

間接的熱量測定装置 Calorimet の精度について

安本和正* 稲田豊**

ABSTRACT

The Accuracy of an Indirect Calorimetric Instrument Calorimet

Kazumasa Yasumoto* and Yutaka Inada**

* Dept Anesthesiology, Showa University Faculty of Medicine

** Ohta General Hospital President

Calorimet is a system which measures $\dot{V}O_2$ by a closed circuit method and calculates energy expenditure. In this investigation we examined its accuracy by 3 different studies, (1) measurements of $\dot{V}O_2$ under artificial ventilation using a model lung, (2) comparison of $\dot{V}O_2$ by Calorimet with that by Douglas Bag Method in 10 healthy volunteers, (3) examination of variations in $\dot{V}O_2$ values in 16 preoperative patients (divided into a normal lung function and an abnormal lung function groups) calculating the point of coefficient of variation. The $\dot{V}O_2$ values by Calorimet in the model experiment were proved to be extremely accurate. In the study on the healthy volunteers, a highly correlative ($R=0.95$) significant linear equation was obtained by comparing the $\dot{V}O_2$ values by Calorimet with those by Douglas Bag Method. Regardless of lung function, Calorimet provides a coefficient of variation of approximately 4% and $\dot{V}O_2$ values with small variation. We conclude that Calorimet could obtain accuracy values, under both spontaneous breathing and artificial ventilation.

重症患者ならびに周術期の患者の管理における栄養管理の重要性が、近年とみに報告されている^{1)~3)}。適切な栄養管理を行うには、まず第一に患者が必要としているカロリー量を正確に把握しなくてはならない。しかし、最近まで患者のカロリーの必要量をルチーンに知る唯一の方法は、Harris-Benedictの予測式⁴⁾を用いて計算するだけであった。しかし、病的状態ではエネルギーの必要量は著しく変動するにもかかわらず、予測式において用いられている変数は年齢、体重、身長⁵⁾の3者だけであるため、重症例では上記の予測式より得られた値と実際のエネルギー消費量とは大

きく異なることが知られている⁵⁾⁶⁾。従って、患者の病状に合わせて補正する予測式を Wilmore⁷⁾が試作しているが、その式から得られた値が個々の症例の必要量に常に一致するとは考えにくい。

従って、栄養管理を合目的に実施するためには、間接的熱量測定法を実施し、すなわち呼吸ガスを分析することにより酸素消費量と炭酸ガス産生量とを測定して、これらの値より間接的に個々の患者のカロリー消費量を算出しなくてはならない。しかし、酸素消費量はたかだか 250 ml/min と極めて少量で、通常⁸⁾の分時換気量の 5% にあたるに過ぎず、誤差範囲内である。そのため、酸素消費量を測定するには、精度の高い換気量計と安

* 昭和大学医学部麻酔学教室

** 太田総合病院附属西ノ内病院病院長



図 1 Calorimet の外観

定性の良いガス分析装置の設置が不可欠となる。

閉鎖回路系を用いて呼吸に伴う回路内容量の推移を測定すると、酸素消費量を比較的簡単に知ることが可能であり、その際には通常肺気量分画を測定する Benedict Roth 型スパイロメータを用いてきた。しかし、本装置は自発呼吸下でしか使用することができない上に、原理は簡単であっても、なかなか安定した値を得にくいという欠点を有している。

間接的熱量測定装置 NMI 社製 Calorimet は、閉鎖呼吸回路系により酸素消費量を測定しているが、従来用いていた Benedict Roth 型のスパイロメータとは異なり、人工呼吸下においても使用することが可能である。

ここに本器の概要を紹介するとともに、酸素消費量の測定値を検討することによりその精度を検定したので報告する。

1. Calorimet の測定原理

図 1 および図 2 に Calorimet の外観の写真および内部構造を示した。本器は閉鎖呼吸回路を有しており、回路内のガス量の推移を連続して把握することにより、酸素摂取量を測定する。Calorimet の主な構成要素は、ベローズ、内部に据え付けた密封の圧チャンバー、そして炭酸ガス吸着装置などである。患者が呼吸すると、ベローズは

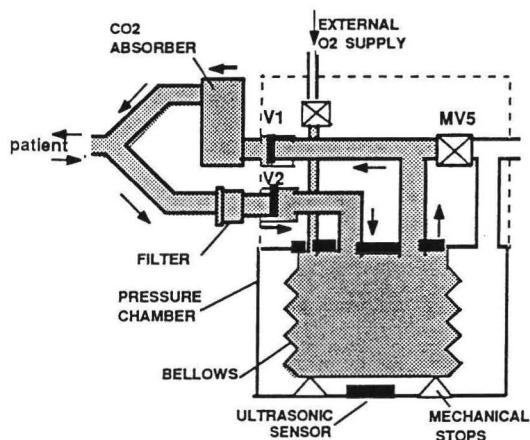


図 2 Calorimet の内部構造

呼吸に一致して上下に移動する。患者が産生した炭酸ガスはすべて炭酸ガス吸着装置によって取り除かれるため、閉鎖回路内のガス量は、患者が消費した酸素の量だけ減少する（従来の Benedict Roth を用いた方式では、この減少量を測定することにより酸素消費量を求めていた）。従って、一呼吸ごとにベローズの容量が少なくなるため、呼吸により上下運動していたベローズの底部（ターニングポイント）が段々上方へと移動する。呼吸により生じるベローズの位置（高さ）の推移は、ベローズの真下に設置してある超音波センサーによって常時監視されており、ベローズの位置が上方へ偏位すると、位置を是正するために、すなわち、最初の位置までベローズが低下するように、呼吸回路内へ患者が摂取した酸素量と同量の酸素が、外部装置から充填される（図 3）。従って、設定時間内にベローズ内へ実際に送りこまれた酸素の量は、患者が消費した平均酸素量と一致する。この外部回路よりの酸素供給量を記録することにより、酸素消費量を算出している。

人工呼吸下の患者に対しては本システムは、所謂 bag in a bottle の原理に基づいて作動する（図 4）。すなわち、人工呼吸器からの送気によってチャンバー内の圧が高まると、その圧によってベローズが押し上げられるため、ベローズ内のガスが気道内へ押し込まれ吸気となる。このようにして、閉鎖呼吸回路があらゆる呼吸モードにおいても維持されるため、自発呼吸下だけでなく人工呼

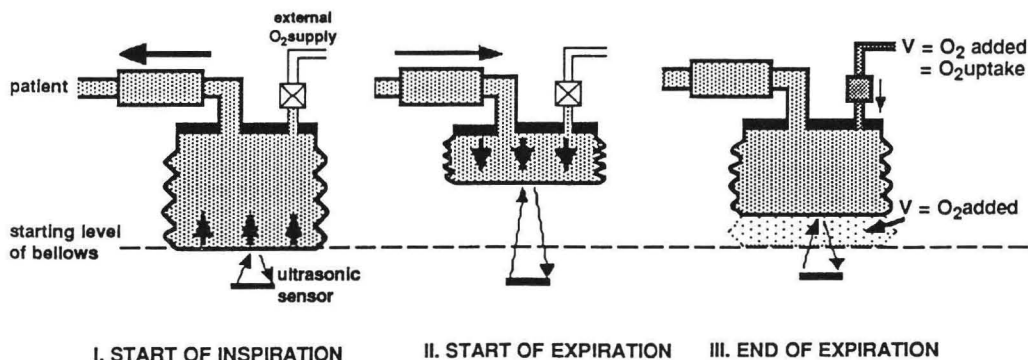


図 3 Calorimet による酸素消費量の測定原理

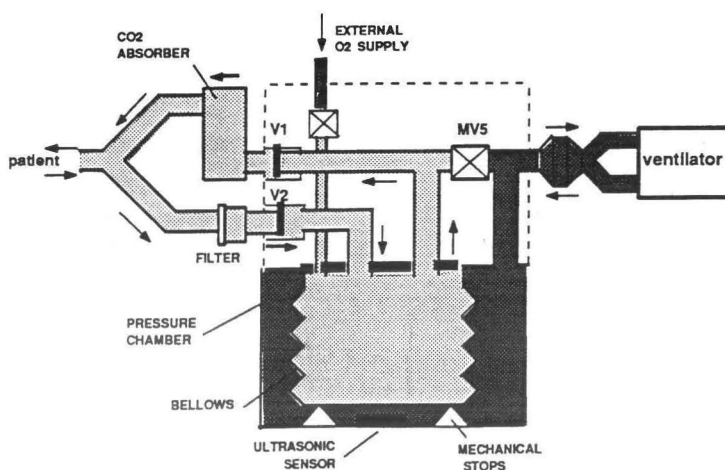


図 4 Calorimet による人工呼吸中の酸素消費量の測定原理

吸下においても、 FI_{O_2} を変更することなく酸素消費量を連続して測定することができる。

酸素消費量を測定すると、de Weir の式を簡略化した式により安静時エネルギー消費量 (REE) を計算する。その際に必要とされる RQ 値は、測定開始前または終了時にあらかじめ 0.7 から 1.0 の範囲で入力する。

$$REE = 1.44(3.941 \times \dot{V}O_2 + 1.106 \times \dot{V}CO_2) - 22.17 \text{ (UN)} \cdots \text{de Weir の式}$$

REE = 安静時エネルギー必要量 (kcal/day)

$\dot{V}O_2$ = 酸素消費量 (ml/min)

$\dot{V}CO_2$ = 炭酸ガス産生量 (ml/min)

UN = 尿素窒素排泄量 (g/day)

本器では炭酸ガス産生量 ($\dot{V}CO_2$) を測定する

ことはできないが、 $\dot{V}CO_2/\dot{V}O_2 = R$ であり、 $\dot{V}CO_2 = R \times \dot{V}O_2$ となるため、その値を代入し、更に尿素窒素を除去すると、de Weir の式は下記のごとく変形する。

$$REE = 1.44 \dot{V}O_2 (3.94 + 1.06RQ)$$

なお、人工呼吸下では、一回換気量が 100 ~ 2,000 ml の範囲で測定でき、小児から成人まで使用することが可能である。

2. 研究方法

1) モデル実験における精度の検定

精度の検定を以下のような実験系を作成して行った (図 5)。5 l の呼吸嚢をモデル肺として Calorimet に接続し、人口呼吸器により換気 ($V_T = 500 \text{ ml}$ $f = 15/\text{min}$) を行ったが、流量計な

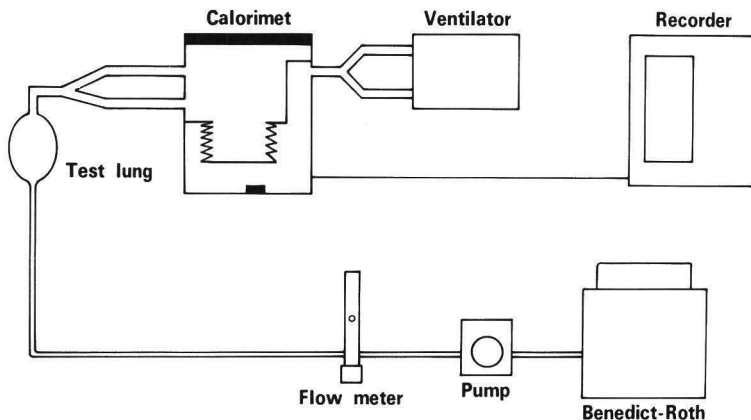


図 5 テスト肺による Calorimet の精度の検討実験系

らびにポンプを用いて、呼吸囊内のガスを一定量連続して吸引した。この採取量をスパイロメータに接続して連続測定し、STPD に換算した。この呼吸囊より吸引したガス量は実験系においては酸素消費量となるため、Calorimet より得られた酸素消費量と比較検討した。

なお、呼吸囊よりの吸引ガス量は 156 ないし 623ml/min であり、合計 8 ポイントにおいて両者の値を比較した。

2) 臨床実験

(1) ダグラスバック法との比較

本器は閉鎖回路系を用いているため、他の装置を用いて同時に酸素消費量を測定することは困難である。従って、25 ないし 38 歳の健康成人 10 名を対象として、本器とダグラスバック法により交互に酸素消費量を測定し、両者の値を比較した。

なお、ダグラスバックの容量は 50l とし、Hans Rudolph 社製の一方弁を用いて呼気ガスを採取し、Perkin Elmer 社製質量分析装置によりガス濃度を測定した。

(2) 測定値の安定性の検討

本器は測定した酸素消費量値を 5 呼吸ごとに平均して表示しており、得られた値にはバラツキが存在する。このバラツキの程度を検討することを目的として、術前肺機能検査を施行した 16 例を対象として、測定値が比較的安定しはじめてから 30 呼吸における酸素消費量（その間に表示され

た値は 6 コ）の変動状態を、バラツキ度を示す変動係数（coefficient of variation: CV）を、下記の式により算出して検討した。

$$CV(\%) = \text{標準誤差} \div \text{平均値} \times 100$$

次いで、対象を肺機能正常者と異常者（% 肺活量 < 80%，または一秒率 < 70%）とに分けて（それぞれ 8 例ずつ）バラツキ度を比較した。

臨床検討に当たっては、正確な酸素消費量を得るために、測定前 2 時間は経口摂取を中止し、30 分前より仰臥位にて安静を保った。ただし、中心静脈栄養を行われていた例では、点滴量を一定に維持して測定を実施した。

推計学的検討には最少 2 乗法の公式を用い、 $P < 0.05$ をもって有意差ありと判定した。

3. 結 果

1) Calorimet より得た酸素消費量と、スパイロメータにより測定された採取ガス量（実験系における酸素消費量）との関係を図 6 に示したが、両者は近似しており、両者間には下記に示す推計学的に有意な一次式を得た（ $P < 0.001$ ）。

$$Y = 0.87X + 12.1 \quad (R = 0.9996)$$

ただし、 $Y = \text{Calorimet より得た } \dot{V}_{O_2}$

$X = \text{スパイロメータの採取量}$

2) Calorimet とダグラスバック法とにより測定した酸素消費量との関係を図 7 に示したが、両測定法により得た酸素消費量は近似し、両者の間には推計学的に有意な下記の一次式を得た（ $P <$

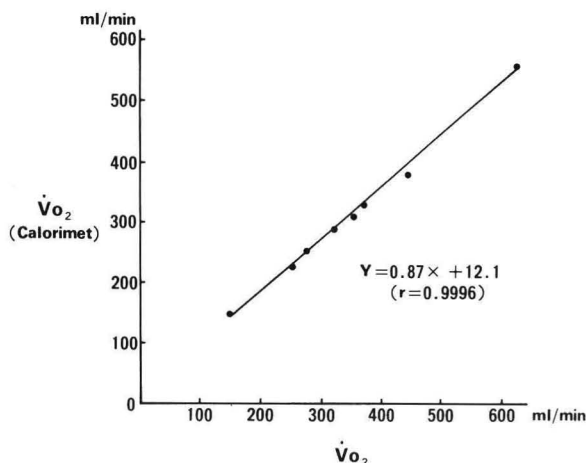


図 6 モデル実験における Calorimet より得た酸素消費量とスパイロメトリーから得たガス吸引量との関係

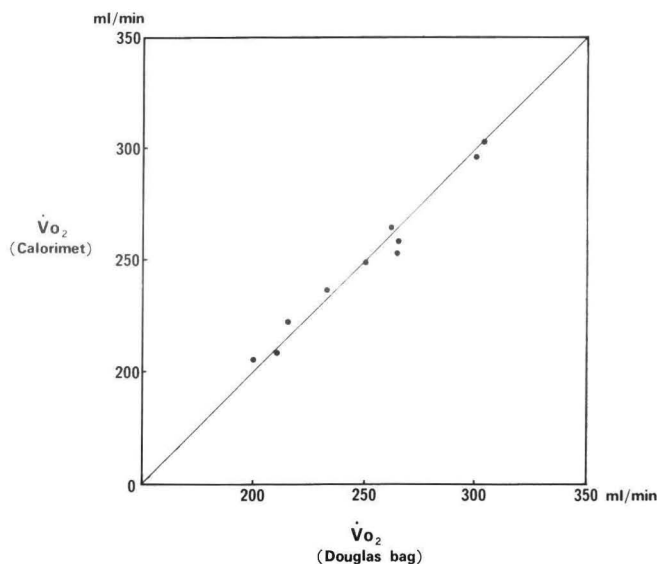


図 7 Calorimet とダグラスバック法による酸素消費量の関係

0.01)。

$$Y = 0.89X + 25.34 \quad (R = 0.9463)$$

ただし、 $Y = \text{Calorimet}$ より得た $\dot{V}O_2$

$X = \text{ダグラスバック法より得た } \dot{V}O_2$

3) 測定値の安定性の検定結果を表 1 に示したが、変動係数の平均値は肺機能正常群では 4.20%，異常群では 4.21% と、両群の値はほぼ同じであった。しかし個々の症例における変動係数は、肺機能正常群では 2.6 ないし 8.6% へ、一方異常群では 2.0 ないし 6.0% へと、それぞれ分

布しており、肺機能正常群内に安定性の悪い例が認められた。

また両群において、安定した酸素消費量値を得られ始めるのに要する時間は 5 ないし 6 分であったが、肺機能異常群のほうが多少時間を要した。

4. 考 察

栄養管理の重要性については既に諸家の意見が一致しており、Mullen ら²⁾は術前より十分に栄養を管理された例では、栄養状態が不良な例に比

表 1 肺機能正常群と異常群における年齢、身長、体重、%VC、FEV_{1.0}%, 変動係数, 安定した $\dot{V}O_2$ を得る時間などを示す

group	N	Age (year)	Ht (cm)	Wt (kg)	%VC (%)	FEV _{1.0} % (%)	$\dot{V}O_2$ (ml/min)	CV (%)	TOSD (sec)
NPF	8	63±4	157±3	63±4	111±5	78±1	257±4	4.20±1.71	316±99
APF	8	55±6	161±1	59±2	104±5	62±1	245±4	4.21±1.72	352±112

NPF：肺機能正常群, APF：異常群

(Mean±SE)

して、術後合併症は 2/5 へ、重症敗血症は 1/6 へ、更に死亡率は 1/5 へそれぞれ有意に減少したと報告している。拡大膀胱摘出術を施行した 35 例を対象として、経口摂取を行い得ない術後 1 週間を、5% 糖水および電解質液により管理された群と、予測カロリー消費量の 1.3 ないし 1.6 倍のカロリー量を有する TPN を投与した群とに分けて、術後の経過を観察した Askanazi ら³⁾によれば、TPN 群では入院期間が通常輸液群の 2/3 と、少なかったという。このように栄養の供給を十分に行うと、術後の経過は良好であるという報告が散見されるが、どの程度カロリーを投与すべきであるかの判断が重要である。Elwyn⁹⁾は各疾病におけるエネルギー消費量と basal metabolic rate (BMR) との関係を検討し、重症感染症では約 50%, また 3 度熱傷が対表面積の 20% 以上存在すると 50 ないし 110% も、エネルギー消費量が BMR より増加することを報告している。著者も術後の患者における両者の関係を検討したが、BMR とエネルギー消費量とが大きく解離する例を認めている⁹⁾。

上記の点を解決するためにカロリー消費量を過大評価して、カロリーをある程度多く投与した試みもあるが、過剰にカロリーが与えられると、多彩な障害が各臓器において発生することもよく知られた事実である¹⁰⁾¹¹⁾。

基礎エネルギー消費量を算出するのに用いられてきた Harris-Benedict の式では、前述のように用いている因子は三つしかないため、① 体温の影響を加味できない、② 年齢が高くなると年齢による差し引きが多くなり、under estimate する可能性がある、③ 急性の重症例では体重の変動が著しい、などの問題点を有することが指摘されている。そのため、個々の症例においてカロ

リー消費量を正確に把握することが望まれる。生体よりの熱量を直接測定する直接熱量測定法を行えば、正確にカロリー消費量を知ることができるが、装置が大規模で、高値であり、その上水蒸気の潜熱を測定するシステムが必要とされるため、臨床上の実施は難しい。従って、呼気ガスを分析することによりエネルギー消費量を算出する間接的熱量測定法が普及してきた。前述のように、同法を施行する際には正確な酸素消費量の測定が不可欠である。従って、本研究では酸素消費量の値を検討することより Calorimet の精度を検定した。

酸素消費量測定法には、大きく分けると、オープン方式と閉鎖回路式の二つがある。前者では、吸気呼気ガス濃度ならびに流量を連続して測定し、演算することにより酸素消費量を知り得るため、算出された値が正確で、かつ連続測定が可能であるといわれているが、精度の高い換気量測定装置とガス分析装置の両者の設置が不可欠である。また、測定機器の管理には細心の注意が必要であり、F_IO₂ の変動に対して、用いる換気量計の較正が必要である。従って、40% 以下の酸素濃度下では正確な値を得ることができるが、40 ないし 60% では精度は低下し、60% 以上では酸素濃度の測定誤差が増大するため、正確な値を得ることは極めて難しいと言われている。

一方、閉鎖回路方式では精度の高いガス分析装置ならびに換気量計を必要としないため、設備も簡単で測定も実施しやすいが、① 精度に問題がある、② 連続測定が不可能、③ 測定期間中は F_IO₂ を一定にしなくてはならない、④ 人工呼吸中の測定は不可能、などいくつかの欠点を有しており、人工呼吸下に管理されることが多い重症患者における測定は不可能とされていた。

従来使用されていた閉鎖回路により酸素消費量を測定する機器では、回路内で消費される酸素量を直接計測していたが、この方法では連続測定は不可能である（ある程度長い期間測定したいならば、大きなチャンバーが必要）。Calorimetは測定するパラメータを消費量より供給量に変えたことによりこの問題を解決した。

今回の検討により、Calorimetは自発呼吸ならびに調節呼吸の両条件下において高い精度で酸素消費量を連続して測定できることが判明した。Gedeonら¹²⁾は、健康成人にエルゴメータを用いて軽い運動を負荷し、酸素消費量を上昇させることにより、190ないし870 ml/minと著者らの検討より広い範囲において本器の精度を確認している。

しかし、閉鎖回路方式では一方弁を用いるため回路内に抵抗が生じ、肺機能障害を有する例では、測定値の安定を得にくいことが危惧される。この点を明らかにするために、変動係数を算出したところ、肺機能障害者においても安定性の高い測定値を得られることが示唆された。しかし、今回の肺機能異常例の平均一秒率は $62.6 \pm 1.2\%$ と、軽度の機能障害例が対象であったため、今後はより機能低下の強い例における検討が必要と思われる。いずれにせよ本研究より、測定値が安定していること、また安定した値を得るのに要する時間が5ないし6分で短いことなどが明らかになり、閉鎖回路を測定原理とした機器が有していた欠点を、本器は解消したと思われる。

本器はオープン方式ではないため、炭酸ガス産生量を同時に測定することができない。従って、エネルギー消費量を算出する際に必要となる炭酸ガス産生量は、前述のように予測したRQ値より演算して求めた仮の値を代入しており、このため得られたエネルギー消費量値に誤差が生じる可能性がある。しかし、酸素消費量を250 mlと仮定し、次いで、RQを0.85と正常、0.7と低下、反対に1.0と上昇した際のエネルギー消費量をde Weirの変形式を用いて算出すると、エネルギー消費量はRQにより下記のように変動する。

RQ	REE (Cal)
0.7	1698

0.85	1758
1.0	1818

RQが0.7ないし1.0と比較的大きく逸脱している時に、仮に0.85と仮定して計算しても、エネルギー消費量の誤差はわずか3.5%である。従って、RQを直接測定しなくともエネルギー消費量値にそれほど大きな誤差は生じないと思われる。

間接的熱量測定装置Calorimetの精度を酸素消費量により検討し、本器より得た値の精度の高いことならびに安定性の良い事などを明らかにした。

本研究は文部省科学研究助成（課題番号62570709）により施行した。

(1990. 7. 3受)

文 献

- 1) Bartlett RH, Dechert RE, Mault JR, et al : Measurement of metabolism in multiple organ failure. Surg 92 : 771-779, 1982
- 2) Mullen JL, Buzby GP, Matthews DC, et al : Reduction of operative morbidity and mortality by combined preoperative and postoperative nutritional support. Ann Surg 192 : 604-613, 1980
- 3) Askanazi J, Starker PM, Olsson C, et al : Effect of immediate postoperative nutritional support on length of hospitalization. Ann Surg 203 : 236-239, 1986
- 4) Black GL, Bistrian BR, Maini BS : Nutritional and metabolic assessment of the hospitalized patient. JPEN 1 : 11-22, 1977
- 5) Feuer ID, Mullen JL : Bedside measurement of resting energy expenditure and respiratory quotient via indirect calorimetry. Nutr Clin Pract 43 : 49, 1986
- 6) 島田康弘：人工呼吸と栄養管理. 人工呼吸 2 : 10-18, 1985
- 7) Wilmore DW : the metabolic management of the critically ill. New York, Plenum Press 1970
- 8) Elwyn DH : Nutritional requirements of adult surgical patients. Crit Care Med 8 : 9-20, 1980

- 9) 安本和正：術後の栄養管理と肺機能. 人工呼吸 5 : 69-73, 1988
 - 10) Manns S, Westenskow DR, Houtchens BA : Measured and predicted caloric expenditure in the acutely ill. Crit Care Med 13 : 173-177, 1985
 - 11) Quebbeman EJ, et al : A re-evaluation of energy expenditure during parenteral nutrition. Ann Surg 195 : 282-286, 1982
 - 12) Gedeon A, Lindblad LE, Mebius C, et al : A New device for energy expenditure measurements. VII European Congress of Anaesthesiology Abstract I p 155, 1986
-