ヒューマン・カロリメータ

吉 武 裕^{*1}, 島 田 美恵子^{*1}, 海老根 直 之^{*2}, 齊 藤 慎 一^{*3}, 田 中 宏 暁^{*4}

^{*1}国立健康・栄養研究所 健康増進部, ^{*2}筑波大学体育科学研究科,

^{*3}筑波大学体育科学系, ^{*4}福岡大学スポーツ科学部

Human Calorimeter

Yutaka Yoshitake ^{*1}, Mieko Shimada ^{*1}, Naoyuki Ebine ^{*2}, Shin-ichi Saitoh ^{*3} and Hiroaki Tanaka ^{*4}

^{*1} Division of Health Promotion, National Institute of Health and Nutrition ;

^{*2} Doctoral Program in Health and Sport Sciences, University of Tsukuba ;

^{*3} Institute of Health and Sport Sciences, University of Tsukuba ;

^{*4} Laboratories of Exercise Physiology, School of Physical Education, Fukuoka University

I. はじめに

肥満は生活習慣病の1つであるだけでなく、糖尿病などその他の生活習慣病の危険因子となることから、肥満の予防や治療は生活習慣病の予防や治療においても重要である¹⁾。

最近、肥満のメカニズムなどについての新知見が蓄積されつつある²⁾が、肥満の原因の多くは基本的にエネルギー摂取と消費のアンバランス、つまり、日常生活における身体活動の減少などによる相対的なエネルギー摂取過剰によるものと考えられている^{3, 4)}。このことから、肥満の予防や治療においては、エネルギー摂取と消費のバランスを保つことが重要となる。

栄養所要量においては、健康の保持・増進の観点から、性・年齢、生活活動強度等を考慮したエネルギー所要量が示されている⁵⁾。しかし、現在においても、我々が健康を保持・増進していくために重要な「どれだけの食物が必要なのか、また、ヒトのエネルギー摂取と消費のバランスは如何にあるべきか」については十分に明らかにされていない⁶⁾。

長時間にわたるヒトのエネルギー消費量の測定には、古くから、ヒューマン・カロリメータが用いられている^{7~16)}。これには、ヒトを一室に入れ、その時の熱産生量を測定する方法と、酸素消費量と二酸化炭素排出量からエネルギー消費量やエネルギー基質の酸化量を測定する方法の2つがある^{8~16)}。栄養学におけるヒトのエネルギー代謝の研究において、ヒューマン・カロリメータは重要な役割を担っている^{8, 9, 11, 12)}ことから、栄養学を研究する施設においては標準的に装備しておくべき機器と考えられる。

我が国では、平成12年に国立健康・栄養研究所にヒューマン・カロリメータが設置され、栄養所要量策定、生活習慣病予防などに関連するエネルギー代謝の研究の準備が整えられている。また、田中らによって、

Lausanne大学のSchutz教授と共同でヒューマン・カロリメータを用いた生活習慣病予防のための基礎的研究が開始されている¹⁷⁾。

本稿では、ヒューマン・カロリメータを用いたエネルギー消費量測定法の原理、利用法などについて簡単に述べることにする。なお、ヒューマン・カロリメータの詳細については、Webb¹⁴⁾, McLeann and Tobin¹⁵⁾, Burszteinら¹⁶⁾の著書を参照されたい。

II. 熱量測定法 (calorimetry)

エネルギー代謝測定法には、直接熱量測定法 (direct calorimetry) と間接熱量測定法 (indirect calorimetry) がある^{8~16)}。本稿では、直接熱量測定法を用いるヒューマン・カロリメータを直接ヒューマン・カロリメータ (direct human calorimeter), 間接熱量測定法を用いるヒューマン・カロリメータを間接ヒューマン・カロリメータ (indirect human calorimeter) とする。

直接熱量測定法は、ヒトのからだから放散される熱を直接測定する方法であり、一方、間接熱量測定法は、生物学的酸化過程で産生された熱量を測定する方法である^{8~16)}。

ここに、直接熱量測定法と間接熱量測定法を表す式がある。

$$\dot{M} = (\dot{R} + \dot{C} + \dot{K} + \dot{E}) + \dot{S} \cdots \cdots \text{式 ①}$$

$\dot{M}$: 代謝による熱産生

$\dot{R}$: 輻射による熱損失

$\dot{C}$: 対流による熱損失

$\dot{K}$: 伝導による熱損失

$\dot{E}$: 蒸発による熱損失

$\dot{S}$: 体蓄熱量

$\dot{M}$ は、間接熱量測定法で測定された熱量である^{9, 10, 12)}。

$\dot{R}$, $\dot{C}$, $\dot{K}$ 及び $\dot{E}$ は直接熱量測定法で測定される^{9, 10, 12)}。

熱蓄積 $\dot{S}$ は、環境により正 (体温上昇による熱獲得) または負 (体の冷却) のいずれかをとることになる^{9, 10, 12)}。

図1 エネルギーバランス、基質バランス及び熱バランスについての一般的な考え方の概略図¹²⁾

直接熱量測定法と間接熱量測定法によって測定されるエネルギーの形態は異なるが、安静時における熱の産生と放散が平衡する定常状態では、代謝による熱産生 ($\dot{M}$) と放散される熱量 $[(\dot{R} + \dot{C} + \dot{K} + \dot{E}) + \dot{S}]$ は同じエネルギー代謝量となることから、直接熱量測定法と間接熱量測定法の間には式①が成り立つ^{9,10,12)}。

式①は、体温の変化がないような理想的な条件で、熱獲得がなく熱産生と熱損失がゼロ（体蓄熱がゼロ）の場合に成り立ち、直接及び間接ヒューマン・カロリーメータで測定される熱量は同じ値となるが、短時間（24時間以内）の測定では体温の日内変動や体蓄熱の影響で同じ値が得られないことがある¹⁸⁾。しかし、24時間以上にわたり直接または間接ヒューマン・カロリーメータにより測定された総熱量は、両者間でほとんど差がみられないことが報告されている¹⁹⁾。

図1は、エネルギーバランス、基質バランス及び熱バランスについて、それぞれの考え方と違いについての概略を示したものである¹²⁾。

1. 直接ヒューマン・カロリーメータ

直接ヒューマン・カロリーメータについては、簡単に述べることにする。直接ヒューマン・カロリーメータによる熱量測定には、Atwater-Benedict型熱量計と熱勾配層型熱量計の2つが用いられており、両者とも被験者を一室に入れ、その時の室内の温度の上昇により人体から発生する放散熱量を測定する装置で、部屋は断熱材で覆われた密閉構造になっている^{9~12)}。

直接ヒューマン・カロリーメータは熱量測定に限定されることから、もっぱら体温調節の研究に利用されており、最近ではエネルギー代謝の研究に用いられることは

少ない^{8,9,11,12)}。しかし、熱バランスとエネルギー代謝との関連についての研究を行うために、直接ヒューマン・カロリーメータと間接ヒューマン・カロリーメータの両者の機能を併せもつものも作製されている^{18~21)}。このタイプのヒューマン・カロリーメータは、呼吸商が1.0以上、または0.7以下の定常状態での酸素消費量（または二酸化炭素排出量）のエネルギー当量の妥当性などを検討するために用いられている^{12,18~21)}。

なお、直接ヒューマン・カロリーメータ内に、テレビ、ラジオなどの電気製品を設置する場合には、これら電気製品から発生する熱量を考慮しなければならない¹¹⁾。

2. 間接ヒューマン・カロリーメータ

間接ヒューマン・カロリーメータは、room respiration calorimeter, whole-room calorimeter, respiratory chamber, whole body indirect calorimeter, whole-body chamber などとも呼ばれている。

間接ヒューマン・カロリーメータは、酸素濃度と二酸化炭素濃度の測定法において、化学的方法から電気的方法へと技術的な進歩がみられ、1980年初め頃から急速に普及するに至った^{9,22,23)}。そして、このような技術面での進歩や改善などにより、日常生活に近い状態での長時間にわたるエネルギー消費量やエネルギー基質の酸化量の測定が可能になった^{22,23)}。

(1) 間接ヒューマン・カロリーメータの基本原理

間接ヒューマン・カロリーメータは、温度や湿度などがコントロールされている密閉された部屋である（室内は若干陰圧になるように設計されているものが多い）。図2に間接ヒューマン・カロリーメータの概略図を示した²²⁾。このカロリーメータには、外気の取り入れ口と室

内の空気を外へ出す排出口が取り付けられている。取り入れられた外気は、カロリーメータから外へ出る前に室内で十分に混合された後、排気口に吸引されるようになっている。なお、カロリーメータ内への空気の流入量と排出量は同じになるようにコントロールされている。吸気口と排出口には流量計、酸素濃度と二酸化炭素濃度の分析のためのセンサー、温度センサー、湿度センサー、圧センサーなどが取り付けられ、カロリーメータ内への空気の流入量と排出量及び吸排気中の酸素と二酸化炭素も連続的に計測されようになっている。また、カロリーメータ内には室内でのヒトの動きを感知するレーダが設置され、室内での活動量を測定できるようになっている

(図3)^{23, 24)}。

間接ヒューマン・カロリーメータの精度は、まず初めに構造的に密閉性が確保されなければならないことはもちろんであるが、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り、それによって決定される。これが間接ヒューマン・カロリーメータの生命といえる^{11, 13, 25)}。なお、最近の間接ヒューマン・カロリーメータはコンピュータで制御され、ほとんどの部分が自動化されている¹¹⁾。

(2) 間接ヒューマン・カロリーメータ内付帯設備

図4は、著者が実際に被験者となり、間接ヒューマン・カロリーメータ (Lausanne大学) 内に入り、24時

図2 間接ヒューマン・カロリーメータの概略図²²⁾

図3 レーダー(ドップラー効果)により測定された身体活動(%)とエネルギー消費量(kJ/分)との関係²⁴⁾

注) 身体活動はレーダーで感知された動作時間の割合を示している。それぞれの点は15分間の平均値を示している。活動ゼロ時の回帰直線の切片は安静時エネルギー消費量の平均値 (EE rest) である。食事誘発性産熱 (DIT) はEE rest - 基礎代謝 (BMR) である。

図4 間接ヒューマン・カロリーメータ (Lausanne大学) によるエネルギー消費量の測定風景 (吉武, 1999)

間のエネルギー消費量を測定している風景を示したものである。最近の間接ヒューマン・カロリーメータはホテルのシングル・ルームのようになっており、広さが30m³のものもあるが、一般的には20m³前後のものが多く用いられている^{11, 23)}。間接ヒューマン・カロリーメータ内は、被験者が閉塞感を感じないように壁には大きなガラス窓がはめ込まれ、いつでも外の景色が見れるようになっている。また、カロリーメータ内には、トイレ、電話、インターホン、パソコン、洗面台、運動器具 (トレッドミル、自転車エルゴメータなど) などが設置されている^{11, 23)}。安全管理などの面から、被験者はインターホンや電話でいつでも外部と連絡がとれるようになっている。

間接ヒューマン・カロリーメータを用いてできるだけ正確なデータを得るためには、測定機器の精度だけでなく、居住性を高め、被験者の精神的負担を少なくし、できるだけ日常生活に近い状態で測定できるようにすることも重要である。

(3) エネルギー消費量とエネルギー基質の酸化量の測定

間接ヒューマン・カロリーメータ内の被験者のエネルギー消費量は、カロリーメータへの空気の入りと出口の酸素濃度の差及び二酸化炭素濃度の差並びにその時の換気量を測定し、これらを基に算出される^{8, 9, 11, 12, 25)}。まず、酸素消費量と二酸化炭素排出量を測定する。呼吸商が1.0以下では、二酸化炭素排出量は酸素消費量より少なくなるので、この時の酸素消費量の算出にはHaldane補正が必要となる。そして次に、酸素消費量、二酸化炭素排出量及び尿中窒素排泄量を基に、Weirの式からエ

表1 呼吸商に影響を及ぼす因子¹²⁾

1. 肺換気：過換気，換気過少
2. 栄養因子：高または低炭水化物食，高または低エネルギー食
3. 疾病因子：糖尿病など
4. 代謝因子：脂肪合成 (炭水化物→脂肪)
糖新生 (アミノ酸→グルコース)
ケトン体生成 (脂肪酸→ケトン体)
5. 心理的因子：不安，ストレス
6. 生理的状态：発育，妊娠など
7. 身体活動：運動のタイプ，時間，強度
8. 体組成：肥満またはやせ

ネルギー消費量を算出する。また、エネルギー基質 (炭水化物、脂質及びたんぱく質) の酸化量は、呼吸商からそれぞれ算出される。

間接ヒューマン・カロリーメータが直接ヒューマン・カロリーメータに比べてエネルギー代謝の研究において勝っている機能としては、エネルギー基質 (炭水化物、脂質及びたんぱく質) の酸化量の算出を挙げることができる^{8, 9, 11, 12, 22)}。間接ヒューマン・カロリーメータによる炭水化物、脂肪及びたんぱく質の酸化量は、二酸化炭素排出量と酸素消費量の比 (呼吸商) 及び尿中窒素排泄量から算出されることは述べたとおりである。しかし、呼吸商は表1に示されているような要因によって影響を受けるので、呼吸商から算出されたエネルギー基質の酸化量が低くまたは高く見積もられることがある (図5)^{12, 25)}。このことから、間接ヒューマン・カロリーメータによるエネルギー基質の酸化量を正確に測定するためには、測

図5 間接ヒューマン・カロリーメータにより見積もられる消失率と真の酸化率の区別¹²⁾

注) 代謝課程（脂肪合成，糖新生）により，間接熱量測定法では真のエネルギー基質を過大または過小に見積もることになる。

定前に食事に対する被験者の十分な適応期間を設けることが必要である¹²⁾。この場合，食事に含まれる栄養素の量を測定し，体重の変化がみられないようにすることが重要である¹²⁾。

一般に，間接ヒューマン・カロリーメータ内での行動は，一定のスケジュールの基に過ごすため，その時の睡眠，安静，活動時のエネルギー消費量が，無拘束で長期間（1日から数週間）連続的に測定できるようになっている（図6，表2）²⁶⁾。

3. 直接及び間接ヒューマン・カロリーメータの長所と短所

ここでは，直接及び間接ヒューマン・カロリーメータのそれぞれの長所と短所を述べることにする。

(1) 直接ヒューマン・カロリーメータ^{8, 9, 11~13)}

表3は，直接ヒューマン・カロリーメータの長所と短所を示したものである。直接ヒューマン・カロリーメータはいずれも測定の精度と確度は高く，信頼できるデータが得られる。しかし，直接ヒューマン・カロリーメータは高価で，装置の操作に高度で専門的な技術や知識が要求される。

直接ヒューマン・カロリーメータによる熱量測定では，熱量の測定前後で体温が同じである（体熱の蓄積がゼロ）場合，総体熱放散量は総体熱産生量と等しくなることから，正確な値（総体熱産生量）を得ることができ。しかし，1日の体温の変化には周期性がみられ，それに熱産生と熱損失が同調しないので，24時間より短い間の熱産生は，直接ヒューマン・カロリーメータでは正確に測定できない。

また，直接ヒューマン・カロリーメータ内で短時間の運動を実施した場合，総体熱産生量と総体熱放散量との間に時間的なずれが生じることから，両者の変化は必ずしも一致しない場合がある。これは，直接ヒューマン・カロリーメータでは体内に蓄積される熱量を正確に測定できないためである。また，直接ヒューマン・カロリーメータは，炭水化物，脂肪，たんぱく質のエネルギー基質の酸化量を測定することができない。

以上のことから，直接ヒューマン・カロリーメータは体温調節の研究に適した機器ではあるが，エネルギー代謝の研究用としては間接ヒューマン・カロリーメータに劣ることから，最近ではエネルギー代謝の研究に利用さ

図6 間接ヒューマン・カロリメータによるエネルギー消費量の測定例²⁹⁾

表2 間接ヒューマン・カロリメータでの日常活動

時 刻	活動時間	活動
20時00分～20時30分	30分	カロリメータの中へ入る。測定開始
20時30分～23時00分	2.5時間	自由時間（テレビ、ラジオ、読書）
23時00分～23時30分	30分	寝支度
23時30分～07時00分	7.5時間	睡眠
07時00分～07時30分	30分	起床（仰臥安静）
07時30分～08時00分	30分	身支度、洗顔
08時00分～08時30分	30分	朝食
08時30分～09時30分	1時間	自由時間（テレビ、ラジオ、読書）
09時30分～10時00分	30分	軽運動
10時00分～12時00分	2時間	自由時間（テレビ、ラジオ、読書）
12時00分～12時30分	30分	昼食
12時30分～13時30分	1時間	自由時間（テレビ、ラジオ、読書）
13時30分～14時00分	30分	軽運動
14時00分～15時00分	1時間	自由時間（テレビ、ラジオ、読書）
15時00分～15時30分	30分	ベッドの整理と折りたたみ
15時30分～16時30分	1時間	自由時間（テレビ、ラジオ、読書）
16時30分～17時00分	30分	軽運動
17時00分～18時00分	1時間	自由時間（テレビ、ラジオ、読書）
18時00分～18時30分	30分	夕食
18時30分～20時00分	1.5時間	自由時間（テレビ、ラジオ、読書）
20時00分		カロリメータを出る

れることが少なくなっている。

(2) 間接ヒューマン・カロリメータ^{8,9,11～13)}

表4は、間接ヒューマン・カロリメータの長所と短所を示したものである。間接ヒューマン・カロリメータによる熱量測定は、直接ヒューマン・カロリメータと同様に測定の精度と確度は高く、信頼できるデータを得ることができる。間接ヒューマン・カロリメータによるエネルギー消費量や基質の酸化量の測定原理は簡単である。しかし、装置の操作や価格は、直接ヒューマン・カロリメータほどではないが、それでも高度で専門的な知識や技術が必要とされ、装置も高価である。

間接ヒューマン・カロリメータが直接ヒューマン・カロリメータより優れている点を簡単に整理すると、次のとおりとなる。

① エネルギー消費量の経時変化をおおよそ5分間隔で観察できる（これは装置の精度がかなり高い場合に可能である）。

② 酸素消費量と二酸化炭素排出量を連続的に測定できることより、呼吸商からエネルギー基質（炭水化物、脂肪、たんぱく質）の酸化量を算出できる。

③ 直接ヒューマン・カロリメータに比べて部屋のサイズを広くとれることから、居住性が高く、室内での

表3 直接ヒューマン・カロリメータの長所と短所^{8,9,11~13}

長 所	短 所
<ul style="list-style-type: none"> ・測定精度が高い ・測定の確度が高い ・応答が速い ・直接に熱量(エネルギー)を測定できる ・正確な環境のコントロールができる 	<ul style="list-style-type: none"> ・装置が複雑である ・装置の設計が難しい(温度、湿度及び気流調節、気密性など) ・高価である(建設費用、維持費) ・飲食物、排泄物、照明、テレビなどから発生する熱影響を受ける(総熱量の約10%) ・消費されたエネルギー基質(炭水化物、脂肪)の量を測定できない ・外部になす仕事量を測定できない ・食事や運動による短時間のエネルギー消費量の変化を測定できない(体熱蓄積) ・人為的な環境である

表4 間接ヒューマン・カロリメータの長所と短所^{8,9,11~13}

長 所	短 所
<ul style="list-style-type: none"> ・測定原理が簡単である ・測定精度が高い ・測定の確度が高い ・応答が速い ・消費されたエネルギー基質(炭水化物、脂肪)の量を測定できる ・正確な環境のコントロールができる 	<ul style="list-style-type: none"> ・装置の設計が難しい(温度、湿度及び気流調節、気密性など) ・装置の性能を維持するために、高度な電気工学、機械工学的、コンピュータ技術などの知識や技術が必要である ・高価である(建設費用、維持費) ・人為的な環境である

活動が制限されることが少ない。

その他、前述したように、直接ヒューマン・カロリメータに比べて建設が容易で、価格が安い、などである。

以上より、間接ヒューマン・カロリメータはエネルギー消費量やエネルギー基質の酸化量を測定できることから、現在ではエネルギー代謝の研究にはもっぱら間接ヒューマン・カロリメータが用いられている。しかし、直接ヒューマン・カロリメータより部屋のサイズが大きいといっても、閉塞感を逃れることはできないのが現状であり、これを克服するには酸素濃度と二酸化炭素濃度の測定精度を向上させるなど、装置の改良や工夫が必要とされる。

Ⅲ. 間接ヒューマン・カロリメータを用いた最近の研究

これまで間接ヒューマン・カロリメータを用いた多くの研究が行われているが、ここでは個々の研究内容には触れず、研究項目と文献を紹介する。

間接ヒューマン・カロリメータの特徴を生かした肥満に関連する研究は多く行われており、その中でもPima Indianを対象にしたWeyerらの長期追跡調査にみ

られるように、興味ある研究結果が得られている^{27,28,29)}。また、これら以外にも、肥満遺伝子とエネルギー消費量との関係²⁹⁾、睡眠時及び安静時のエネルギー消費量の測定³⁰⁾、食事(食品構成の違い、エネルギー過剰または不足など)とエネルギー消費量との関係^{31~36)}、エネルギー消費量と加齢及び性差との関係³⁷⁾、幼児のエネルギー消費量³⁸⁾、妊産婦のエネルギー消費³⁹⁾、運動トレーニングのエネルギー消費量、及びエネルギー基質利用への影響^{40,41)}、疾病とエネルギー消費量との関係^{42~45)}、安静時エネルギー消費量測定法の研究・開発^{17,46)}等が報告されている。

なお、前述したように、我が国においては田中らの研究が行われており、スイスのLausanne大学に設置されている間接ヒューマン・カロリメータ(大きさ約30m³)を用い、Schutz教授と共同で日本人の基礎代謝量と1日の総エネルギー消費量の測定及び簡易エネルギー消費量推定法並びにその機器の研究開発(1999年から2001年までの予定)を実施している¹⁷⁾。

Ⅳ. おわりに

本稿では主に間接ヒューマン・カロリメータについ

での概略を述べた。間接ヒューマン・カロリメータを使った研究の歴史は古く、100年を経過しているが、その有用性は衰えていない。これは、2000年11月3、4日にオランダのマーストリヒトでヒューマン・カロリメータに関するワークショップ (Calorimetry 2000) が開催されることから明らかである。このワークショップでは、ヒューマン・カロリメータ (間接ヒューマン・カロリメータが主と思われる) を用いた研究だけでなく、ヒューマン・カロリメータと他のエネルギー代謝の研究手法とを組み合わせた新たな研究の発表が期待される。

ところで、健康と栄養に関しては、国立健康・栄養研究所の初代所長であった佐伯の言葉にあるように、「栄養のことは人が何かを知って居る様で何も知らない、何も知って居ない様で何かを知って居る」⁴⁷⁾ のが現状ではなからうか。これは、健康と栄養に関する研究の難しさを如実に語っていると思われる。国立健康・栄養研究所に間接ヒューマン・カロリメータが設置されたのを機会に、健康と栄養に関する研究の更なる進展が期待される場所である。

*

謝辞：本稿は、平成11年度厚生科学研究費補助金健康科学総合研究事業 (主任研究者：田中宏暁、エネルギー消費量の評価法及び基準値作成に関する研究) の一環として作成されたものである。

文 献

- 1) 吉池信男, 西 信雄, 松島松翠, 伊藤千賀子, 池田義雄, 桎原英俊, 吉永英世, 小倉 浩, 小峰慎吾, 佐藤祐造, 佐藤則之, 佐々木陽, 藤岡滋典, 奥 淳治, 雨宮禎子, 坂田利家, 井上修二: Body Mass Indexに基づく肥満の程度と糖尿病高血圧高脂血症, 日本肥満学会誌, **6**, 4~17 (2000)
- 2) Arner, P.: Obesity-A genetic disease of adipose tissue?, *Brit. J. Nutr.*, **83**, Suppl. 1, S9~S16 (2000)
- 3) Hill, J.O. and Melanson, E.L.: Overview of the determinants of overweight and obesity: current evidence and research issues, *Med. Sci. Sports Exerc.*, **31**, S515~S521 (1999)
- 4) Levine, J.A., Eberhardt, N.L. and Jensen, M.D.: Role of nonexercise activity thermogenesis in resistance to fat gain in humans, *Science*, **283**, 212~214 (1999)
- 5) 健康・栄養情報研究会編: 第六次改定日本人の栄養所要量—食事摂取基準— (1999) 第一出版, 東京
- 6) Durnin, J.V.G.A., Edholm, O.G., Miller, D.S. and Waterlow, J.C.: How much food does man require?, *Nature*, **242**, 418 (1973)
- 7) 齊藤慎一, 海老根直之, 島田美恵子, 吉武 裕, 田中宏暁: 二重標識水法によるエネルギー消費量測定 の原理とその応用—生活習慣病予防対策からトップスポーツ選手の栄養処方まで—, 栄養学雑誌, **57**, 317~332 (1999)
- 8) Jequier, E.: Long-term measurement of energy expenditure in man: direct or indirect calorimetry?, *In Recent Advances in Obesity Research*, III/Bjorntorp, P., Cairella, M. and Howard, A.N. eds., pp.130~135 (1981) John Libbey, London
- 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) 永坂鉄夫: 第2章エネルギー代謝, 新生理学大系 第22巻, pp. 35~47 (1987) 医学書院, 東京
- 11) Murgatroyd, P.R., Shetty, P.S. and Prentice, A.M.: Techniques for the measurement of human energy expenditure: a practical guide, *Int. J. Obes.*, **17**, 549~568 (1993)
- 12) Schutz, Y.: The basis of direct and indirect calorimetry and their potential, *Diabetes/Metabolism Reviews*, **11**, 383~408 (1995)
- 13) Simonson, D.C. and DeFronzo, R.A.: Indirect calorimetry: methodological and interpretative problems, *Am. J. Physiol.*, E399~E412 (1990)
- 14) Webb, P.: Human Calorimeters (1985) Praeger Publishers, New York
- 15) McLean, J.A. and Tobin, G.: Animal and Human Calorimetry (1987) Cambridge University Press, Cambridge
- 16) Busztein, S., Elwyn, D.H. and Kinney, J.M.: Energy Metabolism, Indirect Calorimetry, and Nutrition (1989) Williams & Wilkins
- 17) 田中宏暁, 吉岡真由美, 熊原秀晃, 進藤宗洋, 齊藤慎一, 吉武 裕: 加速度センサーを用いた簡易エネルギー推定法の精度—メタボリックチャンパー法との比較—, 第54回日本栄養・食糧学会大会講演要旨集, p. 28 (2000)
- 18) Garby, L.: Enthalpy changes and heart production induced by a meal, *Eur.J.Clin.Nutr.*, **43**, 637~639 (1989)
- 19) Dauncey, M.J.: Metabolic effects of altering the 24h energy expenditure in man, *Br.J.Nutr.*, **43**, 257~269 (1980)
- 20) Seale, J.L. and Rumpler, W.V.: Synchronous direct gradient layer and indirect room calorimetry, *J. Appl. Physiol.*, **83**, 1775~1781 (1997)
- 21) Dauncey, M.J., Murgatroyd, P. and Cole, T.J.: A human calorimeter for the direct and indirect

measurement of 24h energy expenditure, *Brit.J.Nutr.*, **39**, 557~566 (1978)

22) 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)

23) Ravussin, E., Lillinoja, S., Anderson, T.E., Christin, L. and Bogardus, C. : Determinants of 24-hour energy expenditure in man, *J.Clin.Invest.*, **78**, 1568~1578 (1986)

24) Jequier, E. and Schutz, Y. : Classical respirometry and doubly-labelled-water ($^2\text{H}^{18}\text{O}$) method : appropriate applications of the individual or combined techniques, *Proc.Nutr.Soc.*, **47**, 219~225 (1988)

25) Elia, M. and Liversey, G. : Energy expenditure and fuel selection in biological systems : the theory and practice of calculations based on indirect calorimetry and tracer methods, *In Control of Eating, Energy Expenditure and the Bioenergetics of Obesity/* Simopoulos, A.P. ed., pp.68~131 (1992) Karger, Basel

26) Rumpler, W.V., Seale, J.L., Conway, J.M. and Moe, P.W. : Repeatability of 24-h energy expenditure measurements in human by indirect calorimetry, *Am.J.Clin.Nutr.*, **51**, 147~152 (1990)

27) Weyer, C., Pratley, R.E., Salbe, A.D., Bogardus, C., Ravussin, E. and Tataranni, P.A. : Energy expenditure, fat oxidation, and body weight regulation : a study of metabolic adaptation to long-term weight change, *J. Clin. Endocrinol. Metab.*, **85**, 1087~1094 (2000)

28) Weyer, C., Snitker, S., Rising, R., Bogardus, C. and Ravussin, E. : Determinants of energy expenditure and fuel utilization in man : effects of body composition, age, sex, ethnicity and glucose tolerance in 916 subjects, *Int. J. Obes.*, **23**, 715~722 (1999)

29) Schrauwen, P., Xia, J., Bogardus, C., Pratley, R. E. and Ravussin, E. : Skeletal muscle uncoupling 3 expression is a determinant of energy expenditure in Pima Indians, *Diabetes*, **48**, 146~149 (1999)

30) Seale, J.L. and Conway, J.M. : Relationship between overnight energy expenditure and BMR measured in a room-sized calorimeter, *Eur. J. Clin. Nutr.*, **53**, 107~111 (1999)

31) Westerterp-Plantenga, M.S., Rolland, V., Wilson, S.A. and Westerterp, K.R. : Satiety related to 24 h diet-induced thermogenesis during high protein /carbohydrate vs high fat diets measured in respiration chamber, *Eur.J.Clin.Nutr.*, **53**, 495~502

(1999)

32) Westerterp, K.R., Wilson, S.A. and Rolland, V. : Diet induced thermogenesis measured over 24h in a respiration chamber : effect of diet composition, *Int. J. Obes. Relat. Metab. Disord.*, **23**, 287~292 (1999)

33) Murgatroyd, P.R., Golberg, G.R., Leahy, F.E., Gilsenan, M.B. and Prentice, A.M. : Effects of inactivity and diet composition on human energy balance, *Int. J. Obes.*, **23**, 1269~1275 (1999)

34) Diaz, E.O., Prentice, A.M., Goldberg, G.R., Murgatroyd, P.R. and Coward, W.A. : Metabolic response to experimental overfeeding in lean and overweight healthy volunteers, *Am.J.Clin.Nutr.*, **56**, 641~655 (1992)

35) Poppitt, S.D., Liversey, G. and Elia, M. : Energy expenditure and net substrate utilization in men ingesting usual and high amount of nonstarch polysaccharide, *Am. J. Clin. Nutr.*, **68**, 820~826 (1998)

36) Dulloo, A., Duret, C., Rohrer, D., Girardier, L., Mensi, N., Fathi, M., Chantre, P. and Vandermander, J. : Efficacy of a green tea extract rich in catechin polyphenols and caffeine in increasing 24-h energy expenditure and fat oxidation in humans, *Am. J. Clin. Nutr.*, **70**, 1040~1045 (1999)

37) Klausen, B., Toubro, S. and Astrup, A. : Age and sex effects on energy expenditure, *Am. J. Clin. Nutr.*, **65**, 895~907 (1997)

38) Cole, C.R., Rising, R., Hakim, A., Danon, M., Mehta, R., Choudhury, S., Sundaresh, M. and Lifshitz, F. : Comprehensive assessment of the components of energy expenditure in infants using a new infant respiratory chamber, *J.Am.Coll.Nutr.*, **18**, 233~241 (1999)

39) Butte, N.F., Hopkinson, J.M., Mehta, N., Moon, J. K. and Smith, E.O. : Adjustments in energy expenditure and substrate utilization during late pregnancy and lactation, *Am. J. Clin. Nutr.*, **69**, 299~307 (1999)

40) Klausen, B., Toubro, S., Ranneies, C., Rehfeld, J.F., Holst, J.J., Christensen, N.J. and Astrup, A. : Increased intensity of a single exercise bout stimulates subsequent fat intake, *Int.J.Obes.*, **23**, 1281~1287 (1999)

41) Morio, B., Montaurier, C., Pickering, G., Ritz, P., Fellmann, N., Coudert, J., Beaufriere, B. and Vermorel, M. : Effects of 14 weeks progressive endurance training on energy expenditure in elderly people, *Br.J. Nutr.*, **80**, 511~519 (1998)

- 42) Hugli, O., Schutz, Y. and Fitting, J.W. : The daily energy expenditure in stable chronic obstructive pulmonary disease, *Am. J. Respir. Crit. Care Med.*, **153**, 294~300 (1996)
- 43) Greco, A.V., Mingrone, G., Benedetti, G., Capriso, E., Tataranni, P. and Gasbarrini, G. : Daily energy and substrate metabolism in patients with cirrhosis, *Hepatology*, **27**, 346~350 (1998)
- 44) Stenlof, K., Johansson, J.O., Lonn, L., Sjostorm, L. and Bengtsson, B.A. : Diurnal variations in twenty-four-hour energy expenditure during growth hormone treatment of adults with pituitary deficiency, *J. Clin. Endocrinol. Metab.*, **82**, 1255~1260 (1997)
- 45) Stenlof, K., Grunstein, R., Hedner, J. and Sjostrom, L. : Energy expenditure in obstructive sleep apnea : effects of treatment with continuous positive airway pressure, *Am. J. Physiol.*, **271**, E1036~E1043 (1996)
- 46) Kistorp, C.N., Toubro, S., Astrup, A. and Sevendsen, O.L. : Comparison of resting energy expenditure measurements by ventilated canopy and by respiratory chamber, *Clin. Physiol.*, **19**, 344~347 (1999)
- 47) 柏崎 浩 : エネルギーの研究にエネルギーを, 民族衛生, **62**, 167~168 (1996)