

## 原著

# 体重増加速度の違いが成長期ラットの身体組成に及ぼす影響

田井 勇毅<sup>\*1</sup>、長谷川 尋之<sup>\*2</sup>、近藤 衣美<sup>\*3,\*4</sup>、前田 めぐみ<sup>\*4</sup>、岡村 浩嗣<sup>\*4</sup>

<sup>\*1</sup> 金沢学院大学人間健康学部、<sup>\*2</sup> 松本大学人間健康学部、<sup>\*3</sup> 国立スポーツ科学センタースポーツ科学部

<sup>\*4</sup> 大阪体育大学大学院スポーツ科学研究科

## 【目的】

体重増加速度の違いが除脂肪組織（FFM）と脂肪組織（FM）の増加比率および体重増加に要するエネルギーに及ぼす影響を検討すること。

## 【方法】

6週齢のラットに飼料を11日間自由摂取させ、体重増加速度の速い群（R群、n=5）とした。摂取量を制限し、R群と同等の体重になるまで17日間飼育した群を体重増加速度の遅い群（S群、n=5）とした。実験期間中の体重、エネルギー摂取量、エネルギー消費量を測定した。FFMとFMの増加比率は、FFMとFMのエネルギー密度と、エネルギー摂取量とエネルギー消費量の差として求めたエネルギー蓄積量とから算出した。

## 【結果】

FFMとFMの増加比率は群間で有意差はなかった。実験期間中のエネルギー摂取量とエネルギー消費量はS群がR群より有意に多かった（ $p < 0.001$ ）が、エネルギー蓄積量には群間で有意差はなかった。1 kgの体重増加に必要なと推定されるエネルギー摂取量とエネルギー消費量はS群がR群よりも有意に多かった（ $p < 0.001$ ）が、エネルギー蓄積量には群間で有意差がなかった。

## 【結論】

体重増加速度が遅いと体重増加のためにより多くのエネルギー摂取が必要であるが、FFMとFMの増加比率には影響しないことが示唆された。

キーワード：増量 エネルギーバランス エネルギー蓄積量 身体組成

## I 緒言

ラグビーやアメリカンフットボールなど、体重が重く有利な競技では体重増加が必要ことがある。体重の増減はエネルギーバランスで決まる。エネルギー摂取量がエネルギー消費量を上回った状態が続けば体重は増加する。体重増加では、脂肪組織（FM）の増加を抑えながら除脂肪組織（FFM）を増加させることが重要である。

体重増加では、FFMを増やすために、1日当たり500~1,000kcalのエネルギーを付加することが多い<sup>1)~3)</sup>。アスリートを対象にした研究で、永澤ら<sup>1)</sup>は1日当たり約1,000kcalのエネルギーを12週間付加した結果、体重とFFMは有意に増加したが、FMには有意な増加が認められなかったことを報告している。一

方、Gartheら<sup>2)</sup>はアスリートが1日当たり約500kcalのエネルギーを8~12週間付加した結果、体重、FFMおよびFMが有意に増加したことを報告している。この研究では、体重増加時に過剰なエネルギーを摂取することは、望ましくないFMを増加させるため、慎重に考えるべきであると述べている。

日常的に正のエネルギーバランスを保ち体重増加し、FMが蓄積した場合、健康への影響も考える必要がある。大学生アメリカンフットボール選手では、体脂肪率とインスリン感受性に負の相関があったこと<sup>4)</sup>、柔道女子重量級選手では、FMと血清インスリン濃度や血清レプチン濃度に正の相関があったこと<sup>5)</sup>、が報告されており、過剰なエネルギー摂取によるFMの蓄積には注意が必要である。これらのことから、体重増加する際に付加するエネルギーは慎重に検討する必要

があることが推察される。

FFMとFMは組成やエネルギー含量が異なる。ラットのFFMとFMの組成を分析した結果<sup>6)</sup>より、FFMは約75%が水分、約20%がタンパク質で1kg当たり約1,400kcal、FMは約85%が脂質で1kg当たり約7,900kcalと算出される。成長期では、組織合成に要するエネルギーと組織増加分のエネルギーを余分に摂取する必要がある<sup>7)</sup>。アスリートの体重増加においても同様の考え方ができることから、体重増加する際に付加するエネルギーを検討するには、FFMとFMの増加比率を考慮する必要があると考えられる。

Forbes<sup>8)</sup>はエネルギー摂取量が過剰なほど、体重増加に占めるFFMの増加比率が低いことを報告している。反対に、エネルギー摂取量の過剰が少なくなり、体重増加速度が遅くなると、FFMの増加比率が高くなることが推察される。Forbesは、体重増加前のFMが少ないヒトはFMの多いヒトよりも体重増加に占めるFFMの割合が高く<sup>9)</sup>、体重増加に要するエネルギーが少なかったこと<sup>10)</sup>を報告している。このことから、体重増加に要するエネルギーは、体重増加に占めるFFMの増加比率が多いほど、少ないことが推察される。しかし、体重増加速度の違いがFFMとFMの増加比率および体重増加に要するエネルギーに及ぼす影響は明らかではない。

ラットのFFMとFMの組成<sup>6)</sup>から算出した結果より、FFMのエネルギー含量はFMのエネルギー含量よりも低いと言える。また、体重増加に占めるFFMの増加比率が多いほど、体重増加に要するエネルギーが少なかったこと<sup>10)</sup>が報告されている。アスリートの体重増加はFFMの増加を目的としていることが多いことから、FFMとFMの増加比率を考慮して体重増加時に付加するエネルギー量を設定することで、過剰なエネルギー摂取によるFMの蓄積を予防できることが考えられる。さらに、体重増加速度の違いがFFMとFMの増加比率および体重増加に要するエネルギーに及ぼす影響を検討することで、アスリートの増量計画に役立つ可能性が考えられる。

アスリートの体重増加ではFMの増加を抑えながらFFMを増加させることが必要なことが多い。また、アスリートの体重増加では、エネルギー消費量を測定または推定し、エネルギー消費量を上回る様にエネルギー摂取量を設定する。これらのことから、体重増加中の身体組成、エネルギー消費量およびエネルギー摂取量を正確に測定することは重要である。ヒトのFFMやFMは水中体重法<sup>11)</sup>、空気置換法<sup>12)</sup>、二重X線吸収法<sup>13)</sup>などを用いて推定できるが、その測定原理によって結果は異なる。また、エネルギー消費量は二重標識水法<sup>14)</sup>やヒューマンカロリメーター<sup>15)</sup>を用いて、比較的高い精度で測定できる。一方、エネルギー摂取量は食事記録法、食物摂取頻度調査法などの食事調査

によって推定することが一般的であるが、食事調査には評価誤差があることが知られている。日本人においても過小評価<sup>16)</sup>が報告されており、高精度で評価することは難しい。動物実験ではこれらを管理できるため、体重増加速度の違いがFFMとFMの増加比率に及ぼす影響を検討するために有用であると考えられる。

そこで、本研究では、摂食量を調節して体重増加速度が異なるラットを作製し、体重増加速度の違いがFFMとFMの増加比率および体重増加に要するエネルギーに及ぼす影響を検討することを目的とした。仮説は、体重増加速度が遅い方がFFMの増加比率が高く、体重増加に要するエネルギーは少ないとした。

## II 方法

### 動物飼育環境および倫理的配慮

本研究では飼育室の温度を $23 \pm 1^\circ\text{C}$ とし、8時から20時までを暗期、20時から8時までを明期とした。本研究計画は実験に先立って、大阪体育大学動物実験委員会にて承認された（受付番号27-1、27-4）。

### 実験1：飼料エネルギーの吸収率

#### 1. 対象動物および飼育方法

3週齢の雄Sprague-Dawleyラット（日本クレア株式会社、東京）6匹に市販飼料（CE-2、日本クレア株式会社、エネルギー比率 タンパク質：31%、脂質：11%、炭水化物：58%）と水を自由摂取させ代謝ケージで1週間、予備飼育した。その後2週間、摂食量の測定と糞の採取を行った。

#### 2. エネルギー吸収率の測定方法

糞の水分量を凍結乾燥（FTS凍結乾燥装置、セントラル科学貿易株式会社、東京）前後の重量差で算出した。乾燥したサンプルはアブソルートミル（Vita-Mix Absolute Blender, Osaka Chemical Co., Ltd、大阪）で粉末状に粉碎し均質化してから分析に用いた。糞のタンパク質含量はケルダール法、総脂質量はFolch法<sup>17)</sup>で定量した。灰分量は直接灰化法（ $550^\circ\text{C}$ ）で灰化前後の重量差で求めた。糞の総重量から水分、タンパク質、脂質、灰分を差し引いた残りを炭水化物とした。

糞に排泄されたエネルギーは、糞に排泄されたタンパク質、総脂質、炭水化物に物理的燃焼値（タンパク質：5.7kcal/g、脂質：9.4kcal/g、炭水化物：4.1kcal/g）を乗じたものを合計して算出した。

飼料も糞と同様に分析してエネルギー含量を求め、摂食量を乗じてエネルギー摂取量を算出した。

飼料エネルギーの吸収率は、糞に排泄されなかったエネルギーをエネルギー摂取量で除して求めた。

## 実験2：体重増加速度の違いがFFMおよびFMの増加に及ぼす影響

### 1. 対象動物および飼育方法

4週齢の雄Sprague-Dawleyラット（日本クレア株式会社、東京）20匹を6週齢まで、市販飼料（CE-2）と水を自由摂取させ個別ケージで飼育した後、本実験に供した。

図1に実験の概要を示した。摂食量を調節して体重増加速度の異なるラットを作製した。市販飼料（CE-2）を11日間自由摂取させた群を体重増加速度の速い群（R群、n=5）、摂食量を制限して体重がR群と同等になるまで飼料を17日間摂取させた群を体重増加速度が遅い群（S群、n=5）とした。ラットはエネルギー消費量を測定するためチャンバー（縦33cm×横22cm×高さ14cm）で飼育した。食餌は両群とも、毎日、午前8時～午前10時にチャンバー内に入れて与えた。R群は自由摂取とし、S群の摂食量は、1日当たりの体重増加量がR群の2/3になるように制限した。S群は食餌がなくなっても、翌日の食餌を与えるタイミングまで補充しなかった。飲水は自由摂取とした。体重、摂食量、エネルギー消費量を毎日測定した。全身のエネルギー含量を測定するため、両群ともに体重増加前後に5匹ずつのラットを屠殺した。

### 2. 実験期間中のエネルギー消費量、エネルギー摂取量、エネルギー蓄積量

6週齢までの飼育と同様に、飼育室の温度を23±1℃とし、8時から20時までを暗期、20時から8時までを明期とした。エネルギー消費量はOpen-Circuitシステムで測定した<sup>18)</sup>。チャンバー内の空気を、ラットの体重に応じて1,350～1,650ml/分で吸引することで換気した。吸引した空気の一部をダグラスバッグ（株式会社ヤガミ、名古屋）にR群で11日間、S群で17日間、23時間45分ずつ採取した。ポータブルガスモニター（VO2000、有限会社エスアンドエムイー、東京）を用いて酸素及び二酸化炭素濃度を分析した。ダグラス

バッグに採取した検体の酸素および二酸化炭素濃度と、チャンバーの換気量から、酸素消費量と二酸化炭素排出量を算出した。酸素消費量と二酸化炭素排出量から、Weirの式<sup>19)</sup>を用いて、エネルギー消費量を算出した。エネルギー消費量は24時間当たりに換算した。

実験期間中の摂食量を毎日測定し、実験1と同様にエネルギー摂取量を算出した。実験期間中の総エネルギー摂取量と総エネルギー消費量の差を、全身へのエネルギー蓄積量とした。

### 3. 解剖

解剖は午前9時から開始した。ラットは麻酔下で開腹し、下大静脈から採血し脱血死させた。その後、肝臓、腎臓、肺、脾臓、胃、腸、精巣、精巣上部、長母趾屈筋、腓腹筋、ヒラメ筋、足底筋、前脛骨筋、腎周囲脂肪組織、後腹壁脂肪組織、生殖器脂肪組織を採取し秤量した。本研究では、エネルギー消費量を測定するために、解剖直前までラットをチャンバーで飼育していた。解剖前に絶食させなかったため、消化管に未吸収の内容物が残っていた。未吸収の消化管内容物は内臓のエネルギー含量の測定値に正の誤差を与えるので、胃と腸の内容物は除去した。血液は屠体の腹腔内に戻し屠体として分析まで凍結保存した。採取した臓器と組織は、内臓（肝臓、腎臓、肺、脾臓、胃、腸、精巣、精巣上部）、骨格筋（腓腹筋、長母趾屈筋、ヒラメ筋、足底筋、前脛骨筋）、脂肪組織（腎周囲脂肪組織、後腹壁脂肪組織、生殖器脂肪組織）としてまとめて分析まで凍結保存した。

### 4. FFMとFMの増加量および増加比率

次の3つの方法で算出した。

#### 4-1：屠体分析

屠体と採取した内臓、骨格筋および脂肪組織の水分量は、凍結乾燥前後の重量差で算出した。乾燥したサンプルはアブソルートミルで粉末状に粉碎し均質化

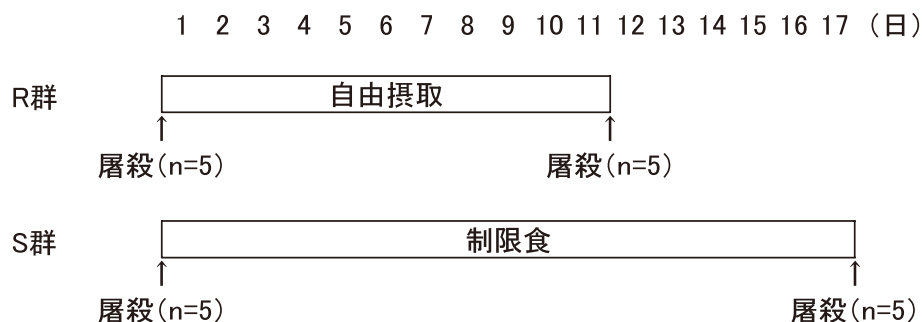


図1 実験2の概要

し、タンパク質含量をケルダール法、総脂質量をFolch法<sup>17)</sup>、グリコーゲン含量をLoらの方法<sup>20)</sup>で定量し、物理的燃焼値（タンパク質：5.7kcal/g、脂質：9.4kcal/g、グリコーゲン：4.1kcal/g）を乗じてエネルギー含量を算出した。

FFMは内臓と内臓以外に分別した。屠体分析から求めた内臓、骨格筋、脂肪組織のエネルギー含量(表1)を用いて、以下の連立方程式から内臓以外のFFMとFMのエネルギー含量を算出した。内臓、内臓以外のFFM、FMの増加量は、体重増加前後の各組織の平均値の差から求めた。

$$\begin{cases} \text{内臓以外のFFM(g)} + \text{FM(g)} = \text{体重(g)} - \text{内臓(g)} \cdots (1) \\ \text{内臓以外のFFM(g)} \times \text{骨格筋のエネルギー含量(kcal/g)} \\ + \text{FM(g)} \times \text{FMのエネルギー含量(kcal/g)} \\ = \text{全身のエネルギー含量(kcal)} - \text{内臓(g)} \times \text{内臓の} \\ \text{エネルギー含量(kcal/g)} \cdots (2) \end{cases}$$

体重から内臓重量を差し引いたものが、内臓以外のFFMとFMの重量であることに基づき、上記の連立方程式で求めた。式(1)は内臓以外のFFMとFMの合計が、体重と内臓の重量の差であること、式(2)は内臓以外FFMとFMのエネルギー含量の合計が、全身のエネルギー含量と内臓のエネルギー含量の差になることに基づいている。内臓以外のFFMは骨格筋が多くを占めるので、内臓以外のFFMのエネルギー含量には骨格筋の値を用いた。

4-2：実験期間中のエネルギーバランスからの推定 (FFMとFM：2成分)

実験期間中の総エネルギー摂取量と総エネルギー消

費量の差として求めた全身へのエネルギー蓄積量と体重増加量とを用いて、FFMとFMの増加量を以下の連立方程式で求めた。

$$\begin{cases} \Delta \text{FFM(g)} + \Delta \text{FM(g)} = \Delta \text{体重(g)} \cdots (3) \\ \Delta \text{FFM(g)} \times \text{FFMのエネルギー含量(kcal/g)} + \Delta \\ \text{FM(g)} \times \text{FMのエネルギー含量(kcal/g)} \\ = \text{全身のエネルギー蓄積量(kcal)} \cdots (4) \end{cases}$$

式(3)はFFMとFMの増加量の合計が体重の増加量であること、式(4)はFFMとして蓄積するエネルギーとFMとして蓄積するエネルギーの合計が、全身へのエネルギー蓄積量であることを示している。この式におけるFFMのエネルギー含量には、各ラットの内臓と骨格筋のエネルギー含量の測定値に、平均増加量の比率を考慮して算出した値(表1)を用いた。

4-3：実験期間中のエネルギーバランスからの推定 (内臓、内臓以外のFFM、FM：3成分)

2成分の計算でのFFMを内臓と内臓以外に分けて算出した。

$$\begin{cases} \Delta \text{内臓以外のFFM(g)} + \Delta \text{FM(g)} = \Delta \text{体重(g)} - \Delta \text{内} \\ \text{臓(g)} \cdots (5) \\ \Delta \text{内臓以外のFFM(g)} \times \text{骨格筋のエネルギー含量} \\ \text{(kcal/g)} + \Delta \text{FM(g)} \times \text{FMのエネルギー含量(kcal/g)} \\ = \text{全身のエネルギー蓄積量(kcal)} - \Delta \text{内臓(g)} \times \text{内} \\ \text{臓のエネルギー含量(kcal/g)} \cdots (6) \end{cases}$$

式(5)は内臓以外のFFMとFMの増加量の合計が、体重の増加量と内臓の増加量の差になること、式(6)は内臓以外のFFMとして蓄積するエネルギーとFMとして蓄積するエネルギーの合計が、全身と内臓のエネ

表1 体重増加前後の組織のエネルギー含量

	R 群		S 群	
	前	後	前	後
体重 (g)	210.6 ± 7.4	303.4 ± 15.7	206.2 ± 8.7	297.0 ± 17.2
エネルギー含量 (kcal/g)				
内臓	1.341 ± 0.040	1.508 ± 0.031	1.398 ± 0.013	1.458 ± 0.022
骨格筋	1.288 ± 0.016	1.323 ± 0.051	1.320 ± 0.025	1.356 ± 0.016
FFM <sup>†</sup>		1.333 ± 0.048		1.364 ± 0.014
FM	7.489 ± 0.384	8.009 ± 0.386	7.930 ± 0.623	8.406 ± 0.368

† FFMのエネルギー含量は体重増加時における内臓と内臓以外のFFMの増加比率を考慮して算出した。増加比率は、表3の値を用いて求めた。内臓と内臓以外のFFMの増加比率はR群で5：95、S群で8：92と仮定し、体重増加後の内臓と骨格筋のエネルギー含量をこれらの比率で案分して求めた。

ルギー蓄積量の差になることに基づいている。

内臓増加量には体重増加前後に解剖したラットの臓器重量の平均値の差を用いた。内臓、骨格筋、脂肪組織のエネルギー含量には、体重増加後の各ラットの測定値を用いた。

### 5. 統計処理

データは平均値と標準偏差で示した。群間の比較は対応のないt検定で行った。すべての検定は両側検定で、危険率5%未満を統計的に有意とした。統計解析にはSPSS Statistics Ver.21（日本アイ・ビー・エム、東京）を用いた。

## III 結果

### 実験1：飼料エネルギーの吸収率

表2にタンパク質、脂質、炭水化物および合計のエネルギー摂取量、エネルギー排泄量、吸収率を示した。飼料エネルギーの吸収率は $77.0 \pm 0.8\%$ だった。

### 実験2：体重増加速度の違いがFFMおよびFMの増加比率に及ぼす影響

#### 1. 体重

図2に実験期間中の体重を示した。体重増加前後の体重に群間で有意差はなかった。体重増加量はR群で $89.6 \pm 9.0\text{g}$ 、S群で $87.8 \pm 6.7\text{g}$ と、群間で有意差はなかった。

#### 2. FFMとFMの増加量および増加比率

##### (1) 屠体分析

表3に屠体分析による結果を示した。増加量から求めた増加比率は、内臓：内臓以外のFFM：FMで、R群 $4.6 : 81.1 : 14.3$ 、S群 $7.2 : 79.1 : 13.7$ だった。

##### (2) エネルギーバランスからの推定（2成分）

実験期間中のエネルギー摂取量（R群 $797.6 \pm 48.3\text{kcal}$ 、S群 $1,070.1 \pm 38.9\text{kcal}$ 、 $p < 0.001$ ）とエネルギー消費量（R群 $582.5 \pm 50.1\text{kcal}$ 、S群 $826.2 \pm 55.3\text{kcal}$ 、 $p < 0.001$ ）はS群がR群より有意に多かったが、エネルギー蓄積量

表2 飼料エネルギーの吸収率

	エネルギー摂取量 (kcal/2週間)	エネルギー排泄量 (kcal/2週間)	吸収率 (%)
タンパク質	$405.6 \pm 11.7$	$85.4 \pm 3.2$	$78.9 \pm 0.9$
脂質	$140.8 \pm 4.1$	$32.4 \pm 1.2$	$77.0 \pm 1.0$
炭水化物	$770.7 \pm 22.3$	$184.8 \pm 14.9$	$76.0 \pm 1.4$
合計	$1317.1 \pm 38.1$	$302.6 \pm 16.9$	$77.0 \pm 0.8$

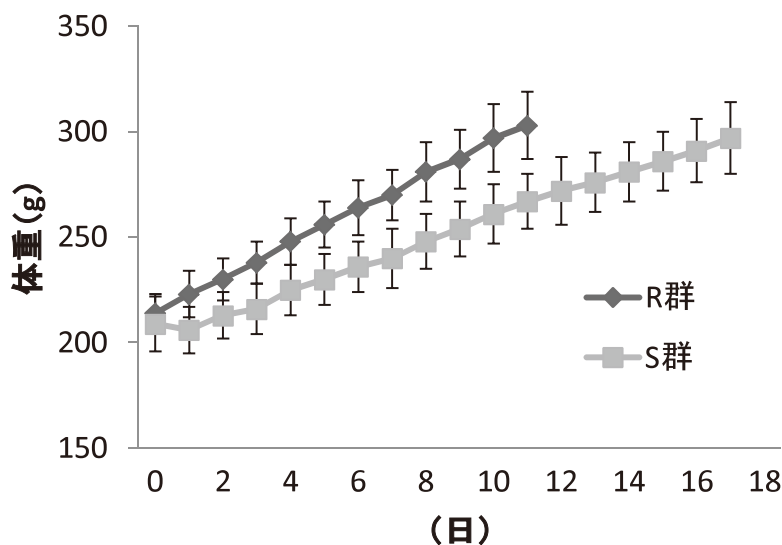


図2 実験期間中の体重 平均値と標準偏差

(R群 $215.1 \pm 20.7$ kcal、S群 $243.9 \pm 49.8$ kcal)には群間で有意差はなかった(図3)。

FFMとFMの2成分に分けて推定した各組織の増加量は、群間で有意差はなかった(表4)。FFMとFMの増加比率は、R群 $83.4 \pm 7.0:16.6 \pm 7.0$ 、S群 $79.4 \pm 9.6:20.6 \pm 9.6$ 、と群間で有意差はなかった。

(3) エネルギーバランスからの推定(3成分)

内臓、内臓以外のFFM、FMの増加量は、群間で有意差はなかった(表4)。内臓：内臓以外のFFM：FMの増加比率は、R群 $4.8 \pm 0.5:78.6 \pm 7.3:16.6 \pm 6.9$ 、S群 $7.5 \pm 0.6:72.0 \pm 9.9:20.5 \pm 9.5$ 、と群間で有意差はなかった。

3. エネルギー摂取量、エネルギー消費量およびエネルギー蓄積量の分布

実験期間中のエネルギー摂取量に占めるエネルギー消費量とエネルギー蓄積量の比率はR群で $73.0 \pm 3.0:27.0 \pm 3.0$ 、S群で $77.2 \pm 4.5:22.8 \pm 4.5$ と群間で有意差はなかった(図3)。

表5に1日当たりのエネルギーを示した。S群の1日当たりのエネルギー摂取量はR群の87%と有意に少なかった( $p = 0.002$ )。エネルギー蓄積量はS群がR群よりも有意に少なかった( $p = 0.010$ )が、エネルギー消費量は群間で有意差はなかった。

表6に1kgの体重増加に必要なと推定されるエネルギーを示した。エネルギー摂取量とエネルギー消費量はS群がR群よりも有意に多かった( $p < 0.001$ )が、エネルギー蓄積量には群間で有意差はなかった。

表3 屠体分析で求めた体重増加前後のFFMとFMおよび増加量

	R群			S群		
	前	後	Δ	前	後	Δ
FFM						
内臓 (g)	$22.5 \pm 1.7$	$26.7 \pm 1.5$	4.2	$19.8 \pm 1.2$	$26.4 \pm 1.5$	6.5
内臓以外 (g)	$183.5 \pm 4.8$	$258.8 \pm 10.8$	75.3	$184.3 \pm 8.1$	$256.0 \pm 14.8$	71.8
FM (g)	$4.6 \pm 2.0$	$17.9 \pm 4.4$	13.3	$2.1 \pm 1.4$	$14.6 \pm 4.5$	12.5

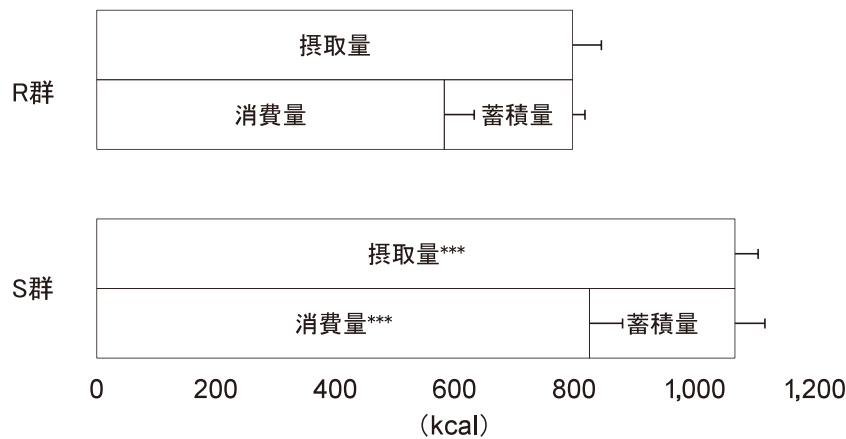


図3 実験期間中のエネルギーの分布 平均値と標準偏差 \*\*\* $p < 0.001$  vs. R群

表4 エネルギーバランスから推定したFFMとFMの増加量

	2成分		3成分	
	R群	S群	R群	S群
FFM (g)	$75.1 \pm 12.7$	$70.0 \pm 12.4$		
内臓 (g)			$4.2 \pm 0.0$	$6.5 \pm 0.0$
内臓以外 (g)			$70.9 \pm 12.7$	$63.5 \pm 12.3$
FM (g)	$14.5 \pm 5.1$	$17.8 \pm 8.0$	$14.5 \pm 5.0$	$17.8 \pm 8.0$

#### IV 考察

本研究は、体重増加速度が遅い方がFFMの増加比率が高く、体重増加に要するエネルギーが少ないとの仮説で行った。その結果、体重増加速度の遅いS群が体重増加速度の速いR群よりも体重増加に要するエネルギーが多かったが、FFMとFMの増加比率に有意差はなく、仮説は証明されなかった。

Forbes<sup>10)</sup>は、体重増加に占めるFFMの増加比率が、体重増加前の体脂肪が5kgのヒトは63%だったのに対して、51kgのヒトでは34%だったことを報告している。すなわち、体重増加前の体脂肪が少ない方が体重増加時のFFMの増加比率が高いことが示唆される。本研究では、体重増加前の平均の体重と体脂肪がR群では210.6gと4.6g、S群では206.2gと2.1gだったので、平均体脂肪率はR群では2.1%、S群では1.0%で、FFMとFMの増加比率は両群とも約8:2だった。Pittsが報告した体重増加前後のラットの身体組成の結果<sup>21)</sup>よりFFMとFMの増加比率を算出すると、体脂肪率が約20%のラットは、FFMとFMの増加比率は、約5:5だった。これらのことから、本研究のラットは体重増加前の体脂肪が少なかったため、体重増加時にはFFMの増加が多かった可能性が考えられる。また、ヒトを対象にしたForbes<sup>10)</sup>の報告と比較し、本研究のラットでは体重増加前の体脂肪量に群間で大きな違いがなかったことが、体重増加時にFFMとFMの増加比率に差がなかったことに関係していたのかもしれない。

Forbes<sup>8)</sup>の報告では、過剰に摂取したエネルギーが25,000kcalだったヒトは体重増加に占めるFFMの増加

比率が高く、80,000kcalだった場合はFFMの増加比率が低かったことが示されている。この報告で、過剰に摂取したエネルギーが少なかった場合のエネルギー摂取量は、多かった場合の31%である。これに対して本研究では、摂食量を制限していたS群の1日当たりのエネルギー摂取量はR群の87%だった(表5)。このように身体に蓄積される過剰なエネルギーの多かった場合と少なかった場合の差が、Forbes<sup>8)</sup>の報告に比べ本研究では小さかったため、FFMとFMの増加比率に差が認められなかったのかもしれない。また、ラットを対象とした研究で、体重増加期間が長いほど、体重増加時にFMの増加比率が高かったこと<sup>22)</sup>が報告されている。この報告ではFMの増加比率は体重増加期間が6日の場合は34%で、30日の場合は90%だった。本研究では11~17日間と、体重増加期間の差が小さかったこともFFMとFMの増加量に有意差がなかったことに関係していたのかもしれない。

S群の方がR群よりも、1kgの体重増加に必要なと推定されるエネルギー摂取量とエネルギー消費量が有意に多かった(表6)。エネルギー摂取量が制限されたS群でも生存や成長に必要なエネルギー消費量は減らせず、1日当たりのエネルギー消費量はS群とR群で有意差はなかった(表5)。このため、1日当たりの身体に蓄積されるエネルギーは少なく、1日当たりの体重増加量が少なかったと考えられる。本研究ではS群がR群よりも生存日数が長かったので、実験期間中の総エネルギー摂取量も総エネルギー消費量も多かったが、体重増加量には有意差がなかった。このことが、S群で1kgの体重増加に必要なエネルギー摂取量とエネルギー消費量が多かった理由と考えられる。

表5 1日当たりのエネルギー

	R 群	S 群
摂取量 (kcal/日)	72.5 ± 4.4	62.9 ± 2.3 **
消費量 (kcal/日)	53.0 ± 4.6	48.6 ± 3.3
蓄積量 (kcal/日)	19.6 ± 1.9	14.3 ± 2.9 *

\*\*p<0.01, \*p<0.05 vs. R 群

表6 1kgの体重増加に必要なと推定されるエネルギー

	R 群	S 群
摂取量 (kcal/kg)	8,937 ± 489	12,224 ± 657 ***
消費量 (kcal/kg)	6,511 ± 165	9,418 ± 279 ***
蓄積量 (kcal/kg)	2,427 ± 390	2,806 ± 674

実験期間中のエネルギー摂取量・消費量・蓄積量を体重増加量で除して1kg当りに換算 \*\*\*p<0.001 vs. R 群

食餌タンパク質は、エネルギー消費量や体重増加時の身体組成に影響を及ぼすこと<sup>23)~25)</sup>が報告されている。Achesonら<sup>23)</sup>はヒトを対象にした研究で、エネルギー摂取量が同じでも、食餌タンパク質のエネルギー比率が50%の方が1%の場合よりも食後5.5時間のエネルギー消費量が有意に多かったことを報告している。Brayら<sup>24), 25)</sup>は、ヒトが過食で体重増加する場合、過剰に摂取するエネルギーが同じでも、食餌タンパク質のエネルギー比率が25%の方が5%の場合よりも24時間のエネルギー消費量が有意に多く、FFMの増加比率が有意に高かったことを報告している。本研究で用いた市販飼料はタンパク質のエネルギー比率が31%だった。ラットの標準飼料の一つであるAIN-93Gのタンパク質のエネルギー比率は19%である。本研究で用いた飼料はAIN-93Gよりも高タンパク食だった。タンパク質のエネルギー比率が高い食餌を摂取したヒトは、エネルギー消費量が多く、FFMの増加比率が高かったことが報告されている<sup>24), 25)</sup>ことから、本研究ではAIN-93Gを用いた場合よりも、エネルギー消費量が多く、FFMの増加比率が高かったかもしれない。

アスリートの体重増加の目的はFFMを増加させることが多いことから、本研究ではFFMの増加が多いと考えられる成長期のラットを用いた。アスリートが体重増加する際は、食事量の増加とトレーニングを併用して実施することが多い。しかしながら、本研究では、チャンバーでラットを飼育していたため、運動を実施できなかった。Pittsが報告した体重増加前後のラットの身体組成の結果<sup>21)</sup>より、FFMとFMの増加比率を算出すると、体重増加時に運動を行ったラットは、運動を行わなかったラットよりもFFMの増加比率が高かった。このことから、本研究のラットに運動を実施させると、FFMの増加比率がより高くなったのかもしれない。

本研究では3つの方法でFFMとFMの増加比率を求めた。内臓と内臓以外のFFMは単位重量あたりのエネルギー含量が異なる<sup>6)</sup>。また、アスリートの体重増加では、筋肉以外に内臓重量が増加することが報告されている<sup>3)</sup>。そのため、本研究では内臓と内臓以外のFFMを分けてこれらの組織の重量およびエネルギー含量を求めた。その結果、内臓を考慮しない方法と内臓を考慮する方法とで、FFMとFMの増加比率に有意差がなかった(表4)。本研究では、体重増加時のFFMの増加に占める内臓の増加は10%以下だった(表3)。また、内臓と内臓以外のFFMのエネルギー含量の差は1g当たり0.2kcal以下だった(表1)。これらのことが、内臓を内臓以外のFFMと区別した場合としなかった場合とで値に差がなかった理由と考えられる。本研究の飼料のような高タンパク質食でFFMとFMの増加比率を検討する際には、内臓の増加を区別して考慮する必要はないものと考えられる。

本研究では、FFMとFMの増加比率を、屠体分析と、エネルギーバランスから推定する方法で求めた。ヒトでは、屠体分析のように全身のエネルギー含量を直接測定し、FFMとFMの増加比率を求めることは不可能である。しかし、屠体分析の結果は体重増加前後で屠殺した異なるラットでの測定値に基づいている。屠体分析では、内臓、内臓以外のFFM、FMの増加量を、体重増加前後に屠殺した各群5匹ずつのラットの平均値の差で求めた(表3)。そのため、統計解析をすることができなかったが、両群で大きく異ならないと考えられた。一方、エネルギーバランスから推定する方法は同一個体で得られたものだが推定値である。本研究ではエネルギーバランスからの推定値と屠体分析の実測値を比較することで、エネルギーバランスからの推定値でFFMとFMの増加比率が推定可能かどうか検討した。エネルギーバランスからの推定値と屠体分析の実測値を統計解析することはできなかったが、FFMとFMの増加比率は推定値と実測値で大きく異ならず、エネルギーバランスから推定可能と考えられた。

本研究の限界点として、飼料エネルギー吸収率の測定(実験1)に関して、サンプル数が少ないことがある。また、体重増加速度の違いがFFMとFMの増加比率に及ぼす影響(実験2)では、ラットをチャンバーで飼育していたため、運動を実施しておらず、身体活動量が低下していた可能性がある。そのため、アスリートが体重増加する際の身体活動状況を模擬出来ていないと考えられる。

以上のような限界点はあるものの、本研究では、ラットを用いて、体重増加速度の違いが身体組成に及ぼす影響について検討し、体重増加速度が遅いとより多くのエネルギー摂取が必要であるが、FFMとFMの増加比率には影響しないことが示唆された。今後の課題は、運動の影響や体重増加速度の差を大きくした影響などを検討し、アスリートの増量方法を提示するためのエビデンスを得ることである。

## V 結論

本研究の結果、成長期のラットでは体重増加速度が遅いと体重増加のためにより多くのエネルギーが必要であるが、FFMとFMの増加比率には影響しないことが示唆された。

## 利益相反

研究内容に関して利益相反は存在しない。



文 献

- 1) 永澤貴昭, 村田浩子, 村岡慈歩, 他: 競技者の増量に適した食事方法の検討, *日本臨床スポーツ医学会誌*, 21, 422-430 (2013)
- 2) Garthe, I., Raastad, T., Refsnes, P.E., et al.: Effect of nutritional intervention on body composition and performance in elite athletes, *Eur. J. Sport. Sci.*, 13, 295-303 (2013)
- 3) Miyauchi, S., Oshima, S., Asaka, M., et al.: Organ size increases with weight gain in power-trained athletes, *Int. J. Sport. Nutr. Exerc. Metab.*, 23, 617-623 (2013)
- 4) Borchers, J.R., Clem, K.L., Habash, D.L., et al.: Metabolic syndrome and insulin resistance in Division 1 collegiate football players, *Med. Sci. Sports. Exerc.*, 41, 2105-2110 (2009)
- 5) 村田浩子, 高田和子, 夏井裕明, 他: 柔道女子重量級競技者における身体組成の特徴とメタボリックシンドロームのリスク, *日本臨床スポーツ医学会誌*, 21, 623-631 (2013)
- 6) Tai, S., Tsurumi, Y., Yokota, Y., et al.: Effects of rapid or slow body mass reduction on body composition in adult rats. *J. Clin. Biochem. Nutr.*, 45, 185-192 (2009)
- 7) 菱田明, 佐々木敏監修: 日本人の食事摂取基準 (2015年版), pp.70 (2014), 第一出版, 東京
- 8) Forbes, G.B.: Influence of nutrition, Human body composition: Growth, aging, nutrition, and activity, pp. 209-247 (1987), Springer-Verlag, New York.
- 9) Forbes, G.B.: Lean body mass-body fat interrelationships in humans. *Nutr. Rev.*, 45, 225-231 (1987)
- 10) Forbes, G.B.: Do obese individuals gain weight more easily than nonobese individuals?, *Am. J. Clin. Nutr.*, 52, 224-227 (1990)
- 11) Behnke, A.R., Feen, B.G., Welham, W.C.: The specific gravity of healthy men, *JAMA.*, 118, 495-498 (1942)
- 12) Dempster, P., Aitkens S.: A new air displacement method for the determination of human body composition, *Med. Sci. Sports. Exerc.*, 27: 1692-1697 (1995)
- 13) Cameron, J.R., Sorenson, J.: Measurement of bone mineral in vivo: an improved method, *Science.*, 142: 230-232 (1963)
- 14) Schoeller, D.A., van Santen, E.: Measurement of energy expenditure in humans by doubly labeled water method, *J. Appl. Physiol. Respir. Environ. Exerc. Physiol.*, 53, 955-959 (1982)
- 15) 田中茂穂, 田中千晶, 二見順, 他: ヒューマンカロリメーターを用いて測定した座位中心の生活における1日当りのエネルギー消費量, *日本栄養・食糧学会誌*, 56, 291-296 (2003)
- 16) Okubo, H., Sasaki, S., Rafamantanantsoa, H. H., et al.: Validation of self-reported energy intake by a self-administered diet history questionnaire using the doubly labeled water method in 140 Japanese adults, *Eur. J. Clin. Nutr.*, 62, 1343-1350 (2008)
- 17) Folch, J., Lees, M., Sloane Stanley, G.H.: A simple method for the isolation and purification of total lipides from animal tissues, *J. Biol. Chem.*, 226, 497-509 (1957)
- 18) Lim, K., Murakami, E., Lee, S., et al.: Effects of intermittent food restriction and refeeding on energy efficiency and body fat deposition in sedentary and exercised rats, *J. Nutr. Sci. Vitaminol.*, 42, 449-468 (1996)
- 19) Weir, J.B.: New methods for calculating metabolic rate with special reference to protein metabolism, *J. Physiol.*, 109, 1-9 (1949)
- 20) Lo, S., Russell, J.C., Taylor, A.W.: Determination of glycogen in small tissue samples, *J. Appl. Physiol.*, 28, 234-236 (1970)
- 21) Pitts, G.C.: Body composition in the rat: interactions of exercise, age, sex, and diet, *Am. J. Physiol.*, 246, R495-501 (1984)
- 22) McCracken, K.J.: Effects of overfeeding by gastric intubation on body composition of adult female rats and on heat production during feeding and fasting, *Br. J. Nutr.*, 49, 193-202 (1983)
- 23) Acheson, K.J., Blondel-Lubrano, A., Oguey-Araymon, S., et al.: Protein choices targeting thermogenesis and metabolism, *Am. J. Clin. Nutr.*, 93, 525-534 (2011)
- 24) Bray, G.A., Redman, L.M., de Jonge, L., et al.: Effect of protein overfeeding on energy expenditure measured in a metabolic chamber, *Am. J. Clin. Nutr.*, 101, 496-505 (2015)
- 25) Bray, G.A., Smith, S.R., de Jonge, L., et al.: Effect of dietary protein content on weight gain, energy expenditure, and body composition during overeating: a randomized controlled trial, *JAMA.*, 307, 47-55 (2012)

(受付日: 2017年9月11日)  
(採択日: 2017年11月22日)

Original Article

# Effect of the rate of body weight gain on body composition in growing rats

Yuki TAI<sup>\*1</sup>, Hiroyuki HASEGAWA<sup>\*2</sup>, Emi KONDO<sup>\*3, \*4</sup>, Megumi MAEDA<sup>\*4</sup>,  
Koji OKAMURA<sup>\*4</sup>

<sup>\*1</sup> Faculty of Human Health Science, Kanazawa Gakuin University

<sup>\*2</sup> Faculty of Human Health Science, Matsumoto University

<sup>\*3</sup> Department of Sports Science, Japan Institute of Sports Sciences

<sup>\*4</sup> Graduate School of Sport Sciences, Osaka University of Health and Sport Sciences

---

## ABSTRACT

### **【Aim】**

The aim of this study was to investigate the effect of the rate of body weight gain (WG) on the ratio of increases in the fat-free mass (FFM) and fat mass (FM) and on the amount of energy required for WG.

### **【Methods】**

Six-week-old rats were fed *ad libitum* for 11 days; this group was named the rapid-WG group (R group; n = 5). In the slow-WG group (S group; n = 5), the body weight (BW) of the rats was increased over a 17-day period to a level comparable to that ultimately achieved in the R group by restricting energy intake. The BW, energy intake (EI) and energy expenditure (EE) were measured throughout the experimental period. The ratio of increases in the FFM and FM were calculated based on the energy content of the FFM and FM, and the energy deposition (ED) was obtained as the difference between the EI and the EE.

### **【Results】**

The ratio of increases in the FFM and FM did not differ between the groups. The total EI and EE in the S group were greater than those in the R Group ( $P < 0.001$ ), whereas the total ED did not differ between the groups. The estimated EI and EE required to increase the BW by 1 kg were greater in the S group than in the R Group ( $P < 0.001$ ), whereas the ED did not differ between the groups.

### **【Conclusion】**

These results suggest that a greater amount of energy is required for WG when the BW increases slowly, while the ratio of increases in the FFM and FM are not influenced by the rate of WG.

**Keywords:** Body weight gain, Energy balance, Energy deposition, Body composition