

氷菓摂取による代謝亢進の包括的評価

石原 達朗¹, 海老根 直之²

Comprehensive evaluation of the hypermetabolism due to the ingestion of low caloric ice cubes

Tatsuro Ishihara¹, Naoyuki Ebine²

We measured overall enhanced energy expenditures (EE) after the ingestion of a low caloric beverage in different temperature states, either liquid or solid. Observation was conducted by the use of a metabolic chamber where EE such as chewing, diet-induced thermogenesis and non-shivering thermogenesis were evaluated. Eight healthy males (age: 22 ± 1 yrs, height: 170 ± 2 cm, weight: 66.7 ± 6.7 kg, body fat: $16.4 \pm 4.1\%$) undertook a randomized crossover study. Two trials were, one in which subjects ate the low caloric beverage for ice cubes (3 kcal/250 g) and the other in which they drank the exact same beverage for control liquid. In order to obtain accurate measures of the increase of EE that was only induced by ingestion, subjects were instructed to watch a video during the trial to avoid unnecessary physical movements. As a result, the ingestion of control liquid increased EE by 2.6 ± 1.3 kcal, whereas the ingestion of ice cubes increased EE by 16.2 ± 4.2 kcal, when both energy intakes were 3 kcal. Since significant body movement was not observed by the accelerometer placed on the chest during the trial, it is assumed that most of the EE was increased by non-shivering thermogenesis. In conclusion, energy consumes greater than the actual calorie intake in the case when low caloric beverage is ingested in a solid state rather than in a liquid state.

[Keywords] diet-induced thermogenesis, non-shivering thermogenesis, metabolic chamber

本研究では、食事摂取中の代謝測定が可能なヒューマンカロリメーターを用い、氷菓を摂取させた際の食事誘発性熱産生や咀嚼、非ふるえ熱産生など、摂取にまつわる代謝亢進を包括的に評価し、低温・低カロリー食物の摂取がエネルギー出納バランスを負に傾ける行動となりうるかを検討することを目的とした。8名の男子学生（年齢： 22 ± 1 歳、身長： 170 ± 2 cm、体重： 66.7 ± 6.7 kg、体脂肪率： $16.4 \pm 4.1\%$ ）を対象に、クロスオーバーデザインで実験を行った。自作した低カロリー氷菓（250 g）と、咀嚼せずに摂取できる同量同成分の常温コントロールを試験食に設定した。また、食事に関連する代謝亢進のみを評価するために、前もって被験者にコンディショニングを整えさせ、測定中は映像視聴をさせることで長時間の安静維持による心理的な負担を軽減するなど、夾雑する代謝亢進が測定中に生じないように配慮した実験を行った。本研究の結果、摂取熱量はいずれの試行とも 3 kcal であったのに対して、コントロールを摂取させた場合に生じた代謝亢進量は 2.6 ± 1.3 kcal、氷菓を摂取させた場合には 16.2 ± 4.2 kcal であった。両群とも体幹の加速度データに基づく代謝測定中の身体活動量指標に変化はみられず、代謝亢進の大部分は非ふるえ熱産生によるものと考えられた。低カロリー氷菓の摂取は、エネルギー出納バランスの観点で評価すると、消費の方が優位な行動であることが明らかとなった。

[キーワード] 食事誘発性熱産生、非ふるえ熱産生、ヒューマンカロリメーター

I. 緒言

食事に起因する代謝亢進は食事誘発性熱産生（diet-induced thermogenesis : DIT）とよばれ、90 年以上にわたって継続的に研究が行われている（Seth and Luck, 1925）。DIT は食物の消化・吸収やそれに伴う腸管の蠕動運動によって生じる代謝亢進であり、ヒ

トの総エネルギー消費量の 10% を占めるとされている（Westerterp, 2004）。食行動はエネルギーを摂取する行為としての側面のみが意識されやすく、食事の摂取により DIT が発生することに加え、摂食に必要な身体活動が代謝を亢進させることでエネルギーが消費されているという事実は認識され難い。座位の安静時エネルギー消費量（resting energy expenditure : REE）

1 同志社大学大学院スポーツ健康科学研究科（Graduate School of Health & Sports Science, Doshisha University）

2 同志社大学スポーツ健康科学部（Faculty of Health & Sports Science, Doshisha University）

を1と定義する代謝当量 (metabolic equivalents : METs) の一覧表において、座位の食事は1.5 METs、座位で会話を伴う食事は2.0 METsと示されており (Ainsworth et al., 2011)、食物を口に運ぶ身体動作や咀嚼運動によってもエネルギーは少なからず消費されている。

ヒトは寒冷環境に暴露された場合に寒冷順化が生じるが、冷たい食物を摂取した際の内的な暴露によっても、体温調節のための代謝亢進がみられることが報告されている (黒島, 2003)。寒冷順化の一般的な型である非ふるえ熱産生によって REE に20% 程度の亢進が生じるとされており (松本, 2012)、冷たい食物を摂取した際にみられる代謝亢進は非ふるえ熱産生によるものと考えられる。すなわち、寒冷食の摂取によって生じるエネルギーの消費は、通常食摂取時に生じる DIT と摂食のための身体活動、これに加えて体温調節のための非ふるえ熱産生の3つから構成されると考えられる。これまで述べてきたように、食事 (食行動) にはエネルギーを消費させる側面があり、極めて低カロリーの食物を摂取させた場合に、理論上ではエネルギーの出納を負に傾かせることが可能である。さらに、食物の硬さや摂取温度による寒冷刺激を付加し、咀嚼運動や熱産生反応による代謝を上乗せすることで、作動的にエネルギーの消費を強化することも可能である。

室内における代謝測定には間接熱量測定法を用いることが一般的である。しかし、食事の最中の代謝測定は、広く流通しているマスクを使用して呼吸を採取するタイプの間接熱量測定法では物理的に困難である。一方で、ヒューマンカロリーメーター (human calorimeter : HC) 法では、被験者が測定室内に滞在している間、室内のガス濃度の変化によってエネルギー消費量 (energy expenditure : EE) を算出することができるため、食事摂取中の代謝測定が可能である。加えて、HC には測定精度の面にも利があり、既存の測定方法の中で最も精確と考えられている (田中, 2009)。

そこで本研究は、HC を用いて氷菓を摂取させた際の代謝亢進を包括的に評価し、低温・低カロリー食物の摂取が、エネルギーの消費優位の行動となりうるかを検証することを目的とした。

II. 方法

1. 被験者

実験参加に同意した健康な8名の男子学生を対象とした。表1には被験者の身体特性を示した。氷を多量に摂取させるため、知覚過敏の症状がある者は被験者から除外した。なお、本研究は同志社大学の「人を対象とする研究」に関する倫理審査委員会の承認を得て

表1 被験者の身体特性

| | (n=8) |
|----------|------------|
| 年齢 (歳) | 22 ± 1 |
| 身長 (cm) | 170 ± 2 |
| 体重 (kg) | 66.7 ± 6.7 |
| 体脂肪率 (%) | 16.4 ± 4.1 |

実施した。測定にあたって、本人に測定の目的、利益、不利益、危険性、データの公表について説明を行い、書面にて同意を得た。

2. 試験食

摂取中の飽きによる心理的影響が結果をゆがめないよう、市販のノンカロリーサイダー (イオン製) をゆず果汁 (ハグルマ製) で調味し、低カロリーの氷菓 (3 kcal/250 g)、ならびに同量同成分の常温液体であるコントロールを自作した。氷菓の提供温度は $-16.3 \pm 2.3^{\circ}\text{C}$ であった。試験食の摂取はいずれの試行も25分間で行わせ、合計250 g となるよう5分おきに50 g ずつ与えた。氷菓はスプーンで1粒 (約 $100 \sim 150 \text{ mm}^3$) ずつ口に運び、噛み砕いて摂取させ、コントロールは紙コップでゆっくりと摂取させた。

3. 測定項目

1) エネルギー消費量および呼吸商

EE および呼吸商の測定には HC (FST-5000S, 富士医科産業製) を使用した。測定室の環境は室温 25°C 、相対湿度50%とした。データ解析には Henning (1996) のアルゴリズムを採用し、酸素摂取量および二酸化炭素排出量データより、Weir (1949) の式を用いて毎分の EE を算出した。食事による代謝亢進を評価するための基線となる REE は、試験食摂取前の安定した5分の平均を代表値とした。EE の測定値から REE を差し引き、代謝の高まりが終息するまでのデータの積算値を総代謝亢進量とした。

試験食摂取前の呼吸商の代表値は EE のデータ採択区間に合わせた時間帯の平均値とした。また、試験食摂取中の呼吸商は摂取時間25分における最後の5分の平均を代表値とした。試験食摂取後の呼吸商は摂取直後から10分ごとにデータを区切り、それぞれ後半の5分の平均を代表値とした。

2) 体幹の動作による身体活動量指標ならびに心拍数

ホルター心電計であるカルポッド (carpod : CP, メディリンク製) を用いて体動による身体活動量を測定した。CP は胸骨柄上に専用電極を添付してデータを採取するため、心電図が取得できることに加え、内蔵の3軸加速度計によって身体活動量の算出が可能であ

る。CP データの専用解析ソフトである CPDConvAct (メディリンク製) により 4 秒ごとの合成加速度から算出される EE (carpod energy expenditure: CPEE) を体幹部の体動による身体活動量の指標とし、代謝測定中の安静状態の評価に用いた。CPEE は呼吸商と同一の時間帯の平均を代表値とした。

専用解析ソフト MLAnalyzer (メディリンク製) を利用し、CP から心拍数のデータを取得した。心拍数に関しても呼吸商と同一の時間帯の平均を代表値とした。

4. 測定手順

被験者には実験に先立って研究の概要を説明した後、代謝測定中に夾雑しうる代謝亢進を抑制する目的で、実際に測定当日の流れを事前に体験させることで馴化させ、緊張による代謝亢進を回避した。加えて、実験前日より飲酒と過度なカフェインの摂取、また当日の激しい運動を控えることを測定参加の条件とした。代謝測定は、前の食事の DIT による代謝変動の影響を避けるため、日常量の食事を摂取した場合は、5 時間以上空けて実施する必要があるとされている (Compher et al., 2006)。そのため本検討では最低でも食後 6 時間経過以降に測定を実施した。

測定にはクロスオーバーデザインを採用した。被験者が研究室に到着した後、移動や緊張によって生じる代謝亢進を抑制するため、ゆるやかに身体計測を実施した。身長計測にはデジタル身長計 (DSN-90, ムラテック KDS 製)、体重と体脂肪率の計測には Inner Scan V (BC-612, タニタ製) を用いた。その後、CP を装着させ実験開始まで座位安静を保持させた。

REE 測定終了後、氷菓を摂取させて 90 分の代謝測定を実施してから、コントロールを摂取させて 35 分の測定を実施する A パターン、またはコントロールの測定を先に実施し、その後に氷菓の測定を実施する B パターンを各被験者にランダムに割り付けて評価を行った。試験食摂取後の代謝測定時間に差があるのは、被験者の尿意への配慮として、予備実験の結果から、データに影響が出ない範囲で測定時間の短縮を計ったためである。なお、被験者に長時間の安静を維持させる必要があるため、測定中は映像視聴させることにより、被験者の精神的負担を軽減することで、退屈しのぎのために生じる余計な身体活動を抑制した。

5. 統計処理

総代謝亢進量、呼吸商、CPEE、心拍数は全て平均値 ± 標準偏差 (standard deviation: SD) で示した。全ての統計処理には IBM SPSS Statistics 23 (日本アイ・ビー・エム製) を用いた。総代謝亢進量の試行間比較には対応のある t 検定を用いた。呼吸商、CPEE、心

拍数の時系列データの検討には、繰り返しのある 2 要因分散分析 (two-way ANOVA) を実施し、事後検定には Bonferroni の多重比較検定を採用した。統計的有意水準はいずれも 5% に設定した。

III. 結果

図 1 には、両試行における総代謝亢進量を示した。コントロール試行における代謝亢進量は 2.6 ± 1.3 kcal、氷菓試行における代謝亢進量は 16.2 ± 4.2 kcal であり、コントロールを摂取させた場合に比べ、氷菓を摂取させた場合に有意に高値であった ($p < 0.001$)。また、被験者の体格差を考慮し、除脂肪体重 (fat-free mass: FFM) 1 kg あたりの相対値で評価した場合には、コントロール試行で 0.04 ± 0.04 kcal/kg FFM、氷菓試行で 0.29 ± 0.07 kcal/kg FFM であり、氷菓摂取で高値であった ($p < 0.001$)。

図 2 は、体幹部の身体活動量指標である CPEE の推移を示したものである。両試行で差は認められず、時系列にも大きな変化はみられなかった。これにより、代謝測定中に不要な身体活動は抑制されていたと判断

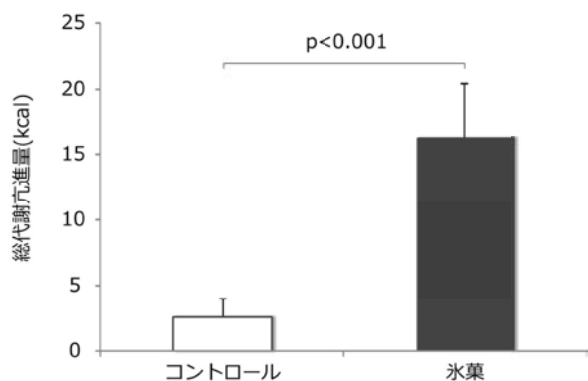


図 1 代謝亢進量の積算値

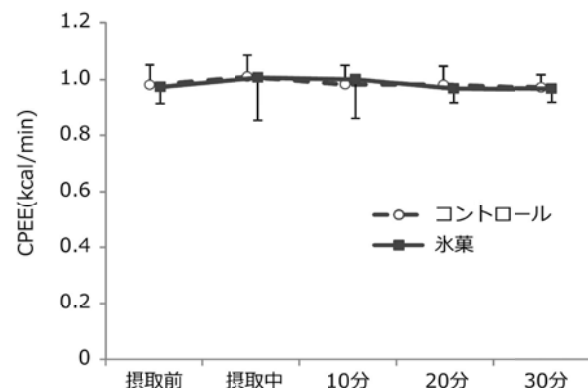


図 2 体幹部の身体活動量指標 (carpod energy expenditure: CPEE) の推移

表2 呼吸商, 体幹部身体活動量指標, 心拍数の推移

| (n=8) | 氷菓 | | | | |
|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 試験食摂取前 | 摂取中 | 10 分 | 20 分 | 30 分 |
| 呼吸商 | 0.84 ± 0.04 | 0.83 ± 0.04 | 0.82 ± 0.03 | 0.83 ± 0.04 | 0.81 ± 0.03 |
| 体幹部身体活動量指標 CPEE (kcal/min) | 0.98 ± 0.06 | 1.01 ± 0.16 | 1.00 ± 0.14 | 0.97 ± 0.05 | 0.97 ± 0.05 |
| 心拍数 (拍) | 61.2 ± 7.8 | 63.2 ± 10.0 | 59.0 ± 10.1 | 55.4 ± 8.1 | 56.8 ± 7.2 |

| (n=8) | コントロール | | | | |
|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 試験食摂取前 | 摂取中 | 10 分 | 20 分 | 30 分 |
| 呼吸商 | 0.84 ± 0.03 | 0.84 ± 0.02 | 0.85 ± 0.03 | 0.84 ± 0.02 | 0.86 ± 0.01 |
| 体幹部身体活動量指標 CPEE (kcal/min) | 0.98 ± 0.07 | 1.01 ± 0.08 | 0.99 ± 0.07 | 0.99 ± 0.07 | 0.97 ± 0.05 |
| 心拍数 (拍) | 61.0 ± 6.0 | 62.0 ± 5.6 | 59.7 ± 6.2 | 59.1 ± 6.4 | 58.0 ± 4.7 |

でき、2 試行いずれにおいても良質な代謝測定が実施できたといえる。

表2は、呼吸商、心拍数を時系列に示したものである。いずれにおいても、試行間で差は認められず、時系列にも統計的に検出できる変化はみられなかった。

IV. 考察

本研究では、食事摂取中の代謝測定が可能な HC を用い、氷菓摂取の際に生じる代謝亢進を包括的に評価し、低温・低カロリー食物の摂取がエネルギーバランスにおいて消費優位の行動となりうるか検証することを目的とした。

250 g の氷菓を摂取させた際に生じる代謝亢進量は 16.2 ± 4.2 kcal であった。試験食の熱量はいずれの試行でも 3 kcal であり、氷菓摂取によって生じる総代謝亢進量は摂取熱量を大きく上回っていた。そのため、低カロリー氷菓の摂取は、エネルギー出納バランスの観点で評価した場合には、摂食行動であるにもかかわらず、カロリーを損失させる行動に位置づけられることになる。氷菓を摂取させた場合に代謝が大きく亢進した要因の1つとして、食行動そのものの身体活動によって生じる代謝亢進が考えられる。座位姿勢での食事は座位安静に比べて 1.5 倍の活動強度と示されており (Ainsworth et al., 2011)、食行動がエネルギーを消費する身体活動であるという認識ももたれている。本研究では、試験食を口に運ぶ動作はコントロール試行においても生じるため、食事に起因する身体活動によって生じる代謝亢進のうち、氷菓摂取試行に特異的に上乘せされているのは咀嚼運動によるもののみである。咀嚼運動による代謝亢進については複数の研究で報告されている (Levine et al., 1999; Hamada et al., 2016)。本研究で試験食に用いた氷菓の場合、噛み砕くために強い咬合が必要となるものの、通常食に比べ

ると少数回の咀嚼で嚥下することが可能である。そのため、弾性が高く、嚥下するにあたって咀嚼回数を多く必要とする食物を摂取させた場合には、さらに大きな代謝亢進が生じると考えられる。

本研究のデザインでは DIT、咀嚼の効果、寒冷刺激の効果を切り分けて考察することはできないが、両試行間で体幹の身体活動指標に有意な差がないことから、コントロール試行に対して氷菓試行で顕著な代謝亢進がみられた理由として、体温よりも著しく低い食物を摂取したことによって生じた非ふるえ熱産生が大きな要因と考えられる (Boschmann et al., 2003)。氷菓が身体から奪う熱量の理論値は、氷菓の比熱、氷菓の融解潜熱、水の比熱、被験者体温から算出することができ、本研究のセットアップであれば約 30 kcal と試算できる (村上, 2012)。氷菓摂取時の総代謝亢進量実測値はおおよそ 16 kcal であり、身体から奪われた熱を補う体温調節のための代謝亢進が大部分であったと推察される。また、非ふるえ熱産生を生じさせる特殊な臓器として、近年、成人でも存在することが明らかになった褐色脂肪細胞は、寒冷暴露により活性が増すことも報告されている (松本, 2012)。褐色脂肪は細胞内に蓄えた中性脂肪から脂肪酸を生成することに加え、自身の細胞内で積極的に酸化分解し、そのエネルギーを熱に変換する機能を持っている。そのため先行研究では味覚などの刺激が交感神経を介して代謝に影響すると述べられている (Saito, 2013)。実際に研究されているのは、外的な寒冷刺激による動物実験などであるが (斉藤, 2003)、氷菓を急激に摂取したことにより、内部から交感神経が刺激されることで褐色脂肪組織に活性が生じる可能性も考えられる。

コントロールに設定した、氷菓と同成分の常温液体を摂取させた場合の代謝亢進量は、氷菓に比べるとかなり小さいもののおおよそ 3 kcal であり、幾分の亢進がみられている。既報では、500 ml の水を摂取さ

せた場合には代謝亢進が観察されている (Boschmann et al., 2007). 水を摂取した場合に腸管の運動が誘発されることは複数の研究で報じられており (Fujino et al., 2003, Brown et al., 2006), 37℃の水を摂取した場合に比べて, 22℃の方が顕著な代謝亢進がみられることも報告されている (Boschmann et al., 2003). 以上のことから, 水は低温で日常的に摂取することが容易で, 熱量をもたないこともあって, 包括的に判断した場合, 飲水行為もエネルギーの消費が優位な行動になると考えられる.

V. おわりに

本研究では, HC を用いることで氷菓を摂取した際に生じる代謝亢進について評価した. 氷菓摂取で消費されたエネルギーは 16.2 ± 4.2 kcal であり, これは試験食の含有熱量 3 kcal を大きく上回っていた. 氷菓摂取により生じる代謝亢進の内訳は, DIT, 摂食時の身体活動による代謝亢進, そして非ふるえ熱産生によるものである. 本研究のデザインでは, 代謝亢進にどの要因がどれだけの影響を及ぼしたかを評価することはできないが, 同量同成分の液体摂取との比較から, 氷菓摂取によって体から奪われた熱を補う体温調節のための非ふるえ熱産生が大部分であったと考えられる. 本研究結果より, 低カロリー氷菓の摂取はエネルギー出納バランスの観点では消費が優位な行動であることが明らかとなった.

本研究では食事によって生じる様々な代謝亢進を包括的に評価する目的で HC 法を用いた検討を実施した. HC 法は測定精度の点では, 既存の測定機器で最も高く位置づけられているが (田中, 2009), 同法を利用した場合, 測定室 (チャンパー) 内には被験者以外は立ち入ることができないために試験食の準備なども被験者自身が実施しなければならず, 食事を摂取させる実験においてはこのような身体活動の影響を排除した測定は困難である. 食事による代謝亢進の要因を個別に検討することを目的とした場合には, 原理的にダグラスバッグ法やフード法による測定が望ましいと考えられる.

謝辞

本研究の実施に際し, 同志社大学大学院スポーツ健康科学研究科 山本満氏ならびに田中歌氏より, データ収集, 分析に関して多大な助言を頂きました. また, 論文作成にあたり同志社大学スポーツ健康科学部 森川綾子氏より協力を得ました. ここに記し感謝の意を表します.

参考文献

- Ainsworth BE., Haskell WL., Herrmann SD., Meckes N., Bassett DR Jr., Tudor Locke C., Greer JL., Vezina J., Whitt Glover MC., Leon AS. Compendium of physical activities: a second update of codes and MET values. *Med Sci Sports Exerc* 43(8): 1575-1581. 2011
- Boschmann M., Steiniger J., Hille U., Tank J., Adams F., Sharma AM., Klaus S., Luft FC., Jordan J. Water-induced thermogenesis. *J Clin Endocrinol Metab* 88(12): 6015-6019. 2003
- Boschmann M., Steiniger J., Franke G., Birkenfeld AL., Luft FC., Jordan J. Water drinking induces thermogenesis through osmosensitive mechanisms. *J Clin Endocrinol Metab* 92(8): 3334-3337. 2007
- Brown CM., Dulloo AG., Montani JP. Water-induced thermogenesis reconsidered: the effects of osmolality and water temperature on energy expenditure after drinking. *J Clin Endocrinol Metab* 91(9): 3598-3602. 2006
- Compher C., Frankenfield D., Keim N., Roth-Yousey L. Best practice methods to apply to measurement of resting metabolic rate in adults: a systematic review. *J Am Diet Assoc* 106(6): 881-903. 2006
- Fujino K., Inui A., Asakawa A., Kihara N., Fujimura M., Fujimiya M. Ghrelin induces fasted motor activity of the gastrointestinal tract in conscious fed rats. *J Physiol* 550(1): 227-240. 2003
- Hamada Y., Miyaji A., Hayashi N. Effect of postprandial gum chewing on diet-induced thermogenesis. *Obesity* (doi: 10.1002/oby.21421). 2016
- Henning B., Lofgren R., Sjostrom L. Chamber for indirect calorimetry with improved transient response. *Med Biol Eng Comput* 34(3): 207-212. 1996
- 黒島晨汎. 体温医学研究の歴史 (前現代史). *日本生気象学会雑誌* 40: 25-34. 2003
- Levine J., Baukol P., Pavlidis I. The energy expended in chewing gum. *N Engl J Med* 341(27): 2100. 1999
- 松本孝朗. 寒冷順化. からだと温度の事典, 朝倉書店: 59-61. 2012
- 村上曜. 熱と温度. 熱力学, プレアデス出版: 63-66. 2012
- 斉藤昌之. エネルギー消費の自律的調節と肥満に関する分子栄養学的研究. *日本栄養・食糧学会誌* 56 (1): 33-39. 2003
- Saito M. Brown adipose tissue as a regulator of energy expenditure and body fat in humans. *Metab J* 37(1): 22-29. 2013
- Seth TN., Luck JM. The relation between the metabolism and the specific dynamic action of amino-acids. *Biochem J* 19(3): 366-376. 1925
- 田中茂穂. エネルギー消費量とその測定方法. *静脈経腸栄養* 24 (5): 1013-1019. 2009
- Weir JDV. New methods for calculating metabolic rate with special reference to protein metabolism. *J Physiol* 109(1-2): 1-9. 1949
- Westerterp KR. Diet induced thermogenesis. *Nutr Metab* 1(1): 5. 2004