

R-01-2017

MFRI Research Report

山梨県富士山科学研究所研究報告書

第36号

富士山研究

「環境の変化が急性高山病に及ぼす影響および急性高山病と
血液生化学的指標との関連」

平成29年度

山梨県富士山科学研究所

はじめに

2013年に富士山が世界文化遺産に登録された。そもそも山に対する憧れ、いわゆる山岳信仰は我々日本人に古くから根付いている。富士山信仰もあの神々しい富士山の景色を楽しみつつも、恐れ敬うといったところから始まったといえる。さらに、近年の登山の大衆化により、富士登山は多くの人にとって身近なものとなっている。実際に年間約350万人が富士山の五合目まで来訪し、その1割近くは山頂を目指すという標高3000m級の山としては、世界でも稀有の山である。

一方、標高2500m以上の高地では、急性高山病の発症リスクが増大することが報告されている。また、一般的に高所は気温の低下に加え、天候も激変する環境下にある。このような激変する自然環境下において、急性高山病や低体温症などの身体的負担を軽減することは、富士登山者の安全を確保する上でも、非常に重要な研究課題である。

このような背景のもと、平成26年度から3年間の計画で、富士山研究「環境の変化が急性高山病に及ぼす影響および急性高山病と血液生化学的指標との関連」に着手し、今回報告書をまとめることになった。本研究では、急性高山病の発症要因を検証し、より健康で快適な登山のための知見を得ることを目的とし、富士登山者に対する大規模アンケート調査を行うとともに、登山・滞山中の登山者の生理指標を測定する実験手法も用いられた。1000名以上を対象としたアンケート調査により、富士登山者の約三分の一が急性高山病を発症しており、急性高山病発症者は非発症者と比較して、喉の渇き（脱水症状の可能性）を訴えていた比率が有意に高いことが明らかになった。これを踏まえて行われたフィールド実験では、脱水予防に効果的と考えられる糖質・電解質溶液や経口補水液を登山中に摂取すると、登山中の心拍数増加を抑制できることが分かった。この結果は、急性高山病のリスク軽減や身体的負担度の軽減に役立つ有用な知見である。また、標高約3000mでの睡眠中の生理応答の感受性は、急性高山病の発症リスクと関係しており、高所において快適な睡眠を確保できるよう努めることが、急性高山病症状の軽減には重要であると考えられる。今回報告する研究成果がより強固なエビデンスに支えられ、普遍化されることで、安全な富士登山の方策を提言できる可能性に繋がることを期待する。

山梨県富士山科学研究所
所長 藤井 敏嗣

目次

はじめに

概要編

I 研究の概要.....	1
I-1 研究テーマおよび研究期間.....	1
I-2 研究体制.....	1
I-3 研究目的.....	1
I-4 研究成果の概要.....	1
I-5 全体要約.....	4
I-6 研究成果の発表.....	4
I-7 謝辞.....	5

本編

II 研究成果報告.....	6
II-1 サブテーマ1 異なる環境下における急性高山病の発症要因に関する検討.....	6
II-2 サブテーマ2 糖質・電解質溶液摂取が、心拍応答およびエネルギー消費量に及ぼす影響...	9
II-3 サブテーマ3 経口補水液摂取が、生理負担度および尿中成分に及ぼす影響.....	13
II-4 サブテーマ4 気圧変化が高所睡眠中の心拍応答と急性高山病に及ぼす影響.....	17

I 研究の概要

I-1 研究テーマおよび研究期間

研究テーマ

「環境の変化が急性高山病に及ぼす影響および急性高山病と血液生化学的指標との関連」

研究期間：

平成 26 年 4 月～平成 29 年 3 月（3 カ年）

I-2 研究体制

山梨県富士山科学研究所

研究代表者：

山梨県富士山科学研究所 環境共生研究部
主幹研究員 堀内 雅弘

所内研究参加者：

山梨県富士山科学研究所 研究管理幹 長谷川達也
山梨県富士山科学研究所 主任研究員 宇野 忠
山梨県富士山科学研究所 助 手 遠藤 淳子
山梨県富士山科学研究所 助 手 半田 陽子

所外研究協力者：

信州大学 教 授 能勢 博

I-3 研究目的

富士山は日本最高峰の山であり、年齢や性別、登山経験を問わず、多くの人が登山する身近な山となっている。近年では登山シーズンの約2ヶ月間で約25～30万人もが富士登山を行っている。

一方、富士山のような高所では急性高山病の発症率も高くなる。急性高山病は高山の低酸素下において頭痛や吐き気などの症状を起こすものであるが、実際には多くの要因が複雑に絡み合っていると考えられている。そのひとつには激変する環境要因があり、例えば、急激な気圧変化や温度変化に生体が適応できず、脱水や低体温などから引き起こされる場合も少なくない。しかし、具体的にどのような条件が急性高山病と関連しているかは明らかでない。

そこで、本研究では、急性高山病の発症要因を検証し、より健康で快適な登山のための知見を得ることを目的とした。登山に伴う環境変化は山でしか再現できないより実践的な登山者の健康管理や安全管理への還元を考慮すると、実際のフィールドでの研究は必要不可欠である。そこで、富士登山者に対するアンケート調査および富士山で登山・滞在して行う実験を含む以下の4つのサブテーマを取り上げ、疫学的、実験的な検証を行った。

- 異なる環境下における急性高山病の発症要因の大規模アンケート調査による疫学的検討。
- 糖質・電解質飲料の摂取が、登山者の心拍応答およびエネルギー消費量に及ぼす影響の検討。
- 経口補水液の摂取が、登山者の生理負担度および尿中成分に及ぼす影響の検討。

- 気圧変化が高所睡眠中の心拍応答と急性高山病に及ぼす影響の検討。

I-4 研究成果の概要

I-4-1 サブテーマ1 異なる環境下における急性高山病の発症要因に関する検討

富士山のような高所では急性高山病のリスクが増大するが、その要因は、多岐にわたり一致した見解は得られていない。急性高山病の初期症状として、体液貯留が挙げられている。すなわち、急性高山病症状を緩和するためには、積極的な水分摂取による利尿反応の促進が重要な鍵となる可能性が指摘されている。しかし、富士登山における特徴として、トイレに行く回数を抑えるために、水分摂取を控える傾向にある可能性もあると思われる。加えて、長時間の運動（登山）による脱水の影響も無視できない。

そこで、本研究では富士登山者を対象に、大規模アンケート調査を行い、急性高山病症状と脱水の間接的な指標である口渴感の関連を明らかにし、さらにこれらに影響を及ぼしている可能性のある因子として、基本属性である性差、年齢差および温冷感、温熱的快適感を調査し、急性高山病との関連を明らかにすることを目的とした。

調査対象者は18歳以上の男女、1810人であった。このうち、アンケート記入に不備がみられた者、ダイアモックスなどの急性高山病予防薬を服薬した者を除いた1399人を分析対象とした。

その結果、レイク・ルーズの急性高山病スコアに基づく急性高山病発症の判断基準である頭痛を発症し、かつ高山病スコアの合計得点が3点以上の者は、1399人中467人であり、全体の33.4%を占めていた（図1-1）。なお、合計得点が2点以下の者においても頭痛を訴えた対象者はいたが、本研究の主目的は高山病発症に影響を及ぼす要因を検討することであるため、この群（2点以下）の対象者の頭痛あり・なしを区分して図示はしなかった。

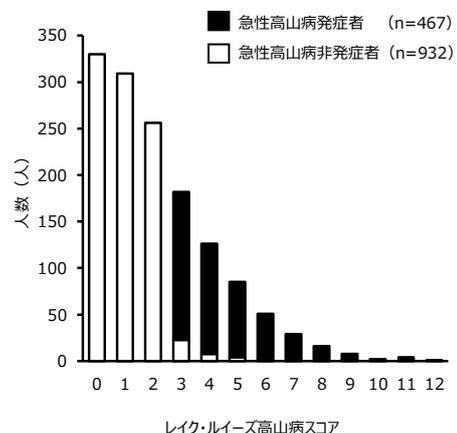


図 1-1 レイク・ルーズ質問表による急性高山病スコアの分布

単変量解析の結果、年齢や性別は急性高山病に影響していなかった。VAS法を用いた「登山中の口渇感」では、急性高山病発症者群 ($38.9 \pm 25.3\text{mm}$) が非発症者群 ($34.2 \pm 25.0\text{mm}$) と比較して有意に喉の渇きを感じていた (図 1-2)。また、急性高山病発症者群は非発症者群と比較して、頂上滞在中に寒さを感じていた傾向にあった。

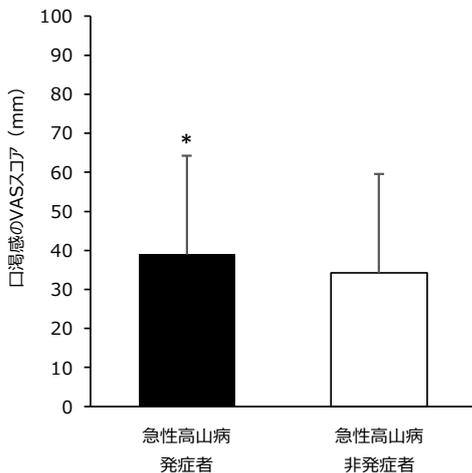


図 1-2 急性高山病発症・非発症者における VAS(Visual Analog Scale)による口渇感。値は平均値と標準偏差(エラーバー)で示している。*は統計的に両群の間に有意な差があったことを示している

以上のことから、必要十分な飲水行動と体温の保持が富士登山における急性高山病の発症の予防に有効であると考えられた。

I-4-2 サブテーマ2 糖質・電解質溶液の摂取が、登山者の心拍応答およびエネルギー消費量に及ぼす影響について

本実験では、糖質・電解質溶液の摂取が、登山中の生理応答に及ぼす影響を検討した。23名の成人男女が本実験に自主的に参加した。全被験者を登山中真水のみ摂取する群と糖質・電解質溶液のみ摂取する群の2グループに無作為に分けた。事前の測定により、両グループの体格、安静時の心拍数および身体能力はすべてほぼ同等であった。腰部にエネルギー消費量を測定する加速度計、胸部に心拍数を測定する心拍計を装着し、登山開始から終了まで1分毎に連続測定した。

その結果、登山開始直後の30分間のエネルギー消費量は、運動時(歩行時)も休息時も両群の間に差は認められなかった。同様に登山終了直前の30分間のエネルギー消費量も両群の間に差は認められなかった(図2-1)。これらの結果は、飲料水の違いがエネルギー消費量にほとんど影響しないことを示唆している。一方、心拍数についてみると、登山開始直後の最初の30分における運動時の値は両グループとも同じような値を示したが、山小屋到着直前の30分においては、糖質・電解質溶液摂取群の心拍数は、真水のみ摂取群よりも有意に低い値を示した(図2-2)。これらのことは、同一のエネルギー消費量にも関わらず、糖質・電解質溶液摂取群の方が、登山中の身体的負担が低かったこと

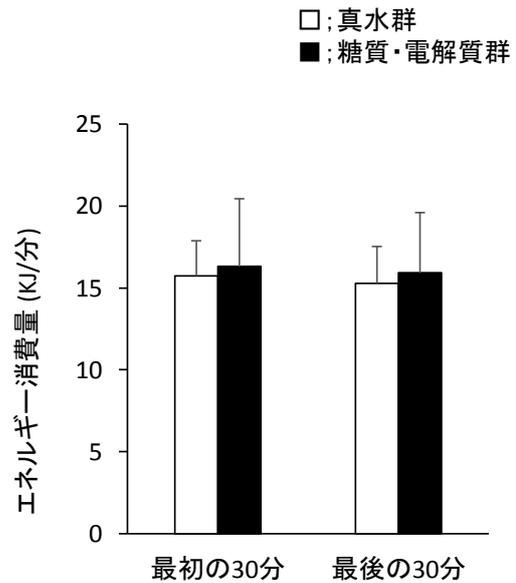


図2-1 真水摂取群と糖質・電解質溶液摂取群における登山開始後最初の30分と山小屋到着直前の最終30分のエネルギー消費量の比較。値は平均値と標準偏差(エラーバー)で示している。エネルギー消費量は、各時間帯において運動時のみ(最大エネルギー消費量の15%以上の値)の平均値として示している

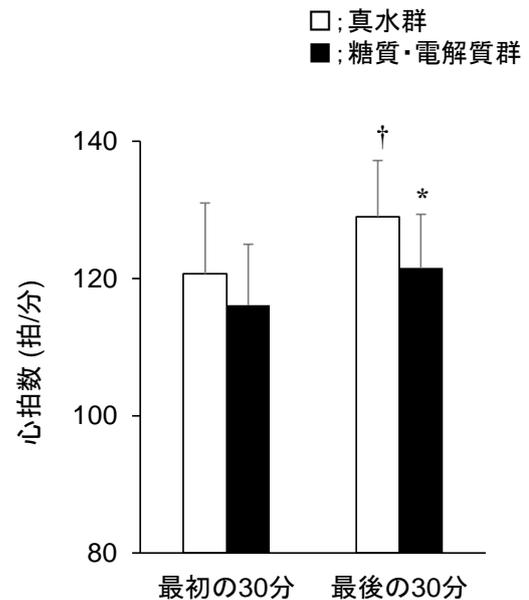


図 2-2 真水摂取群と糖質・電解質溶液摂取群における登山開始後最初の30分と山小屋到着直前の最終30分の心拍数の比較。値は平均値と標準偏差(エラーバー)で示している。心拍数は、各時間帯において運動時のみ(最大エネルギー消費量の15%以上の値を示したときの心拍数)の平均値として示している。*は、最後の30分における真水群と糖質・電解質溶液摂取群との間に有意な差があったことを示している。†は、真水群における最初の30分と最後の30分の間に有意な差があったことを示している

を示している。

以上の結果から、一般的に寒冷環境下での運動と考えられる登山においても、脱水症状予防に効果的な飲料とされている糖質・電解質溶液の摂取が推奨される。

I-4-3 サブテーマ3 経口補水液の摂取が、登山者の生理負担度および尿中成分に及ぼす影響

サブテーマ2の結果を受け、より詳細なメカニズムを解明するために、本実験を行った。17名の成人男女が本実験に自主的に参加した。被験者を無作為に登山中真水のみ摂取する群と経口補水液のみ摂取する群に分けた。サブテーマ2と異なる飲料水を用いた理由は、経口補水液には、ブドウ糖がより多く含まれており、登山（運動）時の脱水回復や疲労軽減により有効である可能性があるからである。事前の測定により、両グループの体格、安静時の心拍数および身体能力はほぼ同等であった。腰部にエネルギー消費量を測定する加速度計を、胸部に心拍計を装着し、登山開始から終了まで1分毎に連続測定した。登山開始前、山小屋滞在時、および下山終了時に、体重および経皮動脈血酸素飽和度（SpO₂）を測定し、さらに尿サンプルを採取した。得られた尿サンプルから、尿中クレアチニン、Naイオン濃度、Clイオン濃度、Kイオン濃度、尿比重、浸透圧および尿pHを測定した。

登山開始直後の30分間と山小屋到着直前の30分間のエネルギー消費量は、分散分析の結果、時間および群の主効果も交互作用は認められなかった（図3-1）。一方、心拍数については、有意な交互作用が認められ、

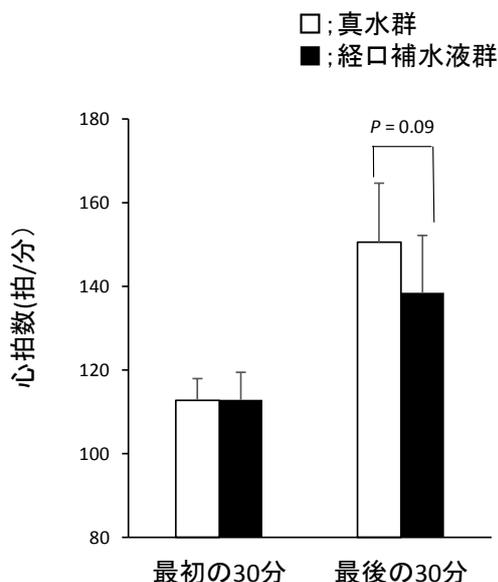


図3-2 真水摂取群と経口補水液摂取群における登山開始後最初の30分と山小屋到着直前の最終30分の心拍数の比較。値は平均値と標準偏差(エラーバー)で示している。心拍数は、各時間帯において運動時のみ(最大エネルギー消費量の15%以上の値を示したときの心拍数)の平均値として示している

経口補水液群の山小屋到着直前の30分間の心拍数は、真水群より低い傾向にあった ($P<0.1$ 、図3-2)。経口補水液の摂取により、両群のNa摂取量に有意な差が認められた ($P<0.05$)。一方、登山開始前、山小屋到着時および下山終了時の尿中Naイオン量に両群の差は認められなかった。

以上のことから、経口補水液摂取群は、真水のみ摂

□;真水群
■;経口補水液群

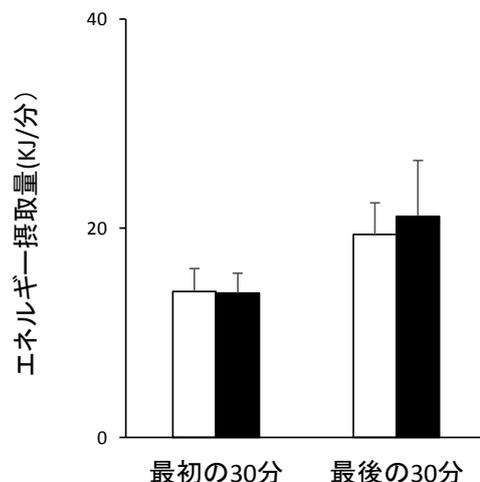


図3-1 真水摂取群と経口補水液摂取群における登山開始後最初の30分と山小屋到着直前の最終30分のエネルギー消費量の比較。値は平均値と標準偏差(エラーバー)で示している。エネルギー消費量は、各時間帯において運動時のみ(最大エネルギー消費量の15%以上の値)の平均値として示している

取群と比較して、登山中の心拍数増加を抑制することができた。これは、Naとブドウ糖の摂取により、脱水状態からの体液の回復が促進され、心臓への静脈還流が維持された結果、一回拍出量が多いまま維持され、心拍数の増加が抑制されたと考えられた。

I-4-4 サブテーマ4 気圧変化が高所睡眠中の心拍応答と急性高山病に及ぼす影響

本実験では、高所睡眠中の気圧変化が心拍応答と急性高山病に及ぼす影響を検討した。19名の成人男女が本実験に自主的に参加した。被験者は、1日目に富士スバルライン五合目から登山を開始し、標高約3000mの山小屋に一泊滞在した後、下山した。腰部に気圧計の機能を持ち、エネルギー消費量も測定できる加速度計を、胸部に心拍計を装着し、睡眠中1分毎に連続測定した。経皮動脈血酸素飽和度（SpO₂）および急性高山病指標を、五合目出発前、山小屋での就床前、起床後、および下山後五合目到着時にそれぞれ測定・評価した。各被験者の入眠および起床の判断基準は先行研究に基づき、登山前に測定した最大歩行運動時の最高エネルギー消費量最大運動時の15%以下の値を示した期間を睡眠と判定した。すなわち、睡眠時間が個々により大きく異なっていた。

その結果、睡眠中の気圧は時間経過とともに徐々に低下した。これは、本実験時には台風が近づいており、実験日の夜は、暴風雨であったためと考えられる。同様に心拍数も徐々に低下し、両者の間に有意な正の相関関係が認められた（図4-1および4-2）。

この有意な相関関係は全被験者について認められた。さらに、気圧変化と心拍応答の間に時間差があるかどうかを検討するために相互相関分析を行った。その結果、気圧変化後、全被験者の平均で約15分遅れて心拍数が増えることが明らかになった。さらに、各被験者について気圧と心拍数の相関係数が最も高くなる時

点での、両者の関係式を求めた。その結果、回帰直線の傾きが急な人ほど、睡眠中の SpO₂ の低下が大きかった。また、この指標は急性高山病指標とも関係していた。

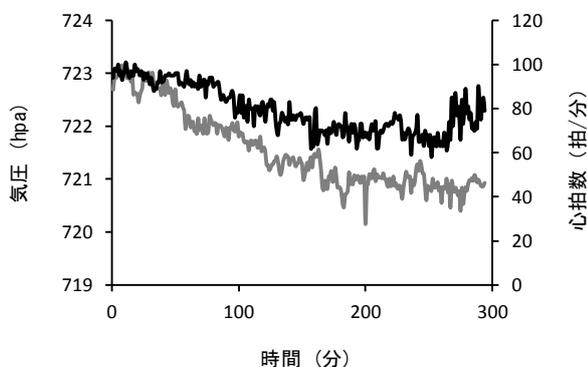


図 4-1 代表的な被験者 1 名における睡眠中の気圧(灰色線)と心拍数(黒線)の時系列変化。

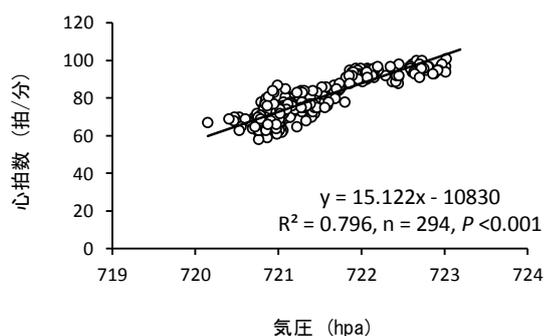


図 4-2 気圧と心拍数の間における時間遅れを補正した後の、代表的な被験者 1 名(図 4-1 と同一被験者)における気圧と心拍数の相関関係

I-5 全体要約

本研究では、急性高山病の発症要因を検証し、より健康で快適な登山のための知見を得ることを目的とし、富士登山者に対するアンケート調査および富士山で登山・滞在して行う実験を行った。

その結果、以下のような知見が得られた。

- 1) アンケート調査により、富士登山者の約 33%が急性高山病を発症していた。
- 2) 急性高山病発症者は非発症者と比較して、有意に喉の渇きを訴えていた。
- 3) 登山中に脱水予防に効果的と考えられる、糖質電解質溶液や経口補水液を摂取すると、登山中の心拍数増加を抑制できた。
- 4) このメカニズムとして、Na とブドウ糖の併用摂取により、体液量が回復し、1 回拍出量を維持できた結果、心拍数増加が抑制されたと考えられた。
- 5) 標高 3000m での睡眠中の、気圧と心拍数の変化との間には有意な相関関係が認められた。
- 6) さらに、気圧変化に対する心拍変化の感受性は、低酸素血症状態と急性高山病と関連していた。

以上のことから、急性高山病症状を緩和するためには、登山中の脱水を予防することが重要であると考えられた。また、メカニズムは不明であるが、睡眠中の心拍応答は、急性高山病と関連する可能性が示唆された。

I-6 研究成果の発表

I-6-1 誌上発表

- 1) Horicuchi M, Endo J, Kondo K, Uno T, Morikawa M, Nose H.
Impact of Carbohydrate-Electrolyte Beverage Ingestion on Heart Rate Response While Climbing Mountain Fuji at ~3000 m.
BioMed Research International, Article ID 3919826, 7 pages, 2017.
- 2) 宇野忠, 遠藤淳子, 半田陽子, 長谷川達也, 堀内雅弘
富士山における急性高山病と口渇感の関係
登山医学, 37(1):78-89, 2017.
- 3) Horiuchi M, Endo J, Handa Y, Nose H.
Barometric pressure change and heart rate response during sleeping at ~ 3000 m high.
International Journal of Biometeorology, doi: 10.1007/s00484-017-1487, 2017.

I-6-2 学会発表

- 1) 堀内雅弘、遠藤淳子、近藤光一、宇野忠、森川真悠子、能勢博
糖質・電解質溶液摂取が富士登山中のエネルギー消費量と心拍数におよぼす影響。
第 70 回日本体力医学会、和歌山、2015 年 9 月 18-20 日
- 2) 宇野忠、堀内雅弘、遠藤淳子、近藤光一
富士登山における高所環境要因が高山病症状に与える影響
第 53 回日本生気象学会、横浜、2014 年 10 月 24-25 日
- 3) Uno T
Effect of environmental factors at high altitude on acute mountain sickness while climbing on Mount Fuji
The 94th Annual Meeting of the Physiological Society of Japan, Hamamatsu, Japan, March 28-30, 2017
- 4) Horiuchi M, Endo J, Handa Y, Nose H
Changes in barometric pressure is related to heart rate responses during sleep at high-altitude.
The Joint Meeting of 4th Congress of Asia-Pacific Society for Mountain Medicine and 37th Annual Scientific Meeting of Japanese Society of Mountain Medicine, Matsumoto, Japan, June 2-4, 2017.

I-6-3 講演等

- 1) 平成 28 年 1 月 26 日
八ヶ岳自然ふれあいセンター
「登山中の体温変化 ～低体温から熱中症まで～」
- 2) 平成 29 年 9 月 12 日
YBS ラジオ ラララ♪モーニング「天気オタ・ぎり」
内ラジオ出演 「高山病について」
- 3) 平成 29 年 10 月 14 日
富士山科学講座 (山梨県富士山科学研究所)
「気象環境が健康に与える影響」

I-7 謝辞

本研究の調査に回答していただいた登山者の皆様および登山実験に被験者として参加いただいたみなさまに心より感謝申し上げます。

均気温、平均相対湿度を算出し高温高湿日、低温高湿日、高温低湿日および低温低湿日の4つの環境条件に分類した

5) 統計処理

得られたデータを対応のない t 検定 (年齢および口渇感)、 χ^2 検定 (性別および気象条件)、およびマン・ホイットニーの U 検定 (温冷感および温熱的快適性) を用いて解析を行った。さらに多重ロジスティック回帰分析を行った。統計的有意水準は5%未満とした。

II-1-4 結果

図 1-1 に全回答者 1399 人の急性高山病スコアの分布図を示した。その結果、急性高山病発症の判断基準である頭痛を発症し、かつ高山病スコアの合計得点が3点以上の者は、1399 人中 467 人であり、全体の 33.4% を占めていた。急性高山病発症と関連する要因を検討するため、まず単変量解析を行った。

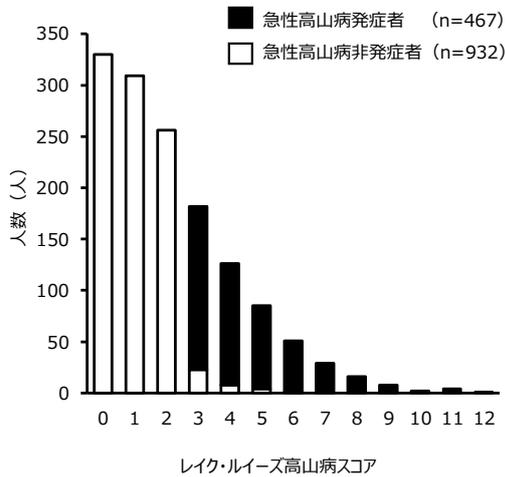


図 1-1 レイク・ルイーズ質問表による急性高山病スコアの分布

急性高山病発症者群と非発症者群における対応のない t 検定の結果、年齢では両群の間に有意な差は認められなかった (高山病発症者群 36.9 ± 12.4 歳、非発症者群 37.5 ± 13.0 歳、 $P=0.384$)。男女別の分布では、急性高山病発症者は男性 872 人中 279 人 (32.0%)、女性 527 人中 189 人 (35.9%) であり、 χ^2 検定の結果、有意な差は認められなかった ($\chi^2=2.14$, $df=1$, $P=0.143$)。VAS 法を用いた「登山中の口渇感」では、急性高山病発症者群 ($38.9 \pm 25.3\text{mm}$) が非発症者群 ($34.2 \pm 25.0\text{mm}$) と比較して有意に喉の渇きを感じていた ($P=0.001$, 図 1-2)。

次に、登山中と頂上滞在中における寒さ、または暑さの感覚指標である「温冷感」、その温冷感に対する快適さ、または不快さを示す「温熱的快適感」に対して7段階評価で得た回答の分布を図 1-3 に示した。急性高山病発症者群と非発症者群において、温冷感、温熱的快適感の項目について、マン・ホイットニーの U 検定を用いて解析を行った。その結果、急性高山病発症者群は頂上滞在中に寒さを感じていた傾向 ($P=0.062$) にあり、温熱的快適感において、登山中 ($P=0.013$) と頂上滞在中 ($P=0.003$) とともに有意に不快に感じていたことが認められた。

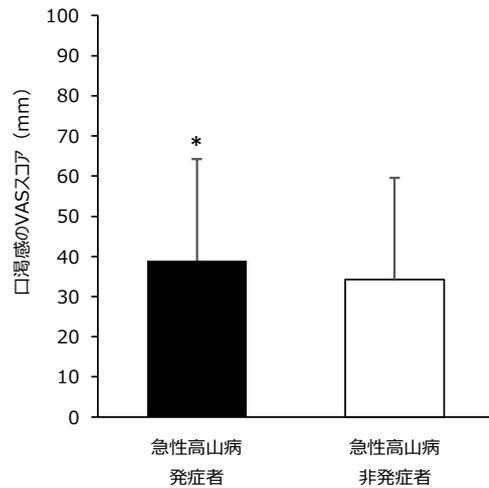


図 1-2 急性高山病発症・非発症者における VAS (Visual Analogue Scale) による口渇感。*は統計的に両群の間に有意な差があったことを示している

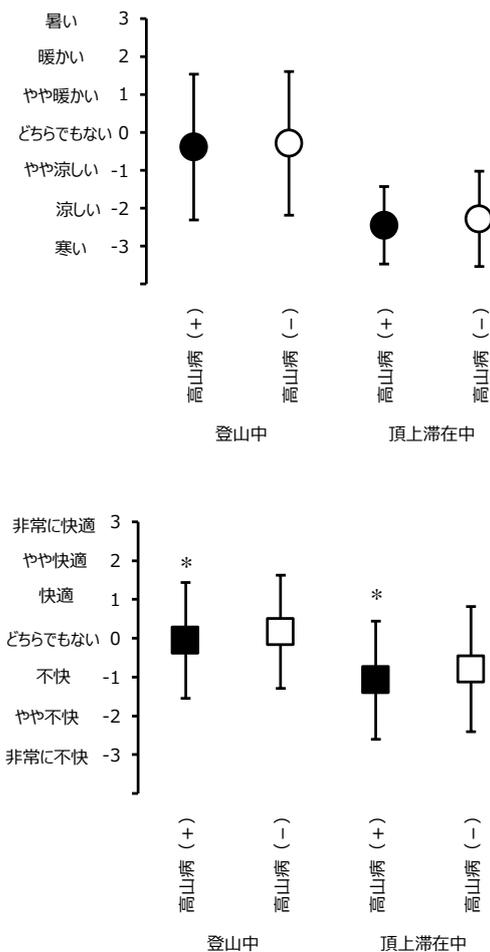


図 1-3 登山中および頂上滞在中における主観的温冷感の違い。高山病 (+) は急性高山病発症者を、高山病 (-) は急性高山病非発症者を示している。値は平均値と標準偏差 (エラーバー) で示している

登山行程の平均時間帯の温湿度によって分類した高温高湿日、低温高湿日、高温低湿日、および低温低湿日の各環境条件において、急性高山病発症の有無の差を χ^2 検定により分析を行った。その結果、温度と湿度の違いにより急性高山病の発症状況が異なることが明らかとなった ($\chi^2=14.78$, $df=3$, $P=0.002$)。残差分析の結果、急性高山病の発症は低温高湿日において有意に多く、高温低湿日において有意に少なかった (表 1-2)。

表 1-2 温度,および湿度による分類日群における急性高山病発症数

	急性高山病発症者	急性高山病非発症者
高温高湿日群	55 人 (34.0%)	107 人 (66.0%)
高温低湿日群	133 人 (28.0%) *	342 人 (72.0%)
低温高湿日群	258 人 (37.9%) *	422 人 (62.1%)
低温低湿日群	21 人 (25.6%)	61 人 (74.4%)

*; $P < 0.05$, 同一環境下における急性高山病発症・非発症者の有意差

全ての因子と急性高山病の発症との関連を、ロジスティック回帰分析を用い検討した。その結果、急性高山病の発症に独立して影響を及ぼす要因として、口渴感と登山中の温熱的快適感が抽出された (表 1-3)。

表 1-3 急性高山病発症を目的変数としたロジスティック回帰分析の結果(n=1399)

	オッズ比	95%信頼区間	P 値
年齢	0.967	0.853 - 1.094	0.590
性別	1.129	0.899 - 1.461	0.270
口渴感	1.177	1.048 - 1.326	0.006 *
登山中の温冷感	0.998	0.938 - 1.061	0.939
頂上滞在中の温冷感	0.924	0.825 - 1.043	0.208
登山中の温熱的快適感	0.917	0.842 - 0.995	0.038 *
頂上滞在中の温熱的快適感	0.934	0.854 - 1.016	0.109
温度湿度分類	0.967	0.826 - 1.132	0.677

*: $P < 0.05$

II-1-5 考察

本研究では、富士登山者における急性高山病の発症と口渴感の関連を明らかにすることを目的に、アンケート調査を実施した。検討要因として、基本属性 (年齢、性別) に加えて喉の渇きの訴えである口渴感や温冷感、および温熱的快適感といった身体状態の主観的評価と、それに関わる気象要因として温度、および湿度を取り上げた。標高 3776m の富士山における今回の調査では、急性高山病の発症率は 33.4%であった。これは、先行研究での 34~38% (標高 3500~3817m) 同様な発症率であり、富士山を含む標高 3000m 以上の高所登山では、約 3 人に 1 人が急性高山病を発症していたことを示している。

登山者の年齢、および性別は急性高山病発症に影響を及ぼしていなかった。先行研究において、急性高山病発症と年齢との関連について、若年者、または高齢

者のリスクが高くなる、逆に年齢差は関係しないという報告があり、急性高山病の発症と年齢の関係は明確ではない。本研究では、年齢と急性高山病との関係は見出すことが出来なかった。このことから、急性高山病の発症が、加齢による体力の衰えといった影響より、登山行程や登山経験の有無などの個人的な要因の影響が強いことが推察されるが、今後、詳細な検討が必要であろう。

先行研究では、女性は男性と比較して急性高山病のリスクが高いことが報告されている。しかし、男性の発症率が高いという報告や、性差は影響しないという研究報告も幾つかみられる。これらの急性高山病と性別に関する見解の一致または不一致に関して、原因は不明であるが、おのおのの体調や女性の月経周期、閉経の影響や男女で異なる人数比 (男性 872 人 : 62%、女性 526 人 : 38%) が影響を及ぼしていた可能性が考えられる。

急性高山病発症者群では、非発症者群に比べ有意に高い口渴感が認められた。一般に登山は、長時間にわたる運動である。発汗に伴う水分損失量に対し、自由飲水による水分摂取量が少なくなり、真水のみを摂取した場合、体液の電解質濃度の低下から自発的脱水が起こりやすい。さらに、高所登山である富士登山では、低酸素環境に起因する換気量増大が呼吸からの水分損失を増加させ、脱水を増悪させる可能性が考えられる。本研究で評価した喉の渇きの主観的な申告である口渴感、運動時の脱水率との間に強い関係が報告されているが、体重の約 1%という比較的少ない発汗量から口渴感の申告が上昇することから、口渴感が重度の脱水状態を反映しているわけではない。しかし、急性高山病発症者が有意に喉の渇きを感じていたという本研究の結果は、重度の脱水状態にならないまでも、口渴感に反映されるような軽度の脱水状態が、急性高山病症状を増悪させる可能性を示唆している。以上のことから、喉の渇きを感じないように、定期的に十分な飲水量を確保すること、自発的脱水に陥らないための塩分などの電解質の摂取を心がけることが、急性高山病の発症を抑えることに重要であると考えられる。

急性高山病発症者群では、温冷感において頂上滞在中に寒さを感じる傾向にあり、温熱的快適感においては、登山中、および頂上滞在中に有意に不快感を訴えていた。温冷感申告の分布を見ると、登山中は暑さ、寒さの両方が申告されていた。一方、気象庁の気象観測データから最低気温が 6 度以下となった調査日の頂上滞在中には、多くの人々が寒さを申告していた。しかし、温冷感は深部体温の影響をほとんど受けず、環境温度に対する評価である。一方、温熱的快適感は環境温度だけではなく、深部体温の状態に依存し、体温が平常な状態を乱されるか、高い、あるいは低い状態をさらに増悪させる環境温度に対し、不快感が生じる。

以上のことから、標高が上昇するに従って環境温度が低下する状況で、急性高山病発症者の温熱的快適感が有意に不快であったことは、彼らの体温が低下していた可能性があるかもしれない。また、登山は運動による発汗を伴い、休憩や停滞時に汗冷えによる体温低下を招く。発汗を抑えるペース配分や衣服の調整、お

よび防寒対策をすることで体温低下を抑制することが、急性高山病の発症を予防するために有効である可能性が示唆された。

温度と湿度による気象要因の影響の検討では、低温高湿日群で有意に急性高山病の発症が多く、高温低湿日群では有意に少なかった。低温高湿日は、環境温度が低いことにより体温の低下を招きやすいが、発汗は抑制される。さらに湿度が高いことは、汗の蒸散が抑えられ、脱水は進行し難い。以上のことから、気象要因と急性高山病発症の関連には、複数の要因が複雑に絡んでいることが推測できる。実際、標高の高い単独峰である富士山では時間帯や場所により気象要因は目まぐるしく変化するため、今後気象条件、登山行程、および飲水や着衣などの個人行動を総合的に、且つ詳細に検討してゆく必要がある。

II-1-6 結論

富士登山における急性高山病発症者群は、非発症者群と比較して、喉の渇きを有意に感じていた。これは、脱水状態が急性高山病症状を増悪させるというこれまでの研究報告と合致し、長時間にわたる登山中の飲水行動が急性高山病予防において非常に重要であることを示唆している。また、急性高山病発症者群は非発症群に比べ、頂上滞在中に寒さを感じる傾向がみられ、温熱的不快感が登山中、頂上滞在中に有意に生じていたことから、体温が低下していた可能性がある。さらに、気温が低く湿度が高い日に、急性高山病の発症が有意に多く認められた。これらの結果は、急性高山病の発症に環境温度の低下と、それに伴う体温の低下が関与している可能性を示唆している。以上のことから、必要十分な飲水行動と体温の保持が富士登山における急性高山病の発症の予防に有効であると考えられた。

II-2 サブテーマ2 糖質・電解質溶液摂取が、心拍応答およびエネルギー消費量に及ぼす影響

II-2-1 背景

富士山は2013年に世界文化遺産に登録され、年間で約25万人もの人が登る世界でも稀有な山である。一方、富士山の七合目および八合目に位置する診療所には夏の登山シーズンで400人ものが来所し、その約65%が急性高山病症状(Acute mountain sickness: AMS)を訴えていることも報告されている。急性高山病の要因は多岐にわたり、明らかにはされていないが、一つの要因として脱水症状が挙げられており、この症状からの回復には生理食塩水などの静脈注入が効果的であることも実験的に確かめられている。したがって、実際の登山を想定した場合、生体内の体液バランスを保つことは、AMSの予防に効果的である可能性がある。さらに、高所での脱水症状の程度には、大きな個人差があることも報告されている。

糖質・電解質溶液の摂取は、運動時の体温調節反応に好影響をもたらす、その結果、運動時の心拍数増加を抑制できることが、平地レベルでの実験で確かめら

れている。しかしながら、この効果が実際の登山中にも見られるのかどうかは、これまで検討されていない。この理由の一つに、高所登山のように気圧変化や勾配変化があるフィールドでの運動強度やエネルギー消費量を正確に測定できる機器が存在しなかったことも挙げられるであろう。近年、三軸加速度計と高度計を搭載したエネルギー消費量計が開発されたことで、登山者に対するフィールド実験も可能となった。さらにこの機器の精度は先行研究ですでに確かめられている。

II-2-2 目的

そこで我々は、糖質・電解質溶液摂取群は、真水のみ摂取する群と比較して、運動時の心拍数増加が抑制できるという仮説を立て、富士登山者を真水のみ摂取する群と糖質・電解質溶液のみ摂取する群に分けた。彼らを対象にして、登山中の心拍数とエネルギー消費量を測定することで、この仮説を検証した。

II-2-3 方法

1) 被験者

ヒトを対象とした本実験は、山梨県富士山科学研究所倫理委員会の承認を受けて行われた。被験者は十分な十分なインフォームドコンセントの後、実験参加に同意を得た健康な成人男女23名である。彼らを真水(Tap water: TW)のみ摂取する群(男性11名、女性1名)と糖質・電解質溶液(Carbohydrate electrolyte: CE)のみ摂取する群(男性10名、女性1名)の2グループに無作為に分けた。

2) 実験飲料および食事

実験に用いた両実験飲料水の成分を表2-1に示した。

表 2-1 両飲料水の成分比較

成分	真水	糖質・電解質溶液
エネルギー, kcal	0	25
タンパク質・脂質, g	0	0
炭水化物, g	0	6.2
ナトリウム, mg	0	49
カリウム, mg	0	20
カルシウム, mg	0	2
マグネシウム, mg	0	0.6

実験中登山開始から40分経過するまでは飲料水摂取なしとし、以降は実験飲料摂取および食物摂取を自由とした。各飲料水は、500mlのペットボトルで登山開始前に渡し、2日間の実験中随時希望に応じて追加した。下山後、空ボトルおよび実験飲料が残ったボトルを回収した。登山中の補食は各自が用意したものを自由に摂取してもらった。夕食および朝食は、山小屋での規定食とした。各被験者は、2日間の実験中、補食および規定食の内容と量を正確に記録してもらった。

3) 実験プロトコールおよび測定項目

各被験者は自身の車またはツアーバスで、2014年7

月6日、軽い昼食後、午後1時までに富士山吉田口五合目に集合した。排尿後、体重測定を衣服のみ着用時、衣服に登山靴を着用時、衣服と登山靴に荷物を背負った状態の3条件で行った。

登山開始前、各被験者の最大有酸素性作業能力を測定するために、衣服と登山靴を着用の状態で3分間の立位安静と9分間の段階的歩行を行った。具体的には立位安静時測定の後、ゆっくり-やや速く-全速力での歩行を各3分間、合計9分間行った。安静時と歩行時の合計12分間に亘り、心拍数(Heart rate: HR)およびエネルギー消費量(Activity energy expenditure: AEE)を1分毎に測定した。AEEは三軸加速度計と高度計を搭載したエネルギー消費量計により測定した。得られたAEEから先行研究に基づき、各被験者の最高酸素摂取量を算出した。

その後、10分ほどの休憩をとり、富士登山を開始した。1日目は標高約3000mの山小屋まで登山し、夕食後、就寝した。2日目は山頂を目指す予定であったが、悪天候のため、そのまま下山した。下山後は、登山開始前と同様の安静時測定および体重測定を行った(図2-1)。

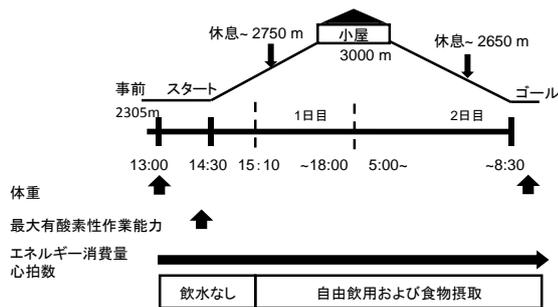


図 2-1 実験のプロトコル。黒矢印は、測定ポイントまたは休憩ポイントを示している

低酸素血症の指標として、パルスオキシメータを用いて経皮動脈血酸素飽和度(SpO₂)を、登山開始前五合目(2305m)、登山中休息時(2750m)、山小屋(3000m)での睡眠前後、下山中休息時(2650m)および登山終了後五合目(2305m)の各地点で測定した。各地点でのSpO₂の最低値を低酸素血症の指標とした。また、同じポイントでAMSスコアをレイク・ルイズのAMS診断評価質問表を用いて調査した。AMS得点の最高値を、AMS症状の指標とした。これらの指標は、いずれも安静時に行った。

4) データ処理

実験中の総エネルギー摂取量は、各被験者が記録したデータを栄養素解析ソフトウェア EXCEL 栄養君に入力することで、算出した。このソフトは、日本食品成分表2015年版に対応しているもので、食事内容と量を記録することで、総エネルギー摂取量と各種栄養素エネルギー量が計算できる。総飲料水摂取量は、下山後回収した空のボトルと、残量をメスシリンダーで計量することで算出した。

登山中のAEE測定から、運動(歩行中)と休息を先行研究に基づき区分した。すなわち、9分間歩行で得ら

れた最大AEE値の15%以下のAEEが記録された区間を休息時と判定した。

最大有酸素性作業能力を評価するために行った9分間歩行時における運動強度は、比較的中強度の運動であった。このため、全被験者とも年齢から予測される最高HR(220-年齢)に達していなかったため、各3分間の歩行時(ゆっくり-やや速く-全速力)の最後の1分間のAEEとHRを直線近似し、さらに予測最高HRまで外挿することで、最大有酸素性作業能力を推定評価した。

急性高山病の診断には、頭痛があり、かつ合計得点が3点以上あることを急性高山病と診断した。

5) 統計処理

すべての値は平均値±標準偏差で示した。両群の身体特性、有酸素性作業能力、総エネルギー摂取量、総飲水量、SpO₂の最低値、および2日間の実験前後の体重変動の比較には、対応のないt検定を用いた。全ての統計処理は、Sigma Stat ver.3.5を用いて行った。各指標における時系列変化の要因(登山開始直後と終了前の30分)および二群(TW群とCE群)の要因の比較検討には、二元配置の分散分析を用いた。有意なF値が得られた場合には、Bonferroniの多重比較を用いた。なお、有意水準は5%未満とした。

II-2-4 結果

表2-1に両群の被験者の身体特性、安静時HR、9分間歩行時の最高HRと最高酸素摂取量、HRを外挿し計算した予測最大酸素摂取量を示した。さらに登山中の最低SpO₂値、登山開始前後での体重変動、総エネルギー摂取量および総飲料水摂取量も示した。その結果、全ての項目において両群の間に有意な差は認められなかった。

表 2-1 両群の被験者における身体特性および生理応答

	真水	糖質・電解質溶液
年齢、才	28.4 ± 1.9	29.0 ± 1.5
身長、cm	173.6 ± 1.7	171.6 ± 2.9
体重、kg	66.4 ± 2.9	66.4 ± 2.8
体格指数、kg/m ²	22.0 ± 0.8	22.5 ± 0.7
安静時HR、拍/分	92 ± 2	89 ± 3
最高HR、拍/分	149 ± 4	142 ± 3
歩行時最高VO ₂ 、ml/kg/分	25.6 ± 1.0	23.8 ± 0.7
予測最高VO ₂ 、ml/kg/分	37.0 ± 2.4	36.5 ± 1.9
SpO ₂ 最低値、%	86.6 ± 2.6	86.9 ± 2.6
体重変化量、g	-154 ± 193	22 ± 106
総水分摂取量、ml	1280 ± 113	1127 ± 100
総エネルギー摂取量、kJ	5266 ± 420	5506 ± 314

値は平均値±標準偏差。HR; 心拍数、VO₂; 酸素摂取量、SpO₂; 経皮動脈血酸素飽和度

表2-2に、両群の各日における摂取エネルギーと栄養素の比較を示した。その結果、食物摂取については両群の間に有意な差は認められなかった。一方、飲料水については、真水が全ての栄養素を含んでいないので、糖質・電解質溶液摂取群のみ、糖質と塩分を摂取していた。

図 2-2 および図 2-3 に登山中開始直後の 30 分間における歩行時と山小屋到着直前の 30 分間における歩行時の HR と AEE を、運動時と休息時に分けて示した。

表 2-2 両群の 1 日目および 2 日目の摂取エネルギーと栄養素

		真水		糖質・電解質	
1 日目					
食物	タンパク質, g	26 ± 4	24 ± 4		
	脂質, g	25 ± 12	21 ± 9		
	糖質, g	169 ± 45	151 ± 23		
	塩分, mg	1755 ± 276	1766 ± 283		
飲料水	タンパク質, g	0	0		
	脂質, g	0	0		
	糖質, g	0	68 ± 21		
	塩分, mg	0	500 ± 154		
2 日目					
食物	タンパク質, g	4 ± 1	4 ± 1		
	脂質, g	3 ± 2	4 ± 2		
	糖質, g	24 ± 11	25 ± 9		
	塩分, mg	248 ± 79	307 ± 105		
飲料水	タンパク質, g	0	0		
	脂質, g	0	0		
	糖質, g	0	7 ± 3		
	塩分, mg	0	52 ± 19		

値は平均値±標準偏差

運動時と休息時の判断基準は、先行研究に基づき、9 分間歩行で得られた最大の AEE の 15% を閾値とした。

TW 群の登山開始直後最初の 30 分間の HR は平均で 121±2 拍/分であったが、到着直前の 30 分間で 129±2 拍/分と有意に増加した ($P=0.002$)。一方 CE 群の HR においては、有意な増加は認められなかった (116±3 拍/分; 開始直後の 30 分 vs. 121±3 拍/分; 到着直前の 30 分、 $P>0.05$)。さらに、到着直前の 30 分間における TW 群の HR は、CE 群の値より有意に高かった ($P=0.031$)。両群の AEE は、運動時も休息時も登山開始直後の 30 分と到着直前の 30 分で変化せず、両群の間に差も認められなかった (全て $P>0.05$)。下山時の平均 HR と AEE は TW 群において 105±12 拍/分と 7.61±1.23 kJ/分であり、CE 群の値は、106±12 拍/分と 7.23±1.02 kJ/分であり、有意な差は認められなかった ($P>0.05$)。

図 2-4 に登山開始前 (1 日目) と下山後 (2 日目) の体重変動と安静時 HR 変化の関係を両群まとめてプロットした。その結果、両者の間に有意な負の相関関係が認められた ($P=0.015$)。さらに、両群の体重変化量についてみると、TW 群は -154±193 g であり、CE 群は 22±106 g (表 2-1) と有意な差は認められなかったが ($P=0.441$)、データのばらつきを示す標準偏差についてみると、TW 群の値が CE 群より有意に大きかった ($F[11, 12]=3.581, P<0.01$)。この体重変動のばらつきの有意差にもかかわらず、安静時の HR の変化は TW 群で 2.6±1.3 拍/分、CE 群で 1.2±1.2 拍/分と平均値においても ($P=0.432$)、標準偏差においても有意な差は認められなかった ($F[11, 12]=1.261; P>0.05$)。

急性高山病を発症したと診断された人は、TW 群で 12 名中 5 名 (41.7%)、CE 群で 11 名中 3 名 (27.2%) であり、 χ^2 検定の結果、人数のばらつきに有意な差は認められなかった ($P>0.05$)。

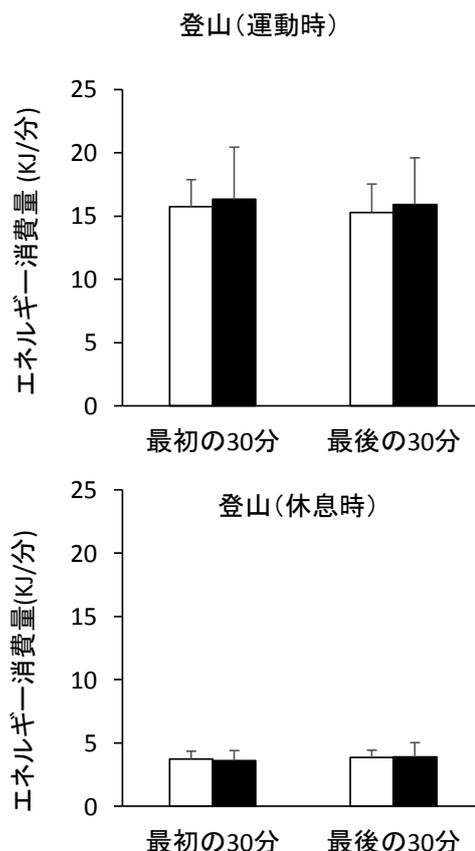


図 2-2 真水摂取群(白い棒グラフ)と糖質・電解質溶液摂取群(黒い棒グラフ)における登山開始後最初の 30 分と山小屋到着直前の最終 30 分のエネルギー消費量の比較。エネルギー消費量は、各時間帯において運動時(上図:最大エネルギー消費量の 15%以上の値を示したときの心拍数)と休息時(下図:同 15%未満)に区分して示している

II-2-5 考察

本研究の主要な結果は、以下の 3 点である。1) 糖質・電解質溶液の摂取は、真水摂取と比較して、同等エネルギー消費量にも係わらず、登山終了直前の HR 増加を抑制でき、2) 体重減少の個人内変動 (ばらつき) を小さくすることができた。さらに 3) 2 日間の登下山でより大きな体重減少は、安静時 HR (下山後) の増加をもたらした。

糖質・電解質溶液摂取により、なぜの HR 増加を抑制できたのか、そのメカニズムは本結果からは明らかにすることができない。しかしながら、糖質・電解質溶液を摂取することで、運動後からの脱水症状回復を早めることが先行研究で報告されている。これは、圧受容器反射を介した皮膚血管拡張能の促進により、深部体温増加を抑制した可能性が推測されている。また、血漿量の回復は深部体温上昇の抑制に効果的であることも報告されている。つまり、糖質・電解質溶液の摂取は、真水摂取と比較して、深部体温上昇を抑制し、血漿量が回復したこと、さらに血漿量回復により心臓への静脈還流量が維持され、1 回拍出量も維持された結果、HR の増加が抑制できたのではないかと推測する。

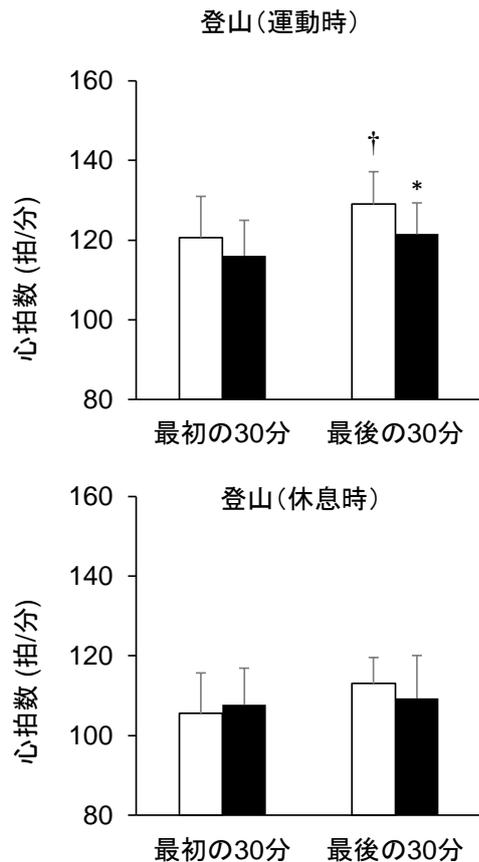


図 2-3 真水摂取群(白い棒グラフ)と糖質・電解質溶液摂取群(黒い棒グラフ)における登山開始後最初の 30 分と山小屋到着直前の最終 30 分の心拍数の比較。心拍数は、各時間帯において運動時(上図:最大エネルギー消費量の 15%以上の値を示したときの心拍数)と休息時(下図:同 15%未満)に区分して示している。*は、最後の 30 分における真水群と糖質・電解質溶液摂取群との間に有意な差があったことを示している。†は、真水群における最初の 30 分と最後の 30 分の間に有意な差があったことを示している

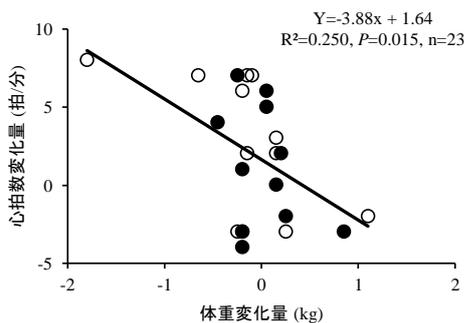


図 2-4 両群を一括してみたときの、登山前後(1 日目の登山開始前と 2 日目の下山終了後)の体重変化量と心拍数変化量との相関関係。白丸は真水群を示し、黒丸は糖質・電解質群を示している

また、腎臓での Na 再吸収は、Na 単体の投与では効率が悪いが、糖質と Na の同時投与により、脱水からの体液量回復が促進されることが、動物実験で確かめられている。したがって、同様に推測ではあるが、糖質・電解質溶液摂取は、腎臓での Na および糖質再吸収を促進し、体液量の維持・回復に貢献した可能性も考えられる。運動時(登山時)の HR 増加は、主観的作業強度

の強さと比例することから、糖質・電解質溶液を摂取したグループは、真水摂取グループと比較して、相対的に低い自覚的運動強度で登山を行うことができた可能性も考えられる。これらの結果は、快適な登山へ向けての情報を発信できる可能性を持つ。

一方、下山時においては、AEE も HR も両群の間に有意な差は認められなかった。これは、登山時と比較して、低い運動強度および短時間の運動であったため、脱水症状の程度に差がみとめられるほどではなかったためと考える。しかしながら、登山終了後の体重変動(1 日目の登山開始前と 2 日目の下山終了時)と同ポイントでの安静時 HR との間に有意な相関関係が認められた。すなわち、下山後の体重減少が大きい人ほど、安静時心拍数の増加がみられた。さらに、糖質・電解質溶液の摂取群は、体重変動のばらつき具合を示す標準偏差は、真水摂取群と比較して有意に小さかった。これらの結果は、真水摂取群は体重変動に対して、より大きな個人差を生みだすが、糖質・電解質溶液摂取群は、その変動幅が小さい、換言すれば、より多くの人に推奨される溶液である可能性を示唆している。

AMS の症状と SpO₂ の最低値は両群の間に差が認められなかった。SpO₂ は低酸素血症の指標になり、また SpO₂ の低下が AMS を悪化させる要因であることも報告されている。本研究では標高約 3000m から下山しており、この標高はヘモグロビン酸素化分解曲線に大きな変化がみられない高度であることが、両群の間に差をもたらさなかったのかもしれない。

II-2-6 本実験の限界

本実験では考慮すべき何点かの限界がある。第一に、比較的少ないサンプル数であったことに加え、異なる被験者間での比較であったことである。しかし、高所登山などでは、環境が大きく変化することがあり、同一被験者に対して、全く同じ環境条件で別々の日に実験を行うことは不可能であろうと我々は判断した。また、表 2-1 に示すように、両群の身体特性、安静時および最大歩行時の呼吸循環応答には差がなかったことから、本実験結果に及ぼす影響は大きくないと考えられる。

第二に、各被験者は実験飲料水以外の食物(補食)は自由選択かつ自由摂取であった。結果的に総エネルギー摂取量に差は認められなかったが、これらの食物摂取の違いが影響を及ぼしていた可能性は捨てきれない。

今後、全ての食物を統一した実験を行うことが必要である。最後に、詳細なメカニズムは依然不明のままであるので、今後、脱水症状などの指標となる、尿や血液サンプルの採取が必要になる。

II-2-7 結論

真水摂取群の HR は登山終了直前の 30 分間で、開始直後と比較して有意に増加した。一方、糖質・電解質溶液の摂取により、この増加は抑制できた。以上のことから、糖質・電解質溶液は、登山中の身体負担を軽減させることができる推奨飲料水であるかもしれない。

II-3 サブテーマ 3 経口補水液摂取が、生理負担度および尿中成分に及ぼす影響

II-3-1 背景

サブテーマ 2 の実験結果から、糖質・電解質溶液を摂取したグループは、真水のみ摂取したグループと比較して、登山終盤の心拍数増加を抑制することができた。心拍数の増加は、主観的作業強度の増大と関係することから、この結果は、登山者に対してより適切な飲料水の提唱と快適な登山に繋がる可能性があるため意義がある。しかしながら、実験の限界として、詳細なメカニズム、すなわち、なぜ糖質・電解質溶液の摂取が心拍数増加を抑制したのかは依然明らかでない。

一つの可能性として、脱水抑制による血漿量の維持が、1 回拍出量を維持でき、心拍数を低く保っていた可能性が指摘できる。

II-3-2 目的

本実験では、この仮説を検証するために、サブテーマ 2 と同様なプロトコルを用い、ブドウ糖をより多く含み、脱水回復に効果的と考えられる経口補水液を本実験では用いた。さらに、尿サンプルの電解質を測定することで脱水症状を評価しようと試みた。

II-3-3 方法

1) 被験者

ヒトを対象とした本実験は、山梨県富士山科学研究所倫理委員会の承認を受けて行われた。被験者は十分な十分なインフォームドコンセントの後、実験参加に同意を得た健康な成人男女 17 名である。彼らを真水 (Tap water: TW) のみ摂取する群 (男性 7 名、女性 2 名) と経口補水液 (Oral rehydration solution: ORS) のみ摂取する群 (男性 6 名、女性 2 名) の 2 グループに無作為に分けた。

2) 実験飲料および食事

実験に用いた両実験飲料水の成分を表 3-1 に示した。

表 3-1 両飲料水の成分比較

成分	真水	経口補水液
エネルギー, kcal	0	10
タンパク質, g	0	0
脂質, g	0	0
炭水化物, g	0	2.5
ブドウ糖, g	0	1.8
食塩相当量, g	0	0.292(ナトリウム 115mg)
カリウム, mg	0	78
マグネシウム, mg	0	2.4
リン, mg	0	6.2
塩素, mg	0	177

実験中登山開始から 40 分経過するまでは飲料水摂取なしとし、以降は実験飲料摂取および食物摂取を自由とした。各飲用水は、500ml のペットボトルで登山開始前に渡し、2 日間の実験中随時希望に応じて追加した。下山後、空ボトルおよび実験飲料が残ったボトルを回

収した。登山中の行動食は、あらかじめスタッフが用意した行動食を各被験者に渡し、自由に摂取してもらった。夕食および朝食は、山小屋での規定食とした。1 日目および 2 日目それぞれの終了時点で、空のボトルの本数と残量を回収した。食事量も同様に行動食の 1 日目および 2 日目それぞれの終了時点での残量から、算出した。夕食・朝食についても、規定量から残量、追加量から解析ソフト (データ処理の項参照) を用いて算出した。

3) 実験プロトコルおよび測定項目

各被験者は自身の車またはツアーバスで、軽い昼食後、午後 1 時までに富士スバルライン五合目に集合した。排尿後、体重測定を衣服のみ着用時、衣服に登山靴を着用時、衣服と登山靴に荷物を背負った状態の 3 条件で行った。

登山開始前、各被験者の最大有酸素性作業能力を測定するために、衣服と登山靴を着用の状態で 3 分間の立位安静と 9 分間の段階的歩行を行った。具体的には立位安静時測定の後、ゆっくり-やや速く-全速力での歩行を各 3 分間、合計 9 分間行った。安静時と歩行時の合計 12 分間に亘り、心拍数 (Heart rate: HR) およびエネルギー消費量 (Activity energy expenditure: AEE) を 1 分毎に測定した。

AEE は三軸加速度計と高度計を搭載したエネルギー消費量計により測定した。得られた AEE から先行研究に基づき、各被験者の最高酸素摂取量を算出した。

その後、10 分ほどの休憩をとり、富士登山を開始した。1 日目は標高約 3000m の山小屋まで登山し、夕食後、就寝した。2 日目は山頂を目指す予定であったが、悪天候のため、そのまま下山した。下山後は、登山開始前と同様の安静時測定および体重測定を行った。

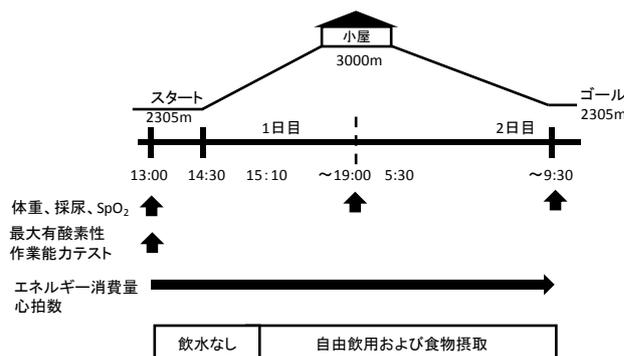


図 3-1 実験のプロトコル。SpO₂ は経皮動脈血酸素飽和度を示し、黒矢印は、測定ポイントまたは休憩ポイント示している

脱水症状の指標として、体重を登山開始前、山小屋滞在時、および下山時にそれぞれ半裸の状態測定した。同一のポイントで採尿も行い、尿量を計測後、50ml のスピッツにサンプルを蓄尿した。

低酸素血症の指標として、パルスオキシメータを用いて経皮動脈血酸素飽和度 (SpO₂) を、登山開始前五合目 (2305m)、登山中休息時 (2750m)、山小屋 (3000m) での睡眠前後、下山中休息時 (2650m) および登山終了後五合目 (2305m) の各地点で測定した。各地点での

SpO₂の最低値を低酸素血症の指標とした。また、同じポイントでAMSスコアをレイク・ルイズのAMS診断評価質問表を用いて調査した。AMS得点の最高値を、AMS症状の指標とした。これらの指標は、いずれも安静時に行った(図3-1)。

4) データ処理

夕食および朝食のエネルギー摂取量は、栄養素解析ソフトウェアEXCEL栄養君に入力することで、算出した。このソフトは、日本食品成分表2015年版に対応しているもので、食事内容と量を記録することで、総エネルギー摂取量と各種栄養素エネルギー量が計算できる。総飲料水摂取量は、下山後回収した空のボトルと、残量をメスシリンダーで計量することで算出した。

登山中のAEE測定から、運動(歩行中)と休息を先行研究に基づき区分した。すなわち、9分間歩行で得られた最大AEE値の15%以下のAEEが記録された区間を休息時と判定した。

最大有酸素性作業能力を評価するために行った9分間歩行時における運動強度は、比較的中強度の運動であった。このため、全被験者とも年齢から予測される最高HR(220から年齢を引いた値)に達していなかったため、各3分間の歩行時(ゆっくり-やや速く-全速力)の最後の1分間のAEEとHRを直線近似し、さらに予測最高HRまで外挿することで、最大有酸素性作業能力を推定評価した。

急性高山病の診断には、頭痛があり、かつ合計得点が3点以上あることを急性高山病と診断した。

5) 統計方法

すべての値は平均値±標準偏差で示した。表3-2および3-3に示した指標の比較には、対応のないt検定を用いた。飲用水のエネルギー摂取量および成分については、真水のエネルギー量および各成分が、元々全てゼロkcalまたは含まれていない(すなわち、平均値も標準偏差もゼロ)ため、検定は行わなかった。各指標における時系列変化の要因(1. 登山開始直後と終了前の30分または、2. 登山開始前、山小屋滞在時と下山終了後)および二群(TWとCE群)の要因の比較検討には、二元配置の分散分析を用いた。有意なF値が得られた場合には、Bonferroniの多重比較を用いた。急性高山病症状の人数の偏りの検定には χ^2 検定を用いた。全ての統計処理は、Sigma Stat ver. 3.5を用いて行った。なお、有意水準は5%未満とした。

II-3-4 結果

表3-2に両群の被験者の身体特性、安静時HR、9分間歩行時の最高HRと最高酸素摂取量、HRを外挿し計算した予測最大酸素摂取量を示した。さらに登山中の最低SpO₂値、登山開始前後での体重変動、総エネルギー摂取量、総飲料水摂取量、および総尿量も示した。その結果、全ての項目において両群の間に有意な差は認められなかった。

両群における実験中の行動食、食事および飲料水のエネルギー摂取量と栄養成分を1日目と2日目に区分して、表3-3に示した。その結果、食事については、全ての指標において両群の間に有意な差は認められな

かった。飲料成分については、各飲料の含有成分に基づくため、ORS群は糖質、ブドウ糖、およびナトリウムを摂取していた。

表3-2 両群の身体特性、安静・歩行時の呼吸循環指標、エネルギー摂取量および尿量

	真水		経口補水液	
	男性7名、女性2名	男性6名、女性2名	男性7名、女性2名	男性6名、女性2名
年齢、才	32.8 ± 8.6	32.5 ± 9.9		
身長、cm	168.9 ± 6.4	170.0 ± 7.6		
体重、kg	61.7 ± 7.6	63.1 ± 11.0		
体格指数、kg(m ²) ⁻¹	21.6 ± 2.1	21.8 ± 3.2		
安静時HR心拍数、拍/分	83 ± 9	83 ± 8		
最高HR、拍/分	155 ± 15	155 ± 9		
歩行時 $\dot{V}O_2$ 、ml kg min ⁻¹	32.8 ± 4.5	33.6 ± 7.5		
予測最高 $\dot{V}O_2$ 、ml kg min ⁻¹	40.7 ± 9.5	41.7 ± 13.1		
最低SpO ₂ 、%	83.4 ± 4.3	87.0 ± 3.0		
総体重変化量、g	-700 ± 320	-575 ± 669		
総エネルギー摂取量、kJ	7874 ± 2166	8605 ± 2374		
総飲料水、ml	861 ± 351	885 ± 456		
総尿量、ml	514 ± 153	505 ± 139		

値は平均値±標準偏差。HR:心拍数、 $\dot{V}O_2$:酸素摂取量、SpO₂:経皮動脈血酸素飽和度

表3-4に、2日間の登山下山における各日の総運動時間(歩行時間)、休息時間、総エネルギー消費量、平均エネルギー消費量、および平均心拍数を示した。その

表3-3 1日目および2日目の両群における栄養摂取状態の詳細

	真水		経口補水液	
	男性7名、女性2名	男性6名、女性2名	男性7名、女性2名	男性6名、女性2名
1日目				
携行食 総エネルギー量、kJ	653 ± 630	569 ± 681		
タンパク質、g	3 ± 4	3 ± 4		
脂質、g	9 ± 8	8 ± 9		
糖質、g	16 ± 15	14 ± 16		
塩分、mg	83 ± 94	72 ± 97		
夕食 総エネルギー量、kJ	3983 ± 1037	4092 ± 1176		
タンパク質、g	32 ± 4	32 ± 4		
脂質、g	17 ± 1	17 ± 1		
糖質、g	158 ± 55	164 ± 62		
塩分、mg	855 ± 2	855 ± 2		
飲料水 総エネルギー量、kJ	0	142 ± 99		
タンパク質、g	0	0		
脂質、g	0	0		
糖質、g	0	8 ± 6		
グルコース、g	0	6 ± 4		
塩分、mg	0	369 ± 258		
2日目				
携行食 総エネルギー量、kJ	1894 ± 1021	1907 ± 1046		
タンパク質、g	6 ± 4	6 ± 4		
脂質、g	18 ± 10	19 ± 9		
糖質、g	67 ± 38	67 ± 39		
塩分、mg	205 ± 133	182 ± 136		
朝食 総エネルギー量、kJ	1343 ± 652	1667 ± 0		
タンパク質、g	9 ± 4	11 ± 0		
脂質、g	11 ± 5	14 ± 0		
糖質、g	51 ± 25	63 ± 0		
塩分、mg	339 ± 165	421 ± 0		
飲料水 総エネルギー量、kJ	0	236 ± 128		
タンパク質、g	0	0		
脂質、g	0	0		
糖質、g	0	14 ± 8		
グルコース、g	0	10 ± 6		
塩分、mg	0	649 ± 353		

値は平均値±標準偏差で示した。ただし、真水は全ての栄養素がゼロであるため、ゼロと表記し、標準偏差は存在しない。同様に、経口補水液のタンパク質および脂質の栄養素もゼロであるため、真水と同様の表記とした

結果、全ての指標に有意な差は認められなかったが、経口補水液群の1日目の平均心拍数は、真水群と比較して平均で約9拍低い値を示し、有意傾向が認められた ($P<0.1$)。

表 3-4 両群の各日における歩行・休息時間およびエネルギー消費量と心拍数

	真水	経口補水液
	男性 7 名、女性 2 名	男性 6 名、女性 2 名
1 日目 (五合目から山小屋)		
歩行時間 (分)	128 ± 4	131 ± 7
休息時間 (分)	23 ± 4	20 ± 6
総エネルギー消費量 (kJ)	2360 ± 377	2510 ± 427
平均エネルギー消費量 (kJ min^{-1})	15.6 ± 2.5	16.7 ± 2.7
平均心拍数 (拍/分)	133 ± 10	124 ± 11
2 日目 (山小屋から五合目)		
歩行時間 (分)	105 ± 10	103 ± 9
休息時間 (分)	25 ± 8	24 ± 9
総エネルギー消費量 (kJ)	1316 ± 254	1485 ± 428
平均エネルギー消費量 (kJ min^{-1})	10.0 ± 2.0	11.7 ± 3.2
平均心拍数 (拍/分)	120 ± 9	120 ± 10

値は平均値 ± 標準偏差で示した

図 3-2 および図 3-3 に登山中開始直後の 30 分間における歩行時と山小屋到着直前の 30 分間における歩行時の AEE と HR を示した。両群の AEE は、登山開始直後の 30 分から到着直前の 30 分で有意に増加したが ($P<0.05$)、両群の間に差は認められなかった ($P>0.05$)。

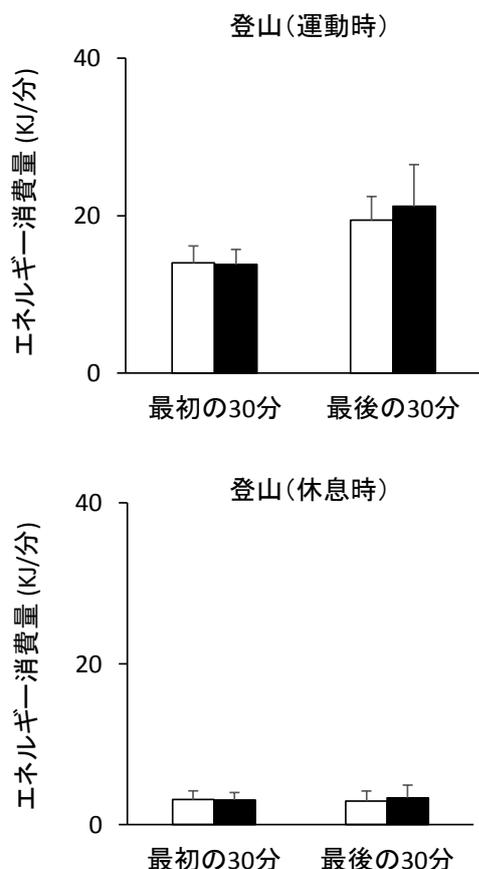


図 3-2 真水摂取群(白い棒グラフ)と経口補水液摂取群(黒い棒グラフ)における登山開始後最初の 30 分と山小屋到着直前の最終 30 分の心拍数の比較。心拍数は、各時間帯において運動時(上図:最大エネルギー消費量の 15%以上の値を示したときの心拍数)と休息時(下図:同 15%未満)に区分して示している

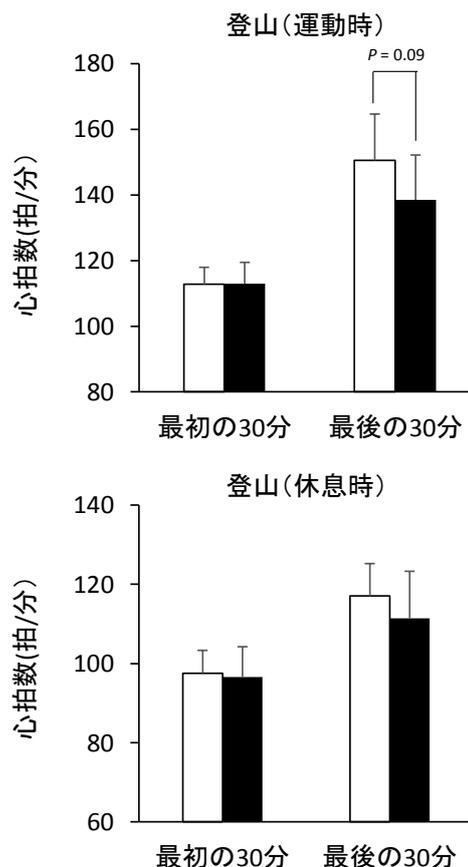


図 3-3 真水摂取群(白い棒グラフ)と経口補水液摂取群(黒い棒グラフ)における登山開始後最初の 30 分と山小屋到着直前の最終 30 分のエネルギー消費量の比較。エネルギー消費量は、各時間帯において運動時(上図:最大エネルギー消費量の 15%以上の値を示したときの心拍数)と休息時(下図:同 15%未満)に区分して示している

登山開始直後最初の 30 分間の運動時 HR は、両群ともほぼ同じような値 (113 ± 5 拍/分; TW 群、 113 ± 7 拍/分; ORS 群) を示し、小屋到着直前に両群とも有意に増加した (151 ± 14 拍/分; TW 群、 139 ± 14 拍/分; ORS 群)。さらに有意な交互作用が認められ ($P<0.05$)、小屋到着直前 30 分の HR は、ORS 群が TW 群と比較して低い傾向を示した ($P<0.1$)。先行研究に基づき、最大 AEE の 15%以下を休息時と規定した両群の HR と AEE についてみてみると、AEE は時間の主効果も群の主効果も交互作用も認められなかった。休息時の HR は、時間の主効果が認められ、両群とも有意に増加したが、群の主効果も交互作用も認められなかった。

各地点(登山開始前、山小屋滞在時、および下山終了後)の、体重、尿量および尿中成分について表 3-5 に示した。その結果、全ての指標で両群の間に有意な差は認められなかった。

急性高山病を発症したと診断された人は、TW 群で 9 名中 2 名 (22.2%)、ORS 群で 8 名中 0 名 (0%) であり、 χ^2 検定の結果、人数のばらつきに有意な差は認められなかった ($P>0.05$)。

表 3-5 各地点での体重、尿量および尿中成分の両群比較

		真水		経口補水液	
		男性 7 名、女性 2 名	男性 6 名、女性 2 名	男性 6 名、女性 2 名	男性 6 名、女性 2 名
体重、kg	登山前	61.65 ± 7.61	63.07 ± 10.24		
	山小屋	61.15 ± 7.46	62.40 ± 10.21		
	下山後	60.95 ± 7.38	62.49 ± 9.73		
尿量、ml	登山前	188 ± 118	265 ± 152		
	山小屋	333 ± 88	330 ± 105		
	下山後	182 ± 119	175 ± 86		
ナトリウム、mg dl ⁻¹	登山前	386 ± 196	280 ± 194		
	山小屋	413 ± 160	329 ± 130		
	下山後	357 ± 122	391 ± 140		
カリウム、mg dl ⁻¹	登山前	188 ± 57	129 ± 73		
	山小屋	191 ± 60	219 ± 58		
	下山後	194 ± 59	258 ± 173		
クロール、mg dl ⁻¹	登山前	629 ± 312	404 ± 277		
	山小屋	604 ± 224	512 ± 231		
	下山後	618 ± 245	657 ± 233		
クレアチニン、mg dl ⁻¹	登山前	122 ± 81	60 ± 34		
	山小屋	123 ± 55	124 ± 40		
	下山後	215 ± 79	233 ± 148		
尿比重	登山前	1.017 ± 0.008	1.011 ± 0.005		
	山小屋	1.018 ± 0.005	1.019 ± 0.004		
	下山後	1.022 ± 0.005	1.024 ± 0.003		
浸透圧	登山前	685 ± 295	463 ± 215		
	山小屋	701 ± 222	680 ± 126		
	下山後	801 ± 192	843 ± 63		
pH	登山前	6.94 ± 0.73	7.19 ± 1.07		
	山小屋	7.11 ± 0.70	6.63 ± 0.64		
	下山後	6.33 ± 0.61	6.31 ± 0.80		

値は平均値±標準偏差で示した

II-3-5 考察

本研究の主要な結果は、以下の 2 点である。1) 経口補水液の摂取は、真水摂取と比較して、同等エネルギー消費量にも係わらず、登山終了直前の HR 増加を抑制でき、2) このメカニズムとして、体内にナトリウムが貯留されたことによる、脱水抑制からくる循環血漿量の維持が貢献していると考えられた。

これまで、糖質や電解質を含んだ溶液を摂取することで、運動後にみられる脱水症状の回復を早めることが先行研究で報告されている。これは、圧受容器反射を介した皮膚血管拡張能の促進により、深部体温増加を抑制した可能性が先行研究から推測できる。また、血漿量の回復は深部体温上昇の抑制に効果的であることも報告されている。つまり、本研究で使用した経口補水液の摂取は、真水摂取と比較して、深部体温上昇を抑制し、血漿量が回復したこと、さらに血漿量回復により心臓への静脈還流量が維持され、1 回拍出量も維持された結果、HR の増加が抑制できたのではないかと推測する。

実際、本実験で使用した ORS は、糖質とナトリウム、さらにブドウ糖を含有している。腎臓での Na 再吸収は、Na 単体の投与では効率が悪いが、糖質と Na の同時投与により、脱水からの体液量回復が促進されることが、動物実験で確かめられている。また、経口摂取したこれらの溶液の栄養素は、小腸で消化吸収され、最終的にブドウ糖の形で取り込まれる。したがって、糖質だけでなく、ブドウ糖も含んだ本実験の溶液は、より速やかに腎臓での Na および糖質（ブドウ糖）の再吸収を促進し、体液量の維持・回復に貢献したと考えられる。

本実験結果から、食物飲用水問わずナトリウムの総

摂取量を計算すると、平均で TW 群は 1482mg であり、ORS 群は 2548mg であった。食物摂取による Na の摂取量には両群に差がないことから、この約 1000mg の摂取量の差は飲料水の違いによる。さらに、登山開始前を除いた総尿量（山小屋滞在時および下山時）と同一地点の単位量あたりの尿中ナトリウム排泄量（mg/dl）から、総ナトリウム排出量を算出したところ、平均で TW 群は 3966mg であり、ORS 群は 3636mg であった。したがって、2 日間の実験で、体内に摂取したナトリウム量と体外に排泄されたナトリウム量の差分は、TW 群で -2484mg であり、ORS 群で -1088mg と、TW 群のほうが約 2.5 倍ナトリウム損失が多かった。これらの結果からも、本実験の仮説は立証されたといえるであろう。

運動時（登山時）の HR 増加は、主観的作業強度の強さと比例することから、経口補水液を摂取したグループは、真水摂取グループと比較して、相対的に低い自覚的運動強度で登山を行うことができた可能性も考えられる。これらの結果は、快適な登山へ向けての情報を発信できる可能性を持つ。

一方、下山時においては、AEE も HR も両群の間に有意な差は認められなかった。これは、登山時と比較して、低い運動強度および短時間の運動であったため、脱水症状に有意な差がみとめられるほどではなかったと考える。

AMS の症状と SpO₂ の最低値は両群の間に差が認められなかった。SpO₂ は低酸素血症の指標になり、かつ AMS を悪化させる要因であることも報告されている。本研究では標高約 3000m から下山をしており、この標高はヘモグロビン酸素化解離曲線に大きな変化がみられない高度であることが、両群の間に差をもたらさなかったのかもしれない。

II-3-6 本実験の限界

本実験では考慮しないといけない何点かの限界がある。第一に、比較的少ないサンプル数であったことに加え、異なる被験者間での比較であったことである。しかし、高所登山などでは、環境が大きく変化することがあり、同一被験者に対して、全く同じ環境条件で別々の日に実験を行うことは不可能であろうと我々は判断した。また、表 3-2 に示すように、両群の身体特性、安静時および最大歩行時の呼吸循環応答には差がなかったことから、本実験結果に及ぼす影響は大きくないと考えられる。第二に、本実験では、悪天候のため標高約 3000m までのデータしか得ることができなかった。一般的に、富士登山者は標高 3776m の頂上を目指すことから、今後、山頂までのデータを得ることで、よりエビデンスに基づいた情報を登山者に提供することが求められる。

II-3-7 結論

真水摂取群の HR は登山終了直前の 30 分間で、開始直後と比較して有意に増加した。一方、経口補水液の摂取により、この増加は抑制できた。以上のことから、糖質、ブドウ糖およびナトリウムを含んだ溶液は、登山中の身体負担を軽減させることができる推奨飲料水であるかもしれない。

II-4 サブテーマ 4 気圧変化が高所睡眠中の心拍応答と急性高山病に及ぼす影響

II-4-1 背景および目的

高所では気圧 (Barometric pressure; P_B) の低下に伴い、吸入酸素分圧が低下する。このことは生体内の酸素不足、すなわち低酸素血症をもたらすことになる。これを補償するため、一般には呼吸循環機能の素早い応答 (例えば肺換気量や心拍数 (HR) を増加させ、末梢組織への酸素供給を維持すること) が重要である。これまでの研究では、気圧変化は脳幹の三叉神経や内耳の三半規管などに作用し、関節リウマチ痛の悪化、めまいや平衡感覚の低下、疼痛などを引き起こす可能性があることが報告されてきている。しかしながら、気圧変化が、呼吸循環応答にどのような影響を及ぼしているかはほとんど明らかにされていない。本実験で、高所での睡眠中に気圧低下に伴い HR も低下すること、さらに 1 気圧当りの HR の変化量は、低酸素血症の指標である動脈血酸素飽和度 (SpO_2) や急性高山病症状と関係があったことを見出したので、ここに報告する。

II-4-2 方法

1) 被験者およびプロトコール

ヒトを対象とした本実験は、山梨県富士山科学研究所倫理委員会の承認を受けて行われた。本実験は実験 2 の被験者 23 名のうち、睡眠時のデータを測定できた者 19 名を対象にした。したがって、プロトコールは実験 2 と同じである。

各被験者は自身の車またはツアーバスで、2014 年 7 月 6 日、軽い昼食後、午後 1 時までに富士山吉田口五合目に集合した。排尿後、体重測定を衣服のみ着用時、衣服に登山靴を着用時、衣服と登山靴に荷物を背負った状態の 3 条件で行った。

登山開始前、各被験者の最大有酸素性作業能力を測定するために、衣服と登山靴を着用の状態で 3 分間の立位安静と 9 分間の段階的歩行を行った。具体的には立位安静時測定の後、ゆっくり-やや速く-全速力での歩行を各 3 分間、合計 9 分間行った。また安静時と歩行時の合計 12 分間にわたり、心拍数 (Heart rate: HR) およびエネルギー消費量 (Activity energy expenditure: AEE) を 1 分毎に測定した。

その後、10 分間ほどの休憩をとり、富士登山を開始した。1 日目は標高約 3000m の山小屋まで登山し、夕食後、就寝した。2 日目は山頂を目指す予定であったが、悪天候のため、そのまま下山した。下山後は、登山開始前と同様の安静時測定および体重測定を行った。

睡眠中、腰部に気圧とエネルギー消費量を測定できる加速度計を、胸部に心拍計を装着し、1 分毎に連続測定した。 SpO_2 および AMS 症状を、五合目出発前、山小屋到着後、就床前、起床後、および下山後五合目到着時にそれぞれ測定・評価した。また、同じポイントで AMS スコアをレイク・ルイズの AMS 診断評価質問表を用いて調査した。AMS 得点の最高値を、AMS 症状の指標とした。これらの指標は、いずれも安静時に行った。

2) データ処理

登山中の AEE 測定から、夜間の覚醒時と睡眠時を先行研究に基づき区分した。すなわち、9 分間歩行で得られた最高 AEE の 15% 以上を睡眠中の覚醒状態と判定し、これらのデータは解析から除外した。AMS の診断には、頭痛があり、かつ合計得点が 3 点以上あることを AMS 発症と診断した。

3) 統計処理

睡眠中の気圧変化 (ΔP_B) と HR 変化 (ΔHR) の関係、および $\Delta HR/\Delta P_B$ と睡眠前後の SpO_2 の変化 (ΔSpO_2) の関係は、ピアソンの相関係数を用いて分析した。気圧変化に対する HR 変化の時間差を検討するために、相互相関分析を用いた。AMS の合計得点と $\Delta HR/\Delta P_B$ の関係には、スピアマンの順位相関分析を用いた。全ての値は平均値±標準偏差で示した。危険率 5% 未満を有意水準とした。

II-4-3 結果

睡眠中の平均室温は、18.2 (18.0~18.7) °C、平均相対湿度は 54.5 (53.2~55.2) % であり、睡眠中の温湿度はほとんど変化しなかった (図 4-1)。

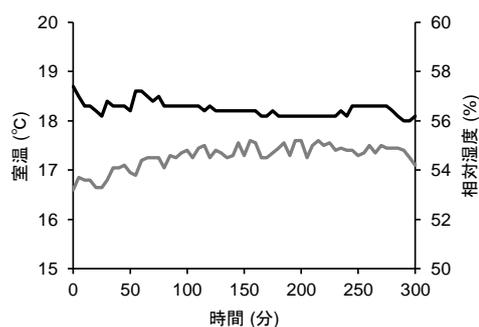


図 4-1 睡眠中の山小屋の室温(黒線)と相対湿度(灰色線)の時系列変化

1 名の被験者の睡眠中の HR と P_B の時間経過を示した (図 4-2 上図)。全体的な傾向として、HR は気圧の低下に伴い徐々に低下していた。この傾向は全被験者について認められた。気圧の変化と HR の変化にどの程度の時間差が存在するかを検討するために相互相関分析を行った結果、この被験者の場合は、18 分の時間遅れがあった (図 4-2 中図)。さらに、この時間差を補正して、気圧と HR の相関関係を求めたところ、両者の間に 0.893 という非常に高い相関関係が得られた (表 4-1 の被験者 1)。残りの 18 名の被験者の傾向も同様であり、全被験者について、一定の時間差が認められた後、気圧と HR の相関係数が最大値を示した。

気圧と HR の相互相関分析の結果の概要を表 4-1 に示した。その結果、各被験者において、最大の相関係数が認められたのは、時間差を補正後の値であった。気圧の変化と HR の変化についての、時間差は平均で 15.3 分であり、 $\Delta HR/\Delta P_B$ は、平均で 11.2 拍/hPa であった。

富士スバルライン五合目 (2305m) での SpO_2 は、平

均で $93.8 \pm 1.7\%$ であり、標高 3000m での山小屋における就床前の値は、 $90.2 \pm 2.2\%$ に低下し、起床時にはさらなる低下を示した ($87.5 \pm 2.7\%$ 、図 4-3)。全被験者において、 SpO_2 の最低値は起床時の値であった。これら 3 ポイントでの SpO_2 の間には、それぞれ有意な差が認められた (それぞれ $P < 0.05$)。

被験者の高山病発症率は 21% であった (19 名中 4 名が発症)。AMS スコアの分布は、6 点が 1 名、3 点で頭痛ありが 3 名 (AMS 発症)、2 点が 4 名、1 点が 3 名、0 点が 8 名 (AMS 発症なし) であった。

気圧の 1hPa 変動に対して、どの程度 HR が変動するかという指標である $\Delta HR / \Delta P_B$ と他の測定指標との関係についてみてみると、 $\Delta HR / \Delta P_B$ が大きい被験者ほど、睡眠前後での SpO_2 の低下が大きかった ($P = 0.006$ 、図 4-4 上図)。同様に $\Delta HR / \Delta P_B$ が大きい被験者ほど、AMS スコアが高かった ($P = 0.034$ 、図 4-4 下図)。

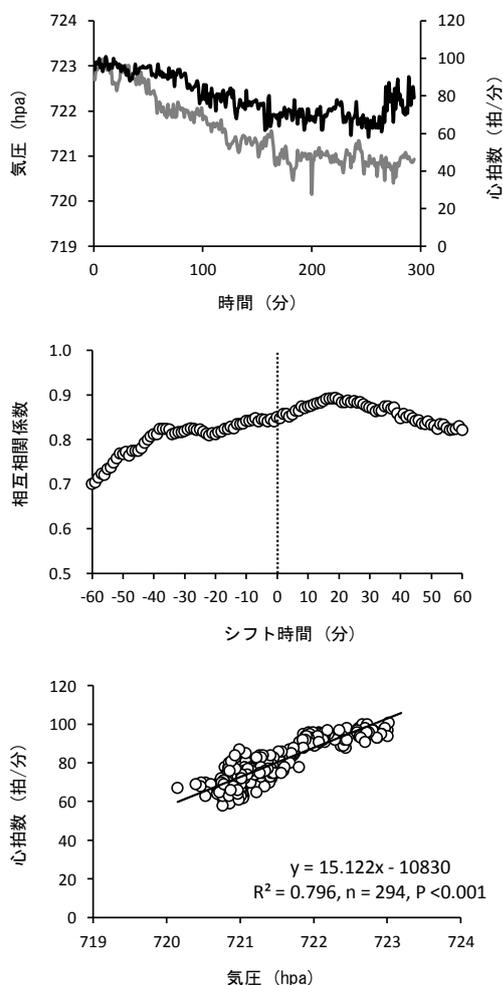


図 4-2 代表的な被験者 1 名における睡眠中の気圧 (灰色線) と心拍数 (黒線) の時系列変化 (上図)。両者 (気圧と心拍数) を 1 分毎に時間をずらしたときの両者の相関係数 (中図)。この被験者の場合、シフト時間が約 18 分時点で、相関係数ももっとも高い値を示していた。気圧と心拍数の間における時間遅れを補正した後の、代表的な被験者 1 名における両者の相関関係 (下図)。被験者は、全て同一人物 (表 4-1 の被験者 1)

表 4-1 各被験者について時間シフト後の心拍数と気圧の相関関係を要約した結果

被験者	睡眠時間 (分)	*相関係数の最大値 (Z 変換後の値)	$\Delta HR / \Delta P_B$ (bpm/hPa)	y-切片 (bpm)	Δ time (分)
1	294	0.893 (1.437)	15.0	4.0	18
2	223	0.742 (0.955)	7.6	0.3	30
3	247	0.823 (1.166)	15.0	0.0	24
4	247	0.492 (0.539)	7.4	-6.9	22
5	242	0.636 (0.751)	8.0	5.0	3
6	316	0.757 (0.989)	9.0	-11.5	7
7	185	0.860 (1.293)	13.7	-9.3	4
8	312	0.682 (0.833)	6.8	-6.3	8
9	291	0.645 (0.767)	6.5	-16.3	19
10	335	0.692 (0.852)	16.0	0.7	23
11	309	0.674 (0.818)	21.4	-7.2	27
12	406	0.650 (0.775)	14.8	-8.2	27
13	352	0.665 (0.802)	12.4	-8.5	17
14	308	0.670 (0.811)	13.2	-10.1	13
15	263	0.595 (0.685)	9.3	4.0	18
16	320	0.613 (0.714)	3.3	-0.3	4
17	326	0.628 (0.738)	14.8	-10.7	14
18	334	0.709 (0.885)	4.0	-4.7	8
19	391	0.531 (0.592)	14.8	-7.3	4
平均値	300	- (0.863)	11.2	-4.9	15.3
標準偏差	54	- (0.226)	4.8	6.0	8.9

HR: 心拍数, P_B : 気圧, bpm: 拍/分. *は相互相関分析により時間シフトを修正した後の相関係数 (R) の最大値を示す

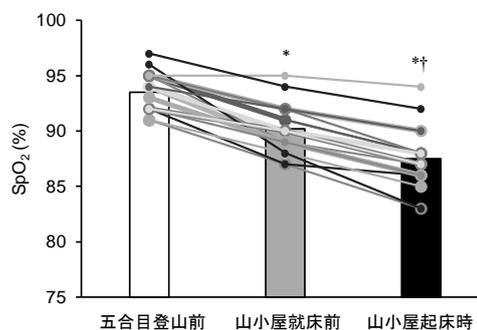


図 4-3 動脈血酸素飽和度 (SpO_2) の各時点の変化。折れ線グラフは各個人値を示し、棒グラフは、全被験者の平均値を示している。*は、五合目登山前との有意差を示しており、†は山小屋就床前との有意差を示している

II-4-4 考察

本実験では、被験者全員の睡眠中の HR が、気圧の低下に応じて、徐々に低下していた。この詳細なメカニズムは、本実験結果からは明らかにできないが、一つの可能性として、気圧変動由来の 三叉神経心臓反射が考えられる。気圧の変化は、三叉神経血管神経ペプチドの変化を介して、頭痛 (特に偏頭痛) の発症と関係することがこれまで報告されてきている。さらに、最近の動物実験では、下顎前方固定手術により、三叉神経心臓反射を惹起させると、手術前と比較して HR が有意に低下し、さらにこの低下は 3 時間以上も維持されたことが報告されている。また、一般に HR は交感神経と副交感神経の活動レベルのバランスによりコントロールされており、HR の低下は副交感神経活動の活性を示唆する。本実験で認められた睡眠中の HR 低下

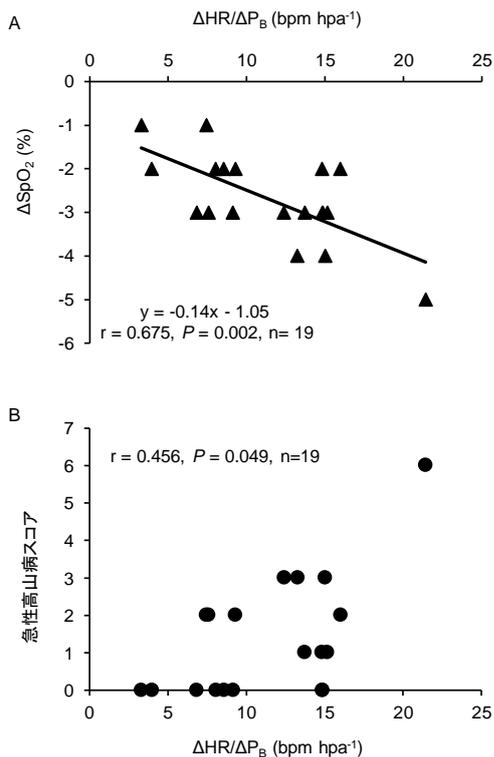


図4-4 気圧の変化に対する心拍数の変化率(ΔHR/ΔP_B)と小屋での就床前と起床後のSpO₂の変化率の関係(上図), およびΔHR/ΔP_Bと急性高山病スコアの関係(下図)

も、副交感神経活動活性由来の可能性は捨てきれない。しかしながら、睡眠中の気圧は低下しており、気圧低下は吸入酸素分圧の低下を意味し、このことは低酸素血症に起因する交感神経活動増加の可能性を意味する。この矛盾を説明することは現時点ではできず、今後の課題である。

HRの増加は、末梢組織への酸素供給を増やすため、睡眠中の継続的なHR低下は、睡眠中の低酸素血症を引き起こす。実際、我々は富士山頂測候所(3776m)の睡眠中にSpO₂を連続測定した結果、SpO₂は入眠後徐々に低下し、その後起床時にむけてやや回復したものの、起床時の値は就床前の値よりも低かったことを報告している。

本実験において、SpO₂は連続測定していなかったため、睡眠中の詳細なSpO₂の動態は不明であるが、起床時のSpO₂の値は、全被験者において、就床前の値より低かったことから、睡眠中に低酸素血症が憎悪していたと考えられる。さらにこの低下率(ΔSpO₂)は、ΔHR/ΔPBと有意に相関していたことから、気圧変動に対してHR変動の感受性が高い人ほど低酸素血症に陥りやすいことを示唆している。また、低酸素血症の重症度はAMSの発症率や重症度と関係があることも報告されており、本実験では、より高いAMSスコアを示した人もより大きなΔHR/ΔP_Bを示していたことから、気圧変動に対する心拍変動の感受性は、AMS症状を予測できる一つの指標となる可能性がある。

II-4-5 本実験の限界

本実験では考慮すべき何点かの限界がある。第一に、サンプル数が少なかったことである。しかしながら、

本実験では19名の被験者全員が、同様の結果を示したことから、本実験結果の妥当性および再現性は比較的高いものであると考える。第二に、詳細なメカニズムは依然不明のままであるため、今後、HRと気圧の連続測定に加え、他に可能性のある指標(例えば、SpO₂、呼吸数、換気量、心拍変動など)の睡眠中の連続測定により、明らかにしたいと考えている。

II-4-6 結論

高所滞在時の睡眠中、HRは気圧変化に対して、一定の時間遅れの後、変化した。気圧変化に対するHR変化の感受性は、低酸素血症さらには、急性高山病症状の予測因子となりえる可能性がある。

R-01-2017

平成29年度
山梨県富士山科学研究所研究報告書
第36号

MFRI Research Report

2017年発行

編集・発行
山梨県富士山科学研究所

〒403-0005 山梨県富士吉田市上吉田剣丸尾 5597-1
電話：0555-72-6211
FAX：0555-72-6204
<http://www.mfri.pref.yamanashi.jp/>
