

白米タンパク質の特性と健康機能

| | |
|-------|---|
| 誌名 | 日本醸造協会誌 = Journal of the Brewing Society of Japan |
| ISSN | 09147314 |
| 著者名 | 久保田,真敏 |
| 発行元 | 日本醸造協会 |
| 巻/号 | 114巻2号 |
| 掲載ページ | p. 64-70 |
| 発行年月 | 2019年2月 |

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



白米タンパク質の特性と健康機能

米は主要な栄養成分がデンプン（77.6%）であるため、炭水化物供給源として認識されている。ところが、米はデンプンに比べ、含量は少ないものの、タンパク質（6%）を含む。日本人は米を主食とし多くの米を摂取するため、米は肉類や魚介類に次ぐ、重要なタンパク質供給源となっている。これまで米タンパク質の栄養学的な価値に関する研究は、供給上の問題や、米を主食とする国が世界で限定的であるため、限られていた。米食を中心とした日本型食生活の健康機能も言われているが、実際には、その食生活形態は大きく崩れつつある。筆者らによる米タンパク質の健康機能の証明が米の新たな付加価値につながり、日本型食生活推進の一助になると期待される。

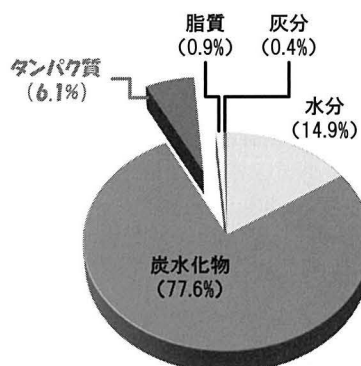
久保田 真 敏

1. はじめに

米は日本で唯一自給可能な穀物として食料自給率の維持に寄与しており、日本人の食卓の中心に位置している食品である。このような重要性にもかかわらず、米の消費量は昭和37年度の118.3 kg/人/年をピークにほぼ右肩下がりに低下しており、平成27年度は60.2 kg/人/年とピーク時と比較してほぼ半減している¹⁾。また食料自給率は米の消費量低下に伴い、昭和35年の79%（熱量ベース）から右肩下がりに低下し、平成27年度では39%まで低下している¹⁾。このような食料自給率の低下は日本が解決すべき大きな課題と考えられており、米の消費拡大に繋がる機能性の発見が期待されており、高アミロース米の食後血糖値上昇抑制作用²⁾、肥満モデルマウスにおける脂質代謝改善作用³⁾、糠層に存在する機能性成分γ-オリザノールに関する報告⁴⁾などいくつかの機能性が報告されている。

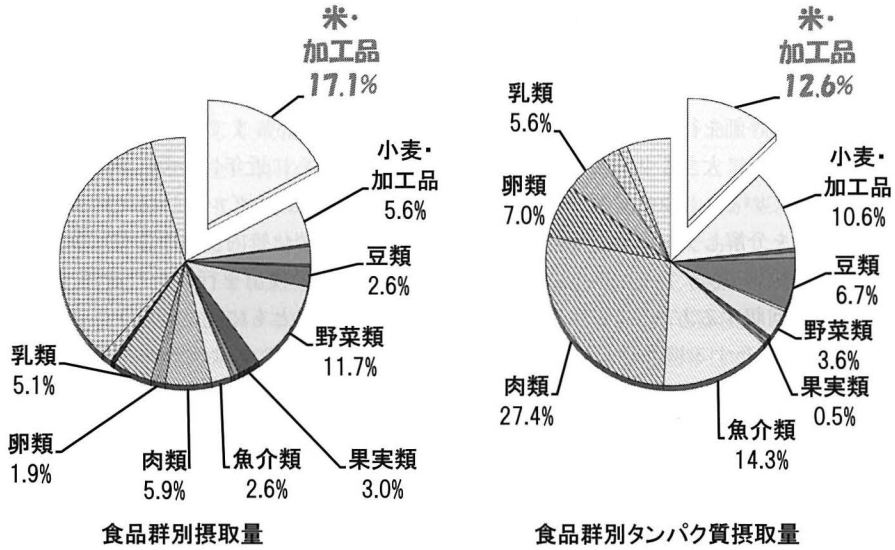
我々が普段、白米として摂取しているものは玄米の外層約10%程度（米糠）を精米時に除去した胚乳と呼ばれる部分であり、最も主要な栄養成分としてデンプン（77.6%）が占めている（第1図）⁵⁾。このような成分構成から一般的に米は糖質（デンプン）の供給源としての認識が高く、僅か6%程度しか含まれないタンパク質に関しては食が多様化した現代においてそ

れほど重要視されてこなかった。先に述べたように摂取量自体が数十年前より減少したとはいえ、米は現在でも日本人の主食であり日々多量に摂取している。この摂取量の多さを考慮して1日の食品群別のタンパク質摂取量で白米のタンパク質を考えると、米は肉類や魚介類に次ぐ3番目に重要なタンパク質の供給源であることが明らかとなっている（第2図）⁶⁾。その摂取量は植物性食品の中で最も多く、脂質代謝改善作用などさまざまな機能が報告されている大豆タンパク質と比較しても、約2倍程度と極めて多く摂取している（20～29歳）。このようなタンパク質供給源としての



日本食品標準成分表2015年版(七訂)

第1図 精白米の成分組成⁵⁾



食品群別タンパク質摂取量 (平成27年度国民健康・栄養調査, 厚生労働省)

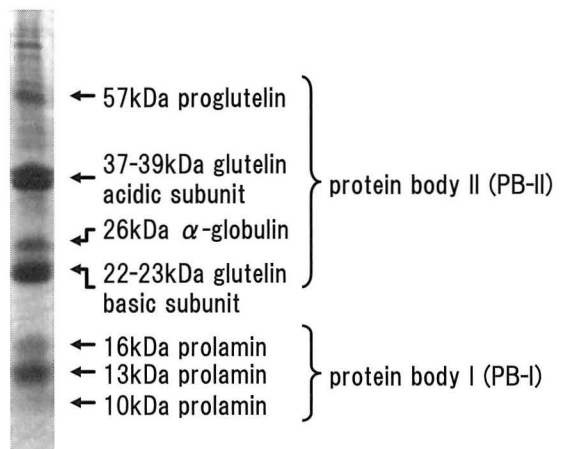
第2図 食品群別摂取量ならびにタンパク質摂取量(20～29歳)⁶⁾

重要性にもかかわらず、簡便に多量かつ安定的に白米タンパク質を供給するための精製方法が確立されていなかったという供給上の問題が原因となり、大豆タンパク質などと比較すると白米タンパク質の機能性に関する研究は非常に限られてきた。しかし近年になり、この精製方法が確立され、機能性研究を行う土台が徐々に整いつつある。このようなタンパク質供給源としての重要性に注目し、白米タンパク質の価値を再評価することを目的として、著者らは白米タンパク質の機能性に関する研究を現在進めている。そこで本稿では、これまでに報告されている白米タンパク質の機能性について紹介させていただく。

2. 白米タンパク質とは？

白米には先に述べたように約6%程度のタンパク質が含まれている。このタンパク質のほとんどは種子発芽時に窒素の供給源として利用される貯蔵タンパク質であり、酵素活性などの機能を持たず、プロテインボディ (PB) と呼ばれる構造体に蓄積することが知られている。米は由来や構造、蓄積するタンパク質の種類が異なる2種類のPBが存在するという特徴を有している。アルコール可溶性のタンパク質であるプロラミンは小胞体由来であるPB-Iに、希酸・希アルカリ可溶性のグルテリンおよび塩溶液可溶性の α -グロブ

リンは液胞由来であるPB-IIに蓄積することが知られている⁷⁾。またPB-IはPB-IIと比較して非常に強固な構造をしており、圧力釜で炊飯してもPB-Iは原型を留めていることが確認されている⁸⁾。主要な貯蔵タンパク質であるプロラミンやグルテリンはそれぞれ電気泳動によって、10, 13, 16 kDaプロラミン⁹⁾、プログルテリン (57 kDa), グルテリン酸性サブユニット (37 - 39 kDa), グルテリン塩基性サブユニット (22 - 23 kDa) に分離される (第3図)¹⁰⁾。このような特徴を持つ白米の貯蔵タンパク質であるが、消化



第3図 白米タンパク質の電気泳動画像

性などについても大きく異なっていることが報告されている。

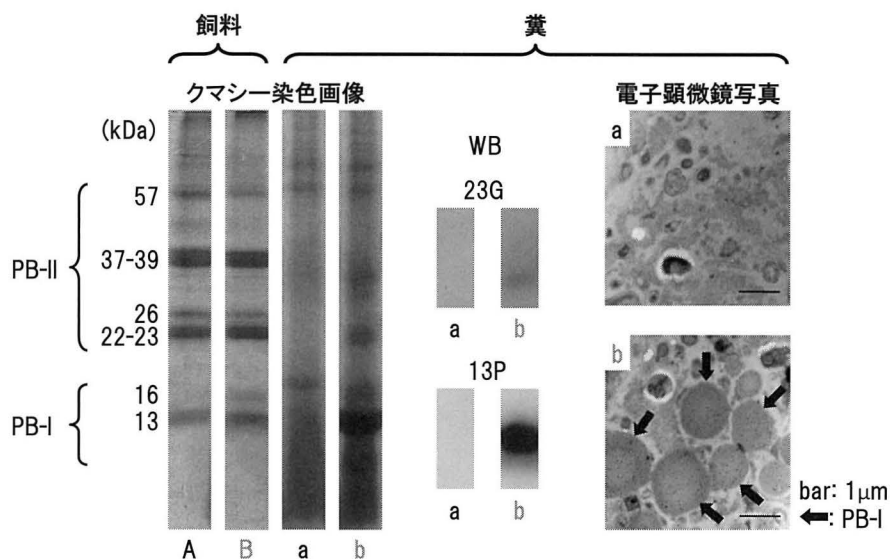
特定の成分の機能性研究を行う際は、一般的にその成分の精製物を利用して評価を行う。白米タンパク質でも同様であり、現在までに大きく2種類のタンパク質精製方法が報告されている。1つは耐熱性のアミラーゼを用いてデンプンを分解しタンパク質を回収する方法 (SD-REP) であり¹¹⁾、もう1つはアルカリによりタンパク質を抽出し回収する方法 (AE-REP) である¹²⁾。なお以下本稿で紹介する機能性のほとんどは AE-REP を用いたものである。

3. 白米タンパク質の消化性について

白米タンパク質の消化性に関する議論は古くから行われており、近年では一部の加工処理が白米タンパク質の消化性に影響することが徐々に明らかになりつつある。Tanaka ら¹³⁾は、炊飯米を含む食事を摂取させたヒトの便中に直径 1.0 ~ 3.5 μm の顆粒状の構造物が排泄されることを形態学的な観察により発見し、feces protein particle (FPP) と命名した。またこの FPP が炊飯米を含まない食事を取ることで便中から消失し、再度炊飯米を摂取することで便中に現れるこ

とを確認し、FPP が炊飯米に由来することも明らかにした。一方、Eggum ら¹⁴⁾はラットを用いた試験を行い、白米のタンパク質消化率が炊飯処理により 99.7% から 88.6% まで約 10% 程度減少することを報告した。さらに近年になり、我々は 13 kDa プロラミンおよび 23 kDa グルテリンに対する特異抗体を用いて、ラット消化管内容物ならびに糞中に残留する白米タンパク質の検出を行った¹⁵⁾。23 kDa グルテリンは生米、炊飯米ともに完全に消化されていたのに対し、13 kDa プロラミンは炊飯米を摂取させたラットの糞中で多量に確認され、生米を摂取させたラットの糞中ではほとんどみられなかったことを報告した。以上の報告より、白米タンパク質の消化性は炊飯処理により低下し、その低下のほとんどはプロラミンの消化性の低下に起因することが明らかとなった。

一方、白米タンパク質精製物の消化性についても報告がなされている。ラットを用いた検討により、牛乳のタンパク質であるカゼインと比較して SD-REP の消化率は有意に低値を示し、その値が 87.0% と炊飯米のタンパク質消化率とはほぼ同じ値であることが明らかとなった¹¹⁾。また AE-REP の消化性について、我々は AE-REP および SD-REP を摂取させたラットの消



(A, a), AE-REP; (B, b), SD-REP; 23G, 23kDa グルテリン; 13P, 13kDa プロラミン

第4図 調製法の違いが白米タンパク質の消化性に与える影響¹⁶⁾

AE-REP, アルカリ抽出白米タンパク質; SD-REP, デンプン分解白米タンパク質; PB, プロテインボディ; WB, ウェスタンブロット法.

化管内容物、糞中に残留する白米タンパク質の検出を行い、各タンパク質精製物の消化性の違いを比較検討した¹⁶⁾。SD-REPを摂取させたラット糞中に炊飯米と同様に13 kDa プロラミンが著しく残留し、AE-REPを摂取させたラットではほぼ完全に消化されていることを明らかとした(第4図)。またKumagaiら¹²⁾はアルカリ処理によりPB-IIの構造がほぼ完全に崩壊し、PB-Iの構造が著しく変形すること報告しており、先に述べたAE-REPとSD-REPにおけるプロラミンの消化性の変化が、このPBの構造変化に由来している可能性が推察されている。さらにこのような消化性の違いがラットの成長に影響するかを検討するために、ラットを用いた4週間の成長試験が行われた。SD-REPと比較してAE-REPを摂取させると体重の有意な増加がみられ、その体重増加はカゼインに匹敵するものであることが報告された¹⁷⁾。以上の報告より、AE-REPはプロラミンの消化性が向上した白米タンパク質精製物であることが明らかとなり、その消化性の向上は体重増加に影響するレベルであることが明らかとなった。このように現在ある白米タンパク質精製物は特に消化性の面で大きな違いがあることが分かっており、機能性研究をする際はこの点を考慮して白米タンパク質精製物を選択する必要があると考えられる。

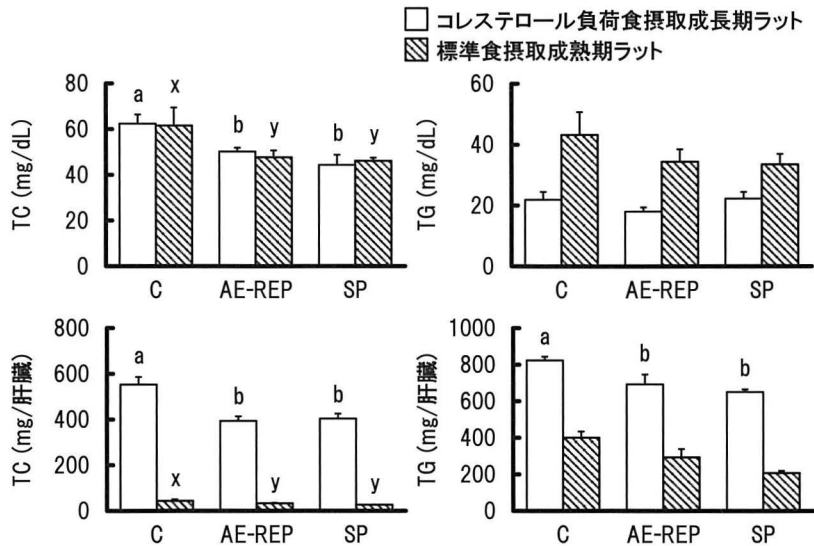
4. 白米タンパク質の脂質代謝改善作用

生活習慣病は食事や運動、喫煙、飲酒などの生活習慣が原因で発症する疾病のことであり、代表的なものとして高血圧、脂質異常症、糖尿病などが挙げられる。この中でも脂質異常症は、日本人の主要な死因である心疾患や脳血管疾患の原因の1つであるアテローム性動脈硬化の発症と密接に関係していると考えられている。その治療には食事や喫煙、運動など生活習慣の改善や薬物療法などが行われており、特に食事、その中でも摂取タンパク質の種類の違いが与える影響については、長年研究が重ねられてきた。成長期(3~4月齢)および成熟期(9~10月齢)のラットを用いた4週間の検討では、Cと比較して、植物性タンパク質である小麦グルテン、大豆タンパク質、ポテトタンパク質の摂取が有意に血中総コレステロールレベルを低下させ、植物性タンパク質の摂取が糞中へのステロイド排泄を有意に増加させることが報告された¹⁸⁾。一方、白米タンパク質についても脂質代謝改善作用について、

いくつかのグループから報告がなされている。

Moritaら¹⁹⁾はAE-REPおよびSD-REPを18日間摂取させたラットにおいて、カゼインと比較して有意に血清コレステロールおよび肝臓中総コレステロール、中性脂肪が低下することを報告した。またその低下作用は、脂質代謝改善作用が報告されている大豆タンパク質に匹敵するものであることを示した。一方、脂質代謝改善作用はAE-REPとSD-REP間で違いはみられなかったものの、SD-REPでのみ糞中への総ステロイド排泄が有意に上昇しており、これら2種類の白米タンパク質ではその作用メカニズムが大きく異なっている可能性が推察された。また我々は成長期(7週齢)および成熟期(20週齢)のラットを用いて、脂質代謝改善作用を検討した²⁰⁾。2週間コレステロール負荷食を摂取させた成長期ラットおよび標準食を摂取させた成熟期ラットにおいて、カゼイン群と比較してAE-REP群で血中総コレステロール、肝臓中総コレステロールおよび中性脂肪が有意に低値を示すことを明らかにした(第5図)。またその効果は大豆タンパク質に匹敵するものであった。これらの報告により、白米タンパク質は調製法やラットの成長ステージにかかわらず、脂質代謝を改善する機能を有していることが明らかとなった。

上述の報告では白米タンパク質の全ての画分を用いた評価であったが、その有効画分について興味深い報告が既になされている。Tongら²¹⁾は、グルテリン、プロラミンに次ぐ主要な貯蔵タンパク質である α -グロブリンに注目し、その脂質代謝改善作用について報告した。1%コレステロール負荷食を摂取させたラットに対し、4週間、100 mg/kg体重となるように白米タンパク質の α -グロブリン、あるいは大豆タンパク質の有効成分である β -コングリシニンを毎日経口投与すると、糞中の中性ステロイド排泄が増加し、血清総コレステロールが有意に低下することを報告した。また α -グロブリンの作用は、 β -コングリシニンに匹敵するものであった。加えてApoE欠損マウスへ9週間100 mg/kg体重となるように α -グロブリンを経口投与すると、アテローム性動脈硬化症の病変領域の増加を有意に抑制し、その進展に対して有効であることを報告した。以上の報告から、白米タンパク質は大豆タンパク質に匹敵する脂質代謝改善作用を有しており、その作用は主に α -グロブリン画分に由来する



第5図 白米タンパク質の摂取が脂質パラメータに与える影響²⁰⁾
 AE-REP, 白米タンパク質; C, カゼイン; SP, 大豆タンパク質;
 TC, 総コレステロール; TG, 中性脂肪. ^{ab, xy}P < 0.05.

可能性が示された。

5. 白米タンパク質の糖尿病, 糖尿病性腎症進行遅延作用

糖尿病は代表的な生活習慣病の1つであり, 慢性的な高血糖を呈する疾病である。この糖尿病の最大の特徴は高血糖を原因としたさまざまな合併症を引き起こすことであり, 特に毛細血管が集中している臓器に重篤な影響を及ぼすことが知られている。糖尿病性網膜症, 神経障害, 腎症は糖尿病の3大合併症と呼ばれており, これら合併症の重篤化は失明や四肢の切断, 透析などに繋がることからその対策が極めて重要視されている。この中でも糖尿病性腎症は, 現在の日本において新規透析導入患者の原因疾患の第1位を占めており²²⁾, 近年大きな社会問題となっている医療費高騰の大きな原因の1つとなっている。糖尿病性腎症を含む慢性腎疾患では食事療法や投薬療法などが行われており, 特に食事療法では摂取タンパク質の量の制限が主に行われている。一方, 摂取タンパク質の種類の違いについてはこれまでほとんど注目が払われてこなかった。ところが近年になり, 糖尿病性腎症に対する大豆タンパク質の有効性などが報告され, 白米タンパク質についても徐々に報告がなされるようになった。そ

こで本項では糖尿病および糖尿病性腎症に対する白米タンパク質の有効性について紹介する。

消化管は消化・吸収を担うだけでなく, さまざまなホルモンを分泌する臓器でもあり, インスリン分泌を促す消化管ホルモンであるインクレチンなどが糖尿病との関連で非常に注目を集めている。インクレチンの1つである Glucagon-like peptide-1 (GLP-1) は小腸のL細胞から分泌され, 膵臓からのインスリン分泌を促すことで上昇した食後血糖値の低下に寄与している。このようなことから GLP-1 は新たな糖尿病治療の対象として, 近年急速に注目を集めている。Ishikawaら²³⁾は AE-REP をペプシンにより加水分解し, 得られたペプチド (REPH) が GLP-1 分泌に与える影響について検討を行った。GLP-1 の分泌機能を有する培養細胞である GLUTag 細胞を用いた検討から, REPH の投与により GLP-1 の分泌が有意に上昇することが示された。一方, GLP-1 は血中の dipeptidyl peptidase-IV (DPP-IV) の作用により速やかに分解, 不活化されるが, この血中 DPP-IV 活性が REPH の投与により減少することが示された。このような GLP-1 の分泌促進および分解抑制作用を介して, REPH はラット血中の活性型 GLP-1 の割合を上昇させ, 最終的に食後血糖値の上昇を緩やかにする可能性

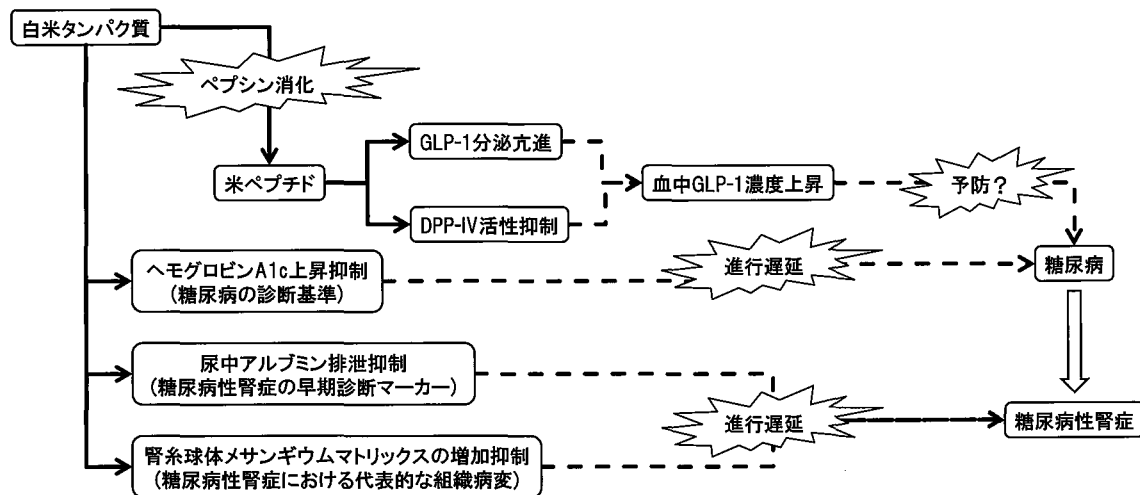
を有していることが報告された。以上の報告より、REPHは血中GLP-1濃度の上昇作用を介して、糖尿病の進行に対して有益な効果を有している可能性が示されている。

上述したようにREPHは糖尿病に対して有益な効果を有している可能性が示され、その合併症に対しても有益な効果を有していることが期待された。我々は、日本人を始めとしたアジア人種に多くみられる、著しい肥満を呈さない糖尿病に適したモデルとして利用されているGoto-Kakizaki (GK) ラットを用いて、AE-REPが糖尿病性腎症に与える影響について検討を行った²⁴⁾。10週間GKラットに高スクロース飼料(スクロース含量30%)を摂取させたところ、AE-REP摂取によりカゼインと比較して明確な血糖値上昇抑制作用は確認できなかったものの、糖尿病性腎症の早期診断マーカーとして利用されている尿中アルブミン排泄(UAE)が有意に抑制され、糖尿病性腎症で見られる代表的な組織病変の1つである腎糸球体のメサンギウムマトリックスの増加が有意に抑制されることが示された。さらに我々は欧米人などでみられる著しい肥満を呈する糖尿病に適したモデルであるZucker Diabetic Fatty (ZDF) ラットを用いて、AE-REPの糖尿病および糖尿病性腎症の進行遅延作用について検討した²⁵⁾。8週間ZDFラットにカゼインあるいはAE-REP飼料を摂取させたところ、比較的長期間の血糖値の推移を反映すると考えられているヘモグロビ

ンA1cが有意にAE-REP群で低値を示すことが明らかとなり、糖尿病の進行が遅延している可能性が示された。さらにUAEならびに腎糸球体のメサンギウムマトリックススコアの有意な改善がみられ、AE-REPの摂取が糖尿病性腎症の進行を遅延させている可能性が示された。またZDFラットは著しい脂肪肝を呈することが知られているモデル動物でもあるが、AE-REPの摂取は肝臓への中性脂肪および総コレステロールの蓄積を有意に抑制することが示された。この結果は先に述べた通常ラットでみられた脂質代謝改善作用が、肥満糖尿病モデルラットでも同様にみられることを示唆したものであり、大変興味深い報告である。以上の報告から、作用メカニズムや有効成分については未だ未解明ではあるが、AE-REP摂取は糖尿病ならびに糖尿病性腎症の進行を遅延させる機能を有している可能性が示された(第6図)。

6. おわりに

本稿では消化性を中心とした白米タンパク質の特性からはじまり、脂質代謝改善作用や糖尿病、糖尿病性腎症の進行遅延作用について紹介してきたが、これら以外の機能性についても報告されつつある。Yangら²⁶⁾は成長期のラットにAE-REP食を3週間摂取させることで、還元型グルタチオンやsuperoxide dismutase活性の上昇などを介してタンパク質や脂質の酸化マーカーが減少する可能性について報告し、白米タンパク



第6図 白米タンパク質・ペプチドの摂取が糖尿病、糖尿病性腎症に与える影響²³⁻²⁵⁾

質が抗酸化作用を有している可能性を示した。また Yoon ら²⁷⁾は米プロラミンの経口投与が Th1 免疫応答を活性化させることで、ジニトロクロロベンゼン誘導性のアトピー性皮膚炎に対し保護作用を示す可能性を報告し、米のプロラミンが免疫調節作用を有している可能性を示した。このように白米タンパク質の機能性に関する研究は日本、韓国、中国などのグループを中心に徐々に始まっており、さまざまな機能性が発見されつつある。今後は作用メカニズムの解明ならびに有効成分の同定など、より詳細な検討が求められつつある。著者らも白米タンパク質の機能性に関する研究を進め、その作用メカニズムの解明を試みる予定である。

(新潟薬科大学 応用生命科学部)

引用文献

- 1) 農林水産省大臣官房政策課食料安全保障室 (2016) 平成 27 年度食料需給表, 品目別累年表 3-1 穀類 米, <http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?lid=000001177544>
- 2) Zenel and Stewart, *Nutrients*, **7**, 5362-5374 (2015)
- 3) Lee *et al.*, *J Nutr Biochem.*, **24**, 1991-2000 (2013)
- 4) Szcześniak *et al.*, *J Anim Physiol Anim Nutr.*, **100**, 601-617 (2016)
- 5) 文部科学省, 日本食品標準成分表 2015 年版 (七訂) (2015)
- 6) 厚生労働省, 平成 27 年国民健康・栄養調査報告, <http://www.mhlw.go.jp/bunya/kenkou/ei-you/dl/h27-houkoku.pdf> (2017)
- 7) Tanaka *et al.*, *Agric Biol Chem.*, **44**, 1633-1639 (1980)
- 8) 田中 國介, 小川 雅弘, *化学と生物*, **24**, 756-758 (1986)
- 9) Ogawa *et al.*, *Plant Cell Physiol.*, **28**, 1517-1527 (1987)
- 10) Yamagata *et al.*, *Plant Physiol.*, **70**, 1094-1100 (1982)
- 11) Morita and Kiriyama, *J Food Sci.*, **58**, 1393-1396 (1993)
- 12) Kumagai *et al.*, *J Nutr Sci Vitaminol.*, **52**, 467-472 (2006)
- 13) Tanaka *et al.*, *Agric Biol Chem.*, **39**, 515-518 (1975)
- 14) Eggum *et al.*, *Nutr Rep Int.*, **16**, 649-655 (1977)
- 15) Kubota *et al.*, *J Nutr Sci Vitaminol.*, **60**, 300-304 (2014)
- 16) Kubota *et al.*, *Biosci Biotechnol Biochem.*, **74**, 614-619 (2010)
- 17) Kumagai *et al.*, *J Nutr Sci Vitaminol.*, **55**, 170-177 (2009)
- 18) De Schrijver, *J Nutr* **120**: 1624-1632 (1990)
- 19) Morita *et al.*, *J Sci Food Agric.*, **71**, 415-424 (1996)
- 20) Yang *et al.*, *Biosci Biotechnol Biochem.*, **71**, 694-703 (2007)
- 21) Tong *et al.*, *Food Chem.*, **132**, 194-200 (2012)
- 22) 日本透析医学会, 図説 わが国の慢性透析療法の実況, 2015 年末の慢性透析患者に関する基礎集計, <http://docs.jsdt.or.jp/overview/pdf2016/p010.pdf> (2016)
- 23) Ishikawa *et al.*, *Food Funct.*, **6**, 2525-2534 (2015)
- 24) Kubota *et al.*, *Br J Nutr.*, **110**, 1211-1219 (2013)
- 25) Kubota *et al.*, *Br J Nutr.*, **116**, 1326-1335 (2016)
- 26) Yang *et al.*, *Life Sci.*, **91**, 389-394 (2012)
- 27) Yoon *et al.*, *BMC Complement Altern Med.*, **15**, 353 (2015)

執筆紹介 (順不同・敬称略)

久保田真敏 < Masatoshi KUBOTA >

昭和 51 年 10 月 16 日生まれ <勤務先と所在地> 新潟薬科大学応用生命科学部 〒956-8603 新潟県新潟市秋葉区東島 265-1 <略歴> 平成 22 年新潟大学大学院博士後期課程修了, 博士 (学術) 取得, 平成 22 年新

潟大学農学部特任助教, 平成 23 年新潟大学超域学術院助教, 平成 28 年新潟大学農学部特任助教, 平成 29 年新潟薬科大学特任講師, 現在に至る <抱負> 米タンパク質の機能性について, もっと深く研究したい。 <趣味> スポーツ観戦 (主にテレビ)