

博士學位論文
システムエンジニアリング学

疲労回復のための低温化アイススラリーによる
身体内部冷却手法の設計とラグビーでの評価

2023年3月

慶應義塾大学大学院
システムデザイン・マネジメント研究科
森戸 暁久

論文要旨

学籍番号	81952559	氏名	森戸 暁久
主論文題名： 疲労回復のための低温化アイスラリーによる身体内部冷却手法の設計とラグビーでの評価			
(論文要旨) 地球温暖化の進行に伴い世界の平均気温は年々上昇しており、夏季スポーツ競技でのアスリートを取り巻く環境は深刻な状況にある。夏季競技では、身体外部からの暑熱ストレスと運動による身体内部からの熱産生により、深部体温の過度な上昇を招きやすく熱中症の発症リスクが高い。暑熱ストレスに長時間曝露されると身体内部の恒常性が破綻しやすくなるため、熱中症や重度の疲労状態に至る前の適切な対策が必要不可欠となる。しかし、暑熱対策に関する知識不足や競技環境への設備投資の難しさから、十分な対策が取られないまま競技が行われることが多い。そのため、競技現場で簡便かつ効果的に運用可能な身体冷却手法が求められている。従来の身体内部冷却手法には、スポーツドリンク等を利用したアイスラリーが良く用いられているが、その摂取量の多さから競技現場での適用に限界があった。 そこで、本研究では、暑熱環境でスポーツ競技を行うアスリートの身体内部での恒常性維持機構をシステムと捉え、システムズエンジニアリング手法に基づき、有効性、運用性、安全性の観点から摂取温度に着目することで、競技現場で適用可能な低温化アイスラリーによる身体内部冷却手法を設計した。 本手法の評価には、身体への負荷が強く深部体温の上昇が激しいラグビーを対象とし、競技中、競技後、就床時といった3つの暑熱環境で生じる疲労時のシナリオを適用した。1つ目は競技中のハーフタイムでの疲労回復を想定したシナリオであり、2つ目は屋外暑熱環境における競技直後の疲労回復を想定したシナリオである。そして、3つ目は暑熱環境により睡眠の質が低下する就床時の疲労回復を想定したシナリオである。競技中及び競技後の有効性を評価した結果、従来の標準的なアイスラリーの摂取量(7.5 g/kg 体重)と比較して、33%減量しても疲労回復効果を示し、就床時では73%減量しても疲労回復効果を示すことが明らかとなった。 本研究によって、有効性、運用性、安全性の観点から従来よりも効率的に身体内部冷却効果を発揮できる手法を実現することができ、ラグビーをはじめとする厳しい暑熱環境でスポーツ競技に従事するアスリートの疲労からの回復や競技パフォーマンスの向上に大きく寄与できることを示した。			
キーワード： 暑熱環境, 身体内部冷却, 摂取温度, 低温化アイスラリー, 疲労回復, ラグビー			

Summary of Doctoral Dissertation

Student No.	81952559	Name	Akihisa Morito
<p>Title:</p> <p>Design of Internal Body Cooling Method Using Low-Temperature Ice Slurry for Fatigue Recovery and Evaluation in Rugby</p>			
<p>Thesis Summary:</p> <p>With the advancement of global warming, summer heat has become more severe for athletes. Heat stress from the external environment and heat production during exercise can easily lead to excessive increases in body temperature, thereby increasing the risk of heat stroke due to disturbances in body temperature homeostasis. It is important to take appropriate precautions to prevent excessive heat during sports competitions in hot environments. However, owing to the lack of knowledge about heat countermeasures and the difficulty of investing in equipment to improve the competition environment, sports competitions are often conducted without adequate countermeasures. Therefore, there is a need for a new body cooling method from heat-induced fatigue that can be applied in sports competitions. Ice slurry made of sports drinks is often used as a conventional internal body cooling method, but its application to sports competitions is limited due to its large ingestion volume.</p> <p>This research viewed the mechanism of athletes' body homeostasis in hot environments as a system, and based on the systems engineering approach, focused on the ingestion temperature from the viewpoints of effectiveness, operability, and safety, and designed an internal body cooling method using low-temperature ice slurry applicable to sports competitions.</p> <p>The effectiveness of the method was evaluated in the following three fatigue recovery scenarios in hot environments, modeled on a rugby match in which the body temperature rises rapidly owing to a high physical exertion: The first scenario targeted fatigue recovery during the half time of a match. The second scenario was an operational scenario that targeted recovery from fatigue immediately after a match in an outdoor hot environment. The third scenario was an operational scenario that targeted recovery from fatigue through sleep.</p> <p>The evaluation of the effectiveness of low-temperature ice slurry designed in this research as an internal body cooling method for recovery from fatigue showed that it was effective for recovery of exercise and physiological functions. Even with 33 % and 73 % less ingestion of this ice slurry than that of conventional ice slurry, it was effective for recovery from fatigue and sleep, respectively.</p> <p>This research has realized the method that can produce the effect of internal body cooling more efficiently than conventional methods from the viewpoints of effectiveness, operability, and safety, and has shown that it can contribute to recovery from fatigue and improvement of performance of athletes in sports competitions in hot environments such as rugby.</p>			
<p>Key words:</p> <p>Fatigue recovery, Hot environment, Ingestion temperature, Internal body cooling, Low-temperature ice slurry, Rugby</p>			

目次

第1章 序論.....	10
1-1. 研究の背景.....	10
1-2. 研究の目的.....	27
1-3. 本論文の構成.....	28
第2章 身体内部冷却による疲労回復手法の現状と課題.....	31
2-1. アスリートの身体冷却戦略の取り組み.....	31
2-2. 身体内部冷却戦略の現状と課題.....	34
第3章 先行研究.....	37
3-1. 身体冷却による疲労回復手法.....	37
3-2. 身体内部冷却を用いた疲労回復手法.....	40
第4章 疲労回復のための身体内部冷却手法の設計.....	44
4-1. 提供対象の特定.....	44
4-2. コンセプト.....	48
4-3. 運用シナリオ.....	48
4-4. 要求の抽出.....	52
4-5. 身体内部冷却手法の設計.....	53
第5章 ラグビー競技シミュレーションモデルによる評価.....	56
5-1. 目的及び背景.....	56
5-2. 実験概要.....	57
5-2-1. 被験者.....	57
5-2-2. 実験手順.....	57
5-2-3. 統計解析.....	62
5-3. 結果.....	62
5-3-1. 運動パフォーマンスへの影響（最大パワー及び平均パワー）.....	62

5-3-2. 生理機能への影響（鼓膜温，平均皮膚温，熱容量及び心拍）	67
5-4. 考察.....	70
5-5. 本章のまとめ.....	71
第6章 実践的ラグビー競技モデルにおける評価	72
6-1. 目的及び背景.....	72
6-2. 実験概要.....	73
6-2-1. 被験者.....	73
6-2-2. 実験手順.....	73
6-2-3. 測定	76
6-2-4. 統計解析.....	79
6-3. 結果.....	79
6-3-1. 被験者背景.....	79
6-3-2. 鼓膜温，熱容量.....	80
6-3-3. 心拍	82
6-3-4. 自覚的運動強度.....	83
6-3-5. 運動パフォーマンステスト.....	83
6-3-6. 運動量.....	83
6-4. 考察.....	84
6-5. 本章のまとめ.....	86
第7章 ラグビー競技後の夜間睡眠時における評価	87
7-1. 目的及び背景.....	87
7-2. 実験概要.....	89
7-2-1. 被験者.....	89
7-2-2. 実験手順.....	89
7-2-3. フィールドトレーニング強度の測定.....	90
7-2-4. 客観的睡眠評価（睡眠センサー）	92
7-2-5. 主観的睡眠評価（睡眠アンケート）	93

7-2-6. 統計解析.....	96
7-3. 結果.....	96
7-3-1. フィールドトレーニング強度.....	96
7-3-2. 客観的睡眠評価（睡眠センサー）.....	97
7-3-3. 主観的睡眠評価（睡眠アンケート）.....	97
7-4. 考察.....	98
7-5. 本章のまとめ.....	100
第8章 低温化アイススラリーの身体への影響.....	101
8-1. 目的及び背景.....	101
8-2. 実験概要.....	102
8-2-1. 被験者.....	102
8-2-2. 実験手順.....	102
8-2-3. サイトカイン分析.....	105
8-2-4. 統計解析.....	107
8-3. 結果.....	108
8-3-1. 被験者背景.....	108
8-3-2. サイトカイン分析.....	109
8-3-3. 直腸温, 鼓膜温及び温熱感覚.....	112
8-3-4. 間質液中グルコース濃度.....	113
8-3-5. 有害事象.....	113
8-4. 考察.....	113
8-5. 本章のまとめ.....	116
第9章 考察.....	117
9-1. 低温化アイススラリーの意義.....	117
9-2. 競技現場における有用性.....	119
9-3. 睡眠を介した疲労回復手法としての可能性.....	120
9-4. 研究限界.....	121

9-5. 今後の展望.....	121
第10章 結論.....	123
謝辞.....	125
参考文献.....	127
研究業績.....	148

目次

図 1	疲労と運動パフォーマンスの関係性	13
図 2	日本の年平均気温偏差	16
図 3	東京における猛暑日の日数（最高気温 35 °C 以上の日）	16
図 4	東京における熱帯夜の日数（夜間最低気温 25 °C 以上）	17
図 5	東京 2020 オリンピック（競歩， マラソン競技日の気温推移）	19
図 6	深部体温と運動時間の関係性	22
図 7	自律神経系と深部体温の日内変動	23
図 8	本論文の構成	30
図 9	身体冷却手法の例	32
図 10	アイススラリーの運動パフォーマンス向上効果	35
図 11	運動パフォーマンスの低下メカニズム	37
図 12	身体冷却の試合中の適用タイミング	39
図 13	身体内部冷却手法の提供対象	45
図 14	大学ラグビー選手を対象とした暑熱環境に関するアンケート調査	47
図 15	運用シナリオの模式図	51
図 16	身体内部冷却手法の設計	53
図 17	凝固点降下を利用した低温化アイススラリーの設計	54
図 18	アルミパウチに充填したアイススラリー	55
図 19	ラグビー競技シミュレーションモデルの実験風景	59
図 20	ラグビー競技シミュレーションモデルの実験プロトコル	59
図 21	鼓膜温計（CE サーモ）	61
図 22	心拍計（Polar OH1）	61
図 23	皮膚温計（サーモクロン Type-SL）	61
図 24	運動パフォーマンスへの影響（最大パワーの変化）	63
図 25	運動パフォーマンスへの影響（最大パワーの累積値）	64

図 26	運動パフォーマンスへの影響（平均パワーの変化）	65
図 27	運動パフォーマンスへの影響（平均パワーの累積値）	66
図 28	生理機能への影響（鼓膜温）	67
図 29	生理機能への影響（平均皮膚温）	68
図 30	生理機能への影響（心拍）	69
図 31	実践的ラグビー競技モデルの実験プロトコル	75
図 32	Yo-Yo 間欠性回復力テストレベル 1	75
図 33	鼓膜温計（IRT6500）	77
図 34	アクチグラフ（MTN-220）	77
図 35	鼓膜温変化	80
図 36	熱容量の変化	81
図 37	心拍推移	82
図 38	睡眠評価の実験デザイン	90
図 39	睡眠センサー（MTN-220）	92
図 40	客観的睡眠パラメータの解析	93
図 41	起床時睡眠感調査票（MA 版）アンケート用紙	95
図 42	実験プロトコル	104
図 43	同意取得から解析までの流れ	108
図 44	間質液中グルコース濃度	113
図 45	低温化アイススラリーによる疲労回復メカニズム	115

表目次

表 1	東京 2020 オリンピック（札幌で開催された競技）	19
表 2	熱中症発生頻度 競技別（1990 年～2012 年）	25
表 3	身体冷却手法の分類	39
表 4	屋内暑熱環境におけるアイススラリー研究	41
表 5	屋外暑熱環境におけるアイススラリー研究	42
表 6	本手法の運用シナリオ（5W1H）	49
表 7	要求の抽出	52
表 8	低温化アイススラリーの設計	55
表 9	生理機能への影響（熱容量）	68
表 10	自覚的運動強度（主観的疲労）	78
表 11	被験者背景	79
表 12	自覚的運動強度	83
表 13	運動パフォーマンステスト	83
表 14	運動量	84
表 15	自覚的運動強度	91
表 16	起床時睡眠感調査票（MA 版）アンケートの因子構成項目	94
表 17	フィールドトレーニング時の自覚的運動強度及び運動量	96
表 18	睡眠センサーによる客観的睡眠評価	97
表 19	睡眠アンケートによる主観的睡眠評価	98
表 20	温熱感覚アンケート	105
表 21	最終解析対象者の背景	109
表 22	血中サイトカイン分析	110
表 23	唾液中サイトカイン分析	111
表 24	直腸温，鼓膜温及び温熱感覚	112

第1章 序論

本章では、研究の背景と目的を示す。まず1-1節では本研究の背景として、地球温暖化がスポーツ競技環境に与える影響、本研究で取り扱う「疲労」の定義、種類、メカニズム、そして、従来行われてきたアスリートの暑熱対策の概略と疲労との関連性などについて論じる。次に1-2節では、本研究の目的について論じ、1-3節で本論文の構成について説明する。

1-1. 研究の背景

日常生活やレクリエーションにおける活動からスポーツ競技における運動まで、すべての身体活動が体力や健康の維持に欠かせないものとなってきている。身体活動量が多い人や運動を良く行っている人ほど、高血圧、糖尿病、肥満、骨粗鬆症や癌などの罹患率や死亡率が低いこと、また、身体活動や運動が人々のメンタルヘルスや生活の質を向上させることが認められており[1]、このような背景から、スポーツ庁が中心となりスポーツに関する施策の総合的かつ計画的な推進を図るための重要な指針として、第3期スポーツ基本計画を2022年にスタートさせた[2]。行政の後押しもあり、成人の週1回以上のスポーツ実施率は56.4%（2021年）に達しており、さらに第3期スポーツ基本計画では、成人の週1回以上のスポーツ実施率を70%、1年に1回以上スポーツを実施する成人の割合を100%に近づけることを目標に掲げている。このような社会的背景やオリンピックをはじめとする国際的なスポーツイベントの人気の高まりもあり、人々の屋外での活動時間が増加しているが、一方で、熱中症による救急搬送件数も年々増加している[3]。特に、その中でもスポーツ競技に従事するアスリートは過酷な暑熱環境に曝される機会が増加しており、熱中症の発症リスクが高い状況にあるといえる。

世界的な気候変動が地球の気温に影響を与えており、2011年～2020年にかけての10年間の世界の平均気温は、過去141年間の記録で最も高く、気温上昇の長期的傾向が観測されている[4][5]。産業革命以降、人類は石油や石炭などの化石燃料を燃やしてエ

エネルギーを取り出し、経済を成長させてきた。その結果、大気中の CO₂ 濃度は、産業革命前に比べて 40 %も増加した。世界の平均気温は過去 100 年で 0.74 °C 上昇しており、さらに、その速度は加速している。国連環境計画と世界気象機関によって設立された「国連気候変動に関する政府間パネル (IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change)」の第 6 次評価報告書 (2021 年) によると[6]、最も気候環境が悪化したシナリオとなる「化石燃料依存型の発展の下で気候政策を導入しない最大排出量シナリオ」では、2081 年～2100 年の世界の平均気温は最大で 5.7 °C 上昇すると予測されている。また世界の大都市では人口増加の影響により、ヒートアイランド化が進行している[7]。これらの要因に加え、熱波の頻度や強度の増加により[8]、様々なスポーツイベントの開催時期、場所、方法などは今後さらに制限されることが予測される[9]。

上記のように暑熱環境での活動時間の増加に伴い、レクリエーション競技者からトップアスリートに至るまで、特に屋外での運動は身体内部の恒常性を維持するためのシステム (生理機能や代謝機能等の調節) への負荷を増大させ、その結果、不眠、食欲不振、運動機能低下などの症状を引き起こし、「疲労」と呼ばれる状態に陥りやすくなってきている[10]。そのため、人々の健康と生活の質を維持するためにも効果的な疲労からの回復手法の考案が求められている。

疲労に関しては、これまで多くの研究が実施されてきたが、疲労が人のパフォーマンスに与える影響については、意外にも明らかになっていることは少ない。この理由としては、疲労の原因や症状が多岐に渡るため、適切な専門用語が存在せず、様々な医学用語が適用されていることや確立された評価手法が少ないことが挙げられる[11]。

一般に、疲労は大きく肉体的疲労と精神的疲労に分類され[12]、肉体的疲労は、身体作業がトリガーとなって生じる疲労を指しており、疲労を感じる部位に応じて、筋疲労、神経疲労、眼精疲労などと呼ばれることもある。一方、精神的疲労は、心理的なストレスがトリガーとなって生じる疲労全般を指しており、鬱症状、更年期障害などと呼ばれることもある[13]。その症状も疲労感・倦怠感と呼ばれるような不定愁訴、頭痛、だるさ、めまい、ほてり、動悸、睡眠障害、手足の冷え、食欲不振、抑うつなど非常に多岐に渡る。また、過度の肉体的疲労を受けると運動機能など身体の各種機能の低下を招き、その状態が持続すると精神的疲労に発展することもあり、両者が完

全に分離された現象ではなく複雑に絡み合っている点も疲労の解釈を難しくしている [14]. そのため、肉体的疲労、あるいは精神的疲労であれ、アスリートの心身の状態を健全に保ち、高い運動パフォーマンスを発揮するためには疲労を知覚した段階で早期に回復戦略を適用することが重要となる.

アスリートの健康管理や疾病対策を行う上で、疲労を適切に管理することは重要であり、疲労の統一的な定義が求められている. 19 世紀後半に Angelo Mosso (1846-1910 年) が提唱した古典的な概念に基づくと、疲労は、「パフォーマンスの低下と知覚機能の低下の相互作用によって身体的及び認知的機能が制限される障害症状」として定義される [11]. そして、その疲労は、特徴的な定量化された変数や自己申告によって報告される症状によって測定することができる. すなわち、疲労は、「ある作業の結果、作業能力が低下した状態」のことであり、作業能力としては、筋力、走行速度、計算能力、判断力、反応速度などの定量的に扱うことができる変数や自己申告による主観的な指標などが該当する. また、疲労は、労働や運動などの結果、身体内部で生じた変化がトリガーとなって、それ以上の労働や運動などを止めさせようとする防御機構が発動した状態でもあり、身体への過剰な負荷を避けるための人体における安全装置の一つともいえる.

アスリートは日常的なトレーニングや試合において、過酷な肉体的ストレスのみならず、精神的ストレスにも曝されているため、常に肉体的疲労と精神的疲労の両方を受けているが、スポーツ競技中に生じる疲労は、肉体的疲労の割合が大きい. スポーツ競技中の肉体的疲労はアスリート自身による主観的な自己申告と客観的な運動パフォーマンス (最大筋力、走行距離、走行スピード等) や生理学的反応 (心拍、血圧、体温、自律神経活動等) の変化から把握することができ、運動開始前の状態と運動終了後の上記パラメータの差分から求められる (図 1) [15]. アスリートが取るべき疲労からの回復戦略は、疲労の原因、疲労部位、回復期間によっても異なり、競技中の数分間の休憩時間における回復戦略から、次の競技までの数時間～数日間における回復戦略、数週間～数ヶ月にわたる競技シーズンにおける回復戦略まで多岐にわたる. 例えば、ラグビー (15 人制) やサッカーのような競技においては、試合中の前半戦と後半戦の間の 10 分間程度のハーフタイム休憩時間が重要な回復期間となる. 短距離走、

柔道，ラグビー（7人制）のように，1日の間に複数の試合が行われるような競技では，試合後，数時間の休憩時間が重要な回復期間となる．また，野球のように週6日間連続して試合が行われるような競技の場合は，翌日の試合に向けた日々の睡眠時間やオフ日の1日間の休息が重要な回復期間となる．そのため，競技の種類や休憩時間，タイミングに応じた疲労回復手法の設計が重要となる．

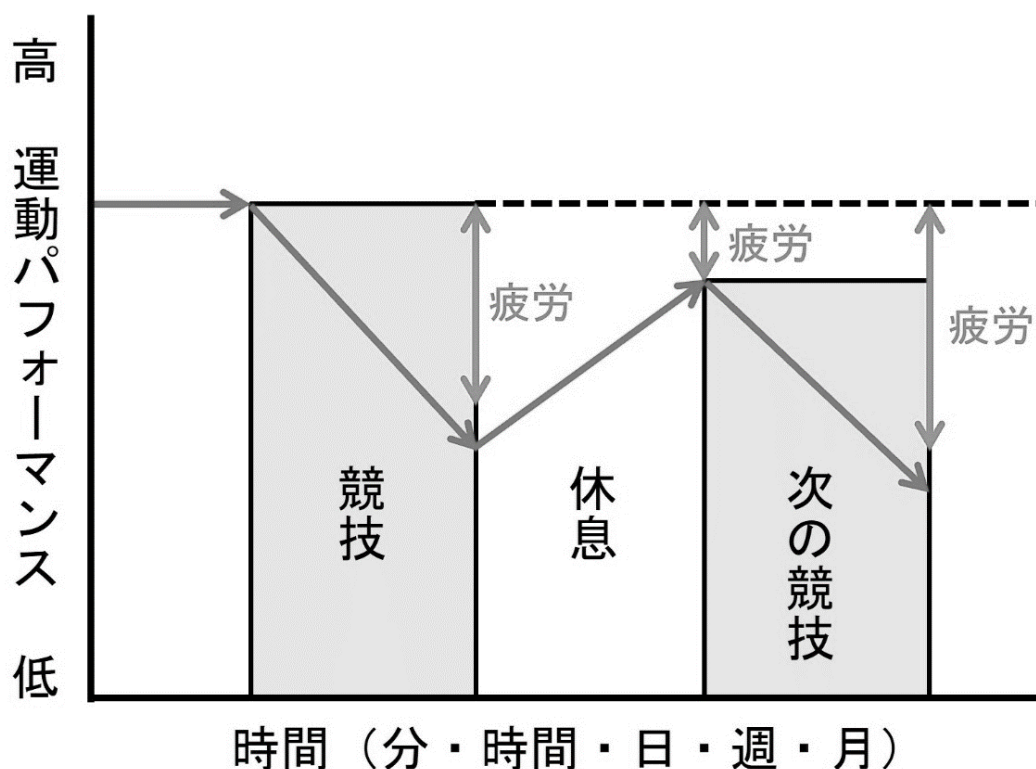


図1 疲労と運動パフォーマンスの関係性

([15]より改変引用)

適切な疲労からの回復戦略を構築する上で，疲労の原因（発症メカニズム）を理解することが重要となるが，疲労の発症メカニズムについては，未だ不明な点が多い．しかしながら，肉体的疲労の中でも筋肉の疲労に関しては，筋組織の損傷や炎症，エネルギー源となるグリコーゲンの低下など，様々な検討がなされている[16]．サッカー

ーやラグビーのような競技を例に挙げると、激しい運動による筋肉への強い負荷は、身体機能に対して様々な障害をもたらす、その障害のレベルによっては数日間から数週間に渡って持続する場合がある[17]。このような疲労状態は、運動誘発性筋損傷（EIMD : Exercise-Induced Muscle Damage）と呼ばれ、筋力低下や痛みを伴い、その後の競技における運動パフォーマンスを著しく低下させる[18]。EIMD の正確なメカニズムは解明されていないが、この反応は二相性であることが知られており、第一相の初期反応は、身体動作による機械的な刺激とそれに伴う代謝変化によって誘発される。まず、過剰な負荷により骨格筋の結合組織が破壊され、損傷細胞への炎症性物質の透過性が高まる[19]。さらに、運動中は筋肉において損傷細胞からの各種酵素の流出や虚血状態が生じるため、筋組織環境が悪化する[20]。また、運動によってエネルギー源となるクレアチンリン酸やグリコーゲンなどが枯渇する上、代謝副産物（アンモニア、乳酸等）の蓄積が進むことで、筋組織中の酸性度が高まり筋組織環境のさらなる悪化を招く。EIMD の第一相反応で生じる筋組織における構造的及び生化学的変化は、炎症反応に特徴付けられる第二相反応を誘発する[21]。この反応は、障害が生じた筋組織の修復と痛みなどによる身体の適応反応に必要な段階でもある。炎症反応の中心は、好中球であり、運動直後に負荷のかかった筋組織に集積し、壊死した筋細胞を除去する[22]。また、好中球は、炎症性サイトカイン（TNF（tumor necrosis factor）- α 、IL（interleukin）-1 β 、IL-6 等）の放出と関連している。これらは、メッセージ機能の役割を果たしており、損傷した筋組織の修復等に関与すると考えられている[23]。一方で、サイトカインによる炎症反応は、ストレス反応に関与するアドレナリン、ノルアドレナリン、コルチゾールなどのホルモンの放出や他の炎症性物質や活性酸素窒素種（RONS: Reactive Oxygen and Nitrogen Species）の放出にも関わっており、筋組織環境や周辺組織の状態を悪化させる[17]。筋組織が損傷を受けると約 48 時間後から、単球とマクロファージの損傷部位への浸潤が増加する。好中球と同様に、マクロファージは RONS や細胞毒性を有する酵素を産生し、筋損傷を悪化させるが、損傷組織に移行したマクロファージは、筋形成の前駆体としても働き、既存の筋線維の修復と新しい筋線維の生成に必要なサテライト細胞の増殖を促進する[24]。さらに、筋組織環境の恒常性を回復するために、マクロファージは、IL-4、IL-10 などの抗炎症性サイトカイ

ンの放出を促す[23]。これらの抗炎症性サイトカインは、炎症性サイトカインの発現を抑制することにより、炎症反応を制御し、恒常性の回復を促進する。上記炎症反応や酸化ストレス反応の進行には、深部体温や損傷部位の組織温度の上昇が大きく関与している。特に暑熱環境における激しい運動は、深部体温の過度な上昇を招きやすく、40℃近くまで到達することがある。高体温状態が持続するとエネルギー代謝や炎症反応をさらに加速させるため、通常の肉体的疲労の対処法に加え、暑熱疲労に対する対処法が必要となる。

以上のように、身体内部の恒常性を維持するための機構は、筋代謝、炎症反応制御、エネルギー代謝、体温制御等から成り立っており、これらを効率良く制御するための手法を設計するためには、システムとして捉えた視点が必要である。

一方、地球温暖化の影響は日本においては特に顕著であり、日本の年平均気温は、1898年以降、100年あたり約1.2℃の割合で上昇している(図2)[25]。また、気温の上昇に伴い、大都市における猛暑日(1日の最高気温が35℃以上の日、図3)[26]や熱帯夜(夜間の最低気温が25℃以上の夜、図4)も増加しており[27]、アスリートは昼間の運動時のみならず、夜間の休息時においても厳しい暑熱環境に曝されている。

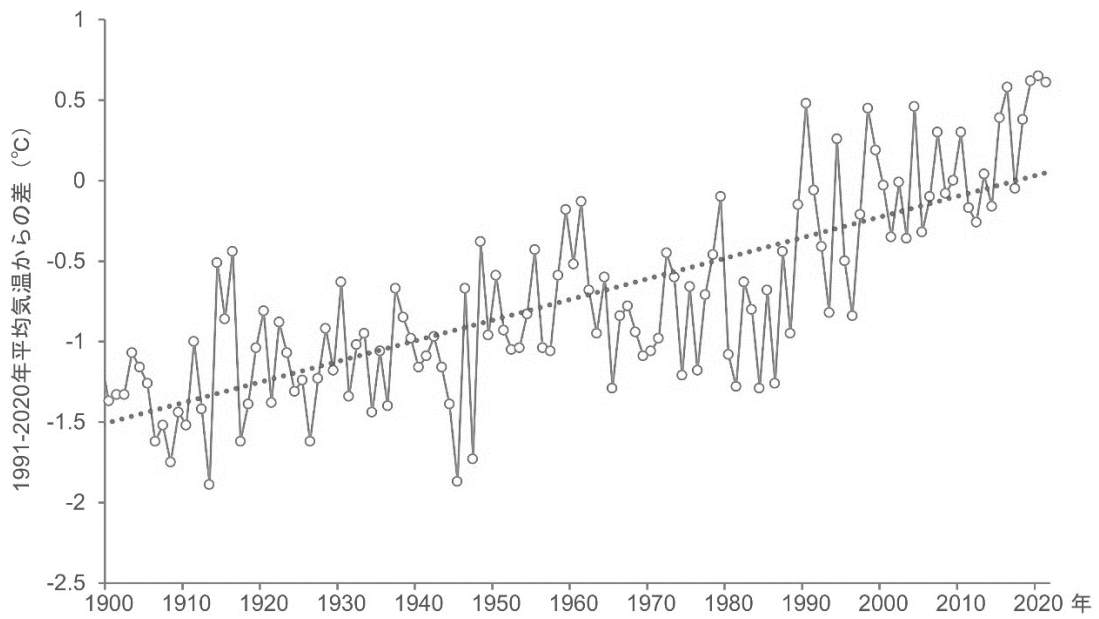


図 2 日本の年平均気温偏差

([25]より改変引用)

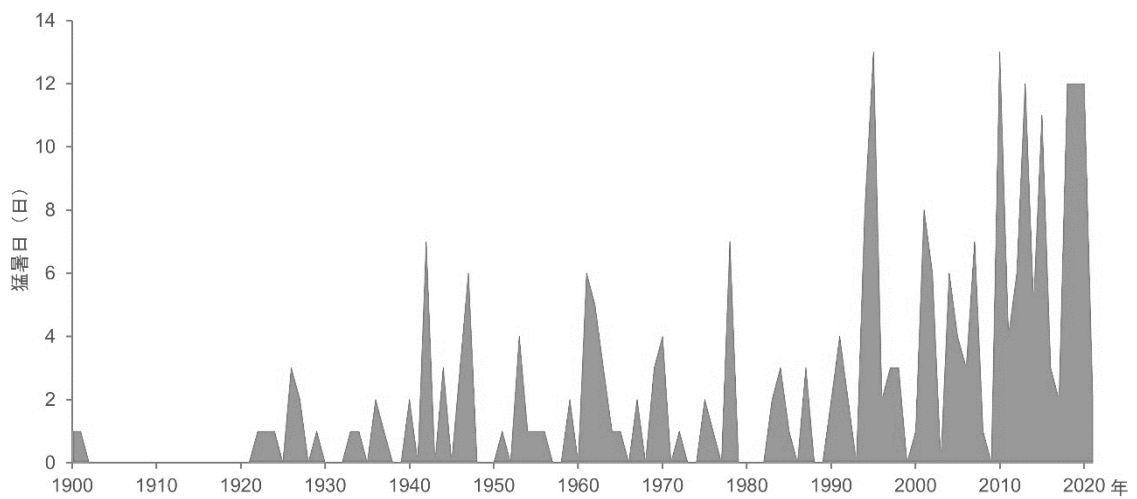


図 3 東京における猛暑日の日数 (最高気温 35 °C以上の日)

([26]より改変引用)

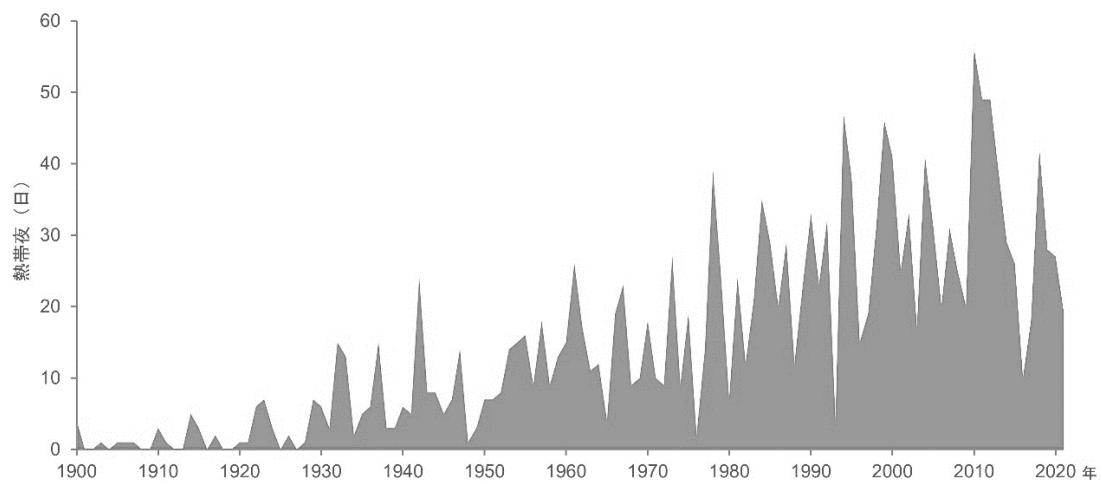


図 4 東京における熱帯夜の日数（夜間最低気温 25℃以上）

（[27]より改変引用）

2021年夏季に開催された東京2020オリンピックにおいては、猛暑の影響により、急遽、マラソンと競歩の競技会場が東京から札幌に移されたが、札幌においても記録的な猛暑に見舞われた。各競技日の気温推移をみると、東京の平均気温（2009-2018年の7月21-31日の平均気温）と比較しても高く推移していることがわかる（図5）[28]。さらに競技開始時刻を早朝あるいは夕方に変更したにも関わらず、男子マラソンにおいては、猛暑の影響が大きく、参加選手106人中30人が棄権する事態へと発展した（表1）[28]。また、競技開始時刻が急遽変更されたため、睡眠時間の調整ができなかったことも選手への負荷が大きくなった要因の一つと考えられている。

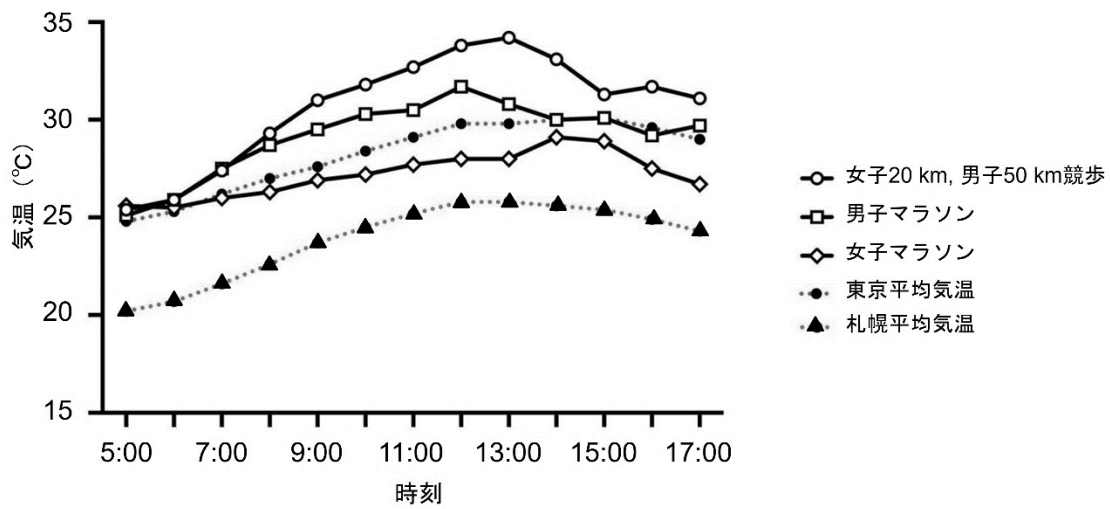


図5 東京2020オリンピック（競歩，マラソン競技日の気温推移）

平均気温：7/21-31（2009-2018），（[28]より改変引用）

表1 東京2020オリンピック（札幌で開催された競技）

競技	開始時刻	完走人数	棄権人数	棄権率
男子20 km 競歩	16:30	52	5	8.8%
女子20 km 競歩	5:30	53	5	8.6%
男子50 km 競歩	16:30	47	12	20.3%
男子マラソン	6:00	76	30	28.3%
女子マラソン	7:00	73	15	17.0%

（[28]より改変引用）

上述したように暑熱環境でのスポーツ競技は、アスリートの疲労状態を加速させることが知られており、多くのアスリートが運動パフォーマンスの著しい低下を経験している。そのため、選手向けの暑熱対策指針として、国際オリンピック委員会より以下の 10 の指針が示されている[29].

暑熱対策指針

1. 少なくとも 2 週間は暑さの中でトレーニングを行い、暑熱順化を行う
2. 2 週間の暑熱順化ができない場合は、少なくとも 1 週間は暑熱順化を行う
3. 大会前の数日間から水分補給計画を実行する
4. ウォームアップ時に予冷を行う（例：アイスベスト）
5. イベント/競技会前の練習で冷却戦略をテストする
6. 汗の蒸発を制限するような衣服は使用しない
7. 多くの薬剤が暑さへの耐性を損なう可能性があるため、かかりつけのスポーツドクターと相談する
8. 下痢や嘔吐は水分補給の状態を悪くするので、経口補水液を使用する
9. 油性でない日焼け止めを使用する
10. 帽子とカテゴリー 3 のサングラスを使用する

暑熱環境での運動は、深部体温の過度な上昇により熱中症を引き起こしやすく、中枢神経系へ大きなダメージを与える[30]。熱中症とは、暑熱環境における身体の適応障害によって生じる状態の総称であり、熱痙攣、熱失神、熱射病などとも呼ばれ[31]、身体における体温制御システムが破綻した状態である[32]。

身体における体温制御システムは、主に、皮膚、内臓、そして延髄に存在する温度センサー、脳の視床下部に存在する体温制御中枢によって制御されている。通常、外部環境の温度に関わらず、深部体温（内臓の温度）は 37 °C 付近に保たれているが、暑熱環境や激しい運動に曝されると、身体における熱産生と熱放散のバランスが崩壊し、過度の体温上昇や脱水により熱中症を発症するリスクが高まる。ヒトの各種臓器が正常に機能できる限界温度は 42 °C 付近と考えられており[33]、この温度を超えてくると、タンパク質の変性が始まり生命の維持が困難になる。そのため、深部体温が 40 °C に近づくと、生体は中枢機能を保護するために、抹消血管を拡張させることで血流を増大させ、体表面からの熱放散を高めると共に、発汗を促すことで、さらに放熱を促進させる。この状況においても、深部温度の低下が認められない場合には、さらに運動機能を制限することで、身体内部で発生する熱産生を抑制し、深部体温の上昇を抑制しようとする。

深部体温の変化と運動時間との関係性を調べた研究によると、運動開始時の深部体温や運動時間に関わらず、深部体温が 40 °C に到達すると運動能力に制限がかかることが報告されている（図 6）[34]。

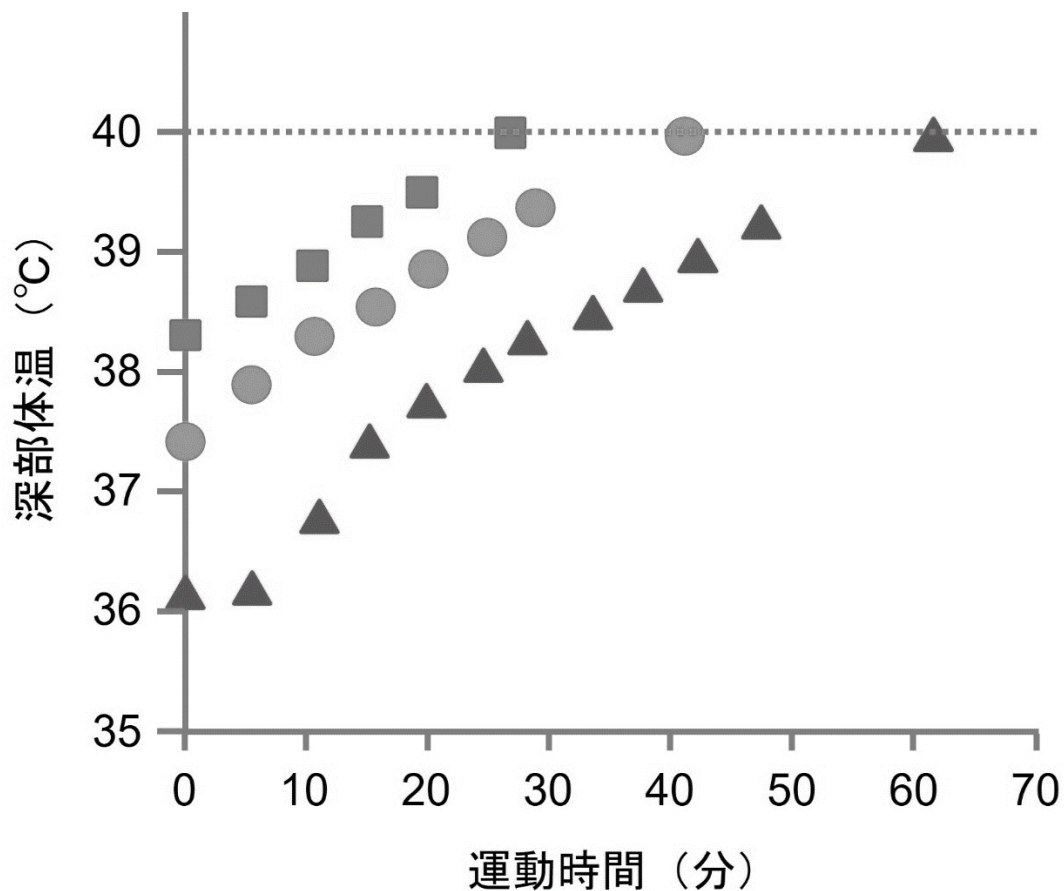


図 6 深部体温と運動時間の関係性

([34]より改変引用)

すなわち、深部体温の過剰な上昇は、熱中症を引き起こすだけでなく、熱中症に至る前段階においても、運動パフォーマンスを著しく低下させるため、スポーツ競技中の暑熱対策による疲労回復戦略はアスリートが高い運動パフォーマンスを発揮する上で重要な戦略の一つとなっている。暑熱環境における運動は、深部体温の上昇をトリガーとして、身体の様々な機能に対して影響を及ぼす。例えば、アスリートにとって重要なエネルギーの供給源となる糖代謝に着目すると、暑熱環境における運動は、糖質の利用や筋肉におけるグリコーゲンの分解を加速させる[35]。そのため、身体に貯蔵されているエネルギー源の枯渇が早まるため、長時間の運動が求められる持久系競

技においては、運動機能が著しく低下する。また、身体活動時の運動機能、生理機能、代謝機能のみならず、疲労回復過程において重要となる睡眠にも影響を及ぼすことが知られている[36]。睡眠は、疲労からの回復過程において、筋肉の修復やグリコーゲンの回復のみならず、自律神経（交感神経、副交感神経）、ホルモン、免疫、精神などの身体の恒常性維持においても重要な役割を果たしている。また、これらの身体の恒常性維持に関わる因子は、サーカディアンリズムの影響を受けており、深部体温も関与している（図7）[37]。例えばヒトが睡眠に入る際は、深部体温が1℃程度、急激に低下するが、暑熱環境でのトレーニングや試合により、過度に深部体温が上昇した状態が就寝時刻まで持続すると、入眠が著しく阻害される。その結果、睡眠の質が低下し、疲労からの回復が阻害されることになる[38]。

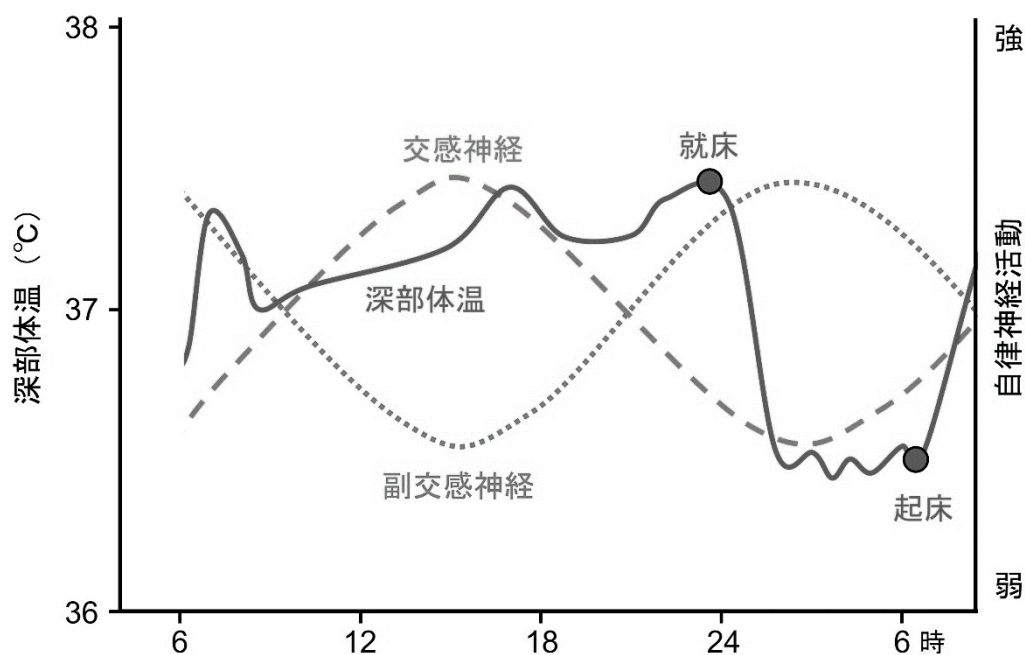


図7 自律神経系と深部体温の日内変動

([37]より改変引用)

さらに、夜間の睡眠の質が低下すると、昼間の活動時間帯における身体の体温制御

システムや認知機能が低下して疲労を引き起こすため、夏季の長期間の暑熱環境でのトレーニングは、負の連鎖を招きやすく、「夏バテ」と呼ばれるような疲労が蓄積した状態が生じやすくする。

上記のような夏季の暑熱環境でのスポーツ競技における疲労回復シナリオとしては、「試合中に高いパフォーマンスを発揮するためにハーフタイムなどの数分間の休憩時間における回復シナリオ」、「次の試合までの数時間の休憩時間における回復シナリオ」、そして「睡眠を介するような日単位、あるいはそれらを組み合わせた競技シーズンを通じた回復シナリオ」などが想定される。しかしながら現在のところ、多くのスポーツ競技における暑熱対策は、熱中症予防を目的とした電解質や水分の補給が主な対策となっているのが現状である。

公益財団法人日本スポーツ協会が示す熱中症予防運動指針では[39]、環境条件の評価には、暑さ指数（WBGT：Wet Bulb Globe Temperature）を用いることが望ましいとされている。WBGTは、熱中症の予防を目的に1954年にアメリカで提案された指標であり、単位は摂氏度（℃）で示され、湿度、日射・輻射などの熱環境の要素を取り入れた指標となっている。WBGT 21℃以下は熱中症のリスクは小さくほぼ安全とされているが、WBGT 21～25℃のときは、熱中症による死亡事故が発生するリスクがあるため、積極的な水分補給が推奨されている。WBGT 25～28℃のときは、熱中症のリスクがさらに上昇するため積極的な休憩が必要であり、激しい運動を行う際は30分おきに休憩を取ることが推奨されている。また、WBGT 28～31℃のときは、熱中症の発症リスクが高く、激しい運動や持久走などの深部体温が上昇しやすい運動は避けることが推奨されており、10～20分ごとの休憩が必要されている。そしてWBGT 31℃以上のときは、運動は原則中止とされている。特に子供の場合は中止すべきとされている。しかしながら大会等の試合においては、競技自体を中止することが難しく、競技の時間帯を早朝や夕方にシフトさせるなどの対応が取られることもあるが、実際の競技現場においては、大部分のアスリートは過酷な暑熱環境で競技を行っているのが現状である。

例えば、中学校・高等学校における運動部活動では、少なくとも毎年約3,000件の熱中症事案が確認されている。独立行政法人日本スポーツ振興センターが2014年に公表した「体育活動における熱中症予防 調査研究報告書」[40]によると1990年～2012年の間に中学校・高等学校の運動部活動中に発生した熱中症の競技人口別（対100万人）の発生頻度は、トップがラグビーの61.3人で、続いて陸上競技58.3人、野球55.9人、サッカー47.4人と屋外の炎天下で行われる競技に多い傾向が認められた（表2）。特に身体負荷が高いフルコンタクトスポーツに分類されるラグビーにおいては、アイスバスなどによる身体冷却手法が積極的に取り入れられているにも関わらず、熱中症の発症リスクが非常に高い。実際に Fenemor et al.[41]は、ラグビー試合後の選手の深部体温は39℃を超えていることを報告している。

表 2 熱中症発生頻度 競技別（1990年～2012年）

競技	発生頻度（対100万人）
ラグビー	61.3人
陸上競技	58.3人
野球	55.9人
サッカー	47.4人
ハンドボール	36.6人
バスケット	26.7人
剣道	26.5人
柔道	18.3人

（[40]より改変引用）

そのような状況において、近年、より積極的な暑熱対策手法として、身体を直接冷却することによる暑熱対策手法が注目されている。身体冷却手法は、大きく分類すると身体外部からの冷却と身体内部からの冷却の2つ分類される。外部冷却手法として

は、アイスバスやアイスベスト、クライオセラピー（全身冷却療法）などがあり、比較的大型の設備が必要になることや冷却媒体の準備に時間を要するため、競技前や競技後に十分な時間を確保できる競技に適している。一方、内部冷却手法としては、冷水やスポーツドリンク、アイススラリーの摂取が知られているが、特に近年、深部体温の冷却効果が高いアイススラリーの摂取が注目されている[42]。アイススラリーとは、液体に微細な氷の粒が混ざったシャーベット状の流動性のある氷点下の飲料のことであり、口から摂取することで直接的に内臓を冷却できる上、水の比熱（4.2 J/g）と比較して、氷の融解熱（333.6 J/g）がはるかに大きいため冷水を摂取するよりも高い冷却効果を得ることができる。また、アイススラリーは、水分や電解質に加え、炭水化物やタンパク質などの疲労回復成分も同時に摂取することができるため、身体冷却、脱水対策、そして疲労回復を同時に対処することも可能となる。従来アイススラリーは、その冷却効果の高さから、工業用プラントの冷却媒体や鮮魚の輸送などに利用されてきたが、Siegel et al. [43]がアスリートに摂取させ、深部体温を低下させることで、運動パフォーマンスが向上することを示した報告以降、新たな熱中症対策として、急速にスポーツ領域での検討が拡大している。しかしながら、アイススラリーを用いた身体内部冷却手法においても、現状は、熱中症予防として、運動前に摂取させることで身体の熱耐性（熱容量）を上げることを目的に使用されており、疲労回復手法としては十分に活用されていない。以上のように、暑熱環境でのスポーツ競技によって生じる疲労に対しては、暑熱環境特有の疲労回復手法が求められているが、有効な手法が確立されていないのが現状であり、いわゆる脱水対策や身体冷却による熱中症予防が主な施策となっている。

1-2. 研究の目的

本研究の目的は、過酷な暑熱環境でスポーツ競技を行うアスリートの身体内部における恒常性維持機構をシステムと捉え、システムズエンジニアリング手法に基づき、有効性、運用性、安全性の観点から実際の競技現場で運用可能な疲労回復のための身体内部冷却手法として設計・評価することである。前述したように、過剰な熱エネルギーの増加は、身体内部の恒常性維持システムに過剰な負荷を与え、身体内部温度（深部体温）が 40 °C 以上に達すると破綻をきたす。この過剰な深部体温の上昇を制御する手法としては、身体外部からの冷却手法と身体内部からの冷却手法が存在しているが、両手法ともに実際の競技現場においては多くの課題を抱えており、そのまま運用可能なスポーツ競技は極めて限定的である。

近年、この深部体温を制御するための簡便な手法として、身体内部冷却手法の一つであるアイスラリーの摂取が注目されている。アイスラリーは、身体内部から直接的に熱を貯蔵する臓器を冷却することができる上、外部冷却手法のように大型の設備も不要であることから、汎用性が高く、コストメリットも高い。しかしながら、先行研究においては、深部体温を冷却するために体重 1 kg 当たり 7.5 g 以上という大量摂取が標準的な運用手法となっており [43]、この量を競技中の短い休憩時間（疲労回復時間）に一度に摂取することは困難である。

そこで、本研究では、従来のアイスラリーにおける課題をシステムズエンジニアリング手法に基づき、有効性、運用性、安全性の観点から解決することで、従来のものよりも冷却効果が高く、実際の競技現場で運用可能な「低温化アイスラリー」を用いた身体内部冷却手法を設計・評価することを目的とする。なお本研究では、炎天下の暑熱環境で高い身体負荷が求められ、熱中症の発症リスクの高いフルコンタクトスポーツの代表的な競技であるラグビー競技を対象として、競技現場での実践的な応用を目指し、暑熱環境における 3 つの疲労回復シナリオにおいて、その有効性を評価する。

1-3. 本論文の構成

本論文の構成について説明する（図 8）。

第 1 章の序論では，本研究の背景として，気候変動による地球温暖化がスポーツ競技環境に与える影響などの社会的背景やスポーツ競技における「疲労」と「暑熱環境」の関連性について論じた上で，本研究の目的を明らかにする。

第 2 章では，身体内部冷却による疲労回復手法の現状と課題として，アスリートの身体冷却戦略の取り組み状況と身体内部冷却戦略の現状と課題を特定する。

第 3 章では，身体冷却に関する先行研究を調査し，冷却手法，冷却部位，冷却効果，競技現場での適用性，疲労回復効果について一覧にまとめると共に，それらを競技中に運用する際の適用タイミングについて述べる。さらに，屋内あるいは屋外暑熱環境で実施されてきたアイススラリーを用いた身体内部冷却手法に関連する研究を抽出する。

第 4 章では，本手法の提供対象を特定した上で，実際の競技現場において発生している暑熱対策の課題に関するアンケート調査結果や先行研究より，コンセプトと想定する運用シナリオを 5W1H にまとめ，その詳細について述べる。また，アンケート調査結果や先行研究の内容を踏まえて要求を抽出し，低温化アイススラリーによる身体内部冷却手法の設計方針について述べる。

第 5 章では，新たな身体内部冷却手法として，設計した低温化アイススラリーの試合中のハーフタイムにおける疲労回復を想定した運用シナリオにて評価した結果について述べ，低温化アイススラリーの意義の明確化を図る。

第 6 章では，実践的な運用シナリオとして，フィールドでのラグビー競技における試合後の疲労回復を想定した運用シナリオにて，低温化アイススラリーを評価した結果について述べ，競技現場での疲労回復手法としての有用性の明確化を図る。

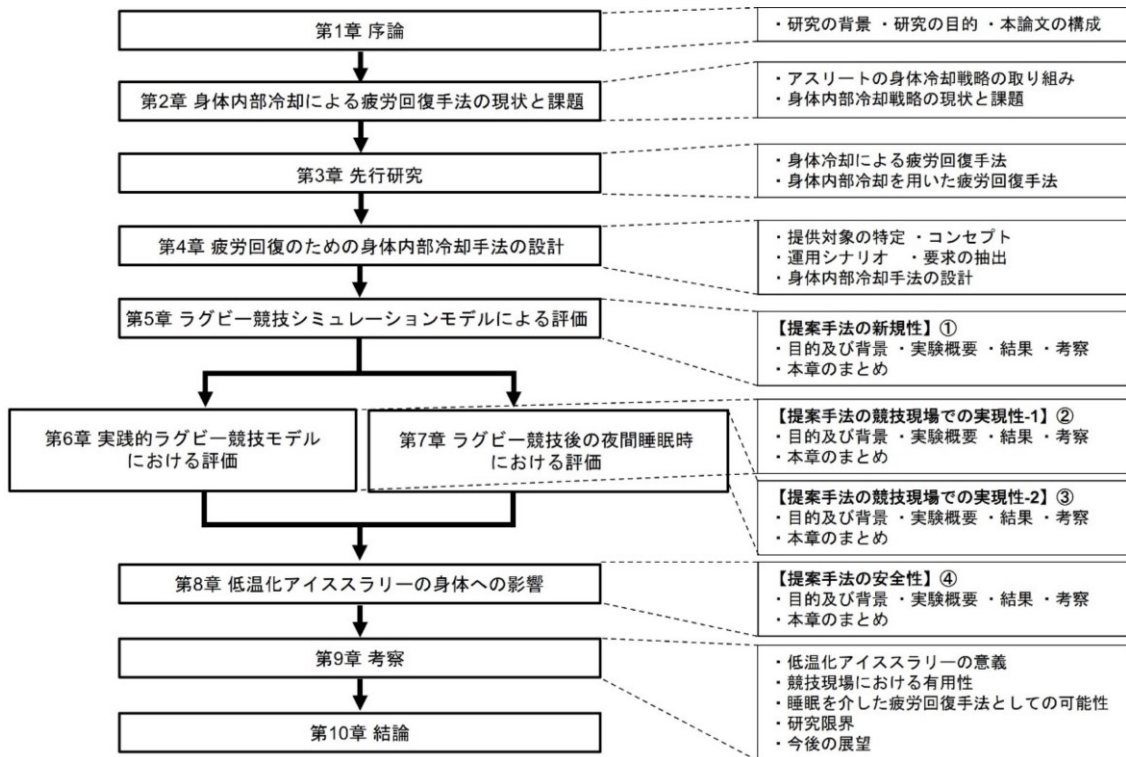
第 7 章では，身体内部冷却手法を用いた疲労回復手法として，睡眠による翌日の疲労回復を想定した運用シナリオにて評価した結果について述べ，低温化アイススラリーの新たな運用手法としての有用性を明らかにする。

第 8 章では，設計した身体内部冷却手法の摂取温度の許容範囲や暑熱環境における身体への影響（生理機能，代謝機能）について検討した結果を述べ，低温化アイスス

ラリーの有効性及び有害事象の有無について明らかにする。

第 9 章では、低温化アイスラリーの意義、競技現場における有用性、睡眠を介した疲労回復手法としての可能性、研究限界、今後の展望について、総合的に考察する。

第 10 章では、本論文の結論を述べる。



- ① **Morito A**, Inami K, Hirata A, Yamada S, Shimomasuda M, Haramoto M, Kato K, Tahara S, Oguma Y, Ishida H, Kohtake N. Ice slurry ingestion improves physical performance during high-intensity intermittent exercise in a hot environment. PLOS ONE, 2022, 17(9), e0274584.
- ② **Morito A**, Inami T, Hirata A, Yamada S, Shimomasuda M, Kato K, Tahara S, Kohtake N. Effect of Ice Slurry Ingestion on Post-Exercise Physiological Responses in Rugby Union Players. Physiologia 2022, 2(4), 154-163.
- ③ **Morito A**, Inami T, Hirata A, Yamada S, Shimomasuda M, Kato K, Tahara S, Kohtake N. Effect of Ingestion of Ice Slurry on the Sleep Quality of Rugby Union Players in the Summer Season. Physiologia, 2022, 2(3), 46–54.
- ④ **森戸暁久**, 山田啓史, 下益田正嗣, 原本真紀, 永井恒, 高岡彰子, 内藤貴司, 斎藤辰哉, 中村真理子, 神武直彦. 健常成人男性を対象とした血中及び唾液中の熱中症バイオマーカーの探索研究—非盲検クロスオーバー試験—, 薬理と治療, 2022, 50(6), 1041-1048.

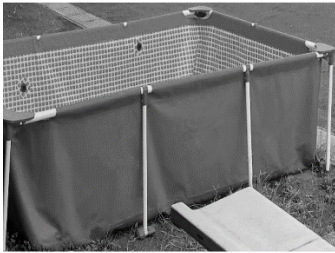
図 8 本論文の構成

第2章 身体内部冷却による疲労回復手法の現状と課題

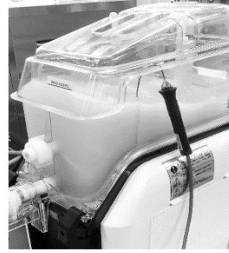
本章では、暑熱環境でのスポーツ競技において、身体内部冷却手法を疲労回復手法として運用する上での現状と課題について論じる。まず、2-1節では、アスリートの競技現場での身体冷却戦略の取り組み状況について述べる。次に、2-2節では、身体内部冷却による疲労回復手法を競技現場に導入する上での課題について論じる。

2-1. アスリートの身体冷却戦略の取り組み

地球温暖化の進行に伴い、暑熱環境の厳しさが増す中、アスリートの熱中症対策の重要性が注目されるようになってきている。従来の水分やミネラル補給といった脱水対策や競技時間の変更による回避行動に加え、身体を直接冷却することによる積極的な暑熱対策が求められるようになってきている。アスリートの暑熱対策は大きく分類すると、身体外部からの冷却手法と身体内部からの冷却手法に分けられる（図9）[44][45]。外部冷却手法は、クライオセラピー、アイスバス（冷水浴）、送風機などによる全身冷却[46][47][48]のみならず、冷水、ネッククーラー、アイスベスト、氷嚢・アイスパックなどによる頭部[49]、首[50][51]、胴体[52]、大腿部[53]、手掌[54]などの特定の身体部位に適用する手法が検討されている。その中でも、クライオセラピーやアイスバスを用いた冷水への浸漬による全身冷却やアイスベストを用いた胴体冷却が、身体冷却効果が高く、競技現場にも取り入れられ始めている[55][56]。しかしながら、これらの外部冷却手法は、専用の設備が必要となる上、冷却媒体の準備に時間を要するため、実際のスポーツ競技中に取り入れることができる競技は非常に限定的である。そのため、現時点では主に運動前のプレクーリングや運動後の暑熱疲労からの回復手法として利用されることが多い。



冷水浴
(外部冷却の例)



アイスラリー
(内部冷却の例)

図9 身体冷却手法の例

外部冷却

クライオセラピー：全身

−120℃から−196℃に冷却した超低温カプセル内で、全身を冷却することで、損傷部位の炎症熱を低下させ、自然治癒力を高めることができる。また、酷使された筋肉の疲労回復や深部体温の低下が期待できる。

冷水浴・アイスバス：全身

冷水や氷水に全身を浸すことで、深部体温や損傷部位の炎症熱の低下が期待できる。

アイスベスト：胴体

保冷剤の収納ポケットが付いたベストであり、皮膚表面温を低下させることができ、冷感覚を得ることができるが、深部体温の低下効果は低い。

ネッククーラー：頸部

首に冷却ベルトを巻き付けることで、頸動脈の冷却が期待できるが、深部体温の低下効果は低い。

氷嚢・アイスパック：腋下等

局所の冷却に適しており、損傷部位の炎症熱の低下が期待できるが、深部体温の低下効果は低い。

内部冷却

アイスラリー：内臓

シャーベット状の氷点下（約−1℃）の飲料で、摂取することにより、深部体温を効率良く低下させることができる。主にスポーツドリンクを用いて製造されており、糖質や電解質の補給を同時に行うことができる。

外部冷却手法を用いた運動前のプレクーリングは、30分から60分程度の比較的長時間の運動において、効果的なことが示唆されている[57]。冷水浸漬による全身冷却は、深部体温を低下させることで、熱耐性（熱容量）の上昇を介して疲労困憊に至るまでの時間を延長し、運動パフォーマンスを改善することが報告されている[58]。一方、アイスベストの着用は、深部体温を十分に低下できないため、運動パフォーマンスを改善しないとの報告もあり[59]、適用可能な競技形態自体が未だ明らかとなっていない。また、全身冷却や胴体冷却による外部冷却手法は、深部体温のみならず、筋温も低下させてしまうことが知られており[53][60]、瞬発力が求められるような競技においては、冷却することで却って運動パフォーマンスを低下させてしまうこともあり、適用可能な競技や冷却タイミングについて、詳細な検討が求められている。

一方、内部冷却手法は、冷たい飲料などを摂取することで、身体内部から直接的に内臓や循環血液を介して冷却する手法であり、外部冷却手法と異なり、筋温を低下させるべく深部体温を効率的に冷却できるというメリットがある[43]。内部冷却手法としては、前述のように、冷水やアイススラリー（氷点下のシャーベット状の飲料）の摂取が挙げられるが、特に深部体温の冷却効果が高いアイススラリーの摂取が注目されている。内部冷却手法のメリットとしては、効率的に深部体温を冷却することができることや疲労回復に必要な水分やミネラル、栄養成分を同時に摂取することが可能な点が挙げられる。暑熱環境下でのスポーツ競技において、脱水対策は極めて重要であり、深部体温の上昇と発汗（放熱）による脱水は密接な関係にある。脱水率が体重に対して1%上昇するごとに深部体温が0.3℃上昇し、心拍数が約10拍/分増加する。そして、脱水率が体重の2%に達すると有酸素運動のパフォーマンスが低下し、3%に達すると無酸素運動のパフォーマンスが低下する。さらに脱水率が体重の4%を超えてくると疲労感や頭痛、めまいなどの症状が発現する。発汗によって失われた水分と電解質を補給するためには、スポーツドリンクや経口補水液の摂取が有効となる。摂取する糖質量は、3~8 g/100 mL、ナトリウム（電解質）量は、40~80 mg/100 mLがそれぞれ適切な濃度と云われており、アイススラリーは、スポーツドリンクをベースにスラリーマシンやミキサーを用いて製造されることが多い。そのため、一般的なアイススラリーの温度は、スポーツドリンク中の溶質濃度による凝固点降下度に従い、

約 -1°C 付近になることが多い。

アスリートがスポーツ競技中に取れる脱水対策，冷却戦略，疲労回復時間は極めて限られているため，外部冷却手法のような大型設備が不要で，短時間で効率的な運用が可能な内部冷却手法は，アスリート，コーチ，トレーナーなどから高い関心を集めている。

2-2. 身体内部冷却戦略の現状と課題

効率的な身体内部冷却手法として注目されるアイススラリーに関する研究は，2010年の Siegel et al. の研究[43]よりスタートしているが，その歴史は浅く研究報告数はまだ少ない。Siegel et al. は， -1°C に冷却したアイススラリーと 4°C の冷水を10名の被験者に運動開始前に 7.5 g/kg 体重の用量で摂取させ，暑熱環境下でランニングさせたときの走行限界に達するまでの時間を測定した。その結果，アイススラリーを摂取させることで深部体温が約 0.7°C 低下し， 4°C の冷水を摂取した条件と比較して疲労困憊に至るまでの走行時間が約10分間延長したことを報告している（図10）。この運動パフォーマンスの向上効果は，アイススラリーを摂取することによる内臓温度の低下とそれに伴う身体の熱容量の増加，そして，循環血を介した脳温の低下の結果，体温制御システムが臨界温度に達するまでの時間を延長したことによるものと考えられている。すなわち，暑熱環境下でのスポーツ競技においては，深部体温を冷却することで，脳温を 40°C 未満に抑え，体温制御システムのオーバーヒートを防ぐことが重要となる。

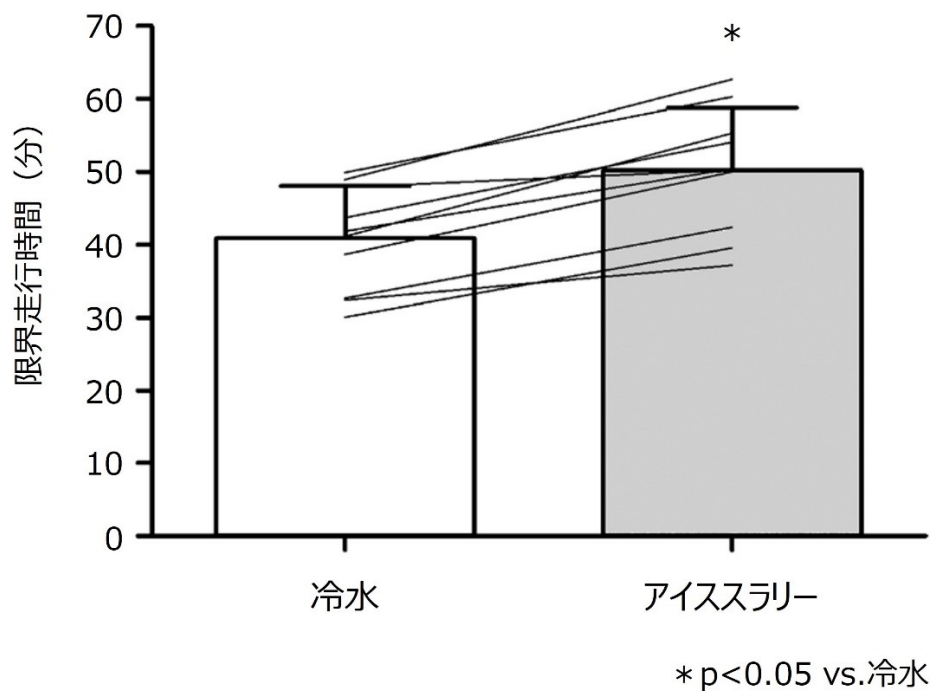


図 10 アイススラリーの運動パフォーマンス向上効果

([43]より改変引用)

一方で、身体冷却効果の高いアイススラリーにも運用上の課題が存在する。上記のように、Siegel et al. の研究でスタートしたアイススラリーのスポーツ競技における運用では、高い冷却効果を得るために大量の摂取が必要なが挙げられる[43]。運動の強度や競技環境によっても要求される摂取量は異なってくるが、先行研究においては、十分な冷却効果を得るためには、7.5~22.5 g/kg 体重もの摂取が必要であり[43][61]、この量は体重 80 kg のアスリートに換算すると 600 g~1,800 g もの摂取量になる。アイススラリーによる内部冷却手法は、融解熱を利用することで深部体温を効率良く冷却することが可能だが、実際の競技現場に適用させるためには、摂取量の多さに関する課題を解決することが必要不可欠である。そのため、アイススラリーの競技現場での運用を目指し、アイススラリーによる内部冷却手法とアイスベストによる外部冷却手法を組み合わせることで、アイススラリーの摂取量を減量させる試みも実践されている[62]。また、アスリートを対象とした研究ではないが、Tabuchi et al. [63]の消防士を

対象とした研究では、 $-1.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ のアイススラリーを摂取させると、これまで主流となっている 7.5 g/kg 体重の摂取用量よりも少ない 5 g/kg 体重の摂取量でも深部体温を冷却できる可能性を示唆している。しかし、この少ない摂取量において、暑熱環境でのスポーツ競技時における疲労回復効果や運動パフォーマンスに関する効果は検証されていない。

以上のように、アスリートの暑熱環境下での疲労回復手法に関しては、未だ確立された手法が存在しないのが現状である。そこで、本研究では、より効果的な身体冷却効果を得るためにアイススラリーの摂取温度に着目し、有効性、運用性、安全性の観点から、競技現場において適用可能な暑熱疲労からの回復のための身体内部冷却手法の設計を目指す。

第3章 先行研究

本章では、身体冷却を用いた疲労回復手法に関連する先行研究についてまとめ、その特徴を明らかにする。まず、3-1節では、身体冷却による疲労回復のための手法の設計や評価に関連する研究について論じる。次に3-2節では、屋内あるいは屋外暑熱環境下における身体内部冷却手法を用いた疲労関連研究について論じる。

3-1. 身体冷却による疲労回復手法

暑熱環境における疲労回復を目指す上で、競技環境に応じた適切な身体冷却手法の選択が重要となる。深部体温の過度な上昇により誘発される疲労は、生理機能、代謝機能、運動機能などの全身の機能に対して影響を及ぼすと共に、炎症反応を誘発することで全身性の疲労を引き起こし、運動パフォーマンスを低下させる（図11）。そのため、深部体温の過度な上昇を防ぎ、炎症反応の連鎖が生じる前の速やかな対策が求められている。

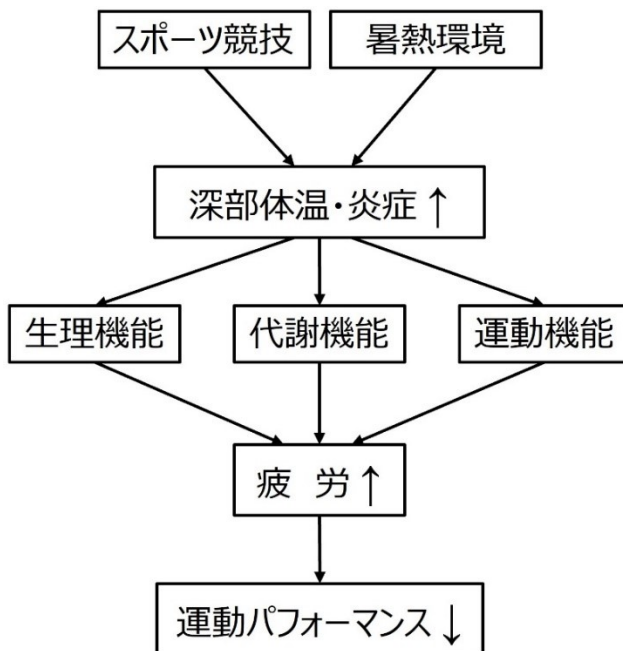


図11 運動パフォーマンスの低下メカニズム

身体冷却戦略に関しては、複数のシステマティックレビューが存在しており[48][57][59]、種々の外部冷却手法や内部冷却手法による身体冷却効果が検証されている。それらの情報をもとに、冷却手法、冷却部位、冷却効果、競技現場での適用性、疲労回復効果を表 3 にまとめた。先行研究において、暑熱環境における身体疲労感は、作業効率、心拍数、深部体温と正の相関を示すことが報告されている[64]。身体（深部体温）冷却効果や疲労回復効果については、外部冷却手法ではクライオセラピー、アイスバスが、内部冷却手法ではアイススラリーの効果が高い。特にアイスバスについては全身を氷水に浸すため、冷却効果が非常に高いが競技現場に設置可能な広いスペースを必要とする。また、全身が濡れるためユニフォームの着替えが必要となることや筋温の低下が生じるため、競技前や競技中の休憩時での運用は非常に限定的となる。一方、内部冷却手法であるアイススラリーの摂取は、深部体温の冷却と水分補給を同時に実現できるため、様々な競技シーンにて運用可能である。しかしながら、十分な冷却効果を得るためには、多量の摂取が必要となる上、屋外で運用する際には、保冷ボックスや冷凍設備による摂取温度の管理が重要となる。さらに表 3 に示した冷却手法を運用する競技中のタイミングについてまとめ、そのイメージを図 12 に示した。競技に応じて運用する冷却手法やタイミングは異なるが、ウォームアップによる体温上昇、スポーツ競技前半戦における体温上昇、後半戦における体温上昇において深部体温を 40 °C 以下に抑えることが重要となる[65]。

表 3 身体冷却手法の分類

	冷却手法	冷却部位	冷却効果 (深部体温)	競技現場での適用			暑熱環境での 疲労回復効果
				運動前	休憩時	運動後	
外部冷却	クライオセラピー	全身	◎	△	△	◎	◎
	アイスバス	全身	◎	△	△	◎	◎
	アイスベスト	胴体	○	○	○	○	○
	送風	全身	△	○	○	○	△
	局所冷却	頭部, 頸部, 前腕部等	△	○	○	○	△
	アイスパック	局所	△	△	○	○	△
内部冷却	水分補給	内臓	○	○	○	○	○
	アイスラリー	内臓	◎	◎	○	◎	◎

◎：有効，○：制限があるが有効，△：無効もしくは弱い

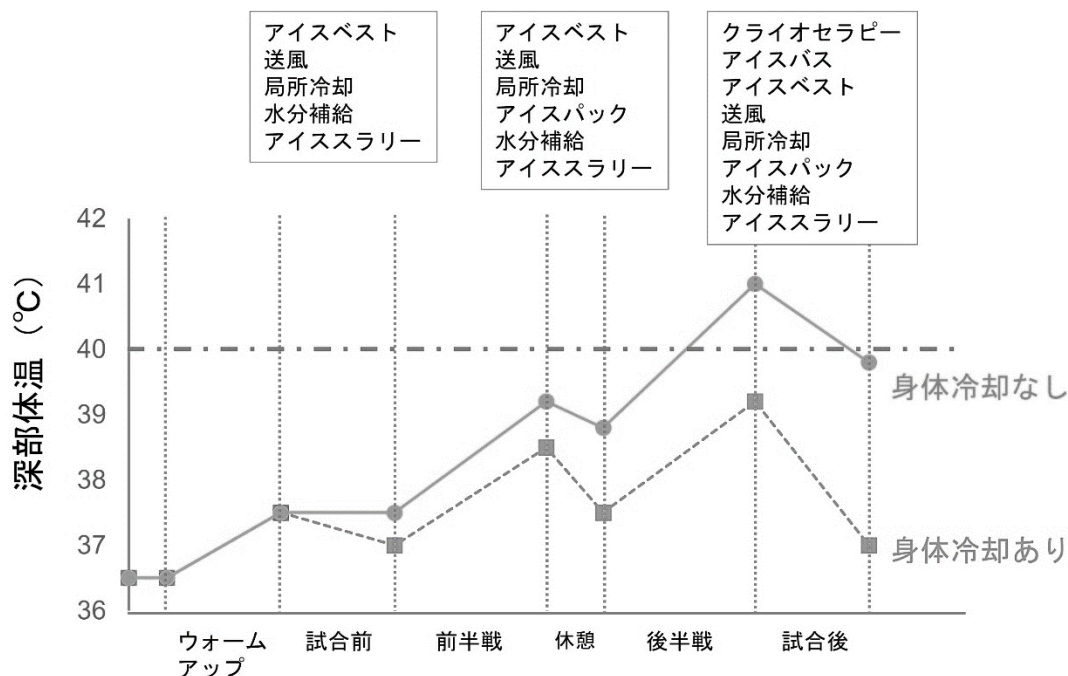


図 12 身体冷却の試合中の適用タイミング

([65]より改変引用)

3-2. 身体内部冷却を用いた疲労回復手法

暑熱環境における身体内部冷却手法の先行研究としては、水分補給（水、スポーツドリンク、経口補水液）やアイススラリーに関する研究が存在するが、水分補給に関しては多くが脱水対策を主目的としており、内部冷却効果に関する研究はアイススラリーに関する研究が多い。アイススラリー研究に関しては、Siegel et al[43][58]の研究以降、アスリートを対象とした研究が盛んに行われているが、未だ実際の競技現場での運用報告は少なく、そのほとんどが実験環境をコントロールしやすい屋内暑熱環境で実施されたものである。そこで、まず屋内暑熱環境で実施されたアイススラリーの単独摂取により深部体温の低下効果が明示されている研究を抽出した（表 4）。先行研究においては、気温 30 °C~35 °C、湿度 30 %~75 %の範囲に設定された実験室において、1.4 °C~-1.7 °Cのアイススラリーを 4~7.5 g/kg 体重の量を摂取させていた。深部体温の冷却に影響を及ぼす要因の一つである摂取温度に着目すると、1.4 °Cの研究が 1 件[66]、0.5 °Cの研究が 3 件[67][68][69]、-0.7 °Cの研究が 1 件[47]、-1 °Cの研究が 4 件[43][58][70][71]、-1.7 °Cの研究が 1 件[63]あった。また、多くの研究が運動前に 7.5 g/kg 体重を摂取させたプレクーリングによる実験であった。アイススラリー摂取による深部体温の低下幅は、0.3~1.1 °Cの範囲であり、運動前の摂取と比較して、運動後の深部体温が上昇した状態での摂取の方が深部体温の冷却効果は高い値を示していた。一方、コントロールの摂取温度は、4~37 °C（常温）となっていたが、深部体温の低下幅に明確な差は認められなかった。摂取温度、摂取量、深部体温の変化と運動パフォーマンスとの関係性を明らかにした研究は未だ見当たらず、アイススラリーの競技現場での運用を目指すためには、さらなる検討が必要である。

表 4 屋内暑熱環境におけるアイススラリー研究

研究	運動	環境	摂取温度	摂取量 (g/kg体重)	タイミング	体温低下	パフォーマンス (対コントロール)
Naito et al., 2016	—	35 °C, 30 %	0.5 °C 4 °C	7.5	安静時	0.4 °C 0.1 °C	—
Naito et al., 2017	エルゴメーター	35 °C, 30 %	0.5 °C 4 °C	7.5	運動前	0.4 °C 0.1 °C	限界走行時間 19.8 %↑
Choo et al., 2019	エルゴメーター	33.2 °C, 45.9 %	-0.7 °C 非摂取	7.5	運動前	0.3 °C 変化なし	平均パワー 変化なし
Siegel et al., 2010	トレッドミル	34 °C, 54.9 %	-1 °C 4 °C	7.5	運動前	0.7 °C 0.3 °C	限界走行時間 19 %↑
Siegel et al., 2012	トレッドミル	34 °C, 52 %	-1 °C 37 °C	7.5	運動前	0.4 °C 0.1 °C	限界走行時間 13 %↑
Onitsuka et al., 2015	エルゴメーター	30 °C, 57 %	-1 °C 4 °C	7.5	ハーフタイム	0.4 °C 0.2 °C	最大パワー 変化なし
Deshayes et al., 2019	トレッドミル エルゴメーター	30.8-31.7 °C 33.1-33.5 %	-1 °C 常温	7.5	運動後	1.1 °C 0.9 °C	心拍 変化なし
Ihsan et al., 2010	エルゴメーター	30 °C, 75 %	1.4 °C 26.8 °C	6.8	運動前	0.5 °C 0.2 °C	タイムトライアル 6.5 %↑ 平均パワー 6.9 %↑
Tabuchi et al., 2021	エルゴメーター	35 °C, 50 %	-1.7 °C 25 °C	5	運動前	0.3 °C 0.1 °C	心拍 上昇
Nakamura et al., 2021	トレッドミル	35 °C, 60 %	0.5 °C 28 °C	4	運動後	1.1 °C 0.5 °C	心拍 変化なし

上段：アイススラリー，下段：コントロール

次に，実際の競技現場で運用可能な身体内部冷却手法の設計に向けて，屋外暑熱環境で実施されたアイススラリー研究を調査した。

アイススラリーを用いて屋外暑熱環境で実施した研究としては，Yeo et al. [72]のランニングを対象とした研究，Trong et al. [73]のサイクリングとランニングの組み合わせを対象とした研究，そしてNaito et al. [62]のテニスを対象とした研究の3つが抽出された（表 5）。

表 5 屋外暑熱環境におけるアイススラリー研究

研究	運動	環境	摂取温度	摂取量	タイミング	深部体温低下	運動パフォーマンス
Yeo et al., 2012	ランニング	気温 24-32 °C 湿度 55-95 %	-1.4 °C	8 g/kg	運動前	0.5 °C	タイムトライアル 約1%↑
Trong et al., 2015	サイクリング ランニング	気温 27.6 °C 湿度 57 %	0.17 °C	18 g/kg (メントール含)	運動前, 中, 後	低下なし	走行時間 約3%↑
Naito et al., 2022	テニス	気温 33.6 °C 湿度 49 %	-1 °C	6 or 15 g/kg + アイスベスト	運動前, 中	0.5 °C	高強度運動時間 6 g/kg 約4%↑ 15 g/kg 約4%↓

Yeo et al. [72]の研究は、 $-1.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ のアイススラリーを 8 g/kg 体重の用量で運動前に摂取させることで、深部体温が $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低下し、熱容量が増大した結果、運動パフォーマンスが向上（約 1%）することを示したものであるが、従来実施されてきた屋内暑熱環境での研究結果と比較すると、摂取温度が低く設定され摂取量が多いにも関わらず、深部体温の低下効果と運動パフォーマンスの向上効果は小さい。一方、Trong et al. [73]の研究と Naito et al. [62]の研究は、アイススラリー単独の検討ではなく、メントールによる冷感付与やアイスベストとの組み合わせによる効果を検討した研究である。Trong et al. [73]は、 $0.17\text{ }^{\circ}\text{C}$ と比較的温度が高めのメントール入りアイススラリーを 1回 190 g ずつ運動前から運動終了後の回復期までの間に、7回に分けて被検者に摂取させることで、計 18 g/kg 体重ものアイススラリーを摂取させているが、コントロールと比較して、有意な深部体温の低下は認められていなかった。しかしながら、運動パフォーマンスの向上効果（約 3%）は認められており、このことは、冷たい飲料の摂取による冷感刺激が疲労感覚を軽減したことによるものと考察されている。3つの研究の中では、Naito et al. [62]の研究が最も競技現場に近い実践形式で実施された実験であり、外部冷却手法（アイスベスト）と 6 g/kg 体重あるいは 15 g/kg 体重のアイススラリー（ $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）の摂取を組み合わせたときの影響を検討している。この実験結果によると、アイススラリーを 6 g/kg 体重で摂取したときには、運動パフォーマンスの向上効果（約 4%）が認められていたが、 15 g/kg 体重を摂取したときには、却って運動パフォーマンスが低下（約 -4%）することが示されていた。すなわち、多すぎるアイススラリーの摂取は、

過度な深部体温の低下を招き、マイナスの作用を示す可能性を示唆している。また、内部冷却手法と外部冷却手法の両方を同時に実践するためには、時間的な制約もあり、競技現場に適用するためには、適切な運用手法の検討が必要なことを示唆している。以上のように、屋外暑熱環境における先行研究は極めて少ないのが現状であり、実際の競技現場にて運用するためには、さらなる検討が求められている。

第4章 疲労回復のための身体内部冷却手法の設計

本章では、疲労回復のための身体内部冷却手法の設計を行う。まず4-1節において、本手法の提供対象を特定した上で、4-2節でコンセプトを説明し、本研究の新規性と独自性を明らかにする。続いて4-3節では、運用シナリオの例を示し、4-4節において、本手法に求められる要求分析を行う。そして、4-5節において、要求分析の結果から本手法の設計を行う。

4-1. 提供対象の特定

本手法は、適用する対象や環境によって、求められる要求が異なるため、まず、提供対象を特定することが重要となる。提供対象に関しては、図13に示すように、「運動時間(長短)」と「競技環境(屋内外)」によって、大きく4つのケースに分類される。

分類Aは、屋外かつ運動時間の長いスポーツ競技に提供するケースであり、ラグビー、サッカー、テニスなどが想定される。このケースにおいては、屋外環境であるため、太陽光や輻射熱など外部環境から受ける影響が強く、暑熱ストレスによる疲労が最も強いケースである。競技前のプレクーリングや競技後の暑熱疲労からの回復のみならず、競技中の15分程度の短いハーフタイム休憩などにおいても提供可能な手法が求められるため、提供タイミングや提供時間が非常に制限される。さらに、外気温の影響を受けやすいため、内部冷却手法(アイスラリー)の温度管理も求められる。

分類Bは、屋内かつ運動時間の長いスポーツ競技に提供するケースであり、バスケットボール、バレーボール、バドミントンなどが想定される。このケースにおいては、屋内環境であるため、太陽光や輻射熱などの影響を受けることが少なく、さらに空調による温度管理が可能な場合が多いため、身体活動によって生じる熱産生対策が中心となる。屋外環境よりは、暑熱ストレスによる疲労のリスクは低下するが、分類Aの場合と同様に競技前や競技後のみならず、競技中の短い休憩時間においても提供可能な手法が求められるため、提供タイミングや提供時間に制約がある。

分類Cは、屋外かつ運動時間の短いスポーツ競技に提供するケースであり、100 m 走など

の短距離走などが想定される。暑熱環境に曝される時間が短いことや身体活動による熱産生時間が短時間であることから、暑熱ストレスによる疲労のリスクは低い。このケースの場合は、暑熱ストレスからの回避行動が取りやすく、提供タイミングや時間的な制約も少ないため、内部冷却手法以外にも、外部冷却手法やマッサージなどの疲労対処法が存在する。

分類 D は、屋内かつ運動時間の短いスポーツ競技に提供する場合であり、柔道などの競技が想定され、最も暑熱ストレスによる疲労のリスクが低い。提供タイミングや時間的な制約も少なく、内部冷却手法のみならず、外部冷却手法(空調など)との併用が有効となる。また、身体冷却戦略以外にも、マッサージやストレッチなどの疲労対処法が存在する。

本研究は、過酷な暑熱環境において競技を強いられているアスリートの疲労回復による運動パフォーマンスの向上を目的としているため、暑熱ストレスによる疲労のリスクが最も高い分類 A のスポーツ競技であり、特にコンタクトプレーにより身体への負荷が高く、熱中症の発生頻度が高いラグビーを対象として設定した。

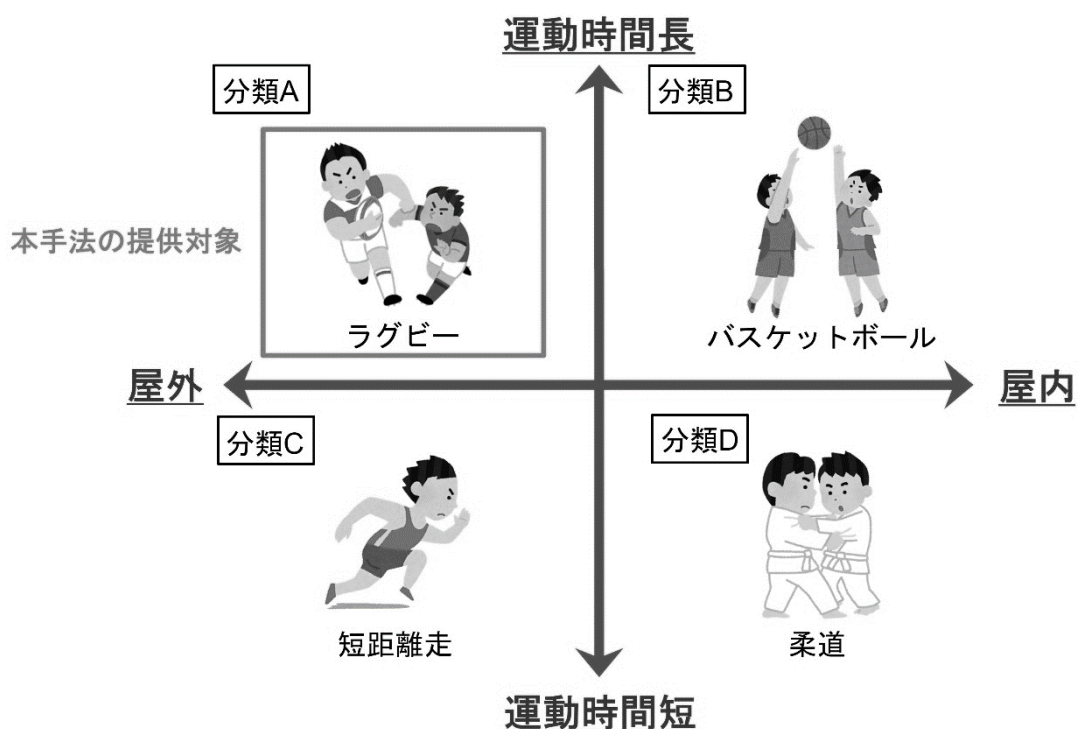


図 13 身体内部冷却手法の提供対象

次に、分類 A に該当する夏季合宿中の大学ラグビー選手 15 名及びスタッフ(コーチ、マネージャーなど)を対象に、暑熱対策や身体冷却手法に関する課題について調査(大学ラグビー選手を対象とした暑熱環境に関するアンケート調査, 2019) (図 14)を実施した。その結果、約 9 割の選手が、暑熱環境において運動パフォーマンスが低下することを実感しており、暑熱対策の必要性を認識していた。暑熱環境における運動パフォーマンスの低下を最も感じるタイミングとしては、試合時の後半戦が挙げられた。さらに、夏季の試合やトレーニング後の睡眠時において、約 9 割の選手が寝苦しさを感じており、夏季においては、睡眠の質が低下している可能性が示唆された。

身体冷却による暑熱対策に関しては、ラグビー競技では日常的にトレーニング後にアイスバスによる外部冷却手法が利用されているが、そのような環境においても 9 割以上の選手が夏季の試合やトレーニングにおいて身体内部冷却によるリカバリー戦略を求めているが、実際の競技現場では、時間的な制約やグラウンドでの保冷設備の問題で、アイススラリーなどの運用が検討されていないことが明らかとなった。また、試合やトレーニング中に水分補給以外にもエネルギー源となるゼリー飲料の摂取が行われており、その摂取量の多さから、アイススラリーを用いることによって深部体温の冷却、水分補給、エネルギー源の補給を同時に行えることに対して、選手らからは高い関心が示された。



図 14 大学ラグビー選手を対象とした暑熱環境に関するアンケート調査

(著者らによる調査, 2019)

4-2. コンセプト

本手法のコンセプトは、従来の摂取量の多さに関する課題を解決し、内部冷却手法を競技現場において運用可能な暑熱疲労からの回復手法として提供することである。具体的には、従来のスポーツドリンクを使用して作製されていた 1.4 °C～-1.7 °Cのアイスラリー（内部冷却手法）とは異なり、アスリートの疲労回復において重要な栄養成分となる炭水化物濃度を調節することで、凝固点を-2 °C以下に降下させた低温化アイスラリーを用い、疲労回復に必要な摂取量と摂取タイミングを明らかにすることで競技現場での運用を実現させることである。また、低温化アイスラリーの有害事象の有無についても検証することで、競技現場で、安心して使用可能な摂取温度の範囲についても明らかにする。

4-3. 運用シナリオ

本手法が想定する運用シナリオを 5W1H の観点から表 6 に示す。本手法を運用するタイミングは、大量の摂取が難しい暑熱環境下でのスポーツ競技によって生じた疲労から回復シーンであり、実現する内容は、深部体温の冷却による暑熱環境下での疲労回復の促進である。前述したように、従来のアイスラリーは、単にスポーツドリンクをシャーベット状にしたものであったため、その摂取量の多さから、暑熱環境下でのスポーツ競技においては予防的な運用が中心であり、疲労回復手法としては検討されてこなかった。しかしながら、暑熱環境下でのスポーツ競技により深部体温が上昇した状態のアスリートは、発熱反応や炎症反応により、生理機能、代謝機能、運動機能が低下し疲労状態のさらなる悪化を招くため、試合中の後半戦、当日中の第 2 試合、翌日の試合などに次の競技に向けて、暑熱疲労からの早期回復が求められている。そこで、以下に本手法を用いた 3 つの暑熱環境下での疲労回復シナリオを記述する。

表 6 本手法の運用シナリオ (5W1H)

5W1H	内容
When	<p>夏季の暑熱環境下において疲労回復が求められる場面</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ スポーツ競技中のハーフタイム休憩時 ・ スポーツ競技直後 ・ 日常生活における睡眠時
What	<p>簡便かつ短時間で処置が可能な深部体温の冷却手法による疲労回復</p>
Where	<ul style="list-style-type: none"> ・ 夏季のスポーツ競技現場 ・ 日常生活における睡眠場所
Who	<p>コンタクトプレーなどによる身体負荷が強く、屋外暑熱環境での競技が求められるアスリート</p>
Why	<ul style="list-style-type: none"> ・ 暑熱環境下での身体への負荷は、過剰な深部体温の上昇を招き、暑熱特有の疲労状態に陥りやすく、運動パフォーマンスを著しく低下させるため ・ 競技中は、短い休憩時間で疲労回復が求められるため
How	<p>既存のアイススラリーよりも低い温度で摂取できる低温化アイススラリーを用いた身体内部冷却手法</p>

①試合中のハーフタイムでの疲労回復を想定した運用シナリオ

夏季の暑熱環境の中、試合が実施された。厳しい暑熱環境は、前半戦のプレーにより選手の体力を奪い、深部体温も 40 °C に近づいており、運動パフォーマンスの低下が認められていた。そこで、15 分間のハーフタイム休憩の間に本手法を運用することで、身体冷却効果が機能し疲労回復が促進され、後半戦の最後まで高い運動パフォーマンスを発揮することができた。

②試合直後の疲労回復を想定した運用シナリオ

夏季の暑熱環境の中，午前中に試合が実施された。厳しい暑熱環境ではあったが，高い運動パフォーマンスを発揮することができた。この日は，午後にもう 1 試合が予定されており，高体温状態を速やかに改善し，身体機能の早期回復が求められていた。そこで，試合直後に本手法を運用することで，身体冷却効果が機能し身体機能の早急な回復が認められ，次の試合に向けた疲労回復を実現することができた。その結果，ベストコンディションにて次の試合に臨むことができた。

③睡眠による試合翌日の疲労回復を想定した運用シナリオ

夏季の暑熱環境の中，試合が実施された。厳しい暑熱環境での競技は，試合終了後の就床時刻になっても深部体温が高い状態を保持したままであった。さらに夜になっても気温が下がらず熱帯夜となったため，寝苦しい環境であり選手の疲労からの回復が阻害される可能性が高かった。そこで，就床前に本手法を運用することで，選手の睡眠の質が改善し，起床時の疲労感を改善することができた。

図 15 に先行研究における予防を目的とした運用シナリオ（運動前及び運動中の予防的運用）及び本手法における疲労回復を目的とした運用シナリオ（試合中のハーフタイムでの回復，試合直後の回復，試合翌日の回復）の模式図を示す．本手法による運用シナリオは，暑熱環境での低温化アイススラリーの少量の単回摂取による疲労からの回復である．

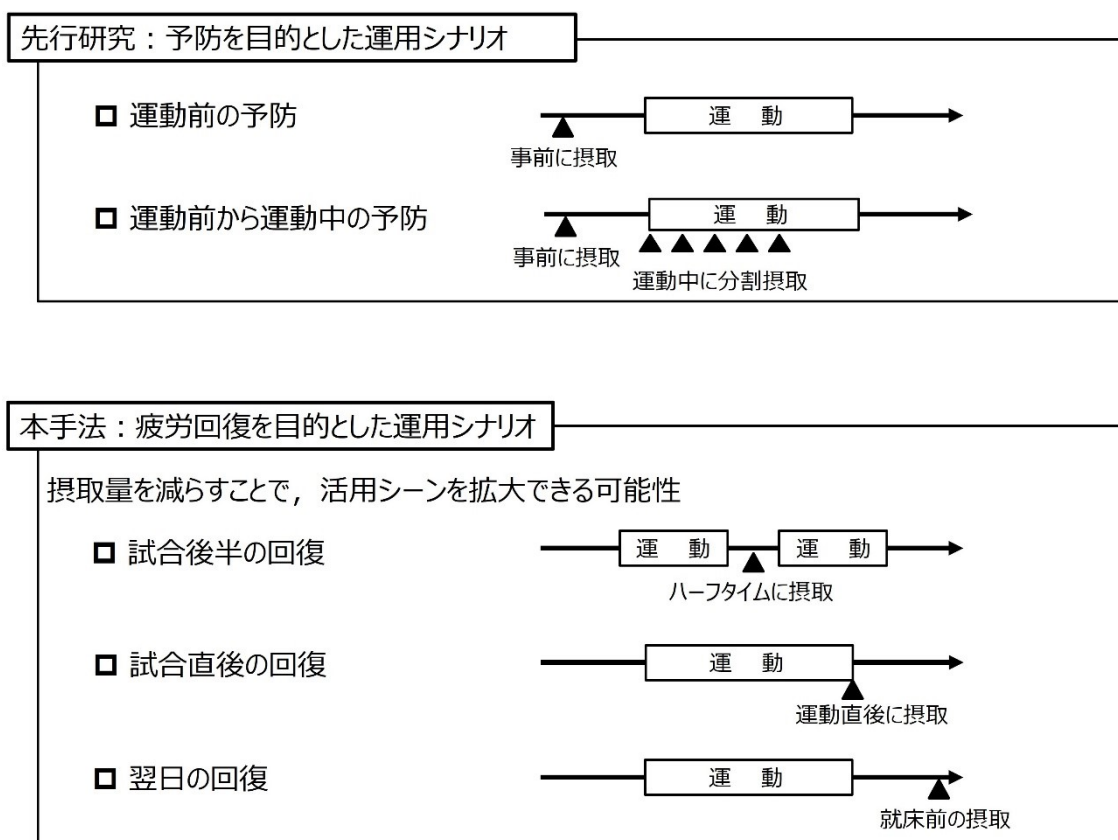


図 15 運用シナリオの模式図

4-4. 要求の抽出

第2章における課題，第3章における先行研究の分析結果，第4章における競技現場でのアンケート調査結果より，本手法に対する要求を抽出し，表7に総括した．まず2-2節で論じた身体内部冷却戦略の現状と課題より，「深部体温を低下できること」，「短時間で摂取できること」を抽出した．次に，3-2節の屋外暑熱環境での身体内部冷却を用いた疲労回復手法の分析結果より，「暑熱環境の競技現場で運用できること」，「深部体温の低下と同時にエネルギー成分を摂取できること」，「疲労が回復すること」，「他の疲労回復手法と併用できること」を抽出した．

表7 要求の抽出

要求
深部体温を低下できること
短時間で摂取できること
暑熱環境の競技現場で運用できること
深部体温の低下と同時にエネルギー成分を摂取できること
疲労が回復すること
他の疲労回復手法と併用できること

4-5. 身体内部冷却手法の設計

要求分析の結果を踏まえ身体内部冷却手法の設計方針を示す。図 16 に示すように、身体内部冷却手法としては、氷の比熱 (2.1 J/g) や水の比熱 (4.2 J/g) よりも大きい氷の融解熱 (333.6 J/g) を利用することで、高い冷却効果を得ることができる流動性のある氷、すなわちアイススラリーの利用が効果的である。

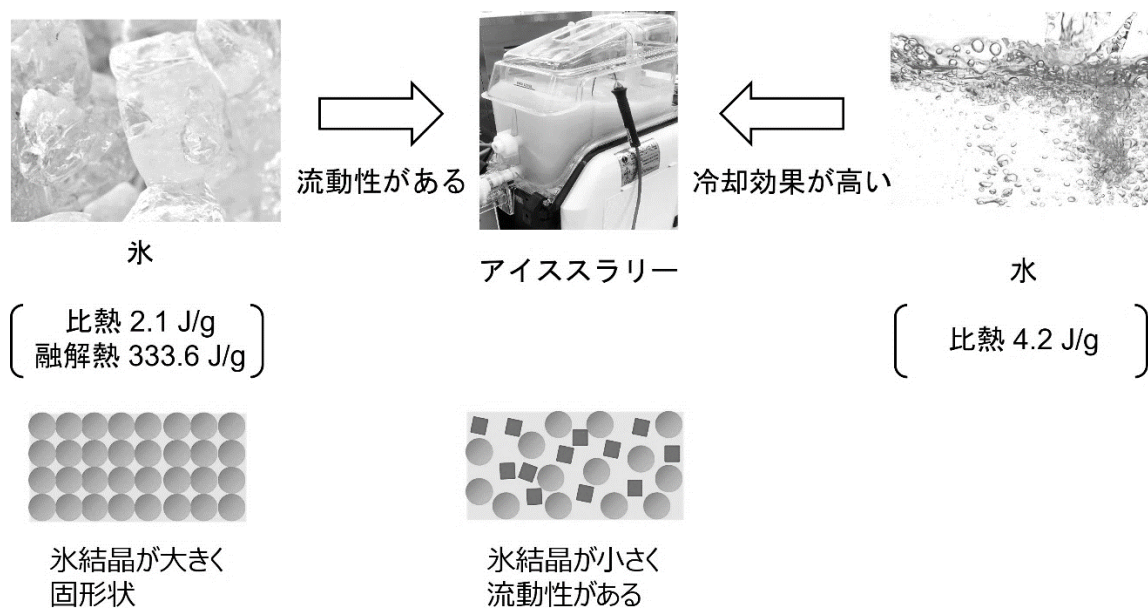
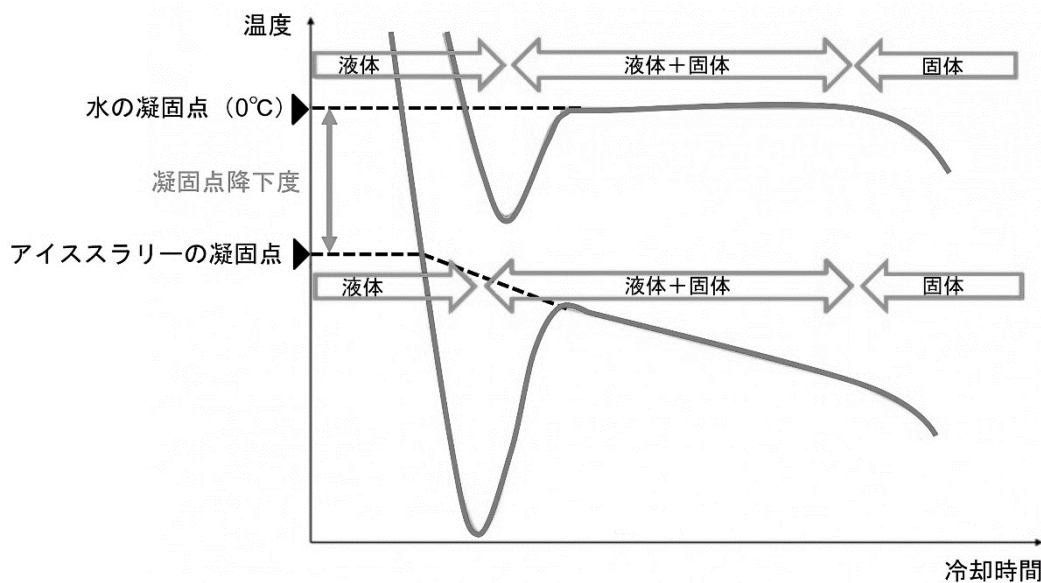


図 16 身体内部冷却手法の設計

本研究では、競技現場において、少量の摂取でも身体冷却効果を発揮できることを想定しているため、外部環境や口腔内での融解を防ぎ、胃部まで氷の状態に到達できるよう先行研究よりも低い $-2^{\circ}\text{C}\sim-5^{\circ}\text{C}$ の温度でも流動性のある低温化アイスラリーを作製した。低温化アイスラリーの設計においては、凝固点降下度の式（図 17）を参考に、内容量 100 g 当たり、エネルギー $56\sim79\text{ kcal}$ 、炭水化物 $14\sim15.1\text{ g}$ 、タンパク質 $0\sim4.7\text{ g}$ 、カリウム 20.3 mg 、マグネシウム 1 mg 、食塩相当量 0.2 g の組成（表 8）とし、屋外で使用することを想定し衛生面の観点からアルミパウチ袋に充填した（図 18）。



$$\Delta T_f = K_f \cdot m \quad (\Delta T_f: \text{凝固点降下度}, K_f: \text{モル凝固点降下定数}, m: \text{質量モル濃度})$$

図 17 凝固点降下を利用した低温化アイスラリーの設計

表 8 低温化アイススラリーの設計

	-2℃アイススラリー	-5℃アイススラリー
内容量	100 g	100 g
エネルギー	56 kcal	79 kcal
炭水化物	14 g	15.1 g
タンパク質	0 g	4.7 g
カリウム	20.3 mg	20.3 mg
マグネシウム	1 mg	1 mg
食塩相当量	0.2 g	0.2 g

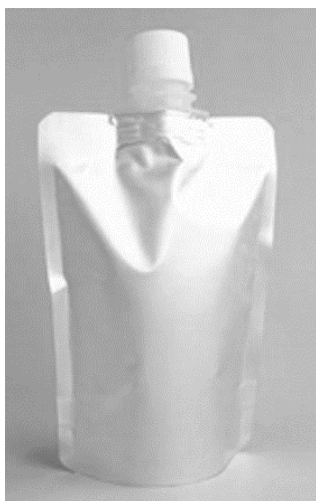


図 18 アルミパウチに充填したアイススラリー

第5章 ラグビー競技シミュレーションモデルによる評価

本章では、設計した低温化アイススラリーが、摂取量を減量したとしても、体温を低下させ疲労回復効果を示すか、試合中のハーフタイムでの疲労回復を想定した運用シナリオでの検討結果について述べる。まず 5-1 節では、本実験の目的及び背景を述べ、5-2 節では、実験の概要を述べる。次に 5-3 節では、本実験の結果を詳述し、5-4 節では、本実験結果の考察を論じる。最後に 5-5 節で本章のまとめを述べる。

5-1. 目的及び背景

1-1 節で述べたように、暑熱環境でのスポーツ競技は、深部体温を過度に上昇させるため、熱疲労や熱中症を引き起こし、重篤な中枢神経系の機能障害を引き起こす危険性がある[30][74]。一般に、身体は深部体温が上昇するにつれて、中枢神経系（脳）を保護するために、発汗、皮膚血流量の増加、身体活動の制限等によって、正常な体温を維持しようとする[30][75]。深部体温の過度な上昇は、運動機能を抑制するため、アスリートにとって暑熱環境での冷却戦略は、安全性の確保と高い運動パフォーマンスを発揮する上で重要となる[76][77][78]。

アイススラリーを摂取すると、口腔から食道を経て胃に到達する各工程において、氷が融解する際の融解熱を利用して深部体温を大きく低下させることができる。そのため、十分な冷却効果を得るためには、氷の状態で、胃内部まで到達させる必要がある。そこで、本実験では、摂取量を増やすのではなく、摂取するアイススラリーの温度を下げることで、口腔内での融解を防ぎ、身体内部までアイススラリーを到達させることが可能になるとの仮説を設定した。

アイススラリーが運動パフォーマンスを向上させる基本原理は、運動前に摂取させることで、深部体温を低下させ、熱容量を増加させることである。そのため、ラグビーやサッカーのようなスポーツ競技を想定し、ハーフタイム休憩中のみに摂取させ、疲労からの回復効果を検証した報告は見当たらない。ラグビー競技は、フルコンタクトスポーツに分類され、競技中にタックルやスクラム等の衝突が繰り返されるため、

身体において産生される熱エネルギーが非常に大きい[79]. そのため、筋肉の損傷や炎症[80][81]が生じやすく、競技中の短いハーフタイム休憩中における試合後半に向けた疲労回復戦略が重要となる.

そこで、まず本実験では、低温化アイススラリーの意義を明確化するため、選手の運動パフォーマンスの変化を定量的に捉えやすい自転車エルゴメーターを用いて、ラグビー競技の試合をシミュレーションした実験モデルを設計した. そして、低温化アイススラリーをハーフタイム休憩中に摂取させた際に、先行研究で検討されてきた摂取量 (7.5 g/kg 体重) より減量しても体温を低下させ、試合後半の運動パフォーマンスを改善するか評価を実施した. なお、以降の評価実験におけるコントロールの摂取温度は、第3章の表4で示したように4℃の液と37℃の液間で、体温低下度に明確な差が認められていないことから、本実験における対象者が普段競技現場において使用している常温とした.

5-2. 実験概要

5-2-1. 被験者

本実験は、同じチームに所属し、ラグビー経験を3年以上有する18歳~22歳の健康な男性大学ラグビー選手12名(年齢: 19.8 ± 1.2 歳, 身長: 1.72 ± 0.05 m, 体重: 86.3 ± 13.4 kg, BMI: 29.1 ± 4.2)を対象に実施した. 被験者には、事前に実験の目的, 方法, 実験に伴う苦痛及び危険度について十分な説明を行い, 書面にて参加の同意を得た. なお本実験は、ヘルシンキ宣言の倫理的原則に則り, 人を対象とする生命科学・医学系研究に関する倫理指針に配慮にした上で, 慶應義塾大学システムデザイン・マネジメント研究科及び慶應義塾大学スポーツ医学研究センターの研究倫理審査委員会の承認を得て実施した.

5-2-2. 実験手順

本実験は無作為化交差試験デザインにて実施し, 被験者は6日間の間隔をあけ, 概日リズムの影響を避けるために, 毎週同じ曜日の同じ時間帯に3回実験に参加した. なお最初の実験の1週間前に本実験と同じプロトコルにて予備実験を行い, 全員が習

熟した状態で本実験に参加した。また予備実験での試験食の摂取量は、Tabuchi et al. [64]の報告（ $-1.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ のアイススラリーを 5 g/kg 体重で摂取させることで深部体温が $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低下するが、心拍の低下は認められていない）を参考に設定し、試験食が充填された容器の摂取前後の重量を測定することで、参加者全員が 5 g/kg 体重の用量を15分間の休憩時間に完食できることを確認した。本実験は3回の実験とも同じ手順で行われ、被験者は、それぞれ各実験において、 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ の低温化アイススラリー、常温のコントロール（アイススラリーと同組成の飲料）、または常温の水の何れかの試験食を予備実験と同様に 5 g/kg 体重の用量で摂取した（先行研究よりも33%減量）。各実験は、高温条件下（ $28.8 \pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度 $49.5 \pm 0.6\%$ ）の実験室（室温 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 設定）で実施した。実験期間中、被験者には通常的生活習慣を維持するよう指示し、実験日の前日から終了までは、実験以外の激しい運動、飲酒、カフェイン、サプリメントの摂取を控えるように指示した。

図19、図20にラグビー競技シミュレーションモデルの実験風景及びプロトコルを示す。Smith et al. [82]の報告を参考に、前半30分間、そして15分間の休憩（ハーフタイム）を挟み、後半30分間からなるラグビー競技の試合において要求される運動形式及び運動量をシミュレーションした高強度間欠運動を、自転車エルゴメーター（風神雷神、株式会社大橋知創研究所）を用いて設計した。



図 19 ラグビー競技シミュレーションモデルの実験風景

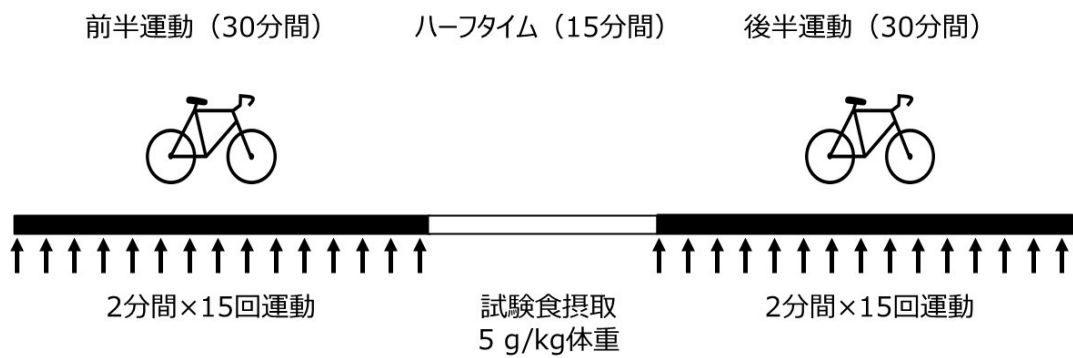


図 20 ラグビー競技シミュレーションモデルの実験プロトコル

前半及び後半運動は、30分間の高強度間欠運動（2分間のスプリント運動を15回繰り返す）からなり、各スプリント運動は、体重×0.075 kp（キロポンド）の負荷の6秒間の最大ペダリングと1.3 kp、60回転/分の負荷の114秒間のペダリングで構成した。なお、ペダリング中は脱水防止のため、被検者には、10分ごとに常温の水100 mLを摂取させた。

低温化アイススラリーによる疲労回復効果を評価する上で、運動パフォーマンスの指標としては自転車エルゴメーター運動における最大パワー、平均パワー及びそれらの累積値を、生理機能の指標としては鼓膜温、平均皮膚温及び熱容量を用いた。自転車エルゴメーター運動における最大パワーと平均パワーは、自転車エルゴメーターに内蔵されるコンピュータにより、10 Hzのサンプリングレートで連続的に記録され、後半運動における最大パワーと平均パワーの変化は、前半運動最後の15回目のスプリント運動に対する相対値として算出した。鼓膜温 (T_{ty}) は、赤外線センサー（CEサーモ、ニプロ株式会社、図21）を用いて記録した[83]。心拍数は、Polar OH1（Polar Electro, Inc., 図22）を被験者の上腕部に装着し、1分ごとに測定した[84]。平均皮膚温 (T_{sk}) は、胸部、前腕部、大腿部に、低アレルギー性粘着テープを用いてサーミスタプローブ（サーモクロン Type-SL, 株式会社KN研究所, 図23）を貼り付け測定した。平均皮膚温 (T_{sk}) は Roberts et al. [85]の式を用いて算出した ($T_{sk} = 0.43 \times (\text{胸温}) + 0.25 \times (\text{前腕温}) + 0.32 \times (\text{大腿温})$) [69][86][87]。身体の熱容量は、Adams et al. [88]の式を用いて計算した (熱容量 (W/m^2) = $0.965 \times \text{体重} \times \text{鼓膜温度変化} \div \text{体表面積}$)。また、体表面積は、Du Bois et al. [89]の式を用いて計算した (体表面積 (m^2) = $0.202 \times \text{体重} \times 0.425 \times \text{身長}^{0.725}$)。また、アイススラリーの摂取に関連する有害事象の有無は、ハーフタイム、運動中及び運動後に参加者の自己申告により評価した。



図 21 鼓膜温計 (CE サーモ)



図 22 心拍計 (Polar OH1)



図 23 皮膚温計 (サーモクロン Type-SL)

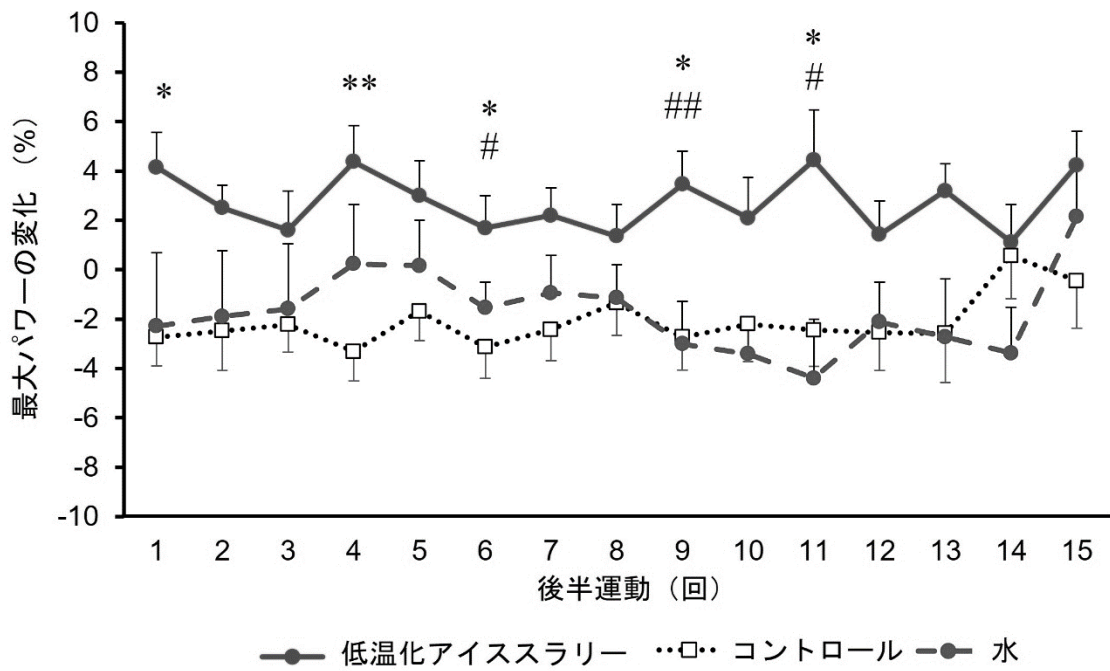
5-2-3. 統計解析

実験結果は、平均値 ± 標準誤差で示した。すべての統計解析は、SAS ソフトウェアパッケージバージョン 9.4 (SAS Institute Japan Ltd.) を用いて実施した。データの正規性と分散の均質性を Shapiro-Wilk 検定と Bartlett 検定を用いて検定した上で、Friedman の二元配置分散分析 (条件 × 時間) で分析した。2 群間の比較には、Wilcoxon の符号付順位検定 (Holm の調整) を用いて Post-hoc 解析を行った。すべての解析において、 $P < 0.05$ を有意水準とした。

5-3. 結果

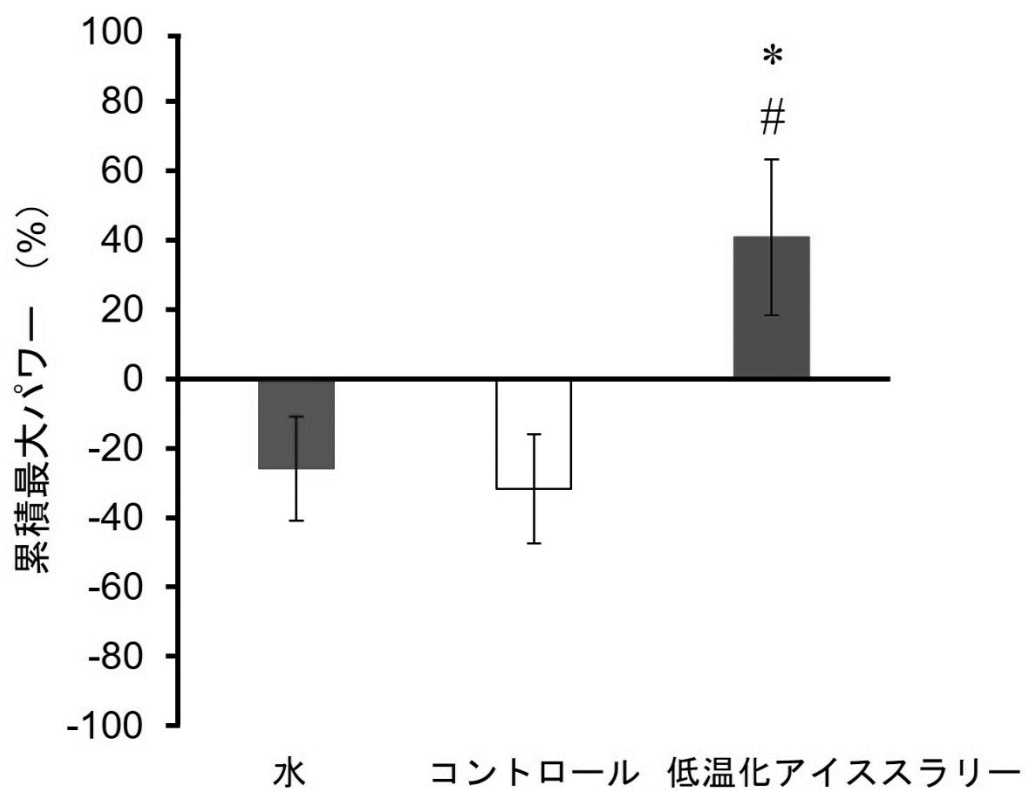
5-3-1. 運動パフォーマンスへの影響 (最大パワー及び平均パワー)

試験食摂取後の最大パワーの変化 (前半運動最後の最大パワーに対する相対値) を図 24 に、その累積値を図 25 に、平均パワーの変化 (前半運動最後の平均パワーに対する相対値) を図 26 に、その累積値を図 27 に示した。前半運動 1 回目の最大パワーは 987.6 ± 19.5 W、平均パワーは 858.9 ± 18.3 W であり、前半運動 15 回目の最大パワーは 961.6 ± 27.0 W、平均パワーは 829.7 ± 24.8 W であった。前半運動終了後の 15 分間のハーフタイムの間に低温化アイスラリー 5 g/kg 体重を摂取することで、後半運動において、コントロールまたは水を摂取した場合と比較して、高い運動パフォーマンスを発揮できることが明らかとなった。



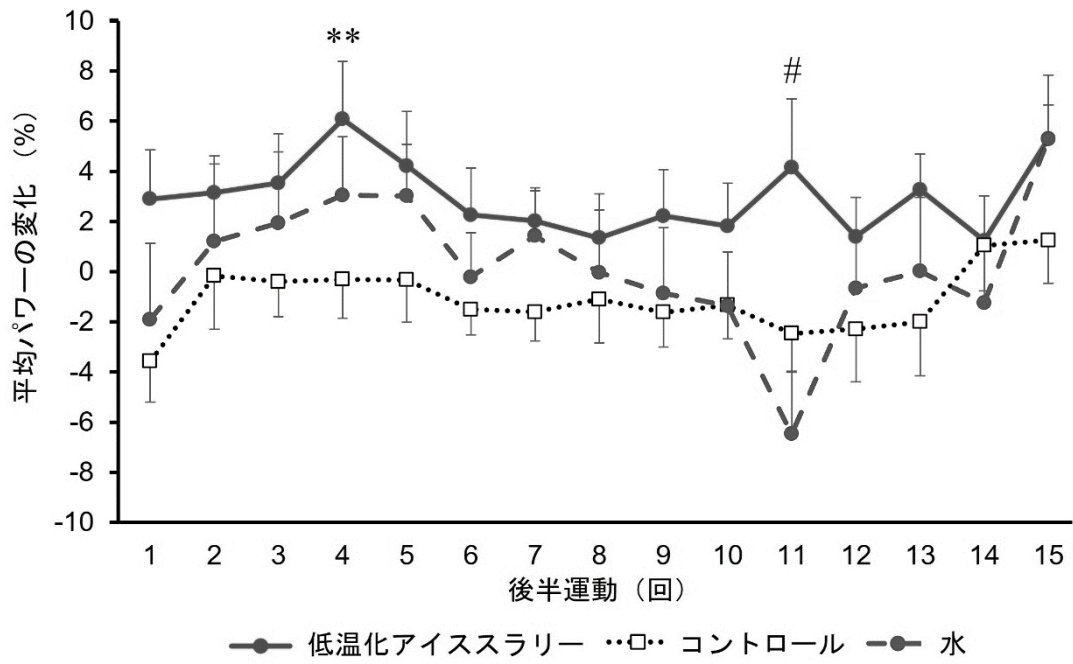
*p < 0.05, **p < 0.01 vs. コントロール ; #p < 0.05, ##p < 0.01 vs. 水

図 24 運動パフォーマンスへの影響 (最大パワーの変化)



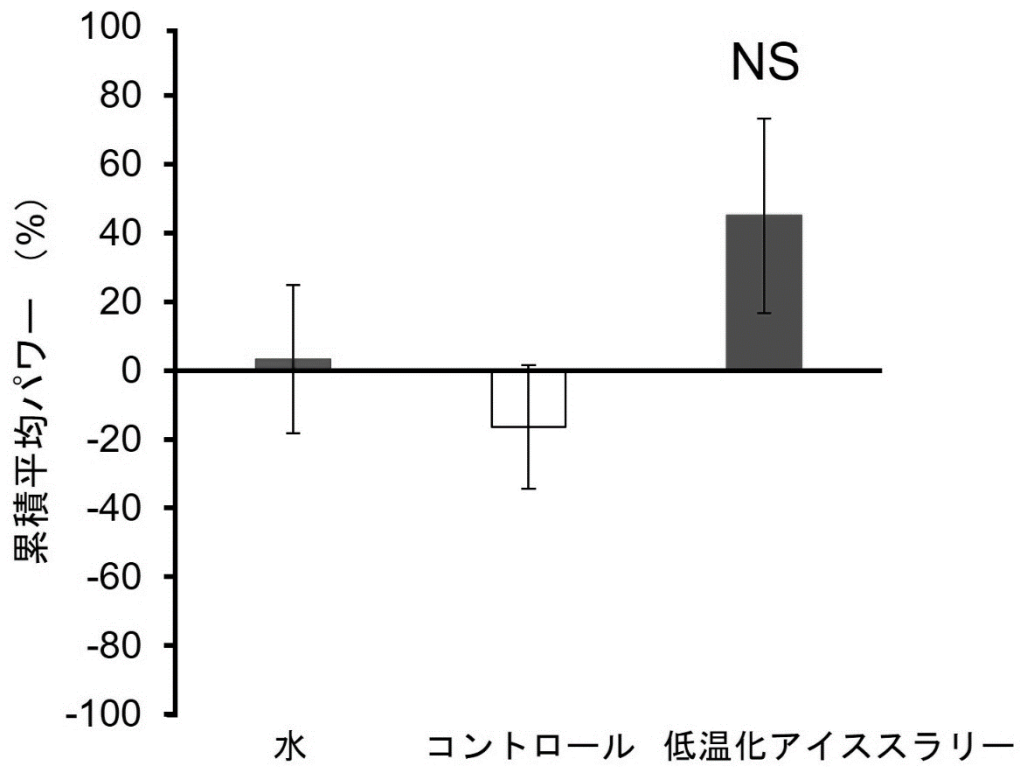
*p < 0.05 vs. コントロール ; #p < 0.05 vs. 水

図 25 運動パフォーマンスへの影響 (最大パワーの累積値)



**p < 0.01 vs. コントロール ; #p < 0.05 vs. 水

図 26 運動パフォーマンスへの影響 (平均パワーの変化)

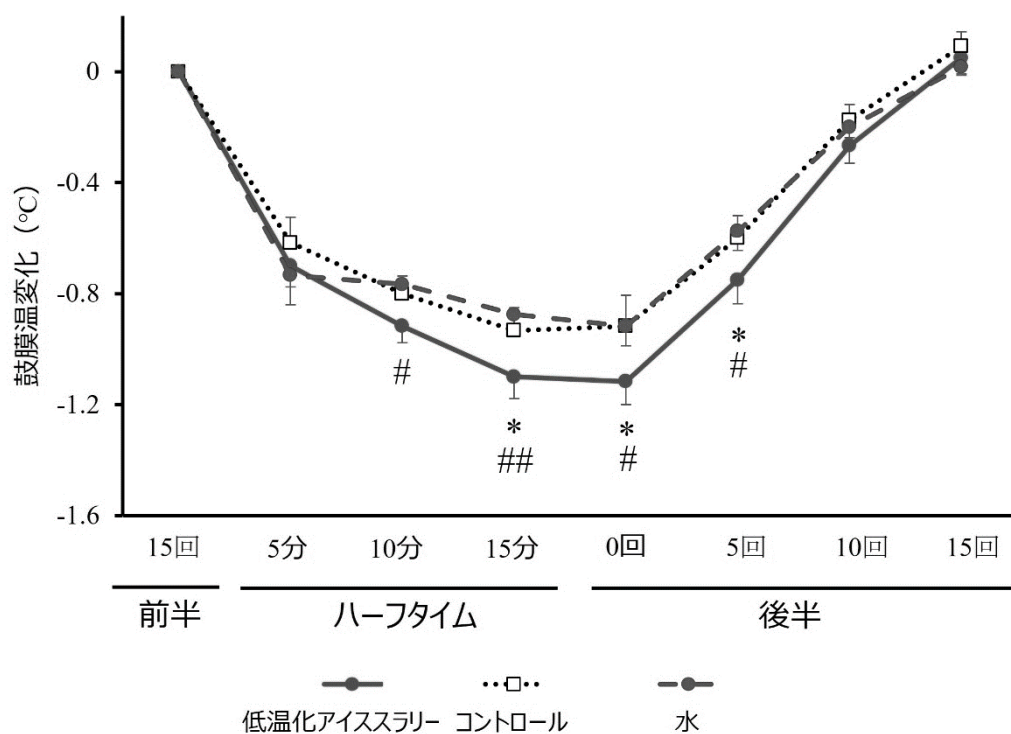


NS : 有意差なし ($p > 0.05$)

図 27 運動パフォーマンスへの影響 (平均パワーの累積値)

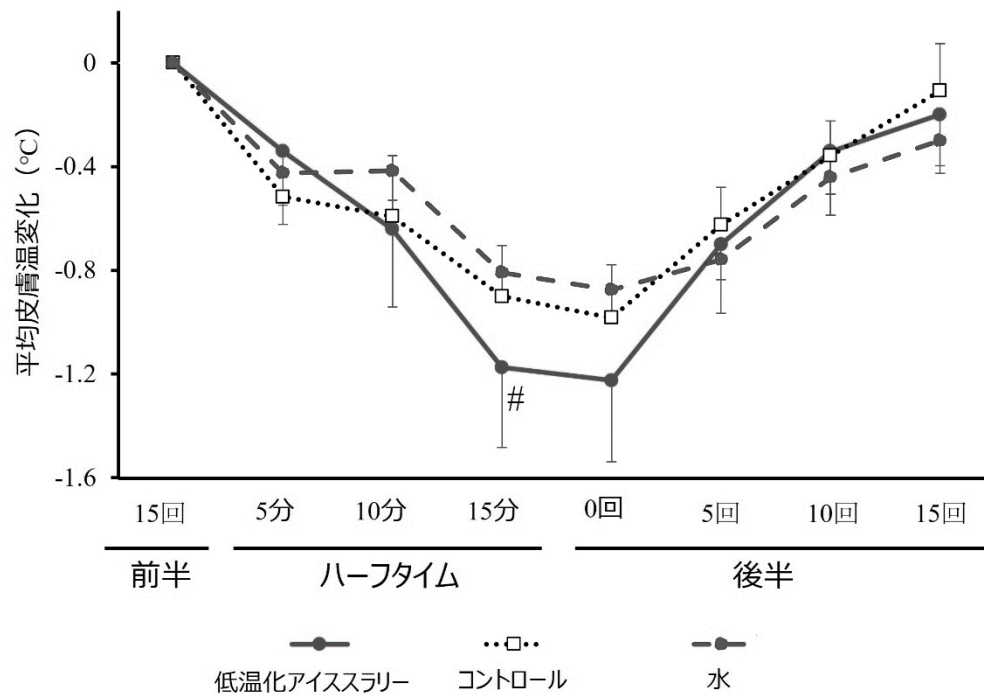
5-3-2. 生理機能への影響（鼓膜温，平均皮膚温，熱容量及び心拍）

前半運動最後（15回目）の値を基準として，試験食摂取後の鼓膜温の変化を図 28 に，平均皮膚温の変化を図 29 に示した，また，試験食を摂取したことによる熱容量の変化を表 9 に示した．前半運動開始前の鼓膜温は 37.2 ± 0.0 °C，平均皮膚温は 33.9 ± 0.1 °C であり，前半運動終了時の鼓膜温は 38.4 ± 0.1 °C，平均皮膚温は 34.8 ± 0.1 °C であった．前半運動終了後の 15 分間のハーフタイムの間に低温化アイススラリー 5 g/kg 体重を摂取することで，速やかに鼓膜温と平均皮膚温の低下が認められ，コントロールまたは水を摂取した場合と比較して，有意な熱容量の増大が認められた．一方，心拍に関しては，後半運動において，低温化アイススラリーまたはコントロールを摂取することで，水を摂取した場合と比較して，有意な増加が認められた（図 30）．



*p < 0.05 vs. コントロール； #p < 0.05, ##p < 0.01 vs. 水

図 28 生理機能への影響（鼓膜温）



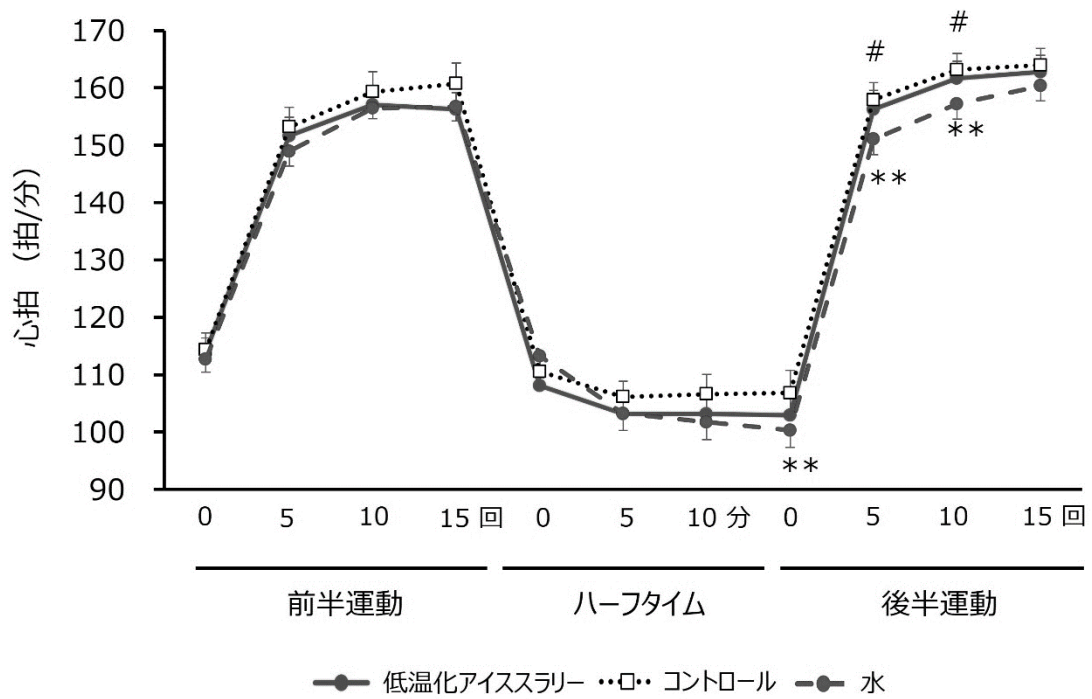
#p < 0.05 vs. 水

図 29 生理機能への影響 (平均皮膚温)

表 9 生理機能への影響 (熱容量)

項目	グループ	後半運動
熱容量	水	44.2 ± 3.5
	コントロール	44.9 ± 4.0
	低温化アイススラリー	50.6 ± 3.4*, ##

*p < 0.05 vs. コントロール ; ##p < 0.01 vs. 水



**p < 0.05 (コントロール vs. 水) ; #p < 0.01 (アイスラリー vs. 水)

図 30 生理機能への影響 (心拍)

5-4. 考察

本実験では、 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ まで低下させた低温化アイススラリーの低用量の摂取によるハーフタイムでの疲労回復効果について検討した結果、 5 g/kg 体重の用量で摂取することで、前半の運動によって生じた疲労の回復を促進し、後半運動時における最大パワー及び平均パワーが、コントロールや水摂取と比較して、有意に回復することが明らかとなった。鼓膜温、平均皮膚温についても低温化アイススラリーを摂取することで、速やかな低下が認められており、暑熱環境でのラグビー競技のように、ハーフタイムを挟んで競技を行うスポーツにおいて、低温化アイススラリーの低用量の摂取が、疲労からの回復を促進し、競技後半の運動パフォーマンスを向上させる可能性を示したものである。

従来のアイススラリーの運用上の課題は、2-2 節で述べたように深部体温を低下させるために必要な摂取量が 7.5 g/kg 体重以上と多く、試合中のハーフタイムなどの短い休憩時間で摂取することが難しいことであった。本実験の被験者の平均体重は 86.3 kg であり、 7.5 g/kg 体重で換算すると必要なアイススラリーの摂取量は 647.3 g となるが、 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ の低温化アイススラリーを用いることで、摂取量を約 33% 減量することが可能となった。また、本実験の15分間のハーフタイムの間に、被験者全員が完食したが、低温化したことによる頭痛や腹痛等の有害事象も認められなかった。Siegel et al. [43]の先行研究では、 $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ のアイススラリーを 7.5 g/kg 体重の用量で摂取した際の深部体温（直腸温度）は、約 $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低下し、 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ の冷水を摂取したときと比較して、有意な体温低下を示すと共に、限界走行時間が向上（ 19% ）することを示している。一方、本実験では、体温の指標として鼓膜温を測定したが、低温化アイススラリーを 5 g/kg 体重の用量で摂取することで、 $-1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低下し、同様に運動パフォーマンスが向上したことを確認している。鼓膜温の運動時の値は、直腸温より低くなることが報告されているが[90]、頸動脈や脳に近いこと、深部体温の測定に代用されており[83][91][92]、体温の測定手法は異なるものの、本実験における体温低下の幅を考慮すると、低温化アイススラリーの摂取量としては十分量であったと推察される。一方、本実験において、コントロールと水摂取の間には、体温、運動パフォーマンスの変化共に、有意な変化は認められなかった。そのため、本実験における疲労回復効果は、低温化アイススラ

リー中に含まれる炭水化物の効果によるものではなく、低温化アイススラリーの冷却効果によるものが大きいと推察され、身体内部冷却手法としての有用性を指し示すものであった。

低温化アイススラリーの疲労回復効果のメカニズムとしては、深部体温の低下による熱容量の増大と脳温の低下によるものが推察される。本実験においても、先行研究と同様に、有意な熱容量の増大が認められ、脳に近い鼓膜温の低下が示されたことから上記メカニズムを介したものと考えられる。

本実験の結果は、ラグビー競技を想定したシミュレーション実験ではあるが、ハーフタイムを挟んで競技を行うサッカー、バスケットボール等においても有効な疲労回復手法になり得ると考えられる。しかしながら、実際の競技現場においては、実験室におけるシミュレーション条件とは異なり、輻射熱や気流、対戦相手との接触プレーなど、多くの外部環境要因が存在する。特に、屋外暑熱環境の競技においては、環境熱の影響が大きく、身体における低温化アイススラリーの反応性に違いが生じる可能性も考えられる。

本章では、低温化アイススラリーを用いることで、従来の摂取量を約 33 %減量できる可能性を示唆したが、実際の競技現場において運用を図るためには、より実践に近い環境での検証が必要である。そこで、本低温化アイススラリーを用いた屋外暑熱環境での運用シナリオについては、第 6 章にて述べる。

5-5. 本章のまとめ

-2 °Cの低温化アイススラリーを用いることで、摂取量を減量 (33 %) しても、仮説通り、疲労回復を促進し、運動パフォーマンスを向上させることが明らかとなった。すなわち、従来のアイススラリーの課題であった摂取量の多さを、低温化アイススラリーが解決できる可能性が示唆された。以上の結果から、低温化アイススラリーは、試合中のハーフタイムでの回復を想定した運用シナリオにおいて、有効な疲労回復手法となり得ることが示唆された。

第6章 実践的ラグビー競技モデルにおける評価

本章では、低温化アイススラリーが、第5章のラグビー競技シミュレーションモデルでの評価結果と同様に摂取量を減量しても、屋外暑熱環境において身体冷却機能を発揮し疲労回復効果を示すか、試合直後の疲労回復を想定した運用シナリオでの検討結果について述べる。まず6-1節では、本実験の目的及び背景を述べ、6-2節では、実験の概要を述べる。次に6-3節では、本実験の結果を詳述し、6-4節では、本実験結果の考察を論じる。最後に6-5節で本章のまとめを述べる。

6-1. 目的及び背景

屋外暑熱環境におけるスポーツ競技は、外部環境の影響を受けやすく熱中症のリスクが非常に高い[30][74]。過剰に上昇した深部体温は、中枢機能や心肺機能にも大きな負荷を及ぼし、運動パフォーマンスを著しく低下させるため、高体温状態から迅速に回復させることが、アスリートにとって重要となる[76][77][78]。ハーフタイムにおける疲労からの回復に低温化アイススラリーの摂取が有効であることを第5章において示したが、ラグビー競技シミュレーションモデルにおける検証は、外部環境要因（太陽光、輻射熱など）の影響を受けにくいため、屋外暑熱環境では、低温化アイススラリーが身体の各種機能に及ぼす影響が異なる可能性が考えられる。これまで屋外暑熱環境においてアイススラリー摂取の影響を評価した研究は、少ないながらも存在するが[62][72][73]、その外気温の高さ故に、大量のアイススラリー（7.5 g/kg 体重以上）を競技直前に摂取させており、現実的な運用とはいえない。

高温暑熱環境（WBGT 25℃～36℃）でスポーツ競技が実施されているのも事実であり[93][94]、スポーツ競技における身体冷却戦略の重要性が増している。ラグビー競技は、そのようなスポーツ競技の代表例であり、炎天下の屋外環境で競技が行われている[95]。暑熱環境における試合やトレーニングは、身体の各種機能に有害な影響を与えるため、ワールドラグビーガイドラインでは、気温30℃以上、相対湿度60%以上の暑熱環境でのラグビー競技を推奨していない[96]。しかしながら、上記のような暑熱

環境においても、競技が行われているのが実情であり、身体冷却戦略による試合やトレーニング後の身体機能の迅速な回復は、暑熱環境でプレーする選手の運動パフォーマンスの維持と安全性確保の観点においても重要な意味を持つ。屋外暑熱環境における先行研究は少なく、さらに疲労の回復過程における作用を検討した報告は見当たらない。

第 5 章において、低温化アイススラリーのスポーツ競技現場での運用を目指し、 -2°C の低温化アイススラリーが、これまで課題となっていた摂取量の多さを解決できる可能性を示した。そこで、本章では、ラグビー競技における屋外暑熱環境での運用を目指し、フィールドベースのラグビートレーニング後の身体機能の回復に対して、低温化アイススラリーの低用量摂取が屋内実験と同様に回復効果を示すか評価を実施した結果について述べる。

6-2. 実験概要

6-2-1. 被験者

本実験は、第 5 章と同様に同じチームに所属し、ラグビー経験を 3 年以上有する 18 歳～21 歳の健常な男性大学ラグビー選手 15 名を対象に実施した。除外基準は、急性期の傷害及びリハビリテーション中の選手、通常のトレーニング、試合、その他の活動に参加できない状態の選手とした。被験者には、事前に実験の目的、方法、実験に伴う苦痛及び危険度について十分な説明を行い、書面にて参加の同意を得た。なお本実験は、ヘルシンキ宣言の倫理的原則に則り、人を対象とする生命科学・医学系研究に関する倫理指針に配慮にした上で、慶應義塾大学システムデザイン・マネジメント研究科の研究倫理審査委員会の承認を得て実施した。

6-2-2. 実験手順

本実験は、無作為化比較試験デザインにて実施し、図 31 に実験プロトコルを示した。被験者は、事前に、実験プロトコルの内容を経験し、習熟した状態で実験に参加した。実験開始時に、コントロール群 ($N=8$) とアイススラリー群 ($N=7$) の 2 群に無作為に割り付けた。実験開始前に、被験者は、ランニングとストレッチ運動からなる 30 分

間の標準化されたウォームアップ運動を実施した。その後、被験者はフィールドベースのラグビートレーニングを受けた[97][98]。ラグビートレーニングは、4つのブロック（各15分間）に分かれており、ブロック1とブロック3の後には、4分間のアクティブレストを設定し、ブロック2の後には10分間のハーフタイム休憩を設定した。各ブロックは、ラグビー競技において要求される動作であるウォーキング、ジョギング、クルージング、スクラム、ラック及びモールから構成された。各ブロックの運動強度は、平均心拍数を最大心拍数の70~90%、総走行距離を722m、スプリント回数（加速度 2.5 m/s^2 以上）を14回に設定した。トレーニング中、被験者は常温の水を自由摂取とした。トレーニング終了後、15分間の回復時間を設定し、低温化アイススラリー（ $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）またはコントロール（常温、アイススラリーと同組成）のいずれかを摂取させた。回復時間終了後、被験者は、20mの距離の往復走行を10秒間の回復時間において繰り返すYo-Yo間欠性回復力テストレベル1（テスト、図32）を実施し[99]、走行距離、走行時間、熱容量を算出した。

本実験は、屋外暑熱環境（ $34.6\pm 1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度 $55.1\pm 2.4\%$ 、WBGT $30.5\pm 0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）で実施した。環境条件はWBGT計（TC-300、株式会社タニタ）を用いて、トレーニング前後とテスト前後に地上1.5mの高さで測定した。被験者には、実験日の24時間前から運動、医薬品、栄養補助食品、カフェイン、アルコール類を控えるよう指示した。被験者全員が実験開始4時間前に同じ朝食（タンパク質47g、炭水化物219g、脂質43g）を摂取した。

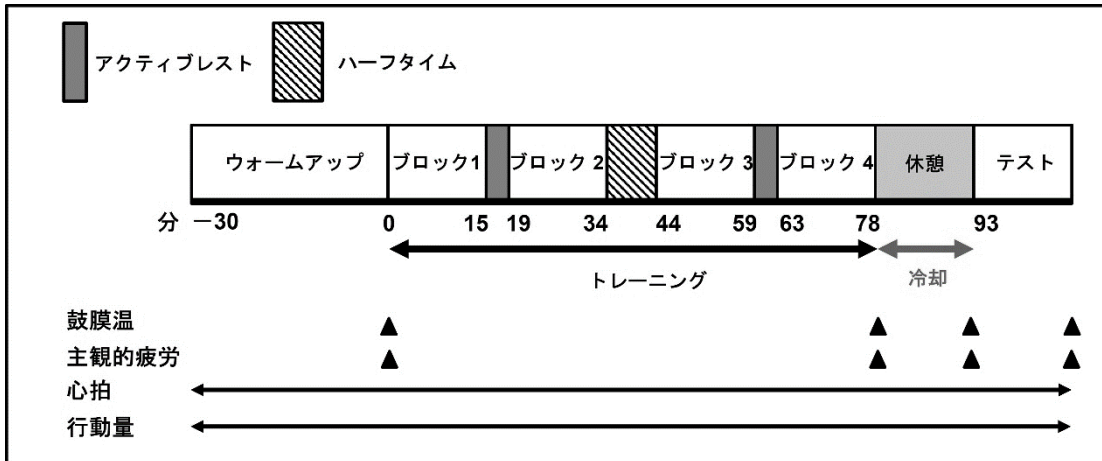


図 31 実践的ラグビー競技モデルの実験プロトコル

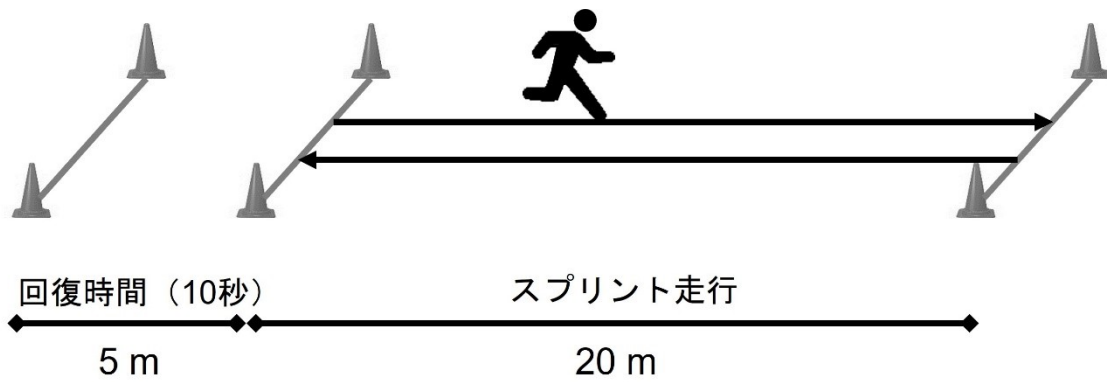


図 32 Yo-Yo 間欠性回復カテストレベル 1

6-2-3. 測定

鼓膜温と自覚的運動強度（主観的疲労）は、トレーニング前後及びテスト前後にて測定した。鼓膜温は、赤外線耳式体温計（IRT6500, Braun GmbH, 図 33）を用いて測定し、3回の測定値の平均値を解析に使用した。自覚的運動強度は、6～20点のスコアからなるボルグスケールを用いて測定した（表 10）[100]。身体の熱容量は、Adams et al. [88]の式を用いて計算した（熱容量（W/m²）=0.965×体重×鼓膜温変化÷体表面積）。また、体表面積は、Du Bois et al. [89]の式を用いて計算した（体表面積（m²）=0.202×体重×0.425×身長^{0.725}）。心拍数は、Polar OH1（Polar Electro, Inc.）を被験者の上腕部に装着し、1分ごとに測定した[84]。運動量は、コイン型アクチグラフ装置（MTN-220, 株式会社アコーズ, 図 34）を用い、内蔵の3軸加速度計で測定した。0.125秒ごとに加速度が基準値を超えた回数を2分毎に活動量として算出した。値が高いほど活動量が多いことを示す[101]。被験者は実験中、MTN-220を装着した。



図 33 鼓膜温計 (IRT6500)

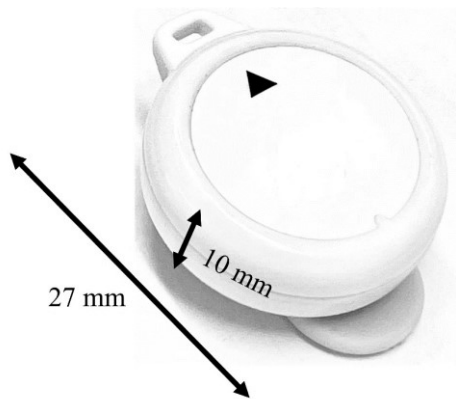


図 34 アクチグラフ (MTN-220)

表 10 自覚的運動強度（主観的疲労）

スコア	自覚的運動強度
20	
19	非常にきつい
18	
17	かなりきつい
16	
15	きつい
14	
13	ややきつい
12	
11	楽である
10	
9	かなり楽である
8	
7	非常に楽である
6	

（[100]より改変引用）

6-2-4. 統計解析

実験結果は、平均値 ± 標準偏差で示した。すべての統計解析は、SAS ソフトウェア パッケージ バージョン 9.4 (SAS Institute Japan Ltd.) を用い、有意水準はすべて 5 %未満として実施した。データの正規性と分散の均質性を Shapiro-Wilk 検定と Bartlett 検定を用いて解析した上で、被験者背景、熱容量、運動量、総走行距離及び走行時間に関しては、Student's t-test もしくは Aspin-Welch's t-test を実施した。鼓膜温、心拍、自覚的運動強度に関しては、二元配置分散分析 (時間 × 群) を行い、有意差が認められた場合、Bonferroni 補正により Post-hoc 解析を行った。

実験に必要なサンプルサイズは、先行研究を参考に[72]、ソフトウェア G*Power (version 3.1.9.6; Düsseldorf, Germany) を用いて算出した。検出力 : 0.95, α : 0.05 とし て算出した結果、各群とも必要な被験者数は 6 名以上となった。

6-3. 結果

6-3-1. 被験者背景

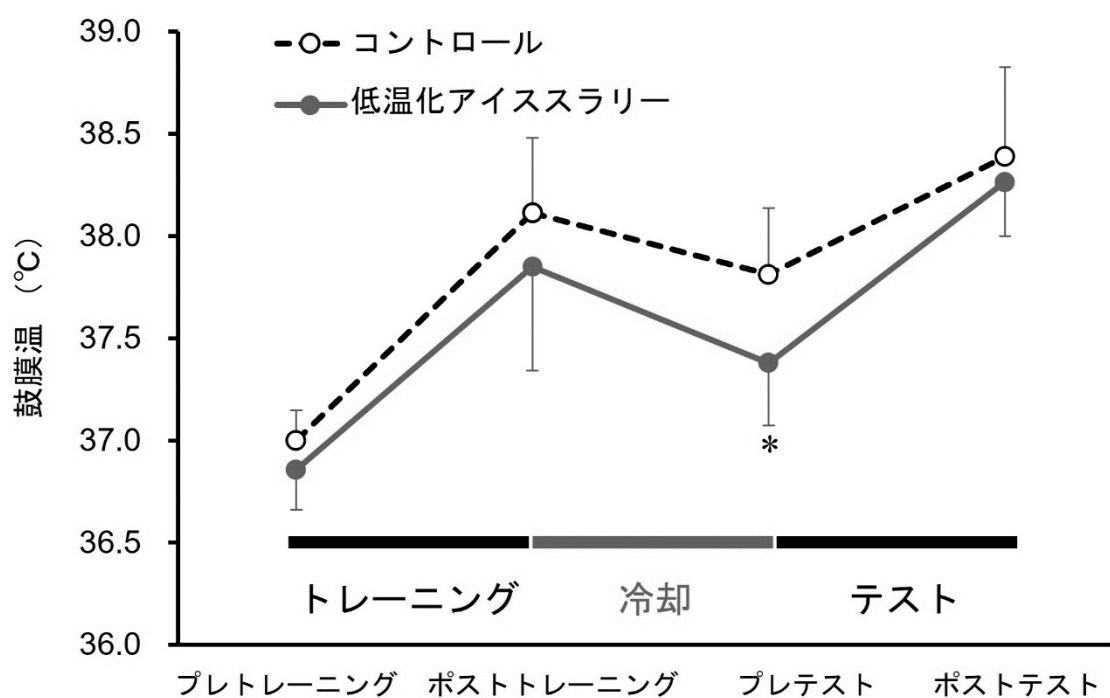
被験者全員 (フォワード 8 名、バックス 7 名) が、プロトコル通りに実験を完了した。被験者の背景を表 11 に示した。

表 11 被験者背景

	コントロール	低温化アイススラリー
年齢 (歳)	19.1 ± 1.0	18.9 ± 0.7
身長 (m)	1.73 ± 0.06	1.71 ± 0.05
体重 (kg)	83.6 ± 8.7	84.1 ± 7.9
BMI (kg/m ²)	28.1 ± 2.0	28.9 ± 3.6
VO ₂ max	45.6 ± 2.2	46.0 ± 3.3

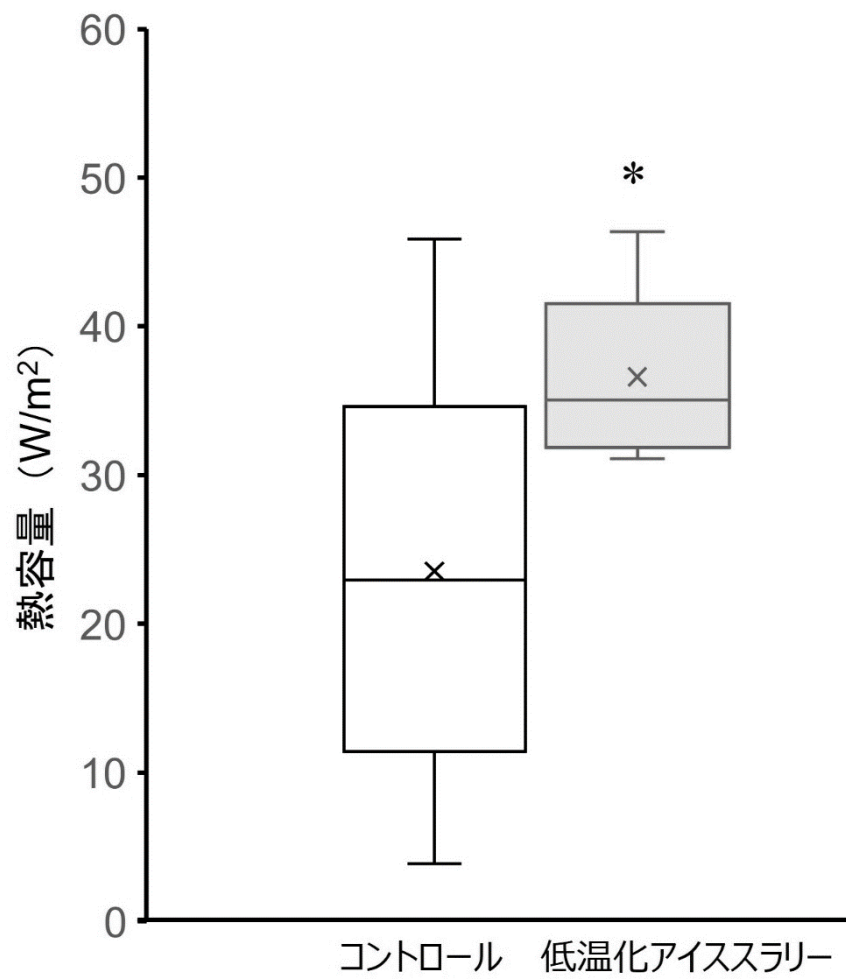
6-3-2. 鼓膜温, 熱容量

実験中の鼓膜温の変化を図 35 に, 熱用量の変化を図 36 に示した. 低温化アイススラリーを摂取することで, コントロール群と比較して有意な鼓膜温の低下が認められた ($p = 0.020$). また, 熱容量についても低温化アイススラリーを摂取することで, 有意な増加が認められた ($p = 0.035$).



* $p < 0.05$ vs. コントロール

図 35 鼓膜温変化

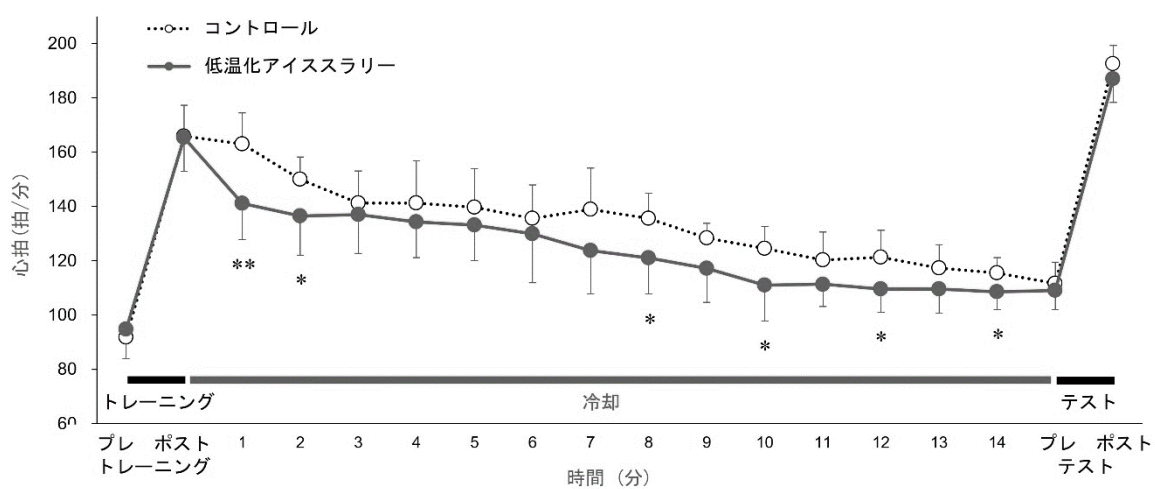


× : 平均値, *p < 0.05 vs. コントロール

図 36 熱容量の変化

6-3-3. 心拍

低温化アイススラリー摂取後の心拍推移を図 37 に示した。低温化アイススラリーを摂取することで、摂取 1 分後 ($p = 0.005$)、2 分後 ($p = 0.040$)、8 分後 ($p = 0.028$)、10 分後 ($p = 0.030$)、12 分後 ($p = 0.031$)、14 分後 ($p = 0.048$) において、有意な低下が認められた。



* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$ vs. コントロール

図 37 心拍推移

6-3-4. 自覚的運動強度

自覚的運動強度は、コントロール群、低温化アイススラリー群ともにプレトレーニングと比較して、ポストトレーニング、プレテスト、ポストテストにおいて有意に増加したが ($p < 0.05$)、両群間に有意差は認められなかった (表 12)。

表 12 自覚的運動強度

群	プレトレーニング	ポストトレーニング	プレテスト	ポストテスト
コントロール	10.1 ± 1.4	15.5 ± 1.4	14.9 ± 1.8	18.3 ± 1.2
低温化 アイススラリー	10.4 ± 1.9	16.4 ± 1.3	15.4 ± 1.3	18.6 ± 0.5

6-3-5. 運動パフォーマンステスト

総走行距離、総走行時間ともに両群間に有意差は認められなかった (表 13)。

表 13 運動パフォーマンステスト

群	総走行距離 (m)	総走行時間 (分)
コントロール	1095.0 ± 265.3	6.6 ± 1.6
低温化 アイススラリー	1142.9 ± 394.5	6.9 ± 2.4

6-3-6. 運動量

トレーニング、テストともに両群間の運動量に有意差は認められなかった (表 14)。

表 14 運動量

群	トレーニング (Counts)	テスト (Counts)
コントロール	1282.8 ± 111.7	238.9 ± 41.8
低温化 アイススラリー	1306.1 ± 42.0	242.9 ± 74.9

6-4. 考察

本実験は、第 5 章において有効性が認められた低温化アイススラリーの競技現場での運用を目指し、屋外暑熱環境での試合直後の疲労回復を想定した運用シナリオにて、その効果を評価したものである。その結果、フィールドトレーニング直後に -2°C の低温化アイススラリーを 5 g/kg 体重の用量で摂取させることで、鼓膜温と心拍の速やかな回復が認められ、運動直後の疲労からの回復を促進することが明らかとなった。

先行研究の多くは、温度と湿度を一定に制御した実験室でアイススラリーの評価を実施してきたが[48]、屋外暑熱環境で、少量の低温化アイススラリーの摂取により疲労の回復を確認したのは、本実験が初めてである。屋外暑熱環境で実施された代表的な先行研究では[72]、深部体温を低下させるために、 7.5 g/kg 体重ものアイススラリーの摂取が必要であったが、ラグビー競技の実践の場において、 7.5 g/kg 体重ものアイススラリーを摂取することは現実的には困難である。しかし、本実験は、運動直後の回復時間に低温化アイススラリーを摂取させることで、標準的な摂取量である 7.5 g/kg 体重と比較して、摂取量を 33 %減量できることを示唆するものであった。本実験は、第 5 章で示した屋内実験をもとに設計された実験であり、外部環境の影響を受けやすい屋外環境においても、 -2°C の低温化アイススラリーを 5 g/kg 体重の用量で摂取させることで、身体の冷却効果が認められた。すなわち、実験プロトコルや屋内と屋外での使用環境の違いはあるものの、低温化アイススラリーの意義を明らかとするものであった。

一方、Nakamura et al. [102]は、 0.5°C のアイススラリーを 4 g/kg 体重で運動後に摂取させると、コントロール群と比べて、深部体温は低下するが、心拍や血圧のパラメータに有意な改善が見られなかったことを報告している。Choo et al. [48]が行ったメタア

ナリシス研究によると、先行研究におけるアイススラリーの平均摂取温度は $-0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ であり、 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ という摂取温度を考慮すると、 4 g/kg という摂取量は少なすぎた可能性が考えられる。このことは、摂取温度が疲労回復効果を得るのに必要な摂取量を規定する上で、重要な要素であることを指し示すものである。今後、低温化アイススラリーの実用化に向けては、摂取温度や摂取量、生理学的な指標（心拍、血圧、深部温度）と疲労回復効果との関係性を詳細に検討していく必要がある。

また、本実験では、15分間の休憩後に、熱容量の変化を測定するために、短時間の運動パフォーマンステスト（約4~10分）を実施している。低温化アイススラリーを摂取することにより、熱容量は有意に増加したが、運動パフォーマンステストにおける自覚的運動強度、走行距離、走行時間には有意な変化が認められなかった。第5章で示した実験において低温化アイススラリーを摂取した際の熱容量の増加量は 50.6 W/m^2 だったが、本実験での増加量は、 36.6 W/m^2 と小さい値であった。これは、運動パフォーマンステストの平均運動時間が6.8分と短かったことが影響したと考えられる。

本実験の知見は、フィールド競技を行うアスリートにとって、いくつかの示唆を与えるものである。アイススラリーの摂取は、先行研究においても持続的な運動パフォーマンスを向上させることが報告されているが、短時間運動に対する効果は、明らかとなっていない。Yeo et al. [18]が実施した屋外暑熱環境での検討では、アイススラリー摂取35分後に深部体温が最も低下したと報告されているが、本実験では、アイススラリー摂取後25分以内に運動パフォーマンステストがすべて完了しており、このことが運動パフォーマンスを改善しなかった要因の一つと考えられる。アイススラリーは、短時間の運動よりも長時間の運動に適した疲労回復手法となり得る可能性が考えられる。

本実験にはいくつかの限界があった。第一に、被験者の安全性を確保するために、直腸温測定の代用として、鼓膜温を使用したことである。鼓膜温は、測定部位が脳に近いという利点があるが、特に屋外においては、外部環境（太陽光、対流など）の影響を受けやすいという欠点がある。今後、内服型の体温計などを用いることで、屋外暑熱環境での競技中の深部体温変化を捉えていくことが必要である。第二に、本実験で実施した運動パフォーマンステストの運動時間が短く、被験者数も限定的であった

ため、熱容量の増加に伴う運動パフォーマンスの変化を十分に捉えることができなくなったことである。今後、低温化アイススラリー摂取が、どのような運動形態に対して効果を示すのか、競技の種類や実験規模を大きくすることで、検証していく必要がある。

低温化アイススラリーを利用することのメリットとしては、身体の冷却効果の高さのみならず、水分、電解質、栄養成分の補給が同時に可能なことや、それらの配合量を調節することで、摂取温度をコントロール可能なことが挙げられる。しかし、過度な低温化は有害事象を招く恐れがあり、スポーツ競技の現場で運用する上で、適切な摂取温度を見出すためには、さらなる検討が必要である。さらに低温化したアイススラリーの身体への影響については、第8章にて述べる。

6-5. 本章のまとめ

屋外暑熱環境において、ラグビー競技直後に低温化アイススラリーを摂取することで、摂取量を減量（33 %減）しても、生理機能（体温、心拍）の回復を促進することが明らかとなった。

以上の結果から、試合直後の疲労回復を想定した運用シナリオにおいて、低温化アイススラリーを用いた疲労回復手法は有用な手法となり得る可能性が示唆された。

第7章 ラグビー競技後の夜間睡眠時における評価

第5章、第6章において、 -2°C の低温化アイスラリーは低用量（5 g/kg 体重）の摂取でも身体を冷却し、疲労回復手法として運用可能なことを示してきた。そこで、本章では、前章よりも、さらに低用量（2 g/kg 体重）の摂取でも疲労回復効果を示すか、睡眠による疲労回復を想定した運用シナリオでの検討結果について述べる。まず7-1節では、本実験の目的及び背景を述べ、7-2節では、実験の概要を述べる。次に7-3節では、本実験の結果を詳述し、7-4節では、本実験結果の考察を論じる。最後に7-5節で本章のまとめを述べる。

7-1. 目的及び背景

アスリートが試合やトレーニングによって生じる疲労を軽減するために、競技現場においては、様々な疲労回復戦略が試みられている[103]。睡眠、ストレッチ、アクティブレスト、コンプレッションウェア、マッサージなど、疲労状態からの回復速度を速めるための様々な戦略について、多くの研究が実践されている[104][105][106]。その中において、睡眠は、翌日の活動に向けた疲労回復戦略として最も重要であると考えられているが、不規則なトレーニングや夏季の暑さ等の環境要因に大きく影響されることが知られている。地球温暖化の影響もあり、年々熱帯夜（夜間最低気温 25°C 以上）の日数も増加している（図4）。例えば、アスリートが暑熱環境に曝されると、睡眠中の覚醒度が高まり、徐波睡眠とレム睡眠が減少し睡眠の質が悪化することが知られている[107]。また、早朝や夜間のトレーニングや試合は、睡眠の質を著しく低下させることも知られている[108]。

睡眠評価においては、睡眠時間と睡眠の質（睡眠潜時、中途覚醒、睡眠効率等）が重要な指標となっているが、それらは概日リズムの影響を大きく受けることが知られている[109][110]。そのため、睡眠は深部体温の変動とも密接に関連しており、眠気は深部体温が急速に低下する時間帯に生じやすいとされている[111]。深部体温は日中に高く、夜間に低くなり、この深部体温のリズムの乱れが睡眠の質を悪化させることが

知られている[112]. アスリートの深部体温のリズムに大きく影響を与える要因としては、夏季のトレーニングや試合が挙げられる. Skein et al. [36], 暑熱環境において、5日間の連続的なトレーニングを行うと、深部体温が本来低くあるべき時間帯に高い状態にあるため、睡眠の質（入眠潜時、中途覚醒）が悪化することを報告している. このことは、アスリートの睡眠の質を向上させ、良好な疲労回復効果を得るためには、就床前の深部体温の制御が重要なことを示唆している. アスリートの睡眠の質の改善を目的とした先行研究としては、トレーニング終了後の全身の冷水浸漬があり、深部体温を低下させると睡眠潜時を短縮できることが報告されている[38]. 一方で、外部冷却手法は、睡眠の質を改善しないとの報告もあり[113][114], 一貫した見解は得られていない. このように、外部冷却手法による睡眠の質への効果は、未だ明らかとなっていない. 外部冷却手法と比較して、深部体温の低下に関しては、前章までに述べたように、低温化アイススラリーの摂取による身体内部冷却手法が効率的であるが、これまで、就床前のアイススラリーの摂取が、睡眠の質に及ぼす影響について検討した研究は見当たらない.

上述の通り、アスリートが、疲労状態からの早期回復を図り、翌日以降も高い運動パフォーマンスを発揮するためには、質の良い睡眠時間を十分に確保することが重要となる[115]. しかし、実際の競技現場においては、夏季の過酷な環境におけるトレーニングや試合の遠征などにより、十分な睡眠時間を確保することが難しいのが現状であり、睡眠の質を向上させることによる疲労回復の促進が重要な戦略となる[116]. 特に、ラグビー競技のようなフルコンタクトスポーツにおいては、タックルやスクラム等の激しい衝突を伴う活動はエネルギーコストが高く、暑熱環境においては、特に深部体温の上昇が激しいため[117][118], Swinbourne et al. [119]は、プロラグビー選手は、常に睡眠不足状態にあることを報告している.

そこで、本章では、暑熱環境でのラグビー競技後の夜間睡眠による疲労回復を低温化アイススラリーの摂取が促進するとの仮説を立て、睡眠による疲労回復を想定した運用シナリオで評価した結果について述べる.

7-2. 実験概要

7-2-1. 被験者

本実験は、第5章、第6章と同様に同じチームに所属し、ラグビー経験を3年以上有する18歳～21歳の健常な男性大学ラグビー選手13名（年齢： 19.1 ± 0.9 歳，身長： 1.71 ± 0.05 m，体重： 84.5 ± 8.4 kg， $VO_2 \text{ max}$ ： 61.7 ± 4.8 mL/kg/min）を対象に実施した。被験者の実験前週の自己申告による平均睡眠時間は 7.8 ± 0.7 時間であり，睡眠および概日リズムに障害がなく，それらに影響を与える可能性のある薬剤の使用歴はなかった。被験者には，事前に実験の目的，方法，実験に伴う苦痛及び危険度について十分な説明を行い，書面にて参加の同意を得た。なお本試験は，ヘルシンキ宣言の倫理的原則に則り，人を対象とする生命科学・医学系研究に関する倫理指針に配慮にした上で，慶應義塾大学システムデザイン・マネジメント研究科の研究倫理審査委員会の承認を得て実施した。

7-2-2. 実験手順

図38に実験デザインを示す。本実験は無作為化交差試験デザインにて実施し，被験者は14日間の間隔をあげ，1日間の睡眠介入実験に2回参加した。2回の実験共に同じ手順で行われ，被験者は，それぞれ各実験において， -2 °Cの低温化アイススラリー，または常温のコントロール（低温化アイススラリーと同じ組成）の何れかを 2 g/kg 体重の用量で就床30分前に摂取した（通常の摂取量よりも73%減量）。各実験日の最高気温は 34.3 °Cと 33.0 °C，平均相対湿度は73%と86%であった。また，16日間の実験期間中の平均最高気温は 33.0 ± 2.2 °C，平均相対湿度は 77.3 ± 4.5 %であった。16日間の実験期間中，被験者は通常のラグビートレーニング（週10時間のフィールドトレーニング）に参加し，通常的生活習慣を維持した。実験日の前日から終了までは，実験以外の激しい運動，飲酒，薬剤，カフェイン，サプリメントの摂取を控えるように指示した。被験者は，実験日当日は，日中に60分間のフィールドにおけるラグビートレーニングに参加した上で，夜間の睡眠計測を行った。被験者は，就床5時間前に，入浴及び夕食（約1,900 kcal：炭水化物235.2 g，脂質63.1 g，タンパク質77.2 g）を済ませた。

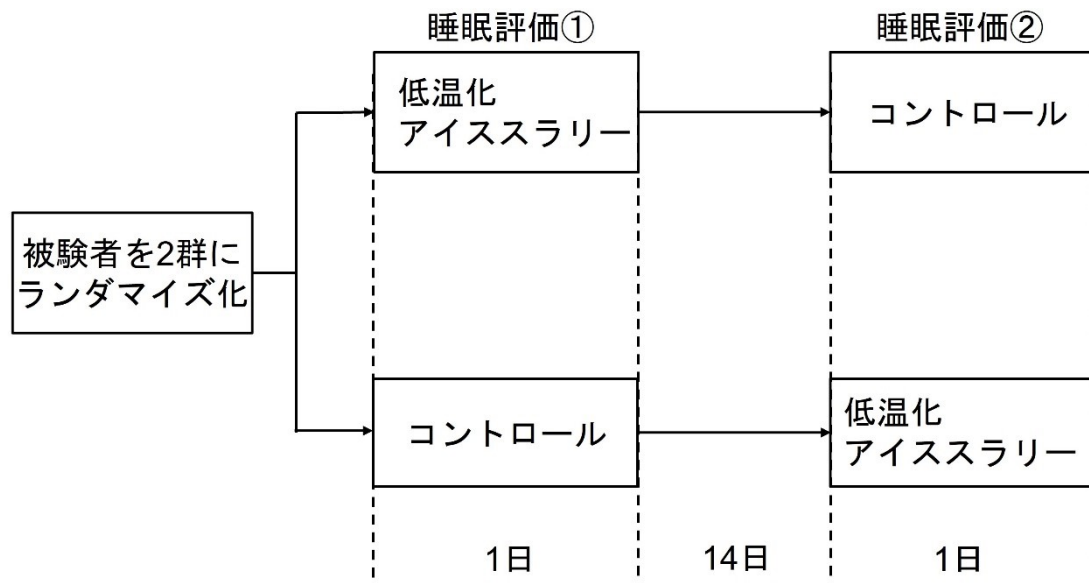


図 38 睡眠評価の実験デザイン

7-2-3. フィールドトレーニング強度の測定

両実験群間において、日中の 60 分間のフィールドトレーニングの強度に差がないことを確認するため、自覚的運動強度をトレーニングの前後に測定した。自覚的運動強度は、表 15 に示す 6~20 点のスコアからなるボルグスケール[100]を用いて測定した。また、フィールドトレーニング中の運動量は、コイン型アクチグラフ装置 (MTN-220, 株式会社アコース) を用い、内蔵の 3 軸加速度計で測定した。0.125 秒ごとに加速度が基準値を超えた回数を 2 分毎に活動量として算出した。値が高いほど活動量が多いことを示す[101]。被験者は実験中、MTN-220 を装着した。

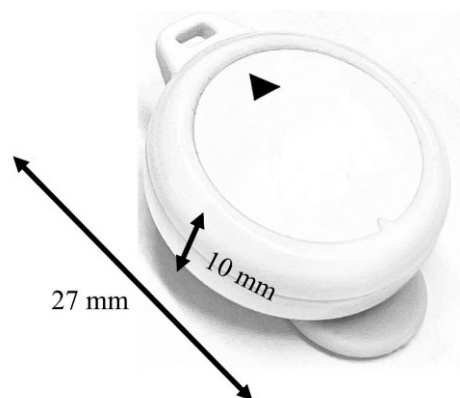
表 15 自覚的運動強度

スコア	自覚的運動強度
20	
19	非常にきつい
18	
17	かなりきつい
16	
15	きつい
14	
13	ややきつい
12	
11	楽である
10	
9	かなり楽である
8	
7	非常に楽である
6	

([100]より改変引用)

7-2-4. 客観的睡眠評価（睡眠センサー）

睡眠センサーを用いた客観的な睡眠評価は、各被験者の大学寮の自室で実施した。室温を 25 °C に設定し、就床 30 分前から起床まで、アクチグラフ装置（MTN-220, 図 39）をズボンの前側に付属のクリップにより装着することで測定した[120][121]。本実験に用いたアクチグラフ装置と睡眠ポリグラフ装置の睡眠・覚醒解析結果の一致率は 85 % である[101]。睡眠時の被験者の体動（活動量）を MTN-220 から NFC インターフェース（RC-S380, ソニー株式会社）を介して、SleepSignAct ver. 2.0 ソフトウェア（キッセイコムテック株式会社）を用いて抽出し、先行研究[101]で開発された睡眠判定アルゴリズムを用いて、評価 4 分前、評価 2 分前、評価時、評価 2 分後、評価 4 分後の活動量（X-2, X-1, X, X+1, X+2）を基に睡眠判定を行った。客観的な睡眠パラメータとしては、就床時刻、起床時刻、在床時間、総睡眠時間、睡眠潜時、中途覚醒時間、睡眠効率を解析対象とした（図 40）。



睡眠判定アルゴリズム

$$Z = 0.24669 x_{-2} + 0.2562 x_{-1} + 0.408771 x + 0.155046 x_{+1} + 0.136726 x_{+2}$$

$Z < 1$: Sleep

$Z > 1$: Wake

図 39 睡眠センサー（MTN-220）

また、各睡眠パラメータは以下のように定義される[122].

睡眠パラメータ

- ・ 就床時刻：ベッドに横になった時刻
- ・ 起床時刻：ベッドから起きた時刻
- ・ 在床時間：ベッドに横になっていた時間
- ・ 睡眠時間：在床時間中に睡眠と判定された時間
- ・ 睡眠潜時：就床後、入眠までにかかった時間
- ・ 中途覚醒時間：入眠後の覚醒時間
- ・ 睡眠効率：在床時間に対する睡眠時間の割合

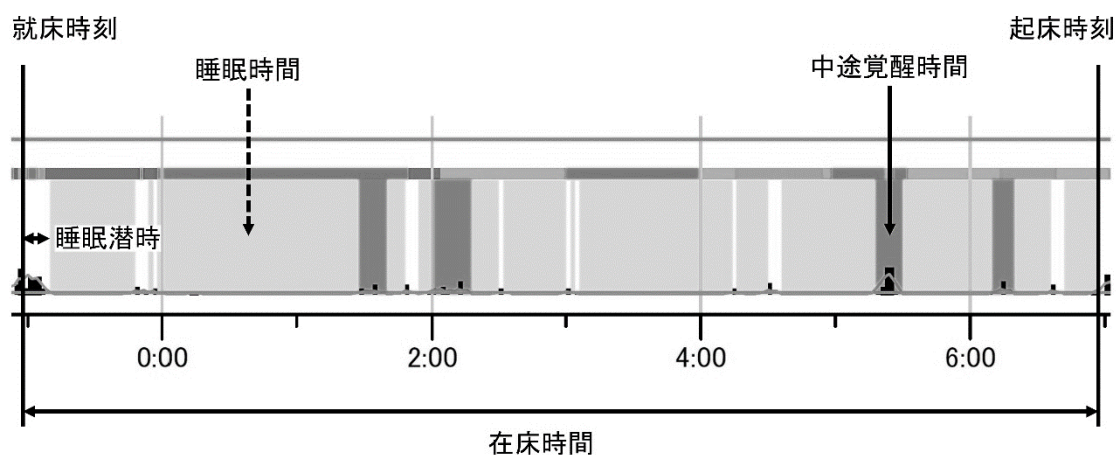


図 40 客観的睡眠パラメータの解析

7-2-5. 主観的睡眠評価（睡眠アンケート）

アンケートによる主観的な睡眠評価は、起床時に図 41 に示す起床時睡眠感調査票（MA 版）（OSA-MA, Oguri-Shirakawa-Azumi sleep inventory version MA）を実施した [123][124]. OSA-MA は、第 1 因子「起床時眠気」、第 2 因子「入眠と睡眠維持」、第 3 因子「夢み」、第 4 因子「疲労回復」、第 5 因子「睡眠時間」の 5 因子 16 項目からなる 4

択式のアンケートで構成される。OSA-MA から得られる睡眠感は、被験者固有の定常的な睡眠感を捉えるものではなく、日々変動する睡眠感を統計的に尺度化したものである。OSA-MA から得られる各スコアは、26～75 歳（男女 670 名）の母集団の標準化得点の平均を 50 点としており、50 点よりも高い場合には、睡眠の質が良い状態と判断され、50 点よりも低い場合は睡眠の質が悪い状態と判断される。

アンケートの 16 項目は、以下のように 5 因子に集約され（表 16）、一般社団法人睡眠改善協議会が提供する解析シート[125]を用いて得点化される。

表 16 起床時睡眠感調査票（MA 版）アンケートの因子構成項目

因子	アンケート項目
第 1 因子：起床時眠気	2, 4, 8, 14
第 2 因子：入眠と睡眠維持	3, 7, 10, 13, 16
第 3 因子：夢み	9, 12
第 4 因子：疲労回復	1, 5, 11
第 5 因子：睡眠時間	6, 15

朝,目覚めたらすぐ記入してください

記入時刻 午前・午後 時 分

この調査票は、あなたの睡眠の状態についてお聞きするものです。

睡眠の時刻等について記入してください。午前・午後どちらかを○で囲んでください。

- ① 昨夜、おやすみになった時刻 (午前・午後) _____ 時 _____ 分
- ② 今朝、目覚めた時刻 (午前・午後) _____ 時 _____ 分
- ③ 昨夜の睡眠時間 およそ _____ 時間 _____ 分

昨夜の睡眠の状態や現在の心身の状態についてお聞きします。4箇所の縦線は各質問項目の状態の程度を示しています。記入例を参考に、あなたの状態にあてはまる線上に○印で囲んでください。

記入例

1. 疲れが残っている 非常に や や 非常に 疲れがとれている

◎ 正しい書き方 × 誤った書き方

	非常に	や	や	非常に	
1. 疲れが残っている					疲れがとれている
2. 集中力がある					集中力がない
3. ぐっすり眠れた					ぐっすり眠れなかった
4. 解放感がある					ストレスを感じる
5. 身体がだるい					身体がシャキッとしている
6. 食欲がある					食欲がない
7. 寝つくまでにウトウトしていた状態が多かった					寝つくまでにウトウトしていた状態が少なかった
8. 頭がはっきりしている					頭がボーとしている
9. 悪夢が多かった					悪夢はみなかった
10. 寝付きがよかった					寝付きが悪かった
11. 不快な気分である					さわやかな気分である
12. しょっちゅう夢をみた					夢をみなかった
13. 睡眠中にしょっちゅう目が覚めた					睡眠中に目が覚めなかった
14. いますぐ、調査にテキパキと答えられる					答えるのは、めんどうである
15. 睡眠時間が長かった					睡眠時間が短かった
16. 眠りが浅かった					眠りが深かった

図 41 起床時睡眠感調査票 (MA版) アンケート用紙

([125]より引用)

7-2-6. 統計解析

実験結果は、平均値 ± 標準偏差で示した。すべての統計解析は、SAS ソフトウェアパッケージバージョン 9.4 (SAS Institute Japan Ltd.) を用いて実施した。データの正規性と分散の均質性を Shapiro-Wilk 検定と Bartlett 検定を用いて解析した上で、Paired t-test または Wilcoxon signed-rank 検定を用いて解析した。効果量の測定には、Cohen's d を用いた[126]。Cohen's d は、0.2~0.5 を効果量小、0.5~0.8 を効果量中、0.8 以上を効果量大とした。被験者のサンプルサイズは、先行研究の睡眠潜時を参考に[110]、ソフトウェア G*Power (version 3.1.9.6; Düsseldorf, Germany) を用いて[127]、効果量 (0.90)、 α 誤差 (0.05)、検出力 (0.8) として算出し、適切なサンプルサイズは 12 以上となった。

7-3. 結果

7-3-1. フィールドトレーニング強度

日中のトレーニング時の自覚的運動強度及び運動量を示す (表 17)。60 分間のトレーニング前後の自覚的運動強度及びトレーニング中の運動量は、両群間で有意な差は認められなかった。

表 17 フィールドトレーニング時の自覚的運動強度及び運動量

自覚的運動強度		コントロール	低温化 アイススラリー	p 値	Cohen's d
自覚的 運動強度	トレーニング前	10.7 ± 1.3	10.6 ± 1.6	0.705	0.19
	トレーニング後	18.1 ± 1.6	18.0 ± 1.7	0.828	0.17
トレーニング中の運動量 (counts)		1487.8 ± 121.3	1444.3 ± 122.6	0.348	1.29

7-3-2. 客観的睡眠評価（睡眠センサー）

MTN-220 から得られた各種睡眠パラメータの値を表 18 に示す。就床時刻，起床時刻，在床時間，睡眠時間，中途覚醒時間，睡眠効率においては，両群間に有意差は認められなかったが，低温化アイススラリー群において，睡眠潜時の有意な短縮が認められた。

表 18 睡眠センサーによる客観的睡眠評価

睡眠パラメータ	コントロール	低温化 アイススラリー	p 値	Cohen's d
就床時刻	23:28 ± 00:43	23:49 ± 01:14	0.451	0.35
起床時刻	07:09 ± 00:59	07:04 ± 00:33	0.755	0.11
在床時間（分）	461.2 ± 65.5	434.8 ± 69.8	0.351	0.39
睡眠時間（分）	259.5 ± 60.1	255.4 ± 64.5	0.867	0.07
睡眠潜時（分）	72.3 ± 60.2	34.3 ± 23.6 *	0.026	0.83
中途覚醒時間（分）	117.2 ± 54.0	133.8 ± 45.2	0.290	0.33
睡眠効率（%）	56.4 ± 11.4	58.8 ± 11.7	0.535	0.21

* p < 0.05 vs. コントロール

7-3-3. 主観的睡眠評価（睡眠アンケート）

OSA-MA スコアから得られた各種睡眠パラメータの値を表 19 に示す。「起床時眠気」，「入眠と睡眠維持」，「夢み」，「睡眠時間」においては，両群間に有意差は認められなかったが，「疲労回復」においては，低温化アイススラリー群に有意な改善が認められた。

表 19 睡眠アンケートによる主観的睡眠評価

睡眠パラメータ	コントロール	低温化 アイススラリー	p 値	Cohen's d
起床時眠気	42.9 ± 6.0	46.2 ± 7.7	0.165	0.48
入眠と睡眠維持	38.6 ± 9.7	41.8 ± 9.4	0.350	0.34
夢み	50.1 ± 10.0	50.7 ± 8.2	0.875	0.07
疲労回復	40.1 ± 6.9	46.8 ± 6.5 *	0.030	1.00
睡眠時間	45.5 ± 9.1	46.2 ± 8.3	0.781	0.08

* p < 0.05 vs. コントロール

7-4. 考察

本実験は、大学ラグビー選手を対象に、就床前の低温化アイススラリーの摂取が夏季における夜間睡眠の質に及ぼす影響を評価した初めての実験である。就床 30 分前に -2℃の低温化アイススラリーを 2 g/kg 体重の用量で摂取することで、客観的な睡眠パラメータである睡眠潜時が短縮し、主観的な睡眠パラメータである OSA-MA スコアの「疲労回復」が有意に改善した。このことは、低温化アイススラリーを摂取することで、寝つきが改善し、夜間の睡眠による疲労の回復が促進されたことを意味する。特に、睡眠潜時、睡眠効率、中途覚醒時間といった睡眠パラメータは、季節変動の影響を受けやすいことが知られており、夏季は他の季節と比較して、睡眠の質が著しく低下することが知られている[128]。夏季に睡眠の質が低下する原因の一つとしては、深部体温や皮膚温の高さが影響している[129][130][131]。本実験は、夏季に行った実験であったこともあり、コントロール群における客観的な睡眠パラメータは、在床時間 461.2 ± 65.5 分、睡眠時間 259.5 ± 60.1 分、睡眠潜時 72.3 ± 60.2 分、中途覚醒時間 117.2 ± 54.0 分、睡眠効率 56.4 ± 11.4 %と被験者の睡眠の状態が悪化していることが示唆された。さらに、睡眠の主観的な評価手法である OSA-MA においても、夢み以外のスコアは、すべて 50 点未満であり、主観的にも睡眠の質が悪い状態であったといえる。ラグビー選手の睡眠を検討した他の先行研究と比較しても、本実験における睡眠の質は低いものであった[119][132]。本実験において、睡眠の質が悪かった主な原因としては、

被験者が暑熱環境において、昼間、フィールドトレーニングを受けていたことが考えられる。表 17 で示したように、フィールドトレーニング後の自覚的運動強度と運動量は 2 群間で有意差は認められず、実験当日の 2 群間の運動強度は同程度であったといえる。睡眠の質に対して、急性的な影響を及ぼす可能性のある要因としては、暑熱環境でのフィールドトレーニングが考えられる。

先行研究によると、就床時刻、起床時刻、在床時間、睡眠時間、中途覚醒時間、睡眠効率の睡眠パラメータに対して、身体外部冷却は有意な改善作用を示さないが、睡眠潜時に関しては改善するとの報告がある[38][113]。睡眠潜時は、深部体温の変化と連動することが報告されている[110]。本実験においては、低温化アイススラリーを摂取することにより、深部体温が急速に低下し、睡眠潜時が改善された可能性が考えられる。睡眠への作用を目的にした実験ではないが、先行研究において、30 分前にアイススラリー（温度記載なし）を 2 g/kg 体重の用量で摂取すると、深部体温がわずかではあるが低下するとの報告がある[133]。そこで、本実験においては、就床 30 分前に -2°C の低温化アイススラリーを 2 g/kg 体重で摂取させた。本実験は、室温 25°C で管理された環境での実験であり、暑熱環境ではなく、さらにアイススラリーの温度も通常よりも低い温度であったため、2 g/kg 体重という摂取量は、睡眠の質を改善する上では、十分な量であったと考えられる。また実験期間中、低温化アイススラリーの摂取に伴う有害事象は認められず、 -2°C の低温化アイススラリーの有用性は高いと考えられた。

本実験にはいくつかの限界があった。第一に、本実験では、睡眠ポリグラフ装置の代わりに、アクチグラフ装置を使用して睡眠の質を評価したことが挙げられる。アクチグラフは睡眠潜時や中途覚醒時間を過小評価し、睡眠時間や睡眠効率を過大評価する可能性が指摘されている[134]。また、本実験で使用した MTN-220 は睡眠の深さ（レム睡眠、ノンレム睡眠）を測定できないため、アイススラリーの摂取が睡眠の深さに及ぼす影響を明らかにするためには、睡眠ポリグラフ装置を用いたさらなる研究が必要である。第二に、本実験はサンプル数が少なく、睡眠の質の測定期間も 1 日と短かったことが挙げられる。そのため、「初夜効果」と呼ばれる、睡眠検査初日の夜に睡眠の質が低下するという現象が影響していた可能性も否定できず[135]、就床時の低温化

アイススラリーの摂取が、睡眠の質に及ぼす影響を明らかにするためには、より大規模かつ長期間の実験が必要である。第三に、低温化アイススラリーの摂取は、客観的睡眠パラメータである睡眠潜時、主観的パラメータである「疲労回復」以外の睡眠パラメータを改善しなかったことが挙げられる。上記パラメータに対しては、2 g/kg 体重という摂取量は効果を示したが、今後、さらに摂取温度と摂取量に関する検討が必要である。最後に、本実験では、睡眠中の深部体温の変化を測定することができなかったことが挙げられる。深部体温の測定は、被験者の睡眠の質を阻害する可能性があるため、非接触で連続的に長時間測定可能な方法の開発が必要である。

7-5. 本章のまとめ

就床時の低温化アイススラリー 2 g/kg 体重の摂取（通常の 73 %減量）は、暑熱環境下でのフィールドトレーニング後の寝つきを改善し、疲労からの回復を促進する可能性を示した。

以上の結果から、睡眠による疲労回復を想定した運用シナリオにおいて、低温化アイススラリーを用いた疲労回復手法は有効な手法となり得る可能性が示唆された。

第8章 低温化アイススラリーの身体への影響

第5章から第7章において、 -2°C の低温化アイススラリーの低用量摂取が、3つの疲労回復シナリオにおいて有効なことを示してきた。そこで、本章では、アイススラリーの温度を -2°C から -5°C に、さらに低温化した際の身体への影響についての検討結果について述べる。まず、8-1節では本実験の目的及び背景を、8-2節では実験の概要を述べる。次に8-3節では本実験の結果を詳述し、8-4節では本実験結果の考察を論じる。最後に8-5節で本章のまとめを述べる。

8-1. 目的及び背景

前章までにおいて述べてきたように、暑熱環境におけるスポーツ競技は、熱中症の発症リスクが高いため、アスリートの安全性を確保する上で、身体の冷却戦略は重要となる。熱中症の最も重要な判定指標には、深部体温の上昇が挙げられるが、主要な病態メカニズムを解析する上で、全身の炎症反応も重要な指標となっている[31]。そのため、熱中症の初期段階において、適切な処置が行われなければ血液凝固異常や多臓器機能障害等の重症化を招く恐れがあり、これらの現象にはサイトカインが関与していることが報告されている[136][137]。第1章でも述べたがサイトカインとは、主に免疫系の細胞から分泌されるタンパク質のことであり、標的細胞表面に存在する特異的な受容体を介して、各種生理的な反応を引き起こす。ホルモンと明確には区別されていないが、一般的にホルモンのように特定の臓器から産生されず、局所部位で産生されることが多い。サイトカインは、炎症性サイトカインと抗炎症性サイトカインに大きく分類され、両者のバランスによって身体内部の恒常性が維持されている[138]。暑熱環境に身体が曝露されると、この恒常性が破綻し、熱中症の重症化や長期化を招くリスクが高まる。

前章までにおいて、低温化アイススラリーのスポーツ競技現場における実践的な運用を目指し、3つの疲労回復シナリオにおいて、その有効性を明らかにしてきた。しかし、現在のところ、低温化アイススラリーを実際の競技現場にて疲労回復手法として

運用した報告はなく、低温化アイススラリーの摂取による身体への影響（頭痛，胃腸症状等）も懸念される．そこで，本章では，アスリートが低温化アイススラリーを安心して運用できるようにするため，身体への影響を検討すると共に，より効果的な身体内部冷却手法として，今後の改良の方向性を探ることを目的とした．具体的には，前章よりも，さらに低温化した -5°C のアイススラリーの身体への影響を生理学的指標及び生化学的指標を解析することで評価を行った．

8-2. 実験概要

8-2-1. 被験者

本実験は，次の選択基準に合致し，除外基準に抵触しない者を被験者として選択した．なお本実験は，ヘルシンキ宣言の倫理的原則に則り，人を対象とする生命科学・医学系研究に関する倫理指針に配慮にした上で，国立スポーツ科学センター倫理審査委員会の承認を受けた後に，被験者に実験の目的，内容，方法等について十分説明を行い，文書による実験参加の同意を得て実施した．

1) 選択基準

- ・同意取得時の年齢が 20 歳以上 35 歳以下の健常な男性

2) 除外基準

- ・体重が 36 kg 未満の者
- ・消化器系に閉塞性の疾患がある者
- ・嚥下障害のある者
- ・1 か月以内に消化器系の手術をした者
- ・心臓ペースメーカーまたは他の電子医療機器を移植した者
- ・疾病に罹患中の者

8-2-2. 実験手順

本実験は，健常な成人男性 8 名を対象とした無作為化交差試験デザインにて実施し

た。第I期、第II期試験は、5日間以上のウォッシュアウト期間を設け、試験食品を交差させて実施した。-5 °Cに冷却した試験食品（低温化アイススラリー）の摂取を先行するグループと28 °Cの試験食品（コントロール）の摂取を先行するグループに無作為に割り付けた。なお、両試験食品は同一の組成である（表8）。被験者は、室温36 °C、相対湿度50%の実験室において120分間、座位安静を保った。実験室に入室10分後から、試験食品1.25 g/kg体重を5分毎に6回摂取した（計7.5 g/kg体重）。

実験室への入室前（Pre）及び退室15分後（Post）に、医務室にて肘正中皮静脈より3 mL採血し、血清を-80 °Cで保存した。唾液は採血と同時に、水で口を漱いだ後、コニカルチューブに唾液1 mL以上を採取し、遠心分離（4 °C, 2,600 × g, 15分）を行った。唾液上清1 mLを採取し、プロテアーゼ阻害剤（cOmplete™, Roche）を添加して-80 °Cで保存した。主観的な指標である温熱感覚アンケートは、9段階スケール（1非常に寒い～5中立（快適）～9非常に暑い、表20）にて記録した[139]。体温は、直腸温と鼓膜温を測定した。直腸温は、専用のゴムカバーを装着した体腔挿入型温度プローブ（ITP010-11, 日機装サーモ株式会社）に潤滑剤を塗り、被験者自らが直腸内に15 cm挿入してデータロガー（N542R, 日機装サーモ株式会社）を用いて記録した。鼓膜温は、赤外線耳式体温計（IRT6500, Braun GmbH）を用いて測定した。なお、直腸温、鼓膜温及び温熱感覚アンケートは、実験室入室後0分、40分、100分に記録した。また、実験中は、FreeStyle リブレ（Abbott）を上腕部に張り付けることで、間質液中グルコース濃度を経時的に測定すると共に、熱中症症状、頭痛、胃腸症状等の有害事象の有無をモニターした。実験プロトコルを図42に示す。

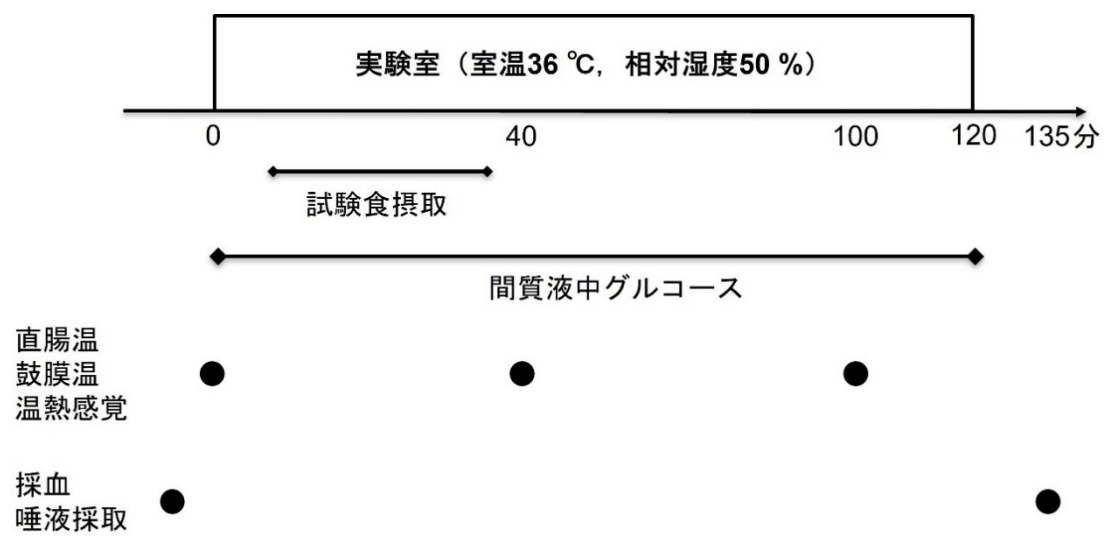


図 42 実験プロトコル

表 20 温熱感覚アンケート

スコア	温熱感覚
9	非常に暑い
8	
7	暑い
6	
5	中立 (快適)
4	
3	寒い
2	
1	非常に寒い

([139]より改変引用)

8-2-3. サイトカイン分析

血中及び唾液中サイトカイン分析は、Olink Proteomics AB（スウェーデン）にて、Olink® Target 48 Cytokine の標準プロトコルに従い、Proximity Extension Assay により 45 種のサイトカインを一斉分析した[140][141]。Olink® Target 48 Cytokine は、サイトカイン研究及び炎症関連疾患研究において重要となるシグナル伝達及び炎症プロセスに関連する主要な経路を網羅的に測定することができる。本分析手法の主な機能と利点としては、45 種のタンパク質バイオマーカーの同時分析が可能で、わずか 1 μ L のサンプル量で定量可能 (pg/mL) なことが挙げられる。

定量タンパク

Fms-related tyrosine kinase 3 ligand (FLT3LG)
Granulocyte colony-stimulating factor (CSF3)
Granulocyte-macrophage colony-stimulating factor (CSF2)
Interferon gamma (IFN- γ)
Interleukin-1 beta (IL-1 β)
Interleukin-2 (IL-2)
Interleukin-4 (IL-4)
Interleukin-6 (IL-6)
Interleukin-7 (IL-7)
Interleukin-8 (CXCL8)
Interleukin-10 (IL-10)
Interleukin-13 (IL-13)
Interleukin-15 (IL-15)
Interleukin-17A (IL-17A)
Interleukin-17C (IL-17C)
Interleukin-17F (IL-17F)
Interleukin-18 (IL-18)
Interleukin-27 (IL-27)
Interleukin-33 (IL-33)
Lymphotoxin-alpha (LTA)
Macrophage colony-stimulating factor 1 (CSF1)
Oncostatin-M (OSM)
Tumor necrosis factor (TNF)
Tumor necrosis factor ligand superfamily member 10 (TNFSF10)
Thymic stromal lymphopoietin (TSLP)
Tumor necrosis factor ligand superfamily member 12 (TNFSF12)
C-C motif chemokine 2 (CCL2)

C-C motif chemokine 3 (CCL3)
C-C motif chemokine 4 (CCL4)
C-C motif chemokine 7 (CCL7)
C-C motif chemokine 8 (CCL8)
C-C motif chemokine 13 (CCL13)
C-C motif chemokine 19 (CCL19)
C-X-C motif chemokine 9 (CXCL9)
C-X-C motif chemokine 10 (CXCL10)
C-X-C motif chemokine 11 (CXCL11)
Eotaxin (CCL11)
Stromal cell-derived factor 1 (CXCL12)
Hepatocyte growth factor (HGF)
Interstitial collagenase (MMP-1)
Macrophage metalloelastase (MMP-12)
Oxidized low-density lipoprotein receptor 1 (OLR1)
Pro-epidermal growth factor (EGF)
Protransforming growth factor alpha (TGF- α)
Vascular endothelial growth factor alpha (VEGF- α)

8-2-4. 統計解析

実験結果は、平均値 \pm 標準偏差で示した。すべての統計解析は、SAS ソフトウェアパッケージバージョン 9.4 (SAS Institute Japan Ltd.) を用い、有意水準はすべて 5 %未満として実施した。データの正規性と分散の均質性を Shapiro-Wilk 検定と Bartlett 検定を用いて解析した上で、サイトカインの前後比較には、paired t-test を実施した。直腸温、鼓膜温及び温熱感覚アンケートの比較には、Friedman's test を実施し、Post-hoc 解析として、paired t-test あるいは Wilcoxon signed-rank test により試験食品条件間の比較を実施した。

8-3. 結果

8-3-1. 被験者背景

本実験対象者の同意取得から解析までの流れを図 43 に、最終解析対象者の背景を表 21 に示した。同意を取得した健常な成人男性 8 名を第 I 期に低温化アイススラリーを摂取するグループとコントロールを摂取するグループにそれぞれ 4 名ずつ割り付け、5 日間以上のウォッシュアウト期間の後に試験食を入れ替えて、再度同じ試験を実施した。8 名全員が試験を完遂したが、1 名が実験期間中に疾病に罹患し、他の 1 名の採血量が規定量に満たなかったため、最終解析対象者は 6 名となった。

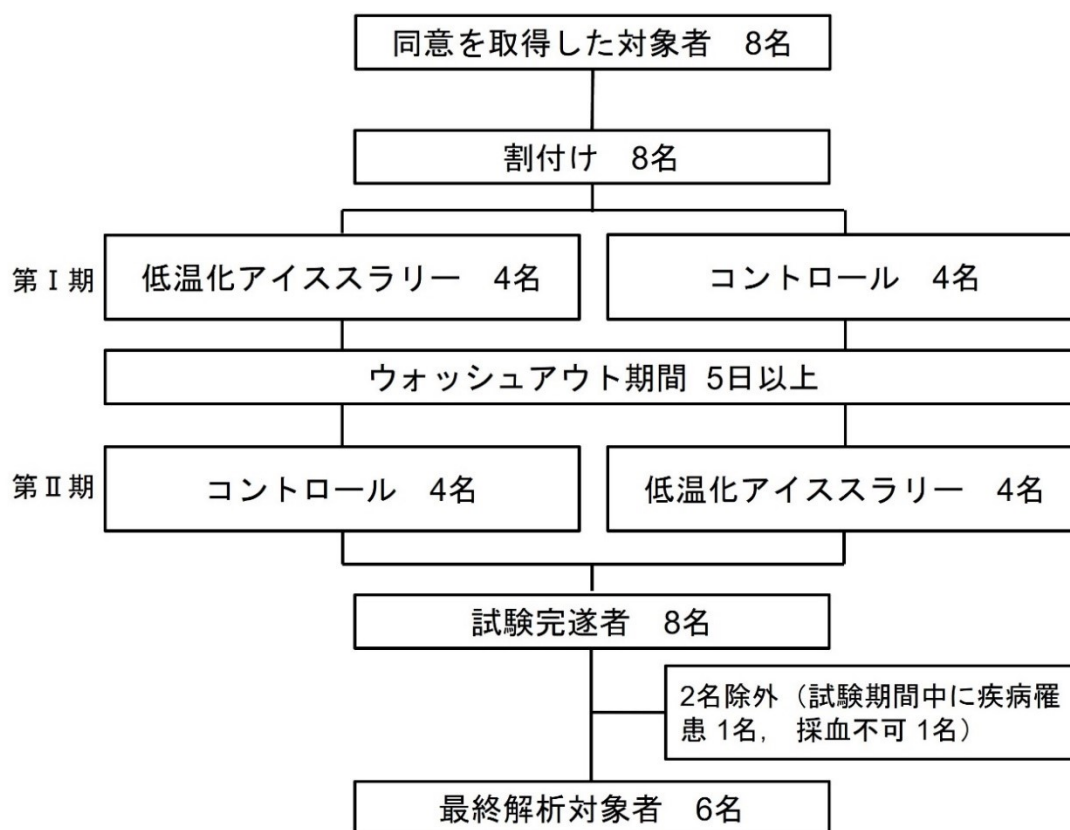


図 43 同意取得から解析までの流れ

表 21 最終解析対象者の背景

項 目	最終解析対象者 (n=6)
年 齢 (歳)	30.8±2.7
身 長 (cm)	173.2±5.2
体 重 (kg)	70.3±5.8

8-3-2. サイトカイン分析

血中及び唾液中のサイトカイン分析結果を表 22 (血中) 及び

表 23 (唾液中) に示した。血中サイトカインについては、コントロール条件において、Pre と Post の間で 8 種 (IL-27, TGF- α , FLT3LG, IL-10, CXCL8, MMP-12, IL-17C 及び OSM) のサイトカインに有意な変動が認められたが、低温化アイススラリー条件においては、Pre と Post の間で有意な変動は認められなかった。一方、唾液中サイトカインについては、Pre と Post の間で、コントロール条件において 4 種 (CXCL9, TGF- α , IL-15 及び VEGF- α)、低温化アイススラリー条件において 13 種 (OLR1, CXCL9, TGF- α , TNFSF12, HGF, TNFSF10, CXCL10, IL-15, MMP-12, VEGF- α , EGF, CSF1 及び MMP-1) のサイトカインに有意な変動が認められた。

表 22 血中サイトカイン分析

サイトカイン	コントロール			低温化アイススラリー		
	Pre (pg/mL)	Post (pg/mL)	p値	Pre (pg/mL)	Post (pg/mL)	p値
CCL8	127.7 ± 77.1	126.9 ± 50.0	0.954	74.2 ± 24.9	109.7 ± 58.8	0.234
IL-33	<LLOQ	<LLOQ		<LLOQ	<LLOQ	
CXCL12	312.1 ± 60.1	333.3 ± 52.8	0.208	271.4 ± 67.8	300.9 ± 46.5	0.528
OLR1	86.4 ± 21.7	94.0 ± 11.4	0.574	62.6 ± 11.8	92.7 ± 37.3	0.084
IL-27	16.9 ± 5.2	13.7 ± 6.4	0.043 *	13.1 ± 6.1	11.1 ± 3.1	0.384
IL-2	<LLOQ	<LLOQ		<LLOQ	<LLOQ	
CXCL9	34.3 ± 10.1	34.0 ± 9.8	0.738	31.0 ± 11.7	29.5 ± 5.4	0.620
TGF-α	8.3 ± 1.5	11.5 ± 2.4	0.028 *	6.7 ± 1.8	10.5 ± 3.6	0.110
IL-1β	<LLOQ	<LLOQ		<LLOQ	<LLOQ	
IL-6	1.2 ± 0.1	1.4 ± 0.3	0.166	1.2 ± 0.3	1.3 ± 0.5	0.495
IL-4	<LLOQ	<LLOQ		<LLOQ	<LLOQ	
TNFSF12	1005.1 ± 199.5	1004.5 ± 199.3	0.992	769.1 ± 164.7	828.5 ± 119.8	0.593
TSLP	<LLOQ	<LLOQ		<LLOQ	<LLOQ	
CCL11	130.8 ± 30.9	129.0 ± 16.4	0.855	101.5 ± 14.9	107.7 ± 28.4	0.659
HGF	446.2 ± 103.4	497.7 ± 124.2	0.106	347.9 ± 135.8	420.0 ± 95.7	0.327
FLT3LG	113.5 ± 12.6	96.3 ± 6.1	0.009 **	103.0 ± 20.5	86.7 ± 12.3	0.144
IL-17F	<LLOQ	<LLOQ		<LLOQ	<LLOQ	
IL-7	9.9 ± 4.5	11.4 ± 3.1	0.098	8.1 ± 3.8	8.4 ± 2.0	0.901
IL-13	<LLOQ	<LLOQ		<LLOQ	<LLOQ	
IL-18	389.5 ± 252.4	376.4 ± 231.4	0.337	331.6 ± 239.6	319.1 ± 195.8	0.569
CCL13	153.9 ± 101.4	156.5 ± 84.8	0.875	100.2 ± 20.5	137.2 ± 82.3	0.392
TNFSF10	661.3 ± 98.7	625.3 ± 73.9	0.051	570.6 ± 132.7	549.7 ± 92.6	0.594
CXCL10	104.0 ± 34.7	94.9 ± 25.9	0.119	84.7 ± 46.1	79.0 ± 8.0	0.736
IFN-γ	0.3 ± 0.1	0.3 ± 0.1	0.285	0.2 ± 0.0	0.2 ± 0.1	0.418
IL-10	7.4 ± 1.9	5.7 ± 1.6	0.029 *	5.3 ± 1.9	4.8 ± 0.9	0.279
CCL19	159.6 ± 116.3	138.3 ± 90.8	0.114	119.3 ± 69.2	116.9 ± 81.8	0.834
TNF	18.7 ± 5.3	18.6 ± 5.9	0.929	14.9 ± 6.6	17.8 ± 8.4	0.382
IL-15	17.5 ± 3.6	17.0 ± 3.7	0.326	13.8 ± 3.3	14.6 ± 2.5	0.467
CCL3	8.4 ± 1.8	8.1 ± 1.5	0.291	7.2 ± 2.8	6.9 ± 0.1	0.789
CXCL8	8.6 ± 2.9	11.3 ± 4.5	0.008 **	7.7 ± 3.3	8.3 ± 1.0	0.687
MMP-12	237.8 ± 36.7	214.5 ± 34.0	0.030 *	207.8 ± 51.7	194.3 ± 31.7	0.248
CSF2	<LLOQ	<LLOQ		<LLOQ	<LLOQ	
CSF3	85.3 ± 19.5	86.5 ± 20.2	0.707	78.6 ± 15.3	71.8 ± 17.1	0.329
VEGF-α	590.1 ± 201.8	665.8 ± 304.1	0.342	446.5 ± 252.4	469.1 ± 92.2	0.864
IL-17C	16.3 ± 5.6	13.6 ± 5.0	0.045 *	12.0 ± 4.2	11.5 ± 2.2	0.714
EGF	299.0 ± 257.0	265.1 ± 201.2	0.852	85.4 ± 63.1	298.5 ± 282.9	0.181
CCL2	377.6 ± 118.0	382.7 ± 75.3	0.810	297.4 ± 72.9	331.5 ± 81.1	0.575
IL-17A	0.7 ± 0.2	0.6 ± 0.2	0.190	0.5 ± 0.2	0.5 ± 0.2	0.782
OSM	2.4 ± 0.6	3.3 ± 0.8	0.026 *	1.8 ± 0.7	3.1 ± 1.3	0.108
CSF1	128.4 ± 6.9	124.3 ± 5.2	0.094	118.1 ± 11.4	113.2 ± 11.8	0.440
CCL4	183.1 ± 65.3	182.4 ± 49.4	0.967	142.0 ± 61.9	147.9 ± 41.6	0.871
CXCL11	44.8 ± 13.3	47.9 ± 19.9	0.677	39.7 ± 18.8	38.0 ± 6.1	0.805
LTA	9.2 ± 2.4	9.3 ± 2.3	0.555	8.8 ± 2.0	8.8 ± 1.7	0.890
CCL7	0.5 ± 0.2	0.5 ± 0.1	0.956	0.4 ± 0.1	0.4 ± 0.1	0.709
MMP-1	>ULOQ	>ULOQ		>ULOQ	3720.0 ± 1862.3	

平均値 ± 標準偏差, LLOQ : 定量限界以下, ULOQ : 定量限界以上, *p < 0.05, **p < 0.01 vs. Pre

表 23 唾液中サイトカイン分析

サイトカイン	コントロール			低温化アイスラリー		
	Pre (pg/mL)	Post (pg/mL)	p値	Pre (pg/mL)	Post (pg/mL)	p値
CCL8	<LLOQ	0.4 ± 0.3		<LLOQ	<LLOQ	
IL-33	<LLOQ	<LLOQ		<LLOQ	<LLOQ	
CXCL12	<LLOQ	<LLOQ		<LLOQ	<LLOQ	
OLR1	398.7 ± 377.9	453.6 ± 276.8	0.658	263.5 ± 223.6	496.1 ± 201.6	0.029 *
IL-27	<LLOQ	<LLOQ		<LLOQ	<LLOQ	
IL-2	<LLOQ	<LLOQ		<LLOQ	<LLOQ	
CXCL9	21.4 ± 13.0	34.7 ± 18.5	0.009 **	22.1 ± 23.2	34.4 ± 21.1	0.040 *
TGF-α	2.8 ± 1.0	4.6 ± 1.7	0.016 *	3.0 ± 1.1	5.2 ± 1.3	0.016 *
IL-1β	44.6 ± 36.2	45.6 ± 21.6	0.943	36.1 ± 26.5	46.6 ± 24.2	0.197
IL-6	1.7 ± 1.6	2.1 ± 1.5	0.087	1.4 ± 0.7	3.0 ± 2.5	0.094
IL-4	<LLOQ	<LLOQ		<LLOQ	<LLOQ	
TNFSF12	44.3 ± 39.0	69.7 ± 61.1	0.129	28.0 ± 21.8	64.2 ± 33.9	0.018 *
TSLP	<LLOQ	<LLOQ		<LLOQ	<LLOQ	
CCL11	<LLOQ	<LLOQ		<LLOQ	<LLOQ	
HGF	34.0 ± 22.2	42.0 ± 13.7	0.250	23.5 ± 9.9	46.5 ± 14.0	0.012 *
FLT3LG	<LLOQ	<LLOQ		<LLOQ	<LLOQ	
IL-17F	<LLOQ	<LLOQ		<LLOQ	<LLOQ	
IL-7	<LLOQ	1.6 ± 0.5		<LLOQ	1.5 ± 0.5	
IL-13	<LLOQ	<LLOQ		<LLOQ	<LLOQ	
IL-18	59.3 ± 28.0	84.0 ± 44.9	0.143	73.4 ± 30.8	107.1 ± 55.8	0.159
CCL13	<LLOQ	<LLOQ		<LLOQ	<LLOQ	
TNFSF10	200.0 ± 76.4	290.3 ± 128.4	0.097	171.7 ± 123.6	307.2 ± 112.8	0.026 *
CXCL10	36.6 ± 36.3	54.1 ± 47.9	0.278	21.9 ± 34.0	46.3 ± 31.9	0.043 *
IFN-γ	<LLOQ	<LLOQ		<LLOQ	<LLOQ	
IL-10	<LLOQ	0.5 ± 0.2		<LLOQ	<LLOQ	
CCL19	<LLOQ	<LLOQ		<LLOQ	<LLOQ	
TNF	<LLOQ	<LLOQ		<LLOQ	<LLOQ	
IL-15	0.6 ± 0.2	1.1 ± 0.4	0.002 **	0.8 ± 0.7	1.3 ± 0.6	0.009 **
CCL3	1.1 ± 1.1	0.8 ± 0.9	0.475	<LLOQ	0.8 ± 0.8	0.266
CXCL8	154.1 ± 118.3	136.0 ± 88.2	0.755	79.5 ± 56.8	137.0 ± 70.3	0.190
MMP-12	682.2 ± 779.3	600.4 ± 418.6	0.727	296.1 ± 192.6	583.1 ± 378.6	0.045 *
CSF2	<LLOQ	<LLOQ		<LLOQ	<LLOQ	
CSF3	20.3 ± 9.1	25.5 ± 8.1	0.362	<LLOQ	31.5 ± 21.3	
VEGF-α	362.5 ± 146.3	739.4 ± 309.7	0.019 *	383.6 ± 197.0	707.0 ± 131.8	0.022 *
IL-17C	<LLOQ	<LLOQ		<LLOQ	<LLOQ	
EGF	201.9 ± 42.5	417.0 ± 240.6	0.057	249.6 ± 90.6	432.4 ± 154.8	0.037 *
CCL2	88.9 ± 47.3	167.7 ± 123.0	0.065	78.2 ± 35.6	178.9 ± 131.6	0.073
IL-17A	<LLOQ	<LLOQ		<LLOQ	<LLOQ	
OSM	5.3 ± 3.4	5.0 ± 2.9	0.663	3.6 ± 2.3	5.1 ± 1.9	0.062
CSF1	19.6 ± 20.5	23.1 ± 11.7	0.458	19.6 ± 19.2	27.1 ± 21.0	0.015 *
CCL4	8.0 ± 12.3	2.7 ± 3.7	0.333	1.6 ± 1.9	2.3 ± 2.3	0.449
CXCL11	<LLOQ	5.5 ± 6.3		<LLOQ	4.3 ± 3.7	
LTA	<LLOQ	<LLOQ		<LLOQ	<LLOQ	
CCL7	<LLOQ	<LLOQ		<LLOQ	<LLOQ	
MMP-1	41.8 ± 47.3	30.7 ± 25.5	0.565	15.1 ± 10.7	28.1 ± 18.1	0.014 *

平均値±標準偏差, LLOQ: 定量限界以下, ULOQ: 定量限界以上, *p < 0.05, **p < 0.01 vs. Pre

8-3-3. 直腸温, 鼓膜温及び温熱感覚

実験室入室 0 分, 40 分, 100 分後の直腸温度, 鼓膜温及び温熱感覚を表 24 に示した. 直腸温, 鼓膜温, 温熱感覚共に低温化アイススラリー条件において, 入室後 40 分でコントロール条件と比較して有意に低値を示したが, 100 分後の値には有意差は認められなかった.

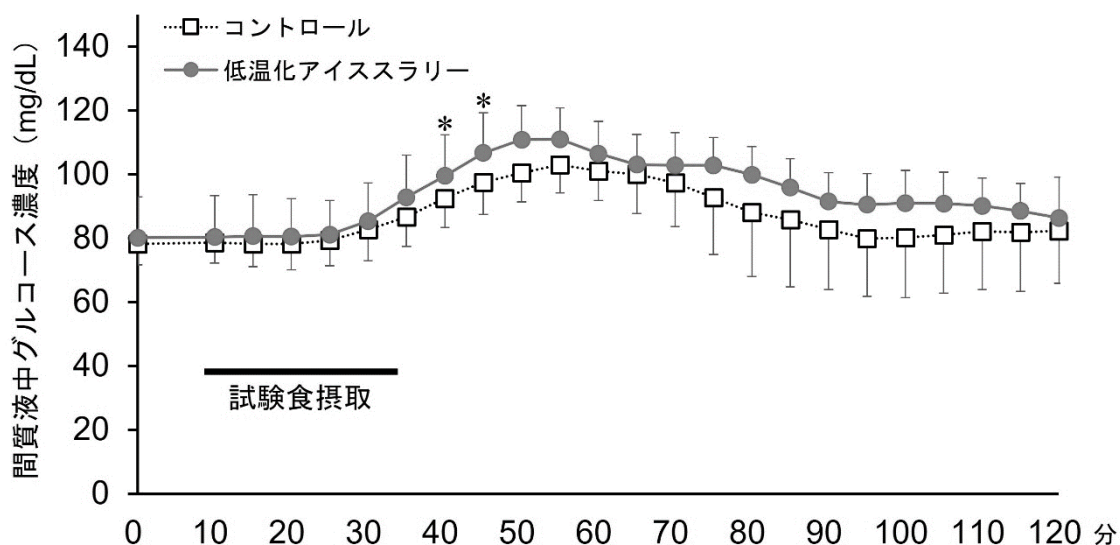
表 24 直腸温, 鼓膜温及び温熱感覚

項目	条件	0分	40分	100分
直腸温 (°C)	コントロール	37.0 ± 0.3	37.2 ± 0.2	37.4 ± 0.1
	低温化アイススラリー	37.0 ± 0.2	36.8 ± 0.2**	37.3 ± 0.1
鼓膜温 (°C)	コントロール	36.4 ± 0.2	37.0 ± 0.2	37.1 ± 0.1
	低温化アイススラリー	36.3 ± 0.2	36.7 ± 0.2**	37.1 ± 0.1
温熱感覚	コントロール	3.5 ± 1.0	8.2 ± 0.4	8.2 ± 0.4
	低温化アイススラリー	3.7 ± 0.8	6.7 ± 1.0**	8.3 ± 0.8

**p < 0.01 vs. コントロール

8-3-4. 間質液中グルコース濃度

実験室入室 0 分～120 分後までの間質液中グルコース濃度を図 44 に示した。実験室入室 40 分及び 45 分後において両条件間に有意差が認められた。



* $p < 0.05$ vs. コントロール

図 44 間質液中グルコース濃度

8-3-5. 有害事象

実験期間を通して、被験者に -5°C の低温化アイススラリーの摂取に起因する有害事象（頭痛，腹痛，低体温，間質液中グルコース濃度異常，その他の異常症状）は認められなかった。

8-4. 考察

暑熱環境に長時間曝露されると，発汗や心拍数が増加し，汗の蒸散や血流増加に伴う皮膚からの熱放散が高まることで身体が冷却されるが，深部体温が 40°C を超えてくると中枢神経系の機能不全や全身性の炎症反応が誘発される[30]。熱中症による症状

の重症化を防ぐためには発症から 30 分以内の適切な対処が必要不可欠であり，初期段階での対処の重要性が指摘されている[30]．動物を用いた基礎実験においても同様に熱中症の初期反応の制御の重要性が示唆されており，暑熱曝露の初期に関与するサイトカインである IL-6 の前処置は熱中症の症状に対して強力な保護作用を示し，全身の炎症性サイトカインの反応を抑制することが報告されている[142][143]．そこで，本実験では，暑熱環境に曝露されたときの -5°C の低温化アイススラリーの生理学的及び生化学的パラメータへの影響を検討した．

まず， -5°C の低温化アイススラリーを摂取することによる身体への影響に関しては，頭痛や胃腸症状等の有害事象は認められなかった．さらに，凝固点降下を引き起こすために使用した高濃度の炭水化物摂取による間質液中グルコース濃度の最大値も 140 mg/dL 未満であり，血糖値スパイク等のリスクは低いと考えられた．また，コントロール条件では，暑熱環境に曝露されることにより，血中において，IL-27，TGF- α ，FLT3LG，IL-10，CXCL8，MMP-12，IL-17C 及び OSM の 8 種の炎症反応に関わるサイトカイン類が有意に変動することが明らかとなり，本実験においても炎症反応が進行していることが明らかとなった．これらサイトカイン類のうち，TGF- α ，CXCL8，OSM は有意な増加を示し，IL-27，FLT3LG，IL-10，MMP-12 及び IL-17C は有意な減少を示した．炎症性サイトカインに分類される CXCL8[144]，抗炎症性サイトカインに分類される IL-10 に関しては[137]，既に先行研究において，暑熱曝露により変動することが報告されているが，TGF- α ，OSM，IL-27，FLT3LG，MMP-12 および IL-17C の変動に関しては新規の知見であった．本実験は，運動をしていない安静状態であっても，室温 36°C ，相対湿度 50% の暑熱環境に 120 分間曝露されると，身体において全身性の炎症反応が生じてくることを初めて示唆したものである．特に血中のみならず，唾液中においても有意な上昇を示した TGF- α は，血管新生，創傷治癒，神経細胞増殖等の機能を有していることが知られており[145][146]，非侵襲的かつ簡便に採取可能な熱中症の初期段階を判別するためのバイオマーカーとしても活用の可能性が考えられる．

また，低温化アイススラリー条件では，コントロール条件とは異なり，すべての血中サイトカインにおいて，有意な変動が認められず，低温化アイススラリーによる身体内部冷却が，暑熱曝露によって生じる初期の炎症反応を減弱させていた可能性が示

唆された。実際に低温化アイススラリー条件では、実験室に入室 40 分後において、コントロール条件と比較して直腸温，鼓膜温及び温熱感覚に有意な低下が認められており，生理学的にも，主観的な感覚においても暑熱曝露によって生じるストレスを緩和していたことが推察される。

一方，唾液検体においては，低温化アイススラリー条件において，定量可能であった 21 種のサイトカイン類すべてが，Pre に対して Post で上昇していた。先行研究によると口腔内への低温刺激は，唾液流量を増大させることが報告されており[147]，低温化アイススラリーの摂取による口腔内への低温刺激が，唾液中のサイトカイン類の増加に影響していた可能性が考えられる。本実験の結果を鑑みると，低温化アイススラリーの摂取は，先行研究[86]において指摘されてきた深部体温や脳温の低下による疲労からの回復効果のみならず，暑熱曝露によって生じる初期の炎症反応を抑制することで，循環血液を介した全身の炎症性反応の伝達を減弱させ，疲労からの回復を促進している可能性が考えられた（図 45）。

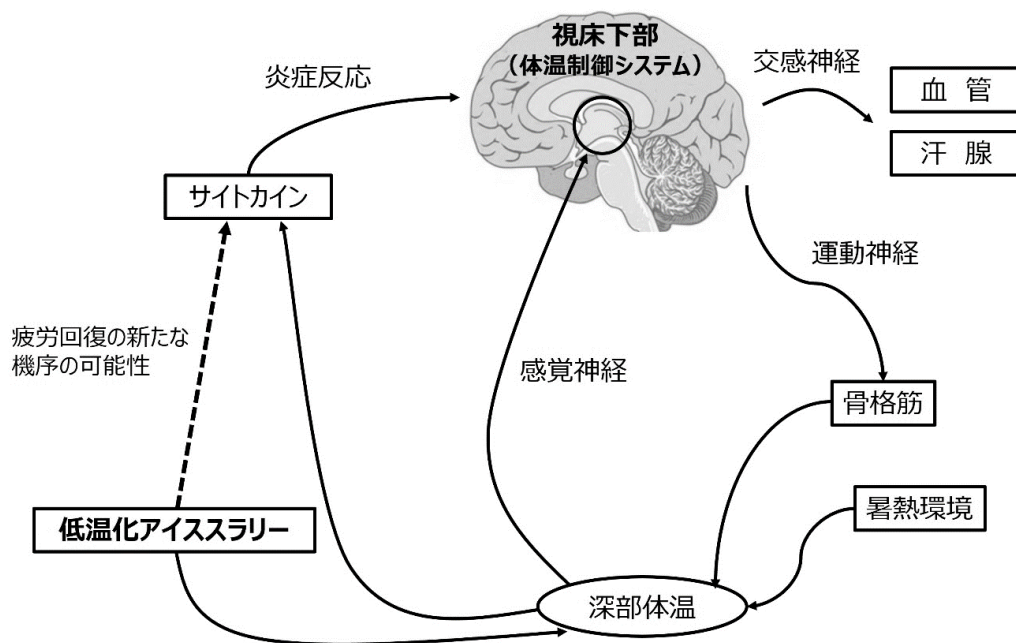


図 45 低温化アイススラリーによる疲労回復メカニズム

8-5. 本章のまとめ

第 5 章から第 8 章にかけて、低温化アイススラリーの疲労回復手法としての有用性を評価した結果、 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}\sim-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ の範囲の低温化アイススラリーに関しては、頭痛や胃腸障害等の有害事象を生じさせずに、疲労回復効果を期待できる可能性が示唆された。さらに、低温化アイススラリーの摂取は、深部体温の低下、脳温の低下、冷感刺激による快適感に加え、暑熱曝露によって生じる初期の炎症反応を抑制することで、疲労からの回復を促進する可能性が示唆された。今後、低温化アイススラリーの疲労回復メカニズムの解析をさらに進めることによって、スポーツ競技のみならず、運動が関与しない非労作性熱中症を対象とした運用シナリオにおいても活用の可能性が示唆された。

第9章 考察

本章では、設計した低温化アイススラリーによる身体内部冷却手法の評価結果を踏まえ、総合的に考察する。まず9-1節では、ラグビー競技をモデルとした屋内での実験に基づき明らかにした低温化アイススラリーを摂取することの意義について考察する。次に9-2節では、低温化アイススラリーの競技現場における有用性について考察する。また9-3節では、低温化アイススラリーの就床時の運用という新たな疲労回復手法としての可能性について考察する。そして9-4節では、本研究における限界について述べ、9-5節では、本研究の今後の展望について述べる。

9-1. 低温化アイススラリーの意義

本研究では、身体内部冷却手法を暑熱環境における疲労からの回復手法として設計するため、大きく2つの課題に着目して検討を実施した。一つ目は身体内部からの冷却効果を得るには、従来、大量のアイススラリーの摂取を要していたため、その解決策を考案することである。そして、二つ目は大量摂取であるが故に、予防的な運用にしか用いることができなかった手法を、実際の競技現場での疲労回復に運用可能な手法として考案することである。アイススラリーをスポーツ競技に取り入れたのは、Siegel et al. の2010年の報告が最初となる[43]。Siegel et al. は、氷の融解熱に着目し、その融解熱を利用して、深部体温の過度な上昇を防ぎ、身体の熱容量を増大させることで、運動能力が向上することを明らかにした。また、その作用機序として、摂取したアイススラリーが氷の状態で食道を通過する際に、食道の側を循環する頸動脈血を冷却し、生命維持において最も重要となる脳の温度を低下させることを示唆している。ヒトの深部体温の限界は42℃付近といわれており、それを超えるとタンパク変性が生じるリスクが高まり、正常に身体を制御できなくなる。脳は全身の体温を監視すると共に、深部体温を一定の範囲に収めるための制御システムの役割を担っている。そのため、身体機能を限界まで追い込み、深部体温の急激な上昇を引き起こす暑熱環境下のスポーツ競技においては、脳の保護が最も重要となる。Onitsuka et al. [86]は、実際

に、磁気共鳴スペクトロスコピーという非侵襲的な手法を用いて、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報告し、その作用機序の一旦を明らかにしている。しかしながら、現在のところ、脳の温度は、上記のような大掛かりな装置を使用しない限り、計測することが不可能であり、その代用として、直腸温や鼓膜温が用いられている。本研究では、実際の競技現場での運用を目的としているため、競技中にも簡便に測定可能で、脳に近い部位である鼓膜温を指標に検討を実施した。

上記のように、アイススラリーによって脳温の低下を引き起こすためには、氷の融解熱を効率的に利用することが重要となる。従来の研究では、アイススラリーを製造する際には、簡便さと衛生面の観点から市販のスポーツドリンクが利用されてきた。スポーツドリンクは、水分とミネラルの補給を目的としているため、冷却したとしてもスラリー状で摂取できるのは、 -1°C 付近であり、それ以上冷却すると完全に固体となり流動性を保つことができなくなる。そのため、従来のアイススラリーは、摂取前の外気温による融解や口腔内での融解の影響を受けやすく、身体内部（胃部）に氷の状態に到達させるために大量の摂取が必要となっていた。そこで、本研究では、第4章で示したように、競技現場での要求分析に基づき、従来のアイススラリーより低い温度でも流動性を保った低温化アイススラリーを作製し、その有用性の検証を行った。低温化アイススラリーの摂取量に関しては、アスリートに対して適用した実験ではないが、Tabuchi et al. [63]の報告を参考にし、第5章の予備実験において、被験者全員が15分以内に完食可能な量である 5 g/kg 体重として設定した。この用量は、従来の標準的な摂取量である 7.5 g/kg 体重と比較すると33%減量した摂取量となる。検証実験の結果、当初の仮説通り -2°C に冷却した低温化アイススラリーは、少ない摂取量でも先行研究と同レベルの冷却効果を示すと共に、スポーツ競技中のハーフタイムを想定した15分間という限られた時間の摂取において疲労を回復し、後半運動のパフォーマンスを改善することが明らかとなった。この作用機序としては、Onitsuka et al. [86]の先行研究の結果を鑑みると冷感刺激や脳温の低下による中枢性の疲労回復効果が大きく寄与している可能性が考えられた。

以上のことから、低温化アイススラリーを用いることで、摂取用量を減らしても先行研究と同程度の身体冷却が可能となり、競技中の疲労回復手法として運用可能なこ

とが示唆された。

9-2. 競技現場における有用性

第 5 章で示したようにラグビー競技シミュレーションモデルでの検証の結果、低温化アイススラリーを摂取することの意義が明確化できたことから、先行研究では達成できていない屋外暑熱環境での疲労回復手法としての有用性の検証を第 6 章にて実施した。屋外の特にチームプレーを伴う競技における実践的な研究では、被験者ごとの運動量や実験日ごとの実験環境（気象条件等）をコントロールすることが難しいため、再現性のあるデータを得ることが困難である。そのため、これまで、アイススラリーを用いた屋外暑熱環境での報告は、筆者が調べた限り、3 報しか見当たらない [62][72][73]。さらにラグビー競技のようなチームプレーを伴う競技に関する報告は見当たらない。従って、本研究は身体への負荷が強く、深部体温の上昇も激しいラグビー競技を対象として、屋外暑熱環境における低温化アイススラリーの身体機能に対する影響を初めて検討したものとなる。屋外暑熱環境でのラグビー競技に関しては、先行研究[97][98]を参考に実際の競技現場での動き（タックル、ラン、ボールキャリアー、スクラム等）を取り入れたモデルを採用した。その結果、屋内で実施した実験と同様に、実践環境に近い屋外条件においても、低温化アイススラリーは従来よりも少ない摂取量で、ラグビー競技により上昇した心拍や体温を速やかに回復し、身体の熱容量を増大させることが明らかとなった。競技後の高体温状態が長時間持続すると熱中症発症のリスクや全身の炎症反応が高まるため、その後の試合やトレーニングに向けた速やかな回復が望まれている。本実験で示した疲労回復効果は、低温化アイススラリーを用いることで、屋外暑熱環境で氷が溶けにくくなり、かつ口腔内で溶けずに身体内部まで到達したことで、身体の冷却効果を十分に発揮できたことによるものと思われる。第 5 章、第 6 章での検証を通じて、低温化アイススラリーを用いることで、実践に近い競技現場においても、効果的な疲労回復手法として運用できる可能性が示唆された。摂取量の多さに起因する課題が解決され、第 5 章においては試合中の疲労回復、第 6 章においては試合後の疲労回復における運用シナリオにおいて、その有用性が明らかとなった。第 7 章では、さらに低用量となる 2 g/kg 体重の低温化アイススラ

リーを用いて、試合翌日の疲労回復を想定した運用シナリオにて、睡眠による疲労回復効果を検証した。従来、アイススラリーは、熱中症の予防的な運用が主な目的となっており、睡眠による疲労回復を目的とした運用シナリオは、非常に独自性の高い試みである。

9-3. 睡眠を介した疲労回復手法としての可能性

第7章で述べたように、睡眠リズムと深部体温の変動は密接な関係にあり、入眠時には、深部体温が急激に低下することが知られているが、これまで身体内部冷却手法を用いた睡眠の質に対する影響検討は行われてこなかった。前章までに述べたように、従来の身体内部冷却手法で十分に深部体温を低下させるためには、7.5 g/kg 体重以上の摂取量が必要であり、就床前に大量の氷点下の飲料を摂取することは、腹痛等を招くリスクが高いため実践されてこなかった。本研究において作製した低温化アイススラリーを用いることで、従来のアイススラリーよりも少ない摂取量で、体温を低下させることが可能となったため、さらに少量となる2 g/kg 体重（約150 g 相当）を用いて検証を行ったところ、入眠に要するまでの時間（睡眠潜時）がコントロールと比較して38分も短縮することが明らかとなった。夜間睡眠中は、レム睡眠（浅い眠り）とノンレム睡眠（深い眠り）が、約90分サイクルで繰り返されるが、入眠直後の最初の90分サイクルにおいて速やかに深い眠りに入ることが、睡眠の質を向上させる上で、最も重要なことが知られている。これらのことを鑑みると低温化アイススラリーの摂取は、深部体温を急激に低下させることにより、寝つきを良くし、速やかに深い眠りに誘導することで、起床時の疲労感の改善に繋がったものと推察される。以上のように、低温化アイススラリーを用いることにより、運用上の大きな課題であった摂取量の多さに関する問題を解決することができ、複数の疲労回復シナリオにおいて運用可能なことが示唆された。従来、アスリートの不眠症状の改善には、睡眠導入剤や抗うつ薬などが使用されてきたが、低温化アイススラリーの運用は、新たな代替手法となり得る可能性がある。これらの知見は、コーチやトレーナーが暑熱環境における選手の体調管理を行う上での新たな選択肢の一つとして、有効な手段となり得るものとする。

9-4. 研究限界

低温化アイススラリーを用いた実証実験において研究限界が存在する。上記実験においては、実際の競技現場での活用を想定したプロトコルとしたため、現役のラグビー選手を対象とする必要があり、一度に実験に参加可能な人数に制限があったこと、そして、実際のフィールドにおける暑熱環境は、日々の天候の影響（気温、湿度、風速、輻射熱等）を受けるため、同一の競技環境条件で何度も再現することが困難なことから、同時に評価可能な比較対象群数に制限が生じた。そのため、比較対象群として、従来の -1°C のアイススラリー群や複数の用量（ 2 g/kg 体重、 5 g/kg 体重、 7.5 g/kg 体重等）を設定した検討を実施することができなかった。今後、競技現場での運用の最適化を図る上で、同一の条件で、複数の摂取量と摂取温度を設定した実験を追加し、低温化アイススラリーの温度と摂取量、そして疲労回復効果の関係性を明らかにする必要がある。また、本検証実験は、競技現場となるフィールドや日常生活の場となる就寝場所での計測を想定していたため、被検者の安全性を考慮して、体温の測定部位に、脳に近い部位であり、かつ被検者への負担の少ない部位である鼓膜温を採用したが、先行研究における深部体温の標準的な測定部位は直腸温等の内臓温となっている。鼓膜温と直腸温の一定の相関性は認められているが、今後、非接触かつ継続的に深部体温の測定が可能な内服カプセル型体温計等を用いて[90]、深部体温の変化と疲労回復度合いの関係性を明確化することで、各シナリオにおいて必要な深部体温の低下度を明らかにする必要があると考える。

9-5. 今後の展望

第5章から第7章において、低温化アイススラリーを摂取することの意義を明らかにし、暑熱環境における新たな疲労回復のための身体内部冷却手法としての可能性を示してきた。アイススラリーの温度は、4-5節の身体内部冷却手法の設計で示したように配合する溶質のモル濃度に依存する。しかし、極度の低温化は胃腸機能への負担が大きくなることが懸念され、さらに溶質量を増やすことで、アイススラリー中の水分量が減少するため氷の融解熱の利用率が低下するといった懸念がある。そのため、今後、低温化アイススラリーの適切な摂取温度とアイススラリー中の水分量、溶質量の

バランスを検証するための実験が必要となる。第 8 章において、今後の低温化アイススラリーによる身体内部冷却手法の設計の方向性を探るため、 -2°C から、さらに -5°C に低温化したアイススラリーの身体への影響を検証した。その結果、 -5°C に低温化しても有害事象は発生せず、従来のアイススラリーと同様に直腸温、鼓膜温、温熱感覚の低下が認められ、機能的にも問題ないことが確認された。

また、本研究においては、身体内部冷却手法を設計する上で、ラグビー競技を評価対象に選定したため、運動によるエネルギー消費の激しさを考慮し、凝固点を降下させる成分として、炭水化物を用いて低温化アイススラリーを作製した。このときの炭水化物濃度は、市販のスポーツドリンクの約 2 倍となるが、今後、さらなる低温化のために凝固点降下を引き起こす際には、炭水化物以外の対象成分の検討も必要となる。一度に大量の炭水化物を摂取すると胃排泄能が遅延すると共に、急激な血糖値の上昇（血糖値スパイク）が生じることが知られている。低温化アイススラリーを用いた身体内部冷却手法の設計においては、摂取温度のみならず、身体の生理機能や代謝機能などへの影響も考慮し、多面的な視点での設計が重要になる。

スポーツ競技時のみならず、睡眠時や安静時においても、暑熱疲労からの回復に対して有用性が示されたことから、今後、本低温化アイススラリーは、熱中症による死亡率が高いことで社会問題になっている工事現場での運用シナリオや高齢者の屋内での非労作性熱中症の運用シナリオにおいても、有用な手法になり得ると考えられる。

第 10 章 結論

本研究では、暑熱環境でスポーツ競技を行うアスリートの身体内部での恒常性維持機構をシステムとして捉え、システムズエンジニアリング手法に基づき、有効性、運用性、安全性の観点から摂取温度に着目することで、競技現場に適用可能な低温化アイスラリーによる身体内部冷却手法を設計し、ラグビーでの評価を実施した。

本研究から得られた結論は、以下の通りである。

1. 炭水化物濃度を調節することにより、暑熱環境において少量の摂取でも身体冷却効果が得られる $-2\text{ }^{\circ}\text{C}\sim-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ の範囲の低温化アイスラリーによる身体内部冷却手法を設計した。
2. 設計した身体内部冷却手法の有効性を身体への負荷が強く深部体温の上昇が激しいラグビーを対象として、「競技中のハーフタイムでの疲労回復を想定したシナリオ」、「屋外暑熱環境における競技直後の疲労回復を想定したシナリオ」、「暑熱環境により睡眠の質が低下する就床時の疲労回復を想定したシナリオ」の3つシナリオにおいて実証した。
3. 設計した身体内部冷却手法が、実際の競技現場に近い実践的な環境において、従来の標準的なアイスラリーの摂取量 (7.5 g/kg 体重) と比較して、運動時では 33 %減量しても疲労回復効果を示し、就床時では 73 %減量しても疲労回復効果を示すことを明らかにした。
4. 高炭水化物含有の低温化アイスラリーが本研究での運用シナリオにおいて、有害事象を示さず安心して使用可能な温度範囲として $-2\text{ }^{\circ}\text{C}\sim-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ の範囲を提示し、疲労回復効果の新たな作用機序の一つとして、暑熱環境で生じる身体内部の炎症反応を抑制することを明らかにした。

本研究によって、有効性、運用性、安全性の観点から従来よりも効率的に身体内部冷却効果を発揮できる手法を実現することができ、ラグビーをはじめとする厳しい暑熱環境でスポーツ競技に従事するアスリートの疲労からの回復や競技パフォーマンスの向上に大きく寄与できることを示した。

謝辞

本論文は、慶應義塾大学大学院システムデザイン・マネジメント（SDM：System Design and Management）研究科後期博士課程在学中に行った研究成果をまとめたものです。

はじめに、指導教員である神武直彦教授に心から御礼申し上げます。スポーツ研究にシステムズエンジニアリングの考え方を取り入れることで、従来の研究アプローチでは気付くことができなかつた課題に対しても、より多面的な視点で見つめ直すことができ、本研究を価値あるものに纏め上げることができました。2019年秋に入学し、約半年後から Covid-19 が世界中に蔓延し、研究環境にも劇的な変化をもたらしました。オンラインでの交流がメインとなり、スポーツ研究を進めるには非常に厳しい環境でしたが、先生のご指導のもと、研究室の方々をはじめとする多くの方々の温かい支援を受けることで、研究を継続することができました。心から御礼申し上げます。

ご多忙の中、副査を引き受けて下さいました狼嘉彰 SDM 研究所名誉顧問、SDM 研究科 当麻哲哉教授、広島大学大学院人間社会科学研究科 長谷川博教授には、深く御礼申し上げます。狼先生、当麻先生には、SDM 研究科における博士研究のあるべき姿についてご指導いただき、これまで学んできたスポーツ研究を新しいものへと昇華させることができました。長谷川先生には、暑熱研究に関する基礎から論文のまとめ方まで幅広くご指導いただくことで、スポーツ研究者としての専門性を高めることができました。厚く御礼申し上げます。

本研究を進める上で、共同研究者として研究計画の立案から論文作成まで、ご指導いただきました慶應義塾大学スポーツ医学研究センター 石田浩之教授、小熊祐子准教授、慶應義塾大学体育研究所 稲見崇孝専任講師、慶應義塾體育會蹴球部 平田昂大アスレチックトレーナー、パフォーマンスゴールシステム株式会社 田原茂行氏、国立スポ

ーツ科学センター 中村真理子 前任研究員，北海学園大学 内藤貴司 講師，鳥取大学 斎藤辰哉 助教に心から御礼申し上げます。

スポーツ競技現場での実践的な研究を進める上で，貴重な練習時間を割いて協力いただきました慶應義塾体育會蹴球部 栗原徹 監督，星野佑貴 S&C コーチ，米田健メデイカルアドバイザー他，スタッフ，選手，マネージャーの皆様心から御礼申し上げます。

神武研究室博士課程に所属する方々とは，研究分野が異なりながらも日々，切磋琢磨することで研究内容をブラッシュアップすることができました。心から感謝いたします。また本研究を推進する上で，ご指導いただきました日比谷孟俊 SDM 研究所名誉顧問，井上雅裕 特任教授，小高暁 特任准教授，和田康二 特任助教，太田千尋 特任助教，山口翔大 特任助教，西野瑛彦 特任助教に心から感謝いたします。また，秘書の太田愛子氏，坂口園美氏，菅野彰子氏，水野久恵氏には日頃から多岐に渡りご支援いただき心から感謝いたします。

本研究の機会を与えて頂きました大正製薬株式会社 上原明 取締役会長，上原茂 代表取締役社長，上原健 代表取締役副社長，高橋伊津美 取締役専務執行役員，高橋健三 執行役員に深甚なる感謝の意を表します。

本研究を進める上で，研究をサポートいただきました大正製薬株式会社の皆様，そして共著者として，研究の推進及び論文執筆に際し，ご指導いただきました高岡彰子 室長，加藤敬太氏，山田啓史氏，下益田正嗣氏，永井亘氏，原本真紀氏に心から感謝いたします。

最後に，日頃から温かく見守り，仕事，家庭，そして博士研究を支えてくれた妻と二人の娘に心から感謝の意を表して謝辞とさせていただきます。

参考文献

- [1] Centers for Disease Control and Prevention. (1999). Physical Activity and Health: A Report of the Surgeon General. Retrieved December 20, 2022, from <https://www.cdc.gov/nccdphp/sgr/index.htm>

- [2] スポーツ庁. (2022). 第3期スポーツ基本計画. Retrieved December 19, 2022, from https://www.mext.go.jp/sports/b_menu/sports/mcatetop01/list/1372413_00001.htm

- [3] 消防庁. (2022). 熱中症情報. Retrieved February 20, 2023, from <https://www.fdma.go.jp/disaster/heatstroke/post3.html>

- [4] National Centers for Environmental Information. (2021). Annual 2020 Global Climate Report. Retrieved December 10, 2022, from <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/202013>

- [5] World Meteorological Organization. (2021). 2020 Was One of Three Warmest Years on Record. Retrieved December 10, 2022, from <https://public.wmo.int/en/media/press-release/2020-was-one-of-three-warmest-years-record>

- [6] 気象庁. (2022). IPCC第6次評価報告書第1作業部会報告書 政策決定者向け要約 暫定訳. Retrieved November 19, 2022, from <https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar6/index.html>

- [7] Zhou, B., Rybski, D., Kropp, J. P. (2017). The role of city size and urban form in the surface urban heat island. *Scientific reports*, 7(1), 4791.

- [8] Haines, A., Kovats, R., Campbell-Lendrum, D., Corvalan, C. (2006). Climate change and human health: impacts, vulnerability, and mitigation. *Lancet*, 367(9528), 2101–2109.
- [9] Smith, K. R., Woodward, A., Lemke, B., Otto, M., Chang, C. J., Mance, A. A., Balmes, J., Kjellstrom, T. (2016). The last Summer Olympics? Climate change, health, and work outdoors. *Lancet*, 388(10045), 642–644.
- [10] Makino, S., Hemmi, J., Kano, H., Kashiwagi, M., Hojo, K., Asami, Y. (2018). Anti-Fatigue Effects of Yogurt Fermented with *Lactobacillus delbureckii* subsp. *bulgaricus* OLL1073R-1 in Healthy People Suffering from Summer Heat Fatigue: A Randomized, Double-Blind, Placebo-Controlled Trial. *Nutrients*, 10(7), 798.
- [11] Enoka, R. M., Duchateau, J. (2016). Translating Fatigue to Human Performance. *Medicine and science in sports and exercise*, 48(11), 2228–2238.
- [12] Blomstrand, E. (2001). Amino acids and central fatigue. *Amino acids*, 20(1), 25–34.
- [13] Yoshimura, S. (2008). Documents Review of Menopausal Disorders and Visual Display Terminals syndrome. *Bull. Kochi Gakuen College*, 38, 45–56.
- [14] 南谷晴之. (1997). 疲労とストレス. *バイオメカニクス学会誌*, 21(2), 58–64.
- [15] 山本利春. (2015). 戦略的リカバリーの考え方と実際. *Sportsmedicine*, 167, 2–10.
- [16] Cheng, A. J., Jude, B., Lanner, J. T. (2020). Intramuscular mechanisms of overtraining. *Redox biology*, 35, 101480.

- [17] Sousa, M., Teixeira, V. H., Soares, J. (2014). Dietary strategies to recover from exercise-induced muscle damage. *International journal of food sciences and nutrition*, 65(2), 151–163.
- [18] O'Connor, E., Mündel, T., Barnes, M. J. (2022). Nutritional Compounds to Improve Post-Exercise Recovery. *Nutrients*, 14(23), 5069.
- [19] Owens, D. J., Twist, C., Cobley, J. N., Howatson, G., Close, G. L. (2019). Exercise-induced muscle damage: What is it, what causes it and what are the nutritional solutions? *European journal of sport science*, 19(1), 71–85.
- [20] Radak, Z., Zhao, Z., Koltai, E., Ohno, H., Atalay, M. (2013). Oxygen consumption and usage during physical exercise: the balance between oxidative stress and ROS-dependent adaptive signaling. *Antioxidants & redox signaling*, 18(10), 1208–1246.
- [21] Bowtell, J., Kelly, V. (2019). Fruit-Derived Polyphenol Supplementation for Athlete Recovery and Performance. *Sports medicine*, 49(1), 3–23.
- [22] Peake, J. M., Neubauer, O., Gatta, P. A. D., Nosaka, K. (2017). Muscle damage and inflammation during recovery from exercise. *Journal of applied physiology*, 122(3), 559–570.
- [23] Suzuki, K., Tominaga, T., Ruhee, R. T., Ma, S. (2020). Characterization and Modulation of Systemic Inflammatory Response to Exhaustive Exercise in Relation to Oxidative Stress. *Antioxidants*, 9(5), 401.
- [24] Gøran, P., Ulla, R. M., Truls, R., Jonathan, M. P. (2012). Leucocytes, cytokines and satellite cells: what role do they play in muscle damage and regeneration following

eccentric exercise? Exercise immunology review, 18, 42–97.

- [25] 気象庁. (2022). 日本の年平均気温. Retrieved December 1, 2022, from https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/temp/an_jpn.html
- [26] 気象庁. (2022). 大都市における真夏日日数の長期変化傾向. Retrieved December 10, 2022, from https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/himr/himr_tmaxGE30.html
- [27] 気象庁. (2022). 大都市における熱帯夜日数の長期変化傾向. Retrieved December 10, 2022, from https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/himr/himr_tminGE25.html
- [28] Sugawara, M., Manabe, Y., Yamasawa, F., Hosokawa, Y. (2022). Athlete Medical Services at the Marathon and Race Walking Events During Tokyo 2020 Olympics. *Frontiers in sports and active living*, 4, 872475.
- [29] INTERNATIONAL OLYMPIC COMMITTEE. (2019). Beat the heat - Athlete365. Retrieved December 13, 2022, from <https://olympics.com/athlete365/beat-the-heat/>
- [30] Gauer, R., Meyers, B. K. (2019). Heat-Related Illnesses. *American family physician*, 99(8), 482–489.
- [31] Bouchama, A., Knochel, J. P. (2002). Heat stroke. *The New England journal of medicine*, 346(25), 1978–1988.
- [32] Miyake, Y. (2013). Pathophysiology of Heat Illness:Thermoregulation, risk factors, and indicators ofaggravation. *JMAJ*, 56(3), 167–173.
- [33] 田中正敏. (1985). 生体と温度. *バイオメカニズム学会誌*, 9(2), 82–88.

- [34] 長谷川博. (2020). スポーツにおける最新の熱中症対策. 医学のあゆみ, 274(2), 214–218.
- [35] Burke, L. M. (2001). Nutritional needs for exercise in the heat. *Comparative Biochemistry and Physiology - A Molecular and Integrative Physiology*, 128(4), 735–748.
- [36] Skein, M., Wingfield, G., Gale, R., Washington, T., Minett, G. (2018). Sleep quantity and quality during consecutive day heat training with the inclusion of cold-water immersion recovery. *Journal of thermal biology*, 74, 63–70.
- [37] 田村聖, 松浦倫子, 北村航輝, 山仲勇二郎. (2021). 眠気の日内変動モデル—ウルトラディアン振動体と概日振動体—. *生理心理学と精神生理学*, 39(1), 79–93.
- [38] Lastella, M., Roach, G. D., Halson, S. L., Sargent, C. (2019). The effects of cold water immersion on the amount and quality of sleep obtained by elite cyclists during a simulated hill climbing tour. *Sport Sciences for Health*, 15(1), 223–228.
- [39] 公益財団法人日本スポーツ協会. (2019). スポーツ活動中の熱中症予防ガイドブック.
- [40] 独立行政法人日本スポーツ振興センター. (2014). 体育活動における熱中症予防調査研究報告書. Retrieved December 11, 2022, from <https://www.jpnsport.go.jp/anzen/Tabid/1729/Default.aspx>
- [41] Fenemor, S. P., Gill, N. D., Driller, M. W., Mills, B., Casadio, J. R., Beaven, C. M. (2022). The relationship between physiological and performance variables during a hot/humid international rugby sevens tournament. *European journal of sport science*,

22(10), 1499–1507.

- [42] 内藤貴司, 山口裕嗣, 大柿哲朗. (2016). 暑熱環境下における持続的パフォーマンス, 体温および主観的感覚に及ぼす運動前氷飲料摂取間隔差の影響. 体育学研究, 61, 103–113.
- [43] Siegel, R., Maté, J., Brearley, M. B., Watson, G., Nosaka, K., Laursen, P. B. (2010). Ice slurry ingestion increases core temperature capacity and running time in the heat. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 42(4), 717–725.
- [44] Douzi, W., Dugué, B., Vinches, L., Al Sayed, C., Hallé, S., Bosquet, L., Dupuy, O. (2019). Cooling during exercise enhances performances, but the cooled body areas matter: A systematic review with meta-analyses. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 29(11), 1660–1676.
- [45] Maley, M. J., Minett, G. M., Bach, A. J. E., Zietek, S. A., Stewart, K. L., Stewart, I. B. (2018). Internal and external cooling methods and their effect on body temperature, thermal perception and dexterity. *PLOS ONE*, 13(1), e0191416.
- [46] Walker, A., Driller, M., Brearley, M., Argus, C., Rattray, B. (2014). Cold-water immersion and iced-slush ingestion are effective at cooling firefighters following a simulated search and rescue task in a hot environment. *Applied physiology, nutrition, and metabolism = Physiologie appliquee, nutrition et metabolisme*, 39(10), 1159–1166.
- [47] Choo, H. C., Peiffer, J. J., Lopes-Silva, J. P., Mesquita, R. N. O., Amano, T., Kondo, N., Abbiss, C. R. (2019). Effect of ice slushy ingestion and cold water immersion on thermoregulatory behavior. *PLOS ONE*, 14(2), e0212966.

- [48] Choo, H. C., Nosaka, K., Peiffer, J. J., Ihsan, M., Abbiss, C. R. (2018). Ergogenic effects of precooling with cold water immersion and ice ingestion: A meta-analysis. *European Journal of Sport Science*, 18(2), 170–181.
- [49] Mazalan, N. S., Landers, G. J., Wallman, K. E., Ecker, U. (2022). A Combination of Ice Ingestion and Head Cooling Enhances Cognitive Performance during Endurance Exercise in the Heat. *Journal of sports science & medicine*, 21(1), 23–32.
- [50] Gordon, R. J. F. H., Tillin, N. A., Tyler, C. J. (2020). The effect of head and neck pre-cooling on neuromuscular fatigue following exercise in the heat. *Applied physiology, nutrition, and metabolism*, 45(11), 1238–1246.
- [51] Cao, Y., Lei, T. H., Wang, F., Yang, B., Mündel, T. (2022). Head, Face and Neck Cooling as Per-cooling (Cooling During Exercise) Modalities to Improve Exercise Performance in the Heat: A Narrative Review and Practical Applications. *Sports medicine - open*, 8(1), 16.
- [52] Maroni, T., Dawson, B., Landers, G., Naylor, L., Wallman, K. (2019). Hand and torso pre-cooling does not enhance subsequent high-intensity cycling or cognitive performance in heat. *Temperature*, 7(2), 165–177.
- [53] Sleivert, G. G., Cotter, J. D., Roberts, W. S., Febbraio, M. A. (2001). The influence of whole-body vs. torso pre-cooling on physiological strain and performance of high-intensity exercise in the heat. *Comparative biochemistry and physiology. Part A, Molecular & integrative physiology*, 128(4), 657–666.
- [54] Sheadler, C. M., Saunders, N. W., Hanson, N. J., Devor, S. T. (2013). Palm cooling does not improve running performance. *International journal of sports medicine*, 34(8),

732–735.

- [55] 中村大輔, 中村真理子, 山中亮, 星川雅子. (2017). 競技者のための暑熱対策ガイドブック. 独立行政法人日本スポーツ振興センター.
- [56] Osakabe, J., Kajiki, M., Kondo, K., Matsumoto, T., Umemura, Y. (2021). Effects of Half-Time Cooling Using a Fan with Skin Wetting on Thermal Response During Intermittent Cycling Exercise in the Heat. *Sports medicine international open*, 5(3), E91–E98.
- [57] Wegmann, M., Faude, O., Poppendieck, W., Hecksteden, A., Fröhlich, M., Meyer, T. (2012). Pre-cooling and sports performance: a meta-analytical review. *Sports medicine*, 42(7), 545–564.
- [58] Siegel, R., Maté, J., Watson, G., Nosaka, K., Laursen, P. B. (2012). Pre-cooling with ice slurry ingestion leads to similar run times to exhaustion in the heat as cold water immersion. *Journal of sports sciences*, 30(2), 155–165.
- [59] Freitag, L., Clijisen, R., Deflorin, C., Taube, W., Taeymans, J., Hohenauer, E. (2021). Intramuscular Temperature Changes in the Quadriceps Femoris Muscle After Post-Exercise Cold-Water Immersion (10°C for 10 min): A Systematic Review With Meta-Analysis. *Frontiers in sports and active living*, 3, 660092.
- [60] Duffield, R., Bird, S. P., Ballard, R. J. (2011). Field-based pre-cooling for on-court tennis conditioning training in the heat. *Journal of Sports Science and Medicine*, 10(2), 376–384.
- [61] Naito, T., Haramura, M., Muraishi, K., Yamazaki, M., Takahashi, H. (2020). Impact of

Ice Slurry Ingestion During Break-Times on Repeated-Sprint Exercise in the Heat.
Sports Medicine International Open, 4(2), E45–E52.

- [62] Naito, T., Nakamura, M., Muraishi, K., Eda, N., Ando, K., Takemura, A., Akazawa, N., Hasegawa, H., Takahashi, H. (2022). In-play optimal cooling for outdoor match-play tennis in the heat. *European Journal of Sport Science*, 22(3), 326–335.
- [63] Tabuchi, S., Horie, S., Kawanami, S., Inoue, D., Morizane, S., Inoue, J., Nagano, C., Sakurai, M., Serizawa, R., Hamada, K. (2021). Efficacy of ice slurry and carbohydrate-electrolyte solutions for firefighters. *Journal of occupational health*, 63(1), e12263.
- [64] Shoji, T., Egawa, Y., Koshimizu, H. (2003). A Study on the Task Performance on the Different Thermal Conditions. *Specific Research Reports of the National Institute of Industrial Safety*, 28, 49–61.
- [65] 長谷川博, 中村大輔 (Eds.). (2021). スポーツ現場における暑さ対策. 有限会社ナック.
プ.
- [66] Ihsan, M., Landers, G., Brearley, M., Peeling, P. (2010). Beneficial effects of ice ingestion as a precooling strategy on 40-km cycling time-trial performance. *International journal of sports physiology and performance*, 5(2), 140–151.
- [67] Nakamura, M., Nakamura, D., Yasumatsu, M., Takahashi, H. (2021). Effect of ice slurry ingestion on core temperature and blood pressure response after exercise in a hot environment. *Journal of Thermal Biology*, 98, 102922.
- [68] Naito, T., Ogaki, T. (2016). Pre-cooling with intermittent ice ingestion lowers the core temperature in a hot environment as compared with the ingestion of a single bolus.

Journal of thermal biology, 59, 13–17.

- [69] Naito, T., Iribe, Y., Ogaki, T. (2017). Ice ingestion with a long rest interval increases the endurance exercise capacity and reduces the core temperature in the heat. *Journal of physiological anthropology*, 36(1), 9.
- [70] Onitsuka, S., Ueno, T., Zheng, X., Hasegawa, H. (2015). Effect of ice slurry ingestion during half-time breaks on intermittent exercise capacity and thermoregulation in the warm environment. *Gazzetta Medica Italiana Archivio per le Scienze Mediche*, 174(3), 113–121.
- [71] Deshayes, T. A., De La Flore, A., Gosselin, J., Beliveau, J., Jeker, D., Goulet, E. D. B. (2019). The Impact of an Ice Slurry-Induced Gastrointestinal Heat Sink on Gastrointestinal and Rectal Temperatures Following Exercise. *Sports*, 7(9), 198.
- [72] Yeo, Z. W., Fan, P. W. P., Nio, A. Q. X., Byrne, C., Lee, J. K. W. (2012). Ice slurry on outdoor running performance in heat. *International journal of sports medicine*, 33(11), 859–866.
- [73] Trong, T. T., Riera, F., Rinaldi, K., Briki, W., Hue, O. (2015). Ingestion of a cold temperature/menthol beverage increases outdoor exercise performance in a hot, humid environment. *PLOS ONE*, 10(4), e0123815.
- [74] Knochel, J. P. (1989). Heat stroke and related heat stress disorders. *Disease-a-month : DM*, 35(5), 301–377.
- [75] Périard, J. D., Travers, G. J. S., Racinais, S., Sawka, M. N. (2016). Cardiovascular adaptations supporting human exercise-heat acclimation. *Autonomic neuroscience : basic*

& clinical, 196, 52–62.

- [76] González-Alonso, J., Teller, C., Andersen, S. L., Jensen, F. B., Hyldig, T., Nielsen, B. (1999). Influence of body temperature on the development of fatigue during prolonged exercise in the heat. *Journal of applied physiology*, 86(3), 1032–1039.
- [77] Adams, W. M., Hosokawa, Y., Casa, D. J. (2016). Body-Cooling Paradigm in Sport: Maximizing Safety and Performance During Competition. *Journal of sport rehabilitation*, 25(4), 382–394.
- [78] Racinais, S., Alonso, J. M., Coutts, A. J., Flouris, A. D., Girard, O., González-Alonso, J., Hausswirth, C., Jay, O., Lee, J. K. W., Mitchell, N., Nassis, G. P., Nybo, L., Pluim, B. M., Roelands, B., Sawka, M. N., Wingo, J., Périard, J. D. (2015). Consensus recommendations on training and competing in the heat. *British journal of sports medicine*, 49(18), 1164–1173.
- [79] Highton, J., Mullen, T., Norris, J., Oxendale, C., Twist, C. (2017). The Unsuitability of Energy Expenditure Derived From Microtechnology for Assessing Internal Load in Collision-Based Activities. *International journal of sports physiology and performance*, 12(2), 264–267.
- [80] Naughton, M., Miller, J., Slater, G. J. (2018). Impact-Induced Muscle Damage and Contact Sports: Etiology, Effects on Neuromuscular Function and Recovery, and the Modulating Effects of Adaptation and Recovery Strategies. *International journal of sports physiology and performance*, 13(8), 962–969.
- [81] Johnston, R. D., Gabbett, T. J., Seibold, A. J., Jenkins, D. G. (2014). Influence of physical contact on neuromuscular fatigue and markers of muscle damage following

small-sided games. *Journal of science and medicine in sport*, 17(5), 535–540.

- [82] Smith, K., Muggeridge, D. J., Easton, C., Ross, M. D. (2019). An acute dose of inorganic dietary nitrate does not improve high-intensity, intermittent exercise performance in temperate or hot and humid conditions. *European journal of applied physiology*, 119(3), 723–733.
- [83] Lee, J. Y., Nakao, K., Takahashi, N., Son, S. Y., Bakri, I., Tochiyama, Y. (2011). Validity of infrared tympanic temperature for the evaluation of heat strain while wearing impermeable protective clothing in hot environments. *Industrial health*, 49(6), 714–725.
- [84] Hettiarachchi, I. T., Hanoun, S., Nahavandi, D., Nahavandi, S. (2019). Validation of Polar OH1 optical heart rate sensor for moderate and high intensity physical activities. *PLOS ONE*, 14(5), e0217288.
- [85] Roberts, M. F., Wenger, C. B., Stolwijk, J. A., Nadel, E. R. (1977). Skin blood flow and sweating changes following exercise training and heat acclimation. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol*, 43(1), 133–137.
- [86] Onitsuka, S., Nakamura, D., Onishi, T., Arimitsu, T., Takahashi, H., Hasegawa, H. (2018). Ice slurry ingestion reduces human brain temperature measured using non-invasive magnetic resonance spectroscopy. *Scientific reports*, 8(1), 2757.
- [87] Naito, T., Sagayama, H., Akazawa, N., Haramura, M., Tasaki, M., Takahashi, H. (2018). Ice slurry ingestion during break times attenuates the increase of core temperature in a simulation of physical demand of match-play tennis in the heat. *Temperature*, 5(4), 371–379.

- [88] Adams, W. C., Mack, G. W., Langhans, G. W., Nadel, E. R. (1992). Effects of varied air velocity on sweating and evaporative rates during exercise. *Journal of applied physiology*, 73(6), 2668–2674.
- [89] Du Bois, D., Du Bois, E. F. (1989). A formula to estimate the approximate surface area if height and weight be known. 1916. *Nutrition*, 5(5), 303–313.
- [90] Easton, C., Fudge, B. W., Pitsiladis, Y. P. (2007). Rectal, telemetry pill and tympanic membrane thermometry during exercise heat stress. *Journal of Thermal Biology*, 32(2), 78–86.
- [91] Masè, M., Micarelli, A., Falla, M., Regli, I. B., Strapazzon, G. (2021). Insight into the use of tympanic temperature during target temperature management in emergency and critical care: a scoping review. *Journal of Intensive Care*, 9(1), 43.
- [92] Taylor, N. A. S., Tipton, M. J., Kenny, G. P. (2014). Considerations for the measurement of core, skin and mean body temperatures. *Journal of thermal biology*, 46, 72–101.
- [93] Misailidi, M., Mantzios, K., Papakonstantinou, C., Ioannou, L. G., Flouris, A. D. (2021). Environmental and Psychophysical Heat Stress in Adolescent Tennis Athletes. *International journal of sports physiology and performance*, 16(12), 1895–1900.
- [94] Nassis, G. P., Brito, J., Dvorak, J., Chalabi, H., Racinais, S. (2015). The association of environmental heat stress with performance: analysis of the 2014 FIFA World Cup Brazil. *British journal of sports medicine*, 49(9), 609–613.
- [95] Read, D., Weaving, D., Phibbs, P., Darrall-Jones, J., Roe, G., Weakley, J., Hendricks, S., Till, K., Jones, B. (2017). Movement and physical demands of school and university

- rugby union match-play in England. *BMJ open sport & exercise medicine*, 2(1), e000147.
- [96] Heat Guidelines. (2020). Retrieved October 3, 2022, from <https://passport.world.rugby/player-welfare-medical/medical-protocols-for-match-day-medical-staff/heat-guidelines/>
- [97] Roberts, S. P., Stokes, K. A., Weston, L., Trewartha, G. (2010). The Bath University Rugby Shuttle Test (BURST): a pilot study. *International journal of sports physiology and performance*, 5(1), 64–74.
- [98] Barber, S., Pattison, J., Brown, F., Hill, J. (2020). Efficacy of Repeated Cold Water Immersion on Recovery After a Simulated Rugby Union Protocol. *Journal of strength and conditioning research*, 34(12), 3523–3529.
- [99] Bangsbo, J., Iaia, F. M., Krstrup, P. (2008). The Yo-Yo intermittent recovery test : a useful tool for evaluation of physical performance in intermittent sports. *Sports medicine*, 38(1), 37–51.
- [100] Borg, G. A. V. (1982). Psychophysical bases of perceived exertion. *Medicine and science in sports and exercise*, 14, 377–381.
- [101] Nakazaki, K., Kitamura, S., Motomura, Y., Hida, A., Kamei, Y., Miura, N., Mishima, K. (2014). Validity of an algorithm for determining sleep/wake states using a new actigraph. *Journal of physiological anthropology*, 33(1), 31.
- [102] Onitsuka, S., Zheng, X., Hasegawa, H. (2020). Ice slurry ingestion before and during exercise inhibit the increase in core and deep-forehead temperatures in the second half of

the exercise in a hot environment. *Journal of thermal biology*, 94, 102760.

- [103] Kellmann, M., Bertollo, M., Bosquet, L., Brink, M., Coutts, A. J., Duffield, R., Erlacher, D., Halson, S. L., Hecksteden, A., Heidari, J., Wolfgang Kallus, K., Meeusen, R., Mujika, I., Robazza, C., Skorski, S., Venter, R., Beckmann, J. (2018). Recovery and Performance in Sport: Consensus Statement. *International journal of sports physiology and performance*, 13(2), 240–245.
- [104] Claudino, J. G., Gabbet, T. J., De Sá Souza, H., Simim, M., Fowler, P., De Alcantara Borba, D., Melo, M., Bottino, A., Loturco, I., D’Almeida, V., Carlos Amadio, A., Cerca Serrão, J., Nassis, G. P. (2019). Which parameters to use for sleep quality monitoring in team sport athletes? A systematic review and meta-analysis. *BMJ open sport & exercise medicine*, 5(1), e000475.
- [105] Roberts, S. S. H., Teo, W. P., Warmington, S. A. (2019). Effects of training and competition on the sleep of elite athletes: a systematic review and meta-analysis. *British journal of sports medicine*, 53(8), 513–522.
- [106] Dupuy, O., Douzi, W., Theurot, D., Bosquet, L., Dugué, B. (2018). An Evidence-Based Approach for Choosing Post-exercise Recovery Techniques to Reduce Markers of Muscle Damage, Soreness, Fatigue, and Inflammation: A Systematic Review With Meta-Analysis. *Frontiers in physiology*, 9(403).
- [107] Karacan, I., Thornby, J. I., Anch, A. M., Williams, R. L., Perkins, H. M. (1978). Effects of high ambient temperature on sleep in young men. *Aviation, space, and environmental medicine*, 49(7), 855–860.
- [108] Conlan, G., McLean, B., Kemp, J., Duffield, R. (2021). Effect of Training/Competition

- Load and Scheduling on Sleep Characteristics in Professional Rugby League Athletes. *Journal of strength and conditioning research*, 14(23), 3390–3397.
- [109] Reid, K. (2019). Assessment of Circadian Rhythms. *Neurologic clinics*, 37(3), 505–526.
- [110] Gilbert, S. S., Van Den Heuvel, C. J., Dawson, D. (1999). Daytime melatonin and temazepam in young adult humans: equivalent effects on sleep latency and body temperatures. *The Journal of physiology*, 514(3), 905–914.
- [111] Kräuchi, K. (2007). The human sleep-wake cycle reconsidered from a thermoregulatory point of view. *Physiology & behavior*, 90(2–3), 236–245.
- [112] Kimura, S., Takaoka, Y., Toyoura, M., Kohira, S., Ohta, M. (2021). Core body temperature changes in school-age children with circadian rhythm sleep-wake disorder. *Sleep medicine*, 87, 97–104.
- [113] Robey, E., Dawson, B., Halson, S., Gregson, W., King, S., Goodman, C., Eastwood, P. (2013). Effect of evening postexercise cold water immersion on subsequent sleep. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 45(7), 1394–1402.
- [114] Krueger, M., Costello, J. T., Stenzel, M., Mester, J., Wahl, P. (2020). The physiological effects of daily cold-water immersion on 5-day tournament performance in international standard youth field-hockey players. *European Journal of Applied Physiology*, 120(1), 295–305.
- [115] Creado, S., Advani, S. (2021). Sleep Disorders in the Athlete. *The Psychiatric clinics of North America*, 44(3), 393–403.

- [116] Nelson, K., Davis, J., Corbett, C. (2022). Sleep quality: An evolutionary concept analysis. *Nursing forum*, 57, 144–151.
- [117] Smith, D. R., King, R. F. G. J., Duckworth, L. C., Sutton, L., Preston, T., O'Hara, J. P., Jones, B. (2018). Energy expenditure of rugby players during a 14-day in-season period, measured using doubly labelled water. *European journal of applied physiology*, 118(3), 647–656.
- [118] Meir, R., Brooks, L., Shield, T. (2003). Body weight and tympanic temperature change in professional rugby league players during night and day games: a study in the field. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 17(3), 566–572.
- [119] Swinbourne, R., Miller, J., Smart, D., Dulson, D. K., Gill, N. (2018). The Effects of Sleep Extension on Sleep, Performance, Immunity and Physical Stress in Rugby Players. *Sports*, 6(2), 42.
- [120] Matsuo, M., Masuda, F., Sumi, Y., Takahashi, M., Yamada, N., Ohira, M. H., Fujiwara, K., Kanemura, T., Kadotani, H. (2016). Comparisons of Portable Sleep Monitors of Different Modalities: Potential as Naturalistic Sleep Recorders. *Frontiers in Neurology*, 7, 110.
- [121] Nakada, Y., Sugimoto, A., Kadotani, H., Yamada, N. (2018). Verification of effect of sleep health education program in workplace: a quasi-randomized controlled trial. *Industrial health*, 56(1), 20–29.
- [122] Shrivastava, D., Jung, S., Saadat, M., Sirohi, R., Crewson, K. (2014). How to interpret the results of a sleep study. *Journal of community hospital internal medicine perspectives*, 4(5), 24983.

- [123] Yamamoto, Y., Takase, M., Yamazaki, K., Shirakawa, S., Azumi, K. (1999). Standardization of revised version of OSA sleep inventory for middle age and aged. *Brain Science and Mental Disorders*, 10, 401–409.
- [124] Umigai, N., Takeda, R., Mori, A. (2018). Effect of crocetin on quality of sleep: A randomized, double-blind, placebo-controlled, crossover study. *Complementary therapies in medicine*, 41, 47–51.
- [125] 一般社団法人日本睡眠改善協議会. (2022). OSA睡眠調査票MA版. Retrieved December 10, 2022, from <https://www.jobs.gr.jp/index.html>
- [126] Cohen, J. (2013). *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*. Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences. New York: Routledge.
- [127] Faul, F., Erdfelder, E., Lang, A. G., Buchner, A. (2007). G*Power 3: a flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. *Behavior research methods*, 39(2), 175–191.
- [128] Li, L., Nakamura, T., Hayano, J., Yamamoto, Y. (2021). Seasonal Sleep Variations and Their Association With Meteorological Factors: A Japanese Population Study Using Large-Scale Body Acceleration Data. *Frontiers in digital health*, 3, 677043.
- [129] Okamoto-Mizuno, K., Tsuzuki, K. (2010). Effects of season on sleep and skin temperature in the elderly. *International journal of biometeorology*, 54(4), 401–409.
- [130] Bannai, M., Kawai, N. (2012). New therapeutic strategy for amino acid medicine: glycine improves the quality of sleep. *Journal of pharmacological sciences*, 118(2), 145–148.

- [131] Hashizaki, M., Nakajima, H., Shiga, T., Tsutsumi, M., Kume, K. (2018). A longitudinal large-scale objective sleep data analysis revealed a seasonal sleep variation in the Japanese population. *Chronobiology international*, 35(7), 933–945.
- [132] Leduc, C., Tee, J., Phibbs, P., Read, D., Ramirez, C., Thomas, S., Weaving, D., Jones, B. (2020). Objective sleep patterns and validity of self-reported sleep monitoring across different playing levels in rugby union. *South African Journal of Sports Medicine*, 32(1), 1–6.
- [133] Levels, K., Teunissen, L. P. J., De Haan, A., De Koning, J. J., Van Os, B., Daanen, H. A. M. (2013). Effect of warm-up and precooling on pacing during a 15-km cycling time trial in the heat. *International journal of sports physiology and performance*, 8(3), 307–311.
- [134] Sivertsen, B., Omvik, S., Havik, O. E., Pallesen, S., Bjorvatn, B., Nielsen, G. H., Straume, S., Nordhus, I. H. (2006). A comparison of actigraphy and polysomnography in older adults treated for chronic primary insomnia. *Sleep*, 29(10), 1353–1358.
- [135] Herbst, E., Metzler, T. J., Lenoci, M., McCaslin, S. E., Inslicht, S., Marmar, C. R., Neylan, T. C. (2010). Adaptation effects to sleep studies in participants with and without chronic posttraumatic stress disorder. *Psychophysiology*, 47(6), 1127–1133.
- [136] Leon, L. R. (2007). Heat stroke and cytokines. *Progress in brain research*, 162, 481–524.
- [137] Leon, L. R., Helwig, B. G. (2010). Heat stroke: role of the systemic inflammatory response. *Journal of applied physiology*, 109(6), 1980–1988.
- [138] Chauhan, P., Nair, A., Patidar, A., Dandapat, J., Sarkar, A., Saha, B. (2021). A primer on

cytokines. *Cytokine*, 145, 155458.

- [139] Gagge, A. P., Stolwijk, J. A. J., Saltin, B. (1969). Comfort and thermal sensations and associated physiological responses during exercise at various ambient temperatures. *Environmental Research*, 2(3), 209–229.
- [140] Lundberg, M., Eriksson, A., Tran, B., Assarsson, E., Fredriksson, S. (2011). Homogeneous antibody-based proximity extension assays provide sensitive and specific detection of low-abundant proteins in human blood. *Nucleic acids research*, 39(15), e102.
- [141] Wik, L., Nordberg, N., Broberg, J., Björkesten, J., Assarsson, E., Henriksson, S., Grundberg, I., Pettersson, E., Westerberg, C., Liljeroth, E., Falck, A., Lundberg, M. (2021). Proximity Extension Assay in Combination with Next-Generation Sequencing for High-throughput Proteome-wide Analysis. *Molecular & cellular proteomics : MCP*, 20, 100168.
- [142] Welc, S. S., Clanton, T. L., Dineen, S. M., Leon, L. R. (2013). Heat stroke activates a stress-induced cytokine response in skeletal muscle. *Journal of applied physiology*, 115(8), 1126–1137.
- [143] Phillips, N. A., Welc, S. S., Wallet, S. M., King, M. A., Clanton, T. L. (2015). Protection of intestinal injury during heat stroke in mice by interleukin-6 pretreatment. *The Journal of physiology*, 593(3), 739–753.
- [144] Liu, C. C., Shih, M. F., Wen, Y. S., Lai, Y. H., Yang, T. H. (2014). Dexamethasone improves heat stroke-induced multiorgan dysfunction and damage in rats. *International journal of molecular sciences*, 15(11), 21299–21313.

- [145] Junier, M. P. (2000). What role(s) for TGFalpha in the central nervous system? *Progress in neurobiology*, 62(5), 443–473.
- [146] Kavanagh, S., Mirzai, B., Fuller, K., Erber, W. N. (2016). TGF α expression in myeloid malignancies. *Journal of clinical pathology*, 69(6), 543–546.
- [147] Dawes, C., O'Connor, A. M., Aspen, J. M. (2000). The effect on human salivary flow rate of the temperature of a gustatory stimulus. *Archives of oral biology*, 45(11), 957–961.

研究業績

《査読付投稿論文》

Morito A, Inami K, Hirata A, Yamada S, Shimomasuda M, Haramoto M, Kato K, Tahara S, Oguma Y, Ishida H, Kohtake N. Ice slurry ingestion improves physical performance during high-intensity intermittent exercise in a hot environment. PLOS ONE, 2022, 17(9), e0274584.

Morito A, Inami T, Hirata A, Yamada S, Shimomasuda M, Kato K, Tahara S, Kohtake N. Effect of Ice Slurry Ingestion on Post-Exercise Physiological Responses in Rugby Union Players. *Physiologia*, 2022, 2(4), 154-163.

Morito A, Inami T, Hirata A, Yamada S, Shimomasuda M, Kato K, Tahara S, Kohtake N. Effect of Ingestion of Ice Slurry on the Sleep Quality of Rugby Union Players in the Summer Season. *Physiologia*, 2022, 2(3), 46–54.

森戸暁久, 山田啓史, 下益田正嗣, 原本真紀, 永井恒, 高岡彰子, 内藤貴司, 斎藤辰哉, 中村真理子, 神武直彦. 健常成人男性を対象とした血中及び唾液中の熱中症バイオマーカーの探索研究—非盲検クロスオーバー試験—, *薬理と治療*, 2022, 50(6), 1041-1048.