

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 26 日現在

機関番号：34310

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K11610

研究課題名(和文)高精度間接熱量測定で挑む食事誘発性熱産生の再評価～自律神経と脂質吸収に着目して～

研究課題名(英文)Reevaluation of Diet-Induced Thermogenesis Challenged by Highly Accurate Indirect Calorimetry

研究代表者

海老根 直之 (EBINE, Naoyuki)

同志社大学・スポーツ健康科学部・教授

研究者番号：30404370

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：ヒトの1日の総エネルギー消費量のおよそ1割を占めるとされる食事誘発性熱産生(Diet-Induced Thermogenesis: DIT)であるが、消化吸収にまつわる不可視の現象であるため、その細部には不明な点が残されている。脂質摂取に由来するDITは、摂取エネルギーの僅か0～3%と他のエネルギー産生栄養素に比べてとりわけ低く見積もられている。この基となっているエビデンスの取得条件を当該分野の最新の研究手法に照らすと大きな乖離が認められる。そこで本研究では、ハード・ソフトの両面から高精度な測定システムを構築し、DIT現象を再評価することを目的とした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ヒトの推定エネルギー必要量は、厚生行政においてそれ自身が重要な位置づけにあることに加え、他の栄養素の適切な摂取量を議論するための基盤情報でもあるため、食事摂取基準の策定時には、科学的エビデンスを最大限反映する形で導き出されている。ヒトの消費するエネルギーの一区分である食事誘発性熱産生は、小さい反応が長時間続く現象であり、そもそも測定が難しいものであるが、古い時代に得られた研究成果に基づき、長年に渡って1日の総エネルギー消費量の1割と大まかに見積もられてきた。これを現在の技術を駆使して再評価することは、食事摂取基準をより強固なものとするために、必要不可欠なステップである。

研究成果の概要(英文)：Diet-Induced Thermogenesis (DIT) accounts for approximately 10% of total daily energy expenditure in humans, but the details of DIT remain unclear because it is an invisible phenomenon associated with digestion and absorption. The amount of DIT derived from lipid intake is estimated to be only 0-3% of energy intake, which is particularly low compared to other energy-providing nutrients. The objective of this study was to reevaluate DIT by constructing a high-precision measurement system that excels in both hardware and software.

研究分野：栄養学

キーワード：食事誘発性熱産生 間接熱量測定 脂質酸化 糖質酸化

## 1. 研究開始当初の背景

フランス人科学者のラボアジェが、動物が酸素を消費して二酸化炭素を産生する事実を発見したのは1770年代のことである。研究者らの興味・関心に支えられ、ヒトの熱量産生やエネルギー消費に関する研究は、20世紀中には概ね現在の大系に至っている。ヒトが消費するエネルギーについては、基礎代謝、身体活動によるエネルギー消費、そして食事誘発性熱産生(Diet-Induced Thermogenesis: DIT)の3つの区分で議論されてきた。DITはその名が示す通り食事摂取後にエネルギー消費が増加する現象であり(Horton, 1983)、その総量は1日に消費されるエネルギー(摂取されるエネルギー)のおよそ10%を占めると見積もられている(Van Zant, 1992)。“およそ”10%と幅が示される最大の背景は、DITとして消費されるエネルギーがその基質である三大栄養素ごとに異なるためである。知見の集約により、たんぱく質であれば20~30%、糖質であれば5~10%、脂質であれば0~3%に相当するエネルギーがDITとなることが広く受け入れられ(Tappy, 1996; Westerterp, 2004)、現在の栄養学ならびに国民に向けた知の集約といえる食事摂取基準もこの礎の上に築かれている。

DIT反応は発生タイミングと機序によって2つに分けられ、摂取物の温度や味に起因する刺激で自律神経活動が活性化することによる代謝亢進(DITの第1相反応)、ならびに、摂取物を消化・吸収するための消化管の蠕動運動やその後のタンパク合成反応によって生じる代謝亢進(第2相反応)から構成されると考えられている(Diamond, 1985)。DIT反応には複数の因子が関与しており、また反応自体がそれほど大きくないために読み解きも難しく、未だ全容の解明には至っていない。また、DITは運動などの身体活動により生じる代謝亢進とは異なり、視認できない反応であり、収束に長い時間を要するため、厳密な測定を行うとなれば、負担が検者と被検者の双方にかかってくるため、包括的な取り組みは国際的にも収束してきている印象がある。精通した研究者らが、DIT研究が隆盛であった当時の最高水準の技術で取り組んでいたとしても、現在の技術を駆使した質の高い検討を実施し、DIT現象を再評価することには学術的な意義のみならず、食事摂取基準の中に定められる推定エネルギー必要量の強化にもつながる国民全体で共有できる利益がある。

## 2. 研究の目的

食後に生じるエネルギー代謝の亢進は食事誘発性熱産生(Diet-induced Thermogenesis: DIT)と呼ばれる不可視の現象であるが、比較的古い時代の1980年代から1990年代にかけて精力的に研究が行われてきた。DITは安静時エネルギー消費量を基線に据え、食事の摂取を起点に高まるエネルギー消費の増加量として評価されるが、そもそも安静時エネルギー消費量自体の正確な取得すら困難なことが知られている。加えて、DITは身体の動作、すなわち身体活動によって生じる代謝亢進に対して随分と小さく、なだらかな反応であるため、研究が盛んに行われていた当時の測定技術では、追求しきれない課題が残されていた。

エネルギー基質ごとにその熱量に対するDIT反応の割合が見積もられているが、これらは主にそれぞれの栄養素の単独摂取試験から導かれた結論となっている。一方、複数の栄養素が混在する一般食では、摂取物同士が消化管腔内で影響し合うため、より複雑な反応となることは明らかである。脂質摂取に由来するDITは、摂取熱量の0~3%相当と、他のエネルギー産生栄養素に比べて低く見積もられている。しかしながら、脂質も管腔内を物質として比較的長時間運搬されることから考えれば、これはあまりにも小さいように思われ、脂質のDIT反応を日常の食事に近い条件で評価することには意義が存在する。

本研究は、当研究室でハード・ソフトの両面を研鑽してきたDIT測定に特化した高解像度なフードシステムを運用し、信頼性に優れたデータの取得を通じて、一旦議論に収束をみせたDIT現象について改めて検討を行うものである。

## 3. 研究の方法

### (1)測定方法の検討

本研究がターゲットとするDIT現象は、身体の物理的運動によって生じるエネルギー消費の高まりに比べるとごく小さな反応であるため、広く行われている測定法の転用では正確な評価が難しい。そこで、まずは最大の夾雑要因となる測定中の被検者の体動を効果的に抑制する手立てを整備した。また、試験食を変えて複数回の測定を実施する場合、測定対象者のコンディションにはばらつきが生じてはいけない。そこで、測定前日から測定に至るまでの過ごし方について、測定値への影響が大きい事柄について洗い出し、細かな留意点を設けることでデータの安定化を図った。とりわけ、試験直前の食事となる前日の夕食については、規定食をデザインし、決められた時刻に摂取する実験デザインとした。

上記条件を整備した後、温湿度を統制した環境制御室内にて、安楽姿勢のとれるゆったりとした椅子に対象者を着座させ、頭部にアクリル製の透明なフード（キャノピー）を被せて呼気分析を行うフード法により安静状態のエネルギー消費量測定を繰り返し、装置のセットアップも含めて測定条件を最適化した。

また、本研究では試験食についても工夫を凝らした。市販の冷凍炒飯をベース食とすることで、測定ごとの食事組成のばらつきを抑えつつ日常に近いかたちの食事とし、試験食を単一の食品にすることで、食べ方によるばらつきが生じにくい条件設定で試験を実施した。また、炒飯は油と味の馴染みがよく、脂質を食事に添加する本実験の試験食として優れることをも確認した。

## (2)実験

消化器・呼吸器系に既往歴の無い男性 12 名（23±2 歳，168.8±5.7cm，63.8±6.1kg）を対象として試験を実施した。被検者には事前に研究の目的と内容についての十分な説明を行い、研究参加の同意を得た。

試験食については、前述したように冷凍炒飯をベース食とする 3 種とした。コントロール食はベース食である炒飯 170g とし、異なるオイルを 15g 添加した食事の DIT を評価した。オイルにはオリーブオイルと中鎖脂肪酸オイルを選択し、3 食による交差比較試験とした。

夾雑要因を抑えるため、規定食の摂取も含めて事前の生活統制を行うことでコンディションを安定させて試験を行った。本研究の目的に特化した高解像度なフード法による間接熱量測定で、エネルギー代謝関連指標を取得した。具体的には、食事前にまず安静時エネルギー消費量の測定を慎重に行った後、いずれかの試験食を摂取させ、その後も安静状態を維持したまま食後 150 分まで 30 分間のサイクルを設けて測定を継続した。この 30 分間のサイクルの中に軽微な動作を許容する時間を設定し、加えて、測定を通じて刺激性の低いアニメ映像を視聴させることで、データ採択区間における体動の発生を抑止した。

測定の際には胸部と利き腕の手首に加速度計（それぞれ Carpod と Actigraph）を装着し、被検者に体動のモニタリングを意識させることで効果的に体動を抑制し、事後に体動指標の解析を行うことでデータ信頼性を高めた。また、上記測定を通じ、体表温、心拍数、自律神経活動指標（心拍変動解析による）を連続測定した。

## 4. 研究成果

### (1)体動関連指標

測定中に生じた体動については、体幹部と上肢に分けて評価した。データの採択区間において視認できる体動は観察されず、食前の安静時エネルギー消費量の測定から最終となる食後 150 分の測定まで、いずれの試験食を摂取した場合においても、一貫して低い値が維持されており、試験が良質な安静が維持される中で実施されたことが裏付けられた。

### (2)エネルギー消費量

食後 150 分までの 30 分ごとの経時的なエネルギー消費量については、いずれの試験食を摂取した場合においても 30 分経過時点から亢進が観察された。コントロール食摂取時に比べると、オリーブオイルまたは中鎖脂肪酸オイル、いずれのオイルを添加した場合でもエネルギー消費量が増加することが確認された。先行研究の中には中鎖脂肪酸オイルの摂取による顕著なエネルギー消費の増加を報告するものがあるが、本研究ではオイル種による明確な差は認められなかった。

### (3)150 分累積 DIT

30 分ごとのエネルギー消費量のデータに基づき、測定終了となる 150 分後までの累積 DIT を算出した。オイルを添加した 2 つの試験食はコントロール食に比べると高値となるものの、本研究の例数では 3 試行に差は認められず、中鎖脂肪酸オイルのエネルギー消費における優位性は観察されなかった。

### (4)基質酸化量

呼気ガスデータから 30 分ごとの経時的な糖質酸化量と脂質酸化量を算出した。まず、脂質酸化量については、食前から食後 30 分にかけて、3 試行とも高まる傾向を見せ、その後は時間の経過と共に緩やかに低下した。試験食間で比較すると、中鎖脂肪酸オイルを添加した場合に、脂質酸化量は高い値を維持し続け、摂取後 30 分と 90 分において、オリーブオイル添加食に対して有意な高値を示した。また、コントロール食に対しても摂取後 60 分から 150 分まで、高い値で推移した。他方、糖質酸化量については、いずれの試験食でも食後 60 分から徐々に高まる様子が確認され、脂質酸化量に対して逆位相となる代償的な反応を見せた。摂取後 120 分と 150 分において、コントロール試行に対して中鎖脂肪酸オイル試行は低値となり、糖質代謝が抑制される様子が観察された。

### (5)心拍数

心拍数データについては、コントロール食とオリーブオイル添加食の間に差はみられなかつ

た。一方、中鎖脂肪酸オイル添加食では明確な違いが生じており、測定 90 分と 120 分時点でコントロール食に対して高い値が認められた。

(6)自律神経活動

心拍変動解析により交感神経活動指標 (LF/HF) と副交感神経活動指標 (lnHF) を求めた。いずれの試験食を摂取した場合においても、測定の後半に向けて交感神経活動指標が高値となる傾向と、副交感神経活動指標が低値となる傾向がみられたが、試験食間に差は認められなかった。

(7)追検討 (オイル単独摂取試験)

追加の検討として、オイルを単独で摂取させる試験を実施した。オイル 15g を封入したカプセルを 150g の水で摂取させる脂質単独摂取試験とした。この結果、180 分の累積 DIT が、速やかに吸収される中鎖脂肪酸オイルを摂取した場合にオリーブオイル摂取時を 4 割程度上回ることを確認した。ここまでの結果から、脂質は摂取の仕方によって食後のエネルギー消費に様相の異なる作用を生じさせることが明らかとなった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>市川真綾, 市川聖也, 山崎啓瑚, 海老根直之                      |
| 2. 発表標題<br>混合食に添加したオイルが食事誘発性熱産生に及ぼす影響 オリーブオイルとMCTオイルの比較 |
| 3. 学会等名<br>第77回日本栄養・食糧学会大会                              |
| 4. 発表年<br>2023年   |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

|       | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)                          | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)                     | 備考 |
|-------|--|---|----|
| 研究分担者 | 福岡 義之<br><br>(Fukuoka Yoshiyuki)<br><br>(20265028) | 同志社大学・スポーツ健康科学部・教授<br><br><br><br>(34310) |    |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

|         |         |
|---------|---------|
| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|