

博士論文

身体冷却による運動能力向上に関わる中枢性機序

2018年3月

広島大学大学院総合科学研究科  
総合科学専攻

鬼塚 純玲

## 目次

<b>I 章. 序論</b> .....	<b>1</b>
1. 暑熱環境下における高体温が運動能力および中枢神経系に及ぼす影響.....	2
2. 身体冷却を用いた実践的暑さ対策.....	3
A. 身体冷却と運動能力.....	3
B. 身体外部冷却.....	3
C. 身体内部冷却.....	7
D. 競技現場への応用.....	9
3. まとめ.....	13
4. 研究の課題および目的.....	13
<b>II 章. 温暖環境下におけるアイススラリーの摂取が前額部皮膚温に及ぼす影響</b> .....	<b>16</b>
1. 緒言.....	17
2. 実験方法.....	18
A. 被験者.....	18
B. 実験手順.....	18
C. 測定項目.....	20
D. 統計処理.....	22
3. 結果.....	22
A. 生理的指標.....	22
B. 主観的指標.....	27

4. 考察.....	28
5. 結論.....	31

### III章. 常温環境下におけるアイススラリーの摂取がヒトの脳温に及ぼす影響

—磁気共鳴スペクトロスコピーを用いた検討—.....	32
1. 緒言.....	33
2. 実験方法.....	34
A. 被験者.....	34
B. 実験手順.....	34
C. MRI および MRS.....	35
D. 測定項目.....	36
E. 統計処理.....	37
3. 結果.....	42
A. 生理的指標.....	42
B. 主観的指標.....	42
4. 考察.....	47
5. 結論.....	50

### IV章. 暑熱環境下における運動前および運動中のアイススラリー摂取が認知機能および運動能力に及ぼす影響.....

1. 緒言.....	52
2. 実験方法.....	53

A.	被験者.....	53
B.	予備実験およびファミリアリゼーション.....	53
C.	本実験.....	54
D.	認知機能の測定.....	55
E.	前額部深部温の測定.....	60
F.	測定項目.....	60
G.	統計処理.....	65
3.	結果.....	66
A.	運動継続時間.....	66
B.	生理的指標.....	67
C.	主観的指標.....	76
D.	認知機能.....	82
4.	考察.....	88
5.	結論.....	92
 <b>V章. 総合考察.....</b>		<b>93</b>
1.	本研究の目的.....	94
2.	脳温に及ぼす影響.....	94
3.	中枢性疲労の検討.....	95
4.	運動前および運動中の摂取.....	96
5.	競技現場への応用.....	97
6.	今後の展望.....	98

7. まとめ.....	99
引用文献.....	102
謝辞.....	116

# I 章 序論

## 1. 暑熱環境下における高体温が運動能力および中枢神経系に及ぼす影響

ヒトの体温は、熱産生と熱放散のバランスによってほぼ一定に調節されている。運動中に活動筋で産生された熱は、対流、伝導、放射および蒸発といった様々な手段で空気中へ放散される。しかし、暑熱環境下では伝導や対流などの熱放散が妨げられるため、体温が上昇しやすくなる。したがって、暑熱環境下における運動時には過度な体温上昇（高体温）が引き起こされ、それにより運動能力が低下することが示されている（MacDougal et al., 1974; Caputa et al., 1986; Brück & Olschewski, 1987; Nielsen et al., 1993; Febbraio et al., 1994; Galloway & Maughan, 1997; Cheung & McLellan, 1998; Fuller et al., 1998; Gonzalez-Alonso et al., 1999; Walters et al., 2000; Drust et al., 2005）。Gonzalez-Alonso et al. (1999) は、運動前の身体冷却または身体加温により異なる核心温で運動を開始させたにも関わらず、どの群も約 40°C の核心温で疲労困憊することから、ヒトには運動出力や熱産生を低下させ、深刻な熱中症を防ぐ保護機構として作用する“危機的限界体温”が存在することを示唆した。運動によって引き起こされる高体温は、脳活動にも影響を及ぼす。タイムトライアルや連続的な最大パワーの発揮といった自発的な運動を行う際には、高体温による危機的状況の回避として“脳の予期活動”が生じ、パワー発揮などの低下が引き起こされることが示唆されている（Tucker et al., 2004; Cheung & Sleivert, 2004）。一方で、最大下運動時の高体温は、過換気による脳循環の低下が脳への血流低下を惹起し、脳への酸素およびエネルギーの供給量や脳からの老廃物の除去能力が低下することにより疲労を誘発させる可能性があることが示唆されている（Nybo & Nielsen, 2001b; Kay et al., 2001; Gray & Nimmo, 2001; Hasegawa & Cheung, 2013）。このような体内のエネルギー源の枯渇や筋機能の不全などの“末梢性疲労”を伴わずに引き起こされる疲労は“中枢性疲労”と呼ばれ、モチベーションの低下や脳代謝の変化、脳内ホルモンおよび脳内神経伝達物質の変化、運動ニューロンの動員などの中枢神経系に影響を及ぼす（Nybo, 2008; Roelands & Meeusen, 2010）。また、この中枢性疲労の発現は、認知機能の低下を引き起こす要因となる。風間ら（2011）は、持久性運動時における核心温の上昇が認知機能に及ぼす影響について検討し

た結果、温熱負荷を与えて核心温が過度に上昇した際に認知機能が低下したことを報告している。この認知機能の低下には、核心温の上昇に伴う脳温の上昇が関与していると考えられている (Cheung & Sleivert, 2004; Hasegawa & Cheung, 2013)。

このように、暑熱環境下における高体温は末梢性疲労および中枢性疲労の増加を介して運動能力や認知機能を低下させる可能性があり、厳しい環境条件下での運動が強いられる近年において、過度な体温の上昇を防ぐことは重要な課題となっている。

## 2. 身体冷却を用いた実践的暑さ対策

### 2-A. 身体冷却と運動能力

過度な体温上昇による運動能力の低下を防ぐ有効かつ実践的な対策として、運動前の身体冷却 (プレクーリング) が挙げられる。プレクーリングが運動能力を改善させるメカニズムについてはまだ完全に明らかにされてはいないが、核心温の低下による熱貯蔵量の増加、心拍数の低下、発汗率の減少による脱水の抑制などが報告されている (Wegmann et al., 2012)。また、運動中の核心温の低下は熱貯蔵量の増加だけでなく中枢神経系の活性を増加させることで、運動能力を改善することが証明されている (Morrison et al., 2004; Skein et al., 2012; Thomas et al., 2006; Burdon et al., 2013)。このように、プレクーリングは末梢性 (脱水やエネルギー可用性の低下、筋代謝の変化など) および中枢性 (モチベーションの低下や脳代謝の変化など) の疲労を抑制し、運動能力を改善させると考えられている。

### 2-B. 身体外部冷却

身体外部冷却が持久性運動能力を向上させることはこれまで数多く示されている。身体外部からのプレクーリングが運動能力に及ぼす影響については Table 1. にまとめた。

González-Alonso et al. (1999) は、暑熱環境下における運動前 30 分間の冷水浴が持久性運動能力に及ぼす影響を調査した。身体冷却によって低体温状態にした条件、身体加温をして運動開始時に高体温を誘発した条件、処置なしのコントロール条件の異なる 3 つの条件を

設定し、疲労困憊に至るまでの運動継続時間を比較したところ、運動前に冷却した条件において運動開始時の核心温が低下することで体温の危機的限界レベルに達するまでの時間が増加し、持久性運動能力が向上したことが報告されている。また、Arngrimsson et al. (2004) は、温暖環境下における 38 分間のウォーミングアップ中に T シャツまたはクーリングジャケットを着用した後、5km のトレッドミルランニングを行った場合、クーリングジャケットを着用した条件において核心温が有意に低下し、ランニング時間が有意に短縮したことを報告している。また、より実践的な研究としては、Duffield et al. (2010) がタイムトライアルを用いてプレクーリングの効果を検証している。彼らの研究では、運動前 20 分間の下半身浴とウォーミングアップ中のアイスパック（大腿および下腿部）を用いたプレクーリングが、冷却なしのコントロール条件と比較して運動前半の核心温を低下させ、40 分のタイムトライアル中の平均パワー出力を向上させたことが報告されている。このような実際の競技現場で行われるタイムトライアルを用いた研究において、プレクーリングによるエルゴジェニック効果は、プレクーリングによる生理学的効果（核心温の低下など）がすでに軽減した段階（タイムトライアル後半）で現れるようである（Wegmann et al., 2012）。以上のように、身体外部冷却を用いたプレクーリングは長時間の運動（30～60 分）においてその有効性が高いことが示唆されている。

一方で、プレクーリングは短時間の高強度または間欠的な運動においては有効性が限られる場合がある。Castle et al. (2006) は、暑熱環境下における間欠的運動前にアイスパックによる大腿部および下腿部の冷却を行うと、全力ペダリング時の最大パワーが改善したことを報告している。Minett et al. (2011) の研究においても、アイスタオルによる頭部および頸部の冷却、冷水浴による手の冷却、アイスパックによる大腿部の冷却を組み合わせた運動前の全身冷却によってその後のスプリントパフォーマンスが改善したことが報告されている。それに対し、Sleivert et al. (2001) は、アイスベストによる胴の冷却と 4℃の水の還流による脚部の冷却を組み合わせたプレクーリングが、その後の高強度運動パフォーマンスを低下させたと報告している。パフォーマンスが改善した Castle らの研究では、プ

プレクーリング後に 6 分間のウォーミングアップを行い、運動開始時には大腿部の筋温が 35°C 程度まで回復していたが、Sleivert et al. の研究では、プレクーリング後にウォーミングアップを行っておらず、運動開始直前における大腿部の筋温が 35°C よりも低い値であった。また、Sleivert et al. の同じ研究でウォーミングアップを行った条件では筋温が 35°C を上回る値まで回復し、パフォーマンスの低下度合いがウォーミングアップなしの条件よりも抑制されたことが報告されている。Minnet et al. の研究においては筋温は測定していないが、全身冷却によっても運動開始時の平均皮膚温（胸部、前腕部、大腿部、下腿部）はコントロール条件と比較して約 3°C の低下（低下後で約 31°C）にとどまっていた。この場合、胸部および前腕部、下腿部は直接冷却されていないため、平均皮膚温の低下は大腿部温の低下によるものが大きいと考えられるが、その低下量はパフォーマンスが低下した Sleivert et al. のウォーミングアップなしのプレクーリング条件の値（約 8°C；低下後で約 27°C）よりもはるかに小さい値であるため、筋温はそれほど低下していないと推察される。このような筋温および平均皮膚温の差は、Sleivert et al. の研究が室温 3°C の実験室でプレクーリングを行っていたことによると考えられる。以上のことから、プレクーリングにより筋温を過度に低下させてしまうとパフォーマンスに対してその効果は小さくなるため、短時間の高強度または間欠的な運動時にプレクーリングを行う場合には、過度な冷却は避け、冷却後に十分な再ウォーミングアップを行う必要がある。このように、身体外部冷却は運動形態によっては効果が制限されることに加え、冷却に必要なとされる十分な量の水および水温を維持するための電力の入手が困難であること、また処置時に不快感を伴うことなど実用性に課題があることが指摘されている（Ross et al., 2011; Siegel et al., 2012a）。

**Table 1. The effect of external cooling on thermoregulation and exercise performance**

Study	Subjects	Method of cooling	Environmental conditions	Protocol	Outcome
Arngrimsson et al. (2004)	9M, 8F	Cooling vest during warm-up	32°C, 50% rh	Warm up for 38 min and 5-km simulated running	↑ Exercise performance (5-km run time was significantly shorter) ↓ $T_{es}$ , $T_{re}$ , $T_{sk}$ , HR, sweat loss
Bogerd et al. (2010)	8	Cooling vest (45min)	29°C, 90% rh	Open-end test on a cycle ergometer at $65 \dot{V}O_{2max}$	↑ Time to exhaustion, body heat content ↓ skin blood flow
Duffield et al. (2010)	8 Trained cyclists	Lower body cooling in water [14°C] at 22°C room temperature (20min)	33°C, 50% rh	40 min time trial on a cycle ergometer	↑ Time trial performance ↓ $T_c$ , $T_{mu}$ , $T_{sk}$ , $T_b$
Hasegawa et al. (2005)	9M	Cooling vest during warm-up and 60 min of exercise	32°C, 80% rh	Cycling at $60\% \dot{V}O_{2max}$ for 60 min and $80\% \dot{V}O_{2max}$ to exhaustion	↑ Time to exhaustion ↓ $T_{re}$ , $T_{sk}$ , HR, HS, sweat loss
Hessemer et al. (1984)	8 Well trained rowers	Cold room, temperature range 0–18°C (90 min)	18°C	60 min time trial on a cycle ergometer	↑ 1h work rate, $O_2$ uptake, $O_2$ pulse ↓ $T_{sk}$ , $T_b$ , $T_{ty}$ , $T_{es}$ , sweat rate → HR, lactate
Lee & Haymes (1995)	14 Trained runners	Cold room, 5°C (33 min)	24°C, 51–52% rh	Open-end test on a treadmill at $82\% \dot{V}O_{2max}$	↑ Exercise duration, HS ↓ $T_{re}$ , $T_{sk}$ , $T_b$ , sweat rate
Minett et al. (2011)	10 Well trained team sport athletes	Whole-body cooling with cooling packs (25 min)	33°C, 33% rh	2 × 35 min free-paced, intermittent sprint exercise	↑ Mean and total hard running distances ↓ $T_c$ , $T_{sk}$ , HR
Quod et al. (2006)	6 Trained cyclists	Cold water application [whole body at 29–24°C] (30 min) + cooling vest (40 min)	34°C, 41% rh	Fixed intensity on a cycle ergometer: 20 min at $75\% \dot{V}O_{2max}$ , then self-paced intensity until same work as during first part was reached	↑ Time trial performance ↓ $T_{re}$
Schniepp et al. (2002)	10 Highly trained cyclists	Cold water application [whole body, 12°C] (15 min)	Moderate	30 sec sprint on a cycle ergometer	→ Time to peak power ↓ Maximum and average powers, maximum and average HR
Yeargin et al. (2006)	12M, 3F	Cold (14°C) or ice (5°C) water immersion for 12min between 2 bouts of exercise	WBGT 27°C	Running for 90 min (distance; 18.6±0.5 km) and 2-mile race	↑ Race time performance (cold water immersion vs control condition) ↓ $T_{re}$ , thermal sensation

WBGT = wet bulb globe temperature; HR = heart rate; HS = heat storage; rh = relative humidity;  $T_b$  = mean body temperature;  $T_c$  = core temperature;  $T_{es}$  = esophageal temperature;  $T_{re}$  = rectal temperature;  $T_{sk}$  = mean skin temperature;  $T_{ty}$  = tympanic temperature;  $T_{mu}$  = muscle temperature;  $\dot{V}O_{2max}$  = maximal oxygen uptake; ↑ indicate increase; ↓ indicate decrease; → indicate no effect.

## 2-C. 身体内部冷却

身体外部からの冷却に対し、より簡便かつ実用的で水分補給も同時に行うことができる身体冷却方法として、冷たい飲料の摂取などによる身体内部冷却が挙げられる。身体内部からのプレクーリングが運動能力に及ぼす影響については Table 2. にまとめた。Lee et al. (2008b) は、暑熱環境下における自転車運動前および運動中に冷水 (4°C) と温水 (37°C) を摂取させたところ、冷水摂取条件において運動前に核心温が 0.5°C 低下し、疲労困憊に至るまでの運動継続時間が有意に向上したことを報告している。また、Mundel et al. (2006) は、温暖環境下における疲労困憊までの持久性運動中に、4°C または 19°C の風味づけされた飲料を自由摂取させたとき、4°C の飲料を摂取した条件で飲水量が高まり、核心温および心拍数の上昇が抑制され、持久性運動能力が改善されたと報告した。

近年、より積極的な身体内部からの冷却方法として、アイススラリーの摂取が注目されている (Siegel et al., 2012a)。アイススラリーとは液体に微細な氷の粒が混ざったもので、飲料として用いることができる。アイススラリーは氷が水に変わる相変化の際に体内の熱を大きく吸収するだけでなく、液体の比熱に固体の比熱が加わるため、液体の水のみよりも効果的に身体内部を冷却することが可能である (Ross et al., 2011)。Siegel et al. (2010) は、温暖環境下における自転車運動前にアイススラリー (-1°C) または冷水 (4°C) を 7.5g/kg 摂取すると、アイススラリーの摂取によって核心温が有意に低下し、疲労困憊に至るまでの走行時間が向上したことを報告している。Siegel et al. (2012b) はその後、アイススラリーの摂取または冷水浴によるプレクーリングが温暖環境下における体温調節反応および持久性運動能力に及ぼす影響を比較した結果、アイススラリーの摂取によって核心温が有意に低下し、冷水浴と同等の走行時間を示すことを報告している。このように、アイススラリーの摂取は冷水よりも冷却効果が高く、従来の身体外部冷却と同等のエルゴジェニック効果があることが証明されている。

また、アイススラリーの摂取は直腸温や食道温などの核心温の低下とは異なるメカニズム、つまり中枢神経系への影響によっても運動能力を向上させる可能性がある。Vanden

Hoek et al. (2004) は、ブタにおいて体重当たり 50ml のアイススラリー ( $-1\sim 0^{\circ}\text{C}$ ) の静脈注射が冷蔵された生理食塩水 ( $0\sim 1^{\circ}\text{C}$ ) と比較して脳温を有意に低下させたと報告している。Gonzalez-Alonso et al. (1999) が提案した“危機的限界体温”はラットの脳温においても観察されており、環境条件や運動継続時間の違いに関わらず約  $40^{\circ}\text{C}$  の脳温で疲労困憊に至ることが明らかにされている (Fuller et al., 1998)。ヒトにおいて脳温を直接測定することは困難であるが、動静脈血の温度測定により脳内の熱交換を算出した研究によれば、高体温運動時では脳血流量の低下と熱産生の増加により正常体温と比較して脳の熱除去能力が 30% 低下し、熱貯蔵率が增大することが報告されているため (Nybo et al., 2002)、ヒトにおいても暑熱下での運動時には脳温が上昇すると考えられている。現在ではこの説は広く受け入れられ、脳温の上昇が中枢性疲労や運動能力低下の重要な要因になることが示唆されている (Nybo, 2012)。したがって、アイススラリーの摂取がヒトの脳温を低下させることができるならば、中枢性疲労の発現やそれに伴う運動能力の低下を抑制することができると考えられる。Siegel et al. (2012b) は脳に流入する頸動脈血の冷却、または顔の皮膚表面の冷却に伴う伝導性冷却により、ヒトにおいてもアイススラリーの摂取によって脳温が低下する可能性を示唆している。頸動脈血の温度を直接測定することは困難であるが、顔の冷却に関しては皮膚温度を測定することで検証することが可能である。しかしながら、これまでの先行研究では核心温に及ぼす影響に議論が集中しており、アイススラリーの摂取が脳温に及ぼす影響はもちろん、顔の皮膚表面を実際に冷却するか否かも明らかにされていない。一方で、中枢神経系の活性という観点では、Siegel et al. (2011) により少量のアイススラリー摂取 ( $1.25\text{g/kg}$ ) が同量の温かい飲料摂取 ( $40^{\circ}\text{C}$ ) と比較して、運動誘発性高体温後における最大随意収縮力の低下を抑制、すなわち中枢性疲労を抑制することが報告されている。また、Burdon et al. (2013) はアイススラリーを用いたマウスリンスが核心温の低下を伴わずに感覚の改善により運動パフォーマンスを改善することを報告している。これらの研究により、アイススラリーの摂取によるエルゴジェニック効果には、中枢神経系へのフィードバック情報を変化させる、あるいは報酬やモチベーションに関連する

脳領域を活性化する感覚的变化による中枢性疲労の抑制が関係する可能性が示唆されている。中枢神経系へのフィードバック情報を変化させる点については主観的運動強度や温熱感覚の低下、熱快適性の改善から多くの研究で示唆されているが、そのような主観的な指標にはプラセボ効果が影響している可能性があり、認知機能など客観的な指標を用いて明らかにする必要性が指摘されている (Burdon et al., 2013)。また、最大随意収縮力に及ぼす影響については相反する結果が報告されており (Burdon et al., 2014)、アイススラリーの摂取が脳温の低下や中枢性疲労に及ぼす影響についてはまだ十分に明らかにされていない。

## 2-D. 競技現場への応用

Yeo et al. (2012) は、気温 24~32°C、相対湿度 55~95%の屋外における 10km のタイムトライアル前に 8g/kg のアイススラリー (-1.4°C) または温水 (30.9°C) を摂取させると、アイススラリーによって温水よりも核心温が有意に低下し、完走時間が改善したと報告している。アイススラリーによるエルゴジェニック効果 (ペーシングの向上) は、前述の身体外部冷却と同様にプレクーリングの生理学的効果が軽減したタイムトライアルの後半に現れていた。このようにプレクーリングが運動後半のペーシングを改善するメカニズムについてはまだ十分に明らかにされていないが、アイススラリーを用いたプレクーリングはタイムトライアル形式の多い実際の競技現場においても有用である可能性が高いと言えるだろう。さらに、Yeo et al. の研究のように、アイススラリーをスポーツ飲料で作成すると、身体冷却と同時に水分および糖-電解質の補給も効率的に行うことができるため、より実践的な暑さ対策として使用することが可能となる。

また、アイススラリーの摂取は皮膚温とおそらく筋温を変化させない、あるいは最低限の変化にとどまらせるため、最大下運動においてだけではなく、チームスポーツにもより適した選択である可能性がある (Siegel et al., 2012a)。Onitsuka et al. (2015a) は、実際にサッカーを模倣した間欠的プロトコルの休息間におけるアイススラリー摂取の効果を検討した。被験者は自転車エルゴメータを用い、5 秒間の全力ペダリング、25 秒間の無負荷ペダ

リング、30秒間の完全休息を1セットとした運動を15分間の休息を挟み、前後半30セットずつ行った。15分間の休息間に4℃の冷水またはアイスラリー（-1℃）を摂取したところ、アイスラリーの摂取は大腿部の皮膚温を低下させず、5秒間全力ペダリング中の最大パワーを維持するとともに、核心温を有意に低下させた。このことから、アイスラリーはこれまでの身体外部冷却とは異なり、おそらく筋温を低下させることなく核心温を冷却させることができ、かつ冷水よりも熱中症予防に有効な身体冷却法であることが示唆されている。しかしながら、平均皮膚温を低下させずに深部のみを冷却すると、深部から皮膚への温度勾配が低下し、熱を周囲に移動する能力が低下することで核心温の上昇率が高くなることが報告されている（Stanley et al., 2010 ; Siegel et al., 2010, 2012a, 2012b）。アイスラリーの摂取による運動中における核心温上昇率の増大に関するメカニズムはまだ十分に証明されていないが、クーリングジャケットやアイスタオルなどの身体外部冷却を組み合わせて使用するとより効果的で安全に身体を冷却できる可能性がある。身体冷却の組み合わせの効果を検討した研究はまだあまり存在しないが、Ross et al. (2011) は暑熱下におけるアイスラリー摂取とアイスタオルの組み合わせが、冷却なしのコントロール条件と比較して46kmのタイムトライアルパフォーマンスを改善したことを報告している。また、運動前だけでなく運動中にもアイスラリーを摂取することで同様に核心温上昇率の増大を抑制できる可能性が考えられるが、運動前および運動中のどちらも摂取させている研究はSchulze et al. (2016) の運動前にアイスタオルを組み合わせた研究のみで、純粋にアイスラリーの運動前および運動中の摂取による効果を検討した研究は存在していない。

以上のように、アイスラリーの摂取による身体冷却は、これまでの身体外部からの冷却よりも簡便で実用的であるだけでなく、同じ身体内部冷却である冷たい飲料の摂取よりも冷却効果に優れ、末梢性疲労だけでなく中枢性疲労も抑制する可能性がある。また、アイスラリーを含め、冷たい飲料の摂取はアスリートに限らず一般の人々の熱中症予防にも手軽に利用することが可能である。アイスラリーを用いた暑さ対策の実現に向けて、今後さらなる研究が期待される。

**Table 2. The effect of internal cooling on thermoregulation and exercise performance**

Study	Intervention	Method of cooling	change in $T_c$	Environmental condition	Protocol	Outcome
Burdon et al. (2010)	4°C vs 37°C fluid vs 37°C fluid + -1°C ICE WASH	2.3mL/kg every 10 min + 30mL mouth wash every 5 min during steady-state exercise	None	28°C, 70% rh	90 min cycling at 65% $\dot{V}O_{2peak}$ + 15 min performance trial	↑ Exercise performance (4°C) → Exercise performance (ICE WASH)
Burdon et al. (2013)	-1°C ICE vs 37°C drink vs 37°C + -1°C ICE WASH	3.5g/kg every 15 min ingestion + 25g mouth wash every 5 min during steady-state exercise	None	32°C, 40% rh	90 min cycling at 62% $\dot{V}O_{2max}$ + 4 kJ/kg time trial	↑ Exercise performance (ICE: 10.5 ± 7.9 %, ICE WASH: 3.3 ± 1.9 %)
Hasegawa et al. (2006)	14–16°C water	30 min drinking equal to sweat loss from a previous exercise bout	~0.3°C lower following water ingestion	32°C, 80% rh	60 min cycling at 60% $\dot{V}O_{2max}$ + TTE 80% $\dot{V}O_{2max}$	↑ Exercise performance
Ihsan et al. (2010)	1.4 – 1.1°C ICE vs 26.8 – 1.3°C water	6.8 g/kg 30 min prior to exercise	1.1 ± 0.59°C lower following ICE	~30°C, ~75% rh	40km cycling time trial	↑ Exercise performance
Lee et al. (2007)	10°C vs 37°C vs 50°C drink	1 L at 30–40 min during exercise	Drink temperature influenced rate of rise in $T_c$	25.4 ± 0.2°C; 61 ± 3% rh	90 min cycling at 53%+TTE; 95% $\dot{V}O_{2peak}$	→ Exercise performance
Lee et al. (2008a)	10°C vs 37°C vs 50°C drink	400mL at 30, 45, 60, 75 min during steady-state cycling	None	25.3 ± 0.5°C; 60 ± 5% rh	90 min cycling at 50%+TTE; 95% $\dot{V}O_{2peak}$	→ Exercise performance
Lee et al. (2008b)	4°C vs 37°C drink	900mL 30 min pre-exercise, 100mL every 10 min during exercise	0.5 ± 0.1°C prior to exercise	35.0 ± 0.2°C; 60.0 ± 1.0% rh	Cycling to exhaustion at 66 ± 2% $\dot{V}O_{2peak}$	↑ Exercise performance
Mundel et al. (2006)	4°C vs 19°C drink	Ad libitum drinking during exercise	~0.25°C lower with cold drink in second half of exercise	33.9 ± 0.2°C; 27.9 ± 0.7% rh	Cycling to exhaustion at 65% maximal aerobic power	↑ Exercise performance
Onitsuka et al. (2015a)	-1°C ICE vs 4°C COOL	7.5 g/kg during 15 min half time breaks	0.42 ± 0.19°C vs 0.19 ± 0.15°C with ICE vs COOL during 15 min half time breaks	30°C, 57% rh	2 × 30 min of intermittent exercise (each periods consisting of 5 s of maximal pedaling, 25 s of pedaling with no workload, and 30 s of rest) separated by 15 min half time	→ Exercise performance
Siegel et al. (2010)	-1°C ICE vs 4°C fluid	7.5 g/kg 30 min prior to exercise	0.66 ± 0.14°C vs 0.25 ± 0.20°C lower with ICE prior to exercise	34.0 ± 0.2°C; 54.9 ± 5.9% rh	Running to exhaustion at VT1	↑ Exercise performance
Siegel et al. (2012b)	-1°C ICE vs 24°C CWI vs 37°C fluid	7.5 g/kg 30 min prior to exercise	0.43 ± 0.14°C vs 0.25 ± 0.09°C lower prior to exercise with ICE vs CWI	34.0 ± 0.2°C; 54.9 ± 5.9% rh	Running to exhaustion at VT1	↑ Exercise performance (vs 37°C) → Exercise performance (vs CWI)
Yeo et al. (2012)	-1°C ICE vs 31°C drink	8 g/kg 30 min prior to exercise	0.1 ± 0.1°C vs 0.5 ± 0.2°C lower at the end of cooling with ICE vs 31°C	WBGT 28°C	10 km outdoor running time trial	↑ Exercise performance

a Data presented as exact, range or mean ±SD where stated. CWI = cold water immersion; ICE = ice ingestion; ICE WASH = ice mouth wash;  $T_c$  = core temperature; rh= relative humidity; WBGT= wet bulb globe temperature; TTE = time to exhaustion;  $\dot{V}O_{2max}$  = maximum oxygen uptake;  $\dot{V}O_{2peak}$  = peak oxygen uptake; VT1 = first ventilatory threshold.

**Table 3. The effect of mixed-method of internal and external cooling on thermoregulation and exercise performance.**

Study	Intervention	Method of cooling	change in $T_c$	Environmental condition	Protocol	Outcome
Brade et al. (2014)	0.6°C ICE vs 23°C water vs 23°C water + cooling jacket vs 0.6°C ICE + cooling jacket	7 g/kg 30 min prior to exercise + 2.1 g/kg during half time breaks with or without cooling jacket	0.2 ~ 0.4°C lower following pre cooling	35.2 ± 0.3°C; 57.8 ± 1.2 % rh	2 × 30 min intermittent exercise consisting of 30 × 4 s of maximal sprint, 56 s of low intensity exercise (25, 50, 75, 100W), and maximal sprint at 2.5, 7.5, 12.5, 22.5, 27.5 min separated by 10 min half time	↑ total mean power and total work (ICE + cooling jacket vs ICE)
Duffield et al. (2013)	ICE + ice towels + ice vest vs room temperature drink	350 mL ICE + ice towels and ice vest for 20 min vs 350 mL room temperature drink ingestion for 20 min	Rectal temperature with pre cooling showed lower value than room temperature drink at following pre cooling and after warming-up	29 ± 3°C; 78 ± 8% rh	Training sessions: 2 x 10-min interval training, followed by 6 x 3-min of 5v5 small sided games. Competitions: official A-League matches during the 2009-10 season	↑ total and relative distance covered during training (moderate-large effects)
Ross et al. (2011)	ICE + ice towels vs whole-body CWI + cooling jacket vs 4°C water ingestion	14 g/kg ICE + ice towels vs 10 min CWI + 20 min cooling jacket vs ad libitum 4°C water – 30 min prior to exercise	0.75±0.31°C with ICE + ice towels	32–35°C; 50–60% rh	46.4 km cycling time trial	↑ Exercise performance (ICE + ice towels vs 4°C water)

**a Data presented as exact, range or mean ±SD where stated. ICE = ice ingestion; rh= relative humidity;  $T_c$  = core temperature.**

### 3. まとめ

身体冷却を用いた暑さ対策にはこれまで一般的に使用されてきた身体外部冷却に加え、近年注目されている身体内部冷却がある。身体外部冷却は30～60分の長時間の運動に有効であることが示されているが、大がかりな設備を必要とするなど実用性に課題があることや、運動形態によっては効果が低減してしまう可能性がある。一方、身体内部冷却は設備面において身体外部冷却よりも優れており、競技現場での応用が期待されている。中でもアイススラリーの摂取は身体外部冷却と同等のエルゴジェニック効果があるとともに、持久性および間欠的運動の両方において有効であることが報告されている。また、同じ身体内部冷却の冷水摂取よりも熱中症の予防に有効であることが明らかとなっている。したがって、アイススラリーを用いた暑さ対策の実現に向けて、今後は実際の競技現場での使用のような応用研究の進展が期待される。一方で、中枢性疲労に及ぼす影響や摂取後の核心温上昇率の増大について等、まだ十分に明らかにされていない点も多く、応用研究とともに実験室ベースの基礎的な実験もなお必要とされる。

### 4. 研究の課題および目的

本研究では、先述のようにアイススラリーの研究課題とされている中枢性疲労に及ぼす影響について検討することとした。アイススラリーの摂取は脳に流入する頸動脈血の冷却、または顔の皮膚表面の冷却に伴う伝導性冷却により脳を冷却する可能性があるため、脳温の上昇による中枢性疲労の発現を抑制できると考えられる。そこで、本研究ではまずアイススラリーの摂取による脳の冷却に着目した。臨床の分野では、脳の冷却法として頭部や前額部の冷却が用いられており、実際に脳温を低下させることが報告されている。アイススラリーの摂取が顔の冷却により脳を冷却することが明らかになれば、運動生理学分野だけでなく他分野においても効率的な冷却方法を提案できると考えられる。また、頸動脈血の冷却とは異なり顔の冷却に関しては皮膚温度を測定することで検証することが可能である。しかしながら、これまでの先行研究では核心温に及ぼす影響に議論が集中しており、アイススラ

リーの摂取が顔の皮膚表面を実際に冷却するか否かは明らかにされていない。したがって、本研究では 1 つ目の課題としてアイススラリーの摂取が顔の皮膚表面を冷却することで、脳温を低下させるか否かを検討することを設定した（実験 1 および実験 2）。次に、実際にアイススラリーの摂取が脳温の上昇による中枢性疲労の発現を抑制するか否かを検討するため、認知機能に着目した。中枢性疲労の発現は認知機能の低下を引き起こす要因となるため、認知機能はその間接的な指標として使用されており、風間ら（2011）は過度な核心温の上昇によって認知機能が低下することを報告している。この認知機能の低下には核心温の上昇に伴う脳温の上昇が関与することが示唆されている（Cheung & Sleivert, 2004; Hasegawa & Cheung, 2013）ことから、本研究における中枢性疲労の指標として適していると考えられる。また、中枢神経系の活性という点からも認知機能など客観的な指標を用いて明らかにする必要性が指摘されている（Burdon et al., 2013）。したがって、2 つ目の課題として、アイススラリーの摂取が脳温の上昇による中枢性疲労の発現を抑制するか否かを、認知機能を指標として検討することを設定した（実験 3）。

アイススラリー摂取に関する先行研究の中で中枢性疲労に及ぼす影響とともに課題となっているのが、摂取後の運動中における核心温上昇率の増大である。核心温上昇率の増大は熱中症の危険性を高めることが懸念されるため、この課題を解決することは今後の競技現場への応用に向けて非常に重要である。これまで先行研究では運動前または運動中のどちらかにアイススラリーを摂取させており、運動前と運動中の両方に摂取させた研究はほとんどない。運動前に加えて運動中にも摂取することで、運動中の核心温上昇率の増大を抑制できるとともに、脳温が低下するとすればその低下も持続させることができ、さらに認知機能や運動能力が向上すると考えられる。唯一 Schulze et al. (2016) が運動前および運動中のアイススラリー摂取について検討しているが、運動前にアイスタオルを組み合わせるため、アイススラリー単独の効果はまだ明らかとなっていない。したがって、3 つ目の課題として、運動前および運動中のアイススラリー摂取が核心温上昇率の増大を抑制するか否か、またそれにより認知機能や運動能力がさらに向上するか否かを明らかにすることを

設定した（実験 3）。

以上より，本研究では，アイススラリーの摂取による運動能力向上の背景にあるメカニズムについて，脳温の上昇による中枢性疲労の抑制という観点から明らかにするとともに，運動中の継続的な摂取による相乗効果の有無を検討することでアイススラリーの適切な摂取方法を明らかにすることを目的とした．この目的を達成するため以下 3 つの実験を設定した．

#### **実験 1. 温暖環境下におけるアイススラリーの摂取が前額部皮膚温に及ぼす影響**

温暖環境下におけるアイススラリー摂取後に前額部皮膚温が低下するか否かを検討する．

#### **実験 2. 常温環境下におけるアイススラリーの摂取がヒトの脳温に及ぼす影響—磁気共鳴スペクトロスコピーを用いた検討—**

常温環境下におけるアイススラリーの摂取が脳温に及ぼす影響について磁気共鳴スペクトロスコピーを用いて非侵襲的に検討する．

#### **実験 3. 暑熱環境下における運動前および運動中のアイススラリー摂取が認知機能および運動能力に及ぼす影響**

暑熱環境下における運動前および運動中のアイススラリー摂取が体温調節反応や中枢性疲労の指標となる認知機能，およびその後の運動能力に及ぼす影響を検討する．

## II 章

温暖環境下におけるアイススラリーの摂取が前額部皮膚温  
に及ぼす影響

## 1. 緒言

近年、より積極的な身体内部からの冷却方法として、アイススラリーの摂取が注目されている (Siegel et al., 2012a). Siegel et al. (2010) は、温暖環境下における自転車運動前にアイススラリー (-1°C) または冷水 (4°C) を摂取すると、アイススラリーの摂取によって直腸温が有意に低下し、疲労困憊に至るまでの走行時間が向上したと報告した. Siegel et al. (2012b) はその後、アイススラリーの摂取または冷水浴によるプレクーリングが温暖環境下における体温調節反応および持久性運動能力に及ぼす影響を比較した結果、アイススラリーの摂取によって直腸温が有意に低下し、冷水浴と同等の走行時間を示すことを報告した. Siegel et al. はこの研究において、アイススラリーの摂取により脳温が低下する可能性を示唆しており、ブタを用いた実験では実際にアイススラリーの静脈注射によって脳温が有意に低下することが報告されている. Siegel et al. の仮説によれば、アイススラリーの摂取は脳に流れる頸動脈血の冷却、または顔面領域の冷却に伴う伝導性冷却により、ヒトの脳温を低下させる可能性がある. 頸動脈血の温度を測定することは困難であるが、顔面領域の冷却に関しては顔の表面温度の測定により検討することが可能である. しかしながら、これまでは核心温に及ぼす影響に議論が集中しており、顔の表面温度に着目した研究は存在しない.

そこで本章では、選択的脳冷却を調査した多くの先行研究 (Cabanac, 1986; Cabanac & Caputa, 1979; Falk, 1990; Gallup & Gallup, 2007; Zenker & Kubik, 1996) が用いている前額部皮膚温に着目した. 前額部の冷却は、皮膚の静脈血を冷却することで頸動脈血を冷却すること、または顔の導出静脈による熱放散 (Cabanac, 1986; Cabanac & Brinnel, 1985; Gallup & Gallup, 2007; Zenker & Kubik, 1996) や頭蓋骨からの熱放散により脳の冷却をもたらすと仮定されている (Cabanac, 1986; Gallup & Gallup, 2007; Zenker & Kubik, 1996). 臨床分野においては、ジェルキャップによる前額部を含めた頭部冷却が脳の硬膜外温度を~1°C低下させることも報告されている (Mellergard, 1992). したがって、前額部皮膚温の低下は脳の冷却を反映することができると考えられる.

以上より、本章ではアイススラリーの摂取による脳の伝導性冷却の観点からアイススラリーの摂取が脳温に及ぼす影響を検討することを目的とした。運動が体温調節に及ぼす影響を除外するため、安静状態で実験を行った。

## 2. 実験方法

### 2-A. 被験者

被験者は健康な男子大学生 8 名（年齢： $22.9 \pm 1.1$  歳，身長： $1.71 \pm 0.03$ m，体重： $59.1 \pm 4.6$ kg，BMI： $20.1 \pm 1.4$ ）であった。実験を行うにあたり、被験者に実験の目的および危険性についての十分な説明を行い、実験の被験者となることの同意を得た。実験は、広島大学大学院総合科学研究科倫理委員会の承認を得て行った。

### 2-B. 実験手順

実験当日の体調を統一するため、被験者には身体活動および食行動を含め、通常的生活活動を維持すること、また実験前日の激しい運動およびアルコール、カフェインの摂取を控えるよう依頼した。各試行はカウンターバランスのとられた順序で 5 日以上の間隔をあげ、サーカディアンリズムを考慮し各被験者につき同一の時間帯で実験を行った。

実験プロトコルを Fig. 1 に示した。被験者は実験準備室に入室後、尿サンプルを採取し、全裸体重を測定した後、直腸温プローブを挿入し、各測定器具を装着した。被験者はその後、室温  $30^{\circ}\text{C}$  および相対湿度 80% に設定された実験室に入室し、5 分間の安静をとり、座位安静状態で  $37^{\circ}\text{C}$ （コントロール条件，以下 CON 条件とする）または  $4^{\circ}\text{C}$ （COOL 条件）のスポーツ飲料， $-1^{\circ}\text{C}$  のアイススラリー飲料（ICE 条件）（PocariSweat, Otsuka Pharmaceutical）を 15 分間で  $7.5\text{g/kg}$  摂取した。摂取間隔を統一するために、被験者は 5 分毎に  $2.5\text{g/kg}$  の間隔で飲料を摂取した。飲料摂取後、被験者は再び 1 時間座位安静状態を保った。なお、 $37^{\circ}\text{C}$  のスポーツ飲料の作成には恒温槽（TR-2AR, AS ONE）を用い、アイススラリーはスラリーマシン（DM1000, Margaritaville）を用いて作成した。

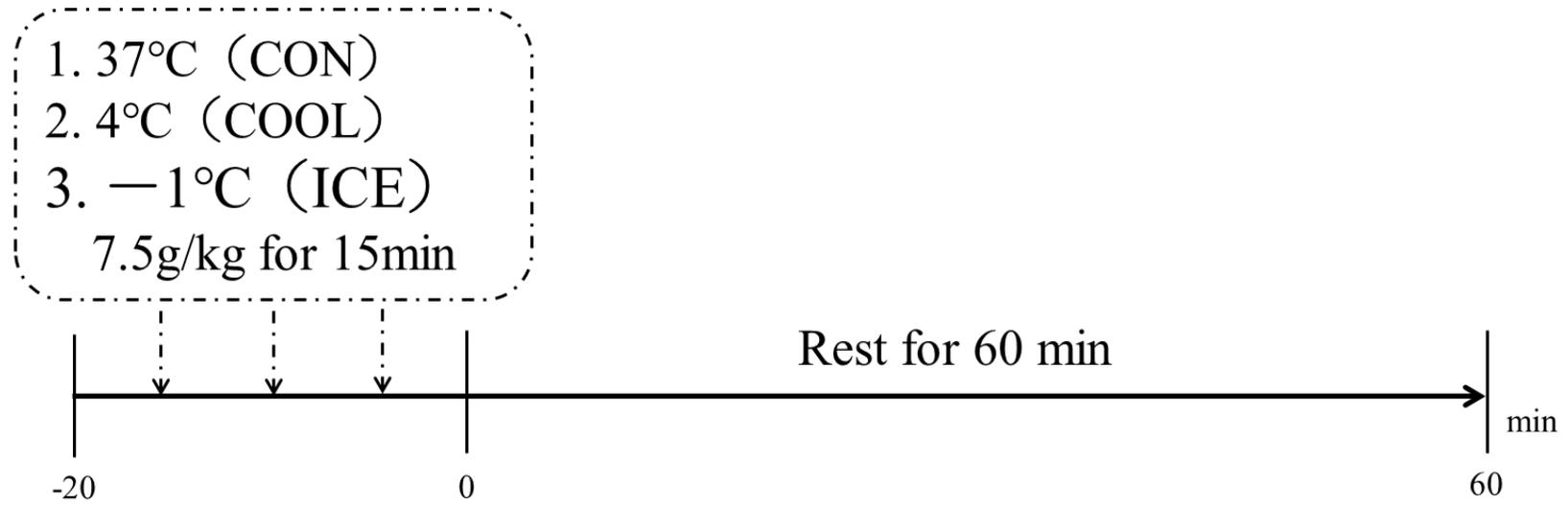


Fig. 1 実験プロトコル

## 2-C. 測定項目

生理的指標として直腸温，前額部皮膚温，平均皮膚温，心拍数，尿比重，全裸体重を測定した．直腸温はサーミスタープローブ用ゴムカバー（11Y24, Nikkiso-Therm Co.Ltd.）を装着したサーミスタープローブ（LT-ST08-21, Nikkiso-ThermCo.Ltd.）の先に直腸温測定用潤滑剤ヌルゼリー（Nichi-iko）を塗り，直腸内に 10～12 cm 挿入して測定した．皮膚温は胸部，上腕部，大腿部，前額部にそれぞれサーミスタープローブをテープで貼りつけて測定した．直腸温および身体各部位の皮膚温はデータ収集型温度計（LT-8A, Gram Corporation）を用いて 5 分毎に計測した．また，平均皮膚温は以下の Roberts（1977）の 3 点法を用いて算出した： $T_{sk} = 0.43 \times \text{胸部温} + 0.25 \times \text{上腕部温} + 0.32 \times \text{大腿部温}$ ．心拍数はハートレートモニター（RS800CX, PolarElectro）を用いて実験中 5 分毎に測定した．体重は，50g 単位の体重計（UC-300, A&D）を用いて裸体で，また尿比重は尿比重計（UG-D, Atago）を用いて実験前後に測定した．発汗量は以下の式を用いて算出した：発汗量 = （実験前体重 - 実験後体重） + 飲料の摂取量．

主観的指標として，温熱感覚（thermal sensation : TS）は Gagge（1963）のスケール（Table 1.）を用いて 5 分毎に測定した．

Table 1. 温熱感觉

8	very hot
7	hot
6	warm
5	slightly warm
4	neutral
3	slightly cool
2	cool
1	cold
0	very cold

Gagge (1963)

## 2-D. 統計処理

実験結果はすべて平均値±標準偏差で示した。環境条件は1要因(条件)の分散分析を用い、体重、尿比重、直腸温、皮膚温、心拍数、温熱感覚は、2要因(条件×時間)の繰り返しのある分散分析を用いた。自由度はGreenhouse-Geisserの $\epsilon$ による補正を行った。有意差が認められた場合にはTurkeyのHSD検定により、各群間の差の検定を行った。また、温熱感覚と直腸温および前額部皮膚温の間の相関関係を評価するためにピアソンの相関係数を算出した。すべての統計分析はSPSS(Ver.17.0)を用いて行った。有意水準は5%未満とした。本章では、飲料摂取前(-20分)の値をベースライン、飲料摂取後の60分の安静開始時点を0分とした。

## 3. 結果

### 3-A. 生理的指標

直腸温の経時的変化をFig.2-A, ベースラインから安静15分まで(飲料摂取終了から20分後)の直腸温変化量をFig.2-Bに示した。直腸温は、ICE条件において5~30分までベースラインと比較して有意に低下した( $p<0.05$ )。また、ICE条件ではCON条件と比較して5~35分まで( $p<0.01$ )、COOL条件と比較して5~30分まで有意に低い値を示した( $p<0.05$ )。直腸温変化量においても、ICE条件でCON条件( $p<0.01$ )およびCOOL条件( $p<0.05$ )よりも有意に大きな値を示した。

前額部皮膚温の経時的変化をFig.3-A, -20分から0分までの前額部皮膚温低下量をFig.3-Bに示した。前額部皮膚温は、ICE条件の0~15分においてCON条件よりも有意に低い値を示し( $p<0.05$ )、0~10分においてCOOL条件よりも有意に低い値を示した。また、前額部皮膚温変化量においても、ICE条件でCON条件およびCOOL条件よりも有意に大きな値を示した( $p<0.01$ )。

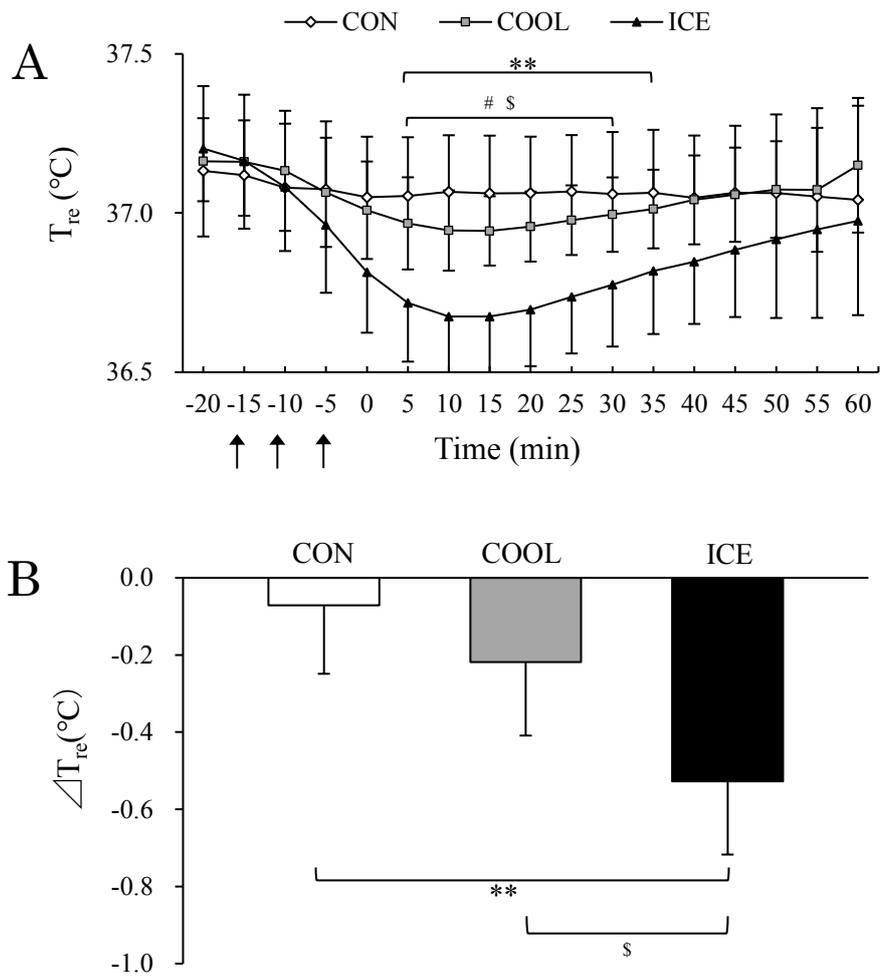


Fig. 2 直腸温の経時的変化 (A) および変化量 (B)

\*, \*\* はコントロール条件 (CON ; それぞれ  $p < 0.05$ ,  $p < 0.01$ ), \$ は COOL 条件 ( $p < 0.05$ ) との有意差を示し, # は ICE 条件におけるベースラインとの有意差を示す ( $p < 0.05$ ). また, ↑ は飲料を摂取した時間を表す.

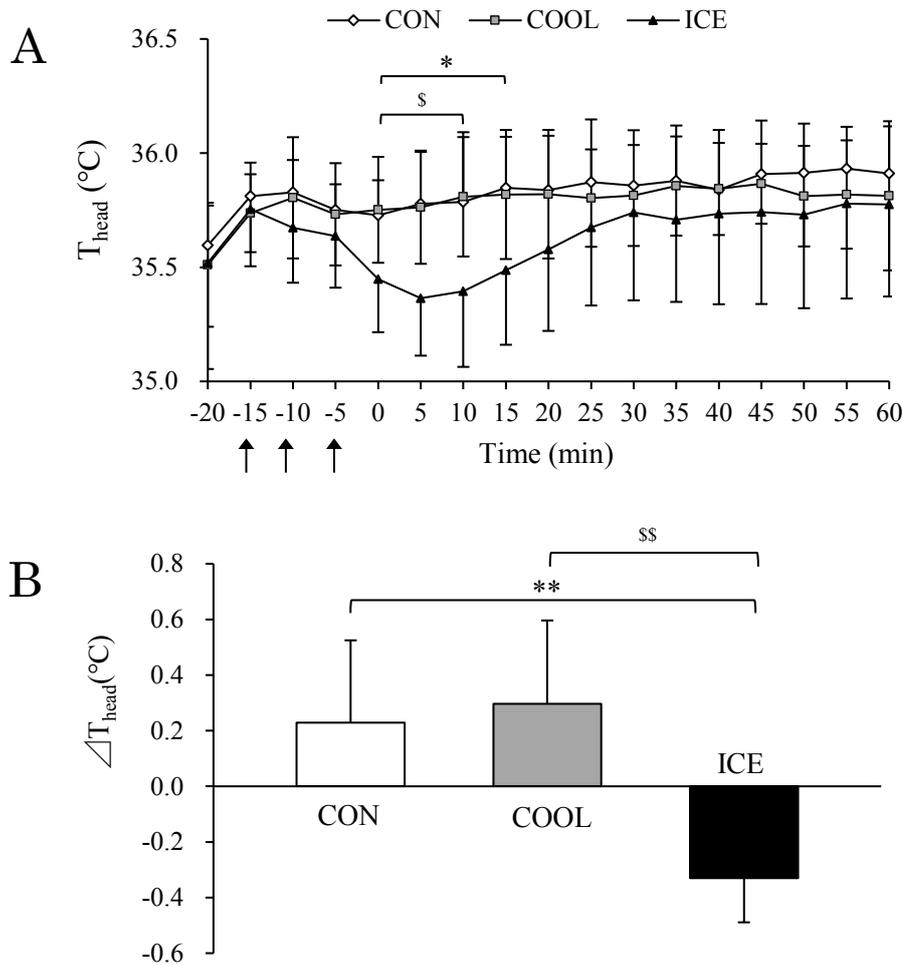


Fig. 3 前額部皮膚温の経時的変化 (A) および変化量 (B)

\*, \*\* はコントロール条件 (CON), \$, \$\$ は COOL 条件との有意差を示す (それぞれ  $p < 0.05$ ,  $p < 0.01$ ). また,  $\uparrow$  は飲料を摂取した時間を表す.

平均皮膚温および心拍数の変化を Table 2. にまとめた. どちらも実験中一定の値を維持し, ベースラインとの有意差および条件間における差は観察されなかった.

体重, 尿比重の変化を Table 3. に示した. 全裸体重はすべての条件で実験後に有意に増加したが ( $p < 0.01$ ), 条件間で有意な差は観察されなかった. 尿比重は, CON 条件および COOL 条件では実験後に有意に低下したが ( $p < 0.05$ ), 条件間で有意な差は観察されなかった. 発汗量においても条件間で有意な差は観察されなかった.

Table 2. 平均皮膚温および心拍数の変化

		CON	COOL	ICE
$T_{sk}$ (°C)	<b>Baseline</b>	34.1 ± 0.3	34.2 ± 1.0	34.1 ± 0.6
	<b>0 min</b>	34.6 ± 0.3	34.7 ± 0.4	34.7 ± 0.3
	<b>End</b>	35.1 ± 0.2	35.1 ± 0.4	35.2 ± 0.3
<b>HR (bpm/min)</b>	<b>Baseline</b>	75.5 ± 15.4	76.0 ± 13.4	77.9 ± 11.9
	<b>0 min</b>	83.3 ± 14.8	76.8 ± 14.4	68.1 ± 12.7
	<b>End</b>	84.9 ± 12.1	81.0 ± 11.7	80.6 ± 11.1

Baseline は飲料摂取前 (-20 分), 0 min は 60 分の安静開始時, End は実験終了時を示す.

Table 3. 水和状態の変化

		CON	COOL	ICE
<b>Body mass (kg)</b>	<b>Before</b>	59.8 ± 4.7	59.1 ± 4.5	59.2 ± 5.1
	<b>End</b>	60.0 ± 4.8**	59.3 ± 4.5***	59.6 ± 5.1***
<b>Sweat rate (kg)</b>		0.19 ± 0.12	0.18 ± 0.11	0.09 ± 0.06
<b>Urine gravity</b>	<b>Before</b>	1.019 ± 0.006	1.021 ± 0.040	1.020 ± 0.009
	<b>End</b>	1.010 ± 0.009*	1.010 ± 0.007*	1.016 ± 0.012

\*, \*\*, \*\*\* は Before (実験前) との有意差を示す (それぞれ  $p < 0.05$ ,  $p < 0.01$ ,  $p < 0.001$ ).

### 3-B. 主観的指標

温熱感覚 (TS) の経時的变化を Fig. 3 に示した. ICE 条件における TS は, CON 条件と比較して-10 分~35 分まで, COOL 条件と比較して-10~5 分まで有意に低下した ( $p < 0.05$ ). また, 温熱感覚と直腸温および前額部皮膚温の間にはそれぞれ有意な相関が見られた (直腸温 :  $r = 0.39, p < 0.05$ , 前額部皮膚温 :  $r = 0.40, p < 0.05$ ).

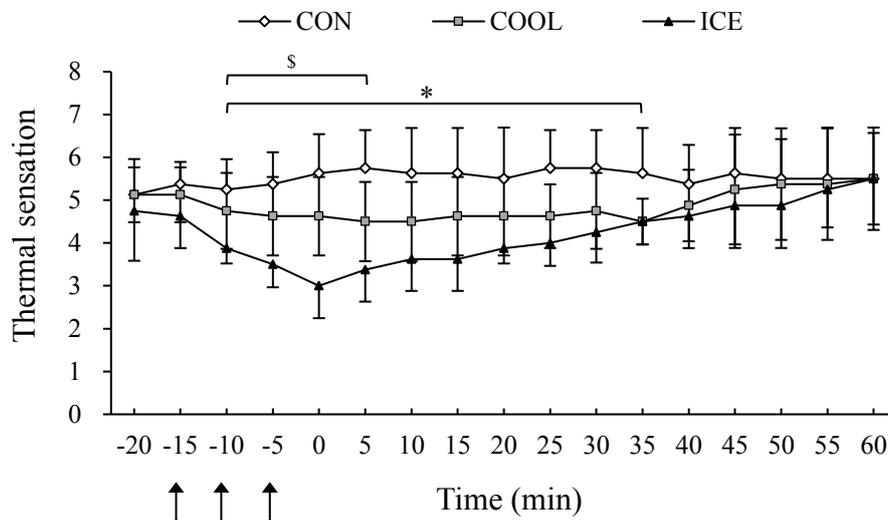


Fig. 4 温熱感覚の経時的变化

\* はコントロール条件 (CON), \$ は COOL 条件との有意差を示す ( $p < 0.05$ ).

また, ↑ は飲料を摂取した時間を表す.

#### 4. 考察

本章では、温暖環境下におけるアイススラリーの摂取が顔面領域の皮膚温に及ぼす影響を検討することを目的とした。その結果、アイススラリーの摂取によって直腸温に加え前額部の皮膚温が有意に低下することが明らかとなった。

現在、アイススラリーの摂取が脳温低下に影響を及ぼす要因として以下の 2 つが考えられている。1 つ目は、アイススラリーを摂取すると食道が冷却され、それと近接している頸動脈から脳に流れる血液が冷やされることで脳温の低下につながる可能性があること、2 つ目はアイススラリーが口から摂取されることで顔の皮膚表面を冷やし、それが脳の伝導性冷却をもたらす可能性があることである (Siegel et al., 2012b)。実際に、Vanden Hoek et al. (2004) は、ブタにおいて体重当たり 50ml のアイススラリーの静脈注射が冷蔵された生理食塩水と比較して脳温を有意に低下させたと報告している。しかしながら、ヒトにおいて脳温を非侵襲的に測定することは困難であるため、本章では前額部皮膚温を測定することで、顔の皮膚温がアイススラリーの摂取によって低下するか否かを調査した。前額部は熱流補償法による脳温の推定によく用いられている領域であり、前額部深部温が頸静脈血の温度とほとんど同じ値であることが報告されている (Yamakage & Namiki, 2003)。さらに、前額部の冷却が効果的に脳温の低下をもたらすことも十分に証明されている (Mariak et al., 1999; Harris et al., 2007; Zenker & Kubik, 1996)。したがって、前額部皮膚温は脳温の有用な指標であると考えられる。

前額部皮膚温は ICE 条件において 0 分から 10 分まで CON および COOL 条件と比較して有意に低下し、ベースラインから 0 分までの変化量も CON および COOL 条件よりも有意に高値を示した。アイススラリーの摂取による顔の皮膚温の低下を観察した研究はこれまでに存在せず、本章で観察された前額部皮膚温の低下により、アイススラリーの摂取が顔の皮膚表面を冷やすことが初めて明らかとなった。したがって、本章では Siegel et al. (2012a) の見解と一致して、アイススラリーの摂取がヒトにおいても脳温を低下させることが示唆された。Cabanac & Caputa (1979) は、38.6°C の温かい浴槽にあごまで浸かりな

から顔へ送風を行っている間、前額部および眼角静脈の表面温度は低下したが、食道温は上昇し続けたことを報告した。これらの結果は頭部冷却中において核心温は脳温とほとんど関係ないことを示している。したがって、アイススラリー摂取によって脳が冷却されれば、それは主に前額部皮膚温の低下によると考えられる。前額部の冷却が脳温を低下させるメカニズムとしては、皮膚の静脈血を冷却することで脳に流入する血液を冷却することが考えられている (Cabanac, 1986; Cabanac & Brinnet, 1985; Gallup & Gallup, 2007; Zenker & Kubik, 1996)。アイススラリーの摂取が運動能力を改善することは多くの研究により報告されているが、そのメカニズムは十分に明らかになっていない。もしアイススラリーの摂取が脳を冷却することができるならば、それはアイススラリーの摂取が末梢性疲労だけでなく、中枢性疲労も抑制することができることを意味しており、またその効果がパフォーマンスの改善に寄与する可能性があることを意味している。

顔面領域（前額部や頬など）は体温の上昇による皮膚血流の増加が他の領域よりも大きいため、顔面領域は熱放散に重要な領域である (Kondo et al., 1998)。さらに、Sato et al. (2011) は頭部の熱放散に伴い脳血流が低下する可能性を示唆している。したがって、アイススラリーの摂取による顔面領域の冷却は頭部における熱放散の負担を減らし、脳温の上昇とともに脳血流の低下を抑制する可能性がある。そしてそれは運動中の中枢性疲労の緩和をもたらし、パフォーマンスを改善させるだろう。アイススラリーの摂取が中枢性疲労を抑制するかどうか明らかにするために、さらなる研究が必要である。

本章では、アイススラリーの摂取によって主観的温熱感覚 (TS) が有意に低下した。これは、Lee et al. (2008b) および Siegel et al. (2010) による報告と一致する。アイススラリーの摂取による TS の低下には 2 つの要因が考えられる。1 つ目はアイススラリーの摂取による直腸温および前額部皮膚温の低下である。本章では、直腸温および前額部皮膚温と TS の間に低い相関が見られた (それぞれ  $r = 0.394$ ,  $p < 0.05$ ,  $r = 0.396$ ,  $p < 0.05$ )。実際に TS の有意な低下が見られた時間 (-10~35 分) と直腸温の有意な低下が見られた時間 (5~35 分) はほとんど一致している。また、直腸温ほどではないが、前額部皮膚温の有意な

低下も TS の有意な低下が見られた時間と一致しており (0~15 分), 0~5 分においては直腸温がまだ有意に低下していないため, 前額部皮膚温の低下が寄与している可能性は十分にあり得る. このことは, 前額部の冷却が他の皮膚領域の冷却よりも冷感覚の喚起に 2 倍効果的であることを報告した先行研究により支持される (Crawshaw et al., 1975). したがって, 本章で観察された TS の低下にはアイススラリーの摂取による直腸温および前額部皮膚温の低下が寄与している可能性がある. 2 つ目の要因は, アイススラリーの摂取による求心性フィードバック情報の変更である. ヒトにおいてはほとんど情報がないが, 他の種においては口腔や食道, 腹部内臓, 腹腔, 脊髄および筋肉に温度受容器が存在することが示されている (Lee et al., 2008b; Siegel et al., 2010). 本章では, 平均皮膚温の低下は観察されなかったため, 前額部を除き皮膚の温度受容器は関与していないと考えられる. したがって, ヒトにおいても口腔や食道, 腹部領域に温度受容器が存在し, アイススラリーの摂取によってそれらが冷感覚を受容することで, 体内の温度状態に関する求心性フィードバック情報を実際の直腸温よりも低く伝え, それによって TS が低下したと考えられる. TS が直腸温の有意な低下が見られない 10 分から 5 分の間にも低下しているのは, この温度受容器に対する冷感覚刺激によるものと推察される. Lee et al. (2008b) および Siegel et al. (2010) も, TS 低下の説明として温度受容器が腹腔内に存在する可能性を示しており, 今後この体内温度受容器の存在領域についてはさらなる研究が必要である. 総合すると, アイススラリーの摂取による TS の低下には核心部 (腹部領域) と頭部 (口腔) の両方の冷却が関与していることが示唆される.

アイススラリーの摂取によって脳温が低下する可能性を示唆する研究は本章を含めいくつか存在するが, 実際にヒトにおいて脳温を評価した研究はまだ存在しない. 現在, 脳温の指標として鼓膜温がしばしば用いられているが, 特に暑熱環境下における運動時など多くの研究がその測定法の問題を指摘している. また, 耳垢や設置の不正確さ, 測定者のスキル不足の結果として測定誤差が生じる可能性があることが証明されているため (Briner, 1996; Hooker & Houston, 1996; Cetas, 1997; Amoateng-Adjepong et al., 1999; Cattaneo et al.,

2000), 鼓膜温は脳温を正確に反映しないと考えられている (Daniel & Liran, 2002). したがって, 本章では鼓膜温よりも正確で脳に近い前額部皮膚温を用いた. 現在のところ前額部皮膚温と脳温の関係を調査した研究は存在しないが, 前額部の冷却が効果的に脳温の低下をもたらすことは十分に証明されている (Mariak et al., 1999; Harris et al., 2007; Zenker & Kubik, 1996). 加えて, 熱流補償法を用いた深部温のモニタリングにおいて, 前額部深部温が頸静脈血の温度とほとんど同じ値を示すことが報告されている (Ymakage & Namiki, 2003). したがって, 前額部皮膚温が脳温の有用な指標であるということは可能であり, 熱流補償法を用いてアイススラリーの摂取が脳温に及ぼす影響を調査することは価値があると考えられる.

## 5. 結論

アイススラリーの摂取はヒトにおいて核心温と前額部皮膚温の両方を有意に低下させ, それにより温熱感覚を低下させた. 本章の結果に基づき, アイススラリーの摂取が顔面領域からの伝導性冷却により脳温を低下させることが示唆される. しかしながら, 本章では間接的な指標を用いているため, アイススラリーの摂取が脳温に及ぼす影響を明らかにするためにさらなる研究が必要である.

### Ⅲ章

常温環境下におけるアイススラリーの摂取がヒトの脳温に  
及ぼす影響  
—磁気共鳴スペクトロスコピーを用いた検討—

## 1. 緒言

アイススラリーの摂取が暑熱環境下における持久性運動パフォーマンスを向上させることは多くの研究により報告されている。Siegel et al. (2010) がその効果を初めて観察し、その後異なる運動形態 (Onitsuka et al., 2015a; Stevens et al., 2013) や摂取のタイミング (運動中や運動後など : Burdon et al., 2013; Schulze et al., 2016; Stanley et al., 2010), 中枢神経系への影響 (最大随意収縮力 : Siegel et al., 2011; Burdon et al., 2014) などアイススラリーの摂取による影響についてさまざまな研究が行われた。これらの研究により、アイススラリーの摂取によるエルゴジェニック効果のメカニズムとして、以下の 2 つが提案されている : (1) 核心温の低下による熱貯蔵能力の増大, (2) 主観的運動強度の低下や熱快適性の改善のような感覚的影響 (すなわち中枢性疲労の抑制)。

中枢性疲労の抑制を介したアイススラリー摂取によるエルゴジェニック効果を説明するもう 1 つの要因として考えられるのは、脳温の低下である。Vanden Hoek et al. (2004) はブタにおいてアイススラリーの静脈注射 (50ml/kg) 後の核心温を同量の冷たい生理食塩水 (4°C) と比較し、アイススラリーが有意に脳温を低下させることを報告した。ヒトにおいては、Siegel et al. (2012b) が、アイススラリーが口から摂取されることにより顔の皮膚表面と脳の伝導性冷却がもたらされる可能性を示唆している。この仮説を検証するため、第 II 章では温暖環境下におけるアイススラリーの摂取が前額部皮膚温に及ぼす影響を調査した。その結果、アイススラリー摂取により前額部皮膚温の有意な低下を観察し、顔の皮膚表面と脳の伝導性冷却により脳温が低下することを示唆した (Onitsuka et al., 2015b)。しかしながら、第 II 章では間接的な指標を用いており、アイススラリーの摂取による脳温の変化を直接明らかにした研究はまだ存在しない。

現在、脳温を測定するための非侵襲的な方法として磁気共鳴スペクトロスコピー (MRS) が導入されている (Cady et al., 1995; Corbett et al., 1997; Jayasunder & Singh, 2002)。モデル溶液となるファントム (水-アスパラギン酸 (NAA) 溶液) を用いた実験研究 (Corbett et al., 1995; Ishihara et al., 1995) や実験モデル (Corbett et al., 1995; Ishihara et al.,

1995; Corbett et al., 1999; Kuroda et al., 2003; McDannold et al., 2004; Trubel et al., 2003) により, MRS と埋め込まれたプローブにより測定された温度の間に密接な相関が示された. しかしながら, この方法は臨床現場においてのみ応用されており, 運動生理学分野においては使用されていないのが現状である.

したがって, 本章の目的は, MRS を用いてアイススラリーの摂取が脳温に及ぼす影響を調査することとした. MRS の利用による制限のため, 常温環境下における安静時において実験を行った.

## 2. 実験方法

### 2-A. 被験者

実験に先立ち 10 名の男性を被験者として募集したが, そのうち 2 人は実験中に頭部の動きによりスペクトルの異常が見つかったため除外された. したがって, 8 名の健康な成人男性 (年齢:  $26.9 \pm 4.6$  歳, 身長:  $1.71 \pm 0.05$ m, 体重:  $67.19 \pm 7.80$ kg, BMI:  $22.9 \pm 2.5$ ) が本章に参加した. 本章は国立スポーツ科学センターの倫理委員会により承認され, ヘルシンキ宣言に従って行われた. すべての被験者は参加に先立ち書面のインフォームドコンセントに署名した.

### 2-B. 実験手順

本実験は以下の 2 つの条件から構成された: 中立温度 ( $37^{\circ}\text{C}$ ) のスポーツ飲料を摂取する条件 (コントロール条件; 以下 CON とする) およびアイススラリー飲料 ( $-1^{\circ}\text{C}$ ) を摂取する条件 (ICE). 研究期間を通して, 被験者には身体活動や食事を含め通常的生活習慣を維持し, 実験開始 2 時間前に 500ml の水を摂取するよう指示した. 各試行はカウンターバランスのとられた順序で連続した 2 日間に実施し, サーカディアンリズムを考慮し各被験者につき同一の時間帯で行われた.

実験プロトコルを Fig. 1 に示した. 被験者は実験準備室に到着次第, 尿サンプルの採取

および全裸体重の測定を行った後、直腸温プローブを挿入し、各測定器具を装着した。被験者はその後、Tシャツと半ズボンに着替えた後、室温 23°C および相対湿度 45% に維持された実験室に入室し、磁気共鳴画像 (MRI) 装置上に仰向けになり、専用のコイルで頭部を固定した。15 分のベースライン測定後、37°C (CON) または -1°C (ICE) のスポーツ飲料を約 5 分間 (CON: 3.9±1.1 分, ICE: 4.7±1.7 分) で 7.5g/kg 摂取した。飲料摂取後、被験者はさらに 30 分間 MRI 装置上で安静を維持した。MRI 装置上で仰向けのまま飲料を摂取させなければならないため、被験者は自分自身で飲料が入れられたボトル (Floe bottle, Technicool Ltd.) を取り、自身のペースで飲料を摂取した。各飲料は 2 つのボトルに分けて入れ、摂取期間の直前に被験者の手元に設置した。ボトルは摂取終了後、回収された。なお、摂取する際にはボトルを手でへこませながら、かつボトルの中身を時々混ぜながら 5 分以内を目安に摂取すること、できる限り頭部を動かさないことが指示された。このような指示にも関わらず、ボトルの構造上氷の一部がボトルに残ったため、ICE 条件において実際の合計摂取量は 7.5g/kg よりも少なかった。残った氷の量には個人差があり、4 人の平均値で 0.5±0.7g/kg であった。アイススラリーはスラリーマシン (Big Biz1, FMI) を用いて作成し、中立温度のスポーツドリンクは恒温槽 (TR-2A, AS ONE) を用いて加温した。どちらの飲料も市販のスポーツ飲料 (Pocari Sweat, Otsuka Pharmaceutical) とした。

## 2-C. MRI および MRS

MRI および MRS は 3 テスラ MRI スキャナー (Magnetom Skyra, Siemens Healthcare Elringen) と 64 チャンネルのヘッドネックコイルを用いて行った。3D-T1-weighted MR images (MPRAGE: magnetization prepared rapid acquisition with gradient echo) は以下のパラメータに従った: 反復時間 (RT) 1900 ms, エコー時間 (TE) 2.29 ms, 反転時間 850 ms, フリップ角 8°, 行列 356×256, 視野 (FOV) 240 mm, 1 mm スライス厚。<sup>1</sup>H MRS は point-resolved spectroscopy (PRESS) localization で行われた。取得パラメータは以下の通りとした: TR 10000 ms, TE 135 ms, FA 90 degree. 2048 データサイズ, 1200 Hz

スペクトル幅, 1 励起. 関心領域 (VOI) は 3D-T1 image を用いて認知機能との関連が示されている前頭皮質 (MacDonald et al., 2006) に設定した (Fig. 2A). VOI のサイズは  $20 \times 30 \times 20$  mm とした. MR スペクトルは 3.2 ppm のコリン含有成分, 3.0 ppm のクレアチンリン酸, および 2.0 ppm の N-アセチルアスパラギン酸を示した. 脳温は Cady et al. (1995) により提案された以下の式を用いてアスパラギン酸 (NAA) と水の化学シフトから算出した:  $\text{脳温} = 286.9 - 94 \times (\Delta\text{H}_2\text{O} - \text{NAA})$  (NAA と水の化学シフトの差; Fig. 2B 参照). 本章では, 観察のしやすさと多くの先行研究において使用されていることから NAA ピークを用いた.

## 2-D. 測定項目

生理的指標として脳温 ( $T_{\text{brain}}$ ), 直腸温 ( $T_{\text{re}}$ ), 平均皮膚温 ( $T_{\text{sk}}$ ), 尿比重, 全裸体重を測定した. 脳温は 30 秒毎に測定し, 1 分間の平均値を算出した.  $\Delta T_{\text{brain}}$  は以下の式を用いて算出した:  $\Delta T_{\text{brain}} = (\text{飲料摂取後の平均値}) - (\text{飲料摂取前の 15 分間の平均値})$ . 直腸温はサーミスタープローブ用ゴムカバー (11Y24, Nikkiso-Therm Co. Ltd.) を装着したサーミスタープローブ (LT-ST08-21, Nikkiso-Therm Co. Ltd.) の先に直腸温測定用潤滑剤ヌルゼリー (Nichi-iko) を塗り, 直腸内に 10~12 cm 挿入して測定した.  $\Delta T_{\text{re}}$  は以下の式を用いて算出した:  $\Delta T_{\text{re}} = (\text{最大低下時の直腸温}) - (\text{Pre の直腸温})$ . 飲料摂取前 (15 分のベースライン終了時) に記録された値を Pre とし, CON 条件における最大低下時間は ICE 条件と同じ時間 ( $23.3 \pm 6.9$  分) に設定した. 皮膚温は胸部, 上腕部, 大腿部にそれぞれサーミスタープローブ (LT-ST08-12, Nikkiso-Therm Co. Ltd.) をテープで貼りつけて測定した. 直腸温および身体各部位の皮膚温はデータ収集型温度計 (LT-8A, Gram Corporation) を用いて 30 秒毎に計測した. 平均皮膚温は Roberts (1977) の 3 点法を用いて算出した:  $T_{\text{sk}} = 0.43 \times \text{胸部温} + 0.25 \times \text{上腕部温} + 0.32 \times \text{大腿部温}$ . 体重は, 10g 単位の体重計 (HW-100KGV, A & D) を用いて裸体で, また尿比重は尿比重計 (PAL-09S, Atago) を用いて実験前後に測定した. 発汗量は以下の式を用いて算出した:  $\text{発汗量} = (\text{実験前体重} - \text{実験後体$

重) + 飲料の摂取量. 主観的温熱感覚 (thermal sensation : TS) および熱快適性 (thermal comfort : TC) は, それぞれ Gagge (1963) の 9 ポイントスケール (Table 1.) および Bedford の 7 ポイントスケールの修正版 (Table 2.) を用いて実験前後に全身および頭部に分けて測定した.

## 2-E. 統計処理

実験結果はすべて平均値±標準偏差 (SD) で示した. 脳温, 直腸温, 皮膚温, 温熱感覚, 熱快適性, 体重, および尿比重は, 2 要因 (条件×時間) の繰り返しのある分散分析を用いて分析した. 有意差が認められた場合には t 検定により, 各群間の差の検定を行った.  $\Delta T_{\text{brain}}$  および  $\Delta T_{\text{re}}$  間の相関関係を評価するためにピアソンの相関係数を算出した. すべての統計分析は SPSS (Ver. 17.0) を用いて行った. 有意水準は 5%未満とした. 本章では, 脳温以外の指標において飲料摂取前に記録された値 (15 分間のベースライン期終了時) を Pre, 飲料摂取終了時 (Pre の 10 分後) に記録された値を Post として定義した. 脳温においては飲料摂取前 15 分間の平均値を Pre として定義した. すべての生理的指標は Post 後 5 分ごとの値を示した.

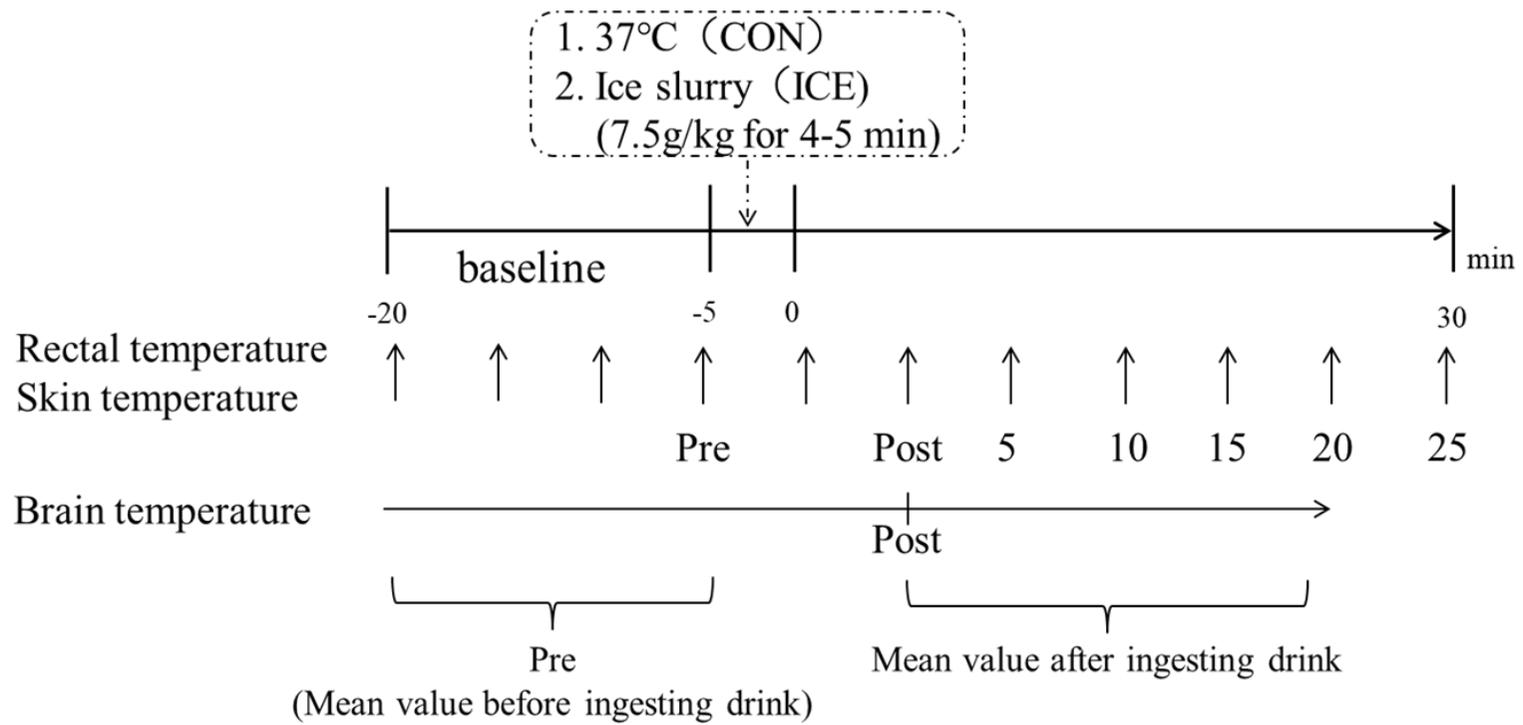


Fig.1 実験プロトコル

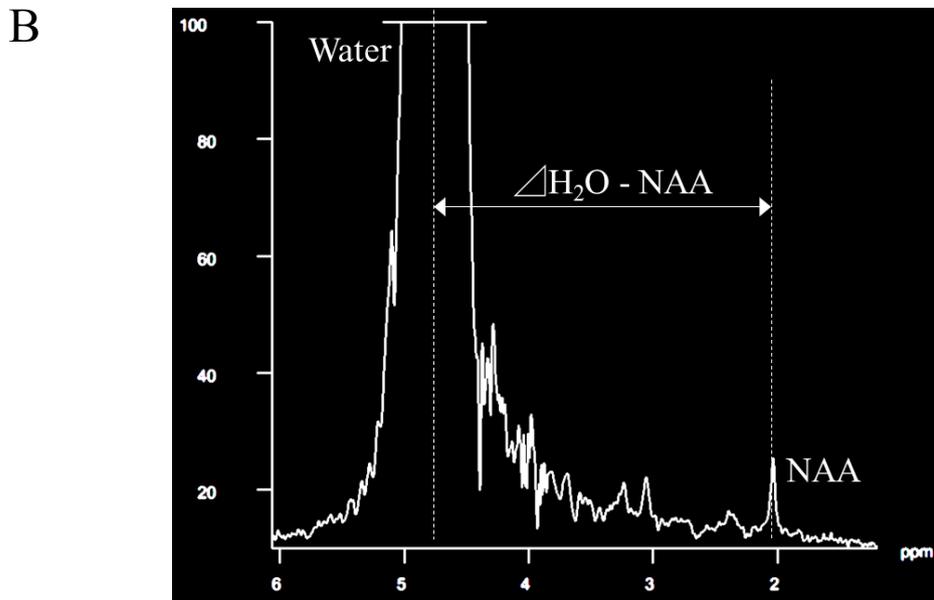
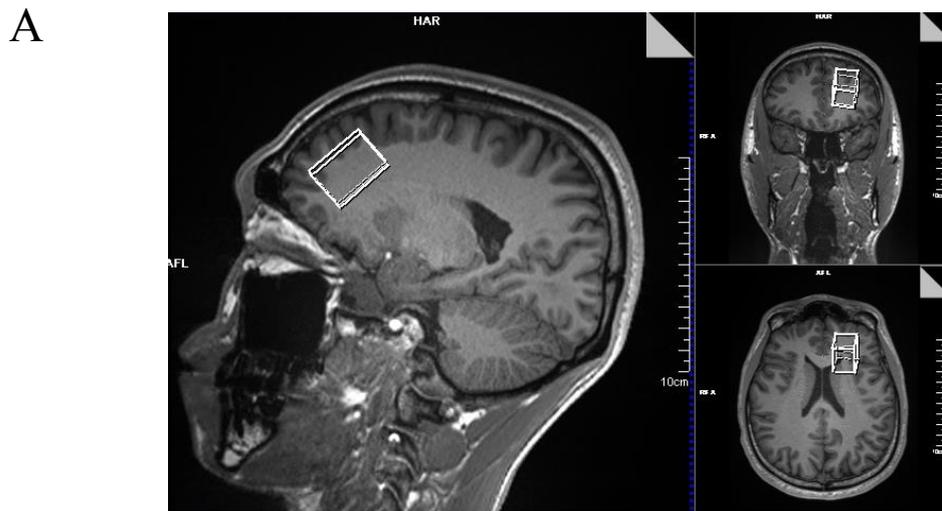


Fig. 2 前頭皮質の MRS 画像 (A) および水とアスパラギン酸 (NAA) の化学シフトを用いた脳温推定の一例 (B)

Table 1. 温熱感觉

8	very hot
7	hot
6	warm
5	slightly warm
4	neutral
3	slightly cool
2	cool
1	cold
0	very cold

Gagge (1963)

Table 2. 熱快適性

7	非常に快適な
6	快適な
5	やや快適な
4	どちらでもない
3	やや不快な
2	不快な
1	非常に不快な

Bedford (1936) 改変

### 3. 結果

#### 3-A. 生理的指標

脳温の経時的変化および変化量 ( $\Delta T_{\text{brain}}$  = 飲料摂取前の平均値 - 飲料摂取後の平均値) をそれぞれ Fig. 3A および B に示した. 脳温は ICE 条件において飲料摂取後 (Post, 10, 15 分) に CON 条件よりも有意に低下した ( $p < 0.05$ ). また,  $\Delta T_{\text{brain}}$  も ICE 条件において CON 条件よりも有意に高値を示した ( $p < 0.05$ ).

直腸温の経時的変化および Pre から最大低下時 ( $23.3 \pm 6.9$  分) までの変化量 ( $\Delta T_{\text{re}}$ ) をそれぞれ Fig. 4A および B に示した. 直腸温は ICE 条件において CON 条件と比較して 5 分から 25 分まで有意に低下し, Pre と比較して Post から 25 分まで有意に低下した ( $p < 0.01$ ). また,  $\Delta T_{\text{re}}$  も ICE 条件において CON 条件よりも有意に高値を示した ( $p < 0.001$ ). さらに,  $\Delta T_{\text{brain}}$  および  $\Delta T_{\text{re}}$  の間に有意な相関関係が見られた ( $r = 0.60, p < 0.05$ ).

平均皮膚温の経時的変化を Fig. 5 に示した. Pre と比較して CON 条件では 20 分および 25 分, ICE 条件では Post および 5 分に平均皮膚温が有意に上昇したが ( $p < 0.05$ ), 条件間で差は観察されなかった.

実験前後における水和状態を Table 3. にまとめた. CON 条件において実験後に体重が有意に増加したが ( $p < 0.001$ ), 条件間で差は観察されなかった. 尿比重は両方の条件において実験後に有意に低下したが ( $p < 0.05$ ), 条件間で差は観察されなかった.

#### 3-B. 主観的指標

温熱感覚および熱快適性の変化を Table 3. にまとめた. 全身の温熱感覚は ICE 条件において実験後に CON 条件よりも有意に低下した ( $p < 0.001$ ). 全身の熱快適性は ICE 条件において実験後に Pre ( $p < 0.01$ ) および CON 条件 ( $p < 0.05$ ) よりも有意に低下した. 本章では, 生理的指標の測定中に主観的指標の評価を行っていないため, 第 II 章のような相関分析は実施しなかった.

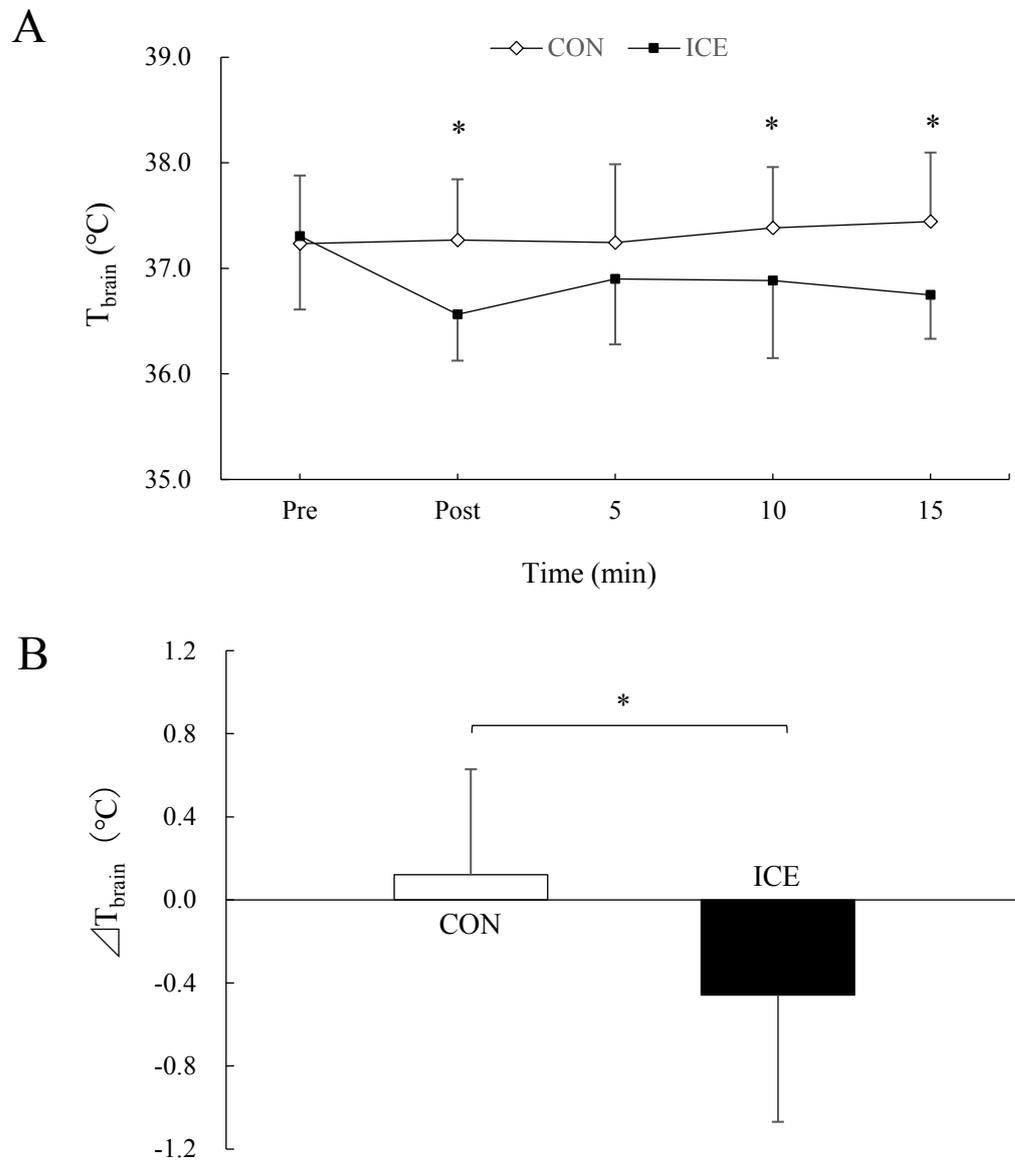


Fig. 3 脳温の経時的変化 (A), および変化量 ( $\Delta T_{\text{brain}} = \text{飲料摂取後の平均値} - \text{飲料摂取前の平均値}$ ) (B)

\* は CON 条件との有意差を示す ( $p < 0.05$ ).

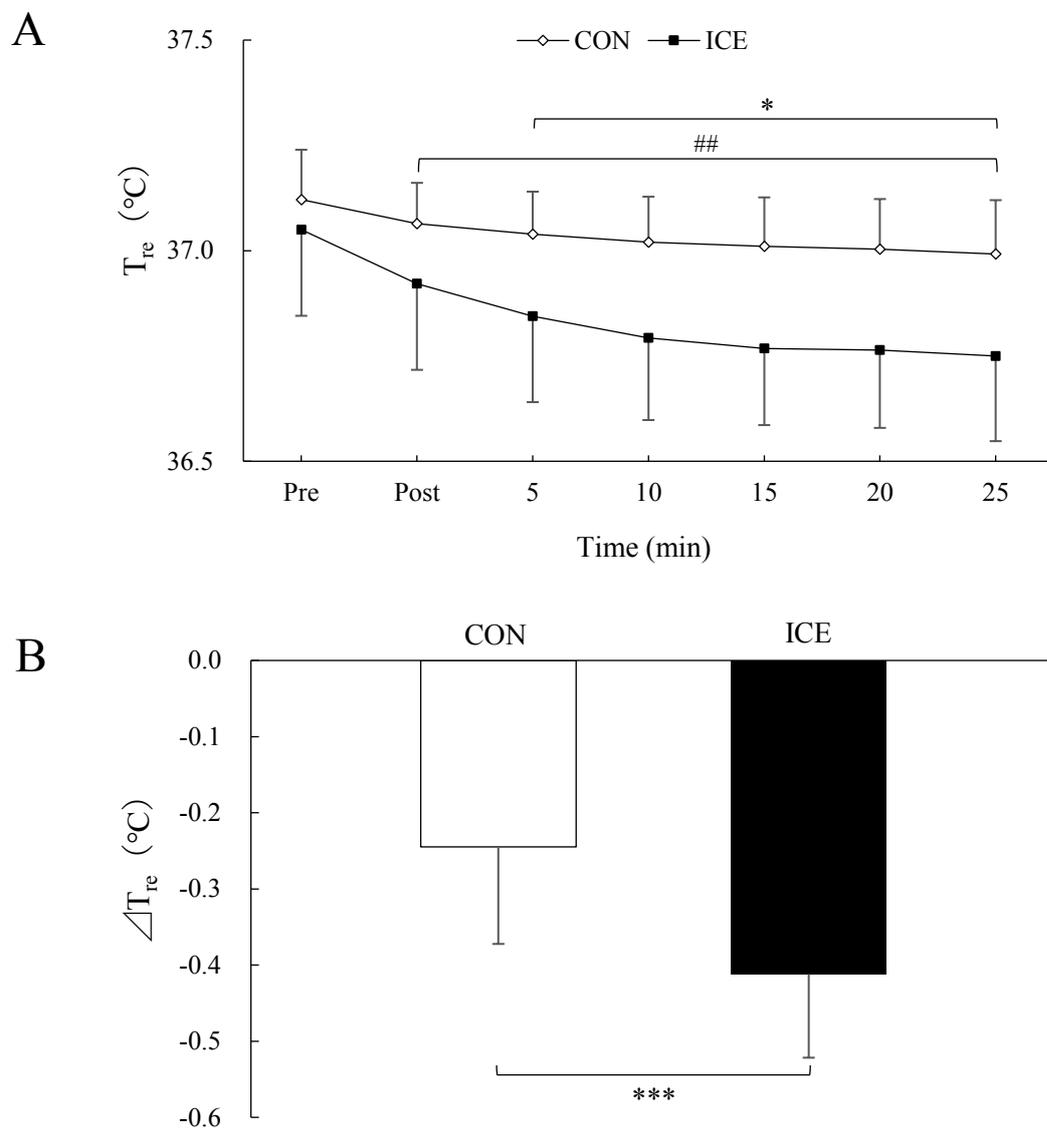


Fig. 4 直腸温の経時的変化 (A) および Pre から最大低下時までの変化量 (B)

\*, \*\*\*は CON 条件との有意差 (それぞれ  $p < 0.05$ ,  $p < 0.001$ ), ##は Pre との有意差 ( $p < 0.01$ ) を示す.

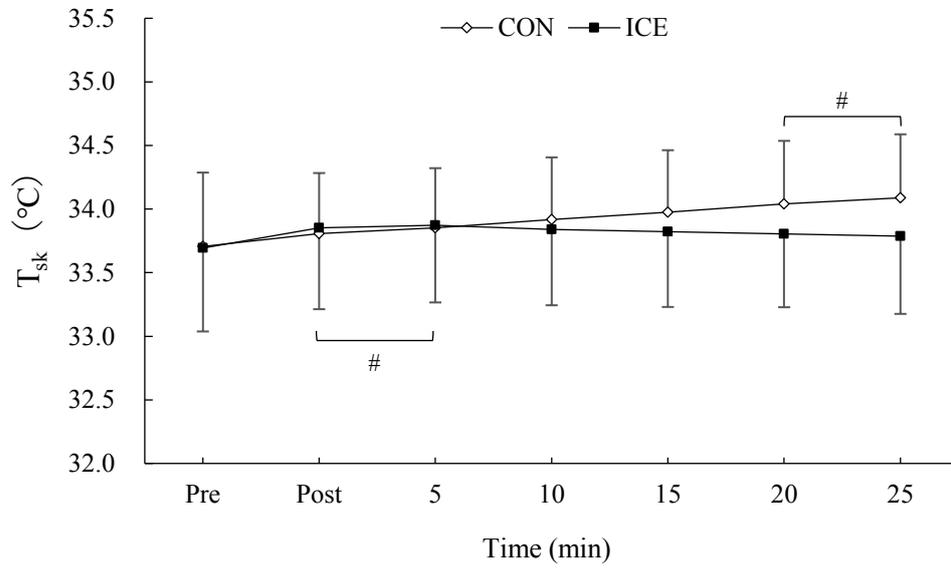


Fig. 5 平均皮膚温の経時的変化

# は Pre との有意差を示す ( $p < 0.05$ ).

Table 3. 実験前後における温熱状態の知覚および水和状態の変化

		CON	ICE
Thermal sensation (whole body)	Before	3.9±0.6	3.6±0.5
	After	4.5±0.9	2.1±0.9***
Thermal comfort (whole body)	Before	4.9±0.8	4.5±0.9
	After	4.6±1.3	2.7±0.5*,##
Body mass (kg)	Before	67.00 ± 7.79	66.98 ± 7.58
	After	67.42 ± 7.84###	67.34 ± 7.99
Urine specific gravity	Before	1.017 ± 0.009	1.013 ± 0.008
	After	1.010 ± 0.010''	1.005 ± 0.002''

\*, \*\*\* は CON との有意差 (それぞれ  $p < 0.05$ ,  $p < 0.001$ ), #, ##, ###, は Before との有意差を示す (それぞれ  $p < 0.05$ ,  $p < 0.01$ ,  $p < 0.001$ ).

#### 4. 考察

近年、アイススラリーの摂取によるエルゴジェニック効果の背景にある新たなメカニズムとして、脳温の低下による運動時の中枢性疲労の抑制が注目されている。アイススラリーの摂取が脳温を低下させる可能性があることを示唆する研究はいくつか存在しており (Naito & Ogaki, 2017; Jones et al., 2012; Tan & Lee, 2015)、アイススラリーの経口摂取により顔の皮膚表面が冷却され、脳の伝導性冷却がもたらされる可能性が示唆されている (Siegel et al., 2012a)。本研究では、まず第Ⅱ章で前額部皮膚温を用いてその可能性を検証した結果、アイススラリーの摂取が顔の皮膚表面を冷却することが明らかとなった。したがって、本章では実際に脳が冷却されるか否かを磁気共鳴スペクトロスコピー (MRS) という手法を用いて検討した。その結果、アイススラリーの摂取が直腸温、温熱感覚および熱快適性と同様に脳温を有意に低下させるということが示された。現在、暑熱環境下での運動中にヒトの脳温を測定することは困難であり、アイススラリー摂取後の運動中における脳温の変化を検討するためには間接的な指標を用いる以外方法がない。本章の結果は、そのような間接的な指標から得られた結果の妥当性を高めるための基礎データを提供する非常に意義のあるものである。

本章は、MRS という非侵襲的な方法を用いてアイススラリーの摂取がヒトの脳温を低下させることを観察するのに初めて成功した。アイススラリーの摂取が脳温を低下させるメカニズムとして以下の2つが提案されている。1つ目は、食道と頸動脈が近接していることにより、アイススラリーの摂取が脳に流れる血液を冷却する可能性、2つ目は、アイススラリーの経口摂取が顔の皮膚表面と脳の伝導性冷却をもたらす可能性である (Siegel et al., 2012b)。本研究では、第Ⅱ章において温暖環境下におけるアイススラリーの摂取が前額部皮膚温を有意に低下させることを観察し、それが顔の皮膚表面と脳の伝導性冷却をもたらすことを示唆した (Onitsuka et al., 2015)。本章では、サーミスタープローブがMRIの磁場により影響を受ける可能性があったため、前額部皮膚温を測定することはできなかったが、第Ⅱ章と同様にアイススラリーの摂取が顔の皮膚温を低下させ、それにより脳温が低下

したと考えることは可能である。興味深いことに、本章で観察された脳温の低下 ( $-0.4^{\circ}\text{C}$ ) はファンを用いた頭部冷却による低下 (Harris et al., 2008) と同様であった。したがって、アイススラリーの摂取は大がかりな設備を用いた頭部冷却よりも簡単に脳を冷却できると言うことができ、本章の結果は効果的な冷却戦略の開発に寄与するものであると考えられる。本章はアイススラリーの摂取が脳温を低下させるという現象を明らかにするための基礎的研究であるため、この現象の背景にあるメカニズムは今後調査していく必要がある。

Fuller et al. (1998) は運動前の体温や環境条件、走行時間が異なるにも関わらず、ラットが同じ脳温で疲労困憊に達したことを報告し、脳温にも核心温と同様に危機的限界レベルが存在することを示唆した。ヒトにおいても同じことが言えるとすれば、アイススラリーの摂取による脳のプレクーリングはこの危機的限界レベルへの到達を遅らせることができ、それにより運動時間も延長させることが可能である。また、脳温の過度な上昇は中枢性疲労の要因になることが示唆されているため (Cheung & Sleivert, 2004; Hasegawa & Cheung, 2013)、脳のプレクーリングは中枢性疲労の発現も抑制することができ、それが運動能力向上の一因になっている可能性がある。さらに、脳温の低下は運動中のアイススラリー摂取によるエルゴジェニック効果も説明できるかもしれない。いくつかの先行研究では運動中のアイススラリー摂取が核心温の変化を伴わずに運動パフォーマンスを改善したと報告している (Burdon et al., 2013 ; Schulze et al., 2016)。その著者らは運動パフォーマンスの改善に寄与した要因として熱快適性のような主観的感覚の改善を挙げたが、核心温および皮膚温に差はなかったため、その感覚的な改善が脳温の低下によりもたらされたということは可能である。本章では、熱快適性はアイススラリー摂取により悪化した。これは常温環境下における摂取が原因であり、平均皮膚温が変化していないことと被験者の様子から、震えによる熱産生が引き起こされる程度の悪化ではなかったと考えられる。温熱感覚の低下 (より寒く感じる) においても同様である。本章では、主観的な指標を経時的に測定していないため、生理的指標との関係を断言することはできないが、直腸温および脳温が測定終了時まで有意に低下していることから、第II章と同様に核心部および頭部の冷却とそれ

に伴う求心性フィードバック情報の変更が温熱感覚低下の要因であると考えられる。本章で温熱感覚の低下が第Ⅱ章よりも小さかったのは、直腸温の変化量が小さかったことが要因だろう。

飲料摂取が MR 画像に及ぼす影響を調査した先行研究 (Chambers et al., 2009 ; Guest et al., 2007) では、被験者が動かずに摂取できるよう、飲料はシリンジから細いチューブを通して被験者の口へ送られた。しかしながら、アイススラリーはチューブを通らないため、本章では被験者が自ら手元に置かれたボトルを手に取り、各飲料を摂取しなければならなかった。これにより本章では 2 つの制限が生じた。1 つ目は、被験者の頭部の動きが脳温に影響を及ぼした可能性を完全に除外することはできないということである。実際、飲料摂取中の脳温は、スペクトルの異常が観察されたため除外された。しかしながら、摂取後のスペクトルは摂取前と同じように安定していたため、アイススラリーの摂取が脳温に及ぼす影響を調査することができたと考えられる。2 つ目に、ボトルの注ぎ口から吸い上げられない氷がボトルに残り、被験者が摂取する飲料の量を統制することができなかったことである。それにより、ICE 条件における直腸温変化量 ( $0.40^{\circ}\text{C}$ ) は同じ常温環境下における先行研究 ( $0.66^{\circ}\text{C}$  : Siegel et al., 2010) や、温暖環境下で行った第Ⅱ章 ( $0.53^{\circ}\text{C}$ ) よりも小さくなった。もし被験者が必要量を摂取できていたならば、ICE 条件における直腸温変化量は本章で観察された値よりも大きくなった可能性がある。さらに、本章では直腸温変化量と脳温変化量の間に関連 (  $r=0.60$ ,  $p<0.05$  ) が観察された。それは、直腸温変化量が大きくなればなるほど脳温変化量も大きくなることを示しており、したがって被験者が必要量を摂取した場合には、ICE 条件における脳温変化量も本章の値よりも大きくなる可能性がある。必要量より少ないアイススラリーの摂取量でさえ脳温を低下させることができたため、アイススラリーの摂取が脳温を低下させるという本章の結果は間違いのないであろう。

MRS を用いて運動中に脳温を測定することは困難である。鼓膜温を用いた間接的な方法が代替法として挙げられるが、その方法は特に暑熱環境下における運動中に使用するには問題があり、耳垢や設置位置の不正確さ、測定者の技術不足により測定に誤差が生じる得る

ことが多くの研究により証明されている (Briner Jr, 1996; Hooker & Houston, 1996; Cetas, 1997; Amoateng-Adjepong et al., 1999; Cattaneo et al., 2000). したがって, 鼓膜温は脳温を正確に反映しないと考えられる (Daniel & Liran, 2002). 一方で, MRS を用いて運動前後に脳温を測定することは可能であるため, アイススラリーの摂取が運動により体温が上昇したときの脳温に及ぼす影響を調査することも可能である.

本章では, 運動時における中枢性疲労の指標とされる認知機能と関連がある前頭皮質において脳温を測定した. しかしながら, 他の領域における脳温はこの領域とは異なる可能性がある. 例えば, ヒトにおいて深層の脳組織に対して表層では最大 1°C まで温度勾配があることを報告している研究がいくつか存在する (Corbett et al., 1997; Shiraki et al., 1988; Mariak et al., 1994). したがって, 体温調節と関連がある視床下部のような他のより深い領域における脳温を測定することは価値があるようだ.

最後に, 本章は第 II 章と同じような温暖環境下で実験を行いたかったが, 実験装置の制限により MRI 室の環境条件を変えることができなかった. したがって, 被験者が循環スーツを着用して第 II 章と同じように直腸温を変化させた状態での脳温測定を試みた. しかしながら, その状態では安静時でさえも脳温を安定して測定することができなかったため, MRI 室の環境で脳温を測定することとなった. 本章の結果を第 II 章と同じような環境条件で再現することは必要であるかもしれないが, 実際の競技現場では快適な室内でアイススラリーを摂取することが予想されるため, 常温環境下における本章の結果も十分意義のあるものであると考える.

## 5. 結論

アイススラリーの摂取は直腸温および温熱感覚と同様に, ヒトの脳温を有意に低下させた. 脳温の低下は, 危機的限界レベルへの到達や中枢性疲労の発現を遅延させることにより, 運動能力向上の一因となっている可能性がある. しかしながら, その関係性を明確にするためには, 暑熱環境下での運動時における変化などさらなる研究が必要である.

## IV章

暑熱環境下における運動前および運動中のアイスラリー  
摂取が認知機能および運動能力に及ぼす影響

## 1. 緒言

暑熱環境下における運動時には、過度な体温上昇により疲労が誘発され運動能力が低下する。この運動能力の低下をもたらす疲労は、主に“末梢性疲労”と“中枢性疲労”の2つに分類される。中枢性疲労は体内のエネルギー源の枯渇や筋機能の不全などの末梢性疲労を伴わずに引き起こされ、モチベーションの低下や脳代謝の変化、脳内ホルモンおよび脳内神経伝達物質の変化、運動ニューロンの動員などの中枢神経系に影響を及ぼす (Nybo, 2008; Roelands & Meeusen, 2010)。アイススラリーの摂取は脳温の低下や報酬およびモチベーションに関連する脳領域を活性化する感覚的变化によって中枢性疲労を抑制することが示唆されている (Jones et al., 2012; Siegel et al., 2012a; Burdon et al., 2014; Tan & Lee, 2015)。本研究ではこれまでその可能性について脳温の低下に着目し検討を行った。第II章ではアイススラリーの摂取により顔の皮膚表面が冷却される(前額部皮膚温が有意に低下する)ことで脳温が低下することを示唆し、第III章では磁気共鳴スペクトロスコピー(MRS)という手法を用いて、アイススラリーの摂取によって実際に脳温が低下することを観察した。これらの観察により、アイススラリーの摂取は脳温を低下させることで暑熱環境下での運動時における中枢性疲労の発現を遅延することが示唆された。したがって、本章ではアイススラリーの摂取によって実際に中枢性疲労が抑制されるか否かを検討する。中枢性疲労の発現は認知機能の低下を引き起こす要因となるため、その間接的な指標として使用されており、風間ら(2011)は過度な核心温の上昇によって認知機能が低下することを報告している。この認知機能の低下には核心温の上昇に伴う脳温の上昇が関与することが示唆されている (Cheung & Sleivert, 2004; Hasegawa & Cheung, 2013) ことから、本研究における中枢性疲労の指標として適していると考えられる。そこで本章では、アイススラリーの摂取が中枢性疲労に及ぼす影響について、認知機能の低下を抑制できるか否かという観点から検討することとした。

アイススラリーの摂取に関する先行研究の中で中枢神経系に及ぼす影響とともに課題となっているのが、摂取後の運動中における核心温上昇率の増大である。これまで先行研究では運動前または運動中のどちらかに摂取させており、運動前と運動中の両方に摂取させた

研究はほとんどない。唯一 Schulze et al. (2016) が運動前および運動中の摂取について検討しているが、運動前にアイスタオルを組み合わせているため、アイススラリー単独の効果はまだ明らかとなっていない。アイススラリーを運動前に加えて運動中にも摂取することで、運動中の核心温上昇率の増大を抑制でき、さらには脳温の低下や感覚的な変化の持続による恩恵も受けることができると考えられる。

以上のことから、本章では運動前のアイススラリー摂取が暑熱環境下における認知機能に及ぼす影響を調査するとともに、運動中の摂取を組み合わせることでさらに運動能力や認知機能の改善がみられるか否かを検討することを目的とした。

## 2. 実験方法

### 2-A. 被験者

被験者は健康な男性 11 名（年齢：22.3±2.2 歳，身長：1.70±0.10 m，体重：65.8±9.7 kg，BMI：21.6±2.0，最大酸素摂取量（VO<sub>2max</sub>）：46.5±9.8 ml/kg/min，最大運動強度（Wattmax）：220.7±24.7 W）であった。実験を行うにあたり、被験者に実験の目的および危険性についての十分な説明を行い、実験の被験者となることの同意を得た。実験は、広島大学大学院総合科学研究科倫理委員会の承認を得て行った。

### 2-B. 予備実験およびファミリアリゼーション

本実験に先立ち、VO<sub>2max</sub> の測定と認知課題の練習を行った。VO<sub>2max</sub> の測定では、室温 24°C，相対湿度 50% に設定した実験室においてセミリカンベント式エルゴメータを用いた漸増負荷テストを行った。漸増負荷テストは 30W で 3 分間のウォーミングアップを行い、その後疲労困憊に至るまで 1 分ごとに 15W ずつ増加した。疲労困憊の定義は、10 秒間 60rpm のペダル回転数を維持できなくなったとき、または心拍数が予測最大心拍数（220－年齢）を超えたときとした。認知課題の練習は、本実験において順化作用による成績の向上の影響を取り除くため、安静時 6 回，運動時 3 回の合計 9 回行った。運動時の練習は VO<sub>2max</sub> の測定後

に、本実験時の負荷を設定して 60rpm の回転数を維持しながら行わせた。

予備実験から 2 日以上間隔を空け、本実験の機器および手順への順化のため、ファミリアリゼーション試行を行った。ファミリアリゼーションは本実験と同じプロトコルとしたが、その後の本実験で使用するため運動は 50%VO<sub>2max</sub> で疲労困憊に至るまでとした。疲労困憊の定義は心拍数が予測最大心拍数に達したとき、直腸温が 39.5°C に達したとき、または言葉による励ましを受けても 60rpm を維持できなくなったときとした。運動継続時間や各指標についての被験者へのフィードバックは一切行わなかった。

## 2-C. 本実験

実験当日の体調を統一するため、被験者にはファミリアリゼーション時に実験開始 24 時間前からの生活活動および食事内容を記録用紙に記入してもらい、その後の本実験でできる限り再現するよう依頼した。また、実験前日の激しい運動およびアルコール、カフェインの摂取を控えるよう依頼した。実験当日は 3 時間前までに食事を済ませ、2 時間前に水 500ml を摂取するよう指示した。各試行はカウンターバランスのとられた順序で 4 日以上の間隔をあけ、サーカディアンリズムを考慮し各被験者につき同一の時間帯で実験を行った。実験は無作為化クロスオーバーデザインで、運動前および運動中に 37°C のスポーツ飲料 (PocariSweat, Otsuka Pharmaceutical) を摂取するコントロール条件 (以下 CON 条件とする)、運動前にアイススラリー (-1°C) を摂取し、運動中に 37°C のスポーツ飲料を摂取する PRE 条件、および運動前および運動中にアイススラリーを摂取する ALL 条件の 3 条件を行った。

実験プロトコルを Fig. 1, 実験中の様子を Fig. 2 に示した。被験者は実験準備室に入室後、尿比重および全裸体重を測定した後、直腸温プローブを挿入した。被験者はその後、室温 24°C および相対湿度 50% に設定された実験室に入室し、各測定器具を装着後、10 分間の安静をとり、半仰臥位安静状態で 37°C のスポーツ飲料 (CON 条件)、またはアイススラリー (-1°C ; PRE 条件および ALL 条件) を 30 分間で 7.5g/kg 摂取した。摂取間隔を統一するために、被験者は 5 分毎に 1.5g/kg の間隔で飲料を摂取した。20 分間の環境移行期間 (室温

34°C, 相対湿度 50%に変更)の後,被験者はセミリカンベント式 (Takei Scientific Instruments Co.,Ltd.) 自転車エルゴメータ (AEROBIKE 75XL II, COMBI) を用い, 30%VO<sub>2max</sub> で3分間のウォーミングアップを行った. その後, 2分間の安静を挟み, 50%VO<sub>2max</sub> でファミリーアライゼーション時に測定した時間 (59.6±9.3 分) 運動を行った. 被験者は運動中 10 分ごとに 37°Cのスポーツ飲料 (CON および PRE 条件) またはアイススラリー (-1°C ; ALL 条件) を 1.25g/kg ずつ摂取した. 一定負荷運動終了後, 10 分間の回復をとり実験室を退室した. 実験終了後, 被験者は直腸温プローブを取り外し, 汗を完全に拭いたのち, 全裸体重を測定した. その後, 尿比重の測定と質問紙への記入を完了し, 実験終了とした. なお, 37°Cのスポーツ飲料の作成には恒温槽 (TR-2AR, AS ONE) を用い, アイススラリーはスラリーマシン (DM1000, Margaritaville) を用いて作成した. どちらの飲料も市販のスポーツ飲料 (Pocari Sweat, Otsuka Pharmaceutical) とした.

追加実験として, 4名の被験者にはパフォーマンステストを実施した. パフォーマンステスト実施群ではファミリーアライゼーションおよび本実験の一定負荷運動時間を 60 分とし, その後 10 分間の回復を挟んで 80%VO<sub>2max</sub> で疲労困憊に至るまでのテストを実施した. 疲労困憊の定義および被験者へのフィードバックはファミリーアライゼーションと同様とした.

## 2-D. 認知機能の測定

本章では, 実際の競技中に見られる「頭がボーっとして判断が遅れる」などのような認知機能の低下を中枢性疲労とし, 本章における認知機能とは実行機能を指すこととする. 実行機能とは, 知覚や注意, 言語や記憶など基本的な認知機能のある目的を達成するために統合・制御する高次の認知機能と定義される (諏訪部および征矢, 2014). 実行機能はさらにいくつかの下位機能に分けられ, Miyake et al. (2000) の説では, 優勢反応の制御 (抑制機能), 情報の更新と監視 (アップデューティング機能), 課題に対する構えの切り替え (シフティング機能) の3つに分類される. 本章では実行機能の中でも抑制機能を必要とする空間ストループ課題を採用した. 空間ストループ課題は特に, 目標とする行動と実際の行動の差

(エラー)を検出し、それを評価・修正する脳内情報処理過程(エラーモニタリング)を評価する行動指標として用いられてきた課題である。空間ストループ課題を用いることで、競技中に得られる様々な情報(対戦相手や自分の状況など)による干渉/葛藤を抑制し、行動を決定するという認知的な状況を再現できると考えられる。

実験プログラムは Inquisit 5 ソフトウェア (Millisecond) によってプログラムされ、実行された。空間ストループ課題の様子を Fig. 3 に示した。この課題は一致刺激および不一致刺激の2つの刺激から構成されている。本章では、常に頭を働かせている実際の競技現場を模倣するため、運動中は飲料の摂取や主観的指標の評価以外の時間を常に認知課題に取り組ませるよう、課題の所要時間を7分程度に設定した。したがって、刺激数は280刺激(統制刺激140, 干渉刺激140)とした。課題は画面中央に表示されている注視点“+”の上下にランダムに提示される矢印の向きを速くかつ正確に回答するという内容であった。一致条件ではその矢印が提示される位置と向きが一致しているが、不一致条件では一致していない刺激が提示された。刺激提示は1500msとし、それ以降に反応した場合は反応していないとみなされた。刺激の間隔は800msとした。反応はテンキーを用い、上と反応する場合はテンキーの「8」を左手の中指で、下と反応する場合は「2」を右手の中指で押すよう指示した。各試行について反応時間および正答率を測定し、評価には不一致条件におけるそれらの平均値を使用した。安静時の練習では、できるだけ速く正確に判断するよう教示を行い、運動時の練習では安静時で最も良かった反応時間および正答率を目標に設定してその目標を両方達成できるように教示した。ファミリアリゼーションでは、練習で最も良かった反応時間および正答率を目標とし、本実験ではファミリアリゼーションまでで最も良かった反応時間および正答率を目標に設定した。本章では、行動指標によるエラーモニタリングの研究において主な指標とされているエラー後の反応時間、および反応時間における不一致条件と一致条件の差を干渉の指標として算出した。



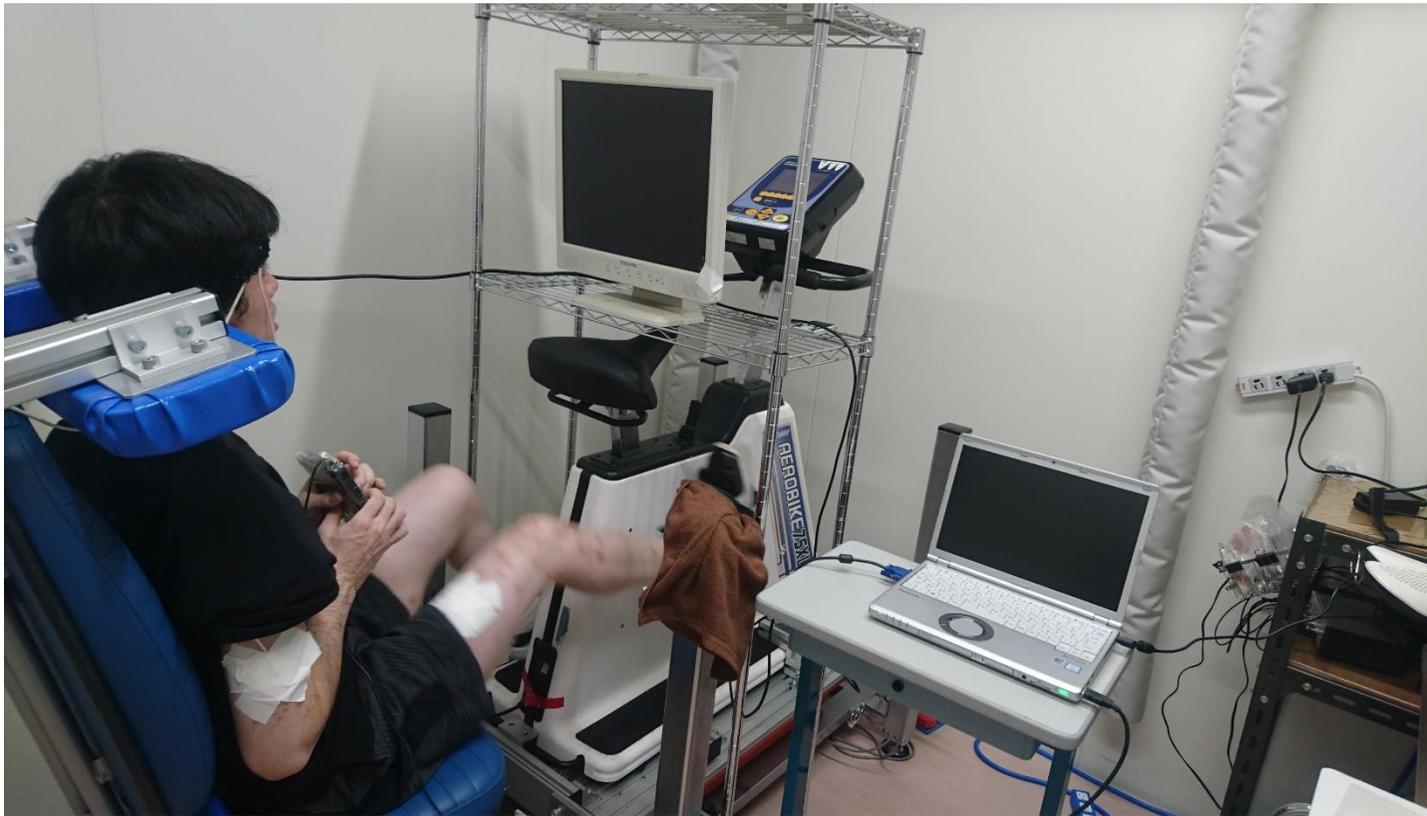


Fig. 2 実験中の様子

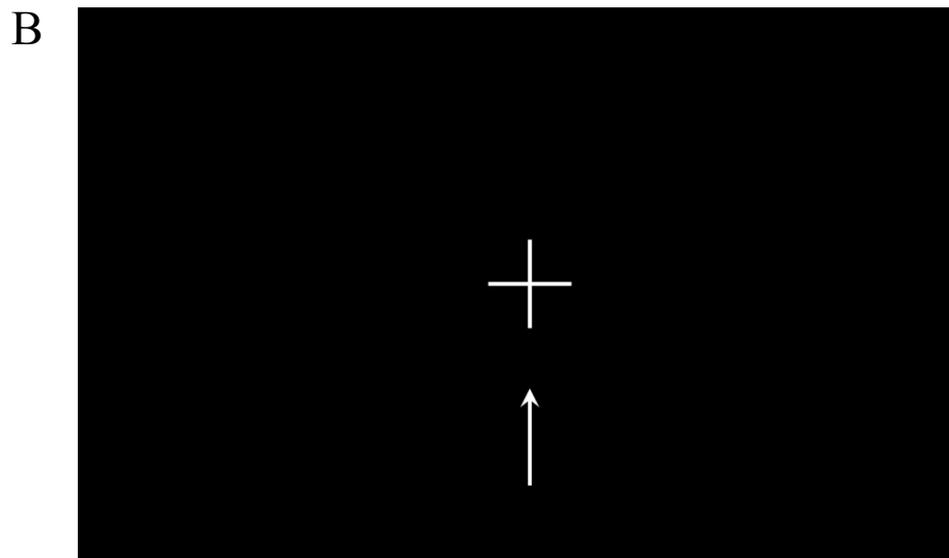
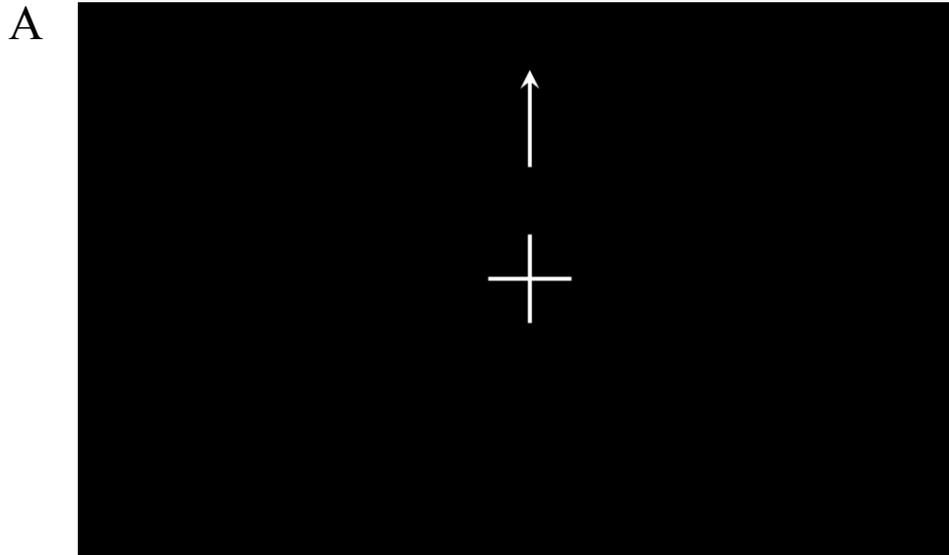


Fig. 3 空間ストループ課題の様子 (A : 一致条件, B : 不一致条件)  
上 (下) 向きの矢印が上 (下) に提示される場合を一致 (A), 上 (下) 向きの矢印が下 (上) に提示される場合を不一致 (B) とする.

## 2-E. 前額部深部温の測定

本章では、中枢性疲労との関係や運動中の継続的な摂取による影響を調査するため、脳温の間接的な指標として熱流補償法を用いた深部温度計 (Coretemp CM-210, Termo) による前額部深部温の測定を行うこととした。体表面の温度は外気温の影響を受けて深部の温度より低くなるのが普通であるが、体表面を断熱材で覆って外気温の影響を防ぐと、体表面は深部と等しい温度になることが知られている。深部温度計はプローブ部分にヒーターが組み込まれており、このヒーターを電子回路で制御することによってプローブ自体を皮膚表面温と等しくなるように保ち、皮膚から外気中に放散する熱を遮断する。これにより理想的な断熱材で体表面を覆ったと同じ効果が得られ、深部温の測定が可能となる (根本ら, 1987; 吉田および松澤, 1997)。この深部温度計を用いて測定した前額部深部温が心肺バイパス中の血液温度によく追従すること (Yamakage et al., 2002)、肺動脈血の温度とよく一致すること (Harioka et al., 2000)、頸静脈血の温度とほとんど同じ値を示すこと (Yamakage & Namiki, 2003) が報告されており、脳温を反映すると考えられている。

## 2-F. 測定項目

生理的指標として直腸温、前額部皮膚温、平均皮膚温、前額部深部温、心拍数、酸素摂取量、終末期二酸化炭素分圧、尿比重、全裸体重を測定した。直腸温はサーミスタープローブ用ゴムカバー (11Y24, Nikkiso-Therm Co.Ltd.) を装着したサーミスタープローブ (LT-ST08-21, Nikkiso-Therm Co.Ltd.) の先に直腸温測定用潤滑剤ヌルゼリー (Nichi-iko) を塗り、直腸内に 10~12 cm 挿入して測定した。皮膚温は胸部、上腕部、大腿部、前額部にそれぞれサーミスタープローブをテープで貼りつけて測定した。直腸温および身体各部位の皮膚温はデータ収集型温度計 (LT-8A, Gram Corporation) を用いて 5 分毎に計測した。また、直腸温については変化量、上昇率を以下の式を用いて算出した：変化量 (°C) = (-15 分の直腸温) - (-50 分の直腸温)；全体の上昇率 (°C/5 分) = 運動中の上昇度 (°C) / (運動継続時間 (分) ÷ 5)；運動前半の上昇率 (°C/5 分) = 運動開始から 15 分までの上昇度 (°C) /

3 ; 運動後半の上昇率 (°C/5 分) = 運動終了前 15 分の上昇度 (°C) / 3 ; 運動前後半の上昇率の差 (°C) = 運動前半の上昇率 (°C/5 分) - 運動後半の上昇率 (°C/5 分). 平均皮膚温は Roberts (1977) の 3 点法を用いて算出した. 前額部深部温は前額部中心部に深部体温測定用プローブ (PD1, Termo) を貼り付けて実験中 5 分毎に測定した. また, 前額部皮膚温および深部温については, -20 分の値から -50 分の値を引いて変化量を算出した. 心拍数はハートレートモニター (RS800CX, PolarElectro) を用いて実験中 5 分毎に測定した. 酸素摂取量および終末期二酸化炭素分圧は, 10 分間の安静終了の 1 分 30 秒前から環境移行期間まで 10 分ごと, また運動中における飲料摂取開始の 1 分 30 秒前から以降 10 分ごと, そして回復期間終了の 1 分 30 秒前のポイントでガス分析器 (AERO MONITOR AE 300S, MINATO) を用いて 1 分間測定し, 分析には最後 30 秒間の値を使用した. 体重は, 50g 単位の体重計 (UC-300, A&D) を用いて裸体で, また尿比重は尿比重計 (UG-D, Atago) を用いて実験前後に測定した. 発汗率は以下の式を用いて算出した: 発汗率 = (実験前体重 - 実験後体重) + 飲料の摂取量 / 実験前体重. 一定負荷運動時間が被験者間で異なるため, 各生理的指標は運動中の時間軸を運動の完遂率で表し, ベースラインの値に差が見られた場合にはベースラインの値を 0 とした相対値を算出した.

主観的指標として, 温熱感覚 (thermal sensation: TS) および熱快適性 (thermal comfort: TC) は, それぞれ Gagge (1963) の 9 ポイントスケール (Table 1.) および Bedford の 7 ポイントスケールの修正版 (Table 2.) を用いて全身と頭部に分けて実験中 5 分毎に測定し, 主観的運動強度 (RPE) は Borg (1973) の 15 ポイントスケール (Table 3.) を用いて全身と脚部に分けて運動中 5 分毎に測定した. また, 実験終了時にその日の運動全体の RPE を session RPE として測定した. 各条件の終了後には課題の取り組み方について (達成度, 眠気, 集中, やる気) 10 cm の Visual Analog Scale (VAS) を用いた質問紙による調査を行い, すべての実験終了時には実験中の飲料摂取に関する質問紙調査を行った. 認知課題前の感情的な反応 (感情価, 覚醒, 動機付け) の評価には Self-Assessment Manikin (SAM ; Morris, 1995) を使用して, 環境移行期間中の 1 回目を除く各認知課題前および回復後に測定した.

Table 1. 温熱感觉

8	very hot
7	hot
6	warm
5	slightly warm
4	neutral
3	slightly cool
2	cool
1	cold
0	very cold

Gagge (1963)

Table 2. 熱快適性

7	非常に快適な
6	快適な
5	やや快適な
4	どちらでもない
3	やや不快な
2	不快な
1	非常に不快な

Bedford (1936) 改変

**Table 3. 主觀的運動強度**

20	
19	very very hard
18	
17	very hard
16	
15	hard
14	
13	somewhat hard
12	
11	fairy light
10	
9	very light
8	
7	very very light
6	

Borg (1973)

認知課題は 10 分間の安静時に 1 回および環境移行期間に 2 回行い、運動前のベースラインとした。運動中は開始 10 分後から運動終了まで飲料の摂取後に毎回実施し、運動終了直後にも実施した。評価には不一致条件における平均の反応時間および正答率、それぞれの目標達成率、エラー後の反応時間および干渉（反応時間における不一致条件と一致条件の差）、連続エラー率（連続エラー数／合計エラー数×100）を用いた。また、安静時の値は 3 回の平均値とし、被験者間で運動継続時間が異なるため運動中の経時的変化は運動終了 30 分前からの値を用いた。エラー後の反応時間および干渉、連続エラー率は安静時および運動時に分けて平均化した後、安静時からの変化量を算出した。

## 2-G. 統計処理

実験結果はすべて平均値±標準偏差で示した。直腸温、運動前後半の直腸温上昇率、皮膚温、前額部深部温、心拍数、酸素摂取量、終末期二酸化炭素分圧、主観的指標、SAM、尿比重、全裸体重、認知機能は、2 要因（条件×時間）の繰り返しのある分散分析を用いて、直腸温変化量、運動全体の直腸温上昇率、運動前後半の直腸温上昇率の差、前額部皮膚温変化量、前額部深部温変化量、発汗率、VAS、session RPE、エラー後の反応時間および干渉、連続エラー率の変化量は 1 要因（条件）の繰り返しのある分散分析を用いて SPSS (Ver. 24.0) より分析した。自由度は Greenhouse-Geisser の  $\epsilon$  による補正を行った。有意な主効果または交互作用が認められた場合には、ボンフェローニ補正を用いてその後の検定を行った。実験終了後に実施した質問紙調査における飲料の快適性のみ t 検定により条件間の差を検定した。また、運動継続時間は被験者数が少なく分布にばらつきがみられたため、ノンパラメトリック検定の Friedman 検定を適用し、その後の検定には符号検定を用いた。また、以下の式により効果量を算出した； $r = \sqrt{t^2/t^2 + df}$ （t は t 値、df は自由度）。効果量の判定は水本および竹内（2008）の基準を参考にした： $r = 0.1-0.3$ ：小さい， $r = 0.3-0.5$ ：中程度， $r > 0.5$ ：大きい。すべての検定において、有意水準は 5%未満とした。生理的指標および SAM を除く主観的指標については 10 分の安静後（-50 分）の値をベースラインとし、認知課題および

SAM については 10 分間の安静時の値をベースラインとした。

### 3. 結果

#### 3-A. 運動継続時間

運動継続時間を Fig. 4 に示した。Friedman 検定により有意差が観察され ( $p=0.04$ )，その後の検定により CON 条件と比較して PRE および ALL 条件で延長する傾向 ( $p=0.07$ ) が観察された。また，それぞれの条件間において大きい効果量が観察された (CON<PRE :  $r=0.86$ , CON<ALL :  $r=0.84$ , PRE<ALL :  $r=0.60$ )。

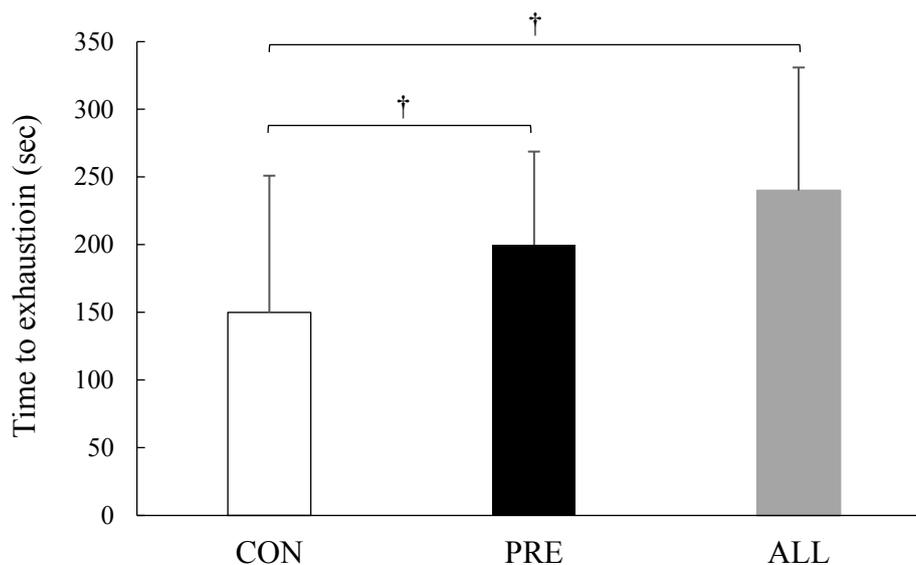


Fig. 4 運動継続時間

† は統計的傾向を示す ( $p=0.07$ )。

### 3-B. 生理的指標

直腸温の経時的変化について絶対値を Fig. 5-A, 相対値を Fig. 5-B, またベースラインから-15分までの変化量を Fig. 5-C に示した. 絶対値では PRE 条件において-35分から運動20%まで, ALL 条件において-30分から0分まで, および運動90%から回復10分まで CON 条件よりも有意に低値を示した ( $p < 0.05$ ). 相対値では PRE 条件において-35分から運動20%まで, ALL 条件において-30分から運動10%まで, および運動70%から回復10分まで CON 条件よりも有意に低値を示した ( $p < 0.05$ ). また, ベースラインと比較して, 絶対値では PRE および ALL 条件において-30分から運動10%まで有意に低値を示し ( $p < 0.01$ ), 相対値では PRE および ALL 条件において-35分から運動10%まで ( $p < 0.01$ ), CON 条件において-5分から0分まで ( $p < 0.05$ ) 有意に低値を示した. 運動中は絶対値および相対値の両方で CON 条件において運動40%から, PRE および ALL 条件において運動50%から回復10分までベースラインよりも有意に高値を示した ( $p < 0.05$ ). 変化量は CON 条件と比較して PRE および ALL 条件で有意に増大した ( $p < 0.001$ ).

直腸温上昇率について, 運動全体の上昇率を Fig. 6-A, 運動前半および後半の上昇率を Fig. 6-B, 運動前半および後半の上昇率の差を Fig. 6-C に示した. 全体の上昇率に条件間で有意な差は観察されなかったが, ALL 条件において運動後半に上昇率が低下する傾向 ( $p = 0.088$ ) が観察され, 前半と後半の差は ALL 条件で有意に高値を示した ( $p < 0.05$ ).

前額部皮膚温の経時的変化について絶対値を Fig. 7-A, 相対値を Fig. 7-B, またベースラインから-20分までの変化量を Fig. 7-C に示した. 絶対値および相対値の両方とも, ベースラインと比較して PRE および ALL 条件において-5分から回復10分まで ( $p < 0.01$ ), CON 条件において-10分から0分まで ( $p < 0.001$ ) 有意に高値を示した. 変化量は CON 条件と比較して PRE および ALL 条件で有意に増大した ( $p < 0.01$ ).

前額部深部温の経時的変化について絶対値を Fig. 8-A, 相対値を Fig. 8-B, またベースラインから-20分までの変化量を Fig. 8-C に示した. 絶対値では PRE 条件において-30分から0分まで, ALL 条件において-35分から0分まで, および運動70%から回復10分まで

CON 条件よりも有意に低値を示した ( $p < 0.05$ ). 相対値では PRE 条件において -30 分から 0 分まで, ALL 条件において -30 分から -5 分まで, および運動 80% で CON 条件よりも有意に低値を示した ( $p < 0.05$ ). また, ベースラインと比較して, CON 条件は絶対値および相対値の両方で -10 分から, PRE 条件は絶対値および相対値の両方で運動 20% から, ALL 条件は絶対値で 0 分から, 相対値で運動 10% から回復 10 分まで有意に高値を示した ( $p < 0.01$ ). 変化量は CON 条件と比較して PRE および ALL 条件で有意に増大した ( $p < 0.001$ ).

胸部温の経時的変化を Fig. 9-A, 上腕部温の経時的変化を Fig. 9-B, 大腿部温の経時的変化を Fig. 9-C, 平均皮膚温の経時的変化を Fig. 9-D に示した. 胸部温は条件 (CON > ALL ;  $p = 0.03$ ) および時間 (-50 分 < -5 分 ~ 回復 10 分 ;  $p < 0.001$ ) の有意な主効果が観察されたが, 交互作用は認められなかった. 上腕部温 (-50 分 < 0 分 ~ 回復 10 分 ;  $p < 0.01$ ) および大腿部温 (-50 分 < -10 分 ~ 回復 10 分 ;  $p < 0.001$ ) は時間の主効果のみ観察された. 平均皮膚温は条件 (CON > ALL ;  $p = 0.02$ ) および時間 (-50 分 < -10 分 ~ 回復 10 分 ;  $p < 0.001$ ) の主効果が観察されたが, 交互作用は認められなかった.

心拍数の経時的変化を Fig. 10-A, 酸素摂取量の経時的変化を Fig. 10-B, 終末期二酸化炭素分圧の経時的変化を Fig. 10-C に示した. 心拍数は条件 (CON > PRE ;  $p = 0.02$ , CON > ALL ;  $p = 0.000$ ) および時間 (-50 分 > -25, -20, -10 分 ;  $p < 0.05$ , -50 分 < 運動 10% ~ 回復 10 分 ;  $p < 0.001$ ) の有意な主効果が観察されたが, 交互作用は認められなかった. 酸素摂取量 (-55 分 < -35 分, 10 分 ~ 回復 ;  $p < 0.05$ ) および終末期二酸化炭素分圧 (-55 分 < -45 分 ~ 運動 50 分 ;  $p < 0.01$ ) は時間の主効果のみ観察された.

実験前後における体重および尿比重の変化, および発汗率を Table 4. に示した. 全裸体重 (実験前 > 実験後 ;  $p = 0.000$ ) および尿比重 (実験前 > 実験後 ;  $p = 0.001$ ) はどちらも時間の主効果のみ観察された. 発汗率はすべてにおいて有意差は観察されなかった.

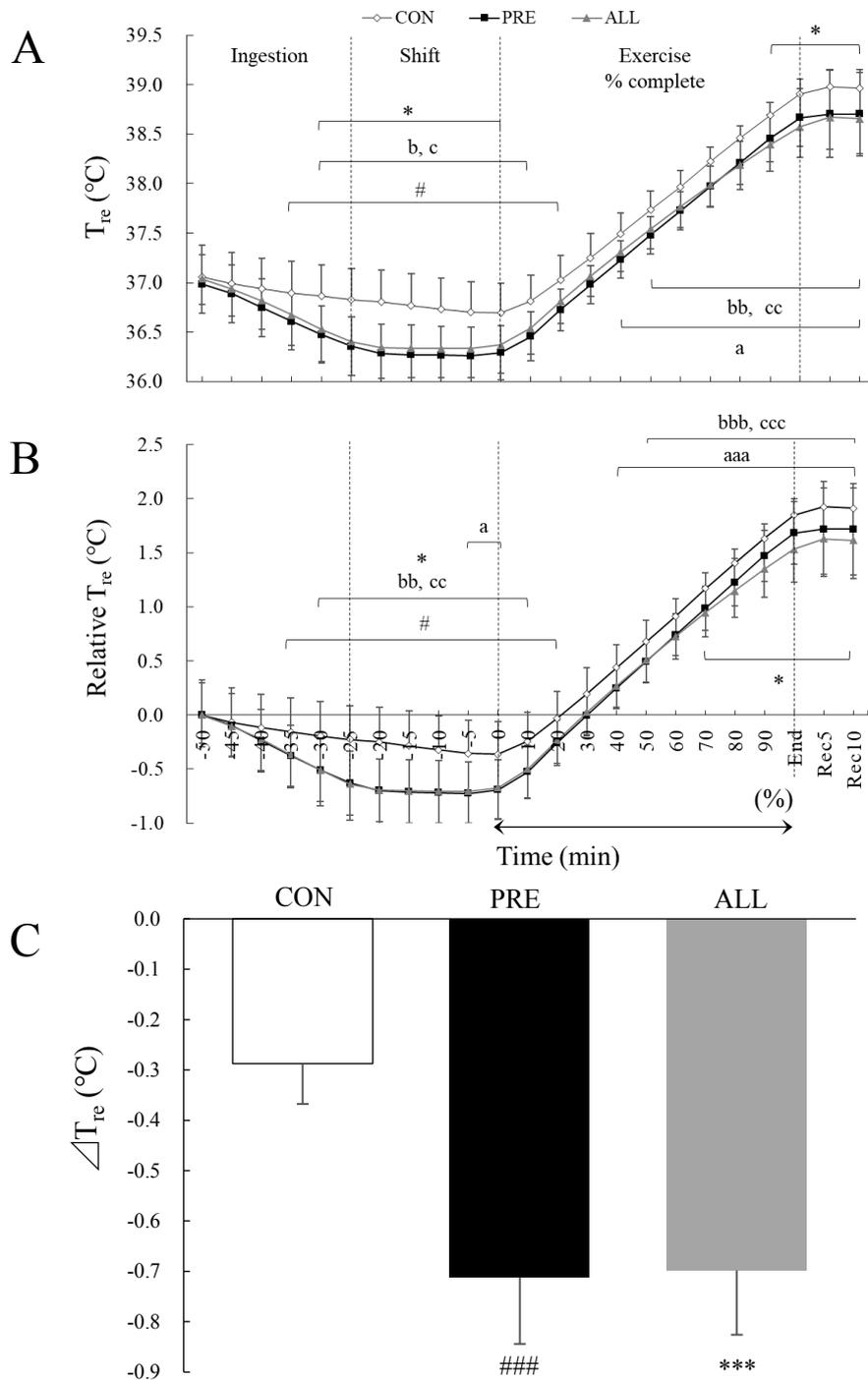


Fig. 5 直腸温の絶対値 (A) および相対値 (B) の経時的変化, 変化量 (C)  
 #, ###は PRE 条件, \*, \*\*\*は ALL 条件における CON 条件との有意差を示す (それぞれ  $p < 0.05$ ,  $p < 0.001$ ). また a, aaa は CON 条件, b, bbb, bbb は PRE 条件, c, cc, ccc は ALL 条件におけるベースラインとの有意差を示す (それぞれ  $p < 0.05$ ,  $p < 0.01$ ,  $p < 0.001$ ).

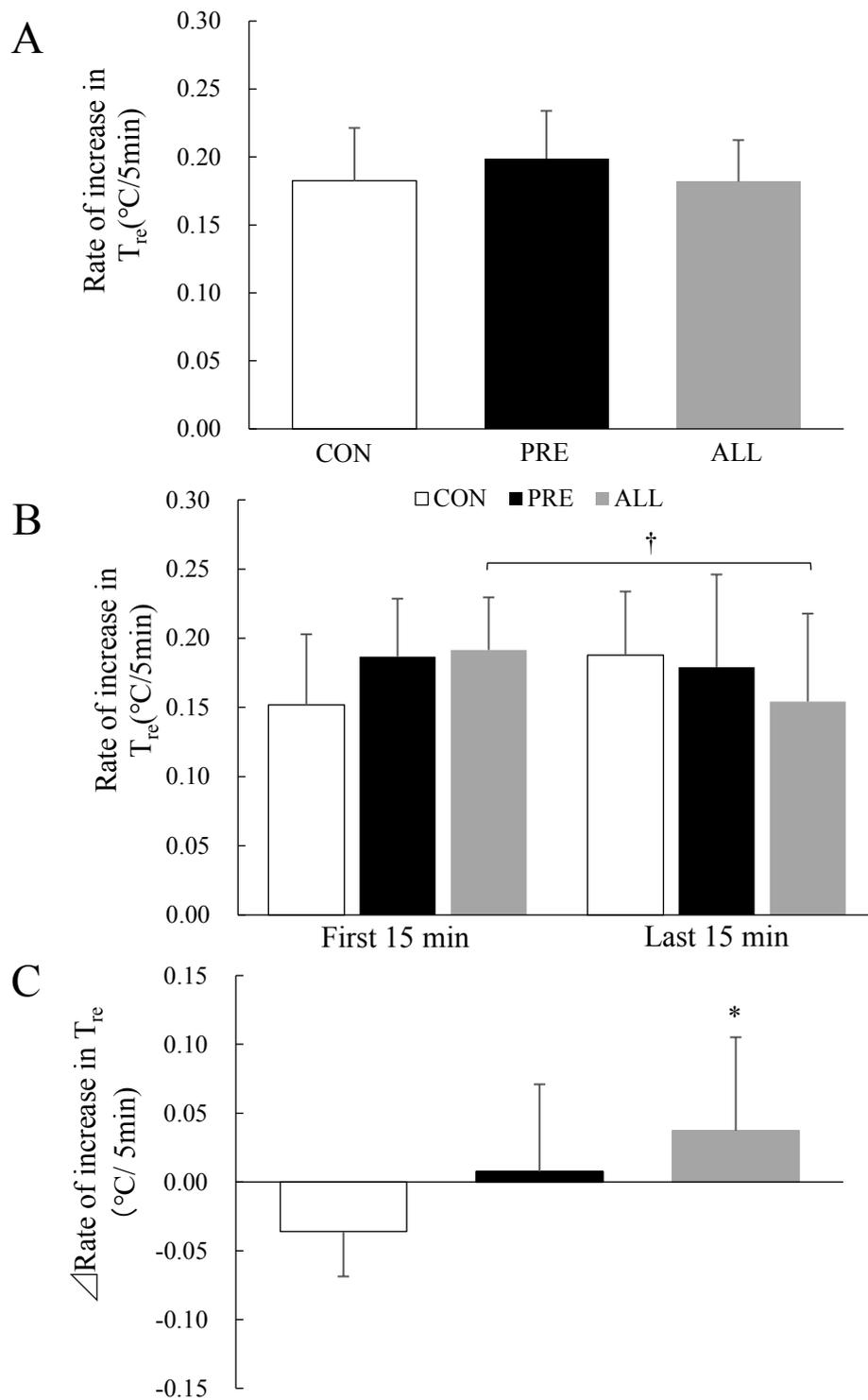


Fig. 6 運動全体 (A) および運動前後半 (B) における直腸温上昇率, 前後半の差 (C)

†は統計的有意傾向 (p=0.088), \* は CON 条件との有意差 (p<0.05) を示す.

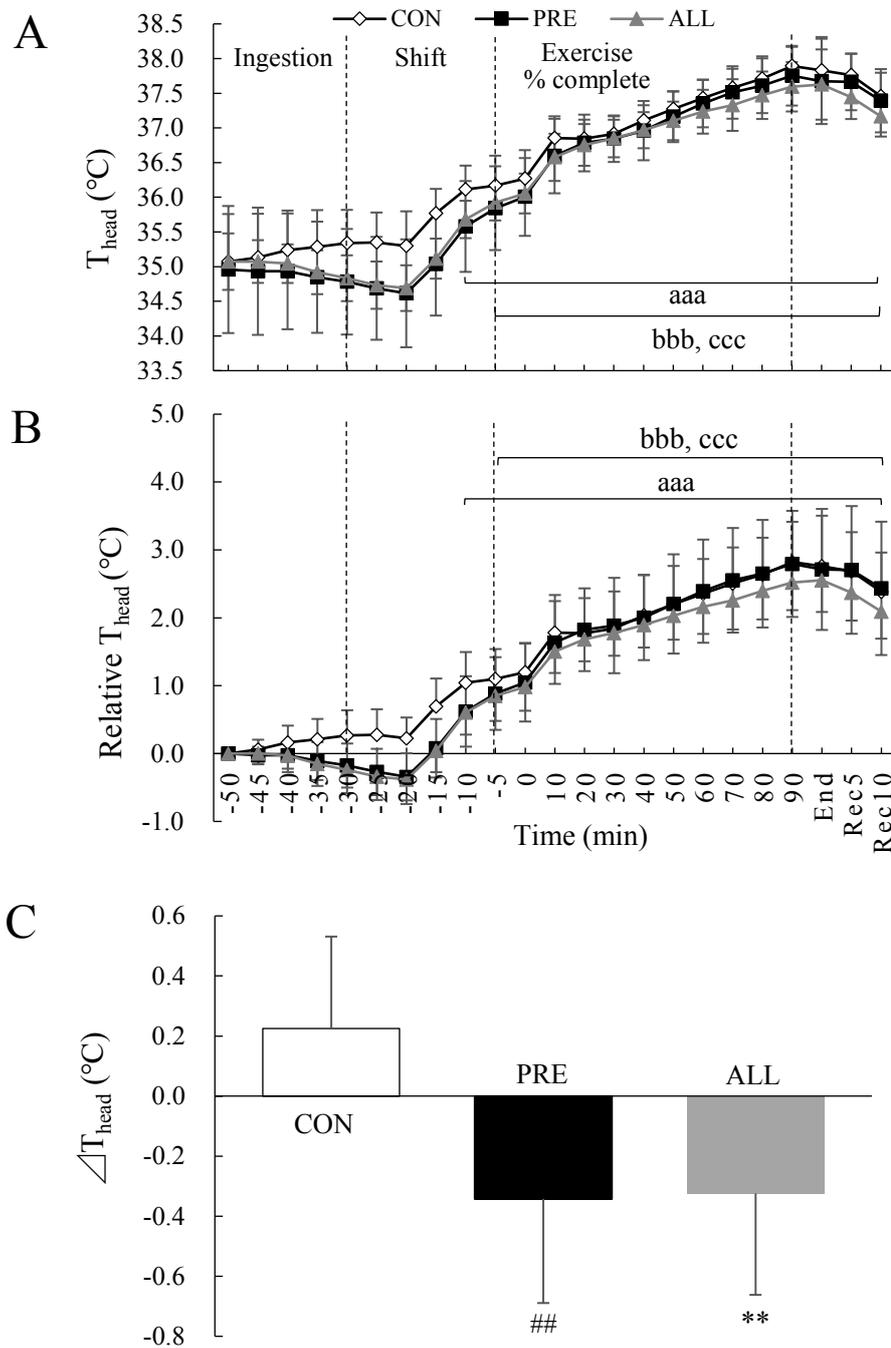


Fig. 7 前額部皮膚温の絶対値 (A) および相対値 (B) の経時的変化, 変化量 (C)  
 #は PRE 条件, \*\*は ALL 条件における CON 条件との有意差を示す ( $p < 0.01$ ). また, aaa は  
 CON 条件, bbb は PRE 条件, ccc は ALL 条件におけるベースラインとの有意差を示す ( $p <$   
 $0.001$ ).

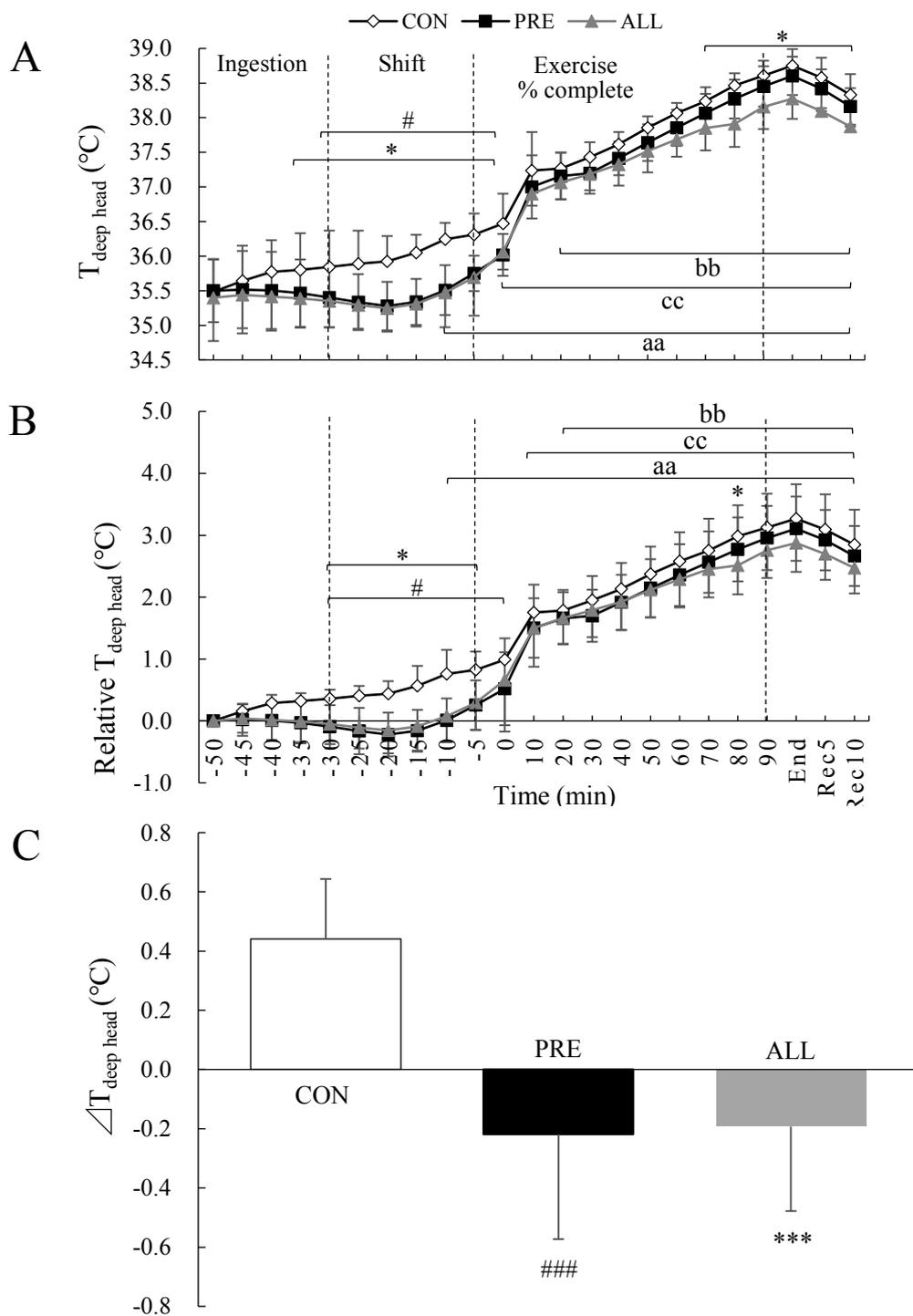


Fig. 8 前額部深部温の絶対値 (A) および相対値 (B) の経時的変化, 変化量 (C) #, ###はPRE条件, \*, \*\*\*はALL条件におけるCON条件との有意差を示す (それぞれ  $p < 0.05$ ,  $p < 0.001$ ). またaaはCON条件, bbはPRE条件, ccはALL条件におけるベースラインとの有意差を示す ( $p < 0.01$ ).

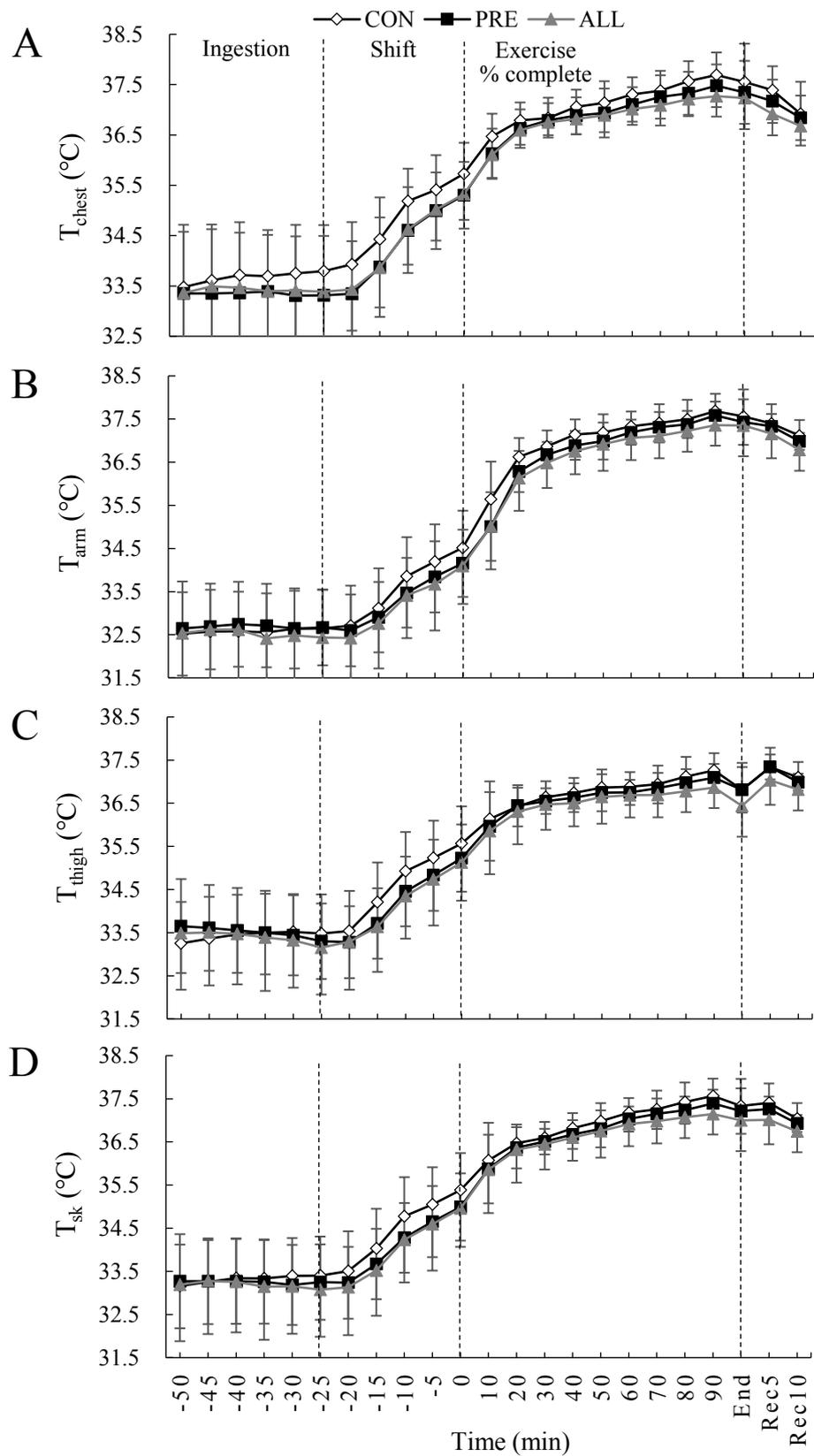


Fig. 9 胸部温 (A), 上腕部温 (B), 大腿部温 (C), 平均皮膚温 (D) の経時的変化

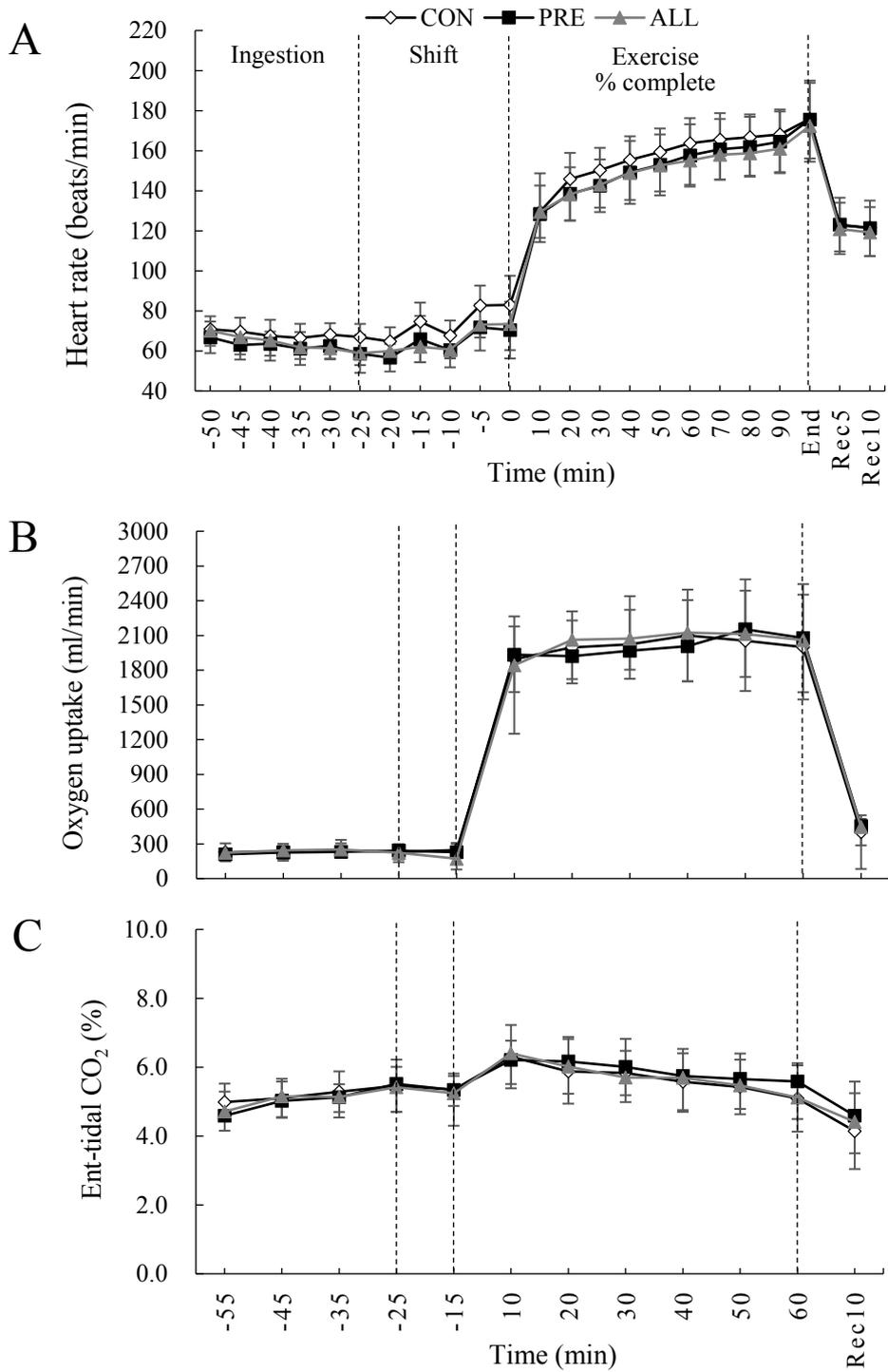


Fig. 10 心拍数 (A), 酸素摂取量 (B) および終末期二酸化炭素分圧 (C) の経時的変化

Table 4. 水和状態の変化

		CON	PRE	ALL
Body mass (kg)	Before	66.01 ± 9.08	65.53 ± 8.83	65.67 ± 9.11
	After	65.27 ± 9.26	64.85 ± 8.84	64.99 ± 9.30
Urine gravity (g/ml)	Before	1.015 ± 0.008	1.016 ± 0.008	1.016 ± 0.011
	After	1.008 ± 0.004	1.008 ± 0.004	1.010 ± 0.007
Sweat rate (%)		0.8 ± 0.4	0.7 ± 0.3	0.7 ± 0.4

### 3-C. 主観的指標

主観的運動強度 (RPE) の経時的変化について全身を Fig. 11-A, 脚部を Fig. 11-B, session RPE を Fig. 11-C に示した. 全身 (5 分<10 分, 30 分~終了時 ;  $p<0.05$ ) および脚部 (5 分<10 分~終了時 ;  $p<0.05$ ) どちらも時間の主効果のみ観察された. session RPE に条件間で有意な差は観察されなかった.

温熱感覚 (TS) の経時的変化について全身を Fig. 12-A, 頭部を Fig. 12-B, 熱快適性 (TC) の経時的変化について全身を Fig. 13-A, 頭部を Fig. 13-B に示した. TS は PRE および ALL 条件において-35 分から-15 分まで CON 条件と比較して有意な低値が観察された ( $p<0.05$ ). また, PRE 条件のみ 5 分においても CON 条件と比較して有意に低値を示した ( $p<0.05$ ). ベースラインと比較すると, PRE および ALL 条件では-30 分と-25 分で有意に低値を示したが, 運動開始に伴い 5 分から回復 10 分まで有意な上昇が観察された ( $p<0.05$ ). CON 条件では-5 分から有意な上昇が観察された ( $p<0.05$ ). 頭部の TS は条件 (CON>PRE ;  $p=0.01$ , CON>ALL ;  $p=0.05$ ) および時間 (-50 分<5 分~回復 10 分 ;  $p<0.01$ ) の主効果が観察されたが, 交互作用は認められなかった. 全身の TC は PRE 条件で-35 分から-25 分まで ( $p<0.01$ ), ALL 条件で-35 分から-15 分まで ( $p<0.05$ ) CON 条件と比較して有意な低値が観察された. ベースラインと比較すると, PRE 条件では-25 分, ALL 条件では-30 分と-25 分で有意に低値を示したが, 運動開始に伴い 5 分から回復 10 分まで有意な上昇が観察された ( $p<0.01$ ). CON 条件では 0 分から有意な上昇が観察された ( $p<0.01$ ). 頭部の TC は PRE 条件で-30 分から-25 分まで, ALL 条件で-35 分から-25 分まで CON 条件と比較して有意な低値が観察された ( $p<0.05$ ). また, PRE 条件のみ 0 分においても CON 条件と比較して有意に低値を示した ( $p<0.05$ ). ベースラインと比較すると, PRE および ALL 条件において運動開始に伴い 5 分から回復 10 分まで有意な上昇が観察された ( $p<0.01$ ). CON 条件では 0 分から有意な上昇が観察された ( $p<0.01$ ).

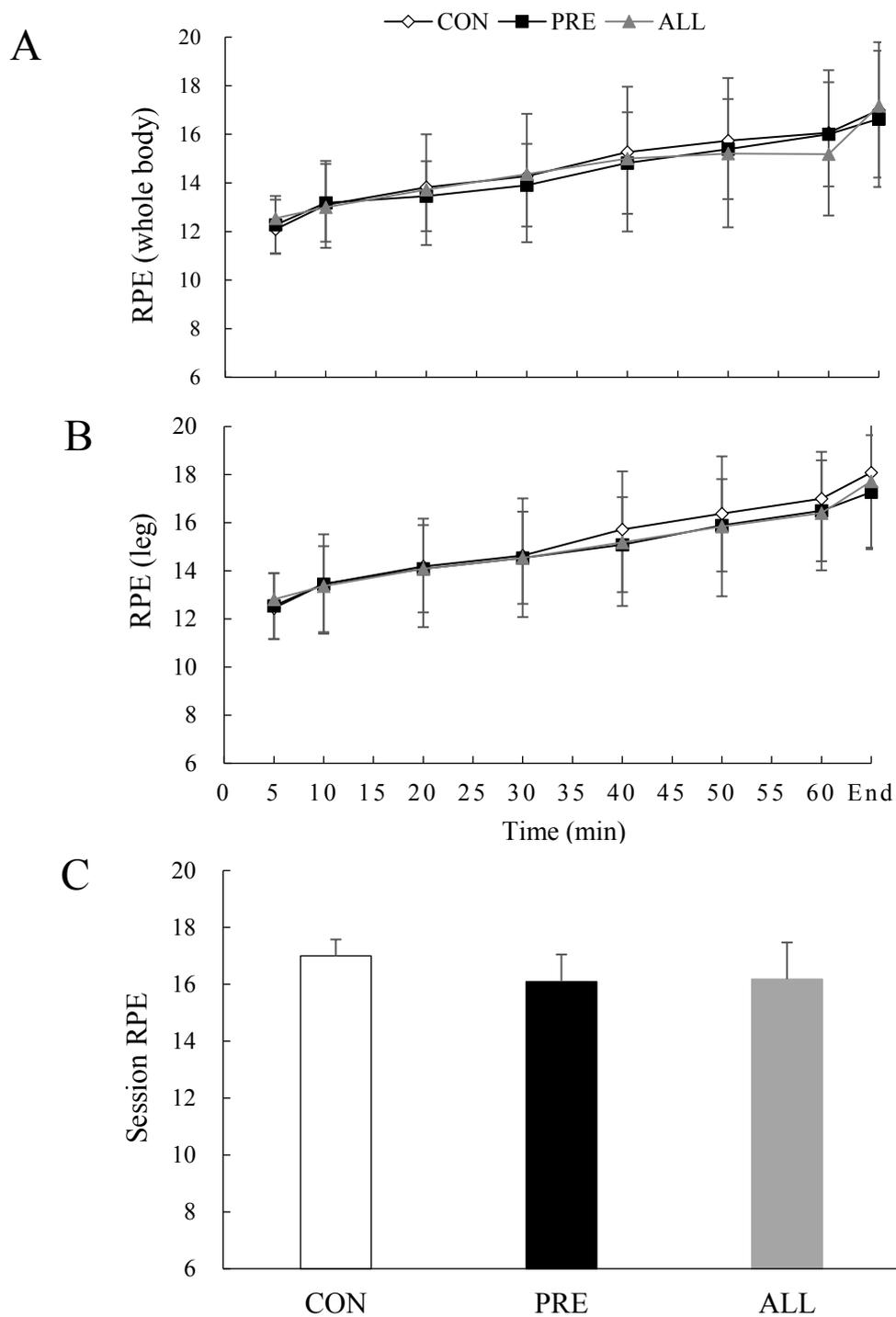


Fig. 11 全身 (A), 脚部 (B) における主観的運動強度の経時的変化および運動全体に対する主観的運動強度 (C)

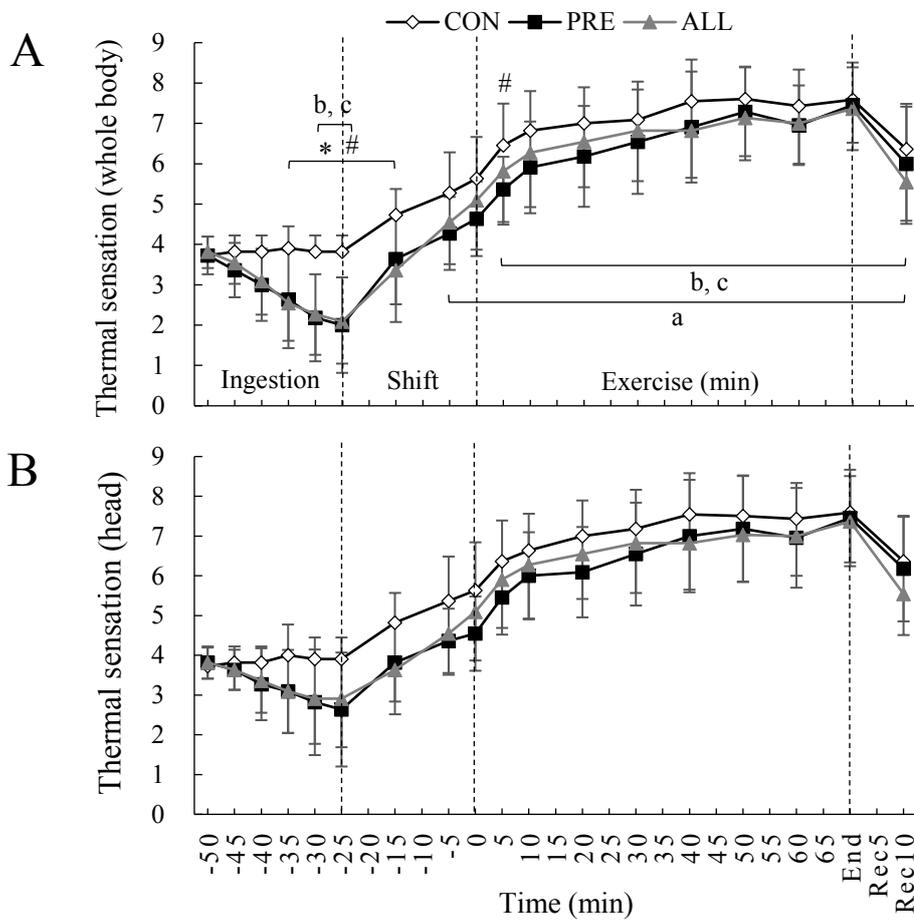


Fig. 12 全身 (A) および頭部 (B) における温熱感覚の経時的変化  
 # は PRE 条件, \* は ALL 条件における CON 条件との有意差 ( $p < 0.05$ ) を示す.  
 また, a は CON 条件, b は PRE 条件, c は ALL 条件におけるベースラインとの有意差を  
 示す ( $p < 0.05$ ).

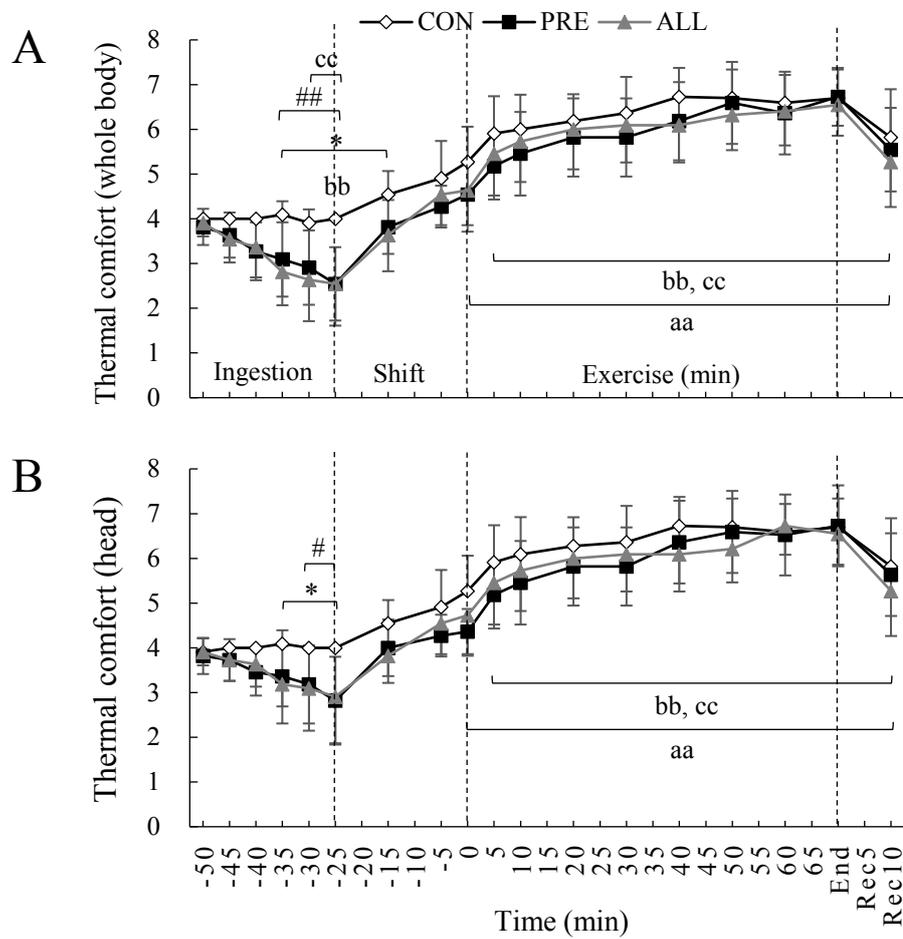


Fig. 13 全身 (A) および頭部 (B) における熱快適性の経時的変化  
 #, ## は PRE 条件, \* は ALL 条件における CON 条件との有意差 (それぞれ  $p < 0.05$ ,  $p < 0.01$ ) を示す. また, aa は CON 条件, bb は PRE 条件, cc は ALL 条件におけるベースラインとの有意差を示す ( $p < 0.01$ ).

各実験終了時に実施した VAS の結果を Fig. 14 に示した。すべての項目において有意差は観察されなかった。

SAM の経時的変化について、感情価を Fig. 15-A、覚醒を Fig. 15-B、動機付けを Fig. 15-C に示した。感情価は時間の主効果が観察され、運動 30 分以降に安静 1 回目よりも不快に感じていることが示された ( $p < 0.05$ )。また、覚醒レベルにおいても時間の主効果が観察され、安静 1 回目と比べて運動の 10 分および 20 分に覚醒レベルが高くなることが示された ( $p < 0.05$ )。しかしながら、条件間に差は観察されなかった。動機付けはすべてにおいて有意差は観察されなかった。

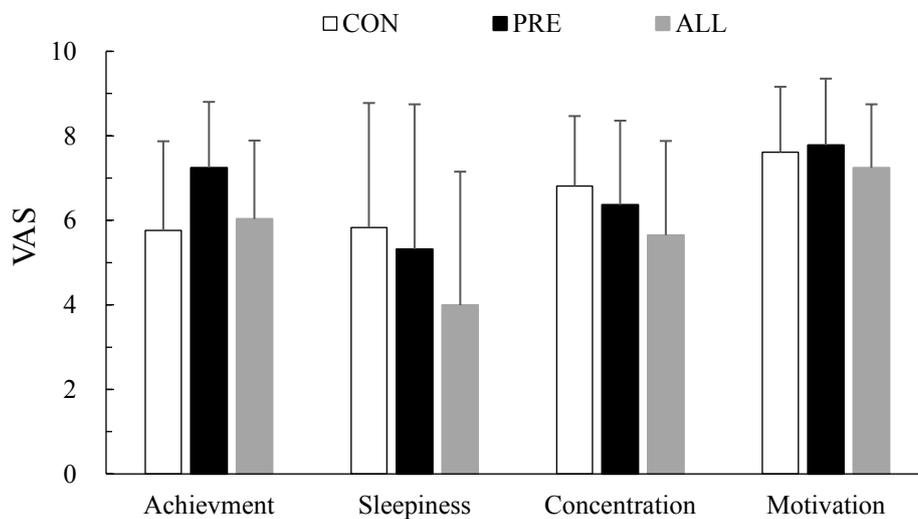


Fig. 14 各条件終了時における VAS

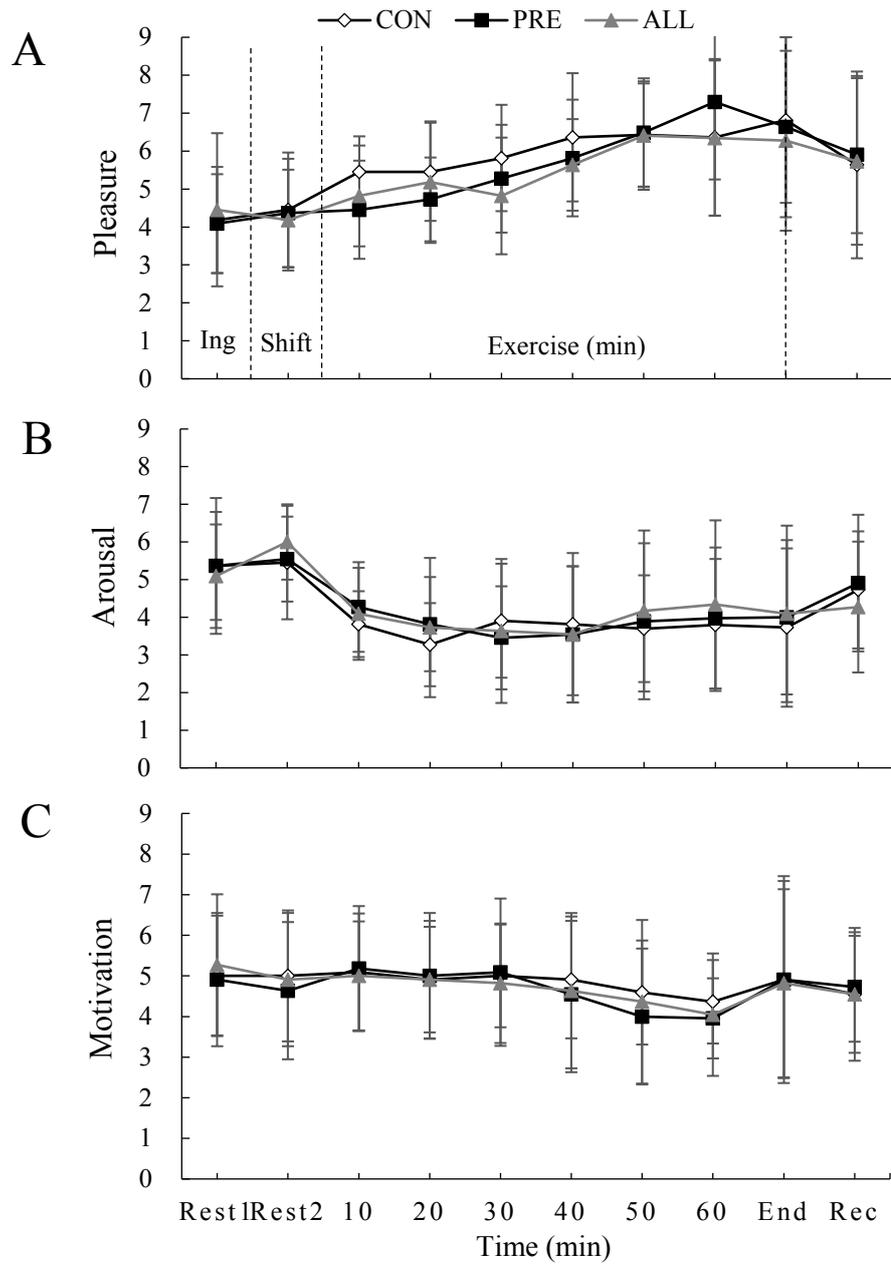


Fig. 15 感情価 (A), 覚醒 (B) および動機付け (C) の経時的変化

Ing は Ingestion (飲料摂取期間) を表す.

### 3-D. 認知機能

反応時間および正答率の運動終了 30 分前からの変化をそれぞれ Fig. 16-A および Fig. 16-B に示した。反応時間は条件 (PRE < ALL ;  $p=0.03$ ) および時間 (Rest > -30 分から End まで ;  $p=0.000$ ) の主効果が観察されたが、交互作用は認められなかった。正答率はすべてにおいて有意差は観察されなかった。

反応時間および正答率における目標達成率の運動終了 30 分前からの変化をそれぞれ Fig. 17-A および Fig. 17-B に示した。反応時間は条件 (PRE > ALL ;  $p=0.01$ ) および時間 (Rest < -30 分から End まで ;  $p<0.01$ ) の主効果が観察され、交互作用も認められた ( $p<0.05$ )。単純主効果の検定により、PRE 条件において -30 分から終了時までの目標達成率が Rest よりも有意に高値を示した ( $p<0.05$ )。一方、正答率に関してはすべてにおいて有意差は観察されなかった。

エラー後の反応時間の安静時および運動時における平均値と安静時に対する変化量をそれぞれ Fig. 18-A, Fig. 18-B に、干渉の安静時および運動時における平均値と安静時に対する変化量をそれぞれ Fig. 19-A, Fig. 19-B, 連続エラー率の安静時および運動時における平均値と安静時に対する変化量をそれぞれ Fig. 20-A, Fig. 20-B に示した。エラー後の反応時間はすべての条件で安静時よりも運動時に短縮し ( $p<0.001$ )、その安静時からの変化量は PRE 条件で最も大きい値を示した (vs ALL 条件:  $p=0.088$ )。すなわち、PRE 条件でエラー後の反応時間が大きく短縮する傾向が観察された。干渉もすべての条件で安静時よりも運動時に短縮したが ( $p<0.01$ )、その変化量は個人差が大きく有意差は観察されなかった。連続エラー率はすべてにおいて有意差は観察されなかった。

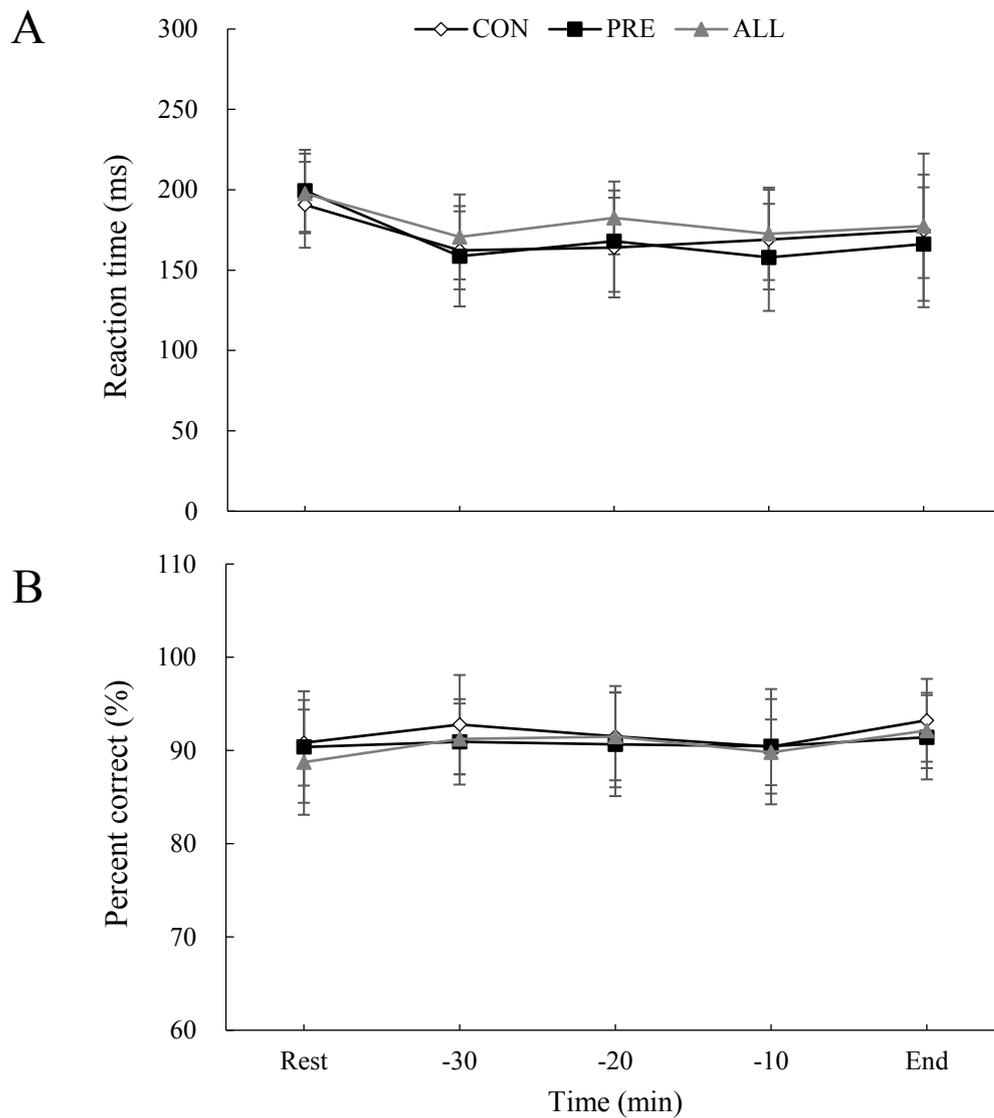


Fig. 16 反応時間 (A) および正答率 (B) における運動終了 30 分前からの経時的変化

Rest は安静時 3 回の平均値, End は運動終了直後を示す.

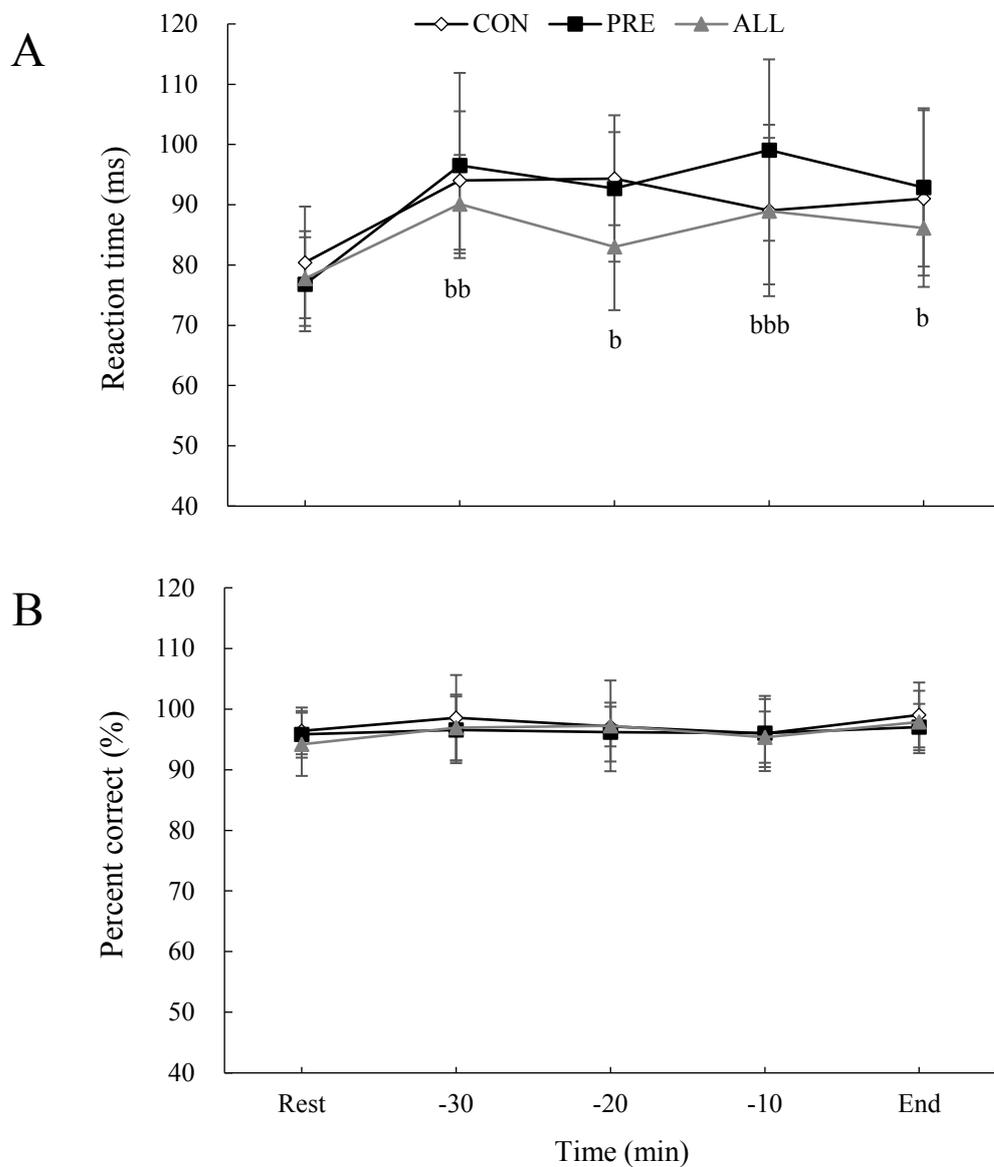


Fig. 17 目標達成率の反応時間 (A) および正答率 (B) における運動終了 30 分  
前からの経時的変化

Rest は安静時 3 回の平均値, End は運動終了直後を示す.

また, b, bb, bbb は PRE 条件における Rest との有意差を示す (それぞれ  $p < 0.05$ ,  $p < 0.01$ ,  $p < 0.001$ ).

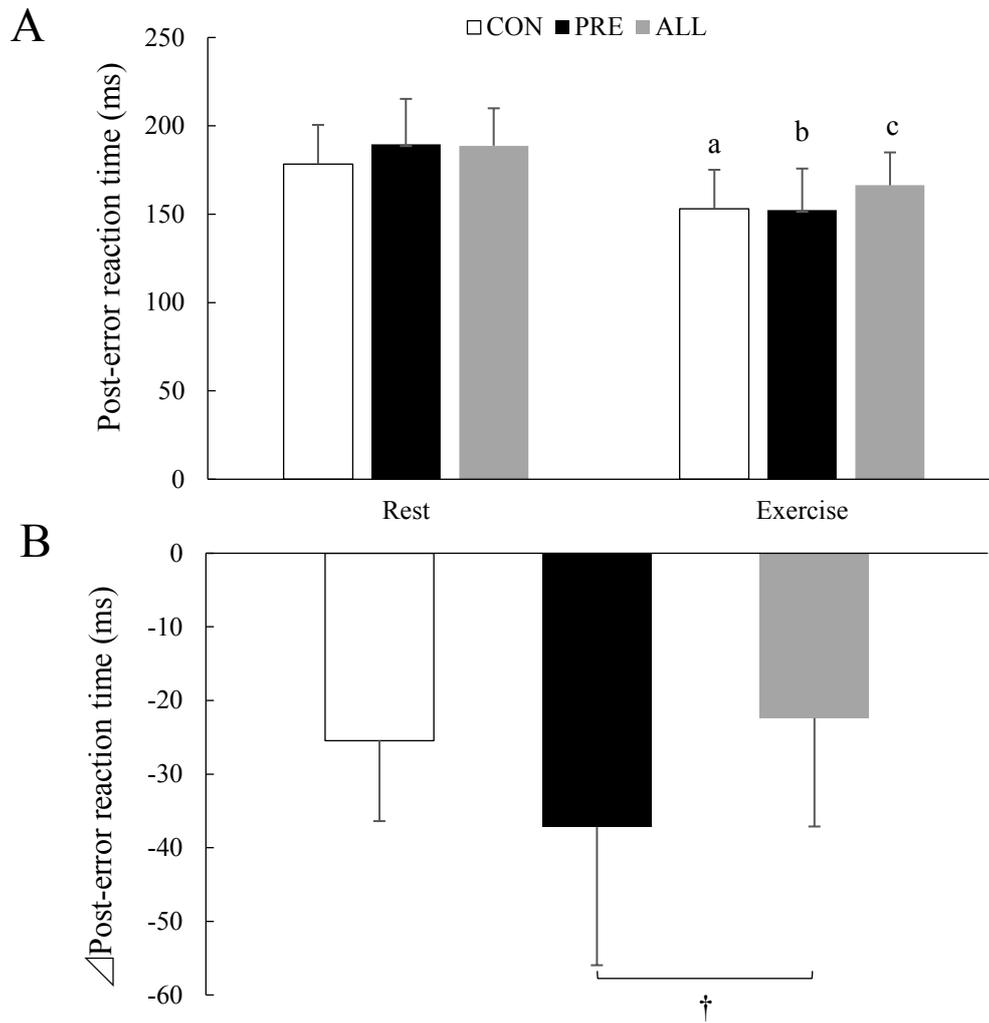


Fig. 18 エラー後の反応時間の安静時および運動時における平均値 (A), 安静時に対する変化量 (B)

a, b, c は Rest との有意差を示す ( $p < 0.001$ ).

また, † は有意傾向 ( $p = 0.088$ ) を示す.

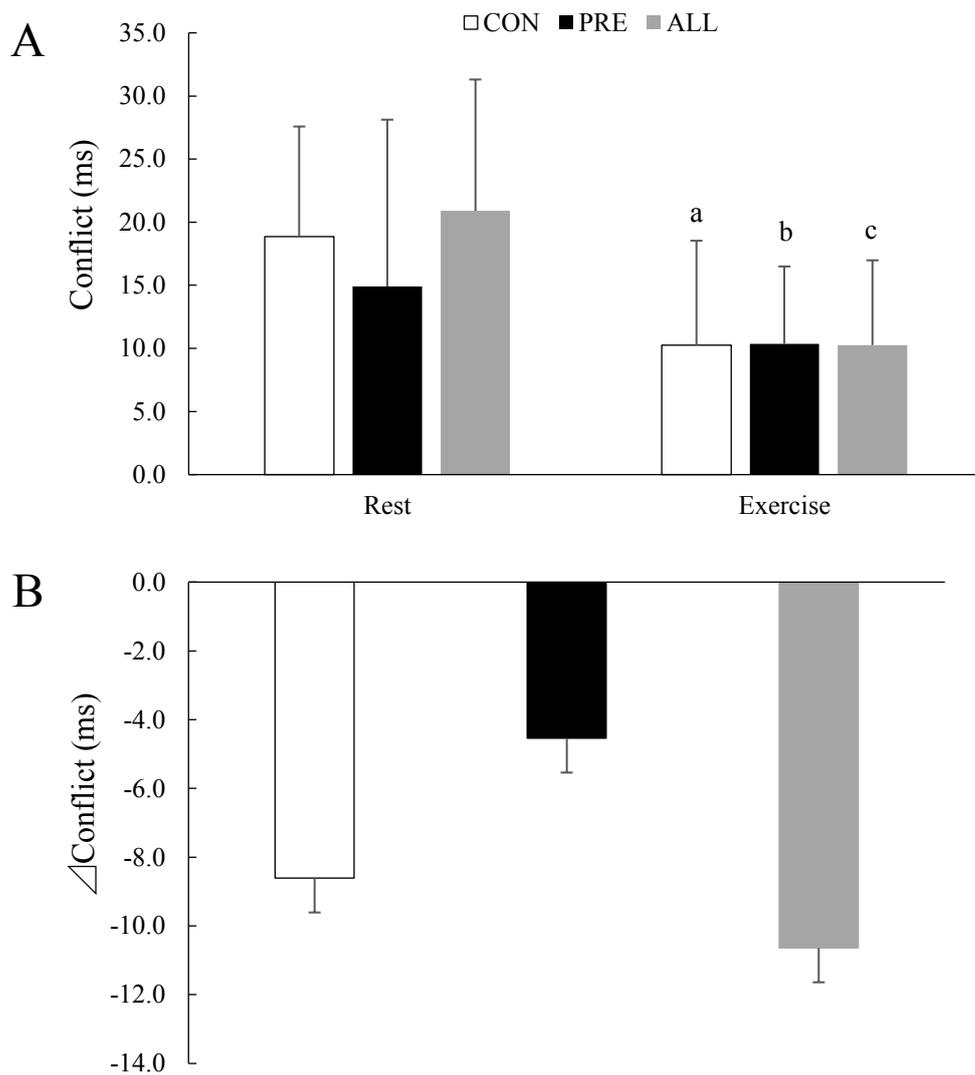


Fig. 19 干渉の安静時および運動時における平均値 (A), 安静時に対する変化量 (B)

a, b, c は Rest との有意差を示す ( $p < 0.01$ ).

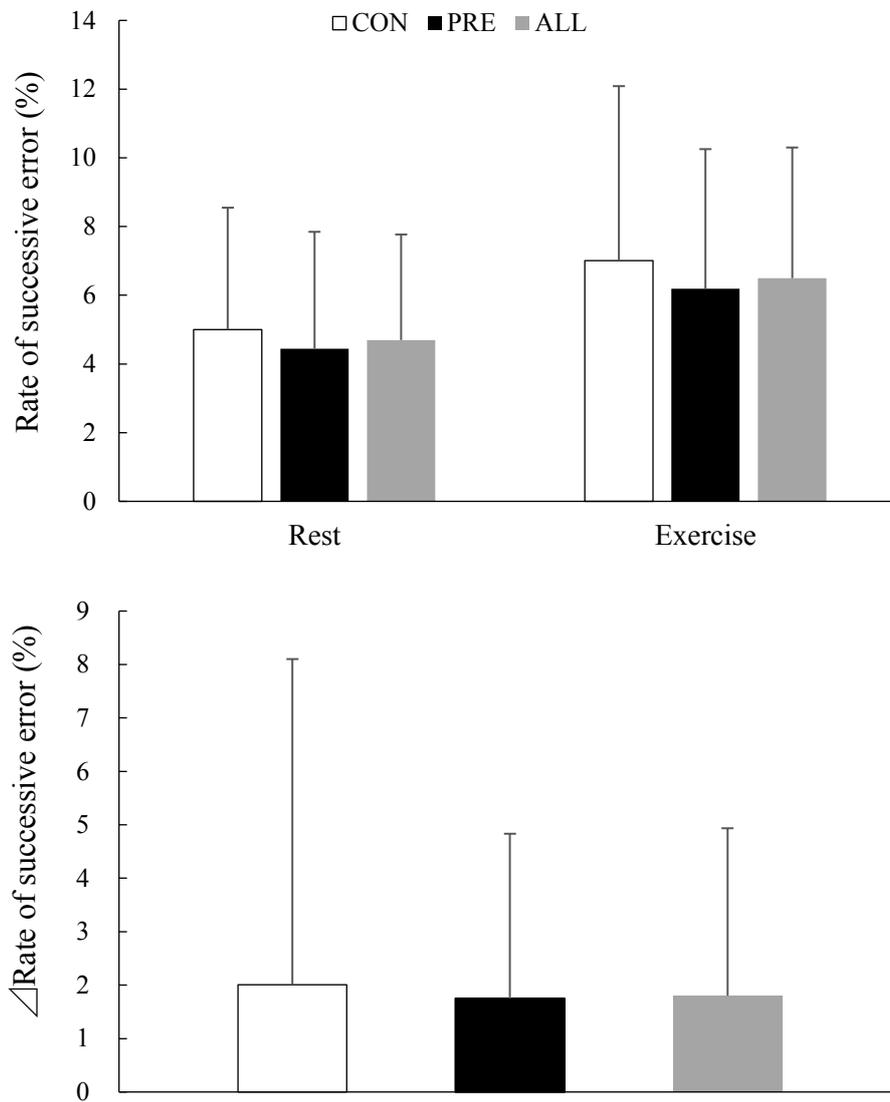


Fig. 20 連続エラー率の安静時および運動時における平均値 (A), 安静時に対する変化量 (B)

#### 4. 考察

本章では、運動前のアイスラリー摂取が暑熱環境下における認知機能に及ぼす影響を調査するとともに、運動中の摂取を組み合わせることでさらに運動能力や認知機能の改善がみられるか否かを検討することを目的とした。その結果、運動前からのアイスラリー摂取によって認知機能が向上することが示唆された。また、運動前および運動中のアイスラリー摂取によって運動後半における直腸温の上昇が有意に抑制され、運動継続時間が延長する傾向が示された。

現在まで、いくつかの研究により運動前のアイスラリー摂取がその後の運動中における核心温上昇率を増大させることが示唆されている (Stanley et al., 2010 ; Siegel et al., 2010, 2011 ; Yeo et al., 2012)。そのメカニズムは明らかではないが、核心温のみが低下することで皮膚との温度勾配が低下し、熱を周囲へ逃がす能力が低下することが要因ではないかと推察されている。本章では、PRE 条件における直腸温上昇率の有意な増大は観察されなかったものの (Fig. 6-A), ALL 条件で運動後半の直腸温上昇率が低下する傾向 ( $p=0.088$  ; Fig. 6-B) が観察され、その差が有意であったこと (Fig. 6-C) から、運動前および運動中のアイスラリー摂取は直腸温上昇率の増大を抑制でき、それにより運動後半の直腸温を低下させる (Fig. 5-A) ことが示された。アイスラリーに関する先行研究の中で、運動前と運動中の両方に摂取させている研究は 2 つ存在するが (Schulze et al., 2016; Naito & Ogaki, 2017), Schulze et al. はプレクーリングにアイスタオルを併用しており、Naito & Ogaki は同様の摂取プロトコルでの冷水との比較であるため、アイスラリー単独の影響や運動前と比較した場合の反応はまだ明らかにされていない。したがって、本章の結果は、これまで運動前の摂取により核心温を低下させることが示されていたアイスラリーを、運動中にも摂取することでその低下が維持されることを初めて明らかにしたものである。

本章では、直腸温と同様に前額部深部温も運動前のアイスラリー摂取により有意に低下し、運動中の摂取により運動後半も有意に低下した (Fig. 8-A)。前額部深部温は頸静脈血の温度とほとんど同じ値を示すことが報告されており (Ymaka & Namiki, 2003), 脳温を

反映すると考えられる。したがって、運動前のアイススラリー摂取によって脳温が低下すること、またその後の継続的な摂取によりその低下が維持されることが明らかとなった。アイススラリー摂取による脳温の低下には顔面領域の冷却が関与していると考えられるが (Siegel et al, 2012a ; Onitsuka et al., 2015), 本章において前額部皮膚温は運動前のみ有意に低下し、運動後半の有意な低下は観察されなかった。これには環境条件が関与していると考えられる。本章では、競技現場を想定し、運動前の摂取は常温環境下 (室温 24℃, 相対湿度 50%) で行い、運動中は暑熱環境 (室温 34℃, 相対湿度 50%) とした。したがって、運動前は環境からの熱の獲得がなく、アイススラリー摂取により前額部皮膚温は低下したが、運動中は環境からの熱の獲得がアイススラリーによる冷却能力を相殺し、ALL 条件においても低下しなかったのではないかと考えられる。Siegel et al. (2012a) はアイススラリーの摂取により脳温が低下するもう 1 つのメカニズムとして、脳へ流れる頸動脈血の冷却を挙げている。中強度までの最大下運動は脳血流を増加させるため (Hellström et al., 1996 ; Sato et al., 2011), 熱の獲得を受けない深部 (つまり脳) はアイススラリーの摂取により冷却された血液が多く流入することによって冷却され、それが前額部深部温の低下として現れた可能性が推察される。

上述のような直腸温および前額部深部温の低下にも関わらず、主観的運動強度や温熱感覚、熱快適性といった主観的指標は運動後半に有意な改善を示さなかった。第 II 章で述べているように、温熱感覚 (および熱快適性) の低下は直腸温および前額部皮膚温の低下が要因であると考えられる。したがって、第 II 章と同様に直腸温および前額部皮膚温の大きな低下がみられた運動前は温熱感覚、熱快適性も低下しているが、運動中は後半に直腸温が低下しているもののその低下は小さくなく、前額部皮膚温に至っては低下していないため、主観的感覚に現れなかったと考えられる。また、口腔や腹部領域に存在する温度受容器からの求心性フィードバックの変更もアイススラリーの摂取による主観的感覚の改善に寄与していると考えられている (Burdon et al., 2010 ; Onitsuka et al., 2015)。求心性フィードバックの変更はアイススラリーの冷刺激によるものであると考えられるが、運動中は運動による熱産生

や環境からの温刺激により求心性フィードバック情報を変更するほどの冷刺激を与えることができなかったため、主観的感覚が改善しなかった可能性がある。

認知機能はすべての条件で運動時に向上することが示されたが（反応時間における時間の主効果，エラー後の反応時間および干渉の有意な低下），反応時間における目標達成率の上昇は PRE 条件でのみ有意であり（Fig. 17-A），エラー後の反応時間も PRE 条件で運動時に他の 2 条件より大きく短縮される傾向が観察された（Fig. 18-B）．本章で用いた空間ストローク課題では，エラー反応の次試行において反応時間が遅延すること（post-error slowing: PES）が報告されている（Rabbitt, 1996）．PES はエラー反応を繰り返し起こさないための方略的な行動調整であり，PES が抑制されることは認知機能の向上を示すものではないが，連続エラー率に条件間で差がなかったため（Fig. 20），本章における PES の抑制はエラーの修正に関する認知機能の向上を示すものと考えられる．また，この PES の抑制が反応時間における目標達成率の上昇に寄与したものとする．本章は，これまでいくつかの先行研究で報告されている過度な体温上昇による認知機能の低下（Simmons et al., 2008 ; 風間ら, 2011 ; Gaoua et al., 2011）を模倣するプロトコルを想定していたが，そのような低下は観察されなかったため，運動前のアイスラリー摂取が暑熱環境下での運動中における認知機能の低下を抑制できるか否かを結論づけることはできない．しかしながら，運動前のアイスラリー摂取によって認知機能が向上するならば，その向上が暑熱環境下での運動時における認知機能の低下を相殺，つまり中枢性疲労を抑制することが推察される．最新の暑熱ストレスと認知機能のレビューによると，認知機能は 38.5°C までの核心温の上昇では改善し，その後 39.0°C までは平衡状態を保つが，39.0°C を超えると低下することが報告されている（Schmit et al., 2017）．本章では CON 条件においても直腸温が 39.0°C に達していないため，本章のような環境条件や運動負荷，それに伴う直腸温の変化では認知機能が低下しなかったと考えられる．また，本章は認知機能低下の要因として脳温の過度な上昇も想定していた．脳温に核心温と同様の閾値が存在するかは不明であるが，直腸温が認知機能の低下が見られるレベルに達していなかったということは脳温においても同じことが言えるだろう．したがっ

て、今後は認知機能の低下を観察できる実験プロトコルを確立し、実際に運動前のアイススラリー摂取によって中枢性疲労が抑制されるか否か再検討する必要がある。

運動前のアイススラリー摂取によって認知機能が向上することが示された一方、運動中における継続的な摂取（ALL 条件）で同じような認知機能の向上あるいはさらなる向上は観察されなかった。先述のように、本章ではおそらく脳温は認知機能が低下するほどのレベルまで上昇しておらず、むしろ反応時間や干渉はすべての条件で運動時に向上したため、認知機能が向上する程度だったと考えられる。PRE 条件でのみエラー修正能力や反応時間の目標達成率に向上が見られたということは、PRE 条件における脳温がそれらの高い認知的パフォーマンスの発揮に最も至適なレベルであったと推察される。すなわち、ALL 条件の継続的な冷却による前額部深部温（≒脳温）の低下が、本章のような実験条件において高い認知的パフォーマンスを発揮するには適さなかったと考えられる。したがって、本章よりも厳しい環境条件や運動形態で脳温がより上昇し、認知機能の低下が見られる場合には、ALL 条件における前額部深部温の低下が有効になる可能性はあるだろう。以上の観点からも、認知機能の低下が観察可能なプロトコルによる再検討の必要性が強調される。

最後に、サンプル数が少ないにも関わらず CON 条件と比較して PRE および ALL 条件で運動継続時間が延長する傾向（ $p=0.07$ ）が見られ、それぞれの間には大きい効果量（CON<PRE :  $r=0.86$ , CON<ALL :  $r=0.84$ ）が観察されたことから、運動前のアイススラリー摂取により運動能力が向上するという先行研究の結果を本章でも再現することができたと考えられる。本章の結果から ALL 条件においてさらなる向上が見られたと言うことは難しいが、PRE 条件との間に大きい効果量（ $r=0.60$ ）が観察され、4 名中 3 名が ALL 条件で最も延長していることから、サンプル数の増加に伴い有意な差が見られる可能性はある。運動前のアイススラリー摂取によって運動能力が向上することは多くの研究により報告されているが、その後の運動中における継続した摂取によって、さらに運動能力が向上することはこれまでのところ報告されていないため、今後サンプル数を増やして検討を重ねていく必要がある。

本章は、運動前および運動中のアイススラリー摂取が生理的指標や認知機能、運動能力に

及ぼす影響を調査するための基礎的な実験として、一定負荷運動とその後の疲労困憊運動から構成されるプロトコルを用いた。被験者数は少ないが、このプロトコルにおいて運動継続時間が ALL 条件で延長する可能性が示された。しかしながら、本章のような疲労困憊に至るまでの運動継続時間を測定するプロトコルでは、プレクーリング (Wegmann et al., 2012) においても運動中の冷却 (Stevens et al., 2017) においてもエルゴジェニック効果が増大することが示唆されており、冷却による効果が誇張されている可能性がある。また、本章で行った無風の実験室は、実際の競技現場よりも体温の人工的な増加を引き起こし、冷却の恩恵的な効果を過大評価することが知られている (Morrison et al., 2014)。したがって、運動前および運動中のアイススラリー摂取による影響を明らかにするためには、風による対流を模倣した実験室内でのタイムトライアルのようなより生態学的に妥当なプロトコルや、屋外での実験のようなより実践的な条件設定で本章の結果が再現されるか否かを検討する必要があるだろう。

## 5. 結論

運動前のみのアイススラリー摂取は認知機能を向上させることが観察され、暑熱環境下での運動時における認知機能の低下を相殺する（すなわち中枢性疲労を抑制する）可能性が示された。また、運動前および運動中のアイススラリー摂取は、暑熱環境下での運動時における直腸温および前額部深部温の上昇を抑制した。しかしながら、プロトコルや被験者数の問題により、認知機能や運動能力がそれによりさらに向上するか否かを明らかにすることはできなかったため、今後再検討する必要がある。

V章  
総合考察

## 1. 本研究の目的

本研究では、アイススラリーの摂取を用いた身体冷却について大きく 2 つの課題に着目して検討を行った。1 つ目は、アイススラリーの摂取が脳温の上昇による中枢性疲労の発現を抑制するか否かである。アイススラリーの摂取は顔の皮膚表面の冷却により脳を冷却する可能性があり、それにより中枢性疲労を抑制すると考えられている。そこで本研究では、実験 1 で前額部皮膚温を指標とし、アイススラリーの摂取が顔の皮膚表面を冷却するか否かを (第 II 章)、実験 2 で実際に脳温が低下するか否かを (第 III 章) 順次検討した。その後、実験 3 でアイススラリーの摂取が中枢性疲労の抑制をもたらすか否かを、認知機能を指標として検討した (第 IV 章)。次に、2 つ目の課題であるアイススラリー摂取後の運動時における核心温上昇率の増大に対しては、運動中の継続的な摂取で抑制できるのではないかと考え、実験 3 で運動前および運動中にアイススラリーを摂取する条件を追加した (第 IV 章)。ここでは、上記 3 つの実験から得られた結果をもとに、アイススラリーの摂取が脳温および中枢性疲労に及ぼす影響とアイススラリーの適切な摂取方法について総合的に考察する。

## 2. 脳温に及ぼす影響

Siegel et al. (2012b) はアイススラリーの摂取が脳温を低下させるメカニズムとして、以下の 2 つを提案している。1 つ目は、アイススラリーの摂取により食道が冷却されることで、近接する頸動脈から脳に流れる血液が冷やされ、脳温の低下につながる可能性、2 つ目は、アイススラリーの経口摂取により顔の皮膚表面が冷やされ、それが脳の伝導性冷却をもたらす可能性である。実際に、Vanden Hoek et al. (2004) は、ブタにおいて体重当たり 50ml のアイススラリーの静脈注射が冷蔵された生理食塩水と比較して脳温を有意に低下させたと報告している。しかしながら、ヒトにおいて脳温や頸動脈血温度を直接測定することは困難である。そこで本研究では、Siegel et al. (2012b) の 2 つ目の仮説を検証するため、まず第 II 章で顔の表面温度に及ぼす影響を調査した。その結果、温暖環境下におけるアイススラリーの摂取により前額部皮膚温の有意な低下が観察された。前額部の冷却が効果的に脳温の

低下をもたらすことは十分に証明されており (Mariak et al., 1999; Harris et al., 2007; Zenker and Kubik, 1996) , 熱流補償法を用いた深部温のモニタリングにおいて前額部深部温が頸静脈血の温度とほとんど同じ値を示すことが報告されている (Ymakage & Namiki, 2003) ため, 前額部皮膚温が脳温の間接的な指標となると考えることは可能であり, アイススラリーの摂取が顔の皮膚表面の冷却により脳温を低下させることが示唆された. そこで, 第III章で磁気共鳴スペクトロスコピーという手法を用いてヒトの脳温に及ぼす影響を非侵襲的に調査したところ, 実際にヒトにおいてもアイススラリーの摂取によって脳温が低下するという現象を観察することができた. 一方で, 脳温の指標とされる前額部深部温の測定を行った第IV章では, 前額部皮膚温の低下が見られない運動後半にも前額部深部温の有意な低下が観察された. 前額部深部温の低下を脳温の低下と考えることができるならば, 第II章および第III章の考察とは矛盾している. 第II章で述べた通り, 前額部の冷却は顔の静脈血の冷却により脳を冷却すると考えられている. 中でも, 顔面や鼻粘膜から来る静脈血を頭蓋内に送る眼角静脈や, 頭蓋骨に開いた導出孔を通じて頭皮側と頭蓋内側を交通する導出静脈は, 高体温時にそれらの静脈を経由して頭蓋内に流入する血液量が増加し, それに応じて脳が冷却されると言われている (永坂, 2000) . 第IV章では第II章および第III章と異なり, 暑熱環境下での運動により体温上昇が引き起こされているため, 同じように頭蓋内に流入する血液量が増加していたと考えられる. この流入量の増加によって有意差が出ないほどの前額部皮膚温の低下 (顔の冷却) でも脳を冷却することができたのではないかと推察される. したがって, アイススラリーの摂取による脳の冷却には, やはり顔の冷却が大きく関与しており, それに伴って脳に流入する血液が冷却されることが要因であると考えられる.

### 3. 中枢性疲労の検討

本研究では, アイススラリーの摂取が脳温の上昇による中枢性疲労の発現を抑制するという仮説に基づき, 第II章および第III章で脳温に及ぼす影響を検討した. その結果アイススラリーの摂取が脳温を低下させることが明らかとなったため, 第IV章で実際に中枢性疲労

を抑制するか否かを検討した。本研究では、脳温の上昇による中枢性疲労が要因となり認知機能の低下が引き起こされるという説 (Cheung & Sleivert, 2004; Hasegawa & Cheung, 2013) に基づき、認知機能の低下を中枢性疲労の指標に用いた。しかしながら、中立温度のスポーツ飲料を摂取する CON 条件においても反応時間や正答率の低下といった認知機能の低下は観察されなかった。暑熱ストレスと認知機能に関する最新のレビューでは、39.0°Cまでの核心温の上昇では認知機能は向上することが報告されている (Schmit et al., 2017)。第IV章の CON 条件の直腸温および前額部深部温 (≒脳温) を見てみると、運動終了時においても39.0°Cには達していない。したがって、第IV章のような暑熱・運動負荷による直腸温および脳温の上昇では、中枢性疲労は引き起こされないと考えられる。むしろ、すべての条件で運動時に反応時間の短縮や干渉の抑制が観察されたため、第IV章では運動による適度な体温上昇によって認知機能が向上したと考えられる。特に、運動前にアイスラリーを摂取する PRE 条件では、先述のような認知機能の向上に加え、反応時間における目標達成率やエラーの修正能力が向上した。これがアイスラリーの摂取によるものであるならば、第IV章とは異なり暑熱環境下での運動時による認知機能の低下が見られる場合には、運動前の摂取による認知機能の向上が低下を相殺し、中枢性疲労を抑制すると考えることは可能である。一方、運動中も継続して摂取した ALL 条件では認知機能のさらなる向上どころか、PRE 条件と同じような向上も観察されなかった。これには脳温が関与していると考えられる。おそらく脳温にも核心温と同じような至適レベルが存在し、第IV章のような実験条件における高い認知機能の発揮には PRE 条件の脳温が最も至適なレベルであった可能性がある。つまり、ALL 条件の継続的な冷却はむしろ認知機能に適したレベルよりも脳温を低下させてしまったため、認知機能の向上が観察されなかったと推察される。したがって、本章よりも厳しい環境条件や運動形態で脳温がより上昇し、認知機能の低下が見られる場合には、ALL 条件における脳温の低下が有効になる可能性はあるだろう。

#### 4. 運動前および運動中の摂取

これまで、運動前のアイスラリー摂取はその後の運動中における核心温の上昇率を増大させることが報告されてきた (Siegel et al., 2010 ; 2012b)。第IV章では、運動中における継続的なアイスラリーの摂取でそれを抑制できるか否か検討した結果、運動の後半に直腸温が他の 2 条件よりも有意に低値を示すとともに、運動後半の上昇率が抑制されることが示された。また、直腸温だけでなく前額部深部温も ALL 条件で運動後半に有意に低値を示したことから、脳温の低下も維持されることが考えられる。運動パフォーマンステストを実施した 4 名のうち 3 名では、これらが主観的にもよい影響を及ぼし、疲労困憊に至るまでの運動継続時間が延長した。第 II 章および第 III 章の考察で述べたように、直腸温や頭部の冷却が主観的感覚の改善の一因であると考えられるため、ALL 条件における直腸温や脳温の低下が主観的感覚の改善につながるような場合には、運動能力の向上ももたらされるのではないかと推察される。また、第IV章と異なり、核心温や脳温がより上昇する厳しい環境条件や運動形態の場合には ALL 条件の生理的負担の軽減が運動能力や認知機能によい影響を及ぼす可能性がある。したがって、本研究のような環境条件や運動形態の場合には、運動前のみの摂取でも十分効果的であるが、より厳しい環境や高度なレベルで競い合うアスリートにおいては運動中の継続的な摂取が恩恵を与えるかもしれない。しかしながら、運動パフォーマンステストの被験者数が少ないこと、また脳内の情報処理そのものを評価することはできていないことから、運動前および運動中のアイスラリー摂取が運動能力や認知機能をさらに向上させるか否かは今後検討を重ねていく必要がある。

## 5. 競技現場への応用

以上のことから、まだ課題はあるものの運動前にアイスラリーを摂取する場合には運動中にも継続して摂取することが勧められる。しかしながら、第IV章の被験者 11 名のうち 5 名は中立温度の方が好ましかったと答えており、それが運動パフォーマンスに影響を及ぼす可能性があるため、競技現場へ応用する場合には注意が必要である。先行研究においても、サイクリング中にアイスラリーを摂取することは、何人かのアスリートにおいては胃腸

不快感をもたらす可能性があるということが報告されている (Stevens et al., 2013). この研究では摂取量が 10g/kg と多かったことが要因であると考えられており, より少ない摂取量による検討の必要性を指摘している. また, 最近の研究においては, アイスラリーと冷たい飲料 (4°C) の自由摂取を比較した結果, アイスラリーを摂取した群でタイムトライアルの完走時間が遅延したことが報告されており, その要因としてアイスラリー群で摂取量が減少したことと激しい運動中に摂取することの不快感が挙げられている (Mauder et al., 2017). 第IV章では, 運動能力が向上した被験者はすべてアイスラリーの方が好ましかったと回答しており, 中立温度の方が好ましいと回答した被験者では運動パフォーマンスを評価していなかったため, 本研究結果から摂取する飲料の快適性と運動パフォーマンスの関連を示すことはできないが, 先行研究で指摘されているように不快感により運動パフォーマンスが低下する可能性は除外できない. 運動中の摂取においては, Mauder et al. (2017) の研究によって示されているように, 冷たい飲料の摂取の方が快適性も高く摂取量も維持できるため, アイスラリーの摂取と同様に核心温上昇の抑制が成し遂げられる可能性があり, 運動前のアイスラリー摂取と運動中の冷たい飲料摂取の組み合わせが体温調節反応および運動能力に及ぼす影響を検討する価値はあると考えられる. 以上のことから, アイスラリーの摂取を含めた身体内部冷却を競技現場へ還元するためには, 適切な摂取量や摂取方法 (自由摂取または定期的な摂取), 摂取する状況毎に適した飲料 (運動前はアイスラリー, 運動中は冷たい飲料) を検討する必要がある.

## 6. 今後の展望

本研究では, アイスラリーの摂取を用いた身体冷却が運動能力を向上させるメカニズムとして, 脳温の低下による認知機能低下の抑制という新たな説を提唱した. しかしながら, 脳温の上昇に伴い上昇することが報告されている  $\alpha/\beta$  波 (Nielsen et al., 2001) のような認知機能の前段階にある脳波を用いた脳活動に及ぼす影響は明らかにできていない. アイスラリーの摂取は報酬や快楽に関連する脳領域を活性化することによって中枢性疲労を抑制

するという仮説も提唱されているため (Siegel et al., 2011; Burdon et al., 2013), アイススラリーの摂取が中枢性疲労に及ぼす影響を明確にするためには, 脳波などを用いた脳活動に及ぼす影響を検討することが今後の課題として挙げられる.

また, 認知機能の低下を抑制することが示唆されたのは運動前だけの摂取であり, 運動中の継続的な摂取によって抑制されるか否かは, 認知機能の低下が観察可能なプロトコルを確立して再検討する必要がある. 加えて, 運動能力に及ぼす影響についても可能性を示すことはできたものの, 運動中の継続的な摂取によってさらに改善するか否かは明らかでない. 本研究で用いた無風の実験室は, 実際の競技現場よりも体温の人工的な増加を引き起こし, 冷却の恩恵的な効果を過大評価することが知られているため (Morrison et al., 2014), 運動能力に及ぼす影響については, より実践的なプロトコルに変更したうえで十分な被験者数を確保することが課題として挙げられる.

以上のように課題はいくつか挙げられるが, 本研究結果より, 運動中の継続的な摂取は運動能力や認知機能を改善する可能性があるとともに, 直腸温や脳温の上昇といった直接疲労につながるような生理学的負担を軽減することができるため, 熱中症の予防にも効果的であることが示された. したがって, 継続的なアイススラリー摂取は, 2020 年東京オリンピックのような過酷な環境が予想される競技会において, 運動パフォーマンスの向上を目的としたアスリートに使用され得るとともに, 観客やスタッフ等の熱中症対策にも使用できる. 運動中のアイススラリー摂取に不快感を示す場合には, 冷水摂取やクーリングベストのような他の実践的な身体冷却と組み合わせることも可能であり, 暑さ対策としての使用に関して実現可能性は非常に高い. 本研究結果は, アイススラリーの摂取を用いた身体冷却の実現に向けて, 運動能力向上の背景にあるメカニズムに関する理解を深め, 適切な摂取方法に対する示唆を提供するための一助となると考える.

## 7. まとめ

Fig. 1 に本研究結果より得られたアイススラリー摂取による身体冷却が脳温および体温に

及ぼす影響に関する考察をまとめた。本研究と異なり、実際の競技場面のようなより厳しい環境条件や運動形態の場合、運動前のアイススラリー摂取による脳のプレクーリングが、中枢性疲労が発現するまでの時間を延長させ、運動中の継続的な摂取による上昇の抑制が、その時間をさらに延長させることが示唆された。また、このような脳温の低下がアイススラリー摂取によるエルゴジェニック効果の一因である可能性が推察される。加えて、先行研究で報告されてきた直腸温のプレクーリングによる危機的限界レベルに到達する時間の延長が、運動中の継続的な摂取によってさらに延長する可能性が示された。

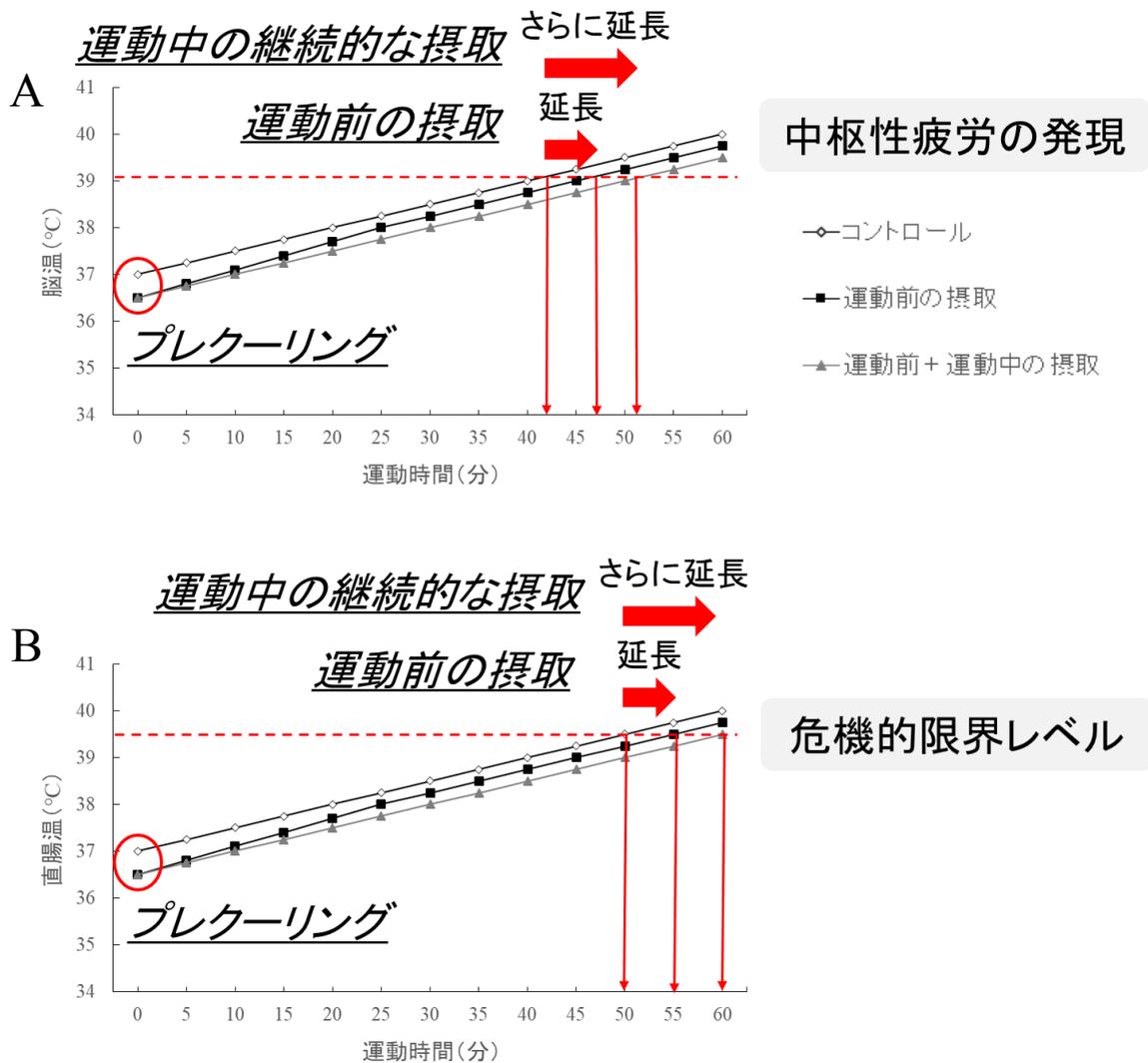


Fig. 1 アイススラリーの摂取が脳温 (A) および直腸温 (B) に及ぼす影響

本研究の結果から得られた結論は、以下に示す通りである。

1. 温暖環境下におけるアイススラリーの摂取は前額部皮膚温を有意に低下させる。
2. 常温環境下におけるアイススラリーの摂取は MRS により測定したヒトの脳温を有意に低下させる。
3. 暑熱環境下における運動前のアイススラリー摂取は認知機能を向上させ、中枢性疲労を抑制することが示唆された。
4. 運動前および運動中のアイススラリー摂取は直腸温および脳温の指標となる前額部深部温の上昇を有意に抑制することが示されたが、それらが運動能力や認知機能をさらに向上させるか否かは検討を重ねる必要がある。

以上の結果より、運動前のアイススラリー摂取によるエルゴジェニック効果には、顔の冷却による脳温上昇の抑制とそれに伴う中枢性疲労の抑制が関与していることが明らかになった。運動中の継続的な摂取については、実験プロトコルの課題等により再検討する必要があるものの、同様に中枢性疲労が抑制され、エルゴジェニック効果が増大する可能性は示された。

## 引用文献

Amoateng-Adjepong, Y., Del, M.J., Manthous, C.A. Accuracy of an infrared tympanic thermometer. *Chest*. 115, 1002-1005, 1999.

Arngrimsson, S.A., Petitt, D.S., Stueck, M.G., Jorgensen, D.K., Cureton, K.J. Cooling vest worn during active warm-up improves 5-km run performance in the heat. *J. Appl. Physiol.* 96, 1867-1814, 2004.

Bedford, T. The warmth factor in comfort at work: a physiological study of heating and ventilation. Industrial Health Research Board. No 76, HMSO, London, 1936.

Briner, Jr, W.W. Tympanic membrane vs rectal temperature measurement in marathon runners [letter]. *J. Am. Med. Assoc.* 276, 194, 1996.

Brück, K., Olschewski, H. Body temperature related factors diminishing the drive to exercise. *Can. J. Physiol. Pharmacol.* 65, 1274-1280, 1987.

Burdon, C.A., Easthope, C.S., Johnson, N.A., Chapman, P.G., O'Connor, H. The influence of ice slushy on voluntary contraction force following exercise-induced hyperthermia. *Appl. Physiol. Nutr. Metab.* 39(7), 781-786, 2014.

Burdon, C.A., Hoon, M.W., Johnson, N.A., Chapman, P.G., O'Connor, H.T. The effect of ice slushy ingestion and mouthwash on thermoregulation and endurance performance in the heat. *Int. J. Sport. Nutr. Exerc. Metab.* 23(5), 458-469, 2013.

Cabanac, M. Keeping a cool head. *News. Physiol. Sci.* 1,41-44, 1986.

Cabanac, M., Brinnet, H. Blood flow in the emissary veins of the head during hyperthermia. *Eur. J. Appl. Physiol.* 54,172-176, 1985.

Cabanac, M., Caputa, M. Natural selective cooling of the human brain: Evidence of its occurrence and magnitude. *J. Physiol.* 286,255-264, 1979.

Cady, E.B., D'Souza, P.C., Penrice, J., Lorek, A. The estimation of local brain temperature by in vivo <sup>1</sup>H magnetic resonance spectroscopy. *Magn. Reson. Med.* 33, 862-867, 1995.

Caputa, M., Feistkorn, G., Jessen, C. Effects of brain and trunk temperatures on exercise performance in goats. *Pflugers. Arch.* 406, 184-189, 1986.

Castle, P.C. et al. Precooling leg muscle improves intermittent sprint exercise performance in hot, humid conditions. *J. Appl. Physiol.* 100, 1377-1384, 2006.

Cattaneo, C.G. et al. The accuracy and precision of body temperature monitoring methods during regional and general anesthesia. *Anesth. Analg.* 90, 938-945, 2000.

Cetas, T.C. Thermometers. *Fever: basic mechanisms and management.* 11-34, 1997.

Chambers, E.S., Bridge, M.W., Jones, D.A. Carbohydrate sensing in the human mouth: effects on exercise performance and brain activity. *J. Physiol.* 15, 587(Pt 8), 1779-1794, 2009.

Cheung, S.S., McLellan, T.M. Heat acclimation, aerobic fitness, and hydration effects on tolerance during uncompensable heat stress. *J. Appl. Physiol.* 84, 1731-1739, 1998.

Cheung, S.S., Sleivert, G.G. Multiple triggers for hyperthermic fatigue and exhaustion. *Exerc. Sport. Sci. Rev.* 32, 100-106, 2004.

Corbett, R., Laptook, A., Weatherall, P. Noninvasive measurements of human brain temperature using volume-localized proton magnetic resonance spectroscopy. *J. Cereb. Blood. Flow. Metab.* 17, 363-369, 1997.

Corbett, R.J., Laptook, A.R., Tollefsbol, G., Kim, B. Validation of a noninvasive method to measure brain temperature in vivo using <sup>1</sup>H NMR spectroscopy. *J. Neurochem.* 64, 1224 -1230, 1995.

Corbett, R.J., Purdy, P.D., Laptook, A.R., Chaney, C., Garcia, D. Noninvasive measurement of brain temperature after stroke. *Am. J. Neuroradiol.* 20, 1851-1857, 1999.

Crawshaw, L.I., Nadel, E.R., Stolwijk, J.A.J., Stamford, B.A. Effect of local cooling on sweating rate and cold sensation. *Pflügers Arch.* 354, 19-27, 1975.

Daniel, S.M., Liran, M. Core Temperature Measurement-Methods and Current Insights. *Sports. Med.* 32(14), 879-885, 2002.

Drust, B., Rasmussen, P., Mohr, M., Nielsen, B., Nybo, L. Elevations in core and muscle temperature impairs repeated sprint performance. *Acta. Physiol. Scand.* 183, 181-190,

2005.

Duffield, R., Green, R., Castle, P., Maxwell, N. Precooling can prevent the reduction of self-paced exercise intensity in the heat. *Med. Sci. Sports. Exerc.* 42, 3, 577-584, 2010.

Falk, D. Brain evolution in Homo: The “radiator” theory. *Behav. Brain Sci.* 13, 333-381, 1990.

Febbraio, M.A., Carey, M.F., Snow, R.J., Stathis, C.G., Hargreaves, M. Influence of elevated muscle temperature on metabolism during intense, dynamic exercise. *Am. J. Physiol.* 271, 1251-1255, 1996.

Fuller, A., Carter, R.A., Mitchell, D. Brain and abdominal temperatures at fatigue in rats exercising in the heat. *J. Appl. Physiol.* 84, 877-883, 1998.

Gagge, A.P., Stolwijk, J.A., Hardy, J.D. Comfort and thermal sensations and associated physiological responses at various ambient temperatures. *Environ. Res.* 1, 1-20, 1963.

Galloway, S.D., Maughan, R.J. Effects of ambient temperature on the capacity to perform prolonged cycle exercise in man. *Med. Sci. Sports. Exerc.* 29, 1240-1249, 1997.

Gallup, A.C., Gallup Jr., G.G. Yawning as a brain cooling mechanism: nasal breathing and forehead cooling diminish the incidence of contagious yawning. *Evol. Psychol.* 5, 92-101, 2007.

González-Alonso, J. et al. Influence of body temperature on the development of fatigue during prolonged exercise in the heat. *J. Appl. Physiol.* 86, 1032-1039, 1999.

Gray, S., Nimmo, M. Effects of active, passive or no warm-up on metabolism and performance during high-intensity exercise. *J. Sports. Sci.* 19, 693-700, 2001.

Guest, S. et al. Human cortical representation of oral temperature. *Physiol. Behav.* 92, 975-984, 2007.

Harris, B.A., Andrews, P.J.D., Murray, G.D. Enhanced upper respiratory tract airflow and head fanning reduce brain temperature in brain-injured, mechanically ventilated patients: a randomized, crossover, factorial trial. *Br. J. Anaesth.* 98, 93-99, 2007.

Hasegawa, H. Cheung, S.S. Hyperthermia effects on brain function and exercise capacity. *J. Phys. Sports. Med.* 2, 429-438, 2013.

Harioka, T. et al., "Deep-forehead" temperature correlates well with blood temperature. *Can. J. Anesth.* 47, 980-983, 2000.

Hooker, E.A., Houston, H. Screening for fever in adult emergency department: oral vs tympanic thermometry. *South. Med. J.* 89, 230-234, 1996.

Ishihara, Y. et al. A precise and fast temperature mapping using water proton chemical shift. *Magn Reson Med.* 34, 814-823, 1995.

Jayasundar, R., Singh, V.P. In vivo temperature measurements in brain tumors using proton MR spectroscopy. *Neurol. India.* 50, 436-439, 2002.

Kay, D. et al. Evidence for neuromuscular fatigue during high-intensity cycling in warm, humid conditions. *Eur. J. Appl. Physiol.* 84, 115-121, 2001.

風間 彬, 高津 理美, 長谷川 博. 体温上昇が持久的運動時における認知機能に及ぼす影響. *体力科学.* 61, 459-67, 2012.

Kondo, N., Takano, S., Aoki, K., Shibasaki, M., Tominaga, H., Inoue, Y. Regional differences in the effect of exercise intensity on thermoregulatory sweating and cutaneous vasodilation. *Acta. Physiol. Scand.* 164(1), 71-78, 1998.

Kuroda, K. et al. Feasibility of internally referenced brain temperature imaging with a metabolite signal. *Magn. Reson. Med. Sci.* 2, 17-22, 2003.

Lee, D.T., Haymes, E.M. Exercise duration and thermoregulatory responses after whole body precooling. *J. Appl. Physiol.* 79, 1971-1976, 1995.

Lee, J.K., Shirreffs, S.M. The influence of drink temperature on thermoregulatory responses during prolonged exercise in a moderate environment. *J. Sports. Sci.* 25, 975-985, 2007.

Lee, J.K., Maughan, R.J., Shirreffs, S.M. The influence of serial feeding of drinks at different temperatures on thermoregulatory responses during cycling. *J. Sports. Sci.*

26(6), 583-590, 2008a.

Lee JK, Shirreffs SM, Maughan RJ. Cold drink ingestion improves exercise endurance capacity in the heat. *Med Sci Sports Exerc*, 40, 1637-44, 2008b.

MacDonald, A.W., Cohen, J.D., Stenger, V.A., Carter, C.S. Dissociating the role of the dorsolateral prefrontal and anterior cingulate cortex in cognitive control. *Science*. 288, 1835-1838, 2006.

MacDougall, J.D., Reddan, W.G., Layton, C.R., Dempsey, J.A. Effects of metabolic hyperthermia on performance during heavy prolonged exercise. *J Appl Physiol*, 36, 538-544, 1974.

Mariak, Z., White MD, Lewko J, Lyson T, Piekarski P. Direct cooling of the human brain by heat loss from the upper respiratory tract. *J. Appl. Physiol.* 87, 1609-1613, 1999.

丸尾 裕矢, 正木 宏明. パフォーマンスモニタリングに及ぼす聴覚性罰刺激の効果. *生理心理学と精神生理学*. 32(1), 29-40, 2014.

Maunder, E., Laursen, P.B., Kilding, A.E. Effect of ad Libitum Ice-Slurry and Cold-Fluid Ingestion on Cycling Time-Trial Performance in the Heat. *Int. J. Sports. Physiol. Perform.* 12(1), 99-105, 2017.

McDannold, N., King, R.L., Hynynen, K. MRI monitoring of heating produced by ultrasound absorption in the skull: in vivo study in pigs. *Magn Reson Med*. 51, 1061-

1065, 2004.

Mellergård, P. Changes in human intracerebral temperature in response to different methods of brain cooling. *Neurosurgery*. 31(4), 671-677, 1992.

Minett, G.M., Duffield, R., Marino, F.E., Portus, M. Volume dependent response of pre-cooling for intermittent-sprint exercise in the heat. *Med. Sci. Sports. Exerc.* 43, 1760-1769, 2011.

水本 篤, 竹内 理. 研究論文における効果量の報告のために—基礎的概念と注意点—. *英語教育研究*. 31, 57-66, 2008.

Morrison, S., Sleivert, G.G., Cheung, S.S. Passive hyperthermia reduces voluntary activation and isometric force production. *Eur. J. Appl. Physiol.* 91(5-6), 729-736, 2004.

Mundel, T., King, J., Collacott, E., Jones, D.A. Drink temperature influence fluid intake and endurance capacity in men during exercise in a hot, dry environment. *Exp. Physiol.* 91, 925-933, 2006.

中田 大貴, 大城 岬, 難波 真理, 芝崎 学. 暑熱環境の違いが運動時のヒト脳認知機能に及ぼす影響. *デサント科学*. 38, 17-27, 2017.

永坂 鉄夫. ヒトの選択的脳冷却機構とその医学・スポーツ領野への応用. *日本生気象学会雑誌*. 37(1), 3-13, 2000.

Nielsen, B. et al. Human circulatory and thermoregulatory adaptations with heat acclimation and exercise in a hot, dry environment. *J. Physiol.* 460, 467-485, 1993.

Nielsen, B., Hyldig, T., Bidstrup, F., González-Alonso, J., Christoffersen, G.R. Brain activity and fatigue during prolonged exercise in the heat. *Pflugers. Arch.* 442(1), 41-48, 2001.

Nybo, L. Brain temperature and exercise performance. *Exp. Physiol.* 97(3), 333-339, 2012.

Nybo, L. Hyperthermia and fatigue. *J. Appl. Physiol.* 104, 871-878, 2008.

Nybo, L., Moller, K., Volianitis, S., Nielsen, B., Secher, N.H. Effects of hyperthermia on cerebral blood flow and metabolism during prolonged exercise in humans. *J. Appl. Physiol.* 93, 58-64, 2002.

Nybo, L., Nielsen, B. Middle cerebral artery blood velocity is reduced with hyperthermia during prolonged exercise in humans. *J. Physiol.* 534, 279-286, 2001.

Ogawa, K., Masaki, H., Yamazaki, K., Sommer, W. The influence of emotions due to verbal admonishment and encouragement on performance monitoring. *Neuroreport.* 22(7), 313-318, 2011.

Onitsuka, S., Ueno, T., Zheng, X., Hasegawa, H. The effect of ice slurry ingestion during half-time breaks on intermittent exercise capacity and thermoregulation in the warm

environment. *Gazz. Med. Ital-Arch. Sci. Med.* 174, 113-121, 2015a.

Onitsuka, S., Zheng, X., Hasegawa, H. Ice slurry ingestion reduces both core and facial skin temperatures in a warm environment. *J. Therm. Biol.* 51, 105-109 (2015b).

Rabbitt, P. M. Errors and error correction in choice-response tasks. *J. Exp. Psychol.* 71, 264-272, 1966.

Roberts, M.F., Wenger, C.B., Stolwijk, J.A., Nadel, E.R. Skin blood flow and sweating changes following exercise training and heat acclimation. *J. Appl. Physiol.* 43, 133-137, 1977.

Roelands, B. Meeusen, R. Alterations in central fatigue by pharmacological manipulations of neurotransmitters in normal and high ambient temperature. *Sports. Med.* 40, 229-246, 2010.

Ross, M.L.R. et al. Novel precooling strategy enhances time trial cycling in the heat. *Med. Sci. Sports. Exerc.* 43(1), 123-133, 2011.

Sato, K., Ogoh S., Hirasawa A., Oue A., Sadamoto T. The distribution of blood flow in the carotid and vertebral arteries during dynamic exercise in humans. *J. Physiol.* 1, 589(Pt 11), 2847-2856, 2011.

Schulze, E. et al. Effect of thermal state and thermal comfort on cycling performance in the heat. *Int. J. Sports. Physiol. Perform.* 10(5), 655-663, 2016.

Siegel, R. et al. Ice slurry ingestion increases core temperature capacity and running time in the heat. *Med. Sci. Sports. Exerc.* 42(4), 717-725, 2010.

Siegel, R., Laursen, P.B. Keeping your cool: possible mechanisms for enhanced exercise performance in the heat with internal cooling methods. *Sports. Med.* 1;42(2), 89-98, 2012a.

Siegel, R., Maté, J., Watson, G., Nosaka, K., Laursen, P.B. Pre-cooling with ice slurry ingestion leads to similar run times to exhaustion in the heat as cold water immersion. *J. Sports. Sci.* 30, 155-165, 2012b.

Siegel, R., Maté, J., Watson, G., Nosaka, K., Laursen, P.B. The influence of ice slurry ingestion on maximal voluntary contraction following exercise-induced hyperthermia. *Eur. J. Appl. Physiol.* 111(10), 2517-2524, 2011.

Skein, M., Duffield, R., Cannon, J., Marino, F.E. Self-paced intermittent-sprint performance and pacing strategies following respective pre-cooling and heating. *Eur. J. Appl. Physiol.* 112(1), 253-266, 2012.

Sleivert, G.G., Cotter, J.D., Febbraio, W.A. The influence of whole-body vs. torso pre-cooling on physiological strain and performance of high-intensity exercise in the heat. *Comp. Biochem. Physiol. A.* 28, 657-666, 2001.

Stanley, J., Leveritt, M., Peake, J.M. Thermoregulatory responses to ice-slush beverage

ingestion and exercise in the heat. *Eur. J. Appl. Physiol.* 110(6), 1163-1173, 2010.

Stevens, C.J., Dascombe, B., Boyko, A., Sculley, D., Callister, R. Ice slurry ingestion during cycling improves Olympic distance triathlon performance in the heat. *J. Sports. Sci.* 31(12), 1271-1279, 2013.

Szabo, G. The number of eccrine sweat glands in human skin. *Advances in Biology of the skin.* Pergamon Press, Oxford, 1-5, 1962.

Thomas, M.M., Cheung, S.S., Elder, G.C., Sleivert, G.G. Voluntary muscle activation is impaired by core temperature rather than local muscle temperature. *J. Appl. Physiol.* 100(4), 1361-1369, 2006.

戸川 達夫, 根本 鉄, 辻 隆之, 須磨 幸蔵, 山崎 とよ. 熱流補償法による生体温度計測. *医科器械学雑誌.* 45, 505, 1975.

Trubel, H.K., Maciejewski, P.K., Farber, J.H., Hyder, F. Brain temperature measured by <sup>1</sup>H-NMR in conjunction with a lanthanide complex. *J. Appl. Physiol.* 94, 1641-1649, 2003.

Tucker, R., Rauch, L., Harley, Y.X., Noakes, T.D. Impaired exercise performance in the heat is associated with an anticipatory reduction in skeletal muscle recruitment. *Pflugers. Arch.* 448, 422-430, 2004.

Vanden Hoek, T.L. et al. Induced hypothermia by central venous infusion: saline ice slurry versus chilled saline. *Crit. Care. Med.* 32, S425-431, 2004.

Walters, T.J., Ryan, K.L., Tate, L.M., Mason, P.A. Exercise in the heat is limited by a critical internal temperature. *J. Appl. Physiol.* 89, 799-806, 2000.

Wegmann, M. et al. Pre-cooling and sports performance. *Sports. Med.* 42, 545-564, 2012.

Yamakage, M., Iwasaki, S., Namiki, A. Evaluation of a newly development monitor of deep body temperature. *J. Anesth.* 16, 354-357, 2002.

Yamakage, M., Namiki, A. Deep temperature monitoring using a zero-heat-flow method. *J. Anesth.* 17, 108-115, 2003.

Yeo, Z.W., Fan, P.W., Nio, A.Q., Byrne, C., Lee, J.K. Ice slurry on outdoor running performance in heat. *Inter. J. Sports. Med.* 33, 859-866, 2012.

吉田 次男, 松澤 正. 熱流補償法を用いた深部温測定についての一考察—深部温測定用プローブつけ替えの試み—. *医科器械学.* 67(6), 279-283, 1997.

Yoshioka, Y. et al. Evaluation of noninvasive measurement of human brain temperature using 1H magnetic resonance spectroscopy at 3T. *J. Iwate. Med. Assoc.* 3(55), 377-384, 2003.

Zenker, W., Kubik, S. Brain cooling in humans – anatomical considerations. *Anat. Embryol.* 193, 1-13, 1996.

## 謝辞

本博士論文を作成するにあたり、懇切丁寧なご指導を賜りました広島大学総合科学研究科 長谷川博教授に深甚なる謝意を表します。また、論文作成に際してご稿閲、ご助言を賜りました広島大学総合科学研究科 船瀬広三教授、林光緒教授、小川景子准教授、共同研究をさせていただいた国立スポーツ科学センターの皆様に心より御礼申し上げます。さらに、本論文の完成に至るまでの日々、常に温かく見守り続けてくれた家族、様々な面からご支援、ご協力いただきました総合科学研究科 身体運動科学研究領域および長谷川研究室の皆様に深く感謝致します。最後に、本博士論文は日本学術振興会特別研究員よりご支援いただきました。この場をお借りして感謝申し上げます。