

水田における緑肥利用の現状と展望

誌名	農業および園芸 = Agriculture and horticulture
ISSN	03695247
著者名	上野, 秀人
発行元	養賢堂
巻/号	85巻1号
掲載ページ	p. 136-146
発行年月	2010年1月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



水田における緑肥利用の現状と展望

上野 秀人 *

〔キーワード〕：水田，緑肥，クローバー，レンゲ，ヘアリーベッチ，カバークロープ

1. はじめに

持続的農業の重要性が叫ばれて久しい昨今ではあるが、最近ではリン酸やカリウムなどが、世界的な資源枯渇問題から肥料価格が何倍にも上昇し、農家経営が圧迫されている。この問題は決して一過性ではなく、現代農業技術が大幅な見直しを迫られるほど大きな局面にあると言っても過言ではないほどであり、長期的見通しに立った持続型農業技術システムの構築が危急の課題となっている。

次世代型肥培管理技術は、①有限資源の投入量削減、②未利用有機物の活用、③土壌残存養分の可給態化、④肥料利用率の向上、⑤環境への流出低減、⑥総合的な地力維持などが基本となると考えられるが、最も期待されるのは、有機物供給による総合的な土壌改良技術であろう。

土壌への有機物施用は、一般的に物理性（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）の面からその積極的な利用が勧められている。しかしながら、実際には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、化学肥料と比べて非常な労力とコスト、エネルギーを必要とすることにもなりうる。

一方、緑肥は、水稲収穫後に圃場に種子を播種すれば、特別な管理をすることなく生育し、春先の適当な時期にトラクターですき込んだり、カバークロープとして活用したりすることにより、土壌に有機物を供給できる最も手軽な手段である。とくにマメ科緑肥は、窒素固定を行うことから窒素供給能力が期待され、その能力は水稲作においては緑肥だけ

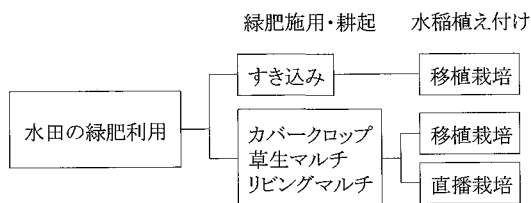


図1 水田における緑肥利用技術体系

で十分な窒素供給が可能なのである。またリン酸等の土壌中で不可給態化した養分を可給化させる効果も期待されている。近年は、安心な食を要望する消費者の増大から、有機農産物に対する需要が拡大しており、資源枯渇問題対策だけでなく、消費者ニーズに応える上でも、水田における緑肥利用は、今後最も重要な技術の一つになるものと考えられる。

水田で緑肥を利用する栽培技術体系として確立されたものとしては、大きく「すき込み」と「カバークロープ」（草生マルチやリビングマルチと同義）に分かれる（図1）。緑肥すき込み栽培では、今のところ苗移植栽培に限られているが、カバークロープとして不耕起栽培を行う場合には、苗移植栽培と種子直播栽培の両方が行われている。カバークロープで直播栽培が可能なのは、土壌や田面水に酸素が比較的供給されやすく、直播された種子の発芽や苗立ちが可能になるためである。

本稿では、緑肥を利用した水稲栽培技術体系について概説するとともに、筆者らが西南暖地の低肥沃度水田において行った栽培研究等について紹介する。

2. 従来研究の歩み

(1) 緑肥すき込み技術

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む水稲栽培技術は古くから行われ、農業現場で最も普及している技術である。緑肥種子は、

*愛媛大学農学部 (Hideto Ueno)

水稲収穫前（立毛中）か収穫直後に播種される場合が多い。播種量は、レンゲ、クローバーで2kg/10a、ヘアリーベッチで5kg/10aが標準である。できるだけ早期に播種を行うのは、緑肥の苗立ち率を向上させ、冬の低温により生育が停滞するまでに、ある程度のバイオマスを確保することで、その後の雑草との競合において優位性を与えることができるからである。3月下旬から5月下旬にかけては、バイオマスを急激に増大させ、開花を迎える頃には、窒素等の養分が最も蓄積される。本技術に関しては数多くの実証研究が行われ、いくつかの一般向け書籍も存在する（安江 1993, 橋爪 2007）。

一般にこの技術は、春先の開花時に繁茂した緑肥をトラクター等で粉碎し、土壌にすき込むことにより、緑肥に蓄積された養分を水稲に供給する機能に重点を置いている。さらに、休閑期の土壌侵食や土壌養分流亡の減少、省資源的な肥沃度維持、農地の景観保全、冬季の植生維持による生物多様性の向上などの機能も付随しており、農業現場においてもその有用性は高く評価されているといえる。

(2) カバークロップ

カバークロップ技術は、水田裏作で緑肥作物を栽培し、春夏作の水稲栽培時には抑草効果と肥沃度向上を同時に行うことを基本とした水稲栽培法である。具体的には、緑肥が春先に急速に生育し、開花期あたりに水稲種子を直播したり、入水によって一部または全部の緑肥を人為的に枯死させた後、水稲苗を移植したりすることになる。

直播栽培の場合、緑肥バイオマスが最も旺盛に生育している立毛時期に、水稲種子を歩行型不耕起溝切り播種機等を用い、深度2~3cmで条播する（嶺田ら 1997, 中野 1999）。水稲種子は発芽・出芽後しばらくは緑肥の被陰があるため、通常の間播に比べて初期生育が劣ることになるが、入水することで、緑肥が枯死してくると急速に生育し始める。

移植栽培の場合、水稲は枯死後の緑肥残渣層の下部の土壌に移植する。その後、緑肥バイオマスは急激に土壌微生物によって分解され、緑肥に蓄えられていた窒素、リン酸、その他無機成分を放出し、作物および土壌へ供給することになる。一方、緑肥構成成分のうち、セルロースやリグニンなどの難分解性成分はリター層として水田表面に残存し、マルチング効果により水田雑草の生育を抑制することに

なる（堀元ら 2002）。

カバークロップ技術は、とくに水稲有機栽培において技術の確立が期待されている。緑肥すき込み技術は養分供給源としては十分であるが、雑草対策もこれとは別に必要になってくるからである。水田カバークロップ研究は、すき込み技術に比べて新しい時期に行われており、雑草抑草効果、不耕起直播栽培、病害虫の生態学的防除等の機能について開発、検討が行われてきている（嶺田ら 1997, 中野 1999, 堀元ら 2002, Choら 2003）。しかし、通常の水稲栽培技術とは大きく異なること、特別な技術や機械が必要なことから（長坂ら 2002）、前述のすき込み技術に比べて普及は進んでいない。今後、より高品質で安定的な栽培技術が確立されることにより、本技術の普及拡大することが期待される。

3. 西南暖地の低肥沃度水田における研究例

(1) 試験栽培概要

愛媛大学附属農場水田（愛媛県松山市八反地）において緑肥すき込み区およびカバークロップ処理区（以下、緑肥マルチ区と略す）を設けて一連の研究を行ってきた。土壌は灰色低地土（花崗岩母材）であり、作土18cm、土性は壤土、全炭素1.24%、全窒素0.11%、CEC=6.21cmol kg⁻¹という低肥沃度水田で行った。供試水稲品種として、穂重型・晩生品種の松山三井（*Oryza sativa* L. cv. Matsuyamamii）を主に使用した。通常、水稲を収穫し終わった11月中旬にシロクローバー、レンゲ、ヘアリーベッチのマメ科緑肥を播種した。すき込み処理区は翌年6月上旬にロータリー耕で緑肥を土壌にすき込んだ。ヘアリーベッチの場合は、ハンマーナイフモアで予め粉碎した後にすき込み処理を行った。その後、6月中旬に湛水を開始し、その10~14日後に水稲を栽植密度20株/m²になるように移植した。すき込み処理区では、通常の水稲移植機の使用が可能であったが、緑肥マルチ区は不耕起栽培であるため土壌が硬く、手作業で植え穴を空けてポット苗を移植した。水管理は開花期までは湛水を保ち、基本的に除草剤、殺虫剤、殺菌剤等の薬剤使用を行わなかった。

(2) 栽培初期の無機態窒素濃度変化

緑肥は、すき込み処理あるいは湛水処理の開始と

ともに分解が開始され、最終的に土壌中のアンモニア化成菌により、アンモニアが田面水および土壌中に放出される。図 2a は、各処理区の田面水中アンモニア態窒素濃度を示したものである。水稻移植前 5 日目（湛水開始後 3 日目）では、各試験区間で差はみられなかったが、移植後 3 日目には緑肥すき込み区で大幅に上昇した。これはシロクロバーが物理的に細かく破碎されたため、物理的な損傷のない緑肥マルチ区に比べて分解が早期に生じ、土壌中から田面水へアンモニア態窒素が移行して、田面水中濃度が高くなったものと考えられた。

一方、緑肥マルチ区の田面水アンモニア態窒素濃度は、移植 11 日目に最も高くなった。これは、この時期に緑肥の分解速度が最高値に達したためである。緑肥マルチ区では緑肥地上部が土壌表面に存在するため、分解とアンモニア放出速度が直接、田面水アンモニア態窒素濃度に反映する。

このように、すき込み処理では、緑肥由来窒素の発現ピークが早期に現れ、ゆっくり減少するのが特徴である。緑肥マルチ区ではピーク発現が遅れるが、減少は急速に起こるといえる。後述するが、緑肥の施用位置がこの後の窒素動態に大きな影響を与えることになる。

図 2b は、土壌中のアンモニア態窒素濃度を示したものである。移植後 1 日目の緑肥すき込み区 (13.8 mg kg^{-1}) では、すでに緑肥分解とアンモニア化成が活発に行われており、無施用区 (10.0 mg kg^{-1}) に比べ 3.8 mg kg^{-1} 高くなった。逆に、緑肥マルチ区 (4.1 mg kg^{-1}) は無施用区に比べ 5.9 mg kg^{-1} 低くなっていた。これは緑肥地下部（根）の炭素率 (C/N 比) が高いため、土壌微生物による分解の際、土壌中のアンモニアが微生物によって消費され、アンモニア態窒素の濃度が低下したものと考えられる。しかし、移植後 40 日目の緑肥マルチ区は、土壌表面の緑肥分解によって生じたアンモニアが下層土壌まで供給され、緑肥すき込み区と同様なアンモニア態窒素濃度まで増加した。

慣行栽培として比較対象のために設けた化学肥料区では、速効性化学肥料を土壌に施用した。緑肥施用区は、移植後 1 日目、40 日目とも、化学肥料区に比べて低い濃度を示しており、遅効性の養分供給パターンであることがわかる。

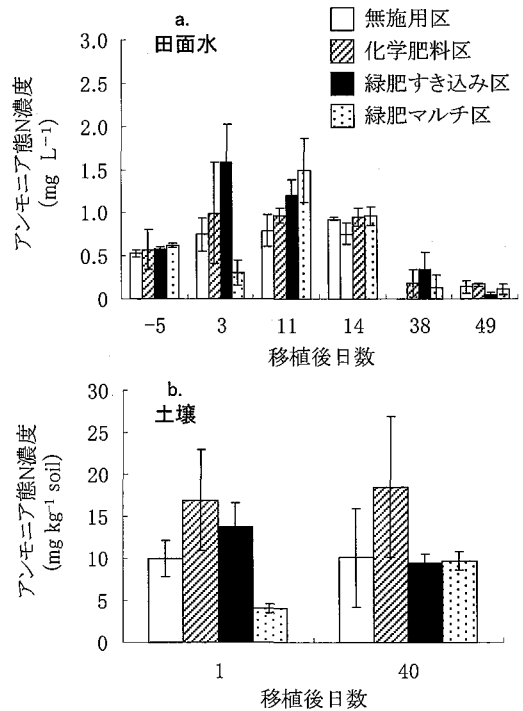


図2 シロクロバー施用水田における田面水(上図)および土壌中(下図)のアンモニア態窒素濃度比較

バーは標準誤差を示す。浅木・上野(2009b)より。

(3) 緑肥由来窒素の動態

緑肥に蓄積された窒素の水稲収穫時における分配割合を図3に示した。この実験では、緑肥として重窒素 (^{15}N) でラベルしたヘアリーベッチを使用し、ベッチに含まれる窒素についてポット実験で窒素動態解析を行った。化学肥料区においても ^{15}N ラベルされた速効性化学肥料(塩化アンモニウム)を施用して比較した。

すき込み区の緑肥由来窒素は、化学肥料区の化学肥料由来窒素に比べ、同等かそれ以上の高効率で水稻茎葉部(8~10%)および子実部(18~19%)に吸収された。大きく異なったのは土壌有機態窒素として残存した部分であり、すき込み区が化学肥料区の2倍程度高くなった。これは、緑肥施用により土壌微生物活性が高まり、土壌への緑肥分解産物の蓄積と微生物による窒素同化が生じたことによるものと考えられる。このような多量の土壌有機態窒素残存は、緑肥由来窒素の脱窒への配分を大幅に減少させることになり、その結果、地力増進や大気汚染ガス発生抑制効果につながる。

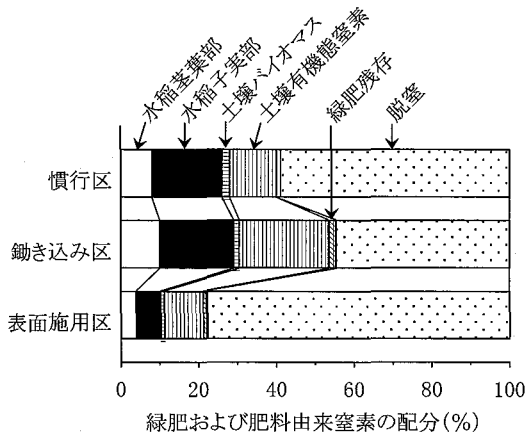


図3 ヘアリーベッチの施用位置が緑肥由来窒素の配分に与える影響
本荘ら (2002) より。

一方、緑肥マルチ区の場合、緑肥由来窒素の水稲による吸収は、茎葉部に4%、子実部に6.3%とすき込み区の半分以下の配分になった。また土壤有機態窒素として残存した割合も10%と低く、78%が栽培期間中に脱窒した。このように緑肥マルチ区で窒素利用率が低くなった原因として、水稲による吸収速度より、土壤微生物による脱窒速度が高かったことが考えられる。緑肥マルチ区の緑肥は田面水中に存在し、すき込み区に比べて比較的溶存酸素濃度の高い環境下にあるため、好気性微生物による分解が活発に行われるとともに、無機化したアンモニア態窒素が容易に硝化・脱窒され易い環境にある。さらに田面水中で分解された緑肥由来窒素が水稲に吸収されるためには、田面水の浸透により下方に移動する必要があり、すき込み区のように水稲根に近い部分で、緑肥の分解と窒素供給が行われる場合に比べて不利な条件が重なっていると言える。

緑肥由来養分の役割は、作物への供給のみに限られず、田面水や土壤表層に生息する水生生物のための栄養源としても重要な意味を持っており、それら生物のバイオマス増加と生物多様性の高度化により (Yokota and Kaneko 2002), 病虫害の生態的防除能力の向上にもつながると考えられる。その意味においては、緑肥マルチの意義は高い。

(4) 緑肥草種の違いが窒素利用率に与える影響

わが国の西南暖地において水田の裏作で栽培可

表1 水田裏作に適用可能な各種緑肥の化学的特性

緑肥草種	C (g kg ⁻¹)	N (g kg ⁻¹)	C/N	セルロース+ リグニン(g kg ⁻¹)
シロクロローバー	376	31.7	11.9	346
レンゲ	393	24.8	15.8	473
ヘアリーベッチ	427	39.7	10.8	376
クリムゾンクローバ	379	28.8	13.2	414
エンバク	424	16.0	26.5	321
ライムギ	316	11.6	27.3	502
イタリアンライグラス	246	11.5	21.7	624
キカラシ	382	15.7	24.4	518
アンジュリア	420	21.0	20.0	324

Asagi and Ueno (2009)より作表。

能な緑肥草種と化学的特性を表1に示した。マメ科4種(シロクロローバー、レンゲ、ヘアリーベッチ、クリムゾンクローバ)、イネ科3種(エンバク、ライムギ、イタリアンライグラス)、アブラナ科1種(キカラシ)、ハゼリソウ科1種(アンジュリア)である。マメ科は窒素固定を行うため、4種とも窒素含量が高く、C/N比も10.8~15.8と低い。さらに難分解性成分であるセルロースやリグニン含量も比較的低いため、微生物分解が速やかに行われ、窒素放出も早期に生じるものと考えられる。一方、非マメ科緑肥は、C/N比が高く、セルロースやリグニン含量も高いものが多いことから分解速度が遅く、窒素放出量も緩慢で少ないと考えられる。

水田においてプラスチック柵(直径20cm)を埋め込み、¹⁵Nでラベルした上記9種類の緑肥をすき込みあるいは緑肥マルチ処理をして水稲を栽培したときの緑肥由来窒素の利用効率を図4に示した。栽培環境が異なるため、図3に比べて高い値を示したが、やはりすき込み区の窒素利用率は、どの緑肥草種においても緑肥マルチ区に比べて高い値を示した。ここで注目したいのは次の2点である。

一つ目は、マメ科草種で窒素利用率が高くなっていることである。これは上述したように、マメ科草種は、その化学的特性から早期に有機物分解や多量の窒素放出を行えることに起因しているものと考えられる。

二つ目は、緑肥由来窒素の水稲根への配分が高いことである。化学肥料由来窒素の根への配分は施用窒素量の10.3%であり、吸収した肥料由来窒素の27%にすぎないが、緑肥由来窒素の場合、とくにマメ科草種では50%程度と高くなっている。つまり、

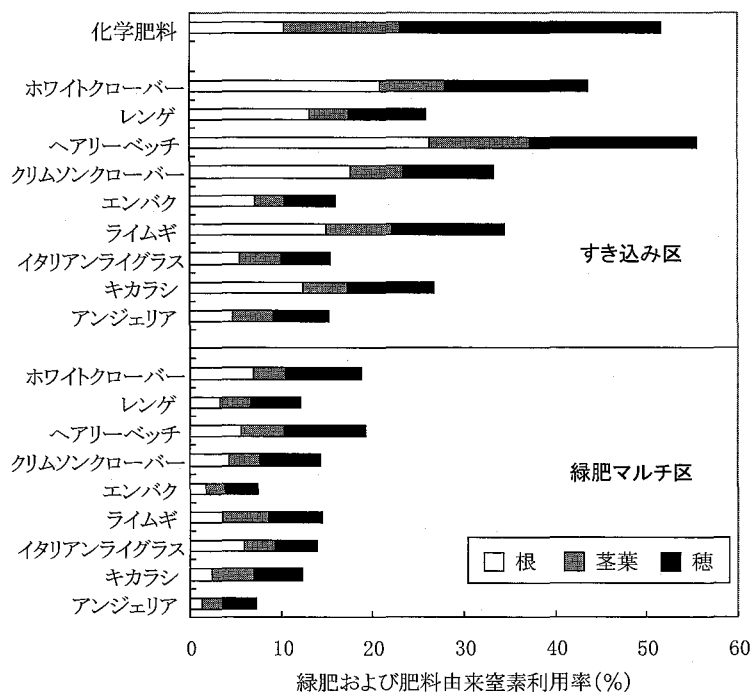


図4 9種類の緑肥をすき込みおよびカバークロップ処理をしたときの水稻による緑肥由来窒素利用率

Asagi and Ueno (2009) より作図。

化学肥料の窒素は水稻茎葉部や穂に蓄積しやすく、マメ科草種の窒素は根に蓄積しやすいことになる。このことは、マメ科草種が水稻に供給する窒素は、単にアンモニア態等の無機態窒素だけでなく水稻根に同化され、上部器官に転流されにくい窒素形態である可能性を示唆している。これらの現象は、現在解析を行っており、緑肥による窒素供給の特殊性と水稻の生理反応については今後、明らかにしていきたい。

(5) 有機酸生成と雑草や水稻への影響

水田に緑肥を施用した場合、入水により急激に枯死と微生物分解が開始される。前述のように窒素成分は、アンモニア化細菌によりアンモニア等の窒素化合物として放出されるが、炭素成分については異なるプロセスが生じる。微生物活性の増加により溶存酸素濃度が低下し、酸化還元電位も急速に低下して、嫌氣的分解反応に移行するため、有機酸が生成することになる。とくに緑肥マルチ区では、田面水中に緑肥が存在するためにこの反応が急激に現れ、湛水開始7~21日目ほどの期間、田面水中の有機酸含量はきわめて高い値を呈する。

図5に水稻移植10日目の田面水中の有機酸濃度を示した。3草種とも290~380ppmの高濃度有機酸が検出された。ベッチ区とレンゲ区ではi-酪酸が

65~79%を占め、残りは酢酸やその他の有機酸(プロピオン酸, n-酪酸, n-吉草酸)であった。一方、クローバー区の場合、i-酪酸は33%と低く、代わりに酢酸の割合が27%と高くなった。おそらく緑肥の成分の違いが、土壤微生物相に変化をもたらし、有機酸生成量の割合に影響を与えたものと考えられる。

これらの有機酸生成および酸化還元電位の低下は、雑草の生育抑制に効果が高いと考えられる。水稻有機栽培で米ぬかを移植直後に田面水に施用するもの、この現象を利用しており、緑肥マルチ処理技術の特長のひとつといえる。

しかし、有機酸生成は水稻にも同時に悪影響を及ぼしており、圃場試験では田面水の有機酸濃度が高いほど栽培初期水稻の伸長量は低くなり、0.2%水準で有意に高い負の相関がみられた(鈴木ら 2001)。このような水稻の生育阻害は移植2週間程度までみられ、その後は有機酸濃度の低下とともに生育が回復した。瀧島らは1960年代に水田の有機酸生成と水稻生育に与える悪影響について一連の報告をしており、図5で示した有機酸濃度は、十分水稻生育を阻害するものであった(瀧島ら 1960)。

このように、緑肥分解における有機酸生成は、雑草および水稻に対して両刃の刃になりうるが、一般

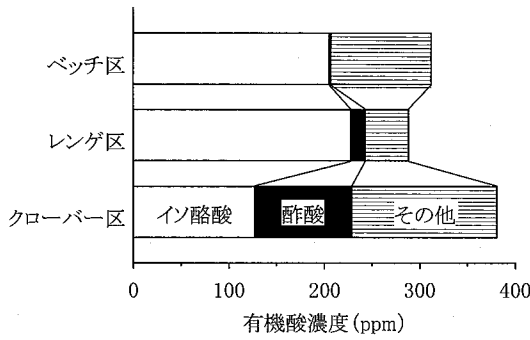


図5 緑肥マルチ区における
水稲移植10日目の田面水中の有機酸濃度
鈴木ら(2001)より。

明らかとなった。とくに本研究は、比較的気温、地温、水温が高い西南暖地で行われたため、緑肥分解が栽培初期に、急激に生じてしまった。一方で、水稲はまだ幼植物であり、緑肥からの供給された養分を吸収しきれない状況が観測された。さらに供試した土壌は、養分保持能力が低く(低い陽イオン交換量と薄い作土層)、余剰の緑肥養分が脱窒や流亡に移行していることも明らかになった。

このような緑肥マルチ処理の欠点を補うためには、緑肥分解を遅延化、緩慢化させて、緑肥養分の放出パターンと水稲の養分吸収パターンと同期させること、また、有機酸による初期生育阻害を減少させることが必要と考え、灌水時期を遅延する実験を行った。

的に雑草の発芽や出芽に与える影響の方が高いと考えられ、雑草密度が高い水田においては有用な技術となりえる。雑草密度が低い水田の場合には、常時灌水ではなく間断灌水等を行い、好气的条件を作れば有機酸は発生せず、水稲の初期生育が抑制されることは少ない。

(6) 灌水開始時期と水稲生育の関係

前述の田面水および土壌中のアンモニア態窒素濃度の動向、水稲による緑肥由来窒素の利用効率、有機酸の生成の面から、水田の緑肥利用については、すき込み処理の方が、除草対策を除き、緑肥マルチ(カバークロープ)処理に比べて有利となること

図6に、シロクローバーを施用したときの水稲草丈、茎数、葉色値の経時変化を示した。緑肥標準区、10日区、30日区は、緑肥を緑肥マルチとして不耕起栽培を行い、灌水開始時期をそれぞれ水稲移植前10日、移植後10日、移植後30日に変化させた処理区である。つまり10日区および30日区では、シロクローバーが繁茂している状態のところへ水稲苗を移植したことになる。

草丈は、無施用区だけは養分供給量が少ないため全期間を通して低く推移したが、その他の処理区は、ほぼ同等に推移した(図6a)。茎数は緑肥30日区

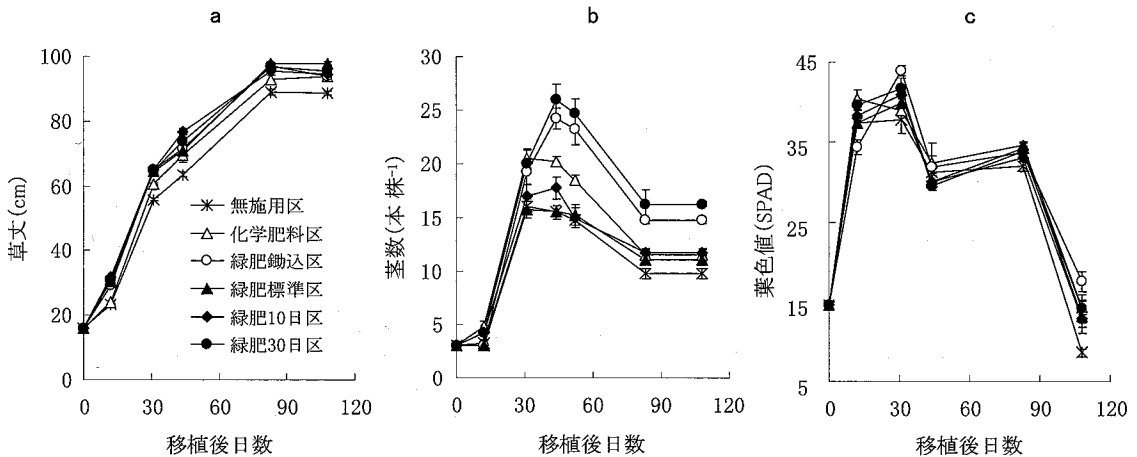


図6 シロクローバーを施用した西南暖地低肥沃度水田における生育調査結果(ポット試験)
緑肥標準区、10日区、30日区は緑肥カバークロープとして不耕起栽培を行い、灌水開始時期をそれぞれ水稲移植前10日、移植後10日、移植後30日とした。バーは標準誤差(n=4)を示す。

浅木・上野(2009a)より。

と緑肥すき込み区が化学肥料区よりも高くなり、緑肥により養分供給が十分に行えたと考えられる(図6b)。また緑肥30日区の方が緑肥すき込み区より若干高く推移しており、灌水時期の遅延が初期生育や初期の養分吸収に対して非常に効果的であることがわかった。この現象については、圃場試験でも同様な傾向が見られた。葉色値については、処理区間でとくに特徴的な傾向はみられなかった(図6c)。

この時の土壌を分析したところ、灌水開始時期を移植後30日目まで遅らせた場合は、他の処理区に比べ、初期のアンモニア態窒素濃度が低下し、代わりに硝酸態窒素濃度の増加が認められた(図略)。これは、灌水開始時期の遅延化が土壌を好気的環境にしたことを意味するものであり、有機酸生成は生じなかったと考えられる。また水稻は、硝酸態窒素も吸収可能であるため、アンモニア態窒素とともに吸収し、十分な生育を維持できたと思われる。

(7) 緑肥施用法と水稻収量、雑草抑制の関係

シロクロバーを用い、各種緑肥施用を行った場合の収穫時水稻乾物重量、玄米収量、収量構成要素および雑草量について表2に示した。

収穫時の深さ5cm(表層土壌)における水稻根の乾物重は、緑肥30日区と化学肥料区において、緑肥標準区、10日区および無施用区より有意に高くなった。さらに深い土層(5~13cm)では、緑肥鋤込区と緑肥標準区で他の試験区より高かった。水稻のうわ根(地表面から深さ5cmまでの根)の量は追肥や水管理の違いによって影響されることが知られており(川田ら1977a, 1977b)、緑肥30日区では灌水開始時期が遅かったこと、化学肥料区は追肥を行ったことが、うわ根増加の原因と考えられる。茎葉重は、緑肥30日区が最も高く、緑肥標準区

や10日区に比べて有意に高くなっており、灌水開始時期の遅延は水稻生育を向上させる効果が高いことが示された。緑肥30日区の穂重は、緑肥標準区や緑肥10日区と有意差はなかったが、緑肥すき込み区と同等に高くなった。

玄米収量は、緑肥すき込み区が最も高くなり、緑肥30日区も比較的高い値を示した。収量が高くなった要因は、穂数増加のためであり、緑肥すき込み区と緑肥30日区は、他の処理区より有意に穂数が高かった。しかし一穂粒数は低めになったことから、この両処理区は初期の養分供給は潤沢であるが、中後期には不足しがちであったと推定された。本研究で供試した水田は、作土が薄く、CECも低い脆弱な土壌であったため、栽培中後期の窒素供給不足が極端に現れやすいといえる。ベントナイトやゼオライト等の優良粘土の客土等による土壌改良が必要と考えられる。登熟歩合および玄米千粒重には、試験区の間で有意差はみられず、玄米品質は各処理区とも同等であった。

雑草乾物重は、緑肥マルチを行った3処理区(緑肥標準区、10日区および30日区)において、化学肥料区および無施用区より有意に低かった。これは緑肥をカバークロップとして利用したためであり、遮光およびマルチングによる雑草の発生・生育抑制効果が大きいと考えられる。緑肥鋤込区も化学肥料区より雑草量は減少しており、緑肥マルチ処理よりは緩慢であるが、有機酸生成等により雑草生育が抑制された可能性がある。緑肥に含まれる化学物質が、アレロパシー(他の植物生育を阻害)作用をもたらす、雑草抑制を行うことも研究されている(藤井1995, 藤原・吉田2000)。シロクロバー地上部についても、その水溶性抽出物がレタスの幼根および胚軸伸長を阻害することが報告されており(高橋

表2 収穫時の水稻乾物重、玄米収量、収量構成要素および雑草量(ポット試験)

試験区	乾物重(g株 ⁻¹)			茎葉	穂	玄米収量(g株 ⁻¹)	穂数(本株 ⁻¹)	有効歩合(%)	粒数		登熟歩合(%)	玄米千粒重(g)	雑草量(gpot ⁻¹)
	0~5cm	5~13cm	合計						(粒穂 ⁻¹)	(粒株 ⁻¹)			
無施用区	14.2 d	3.7 c	17.9 c	18.6 d	17.0 c	15.4 c	9.8 b	61.5 a	68.4 ab	664 c	91.4 a	25.3 a	0.93 ab
化学肥料区	26.2 a	4.3 bc	30.5 a	25.3 bc	22.7 ab	20.9 ab	11.5 b	56.4 a	78.4 a	894 ab	91.0 a	25.7 a	1.43 a
緑肥すき込み区	19.6 bc	6.2 a	25.9 ab	27.3 ab	26.0 ab	23.8 ab	14.8 a	61.0 a	69.3 ab	1,022 a	93.8 a	25.0 a	0.41 bc
緑肥標準区	16.5 cd	5.2 ab	21.6 bc	24.3 bc	21.7 b	19.8 ab	10.8 b	70.6 a	79.2 a	847 b	93.0 a	25.2 a	0.03 c
緑肥10日区	14.6 d	4.0 bc	18.6 c	22.7 c	21.4 b	19.2 bc	11.5 b	66.7 a	72.6 a	836 b	91.2 a	25.2 a	0 c
緑肥30日区	24.3 ab	4.4 bc	28.6 a	29.6 ab	24.3 ab	21.9 ab	16.0 a	63.2 a	59.1 b	946 ab	90.0 a	25.7 a	0.13 c

各項目において右側のアルファベットが同一の数値間には、5%水準で有意な差がないことを示す。処理区説明は図6参照。浅木・上野(2009a)より。

ら 1995) , 雑草抑制効果をもたらした可能性がある。

上記のことから、マメ科緑肥のカバークロップ処理において、湛水開始時期の遅延は緑肥分解をコントロールできるため、有効な高度化技術になり得る。しかしながら、その要因やメカニズムを明らかにし、技術のシステム化を図るために、今後、湛水開始時期の遅延が緑肥由来 N の動態に与える影響だけでなく、土壌 Eh、地温の日較差、さらに雑草発生量などに与える影響について詳細な検討する必要がある。

(8) 水稲品種の検討

わが国の水稲栽培技術は、長年の研究蓄積により最高水準に達しており、各地域における栽培指針も高度に調整され、マニュアル化されることにより、比較的容易に高収量を得られるようになってきている。しかし、上述のように、緑肥を利用した栽培体系、とくに緑肥マルチ処理を行った場合は、極端な養分供給量の変化や有機酸生成など、栽培環境が、いわゆる化学肥料を使った慣行栽培に比べて大きく異なるため、システムの根本的な再構築が必要となってくる。その一つの検討材料が水稲品種であり、異なる養分吸収特性や草型、早晩性を持つ品種を用い、緑肥マルチ栽培に適した品種検索を行った。

図7は、愛媛県において早生から晩生に分類される26品種をシロクローバーによる緑肥マルチ栽培によって栽培し、玄米収量を比較したものである。当初、早生品種は初期生育が早く、生育期間も短いため、緑肥養分の放出パターンと一致し、緑肥養分を効率的に吸収できると予想した。しかし、実際は全体的に早生品種の収量は低く、晩生になるほど収量が高くなる傾向が見られた。また、品種特性として、草丈が高い品種、窒素吸収量の高い品種が比較的収量が高くなることが明らかとなった。これらのことから栄養生長段階で蓄積された窒素等の養分量が多いほど、生殖生長段階での子実への転流量が多くなり、最終的な収量増加につながると考えられた。

消費者ニーズの変化から毎年、いろいろな良食味品種が開発されているが、緑肥利用水田では、品種選択は収量や品質に大きな影響を与える重要な要素になると考えられるため、地域ごとに適品種の検索や緑肥専用品種の開発が必要と考えられる。

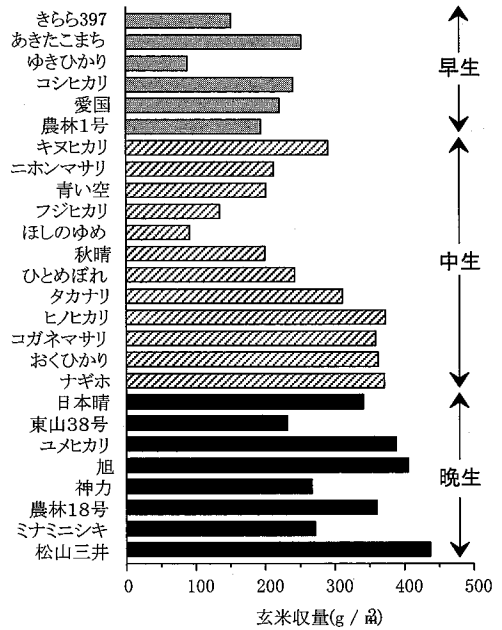


図7 ヘアリーベッチ草生マルチ水田における各水稲品種の収量比較
品種は収穫時期の早いものが上位になるように配置した。
長井ら (2001) より。

4. まとめ

(1) 水田における緑肥利用の留意点

緑肥を水田裏作で栽培する場合、一般に、①有機物供給による土壌改良、②土壌養分の可給態化、③休閑期の土壌養分溶脱防止、④土壌の水食および風食防止、⑤窒素固定による窒素養分供給(マメ科)、⑥雑草抑制、⑦景観保護やアメニティ創出、⑧養蜂における採蜜、⑨天敵保護を含めた生物多様性の向上などの多くの利点が挙げられる。

しかし、個人的な経験ではあるが、東北、北陸地方ではマメ科緑肥の窒素固定能力が高すぎ、コシヒカリでは倒伏や食味低下が心配されて、緑肥利用が進まないとも聞かれる。農業は、いうまでもなく気候、土壌、作物種、水資源、病害虫、自然的・社会的地理条件等によって、作付体系や技術を変化せざるを得ない宿命をもつものであるが、水田作での緑肥利用については、さらに多くの不確定要素が加わるために千差万別の環境となり、緑肥の能力が活用できない場面も多く生じると考えられる。

図8に水田の緑肥利用における環境要因の組み合

わせ例について示した。栽培を始める前にまず、目的の圃場が、気象要因（気温、降水量、日射量、風速など）、土壌要因（土性、有機物含量、CEC、母材種類、作土厚、排水など）、その他要因（水稻品種、労力、コスト、灌漑可能時期、雑草密度、病害、害虫など）の組合せのどこに位置するかを見極める必要がある。そして緑肥利用技術の高度化やマニュアル化を進めるためには、上記栽培環境が同質な地域あるいは圃場ごとに検討を行っていく必要がある。しかし、これら栽培環境要因のすべてのマトリックスについて、答を用意できるほど研究は進行していないと思われるが、既存研究から得られた知見から以下にそのヒントを抽出してみたい。

- i) 緑肥は文字通り、生きた有機物であるので、土壌にすき込んだら2週間ほどは放置し、土壌微生物による分解が落ち着いた時点で灌水を開始する必要がある。圃場条件によっては強還元状態となり、メタン等のガスが発生したり、硫化水素の発生により水稻根を痛めたりすることもある。
- ii) 温暖な地域あるいは気温が高い時期における緑肥すき込みは、土壌微生物活性が高いために、緑肥分解が急速に行われる。そのため栽培初期の養分濃度は過剰なほど高くなり、水稻の過繁茂や軟弱化、そして病害虫被害の多発につながる。対策として、緑肥の種類を変えて養分供給パターンの最適化を図ることが一案として挙げられる。緑肥の分解速度は高い方から、レンゲ>シロクロバー>ヘアリーベッチ>イネ科緑

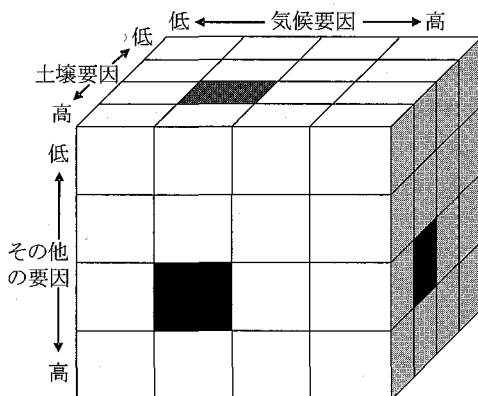


図8 水田の緑肥利用における栽培環境要因マトリックスの例

- 肥（ライムギなど）の順になり、分解速度が早いほど速効性であり、遅いほど緩効的に養分が放出される。シロクロバーとライムギを混合播種することも可能である（Choら2003）。そして最終的に水稻の養分吸収パターンと同期させることにより、高品質安定生産が可能になる。
- iii) 寒冷地では、緑肥分解が緩慢になるため、分解が速く、速効的なレンゲの利用が望ましいと考えられる。また緑肥バイオマスを早期に確保でき、開花時期も早い草種が有利と考えられることからレンゲの有用性は高い。
 - iv) マメ科緑肥を開花期にすき込むと窒素量が多すぎて徒長して倒伏したり、食味が落ちたりする場合は、①播種量を減らす、②分解速度の遅い緑肥を選ぶあるいは混合播種する、③開花期以前の早期に土壌にすき込む、④地上部を刈り、1~2週間の時間をおいてからすき込むことにより、窒素量を減らすことが可能である。水稻生育中に窒素供給量を減らすことは非常に難しいが、中干しや間断灌水を控えることによりある程度、養分放出は緩慢になる。
 - v) 土壌が重粘土質である場合は、カバークロープ栽培が有効である。緑肥が冬季期間中に根系の発達により土壌中に微細な穴を空け、通気性や透水性を改善させるとともに、土壌深部に移動した養分を吸収・回収し、最終的に作土層へ供給する。また不耕起栽培であるため地耐力が高まり、移植機やコンバインなどの農業機械を用いた作業が容易になる。苗はポット苗を使用すると活着が良く初期生育が順調である。ただし、専用の不耕起移植機が必要となる。
 - vi) 作土が薄い、粘土含量が低い、有機物含量が低い（一般に土色が淡い）水田は、保肥力が低いため、緑肥分解に伴って放出される養分が土壌に保持しきれず、排水や地下浸透によって河川に流れたり、脱窒により大気中へ放出されたりする可能性が高い。そのため、緑肥はすき込み処理を行うことが望ましい。すき込みにより分解速度が遅くなり、田面からの養分ロスが低くなる。また、緑肥種も生育量が多く、分解速度が中程度のものを選択するとよい。しかし養分供給が不安定になりやすいので、優良粘土の客土などの根本的な土壌改良が必要である。

vii) 有機栽培の場合は、除草剤や殺虫剤、殺菌剤が使用できないため、特別な注意が必要となる。カバークロープ栽培が行える環境であれば、地表面に緑肥残渣が存在するため、微生物やプランクトン、水生動物、昆虫などの生物が繁殖し、生物多様性が向上することから天敵による害虫防除がある程度可能となる。また不耕起栽培であるため、埋土種子からの雑草発芽が抑えられて発生量が減り、発芽した雑草も田面水中の緑肥分解産物により抑制される。病害については、有機栽培で使用できる資材施用の他に、疎植などの耕種的技術によって対応が可能と考えられる。

(2) 今後の展望

わが国の農業が抱える最近の問題や課題として、農業者の高齢化、安全な食の供給のためのトレーサビリティの向上、消費者の多様なニーズに応えるための新商品開発が挙げられる一方で、低コスト、省力化対策も依然として大きな課題として残されている。水稲作においては直播技術がその鍵を握ると考えられ、何十年にもわたる技術開発が行われてきた。移植栽培に比べ、苗立ちの不安定性、鳥害、雑草対策、倒伏、登熟の不均一、土壌の均平や水分管理技術等の問題があったが解決し、少しずつであるが広がっている。

緑肥施用水田においてもやはり直播栽培に期待したい。これまでに直播栽培研究が行われ、技術的には実施可能な水準に達しているが、次のような問題も多く残されている。緑肥カバークロープ水田に水稲を直播した場合、①レンゲは稲わらから浸出するアレロパシー物質により(中野・平井 2000)、レンゲの生育が抑制され、年々、レンゲ生育量が減少する(嶺田ら 1997)、②水稲が発芽・出芽しても、緑肥の被陰の影響が大きく、初期生育に悪影響が出るとともに水稲の苗立ち本数が確保できない(中野・杉本 1999)、③ヘアリーベッチなど、茎が強固である場合、播種作業が困難を伴う、④アルサイククローパー、ヘアリーベッチ、アルファルファは、欠株が多く、穂数、一穂粒数が少なく、登熟歩合も低いことから低収量になる(中野 1999)などの問題が指摘されている。

しかし最近では Asagi ら (2008) が、複粒化種子(複数の種子を粘土でコーティングしたもの)を緑

肥カバークロープ水田に点種して、出芽、苗立ちが安定させる技術を開発している。また複粒化種子は催芽靱に比べ、鳥害を抑制できると考えられ、緑肥施用水田における一つの選択肢として今後、発展することが望まれる。

1999年の食料・農業・農村基本法および持続農業法、2006年の有機農業推進法が制定・施行され、さらに資源枯渇問題のため、農業分野における資源有効利用が切実な問題となりつつある現在、緑肥利用は、今後益々需要が高まる技術と考えられる。とくに水田は、わが国農業の根幹であり、水田における緑肥利用技術の高度化研究推進とさらなる普及拡大が望まれる。そのためには、栽培環境(土壌、気候、地形、飛来害虫密度)、緑肥栽培管理(緑肥の種類、播種時期、入水枯死時期)、水稲栽培管理(水稲品種、作付け時期、作付け方法(移植または直播)、水管理技術、有機質肥料等の追肥)について知見をさらに蓄積し、高品質安定生産(高収量、良食味)や省力化、水田機能の向上技術開発につなげることが必要である。

引用文献

- Asagi, N. and H. Ueno 2009). Nitrogen dynamics in paddy soil applied with various ¹⁵N-labelled green manures. *Plant and Soil*. 322: 251-262.
- 浅木直美・上野秀人 2009a. マメ科緑肥リビングマルチ条件下の水稲栽培における湛水開始時期の違いが水稲の生育、収量に与える影響. *日本作物学紀事* 78: 27-34.
- 浅木直美・上野秀人 2009b. 西南暖地におけるシロクローパーのすき込みおよびリビングマルチ処理が水稲の生育、収量および土壌アンモニア態窒素濃度に与える影響. *農作業研究* 44: 127-136.
- Asagi, N., H. Ueno, H. Sekiya and H. Ogiwara 2008. Establishment of rice seedlings by direct sowing of multiple seed pellets on paddy soil covered with legume living mulch. *Plant Production Science*. 11: 361-365.
- Cho, Y.S., K. Hidaka and T. Mineta 2003. Evaluation of white clover and rye grown in rotation with no-tilled rice. *Field Crop Res.* 83: 237-250.
- 藤井義晴 1995. ヘアリーベッチの他感作用による雑草の制御—休耕地・耕作放棄地や果樹園への利用—. *農業技術* 50: 199-204.
- 藤原伸介・吉田正則 2000. 被覆植物ヘアリーベッチのアレロパシーとマルチ資材としての利用に関する研究. *四国農試報* 65: 17-32.
- 長坂善禎・金谷 豊・梅田直円・谷脇 憲・大谷隆二・重田一人・藤井義晴・堀元栄枝・藤本寛 2002. 植生マルチ被覆田への水稲機械移植. *農作業研究* 37(別1): 79-80.
- 橋爪 健 2007. 緑肥を使いこなす—上手な選び方・使い方. *農文協*.
- 本莊陽一・上野秀人・鈴木孝康・松村奈理広・長井 伸・奥野祐崇・島田絵未 2002. マメ科草生マルチ水田における土壌バイオマスNの動態: 緑肥分解と植物生育が土壌バイオマスにおよぼす影響. *日本土壌肥科学会講演要旨集* 48: 22.
- 堀元栄枝・荒木 肇・伊藤一幸・藤井義晴 2002. ヘアリーベッチ (*Vicia villosa* Roth) を利用した水田における雑草抑制と水稲収

- 量への影響. 雑草研究 47(3): 168-174.
- 川田信一郎・副島増夫・田吹亮一 1977a. 水稲における“うわ根”の形成と水管理との関係について. 日作紀 46: 24-36.
- 川田信一郎・副島増夫・田吹亮一 1977b. 水稲における“うわ根”の形成と窒素の施肥法, とくに追肥との関係. 日作紀 46: 254-260.
- 嶺田拓也・日鷹一雅・榎本 敬・沖 陽子 1997. レング草生マルチを活用した不耕起直播水稲作における雑草の発生消長. 雑草研究 42: 88-96.
- 長井 伸・上野秀人・楠谷彰人・鈴木孝康・本荘陽一・松村奈理広・奥野祐崇・島田絵未・
- 三澤 優・宮地雅仁 2001. マメ科草生マルチ不耕起水田における水稲26品種の生育および収量特性. 日本作物学会四国支部会報 38: 44-45.
- 中野尚夫 1999. 緑肥作物立毛中に不耕起播種した水稲の生育と収量. 日作紀 68: 470-475.
- 中野尚夫・杉本真一 1999. 緑肥立毛中に不耕起播種した水稲の苗立ち. 日作紀 68: 357-363.
- 中野尚夫・平井 幸 2000. 稲わら水抽出液がレング生育におよぼす影響. 日作紀 69: 470-475.
- 鈴木孝康・上野秀人・本荘陽一・松村奈理広・吉野久恵・嶺田拓也・日鷹一雅 2001. マメ科草生マルチを活用した LISA 型不耕起水田土壌における養分動態の解析: 栽培初期における緑肥窒素の無機化と有機酸の生成. 日本土壤肥料学会講演要旨集 47: 147.
- 高橋佳孝・齋藤誠司・大谷一郎・魚住 順・萩野耕司・五十嵐良造 1995. 草地におけるアレロパシーの解明とその評価に関する研究(6) 地上部水溶性抽出物のレタス発芽・生育試験による野草地構成植物からのアレロパシー発現種の検索. 日草誌 41: 232-239.
- 瀧島康夫・塩島光州・有田 裕 1960. 水田土壌中の有機酸代謝と水稲生育阻害性に関する研究(第2報) 有機酸の根生長並に養分吸収阻害. 日土肥誌 31(10): 441-446.
- 上野秀人・鈴木孝康 2005. 水稲有機栽培における焼酎廃液資材と米ぬかの抑草効果および養分供給特性. 農作業研究 40: 191-198.
- 安江多輔 1993. レング全書: 来歴・性状・栽培・利用・文化. 農文協.
- Yokota, H. and N. Kaneko 2002. Naidid worms (*Oligochaeta Naididae*) in paddy soils as affected by the application of legume mulch and/or tillage practice. *Biol Fertil Soils* 35: 122-127.