

常温溶液の急速過冷却法を用いた 身体内部冷却効果の検討

東京理科大学 柳田 信也

Investigation of Internal Body Cooling Effect Using Rapid Supercooling Method of Ambient Temperature Solution

by

Shinya Yanagita
Tokyo University of Science

ABSTRACT

Prevention of dehydration and cooling of the body is important for the prevention of heatstroke. In recent years, the effects of ingesting an ice slurry have been reported as an innovative method to simultaneously achieve dehydration and body cooling. However, ice slurries are difficult to drink and to adjust to the needs of the subjects, so these issues need to be improved before they can be implemented in the field. In this study, as an approach to this implementation, we focused on the effect of supercooled water and conducted an experimental investigation. We also developed a method to rapidly cool the surrounding environment using supercooled water.

As a result, it was found that although the body cooling effect of supercooled water is not as good as that of ice slurry, it is easy to drink, has an immediate effect, and has a high possibility of preventing dehydration. On the other hand, theoretical considerations revealed problems in the development of a cooling method for ambient temperature solutions using endothermic reactions. The results of this study show the potential of supercooled water as a new body cooling tool.

要 旨

熱中症の予防には、脱水予防と身体冷却が重要である。近年、この脱水と身体冷却を同時に実現する画期的な手法として、アイススラリー摂取の効果が報告されている。しかし、アイススラリーは飲みにくさや用事調整の困難さなどの課題があり、現場での実装のためにはこの改善が求められる。本研究は、この実装に向けた取り組みとして、過冷却水の効果に注目し、実験的な検討を行った。また、屋外での長時間の活動を想定して、吸熱反応を利用した常温溶液を急速に冷やす手法の開発に合わせて取り組んだ。

実験的な検討の結果、過冷却水の摂取による身体冷却効果はアイススラリーには及ばないものの、飲みやすさや効果の即時性、脱水予防効果が高い可能性などが明らかとなった。一方で、吸熱反応を用いた常温溶液の冷却手法の開発は理論的な検討から課題が浮き彫りとなった。本研究の成果から新たな身体冷却ツールとしての過冷却水の可能性に期待が持たれる。

緒 言

熱中症の発症には、主に暑熱環境における脱水と深部体温の上昇が関わっている。つまり、熱中症を予防するためには、「脱水の予防」と深部体温の上昇抑制のための「身体冷却」が必要である。近年、スポーツ科学や労働衛生分野の研究において、この脱水と深部体温上昇を同時に予防する画期的な手法として「アイススラリー摂取（冷水と細かい氷の混合物；飲める氷）」の効果が多数報告されている。

Rodney Siegel¹⁾は、高温環境下（34.0℃ ± 0.2℃，54.9% ± 5.9%）においてトレッドミルによる漸増負荷運動中の直腸温の上昇が、アイススラリー摂取によって冷水（4℃）の摂取よりも有意に抑制されることを報告している。また、主観的な

温冷感覚や自覚的運動強度の上昇が抑制されたことも示された。また、Rodney Siegel²⁾は運動前のアイススラリー摂取とアイスバス浴（24.8℃）を比較し、同等のプレクーリング効果があることも報告している。国内においても、長谷川・鬼塚らの研究によって、スポーツ場面への導入を検討した実践的なレビュー³⁾や冷却効果の生理学的機構の解明を行った基礎的研究⁴⁾が報告され、興味深い知見が集まっている。これらの研究成果から、アイススラリーの熱中症予防効果が期待される。特に、他の身体冷却手法と異なり、水分や電解質の摂取を同時に行うことができる優位性もこの期待を増幅させるものである。

我々も、実際の装備を着装した消防隊員における暑熱環境下での運動実験において、アイススラリー摂取による運動中の深部体温の上昇抑制を確認し、熱中症予防ツールとしての有効性を示す報告をしている^{5,6)}。消防隊員は、消火に対応するために気密性の高い装備を着用して活動しなければならないため、発汗/蒸散による熱放散反応が抑制されるため、特に身体冷却の効果検証が必要な職業である。我々の検証の結果、防火服（消火活動中に着用する装備）や毒劇物防護衣（化学災害対応中に着用する装備）など、高重量かつ高气密断熱性能を有した条件においても、アイススラリー摂取によって高温環境における運動中の直腸温の上昇抑制が確認された。この結果から、アイススラリーは熱放散反応を制限するような装備の影響に依存しない身体内部冷却効果があることが示唆された。これらを総合的に考えると、アイススラリーはスポーツから労働現場まで幅広く利用することができるツールであると言える。

一方、消防隊員への実装を目指した我々の先行研究⁶⁾においては、アイススラリーを現場で使用する際の重大な問題も明らかになった。その問題とは、①飲みにくさ、及び②現場での調整の難しさであった。アイススラリー摂取に対する主観を

5件法で調査した結果では、飲みにくい（飲みやすいを5として、回答結果は1もしくは2であった）とすべての被検者が回答している。また、アイススラリーの作成は事前に調整したものを保冷して持ち運ぶか、その場での調整が必要となるが、予想が不可能な災害現場や長時間にわたる屋外でのスポーツや労働に対応するためには用事調整ができることが望ましい。この2つの問題を解消したスラリー状の飲料を導入することはスポーツや労働現場における身体内部冷却手法の実装を加速するものとなることが予想される。

本研究は、この実装に向けた改善として、過冷却水の効果に注目をするものである。過冷却水は、糖質などの成分が水分子の周りに存在することで溶液の温度がマイナスになった状態でも凝固しない液体のことである。この過冷却水に衝撃を与えると、分子の移動により水分子同士が接合し、急速に微細な氷（スラリー状）が形成される。本研究の第一の目的は、この過冷却溶液の凝固点降下反応によって作成された飲料による身体内部冷却効果を既存の手法で作成したアイススラリーや冷水と比較検討し、現場への実装可能性を考察することである（課題1）。

また、冷蔵設備の乏しい屋外での長時間の活動に対応するためには、常温の水溶液を急速に冷やす手法が期待される。そこで、本研究の第二の目的は、硝酸アンモニウム等の物質と水の吸熱反応（市販の瞬間冷却材の原理）に注目し、この反応を用いて常温の溶液を急速に過冷却することが可能かどうかについて検証する（課題2）。以上のことをまとめると、本研究では、2つの課題を通して、常温のスポーツドリンクなどを化学的吸熱反応により急速に過冷却した水溶液の摂取が、暑熱環境における運動時の脱水状態や深部体温変動に及ぼす効果を検討するものである。

1. 方法

1.1 研究対象者

本研究では、基礎的な検討として実験室内における安静時の生理指標変化に対する各種冷却溶液摂取の影響が検討された。研究対象者は運動習慣のある、一般健常男性5名（年齢：20.6 ± 1.4歳）であった。対象者の形態の平均値は、身長：175.6 ± 1.9cm、体重：68.9 ± 8.6、体脂肪率：18.1 ± 6.8であった。全ての実験は、東京理科大学ヒトを対象とする医学系研究に係る倫理審査委員会の承認を得た上で、インフォームドコンセントで相互理解が得られたものを対象に実施した。

1.2 実験手順と測定項目

本研究では、深部体温の指標として直腸温、その体温変動に伴う生理指標として心拍数を測定した。また、脱水レベルを推定するために尿比重と唾液浸透圧の測定を実施した。研究対象者は実験室（室温25℃）に到着後、体組成を体成分分析装置（Best health care Solutions：InBody770）で測定し、尿比重を尿比重計（アタゴ社製；ポケット尿比重屈折計PAL-09S）で測定した。その後、実験中の温度環境を統一するために、45℃の温水を循環させた水循環スーツを着用し、安静状態とした。測定装置を接続後、安静座位で過冷却水、アイススラリー、冷水の摂取する実験を行った。測定の様子を図1に示した。

対象者はまず、唾液の浸透圧を脱水度センサー（MX3社製；Hydration Testing System, Pro Version）で測定した。直腸温センサー（グラム社製；LT-2N-11型）、心拍数計（アフォードセンス社製；Vitalgram[®]CT2（ベルト装着タイプ））を装着し、実験を開始した。開始後10分間の安静時間を取り、45℃に設定した循環槽（TAITEC社製；ZL-100）と接続した水循環スーツ（MED-ENG社製；BCS-4 Body Cooling System-Suit）を着用し、



図1 測定の様子

さらに10分間安静時間をとった。その後、各種水分摂取を行った。水分摂取は3分ごとに計5回、1回100gの各種飲料水を摂取し、水分摂取終了後20分間の安静時間を経て、再度、尿比重、脱水度を測定した。

対象者の主観的な評価を検証するために、各種溶液を摂取した際の温冷感及び飲みやすさを測定した。温冷感は、0（信じられないくらい寒い）から（4を快適）、8（信じられないくらい暑い）の9段階を対象者が選択する方法で測定した。飲みやすさの評価には、VAS（Visual Analog Scale）を用いた。VASの測定には図2に示した測定用紙を用いた。対象者は各種溶液摂取後の飲みやすさ（飲みにくさ）に対する主観的な評価を、10cmの線分にチェックし、その長さを主観的な飲みやすさとして評価した。温冷感や飲みにくさの評価は、水分摂取開始前及び終了後は5分間隔で、水分摂取時間中は3分間隔（水分摂取の度）で行われた。

VAS 質問票	
被験者 No.	実験条件
記入日時:	年 月 日 時 分
飲みにくさ	
全く〆	非常に〆
感じない〆	感じる〆
全く〆	非常に〆
感じない〆	感じる〆

図2 VASの測定用紙と記入例

1. 3 身体内部冷却用溶液の作成

実験条件として過冷却水、アイススラリーの3種類の飲料水を使用した。摂取量はそれぞれ500gとした。また、添加物などは加えない条件とした。使用したアイススラリー、過冷却水、冷水はすべて自作し、水は純粋製造装置（メルク社；水道水直結純水製造装置Direct-Q用 SmartPakDQ3）の純水を用いた。アイススラリーは氷と水からアイススラリー製造機（ドウシシャ社；大人の氷フローズン ホワイト DCFZ-17W）を用いて作成した。氷250g、水250gを混ぜアイススラリー製造機に入れて氷を粒状に砕いた状態で摂取した。また、過冷却水は冷凍ボックス（ENGEL社；ポータブル冷凍冷蔵庫）を用いて作成した。純水を内部温度-10℃に設定した冷凍ボックスに12時間以上保存し、水の温度を-7.5℃にした状態で、常温のコップに注ぎ過冷却状態のまま摂取できるようにした。冷水は4℃の冷蔵庫に12時間以上入れ、水の温度が4℃になった状態で摂取した。

1. 4 過冷却溶液の凝固点降下による溶液の冷却効果の理論値

過冷却水とは凝固点を超えて冷やしても固体にならず、液体の状態を保つ水である。通常の冷水よりも高い冷却効果が期待できる。冷却能力を概算するため、人体熱収支を考慮し深部体温に至るまでに各溶液が失う熱量を導いた。この算出には、次のような理論式及びパラメーターを用いた。

$$Q = c \times m_{water} \times \Delta T + \Delta h_f \times m_{ice}$$

- Q : 溶液 500g が 37℃まで上昇するときに必要な熱量 (kJ)
- c : 水の比熱 4.2 (kJ/gK)
- m_w : 水の質量 (g)
- ΔT : 上昇する温度 (K)
- Δh_f : 氷の融解熱 333.6 (kJ/g)
- m_i : 氷の質量 (g)

1. 5 吸熱反応による吸熱量の理論値

本研究では、吸熱反応を示す代表的な物質として硝酸アンモニウムに注目した。まず、吸熱反応によって過冷却水を作成できるのかどうかについて、熱量計算を基にその理論値を求めた。硝酸アンモニウムの吸熱量は25.7kJ/molである。また、モル質量は80g/molであるため、1gあたりの吸熱量は321J/g (25.7/80) と見積もることができる。この吸熱量の反応効率については、難波らの先行研究において、硝酸アンモニウムと水の比率が4:3であることが示されている⁷⁾。これらの数値を基に、理論式を算出し、水溶液の温度を低下させる容量と吸熱反応によって低下する温度を算出した。容器外とは完全に断熱されており、硝酸アンモニウムの吸熱が全て容器内の水溶液と反応すると仮定し、暑熱環境下の運動時の対策として十分な量となると考えられる500mlの過冷却水を作成するための熱量等式を立てた。等式は以下のとおりである。

$$\Delta T = \frac{321x}{\left(\frac{3}{4}x + 500\right) \times c}$$

ΔT :温度変化 (K)
 x :硝酸アンモニウムの質量 (g)
 c :水の比熱容量 4.2 (J/gK)

1. 6 統計処理

過冷却水の身体内部冷却効果を明らかにするために、冷水及びアイスラリー摂取後の測定項目について、1元配置分散分析を行った。分散に主効果が認められた場合には、多重比較検定によって水準間の差の比較を行った。

2. 実験結果

2. 1 身体内部冷却用水溶液摂取による生理指標の比較

本研究では、課題1に対する実験的検討として、

各種身体内部冷却用溶液の摂取が生理指標の応答に及ぼす影響が行われた。生理指標として、深部体温(直腸温)及び心拍数の変化を以下の項目に示した。

2. 1. 1 直腸温の比較

図3に、各種水溶液摂取時から測定終了時までの直腸温の変化を示した。直腸温は安静時の値に個人差が大きいいため、測定開始時の値を基準として変化量の推移を算出し、その値について比較を行った。溶液摂取後の直腸温低下の平均値と標準偏差は、過冷却水摂取条件では -0.17 ± 0.10 、アイスラリー摂取条件では -0.26 ± 0.15 、冷水摂取条件では -0.16 ± 0.09 であった。各種冷却溶液摂取による直腸温の変化量について一元配置分散分析を用いて比較した結果、水溶液の種類に有意な主効果が確認された($F(2,2100) = 140.4, p < 0.001$)。多重比較検定の結果、アイスラリー摂取と過冷却水及び冷水の摂取では有意に直腸温の変化量に差が認められ、アイスラリー摂取によって他の条件よりも直腸温が低下することが明らかになった($p < 0.01$)。過冷却水には統計的に有意な直腸温を低下させる効果は認められなかったものの、水分摂取後には冷水よりも直腸温を早く低下させる傾向がみられた。

2. 1. 2 心拍数の比較

直腸温と同時に心拍数の条件間比較を行った結果を図4に示した。心拍数についても、安静時の

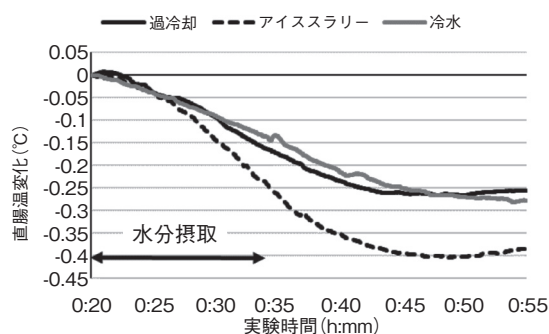


図3 身体内部冷却用溶液による直腸温の変化

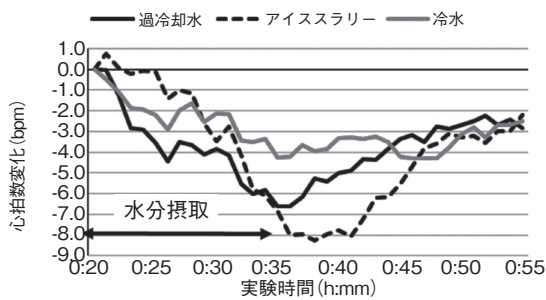


図4 身体内部冷却用溶液による心拍数の変化

値に個人差が大きいため、溶液摂取開始時の値を基準に変化量を算出し、条件間の比較を行った。心拍数変化量の平均値と標準偏差は、過冷却水摂取条件で -3.75 ± 1.61 、アイススラリー摂取条件で -3.93 ± 2.77 、冷水摂取条件で -2.93 ± 1.07 であった。この各種溶液摂取による心拍数の変化量について一元配置分散分析を行った結果、条件間に有意な主効果は認められなかった ($F(2,105) = 2.64, p > 0.05$)。統計的に有意な変動は認められなかったものの、過冷却水摂取中 (25分付近) においては他の条件と比較して心拍数の上昇抑制がみられる傾向があった。また、溶液摂取終了後 (45分付近) において、アイススラリー摂取による心拍数上昇抑制がみられる傾向がわかった。

2.2 身体内部冷却用水溶液摂取による脱水状態の比較

過冷却水やアイススラリーの摂取による効果は、身体冷却とともに水分摂取が同時に行えることにあるため、脱水に関する生体指標の測定を実施した。

2.2.1 唾液の浸透圧の比較

図5に実験終了時の唾液浸透圧の平均値を示した。条件間に統計上の有意な差は認められなかった ($F(2,12) = 206.5, p > 0.05$)。しかし、平均値としては過冷却水摂取後の唾液浸透圧が最も低い値を示していた。

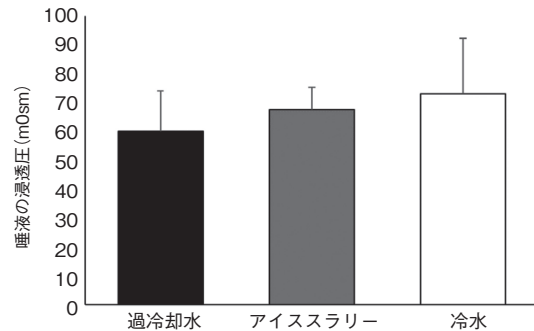


図5 溶液摂取後の唾液浸透圧の比較

2.2.2 尿比重の比較

3つの条件間で、実験終了時の唾液浸透圧の平均値の比較を行った結果、統計的に有意な差は認められなかった ($F(2,12) = 2.8, p > 0.05$)。一方で、アイススラリー摂取条件の分散が非常に大きく、この誤差範囲の広さが影響している可能性も見受けられる。平均値のデータでは、過冷却水と冷水はアイススラリーよりも低い値を示していた (図6)。

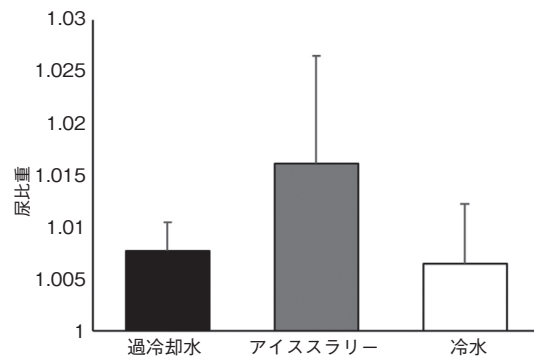


図6 溶液摂取後の尿比重の比較

2.3 身体内部冷却用溶液摂取による主観的評価の比較

過冷却水とアイススラリーを比較する上では、生理指標とともに身体冷却に対する主観的な温冷感や飲みやすさなどの比較も重要である。そこで本研究では、測定用紙を用いた主観の評価も実施した。

2.3.1 温冷感

温冷感の比較について図7に示した。3つの条

件間で実験を通した温冷感の平均値は、過冷却水摂取条件で 4.01 ± 0.75 、アイススラリー摂取条件で 3.89 ± 0.88 、冷水摂取条件で 4.91 ± 0.47 であった。これらの値について一元配置分散分析によって比較したところ、要因間に有意な主効果が認められた ($F(2,27) = 5.96, p < 0.01$)。要因間の差の検定を行った結果、過冷却水及びアイススラリー摂取時の温冷感と冷水摂取時では有意な差が認められ、過冷却水やアイススラリー摂取時の温冷感は冷水摂取に比べて、どちらも低いことが明らかになった ($p < 0.05$)。過冷却水とアイススラリー摂取の間には温冷感に有意な差は認められなかった。

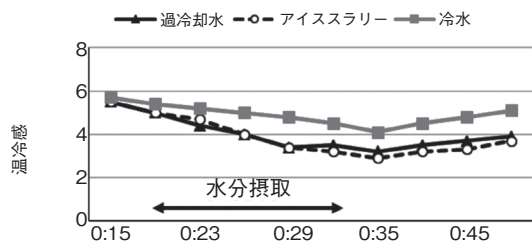


図7 実験中の温冷感の変化

2. 3. 2 飲みにくさ

VASを用いて各溶液摂取中の飲みにくさに関する主観的評価の平均値と標準偏差（過冷却水： 33.7 ± 6.78 、アイススラリー： 45.8 ± 6.63 、冷水： 11.6 ± 5.18 ）を図8に示した。分散分析により、条件間に有意な主効果が認められたため ($F(2,12) = 38.6, p < 0.001$)、多重比較検定によって要因間の差の検定を行った結果、過冷却水及び

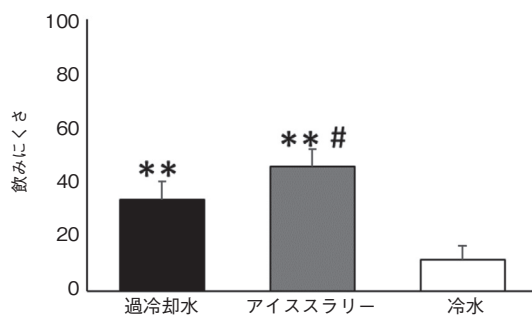


図8 溶液に対する主観的評価の比較
**: $p < 0.01$ vs. 冷水, #: $p < 0.05$ vs. 過冷却水

アイススラリー摂取条件と冷水摂取条件において有意な差が認められ、過冷却水やアイススラリー摂取は冷水よりも飲みにくさの値が高かった ($p < 0.01$)。さらに、過冷却水に比べ、アイススラリーの飲みにくさが高かった ($p < 0.05$)。

2. 4 理論式によって算出された身体内部冷却用水溶液の熱量

方法1.4に示した過冷却溶液の凝固点降下による溶液の冷却効果の等式を用いて、各溶液の冷却能力を理論的に算出した。具体的には人体熱収支を考慮し、深部体温付近の温度である 37°C に至るまでに各溶液が失う熱量を導いた。図9に示すように熱量変化はアイススラリー (156.9kJ)、過冷却水 (92.4kJ)、冷水 (69.3kJ) となり、アイススラリー、過冷却水、冷水の順に大きいものであった。このため、熱収支の理論上の冷却効果はこの順で大きいと考えることができる。

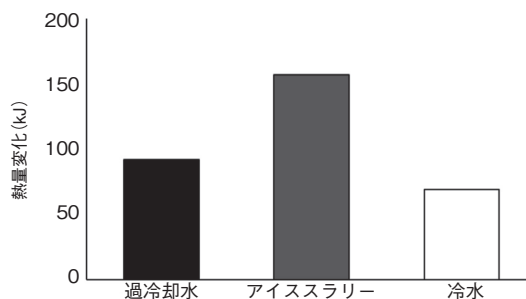


図9 各溶液が 37°C になるまでの熱量変化

2. 5 理論式によって算出された吸熱反応と温度変化

方法1.5に示した吸熱反応による吸熱量の算出に関する理論式から、常温溶液を身体冷却に適する状態まで冷却するために必要な吸熱反応物質（硝酸アンモニウム）と冷やされる側の溶液の初期設定温度の関係性を導いた。暑熱環境下における運動時の身体冷却及び水分摂取に実装することを想定し、500gの溶液の温度低下の理論値を算

表1 硝酸アンモニウムの吸熱反応の理論値と溶液の初期設定温度の関係

初期設定温度(°C)	硝酸アンモニウム100g	硝酸アンモニウム200g
	反応後温度(°C)	反応後温度(°C)
0	-13.3	-23.5
4	-9.3	-19.5
10	-3.3	-13.5
20	6.7	-3.5
30	16.7	6.5

出した(表1)。この実験的な検証は今後の課題となるものの、代表的な物質としてシミュレーションに利用した硝酸アンモニウムが100gの場合でも、常温(20°C以上)の溶液を十分な冷却状態である一桁代の温度を実現できないことが理論的には示された。

3. 考察

本研究では、スポーツや労働現場における熱中症予防を目指し、その基盤となる「水分摂取」と「身体冷却」を同時に実現する効率的なツールとして、過冷却水の効果を検証した(課題1)。さらに、現場での実装として望まれる「用事調整」について、常温溶液を吸熱効果によって冷却する理論の導入を検討した(課題2)。

まず、これらの検証方法として、優れた効果が確認されている既存手法であるアイススラリーや冷水との生理指標や主観の比較が行われた。恒温をキープできる温水循環スーツ着用の安静時に、過冷却水(-7°C)アイススラリー(水:氷=1:1)及び冷水(4°C)のいずれかを摂取し、深部体温の指標である直腸温を比較した結果、アイススラリーは過冷却水や冷水よりも有意な深部体温の上昇抑制効果を有することが明らかとなった(図3)。これまでに多くの先行研究において、運動前や運動中、運動間(休息中)のアイススラリー摂取が身体冷却効果を有することが報告されてきた^{8,9,10)}。また、この身体冷却効果の基盤は深部体温の上昇を抑制する効果であり、循環血液の温度を低下させることによる脳温の上昇抑制の影響が示唆されるなど、アイススラリーの効果のメカ

ニズム解明も進められている⁴⁾。一方で、我々の先行研究結果に明確に示されているように、細かい氷であっても飲み込むことが困難であり、利用に対する不快感を示す人も一定数確認されている⁵⁾。本研究では、この問題を解消するためにマイナス温度帯を維持しながらも、液状をキープすることができる過冷却水に注目した。統計的に有意な差が認められなかったものの、過冷却水摂取は冷水よりも若干の直腸温低下効果を摂取直後に示していた。本研究は、基礎的・予備的研究として安静時の効果のみに着目したものであり、酷暑環境などによって運動誘発性高体温がみられるような条件においては、過冷却水による微細な効果も意味のあるものとなる可能性は否定できないと考えられる。特に、酷暑環境における運動においては、十分な深部体温上昇抑制や最終的な表現型である運動パフォーマンスの維持が、身体冷却によって導かれないという報告もいくつか見られるため¹¹⁾、新たなツールとしての過冷却水の運動中の効果の検証に期待が持たれると考えられる。運動中の過冷却水摂取実験や摂取条件(摂取量や回数、タイミング)の更なる検討が新たな道を切り拓くかもしれない。

直腸温の測定と同時に心拍数を解析した結果から、過冷却水とアイススラリーでは、心拍数変化の位相が異なるという興味深い結果が得られた(図4)。本研究では、15分間(3分間隔で5回)の水分摂取時間を設け、その後の経過を測定した。過冷却水摂取条件では、この水分摂取時間中にアイススラリーや冷水よりも早く、より低く心拍数を低下させる傾向がみられた。一方で、アイスス

ラリーは摂取終了後に最低値を示し、それがしばらく継続されている。この反応の違いのメカニズムは現段階では明確にわからないものの、溶液の形状が影響しているのではないかと考えられる。水と氷の混合物であるアイスラリーは、潜熱変化をしている状態が長いことが予想される。一方で、溶液成分が多い過冷却水は、顕熱変化として温度変化を起こしやすい状態である。つまり、過冷却水とアイスラリーでは、顕熱比が異なる可能性が考えられる。そのため、顕熱変化の影響が早く出た過冷却水と、氷から水へと状態変化が必要となるアイスラリーで位相が異なったのではないかと仮説を立てることができる。さらに、本研究において人体熱収支を考慮した条件で、過冷却水とアイスラリーの熱量変化の総量について検討した結果、熱収支理論上の冷却効果についても過冷却水とアイスラリーでは大きな差がみられている(図9)。このことも全熱(潜熱+顕熱)が影響していると考えられ、過冷却水の改善するポイントの一つであると考えられる。

一方で、このような位相差は直腸温の変化には見られていない。直腸温と心拍数では恒常性の維持に関する反応が異なるのかもしれない。いずれにせよ、これらは仮説の域を出るものではないが、水と氷の割合や状態はアイスラリー研究においても重要なポイントであると考えられるため、本研究によって得られた興味深い知見であると考えられる。

過冷却水とアイスラリー摂取による脱水予防効果について、唾液浸透圧と尿比重を指標として比較検討を行った。その結果、統計学的に有意な差は認められなかった。唾液浸透圧についても、尿比重についても過冷却水はアイスラリーよりも低値を示していることから、サンプル数を増やすなど、更なる検証が必要であると考えられる。また、スポーツや労働現場における実装に向けた重要課題である「飲みにくさ」については、アイ

スラリーよりも有意に過冷却水が低い値を示していた(図8)。一方で、主観的な身体冷却感はアイスラリーと同等であることがわかった。現場における実装を視野に入れた場合、飲みやすさと冷却感の両立は極めて有効なポイントである。脱水予防の可能性、飲みやすさ及び冷却感を総合的に考えた場合、過冷却水はアイスラリーよりも現場における実装に適している可能性が考えられる。さらに、心拍数に見られたような即時性が立証されるとこの可能性はさらに高まると考えられる。本研究の核心的な課題である、現場での実装に向けたアイスラリーの問題点を解消するツールの検証という観点においては、極めて有益な研究結果であると思われる。さらに、飲みやすいという主観によって、より多く、もしくは頻回の摂取が可能となることが予想させるため、この点についてもアイスラリーを上回る可能性を秘めていることが示唆される。

本研究では、過冷却水の実装に向けた更なる発展として、常温溶液から身体冷却効果を有する溶液を作成する手法を検討した。この手法として、硝酸アンモニウム及び尿素(データ未掲載)の吸熱反応に注目し、まず理論的な検証を実施した(表1)。硝酸アンモニウムや尿素の吸熱効果は、衝撃を加えることで水と反応させ、冷却効果を得る身体外部冷却剤として一般的に利用されている反応である。本研究では、この反応性をより高いものにするすることで、ペットボトル等の溶液を一気に冷却することを目指した。表1に示した通り、ペットボトル1本分に相当する500mlの溶液をマイナス温度帯にするためには、20℃環境の場合、200gもの硝酸アンモニウムが必要となることがわかった。暑熱環境を想定した30℃の環境下では、200g以上の硝酸アンモニウムが求められる。化学反応を行うための安全性の確保やこの多量な試薬を必要とする条件は実装に向けた現実性が低いことから、極めて実装困難な条件であることがわ

かった。そのため、吸熱反応がより高い条件を検討するなどの基礎研究が、常温溶液を身体冷却効果が十分な条件で作成するためには必要であることがわかった。化学系の研究者との共同開発の可能性などが求められると考えられる。いずれにせよ、いつでも・どこでも・誰にでも、安心して簡単な熱中症対策として、常温環境を想定した身体内部冷却手法の開発は必須であると考えられる。この考え方に即した今後の更なる研究の発展が望まれる。

結 論

本研究では、熱中症予防の核心的なポイントである身体冷却と水分摂取を同時に実現する身体内部冷却ツールとして、過冷却水の効果を既存の有効な手法であるアイススラリーと比較検討した。その結果、身体冷却効果はアイススラリーには及ばないものの、摂取の容易さや効果の即時性、脱水予防の可能性について、アイススラリーを上回る効果を過冷却水が有する可能性が示された。特にスポーツや労働現場において、これらのポイントは顕著な優位性であると考えられ、今後の導入が期待されるものである。

謝 辞

本研究は、公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団の研究助成により遂行されました。ここに記して深謝をいたします。また、本研究の測定を中心となり実施して下さった東京理科大学大学院理工学研究科、松尾健右氏に感謝と御礼を申し上げます。

文 献

- 1) Siegel et al., Ice slurry ingestion increases core temperature capacity and running time in the heat, *Medicine Sciences Sports and Exercise*, 42:717-725 (2010)
- 2) Siegel et al., 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):155-65(2012)
- 3) 長谷川博, 柳岡拓磨, 飲むアイススラリー, 臨床スポーツ医学, 37(11):1330-1333(2020)
- 4) Onitsuka et al., Ice slurry ingestion reduces human brain temperature measured by noninvasive method of magnetic resonance spectroscopy, *Scientific Reports*, 8:2757(2018)
- 5) 柳田信也, 消防隊員の暑熱環境下におけるアイススラリー摂取による身体冷却効果, 総合危機管理, 4:79-84(2020)
- 6) 丁鐘珍ら, 高温又は常温環境で模擬活動する消防隊員の生理指標へのアイススラリー又は水の摂取の影響, *Bulletin of Japan Association for Fire Science and Engineering*, 70:35-51(2020)
- 7) 難波真大ら, 手作り瞬間冷却材の製作, 神戸市立工業高等専門学校研究紀要, 50:177-180(2012)
- 8) Onitsuka et al., Effects 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*, 174:113-121(2015)
- 9) Onitsuka et al., Ice slurry ingestion reduces both core and facial skin temperatures in a warm environment, *Journal of Thermal Biology*, 51:105-109(2015)
- 10) Naito et al., 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(Austin)*, 5(4):371-379(2018)
- 11) Chaen et al., Wearing a cooling vest during half-time improves intermittent exercise in the heat, *Frontier Physiology*, 10:711(2019)