

2024 年 7 月 5 日

野村證券株式会社

フード&アグリビジネスビジネス・コンサルティング部

ヴァイス・プレジデント 石井 佑基

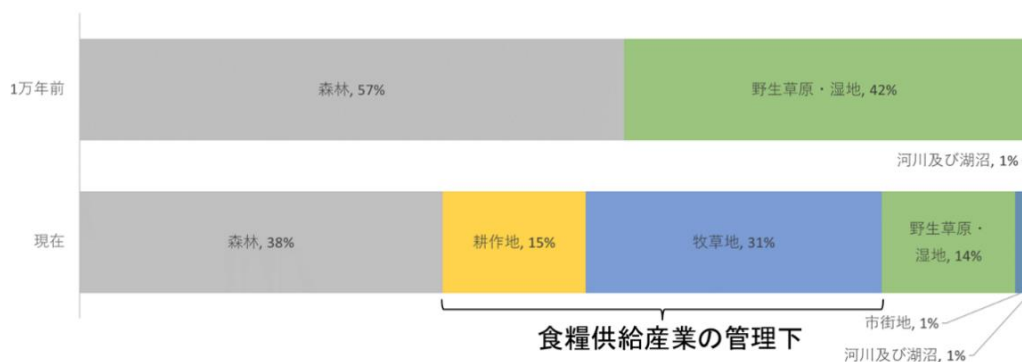
(TEL:03-3281-0780)

カーボンファームの将来性と課題

はじめに

砂漠や氷河を除く地球上の陸地の 46%が農業及び放牧等の畜産に利用されている。温室効果ガスに注目すると、農業及びその他土地利用 によって発生する温室効果ガスは全排出量の 24%に及ぶ。更に、有史以来、農業によって排出された温室効果ガスは化石燃料の燃焼によって排出された温室効果ガスの総量の約 2 倍である。

図表 1 地球上の陸地(砂漠・氷河除く)の利用割合の変化



(出所)「History Database of global Environment」、FAO STAT の図に一部筆者加筆修正

近年、農業によって排出された二酸化炭素を再び農地に戻す「カーボンファーム」が再生農業と共に注目されている。本稿ではその取り組みと日本での可能性について言及する。

1. 炭素貯留の基本的な考え方とカーボンファーム

(1) 炭素貯留の基本的な考え方

炭素は有機炭素と二酸化炭素、炭酸塩など、さまざまに形を変えながら地球を循環している。化石燃料は地下に固定された太古の二酸化炭素由来の有機物で、これを使えば大気中に二酸化炭素が放出され、樹木

が生長すれば二酸化炭素は有機物として固定される。ストックで見れば 大気中 7,500 億トン、陸上植生 5,000 億トン、土壌 1 兆 5,000 億トン、海洋 38 兆トンであり、地上では最大の炭素貯留源が土壌である。炭素固定というともっとも一般的なのは森林育成による炭素固定だが、ほかにも土壌炭素固定（不耕起栽培、バイオ炭、これらをまとめてカーボンファーマーミングと呼ぶ）や海洋炭素固定（ブルーカーボン：海洋のマングローブ林や海草藻場、干潟の再生などで炭素を固定する手法、または創出されたカーボンクレジット）が存在する。農業は耕耘などによって土壌の炭素を二酸化炭素に変え、化学肥料の投入によって特定の微生物が増加することで炭素の分解が促進される。これを炭素循環という。

土壌炭素固定（土壌への炭素貯留）は、2015 年のパリ協定では 4‰イニシアチブ（‰：パーミル、100 万分の 1）として、フランス政府主導で開始された。土壌炭素量を 4‰増加させれば大気中の二酸化炭素濃度上昇を止められるというものである。

農業が耕耘によって放出した二酸化炭素は 4,500 億トンと言われており、耕耘を控えたり、全く行わない不耕起農業などによって炭素の分解を抑制し、土壌中に炭素を戻すのが基本的な考え方である。その他にも、大量の炭素が固定されている泥炭湿地の保全や、下草を意図的に育成させるカバークロップ、牧草地の休耕による炭素固定量の増加などの方法がある。仮に耕耘によって発生した二酸化炭素 4,500 億トンの半分以上を土壌に貯留した場合は産業革命によって生じた温室効果ガスを吸収することが可能となる。

いずれの方法でも農業生産性は低下する場合が多いので、固定した二酸化炭素を炭素クレジットとして販売して収益の低下を抑制するための方法論が開発されている。

カーボンファーマーミングは土壌に炭素を貯留する技術だが、ネットゼロだけでは気候変動を止めることはできない。二酸化炭素は非常に安定した物質であり、数百年間大気中に存在し続ける。したがって、気候変動を止めるにはすでに排出した二酸化炭素を再び固定して大気から除去する必要がある。再生可能エネルギーの利用など、排出を削減するだけでは気候変動対策として不十分であり、森林育成による炭素固定や土壌炭素固定（カーボンファーマーミング）、海洋炭素固定（ブルーカーボン）など、高い貯留力を持つ自然環境に炭素を隔離する必要がある。

(2) 主なカーボンファーマーミングの方法論

土壌の炭素貯留方法は大きく 4 つある（図表 2）。世界の農業生産の中心地である北米で広く取り入れられているカバークロップ（緑肥）の利用と不耕起・低耕起栽培、日本で J-クレジット認証に取り入れられているバイオ炭の活用、牧草地における草地管理の適切化である。それぞれにメリットとデメリットがある。特に大きな課題はカバークロップ、不耕起・低耕起栽培、草地管理に共通する「正確な測定と炭素固定量の算出」となっている。

カバークロップは生長が早い作物を意図的に農地に育成させ、その残渣によって炭素を土壌に固定する方法である。コストが追加的に発生する手法であるものの、簡単なため、広大な農地を有する欧米では有効な方法と言える。カバークロップには日本では緑肥として使われるマメ科の作物や、ソルガムなどの高生長作物が使われることが多い。窒素肥料を減らすことで、二酸化炭素よりも高い温室効果を持つ一酸化二窒素の削減も期待できる方法である。表作の穀物（ダイズ、コムギ、トウモロコシなど）を収穫後に作付けできるカバークロップを使って生産性を下げずに行う事も可能である。

図表 2 カーボンファームの主要手法

	カバークロップ	不耕起・低耕起	バイオ炭	草地管理
概要	高生長作物を粗放栽培してから漑き込み、炭素を固定する方法	耕耘を行わずに土壌を維持する手法	有機廃棄物から作った炭を土壌に漑き込む	牧草地の維持に最適な規模に放牧動物を抑制する
メリット	- 雑草予防 - 比較的管理が容易 - 土壌浸食の抑制 - 作物収量増（緑肥効果） - 施肥量削減（緑肥効果）	- 雑草予防 - 土壌浸食の抑制	- 比較的低コスト - 管理が容易 - 炭素固定量の算出が容易 - 食品残渣の再利用	- 管理が容易 - 土壌浸食の抑制 - 生物多様性の維持
デメリット	- 追加コスト - 農地回転率の低下 - 正確な炭素固定量の測定が難しい	- 遺伝子組換え種子を使わない場合、収量の低下リスクがある - 正確な炭素固定量の測定が難しい	通常の炭では2%程度の混入が限界	- 単位面積当たりの収益性は低下 - 正確な炭素固定量の測定が難しい
利用状況	アメリカ、ブラジル、豪州など	アメリカ、ブラジルなど	日本など	アメリカ、メキシコ、豪州、英国など

（出所）各種資料を基に野村證券フード＆アグリビジネス・コンサルティング部作成

図表 3 のような大陸型の広大な農地での穀物生産の場合、不耕起栽培も使いやすい方法と言える。2020 年にはブラジルの穀物生産面積の約 54% に相当する 3,600 万 ha で不耕起栽培が行われていることをブラジル直播連盟が発表している。不耕起・低耕起栽培による環境負荷の軽減と農薬使用量の削減に最も貢献したのは遺伝子組換え作物である。1996 年から 2020 年までの 25 年間の遺伝子組換え作物の導入効果を研究したグラハム・ブルックス博士とピーター・バーフット博士の論文¹では、遺伝子組換え作物によって全世界で農薬使用量の 17.3% が、また不耕起栽培によって二酸化炭素排出量（2020 年）の 2,343 万トンが、それぞれ削減できたと報告されている。この削減量は約 1,568 万台のガソリン車の年間二酸化炭素排出量に匹敵し、環境負荷の軽減に大きく貢献している。

図表 3 不耕起・低耕起農法が一般的なアメリカの農地（大規模単一作）



（出所）Getty Images

¹ 「GM crops: global socio-economic and environmental impacts 1996-2020」
<https://pgeconomics.co.uk/pdf/Globalimpactbiotechcropsfinalreportoctober2022.pdf>

不耕起・低耕起栽培が拡大した背景は、技術的には遺伝子組換え作物による収量増加と不耕起や低耕起を可能とする高生産性が挙げられる。そういう意味では、土壌の再生と気候変動の緩和に遺伝子組換え作物が与えた影響は大きく、環境負荷が少ない農業と言える。もちろん、高生産性を実現したために得られた効果であり、環境負荷軽減だけではカーボンファームが拡大することは難しいと考えている。

バイオ炭は日本のスタートアップである TOWING (愛知) などが手掛けており、今後の成長が期待されている。バイオ炭は土壌の 2% 程度しか混入できないことやコストなどの問題点があったが、同社は微生物技術を活用して 2% 以上の混入率と収量を下げずにバイオ炭を利用することができるうえ、認証機関へのカーボンクレジット申請の代行なども行っている。TOWING は微生物を付加したバイオ炭を「宙炭 (そらたん)」という商標で販売している。更に、「宙炭」は単体でも栽培が可能で、施設園芸分野への応用も可能という点が大きな差別化ポイントである。バイオ炭と有用微生物を組み合わせた人工土壌によるカーボンファームは日本独自の技術だが、収量の低下を回避して多くの土壌炭素を固定でき、炭素固定に重要な役割を果たすのではないかと期待されている。その一方で、生産過程での GHG 定量と、圃場への投入量の把握が容易なバイオ炭を除けば、カーボンファームは土壌分析が必要であるため、炭素貯留量モニタリングが難しいという欠点もある。土壌の炭素量を低コストで正確に測定するのは難しく、技術開発の余地が残る。海外では中性子線や赤外線を使った測定システムが実用化されているが、これらは大規模な耕作地に特化したシステムであり、日本での利用は難しいだろう。

図表 4 TOWING のバイオ炭「宙炭」



(出所) TOWING

(3) 主なカーボンファームの実績と適地

カーボンファームはどの手法も 1ha あたりの炭素固定量が 2~5 トン程度ととても少ないため、広大な農地を抱える南北アメリカ大陸、豪州、中国、欧州等が適地となっている。アメリカのユニコーン企業である Indigo Ag は不耕起栽培によるカーボンファーム手法である「Indigo Carbon®」を展開しているが、これは 1 経営体当たりの耕作面積が大きい北米であるからこそ可能な手法である。この点はカバークロップや草地

管理でも共通している。近年これらで大規模なプロジェクトが多数 VCS (Verified Carbon Standard) 登録されているが、中国や南米の放牧地など、いずれも数百～数千万 ha 規模の大型プロジェクトである。

土壌炭素貯留の基本的な考え方は耕起を減らすことによって土壌の炭素分解を抑制することであり、管理負荷軽減に繋がる。ただし、穀物は別として野菜の場合は収量の低下などの負の影響も大きく、生産者のコスト負担が増加するリスクも有している。日本で現実的な方法は不耕起栽培やカバークロップというよりもバイオ炭の施用だろう。例外として、農地が大規模な北海道の場合は不耕起栽培やカバークロップ、草地管理手法を検討する余地がある。

2. グローバル・テック企業が注目するカーボンファーマーミング

(1) グローバル・テック企業が注目する理由と取り組み例

グローバル・テック企業は現在、AI とクラウドコンピューティングの拡大で成長を続けているが、解決しなければならない課題も抱えている。それは増加し続けるデータセンターの電力需要である。このまま電力消費が拡大を続けると再生可能エネルギーだけで賄う事は難しくなることが予想されており、グローバル・テック系企業にとって脱炭素は大きな課題である。そこで、グローバル・テック系企業が注目しているのが膨大な炭素吸収キャパシティを持つ土壌への炭素貯留である。既に Microsoft と Google は炭素固定プロジェクトに多くの資金を拠出しており、その中の重要な方法論がカーボンファーマーミングによる炭素固定となっている。カーボンファーマーミングによるカーボンクレジットはその供給に制約が起きない限り、AI 需要の拡大に伴い成長を続けていくと予想する。

Microsoft は 2024 年に世界最大のバイオ炭事業者 Exomad Green (ボリビア) との間で 3.2 万トンのバイオ炭によるカーボンクレジットの売買契約を結んだと発表した。同クレジットはボリビアで森林残渣を使って算出されるプロジェクトであるが、Microsoft は更に、農場管理手法の改善プロジェクトで 10 万トン、草地管理手法の改善で 9.3 万トンなど、大型プロジェクトに次々と投資している。

Apple は 2021 年にゴールドマンサックスと共に立ち上げた Restore Fund に追加投資も含めて 4 億ドルの拠出を決めている。同プロジェクトはブルーカーボン、森林再生等がメインとなっているが、草地再生などのプロジェクトも含む大型のものとなっている。

(2) 市場規模予測と有望地域

カーボンクレジットには国が主導する規制クレジット市場と、民間主導のボランタリークレジット市場がある。足元ではボランタリークレジットが主体となっており、20 億ドル市場と言われているが、筆者は 2040 年には 1 兆ドル程度に拡大すると予想している。

主なドライブは電動化が難しい航空業界、及び拡大を続ける AI 産業が必要とするデータセンターの電力需要である。航空業界だけで、2021 年から 2030 年までの間に 25 億トンのカーボンクレジット需要が試算されている。特にテック系企業はカーボンネガティブを掲げ、積極的な炭素固定プロジェクト支援を行っている。また、AI 産業が成長していく限り、カーボンクレジットの市場も堅調に推移することが見込まれる。土壌炭素貯留はキャパシティが 4,700 億トンであり、最大 5 トン/ha 程度の固定が可能であるため、年間 20 億トンのカーボンクレジット創出も可能であり、10 ドル/トンの単価で 20 億ドルの市場規模が 2040 年段階で予想される。

このような背景があり、カーボンクレジット関連のスタートアップはアメリカの存在感が大きい。前述の

Indigo Ag だけでなく、営農プラットフォーマーの Farmers Business Network も自社のプラットフォームを活用して農業生産者がカーボンのクレジットを創出・販売できるサービスを 2021 年にローンチしている。資金調達額でも企業規模でも現在は Indigo Ag と Farmers Business Network が圧倒的に大きい、他は資金調達額が 1 億ドルよりも少ない企業が多く、創業 10 年以内の企業が多いのも特徴である。カーボンファーマーミング関連スタートアップは現在が黎明期と言える。

アメリカのスタートアップである Nori、ドイツのスタートアップである Klim など、ブロックチェーン技術と再生農業を組み合わせる例も出てきている。この 2 社はマーケットプレイス（私設取引所）も手掛けている。マーケットプレイスを運営するか、VCS や規制市場を利用するかは戦略が分かれているが、この分野も黎明期と言えよう。

3. 日本における取組の可能性

(1) 日本の事情に適したカーボンファーマーミングの戦略仮説

日本はカーボンファーマーミングには不利である。主な理由として、1 経営体当たりの農地面積が小さいこと、カーボンファーマーミングのターゲットとなる畑作地では野菜中心の畑作で不耕起栽培が難しいことなどが挙げられる。

現状、日本の農地事情に最も適しているカーボンファーマーミングの手法は微生物などと組み合わせ高機能化したバイオ炭である。一例として前述の「宙炭」があるが、今後、このような微生物付与バイオ炭の商品数は増加していくだろう。なぜなら、通常施用量に限界があるバイオ炭の欠点を克服し、農地に大量に漉き込むことが可能である。課題はバイオ炭の施用コストであるが、現状で先行している TOWING では、バイオ炭（宙炭）を使って生産した野菜を、カーボンインセット方式²による「ネットゼロ野菜」として高付加価値化して販売するなどの戦略がとられている。

しかしながら、バイオ炭のコストは高く、利用は高価格帯の野菜（有機栽培など）に限られるだろう。しかし、それでも将来的にコスト削減が大きく進んだ場合はより広く普及する可能性もある。また、海外でも野菜などの高単価農作物向けを中心に利用が進んでいくと予想する。

東南アジア（特にインド）でも、日本のスタートアップのサグリ（兵庫）が、リモートセンシングや土壌分析を組み合わせた方法で化学肥料の削減による GHG（一酸化二窒素）の削減を目的としたカーボンのクレジットの登録に入っているほか、土壌炭素のモニタリングも実装している。化学肥料（窒素肥料）の過剰施用は世界的に問題になっている。ただ、過去に施用した化学肥料が土壌に残留することもあり、土壌分析の結果、減化学肥料が可能の場合もある。この方法は検査費用をカーボンのクレジットでオフセットできれば、大規模経営体では普及の可能性があるだろう。

カーボンファーマーミングではないが、水田の中干期間の延長（水田の中干し：水稲栽培の水管理作業で、一時的に水田から水を抜いて干すこと）による水田のメタン削減は、三菱商事などによって日本で既に大規模プロジェクトの登録が開始されている。水田の中干期間延長によるメタン削減は、カーボンファーマーミングに類似した脱炭素方法として拡大を図る可能性を秘めている。

人工的に雑草などを排除する慣行農法ではなく、多様なカバークロップを併用して自然環境の再生も同時に行う再生農法なども、土壌炭素貯留固定は相性がよいために注目されている。ただし、再生農法は生態系

2 カーボンインセット方式：サプライチェーン上で排出量を相殺してネットゼロにする方法

保全や土壌炭素貯留固定などの効果があるものの、それによってブランド化することは一部の製品（ワインなど）以外は難しい。メルシャンのワイナリーでは下草を効果的に利用した再生農法栽培で「ネイチャーポジティブ（自然生態系の損失を食い止め、回復させていくこと）」を実現している。生産性の低下を招きやすい再生農法だが、ワインなどの高い付加価値があり、ネイチャーポジティブがブランド化しやすい作物では、再生農法を検討する価値があると考えられる。

（2）カーボンファーマーミング及び農地関連脱炭素クレジットの国内推計市場規模

バイオ炭の施用量は最大 5 トン/年・ha 程度であり、日本の畑作地 198 万 ha の 1 割に普及した場合、約 99 万トンの固定量となり、市場規模はおよそ 100 億円と推計できる。日本の場合は耕作地が少ないことで市場規模は小さめとなる。しかしながら、化学肥料の削減や有機農業の拡大（宙炭を使った場合）など、副次的な効果も期待できる。そうした意味で、日本の市場はグローバルの市場規模との比較では小さいものの、注目する価値はあるだろう。

水田中干では、日本国内で最大 358 万トン程度（水田からのメタン削減量の 3 割程度、二酸化炭素換算）のメタンが削減できるため、日本の水田の約 2 割に普及した場合、80 億円程度のクレジット創出が推計される。日本の広大な水田を抱える東南アジアへの展開の可能性も秘めており、日本にとって大きなビジネスチャンスがあると言えるだろう。

おわりに

日本の畑作地は 197 万 3,000ha と非常に小さい。しかも、日本の畑作地は年間数回にわたって異なる作物を作付ける野菜作が中心であり、年一回大面積に穀物を作付けする欧米の農業と比べると日本の農地は特殊である。広大な農地での穀物生産を前提とした不耕起栽培、カバークロップ、牧草地管理は不向きである。しかしながら、バイオ炭の施用に関しては日本が得意とする微生物学の蓄積もあり、可能性を秘めている。また、バイオ炭の施用は海外展開の可能性も有している。

また、カーボンファーマーミングではないが、全耕作地の約 54% を占める水田の中干によるメタン削減や、耕作地での化学肥料の削減など、日本が先行している分野も多い。このように、日本の実情に即した独自のカーボンファーマーミングや農地関連脱炭素技術を探求できる可能性が、我が国には残されている。

現在はまだ高コストではあるものの、今後の日本の脱炭素化だけではなく、東南アジアなどへの展開を通じて国際協力にも貢献できる分野であり、日本としても注力していく価値がある分野だろう。東南アジアでのカーボンファーマーミングや水田のメタン削減を通じて、日本は脱炭素化、ビジネス化、国際貢献の一石三鳥を狙う事を考えていくことが重要である。

ディスクレーマー

本資料は、ご参考のために野村證券株式会社が独自に作成したものです。本資料に関する事項について貴社が意思決定を行う場合には、事前に貴社の弁護士、会計士、税理士等にご確認いただきますようお願い申し上げます。本資料は、新聞その他の情報メディアによる報道、民間調査機関等による各種刊行物、インターネットホームページ、有価証券報告書及びプレスリリース等の情報に基づいて作成しておりますが、野村證券株式会社はそれらの情報を、独自の検証を行うことなく、そのまま利用しており、その正確性及び完全性に関して責任を負うものではありません。また、本資料のいかなる部分も一切の権利は野村證券株式会社に属しており、電子的または機械的な方法を問わず、いかなる目的であれ、無断で複製または転送等を行わないようお願い致します。

当社で取り扱う商品等へのご投資には、各商品等に所定の手数料等(国内株式取引の場合は約定代金に対して最大 1.43%(税込み)(20 万円以下の場合は、2,860 円(税込み))の売買手数料、投資信託の場合は銘柄ごとに設定された購入時手数料(換金時手数料)および運用管理費用(信託報酬)等の諸経費、等)をご負担いただく場合があります。また、各商品等には価格の変動等による損失が生じるおそれがあります。商品ごとに手数料等およびリスクは異なりますので、当該商品等の契約締結前交付書面、上場有価証券等書面、目論見書、等をよくお読みください。

国内株式(国内 REIT、国内 ETF、国内 ETN、国内インフラファンドを含む)の売買取引には、約定代金に対し最大 1.43%(税込み)(20 万円以下の場合は、2,860 円(税込み))の売買手数料をいただきます。国内株式を相対取引(募集等を含む)によりご購入いただく場合は、購入対価のみお支払いいただきます。ただし、相対取引による売買においても、お客様との合意に基づき、別途手数料をいただくことがあります。国内株式は株価の変動により損失が生じるおそれがあります。

外国株式の売買取引には、売買金額(現地約定金額に現地手数料と税金等を買いの場合には加え、売りの場合には差し引いた額)に対し最大 1.045%(税込み)(売買代金が 75 万円以下の場合は最大 7,810 円(税込み))の国内売買手数料をいただきます。外国の金融商品市場での現地手数料や税金等は国や地域により異なります。外国株式を相対取引(募集等を含む)によりご購入いただく場合は、購入対価のみお支払いいただきます。ただし、相対取引による売買においても、お客様との合意に基づき、別途手数料をいただくことがあります。外国株式は株価の変動および為替相場の変動等により損失が生じるおそれがあります。

野村證券株式会社

金融商品取引業者 関東財務局長(金商) 第 142 号

加入協会／日本証券業協会、一般社団法人 日本投資顧問業協会、一般社団法人 金融先物取引業協会、
一般社団法人 第二種金融商品取引業協会