

2025 年度日本農学会
シンポジウム講演要旨

農学における健康とは？

日 時：2025（令和7）年10月4日（土）

会 場：東京大学弥生講堂 ／ オンライン配信

一般社団法人 日本農学会

2025 年度日本農学会シンポジウム

日時:2025 年 10 月 4 日(土) 10 時より

会場:東京大学弥生講堂・オンライン配信

10:00 開会挨拶および趣旨説明

10:10 ～ 12:10 講演および質疑

12:10 ～ 13:10 — 休憩 —

13:10 ～ 15:50 講演および質疑

16:05 ～ 17:05 総合討論

17:05 閉会挨拶

目 次

開催趣旨	3
人と植物の健康に影響を及ぼす植物の微量気体の交換	5
静岡県立大学食品栄養科学部 谷 晃	
気候変動下におけるコメの眠りと澱粉代謝	13
新潟大学社会連携推進機構 三ツ井 敏明	
家畜健全育成からヒトの健康生活の向上に貢献する イムノバイオティクスの魅力	19
東北大学大学院農学研究科 北澤 春樹	
食と健康 ―食品の機能性の観点から―	23
農研機構 食品研究部門 山本（前田）万里	
樹木医学の視点から見た樹木の健全性	29
日本大学生物資源科学部 太田 祐子	
水産生物の健康とヒトとの関わり ：養殖業の健全で持続的な発展のために	33
東京海洋大学学術研究院 佐野 元彦	
気候変動・食料危機と土壌の健康	39
福島国際研究教育機構 藤井 一至	
食と生態系の健康を支える有機農業の可能性 ―「環境再生型農業」の再定義―	45
島根大学生物資源科学部 金子 信博	
生物多様性と人々のウェルビーイングをつなぐ農業の役割	51
東京大学大学院農学生命科学研究 橋本 禪	
講演者プロフィール	57
企画委員会名簿	（裏表紙裏）

開催趣旨

今年も暑い夏が続いており、時折豪雨にも見舞われています。このような猛暑・豪雨といった極端現象は、人間の経済行為に基づく温室効果ガス排出増加による地球温暖化の影響であると言っていいでしょう。IPCCも既に2023年第6次報告書で、「人間の影響が大気、海洋及び陸域を温暖化させてきたことには疑う余地がない」と最大級の警告を発しています。このような温暖化は、イネの高温障害や果樹の生産地の移動、海面水温の上昇による魚類水揚げ量の減少などを生じさせ、農林水産業に大きな影響をもたらしています。

加えて、新型コロナウイルス感染症の記憶も新しく、鳥インフルエンザやアフリカ豚熱などの家畜の疾病も増加しており、まさに地球は病んでいる、といっても過言ではありません。これらの環境（生態系）の変化や動植物への影響は多方面に及んでおり、それらを克服して地球の健康を取り戻し、持続可能な世界を実現することは喫緊の課題です。

動植物の健康や環境・生態系の健康（健全性）は、相互に密接に関連してヒトの健康とも結びついており、それは農林水産業や食品産業についても同じです。このため、それらの産業の発展に資する研究を行っている農学分野においても、環境と動植物などの健康を通じたより良き関係を目指して多くの研究が行われています。それらの中には、健康を正面から捉えた研究もありますが、表向きは特に健康を目的として掲げていなくてもその視点がしっかりと含まれているものもあります。

今回のシンポジウムでは、「健康」という側面から農学研究を捉え直し、作物、土壌、家畜、魚類、森林、環境（生態系）というさまざまな分野における健康に関する研究の成果を紹介し、日本の農学における健康研究の将来について、様々な角度から議論したいと考えています。

2025 年 10 月

一般社団法人日本農学会会長

大杉 立

人と植物の健康に影響を及ぼす植物の微量気体の交換

谷 晃

静岡県立大学食品栄養科学部

1. はじめに

植物と大気の間では、様々な物質が交換されている（図 1）。例えば、植物が放出するイソプレンやモノテルペンなどのテルペン類は森林大気中に十数種程度の異性体が検出され、それぞれ異なる香りをもつ。これらは森林療法などで利用され、人の健康にプラスに働くと報告されている。他方、テルペン類は大気中の反応性が高いため、光化学オキシダントや二次有機エアロゾルの生成を助長し、大気質を悪化させうる。これは、人にマイナスに働く。他方、植物は様々な人為起源 VOC を葉から吸収することを著者は近年明らかにしてきた。これは植物の大気浄化機能の新たな側面であり、光化学オキシダント生成を抑え人の健康にプラスに働く。本講演では、植物の様々な微量気体の交換に関する最近の知見を紹介する。

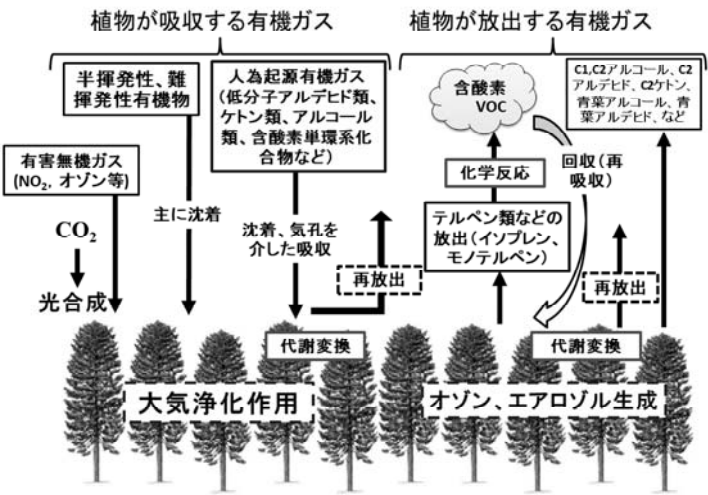


図 1 植物と大気の微量気体の交換

植物は様々な人為起源 VOC を葉から吸収することを著者は近年明らかにしてきた。これは植物の大気浄化機能の新たな側面であり、光化学オキシダント生成を抑え人の健康にプラスに働く。本講演では、植物の様々な微量気体の交換に関する最近の知見を紹介する。

2. 植物によるテルペン類放出

植物は二次代謝物としてテルペン類を合成し大気に放出する。揮発性のテルペン類には、5 個の炭素原子から成るイソプレン（ C_5H_8 ）と 10 個の炭素原子から成るモノテルペン（ $C_{10}H_{16}$ ）がある。また、半揮発性であるがセスキテルペン（ $C_{15}H_{24}$ ）

表 1 揮発性テルペン類を日中恒常的に放出する植物の分類

分類	貯蔵・非貯蔵の別	植物の分類	代表植物
イソプレン放出種	非貯蔵	多くの広葉樹や草本	コナラ、ミズナラ、カシワ、ナラガシワ、ミツマタ、クス、モミジバフウ、ホルトノキなど
モノテルペン放出種	貯蔵	ほとんどの針葉樹や一部の広葉樹、ハーブ植物	スギ、ヒノキ、アカマツ、モミ、トウヒ、クスノキ、ユーカリ、ハッカ、ローズマリーなど
	非貯蔵	一部の広葉樹	ウバメガシ、シラカシ、スダジイなど
無放出種		上記以外の広葉樹、針葉樹	ブナ、クスギ、イチョウ、サクラ、アベマキ、ハナミズキ、クロガネモチ、サルスベリ、キョウチクトウ、ケヤキ、ユリノキなど

やジテルペン（ $C_{20}H_{32}$ ）を放出する植物もある。テルペン類は概して大気中の反応性が高く、 O_3 生成能が高い。ただし、すべての植物がテルペン類を放出するわけではない（表 1）（Tani *et al*, 2024; Tani and Mochizuki 2021）。

イソプレンを放出する植物には、コナラ、ミズナラ、ポプラ、ミツマタなどの落葉広葉樹の一部が含まれる。モノテルペンを放出する植物は、貯蔵型と非貯蔵型に分けられる。貯蔵型には、スギ、ヒノキ、アカマツ、カラマツ、トウヒなどのほとんどの針葉樹が含まれる。非貯蔵型には、ウバメガシ、スダジイなどがある。イソプレンを放出する植物には、同時にモノテルペンを少量放出する植物種や、その逆のタイプもあるが、それらもここではそれぞれイソペン放出種、モノテルペン放出種として分類する。通常、テルペン類を放出しない植物でも、昆虫による食害など外的ストレスによって代謝経路を活性化させ、テルペン類を生産し放出し始める場合がある。

植物からのテルペン類の放出は、いわゆるG93モデルで説明される

(Guenther et al, 1993)。イソペン放出は、温度と光強度の上昇とともに高まり、光飽和点は植

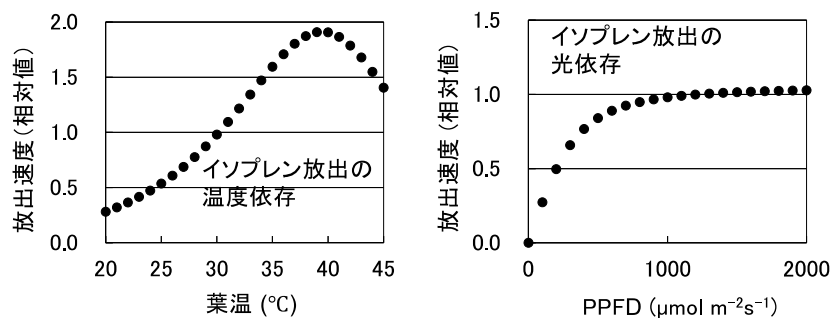


図2 イソペン放出種の放出速度の温度依存と光依存
モノテルペン非貯蔵タイプも同じ応答を示す。

物の生育条件によって500~1000 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ の範囲で変化する(図2右)。またイソペン放出は、イソペン合成酵素の至適温度である約40°Cまで上昇し続ける(図2左)。モノテルペン非貯蔵タイプの植物の場合、放出の環境応答はイソペンのそれに類似している。他方、貯蔵タイプのモノテルペン放出は、貯蔵器官からの蒸発量が放出量の大小を決めるため、温度に依存するモノテルペンの飽和蒸気圧に従う(図3)。これらの放出特性はいずれも温度に依存し、温度上昇とともに

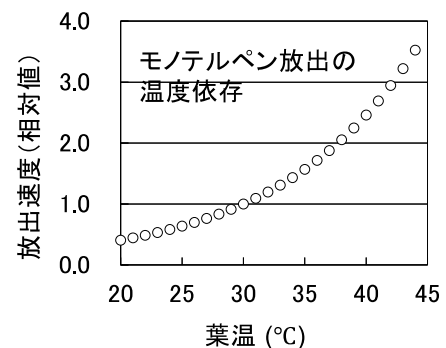


図3 モノテルペン貯蔵タイプのモノテルペン放出速度の温度依存

に放出速度が高まる。これは、 O_3 濃度が温度上昇とともに高まる現象と一致し、テルペン類がその原因であるという仮説の根拠となる。実際、都市部に植栽される樹木にはイソプレンを大量に放出するものが複数種存在する。植物のテルペン類放出は、水ストレス、 CO_2 濃度、 O_3 濃度などの影響を受けて変化することもこれまでに報告されてきた。

3. フィトンチッドと香りの人への効果

森の香りはフィトンチッドと呼ばれるが、主成分はモノテルペン類である。モノテルペンは園芸療法の場合においても香りとして嗅覚に影響する。アロマセラピーで使わ

れる植物オイルも主成分はモノテルペン類である。香りの効果については多くの報告がある。森林で観測される濃度域(<10 ppbv)は、脳波や血圧の測定からプラスの効果があり、ストレスや疲労を軽減することが報告されている(e.g. Yatagai, 2000, Park et al, 2000)。精油の吸引は、睡眠時間を長くし、緊張を和らげる効果がある(Edris, 2007)。しかし、濃度がppmを超えるとマイナスの影響が出てくる。モノテルペンの中には、数10 ppmv では目、鼻、咽喉への不快な刺激があるものがある(Kasanen et al., 1999; Molhave et al., 2000)。3000 ppmv 以上でラットやマウスが死亡すると報告されている(Molhave et al., 2000)。他方、食事に5- 95 % の濃度で加えられた場合、ラットやマウスの前胃や肺、乳房の腫瘍に対して増殖抑制効果があると報告されている(e.g. Crowell and Gould, 1994)。

図4はローズマリーを育てている温室内で、鉢移動、挿し穂採取、灌水をした際のモノテルペン濃度を示す(Tani et al, 2012)。作業前後と比べ、いずれの作業でもモノテルペン濃度が上昇している。温室内の濃度はppbレベルであるので、人に対してプラスの効果があると思われる。ただし、人の鼻の位置で採取したガスの濃度は、これらの3倍程度高く、作業内容によっては、逆に強すぎる濃度になりうる。香りの受容感度に個人差がある点も注意を要する。

4. テルペン類などVOCが関与する光化学オキシダント生成

光化学オキシダントは大気中のVOCと二酸化窒素(NO_x)との一連の反応で生成される。VOCは大気の掃除屋と呼ばれるOHラジカルと反応し、有機過酸化物に変換される。この有機過酸化物はNO₂の光分解で生成するNOに酸素を渡す役目をする。光化学オキシダントの主成分であるオゾンも同じくNOに酸素を渡すが、VOCが多い場合、オゾンの寄与度が低くなり結果としてオゾン濃度は上昇する。オゾンに代表される光化学オキシダントは、ヒトの健康や植物の生育に悪影響を及ぼす。それらが問題となった1970年代と比べて、現在では二酸化硫黄、二酸化窒素、PM2.5などの大気

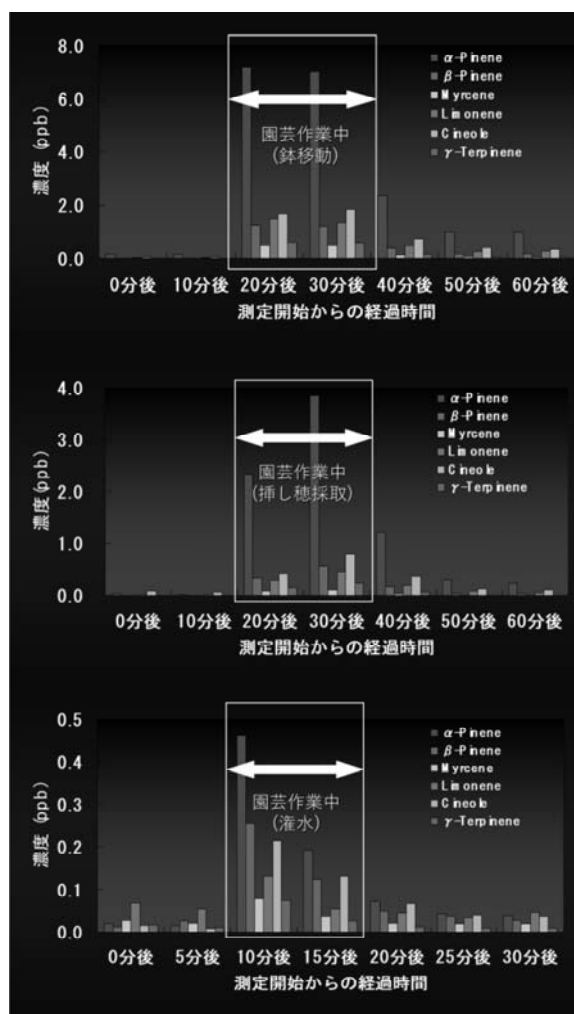


図4 ローズマリー温室内で、鉢移動、挿し穂採取、灌水をした際のモノテルペン濃度

汚染物質濃度は、ずいぶん下がっているのに対して、オゾンの濃度は未だに下がらず環境基準が達成されていない。

テルペン類の多くは大気中の反応種である OH ラジカルと反応性が極めて高いため (Atkinson and Arey, 2003), VOC の中でも強く光化学オキシダントの生成に関与する。ただし、大気中には人為起源 VOC (AVOC) が多種あり、かつ濃度もテルペン類より高いので、総合的に見てオゾン生成への寄与は AVOC のほうが高い場合がほとんどであると考えて良い。しかし、NO_x を含む汚染空気塊が森林域へ運ばれてきた時や、都市部の緑地帯などでは、テルペン類の寄与が高くなる。

また、テルペン類を起点として、複雑な反応を経て二次有機エアロゾル (SOA) が生成される。BVOC 由来 SOA (BSOA) は短波放射 (太陽光) を直接反射したり (直接効果)、雲の凝結核となり雲を形成し太陽光を散乱・反射する (間接効果)。したがって、BSOA は負の放射強制力を持ち地球の冷却化する作用があると考えられている。

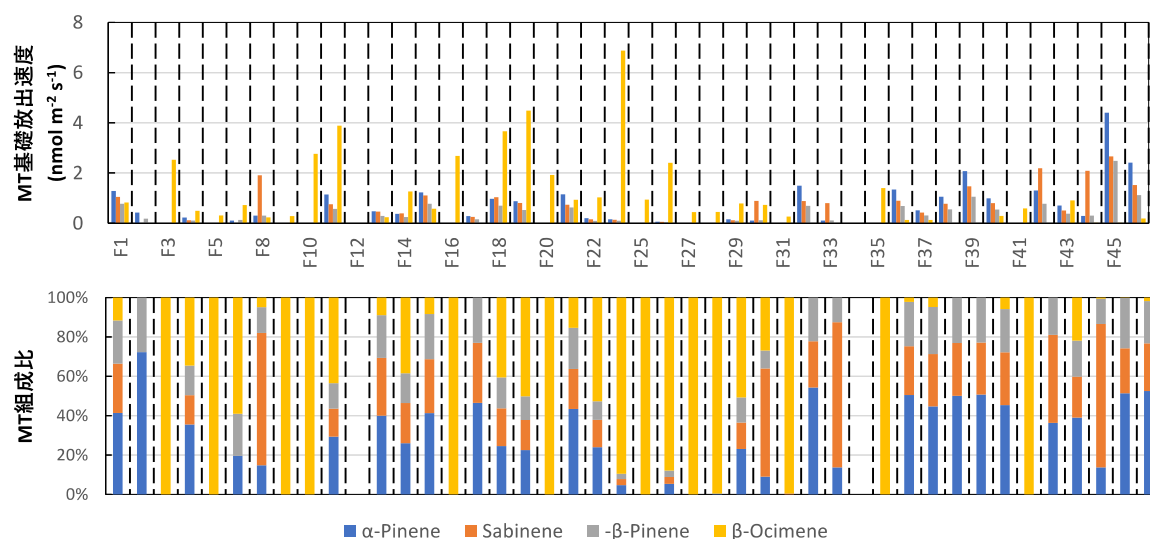


図5 バイアル法によって求めたシラカシのモノテルペン (MT) 放出速度と組成比
放出されるモノテルペン類には、 α ピネン、サビネン、 β ピネン、 β オシメンがある。
F12 と F34 では放出が認められなかった。

5. テルペン類無放出変異体の選抜と緑化樹木への応用による大気汚染抑制

モノテルペンを放出する都市緑化樹木の中には、放出能力の種内変動が大きい種がある。当研究室では、テルペン類放出種のウバメガシ、シラカシおよびアラカシから無放出や極低放出の変異体を発見した。これら変異体はオゾンや SOA の生成にほとんど関与しないため、大気に悪影響を及ぼさない。これら変異体を迅速に発見するために、バイアルに葉切片を入れて測定する方法 (バイアル法) を開発した (Chang *et al*, 2022)。バイアル内部のガス測定には、リアルタイム測定装置の陽子移動反応質量分析計 (PTR-MS) を適用し、より迅速に測定する方法を確立した。

図5 は、シラカシに対してこの方法を用いてスクリーニング測定した結果である。シラカシはモノテルペン非貯蔵タイプに分類されるが、放出されるモノテルペンの種

類と放出速度に大きな個体間差が認められる。その中で、モノテルペンをほとんど放出しない2個体を選別した。これらを挿し木によってクローン増殖したが、その個体群もモノテルペンをトレース程度しか放出しない (Chang *et al*, Major revision)。ウバメガシでは、完全に無放出の個体を複数選別し、それらのクローンを得ている (Chang *et al*, 2024)。

このような方法で、無放出や極低放出の変異体を増殖し都市緑化に用いれば、種の多様性を維持しつつオゾン生成を抑えられると考えている。また、重要植林樹木のアブラヤシのようなイソプレン放出種においても、イソプレン低放出個体の選抜は大気汚染抑制という観点では重要な視点である (Chang *et al*, 2025)。

6. 植物の高い汚染ガス吸収能力は大気浄化に貢献する

植物は葉の気孔から二酸化炭素以外に様々な大気中のガスを吸収する。吸収されるガスとして、二酸化窒素、二酸化硫黄、オゾンなどの無機ガスが知られているが、著者らは植物が有機ガスの中で含酸素 VOC も吸収出来ることを明らかにしてきた。吸収される含酸素 VOC には、低分子のアルデヒド、ケトンおよびアルコール、含酸素単環芳香族炭化水素 (フェノール、ベンズアルデヒド) などがある。

葉面のガス吸収を議論する際、気孔コンダクタンスという指標をよく用いる。気孔コンダクタンスとは、葉の表面にある通気孔の役目をする気孔の開き具合を示す指標で、値が大きいと気孔の開度が高いことを示す。一般的に、光強度が高まると気孔の開度が大きくなり (つまり気孔コンダクタンスが高まり)、ガスが通過できる面積が増す。含酸素 VOC は一般的に、光強度が高まり気孔コンダクタンスが大きくなるほど葉によく吸収される。他方、暗黒下では気孔が閉じるため、主要なガス交換経路が遮断され吸収は停止する。含酸素 VOC の吸収速度は、気孔コンダクタンスと正の線形関係にあり、気孔コンダクタンスがゼロの場合に計算される吸収速度は極めて小さいことから、気孔を介した吸収が主経路であると判断できる。著者は、多くの含酸素 VOC についても、このように気孔を介した吸収を報告してきた (Tani and Hewitt, 2009; Tani *et al*, 2010; 2014)。

植物由来の物質が大気中で化学反応を受けて酸化され、植物に再吸収される場合がある。テルペン類の場合は、大気中で酸化され含酸素物質であるカルボニルを生成する。イソプレンの場合、アルデヒドの一種であるメタクロレインとケトン類の一種であるメチルビニルケトンなどへ変換される。これら物質の主要なシンク (消失項) は大気中での反応や光分解と考えられてきたが、植物がこれら物質を吸収すること、およびこの吸収量は上記の消失量に匹敵すると報告されている (Tani *et al*, 2010; Karl *et al*, 2010)。

植物に吸収される VOC は概してヘンリー定数は高く、いったん植物の気孔内に入ると葉中の水分へ多くが分配される。この分配現象だけでは葉による吸収は途中で停止するが、これら物質の葉による吸収は数日間の測定期間中も継続し、内部で代謝されていると考えられる。著者は、植物による VOC 吸収を、大気から葉内部の代謝場

所までの濃度や抵抗を用いて説明するモデルを、フィックの法則に準じて開発した (Yamane and Tani, 2024)。著者らのグループによる研究で、メタクロレインの一部がアルコールに還元され葉から再揮発するとともに、別の代謝系にてグルタチオンによる抱合化を受けセルロースやリグニンに取り込まれることを明らかにした (Muramoto *et al*, 2015)。また、葉に吸収されたメチルビニルケトン、メチルエチルケトン、さらには 1-ブタノールへ還元され、葉から放出される (Tani *et al*, 2020) ことや、含酸素単環芳香族のフェノールは葉に吸収された後に、ヒドロキシ基がメトキシ化されアニソールとして葉から放出される (Tani *et al*, 2022) ことを明らかにしてきた。このような、大気化学反応や葉内部の代謝反応にともなう物質の双方向交換も起きている。

なお、植物がほんのわずかな量しか取り込まない VOC も多くあり、これらには酸素原子を含まないという特徴がある。脂肪族炭化水素、ベンゼンやトルエンなどの芳香族炭化水素などが該当する。もちろん、分子レベルでわずかには入り込むようだが、大気浄化という観点では、これら物質に対する植物の吸収機能は期待できない。

7. おわりに

著者は学位論文研究時代から現在に至るまで 30 年間以上、微量気体、特に VOC の研究に、農学的・植物生理生態学的視点から取り組んできた。ここでは紹介しきれなかったが、VOC の問題は閉鎖性の高い植物栽培施設内でも顕在化しており、農学に係わる様々な分野で重要な物質である。

文献

- Atkinson R, Arey J, 2003: Gas-phase tropospheric chemistry of biogenic volatile organic compounds: a review. *Atmos Environ* 37, 197–219.
- Chang T-W, Masui N, Hirano T, Nyawai TN, Rahman M, Abdullah MO, Tani A, 2025: Intraspecific variability in isoprene emission rate of oil palm (*Elaeis guineensis*). *Atmos Environ* 361, 121469
- Chang T-W, Tokiwa S, Masui N, Tani A, 2024: Quantifying variabilities in monoterpene emission among natural individuals of an urban-greening species (*Quercus phylliraeoides*) using a rapid measuring method. *Urban Forestry & Urban Greening*, 94, 128245.
- Chang T-W, Okamoto H, Tani A. 2022: Rapid Sampling Protocol of Isoprene Emission Rate of Palm (*Arecaceae*) Species Using Excised Leaves. *Atmosphere* 13(5), 778.
- Crowell PL, Gould MN. 1994: Chemoprevention and therapy of cancer by d-limonene. *Crit Rev Oncog* 5: 1–22.
- Edris AE, 2007: Pharmaceutical and therapeutic potentials of essential oils and their individual volatile constituents: a review. *Phytother Res* 21: 308–23.
- Guenther AB, Zimmerman PR, Harley PC, Monson RK, Fall R, 1993: Isoprene and monoterpene emission rate variability: Model evaluations and sensitivity analyses. *J Geophys Res* 98, 12609

- Karl T, Harley P, Emmons L, Thornton B, Guenther A, Bas C, Turnipseed A, Jardine K. 2010: Efficient atmospheric cleansing of oxidized organic trace gases by vegetation. *Science* 2010, 330, 816-819.
- Kasanen JP, Pasanen AL, Pasanen P, Liesivuori J, Kosma VM, Alarie Y. 1999: Evaluation of sensory irritation of Δ^3 -carene and turpentine, and acceptable levels of monoterpenes in occupational and indoor environment. *J Toxicol Environ Health A* 57, 89–114.
- Muramoto S, Matsubara S, Mwenda CM, Koeduka T, Sakami T, Tani A, Matsui K, 2015: Glutathionylation and reduction of methacrolein in tomato plants account for its absorption from the vapor phase. *Plant Physiology* 169(3), 1744-1754
- Mølhave L, Kjaergaard SK, Hempel-Jørgensen A, et al. 2000: The eye irritation and odor potencies of four terpenes which are major constituents of the emissions of VOCs from Nordic soft woods. *Indoor Air*, 10, 315–8.
- Park BJ, Tsunetsugu Y, Kasetani T, et al, 2000: Physiological effects of Shinrin-yoku (taking in the atmosphere of the forest)—using salivary cortisol and cerebral activity as indicators. *J Physiol Anthropol* 26: 123–8.
- Tani A, Masui N, Chang TW, Kokubu Y, Okumura M. 2024: Basal emission rates of isoprene and monoterpenes from major tree species in Japan: interspecies and intraspecies variabilities. *Prog Earth Planet Sci* 11, 42
- Tani A, Koike M, Mochizuki T, Yamane M, 2022: Leaf uptake of atmospheric monocyclic aromatic hydrocarbons depends on plant species and compounds. *Ecotoxicol Environ Saf* 236:113433
- Tani A, Mochizuki T, 2021: Review: Exchanges of volatile organic compounds between terrestrial ecosystems and the atmosphere. *J Agric Meteorol* 77, 66-80
- Tani A, Muramatsu K, Mochizuki T, 2020: Emission of methyl ethyl ketone and 2-butanol converted from methyl vinyl ketone in plant leaves. *Atmosphere* 11, 793
- Tani A, Nozoe S, 2012: Workplace concentrations and exposure assessment of monoterpenes in rosemary- and lavender-growing greenhouses. *J. Occupational health* 54, 459-468
- Tani A, Bobe S, Shimizu S, 2010: Uptake of methacrolein and methyl vinyl ketone by tree saplings and implications for forest atmosphere. *Environ Sci Technol* 44, 7096–7101
- Tani A, Hewitt CN, 2009: Uptake of aldehydes and ketones at typical indoor concentrations by houseplants. *Environ Sci Technol* 43 (21), 8338–8343
- Yamane M, Tani T, 2024: An absorption model of volatile organic compound by plant leaf: The most influential site in the absorption pathway. *Atmos Environ X*, 23, 100274. <https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2024.100274>
- Yatagai M, 2000: Tree aroma and its function on relaxation and rest. *Aroma Research* 1: 2–7 (in Japanese with English summary).

気候変動下におけるコメの眠りと澱粉代謝

三ツ井 敏明

新潟大学 社会連携推進機構

1. はじめに

近年の地球温暖化・地球沸騰化そして気候変動は私達人類にとって極めて深刻な環境問題の1つとなっている。気候変動は、夏季の猛暑・酷暑のみならず、豪雨による洪水、干ばつやそれに伴う塩害を世界中で引き起こしている。気候変動によって作物生産、特に澱粉生産でもある穀物生産にも大きな影響を及ぼしている。令和5年8月の新潟市の平均気温は30℃を超え、過去150年間で最も暑い8月となった。新潟地域では夏季の異常高温と少雨による渇水が発生し、コメづくりに甚大な被害が出た。さらに、日本海に注ぎ込む阿賀野川の河口から5km以上も離れた河川敷にある水田では、我が国ではあまり見られない海水の逆流による広範な塩害が発生し、コメの収穫ができない事態となった。高温被害の1つである玄米白濁化が多発し、通常のコシヒカリの1等級比率は80%程度であるが、令和5年の1等級比率は一桁に激減した。玄米が白く濁る原因は集積する澱粉顆粒の形成異常であり、異常集積によって生ずる澱粉顆粒間の空隙が光を乱反射させることで白濁として見える。高温登熟による澱粉顆粒形成異常は転流能力を含め様々な要因が複雑に絡み合っていると考えられているが、最終的には胚乳組織における澱粉生合成と分解のバランス異常によって起こることは間違いない。澱粉生合成の基質であるADP-グルコースを供給するADP-グルコースピロホスホリラーゼや澱粉枝付け酵素BEIIbは比較的熱に弱く、一方、イネの主要澱粉分解酵素 α -アミラーゼI-1は70℃でも活性を有する。高温登熟による α -アミラーゼのタンパク質発現誘導は10倍以上にも達することもあり、澱粉顆粒表面に小穴を生じさせる等、澱粉顆粒形成異常を起こす主要原因の1つとなっている。令和7年の夏も各地で最高気温が40℃を超える危険な暑さ、酷暑が頻発している。今後予想される高温登熟のさらなる激化は澱粉収量の大幅な低下を引き起こすことが懸念される。

2. イネ種子の澱粉代謝

イネ種子が吸水すると、胚盤上皮細胞およびアリュエロン層細胞において澱粉分解酵素 α -アミラーゼが発現・合成され、澱粉が集積している胚乳に分泌される。澱粉は、 α -アミラーゼ、枝切り酵素、 β -アミラーゼおよび α -グルコシダーゼの協調的な作用によってグルコースまで分解される。グルコースは胚に吸収されて、ショ糖に変換されて、成長する芽や根にエネルギー源、炭素骨格源として供給される。 α -アミラーゼの生合成・分泌は植物ホルモン（ジベレリンとアブシジン酸）や澱粉代謝物の糖に

よって調節されている (Mitsui et al., 2016)。

登熟種子ではもっぱら澱粉合成が行われるが、高温ストレス下では α -アミラーゼの発現が異常に高まり、澱粉分解が起こる (Yamakawa et al., 2007)。高温登熟による澱粉分解の上昇は、高温ストレスに対抗するための適合溶質やエネルギーの生成を行うための生理現象と考えられる。生細胞の澱粉合成・分解は細胞内小器官プラスチド (葉緑体やアミロプラスチ等) で行われる。分泌酵素 α -アミラーゼがプラスチドにおける澱粉代謝に関われるのかという疑問があるが、私達の研究グループは、バイオイメージング等の分子細胞生物学的な手法を駆使して、 α -アミラーゼが分泌経路からゴルジ装置を介してプラスチドに輸送・局在化し、機能することを明らかにした (Kitajima et al., 2009)。

3. コメの眠り

休眠 (seed dormancy) は、過度の乾燥等の劣悪な環境での発芽を防ぐことで種子の生存と作物の収量に重要な役割を果たしている。一方で休眠が深くなると、通常は発芽に適した環境条件下であっても種子が発芽しない状態を維持し、そしてそれは遺伝的および環境的要因の両方の影響を受ける。遺伝的要因としては、母植物由来の被覆組織と胚が関わっている。母体の遺伝情報は種皮のような胚を取り囲む組織の性質に影響を与え、これらの組織は物理的障壁として機能し、休眠を維持するとともに小根の伸長を阻害する。被覆組織による休眠の程度は種子の解剖学的構造に依存し、種によって異なる。一方、胚の休眠は胚自身の発生プログラムにより制御されている。イネの種子休眠に

は以下の植物ホルモンが関与している。アブシジン酸 (ABA) は休眠を促進し、ジベレリン (GA) は発芽を促進する。両者のバランスが休眠の深さや解除



図1 植物ホルモン ABA と GA の拮抗作用と休眠制御

に関係している (図 1)。代表的な休眠遺伝子とその特徴を下記に示す。

Sdr4 (Seed dormancy 4) 遺伝子

Sdr4 は種子休眠を正に制御する調節因子である。*Sdr4* の発現は植物ホルモン ABA の作用と関連して、ABA のシグナル伝達経路に影響し、種子の休眠強度を調整する。*Viviparous1* のイネホモログ (類似遺伝子) である *OsVP1* という ABA 応答性の転写因子が *Sdr4* の上流因子として知られており、*Sdr4* の発現誘導に関与する。*Sdr4* の発現が低下すると、発芽抑制が弱まり、休眠が浅くなる。インディカ型イネ品種のカサラス

由来の *Sdr4-k* は活性化型ジベレリン (GA) 生合成を抑制し、休眠の深化を導く。(Sugimoto et al., 2010)

Rc (*Red coleoptile*) 遺伝子

Rc 遺伝子は種皮の色 (赤色) とともに、休眠の深さにも関係する。赤色種皮はフラボノイド (タンニンなど) を多く含み、これが水分の浸透を抑え、物理的に発芽を抑制すると言われており、種子保存・発芽体力に影響する。(Manjunath et al., 2023)

qSD1 (*Quantitative trait locus for seed dormancy 1*) 遺伝子

qSD1 は、種子休眠、発芽抑制の強さに関与する主要な量的形質遺伝子座 (QTL) の一つである。主に栽培イネと野生イネの間の休眠性の違いを解析する研究で同定された。*qSD1-2* はイネの半矮性を制御する *sd1* (*semi-dwarf 1*) であり (Ye et al., 2015)、GA20 oxidase-2 (GA20ox2) というジベレリン生合成酵素をコードしている。*qSD1* が *sd1* であることは、休眠性においてジベレリン (GA) の量に関係していることを意味し、GA 量の増減を介して休眠性を調節していると考えられる。

オオムギ *Qsd1* はオオムギにおける種子休眠を制御する QTL の 1 つであり、アミノ酸代謝に関与する酵素アラニンアミノトランスフェラーゼ (AlaAT) をコードしており、種子休眠の遺伝的制御に関与している。AlaAT は、アラニンとピルビン酸の間の変換 (アラニン + α -ケトグルタル酸 $\rightleftharpoons$ ピルビン酸 + グルタミン酸) を触媒する。発芽時のエネルギー代謝や窒素代謝に関与し、休眠打破との関係が示唆されている。(Sato et al., 2016)

DOG1 (*Delay Of Germination 1*)

DOG1 は、モデル植物のシロイヌナズナで発見された種子休眠の主要な制御因子として知られている。*DOG1* ホモログは、トマト、コムギ、イネ、ダイズなど他の種子植物にも存在する。*DOG1* は ABA のシグナル伝達を補強または延長することで、休眠の持続性や深さを制御している。また、*DOG1* は GA 合成を抑え、GA 分解を促進することで発芽を防ぐ。(Carrillo-Barral et al., 2020)

4. コメ澱粉代謝に及ぼす休眠遺伝子の影響

酒米 (酒造好適米) の大きな特徴の 1 つとして心白と呼ばれる白濁部分が見られるが、高温登熟による白濁粒とどのような違いがあるのか。うるち米整粒や酒米心白周りの透明な組織は多角形の澱粉顆粒が密に詰まっているが、心白部の澱粉粒は丸みを帯びており隙間が豊富である。この隙間によって、心白粒は吸水率が高く、麹菌が米内部まで菌糸を伸長しやすくなる。うるち米の心白は稲体が開花・登熟期に高温に当たることによって生じやすいとされるが、酒米では通常の温度条件でも高い心白発現率を示す。しかし、酒米においても全ての種子に心白が存在するわけではなく、心白の発現率や形状は品種だけでなく、栽培環境などの外的要因にも影響を受ける。酒米品種は環境

ストレスに比較的弱いことが報告されている (Baslam et al., 2020)。醸造利用の観点から安定した心白発現が強く望まれるが、そのメカニズムに関しては十分な解明がなされていない。

高温登熟はうるち米の白未熟粒の増加だけでなく酒米の醸造特性にも大きく影響する。高温に暴露した米は消化性が低下することが知られている。また、高温登熟によって酒米の心白が大きく広がり（図 2）、酒米の搗精時に碎粒を生じさせる。碎粒の多発は、歩留まりを悪くするばかりではなく酒質を低下させる要因となり、清酒醸造において望ましくない。私達は、カサラス由来の休眠遺伝子 *Sdr4-k* を酒米に導入し、高温登熟性への影響を調べた。上述のように、*Sdr4* 遺伝子は種子登熟を制御する転写調節遺伝子 *OsVPI* により正に制御され、休眠関連遺伝子 *OsDOGIL2* の発現を促進する制御因子である。種子休眠性を失った *sdr4* 変異体種子の発芽は ABA への感受性が低下しているが、*LEA* 等の乾燥ストレス耐性遺伝子の ABA 応答は維持されており、*Sdr4* が特異的に種子休眠を制御しているものと考えられる。*OsDOGIL2* の遺伝子はその下流にある活性型ジベレリンの合成を担う *OsGA20ox-1* 遺伝子を抑制する。そして、 α -アミラーゼ発現を負に制御し、発芽を抑える (Sugimoto et al., 2010)。交配と迅速世代促進技術 (Rana et al., 2019) を駆使して、酒米品種の越淡麗および五百万石に *Sdr4-k* 遺伝子を導入した。越淡麗は穂発芽しやすいという欠点を有しているが、*Sdr4-k* 導入によって穂発芽性が有意に改善された。穂発芽時の α -アミラーゼ活性も越淡麗 *Sdr4-k* 系統において顕著に低かった。五百万石は比較的大きな心白（眼状心白）を有する特性を持つ酒米品種である。五百万石 *Sdr4-k* 系統の心白形状分析を行ったところ、五百万石母本と比較して心白の縮小化が見られた。すなわち、五百万石の特徴である眼状心白のような大きな心白形状が減少し、山田錦に代表される線状心白や点状心白といった比較的小さな心白形状の発現割合が増加した。加えて、五百万石 *Sdr4-k* 系統では高温登熟による白濁部分の拡張を抑えることによって酒米搗精時の碎粒化が軽減されることも見られた。休眠遺伝子 *Sdr4-k* が酒米種子の澱粉代謝を制御し、酒米形質に良い影響をもたらす可能性が示唆された。



図 2 高温登熟が酒米外観品質に及ぼす影響

5. 新大コシヒカリの取組み

うるち米の整粒は上下・左右に均整が取れていて透明感のある綺麗なコメである。登熟期に高温に晒されると白濁玄米が多発する。玄米白濁化の原因は、胚乳に集積する澱粉顆粒の形成異常によって顆粒間に空隙ができてしまうことにある。私達は、高温登熟により発生した白濁粒の澱粉顆粒表面に見られる小穴と発芽イネ種子における α -アミラーゼによる澱粉顆粒分解の様子との類似性に着目し、高温登熟種子において α -アミラーゼが悪さをして澱粉顆粒形成異常を生じさせるものと推測した。実際に α -アミラーゼが玄米白濁化に関与するのかを検証するために、 α -アミラーゼの働きを強めた遺伝子組換え稲を作出し、平温で栽培したところ、澱粉顆粒に多数の小穴を持つ白濁粒が収穫された（Asatsuma et al. 2006）。さらに、 α -アミラーゼの働きを弱めた遺伝子組換え稲では、高温登熟させても白濁粒の発生が軽減された（Hakata et al. 2012）。これらの結果から、 α -アミラーゼが玄米の白濁化に関与することが明らかにされ、最終的には澱粉の合成・分解のバランス異常によって澱粉顆粒形成異常そして白濁化が生じるものと考えられる（Mitsui et al., 2016）。

私達は、高温登熟しても子実中の α -アミラーゼの発現が高まらず、澱粉の合成・分解のバランス異常を軽減するコシヒカリ変異体を開発することを試みた。培養変異法による自然な変異誘発を採用し、本法により高温登熟耐性コシヒカリ系統が高い頻度で出現することを見いだした。迅速世代促進技術を駆使して変異遺伝子の固定化を進め、2020年3月9日に暑さに強いコシヒカリ新品種「コシヒカリ新潟大学NU1号」を品種登録、2023年7月27日に「新大コシヒカリ」として商標登録を完了した。NU1号の形態特性としては、無論コシヒカリそのものの遺伝子を持っていることからコシヒカリにそっくりである。ただ、高温登熟性が強であることで品種登録が認められている。遺伝子発現特性としては高温登熟による一群の α -アミラーゼ遺伝子の発現誘導が抑制されており、澱粉の合成・分解のバランス異常が軽度で整粒が出来やすくなったと考えられる（図3）。NU1号の穂発芽性を調べて見たところ、NU1号はコシヒカリに比べて発芽の遅延が見られた。NU1号が

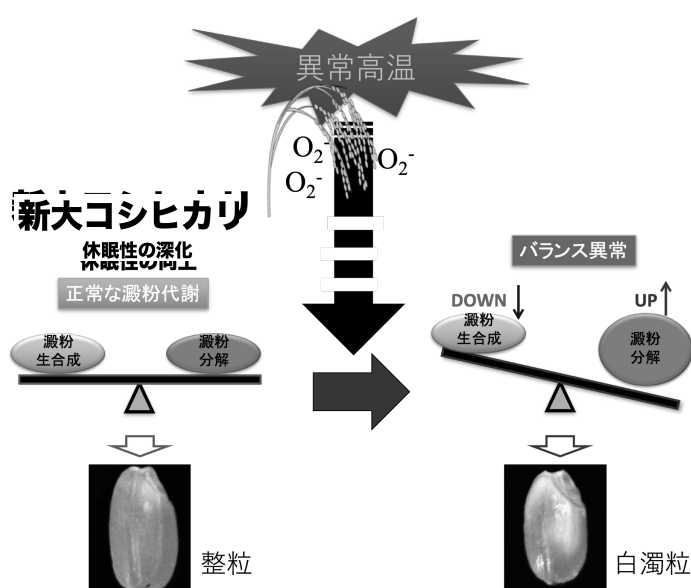


図3 高温登熟下における新大コシヒカリの応答

深い休眠性を示すことは興味深い。ただ、NU1 号とコシヒカリの休眠性の違いは、適度な浸種を施すことによってその区別性はほぼ無くなる。

6. おわりに

ヒトの睡眠は、心身の疲労を回復し、記憶を整理し、免疫機能やホルモンバランスを整えるために重要であり、健康を保つために欠かせない基本的な生理機能である。本稿では、コメの眠りと澱粉代謝の関係をとり上げ、休眠が植物成長に適さない劣悪な環境での発芽を防ぐことで生命の維持に重要な役割を果たしているとともに、コメの健康状態を維持し、眠りによる澱粉代謝制御が玄米品質維持に密接に関わっていることを述べさせていただいた。

【引用文献】

- S. Asatsuma, S. et al. (2006) α -Amylase affects starch accumulation in rice grain. *J. Appl. Glycosci.*, 53, 187-192.
- Baslam, M. et al. (2023) Functional traits of field-droughted contrasting rice genotypes reveal multiple independent genomic adaptations and metabolic responses. *Environ. Exp. Bot.*, 215, 105483.
- Carrillo-Barral, N. et al. (2020) Delay of germination-1 (DOG1): A key to understanding seed dormancy. *Plants*, 9, 480.
- Hakata, M. et al. (2012) Suppression of α -amylase genes improves quality of rice grain ripened under high temperature. *Plant Biotechnol. J.*, 10, 1110-1117.
- Kitajima, A. et al. (2009) The rice α -amylase glycoprotein is targeted from the Golgi apparatus through the secretory pathway to the plastids. *Plant Cell*, 21, 2844-2858.
- Mitsui T. et al. (2016) Molecular physiological aspects of chalking mechanism in rice grains under high-temperature stress. *Plant Prod. Sci.*, 19, 22-29.
- Manjunath, P.C.T. et al. (2023) Identification of the rice Rc gene as a main regulator of seed survival under dry storage conditions. *Plant Cell Environ.*, 46, 1962-1980.
- Rana, M.M. et al. (2019) Salt tolerance improvement in rice through efficient snp marker-assisted selection coupled with speed-breeding. *Int. J. Mol. Sci.*, 20, 2585.
- Sato, K. et al. (2016) Alanine aminotransferase controls seed dormancy in barley. *Nat. Commun.*, 7, 11625.
- Sugimoto, K. et al. (2010) Molecular cloning of Sdr4, a regulator involved in seed dormancy and domestication of rice. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 107, 5792-5797.
- Yamakawa, H. et al. (2007) Comprehensive expression profiling of rice grain filling-related genes under high temperature using DNA microarray. *Plant Physiol.*, 144, 258-277.
- Ye, H. et al. (2015) Map-Based cloning of seed dormancy1-2 identified a gibberellin synthesis gene regulating the development of endosperm-imposed dormancy in rice. *Plant Physiol.*, 169, 2152-2165.

家畜健全育成からヒトの健康生活の向上に貢献する

イムノバイオティクスの魅力

北 澤 春 樹

東北大学大学院農学研究科

1. はじめに

豚をはじめとする家畜の幼若期における感染症は、生産性や経済性に大きな影響を及ぼすため、長年にわたり解決すべき重要課題とされてきました。従来は衛生管理やワクチンなどの薬剤が中心的に利用され、一定の成果を挙げてきましたが、薬剤耐性菌の増加や開発コストの高騰や過剰な労力といった課題が顕在化しています。国際的な報告では、2050 年には薬剤耐性菌による死者数が世界で最も多い死因になると予測されており¹⁾、薬剤依存に代わる新たな解決策が強く求められています。

そこで注目されているのが、粘膜免疫を介して健康促進効果を発揮するイムノバイオティクスです。我々は豚を対象に、世界に先駆けて粘膜免疫調節機能の評価系を構築し、候補株の選抜とその免疫メカニズム解明に取り組んできました。本講演では、イムノバイオティクス研究の歩み、ポストイムノバイオティクスの革新、そして将来展望について概説します。

2. イムノバイオティクスの誕生とさらなる進化(図1)

1980 年代にプロバイオティクスが「宿主に有益な効果をもたらす生きた微生物」と定義されて以来、プロバイオティクス研究は急速に進展し、現在は、「十分な量を摂取したときに宿主に有益な健康効果をもたらす生きた微生物」の定義が広く使われています²⁾。その後、難消化性食品成分を利用するプレバイオティクス、両者を組み合わせたシンバイオティクスの概念が提唱され、それらの利用可能性が拡大しました。さらに 2003 年には、Clancy により、イムノバイオティクス(「粘膜免疫を調節することで宿主に有益な効果を与えるプロバイオティクス」)が提唱され³⁾、免疫機能性の研究が活発化しました。我々はさらに、海藻などの免疫調節作用を有する素材を「イムノプレバイオティクス」と位置付け、それらとイムノバイオティクスを組み合わせた「イムノシンバイオティクス」を提案し、相乗効果の可能性を追究しています⁴⁾。

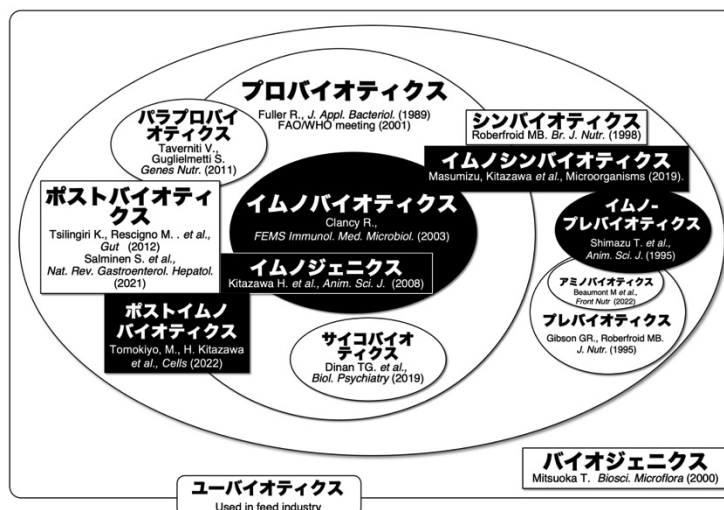


図1 プロバイオティクスの進化

一方、生菌だけでなく死菌体や構成成分も健康効果を示すことが明らかとなり、最近では

「ポストバイオティクス」⁵⁾(「宿主の健康に有効な作用を発揮する死菌体やその構成成分」)の概念が広がりました。我々は特に免疫調節作用を有する活性因子をイムノジェニクス⁶⁾と提唱しましたが、それらを含め、死菌体や菌体成分を「ポストイムノバイオティクス」と整理し、分子基盤の解明に取り組んでいます。

3. ポストイムノバイオティクスの革新と発展的応用

現在、日本で豚向けに認可されているプロバイオティクスは限られています。より持続可能な家畜生産には、イムノバイオティクスやイムノシンバイオティクスの積極的な導入が不可欠と考えています。これまでに我々は、世界に先駆けて豚小腸上皮細胞を用いたインビトロ評価系を確立し、抗炎症性や抗ウイルス性を有するポストイムノバイオティクス候補株の選抜を可能にしました⁷⁻¹⁰⁾(図2)。さらに、選抜株を用いたインビボ試験では、免疫機能の強化や肉質改善といった実用的効果も確認され、構築したインビトロ評価系の有用性検証を進めています¹¹⁻¹⁴⁾。ある乳酸菌株はToll様受容体(TLR)のネガティブレギュレータを上昇させ、炎症性サイトカインの産生を抑制することが分かりました¹⁵⁾。別のイムノバイオティクス候補菌株は、TLRのネガティブレギュレータである

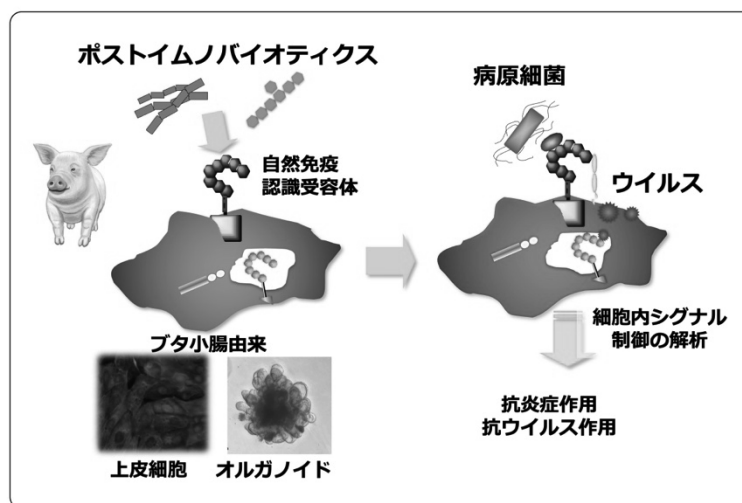


図2 豚小腸由来の上皮細胞およびオルガノイドによる *in vitro* 評価系

A20、Bcl-3 および MKP-1 を上昇させることにより、TLR4 における NF- κ B および MAPK 活性の低下から、炎症性サイトカインやケモカインの発現を低減させる抗炎症機構が明らかになりました⁹⁾。二本鎖 RNA Poly(I:C)を用いた抗ウイルス免疫評価系⁸⁾から、ロタウイルス感染評価系¹⁰⁾の構築により、新規抗ウイルス性ポストイムノバイオティクスの選抜と機構解明が可能となりました(図2)。より生体に近いモデルの構築にも取り組み、豚小腸オルガノイドの構築からその応用も展開しています¹⁶⁾(図2)。我々はまた、ワカメ残渣を摂取した豚の小腸で増えた乳酸桿菌の中から、ポストイムノバイオティクス候補株を見出し、ロタウイルス感染に対する低減性のみならず、ロタウイルス/毒素原性大腸菌(ETEC)のスーパーインフェクションに対する有意な改善効果についても大いに期待されています¹⁷⁾。最近では、豚気管支上皮細胞株を樹立¹⁸⁾し、腸-肺軸を介する免疫評価系の開発により、呼吸器感染症への応用も可能としています。今後、インビトロ評価系のさらなる構築のためには、家畜由来の種々の細胞株の樹立が必要不可欠であり、それらを用いたオミクス統合解析により、新たなポストイムノバイオティクスの探索と抗病性機構の解明が飛躍的に進むものと大いに期待されます^{19,20)}。

ポストイムノバイオティクスに含まれる有用な成分として、細胞壁構成成分であるペプチドグリカン²¹⁾、リポテイコ酸やテイコ酸²²⁾、細胞外に分泌される多糖²³⁻²⁸⁾をはじめ、ゲノム DNA^{29,30)}や二本鎖 RNA³¹⁾も有用因子と期待されます。我々は、それらの因子がパターン認識受容体を介

して感染防御に関わる免疫機能性を発揮することを明らかにしてきました。最近でも、コリン結合タンパクの重要性を見出しています³²⁾。その中でも特に注目されているのが、菌体外多糖(EPS)です。EPS産生乳酸菌は、パターン認識受容体(PRRs)を介して抗炎症性や抗ウイルス性の免疫調節作用を示すことや、EPSには中性型と酸性型があり、それぞれ異なる

PRRsを介して作用することも明らかになりました^{25-27,33)}。EPSを産生する乳酸菌株によるオカラ発酵の*in vivo*有用効果も認められた¹²⁾ことから、イムノシンバイオティクスとしての利用性が考えられ、畜産現場での新しい予防戦略として応用できると期待されます。

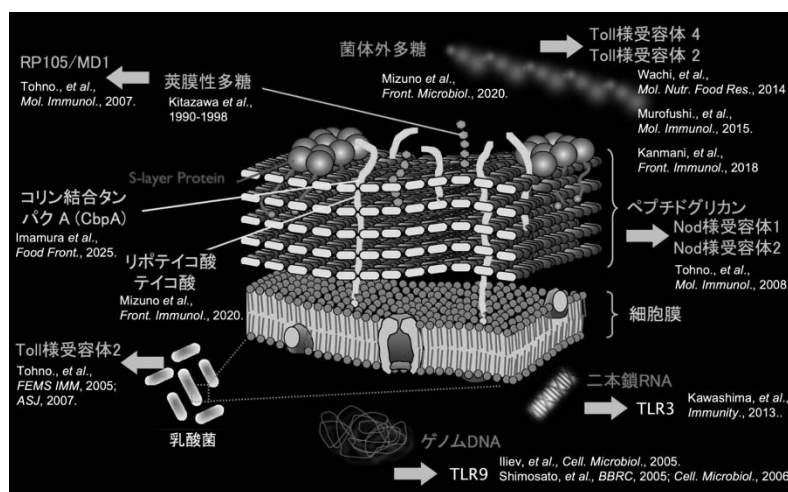


図3 免疫調節因子としてのポストイムノバイオティクス

4. イムノバイオティクス利用の将来展望

イムノシンバイオティクスは、抗菌剤耐性の問題に対し、環境負荷の小さい持続可能なアプローチとして国際的に期待されます。プレバイオティクスとしてのワカメは、フコイダンやアルギン酸などの活性成分が含まれ、抗炎症および抗ウイルス特性などが知られており、イムノプレバイオティクスとして期待されます³⁴⁾。そのため三陸産ワカメ残渣の有効活用は、震災復興と資源循環型社会への貢献にもつながり大変有意義です。現在、我々は豚への*in vivo*試験を進め、実用化に向けた検証を行っています。また、腸内細菌と遠位粘膜の相関研究の進展により、腸-肺軸を介する呼吸器感染症の予防といった新しい応用領域も広がっています³⁵⁾。

豚は産業動物としての重要性に加え、ヒトのモデル動物としても有用であり、ポストイムノバイオティクスは家畜の健全育成とヒトの健康増進の双方に資する技術基盤としてその利用拡大の意義は極めて大きいと言えます。

5. おわりに

我々はこれまで、イムノバイオティクスの単離、家畜由来細胞株を利用した抗病性評価系の構築、ポストイムノバイオティクス研究の推進などを通じ、世界をリードする成果を積み上げてきました。これらの取り組みは、家畜の病原体を起因とする免疫関連疾患への新しい予防・治療戦略を開くだけでなく、ヒトの健康生活の向上にもつながると確信しています。

イムノバイオティクス研究は、持続可能な社会とグローバルな健康課題解決に直結する革新的技術であり、我々は今後もその社会実装に向けて努力を続けてまいります。

謝辞

本文には、生物系特定産業技術研究支援センター「イノベーション創出強化研究推進事業」、日本学術振興会科学研究費補助金および日本中央競馬会畜産振興事業の支援を受けて推進した成果を含みます。

引用文献

- 1) O'Neill, J. (Chaired): The review on Antimicrobial Resistance. Tackling drug-resistant infections globally: Final report and recommendations. (2016).
- 2) FAO/WHO. Report of a joint FAO/WHO expert consultation on guidelines for the evaluation of probiotics in food. FAO/WHO, London Ontario, Canada (2002).
- 3) Clancy, R., *FEMS Immunol. Med. Microbiol.*, 38, 9-12 (2003).
- 4) Masumizu, Y. *et al.*, *Microorganisms*, 7:167, 1-17 (2019).
- 5) Salminen, S. *et al.*, *Nat Rev Gastroenterol Hepatol*, 18, 49-667 (2021).
- 6) Kitazawa, H. *et al.*, *Anim. Sci. J.*, 79, 11-21 (2008).
- 7) Moue, M. *et al.*, *Biochimica et Biophysica Acta 1780.*, 134-144 (2008).
- 8) Hosoya, S. *et al.*, *Vet. Res.*, 42:111, 1-13 (2011).
- 9) Shimazu, T. *et al.*, *Infect. Immun.*, 80(1), 276-288 (2012).
- 10) Ishizuka, T. *et al.*, *PLoS ONE*, 11(3), e0152416 (2016).
- 11) Suda, Y., *et al.*, *BMC Immunol.*, 15(24), 1-18 (2014).
- 12) Suda, Y., *et al.*, *Microorganisms*, 9:921, 1-18 (2021).
- 13) Islam, M. A. *et al.*, *Animals*, 11:752, 1-18 (2021).
- 14) Suda, Y., *et al.*, *Benef. Microbes*, 13(1), 61-72 (2022).
- 15) Vinella, J. *et al.*, *Clinical and Vaccine Immunology*, 19(7), 1038-1053 (2012).
- 16) Indo, Y., *et al.*, *Front. Immunol.*, 12:652923 (2021).
- 17) Matsumoto, K., *et al.*, *Biosci. Microb. Food Health*, 43(4), 342-351 (2024).
- 18) Fukuyama, K. *et al.*, *Front. Immunol.*, 14:1117102, 1-14 (2023).
- 19) Albarracin, L. *et al.*, *Front. Immunol.*, 8(57), 1-15 (2017).
- 20) Albarracin, L. *et al.*, *Front. Immunol.*, 11:543, 1-16 (2020).
- 21) Tohno, M. *et al.*, *Mol. Immunol.*, 45, 194-203 (2008).
- 22) Mizuno, H. *et al.*, *Front. Immunol.*, 11:571, 1-14 (2020).
- 23) Kitazawa, H. *et al.*, *Int. J. Food Microbiol.*, 40, 169-175 (1998).
- 24) Tohno, M. *et al.*, *Mol. Immunol.*, 44(10), 2566-2577 (2007).
- 25) Wachi, S. *et al.*, *Mol. Nutr. Food Res.*, 58(10):2080-93 (2014).
- 26) Murofushi, Y. *et al.*, *Mol. Immunol.*, 64, 63-75 (2015).
- 27) Kanmani, P. *et al.*, *Front. Immunol.*, 9:2178 (2018).
- 28) Mizuno, H. *et al.*, *Front. Microbiol.*, 11:894, 1-14 (2020).
- 29) Iliev, I. D. *et al.*, *Cell. Microbiol.* 7(3), 403-414 (2005).
- 30) Shimosato, T., *et al.*, *Cell. Microbiol.*, 8(3), 485-495 (2006).
- 31) Kawashima, T., *et al.*, *Immunity*, 38(6):1187-97 (2013).
- 32) Imamura, Y. *et al.*, *Food Front.* (2025) in press.
- 33) Laiño, J. *et al.*, *Microorganisms*, 4, 27 (2016).
- 34) Liu, F., *et al.*, *Phytomedicine.*, 19(8-9):797-803 (2012).
- 35) Villena, J., H. Kitazawa, *Front. Physiol.* 11, 1-20 (2020).

食と健康 ―食品の機能性の観点から―

山本（前田）万里

国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構 食品研究部門

1. 機能性を食品に表示できる制度

日本では、毎日摂取している食が体調を整えるとともに、食品の付加価値を向上させるため、食の機能性表示の制度が発達してきた。機能性表示に関しては、日本は先進国であり、世界に先駆けて特定保健用食品の制度を 1991 年に施行したときには、Nature 誌にも「日本は食と医薬の境界を探り始めた」と掲載された。機能性という言葉も日本から発信された。その後、食の機能という考え方は栄養と組みあわせた形で世界中に定着した。ここでは機能性表示食品制度、農産物での機能性表示、健康維持増進のための食について紹介する。

栄養成分や機能性関与成分の機能性表示が可能な食品は、特定保健用食品（トクホ）、栄養機能食品、機能性表示食品である（Maeda-Yamamoto, 2021）。「栄養機能食品」（消費者庁、2025a）は、栄養成分（ビタミン 13 種（ナイアシン、パントテン酸、ビオチン、ビタミン A、B₁、B₂、B₆、B₁₂、C、D、E、K、葉酸）、ミネラル 6 種（亜鉛、カルシウム、鉄、銅、マグネシウム、カリウム）、n-3 系脂肪酸）の補給のために利用される食品で、一日当たりの摂取目安量に含まれる当該栄養成分量を、定められた上・下限値の範囲内におさめて、「本品は多量摂取により疾病が治癒したり、より健康が増進するものではありません」などという注意喚起を行った上で、健康機能を自主的に表示できる規格基準型の制度である。

現在、栄養機能生鮮食品としては、ピーマン（ビタミン C）、イチゴ（ビタミン C）、豆苗（葉酸）、かいわれ大根（ビタミン B₁₂）、プチベール（ビタミン C、葉酸）、キウイ（ビタミン C、E）、ミニトマト・人参（ビタミン A）、えのきだけ（葉酸、ナイアシン）などである。

2015 年 4 月 1 日から施行されている機能性表示食品制度（消費者庁、2025b）では、一般加工食品やサプリメントの他、農林水産物（生鮮食品）も対象とされたこと、国ではなく事業者自身が安全性や機能性について責任を持つこと、届出制であり、届け出られた情報は消費者庁のホームページで販売前に公開されること、機能性としては「身体の特定の部位の表現」や「主観的な指標による評価」が認められたこと、機能性関与成分（機能性成分）の分析法を開示することがトクホと大きく違う点である。生鮮食品など農林水産物を機能性表示できる制度が世界的に珍しいことから、現在、アジア各国から注目され、それぞれの国の制度とどう協調するかが検討されている。届出するためには、その食品の安全性の担保、機能性成分や機能性成分の分析法の開示、科学的根拠を臨床試験かシステマティックレビューによって明確にすること、機能性成分の作用メカニズムの考察、当該食品の食経験もしくは安全性試験結果、一日摂取目安量で通常摂取できる量であること、などが求められる。しかし、科学的根拠や作用メカニズムは農業事業者などが整備することは困難な場面が多い。そこで農研機構では、生鮮食品等に自由に届出に使える機能性成分のシステマティックレビューおよび作用メカニズムの事例を 18 種類公開した。2025 年 6 月 30 日現在、生鮮食品の届出の約 33%で本システマティックレビューが活用されている。

2. 農産物の機能性表示

販売されている機能性表示食品の機能性のターゲットは、体脂肪、おなかの調子、血圧、血糖、コレステロール、血管の柔軟性、目、目鼻の不快感、肌、筋肉、排尿、むくみ、骨、膝、末梢体温、睡眠、身体的疲労、精神的ストレス、認知機能、尿酸、肝臓、オーラルケア、免疫機能、ミネラル吸収促進である。現在、生鮮食品では 263 品目が届出・受理されており、農林水産物としては、野菜、果物、大豆、きのこ、卵、肉、魚、米、大麦、ナッツ、緑茶などが届出、受理されている(表1)。農産物は様々な成分が入った混合成分含有食品である。現在、栄養成分と機能性成分は明確に分けられて表示されている。しかし、海外では栄養成分と機能性成分を区別せず栄養成分として扱っているところも多い。日本でも両成分とも健康を維持・増進できる成分として同様に扱うべきであり、機能性表示制度については、特定保健用食品制度や栄養機能食品制度との関係を整理して、消費者がわかりやすい制度に再設計していくことが重要である。さらに、今後、食品の組み合わせによる複合効果に関する研究を行って食事の重要性を明らかにし、生鮮食品を含む農林水産物や食事の健康機能性は長期の継続的な喫食で発揮されることを消費者に理解してもらうことが必要である。

3. 個別化をめざす食と健康の未来

近年、生活様式が急変し、ストレスの増加、睡眠の不調、生活習慣病の増加などが懸念されており、健康を維持増進する食品の果たす役割が重要性を増している。筆者らは、戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「スマートバイオ産業・農業基盤技術」の中で、「健康寿命の延伸を図る「食」を通じた新たな健康システムの確立」に取り組み、軽度な心身不調(軽度不調; Minor Health Complaints; 個人が主観的に感ずる軽度な心身不調であり、活気の低下、イライラ感、疲労感、身体愁訴などの症状を示し、食生活等生活習慣の見直しで緩和する状態)を評価し、それを緩和して労働生産性を向上させることを目的に研究を推進した。健常人 1000 名(20~80 歳)の夏季と冬季の 2 回、遺伝子、腸内マイクロバイオーーム、メタボローム、血液検査、尿検査、自律神経、睡眠脳波、食事摂取頻度調査、栄養調査、生活状態やストレス、睡眠などのアンケート調査等の健康調査データ解析から、軽度不調を評価する指標の開発や、軽度不調に見える化して、軽度不調の緩和のための G-Plus 食品の開発・提案を目指してきた。一般的に、心身の不調の多くは、主観的な回答に基づく質問紙法により評価されることが多いため、軽度不調に関しても、広く簡易に心身の不調を尋ねる項目から構成される「職業性ストレス簡易調査票」(労働の場におけるストレス及び健康影響に関する研究報告書:労働省平成 11 年度「作業関連疾患の予防に関する研究」、1999)を用い、簡便に軽度不調を評価する方法を図1のように行うこととした(Kagami-Katsuyama et al.,2023)。

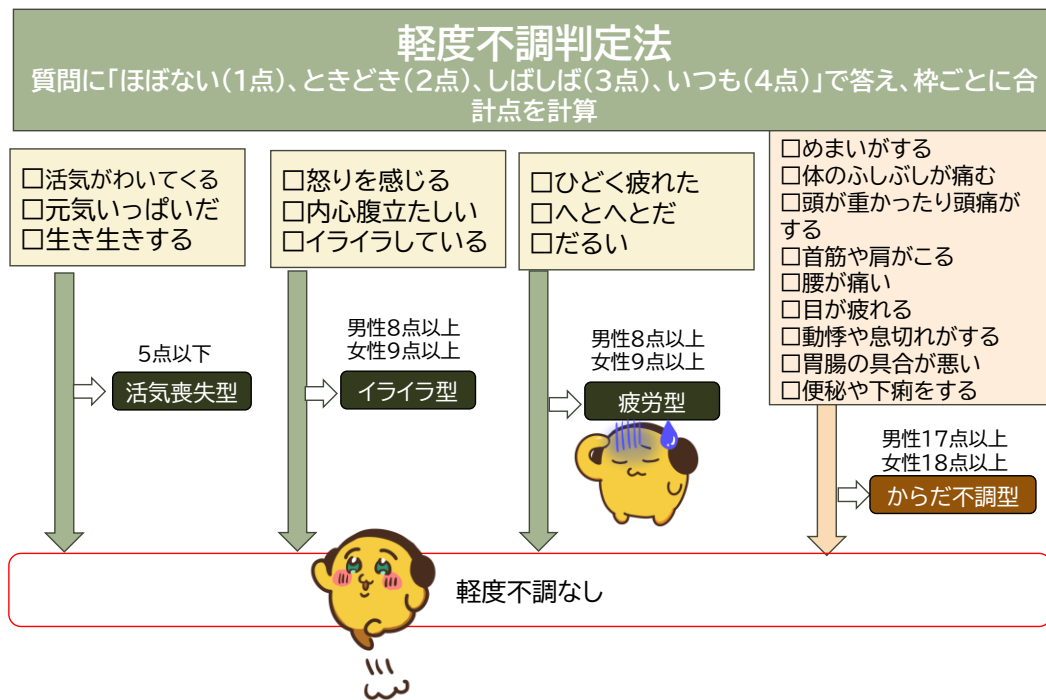


図 1. 質問紙法を使った軽度不調の評価フロー

本健康調査データを解析することで、軽度不調を感じる人はそうでない人に比べ、17 の栄養成分（ビタミン A、β-カロテン、β-クリプトキサンチン、ビタミン B1、ビタミン B6、ビオチン、パントテン酸、ナイアシン、葉酸、カリウム、マグネシウム、鉄、リン、亜鉛、銅、不溶性食物繊維、食物繊維）の摂取が少ないことが明らかになった。特に、からだ不調型では、β-クリプトキサンチン、葉酸、食物繊維、ナイアシン、ビタミン B6、ビオチン、マグネシウム、ビタミン A が著しく摂取量が少なかった (Kagami-Katsuyama et al., 2023)。そのため、これらを軽度不調関連栄養成分とし、これら 17 栄養成分のうち、5 成分以上で必要量を含有する食品を G-Plus 食品とした。G-Plus 食品は、一般社団法人セルフケアフード協議会独自の認証スキームによる民間認証食品である。同法人の「統合健康栄養食品委員会」が定義した基準に従い作成された認証スキームにより、第三者認証機関が認証を行う。認証された製品には「ジープラス (G-plus) マーク」が表示される。保健効能成分や機能性関与成分により、特定の症状に対する効能や機能を持つ「特定保健用食品」や「機能性表示食品」とは異なり、栄養バランスに考慮するとともに、健康を維持することを目指している。

以前のプロジェクト研究で、科学的エビデンスの検証を行った農産物等を組み合わせて、機能性弁当のレシピを構成し、内臓脂肪面積が高め (100cm² 以上) の被験者 159 人による、機能性農産物を使用した弁当のメタボリックシンドローム改善の有効性 (複合食品の有効性) を検証した。被験食品は、機能性農産物を使用した「おかず」(カロテノイド類が多く含まれている)、「茶」(高カテキン「べにふうき」緑茶、メチル化カテキン等のポリフェノール類が多く含まれている) 及び「米飯」(50%もち性大麦「キラリモチ」及び玄米、β-グルカンなどの食物繊維が多く含まれている) であり、4 群に無作為に割り付け、12 週間、平日の昼食時のみ喫食してもらった。全ての弁当のエネルギーは約 600~700 kcal、タンパク質は約 28 g、脂質は 19 g、炭水化物は約 100 g、塩分 2.3 g 以下、機能性成分として、ポリフェノール 0.8g (茶カテキン 0.6g)、食物繊維 10.4 g (β-グルカン 2g)、カロテノイド 15 mg

であった。弁当を 80 %以上喫食した 137 人について統計解析をすると、この介入試験に参加することによって、内臓脂肪面積が試験前と比べて、有意に 9.2 cm² 減少した。内臓脂肪面積を減少させる効果の高い食品は、機能性米飯(50 %もち性大麦「キラリモチ」混合白飯)であり、女性では平均 14.9 cm² 減少した。このことから、食生活全体の変化と機能性農産物を使用した弁当(NARO Style[®] 弁当)の連続摂取により、内臓脂肪面積の低減等が期待されることが明らかになった(山本(前田)万里ほか、2017)。食品を組み合わせた弁当(主食、主菜、副菜、嗜好飲料の組み合わせ)にして、疾病予防に役立てるという考え方はまさに、健康に良い食の提案につながる取り組みと考えられる。

これをさらに改良して、軽度不調関連栄養成分(不溶性食物繊維、β-クリプトキサンチン、葉酸、ビタミン B6、パントテン酸、ビオチン、マグネシウム、カリウム等)を必要量含有した NARO Style[®] PLUS 弁当を設計した。これを 30 歳以上の就労者 100 人に 8 週間、平日昼食時に喫食してもらったところ、60 歳未満の就労者で、喫食していなかった時と比較して午後の仕事の主観的達成感、午後のイライラ感、午後の眠気が有意に改善した(Kawai et al.,2024)。この結果を踏まえて、NARO Style[®] PLUS 弁当のいくつかは G-Plus 食品として認証、販売された。

また、軽度不調を緩和する農産物探索のため、有色馬鈴薯の継続摂取試験を実施した。45mg のアントシアニン(ペタニン)を含有する有色馬鈴薯「シャドークイーン」を 8 週間喫食すると、アントシアニンを含まない白色馬鈴薯「はるか」喫食に比べ、精神的ストレス反応、イライラ感、抑うつ感が有意に緩和した(Maeda-Yamamoto et al.,2022)。このことから馬鈴薯アントシアニンは軽度不調緩和に役立つことが期待された。

健康な食をデザインするためには、2つの情報、①ヒト個人の情報(健康状態、遺伝子、マイクロバイオーム、嗜好性、アレルギー等)、②食材情報(栄養成分、機能性成分、アレルギー、味、香り、食感、賞味期限、調理方法等)が必要である。これらの情報を収集、統合、解析を行うことで、健康に良い食を設計することが可能となる。SIP3「豊かな食が提供される持続可能なフードチェーンの構築」のうち、「国産大豆等を利用した豊かな食解析システムの開発」では、観察研究のデータを使い、個人の体調、習慣、嗜好に応じた食事を設計するための「豊かな食解析システム」を開発中である。個人の性別、年齢、身長、体重、目標とする体調、直近 2 食以上の食事内容を入力すると、不足している栄養素や機能性成分の含有量、摂取すべき食材が優先順位をもって提案されるシステムとなっている。将来的には、このように個々人に適した食のレコメンドサービスが簡単に利用出来る状況になり、あまり食に関心のない消費者でも栄養バランスの整った食事を無理なく選択できるような環境を作り出していくことが重要であると考えている。

表 1 機能性表示農産物の実例

農産物	機能性関与成分／1日摂取目安量	表示される機能性
みかん・柿・ぶどう	β -クリプトキサンチン／3mg	骨の健康の維持
パイナップル	グリコシルセラミド／1.2mg	肌の保湿力(バリア機能)を高める機能
リンゴ	プロシアニジン／110mg	内臓脂肪を低下させる機能
ビルベリー	アントシアニン／43.2mg	一時的に低下しがちな目のうおい感の維持や目の焦点を合わせやすくすることによって、目の疲労感の緩和に役立つ
マルベリー	γ -アミノ酪酸(GABA)／20mg	高めの血圧を低下させる機能
メロン	GABA／100mg	睡眠の質(眠りの深さ、すっきりとした目覚め)の向上に役立つ機能
レモン	クエン酸／1000mg	日常生活における事務作業や軽い運動後の一時的な疲労感を軽減する機能
トマト	リコピン／22mg	血中LDLコレステロールを低下させる機能
トマト	GABA／28mg	仕事や勉強による一時的な精神的ストレスを緩和する機能
トマト	クエン酸／1000mg	日常生活における事務作業や軽い運動後の一時的な疲労感を軽減する機能
ナス	コリンエステル／2.3mg	血圧が高めの方の血圧(拡張期血圧)を改善する機能
へちま	GABA／12.4mg	血圧が高めの方の血圧を下げる機能
にんにく	イヌリン／5000mg	善玉菌であるビフィズス菌や乳酸菌を増やすことでおなかの調子を整える機能
唐辛子	ルテオリン／5mg	食後の血糖値の上昇を抑える機能
パプリカ	キサントフィル／9mg	紫外線刺激から肌を保護するのを助ける機能、およびBMIが高めの方の体脂肪(皮下脂肪および総脂肪)の低減を助け、BMIを改善する機能
パプリカ、ケール、えのきだけ、ブロッコリー、キャベツ、モロヘイヤ	GABA／12.3mg	血圧が高めの方の血圧を下げる機能
ホウレンソウ、カボチャ、ケール	ルテイン／10mg	光による刺激から目を保護するとされる網膜(黄斑部)色素を増加させる機能
ブロッコリースプラウト	スルフォアファングルコシノレート／24mg	やや高めの血中肝機能酵素(ALT)値を低下させる機能
ブロッコリースプラウト	スルフォアファングルコシノレート／20mg	肌の乾燥が気になる方の肌の水分量を高める機能
大葉、エゴマ葉	ロスマリン酸／50mg	花粉やハウスダスト、ホコリなどによる目の不快感を軽減する機能
大豆もやし	イソフラボン／25-36mg	骨の成分維持をサポートする機能
玉ねぎ	ケルセチン／50mg	やる気を維持する機能
アボカド	オレイン酸／15.3g	コレステロールを低下させる機能
はなびらたけ	エルゴチオネイン／5mg	言語記憶力や単純注意力の維持
緑茶	メチル化カテキン／34mg	花粉やハウスダストによる目や鼻の不快感軽減
緑茶	茶カテキン／540mg	体脂肪を低下させる機能
大麦	β -グルカン／1.055g	食後血糖上昇をおだやかにする機能
カンパチ、ブリ、いわし、真鯛、鯨皮	DHA,EPA／860mg以上	中性脂肪を低下させる機能
サーモン	アンセリン／205mg	尿酸値を低下させる機能
鶏胸肉、鶏モモ肉、鶏ささみ、豚枝肉、ダチョウモモ肉	イミダゾールジペプチド／(1)200mg、(2)1000mg	(1) 一時的な疲労感を軽減させる機能
		(2) 記憶力を維持させる機能

引用文献

- Maeda-Yamamoto, M., 2021. The use of functional agricultural products in the functional food labeling system and its challenges after five years, Food Science and Technology Research, 27,169-179.
- 消費者庁. 2025a. 栄養機能食品について(2025 年 8 月 31 日確認).
<https://www.caa.go.jp/policies/policy/food_labeling/foods_with_nutrient_function_claims/>.
- 消費者庁. 2025b. 機能性表示食品について(2025 年 8 月 31 日確認).
<https://www.caa.go.jp/policies/policy/food_labeling/foods_with_function_claims/>
- Kagami-Katsuyama, H., Sato-Ueshima, M., Satoh, K. et al., The Relationship between Mental and Physical Minor Health Complaints and the Intake of Dietary Nutrients, Nutrients 2023, 15, 865.
- 山本(前田)万里、廣澤孝保、三原洋一他, 2017. 機能性農産物を使用した機能性弁当の内臓脂肪等メタボリックシンドロームへの影響を検証するヒト介入ランダム化プラセボ対照比較試験、日本食品科学工学会誌, 64(1), 23-33.
- Kawai, T., Kagami-Katsuyama, H., Satoh, K., 2024. Improvement of Subjective Accomplishment on workdays by dietary intervention in healthy adults: A single-arm Study, Nutrients, 16(10),1410.
- Maeda-Yamamoto, M., Honmou, O., Sasaki, M. et al., 2022. The Impact of Purple-Flesh Potato (*Solanum tuberosum* L.) cv. “Shadow Queen” on Minor Health Complaints in Healthy Adults: A Randomized, Double-Blind, Placebo-Controlled Study. Nutrients, 14, 2446.

謝辞

紹介した研究の一部は戦略的イノベーション推進事業(SIP2)「スマートバイオ産業・農業基盤技術(SIP2B)、SIP3「豊かな食が提供される持続可能なフードチェーンの構築」(研究推進法人:生研支援センター)(グラント番号:JPJ012287)の助成によって実施された。

樹木医学の視点から見た樹木の健全性

太田 祐子

日本大学生物資源科学部

1. はじめに

樹木の健全性を考える際、“生物学的な”健全性と樹木医などの技術者に必要とされる“実用的な”健全性を分けて考える必要がある。たとえば森林において、樹木にサルノコシカケ等の腐朽菌が発生し内部が腐朽していると推察されても、樹木は直ちに枯死したり倒れたりするわけではなく、仮に倒れたとしても、倒木は後継樹の更新を促進し、他の生物に餌資源や住处（生息場所）を提供することになる。一方、街路や公園など人間生活と密接に関わる場では、腐朽による物理的強度が低下が安全性を脅かすので、技術者はその危険性を重視して適切な管理上の判断が求められる。つまり、樹木の健全性は用途や環境によって評価軸が異なる。本稿では樹木医学の視点から見た樹木の健全性について考える。

2. 樹木とは

樹木とは、木本植物とも呼ばれる多年生の植物であり、一般には針葉樹(裸子植物)や広葉樹(被子植物双子葉類)を指すが、場合によってはタケ類(単子葉類)や木性シダなども含まれる。樹木の最大の特徴は長い生育期間にあり、数十年から数百年にわたって伸長成長と幹の肥大成長を続ける。幹を構成する組織の大部分が、死んだ細胞のみからなる組織(心材)であることも大きな特徴である。樹木は、部分的に枯死や損傷があっても、萌芽や不定芽によって再生する能力を持ち、二次代謝物質による防御機構や乾燥耐性の高さが、長寿の理由であろう。たとえば、日本で最も長寿といわれる屋久島の大王杉の樹齢は、木材の放射線年代測定から約 3,000 年とされている。中央部分が腐朽によってなくなっていることから正確な樹齢は

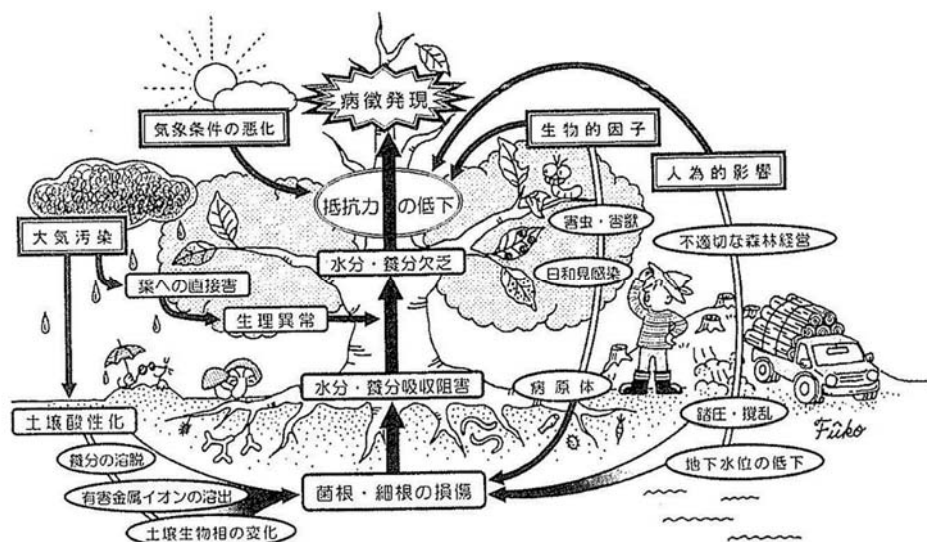
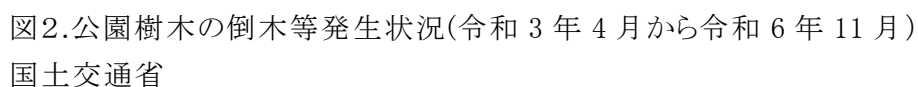


図1. 森林・樹木の健全性に関わる要因 (鈴木 2004).

注:この図が作成された当時はヨーロッパでの酸性雨被害がクローズアップされていたため、大気汚染の項目が強調されているが、その他の項目は現在と変わらない

近年、樹木の幹折れや大枝の落枝、倒木の被害のニュースが後を絶たない。2025 年には台風 10 号が屋久島に接近し、推定樹齢 3000 年とされる弥生杉が根元から約 1.5m の高さで折れた。2024 年 4 月におきた清水寺近くの産寧坂の樹齢 120 年とされるシダレザクラの倒木事故も記憶に新しい。国土交通省が令和 3 年 4 月から令和 6 年 11 月の約 2 年 8 か月間、全国の都市公園及び国・都道府県・自治体が管理する道路で倒木など調査を行った結果、都市公園では 931 件、道路では 801 件の樹木による事故が発生したという(図2)。

古い例ではあるが 1954 年に北海道を襲った洞爺丸台風後に風倒木の腐朽被害調査が行われている(石狩川源流原生林総合調査団編 1955)。この台風は針葉樹の優先する天然林に約 75 万ヘクタールもの被害をあたえ、特に石狩川源流域では森林蓄積量のほぼ半分を失



う激甚な被害であった。台風後に実施された調査では、風倒した根返り木の60%に根株腐朽、幹折木の100%に幹腐朽があったと報告されている。天然林においても、生きている樹木の内部が腐朽しているのは自然な現象であることが示された。

腐朽とは、微生物の作用によって材を構成する成分が分解され、材の強度が低下する現象である。腐朽が生じる部位によって、心材腐朽と辺材腐朽に分けられる。特に問題となるのは心材腐朽である。心材腐朽は、中心部の死んだ材からなる心材部分が腐朽する現象である。樹種にもよるが、心材部には多くの場合抗菌性物質が蓄積されているので腐朽しにくい、この心材部分を特異的に腐朽させる菌種が心材腐朽菌である。生きた樹木の心材腐朽の進行は早くはないが少しずつ確実に進行する。葉量、葉の大きさ、フェノロジーなどには全く影響が見られないことから腐朽の存在には気が付かない場合が多い。腐朽菌の子実体(きのこ)が生じてはじめて、外観から判断できる。樹木医学的に診断するときには、まずは簡易診断として幹の打音を確認したり、鋼棒を根株に貫入したりして腐朽程度を推定する。さらに必要な場合は、機器を使って根株や幹の腐朽や空洞大きさを詳細に調査し推定する。

一方辺材腐朽の場合は、幹の外側から腐朽が進むので比較的外観からわかりやすい。多くの場合、幹に溝が形成されるなどの外観上の変化がみられる。辺材腐朽の場合は、心材腐朽に比較して、速やかに子実体が発生する傾向にもある。

3. サクラの健全性

国土交通省の公園樹木の調査では、サクラ(サクラ類)の倒木数がコナラに次いで多い。サクラ類の多くは、第2次世界大戦後に各地に多数植栽された栽培品種である‘染井吉野’である。その倒木に関わるのは根株心材腐朽菌のベッコウタケと幹腐朽菌のコフキサルノコシカケによる腐朽である。公園や緑地に植栽された‘染井吉野’は、街路樹として植栽されたものよりも良い環境に植栽されているが、樹齢50年を超えると「良好」な健全度とされる個体が少なくなり、樹齢を重ねると健全度が低下する傾向が見られる(勝木ら 2018)。勝木ら(2018)によると樹齢100年を超えても「やや良好」な健全度を保っている個体も存在していることから、‘染井吉野’の生物としての寿命は100歳よりもまだ長いと考えられている。また、高齢木の主幹の多くで、回復不能な腐朽が確認されていることは、やがて衰弱・枯損することを意味しており、加齢にともなう大径化や腐朽を中心とした病虫害の蓄積が「健全度」に影響していると述べている。腐朽による物理的強度の低下が進むと、倒木の危険性が高まり、樹木医学的には健全とは言えなくなる。‘染井吉野’短命説は、こうした実用的な健全性の視点から導かれたものである。

3. コナラの健全性

国土交通省の公園樹木の調査では、コナラの被害件数が最も多い。被害件数の半数以上が倒木被害であり、57%がナラ枯れの被害を受けていたと報告されている。コナラの被害は関東に集中していることから、近年関東へ拡大してきた「なら枯れ」(正式にはナラ類カシ類萎凋病)の影響であることは間違いない。ナラ枯れは、子囊菌の一種(通称ナラ菌)をカシノナガキクイムシという5mm程度のキクイムシが媒介することで拡大する病害である。ナラ枯れは松枯れに次いで大きな被害を起こしている病害である。松枯れと異なり病原菌も媒介昆虫も土着であることから、流行には環境要因が関わっていると考えられている。媒介昆虫のキクイムシが辺材

に穿孔しナラ菌を持ち込むことで辺材中にナラ菌が蔓延し、最終的には辺材に通導障害が引き起こされ枯死する。個体全体が枯死する場合も多いが、辺材のダメージが限定的だと、生き残る個体もある。いずれの場合も枯死した辺材部には速やかに腐朽菌が侵入し腐朽が進行するため、通常 3 年から 5 年程度で材強度は大きく低下することになる。全体が枯死した個体だけでなく、生き残った個体でも材が腐朽してしまうので倒木あるいは幹折れが引き起こされるケースが多い。ナラ枯れのように、病害によって安全性が損なわれる場合、個体が生きていても樹木医学的に健全とは判断されない。

4. 樹木医学の視点での樹木の健全性

樹木の健全性とは、樹木が本来の生理機能を十分に発揮し、外的ストレスに対して抵抗力を持ち、長期的に安定して生育できる状態を指す(黒田ら 2020)。これは単に枯れていないという意味ではなく、構造的な安定性、生理的活力、病虫害への抵抗性などを総合的に評価した結果として判断される。

ここで重要なのは「健全性」が、生物としての視点か、人間社会における安全・管理の視点かによって意味が異なることである。腐朽が進行していても樹木の生理的活力が高ければ、生物学的には健全といえるかもしれない。しかし、倒木の危険性がある場合には、樹木医学的には健全とはいえない。

都市における樹木・森林の健全性とは、樹木が本来持つ多面的な機能を持続的に発揮できる状態であり、土壌、水、微生物、人はもちろん、周辺の動植物との相互作用を含む生態系全体のバランスが保たれていることが求められる。

近年は異常気象や外来種の影響も深刻化しており、樹木の健全性に大きな影響を与えている。樹木の「生物としての健全性」と「樹木医学的健全性」ができるだけ重なるよう、私たちの樹木との関わり方を再考することが求められている。

引用文献

Currey DR (1965) An ancient bristlecone pine stand in Eastern Nevada. *Ecology* 46:564-566

Gibbs JN (1968) Resin and the resistance of conifers to *Fomes annosus*. *Ann Bot* 32: 649-665.

石狩川源流原生林総合調査団編(1955)石狩川源流原生林総合調査. 旭川営林局

勝木俊雄・長谷川絵里・岩本宏二郎(2018)東日本における高齢の‘染井吉野’のサイズと健全度. *樹木医学研究* 22:115-116

国土交通省. 倒木等による事故に関する全国調査について.

<https://www.mlit.go.jp/toshi/park/content/001883629.pdf>(2025 年 9 月 1 日閲覧)

鈴木和夫編(2004)森林保護学. 朝倉書店

水産生物の健康とヒトとの関わり： 養殖業の健全で持続的な発展のために

佐野 元彦
東京海洋大学 学術研究院

1. はじめに

魚介藻類の養殖は、人類 100 億人時代に向けて食料の供給源として大いに期待される。水生動植物は基本的には水という環境がないと生きられない。魚介藻類の養殖は、ヒトの活動の影響を大きく受ける河川湖沼や海のごく沿岸部で行われている。安全な魚介藻類の提供で人類の健康に貢献しつつ、雇用創出としての産業自体も健全で持続的な発展が可能なが求められる。近年、ヒト、魚介藻類、環境の健康を統合的に管理していこうとするワンヘルスアプローチが論議・検討されている。非常に多くの要因が関連しているが、ここでは、養殖を中心としてそれらの水産生物とヒトとのいくつかの関わりについて述べてみたい。

2. 水産養殖について

水産庁発行の「水産白書」では、産業形態として「漁業」と「養殖業」に分けられており、2023 年の生産量は、全体で 383 万トン、その内訳では海面の「漁業」で 292 万トン、「養殖業」で 85 万トン、内水面の「漁業」で 2 万トン、「養殖業」で 3 万トンとなっている。「養殖業」では、魚類に代表される餌をやる「給餌養殖」と、ノリやカキなど二枚貝類に代表される餌をやらない「無給餌養殖」に大別される。生産量は 1984 年頃のおよそ 1,280 万トンをピークとし、「漁業」での生産の減少が著しい。生産額でみると、全体で 1 兆 6,853 億円、その内訳では海面の「漁業」で 9,534 億円、「養殖業」で 5,956 億円、内水面の「漁業」で 149 億円、「養殖業」で 1,213 億円となっている(令和 6 年度水産白書)。近年の「養殖」の生産量に占める割合は約 23%で、生産額では約 43%を占めており、つまり、養殖では付加価値の高いものを生産していることが分かる。特に海面養殖は、リアス式海岸や島影など波浪の影響を受けにくい内湾で行われている。このような地方や島嶼では、水産養殖業が重要な基幹産業となっているが、近年、魚価が安く、厳しい経営状態が続き、廃業する経営体も多い。漁業就業者は 2023 年(令和 5 年)では約 12 万人で平均年齢 57.1 歳となっており、20 年前の 2003 年(平成 15 年)の約半数で、一貫して減少傾向が続いている(令和 6 年度水産白書)。

世界的に見ると、近年、「漁業」(海面と内水面の合計)は 1980 年代以降ほぼ横ばいの傾向で 9,080 万トン、「養殖業」(海面と内水面の合計)は急進して 13,617 万トンとなっている(令和 6 年度水産白書)。養殖業の生産量を国別にみると、中国の生産が 7,828 万トンと世界の 6 割弱を占め、また、インドネシアの生産も急進しており、1,536 万トンと世界の 11%を占めている。魚種別に見ると、コイ・フナ類が 3,323 万トンで最も多く、全体の 24%を占め、次いで紅藻類が 2,019 万トン、褐藻類が 1,730 万トンとなっており、紅藻類の多くは、食品その他の工業で使用される増粘剤等となるカラギーナンの原料となっている。約 6 割が養殖された水産物であり、近年顕在化してきた海洋環境の



養殖施設 左:海面小割養殖筏(マダイ) 右:内水面流水式養殖池(ニジマス)

変化等により水産資源の漁獲が不安定な中、計画的で安定的に生産できる養殖業に対する期待は高く、動物性タンパク質など食料の供給源として「養殖業」がますます重要となってきた。さらに、魚介類はヒトの健康に有用な EPA や DHA などの多

価不飽和脂肪酸の供給源としても貴重である。

3. 水産養殖と養殖魚自体の健康（魚病）

給餌を行う魚類養殖では、海面ではブリ、マダイ、クロマグロなど、内水面ではウナギ、ニジマスなどのサケ科魚類、アユ、コイなど多様な魚種が養殖されている。海面の養殖場は区画漁業権などにより設置が制限されており、決められた養殖筏の中に魚を収容して利益を確保するためには、ある程度の尾数を収容しなければならず、このような高密度での養殖では、一旦、魚病、特に感染症が発生すると大きな被害につながる。2022 年の推定魚病被害額は、105 億円となっており、生産額に対する魚病被害額は約 2.5%で、近年では 100 億円前後の被害額が続いている（農林水産省「魚病被害の発生状況に関する情報」）。魚種別の魚病推定被害額を見ると、ブリ類では 49.2 億円、マダイでは 10.5 億円、ウナギでは 12.1 億円である。これらの被害を原因別にみると、細菌病が多く、ブリ類では α 溶血性レンサ球菌症が魚種全体の被害に対し 38.1%、ノカルジア症が 33.4%、マダイではエドワジエラ症が 69.1%、ウナギではエドワジエラ症（パラコロ病）が 36.4%を占めている。細菌病に対しては、抗菌剤が使用可能で、日本では比較的承認されて使用できる動物用医薬品としての水産用医薬品の種類は多く、2025 年現在、アンピシリン、塩酸オキシテトラサイクリン、エリスロマイシン、オキシリシン酸、サルファ剤、フロルフェニコールなど 13 製剤が市販されている（農林水産省「水産用医薬品について」（第 38 報））。寄生虫に対してもトリクロルホン、プラジカンテル、過酸化水素、フェバンテルやアルベンダゾールなどの駆虫薬が使用できる。ヒトの医薬品として重要であるニューキノロンやセファロスポリン、クラリスロマイシンなどの新しいマクロライド剤は水産用医薬品として認可されていない。養殖魚介類の医薬品の残留は、ヒトへの健康被害を与えかねない。そのため、食品安全委員会は各薬品の一日許容摂取量 (ADI) を設定し、消費者庁では食品の安全性が確保されるよう残留基準値 (MRL) を設定している。養殖生産物において水産用医薬品が残留しないように飼育魚類に投薬後、水揚げまでの休薬期間が設定されている。なお、以前使用されていたマラカイトグリーンやニトロフラン剤、クロラムフェニコールは、発がん性などが指摘され、現在、食用魚介類には使用してはならない 16 成分の中に含まれている。

抗菌剤の使用は耐性菌の出現を助長し、耐性菌の出現はヒトの健康も脅かしかねない。このようなワンヘルスの考えに基づいて、世界保健機関 WHO のグローバルプランが 2015 年に採択された。これを受けて、日本においても耐性菌出現に対するアクションプランが 2016 年に作成され、ワクチン等の開発によって予防にシフトするとともに、抗菌剤の使用は必要最小限にすることが求められている。国際獣疫事務局 WOA/H/OIE や国際連合食糧農業機関 FAO でも耐性菌出現を最小限にする論議・取組みが進められ、さらに各国でも対策が講じられてきている (Caputo ら、2022)。水産養殖動物では人魚共通伝染病がほとんどないことから、養殖魚で生じた耐性菌自体がヒトに直接感染して被害を与えるリスクは低いと考えられるが、環境中に放出・拡散した耐性菌や海底堆積物中などで耐性菌が出現し、耐性遺伝子が水平伝播する可能性もあり、リスク自体を最少にする努力は必要であろう。動物用医薬品として家畜に投与された場合に選択される薬剤耐性菌のリスクアセスメントが内閣府食品安全委員会によって行われてきている（食品安全委員会「薬剤耐性菌の食品健康影響評価に関する情報」）。養殖における耐性菌のリスクアセスメントは、ブリ類のマクロライド系抗菌性物質を例にトライアルが行われ、家畜動物における食品健康評価の評価指針が概ね適用できるとされたが、魚類養殖では、畜産動物と異なる飼育法や飼育環境における薬物動態、耐性菌の出現動態や耐性因子などをさらに明らかにしていく必要性が指摘された。なお、動物分野の耐性菌のモニタリングは、農林水産省動物医薬品検査所により行われている。

抗菌剤による治療からワクチンによる予防への動きは、日本においては 1988 年のアユのビブリオ病浸漬ワクチンに始まり、その後、ブリのレンサ球菌症の経口ワクチンと同注射ワクチンで本格化した。2025 年現在、多価ワクチンも含め 12 疾病に対するワクチンが市販されている（農林水産省「水産用医薬品について」（第 38 報））。これらは全て不活化ワクチンで、昨年度、農林水産省は DNA ワクチンおよびサブユニットワクチンの申請を受け付けるとし、細胞内寄生性細菌やウイルスの感染症に対するワクチン開発に可能性が広がった。いまだに弱毒生ワクチンは認可の対象となっていない。不活化ワクチンや DNA ワクチンの多くは今のところ魚体への注射が必要であり、ブリ

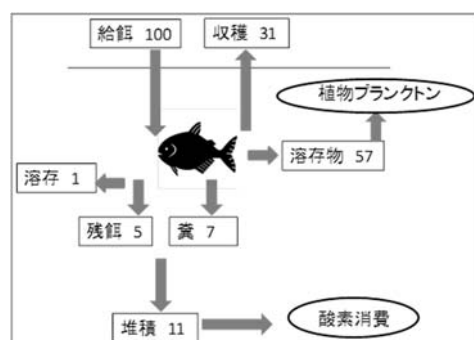
やマダイなどの魚価の高い養殖魚種ではその労働コストが見合うものの、魚価の安い淡水魚種などではニジマスとアユのビブリオ病の浸漬ワクチンだけである。魚価の安い魚種に浸漬や経口で簡便・安価に投与できなければならない。この点では、畜産で多く使われている生ワクチンに大きなメリットがあり、海外ではいくつかの生ワクチンが実用化されている。環境への安全性が確保できれば、日本の養殖でもその実用化が大いに期待される。

4. 給餌養殖と環境とのかかわり

魚類の給餌養殖では、イワシ類などの小魚を魚粉と魚油とし、これを給与することで育成される。魚で魚を育てるという付加の付け替えが行われてきた。日本の養殖の歴史の初期では、魚のミンチが給与され、餌の海水中への逸散によって海の富栄養化が深刻となった。次いでミンチを練り餌状にしたモイストペレットが主流となり、さらには、ペレット状に整形された配合飼料が普及し、環境への付加はかなり軽減された。しかし、物質のフローをみると、魚の育成に利用されるのは3割程度となっており、環境への負荷をさらに軽減する必要がある。また、近年では、植物タンパク質や畜産の廃棄タンパク質などの利用により配合飼料中の魚粉含量をかなり少なくすることに成功している。植物タンパク質は含有するリンが魚粉に比べて少ないため、漁場環境への負荷が軽減される。養殖魚介類が栄養学的にヒトの健康に良いとして、世界中で魚介類の消費が増え、養殖生産量も右肩上がりに増えている中で、飼料原料用の魚粉・魚油の高騰を招き、日本が買い負けによって養殖生産ができなくなる事態は現実となりつつある。

給餌養殖では、図に示したように、給餌した全てのエネルギーが魚に利用されるわけではなく、海中への逸散・溶解に加え、残餌や糞、尿など排泄物が出てくる。養殖筏の下海底には、残餌や糞などの堆積物が発生し、還元層が形成されてヘドロとなっていく。堆積物の分解に酸素が消費されると貧酸素水塊の形成にもつながるなど、養殖漁場の悪化をもたらす。特に給餌養殖が波あたりの少ない、比較的閉鎖的な内湾で行われるため、自家汚染の影響は大きく、環境が持つ自然浄化能力を超えて使用している自家汚染の進んだ疲弊漁場では、魚病などの増加も問題となる。これを防止するため、持続的養殖生産確保法では、漁場環境の改善を求めており、多くの養殖漁場で改善計画が策定されている。また、投入される半分以上の窒素やリンが環境中に放出され、環境の富栄養化をもたらす。これは例えば、プランクトンの異常繁殖による赤潮の発生などにも関連する。プランクトンの種類や赤潮の規模は様々で、養殖生け簀の中の魚を酸欠や生理的な障害により死亡させるプランクトンや人の健康被害を生じさせる毒性物質を産生し、その物質を蓄積した二枚貝類を喫食したヒトに健康被害を生じさせるプランクトンもある。河川湖沼・海洋は、他の産業活動でも利用されることに加え、ヒトがリクレーションを楽しんだり、こころの安らぎを求めたりするため、赤潮などの異常がない健全な水環境を維持することは、非常に重要であり、自然浄化能力を把握し、養殖などの生産活動に適切に利用することが求められる。

近年顕著となってきた地球温暖化による異常気象は、水生生物の生態系を大きく変化させており、養殖業にも大きな影響を与えている。高水温では、酸欠になりやすく十分な給餌ができないことや、食欲自体が減退したり、魚の育成に大きく影響している。また、小雨で河床が見えてしまうこともある一方で、降れば土砂降りで養殖池があふれて魚が逃げる、養殖池がといった被害も起こっている。環境が大きく変化する中で、一つの方向性として閉鎖循環システム(Recirculating Aquaculture System: RAS)による養殖が世界的にも注目されている。工場のような施設で、水温や



養殖由来有機物のフロー(マダイ・EP 給餌の事例) 数字は窒素ベース(三重県(1995):阿保(2008)を改編)

溶存酸素濃度などを機械で制御し、飼育排水を高度な水処理技術で再生し、糞などの廃棄物を回収して育成する。電気代などのコストが高く、現実には難しいと考えられてきていたが、水処理技術に加え、RAS に特化した配合飼料の開発や魚の育種などの技術が相まって、激変する環境や環境中の病原体などに影響されない生産システムとして確立しつつある。サケやニジマスを対象としたかなり大規模なRAS が国内に建設され、いままではほとんどニジマスの生産のなかった地域が日本の最大生

産量になるなど養殖生産の構造に大きな影響を及ぼしている。養殖＝河川・湖沼・海洋という場から産業がある程度解放され、環境への負荷の少ない養殖生産を可能にするものとして今後の発展が大いに期待される。

5. 無給餌養殖と環境とのかかわり

ノリでは、ごく沿岸で、ひびを立てて、あるいはそのまま網を広げて養殖する。カキや真珠貝などの二枚貝では海面から垂らしたロープに貝を固着させ、垂下した状態で飼育する。これらの無給餌養殖では、栄養塩を同化することから、環境保全に繋がるが、本来海域を通過していくプランクトンが、二枚貝に摂食されることで糞として海底に堆積するため、海底の浚渫等の漁場改善を行う必要がある。これらの無給餌養殖では、環境中の餌料プランクトンや栄養塩に依存することになり、給餌養殖よりもより環境への依存度が高くなる。

水質では、環境省が公共用水域の水質汚濁に係る環境上の条件につき人の健康を保護し及び生活環境を保全するうえで維持することが望ましい基準を水質汚濁に係る環境基準を定めている（環境省「水質汚濁に係る環境基準」）。（公社）日本水産資源保護協会では、水産としての視点として、水生生物の生息環境として維持することがのぞましい基準として河川、湖沼と海域に分けて取りまとめている（日本水産資源保護協会「水産用水基準」）。養殖生物の中で、特にノリは栄養塩類に富んだ水が適しており、魚類等とは異なる基準を設けている。近年、陸から負荷される栄養塩が減少し、冬場のノリ養殖で栄養不足となり、生育不足や色落ちが問題となっている。水産用水基準では、全窒素 0.2 mg/L 以下・全リン 0.02 mg/L 以下の海域は、閉鎖性内湾では生物生産性の低い海域とされる。

ノリやカキなどの給餌しない水産生物の養殖では、栄養塩類、それによって増える微小な藻類が栄養であり、これも海域の環境に依存している。近年、温暖化の影響でノリの生育に適した水温時期が短くなって来ていることに加え、冬のノリ養殖時期に栄養塩類が不足し、ノリの色が落ちるといった現象が各地で見られている。栄養塩不足は深刻であり、陸域からの積極的な栄養塩の流入や海底の攪拌効果など意図したダム放水、下水処理の緩和、海底の耕耘や施肥など様々な取組が行われている。養殖生物だけでなく、海域の生態系が正常に保たれることにより、一次生産者の植物プランクトンの増加から食物連鎖を通じて二枚貝や魚類等の漁獲が増加するなどの効果があるといわれる。以前、海には、豊かな森から河川を通じて、自然の恵み、栄養塩類が流入していた。この生態系を通じて、美味しいノリやカキが生産されてきた。宮城県気仙沼では、赤潮など環境の悪化から豊かな海と美味しいカキを取り戻そうと、カキ養殖業者が率先して植林運動を行った。その他の地域でも海を守るための植林運動が行われている。古来、豊かな海を守るために近郊の森林が保護されてきた。このような森林は魚付き林とよばれる。大きな気候変動など種々の影響があると考えられるが、陸・川・海・空は繋がった自然であり、陸の森林を守ることにより砂漠化しない海の生態系の維持・回復に繋がるだろう。

人の健康と直接関連するものとして、養殖マガキのノロウイルスの汚染が挙げられる。ノロウイルスは、人の病原体で、人の小腸でしか増えないが、下水処理場などをすり抜けたウイルスが海域に到達し、養殖カキなどに蓄積する。カキの中ではウイルスは増えない。ウイルスが蓄積したカキを食べた人が感染性胃腸炎を起こす。ごく沿岸の栄養塩の多くプランクトンや有機物が豊かな海域こそ、美味しいカキが養殖できるが、これがマガキのノロウイルス汚染のリスクを高めている。

6. おわりに

養殖業は、その実施の場としての環境である生態系に依存しており、激甚化する地球温暖化の影響も大きく受ける。生態系が健全でこそ成り立つ産業であるため、その保全をきちんと進めていく必要がある。一方で、地球温暖化の影響を受けにくく、環境から独立する養殖実施体制の構築も必要であろう。養殖水産生物、生態系とヒト、それぞれの健康とそのつながりを意識し、持続的な産業の進展が求められる。そのことによって、地方や島嶼地域での基幹産業としての養殖業が発展し、地域経済が豊かになっていくことを期待したい。

引用文献

水産庁 令和 6 年度水産白書 https://www.jfa.maff.go.jp/j/kikaku/wpaper/R6/250606_1.html

農林水産省 魚病被害の発生状況に関する情報

https://www.maff.go.jp/j/syouan/suisan/suisan_yobo/disease/gyobyou_higai_jyoukyou.html

農林水産省「水産用医薬品について」(第 38 報)

https://www.maff.go.jp/j/syouan/suisan/suisan_yobo/fishmed.html

食品安全委員会「薬剤耐性菌の食品健康影響評価に関する情報」

https://www.fsc.go.jp/senmon/sonota/amr_wg/amr_info.html

Caputo, A. et al., 2023: Antimicrobial resistance in aquaculture: A global analysis of literature and national action plans. *Rev Aquaculture*, 15: 568-578. <https://doi.org/10.1111/raq.12741>

阿保勝之 2008: 数値シミュレーションによる魚類養殖場の環境評価. 農林水産技術 研究ジャーナル, 31, 15-19.

三重県 1995: 魚類養殖対策調査事業報告書, 61-91.

環境省 「水質汚濁に係る環境基準」 <https://www.env.go.jp/kijun/mizu.html>

公益社団法人日本水産資源保護協会 2018: 第 8 版 水産用水基準年

気候変動・食料危機と土壌の健康

藤井 一至

福島国際研究教育機構土壌ホメオスタシス研究ユニット

1. 土壌の健康の定義と意義

かつて土壌肥料学は農芸化学の中心にあった。農芸化学が支える食料、エネルギーなどのバイオエコノミーは生態系の再生可能資源を利用するが、その基盤には土壌がある。ところが、肝心の土壌の発達は極めて緩慢であり（1 cm 厚の土壌生成に 100～1000 年かかる）、人間の時間スケールでは非再生可能資源である。現在、土壌生成速度を消耗速度が上回る土壌劣化は陸地面積の 3 割にも及ぶとされている。バイオエコノミーの持続性は、気候変動や生物多様性の低下とともに土壌劣化によって危機に瀕している（Science 20 Brazil committee, 2024）。これが土壌の健康への意識の高まりを生んでいる。人間の健康が（単なる病気・虚弱の欠如ではない）社会的、経済的、精神的な充足（幸福）を指すのに対して、土壌の健康は厳密性を求める科学的な用語というよりはメタファーである。FAO（国際連合食糧農業機関）では、2020 年に土壌の健康（Soil Health）を「土壌が陸上生態系の生産性、多様性、環境サービスを維持する能力」と定義している。土壌の持つ化学的、物理的、生物学的な面を包括している点では土壌肥沃度や地力、土壌の質（Soil quality）という既存の用語と似ているが、違いは農地の生産性（収穫量）や環境汚染に限らず、消費者を含む人間生活や地球規模の物質循環、生態系との関わり、生物多様性や気候変動といった農地以外、生産性以外の視点を含んでいる点にある。気候変動や食料危機などの問題に対峙する上で、しばしば細分化しがちな土壌科学諸分野を「土壌の健康」として包括的に捉えることで、幅広いステークホルダー（農地や森林の生産者から消費者、政策立案者まで）間でのコミュニケーションを促進できるツールとなることが期待されている。文献検索エンジン（英語）上の「土壌の健康（Soil health）」という用語の使用は 2000 年代で急増するために新しい概念・用語と誤解されがちだが、概念自体は既に 20 世紀初頭に登場している。それは土壌に対して近代科学のメスが入り（土壌・肥料学の勃興）、同時に土壌の劣化が認識されるようになった時代と対応している。土壌の健康は人間の健康と同じく、それが失われてはじめてその輪郭が認識される。しかし、SDGs でもプラネタリーバウンダリーでも直接的に土壌は改善目標となっていない。生産性や土壌の肥沃度を評価するパラメーター（例えば土壌窒素や pH）を特定するこれまでのアプローチに対し、土壌の健康では全体論的なアプローチが求められる。それゆえに「土壌の健康」は曖昧さや個々人の価値判断を排除できない問題を抱える一方で、定量困難であったがゆえに軽視されてきた全プロセスを捉えられるのが強みとなる。線形だけでなく非線形の関係性を予測する機械学習のように、土壌自体の持つ相互作用・進化する機能を模倣・強化するイノベーションの契機となることが期待される。生態系の多面的機能として埋没してきた土壌の価値（＝機能喪失のリスク）を再発見・再評価するチャンスでもある。土壌の健康を駆動する理論と課題について事例を紹介しながら整理したい。

2. 土壌の健康の変化と多様性

土壌の健康（ここでは soil health に限らず、health of soils など含む。また日本語、

英語に限らない) という言葉が使われる新旧の思想は、大きく以下の 6 つに分類できる。①資本主義の発展に伴う物質代謝の亀裂への問題意識、②土壤劣化(土壤の圧密、侵食、酸性化、土壤有機物の損失)への問題意識、③細分化、物理化学偏重への問題視、④近代科学・テクノロジー(化学肥料、農薬、遺伝子編集微生物資材)への不信感、⑤土壤の健康の達成による植物の健康、家畜の健康、人間の健康の実現への期待、⑥土壤の安全保障である。①の資本主義批判については、リービッヒの『有機化学の生理学および病理学への応用』(Liebig, 1842)がある。植物は主に無機栄養を土壤から吸収・利用する事実をもとに、農地からの収穫物の持ち去りが土壤養分の減耗を招き、ひいては人間の健康(兵士の体格)にすら影響することを指摘している。この関係にヒントを得て、マルクスは『資本論』(Marx, 1867)で資本主義の問題点を指摘している。②の土壤劣化については、化学肥料による堆肥の代替可能性を示したリービッヒ以降、化学肥料の増加に対して家畜糞あるいは人糞堆肥の施用が減少した。キングは『東アジア四千年の永続農業』(King, 1911)は近代化による土壤劣化と、日本などの人糞尿リサイクルの前時代的・停滞的な営みの持続性を指摘している。特に硫安の使用増加による土壤酸性化はドイツ、日本で深刻であった。国内の食料安全保障のためのプロパガンダ「血と土」を提唱したナチスドイツの食糧農業大臣ダレは「土壤の健康を保て」と主張し、土壤劣化と食糧難を東方侵略の動機としている。③の生物学の軽視については顕微鏡や遺伝子解析技術が未発達だった点が挙げられる(現在とは逆)。土壤動物の減少に基づく「土壤が死んでいる」という指摘(Harshberger, 1911)や菌根菌の活性低下の指摘(Howard, 1945)がある。ハワードを一つのルーツに持つ有機農業(IFOAM, 2008)や人獣共通感染症から視野を拡張したワンヘルス(OHHLEP, 2021)においてもそれぞれ、「production system that sustains the health of soils, ecosystems, and people」、 「土壤、植物、動物、人、そして環境の健康は一つであり、不可分である」という理念を掲げている。④の近代科学・テクノロジーへの不信感は、農薬の生物濃縮を指摘したカーソンの『沈黙の春』(Carson, 1962)に始まり、ベトナム戦争の枯葉剤散布への批判へと展開した。近年、米国では遺伝子編集細菌(窒素固定微生物資材)も利用されており、これによって化学肥料の削減による土壤・地下水への環境負荷軽減が期待されているが、一部には忌避感もあるだろう。土壤の健康が立場によって異なる事例だ。⑤の人間の健康の実現への期待については、科学的根拠は不十分だが、石塚左玄の食養論、桜沢如一のマクロビオティックでは、その土地や旬のものを食べるのが体に良いとする「身土不二(しんどふじ)」の理念(仏教の身土不二(しんどふに)に由来するが、意味は異なる)がある。福岡正信の自然栽培も含め、農業の工業化、生活習慣病を問題視する先進国で評価が高い。土壤微生物がヒトの腸内にも一部取り込まれ多様性を高めるという仮説をもとに、有機農業や自然栽培による土壤の健康を求める期待もある(food faddism のリスクもある)。⑥の安全保障は、より地球規模、世代間で生じる気候変動、食料の安定供給、生物多様性維持に対する取り組みであり、土壤の安全保障(Soil security)と接続している。不耕起栽培による土壤侵食抑制、4%イニシアティブなどの炭素貯留に向けた取り組み(Lal, 2004)を軸とし、バイオエコノミー関連企業のリジェネラティブ(環境再生型)農業による土壤再生への期待、サプライチェーンの安定化を目指している。良心(環境倫理)や信念だけではなく経済を駆動力としている点で資本主義社会においても期待できるが、グリーン・ウォッシュにすぎないと

いう批判、持続的集約化（土壌の健康よりも生産性を重視するアプローチ）を求める途上国との意識のずれがある。これら 6 つの思想は独立するものではなく、時にオーバーラップしながら変化し、同じ「土壌の健康」という言葉を使いながらステークホルダー間で意味していることが異なるという土壌の健康の曖昧さ、リスクもまた示している。「土壌の健康」の指標化に向けて処理後/初期値の比（例えば、不耕起栽培後の土壌炭素蓄積量/開始前の土壌炭素蓄積量）などの提案はあるが、普遍的に受け入れられているベンチマークはない。土壌炭素を指標とした場合、炭素クレジットによって土壌の健康に価値が生まれるが、炭素の相場次第では陳腐化するリスクもある。「土壌の健康」をただ土壌科学の解像度を落とすツールとするのではなく、科学を発展する契機としたい。

3. 土壌ホメオスタシスの機構解明

森林・農地生態系の持続的な物質循環には、土壌の養分収支において見た目の「ホメオスタシス（恒常性）」を駆動するカギとなるプロセスが存在すると考えられる。養分収支が釣り合う場合、微生物による分解活動による養分供給と植物による養分吸収の時期が同調し、それらの量がおおよそ一致する。持続性を欠く農地では、微生物による分解活動による養分供給と植物による養分吸収の時期と量にミスマッチが起こり、これが土壌からの正味の養分のロス（揮発・流出）を招く。インドネシア東カリマンタン州のフタバガキ林を事例とすると、樹冠で光合成によって生産された糖の一部は根に転流され、その一部が外生菌根菌に配分される。菌根からの有機酸（特にクエン酸やリンゴ酸）の放出量は一次生産量に依存するが、放出割合は酸性土壌で高まる。有機酸の中でも特にリンゴ酸は、岩石風化、アルミニウムイオンの解毒、リン酸の溶解に働くだけでなく、白色腐朽菌のリグニン分解酵素（マンガンペルオキシダーゼ）の反応を媒介する Mn^{3+} の安定化（キレート化）にも働く。これにより、リグニンの酸化もまた酸性環境で高まり、溶存有機物の生産も高まる（Fujii et al., 2024）。溶存有機物は粘土に吸着しやすいために系外に流亡しにくく、溶存有機窒素・リンなどの栄養分のロスも少ない。外生菌根菌からのリンゴ酸放出と白色腐朽菌のリグニン分解が物質循環の恒常性のカギとなっている。フタバガキ林は 4 年に一度程度しか開花・結実しないものの、エルニーニョ（干ばつ）による土壌微生物バイオマスの減少によって放出された栄養分を樹木根が吸収することでリンに乏しい強風化土壌でも果実の再生産が可能になる（Fujii, 2024）。作物にとって過酷な強風化・酸性土壌であっても、フタバガキにとっては健康な土壌といえる。一方、フタバガキ林を切り拓いた畑地では有機物分解が加速し、硝酸化成によって発生した硝酸とカルシウムなどが溶脱することで土壌酸性化リスクが高まる。作物バイオマスが雨季直後には小さく、養分吸収が不十分であるためだ。土壌有機物の減耗时に、カルボキシ基のプロトネーション化（酸の消費）で酸性化を緩和できるかがカギとなる。これは一観測事例にすぎないが、アグロフォレストリーや焼畑農業の休閑システムで実現しうるプロセスである。有機物量の多い土（ただし、泥炭土は除く）を健康とする認識は、畑地の多くの場合で当てはまる。物質循環の持続性を示す国内の畑地土壌の多くは、黒ボク土のように過去（黒ボク土であれば、縄文時代）からの土壌有機物、栄養分の蓄積があることが多い。同じようでも有機栽培に持続性を求める場合、過剰施用、堆肥供給までの環境負荷（輸入飼料、アンモニア揮

散)の問題を克服する必要がある。私たちは「土壌の健康」にどうしても単純な指標値を求めてしまいがちだが、一時的な微生物活性や収穫量を指標化すると、持続性に関わる時空間的なばらつきを評価しきれない限界もある。生産性、多様性、環境サービスを維持する能力として持続性を加えた強みを活かし、システム全体として考える必要がある。

4. 水田土壌のホメオスタシスを維持するには

土壌の健康に関しては、それが失われやすい畑地での研究（不耕起栽培や緑肥など）が先行しており、水田のように耕うんを伴うアジアの農業への理解が乏しいケースが少なくない。数千年にわたって継続されている我が国の水田稲作では、ケルネル、古在らの駒場（通称、ケルネル田んぼ）での国内初の三要素（窒素、リン・カリウム）試験（一つずつ肥料を抜いて効果を調べる栽培試験）によって、湛水下の水稲栽培では窒素が米生産を制限し、陸稲栽培ではリンが制限要因となることが解明された。湛水田では酸素の供給が制限され、酸化鉄が還元溶解することで酸化鉄に吸着していたリンが放出される。このため、リン肥料無施用でも数十年にわたって 6 割程度の収穫が得られる点は水田稲作の特長といえる。上流部から風化・侵食した物質が灌漑を通して運搬される「地質学的施肥作用」がカギとなる。灌漑水を通して供給されるケイ素は稲の高温や病虫害への抵抗性を高める。灌漑水のカルシウムは酸性土壌を中和する。懸濁物質は年間数十キロの窒素を供給する。近年、総延長 40 万 km に及ぶ水田用水路の維持にかかるコスト、過疎化、災害（地震、重金属・放射性物質汚染）、湛水稻作による温室効果ガス（メタン）排出の抑制、大規模化による低コスト化（労働ピークの分散）などを背景として、従来の育苗・移植だけではなく水田稲作として乾田直播・節水栽培が始まっている。土壌肥沃度の低下、畑地雑草の増加を防ぐ湛水環境が一時的あるいはなくなる栽培技術であり、土壌の健康に配慮した、持続的な節水栽培技術の確立が急がれる。還元条件で期待できるリン溶解、灌漑水由来カルシウムによる酸性中和、ケイ素供給によるイネの抵抗性強化、微生物群集の入れ替わりによる施肥効果・連作障害回避といった湛水田のメリットを失うことが懸念される。これらの機能を代替する資材の施用も激減している（例えば、堆肥施用は過去 60 年で 5 分の一に減少。ケイ酸資材の施用は過去 60 年で 10 分の一に減少。）。既存の水田土壌学、生態学の視点から新しいチャレンジへの批判はあるが、現場を担う稲作農家が減少すれば（すでに過去 60 年で 10 分の一）、稲作文化そのものの景観喪失（耕作放棄地の増加）、水田によって維持されてきた湿地生態系の生物多様性喪失のリスクが高まる。持続的な営農のオプションとして乾田直播・節水型稲作を組み込み、逆に湛水稻作にこれまで当然視されてきた経済価値を与える基盤となる研究が必要となる。

5. 土壌の健康の課題

近年の土壌の健康への期待の高まりの背景には、気候変動、食料安全保障に対する危機感の高まりがある。農家が減少し、都市人口が増加する中で、健康は多くの人々の共通の関心事であり、気候変動や食料問題への取り組みで共感を得やすいコミュニケーションツールとなることが期待できる。しかし、「健康」というメタファーの利点は、2つの側面で短所にもなる。一つは政治利用であり、もう一つは産業利用である。土壌の健康と民族の食料安全保障が Lebensraum の思想背景となった戦時中のドイツの事

例を教訓にし、あくまで国際的な取り組みにつなげることが重要である。土壌の健全性と人間の健康の理解が限られているにもかかわらず、メタファーは複雑で未解決の関係を単純化するリスクがある。土壌の健康が人間の健康の基盤となるというだけでなく、実際に健康につながるという短絡的な誤解を防ぐための科学的根拠の積み重ねもまた土壌学の責任となる。

Fujii K (2024) Plant strategy of root system architecture and exudates for acquiring soil nutrients. *Ecol. Res.*, **39**, 623-633.

Fujii K, Hayakawa C, Sukartiningsih (2024) Drought-induced turnover of soil microbial biomass increases nutrient subsidies for the reproduction of tropical forest. *Biogeochemistry*, **167**, 695-703.

藤井一至 (2024) 持続的農業と土壌の健康の実現に向けた土壌生成・劣化メカニズムの解明. *土と微生物*, **78**, 61-67.

Lal R (2004) Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, **304**, 1623-1627.

Science 20 Brazil committee (2024) Bioeconomy: Shaping the world toward a sustainable planet Task Force 2 - S20 Brasil 2024.

Vanlauwe B, Dobermann A (2020) Sustainable intensification of agriculture in sub-Saharan Africa: first things first. *Front. Agric. Sci. Eng.*, **7**, 376-382.

食と生態系の健康を支える有機農業の可能性

—「環境再生型農業」の再定義—

金子信博

島根大学生物資源科学部

1. はじめに

現代の農業は技術革新のおかげで生産力を大幅に増大させてきた。その一方で、さまざまな「不健康な」側面もあり、世界的にその見直しが進められている。有機農業は近代的な農業における課題に対するひとつの考え方であるが、かならずしも有機農業によって課題解決が進んでいるわけではない。近代農法の問題解決にはさまざまなアプローチがあるが、なかでも「環境再生型農業」と呼ばれる農業が拡大している(Newton et al., 2020)。

農業の「健康」には2つの意味がある。ひとつは、農地の健康である。さまざまな資材の投入や不自然な耕うんにより、現代の農地は健康ではない。もうひとつは、そこで生産される食の健康である。収量の重視による作物の栄養素の低下、化学物質による汚染が食を通して人の健康に影響している(Gupta et al., 2024)。

農地の健康を再生するためにもっとも大きな反省点は何だろうか？ 意外に思われるかもしれないが、それは「耕してしまったこと」である(金子, 2023a)。自然の土壌では土が耕されることは起こらない。耕うんにより土壌の健康は損なわれ、そのため資材や薬剤の投入が増えるだけでなく、農地が温室効果ガスの大きな排出源となった。

そのため、耕さずに農業生産を行う「不耕起栽培」の技術開発が盛んとなり、「不耕起＋除草剤」の組み合わせを「環境再生型農業」と呼ぶようになってきた。しかし、この「不耕起＋除草剤」農法では除草剤の多用という問題から逃れられず、結果的に土壌の健康も改善しない。

そこで、急速に拡大している「環境再生型農業」の実態を明らかにするとともに、農地、すなわち生態系と人にとっての食の健康を支える有機農業を「環境再生型農業」として再定義するための議論を行う。

2. 環境再生型農業の定義

ここでは、「環境再生型農業」を世界的に使用されている Regenerative agriculture (RA) を意味するものと考えて議論する。

環境再生型農業(RA)という用語は、近年研究論文にも多数登場し、FAO のような国際機関、世界的なアグリビジネス、あるいは農業団体などにも広く使われている(Newton et al., 2020)。一般には、「土壌の健康を回復し、土壌に炭素を蓄えることで気候変動をやわらげ、生物多様性の回復に寄与する農法」と説明されている。しかし、この取り組みは広い内容を含んでおり、多くの関係者のなかで決してその定義に合意が得られたものではない。むしろ使用する主体によって実にさまざまな解釈が行われているのが現状である(Newton et al., 2020)。

「土壌の健康」という概念も同様に持続可能な農業にとって達成すべき目標として取り上げ

られることが多く、海外では指標の開発が進められてきた(Lehmann et al., 2020)。しかし、これ
もはっきりした定義が難しい。「環境再生型農業」も「土壌の健康」も、多くの関係者がその定義
に合意することは難しく、むしろ定義が曖昧なことが、「環境に優しい農法」の代名詞としてや、
あるいは説明のためのキーワードとして都合よく使われている場合もある。

環境再生型農業の管理手法と効果

管理手法	効果
外部からの投入を減らす	生態系、土壌、水の健康の改善
家畜と組み合わせる	生物多様性の向上
農薬を使わない	土壌炭素隔離
化学肥料を使わない	社会の福利の向上
耕うんを減らす	農家の収益向上
輪作	
作物の多様化	

Newton et al. 2020

表1 環境再生型農業で使われる管理手法と、それによって得られる効果
(Newton et al. 2020 より著者作成)。

「環境再生型農業」における考え方には2通りある(表1)。一つはどのような栽培管理や技術
を投入するかというプロセスに基づくものである。不耕起や省耕起、輪作や混作、有機物に
よる地表面のマルチといった FAO の「保全農法」の鍵となっている栽培管理や、家畜との組み
合わせ、堆肥や緑肥の使用、バイオ炭の投入などが含まれる場合もある。

もう一つは、効果に基づくものである。「環境再生型農業」を行うことによって、土壌の健康が
改善し、土壌に蓄えられる炭素が増加し、投入に対する収穫量が向上する。さらには、農地を
取り巻く生物多様性が向上するというものである。

なぜ、「環境再生型農業」が重視されるようになったかという、近代農法による環境負荷の
大きさが認識され、生物多様性への悪影響が懸念され、その解決策として「環境再生型農業」
が有望視されるようになってきたためといえる(金子, 2023a)。

先に述べたプロセスベースの考え方では、そのアクションがどのような効果があったかを確か
める必要がある。また、効果ベースでは、どのようなアクションがその効果をもたらしたかの因果
関係の証明が求められる。農地システムは生態系の一部であり、環境とそこに生息する生物の
相互作用が複雑に関係しているため、単一のアクションがいつも同じ結果をもたらすとは限らな
い。むしろシステムの挙動を見ながら順応的に管理することが求められる。このような管理と検
証をリアルタイムで行うことを農業現場で実現することは難しいだろう。

「環境再生型農業」の効果としてよく取り上げられる土壌炭素隔離についても、土壌炭素の動態を農地で広範囲に把握することは難しく、一旦貯留された炭素がどのくらいの期間、土壌にとどまるかも正確な推定が難しい。土壌炭素隔離に炭素クレジットが発生するようになってきているが、一見よい取り組みのように見えて、実効性が伴わない可能性も高い。

3. 環境再生型農業と有機農業

さまざまな農法を耕うんという攪乱の程度と、化学肥料や堆肥などの外部投入への依存度を用いてシンプルに整理すると図1のようになる。

有機農業は、合成農薬や化学肥料、遺伝子組換え作物を使用しない農業とされているが、慣行農業と比べて、かならずしも環境によいわけではない。化学肥料の代わりに投入される堆肥は、量が多い場合には窒素などの栄養塩が水系を汚染したり、一酸化二窒素の形で大気に放出されたりして、環境に負の影響をもたらす。

さらに、見落とされている点は、耕うんである。有機農業では除草剤が使えないため、雑草の除草のために物理的に土壌を攪乱する必要がある。耕うんによる攪乱はすべての土壌生物にとって有害であり、微生物からミミズのような土壌動物に至るまで、その数量や多様性が低下する(金子, 2023a)。土壌生物の活動の低下は、それらによって担われてきた生態系機能の低下をもたらす。有機農業は本来、生態系の持つ機能を尊重して活用すると云われているが、耕うんによる負の影響はほとんど認識されてこなかった。

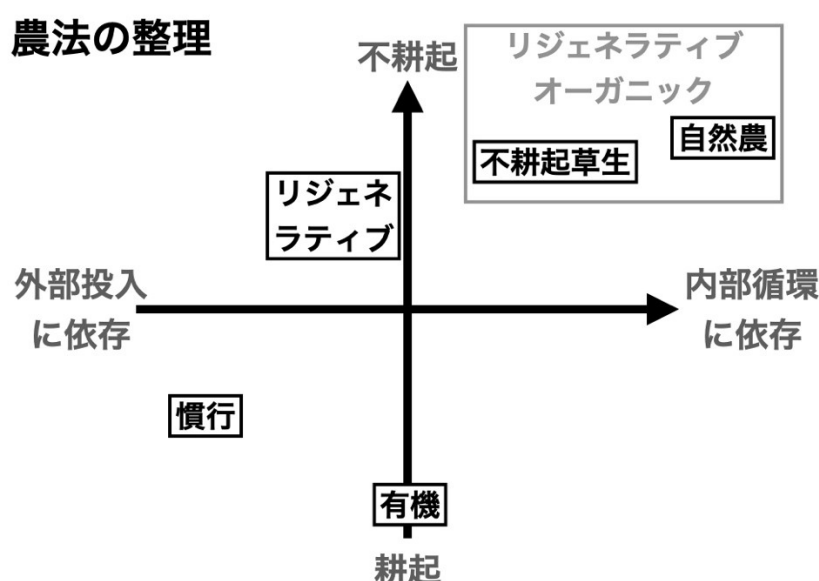


図1 様々な農法を耕起—不耕起、外部投入—内部循環との関係で整理(著者原図)

「環境再生型農業」に共通の技術として取り入れられたのは、耕さない管理、すなわち不耕起栽培の採用である。除草剤とその除草剤で枯れない遺伝子組み換え作物の開発は、農地土壌の劣化の大きな原因であった耕うんを不要にした。耕うん作業を省くことは、農作業にかかる時間と燃料を削減するのに大きな効果がある。アメリカ農務省の報告では、農地の半分以上で不耕起栽培が取り入れられており、1973年から2002年までの30年間で、農業機械による燃料消費量が40%削減された(Triplett and Dick, 2008)。また、1990年頃から急速に拡大し

たブラジルのセラード地域におけるダイズ栽培は、熱帯でうまく生育し除草剤耐性を持つ品種の採用と、現地で Zero-tillage と呼ばれる不耕起栽培を軸とした機械化農業によって支えられている(Ofstehage and Nehring, 2021)。ブラジルは現在、ダイズの単収、総生産量ともアメリカを抜き、世界第一位である。

耕うんを基本とする農地管理

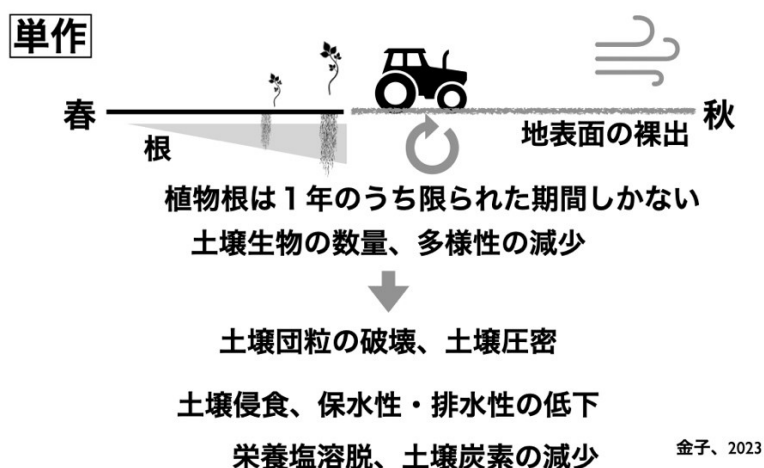


図2 耕うんを基本とする農地管理(金子, 2023b)

4. 土壌生態系のしくみ

土壌は陸上生態系のまさに基盤であり、わたしたちの食は95%以上が土壌で生産されたものである。人類は自然の生態系である森林や草地を、作物生産や放牧に使うために転換してきた。農地土壌では極めて少数の種類の作物が栽培され、化学合成農薬、化学肥料や堆肥が農地の外部から投入され、収穫物が外部へと運び出される。自然の陸上生態系では、外部からの投入はほとんどなく、植生と土壌との間で栄養塩類が閉鎖的に循環してきた。この物質循環の大きな変更は、耕うんという大きな攪乱と合わせて土壌の機能低下をもたらした。多くの農地では土壌侵食が発生し、同じ量の肥料を投入しても以前の生産力を維持できなくなる、いわゆる土壌劣化が進行している。先にあげた「土壌の健康」に関する研究は、このような生産力の低下を懸念したアメリカの農家の要求から始まった(Karlen et al., 2019)。

土壌の劣化、すなわち土壌の健康状態が悪化しているとの認識は多くの生産者に共通するものだろう。そして、投入量の増加や農業機械の大型化では解決できないことも明らかである。

「環境再生型農業」の大きなうねりは、農業現場で起きている土壌劣化を防ぎ、「土壌の健康」をなんとか回復させ、以前のような豊潤な農地に「再生」したいという思いが込められている。

それでは、農地における「土壌の健康」を回復させるにはどうしたらよいのであろうか？ 自然土壌を参照するならば、基本的な物質循環の再生と土壌生物の多様性の保全が必然となる。陸上生態系の生産力は資源的な制約が少ない太陽光、二酸化炭素、酸素と場所ごとの制約の程度が大きく異なる水、栄養塩類の2種類の資源によって律速されている。近代的な農業では灌漑と化学肥料の導入により、この制限を突破したが、効率的な農業生産を行うために、単一の作物を広範囲に栽培し、収穫残渣は病原菌の拡大の懸念があるのでなるべく農地に残さな

い方法を優先した。さらに、除草を兼ねた耕うんにより土壌を大きく攪乱した。このため、栄養塩は化学肥料によって十分な量を供給することが可能であっても、土壌生物のエネルギー源である炭素の土壌への供給が激減した。

光合成による一次生産は食物網にエネルギーを供給するが、化学肥料には他の生物のエネルギーとなる成分は含まれていない。土壌生物にとってもっとも効率的にエネルギーを供給するしくみは根系である。実際、植物は少なくとも光合成産物の 10% 以上を根滲出物として土壌に供給していると考えられている。この根滲出物はいわば、植物から土壌に廃棄されており、直接植物の資源とならないが、根滲出物を起点とする土壌食物網は、植物に代わって栄養塩類の可給性を高め、根の入らない微小な隙間から栄養塩を運ぶことで間接的に植物の生育を助けている。

効率のために単一の作物を作る単作と農地の耕うんは、一年の間に農地で生育する根を極端に減らしてしまった。

5. 有機農業こそ環境再生型の取り組みが有効

日本の自然農の栽培では常に作物か雑草が地面を覆い、収穫時を除いてなるべく土壌を攪乱しない。不耕起でカバークロップを栽培し、カバークロップを収穫せずに地面に押し倒して有機物マルチとして使う方法が 1990 年ごろにアメリカで開発された(Mirsky et al., 2009)。日本の自然農もアメリカの方法も、いずれも「不耕起草生栽培」と呼ぶことができる。

「不耕起草生栽培」では年間を通して生きた根が土壌に生育し、土が見えることはない(図 3)。耕うんもほとんど行わないため、土壌生物の数量と多様性が向上する。農地における土壌生物の数量と多様性を比較すると、慣行農地に比べて不耕起草生栽培の農地では数量も多様性も高い。



図3 保全農法を基本とする農地管理(金子、2023b)

少しの工夫で、土壌生物相を「再生」できる。そのためには、有機農業でかつ、耕さず生きた根が多い「不耕起草生栽培」である必要がある。

よく「不耕起草生栽培」では、収量が低下すると云われているが、それは削減できるコストとの

関係で評価するべきである。最近のメタ解析では、収量の差は小さくなり、コストは大幅に低い (Hashimi et al., 2022) (Yue et al., 2023)。これまで有機農業では、禁止された資材の代替しか考えず、本来の理念である自然のしくみの活用がおろそかにされてきた。そして、除草に多大な労力と時間を費やしてきた。冷静に考えると、使用できる資材の制約がある有機農業こそ、土壌生態系のしくみを「再生」することが基本であり、生産コストを下げることにもつながる。

引用文献

金子信博 2023a 『ミミズの農業改革』 みすず書房

金子信博 2023b 土壌環境からみた持続的な有機農業, 農村計画学会誌 42:21-24

Gupta, J. et al., 2024. A just world on a safe planet: a Lancet Planetary Health–Earth

Commission report on Earth-system boundaries, translations, and transformations. *Lancet Planet Health* 8, e813–e873. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(24\)00042-1](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(24)00042-1)

Hashimi, R., Kaneko, N., Komatsuzaki, M., 2022. Impact of no-tillage on soil quality and crop yield in Asia: A meta-analysis. *Land Degrad Dev.* <https://doi.org/10.1002/ldr.4512>

Karlen, D.L., Veum, K.S., Sudduth, K.A., Obrycki, J.F., Nunes, M.R., 2019. Soil health assessment: Past accomplishments, current activities, and future opportunities. *Soil Tillage Res* 195, 104365. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104365> Lehmann, J., Bossio, D.A., Kögel-Knabner, I., Rillig, M.C., 2020. The concept and future prospects of soil health. *Nat Rev Earth Environ.* <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0080-8>

Mirsky, S.B., Curran, W.S., Mortensen, D.A., Ryan, M.R., Shumway, D.L., 2009. Control of cereal rye with a roller/crimper as influenced by cover crop phenology. *Agron J* 101, 1589–1596. <https://doi.org/10.2134/agronj2009.0130>

Newton, P., Civita, N., Frankel-Goldwater, L., Bartel, K., Johns, C., 2020. What Is Regenerative Agriculture? A Review of Scholar and Practitioner Definitions Based on Processes and Outcomes. *Front Sustain Food Syst* 4, 1–11. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.577723>

Ofstehage, A., Nehring, R., 2021. No-till agriculture and the deception of sustainability in Brazil. *Int J Agric Sustain* 19, 335–348. <https://doi.org/10.1080/14735903.2021.1910419>

Triplett, G.B., Dick, W.A., 2008. No-Tillage Crop Production: A Revolution in Agriculture! *Agron J* 100, S153–S165. <https://doi.org/10.2134/agronj2007.0005c>

Yue, K., Fornara, D.A., Heděnec, P., Wu, Q., Peng, Y., Peng, X., Ni, X., Wu, F., Peñuelas, J., 2023. No tillage decreases GHG emissions with no crop yield tradeoff at the global scale. *Soil Tillage Res* 228, 105643. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105643>

生物多様性と人々のウェルビーイングをつなぐ農業の役割

橋本 禅

東京大学大学院農学生命科学研究科

1. はじめに

農業は、人類が生存する上で不可欠な食料を供給するだけでなく、洪水制御や微気象の緩和、景観形成やレクリエーションなどのさまざまな生態系サービスを供給している。しかしその一方で、人口増加や経済発展に寄与した農業生産の拡大が、気候変動、生物多様性の損失、土壌や水域の汚染といったさまざまな地球規模の環境問題を引き起こす一因となってきた。

本稿では、農業と社会の関係を、人間活動と生態学的プロセスが相互に作用する社会・生態システムとして捉える。まず、農業生産を支える生物多様性の重要性、農業生態系が社会にもたらすさまざまな恩恵が人々のウェルビーイングを支えていることを論じる。次に、農業生産が引き起こしてきた環境問題について具体的に解説する。ここでは、グローバル経済の下で、食料の生産と消費が国境を越えて分断され、ある国の豊かな食生活が遠隔地の生態系や人々の生活に負荷をかける状況についても概観する。最後に、これらの問題に対処すべく国内外で進められている、農業と環境の調和を目指す新たな政策動向を紹介する。最後に、これら問題に対処すべく、国内外で進められている農業と環境の調和を目指す新たな政策動向を紹介したい。

2. 農業と社会のつながりを社会・生態システムとして捉える

社会・生態システムとは、人類が抱える環境問題や食料やエネルギーを含む資源問題について、社会システムと生態システム(生態系)を統合した一つのシステムとして捉える枠組みのことである(Colding & Barthel, 2019)。農業と社会の関係も、人間の活動と生態学的プロセスが絶えず相互作用し影響し合う動的な社会・生態システムとして捉えることができる。食料、繊維、燃料その他の産物を生産するために人為的に改変された空間のことを「農業生態系」とも呼ぶ。農業生態系は農業生態系を取り巻く森林や草地、湿地などのより広い生態系と社会システムの接点に位置づけられる。

農業生態系やその周辺の生物多様性は、微生物や動植物の働きを通じて、土壌の肥沃度を高め、害虫や病気の防除や作物の受粉の促進を通じて農業を支えている。生物多様性がもたらすさまざまな自然の恵みを、専門的には生態系サービスと言う。ここでいう生態系サービスは、供給サービス(食料、木材、繊維、水、など)、調整サービス(炭素貯留、洪水制御、土壌流出・土砂崩壊制御、送粉など)、文化的サービス(美観、教育、精神的安らぎ、レクリエーション機会、など)、基盤サービス(水循環、栄養塩循環、土壌生成、など)に分けられる。

農業生産は水循環、栄養塩類等の物質循環の他にもさまざまな生態系サービスによっても支えられている。その典型例が、動物や昆虫などが植物の花粉を運び、受粉させるという花粉媒介を意味する送粉サービスだ。送粉サービスは調整サービスに該当する。花粉媒介は、世界の総作物生産量の約 5~8% に相当し、市場価値に換算すると年間 2,350 億~5,770 億米ドル(2015 年時点)という推計もある(IPBES, 2016)。また、日本では、国内の耕種農業産出額の約 8%(約 5.7 兆円)が花粉などを運ぶ送粉者(昆虫や動物など)に依存していると言われる(小沼・大久保, 2015)。この他にも農業生産を支える生態系サービスとしては、テントウムシやハチなどの捕食性昆虫、クモ、鳥類、コウモリなどが、農作物に害を及ぼす生物の個体数を自然に抑制する働きである害虫駆除サービスも挙げられる。自然の生態系が提供する害虫駆除サービスは、化学農薬の調達・散布に必要なコストの削減だけでなく、農薬使用による健康リ

スクや環境負荷を軽減する潜在的な可能性を秘めている。例えば米国では、在来昆虫による害虫駆除により農業セクターが年間約 45 億ドルの節約に貢献しているという研究もある(Losey & Vaughan, 2006)。

3. ウェルビーイングを支えるさまざまな生態系サービス

農業生態系はさまざまな生態系サービスを社会に提供している。生態系サービスというと、人為的な介入なしに生態系から生まれる便益のみが該当すると思われがちだが、実際には生態系サービスの産出から受益まで様々な人為的な介入が必要な例が多いことが国際的にも知られている。農業生態系における農業生産(供給サービス)はその好例である。例えば米の生産には、水管理、耕耘や田植え、施肥、害虫防除、草刈り、収穫などの作業を伴うし、農業生産を行う場としての田んぼの整備・維持管理も必要だ。また、農業生産を通じて、洪水制御、微気象の緩和、土砂崩壊・流出の防止などの調整サービスだけでなく、美しい田園景観、教育、レクリエーションなどの文化的サービスも生み出される。これら生態系サービスはいずれも農業生産や地域資源の維持管理などの人為的な介入なくしては成り立たない。

農業は、食料・栄養を含むさまざまな生態系サービスの供給を通じて、人々の心身の健康や安全、文化的アイデンティティなどさまざまな形で人々のウェルビーイング(身体的・精神的・社会的に良好な状態にあること)を支えている。日本の食料・農業・農村基本法でも、農業が食料やその他農産物の供給だけでなく、国土保全、水源涵かん養、自然環境の保全、良好な景観の形成、文化の伝承等に貢献することを明記し、将来にわたり適切かつ十分に発揮する必要があるとしている。農業が生み出すこれらの便益は、法律上は多面的機能と呼ばれているが、これらは生態系サービスに他ならない。

世界的に見ても、農業生産の拡大は経済発展や飢餓や貧困をはじめとする社会課題の解決に寄与してきた。1961 年から 2020 年にかけて世界の農業生産量は約 4 倍に増加した。農業生産の増加の大部分は、新興国や開発途上国などのいわゆるグローバル・サウスで生じ、先進国の農業生産量は 1990 年代以降横ばいの状態が続いている(Fuglie et al., 2024)。2021 年時点で世界全体で農業に利用されている土地の面積は 48 億 ha、その内訳は耕作地は 16 億 ha、永久牧草地を含む牧草地の面積が 32 億 ha となっている。これは世界の陸地面積の約 37%に相当する。灌漑面積も 1961 年から 2020 年の間に約 2 倍に拡大し(Fuglie et al., 2024)、世界の淡水取水量の約 72%が農業部門によるものである(2021 年時点)。世界の農業作物生産額は 1970 年以降に約 3 倍に増加し、2016 年には 2.6 兆ドルに達した(IPBES et al., 2019)。世界の貧困層の 80%は農村地域に居住し、その約 80%が農業に従事している(IEG, 2017)。農業生産の拡大により、世界の飢餓人口は 1990 年初頭の約 10 億人から 2019 年の 6 億 9000 万人にまで大幅に減少した(FAO, 2020)。

4. 農業生産はさまざまな環境問題も引き起こしてきた

農業生産の拡大は社会経済の発展に大きく寄与してきた一方で、気候変動や生物多様性の喪失、汚染といった環境問題を引き起こしてきた。世界全体の GDP の半分以上(約 58 兆ドル)が、農林水産業をはじめとする自然への依存度が高～高い経済活動により生み出されている一方で、温室効果ガスの排出や、生物多様性の損失、水質汚染、土壌劣化などの形で外部不経済は総額 11 兆ドルに上ると推定されている(IPBES, 2025)。その結果、農業生産を支える農業生態系や周辺の自然環境が損なわれ、食料安全保障や持続可能性にも深刻な影響を与え始めている。

気候変動の原因とされる温室効果ガス(GHG)の世界全体での排出量(2019 年値)は 590 億トン(CO₂換算、以下同じ)で、このうち農・林業及びその他の土地利用に由来する排出は 22%、農業はその約半分(11%)を占めている。日本についてみると、2022 年の農林水産分野の GHG 排出量は日本全体の GHG 排出量(約 11 億トン)の約 4%(約 4790 万トン)である(農林水産省, 2024a)。その内訳は、稲作や家畜の消化管内発酵、家畜排泄物管理に由来するメタン(CH₄) (51%)、農林水産業分野での燃料燃

焼(例えば、農業機械の燃料利用)や石灰・尿素施用に由来する二酸化炭素(CO₂) (31%)、農地土壌や家畜排泄物管理由来の亜酸化窒素(N₂O) (18%)である。

生物多様性及び生態系サービスに関する政府間科学-政策プラットフォーム(IPBES)の地球規模評価報告書は、地球全体でかつてない規模で多くの種が絶滅の危機に瀕しており、約 800 万種の生物のうち、約 100 万種が絶滅の危機に瀕していることを指摘している。農業について同報告書は、世界中で栽培、飼育、取引、維持されている植物や動物の品種はますます少なくなっていること、食料や農業に利用されている家畜哺乳動物 6,190 品種のうち 559 品種が 2016 年までに絶滅し、少なくとも 1,000 品種が絶滅の危機に瀕していることを指摘している(IPBES et al., 2019)。このような遺伝的多様性を含む多様性の消失は、害虫、病原体、気候変動などに対する農業システムのレジリエンスを損ない、世界の食料安全保障にとって重大な脅威になることが懸念されている。本報告書は生物多様性の損失に関わる5つの直接要因として、①陸・海の利用変化、②直接採取(狩猟、漁業、伐採、野生植物の採取等)、③気候変動、④汚染、⑤侵略的外来種をあげている(IPBES et al., 2019)。農業生産はこれら直接的要因と密接に関係していることは言うまでもない。2024 年に公表された UNEP 国際資源パネルのレポートは、陸域の生物多様性の損失の実に約 75%が農業に由来することを指摘している(IRP, 2024)。

農業生産は汚染や土壌の塩類化、土壌流亡、地下水枯渇などの問題も世界各地で引き起こしている。農業部門の世界の農薬使用量は、1990 年代初頭には約 230 万トンであったが、2016 年には 400 万トン以上に増加した(UNEP et al., 2022)。2022 年の世界の無機肥料の総消費量は、三大栄養素である窒素(N)、五酸化二リン(P₂O₅)、酸化カリウム(K₂O)の合計で約 2 億トンにのぼる(FAO, 2024b)。農薬や化学肥料の過剰な使用は、土壌劣化や水質汚濁の原因となる。実際、世界の海洋および淡水の富栄養化の約 78%が食料生産に由来するという推計もある(Poore & Nemecek, 2018)。農業生産では、温室やマルチング、サイレージの資材として大量のプラスチックを使用している。FAOによると、2019 年時点で温室やマルチングフィルム、被覆肥料、サイレージの資材などとして年間 1,000 万トンのプラスチック製品が作物生産と畜産部門で使用されている(FAO, 2021)。農業用プラスチックは土壌中で劣化し微小なマイクロプラスチックとなり、生産性の低下や土壌や地下水、水域の汚染だけでなく、食物連鎖を通じて人間の健康に悪影響を及ぼすことが懸念されている。

この他、乾燥地における灌漑は、農業生産性の向上に寄与する一方で、灌漑水中の微量な塩類や土壌中の塩類が土壌表面に過剰に集積し、植物の正常な生育を阻害する塩害を引き起こしてきた。国連食料農業機関(FAO)は、世界全体の塩害土壌は 13.8 億ヘクタール(全土地面積の約 11%)と推計している(2024 年時点)(FAO, 2024a)。また灌漑のための地下水の組み上げは世界各地で地下水の枯渇や生態系の劣化を引き起こしている。また、集約的農業や過放牧、森林伐採により、作物の生育に不可欠な肥沃な表土の流亡を引き起こし、その規模は、年間で 750 億トンと推計されている。今後、気候変動が進むことで、その量は更に増大することが懸念されている(Sartori et al., 2024)。

5. 食料の消費は世界の生物多様性につながっている

農業生態系は、より広範な生態系と社会システムが交わる接点に位置しているが、留意すべきなのは、こうした農業生態系やそれに隣接する周辺生態系が、必ずしも同一の国や地域の社会システムと対応しているわけではないという点である。グローバル化の進んだ現代においてはむしろ、一つの社会システムが、国内外の複数の農業生態系や周辺生態系によって支えられているし、逆に社会システムのあり方がそれら農業生態系や周辺生態系にさまざまな影響を与えていると理解すべきである。このように、地理的に遠く離れた社会システムと生態系が相互に依存し合う状況は、テレ・カップリングと呼ばれている。

農林水産省によると、日本の国民一人当たりの総供給カロリーは約 2,200kcal、カロリーベースの自給率は 38%である(2024 年時点)(農林水産省,2024b)。品目別の食料自給率を見ると、米、野菜はそれぞれ

れ 100%、76%であるのに対し、魚介類は 49%、小麦は 18%、油脂類は 4%、砂糖は 26%、大豆は 26%、果実は 29%と低水準である。畜産物に関しては、国産飼料による生産分は 17%にとどまり、輸入飼料を含めても 54%に過ぎない。これらの数値は、日本の食料供給が、多くの品目において国外からの輸入に大きく依存している実態を明確に示している。日本の食料自給率の低さは、食料安全保障の観点から問題視されることが多いが、農業が様々な環境問題を引き起こしていることを踏まえると、この値は同時に日本の食生活が他国の農業生態系や周辺生態系に潜在的に大きな負荷をかけていることを示している。

IPBES の地球規模評価では、拡大する貿易は CO₂ 排出、化学物質汚染、生物多様性の損失、淡水資源の枯渇などの多くの間接的影響を伴い、消費活動による環境負荷の約 25～50%は消費地以外の地域で生じているとしている(IPBES et al., 2019)。生物多様性については、世界の生物種の脅威の 30%は国際貿易に起因しており、欧米諸国や日本などの先進国が、発展途上国で生産されたコーヒー、茶、砂糖、繊維、魚などの消費を通じて、国外の生物多様性の損失に大きな影響を与えていることが知られている(Lenzen et al., 2012)。このような生産地における生物多様性の損失は、水源涵養、水質浄化、土砂流出防止といった多岐にわたる生態系サービスの劣化を招き、結果的にその地域に暮らす人々の生活基盤にも悪影響を与える可能性があることも忘れてはならない。単一の社会システムが複数の農業生態系や周辺生態系と結びつく一方で、これらの生態系もまた複数の社会システムと相互に関係しているのである。そして、生態系の劣化がもたらす影響を最も直接的に受けるのは、その生態系が存在する地域に居住する人々なのである(IPBES et al., 2019)。

皮肉なことに日本は食料の多くを海外からの供給に依存する一方で、国内では耕作放棄地の拡大を始めとする里地・里山の利用低下が進み、国内の生物多様性の脅威となっている。里地・里山の利用低下に代表される自然に対する人々の働きかけの縮小は、開発行為、化学物質等による汚染、侵略的外来種、気候変動とならび、日本の生物多様性の低下を引き起こす要因の一つである。里地里山のように人との関わりの中で維持管理されてきた生態系には、定期的な人為的かく乱に依存する種が多数生息しており、農業生産や農地や農道、水路等の維持管理の継続が、その地域の生物多様性の維持を支えるケースもある。これは、社会システムからの人間の働きかけが農業生態系の生物多様性保全を支えている例である。

6. 国内外での対応

このような課題に対応するため、国内外でさまざまな対応が進んでいる。国際レベルでは、2022 年 12 月に合意された生物多様性条約の昆明・モンテリオール生物多様性枠組がその一例である。本枠組みは、2050 年ビジョン、2030 年ミッション、2050 年グローバルゴール、2030 年グローバルターゲットおよびその他の関連事項から構成されている。このうち 2030 年グローバルターゲットは 23 の目標で構成され、これらは「生物多様性への脅威を減らす」目標群(8 項目)、「人々のニーズを満たす」目標群(5 項目)、「ツールと解決策」に関する目標群(10 項目)に大別される(環境省、2024)。「ツールと解決策」の目標群は、「生物多様性への脅威を減らす」目標群や「人々のニーズを満たす」目標群の実施を促進する役割を担っている。これら 23 の目標には、農業と関連の深い項目が複数含まれている。

例えば、目標 7 では「環境中に流出する過剰な栄養素の半減、農薬及び有害性の高い化学物質による全体的なリスクの半減、プラスチック汚染の防止・削減」すること、目標 10 は「農業、養殖業、漁業、林業地域が持続的に管理され、生産システムの強靱性及び長期的な効率性と生産性、並びに食料安全保障に貢献」すること、目標 15 は「事業者(ビジネス)が、特に大企業や金融機関等は確実に、生物多様性に係るリスク、生物多様性への依存や影響を評価・開示し、持続可能な消費のために必要な情報を提供するための措置を講じる」こと、目標 16 では「適切な情報により持続可能な消費の選択を可能とし、食料廃棄の半減、過剰消費の大幅な削減、廃棄物発生的大幅削減等を通じて、グローバルフット

プリントを削減」、目標 18 では「生物多様性に有害なインセンティブ(補助金等)の特定、及びその廃止又は改革を行い、少なくとも年間 5,000 億ドルを削減するとともに、生物多様性に有益なインセンティブを拡大」することが述べられている。生物多様性の保全のための対策というと、保護絶滅危惧種や希少野生動植物の保護やその生息地の保全、保護区の設定、劣化した自然生態系の再生や回復ばかりだと考えられがちだが、農業生産や食生活、補助金のあり方など、農業分野も生物多様性保全において重要な役割を担っていることがわかる。

日本国内での対応も進みつつある。農林水産省は 2021 年 5 月に、2050 年を視野に入れ、食料・農林水産業の生産力向上と持続性の両立をイノベーションで実現することを目指した長期的な政策として「みどりの食料システム戦略」を打ち出している。ここでいう「食料システム」とは、食料の生産・加工・流通・消費にかかわる一連のネットワークのことである。従来の農業政策は主に生産段階に焦点を当てていたのに対し、加工や流通・消費にまで射程が広がっているのが本戦略の特徴の一つである。本戦略には①温室効果ガス削減、②環境保全、③食品産業、④林野、⑤水産について計 14 の KPI(重要業績評価指標)を設定し、2030 年と 2050 年について目標値が設定されている。KPI の③環境保全に関する 2 項目(化学農薬使用量の 50%低減(2050 年)、化学肥料使用量の 50%削減(2050 年))と④食品産業に関する 1 項目(事業系食品ロスを 2000 年度比で半減(2030 年))は、昆明・モンテリオール生物多様性枠組にある 7 項目の数値目標のうち目標 7(汚染・廃棄物削減)と目標 12(食料廃棄削減)の記載に対応するものである。

また、昆明・モンテリオール生物多様性枠組の成立を受けて、2023 年 3 月には生物多様性国家戦略 2023-2030 が閣議決定、またこれと同時に農林水産省生物多様性戦略も公表された。生物多様性国家戦略は 5 つの基本戦略で構成され、うち基本戦略 2、3 はそれぞれ経済分野、生活・消費活動分野に向けたものである。農林水産省生物多様性戦略も、基本方針として「サプライチェーン全体での取組」や「生物多様性への理解と行動変容の促進」を位置づけている。この他、2024 年 5 月に成立した改正食料・農業・農村基本法では、食料安全保障の確保(食料の安定供給の確保から変更)や多面的機能の発揮、農業の持続的発展、農村新興という従来の基本法の基本理念に加え、新たに第 3 条に「環境と調和のとれた食料システムの確立」を位置づけ、食料システムの各段階における環境負荷の低減の重要性を明記している。

食に関わる環境負荷は、農作物等の生産段階だけでなく、生産に必要な資材やエネルギーの調達、生産物の加工・流通、消費・廃棄の各段階で生じ、気候変動、生物多様性の損失、環境汚染の問題と密接につながっている。政策の射程を農業生産だけでなく食料システム全体に広げ、食料システム全体にわたる環境負荷の削減を目指すという近年の政策動向は、農業の社会的な役割・責任に対する認識の変化に対応したものとみることもできる。そして、このような政策の転換は、農業生産に携わるものだけでなく、加工、流通や小売、さらには消費者の認識や行動の変容も求めている。

7. おわりに

本稿では社会・生態システムの枠組を用いて、生物多様性と人々のウェルビーイングをつなぐ農業の多面的な役割や課題を考察した。農業は食料供給だけでなく、さまざまな生態系サービスの供給を通じてわれわれの暮らしや心身の健康を支えている。しかし、農業は一方で、気候変動や生物多様性の損失、汚染等のさまざまな環境問題を引き起こした。グローバル化は、遠隔地の社会システムと生態系が相互に依存・影響するテレ・カップリングを引き起こし、われわれの食生活が国内外で引き起こす帰結との関係を一層に複雑にしている。このような課題に対応するため、昆明・モンテリオール生物多様性枠組やみどりの食料システム戦略のような国内外の取り組みが進んでいる。これらは、農業が生物多様性の保全に重要な役割を果たすと同時に、生産者だけでなく、消費者も含めた食料システム全体で環境負荷

の低減に取り組むことの重要性を示している。農業は単なる経済活動ではなく、地球の未来と人々のウェルビーイングを育む営為である。豊かな自然の恵みを持続的に享受し、将来世代に継承するためには、生産から消費まで、食料システム全体で環境と調和したあり方を追求していく必要がある。

参考文献

- 小沼 明弘, 大久保 悟(2015). 日本における送粉サービスの価値評価, 日本生態学会誌, 65(3),
https://doi.org/10.18960/seitai.65.3_217
- 環境省(2024). 昆明・モントリオール生物多様性枠組-ネイチャーポジティブの未来に向けた 2030 年世界目標-,
https://www.biodic.go.jp/biodiversity/about/treaty/files/kmgbf_pamph_jp.pdf (参照 2025-9-10)
- 農林水産省(2024a). 世界全体と日本の農林水産分野の温室効果ガス(GHG)の排出,
<https://www.maff.go.jp/j/council/seisaku/kikaku/goudou/attach/pdf/241219-8.pdf> (参照 2025-9-10)
- 農林水産省(2024b). 食料消費の構造と食料自給率 (令和 5 年度) ,
https://www.maff.go.jp/j/zyukyu/zikyu_ritu/attach/pdf/012-9.pdf (参照 2025-9-10)
- Colding, J., & Barthel, S. (2019). Exploring the social-ecological systems discourse 20 years later. *Ecology and Society*, 24(1).
<https://doi.org/10.5751/ES-10598-240102>
- FAO. (2020). *The State of Food Security and Nutrition in the World 2020*. FAO, IFAD, UNICEF, WFP and WHO.
<https://doi.org/10.4060/ca9692en>
- FAO. (2021). *Assessment of agricultural plastics and their sustainability: A call for action*. FAO.
<https://doi.org/10.4060/cb7856en>
- FAO. (2024a). *Global status of salt-affected soils*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cd3044en>
- FAO. (2024b). *Inorganic fertilizers*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cd1485en>
- Fuglie, K. O., Morgan, S., Jelliffe, J., & United States. Department of Agriculture. Economic Research Service,. (2024). *World agricultural production, resource use, and productivity, 1961-2020*. Economic Reserach Service,.
<https://doi.org/10.32747/2024.8327789.ers>
- Independent Evaluation Group (IEG). (2017). *Growing the Rural Nonfarm Economy to Alleviate Poverty An Evaluation of the Contribution of the World Bank Group*. World Bank.
- IPBES. (2016). *Summary for policymakers of the assessment report of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services on pollinators, pollination and food production*. Zenodo.
<https://doi.org/10.5281/ZENODO.2616457>
- IPBES. (2025). *IPBES Transformative Change Assessment: Summary for Policymakers* (Version 10.2.0). Zenodo.
<https://doi.org/10.5281/ZENODO.11382230>
- IPBES, Brondizio, E., Diaz, S., Settele, J., & Ngo, H. T. (2019). *Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services* (Version 1). Zenodo.
<https://doi.org/10.5281/ZENODO.6417333>
- Lenzen, M., Moran, D., Kanemoto, K., Foran, B., Lobefaro, L., & Geschke, A. (2012). International trade drives biodiversity threats in developing nations. *Nature*, 486(7401), 109–112. <https://doi.org/10.1038/nature11145>
- Losey, J. E., & Vaughan, M. (2006). The Economic Value of Ecological Services Provided by Insects. *BioScience*, 56(4), 311.
<https://doi.org/10.1641/0006-3568>
- Poore, J., & Nemecek, T. (2018). Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. *Science*, 360(6392), 987–992. <https://doi.org/10.1126/science.aag0216>
- Sartori, M., Ferrari, E., M'Barek, R., Philippidis, G., Boysen-Urban, K., Borrelli, P., Montanarella, L., & Panagos, P. (2024). Remaining Loyal to Our Soil: A Prospective Integrated Assessment of Soil Erosion on Global Food Security. *Ecological Economics*, 219, 108103. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2023.108103>
- UNEP. (2024). *Global Resources Outlook 2024*. <https://www.unep.org/resources/Global-Resource-Outlook-2024>
- UNEP, WHO, & FAO. (2022). *Chapter 2/12: Status and Trends of Pesticide Use*.
<https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/40351> (参照 2025-9-10)

講演者プロフィール

敬称略・講演順

【谷 晃（たに あきら）】

大阪府出身。大阪府立大学大学院農学研究科農業工学専攻博士課程中退。博士（農学）。
1991年～1997年 大阪府立大学農学部助手、1997年～2004年 東海大学開発工学部講師、
2001年～2002年 英国ランカスター大学環境科学部客員研究員、2005年～2006年 東海大学
開発工学部助教授、2007年～2014年 静岡県立大学准教授、2015年～現在 静岡県立大学
食品栄養科学部教授。2017年～現在 日本学術会議連携会員（第24期～26期）、2024年～現
在 日本学術振興会学術システム研究センター専門研究員。主な受賞：2017年 日本農業気象
学会学術賞、2007年 生態工学会学術賞。主な学会活動：生態工学会副会長、日本農業気象
学会副会長。気象予報士（国家資格）、通訳案内士（外国語：英語、国家資格）。

【三ツ井 敏明（みつい としあき）】

1986年名古屋大学大学院農学研究科生化学制御専攻博士課程修了、同年日本学術振興会
特別研究員、同年新潟大学農学部助手、1989年米国ケースウェスタンリザーブ大学医学部博士
研究員、1993年新潟大学農学部助教授、1999年日本農芸化学会奨励賞受賞、2002年新潟大
学農学部教授、2018年日本応用糖質科学会賞受賞、2024年新潟大学社会連携推進機構特任
教授、同年食の新潟国際賞地域未来賞・新潟日報文化賞「産業技術部門」受賞。

【北澤 春樹（きたざわ はるき）】

長野県出身。1988年3月 東北大学大学院農学研究科 博士課程前期畜産学専攻 修了。
1988年4月 東北大学農学部助手。1993年9月 農学博士（東北大学）。2002年4月 東北大
学大学院農学研究科助教授（准教授）。2019年4月 東北大学大学院農学研究科教授。2022年
4月 東北大学大学院農学研究科長・学部長。現在に至る。その間、1994年 日本学術振興会
海外特別研究員（NCI/NIH）。2006年 文部科学省海外先進研究実践支援派遣研究員
（NCI/NIH）。主な受賞：1994年3月 日本畜産学会奨励賞。2006年3月 日本畜産学会賞。
2008年3月 「世界の発酵乳」論文賞。2012年10月 日本食品免疫学会賞。2013年6月 森
永奉仕会賞。2025年度日本農学賞/読売農学賞。主な学会活動：日本乳酸菌学会 会長、日本
食品免疫学会 評議員、日本畜産学会 編集委員、日本獣医学会 評議委員、日本酪農科学
会 監事、アジア乳酸菌学会連合 理事。主な著書：Probiotics: Immunobiotics and
Immunogenics (CRC Press, 2013年)、Immunobiotics: Interactions of Beneficial Microbes With
the Immune System (eBook, Front. Immunol., 2017年)、食品免疫学事典（分担、朝倉書店、
2021年）、特集 生産性向上のカギ！ 豚の腸内環境を整えよう。（分担、養豚界、緑書房、2025
年）ほか。

【山本（前田）万里（やまもと（まえだ）まり）】

東京都出身。1986年千葉大学園芸学研究科修士課程修了。同年農林水産省入省。農業研究センター、中国農業試験場、野菜茶業研究所、食品総合研究所食品機能研究領域長、食農ビジネス推進センター長、ヘルスケア創出研究統括監を経て、食品研究部門エグゼクティブリサーチャー。農学博士。抗アレルギー緑茶、機能性農産物、機能性弁当開発等に従事。2018年11月～2023年3月 内閣府戦略的創造イノベーションプログラム(SIP2)「食を通じた健康システムの確立による健康寿命の延伸への貢献」の研究代表者。2023年から SIP3「国産大豆等を利用した豊かな食設計システムの開発」の研究代表者。食による健康長寿社会の実現を目指した研究活動として、個人の体調、食習慣に適した食事や不足している栄養・機能性成分を民間認証する仕組みの開発、個人に適した食事、食材をレコメンドして国民の well-being に寄与する豊かな食解析システム開発を多くの民間企業とともに実施している。

【太田 祐子（おおた ゆうこ）】

神奈川県出身。東京大学大学院 農学生命科学研究科 博士課程進学・修了。博士(農学)。森林総合研究所研究員、チーム長を経て日本大学生物資源科学部教授。専門分野は森林病理学。学会などの公的活動:樹木医学会副会長、日本森林学会副会長。主な編著書:黒田慶子・太田祐子・佐橋憲生編著(2020)森林病理学(朝倉書店)。太田祐子・杉浦克明・園原和夏・松倉君予(2025)これからの森林学入門(朝倉書店)。日本森林学会編(2024)図説日本の森林 森・人・生き物の多様な関わり(朝倉書店)など。

【佐野 元彦（さの もとひこ）】

東京都出身。1990年東京水産大学大学院水産学研究科博士課程修了、水産学博士。1990年より明治製菓株式会社薬品総合研究所勤務。1995年水産庁に採用、西海区水産研究所、同石垣支所、独法化により水産総合研究センター 養殖研究所病理部、本部、養殖研究所魚病診断・研修センター、中央水産研究所遺伝子解析センター勤務を経て、2013年より東京海洋大学学術研究院海洋生物資源学部門、教授。専門分野は魚病学。水産用医薬品調査会座長。国際獣疫事務局 OIE のコイヘルペスウイルス病リファレンスラボ(2007年～2010年)。日本水産学会、日本魚病学会(現学会長)、日本水産増殖学会、ヨーロッパ魚病学会、アジア水産学会(現魚病部会評議員)、アメリカ微生物学会に所属。2021年日本魚病学会賞受賞。

【藤井 一至（ふじい かずみち）】

1981年富山県生まれ。福島国際研究教育機構土壌ホメオスタシス研究ユニット・ユニットリーダー。京都大学農学研究科博士課程修了。博士(農学)。(国)森林研究・整備機構 森林総合研究所主任研究員などを経て2025年3月より現職。カナダ極北の永久凍土からインドネシアの熱帯雨林までスコップ片手に世界、日本の各地を飛び回る。『土地球最後のナゾ』(光文社新書)で第7回河合隼雄学芸賞、『土と生命の46億年史』で第41回講談社科学出版賞を受賞。著書は他に『大地の五億年』(ヤマケイ文庫)など。『1億人の大質問!? 笑ってコラえて!』(日本テレビ系)、『クレイジージャーニー』(TBS系)などメディア出演多数。

【金子 信博（かねこ のぶひろ）】

長崎県生れ。1983 年京都大学大学院農学研究科修士課程修了、農学博士。島根大学生物資源科学部助教授、横浜国立大学大学院環境情報研究院教授、福島大学農学群食農学類教授を歴任。専門は土壌生態学。森林、畑地、水田土壌の生物多様性と生態系機能の関係を研究。日本の大学院で初めてのアグロエコロジープログラムを福島大学大学院食農科学研究科に開設。横浜国立大学名誉教授。福島大学名誉教授。2025 年から島根大学客員教授。主要な著書に「土壌生態学入門（2007）」「土壌生態学（編著）(2018)」。「ミミズの農業改革（2023）」。

【橋本 禪（はしもと しずか）】

山口県出身。東京大学大学院農学生命科学研究科で学位を取得（2003 年）、東京大学大学院農学生命科学研究科（2003 年－2005 年、日本学術振興会特別研究員（PD））、マサチューセッツ工科大学（2005 年－2008 年、日本学術振興会海外特別研究員）、国立環境研究所（2007 年－2009 年、NIES 特別研究員）、京都大学（2009 年－2015 年、講師・准教授）、東京大学（2015－2024 年、准教授）を経て現職。国内では「日本の里山里海アセスメント」の CLA のほか、環境省による「生物多様性及び生態系サービスの総合評価」の検討会委員（第 2 版～）、日本学術会議連携会員（第 25 期～）、環境省中央環境審議会自然環境部会委員、農林水産省 食料・農業・農村政策審議会企画部会地球環境小委員会委員。国際的には、生物多様性と生態系サービスに関する政府間科学政策プラットフォーム（IPBES）地球規模評価及びおよびアジアオセアニア地域アセスメントに LA として貢献。2018 年より IPBES の学際的専門家パネル（MEP）メンバー、2022 年より MEP 共同議長を務める。主な受賞：農業農村工学会沢田賞（2024 年度）、奨励賞（2009 年）、日本農学進歩賞（2012 年度）、農村計画学会論文奨励賞（2003 年）など。

2025 年度日本農学会企画委員会

【日本農学会役員】

会 長	大杉 立
副会長	金子 豊二
	小崎 隆
監 事	佐藤 秀一
	羽藤 堅治

【日本農学会常任委員】

企画担当	古橋 元	(日本フードシステム学会)
	殿塚 隆史	(日本応用糖質科学会)

庶務担当	松脇 貴志	(日本繁殖生物学会)
	神谷 岳洋	(日本土壌肥料学会)

会計担当	建石 邦夫	(日本農作業学会)
	西田 和弘	(農業農村工学会)

【日本農学会企画委員】

伊東 明子	(園芸学会)
松下 範久	(樹木医学会)
青木 直大	(日本作物学会)
小山 寛喜	(日本水産学会)
松田 二子	(日本畜産学会)
植山 秀紀	(日本農業気象学会)
小松崎 将一	(日本有機農業学会)

複写される方に

本誌に掲載された著作物を複写したい方は、著作権者からの複写権の委託を受けている次の団体から許諾を受けてください。

一般社団法人 学術著作権協会

〒107-0052 東京都港区赤坂 9-6-41 乃木坂ビル 3F

TEL: 03-3475-5618 FAX: 03-3475-5619

Notice about photocopying

In order to photocopy any work from this publication you or your organization must obtain permission from the following organization which has been delegated for copyright for clearance by the copyright owner of this publication.

Japan Academic Association for Copyright Clearance, Inc

Phone : 81-3-3475-5618 Fax : 81-3-3475-5619

2025 年 10 月 1 日

発行者 大杉 立

発行所 一般社団法人日本農学会

〒113-8657 東京都文京区弥生 1-1-1
