

資 料

仙台大学におけるヒューマンカロリメーターを用いた
エネルギー消費量測定の実際：
その研究背景と測定の原理，ならびに精度試験について

佐藤 真樹， 藤井 久雄

Measurement of energy expenditure with the whole-body indirect human calorimeter in Sendai College : The back ground of study, and principle and precision of measurement.

SATO Maki, FUJII Hisao

Whole-body indirect human calorimeter, which set up at Sendai College in 2005, measures gas concentration and flow rate of inlet and outlet air in the chamber room where a testee stays, and his energy expenditure was calculated based on the oxygen consumption and carbon dioxide production. It is important to control measurement precision. We repeated measurement tests of fresh air and alcohol burning tests for long periods of time. We should continuously adjust this instrument to overcome the problem that came out from these examinations.

Key words : whole-body indirect human calorimeter, energy expenditure, measurement precision

1. はじめに

フランスの生理学者 Lavoisier が、物質の燃焼には酸素が必要であることを発見したのが 18 世紀末である¹⁾。その 100 年ほど後の 19 世紀後半から 20 世紀初めにヒトのエネルギー代謝研究の基礎が確立したといわれている²⁾。

エネルギー代謝の研究は運動・スポーツや栄養に関わる者にとって重要な領域であるといえるが、「ヒトはどれだけのエネルギーを消費し、また必要としているのか」という課題について、まだ不明な部分が多いというのが現状である。平成 17 年 3 月、仙台大学に設置されたヒューマンカロリメーターは、わが国での歴史は浅いが、海外では数多くの研究が行われており、エネルギー代謝を研究する上で必須の測定装置と

なっている。本稿ではこのヒューマンカロリメーターによる測定の概要や、現在行っている精度試験について述べることにする。

2. エネルギー消費量の測定法

エネルギー消費量の測定には、Lavoisier の古典的原理に基づく方法として、直接熱量測定法と間接熱量測定法がある^{3),4)}。

直接熱量測定法は密閉された小部屋(代謝室)の中で、人体から放散される熱を水や空気に吸収させ、熱産生量を測定する方法(直接ヒューマンカロリメーター)である。この方法は精度が高く理論的にも重要であるが、装置が大がかりで高価なことや被験者に長時間の拘束を強いることなどから、現在はほとんど用いられてい

ない。

一方、間接熱量測定法では呼気ガス中の酸素、二酸化炭素の変化量あるいは窒素排泄量からエネルギー消費量を算出する方法で、現在もっとも汎用されている。なお、直接熱量測定法との測定値が一致することは約100年前にAtwaterとBenedictによって確認されている⁵⁾。

さらに間接熱量測定法は、閉鎖回路系と開放回路系に区別される。閉鎖回路系は閉鎖した回路内の酸素を再呼吸させ、酸素の減量を計測する方法である。開放回路系は、外気を吸入させ、呼気を採取し、呼気中の成分と量を測定することで、酸素摂取量と二酸化炭素排泄量を算出する方法である。この測定原理によりエネルギー消費量を推定する方法が、現在最も一般的で多く使われている。開放回路系にはダグラスバッグ法、フード法などがあるが、本学に設置されたヒューマンカロリメーターも間接熱量測定法の中のこの分類に入る。

3. ヒューマンカロリメーターとは

ヒューマンカロリメーターは被験者の居住する測定室の排気および給気側のガス濃度、流量等を測定し、これらを基に酸素摂取率および二酸化炭素排泄率を算出するようになっている。測定室は温度、湿度、気圧が一定にコントロールされた密閉の小部屋である（室内は若干陰圧になっていることが多い）。外気を取り入れる給気口と室内空気の排気口が取り付けられており、流量、気圧、温度および湿度が連続的に計測される。取り入れられた外気は測定室から外へ出る前に十分に混合された後、排気口に吸引される。室内空気が排気側に吸引される際、一部はガス分析計に送られ、コンピュータの自動制御により連続的にガス濃度の計測がされる。

ヒューマンカロリメーターの最大の特徴は、呼気採取のためにマスク等の特別な器具を装着することなく、普段の生活状態で長時間にわた

ってエネルギー消費量を測定できることである。24時間あるいはそれ以上の長時間にわたる連続測定や、食事や睡眠中の連続測定が可能となっている。またヒューマンカロリメーターのその他の特徴として、酸素摂取量と二酸化炭素排泄量を連続的に測定できることにより、呼吸商（RQ）から酸化基質を特定できることがあげられる。この方法で得られたエネルギー消費量は、現在のところ精度の高い、最も信頼できるデータとされており、他の測定法の精度検定にも用いられている⁶⁾。

ヒューマンカロリメーターは古くはPettenkofer⁷⁾やAtwater⁸⁾の時代に建設されており、その後酸素および二酸化炭素濃度の測定法において技術的な進歩を経て、1980年初頭から急速に普及するに至ったとされている⁹⁾⁻¹¹⁾。

わが国では平成12年に国立健康・栄養研究所に設置されたのを筆頭に、現在4施設においてヒューマンカロリメーターが稼動している。前述のとおり、うち1台は平成17年3月、仙台大学に設置されたものである。

4. 仙台大学ヒューマンカロリメーターの概要

写真1および図1に仙台大学の第3体育館1階に設置されたヒューマンカロリメーター（富士医科産業株式会社製：FCH-15S）の概要を示した。

設置されたヒューマンカロリメーターはチャンバーシステム、高精度分析システム、およびエネルギー代謝システムからなる。容積約18m³の測定室は温度、湿度、気圧が一定にコントロールされている。ガス分析には質量分析計VG Prima δ B（Thermo社製）が採用されており、それぞれのガス濃度値（%）は小数点以下第4位まで計測可能となっている。質量分析計の分析値、測定室の環境条件測定値および流量等は、コンピュータで解析、自動制御されている。

測定室内にはトイレ，洗面台，ベッド，机，電話，テレビ機能のついたパーソナルコンピュータ等が備わっており，ホテルのシングルルーム並みの居住空間となっている．また自転車エルゴメーターを室内に設置し，運動を行うことも可能である．被験者が閉塞感を感じないように，室内からは大きなガラス窓を通して

いつでも室外の景色が見られるようになっている．また安全面での配慮から，電話やインターホン，e-メールを通していつでも外部と連絡が取れるようになっている．

5. ケーススタディー

①長時間外気連続測定

ヒューマンカロリメーターによるエネルギー消費量測定にあたっては，測定精度の管理が重要である．特に換気量と呼気ガス濃度をいかに正確に測定できるかが最も重要である．本学ではヒトのエネルギー消費量測定と並行して精度確認を行っており，現在も微調整を続けているところである．

前述のとおり本学のヒューマンカロリメーターのガス分析には質量分析計が採用されており，それぞれのガス濃度値は小数点以下第4位まで計測可能となっている．はじめに，質量分析計の精度確認として，測定室に取り込む外気のガス濃度の長時間（24時間以上）連続測定を繰り返している．図2に外気のガス濃度測定結果を示した．

測定結果より，外気ガス濃度が日内変動を示していることがわかった．図2より酸素濃度が日没から徐々に下降し，日の出とともに上昇しているが24時間後に同じ濃度には戻っていないことがわかる．なお二酸化炭素濃度は酸素と逆の変化を示している．著者は昨年，筑波大学に設置されている本学と同型のヒューマンカロ

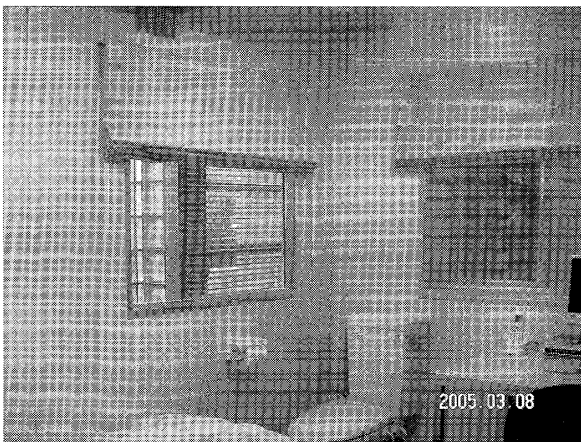
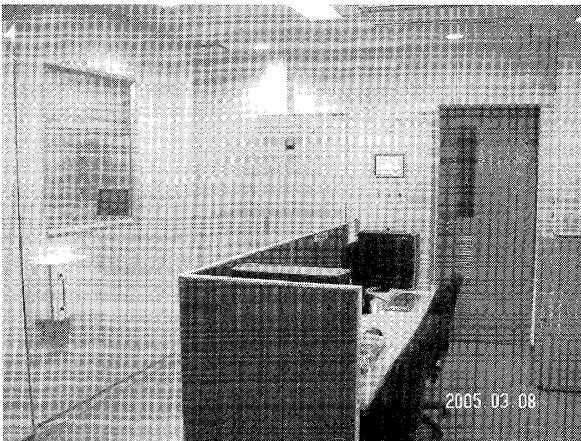


写真1 ヒューマンカロリメーター

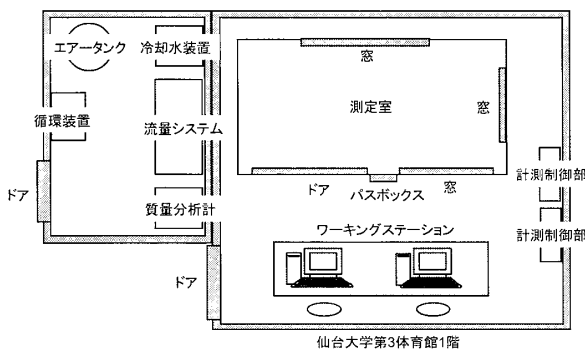


図1 ヒューマンカロリメーター設置図

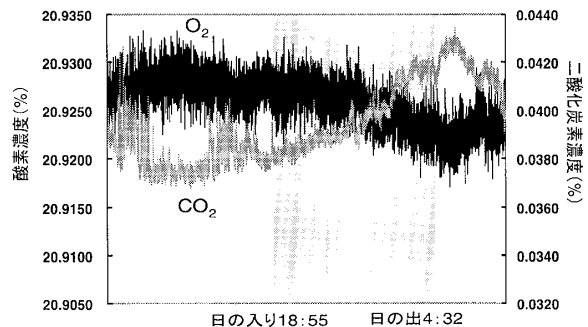


図2 24時間外気ガス濃度

リメーターにおいて同様の測定を行い、昼間に酸素濃度、夜間には二酸化炭素濃度が上昇するという日内変動を観察した¹²⁾。これは日没による周辺植物の二酸化炭素吸収能の変化に関連があるかもしれないと報告した。前述のようにガス濃度は小数点以下第4位まで計測可能であり、ごくわずかな変動にも対応していることから、周辺の環境の影響を非常に受けやすいといえる。特にヒューマンカロリメーターの設置場所が体育館であるため、外気に混じった人間の呼気を検知する可能性がある。

②アルコール燃焼試験

ヒューマンカロリメーターでは化学組成が既知である物質（アルコール等）を測定室内で燃焼させる試験を繰り返し行うことにより、測定したエネルギー消費量の確度と精度を確認することができる¹³⁾。これまで、本学でも数回のアルコール燃焼試験を行った。その方法を以下に示す。

エタノールで満たしたアルコールランプをヒューマンカロリメーターの測定室内で着火し、自然消火を確認した後、ドアを開け測定室から取り出した。燃焼したエタノールの重量を求め、エタノール燃焼の化学反応式（1モルのアルコールが完全燃焼する際に、3モルの O_2 が必要であり、2モルの CO_2 を発生する）より総酸素消費量および総二酸化炭素産生量の理論値を算出した。また、理論値とは別にヒューマンカロリメーターによる実測値を算出するため、エタノール燃焼中の測定室内ガス濃度を質量分析計VG Prima δ B (Thermo 社製) にて連続的に計測した。Brownらの方法¹⁴⁾を用い、測定室内に流入するガス、排出されるガスの体積および測定室内のガス蓄積量の変化率から、総酸素消費量および総二酸化炭素産生量を算出し、実測値/理論値（回収率とする）を検討した。また呼吸商をエタノールの燃焼化学式から求められる理論値（0.667）と比較することにより、測定室内空気とアルコールランプとの間のガス

交換について検討した。

結果、実測の酸素消費量および二酸化炭素産生量のそれぞれの理論値に対する回収率はそれぞれ106.9%、108.4%であった。一方、実測の燃焼中総酸素消費量および総二酸化炭素産生量から算出した呼吸商をエタノールの燃焼化学式から求められる理論値0.667と比較したところ、0.676であり、ほぼ同一の値が得られた。

燃焼中の室内ガス濃度の変化（図3）より、測定室内空気とアルコールランプとの間のガス交換は滞りなく行われているものと考えられる。なお、燃焼からおよそ3時間の時点で酸素濃度の低下および二酸化炭素濃度の上昇がなくなり、再び元の室内濃度に戻る動態となっているが、これはアルコールランプ内のエタノール減少ともない、炎が小さくなったことによるものと考えられる。これまで日本では二見ら¹³⁾により、アルコール燃焼試験によるヒューマンカロリメーターの精度評価がなされた報告があり、その中で実測値と理論値のばらつきの原因について指摘している。これを踏まえ、今回実測の回収率が理論値と比較して高値となった原因として、特に以下のことが考えられる。二見ら¹³⁾は燃焼時間の短縮とともに実測値と理論値のばらつきが拡大することがわかり、比較的長時間な6時間の燃焼によりその測定値の高い精度と確度が得られたと報告している。今回の燃焼時間がおよそ3時間40分と短時間のため、理論値に対し回収率が高値となったと考えられる。

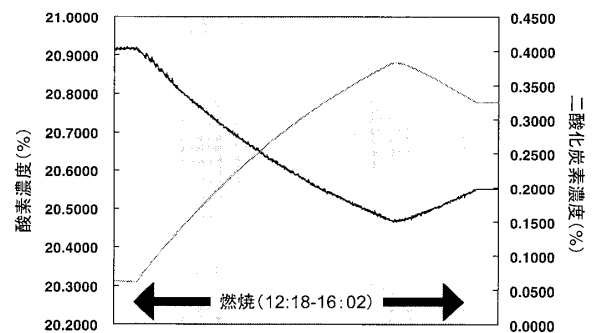


図3 測定室内ガス濃度の変動

一方で燃焼中や、アルコールランプの測定室への持ち込み、持ち出し作業中のアルコール蒸発による誤差も影響している可能性がある。本装置による測定では、ガス濃度のわずかな誤差が酸素消費量および二酸化炭素産生量を算出する際に 18 m³ という膨大な測定室の容積の積として換算されることになるため、さらにばらつきが大きくなる。したがってアルコール燃焼試験の方法自体にも改善が必要である。

本稿では 1 例のデータのみを示したが、これから繰り返し測定を行い、例数を増やしていくところである。今後はデータのサンプリング方法、ノイズを軽減するための測定システムの検討も必要である¹⁴⁾⁻¹⁶⁾。

6. 今後の展開

吉武らの総説⁴⁾にあるように、現在欧米の国々においてヒューマンカロリメーターを用いたエネルギー代謝研究が盛んに行われている。我が国においてはヒューマンカロリメーターによるエネルギー消費量測定の精度評価に関する研究¹³⁾や、座位中心の一日あたりのエネルギー消費量の測定¹⁷⁾、活動記録法との比較¹⁸⁾、測定機器から求めた身体活動量の評価精度の検討^{19),20)}などが行われている。しかしながら欧米諸国と比較して我が国におけるヒューマンカロリメーター研究の歴史は浅いことから、データもまだ少ないのが現状である。2004年11月、筑波大学にて第1回ヒューマンカロリメーターセミナーが開催された。その中で国内におけるヒューマンカロリメーターの現状、これからの研究方法などについて活発な意見交換が交わされた。今後も開催が予定されており、エネルギー代謝研究のさらなる進歩が期待される。

今後は無拘束で長時間の連続測定が可能であるというヒューマンカロリメーターの特性を活かし、食事による産熱効果 (TEF; Thermic Effect of Food) や運動後過剰酸素消費 (EPOC; Excess Post exercise Oxygen Consumption) の測定、睡眠

時のエネルギー消費量測定などの研究も期待される。ヒューマンカロリメーターによる測定は従来の方法に比べ被験者の負担が少ないため、小児から高齢者まで幅広い年齢層のデータ収集が可能であるといえる。また測定室内に測定機器を持ち込むことで、他の計測 (加速度計、心拍、脳波など) と組み合わせた研究が可能である。その他、遺伝的要因の検討なども今後必要となってくるであろう。

先にも述べたが、エネルギー代謝研究は運動・スポーツおよび栄養の両分野にまたがる重要な領域であるといえる。しかし「ヒトはどれだけだけのエネルギーを消費し、また必要としているのか」という課題について、まだ不明な部分が多いというのが現状である。細谷³⁾は著書の中でエネルギー代謝に関する定義や測定方法などの検討・見直しが必要であると繰り返し述べている。エネルギー代謝を明らかにすることは健康の維持増進はもちろんのこと、スポーツ選手の競技力の向上などにおいても重要な意味を持つといえる²¹⁾。エネルギー消費量が分かれば、トレーニング内容やエネルギー必要量を定めることに役立つ。すなわちエネルギー消費量測定のゴールデンスタANDARDといえるヒューマンカロリメーターが導入されたことは、運動と栄養の両面から研究教育を行う本学にとって意義深い。これを機に更なる進展が期待される場所である。まずは本機器の特性を理解しながら研究を軌道に乗せ、データを蓄積していくことが今後の課題である。本学におけるヒューマンカロリメーターを用いたヒトのエネルギー消費量測定に関する研究については追って報告したい。

参考・引用文献

- 1) Holmes F L.: Lavoisier and the chemistry of life. *The University of Wisconsin Press*, 91-128(1985)
- 2) Kinney JM.: Energy metabolism -an overview. *Infusionstherapie*. 15,148-151 (1988)
- 3) 細谷憲政: 今なぜエネルギー代謝か. 第一出版 (2000)
- 4) 吉武裕, 島田美恵子, 海老根直之, 齊藤慎一, 田中宏暁: ヒューマンカロリーメーター. 栄養学雑誌 58, 185-194 (2000)
- 5) Webb, P.: The measurement of energy expenditure. *J.Nutr.*, 121, 1897-1901(1991)
- 6) 柏崎浩: エネルギー代謝測定法-最近の進歩. 臨床スポーツ医学, 18, 409-418(2001)
- 7) Pettenkofer M.: Ueber die Respiration, *Annalen der Chemie und Pharmacie*. (1862)
- 8) Carpenter KJ.: The life times of W.O. Atwater (1844-1907). *J.Nutr.*, 124, 1707-1714 (1994)
- 9) Jequier E, Acheson K, and Schutz Y.: Assessment of energy expenditure and fuel utilization in man. *Ann.Rev.Nutr.* 7:187-208(1987)
- 10) Jequier E, and Schutz Y.: Long term measurement of energy expenditure in humans using a respiratory chamber. *Am.J.Clin.Nutr.* 38:989-998(1983)
- 11) Ravussin E, Lillinoja S, Anderson TE, Christin, L, and Bogardus C.: Determinants of 24-hour energy expenditure in man. *J.Clin.Invest.* 78:1568-1578(1986)
- 12) 佐藤真樹, 緒形ひとみ, 遠藤隆昭, 麻見直美, 徳山薫平, 中島茂: 長時間分解能ヒューマン・カロリーメーター. 第24回日本肥満学会大会 (2004. 大阪)
- 13) 二見順, 田中茂穂, 山村千晶, 岡 純, 高田和子, 柏崎浩: ヒューマンカロリーメーターによるエネルギー消費量測定 - 精度評価と精度向上のための問題点の検討 -. 日本栄養・食糧学会誌 56: 229-236 (2003)
- 14) Brown D, Cole TJ, Dauncey MJ, Marrs RW, and Murgatroyd PR.: Analysis of gaseous exchange in open-circuit indirect calorimetry. *Med, Biol, Eng, Comput.* 22,333-338(1984)
- 15) Sun M., Reed GW, and Hill JO.: Modification of a whole room indirect calorimeter for measurement of rapid changes in energy expenditure. *J.Appl.Physiol.* 76,2686-2691 (1994)
- 16) Henning B, Lofgren R, and Sjostrom L.: Chamber for indirect calorimetry with improved transient response. *Med. Biol. Eng. Comput.* 34: 207-212 (1996)
- 17) 田中茂穂, 田中千晶, 二見順, 岡 順, 高田和子, 柏崎浩: ヒューマンカロリーメーターを用いて測定した座位中心の生活における1日あたりのエネルギー消費量. 日本栄養・食糧学会誌 56: 291-296 (2003)
- 18) Yamamura C, Tanaka S, Futami J, Oka J, Ishikawa-Takata K, and Kashiwazaki H.: Activity diary method for predicting energy expenditure as evaluated by a whole-body indirect human calorimeter. *J. Nutr. Sci. Vitaminol.* 49: 262-269 (2003)
- 19) 田中茂穂: 身体活動量の量的および質的評価法の確立. (財) 明治安田厚生事業団第20会健康医科学研究助成論文集 (2005)
- 20) Kumahara H, Schutz Y, Ayabe M., Yoshioka M, Yoshitake Y, Shindo M, Ishii K, and Tanaka H.: The use of uniaxial accelerometry for the assessment of physical-activity-related energy expenditure: a validation study against whole-body indirect calorimetry. *Br. J. Nutr.* 91: 235-243 (2004)
- 21) 小林修平: スポーツ医学におけるエネルギー代謝研究の重要性. 臨床スポーツ医学 18: 393-397 (2001)

(平成17年7月21日受付, 平成17年7月25日受理)