

早稲田大学審査学位論文

博士（スポーツ科学）

運動後の胃運動および食欲向上に効果的な
飲料温度の検討

Examination of effective fluid temperature for
improving post-exercise gastric motility and
appetite

2020年1月

早稲田大学大学院 スポーツ科学研究科

藤平 杏子

FUJIHIRA, Kyoko

研究指導教員： 宮下 政司 准教授

目次

第1章 序論

第1節 序	1
第2節 研究小史	6
第3節 本論文の目的および構成	12

第2章 安静時における異なる温度の水の摂取が胃運動および食欲に与える影響

第1節 緒言	15
第2節 方法	16
第3節 結果	21
第4節 考察	31
第5節 結論	33

第3章 運動後における冷水摂取が胃運動および食欲に与える影響

第1節 緒言	34
第2節 方法	35
第3節 結果	41
第4節 考察	59
第5節 結論	61

第4章 運動後における異なる温度のタンパク質含有飲料摂取が胃運動および食欲に与える影響

第1節 緒言	63
第2節 方法	64
第3節 結果	70
第4節 考察	86
第5節 結論	89

第5章 総合考察

第1節 安静時と運動後の飲料摂取による食欲の変化	90
第2節 食欲調節における胃運動と生理学指標	91
第3節 アスリートの運動実施現場への応用	98
第4節 研究の限界	99
第5節 今後の展望	100
第6節 総括	101
第7節 結論	103
参考文献	104

本博士論文は以下の研究成果を基に執筆された。

【第2章】

■ 原著論文

- Fujihira K, Hamada Y, Yanaoka T, Yamamoto R, Suzuki K, Miyashita M. The effects of water temperature on gastric motility and energy intake in healthy young men. *European Journal of Nutrition*. 2019. In press.

■ 学会発表

- Kashiwabara K, Kidokoro T, Yanaoka T, Kurata K, Yamamoto R, Suzuki K, Miyashita M. The effects of water temperature on gastric antral cross-sectional area and energy intake in healthy young men. 25th European Congress on Obesity, Program p 84, Vienna, Austria, 24 May 2018.
- ※旧姓(柏原 : Kashiwabara)での発表
- 柏原杏子、濱田有香、柳岡拓磨、山本遼、鈴木克彦、宮下政司. 摂取する水の温度の違いがその後の胃運動とエネルギー摂取量に及ぼす影響. 第73回日本体力医学会大会. 予稿集 p125, 福井, 2018年9月7日.

- ※旧姓(柏原 : Kashiwabara)での発表

■ 受賞歴

- 2017-2018年度日本体力医学会国際学術交流奨励賞の受賞、福井, 2018年9月8日.

【第3章】

■ 学会発表

- Fujihira K, Hamada Y, Suzuki K, Miyashita M. The effects of water ingestion after exercise on gastric motility and energy intake in healthy young men. British Association of Sports and Exercise Sciences Conference 2019. In Press, King Power Stadium, Leicester, UK, 19 November 2019.

【第4章】

■ シンポジウム

- 藤平杏子、濱田有香、鈴木克彦、宮下政司. 運動後の効果的な栄養摂取方法の検討—胃運動と食欲の視点から—. 第74回日本体力医学会大会シンポジウム17回復期の栄養摂取：消化機能及び食欲の視点から. 予稿集 p145, 筑波, 2019年9月20日.

第1章

序論

第1節 序

アスリートは健康を維持しトレーニング中のパフォーマンスを最大化するために、トレーニングによる消費量に見合ったエネルギーを摂取する必要がある¹。特に、運動後においては疲労回復および筋グリコーゲンの回復を行うために、運動後できるだけ早く栄養補給を行うことが推奨されている。しかし、アスリートにおいて、エネルギー消費量とエネルギー摂取量の収支バランスを検討した研究を概観すると、運動による消費量に見合ったエネルギーを食事から摂取できていないことが報告されている²。Drenowatzらの、1週間の高強度および低強度のトレーニング期間におけるエネルギー消費量と食事からのエネルギー摂取量を測定した研究においては、トレーニング期間中にエネルギー消費量が増加してもエネルギー摂取量に変化がないことから、エネルギー収支バランスが負の状態にあることが指摘されている³。過体重・肥満者や一般健常者に対しては、運動によるエネルギー消費に加え、食事量の低下によりエネルギー収支が負のバランスに傾くことは体重の維持や減量にポジティブな効果がある。一方、食事によりコンディションや体格を保たなければならず、運動後に急速な栄養摂取が求められるアスリートにとっては、安静時および運動後に適切なエネルギー摂取量を確保するための方策が必要である。本論文では、摂食量から算出したエネルギー量を「エネルギー摂取量」、ヒトの主観的かつエネルギーの恒常性を保つための食への欲求を「主観的な食欲」、エネルギー摂取量と主観的な食欲を総称して「食欲」、食欲を調節する役割を持つ生体内のホルモンを「食欲関連ホルモン」として定義し、記載する。

1. 生体内の食欲調節

ヒトの食欲は、中枢である大脳の視床下部と末梢である消化管などの臓器の活動や

消化管から分泌される食欲関連ホルモンによって調節されている^{4,5}。本節内では、人の生体内で行われる中枢と末梢における食欲調節について概説する。

1.1. 中枢による食欲調節

食欲は脳の深部に存在する視床下部で調節がされており⁶、視床下部の中でも腹内側核は摂食を抑制する「満腹中枢」として、外側野は摂食を亢進する「摂食中枢」として食欲を調節している。この相反する2つの中枢によって食欲が制御されていることを「二重中枢説」という。腹内側核および外側野に加えて、視床下部室傍核および弓状核において摂食に関連する神経ペプチドが存在し、食欲を調節している⁷。食事により体内のグルコース量が増加すると視床下部腹内側核の満腹中枢が刺激され、外側野の摂食中枢の活動が抑制されるといったグルコースによる食欲調節が行われている。

1.2. 末梢による食欲調節

消化管運動

古典的に食事による胃壁の伸展などの消化管の運動は満腹感を引き起こすとされている⁵。空腹期の胃はしぼんだ状態であり、食物の流入に合わせて伸展する。胃壁の伸展による刺激は迷走神経を介して延髄に伝えられ、視床下部によって満腹感として認識される。この満腹感の増加は食物の流入による刺激だけではなく、胃内にバルーンを配置し、膨らませることで人工的に胃壁の伸展を起こした研究によって、胃壁の伸展に伴い満腹感が増加し、胃壁の伸展による機械的刺激が満腹感を引き起こすことが分かっている⁸。加えて、胃壁の伸展による満腹感の増加は、主に小腸で分泌されるホルモンであるコレシストキニン(cholecystokinin: CCK)によって増強され、胃幽門に分布するCCK受容体に伝えられ、脳幹を通して視床下部に情報が伝えられる⁹。食物の流入後は胃の蠕動運動によって混和が行われ、胃の出口の部分である幽門部から十二指腸に排出され

る。さらに、空腹期においても胃の収縮運動は行われ、食物の残渣を十二指腸に押し出し、次の食事に備える役割を担っている¹⁰。

食欲の調節は消化管の機械的運動だけではなく、消化管血流によっても制御されている。胃に血流を分配する腹腔動脈や腸管に血流を分配する上腸間膜動脈は食事摂取により血流量が増加し¹¹、運動により減少することが報告されている¹²。さらに、消化管血流は、後述する食欲関連ホルモンを末梢から中枢に送る役割も担っており、運動による一過性の消化管の虚血は、食欲関連ホルモンの分泌動態に影響を及ぼし、運動後の食欲不振を生み出す一因であると考えられている¹³。

1.3. 食欲関連ホルモン

末梢から分泌される食欲関連ホルモンには摂食を亢進するホルモンであるグレリンと、摂食を抑制するペプチド YY (Peptide YY: PYY)、グルカゴン様ペプチド 1 (Glucagon-like peptide-1: GLP-1) などが存在する。グレリンは末梢組織から分泌される唯一の食欲亢進ホルモンであり、食欲促進に対し生理活性の高いアシル化グレリンと食欲抑制に対し影響のあるデアシル化グレリンに分類される¹⁴。腸、膵臓、視床下部、胎盤、腎臓、そして主に胃体部から産生されることが知られており、迷走神経を介して視床下部に摂食調整の情報を伝えている^{15,16}。空腹時の血中グレリン濃度は体格指数 (Body Mass Index: BMI) と逆相関を示しており肥満者で低く、神経性食欲不振症で高い値を示す^{17,18}。血中グレリン濃度は食事前に上昇し、食後速やかに低下するため、食事により血中濃度が変動すると考えられている¹⁹。PYY は神経ペプチド Y ファミリーの一つで摂食を抑制するホルモンであり、主に十二指腸、回腸、結腸を中心とした腸管に分布する L 細胞から分泌され、胃腸の収縮の抑制、胃酸や膵液の分泌抑制に関わっている²⁰。PYY には PYY1-36 と PYY3-36 の 2 種類の分子型が存在し、PYY3-36 は PYY1-36 と比較してより強い摂食抑制作用があることが報告されている^{21,22}。先行研究において、PYY3-36

の静脈投与により自由摂取下での食事摂取量が 30%減少したことが報告されている¹⁶。

GLP-1 は PYY と同様に腸管に分布する L 細胞から血中に分泌される²³。37 個のアミノ酸から成り、活性型としては GLP-1 (7-36) と GLP-1 (7-37) が存在する²⁴。胃の運動、膵液、胃酸の分泌を抑制し、食欲を減退させる働きがある^{23,24}。その他に食欲調節に関わる食欲関連ホルモンとして、十二指腸や小腸より分泌される食欲抑制ホルモンである CCK や膵ポリペプチドが存在する^{25,26}。

2. 一過性の運動が食欲に及ぼす影響

2.1 胃運動による影響

前述した食欲関連ホルモンは食欲の調節を行うとともに、消化管運動の制御も行っている。食欲を亢進するホルモンであるグレリンは、胃内容物の排出を促進する働きを持っており²⁷、食欲を抑制するホルモンである PYY および GLP-1 は胃内容物排出を遅延させる働きを持っている²⁸。これら胃内容物排出は、胃内の内容物を空にし、次の食事に備える生体的反応であり、食欲の調節に重要な役割を担っている²⁹。また、胃内容物排出の速度は運動によって変化することが知られており、低強度の運動によって胃内容物排出は変わらないか^{30,31}、わずかに加速する^{32,33,34}。反対に、高強度の運動によって胃内容物排出は遅延することが報告されている^{33,35,36,37,38,39}。高強度運動による胃内容物排出の遅延は、運動後食欲不振のメカニズムの一つと考えられているが、運動後の飲料摂取による胃内容物排出とエネルギー摂取量への影響の両方を評価した研究は皆無である。

2.2 消化管血流による影響

運動により食欲および消化管運動が変化する要因の一つとして、運動による消化管血流量の変化が挙げられる。運動中は骨格筋の利用率増大に伴い、血液が再分配され、消化管血流量が減少する¹³。胃、肝臓、脾臓、膵臓に血液を供給し、消化活動の維持を行

う血管である腹腔動脈（celiac artery: CA）の血流量は、30 分間の間欠性高強度運動後に減少すると報告されている⁴⁰。同様に、小腸および大腸に血液を供給し、消化活動の維持を行う上腸間膜動脈（superior mesenteric artery: SMA）の血流量は15 分間のトレッドミル運動後に43%減少すると報告されている⁴¹。消化管の血流量の減少は、酸素利用率を低下させ、この消化管の低酸素状態は膵ポリペプチドや血管作動性腸管ペプチドの分泌促進を促し、胃内容排出を遅延させる可能性を持つと考えられている⁴²。さらに、運動後の消化管血流量の低下は胃から分泌されるグレリンの分泌低下をもたらす一因であると考えられており、運動後の消化管血流量の低下によるグレリンの分泌量の低下が食欲の低下を説明するメカニズムとして考えられる¹³。

2.3. 食欲関連ホルモンによる影響

一過性の運動による食欲への影響は、食欲関連ホルモンの分泌が変動することが関連していると報告されている⁴³。この一過性の運動による食欲関連ホルモンの変動には、運動の強度が強く関わっていると報告されており、運動強度は食欲関連ホルモンの種類によって異なる影響を及ぼすと報告されている^{44, 13, 45, 46}。運動と食欲に関する研究は中等度強度（最大酸素摂取量（maximum oxygen uptake: VO_{2max} ）の60-75%）の運動を用いる研究が大半であった。しかし近年、高強度運動（ $>75\%VO_{2max}$ ）後において、運動後の摂食量の減少が報告されている⁴⁴。Erdmann らは30 分間の自転車運動において、100 W の強度の運動は総グレリン濃度において安静試行と差がない一方、50 W の低強度運動は総グレリン濃度を上昇させることを明らかにしている⁴⁵。対して摂食亢進作用の強いアシル化グレリン濃度は運動強度と反比例して減少することが明らかとなっている⁴⁴。総 PYY 濃度は運動強度に影響を受けない一方、摂食抑制作用の強い PYY3-36 濃度は運動強度に比例して増加することが報告されている⁴⁵。摂食を抑制する GLP-1 は運動刺激によって分泌は促進されるものの、Ueda らは $50\%VO_{2max}$ のサイクリング運動と

75% VO_{2max} のサイクリング運動において、安静時と比較して GLP-1 濃度が増加するが、50%VO_{2max} のサイクリング運動と 75% VO_{2max} のサイクリング運動間で GLP-1 の分泌量に差が見られないことから、50%VO_{2max} 以上においては、運動強度に依存せず分泌されると考えられる⁴⁴。これらの研究より、運動強度の変化に伴い総グレリン、アシル化グレリンおよび PYY3-36 濃度は変動し、GLP-1 は一定の強度以上の運動であれば分泌が誘発されることが考えられる。また運動の継続時間が食欲関連ホルモンに及ぼす影響を検討した研究として、Erdmann らは、50 W の強度で 30 分、60 分、120 分の運動を行った場合の、総グレリン、インスリンおよびグルコース濃度を評価している⁴⁵。その結果、120 分の運動試行はその後の食事摂取量は増えたものの、総グレリン濃度は運動の継続時間の長さに影響を受けなかったことを報告している⁴⁵。しかし、Erdmann らは食欲促進に対し生理活性の高いアシル化グレリンではなく、総グレリン濃度を評価していることから⁴⁵、運動の継続時間の長さに影響を受けなかった可能性が考えられる。運動の種類においては、現在までにランニング、歩行、水泳、レジスタンス運動、縄跳びなどの運動で検討がされてきた^{46, 47, 48, 49, 50, 51}が、その差の大部分が運動強度の違いに依存するものであることも指摘されている¹³。

第 2 節 研究小史

1. 飲料の温度と胃運動への影響

胃運動は食欲の調節に重要な役割を担っており²⁹、飲料の温度は胃運動に影響を与える因子の一つとして考えられている²⁹。胃運動の評価として胃電位計を用いた胃電位の振幅の大きさや頻度の測定、胃内容排出の評価としてシンチグラフィや超音波診断装置を用いて胃拡張の程度から胃内容排出率の測定、安定同位体呼気試験から胃内容排出率の測定を行ったものがある^{52, 53, 54, 55, 56, 57}。Sun らは、シンチグラフィを用いて健常男性において 400 mL のオレンジジュースの胃内容排出率を、4°C、37°C、50°C の 3 つ

の温度で比較検討し、4°C と比較して 37°C のオレンジジュースを摂取した場合に胃内容排出が早まることを報告している⁵³。Mishima らは安定同位体呼気試験を用いて健常男女において 200 mL の固形食および流動食の胃内容排出率を 4°C、37°C、60°C の 3 つの温度で比較検討し、37°C より 60°C の固形食および流動食で胃内容排出が早まることを報告している⁵⁵。2 つの研究結果において、最も胃内容排出が速まった温度は統一されていないものの、低い温度の飲料よりも温かい飲料において胃内容排出が早いということが分かる。しかし、Bateman らの研究においては、超音波診断装置を用いて健常男性において 200 mL もしくは 500 mL のオレンジジュースの胃内容排出率を 12°C と 37°C とで比較検討し、37°C より 12°C のオレンジジュースの摂取 5 分後に胃の容量が減少することを報告している⁵⁶。先行研究^{53, 55, 56}においては、胃内温度と同等の 37°C の飲料が使用される場合が多いものの、冷飲料や温飲料の温度について統一されておらず、今後は包括的な検討が必要である。

胃内容排出が速い場合、胃の膨満が減少することによる空腹感の増強が引き起こされる²⁹。Sun らの研究では胃電位計を用いて、健常男女において 400 mL のオレンジジュースを摂取した後の胃電位を 4°C、37°C、50°C の 3 つの温度で比較検討し、37°C と比較して 4°C および 50°C のオレンジジュースを摂取した場合に胃運動の速度である胃の筋電位活動の正常波出現頻度が増加したことを報告している⁵²。また、Verhagen らの研究では胃電位計を用いて、健常男性において 300 mL の流動食を摂取した後の胃電位を 4°C、37°C と 55°C の 3 つの温度で比較検討し、4°C と比較して 37°C および 55°C の流動食を摂取した場合に正常波出現頻度が増加したことを報告している⁵⁴。また脇坂らの研究において胃電位計を用いて、健常女性において 250 mL の水を摂取した後の胃電位を 15°C と 65°C とで比較検討し、15°C と比較して 65°C の温水を摂取した場合に正常波出現頻度が増加したことが報告されている⁵⁷。これら 3 つの研究から、冷たい飲料の摂取が胃運動を増加させるか否かは見解が統一されていないものの、温かい飲料の摂取は

胃運動を増加させると考えられる。飲料の温度が胃運動に及ぼす影響を検討した先行研究を Table 1 にまとめた。

Table 1. The effects of fluid temperature on gastric motility

Author	yrs	Subjects	Meal strategy		Measurements	Results (slow, a few < fast, many)	
			Test meal	Temperature		Gastric emptying	Gastric motility
Bateman, et al.	1982	8 normal males	200 mL orange juice	12°C	Ultrasound imaging	Gastric emptying 37°C<12°C	NM
			500 mL orange juice	37°C			
Sun, et al.	1988	6 healthy males	400 mL orange juice	4°C	Scintigraphy	Gastric emptying 4°C<37°C	NM
				37°C			
Sun, et al.	1995	10 normal males	400 mL orange juice	4°C	Gastric electrogastrography	NM	EGG frequency 37°C<4°C=50°C
		2 normal females	(50 mL orange juice + 350 mL normal saline)	37°C			
Verhagen, et al.	1998	10 healthy males	300 mL liquid meal (200 mL nutrient drink + 100 mL water)	4°C	Gastric EGG	NM	EGG frequency 4°C<37°C=55°C
				37°C			
Mishima, et al.	2009	22 healthy males	200mL caloric liquid	4°C	Isotope spectrometry	Gastric emptying 37°C<60°C	NM
		3 healthy females	meal	37°C			
脇坂 ら.	2011	27 healthy females	250 mL water	15°C	Gastric electrogastrography	NM	15°C<65°C
				65°C			

NM: Not measure, EGG: Electrogastrogram

2. 運動時の水分摂取が胃運動および食欲に及ぼす影響

運動前および運動中における飲料摂取が胃運動に及ぼす影響については検討が進められている一方、運動後の飲料摂取が胃運動および食欲に及ぼす影響についての報告は限られている⁴²。現在までに4つの研究において、運動中および運動後における水分摂取が胃運動と満腹感もしくは空腹感に与える影響について検討しているが、エネルギー摂取量について検討している研究は皆無である⁴²。Evansらは8名の健康成人を対象に、安静、 VO_{2max} の33%の強度で30分間のサイクリング運動を行う低強度運動試行、1分間の最大負荷スプリントと2分間の休憩を計10回繰り返す合計30分間のサイクリング運動を行う高強度運動試行の3試行において、安静および運動が終了した30分後における飲料摂取が胃内容排出と主観的な空腹感に及ぼす影響を検討している。主観的な空腹感が高強度運動試行において、運動後に低下を示したものの、飲料摂取を行う前に空腹時の値に回復していることを報告している⁵⁸。Kashimaらは11人の健康男女を対象に運動後に糖・タンパク質飲料を摂取するタイミングの違いが胃内容排出と主観的な空腹感に及ぼす影響を検討している⁵⁹。運動5分後に糖・タンパク質飲料を摂取した試行は運動30分後に飲料を摂取した試行と比較して、胃内容排出が遅延し、飲料摂取から30分後において主観的な空腹感や食事への欲求が減少したことを報告している⁵⁹。

運動後は水分補給および筋グリコーゲンの回復の為に、糖質やタンパク質飲料の摂取が推奨されているが、運動直後の糖・タンパク質飲料の摂取は運動30分後の摂取と比較して消化および吸収が遅延することが報告されている⁴⁰。さらにこれまでの研究において運動後の飲料摂取がエネルギー摂取量に及ぼす影響を検討した研究は皆無であり⁴²、食欲が減退する運動後に適切な栄養補給を行うためには運動後の飲料摂取が胃運動とエネルギー摂取量に及ぼす影響を評価する必要がある。運動中もしくは運動後の飲料摂取が胃運動および食欲に及ぼす影響を検討した先行研究をTable 2にまとめた。

Table 2. The effects of fluid intake during or after exercise on gastric motility and appetite

Author	yrs	Subjects	Exercise	Test meal (mL, kcal, timing)	Measurements	Results (slow, few < fast, much)	
						Gastric emptying	Appetite
Kashima, et al.	2018	Four males Seven females	Resistance exercise	Semi-liquid drink (400 mL, 200 kcal, 5 or 30 min after exercise)	¹³ C-sodium acetate breath test	5 min after exercise < Control = 30 min after exercise	5 min after exercise < Control = 30 min after exercise
Evans, et al.	2010	Five males Three females	30 min cycle at 33% of VO ₂ max 30 min cycle of 1-min peak power sprints and 2-min rest	Glucose solution (595 mL, 199 kcal, 30 min after exercise)	Gastric tube	NS	NS
Mitchell, et al.	1989	Ten trained male cyclists	105 min cycle at 70% of VO ₂ max + 15-min all-out self-paced performance ride	Water Liquid (~150 mL every 15 min, 288 kcal, during exercise)	Nasogastric tube	NS	NS
Houmard, et al.	1991	Ten male biathletes	60 min ran or cycle 75% of their specific mode VO ₂ max	Water 7% carbohydrate solution (10 mL/kg/h, during exercise every 15 min)	Nasogastric tube	All other trials < Rest + water	NS

NS: Not significant, VO_{2max}: maximum oxygen uptake.

3. 運動後の食欲を亢進させるための介入方法

前述した運動後の食欲不振（運動誘発性食欲不振）の改善方法はいくつかの研究において検討されている。まず、運動する環境を低温にすることで運動後の食欲が改善することをいくつかの研究が報告している^{60, 61, 62, 63, 64}。Wasseらは活動的な男性を対象に65%VO_{2max}の強度でランニング運動を行ったところ、暑熱環境（30°C）で運動を行った試行と比較して寒冷環境（10°C）で運動を行った試行でエネルギー摂取量が増加したことを報告している⁶²。さらにKojimaらは男性アスリートを対象に高強度の間欠的ペダリング運動後にWhole body cryotherapyと呼ばれる超低温（-195°Cから-100°C）キャビン内に入り、全身を冷却することによって運動後のエネルギー摂取量が増加したことを報告している⁶³。一方、Halseらは活動的な男性を対象に70%VO_{2peak}のランニング運動を40分間行った後に水浴（15°Cもしくは33°C）を行い、エネルギー摂取量に及ぼす影響を検討している⁶⁴。その結果、水浴は温度（15°Cもしくは33°C）に関わらず、運動後に水浴を行わなかった試行と比較してエネルギー摂取量が増加したことを報告しており、寒冷による刺激のみが運動後のエネルギー摂取量を増加させる要因ではないことを示唆している⁶⁴。

前述した研究は、運動する環境を冷やす、運動後に水浴を行う、運動後に寒冷環境に暴露させるなど、特殊な施設や機械を必要とする介入方法である。しかし、すべての運動を実施するものが空調のきいた室内や水浴や寒冷環境への暴露ができる環境で運動を行うことは難しく、アスリートのコンディショニングを保つために様々な運動場面で対応が可能な、運動後の食欲を増加させる方法が必要である。

第3節 本論文の目的および構成

先行研究で明らかのように、運動中および運動後は胃からの飲料や食事の排出が遅延する。またこの胃からの排出の遅延は、前述した運動誘発性食欲不振の機序の一つとし

て考えられているが、運動後の水分摂取が欠かせない状況下において、その後の食欲を低下させない適切な飲料摂取方法を検討する必要がある。摂取する飲料の温度に着目し、運動後の食欲の低下抑制を目的とした飲料摂取方法の検討を行うために、以下の3つの問題点を本論文において、学術的に集積すべき検討課題として挙げた。

1. 安静時における摂取する飲料の温度が胃運動と食欲に及ぼす影響が両視点から検討されていないこと
2. 運動誘発性食欲不振が運動後の飲料摂取による消化管機能の変化に起因するものなのか不明なこと
3. 運動後における摂取するタンパク質含有飲料の温度が胃運動と食欲に及ぼす影響が不明なこと

本論文は、課題研究1（第2章）、課題研究2（第3章）、課題研究3（第4章）の3つの実験、総合考察（第5章）で構成されている。前述した問題点1-3に対応し、以下の課題研究を設定した。文末の括弧内に対応する問題点を記載した（Fig. 1）。

課題研究1（第2章）では、健常成人男性の安静時における異なる温度の水の摂取が胃運動と食欲に及ぼす影響を検討することを目的とした（問題点1）。

課題研究2（第3章）では、健常成人男性における運動後の栄養補給が求められる時間帯の水摂取が、胃運動および食欲に及ぼす影響を検討することを目的とした（問題点2）。

課題研究3（第4章）では、健常成人男性において運動後に摂取するタンパク質含有飲料の温度が胃運動および食欲に及ぼす影響を検討することを目的とした（問題点3）。

最後に、これらの研究について第5章で総合考察を行った。

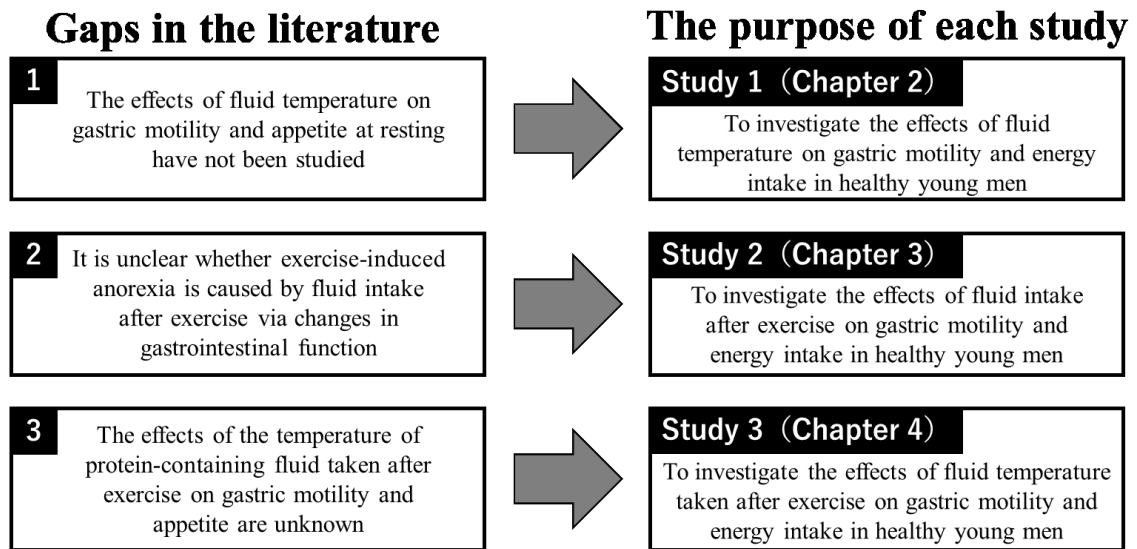


Fig. 1. The overview of the gaps in the literature and the purpose of each study

The figure on the left shows the gaps in the literature. The figure on the right shows the purpose of each study corresponding to each gap in the literature.

第2章

安静時における異なる温度の水の摂取が胃運動および食欲に与える影響

第1節 緒言

1. 背景

アスリートは運動パフォーマンスの維持および脱水予防のために、運動実施時だけでなく、運動前や運動後における適切な水分摂取が求められる¹。しかし、安静時の水分摂取は、その後の主観的食欲やエネルギー摂取量に影響を及ぼすことが報告されている⁶⁵。現在までに3つの実験室にて実施されている研究において、水分摂取がその後のエネルギー摂取量に及ぼす影響を様々な対象者において検討している^{66, 67, 68}。

Davy らは過体重肥満者において、食事30分前の500 mLの水の摂取は水の摂取をしなかった場合と比較してエネルギー摂取量を13%減少させることを報告している⁶⁶。Corney らは健常成人において、食事直前の568 mLの水の摂取は、水の摂取をしなかった場合と比較してエネルギー摂取量を22%減少させることを報告している⁶⁸。しかし、Van らは高齢者において、食事30分前の水の摂取（男性: 500 mL、女性: 375 mL）は水の摂取をしなかった場合と比較してエネルギー摂取量を減少させるが、若年成人においては影響を及ぼさないことを報告している⁶⁷。先行研究間における異なる結果の要因として Corney らは、先行研究間のプロトコルの差異により、食事を行う際の胃内の水の残留量が異なる可能性を挙げている⁶⁸。Corney ら、Davy ら、Van らの研究で用いられた水の量(375-568 mL)や、その後の食事までの時間間隔(食事の直前-食事の30分前)は統制されていない^{66, 67, 68}。さらに、この先行研究で使用された水の温度(5~7°C)を報告している研究は1つのみであり⁶⁶、3つの研究の中で使用されている水の温度が異なる結果を示した要因の一つであると考えられる。胃運動は食欲を調節する重要な要因の一つであり、胃内容排出速度または胃の収縮頻度は、摂取する飲料の温度によって影

響を受けることが報告されている^{54,55}。特に温かい飲料の摂取は胃の運動を活発にし、胃内容排出が促進されることから、冷たい飲料の摂取と比較して、エネルギー摂取量が増加する可能性があると考えられる。しかし、現在までの研究において、若年健常成人における食事前の水摂取が胃運動とその後のエネルギー摂取量の両方に及ぼす影響を調べた研究は皆無である^{66,67,68}。さらに、摂取する水の温度が胃運動およびエネルギー摂取量や主観的な食欲にどのように影響するかを検討した研究は存在しない。摂取する水の温度によってエネルギー摂取量を調節することができれば、簡便で日常生活に応用可能な、日々のエネルギー収支の調整方法の開発に寄与する可能性がある。

2. 目的

本研究（課題研究1）の目的は、健常成人男性における異なる温度の水の摂取が胃運動と食欲に及ぼす影響を検討することとした。

第2節 方法

1. 被験者

若年健常男性12名を対象とした（年齢 23.4 ± 1.4 歳、身長 1.71 ± 0.04 m、体重 64.0 ± 9.8 kg、体格指数 21.8 ± 2.6 kg/m²、腹囲 73.1 ± 5.4 cm [平均値 \pm 標準偏差]）。すべての被験者は服薬および喫煙習慣がなく、過去3か月に渡り大きな体重変動が無い者とした。対象者にはあらかじめ、研究の目的、方法および実験に伴う苦痛、危険性について十分な説明を行い、書面にて参加に対する同意を得た。また、個人の自由意志による参加を尊重し、途中で研究から離脱する権利を有することを伝えた。本研究は、ヘルシンキ宣言を尊重し、対象者の人権および利益の保護に配慮した研究計画を行い、早稲田大学研究倫理委員会の承認（承認番号:2017-104）を得て実施した。

2. 実験デザイン

すべての被験者は 500 mL の水をそれぞれ、1) 2°C、2) 37°C、3) 60°C の温度で摂取する 3 試行に参加した。試行間は最低 6 日空けて実施した。実験当日の食欲およびエネルギー摂取量に影響することを避けるため、すべての被験者は実験期間において通常の食事摂取量を保ち、実験前日は激しい運動および飲酒を禁止された。1 回目の実験の前日に被験者は摂取した食事を秤で計量し、記録を行った。2 回目、3 回目の実験前日は 1 回目の実験前日に摂取した食事内容に基づき、摂取する食事内容および量を統一した。被験者が実験前日に摂取した食品は栄養計算ソフトを用いて、エネルギー摂取量および栄養素を解析した（エクセル栄養君 Ver 5.0、建帛社、日本）。対象者は 10 時間の絶食後、実験当日 08:50 に実験室に来研した。被験者は実験開始 2 時間前までコップ二杯（500 mL）の水を摂取することが可能であった。来研後、被験者は座椅子に座り半仰臥位で安静を保った。その後、09:00 より既定の水 500 mL を 5 分間かけて、それぞれ 2°C、37°C、60°C で摂取した。摂取する水の温度は電子温度計にて測定を行った（testo 106、Testo K.K、日本）。摂取する水の量について、先行研究より食事前の 500 mL の水は、その後の食事からのエネルギー摂取量を減少させる⁶⁶と報告されていることから本研究において 500 mL の水を用いた。その後、被験者は半仰臥位にて 10:05 まで座位安静を保った。その間、2 次元超音波診断装置を用いて被験者の胃幽門部を記録した。10:05 から被験者は自由摂取の食事量調査を行った。実験の流れを Figure 2 に示した (Fig. 2)。

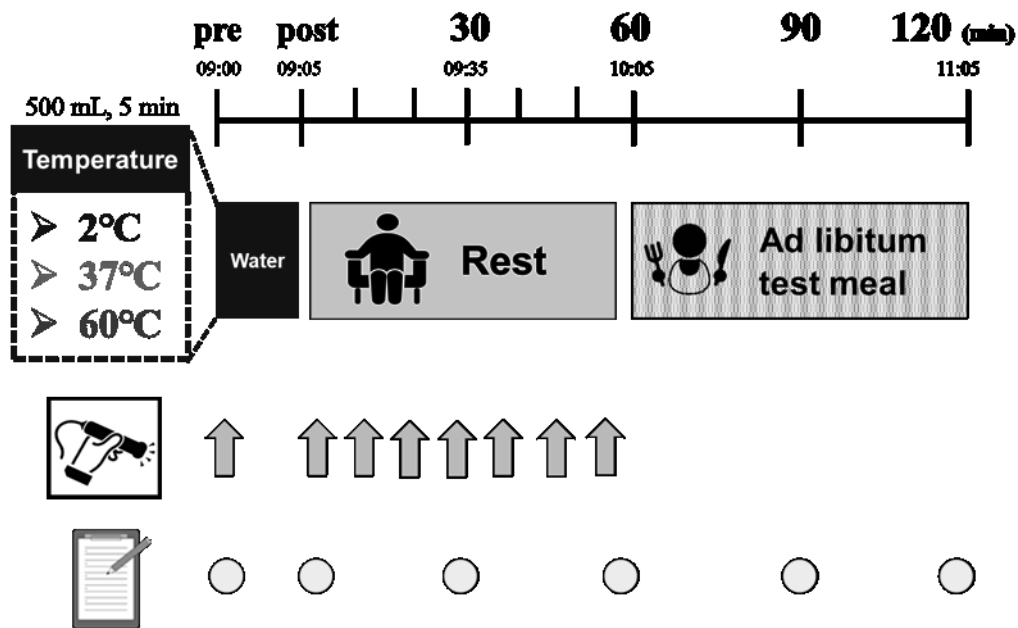


Fig. 2. A schematic presentation of the study protocol

For the all trials, participants consumed 500 mL of water at 2°C or 37°C or 60°C for 5 min at 09:00. Then, participants sat in a chair in the laboratory until 10:05 to measure the gastric motility, and consumed ad libitum buffet meal until 11:05. Subjective feelings of appetite were measured at 09:00, 09:05, 09:35, 10:05, 10:35 and 11:05.

3. 主観的食欲およびエネルギー摂取量の測定

実験で使用した試験食（インスタント焼きそば、日清、日本）は事前の調査にて、被験者のアレルギー食品が含まれていないことを確認した。10:05 より被験者はインスタント焼きそば（タンパク質 9.7%、脂質 20.5%、炭水化物 69.8%）を、本人が心地よい満腹と感じるまで自由摂取した。被験者が摂取した食事量を把握できないようにするため、お椀に少量の焼きそばを盛る方法で被験者に提供し、被験者が満腹と感じるまで、繰り返しつぎ足した⁴⁴。試験食は食事摂取量調査の間に加温し、被験者は食事摂取量調査の間、継続して温かい試験食を摂取した。食事摂取量調査の間、エネルギー摂取量への影響を避けるため、被験者は水を飲むことを禁止された。食事摂取量調査は最長 1 時間とし、平均摂取時間と標準偏差はそれぞれ 2°C 試行 18.2 ± 6.5 分、37°C 試行 21.8 ± 9.4 分、60°C 試行 24.1 ± 11.9 分であった。試験食の総摂取量は事前に提供した試験食の重量から、残りの試験食の重量を差し引きし、エネルギー摂取量を算出した。主観的食欲の調査として視覚的アナログスケール（100-mm visual analogue scales : VAS）⁶⁹にて、水摂取前、水摂取直後、水摂取 30 分後、水摂取 60 分後、水摂取 90 分後、水摂取 120 分後に被験者の食欲度（空腹感、満腹感、甘いもの、酸っぱいもの、脂っこいもの、しょっぱいものへの欲求）を調査した。さらに VAS にて被験者の胃の状態（「胃の張りを感じますか?」、「今食事をしたいと思いますか?」、「今のどが渴いていますか?」）。VAS における調査では 100 mm の線の左端を「全く感じない」、右端を「非常に感じる」とし、被験者が感じる感覚を線分上に印をつけた。

4. 胃運動の測定

本研究では超音波診断装置（LOGIQ-e、GE Healthcare、アメリカ）を用いて、安静時の胃幽門部の動きを記録した。記録した動画から胃の拡張の度合いを反映する胃幽門部の断面積⁷⁰、胃の動きを示す胃幽門部収縮回数を測定した。超音波診断の妨げにならない

いよう、被験者は測定の間、すべての貴金属を外した。測定の際、被験者は座椅子に半仰臥位の状態で座り、大腿と腹部が 120°C の角度になるよう調節した。コンベックス型プローブを 5MHz の周波数で用い、被験者の胃幽門部の断面積および胃幽門部収縮回数を算出した。先行研究に倣い、同画像上に肝臓、腹腔動脈および上腸間膜動脈が撮像できる位置の胃の断面図を胃幽門部として撮像した⁷⁰。胃幽門部断面積 (cm²) は水摂取前、水摂取直後、水摂取 10 分後、水摂取 20 分後、水摂取 30 分後、水摂取 40 分後、水摂取 50 分後、水摂取 60 分後において、各ポイントから 3 分間の動画を記録した⁷¹。その後、画像処理ソフト (ImageJ 1.47、National Institute of Mental Health、アメリカ) を用いて胃幽門部を描画し、断面積を算出した。胃幽門部の収縮回数は水摂取前、水摂取直後、水摂取 10 分後、水摂取 20 分後、水摂取 30 分後、水摂取 40 分後、水摂取 50 分後、水摂取 60 分後において、各ポイントから 3 分間の胃幽門部の動きを動画として記録し、3 分間当たりの胃幽門部の収縮回数を測定した⁷²。胃運動の測定は、超音波測定の訓練を受けた技術者が行った。

5. 統計解析

すべての統計処理には SPSS Statistics version 23.0 (IBM SPSS Statistics version 23.0、日本 IBM、日本) を用いた。統計量は平均値 ± 標準偏差で示した。すべての測定項目において、統計処理前に Shapiro-Wilk テストを用い、正規性の検定を行った。すべての項目において正規性が確認された為、下記の検定を行った。試行間における評価項目の変化は一元配置の分散分析によって、有意性を検定した。一元配置の分散分析で試行間に有意な差が認められた項目は、Bonferroni の方法にて多重比較を行った。測定条件 (試行) と時間を要因とした測定項目の変化については、二元配置の分散分析によって、その有意性を検定した。二元配置の分散分析で試行間に有意な差が認められた項目は、Bonferroni の方法にて多重比較を行った。二元配置の分散分析において試行-時間の交互

作用が認められた場合は、単純主効果の検定を行った。試行間の関連性の検定には Pearson の相関分析を用いた。検定の有意水準は 5%とし、P 値が 5%未満の時に有意とした。また、P 値が 5%未満を満たすことなく、10%未満であった場合は傾向とした。

第3節 結果

1. 測定前日のエネルギー摂取量

3 試行の前日の総エネルギー摂取量は 1730 ± 349 kcal/日であった。総エネルギー摂取における栄養素の割合は脂質 $30 \pm 6\%$ (59.9 ± 20.7 g/日)、炭水化物 $54 \pm 7\%$ (218.3 ± 30.8 g/日)、タンパク質 $16 \pm 3\%$ (70.4 ± 20.6 g/日) であった。

2. 各試行当日の統制

3 試行当日の体重は各試行間に有意な差は見られなかった ($2^{\circ}\text{C} : 63.8 \pm 9.9$ kg、 $37^{\circ}\text{C} : 64.3 \pm 9.7$ kg、 $60^{\circ}\text{C} : 63.9 \pm 9.9$ kg ; $P=0.075$)。各試行の水摂取前の主観的食欲度 (空腹感、満腹感、甘いもの、酸っぱいもの、脂っこいもの、しょっぱいものへの欲求) に有意な差は見られなかった。各試行の水摂取前の胃幽門部断面積に有意な差は見られなかった ($2^{\circ}\text{C} : 3.1 \pm 1.3$ cm²、 $37^{\circ}\text{C} : 3.6 \pm 1.3$ cm²、 $60^{\circ}\text{C} : 3.1 \pm 1.0$ cm² ; $P=0.277$)。各試行の水摂取前の胃幽門部収縮回数に有意な差は見られなかった ($2^{\circ}\text{C} : 4.5 \pm 2.5$ 回/3 分、 $37^{\circ}\text{C} : 4.5 \pm 2.7$ 回/3 分、 $60^{\circ}\text{C} : 3.1 \pm 1.0$ 回/3 分 ; $P=0.996$)。

3. エネルギー摂取量

試験食の自由摂取におけるエネルギー摂取量は、一元配置の分散分析において、試行間で有意な差が認められた ($2^{\circ}\text{C} : 1599 \pm 419$ kcal、 $37^{\circ}\text{C} : 1899 \pm 551$ kcal、 $60^{\circ}\text{C} : 2022 \pm 755$ kcal ; $P=0.009$) (Fig. 3)。 2°C の水を摂取した試行と比較して 37°C の水を摂取した試行は 19% ($P=0.039$)、 60°C の水を摂取した試行は 26% ($P=0.025$) エネルギー摂

取量が高値を示した。食事摂取時間は一元配置の分散分析において、試行間で有意な差が認められた (2°C : 18.2 ± 6.5 分、37°C : 21.8 ± 9.4 分、60°C : 24.1 ± 11.9 分 ; P = 0.046)。2°C の水を摂取した試行と比較して 60°C の水を摂取した試行において、食事摂取時間が 5.9 分長いことが示された。

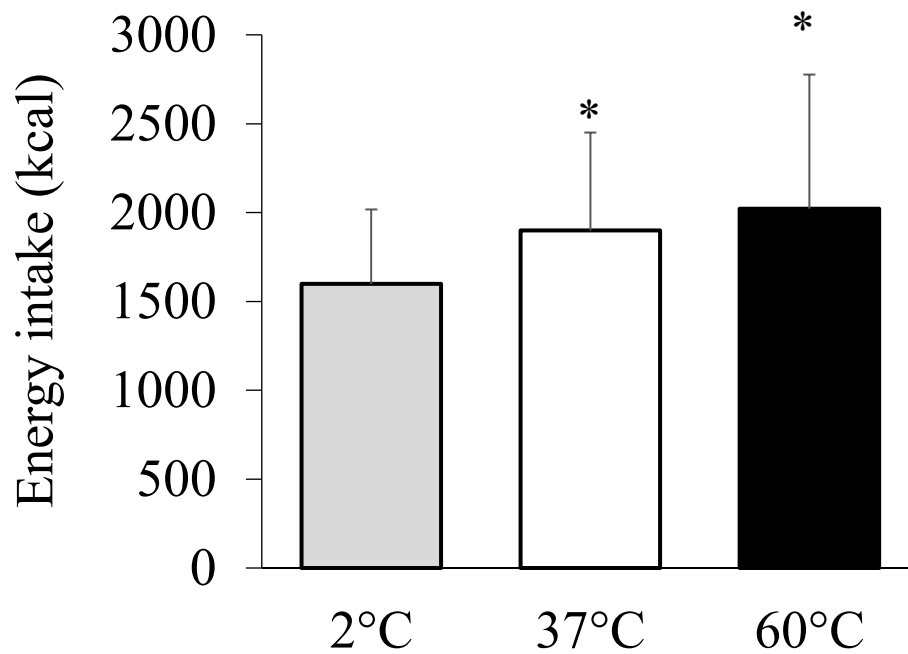


Fig. 3. Energy intake at ad libitum test meal: 60 min after consuming water (500 mL) at 2°C, 37°C and 60°C

Data are means \pm SD. Means were compared using one-factor ANOVA for the main effect of the trial followed by a multiple comparison test using the Bonferroni method.

* Significantly different from the 2°C trial ($P < 0.05$).

4. 主観的食欲度

被験者の主観的食欲の空腹感は、二元配置の分散分析において有意な時間の主効果 ($P < 0.001$) および交互作用 (試行-時間) がみられた ($P = 0.027$) (Fig. 4)。2°C の水を摂取した試行と比較して 60°C の水を摂取した試行において、水摂取 30 分後 ($P = 0.074$) および 60 分後 ($P = 0.086$) に被験者の空腹感が高値を示した。各試行において、水摂取 60 分後に主観的な空腹感が最大値となった ($P < 0.001$)。被験者の主観的な満腹感、甘いもの、酸っぱいもの、脂っこいもの、しょっぱいものへの欲求は、二元配置の分散分析において試行の主効果、時間の主効果および交互作用 (試行-時間) が見られなかった。主観的な胃の状態を尋ねた、「胃の張りを感じますか?」、「今食事をしたいと思えますか?」、「今のどが渴いていますか?」という質問においても、二元配置の分散分析において試行の主効果、時間の主効果および交互作用 (試行-時間) が見られなかった。

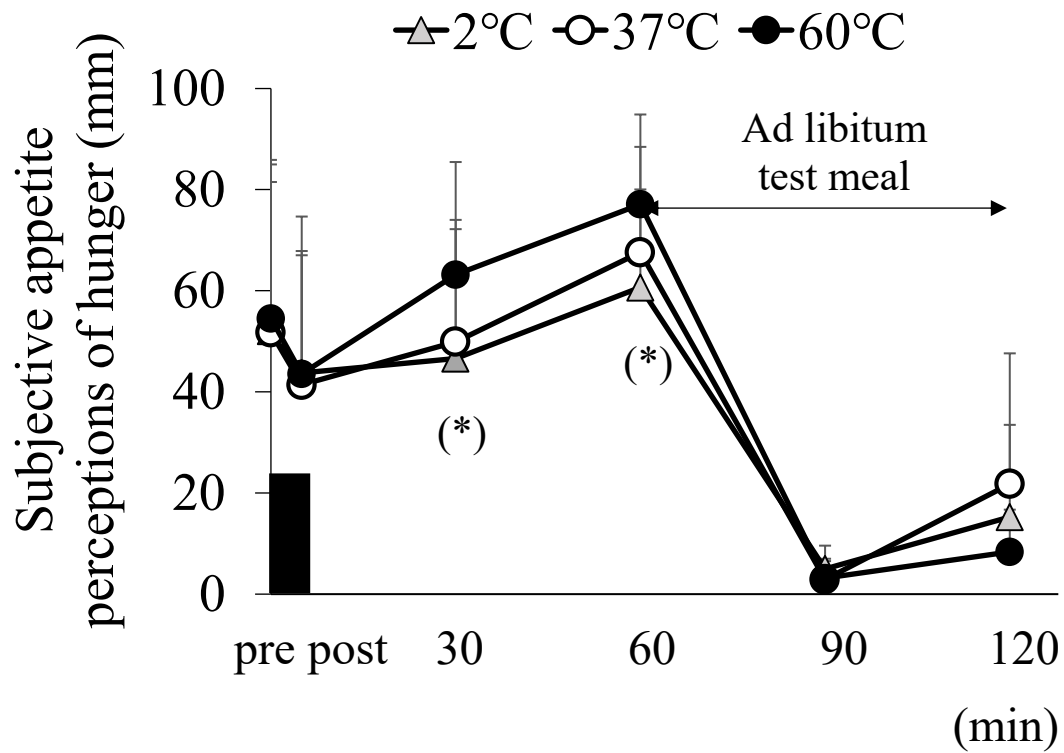


Fig. 4. Subjective appetite perceptions of hunger before and after consuming water (500 mL) at 2°C, 37°C and 60°C

Data are means \pm SD. The black rectangle indicates consuming water in 5 min. Data were analysed using two-factor ANOVA followed by a multiple comparison test using the Bonferroni method. There was a significant main effect of time ($P < 0.001$) and trial-time interaction ($P = 0.027$).

(*) Different between the 2°C and 60°C trials ($P < 0.10$).

5. 胃幽門部断面積および幽門部収縮回数

胃幽門部断面積において有意な交互作用(試行-時間)が見られた(2°C: $10.0 \pm 5.0 \text{ cm}^2$ 、37°C: $9.3 \pm 1.2 \text{ cm}^2$ 、60°C: $6.8 \pm 2.1 \text{ cm}^2$; $P < 0.001$) (Fig. 5)。水摂取直後において、37°C および 60°C の水を摂取した試行と比較して 2°C の水を摂取した試行で有意に胃幽門部断面積が大きい値を示した (2°C vs 60°C ; $P = 0.030$ 、37°C vs 60°C ; $P = 0.019$)。

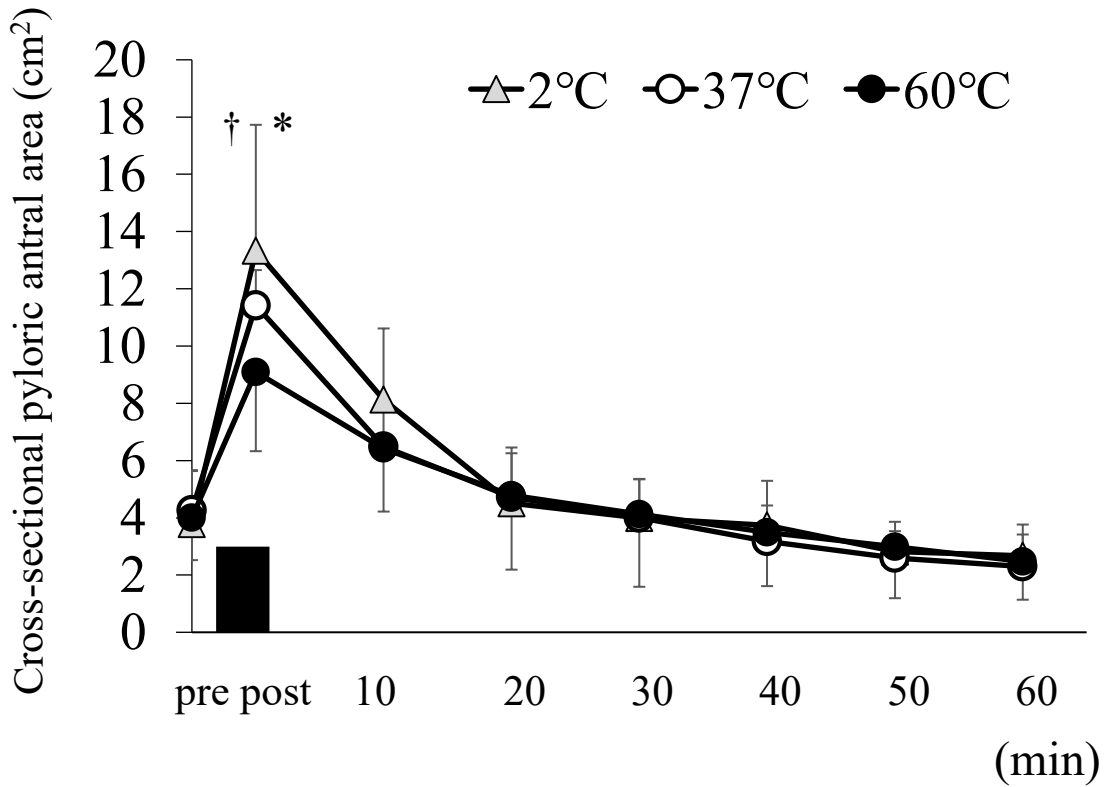


Fig. 5. Cross-sectional gastric pyloric antral area before and after consuming water (500 mL) at 2°C, 37°C and 60°C

Data are means \pm SD. The black rectangle indicates consuming water in 5 min. Data were analysed using two-factor ANOVA followed by a multiple comparison test using the Bonferroni method. There was a significant main effect of time ($P < 0.001$) and trial-time interaction ($P = 0.020$).

* Significantly different between the 2°C and 60°C trials ($P < 0.05$).

† Significantly different between the 37°C and 60°C trials ($P < 0.05$).

胃幽門部収縮回数は試行の主効果 ($P < 0.001$) および交互作用 (試行-時間) ($P < 0.001$) が見られた (Fig. 6)。水摂取直後、水摂取 10 分後、水摂取 20 分後、水摂取 30 分後、水摂取 40 分後、水摂取 50 分後、水摂取 60 分後において、 2°C の水を摂取した試行と比較して 60°C の水を摂取した試行で有意に胃幽門部収縮回数が高値を示した (水摂取直後 ; $P < 0.001$ 、水摂取 10 分後 ; $P = 0.001$ 、水摂取 20 分後 ; $P = 0.004$ 、水摂取 30 分後 ; $P = 0.002$ 、水摂取 40 分後 ; $P = 0.016$ 、水摂取 50 分後 ; $P = 0.026$ 、水摂取 60 分後 ; $P = 0.002$)。水摂取直後、水摂取 30 分後、水摂取 50 分後、水摂取 60 分後において、 37°C の水を摂取した試行と比較して 60°C の水を摂取した試行で有意に胃幽門部収縮回数が高値を示した (水摂取直後 ; $P = 0.011$ 、水摂取 30 分後 ; $P = 0.034$ 、水摂取 50 分後 ; $P = 0.024$ 、水摂取 60 分後 ; $P = 0.005$)。水摂取直後および 10 分後において、 2°C の水を摂取した試行と比較して 37°C の水を摂取した試行で有意に胃幽門部収縮回数が高値を示した (水摂取直後 ; $P = 0.003$ 、水摂取 10 分後 ; $P < 0.001$)。

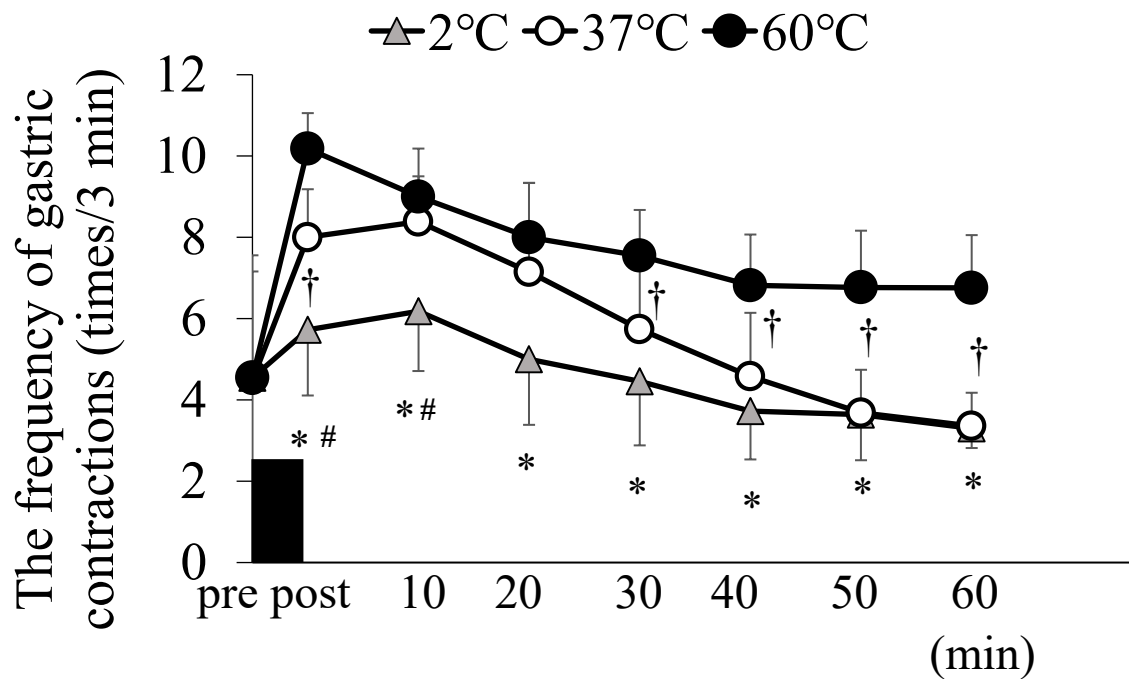


Fig. 6. The frequency of gastric contractions before and after consuming water (500 mL) at 2°C, 37°C and 60°C

Data are means \pm SD. The black rectangle indicates consuming water in 5 min. Data were analysed using two-factor ANOVA followed by a multiple comparison test using the Bonferroni method. There was a significant main effect of trial ($P < 0.001$), time ($P < 0.001$) and trial-time interaction ($P = 0.020$).

* Significantly different between the 2°C and 60°C trials ($P < 0.05$).

Significantly different between the 2°C and 37°C trials ($P < 0.05$).

† Significantly different between the 37°C and 60°C trials ($P < 0.05$).

6. エネルギー摂取量と胃幽門部収縮回数との関連

自由摂取の食事から摂取したエネルギー摂取量と水摂取直後の胃幽門部収縮回数には有意な正の相関関係が見られた ($r = 0.365$, $P = 0.037$) (Fig. 7)。水摂取直後の胃幽門部収縮回数が高値を示すほど、自由摂取の食事量からのエネルギー摂取量が多いことが明らかとなった。

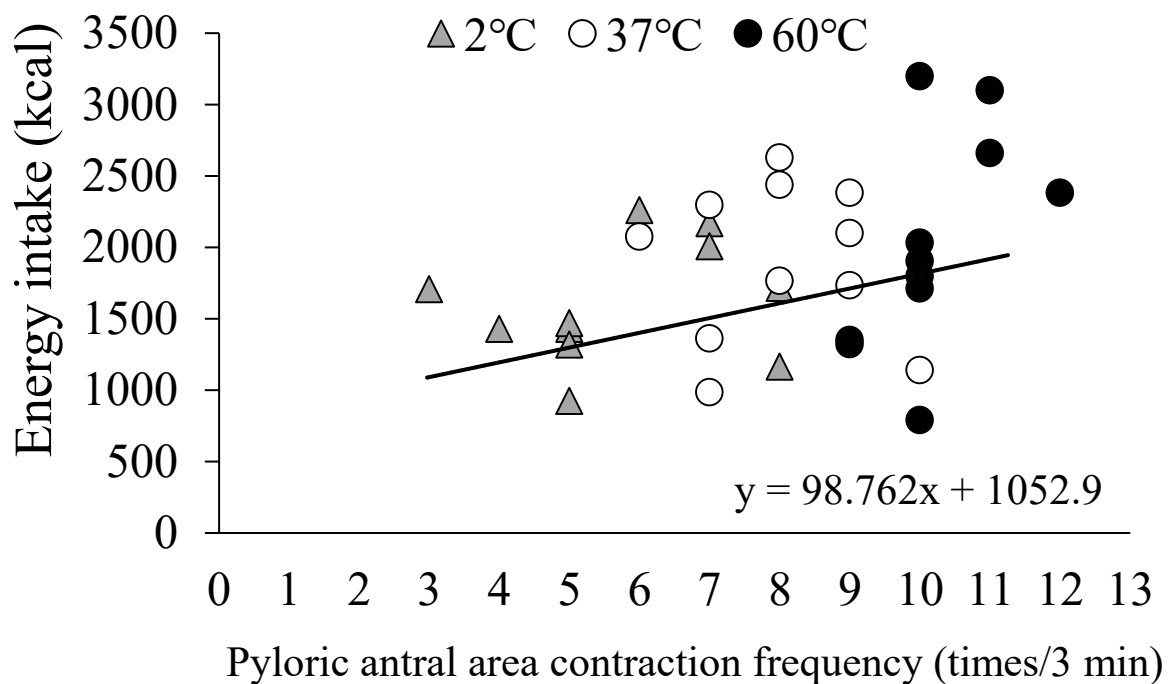


Fig. 7. Correlations between energy intake and pyloric antral area contraction frequency

Data were analysed using Pearson's correlation coefficient (r) test. There was a significant correlation between energy intake and pyloric antral area contraction frequency ($r = 0.365$, $P = 0.037$).

第4節 考察

本研究の目的は摂取する水の温度が胃運動および食欲に及ぼす影響を検討することであった。本研究で得られた主な知見は、2°C の 500 mL の水を摂取した試行と比較して 37°C および 60°C の 500 mL の水を摂取した試行において、胃幽門部収縮回数と自由摂取の食事からのエネルギー摂取量が高値を示したことである。また、2°C の 500 mL の水を摂取した試行と比較して 60°C の 500 mL の水を摂取した試行において、水摂取直後の主観的な空腹感が高値を示した。さらに、自由摂取の食事から摂取したエネルギー摂取量と水摂取直後の胃幽門部収縮回数には有意な正の相関関係が見られた。本研究は、摂取する水の温度が胃運動とエネルギー摂取量の調整に重要な役割を果たすことを明らかにした。これらの所見は、より大規模で多様な集団で検討する必要があるが、本研究の結果は、健常成人男性において、食事前の温かい水の摂取は胃運動を亢進し、その後のエネルギー摂取量を増加させる可能性を示した。

実験室内で行われた3つの研究は、本研究と同様に食事前の水の摂取がエネルギー摂取量に及ぼす影響を検討している^{66, 67, 68}。Davy らは、過体重および肥満の高齢成人において、食事30分前の水摂取は食事からのエネルギー摂取量の減少に有効であることを報告している⁶⁶。Van らの研究では、健康な高齢者において食事30分前の水摂取は食事からのエネルギー摂取量を減少させたが、健康な若年成人では同様の結果が得られなかった⁶⁷。近年行われた Corney らの研究では、健常若年成人において食事直前の水摂取は食事からのエネルギー摂取量の減少に効果的であることを明らかにしている⁶⁸。Davy ら、および Corney らの研究と比較して Van らの研究では、若年成人において水摂取後にエネルギー摂取量が減少しなかった理由として、水摂取から食事摂取を行うまでの時間間隔が異なることが挙げられる⁶⁸。また、栄養素含有飲料を用いて検討した先行研究では、自由摂取の食事量調査間の時間間隔が、胃前庭部とエネルギー摂取に関連し

ていることが報告されている^{73,74}。他の理由として、若年者と高齢者の間での胃内容排出量の差が、エネルギー摂取量に影響を及ぼす可能性が考えられる^{68,75}。あるいは、37°Cの温水と比較して5°Cの冷水では胃内容排出速度が遅延することが報告されており、摂取した水の温度が異なることが先行研究の結果が一致しない理由の一つとして考えられる。実際に、前述した食事前の水摂取が人のエネルギー摂取量に及ぼす影響を検討した3つの研究の中で、実験で使用された水の温度(5-7°C)を明記している実験は1つだけである⁶⁶。

食事前に摂取する水の温度が自由摂取の食事におけるエネルギー摂取量に影響を及ぼす理由の中でも、胃運動性の変化は大きな要因であると考えられる。本研究では、水を摂取した直後に測定した胃幽門部面積(Post)は2°Cおよび37°C試行において、60°C試行と比較して有意に高値を示した。一方、水を摂取した1時間後に測定した胃幽門部収縮の頻度は、60°C試行と比較して2°C試行で有意に低値を示した。飲料の温度は胃運動性に影響する主要な要因の一つであることが報告されている^{52,53,54,55}。現在までに異なる温度の水摂取が胃幽門断面積に及ぼす影響について検討した研究は存在しないものの、Mishimaらの研究では37°Cの水を摂取した試行と比較して60°Cの温水を摂取した試行において胃内容排出速度が速まったことが報告されている⁵⁵。複数の研究において、胃の拡張は食欲を調整する機構の一つであることが報告されている^{76,77,78}。先行研究において胃の容積は主観的な満腹感と正の相関があることが報告されている⁷⁶。その他、食事前の胃拡張の程度がエネルギー摂取量と負の相関があることが報告されている^{73,79}。さらに、本研究において、水摂取直後の胃幽門部収縮回数と自由摂取の食事からのエネルギー摂取量に正の相関があった。このように胃収縮が被験者のエネルギー摂取量と関連していることを説明する機序の一つとして、胃の近位を刺激し食事への欲求を亢進させるモチリンなどの消化管ホルモンの働きが挙げられる⁸⁰。しかし、本研究においては消化管ホルモンを始めとした血液項目の測定を行っていない為、今後の研究に

においては胃運動を制御する消化管ホルモンや食欲関連ホルモンを含めて検討する必要がある。

第5節 結論

本研究から、若年健常男性において、食事前に摂取する水の温度は、その後の胃運動とエネルギー摂取量に影響することが明らかとなった。具体的には、食事の一時間前において60°Cの温水500 mLを摂取すると、2°Cの同量の冷水を摂取した際と比較して自由摂取の食事調査からのエネルギー摂取量および胃幽門部収縮回数が有意に高値を示した。これらの所見は、温水摂取による胃運動の増加が、食欲の増加に関連していることを示唆した。

第3章

運動後における冷水摂取が胃運動および食欲に与える影響

第1節 緒言

1. 背景

第2章の課題研究1では安静時において摂取する水の温度が胃運動およびエネルギー摂取量に及ぼす影響を検討し、温水(60°C)の摂取は冷水(2°C)および体温(37°C)と同等の水と比較して、胃幽門部収縮回数とエネルギー摂取量において高値を示す結果が得られた。アスリートはコンディションの維持のために1日を通してのエネルギー摂取量を適正に保つ必要がある。同時に、運動後できるだけ早く栄養補給を行うことで、筋グリコーゲンの合成が促進することから⁸¹、運動後の急速な栄養補給が必要とされている。しかし、アスリートにおけるエネルギー消費量とエネルギー摂取量の収支バランスを検討した研究では、アスリートは運動によって消費したエネルギー量を、日々の食事から補えていないことが報告されている²。急性運動においては、一過性の中等度および高強度サイクリング運動後は、その後のエネルギー摂取量が減少することが報告されている⁴⁴。運動誘発性食欲不振の原因として、骨格筋に血流が再分配される為に引き起こされる消化管の虚血、またそれによる消化管から分泌される食欲関連ホルモンの分泌、胃内容物の排出の低下が挙げられる⁸²。中でも胃内容物排出の低下は、運動誘発性食欲不振の要因として考えられている⁴²。その理由として、高強度の運動後は胃内容物排出が遅延し内容物が胃に滞留することにより、胃の拡張状態が継続することから食欲が低下することが推察される、さらに胃内容物排出を制御する消化管ホルモンは食欲を調節する働きも併せ持つことから、運動による胃内容物排出および食欲関連ホルモンの変化は相互に作用する可能性がある⁴²。

しかし、急速に栄養補給が必要である運動後の時間帯において、飲料摂取が胃運動お

よび食欲に及ぼす影響を検討した研究は不足している⁴²。現在までに、3件の実験が運動時における飲料摂取が胃運動と主観的な満腹感もしくは空腹感に与える影響を検討しているが^{58, 83, 84}、エネルギー摂取量に及ぼす影響まで検討した研究は皆無である⁴²。アスリートが運動後の速やかな栄養摂取を行うために、運動誘発性食欲不振が、運動時に飲料を摂取することによって胃内容排出率が低下して食欲が低下することで引き起こされるのか、もしくは高強度運動による他の生体反応が食欲に影響を及ぼすのかといったメカニズムを明らかにする必要がある。

2. 目的

本研究は健常成人男性における運動後の栄養補給が求められる時間帯の水摂取が胃運動および食欲に及ぼす影響を検討した。

第2節 方法

1. 被験者

若年健常男性14名を対象とした（年齢 23.7 ± 2.1 歳、身長 1.72 ± 0.04 m、体重 66.6 ± 7.4 kg、体格指数 21.8 ± 2.6 kg/m²、最大酸素摂取量 58.0 ± 7.2 mL/kg/分 [平均値 ± 標準偏差]）。すべての被験者は服薬および喫煙習慣がなく、過去3か月に渡り大きな体重変動が無い者とした。対象者にはあらかじめ、研究の目的、方法および実験に伴う苦痛、危険性について十分な説明を行い、書面にて参加に対する同意を得た。また、個人の自由意志による参加を尊重し、途中で研究から離脱する権利を有することを伝えた。本研究は、ヘルシンキ宣言を尊重し、対象者の人権および利益の保護に配慮した研究計画を行い、早稲田大学研究倫理委員会の承認（承認番号:2017-260）を得て実施した。

2. 事前測定

本実験時における運動強度を設定するため、被験者は最大漸増運動負荷試験を実施し、最大心拍を算出した (JOG NOW 700、Technogym、Italy)。まず、被験者は走行速度と酸素消費量の関係を明らかにするために、4分×4段階の計16分間の最大下漸増負荷試験を行った。被験者の体力レベルによって走行開始時の速度は7-8 km/hに設定され、4分ごとに1.5 km/hずつ速度を増加させた。試験中の酸素消費量および二酸化炭素産生量はbreath-by-breathの呼気ガス分析によって測定した (Quark CPET、COSMED、Italy)。被験者の主観的な運動強度を6から20までのボルグスケールにて測定した⁸⁵。負荷試験の間、被験者の心拍数はワイヤレス心拍計を用いて連続的に測定した (Polar RCX3、Polar Electro、Kempele, Finland)。

最大下漸増運動負荷試験終了時から15分間を休憩時間とし、その後、最大心拍数を算出するために最大運動負荷試験を行った⁸⁶。走行開始時のトレッドミルの傾斜は3.5%とし、被験者が疲労困憊に至るまで3分ごとに2.5%の傾斜を追加した⁸⁶。走行開始時の速度は被験者の最大下漸増運動負荷試験時から判断した体力レベルに合わせて設定した。以下の項目の2つ以上に当てはまる場合、被験者が疲労困憊に達したとして最大運動負荷試験を終了した。1) 心拍数が年齢予測最大心拍数 (220-年齢) に達した、2) 呼吸交換比が1.15以上である、3) 酸素摂取量がプラトーに達した。最大下漸増運動負荷試験および最大運動負荷試験の結果より、本実験中の走行速度を決定した。

3. 実験デザイン

すべての被験者は、1) 安静試行、2) 安静+水摂取試行、3) 運動試行、4) 運動+水摂取試行の4試行に参加した。試行間は最低6日空けて実施した。実験当日の食欲およびエネルギー摂取量に影響することを避けるため、すべての被験者は実験期間において通常の食事摂取量を保ち、実験前日は激しい運動および飲酒を禁止された。1回目の実験の前日は、18:00以降に摂取した食事を計量し、記録を行った。2回目、3回目、4回

目の実験前日 18:00 以降は 1 回目の実験前日 18 時以降に摂取した食事内容に基づき、摂取する食事内容および量を統一した。被験者が実験前日に摂取した食品は栄養計算ソフトを用いて、エネルギー摂取量および栄養素を解析した（エクセル栄養君 Ver 5.0、建帛社、日本）。対象者は 10 時間の絶食後、実験当日 08:50 に実験室に来研した。被験者は実験開始 2 時間前までコップ 2 杯（500 mL）の水を摂取することが可能であった。来研後、被験者は座椅子に座り半仰臥位で安静を保った。その後、09:00 より安静試行および安静＋水摂取試行では 60 分間の座位安静を保った。運動試行および運動＋水摂取試行においては、事前測定から求めた最大心拍数の 70%の強度で 60 分間のトレッドミル走行を行った。被験者の主観的な運動強度は Borg スケールを用いて、5 分おきに記録した。10:00 より、安静＋水摂取試行および運動＋水摂取試行において、2°C の温度の 500 mL の水を 5 分間で摂取した。摂取する水の温度は電子温度計にて測定を行った（testo 106、Testo K.K、日本）。摂取する水の量について、先行研究より食事前の 500 mL の水は、その後の食事からのエネルギー摂取量を減少させる⁶⁶と報告されていることから、本研究において 500 mL の水を用いた。10:05 より、すべての試行において被験者は半仰臥位にて 30 分間の座位安静を保った。その間、2 次元超音波診断装置を用いて被験者の胃幽門部を記録した。その後、10:35 より、被験者は自由摂取の食事量調査を行った。血液は 1 試行につき来研時、60 分間の安静もしくは運動の 5 分後、60 分間の安静もしくは運動の 35 分後、60 分間の安静もしくは運動の 95 分後の時間帯において、真空採血管を用いて対象者の静脈より採取した。血液項目として、遊離脂肪酸、グルコース、白血球数、赤血球数、血色素測定、ヘマトクリット、血小板数、平均赤血球容積（Mean Corpuscular Volume : MCV）、平均赤血球ヘモグロビン量（Mean Corpuscular Hemoglobin : MCH）、平均ヘモグロビン濃度（Mean Corpuscular Hemoglobin concentration : MCHC）、インスリン、PYY、アシル化グレリンを測定した。インスリン、PYY、アシル化グレリンは酵素免疫測定法にて、遊離脂肪酸、グルコース、白血球数、赤血球数、血

色素測定、ヘマトクリット、血小板数、MCV、MCH、MCHCは酵素法にて、プレートリーダー (Sunrise Remote、Tecan Austria GmbH、オーストリア) および自動分析装置 (JCA-BM8000、日本電子株式会社、日本) を用いて測定を行った。実験の流れを Figure 8 に示した (Fig. 8)。

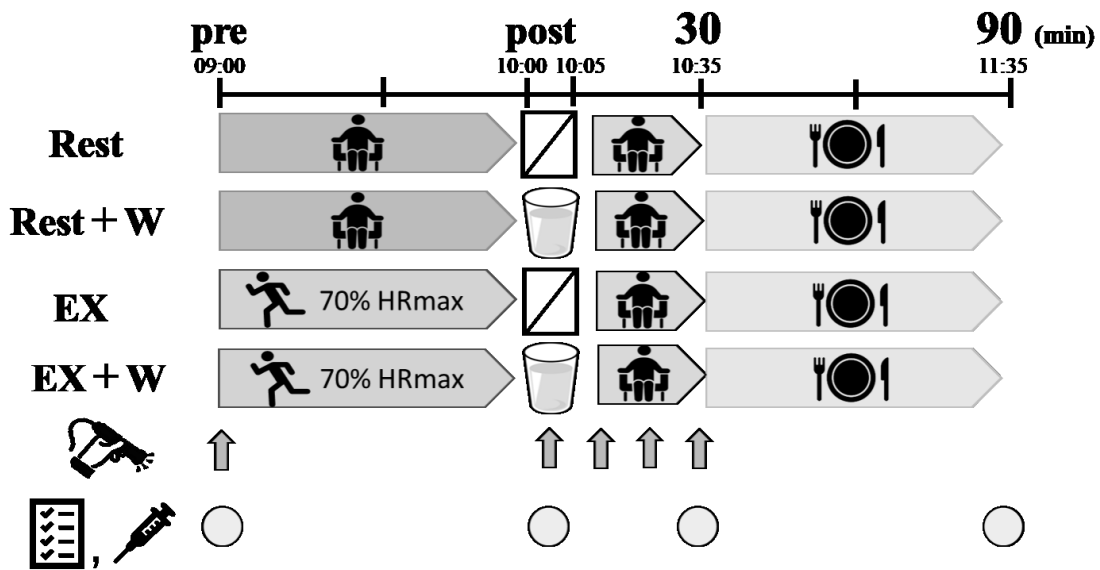


Fig. 8. A schematic presentation of the study protocol

W: 500 mL of water intake, EX: running for 60 min at 70% of maximum heart rate (HRmax).

HRmax: maximum heart rate. For the trials including rest, participants sat in a chair in the

laboratory until 10:00. For the trials including exercise, participants ran for 60 min at 70% of

HRmax. For the trials including water intake, participants consumed 500 mL of water for

5 min. For all trials, participants sat in a chair in the laboratory until 10:35 to measure the gastric

motility, and consumed ad libitum buffet meal until 11:35. Subjective feelings of appetite, gastric

motility and blood parameters were measured at 09:00, 10:05, 10:35 and 11:35.

4. 主観的食欲度およびエネルギー摂取量の測定

実験で使用した試験食（食パン、マーガリン、シリアル、エナジーバー、チーズ、ハム、牛乳、オレンジジュース）は事前の調査にて、各被験者に対してアレルギー食品が含まれていないことを確認した。試験食は実験室内のブースにて提供され、被験者は提供された食事を、本人が心地よい満腹と感じるまで自由に摂取した。食事摂取量調査の間、エネルギー摂取量への影響を避けるため、被験者は水を飲むことを禁止された。食事摂取量調査は最長 1 時間とし、平均摂取時間は安静試行 35.9 ± 17.6 分、安静+水摂取試行 35.8 ± 17.6 分、運動試行 32.2 ± 18.8 分、運動+水摂取試行 27.8 ± 13.9 分であった。試験食の総摂取量は事前に提供した試験食の重量から、残りの試験食の重量を差し引きし、エネルギー摂取量を算出した。主観的食欲度の調査として VAS⁶⁹にて、来研時、60 分後、90 分後、120 分後に被験者の食欲度（空腹感、満腹感、甘いもの、酸っぱいもの、脂っこいもの、しょっぱいものへの欲求）を調査した。さらに VAS にて被験者の胃の状態（「胃の不快感は感じますか?」、「胃の張りを感じますか?」、「今食事をしたいと思いますか?」、「今のどが渴いていますか?」）。VAS における調査では 100 mm の線の左端を「全く感じない」、右端を「非常に感じる」とし、被験者が感じる感覚を線分上に印をつけた。

5. 胃運動の測定

第 2 章の課題研究 1 と同様に、超音波診断装置（LOGIQ-e、GE Healthcare、アメリカ）を用いて、安静時の胃幽門部の動きを記録した。胃幽門部断面積（ cm^2 ）は来研時、60 分間の安静もしくは運動直後、60 分間の安静もしくは運動 10 分後、60 分間の安静もしくは運動 20 分後、60 分間の安静もしくは運動 30 分後において、各ポイントから 3 分間の動画を記録した⁷¹。その後、画像処理ソフト（ImageJ 1.47、National Institute of Mental Health、アメリカ）を用いて胃幽門部を描画し、断面積を算出した。胃幽門部の収縮回

数は来研時、60分間の安静もしくは運動直後、60分間の安静もしくは運動10分後、60分間の安静もしくは運動20分後、60分間の安静もしくは運動30分後において、各ポイントから3分間の胃幽門部の動きを動画として記録し、3分間当たりの胃幽門部の収縮回数を測定した⁷²。

6. 消化管血流量

CA および SMA の血流量は、超音波ドップラー血流計（LOGIQ3、GE Healthcare、アメリカ）を用いて、心拍数、平均血流速度および血管径を測定し、算出した。心拍数は被験者の胸部に電極を貼り、3点誘導法を用いて心電図波形を記録した（MEG2000、日本光電、日本）。CA および SMA の平均血流速度（mean blood velocity: MBV）および血管径は、5MHz のコンベックス型プローブを用いて測定を行った。測定の際は被験者の腹部にプローブを当て、各動脈の血管走行角度とドップラービームの角度が CA は 45°、SMA は 60°になるよう設定した。各動脈の MBV は各ポイントにおいて1分間測定を行った。各動脈の血管径は超音波診断装置（LOGIQ-e、GE Healthcare、アメリカ）を用いて、血管の横断画像を各ポイントにおいて30秒描写し、画像処理ソフト（ImageJ 1.47、National Institute of Mental Health、アメリカ）を用いて血管径を測定した。心電図波形、心拍数、MBV 波形は A/D 変換機（PowerLab 4/26、ADInstruments、オーストラリア）を用いて、20kHz にてアナログデジタル変換を行い、コンピューターに取り組んだ。記録された心電図波形と各動脈の MBV 波形を、高速フーリエ変換を介して、1心拍ごとの MBV を求めた。CA および SMA は呼吸により測定部位を一定に保つことが難しく、測定部位が血管の中心から外れた場合は MBV が低く算出される¹¹。そこで、先行研究の測定方法を踏襲し、1分間の MBV 測定データを、速度が速い順に並べ替えを行い、最も速い流速10拍分の平均の値を MBV とした。CA および SMA の MBV と血管径より、血流量を求めた。胃運動および血流量の測定は、測定の訓練を受けた技術者が行った。

7. 統計解析

すべての統計処理には SPSS Statistics version 23.0 (IBM SPSS Statistics version 23.0、日本 IBM、日本) を用いた。統計量は平均値 ± 標準偏差で示した。すべての測定項目において、統計処理前に Shapiro-Wilk テストを用い、正規性の検定を行った。すべての項目において正規性が確認された為、下記の検定を行った。空腹時における試行間の変化は一元配置の分散分析によって、有意性を検定した。一元配置の分散分析で試行間に有意な差が認められた項目は、Bonferroni の方法にて多重比較を行った。運動実施の有無と水の摂取の有無を要因とした測定項目の変化については、二元配置の分散分析によって、その有意性を検定した。二元配置の分散分析で試行間に有意な差が認められた項目は、Bonferroni の方法にて多重比較を行った。二元配置の分散分析において試行-時間の交互作用が認められた場合は、単純主効果の検定を行った。運動実施の有無、水の摂取の有無、時間を要因とした測定項目の変化については、三元配置の分散分析によって、その有意性を検定した。三元配置の分散分析で試行間に有意な差が認められた項目は、Bonferroni の方法にて多重比較を行った。三元配置の分散分析において運動実施の有無-時間、運動実施の有無-水の摂取の有無、水の摂取の有無-時間の交互作用が認められた場合は、単純主効果の検定を行った。試行間の関連性の検定には Pearson の相関分析を用いた。検定の有意水準は 5% とし、P 値が 5% 未満の時に有意とした。また、P 値が 5% 未満を満たすことなく、10% 未満であった場合は傾向とした。

第 3 節 結果

1. 測定前日の夕食のエネルギー摂取量

4 試行の前日の 18 時以降のエネルギー摂取量は 879 ± 179 kcal であった。栄養素の割合は脂質 $28 \pm 5\%$ (27.8 ± 9.3 g)、炭水化物 $57 \pm 7\%$ (121.3 ± 28.3 g)、タンパク質 $28 \pm 5\%$

(33.7 ± 12.5 g) であった。

2. 各試行当日の統制

4 試行当日の体重について、各試行間に有意な差は見られなかった（安静： 67.2 ± 8.1 kg、安静+水摂取： 66.5 ± 8.0 kg、運動： 67.2 ± 7.8 kg、運動+水： 66.4 ± 7.5 kg； $P=0.592$ ）。各試行の空腹時の主観的食欲度（空腹感、満腹感、甘いもの、酸っぱいもの、脂っこいもの、しょっぱいものへの欲求）に有意な差は見られなかった（ $P>0.05$ ）。各試行の空腹時の胃幽門部断面積に有意な差は見られなかった（安静： 3.8 ± 1.2 cm²、安静+水摂取： 4.0 ± 1.2 cm²、運動： 3.4 ± 0.9 cm²、運動+水： 3.9 ± 0.7 cm²； $P=0.361$ ）。胃幽門部収縮回数に有意な差は見られなかった（安静： 0.9 ± 0.3 回、安静+水摂取： 1.3 ± 1.0 回、運動： 1.8 ± 0.7 回、運動+水： 0.9 ± 0.5 回； $P=0.051$ ）。各試行の空腹時における、白血球数（安静： 5528.6 ± 1223.1 μ L、安静+水摂取： 5628.6 ± 1299.4 μ L、運動： 5450.0 ± 1058.1 μ L、運動+水： 5592.9 ± 1014.9 μ L）、赤血球数（安静： $521.3 \pm 18.3 \times 10^4/\mu$ L、安静+水摂取： $518.0 \pm 20.5 \times 10^4/\mu$ L、運動： $516.8 \pm 25.7 \times 10^4/\mu$ L、運動+水： $518.0 \pm 26.1 \times 10^4/\mu$ L）、血色素測定（安静： 15.7 ± 0.8 g/dL、安静+水摂取： 15.7 ± 0.7 g/dL、運動： 15.6 ± 0.9 g/dL、運動+水： 15.7 ± 0.9 g/dL）、ヘマトクリット（安静： 47.4 ± 2.2 %、安静+水摂取： 46.9 ± 1.8 %、運動： 47.1 ± 2.6 %、運動+水： 46.9 ± 2.3 %）、MCV（安静： 90.9 ± 3.0 fL、安静+水摂取： 90.6 ± 2.7 fL、運動： 91.2 ± 2.9 fL、運動+水： 90.5 ± 2.8 fL）、MCH（安静： 30.2 ± 0.9 pg、安静+水摂取： 30.2 ± 1.0 pg、運動： 30.2 ± 0.8 pg、運動+水： 30.2 ± 1.1 pg）、MCHC（安静： 33.2 ± 0.6 g/dL、安静+水摂取： 33.4 ± 0.9 g/dL、運動： 33.2 ± 0.6 g/dL、運動+水： 33.4 ± 0.8 g/dL）、血小板数（安静： $24.8 \pm 4.5 \times 10^4/\mu$ L、安静+水摂取： $24.8 \pm 4.9 \times 10^4/\mu$ L、運動： $24.4 \pm 4.0 \times 10^4/\mu$ L、運動+水： $24.3 \pm 4.7 \times 10^4/\mu$ L）に有意な差は見られなかった（ $P>0.05$ ）。各試行の空腹時における、遊離脂肪酸、グルコース、インスリン、PYY 濃度に有意な差は見られなかった（ $P>0.05$ ）。各試行の空腹時におけるアシル

化グレリンは運動試行と比較して運動+水摂取試行は高値を示した ($P < 0.05$)。各試行の空腹時における、遊離脂肪酸、グルコース、インスリン、PYY、アシル化グレリン濃度を Table 3 に示した。

Table 3. Fasting concentrations of free fatty acids, glucose, insulin, PYY and acylated ghrelin among the four trials

	Rest	Rest+W	EX	EX+W	P
Free fatty acids (mmol/L)	0.4 ± 0.2	0.4 ± 0.2	0.4 ± 0.1	0.3 ± 0.2	NS
Glucose (mg/dL)	87.8 ± 4.7	88.4 ± 4.9	90.2 ± 4.8	88.3 ± 3.4	NS
Insulin (μU/mL)	3.6 ± 1.6	4.0 ± 2.1	4.6 ± 3.4	4.9 ± 3.8	NS
Peptide YY (fmol/mL)	0.7 ± 0.4	0.7 ± 0.5	0.7 ± 0.4	0.7 ± 0.4	NS
Acylated ghrelin (pg/dL)	14.8 ± 4.6	22.0 ± 10.3	13.7 ± 4.5	19.9 ± 8.0 [#]	0.016

Data are means ± SD. Data were analysed using one-factor ANOVA followed by a multiple comparison test using the Bonferroni method. NS: not significant difference. W: 500 mL of water intake, EX: running for 60 min at 70% of maximum heart rate.

[#] Different from the exercise trial (P < 0.05).

3. 運動における生理的応答

運動試行および運動+冷水摂取試行における 60 分間のランニング中の平均心拍数および RPE は試行間で有意な差は見られなかった（平均心拍数：運動：165±10 bpm/分、運動+水：162±7 bpm/分；P=0.062, RPE：運動：14±1、運動+水：13±1；P=0.068）。

4. エネルギー摂取量

試験食の自由摂取におけるエネルギー摂取量は、二元配置の分散分析において、有意な運動の有無による主効果（P=0.014）および交互作用（運動の有無-水摂取の有無）が見られた（安静：2002±856 kcal、安静+水摂取：1761±689 kcal、運動：1716±826 kcal、運動+水：1696±832 kcal；P=0.028）（Fig. 9）。単純主効果の検定より、水の摂取を行わない場合、安静試行と比較して、運動試行でエネルギー摂取量が減少した（P=0.006）。また、運動を行わない場合、安静試行と比較して安静+水摂取試行は 12%（P=0.036）エネルギー摂取量が減少した。

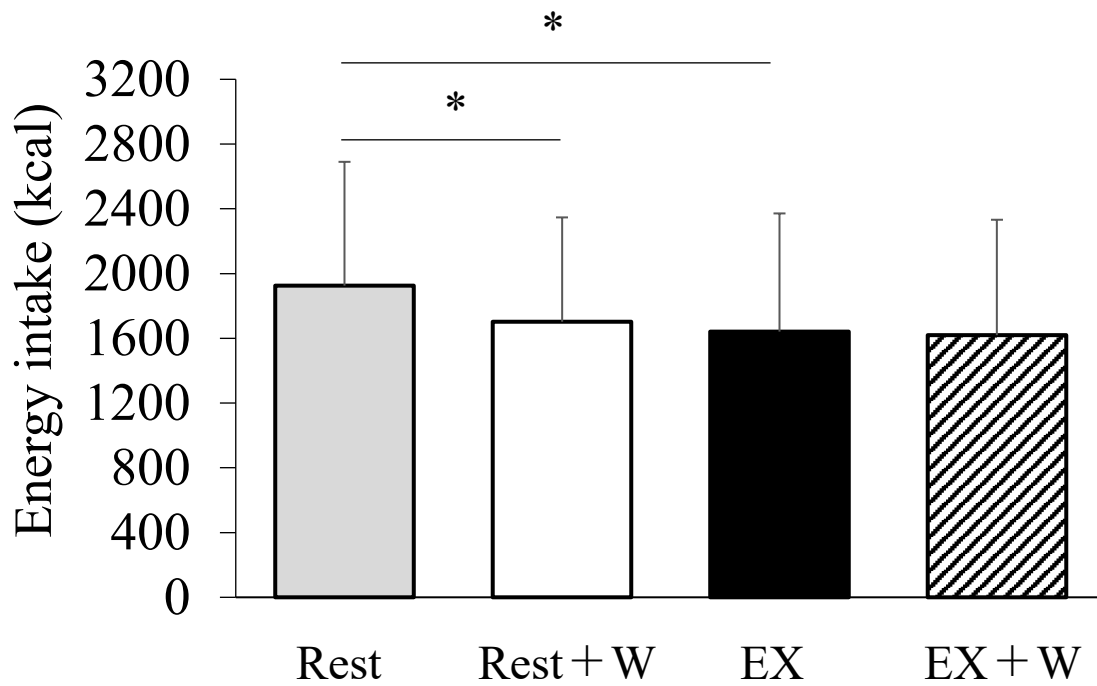


Fig. 9. Energy intake at ad libitum test meal: 30 min after rest or exercise

Data are means \pm SD. Means were compared using two-factor ANOVA for the main effect of the trial followed by a multiple comparison test using the Bonferroni method. W: 500 mL of water intake, EX: running for 60 min at 70% of maximum heart rate. * Significantly different from the rest trial ($P < 0.05$).

5. 主観的食欲度

被験者の主観的な空腹感、甘いもの、酸っぱいもの、脂っこいもの、しょっぱいものへの欲求は、三元配置の分散分析において有意な時間の主効果 ($P < 0.05$) がみられたが、運動の有無や水の摂取の有無による主効果および交互作用はみられなかった ($P > 0.05$)。主観的な満腹感には有意な時間の主効果 ($P < 0.05$) および、水の摂取の有無と時間の交互作用が見られた ($P = 0.011$)。単純主効果の検定より、安静+水摂取試行および運動+水摂取試行では、水摂取を行った直後において、水摂取を行わない試行と比較して満腹感が高値を示した ($P = 0.023$)。

「胃の不快感は感じますか?」、「今食事をしたいですか?」という質問においては、三元配置の分散分析において時間の主効果のみみられた ($P < 0.05$)。「胃の張りを感じますか?」という質問においては、飲水の有無と時間の主効果がみられ ($P < 0.05$)、その後の多重比較において、安静試行および運動試行と比較して、安静+水摂取試行および運動+水摂取試行において高値を示した。「今のどが渴いていますか?」という質問においては、試行と時間の主効果および試行と時間の交互作用がみられた ($P < 0.05$)。その後の単純主効果の検定において、60 分後において、安静+水摂取試行と比較して安静試行および運動試行で高値を示した ($P < 0.05$)。また、70 分後においては安静+水摂取試行および運動+水摂取試行と比較して運動試行で高値を示した ($P < 0.05$)。

6. 胃幽門部断面積および幽門部収縮回数

胃幽門部断面積において有意な飲水の有無による主効果 ($P < 0.001$)、時間の主効果 ($P < 0.001$) および交互作用 (飲水-時間) が見られた ($P < 0.001$) (Fig. 10)。60 分間の安静もしくは運動直後、60 分間の安静もしくは運動 10 分後、60 分間の安静もしくは運動 20 分後、60 分間の安静もしくは運動 30 分後において水を摂取した試行(安静+水摂取試行、運動+水摂取試行)は水を摂取しなかった試行(安静試行、運動試行)と比較して有意に胃幽門部断面積が高値を示した ($P < 0.05$)。

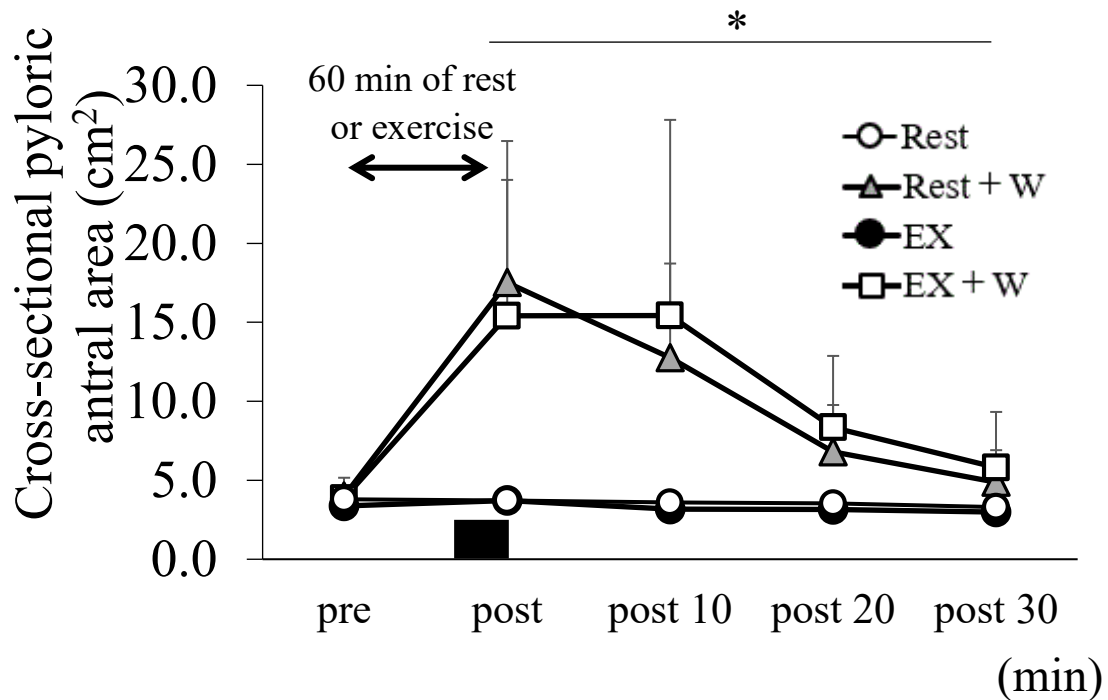


Fig. 10. Cross-sectional gastric pyloric antral area before and after rest or exercise

Data are means \pm SD. The black rectangle indicates consuming water in 5 min at the control + water trial and the exercise + water trial. W: 500 mL of water intake, EX: running for 60 min at 70% of maximum heart rate. Data were analysed using three-factor ANOVA followed by a multiple comparison test using the Bonferroni method. There was a significant main effect of water intake ($P < 0.001$), time ($P < 0.001$) and water intake-time interaction ($P < 0.001$). Trials including water intake (Rest + water intake, Exercise + water intake) showed higher pyloric antral area compared with no water intake trials.

* Significantly different from the no water intake trial (i.e., the rest and exercise trials) ($P < 0.05$).

胃幽門部収縮回数は有意な運動-飲水の交互作用 ($P < 0.001$) および時間-飲水の交互作用 ($P = 0.007$) が見られた (Fig. 11)。安静+水摂取試行において、運動+水摂取試行と比較して胃幽門部収縮回数が高値を示した ($P = 0.004$)。60分間の安静もしくは運動20分後、60分間の安静もしくは運動30分後において、水摂取を行った試行 (安静+水摂取試行、運動+水摂取試行) は水摂取を行わなかった試行 (安静試行、運動試行) と比較して胃幽門部収縮回数が高値を示した ($P < 0.05$)。

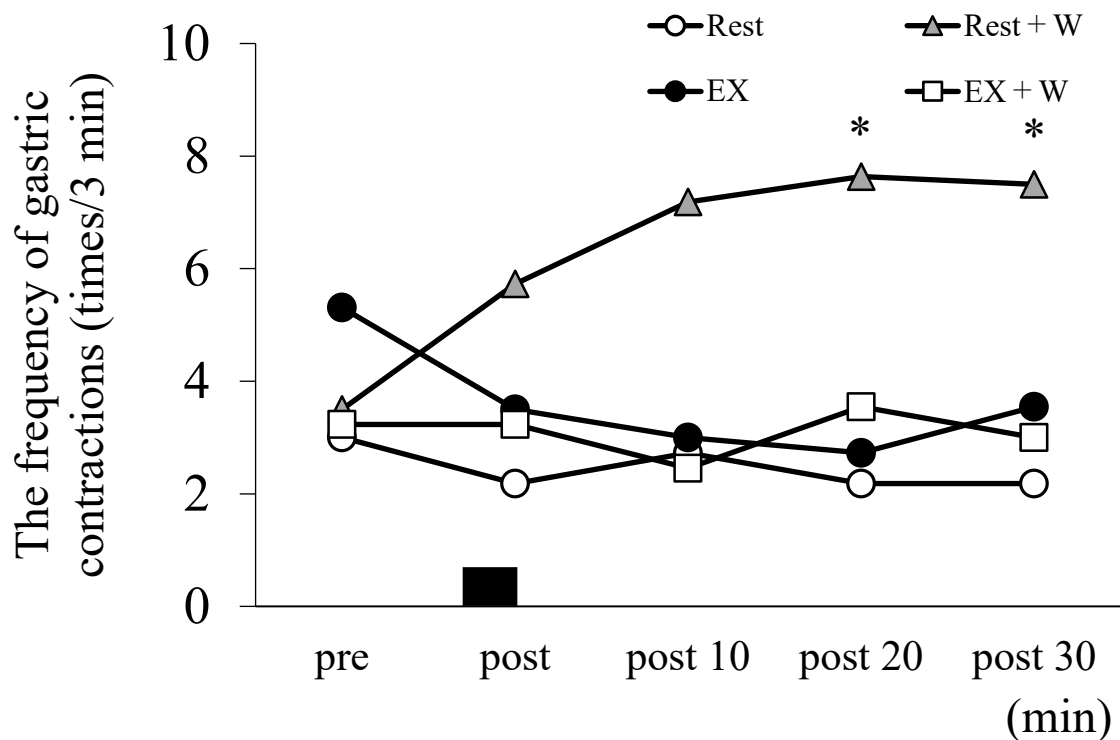


Fig. 11. The frequency of gastric contractions before and after rest or exercise

Data are means \pm SD. The black rectangle indicates consuming water in 5 min at the control + water trial and the exercise + water trial. W: 500 mL of water intake, EX: running for 60 min at 70% of maximum heart rate. Data were analysed using three-factor ANOVA followed by a multiple comparison test using the Bonferroni method. There was a significant exercise-water intake interaction ($P < 0.001$) and water intake-time interaction ($P = 0.007$).

* Significantly different from the no water intake trials (i.e., the rest and exercise trials) ($P < 0.05$).

7. 消化管血流量

SMA の血流量は有意な時間の主効果 ($P = 0.001$) のみ見られた (Fig. 12)。また、運動を実施した試行 (運動試行、運動+水摂取試行) は、運動を実施しなかった試行 (安静試行、安静+水摂取試行) と比較して、血流量が低下する傾向にあった ($P = 0.064$)。

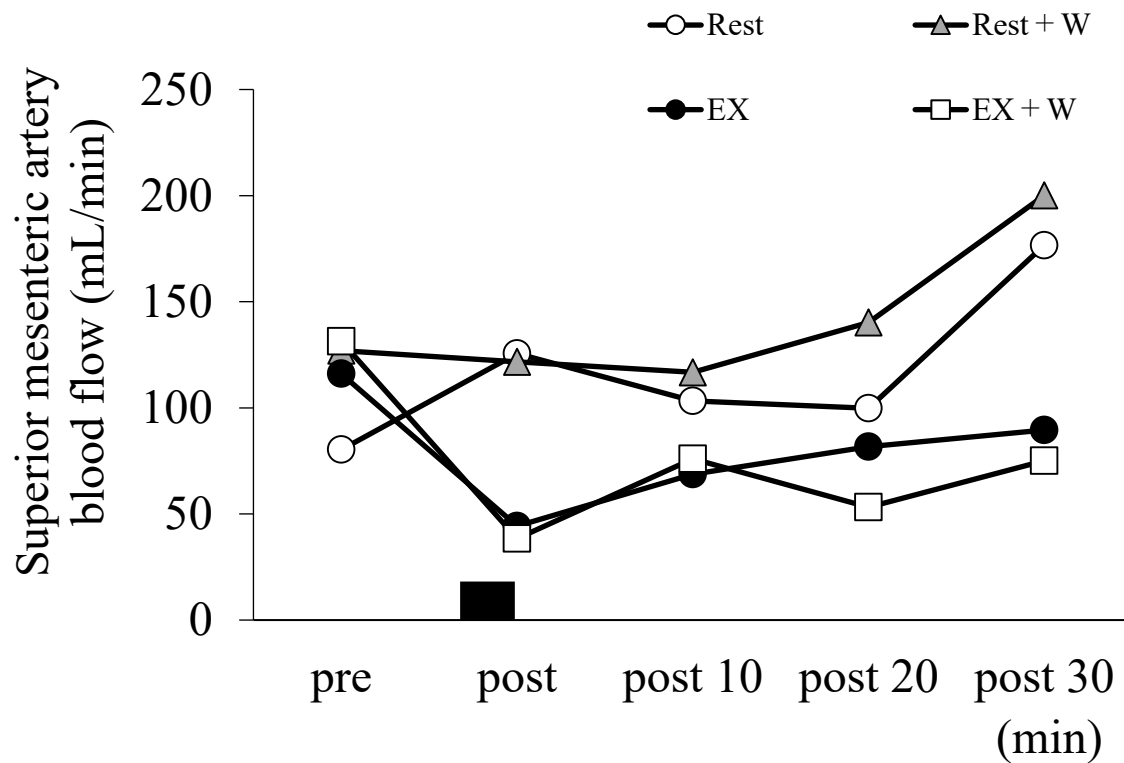


Fig. 12. Blood flow responses in superior mesenteric artery (SMA)

Data are means \pm SD. The black rectangle indicates consuming water in 5 min at the control + water trial and the exercise + water trial. W: 500 mL of water intake, EX: running for 60 min at 70% of maximum heart rate. Data were analysed using three-factor ANOVA followed by a multiple comparison test using the Bonferroni method. There was a significant main effect of time ($P < 0.001$). Trials including exercise (i.e., the exercise and exercise + water intake trials) tend to lower blood flow compared with no exercise trials.

CA の血流量は有意な運動および飲水の主効果、時間の主効果および交互作用が見られなかった ($P > 0.05$) (Fig. 13)。

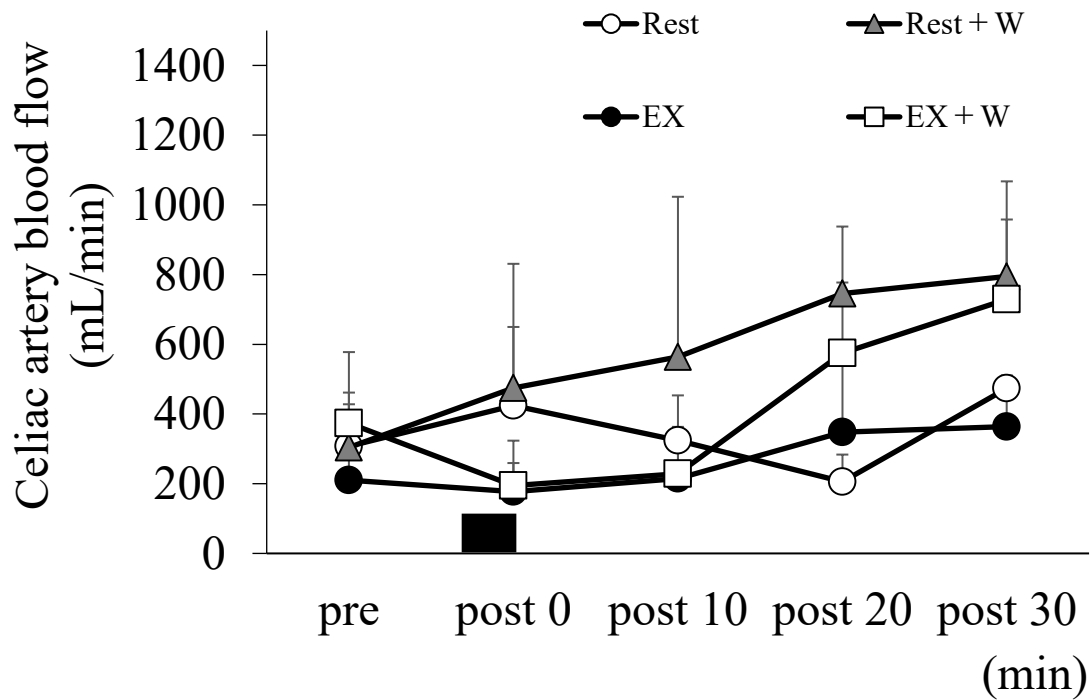


Fig. 13. Blood flow responses in celiac artery (CA).

Data are means \pm SD. The black rectangle indicates consuming water in 5 min at the control + water trial and the exercise + water trial. W: 500 mL of water intake, EX: running for 60 min at 70% of maximum heart rate. Data were analysed using three-factor ANOVA followed by a multiple comparison test using the Bonferroni method. There was no significant main effect of exercise, water intake and time and interaction ($P > 0.05$).

8. 血液項目

遊離脂肪酸濃度は有意な運動の有無による主効果がみられた ($P < 0.001$)。その後の多重比較において、運動を実施した試行 (運動試行および運動+水摂取試行) は運動を実施しなかった試行 (安静試行、安静+水摂取試行) と比較して高値を示した ($P < 0.001$)。白血球数は有意な運動の有無による主効果がみられた ($P < 0.001$)。その後の多重比較において、運動を実施した試行 (運動試行および運動+水摂取試行) は運動を実施しなかった試行 (安静試行、安静+水摂取試行) と比較して高値を示した ($P < 0.001$)。赤血球数は有意な運動の有無による主効果がみられた ($P < 0.05$)。その後の多重比較において、運動を実施した試行 (運動試行および運動+水摂取試行) は運動を実施しなかった試行 (安静試行、安静+水摂取試行) と比較して高値を示した ($P < 0.05$)。MCV 量は有意な運動の有無による主効果がみられた ($P < 0.05$)。その後の多重比較において、運動を実施した試行 (運動試行および運動+水摂取試行) は運動を実施しなかった試行 (安静試行、安静+水摂取試行) と比較して低値を示した ($P < 0.05$)。血小板数は有意な運動の有無による主効果がみられた ($P < 0.001$)。その後の多重比較において、運動を実施した試行 (運動試行および運動+水摂取試行) は運動を実施しなかった試行 (安静試行、安静+水摂取試行) と比較して高値を示した ($P < 0.001$)。グルコース濃度、血色素測定、MCH 量、MCHC 濃度、ヘマトクリット率、インスリン濃度、アシル化グレリン濃度は運動の有無による主効果、飲水の有無による主効果、交互作用が見られなかった ($P > 0.05$)。血液指標の実験開始から自由摂取の食事調査終了までの 2 時間半における、各試行の上昇曲線化面積を Table 4 に示した。さらに、インスリン、PYY、アシル化グレリンの実験開始から自由摂取の食事調査前までの 1 時間半における、各試行の上昇曲線化面積を Table 5 に示した。

Table 4. Incremental area under the curve values of blood measurements over 2.5 h

	Rest	Rest + W	EX	EX + W	P Exercise	P Water intake	P Interaction
Free fatty acids (mmol·2.5h/L)	3.7 ± 4.9	6.3 ± 9.2	66.2 ± 25.4	58.4 ± 31.2	< 0.001	NS	NS
Glucose (mg·2.5h /dL)	469.3 ± 663.1	535.7 ± 724.3	835.7 ± 649.0	808.9 ± 606.3	NS	NS	NS
White blood cell count (μL·2.5h)	5142.9 ± 16824.2	6857.1 ± 14080.0	87750.0 ± 65456.9	92785.7 ± 88045.8	< 0.001	NS	NS
Red blood cell count (×10 ⁴ ·2.5h/μL)	340.7 ± 420.4	369.6 ± 386.1	1287.9 ± 1404.7	1131.4 ± 1033.0	0.008	NS	NS
Hemoglobin (g·2.5h /dL)	12.9 ± 14.4	16.3 ± 19.7	34.8 ± 35.0	31.1 ± 27.1	NS	NS	NS
Hematocrit (%·2.5h)	28.9 ± 39.3	45.2 ± 52.7	82.7 ± 120.1	88.3 ± 91.3	NS	NS	NS
MCV (fL·2.5h)	37.5 ± 50.2	60.0 ± 60.6	8.6 ± 17.4	19.3 ± 29.7	0.010	NS	NS
MCH (pg·2.5h)	20.3 ± 21.8	26.3 ± 31.1	12.2 ± 17.3	22.3 ± 22.1	NS	NS	NS
MCHC (g·2.5h/dL)	36.2 ± 36.0	29.6 ± 44.8	45.1 ± 42.5	39.0 ± 30.4	NS	NS	NS
Platelet count (×10 ⁴ ·2.5h/μL)	13.3 ± 20.9	43.4 ± 101.3	169.1 ± 109.6	146.6 ± 100.6	< 0.001	NS	NS
Insulin (μU·2.5h/mL)	1618.0 ± 972.5	1567.9 ± 940.4	1849.4 ± 912.2	1857.8 ± 1624.7	NS	NS	NS
Peptide YY (fmol·2.5h /mL)	4.5 ± 3.9	7.8 ± 12.0	11.6 ± 17.1	11.6 ± 17.1	NS	NS	NS
Acylated ghrelin (pg·2.5h/dL)	685.1 ± 749.6	77.3 ± 125.0	540.3 ± 601.4	369.2 ± 706.9	NS	NS	NS

Data are means \pm SD. Data were analysed using two-factor ANOVA followed by a multiple comparison test using the Bonferroni method. NS: not significant difference, MCV: mean corpuscular volume, MCH: mean corpuscular hemoglobin, MCHC: mean corpuscular hemoglobin concentration, W: 500 mL of water intake, EX: running for 60 min at 70% of maximum heart rate.

Table 5. Incremental area under the curve values of insulin, peptide YY and acylated ghrelin over 1.5 h

	Rest	Rest+W	EX	EX+W	P Exercise	P Water intake	P Interaction
Insulin ($\mu\text{U} \cdot 1.5 \text{ h/mL}$)	45.0 \pm 63.9	34.9 \pm 56.8	82.4 \pm 80.9	57.7 \pm 77.2	NS	NS	NS
Peptide YY ($\text{fmol} \cdot 1.5 \text{ h /mL}$)	1.1 \pm 2.1	4.5 \pm 8.0	5.1 \pm 11.1	3.1 \pm 3.3	NS	NS	NS
Acylated ghrelin ($\text{pg} \cdot 1.5 \text{ h /dL}$)	432.3 \pm 602.6	62.2 \pm 119.8	272.2 \pm 384.9	161.9 \pm 307.3	NS	NS	NS

Data are means \pm SD. Data were analysed using two-factor ANOVA followed by a multiple comparison test using the Bonferroni method. NS: not significant difference. W: 500 mL of water intake, EX: running for 60 min at 70% of maximum heart rate.

第4節 考察

本研究の目的は、運動後の栄養補給が求められる時間帯の水摂取が胃運動および食欲に及ぼす影響を健常成人男性で検討することであった。本研究で得られた主な知見は、運動後は水の摂取の有無に関わらず、安静時と比較してエネルギー摂取量が減少することであった。さらに、先行研究と同様、安静時の冷水（2°C）摂取は胃幽門部断面積を増加させ、その後の食事からのエネルギー摂取量を減少させることが明らかとなった。一方、飲料摂取による運動後の胃内容排出の遅延は、運動後のエネルギー摂取量の減少の一因であると考えられてきた。本研究では、500 mL の冷水（2°C）摂取した試行（安静+水摂取試行、運動+水摂取試行）は、冷水を摂取しなかった試行（安静試行、運動試行）と比較して、胃幽門部断面積が有意に高値を示したものの、運動試行と運動+水摂取試行間にエネルギー摂取量に有意な差が見られなかったことから、運動後の冷水（2°C）摂取による一過性の胃の伸展はエネルギー摂取量の低下に対し影響する要因でない可能性が示唆された。

運動後の飲料摂取による胃運動と食欲の変化を検討した Kashima らは、サイクリング運動後の糖・タンパク質飲料摂取のタイミングが胃内容排出および主観的食欲度に及ぼす影響を検討しており、運動終了5分後に400 mL の糖・タンパク質飲料摂取を行った試行は、運動終了30分後に飲料を摂取した試行と比較して、飲料摂取30分後において食への欲求、空腹感、予想の摂食量、主観的食欲度から算出した食欲スコアが低下することを報告している⁵⁹。本研究の結果は、運動後の主観的食欲の有意な変化は見られないものの、運動後は冷水（2°C）の摂取の有無に関わらず、安静時と比較してエネルギー摂取量が減少することを報告しており、Kashima らと異なった結果となった。結果の差異を説明する要因としては、運動後に摂取する飲料の組成が考えられる。胃内容排出は摂取する飲料のエネルギー含有量および組成によって調節されることが報告されている⁸⁷。エネルギー含有飲料は水と比較して胃内容排出が遅延すると既存の研究により

報告されており⁸⁸、本研究において運動後の冷水（2°C）の摂取は、糖・タンパク質飲料と比較して胃内容排出が促進した可能性がある。安静時において、飲料摂取による胃の膨張はエネルギー摂取量の減少に影響を及ぼすことが示唆されているが⁷³、エネルギーを含まない水を使用した本研究においては、胃内容排出が促進し、エネルギー摂取量が減少するほどの胃の膨満が起こらなかった可能性が考えられる。また、Kashima らの研究と異なり、本研究では主観的食欲の調査に加えて、食事からのエネルギー摂取量の調査を行った。視覚的アナログスケールを用いた主観的食欲の測定は、食欲の評価として広く用いられているが⁶⁹、食事前の主観的食欲の値は、その後の自由摂取の食事調査におけるエネルギー摂取量と関連しないという報告もあり⁸⁹、食欲の評価に用いる指標が異なったことが、先行研究との差を説明する可能性が考えられる。

課題研究 1 では食事前の異なる温度の水の摂取が胃運動とエネルギー摂取量に及ぼす影響を検討し、2°C の冷水の摂取は、60°C の温水の摂取と比較して、その後の胃運動とエネルギー摂取量を減少させることを明らかにした。さらに食事前の水の摂取がエネルギー摂取量に及ぼす影響について、健常成人を対象に検討した Corney らの研究では、食事直前の 568 mL の水の摂取は、その後のエネルギー摂取量を 22%減少させたことを報告している⁶⁸。本研究では安静時における 500 mL の冷水（2°C）の摂取は安静試行と比較してエネルギー摂取量を 12%減少させたことから、Corney らの研究結果を支持する結果となった。さらに、運動後は末梢への血流の再分配が起こり、一時的な消化管の虚血が起こるなど消化機能の低下が起こり、運動後の食欲が低下する可能性が報告されており¹³、この運動直後の時点での 500 mL の冷水（2°C）の摂取は、消化不良を引き起こし、エネルギー摂取量の減少に相加的に影響すると予想された。冷水摂取を行った試行（安静+水摂取試行、運動+水摂取試行）は、水摂取後の胃幽門部断面積が高値を示した。さらに安静+水摂取試行では水摂取後に胃幽門部収縮回数が増加したものの、運動+水摂取試行では、運動試行と比較して胃幽門部収縮回数に差が見られなかったこと

から、運動後は胃の運動性が低下した可能性が考えられる。しかし、本研究では、運動試行および運動＋水摂取試行の両試行で、小腸および大腸に血液を供給し、消化活動の維持を行う SMA の血流量⁴¹が運動直後に減少していたことから、水摂取の有無に関わらず、運動を行った試行では、運動後に消化機能の低下状態であったことが予想される。運動後は運動試行と運動＋水摂取試行の両試行で、安静試行と比較して 14%と 15%のエネルギー摂取量の低下が確認されているが、両試行の主観的食欲およびエネルギー摂取量に有意な差は見られなかった。本研究の結果から、運動後の消化不良が起きている時点においては、水摂取による胃の伸展がエネルギー摂取量に及ぼす影響が小さいことが考えられる。

また、本研究においては、水摂取の有無による食欲関連ホルモンおよび血液指標の変化は安静時、運動時を問わず見られなかったことから、安静試行と比較してエネルギー摂取量が減少した安静＋水摂取試行においても、冷水（2°C）の摂取によるエネルギー摂取量の低下には、食欲関連ホルモンが介していない機構が存在することが示唆された。安静時におけるエネルギー含有飲料摂取がその後のエネルギー摂取量に及ぼす影響を検討した研究では、食事前の 500 mL のエネルギー含有飲料（750 kcal）は胃幽門部断面積を増加させ、機械的な胃の伸展がエネルギー摂取量の減少に寄与している可能性が指摘されている⁷³。本研究は水を使用した研究であるが、500 mL の水（2°C）摂取後に先行研究と同様に胃幽門部断面積が高値を示し、エネルギー摂取量が減少したことから、安静時における 500 mL の冷水の摂取後は、胃幽門部の拡張を介してエネルギー摂取量が減少した可能性が考えられる。

第 5 節 結論

本研究から、若年健常男性において、運動後の水の摂取は、一過性に胃幽門部断面積を増加させるが、その後の食欲には影響を及ぼさないことが明らかとなった。安静時に

においては 500 mL の 2°C の冷水の摂取により、胃幽門断面積が高値を示し、その後のエネルギー摂取量が減少した。運動後に 500 mL の冷水 (2°C) を摂取した試行においても、胃幽門断面積が高値を示した。しかし、水摂取の有無に関わらず、60 分間における 70%VO_{2max} のランニング運動後は SMA の血流量が減少し、主観的食欲は変化しないものの、同程度にエネルギー摂取量が減少することが明らかとなった。これらの所見は、運動後のエネルギー摂取量の減少に対して、運動後の冷水の摂取による胃の膨満が及ぼす影響は小さいことを示しており、運動後の食欲の減退に対する打開策の検討の一助となると考えられる。

第4章

運動後における異なる温度のタンパク質含有飲料摂取が

胃運動および食欲に与える影響

第1節 緒言

1. 背景

課題研究2では冷水摂取の有無にかかわらず運動後はエネルギー摂取量が低下し、その要因としては運動による消化管血流量の低下が関連している可能性があり、冷水摂取後の一時的な胃幽門部断面積の増加がエネルギー摂取量に及ぼす影響は小さいことが示唆された。現在まで、アスリートにおいて運動後にエネルギー摂取量を増加させるための取り組みとして、運動中^{48,60,61,62}、運動後の環境を低温にする⁶³、または運動後に水浴する方法⁶⁴が検討されてきた。身体の外部からの冷却は食欲を亢進させる血中のグレリン濃度を増加させることが報告されており⁹⁰、運動中や運動後の外部温度がエネルギー摂取量に影響を及ぼす一因であることが考えられる。反対に、運動中や運動後に摂取する飲料の温度を変化させ、体内部の温度を変化させる方策は主に、核心温の低下による運動パフォーマンスへの影響⁹¹や脱水予防⁹²などの観点から検討されてきており、エネルギー摂取量に及ぼす影響について検討されていないため、運動誘発性食欲不振の打開策の一助となり得るか不明である。摂取する飲料の温度は食欲を調節する因子である胃運動に影響を及ぼすことがいくつかの研究で報告されており^{52,53,55,56}、温かい飲料の摂取は胃運動(胃電位または胃内容排出)を亢進させることが報告されている。また、課題研究1において安静時の温水の摂取により、冷水の摂取と比較して胃幽門部収縮回数およびエネルギー摂取量の高値を報告している(課題研究1)⁹³。しかし、運動中や運動後に摂取する飲料の温度を変化させることによる内部からの温度変化がエネルギー摂取量に及ぼす影響を検討した研究は皆無である。さらに、現在までに運動後の食欲

を亢進する方法としての運動中、運動後の寒冷暴露や運動後の冷浴には特殊な施設や機械が必要であり、日々運動を行うアスリートへの応用にはより簡易で実現可能な方策が求められる。

2. 目的

本研究では、健常成人男性において運動後に摂取するタンパク質含有飲料の温度が胃運動および食欲に及ぼす影響を検討することとした。

第2節 方法

1. 被験者

若年健常男性 12 名を対象とした（年齢 24.2 ± 2.3 歳、身長 1.71 ± 0.04 m、体重 65.9 ± 6.0 kg、体格指数 22.7 ± 1.6 kg/m²、最大酸素摂取量 53.5 ± 7.7 mL/kg/分 [平均値 \pm 標準偏差]）。すべての被験者は服薬および喫煙習慣がなく、過去 3 か月に渡り大きな体重変動が無い者とした。対象者にはあらかじめ、研究の目的、方法および実験に伴う苦痛、危険性について十分な説明を行い、書面にて参加に対する同意を得た。また、個人の自由意志による参加を尊重し、途中で研究から離脱する権利を有することを伝えた。本研究は、ヘルシンキ宣言を尊重し、対象者の人権および利益の保護に配慮した研究計画を行い、早稲田大学研究倫理委員会の承認（承認番号: 2019-016）を得て実施した。

2. 事前測定

本実験時における運動強度を設定するため、被験者は最大漸増運動負荷試験を実施し、最大心拍を算出した（JOG NOW 700、Technogym、Italy）。まず、被験者は走行速度と酸素消費量の関係を明らかにするために、4 分×4 段階の計 16 分間の最大下漸増負荷試験を行った。被験者の体力レベルによって走行開始時の速度は 7-8 km/h に設定され、4 分

ごとに 1.5 km/h ずつ速度を増加させた。試験中の酸素消費量および二酸化炭素産生量は breath-by-breath の呼気ガス分析によって測定した (Quark CPET、COSMED、Italy)。被験者の主観的な運動強度を 6 から 20 までのボルグスケールにて測定した⁸⁵。負荷試験の間、被験者の心拍数はワイヤレス心拍計を用いて連続的に測定した (Polar RCX3、Polar Electro、Finland)。最大漸増運動負荷試験終了時から 15 分間を休憩時間とし、その後、最大心拍数を算出するために最大運動負荷試験を行った⁸⁶。走行開始時のトレッドミルの傾斜は 3.5%とし、被験者が疲労困憊に至るまで 3 分ごとに 2.5%の傾斜を追加した⁸⁶。走行開始時の速度は被験者の体力レベルに合わせて設定した。以下の項目の 2 つ以上に当てはまる場合、被験者が疲労困憊に達したとして最大運動負荷試験を終了した。1) 心拍数が年齢予測最大心拍数 (220-年齢) に達した、2) 呼吸交換比が 1.15 以上である、3) 酸素摂取量がプラトーに達した。最大下漸増運動負荷試験および最大運動負荷試験の結果より、本実験中の走行速度を決定した。

3. 実験デザイン

すべての被験者は、1) 運動試行、2) 運動+冷飲料摂取試行 (2°C)、3) 運動+温飲料摂取試行 (60°C) の 3 試行に参加した。試行間は最低 6 日空けて実施した。実験当日の食欲およびエネルギー摂取量に影響することを避けるため、すべての被験者は実験期間において通常の食事摂取量を保ち、実験前日は激しい運動および飲酒を禁止された。被験者は各試行前日の入浴および入水時を除く起床時から就寝まで、1 軸加速度計 (ライフコーダーEX、株式会社スズケン、日本) を右腰部に装着し、歩数、低強度身体活動、中等度強度身体活動、高強度身体活動の測定を行った。被験者は 1 回目の実験の前日の 18 時以降に摂取した食事を計量し、記録を行った。2 回目、3 回目の実験前日は 1 回目の実験前日に摂取した食事内容に基づき、摂取する食事内容および量を統一した。被験者が実験前日に摂取した食品は栄養計算ソフトを用いて、エネルギー摂取量および栄養

素を解析した（エクセル栄養君 Ver 5.0、建帛社、日本）。対象者は 10 時間の絶食後、実験当日 08:50 に実験室に来研した。被験者は実験開始 2 時間前までコップ二杯（500 mL）の水を摂取することが可能であった。来研後、被験者は座椅子に座り半仰臥位で安静を保った。その後 09:00 よりすべての試行において、事前測定から求めた最大心拍数の 80%の強度で 30 分間のトレッドミル走行を行った。被験者の主観的な運動強度は Borg スケールを用いて、5 分おきに記録した。その後、運動+冷飲料摂取試行では、2°C のタンパク質含有飲料 300 mL を 3 分間で摂取した。運動+温飲料摂取試行では、60°C のタンパク質含有飲料 300 mL を 3 分間で摂取した。本実験で使用したタンパク質含有飲料は市販のホエイタンパク質粉末（21 g、82 kcal）（ザバス ホエイプロテイン 100、株式会社 明治、日本）を 2°C の冷水もしくは 60°C の温水で溶解し、作製した。摂取する飲料の温度は電子温度計にて測定を行った（testo 106、Testo K.K、日本）。溶解するための水の量は、タンパク質含有飲料の推奨量に従った。その後、すべての試行において被験者は半仰臥位にて 30 分間の座位安静を保った。その間、2 次元超音波診断装置を用いて被験者の胃幽門部を記録した。その後、被験者は自由摂取の食事量調査を行った。血液は 1 試行につき来研時、運動終了 5 分後、運動終了 35 分後、運動終了 95 分後の時間帯において、真空採血管を用いて対象者の静脈より採取した。血液項目として、遊離脂肪酸、グルコース、白血球数、赤血球数、血色素測定、ヘマトクリット、血小板数、MCV、MCH、MCHC、インスリン、アシル化グレリンを測定した。インスリン、アシル化グレリンは酵素免疫測定法にて、遊離脂肪酸、グルコース、白血球数、赤血球数、血色素測定、ヘマトクリット、血小板数、MCV、MCH、MCHC は酵素法にて、プレートリーダー（Sunrise Remote、Tecan Austria GmbH、オーストリア）および自動分析装置（JCA-BM8000、日本電子株式会社、日本）を用いて測定を行った。本実験の流れを Figure 14 に示した（Fig. 14）。

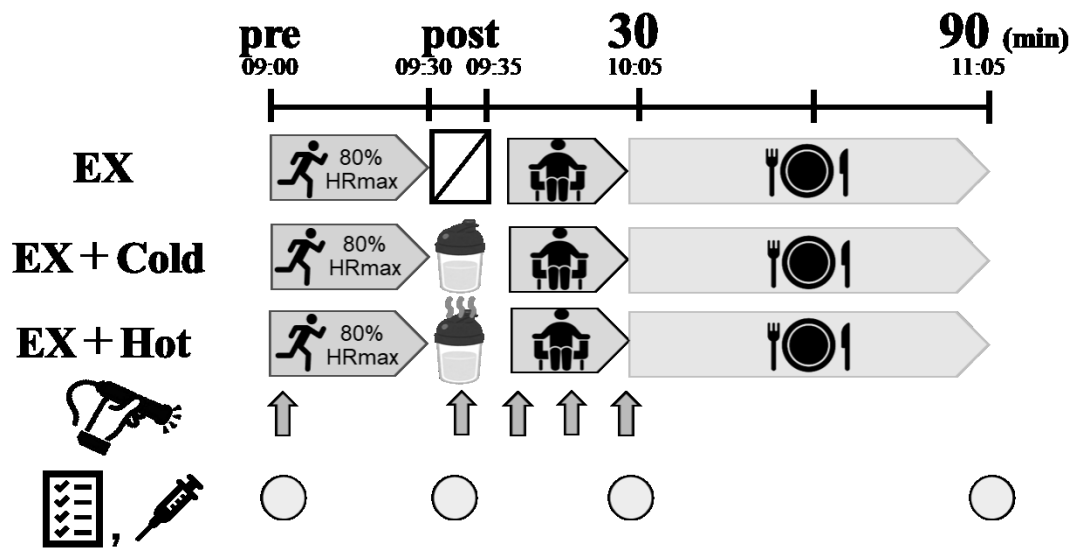


Fig. 14. A schematic presentation of the study protocol

Cold: 300 mL of protein-containing drink intake at 2°C, Hot: 300 mL of protein-containing drink intake at 60°C, EX: running for 30 min at 80% of maximum heart rate. HRmax: maximum heart rate. For the trials including exercise, participants ran for 30 min at 80% of maximum heart rate until 09:30. For the trials including protein-containing intake, participants consumed 300 mL of protein-containing drink at 2°C or 60°C for 3 min until 09:35. For all trials, participants sat in a chair in the laboratory until 10:05 to measure the gastric motility, and consumed ad libitum test meal until 11:05. Subjective feelings of appetite, gastric motility and blood parameters were measured at 09:00, 09:35, 10:05 and 11:05.

4. 主観的食欲度およびエネルギー摂取量の測定

実験で使用する試験食（コーンフレーク、牛乳）は事前の調査にて、被験者のアレルギー食品が含まれていないことを確認した。試験食は実験室内のブースにて提供され、被験者は提供された食事を、本人が心地よい満腹感だと感じるまで自由に摂取した。食事摂取量調査の間、エネルギー摂取量への影響を避けるため、被験者は水を飲むことを禁止された。食事摂取量調査は最長 1 時間とし、平均摂取時間は運動試行 25.5 ± 6.5 分、運動 + 冷飲料摂取試行 23.1 ± 4.5 分、運動 + 温飲料摂取試行 23.9 ± 6.1 分であった。試験食の総摂取量は事前に提供した試験食の重量から、残りの試験食の重量を差し引きし、エネルギー摂取量を算出した。課題研究 1、2 と同様に、主観的食欲度の調査として VAS⁶⁹にて、来研時、運動終了 5 分後、運動終了 35 分後、運動終了 95 分後に被験者の食欲度（空腹感、満腹感、甘いもの、酸っぱいもの、脂っこいもの、しょっぱいものへの欲求）を調査した。さらに VAS にて被験者の胃の状態（「胃の張りを感じますか？」、「今食事をしたいと思いますか？」、「今のどが渴いていますか？」）。VAS における調査では 100 mm の線の左端を「全く感じない」、右端を「非常に感じる」とし、被験者が感じる感覚を線分上に印をつけた。

5. 胃運動および消化管血流量の測定

課題研究 1、2 と同様に、超音波診断装置（LOGIQ-e、GE Healthcare、アメリカ）を用いて、安静時の胃幽門部の動きを記録した。胃幽門部断面積（ cm^2 ）は来研時、運動終了 5 分後、運動終了 15 分後、運動終了 25 分後、運動終了 35 分後において、各ポイントから 3 分間の動画を記録した。その後、画像処理ソフト（ImageJ 1.47、National Institute of Mental Health、アメリカ）を用いて胃幽門部を描画し、断面積を算出した。胃幽門部の収縮回数は来研時、運動終了 5 分後、運動終了 15 分後、運動終了 25 分後、運動終了 35 分後において、3 分間当たりの収縮回数を測定した。

CA および SMA の MBV を超音波ドップラー血流計（LOGIQ3、GE Healthcare、アメリカ）を用いて、来研時、運動終了 5 分後、運動終了 15 分後、運動終了 25 分後、運動終了 35 分後に測定した。各動脈の血管径は各ポイントにおいて描写し、画像処理ソフト（ImageJ 1.47、National Institute of Mental Health、アメリカ）を用いて測定した。各動脈の MBV および血管径から血流量を算出した。

6. 統計解析

すべての統計処理には SPSS Statistics version 23.0（IBM SPSS Statistics version 23.0、日本 IBM、日本）を用いた。統計量は平均値 ± 標準偏差で示した。すべての測定項目において、統計処理前に Shapiro-Wilk テストを用い、正規性の検定を行った。すべての項目において正規性が確認された為、下記の検定を行った。試行間における評価項目の変化は一元配置の分散分析によって、有意性を検定した。一元配置の分散分析で試行間に有意な差が認められた項目は、Bonferroni の方法にて多重比較を行った。測定条件（試行）と時間を要因とした測定項目の変化については、二元配置の分散分析によって、その有意性を検定した。二元配置の分散分析で試行間に有意な差が認められた項目は、Bonferroni の方法にて多重比較を行った。二元配置の分散分析において試行-時間の交互作用が認められた場合は、単純主効果の検定を行った。胃幽門部収縮回数とエネルギー摂取量の関連を Pearson の相関係数を用いて検討した。試行間の相関の検定には Pearson の相関分析を用いた。検定の有意水準は 5%とし、P 値が 5%未満の時に有意とした。また、P 値が 5%未満を満たすことなく、10%未満であった場合は傾向とした。

第3節 結果

1. 測定前日の夕食のエネルギー摂取量

3 試行の前日の 18 時以降におけるエネルギー摂取量は 799 ± 321 kcal であった。栄養素の割合は脂質 $36 \pm 24\%$ (36.7 ± 30.7 g)、炭水化物 $41 \pm 24\%$ (99.7 ± 40.8 g)、タンパク質 $14 \pm 6\%$ (30.8 ± 15.0 g) であった。

2. 前日および当日の統制

各試行前日の歩数（運動： 8124 ± 5588 歩/日、運動＋冷飲料摂取： 8721 ± 6024 歩/日、運動＋温飲料摂取： 7510 ± 2924 歩/日； $P > 0.05$ ）、低強度身体活動（運動： 56 ± 36 分/日、運動＋冷飲料摂取： 55 ± 33 分/日、運動＋温飲料摂取： 45 ± 22 分/日； $P > 0.05$ ）、中等度強度身体活動（運動： 26 ± 25 分/日、運動＋冷飲料摂取： 32 ± 28 分/日、運動＋温飲料摂取： 30 ± 16 分/日； $P > 0.05$ ）、高強度身体活動（運動： 2 ± 2 分/日、運動＋冷飲料摂取： 3 ± 4 分/日、運動＋温飲料摂取： 2 ± 1 分/日； $P > 0.05$ ）に有意な差は見られなかった。各試行当日の体重は試行間に有意な差は見られなかった（運動： 65.5 ± 6.1 kg、運動＋冷飲料摂取： 65.1 ± 5.8 kg、運動＋温飲料摂取： 65.1 ± 5.8 kg； $P > 0.05$ ）。各試行の空腹時の主観的満腹感、甘いもの、酸っぱいもの、脂っこいもの、しょっぱいものへの欲求、胃の不快感、膨張感、食事への欲求、のどの渇きに有意な差は見られなかった（ $P > 0.05$ ）。各試行の空腹時の胃幽門部断面積に有意な差は見られなかった（運動： 3.4 ± 0.8 cm²、運動＋冷飲料摂取： 3.9 ± 1.2 cm²、運動＋温飲料摂取： 3.8 ± 0.8 cm²； $P > 0.05$ ）。各試行の空腹時の胃幽門部収縮回数に有意な差は見られなかった（運動： 2.7 ± 2.0 回/3 分、運動＋冷飲料摂取： 4.0 ± 2.5 回/3 分、運動＋温飲料摂取： 3.8 ± 1.3 回/3 分； $P > 0.05$ ）。各試行の空腹時の SMA（運動： 97.1 ± 68.1 mL/min、運動＋冷飲料摂取： 91.4 ± 44.3 mL/min、運動＋温飲料摂取： 126.4 ± 66.0 mL/min）および CA（運動： 116.6 ± 77.7 mL/min、運動＋冷飲料摂取： 113.8 ± 71.3 mL/min、運動＋温飲料摂取： 138.7 ± 57.1 mL/min）の血流量

に有意な差は見られなかった ($P > 0.05$)。空腹時における、白血球数 (運動 : $5866.7 \pm 1721.1 \mu\text{L}$ 、運動+冷飲料摂取 : $5333.3 \pm 1087.3 \mu\text{L}$ 、運動+温飲料摂取 : $5216.7 \pm 1018.9 \mu\text{L}$)、赤血球数 (運動 : $502.8 \pm 33.2 \times 10^4/\mu\text{L}$ 、運動+冷飲料摂取 : $509.7 \pm 38.1 \times 10^4/\mu\text{L}$ 、運動+温飲料摂取 : $504.3 \pm 38.1 \times 10^4/\mu\text{L}$)、血色素測定 (運動 : $15.2 \pm 0.7 \text{ g/dL}$ 、運動+冷飲料摂取 : $15.5 \pm 1.0 \text{ g/dL}$ 、運動+温飲料摂取 : $15.3 \pm 1.0 \text{ g/dL}$)、ヘマトクリット (運動 : $46.2 \pm 2.6 \%$ 、運動+冷飲料摂取 : $46.6 \pm 2.5 \%$ 、運動+温飲料摂取 : $46.2 \pm 2.67\%$)、MCV (運動 : $92.1 \pm 2.8 \text{ fL}$ 、運動+冷飲料摂取 : $91.7 \pm 3.4 \text{ fL}$ 、運動+温飲料摂取 : $91.8 \pm 3.5 \text{ fL}$)、MCH (運動 : $30.4 \pm 1.4 \text{ pg}$ 、運動+冷飲料摂取 : $30.5 \pm 1.2 \text{ pg}$ 、運動+温飲料摂取 : $30.5 \pm 1.2 \text{ pg}$)、MCHC (運動 : $33.0 \pm 0.9 \text{ g/dL}$ 、運動+冷飲料摂取 : $33.3 \pm 1.0 \text{ g/dL}$ 、運動+温飲料摂取 : $33.2 \pm 0.6 \text{ g/dL}$)、血小板数 (運動 : $27.4 \pm 4.1 \times 10^4/\mu\text{L}$ 、運動+冷飲料摂取 : $27.1 \pm 3.5 \times 10^4/\mu\text{L}$ 、運動+温飲料摂取 : $27.1 \pm 3.2 \times 10^4/\mu\text{L}$) に有意な差は見られなかった ($P > 0.05$)。各試行の空腹時における、遊離脂肪酸、グルコース、インスリン、アシル化グレリン濃度に有意な差は見られなかった ($P > 0.05$) (Table 6)。

Table 6. Fasting concentrations of free fatty acids, glucose, insulin and acylated ghrelin

	EX	EX + Cold	EX + Hot	P
Free fatty acids (mmol/L)	0.4 ± 0.2	0.3 ± 0.1	0.4 ± 0.1	NS
Glucose (mg/dL)	83.8 ± 7.7	87.1 ± 5.3	87.9 ± 6.2	NS
Insulin (μU/mL)	2.5 ± 1.3	3.2 ± 1.7	2.8 ± 1.4	NS
Acylated ghrelin (pg/dL)	18.2 ± 5.2	17.9 ± 4.5	17.0 ± 4.8	NS

Data are means ± SD. Data were analysed using one-factor ANOVA followed by a multiple comparison test using the Bonferroni method. NS: not significant difference. Cold: 300 mL of protein-containing drink intake at 2°C, Hot: 300 mL of protein-containing drink intake at 60°C, EX: running for 30 min at 80% of maximum heart rate.

3. 運動における生理的応答

30 分間のランニング中の平均心拍数および RPE は試行間で有意な差は見られなかった（平均心拍数：運動：161 ± 12 bpm/分、運動＋冷飲料摂取：161 ± 15 bpm/分、運動＋温飲料摂取：162 ± 14 bpm/分； $P > 0.05$, RPE：運動：14 ± 2、運動＋冷飲料摂取：14 ± 2、運動＋温飲料摂取：14 ± 2； $P > 0.05$ ）。

4. エネルギー摂取量

試験食の自由摂取におけるエネルギー摂取量は、一元配置の分散分析において、試行間で有意な差が認められた（運動：1548 ± 495 kcal、運動＋冷飲料摂取：1453 ± 506 kcal、運動＋温飲料摂取：1791 ± 604 kcal； $P < 0.001$ ）（Fig. 15）。運動＋温飲料摂取試行は運動試行と比較して 14%（ $P = 0.046$ ）、運動＋冷飲料摂取試行と比較して 19%（ $P = 0.001$ ）エネルギー摂取量が高値を示した。食事摂取時間は一元配置の分散分析において、試行間で有意な差が認められなかった（運動：25.5 ± 6.5 分、運動＋冷飲料摂取：23.1 ± 4.5 分、運動＋温飲料摂取：23.9 ± 6.1 分； $P = 0.143$ ）。

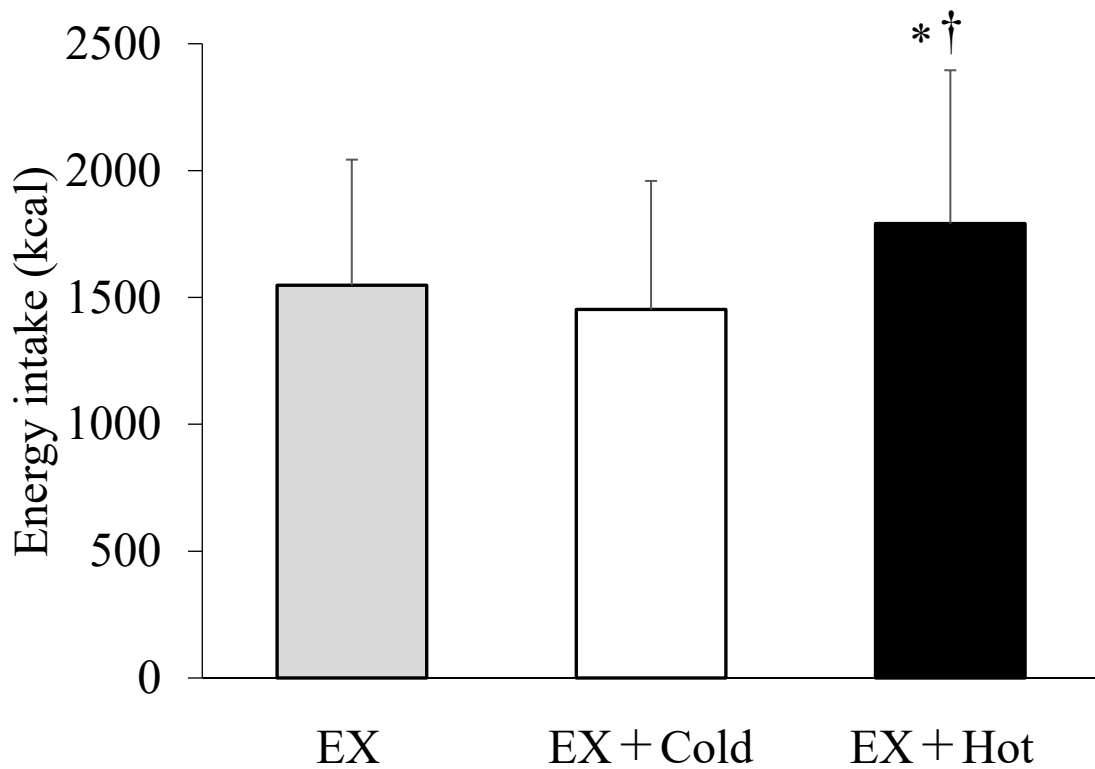


Fig. 15. Energy intake at ad libitum test meal: 30 min after exercise

Data are means \pm SD. Means were compared using one-factor ANOVA for the main effect of the trial followed by a multiple comparison test using the Bonferroni method. Cold: 300 mL of protein-containing drink intake at 2°C, Hot: 300 mL of protein-containing drink intake at 60°C, EX: running for 30 min at 80% of maximum heart rate.

* Significantly different from the Exercise trial ($P < 0.05$).

† Significantly different from the Exercise + Cold water trial ($P < 0.05$).

5. 主観的食欲度

被験者の主観的な空腹感、満腹感、甘いもの、酸っぱいもの、脂っこいもの、しょっぱいものへの欲求は、二元配置の分散分析において時間の主効果 ($P < 0.05$) が見られたものの、試行の主効果および交互作用 (試行-時間) が見られなかった ($P > 0.05$)。「胃の不快感はありますか」、「胃の張りを感じますか?」、「今食事をしたいと思いますか?」という質問においては、二元配置の分散分析において時間の主効果 ($P < 0.05$) が見られたものの、試行の主効果および交互作用 (試行-時間) が見られなかった ($P > 0.05$)。

「今のどが渴いていますか?」という質問においては、試行および時間の主効果、交互作用 (試行-時間) が見られた ($P < 0.05$)。その後の多重比較において、運動直後は運動+冷飲料摂取試行と比較して運動試行において有意に高い値を示した ($P = 0.005$)。さらに、運動 35 分後において、運動+冷飲料摂取試行および運動+温飲料試行と比較して運動試行において有意に高い値を示した ($P < 0.05$)。

6. 胃幽門部断面積および幽門部収縮回数

胃幽門部断面積において有意な試行の主効果 ($P < 0.001$)、時間の主効果 ($P = 0.004$) および交互作用 (試行-時間) が見られた ($P = 0.011$) (Fig. 16)。運動終了 5 分後、運動終了 15 分後、運動終了 25 分後において運動試行と比較して、運動+冷飲料摂取試行と運動+温飲料摂取試行は有意に胃幽門部断面積が高値を示した ($P < 0.05$)。

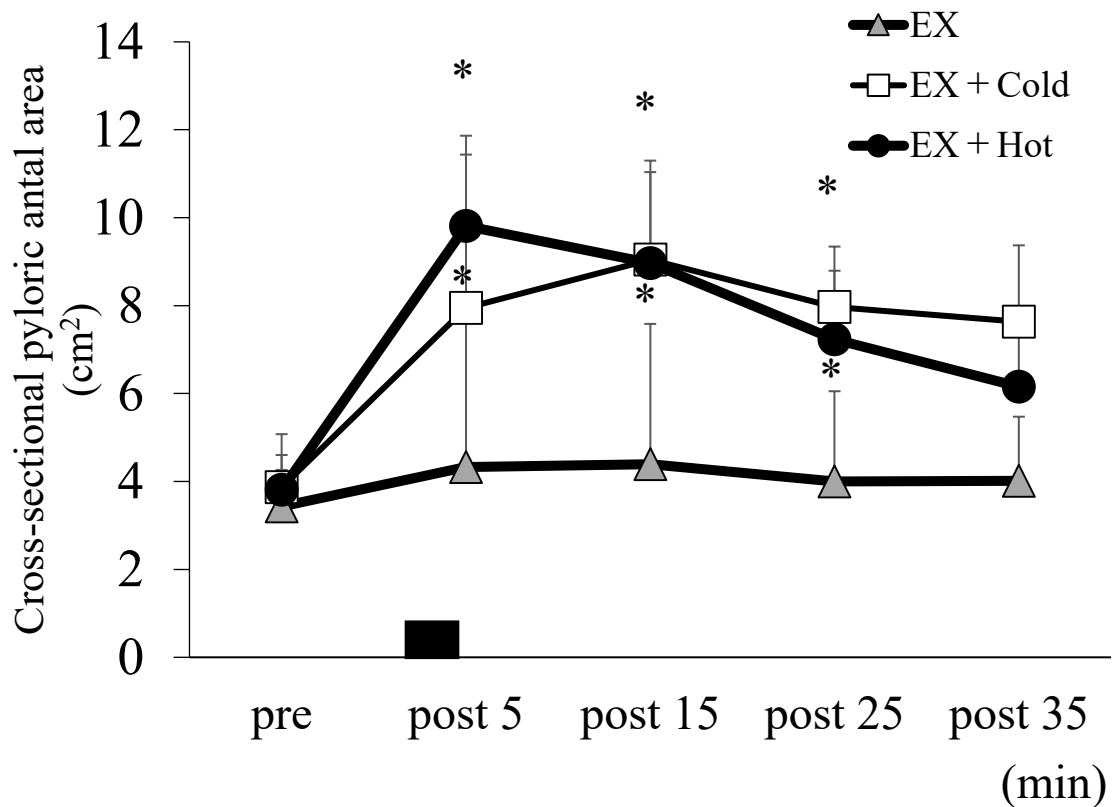


Fig. 16. Cross-sectional gastric pyloric antral area before and after exercise

Data are means \pm SD. The black rectangle indicates consuming protein drink in 5 min at the Exercise + cold drink trial and the exercise + hot drink trial. Data were analysed using two-factor ANOVA followed by a multiple comparison test using the Bonferroni method. Cold: 300 mL of protein-containing drink intake at 2°C, Hot: 300 mL of protein-containing drink intake at 60°C, EX: running for 30 min at 80% of maximum heart rate. There was a significant main effect of trial ($P < 0.001$), time ($P = 0.004$) and trial-time interaction ($P = 0.011$).

* Significantly different from exercise trial ($P < 0.05$).

胃幽門部収縮回数は有意な試行の主効果 ($P < 0.001$) が見られた (Fig. 17)。運動+温飲料摂取試行は、運動試行、運動+冷飲料摂取試行と比較して胃幽門部収縮回数が高値を示した ($P < 0.05$)。

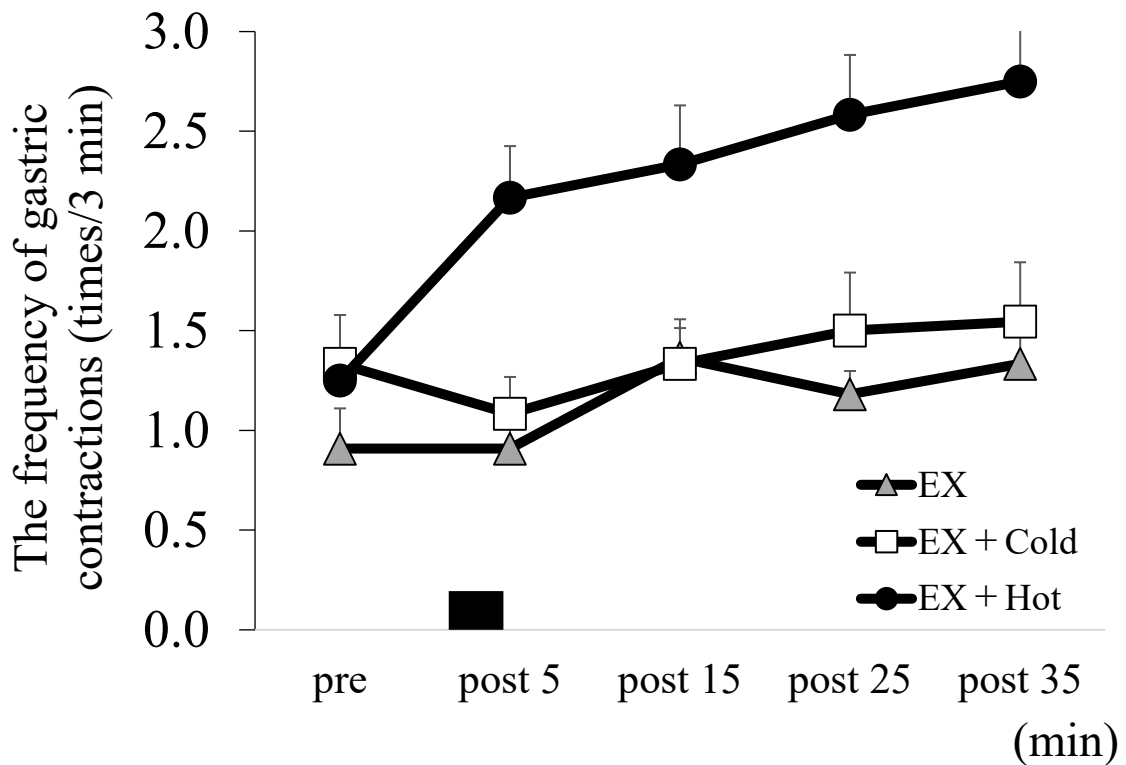


Fig. 17. The frequency of gastric contractions before and after exercise

Data are means \pm SD. The black rectangle indicates consuming water in 5 min at control + water trial and exercise + water trial. Data were analysed using two-factor ANOVA followed by a multiple comparison test using the Bonferroni method. Cold: 300 mL of protein-containing drink intake at 2°C, Hot: 300 mL of protein-containing drink intake at 60°C, EX: running for 30 min at 80% of maximum heart rate. There was a significant main effect of trial ($P = 0.001$). There was no significant effect of time and trial-time interaction ($P > 0.05$).

7. 胃幽門部収縮回数とエネルギー摂取量との関連

各ポイントの胃幽門部収縮回数を合計した総収縮回数とエネルギー摂取量との間に正の相関関係が認められた ($r = 0.386, P = 0.022$) (Fig. 18)。

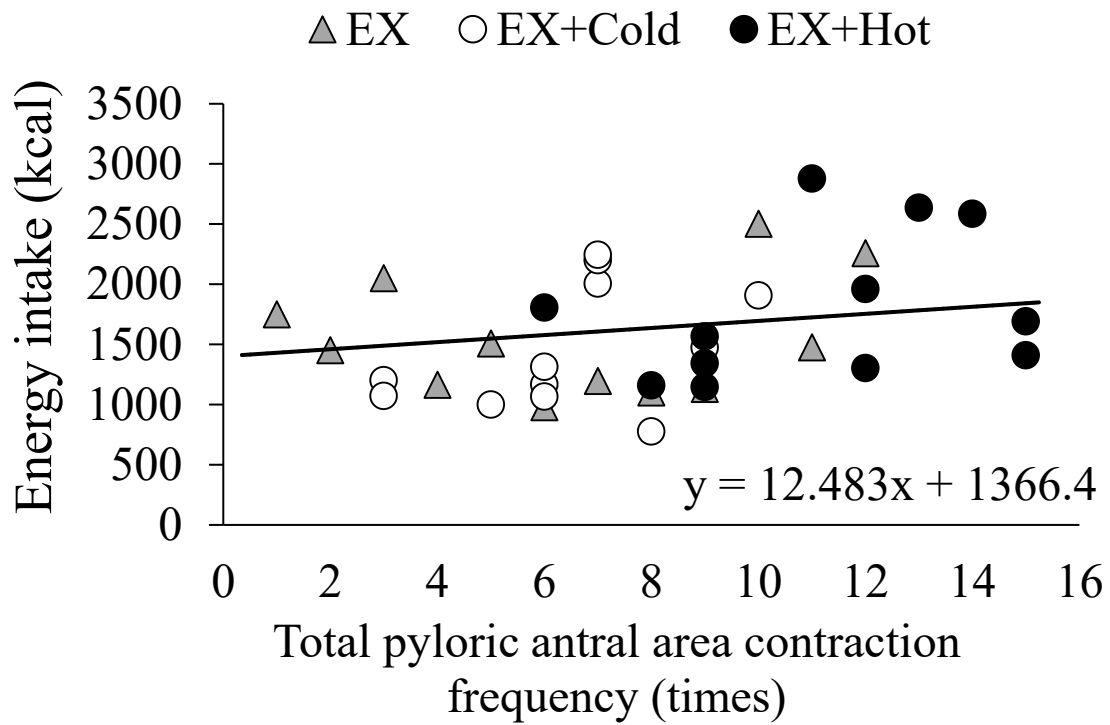


Fig. 18. The relationship between energy intake and the frequency of the total pyloric antral area contractions

Data were analysed using Pearson's correlation coefficient (r) test. There was a significant positive correlation between energy intake and the frequency of the total gastric contractions ($r = 0.386, P = 0.022$).

8. 消化管血流量

SMA の血流量は試行の主効果、時間の主効果および交互作用（試行-時間）が見られなかった ($P > 0.05$) (Fig. 19)。

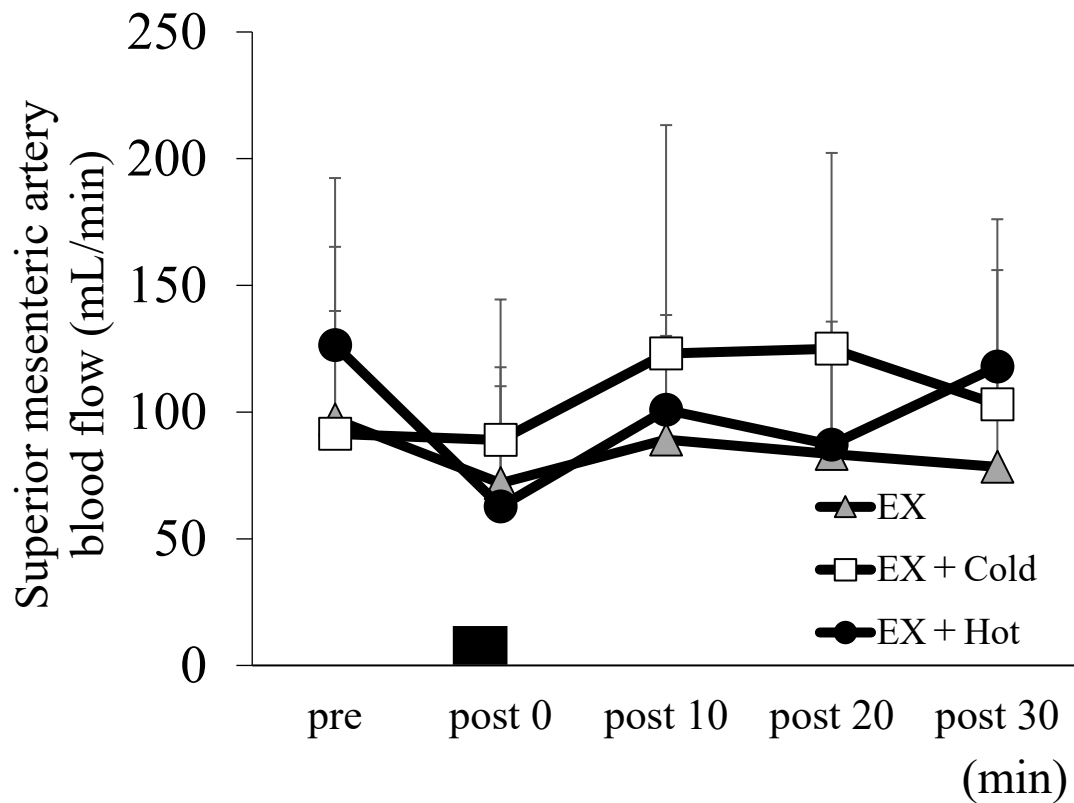


Fig. 19. Superior mesenteric artery blood flow responses to exercise among the three trials.

Data are means \pm SD. The black rectangle indicates consuming water in 5 min at control + water trial and exercise + water trial. Data were analysed using two-factor ANOVA followed by a multiple comparison test using the Bonferroni method. Cold: 300 mL of protein-containing drink intake at 2°C, Hot: 300 mL of protein-containing drink intake at 60°C, EX: running for 30 min at 80% of maximum heart rate. There was no significant main effect of trial, time and trial-time interaction ($P > 0.05$).

CA の血流量は試行の主効果、時間の主効果および交互作用（試行-時間）が見られなかった ($P > 0.05$) (Fig. 20)。

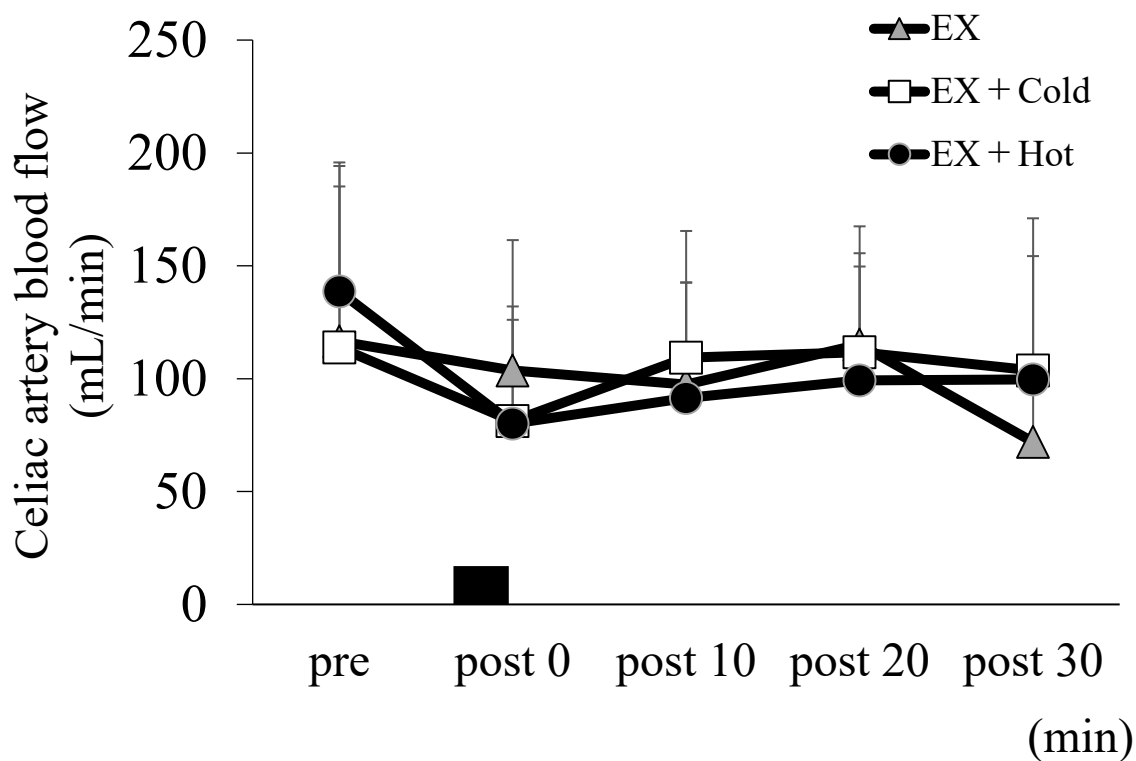


Fig. 20. Celiac artery (CA) blood flow responses to exercise among the three trials

Data are means \pm SD. The black rectangle indicates consuming water in 5 min at control + water trial and exercise + water trial. Data were analysed using two-factor ANOVA followed by a multiple comparison test using the Bonferroni method. Cold: 300 mL of protein-containing drink intake at 2°C, Hot: 300 mL of protein-containing drink intake at 60°C, EX: running for 30 min at 80% of maximum heart rate. There was no significant main effect of trial, time and trial-time interaction ($P > 0.05$).

9. 血液項目

来研時（空腹時）、運動終了 5 分後、運動終了 35 分後、運動終了 95 分後に採取した血液から測定を行った血液項目に関して、二元配置の分散分析の結果を以下に示す。インスリン濃度は有意な試行の主効果が見られた ($P = 0.016$)。運動+温飲料摂取および運動+冷飲料摂取試行は運動試行と比較して有意に高い値を示した ($P < 0.05$)。時間の主効果および交互作用（試行-時間）に差は見られなかった ($P > 0.05$)。血小板数に試行の主効果は見られなかったが ($P > 0.05$)、時間の主効果および交互作用（試行-時間）が見られた ($P < 0.05$)。運動終了 5 分後において、運動+温飲料摂取および運動+冷飲料摂取試行は運動試行と比較して有意に低い値を示した ($P < 0.05$)。遊離脂肪酸、グルコース、白血球数、赤血球数、血色素測定、ヘマトクリット、平均赤血球容積、平均赤血球ヘモグロビン量、平均ヘモグロビン濃度は試行の主効果、時間の主効果および交互作用（試行-時間）が見られなかった ($P > 0.05$)。

血液指標の実験開始から自由摂取の食事調査終了までの、2 時間における上昇曲線化面積を Table 7 に示した。インスリンおよびアシル化グレリンの実験開始から自由摂取の食事調査開始までの、1 時間における上昇曲線化面積を Table 8 に示した。

Table 7. Incremental area under the curve values of blood measurements over 2 h

	EX	EX + Cold	EX + Hot	P
Free fatty acids (mmol·2 h/L)	28.4 ± 14.0	25.5 ± 13.2	28.7 ± 12.5	NS
Glucose (mg·2 h/dL)	1201.3 ± 997.3	716.3 ± 700.8	812.5 ± 837.3	NS
White blood cell count (μL·2 h)	72375.0 ± 60801.3	62250.0 ± 61082.4	68375.0 ± 78807.0	NS
Red blood cell count (×10 ⁴ ·2 h/μL)	1168.8 ± 676.9	733.8 ± 606.9	943.8 ± 560.3	NS
Hemoglobin (g·2 h/dL)	37.5 ± 21.6	21.9 ± 20.1	25.3 ± 14.9	NS
Hematocrit (%·2 h)	88.1 ± 67.8	62.0 ± 59.4	65.0 ± 54.5	NS
MCV (fL·2 h)	10.0 ± 18.7	10.0 ± 25.5	13.8 ± 22.5	NS
MCH (pg·2 h)	15.0 ± 10.4	11.9 ± 12.5	9.1 ± 13.5	NS
MCHC (g·2 h/dL)	43.5 ± 38.2	24.3 ± 20.3	28.5 ± 23.5	NS
Platelet count (×10 ⁴ ·2 h/μL)	208.8 ± 105.4	87.3 ± 38.3*	110.9 ± 62.0*	0.001
Insulin (μU·2 h/mL)	1122.0 ± 619.6	1809.5 ± 614.5*	2259.8 ± 1310.1*	0.002
Acylated ghrelin (pg·2 h/dL)	231.1 ± 397.0	138.1 ± 255.4	82.2 ± 100.8	NS

Data are means ± SD. Data were analysed using one-factor ANOVA followed by a multiple comparison test using the Bonferroni method. NS: not significant difference, MCV: mean corpuscular volume, MCH: mean corpuscular hemoglobin, MCHC: mean corpuscular hemoglobin concentration,

Cold: 300 mL of protein-containing drink intake at 2°C, Hot: 300 mL of protein-containing drink intake at 60°C, EX: running for 30 min at 80% of maximum heart rate. * Different from the exercise trial ($P < 0.05$).

Table 8. Incremental area under the curve values of insulin and acylated ghrelin over 1 h

	EX	EX + Cold	EX + Hot	P
Insulin ($\mu\text{U} \cdot 1 \text{ h} / \text{mL}$)	87.7 ± 105.8	$305.9 \pm 131.7^*$	$334.2 \pm 160.2^*$	< 0.001
Acylated ghrelin ($\text{pg} \cdot 1 \text{ h} / \text{dL}$)	80.8 ± 144.5	37.5 ± 59.8	62.2 ± 84.0	NS

Data are means \pm SD. Data were analysed using one-factor ANOVA followed by a multiple comparison test using the Bonferroni method. NS: not significant difference, Cold: 300 mL of protein-containing drink intake at 2°C, Hot: 300 mL of protein-containing drink intake at 60°C, EX: running for 30 min at 80% of maximum heart rate. * Different from the exercise trial ($P < 0.05$).

第4節 考察

本研究の目的は、運動後に摂取する異なるタンパク質含有飲料の温度が胃運動および食欲に及ぼす影響を検討することであった。本研究で得られた主な知見は運動後の60°Cの温かいタンパク質含有飲料の摂取は、タンパク質含有飲料を摂取しない試行および2°Cの冷たいタンパク質含有飲料を摂取した試行と比較し、その後のエネルギー摂取量を増加させることであった。課題研究1において、食事前の60°Cの温かい水の摂取は胃幽門部収縮回数を増加させ、エネルギー摂取量を増加させることを報告した。本研究の結果から、課題研究1と同様に、60°Cの温かいタンパク質含有飲料の摂取後は、飲料摂取を行わない運動試行および運動後に2°Cの冷たいタンパク質含有飲料を摂取した試行と比較して、一過性に胃幽門部収縮回数が増加することが、エネルギー摂取量を増加させる要因の一つであることが考えられる。さらに課題研究2では運動後は冷水の摂取の有無に関わらず、エネルギー摂取量が減少することを報告した。本研究においても、運動試行と運動+冷飲料摂取試行においては有意なエネルギー摂取量の差は認められず、運動+温飲料摂取試行においてのみ増加したことから、温かい飲料の摂取が引き起こす生体反応の変化がエネルギー摂取量に影響を及ぼしたと考えられる。課題研究2と3を踏まえ、本研究では運動終了後の食欲が低下しやすい時間帯においても、温かい飲料の摂取は胃運動を増加させエネルギー摂取量を増加させたことから、飲料の温度に着目し運動後の栄養指導方法に寄与できる可能性が考えられる。また、本研究において、異なる温度のタンパク質含有飲料摂取を行った後でも、被験者の胃の不快感や膨張感に差が見られないことから、実際のアスリートの運動実施現場でも応用しやすい栄養指導方法であることが考えられる。

本研究において、高強度のランニング運動後の60°Cのタンパク質含有飲料の摂取は、タンパク質含有飲料を摂取しない試行および2°Cのタンパク質含有飲料を摂取した試行と比較してランニング運動終了30分後に評価した食事調査時のエネルギー摂取量が

それぞれ 14%と 19%増加した。60°C のタンパク質含有飲料がその後のエネルギー摂取量に影響を及ぼした理由として、温かい飲料が胃内に流入したことによる胃運動の変化が考えられる。異なる温度の飲料の摂取が胃運動に及ぼす影響について、胃電位計を用いて検討した 3 つの先行研究では一貫して、温かい飲料の摂取 (55°C-65°C) 後は、冷たい、もしくは体温と同等の飲料の摂取 (4°C-37°C) 後と比較して胃収縮頻度が増加していることを報告している^{52,59,78}。本研究は先行研究では評価されていない超音波診断装置を用いて、異なる温度の飲料の摂取が胃運動に及ぼす影響を検討した研究であり、本研究の結果はこれらの先行研究の結果を支持するものである。液体の食事の消化には幽門部の蠕動運動が重要な役割を果たしていることが報告されている⁹⁴。胃の蠕動運動は胃体部から幽門部にかけて伝播し、遠位部では胃のゆっくりとした振動である徐波と蠕動運動によって胃運動が制御されている²⁹。この徐波は 24°C から 42°C の範囲における胃内温度の上昇により、頻度および上昇率が増加することが報告されている⁹⁵。Sun らは 50°C のオレンジジュース 400 mL を経口投与した場合、胃内到達時の温度は 43°C であることを報告しており⁵³、本研究における 60°C のタンパク質含有飲料 300 mL の摂取においても同程度の胃内温度となったことが予想され、胃運動の増加が胃内温度の上昇に起因している可能性があると考えられる。

課題研究 1 と同様に、胃運動は食欲を調節する潜在的メカニズムの一つであり、胃収縮の増加は食物を十二指腸に送り出し、次の食事に備える生体反応である。本研究では運動後から食事摂取量調査までの 30 分間において胃幽門部収縮を測定したタイムポイントの総合計収縮回数と食事摂取量調査からのエネルギー摂取量に正の相関関係が見られたことから、60°C のタンパク質含有飲料の摂取による胃収縮の増加が、エネルギー摂取量を増加させた要因の一つであることが考えられる。課題研究 2 において一過性の運動後は、冷水の摂取の有無に関わらず、安静試行と比較してエネルギー摂取量が減少することが明らかとなった。本研究においても、運動試行と運動+冷飲料摂取試行

においてエネルギー摂取量に有意な差が見られなかったことから、一貫して、運動後の冷飲料の摂取はエネルギー摂取量に影響を及ぼさないことが示唆された。先行研究において、運動後は末梢への血流の再分配が起こり、一時的な消化管の虚血が起こるなど消化機能の低下が起こり、運動後の食欲の低下に起因している可能性が報告されている¹³。しかし、本研究では運動試行、運動+冷飲料摂取試行、運動+温飲料摂取試行の3試行間で、すべての時間帯において、腹腔動脈および上腸間膜動脈の血流量に差が見られなかったことから、ランニング運動後における異なる温度（2°C もしくは 60°C）のタンパク質含有飲料の摂取は、消化管血流量に影響を及ぼさない可能性が考えられる。本研究では運動後に温かいタンパク質含有飲料（60°C）を摂取した試行において、飲料摂取後の胃幽門部収縮回数が増加したが、消化管血流量の変動において個人差が大きいことから、温度による影響は見られなかった。また、本研究では2°C および 60°C のたんぱく質含有飲料の摂取において、インスリン、アシル化グレリンをはじめとした血液指標に試行間の有意な差が見られなかった。また、2°C および 60°C のたんぱく質含有飲料を摂取した両試行において、飲料摂取を行わなかった運動試行と比較して、同程度にインスリン濃度が上昇していることから、異なる温度のタンパク質含有飲料の摂取において消化吸収に差が生じていない可能性が考えられる。これらの結果から、60°C の温かいタンパク質含有飲料の摂取による胃運動の増加は、消化管の血流や血液指標による影響を介していない可能性が示唆された。胃運動は本研究で測定したアシル化グレリン以外に、モチリンなどの消化管ホルモンによって制御されており、今後、異なる温度の飲料摂取が胃運動に及ぼす影響を検討するためにモチリンなどの消化管ホルモンの検討も必要である。

第5節 結論

本研究から、若年健常男性において、運動後に摂取するタンパク質含有飲料の温度は、その後の胃運動と食欲の中でもエネルギー摂取量に影響することが明らかとなった。具体的には、運動直後に 300 mL で 60°C のタンパク質含有飲料を摂取すると、2°C のタンパク質含有飲料を摂取した際と比較して自由摂取の食事調査からのエネルギー摂取量および胃幽門部収縮回数が有意に増加した。これらの所見は、温かい飲料の摂取によるエネルギー摂取量の増加は胃運動の増加に関連していることを示唆した。

第5章

総合考察

第1節 安静時と運動後の飲料摂取による食欲の変化

第2章では2°C、37°C、60°Cの異なる水の摂取が胃運動およびエネルギー摂取量に及ぼす影響を検討し、先行研究で胃運動が亢進すると報告されている60°Cの温水摂取後において胃幽門部収縮回数が増加し、その後のエネルギー摂取量が増加することを明らかにした。第3章では第2章の異なる温度の飲料摂取が胃運動とエネルギー摂取量に及ぼす影響を検討するために、まず、安静時と運動後の飲料摂取が胃運動とエネルギー摂取量に及ぼす影響を検討した。安静時における2°Cの冷水の摂取はエネルギー摂取量を減少させる一方、運動後は2°Cの冷水の摂取の有無でエネルギー摂取量に差は見られないことを明らかにした。第4章では、第2章と第3章の結果を踏まえ、運動後における2°Cと60°Cの異なる温度の飲料摂取が、運動後に飲料摂取を行わない試行と比較して胃運動とエネルギー摂取量に及ぼす影響を検討した。運動後の2°Cの冷水の摂取を行った試行は運動後に飲料摂取をしない試行と比較してエネルギー摂取量の差が見られず、第3章の結果を支持するものであった。また第2章の結果と同様に、運動後に60°Cの温飲料の摂取により胃運動およびエネルギー摂取量が増加することを明らかにした。

第2章と第4章の比較から、温かい飲料の摂取は安静時、運動後の摂取タイミングを問わず、胃運動およびエネルギー摂取量を増加させることを明らかにした。また第4章では、先行研究で胃内容排出が遅延すると報告されているタンパク質含有飲料においても⁹⁶、温かい温度で摂取することで胃運動が増加し、その後のエネルギー摂取量を増加させることを示した。現在まで、運動前や運動中の飲料摂取による胃内容排出の遅延などの胃運動の変化は運動誘発性食欲不振のメカニズムの一つとして考えられてきたが、運動後の飲料摂取が胃運動および食欲に及ぼす影響については検討が不足している⁴²。

第 3 章と第 4 章の結果から、運動後における 2°C の飲料の摂取はその後のエネルギー摂取量に影響を及ぼさないことが明らかになり、運動後の冷水摂取による胃幽門部断面積の増加は、運動誘発性食欲不振に影響を及ぼさない可能性が示された。アメリカスポーツ医学会では、運動後の脱水予防やコンディションの回復を目的として、運動後から試合間の栄養補給として、運動後は運動で失われた水分の 120 から 150%にあたる水分を補給すること、水分、電解質、炭水化物、タンパク質を適切に摂取して筋グリコーゲンを回復させることを推奨している⁹⁷。また現在までに、運動後の消化吸収機能が低下する時間帯における栄養補給がその後の食欲に及ぼす影響について、摂取タイミングや飲料の質による影響が検討されている。Kashima らは運動後に糖・タンパク質飲料を摂取するタイミングが消化吸収に及ぼす影響を検討し、運動直後の糖・タンパク質飲料の摂取は運動 30 分後の摂取と比較して胃内容排出を遅らせ、血中グルコースおよび血中分岐鎖アミノ酸の動態が変化することを報告している⁵⁹。Clayton らは運動後に摂取する栄養の質がその後のエネルギー摂取量に及ぼす影響を検討し、運動後の糖飲料の摂取はエネルギー摂取量に影響を及ぼさないものの、同じエネルギー含有量のタンパク質飲料の摂取はプラセボ飲料と比較してエネルギー摂取量が減少することを報告している⁹⁸。第 4 章における研究は運動後に摂取する飲料の温度の違いが胃運動と食欲へ及ぼす影響を検討した初めての研究である。第 1 章で先述したとおり、運動中で消費したエネルギーを食事として補えていない先行研究の結果⁴⁴を踏まえると運動後の栄養補給の仕方について、「温度」という新たな視点で検討したことで、当該分野の研究を発展させるための基礎的論拠を示すことができたと考えられる。

第 2 節 食欲調節における胃運動と生理学指標

第 2 章および第 4 章において、温かい飲料の摂取がその後のエネルギー摂取量を増加させた理由として、胃幽門部収縮回数の増加が挙げられる。熱刺激は胃の温度受容体に

において、迷走神経を介して胃および腸の機械的収縮に影響を及ぼすと報告されている⁹⁹。胃運動の増加は食欲調節の重要な要因であり、胃電位計にて摂取する飲料の温度と胃運動の頻度の関連を検討した研究では、温かい飲料の摂取により胃収縮頻度が増加することが報告されている^{52,54}。本研究においても、第3章にて運動後に500 mLの冷水(2°C)を摂取した場合は胃幽門部収縮回数が増加せず、第4章においても運動後に300 mLの冷たいタンパク質含有飲料(2°C)摂取することで胃幽門部収縮回数が増加しなかった。一方、第2章では安静時にて500 mLの温水(60°C)摂取後に胃幽門部収縮回数が増加し、第4章においても運動後に300 mLの温かいタンパク質含有飲料(60°C)摂取することで胃幽門部収縮回数が増加し、エネルギー摂取量が増加した。これらの結果から、胃幽門部収縮回数の増加は摂取する飲料の温度に依存する可能性が考えられる。そこで、摂取した飲料の温度と胃幽門部収縮回数における測定ポイントの総合計回数とをピアソンの積率相関係数を用い、これらの関連性を検討した(Fig. 21)。第2章における2°C、37°Cおよび60°Cの水摂取と総収縮回数との間に有意な正の相関関係が認められた($r = 0.830, P < 0.001$) (Fig. 21 (a))。第4章における2°Cおよび60°Cのタンパク質含有飲料摂取と総収縮回数との間に有意な正の相関関係が認められた($r = 0.692, P < 0.001$) (Fig. 21 (b))。第2章と第4章のデータを合わせた解析においても、飲料摂取温度と総収縮回数との間に正の相関関係が認められた($r = 0.319, P = 0.016$) (Fig. 21 (c))。

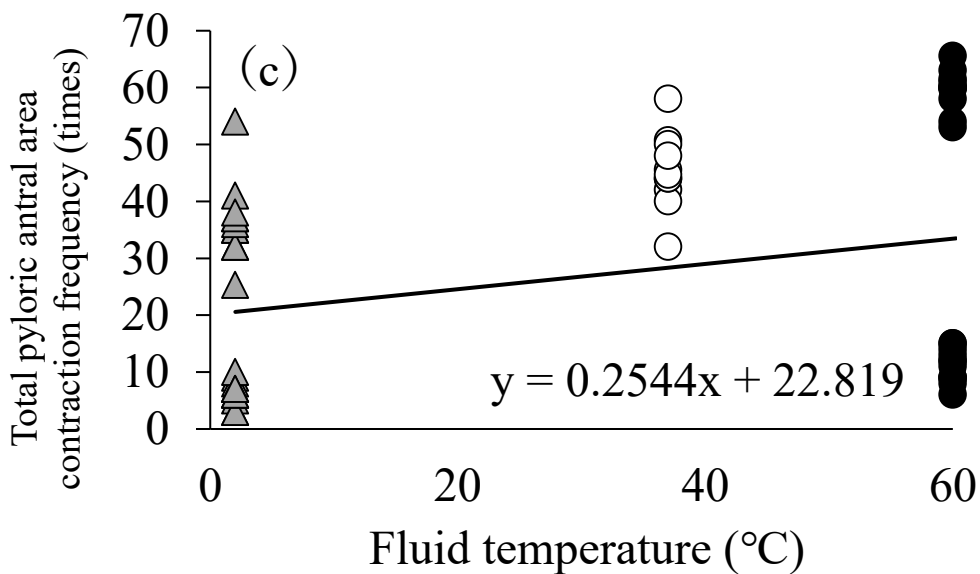
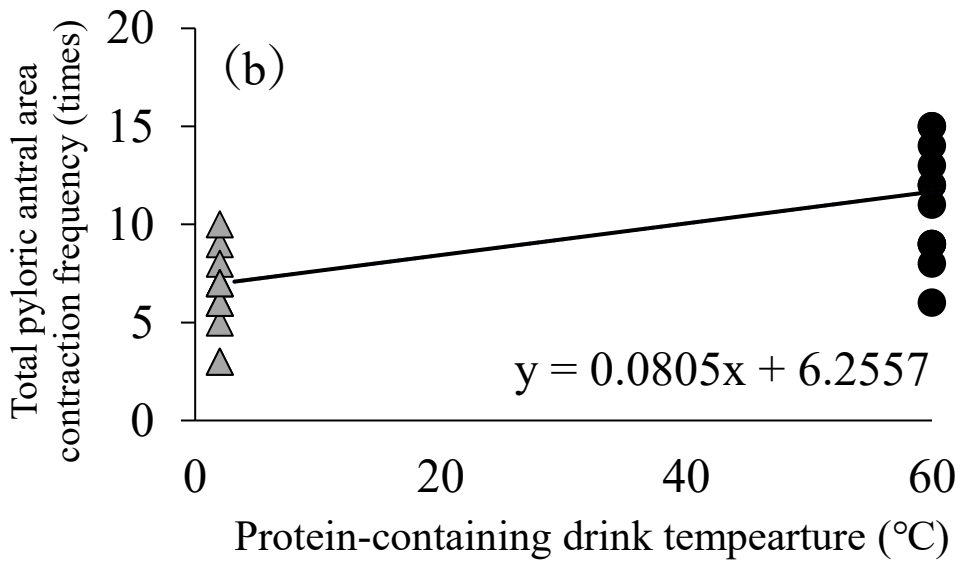
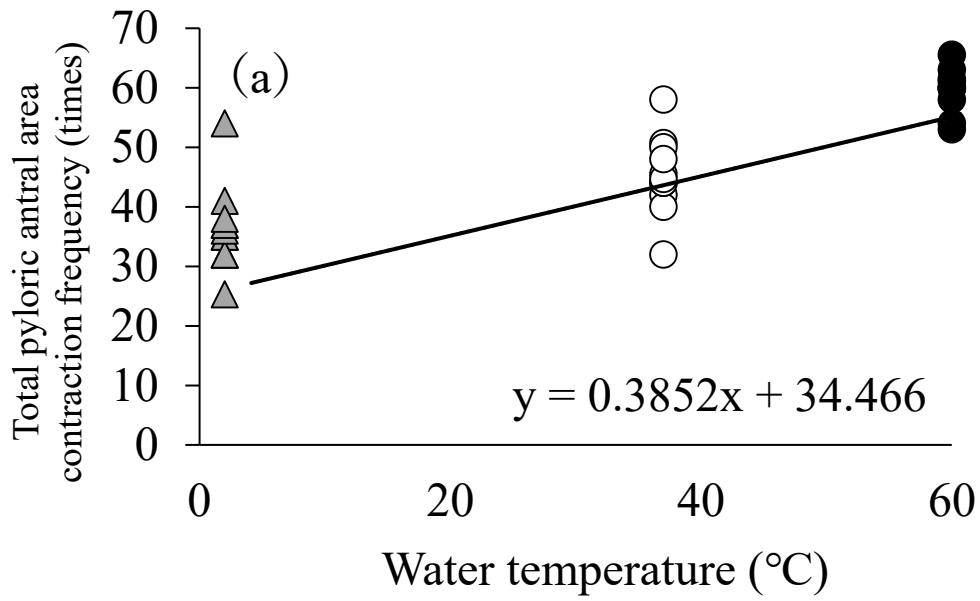


Fig. 21. The relationship between pyloric antral area contraction frequency and water temperature (a), protein-containing drink temperature (b), fluid (water and protein-containing drink) temperature (c)

Data were analysed using Pearson's correlation coefficient (r) test. (a) There was a significant positive correlation between energy intake and the frequency of the total gastric contractions ($r = 0.830, P < 0.001$). (b) There was a significant positive correlation between energy intake and the frequency of the total gastric contractions ($r = 0.692, P < 0.001$). (c) There was a significant positive correlation between energy intake and the frequency of the total gastric contractions ($r = 0.319, P = 0.016$).

これらの結果から、安静時と運動後の両時点において、胃幽門部収縮回数の増加は摂取する飲料の温度に依存する可能性が示唆された。また第2章 (Fig. 7) および第4章 (Fig. 18) において、飲料摂取後の幽門部収縮回数とエネルギー摂取量との間に正の相関関係が認められたことから、前述した胃幽門部収縮回数と摂取する飲料の温度との関連性を踏まえ、飲料の温度と自由摂取の食事調査から得たエネルギー摂取量との関連をピアソンの積率相関係数を用いて検討した。第2章における2°C、37°C および60°Cの水摂取とエネルギー摂取量との間に正の相関関係の傾向が認められた ($r = 0.298, P = 0.092$) (Fig. 22 (a))。同様に第4章における2°C および60°Cのタンパク質含有飲料摂取とエネルギー摂取量との間には正の相関関係の傾向が認められた ($r = 0.302, P = 0.151$) (Fig. 22 (b))。第2章と第4章のデータを合わせた解析においては、飲料摂取温度と総収縮回数との間に正の相関関係が認められた ($r = 0.300, P = 0.024$) (Fig. 22 (c))。これらの結果から、摂取する飲料の温度、胃幽門部収縮回数、エネルギー摂取量の間、それぞれ正の相関関係があり、温かい飲料の摂取によるエネルギー摂取量の増加は、温かい飲料摂取による胃幽門部収縮回数の増加が介している可能性が示唆された。

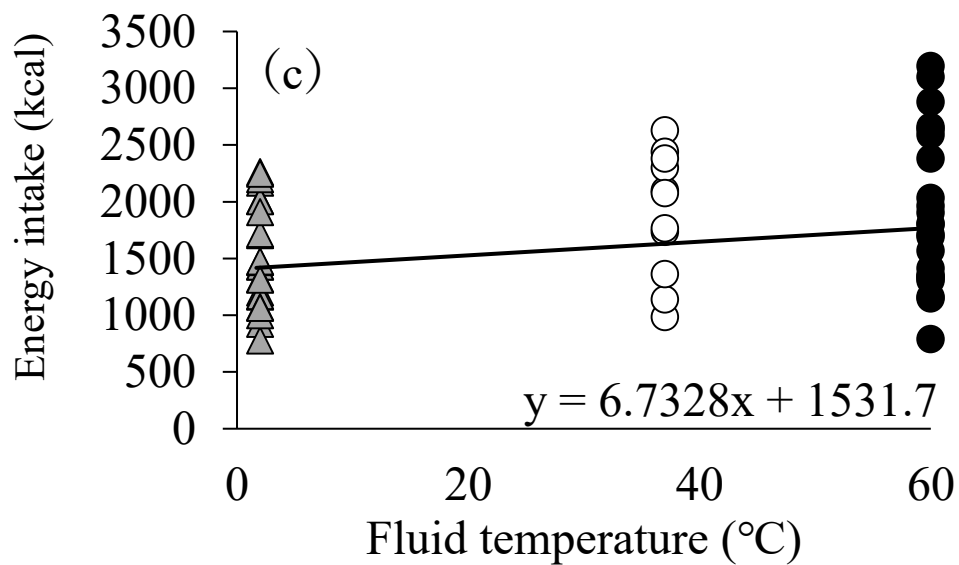
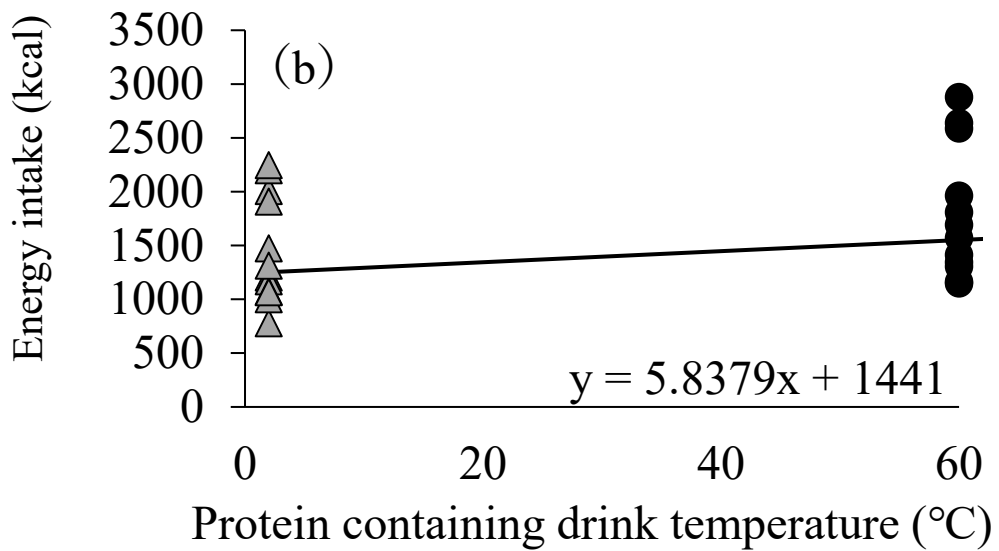
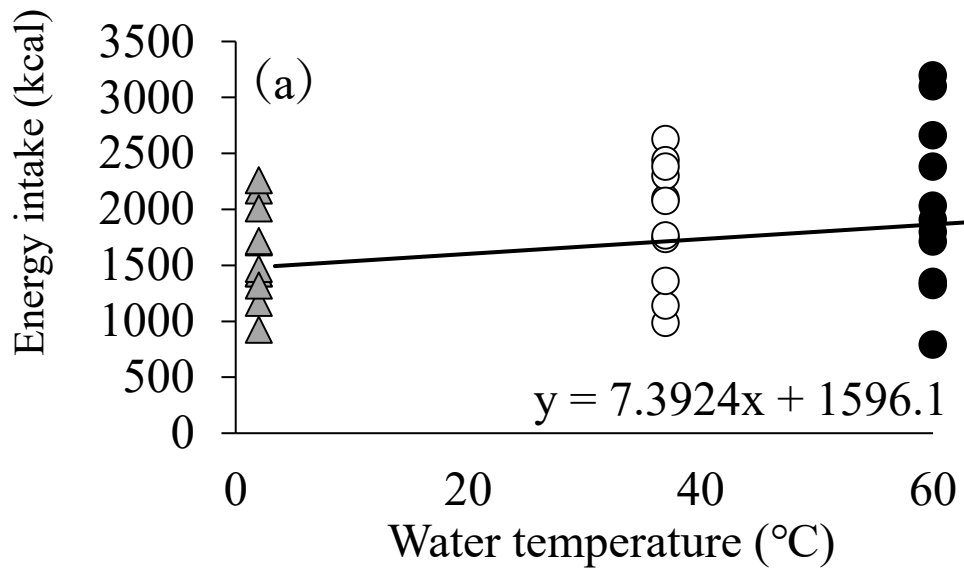


Fig. 22. The relationship between energy intake and water temperature (a), protein-containing drink temperature (b), fluid (water and protein-containing drink) temperature (c)

Data were analysed using Pearson's correlation coefficient (r) test. (a) There was a small positive correlation between energy intake and the frequency of the total gastric contractions ($r = 0.298$, $P = 0.092$). (b) There was a small positive correlation between energy intake and the frequency of the total gastric contractions ($r = 0.302$, $P = 0.151$). (c) There was a significant positive correlation between energy intake and the frequency of the total gastric contractions ($r = 0.300$, $P = 0.024$).

本研究において、第3章では安静試行と比較して安静後に500 mLの冷水(2°C)を摂取した試行では、胃幽門部断面積が増加し、その後のエネルギー摂取量が減少したが、運動試行と比較して運動後に500 mLの冷水(2°C)を摂取した試行においては、胃幽門部断面積が増加したものの、エネルギー摂取量に有意な差は見られなかった。同様に、第4章において、飲料摂取を行わない運動試行と比較して、運動後に300 mLのタンパク質含有飲料(2°Cもしくは60°C)を摂取した試行においては、胃幽門部断面積が増加したものの、エネルギー摂取量に有意な差は見られなかった。安静時において、食事前の飲料摂取がエネルギー摂取量におよぼす影響を検討した先行研究では、飲料摂取による一時的な胃幽門部断面積の拡張はエネルギー摂取量が減少する要因の一つであると報告されており⁷³、第3章の安静時における結果は先行研究を支持するものであった。運動後の飲料摂取が主観的食欲度におよぼす影響を検討したKashimaらの先行研究では、レジスタンス運動直後に400 mLの糖・タンパク質飲料を摂取した試行において、運動後に糖・タンパク質飲料を摂取していない試行および運動30分後と比較し主観的な空腹感や食事への欲求が減少したことを報告している⁵⁹。一方、第3章および第4章の結果から、運動後は飲料摂取による胃幽門部断面積の増加の有無に関わらず、エネルギー摂取量が減少することから、安静時における飲料の摂取と運動後における飲料摂取

では、胃幽門部断面積の増加がエネルギー摂取量に及ぼす影響について、異なる結果であることが示唆された。一過性の運動後は食事からのエネルギー摂取量が減少することが報告されており⁴⁴、安静時における食前の飲料摂取と比較して、運動後の飲料摂取はエネルギー摂取量に及ぼす影響が小さい可能性が考えられる。

その他に食欲に影響を及ぼす生理学指標としては、本研究で測定を行っていない交感神経、副交感神経による働きが挙げられる。Kojima らは、高強度の間欠的ペダリング運動後に Whole body cryotherapy と呼ばれる超低温 (-195°C から-100°C) キャビン内に入り、全身を冷却することによって運動後のエネルギー摂取量が増加したことを報告しており、自律神経の働きによる影響が考えられる⁶³。胃運動は交感神経および副交感神経の働きによって拮抗的に制御されており^{42, 100}、副交感神経の賦活化はエネルギー摂取量の調節を行う胃運動を増加させることが報告されている¹⁰¹。Kojima らは間欠的ペダリング運動後の寒冷暴露により運動後のエネルギー摂取量が増加した際に、寒冷暴露なし条件と比較して寒冷暴露条件では心拍数が減少したことから、寒冷暴露が静脈還流の増加を介して、副交感神経の賦活化が亢進したと考察している⁶³。交感神経および副交感神経の賦活化はエネルギー摂取量の調節にも寄与することが報告されており、交感神経の賦活化はエネルギー摂取量の減少に関連することが報告されている¹⁰²。本研究は Kojima らの体外から寒冷暴露を行った研究とは対照的に、温かい飲料を摂取するといった、体内からの温熱暴露を行った研究であるといえる。しかし、本研究においては交感神経および副交感神経活動の測定は行っていないものの、第2章および第4章の結果から 60°C の飲料の摂取後は胃運動が増加していることから、副交感神経優位の状態であった可能性が考えられる。副交感神経は交感神経と拮抗的に作用することから、60°C の飲料の摂取による副交感神経賦活化は、交感神経の減弱を介して、エネルギー摂取量の増加に寄与した可能性が考えられる。

また本研究においては、第3章および第4章で食欲関連ホルモンの測定を行ったが、

飲料の摂取の有無や摂取する飲料の温度の違いによるアシル化グレリン、PYY（第3章のみ測定）、インスリン濃度の変化は見られなかった。食欲関連ホルモンであるアシル化グレリン、PYYは胃運動の制御を行う消化管ホルモンとしての作用も持つ^{27,28}。本研究では胃運動とエネルギー摂取量が正に相関している一方、アシル化グレリン、PYYの分泌動態に差が見られなかった。胃運動を制御するアシル化グレリン、PYYに分泌の変化が見られなかった一方で、胃運動が飲料摂取の有無や摂取する飲料の温度の違いによって変化した理由として、胃収縮を制御するモチリンなどの消化管ホルモンの働きが影響している可能性が考えられる¹⁰³。モチリンは十二指腸から分泌される消化管ホルモンであり、消化管の運動と食欲の制御を行っている¹⁰³。今後の研究においては、食欲関連ホルモンだけではなく、胃運動を制御するモチリンなどの消化管ホルモンの測定を行い、摂取する飲料の温度が胃運動に影響を及ぼす機構の検討が必要だと考えられる⁸⁰。

第3節 アスリートの運動実施現場への応用

第3章において運動後は安静時と比較してエネルギー摂取量が低下することが明らかとなった。第3章および第4章において、運動後の2°Cの冷水およびタンパク質含有飲料の摂取は、運動のみを行った試行とエネルギー摂取量は変わらないことを明らかにした。第2章および第4章では、60°Cの温水およびタンパク質含有飲料の摂取は、その後のエネルギー摂取量を増加させることを明らかにした。さらに、第4章の結果から、60°Cのタンパク質含有飲料の摂取後においても胃の不快感や膨張感が増加しないことから、運動後の温かいタンパク質含有飲料の摂取は胃の不快感を増加せずに、エネルギー摂取量を増加させることができることが明らかとなった。

運動後は水分、電解質、炭水化物、タンパク質を適切に摂取して筋グリコーゲンを回復させることが推奨されているが、Claytonらは運動後の500 mLの6%タンパク質飲料（4°C、126.4 kcal）の摂取は、500 mLの糖質、脂質、タンパク質の含有が少ないプラセ

ボ飲料（4°C、3.6 kcal）と比較して、その後の自由摂取の食事からのエネルギー摂取量を減少させることを報告している⁹⁸。第4章の結果より、運動後に摂取が推奨されているが、その後のエネルギー摂取量の低下が報告されているタンパク質含有飲料について、温かい温度（60°C）で摂取することにより胃運動が増加し、その後のエネルギー摂取量が増加することを報告し、運動後の食欲を増加させる観点から、栄養摂取における効果的な摂取温度について有益な情報となることが予想される。また第4章の結果において、運動＋冷飲料摂取試行および運動＋温飲料摂取試行にて飲料摂取後にインスリンの高値が確認できた。運動後は糖・タンパク質飲料の摂取により、インスリン分泌が増大し、筋グリコーゲンの合成が促進されることから¹⁰⁴、運動＋温飲料摂取試行では筋グリコーゲンの回復に必要なインスリン分泌が促進されており、かつ、運動後の食欲が低下しやすい時間帯においてもエネルギー摂取量が冷飲料の摂取時より増加していることを明らかにできた。これらの結果から、運動後の温かい糖・タンパク質飲料の摂取は運動後の筋グリコーゲンの回復を目的とした栄養補給と、コンディションを整えるための適切なエネルギー摂取を亢進する方法として有効である可能性が示唆された。

第4節 研究の限界

第2章および第4章では異なる温度の飲料摂取がエネルギー摂取量に及ぼす影響を検討し、安静時と運動後のどちらの時間帯においても、温かい飲料の摂取はその後の胃幽門部収縮回数が増加し、エネルギー摂取量が増加することを明らかにした。胃運動の活性化は食欲の調節に影響を及ぼすことが報告されている一方、第4章では温かい飲料の摂取による食欲関連ホルモン、消化管血流、胃内容排出の変化は認められていないことから、温かい飲料の摂取による胃運動の増加がどのような生体反応の変化を介して摂食を亢進させるかについて本研究全体より明らかにすることができなかった。先行研究において胃内への熱刺激によって、胃壁の血流と胃内温度はともに上昇することが報告

されている¹⁰⁵。また、50°Cのオレンジジュースを経口投与した場合の胃内温度は43°Cであると報告されており⁵³、本研究でも2°Cおよび60°Cの飲料摂取後は胃内温度が変化した可能性があるが、実際に胃幽門部収縮回数に影響を及ぼした胃内温度については不明であり、今後、異なる温度の飲料を摂取した際の生体内、特に胃内温度の変化を検討する必要があると考えられる。

本研究の対象者は健康成人男性であり、今後は試合期やトレーニング期にコンディションを保つためにエネルギー摂取量を調節する必要があるアスリートを対象とした検討も必要である。同時に、運動後のエネルギー摂取量の減少が、体重管理の為にポジティブに働く可能性がある過体重者や肥満者における検討も必要であると考えられる。

第5節 今後の展望

第2章から第4章にかけて、エネルギー摂取量の測定のために自由摂取の食事調査を行った。第2章と第4章においてはカップ焼きそば、コーンフレークの単一食の食事調査を行い、第3章ではビュッフェ形式の食事調査を行い、満腹になるまで摂取してもらい、エネルギー摂取量を算出した。ビュッフェ形式の食事と単一食の食事は、それぞれエネルギー摂取量の評価方法として確立している。しかし、食事には栄養を補給するという役割とともに、おいしさや楽しさの提供といった質的な側面が存在する¹⁰⁶。しかし、本研究では対象者が食事をおいしく摂取できているかといった味覚への影響については測定しておらず、アスリートが日々行う食事におけるエネルギー摂取量を増加させるための取り組みとして、今後の研究では食事をおいしく感じているかといった味覚への影響についても検討が必要である。

本研究は安静時や運動後の飲料の摂取が急性的なエネルギー摂取量に及ぼす影響を検討した。しかし、アスリートにおける日々のトレーニングや試合後のコンディションを整えるための食欲亢進方法の検討のためには、今後、日々の継続した温かい飲料の摂

取が食欲に及ぼす影響といった、慢性の影響を検討する必要がある。

また、先行研究において、50°C から 65°C の飲料は胃電位計で測定した胃収縮頻度が増加することが報告していることから^{52, 54, 57}、本研究では温かい飲料として 60°C の水（第 2 章）、タンパク質含有飲料（第 4 章）を用いた。80%VO_{2max} の強度における 30 分間のランニング運動後においても、60°C のタンパク質含有飲料は 2°C のタンパク質含有飲料の摂取と比較して、胃の不快感や膨張感を増加させなかった。しかし、日常生活の中の運動実施場面を想定した場合、運動後の胃運動と食欲を増加させるために、60°C という温度が最も適しているか、また試料の組成についても今後詳細な検討が必要である。

第 6 節 総括

本研究では摂取する飲料の温度に着目し、運動後の食欲の低下抑制を目的とした飲料摂取方法の検討を行うために、以下の 3 つの研究を行った。それぞれの研究が着目した問題点、研究の目的、結果を以下にまとめた。

【課題研究 1（第 2 章）】安静時における異なる温度の水の摂取が胃運動および食欲に与える影響

問題点：安静時における摂取する飲料の温度が胃運動と食欲に及ぼす影響について、両視点から検討されていないこと。

目的：健常成人男性の安静時における異なる温度の水の摂取が胃運動と食欲に及ぼす影響を検討すること。

結果：食事の一時間前に 500 mL の温水（60°C）を摂取すると、500 mL の冷水（2°C）を摂取した際と比較して、自由摂取の食事調査からのエネルギー摂取量および胃幽門部収縮回数が有意に高値を示した。飲料摂取直後の胃幽門部収縮回数とエネルギー摂取量が正の相関関係にあった。本研究の結果は、500 mL の温水（60°C）の摂取によるエネ

ルギー摂取量の増加が胃運動の増加に関連していることを示唆した。

【課題研究 2 (第 3 章)】 運動後の冷水摂取が胃運動および食欲に及ぼす影響

問題点: 運動誘発性食欲不振が運動後の飲料摂取による消化管機能の変化に起因するものなのか不明なこと。

目的: 本研究は健常成人男性における運動後の栄養補給が求められる時間帯の水摂取が、胃運動および食欲に及ぼす影響を検討すること。

結果: 70% $\text{VO}_{2\text{max}}$ の強度で行った 60 分間のランニング運動後は、500 mL の冷水 (2°C) を摂取するか否かに関わらず、安静試行と比較して、同程度にエネルギー摂取量が減少することが明らかとなった。60 分間の安静後に 500 mL の冷水 (2°C) の摂取を行った試行では、安静試行と比較して、エネルギー摂取量が減少した。60 分間の安静もしくは 70% $\text{VO}_{2\text{max}}$ の強度で 60 分間のランニング運動を行った後に 500 mL の冷水 (2°C) を摂取した両試行において、冷水を摂取しない安静試行及び運動試行と比較して胃幽門部断面積が有意に高値を示した。本研究の結果は、運動誘発性食欲不振の原因として、冷水の摂取による胃幽門部断面積の増加が及ぼす影響は小さいことが示唆された。

【課題研究 3 (第 4 章)】 運動後に摂取する飲料の温度が胃運動および食欲に及ぼす影響

問題点: 運動後における摂取するタンパク質含有飲料の温度が胃運動と食欲に及ぼす影響が不明なこと。

目的: 健常成人男性において運動後に摂取するタンパク質含有飲料の温度が胃運動および食欲に及ぼす影響を検討すること。

結果: 80% $\text{VO}_{2\text{max}}$ の強度で行った 30 分間のランニング運動後は、300 mL の温かいタンパク質含有飲料 (60°C) を摂取すると、同量で冷たいタンパク質含有飲料 (2°C) を摂

取した試行および運動後に何も摂取しない試行と比較して、胃幽門部収縮回数およびエネルギー摂取量が有意に高値を示した。本研究の結果は、運動後における温かいタンパク質含有飲料の摂取（60°C）によるエネルギー摂取量の増加は胃運動の増加に関連していることを示唆した。

第7節 結論

本研究の結果は、一過性の運動後は冷水（2°C）の摂取の有無に関わらず、エネルギー摂取量が減少すること、しかし、安静時および一過性の運動後の両時間帯において、温かい飲料（60°Cの水 500 mL および 60°Cのタンパク質含有飲料 300 mL）の摂取は、胃幽門部収縮回数およびエネルギー摂取量を増加させることを示した。本研究は、栄養補給が求められる運動後の時間帯における、温かい飲料の摂取はエネルギー摂取量の増加に寄与する可能性を提示した。

参考文献

1. Van Itallie TB, Sinisterra L & Stare FJ. Nutrition and athletic performance. *Journal of the American Medical Association*, 2016: 162(12): 1120–1126.
2. Heydenreich J, Kayser B, Schutz Y & Melzer K. Total energy expenditure, energy intake, and body composition in endurance athletes across the training season: a systematic review. *Sports Medicine Open*, 2017: 3(1): 1–24.
3. Drenowatz C, Eisenmann JC, Carlson JJ, Pfeiffer KA, Pivarnik JM, Drenowatz C, Eisenmann JC, Pfeiffer KA, Pivarnik JM & Carlson JJ. Energy expenditure and dietary intake during high-volume and low-volume training periods among male endurance athletes. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 2012: 37(2): 199–205.
4. Stubbs RJ. Peripheral signals affecting food intake. *Nutrition*, 1999: 15(7–8): 614–625.
5. Camilleri M. Peripheral mechanisms in appetite regulation. *Gastroenterology*, 2015: 148(6): 1219–1233.
6. Schwartz MW, Woods SC, Porte D, Seeley RJ & Baskin DG. Central nervous system control of food intake. *Nature*, 2000: 404(6778): 661–671.
7. Valassi E, Scacchi M & Cavagnini F. Neuroendocrine control of food intake. *Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases*, 2008: 18(2): 158–168.
8. Lee KJ, Vos R, Janssens J TJ. Differences in the sensorimotor response to distension between the proximal and distal stomach in humans. *Gut*, 2004: 53(7): 938–943.
9. Kissileff HR, Carretta JC, Geliebter A, Xavier Pi-Sunyer F, Ge-liebter A & Xavier Pi F. Peptides that regulate food intake cholecystokinin and stomach distension combine to reduce food intake in humans. *American Journal of Physiology - Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 2003: 285(5): 992–998.
10. 本郷 道夫. 胃酸分泌、胃内分泌そして胃運動. *化学と教育*, 2017: 65(7): 356–357.

11. Someya N, Endo MY, Fukuba Y & Hayashi N. Blood flow responses in celiac and superior mesenteric arteries in the initial phase of digestion. *American Journal of Physiology - Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 2008; 294(6): 1790–1796.
12. Perko MJ, Nielsen HB, Skak C, Clemmesen JO, Schroeder T V. & Secher NH. Mesenteric, coeliac and splanchnic blood flow in humans during exercise. *Journal of Physiology*, 1998; 513(3): 907–913.
13. Hazell TJ, Islam H, Townsend LK, Schmale MS & Copeland JL. Effects of exercise intensity on plasma concentrations of appetite- regulating hormones : Potential mechanisms. *Appetite*, 2016; 98: 80–88.
14. Delhanty PJD, Neggers SJ & van der Lely AJ. Mechanisms in endocrinology: Ghrelin: the differences between acyl- and des-acyl ghrelin. *European Journal of Endocrinology*, 2012; 167(5): 601–608.
15. Nakazato M, Kangawa K, Kojima M, Matsuo H, Matsukura S, Murakami N & Date Y. A role for ghrelin in the central regulation of feeding. *Nature*, 2002; 409(6817): 194–198.
16. Wren AM, Seal LJ, Cohen MA, Brynes AE, Frost GS, Murphy KG, Dhillon WS G & MA BS. Ghrelin enhances appetite and increases food intake in humans. *Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism*, 2001; 86(12): 5992.
17. Hotta M, Ohwada R, Katakami H, Shibasaki T, Hizuka N & Takano K. Plasma levels of intact and degraded ghrelin and their responses to glucose infusion in anorexia nervosa. *Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism*, 2004; 89(11): 5707–5712.
18. Tataranni PA, Ravussin E, Tschop M, Weyer C, Devanarayan V & Heiman ML. Circulating ghrelin levels are decreased in human obesity. *Diabetes*, 2007; 50(4): 707–709.
19. Matsukura S, Kangawa K, Date Y, Nozoe S-I, Mizuta M, Hosoda H, Nakazato M, Mondal MS, Shiiya T & Tanaka M. Plasma ghrelin levels in lean and obese humans and the effect of

- glucose on ghrelin secretion. *Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism*, 2014: 87(1): 240–244.
20. Persaud SJ & Bewick GA. Peptide YY: more than just an appetite regulator. *Diabetologia*, 2014: 57(9): 1762–1769.
 21. Sloth B, Davidsen L, Holst JJ, Flint A & Astrup A. Effect of subcutaneous injections of PYY 1-36 and PYY 3-36 on appetite, ad libitum energy intake, and plasma free fatty acid concentration in obese males. *American Journal of Physiology - Endocrinology and Metabolism*, 2007: 293(2): E604-609.
 22. Sloth B, Holst JJ, Flint A, Gregersen NT & Astrup A. Effects of PYY 1-36 and PYY 3-36 on appetite, energy intake, energy expenditure, glucose and fat metabolism in obese and lean subjects. *American Journal of Physiology - Endocrinology and Metabolism*, 2007: 292(5): 1062–1068.
 23. Shah M & Vella A. Effects of GLP-1 on appetite and weight. *Reviews in Endocrine and Metabolic Disorders*, 2014: 15(3): 181–187.
 24. Verdich C, Flint A, Gutzwiller J-P, Näslund E, Näslund N, Beglinger C, Hellström PM, Hellström H, Long SJ, Morgan LM, Holst JJ & Astrup A. A meta-analysis of the effect of glucagon-like peptide-1 (7-36) amide on ad libitum energy intake in humans. *The Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism*, 2001: 86(9): 4382–4389.
 25. Stanley S, Wynne K, McGowan B, Bloom S, Wynne K, McGowan B, Bloom S & Regulation H. Hormonal regulation of food intake. *Physiological Reviews*, 2005: 85(4): 1131–1158.
 26. Kojima S, Ueno N, Asakawa A, Sagiyama K, Naruo T, Mizuno S & Inui A. A role for pancreatic polypeptide in feeding and body weight regulation. *Peptides*, 2007: 28(2): 459–463.
 27. Levin F, Edholm T, Schmidt PT, Grybäck P, Jacobsson H, Degerblad M HC & Holst JJ,

- Rehfeld JF, Hellström PM NE. Ghrelin stimulates gastric emptying and hunger in normal-weight humans. *Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism*, 2006: 91(9): 3296–3302.
28. Camilleri M. Peripheral mechanisms in the control of appetite and related experimental therapies in obesity. *Regulatory Peptides*, 2009: 156(1–3): 24–27.
29. Janssen P, Berghe P Vanden, Verschueren S, Lehmann A, Depoortere I & Tack J. Review article : the role of gastric motility in the control of food intake. *Alimentary Pharmacology & Therapeutics*, 2011: 33(8): 880–894.
30. Costill DL & Saltin B. Factors limiting gastric emptying during rest and exercise. *Journal of Applied Physiology*, 1974: 37(5): 679–683.
31. Feldman M & Nixon J V. Effect of exercise on postprandial gastric secretion and emptying in humans. *Journal of Applied Physiology*, 1982: 53(4): 851–854.
32. Cammack J, Read NW, Cann PA, Greenwood B, Holgate AM & Royal Hallamshire Hospital H. Effect of prolonged exercise on the passage of a solid meal through the stomach and small intestine. *Gut*, 1982: 23(11): 957–961.
33. Neuffer PD, Young AJ & Sawka MN. Gastric emptying during walking and running: effects of varied exercise intensity. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 1989: 58(4): 440–445.
34. Neuffer PD, Costill DL, Fink WJ, Kirwan JP, Fielding RA & Flynn MG. Effects of exercise and carbohydrate composition on gastric emptying. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 1986: 18(6): 658–662.
35. Fordtran JS & Saltin B. Gastric emptying and intestinal absorption during prolonged severe exercise. *Journal of Applied Physiology*, 1967: 23(3): 331–335.
36. Ramsbottom N & Hunt JN. Effect of exercise on gastric emptying and gastric secretion. *Digestion*, 1974: 10(1): 1–8.

37. Marzio L, Formica P, Fabiani F, LaPenna D, Vecchiatt L & Cucurullo F. Influence of physical activity on gastric emptying of liquids in normal human subjects. *American Journal of Gastroenterology*, 1991; 86(10): 1433–1436.
38. Leiper JB, Broad NP & Maughan RJ. Effect of intermittent high-intensity exercise on gastric emptying in man. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 2001; 33(8): 1270–1278.
39. Leiper JB, Nicholas CW, Ali A, Williams C & Maughan RJ. The effect of intermittent high-intensity running on gastric emptying of fluids in man. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 2005; 37(2): 240–247.
40. Kashima H, Harada N, Miyamoto K, Fujimoto M, Fujita C, Endo MY, Kobayashi T, Miura A & Fukuba Y. Timing of postexercise carbohydrate-protein supplementation: roles of gastrointestinal blood flow and mucosal cell damage on gastric emptying in humans. *Journal of Applied Physiology*, 2017; 123(3): 606–613.
41. Qamar MI RA. Effects of exercise on mesenteric blood flow in man. *Gut*, 1987; 28(5): 583–587.
42. Horner KM, Schubert MM, Desbrow B, Byrne NM, King NA, Horner KM, King NA, Schubert MM, Desbrow AB & Byrne NM. Acute exercise and gastric emptying: a meta-analysis and implications for appetite control. *Sports Medicine*, 2015; 45(5): 659–678.
43. Broom DR, Stensel DJ, Bishop NC, Burns SF & Miyashita M. Exercise-induced suppression of acylated ghrelin in humans. *Journal of Applied Physiology*, 2007; 102(6): 2165–2171.
44. Ueda SY, Yoshikawa T, Katsura Y, Usui T & Fujimoto S. Comparable effects of moderate intensity exercise on changes in anorectic gut hormone levels and energy intake to high intensity exercise. *Journal of Endocrinology*, 2009; 203(3): 357–364.
45. Erdmann J, Tahbaz R, Lippl F, Wagenpfeil S & Schusdziaarra V. Plasma ghrelin levels during exercise - effects of intensity and duration. *Regulatory Peptides*, 2007; 143(1–3): 127–135.

46. Bilski J, Mańko G, Brzozowski T, Pokorski J, Nitecki J NE & Wilk-Frańczuk M, Ziółkowski A, Jaszczur-Nowicki J, Kruczkowski D PW. Effects of exercise of different intensity on gut peptides, energy intake and appetite in young males. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 2013: 20(4): 787–793.
47. King JA, Miyashita M, Wasse LK SD. Influence of prolonged treadmill running on appetite, energy intake and circulating concentrations of acylated ghrelin. *Appetite*, 2010: 54(3): 492–498.
48. King JA, Wasse LK & Stensel DJ. The acute effects of swimming on appetite, food intake, and plasma acylated ghrelin. *Journal of Obesity*, 2010: 2011: 1–8.
49. Wasse LK, Sunderland C, King JA, Miyashita M & Stensel DJ. The influence of vigorous running and cycling exercise on hunger perceptions and plasma acylated ghrelin concentrations in lean young men. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 2013: 38(1): 1–6.
50. Broom David R., Batterham RL, King JA & Stensel DJ. Influence of resistance and aerobic exercise on hunger, circulating levels of acylated ghrelin, and peptide YY in healthy males. *American Journal of Physiology - Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 2009: 296(1): R29–R35.
51. Kawano H, Mineta M, Asaka M, Miyashita M, Numao S, Gando Y, Ando T, Sakamoto S & Higuchi M. Effects of different modes of exercise on appetite and appetite-regulating hormones. *Appetite*, 2013: 66: 26–33.
52. Sun WM, Penagini R, Hebbard G, Malbert C, Jones KL, Emery S, Dent J & Horowitz M. Effect of drink temperature on antropyloroduodenal motility and gastric electrical activity in humans. *Gut*, 1995: 37(3): 329–334.
53. Sun WM, Houghton LA, Read NW, Grundy DG & Johnson AG. Effect of meal temperature

- on gastric emptying of liquids in man. *Gut*, 1988; 29(3): 302–305.
54. Verhagen MAMT, Luijk HD, Samsom M & Smout AJPM. Effect of meal temperature on the frequency of gastric myoelectrical activity. *Journal of Neurogastroenterology and Motility*, 1998; 10(2): 175–181.
 55. Mishima Y, Amano Y, Takahashi Y, Mishima Y, Moriyama N, Miyake T, Ishimura N, Ishihara S & Kinoshita Y. Gastric emptying of liquid and solid meals at various temperatures. *Journal of Gastroenterology*, 2009; 44(5): 412–418.
 56. Bateman DN. Effects of meal temperature and volume on the emptying of liquid from the human stomach. *The Journal of Physiology*, 1982; 331(1): 461–467.
 57. 脇坂 しおり, 松本 雄大, 永井 元, 村 絵美, 森谷 敏夫, 永井 成美. 摂取する水の温度と量がヒトの胃運動に及ぼす影響. *日本栄養・食糧学会誌*, 2011; 64(1): 19–25.
 58. Evans GH, Shirreffs SM, Watson P & Maughan RJ. Gastric emptying rate and perceived hunger after rest and exercise in man. *British Journal of Sports Medicine*, 2010; 44(14): i20–i21.
 59. Kashima H, Sugimura K, Taniyawa K, Kondo R, Yamaoka Endo M, Tanimoto S, Kobayashi T, Miura A & Fukuba Y. Timing of post-resistance exercise nutrient ingestion: effects on gastric emptying and glucose and amino acid responses in humans. *British Journal of Nutrition*, 2018; 120(9): 995–1005.
 60. White LJ, Dressendorfer RH, Holland E, McCoy SC & Ferguson MA. Increased caloric intake soon after exercise in cold water. *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism*, 2005; 15(1): 38–47.
 61. Crabtree DR & Blannin AK. Effects of exercise in the cold on ghrelin, PYY, and food intake in overweight adults. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 2015; 47(1): 49–57.
 62. Wasse LK, King JA, Stensel DJ SC. Effect of ambient temperature during acute aerobic

- exercise on short-term appetite, energy intake, and plasma acylated ghrelin in recreationally active males. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 2013: 38(8): 905–909.
63. Kojima C, Kasai N, Kondo C, Ebi K GK. Post-exercise whole body cryotherapy (-140 °c) increases energy intake in athletes. *Nutrients*, 2018: 10(7): E893.
 64. Halse RE, Wallman KE GK. Postexercise water immersion increases short-term food intake in trained men. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 2011: 43(4): 632–638.
 65. Daniels MC & Popkin BM. The impact of water intake on energy intake and weight status: a systematic review. *Nutrition Reviews*, 2010: 68(9): 505–521.
 66. Davy BM, Dennis EA, Dengo AL, Wilson KL & Davy KP. Water consumption reduces energy intake at a breakfast meal in obese older adults. *Journal of the American Dietetic Association*, 2008: 108(7): 1236–1239.
 67. Van Walleghen EL, Orr JS, Gentile CL & Davy BM. Pre-meal water consumption reduces meal energy intake in older but not younger subjects. *Obesity (Silver Spring)*, 2007: 15(1): 93–99.
 68. Corney RA, Sunderland C & James LJ. Immediate pre-meal water ingestion decreases voluntary food intake in lean young males. *European Journal of Nutrition*, 2016: 55(2): 815–819.
 69. Flint A, Raben A, Blundell JE & Astrup A. Reproducibility, power and validity of visual analogue scales in assessment of appetite sensations in single test meal studies. *International Journal of Obesity and Related Metabolic Disorders*, 2000: 24(1): 38–48.
 70. Putte P Van De & Perlas A. Ultrasound assessment of gastric content and volume. *British Journal of Anaesthesia*, 2014: 113(1): 12–22.
 71. Muresan C, Blaga TS, Muresan L & Dumitrascu DL. Abdominal ultrasound for the evaluation of gastric emptying revisited. *Journal of Gastrointestinal and Liver Diseases*,

2015; 24(3): 329–338.

72. Sekino Y, Yamada E, Sakai E, Ohkubo H, Higurashi T, Iida H, Endo H T & H, Koide T, Sakamoto Y, Nonaka T, Gotoh E, Maeda S, Nakajima A IM. Influence of sumatriptan on gastric accommodation and on antral contraction in healthy subjects assessed by ultrasonography. *Journal of Neurogastroenterology and Motility*, 2012; 24(12): 1083-e564.
73. Little TJ, Luscombe-marsh ND, Gentilcore D, Brook EJ & Feinle-bisset C. Effects of varying the inter-meal interval on relationships between antral area, gut hormones and energy intake following a nutrient drink in healthy lean humans. *Physiology & Behavior*, 2014; 135: 34–43.
74. Rolls BJ, Kim S & Fedoroff IC. Effects of drinks sweetened with sucrose or aspartame on hunger, thirst and food intake in men. *Physiology & Behavior*, 1990; 48(1): 19–26.
75. Morley JE. *Nutrition in older adults, an issue of clinics in geriatric medicine*. Elsevier, 2015: 1–158.
76. Marciani L, Gowland PA, Spiller RC, Manoj P, Moore RJ, Young P & Fillery-Travis AJ. Effect of meal viscosity and nutrients on satiety, intragastric dilution, and emptying assessed by MRI. *American Journal of Physiology - Gastrointestinal and Liver Physiology*, 2001; 280(6): G1227-1233.
77. Rigaud D, Trostler N, Rozen R, Vallot T AM. Gastric distension, hunger and energy intake after balloon implantation in severe obesity. *International Journal of Obesity and Related Metabolic Disorders*, 1995; 19(7): 489–495.
78. Gyring Nieben O & Harboe H. Intragastric balloon as an artificial bezoar for treatment of obesity. *Lancet*, 1982; 23(1): 198–199.
79. Sturm K, Parker B, Wishart J, Feinle-bisset C, Jones KL & Chapman I. Energy intake and appetite are related to antral area in healthy young and older subjects. *American Journal of*

- Clinical Nutrition, 2004: 80(3): 656–667.
80. Tack J, Deloof E, Ang D, Scarpellini E, Vanuytsel T, Van Oudenhove L & Depoortere I. Motilin-induced gastric contractions signal hunger in man. *Gut*, 2016: 65(2): 214–224.
 81. Parkin JA, Carey MF, Martin IK, Stojanovska L & Febbraio MA. Muscle glycogen storage following prolonged exercise: effect of timing of ingestion of high glycemic index food. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 1997: 29(2): 220–224.
 82. Blundell JE, Gibbons C, Caudwell P, Finlayson G & Hopkins M. Appetite control and energy balance: Impact of exercise. *Obesity Reviews*, 2015: 16(S1): 67–76.
 83. Mitchell JB, Costill DL, Houmard JA, Fink WJ, Robergs RA DJ. Gastric emptying: influence of prolonged exercise and carbohydrate concentration. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 1989: 21(3): 269–274.
 84. Houmard JA, Egan PC, Johns RA, Neuffer PD, Chenier TC IR. Gastric emptying during 1 h of cycling and running at 75% VO₂max. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 1991: 23(3): 320–325.
 85. Borg GA. Perceived exertion: a note on ‘history’ and methods. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 1973: 5(2): 90–93.
 86. Taylor HL, Buskirk E & Henschel A. Maximal Oxygen Intake as an Objective Measure of Cardio-Respiratory Performance. *Journal of Applied Physiology*, 1955: 8(1): 73–80.
 87. Calbet JAL & MacLean DA. Role of caloric content on gastric emptying in humans. *Journal of Physiology*, 1997: 498(2): 553–559.
 88. Okabe T, Terashima H & Sakamoto A. Determinants of liquid gastric emptying: comparisons between milk and isocalorically adjusted clear fluids. *British Journal of Anaesthesia*, 2015: 114(1): 77–82.
 89. Tucker AJ, Heap S, Ingram J, Law M & Wright AJ. Postprandial appetite ratings are

- reproducible and moderately related to total day energy intakes, but not ad libitum lunch energy intakes, in healthy young women. *Appetite*, 2016: 99: 97–104.
90. Tomasik PJ, Sztéfko K & Pizon M. The effect of short-term cold and hot exposure on total plasma ghrelin concentrations in humans. *Hormone and Metabolic Research*, 2005: 37(3): 189–190.
 91. Tan PMS & Lee JKW. The role of fluid temperature and form on endurance performance in the heat. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 2015: 25(S1): 39–51.
 92. Hosseinlou A, Khamnei S & Zamanlu M. The effect of water temperature and voluntary drinking on the post rehydration sweating. *International Journal of Clinical and Experimental Medicine*, 2013: 6(8): 683–687.
 93. Fujihira K, Hamada Y, Yanaoka T, Yamamoto R, Suzuki K & Miyashita M. The effects of water temperature on gastric motility and energy intake in healthy young men. *European Journal of Nutrition*, 2019: In press.
 94. Treacy PJ, Jamieson GG DJ. The importance of the pylorus as a regulator of solid and liquid emptying from the stomach. *Journal of Gastroenterology and Hepatology*, 1995: 10(6): 639–645.
 95. Nakamura E, Kito Y, Hashitani H & Suzuki H. Metabolic component of the temperature-sensitivity of slow waves recorded from gastric muscle of the guinea-pig. *Journal of Smooth Muscle Research*, 2006: 42(1): 33–48.
 96. Stanstrup J, Schou SS, Holmer-Jensen J, Hermansen K & Dragsted LO. Whey protein delays gastric emptying and suppresses plasma fatty acids and their metabolites compared to casein, gluten, and fish protein. *Journal of Proteome Research*, 2014: 13(5): 2396–2408.
 97. Thomas DT, Erdman KA & Burke LM. American college of sports medicine joint position statement. Nutrition and athletic performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*,

- 2016: 48(3): 543–568.
98. Clayton DJ, Stensel DJ, Watson P & James LJ. The effect of post-exercise drink macronutrient content on appetite and energy intake. *Appetite*, 2014; 82: 173–179.
 99. El Ouazzani T. Thermoreceptors in the digestive tract and their role. *Journal of the Autonomic Nervous System*, 1984; 10(3–4): 246–254.
 100. Browning KN, Verheijden S & Boeckxstaens GE. The vagus nerve in appetite regulation, mood, and intestinal inflammation. *Gastroenterology*, 2017; 152(4): 730–744.
 101. 河原 克雅, 佐々木 克典. カラー図解 人体の正常構造と機能 III 消化管. 日本医事新報社, 2012: 28–71.
 102. Messina G, De Luca V, Viggiano A, Ascione A, Iannaccone T, Chieffi S & Monda M. Autonomic nervous system in the control of energy balance and body weight: Personal contributions. *Neurology Research International*, 2013; 2013: 639280.
 103. Kitazawa T & Kaiya H. Regulation of gastrointestinal motility by motilin and ghrelin in vertebrates. *Frontiers in Endocrinology*, 2019; 10: 278.
 104. Berardi JM, Price TB, Noreen EE & Lemon PWR. Postexercise muscle glycogen recovery enhanced with a carbohydrate-protein supplement. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 2006; 38(6): 1106–1113.
 105. 田窪 重徳. 胃壁血流量と胃内温度の相関関係に関する実験的研究. *日本薬理学雑誌*, 1956; 52(3): 228–237.
 106. 厚生労働省. 日本人の長寿を支える「健康な食事」のあり方に関する検討会 報告書. 厚生労働省, 2014: 1–105.

謝辞

本学位論文は、早稲田大学博士後期課程 3 年間における研究成果をまとめたものです。本学位論文の執筆にあたり、多くの方々からご支援を頂きました。この場を借りて、ご支援を頂きました皆様に心より感謝申し上げます。

初めに、指導教員として多大なるご指導ならびにご高閲を賜りました本研究科の宮下政司准教授に感謝の意を表します。懇切丁寧な研究および論文指導を頂きましたお陰で、本学位論文を完成させることができました。博士後期課程中には2度、短期留学を行った為、遠方からのご指導を頂く形となり、大変ご迷惑をおかけしました。博士後期課程在籍中には、国際学会への参加や国際シンポジウムの企画に携わらせて頂き、国際的な視座を持って研究に取り組む姿勢を学ばせていただきました。長きにわたる懇切丁寧なご指導、ご鞭撻、誠にありがとうございました。

本研究科の鈴木克彦教授には学位論文の副査としてご指導を頂いたことに加え、課題研究の実施および論文投稿において多大なるご支援を頂きました。また、日々の研究活動の中で、いつも温かい言葉をかけて励ましてくださいました。温かいご支援を頂きましたお陰で、無事に博士後期課程を修了することができました。3年間にわたる学生生活にあたり、厚くご支援を頂きましたことに、心より感謝申し上げます。

本研究科の坂本静男教授には、学位論文の副査としてご指導を頂きました。ご多忙の中、副査を快く引き受けて下さり、医学的観点から貴重なご助言を賜りました。審査にあたり、丁寧に本学位論文をご高閲頂き、ご助言を頂いたことで、博士学位論文の考察を深めることができました。改めまして、御礼申し上げます。

博士後期課程の中では、英国 Loughborough 大学およびベルギー KU Leuven 大学に留学をさせて頂いたことが、研究生活の大きな転機となりました。留学期間には、運動生理学における世界最先端の研究に携わらせていただいたことに加え、研究生活を長く続けるためには研究を楽しむ姿勢が重要であることを再認識することができました。Loughborough 大学で過ごした3ヶ月間、KU Leuven 大学で過ごした1ヶ月間と多くの友人の存在は、私の財産です。研究のご指導をくださり、時にはメンターとして導いてくださった Loughborough 大学 David Stensel 教授と KU Leuven 大学 Katrien Koppo 教授に、この場を借りて厚く御礼申し上げます。また、渡航にあたり多くのご支援を賜りま

した、本学所沢総合事務センターの職員の皆様に感謝申し上げます。

課題研究の実施にあたっては、多くの被験者の皆様にご協力を頂きました。高強度のランニング運動や、満腹になるまで食事をして頂くなど、決して楽ではないプロトコルでありましたが、ひとえに、ご参加いただいた被験者の皆様の協力があったからこそ成し遂げることができました。また、被験者の方との関わりの中で、研究の応用性や、次の研究への気づきを得ることができました。改めまして、ご協力をいただきました皆様へ、心より御礼申し上げます。

加えて、博士後期課程の生活にあたり、いつも温かく接してくださった早稲田大学の院生、研究員の皆様、同期の皆様に感謝いたします。研究生活の中で、皆様の温かい支援があったからこそ、博士学位論文提出までに至ることができました。特に、研究室の皆様の力強い協力関係とサポートのお陰で、楽しい研究生活を送ることができました。この場をお借りして、感謝申し上げます。

最後に、長きにわたった学生生活において、いつも温かくサポートをしてくれた家族に、最大限の感謝を意を表します。研究を応援するけれど、まずは体を大切に、いつも温かく見守ってくれた父の存在と、病床の中でも仕事に関する勉強を続けていた亡き母の存在があったからこそ、今日まで研究をつづけることができました。研究生活が上手く立ち行かない時には耳を傾け、頑張りすぎないように、いつも支えてくれた家族がいたお陰で、博士後期課程を無事に修了することができました。特に、海外渡航の機会も多い研究生活の中で、最大限の協力と応援をしてくれた夫に感謝致します。研究に対して深い理解を示し、いつも背中を押してくれた夫の存在がなければ、博士学位論文を完成することはできませんでした。本当に感謝の気持ちでいっぱいです。

博士後期課程を通して、本当に沢山の皆様からご支援を頂きました。ご協力くださった全ての方々に、心より感謝申し上げます。

2020年1月吉日
藤平 杏子