

平成 30 年 5 月 13 日現在

機関番号：83501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26440268

研究課題名(和文) 高所環境における経済速度と体温・体液調節能からみた環境適応能

研究課題名(英文) Economical speed at high-altitude and adaptation to high-altitude from the viewpoint of thermoregulatory responses

研究代表者

堀内 雅弘 (Horicuhi, Masahiro)

山梨県富士山科学研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：50310115

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、主に高所(低酸素)環境下でのヒトの歩行時のエネルギーコスト、およびこのコストが最小になる速度(経済速度)について検討してきた。さらに、実際の登山や生活環境にも応用できるように、環境温度を変化させたときの、エネルギーコストについても検討した。その結果、経済速度は吸入酸素濃度が13%以下になると、低下することが明らかになった。また、環境温度を13°Cと23°C、吸入酸素濃度を13%および21%にそれぞれ設定し、寒冷と低酸素の複合的影響も検討した。その結果、経済速度は酸素濃度には影響されるが、本実験で用いた環境温度には影響されないことが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：This study was investigated to explore effect of hypoxia and environmental temperature on energy cost of walking. Further, we also investigated effect of these environmental factors on economical speed that can minimize energy cost of walking. As a result, economical speed was significantly slowed in hypoxia (fraction of inspired oxygen; $FiO_2 \sim 13\%$). Thereafter, we set ambient temperature as 13°C and 23°C, and FiO_2 was set as 13% and 21%, respectively. Combined effects of cool and hypoxic environment on energy cost of walking and economical speed were also investigated. We found that overall energy cost unchanged irrespective of cool and hypoxia, while hypoxic condition significantly slowed ES. Conversely, there were no effects of ambient temperature which was used in the present study.

研究分野：環境生理学 運動生理学

キーワード：高所適応 低酸素 エネルギーコスト 経済速度 歩行

1. 研究開始当初の背景

人類が高所で生活するようになったのは、2 万年も前のことである。彼ら高所住民は、遺伝的にも生理学的にも高所に適応してきた。一方、平地住民は高所に移動すると動脈血酸素飽和度の低下から、生理学的に対応が難しいこともよく知られている。近年では、高所のスポーツイベント(登山等)やアスリートの高所トレーニングも盛んに行われていることから、平地住民の高所適応能力とそのメカニズムを解明することは重要であると考えられる。人類は他の生物種と異なり二足歩行ができ、このことが文明の発達をもたらしたといえる。すなわち、二足歩行は人類の基盤となる移動形式である。

人が歩行するときのエネルギーコスト(Cost of walking; C_w)は、歩行速度の増加とともに直線的に増大するが、このコストを各歩行速度で除すると比例直線の関係が U 字曲線に変化する。すなわちヒトの歩行速度と C_w との関係には、コストを最小限にする速度(U 字曲線の頂点)が存在し、これを経済速度(Economical speed; ES)と呼んでいる。歩行時の C_w や ES に及ぼす要因としては、これまで加齢や荷重(肥満や荷物運搬)が挙げられている。しかしながら、環境要因(低酸素、暑熱、寒冷等)が歩行時の C_w や ES に及ぼす影響は、ほとんど明らかにされていない。

2. 研究の目的

そこで本研究では、若年者を対象にして、多段階歩行時の C_w および ES が、異なる環境下でどのように影響を受けるのかを検討することを目的とした。さらに、実際のスポーツ現場へ還元するために、登山時のエネルギー消費量と心拍数を連続測定した。

3. 研究の方法

1) 実験 1

若年男性 12 名が、0.67、0.86、1.06、1.25、1.44、および 1.64m/秒までの 6 段階(各段階の歩行時間は 4 分間; 合計 24 分間)の漸増歩行を行った。測定項目は呼気ガス諸変量と心拍数、および近赤外線分光法装置を用いた大腿部の筋組織酸素化動態であった。環境要因として、吸入酸素濃度を 21%、15%、および 11% の三条件を設定した。

2) 実験 2

若年男性 12 名、および女性 10 名が、0.67、0.83、1.00、1.17、1.33、1.50 および 1.67m/秒までの 7 段階(各段階の歩行時間は 4 分間; 合計 28 分間)の漸増歩行を行った。測定項目は呼気ガス諸変量と心拍数、および皮膚温であった。環境要因として、a) 常温常酸素(環境温 23℃、吸入酸素濃度 21%; 21% O_2)、b) 常温低酸素(23℃、13% O_2)、c) 低温常酸素(13℃、21% O_2)、d) 低温低酸素(13℃、13% O_2) の四条件を設定した。

3) 実験 3

若年男性 14 名が、0.67、0.83、1.00、1.17、1.33、1.50 および 1.67m/秒までの 7 段階(各段階の歩行時間は 4 分間; 合計 28 分間)の漸増歩行を行った。測定項目は呼気ガス諸変量と心拍数、および皮膚温であった。環境要因として、a) 常温常酸素(環境温 23℃、吸入酸素濃度 21%; 21% O_2)、b) 低温常酸素(13℃、21% O_2)、c) 高温常酸素(33℃、21% O_2) の三条件を設定した。

4) 実験 4

成人男女 23 名を対象にして、富士登山を行った。彼らを登山中真水のみ摂取する群と脱水状態からの回復に有用と考えられる糖質・電解質溶液のみ摂取する群に無作為に分けた。測定項目は、3 軸加速度計によるエネルギー消費量(Activity Energy Expenditure; AEE)と心拍数(HR)であった。

4. 研究成果

1) 実験 1

歩行全体にわたり、 C_w は酸素濃度の影響を受けなかった。ES は 15% O_2 条件では、常酸素(21% O_2)と差が認められなかったが、11% O_2 条件で約 8% 低下し、21% および 15% との間に有意な差が認められなかった。また、近赤外線分光法装置により測定した大腿部の脱酸素化ヘモグロビンは、21% および 15% O_2 条件では、歩行中、ほぼ一定の値を示したが、11% O_2 条件では、高速の歩行時に増加しており、他の 2 条件と比較して有意な差が認められた。これらの結果は、標高が約 2700m 付近(約 15% O_2)までは、平地と同等の速度で歩行しても C_w は、変わらないが、それ以上の標高(11% O_2 ~標高約 5000m)では、平地より歩行速度を少なくとも 8% は低下させる必要があることを示唆した。さらに、11% O_2 条件での脱酸素化ヘモグロビンの急激な増加は、この環境下では、活動筋への酸素供給が追いついていないため、脱酸素化が亢進していたと考えられた(雑誌論文の 2 および 4、学会発表の 2、3 および 4)。

2) 実験 2

環境温度も酸素濃度も歩行全体の C_w に影響を及ぼさなかった。一方、ES は常酸素条件であれ低酸素条件であれ、23℃ 条件と 13℃ 条件の間に差は認められなかった。しかしながら、13% O_2 条件における ES は、常酸素(21% O_2)条件における値より有意に遅かった(約 7% 低下)。これらの結果は、少なくとも本実験で設定した寒冷環境(13℃)は、 C_w や ES に影響するほどの環境でなかったことを示している。一方、低酸素(13% O_2)条件では、高速での C_w のわずかな増大が U 字曲線に影響を及ぼし、その結果、ES が低下したと考えられた。さらに、被験者や実験条件は異なるものの、実験 1 の結果と考え併せると、人

が高所で歩行するとき、標高約 3200m(約 13%O₂)から、歩行速度を低下させる必要があることを示唆した(学会発表の 5)。

3) 実験 3

予測したとおり、皮膚温は安静時および歩行時のすべてに亘り、環境温の影響が見られ、3 条件の間に有意な差が認められた(33 > 23 > 13)。歩行全体の Cw については、条件の間に差は認められなかったが、有意な交互作用が認められた。このことは、33 条件における高速での Cw の増加率が高かったことを示している。その結果、33°C 条件では、23°C や 13°C 条件と比較して有意な ES の低下が認められた(約 7%)。さらに HR も 33°C 条件の値が、23°C および 13°C 条件の値より有意に高かった。一方、23°C と 13°C 条件の間には、皮膚温を除く全ての生理指標(Cw、ES および HR)に差が認められなかった。これらの結果は、高温環境下(~33°C)では、歩行のような軽度の運動においても、その歩行速度には留意する必要があることを示唆している(2018 年国際学会で発表予定(決定)、および現在学術論文投稿中)。

4) 実験 4

無作為に分けた両群の、身体特性(性別割合、年齢、身長および体重)および登山開始前に行った 9 分間歩行テストより推測した最大有酸素性作業能力に有意な差は認められなかった。また、登山中の総エネルギー摂取量においても両群の間に差は認められなかった。しかし、栄養素別にみても、糖質・電解質溶液摂取群は、糖質とナトリウムの摂取量(飲水量)が、真水摂取群より有意に多かった。登山開始直後の最初の 30 分間の AEE と HR は両群の間に有意な差は認められなかった。しかしながら、登山終了直前の最終 30 分間の HR は、真水のみ摂取する群の値が糖質・電解質溶液のみ摂取する群の値より有意に高かった。これらの結果は、糖質・電解質溶液を摂取することにより、血液量の回復が促進し、静脈還流量および一回拍出量を維持でき、HR 増加を抑制できたと考えられた。また、両群を一括してみた場合であるが、登山開始前の安静時 HR の差は、下山終了後の安静 HR の差分は、登山開始前の体重と下山終了後の体重の差分と有意な負の相関関係が認められた。すなわち、登山前後でより体重が減少していた者ほど(脱水率が多い者ほど)、安静時心拍数が増加していた。本実験結果は、実験室で行った実験 3 を現場で裏付けるものとなる可能性が示唆された。(雑誌論文の 1 および学会発表の 1)。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 5 件)

- 1) Horiuchi Masahiro, Endo Junko, Kondo Koichi, Uno Tadashi, Morikawa Mayuko, Nose Hiroshi. Impact of Carbohydrate-Electrolyte Beverage Ingestion on Heart Rate Response While Climbing Mountain Fuji at ~3000 m. *Biomed Research International*. 2017, doi: 10.1155/2017/3919826.
- 2) Horiuchi Masahiro, Fukuoka Yoshiyuki, Handa Yoko, Abe Daijiro, Pontzer Herman. Measuring the Energy of Ventilation and Circulation during Human Walking using Induced Hypoxia. *Scientific Reports*, vol.10, 2017, doi: 10.1038/s41598-017-05068-8.
- 3) Abe Daijiro, Fukuoka Yoshiyuki, Horiuchi Masahiro. Muscle activities during walking and running at energetically optimal transition speed under normobaric hypoxia on gradient slopes. *PLoS One*, vol.12, 2017, doi:10.1371/journal.pone.0173816.
- 4) Horiuchi Masahiro, Handa Yoko, Abe Daijiro, Fukuoka Yoshiyuki. Walking economy at simulated high altitude in human healthy young male lowlanders. *Biology Open*, vol.5, 2016, doi: 10.1242/bio.019810.
- 5) Abe Daijiro, Fukuoka Yoshiyuki, Horiuchi Masahiro. Muscle activities during walking and running at energetically optimal transition speed under normobaric hypoxia on gradient slopes. *PLoS One*. 2017, 16;12(3):e0173816. doi: 10.1371/journal.pone.0173816.

〔学会発表〕(計 6 件)

- 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。2015、日本体力医学会。
- 2) Horiuchi Masahiro, Energy cost of walking and the economical speed during walking under hypoxic condition. 2016, *International Journal of Physiological Anthropology*.
- 3) Horiuchi Masahiro, Handa Yoko, Abe Daijiro, Fukuoka Yoshiyuki. Energy cost during walking at simulated high-altitude in healthy young male lowlanders. 2016, *European College of Sports Science*.
- 4) Horiuchi Masahiro, Fukuoka Yoshiyuki, Handa Yoko, Abe Daijiro, Pontzer Herman. Measuring energy of ventilation and circulation during human walking induced hypoxia. 2017, *European College of Sports Science*.
- 5) Horiuchi Masahiro, Handa Yoko, Fukuoka Yoshiyuki. Combined effects of cool and hypoxia during walking in health male lowlanders. 2017, 17th *International Conference of Environmental Ergonomics*.
- 6) 安陪大治郎、福岡義之、前田享史、堀内雅弘。高酸素環境における経路速度と移行速度、および移行速度における筋活動様相。2017、*日本人類学会大会*。

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

堀内 雅弘 (HORIUCHI, Masahiro)

山梨県富士山科学研究所・環境共生研究

部・主幹研究員

研究者番号：50310115

(2) 研究分担者

安陪 大治郎 (ABE, Daijiro)

九州産業大学・健康スポーツ科学センタ

ー・専任講師

研究者番号：10368821