

温暖地の外部低投入水稻栽培体系における緑肥作物の利用

1. はじめに

現在、世界の農業政策が大きく変わろうとしている。EUは、2020年5月20日に「Farm To Fork戦略」を発表し、農場から食卓までを通して、「環境」や「持続性」の重要性をさらに高めることを新しい食品産業戦略にした。農業部門においては、「フードシステムが依拠する土壌、淡水資源、海洋資源の保護・回復」「気候変動の緩和とその影響への適応」「土地、土壌、水、空気の保護、動植物衛生、動物福祉の確保」「生物多様性の回復」を実現し、食料の生産・輸送・流通・販売・消費を含むフードチェーンが環境に中立または良い影響を与えるようにすることが求められている¹⁾。具体的には、農業における炭素隔離、未利用生物資源を活用した循環型農業の推進、化学農薬の削減、有機農業の推進を行うものである。

日本においても農林水産省が、「みどりの食料戦略システム」の中間取りまとめを2021年3月に発表し、2050年までに有機農業用農地を100万ha（全農耕地の約25%）に増加させる農業戦略を示した。これは、日本の有機農業栽培面積を現在の40倍に大幅拡大させるものであり、これにより、農林水産業からのCO₂ゼロ排出や化学農薬50%削減、化学肥料30%削減を実現するとしている。この政策は2022年度予算に繁栄される予定であり、今後、国内農業に大幅な変革が求められていくことになる。

これまでも有機農業の重要性は唱えられてきており、土壌への有機物施用による地力向上、無農薬による農業生態系の保全や生物多様性の高度化、環境保全等に対して、多くのメリットがあることから推奨されてきたが、日本の有機農業農地の面積割合は、欧米の1/10以下である²⁾。この理由として、消費者の認知度が低い、有機農産物の価格が高い、農業従事者が高齢化している、高品質安定生産が難しい等、多方面にわたる要因が指摘されている。農業現場の問題に絞ると、技術習得や労力、コストの面で課題が残されているが、有機農業の根幹を成す

「土づくり」にも課題が多い。

土壌への有機物施用は、単なる養分供給だけでなく総合的な土壌改良が可能になる。土壌の物理性（透水性・通気性・保水性・易耕性・耐食性の増大等）、化学性（養分の継続的な供給、土壌pH矯正、陽イオン交換容量の増大、有害物質の除去、養分の可給態化等）、生物性（有害生物の増殖抑制、生物多様性の増進等）の改善が可能である。

しかしながら、家畜糞や食品残渣等の有機物の発生場所と圃場は離れている場合が多く、堆肥などの有機物を水田や畑に運搬し、散布することは、化学肥料施用に比べて、多くの労力とエネルギー、コストが必要になってしまう。

一方、緑肥は、水稻収穫後に圃場に種子を播種すれば、容易な管理で生育し、カバークロープとして活用したり、開花期頃にトラクターですき込んだりすることにより、土壌に有機物を供給できる最も手軽な手段と言える。特にマメ科緑肥は、窒素固定を行うことから窒素供給も可能である。また土壌中で不可給態化したリン酸等の養分を可給態化させる効果も期待される等、多くの利点を有している（図1）。

日本農業において水稻は、最も重要な作付品目であり、水田面積は237.9万ha（令和2年度農林水産省調べ）であり、全耕地面積の約54%を占めるた

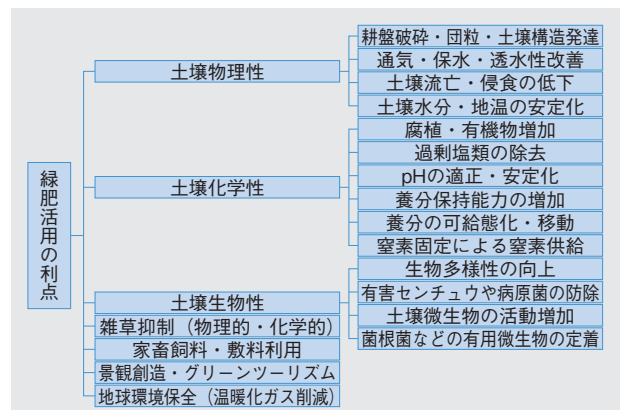


図1 緑肥活用の主な利点

め、水田で緑肥利用面積を拡大すれば、環境保全的で持続的な農業を行うための大きな推進力になると考えられる。

愛媛大学農学部では、1995年から持続型農業技術構築のための研究を行っており、その中心技術が、外部低投入水稲栽培におけるマメ科緑肥の利用であった。研究開始当初は、不耕起移植栽培を行い、緑肥草種、水稲品種、作付時期、湛水時期などの条件を変えて栽培実験を行い、養分供給や雑草抑制について、一定の成果を取ることができた。しかし、供試圃場が極めて低肥沃な土壌であることから、不耕起移植栽培では、長期的に安定した収量が得られないことが明らかとなり、本栽培体系は、本圃場には適さず、鋤込み栽培が有効であると判断し、栽培体系を切り替えた。本稿では、水田においてシロクロバーを緑肥として鋤込み施用する栽培研究を中心に紹介する。なお、水稲不耕起移植栽培は、粘土質で作土が深い低湿な水田であれば、その長所を十分発揮できる技術であると考えられる。

2. 緑肥を活用した水稲栽培体系

水田における緑肥活用は、古くから行われており、レンゲなどの緑肥を水田裏作として栽培し、有機質肥料として土壌にすき込まれてきた（図2）。緑肥種子は、水稲収穫前（立毛中）に播種することもできるが、耕起後に播種を行い、鎮圧をすると発芽率が高く維持される。畑作であれば、草生栽培や不耕起草生の方が、雑草抑制、菌根菌密度の維持等の面で効果が高い（図2）。

愛媛大学の研究圃場におけるシロクロバーの播種量は2 kg/10aであるが、10年以上シロクロバーを栽培したことから、播種量を1 kg/10aまで減らしても草量は維持できている。播種はできるだけ早期に行うと、発芽、苗立ちが向上し、冬季の低温に

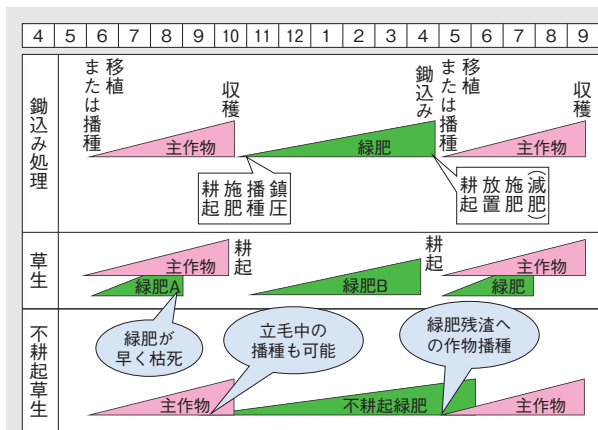


図2 緑肥を活用した作付体系例

より生育が停滞するまでに、ある程度のバイオマスを確認することができる。例年、雑草としてスズメノテッポウが先行して繁茂するが、3月下旬から5月下旬にかけては、緑肥の生育が旺盛になり、開花時期には、ほぼ、シロクロバーが優占する。休閑期の緑肥栽培は、土壌侵食や土壌養分流亡の減少、農業生態系の維持などの面からも有用性は高いと言える。

3. 養分供給能力

日本の農地に施用されている化学肥料の原料は、ほぼ100%輸入に頼っている現状である。窒素肥料は石油精製時に排出されるナフサを利用し、リン肥料は主に南アフリカや中国、ヨルダンからリン鉱石を輸入したり、中国、アメリカからリン安を輸入したりしている。塩化カリウムはカナダから主に輸入している。もちろんこれらの原料は、地下資源を掘り出しており、限りある資源である。特にリン鉱石は、資源枯渇が深刻な問題であり、あと100年ほど枯渇するといわれ、世界的な資源争奪戦が始まっている。2008年の肥料価格の急激な高騰は、記憶に新しいところであるが、今なお世界人口が増加しており、肥料需要も引き続き高く維持されることから、肥料価格のさらなる増加は避けられない状況である。日本では、フード・セキュリティの面からも肥料資源の確保や有効利用が喫緊の課題と言える。

(1) 緑肥による養分確保と供給

休閑期に栽培されたシロクロバーは、基本的に窒素については窒素固定により供給され、リンやカリウムは土壌から吸収される。

表1に、愛媛大学における各研究水田の養分施用量を示した³⁾。慣行栽培4圃場では、緩効性被覆肥料を用いているため、窒素施肥量は少なめに設定されている。有機水田圃場1～4では、全て休閑期にシロクロバーを栽培したが、緑肥施用量が異なっている。これは、緑肥の生育量が圃場により異なることと、緑肥の鋤込み時期が異なるためである。基本的に鋤込み時期が早ければ緑肥施用量は減少し、遅ければ生育が進むので増加する。

緑肥施用量が多いほど、窒素、リン酸、カリウム施用量が多くなる傾向がある。これら3要素の施用量は、水稲栽培には十分であり、過剰ですらあるほどである。したがって、圃場でシロクロバーが十分生育している状態が確認できれば、水稲栽培に必

処理区	緑肥施用量	窒素施用量	リン酸施用量	カリ施用量
慣行栽培	0	5.20	5.20	5.20
有機水田1	1,215	8.21	5.24	13.1
有機水田2	1,227	15.2	7.21	14.7
有機水田3	1,941	21.6	8.51	26.3
有機水田4	1,562	24.0	8.41	25.7



写真1 水田に栽培されるシロクローバー

要な養分は供給できると考えて良く、ある種の土壌養分診断にもなり得る。

リンについては現在、研究が進行中であるが、その一端を紹介する。土壌中のリンのほとんどはCa、Fe、Alなどと結合して不溶性となり、植物には吸収されにくい形態となっている。休閑期にシロクローバーの根がCa型、Fe型、Al型リン酸を溶解して、遊離したリン酸を吸収していると考えられる。春先に緑肥をすき込むと土壌中で土壌微生物により分解され、有機態リンが放出されることになる。有機態リンは、水稻が吸収しやすい形態であるため、リンの安定供給が行われるものと推測している。

カリウムは、比較的溶脱しやすい養分であり、休閑期の降雨により地下や圃場外に流出する可能性がある。緑肥を栽培することにより、緑肥が流出しやすい表土近くや作土層下部のカリウムを吸収し、圃場内に保持し、春先には緑肥地上部に集積して、水稻栽培時に供給することができる。

(2) 雑草による緑肥窒素の供給コントロール

前述したとおり、本研究水田では例年、シロクローバーの繁茂よりも先に、雑草であるスズメノテッポウが優占して生育する(写真2)。

研究開始当初は、雑草生育を抑えることにより、シロクローバーへの養水分や光環境条件を高められ、生育を旺盛にすることができ、最終的に窒素固定量や養分保持量の増加を図ることをするので、できるだけ雑草生育が抑制されるような圃場管理方法の開発を考えていた。例年、3月まではシロク

ローバーの生育は緩慢で、雑草に比べて劣勢ではあるが、4月以降になると、シロクローバーの生育は良好になる。一方、スズメノテッポウは、すでに開花を終えており、枯死しはじめる。最終的に緑肥をすき込む5月中下旬には、雑草の存在を気にしなくても良いほど、シロクローバーが繁茂、優占する状態にまでなる。しかし、雑草の存在が、鋤込み後の緑肥の分解や水稻への養分供給にどのような影響を与えているかを調べる必要があると考え、緑肥、雑草、緑肥葉、緑肥茎、緑肥根に分けて土壌中に混合し、アンモニア態窒素放出量を経時的に測定した(図3)⁴⁾。

緑肥を土壌に鋤込むと、細胞死による自己消化と土壌微生物による分解が始まる。水田は、湛水状態であるので酸素濃度が低く、土壌微生物による分解は畑に比べて比較的緩やかであるが進行する。図3を見ても、緑肥のみや緑肥の葉を土壌に入れた状態では、14日目までは、ほとんどアンモニア態窒素の放出はなかった。しかし、14日目以降から土壌中にアンモニア態窒素が放出されはじめた。一方、緑肥茎と緑肥根はもともと窒素濃度が低いため、分解しても窒素放出があまり行われなかった。このことからシロクローバーの部位により分解や窒素供給速度は異なることが明らかになった。

一方、雑草を鋤込んだ場合は、土壌中のアンモニア態窒素濃度が減少した。これは雑草を土壌微生物が分解するときに、土壌中の窒素を取り込むため、



写真2 有機栽培水田に繁茂するスズメノテッポウ

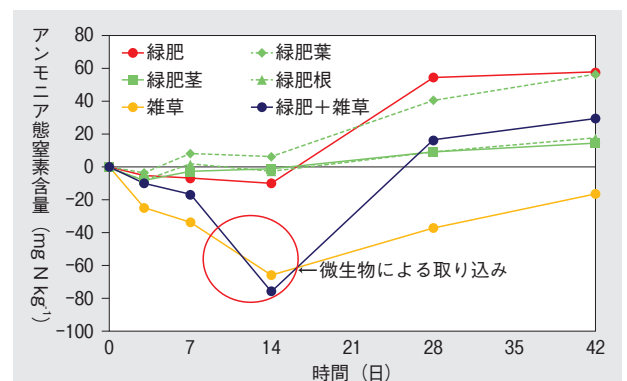


図3 緑肥(シロクローバー)と雑草の分解時における土壌中のアンモニア態窒素濃度の変化

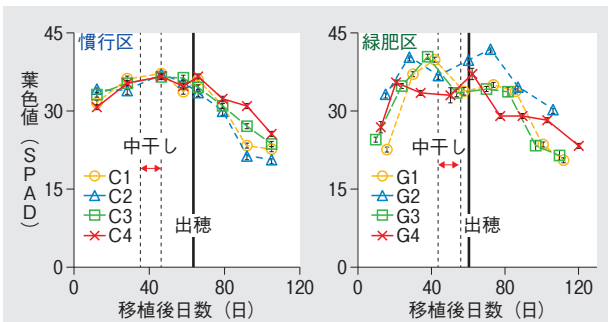


図4 水稻葉色値の推移 慣行栽培(左)、有機栽培(右)各処理区とも4圃場のデータを示す。



写真3 愛媛大学有機栽培水田の出穂始期の様子

いわゆる窒素飢餓が生じたと考えられる。14日目是最も濃度が低くなり、その後、徐々に上昇したことから、14日目以降、土壤微生物によるアンモニア放出が始まったと言える。

実際の圃場では、緑肥と雑草と一緒に水田土壤に鋤込まれるため、緑肥分解によるアンモニア放出と雑草分解による土壤微生物のアンモニア取り込みが同時並行して行われている。本研究では、全体として、鋤込み後14日まではアンモニア態窒素が土壤微生物により取り込まれるが、その後、アンモニア態窒素供給速度が増加し、28日目以降は、アンモニア供給が緩やかに行われることが明らかになった。以上のことから、窒素供給において緑肥はプラスに働き、雑草はマイナスに働いていた。

水稻生育にとって窒素が多量に必要な時期は、移植後30~60日目頃であり、緑肥による多量の窒素供給に対して、雑草がブレーキを掛ける形になり、ちょうどこの期間に多くの窒素供給が行われるようコントロールされていると推測された。図4に水稻栽培期間中の葉色値の推移を示した。緑肥区の葉色値は、初期は低いが、30日目までに急速に増加し、その後、60日目頃の出穂期までの間、慣行栽培より高く推移しており、適切な時期に十分量の窒素供給が行われていると言える。

鉄に関しては、農業現場であまり重要視されておらず、一般的に施肥も行われていないことが多いが、必須養分であり、特に水稻根の健全な生育には

十分量が必要である。水稻を長年栽培すると、鉄が溶脱して土壤の深層に蓄積する。愛媛大学の慣行栽培水田でも、作土層下の深さ20-30cmに遊離酸化鉄の蓄積が見られた。しかしながら有機水田では、緑肥等が深層の鉄を吸収するとともに、鋤込み時には表層近くに鉄を供給するため、遊離酸化鉄濃度は、上層から下層まで、比較的高く維持されていた。他の微量元素についても同様に養分リサイクルが行われている可能性が高く、本栽培体系は養分回収能力と有効態化の点で優れていると考えられる。

有機栽培水田の収量は、例年10aあたり400~420kg程度であり、近隣の慣行栽培収量と同等である。

4. 農業生態系の保全と高度化

緑肥を活用した水稻栽培体系では、ほとんどの時期において水稻や緑肥が栽培されており、植生があることから、農地に生息する土壤生物が増加しやすいと考えられる。

愛媛大学の研究水田において、水稻生育期間を中心に土壤生物のモニタリング調査を行ったところ、貝類、甲殻類、昆虫類、両生類、クモ類、環形動物類が生息していた⁵⁾。その結果を集計して主成分分析で解析すると、有機栽培水田(緑肥水田)の生物数や多様性は、慣行栽培水田(化学肥料水田)より高いことが明らかになった(図5)。有機栽培水田は、特に貝類と昆虫類の数が多く、慣行栽培水田と比べて大きな差が現れた。

有機栽培水田では、窒素、リン酸、カリウム等の養分に加えて、多量の有機物が緑肥施用によって供給されるため、緑肥施用直後から、有機物を分解する微生物が増加し、次に栄養塩類などの分解産物を

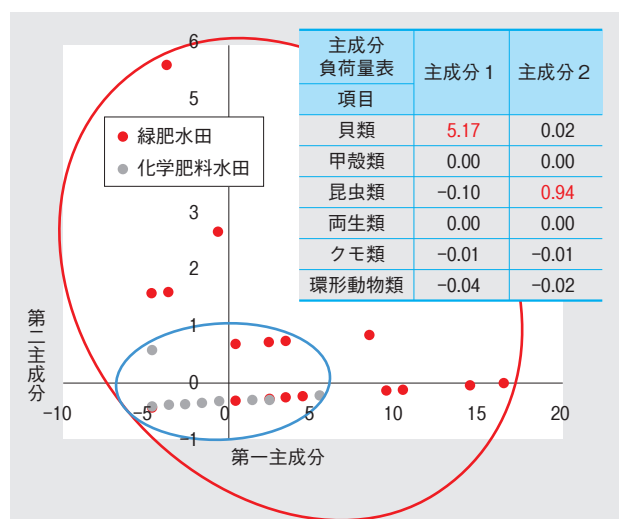


図5 有機栽培水田(赤色の円)と慣行栽培水田(青色の円)における生物数の主成分分析結果



写真4 愛媛大学有機栽培水田に生息したオオハクチョウの親子（左）と愛媛大学の安心米（右）

吸収する植物プランクトンや動物プランクトンが増加する。さらにプランクトンを摂食する甲殻類、昆虫類、貝類等が増殖して、多様で豊富な農耕地生態系を形成している。

秋冬の緑肥栽培時期も、土壌生物量を増加していると考えられる。2009～2010年に掛けて、愛媛大学有機栽培水田に母と息子のオオハクチョウ2羽が飛来し、生息した（写真4左）。愛媛県におけるオオハクチョウの越冬は珍しいため、地元新聞の記事にもなり、多くの野鳥観察者が訪れた。オオハクチョウは、草や昆虫などの土壌生物を食べることから、冬季でも生物量が多い場所に生息する。緑肥栽培水田が一種のビオトープの役割を果たし、自然生態系の維持に貢献したと言える。

このように水田における緑肥利用は、年間にわたり生物多様性の維持拡大を図るための重要なツールになりうると考えられる。

5. おわりに

緑肥を活用した外部低投入水稻栽培研究を始めた当初、収穫による圃場からの養分持ち出しがあるため、水稻収量は低下し、無化学肥料で栽培できるのは数年程度と考えていた。しかし、予想に反して、収量はわずかずつであるが着実に増加し、緑肥栽培のみで10～12年間は、連続して栽培することが可能であることが実証された。もともと造成地の痩せた水田であったが、栽培期間中に土壌有機物量が増加し、CECも2倍程度まで増加しており、確実に地力が向上していることも確かめられた。収量や品質も安定している。リンについては、2、3年前から生育後半に不足する場面が見られはじめたが、土壌中に蓄積するリン酸の有効態化技術が開発されたため、引き続き外部低投入水稻栽培を継続する予定である。

愛媛大学の研究水田は、技術職員が管理している。彼らは慣行栽培体系から離れて、緑肥のみの有機栽培を行うことに当初、懐疑的であったが、本裁

培体系は収量増加と安定的な生産能力があることについて、身を持って体験したことから印象が変わり、学内の一部の水田で行っていた有機栽培を主要な全ての水田で行うことにした。それにより収量が増大し、「愛媛大学の安心米」というブランド米ができた（写真4右）。現在、愛媛大学のショップ等での販売や県内外への直販をしている。また「愛媛大学の安心米」を原料として日本酒を製造するなど、大学の情報発信やイメージアップ戦略にも使われている。

地球温暖化ガスの発生抑制が、政府の重要な検討課題になって久しい。大気中のCO₂濃度削減においては、排出量削減の他に、炭素隔離も有効な選択肢である。近年、「4パーミル・イニシアチブ」という運動が世界的に展開されている。もともと土壌には大気の約3.3倍量の多量の炭素が貯留されており、土壌中の炭素量を毎年4パーミル（0.4%）増加させるだけで、人類が毎年排出する二酸化炭素量を吸収できるというのが活動の趣旨である。

前述のように農耕地に有機物を施用することは、炭素隔離の他に、農地の植物生産能力を向上することにもつながり、植物の光合成能力増加によるさらなる炭素蓄積が可能になることから、正のスパイラルが促進されることになる。その中で緑肥は中心的な役割を果たす可能性を秘めており、その活用拡大が期待される。

6. 参考文献

- 1) 日本貿易振興機構（2020）EUの新しい食品産業政策「Farm To Fork戦略」を読み解く：一段と明確化される持続可能性と環境重視の方向性。
<https://www.jetro.go.jp/biz/areareports/2020/a718804066114a95.html>
- 2) 上野秀人（2019）有機農業の最近の技術動向と今後の課題. 農業1652：26-45.
- 3) 中矢夏子・上野秀人・当真要（2018）シロクローバー施用水田における養分放出メカニズムの解明. 日本土壌肥料学会講演要旨集64：289.
- 4) 細谷和宏・上野秀人・当真要・岩田千宙・辻本泰地・山下陽一・阿立真崇・河野貴幸（2019）緑肥利用超低投入持続水田における土壌養分動態と水稻による養分吸収. 日本土壌肥料学会講演要旨集65：88.
- 5) 永瀧泰・上野秀人・当真要（2019）緑肥利用超低投入持続型水田の土壌動物生態. 日本土壌肥料学会講演要旨集65：29.