

● 解 説 ●

代謝量のモニタリング：重症患者の消費エネルギー測定法

海塚安郎

キーワード：間接熱量計，投与エネルギー量設定，生体侵襲，異化亢進

はじめに

どのように消費エネルギーを測定するのかを解説する前に、確認のため、どうして呼吸管理を必要とする重症患者で「代謝量のモニタリング」をする必要があるのかについてまず説明する。そのうえで、各種測定法と、その中で臨床現場において唯一使用可能な間接熱量測定法（indirect calorimetry：IC）について、その原理、得られたデータの解釈、臨床応用などについて概説する。

I. 重症患者の代謝動態と栄養管理

侵襲時、消費エネルギーを測定した患者管理法が、より望ましいと考えられる背景を列記する。

1. 侵襲と生体反応

外傷、病原微生物、外科手術などの生体に加わる侵襲に対して、障害が発生した局所から全身に情報が伝播し、生体恒常性維持を図るための各種反応が連携し連続して起こる。表1に示したような反応系であり、それを全身性炎症反応症候群（systemic inflammatory response syndrome：SIRS）として認識する。その中には、代謝系の反応も含まれている。

さらに、より具体的なイメージを喚起するために、呼吸不全時の代謝反応の進展を模式図に示した（図1）。挿管下人工呼吸管理された鎮静中の患者の体内でもこ

表1 侵襲時生体反応

1. **神経・内分泌系**：アドレナリン、ノルアドレナリンなどのカテコールアミン、コルチゾール、副腎皮質刺激ホルモン（ACTH）、グルココルチコイド、成長ホルモン（GH）、グルカゴン、抗利尿ホルモン（ADH）、レニン、アルドステロン、エイコサノイドの産生亢進
2. **免疫系**：リンパ球、マクロファージ、好中球などの免疫細胞からサイトカインを中心とする炎症性メディエーターが産生（各種インターロイキン、インターフェロン、NFκB）されサイトカインネットワークが働く
3. **代謝系**：水分電解質貯留、エネルギー代謝亢進（内因性エネルギーの利用）、糖新生・糖利用障害、タンパク異化、脂質異化
4. **循環系**：頻脈、末梢血管抵抗増大、心収縮力増大（いわゆる hyperdynamic state）
5. **その他**：尿量減少、凝固亢進、広義の bacterial translocation 発生

侵襲（stress）時の生体恒常性維持のための全身反応。侵襲の種類とは無関係に生体内の各系が反応する。各反応系は相互に関連している。原因および表現型を列記する。

のような反応が進展し、場合によってはそれが生体に不可逆かつ不利益な結果をもたらす可能性があることを認識する必要がある。

2. 侵襲下における代謝栄養管理

近年、ICU入室を必要とするような重症患者に対して代謝栄養療法の重要性は広く認識されている。入院時栄養評価、早期経腸栄養、血糖値管理が基本である。

重症患者の栄養管理全般に関しては、本会発行の『急性呼吸不全による人工呼吸患者の栄養管理ガイドライン』¹⁾を参考にされたい。

臨床の場において栄養療法を行う場合、開始時期、

製鉄記念八幡病院 救急・集中治療部

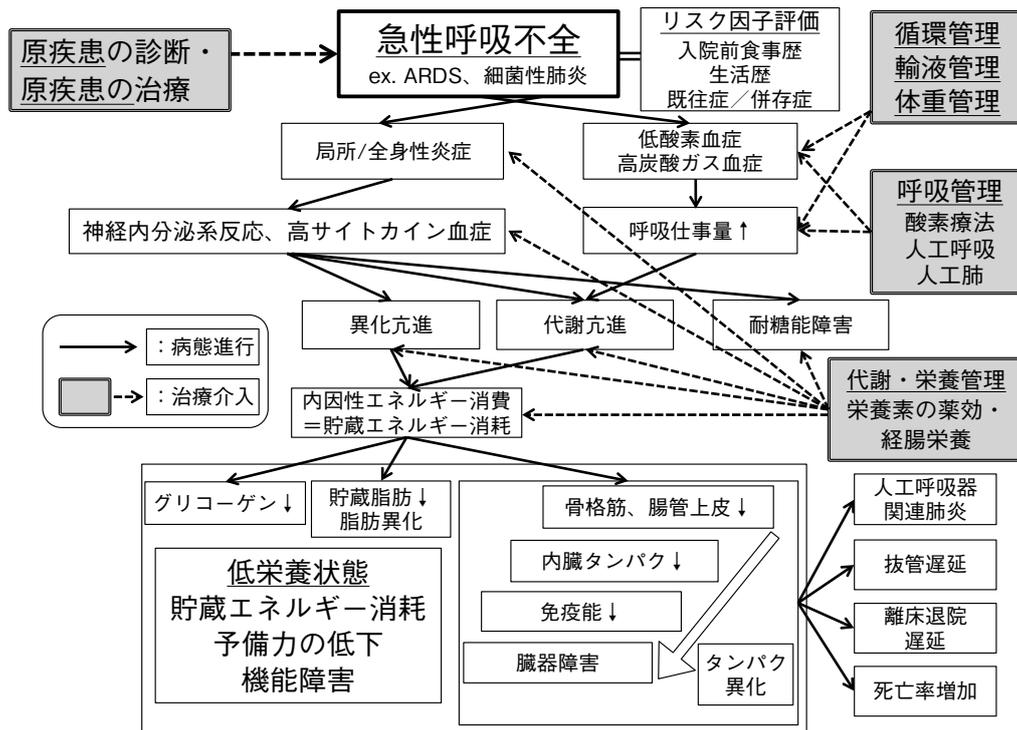


図1 呼吸不全時の代謝反応および栄養障害の進展

表2 侵襲下栄養療法時の決定事項とその優先順序

<p>1. アセスメント：</p> <p>a) 病歴（現病歴、既往歴、手術歴など）、栄養歴（食欲、食事内容、体重変化、消化器症状、嗜好、食物アレルギーなど）、身体診察（筋量、浮腫、腹水など）、身体計測（身長、体重、BMI、上腕周囲長など）、身体機能評価（呼吸機能、嚥下機能、ADLなど）</p> <p>b) 測定データ（血液生化学データ、間接熱量値、体重の変化）；繰り返し測定</p> <p>以上のデータから各種栄養評価スコアを用いて栄養リスクの有無、程度を判定</p> <p>2. 積極的栄養介入の適応：栄養リスク、疾病の侵襲度・持続から栄養介入の時期、強度、リスクを決定</p> <p>3. 開始時期、投与方法（ルート）の検討：早期経腸栄養の可否（循環/腸管機能評価、チューブ先端；胃内 or 空腸内）、静脈栄養（開始時期、ルート；末梢 or 中心静脈、SPN）</p> <p>4. 投与エネルギー量設定：推算式/間接熱量測定からの設定、漸増法による投与計画（急性期の過剰栄養回避、累積エネルギー喪失値の勘案）</p> <p>5. 組成（糖質、脂質、蛋白質、ビタミン、ミネラル、水分）設計：適合栄養剤、輸液製剤、病態別栄養剤の選択</p> <p>6. 特殊栄養素の選択：グルタミン、アルギニン、n-3系脂肪酸、核酸、微量元素等の栄養素、含有栄養剤投与</p>

アセスメントは、入室時に初回を行い、以後栄養介入後も繰り返し実施し、効果判定、栄養療法の変更を行う。
1. から 6. に順を追って決定してゆくことが肝心である。

投与ルート、投与エネルギー量、組成を決定する必要がある（表2）。

3. 投与熱量の決定：推算式の利用と問題点

栄養療法時の決定事項のうち、投与エネルギーの設定には消費エネルギー測定が参考になるが、通常は推算式を用いて投与エネルギーを決定する。

本邦では、主に簡易推算式（25～30kcal/kg/day）、Harris-Benedict 式²⁾ から基礎代謝量（basal energy

expenditure：BEE）を求め、それに活動係数やストレス係数を掛けて必要エネルギーを算出する（Longの方法³⁾ 算出法が用いられる。BEEにストレス係数を上乘せする根拠は、上述のように、侵襲下生体の消費エネルギーが、神経内分泌系、免疫系の賦活化が起こり生体恒常性の維持目的で合目的的に増加するので、それに見合うだけの熱量の増加が必要であるとの考えに基づいている。しかし、この係数自体の決定は経験によるところが多い。さらに、いずれの推算式もあくまで

平均値であり、複雑な病態、侵襲に対する生体反応の個別性、侵襲の持続期間、治療に伴う新たな侵襲（熱傷包交時の疼痛、カテーテル感染症など）による代謝変動などは考慮されない。

4. 侵襲下栄養療法の問題点

重要であるはずの急性期栄養療法のエビデンスは思いの外脆弱である（ガイドライン内の各項の解説参照）。現状において重症病態における問題点を略記する。

- 1) 簡便に測定でき、予後を推定できる適切な栄養評価指標が存在しない^{4,5)}
- 2) 個々の症例に最も望ましい投与エネルギーは明確ではない：over-feeding が好ましくないことは一定のコンセンサスがある。逆に under-feeding で栄養療法を行った場合、日々の栄養負債（消費エネルギー>投与エネルギー量）、栄養素負債の累積が一定以上になると予後が悪化するが、その累積値も個々の症例より異なっている。
- 3) 侵襲下では代謝動態が変動し異化亢進といわれる病態となり、体内貯蔵エネルギーが優先的に利用されるが、その値は知り得ない。
- 4) 特定の栄養素が予後を改善するエビデンスはない：いくつかの大規模研究^{6~8)}での検討はあるが、いずれの栄養素も予後を改善するといった、一定の結論は出ていない。

以上の重症病態における栄養療法の現状、問題点を踏まえ、消費熱量測定法とその実際を以下に概説する。

II. 消費エネルギー測定法

重症患者が現在どのような代謝状態であるのか、継続的にどのようにエネルギー消費が変化しているのかを知るには、個々人のエネルギー消費量(energy expenditure: EE)を測定する以外にはない。これは、消費エネルギー測定は代謝栄養の動的評価指標の側面を持つことになる。

EE 算定は、その原理により直接熱量測定法と間接熱量測定法に大別される。

直接熱量測定法は、消費されたエネルギーが熱となって放散されるため、その熱量を直接的に測定することにより EE を知る方法である。具体的な測定法は、特殊な専用の実験室内で人がその目的に応じて生活、運

動などを行い、これによって放出された熱を周囲に埋め込まれた水管で吸収し、この水温の差から熱量を測定するものがある。非常に大がかりな装置であり、臨床に応用することは無理なことは当然として、生理学検査としても現在ではほとんど使用されない。

一方、間接熱量測定法には IC と二重標識水 (doubly labeled water : DLW) の2つがある。

IC は、生体がエネルギーを生成する際に食物から摂取した栄養素、もしくは、グリコーゲン、脂肪、内臓蛋白などの体内構成物が酸素と化学反応を起こし、二酸化炭素を産生するという生理的なメカニズムを利用して、呼気ガス分析により酸素摂取量および二酸化炭素産生量、加えて尿中窒素排泄量を正確に測定することで、高精度（1%以下の誤差）で EE を算出すること、この測定機器を間接熱量計 (indirect calorimetry) という。

医療においては、一部の分野（外科代謝栄養、小児育成医療、熱傷・外傷、内因性重症疾患など）で主に研究目的で用いられてきたが、臨床現場で一般的に用いられるまでには至っていない。その理由は、臨床の現場では測定（機器の暖気、校正、測定条件）が煩雑であり、測定機器が高価、かつ得られたデータの解釈や有効な臨床応用法が確立していないなどの理由からである。

もう1つの DLW 法は、炭水化物と脂肪が体内で燃焼した場合に生成する水と二酸化炭素の比率が異なることを利用し、DLW（水を構成する酸素と水素の原子が通常のもので安定同位体 (¹⁸O, ²H) で作成) を内服し、体内での標識の稀釈速度から間接的に EE を求める⁴⁾。測定は水を飲むことと定期的な採尿だけであるが、標識水が高額であることに加え、分析完了までに時間を要することで即時のフィードバックはできず、臨床現場での利用は現実的でない。

以上から、臨床の現場で利用可能な測定法は、ICに限られる。

III. 間接熱量測定 (indirect calorimetry)

1. 測定原理と計算式、呼吸商

生体は、有機燃料（炭水化物、脂肪、タンパク質）で動く生化学的エンジンと考えられる（図2）。ちなみにその調整のための酵素活性にビタミン、ミネラルなどが必要になる。

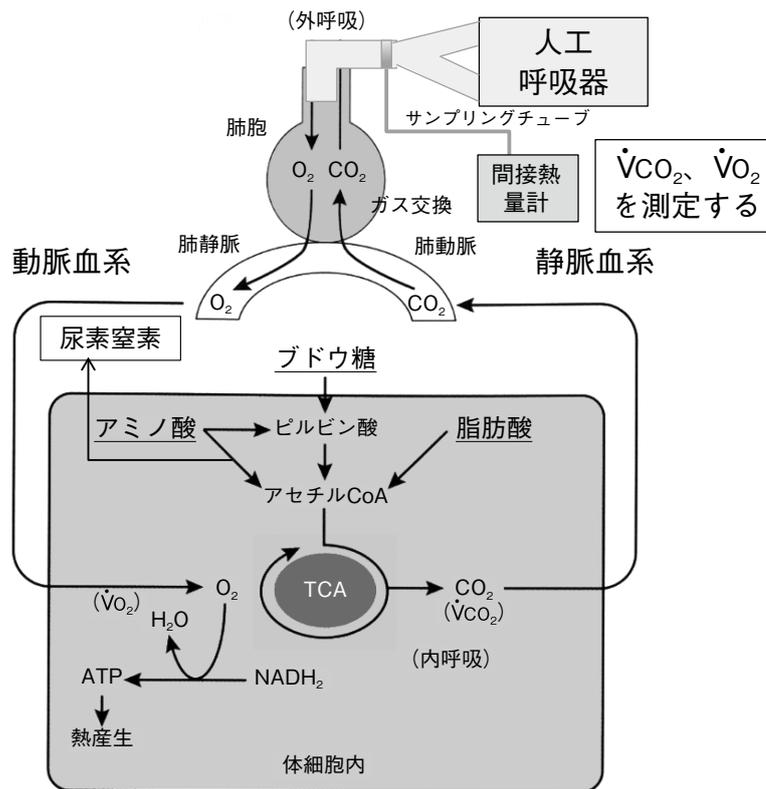


図2 肺による外呼吸と細胞内代謝の関連模式図と挿管症例での測定系 (図3-c 参照)
 呼気ガス分析により消費熱量が測定できる理由を示した。アミノ酸代謝は、尿中尿素窒素を測定する。肺機能、循環動態の評価が重要となることが理解できる。(文献9から引用改変して転載)

エネルギーを生み出す際、食物から取り込んだ栄養素が酸素と反応し、二酸化炭素を産生する。これらの化学式に基づいて、消費エネルギーは、全身の酸素消費量 ($\dot{V}O_2$) と二酸化炭素産生量 ($\dot{V}CO_2$)、そしてタンパク代謝を知るため尿中窒素量を測定し、その結果を計算式に代入することで知ることができる。

それらの値から EE を導く式は多数報告されているが、最もよく利用される Weir の公式¹⁰⁾ は、以下のとおりである。

$$EE \text{ (kcal/min)} = 3.941 \times \text{酸素摂取量 (mL/min)} + 1.106 \times \text{二酸化炭素産生量 (mL/min)} - 2.17 \times \text{尿中窒素排泄量 (g)}$$

なお、三大栄養素のうち、摂取エネルギーに占めるたんぱく質の割合は比較的安定している。そこで、たんぱく質の占める割合を 12.5% と仮定すると、先の Weir の式は以下ようになる (Weir の変式)。これに (60 分 × 24 時間) を掛けると 1 日消費熱量が算出される。

$$EE \text{ (kcal/min)} = 3.9 \times \text{酸素摂取量 (mL/min)} + 1.1 \times \text{二酸化炭素産生量 (mL/min)}$$

たんぱく質の占める割合が 20% を大きく越えるような極端な栄養投与や、激しい運動中に限定しなければ、尿中窒素排泄量を考慮しないことによる誤差の影響は 1% 未満であり、呼気ガス分析だけでも正確に測定することができる。

侵襲下で異化が亢進している場合は、煩雑であるが尿中尿素窒素排出量 (urine urea nitrogen : UUN) を求め 1.25 倍し窒素排泄量を測定する方法が望ましい。

ただし実際には、以上の計算式は測定器に組み込まれたパソコンで処理され、EE 値 (kcal/day) と呼吸商 (respiratory quotient : RQ) が表示される。

炭水化物、脂質、たんぱく質は、それぞれ代謝される際に消費される酸素の量と二酸化炭素の産生量の比が異なっている。これは RQ (計算式: $\dot{V}CO_2/\dot{V}O_2$) と呼ばれるものである。例えばブドウ糖が代謝される場合には、 $C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O + 36ATP$ (= エネルギー → 熱産生) となり、RQ は 1.0 となる。同様に、たんぱく質 (各種アミノ酸から構成) では概ね 0.80、脂質 (各種脂肪酸から構成) では概ね 0.70 となる (表 3)。

表3 栄養素のエネルギー代謝 (基質 1g 当たり)

エネルギー源	酸素消費量 (L/g)	二酸化炭素消費量 (L/g)	熱産生量 (kcal/g)	RQ ($\dot{V}CO_2/\dot{V}O_2$)
ブドウ糖	0.74	0.74	3.7	1.0
脂質	2.00	1.40	9.1	0.7
蛋白質	0.96	0.78	4.0	0.8

表の関係に加え $\dot{V}O_2$ 、 $\dot{V}CO_2$ が分かれば、代謝熱産生量を知ることができる。

表4 呼吸商 (Respiratory Quotient : RQ) の解釈

RQ	数値の意義 (可能性として)
<0.70	アルコール酸化 (燃焼) ケトン体酸化 (燃焼) 炭水化物合成 測定上の過誤
0.70 ~ 0.75	脂質が主に燃焼 飢餓状態である可能性
0.85 ~ 0.95	エネルギー基質の混合性燃焼 至適栄養投与
>1.00	脂質合成 (炭水化物過剰) 炭水化物優先燃焼 過呼吸 測定上の過誤

(文献9から引用改変して転載)

表5 重症症例で EE に影響を与える因子

EE 増加要因	
発熱	13% per 1°C
シバリング	100%
呼吸仕事量増加	40%
栄養投与	9%
カテコラミン	30%
EE 減少要因	
低体温	13% per 1°C
筋弛緩	40%
麻酔	50%
同期した呼吸管理	20%
飢餓	10 ~ 20%
β ブロッカー	25%

(BASICS IN CLINICAL NUTRITION (Fourth Edition)、p.101 : ESPEN Blue Book から引用作成)

測定して得られた RQ の解釈について表 4⁹⁾ にまとめた。臨床現場で測定患者が極度の侵襲下や不適切な栄養管理下でも、RQ は少なくとも $0.67 \leq RQ \leq 1.3$ の範囲である^{8,9)}。それ以外の値では、測定上の過誤を疑う必要がある。

2. 間接熱量測定の実際

測定条件の設定が重要である。適切な測定条件下でなければ、得られたデータの信憑性は著しく劣ることになる。

1) 測定条件、用語

一般生理学では、8時間以上の絶食後に安静、覚醒状態で測定することが基礎代謝量 (basal metabolic rate : BMR = BEE) の基本的な測定条件である。絶食期間を設けるのは、食事誘導性代謝 (diet induced thermogenesis : DIT) が 6 ~ 8 時間程度持続することから食事による影響を除くためである。通常、BMR は食事により 1.2 倍程度となり、睡眠中には 5 ~ 10% 少なくなり、1°C の発熱では 10 ~ 13% 増加する。重症症例で、EE に影響を与える因子を表 5 にまとめた。

BMR 測定の条件を満たすことは、疾病下、特に重症疾患では難しいため、安静時消費エネルギー (resting energy expenditure : REE) を測定する。一般的に重症患者においては、一番安定した安静臥床時の 15 ~ 60 分間程度を測定する。これは measured energy expenditure (MEE) ともいわれ、この値から係数による補正を行い、1日の総消費エネルギー消費量 (total energy expenditure : TEE) を求める。この値が投与エネルギー設定、動的栄養評価の基準になる。

健常人では、Harris-Benedict 式から求めた BEE は、測定で求めた REE に相当するとされている。

一定期間の測定値から推計する以外の測定法として、挿管下人工呼吸管理の患者では 24 時間連続測定により TEE を求める方法がある。測定器機が 1 人の患者に独占されるが、重症患者ではストレス係数による補正の必要がなく有効な測定法である。

2) 呼気ガス分析法

正確な測定には、患者呼気ガスをもれなく集め、呼気ガスの中の酸素、二酸化炭素濃度と換気量を測定し、吸入気酸素 (大気では 21%) および二酸化炭素 (大気

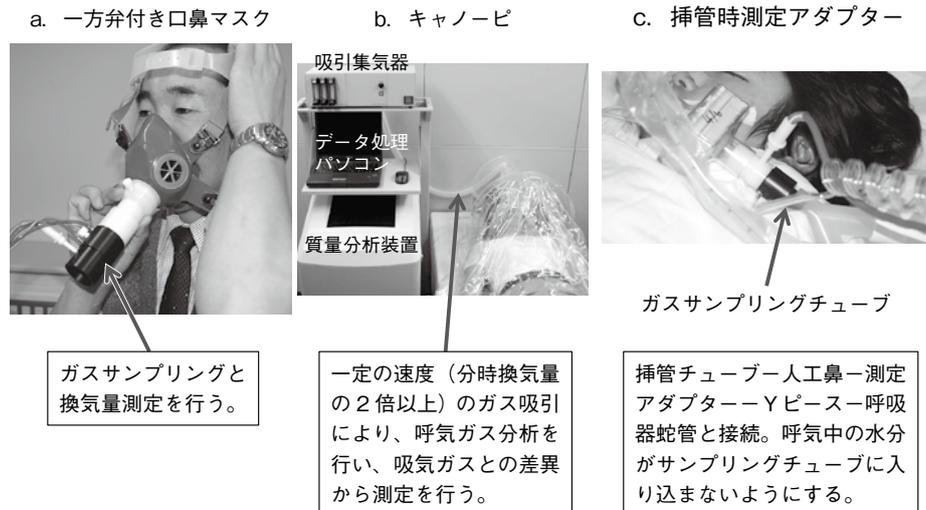


図3 IC測定のための各種集気デバイス（文献9から引用改変して転載）

では0%)濃度との差を求め、標準ガスに換算して測定期間の $\dot{V}O_2$ と $\dot{V}CO_2$ を求める必要がある。

大気 (room air) を呼吸している場合は、吸気ガス分圧に関しては当然ながら常に一定である。この場合の集気法は、非検者に一方弁の付いた口鼻マスクを装着させる (運動生理学では最も一般的) か (図3-a)、キャノピー (天蓋) の中に非検者を臥位にして、胸から上をいれてキャノピー内を常に一定の陰圧で引いて、呼気ガスを集気し測定する方法 (図3-b) である。ただし、これらの方法は、酸素投与下の患者では安定した測定ができない。

重症患者では、挿管中の測定が標準的な測定法である (図3-c)。人工呼吸器と挿管チューブの間エアウェイアダプタを装着し、持続的に回路内ガスのサンプリングを行い呼吸毎に吸気ガスと呼気ガスの分析を繰り返し測定する。アダプタの患者側に人工鼻フィルターを装着し、ガスサンプリングチューブ内に結露を引き込まないようにする。

3) 測定上およびデータ評価の注意点

IC測定は、非侵襲的な方法であり測定に伴う禁忌は特にない。しかし、測定によって得られたデータは十分にその適正さを以下の観点から吟味する必要がある⁹⁾。

①重症病態のICは、挿管下人工呼吸管理中の測定を原則とする

酸素療法を必要としない急性期の重症患者はごく稀である。マスクなどによる酸素療法中は吸入気酸素分圧が一定でなく、正確な $\dot{V}O_2$ (分時換気量 \times [吸入気酸

素分圧-呼気酸素分圧])の測定は不可能である。よって挿管患者の測定データを基本とする。

②患者の測定系が閉鎖系であること

呼吸器およびIC測定器の回路リーク、気管挿管チューブ周囲、胸腔ドレーンからのエアリークがある場合は、当然その程度に応じた測定誤差が生じる^{11~14)}。同様に血液透析、腹膜透析では二酸化炭素が透析膜、生体膜から除去されるので、正確さに欠ける¹⁵⁾。

③吸入気酸素分圧による注意点

酸素療法中の吸入気酸素分圧は21~100%に変動する。一方、呼気炭酸ガス濃度は5~10%程度であり、測定レンジの変動は酸素が遙かに広い。二酸化炭素濃度の測定はもっぱら赤外線吸収法が用いられており、精度に関してはほとんど問題がない。一方、酸素濃度の測定方式は数種あり、それぞれ一長一短があり、高濃度酸素では不安定な動作がみられる^{11~14, 16, 17)}。よって、高精度質量分析装置を用いる以外では FiO_2 は、80%未満が望ましい。

④呼吸数増加、二酸化炭素呼出障害がある症例での注意点

挿管患者では測定は、呼吸毎 (breath by breath) の測定で行っており、流量に対するガス濃度分析計の時間遅れの補正を計算上で行っているため、呼吸数が増加 (RR>35/min) すると測定は正確性を欠く。また、慢性閉塞性肺疾患 (chronic obstructive pulmonary diseases: COPD) など二酸化炭素の呼出障害がある症例でも、呼気終末二酸化炭素濃度 (fraction of end-tidal

carbon dioxide : $F_{ET}CO_2$) が正確に得られず測定結果 (EE 値) に信憑性はない。

⑤機器の条件

測定の最低 30 分以上前に測定器の電源を入れ、暖機運転する必要がある。また、機種毎に指定された頻度で、指定された校正ガスによる校正を行う。このあたりの手順が煩雑である。異なる機種間の測定値の差異 (機器間誤差) が、測定法の差異などにより存在するため、使用した測定機種を明記する。

3. 間接熱量計の種類

本邦で市販されている間接熱量計は、酸素と二酸化炭素の濃度を両方測定する据え置き型 (metabolic cart) の呼気ガス分析装置と、酸素濃度のみを測定する簡易機器の 2 種類がある。簡易型は二酸化炭素産生量を測定することは出来ず、RQ を一定値に固定することにより REE を求めており、重症患者の測定には向いていない。

現在市販されている据え置き型の呼気ガス分析装置は、エアロモニタ AE-310s (ミナト医科学、日本; 定価 700 万円程度、オプションで異なる)、Vmax S229 (日本光電工業、日本; 定価 1,700 万円程度、オプションで異なる)、CCM Express (パシフィック・メディコ、日本; 定価 900 万円程度、オプションで異なる) の 3 種類があり、各々マスク、キャノピー、挿管下人工呼吸管理中の測定が可能である。

いずれの機器も二酸化炭素濃度の測定は赤外線吸収式であるが、酸素濃度は前者がダンベル式、後 2 者がガルバニ電池法と異なっている。

また、人工呼吸器に IC 装置を組み込んだ、特に連続測定に向いている使い勝手の良い機器 (Engström Carestation) を米国 GE 社が製造しているが、残念ながら本邦では 3 年前に販売中止となった。

これ以外に、市販の質量分析装置にガス吸引装置、データ処理のソフトを組み込んだパソコンを装着すれば、 O_2 、 CO_2 の 2 種のガス以外に、 N_2 を同時に測定することもでき、より精度の高い測定器となる。

IV. 間接熱量測定データの利用

測定を実施すれば、上記のどの機種であれ EE 値 (kcal/day)、RQ が算出される。慎重に測定し、納得して得られたデータを如何に利用するかを以下に述べる。

1. 投与エネルギーの設定への利用

1) EE 値と近似的投与

IC を繰り返して EE 値に近づけた投与量を設定する。Singer らは、重症患者へのこのような栄養投与法を **The tight calorie control study (TICACOS)** として報告している¹⁸⁾。報告では、APACHE II score 22 程度の内科系外科系および外傷患者が混在した ICU において、3 日以上入室が予測される人工呼吸器装着患者 130 名を対象としている。初日から投与エネルギーを消費エネルギーに適合させて投与する栄養管理法 (study group、 $n=56$) は、入院前体重に簡易推算式 25kcal/kg/day を適用する投与熱量決定法 (control group、 $n=56$) に比べて、院内死亡率 ($32.3\% \text{ vs } 47.7\%$ 、 $p=0.058$) が改善する傾向があった (ITT 解析)。ただし、人工呼吸器装着期間、ICU 在室日数は有意に延長し、感染性合併症が増加したというものであった。

私見では、Sepsis などの内因性疾患では、EE 値に合わせる時期は侵襲制御の目処がつく概ね 3 日目以降にするほうが望ましいと考えられる。実際に当院は、内因性疾患で「入院時栄養障害有り」と判定された症例では、入室数日以内に EE 値に合わせた投与エネルギー設定をしている。

2) Permissive underfeeding 時の累積逸失エネルギー算定

侵襲下の投与熱量設定は、overfeeding を回避し、underfeeding を許容する、いわゆる permissive underfeeding の戦略が現在のスタンダードとなっている。では、どの程度まで underfeeding が許容されるのかが問題になる。その点に関し、Barlett らは多臓器不全リスクのある外科 ICU 患者 57 例の観察研究を行い、IC で算出した REE をもとに累積エネルギーバランスの解析を行った¹⁹⁾。この研究では、累積エネルギーバランスが $0 \sim -10,000\text{kcal}$ の患者の死亡率は $11/28$ (39%) であったのに対し、 $-10,000\text{kcal}$ を超えてマイナスバランスだった患者の死亡率は $12/14$ (86%) であった。この他にも、エネルギーバランスがマイナスで合併症や ICU 在室日数延長を示す観察研究が存在する²⁰⁾。繰り返して、継続的に IC を測定することで、初めて累積エネルギー負債を知ることができる。

本邦において、より高齢で痩せた ICU 症例での累積エネルギー負債がどこまで許容されるかは不明であるが、より少ない累積エネルギー量であることが推測される。

3) 肥満症例、るい痩症例への栄養投与

推算式はあくまで、その疾患における EE の平均値である。BMI (body mass index) が <18.5 の低体重、 ≥ 35 の過体重症例ではその原因もさまざまであり投与熱量の安全域は狭い。よって、個別性を無視した投与熱量の設定ではリスクが高まり、測定結果を反映した投与熱量の設定が望ましい。肥満症例での各種推算式は、IC と比較した場合に不正確であるという報告²¹⁾がある。

4) 過大侵襲時

重症熱傷 (体表面積 >20% の熱傷)^{22, 23)}、多発外傷²⁴⁾では、生体に加わる外部からの過度の侵襲により、多大な熱量が消費されることが予想される。それに対し、例えば熱傷では投与熱量設定の公式が多数発表されている。どの公式を用いるかで、同一熱傷症例で初期熱量設定は約 2.5 倍異なる²²⁾。このような極端な侵襲下においては、可能な限り EE を測定すべき²⁵⁾であることは、各種栄養ガイドラインでも同一の見解が示されている^{26, 27)}。

2. RQ 値からの燃焼基質の推定

前項を参照されたい (表 4)。結果としては、RQ 値 0.86 ± 0.04 程度が、バランス良く体内でエネルギー産生

がなされていることになる²⁸⁾。特に、全静脈栄養 (total parenteral nutrition : TPN) による栄養管理下、 $RQ > 1.0$ が持続する場合には、脂質不足 (投与忘れ)、もしくは糖質の (相対的) 過剰投与を疑う必要がある。

3. 継時的測定による代謝動態の変動

短期測定法を継時的に繰り返す、もしくは挿管から抜管まで連続測定することで、個々の症例における病期・病態、治療介入による EE の変化を知ることができる。動的栄養評価法の 1 つであるゆえんである。侵襲に伴う代謝動態変動の概略を把握できる。

また、気管内吸引時、腹臥位人工呼吸管理時、熱傷患者の包交、ICU 内での挿管中のリハビリテーション時などの代謝を測定することで、各種の医療行為による代謝動態を知り、最適な代謝栄養管理を行う一助となる。

V. 間接熱量の実際

実際の症例のデータを供覧する。

症 例 (本稿執筆時点の最直近症例) : 83 歳女性 (HT 148cm, BW44.7kg, BMI20.4)

診 断 : Septic Shock、DIC、急性腎不全、MSSA による両側膿胸 (原疾患)、APACHE II score 34

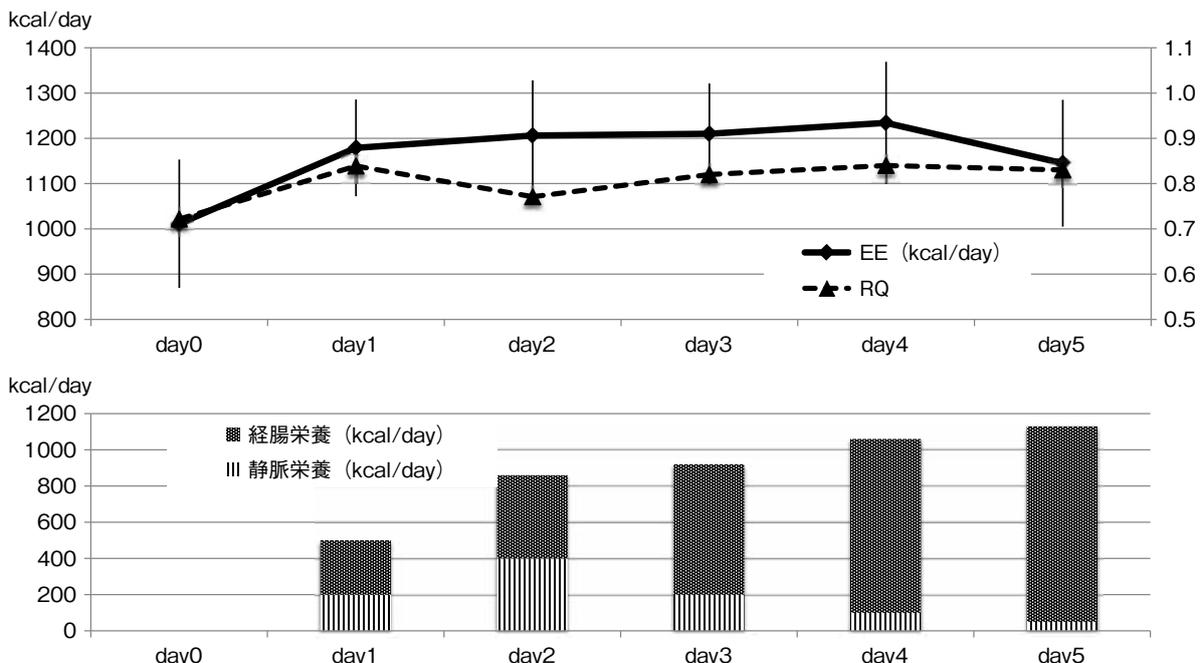


図 4 Case ; 83y (F). Septic Shock : 入室時から day5 までの EE、RQ の継時変化および投与エネルギー量 5 分間毎の挿管から day5 までの連続データ。不適値除去を目的として、 $0.7 \leq RQ \leq 1.0$ の EE 値を選択のうえ、各日毎に EE = 平均値 \pm SD (kcal/day)、RQ = 平均値 \pm SD で表示。図 5 は、同一症例の day3 の午前 8 時 7 分から 24 時間の B by B の連続記録。

a. EE row data (B by B)

Time/Date	Measured $\dot{V}O_2$ (mL/min)	Measured $\dot{V}CO_2$ (mL/min)	Measured EE (kcal/day)	Measured RQ
160122 08:07:09.7	123	94	815	0.76
160122 08:07:12.5	123	92	811	0.74
160122 08:07:15.3	123	95	816	0.76
160122 08:07:18.1	122	92	809	0.75
160122 08:07:20.1	122	91	803	0.74
160122 08:07:23.3	125	96	829	0.76
160122 08:07:26.1	126	96	836	0.75
160122 08:07:29.3	125	96	829	0.76
160122 08:07:32.3	125	96	829	0.76

b. 24min. 540呼吸分の連続データ ; $\dot{V}O_2$, $\dot{V}CO_2$, EE, RQ (B by B)

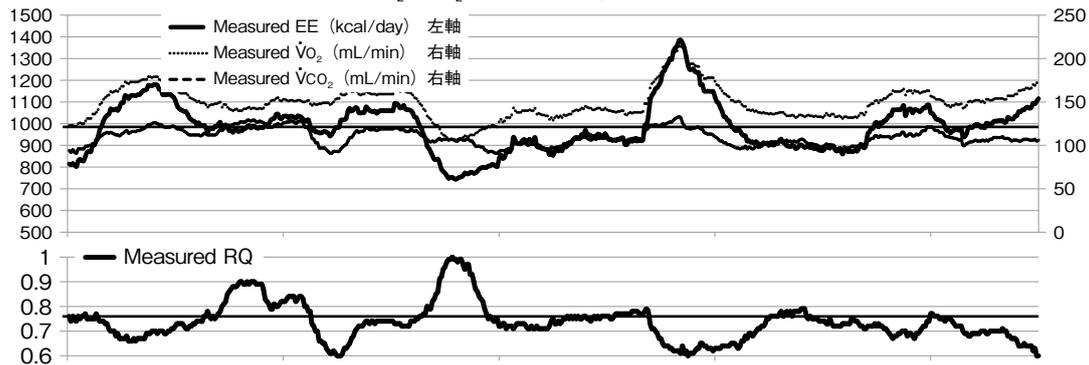


図5 Case ; 83y (F). Septic Shock day3
発熱以外にも、吸引、体動、看護処置等により変動する。

代謝栄養管理：入院時栄養評価：栄養障害の可能性 (+)、入室 36 時間目に経管栄養開始、比較的早期に漸増し EE 値に近似し投与エネルギーを設定した (図 4)。血糖値管理はインスリン div+スライディングスケールによる (目標 BS 値 120 ~ 180mg/dL)。

治療：挿管呼吸管理、抗菌薬、ノルアドレナリンによる昇圧、鎮静薬、輸血 (MAP、FFP、PC)。day5 には、炎症所見改善、ノルアドレナリン中止。

- 1) 入室 3 日目 Breath by Breath 測定値、24 分間の連続測定値 (図 5)
- 2) 入室から 5 日目までの EE、RQ の継時的推移と実投与エネルギー量 (図 4)

本患者は、day6 から間歇的な血液透析を行い、day8 抜管、現在も治療継続中。

現在当院では、挿管期間が 3 日以上と予測される症例では、全例 EE 測定を行い、投与エネルギー設定に利用している (4 台の IC を保有)。

本稿の著者には規定された COI はない。

参考文献

- 1) 氏家良人, 海塚安郎, 佐藤格夫ほか：急性呼吸不全による人工呼吸患者の栄養管理ガイドライン 2011 年版. 人工呼吸. 2012 ; 29 : 75-120.
- 2) Harris JA, Benedict FG : A biometric study of human basal metabolism. Proc Natl Acad Sci USA. 1918 ; 4 : 370-3.
- 3) Long CL, Schaffel N, Geiger JW, et al : Metabolic response to injury and illness : Estimation of energy and protein needs from indirect calorimetry and nitrogen balance. JPEN J Parenteral Entr Nutr. 1979 ; 3 : 452-6.
- 4) Ferrie S, Allman-Farinelli M : Commonly used "nutrition" indicators do not predict outcome in the critically ill : a systematic review. Nutr Clin Pract. 2013 ; 28 : 463-84.
- 5) Sungurtekin H, Sungurtekin U, Oner O, et al : Nutrition assessment in critically ill patients. Nutr Clin Pract. 2008 ; 23 : 635-41.
- 6) Heyland D, Muscedere J, Wischmeyer PE, et al : A randomized trial of glutamine and antioxidants in critically ill patients. N Engl J Med. 2013 ; 368 : 1489-97.
- 7) Andrews PJ, Avenell A, Noble DW, et al : Randomised trial of glutamine, selenium, or both, to supplement parenteral nutrition for critically ill patients. BMJ. 2011 ; 342 : d1542.
- 8) van Zanten AR, Sztark F, Kaisers UX, et al : High-protein enteral nutrition enriched with immune-modulating nutrients vs standard high-protein enteral nutrition and nosocomial infections in the ICU : a randomized clinical trial.

- JAMA. 2014 ; 312 : 514-24.
- 9) 海塚安郎 : 間接熱量計. ICU と CCU. 2015 ; 39 : 609-19.
 - 10) Weir JB : New methods for calculating metabolic rate with special reference to protein metabolism. J Physiol. 1949 ; 109 : 1-9.
 - 11) Weissman C : Measuring oxygen uptake in the clinical setting. In : Oxygen transport and utilization. Bryan-Brown CW, Ayres SM (Eds). Society of Critical Care Medicine, 1987, pp25-64.
 - 12) Kemper MA : Indirect calorimetry equipment and practical considerations of measurement. In : Problems in respiratory care : nutrition and respiratory disease. Weissman C (Eds). JB Lippincott, 1989, pp479-90.
 - 13) Branson RD : The measurement of energy expenditure : Instrumentation, practical considerations, and clinical application. Respir Care. 1990 ; 35 : 640-59.
 - 14) Bishop MJ, Benson MS, Pierson DJ : Carbon dioxide excretion via bronchopleural fistulas in adult respiratory distress syndrome. Chest. 1987 ; 91 : 400-2.
 - 15) Blumberg A, Keller G : Oxygen consumption during maintenance hemodialysis. Nephron. 1979 ; 23 : 276-81.
 - 16) Browning JA, Linberg SE, Turney SZ, et al : The effects of a fluctuating F_{iO_2} on metabolic measurements in mechanically ventilated patients. Crit Care Med. 1982 ; 10 : 82-5.
 - 17) Ultman JS, Bursztein S : Analysis of error in the determination of respiratory gas exchange at varying F_{iO_2} . J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol. 1981 ; 50 : 210-6.
 - 18) Singer P, Anbar R, Cohen J, et al : The tight calorie control study (TICACOS) : a prospective, randomized, controlled pilot study of nutritional support in critically ill patients. Intensive Care Med. 2011 ; 22 : 601-9.
 - 19) Bartlett RH, Dechert RE, Mault JR, et al : Measurement of metabolism in multiple organ failure. Surgery. 1982 ; 92 : 771-9.
 - 20) Villet S, Chioloro RL, Bollmann MD, et al : Negative impact of hypocaloric feeding and energy balance on clinical outcome in ICU patients. Clin Nutr. 2005 ; 24 : 502-9.
 - 21) Frankenfield DC, Coleman A, Alam S, et al : Analysis of estimation methods for resting metabolic rate in critically ill adults. JPEN J Parenter Enteral Nutr. 2009 ; 33 : 27-36.
 - 22) Mendonça Machado N, Gagnani A, Masako Ferreira L : Burns, metabolism and nutritional requirements. Nutr Hosp. 2011 ; 26 : 692-700.
 - 23) Suman OE, Mlcak RP, Chinkes DL, et al : Resting energy expenditure in severely burned children : analysis of agreement between indirect calorimetry and prediction equations using the Bland-Altman method. Burns. 2006 ; 32 : 335-42.
 - 24) Brandi LS, Santini L, Bertolini R, et al : Energy expenditure and severity of injury and illness indices in multiple trauma patients. Crit Care Med. 1999 ; 27 : 2684-9.
 - 25) Saffle JR, Larson CM, Sullivan J : A randomized trial of indirect calorimetry-based feedings in thermal injury. J Trauma. 1990 ; 30 : 776-82.
 - 26) American Burn Association : Practice guidelines for burn care. www.ameriburn.org/PracticeGuidelines2001.pdf (2015年12月15日アクセス)
 - 27) Rousseau AF, Losser MR, Ichai C, et al : ESPEN endorsed recommendations : nutritional therapy in major burns. Clin Nutr. 2013 ; 32 : 497-502.
 - 28) McClave SA, Lowen CC, Kleber MJ, et al : Clinical use of the respiratory quotient obtained from indirect calorimetry. JPEN J Parenter Enteral Nutr. 2003 ; 27 : 21-6.