

ットを含む) の場合

低炭水化物食の定義ははっきりしていないが、欧米では肥満の治療に用いる場合、炭水化物食 100 g/日以下か 10-20 en%炭水化物、25-35 en%蛋白質、55-65 en%脂質の超低炭水化物食を意味する⁶⁾。脂質の内容は飽和脂肪酸より、不飽和脂肪酸や一価不飽和脂肪酸の増加が強調されている。摂取エネルギーにかかわらず、炭水化物 40 g/日以下はケトジェニックダイエットと呼ばれている。ちなみに日本人の平成 19 年度国民健康・栄養調査によると 20 歳以上(男女合わせて)でエネルギー摂取量の中央値は 1856 kcal/日、蛋白質は 68 g/日 (14.6 en%)、脂質は 51 g/日 (24.8 en%)、炭水化物は 258 g/日 (56 en%) である⁷⁾。

注目を浴びている研究分野であり、欧米から多くのレビューやメタアナリシスが報告されている⁸⁻¹¹⁾。最近のメタアナリシスでは、超低炭水化物食の方が体重減少は強い¹⁰⁾。2009 年のメタアナリシスでは、エネルギー制限を行なった低脂肪食 (30 en%脂質以下で 600 kcal の摂取エネルギー減少) と超低炭水化物食 (炭水化物 60 g/日以下) を比較し、6 月以上観察した研究 9 つ中、6 つの研究で超低炭水化物食の方が低脂肪食よりも体重低下効果が強く¹²⁻¹⁷⁾、他の 3 つの研究では 2 群間に差は認められていない¹⁸⁻²⁰⁾。

機序についても幾つか報告がある。低炭水化物食ではエネルギー制限をしないでも、摂取エネルギーが減少することが知られていることも理由の 1 つである¹²⁻¹⁷⁾。動物実験からも低炭水化物食の体脂肪減少機序推定することができる。マウス (C57BL/6J を使うことが多い) に高脂肪食 (n-6 系の多いサフラワー油) を摂取させると摂取脂肪のエネルギー比 10-60%の範囲で用量依存性に肥満を生じる

²¹⁾。しかし、食事中の脂肪量を非常に多くして (95 en%脂肪)、炭水化物が殆ど含まれていない超低炭水化物/超高脂肪食 (ケトジェニックダイエット) にすると、通常食 (17 en%脂質) や高脂肪食 (45 en%脂質) に比べて、摂取エネルギー量は 3 群間で変わらないのにケトジェニックダイエットで著明な体重減少が認められた²²⁾。34%のカロリー制限 (CR) を行った場合とも比較しても、ケトジェニックダイエット群では CR 群に比べて、同様な体重減少量であったが、15%の全身酸素消費量亢進、血中インスリン値の低下、血中ケトン体の増加が認められた。肝臓では SREBP-1c 活性の低下を示したが、脂肪酸流入に反応し CD36 が増加し脂肪肝を生じた。また、ケトン体合成に関する酵素 hydroxy-butylate dehydrogenase 発現量の増加が見られた。骨格筋では AMPK 活性の亢進、ACC 活性の低下が認められたが、脂肪酸 β 酸化が亢進していたかどうかは明らかでない。褐色脂肪細胞で UCP1 蛋白質量の増加も認めた。

これらの病態を推定してみると、多量のキロミクロンが体内に入ると、食後 LPL によりキロミクロン中のトリグリセライドが分解され、遊離脂肪酸が増加し、肝臓、筋肉、脂肪組織、褐色脂肪組織に供給される。肝臓に流入した脂肪酸はトリグリセライドとして蓄積され脂肪肝になり、多量のアセチル Co-A は一部は TCA サイクルで使用されるが、残りは β -hydroxybutylate などのケトン体となり、筋肉、脳で使用されるか、尿から排泄されると思われる。脂肪酸が多くの組織に沢山流入してくるので、体内で脂肪酸を合成する必要はなく、脂肪酸を熱として放散する系がないと脂肪がどこかに多量に蓄積する可能性がある。マウスでは褐色細胞が発達しているため、

熱としての放散が可能であるのかもしれない。UCP1 は交感神経の活性化により増加するが、ケトジェニックダイエットにより交感神経が活性化されている可能性がある。糖代謝に関しては、血糖値の低下が見られている。糖新生を介して血糖値を維持している状態であろう。グリコーゲン不足していることが推定される。

人での研究でも炭水化物 40 g/日以下では尿中のケトン体が検出される（ケトアシドーシスではない）¹⁷⁾。ケトン体の蓄積は、高尿酸血症、立位低血圧を生じ、好ましくない²³⁾。また、安定同位体を用いた研究で、ケトジェニックダイエットの糖新生は乳酸/アミノ酸由来で、グリセロール由来でないことが示されている²⁴⁾。糖新生のためのアミノ酸供給源として、高蛋白質食が必要とされる。

B) 軽度の高脂肪/低炭水化物食（低グリセミックロード食）

欧米人は日常食の脂肪エネルギー比が高いため、欧米人の低脂肪食は日本人の通常の脂肪摂取比率である。また、ケトジェニックダイエットの炭水化物量は極めて少なく現実的でない。10-20 en%程度炭水化物摂取量を減少させ、そのかわり脂質や蛋白質摂取量を軽度増加させた研究のメタアナリシスも行われている。2007年のコクランレビューではグリセミックインデックス（又はロード）の低い食事と多い食事の体脂肪の変化を比べた研究がまとめられ、グリセミックロードの低い食事は炭水化物摂取量を 10-20 en%減少させている²⁵⁾。これらの研究ではエネルギー摂取量は制限していない。6つの研究²⁶⁻³¹⁾をまとめると、グリセミックインデックス（又はロード）の低い食事の方が、高い食事（低脂肪/高炭水化

物食）より体重（または体脂肪）の減少量が多かった²⁵⁾。しかしながら、摂取エネルギーの 750 kcal/日減少を目指した最近の研究では、20 en%脂質/65 en%炭水化物群と 40 en%脂質/45 en%炭水化物群の間に2年間の体重減少量に差は認められていない（2年間にわたる摂取エネルギーを調べることは困難であった可能性もある）³²⁾。しかし、以下のように肥満者の病態をインスリン抵抗性（又は血中インスリン濃度）で区別すると明確な結果が得られる。

肥満者の中でも、インスリン抵抗性が強く血中インスリン濃度の高い群で低炭水化物食の方が低脂肪食よりも体重低下効果が強いことがいくつかの研究で示されている³³⁻³⁵⁾。これらの研究では、20 en%脂質/55-60 en%炭水化物食群と 40 en%脂質/40 en%炭水化物食群とを比較した研究が多い。図2にインスリン抵抗性の強弱で肥満者を区別すると、低炭水化物食と低脂肪食の体重減少効果が大きく異なることを示した³⁴⁾。逆にメタボリック症候群でない人（おそらくインスリン抵抗性の少ない人）は低脂肪食の方が腹周の減少効果が強い³⁶⁾。

インスリン抵抗性はインスリンの肝臓での糖新生抑制作用、グリコーゲン分解抑制作用の減弱と骨格筋での糖の取り込み亢進作用の低下により生じ、高血糖、高インスリン血症を生じるが、インスリン抵抗性を生じる病態で、インスリンの脂肪蓄積作用は障害されることが知られている^{37,38)}。このため、肥満者では高インスリン血症を来しやすく、低炭水化物食の方が血中インスリン濃度をより減少しやすいことが、低炭水化物食が肥満をより改善しやすい理由の1つであろう。

3. 低炭水化物/高脂肪食の副作用

炭水化物摂取が減少すると VLDL が減少し、血中中性脂肪値が減少する。また、HDL-コレステロール値も増加する良い効果が認められるが、高脂肪食のため LDL-コレステロール値が増加する悪い効果も認められるため、リポタンパクの変動から動脈硬化症に対して良い効果をもたらすか、悪い効果をもたらすかどうか推定できない。最近、エネルギー制限下でも、高脂肪食（60 en%脂質/5%炭水化物）を6週間³⁹⁾、又は（60 en%脂質/4%炭水化物）を1年摂取すると⁴⁰⁾、内皮細胞による血管拡張能（FMD, endothelium-dependent flow-mediated dilation）が減少すること、また、高脂肪食（60 en%脂質/20%炭水化物）で動脈の機能 AI（aortic augmentation index）が悪化することが示され⁴¹⁾、60 en%の高脂肪食は動脈硬化症のリスクとなる可能性が示されている。

E. 結論

糖尿病罹患予防のため、肥満の予防は極めて重要である。このため、2010年、2005年版日本人の食事摂取基準の策定で用いた文献、さらにその後発表された文献を用いて、肥満予防、治療に最適な脂質/炭水化物摂取比率についてレビューを行った。

肥満を予防する場合と治療する場合とでは至適な脂肪エネルギー比が異なり、一般人を対象に肥満を予防するには25-30%エネルギー未満が良いこと、高インスリン血症を示すインスリン抵抗性の強い肥満者（肥満者の半数以上）の治療には脂肪エネルギー比を少し高め、30-35%に、炭水化物比率は40%に低く設定した低グリセミック食が良いことが示された。しかし、高インスリン血症を示さ

ない、インスリン抵抗性のみられない肥満者に対しては、低脂肪食（脂肪エネルギー比20%）の方が抗肥満効果は強かった。機序の面からも高インスリン血症は肥満を助長することが示されている。肥満者においては、糖代謝にはインスリン抵抗性が存在しても、インスリンの肝臓での脂肪合成亢進作用、脂肪組織でのリポタンパク質リパーゼ（LPL）活性亢進作用、脂肪組織での脂肪分解抑制作用は障害されず、むしろ高インスリン血症により亢進される。このように、集団での肥満を予防する最適な脂肪/炭水化物摂取比率は集団での肥満罹患率により異なる。日本人成人の過体重/肥満者（BMI \geq 25）は男性30%、女性20%であり、米国に比べ半数以下であり、肥満予防を目的とした場合、脂肪エネルギー比の上限は食事摂取基準で示されている25-30%で良いと思われる。将来的には、遺伝的背景、代謝状態を考慮した個人別の最適な脂肪/炭水化物摂取比率の策定が望まれる。

F. 研究発表

1. 発表論文

Ezaki O. The optimal dietary fat to carbohydrate ratio to prevent obesity in Japanese population: a review of the epidemiological, physiological and molecular evidence. *J Nutr Sci Vitaminol* (2011) **57**, 383-393.

2. 学会発表

なし

G. 知的財産権の出願・登録状況

1. 特許取得

なし

2. 実用新案登録

なし

3. その他

なし

H. 引用文献

1. 厚生労働省策定 日本人の食事摂取基準 2010年版. (2009).
2. Astrup A, Ryan L, Grunwald GK, Storgaard M, Saris W, Melanson E, Hill JO. The role of dietary fat in body fatness: evidence from a preliminary meta-analysis of ad libitum low-fat dietary intervention studies. *Br J Nutr* (2000) **83**, 25S-32S.
3. Shikany JM, Vaughan LK, Baskin ML, Cope MB, Hill JO, Allison DB. Is dietary fat "fattening"? A comprehensive research synthesis. *Crit Rev Food Sci Nutr* (2010) **50**, 699-715.
4. Yu-Poth S, Zhao G, Etherton T, Naglak M, Jonnalagadda S, Kris-Etherton PM. Effects of the National Cholesterol Education Program's Step I and Step II dietary intervention programs on cardiovascular disease risk factors: a meta-analysis. *Am J Clin Nutr* (1999) **69**, 632-646.
5. Howard BV, Manson JE, Stefanick ML, Beresford SA, Frank G, Jones B, Rodabough RJ, Snetselaar L, Thomson C, Tinker L, Vitolins M, Prentice R. Low-fat dietary pattern and weight change over 7 years: the Women's Health Initiative Dietary Modification Trial. *JAMA* (2006) **295**, 39-49.
6. Freedman MR, King J, Kennedy E. Popular diets: a scientific review. *Obes Res* (2001) **9**, 1S-40S.
7. 国民健康・栄養の現状—平成 19 年厚生労働省国民健康・栄養調査報告より 東京: 第一出版. (2010).
8. Dansinger ML, Schaefer EJ. Low-carbohydrate or low-fat diets for the metabolic syndrome? *Curr Diab Rep* (2006) **6**, 55-63.
9. de Souza RJ, Swain JF, Appel LJ, Sacks FM. Alternatives for macronutrient intake and chronic disease: a comparison of the OmniHeart diets with popular diets and with dietary recommendations. *Am J Clin Nutr* (2008) **88**, 1-11.
10. Hession M, Rolland C, Kulkarni U, Wise A, Broom J. Systematic review of randomized controlled trials of low-carbohydrate vs. low-fat/low-calorie diets in the management of obesity and its comorbidities. *Obes Rev* (2009) **10**, 36-50.
11. Nordmann AJ, Nordmann A, Briel M, Keller U, Yancy WS Jr, Brehm BJ, Bucher HC. Effects of low-carbohydrate vs low-fat diets on weight loss and cardiovascular risk factors: a meta-analysis of randomized controlled trials. *Arch Intern Med* (2006) **166**, 285-293.
12. Brehm BJ, Seeley RJ, Daniels SR, D'Alessio DA. A randomized trial comparing a very low carbohydrate diet and a calorie-restricted low fat diet on body weight and cardiovascular risk factors in healthy women. *J Clin Endocrinol Metab* (2003) **88**, 1617-1623.
13. Due A, Toubro S, Skov AR, Astrup A. Effect of normal-fat diets, either medium or high in protein, on body weight in overweight

- subjects: a randomised 1-year trial. *Int J Obes Relat Metab Disord* (2004) **28**, 1283-1290.
14. Foster GD, Wyatt HR, Hill JO, McGuckin BG, Brill C, Mohammed BS, Szapary PO, Rader DJ, Edman JS, Klein S. A randomized trial of a low-carbohydrate diet for obesity. *N Engl J Med* (2003) **348**, 2082-2090.
 15. Samaha FF, Iqbal N, Seshadri P, Chicano KL, Daily DA, McGrory J, Williams T, Williams M, Gracely EJ, Stern L. A low-carbohydrate as compared with a low-fat diet in severe obesity. *N Engl J Med* (2003) **348**, 2074-2081.
 16. Seshadri P, Iqbal N, Stern L, Williams M, Chicano KL, Daily DA, McGrory J, Gracely EJ, Rader DJ, Samaha FF. A randomized study comparing the effects of a low-carbohydrate diet and a conventional diet on lipoprotein subfractions and C-reactive protein levels in patients with severe obesity. *Am J Med* (2004) **117**, 398-405.
 17. Yancy WS Jr, Olsen MK, Guyton JR, Bakst RP, Westman EC. A low-carbohydrate, ketogenic diet versus a low-fat diet to treat obesity and hyperlipidemia: a randomized, controlled trial. *Ann Intern Med* (2004) **140**, 769-777.
 18. Brinkworth GD, Noakes M, Keogh JB, Luscombe ND, Wittert GA, Clifton PM. Long-term effects of a high-protein, low-carbohydrate diet on weight control and cardiovascular risk markers in obese hyperinsulinemic subjects. *Int J Obes Relat Metab Disord* (2004) **28**, 661-670.
 19. Dansinger ML, Gleason JA, Griffith JL, Selker HP, Schaefer EJ. Comparison of the Atkins, Ornish, Weight Watchers, and Zone diets for weight loss and heart disease risk reduction: a randomized trial. *JAMA* (2005) **293**, 43-53.
 20. Truby H, Baic S, deLooy A, Fox KR, Livingstone MB, Logan CM, Macdonald IA, Morgan LM, Taylor MA, Millward DJ. Randomised controlled trial of four commercial weight loss programmes in the UK: initial findings from the BBC "diet trials". *BMJ* (2006) **332**, 1309-1314.
 21. Takahashi M, Ikemoto S, Ezaki O. Effect of the fat/carbohydrate ratio in the diet on obesity and oral glucose tolerance in C57BL/6J mice. *J Nutr Sci Vitaminol* (1999) **45**, 583-593.
 22. Kennedy AR, Pissios P, Otu H, Roberson R, Xue B, Asakura K, Furukawa N, Marino FE, Liu FF, Kahn BB, Libermann TA, Maratos-Flier E. A high-fat, ketogenic diet induces a unique metabolic state in mice. *Am J Physiol Endocrinol Metab* (2007) **292**, E1724-1739.
 23. Larosa JC, Fry AG, Muesing R, Rosing DR. Effects of high-protein, low-carbohydrate dieting on plasma lipoproteins and body weight. *J Am Diet Assoc* (1980) **77**, 264-270.
 24. Browning JD, Weis B, Davis J, Satapati S, Merritt M, Malloy CR, Burgess SC. Alterations in hepatic glucose and energy metabolism as a result of calorie and carbohydrate restriction. *Hepatology* (2008) **48**, 1487-1496.

25. Thomas DE, Elliott EJ, Baur L. Low glycaemic index or low glycaemic load diets for overweight and obesity. *Cochrane Database Syst Rev* (2007) CD005105.
26. Bouche C, Rizkalla SW, Luo J, Vidal H, Veronese A, Pacher N, Fouquet C, Lang V, Slama G. Five-week, low-glycemic index diet decreases total fat mass and improves plasma lipid profile in moderately overweight nondiabetic men. *Diabetes Care* (2002) **25**, 822-828.
27. Ebbeling CB, Leidig MM, Sinclair KB, Hangen JP, Ludwig DS. A reduced-glycemic load diet in the treatment of adolescent obesity. *Arch Pediatr Adolesc Med* (2003) **157**, 773-779.
28. Ebbeling CB, Leidig MM, Sinclair KB, Seger-Shippe LG, Feldman HA, Ludwig DS. Effects of an ad libitum low-glycemic load diet on cardiovascular disease risk factors in obese young adults. *Am J Clin Nutr* (2005) **81**, 976-982.
29. McMillan-Price J, Petocz P, Atkinson F, O'neill K, Samman S, Steinbeck K, Caterson I, Brand-Miller J. Comparison of 4 diets of varying glycemic load on weight loss and cardiovascular risk reduction in overweight and obese young adults: a randomized controlled trial. *Arch Intern Med* (2006) **166**, 1466-1475.
30. Slabber M, Barnard HC, Kuyl JM, Dannhauser A, Schall R. Effects of a low-insulin-response, energy-restricted diet on weight loss and plasma insulin concentrations in hyperinsulinemic obese females. *Am J Clin Nutr* (1994) **60**, 48-53.
31. Sloth B, Krog-Mikkelsen I, Flint A, Tetens I, Bjorck I, Vinoy S, Elmstahl H, Astrup A, Lang V, Raben A. No difference in body weight decrease between a low-glycemic-index and a high-glycemic-index diet but reduced LDL cholesterol after 10-wk ad libitum intake of the low-glycemic-index diet. *Am J Clin Nutr* (2004) **80**, 337-347.
32. Sacks FM, Bray GA, Carey VJ, Smith SR, Ryan DH, Anton SD, McManus K, Champagne CM, Bishop LM, Laranjo N, Leboff MS, Rood JC, de Jonge L, Greenway FL, Loria CM, Obarzanek E, Williamson DA. Comparison of weight-loss diets with different compositions of fat, protein, and carbohydrates. *N Engl J Med* (2009) **360**, 859-873.
33. Cornier MA, Donahoo WT, Pereira R, Gurevich I, Westergren R, Enerback S, Eckel PJ, Goalstone ML, Hill JO, Eckel RH, Draznin B. Insulin sensitivity determines the effectiveness of dietary macronutrient composition on weight loss in obese women. *Obes Res* (2005) **13**, 703-709.
34. Ebbeling CB, Leidig MM, Feldman HA, Lovesky MM, Ludwig DS. Effects of a low-glycemic load vs low-fat diet in obese young adults: a randomized trial. *JAMA* (2007) **297**, 2092-2102.
35. Pittas AG, Das SK, Hajduk CL, Golden J, Saltzman E, Stark PC, Greenberg AS, Roberts SB. A low-glycemic load diet facilitates greater weight loss in overweight adults with high insulin secretion but not in overweight adults with low insulin secretion

- in the CALERIE Trial. *Diabetes Care* (2005) **28**, 2939-2941.
36. Klemsdal TO, Holme I, Nerland H, Pedersen TR, Tonstad S. Effects of a low glycemic load diet versus a low-fat diet in subjects with and without the metabolic syndrome. *Nutr Metab Cardiovasc Dis* (2010) **20**, 195-201.
37. Brown MS, Goldstein JL. Selective versus total insulin resistance: a pathogenic paradox. *Cell Metab* (2008) **7**, 95-96.
38. Li S, Brown MS, Goldstein JL. Bifurcation of insulin signaling pathway in rat liver: mTORC1 required for stimulation of lipogenesis, but not inhibition of gluconeogenesis. *Natl Acad Sci U S A* (2010) **107**, 3441-3446.
39. Varady KA, Bhutani S, Klempel MC, Phillips SA. Improvements in vascular health by a low-fat diet, but not a high-fat diet, are mediated by changes in adipocyte biology. *Nutr J* (2011) **10**, 8.
40. Wycherley TP, Brinkworth GD, Keogh JB, Noakes M, Buckley JD, Clifton PM. Long-term effects of weight loss with a very low carbohydrate and low fat diet on vascular function in overweight and obese patients. *J Intern Med* (2010) **267**, 452-461.
41. Bradley U, Spence M, Courtney CH, McKinley MC, Ennis CN, McCance DR, McEneny J, Bell PM, Young IS, Hunter SJ. Low-fat versus low-carbohydrate weight reduction diets: effects on weight loss, insulin resistance, and cardiovascular risk: a randomized control trial. *Diabetes* (2009) **58**, 2741-2748.

図1

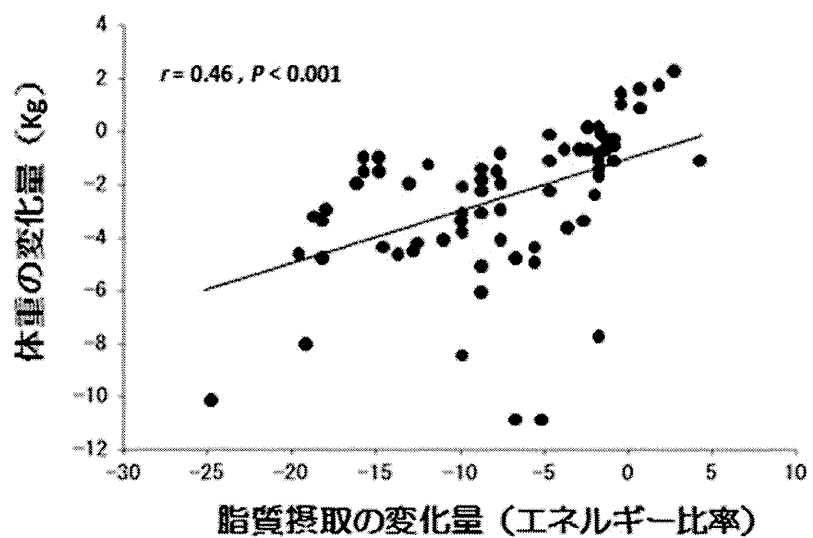


図 1 脂肪エネルギー比率の低下は体重減少をもたらす。多くの介入研究を集めたメタ・アナリシスの結果を示す⁴⁾。

図2

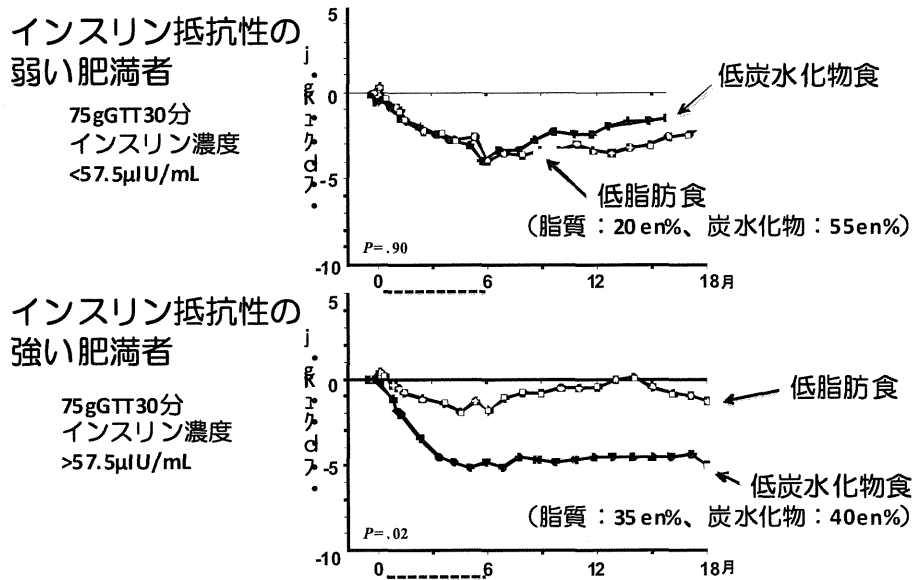


図2 肥満者 (BMI > 30) の最適な脂肪エネルギー比率はインスリン抵抗性の程度によって異なる³⁴⁾。

糖尿病でない肥満者 18-35 歳の男女 56 人を対象に、75 gGTT の血中インスリン 30 分値 57.5 μU/ mL 以下 (インスリン非抵抗性群) と以上 (インスリン抵抗性群) の 2 群に対し、それぞれ低脂肪食 (高グリセミック食 ; 55 en%炭水化物/ 20 en%脂質/ 25 en%蛋白質) と低炭水化物食 (低グリセミック食 ; 40 en%炭水化物/ 35 en%脂質/ 25 en%蛋白質) を 6 ヶ月間介入し (図中点線部分)、その後 1 年間フォローした³⁴⁾。どちらもエネルギー摂取量は約 400 kcal 減少したが、体重減少量では極端な差が認められた。インスリン抵抗性群では低炭水化物食 (低グリセミック食) で強い体重減少が認められた。

厚生労働科学研究費補助金（循環器疾患・糖尿病等生活習慣病対策総合研究事業）
（総合）研究報告書

日本人の食事摂取基準の改定と活用に資する総合的研究

研究代表者 徳留 信寛 国立健康・栄養研究所 理事長

II. 研究分担者の報告書

2. たんぱく質の出納と生活習慣病関連の検討解析

（指標アミノ酸酸化法による日本人成人女性のたんぱく質代謝要求量に関する研究）

研究分担者 木戸 康博 京都府立大学大学院生命環境科学研究科

研究要旨

【目的】 現行のたんぱく質必要量は、窒素出納法により算定されている。窒素出納法は、たんぱく質代謝研究に有用な手段であるが、被験者と測定者への負担が大きく、たんぱく質必要量が低く算出されるなどの問題点も指摘されている。そこで本研究では、近年新しく開発された指標アミノ酸酸化 (IAAO)法を用い、鶏卵たんぱく質をたんぱく質源とした日本人成人のたんぱく質代謝要求量を算出することを目的とした。

【方法】 実験1（健康成人男性）：被験者は、健康な成人男子大学生6名（延べ36名）であり、平均年齢 23 ± 0.6 歳、平均体重 61.5 ± 1.4 kg および平均 BMI 20.5 ± 0.4 kg/m² であった。被験者は、実験前日より調整された食事（エネルギー量: 2240~2360 kcal/day、たんぱく質量: 1.1~1.4 g/kg 体重/day）を摂取した。実験日の9:00 から 18:00 までは1時間ごとに、基礎代謝量×1.5 kcal/day の 1/12 量のエネルギーおよび1日摂取量の 1/12 量のたんぱく質を含む実験食を摂取した。実験食は、たんぱく質摂取量が 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 あるいは 1.2 g/kg 体重/日となるように調整した。実験食は、たんぱく質源として、鶏卵（玉子焼き）を用い、たんぱく質摂取量が 1.0 g/kg 体重/day 以下の場合、1.0 g/kg 体重/day でのフェニルアラニン（Phe）とチロシン（Tyr）摂取量に達するまで Phe と Tyr をアミノ酸として追加摂取した。指標アミノ酸として、[1-¹³C]標識 Phe (¹³C-Phe)を用いた。¹³C 標識物質として 13:00 に¹³C 標識炭酸水素ナトリウム（NaH¹³CO₃）を経口摂取し、14:00 から ¹³C-Phe を1時間ごとに5回経口摂取した。¹³C 標識物質経口摂取開始より30分間隔で食事終了1時間後までの呼気中¹³C 標識二酸化炭素（¹³CO₂）量を赤外分光分析装置により測定した。加えて、¹³C-Phe 摂取開始後330分に被験者の末梢静脈より採血し、血漿アミノ酸濃度を分析した。呼気中¹³CO₂量の結果を Mixed Effect Change Point Regression Model（ME-CPRM）により解析した。実験2（健康成人女性）：被験者は健康な女子大学生6名（延べ36名）であり、平均年齢 21.2 ± 0.2 歳、平均体重 51.2 ± 1.1 kg、および平均 BMI は 20.2 ± 0.8 kg/m² であった。安静時代謝量は、間接熱量測定法により測定した。また、卵胞期と黄体期にわけて検討し、月経周期は、基礎体温を測定することで確認し、卵胞期のたんぱく質代謝要求量を検討した。被験者は、実験前日に、調整された食事（エネルギー量:各被験者の安静時代謝量×1.5 kcal/day (1594~1959 kcal/day)、たんぱく質量: 1.1 g/kg BW/day (51.8

～60.0 g/day) を満たすもの) を摂取した。実験日の手順は、健康成人男性と同じとした。

【結果】実験1 (健康成人男性) : ^{13}C -Phe 摂取により、呼気中 $^{13}\text{CO}_2$ 量は上昇し、摂取開始後 330 分では、たんぱく質摂取量が最も少ない 0.2 g/kg 体重/day の時に最大となり、たんぱく質の摂取量に依存して減少した。しかし、1.0 g/kg 体重/day 以上の摂取量では呼気中 $^{13}\text{CO}_2$ 量がほぼ一定となった。Mixed Effect Change Point Regression Model (ME-CPRM) により変曲点を算出したところ、0.89 g/kg 体重/day であった。また、たんぱく質摂取量が 0.2 g/kg 体重/day および 1.2 g/kg 体重/day の被験者の血漿 Phe と Tyr 濃度に有意な差はなく、血漿中のアミノ酸プールの大きさは、たんぱく質摂取量によって変化しなかった。実験2 (健康成人女性) : ^{13}C -Phe 摂取により、呼気中 $^{13}\text{CO}_2$ 量は上昇した。鶏卵たんぱく質の摂取量を 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 および 1.2 g/kg BW/day の間で変化させ、6回の栄養実験の呼気中 $^{13}\text{CO}_2$ 量の結果を ME-CPRM により解析した。その結果、19時の呼気中 $^{13}\text{CO}_2$ 量の屈曲点は 0.96 g/kg BW/day と算出した。

【結論】IAAO法を用いた日本人成人男性のたんぱく質代謝要求量は、0.89 g/kg 体重/day と算出された。また、健康成人女性のたんぱく質代謝要求量は、卵胞期で 0.96 g/kg BW/day と算出された。将来的に必要となる新たな手法 (IAAO法) を用いた必要量の算出も実施したことで、国際的な考え方との整合性に向けて準備も整った。本方法は、簡便性に優れた方法であり、傷病者や妊婦、高齢者にも小さな負担で試験を実施することが可能であると考えられた。

A. 目的

たんぱく質必要量の算出には、これまで窒素出納法が用いられてきた¹⁻²⁾。窒素出納法は、食事等からの摂取窒素量と、皮膚表面や尿、糞等からの排出窒素量を調べ、それらの出納に基づき窒素平衡を維持できる量をもってたんぱく質必要量としている。窒素出納法はたんぱく質栄養研究に最も標準的かつ有効な方法として用いられているが、摂取窒素量を過大評価し、排泄窒素量を過小評価することから、出納値が正に傾きやすいこと³⁾や、被験者および測定者への負担が大きいことが指摘され、より簡便な測定法の確立が望まれてきた。

指標アミノ酸酸化 (Indicator Amino Acid Oxidation; IAAO)法は、近年新しく開発された¹³C 標識アミノ酸法の 1 つである。体内で必要とするたんぱく質が、過不足なく合成されるためには、たんぱく質の構成アミノ酸が、全て揃っていることが必要である。体内で必要とするたんぱく質の合成は、第一制限アミノ酸量に依存しているため、摂取する第一制限アミノ酸量が少なければ、たんぱく質合成に利用されなかった他のアミノ酸の余剰分がエネルギーとして利用され、二酸化炭素 (CO₂)として呼気中へ排出される。一方、第一制限アミノ酸の摂取量が増すと、他のアミノ酸のたんぱく質合成への利用量も増加し、アミノ酸の酸化により発生する CO₂の呼気中への排出量も減少する。IAAO 法は、このアミノ酸代謝の反応を利用し、¹³C で標識された指標アミノ酸を経口摂取し、発生する ¹³CO₂量を測定するものである⁴⁾。

IAAO 法は、現在までにブタやヒトにおいて、不可欠アミノ酸の必要量算出に用いられてきた⁵⁻⁶⁾。2007 年に Humayun ら⁷⁾は、成人

男性のたんぱく質必要量の測定に IAAO 法を応用した。その結果、たんぱく質必要量を 0.93 g/kg 体重/day と算出し、現行の値より高値であったと報告した。IAAO 法は、適応期間を設けず、習慣的なたんぱく質摂取量におけるたんぱく質代謝応答でのたんぱく質必要量の算出が可能であるため、各ライフステージでの必要量だけでなく、急性期の傷病者に対しても試験の実施が可能である。しかし、Humayun ら⁷⁾が行った成人男性を対象とした IAAO 法では、たんぱく質源としてアミノ酸混合物を用いていた。アミノ酸混合の消化・吸収機構はたんぱく質とは異なると考えられるので、たんぱく質をたんぱく質源とした IAAO 法を行うことが必要である。しかし、成人男性において、たんぱく質源としてアミノ酸混合物ではなくたんぱく質を用いた研究は未だ報告されておらず、そのための基礎研究も十分に行われていない。さらに、IAAO 法で算出された値の解釈や、指標アミノ酸の選択など、依然として検討すべき課題は山積している。

そこで本研究では、鶏卵たんぱく質をたんぱく質源とする IAAO 法において、日本人成人男性 (実験 1) および成人女性 (実験 2) のたんぱく質代謝要求量を算出した。

B. 実験方法

本研究は、京都府立大学倫理委員会の承認を得て行った。

1) 被験者

実験 1 (健康成人男性) : 健康な成人男性 6 名 (延べ 36 名) を被験者とした。各被験者の特徴および DHQ による食事調査結果は表 1 に示した。被験者は、試験前日および試験中の激しい運動およびアルコールの摂取を避け

た。また、試験前日の22時以降は水、お茶および紅茶以外は摂取せず、試験開始まで11時間絶食とした。

実験2(健康成人女性):健康な成人女性6名(延べ36名)を被験者とした。各被験者の特徴は表2に示した。なお、安静時代謝量は、食後2時間以上経過の空腹状態で、座位安静を保ち、エアロモニタ AE-310S(ミナト医科学株式会社)を用いて、間接熱量測定法により測定した。また、最初の試験日1週間前から最後の試験日1週間後までの期間、被験者に起床時に基礎体温の測定を依頼し、記録してもらうことにより、月経周期を確認した。

2) 実験食

実験食1回の摂取量は、1日のエネルギー摂取量およびたんぱく質摂取量の1/12とした。エネルギー摂取量は、18歳から29歳男性の基礎代謝基準値(24.0 kcal/kg 体重/day)に個人の体重および身体活動レベルI(1.50)を乗じて算出した⁸⁾。たんぱく質摂取量は、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0あるいは1.2 g/kg 体重/dayとした。食事は、たんぱく質源として鶏卵たんぱく質、エネルギー源として、いろいろ、粉あめを用いた。各たんぱく質摂取量時の鶏卵たんぱく質の栄養成分組成を表3に示した。また、いろいろは、コーンスターチ、甘藷澱粉、スクロース、水およびフレーバーとしてたんぱく質を含まない市販のジュースを混合して加熱し、冷ましたものを必要エネルギー分切り分けた。粉あめは、必要エネルギー分を紅茶に溶かして摂取した。たんぱく質摂取量が1.0 g/kg 体重/day以下の場合、1.0 g/kg 体重/dayでのPheとTyr摂取量(54.7 mg/kg 体重および40.7 mg/kg 体重)に達する

までPheとTyrをアミノ酸として追加摂取した(表4)。

3) 実験プロトコール

実験は試験日前日と試験日の計2日間とした。試験日前日には、被験者は3食の調整食を摂取した。調整食は、全ての被験者において基礎代謝量×1.5で算出したエネルギー摂取量を満たしており(2240~2360 kcal/day)、たんぱく質摂取量は平成21年国民健康・栄養調査での同年齢区分の平均中央値と同程度であった(1.1~1.4 g/kg BW/day)。また、試験日前日の22時以降より水、お茶および紅茶以外は摂取せず、試験開始まで11時間絶食とした。試験日は9時より試験を開始し、19時までとした。実験食は試験開始から1時間毎に同量ずつ計10回摂取した。安定同位体の摂取は、5回目の食事より開始し、5回目の食事では、NaH¹³CO₃を0.176 mg/kg 体重、L-[1-¹³C]phenylalanine (¹³C-Phe) (99 atom percent excess; Cambridge Isotope Laboratories)を0.66 mg/kg 体重摂取した。それ以降では、実験食の摂取終了まで、実験食とともに¹³C-Pheを1.20 mg/kg 体重摂取した。そして、安定同位体の摂取開始と同時に呼気バッグにて呼気回収を開始し、全ての実験食の摂取終了1時間後まで30分毎に呼気を回収した。回収した呼気は赤外線分光分析装置POCone(大塚電子株式会社)にて呼気中¹³CO₂量を測定した。

また、実験1(健康成人男性)では、安定同位体の摂取が終了した後の18時30分の呼気回収と同時に末梢静脈より採血した。採取した血液の血漿画分は、血漿アミノ酸分析に供した。

4) 血漿中アミノ酸分析

実験 1 (健康成人男性) : 被験者より採取した血液は、直ちに遠心分離し (12,000 rpm、15 min、4°C)、血漿画分と血球画分に分け、血漿画分を-80°C で使用するまで保存した。使用時には、自然解凍した血漿画分に、エタノールを添加、75%エタノールとし、除タンパク処理を行った。次に、血液中の Phe および Tyr のキャプチャリングのため、Aito-Inoue ら⁹⁾の方法を用い固相抽出を行い、6-aminoquinoly-N-hydroxysuccinimidyl carbamate (AQC)により誘導化し、RP-HPLCにて分析した。Phe および Tyr 溶出画分の溶出液は分取し、エレクトロスプレーイオンゼーションマスマスペクトロメトリー (ESI-MS)により $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比を求めた。

C. 実験結果

実験 1 (健康成人男性) : 結果は、13 時の呼気中 $^{13}\text{CO}_2$ 量を Pre 値とし、測定値から Pre 値 (%/kg 体重)を差し引き $\Delta^{13}\text{CO}_2$ (%/kg 体重)として算出した。13 時の安定同位体の摂取後、すべてのたんぱく質摂取量において急速に呼気中 $^{13}\text{CO}_2$ 量が上昇した。たんぱく質摂取量が 0.2 g/kg 体重/day および 1.2 g/kg 体重/day での呼気中 $^{13}\text{CO}_2$ 量は、15 時 30 分以降たんぱく質摂取量の少ない 0.2 g/kg 体重/day では 1.2 g/kg 体重/day に比べ高い値で推移した。

たんぱく質摂取量が 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 あるいは 1.2 g/kg/day となるように調整した食事を摂取し、各たんぱく質摂取量での 18 時 30 分で採取した呼気中 $^{13}\text{CO}_2$ 量を、Mixed Effect Change Point Regression Model (ME-CPRM)¹⁰⁾を用いて比較したところ、変曲点は 0.89 g/kg 体重/day と算出された (図

1)。また、18 時 30 分での血漿アミノ酸分析を行った結果、Phe と Tyr 濃度および $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比はたんぱく質摂取量 0.2 g/kg 体重/day と 1.2 g/kg 体重/day において有意な差を認めなかった (図 2)。本結果より、鶏卵たんぱく質をたんぱく質源とした際の日本人成人男性のたんぱく質代謝要求量は 0.89 g/kg 体重/day、その 95%信頼値は 1.11 g/kg 体重/day であった。

実験 2 (健康成人女性) : 結果は、13 時の同位体摂取後、すべての摂取たんぱく質量において急速に呼気中 $^{13}\text{CO}_2$ 量が増加し、その後も増加傾向が続いたが、18 時より安定した。19 時では、摂取たんぱく質量 0.2-0.6 g/kg BW/day で高値を、摂取たんぱく質量 0.8-1.2 g/kg BW/day で低値を示した (図 3)。

19 時での呼気中 $^{13}\text{CO}_2$ 量を、ME-CPRM¹⁰⁾を用いて、全ての摂取たんぱく質量で比較したところ、屈曲点は 0.96 g/kg BW/day、95%信頼区間の上限は 1.53 g/kg BW/day と算出された (図 4)。

本研究の結果より、鶏卵たんぱく質をたんぱく質源とした際の日本人成人女性の卵胞期のたんぱく質代謝要求量の推定平均必要量 (EAR) は 0.96 g/kg BW/day、推奨量 (RDA) は 1.53 g/kg BW/day と算出された。

D. 考察

健康成人男性において、鶏卵たんぱく質を 0.2 g/kg 体重/day あるいは 1.2 g/kg 体重/day 摂取した際の血漿 Phe 濃度および Phe 濃度全体に占める ^{13}C -Phe の割合は、ほぼ同じであり、血漿 Tyr 濃度および Tyr 濃度全体に占める ^{13}C -Tyr の割合も、ほぼ同程度であった (図 2)。また、Ogawa ら¹¹⁾は、鶏卵たんぱく質をたんぱく質源として用いたアミノ酸プールな

らびにアミノ酸代謝速度は、本研究プロトコールにおいて定常状態であると報告している。

本研究で、健康成人男性において、摂取たんぱく質レベルを 0.2 g/kg 体重/day から 1.2 g/kg 体重/day と変化させて変曲点を解析した結果、変曲点は 0.89 g/kg 体重/day、その 95%信頼値は 1.11 g/kg 体重/day となった。本研究で、鶏卵たんぱく質を用いて算出された 0.89 g/kg 体重/day という値は、現行のたんぱく質必要量である 0.72 g/kg 体重/day⁸⁾と比較した場合、高値となった。現行のたんぱく質必要量は、窒素出納法で算出されており、窒素出納法で算出される値は最小たんぱく質必要量であるのに対し、IAAO 法で算出される値がたんぱく質代謝要求量であり、それぞれの算出値の意味するところが異なるため、本研究結果で高値を示したと考えられた。

窒素出納法で算出される最小たんぱく質必要量は、たんぱく質代謝状態を低たんぱく質状態に適応させた状態での窒素平衡維持に必要なたんぱく質摂取量である。したがって、このたんぱく質必要量を下回るたんぱく質量を継続的に摂取すると、たんぱく質欠乏症が発症すると考えられる。一方、IAAO 法は、実験毎にそのたんぱく質摂取状態での適応を必要とせず、普通に生活している人が摂取している習慣的なたんぱく質摂取量でのたんぱく質代謝を維持するために必要なたんぱく質摂取量を推定することが出来る。

習慣的なたんぱく質摂取量でのたんぱく質代謝状態を変化させるためには、5~7 日間を要する¹²⁾ので、たんぱく質摂取量を一時的に少ない摂取量に変化させても、習慣的なたんぱく質摂取量でのたんぱく質代謝応答となる。そのため、習慣的に十分量のたんぱく質を摂取している状態で、IAAO 法により算出した

値は、習慣的なたんぱく質摂取量でのたんぱく質代謝に必要なたんぱく質代謝要求量と考えられる。したがって、このたんぱく質摂取量を下回るたんぱく質量を継続的に摂取してもたんぱく質欠乏症は発症しないと考えられる。

本研究で、健康成人男性において、食事調査により被験者の習慣的なたんぱく質摂取量は 1.1 g/kg 体重/day と算出され (表 1)、平成 21 年国民健康・栄養調査の 20~29 歳男性におけるたんぱく質摂取量の平均中央値 (1.0 g/kg 体重/day) と比較して同程度であった。そのため、本研究で算出したたんぱく質代謝要求量は、20~29 歳日本人男性が習慣的に摂取しているたんぱく質状態における代謝要求量であると考えられた。

IAAO 法で算出されるたんぱく質代謝要求量は、普通に生活している人が摂取している習慣的なたんぱく質摂取量でのたんぱく質代謝を維持するために必要なたんぱく質摂取量である。したがって、実験食として摂取するたんぱく質レベルごとに、そのたんぱく質摂取状態への適応を必要としないので、代謝変動の激しい傷病者や、経時的に代謝の変化する妊婦などでも IAAO 法によるたんぱく質代謝要求量の算出方法を適用することが可能と考えられた。

本研究で、健康成人女性において、被験者の身体的特徴は、平成 22 年国民健康・栄養調査の 20~29 歳女性における平均身長 158.1 ± 5.4 cm、平均体重 51.0 ± 9.0 kg、および平均 BMI 20.37 ± 3.16 kg/m² と比較して同程度であった。

本研究で、摂取たんぱく質量を 0.2 g/kg BW/day から 1.2 g/kg BW/day まで変化させて解析した結果、健康な日本人成人女性の卵胞

期での屈曲点は0.96 g/kg BW/day と算出された。この結果は、現行のたんぱく質必要量である0.72 g/kg BW/day と比較すると高値となった。現行のたんぱく質必要量は窒素出納法で算出されており、窒素出納法で算出される値が最小たんぱく質必要量であるのに対し、IAAO 法で算出される値はたんぱく質代謝要求量であり、それぞれの算出値の意味するところが異なるため、本研究結果では、高値となると考えられた。

また、現行の日本人成人のたんぱく質必要量は、男性と女性で同じとされている。日本人成人の窒素平衡維持量は0.46 g/kg BW/day ~0.96 g/kg BW/day の範囲であり⁸⁾、その平均値である0.65 g/kg BW/day が窒素平衡維持必要量として採用されている。たんぱく質の推定平均必要量0.72 g/kg BW/day は、0.65 g/kg BW/day を消化率90%で補正して算出したものである⁸⁾。しかし、これらの先行研究は、成人男性を対象としたものが多く、成人女性のたんぱく質必要量として適さない可能性がある。本研究で、鶏卵たんぱく質を用いて算出されたたんぱく質代謝要求量0.96 g/kg BW/day は、窒素出納法による日本人成人女性を対象とした先行研究の窒素平衡維持量0.96 g/kg BW/day⁸⁾ と近い値であった。

以上の結果から、IAAO 法を用いた日本人成人男性のたんぱく質代謝要求量は、0.89 g/kg 体重/day と算出された。また、健康成人女性のたんぱく質代謝要求量は、卵胞期で0.96 g/kg BW/day と算出された。将来的に必要となる新たな手法 (IAAO 法) を用いた必要量の算出も実施したことで、国際的な考え方との整合性に向けて準備も整った。本方法は、簡便性に優れた方法であり、傷病者や妊

婦、高齢者にも小さな負担で試験を実施することが可能であると考えられた。

E. 研究発表

1. 発表論文

- 1) Ogawa A, Naruse Y, Shigemura Y, Kobayashi Y, Suzuki I, Wada S, Hayamizu K, Kuwahata M, Kido Y. An evaluation of protein intake for metabolic demands and the quality of dietary protein in rats using an indicator amino acid oxidation method. *J Nutr Sci Vitaminol* (2011) **57**, 418-425.
- 2) 木戸康博. たんぱく質・アミノ酸の必要量に関する研究. *栄養学雑誌* (2011) **69**, 285-293.
- 3) Kido Y, Shizuka F, Shimomura Y, Sugiyama T. Dietary reference intakes for Japanese 2010: Protein. *J Nutr Sci Vitaminol* (2013) **59 suppl**, S36-S43.

2. 学会発表

- 1) Hirose T, Araki N, Ogawa A, Kobayashi Y, Wada S, Kuwahata M, Kido Y. Estimation of protein requirement for young Japanese men using the indicator amino acid oxidation method. 11th Asian Congress of Nutrition, Singapore, p. 236. 2011.
- 2) Ogawa A, Hirose T, Kobayashi Y, Hayamizu K, Kuwahata M, Kido Y. An evaluation of the quality of dietary protein in rats using an IAAO method. 11th Asian Congress of Nutrition, Singapore, p.155. 2011.

F. 知的財産権の出願・登録状況

1. 特許取得

なし

2. 実用新案登録

なし

3. その他

なし

G. 引用文献

1. Rose WC. The amino acid requirements of adult man. *Nutr Abst Rev* (1957) **27**, 631-647.
2. Rand WM, Pellet PL, Young VR. Meta-analysis of nitrogen balance studies for estimating protein requirements in healthy adults. *Am J Clin Nutr* (2007) **77**,109-127.
3. Hegsted DM. Balance studies. *J Nutr* (1976) **106**, 307-311.
4. 岸恭一, 木戸康博. タンパク質・アミノ酸の新栄養学. 講談社 (2007).
5. Ball RO, Bayley HS. Influence of dietary protein concentration on the oxidation of phenylalanine by the young pig. *Br J Nutr* (1986) **55**, 651-658.
6. Kriengsinyos W, Wykes LJ, Ball RO, Pencharz PB. Oral and intravenous tracer protocols of the indicator amino acid oxidation method provide the same estimate of the lysine requirement in healthy men. *J Nutr* (2002) **132**, 2251-2257.
7. Humayun MA, Elango R, Ball RO, Pencharz PB. Reevaluation of the protein requirement in young men with the indicator amino acid oxidation technique. *Am J Clin* (2007) **86**, 995-1002.
8. 厚生労働省「日本人の食事摂取基準」策定検討報告書: 日本人の食事摂取基準[2010年版]. 厚生労働省 (2009).
9. Aito-Inoue M, Ohtsuki K, Nakamura Y, Park Y, Iwai K, Morimitsu, F, Sat, K. Improvement in isolation and identification of food-derived peptides in human plasma based on precolumn derivatization of peptides with phenylisothiocyanate. *J Agric Food Chem* (2006) **54**, 5261-5266.
10. Hayzmizu K, Kato M, Hattori S. Determining amino acid requirements from repeated observations on indicator amino acid oxidation method by mixed-effect change-point regression models. *J Clin Biochem Nutr* (2011) **49**, 115-120.
11. Ogawa A, Naruse Y, Shigemura Y, Kobayashi Y, Suzuki I, Wada S, Hayamizu K, Kuwahata M, Kido Y. An evaluation of protein intake for metabolic demands and the quality of dietary protein in rats using an indicator amino acid oxidation method. *J Nutr Sci Vitaminol*, (2011) **57**, 418-425.
12. Uauy R, Scrimshaw NS, Rand WM, Young VR. Human protein requirements: Obligatory urinary and fecal nitrogen losses and the factorial estimation of protein needs in elderly males. *J Nutr* (1978) **108**, 97-103.

表 1 健康な成人男性被験者の特徴

	年齢 (歳)	体重 (kg)	身長 (cm)	BMI* (kg/m ²)	Protein intake (g/kg BW/day)	PFC 比率 (%)
A	23	66	178	20.8	0.9	14.6 : 27.0 : 58.4
B	24	57	170	19.7	1.2	13.4 : 27.5 : 59.0
C	22	59	175	19.3	1.0	11.4 : 28.9 : 59.7
D	20	60	172	20.3	1.2	12.2 : 27.3 : 60.4
E	23	64	172	21.6	1.2	13.5 : 30.9 : 55.6
F	23	63	173	21.0	1.3	15.0 : 32.2 : 52.8
平均値	22 ± 0.6	61.5 ± 1.4	173 ± 1.1	20.5 ± 1.4	1.1 ± 0.1	13.4 : 29.0 : 57.7

*BMI: body mass index

結果は mean ± SE で示した。

表 2 健康な成人女性被験者の特徴

	年齢 (歳)	身長 (cm)	体重 (kg)	BMI* (kg/m ²)	安静時代謝量 (kcal/day)
A	21	151	50.0	21.9	1063
B	21	166	50.4	18.3	1072
C	22	161	53.5	20.6	1306
D	21	164	47.1	17.5	1227
E	21	158	54.5	21.8	1284
F	21	157	51.5	20.9	1300
平均値±標準誤差	21.2±0.2	159.5±2.2	51.2±1.1	20.2±0.8	1209±46.1

*BMI: body mass index

結果は mean ± SE で示した。

表 3 各摂取たんぱく質量での 1 回の玉子焼き栄養成分組成 (体重 50kg)

摂取たんぱく質量 (g/kg BW/day)	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2
鶏卵 (g)	6.8	13.6	20.3	27.1	33.9	40.7
オリーブ油 (g)	0.7	1.4	2.0	2.7	3.4	4.1
エネルギー (kcal)	17	34	51	68	85	102
たんぱく質 (g)	0.8	1.7	2.5	3.3	4.2	5.0
脂質 (g)	1.4	2.8	4.2	5.6	7.0	8.4

表4 各たんぱく質摂取量のアミノ酸組成

	評定パターン (全卵パターン) mg/g	たんぱく質摂取量(g/kg BW/day)					
		0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2
Ala	61.4	12.3	24.6	36.8	49.1	61.4	73.7
Arg	75.1	15.0	30.0	45.1	60.1	75.1	90.1
Asn	33.3	6.7	13.3	20.0	26.6	33.3	40.0
Asp	33.3	6.7	13.3	20.0	26.6	33.3	40.0
Cys	22.1	4.4	8.8	13.3	17.7	22.1	26.5
Gln	56.6	11.3	22.6	34.0	45.3	56.6	67.9
Glu	56.6	11.3	22.6	34.0	45.3	56.6	67.9
Gly	33.3	6.7	13.3	20.0	26.6	33.3	40.0
His	22.7	4.5	9.1	13.6	18.2	22.7	27.2
Ile	62.8	12.6	25.1	37.7	50.2	62.8	75.4
Leu	83.3	16.7	33.3	50.0	66.6	83.3	100.0
Lys	75.7	15.1	30.3	45.4	60.6	75.7	90.8
Met	29.6	5.9	11.8	17.8	23.7	29.6	35.5
Phe	54.7	54.7	54.7	54.7	54.7	54.7	65.6
Pro	41.9	8.4	16.8	25.1	33.5	41.9	50.3
Ser	83.9	16.8	33.6	50.3	67.1	83.9	100.7
Thr	47.1	9.4	18.8	28.3	37.7	47.1	56.5
Trp	15.6	3.1	6.2	9.4	12.5	15.6	18.7
Tyr	40.7	40.7	40.7	40.7	40.7	40.7	48.8
Val	70.3	14.1	28.1	42.2	56.2	70.3	84.4

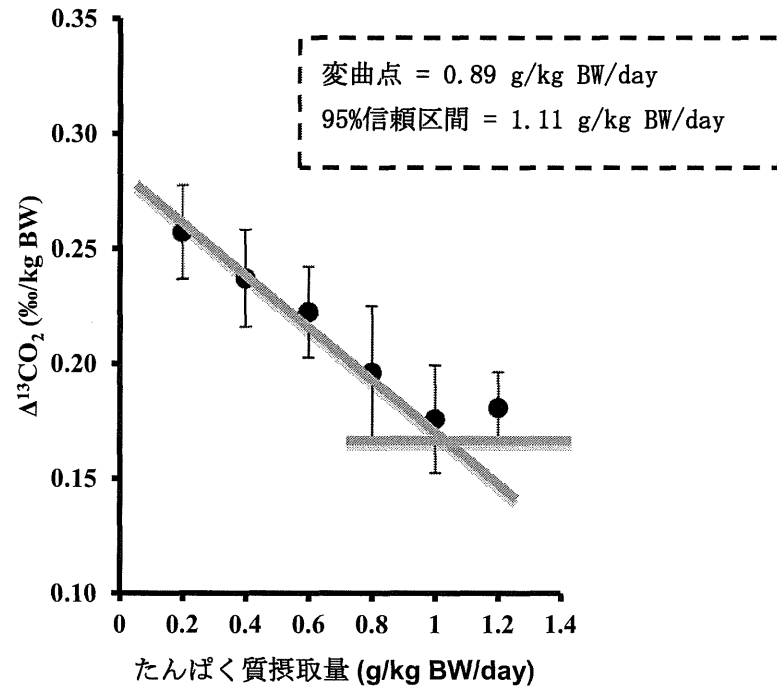


図1 たんぱく質摂取量と呼気中¹³CO₂量の相関
値は18時30分の $\Delta^{13}\text{CO}_2$ (%/kg BW)を用いた。結果は mean ± SE で示した。