緑肥作物のリレー混作導入によって化石燃料 に依存した施肥管理体系からの脱却を図る

1. はじめに

化石燃料や地下資源を利用して生産される化学肥料は、農業生産に不可欠な資材である。しかし、作物の生育にとって最も重要な元素である窒素やリンは地球レベルでの循環に問題があり、現状の肥培管理が続くと食料供給面や環境面で危機的な状況に陥るとされている。パリ協定に基づく温室効果ガス削減目標の強化や資源枯渇の問題から、農業分野においても化石資源依存からの脱却を目指した技術開発が現在求められている。これらを受けてわが国では2050年までに国内の温室効果ガス排出を実質ゼロにし、化学肥料の使用量を30%削減する目標が掲げられた。

化成肥料の主要な3要素である窒素、リン酸、カリそれぞれを生産するのに要するエネルギーを地球温暖化係数(kg-CO2 eq/kg)で比較してみると、窒素肥料の生産にはリン酸やカリの9~15倍の温室効果ガスが放出されている¹)。また、窒素肥料である硝安を生産するには、硝酸が必要となるが、この硝酸を生産する際にも二酸化炭素よりも地球温暖化係数が高い亜酸化窒素が大気中へ放出されている。もちろん亜酸化窒素が大気へ放出される前に回収あるいは触媒利用で分解されるが、すべてが回収や分解されるわけではない。これらのことから、窒素肥料の代替となる資源の活用は重要である。

国際的な天然ガスの価格上昇や肥料の輸出削減などが原因で世界的に肥料価格が高騰している。肥料の大部分を海外に依存している我が国にとっては大変苦しい状況であり、肥料コストの面で生産者の経済的な負担が増加している。このような状況を受けて農林水産省は「肥料コスト低減体系緊急転換事業」を立ち上げて、化学肥料の原料にかかる国際市況の影響を受けにくい生産体系づくりを進めている。つまり、「土づくり」の重要性が改めて問われている。有機物を圃場系外からの補充に依存せず系内のみで賄うことができ、根粒菌との共生によって

窒素成分を土壌に還元でき、土壌蓄積養分の回収・再資源化を図ることができる緑肥作物の出番であると著者は考える。最近では緑肥利用マニュアルが一般公開され、各都道府県へ積極的な緑肥導入が推奨されている²⁾。

2. 緑肥やカバークロップに関する研究

(1) 緑肥作物の役割

緑肥作物は、主に換金作物の休閑期中に栽培されることが多い。作物収穫後の土壌が裸地状態になると降雨による浸食が助長され、窒素やリンなどの肥料成分あるいは土壌そのものの流出が生じる。緑肥作物の栽培期間中は、カバークロップとして地表面を覆うことでこれらの問題を軽減し、団粒構造の安定化や土壌の透水性維持、土壌微生物の活性化など、土壌の物理性、化学性、生物性を改善できる。栽培した緑肥作物を土に鋤きこむと、微生物による分解を受けて植物体内に蓄積された養分が土壌へ還元され、いわゆる緑肥として肥料効果を発揮する。現在、多様な機能を有する緑肥作物が開発されており、うまく活用できれば環境調和型の農業を実現できる。

(2) 研究論文の動向

ここでは、これまで公表された学術論文数に着目して、緑肥やカバークロップに関する研究の動向をみてみる。Scopusの論文検索システム(2022年2月2日時点)で「緑肥(green manure)」や「カバークロップ(cover crop)」を検索してみると、年ごとの論文数は図1のような推移をしており、ここ10年で論文数が増加している。過去110年間の累積を調べると、「緑肥」で検索した場合は約4,300報、「カバークロップ」の場合は約8,000報がヒットした。論文の出どころは、圧倒的に米国が多く、次いでブラジルやインド、中国、カナダが続いた。EU諸国では、イタリア、フランス、スペイン、ドイツ、イギリスなどから比較的多くの論文が公表されている

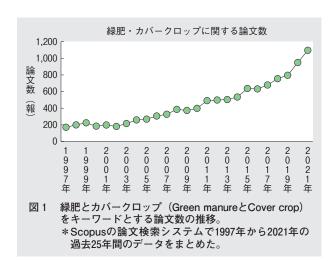
(図2)。ちなみに、日本は11位にランクされた。

3. 緑肥作物のリレー混作

緑肥作物は主作物の栽培期間や収穫後の環境(気 温や降水量など) との関係で栽培を導入することが 難しい場合がある。つまり、収穫後に緑肥を播種した としても、次作物の栽培開始時期の関係で十分なバイ オマス量を確保できず、カバークロップとしての機能 も期待できないことがある。そこで考案されているの が、リレー混作で、英語では「Relay cropping」ある いは「Interseeding」と表現されることが多い。リ レー混作とは、主作物の栽培中に別の作物の栽培を 開始する混作方法であり、栽培に時間差を設けるこ とで植物間の光や養分の競合をできる限り抑えるも のである。この発想は、大昔からあったかもしれな いが、学術論文としては50年ほど前に公表されてい る³⁾。ここ数年、数としてはそれほど多くはないが 緑肥作物のリレー混作についての研究論文が増加し ている(図3)。

米国ではサイレージ用のトウモロコシ栽培で様々な種類の植物がリレー混作されている。トウモロコシとカバークロップを同時播種すると両者で競合が生じるため、トウモロコシの生育がV4~V5ステージに達したときにカバークロップをリレー播種すると収量に影響がないと報告されている。また、トウモロコシの収穫後にカバークロップを播種した場合と比べて、リレー混作ではカバークロップのバイオマス量が十分に確保されて、窒素やリンの流亡を軽減できるという研究事例もある⁴⁾。

わが国からも緑肥の「Interseeding」に関する報告がScopusで3報確認できた(和文を含めるともっとあるのかもしれない)。すべて内野氏らの報告であり、北海道で栽培するトウモロコシやダイズ、ジャガイモにライムギとヘアリーベッチをカバークロップとしてリレー播種し、土壌環境や雑草抑制、主作物への影響などを評価したものであった5~7)。これらは有機農業を意識した研究で大変興味深い。食料生産と環境保全の両立を目指す上で、緑肥のリレー混作は有効な栽培方法であり、著者も野菜類の栽培でリレー混作の可能性を追究しているところである。まだ試行錯誤中で小規模な研究であるが少し紹介させてもらいたいと思う。



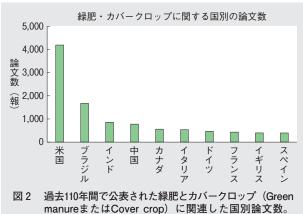
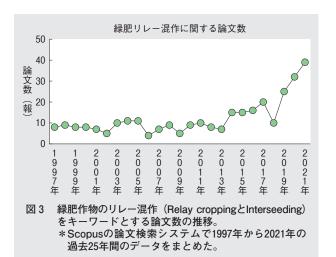


図 2 過去110年間で公表された緑肥とカバークロップ (Green manureまたはCover crop) に関連した国別論文数。 *Scopusの論文検索システムで1911年から2021年の 過去110年間のデータをまとめ、上位10か国を表示した。



4. 秋冬野菜に緑肥作物をリレー混作して、後作物の施肥量削減を目指す

野菜の輪作では、継続した収穫物の持ち出しや頻繁に行われる耕耘などで土壌有機物の消耗が生じる。また、集約的な栽培管理によって、依然として 化学肥料の施肥量は多く、作付け回数も多いことか

らリンやカリウムなどの土壌養分は蓄積傾向にあ る。これらを背景として持続的農業の推進に緑肥利 用が有効な方策であることは認知されているが、わ が国は耕地率が低いという地理的条件から土地生産 性の向上を図る栽培に頼らざるを得ない。そのため 緑肥作物をどのタイミングで導入すべきか悩ましい ところである。このことから緑肥の普及拡大を図る ためには集約栽培に導入可能な緑肥の栽培技術が必 要であると著者は考える。そこで着目したのが緑肥 リレー混作効果であり、集約栽培下でも緑肥リレー 混作がうまく機能すれば、緑肥栽培期間の確保とい うボトルネックを解消でき化学肥料の投入量も減ら せると考えた。

(1) ブロッコリー栽培にヘアリーベッチをリレー 混作して後作トウモロコシの減肥を狙う

ブロッコリーとヘアリーベッチをリレー混作し て、その後に後作スイートコーンへの緑肥効果を検 証した。ヘアリーベッチは、生態型が異なる3品種 (ナモイ、サバン、マッサ)を用いてみた。ブロッ コリーの葉が4枚程度のときにヘアリーベッチを平 行に播種した(写真1)。

出芽したヘアリーベッチはブロッコリーの葉で遮 光されるため初期は弱々しく生育するが、逆に旺盛 に生育してしまうとブロッコリーの成長に影響が出 るので、この状態でよいと考えている。ブロッコ リー収穫直後のヘアリーベッチの様子は写真2のよ うな状態である。その後、春に差し掛かるとヘア リーベッチの生育の勢いは一気に増し、鋤きこみ直 前では完全に地表面を覆っている。なお、土壌表面 がむき出しになっている場所は、実験の都合上、へ アリーベッチを播種していない所である。

4月中旬にヘアリーベッチを緑肥として鋤きこ み、4月下旬に化学肥料を用いる慣行区、各へア リーベッチを緑肥として用いる区、化学肥料も緑肥 も用いない無施肥区を準備してトウモロコシを栽培 した。ヘアリーベッチの品種による違いは多少認め られたが、ヘアリーベッチのみでも慣行区に匹敵す るトウモロコシが得られた(写真3)。

また、トウモロコシ初期の雑草繁茂についてヘア リーベッチを混作しなかった慣行区とヘアリーベッ チ混作区を比べると、ヘアリーベッチ混作区で明ら かに雑草が少ないことが確認された(写真4)。し かし、この現象は初期のみで認められ、時間が経過 するとヘアリーベッチ区であっても雑草は生えてく る。これは、ヘアリーベッチが有するアレロケミカ ル (シアナミド) による雑草抑制効果であると推察





播種位置

ブロッコリー条間で出芽したヘアリーベッチ

写真 1 ブロッコリーにリレー播種したヘアリーベッチの播 種位置と出芽の様子







ブロッコリー収穫直後の様子

HV鋤きこみ直前の様子

写真2 ブロッコリー収穫時(左)と鋤きこみ前(右)のへ アリーベッチの様子





ブロッコリーとリレー混作したヘアリーベッチの鋤 きこみ効果をスイートコーンで評価





ブロッコリー栽培時にヘアリーベッチを 混作していない慣行区

写真4 後作トウモロコシの栽培初期にみられたヘアリー ベッチの雑草抑制効果

されるが、地温の上昇とともにアレロケミカルが分 解され、効果がなくなるのであろう。

経時的に土壌をサンプリングして土壌養分を比較 すると、ヘアリーベッチの鋤きこみだけでは化学肥 料には及ばなかったが、大幅な減肥が可能であるこ とは示された。

(2) 根菜類にヘアリーベッチをリレー間作して後 作エダマメへの減肥を狙う

次に根菜類のダイコンとニンジンにヘアリーベッチ (ナモイ)をリレー混作してみた。12月~翌年1月に根菜類を収穫した後、ヘアリーベッチがカバークロップとして機能し、翌年5月に栽培するエダマメで鋤きこみ効果を図るのが狙いである。ダイコンとニンジンの収量は、ヘアリーベッチを混作しようとしまいと変わらなかった。意外だったのは、その後のヘアリーベッチの生育である。ヘアリーベッチのバイオマス量は、ニンジンと混作したほうがダイコンよりも明らかに高かった。

ニンジンは細葉でダイコンと比較して光を透過し やすい形状となっており、混作したヘアリーベッチ にも光が当たりやすかったことが一因と考える。ま た、ニンジンより収穫時期が早かったダイコンと混 作したヘアリーベッチは、ダイコンを引き抜いた後 にアントシアニンの蓄積が目立った(写真5)。ダ イコンを引き抜くことでヘアリーベッチが低温スト レスに遭遇して生育が遅延した可能性がある。一 方、ダイコンよりも収穫時期が遅いニンジンと一緒 に育てたヘアリーベッチは比較的緑色が保たれてい たことから、ニンジンが防寒の役割を担っていたの かもしれない。ブロッコリーと混作したヘアリー ベッチでも同様のことが観察され、畝の端に育った ものと株間で育ったものではヘアリーベッチの生育 に大きな違いがある(写真6)。混作によって冬期 の作物群落にどれくらいの温度変化が生じるのか現 在調べているところである。

ちなみに鋤きこみ前のヘアリーベッチのバイオマス量は、2.9~4.8t FW/10a、鋤きこみによる窒素還元量は20~35kg N/10a(ダイコン区~ニンジン区)となり、混作する野菜によって幅があったが、値としてはそこまで悪くはない。エダマメの収量は、化成肥料で育てた慣行栽培区とヘアリーベッチのみを肥料源とした緑肥区で有意な差は認められず、平均830kg FW/10aと比較的高い収量が得られた。エダマメは窒素固定を行うので、トウモロコシのように窒素源をあまり必要とせず、ほどほどの窒素が与えられれば良いと考える。

以上、現在取り組んでいる緑肥リレー混作の研究を簡単に紹介してきたが、播種のタイミングや場所、緑肥の種類など検討すべき内容はたくさんある。肥料削減効果に加え、混作による土壌物理性の改善効果や土壌微生物生態系への影響も視野に入れて今後も研究に取り組んでいきたいと思う。



写真 5 ニンジンまたはダイコンとリレー混作したヘアリー ベッチの様子。ニンジン区のヘアリーベッチは緑色 が保たれ生育は良いが、ダイコン区のヘアリーベッ チはアントシアニンを蓄積し、生育が悪い。





写真 6 ブロッコリーと混作したヘアリーベッチの様子 (2022年2月3日撮影)。 畝の一番端で育ったヘアリーベッチ(左) は寒さで 生育が悪いが、ブロッコリーの株間で育つヘアリー ベッチ(右)は、ブロッコリーの葉が防寒の役割を しているのか緑色が保たれ、生育も比較的よい。

5. 混作緑肥で欠点を補う

現在市販されている緑肥作物には一長一短のところがある。例えば、マメ科緑肥作物は窒素固定による土壌への窒素補給が期待されるが、バイオマス量は比較的少なく、易分解性である。イネ科緑肥作物には、高いバイオマス量や線虫対抗性、アブラナ科緑肥作物には、主根伸長による土壌物理性の改善効果や土壌燻蒸効果を有しているものがあるが窒素固定はできない。

単一緑肥では得られない効果を複数の緑肥作物で補う混作緑肥にも注目が集まっている。Chapagainら(2020)が取りまとめた総説によると、緑肥の研究が進んでいる米国では2種類どころか、5種類以上の緑肥作物を混合播種して作物の収量や土性を改善しようとしている⁸⁾。紹介されている研究事例では、単一あるいは二種混合の緑肥よりも、多様な緑肥を混播したほうが作物の収量が良く、土壌改良効果も高かったらしい。YouTubeでも混合播種の動画が配信されており、見ていて大変面白い。一方で種子コストの問題があり多種混合緑肥の有用性につ

いては今後さらなる検討が必要である。著者が混作 緑肥として扱ったことがあるのはせいぜい2種類止 まりであるが、近いうちに混合する種の数を増やし て研究してみたいと思っている。

6. おわりに

化石資源に依存した施肥管理体系から脱却するた めにはどのような方策が必要なのか、この問いにい つも悩まされる。色々模索する中で今回紹介した緑 肥作物のリレー混作は現時点で自分の中ではかなり 有効な策ではないかと考えている。現在、高度な技 術を駆使した新たな農業形態が模索されているが、 地力維持向上の意義は昔から少しも変わることはな い。緑肥のリレー混作利用は、緑肥栽培に要する期 間というデメリットの克服につながり収益性も確保 できるため導入価値は高いのではないかと考える。 またリレー混作をベースに不足分を堆肥や有機肥料 で補完することで有機農業への展開も期待できると 考える。畑で肥料を生産する・循環させるという意 識を生産者がもつことはわが国の将来の農業にとっ て重要だと思う。この実現可能性を社会に少しでも 伝えていけるよう今後も緑肥作物のデータを取り続 けていきたい。

7. 参考文献

- 1) Woods et al. (2010). Energy and the food system. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biol. Sci.*, *365*, 2991-3006.
- 2) 唐澤ら (2020). 緑肥利用マニュアル―土づく りと減肥を目指した新しい試み―、国立研究開 発法人農業・食品産業技術総合研究機構中央農

業研究センター

- 3) Andrews, D. J., & Kassam, A. H. (1976). The importance of multiple cropping in increasing world food supplies. *Multiple cropping*, *27*, 1-10.
- 4) Barnes et al. (2021). Cover cropping and interseeding management practices to improve runoff quality from dairy farms in central Pennsylvania. *Transactions of the ASABE, 64*(4), 1403-1413.
- 5) Uchino et al. (2009). Yield losses of soybean and maize by competition with interseeded cover crops and weeds in organic-based cropping systems. *Field Crops Res.*, 113, 342-351.
- 6) Uchino et al. (2012). Effect of interseeding cover crops and fertilization on weed suppression under an organic and rotational cropping system: 1. Stability of weed suppression over years and main crops of potato, maize and soybean. *Field Crops Res.*, 127, 9-16.
- 7) Uchino et al. (2015). Interseeding a cover crop as a weed management tool is more compatible with soybean than with maize in organic farming systems. *Plant Prod. Sci.*, 18, 187-196.
- 8) Chapagain et al. (2020). The potential of multispecies mixtures to diversify cover cropbenefits. *Sustainability*, 12(5), 2058.