

成熟期レンゲの窒素無機化特性およびその鋤きこみが湿田での 水稻の窒素吸収と収量に及ぼす影響

南雲俊之・金澤裕美・大井友紀子・久保田恭子

(静岡大学農学部)

要旨：レンゲ (*Astragalus sinicus* L.) は水田稲作で伝統的に使われてきた緑肥作物である。我われは成熟期レンゲの水稻への窒素供給能を評価し、開花期レンゲとの違いを考察した。湿田に成熟期レンゲを鋤き込み、栽培試験を実施するとともに、インキュベート実験を行った。その結果は、開花期レンゲと比べて、成熟期レンゲは水稻生育初期に窒素供給が少なく、基肥代替効果は小さいことを示した。これは穂数の減少をもたらす、総粒数の減少を招いた。一方、成熟期レンゲの窒素無機化が継続するという特徴は追肥の省略を期待させたが、その窒素供給能は十分でなかった。それでもなお、成熟期レンゲを使った水稻は、化学肥料なしに 450 g m^{-2} 以上の収量を与えた。湿田で多量施用する条件で、成熟期レンゲは潜在的に利用価値があると推察される。

キーワード：グライ土、水稻、窒素、無機化、緑肥、レンゲ。

緑肥作物は、土壌被覆による侵食防止、有機物補給による土壌改良効果、肥料効果、雑草抑制や連作障害の回避など様々な効果をもち、その有効利用が期待される (大門 1999, Kundu and Ladha 1999, Cherr ら 2006)。水田稲作では、レンゲが緑肥作物として広く栽培、利用されてきた (黒川 1982, 安江 1991)。

マメ科植物であるレンゲには、おもに基肥窒素の代替効果が期待された。そのため、開花期のレンゲが利用された (石川 1963, 安江 1991, 川瀬・北嶋 1993, 清水・沖野 1994a, b, 川村・辻 1994)。開花期レンゲは窒素含有量が多く、その無機化率が施用直後から高いため (末次 1954, Saeki and Azuma 1956, 石川 1963, 安江 1991, 川瀬・北嶋 1993, 上原 1993, 清水・沖野 1994a, b)、水稻生育初期に窒素供給量が多いからである。ただし、レンゲ窒素の過剰供給は過繁茂、倒伏や登熟低下を招き、病害を助長する原因となる (末次 1954, 石川 1963, 中山・吉田 2005)。そのため、レンゲの適正投入量や上限が提案された (末次 1954, 石川 1963, 安江 1991, 清水・沖野 1994a, b, 川村・辻 1994, 福島県農業総合センター 2007)。また、レンゲ分解初期に有機酸が生成し集積すると、水稻に還元障害を引き起こす原因となりうる (山崎 1959, Yamada and Ota 1959, 瀧嶋ら 1960, 安江 1991, 清水・沖野 1994a)。有機酸の分解消失を図るため、移植 7–14 日前に畑状態で鋤きこむことが推奨された (末次 1954, 西川 1960, 安江 1991, 川瀬・北嶋 1993, 上原 1993, 清水・沖野 1994a, 川村・辻 1994)。これには過剰な窒素を除去する効果もあった (川瀬・北嶋 1993, 1994)。畑条件でレンゲ窒素の無機化と硝化が進行し、生じた硝酸態窒素が湛水条件下で脱窒を受けるためである。このように、従来のレンゲ利用は、開花期レンゲを使い、基肥窒素としての効果が障害なく最大限発揮されるよう管理されてきたといえる。開花期レンゲを利用するため、

多くの場合、水稻は 4 ないし 5 月に移植された (川瀬・北嶋 1993, 1994, 清水・沖野 1994a, b, 川村・辻 1994)。生育後期に窒素不足となる場合、生育状況に応じて穂肥や実肥が与えられた (石川 1963, 安江 1991, 川瀬・北嶋 1993, 上原 1993, 清水・沖野 1994a, 川村・辻 1994)。

一方、還元障害の起こりやすい湿田でレンゲの多量鋤きこみを行う場合、乾草鋤きこみが推奨された (末次 1954, 西川 1960, 安江 1991)。これはレンゲを乾燥することで初期分解を抑えて還元障害を緩和する効果 (西川 1960) を狙ったものと推察される。ただし、レンゲの乾燥処理は無機化パターンを変化させ、添加直後の窒素無機化を抑制するとともに、窒素無機化を長期間持続させる (三須 1931, 木村 1935, 山本 1937, 長谷川 1939, 清水・沖野 1994b, 埼玉県農林総合研究センター 2000)。成熟期のレンゲは、そもそも水分含有率が低く、開花期レンゲと比べて炭素率 (C/N 比) が高く、リグニンなど難分解性成分含有率が高い (石川 1963, 安江・笹野 1986, 安江ら 1987)。乾燥処理と同様に、成熟期レンゲは分解が抑制され、窒素無機化量も減少する (石川 1963, 川瀬・北嶋 1994, 清水・沖野 1994b)。一方、レンゲは成熟期に可溶性炭水化物含有率が高まるため、土壌に鋤きこむと有機酸生成量が増加しやすいことも指摘された (石川 1963)。このように、成熟期レンゲや乾燥処理レンゲは、生育初期の無機化窒素量や窒素無機化パターン、還元障害発生の可能性において開花期レンゲと異なる特徴をもつ。レンゲの刈り取り時期を遅らせたり (安江・笹野 1986, 安江ら 1987)、乾草レンゲを用いたりすることで (山本 1938, Ali ら 1993)、水稻の穂数や総粒数が減少して収量低下を招いた事例が報告された。成熟期レンゲの利用においては、開花期レンゲと異なる管理が必要と推察される。利水条件等の理由で 6 月移植が慣行となっている地域では、開花期レンゲ利用とともに (埼玉県

第1表 水田作土の化学性.

	pH (H ₂ O) ¹⁾	全有機炭素 ²⁾ (g kg ⁻¹)	全窒素 ³⁾ (g kg ⁻¹)	C/N 比	可給態窒素 ⁴⁾ (mg kg ⁻¹)	交換性塩基 (cmolc kg ⁻¹) ⁵⁾		
						カルシウム	マグネシウム	カリウム
慣行区	6.2	20	2.1	9.5	180	10.5	3.4	0.55
レンゲ区	6.0	27	2.8	9.6	305	11.1	2.8	0.40
レンゲ無農薬区	5.7	24	2.6	9.2	282	10.3	3.1	0.38
無肥料区	6.2	21	2.4	8.8	203	9.4	3.5	0.34

¹⁾ 土液比 1:2.5 で, pH メーターで測定した (土壤環境分析法編集委員会 1997).

²⁾ チューリン法により測定した (土壤標準分析・測定法編集委員会 1986).

³⁾ ケルダール法により測定した (土壤環境分析法編集委員会 1997).

⁴⁾ 湛水条件下で 30℃, 4 週間インキュベート後の土壌の無機態窒素を 2M 塩化カリウムで抽出し, 水蒸気蒸留法で測定した (土壤環境分析法編集委員会 1997).

⁵⁾ 土液比 1:20 で, 1M 酢酸アンモニウム抽出し, 原子吸光光度計で測定した (土壤環境分析法編集委員会 1997).

農林総合研究センター 2000), 成熟期レンゲ利用が選択肢の 1 つになりうる (川瀬・北嶋 1994). しかし, 成熟期レンゲ利用に関する知見は少ない.

そこで, 筆者らは成熟期レンゲの水稲栽培における利用可能性を明らかにしようとした. 本研究では, 圃場での水稲栽培試験にインキュベート実験を組み合わせて行い, 慣行栽培と比較しながら水稲生育, 収量に対する成熟期レンゲの窒素供給効果を明らかにし, また, 湿田で利用する場合の還元障害等発生の可能性についても検討した.

材料と方法

1. 試験地と栽培方法

試験は 2003 年と 2004 年に, 静岡大学農学部附属地域フィールド科学教育研究センター (静岡県藤枝市) の水田圃場で行った. 土壌タイプはいずれも地下水型グライ土, 作土の土性はシルト質埴土であった.

試験区は慣行区, レンゲ区, レンゲ無農薬区と無肥料区の 4 つで, 1 区画 10a の圃場を 1 つずつあてた. 第 1 表はこれらの圃場の主要な土壌特性 (2002 年 3 月採取) を示す. 土壌の全窒素含有率は, レンゲ区とレンゲ無農薬区で 2.6 ~ 2.8 g kg⁻¹ と多く, 次いで無肥料区 2.4, 慣行区 2.1 g kg⁻¹ の順であった. とくに, レンゲ区とレンゲ無農薬区土壌の可給態窒素量は 282 ~ 305 mg kg⁻¹ と, 無肥料区 (203 mg kg⁻¹) の 1.4 ~ 1.5 倍, 慣行区 (180 mg kg⁻¹) の 1.6 ~ 1.7 倍多かった (第 1 表).

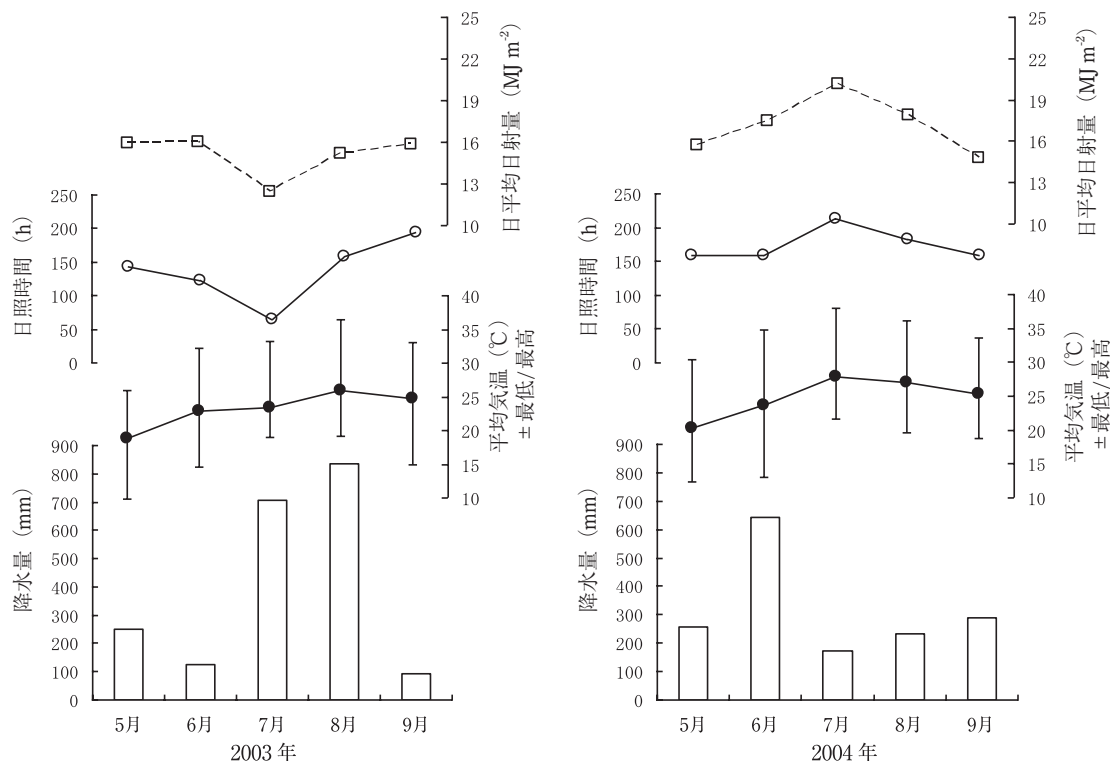
慣行区は, 窒素成分として, 移植のおよそ 1 週間前に基肥 4 g m⁻² (化成肥料 10-12-10), 7 月中旬に穂肥 2.8 g m⁻² (化成肥料 14-6-18) の計 6.8 g m⁻² を施用した. この基肥施用 3 ~ 4 か月前に, 土壌改良剤 160 g m⁻² (リン酸 5%, ケイ酸 20%, 苦土 4%, アルカリ分 35% を含む) を施用した. 2003 年は前年収穫量の半量 (約 290 kg m⁻²) を秋に鋤きこんだが, 2004 年はすべて持ち出した. 慣行区では殺虫剤を育苗箱散布 1 回, 6 月に除草剤散布 1 回, 7 月上旬に害虫防除 1 回, 8 月中旬に害虫・病害防除 1 回を行い, 種子消毒を含めて計 5 回農薬を使った. レンゲ区は 1993 年以来,

レンゲ無農薬区は 1999 年以来, 化学肥料を施用せず, レンゲの鋤きこみだけを行い水稲を作付けしてきた区である. レンゲは前年水稲収穫後 10 月に播種 (約 2 g m⁻²) した. 成熟期に入る 5 月中旬 (2003 年 5 月 7 日, 2004 年 5 月 12 日) にハンマーナイフ (Baroness HM72-A, 共栄社) で粉碎刈りし, そのまま圃場に放置した. 鋤きこみは 2003 年 5 月 28 日, 2004 年 5 月 27 日に行った. 放置期間はそれぞれ 21, 15 日間であった. なお, レンゲは, 粉碎刈りの際に圃場の 4 地点で 1 m² を地際から刈り取り, ボックスメッシュタイプのプラスチックコンテナに入れて天日乾燥し, レンゲの地上部風乾重を求めてレンゲ鋤きこみ量と見なした. その量は, レンゲ区で 2003 年に 490, 2004 年に 660 g m⁻² であり, レンゲ無農薬区ではそれぞれ 450, 490 g m⁻² であった. これにケルダール法 (土壤環境分析法編集委員会 1997) で測定した窒素含有率を乗じてレンゲの窒素含有量を求めたところ, レンゲ区では 2003 年に 11.9, 2004 年に 15.9 g m⁻², レンゲ無農薬区ではそれぞれ 12.6, 10.5 g m⁻² と見積もられた. レンゲ区では慣行区と同じに農薬散布 (計 5 回) を行った. 一方, レンゲ無農薬区は種子消毒のみを行い, 移植 3 週後に機械除草 (オータケミニカルチ MA-3, 大竹製作所) を 1 回行った. レンゲ区・レンゲ無農薬区とも, 前年収穫量の全量 (550 ~ 650 g m⁻²) を 5 月初旬に鋤きこんだ. 無肥料区では, 土壌改良剤や堆肥を含めて肥料投入を行わなかったが, 農薬散布は慣行区と同様に行った.

水稲品種には静岡県の奨励品種ひとめばれを供した. 上述の施肥および除草, 病虫害防除以外の栽培管理は地域の慣行に従った. 2003 年 6 月 2 ~ 3 日, 2004 年 5 月 31 日 ~ 6 月 1 日に幼苗を機械移植した. 両年とも 7 月中旬に 2 週間程度中干しを行った. 収穫は 2003 年 9 月 22 日, 2004 年 9 月 29 日 ~ 10 月 1 日に行った. 栽培期間の気象条件を第 1 図に示す.

2. 土壌溶液中窒素濃度の測定と水稲の窒素吸収, 生育および収量の調査 (栽培試験)

4 株中央部の作土 0 ~ 10 cm にファイバー式土壌溶液採取



第1図 栽培期間の気象条件.

試験地のもっとも近隣、約 15 km 東に位置する静岡気象台のアメダスデータを用いた (<http://www.jma.go.jp/>). 降水量 (棒グラフ) は月別積算値、気温 (●折れ線) は月平均気温で、バーは当該月の最高 / 最低気温を示す。日照時間 (○折れ線) は月別積算値、日射量 (□折れ線) は日合計全日射量の月平均値を示す。

器 (DIK-301A, 大起理化工業) を設置し、1 区あたり 4~5 地点で土壌溶液を採取した (鳥山・石田 1987, 鳥山 1988). 2003 年は 6 月 17 日, 6 月 27 日, 7 月 9 日の計 3 回, 2004 年は 6 月 18 日, 7 月 8 日, 7 月 27 日の計 3 回行なった. 採取した土壌溶液はカートリッジフィルター (セルロース混合エステル, 孔径 $<0.45 \mu\text{m}$) でろ過した. インドフェノール青法 (都築 1994) に従いアンモニウム態窒素濃度を測定した.

最高分げつ期 (2003 年 7 月 9 日, 2004 年 7 月 14 日), 穂揃期 (それぞれ 8 月 7 日, 8 月 13 日), 成熟期 (それぞれ 9 月 29 日, 9 月 22 日) の 3 回にわたり, 1 区あたり生育中庸な 3 地点から各 6 株ずつ水稻試料を採取した. ビニールハウス内に架干しし, 1 週間以上乾燥させて地上部風乾重を求めた. 風乾試料の一部をとり, ウイレー粉砕機を用いて粉砕した. ケルダール法 (土壌環境分析法編集委員会 1997) で窒素含有率を測定し, これを地上部風乾重に乗じて窒素含有量を求めた.

成熟期に 1 区あたり交差する対角線上の 5 地点, 各 10 株 (計 50 株) を収穫し, 収量と収量構成要素を調査した. まず, 栽植密度と穂数を調査して刈り取った. 刈り取った株は上述のように全風乾重を測ったのち, 脱穀し, 籾風乾重を測定した. 全風乾重から籾風乾重を引き算して, 藁風乾重を求めた. 風乾籾は籾摺り後, グレーダー (<1.8

mm) にかけて屑米を除き精玄米重を求めた. 10 株の精玄米重に栽植密度を乗じて精玄米収量を求めた. 精玄米 20 g について粒数を測り千粒重を求めた. また, 代表穂を同じ 5 地点からそれぞれ 10 穂ずつ (計 50 穂) とり, 籾数を数えて 1 穂籾数を求めた. 手で脱穀後その全籾について塩水選 (比重 1.06) を行い, 登熟歩合を求めた. 総籾数を穂揃期の窒素含有量で除して, 穎花生産効率を求めた (藤井ら 1998). また, 精玄米収量を成熟期窒素含有量で除して, 精玄米生産効率を求めた (清野 1991).

3. レンゲ窒素の無機化特性 (インキュベート実験)

慣行区の土壌 (表層 0~15 cm) を採取し, 風乾細土 ($<2 \text{ mm}$) に調製した. 一方, レンゲ試料は粉砕刈りのとき採取した風乾試料を粉砕 ($<2 \text{ mm}$) して用いた. このレンゲ粉砕物は有機態炭素 37.0% と窒素 2.17% を含み, 炭素率 (C/N 比) は 17.1 であった.

インキュベート実験は 4 反復で行った. フタ付ポリプロピレン製遠沈管 (内径 $\phi 15 \times 120 \text{ mm}$, 15 mL 容) に乾土 10 g 相当の風乾細土と 0.2 g のレンゲ粉砕物をとった. これは, 土壌 1 kg あたり窒素成分 434 mg の添加に相当した. 同時に, 土壌由来無機化窒素量を測るため, 土壌のみをとったものも用意した. 脱イオン水 10 mL を加えて充分攪拌したのちフタを強く閉めた. このとき, 土層の高さは約 7.5

cm, 土層上部の液層は1~1.5 cmであった。インキュベートは25℃, 暗所で168日間行った。インキュベート期間中, 週1~3回の頻度でガス抜きを行った。試料(土壌)を定期的に取り出し, アンモニウム態窒素をブレンナー法(土壌環境分析法編集委員会 1997)に従い定量した。湛水条件下で土壌中の無機態窒素は大部分がアンモニウム態窒素として存在するものとみなし, 硝酸態窒素は測定しなかった。

レンゲ添加した場合の窒素無機化量から土壌由来窒素無機化量を引き算して, レンゲ由来窒素無機化量を求めた。レンゲ由来窒素無機化量は, 反応速度論的無機化モデルにあてはめた(Stanford and Smith 1972, 杉原ら 1986, 日本土壌肥料学会 1990)。無機化モデルには, 単純な1次反応モデルである「単純型」, 分解を受けやすい有機態窒素画分と分解を受けにくい有機態窒素画分の無機化が同時に起こる「単純並行型」, 窒素の無機化と有機化が同時に起こる「無機化-有機化並行型」などがある。モデル式に当てはめて, 「可分解性有機態窒素量」, 「有機化窒素量」, 「無機化速度定数」や「有機化速度定数」などの窒素無機化に関するパラメーターが推定される(杉原ら 1986)。本研究では, 窒素無機化パターンを見て該当するモデル式を判別し, DeltaGraph ver.5 (日本ボラデジタル株式会社)のあてはめ曲線機能を用いてパラメーターを推定した。このとき, モデル式の定数項にはレンゲ中の無機態窒素含有量を与えるとともに, 既往の事例(島田・黒田 1993, 清水・沖野 1994b, 川瀬・北嶋 1994)を参考にしてパラメーターの初期値(可分解性窒素量と速度定数)を与えた。

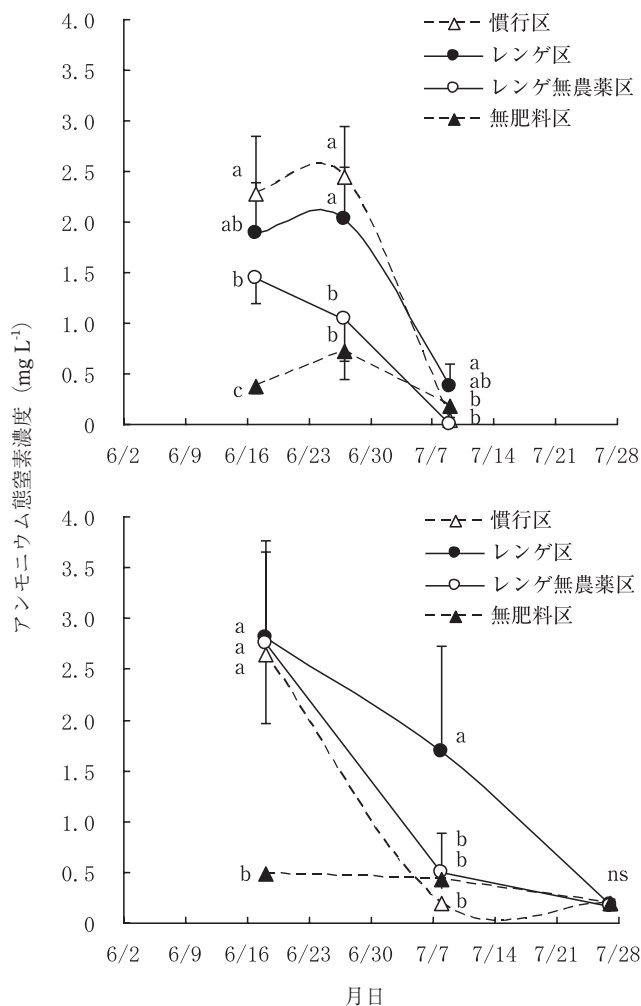
4. 統計解析

土壌溶液アンモニウム態窒素濃度は, Kaleida Graph ver.4.0 (株式会社ヒューリンクス)の統計解析機能を用いて測定日ごとにTukeyの多重比較検定を行った。水稻の窒素含有量と風乾重, 収量および収量構成要素, 穎花生産効率と精玄米生産効率は, 試験区と年次を要因とする繰返しなしの二元配置分散分析を行なった(MS Excel 2003, 分析ツール)。回帰分析(MS Excel 2003, 分析ツール)により, 水稻窒素含有量, 収量と収量構成要素との関係を調べた。

結 果

1. 栽培実験

土壌溶液中アンモニウム態窒素濃度の測定結果を第2図に示す。移植直後の2003年6月に注目すると, 慣行区での2.3~2.5 mg L⁻¹に対して, レンゲ区では有意でないものの1.9~2.0 mg L⁻¹と低く, レンゲ無農薬区では1.1~1.5 mg L⁻¹と有意に低い値を示した。一方, 2004年6月は1回のみの測定であるが, 慣行区と2つのレンゲ区で2.7~2.8 mg L⁻¹と有意差がなかった。土壌溶液中アンモニウム態窒素濃度は, 全ての区で7月中旬には<0.2 mg L⁻¹以下とほぼ消失した。ただし, 2004年のレンゲ区で7月8日に1.7 mg L⁻¹と有意に高い値が観察された。



第2図 土壌溶液中アンモニウム態窒素濃度の推移。

上段は2003年, 下段は2004年のデータである。

バーは標準偏差を示す。異なるアルファベットは, 同一測定日での処理間の比較において有意差があることを示し, nsは有意差がないことを示す(Tukeyの検定, $p < 0.05$)。

水稻の窒素含有量と地上部風乾重の測定結果を第2表に示す。水稻の窒素含有量には, いずれの時期も有意な試験区効果があった。最高分けつ期を見ると, 慣行区が4.6 g m⁻²で最も多く, 次いでレンゲ区とレンゲ無農薬区が3.5~3.6 g m⁻²であり, 無肥料区が2.4 g m⁻²と最も少なかった。レンゲ区とレンゲ無農薬区の窒素含有量は, 慣行区より22~24%少なかった。穂揃期も, 慣行区8.0 g m⁻² > レンゲ区とレンゲ無農薬区6.7~6.9 g m⁻² > 無肥料区3.8 g m⁻²の順で, レンゲ区・レンゲ無農薬区は慣行区より14~16%少なかった。ただし, 最高分けつ期から穂揃期の窒素含有量の増加量をこの期間の窒素吸収量と見なすと, その量は慣行区で3.4 g m⁻², レンゲ区とレンゲ無農薬区で3.1~3.4 g m⁻², 無肥料区では1.4 g m⁻²と見積もられた。同様に, 穂揃期から成熟期の窒素吸収量を求めると, 慣行区で2.6 g m⁻², レンゲ区・レンゲ無農薬区で3.2~3.3 g m⁻², 無肥料区では1.7 g m⁻²と見積もられた。成熟期には, レンゲ

第2表 水稻地上部の窒素含有量と風乾重の推移.

	窒素含有量 (g m^{-2})			地上部風乾重 (g m^{-2})		
	最高分げつ期	穂揃期	成熟期	最高分げつ期	穂揃期	成熟期
試験区						
慣行区	4.6	8.0	10.6	232	791	1293
レンゲ区	3.5	6.9	10.2	155	731	1233
レンゲ無農薬区	3.6	6.7	9.9	171	673	1128
無肥料区	2.4	3.8	5.5	120	437	750
年次						
2003年	2.8	5.9	9.0	117	532	992
2004年	4.2	6.8	9.1	222	784	1211
分散分析 ¹⁾						
試験区	*	**	**	ns	*	*
年次	*	**	ns	**	**	*

¹⁾ **, * はそれぞれ 1%, 5% 水準で有意であることを示し, ns は有意でないことを示す.

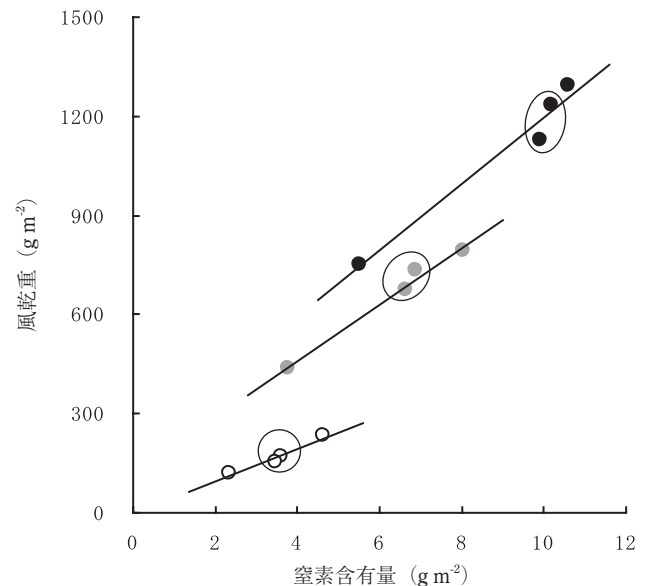
区とレンゲ無農薬区の窒素含有量は、慣行区 (10.6 g m^{-2}) の 93~96% にまで増加した. 生育時期別の水稻の地上部風乾重は、その時期の窒素含有量と直線的な関係があった (第3図). 最高分げつ期を除いて、水稻の地上部風乾重に有意な試験区効果が見られた. 最高分げつ期の風乾重は、有意な試験区効果はないものの、レンゲ区とレンゲ無農薬区で $155\sim 171 \text{ g m}^{-2}$ と、慣行区 (232 g m^{-2}) より 26~33% 少なかった. しかし、窒素含有量・吸収量の増加に伴い風乾重も増加し、成熟期には、レンゲ区とレンゲ無農薬区の風乾重は慣行区の 87~95% になった.

収量と収量構成要素を第3表に示す. 初穂比を除いて、収量・収量構成要素に有意な試験区効果が認められた. 精玄米収量は、レンゲ区で 538, レンゲ無農薬区で 475 g m^{-2} と、それぞれ慣行区より 10%, 21% 少なかった. レンゲ区は、慣行区と比べて1穂初数が5%少ないため総初数が5%少なかったが、登熟歩合は3ポイント高かった. また、レンゲ無農薬区では、穂数が11%, 1穂初数が5%慣行区より少なく、総初数は15%少なかった上に、登熟歩合が4ポイント低下し、千粒重も4%少なかった. 総初数は収量と有意な強い正の相関があり ($R^2=0.98$, $n=4$, $P=0.011$), 収量を決定付けていた. 穎花生産効率に有意な試験区効果はなかった. 一方、精玄米生産効率には有意な試験区効果が見られ、無肥料区 62.2, 慣行区 56.6, レンゲ区・レンゲ無農薬区 $48.0\sim 52.8 \text{ kg kg}^{-1}$ の順で多かった.

なお、生育初~中期 (最高分げつ期, 穂揃期) の水稻窒素含有量と風乾重に有意な年次効果が見られ、2003年より2004年で多かった. これは、この時期、とくに7月に、2004年と比べて2003年で日照が少なかった (第1図) ためかもしれない. しかし、収量に対する年次効果は有意でなかった (第3表).

2. インキュベート実験

レンゲ由来の窒素無機化は、初め1週間で急速な窒素無



第3図 水稻の地上部窒素含有量と風乾重との関係.

白点 (○) は最高分げつ期, 灰色点 (●) は穂揃期, 黒点 (●) は成熟期を示す. 枠で囲ったプロットはレンゲ区, レンゲ無農薬区である.

いずれの時期も水稻地上部の窒素含有量と風乾重の間には直線関係があった. また、生育が進むにつれて、レンゲ区・レンゲ無農薬区のプロットが慣行区に近づいた.

機化が起こり、その後インキュベート終了時まで緩やかに継続した (第4図). 無機化パターンは単純並行型無機化モデル, すなわち (1) 式にもっとも適合した. 得られたモデル式は (2) 式に示す ($R^2=0.97$).

$$N=N_{0a} \times (1 - \exp(-k_1 \times t)) + N_{0b} \times (1 - \exp(-k_2 \times t)) + A \quad (1)$$

ただし、 N は窒素無機化量 (mg kg^{-1}), N_{0a} は易分解性有機態窒素画分 (分解を受けやすい画分) (mg kg^{-1}), N_{0b} は難分解性有機態窒素画分 (分解をうけにくい画分) (mg kg^{-1}), k_1 と k_2 はそれぞれ N_{0a} と N_{0b} の無機化速度定数 (d^{-1}), t はインキュベート開始後の日数, A は定数である.

第3表 収量と収量構成要素.

	穂数 (本 m ⁻²)	1 穂粒数 (粒 本 ⁻¹)	総粒数 (千粒 m ⁻²)	登熟歩合 (%)	千粒重 (g 千粒 ⁻¹)	精玄米収量 (g m ⁻²)	籾薬比	穎花生産効率 ¹⁾ (粒 kg ⁻¹)	精玄米生産効率 ²⁾ (kg kg ⁻¹)
試験区									
慣行区	384	92.5	35.5	82.6	22.4	600	1.03	444	56.6
レンゲ区	383	87.5	33.6	85.8	21.9	538	0.97	486	52.8
レンゲ無農薬区	342	88.1	30.2	78.3	21.4	475	1.01	455	48.0
無肥料区	283	74.3	21.0	85.9	21.6	343	0.93	561	62.2
年次									
2003 年	341	84.6	29.1	81.2	21.7	470	1.00	508	53.2
2004 年	355	86.6	31.0	85.1	21.9	508	0.97	465	56.6
分散分析 ³⁾									
試験区	*	**	*	**	**	**	ns	ns	*
年次	ns	ns	ns	**	ns	ns	ns	ns	ns

¹⁾ 穎花生産効率は穂揃期窒素含有量 1 kg あたりの総粒数を示す (藤井ら 1998).

²⁾ 精玄米生産効率は収穫期窒素含有量 1 kg 当たりの精玄米収量を示す (清野 1991).

³⁾ **, * はそれぞれ 1%, 5% 水準で有意であることを示し, ns は有意でないことを示す.

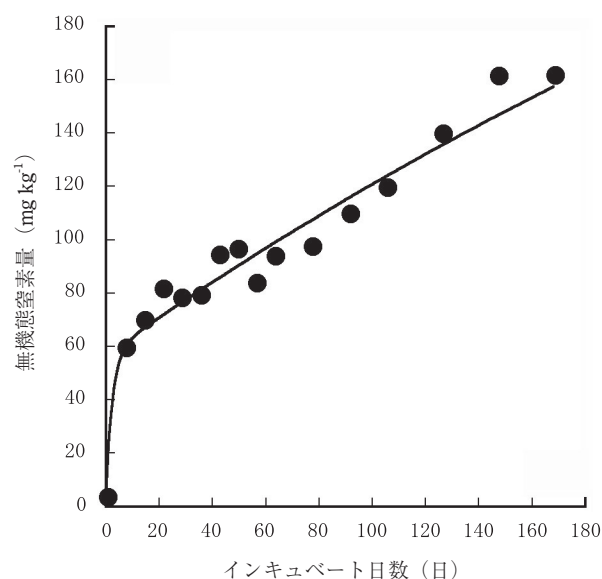
$$N = 54.0 \times (1 - \exp(-0.428 \times t)) + 348 \times (1 - \exp(-0.00203 \times t)) + 2.93 \quad (2)$$

分解を受けやすい有機態窒素画分 N_{0a} は 54.0 mg kg^{-1} と見積もられ, レンゲ窒素添加量 434 mg kg^{-1} の 12.5% を占めた. レンゲからの窒素無機化量は最初の 7 日間で 59 mg kg^{-1} となり, その 95% は N_{0a} 画分からの無機化量 (51.3 mg kg^{-1}) が占めた. ただし, レンゲ窒素無機化量そのものは, レンゲ添加窒素量 (434 mg kg^{-1}) のわずか 13.6% に過ぎなかった. 30 日後でもレンゲ窒素の無機化量は 78 mg kg^{-1} しかなく, 無機化率は 17.9% であった. 一方, 分解を受けにくい有機態窒素画分 N_{0b} は 348 mg kg^{-1} と見積もられ, 添加したレンゲ窒素の大部分 (80%) を占めた. しかし, その無機化速度定数は -0.00203 d^{-1} ときわめて小さかった. そのため, 窒素無機化が長期継続するとはいえ, インキュベート終了時の 168 日後でも無機化量は 161 mg kg^{-1} , 無機化率は 36% であった.

考 察

1. 水稻生育初期における成熟期レンゲ利用の窒素供給能

これまで水田稲作では, 開花期レンゲ生草がおもに使われた. 開花期レンゲの一般的な窒素含有量は $10 \sim 18 \text{ g m}^{-2}$ と多く, その窒素無機化率は添加 1 か月後で 50~70% と高い (末次 1954, Saeki and Azuma 1956, 石川 1963, 安江 1991, 上原 1993, 川瀬・北嶋 1993, 清水・沖野 1994a, b). 窒素無機化パターンも, 1 次反応式に従う単純型モデルに従い (島田・黒田 1993, 清水・沖野 1994b, 川瀬・北嶋 1994), 施用直後の窒素無機化が多く, 日数を経るにつれて徐々に無機化量が減少する. これらの特徴は基肥窒素を代替するのに適し, 水稻生育初期に十分な窒素供給が期待された. ただし, その窒素供給量はしばしば過剰で, 倒伏や病害の助長などへの懸念から, 窒素除去も検討された



第4図 湛水条件におけるレンゲ由来の窒素無機化量.

点は測定値, 線は推定された無機化モデルを示す (モデルの詳細は本文を参照).

(末次 1954, 石川 1963, 川瀬・北嶋 1993, 1994, 中山・吉田 2005).

これに対して, 本研究のレンゲ区・レンゲ無農薬区での成熟期レンゲの窒素含有量は $11 \sim 16 \text{ g m}^{-2}$ と, 開花期レンゲの一般的な窒素含有量と同等であった. しかし, インキュベート試験によると, 成熟期レンゲ風乾物の窒素無機化率は添加 1 か月後で約 18% しかなく (第4図), 開花期レンゲでの 50~70% と比べて明らかに低かった. 初めの 1 か月間の窒素無機化率を 20% と仮定しても, 成熟期レンゲ窒素 ($11 \sim 16 \text{ g m}^{-2}$) からの窒素無機化量は $2 \sim 3 \text{ g m}^{-2}$ に過ぎない. これは慣行区の基肥窒素量 4 g m^{-2} より少ない. 成

成熟期レンゲの無機化モデルは、分解速度が早い N_{0a} 画分と分解速度が遅い N_{0b} 画分の無機化が同時に起こる単純並行型に適合したが、 N_{0b} 画分と比べると N_{0a} 画分はかなり少なかった（第4図）。これは、レンゲの分解初期に窒素無機化率が低い原因と推察され、成熟期レンゲにリグニンなどの分解しにくい成分が増加すること（石川 1963, 安江・笹野 1986, 安江ら 1987）と矛盾しない。成熟期レンゲは、乾燥処理レンゲで観察された窒素無機化の抑制効果（三須 1931, 木村 1935, 山本 1937, 長谷川 1939, 清水・沖野 1994b, 埼玉県農林総合研究センター 2000）のあることが確認された。成熟期レンゲはその窒素無機化率が低いため窒素供給量が少ないといえる。

成熟期レンゲ（安江・笹野 1986, 安江ら 1987）や乾草処理レンゲ（山本 1938, Ali ら 1993）で、水稻の穂数や総粒数が減少して収量低下を招いた事例が報告された。水稻生育初期の土壤溶液中アンモニウム態窒素濃度は、同一土壤の場合、土壤中の交換性アンモニウム態窒素含有量を反映し（鳥山・石田 1987）、水稻生育初期の窒素供給量の指標となる。水稻の生育初期の土壤溶液中アンモニウム態窒素濃度は水稻の分けつ数と有意な正の相関がある（安藤ら 1988, Sasaki ら 2002）。分けつの発達は穂数を決定付ける（星川 1975, 吉田 1986）。2004 年 6 月の土壤溶液アンモニウム態窒素濃度はレンゲ区、レンゲ無農薬区ともに慣行区と有意差がなかったものの、2003 年のレンゲ区では有意差はないものの慣行区より低い傾向があり、レンゲ無農薬区では慣行区より有意に低かった（第2図）。また、穂数は穂首分化期の追肥に影響されず（小林ら 2001）、穂首分化期までの窒素吸収量により決定付けられる（和田 1969）。本研究では、最高分けつ期の窒素含有量がこれに近い。この窒素含有量はレンゲ区、レンゲ無農薬区とともに、慣行区より 20% 以上少なかった（第2表）。これらのことは、レンゲ由来の窒素供給が少ないため、穂数の減少が起こりうることを示唆する。実際、本研究のレンゲ無農薬区で穂数が慣行区より 11% 少なく、レンゲ区でも 5% 減少した（第3表）。

開花期レンゲ生草では、施用直後の水稻生育初期に還元障害の発生が懸念されてきた。急激な有機物分解に伴う酸素不足（平野ら 1958）や有機酸の増加（Yamada and Ota 1959, 瀧嶋・佐久間 1961, 清水・沖野 1994a）により根の伸長や呼吸活性が減少し、窒素などの養分吸収障害が起こるためである（山崎 1959, Yamada and Ota 1959, 瀧嶋ら 1960, 安藤ら 1986, 安江 1991）。本研究ではレンゲを移植 4~7 日前に鋤きこんでおり、水稻の移植時から移植直後は、まさにレンゲ分解初期に当たる。石川（1963）は、可溶性炭水化物含有率が高い成熟期レンゲを土壤に鋤きこんだ直後に湛水することで有機酸生成量が増加することを示した。最高分けつ期にレンゲ区とレンゲ無農薬区で観察された窒素含有量の減少（第2表）は、還元障害に伴う窒素吸収障害が原因かもしれない。2004 年 7 月 8 日にレンゲ区

で高い土壤溶液アンモニウム態窒素濃度 1.7 mg L^{-1} を観察した（第2図）。これは、還元障害のため水稻窒素吸収が阻害され、無機化した窒素の一部が残存した結果ということもできる。残念ながら、本研究では土壤の酸化還元電位、有機酸濃度や水稻根活性のような還元障害を直接評価できるデータを測定しなかった。末次（1954）は、レンゲを湛水後に施用することで生育遅延を生じ、結果的に藁収量の増加と籾収量の減少を招いたと報告した。しかし、本研究で籾藁比に有意な試験区効果は観察されなかった。成熟期レンゲの有機態窒素は、分解しやすい N_{0a} 画分が少なく、分解しにくい N_{0b} 画分が極めて多かった。成熟期レンゲはそもそも水分含有率が低く、さらに本研究では刈り取り後に乾燥させた。木村（1935）はレンゲを 70°C オープン乾燥するとその分解が抑制されることを報告した。乾燥処理には、初期分解を抑えて還元障害を緩和する効果があるという（西川 1960）。成熟期レンゲの分解しにくい特徴は、有機酸生成そのものを抑制させた可能性がある。また、レンゲ分解に伴う有機酸集積量は、地温が低いほど多いとされる（石川 1963）。一方、地温が高いと有機酸の消失が早いことも指摘された（山崎 1959, 石川 1963）。本研究の移植時期は 6 月であり、少なくとも開花期レンゲで一般的な 4 月ないし 5 月移植の場合と比べて気温が高く（第1図）、地温も高いと予期される。つまり、生成した有機酸の分解が早かった可能性もある。これらの知見を踏まえると、移植直後に一時的な窒素吸収の阻害が起こった可能性は完全には否定できないものの、成熟期レンゲを利用することで還元障害が発生する可能性は開花期レンゲで指摘されたより小さいと考えられた。

以上から、開花期レンゲ生草に基肥窒素代替効果が期待されたが、成熟期レンゲでは、水稻生育初期の窒素供給能が劣り、水稻窒素吸収量が減少した。そのため、初期生育が抑制され、穂数の減少を招きやすい。開花期レンゲでは窒素過剰を防ぐため基肥添加はしないほうが良いとされた（安江 1991）。しかし、成熟期レンゲでは、水稻生育初期の窒素供給を増加させるため少量の基肥窒素添加を検討する必要がある。成熟期レンゲを使うことで、開花期レンゲで指摘されたような還元障害が発生する懸念は小さいと考えられた。この点は、成熟期レンゲを使うメリットの 1 つとなりうる。ただし、成熟期レンゲ施用に伴う還元障害の発生可能性については、今後さらに検証する必要がある。

2. 水稻生育中～後期の成熟期レンゲによる窒素供給

開花期レンゲは、水稻生育初期に基肥代替効果が高い。一方、しばしば水稻生育中～後期に窒素不足となり、穂肥や実肥が必要な場合が生じた（石川 1963, 安江 1991, 川瀬・北嶋 1993, 上原 1993, 清水・沖野 1994a, 川村・辻 1994）。これに対して、成熟期レンゲは、 25°C でのインキュベート試験によれば、難分解性有機態窒素 N_{0b} 画分からの窒素無機化が 5 か月間にわたりほぼ一定の速度で継続することを

示した(第4図)。レンゲ窒素から継続的に無機化が起こることは、穂肥窒素の省略を期待させる。また、土壌の窒素無機化には温度依存性があり(日本土壌肥科学会 1990, Kyuma 2004)、温度依存性はレンゲ由来窒素の無機化においても認められている(石川 1963)。夏場の地温上昇に伴い、さらに、レンゲ由来窒素の無機化は促進されると期待される。

出穂期あるいは穂揃期の窒素含有量は総粒数を決定付ける(和田 1969, 松田ら 1997)。とくに、生育中期の窒素供給の不足は1穂粒数に影響する(和田 1969, 吉田 1986)。レンゲ区とレンゲ無農薬区の穂揃期窒素含有量は慣行区より14~16%少なかった(第2表)。これらのレンゲ区では慣行区より総粒数が少なく、とくにレンゲ無農薬区で観察された1穂粒数の減少(第3表)は生育中期の窒素不足が影響したかもしれない。水稻生育中~後期は、水稻吸収窒素の大部分を土壌由来の無機化窒素が占める時期とされる(日本土壌肥科学会 1990)。土壌溶液中アンモニウム態窒素が消失すると、水稻窒素吸収量は土壌窒素無機化量とほぼ等しくなるとされる(鳥山・石田 1987, 鳥山 1988)。本研究で土壌溶液中アンモニウム態窒素の消失時期は7月中旬(最高分げつ期ごろ)であった(第2図)。すなわち、最高分げつ期以降の窒素吸収量は土壌とレンゲの無機化による窒素供給量の指標となる。最高分げつ期~穂揃期に注目すると、レンゲ区・レンゲ無農薬区と慣行区の窒素吸収量はほぼ同じであった(第2表)。これらのレンゲ区で慣行区とほぼ同量の窒素供給があったといえる。レンゲ区・レンゲ無農薬区での最高分げつ期~穂揃期の窒素吸収量は $3.1 \sim 3.4 \text{ g m}^{-2}$ であり、無肥料区の窒素吸収量(1.4 g m^{-2})との差 $1.7 \sim 2.0 \text{ g m}^{-2}$ がレンゲ由来の窒素無機化量と推定される。一方、穂肥窒素は、1穂粒数を増加させ、総粒数の増加に寄与することが知られる(星川 1975)。穂肥窒素の利用効率はおおよそ45~70%と高い(和田ら 1971, 後藤ら 2006)。慣行区での穂肥窒素量 2.8 g m^{-2} に、この利用効率を乗じて穂肥由来窒素吸収量を求めると、 $1.3 \sim 2.0 \text{ g m}^{-2}$ と推定される。また、慣行区での最高分げつ期~穂揃期の窒素吸収量は 3.4 g m^{-2} であった(第2表)。このとき、慣行区での土壌由来の窒素吸収量は可給態窒素含有率(第1表)から見て無肥料区(1.4 g m^{-2})と同じかこれより少ないものと推察される。つまり、最大 2.0 g m^{-2} が穂肥由来窒素量と見積もられ、レンゲ由来窒素無機化量はこれに匹敵した。しかし、これらのレンゲ区は、無肥料区と比べてもともとの土壌の可給態窒素含有率が1.4~1.5倍、慣行区に対しては1.6~1.7倍も多かった(第1表)。このことは、もともとの土壌由来の無機化窒素量が無肥料区や慣行区よりレンゲ区で多いことを示唆する。よって、レンゲ窒素の無機化による窒素供給はあるものの、その量は少なくとも穂肥窒素以下であったことになる。成熟期レンゲは、その窒素無機化が継続的に生じる特徴があり、地温上昇効果によって無機化がさらに促進された可能性があるといえ、

やはり窒素無機化速度が遅いためと推察される。レンゲ区・レンゲ無農薬区と慣行区に、総粒数を穂揃期の窒素含有量で除した穎花生産効率の有意差はなかった(第3表)。しかし、いずれのレンゲ区も総粒数は慣行区より少なかった。つまり、レンゲ区と慣行区で穎花生産効率は同じなので、レンゲ区では穂揃期までの窒素供給量が少ないため、総粒数が減少したといえる。松田ら(1997)は、穂揃期の窒素含有量が過剰であると穎花生産効率が低下し、却って総粒数が低下すると述べた。しかし、レンゲ区・レンゲ無農薬区の穂揃期水稻窒素含有量は慣行区より少なく(第2表)、過剰であるとはいえず、穎花生産効率の低下もなかった。

また、出穂期以降の窒素栄養状態は少なからず登熟過程に影響を与える(山田ら 1957, 和田 1969)。レンゲ区・レンゲ無農薬区での穂揃期~成熟期の窒素吸収量は $3.2 \sim 3.3 \text{ g m}^{-2}$ であり、慣行区(2.6 g m^{-2})よりおよそ1.3倍多い(第2表)。この窒素吸収量の増加は、レンゲ由来の無機化窒素とともに、土壌の可給態窒素量が慣行区より2つのレンゲ区で多いためであろう。出穂期以降の生育後期の窒素供給は、葉身窒素含有率を高めて光合成能を維持し、純同化速度を増加させることで登熟増加に貢献する(和田 1969)。レンゲ区・レンゲ農薬区では、生育後期に慣行区より多い窒素供給があり、地上部風乾重も増加した(第2表)。このことは、生育後期に光合成活性が維持されたことを示唆する。しかし、レンゲ区では登熟歩合が慣行区よりわずかに増加したものの、レンゲ無農薬区では慣行区と比べて登熟歩合が低下し、千粒重も少なかった(第3表)。千粒重は品種固有の特性で、栽培条件による変動は小さいといわれる(吉田 1986)。一方、山田ら(1957)は、生育中~後期を窒素過剰にすると、乾物生産量の増加に伴い収量そのものは増加するけれども、総粒数が多いと1つ1つの米粒肥大が低下し、登熟歩合とともに千粒重が減少すると述べた。しかし、レンゲ区とレンゲ無農薬区はともに、慣行区より総粒数が少なかった(第3表)。一般的に、総粒数が多いと登熟歩合は低くなるとされる(吉田 1986, 日本土壌肥科学会 1990)。これは、光合成産物の「受け取り容量」とその「充填率」として理解される(星川 1975)。しかし、本研究では、総粒数と登熟歩合、千粒重との間に一定の関係が認められなかった(第3表)。レンゲ無農薬区で観察された千粒重の低下は、光合成活性が維持されていたとすれば、籾への光合成産物の転流阻害のためかもしれない。本圃場では、ツマグロヨコバイやウンカ類の発生がしばしば確認された(浅井・西川 2003)。セジロウンカによる穂の吸汁被害は不稔・登熟不良の原因となる(野田 1987)。ツマグロヨコバイの吸汁被害は、光合成産物の籾への転流を阻害し、千粒重の低下を招く(那波 1988)。しかし、レンゲ無農薬区だけでなく、農薬散布して防除に努めたレンゲ農薬区でも千粒重の低下が観察されており(第3表)、千粒重が低下した原因は十分説明できなかった。

以上から、成熟期レンゲでは、分解の遅い有機態窒素画

分から継続的な窒素無機化が起こり、追肥の省略が図れると期待された。しかし、総初数を決定付ける出穂期までのレンゲ由来の窒素供給量は、穂肥を施用した慣行区に劣った。開花期レンゲでは、しばしば水稻生育中～後期に窒素不足が生じ、穂肥や実肥を必要とする場合があった。成熟期レンゲでは、この追肥が省略できると期待されたが、少なくとも本研究の結果は穂肥の必要性を示唆した。レンゲ区での穂揃期以降の窒素供給量は少なくとも慣行区に劣ることはなかった。

3. 成熟期レンゲを用いた水稻栽培の収量レベルと湿田での利用可能性

レンゲ区での精玄米収量は2か年の平均で 538 g m^{-2} であった(第3表)。慣行区と比べて少ないものの、その減収程度は10%であった。同様に、レンゲ無農薬区の収量は 475 g m^{-2} と(第3表)、慣行区より約20%減収した。しかしながら、成熟期レンゲのみの施用で、少なくとも 450 g m^{-2} 以上の収量は達成可能と言える。

開花期レンゲでは、窒素過剰や還元障害の懸念から、レンゲの適正投入量や上限が検討されてきた(末次 1954, 石川 1963, 安江 1991, 清水・沖野 1994b, 川村・辻 1994, 福島県農業総合センター 2007)。しかし、現地圃場でレンゲの生産量は生草重で $1\sim7 \text{ kg m}^{-2}$ と変動が大きい(川瀬・北嶋 1994, 清水・沖野 1994a, 中山・吉田 2005)。過少な場合は化学肥料の併用が有効である(福島県農業総合センター 2007)。一方、過剰な場合、鋤きこみを早める手段が有効とされた(川瀬・北嶋 1993, 1994)。刈り取って圃場外へ持ち出すことも選択肢の1つであるが(西川 1960, 福島県農業総合センター 2007)、多大な労力を要する。本研究での成熟期レンゲ投入量は風乾重で $450\sim660 \text{ g m}^{-2}$ であった。これは風乾重で示された許容限界(450 g m^{-2} , 安江 1991)と同じか、むしろ多い。窒素投入量としても、 $11\sim16 \text{ g m}^{-2}$ と多かった。レンゲの刈り取り搬出も行なわず、畑状態で予め分解する期間も設けなかった。それにもかかわらず、成熟期レンゲを使うことで、 450 g m^{-2} 以上の水稻収量が達成された。還元障害の起こりやすい湿田では、レンゲの多量鋤きこみを行う場合、乾草処理が推奨される(末次 1954, 西川 1960, 安江 1991)。同様の効果が、成熟期レンゲを使うことで得られると期待される。

謝辞：静岡大学農学部附属地域フィールド科学教育研究センター(藤枝フィールド)助教の浅井辰夫氏には生育・収量調査において多大なご協力をいただいた。また同センターの西川浩二氏をはじめ技術職員各位には試験圃場の管理等でお世話になった。土壌分析は静岡大学農学部の林宗一郎氏に手伝っていただいた。ここに記して深く感謝いたします。

引用文献

Ali, M., Yasue, T. and Oba, S. 1993. Effect of water content and amount

of Chinese Milk Vetch (*Astragalus sinicus* L.) applied as green manure on the yield and yield component of rice. Rep. Tokai Br. Crop Sci. Soc. Japan 115: 13-17.

安藤豊・庄司貞雄・及川勉・菅野忠教 1986. 水田土壌中での稲わらの分解と窒素の挙動. 土肥誌 57: 359-364.

安藤豊・安達研・南忠・西田直樹 1988. 水稻生育初期の茎数と土壌アンモニア態窒素の関係. 日作紀 57: 678-684.

浅井辰夫・西川浩二 2003. レンゲを緑肥として用いた持続的水稻栽培の10年間の収量変遷. 東海作物研究 134: 17.

Cherr, C.M., Scholberg, J.M.S. and McSorley, R. 2006. Green manure approaches to crop production: a synthesis. Agron. J. 98: 302-319.

大門弘幸 1999. 熱帯原産マメ科植物の緑肥利用に関する研究の現状と種々の作付体系への導入の期待. 日作紀 68: 337-347.

土壌標準分析・測定法委員会 1986. 土壌標準分析・測定法. 博友社, 東京. 86-94.

土壌環境分析法編集委員会 1997. 土壌環境分析法, 博友社, 東京. 1-427.

藤井弘志・安藤豊・松田裕之・柴田康志・森静香・小南力・長谷川愿 1998. 追肥時期および遮光処理による穎花生産効率の変化とそれが精米中のタンパク質含有率に及ぼす影響. 土肥誌 69: 463-469. 福島県農業総合センター 2007. レンゲ稲作での適正なレンゲすき込み量. 平成 18 年度研究成果選, 浜地域研究所-01.

後藤英次・野村美智子・稲津脩 2006. 寒地水稻に対する時期別追肥窒素の利用効率と各期間への分配. 日作紀 75: 443-450.

長谷川精作 1939. 紫雲英分解の部分的差異. 土肥誌 13: 314-315.

平野俊・原楨紀・中野啓三・藤井兵夫 1958. 土壌の酸化還元と水稻生育について. 四国農試報 4: 45-62.

星川清親 1975. 図説解剖 イネの生長. 農文協, 東京. 1-317.

石川昌男 1963. 水稻に対する緑肥レンゲの肥効増進に関する土壌肥料学的研究. 富山県農業試験場報告 特 5: 1-140.

川村戈十二・辻藤吾 1994. 水稻早期栽培でのレンゲ鋤込み時期および窒素施用量. 滋賀農試研報 35: 19-30.

川瀬昭・北嶋敏和 1993. レンゲ跡水稻の生産安定肥培管理法. 土肥誌 64: 444-447.

川瀬昭・北嶋敏和 1994. レンゲ跡水稻の生産安定肥培管理法. 岐阜農総研セ研報 7: 9-19.

木村次郎 1935. 紫雲英施用方法が水稻の収量に及ぼす影響. 土肥誌 9 (補冊): 55-56.

小林和広・中瀬寛子・今木正 2001. 穂首分化期の窒素追肥と栽植密度の組み合わせが水稻の面積あたり穎花数に及ぼす影響. 日作紀 70: 34-39.

Kundu, D.K. and Ladha, J.K. 1999. Sustaining productivity of lowland rice soils: issues and options related to N availability. Nutr. Cycle. Agroecosyst. 53: 19-33.

黒川計 1982. 日本における明治以降の土壌肥料考(下巻). 日本制作社, 東京. 345-429.

Kyuma, K. 2004. Paddy Soil Science. Kyoto University Press and Trans Pacific Press, Kyoto and Melbourne. 1-280.

松田裕之・藤井弘志・柴田康志・小南力・長谷川愿・大淵光一・安藤豊 1997. 水稻の窒素吸収量からみた粗生産効率と精米中のタンパク質含有率の関係. 土肥誌 68: 501-507.

三須英雄 1931. 乾燥度を異にする緑肥窒素分解と化学的成分との相関関係. 土肥誌 5: 1-36.

那波邦彦 1988. ツマグロヨコバイの吸汁害に関する研究III. 穂吸汁加

- 害によるイネの生理的反応. 応動昆 32: 31-36.
- 中山秀貴・吉田直史 2005. 相馬におけるレンゲ施用水田での水稻生育・収量の特徴と土壌窒素供給量の増加. 東北農業研究 58: 35-36.
- 日本土壌肥科学会編 1990. 水田土壌の窒素無機化と施肥. 博友社, 東京. 1-181.
- 西川光一 1960. 水田裏作れんげのすきこみの注意. 農及園 35: 661-666.
- 野田博明 1987. セジロウカノ発生推移と水稻の被害. 島根農試研報 22: 82-99.
- Saeki, H. and Azuma, J. 1956. Studies on the accumulation and the quality of humus derived from various organic materials under different conditions. Soil and Plant Food 2: 19-24.
- 埼玉県農林総合研究センター 2000. レンゲあと水稻の栽培方法. 新技術情報, 農 00-04.
- Sasaki, Y., Ando, H. and Kakuda, K. 2002. Relationship between ammonium nitrogen in soil solution and tiller number at early growth stage of rice. Soil Sci. Plant Nutr. 48: 57-63.
- 清野馨 1991. コシヒカリの施肥法と窒素の玄米生産効率. 土肥誌 62: 500-506.
- 島田義明・黒田晃 1993. 夏作緑肥作物－水稻体系における緑肥作物の吸収窒素の動態について. 石川農試研報 17: 31-43.
- 清水祐治・沖野英男 1994a. 転作レンゲの土壌, 収量実態とレンゲ跡におけるイネ栽培法. 愛知農総試研報 26: 123-131.
- 清水祐治・沖野英男 1994b. すき込みレンゲの湛水, 非湛水時の窒素の無機化. 愛知農総試研報 26: 133-138.
- Stanford, G. and Smith, S.J. 1972. Nitrogen mineralization potentials of soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 36: 465-472.
- 末次勲 1954. 北陸・東北地方のレンゲ作と水稻. 農及園 29: 166-170.
- 杉原進・金野隆光・石井和夫 1986. 土壌中における有機態窒素無機化の反応速度論的解析法. 農環研報 1: 127-166.
- 瀧嶋康夫・塩島光洲・有田裕 1960. 水田土壌中の有機酸代謝と水稻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. 土肥誌 31: 441-446.
- 瀧嶋康夫・佐久間宏 1961. 水田土壌中の有機酸代謝と水稻生育阻害性に関する研究 (第 7 報). 土肥誌 32: 557-564.
- 鳥山和伸・石田博 1987. 土壌溶液モニター法による水田土壌中の NH₄-N 消失時期の把握. 土肥誌 58: 747-749.
- 鳥山和伸 1988. 真空採血管を利用した水田土壌窒素の簡易モニター法. 農及園 63: 52-56.
- 都築俊文 1994. アンモニア態窒素. 日本分析化学会北海道支部編, 水の分析第4版, 化学同人, 京都. 253-256.
- 上原敬義 1993. レンゲ稲作. 農業技術体系, 農山漁村文化協会, 東京作物編②追録第 15 号 技 522 の 9 の 32.
- 和田源七 1969. 水稻収量成立におよぼす窒素栄養の影響－とくに収穫期以後の窒素の重要性について. 農技研報 A16: 27-167.
- 和田源七・庄子貞雄・高橋重郎・斎藤公夫・新保到 1971. 水田における窒素の動態と水稻による窒素吸収について: 第 3 報 追肥窒素の土壌中における行動ならびに水稻による吸収. 日作紀 40: 287-293.
- 山田登・太田保夫・櫛渕欽也 1957. 水稻の登熟に関する研究 第 1 報 登熟に於ける窒素の役割について. 日作紀 26: 111-115.
- Yamada, N. and Ota, Y. 1959. Study on the respiration of crop plants. 8. Effect of hydrogen-sulfide and lower fatty acids on the respiration of root in rice plant. Proc. Crop Sci. Soc. Japan 27: 155-160.
- 山本義彦 1937. 紫雲英の半乾程度と其分解. 土肥誌 11: 475-478.
- 山本義彦 1938. 紫雲英施用量対処置法に関する試験成績. 土肥誌 12: 97-99.
- 山崎欣多 1959. 水田における「レンゲ」の施用について. 農及園 34: 455-460.
- 安江多輔・笹野晶子 1986. 緑肥レンゲの鋤込み時期と水稻の生育及び収量. 日作紀 55 (別 1): 78-79.
- 安江多輔・松生尚典・細江重男 1987. 鋤込み時期を異にしたレンゲの地上部及び地下部の水稻に対する部位別肥効について. 日作東海支部報 104: 37-38.
- 安江多輔 1991. レンゲ栽培・利用の変遷と肥効及び地力増進効果. 日作紀 60: 583-592.
- 吉田昌一 1986. 稲作科学の基礎. 博友社, 東京. 1-316.

Nitrogen Mineralization of Mature Chinese Milk Vetch, and the Effect of Incorporated Mature Chinese Milk Vetch on Nitrogen Uptake and Yield of Rice on a Gley soil : Toshiyuki NAGUMO, Hiromi KANAZAWA, Yukiko OOI and Kyoko KUBOTA (Fac. of Agr., Shizuoka Univ. Shizuoka 422-8529, Japan)

Abstract : Chinese milk vetch (CMV) (*Astragalus sinicus* L.) at flowering-stage is a green manure traditionally used as alternative basal nitrogen in paddy rice fields. In order to evaluate the nitrogen availability of mature-stage CMV, compared with the flowering-stage CMV, we carried out field cultivation and incubation studies using ill-drained Gley soil with either mature-stage CMV incorporated. The results showed that mature-stage CMV provided less available nitrogen for early rice growth than the fresh flowering-stage CMV, resulted in lower panicle number and hence lower total grain number of rice. Contrary to our expectation, which mature-stage CMV replace nitrogen topdressing due to the prolonged nitrogen mineralization, the small amount of the mineralized nitrogen was insufficient to support the rice growth. Nevertheless, rice cultured with the mature-stage CMV achieved a yield over 450 g m⁻², without the use of agrochemicals. Mature-stage CMV was suggested to be potentially applicable under ill-drained soil conditions, if applied heavily.

Key words : Chinese Milk Vetch, Gley Soil, Green Manure, Mineralization, Nitrogen, Paddy Rice.