乗客個人の危険因子

どのような人が DVT になりやすいのか把握できれば、研究を進めていく上で有用である。文献[5] [6] [24][25]と、専門医の意見調査から日本人における乗客個人の危険因子を図 1.4 にまとめた。ホルモン療法、悪性腫瘍、喫煙は血液凝固能の亢進に繋がる。糖尿病や高脂血症などの慢性疾患は血液凝固能の亢進と静脈血流の停滞をもたらしやすい。静脈血栓症の既往歴がある人は、血液凝固能の亢進、静脈血流の停滞、血管壁の障害のいずれにも関与し、ハイリスクと考えられている。なお、肺血栓塞栓症・

深部静脈血栓症予防に関するガイドラインは、文献[25]に詳しく記載されているのでそちらを参照されたい。

本研究で対象とする航空機座席と関係が深いと考えられるのは、長時間座位姿勢、中高年女性、低身長、肥満が挙げられる。下腿が短い低身長の人や肥満の人は、座位では下肢静脈が圧迫されやすいことによる静脈血流の停滞や血管壁の損傷をもたらしやすいと考えられる。北里大学医学部の金城 正佳 医師によると、女性の場合、男性に比べて胸式呼吸になりやすいため静脈還流が十分ではないこと、肥満は鼠径靭帯周辺に蓄積した脂肪が総大腿静脈を圧迫して静脈還流を低下させ、静脈血流の停滞をもたらしやすい可能性があるという意見であった。

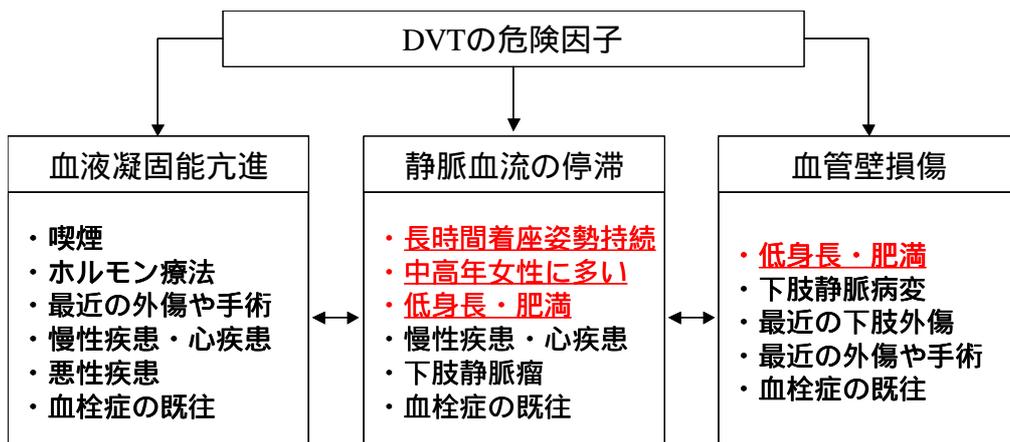


図 1.4 乗客個人の DVT 危険因子の分類（下線部は座席に係する要因）

1.3 航空機における血栓症の臨床例

いわゆるエコノミークラス症候群の症例

1946年に14時間に及ぶ航空機旅行とDVTの関連が報告された[26]。その後、1977年にはSymingtonら[27]が、エコノミークラスの座席に搭乗した乗客が肺塞栓症を起こしたとし、これをEconomy Class Syndrome（エコノミークラス症候群）と初めて呼んだとされている。最近では、航空機旅行に限らず、他の交通機関を利用した旅客にも発症が認められていることから、旅行に関連した同じような病態をTraveler's Thrombosis（旅行者血栓症）と呼ぶ場合もある。一方、日本でも同じような症例が報告され、その臨床像が次第に明らかにされつつあるが、発症数など正確な統計が無いことや、航空機旅行との直接的因果関係が不明な部分も多いことから、2003年、日本宇宙航空環境医学会[24]は、エコノミークラス症候群という名称は適当ではないことを指摘し、病態を示す深部静脈血栓症・急性肺動脈血栓塞栓症を原則的には用いることを提言している。ここでは、エコノミークラス症候群は、航空機旅行に関連した深部静脈血栓・肺塞栓症全体を指すものとして、これまでの臨床報告に関する調査結果を述べる。

1.3.1 疫学的知識

Nissenら[28]によると、1997年までに84例の症例報告があり、我が国の報告を併せると約400例以上が報告されている。しかし、症状が軽かったため医療機関を受診しない例があることや、また報告されていない症例も存在するものと考えられ、実際の症例数はこの何倍にも及ぶものと推察される。エコノミークラス症候群の発症頻度は、重症の肺塞栓症は100万人あたり0.41人で、飛行距離10,000km以上（飛行時間12時間以上）では100万人あたり4.77人という報告がある[29]。飛行時間は3~4時間程度でも発症するという報告[27]があり、3時間以下では報告はなく[30]、飛行時間が長いほど、その頻度が増加すると考えられている。搭乗中ないし航空機を降りた直後に起きることが多いとされるが、旅行後長時間経過した後に発症することもあるという。同症例の増加率は、航空機の性能向上により長距離旅行をする機会が増えていることや、比較的リスクが高いと考えられる高齢者も積極的に航空旅行するようになってきていることから、近年増加傾向にあると考えられている[31]。発生頻度の男女

比では、欧米では女性に多いとする報告[29]と男女ほぼ同数とする報告[30]があり、日本では女性に多いという報告が多い[32][33][34]。日本で女性に多い明確な理由は不明だが、後述するように日本人女性に低身長者が多いことが理由の一つと考えられている。また、DVTに関連する全国規模の実態調査[35]によれば、男女比は1:1.3で、女性にやや多いとされている。一般的に女性では妊娠・分娩を契機として、増大した子宮による腸骨静脈の圧迫や下肢静脈還流の減少により一次性静脈瘤などの静脈疾患の発生頻度が高いことも原因と考えられる。年齢的には高齢者に多く、死亡例は40歳以上に集中するという報告がある[36]。行きよりも帰りのフライト後に多く[37]、座席位置は通路側の席よりも窓側や中央座席の搭乗者に多いとする報告がある[38]。

1.3.2 成田赤十字病院の臨床例

2002年、日本有数の国際空港に隣接する成田赤十字病院内科部長 森尾 比呂志 医師を訪問し、同症例の臨床像について意見調査を行った。森尾 医師によれば、1994年から2001年まで24の症例のうち、女性が22例で40歳以上に多かったとしている（図1.5）。また、身長は150cm台の人に多く（図1.6）、平均搭乗時間は11.4時間で、発症前に席を立った平均回数0.5回と極端に低かったとしている。さらに、航空機座席と血栓症の関係については、乗客は座席を立つことはほとんどなく、動きが少ないために血流の停滞が誘発されやすいこと、国際線の座席の高さは日本人の女性には高すぎて足が床に着きにくいいため、膝裏が圧迫されて、このことも血流障害の要因となっているのではないか、ということであった。

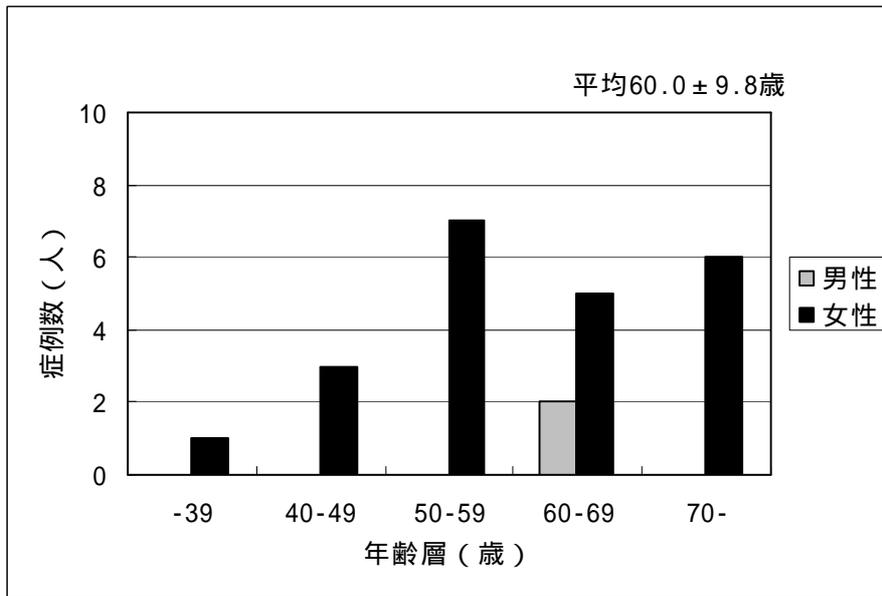


図 1.5 年齢別のエコノミークラス症候群の症例 (成田赤十字病院)

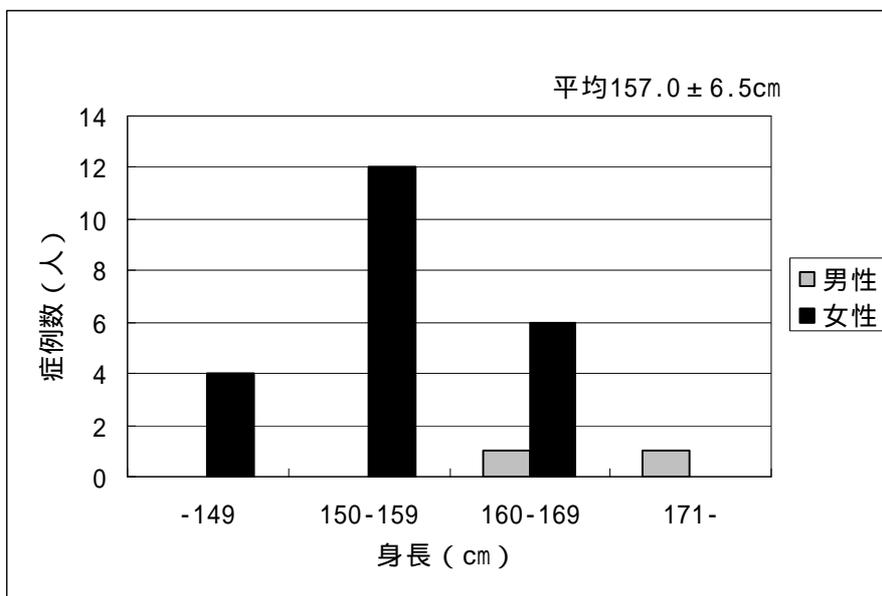


図 1.6 身長別のエコノミークラス症候群の症例 (成田赤十字病院)

1.4 エコノミークラスシートの課題と対策

では実際のところ，現状のエコノミークラスシートの課題とは，どのようなものがあるのだろうか．客室環境に近似させたモックアップ内で，既存の国際線エコノミークラスシートを調査した結果，次のことがわかった．

1.4.1 狭い座席環境による不動化の助長

座席間のシートピッチが狭いことにより，下肢の可動範囲が非常に狭く，不動化という動かない状態になりやすかった（図 1.7）．また，クッション形状や構造的な問題が挙げられた．立体形状のバケット型シートは姿勢の安定性は保たれる利点があるが，長時間の着座では姿勢が拘束されやすかった．さらに，シートスウィング機構と称されるリクライニングと同時に座面が沈み込む機構は，臀部の前ズレを防止して安定した姿勢を提供する利点があるが，後傾姿勢の際に踵が浮いて膝裏が圧迫されることや，姿勢が拘束されやすいといった問題があった．

1.4.2 座面高と奥行きの問題

国際線の座席は，欧米人体型に設計されており，日本人の人体寸法には大きかった．特に座面高が高く，奥行きが長かった．座面高について述べると，A社 450 mm，B社 435 mm であり，日本人平均女性の下腿高が 385 mm[39]なので，靴の高さを考慮しても，高すぎるといえる．図 1.8 は，DVT のリスクが高いとされる低身長女性の座圧分布を示している．図 1.8 の上図は，従来座席に着座した状態を示し，踵が床面から浮いていること，膝裏が圧迫されて臀部の圧力集中が認められる．また，踵が床面に着かない場合，下腿筋ポンプが働きにくいとため，静脈還流の低下にも影響を及ぼすと考えられた．このような問題を改善するためには，椅子や作業環境の改善に関するガイドライン [40][41]にあるように，座面高を調節する必要があるのだが，航空機座席は，機内安全に関わる座席構造の耐久性と乗客利用率のコスト的な面から，現状では座面高調整の実現は難しい．我々の調査では，身長 160cm 以下の人の座面圧迫を改善するためには，現状の座面高を最低でも 60mm は低くすること，すなわち，380mm 程度にすると，膝裏の圧迫や臀部の圧力の集中が改善されることがわかった（図 1.8 下）．座面高を低減できない場合には，フットレストで対応する必要がある．



図 1.7 狭い座席環境

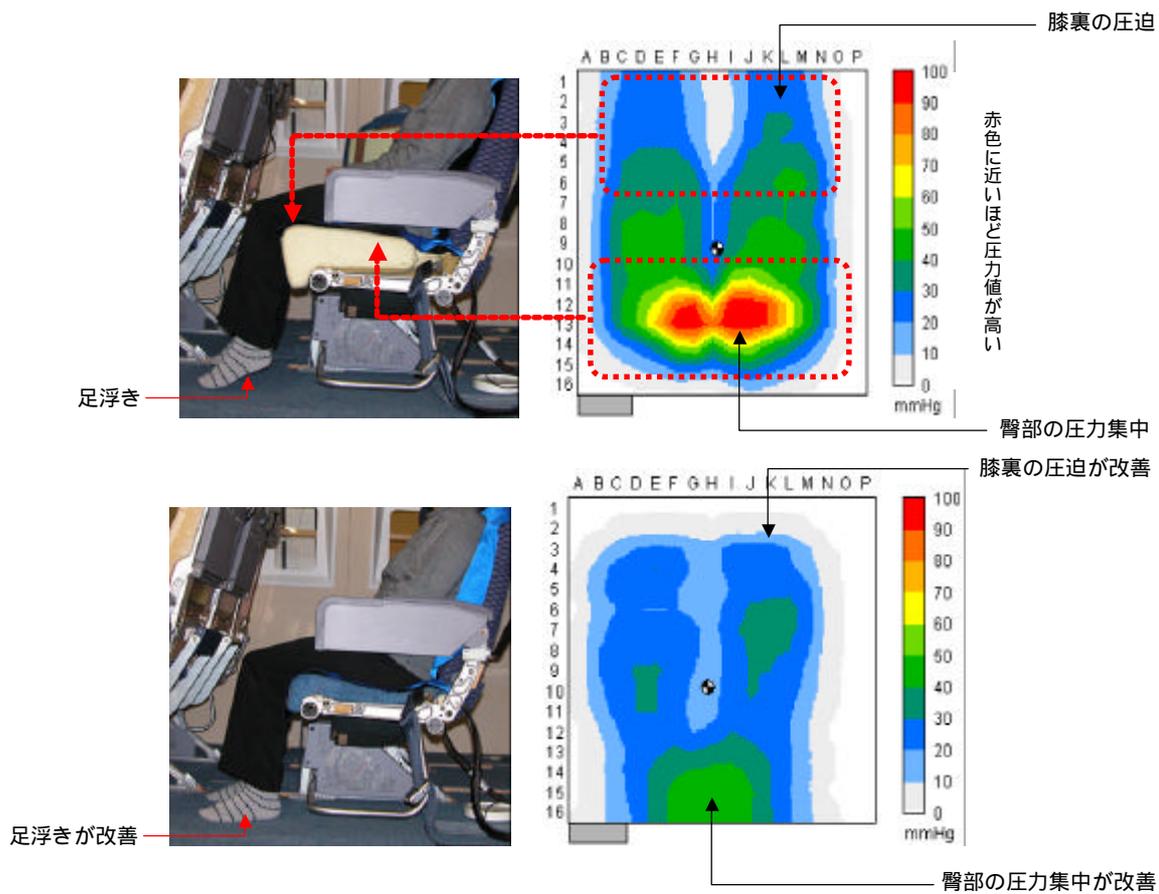


図 1.8 従来座席に着座した場合（上）と座面高を低くした場合（下）の座圧分布の比較

（被験者：身長 152 cm，体重 57 kg の女性）

1.4.3 DVT 予防座席の機能要求

これまで述べてきた文献ならびに実地調査から ,DVT 予防を考慮した座席の機能要求として , 次の 3 点が挙げられる .

下肢の運動により筋ポンプ作用が得やすいこと

上体の運動により呼吸ポンプ作用が得やすいこと

大腿部と膝裏の圧迫を軽減すること

下肢の運動は , 筋ポンプ作用が期待できるため , 一般的な DVT の予防策として推奨され , 航空各社でも実践されている[42] . 本研究では , 下肢の運動だけではなく , 上体の運動もとりいれることで , 呼吸ポンプ作用による静脈還流を促し , 血栓形成の危険因子である静脈血流の停滞を改善できるかもしれないと考えた . しかしながら , 現実場面を想定した航空機座席環境において , 着座中の軽運動と下肢の血行動態との関係を検討した研究は少なく , 比較的风险が高いとされる中高年女性層に関する知見が見当たらなかった . このような経緯から , 本研究では , 次章で述べる測定手法を応用して , 下肢と上体の運動を補助する座席機能が下肢の血行動態にどのような影響を与えるのか実験的に明らかにしていくことを目標とした .

第2章 測定手法と実験機材

2.1 血液循環の測定手法

血液循環の測定方法は、侵襲的および非侵襲的方法がある。侵襲的方法としては、一定濃度の色素を血管に注入して、希釈速度から血流量を定量化する色素希釈法や熱希釈法がある。静脈血の測定では、形態学的な異常を評価する静脈造影検査と、静脈還流効率を他覚的に評価する静脈圧測定がある[20]。いずれの測定法も侵襲的方法という点で、被験者への負担が大きく、反復して施行できる測定法でないため、近年では非侵襲的な計測方法が広く用いられている。

非侵襲的な計測法に、ストレインゲージ脈波 (strain gauge plethysmography: SPG) と空気容積脈波 (air plethysmography: APG) を利用した脈派計測がある[43]。SPGは、水銀やガリウムインジウムを充填したプローブを下肢に巻きつけチューブの伸縮を電気抵抗の変化として計測し、容積の変化を記録する。APGは、下肢に伸縮性のないカフを巻き、容積の変化をカフにかかる圧変化として記録する。両測定では、50～60mmHgのカフ圧で静脈血流を遮断し、その際の容積の変化や、圧迫解除後の回復の程度を計測することで、静脈還流機能の定量評価が可能といった利点があるが、姿勢を拘束するため動的な環境での計測は難しい。超音波Doppler法は、太い血管や局所の血流計測を可能とする利点があるが、末梢レベルでの血流計測には難点がある。より末梢レベルの計測では、機能的磁気共鳴画像法 (functional magnetic resonance imaging : f-MRI)、ポジトロン断層撮影法 (positron emission topography : PET)、近赤外線分光法 (near-infrared spectroscopy: NIRS)、そして、むくみ測定がある。f-MRIやPETは、深部組織血流変化を3次元的に描写できる利点があるが、非常に高価で大型であるため測定環境に限られるという点で汎用性は乏しい[44]。一方、NIRSは、簡便、非侵襲的かつ連続的に末梢レベルでの血行動態の計測ができる利点がある。また、表層からの下肢

周径囲や水槽による容積の計測は、むくみの程度が判別でき、水分を含めた血液の貯留を間接的に計測できること、安価であるといった利点があるが、測定誤差の低減が課題となる。

2.2 本研究で用いた測定手法

本研究では、非侵襲的計測法のうち、下肢の血行動態を時系列計測できる NIRS 法、局所血管の血流計測が可能な超音波 Doppler 法、下肢の周径囲と足全体の容積変化を計測するむくみ測定を用いることとした。その特徴と原理について以下に述べる。

2.2.1 近赤外線分光法 (NIRS) による組織血液量測定

NIRS とは、800 ~ 2500 nm の波長域におけるヘモグロビンの光吸収スペクトルの相違を応用し、測定部位内の酸素化ヘモグロビンと脱酸素化ヘモグロビンの変化を簡便、非侵襲的かつ連続的に計測できる光計測法である[45][46]。NIRS は、1977 年の Jobosis の近赤外光を用いた生体酸素代謝の無侵襲計測法の提唱以来、非観血的計測法として、新生児の脳内酸素化状態モニタに利用されてきた。末梢循環検査への応用は、運動時の筋内血流や酸素状態の測定[44][47]、動脈疾患に対する歩行運動中の筋虚血評価[48]、下肢静脈還流障害のうっ血状態の評価[49]などに利用され、その有用性が指摘されている。本研究で対象とする長い時間の着座条件の評価に対して NIRS を応用した例は少ないが、着座中の血行動態を詳細に把握できることが期待できる。

NIRS の基本原理は、散乱がない試料に強度 I_0 、波長 λ の光を入射し、透過光強度 I を検出すると、

$$\ln (I_0/I) = (\epsilon) cd \text{ ----- (1)}$$

の関係が成立するという Beer-Lambert 則に基づいている。ここで、 c は吸収物質の濃度、 d は試料の厚さ、 (ϵ) は吸収物質のモル吸光係数である。この関係から試料中の吸収物質濃度が測定される。生体組織中で酸素輸送に関係しているヘモグロビンの吸収スペクトルは、その酸素化・脱酸素化で変化することが分かっている。このことを利用して、複数の波長に対する生体組織の吸収を測定することで、組織中の血

液量や組織酸素飽和度を求めることが可能となる。

本研究で用いた NIRS 装置は、3 波長 2 受光式のレーザ組織血液酸素モニタ (BOM-L1TRW オメガウェーブ社) である (図 2.1)。その特徴は、送光用プローブから波長の異なる 3 種類の半導体レーザ光 (780nm, 810nm, 830nm) を組織に照射し、吸収、散乱された光を 2 つの受光部でとらえ、組織内の浅い部分 (A) と深い部分 (B) との差をとることで、光吸収スペクトルの異なる酸素化ヘモグロビン量 (oxygenated hemoglobin : oxy-Hb) と脱酸素化ヘモグロビン量 (deoxygenated hemoglobin : deoxy-Hb) を計測する。本装置は筋の酸素化状態を忠実に反映することが確認されており [50], 1mm^3 あたりの oxy-Hb と deoxy-Hb を絶対量で演算し、その単位は $\times 10^4$ 個/ mm^3 である。また、組織全血液量 (total-Hb) と組織酸素飽和度 (StO_2) は次式にて算出される。

$$\text{total-Hb} = \text{oxy-Hb} + \text{deoxy-Hb} \text{ ----- (2)}$$

$$\text{StO}_2 (\%) = \text{oxy-Hb} / \text{total-Hb} \times 100 \text{ ----- (3)}$$

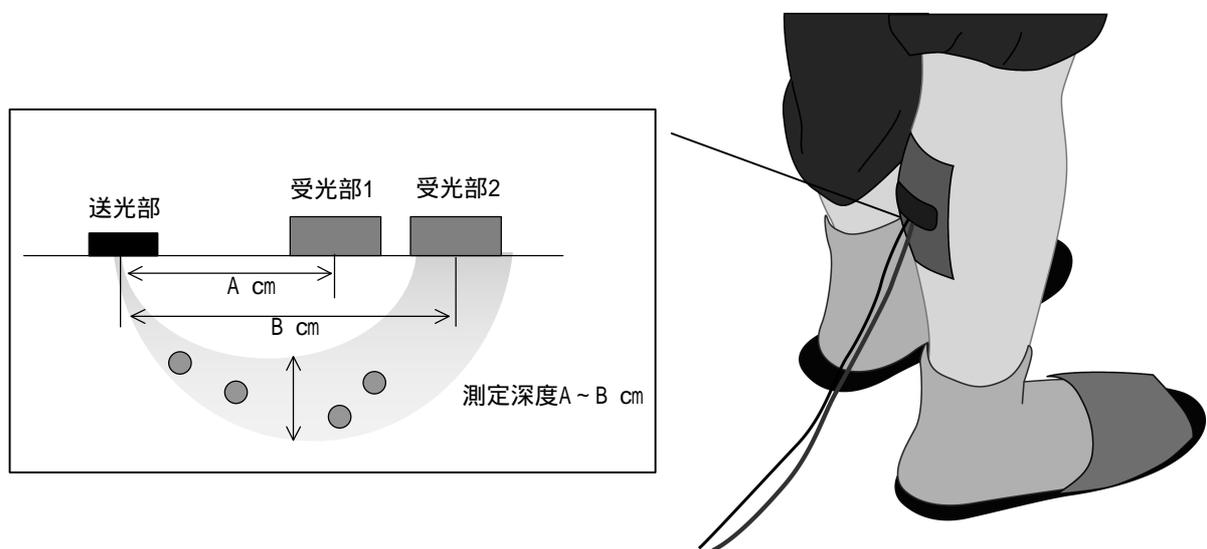


図 2.1 NIRS の概略

ここで、NIRS 測定は原理的に測定部位内の血液中の oxy-Hb と deoxy-Hb の数を計測することで、経時的血液量変化を測定しているため、血流量を測定しているのではないことを念頭に置いておく必要がある[51]。このことは、NIRS 計測単独では、血液量の増加が血流増加によるものなのか、血液の貯留を示しているものなのか判別・評価することは難しいことを意味する。そのため、本研究では次の血流計測とむくみ測定を併用して用いることとした。

2.2.2 超音波 Doppler 法による血流速度測定

超音波計測では、血流情報を定量計測する Pulsed Doppler 法と、画像上に色情報として提示する Color Doppler 法がある。本研究では、パルス式の超音波双方向血流計 smartdop 50EX（林電気株式会社製）が用いられた。Doppler 法の原理は、超音波を血流に体表から照射し、主に血球によって散乱される超音波が、血流速度の比例した Doppler 効果を受けていることを利用し、その Doppler 周波数から血流速度を計測している。血流速度と Doppler 周波数は次の関係にある。

$$V = \frac{FC}{2F_e \cos \theta} \quad (4)$$

ここで、 V は血流速度 (cm/sec)、 F は周波数の変化 (Hz)、 C は組織内音速 (cm/sec)、 θ は超音波ビームの入射角、 F_e は超音波ビームの周波数 (Hz) である。通常、 C と F_e は既知であるので、 θ を決定できれば血流速度が求められる (図 2.2)。しかし、この θ を体表から測定することは難しく、一般的には周波数そのものの表示が、 $\theta = 60^\circ$ で換算して血流速度 (cm/sec) を算出している[52][53]。

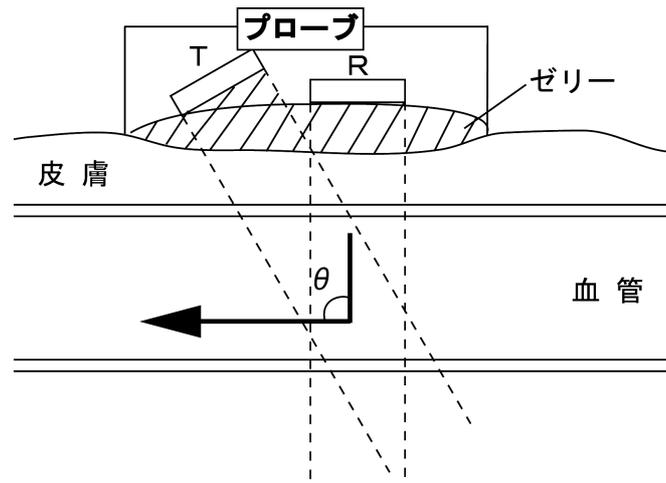


図 2.2 超音波による測定原理 (T: 入信波, R: 受信波)

2.2.3 下肢のむくみ測定

むくみとは、組織間質腔に過剰な水分が貯留した状態と説明される[22][54]。むくみの生成過程について述べると、毛細血管壁を通じたの濾過・再吸収について、古くから Starling の仮説がある。すなわち、「毛細血管壁を通じたの水分の移動方向と移動速度は、毛細血管内外の静水圧、膠質浸透圧、および濾過膜としての管壁の性質に依存する」と説明され、下記の数式として示される。図 2.3 に濾過・再吸収の仕組みを示す。

$$\text{濾過 } F_o = K (P_c + t)$$

$$\text{再吸収 } F_i = K (P_t - p)$$

$$\text{正味の濾過量 } F = F_o - F_i = K (P_c + t - P_t - p) \text{ ----- (5)}$$

(定常状態では、 $F = F_e$)

< K: 毛細血管濾過定数, P_c : 毛細血管圧, t : 組織液膠質浸透圧, P_t : 組織圧, p : 血漿膠質浸透圧, F_e : リンパ経路 >

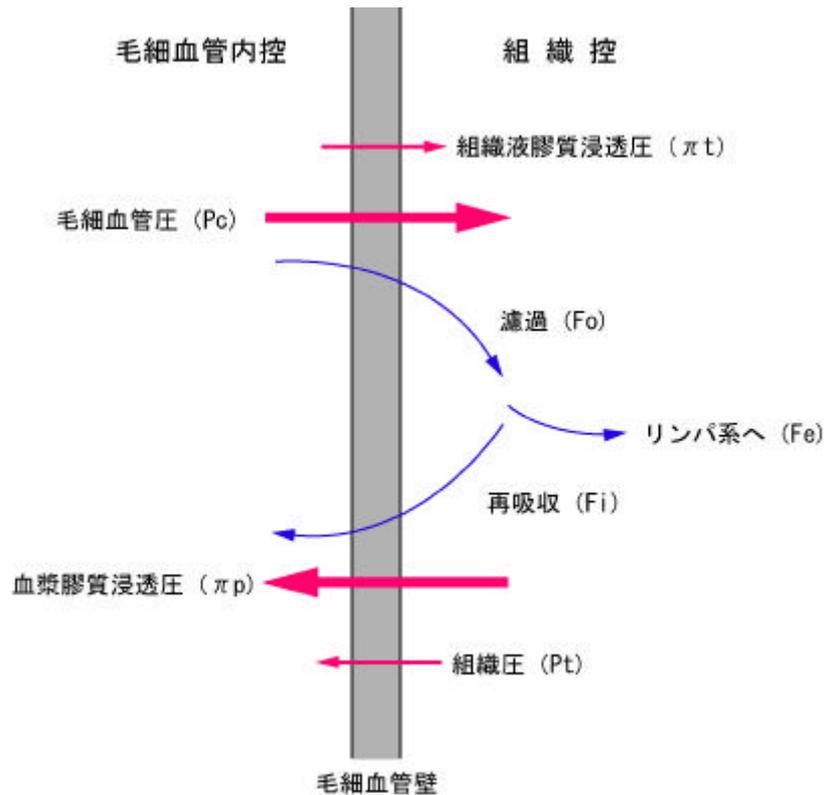


図2.3 Starlingの仮説に基づく濾過 再吸収の駆動力 (文献22より引用・作成)

式(5)の簡略式は次式である。

$$\text{正味の濾過量 } F = K (P - \quad) \text{ ----- (6)}$$

< K: 血管壁濾過定数, P: 毛細血管圧, : 血漿膠質浸透圧 >

式(6)から、一般的にむくみの発生要因は次の4点が考えられている。

- ・ P の増大 (毛細血管圧の上昇)
- ・ の減少 (血漿膠質浸透圧の減少)
- ・ K の増大 (血管壁の傷害)
- ・ その他: リンパ傷害

このなかで、病的な障害がなければ、むくみの要因は毛細血管圧 P の上昇が関与する。P の増大は、毛細血管内腔から組織間質腔への外向きの駆動力となるため、濾過量を増大させる。P は静脈圧の上昇に起因することが多い。座位によるむくみ

の発生は、筋ポンプ作用が働きにくいことによる静脈還流の低下 静脈圧の上昇 濾過亢進となる。逆に、濾過が亢進してむくみが起これば、末梢血管抵抗の増大 末梢血管は圧迫されて細くなる 血流が減少する、ということも考えられる。このことから、むくみを測定することによって、血行動態を間接的に把握できると考えられる。

以上のようなむくみの生成を簡便に計測する方法に、巻尺による方式、ストレインゲージによる方式[55][56]、水槽による方式[57][58][59]がある。いずれも、体表より対象部位の膨張の度合いを計測しているため、原理的には、血液を含めた水分の貯留の程度を測定していることになる。本研究では、次の巻尺と水槽による方法を用いた。

1) 巻尺による周径囲計測

この方法は巻尺を使用して各部位の周径囲を測定する(図 2.4)。巻尺による測定は、簡便に計測できる点において、様々な研究で採用されているが、測定部位については明確な基準は定められていない。筆者所属の野呂研究室では、主に、下腿最大囲(ふくらはぎ)、甲囲(足の甲)、前足囲(足の指の付け根付近)の三箇所の測定を行っている[60]。測定機材は、下肢の凹凸に対応できるように幅 11mm のファイバークラス製の巻尺を使用した。測定時の姿勢は、椅子の座面高を被験者の下腿高に調節して、膝の角度が直角になるように行った。

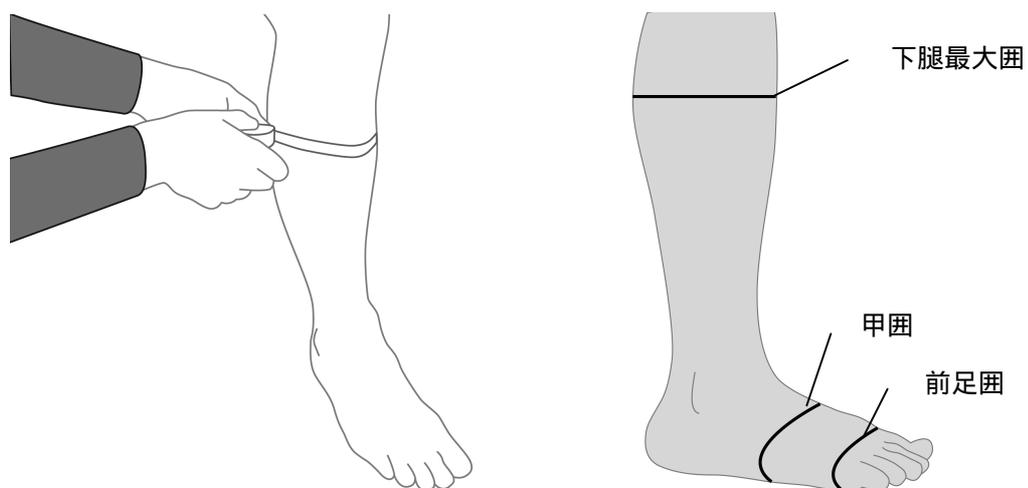


図 2.4 周径囲の測定方法と測定部位

2) 水槽による容積測定

1999年に工業技術院生命工学工業技術研究所(2001年産業技術総合研究所に統合)の持丸 正明 博士のアドバイスをもとに、水槽によるむくみ(容積)の測定方法が開発された[61]。その後、三家、海老根ら[62] [63]により水槽の改良が重ねられ、水槽から溢れ出る水の増減率により計測する方法が考案された(図2.5)。この方法を用いて、本研究では下肢の容積変化が計測された。測定の手順は、次のようになる。

足を水槽に入れる、

水が流出口から容器に流しこまれる

デジタル計測器を用いて重量を計測する(1g = 1ml)

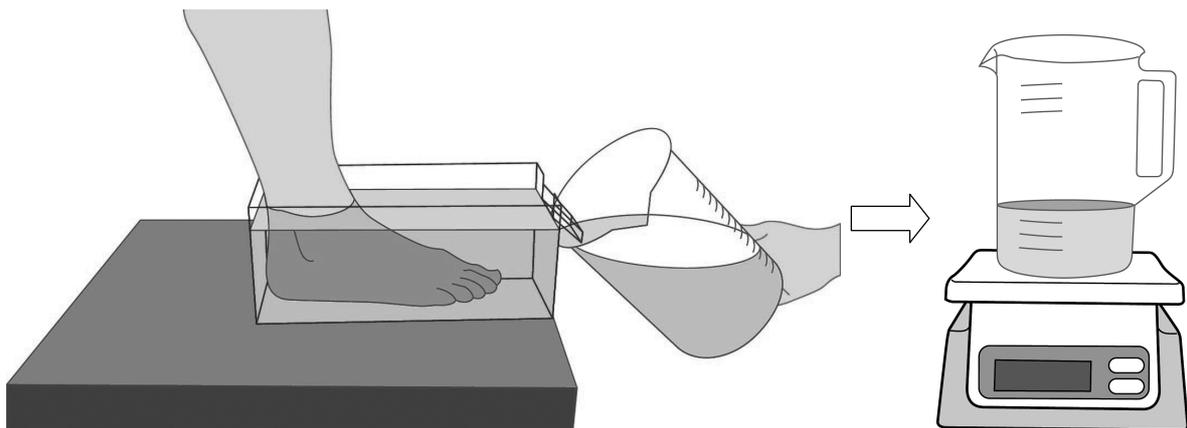


図 2.5 容積の測定方法

水槽は、10mm 厚の亚克力板で構成され、寸法は横 300mm × 縦 130mm × 高さ 130mm である。また、高さ 80mm から水がこぼれるように加工されている。むくみ測定では測定誤差が課題となるが、本法では次の諸点に留意している。

まず、水槽に入れる水温は温度による影響を防ぐために、先行研究に基づき常に 26℃ に設定している。また、デジタル計測器を用いることにより、従来の目視による目盛りの確認よりも測定精度は向上している。さらに、水槽内に雫が残る場合もあり、

測定誤差の要因となることから，スポイトを用いて一滴残らず容器にうつすように細心の注意を払っている．前述の巻尺による方法は簡便に計測できる利点があるが，実験者の力の入れ具合で誤差も発生しやすい場合もある．これに対し，容積測定は周径計測よりも測定精度は高いといえる．また，Doppler 法や NIRS 法は，それぞれの静脈や局所循環の計測に優れるが，下肢全体の血行動態を把握することは難しい．水槽による容積測定では，足全体の水分を含めた血液の貯留の程度を把握できるため，Doppler 法や NIRS 法との併用により，局所と足全体の両側面からの血行動態の評価が可能となると考えられる．

なお，巻尺と水槽による実験前後の下肢の膨張率は，次式にて算出される．

$$\text{下肢の膨張率 (\%)} = \{ (\text{着座後} - \text{着座前}) / \text{着座前} \} \times 100 \text{ ----- (7)}$$

2.3 実験環境



図 2.6 客室環境モックアップ

2.3.1 客室環境モックアップ

実験に際しては、小糸工業（株）ならびにエルゴシーティング社（株）との共同により、図 2.6 に示す航空機内客室環境を再現したモックアップと実験用座席を製作した[64]。モックアップ内の床面は、飛行中の床面状態を想定して 3° 後傾させた。座席配置は、一般的な国際線エコノミークラスのシートピッチ 787 mm (31 inch) にて、縦 2 列×横 3 座席の計 6 席が用意した。前席はダミーとし、後席を実験に用いた。

2.3.2 実験用座席の製作経緯

従来の航空座席の改善をふまえて、DVT 予防を考慮した座席を製作した。ここでは、計画・設計 第一次試作 評価 改良 第二次試作、という製品デザインの手順をふんだ。DVT 予防座席には、背もたれの逆中折れ機能、フットレスト機能、薄型座面クッションの特徴を持たせた。

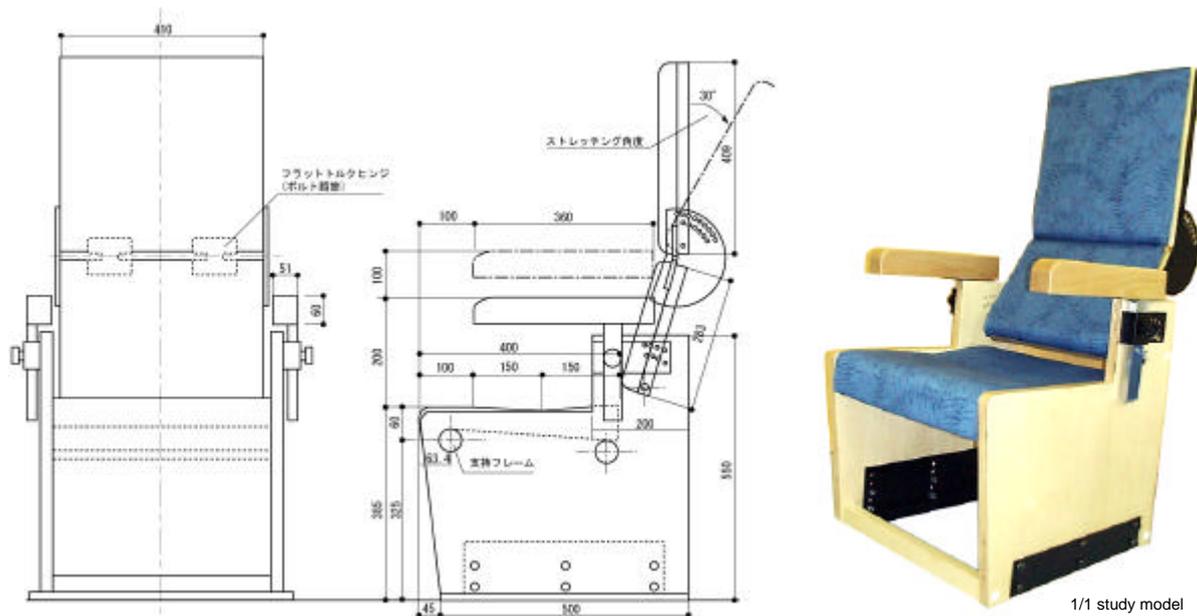


図 2.7 実験用座席 の概略図

1) 背もたれの逆中折れ機能

逆中折れ機能とは、背もたれを上下に 2 分割して、背もたれの上部が最大 30° 後方に傾斜する機能である。この機能は、上体の後屈運動を促して呼吸ポンプ（静脈還流促進作用）を得ることを意図している。安楽姿勢確保の視点から、背もたれ上部が下部よりも前屈（前方傾斜）する「シートバック中折れ機能」と呼ばれる車両用座席が開発されている[65]。本研究で試作した座席は、従来の中折れ機能とは考え方が異なり、運動を促して後屈（後方へ傾斜）させることを意図しているので、「逆中折れ機能」と呼べる。逆中折れ機能の設計にあたっては、中折れ角度、支点の位置をどのように設定すべきかという課題があった。中折れ角度については、日本整形外科学会が定める胸腰部後屈時の正常可動範囲 0~30° [66] を参考にした。第一次試作（図 2.7）を用いて、様々な体型の人を対象とする官能評価実験の結果、中折れ角度は、0~30° の範囲で十分であり、背伸びがしやすいという肯定的な結果が得られた。しかし、中折れ支点の位置は、やや高いという課題が認められたため、第二次試作の段階では、下方に修正した。

図 2.8 と図 2.9 は、第二次試作の概略図を示す。左側が改良座席で、右側が従来の Boeing 767 Passenger Seat である。改良座席の中折れ支点の位置は、座面からの高さを 230 mm とした。この位置は、平均的な日本人の腰椎下部、すなわち第 5 腰椎付近で、後屈時の可動量が大きい部位に相当する[39]。ただし、身長が低い人にとっては、第 1 腰椎から第 12 胸椎付近となるため、腰椎下部に比べて、可動量が小さいが、実験を進める上では問題はないものと判断した。中折れ支点のジョイント部材は、一般的なうず巻きばねを使用して、背伸びをしない時は、治具を用いてロックするようにした。

2) フットレスト機能

第二次試作では、シートピッチが 787 mm 内に設置することを前提に、半径 325 mm の駆動軌跡をとるフットレストを備えた。これは、下肢の筋ポンプ作用を得ることを意図しており、足関節の底屈・背屈運動を補助する機能である。また、航空座席は座面高さの上下調節が難しいため、膝裏の圧迫を回避する足置き台としての意味も持つ。フットレストの駆動軌跡については、下肢の関節可動域と基本寸法の調査結果[67]に基づき設定した。

3) 座席寸法の改善と薄型座面クッション

第二次試作の座席寸法は、座面の高さを 380 mm、座面の奥行きを 400 mm とした。この寸法は、日本人の平均女性の身体寸法に相当し、低身長者でも踵が床面につき、膝裏の圧迫を回避することを意図している。ここでは、安全性の観点から座席下部の支持構造体の高さを変更できない物理的制約があったため、クッションの厚みを薄くすることで対応した。クッションの厚みについては、40 mm、60 mm、80 mm 厚にて比較検討したところ、40 mm 厚では座り心地の低下が認められるが、60 mm 厚では問題がなかったという調査結果[68]と、DVT のリスクが高いとされる身長 150 cm 台の人でも踵が床面につくことが確認されたため、60 mm の厚みを設定した。なお、本研究で比較対象としている従来座席のクッションの厚みは 120 mm である。クッションの素材については、従来の航空機座席と同じ高密度の発泡ウレタン材とした。

次章から述べる各実験では，図 2.8 に示す従来座席と改良座席（第二次試作）をサンプル座席として用いた．

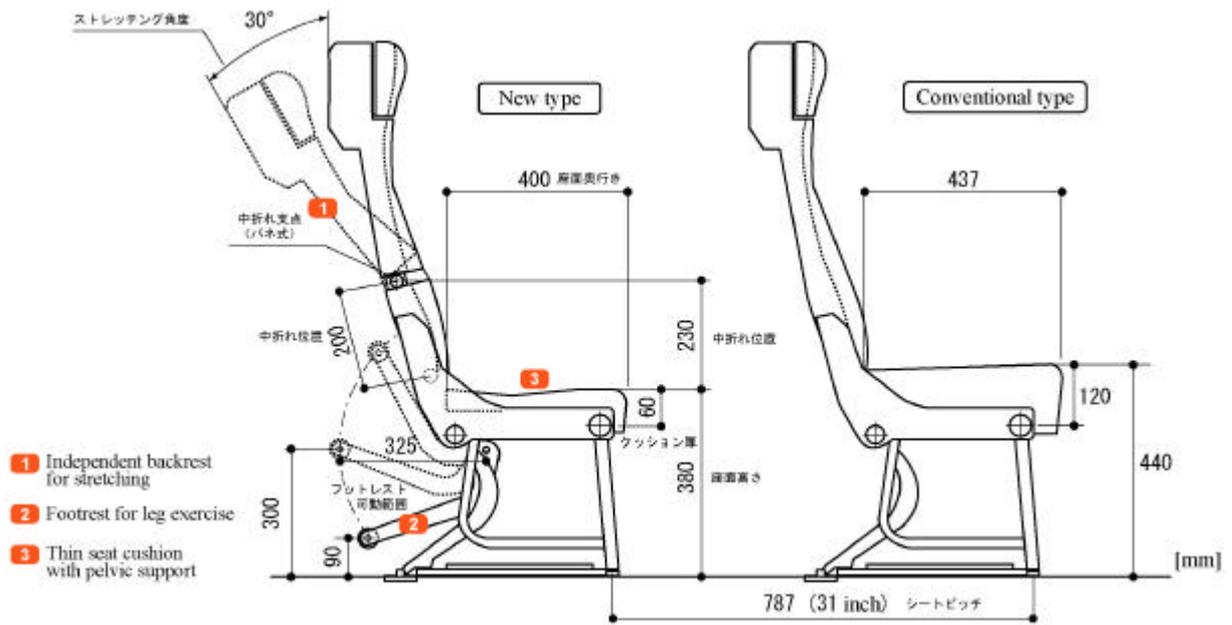


図 2.8 実験用座席 の概略図（左：改良座席，右：従来座席）



図 2.9 実験用座席 （左側：従来座席，中央と右側：改良座席，製作協力：小糸工業）

第3章 フットレストと背もたれの動的機能の効果

3.1 本章の目的

本章の目的は、2章で述べた測定手法を応用して、従来の航空機座席と下肢と上体の軽運動を補助することを意図して設計された改良座席に、それぞれ60分間着座した場合に、下肢の血行動態にどのような変化が生じるか検討することである。また、NIRS法、Doppler法、下肢のむくみ測定から得られるパラメータ間の相互関係を分析し、着座条件の違いによる下肢の血行動態を測定・評価が可能か検討する。

3.2 実験の方法

3.2.1 実験日時と場所

日時：2003年7月11日～12日

場所：早稲田大学 野呂研究室 駒ヶ根実験施設内

3.2.2 被験者

被験者は実験の主旨を理解し、協力が得られた男性4名、女性4名、計8名であった。被験者の年齢、身長、体重、体格指数（body mass index: BMI）を表3.1に示す。

3.2.3 実験環境

実験は、機内客室環境を模したモックアップ内に座席を配置して行った。実験に用いた座席は、2章で示した従来座席と改良座席を用いた。座席の配置は、通常の国際線エコノミークラスのシートピッチ787mm（31inch）にて、縦2列×横3座席の計6席を用意した。後部座席を実験に用い、前席はダミーとした。

表 3.1 被験者の身体特性

No.	性別	年齢 (歳)	身長 (cm)	体重 (Kg)	BMI
1	男性	20	177.0	65.0	20.7
2	男性	22	171.0	55.0	18.8
3	男性	21	171.0	67.0	22.9
4	男性	66	169.2	63.8	22.3
5	女性	24	158.0	44.0	17.6
6	女性	21	159.1	57.0	22.5
7	女性	21	158.0	51.0	20.4
8	女性	20	161.3	55.7	21.4
Mean		26.9	165.6	57.3	20.8
STD		15.9	7.3	7.7	1.9

3.2.4 測定項目

1) 組織血液量測定

NIRS に基づく、3 波長 (780 nm, 810 nm, 830 nm) の 2 受光式レーザ組織血液酸素モニタ (BOM-L1TRW オメガウェーブ社) を用い、総ヘモグロビン量 (total-Hb), 酸素化ヘモグロビン量 (oxy-Hb), 脱酸素化ヘモグロビン量 (deoxy-Hb) をモニタリングした。計測部位は、右足大伏在静脈上にプローブを貼付けて、13? 30 mm の深部を計測した。サンプリング間隔は 1 秒間にて 60 分間連続記録した。

2) 血流速度測定

Doppler 式超音波双方向血流計 (Smartdop 50 EX, 林電気製) を用いて、右足の踝付近にある大伏在静脈上の血流測定を行った。計測は実験の前後に行った。

3) むくみ測定

実験の前後に巻尺を用いて、下肢の3つ周径囲（下腿最大囲、足の甲囲、前足囲）を計測した。また、水槽に足を入れることにより溢れ出る水量を計測する方法を用い、容積の変化を求めた。水温は26℃に設定し、その重量はデジタル秤で計測した。

4) 自覚負担調査

調査用紙を用いて、実験開始前、15分、30分、45分、60分時に自覚負担調査を行った。評価項目は、頸部、肩部、上腕部、肘、前腕部、腹部、背部、腰部、臀部、大腿部、膝部、下腿部、足部の13項目とし、評点尺度を7段階とした。

3.2.5 実験条件

実験は次の二つの条件を設定した。

1) 条件1

被験者は、従来座席Aに自然な状態で60分間安静着座した。座席の背もたれ角は、一般的なエコノミークラスのシート角度である95度に固定した。床面が3度後傾しているため水平面からの背もたれ角は98度になる。

2) 条件2

被験者は、改良座席Bに自然な状態で60分間着座した。この条件では、座席の機能を利用してもらうため、20分時にフットレストを使った足関節の低屈・背屈運動、40分時に可動式背もたれを利用して腕を挙げた上体の背伸び（後屈運動）、60分時に下肢と上体の運動を30秒間ずつ行った。各運動の大きさや速さに関する実験統制に関しては、フットレストと可動式背もたれを使用した時の自然な反応をみるために、制約は与えずに被験者の自由とした。



図 3.1 実験の様子

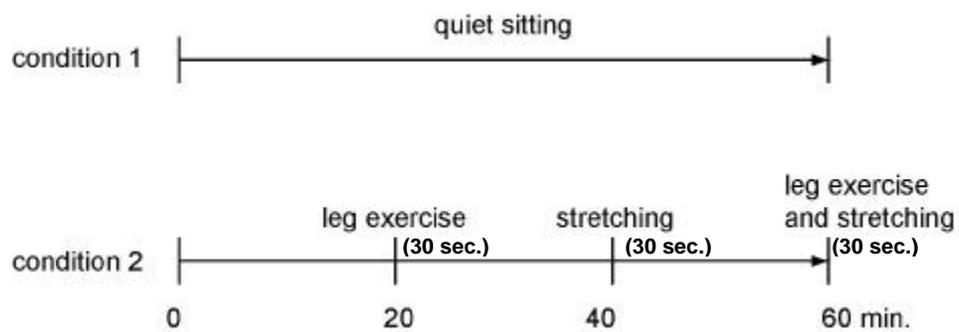


図 3.2 実験プロトコル

3.2.6 実験手順

実験の様子と実験プロトコルを図 3.1 と図 3.2 に示す。被験者には実験開始 1 時間前の飲食を控えてもらい実験室に入室してもらった。実験は次の手順で行った。

- 1) 身体計測と測定装置の装着：デジタル式身長計と体重計を用いて、身長と体重を計測した。また、近赤外光のプロープを下肢の大伏在静脈上に装着した。

- 2) 下肢のむくみと血流測定:巻尺を用いて,下腿最大囲の足の甲囲と前足囲ならびに,水槽を用いて下肢の容積を求めた.また,大伏在静脈上の血流計測を行った.
- 3) 組織血液量測定と自覚負担調査:被験者は二人一組にて実験用座席に着座して,自覚負担の質問紙に記入した.実験中は,組織血液量の変化を連続記録した.実験終了後には,すみやかに,血流計測とむくみ計測を行った.

以上の手順にて,各条件は無作為に施行した.条件間には30分以上の休憩を入れ,負担蓄積を解消するように留意した.

3.2.7 結果の処理

結果はすべて平均 \pm 標準誤差で示した.NIRSの測定値は,初期着座0分から3分間の平均をベースライン(基準値0)とした.次に,60分間の経時変化を5分毎に区間化し,各区間の初期値から3分間の平均値と基準値の差の相対値に変換した.結果の統計処理は,着座条件(2水準)と区間(12水準)を要因とする二元配置の分散分析を行った.血流速度とむくみ測定は,実験前値を基準とする相対値に換算し,t検定にて条件間の比較を行った.有意水準は $p < 0.05$ とした.また,NIRSの測定値,血流速度,下肢のむくみとの関係を把握するため,oxy-Hb, deoxy-Hb, total-Hbの相対値の平均,最大値,最小値,標準偏差を代表値として,パラメータ間の相関分析を行った.心理的な自覚負担については,標準得点に換算し,着座条件(2水準)と区間(5水準)を要因とする二元配置の分散分析を行った.

3.3 実験の結果

3.3.1 下肢の血行動態について

1) 組織血液量

各条件の相対変化を図 3.3 と図 3.4 に示す。分散分析の結果から、条件間に顕著な差は認められなかった。図 3.3 より、条件 1 では初期値を基準に oxy-Hb と deoxy-Hb は放射状に解離していく傾向にあった。図 3.4 より、条件 2 では oxy-Hb と deoxy-Hb の変動が著しく、oxy-Hb と deoxy-Hb の相互の解離が抑えられ、中盤にかけて増加、終盤にかけて回復する傾向にあり、total-Hb も同様の変化を示すことがわかった。

2) 下肢のむくみ

4 つの計測部位の結果を図 3.5 に示す。前足囲を除き、条件 1 に比べて、条件 2 の方が、むくみが抑制されていることがわかった。t 検定より、下腿最大囲に有意傾向が認められた ($p = 0.059$)。

3) 血流速度

右足大伏在静脈表層から採取した血流速度の変化を図 3.6 に示す。条件間に顕著な差は認められなかった。個人毎でみると、条件 1 では被験者 8 例中、実験前に比べて実験後に 4 例が減少、3 例が変化なし、1 例が増加した。一方、運動を挿入した条件 2 では、3 例が減少、1 例が変化なし、4 例が増加していることがわかった。顕著な例として、被験者 No.4 の 5 秒間の原波形を図 3.7 に示す。図中の赤線は実験開始時の波形、青線は実験終了後の波形を表している。条件 1 では実験後に血流速度が減少しているのに対し、条件 2 の下肢と上体の軽運動をすることにより、血流速度が増加することがわかった。

4) 各パラメータ間の関係

相関分析の結果から、NIRS の oxy-Hb 最大値と血流速度の間に有意な正の相関 ($r = 0.510$, $p < 0.05$) を示した (図 3.8)。また、有意ではないが、deoxy-Hb、total-Hb の最大値と血流速度の間にも正の相関 ($r = 0.314 \sim 0.354$) を示した。むくみについては、oxy-Hb の最大値と下肢の容積変化に負の相関 ($r = -0.36$) を示した (図 3.9)。また、

deoxy-Hb , total-Hb の最大値と下肢の容積変化の間にも負の相関を示した ($r = -0.456 \sim -0.458$).

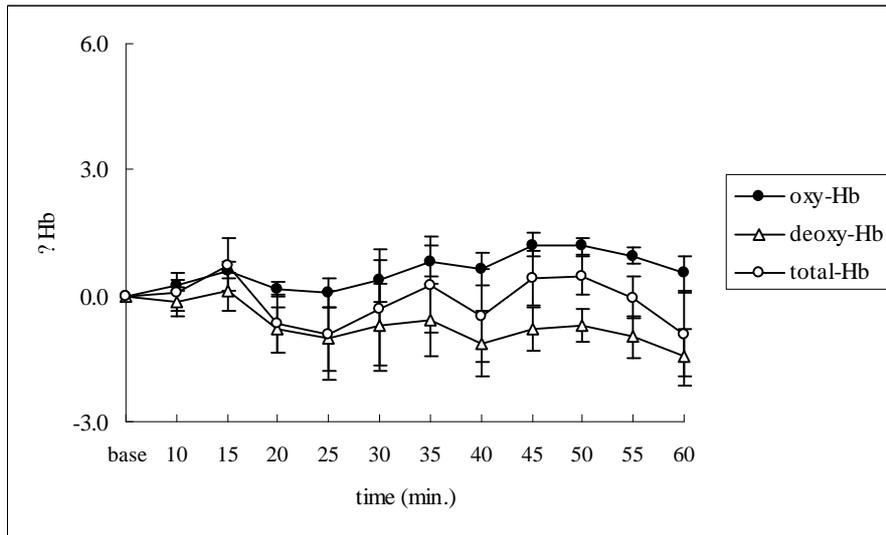


図 3.3 条件 1 の組織血液量の相対変化

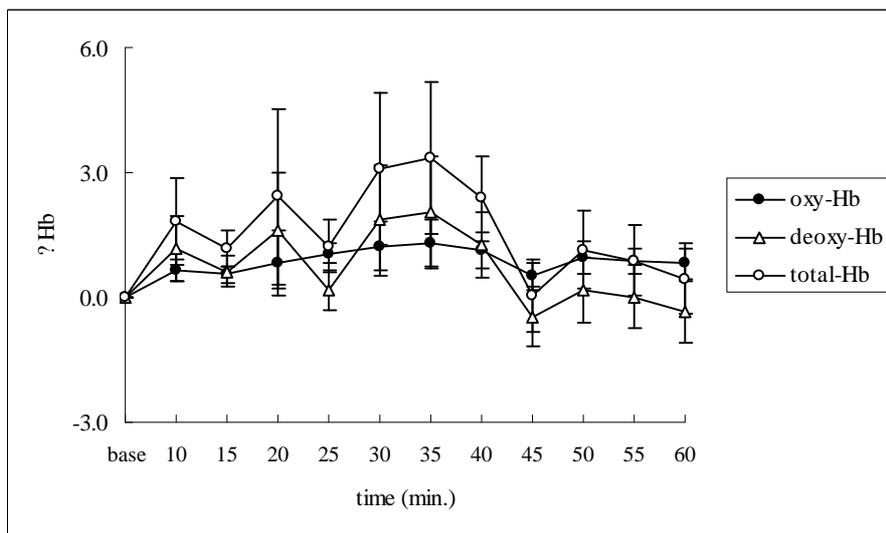


図 3.4 条件 2 の組織血液量の相対変化

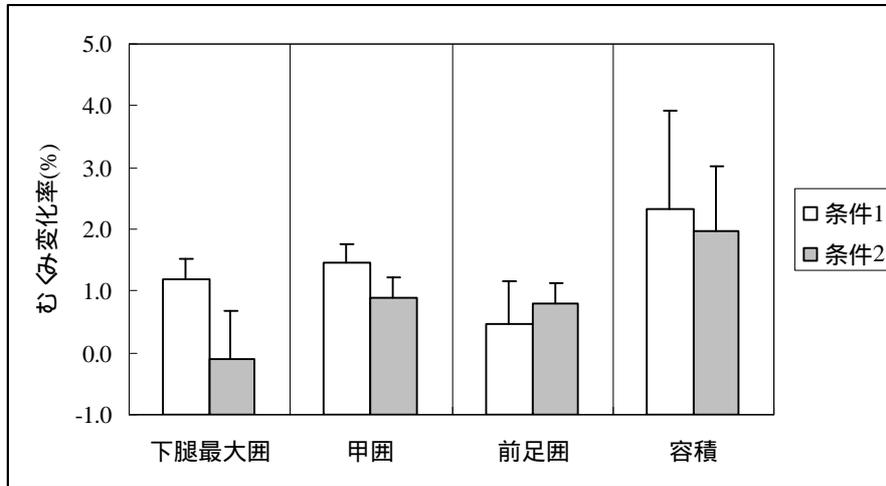


図 3.5 下肢のむくみの変化

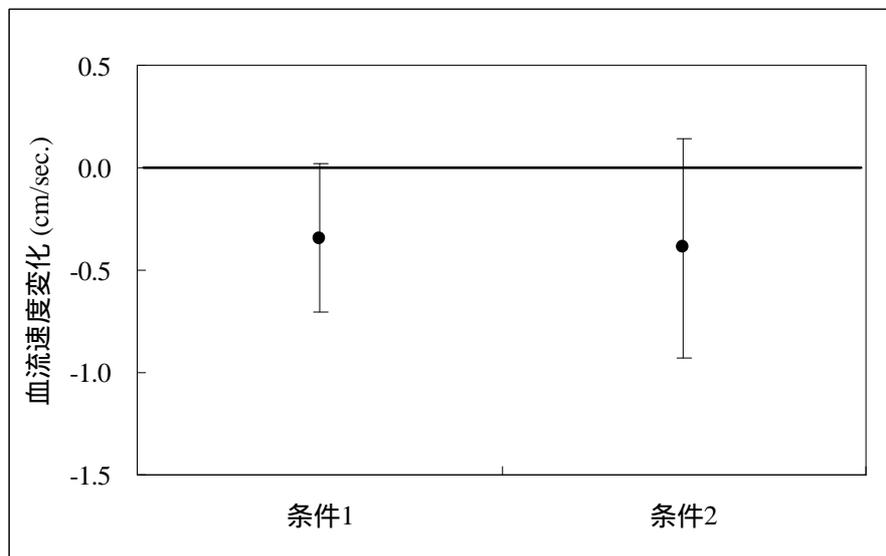


図 3.6 血流速度の変化

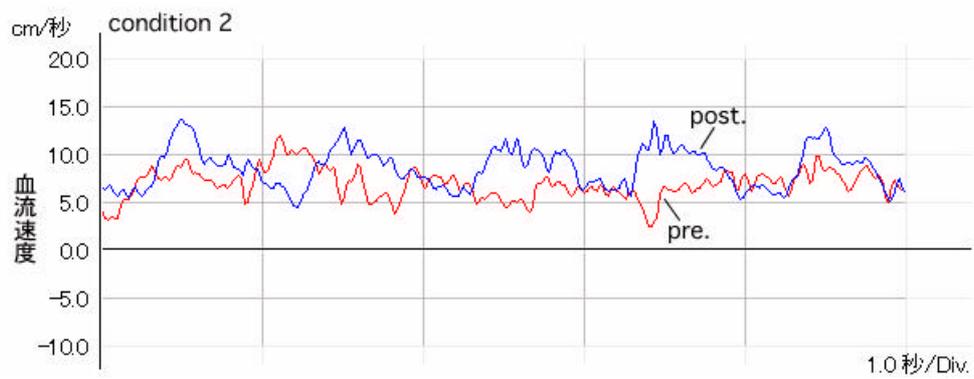
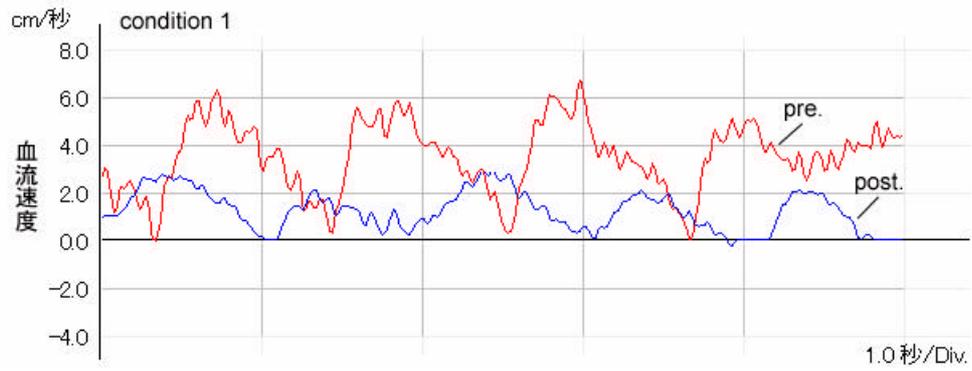


図 3.7 着座条件の違いによる被験者 4 の血流速度の変化

(上図 : 条件 1 , 下図 : 条件 2 , 赤線 : 実験前 , 青線 : 実験後)

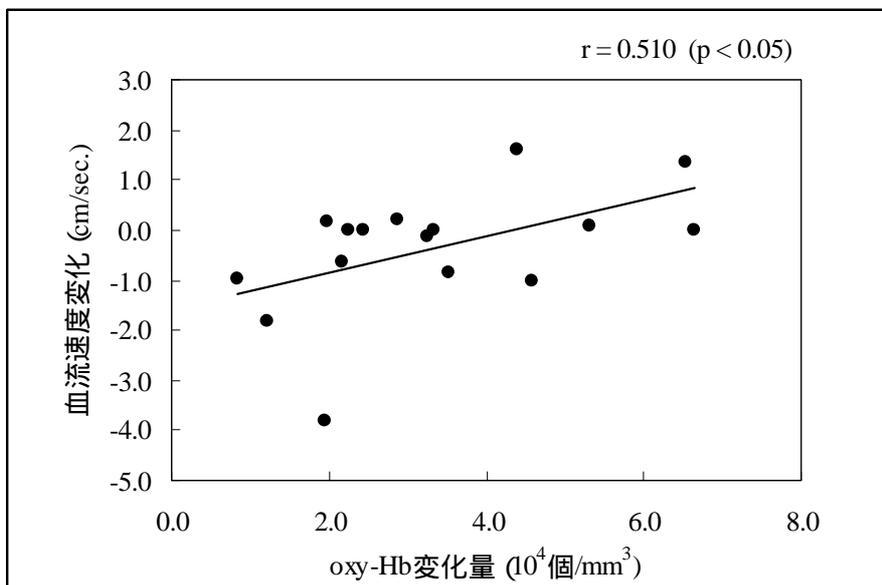


図 3.8 NIRS 測定値 (oxy-Hb 変化量最大値) と血流速度変化の関係

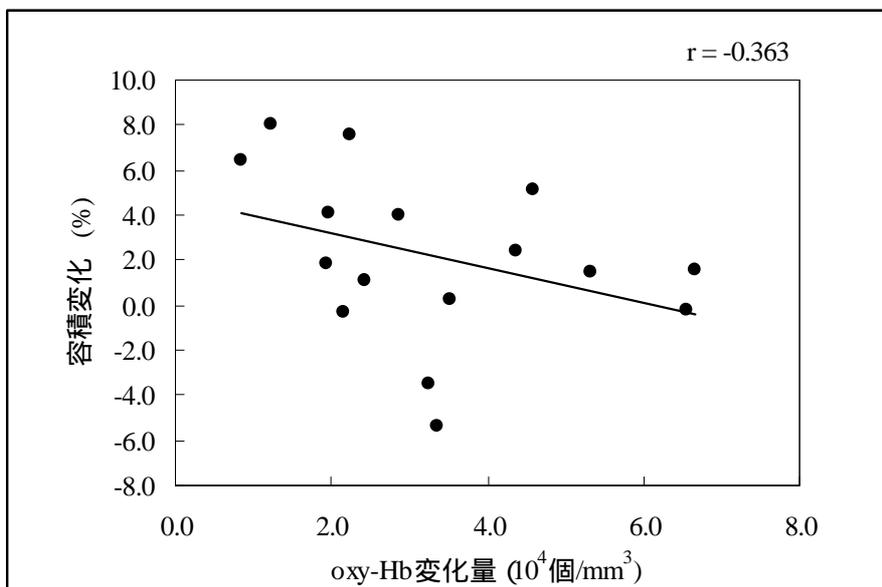


図 3.9 NIRS 測定値 (oxy-Hb 変化量最大値) と容積変化の関係

3.3.2 自覚負担について

全ての部位において心理的な負担感は時間経過とともに増加し、条件1に比べて条件2が抑制される傾向にあった。分散分析の結果から、足の負担度スコアにおいて、条件に主効果 ($F = 6.248, p < 0.05$) ならびに、区間に主効果 ($F = 5.068, p < 0.01$) が認められた (図 3.10)。次に初期値を対照とする事後比較検定から、条件1では15分から負担度が有意に増加したのに対し、条件2では時間による影響は認められなかった。このことから、条件1に比べて、条件2の運動を挿入することにより、足の負担感が明らかに改善されることがわかった。また、相関分析より、足の負担度スコアと下腿最大囲の間に正の相関 ($r = 0.441, p < 0.1$) が認められた。

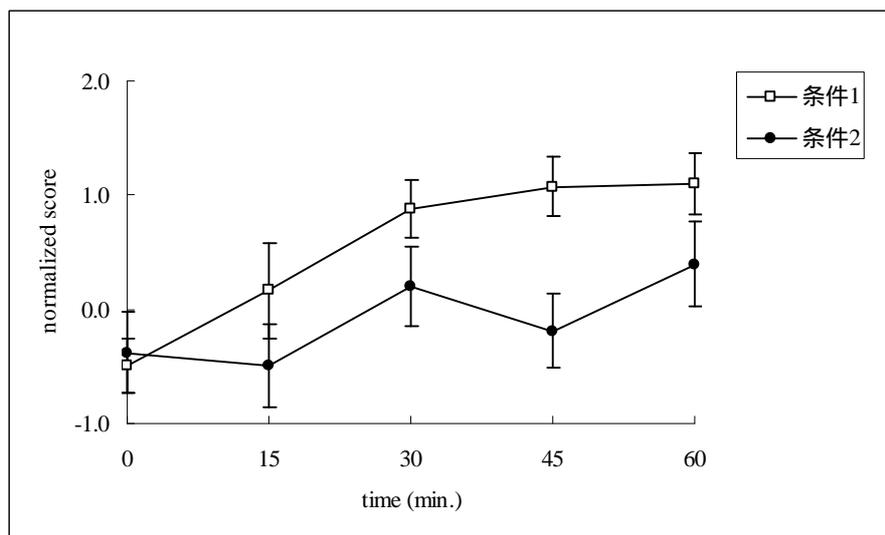


図 3.10 足の負担感の経時変化 (標準得点)

3.4 考察

本章では、従来の航空機座席に着座した場合と、軽運動を補助することを意図して設計された改良座席に、それぞれ 60 分間着座した場合に、下肢の血行動態と心理反応にどのような変化が生じるか検討した。実験の結果から、次のことがわかった。

NIRS の結果から、条件 2 の改良座席に座り、着座中に軽運動を行うことにより、oxy-Hb と deoxy-Hb が増加し、血液量の指標となる total-Hb (oxy-Hb と deoxy-Hb の総和) が一時的に増加する傾向にあった。total-Hb の増加傾向は、測定対象部位への血流量が増加した、あるいは、血液が貯留した、という二つの解釈ができる。今回の実験では、血流測定とむくみ測定の結果から、条件 2 ではむくみが抑制され、血流速度が増加している被験者の割合が多かった。また、oxy-Hb と total-Hb の変動と血流速度には有意な正の相関を、むくみとは負の相関を示したことを考慮すると、条件 2 における oxy-Hb と total-Hb の増加傾向は、測定対象部位への血流量が増加し、血液循環が活性化したことを示唆していると考えられる。一方、条件 1 では、初期値を基準に oxy-Hb と deoxy-Hb は放射状に解離していく現象が認められた。このことは、ただ座っているだけでは、筋ポンプ作用が働かず、酸素が殆ど消費されていないことを示唆しているものと思われる。結果的に、条件 1 は条件 2 に比べて、下肢がむくみやすかったものと考えられる。これら生理的な反応は次の心理反応の結果からも裏付けられる。足の自覚負担は、条件 1 に比べて、条件 2 のほうが有意に抑制されることがわかった。このことは、着座中の軽運動により、下肢の血液の還流がよくなり、心理的な負担度も改善されたものと考えられる。

以上のことから、従来の航空機座席は安楽性を考慮したものが殆どであったが、座席機能の設計にあたっては、下肢の運動や上体の運動を補助する機能を備えることで、従来よりも、着座者の下肢の血行動態を活性化させ、DVT の危険因子である血流停滞を予防し、心理的な負担感も軽減できる可能性があるといえる。また、本実験の結果から、NIRS 測定、Doppler 法による血流測定、むくみ測定を併用することにより、長時間着座中の下肢の血行動態を計測することができ、相互の対応をとることで、NIRS から得られるパラメータの解釈に役立てることができた。

第4章 背もたれの動的機能が下肢の血行動態に与える影響

4.1 本章の目的

本章の目的は、中高年女性層を対象に、背もたれの動的機能を使った上体の後屈運動が下肢の血行動態に与える影響について検討することである。DVT 予防を視野に入れた座席機能の改善では、下肢運動を促すフットレスト[69]、膝裏の圧迫を回避する座席構造体[70]に関する研究が行われている。ところが、現実場面を想定した航空機座席における下肢の血行動態を連続的に計測した研究や、DVT のリスクが比較的高いとされる中高年層を対象に検討した研究は見受けられなかった。また、下肢の運動については、従来知見や3章の検討結果からも筋ポンプ作用による静脈還流増進が期待でき、DVT のリスク予防に有用であると思われる。一方、長時間着座中の上体の運動が中高年女性層の下肢の末梢レベルでの血液循環にどのような影響を与えるのかについては、よく分かっていない。

以上の観点から、本章では、狭い座席内でも簡便にできると考えられる上体の運動と中高年女性層に焦点を絞り、安静着座の場合と上体の運動を取り入れた場合の、下肢の末梢血行動態に与える影響について比較検討した。

4.2 実験の方法

4.2.1 実験日時と場所

日時：2003年11月1日-3日 9:00-13:00, 14:00-18:00

場所：早稲田大学 野呂研究室 駒ヶ根実験施設

4.2.2 被験者

被験者は、長野県駒ヶ根市商工会議所のボランティア団体に依頼し、実験の主旨を

理解して、協力が得られた 43? 67 歳の女性 10 名であった。被験者の年齢、身長、下腿高（床面から膝窩までの距離）、体重、体格指数（body mass index: BMI）を表 4.1 に示す。1 章で述べたように、成田赤十字病院の森尾医師の調査[33]に基づく、航空機旅行中に血栓症にかかった日本人の臨床像は、40 歳以上、身長 160 cm 以下、体重平均 $58.7 \pm 8.4\text{kg}$ （ \pm 標準偏差）、BMI 平均 23.8 ± 2.2 の中高年女性層に多かったとされている。本実験の被験者層は、DVT の臨床例の身長と体型に近似で、最近の病的疾患や喫煙習慣がなく、航空機での旅行経験があり、普段は介護職の仕事をしている活動的な方々であった。

表 4.1 被験者の身体特性

No.	年齢（歳）	身長（cm）	下腿高（cm）	体重（kg）	BMI
1	44	168.0	40.3	63.0	22.3
2	47	160.1	38.0	72.4	28.2
3	65	156.0	36.5	54.0	22.2
4	67	146.2	33.3	57.2	26.8
5	56	159.1	37.8	55.6	22.0
6	51	148.0	36.1	62.8	28.7
7	51	152.0	35.2	57.0	24.7
8	50	154.8	36.2	67.2	28.0
9	43	161.3	38.8	67.3	25.9
10	55	152.2	35.8	57.0	24.6
Mean	52.9	155.8	36.8	61.4	25.3
STD	8.1	6.6	2.0	6.1	2.6

4.2.3 実験環境

実験は、図 4.1 に示す機内客室環境を模したモックアップ内に座席を配置して行った。室内温度は 20? 21 にて空調は被験者にあたらないように留意した。座席の配置は、通常の国際線エコノミークラスのシートピッチ 787 mm (31 inch) にて、縦 2 列 × 横 3 座席の計 6 席を用意した。実験に用いた座席は、3 章で評価が高かった改良座席を用いた。

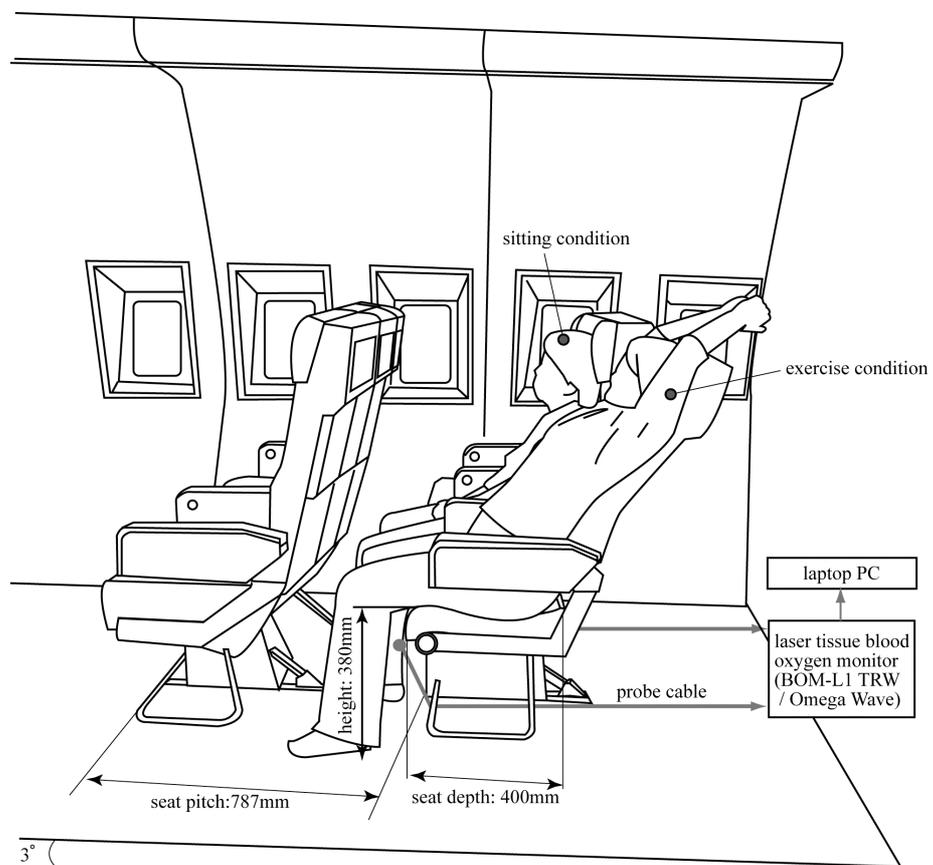


図 4.1 実験環境

4.2.4 測定項目

1) 組織血液量測定

NIRS の測定機器は、3 波長 (780 nm, 810 nm, 830 nm) の 2 受光式レーザ組織血液酸素モニタ (BOM-LITRW オメガウェーブ社) を用い、組織酸素飽和度 (StO₂)、総ヘモグロビン量 (total-Hb)、酸素化ヘモグロビン量 (oxy-Hb)、脱酸素化ヘモグロビン量 (deoxy-Hb) をモニタリングした。計測部位は、右下腿後面内側の腓腹筋にプローブを貼付けて、13? 30mm の深部を計測した。サンプリング間隔は 1 秒間にて 60 分間連続記録した。

2) むくみ測定

下肢の血行動態の一指標として、実験の前後に巻尺を用いて、足の甲囲、前足囲を計測した。また、水槽に足を入れることにより溢れ出る水量を計測する方法を用い、容積の変化を求めた。

4.2.5 実験条件

実験は次の二つの条件を設定した。

1) 条件 1 [安静着座条件]

座席の背もたれ角は、一般的なエコノミークラスのシート角度である 95 度に固定した。床面が 3 度後傾しているため水平面からの背もたれ角は 98 度になる。被験者は臀部を座面の奥にいれて自然な状態で 60 分間着座し、足を組むことは規制された。

2) 条件 2 [軽運動条件]

条件 1 と同様の着座姿勢にて、着座開始 20 分時、40 分時、60 分時に腕を挙げて背中を後屈させる背伸び運動 (体幹後屈運動) を各 30 秒間行った。運動の大きさや速さは、被験者の自然な反応をみるために自由とした。先行調査にて、安静座位、体幹後屈運動時、歩行時の心拍数を計測したところ、安静座位の平均心拍数を 100 とした場合、後屈運動時の平均心拍数と瞬時最大心拍数は、それぞれ $12 \pm 7\%$ 、 $35 \pm 14\%$ 、歩行時の平均心拍数は $27 \pm 9\%$ 増加することを確認している [71]。このことから、後屈運動は、歩行程度の軽い活動度であり、中高年にも無理のない運動であると考えられた。



図 4.2 実験の様子

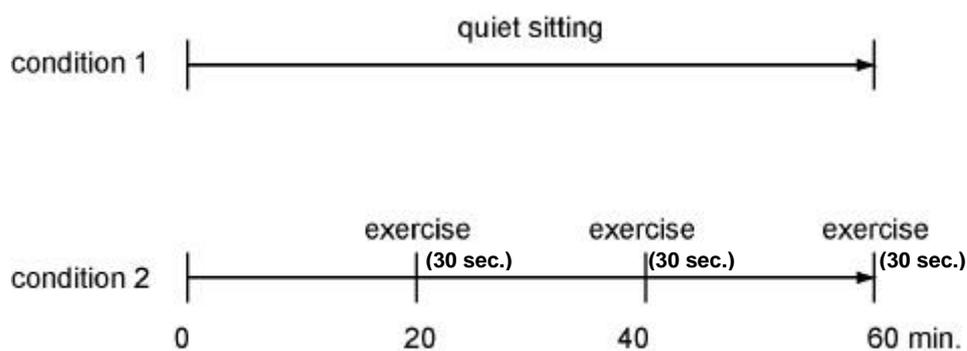


図 4.3 実験プロトコル

4.2.6 実験手順

実験の様子と実験プロトコルを図 4.2, 図 4.3 に示す。被験者には実験開始 1 時間前の飲食を控えてもらい実験室に入室してもらった。実験は次の手順で行った。

- 1) 身体計測および測定装置の装着：デジタル式身長計と体重計，マルチン式人体計測器を用いて，身長，体重，下腿高を計測した。次に下腿の腓腹筋に近赤外光のプロープを 13～30 mm 離して装着した。

- 2) 下肢のむくみ測定：巻尺を用いて、足の甲囲と前足囲を計測した。また、水槽に足を入れることにより溢れ出る水の重量をデジタル秤で計測して容積を求めた。
 - 3) 組織血液量の測定：被験者は二人一組にて実験用座席に 60 分間着座し、組織血液量の変化をサンプリング間隔 1 秒にて連続記録した。実験の様子を視察するため側方からビデオ撮影を行った。測定終了後は、2) と同様にむくみ計測を行った。
- 以上の手順にて、各条件は無作為に行い、条件間には 30 分以上の休憩を入れ、負担蓄積を解消するように留意した。

4.2.7 結果の処理

結果はすべて平均 ± 標準誤差で示した。NIRS の測定値は、初期着座 0 分から 3 分間の平均をベースライン（基準値 0）とした。次に、60 分間の経時変化を 5 分毎に区間化し、各区間の初期値から 3 分間の平均値と基準値の差の相対値に変換した。結果の統計処理は、着座条件（2 水準）と時間（13 水準）を要因とする二元配置の分散分析を行った。むくみ測定は t 検定を用いて条件間の比較を行った。有意水準は $p < 0.05$ とした。また、NIRS の測定値と下肢のむくみとの相互関係を確認するため、oxy-Hb、deoxy-Hb、total-Hb、StO₂ の 60 分間の相対値の平均値、最大値、最小値、標準偏差、を代表値として、3 つの測定部位の膨張率との相関分析を行った。

4.3 実験の結果

4.3.1 組織血液量の相対的变化

被験者 10 名の StO_2 , total-Hb , oxy-Hb , deoxy-Hb の 5 分毎の相対的变化を図 4.4 ~ 図 4.7 に示す . 表 4.2 は StO_2 の分散分析表で , 着座条件の主効果 ($F = 6.569$, $p < 0.05$) と時間の主効果 ($F = 4.356$, $p < 0.01$) が有意であった . また , 着座条件と時間の交互作用が認められた ($F = 2.423$, $p < 0.01$) . 図 4.4 より , 軽運動条件の StO_2 は運動を挿入した 20 分時に最も高値を示し , その後は低下する傾向にあった . その増加の度合いは , 安静着座条件に比べて大きいことがわかった . 表 4.3 は total-Hb の分散分析表で , 着座条件と時間の交互作用に有意傾向 ($F = 1.705$, $p = 0.075$) が認められた . 図 4.5 より , total-Hb の経時変化のパターンが着座条件により異なる傾向にあることがわかった . 表 4.4 は oxy-Hb の分散分析表で , 着座条件の主効果 ($F = 6.183$, $p < 0.05$) が有意であり , 時間の主効果 ($F = 5.80$, $p < 0.01$) が有意であった . 図 4.6 より , 軽運動条件の方が安静着座条件に比べて , oxy-Hb の増加量が大きいことがわかった . 表 4.5 は deoxy-Hb の分散分析表で , 時間の主効果が有意であり ($F = 2.396$, $p < 0.01$) , 時間と運動の交互作用が認められた ($F = 2.779$, $p < 0.01$) . 図 4.7 より , 着座条件の違いによって , deoxy-Hb の経時変化のパターンには違いが認められ , 運動挿入後の 20 分時に最も低値を示し , 終盤にかけて徐々に回復する傾向を示すことがわかった .

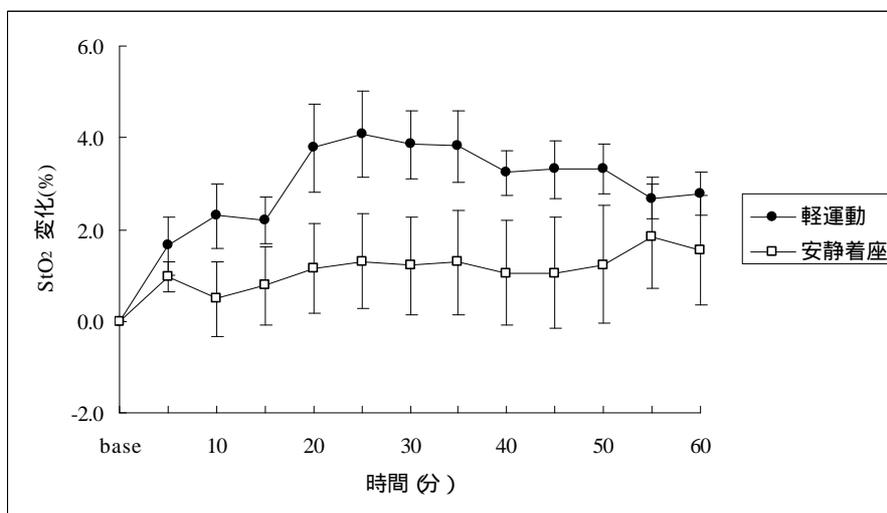


図 4.4 組織酸素飽和度 (StO₂) の経時変化

表 4.2 組織酸素飽和度 (StO₂) の分散分析表

ソース	平方和	自由度	平均平方	F 値	有意確率
着座条件 (A)	204.691	1	204.691	6.569*	0.031
誤差 (A)	280.422	9	31.158		
時間 (B)	131.908	12	10.992	4.356**	0.000
誤差 (B)	272.507	108	2.523		
A × B	46.070	12	3.839	2.423**	0.008
誤差 (A × B)	171.114	108	1.584		

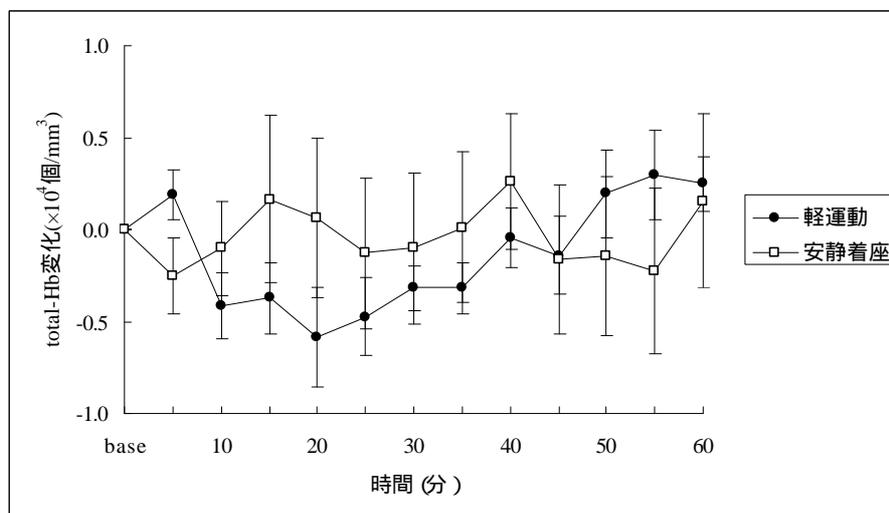


図 4.5 総ヘモグロビン (total-Hb) の経時変化

表 4.3 総ヘモグロビン (total-Hb) の分散分析表

ソース	平方和	自由度	平均平方	F 値	有意確率
着座条件 (A)	0.637	1	0.637	0.108	0.750
誤差 (A)	53.003	9	5.889		
時間 (B)	5.797	12	0.483	1.186	0.302
誤差 (B)	43.992	108	0.407		
A × B	8.206	12	0.684	1.705	0.075
誤差 (A × B)	43.328	108	0.401		

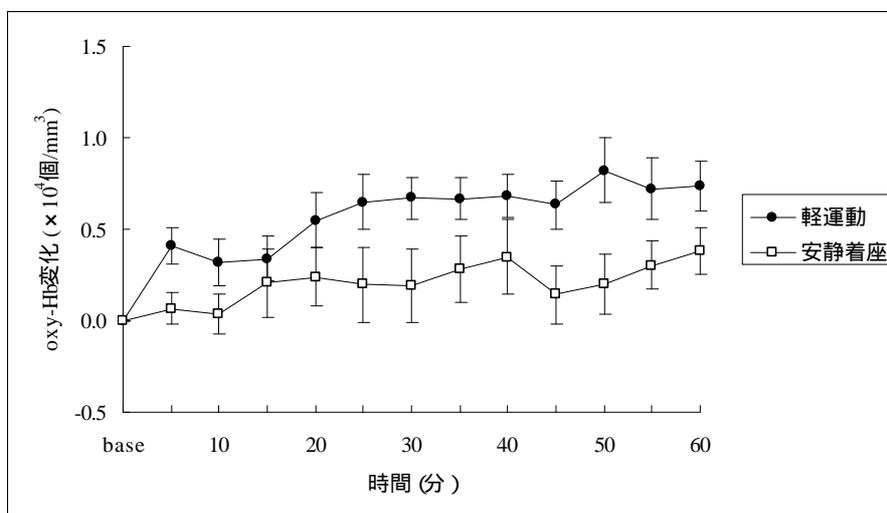


図 4.6 酸素化ヘモグロビン (oxy-Hb) の経時変化

表 4.4 酸素化ヘモグロビン (oxy-Hb) の分散分析表

ソース	平方和	自由度	平均平方	F 値	有意確率
着座条件 (A)	8.122	1	8.122	6.183*	0.035
誤差 (A)	11.823	9	1.314		
時間 (B)	6.311	12	0.526	5.800**	0.000
誤差 (B)	9.793	108	0.091		
A × B	1.516	12	0.126	1.103	0.365
誤差 (A × B)	12.370	108	0.115		

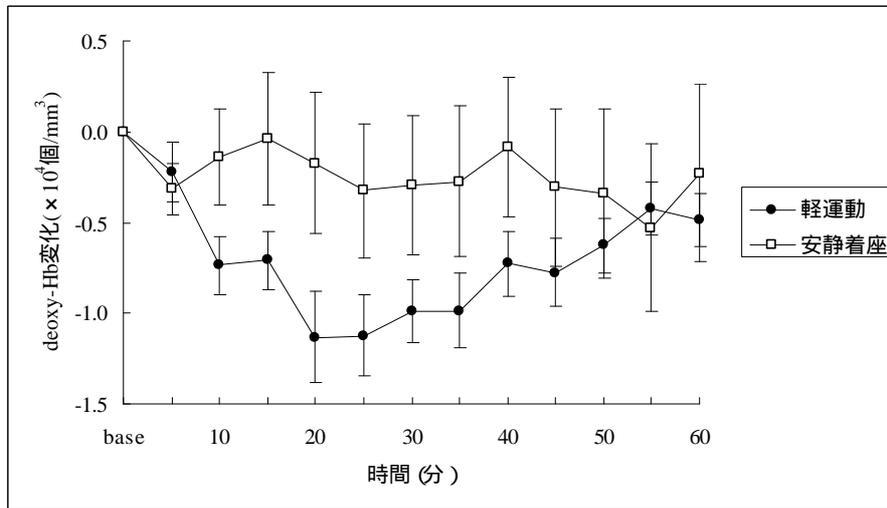


図 4.7 脱酸化ヘモグロビン (deoxy- Hb) の経時変化

表 4.5 脱酸素化ヘモグロビン (deoxy- Hb) の分散分析表

ソース	平方和	自由度	平均平方	F 値	有意確率
着座条件 (A)	13.261	1	13.261	3.114	0.111
誤差 (A)	38.321	9	4.258		
時間 (B)	8.886	12	0.741	2.396**	0.009
誤差 (B)	33.383	108	0.309		
A × B	7.420	12	0.618	2.779**	0.002
誤差 (A × B)	24.033	108	0.223		

4.3.2 下肢のむくみ

図4.8は、実験前値を基準とした下肢のむくみの変化率を示す。3つの測定部位において、条件間で有意な差は認められなかったものの、軽運動条件の方が、安静着座条件に比べて、前足囲と容積の膨張率が少ない傾向にあることがわかった。

4.3.3 NIRS の測定値と下肢のむくみの関係

下肢の容積の変化率はoxy-Hb 平均値の間 ($r=-0.451$, $p < 0.05$) とoxy-Hb 最大値の間 ($r=-0.527$, $p < 0.05$, 図4.9)に有意な負の相関を示した。前足囲の変化率は,deoxy-Hb, total-Hb, StO₂ 相対値の標準偏差との間に有意な負の相関を示した (deoxy-Hb SD : $r=-0.588$, $p < 0.01$, 図4.10; tota-Hb SD : $r=-0.489$, $p < 0.05$; StO₂ SD : $r=-0.527$, $p < 0.05$)。

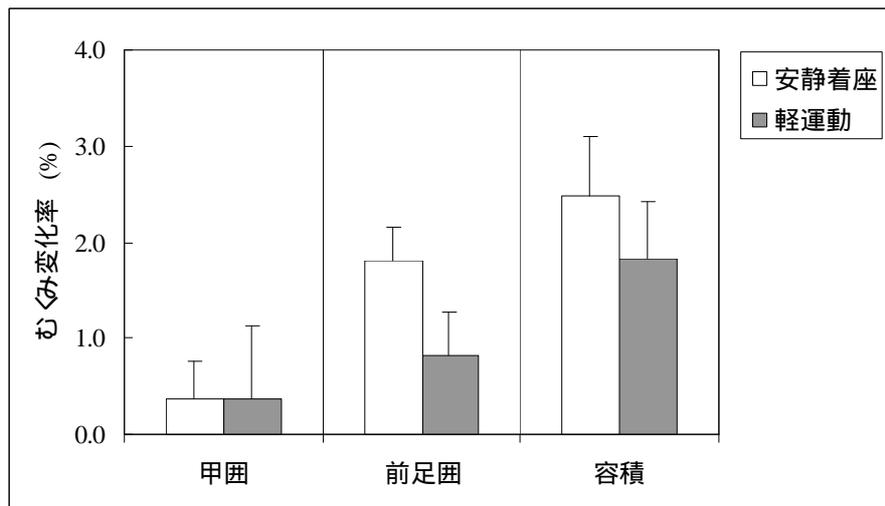


図 4.8 下肢のむくみの変化

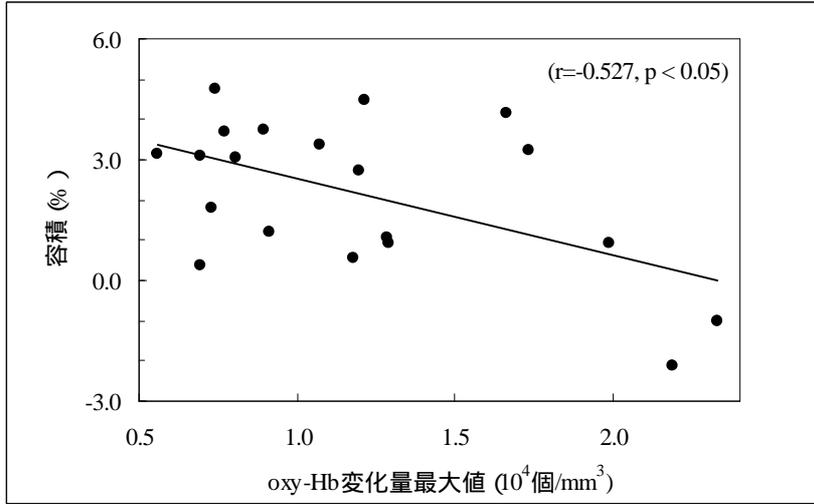


図 4.9 oxy-Hb 変化量の最大値と下肢の容積変化率との関係

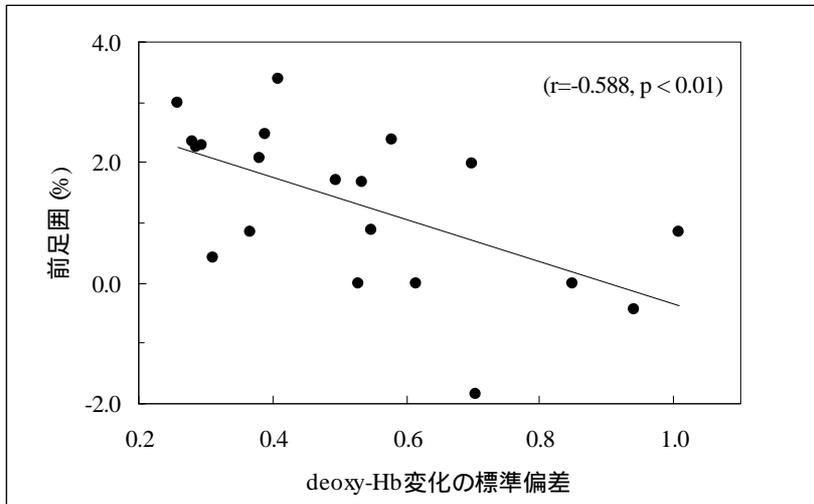


図 4.10 deoxy-Hb 変化量の標準偏差と前足囲変化率との関係

4.4 考察

本実験により，着座中に体幹後屈運動を行う場合と安静着座の場合では，下肢の血行動態の経時変化に違いがあることがわかった．とくに，軽運動条件では oxy-Hb と StO₂ が有意に増加し，deoxy-Hb は運動を挿入した 20 分時に著しい減少と徐々に回復する傾向にあった．NIRS から得られるパラメータは，運動時の筋血流量の変動指標ならびに，酸素消費と供給のバランスを評価する際に用いられている．組織への酸素供給は大きく分けて拡散による酸素供給と循環による酸素供給に分けられる[44]．本実験で対象とした着座中の体幹後屈運動では，下肢の筋収縮による酸素供給が行われたことは考えられにくいことから，NIRS から得られたパラメータは，主に血液循環による酸素供給を反映していると考えられる．そのため，軽運動条件では，体幹および上肢の作業筋による酸素需要に伴う循環血液量の増大が，下肢筋の動脈血の流入量に影響を与え，oxy-Hb が増加したものと考えられる．また，deoxy-Hb は動脈には殆ど存在しないため，その経時変化は静脈の動態を反映し，deoxy-Hb の減少は静脈還流量の増加を示すという報告がある[49]．今回の実験においても運動により deoxy-Hb の顕著な減少を捉えることができ，静脈血の流出量の増加，すなわち下肢から心臓への静脈還流量が改善されたことが示唆される．

次に，下肢のむくみは，運動により前足囲と容積の膨張率が抑制される傾向にあった．この結果は，図 4.5～図 4.7 の NIRS の結果と照らし合わせると，運動によって動脈血は増加したが (oxy-Hb の増加)，一方で静脈還流量も増大し (deoxy-Hb の減少)，結果として total-Hb の減少に見られるように全体としての血液の貯留が減少したことが，むくみが少なかったことの原因であると考えられる．また，相関分析の結果より，oxy-Hb の増加量と容積の変化の間，ならびに deoxy-Hb の標準偏差と前足囲の間に負の相関を示した．この結果は，oxy-Hb と deoxy-Hb の変動が足のむくみの抑制に関与したことが示唆される．ただし，本実験では，むくみと total-Hb のいずれにも運動の有意な効果を明らかにすることができなかった．本実験では，実用場面への応用を想定していたことから，自然着座を許容して，運動の程度も被験者に委ねた．そのため，条件間で差がでにくかったものと考えられる．また，軽運動条件の deoxy-Hb と total-Hb の経時変化は，中盤から終盤にかけて増加する傾向にあった．これは，運動後の動脈からの血液供給によって，血液が再び充満した可能性があると考えられる．今後，運

動の程度や挿入時間について更に研究を深める必要があるといえる。

以上の結果より、狭い航空機座席環境では、一般的に下肢の運動が DVT 発症の予防策として有用であるとされているが、上体の運動でも中高年女性層の下肢の血行動態に影響を与え、動脈血の流入増加と一時的にも静脈還流量の増進を期待できることがわかった[72]。

第5章 背もたれの動的機能が大腿静脈血流に与える影響

5.1 本章の目的

本章の目的は、4章の検証作業として、背もたれの動的機能を使った上体の後屈運動が深部静脈の本態である大腿静脈血流に与える影響を検討することである。前章では、上体の後屈運動が下肢の末梢循環に影響を与えることが確認されたが、大腿静脈ではどのような変化があるのか確認することが必要と考えた。静脈還流調節には、筋ポンプと呼吸ポンプが静脈還流に及ぼすことが知られている。また、長田らは、パルス式 Doppler 法により半臥位ベッド上での下肢の運動と呼吸が大腿静脈の還流量に与える影響を調査し、筋ポンプ作用と呼吸の協調効果について検討している[73]。しかしながら、下肢からの静脈還流は、筋ポンプや呼吸変動のみならず、姿勢や重力にも影響されるため、運動形態や体位に応じた血行動態の検討が必要といえる。そこで、本章では、着座条件と呼吸による大腿静脈血流への影響を検討することで、座席の背もたれを後屈させる機能の効果を確認することを目的とした。

5.2 実験の方法

5.2.1 実験日時と場所

日時：2004年3月7-8日 13:00-17:00

場所：早稲田大学 野呂研究室 駒ヶ根実験施設

5.2.2 被験者

被験者は22? 30歳、身長163? 176cm、体重55? 71.5kgの男性5名であった(表5.1)。

表 5.1 被験者の身体特性

No.	年齢 (歳)	身長 (cm)	体重 (Kg)	BMI
1	22	168.0	62.0	22.0
2	29	163.0	55.0	20.7
3	24	174.1	71.5	23.6
4	30	174.5	59.0	19.4
5	27	176.0	58.0	18.7
Mean	26.4	171.1	61.1	20.9
STD	3.4	5.5	6.3	2.0

5.2.3 実験条件

実験はこれまでに使用してきた航空機モックアップ内にて行った。室内温度は 21? 22 にて空調は被験者にあたらないように留意した。実験座席には改良座席を用いて行った。実験の条件は、背もたれを立てた状態で着座した直立姿勢 (95 度)、背もたれをリクライニングさせた後傾姿勢 (105 度)、背もたれの上部を可動させて背中を後屈させる条件を設定した。また、3 つ着座条件にて、通常の呼吸と深呼吸を組み合わせる条件を設定した。したがって、着座条件 3 水準、呼吸 2 水準の 3×2 の 6 条件を無作為に試行した (表 5.2)。

5.2.4 実験手順

被験者には、実験開始 1 時間前の飲食を控えてもらい実験室に入室してもらった。測定部位は、図 5.1 に示す右大腿付け根の鼠径部付近にある大腿静脈とした。測定器は、超音波血流計 (Smartdop 50EX, 林電気社製) と 8MHz のプローブにて、血流速度を計測した。Doppler 入射角は 60 度以下を保つように留意し、反射音にて動脈と静脈を識別することにより、大腿静脈を同定した。

表 5.2 実験条件

		要因 A: 呼吸	
		通常呼吸	深呼吸
要因 B: 着座条件	直立姿勢	A ₁ B ₁	A ₂ B ₁
	後傾姿勢	A ₁ B ₂	A ₂ B ₂
	体幹後屈	A ₁ B ₃	A ₂ B ₃

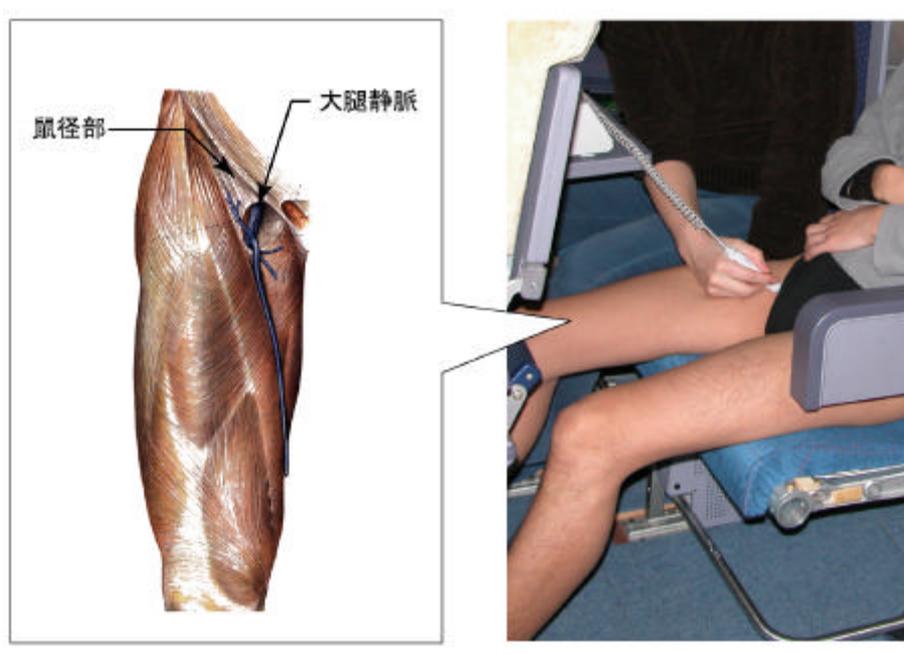


図 5.1 測定部位 (左図は文献 74 より引用)

5.2.5 結果の処理

計測データは、5秒間の血流速度最大値を標準得点に変換した。次に、呼吸 (A) と着座条件 (B) を要因とする二元配置の分散分析にて検討を行った。結果は平均 ± 標準誤差で示した。

5.3 実験の結果

図5.2は、血流速度の結果を示す。表5.3の分散分析表より、呼吸の主効果が有意であり ($F = 86.096, p < 0.01$)、着座条件の主効果 ($F = 6.568, p < 0.05$) が有意であった。交互作用は認められなかった。この結果から、着座条件と呼吸により静脈血流速度に与える影響が異なることが確認された。図5.2より、直立姿勢、後傾姿勢、体幹後屈の順で血流速度が増加し、深呼吸をしながらの体幹後屈が最も増加することがわかった。

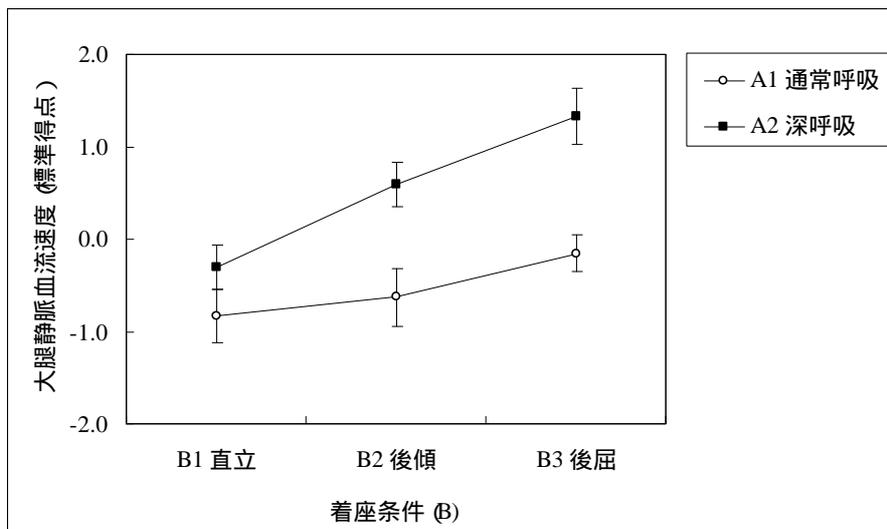


図 5.2 着座条件と呼吸による大腿静脈血流速の変化

表 5.3 大腿静脈血流速度の分散分析表

ソース	平方和	自由度	平均平方	F 値	有意確率
呼吸条件 (A)	8.714	1	8.714	86.096**	0.001
誤差 (A)	0.405	4	0.101		
着座条件 (B)	6.609	2	3.305	6.568*	0.021
誤差 (B)	4.025	8	0.503		
A × B	1.194	2	0.597	1.178	0.356
誤差 (A × B)	4.053	8	0.507		

5.4 考察

本章では、Doppler 法による血流計測より、着座条件と呼吸による大腿静脈の血流速度に与える影響を検討した。実験の結果から、姿勢と呼吸により大腿静脈の血流速度に変化が認められた。血流量は血管内の断面積と血流速度の積で決まるため、本実験において、静脈血管内の断面積の変化が少ないと仮定した場合、直立姿勢に比べて、後傾姿勢、体幹を後屈させる姿勢の順で静脈還流が増加することが示唆される。また、体幹後屈と深呼吸との併用は静脈還流を増進させる点において効果的であることが示唆される。

以上より、本実験で用いた背もたれを折り曲げる座席機能のような工夫により、体幹後屈と深呼吸を促し、静脈還流の促進作用の一つである呼吸ポンプ作用が期待できることがわかった[75]。

第6章 結論

6.1 本論文のまとめ

本研究では、DVT のリスク予防を視野にいた航空機座席について、実際の応用場面を想定した評価を行った。評価にあたっては、機内座席環境を実験モデルとする着座条件の違いが、下肢の血行動態に与える影響を調べるために、NIRS 法による組織血液量の測定、Doppler 法による静脈血流の測定、下肢の容積・周径囲の測定が応用された。以下に、本研究の成果をまとめる。

3 章では、従来の航空機座席と下肢と上体の軽運動を補助する改良座席に、それぞれ 60 分間着座した際、下肢の表在静脈血流（大伏在静脈）にどのような変化が生じるか検討した。実験の結果から、着座中に軽運動を行うことにより、NIRS 測定のパラメータである oxy-Hb と total-Hb が一時的に増加する傾向が認められた。また、Doppler 法による血流測定から運動により血流速度が増加する被験者の割合が多かった。下肢の容積と周径囲の計測からは、運動により下肢の膨張率が改善されることがわかった。各パラメータ間の相関分析からは、oxy-Hb、total-Hb と血流速度の変化値の間に正の相関を、oxy-Hb、total-Hb と容積の変化値の間に負の相関を示すことがわかった。このことから、着座中に軽運動を挿入した場合の oxy-Hb と total-Hb の増加傾向は、大伏在静脈の血液循環が活性化したことが示された。また、この実験結果から、血流測定と容積・周径囲計測を併用することにより、NIRS の測定値の解釈に役立てることができ、長時間着座中の下肢の血行動態を評価できることが確認された。

4 章では、3 章の結果に基づき、着座条件の設定を上体の後屈運動に絞った。また、先行研究の知見から、DVT のリスクが比較的高いとされる中高年女性層を対象とする検討を行った。実験は、改良座席に 60 分間着座した条件と上体の後屈運動を挿入した条件を比較した。その結果、運動により下肢腓腹筋内の oxy-Hb と StO₂ が有意に増加

することがわかり，動脈血の流入増加を示唆した．deoxy-Hb は運動により低値となり回復する傾向を示し，静脈血の流出量の増加，すなわち静脈還流が改善することを示唆した．下肢の容積と周径囲の膨張率は，運動により抑制される傾向にあった．これらの結果から，着座中に上体の後屈運動を取り入れることは下肢筋内の oxy-Hb に影響を与え，動脈血の流入増加と静脈還流を効果的に増加させることが示された．

5章では，4章の検証作業を行った．ここでは，上体の後屈運動が下肢の深部静脈(大腿静脈)の還流増進に寄与するかどうか，血流測定により検討した．実験の結果から，後屈運動は，従来のアップライト姿勢に比べ，大腿静脈の血流速度が有意に増加し，下肢から心臓への静脈還流量が増進することが確認された．また，深呼吸を併用することにより，さらに血流速度が増加することが確認できた．この結果から，機内座席環境における着座中の上体の後屈運動は，大腿静脈還流を高めるとともに，深呼吸を組み合わせることで，相乗効果が期待できることがわかった．

以上の所見から，本研究を要約すると，NIRS 測定，静脈血流の測定，下肢の容積・周径囲の測定を応用することにより，着座中の下肢の深部静脈，表在静脈，末梢レベルの血行動態を理解することができ，DVT のリスク予防を視野にいれた航空機座席の評価をすることができた．本研究から得られた知見を表 6.1 に単純化してまとめた．

表 6.1 本研究で得られた座位における静脈還流促進作用

測定法	測定部位	運動効果		相乗効果
		下肢運動	上体運動	深呼吸
NIRS+Doppler+水槽	大伏在静脈(表在)			
NIRS+水槽	末梢循環(筋内)			
Doppler	大腿静脈(深部)			

~ : 安静座位に比べて軽度～高度の増加

6.2 DVT 予防を考慮した航空機座席の諸機能と効果

従来の航空機座席は安楽性を意図したものが殆どであったが、座席機能の設計によっては、着座者の軽運動を補助する、あるいは喚起する機能を備えることにより、下肢の血行動態を活性化させ、DVT のリスク・ファクタである血流停滞の予防に寄与できると考えられる。本研究で得られた知見に基づき、長時間着座による DVT のリスクを軽減するための座席機能について図 6.1 にまとめた。



図 6.1 DVT のリスク・ファクタを軽減する座席の諸機能と効果

6.3 今後の課題

本研究で得られた結果から，航空機内座席環境における下肢の血行動態に関する基礎的な知見を与えることができた．研究全体を通して，DVT 予防として一般的に推奨されている下肢の運動だけではなく，上体の運動でも下肢の血行動態に影響を与えることがわかった．本研究で得られた知見は，実用場面への応用を想定しているという観点から，着座者には自然着座を許容して運動の程度も主観に委ねたため，被験者内での検討に基づいている．年齢，性別，体型差なども着座中の下肢の血行動態に影響することが推察されるため，例数の増加，ならびに個人特性を考慮した実験条件の追加が今後の課題として挙げられる．これに加えて，本研究で得られた結果から，今後の座席環境の改善に応用していくためには，以下の2点が課題として挙げられる．

1) 評価指標と方法の検討

本研究で用いた NIRS 測定は，非侵襲的かつ時系列的な計測ができる利点があるが，原理的に血液中のヘモグロビンの数を計測することで，血液量変化を測定している．NIRS は血流量を測定しているわけではないことから，その利用方法や解釈には注意が必要である．現状では，本研究で示したように容積測定や血流測定を併用し，相互の対応をとることで，NIRS から得られるパラメータの解釈を行う必要があると思われる．最近では，カフを用いた静脈圧迫法と NIRS の併用による定量評価法が提案されている[76]．以上のことから，NIRS の測定指標および評価方法について今後も検討が必要といえる．

2) 他の着座環境への応用

本研究で示した計測法は，オフィス用いす，木製いす，車両用座席などの評価，作業環境の改善を意図した評価研究にも応用できると考えられる．今後の椅子作りの新たな方向性の一つとして，下肢の血行動態や静脈還流を考慮した椅子への応用が期待される．

謝辞

本研究を進めるにあたって、研究の当初より熱心にご指導いただきました、早稲田大学人間科学部の野呂 影勇 教授に感謝の意を表します。野呂 教授には、様々な研究の機会を与えて下さり、研究の計画から実施、まとめ、発表に至る全てのステップにおいて、数多くのご指導をいただきました。また、北里大学医学部血管外科・山梨峡東病院の金城 正佳 医師には、有益なご助言とご協力ならびに本研究に関わる学術論文には共同研究者として、懇切なご指導をいただきましたことに感謝の意を表します。論文作成にあたって、温かく適切なご指導をいただきました早稲田大学人間科学部の鈴木 秀次 教授、町田 和彦 教授に深く感謝いたします。また、成田赤十字病院内科の森尾 比呂志 医師には、血栓症の臨床例について有益なご助言をいただきました。早稲田大学理工学術院の三家 礼子 博士には、むくみ計測や統計解析について懇切なご指導をいただきました。神奈川工科大学福祉システム工学科の高尾 秀伸 博士には、温かい励ましと親身なご指導をいただきました。ここに記して、深く感謝いたします。

本研究の実施にあたって、小糸工業株式会社ならびにエルゴシーティング株式会社の皆様には実験機材の準備・製作・設置のご協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。岐阜県生活技術研究所の皆様ならびに同研究所の安藤 敏弘さんには貴重なご助言と実験のご協力をいただきましたことに深く感謝いたします。また、長野県駒ヶ根商工会議所には、ボランティアの募集にご尽力いただきました。ここに記して深く御礼申し上げます。

本研究で行った実験では、早稲田大学人間科学部野呂研究室の皆様にもさまざまな形でご協力いただきました。特に、野呂研究室卒業生の海老根 祐一 君、小澤 紀子さん、藤本 由佳さん、近藤 浩輔 君、田中 利尚 君には、共同研究者として実験の実施、資料の収集のご協力をいただきました。みなさんのご助力に感謝いたします。

最後になりましたが、本研究で行った実験の被験者を努めていただいた方々に、深く感謝いたします。

参考文献

- [1] Virchow, R. : Gesammelte Abhandlungen zur Wissenschaftlichen Medizin ,Frankfurt ,*Meidinger*(1856)
- [2] 正田 亘 : 人間工学 , 恒星社厚生閣 (1981)
- [3] Salvendy, G. 編 , 大島 正光 監訳 : ヒューマンファクター 新人間工学ハンドブック , 同文書院 (1989)
- [4] 野呂 影勇 : 図説エルゴノミクス入門 , 培封館 (2004)
- [5] Eklof, B., Kistner, R., Masuda, E., Sonntag, B. and Wong, H. : Venous thromboembolism in association with prolonged air travel , *Dermatol Surg* , Vol. 22 , 637-641 (1996)
- [6] 森尾 比呂志 : エコノミークラス症候群 , *呼吸と循環* , Vol.50 , No.3 , 291-296 (2002)
- [7] Landgraf, H., Vanselow, B. and Schulte, D. : Economy class syndrome: Rheology, fluid balance, and lower leg edema during a simulated 12-hour long distance flight , *Aviation, Space and Environmental Medicine* , No.65 , 930-935 (1994)
- [8] Hitosugi, M., Niwa, M. and Takatsu A. : Rheologic change in venous blood during prolonged sitting , *Thrombosis Research* , No.100 , 409-412 (2000)
- [9] 須藤 正道, 杉山 由樹, 古賀 一男 , 三浦 靖彦 : 機内環境が航空の安全に及ぼす影響に関する研究 ~ 長時間飛行に伴う肺血栓塞栓症について ~ , *航空医学問題に関する研究報告書* , 27-46 (2002)
- [10] 唐木 千岳, 松橋 秀明, 栃原 裕, 徳永 英治 : 長時間座位時に低湿度が人間の生理反応に与える影響 , *空気調和・衛生工学* , CD-ROM , 685-688 (2003)
- [11] Hamada K., Doi T., Sakurai M., et al. : Effects of hydration on fluid balance and lower-extremity blood viscosity during long airplane flights , *JAMA* , Vol.287 , No.7 , 844-845 (2002)
- [12] 川村 智一 , 大橋 俊彦 , 遠藤 敏広 : エコノミークラス症候群予防を目的とした試作エアークニットの検討 , *人間工学* , Vol.42 , 166-167 (2001)
- [13] Keegan, J. J. : The medical problem of lumber spine flattening in automobile seats , *Automotive Engineering* , 1-9 (1964)

- [14]山口 義臣, 梅沢文彦: 椅座位における腰部椎間板の歪みに関する研究, *姿勢シンポジウム論文集*, 269-276 (1971)
- [15]Anderson, B.J.G., Ortengren, R., Nachemson, A. and Elfstrom, G.: Lumber disc pressure and myoelectric buck muscle activity during sitting 1. Studies on an experimental chair, *Scand. J. Rehabil. Med*, Vol.6 (1974)
- [16]小原 二郎 編: インテリアデザイン 2, 鹿島出版 (1973)
- [17]上条 健: シート座り心地の定量評価, *自動車技術*, Vol.36, No.12, 1305-1310 (1982)
- [18]Grandjean, E.: *Fitting the task to the man*, Taylor and Francis, London (1983)
- [19]Lueder, R. and Noro, K.: *Hard facts about soft machines-The ergonomics of seating*, Taylor and Francis, London (1994)
- [20]阪口 周吉 編: 臨床静脈学, 中山書店 (1994)
- [21]血管無侵襲診断法研究会将来構想委員会 編: 血管無侵襲診断の実際, 文光堂 (2002)
- [22]本郷 利憲, 廣重 力 監修: 標準生理学 (第5版), 医学書院 (2003)
- [23]金城 正佳: 椅子と下肢静脈還流, *マイサイズチェア*, 8-9, JAFICA (2003)
- [24]日本宇宙航空環境医学会: エコノミークラス症候群に関する提言,
Web URL <http://wwwsoc.nii.ac.jp/jsasem/news/ecs.html> (2002)
- [25]肺血栓塞栓/症深部静脈血栓症 (静脈血栓塞栓症) 予防ガイドライン作成委員会: 肺血栓塞栓/症深部静脈血栓症 (静脈血栓塞栓症) 予防ガイドライン, Medical Front International Limited (2004)
- [26]Homans, J.: Thrombosis of deep leg vein due to prolonged sitting, *N Engle J Med*, Vol.250, 148-149 (1954)
- [27]Symington IS. and Stack, B.H.R.: Pulmonary thromboembolism after travel, *Br J Chest*, Vol.71, 138-140 (1977)
- [28]Nissen, P.: Das sogenannte <economy class> -Syndrome oder die Riese- Thrombose, *VASA*, No.26, 239-246 (1997)
- [29]Lapostolle, F., Surget, V., Borron, S.W., et al: Severe pulmonary embolism associated with air travel, *N Engl Med*, Vol.357, 4185-4189 (2001)
- [30]Milne, R.: Venous thromboembolism and travel, is there an association? *J R Coll Phys London*, Vol.26, 47-49 (1992)

- [31] Arfvidsson, B. Eklof, B., Kistner, R.L., et al : Risk factors for venous thromboembolism following prolonged air travel-Coach Class Thrombosis *Haematol Oncol Clin North Am* ,Vol.14 ,391-400(2000)
- [32] 森尾 比呂志, 藤森 義治, 寺沢 公仁子 他 : 航空機旅行中に発症した肺塞栓症の 14 例—エコノミークラス症候群, *呼吸と循環*, Vol.48 , No.4 , 411-415 (2000)
- [33] 山下 三代子, 森 豊, 島田 孝夫 他 : Economy class syndrome として発症した肺塞栓症の 1 例, *臨床核医学*, Vol.29 , 105-107 (1996)
- [34] 佐藤 温, 大圓 修身, 真垣 一成 他 : エコノミークラス症候群と考えられた肺血栓塞栓症の 1 例, *日呼吸会誌*, Vol.36 , 524-529 (1998)
- [35] 三島 好雄 : リンパ浮腫, 静脈血栓症の実態, *厚生省特定疾患系統的脈管障害調査研究班調査報告書* (1988)
- [36] Sarvesvaran R. : Sudden natural deaths associated with commercial air travel, *Med Sci Law* , Vol.26, 35-38 (1986)
- [37] Kesteven, P.J.L. and Robinson, B.J. : Clinical risk factors for venous thrombosis associated with air travel , *Aviat Space environ Med* , Vol.72 , 125-128 (2001)
- [38] Belcaro, G. Geroulakos, G., Nicolaides, A.N., et al : Venous thromboembolism from air travel, The LONFLIT Study, *Angiology* , Vol.52 , 369-374 (2001)
- [39] 生命工学工業技術研究所編 : 設計のための人体計測マニュアル, 日本出版 (1994)
- [40] ANSI/HFS100-1988 : American National Standard for Human Factors Engineering of Visual Display Terminal Workstation (1988)
- [41] JIS S 1032 : オフィス用いすの寸法, 日本オフィス家具協会/日本規格協会 (1999)
- [42] Web URL <http://www.jal.co.jp/safety/fly/economy.html> : 機内で行える深部静脈血栓症の予防対策, 日本航空 (2003)
- [43] 佐戸川 弘之 : 脈派検査, 空気容積脈波検査, 血管無侵襲診断の実際 (血管無侵襲診断法研究会将来構想委員会 編), 17-32 , 文光堂 (2002)
- [44] 浜岡 隆文, 木目良 太郎, 本間 俊行 : 筋の酸素供給と消費, 運動と呼吸 (宮村 実晴 編), 真興交易医書出版 (2004)
- [45] 小見山 高士, 重松 宏 : 近赤外線分光法, *血栓と循環*, Vol.9 , No.3 , 88-92 (2001)
- [46] 尾崎 幸洋 編 : 近赤外線分光法, *アイビーシー* (1998)

- [47] 舌間 秀雄, 大峯 三郎, 木村 美子 他: 等運動性筋収縮による筋持久力測定時の筋内酸素動態について—近赤外線分光法による検討, *北九医工誌*, Vol.13, No.1, 21-24, (2002)
- [48] 佐藤 一善, 金城 正佳, 西巻 博 他: 間歇性跛行肢の客観的重症度評価法としての近赤外線分光法の有用性に関する研究: *日血外会誌*, Vol.7, No.7, 813-820 (1998)
- [49] Hosoi, Y., Yasuhara, H., Shigematsu, H., et al: Influence of popliteal vein thrombosis on subsequent ambulatory venous function measured by near-infrared spectroscopy, *American Journal of Surgery*, Vol.177, 111-116 (1999)
- [50] Kawaguchi, K., Tatusadani, M., Sekikawa, K., et al: Do the kinetics of peripheral muscle oxygenation reflect systemic oxygen intake?, *Appl Physiol*, Vol.84, 158-161 (2001)
- [51] 小見山 高士, 重松 宏, 小野塚 温子: NIRS (近赤外線分光法), 血管無侵襲診断の実際 (血管無侵襲診断法研究会将来構想委員会 編), 33-36, 文光堂 (2002)
- [52] 臼井 由行, 谷崎 真, 藤田 邦雄: 超音波ドップラー法による下肢閉塞性動脈疾患の診断, *現代医療*, Vol.21, No.3025, 199-203 (1989)
- [53] 古幡 博, 加納 隆: 四肢動脈疾患 超音波診断, *治療*, Vol.67, No.3, 49-55 (1985)
- [54] 真島 英信: 生理学 (第18版), 文光堂 (2002)
- [55] 川野 常夫, 西田 修三, 水野 拓也: 下腿部むくみ量による下肢の疲労評価, *人間工学*, Vol.37, 320-321 (2001)
- [56] Chester, M.R., Rys, M.J. and Konz, S.A.: Leg swelling, comfort and fatigue when sitting, standing, and sit/stand, *Industrial Ergonomics*, Vol.29, No.5, 289-296 (2002)
- [57] Pottier, M., Dubreuil, A. and Monod, H.: The effects of sitting posture on the volume of the foot, *Ergonomics*, Vol.12, No.5, 753-758 (1969)
- [58] Winkel, J.: Evaluation of foot swelling and lower-limb temperatures in relation to leg activity during long-term seated office work, *Ergonomics*, Vol.29, No.2, 313-328 (1986)
- [59] Khiabani, H.Z., Anvar, M.D., Strandén, E., et al: Oedema in the lower limb of patient with chronic critical limb ischaemia (CLI), *Eur J Vasc Endovasc Surg*, Vol.17, 419-423 (1999)
- [60] 海老根 祐一: 長時間座位における下肢の膨張率測定と応用, *早稲田大学人間科学研究科修士論文* (2003)
- [61] 三家 礼子, 野呂 影勇: VDT 作業時における足不快感の一評価, *人間工学*, Vol.36, 406-407 (2000)

- [62]Mituya, R., Ebine, Y., Nozaki, M. and Noro K. : Prevention of deep vein thrombosis in VDU work , *Occupational Safety and Ergonomics* , Vol. 9 , No.4 , 393-403 (2003)
- [63]Noro, K. Ebine, Y. and Fujimaki, G. : Measurement of lower limbs vein flow-A new research technique for a prolonged sitting work, In Strasser, H., Kluth, K., Rausch, H., and Bubb, H. (Eds.), *Quality of work and products in enterprises of the future* , Germany , 333-336 (2003)
- [64]早稲田大学野呂影勇研究室：深部静脈血栓症（DVT）を防止する航空機シートの開発，*小糸工業株式会社委託研究成果報告書*（2004）
- [65]花井利通，松岡由幸：安楽姿勢に関する研究，*自動車技術*，Vol.41，No.11，1275-1279（1987）
- [66]中村 隆一，斎藤 宏：基礎運動学（第4版），医歯薬出版（1994）
- [67]近藤 浩輔：航空機シートにおけるフットレストの効果，*早稲田大学人間科学部卒業論文*（2002）
- [68]藤本 由佳：航空機シートの人間工学的評価と開発，*早稲田大学人間科学部卒業論文*（2002）
- [69]加藤 貴英，金柅 直也，北川 薫：旅行者血栓症（いわゆるエコノミークラス症候群）対応座席についての生理学的検討，*体力科学*，Vol.51，No.6，746（2002）
- [70]松岡 由幸，山下 太一，北村 武士：多様場におけるシートスウィング機構の皮膚血流量への影響，*デザイン学会誌*，Vol.49，No.1，93-102（2002）
- [71]小山 秀紀，海老根 祐一：深部静脈血栓症を予防する航空機シート，*Science of Seating*，*ASTE Special Issue*，早稲田大学理工学総合研究センター，Vol.B5，69-78（2003）
- [72]小山 秀紀，海老根 祐一，安藤 敏弘，坂東 直行，金城 正佳，野呂 影勇：航空機シート着座中の軽運動が下肢の血行動態に与える影響，*人間工学*，Vol.40，No.6，309-314（2004）
- [73]長田 宅也，勝村 敏仁：ベッド上での下肢運動に伴う筋ポンプと呼吸の影響について，*デサントスポーツ科学*，Vol.22，82-87（2001）
- [74]岡本道雄 監訳：図説人体解剖学2（第3版），医学書院（1987）
- [75]Oyama, H., Ebine, Y., Ando, T. and Noro, K. : Measurement of venous blood flow in the lower limbs- Prevention of deep vein thrombosis during prolonged sitting , *Proceedings of international conference WWCS 2004* , Kuala Lumpur , Vol.7 , 302-305 (2004)
- [76]佐々木 規之，飛田 研二，四方 裕夫，坂本 滋：近赤外線分光法を用いた下腿筋血流測定，*脈管学*，Vol.43，No.8，345-349（2003）