

新アミノ酸指標 DIAAS によるたんぱく質の再評価と 動物性食品の生産に伴う環境負荷の再考

齋藤 忠夫

(東北大学大学院農学研究科名誉教授, 〒980-8572 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1)

Re-evaluation of proteins using the new amino acid index DIAAS and reconsideration of the environmental burden associated with the production of animal products

Tadao Saito

(Emeritus Professor, Graduate School of Agricultural Science, Tohoku University)

要 旨

ヒトが摂取するたんぱく質には、植物性たんぱく質と動物性たんぱく質がある。食事性たんぱく質は、単に「量」を摂るのではなく、その「質」を考えて効率的に摂取することが望まれる。たんぱく質栄養価の評価基準は、「アミノ酸スコア」について「たんぱく質消化性補正アミノ酸スコア：PDCAAS」を経て、現在では「消化性必須アミノ酸スコア：DIAAS」が推奨される。この新評価基準 DIAAS を用いてたんぱく質の「量と質」を再考する論文が報告されている。従来たんぱく質は過剰摂取されていると考えられていたが、DIAAS による再計算では1日平均摂取量が必要量を満たしている国は存在しなかった。また、動物性たんぱく質は植物性たんぱく質よりも DIAAS 値は優れており、ビーガンなどの極端な菜食の継続による健康上の課題が明らかとなった。また、DIAAS 再計算により、動物性食品の生産に伴う環境負荷（土地使用量、淡水使用量、温室効果ガス排出量）に従来値と大きく異なる結論が導きだされた。将来に渡る健康的で持続可能な食料システムの構築には、植物性食品を生産する農業と動物性食品を生産する農業がバランスを保ちつつ、補完しあう関係を維持していく必要がある。

はじめに

たんぱく質は、生体組織における筋肉、内臓、皮膚などの重要な構成成分であるとともに、代謝系での酵素やホルモンとしても極めて重要な存在である。食事からのたんぱく質は、筋肉などの材料として捉えられることが多いが、近年の研究では耐糖能

の改善¹⁾ や脳卒中の発症リスクの低減²⁾ に関係するなど、多くの健康機能を有することも報告されている³⁾。

たんぱく質は糖質、脂質と並んで3大栄養素の一つであり、その摂取の栄養学的な重要性は広く認識されている。「国民健康・栄養調査」⁴⁾ によると、日本人のたんぱく質摂取量は、第二次世界大戦後から1970年代にかけては増加し、1995年には81.5 g（全年齢の平均値）としばらくは高い水準を維持し

* Tel: 090-6220-0830

E-mail: tadao.saito.a3@tohoku.ac.jp

ていたが、2000年の77.7g（全年齢の平均値）より減少に転じ、2019年には71.4g（全年齢の平均値）と戦後間もない1950年と同水準まで減少している⁴⁾。この日本国民のたんぱく質摂取量の減少の背景には、近年の肥満やメタボリックシンドロームへの関心の高まりや、とくに若年女性の瘦身願望から総エネルギー摂取量を制限する意識の高まりなどがあると推定されている。

厚生労働省の定めている「日本人の食事摂取基準」では、成人・高齢者・小児の全年齢区分で、男女ともに同一のたんぱく質維持必要量（0.66g/kg体重/日）で推定平均必要量が設定されている⁵⁾。2020年版の基準では、高齢者のフレイル予防の観点から、総エネルギー量に占めるべきたんぱく質由来エネルギー量の割合（%エネルギー）について、65歳以上の目標量の下限が13%から15%エネルギーに引き上げられた。基準では、15歳～64歳の男性は1日あたり65gのたんぱく質摂取が推奨されている。私たちの筋肉を維持するためには、体重1kgあたり1.0gのたんぱく質を摂るべきであり、筋肉をさらに増やしたいのであれば1.2～1.4gのたんぱく質の摂取が推奨されている。2016年、Nutrition誌に国際的なポジションスタンドが発表されたが、この声明によるとアスリートや運動習慣のある人は、体重1kgあたり1.2～2.0gのたんぱく質が必要とされている。

しかも、私たちはたんぱく質を構成する20種類のアミノ酸のうち、実に9種類の必須アミノ酸は自身の体内で生合成できず、必ず食事から補う必要がある。食事性のたんぱく質は、単に「量」を摂るのではなく、その「質」を考えて効率的に摂取することが望まれている。例えば筋肉を形づくるために重要な分岐鎖アミノ酸（BCAA）が多く含まれるたんぱく質は、筋肉合成を高める効果に優れているため、アスリート向けに留まらず、高齢者のサルコペニア防止などにも極めて有効である⁶⁾。

最近、このたんぱく質の「量と質」を再度考え直す論文が報告されており、それによりたんぱく質摂取は、単に個人の健康管理の問題を超えて、近年

重要視されているSDGs（Sustainable Development Goals: 持続可能な開発目標）に関連するデータまで塗り替える可能性が示唆されている⁷⁾。本稿では、たんぱく質の栄養価の解釈が、動物福祉、気候変動、動物性食品の生産と消費倫理などを含む持続可能な開発目標にまで影響が及ぶことを共に考えていきたい。

たんぱく質の「質」を評価する新しい指標 DIAAS

我々が食品として摂取する主要なたんぱく質には、「植物性たんぱく質」と「動物性たんぱく質」があり、さらに食品ごとにたんぱく質含有量、アミノ酸組成、消化吸収率や利用率が異なっている。たんぱく質における「質」とは、食品または食品の組み合わせに含まれるたんぱく質が、必要なアミノ酸を供給するかどうかの総合的な能力を意味している。栄養学的には、たんぱく質の評価は「量」に加えて「質」も共に重視する必要がある。

植物性たんぱく質は、一般的には動物性たんぱく質と比較して「質」が低いと考えられている。その理由は、植物性たんぱく質はリジンなどの必須アミノ酸含有量の不足により、生体の利用効率の低いものが多いことにある。また、動物性たんぱく質と比較して、消化時に重要な物理化学的な構造が大きく異なることもある。さらに、植物性食品には摂取後の消化や吸収を阻害する成分である食物繊維、トリプシンインヒビター、フィチン酸塩あるいはタンニンなどが含まれていることも、消化吸収率を下げる原因となる。

食品たんぱく質の評価を決める必須アミノ酸の重要性については、古くから「桶の理論」で説明されている。たんぱく質の評価は9種類の必須アミノ酸の含有バランスが重要であり、バランスが悪いと最も少ないアミノ酸（制限アミノ酸）の高さまでしか桶に水が溜まらない、すなわち最も少ないアミノ酸の量までしか体内でたんぱく質を合成できないことになる。例えば、小麦と卵のたんぱく質の構成アミノ酸を比較した場合は、小麦は極めてリジン含量が少なく桶に水が溜まらず、一方卵では全ての必須ア

ミノ酸の含量が等分に高く沢山の水が桶に溜まることになる。すなわち、小麦は多量に摂取しないと十分なたんぱく質が体内で合成できないが、卵であれば少量の摂取で十分なたんぱく質が合成でき、大きな差となる。

たんぱく質の栄養価を考える場合の評価基準はいくつか存在する。1973年、国連食糧農業機関（FAO）と世界保健機関（WHO）により「アミノ酸スコア」が提唱され、たんぱく質の栄養学的な「質」については本スコアにより評価されることになった⁸⁾。アミノ酸スコアは、たんぱく質を構成する窒素1gあたりに占める各必須アミノ酸のmg数で表され、FAO/WHOの合同委員会が基準としたアミノ酸評点パターンに対する割合で算出された。この指標は、たんぱく質中の必須アミノ酸含量を、基準パターン（9種類の必須アミノ酸の必要量）と比較するもので、導入当時は比較的食材ごとの差別化が容易であった。

しかし、その後1985年には基準値や算出方法の変更があり、現在では動物性たんぱく質の中でも、牛肉、豚肉、鶏肉、鶏卵、牛乳、ヨーグルトそしてほとんどの魚肉など多くの食品のアミノ酸スコアが100（満点）とされる。その結果、アミノ酸スコアでは、食品のたんぱく質の「質」の差を相互比較することが難しくなっていた。また、この指標の最大の欠点は、たんぱく質の消化吸収率を全く反映していない点であった。

1991年、FAO/WHOの合同委員会は、たんぱく質の消化吸収率も合わせて評価した「たんぱく質消化吸収率補正アミノ酸スコア：PDCAAS（Protein Digestibility Corrected Amino Acid Score）」という新しい指標を提唱し、たんぱく質の「質」を表す正確な指標として用いられてきた⁹⁾。この指標では、アミノ酸スコアにたんぱく質の消化吸収率（糞便中の窒素含量からたんぱく質量を推定し消化吸収率を計算）を掛けた値を用いた。例えば、良質なたんぱく質源である牛乳、鶏肉鶏卵については、アミノ酸スコアおよびPDCAASともに最高点である100あるいは1.00となり、一律に最高評価となった。

しかし、このPDCAASについても野間らにより2つの問題点が指摘されている³⁾。一つは、スコアに上限値を設け100または1.00を超える部分は切り捨てられるために、上限を超える良質なたんぱく質を過小評価してしまう点である。もう一つは、たんぱく質の消化吸収率の計算に、糞便中の窒素含量を用いて腸全体での消化吸収率をみている点である。より正確な消化吸収率は、回腸末端（小腸まで）で測定すべきであり、大腸において腸内細菌により代謝を受けた後の糞便測定では、正確なたんぱく質の消化吸収率の値が得られないという内容である。

その後議論が進み、現在最もたんぱく質の「質」を正確に評価する指標として推奨されているのは、必須アミノ酸の消化吸収率と利用効率まで総合的に判断することができる「消化性必須アミノ酸スコア：DIAAS」であり、この指標を用いての再計算により牛乳製品などの優位性が改めて再認識されてきている。

2013年、FAOの専門家協議会はDIAAS（Digestible Indispensable Amino Acid Score）という新しいたんぱく質の評価指標を提唱した¹⁰⁾。この指標は、たんぱく質を構成するアミノ酸のより正確な消化吸収率の測定をもとに、易消化性（消化のされ易さ）と体内での利用効率など、総合的にたんぱく質の「質」を評価することを可能としている。DIAASは以下の式で計算することができる。

$$\text{DIAAS (\%)} = 100 \times \left[\frac{\text{食物たんぱく質 1g 中の消化性必須アミノ酸の mg 数}}{\text{(参照たんぱく質 1g 中の同じ消化性必須アミノ酸の mg 数)}} \right]$$

参照たんぱく質のアミノ酸量は、生後6ヵ月から3歳までの子どもの必須アミノ酸必要量である。また、評価には、100や1.00などの上限値は設けず、この数値が高ければ高いほど良質なたんぱく源と評価される。

2016年、Ertleらは家畜用の濃厚飼料にも多用されているとうもろこしや大豆などの植物性たんぱく質と牛乳や食肉などの動物性たんぱく質のDIAAS値を相互比較した^{11,12)}（表1）。とうもろこしや麦

		DIAAS
植物性たんぱく質	小麦	40.2
	大麦	47.2
	とうもろこし	42.4
	大豆	99.6
動物性たんぱく質	牛肉	111.6
	豚肉*	113.9
	鶏肉*	108.2
	鶏卵*	116.4
	牛乳	115.9

出典：Ertl P et al. Animal. 2016;10(11):1883-1889.
 *は、Ertl P et al. Die Bodenkultur: Journal of Land Management, Food and Environment. 2016;67(2).

表1 植物性および動物性たんぱく質における代表的な食材のDIAAS値¹²⁾

類の植物性たんぱく質のDIAAS値は40-47程度と極めて低かったが、一方で、動物性たんぱく質の肉類はいずれも100を超えており、さらに牛乳は116となり必須アミノ酸バランスの取れた良質なたんぱく質として評価されている。

動物性たんぱく質のDIAAS値が100を超えた部分は、植物性たんぱく質の利用効率の低さを補助して完全に近づける役割を担っていると考えられる。牛乳乳製品のたんぱく質は、リジンなどの必須アミノ酸含量もバランスも良くなっており、動物性食品の中でも非常にすぐれた食材として評価されたことが理解できる。

DIAASによる世界のたんぱく質摂取量の再検討

2021年、Moughanらは世界103ヶ国のさまざまな国や地域における「平均的なたんぱく質必要量」と、成人1人あたりの1日平均「総たんぱく質摂取量」とを新しいたんぱく質評価指標のDIAASで補正して比較した¹³⁾。「必要量」はDIAAS値が100以上の良質なたんぱく質をもとに設定されている。

図1は、世界103ヶ国における、1日あたりの平均たんぱく質摂取量とたんぱく質消化率および利用率による補正結果を報告したMoughan論文¹³⁾を参考にして作成したグラフを示した。

図1-A: 腸全体でのたんぱく質消化吸収率によるPDCAASを用いた元データでは、世界のほとんど

各グラフ中の太い横線は、1日平均たんぱく質必要量

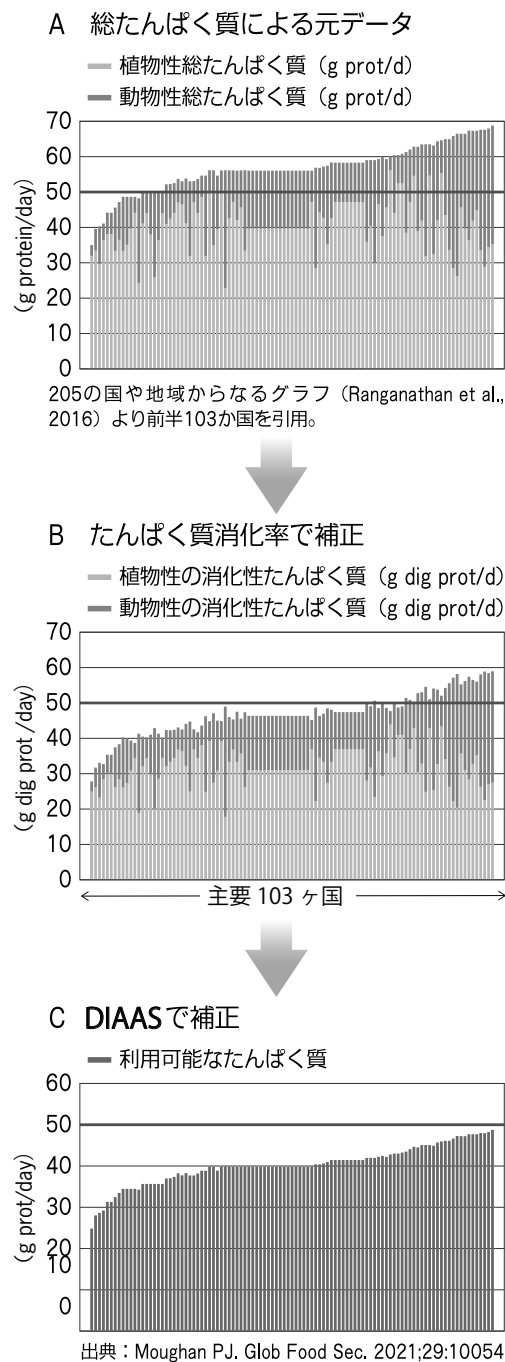


図1 主要103ヶ国の1日あたり平均たんぱく質摂取量およびたんぱく質消化率・利用率による補正¹³⁾

の国で国民の総たんぱく質摂取量は必要量を満たしており、むしろ過剰に摂取されているという結論であった。

図1-B: 大腸を含まない回腸末端で測定したたんぱく質消化吸収率を用いて元データを補正すると、たんぱく質摂取量は、103ヶ国のうち18ヶ国がたんぱく質

ばく質必要量をわずかに上回ったのみであり、大半の国で必要量を満たしていなかった。

図 1-C: 必須アミノ酸の消化吸収率に加えて利用率まで総合的に評価する DIAAS で元データを補正すると、必須アミノ酸のバランスがとれたたんぱく質摂取量が必要量を満たしている国は、103 国中 1 か国も存在しなかった。

このように、たんぱく質の評価指標が新たに変わることによって、これほど顕著な差異が生じることは驚きであるとともに、たんぱく質の「質」を反映していない総たんぱく質「摂取量」により充足度を考えると、栄養学的に誤った結論に至る可能性が初めて示された。

我が国の 65 歳以上の高齢者が総人口に占める割合は約 30% となり、将来的に加齢により筋肉が減少するサルコペニアや低栄養と相まってのフレイルの増加が社会的に心配されている。筋肉を作るものになるたんぱく質の摂取量についても、今後はロイシンなどの筋肉合成に重要な必須アミノ酸の消化吸収率を重視した DIAAS による摂取基準の改訂や、量よりも質に重点を置いた栄養指導や臨床治療が必要となるであろう。

世界で拡大する菜食およびプラントベース食品市場

近年、植物性食品をベースにした食生活が急速に広がっており、ベジタリアンやビーガンと呼ばれる、特別な食事スタイルを採用している集団が世界中に存在している。

ベジタリアンとは、日々の食事において肉や魚といった動物性食品を避け、豆類、野菜、果物、穀物などの植物性食品を中心に摂る人々であり、菜食主義者と訳される。語源は野菜のベジタブルではなく、ラテン語の活力あるという意味のベジタス (vegetus) が由来であることは意外と知られていない。また、ビーガンとは徹底した菜食主義者をさし、完全菜食主義者とも訳されることがある。彼らは肉や魚に加えて、卵や乳製品などの動物由来の食材を一切摂取しないことが知られている。

菜食の広がりには、今や世界的な潮流といえる。ユーロモニターインターナショナルの調査では、主要 100 カ国・地域のベジタリアンやビーガン等の人口は、欧米諸国を中心に毎年約 1% ずつ増加傾向にあり、2018 年にはその人口は約 6.3 億人に達した¹⁴⁾。また、独スタティス社 (世界最大の市場調査会社) は、植物由来の代替食品の開発も活発化し、植物性たんぱく質の世界全体の市場規模は、2020 年の 103 億ドル (約 1 兆 1000 億円) から、2026 年には 50% 増の 156 億ドル (約 1 兆 7000 億円) に成長することを予測している^{15,16)}。

市場では、肉や魚や乳製品に似せた、植物から作る「プラントベース食品 (PBF)」の存在感が増している。プラントベースとは、動物由来の原料を使用せず、植物由来の原料のみを使用して作ったものであることを指している。具体的には、大豆由来の代替肉や、豆乳やアーモンド・オーツ由来の代替乳飲料などがある。動物由来の原料を使用しないために、健康に良いあるいは環境にやさしいという解釈から、海外を中心に近年注目が集まっている。

また、プラントベース食品は、土地や水の節約や、温室効果ガスの排出を抑制することで環境への負荷を減らすという考え方より、国際連合が提唱している持続可能な開発目標 (SDGs) の観点からも支持を得ている。このように、プラントベース食品はベジタリアンやビーガンの人達だけでなく、動物性の食品を控えている人達にとっても、新たな食の選択肢の一つとなりつつある。

植物性食品の栄養学上の留意点

健康に良さそうに思えるベジタリアン食やビーガン食であるが、栄養学的な留意点もある。近年、菜食の長期的な継続による健康上の問題点や、とくにベジタリアンやビーガンの家庭における子どもの発達や成長への問題点が指摘され、たんぱく質の摂取において量と質の関係への注意が喚起されている。

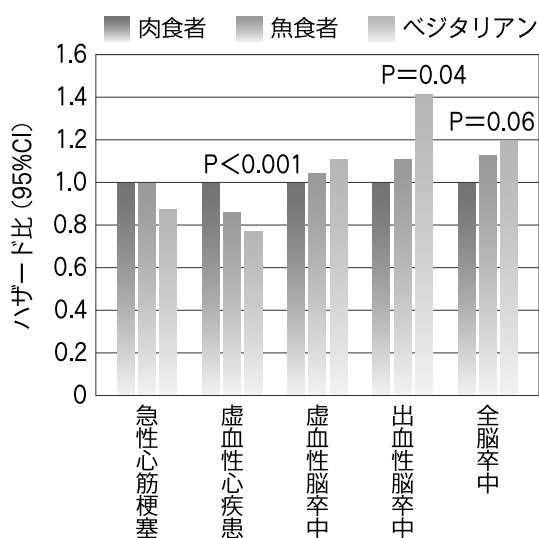
植物性食品には、食物繊維やビタミンやミネラルも豊富で、とくに抗酸化作用のあるポリフェノールが重要な生理活性成分として含まれている。しか

し、植物性食品からだけでは摂取が難しい栄養素もある。厳格なビーガン食のように完全な菜食に近づくほど、たんぱく質などの栄養素不足に陥る可能性が高まる。

菜食により摂取不足が心配される栄養素には、たんぱく質を筆頭に、カルシウム、鉄、亜鉛、ビタミンD、ビタミンB₁₂およびオメガ3脂肪酸（n-3不飽和脂肪酸）などが挙げられる。代謝に重要な補酵素であるビタミンB₁₂は、動物性食品（魚、肉、卵、牛乳製品）に豊富に含まれるが、穀類、いも・でん粉類、豆類、野菜類には含まれない。カルシウムも葉物野菜に多く含まれているが、吸収性と利用性が低く、必要量を満たすためには大量に摂取する必要がある。さらに、植物性食品に含まれる鉄は非ヘム鉄であり、動物性食品のヘム鉄よりは吸収率が低い。

2019年、Tongらは英国のベジタリアンと虚血性心疾患と脳卒中の発生リスクとの関連について、長期間かつ大規模な研究結果を報告した¹⁷⁾。この研究は、肉食者（2.4万人）、魚食者（7.5千人）、ベジタリアン（1.6万人）の3つの異なった食習慣のグループにおける18年間に渡る追跡調査であった。

図2は、各食事グループの疾患発症率の比較をTongらの論文¹⁷⁾を参考にして作製した。とくに注



出典：Tong TYN et al. BMJ. 2019;366:l4897 を参考に作成
 図2 3つの食事グループにおける心疾患および脳疾患発症率の比較¹⁷⁾

目されるのは、脳内出血やくも膜下出血などの「出血性脳卒中」であり、魚食者や肉食者よりも、ベジタリアンの発症率が有意に高かった。このことから、食事からのたんぱく質の摂取量が低いことが、脳の血管強度が脆弱になる原因の一つとして考えられている。虚血性心疾患は、ベジタリアンの方が肉食者や魚食者よりも発症率が低かった。また、急性心筋梗塞と虚血性脳卒中は、食事グループ間での有意な差は認められなかった。日本でも近年、肉食を中心に糖質を減らすアトキンス法などの糖質制限食が流行し、またベジタリアンやビーガン食への人気が高まっている。しかし、長期的にみた場合、これらの食習慣も将来の疾病リスクを上昇させる危険性がある。

子どもは健全な成長と発達のために、成人よりも単位体重あたり、より多くのエネルギーと栄養素を必要とする。2021年、フィンランドのHovinenらの研究により、ビーガン食と子どもの代謝や栄養状態の調査が、同じ保育園に通う中央値3.5歳のフィンランド人の子ども40名を被験者として実施された¹⁸⁾。

身体計測では、ビーガン食と普通食の子どもでは、身長、BMI（ボディマス指数、肥満度を表す体格指数）、中上腕部の太さに差はなかったが、栄養素の摂取状況や血中のバイオマーカーや微量栄養素では大きな差異が観察された。ビーガン食では、たんぱく質や飽和脂肪酸から得られるエネルギーの割合が低く、多くの栄養状態を示すバイオマーカーが低い傾向にあった。例えば、レチノール結合たんぱく質、トランスサイレチン（プレアルブミン、超早期の栄養状態を知る）、コレステロール、ビタミンA、ビタミンD₈および必須アミノ酸、DHAの血清レベルが、普通食に比べてビーガン食では非常に低かった。ビーガン食で摂取量が多かったのは、葉酸のみであった。これらの低たんぱく質の食事傾向は、将来的に子供たちの健康に大きく影響する可能性が指摘された¹⁸⁾。

食事全体に占める植物性たんぱく質の割合がさらに高くなると、問題が生じる。もし、食事がビーガ

ン食のように完全に植物性食品で構成された場合には、DIAAS 値は約 60%にまで減少することが推定され、たんぱく質摂取に関しては非常に非効率的な食事となる¹⁸⁾。ベジタリアンやビーガンの人達は、その食事習慣を将来さらに続ける場合は、食事の正確な DIAAS 値を知り、自身および家族への健康への影響を真剣に考えることが必要になるであろう。

動物性食品の生産は環境負荷が大きい、は誤り

前述の 2021 年の Moughan による研究報告は、単に世界各国におけるたんぱく質摂取不足に警鐘を鳴らしたものではなかった。新指標の DIAAS によりたんぱく質の「質」を考慮した場合、動物性食品の生産に伴う環境負荷について、これまでとは大きく異なる結論が導きだされた¹³⁾。

Green Note の説明によると、近年、カーボンフットプリントをはじめとする環境フットプリントは、「環境負荷を計算して見える化」する方法として重要視されている。フットプリント (footprint) は、IT 分野でも活動の足跡や活動の及ぶ範囲ということで用いられ、環境フットプリントは「環境の足跡」を意味しており、人間の消費活動が環境に対してどのくらいの負荷をかけているのかを計測する方法になる。

環境フットプリントは SDGs に深く関係しており、SDGs 目標 12 の「つくる責任つかう責任」では「持続可能な生産・消費」を目指している。私たちの経済活動のライフサイクルを通して、環境や人間に害を及ぼす物質の排出を管理し、人の健康や環境への影響を少なくする努力を行う必要がある。したがって、環境フットプリントは SDGs の目標を達成するためにも必要な手段と考えられるとしている¹⁹⁾。

前述したように、ヒトの 9 種類の必須アミノ酸の一つであるリジンは、ヒトの一般的な食事における第一制限アミノ酸であることから、リジンの供給は極めて重要である。Moughan の報告では、いくつかの動物性食品と植物性食品における「環境フットプリント」の 3 つの因子 (土地使用量、水使用量、

GHG 排出量) について、生産された「総たんぱく質 1 トンあたり」でこれまで示されてきた「量」に基づく既報告のデータを、「消化性リジン 1 kg あたり」の「質」に変換して比較している¹³⁾ (図 3)。この研究では、植物性食品の例として小麦、米、トウモロコシの 3 点を、また動物性食品の例として卵、豚肉、牛乳の 3 点を選抜して比較対象としている。

1) 土地使用量での再検討 (図 3-A)¹³⁾

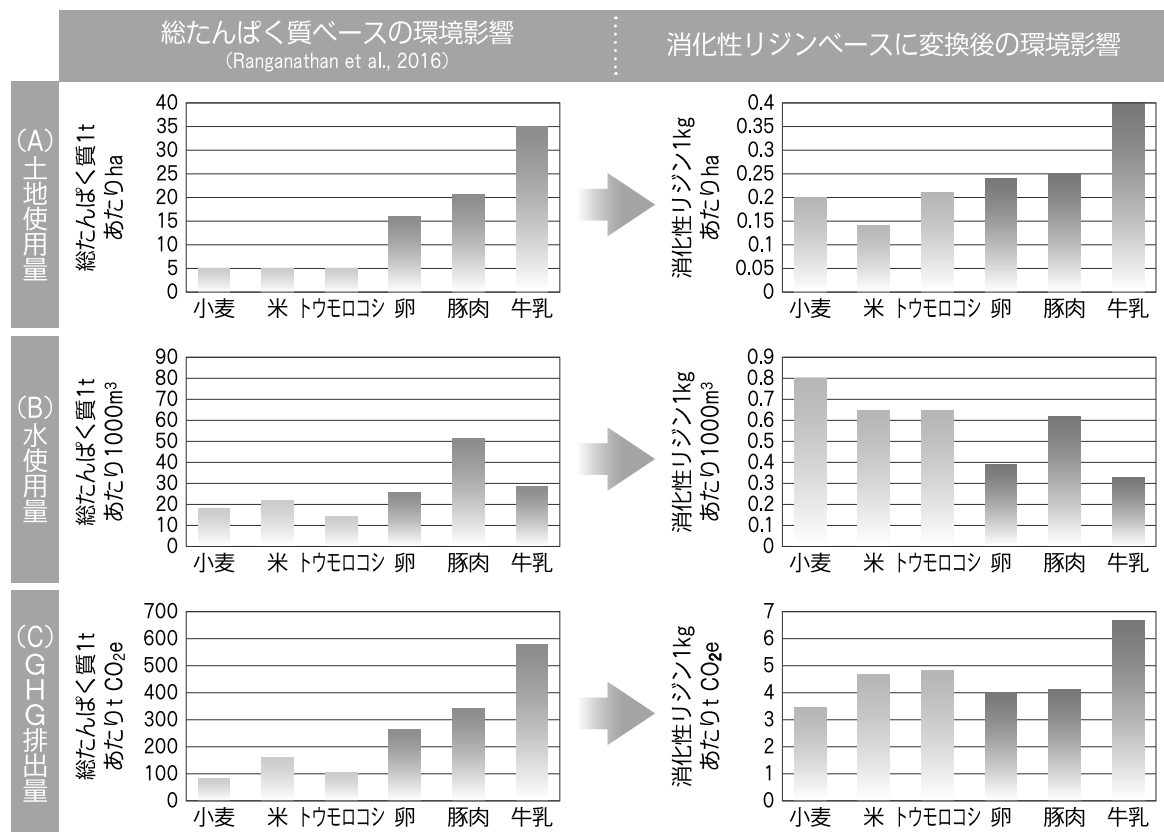
食料生産に使用される土地の面積は、たんぱく質の「量」に基づく総たんぱく質ベースでは、卵、豚肉、牛乳のたんぱく質生産は、植物性食品の約 3~7 倍の広大な土地面積が必要とされていた。しかし、DIAAS の消化性リジンベースに変換すると、牛乳生産で推定される土地使用量は両者間での差が小さくなり、卵と豚肉の生産に必要な土地面積は、トウモロコシや小麦とほぼ同程度になった。また米 (コメ) は、最も効率的に土地を利用して生産されていることが示された。

2) 水使用量での再検討 (図 3-B)¹³⁾

さまざまな食料生産システムにおける淡水 (真水) の使用量の検討では、総たんぱく質ベースの計算では、動物性食品 3 点はいずれも植物性食品 3 点よりもより多くの水を使用して生産されていた。しかし、消化性リジンベースに変換すると、動物性食品と植物性食品では数値が驚くべきことに「逆転」した。比較的水の使用量が少ないように見えた小麦、米、トウモロコシは、変換後には最も水の使用量の多いグループになった。豚肉生産は小麦よりも効率的であり、牛乳生産は比較対象の中では、最も水の使用量が少なく効率的に生産されていることが示されている。

3) GHG 排出量での再検討 (図 3-C)¹³⁾

総たんぱく質ベースの計算では、動物性食品 3 点は GHG の排出量が多く、環境に負荷をかけていた。しかし、DIAAS による消化性リジンベースに変換後は、動物性食品と植物性食品の GHG 排出量は、



出典：Moughan P.J. Glob Food Sec. 2021;29:100548.

図3 植物性および動物性食品生産における3つの環境フットプリントへのDIAAS変換による影響¹³⁾

全般的にはほぼ同程度になった。とくに、卵生産に伴うGHG排出量はトウモロコシ生産よりも低くなり、牛乳と植物性食品とのGHG排出量の差も大幅に縮まっていることが示されている。

さらにこの研究では、検討する食品の数を増やして、同様に総たんぱく質100g当たりのGHG排出量を、DIAASにより消化性リジン供給量1gあたりに変換してきている(図4)。その結果、総たんぱく質ベースでは2番目に少なかった穀物は、変換後には7番目となり、卵や養殖魚、鶏肉、豚肉のほうが、穀物や豆乳よりもGHG排出量が少ない結果となった。また、牛乳は総たんぱく質ベースでは穀物の3.6倍のGHG排出量であったが、変換後にはその差が1.16倍まで縮まった。どちらの評価でも、平均GHG排出量が最も多いのは牛肉であり、最も少ないのは豆腐とされている。

以上の様に、たんぱく質の「質」を評価する新しい指標DIAASにより既存データの変換を行うと、これまで議論されてきた環境フットプリントの評

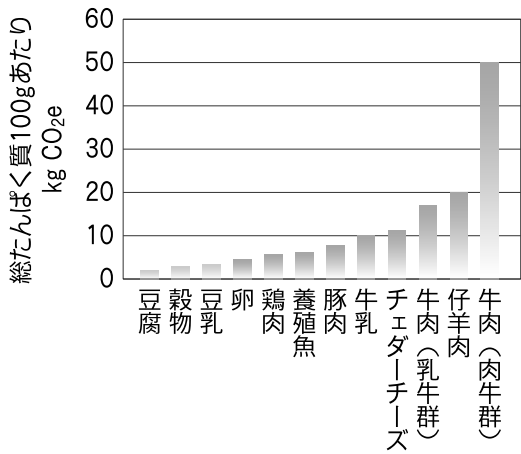
価結果も大きく異なることが示されている。このMoughanの研究は、現状の環境フットプリントへの影響評価を見直す必要性を初めて指摘したものであり、今後の環境科学研究に一石を投じるものとなった。

日本における動物性食品と環境のつながり

動物性食品は、牛のゲップから排出されるメタンガスなどの温室効果ガス(GHG)や高エネルギー飼料の消費や排泄物の処理などに伴う環境負荷が高い。そのために、動物性食品の摂取を控えたり、動物性食品を生産する農業(動物農業)そのものを否定的に議論する傾向もある。しかし、新たな知見に基づく再検討により、動物性食品の価値と必要性が再認識されている。

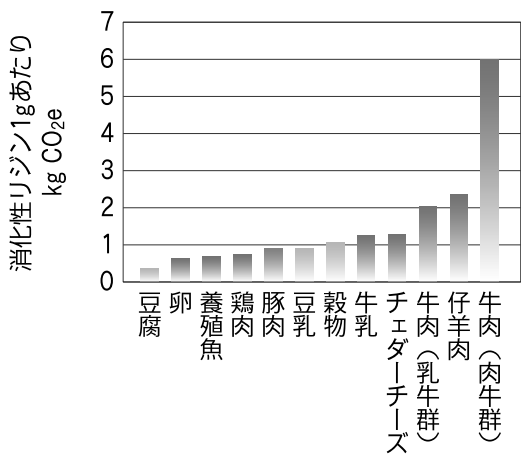
2019年、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)では、「土地関係特別報告書」を出した²⁰⁾。この報告書では、日本国民一人の暮らしに伴うカーボンフットプリントとしてのGHG排出量は約7.6トン

A 総たんぱく質で表されたGHG排出量



Poore and Nemecek, 2018

B 消化性リジンに変換後のGHG排出量



出典：Moughan PJ. Glob Food Sec. 2021;29:100548.

図4 12種の食品生産に伴うGHG排出量のDIAAS変換による変化¹³⁾

であった。その内訳は、住居（2.4トン）、移動（1.6トン）、食（1.4トン）、レジャー・サービス（1.2トン）およびその他の消費財（1.0トン）であった。とくに食料システム（食料の生産、加工、流通、調理、消費から廃棄まで）全体におけるGHG排出量（1.4トン）は、全体の18%強を占めていた。

また、日本での食品由来のGHG排出量の内訳では、カーボンフットプリントが高いのは、肉類（23%）、穀類（19%）、乳製品（13%）の順であった。とくに肉類は消費量が消費全体の5%と少ないにも関わらず、GHG排出量は食全体の約4分の1

（23%）を占めているのは大きな指摘であった。

さらに、日本での「食品ロス」は年間約600万トン発生しており、その処理に多額のコストがかかり、さらに焼却することによるCO₂排出で環境負荷がかかることになる。このように、我々は健康と環境負荷の両輪を考えながら、今後何をどのように食べるかを選択し、将来に渡って持続可能な食料システム全体を改良し構築して行くことが求められている。

2019年、農研機構は食料生産～消費がもたらす窒素負荷の長期変遷として、窒素フットプリントから考える食の選択について情報公開をした²¹⁾。私たちの食生活（たんぱく質をどの食品から摂るか、たんぱく質の摂り過ぎ、食品ロス）が、食の窒素フットプリントに大きく影響していることを示した。2015年の国内消費向けに供給される「食べる窒素」のうち22%はたんぱく質の摂り過ぎ、11%は食品ロスとなっていることが指摘された。

日本における一人当たりの「食べる窒素」の供給量は、過去半世紀の間、約4~5 kg N/年の範囲でほぼ一定であり、2015年の供給量は1970年とほぼ同じである。一方、「食べる窒素」の内訳はこの間に大きく変化し、畜産食品（肉類、鶏卵、牛乳等）は約5倍に増加、豆類等の植物性たんぱく質は全体で30%減少した。1970年の日本食（豆類・魚介類のたんぱく質が主体）では、食の窒素フットプリントが2015年より19%小さいことが分かった。

以上の研究内容は、日本人の食事摂取基準に対してたんぱく質量をすでに摂り過ぎと判定しており、その摂り過ぎの削減と食品ロスの削減、さらにより窒素フットプリントの小さい食品を選択することにより、環境中への窒素負荷を大幅に削減できるとしている。これらのデータも、DIAASを考慮した変換により、数値が修正され、たんぱく質の過剰摂取と評価された部分も異なる結果となる可能性があると考えられた。

おわりに

以上述べてきたように、健康への影響や環境負荷

の観点から、植物性食品は良い、動物性食品は悪い、という両者が対立する構図で現状では議論されている。また、動物性食品を生産する動物農業と、植物性食品を生産する植物農業も同様にどちらが良い悪いという単純な二元論からの脱却が必要で、両者の共生と補完的な役割を私たちは再度認識する必要がある。

例えば、牛などの反芻動物は年間数百万トンの植物ベースの副産物を飼料や敷料に利用しているが、そのほとんどは人間は食べられず、廃棄すればGHG排出の可能性がある。このように動物農業には、植物にはない栄養素を生み出す栄養素サイクルに加えて、廃棄物に新しい価値を与えるアップサイクリングという重要な役割もある。

また、日本ではエコフィードとして、調理残渣や食品製造副産物、売れ残り食品、農場残渣などを家畜用飼料製造に有効利用している。さらに、食用植物の生産に適さない土地も、家畜を放牧すれば栄養豊富な動物食品に変換でき、世界の低栄養の人々に提供できるし、堆肥などの有機肥料を生産することもでき、食用植物栽培にさらに貢献することが可能となる。

結論としては、健康的で持続可能な食料システムの構築のためには、植物農業と動物農業とがバランスを保ちつつ補完し合う関係を将来的にも維持していく必要があると言えよう。

謝辞

本稿の執筆では、一般社団法人Jミルクが2021年12月に発行された「FACTBOOK ファクトブック」⁷⁾より、図表の一部を転載させて頂きましたことに心より感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) Yamaguchi, M., Takai, S., Chronic administration of bovine milk-derived α -lactalbumin improves glucose tolerance via enhancement of adiponectin in Goto-Kakizaki rats with type 2 diabetes., *Biol. Pharm. Bull.*, **37**: 404–408 (2014).
- 2) Ozawa, M., Yoshida, D., Hata, J., Ohara, T., Mukai, N., Shibata, M., et al., Dietary Protein Intake and Stroke Risk in a General Japanese Population: The Hisayama Study, *Stroke*, **48**: 1478–1486 (2017).
- 3) 野間晃幸, 神田 淳, 中山恭佑, 齊藤佳絵, ミルクプロテインの機能性と高付加価値化への取り組み, *Milk Science*, **67**(3):206–212 (2018).
- 4) 「国民健康・栄養調査」, 主な健康指標の経年変化: 栄養摂取状況調査, タンパク質摂取量(タンパク質摂取量の平均値・標準偏差の年次推移) 健康日本21(第2次)分析評価事業, 国立研究開発法人 医療基盤・健康・栄養研究所(国立健康・栄養研究所) (2019).
- 5) 「日本人の食事摂取基準(2020年版)」策定委員会報告書(2019.12.24), 厚生労働省.
- 6) 神田 淳, 中山恭佑, 赤松あゆみ, 三本木千秋, 武田邦弘, 吸収性に優れ, カラダ作りに最適な革新的乳タンパク質飲料の開発研究. スッキリ飲める乳タンパク質飲料の誕生秘話, *化学と生物*, **58**: 54–58 (2020).
- 7) FACTBOOK (ファクトブック)「動物性食品と植物性食品—補完と共生で築く, 健康で持続可能な未来」. 2021年12月(一般社団法人Jミルク).
- 8) FAO/WHO (1973): Energy and Protein Requirements. Report of a joint FAO/WHO adhoc Expert Committee. FAO Nutritional Meeting Report Series No. 52, Technical Report Series No. 522 Food and Agriculture Organization of United Nation, Rome, Italy.
- 9) FAO/WHO (1991): Protein quality evaluation: Report of the joint FAO/WHO Expert Consultation. Food and Nutrition Paper 51. FAO, Rome, Italy.
- 10) FAO (2013): Dietary protein quality evaluation in human nutrition – Report of an FAO Expert Consultation. FAO Food and Nutrition Paper 92. FAO, Rome, Italy.

- 11) Ertl, P., Knaus, W., Zollitsch, W., An approach to including protein quality when assessing the net contribution of livestock to human food supply., *Animal*, **10**(11):1883–1889 (2016).
- 12) Ertl, P., A. Stein Wider, J. Schonauer, K. Krimberger, W. Knaus, W. Zollitsch., Net food production of different livestock; A national analysis for Austria including relative occupation of different land categories., *Die Bodenkultur: Journal of Land Management, Food and Environment*, **67**(2): 91–103 (2016).
- 13) Moughan, P. J., Population protein intakes and food sustainability indices: The metrics matter, *Global Food Security*, **29**: 100548 (2021).
- 14) 観光庁参事官（外客受入れ担当）「飲食事業者等におけるベジタリアン・ヴィーガン対応ガイド（令和2年4月版）」（現出所：ユーロモニターインターナショナル，乳成分不使用の食品（アイスクリーム，ヨーグルト，プラントベースミート）・飲料の市場）。
- 15) Jミルク国際 Dairy レポート，変化する世界のマーケット：植物性代替品，新たな広がり，「環境」意識高まり菜食主義者以外にも」Vol.6, 2021年秋号，一般社団法人Jミルク。
- 16) Statista, Plant protein market value worldwide from 2020 to 2026.
- 17) Tammy, Y.N. Tong, P.N. Appleby, K.E. Bradbury, A. Perez-Cornago, R.C. Travis, R. Clarke, T.J. Key, Risks of ischaemic heart disease and stroke in meat eaters, fish eaters, and vegetarians over 18 years of follow-up: results from the prospective EPIC-Oxford study., *BMJ (British Medical Journal)*, **366**: 14897 (2019).
- 18) Hovinen, T., L. Korkalo, R. Freese, E. Skaffari, P. Isohanni, *et al.*, Vegan diet in young children remodels metabolism and challenges the statuses of essential nutrients., *EMBO Mol. Med.*, **13**: e13492 (2021).
- 19) Green Note, 環境フットプリントとは？ (<https://green-note.life/2510/>)
- 20) 気候変動に関する政府間パネル (IPCC) 「2019年方法論報告書 (Methodology Report: MR)」, (第49回総会の結果) (2019.5.), 環境省.
- 21) 渡邊朋也, 江口定夫, 大浦典子, 研究報告書：食料生産～消費がもたらす窒素負荷の長期変遷—窒素フットプリントから考える食の選択, 農林水産省農林水産業・食品産業科学技術研究推進事業 (28005A), 農研機構生研支援センターイノベーション創出強化研究推進事業 (28005A) (2019.9.18 プレスリリース) 農研機構.