COMMUNICATION

呼吸 $^{13}\text{CO}_2$ を指標とした持久的運動中の糖代謝動態測定法Measurement Method of Carbohydrate Metabolism during Prolonged Exercise by Monitoring $^{13}\text{CO}_2$ as Tracer二見 順^{*a)}・西 功^{b)}・岡 吉夫^{c)}

Jun FUTAMI, Isao NISHI, and Yoshio EN

The discriminative measurement method of the dynamic metabolic change of an administered glucose and a pre-reserved carbohydrate is clearly demonstrated during the prolonged exercise (75 W bicycle ergometer work). The administered glucose is an ordinary commercial available medical use. The isotopic abundance difference ratio of the glucose is as high as 20‰ comparing to that of the expired CO_2 before the administration. This paper proposed the discriminative measurement method and showed a trail measurement for inspecting the method.

1. はじめに

呼吸により単位時間あたりに、体内に摂取される酸素量（酸素摂取率）、体内からの排出される二酸化炭素量（二酸化炭素排出率）の従来からの測定¹⁾に加えて、体内から排出される $^{13}\text{CO}_2$ 量を同時にオンライン連続測定する新しい測定法を考案し、測定システムを開発した。測定システムには、独自開発した呼吸気分析用質量分析計²⁾が含まれる。本測定法は、投与した ^{13}C 標識糖と投与時点での体内存在糖の代謝率を同時に区別してオンライン連続測定可能とする。本報の目的は、上記測定法を提示し、その検証のために行った持久的運動中の糖負荷実験について報告、本測定法の持久的運動中におけるエネルギー管理への有用性を考察することにある。

2. 測定装置および検証実験の方法

測定システムは、呼吸気分析用質量分析計（独自開発）、呼吸流量測定用フライシュ型ニューモタコ流量計 (Model: WPN-200, Westron Co., Ltd., Kashiwa, Japan), 呼吸温

度測定用サーミスタ温度計 (Type: 402ET-2, Ishizuka Electronics Co., Ltd., Chiba, Japan), そして測定システムの制御用コンピュータ (PC9821Xa12, NEC Co., Ltd., Japan) から構成される。質量分析計は、 N_2 , O_2 , Ar , $^{12}\text{CO}_2$, $^{13}\text{CO}_2$ ガス濃度を同時に、10 ms ごとのオンライン連続測定を可能とする 180 度磁場型複式コレクター方式のものである²⁾。

本測定法の検証のため、健康男子（22 歳、183 cm, 63 kg）を被験者とした、自転車エルゴメータによる一定強度（75 W）の持久的運動中における糖負荷実験を行った。実験前の食事制限として、米、パン、麺、イモなどの炭水化物の摂取を 2 日間禁止、実験開始 13 時間前からは絶食を行った。糖投与は、実験開始 20 分後に、和光純薬工業（株）製一級無水グルコース 50 g を水 150 ml とともに経口投与した。このグルコースは人工的に ^{13}C を標識したものではないが、その ^{13}C 同位体比が 1.128%（自然 ^{13}C 同位体比 1.108% に比しわずかに高値）であることを、燃焼ガスの ^{13}C 同位体比測定により確認した。

投与糖と体内存在糖を合わせた糖代謝率 $\dot{M}_{\text{CH}}$ (g/min)、投与糖の代謝率 $\dot{M}_{\text{AD}}$ (g/min)、糖投与時点での体内存在糖の代謝率 $\dot{M}_{\text{RES}}$ (g/min)、脂肪代謝率 $\dot{M}_{\text{FAT}}$ (g/min)、エネルギー代謝率 $\dot{M}_{\text{E}}$ (kcal/min)、呼吸商 RQ を下式^{1), 2)}により 10 ms ごとにオンライン連続測定した。

$$\dot{M}_{\text{CH}} = 4.50 \dot{V}_{\text{CO}_2} - 3.16 \dot{V}_{\text{O}_2} \quad (1)$$

$$\dot{M}_{\text{AD}} = 1.34 \frac{\gamma - \gamma_0}{\gamma_{\text{AD}} - \gamma_0} \dot{V}_{\text{CO}_2} \quad (2)$$

$$\dot{M}_{\text{RES}} = \dot{M}_{\text{CH}} - \dot{M}_{\text{AD}} \quad (3)$$

$$\dot{M}_{\text{FAT}} = 1.66 (\dot{V}_{\text{O}_2} - \dot{V}_{\text{CO}_2}) \quad (4)$$

$$\dot{M}_{\text{E}} = 4.1 \dot{M}_{\text{CH}} + 9.3 \dot{M}_{\text{FAT}} \quad (5)$$

$$RQ = \dot{V}_{\text{CO}_2} / \dot{V}_{\text{O}_2} \quad (6)$$

$$\dot{V}_{\text{O}_2} = k_s \left(\frac{F_{\text{EN}_2}}{F_{\text{IN}_2}} F_{\text{IO}_2} - F_{\text{EO}_2} \right) \dot{V}_{\text{E}} \quad (7)$$

$$\dot{V}_{\text{CO}_2} = \dot{V}_{^{12}\text{CO}_2} + \dot{V}_{^{13}\text{CO}_2} \quad (8)$$

^{*a)} 東日本国際大学経済学部経済情報学科 (☎970-8567 福島県いわき市平鎌田寿金沢 37)

Department of Economic Informatics, Faculty of Economics, Higashi Nippon International University (37 Suganezawa, Kamata, Taira, Iwaki-city, Fukushima 970-8567, Japan)

^{b)} 山口東京理科大学基礎工学部電子基礎工学科 (☎756-0884 山口県小野田市大学通り 1-1-1)

Department of Electronics and Computer, Faculty of Science and Engineering, Science University of Tokyo in Yamaguchi (1-1-1 Daigakudori, Onoda-city, Yamaguchi 756-0884, Japan)

^{c)} 日本体育大学運動生理学研究室 (☎158-8508 東京都世田谷区深沢 7-1-1)

Institute of Exercise Physiology, Nippon Sport Science University (7-1-1 Fukasawa, Setagaya-ku, Tokyo 158-8508, Japan)

$$\dot{V}_{12\text{CO}_2} = k_s \left(F_{E12\text{CO}_2} - \frac{F_{E\text{N}_2}}{F_{\text{IN}_2}} F_{I12\text{CO}_2} \right) \dot{V}_E \quad (9)$$

$$\dot{V}_{13\text{CO}_2} = k_s \left(F_{E13\text{CO}_2} - \frac{F_{E\text{N}_2}}{F_{\text{IN}_2}} F_{I13\text{CO}_2} \right) \dot{V}_E \quad (10)$$

$$k_s = \frac{P_B - P_{\text{H}_2\text{O}}}{760} \frac{273}{273 + T} \quad (11)$$

$$\gamma = \frac{F_{E13\text{CO}_2}}{F_{E12\text{CO}_2} + F_{E13\text{CO}_2}} \times 100 (\%) \quad (12)$$

ここで、 $\dot{V}_{\text{O}_2}$ (l/min) は酸素摂取率、 $\dot{V}_{\text{CO}_2}$ (l/min) は二酸化炭素排出率、 $\dot{V}_{12\text{CO}_2}$ (l/min) は $^{12}\text{CO}_2$ 排出率、 $\dot{V}_{13\text{CO}_2}$ (l/min) は $^{13}\text{CO}_2$ 排出率、 $\dot{V}_E$ (l/min) は呼気流量である。 F_{Ei} (%), F_{Ii} (%) は、それぞれ、成分ガス種 i の呼気濃度、吸気濃度である。 k_s は呼気流量を 0°C, 1 気圧、乾燥状態での値に変換するための係数、 T (°C) は呼気温度、 P_B (mmHg) は測定環境気圧、 $P_{\text{H}_2\text{O}}$ (mmHg) は呼気温度での飽和水蒸気圧である。 γ (%), γ_0 (%), γ_{AD} (%) は、それぞれ、呼気中二酸化炭素の ^{13}C 同位体比 (以下、呼気二酸化炭素同位体比)、糖投与直前の呼気二酸化炭素同位体比、投与糖自体の ^{13}C 同位体比である。式 (1) から式 (4) 中の各係数は、体内で燃焼する栄養素が、糖としてブドウ糖 ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$)、脂肪としてオレイン酸 ($\text{C}_{18}\text{H}_{34}\text{O}_2$) とパルミチン酸 ($\text{C}_{16}\text{H}_{32}\text{O}_2$) の混合物 (混合比 2 対 1) と仮定すると、それらの燃焼反応式から求めることができる。特に式 (2) は、投与糖による二酸化炭素排出率を $\dot{V}_{\text{ADCO}_2}$ (l/min) として、糖投与後の $^{13}\text{CO}_2$ 排出率 ($\gamma \dot{V}_{\text{CO}_2}$) = 投与糖による $^{13}\text{CO}_2$ 排出率 ($\gamma_{\text{AD}} \dot{V}_{\text{ADCO}_2}$) + 糖投与時点での体内存在糖による $^{13}\text{CO}_2$ 排出率 [$\gamma_0 (\dot{V}_{\text{CO}_2} - \dot{V}_{\text{ADCO}_2})$] であること、また $\dot{M}_{\text{AD}} = 1.34 \dot{V}_{\text{ADCO}_2}$ であることから導出した。式 (5) の係数は、糖 1 g の燃焼熱が 4.1 kcal、脂肪 1 g の燃焼熱が 9.3 kcal であることを示す³⁾。式 (7) の $\dot{V}_{\text{O}_2}$ は、単位時間当たりの酸素吸気量から酸素呼気量を減ずることにより求めた。この際、単位時間当たりの室素吸気量と呼気量は等しいと仮定した。この仮定は呼吸が定常状態のとき成立する。同様に、 $\dot{V}_{12\text{CO}_2}$ と $\dot{V}_{13\text{CO}_2}$ は、それぞれの成分ガスについて、単位時間当たりの呼気量から吸気量を減ずることにより求めた。

3. 結果および考察

Fig. 1, Fig. 2 に $\dot{M}_{\text{CH}}$, $\dot{M}_{\text{FAT}}$, $\dot{M}_E$, $\dot{M}_{\text{AD}}$, $\dot{M}_{\text{RES}}$, RQ の測定結果を示す。10 ms ごとの測定値を 10 分間の平均値としてプロットした。糖投与後 $\dot{M}_{\text{CH}}$ と RQ は上昇、 $\dot{M}_{\text{FAT}}$ は減少する動態を示した。これは、糖と脂肪のうち、エネルギー源として糖が支配的になったことを意味し、生理学的見地からも妥当な動態と考えられる。 $\dot{M}_E$ は実験中約 4.8 kcal/min の一定値を保持した。運動負荷 75 W は 1.1 kcal/min に相当することから、生理的産生エネルギーの機械的エネルギーへの変換効率は 22% と見積もられる。この値は、一般とされる 20~30% に対し妥当な値と考えられる。 $\dot{M}_{\text{CH}}$, $\dot{M}_{\text{FAT}}$, $\dot{M}_E$, RQ の測定精度は $\dot{V}_{\text{O}_2}$, $\dot{V}_{\text{CO}_2}$ の測定精度に依存するが、本測定システムにおける $\dot{V}_{\text{O}_2}$, $\dot{V}_{\text{CO}_2}$ の測定誤差は、一般に信頼されている Douglas bag

Fig. 1. $\dot{M}_{\text{CH}}$, $\dot{M}_{\text{FAT}}$, $\dot{M}_E$ Fig. 2. $\dot{M}_{\text{AD}}$, $\dot{M}_{\text{RES}}$, RQ

法での値に比較し、3% 以内であることが検証されている⁴⁾。

$\dot{M}_{\text{AD}}$ と $\dot{M}_{\text{RES}}$ については、糖投与後 $\dot{M}_{\text{AD}}$ は上昇、 $\dot{M}_{\text{RES}}$ は減少する動態を示した。これは、投与糖と投与時点での体内存在糖のうち、エネルギー源として投与糖が支配的になったことを示している。このことは、持久的運動中における糖枯渇状態での糖負荷後の動態として、生理学的にも妥当と考えられる。 $\dot{M}_{\text{AD}}$ と $\dot{M}_{\text{RES}}$ の測定精度は γ の測定精度に依存するが、別に行ったバッグに採取した呼気 (二酸化炭素濃度 4.8%) を測定した際の本測定システムの精度は、 $\gamma = 1.1080 \pm 0.0004 \text{ sd}\%$ であった。

各測定項目の動態は生理的に合理性を有すると考えられ、本測定法は持久的運動中におけるエネルギー管理に有用であると考えられる。

4. おわりに

本報では、大気の主成分である N_2 , O_2 , Ar , $^{12}\text{CO}_2$ ガスに加えて、 $^{13}\text{CO}_2$ ガスの濃度を同時に 10 ms ごとのオンライン連続測定を可能とする質量分析計を開発し、持久的運動中におけるエネルギー管理への応用を示し、上述の結果を得た。

なお、本報に示した検証実験は 1 例のみであるが、測定条件などの異なる他の数例においても、本測定法により $\dot{M}_{\text{AD}}$ と $\dot{M}_{\text{RES}}$ が有意な差で分別できた同様の結果を得ている。しかしながら、測定データの十分な定量的・生理的解析については、現在計画中である多人数の被験者での実験が待たれる。本報は、それに先行し上記測定法を提示するものである。

文 献

- 1) I. Nishi, *Mass Spectrosc.*, 32, 235 (1984).
- 2) 西 功, 人工呼吸, 14, 10 (1997).
- 3) 山岡誠一, 吉岡利治, 木村みさか, “運動と栄養,” 杏林書院 (1987), p. 106.
- 4) G. Tomizawa, I. Nishi, and A. Nagano, *Mass Spectrosc.*, 34, 207 (1986).
- 5) I. Nishi, I. Sugai, K. Kimura, and M. Kusakabe, *Mass Spectrosc.*, 22, 191 (1974).

Keywords: Energy metabolism, $^{13}\text{CO}_2$ isotopic tracing, Respiratory gas analysis