

2022 年度日本農学会

シンポジウム講演要旨（WEB 用）

カーボンニュートラルの 達成にむけた農学研究

日 時：2022(令和 4)年 10 月 1 日（土）10 時～17 時 10 分

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

2022 年度日本農学会シンポジウム

日時:2022 年 10 月 1 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 ～ 12:00 講演および質疑

12:00 ～ 13:00 — 休憩 —

13:00 ～ 16:05 講演および質疑

16:15 ～ 17:05 総合討論

17:05 閉会挨拶

目 次

開催趣旨	3
食料生産と気候変動緩和の一石二鳥 ～土壌は地球を救う！～	4
農研機構 農業環境研究部門 白戸 康人	
家畜由来の温室効果ガス低減の取り組み	9
農研機構 畜産研究部門 野中 最子	
園芸生産に要するカーボンの排出削減に向けた技術革新	14
千葉大学園芸学研究院 彦坂 晶子	
ゲノム編集が引き出す植物の未知なる可能 ーゼロエミッション、マイナスエミッションに向けてー	20
農研機構 生物機能利用研究部門 遠藤 真咲	
再生可能エネルギー発電をマネジメントする ー中国地方の農協小水力を事例にー	26
岡山大学学術研究院 本田 恭子	
都市の木づかいでカーボンニュートラルに貢献！	32
東京大学大学院農学生命科学研究科 恒次 祐子	
環境保全と食糧生産および農業経営を安定化させるカギは土壌炭素	37
北海道大学農学研究院 佐々木 章晴	
地域バイオマスを活用した堆肥づくりと除染後農地土壌の肥沃度向上	43
東京大学大学院農学生命科学研究科 溝口 勝	
講演者プロフィール	49
企画委員会名簿	(裏表紙裏)

開催趣旨

政府は2050年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする、カーボンニュートラルを目指すことを宣言しました。2020年度の我が国の温室効果ガスの総排出量は11億5,000万トン(CO₂換算)で、前年度の12億1,200万トンに比べて、新型コロナウイルス感染症の感染拡大による製造業の生産量の減少、旅客・貨物輸送量の減少等に伴うエネルギー消費量の減少等から、5.1%(6,200万トン)の減少でした。

近年、農林水産分野の排出割合は4%前後で推移していますが、その主なものは、水田や家畜の消化管内発酵等によるメタンと農地土壌や家畜糞尿等からのN₂Oです。

一方で、2020年度の森林等の吸収量は、4,450万トン(森林吸収4,050万トン、農地土壌炭素吸収270万トン、都市緑化等130万トン)です。

このような状況の中で、農林水産分野においてもカーボンニュートラルの達成に向けて、温室効果ガス削減のための「緩和策」と地球温暖化の影響に対処する「適応策」が求められています。緩和策としては、農地、森林、海洋の生態系による二酸化炭素吸収、農畜産業からのメタンやN₂Oの排出削減、再生可能エネルギーの活用やスマート農業の促進などが必要であり、また適応策としては、高温適応品種の育成や迅速な品種開発のためのスマート農業育種技術の開発などが必要です。これらの実現のために、幅広い基礎的研究と多岐にわたる革新的な技術の開発が求められています。

そこで本シンポジウムでは、農学におけるカーボンニュートラルの達成に向けた様々な研究や技術開発の現状を紹介し、将来に向けた議論を深めたいと考えています。様々な観点から新たなアイデアや知見を持ち寄り、多角的に議論する場となることを期待しています。

2022 年 10 月

一般社団法人日本農学会会長

大杉 立

食料生産と気候変動緩和の一石二鳥 ～土壌は地球を救う！～

白 戸 康 人
農研機構農業環境研究部門

1. はじめに～2050 カーボンニュートラルと、土壌炭素貯留への期待

気候変動が進行しつつあり、既にさまざまな影響が出始めていて、その影響は将来いっそう大きくなると予測されている。そんな中、世界中で、脱炭素社会の実現に向けた動きが急速に進んでおり、多くの国が野心的な温室効果ガス(Greenhouse Gas: GHG)の排出削減目標を公表している。日本政府も、2050 年にカーボンニュートラル(CO_2 排出の実質ゼロ)を目指すことを宣言した。それまでも、2050 年に 80%減など大きな削減目標を掲げてはいたが、「80%減」と「実質ゼロ」の違いは非常に大きい。80%減は省エネなどの努力を進めた先にたどり着ける可能性もあるが、いくら省エネを進めても完全に排出ゼロにはできないため、「実質ゼロ」とするには、 CO_2 を吸収する「吸収源」が必ず必要になる。吸収源と言えば京都議定書において日本の削減目標の多くを担った森林を思い浮かべる人が多いと思うが、森林だけではなく、農地土壌への炭素貯留にも大きな期待が寄せられている(さらには、陸地だけではなく、藻場などの海も！)。土壌への炭素貯留など、自然を活用した脱炭素技術は、他の工業的な方法や技術と比べて有利な点が多く、今後、期待はどんどん高まるだろう。我々農学者の出番である。

2. 土壌炭素と気候変動緩和

農地を含む陸域の生態系では、植物が光合成をして CO_2 を吸収し、その植物体が土壌に還り、土壌中の微生物により分解されて CO_2 が大気に出る、というように、大気、植物、土壌の間で炭素(C)が循環している(図1)。このうち「陸上植生」については、例えば森林では長期的に量が増加している「吸収源」となることがあるが、イネやムギなど農地の作物の多くは単年性のため、作物体に存在するCの量は長期的に変わらないとみなせる(短期的な、例えば季節変化はするが)。従って、土壌

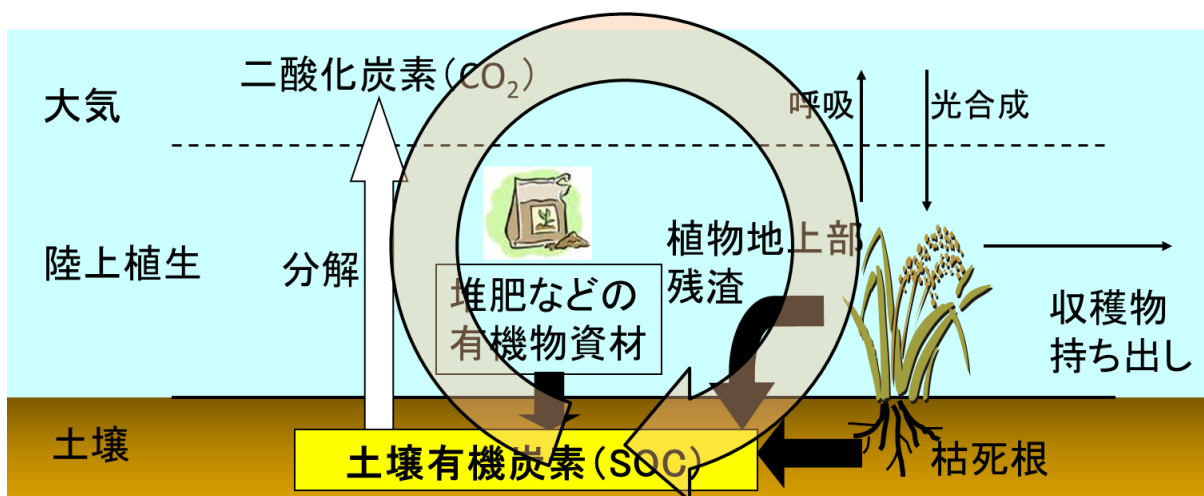


図1. 土壌を中心とする農地の炭素(C)循環。Cは大気中の二酸化炭素(CO_2)、植物体中のC、土壌中の有機炭素(SOC)と姿を変えながら循環しており、農地でSOCが増えることは、大気 CO_2 の減少を意味する。

有機炭素(SOC)が減少するなら大気 CO₂が増え、SOC が増加なら大気 CO₂が減る勘定になる。このことから、土壌の管理を工夫し、SOC を増やすことが気候変動緩和につながるといえる。

しかも、地球全体でみると、SOC 量は、大気 CO₂の 2 倍、陸上植生の 3 倍以上あると推定されており¹⁾、非常に多量なので、その量の変化が地球全体の C 循環に及ぼす影響は大きい。実際、過去に人為により失われた土地由来の C 量はこれまでの産業革命以降の化石燃料消費の C 総量を大きく上回るとの見積もり²⁾もある。これまで土地から放出した量が多いということは、土地を過去の状態に戻すことによる吸収源としてのポテンシャルも大きいことを意味する。すなわち、世界中のあちこちの農地で SOC を少しずつ増やせば、「チリも積もれば山となる」で非常に大きな吸収源となる可能性を秘めている。2015 年にパリ協定と同時に立ち上がったフォーパーミル(4/1000)イニシアチブは、「全世界の SOC 量を毎年 0.4% (つまり 4‰:4 パーミル) ずつ増加させることができれば、大気 CO₂の増加をゼロにすることができる」という試算⁴⁾に基づき、世界中で土壌への C 貯留を推進しようという国際的な大きな動きである。

また、土壌への C 貯留は、他の(工業的な)ネガティブエミッション技術と比べてコストが安いのも特徴である³⁾。

3. 土壌 C を維持増進する土壌管理～食料生産との一石二鳥

SOC 量を増加させるためには、土壌にすき込む堆肥や緑肥など有機物の投入量を増やすか、不耕起・省耕起栽培に切り替えるなど土壌有機物の分解を遅くする管理が有効である。図2は、世界で最も古い長期連用試験(同じ圃場で長期間同じ管理を継続する試験)として有名な英国のローザムステッド農業試験場のデータで、堆肥を施用した畑では土壌 C 量が増加し続けることを示している。ただし、堆肥は製造にも散布にも労力がかかるので、園芸など、小面積で高収益が見込める労働集約的な品目に向いているが、大面積の土地利用型農業には向かないという見方もある。また、堆肥の総量が同じであれば、投入を増やした畑があれば投入量が減った畑もあるはずで、前者だけを評価して C 貯留を主張するのは認められない(つまり、堆肥が移動しただけで、新たな大気CO₂の吸

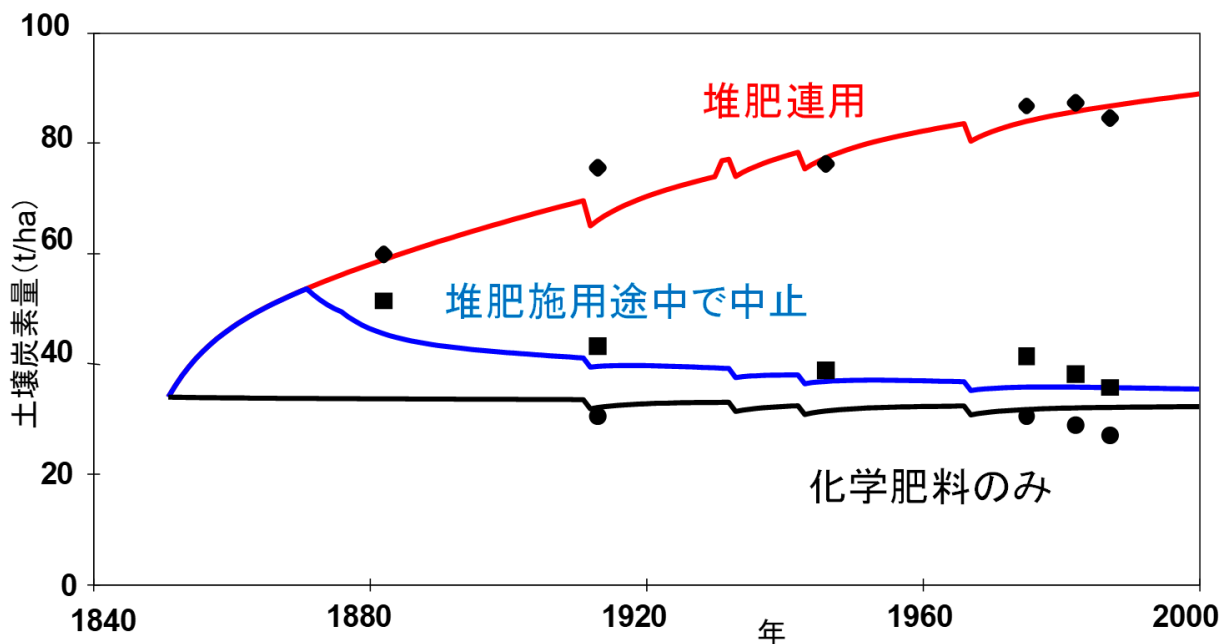


図2. 英国ローザムステッド農業試験場の有名な長期連用試験の結果。土壌炭素は、堆肥の施用で増加し、化学肥料のみでは横ばい。堆肥施用を中止すると、徐々に低下して元に戻ってしまう(Coleman & Jenkinson, 1996⁵⁾を改変)。

収は起きていない)ので注意が必要である。一方、緑肥なら堆肥ほどの労力がかからないので、イネ、ムギ、ダイズなど土地利用型の品目にも向いているし、緑肥作物は確かにその場所で光合成して CO_2 を吸収するので上記の「堆肥の移動に過ぎない」問題は生じない。

堆肥や緑肥の施用は、作物の生産性を高めるために古くから農家が行ってきた土壌の有機物管理である。土壌の C 量は、大まかに言って、窒素をはじめとする作物にとっての養分の量と相関があるし、保水性や排水性などの物理性の良さと相関がある。つまり、土壌 C 量を増やすような土壌管理は、食料生産と気候変動緩和の両方に貢献する一石二鳥ということになる。

堆肥や緑肥以外では、最近、バイオ炭が注目されている。堆肥や緑肥のように土壌中で土壌に固有のプロセスで安定な有機物の腐植がつけられるのとは違い、低酸素状態で加熱されて炭化することで炭素が安定化するので、C の安定化のメカニズムは全く異なるが、炭化物は非常に安定で分解を受けにくく、多量の C を貯留できる可能性があるため、注目を集めている。

一方、C の投入ではなく分解を減らすほうの技術では、不耕起・省耕起栽培が有効と言われている。世界では成功事例が多く報告されているが、日本のような高温多湿の気候では雑草対策など不利な条件もあり、これまでのところ日本ではあまり大きな広がりを見せていない。

4. トレードオフと総合評価

環境問題を考える際に考慮すべきこととして「トレードオフ」がある。一方を立てれば他方が立たなくなる、何かを達成するときに他の何かが犠牲になるということを指す言葉であるが、環境問題では、「風が吹けば桶屋が儲かる」のように、様々な事象が複雑に絡み合っているために、物事の一面だけを見ていると思わぬところに悪影響が出るというトレードオフが起こりやすい。

例えば、前述した土壌への C 貯留を目指して農地への有機物の投入量を増やした場合、土壌 C 貯留という面だけを見ると確かに土壌 C 量の増加に伴い CO_2 の吸収が促進、あるいは排出が削減されることになるが、同時に、他の GHG (メタンや一酸化二窒素) の排出増加や、化石燃料消費による CO_2 排出の増加を伴うこともある。よって、物事の一面だけを見ずに、総合的に評価することが大切である。

なお、メタンと一酸化二窒素は、気候変動への寄与としては CO_2 に次ぐ 2 番目、3 番目の気体であるが、排出量に占める農業の寄与が大きいと、農業分野においては排出削減の意義が大きい気体である。

上述したような GHG に関するトレードオフの場合には、異なる種類のガスもすべて地球温暖化係数(GWP:Global Warming Potential)を使って CO_2 に換算することでプラスの効果とマイナスの効果を両方同じ尺度で総合評価することができる。ただし、環境問題には、地球温暖化だけでなく、水質の富栄養化、生物多様性、重金属などの有害化学物質など、種類の違う様々な環境へのインパクトがあり、これらを総合評価するには、LCA(Life Cycle Assessment)などの考え方をういた総合評価の手法が必要となる。地球温暖化は、これらの問題の一部に過ぎない。

5. 緩和技術の普及のために

土壌管理の工夫による土壌への C 貯留の効果は、同じ管理を行ったとしても気候条件や土壌タイプなどの環境条件により異なる。また、前述したように他の環境負荷とのトレードオフも考慮しなければならない。これらのことを知り、農法と環境負荷の関係を理解する方法の一つとして、筆者らが開発した Web アプリケーション⁶⁾を紹介する(図 3)。土壌への炭素貯留量や GHG の発生量は、その場所ごとの環境条件や管理で変わるが、それを簡単に計算できる「土壌の CO_2 吸収「見える化」サイト」を開発・公開している(<https://soilco2.rad.naro.go.jp/>)。この Web サイトでは、地図上で計算し

たい場所をクリックし、作物や管理の方法を簡単な操作で選択するだけで、土壌への炭素貯留量を、標準的な管理とユーザーが選んだ「あなたの管理」の場合で比較できる⁶⁾。このようなサイトを、意思決定を支援するツールとして、生産者や行政が意思決定に活用してくれることを望む。

このサイトは、普及啓発用、教育用という意味合いを重視し、ユーザーの操作は非常に簡単であるが、その裏側では土壌炭素動態モデル RothC が動いて土壌炭素の増減を計算する仕組みになっている。土壌炭素量の変化にしても、他の GHG 排出にしても、最初は「まず測ってみる」ところから始まり、測る場所の条件(気象、土壌、土地利用、営農管理など)により観測値が異なることが分かってくると、その関係を一般化し、モデル化しようという試みが生まれる。この web サイトは、そのようなこれまでのモニタリングとモデリングの両方の研究の蓄積に基づいたものである。モデリングの研究は、将来予測など実用的な利点があるのはもちろんであるが、現象のメカニズム理解にも有用であり、モニタリングとモデリングの両輪でこの分野の研究が進展し、脱炭素社会の実現という社会問題の解決に貢献することを望む。



図3. 意思決定支援のための web サイト「土壌の CO₂ 吸収「見える化」サイト」の概要。簡単な操作で場所や土壌の有機物管理に応じた土壌炭素量の増減を計算することができる。

6. 終わりに

本シンポジウムでの講演を依頼された際、「若手研究者へ有益な刺激を与える」ことを期待しているとの言葉があった。私などがそう簡単に刺激など与えられるものではないと思っているが、私たちが取り組んでいるテーマは面白いですよ。GHG のゼロエミッションを目指すこれからの社会において、吸収源は必須であり、農地の土壌炭素貯留への期待は大きい。ポテンシャルも大きいし、食料生産

にも環境にも役立つ一石二鳥で、やりがいがあるテーマだと思っています。一緒に研究をしてくれる若い仲間をお待ちしています。

引用文献

- 1) IPCC 2021. Climate change 2021: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change
- 2) Lal, R. (2004) Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security, *Science*, 304, 1623-1627
- 3) IPCC 2022. Climate change 2022: Mitigation of Climate Change, Contribution of Working Group III to the sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change
- 4) Soussana, J. F, Lutfalla, S., Ehrhardt, F., Rosenstock, T., Lamanna, C., Havlík, P., Richardsd, M., Wollenberg, E., Chotte, J. L., Torquebiau, E., Ciais, P., Smith, P., Lal, R. (2019) Matching policy and science: Rationale for the ‘4 per 1000 – soils for food security and climate’ initiative, *Soil and Tillage research*, 188, 3-15.
- 5) Coleman, K., and D. S. Jenkinson. 1996. RothC-26.3 - A model for the turnover of carbon in soil. In *Evaluation of Soil Organic Matter Models: Using Existing Long-Term Datasets*, edited by Powlson, D. S., P. Smith, and J. U. Smith, 237-246, Berlin: Springer-Verlag.
- 6) 白戸康人 (2015) 農地の温室効果ガス吸排出を総合評価するウェブサイト、*ニューカントリー*、738、42-43

家畜由来の温室効果ガス低減の取り組み

野 中 最 子

農研機構 畜産研究部門 乳牛精密管理研究領域 乳牛精密栄養管理グループ

1. はじめに

日本人の食生活はここ 50 年で大きく変わっており、食料需給表(農林水産省, 2022)によると 1970 年代には動物性タンパク質の 7 割を魚介類から摂取していたが、2021 年には魚介類は 4 割となり、食肉が 6 割を占めるようになっている。2021 年における 1 人あたりの食肉の年間消費量は、鶏肉 14kg、豚肉 13kg、牛肉 6kg と合計で 34kg にも及ぶ。その他、鶏卵 290 個、牛乳 30L、チーズ、ヨーグルトなどの乳製品は 60kg も消費しており、畜産物は私達の食卓になくてはならないものになっている。

一方で他の産業と同様に、畜産業からも温室効果ガスが排出されており、国内の農林水産分野において、家畜の消化管内発酵由来メタン、家畜排せつ物管理由来一酸化二窒素(N_2O)とメタンでおよそ 3 割を占めている(図 1)。今後の持続的な畜産業の展開を図るためにも、生産性向上と環境負荷低減を同時に達成することが大きな課題となっている。

そのような中、我が国において持続可能な家畜生産体系の確立のため、2017 年から農林水産

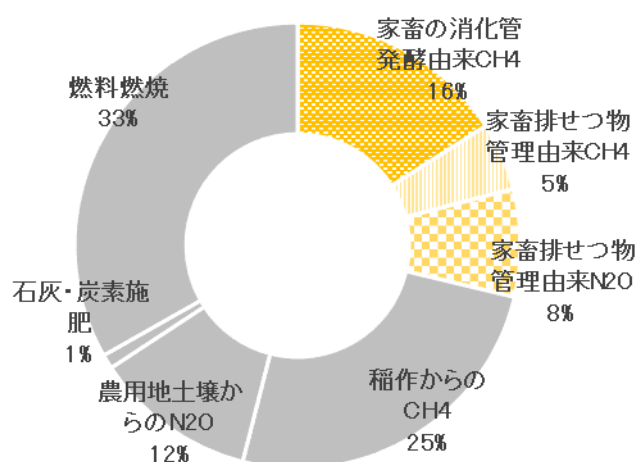


図 1. 国内農林水産業からの GHG の排出と畜産の割合
(農林水産省農林水産省 web サイトの図を改変)

省委託プロジェクト研究「農業分野における気候変動緩和技術の開発」(畜産分野における気候変動緩和技術の開発)、2020 年から内閣府ムーンショット型農林水産研究開発事業「牛ルーメンマイクロバイーム完全制御によるメタン 80 %削減に向けた新たな家畜生産システムの実現」が開始された。これらは、主にウシ消化管を由来とするメタン、家畜排せつ物処理から発生するメタンと N_2O を削減するための技術開発を目的としている。これらプロジェクト内で得られた成果を中心に先行研究とともに紹介する。

2. ウシ消化管由来メタンの削減

ウシには胃が 4 つあり、1 番目(ルーメン)と 2 番目の胃の中にはたくさんの微生物が生息している。その微生物がまず、ウシが食べた飼料を分解し、発酵させて、ウシがエネルギー源として使える形(短鎖脂肪酸)に変換する。さらに、自分たち微生物を増やし、それらが 3、4 番目の胃へ、そ

して小腸へ流れていく過程で、ウシのタンパク質源(微生物態タンパク質)として利用される。このようにウシは、ヒトが栄養として利用できない牧草などの繊維質を、微生物の力を借りて、ミルクや肉を生産する仕組みを持っている。ただ、これら微生物は飼料を分解、発酵する過程で、副産物として二酸化炭素や水素などのガスを産生し、その一部はメタン細菌等に利用されてメタンとなり、他のガスと一緒にいわゆる「ゲップ」として放出される。

このようにウシからメタンが出てくるのは必然であるが、このメタンを減らすためのアプローチとして次の4つが考えられている。

1) 飼料、栄養管理の工夫、資材の添加

採食する飼料の量や種類によってメタン排出量は変わる。採食量の増加にともないメタン排出量は増加するが、採食量あたりのメタン排出量は減少する。牧草より穀類などの濃厚飼料割合が増えるとメタン産生量は減少する。牧草などの粗飼料は刈り取り時期によって栄養価は異なることは知られているが、メタンの排出量も異なる。飼料中の脂肪含量を高める、あるいは、脂肪酸カルシウムを添加するとメタン排出量を減らすことができる。

2) ルーメン微生物の制御

メタン排出量を低減する微生物相改変資材の1つであるカシューナッツ殻液の添加は、飼料の消化率や乳生産性を落とすことなく1割弱の低減が可能である(真貝、2014)。また、最近になり、乳牛の第一胃から、プロピオン酸前駆物質を既知の近縁菌より多く産生する新種の嫌気性細菌が発見された(Shinkai, 2021)。プロピオン酸とメタンはともに水素を利用する拮抗関係にあるため、この新しい細菌は、ウシにおけるメタン産生量の低減とプロピオン酸産生による生産性の向上に資することが期待されている。

3) 1頭当たりの生産性の向上

育種改良や飼養・栄養管理技術の高度化により、1頭あたりの乳生産量や増体速度は年々増加している。1頭当たりの生産量の増加に伴い1頭あたりのメタン排出量は増えるが、生産物あたりのメタン排出量は減る。つまり、1頭あたりの生産性の向上は、飼養頭数の減少につながるため、全体としてメタン排出量が減ることになる。また、ウシ1頭あたりからのメタン排出量は、摂取量が多くなるほど排出量も多くなるため、ウシの栄養要求量に合わせて給与し、必要以上に食べさせないことも重要である。他にも、初産の分娩月齢の遅れや、乾乳期間の長期化は、生産物あたりのメタン排出量を増加させることから、繁殖をうまく回すことも大切である。さらに、子牛の損耗や乳房炎などの生産病も少ない方が良く、健全性を高めることも重要である。

4) メタン排出量の少ないウシの選抜

これまで述べてきたようにウシからのメタン排出量は、飼料や微生物相によって変わるが、食べた飼料の種類、量が同じであってもメタン排出量は個体によって異なる。さらに、その特性は産子に遺伝するということも徐々に明らかにされてきた。つまり、メタン排出量の少ないウシを選び(育種選抜)、その子孫を増やしていけば、将来においてウシ消化管からのメタン排出量を減らせる可能性がある(Uemoto et al., 2020)。

ただ、メタン排出量の少ないウシを選ぶことが極めて難し



写真 1. 呼吸試験チャンバー

成牛1頭が滞在できる大きさ。

い。育種選抜には多頭数のメタン測定値が必要だが、ウシからのメタン排出量を測定することが困難であるからだ。これまでは、開放型呼吸試験チャンバー(写真 1)やヘッドボックスの中にウシを数日間滞在させる方法で、ウシからのメタン排出量を定量的に測定していた。この方法は最も精密に測定できるが、国内では農研機構が保有する 4 台のみで、育種改良に必要な何百、何千という多頭数のデータを得るには向いていない。そこで、呼気ガスの一部を採取して、そのガス中のメタン/二酸化炭素比(CH_4/CO_2 比)をもとにメタン排出量を推定するヨーロッパで開発された手法を日本の牛に適した手法に改良した(Suzuki et al.,2021)。搾乳ロボット(写真 2)や個体別飼槽においてその場に滞在中のウシの呼気を数分間 1 日に 2〜3 回、7 日間連続で採取し平均的な CH_4/CO_2 比を求め、牛個体からのメタンを推定できる簡便かつ安価な「スニファー法によるメタン排出測定システム」を開発した。今年度より 5 年間の計画で開始されたプロジェクト「畜産 GHG プロ」では、このシステムを用いて、複数の大学や公設試などで飼育されているウシから、メタン排出量を測定する予定である。これによりメタン排出量の少ないウシを選んで増やしていけば、時間はかかるかもしれないが、牧草を栄養とすることができるウシの利点を生かしながらメタン排出量を減らすことができると期待している。



写真 2. 搾乳ロボット

3. 家畜ふん尿由来一酸化二窒素およびメタンの削減

飼料のタンパク質はエネルギーと同様に、家畜自身の維持や成長のみならず、泌乳や妊娠などにも必要な主要栄養素の 1 つであるが、体内で利用されなかったタンパク質やアミノ酸は、ふん尿として排せつされる。このふん尿に含まれる窒素こそが、温室効果ガスの一つである N_2O と、 N_2O の前駆物質で臭気(悪臭)とも深く関わっているアンモニア(NH_3)の発生源である。ふん尿中の窒素が減少することで N_2O と NH_3 も減ることから、体内で必要な分だけのタンパク質やアミノ酸の給与が環境負荷ガスの削減につながる。ただし、単純に、飼料のタンパク質量を減らすと、畜産物の生産量まで低下してしまうので、不足するアミノ酸を添加することがポイントである。このような考え方に基づいて設計した飼料のことをアミノ酸バランス改善飼料と呼んで、肥育豚とブロイラーでは温室効果ガス排出削減方策として提案してきた(図 2)。ここでは、農林水産省委託プロジェクト研究推進事業「農業分野における気候変動緩和技術の開発」(2017-2021)において新しく取り組んだ採卵鶏と肉用牛について紹介する。



図 2. アミノ酸バランス改善飼料のイメージ

1) 採卵鶏におけるアミノ酸バランス改善飼料の取り組み

採卵鶏は 150 日齢から 600 日齢くらいまで産卵を続ける。茨城県畜産センター(飯尾ら、2021)では、ジュリア種採卵鶏を用い、200 日齢から 300 日齢の産卵前期試験、および 400 日齢から 600 日齢までの産卵中後期試験を行った。産卵前期の飼料粗タンパク質(CP)含量は原物あたり対照区 19%、試験区 17%、産卵中後期の飼料 CP 含量は原物あたり対照区 16%、試験区 14%に設定した。このように産卵前期、後期ともに対照区と試験区で 2%ポイントの差を設け、さらに試験区の飼料には採卵鶏の要求量を満たすため、リジン、メチオニン、トリプトファンを添加した。その結果、試験区では対照区と比較し、採食量や産卵成績に差は認められず、排せつ物への窒素量を前期では 2 割削減した(産卵後期の結果は現在取りまとめ中)。さらに、産卵前期においてこれら飼養試験で得られた排せつ物を実際に堆肥化して温室効果ガスを測定したところ、対照区と比較して試験区では、 N_2O や NH_3 だけでなくメタンも低下しており、アミノ酸バランス改善飼料の温室効果ガス削減への有効性を明らかにすることができた。この成果をもとに一般の農家でボリスブラウン種を用いて実証試験を行った。その結果、産卵前期、中後期とも、アミノ酸改善バランス飼料を給与しても産卵成績などの生産性に影響はないことが確認された。

2) ホルスタイン種肥育去勢牛へのアミノ酸バランス改善飼料の給与

前述の通りウシのルーメンには微生物が生息しており、ヒトが栄養として利用できない繊維成分や尿素なども微生物態タンパク質やアミノ酸に変換する。そのため、ウシのアミノ酸の要求量を精密に知ることは鶏や豚などの単胃動物と比較して難しい。このプロジェクトで Kamiya ら(2021)は、肥育前後期あわせて 12 ヶ月以上の飼養試験によって生産性維持と環境保全の両立に関する検証を行った。ホルスタイン種去勢牛 8 頭(対照区 4 頭、試験区 4 頭)を供試し、肥育前期(7~10 ヶ月齢)の飼料 CP 含量を乾物あたり対照区 17.2%、試験区 14.4%、肥育後期(10~18 ヶ月齢)の飼料 CP 含量を対照区 14.5%、試験区 11.4%に設定した。試験区の飼料には、1 日 1 頭あたりリジン(前期 13g、後期 22g)とメチオニン(前期 1g、後期 2g)をルーメン保護アミノ酸(ルーメン内の微生物が利用しにくい形)として添加した。その結果、飼料 CP 含量を減らした試験区では対照区と比較し、採食量や増体量などの飼養成績、あるいは枝肉重量やロース芯面積など生産性に差は認められず、ふん尿中への窒素排せつ量は 15%程度減少した(図 3)。

この結果をもって、実際に肉用牛を飼っている農家においてアミノ酸バランス改善飼料を用いた試験を実施した(写真 3)。その結果、試験区と対照区で、増体成績、枝肉重量やロース芯面積、歩留まりに差は認められなかった。また、肉質にも差は認められないという成績を得た。

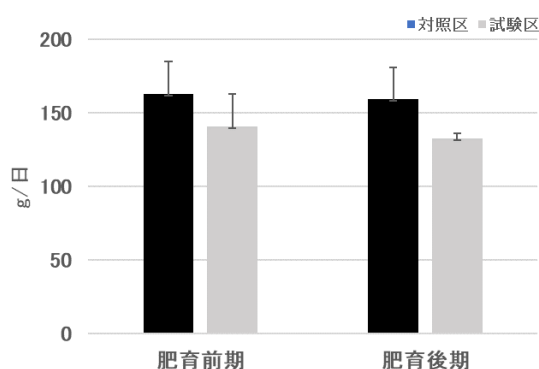


図 3. 肉用牛におけるふん尿からの窒素排せつ量



4. おわりに

以上のように、ウシ消化管からのメタン排出量の低減、排せつ物処理からのメタンと N_2O の低減技術はいくつか開発されてきているが、食糧生産と環境負荷軽減を同時に達成しなければならない課題であるため、短期間に大幅な削減を行うことはかなり難しい。しかし、畜産経営は、飼料生産、栄養・飼養管理、ふん尿処理・利用などで複合的に成り立っていることから、システム全体として温室効果ガスの低減を考えていくことで、この問題の解決に貢献することができるものと考えている。その際には、生産者への技術導入を促すような方策も視野に入れつつ、その取り組みを消費者へもアピールし、理解を深めてもらうことも重要であろう。

引用文献

- 1) 食料需給表(2022). 農林水産省 web サイト
<https://www.maff.go.jp/j/zyukyu/fbs/>
- 2) みどりの食料システム戦略(2021) 農林水産省 web サイト
<https://www.maff.go.jp/j/kanbo/kankyo/seisaku/midori/index.html>
- 3) 真貝拓三ら(2014) 栄養生理研究会報, 58: 45-51.
<https://agriknowledge.affrc.go.jp/RN/2030873698.pdf>
- 4) Shinkai et al. (2022) International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 72
<https://doi.org/10.1099/ijsem.0.005278>
- 5) Suzuki et al. (2021) Animal Science Journal, 92: e13637.
<https://doi.org/10.1111/asj.13637>
- 6) 飯尾ら (2021) 日本畜産学会報 92: 485-491.
<https://doi.org/10.2508/chikusan.92.485>
- 7) Kamiya et al. (2021) Animal Science Journal, 92. e13562.
<https://doi.org/10.1111/asj.13562>
- 8) Uemoto et al. (2021) Animal Science Journal, 91. e13383.
<https://doi.org/10.1111/asj.13383>

「園芸生産に要するカーボンの排出削減に向けた技術革新」

彦 坂 晶 子

千葉大学園芸学研究院

1. はじめに

園芸作物の生産対象は、人が健康に生きるために必須の栄養成分や機能性成分を含む野菜や果樹、生活の質を高める花き類である。私たちの生活に欠かせない園芸生産は、その過程でカーボン(以下、C)吸収を行うことから、他の農業分野や工業分野と比べるとカーボンニュートラル(CN)に寄与しやすいと言える。しかし、実際の園芸作物の生産現場を CN の視点で見直すと、かなりの量のカーボンを排出することで成立している。本講演では、一般的に浸透している「園芸」=「野菜、果物、花木、栄養、健康」=「CN に貢献」というポジティブなイメージから離れ、「園芸作物が吸収する C 量」と「園芸生産によって排出される C 量」を整理し、C 削減に必要な要素技術と今後の技術革新の方向性について考える。

2. これまでの園芸生産の目標

カロリー源となる作物(穀類、マメ類、イモ類)は土地利用型農業で、露地で適した季節に生産され、年に 1 回の収穫で長期保存できる。他方、園芸作物(野菜、果樹、花き)は鮮度が重要であり、長期保存ができない。そのため、周年摂取が必要なビタミン類や機能性成分を含む野菜類には周年生産が求められ、生活を豊かにする花きや果樹には特有の香りや味、色、形状をもち高品質なものや季節外れなものに付加価値がつく。つまり、これまで園芸生産で推進してきたことは、「対象作物に不適な季節の安定生産」である。そもそもこれは「一年中、健康でいたい」「おいしいものを食べたい」「きれいな花をみたい」という人間の欲(希望)が推進してきた技術革新の積み重ねである。

当然、不適な季節の生産には、適した環境にするための資源やエネルギー投入が必要である。幸い日本には多様な気候帯があり、古くから「作型」という概念が発達していたことで、主要品目については指定産地による周年安定供給が確立していた。見方によっては、これは季節ごとに栽培適地に産地を移動することで、資源・エネルギー投入量を最小限にする「日本独自の省エネ生産方式」と言える。

しかし、同じ産地で周年生産し、栽培適期を外して収穫物の付加価値を高めるためには、資源・エネルギー投入量、すなわちコストを増やすことが前提となる。そのため、生産者視点だったこれまでの研究開発では、常に「コスト削減と収量増加、品質向上」というわかりやすい目標が掲げられてきた。そしてこれまで研究者は、知見に基づいた多様な生産技術を開発し、周年安定生産や高品質生産を実現してきた。しかし、今、我々は「資源・エネルギー投入量を前提とした周年安定生産」という生産体系を見直し、グローバル視点で「CN」という緊急の目標に取り組まなければならない。

3. カーボン吸収量・排出量の数値化の必要性和複雑性

3-1. 吸収量の数値化

工業製品の生産とは大きく異なり、園芸生産では植物が光合成によって CO_2 を吸収する過程がある。アマゾンや東南アジア、日本の森林が大量の C を吸収することで CN に大きく貢献している、あるいはカーボンクレジット関連のニュースなどから、園芸生産にも CN 的なイメージを持つ消費者は多い。しかし、実際の C の流れを考えると、光合成によって固定される C は一時的に植物体中に貯留されるものの、食料として消費される部分はもちろん、消費されない部分も、じきに焼却や埋設後に土壌微生物によって徐々に分解され、大気へと放出される。すなわち、草本植物が貯留できる C 量は木本植物に比べて小さく、また貯留期間も短い。果樹は木本植物のため、他の園芸作物や花きよりも貯留期間が長いと考えられるが、毎年、同じ樹形を維持するために剪定は必須であり、剪定枝や落葉の処理方法によっては、やはり C 吸収量はかなり少ない。忘れがちだが、CN 達成に必要なのは「光合成による C 固定」だけでなく「固定した C の貯留」である。この視点での研究開発は農学分野においては新規課題であり、C 収支の全体像を考えるような思考領域の拡張が求められる。

3-2. 排出量の数値化と収支

園芸生産で排出される主要な C には、石油由来の燃料（農業機械、暖房など）や温室の被覆資材（外張り、保温・張遮光カーテン）、マルチ栽培やトンネル栽培に用いられる被覆資材などが含まれる。石油由来の燃料や資材の使用は、何百万年もの時間をかけて木本植物と自然環境が固定した C を短期間で地上に排出することになるため、相当の「C ポジティブ」と言える（ポジティブというと良いことのように聞こえるが、環境負荷が大きいという意味）。しかし、現状「生産に不適な季節」を「適した季節」に制御することで成立している園芸生産では、これら石油由来の燃料や資材の投入は必要不可欠である。

ここまで C 吸収と排出の主要因を説明してきたところで、かなり大雑把に収支計算をする。

【吸収量：ネガティブ】トマト群落の純光合成速度を $5\sim 10\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ （成熟葉）とすると、1 日（明期 12 時間）あたりの CO_2 固定量は $9\sim 18\ \text{g}\ \text{m}^{-2}$ であり、 $\text{LAI}=1.0$ （総葉面積＝栽培面積）で栽培面積が 10 a の場合、 CO_2 固定量は $9\sim 18\ \text{kg}$ である。

（注：LAIを増やしても面積あたりの日射量は一定で、むしろ相互遮蔽が増えるので、計算誤差として CO_2 吸収量が最大 2 倍になることはあっても 10 倍になることはない。）

【排出量：ポジティブ】温室（10 a）の果菜類に暖房する場合、A 重油暖房の年間使用量（高知県）を日平均すると $10\sim 27\ \text{L}\ 10\text{a}^{-1}$ であり、A 重油の CO_2 排出量は $2.7\ \text{kg}\ \text{L}^{-1}$ （環境省）なので、1 日あたりの CO_2 排出量は $27\sim 73\ \text{kg}$ である。

【収支】暖房燃料だけで既に光合成で固定した C の 1.5～8 倍あり、C ポジティブである。実際には、さらに被覆資材や肥料、水、農薬、流通時の C 排出量が加算されることから、施設園芸での CN 達成に必要な CO_2 吸収量を考えると気が遠くなる。露地野菜などの土地利用型園芸生産においても、生産施設と暖房以外の部分は共通であり、むしろ農業機械の燃料や水、肥料、農薬は施設園芸の数倍は必要であることから、CN への道のりは施設園芸と大差ないと思われる。

3-3. 数値化の必要性和複雑性

園芸生産に限らず、排出した C を試算する上で最も難しいのは、「空間・時間的にどこまでを含めるか」ということである。燃料使用量は季節や気象条件で大きく異なり、被覆資材は素材

や使用方法・頻度により遮光・保温効果(熱貫流率)や耐用年数が異なる。上述のように、実際には燃料と被覆資材に加え、温室の構造物、農業機械、水、肥料、農薬を生産(精製)するための C や、これら資材や収穫物を輸送する C(空路か陸路か)など、詳細に定義して試算する必要がある。さらに、試算の表示方法も目的に応じて変える必要があり、生産物の重量あたりや栽培面積あたり、月平均や年平均など、多様な分母で試算・評価することが求められる。

施設園芸の中でもトンネル、パイプハウス、大規模温室、植物工場など、様々な生産施設があり、資源・エネルギー投入量が多いほど制御できる環境要因が増え、周年安定生産や高収量・高品質生産が可能になる。これら生産施設の建設コストや資材の耐用年数、栽培に必要な資源・エネルギー投入量は生産施設ごとに異なることから、C 排出量の試算や比較は容易ではない。しかし、CN の達成には C 吸収・排出量の数値化と収支計算は必須である。

最近では、環境省や農林水産省から簡易 C 排出量試算ツールが提供されており、品目や条件は限られるが、一般利用が可能である。また、農業分野での利用例は少ないが、製品等のライフサイクルを通じた環境負荷を定量的に評価する手法として、ライフサイクルアセスメント(LCA : Life Cycle Assessment)という ISO 規格に基づいた評価法もあり、今後、C 収支の算定精度の向上、試算に関する報告や活発な議論が期待される。

被覆資材のみ

べたがけ、トンネル



日射、気温、地温

温室

ビニルハウス



日射、気温、湿度

ガラス室



日射、気温、湿度、
CO₂、培養液

植物工場

太陽光利用型
完全人工光型



光質、光強度、日長
気温、湿度、CO₂、培
養液

生産施設の種類と制御できる環境要素

4. 低コスト化、カーボン排出削減に向けたこれまでの取り組み

4-1. コスト、燃料削減のこれまでの背景

燃料費や電気料金が低い日本では、これまで何度となく暖房用灯油や重油の高騰を経験してきた。「歴史はらせん階段状に繰り返す」の言葉通り、10-15 年間隔で暖房費を抑制する暖房方法や温室の保温技術に関する研究開発が活発化している。最近では、2011 年の東日本大震災の際に広範囲な停電や節電があり、この時は CN という目標はなかったものの、省エネに関する多数の研究開発が行われた。

これまで積極的に研究開発されたものには、温室の断熱資材、地中熱・地下水利用、局所冷・暖房、木材チップ利用などがある。類似の研究は古くからあるものの、その時代に開発され

た新素材や新技術を取り入れ、少しずつ実用化に向けて研究成果を蓄積している。

4-2. 断熱性と高機能被覆資材

コンクリートや断熱材などで覆われているビルや植物工場と違って、通常の温室では断熱性の低い(熱貫流率の高い)薄いフィルム資材や保温カーテンで栽培空間を覆っている。当然、内外での熱移動は大きく、現状、冬季や寒冷地の暖房による C 排出量は植物工場より大きくなる。一般に、温室内に投入した暖気をできるだけ温室内にとどめておくために、2 重、3 重の内張カーテンを張ったり、密閉した空気の相を設けている。数年前になるが、農研機構からナノファイバー断熱資材のマニュアルが出され、新素材の重油の節減効果や資材の特性についての広報が進められた。いずれにしても、温室内外の熱交換を抑制する「断熱」は重要な研究要素であり、断熱性が高く、生産時の C 排出量が極力少ない被覆資材の開発が求められる。

他方、夏季の高温時には昇温抑制のために遮光カーテンを展張するため、光合成が抑制され、気温と日射の制御が難しい。また、細霧冷房と遮光カーテンを併用する場合には、換気を十分に行わないと冷房効果が損なわれ、高湿度になる。そこで最近開発されているのは、光合成有効放射(PAR)は透過し、近赤外線(NIR)を反射する新素材の被覆資材である。このような高機能被覆資材を用いることで、温室の昇温抑制をしながら夏季の日射量を十分に生かした光合成が実現する。近い将来、PAR の透過率を低下させずに、より NIR や IR を反射し、さらに断熱性が高い(熱貫流率が低い)素材が開発されれば、閉鎖型温室でも植物工場のように日中の昇温を冷房で抑制可能である。また、閉鎖型温室では病虫害の侵入リスクが低く、日中でも CO₂ 施用が可能になり、農薬散布量の削減や光合成促進が期待できる。

4-3. 木材チップ利用

近年、北海道や寒冷地の一部の温室では、燃料に重油や灯油ではなく木材チップを利用した暖房設備が導入されている。これは地上にあった C を吸収した木本植物を燃料として利用するもので、地下にある石油由来の C を新たに地上に放出しないという点で CN に合致する。また、森林の受光状態をよくするための間伐などで出される木材の利活用にもなっている。ただし、この木材チップの利用は固定した C を大気に再放出することになる。よって、後述の暖房の電力化に移行する間の手段としては有効であるが、可能な限り木材は木材のまま利用、貯留することが望ましい。

5. 今後の技術革新

5-1. 石油燃料から電力へ

温室の環境制御に必要な装置(冷・暖房、遮光・補光、かん水制御)は、コストを度外視すれば技術的にすべて電化できる。これをコストも加味して究極まで進めたのが植物工場である。電化できるということは、C 排出のない(少ない)方法で発電すれば、温室の環境制御に伴って排出される C は CN に近づく。すぐにゼロにならないのは、温室の構造物や発電装置、環境制御装置の作製といったイニシャル部分で多量の C が排出され、それが減価償却されるまで時間がかかることが理由である。さらに、水、肥料、農薬などの合成(精製)や輸送といったランニング部分でも C が排出される。

近年では、冷・暖房能力の高い電気ヒートポンプ(EHP)が開発されているものの、日中の温

室内の昇温抑制には能力不足であり、複数台の設置が必要になる。また、機器の価格や電気代の高さから、生産施設での普及は進んでいない。C 収支の観点から言えば、EHP の「冷・暖房能力のさらなる向上」、「自然エネルギー由来の電力を安定十分供給」の2点が実現すれば、温室内の冷・暖房に使用される燃料を削減できる。これには工学分野での技術革新が必要で、農学分野と他分野との情報交換や研究協力が必要である。

5-2. 資源・エネルギーおよびカーボンの地産地消

太陽光発電で得た電気を温室の換気や空調用 EHP に使用できれば、石油由来の C 排出なしに生産施設内の気温や湿度を最適化できる。この場合、太陽から受け取る一定のエネルギー（電磁波）を一時的に電気に変換し、蓄電池に貯めて利用するので、冷・暖房による C 排出量は大幅に削減される。このような発電と蓄電技術が今後一層進めば「電力の地産地消」が実現し、送電ロスの削減や地域内での消費電力の平準化（調整）によって、広域かつ大幅な C 削減に貢献することができる。

CN の観点から近年再評価されているモデルとして、地域一体となって資源・エネルギーを無駄なく利用するスマートシティがある。古くから言われていることだが、工場などから排出される熱源や CO₂ を隣接する温室や植物工場で利用し、生鮮野菜を少ない輸送コスト（C 排出）で地産地消するモデルである。このモデルでは、地域ごとに水産や畜産分野との連携が可能なことから、流通や消費段階で発生したフードロスを飼料や堆肥などに利用することもできる。

実際の研究事例として、離島を実証地として、植物工場を発・蓄電拠点かつ消費電力の平準化（調整）バッファとして利用することで、電力を地産地消する研究開発が進んでいる。このような地域限定のモデル研究は C 収支が解析しやすく、前述の C 収支の算定精度の向上につながる。また、環境制御による収量・品質の最大化と、それに必要な資源・エネルギー使用量や C 排出量の最少化を最適化するシミュレーションに応用できる。地域によって利用可能な資源・エネルギーの種類や価値は異なることから、解析には、トレードオフ関係にある複数の目的関数を同時に求める「多目的最適化」などが適していると思われる。

5-3. エネルギー保存則（余談）

前節で「換気や EHP で生産施設内の気温や湿度を最適化できる」と書いた。この時、同時に「温室外に不適な気温や湿度の空気が排出された」と理解された方は正解である。夏季のビル群や住宅密集地では、エアコン（EHP のこと）からの排熱で建物外の気温が上昇する。これと同じで、温室内環境の最適化は「局所冷・暖房している（自分の）空間以外はどうでもいい」という状態になっていることを忘れてはならない。NIR 反射資材も同様である。仮に、1 棟の温室内だけでなく、複数の温室群、地域全体を周年快適に空調制御したい場合、複数の地域間（または地上と宇宙空間）で熱交換をする巨大 EHP と巨大蓄熱槽が必要になる。資源・エネルギーや C を移動させるには、エネルギー（熱）が必要であり、C 収支を考える際には熱収支についての議論も欠かせないが、本稿では割愛する。

6. 農学研究、次の 100 年に向けて

現在の園芸生産技術では、残念ながら CN 達成は困難である。しかし、課題は明らかで、まずは C 収支の算定精度の向上と試算例の蓄積が必要である。次に、収量・品質と、それに必

要な資源・エネルギー使用量や C 排出量を最適化するシミュレーション開発が求められる。具体的な生産技術としては、生産時や輸送時の C 排出量を極限まで減らし、固定した C を貯留する技術革新が求められる。

CN に向けたアプローチは他にも多数ある。土壌特性を生かした耕地利用、遺伝子組換えやゲノム編集による耐病性強化や可食率・目的成分濃度の向上、環境制御技術による高効率生産、長期鮮度保持技術なども有効である。これらは農学研究が深く関わる領域であり、学会連携を通じて効率的に取り組むべき研究課題である。

来年、2023 年に(一社)園芸学会は創設 100 年を向かえる。これまで園芸学研究は、地域に適した園芸生産技術と、生理・生態、ゲノム、流通に関する基礎研究を積み重ね、全国や海外の園芸産業の発展に寄与してきた。今、急激な気候変動、資源・エネルギー問題、極端な経済不均衡という世界規模の危機に際し、次の 100 年を無事に向かえるためには、他分野、他学会との連携を通じて、科学的見地から何を研究し、何を提唱すべきか、慎重かつ迅速に判断しなければならない。

参考 URL

第 3 回グリーンイノベーション戦略推進会議 WG 2020 年 9 月 8 日 農業由来温室効果ガス排出削減技術の開発

https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/green_innovation/pdf/003_03_01.pdf

環境省 資料4 燃料別の二酸化炭素排出量の例

<https://www.env.go.jp/council/16pol-ear/y164-04/mat04.pdf>

施設園芸省エネルギー生産管理マニュアル(改定 2 版)平成 30 年 10 月農林水産省生産局

<https://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/ondanka/attach/pdf/index-112.pdf>

園芸農業の省エネルギー等に関する調査報告書(Ⅲ)(緊急雇用創出臨時特例基金事業)平成 24 年 2 月 高知県農業振興部環境農業推進課

https://www.pref.kochi.lg.jp/soshiki/111901/files/2012062500570/2012062500570_www_pref_kochi_lg_jp_uploaded_attachment_74650.pdf

地球温暖化対策地域推進計画策定ガイドライン(第3版)平成 19 年 3 月環境省地球環境局地球温暖化対策課

参考資料2 温室効果ガス排出量計算のための算定式及び排出係数一覧

https://www.env.go.jp/earth/ondanka/suishin_g/3rd_edition/ref2.pdf

ナノファイバー断熱資材活用マニュアル 平成30年1月 農食事業 27013C コンソーシアム

https://www.naro.go.jp/publicity_report/publication/files/warc_man_NanofiberManual201802a.pdf

農産物の温室効果ガス簡易算定シートの概要

https://www.maff.go.jp/j/press/kanbo/b_kankyo/attach/pdf/220912-1.pdf

環境技術解説 ライフサイクルアセスメント(LCA) 国立環境研究所

<https://tenbou.nies.go.jp/science/description/detail.php?id=57>

電気新聞テクノロジー&トレンド「食の脱炭素」へ 2022 年 6 月 24 日 電中研の挑戦 電力中央研究所

<https://criepi.denken.or.jp/press/journal/techtrend/220411.html>

ゲノム編集が引き出す植物の未知なる可能性 —ゼロエミッション、マイナスエミッションに向けて—

遠 藤 真 咲

国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構 生物機能利用研究部門

1. はじめに

約 35 億年前、地球の大気の 96%は二酸化炭素で占められていた。その後、植物が誕生し、光と二酸化炭素から酸素を生み出し、徐々に大気中の酸素濃度が高まることによってオゾン層が形成された結果、動植物の陸上生活が可能になった。また、植物は酸素の供給源であると同時に、食品や建材、紙製品、繊維、燃料として利用され、今日の人間生活にとって不可欠であることは言うまでもない。一方、豊かな暮らしの追求は、化石燃料の使用や森林伐採、農耕地拡大による生態系の破壊を引き起こし、干魃や水害が世界的な問題となっている。

植物は多様な環境に適応するために DNA を変化させ、数十億年かけて多様な進化を遂げてきた。さらに約 1 万年前、農耕の開始とともに、人類は積極的に植物を選抜、改良し、よりよい暮らしの実現を目指してきた。そして今日、生物の遺伝情報を自由自在に書き換えることができる『ゲノム編集』の手法も手に入れた。本稿では、バイオテクノロジーのビッグバンともいえる『ゲノム編集』を利用することにより、植物が持つポテンシャルをどのように高められるのか、そして、カーボンニュートラルの実現にどう貢献できるのかを考えてみたい。

2. 人類による植物改良の歴史 —従来育種とゲノム編集—

育種とは生物を遺伝的に改良して新しい品種を作成することである。育種という概念を持つ以前から、人類は、育てやすく、美味しい実をたくさんつける個体を選んで種を増やし、その種を植えることを繰り返してきた。現代農業においては、別の品種を掛け合わせたり（図 1A）、耐病性など優れた性質を持つ野生種を探索し、エリート品種にかけ合わせたり、放射線照射によって突然変異を誘発するなどして（図 1B）、積極的に作物を作り替えてきた。これらの方法は、遺伝子の多様性を拡大させる非常に有効な育種法であるが、掛け合わせた品種の遺伝子の混ざり具合や、放射線照射により変異が生じる遺伝子を指定することはできないため、期待する性質を持った個体が確実に得られる保証はなく、多くの個体の中から有望な個体を選抜するには多くの時間と労力を必要とした。

一方、ゲノム編集は、狙った遺伝子をピンポイントで改変できる技術であり、代表的なゲノム編集技術が CRISPR/Cas9 システムである（図 1C）。CRISPR/Cas9 システムは

元々、微生物の免疫システムとして見出されたものであり（Jinek et al., 2012）、Cas9 タンパク質と guide RNA という二つの物質の複合体が外敵の DNA 配列を見つけて結合し、DNA を切断するシステムを指す。CRISPR/Cas9 システムが特定の DNA 配列を見つけて切断するメカニズムが解明され、動物や植物の DNA 切断にも応用できることが証明されたことにより、ゲノム編集は一気に現実的なものとなった。CRISPR/Cas9 システムによって動物の特定の DNA 配列を切断し、切断部位の修復エラーによって遺伝子が改変されたことを報告した論文発表（Cong et al., 2013; Jinek et al., 2013; Mali et al., 2013）からわずか7年後の2020年、CRISPR/Cas9 の発見者である2名の研究者にノーベル化学賞が授与されたことは、この技術のインパクトの大きさを物語っている。CRISPR/Cas9 の登場をきっかけに、その基本原理を応用したゲノム編集技術が次々と開発され、塩基の挿入や欠失、入れ替えも可能になってきた。これらの技術を使うことで、自由自在に遺伝子を編集できる日も近いと感じている。

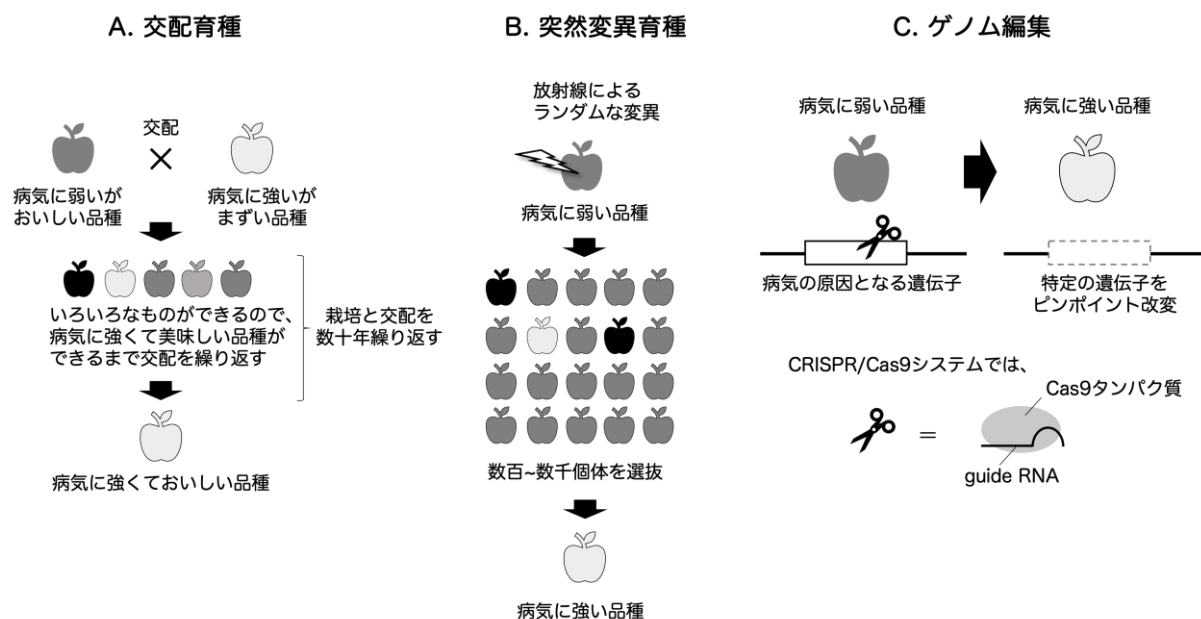


図1 植物育種法の比較

A 交配育種 異なる品種を掛け合わせることで、それぞれの品種が持つ良い性質を併せ持つ個体を作成する。**B 突然変異育種** ランダムに変異を導入し、目的の性質が現れた個体を選ぶ。**C ゲノム編集** 狙った遺伝子をピンポイントで改変する。

3. 脱炭素につながる植物のポテンシャルとゲノム編集

ゲノム編集は育種を加速する有望な技術であるが、この技術を活かすには、“どの遺伝子をどのように変えれば、期待する性質が現れそうか” という予測を立てる必要がある。近年、さまざまな植物の全ゲノム配列が解読され、ゲノム中にどんな遺伝子があ

り、どんな機能を担っているか明らかになりつつある。機能が明らかになっている遺伝子の中には、ゲノム編集でほんの少し変えることによって、直接、あるいは間接的に、炭素の吸収増加や排出抑制に貢献しうるものもあるので、その例を紹介したい。

前述した通り、植物は二酸化炭素を吸収し、その炭素固定産物は私たちの生活にさまざまな恩恵を与えてくれる。しかし、同時に植物の生産、加工、流通の過程では多くの二酸化炭素が排出されている。ゲノム編集による植物の改良は、植物が本来有する二酸化炭素吸収能力、貯蓄能力を最大限に活かすことはもちろんだが、植物由来製品の生産、流通、消費の過程において排出される二酸化炭素排出の削減にも貢献できるのではないだろうか。

光合成能の向上—植物は光合成によって毎年数百億トンもの二酸化炭素を大気中から除去しており、除去された炭素の半分は植物の根や土壤に貯留される。光合成は光エネルギーを利用して、二酸化炭素と水から有機化合物を作り出す非常に複雑な化学反応であるが、長年の研究から、反応の鍵となる酵素も同定されつつある。ゲノム編集により、光合成の反応経路を最適化することができれば、積極的な二酸化炭素の吸収が可能となり、イネの場合、有益な遺伝子改変を何重にも重ねることで、植物体に取り込む炭素の量を 30%以上増やせると見積もっている研究者もいる。

窒素利用効率の向上—窒素はタンパク質の元となるアミノ酸の合成に必須であるため、作物の生育に欠かせない。窒素肥料の化学合成が可能になったことで作物の収量は飛躍的に向上したが、窒素肥料の化学合成には大量のエネルギーを要するため、世界の二酸化炭素排出量の 1%はこの過程で生じるとも言われている。さらに、大量に投入された余剰窒素肥料は農地からの窒素やメタンの排出につながり、温暖化の原因となっている。そこで、低窒素施肥条件下でも高い収量を維持できる作物の開発に向けて、根から窒素が取り込まれるメカニズムや、植物体で窒素がどのようにアミノ酸に変換されるのかを明らかにする研究が進んでいる。また、土壌中には大気中の窒素ガスをアンモニアに変換し、窒素源として植物に供給する微生物も存在するため、その微生物と植物の関係性を解明する研究も進んでいる。これらの知見を活かしたゲノム編集を行い、少ない窒素肥料でも生育可能な作物ができれば、温暖化ガス排出の削減につながると考えられる。

フードロスの削減—FAO の報告書によると、フードロスにより発生する二酸化炭素の量は自動車からの排出量にも匹敵すると言われている（参考 1）。フードロスは、食品の生産、貯蔵、加工、食品製造、流通の過程で生じる廃棄全般を指すため、フードロス削減に効果的なアプローチも様々である。例えば、摩擦や切断による変色は消費者に好まれ

ないため、加工野菜や果物の廃棄の一因となっているが、レタスやマッシュルーム等で、空気と接触した部分の褐変を抑えるゲノム編集に成功している。また、ジャガイモは緑色になった皮や芽に、食中毒の原因となる毒素が貯まるため、貯蔵中に日が当たることで芽が出たジャガイモは廃棄される。理化学研究所、大阪大学、神戸大学の共同研究グループは、ゲノム編集によって、毒素を作らないジャガイモの作出に成功しており（Yasumoto et al., 2020）、野外圃場での栽培試験も行われている。さらに、植物や果実の老化に関わる遺伝子も明らかになっており（Ito et al., 2017 他）、ゲノム編集によってその遺伝子を改変し、日持ちを向上させる試みも行われている。

食料自給率の向上—食糧の多くを輸入に頼っている我が国の食糧輸入に伴う二酸化炭素の排出量は、年間 1 億 6900 万トンと世界でも群を抜いて高い（参考 1）。そこで、輸入依存度の高い農作物の自給率を上げることも二酸化炭素排出の削減につながる。日本の小麦の自給率は 12%と低く、世界的な天候不順やウクライナ侵攻による国際的な価格高騰を受けて食料安全保障の面からも自給率の向上が求められている（参考 2）。コムギの自給率を上げるためには、作付け面積を増やすことはもちろんだが、日本の気候に合った品種を開発することも重要である。コムギは西アジアの乾燥地域が原産であるため、高温多湿の日本と相性がいい作物とは言えない。特に、収穫時期となる 7-8 月に長雨が続くと、穂についた状態の種子が発芽してしまう穂発芽や、受粉時に穎が開く際に、穎中にカビが入って毒素を産生する赤カビ病が発生する。岡山大と農研機構の共同研究によって、ゲノム編集による穂発芽耐性小麦の作出に成功しており（Abe et al., 2019、図 2）、現在、圃場試験栽培が行われている。赤カビ病耐性についても、穎の開閉に関わる遺伝子を改変して、穎を開かなくすることでカビの侵入を防ぐ試みが行われている。



図 2 ゲノム編集で作出した穂発芽耐性コムギ

左: 元品種 右: ゲノム編集コムギ

ゲノム編集コムギは、水分があっても、穂についた状態では発芽しない。

(写真は、Abe et al. (2019) Graphical Abstract を改変)

4. ゲノム編集だからできること、その可能性を広げるために必要なこと

ゲノム編集は、生物がもともと持っている遺伝子を変化させる技術であるため、自然界でも同じ変化は起こりうる。世界各地で野生種を収集したり、突然変異を誘発することで、有用な個体を見つけ出すことも理論上は不可能ではない。しかし、同じ遺伝子を 4

個ずつ持つジャガイモや、6個ずつ持つコムギの場合、同一遺伝子全てに偶然変異が入る確率はかなり低いため、全ての同一遺伝子を変えないと性質が変わらない場合、突然変異によって期待する植物体を獲得することは困難である。一方、ゲノム編集の場合は、複数の遺伝子を同時に改変することも可能であるため、前述した、毒を作らないジャガイモや、穂発芽耐性コムギを数年のうちに作出することができた。イネやトマトが有する同一遺伝子は2個であるが、ジャガイモ、コムギ以外にも、同じ遺伝子を多数持つ植物は多く、サツマイモは6個、イチゴは8個ずつ同じ遺伝子を持つ。同一遺伝子を多数もつ種が多いことも、植物育種においてゲノム編集への期待が大きい理由の一つといえる。ただ、ゲノム編集を行うには、そのツール (Cas9 タンパク質や guide RNA) を直接細胞に入れるか、Cas9 タンパク質と guide RNA を植物自身に作らせるために、それらのコードが書き込まれた DNA を細胞の中に入れる必要があり、物質導入の難しさは植物種によって大きく異なる。ゲノム編集を多様な植物種で実現するには、DNA や RNA、タンパク質の導入法の開発など、周辺技術の開発も重要であることを付け加えておきたい。

5. まとめ

1980年代半ばに地球温暖化の問題が大きく取り上げられるようになってから約40年、温暖化防止の重要性は認識しながらも、先進国に暮らす人々が危機感を持つことは少なかったと思う。しかし、ここ数年の世界各地の異常気象は、この問題が他人事ではないこと、問題の解決を先送りにする猶予は残されていないことを世界中の人々に実感させたのではないだろうか。本稿を執筆するにあたって、日々の生活の中で何ができるか、研究者としてこの問題解決にどう貢献できるかを考えた時、できることは後回しにしない、小さな貢献であってもそれを積み重ねていくことが重要であるとの思いに至った。工学的な手法と異なり、植物の遺伝子をほんの少し変えることで劇的な効果を期待することは難しいが、遺伝子の書き換えを可能にする画期的な科学技術である『ゲノム編集』が植物の迅速な改良を可能にし、ひいては脱炭素社会の実現に活かされることに期待したい。

引用文献

- 1) Abe F. et al. (2019) Genome-edited triple-recessive mutation alters seed dormancy in wheat. *Cell Reports* 28, 1362-1369.
- 2) Cong L. et al. (2013) Multiplex and programmable regulation of gene networks with an integrated RNA and CRISPR/Cas system. *Science* 339, 819-823.
- 3) Ito Y. et al. (2017) Re-evolution of the rin mutation and the role of RIN in the induction of tomato ripening. *Nature Plants* 3, 866-874.

- 4) Jinek M. et al. (2012) A Programmable Dual-RNA–Guided DNA Endonuclease in Adaptive Bacterial Immunity. *Science* 337, 816-821.
- 5) Jinek M. et al. (2013) RNA-programmed genome editing in human cells. *eLife* 2, e00471.
- 6) Mali P. et al. (2013) RNA-guided human genome engineering via Cas9. *Science* 339, 823-826.
- 7) Yasumoto S. et al. (2020) Targeted genome editing in tetraploid potato through transient TALEN expression by Agrobacterium infection. *Plant Biotechnol.* 37, 205-211.

参考

- 1) 消費者庁消費者教育推進課 食品ロス削減関係参考資料
https://www.caa.go.jp/policies/policy/consumer_policy/information/food_loss/efforts/assets/efforts_210826_0001.pdf
- 2) 農林水産省（2008）中田哲也（北陸農政局 企画調整室長）「フード・マイレージについて」 <https://www.maff.go.jp/j/council/seisaku/kikaku/goudou/06/pdf/data2.pdf>
- 3) 農林水産省 知ってる？日本の食料事情 ～日本の食料安全保障と食料自給率・食料持久力～ <https://www.maff.go.jp/j/zyukyu/>

再生可能エネルギー発電をマネジメントする

—中国地方の農協小水力を事例に—

本 田 恭 子

岡山大学学術研究院 環境生命科学学域

1. はじめに

わが国の一次エネルギー国内供給は、東日本大震災以降の原子力発電所の稼働率低下などにより現在 $19 \times 10^{18} \text{J}$ と、東日本大震災以前の水準 ($22 \times 10^{18} \text{J}$) に比べ 10% 以上低下しており、昨今の電力需要逼迫の一因となっている。2020 年度の冬季には、寒波による電力需要の大幅増と LNG 在庫の減少に伴う LNG 火力発電の抑制から、電力の市場価格は前年の同時期に比べて 10 倍以上に跳ね上がり、2022 年 3 月には「電力需給ひっ迫警報」が 2012 年の運用開始以降、初めて発出された。一次エネルギー国内供給に占める化石燃料の割合（化石エネルギー依存度）は 88.6%¹⁾、化石燃料のほとんどを輸入に頼っているため、我が国のエネルギー供給は世界情勢に左右されやすい。また、少数の大規模な発電所に依存しているため、自然災害の影響も受けやすい。2018 年の北海道胆振東部地震では、道内の電力需要の 1/3 をまかなっていた火力発電所の緊急停止により大規模な停電（ブラックアウト）が発生した。このように、わが国のエネルギー供給体制は脆弱であり、電源の多様化と分散化を含むエネルギー改革はまさに喫緊の課題である。

この問題に対しては、安定的な資源確保や徹底した省エネなどとともに、再生可能エネルギー（以下、「再エネ」）の主力電源化が重要な政策目標として掲げられている。第 6 次エネルギー基本計画では、再エネの 2030 年度の電源構成の目標値は 36~38% と、現在のおよそ 3 倍に設定されている。再エネの 1kWh あたりのライフサイクル CO₂ 排出量は火力発電の数十分の一であることから、再エネの主力電源化は、エネルギー安全保障や災害に対するレジリエンスの向上に寄与するだけでなく、カーボンニュートラルの実現にも不可欠である。

2. 小水力発電の可能性

再エネで最も身近なものは太陽光発電（以下、「太陽光」）であろう。太陽光は 2012 年に再エネの固定価格買取制度（FIT）が導入されて以降急激に増加し、今や電源構成の約 8% を占めるまでに至った。しかし、夜間に発電ができず、発電量も季節や天候に大きく左右されることから、太陽光はベースロード電源（安価で昼夜、季節を問わず安定的に発電できる電源）にはなれないという根本的な問題が存在する。これに対して小規模な水力発電（以下、「小水力」）^{注 1)} は一定量を安定的に発電できるために、ベースロード電源になり得る。また、1kWh あたりのライフサイクル CO₂ 排出量も太陽光発電に比べて 1/3 以下であり、よりクリーンな電源である。

小水力は大規模な水力発電とは異なりダムを造成する必要がないことから、一般電気事業者（電力会社）以外の多様な事業主体が参画できる。一方で、太陽光と異なり水利権の取得が不可欠であるため、地域住民の理解が欠かせない。つまり、小水力のエネルギー源である、地域住民が長年守り続けてきた河川水やそれを涵養してきた森林を、地域住民を置き去りにし

て利用することはできない。よって、小水力は太陽光と異なり、地域住民が何らかのかたちでかわり、小水力から得られる利益が地域社会に還元されるしくみを作りやすく、衰退しつつある農山村の再生にも貢献が期待できる。小水力の開発ポテンシャルは 10,000kW 以下までを含めると約 900 万 kW であり²⁾、これは原子力発電所 1 基の平均が 100 万 kW であることから、原子力発電所 9 基分に相当する。このように、小水力は分散型のベースロード電源になり得ること、地域再生の核となりうること、そして今後の開発ポテンシャルが大きいことから、次世代の主力候補として近年注目を集めている。

本稿では、小水力が今後普及するためにはコスト面での検証が不可欠であることから、中国地方の農業協同組合（以下、「農協」）から格別のご厚意で提供いただいた小水力発電所の収支データの分析を通して、再エネ発電事業のマネジメントの実態を明らかにする。

2. 中国地方の農協小水力—その特徴と先進性

本題に入る前に、本稿が取り上げる中国地方の小水力発電について説明したい。一般的に、小水力発電所は電力会社や地方自治体が所有していることが多いのに対して、中国地方には農協が建設した小水力発電所（以下、「農協小水力」）^{注 2)}が一定数存在する。これらは、1952 年の農山漁村電気導入促進法にもとづいて、主に 1950、60 年代に集中的に建設された。また、これらは全て発電目的で水利使用許可を得ており、水路や堰堤等の施設も発電専用のものである。

1950、60 年代に農協による小水力発電所の建設が盛んになった背景には、この運動を主導した織田史郎の役割が極めて大きい^{注 3)}。現在の中国電力の元役員であった織田は、戦後の復興には農村主導型の小水力発電が欠かせないと考え、農山漁村電気導入促進法の制定に尽力するかたわら、発電所の調査・設計から安価な水車製造までを担う企業を立ち上げ、各地の農協をサポートした³⁾。企業活動を通じて社会貢献を実現した織田の活動は、ソーシャルビジネスの先駆けであった。また、近年再エネの望ましい導入のあり方として、地域主導と地域貢献を特徴とする「コミュニティ・エネルギー」⁴⁾が注目されている。中国地方の農協小水力は地域ぐるみで建設され、様々なかたちで地域に還元してきた⁵⁾ことから、日本におけるコミュニティ・エネルギーの先駆的事例といえる。

3. 研究の方法

(1) 調査対象事例とデータの概要

本稿の対象事例は中国山地に位置する A 発電所である。砂防えん堤を活用したダム水路式の発電所で最大出力約 500kW であり、発電電力の全量が中国電力株式会社（以下、「中国電力」）に販売されている。総事業費は当時価格で約 92,000 千円であり、土木工事費が 7 割を占める。農山漁村電気導入促進法にもとづき、総事業費の約 8 割を農林漁業金融公庫からの借入金でまかなっている。建設当時の事業者は B 町農協であったが、2 度の合併を経て、現在は C 農協が所有している。

分析に用いたデータは 1964～1971、1975 年度の A 発電所収支決算書と 1972～74 年度および 1976～1997 年度の B 町農協総代会提出議案の財務諸表から作成した^{注 4)}。

(2) 分析の手順

まず収支の推移と費用の項目別の推移を整理し、次に事業性評価を行った。費用は秋山(1980)⁶⁾の4項目(人件費、借入金利息、減価償却費、その他)に修繕費を追加した5項目で整理した。これは、1980年代後半より修繕費が増加していることをふまえたものである。

発電事業の事業性評価については、FIT以前より小水力発電事業計画の導入可否を判断するため、様々な手法が提案されてきた(例:投資回収年数や建設単価法、費用便益法、発電原価)。これらのうち、本稿では投資回収年数を用いる。投資回収年数とは、各年度の収支の累積額が初期投資額(建設工事費)を上回るまでに要する年数のことであり、他の手法と比べて事業自体の経済性を評価できる点で優れている⁷⁾。投資回収年数の参考値としては、電気業用水力発電設備の法定耐用年数22年⁷⁾や融資借入期間⁸⁾などがある。

4. 収支データの分析からみる小水力マネジメントの実態

(1) 収支の内訳

図1にA発電所の収支の推移を示す。収入は短期的には変動しつつも長期的には増加傾向にある。費用は稼働12年目の1976年をピークに緩やかに減少しているが、1993年のみ1976年を上回る。単年度で初めて黒字を計上したのは1974年(稼働11年目)、累積赤字解消年は1985年度(稼働22年目)である。1985年度以降は常に黒字である。

次に、図2に年間の発電電力量と売電単価を示す。年間の発電電力量については、1980年頃までは年毎の変動が大きいものの、長期的には減少傾向にある。売電単価は1970年頃までは3円/kWhであったが、1975年頃から増加し、1989年に10円/kWh台へ到達している。つまり、1975年以降の収入増加は発電量の増加ではなく、売電単価の上昇に起因している。

売電単価向上の背景として、石油危機以降の水力発電への再評価の動きと売電単価交渉に対する農協と地域の積極的な取り組みが指摘できる。このうち後者に関して、中国地方の農協小水力は中国電力と売電単価の集団交渉を行っており、中国電力との交渉経験を持つJA広島中央会が事務局として交渉にあたってきている。加えて、当時の事業者であった旧B町農協はA発電所の経営が厳しかったこともあり、旧B町町会議員の協力も得て、単独でも中国電力に働きかけを行っていた。(以上、旧B町農協元役員、元職員への聞き取り調査結果)。これ以外にも旧B町は資金調達時の債務保証を行うなど、A発電所の建設に多大な支援を行っていた(旧B町農協内部資料より)。

また、A発電所が稼働開始直後より損失を出していた理由は水量不足にある。当初の計画では、年間発電電力量を3,622千kWh、売電料単価3円と想定していた。しかし、図2のとおり、電力量が当初の計画を上回った年は一度もない。これは、計画時の想定よりも雨量が少なく、度々干ばつが発生していたことによる(B町農協元職員への聞き取り調査結果)。そのため、1970年代には、職員総出で水路の清掃を行い、山中の小川から水路に水を引き入れるなどの水量確保対策が熱心に行われた。

続いて、表1に5年ごとの費用の項目別平均とその割合を示した。人件費が1980年度以降大幅に減少している点と修繕費が1985年度以降大幅に増加している点が特徴である。なかでも修繕費の割合は、1985年度以降、20%前後まで増えている。

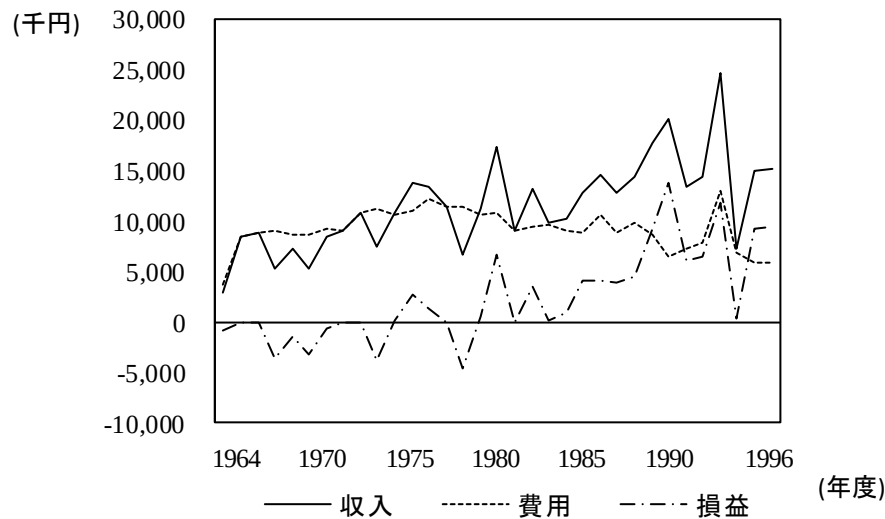


図 1 A 発電所の収支の推移(1964～1996 年度)

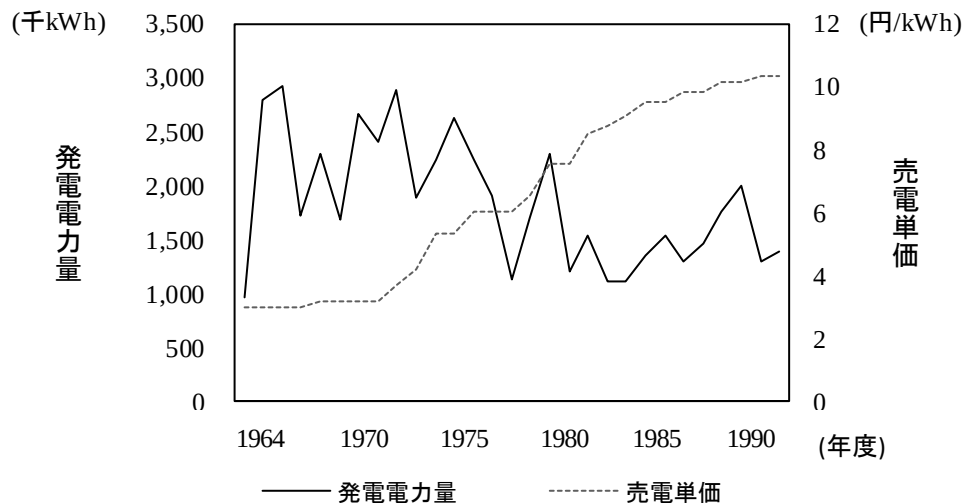


図 2 A 発電所の発生電力量と売電単価の推移(1964～1992 年度)

注: 1975、1977～1984、1992 年度は売電単価のデータがないため、年間の売電料金を発電電力量で除して売電単価とした。1993 年度以降は発電電力量と売電単価のデータ自体が存在しない。

表 1 費用の項目別平均と構成比の推移(単位: 千円)

年度	人件費	借入金利息	減価償却費	修繕費	その他	合計
1964～69	1,176(15%)	3,219(41%)	2,884(37%)	156(2%)	454(6%)	7,889(100%)
1970～74	1,617(16%)	4,738(47%)	2,711(27%)	119(1%)	996(10%)	10,181(100%)
1975～79	1,206(11%)	3,790(33%)	5,075(45%)	212(2%)	1,044(9%)	11,326(100%)
1980～84	390(4%)	3,288(34%)	4,598(48%)	379(4%)	983(10%)	9,638(100%)
1985～89	548(6%)	2,896(31%)	3,301(35%)	1,813(19%)	777(8%)	9,334(100%)
1990～96	639(8%)	1,611(21%)	2,754(36%)	1,967(26%)	631(8%)	7,602(100%)
全期間	919(10%)	3,156(34%)	3,485(38%)	828(9%)	792(9%)	9,180(100%)

注: 5 年ごとの平均値としているが、稼働開始年度(1964 年度)は 1965～69 年度に、データの最終年度(1996 年度)は 1990～1995 年度に含めている。

人件費の削減は、維持管理業務に従事する職員数を減らしたり、職員が発電所以外の業務も担当したりするなどの対策が取られた結果である(旧 B 町農協職員への聞き取り調査結果)。このような形での人件費削減は、多様な事業を営む総合農協だからこそ実現できたといえる。また、修繕費の増大は、設備の老朽化と自然災害によるものである。A 発電所の発電設備は 1986 年に法定耐用年数 22 年を迎えており、維持管理業務担当者によれば、1980 年代後半より豪雨が増加してきている。その結果、少なくとも 1980 年代後半に水路を 2 度、水車を 1 度修繕し、1990 年代には水路を 1 度、発電機を 1 度修繕している。

(2) 事業性評価

A 発電所はデータの最終年度では総工事費 92,000 千円を回収できていないものの、仮に、1997 年以降の損益を 1990～1996 年度の平均値とすると、投資回収年は 1998 年、投資回収年数は 34 年となる。また、A 発電所は 2010 年代前半までは稼働している。よって、A 発電所は水力発電設備の法定耐用年数は超過したものの初期投資額を回収し、その後 10 年以上収益を生み出していたことがわかる。

A 発電所の売電単価は最高でも 10 円前後である。FIT の買取価格 29 円(2022 年度、200kW 以上 1,000kW 未満)と比べてはるかに低い価格でも採算が取れた理由として、当時の工事費の安さがあげられる。一般的な小水力発電所の現在の建設費は 800～1,000 千円/kW とされる⁹⁾ことから、A 発電所と同規模の発電所を建設しようとする 4～5 億円かかると推定される。よって、今日小水力の採算性を確保するためには、売電単価を 10 円よりもっと高く設定する必要はあろう。しかし、このことを考慮したとしても、A 発電所の事例からは、FIT の買取価格ほど高くはなくても適切な売電単価が設定されれば、小水力が事業として現在でも成立しうることが示唆される。

5. おわりに

A 発電所は、稼働当初は厳しい運営を迫られたものの、1990 年代末には初期投資を回収し、その後 10 年以上収益を生み出すことができています。FIT の買取価格ほどではなくとも相応の単価さえ設定されれば、小水力は長期間にわたり一定の収益が見込める事業となりえる。

FIT が存在しない時代に、電力会社でも自治体でもない、地域の事業者による小水力が長期間存続した事実をもっと広く知られてよい。A 発電所の事例では売電単価向上と人件費削減が黒字化に寄与していた。ただし、人件費削減は、事業者が総合農協であることの強みを活かしたものである。よって、再エネ事業のみを営む事業主体には、このような大幅な人件費削減は難しく、その点は売電単価を設定する際に留意する必要がある。また、災害が激甚化すると、修繕費は増大することから、今後はその対応も課題となる可能性がある。

付記

本稿は、本田(2017)¹⁰⁾をもとに追加調査を行って大幅に加筆修正したものである。また、本稿は 2015 年度生協総研賞助成事業および JSPS 科学研究費 16K21182、19K20506 の助成を受けている。聞き取り調査へのご協力ならびに貴重な資料のご提供をいただいた旧 B 町農協および C 農協の皆様にお礼を申し上げます。

注

- 1) 本稿における「小水力発電」とは、再生可能エネルギー関連法案における定義にならい、最大出力 1,000kW 以下の水力発電を指している。
- 2) ただし、現存する農協小水力のなかには、農協合併を契機として市町村や住民出資の協同組合（電化農業協同組合）が発電所の運営を引き継いだケースが存在する。
- 3) 織田史郎の功績については、沖（2011）¹¹⁾などを参照されたい。
- 4) データ作成にあたって、旧 B 町農協元役員および元職員、C 農協職員（発電所の維持管理業務担当者および会計業務担当者）への聞き取り調査を行った（2015～2016 年、2018 年に 3 回実施）。2 つの資料のうち、収支決算書は中国電力との売電単価交渉の資料として作成されたものである。そのため、農協組合員への報告用に作成された財務諸表には計上されていない科目（例：災害補償金引当繰入、管理部門費、部内共通費）が費用に含まれている。これらの科目は財務諸表からの作成が困難であることから、費用から省いた。また、運搬費や通信費、水道光熱費は財務諸表にのみ記載されているが、これらの合計額が費用全体に占める割合は 0.5～1.6%とわずかであるため、「その他」の項目に含めている。なお、支払利息や保険料、減価償却費の算定方法も異なり、収支決算書の方で費用が多く見積もられる傾向があった。

引用文献

- 1) 資源エネルギー庁（2021）（参照 2022.9.7）：令和 2 年度エネルギーに関する年次報告，（オンライン），入手先<https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2021/pdf/2_1.pdf>
- 2) 株式会社エックス都市研究所・アジア航測株式会社（2020）（参照 2022.9.7）：令和元年度再生可能エネルギーに関するゾーニング基礎情報等の整備・公開等に関する委託業務報告書，（オンライン），入手先<https://www.renewable-energy-potential.env.go.jp/RenewableEnergy/dat/report/r01/r01_whole.pdf>
- 3) 本田恭子（2020）：コミュニティ・エネルギーを体現する地域社会の形成（小林久編著『再エネで地域社会をデザインする』，京都大学学術出版会，京都，187-233.
- 4) 室田武（2013）：持続可能なエネルギーとコミュニティ再生（室田武・倉阪秀史・小林久・島谷幸宏・山下輝和・藤本穰彦・三浦修一・諸富徹著『シリーズ地域の再生 13 コミュニティ・エネルギー—小水力発電、森林バイオマスを中心に』，農山漁村文化協会，東京，13-48.
- 5) 本田恭子・松岡崇暢・岩本光一郎（2017）：中国地方の小水力発電の運営実態と固定価格買取制度の影響—事業者の種類に着目して—，農村計画学会誌，36，317-322.
- 6) 秋山武（1980）：農協小水力発電の歴史と問題点，協同組合経営研究月報，323，55-68.
- 7) 資源エネルギー庁・新エネルギー財団（2005）：『ハイドロバレー計画ガイドブック』新エネルギー財団水力本部，東京.
- 8) 沖縄県（2007）（参照 2022.8.11）：小水力発電事業化可能性調査報告書，（オンライン），入手先<<https://www.pref.okinawa.lg.jp/site/kikaku/chosei/documents/50.pdf>>
- 9) 資源エネルギー庁（2021b）（参照 2022.9.7）：総合資源エネルギー調査会発電コスト検証ワーキンググループ（第 8 回会合）資料 3 各電源の諸元一覧，オンライン，入手先<https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/mitoshi/cost_wg/2021/data/08_06.pdf>
- 10) 本田恭子（2017）：中国地方の小水力発電を支えたローカル・ガバナンス，生協総研賞・第 13 回助成事業研究論文集，25-41.
- 11) 沖武宏（2011）：小水力発電の巨人 織田史郎，水の文化，39，28-33.

木材利用によるカーボンニュートラル社会への貢献

恒 次 祐 子

東京大学大学院農学生命科学研究科

1. はじめに

木材は代表的な生物材料であり、古くから建築や生活用具等に使われてきた人間に身近な材料である。現在の国内供給量のうち国内の森林に由来するもの（いわゆる国産材）は概ね40%である（図1）。

森林は二酸化炭素吸収源機能を持つが、木材をどのように利用するかということは森林吸収に大きな影響を与える。また木材そのものも吸収源の一つであること、さらに木材利用による排出削減効果もあることから、木材利用はカーボンニュートラル社会への移行において大きな役割を果たすものと考えられる。本稿では木材が二酸化炭素吸収や排出削減にどのように貢献できるかを整理し、カーボンニュートラル社会に向けた木材の役割について考える。

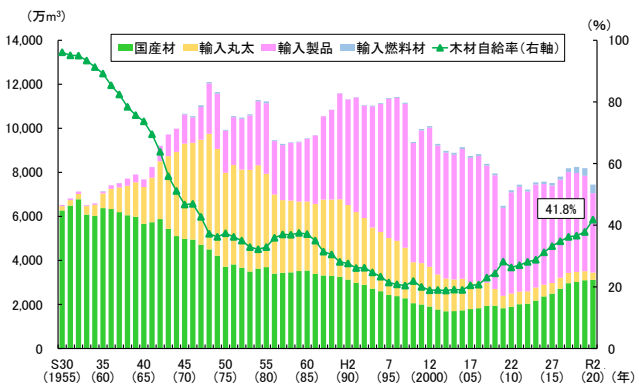


図1 木材供給量と木材自給率の推移
(林野庁 木材需給表による)

2. 森林吸収源機能と木材利用

森林は多面的な機能を持ち、二酸化炭素吸収源機能はその一つである。気候変動枠組条約においては温室効果ガスの「吸収源及び貯蔵庫」として「バイオマス、森林、海その他陸上、沿岸及び海洋の生態系」が特記されており、これらの持続可能な管理、保全や強化の促進が謳われている。

樹木は成長が旺盛なときには多くの二酸化炭素を吸収する。したがって若い森林においては植生による二酸化炭素の吸収速度が速く、成熟段階になると吸収速度が低下し、老齢段階では吸収と排出（呼吸による二酸化炭素排出や、枯死木、リターによる）がバランスして見かけ上は収支ゼロとなる¹⁾。二酸化炭素の吸収量を維持するためには、木材生産を目的として持続的に経営を行っている森林において適切な時期に伐採を行い、その後には必ず植林をして森林を若返らせることが必要であるということになる。木材利用には成熟した森林の若返りを促進し、吸収源機能を復活させる意義があるともいえる。

森林の多面的機能のうち、もう一つ木材と関連が深いものとして物質生産機能に着目すると、森林は木材を産出するが、木材伐出後に植林を行えば、再び木材を生産することが可能である。すなわち木材は再生可能資源であるといえる。一方、このこと（木材が再生可能資源であること）が成り立つためには、人間が木材を消費する速度が森林の成長速度を超えないことが必要である。伐採量が成長量を上回らないことは持続的な森林利用の基盤となるものであり、さらに森林が吸収源であるためにも必要な条件となる。

3. 木材利用による地球温暖化防止機能

森林の吸収源機能への影響だけではなく、木材利用自体にも二酸化炭素吸収や排出削減の機能があると考えられている。二酸化炭素吸収にあたるものとして木材による「炭素貯蔵効果」、排出削減として「材料代替効果(省エネルギー効果)」、「化石燃料代替効果」が挙げられる。木材利用の持つこのような効果については 1990 年ごろから指摘されるようになったと思われる^(例えば 2-3)。当時は熱帯雨林の破壊などが問題となっており、木材利用は森林や環境の破壊に繋がる行為であるとの一般的な認識が強かったが、この頃から徐々に木材利用のイメージが変わっていったと考えられる。

3.1. 木材の炭素貯蔵効果

木材には樹木が光合成により固定した二酸化炭素が炭素の形で貯蔵されている。木材は主にセルロース、ヘミセルロース、リグニンから構成されており、全体の化学組成から見ると炭素が重量の約半分を占めている。このことから、ある木材の全乾重量が分かれば、貯蔵されている炭素量はその半分であると考えることができる。

国内にある程度長期的に存在する木材の多くは建築物に使用されており、近年の中大規模木造建築への関心の高まりとともに、建築物中木材による炭素貯蔵量の推計方法にも関心が集まっている。このため林野庁は「建築物に利用した木材に係る炭素貯蔵量の表示に関するガイドライン」を公表し、以下のように建築物に使用されている木材中炭素量(二酸化炭素換算)計算式を示している。

$$Cs = W \times D \times Cf \times 44 / 12$$

ここで

Cs: 建築物に利用した木材(製材のほか、集成材や合板、木質ボード等の木質資材を含む)に係る炭素貯蔵量(CO₂換算量)(t-CO₂)

W: 建築物に利用した木材の量(m³)(気乾状態の材積)

D: 木材の密度(t/m³)(気乾状態の材積に対する全乾状態の質量の比)

Cf: 木材の炭素含有率(木材の全乾状態の質量における炭素含有率)

D(木材の密度)は一般的に文献から得られる気乾密度、全乾密度ではなく、気乾材積あたりの全乾質量を使うこととなっており、気乾状態を含水率 15%と仮定して、気乾密度に 0.87(=100/115)を乗じる変換方法が提案されている。

W(建物に使用される木材量)は木造建築物で概ね 0.2 m³/m²と考えられるため⁴⁾、仮に 100m²の建物を気乾密度 0.4 m³/m²の木材で建てたとすると、約 3.5t-C の炭素貯蔵量となる。35 年生のスギ 1 本あたりの炭素貯蔵量が 68 kg-C との試算例(森林総合研究所)があるので、これはスギ 50 本以上に相当することとなる。今後都市部において中大規模木造建築物が増えた場合、相当量の木材および木材中炭素が都市に存在するようになることができる。このようなことから、木造建築物は「都市の森林」⁵⁾とも呼ばれる。

3.2. 材料の代替による削減効果

木材は材料製造に伴うエネルギー消費量が他の主要材料に比較して少なく、これに伴って製造時の排出量が少ない。したがって同程度の機能を持つものを他材料製とするより木製とした方が排出量を抑制することができることが多い。これを材料代替効果(省エネルギー効果)と

呼ぶ。例えば産業連関表を用いて建築物への投入資源の製造に伴う排出量を構造別に比較した事例では、床面積あたりの排出量が木造で他の構造よりも少なかったことが報告されている(表 1)⁶⁾。

表 1 建築構造種別使用材料の製造に由来する炭素排出量の比較(文献 6 より作成)

単位: kg-C/m²

	木材	セメント	鉄	その他	運輸
木造	5	24	12	6	24
SRC 造	5	42	46	10	42
RC 造	6	36	44	9	36
S 造	2	19	33	6	25

SRC 造: 鉄骨鉄筋コンクリート造、RC 造: 鉄筋コンクリート造、S 造: 鉄骨造

このことより、1 棟の建物を建てるときに木造を選択した方が使用材料の製造に伴う排出量を抑制することができるといえる。また、家具などについても同様の比較を行うことができる。なお表 1 に示した研究事例はあくまでもある年に建てられた各構造建築物の平均的な排出量の比較であり、同機能、同面積の建物を異なる構造で建てた場合を比較したものではないことに留意が必要である。

3.3. 化石燃料代替効果

木材を燃焼させると木材中に貯蔵された炭素は二酸化炭素となって大気中に戻っていく。しかしこの炭素は樹木が成長し、成熟し、最後には枯れて分解されるという大きな循環の中にあるものと同等であると考えれば、大気中の二酸化炭素濃度を上昇させておらず、カーボンニュートラルであるとみなすことができる。これにより、化石燃料の代わりに木質燃料を使用すれば、化石燃料由来の排出量を削減することができると考えられ、これを化石燃料代替効果と呼ぶ。前述のように持続性を考慮すると木材の消費速度は森林の成長速度を超えないことが肝要であり、消費速度の速いエネルギー利用については未利用材等の利用を優先するなど、材料利用とのバランスを考えるべきである。

4. パリ協定と木材利用

パリ協定において、木製品(HWP)は基本的には京都議定書における扱いを踏襲する形で扱われることとなった。京都議定書では第二約束期間(2013~2020 年)より木材製品(Harvested Wood Products; HWP)の炭素貯蔵効果を森林吸収源の一環として算定、報告することとなり、パリ協定でも引き続き報告が求められている。基本的には各国において木材蓄積量が増えた場合は増加量分を吸収とみなし、逆に蓄積量が減少した場合は排出とみなされるが、ここで「各国における木材蓄積量」にはいくつかの考え方(アプローチ)があり得る。一つめは国内にある全 HWP を対象とするというもので、この場合は国内で利用している国産材と輸入材を対象とすることになる(蓄積変化法)。二つめは自国の森林に由来する HWP を対象とするもので、この場合国内で利用している国産材と輸出して海外で利用されている国産材を対象と

する(生産法)。三つめは化石燃料と同様に扱う考え方で、HWP が廃棄された際に排出とみなすというアプローチである(大気フロー法(Atmospheric Approach))。第二約束期間から HWP を扱うにあたっては、これらに第一約束期間の扱いであった即時排出の考え方を加えた 4 アプローチについて検討が進められた。このような検討が必要であったのは、木材が輸出入により国境を超えて動くものであり、どのアプローチが採られるかによって各国の HWP による吸収・排出量が異なるという特性があるためである。京都議定書第二約束期間においては議論の結果生産法が採択され、日本でも生産法による算定手法の精緻化に取り組んできた。一方パリ協定においては京都議定書と異なりより多くの国が参加していることから、アプローチの選択などにある程度の幅を持たせたルールとなっている(表 2)⁷⁾。

表 2 気候変動枠組条約制度下での HWP の扱い(文献 7 を改変)

	制度	使用 HWP アプローチ	利用する IPCC ガイドライン
推計・報告	GHG インベントリ (附属書 I 国)	いずれも可	2006 ガイドライン
	パリ協定 GHG インベントリ	いずれも可(PA 付記)	2006 ガイドラインおよびパリ協定 締約国会合で合意された IPCC ガイドラインの改良版
	京都議定書 第 2 約束期間	即時排出/生産法	2013 年議定書補足的方法論 ガイダンス
削減目標	パリ協定 NDC	いずれも可	特定ガイダンスなし (推計はインベントリに合わせる)

このように京都議定書、パリ協定では木材の炭素貯蔵効果が吸収源として扱われ、日本を含めて世界各国は HWP による吸収・排出量を報告することとなっている。一方材料代替効果、化石燃料代替効果は排出削減効果であり明示的な扱いはされていない。しかしこれら 3 つの効果はいずれも木材利用に伴って発生するものであり、適切に評価して「見える化」することが木材利用による影響を考えるときには重要であると考えられる。また、前述のように木材利用と森林の吸収機能は密接な関係にあることから、吸収源対策においては森林と木材を一体として検討することが必要である。さらに地球環境保全の観点からは、木材利用について炭素収支の観点のみではなく、水資源や接着剤、塗料、薬剤など使用も含め、ライフサイクルアセスメント(Life Cycle Assessment: LCA)等の手法により正しく環境影響を評価し、なるべく影響を低下させることが必要である。

日本を 3 地域に分けて木材利用をモデル化しシミュレーションを行った研究例⁸⁾では、生産法による炭素貯蔵効果と材料代替効果は同程度の効果、化石燃料代替効果がやや大きい効果を持つとの推計結果が出ている。また森林と木材を一つのモデルとして扱った例⁹⁾では、木材利用と森林吸収はトレードオフ(木材利用を増やすと森林吸収が減少する)の関係にあるが、補完的な関係にもあり、木材を適切に利用することにより森林吸収量の減少分をカバーできることが示されている。

5. おわりに

今後のカーボンニュートラル社会への移行に向けて森林ならびに木材に向けられる期待は大きい。森林吸収量のうちに木材による吸収量が占める割合は小さいかもしれないが、木材利用なしに森林の吸収源機能を考えることはできない。前述のように吸収源対策においては森林と木材を一体のものとして検討する必要がある。

人間は材料を使わずに生きていくことはできない。材料選択を含む全ての行動に対し環境調和性を求められる時代にあつて、代表的な生物材料、再生可能資源であり、炭素貯蔵材料である木材を適材適所で活用することが不可欠である。

引用文献

1. 藤森隆郎(2003): 森林の二酸化炭素吸収の考え方、紙パ技協誌、57(10): 1451-1457
2. Buchanan AH (1990): Timber engineering and the greenhouse effect. In: IPENZ Annual Conference 1990, Proceedings of: Engineering, past, present and future: Building the environment; Volume 1: Civil ; Institution of Professional Engineers New Zealand, 213-223
3. 大熊幹章(1990): 木材利用と環境保全、そして知能性材料としての木材の可能性、木材工業、45: 301-306
4. 林野庁(2011): 第1章第2節 木材需要拡大に向けたこれまでの取組、平成22年度森林・林業白書
5. 有馬孝禮(2003): 木材の住科学—木造建築を考える、東京大学出版
6. 酒井寛二、漆崎 昇、中原智哉(1997): 建設資材製造時の二酸化炭素排出量経時変化と土木分野への影響、環境システム研究、25: 525-532
7. 佐藤 淳 (2021): パリ協定下の伐採木材製品 (HWP): 気候変動対策としての取り扱いの変遷と排出削減ポテンシャル、木材保存、47(5): 217-228
8. Kayo C, Tsunetsugu Y, Tonosaki M (2015): Climate change mitigation effect of harvested wood products in regions of Japan. Carbon Balance and Management 10, 24
9. Matsumoto M, Oka H, Mitsuda Y, Hashimoto S, Kayo C, Tsunetsugu Y, Tonosaki M (2016): Potential contributions of forestry and wood use to climate change mitigation in Japan, Journal of Forest Research, 21:5, 211-222

環境保全と食糧生産および農業経営を安定化させるカギは土壤炭素

佐々木 章 晴
北海道大学 農学研究院

1 はじめに

産業革命によって人類が化石燃料を大量に消費するようになってから、大気中の二酸化炭素濃度は増加し、地球温暖化が促進され、気候や水文循環に変化が生じ、食糧生産をはじめとした人間活動に大きな影響が生じることが懸念されている(環境省 2020)。このことへの対策として、大気中の二酸化炭素濃度を抑制することが必要となる(白戸 2016)。

一方近年の農業生産は、単年度の生産量を最大化するために化学肥料を大量に消費している。このことは、 N_2O などの GHG 放出を促進し(環境省 2020)、水系への窒素、リンなどの流出を増加させ、水生生物への影響も予想される(佐々木 2009)。

また、化学肥料などの生産資材を大量に消費する農業経営は、生産コストを上昇させ、農産物価格の低迷もあり、農業経営を不安定化させている(佐々木 2014)。

そこで本報告では、大気中の二酸化炭素濃度抑制、農耕地への化学肥料などの投入量抑制による生産コストの抑制、環境負荷の抑制のためにどのような方向性が考えられ、また生産現場ではどのような実践が行われているかについて報告する。

2 農業生産現場における土壤炭素の認識

農業生産現場では、黒い土が求められる。特に野菜や花き栽培の育苗土では、黒く、手で握って離した時に団粒構造が認められる土が好まれる。育苗は生産現場では「苗立て 8 割」と言われ、育苗の成否は収量に大きく影響する。また苗を定植する圃場では、作土の黒色が強い方が好まれる。

このように農業生産現場においては、黒い土 $\equiv$ 腐植(土壤炭素)の高い土は収量が高い、生産性が高い傾向にあるとの認識がある(佐々木 2014)。

3 河川流域の観測による気づき

河川の水質は、河川や沿岸域の水生生物や水産生物に大きな影響を与えることが徐々に明らかになりつつある。一方、流域の土地利用や土地管理を河川水質は反映する(佐々木 2009; 佐々木 2017)。

北海道東部根釧地方の酪農地帯における河川流域の観測において、酪農場全体の投入窒素(購入肥料・飼料)から搬出窒素(生乳生産)を差し引いた余剰窒素が存在し、投入窒素の増加によって余剰窒素も増加することが明らかとなり、このことが河川水中の硝酸態窒素濃度に影響している可能性が考えられた(佐々木 2017)。

これら河川流域の観測から、投入窒素が地域平均の1/3であるが、牧草の TDN 収量が 8 割程度の酪農経営事例(以下、低投入酪農経営事例)が見いだされた。草地土壌を調査したところ、土壤炭素含有率の地域平均($n=31$)が 8.6%に対して、この事例($n=2$)では 10.7%であった(表1)。草地土壌の土壤炭素含有率の違いが、草地生産性に何らかの影響を与えている可能性を考え、土壤炭素の研究を行った(佐々木 2014)。

表 1 土壤全炭素含有率・腐植酸+フルボ酸としての炭素含有率の結果
(佐々木 2014: これからの酪農経営と草地管理 より)

調査年・調査地	酪農経営・草地管理	土壌全炭素	腐植酸	調査 草地数
		含有率%	+フルボ酸C%	
		平均±標準偏差	平均±標準偏差	
2005年・中標津町	慣行施肥量（地域の平均的な酪農経営）	8.6±2.9	3.9±2.0	n=31
	低投入酪農経営の事例	10.7±0.3	8.6±2.0	n=2

4 見えてきた土壌炭素の実態と役割

2005 年に採取した 33 草地圃場の土壌の腐植酸＋フルボ酸の測定を行った。その結果、地域平均(n=31)では 3.9%、低投入酪農経営事例では 8.6%となった。このことから、土壌全炭素のうち 45～80%は腐植酸＋フルボ酸であること、土壌炭素含有率の差は腐植酸＋フルボ酸含有率の差である可能性が考えられた(表1)(佐々木 2014)。

次に、腐植酸＋フルボ酸の由来として、草地に散布される完熟堆肥、草地に還元されるリターの土壌表層への堆積が考えられる。完熟堆肥、リターともに腐植酸＋フルボ酸と思われる黒色物質が抽出された。これらが土壌から抽出される腐植酸＋フルボ酸と類似の物質かどうかを、可視光の吸収スペクトルを測定し検討した。

その結果、長い波長(赤)よりも短い波長(青)の吸光度が高くなり、この傾向は土壌 A 層の腐植酸＋フルボ酸と、完熟堆肥およびリターの腐植酸＋フルボ酸では、大きな差は見られなかった(図1)。これらのことから、土壌の腐植酸＋フルボ酸の由来は完熟堆肥とリターである可能性が考えられた。

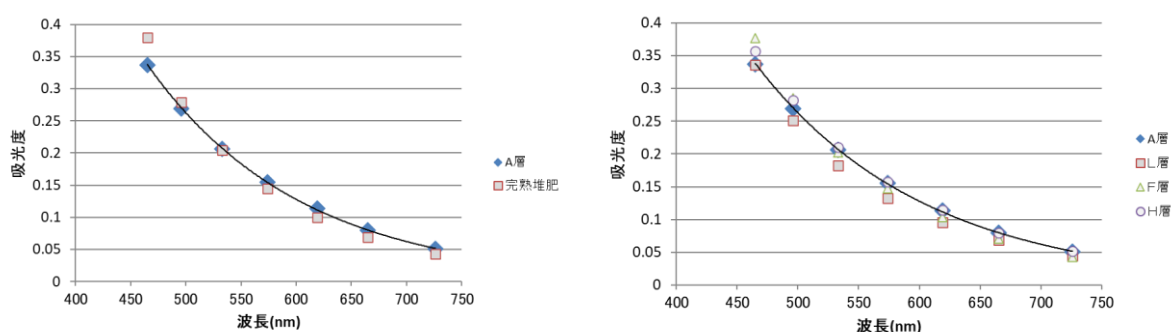


図1 土壌 A 層位・完熟堆肥・リターから抽出された腐植酸＋フルボ酸の吸光特性 (佐々木 2017: 草地と語る より)

腐植酸＋フルボ酸が土壌化学性に与える影響を検討した。腐植酸＋フルボ酸含有量と土壌塩基置換容量には正の相関が見られた。また、腐植酸＋フルボ酸含有量と土壌交換性アルミニウム含有量との間には、負の相関が見られた(図2)。一方、交換性アルミニウム含有率と投入窒素 1kg あたりの牧草乾物収量には負の相関が見られた(図2)。これらのことから、腐植酸＋フルボ酸の増加は塩基置換容量を上昇させることにより土壌の肥料保持力を高める可能性があること、また、作物生産性を抑制すると予想される土壌交換性アルミニウムを抑制する可能性があることから、腐植酸＋フルボ酸は作物生産性に影響を与えている可能性が示唆され、このことが低投入型酪農経営事例における低窒素投入における作物生産性維持に関連している可能性が考えられた(図3)。

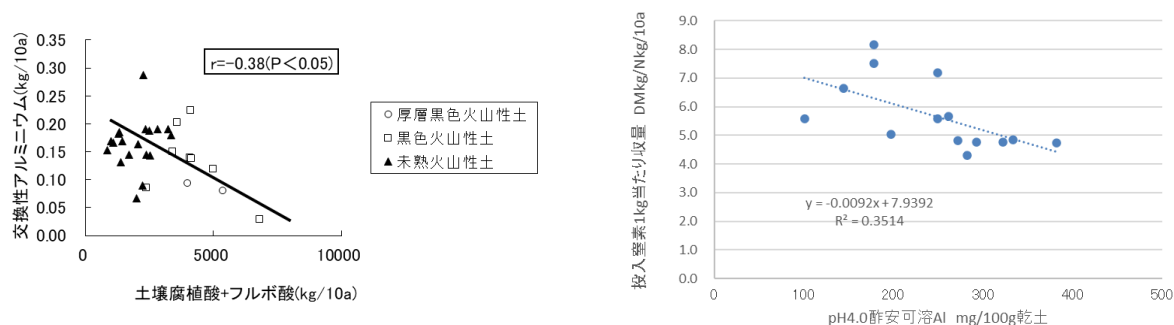


図2 腐植酸＋フルボ酸の交換性アルミニウム抑制効果と交換性アルミニウムが投入窒素 1kg 当たりの収量に与える影響 (佐々木 2014: これからの酪農経営と草地管理 より)

またこのことは、購入肥料や購入飼料の投入量が少ないことでもあることから、生産コストを圧縮することが可能になり、農業所得率を高く維持することが可能になると考えられた(図4)(佐々木 2014)。

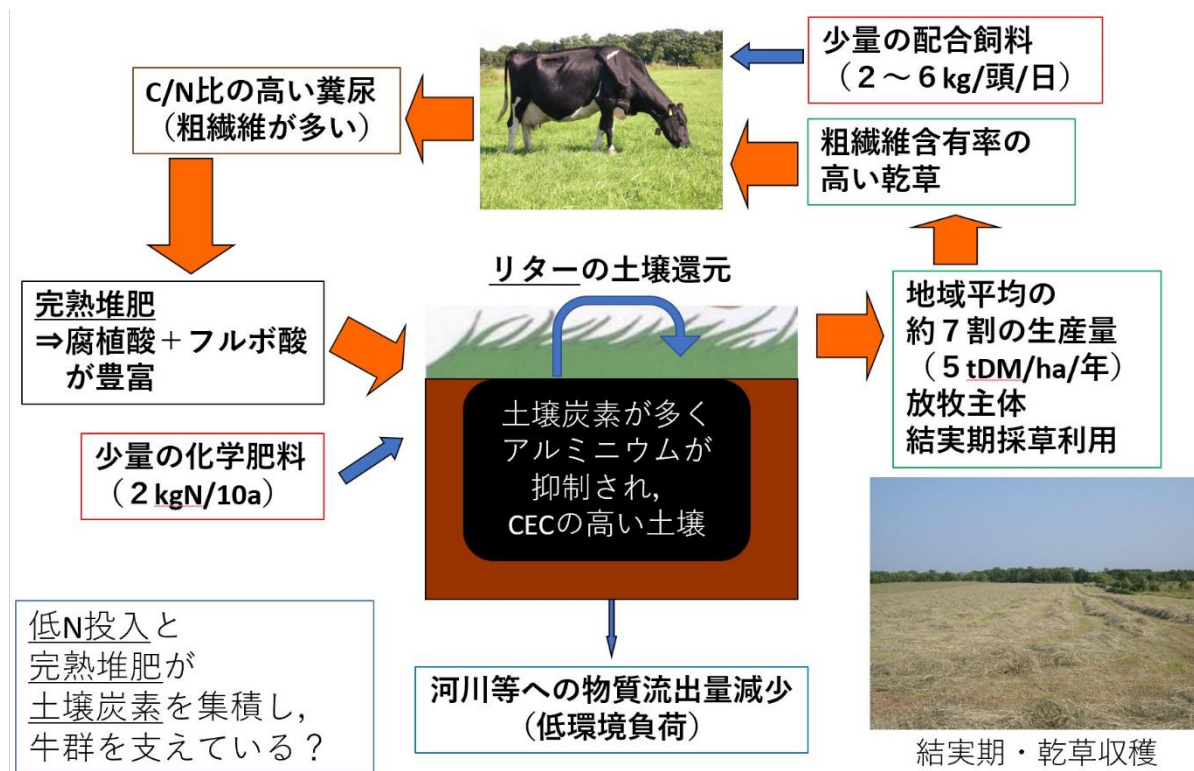


図3 現在までに推定される低投入型酪農経営事例の物質動態

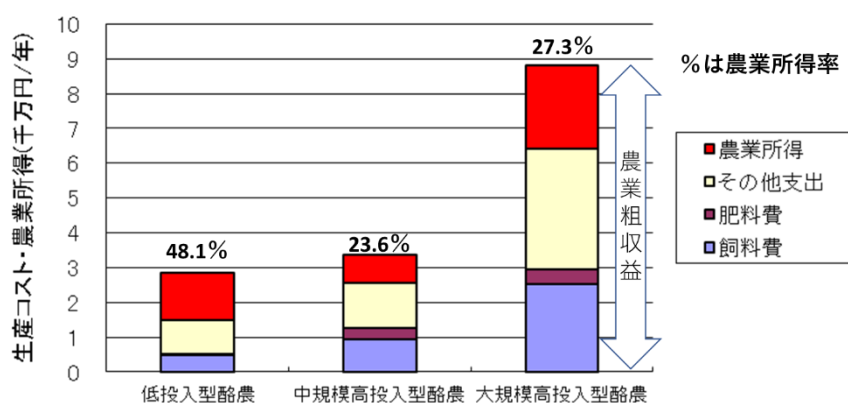


図4 酪農経営形態と経営状況(佐々木 2014: これからの酪農経営と草地管理)

5 土壌炭素の新たな価値の認識

現在、地球の大気中には炭素(大部分は二酸化炭素)として 760Gt 存在する。これが地球温暖化の主因であるとされている。一方、土壌炭素は地球全体で 2000Gt 存在すると推定されている(白戸 2016)。

低投入型酪農経営事例では、17 年で土壌炭素含有率が 10.5%から 13.5%へ増加した例もみられる。もしこの事例が地球全体で実現できたならば、地球全体の土壌全炭素含有量は 2000Gt から 2570Gt となり、産業革命期の二酸化炭素濃度よりも低くなる可能性がある(白戸 2016)。しかし、陸域の 40%を占める農耕地・草地において、土壌炭素を変動させる人為的要

因については未解明の部分が多い。

そこで、北海道東部の草地酪農地帯において、草地更新を20年以上行っていない低投入型酪農経営事例8例と、草地更新を10年ごとに行い購入肥料・購入飼料を地域内で平均的な量を使用する酪農経営事例6例から、土壌炭素含有率に影響する要因を解析した。

その結果、草地更新後の年数が長く、購入肥料・購入飼料が少ない(≡窒素投入が少ない)と土壌炭素含有率は上昇する傾向が見られた。また、土壌pHが低いと土壌炭素含有率が上昇する傾向が見られた(図5)(佐々木ら2021)。このことは、低投入型酪農経営事例が土壌炭素蓄積を促進する可能性を示唆していると考えられた。

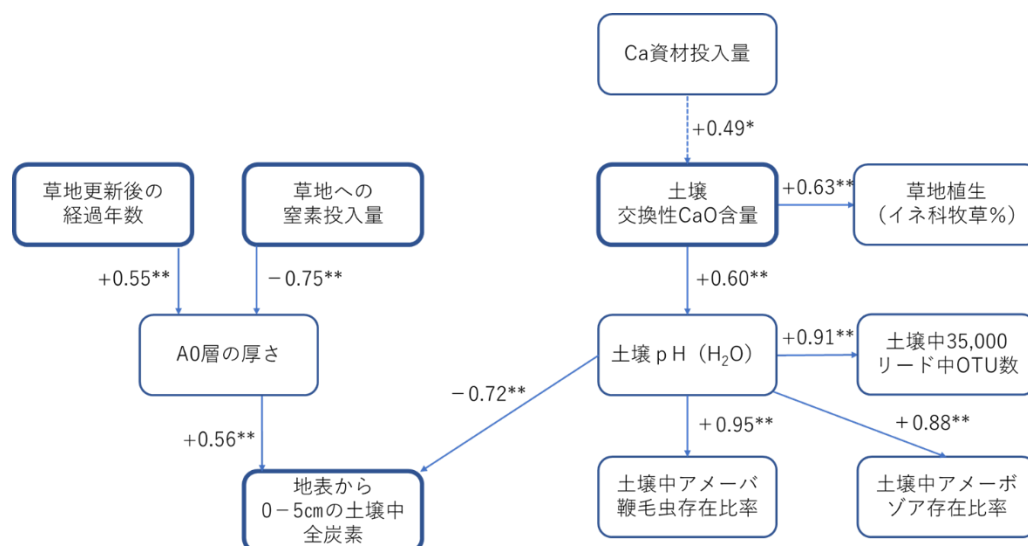


図5 草地の人為的管理と土壌炭素との相関図(佐々木ら2021:北海道東部火山性草地土壌における人為的要因による土壌炭素含有率への影響より)

6 土壌炭素を増加させる可能性

土壌炭素を増加させることによって、地球温暖化の抑制し、施肥量を削減し肥料要素の水系流出抑制による農業生産および水産生産の両立、農業経営の低コスト化が実現できると考えられる(図6)(佐々木2017)。

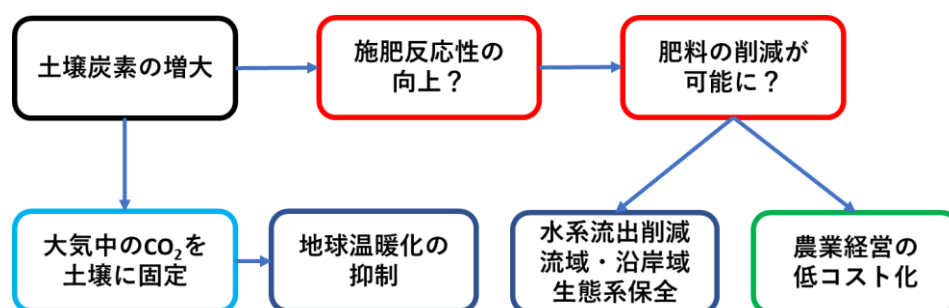


図6 土壌炭素増大による地球環境・農業経営への影響

しかし、低投入型の農業経営は収量が減少する。そこで、近年利用が拡大しているバイオ炭の土壌添加による土壌炭素含有量増加を試みた。

バイオ炭の土壌への施用によって、作物体の糖度は減少し、逆に土壌炭素がバイオ炭の施肥量以上に増大する事例が見られ、土壌炭素蓄積には植物根からの糖分放出も大きく関与している可能性が考えられた。また、バイオ炭以外の施用を全く行わない条件でも、収量が増加する事例も見られた(図7)。

これらのことから、地域内の未利用有機質資源（雑木林や竹林など）の炭化とその土壌への施用による土壌炭素含有量の増大は、大きな可能性を秘めていると考えられる。

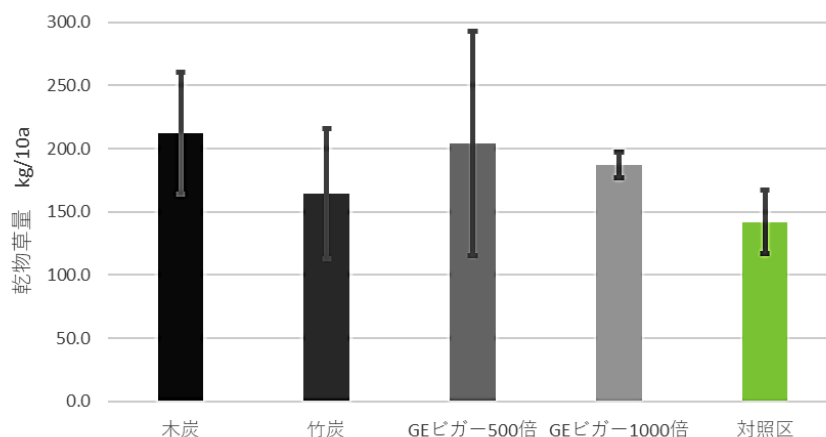


図7 炭資材の土壌添加による乾物草量の変化（2022年6月 岩見沢農高）

7 土壌炭素を中心にこれからのすべきこと

日本の国土のほとんどは「河川流域」であり、河川流域の土壌炭素量が河川流域・沿岸域生態系の生産性と地域経済に大きな影響を与える。

土壌炭素含有量を増加させる具体的行動のためには、河川流域・沿岸域全体におけるステークホルダーの合意形成とその場の形成がまず必要である（図8）。次に、合意形成による行動を検証する方法として、地域住民が効果を検証できるための技術開発が必要となる。

そして、合意形成の場の政策化のために、既存の環境保全の枠組みとのすり合わせが必要となる。土壌炭素が関わる範囲は、既存の複数の枠組みに関係し、土壌炭素の増大には地域住民の主体的な参加が必要であることから、土壌炭素の政策的な位置づけと、地域ごとの手触り感のある政策展開が必要であると考えられる（図9）。

（地域内のボトムアップ型合意形成については「ニシベツ伝記（草野 2022）」に詳しい）

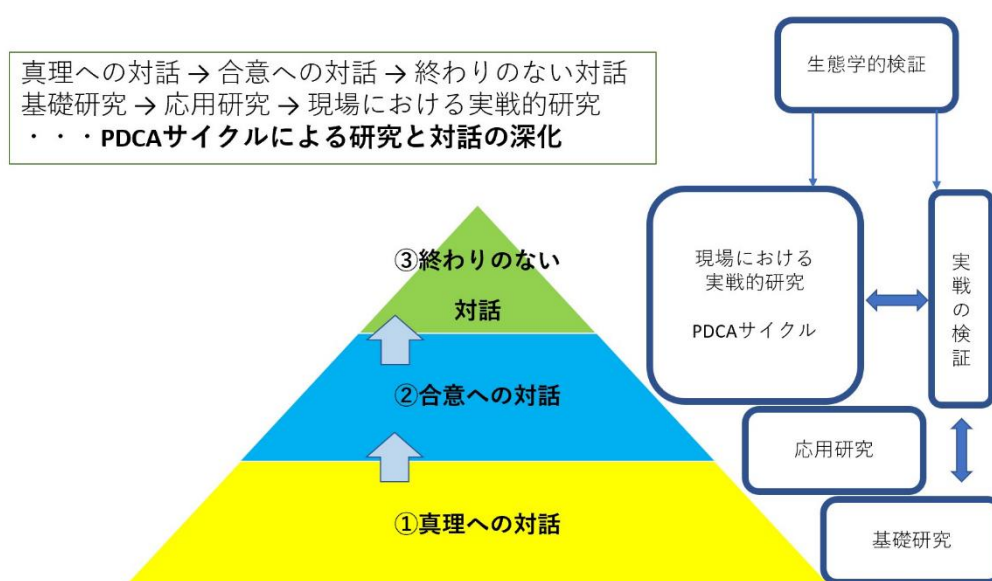


図8 河川流域内における合意形成に必要な3つの対話

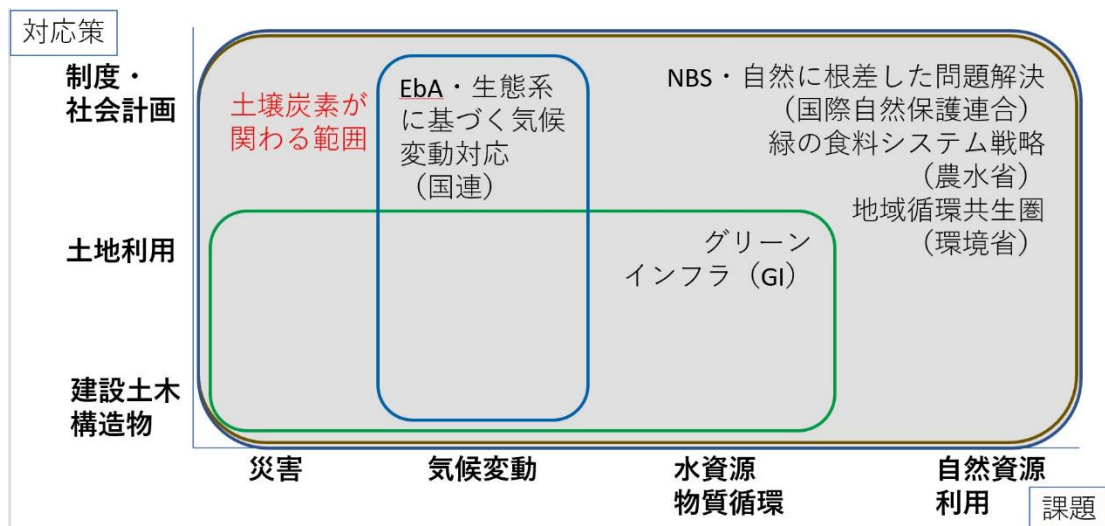


図9 既存の環境保全の枠組みと土壌炭素との関連

参考文献

- 環境省(2020)気候変動影響評価報告書(総説). 環境省:1-95
- 白戸康人(2016) 家畜糞堆肥等の有機物施用による土壌の炭素貯留～地力の維持増進と地球温暖化緩和の両立を目指して～. 畜産環境情報, 64, 11-22.
- 佐々木章晴(2009)根釧地方の酪農開発が自然環境に与える影響. 日本草地学会誌 55(3): 252-263
- 佐々木章晴(2014)これからの酪農経営と草地管理: 土-草-牛の健康な循環でムリ・ムダをなくす. 農山漁村文化協会 (ISBN: 4540131516)
- 佐々木章晴(2017)草地と語る マイペース酪農ことはじめ. 寿郎社, 札幌, p1-221 (ISBN: 9784902269970)
- 佐々木章晴(2017)北海道根釧地方における土地利用の変化と酪農生産システムが河川流域の物質動態と野生生物および水産業に与える影響. 横浜国立大学環境情報学府 博士論文, 横浜, p1-141
- 佐々木章晴・Zhihao Tu・湯本勲(2021)北海道東部火山性草地土壌における人為的要因による土壌炭素含有率への影響. 日本土壌肥料学雑誌 92(2):182-191
- 草野謙次郎(2022)ニシベツ伝記. 幻冬舎, 東京

地域バイオマスを活用した堆肥づくりと除染後農地土壌の肥沃度向上

溝 口 勝

東京大学大学院農学生命科学研究科

1. はじめに

2011 年 3 月の原発事故では放射性セシウムによって山林・農地・海洋等が広範囲に汚染された。特に、汚染された農地では数年間にわたる除染工事の結果、被災地域の農家がようやく農業再開のスタートラインに立てるようになった。筆者は原発事故の 3 か月後から福島県飯舘村の現地に入り、NPO 法人と協働（田尾，2020）で農民自身が実施できる農地除染法の開発やイネの栽培試験を重ね、避難指示解除後の農業再生の方策を探り続けてきた（溝口，2016）。そんな中、2020 年 6 月に浜通り地域で農業復興に関して研究してきた研究者を中心に「復興農学会」が設立された（復興農学会，2020）。一方、復興庁は福島県浜通り地域に福島国際研究教育機構²⁾（以降、機構）を新設する準備を進めている。機構では農林水産業分野の参画も期待されている。農業の基本は土づくりにある。本論では、除染後の農地土壌の課題をレビューし、課題解決のための土壌再生とカーボンニュートラルの達成にむけた復興農学研究のシナリオについて述べる。

2. 除染後の農地土壌の課題

(1) 除染土の処理

農林水産省は原発事故から 1 年半後に農地除染対策の技術書（農林水産省，2013）を公開した。この技術書では農地の汚染程度に応じて、①表土剥ぎ取り、②水による土壌攪拌・除去、③反転耕による対策工法が推奨された。しかし、避難区域の一部では主に表土剥ぎ取りが行われ、汚染土が詰め込まれた黒いフレコンバックが“仮仮”置場と呼ばれる農地に山積みになった。福島県飯舘村ではこの除染土を中間貯蔵施設に運び込む予定で除染工事を進めたが、工事完了後も順番待ちの状態が続き、避難指示解除後に村に戻ってきた村民には精神的な重荷になっていた。そこで、村と環境省は除染土をセシウム濃度で分別し除染土を帰還困難区域にしてされている長泥地区に埋設し、そこで花卉などを栽培する実験を進めている（環境省，2020a）。

除染土の地中埋設に関しては様々な議論があった（環境省，2020b）。しかし、溝口は独自の現地実験により埋設した除染土からほとんど放射性セシウムは漏洩しないこと、現在は理論曲線の通りに自然崩壊の過程にあることを実証し、今では埋設除染土から環境中への二次汚染はほとんどないと考えている（溝口，2020a）。

(2) 排水不良

除染工事では先の技術書に従い重機で表土を剥ぎ取り、その上に汚染されていない山土（真砂土）を客土して低くなった地盤高を戻す公共工事が行われた。このため重機の踏圧によって客土直下 5cm くらいの深さに硬盤層が形成され、水を貯めるために 20cm くらいの深さに人工的に作られる水田硬盤と二層で透水性が低下し、農地全体の排水性が悪くなった（溝口，2017）。上部の硬盤は

耕作時に破砕すれば透水性は戻るので問題はないが、重機による作業で水田の 50-60cm の深さにあった暗渠が壊れ、それも農地の排水不良の原因になっているようである。こうした農地では改めて暗渠の埋設工事が必要である。また公共の除染工事では空間線量率を短期間で低下させることを優先したために水田の畦畔は除染されなかった。

(3) 土壌肥沃度の低下

営農的には除染工事によって肥沃な栄養分を含む表土が失われたことが最大の問題である。除染後の農地土壌では有機物の含有量が低下し、作物の健全な生育が望めない。このため土壌中の有機物含有量を増やす必要がある。

土壌の有機物は生態系の中で多くの重要な役割を果たしている(松中, 2018)。土壌の化学的緩衝材となり、植物栄養を供給し、土壌の物理性(土壌硬度・排水性・保水性)を改善し、土壌微生物の餌となる。地元農家は有機炭素などの栄養分を多く含む家畜糞尿と稲わらから堆肥を作り、土に鋤き込んで何世代にわたり土づくりをしてきた。しかし、原発事故後に畜産業が再開できたところが少なく、家畜糞尿の供給量も少ない状況にある。

伊井らは、2013 年と 2014 年に農家と NPO 法人が自分たちで除染した飯舘村の実験水田で収穫された玄米と稲わらの放射性セシウム濃度を継続的に測定した結果、2015-2019 年の 5 年間で指数関数的に減少していることも明らかにした。(Ii ら, 2021)

八島らは、福島県川俣町山木屋で家畜糞尿の堆肥の代わりに緑肥を使った栽培実験を行った結果、除染された農地ではより多くの有機物を土壌に施用する必要があること、土壌に化学肥料を施しても健康な植物が育ちにくいこと、牛糞を施用することで植物の根や地上部のバイオマスが増加することを報告している³⁾。

福島県農業総合センターは「除染後農地での地力回復マニュアル」の中で、牛糞堆肥を補てんした時の地力回復データを示しながら保肥力の改善と肥料分の補てんの重要性を指摘し、作物の生育ムラを少なくするために丁寧に耕うんするよう注意している(福島県農業総合センター, 2018)。

土づくりは農業の基本である。そのため農林水産省は農業生産力の増進と農業経営の安定を図ることと目的にした地力増進法(昭和 59 年法律第 34 号)などに基づき、全国の農地の土壌改良資材と肥沃度に関する調査を長年実施してきた(農林水産省, 2019)。最近では内閣府が推奨する Society5.0 戦略に相まって、長年蓄積してきた土壌データをデジタル化してスマート農業の推進に活用するために、農林水産省生産局が 2019 年に土づくりコンソーシアム(農林水産省生産局, 2019)を設立し、土壌データの収集・蓄積・利用を通じて農家が土づくりを実践できる環境を提供し始めた。

しかし、福島県浜通り地域では除染と客土により表土の性質が大きく変化してしまったために土壌データベースを単純には利用できない。また、堆肥を作る過程や堆肥を土壌に鋤き込む過程でその地域に存在する放射性セシウムがどのように挙動するのも不明解明されていない。浜通り地域で営農を再開するためには、他の都道府県にはない独自の視点での土づくりが求められている。

(4) 耕作放棄と獣害

原発事故による避難区域では、一時的に人間が住んでいなかったために深刻な獣害(イノシシやサルによる農業被害)が顕在化している。藤本は、獣害があくまで「人間活動の低下」による動物の行動変化が原因であり、避難区域で営農を再開せずに耕作放棄地が増えると野生動物にとって生

活しやすい環境が生まれ、残された農地での獣害リスクが高まるという悪循環が起きることを指摘している(藤本, 2016)。浜通り地域ではこれらの点を考慮して耕作放棄問題と共に総合的な獣害対策を考える必要がある。

(5) 森林から農地への放射性セシウムの流入リスク

浜通り地域の内陸部には森林が多い。原発事故で汚染された森林は、宅地や道路などの林縁から 20m だけしか除染されなかった(環境省, 2020c)。そのため、せっかく農地を除染したのに台風や大雨によって森林から放射性セシウムが河川や農業用水を經由して農地に流入し、再汚染されることが懸念された。

しかし、これまでの研究で放射性セシウムは森林内を循環していること(環境省, 2020c)が明らかになった。山崎らは GIS を用いて飯館村の森林からの土壌流出量をシミュレーションした結果、森林内の土壌流出源は水流の近くに限定され、森林外への流出量がきわめて小さいことを報告している(山崎ら, 2019)。

水文学の分野では流域の水の動きを追跡するトレーサーとして放射性セシウムが使われていた。浜通り地域の森林には図らずも原発事故によりこのトレーサーがばらまかれたことになるが、逆に流域内のいたるところで放射性セシウム濃度を長期的にモニタリングする観測点を設置すれば世界の研究者がうらやむ森林水文学の実験フィールドになると思われる。

(6) 農業基盤の整備と農村コミュニティの崩壊

農業に水は不可欠である。そのため土地改良や圃場整備事業によって山に降った雨や雪がダムやため池に貯められ、農業用水として農業用水路を經由して農地に届けられる。また、大雨の際には余分な水を農地から排水路に流すことで水田などの水管理が行われている。日本の農村ではこうした農業水利施設と農地がセットで整備された農業基盤によって農業生産が支えられ、洪水などの災害から農村地域が守られている。しかし、原発事故により農業水利施設も放射性セシウムに汚染された。森林に降った雨は森林の放射性セシウムを泥と一緒にダムやため池に運び、水底に堆積させた。また、除染工事の際に発生した汚染土は雨水と一緒に農業用水路や排水路の底に溜まった。農地の除染工事は終了したものの農村地域内の農業用水路や排水路には大雨のたびに土砂や泥が溜るリスクがある。自然減衰で濃度が低下したとはいえ、泥には放射性セシウムを固定した粘土分が多く含まれる。毎年春先に農家は自分でこの泥上げ作業をしなければならない。

原発事故前には農業用排水路の泥上げ作業や畦畔の草刈り作業など、農業基盤を含む農村地域の環境は集落単位の共同活動により保全管理されてきた。しかし、原発事故で避難生活が続き、避難指示解除後も戻らない農家がいるために、何世代にもわたって形成された農村コミュニティが崩壊してしまった。近所に共に頑張る仲間がいることは農業復興には不可欠である。農業の担い手の問題も含めて農業基盤の維持管理と農村コミュニティの維持をどのように再構築すべきか頭の痛い問題である。

3. 土壌再生研究に基づく福島農業復興シナリオ

農業の基本は土づくりにある。福島県には会津農書(1684 年)に基づく堆肥づくりを実践するなど、伝統的な現場知を持つ農家も多い。また、最近では世界的に有機栽培に対する消費者の関心も高く、そうした時代の流れを酌んで農林水産省も 2006 年に有機農業推進法(農林水産省, 2006)を

制定し、日本国内における有機農業の推進を図り、堆肥による土づくりを推奨している。2021 年 5 月には 2050 年までに有機農業の取組面積の割合を 25%に拡大するという「みどりの食料システム戦略⁴⁾」を策定した。

2.(3)で指摘したように、浜通り地域の農地では除染工事で表土の栄養分(肥沃度)が失われた。この肥沃度を化学肥料で回復するには限界があるため長期的に地域内で発生する家畜糞尿と稲わらによる堆肥の投入が不可欠である。また、福島県は地形的に中山間地が多いという土地柄を考慮しながら伝統的な農業と新しい農業の融合技術の開発が必要である。

図 1 は、こうした背景を踏まえて筆者が試作した「土壌再生研究に基づく福島の農業復興シナリオ」である。以下ではこの図の内容を具体的に説明する。



図 1 土壌再生研究に基づく福島の農業復興シナリオ¹⁾

(1) 土壌再生技術の開発

これは、表土剥ぎ等の除染工事で失われた地力を回復するために、地域内で産出・排出される落葉・木材・稲わら・家畜糞尿などのバイオマスを活用して堆肥をつくり、農地の初期栄養分や作目に応じて土壌に鋤き込み、最適な土壌（テラーメイド土壌）をつくる技術である。堆肥づくりでは、どのような有機質資材を、いつ、どのくらい、どのような方法で土壌に投入するかなどの因子に基づき、どのような機能や土壌改良効果を期待するのかを明確にすることが必要である（谷，2013）。それを具体的に実現する方法として、IoT 土壌センサを用いた堆肥の熟度診断技術を開発することを提案したい。すなわち、堆肥づくりのノウハウを持つ農家を「堆肥ソムリエ」として認定し、そのソムリエが持つ経験知（水分量や温度、堆肥を混ぜ合わせるタイミングなど）を IoT センサで数値化し、データを蓄

積し、その経験知とデータを融合し、AI などの最先端技術と組み合わせて堆肥生産を自動化するシステムを開発する。

図2は堆肥の熟成過程の温度と水分量を IoT センサで遠隔モニタリングした一例⁵⁾である。IoT センサを活用することにより堆肥の温度と水分量が可視化され、非専門家でも切り返しのタイミングを判断できる可能性があることを示している。

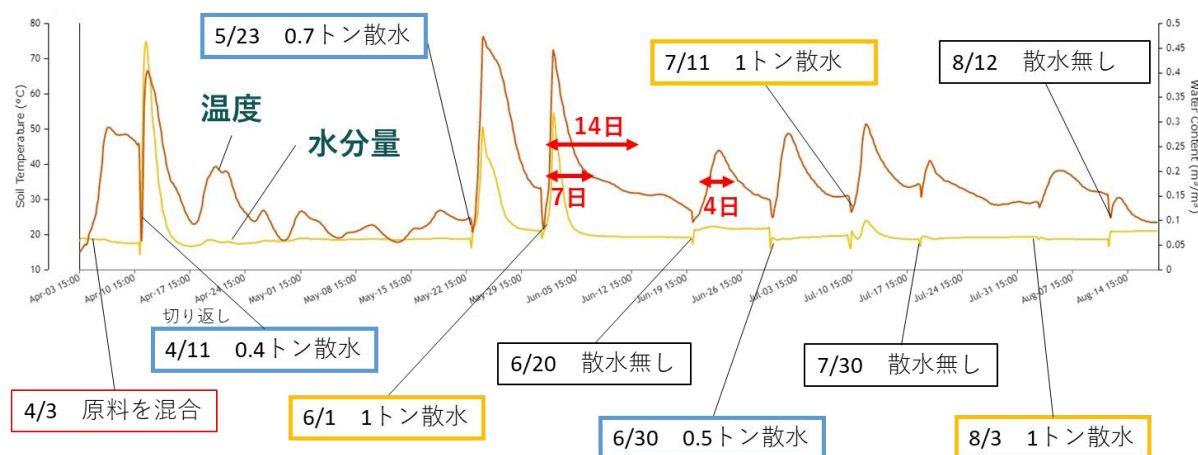


図2 堆肥の熟成過程の堆肥中の温度と水分量の遠隔モニタリング例⁴⁾

(2) 中山間地域の小規模スマート農業技術の開発

農林水産省と内閣府はこれからの日本の農業を展開するための切り札として大規模な土地の集約とスマート農業を推進している。しかしながら中山間地の多い日本国内の一般農地では大規模なスマート農業を展開するのが難しい(溝口、2020b)。そこで、大規模なスマート農業ではなく中山間地でも適応できる小規模なスマート農業技術の開発が必要である。幸いなことに、機構の設置に先立ち、南相馬市では福島ロボットテストフィールドの整備が進められている。そこで、ロボット分野と農業分野とが連携して中山間地域にロボットテストフィールドを展開し、ここで小規模スマート農業を支援する技術を開発してはどうだろうか。

浜通り地区の中山間地には携帯電話すら入らない地域も多い。総務省は日本国内のすべてに10km グリッドで5G 基地局設置を展開しているが、山林の多い浜通りで5G などの高速大容量のインターネットサービスは使えない。そのために、木などの障害物があっても通信ができる補助的な技術開発が必要である。例えば、圃場整備事業の際に農業用排水路に光ケーブルを敷設し、あるいは浜通り地域で電波特区を申請して山林でも利用可能な周波数帯を使って、中山間地域でも情報のやりとりができる小規模スマート農業の基盤技術の研究開発を行うのである。そこで開発されたロボットと通信の技術を使って、水田の水管理、畦畔の草刈り、獣害対策などができたら面白いだろう。こうした高度通信インフラが整備された新技術の開発拠点が浜通りの中山間地域にできれば、首都圏に住む若者も新しい価値観と夢を求めて集まってくる可能性がある。

(3) 国際的連携

堆肥による土壌再生は地球温暖化対策(カーボンニュートラル)にも貢献する。現在土壌科学の分野では土壌中の炭素蓄積に関する研究が注目されている(白戸、2018)。「世界の土壌炭素を毎年0.4%増加させることができれば、大気CO₂濃度の上昇を止められる」という計算に基づいて2015

年の COP21 でフランス政府が提案した「4パーミル・イニシアティブ」が採択されたからである。このように土壌再生研究には土壌科学分野との連携が不可欠である。

国際教育研究拠点(機構の前の呼称)構想ではアメリカのハンフォードサイトをモデルにした地域づくりが提案されていた。この地域には土壌浄化に取り組む科学技術研究所と関連する教育機関に加えて、ブドウ栽培農家やワイン関連の食産業企業が集まり、それらの相乗効果で地域全体が活気づいている。同様のことを福島県浜通り地域で行うとすれば、ワインに加えて、日本酒が有望である。福島県には酒蔵が多く、日本酒の品評会で毎年優勝している実績があるからである。そして、発酵醸造系の研究分野が新設される福島大学食農学類がこの地域連携に加わることで、福島はハンフォードサイト以上の「究極の地方創生モデル」になるだろう。

4. おわりに

福島国際研究教育機構は 2023 年 4 月に新設される。復興庁は 2030 年で解体されるが、機構で実施される研究開発は福島復興再生特別措置法に基づく「新産業創出等研究開発基本計画²⁾」(令和 4 年 8 月 26 日内閣総理大臣決定)に決まろうとしている。この基本計画には重点 5 分野の一つを占める農林水産業では「スマート農業やカーボンニュートラル等を通じた地域循環型経済モデルの構築を目指し、…」という記述があるが、不思議なことに福島の農業復興にとって最優先課題と思われる農地土壌の肥沃度向上に関する言及が一切ない。省庁間の調整の難しさを伺える。

本論で提案した農業復興のシナリオ¹⁾(図1)は復興農学会誌(創刊号)に掲載された。日本農学会会員諸氏が省庁間の綱引きに囚われることなく、現地農家の切実なる要望を素直に受け入れ、「除染工事で失われた農地土壌の肥沃度向上×カーボンニュートラル」を意識しながら、福島の農業復興を実現する新しい農学研究を創出してくれることに期待したい。

引用文献

本論文は復興農学会誌(電子版)に掲載された総説¹⁾を改変し、そこに最新情報を追記したものである。本文中で”(溝口, 2020a)”のように記した文献については 1)の引用文献を参照されたい。

- 1) 溝口勝: 原発事故で失われた土壌の再生に向けてー除染後農地の問題と復興農学ー, 復興農学会誌, Vol.1 No.1, p.28-34(2021)
- 2) 復興庁: 福島国際研究教育機構, <https://www.reconstruction.go.jp/topics/main-cat1/sub-cat1-21/20210202160535.html> (2022 年 9 月 14 日閲覧)
- 3) 八島未和・斎藤葉瑠佳・菊地悠汰: 除染による土壌肥沃度低下とその回復に向けた取り組み(第 1 報)ー山木屋地区除染後農地における緑肥の分解と土壌微生物バイオマス炭素量への影響ー, 復興農学会誌, Vol.2 No.1, p.11-23 (2022)
- 4) 農林水産省: みどりの食料システム戦略トップページ, <https://www.maff.go.jp/j/kanbo/kankyos/seisaku/midori/> (2022 年 9 月 14 日閲覧)
- 5) 内山健太郎・溝口勝・原拓朗: 完熟堆肥製造における温度・水分・マトリックポテンシャル等の連続リモートモニタリングの有効性, 2021 年度(第 1 回)復興農学研究会, <http://fukkou-nougaku.com/conf/> (2022 年 9 月 14 日閲覧)

講演者プロフィール

敬称略・講演順

【白戸 康人（しらと やすひと）】

北海道出身。1991 年東北大学大学院農学研究科博士課程前期課程修了。青年海外協力隊員（パラグアイ）、鯉淵学園技師、農林水産省草地試験場、農業環境技術研究所、農林水産技術会議事務局研究調査官などを経て 2021 年より農研機構農業環境研究部門気候変動緩和策研究領域長。専門分野は土壌学。所属学会は日本土壌肥料学会、日本ペドロロジー学会。中央環境審議会気候変動影響評価等小委員会委員。主な編著書：土のひみつ（朝倉書店）など。

【野中 最子（のなか いとこ）】

大阪府出身。1995 年北海道大学大学院農学研究科修士課程修了。1996 年農水省畜産試験場入省、2021 年農研機構畜産研究部門グループ長。専門分野は反すう家畜のエネルギー代謝。農林水産省農業資材審議会専門委員、日本畜産学会男女共同参画委員
主な編著書：日本飼養標準・乳牛 2017 年版（編集事務局、2017）、家畜生産における温室効果ガスの排出削減技術（JATAFF ジャーナル 2020）、地球温暖化と日本の農業、第 7 章 家畜・飼料作物（気象ブックス 2020）

【彦坂 晶子（ひこさか あきこ）】

東京都出身。千葉大学大学院自然科学研究科博士課程修了。博士（農学）。財団法人日本園芸生産研究所、東京大学農学生命科学研究科助手を経て、2006 年より千葉大学園芸学研究院准教授。

専門分野は環境調節工学、施設園芸学。最近の研究テーマは、植物群落の画像情報や環境情報に基づくかん水制御システムで高糖度果実を無人生産する研究、植物工場で環境ストレスを与え野菜や薬用植物の有用成分を高濃度化する研究を行っている。

日本学術会議連携会員、園芸学会代議員、日本生物環境工学会理事、日本農業気象学会理事。農林水産省農業資材審議会委員。

分担著書：施設園芸学、2.5. 成長. と Smart Plant Factory: The Next Generation Indoor Vertical Farms. Springer; 1st ed. 2018 版 の 20. Production of value-added plants.

【遠藤 真咲（えんどう まさき）】

千葉県出身。2007 年筑波大学大学院生命環境科学研究科博士課程後期終了。日本学術振興会特別研究員を経て、2009 年 農業生物資源研究所 任期付研究員。2010 年-2011 年在外研究 Purdue University（米国）客員研究員。2014 年より、農研機構・生物機能利用研究部門所属となり、現在に至る。上級研究員。2021 より、農研機構・農業情報研究センターならびに、横浜市立大学 客員准教授を兼任。専門分野は植物分子育種学。日本育種学会、日本植物生理学会、日本植物バイオテクノロジー学会に所属。主な論文：Endo et al. (2019) Genome editing in plants by engineered CRISPR-Cas9 recognizing NG PAM. Nature Plants 5,

14-17. 遠藤真咲、土岐精一 (2021) ゲノム編集 学術会議叢書 28「日本の食卓の将来と食料生産の強靱化について考える」243-262.

【本田 恭子（ほんだ やすこ）】

兵庫県出身。京都大学農学部卒、同大学院農学研究科博士後期課程修了、博士(農学)。岡山大学学術研究院環境生命科学学域 助教(特任)を経て、2018 年より同大学学術研究院環境生命科学学域 准教授。専門は農村社会学、農業経済学。主な所属学会は農村計画学会(評議員、脱炭素特別委員会委員)、日本農業経済学会、地域農林経済学会、日本村落研究学会、農業農村工学会。地域農林経済学会学会奨励賞、農村計画学会奨励賞(論文)受賞。主な著書:1)『地域資源保全主体としての集落—非農家・新住民参加による再編を目指して』(単著, 農林統計協会, 2013 年)、2)『再エネで地域社会をデザインする』(分担執筆, 京都大学学術出版会, 2020 年)、3)『農村計画レビュー』(分担執筆, 筑波書房, 2022 年)。

【恒次 祐子（つねつぐ ゆうこ）】

東京都出身。1999 年東京大学大学院農学生命科学研究科修士課程生物材料科学専攻修了。農林水産省森林総合研究所研究官、独立行政法人森林総合研究所主任研究員、東京大学大学院農学生命科学研究科准教授を経て 2021 年 10 月より東京大学大学院農学生命科学研究科教授。木材利用による地球環境保全効果の定量的な評価、木材や木材を用いた空間が人に与える影響などを研究。日本木材学会理事、日本生理人類学会理事、IPCC 2013 Revised Supplementary Methods and Good Practice Guidance Arising from the Kyoto Protocol 著者、「ウッドチェンジネットワーク事業 内装木質化ワーキンググループ」主査、「内装木質化等の効果実証事業」委員、「木の良さデータ整理検討委員会」委員など。主な著書「日本は森林国家です—産業界からのアプローチ(ぎょうせい)」(分担執筆)、「最新木材工業事典」(日本木材加工技術協会)(分担執筆)など。

【佐々木 章晴（ささき あきはる）】

1971 年北海道野付郡別海町西別原野生まれ。1995 年帯広畜産大学・畜産環境科学専攻修了。修了後、北海道の農業高校教員として勤務し、2001 年より低投入型酪農のモデルとされる三友農場(現酪農適塾・吉塚牧場)の調査研究を開始する。同時に多様な形態の酪農経営や草地の実態調査、山階鳥類研究所標津 2 級ステーションにおける鳥類標識調査、河川流域土地利用や水産業の実態調査など、北海道根釧地方を総合的に捉える研究を行う。2017 年 9 月、横浜国立大学にて博士(環境学)。2017 年 10 月より北海道大学農学研究院客員研究員。日本草地学会、日本土壌肥科学会などの各会員。日本生態学会生態系管理専門委員。主な著書:佐々木章晴(2009)根釧地方の酪農開発が自然環境に与える影響. 日本草地学会誌 55(3):252-263. 佐々木章晴(2014)これからの酪農経営と草地管理. 農山漁村文化協会, 東京, p1-142. 佐々木章晴(2017)草地と語る マイペース酪農ことはじめ. 寿郎社, 札幌, p1-221. 佐々木章晴・Zhihao Tu・湯本勲(2021)北海道東部火山性草地土壌における人為的要因による土壌炭素含有率への影響. 日本土壌肥科学雑誌 92(2):182-191.

【溝口 勝 （みぞぐち まさる）】

栃木県出身。1984 年東京大学大学院農学系研究科博士課程中退。三重大学農学部助手、助教授を経て 1999 年より東京大学大学院農学生命科学研究科助教授、2003-2004 年内閣府参事官補佐(併任)、2008 年東京大学大学院情報学環教授を経て、2010 年より東京大学大学院農学生命科学研究科教授。専門分野は農業土木学・土壌物理学・国際情報農学。復興農学会、農業農村工学会、土壌物理学会、認定 NPO 法人ふくしま再生の会(副理事長)。主な編著書:秋光信佳・溝口勝編著, 福島復興知学講義, 東大出版会(2021)、溝口勝ら著, ドロえもん博士のワクワク教室「土ってふしぎ!」ー放射性セシウムに対する土のはたらきー, 東方通信社(2019)、溝口勝訳編著, メイドインふくしま, 東方出版社(2021)

2022 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	大政 謙次
	渡部 終五
監 事	佐藤 秀一
	與語 靖洋

【日本農学会常任委員】

企画担当	玉井 幸治	(日本森林学会)
	松本 浩一	(日本農業経済学会)
庶務担当	岩田 洋佳	(日本育種学会)
	濱寄 孝弘	(日本農業気象学会)
会計担当	松元 哲	(園芸学会)
	上吉原 裕亮	(日本熱帯農業学会)

【日本農学会企画委員】

齋藤 勝晴	(日本草地学会)
杉浦 幸二	(日本畜産学会)
大塚 重人	(日本土壌肥料学会)
恒次 祐子	(日本木材学会)
牧山 正男	(農村計画学会)

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

2022 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
