論 文 の 内 容 の 要 旨

論文題目　地域輪換田における合理的な土壌管理技術の確立に関する研究

氏　名　北 田 敬 宇

近年，土壌資源の劣化や地球温暖化が地球的規模で進んでおり，このため環境と調和した持続型農業への転換が求められている．このような背景の下で，土地利用型農業における水田の総合生産力の向上は，今日わが国の農業にとって重要な課題となっている．この課題解決にあたって，水田の有する潜在的生産力を安定かつ持続的に発揮させる田畑輪換技術の確立が重要と考える．

生産現場では，田畑輪換により増収効果をあげているが，土壌養分供給力の変動に応じた土壌管理が行われていない場合が多く，このため作物の生育・収量は低位で，かつ不安定となっている．このことが，田畑輪換の円滑な導入を阻害している一要因となっている．そこで，本研究は地域輪換田における合理的な土壌管理技術の確立に向けて一連の研究を行った．

1．田畑輪換における土壌養分供給力変動の解明

輪換田土壌の窒素，リン酸，ケイ酸などの養分動態は，輪換年数，作付前歴

および有機物管理などの要因により大きく影響を受けると考えられる．とりわけ，耐倒伏性の弱い良質米品種が多く導入されている状況下では，土壌窒素供給力の変動により，水稲の生育・収量は不安定であり，地域ごとの適正な窒素施肥基準の確立が求められている．

そこで，稲ー麦ー大豆体系下での大豆跡輪換田について，良質米品種「コシヒカリ」を対象に，適正な基肥窒素施肥量の解明について検討した．その結果，水田作付に伴う土壌窒素無機化過程，水稲の窒素吸収量および生育・収量の推移から判断すると，輪換田水稲の適正な基肥窒素施肥量は，細粒グライ土では，輪換田2年目までは慣行施肥量の 10 割減肥が，3年目は6割減肥が適しており，一方，細粒・中粗粒灰色低地土では，輪換田初年目は5割減肥が適しており，2年目以降は慣行施肥量でよいと判断された．

一方，窒素以外のリン酸，ケイ酸などの養分動態についても変動すると考えられるが，生産現場では窒素以外の養分については水稲連作田土壌と同様の肥培管理を行っている状況である．輪換田土壌のケイ酸の動態が解明されていないため，土壌ケイ酸の有効化過程に応じた肥培管理が十分に行われていない状況にある．

そこで，土壌ケイ酸をできるだけ圃場の状態に類似した環境条件下で測定できるように，上澄液法を改良した逐次上澄液法を用いて，輪換田土壌のケイ酸の有効化過程の解明について検討した．その結果，逐次上澄液法は，圃場の土壌ケイ酸の有効化過程を把握する有効な方法であることが示された．また，逐次上澄液法による土壌ケイ酸の溶出過程は指数式で近似でき，この指数式と移植後日数および作土重量から，土壌のケイ酸供給量を推定した．灌漑水の供給量を考慮したケイ酸供給量の推定値とケイ酸吸収量の実測値とは，最高分げつ期を除き，穂揃期および成熟期においてほぼ一致した．以上より，田畑輪換の繰り返しは土壌ケイ酸の動態を大きく変動させるが，逐次上澄液法の適用により，土壌ケイ酸の有効化過程の定量が可能になるものと考えられる．

田畑輪換の繰り返しによる土壌養分供給力の変動を解明するためには，土壌環境要因の評価法を解明することが重要と考える．

そこで，輪換田土壌における土壌養分供給力変動の解明にあたっては，土壌

の置かれた環境条件が反映される土壌分析値による指標を用いるのが妥当であると判断し，水中沈定容積の変化を利用した畑地土壌化指数を用いて，窒素，リン酸およびケイ酸供給力変動との関係について検討した．その結果，田畑輪換に伴う土壌の化学性の変化には土壌の乾燥履歴が反映しており，これを客観的に評価する手法として畑地土壌化指数が有効であることが示された．土壌養分の畑地土壌化指数による分類が水稲の養分吸収と対応しており，これは本評価法の妥当性を支持しているものと考えられる．

2．安定かつ持続的な高生産力を引き出す水田・畑期間の究明

地域の田畑輪換の取り組みがブロックローテーションにより一律的に行われ，土壌条件に応じた作付利用が行われていない状況である．このため，安定かつ持続的な高生産力を引き出す合理的な田畑輪換方式の確立が急務となっている．

そこで，田畑輪換の前歴の異なる灰色低地土の輪換田土壌およびグライ土の転換畑土壌において，田畑輪換に伴う土壌養分および土壌環境の影響を明らかにし，さらに水稲および転換畑作物の生育・収量との関係を解析し，安定かつ持続的な高生産力を引き出す最適な水田・畑期間について検討した．その結果，田畑輪換方式は土壌の窒素，リン酸，ケイ酸などの養分を有効化するが，畑2～3年ー水田2～3年の組み合わせである畑短期導入田が土壌養分の持続性の点で勝っていることが明らかとなった．このことは，田畑輪換に伴う土壌養分と畑地土壌化指数との関係からも裏付けられた．灰色低地土輪換田における水稲の増収効果が輪換田3年目まで認められ，とくに畑短期導入田では安定した増収効果が認められた．また，グライ土転換畑における大豆，大麦の収量は，転換2年目までは収量変動が認められたが，圃場の排水性が向上した転換3年目になると比較的安定した生産が得られた．以上より，田畑輪換に伴う土壌養分供給力の変動と，作物の生育・収量の推移から判断すると，水田の安定かつ持続的な高生産力を引き出すには田畑輪換方式が有効であり，灰色低地土水田では畑2～3年ー水田2～3年の組み合わせが適しているのに対し，グライ土水田では畑期間を灰色低地土水田より1～2年長くする必要があろう．

3．田畑輪換技術の導入・定着化のための実用土壌図の作成

田畑輪換技術の導入・定着化を図るためには，土壌情報システムの活用により実用土壌図を作成することが重要と考える．

そこで，土壌情報システムを使った実用土壌図の例として，水田転作大麦の生育適性区分図を作成し，その適合性について検討した．まず，数量化Ｉ類による土壌群別の大麦収量と気象要因との関係を解析し，気象条件が不良な年ほど土壌群間の収量に差異が生じ，この場合グライ土で著しく減収することを認めた．ここでは，土壌条件からみた大麦の生育適性区分図の作成を試みた．

モデル地域において，数量化Ｉ類による大麦の生育適性から見た土壌評価を行い，大麦収量は「作土の深さ」＞「Ⅱ層の粗孔隙率」＞「Ｉ層の仮比重」の順に密接な関係が認められた．大麦の生育適性評価値を回帰・積算型圃場評価手法に従って求め，①適地，②普通地，③不適地の 3ランクに区分した．一方，縮尺５万分の１「金沢」図幅内の土壌調査データを入力し，データファイルを作成した．また，基本土壌図をデジタイザーを使用してコンピュータ入力し，水田土壌図を自動製図機で出力作成した．さらに，これらを基に，適地，普通地，不適地の 3つのカテゴリーからなる大麦の生育適性区分図を作成した．農協支所別の大麦収量と生育適性区分図のカテゴリー区分との関係を解析し，作成した図の妥当性が確かめられた．

本研究成果は，田畑輪換に伴う土壌養分供給力の変動と，水稲および転換畑作物の生育・収量との関係を総合的に理解することで，水田の安定かつ持続的な高生産力を引き出す田畑輪換技術が明らかとなった．また，土壌情報システムを活用した実用土壌図の作成は，生産現場への田畑輪換の円滑な導入・定着化に寄与するものと期待される．

持続型農業を実現するには，土壌の機能を最大限に発揮させた上で合理的な肥培管理を行うことが重要であり，そうした新しい農法が多くの地域で展開される必要があろう．この意味において，本研究は，持続型農業の実現に向けて，地域に根ざした土壌管理技術を確立する上で参考になるものと考えられる．

地域輪換田における合理的な土壌管理技術の確立に関する研究

北田敬宇

②

地域輪換田における合理的な土壌管理技術の確立に関する研究

北田敬宇

地域輪換田における合理的な土壌管理技術の確立に関する研究

目　次

緒　言 …… 1

第1章　田畑輪換における土壌養分供給力変動の解明 …… 4

1．輪換田水稲の地域ごとの適正な窒素施肥基準の確立 …… 8

2．逐次上澄液法による輪換田土壌ケイ酸の有効化過程の解明 …… 24

3．畑地土壌化指数による輪換田の土壌養分動態の評価 …… 43

第2章　安定・持続的高生産力を引き出す水田・畑期間の究明 …… 53

1．灰色低地土水田における田畑輪換による土壌養分動態と最適な水田・畑期間 …… 56

2．グライ土水田における畑転換による土壌
養分供給力変動と最適な水田・畑期間 …… 72

第3章 田畑輪換技術の導入と定着化のための
実用土壌図の作成
－水田転作大麦の生育適性区分図の例－ …… 83

第4章 総合考察 …… 97

摘 要 …… 108
謝 辞 …… 112
引用文献 …… 114
英文摘要 …… 127

緒　言

近年における世界人口の爆発的増加に伴い，食糧の供給増加が，単位面積当りの収量増加に依存しなければならない状況になっている．日本の穀物自給率は 30 %しかなく[73]，このため，土地利用型農業，とりわけ水田における総合生産力の向上は，今日わが国の農業にとって重要な課題となっている．ここでいう総合生産力とは，水稲作と転換畑作とを組み合せた効率的な土地利用により，単位面積当りの水田から生産される水稲および転換畑作物を合わせた全体的な生産力を意味する．この課題解決にあたって，水田の有する潜在的生産力を安定かつ持続的に発揮させる田畑輪換技術の確立が重要であると考える．

近年，砂漠化，土壌侵食などの土壌資源の劣化，地球温暖化および地下水汚染などが地球的規模で進んでおり[4, 5, 11, 19, 30, 32, 53, 70, 87, 91]，このため農薬，化学肥料およびエネルギーを多投する資材多投型農業から環境と調和した持続型農業への転換が求められている[7, 25]．その根幹をなすものは土壌の機能を最大限に発揮させることであり，このため田畑輪換の活用や合理的な肥培管理に期待するところは大きいといえる．

田畑輪換の繰り返しは土壌養分供給力を著しく変動させ，作物の生育・収量に大きな影響を及ぼしている

[93]．生産現場では，田畑輪換により潜在地力を発揮させて増収効果をあげているが，土壌養分供給力の変動に応じた土壌管理が行われていない場合が多く，このため作物の生育・収量は低位で，かつ不安定となっている．とりわけ，輪換田においては土壌窒素供給力が大きく変動するため，耐倒伏性の弱い良質米品種の生育・収量は不安定となっており，地域ごとの適正な窒素施肥基準の確立が求められている．また，窒素以外のリン酸，ケイ酸などの養分動態についても変動すると考えられるが，これら養分については水稲連作田土壌と同様の肥培管理を行っている状況である[12]．

一方，地域の田畑輪換の取り組みがブロックローテーションにより一律的に行われ[61,68]，土壌条件に応じた作付利用が行われていない状況である．このため，水稲および転換畑作物を通じた地域全体の総合生産力の向上が不可能となっている．このことが，田畑輪換の円滑な導入を阻害している一要因となっている．

そこで，本研究は地域輪換田における合理的な土壌管理技術の確立に向けて一連の研究を行った．研究結果の一部はすでに日本土壌肥料学会誌等で報告[34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47]したが，本報告では未発表のものも加えて総合的にとりまとめた．

第1章では，田畑輪換における土壌養分供給力の変動を解明するため，土壌の種類の異なる輪換田において，

水田作付に伴う土壌窒素供給力の変動と水稲の窒素吸収量および生育・収量との関係を解析し，地域ごとの適正な窒素施肥基準を確立しようとした．また，土壌ケイ酸を動的な圃場の状態に類似した環境条件下で測定できるように考案した逐次上澄液法を用いて，その有効化過程の解明について検討した．さらに，田畑輪換の前歴の異なる輪換田土壌において，水中沈定容積の変化を利用した畑地土壌化指数を用い，土壌養分供給力変動との関係について検討した．

第２章では，安定・持続的高生産力を引き出す水田・畑期間を究明するため，灰色低地土およびグライ土水田について，田畑輪換に伴う土壌養分供給力の影響を解明し，さらに水稲および転換畑作物の生育・収量との関係を解析した。

第３章では，田畑輪換技術の円滑な導入・定着化を図るため，土壌情報システム（JAPSIS）を使った実用土壌図の例として，水田転作大麦の生育適性区分図を作成し，その適合性について検討した．

第４章では，総合考察として，各章のまとめと考察を行った．

第1章　田畑輪換における土壌養分供給力変動の解明

水田の総合生産力の向上を図るため，田畑輪換による水田の高度利用技術が求められている．田畑輪換の繰り返しは土壌養分供給力を著しく変動させ，水稲および転換畑作物の生育・収量に大きな影響を及ぼしている[93]．輪換田土壌の窒素，リン酸，ケイ酸などの養分動態は輪換年数，作付前歴および有機物管理などの要因により大きく影響を受けると考えられる．とりわけ，耐倒伏性の弱い良質米品種が多く導入されている状況下では，土壌窒素供給力の変動により，水稲の生育・収量は不安定となっており，地域ごとの適正な窒素施肥基準の確立が求められている．また，現場対応技術として生産農家にこうした施肥管理指標の普及を図っていくことが重要となる．

石川県では，良質米品種「コシヒカリ」は，水稲作付面積に対する比率が年々増加し，1989年には 57 %に達している．また，グライ土および灰色低地土水田において，主として稲－麦－大豆の2年3作体系による土地利用がなされている．とくにグライ土輪換田では，生育が初期から旺盛で倒伏する場合も多くみられ，このため適正な基肥窒素施肥量の解明が求められている．そこで，

「コシヒカリ」を対象に，まず水稲の理想的な窒素吸収パターンを明らかにしようとした．さらに，大豆跡輪換田について，土壌窒素供給力の変動が水稲の窒素吸収量および生育・収量に及ぼす影響を解析し，土壌の種類別に適正な基肥窒素施肥量を明らかにしようとした．

一方，窒素以外のリン酸，ケイ酸などの養分動態についても変動すると考えられるが，生産現場では窒素以外の養分については水稲連作田土壌と同様の肥培管理を行っている状況である[12]．これらリン酸，ケイ酸資材の合理的な施用が行われていないため，地域によっては土壌の養分負荷がみられ，資材の効率的な施用が求められている．これは，環境に負担を与えない肥培管理技術としても重要な側面をもつと考える．水稲にとってケイ酸は，病虫害に対する抵抗性[114]，根の活力の増大[79]など重要な役割を果たしており，準必須成分といわれている[76]にもかかわらず，輪換田における土壌ケイ酸の養分動態に関する報告事例は見あたらない．このように，輪換田における土壌ケイ酸の動態が解明されていないため，土壌ケイ酸の有効化過程に応じた効率的な肥培管理が十分に行われていない状況にある．すなわち，土壌ケイ酸の有効化量を予測し，目標とする水稲のケイ酸保有量に対する不足量を，生育時期を追って施肥により補っていく肥培管理が行われていない状況にある．

水田土壌のケイ酸供給力の測定法として，これまでN酢酸緩衝液浸出法[16]が用いられ，ケイ酸資材の要否判

定が行われてきた．しかし，この方法はケイ酸資材の施用田には適用できない場合が多いことが明らかにされている[102]．そこで，新しいケイ酸供給力の指標として，土壌溶液測定法[77]，湛水静置法[103]，上澄液法[97]が提示されている．これらの方法により得られるケイ酸含量は，水稲のケイ酸吸収との間に高い相関のあることが認められている．しかし，土壌ケイ酸の有効化を予測し，これに基づいた合理的な施肥体系を確立する場合，これらの方法では土壌ケイ酸の有効化過程の定量的把握が困難であり，有効な診断指標とはなり得ないと考えられる．そこで，土壌ケイ酸をできるだけ圃場の状態に類似した環境条件下で，すなわち灌漑により田面水が逐次更新されるような条件下で測定できるように従来の上澄液法を改良し，上澄液を一定期間ごとに更新する逐次上澄液法を用いて，輪換田土壌におけるケイ酸の有効化過程を解明するための適用可能性について検討した．

一方，田畑輪換の繰り返しによる土壌養分供給力の変動を解明するためには，土壌環境要因の評価法を解明することが重要と考える．輪換田土壌における肥培管理基準の策定は，過去の圃場試験データを基に，主に輪換年数と前作物の種類を指標として，窒素成分についてのみ行われているのが実情である．さらに，近年の多様な土壌管理や作付体系が実施されるなかで，この肥培管理基準の現場への適用が難しくなってきている．たとえば，間断灌漑を行う大豆の飽水栽培の導入では，転換畑作物

を栽培したとはいえ，土壌面では必ずしも畑地化の影響を受けない場合があり，また，田畑輪換を長期間続けた場合とそうでない場合とでは，同じ輪換田初年目でも畑地化の土壌養分供給力変動に及ぼす影響は，両者間で異なるものと考えられる．このことは，輪換田土壌における土壌養分供給力変動の解明にあたっては，土壌の置かれた環境条件が反映される土壌分析値による指標を用いるのが妥当であることを示唆している．

長野間・諸遊[60]は，転換畑土壌の物理性の変化が微細構造の変化から理解できるとし，水中沈定容積を用いて物理性からみた変化の指標を計算することを提案している．そこで，この水中沈定容積の変化を利用した畑地土壌化指数を用いて，土壌養分供給力変動との関係について検討し，さらにこの評価法の適用可能性についても検討した．

1．輪換田水稲の地域ごとの適正な窒素施肥基準の確立

良質米品種「コシヒカリ」を対象に，まず水稲の理想的な窒素吸収パターンを明らかにしようとした．次に，グライ土および灰色低地土の大豆跡輪換田について，土壌窒素供給力の変動が水稲の窒素吸収量および生育・収量に及ぼす影響を解析し，適正な基肥窒素施肥量の解明について検討した．

1－1．コシヒカリの多収水準における窒素吸収パターン

(1) 試験方法

細粒グライ土水田および細粒灰色低地土水田において，1984年から 1988 年にかけてコシヒカリを供した105点の各種調査圃の収量および収量構成要素と，水稲の生育診断時期として重要な最高分げつ期，幼穂形成期，穂揃期および成熟期の窒素吸収量を解析に用いた．

解析方法として，一つは各水田土壌ごとに収量水準別(650≦，600 ≦～<650，550 ≦～<600，<550kg/10a) に水稲の生育時期別の窒素吸収量を集計して解析し，もう一つは数量化Ｉ類による解析であり，まず各生育時期の水稲の窒素吸収量の度数分布表を作成し，各カテゴリーに所属するサンプルの数が偏らないようにカテゴリー区

分を行い，次にこの区分により収量と生育時期別の窒素吸収量について，駒澤[49]による数量化Ｉ類のコンピュータプログラムを用い統計解析した．

本試験では，気象条件の異なる年次や栽培管理条件の異なる圃場における調査資料を合わせて解析することにより，年次や圃場が異なっても適用可能な水稲生育のモデルを得ようとした，

2）　結果および考察

(1) 収量水準別の水稲の窒素吸収パターン

収量水準別の生育時期別の窒素吸収量について集計した結果を第１表に示した．その結果，多収水準ほど最高分げつ期から幼穂形成期にかけて，および幼穂形成期以降，とくに穂揃期から成熟期にかけての窒素吸収量が高く，この傾向は細粒グライ土水田で著しかった．

(2) 収量水準別の水稲の生育時期別窒素吸収割合

収量水準別の水稲の生育時期別窒素吸収割合について集計した結果を第１図に示した．その結果，両土壌とも多収水準ほど移植から最高分げつ期にかけての吸収割合が相対的に小さく，また穂揃期から成熟期にかけてのそれは逆に大きい傾向が認められた．

丹野・武田[107]が福島県の細粒灰色低地土水田において求めたコシヒカリの収量 600kg/10aレベルの吸収割合は，移植～幼穂形成期，幼穂形成期～出穂期，および出穂期～成熟期がそれぞれ，39，33，28%であり，これは

第1表　細粒グライ土水田および細粒灰色低地土水田における収量水準別の生育時期別窒素吸収量

収量水準 (kg/10a)	土壌の種類	標本数	窒素吸収量 (g/m²)			
			最高分げつ期	幼穂形成期	穂揃期	成熟期
650≦	細粒グライ土水田	8	3.5±1.2	6.5±1.1	10.9±1.1	15.7±1.3
	細粒灰色低地土水田	15	4.2±0.6	5.5±0.9	10.3±1.0	12.9±0.9
	全　　体	23	4.0±0.9	5.9±1.0	10.5±1.0	13.9±1.6
600≦～＜650	細粒グライ土水田	12	3.1±1.1	5.5±1.1	10.5±1.2	14.3±1.4
	細粒灰色低地土水田	12	4.1±0.9	5.1±0.8	9.4±1.2	11.1±1.7
	全　　体	24	3.6±1.0	5.3±0.9	10.0±1.2	12.7±2.2
550≦～＜600	細粒グライ土水田	9	3.2±1.0	5.3±0.9	10.1±2.2	13.4±1.5
	細粒灰色低地土水田	6	4.5±1.0	5.4±1.1	8.9±1.0	11.2±1.2
	全　　体	15	3.7±1.1	5.3±1.0	9.6±1.9	12.5±1.7
＜550	細粒グライ土水田	35	3.8±1.8	5.7±2.2	8.8±1.8	11.0±2.4
	細粒灰色低地土水田	8	3.0±0.9	3.8±0.9	6.4±2.1	7.3±2.3
	全　　体	43	3.7±1.6	5.4±2.1	8.4±2.0	10.2±2.7

第1図　収量水準別の生育時期別窒素吸収割合

筆者が同様の土壌で得た値に近似しているが，出穂期後の吸収割合はより寒地の福島県が石川県に比べ8％高かった．

(3) 数量化Ⅰ類による収量と水稲の生育時期別の窒素吸収量の統計解析

収量と水稲の生育時期別の窒素吸収量との関係について，数量化Ⅰ類により統計解析した結果を第2表に示した．

細粒グライ土水田，細粒灰色低地土水田について得られた重相関係数はそれぞれ，0.748，0.796といずれも高い値を示した．偏相関係数およびカテゴリー数量は各アイテムが収量に寄与する度合いを示す指標である．すなわち，偏相関係数が大きいアイテムほど収量に大きく寄与し，また各アイテムのカテゴリー数量が小さいカテゴ

第2表　数量化Ⅰ類による細粒グライ土水田および細粒灰色低地土水田における収量と生育時期別窒素吸収量の解析結果

アイテム	カテゴリー	細粒グライ土水田		細粒灰色低地土水田	
		カテゴリー数量	偏相関係数	カテゴリー数量	偏相関係数
最高分げつ期の窒素吸収量	6≦	-105.2	0.742	-8.9	0.572
	4≦～＜6	-6.1		21.5	
	2≦～＜4	11.1		-0.5	
	＜2	27.6		-173.1	
幼穂形成期の窒素吸収量	8≦	2.6	0.389	-0.9	0.114
	6≦～＜8	24.5		-3.1	
	4≦～＜6	-7.3		17.9	
	＜4	-10.2			
穂揃期の窒素吸収量	12≦	44.0	0.394	23.5	0.451
	10≦～＜12	1.8		9.8	
	8≦～＜10	-7.2		-67.8	
	＜8	-1.9			
成熟期の窒素吸収量	14≦	42.9	0.837	46.0	0.315
	12≦～＜14	29.8		5.9	
	10≦～＜12	-23.1		10.4	
	＜10	-79.2		-31.4	
重相関係数（標本数）		0.748(41)		0.796(64)	

リーほど収量を低下させることになる．偏相関係数から判断すると，窒素吸収量（g/m²）が，細粒グライ土水田では最高分げつ期で6以上，幼穂形成期で6未満，穂揃期で10未満，そして成熟期で12未満において，一方，細粒灰色低地土水田では最高分げつ期で2未満，穂揃期で8未満，そして成熟期で10未満において収量を大幅に低下させていることが推察された．

(4) 多収水準における水稲の窒素吸収パターン

2)-(3)の結果をまとめ，多収水準の窒素吸収パターン

を第2図に示した．すなわち，最高分げつ期，幼穂形成期，穂揃期および成熟期の窒素吸収量はそれぞれ，細粒グライ土水田では2～4，5～8，10～13，14～17g/m²であり，細粒灰色低地土水田では3～5，4～7，9～12，12～15g/m²であった．

丹野・武田[107]が細粒灰色低地土水田において，3か年の平均値から求めたコシヒカリの収量600kg/10aレベルの窒素吸収パターンは，最高分げつ期，幼穂形成期，穂揃期および成熟期の窒素吸収量がそれぞれ，2.9，5.2，9.6g/m²であり，これは筆者が同様の土壌で得た値に近似している．

本析は気象条件を異にする年次を含めてのものである．旬別平均気温から求めた生育時期別の平均気温は，移植～最高分げつ期，最高分げつ期～出穂期，出穂期～成熟期がそれぞれ，17.2～20.2，21.8～26.1，22.9～

第2図　多収水準（収量650kg/10a）における水稲の窒素吸収パターン

27.2℃の範囲にあった．一方，福島県におけるそれはそれぞれ，17.8～18.7，22.2～25.6，20.7～21.5℃の範囲にあり，各生育時期の平均気温は出穂期～成熟期を除き，石川県のその範囲に包含されている．このことは，同一の土壌の種類では，多収水準における窒素吸収パターンが少なくともこの平均気温の範囲内にある地域や年次においても適用しうることを示唆している．

(5) 多収水準における水稲の収量構成要素

多収水準における水稲の収量構成要素を第3表に示した．細粒グライ土水田は細粒灰色低地土水田に比べ，穂数が約6％上回ったが，総籾数，登熟歩合および千粒重が逆に2～4％下回った．このことは，土壌の種類に対応した最適な収量構成要素が存在することを示しており，この形質は今回得た多収水準における窒素吸収パターンに誘導することにより得られるものである．

本試験で得た多収水準における窒素吸収パターンは，コシヒカリの安定多収を得るための窒素施肥基準を策定する上で参考になるものと考えられる．

第3表　多収水準（収量 650kg/10a）における水稲の収量構成要素

土壌の種類	標本数	穂数 (本/m²)	総籾数 (×100/m²)	登熟歩合 (%)	千粒重 (g)
細粒グライ土水田	8	437±42	308±18	83.5±7.0	23.0±0.5
細粒灰色低地土水田	15	414±34	317±27	86.7±5.7	22.5±0.5
全　体	23	423±39	315±24	85.3±6.4	22.6±0.6

1－2．輪換田水稲の適正な基肥窒素施肥量

1）試験方法

(1) 供試圃場および土壌

羽咋（細粒グライ土），野々市（細粒灰色低地土）および松任（中粗粒灰色低地土）の大豆跡輪換田および近隣の水稲連作田圃場について，4月上旬の耕起前に土壌試料（作土層，0～13cm）を採取し，4mm で篩別後，その一部は土壌窒素無機化量を測定するために湛水培養し，残りは風乾処理を行い，理化学分析に供した．各土壌の理化学的特性を第4表に示した．

羽咋では 1985 年から 1987 年にかけて輪換田初年～3 年目の，野々市および松任ではそれぞれ，1988年，1989年に輪換田初年目および連作田の計 4圃場について，水稲の栽培を行った．連作田は，野々市近隣の圃場である．輪換田圃場の来歴は，いずれも麦－大豆体系による大豆跡の圃場である．

第4表　供試土壌の理化学的特性

土壌の種類	土性	容積重 (g/ml)	pH (H_2O)	全炭素 (%)	全窒素 (%)	塩基交換容量 (meq/100g乾土)	風乾土アンモニア化成量 (mg/100g乾土)
細粒グライ土	LiC	0.66	5.2	3.55	0.281	32.6	36.1
細粒灰色低地土	CL	1.08	5.4	1.42	0.160	11.5	15.7
中粗粒灰色低地土	L	1.14	5.3	1.35	0.107	10.3	13.4

(2) 供試品種および肥培管理

水稲品種「コシヒカリ」を用いて栽培を行い，水稲連作に伴う生育・収量および窒素吸収量の推移を調査した．窒素吸収量は，最高分げつ期，穂揃期および成熟期に水稲株を採取し，調査を行った．肥培管理は，各地域における連作田の慣行施肥量を基準に，基肥窒素量3～5kg/10aに対し，3～10割の範囲内で減肥区を設け，適正な基肥窒素量を明らかにしようとした．追肥窒素については，羽咋で1～2.5 kg/10a，野々市および松任で7kg/10aを分施した．窒素以外の肥培管理はいずれの区も慣行施肥量とし，リン酸は3～5kg/10aを，カリウムは，羽咋，野々市および松任でそれぞれ，4～5.5，10，9kg/10aを分施した．

(3) 分析方法

湿潤土アンモニア化成量は，乾土15g相当量の湿潤土を試験管（直径30mm，高さ75mm)にとり，30℃で10週間にわたって湛水培養し，生成された窒素無機化量を10％塩化カリウムで抽出後，水蒸気蒸留法により定量した．

作物体の全窒素は，ケルダール法により定量した．

2) 結果および考察

(1) 水田作付に伴う土壌窒素無機化過程の推移

水田作付が土壌窒素無機化に及ぼす影響を，土壌の種類別にとりまとめ，第3図に示した．連作田の土壌窒素

第3図　土壌窒素無機化過程の水田作付に伴う推移

＊ 湿潤土30℃，湛水培養.

無機化過程は，細粒グライ土が細粒および中粗粒灰色低地土に比べて高く推移し，培養 10 週の土壌窒素無機化量は，細粒および中粗粒灰色低地土の 1.9倍を示した．いずれの土壌とも輪換田初年目が最も高く推移し，細粒グライ土では水田作付に伴い低く推移した．そして，連作田の土壌窒素無機化過程に近似するのに，水田期間が少なくとも，細粒グライ土で 2 年を，細粒灰色低地土で 1年を要した．

(2) 土壌の種類別の基肥窒素量が生育時期別窒素吸収量に及ぼす影響

基肥窒素量が生育時期別窒素吸収量に及ぼす影響を土壌の種類別にとりまとめ，第5表に示した．細粒グライ土では，無窒素区の窒素吸収量は，輪換田2年目においても生育初期から高く推移したが，3年目に低下して総窒素吸収量が 8.6kg/10aとなり，2年目より約 30 %低下した．生育時期別の窒素吸収量は3か年とも，基肥窒素量の減肥割合を高めるにしたがい，数値の変動があるものの，移植～最高分げつ期，最高分げつ期～穂揃期とも減少し，逆に穂揃期～成熟期では増加傾向を示した．このことは，輪換田3年目においても生育が旺盛過ぎであり，基肥窒素量を減肥する必要があることを示唆している．

細粒および中粗粒灰色低地土では，輪換田初年目において，無窒素区の総窒素吸収量が 6.5kg/10aであり，グライ土の初年目に比べ約 50 %と低かった．生育時期別の窒素吸収量は，生育時期を問わず基肥窒素量の減肥割合を高めるにしたがい減少傾向を示した．

1－1．で，コシヒカリの多収水準（収量 650kg/10a）における窒素吸収パターンを土壌の種類別に解析し，グライ土水田，灰色低地土水田の窒素保有量（最高分げつ期，穂揃期，成熟期）はそれぞれ kg/10a で表して，(2～ 4，10～ 13，14 ～17)，(3 ～5，9～ 12，12 ～15) であることが明らかとなった．また，最高分げつ期の窒素吸収量が収量に大きく寄与することが明らかとなった．最高分げつ期の窒素吸収量はいうまでもなく，

第5表　土壌の種類別の基肥窒素量が生育時期別窒素吸収量に及ぼす影響　(kg/10a)

処　理	細粒グライ土											
	1985年				1986年				1987年			
	移植～最高分げつ期	最高分げつ期～穂揃期	穂揃期～成熟期	計（移植～成熟期）	移植～最高分げつ期	最高分げつ期～穂揃期	穂揃期～成熟期	計（移植～成熟期）	移植～最高分げつ期	最高分げつ期～穂揃期	穂揃期～成熟期	計（移植～成熟期）
無窒素	6.4	5.0	2.1	13.5	4.2	4.6	3.3	12.1	3.8	4.7	0.1	8.6
慣行施肥	8.4	3.5	3.1	15.0	4.7	6.2	1.8	12.7	4.9	6.5	-0.8	10.6
3割減肥	6.6	4.3	4.3	15.2	4.0	4.5	3.3	11.8	4.6	4.2	2.3	11.1
6割減肥	6.3	2.9	5.0	14.2	4.8	4.0	4.4	13.2	4.8	6.0	0.1	10.9
10割減肥	5.9	3.8	5.1	14.8	4.2	4.6	2.5	11.3	4.0	4.9	1.9	10.8

処　理	細粒灰色低地土 1988年				中粗粒灰色低地土 1989年			
	移植～最高分げつ期	最高分げつ期～穂揃期	穂揃期～成熟期	計（移植～成熟期）	移植～最高分げつ期	最高分げつ期～穂揃期	穂揃期～成熟期	計（移植～成熟期）
無窒素	2.6	2.5	1.4	6.5	3.4	1.3	1.8	6.5
慣行施肥	4.8	6.6	1.7	13.1	3.6	6.0	1.8	11.4
3割減肥	3.9	7.3	0.7	11.9	3.3	5.8	2.9	12.0
5割減肥	3.3	6.9	0.9	11.1	3.1	6.0	1.3	10.4
連作田	3.2	5.3	1.8	10.3	3.0	5.1	2.1	10.2

基肥窒素量に大きく支配されているので，収量 650kg/10a以上の安定多収を図る場合には適正な基肥窒素量が重要となる．減肥割合別の窒素吸収パターンを多収水準のそれと対比してみると，細粒グライ土では，10割減肥区が輪換田2年目においても最高分げつ期で 4.2kg/10aと過剰であり，また3年目において穂揃期で 8.9kg/10aと不足していた．細粒灰色低地土では，慣行施肥区が最高分げつ期で若干過剰であり，5割減肥区が連作田と同様に推移した．中粗粒灰色低地土では，慣行施肥区でも過剰に推移することはなく，また5割減肥区が連作田と同様に推移した．

以上の結果から，連作田と同様の窒素吸収パターンを示したのは，細粒グライ土では，多収水準の窒素吸収パターンとの対比から推察すると，輪換田2年目までは10割減肥区，3年目は6割減肥区であり，一方，細粒および中粗粒灰色低地土では，輪換田初年目は5割減肥区であると考えられる．

(3) 土壌の種類別の基肥窒素量が収量・収量構成要素に及ぼす影響

基肥窒素量が収量・収量構成要素に及ぼす影響を土壌の種類別にとりまとめ，第6表に示した．細粒グライ土では，無窒素区の収量は慣行区に比べ，輪換田2年目までは倒伏の軽減により登熟歩合が高まり3～7％高まったが，3年目では穂数の減少により逆に7％低下した．また，基肥減肥区の収量は慣行区に比べ，輪換田初年目

第6表　土壌の種類別の基肥窒素量が収量・収量構成要素に及ぼす影響

処理	細粒グライ土 収量(kg/10a)			穂数(本/m²)			一穂着粒数			登熟歩合(%)		
年次	1985	1986	1987	1985	1986	1987	1985	1986	1987	1985	1986	1987
無窒素	508	537	482	559	425	392	82.9	78.2	70.6	71.4	79.0	90.3
慣行施肥	476	523	521	551	427	443	67.0	86.3	72.6	68.8	73.1	70.7
3 割減肥	501	542	522	524	394	416	77.6	76.9	71.9	64.3	80.8	71.3
6 割減肥	493	541	519	495	434	423	77.0	78.1	72.2	57.2	77.6	83.9
10 割減肥	534	526	517	522	414	386	77.0	84.7	67.6	71.4	77.4	84.9

処理	細粒灰色低地土 1988年				中粗粒灰色低地土 1989年			
	収量	穂数	一穂着粒数	登熟歩合	収量	穂数	一穂着粒数	登熟歩合
無窒素	459	338	63.8	92.4	430	383	59.5	94.8
慣行施肥	659	470	70.0	78.2	622	417	59.7	92.3
3 割減肥	638	420	71.2	85.0	599	423	57.3	91.9
5 割減肥	652	406	72.0	84.8	592	414	61.8	86.1
連作田	599	418	68.1	90.1	566	420	68.8	79.7

では3割および6割減肥区が約5%，10割減肥区が12%高く，2年目ではすべての減肥区で若干高く，3年目では同程度となった．ただ，輪換田3年目の登熟歩合をみると，慣行施肥および3割減肥区が約71%であり，6割および10割減肥区に比べ約16%低かった．

細粒および中粗粒灰色低地土とも，無窒素区の収量は慣行区に比べ，約30%低かった．また，減肥割合による収量の影響は小さく，すべての基肥減肥区で連作田に比べ5～10%高かった．

このように，細粒グライ土の輪換田2年目までは土壌窒素の過剰供給により倒伏し，この場合，小野ら[83,84]が指摘するように，多収性品種の導入や疎植栽培が有効であると考えられる．さらに，輪換田における増収効果は，水稲の初期生育が過剰とならないように生育量を制御することが重要であり，また，水管理の徹底により生育の健全化を図る必要があると考えられる．このことについて，高橋ら[105]，荻原[75]は窒素少肥条件下における輪換田の増収効果を認めており，この増収程度は前作物が豆科作物の場合とくに高まることを報告している．

以上の結果，水田作付に伴う土壌窒素無機化過程，水稲の窒素吸収量および収量の推移から判断すると，大豆跡輪換田における「コシヒカリ」の適正な基肥窒素施肥量は，細粒グライ土では，輪換田2年目までは慣行施肥量の10割減肥が，3年目は6割減肥が適しており，4年目以降も控え目にするのがよいと判断された．また，細粒および中粗粒灰色低地土では，輪換田初年目は5割減肥が適しており，2年目以降は慣行施肥量でよいと判断された．追肥窒素量の判定については，筆者ら[37,42]，水稲の窒素吸収パターンと土壌窒素無機化予測によるシステム施肥法の適用可能性が高いことを認めている．システム施肥法は，目標とする稲体の窒素保有量と土壌窒素供給量との差を，生育時期を追って補足していく方法である．本技術は稲－麦－大豆体系による土地利用が行われている地帯で適用できると考えられるが，多

様な土壌管理や作付体系が実施される場合には問題があると考えられ，この点については３．で検討する．

2．逐次上澄液法による輪換田土壌ケイ酸の有効化過程の解明

輪換田土壌におけるケイ酸の有効化過程の特徴を解明するため，逐次上澄液法の適用可能性について検討した．

2－1．逐次上澄液法による土壌養分測定の適用性（試験1）

1）試験方法

(1) 供試圃場および土壌

水戸（グライ土），観音台および谷和原（灰色低地土）の水稲連作田と輪換田初年目の計6圃場から，1990年春の耕起前に深さ 13cm の作土を採取し，その一部は土壌ケイ酸の有効化量を測定するために湛水培養に供し，残りは風乾処理を行い，理化学分析に供した．各土壌の理化学的特性を第7表に示した．輪換田圃場の来歴は，水戸および観音台が大豆－麦体系による畑 2年後の，谷和原が大豆作による畑1年後の圃場である．

(2) 土壌の測定条件と上澄液中への養分溶出過程

供試土壌を 4mmで篩別後，乾土 15g相当量の湿潤土を試験管（直径 30mm，高さ 75mm)にとり 42 日間にわたって湛水保温静置し（土壌と水の比 1:4.5),上澄液中への養分溶出に及ぼす上澄液のイオン交換水との交換，土

壌と水の比および培養温度の影響について検討した．上澄液のイオン交換水との交換は培養7日間ごと，無交換の 2段階，土壌と水の比は 1:2，1:4.5，1:6.5の 3段階，培養温度は 20，25，30 ℃の3段階について行い，それぞれ二価鉄，ケイ酸濃度，さらに pH，EC（2倍希釈液）を測定した．土壌と水の比を変えた時の添加水量は，1:2，1:4.5，1:6.5 がそれぞれ，39，44，49mlであった．ケイ酸の定量分析には，モリブデンブルーによる吸光光度法を用いた．

逐次上澄液法は上澄液法と同様，湛水条件下でケイ酸を測定するが，より圃場の土壌状態に類似した環境条件，すなわち灌漑により田面水が更新されるような環境条件を設定するため，上澄液のイオン交換水との交換を培養7日間ごとに行った．上澄液の採取および排除は，ピペットにより吸引して行った．なお，土壌表面にガラス繊維ろ紙を密着させることにより，イオン交換水との交換時における土壌の混濁を回避した．

2）結果および考察

（1）上澄液法と逐次上澄液法との比較

上澄液法と逐次上澄液法による，培養に伴う土壌のpH，EC，二価鉄およびケイ酸含量の推移を第8表に示した．培養 42 日間にわたる測定の結果，pHは，上澄液法が培養に伴い若干増加し，培養 42 日後の pH は平均6.3 であるのに対し，逐次上澄液法では大きな変動はな

第7表　供試土壌の理化学的特性

土壌の種類		土性	容積重 (g/ml)	pH (H_2O)	可給態リン酸*1 (mg/100g 乾土)	可給態ケイ酸*2 (mg/100g 乾土)	アンモニア化成量*3 (mg/100g 乾土)
グライ土	連作田	LiC	0.89	4.7	26.6	31.4	23.1
(水戸)	輪換田*4	LiC	1.02	5.7	29.3	46.0	15.7
灰色低地土	連作田	CL	1.00	5.7	20.8	71.4	9.2
(観音台)	輪換田*4	CL	1.03	5.3	32.1	74.8	8.1
灰色低地土	連作田	CL	0.97	5.1	19.0	43.0	8.0
(谷和原)	輪換田*5	CL	0.99	5.0	20.8	45.3	8.5

*1 ブレイ第2法.
*2 N酢酸緩衝液浸出法.
*3 風乾土 30℃ 4週間，湛水培養.
*4 大豆一麦　体系による畑2年後.
*5 大豆 畑1年後.

第8表　上澄液法と逐次上澄液法による，培養に伴う養分の溶出過程

土壌の種類		培養法	pH(H_2O)			EC(mS/cm)			二価鉄(mg/100g 乾土)			ケイ酸(mg/100g 乾土)		
		培養日数	14	28	42	14	28	42	14	28	42	14	28	42
グライ土	連作田	上澄液	5.7	6.0	6.2	0.08	0.19	0.33	2.7	12.5	35.5	8	9	10
(水戸)		逐次上澄液	5.9	5.6	6.0	0.05	0.08	0.10	1.4	5.7	20.1	12	20	28
	輪換田	上澄液	6.1	6.3	6.5	0.12	0.23	0.38	2.4	8.9	15.8	6	8	10
		逐次上澄液	6.1	5.9	6.1	0.08	0.09	0.11	1.7	2.7	7.2	13	22	32
灰色低地土	連作田	上澄液	5.9	6.2	6.3	0.09	0.15	0.25	0.6	3.3	9.3	4	5	6
(観音台)		逐次上澄液	6.1	5.9	6.1	0.06	0.07	0.07	1.6	2.1	3.0	8	14	19
	輪換田	上澄液	5.8	6.1	6.2	0.09	0.15	0.19	1.6	4.5	8.3	5	6	7
		逐次上澄液	6.0	5.8	6.0	0.04	0.04	0.04	1.6	1.9	2.3	10	17	23

逐次上澄液法による二価鉄とケイ酸含量は，累積値を示す.

く平均 6.0であった．ECは，上澄液法では培養に伴い増加し，培養 42 日後の EC は平均 0.28ms/cmであり，逐次上澄液法（平均 0.08ms/cm）の約 3 倍となった．二価鉄含量は EC と同様，上澄液法のほうが逐次上澄液法に比べ高く推移し，培養 42 日後の二価鉄含量は上澄液法が平均 17.2 mg/100g 乾土であり，逐次上澄液法（平均 8.1mg/100g乾土）の約 2倍となった．ケイ酸含量は逆に，上澄液法のほうが逐次上澄液法に比べ低く推移し，培養 42 日後のケイ酸含量は上澄液法が平均 8mg/100g 乾土であり，逐次上澄液法（平均 25mg/100g乾土）の約 3 分の 1となった．このように，上澄液法によるケイ酸の溶出過程が逐次上澄液法に比べて低く推移した原因として，両培養法間で pH の推移に大差がなく，また，ECは上澄液法が逐次上澄液法に比べ高く推移したことから，上澄液中へ溶出する多量のイオンがケイ酸の溶出を抑制したものと考えられる．岡山・吉野[78]は，土壌溶液中へ溶出するケイ酸と付随イオンの関係を検討した結果，ケイ酸の溶出に，重炭酸イオン，カルシウムイオンおよび鉄イオンなどが関与しており，中でもカルシウムイオンの役割が土壌 pH とともに重要であると報告している．これらのことから，土壌ケイ酸の有効化過程を把握するには，上澄液法ではケイ酸の溶出が抑制されると考えられるので適用が難しいが，逐次上澄液法ではこのような影響が回避されるので適用可能性が高いと考えられた．

(2) 土壌と水の比，および培養温度の影響

土壌と水の比がケイ酸の溶出過程に及ぼす影響を，逐次上澄液法を用いて灰色低地土水田（観音台）について調査し，結果を第4図に示した．土壌と水の比が 1: 2 から 1: 6.5 の範囲では，この比が大きいほどケイ酸含量が高く推移したが，この内 1: 2 から 1: 4.5 の範囲ではその変化が比較的小さかった．この傾向は，土壌の種類を問わず同様に認められた．したがって，土壌と水の比としては，上澄液が十分確保でき，しかも比較的安定した測定値が得られる 1: 4.5 が適当と考えられた．

培養温度がケイ酸の溶出過程に及ぼす影響を上記と同じ灰色低地土水田（観音台）について調査し，結果を第5図に示した．連作田および輪換田とも，20℃から 30℃の温度範囲では，温度が高いほどケイ酸含量が高く推

第4図　土壌と水の比がケイ酸の溶出過程に及ぼす影響
（灰色低地土，観音台，連作田）

第5図　培養温度がケイ酸の溶出過程に及ぼす影響
（灰色低地土，観音台）

移する傾向が認められた．また，グライ土水田についても同様の傾向が認められた．住田，大山[97]は上澄液法によるケイ酸濃度に対する培養温度の影響を調査した結果，これと同様の傾向を認め，暖地と寒地では土壌のケイ酸供給力に差が生ずるものと推定している．しかし，圃場におけるケイ酸溶出量に及ぼす温度の影響については論じていない．この点については，試験 2で検討する．

2－2．圃場における土壌ケイ酸の溶出過程の推定（試験2）

1）試験方法

グライ土および灰色低地土水田土壌について，逐次上澄液法を用いて培養87日間にわたる二価鉄およびケイ酸含量を調査し，土壌ケイ酸の溶出過程を解析した．さらに，この実験データを基に，圃場における土壌ケイ酸の溶出過程を推定する方法について検討した．

2）結果および考察

(1) 逐次上澄液法による上澄液中への養分溶出過程

逐次上澄液法による土壌の二価鉄，ケイ酸の溶出曲線をそれぞれ，第6，7図に示した．二価鉄含量は，グライ土水田のほうが灰色低地土水田に比べて高く推移し，培養87日後の二価鉄含量はグライ土水田が31～73mg/100g乾土であるのに対し，灰色低地土水田は8～20mg/100g乾土であった．また，各土壌とも輪換田のほうが連作田に比べて低く推移した．一方，ケイ酸含量もグライ土水田のほうが灰色低地土水田に比べて高く推移し，培養87日後のケイ酸含量はグライ土水田が54～59mg/100g乾土であるのに対し，灰色低地土水田は32～43mg/100g乾土であった．また，各土壌とも輪換田のほうが連作田に比べて高く推移した．逐次上澄液法で求めたこれら養分の輪換田，連作田の関係が圃場レベルで

第6図　逐次上澄液法による土壌の二価鉄の溶出曲線

第7図　逐次上澄液法による土壌ケイ酸の溶出曲線

も同様に認められるか否かについては，試験3で検討する．

(2) 室内実験におけるケイ酸溶出過程の解析

14日ごとの培養時期別のケイ酸溶出速度を算出し，第9表に示した．いずれの土壌とも培養に伴い土壌ケイ酸の溶出量は漸増傾向にあり（第7図），また溶出速度は培養後期になるとほぼ一定の値を示した．この平衡に達する時期は連作田および輪換田とも，グライ土，灰色低地土水田がそれぞれ，培養14日頃，42日頃以降であった．ケイ酸の溶出過程が指数曲線を示したので，指数式を溶出曲線へあてはめた．解析の結果，ケイ酸溶出量は次式で近似することができた．

$$Y = kX^{n}$$

Y: 時間X(day)までに溶出したケイ酸量(mg/100g乾土)

k: 培養初期の溶出速度を示す定数(day^{-1})

n: 溶出曲線の型を示す定数

得られた定数k，nの値を第10表に示した．kは，

第9表　培養時期別のケイ酸溶出速度　(mg/100g/day)

土壌の種類		培養時期 (day)				
		0～14	14～28	28～42	42～56	56～70
グライ土	連作田	0.871	0.607	0.585	0.614	0.664
(水戸)	輪換田	0.942	0.692	0.700	0.685	0.692
灰色低地土	連作田	0.605	0.416	0.392	0.321	0.335
(観音台)	輪換田	0.735	0.500	0.442	0.342	0.321
灰色低地土	連作田	0.650	0.478	0.407	0.300	0.292
(谷和原)	輪換田	0.870	0.635	0.557	0.407	0.385

第10表　ケイ酸溶出曲線の指数式*の定数

土壌の種類		k (day^{-1})	n
グライ土	連作田	1.09	0.883
(水戸)	輪換田	1.13	0.902
灰色低地土	連作田	1.06	0.777
(観音台)	輪換田	1.15	0.800
灰色低地土	連作田	1.07	0.792
(谷和原)	輪換田	1.17	0.847

* $Y=kX^n$.

土壌の種類による差異は認められないが，輪換田のkは平均 $1.15d^{-1}$であり，連作田の平均 $1.07d^{-1}$より高い値を示した．nは，グライ土水田が 0.88 ～0.90であり，灰色低地土水田の 0.77 ～0.84より高い値を示し，また，輪換田のほうが連作田より高い値を示した．このように，ケイ酸の溶出過程の特徴が定数k，nの値により理解できる．

さて，土壌中のケイ酸について，Alexander[1] は，非晶質ケイ酸の水溶液では，単分子状ケイ酸と固相との間には平衡関係があり，また pH 1 ～ 8 の間では溶解度が一定であると報告している．また，金野[51] は，土壌の種類により溶液中のケイ酸濃度が異なるのは土壌の風化ゲルの組成が違うためであるとし，さらに，ケイ酸と三二酸化物との沈殿反応のメカニズムとして，三二酸化物の表面でのケイ酸の重合反応を推定している．これらによれば，輪換田土壌では，ケイ酸の重合物の結合水が変

化し，これが解重合することにより可溶化が進むものと推定される．そして，①ケイ酸の溶出速度が培養後期になるとほぼ平衡に達すること，さらに，②溶出過程は輪換田のほうが連作田より高く推移することが容易に理解される．また，①の結果は，指数式の溶出曲線への適用がほぼ妥当であることを示唆するものでもある．

(3) 圃場におけるケイ酸溶出過程の推定

圃場における土壌ケイ酸の溶出過程を考える場合，2－1.2)-(2) で示したように，土壌と水の比および温度の影響を考慮する必要のあることが，室内実験の結果から示唆された．前者の土壌と水の比が圃場のどのような土壌状態に相当するのかは興味深い問題であり，今後の研究課題と考える．そこで，室内実験における温度要因の結果を用いて，圃場におけるケイ酸溶出量に対する温度の影響について検討した．移植から成熟期までのケイ酸溶出量は，この生育期間の日数と，得られた指数式から算出した．観音台の輪換田土壌のケイ酸溶出量は，30℃の温度条件では 41.7mg/100g乾土と算出され，また20℃の温度条件では，20℃における輪換田のケイ酸の溶出過程が連作田の 30 ℃のそれとほぼ一致する（第 5 図）ことから，37.9mg/100g 乾土と推定された．すなわち，温度 10 ℃の下降が成熟期までのケイ酸溶出量を 3.8 mg/100g 乾土，比率では約 9 %減少させることになる．一方，生育期間中の作土層の日平均地温が，観音台の測定結果 (1990年）によると平均 24.6 ℃であった．

したがって，30℃との差は 5.4℃であり，成熟期までのケイ酸溶出量を 2.0 mg/100g減少させるだけであり，この範囲の温度差では，成熟期までのケイ酸溶出量に及ぼす温度の影響はわずかであると考えられた．

以上の結果，圃場における土壌ケイ酸の溶出過程は，30℃の温度条件下で，逐次上澄液法により求めた指数式の溶出曲線から推定できると判断された．

2－3．圃場における土壌ケイ酸の有効化予測と水稲のケイ酸吸収との関係（試験3）

1）試験方法

(1) 供試品種および施肥量

水戸では「コシヒカリ」を，観音台では「初星」を，谷和原では「むさしこがね」を供試した．水稲の栽培にあたっては各圃場とも窒素は無施用とし，リン酸およびカリウムは慣行法で行い，各々 8kg/10aを施用した．最高分げつ期，穂揃期および成熟期に水稲株を採取し，水稲体のケイ酸吸収量を調査した．水稲吸収ケイ酸量は，主として土壌および施肥ケイ酸に由来すると考えられるが，ここでは田畑輪換による土壌のケイ酸供給力変動を解明する視点から，土壌ケイ酸の溶出推定量とケイ酸吸収量との関係について解析した．また，生育期間中に水稲株間土壌を採取し，土壌還元発達の指標としての土壌の二価鉄含量，および上澄液ケイ酸含量を調査し，室内実験で求めたこれら養分の輪換田，連作田の関係が圃場レベルでも同様に認められるか否かについて検討した．なお，有機物，リン酸・ケイ酸質資材などは転換畑期間を含め無施用とした．

(2) 土壌の上澄液ケイ酸および作物体ケイ酸の測定方法

土壌の上澄液ケイ酸は，30℃，2週間湛水保温静置し，その上澄液のケイ酸濃度を測定して求めた．作物体

ケイ酸は，試料を硫酸－過酸化水素水で湿式分解し，熱水を加えてろ過する．そして残渣を灼熱し，重量法により粗ケイ酸として求めた[90]．

2）結果および考察

(1) 圃場における養分動態と逐次上澄液法による上澄液中への養分溶出過程

灰色低地土水田について，生育期間中における土壌の二価鉄および上澄液ケイ酸含量の推移を第 8図に示した．２－２．2)-(1)で示した室内実験の結果と同様，二価鉄含量は輪換田のほうが連作田に比べて低く推移し，

第8図　生育期間中における土壌の二価鉄および上澄液ケイ酸含量の推移
（灰色低地土，観音台）

上澄液ケイ酸含量はこれと逆に輪換田のほうが連作田に比べて高く推移した．この傾向は，グライ土水田についても同様に認められた．

以上の結果，逐次上澄液法で求めた二価鉄およびケイ酸含量の輪換田，連作田の関係が圃場においても同様に認められ，さらに，前記のとおり逐次上澄液法では上澄液法でみられたケイ酸の溶出抑制の影響が回避された．これらの実験事実は，圃場における土壌ケイ酸の有効化過程を解明する場合，逐次上澄液法による測定が妥当であることを示唆している．

(2) 逐次上澄液法による土壌ケイ酸の溶出推定量と，水稲のケイ酸吸収量との関係

土壌ケイ酸の溶出推定量は，ケイ酸溶出曲線から移植後日数に相当する溶出量を求め，その値を圃場の作土深に容積重を乗じた作土重量当たりに換算して算出した．ケイ酸溶出量の水稲による利用率は不明であり，今後の研究課題と考えるが，100 %と仮定して算出した結果を第 11 表に示した．土壌ケイ酸の溶出推定量は，グライ土水田のほうが灰色低地土水田に比べて高く推移し，成熟期ではグライ土水田が 93 ～114kg/10a であるのに対し，灰色低地土水田が 49 ～98kg/10aであった．また，各土壌とも輪換田のほうが連作田に比べて高く推移した．

水稲のケイ酸吸収量は，グライ土水田のほうが灰色低地土水田に比べて高い傾向があり，また成熟期では輪換

第11表　逐次上澄液法による水稲吸収ケイ酸量の推定値と実測値との関係

(kg/10a)

土壌の種類		最高分げつ期		穂揃期		成熟期	
		推定値	実測値	推定値	実測値	推定値	実測値
グライ土	連作田	43.4	16.7	62.7	70.2	93.3	—
(水戸)	輪換田	64.6	43.0	79.7	—	114.1	110.1
灰色低地土	連作田	25.1	11.1	35.3	47.1	49.3	75.3
(観音台)	輪換田	30.6	15.2	43.4	55.8	55.9	84.3
灰色低地土	連作田	26.0	5.6	45.0	65.6	67.1	98.1
(谷和原)	輪換田	35.6	7.8	64.2	75.5	98.3	139.2

表中の—はデータがないことを表す.

田が 84 ～139kg/10a であり，連作田の 75 ～98kg/10a より高かった.

穂揃期および成熟期では，土壌ケイ酸の溶出推定量がケイ酸吸収量よりも少ない傾向が認められるものの，土壌の種類を問わず溶出推定量が多いほどケイ酸吸収量が多く，このことは逐次上澄液法による測定が土壌ケイ酸の有効化予測を行う有効な方法であることを示している．溶出推定量がケイ酸吸収量よりも少ない原因の一つには，灌漑水からの供給量を無視した点にあると考えられた．そこで，灌漑水からの供給量を考慮した水稲吸収ケイ酸量の推定について以下検討する．

(3) 灌漑水からの供給量を考慮した水稲吸収ケイ酸量の推定値と，実測値との関係

水稲吸収ケイ酸量の給源は主に土壌であるが，灌漑水からの供給量も無視できない[48]．したがって，水稲吸収ケイ酸量を推定する際，水由来と土壌由来のケイ酸量を

合わせたものとして考える必要がある．灌漑水からの供給量は，灌漑水中のケイ酸濃度を移植後1か月頃に2回測定した結果では，水戸，観音台および谷和原がそれぞれ，14.3，13.1，18.2 ppmであり，10a当りの灌漑水量をいずれも 1,200t として算出するとそれぞれ ,17.2，15.7，21.8kg/10aとなった．各生育時期の水由来ケイ酸量は，灌漑水からの供給量を，全生育期間に対する各生育時期の日数で比例配分して求めた．土壌由来ケイ酸量は，前記のとおりである．水由来と土壌由来のケイ酸量を合わせて求めた推定値と，実測値との関係を第 12 表に示した．

推定値と実測値とは，最高分げつ期を除き，穂揃期と成熟期においてほぼ一致した．最高分げつ期でそれほど一致しなかった原因として，生育初期では，根群が作土層に蔓延してなく，またケイ酸吸収力が弱いためと考えられる．水稲が強いケイ酸吸収能力を持っていることについては，奥田・高橋[80]が認めており，その生育期間中の変化については，長谷部・飯村[91]が水耕試験の結果から，ケイ酸は生育初期よりも後期のほうが積極的に吸収されることを認めている．本圃場試験の結果でも，第 13 表に示したように，ケイ酸吸収力は生育初期で弱く，また輪換田のほうが連作田より強いことが認められた．この原因の一つとして，輪換田は連作田に比べて土壌の還元発達が緩慢であり（第 8 図），水稲の根活力が生育後期までも高く維持されたことが考えられる．

第12表　灌漑水からの供給量を考慮した水稲吸収ケイ酸量の推定値と実測値との関係　(kg/10 a)

土壌の種類		最高分げつ期				穂揃期				成熟期			
		推定値			実測値	推定値			実測値	推定値			実測値
		水由来	土壌由来	計		水由来	土壌由来	計		水由来	土壌由来	計	
グライ土	連作田	9.5	43.4	52.9	16.7	12.6	62.7	75.3	70.2	17.2	93.3	110.5	—
(水戸)	輪換田	8.4	64.6	73.0	43.0	11.6	79.7	91.3	—	17.2	114.1	131.3	110.1
灰色低地土	連作田	6.6	25.1	31.7	11.1	10.2	35.3	45.5	47.1	15.7	49.3	65.0	75.3
(観音台)	輪換田	6.6	30.6	37.2	15.2	10.2	43.4	53.6	55.8	15.7	55.9	71.6	84.3
灰色低地土	連作田	6.6	26.0	32.6	5.6	13.2	45.0	58.2	65.6	21.8	67.1	88.9	98.1
(谷和原)	輪換田	6.6	35.6	42.2	7.8	13.2	64.2	77.4	75.5	21.8	98.3	120.1	139.2

表中の—はデータがないことを表す.

第13表　乾物 1g 生産当たりのケイ酸吸収量

(mg/g)

土壌の種類		生育時期		
		移植～最高分げつ期	最高分げつ期～穂揃期	穂揃期～成熟期
灰色低地土	連作田	59	88	79
(観音台)	輪換田	97	108	97
灰色低地土	連作田	70	110	116
(谷和原)	輪換田	77	110	127

以上のように，輪換田における土壌ケイ酸の有効化過程について，逐次上澄液法を用いて検討した結果，土壌ケイ酸の溶出量は，輪換田のほうが連作田に比べて高く推移し，その有効化予測には，穂揃期以降の時期において逐次上澄液法が適用できると判断された．すなわち，田畑輪換の繰り返しは土壌ケイ酸の動態を大きく変動させるが，逐次上澄液法の適用により，土壌ケイ酸の有効化過程の定量的把握が可能になるものと考えられる．また，逐次上澄液法の測定は，ケイ酸資材の溶出過程の検討にも応用できるものと考えられる．今後，ケイ酸の合理的な肥培管理を確立する場合，ケイ酸資材および土壌のケイ酸溶出量の水稲による利用率と，根域の拡大および根活力との関係を明らかにする必要があろう．

3．畑地土壌化指数による土壌養分動態の評価

田畑輪換の前歴の異なる輪換田土壌において，畑地土壌化指数による土壌養分供給力変動の評価法について検討し，さらに水稲の養分吸収との関係を調査し，この評価法の適用可能性についても検討した．

1）試験方法

(1) 供試圃場および土壌

1981年から稲－麦の二毛作を基幹とし，水稲の代わりに夏作物としての大豆を水田・畑期間が種々異なるように導入して，田畑輪換の前歴の異なる圃場を作出した．本圃場は，佃ら[109]が田畑輪換において，水田・畑期間の組み合わせと転換畑作物の生産力との関係を明らかにするため，8年間にわたり水田期間（1～3年）と畑期間（1～4年）とを組み合わせ，調査・研究を行ってきたものである．田畑輪換の前歴の組み合せは第9図に示したとおり10種類である．1989年から1991年にかけて，上記圃場について，5月下旬の耕起前に土壌試料（作土層，0～13cm）を採取し，理化学分析に供した．

連作田と輪換田圃場について水稲の栽培を行い，1989年には輪換田初年目の，1990年には輪換田初年および2年目の，1991年には輪換田初年～3年目の圃場を用いた．生育期間中に水稲株間土壌を採取し，土壌の可給態リン酸含量および上澄液ケイ酸含量を調査した．また，

第9図　圃場の田畑輪換の前歴と畑地土壌化指数との関係
＊水中沈底容積(ml/g)を示す.
1990年度の調査結果を示す.

生育時期別の水稲の養分吸収量を調査した.

本圃場は，農業研究センター構内に設置された有底コンクリート枠を用いたもの（200m²，10区画）で，土壌は灰色低地土造成相である.

(2) 供試品種および肥培管理

水稲品種「初星」を用いて無窒素栽培を行い，リン酸，カリウムの肥培管理は慣行法で行い，各々 8kg/10a を施用した．なお，有機物，リン酸・ケイ酸質資材は

1981 年以降無施用である．最高分げつ期，穂揃期および成熟期に水稲株を採取し，窒素，リン酸およびケイ酸吸収量を調査した．

(3) 分析方法

ア　畑地土壌化指数

畑地土壌化の程度に応じて水中沈定容積が変動すると考えられ，このことは水中沈定容積値の相対化により畑地土壌化の程度を客観的に示すことができることを示唆している．畑地土壌化指数は，青峰の方法[81]により水中沈定容積を測定し，連作田土壌の値を 0，永年畑土壌の値を 1 として，対象とする輪換田土壌の値を 0 ～ 1 に相対化したものである．すなわち，畑地土壌化指数は次の式で示される．

$$I = (V_w - V_s)/(V_w - V_D)$$

ここで，I は畑地土壌化指数を，V_w，V_s，V_Dはそれぞれ，連作田土壌・湿潤土，輪換田土壌・湿潤土，輪換田土壌・風乾土の水中沈定容積 (ml/g)を表している．

イ　土壌分析

アンモニア化成量は，湿潤土および風乾土を 30 ℃で 4 週間湛水培養し，無機化するアンモニア態窒素量を水蒸気蒸留法により定量した．可給態リン酸は，湿潤土および風乾土を用いブレイ第 2 法[71]により定量した．上澄液ケイ酸は，湿潤土を 30 ℃で 2週間湛水保温静置し，その上澄液のケイ酸濃度をモリブデンブルーによる吸光光度法により定量した．これとは別に，逐次上澄液

法による培養 70 日間にわたる土壌のケイ酸含量の推移は，2－1．1)の方法により定量した．

ウ　作物体分析

試料を硫酸－過酸化水素水で湿式分解後，窒素とリン酸はオートアナライザーにより[98]，ケイ酸は重量法により粗ケイ酸として求めた[90]．

2) 結果および考察

(1) 畑地土壌化指数に及ぼす田畑輪換の前歴の影響

田畑輪換の前歴の異なる圃場における畑地土壌化指数の変化を 1990 年についてとりまとめ，第 9図に示した．田畑輪換の前歴の異なる圃場は畑地土壌化指数により類型化することができ，畑地土壌化指数は，各処理区とも 0 ～ 0.42 の範囲にあり，輪換田初年が 0.3以上，輪換田 2 年が 0.1以上 0.3未満，そして連作田が 0 に包含された．1989年および 1991 年についても同様に，この範囲に包含された．このように，畑地土壌化指数が単に過去 9 か年の水田あるいは畑の作付年数により決定されず，これは土壌の乾燥履歴が水田復元の畑地土壌化指数に及ぼす影響が異なるためと考えられる．

(2) 土壌養分と畑地土壌化指数との関係

土壌養分と畑地土壌化指数との関係について 3 か年の結果をとりまとめ，第 10 図に示した．湿潤土アンモニア化成量，可給態リン酸および上澄液ケイ酸含量は畑地土壌化指数が 0.1以上の範囲においてこれと正の相関が

第10図　土壌中養分含量と畑地土壌化指数との関係

○，1989年；△，1990年；□，1991年.

回帰式は畑地土壌化指数0.1以上のデータより求めた.

* 5%，** 1%，*** 0.1% 水準で有意差があることを示す.

認められ，とくに上澄液ケイ酸含量で密接に認められた．逐次上澄液法による土壌ケイ酸の溶出過程を第 11 図に示した．畑地土壌化指数が高いほど高く推移し，その溶出曲線は指数式（$Y=kX^n$）で近似できた．また，その定数を第 14 表に示した．k は畑地土壌化指数が高いほど大きい傾向が認められた．一方，風乾土アンモニア化成量は逆に，畑地土壌化指数が高いほど減少する傾向が認められた．

第11図　畑地土壌化指数別の逐次上澄液法による土壌ケイ酸の溶出曲線

第14表　ケイ酸溶出曲線の指数式＊の定数

畑地土壌化指数	k (day^{-1})	n
0.41	2.67	0.587
0.26	2.09	0.639
0.24	1.54	0.670
0	1.53	0.650

＊　$Y = kx^n$

生育期間中における土壌の可給態リン酸含量および上澄液ケイ酸含量の推移を調査し，1991年の結果を第 12 図に示した．前記の室内実験と同様，可給態リン酸含量および上澄液ケイ酸含量とも畑地土壌化指数が高いほど高く推移し，とくに上澄液ケイ酸含量で顕著に認められた．同様な傾向は 1990 年についても認められた．

諸遊[56]は，水田転換に伴う土壌の理化学性の変化についてとりまとめている．これによると，土壌窒素無機化量は，畑地化の進行とともに土壌の易分解性有機物含量が減少するため，風乾土を培養すると連作田土壌より転換畑土壌のほうが少ない場合が一般的であるが，この場合でも，湿潤土を培養すると転換畑土壌のほうが多い場合があるとしている．さらに，リン酸については，畑状態ではそれが鉄やアルミニウムと結合して有効性が低下しやすい条件下にあるにもかかわらず，転換年次とともに有効性リン酸含量が増加する事例が多いとしている．本試験における土壌窒素供給力の変化は，畑地化に

第12図　畑地土壌化指数別の土壌中養分含量の推移（湿潤土）
1991年度の調査結果を示す.

よる土壌有機態窒素の形態変化や易分解性有機物含量の消耗に起因しているものと考えられる．また，リン酸含量増加の原因として，木村[31]は転換畑期間中の多量のリン酸質資材の投入によるものであると報告しているが，本試験の結果では，畑期間においても資材施用は行っていないにもかかわらず可給態リン酸含量が畑地化の進行とともに増加しており，これらの結果と異なる．この理由については興味ある問題であり，今後の研究課題と考える．上澄液ケイ酸含量は畑地化の進行とともに増

加しており，この傾向は２－２．2)-(1)で述べたように，輪換田土壌のほうが連作田土壌より多いという結果と一致した．上澄液ケイ酸含量増加の原因は，畑地化に伴い非晶質ケイ酸の結合水が変化し，構造や凝集状態に変化を生じて可溶化するためと推定される．

このように，田畑輪換に伴う土壌の化学性の変化には土壌の乾燥履歴が反映しており，これを客観的に評価する手法として畑地土壌化指数は有効であることが示された．

(3) 土壌養分の畑地土壌化指数による類型化と水稲の養分吸収量との関係

畑地土壌化指数別の水稲の生育時期別養分吸収量を1990年についてとりまとめ，結果を第 15 表に示した．窒素，リン酸およびケイ酸吸収量はいずれも，とくに生育後期において畑地土壌化指数が大きいほど高く，同様

第15表　畑地土壌化指数別の生育時期別養分吸収量

養分	畑地土壌化指数	標本数	養分吸収量 (kg/10a) 移植～穂首分化期	穂首分化期～穂揃期	穂揃期～成熟期	計（移植～成熟期）
窒素	0.3≦	3	1.98±0.28	3.32±0.31	3.20±0.51	8.50±0.79
	0.1≦～<0.3	4	1.68±0.21	2.73±0.56	2.49±0.22	6.99±0.16
	<0.1	1	1.37	3.21	2.48	7.06
リン酸	0.3≦	3	0.67±0.11	2.17±0.13	1.22±0.33	4.06±0.32
	0.1≦～<0.3	4	0.65±0.06	1.91±0.21	1.51±0.43	4.07±0.27
	<0.1	1	0.55	2.14	0.99	3.68
ケイ酸	0.3≦	3	6.7 ±1.1	48.2 ±0.3	35.3 ±10.0	90.2 ±10.3
	0.1≦～<0.3	4	6.5 ±0.6	42.7 ±4.9	25.3 ± 6.8	74.5 ± 9.9
	<0.1	1	5.1	42.0	28.2	75.3

1990年の調査結果を示す．

な傾向は 1989 年および 1991 年についても認められた．土壌養分の畑地土壌化指数による分類が水稲の養分吸収と対応しており，これは本評価法適用の妥当性を支持しているものと考えられる．

以上の結果，畑地土壌化指数の指標化により，田畑輪換の前歴を問わず，輪換田土壌の窒素，リン酸およびケイ酸供給力の変動が予測できることが明らかになった．本技術は畑地への転換により土壌の畑地化がある程度進行する地帯，少なくとも積雪地帯を除く，細粒～中粒質の灰色低地土の二毛作地帯に適用できると考えられる．

第２章　安定・持続的高生産力を引き出す水田・畑期間の究明

水田の総合生産力の向上を図るため，田畑輪換による水田の高度利用が集落等の一定の広がりの中で行われている．その取り組み内容をみると，ブロックローテーション，すなわち地域の水田全体を複数のブロックに等分し，転作するブロックを毎年移動させて地域の水田全体にわたって転作を一巡させる方法が大部分を占めている[61,68]．この田畑輪換方式では，集団的水管理が可能となることにより用排水管理が容易となることや，隣接水田から転換畑への水の侵入がないことなどの利点がある．しかし，石川県における水田面積 44,000 haの内，グライ土が 58 %と半分以上を占めており[22]，転換畑面積の拡大に伴い，排水不良な湿田タイプの圃場においても基幹作物の大麦および大豆を作付せざるを得ない状況にある．土壌条件に応じた排水改良対策が十分行われていないこともあり，それらの生育・収量は低く，しかも年次変動が大きい．また，転換畑作物の生産性向上が畑転換２年目から期待できる地域・土壌についても，一律的に畑転換１年の後水田に復元される場合が多く，水稲および転換畑作物を通じた地域全体の総合生産力の向上が不可能となっている．このため，安定かつ持続的な

高生産力を引き出す最適な水田・畑期間が求められている．佃ら[109]は田畑輪換において，水田・畑期間の組み合わせと転換畑作物の生産力との関係を明らかにするため，8年間にわたり水田期間（1～3年）と畑期間（1～4年）とを組み合わせ，前歴が異なる区の生産力を1988年に比較した．その結果，大豆の安定生産のためには，水田期間2～3年の田畑輪換が有効であることを報告している．しかし，田畑輪換が水稲の生産力に及ぼす影響，田畑輪換に伴う土壌養分供給力の変動と水稲の生産力との関係については論じていない．

一方，輪換田水稲に着目すると，その生育は連作田に比べ初期から旺盛で，多収である事例が多い[54,85,96,106,108,116,117]．しかし，畑期間中に生成した亀裂による漏水過多や土壌窒素の過剰供給のため，収量が必ずしも増加しない場合がある[8,100]．北陸地域における輪換田の施肥基準[38,69]によれば，重粘質グライ土の輪換田初年目では土壌窒素の過剰供給のため，コシヒカリの作付は不可能としている．小野ら[83,84]は輪換田における水稲栽培技術として，多収性品種の導入や疎植栽培が有効であるとしている．これら収量の増減は，土壌の種類，田畑輪換の前歴および気象型などにより大きな影響を受けると考えられ，これら不安定要因の解消が求められている．

そこで，上記の佃らが実施した試験に引き続き，田畑輪換の前歴の異なる灰色低地土水田において，田畑輪換

に伴う土壌養分供給力の変動を解明し，さらに水稲の生育・収量との関係を解析して，安定かつ持続的な高生産力を引き出す田畑輪換方式について検討した．

1．灰色低地土水田における田畑輪換による土壌養分動態と最適な水田・畑期間

田畑輪換の前歴の異なる灰色低地土の輪換田土壌において，田畑輪換に伴う土壌養分および土壌環境の影響を明らかにし，さらに水稲の生育・収量との関係を解析し，安定かつ持続的な高生産力を引き出す水田・畑期間について検討した．

1）試験方法

(1) 供試圃場および土壌

1981年から稲－麦の二毛作を基幹とし，水稲の代わりに夏作物としての大豆を水田・畑期間が種々異なるように導入して，田畑輪換の前歴の異なる圃場を作出した．土壌は灰色低地土造成相であり，第1章の 3．で供試した圃場と同一である．供試圃場の田畑輪換の前歴は第13図に示したとおりである．田畑輪換の前歴は，連作田(A)，畑長期導入田 (B)，畑短期導入田 (C- 1～5)，田畑交互導入田 (D)の4つの形態に大別された．1989年から 1992 年にかけて，上記圃場について，5 月下旬の耕起前に土壌試料（作土層，0 ～ 13 cm）を採取し，4mm で篩別後，その一部は上澄液ケイ酸含量および土壌窒素無機化量を測定するために湛水培養し，さらに畑地土壌化指数の分析に供試し，残りは風乾処理を行い，理化学分析に供した．データを田畑輪換の前歴別にとりまと

第13図　供試圃場の田畑輪換の前歴

，水田；　，畑．

め，畑短期導入田の値は C-1・2・3の3つの平均値で示した．また，生育期間中の土壌Eh（深さ 5cm）は，1991年に連作田および輪換田初年～3年目の圃場（A，C-2・4・5，D)について調査し，田畑輪換の土壌環境および土壌養分に及ぼす影響について解析した．

(2) 供試品種および肥培管理

連作田および輪換田圃場について，水稲品種「初星」を用いて無窒素栽培を行った．輪換田としては，B，C-1・2，Dの圃場を用い，輪換田初年目から3年目にかけての水稲連作に伴う生育・収量および窒素吸収量の推移を調査した．データを田畑輪換の前歴別にとりまとめ，畑短期導入田の値は C-1・2の2つの平均値で示した．リン酸，カリウムの肥培管理は慣行法で行い，各々 8kg/10a を施用した．幼穂形成期，穂揃期および成熟期に水

稲株を採取し，窒素吸収量を調査した．冬作の大麦は1989～ 1991 年の間も各圃場とも作付し，窒素，リン酸，カリウムを各々 10 kg/10a施用した．なお，有機物および作物残渣，リン酸・ケイ酸質資材は1981年以降施用していない．1988年以前の水稲，大豆，麦の施肥量（窒素，リン酸，カリウム）はそれぞれ kg/10a で表して，(10 ～12, 8, 10 ～12), (3, 10 ,10), (10 ～13, 8 ～10, 10～13) である．

(3) 分析方法

土壌の全炭素は CN コーダーにより乾式燃焼法で，交換性塩基含量は1 N酢酸アンモニウム溶液で抽出後，原子吸光光度法により定量した[71]．可給態リン酸は風乾土を用いブレイ第2法[71]を，上澄液ケイ酸は乾土 15g相当量の湿潤土を試験管（直径 30mm, 高さ 75mm)にとり，30℃で2週間湛水保温静置し，その上澄液のケイ酸濃度をモリブデンブルーによる吸光光度法により定量した．また，アンモニア化成量は，乾土 15g相当量の湿潤土および風乾土を上記の試験管にとり 30 ℃で4週間湛水培養し，生成された窒素無機化量を 10 %塩化カリウム溶液で抽出後，水蒸気蒸留法により定量した．畑地土壌化指数は第1章の 3. の方法に準じ，長野間・諸遊[60]により提案された方法を用いた．すなわち，水中沈底容積を測定し，連作田土壌の値を0，永年畑土壌の値を1として，対象とする輪換田土壌の値を0～1に相対化して求めた．

作物体の全窒素は、試料を硫酸－過酸化水素水で湿式分解後，オートアナライザーにより測定した[98]．

土壌Ehの測定には，白金電極を用いた[82]．作土内部（深さ 5cm）に白金電極を各圃場3本ずつ設置し，生育期間中の土壌Ehを経時的に測定した．

2）結果および考察

(1) 田畑輪換に伴う土壌養分の推移

田畑輪換の前歴別の，田畑輪換に伴う土壌養分指数の推移を第 14 図に示した．連作田における土壌養分の 4 か年の標準偏差値が示すとおり，連作田では土壌養分の年次による変動が少ないのに対し，輪換田圃場では変動が大きく，この変動は田畑輪換の前歴により特徴付けられた．

全炭素含量は，畑短期導入田が連作田よりも高く推移し，次いで田畑交互導入田，畑長期導入田の順であった．畑長期導入田では 1990 年から 1991 年にかけて，すなわち輪換田 2 年目から 3 年目にかけて 99 から 89 に減少したが，4 年目に 98 と増加した．全窒素含量は全炭素含量と同様，畑短期導入田が連作田よりも高く推移し，次いで田畑交互導入田，畑長期導入田の順であった．交換性塩基のうちカルシウム含量は各輪換田とも畑期間中に減少したが，その後水田作付に伴い増加した．マグネシウムおよびカリウム含量もカルシウムと同様の傾向を示した（図省略）．全リン酸含量は，畑長期導入

第14図　田畑輪換の前歴別土壌養分指数の推移

—○—，畑長期導入田；　-△-，畑短期導入田；　…□…，田畑交互導入田.

*　土壌養分指数は，各年次における連作田の値を100として算出した.

**　図中の数値は，連作田における 4か年の平均値±標準偏差を表す.

畑短期導入田の値は，C-1·2·3 の 3つの平均値である.

田が輪換田初年目から2年目にかけて 87 から 79 に減少したが，水田作付に伴い増加して4年目に 98 と増加した．この水田作付に伴う増加は畑短期導入田でも同様に認められ，また，田畑交互導入田では畑作付により1990年から 1991 年にかけて 116から 97 に減少した．可給態リン酸は，各輪換田とも輪換田初年目では 113～143 と連作田に比べ高いが，水田作付に伴い減少し，とくに畑長期導入田では 3年目に 82 と最低値を示したが，4年目に増加に転じて 95 の値を示した．上澄液ケイ酸含量は，各輪換田とも輪換田初年目では連作田に比べ高いが，畑長期導入田および畑短期導入田では水田作付に伴い減少して3年目に 95 ～104 の値を示したが，4年目に増加に転じた．湿潤土アンモニア化成量は，畑長期導入田が輪換田初年目に 94 と連作田に比べ若干低く，3年目に 83 と減少したが，4年目に 104と増加した．また，畑短期導入田では水田作付に伴い減少して4年目に 87 の値を示した．風乾土アンモニア化成量は，各輪換田とも畑期間中に 83 ～94と減少したが，畑長期導入田では水田作付によりさらに減少して輪換田3年目に 63 と最低値を示したが，4年目に 84 と増加した．また，畑短期導入田では輪換田2年目に若干減少するものの，3年目以降増加して4年目に 101の値を示した．

このように，湿潤土アンモニア化成量は，畑期間中の増加が畑短期導入田では水田期間2年まで維持したが，畑長期導入田では連作田を上回ることはほとんどなかっ

た．また，風乾土アンモニア化成量は，畑期間中に減少したが，その回復には畑長期導入田が少なくとも水田期間3年以上を要したのに対し，畑短期導入田が2年とより短かかった．全炭素および全窒素含量は，畑短期導入田が連作田より高く推移し，これらの結果は，畑短期導入田の田畑輪換が土壌窒素供給力を高く維持する上で適していることを示している．しかし，転換畑として長期間利用する場合は，土壌有機物の消耗に応じて有機物を補給する必要があると考えられる．この点について，筆者ら[47]は灰色低地土転換畑における有機物連用試験を行った結果，全炭素含量は畑転換2年目まで急減し，5年目においても依然として漸減傾向を示すが，きゅう肥の年間 3,000 kg/10a の施用によりその減少が抑制されることを認めている．西川[64]，立谷ら[100]は，牧草を導入した転換畑土壌では逆に，牧草の根から供給される有機物が蓄積して全炭素および全窒素含量が増加することを報告している．諸遊[56]は，畑転換に伴う土壌有機物含量の消長は，畑転換前の有機物含量，畑転換に伴う土壌環境の変化の程度および作物残渣など有機物の添加量の違いによって異なることを指摘している．これらから，畑転換に伴う土壌の畑地化速度は土壌の種類により異なり，したがって土壌の種類により養分供給力を維持するための水田・畑期間が異なるものと考えられる．この点については，次の2．で検討する．

リン酸については，転換年次と共に有効態リン酸含量

が増加する事例が多く，この原因として木村[31]は，転換畑期間中における多量のリン酸資材の投入によるものであると報告している．しかし，本試験では 1981 年以降リン酸資材を施用しておらず，またリン酸施肥量の導入作物間による大きな違いがないので，田畑輪換による土壌のリン酸供給力変動を解析する際，リン酸資材や施肥による影響は考慮しなくてよいことになる．畑状態ではリン酸が鉄やアルミニウムと結合して有効性が低下しやすい条件下にあるにもかかわらず，可給態リン酸含量は畑地化がより進行した圃場ほど高く，また水田作付に伴う減少は著しかった．この原因の一つとして，畑地化がより進行した圃場ほど，水田への還元時に土壌有機態窒素の無機化が促進され，これに伴ってリン酸が有効化されるためと考えられる．この有効化量は水田作付に伴い，土壌の畑地化により易分解化された有機物含量が減少することや，土壌微生物による有機物分解能が減衰することに起因して減少した可能性もあると考えられる．畑地化による化学性の変化の方向として，本谷ら[14]は火山灰水田土壌を 3 か年畑として利用した結果，本試験結果と同様，土壌有機物が消耗の方向をたどり，また火山灰畑土壌に不足がちな有効態リン酸および土壌塩基は依然として転換畑に多いことを認めている．

以上の結果，田畑輪換方式は土壌の窒素，リン酸，ケイ酸などの養分を有効化するが，畑短期導入田が畑長期導入田および田畑交互導入田に比べ土壌養分を高く維持

する点で勝っていることが明らかとなった．

(2) 田畑輪換の前歴と生育期間中の土壌環境

生育期間中の土壌環境，とりわけ土壌の酸化・還元環境は，土壌養分の溶出をはじめ作物生育にとっても大きな影響を及ぼしていると考えられる．田畑輪換の前歴別の，生育期間中における土壌Ehの推移を第 15 図に示した．土壌Ehは各圃場とも幼穂形成期から穂揃期にかけて低下した．畑短期導入田 (C-4)の輪換田初年目では，幼穂形成期まで +150 mV以上の高い値を維持したとおり最も高く推移し，次いで畑短期導入田 (C-5)の輪換田 2 年

第15図 田畑輪換の前歴別の生育期間中における土壌Ehの推移
1991年度の調査結果を示す．

目および田畑交互導入田 (D)の輪換田初年目，そして畑短期導入田 (C-2)の輪換田3年目，連作田 (A)の順であった．同じ輪換田初年目でも，田畑輪換の前歴により土壌Ehの推移に大きな差異があり，このことは土壌窒素無機化にも影響を及ぼすものと考えられる．そこで，1989年の輪換田初年目について，田畑輪換の前歴別の違いが土壌窒素無機化に及ぼす影響をみると，第 16 図に示したように，畑長期導入田が連作田および畑短期導入田に比べ培養 28 日まで低く推移したが，培養 70 日目では畑長期導入田が最も高く，次いで畑短期導入田，連作田

第16図　田畑輪換の前歴別土壌窒素無機化過程

—●—，連作田 ；‥○‥，畑長期導入田；

--△-，畑短期導入田 .

畑短期導入田の値は，C-1·2·3 の 3つの平均値である.

＊ 湿潤土30℃，湛水培養.

1989年度の調査結果を示す.

の順であった．西天・山室の報告[89]でも，低湿重粘土の水田土壌において，土壌窒素無機化量は培養2週間以降では輪換田のほうが連作田に比べ高く推移し，培養と共に両者の差が大きくなることが認められている．

このように，土壌Ehは前作の畑期間の長さにより大きな影響を受け，すなわち畑地土壌化指数が高い圃場ほどよりプラス側の高い土壌Eh値を示した．この結果は，生育期間中における土壌Ehの推移が畑地土壌化指数の値により予測できることを示唆している．田畑輪換の土壌Ehに及ぼす影響は，輪換田2～3年目まで，また畑地土壌化指数では約 0.2の値まで及んだ．

(3) 田畑輪換に伴う土壌養分と畑地土壌化指数の関係

畑地土壌化指数の指標化により，輪換田土壌の窒素，リン酸およびケイ酸肥沃度の変動が予測できることを第1章の 3. で記した．具体的には，湿潤土アンモニア化成量，可給態リン酸および上澄液ケイ酸含量は，畑地土壌化指数が 0.1以上の範囲においてこれと正の相関が認められる．これらの関係の，田畑輪換に伴う経年的変動について解析した．

輪換田の水田作付に伴う土壌養分と畑地土壌化指数との関係を第 17 図に示した．上澄液ケイ酸含量は，畑地土壌化指数との間に正の相関があり，畑長期導入田および畑短期導入田とも輪換田初年目から4年目にかけて畑地土壌化指数の低下と共に減少して4年目に 2.9～3.2 mg/100g となり，連作田の平均値の 3.12mg/100gとほぼ

第17図　輪換田の水田作付に伴う土壌養分と畑地土壌化指数との関係
-○-，畑長期導入田；-△-，畑短期導入田；●，連作田．
矢印は輪換田初年目から４年目にかけての変化の方向を示す．

一致した．同様な傾向は，湿潤土アンモニア化成量および可給態リン酸含量についても認められた（図省略）．風乾土アンモニア化成量は，畑地土壌化指数との間にそれほど密接な相関関係が認められないが，畑長期導入田では輪換田初年目から２年目に急減し，その後３年目まで平衡状態を示し，４年目に増加に転じて 9.6mg/100g となった．一方，畑短期導入田では輪換田初年目から２年目に急減したが，３年目に増加し，その後４年目まで漸増して 11.6mg/100gとなり，連作田の 10.6mg/100gに近い値となった．

このように，畑期間中に低下した土壌窒素供給力を以前の水田状態へ回復させるのに，畑長期導入田では少なくとも水田期間３年を要したのに対し，畑短期導入田で

は2年を要した．これは，畑地化がより進行した圃場ほど土壌窒素供給力の低下が長期にわたって進行するため，土壌窒素供給力を以前の水田状態へ回復するには，土壌有機物の蓄積を図るための長い水田期間を要したものと考えられる．

以上の結果，畑期間中に低下した土壌窒素供給力の回復は，畑短期導入田が畑長期導入田に比べより早く，このことは畑短期導入の田畑輪換が土壌窒素供給力をより高く維持する点で勝っていることを示している．

(4) 田畑輪換の前歴の違いが水稲の窒素吸収および生育・収量に及ぼす影響

田畑輪換の前歴別の水稲連作に伴う生育時期別窒素吸収量の推移を第16表に示した．水稲の総窒素吸収量は，畑長期導入田および畑短期導入田が1989年の輪換田初年目では連作田に比べそれぞれ，約70％，約50％も顕著に高まった．2年目以降は畑長期導入田が連作田とほぼ同様に推移したのに対し，畑短期導入田が連作田に比べ若干高く推移した．また，田畑交互導入田の1991年の輪換田初年目についても約30％高まった．一方，幼穂形成期の窒素吸収量は，畑長期導入田が輪換田初年目では連作田に比べ約30％低く，2年目では同程度となったが，畑短期導入田が2年目まで連作田に比べ約40～90％高く推移し，3年目では同程度となった．また，田畑交互導入田では輪換田初年目に連作田と同程度であった．

田畑輪換の前歴別の水稲連作に伴う収量および収量構成要素の推移を第 17 表に示した．収量は，畑長期導入田および畑短期導入田が 1989 年の輪換田初年目に連作田に比べ約 60 %高かった．畑短期導入田が 2 年目以降も 10 ～30%高く推移したのに対し，畑長期導入田は 2 年目では 5 %低かったが，3 年目では 15 %高まった．また，田畑交互導入田が 1991 年の輪換田初年目に連作田の約 30 %高まった．

このように，輪換田初年目における窒素吸収量は，幼穂形成期では畑短期導入田が最も高く，次いで連作田，畑長期導入田の順であったが，成熟期では両輪換田とも連作田に比べ高まった．この傾向は，田畑輪換の前歴別土壌窒素無機化過程（第 16 図）からも裏付けられる．幼穂形成期の窒素吸収量は，畑短期導入田が輪換田 2 年目まで連作田に比べ高く推移したが，これは乾土効果や前作物の残渣に由来する易分解性有機物含量の存在に起因しているものと考えられる．連作に伴う収量の推移と窒素吸収量の推移（第 16 表）を対比すると，収量は水稲の総窒素吸収量が多いほど高く，これら収量の増減は主に穂数および一穂着粒数に起因している．また，増収効果は畑長期導入田および畑短期導入田とも輪換田 3 年目まで認められ，とくに畑短期導入田では安定した増収効果が認められた．この増収効果は田畑交互導入田でも同様に認められ，これら収量の増減はアンモニア化成量の推移（第 14 図）からも裏付けられる．しかし，畑長

第16表　田畑輪換の前歴別の水稲連作に伴う生育時期別窒素吸収量の推移　(kg/10a)

田畑輪換の前歴	1989年			1990年			1991年		
	幼穂形成期	穂揃期	成熟期	幼穂形成期	穂揃期	成熟期	幼穂形成期	穂揃期	成熟期
連作田	1.70	3.48	5.30	2.23	4.58	7.06	2.79	4.44	5.69
畑長期導入田	1.24	5.90	8.87	2.15	4.73	6.97	2.90	5.00	5.90
畑短期導入田	3.18	6.17	7.92	3.04	4.83	7.23	2.79	5.03	6.42
田畑交互導入田	—	—	—	—	—	—	2.64	4.59	7.56

表中の—はデータがないことを表す.
畑短期導入田の値は，C-1·2 の 2 つの平均値である.

第17表　田畑輪換の前歴別の水稲連作に伴う収量および収量構成要素の推移

田畑輪換の前歴	収量 (kg/10a)			穂数 (本/m²)			一穂着粒数			登熟歩合(%)		
	1989年	1990年	1991年	1989年	1990年	1991年	1989年	1990年	1991年	1989年	1990年	1991年
連作田	277	325	268	236	235	211	53.4	65.6	61.6	92.0	93.5	89.7
畑長期導入田	429	310	308	286	238	227	66.0	62.6	69.5	92.0	93.8	85.4
畑短期導入田	430	352	341	294	252	243	66.7	69.8	64.9	89.0	93.5	92.4
田畑交互導入田	—	—	344	—	—	245	—	—	65.6	—	—	91.7

期導入田の輪換田3年目では，アンモニア化成量の減少にもかかわらず増収効果が認められ，この要因として田畑輪換による根系の下層への拡大や，水稲の根活力が生育後期まで高く維持されたことが考えられる．金田ら[26,27]，市田・遊坐[15]は，輪換田の水稲根域が連作水田に比べて深く，その活力も高いことを認めている．

以上の結果，排水良好な灰色低地土水田では，田畑輪換に伴う土壌養分の変動および水稲収量の推移から判断すると，水稲の安定かつ持続的な高生産力を引き出すには田畑輪換方式が有効であり，畑2～3年－水田2～3年の組み合わせが適していると考えられる．

2．グライ土水田における畑転換による土壌養分供給力変動と最適な水田・畑期間

麦－大豆体系のグライ土転換畑において，弾丸暗きょおよび有機物施用が圃場の排水性，土壌養分および転換畑作物の収量に及ぼす影響を明らかにし，安定かつ持続的な高生産力を引き出す水田・畑期間について検討した．

1）試験方法

(1) 供試圃場および土壌

グライ土・粘質転換畑（加賀市）およびグライ土・強粘質転換畑（小松市）において，1979年から 1981 年の 3 か年にわたって大麦と大豆の栽培を行った．弾丸暗きょ施工の有無（深さ 40cm,間隔 2m，大豆作前に施工），牛糞施用の有無（3,000 kg/10a，大麦作前に施用）および深耕，普通耕を組み合わせ，多因子要因実験として試験区を設定した．各処理区について，収穫跡地の作土層から土壌試料を採取し，風乾処理を行った後，理化学分析に供試した．両土壌の理化学的特性を第 18 表に示した．これら要因の畑転換に伴う土壌断面形態，圃場の排水性および土壌養分に及ぼす影響，さらに作物の生育・収量に及ぼす影響を解析した．ここではデータを弾丸暗きょ施工および牛糞施用の要因別にとりまとめ，4 つの平均値で示した．

調査は，本暗きょ間のほぼ中央部で行った．圃場の区画および本暗きょの施工などの排水整備状況を第19表に示した．

第18表　供試土壌の理化学的特性

土壌の種類	層位 (cm)	土性	容積重 (g/100ml)	飽和透水係数(cm/s)	pH (H_2O)	全炭素 (%)	全窒素 (%)	塩基交換容量 (meq/100g乾土)	風乾土アンモニア化成量(mg/100g乾土)
グライ土・粘質	0～12	CL	0.98	4.4×10^{-7}	5.6	2.50	0.190	13.6	22.1
	12～20	LiC	1.13	3.3×10^{-7}	5.6	1.95	0.180	11.4	9.8
	20～	CL	0.97	3.0×10^{-6}	-	-	-	-	-
グライ土・強粘質	0～11	CL	0.85	3.7×10^{-6}	5.5	2.17	0.160	15.5	14.7
	11～18	CL	1.28	1.2×10^{-6}	5.0	1.84	0.100	15.4	5.4
	18～46	LiC	0.94	7.0×10^{-7}	-	-	-	-	-

表中の－はデータがないことを表す．

第19表　圃場の排水整備状況

土壌の種類	圃場の区画	本暗きょ	
		施工年次	間隔・深さ
グライ土・粘質	20m×100m	1974年	10m・60～80cm
グライ土・強粘質	40m×120m	1978年	4m・50～75cm

(2) 供試品種および肥培管理

大麦品種には「べんけいむぎ」を，大豆品種には「エンレイ」を供試した．これら作物の栽培にあたっては，大麦は全面全層播とし，大豆は条播とした．施肥量（窒素，リン酸，カリウム）はそれぞれ kg/10a で表して，大麦の基肥が（4，7，7)，追肥が（6，0，6)であり，大豆が（2，4，4)である．

(3) 分析方法

土壌の全炭素は乾式燃焼法で，風乾土アンモニア化成量は，風乾土を 30 ℃で 4 週間湛水培養し，無機化するアンモニア態窒素量を水蒸気蒸留法により定量した．

(4) 圃場の排水性調査の方法

降雨後の地表残留水の面的分布調査を行った．また，シリンダー・インテーク・レート法[6]を用いて水の浸透能を測定した．すなわち，長さ 35cm，内径 30cm の円筒を土壌に打ち込み，円筒内に給水した水面の高さを一定時間ごとに測定する．両対数紙上の横軸に経過時間をとり，縦軸に積算浸入量をとって，各経過時間ごとの積算浸入量の測定値をプロットし，両者間の関係式を求めた．

2) 結果および考察

(1) 畑転換に伴う土壌断面形態の変化

畑転換に伴う土壌断面形態の変化を第 18 図に示した．各転換畑とも畑転換に伴い，土層のⅡ層およびⅢ層

第18図　畑転換に伴う土壌断面形態の変化

▨,腐植含む(2～5%);▭,グライ層;▩,▩,斑紋・結核富む(10～30%),含む(10%未満);×,糸根・膜状;∫,管状斑;▭,ち密度.

に斑鉄の生成量が増加し，また形態は管状から糸根状へと変化した．さらに，土色も青灰色から灰色に変化し，グライ層の出現位置が低下した．この土壌断面形態の変化には，弾丸暗きょ施工による明瞭な差異が認められなかった．転換3年目では，II層においてち密度が増大し圧密層の形成が認められ，また，III層において亀裂の形成がわずかに認められたが，弾丸暗きょの周辺部では斑鉄の生成および土壌構造の発達が顕著であった．

斑鉄が下層へと発達するに伴い順次グライ層が消失していくのが認められ，この畑転換に伴うグライ層の消失

過程と土壌断面形態との関係は，既往の報告[52,57,58,95]と同様の傾向を示した．南・前田[55]は，黄褐色土および礫質土水田では，土壌の三相組成，土塊分布および透水係数などの物理性は転換初年目では不良であるが，転換2年目になると著しく良好となることを認めている．このように，畑転換を続けることにより畑地化が進むものの，下層の圧密層の発達が認められ，転換4年目以降も転換作物を導入する場合は，根圏土層を改良し，下層への根群域拡大を図る必要があると考えられる．根圏土層の改良対策としては，心土破砕や深耕による硬盤破砕の他，作物栽培を通じて行う方法も考えられる[24,94]．山田[112]は直根性の豆科牧草の根が下層の圧密層に孔隙を形成する効果があることを認めている．効率的な改良対策については，今後の検討課題である．

(2) 圃場の排水性および排水改良対策

降雨後の地表残留水の面的分布調査を大麦作圃場について行った結果，各転換畑とも転換初期から降雨後ほぼ2日以内に消失し，処理間の差異は認められなかった．

シリンダー・インテーク・レート法による水の浸透能調査を転換6作跡地において行い，その結果を第19図に示した．各転換畑土壌とも，経過時間と積算浸入量との間には次の関係式が成立した．

$$D = c\,t^{n}$$

D：時間 t(min) までの積算浸入量(mm)，c：給水初期の浸入速度を示す定数，n：浸入曲線の型を示す定数．

第19図　暗きょ施工による圃場の水浸透能の効果

□——□ グライ土・粘質　暗きょ無施工
■——■ 〃　〃　施　工
△---△ グライ土・強粘質 暗きょ無施工
▲---▲ 〃　〃　施　工

nは弾丸暗きょの施工による大きな差異が認められないが，cは弾丸暗きょの施工により増加し，グライ土・粘質転換畑，グライ土・強粘質転換畑ではそれぞれ，2倍，5倍の増加を示した．

この結果は弾丸暗きょの施工により排水性が向上したことを示すものであり，このことは弾丸暗きょ周辺部における土壌構造の発達が顕著であることからも伺われる．したがって，弾丸暗きょの施工位置を毎年移動するに伴い，圃場の隅々まで土壌構造が発達し，深耕した場合と同様の土壌状態に改良されるものと考えられる．同様の事象を井出[17]も確認し，これを「地中耕起」と命名している．ブロックローテーションが実施されている状況下では，転換初年目から排水改良効果が求められて

いるが，供試圃場の暗きょの構造では弾丸暗きょで集水された水が本暗きょに導かれにくくなっており，転換初年目から十分な排水効果をうることは困難であった．そこで，筆者ら[43,44]は本暗きょと弾丸暗きょの直交部にまでもみ殻を充填した構造の組み合わせ暗きょを考案し，本試験に引き続いて調査を行い，その排水効果を確認している．転換畑の排水改良法が種々検討されている[3,18,50,92]が，従来の水田における排水改良技術の成果[65,66,72]を利用している場合が多く，このため効率的な排水改良対策が求められている．今後，低コストで，しかも効率的な排水改良対策の基準を設定することが必要であろう．

(3) 畑転換に伴う土壌の有機物含量および窒素供給力の推移

土壌の全炭素含量および風乾土アンモニア化成量の推移を第 20，21 図に示した．土壌の全炭素含量は，各転換畑とも転換 2～ 3作目までは大きな変動がなかったが，それ以降は減少し，とくに排水がより良好なグライ土・粘質転換畑で顕著であった．有機物の施用により高く推移し，暗きょの施工により逆に低く推移した．一方，風乾土アンモニア化成量は，グライ土・粘質転換畑が転換 1 作まで，グライ土・強粘質転換畑が 2 作までやや増加し，その後各転換畑とも 4 ～ 5 作まで減少した．また，有機物の施用および暗きょの施工により若干高く推移した．

第20図　畑転換に伴う土壌の全炭素含量の推移

第21図　畑転換に伴う風乾土アンモニア化成量の推移

このように，土壌の有機物含量の推移は圃場の排水性向上に伴う土壌の乾燥化と密接な関係が認められ，より排水不良なグライ土・強粘質転換畑のほうがグライ土・粘質転換畑に比べ，土壌の全炭素含量および風乾土アンモニア化成量の減少時期が1作遅延された．高橋ら[101]は，細粒灰色低地土および中粗粒グライ土転換畑土壌について調査を行い，両土壌とも畑転換により全炭素および風乾土アンモニア化成量が経年的に減少し，畑地化がより進行した周年畑利用体系で著しいことを認めている．転換に伴う風乾土アンモニア化成量の低下割合は，土壌有機物含量のより高いグライ土・粘質転換畑が 55 %，グライ土・強粘質転換畑が 40 %であり，土壌窒素供給力の高い圃場ほどその程度が大きかった．さらに，土壌の全炭素含量および風乾土アンモニア化成量は，有機物施用区のほうが有機物無施用区に比べ高く推移するものの，有機物無施用区と同様に減少傾向にあり，畑地化に伴う土壌の有機物含量および窒素供給力の消耗が著しいことが確認された．有機物は土壌窒素供給力の向上の他，物理性の改善効果があり[46,59]，施用有機物の特性に応じて施用することが重要である[34,67]と考えられる．

(4) 転換畑作物の収量の推移

転換畑作物の収量の推移を第 20 表に示した．グライ土・粘質転換畑における有機物施用区の3か年の平均収量は，大豆，大麦がそれぞれ，262，453 kg/10a であ

第20表　転換畑作物の収量の推移　(kg/10a)

土壌の種類	処理	転換 1作 大豆	2作 大麦	3作 大豆	4作 大麦	5作 大豆	6作 大麦	平均 大豆	平均 大麦
グライ土・粘質	暗きょ無施工	240	425	262	396	250	521	251	447
	〃 施工	244	428	264	393	257	506	255	442
	有機物無施用	222	417	257	404	245	499	241	440
	〃 施用	262	436	269	395	255	528	262	453
グライ土・強粘質	暗きょ無施工	149	363	206	湿害の	272	361	209	362
	〃 施工	153	372	215	ため収	284	381	217	377
	有機物無施用	145	363	205	穫皆無	272	356	207	360
	〃 施用	157	372	215		284	386	219	379

り，有機物無施用区に比べそれぞれ，9，3％増加した．この増収効果は土壌の種類を問わず，また暗きょ施工によっても認められた．大豆および大麦の増収要因として，大豆作では全粒数の増加が，大麦作では穂数の増加が挙げられる．

各転換畑とも転換2年目までは収量変動が認められたが，転換 3年目になると比較的安定した生産が得られた．しかし，グライ土・強粘質転換畑における転換4作目大麦のように，積雪期間が長く圃場周囲の地下水位が高いため雪腐病が多発し，壊滅的被害を受けた年もあった．この壊滅的被害は，播種時期の長雨により播種が遅れ，越冬前の生育量が確保できなかったことも挙げられる．石田・姫田[21]は，適期播種，排水対策，必要苗立数の確保および越冬後の施肥などの基本技術が重要であることを指摘している．また，青田ら[2]は，土壌の透水

機構が完成する転換3年目ぐらいまでの期間が問題であり，とくに排水対策や初期生育の促進に留意することが重要であるとしている．一方，高橋ら[104]は，褐色低地土転換畑について調査を行い，大豆の収量が麦－大豆体系による5年の長期連作で減収するが，田畑輪換の導入により増収することを認めている．

以上の結果，田畑輪換に伴う土壌養分供給力の変動，水稲および転換畑作物の収量の推移から総合的に判断すると，安定かつ持続的な高生産力を引き出す水田・畑期間は，灰色低地土水田では畑2～3年－水田2～3年の組み合わせが適しているのに対し，グライ土水田では畑期間を灰色低地土水田より1～2年長くする必要があろう．

第３章　田畑輪換技術の導入と定着化のための実用土壌図の作成

－水田転作大麦の生育適性区分図の例－

田畑輪換技術の導入と定着化を図り，さらに農地の合理的かつ計画的な作付利用および基盤整備を推進する必要があるが，この際，作物の生育適性区分図や水田汎用化のための難易度別排水改良対策図などの利活用が効果的であると考える．これら実用土壌図を作成する場合，土壌情報システムを活用する必要がある．Kato[28] は施肥改善事業（昭和 28 ～36年）や地力保全調査事業（昭和 34 ～51年）などの各種調査事業による土壌調査データをコンピュータを中心とした電子機器を使ってシステム化し，必要な時に最新の土壌情報を最適な形で得られる土壌情報システム（JAPSIS）の構築を試みている．

そこで，JAPSISを使った実用土壌図の例として，水田転作大麦の生育適性区分図を作成し，その適用性について検討した．

1）試験方法

大麦の生育適性区分図の作成手順は第 22 図に示すとおりであるが，その研究対象地域は国土地理院発行の 5 万分の 1 地形図「金沢」図幅とした．

第22図　大麦の生育適性区分図の作成手順

(1) データファイルの作成

「金沢」図幅内の地力保全調査事業による代表土壌断面 170地点についての土壌断面形態および土壌の理化学分析データを入力し，データファイルを作成した．

(2) モデル地域の選定

大麦が広く作付されており栽培技術が標準化されていること，さらに異なる各種タイプの土壌の分布がみられることを条件に，モデル地域として河北郡津幡町を設定した．このモデル地域において，大麦「べんけいむぎ」の生育・収量と土壌要因との関係について検討を行った．

(3) 解析に用いた市町村別収量データと各市町村の土壌群によるコーディング

石川県の過去 10 年間における大麦の作付面積[13] の推移を第 23 図に示した．昭和 54 年には水田利用再編対策の実施に伴い前年の 10 倍を上回る約 400haに激増し，その後も増加傾向を示し，昭和 56 年以降は約 1,500ha で推移している．この傾向は当調査地域でも同様である．

本報告では，昭和 54 ～60年までの 7 年間の「金沢」図幅内の市町村別収量データを解析に用いた．この理由として，昭和 54 年以降では作付面積の拡大に伴い，自然環境要因の異なる広い地域において作付が行われ，さらに大麦栽培の基本技術がほぼ定着し，標準化されたことなどにより解析が容易になったことが挙げられる．市町村別収量データを用いて，大麦収量と土壌要因との関係を解析するため，各市町村の土壌群によるコーディン

第23図　石川県における大麦作付面積の推移

グを行った．具体的には，各市町村の1土壌群分布割合が60％以上のものはその土壌群を割り当て，60％未満のものについては上位2つの土壌群をそれぞれ割り当てる方法でコーディングを行った．

(4) 大麦の生育適性に関する自然環境要因の摘出

大麦の生育適性と気象や土壌などの自然環境要因との関係を解析するのに，すべての要因項目を用いるのはサンプル数に比べて説明要因が多すぎて解析に適さない．そこで，市町村別収量と自然環境要因の解析や，モデル地域における大麦収量と土壌要因の解析により，主要な説明要因を選定し，解析に用いることにした．

(5) 土壌図および実用土壌図の出力作成

地力保全調査事業による基本土壌図を「金沢」図幅について，デジタイザーを使用して土壌図の数値化を行いコンピュータ入力し，水田土壌図を国土地理院発行の「金沢」図幅5万分の1地形図上に自動製図機で出力作成した．大麦の生育適性区分図も同様に，国土地理院発行の「金沢」図幅5万分の1地形図上に自動製図機で出力作成した．

2) 結果および考察

(1) 大麦の生育適性に関する自然環境要因の摘出と評価

ア　市町村別収量と主要自然環境要因の解析

自然環境要因項目の中から影響が大きく，データの蓄

積のある気象および土壌要因を選定し，解析を行った．

はじめに，生育適性に関する気象要因について解析した．「金沢」図幅を網羅する加賀地域 14 市町村における大麦収量の経年変化を第 24 図に示した．7 年間の中で 370 kg/10a 以上の多収を得た豊作年は昭和 54 年と昭和 58 年で，一方，300 kg/10aに達しなかった凶作年は昭和 56 年と昭和 59 年であった．豊作年と凶作年の気象概況は第 25 図に示したようにそれぞれ特徴的な傾向が認められた．すなわち，豊作年においては，11月と12月は晴れの暖かい日が続いたことにより越冬前の生育は良好となった．また，4 月から 6 月の成熟期にかけても気温は高く，日照時間は多めに経過したことから，生育は旺盛で登熟も良好となり多収になったと考えられる．一方，凶作年においては，播種後は低温傾向が続き，12月は雨や雪の降る日が多かったことにより越冬前

第24図　加賀地域における大麦収量の経年変化

第25図　大麦の豊作年と凶作年における気象（平年偏差）

の生育は不良となった．また，3月上旬まで降雪が続き，その後も低温寡少に経過したことから，生育は不良となり低収になったと考えられる．このように，大麦の生育・収量は気象要因に大きく影響されることが理解される．

次に，土壌要因について解析した．大麦収量は各市町村単位に集計されているので，土壌要因との解析をする前に，各市町村における土壌群別分布割合から各市町村ごとの土壌群を割り当てた．その結果，次の4種類にコーディングすることができた．

①灰色低地土，②グライ土，③灰色低地土＋グライ土，④灰色低地土＋褐色低地土．

このようにコーディングした各土壌群別の大麦収量を第21表に示した．これによると，7年間の平均収量ではグライ土の290 kg/10aを除いていずれも330～350 kg/10aと高かった．グライ土の収量とそれ以外の土壌群

の収量との間には，対応のある場合の平均値の差の検定[86]を行うと危険率5％で有意な差が認められた．

豊作年および凶作年における土壌群別収量について，駒澤[49]による数量化Ｉ類のコンピュータプログラムを用い解析した．結果を第 22 表に示した．豊作年における重相関係数 0.218に対し，凶作年においては 0.447とより高い値を示した．また，いずれの年においてもグライ土のカテゴリー数量は負の値を示した．すなわち，気象条件が不良な年ほど土壌群間の収量に差異が生じ，この場合グライ土で著しく減収することが明らかとなった．この場合，重相関係数の値は低いが要因選出の一方法としてカテゴリー数量を参考に用いた．

以上の結果，大麦の生育・収量に関与する主要な自然環境要因として気象および土壌要因が採用可能な指標であると考えられた．気象要因については今回細部にわたって検討することはできなかったが，今後これら要因をよりきめ細かく組み合わせて生育適性評価を行う必要があると考えられる．

第21表　土壌群別・大麦収量(kg/10a)

土　壌　群	54	55	56	57	58	59	60年	平均	t 値※	豊作年	凶作年
灰色低地土	330	298	204	333	391	370	389	331	2.81*	361	287
グ ラ イ 土	288	261	208	318	377	264	313	290	2.77*	333	236
灰色低地土＋グライ土	400	313	188	334	404	408	415	352	2.50*	402	298
灰色低地土＋褐色低地土	317	356	298	332	337	375	368	340		327	337

※　$t(6,\ 0.05)=2.45$

第22表　数量化Ⅰ類による土壌群別収量と気象要因の関係

カテゴリー	全体年		豊作年		凶作年	
	カテゴリー数量	レンジ	カテゴリー数量	レンジ	カテゴリー数量	レンジ
灰色低地土	15.19		13.64		20.57	
グ ラ イ 土	−25.48	62.34	−19.52	75.00	−37.43	107.50
灰色低地土＋グライ土	36.86		55.14		31.07	
灰色低地土＋褐色低地土	24.86		−19.86		70.07	
重相関係数	0.4012		0.2184		0.4472	

イ　モデル地域における大麦の生育適性からみた土壌評価

土壌調査のデータファイルには，主に土壌統を決定する内容の土壌断面形態と土壌の理化学分析データが入力されている．これら多数の土壌要因項目の中から，前述の市町村別収量と主要自然環境要因を解析した結果，既往の大麦に関する調査結果[23,43]，さらに農作物の生育環境指標[62]などを参考に大麦の生育適性評価のための指標と考えられる 15 項目を選定し，土壌要因項目のコーディング化を行い，これを第 23 表に示した．

この 15 項目を用いて，モデル地域における大麦収量と土壌要因について数量化Ｉ類により解析を行い，説明度の高い次の 3 要因を選定した．

①作土の深さ，②Ⅱ層の粗孔隙率，③Ｉ層の仮比重．

これらの要因を用いて解析した結果を第 24 表に示した．カテゴリー数量および偏相関係数の絶対値の大きさは，土壌要因およびカテゴリーの土壌評価値の程度を示している．偏相関係数の値から外的基準である大麦収量は，「作土の深さ」＞「Ⅱ層の粗孔隙率」＞「Ｉ層の仮比重」の順に密接な関係が認められた．「作土の深さ」要因では 15cm 未満のカテゴリー数量が -45.1，「粗孔隙率」要因では 5％未満のカテゴリー数量が -21.6，さらに「仮比重」要因では 1.2以上のカテゴリーにおいて負の値が得られており，いずれも大麦の生育適性評価値を大きく低下させていることが明らかとなった．

第23表　土壌要因項目とカテゴリー

要因項目	カテゴリー 1	2	3
作土の深さ（cm）	15 ≦	＜15	
グライ層	なし，または 80 cm 以下	1，3 以外	上層 50 cm 以内に出現
Ⅰ層*1の仮比重	≦1.2	1.2 ＜	
Ⅱ層の　〃	≦1.2	1.2 ＜	
Ⅰ層の粗孔隙率（%）	10 ≦	5 ≦～＜10	＜ 5
Ⅱ層の　〃	10 ≦	5 ≦～＜10	＜ 5
Ⅰ層の孔隙率（%）	65 ≦	60 ≦～＜65	＜ 60
Ⅱ層の　〃	65 ≦	60 ≦～＜65	＜ 60
飽和透水係数（cm/sec）*2	10^{-4} ≦	10^{-6} ≦～＜10^{-4}	＜ 10^{-6}
Ⅰ層の pH(H_2O)	6 ≦～＜7	5 ≦～＜ 6，7≦～＜7.5	＜ 5 ，7.5≦
〃　全炭素（%）	1.7 ≦	1.2 ≦～＜ 1.7	＜ 1.2
〃　全窒素（%）	0.17≦	0.12≦～＜ 0.17	＜ 0.12
〃　石灰飽和度（%）	50 ≦～＜70	40 ≦～＜50，70≦～＜75	＜ 40 ，75 ≦
〃　苦土飽和度（%）	15 ≦	10 ≦～＜15	＜ 10
〃　可給態リン酸（mg/100 g）*3	10 ≦	5 ≦～＜10	＜ 5

*1：Ⅰ層は作土層として色別した．

*2：深さ 60 cm 内の最小飽和透水係数．

*3：Truog-P_2O_5．

第24表　数量化Ｉ類による大麦の生育適性からみた土壌評価

アイテム	カテゴリー	カテゴリー数量	カテゴリーウェイト	偏相関係数	要因項目間ウェイト
作土の深さ	15≦	30.11	1	0.4562	0.4562
	<15	-45.17	0		
粗孔隙率（Ⅱ層）	10≦	29.73	1	0.3259	0.3259
	5≦～<10	21.04	0.83		
	<5	-21.67	0		
仮比重（Ｉ層）	≦1.2	3.55	1	0.1205	0.1205
	1.2<	-23.09	0		
重相関係数		0.6518			

(2) 大麦の生育適性からみた総合評価の方法

大麦の生育・収量に関与する自然環境要因項目として，土壌要因を重要な指標として摘出した．そこで，数量化Ｉ類によるモデル地域における土壌評価の解析結果から，要因項目間ウェイトおよびカテゴリーウェイトを求めた．第 24 表に示したように，要因項目間ウェイトは偏相関係数の値であり，カテゴリーウェイトはカテゴリー数量を 0～ 1の値に相対化したものである．石田[20]は農地基盤の優良性評価のための回帰・積算型圃場評価手法を適用し，土地利用計画区分図の作成手法について検討している．この計画手法を用いると，大麦の生育適性評価値は次のような数式で示される．

$$P = \sum_{k=1}^{3} \sum_{i=1}^{ki} r_i \cdot B_{ik}$$

P：生育適性評価値，r_i：i要因項目のウェイト，B_{ik}：i要因，kカテゴリーのウェイト，ki：i要因のカテゴリー数．

湯浅ら[115]はインドネシアにおける農業開発適地選定の手法として，等級式評価法（ランキング法）とパターン法による評価の比較を行っている．その結果，両法を併用し，等級式評価法で得られた各クラス内での細部の開発優先順位を，パターン法で決定していくことが有効であると推察している．

本報告における評価手法は，大麦の生育適性に対する地域の有する生産力差を統計的方法によりモデル化するものであり，等級式評価法やパターン法による評価手法とは性格を異にする．回帰・積算型圃場評価手法にしたがって，データファイルに入力した各土壌統を代表する23地点の土壌調査データから大麦の生育適性評価値を求め，次の3ランクに区分した．

①適地（0.33≦），②普通地（0.12≦～<0.33），③不適地（<0.12）．

この生育適性評価値による区分とは別に，(1)-アで得られた結果より，湿田タイプの土壌（グライ層が80cm以内に出現し，斑紋結核が30cm以下に認められない）を不適地に位置づけた．

(2) 作成した生育適性区分図の検証

適地，普通地，不適地の3つのカテゴリーからなる大麦の生育適性区分図を写真に示す．この生育適性区分図

の妥当性を検証するため，同図幅内 44 か所の農協支所管内の大麦収量と生育適性区分図のカテゴリー区分との関係について検討した．大麦収量のデータは，凶作年である昭和 59 年の作付面積と出荷量（農水省石川食糧事務所調べ）から求めたものである．対応のない場合の平均値の差の検定（welch の方法）[86] により適合度を解析した結果を第 25 表に示した．これによると，適地，普通地，不適地の順に収量は高く，適地と普通地のカテゴリー間では危険率 1 % 水準で，普通地と不適地間では 0.1 % 水準で有意な差が認められ，作成した図の妥当性が確かめられた．

安田[113] は，図式情報システムを利用した土壌診断により転換畑の排水対策図を作成している．農業生産環境情報システム実用化事業[63] においては，土壌および気象のデータベースを利用して，各種作物の生育適地図の

第25表　農協支所別の大麦収量と生育適性区分図のカテゴリー区分との関係

農協支所別の収量区分 (kg/10a)		カテゴリー 適地	普通地	不適地
収量 350≦	の支所数	10	9	0
収量 200≦～<350	の支所数	5	9	0
収量 <200	の支所数	0	6	5
平均収量		378	296	140
t 値		3.08**	7.12***	

, * はそれぞれ 1%, 0.1% 水準で有意差があることを示す．

作成を試みている．また，加藤[29]は山梨県におけるブドウの生育適地図を，基本土壌図を基に気象および地形条件を重ね合わせて作成し，作成した図の妥当性を確かめている．このブドウの生育適地判定には気象要因に重要度を高く置いている．本報告の大麦に関しては，土壌要因を重要な指標に位置づけた．これらの要因の多くは土壌条件に応じた田畑輪換技術の導入によって改善しうる内容であり，不適地の地域においては大麦の生育適性を高めるために，深耕，有機物の施用，さらに排水改良などの実施が強く望まれる．本報告で取り上げた土壌要因に加えて，適期播種や適切な肥培管理の徹底などの基本技術の励行は，大麦の生育・収量を大きく左右することはいうまでもない．

本システムの適用により，生産現場への転換畑作物の円滑な導入・定着化が図られ，地域全体の安定生産に寄与するものと期待される．

1:50,000 地形図　N
かなざわ　（金

写真　水田転作大麦の生育適性区分図

金　沢

水田転作大麦の生育適性区分図

第４章　総　合　考　察

近年における世界人口の爆発的増加に伴い，食糧の供給増加が求められている．日本の穀物自給率は 30 %しかなく，このため，土地利用型農業における水田の総合生産力の向上は，今日わが国の農業にとって重要な課題となっている．ここでいう総合生産力とは，水稲作と転換畑作とを組み合せた効率的な土地利用により，単位面積当りの水田から生産される水稲および転換畑作物を合わせた全体的な生産力を意味する．この課題解決にあたって，水田の有する潜在的生産力を安定かつ持続的に発揮させる田畑輪換技術の確立が重要であると考える．

近年，土壌資源の劣化，地球温暖化および地下水汚染などが地球的規模で進んでおり，このため資材多投型農業から持続型農業への転換が求められている．その根幹をなすものは，土壌の機能を最大限に発揮させることであり，このため田畑輪換の活用や合理的な肥培管理技術に期待するところは大きいといえる．

生産現場では，田畑輪換により土壌養分供給力が著しく変動するが，この変動に応じた土壌管理が行われていない場合が多く，地域によっては土壌の養分負荷がみられ，施用資材の効率的な施用が求められている．また，作物の生育・収量は低位で，かつ不安定となっており，このことが，田畑輪換の円滑な導入を阻害している一要

因となっている．そこで，本研究は輪換田における合理的な土壌管理技術の確立に向けて，①田畑輪換における土壌養分供給力変動の解明，②安定・持続的高生産力を引き出す水田・畑期間の究明，③田畑輪換技術の導入・定着化のための実用土壌図の作成，について検討を行った．その結果，第1は，大豆跡輪換田における良質米品種について，土壌の種類ごとの適正な基肥窒素施肥量が明らかとなった．また，田畑輪換の繰り返しは土壌ケイ酸の動態を大きく変動させるが，逐次上澄液法の適用により，土壌ケイ酸の有効化過程の定量的把握が可能になるものと考えられた．さらに，輪換田土壌の窒素，リン酸およびケイ酸の養分動態は，畑地土壌化指数の指標化により評価できることが明らかとなった．第2は，安定かつ持続的な高生産力を引き出すための最適な水田・畑期間は，灰色低地土水田では畑2～3年－水田2～3年の組み合わせが適しているのに対し，グライ土水田では畑期間を灰色低地土水田より1～2年長くする必要があることが明らかとなった．第 3は，土壌情報システム（JAPSIS）を使った実用土壌図の例として，水田転作大麦の生育適性区分図を作成し，その適用性が確認された．

1．田畑輪換における土壌養分供給力変動の解明

輪換田土壌の窒素，リン酸，ケイ酸などの養分動態

は，輪換年数，作付前歴および有機物管理などの要因により大きく影響を受けると考えられる．とりわけ，耐倒伏性の弱い良質米品種が多く導入されている状況下では，土壌窒素供給力の変動により，水稲の生育・収量は不安定であり，地域ごとの適正な窒素施肥基準の確立が求められている．

そこで，良質米品種「コシヒカリ」を対象に，まず水稲の理想的な窒素吸収パターンを明らかにしようとした．次に，石川県で広く行われている稲－麦－大豆体系下での大豆跡輪換田について，土壌窒素供給力の変動が水稲の窒素吸収量および生育・収量に及ぼす影響を解析し，適正な基肥窒素施肥量の解明について検討した．その結果，コシヒカリの収量 650 kg/10a 以上の窒素吸収パターンが土壌の種類別に明らかとなった．さらに，輪換田における適正な基肥窒素施肥量は，細粒グライ土では，輪換 2 年目までは慣行施肥量の 10 割減肥が，3 年目は 6 割減肥が適しており，4 年目以降も控え目にするのがよいと考えられた．また，細粒および中粗粒灰色低地土では，輪換初年目は 5 割減肥が適しており，2 年目以降は慣行施肥量でよいと考えられた．

一方，窒素以外のリン酸，ケイ酸などの養分動態についても変動すると考えられるが，生産現場では窒素以外の養分については水稲連作田土壌と同様の肥培管理を行っている状況である．これらリン酸，ケイ酸資材の積極的な施用も伴い，地域によっては土壌の養分負荷がみら

れ，これら資材の効率的な施用が求められている．これは，環境に負担を与えない肥培管理技術として重要な側面をもつと考える．輪換田土壌におけるケイ酸の養分動態については今までほとんど注目されず，合理的なケイ酸の肥培管理が十分に行われていない状況にある．これまでの水田土壌のケイ酸供給力の測定法では，土壌ケイ酸の有効化過程の定量的把握が困難であり，有効な診断指標とはなり得ないと考えられる．

そこで，土壌ケイ酸をできるだけ圃場の状態に類似した環境条件下で測定できるように，上澄液法[97]を改良した逐次上澄液法を用いて，輪換田土壌におけるケイ酸の有効化過程の特徴を解明するとともに，逐次上澄液法の適用可能性についても検討した．その結果，従来の上澄液法では上澄液の交換を行わないためケイ酸の溶出が抑制されるのに対し，上澄液の交換を7日ごとに行う逐次上澄液法では交換した上澄液へ新たに溶出されるので，圃場における土壌ケイ酸の有効化過程を把握するには有効な方法であると考えられた．逐次上澄液法による土壌ケイ酸の溶出過程（30℃，培養）は指数式（$Y = KX^n$）で近似でき，溶出量YはXに培養日数を代入することにより求められる．土壌のケイ酸溶出量に対する温度の影響は，室内実験から，培養温度と圃場との温度差（5.4 ℃）の範囲では，成熟期までは小さいと推察されたので，圃場における土壌ケイ酸の溶出推定量 S(kg/ha) は，30℃の温度条件下で求めた指数式を基に以下の

式で求められると判断した．

$S = K * (移植後日数)^{n} * 作土深(cm) * 仮比重$

ここで，K，nは上記の土壌ごとに求めた指数式の定数を表している．

灌漑水の供給量を考慮したケイ酸供給量の推定値とケイ酸吸収量の実測値とは，最高分げつ期を除き，穂揃期および成熟期においてほぼ一致した．以上より，土壌ケイ酸の溶出量は，輪換田のほうが連作田に比べて高く推移し，その有効化予測には，穂揃期以降の時期において逐次上澄液法が適用できると判断した．

この研究成果は，田畑輪換の繰り返しにより土壌ケイ酸の動態が大きく変動するが，逐次上澄液法の適用により土壌ケイ酸の有効化過程が定量的に把握され，輪換田におけるケイ酸の肥培管理基準を策定する上で参考になるものと考えられる．

一方，田畑輪換の繰り返しによる土壌養分供給力の変動を解明するためには，土壌環境要因の評価法を解明することが重要と考える．輪換田土壌における肥培管理基準の策定には，これまで過去の圃場試験データを基に，主に輪換年数と前作物の種類を指標として，窒素成分についてのみ行われてきた．さらに，近年の多様な土壌管理や作付体系が実施されるなかで，この肥培管理基準の現場への適用が難しくなってきた．

そこで，輪換田における土壌養分供給力変動の解明にあたっては，土壌の置かれた環境条件が反映される土壌

分析値による指標を用いるのが妥当であると判断し，水中沈定容積の変化を利用した畑地土壌化指数[60]を用いて，土壌養分供給力変動との関係について検討し，この評価法の適用可能性についても検討した．その結果，田畑輪換に伴う土壌の化学性の変化には土壌の乾燥履歴が反映しており，これを客観的に評価する手法として畑地土壌化指数が有効であることが示された．土壌養分の畑地土壌化指数による分類が水稲の養分吸収と対応しており，これは本評価法の妥当性を支持しているものと考えられる．以上より，畑地土壌化指数の指標化により，田畑輪換の前歴を問わず，輪換田土壌の窒素，リン酸およびケイ酸供給力の変動が予測できることが明らかとなった．

本評価法の導入は，田畑輪換による土壌養分供給力の変動に対応した肥培管理指針を策定する上で参考となり，このことは環境に負担を与えない肥培管理技術としても重要な側面をもつものと考えられる．

2．安定かつ持続的な高生産力を引き出す水田・畑期間の究明

ブロックローテーションによる田畑輪換方式が，多くの地域で行われている．転換畑面積の拡大に伴い，排水不良な湿田タイプの圃場においてもこの方式により基幹作物の大麦および大豆が広く作付され，水稲および転換

畑作物を通じた地域全体の総合生産力の向上が不可能となっている．このため，安定かつ持続的な高生産力を引き出す合理的な田畑輪換方式の確立が急務となっている．そこで，田畑輪換の前歴の異なる灰色低地土の輪換田土壌およびグライ土の転換畑土壌において，田畑輪換に伴う土壌養分および土壌環境の影響を明らかにし，さらに水稲および転換畑作物の生育・収量との関係を解析し，安定かつ持続的な高生産力を引き出す最適な水田・畑期間について検討した．その結果，畑転換により土壌の畑地化が進むほど易分解性有機物が消耗して窒素養分供給力の低下が認められた．田畑輪換方式は土壌の窒素，リン酸，ケイ酸などの養分を有効化するが，畑2～3年－水田 2～3年の組み合わせである畑短期導入田が，畑長期導入田および田畑交互導入田に比べ土壌養分を高く維持する点で勝っていることが明らかとなった．このことは，田畑輪換に伴う土壌養分と畑地土壌化指数との関係からも裏付けられた．田畑輪換に伴う生育・収量については，灰色低地土輪換田における水稲の増収効果が輪換田3年目まで認められ，とくに畑短期導入田では安定した増収効果が認められた．また，グライ土転換畑における大豆，大麦の収量については，転換2年目までは収量変動が認められたが，圃場の排水性が向上した転換3年目になると比較的安定した生産が得られた．以上より，田畑輪換に伴う土壌養分供給力の変動および作物の生育・収量の推移から判断すると，水田の安定かつ

持続的な高生産力を引き出すには田畑輪換方式が有効であり，灰色低地土水田では畑2～3年－水田2～3年の組み合わせが適しているのに対し，グライ土水田では畑期間を灰色低地土水田より1～2年長くする必要があろう．

本技術は田畑輪換の多面的機能を最大限に発揮させるものであり，生産現場への導入により地域全体における水田の総合生産力の向上に寄与するものと期待される．

3．田畑輪換技術の導入・定着化のための実用土壌図の作成

田畑輪換技術の導入・定着化を図るためには，土壌情報システム[28]の活用により実用土壌図を作成することが重要と考える．そこで，土壌情報システムを使った実用土壌図の例として，水田転作大麦の生育適性区分図を作成し，その適用性について検討した．まず，大麦の生育適性に関する自然環境要因として，気象および土壌要因の影響が大きいことが明らかとなった．数量化Ⅰ類[49]による土壌群別の大麦収量と気象要因との関係を解析し，気象条件が不良な年ほど土壌群間の収量に差異が生じ，この場合グライ土で著しく減収することが明らかとなった．ここでは，土壌条件からみた大麦の生育適性区分図の作成を試みた．

モデル地域において，数量化Ⅰ類による大麦の生育適

性から見た土壌評価を行い，大麦収量は「作土の深さ」＞「Ⅱ層の粗孔隙率」＞「Ⅰ層の仮比重」の順に密接な関係が認められた．回帰・積算型圃場評価手法[20]に従って，データファイルに入力した「金沢」図幅内の土壌調査データから大麦の生育適性評価値を求め，①適地，②普通地，③不適地の3ランクに区分した．土壌群別の大麦収量の解析から，この生育適性評価値による区分とは別に，湿田タイプの土壌を不適地に位置づけた．一方，地力保全調査事業による基本土壌図をデジタイザーを使用してコンピュータ入力し，水田土壌図を自動製図機で出力作成した．さらに，これらを基に，適地，普通地，不適地の3つのカテゴリーからなる大麦の生育適性区分図を，縮尺5万分の1「金沢」図幅の地形図上に出力作成した．作成した生育適性区分図の妥当性を検証するため，農協支所別の大麦収量と生育適性区分図のカテゴリー区分との関係を解析し，作成した図の妥当性が確認された．

以上の結果を整理し，地域輪換田における合理的な土壌管理技術を確立するための研究の流れを，第26図にとりまとめた．この研究成果は，田畑輪換に伴う土壌養分供給力の変動と，水稲および転換畑作物の生育・収量との関係を総合的に理解することで，水田の安定かつ持続的な高生産力を引き出す田畑輪換技術が明らかとなった．また，土壌情報システムを活用した実用土壌図の作成は，生産現場への田畑輪換の円滑な導入・定着化に寄

第26図　地域輪換田における合理的な土壌管理技術を確立するための研究の流れ

与するものと期待される．

環境と調和した持続型農業の実現に向けて，対策技術の試案[7,39,88]や対策試験[10,33,42,45,74,110,111]の検討が行われている．持続型農業の根幹をなすものは，土壌の機能を最大限に発揮させた上で合理的な肥培管理を行うことであり，そうした新しい農法が多くの地域で展開される必要があろう．この意味において，本研究は，持続型農業の実現に向けて，地域に根ざした合理的な土壌管理技術を確立する上で参考になるものと考えられる．

摘　　要

土地利用型農業における水田の総合生産力の向上は，今日わが国の農業にとって重要な課題となっている．この課題解決にあたって，水田の有する潜在的生産力を安定かつ持続的に発揮させる田畑輪換技術の確立が重要であると考える．

そこで，本研究は，輪換田における合理的な土壌管理技術の確立に向けて，①田畑輪換における土壌養分供給力変動の解明，②安定・持続的高生産力を引き出す水田・畑期間の究明，③田畑輪換技術の導入・定着化のための実用土壌図の作成，について検討を行ったものである．

1．田畑輪換における土壌養分供給力変動の解明

稲－麦－大豆体系下での大豆跡輪換田について，良質米品種「コシヒカリ」を対象に，土壌窒素供給力の変動が水稲の窒素吸収量および生育・収量に及ぼす影響を解析し，適正な窒素施肥基準の確立について検討した．その結果，大豆跡輪換田におけるコシヒカリについて，土壌の種類ごとの適正な基肥窒素施肥量が明らかとなった．

土壌ケイ酸を動的な圃場の状態に類似した環境条件下

で測定できるように考案した逐次上澄液法を用いて，輪換田におけるその有効化過程の解明について検討した．その結果，田畑輪換の繰り返しは土壌ケイ酸の動態を大きく変動させるが，逐次上澄液法の適用により，土壌ケイ酸の有効化過程の定量的把握が可能になるものと考えられた．

田畑輪換の前歴の異なる輪換田土壌において，水中沈定容積の変化を利用した畑地土壌化指数を用い，土壌養分供給力変動との関係について検討した．その結果，輪換田土壌の窒素，リン酸およびケイ酸の養分動態は，畑地土壌化指数の指標化により評価できることが明らかとなった．

2．安定・持続的高生産力を引き出す水田・畑期間の究明

灰色低地土およびグライ土水田において，田畑輪換に伴う土壌養分供給力の影響を解明し，さらに水稲および転換畑作物の生育・収量との関係を解析した。その結果，安定かつ持続的な高生産力を引き出すための最適な水田・畑期間は，灰色低地土水田では畑2～3年－水田2～3年の組み合わせが適しているのに対し，グライ土水田では畑期間を灰色低地土水田より1～2年長くする必要があることが明らかとなった．

3．田畑輪換技術の導入・定着化のための実用土壌図の作成

土壌情報システム（JAPSIS）を使った実用土壌図の例として，水田転作大麦の生育適性区分図を作成し，その適用性について検討した．モデル地域において，数量化Ⅰ類による大麦の生育適性からみた土壌評価を行い，①適地，②普通地，③不適地に区分した．これら3つのカテゴリーからなる大麦の生育適性区分図を「金沢」図幅の地形図上に自動製図機で出力作成し，作成した図の妥当性が確認された．

4．まとめ

本研究は，田畑輪換に伴う土壌養分供給力の変動と，水稲および転換畑作物の生育・収量との関係を総合的に理解することで，水田における稲作および転換畑作を通じた安定かつ持続的高生産力を引き出す田畑輪換技術が明らかとなった．また，土壌情報システムを活用した実用土壌図の作成は，生産現場への田畑輪換の円滑な導入・定着化に寄与するものと期待される．

持続型農業を実現するには，土壌の機能を最大限に発揮させた上で合理的な肥培管理を行うことが重要であり，そうした新しい農法が多くの地域で展開される必要があろう．この意味において，本研究は，持続型農業の実現に向けて，地域に根ざした土壌管理技術を確立する上で参考になるものと考えられる．

謝　　辞

本研究は，農林水産省農業研究センターおよび石川県農業総合試験場において行われた．本研究の推進に際し，農業研究センター前土壌肥料部長関矢信一郎博士（現北海道農業試験場），同金野隆光博士から有益なご指導と研究上のご配慮をいただいた．また，水田土壌肥料研究室長秋山　豊氏，亀川健一氏，土壌診断研究室長上沢正志博士，栄養診断研究室長米山忠克博士，土壌改良研究室長長野間　宏氏，畑土壌肥料研究室長井上隆弘博士（現農林水産技術会議），水質保全研究室長尾崎保夫博士をはじめ土壌肥料部の各位から，水田作付体系研究室長下田英雄氏（現九州農業試験場）をはじめ研究室の各位から貴重なご助言とご協力をいただいた．

石川県農業総合試験場前場長脇坂聿雄博士，同渡辺信利氏，前環境部長山本洋久氏，同横谷政志氏，同寺田優博士，同川畠平一氏からご助言と研究上のご配慮をいただき，前土壌肥料科長丸山武雄氏，同塩口直樹氏，同森正克英氏，土壌肥料科および畑作特産科の各位からご助言とご協力をいただいた．石川県農業短期大学長谷川和久博士，名古屋大学農学部教授木村眞人博士および三重大学生物資源学部助教授犬伏和之博士から激励とご助言をいただいた．また，北陸農業試験場，その他多くの関係各位からご助言をいただいた．

この研究の一部は，筆者が 1987 年に農業環境技術研究所環境立地研究室へ短期研修として行った時に実施したものであり，加藤好武博士（現東北農業試験場）をはじめ研究室の各位から懇切なご教示とご助言をいただいた．

最後に本論文のとりまとめについて，東京大学農学部教授松本　聰博士から懇切なご教示とご校閲を賜った．

ここに記して，これらの方々に心からお礼申し上げる．

引　用　文　献

1) Alexander, G. B., Heston, W. M. and Iler, R. K. : The Solubility of Amorphous Silica in Water. J. phys. Chem., 58, 453 (1954)

2) 青田精一・渡辺好照・石田良作：低湿重粘土転換畑における大豆の生育，収量の経年変化，北陸作物学会報，18～21 (1983)

3) 千葉　豪：転換畑のための排水技術，農及園，56 (9),47～ 53 (1981)

4) Cicerone, R. J. and Shetter, J. D., Sources of atmospheric methane : measurements in rice paddies and a discussion, J. Geophys. Res., 86 (c), 7203 ～ 7209 (1981)

5) Cicerone, R. J. and Oremland, R. S., Biogeochemical aspect of atmospheric methane, Global Biogeochem. Cycles, 2, 299～327 (1988)

6) 土壌物理性測定法委員会編：土壌物理性測定法，p. 168 ～177，養賢堂，東京 (1982)

7) 藤沼　亮：環境問題，農業そして肥料，肥料科学 (14), 45～ 83 (1991)

8) 古田土通・石川次郎：那須野ケ原における田畑輪換に関する研究，栃木農試研報，13, 9 ～17 (1969)

9) 長谷部　亮・飯村康二：水耕培地のケイ酸供給濃度

と水稲の生育，土肥誌，57，42～48（1986）
10）長谷川清善：水田における窒素の動態と環境への影響評価に関する研究，滋賀農試特別研報，17，1～164（1992）
11）Holzapfel-Pschorn, A and Seiler, W.: Methane emission during a cultivation period from an Italian rice paddy, J. Geophys. Res., 91(D), 11803 ～ 11814 (1986)
12）北陸農業試験場編：転換畑作生産技術マニュアル北陸における水田の畑利用技術と営農（1988）
13）北陸農政局統計情報部編：昭和 54 年～60年（1979～1985）
14）本谷耕一・高橋和吉・田代英臣：耕地の交互利用に関する研究，東北農試研報，31，45～72（1965）
15）市田俊一・遊坐次夫：地力培養による田畑輪換水田の収量性について，青森農試研報，26，139 ～160（1982）
16）今泉吉郎・吉田昌一：水田土壌の珪酸供給力に関する研究，農技研報，B8，261 ～304（1958）
17）井手一浩：高水準水田麦作新農法，農業技術，35，298 ～303（1980）
18）飯田周治・吉野　喬・猪原明成・岡山清司・鎌仲一夫：グライ土水田の排水施工による畑地化，土肥誌，61，54～60（1990）
19）Inubushi, K., Hori, K., Matsumoto, M.,

Umebayashi, M. and Wada, K., Methane emission from flooded paddy soil to the atmosphere through rice plant, Jpn. J. Soil Sci. Plant Nutr., 60, 318～324 (1989)

20) 石田憲治：農地基盤の優良性に基づく土地利用区分作成手法の開発，土地利用区分図研究報告，5，21～38 (1987)

21) 石田良作・姫田正美：北陸地域における麦作の現状と技術課題，農業技術，39(1)，30 ～ 35 (1984)

22) 石川県農業試験場：石川県地力保全基本調査総合成績書，p.244 ～248 (1978)

23) 石川県農業試験場：昭和 58 年～61年度土壌保全対策事業成績書 (1983～1986)

24) 伊藤滋吉：新しい緑肥植物の利用，土肥要旨集，38，213 ～214 (1992)

25) 嘉田良平：環境保全と持続的農業，家の光協会，東京 (1990)

26) 金田吉弘・児玉 徹・長野間 宏：八郎潟干拓地の輪換水田における窒素吸収パターンの特徴，土肥誌，127 ～133 (1989)

27) 金田吉弘・三浦昌司・児玉 徹：八郎潟干拓地の輪換水田における土壌変化と水稲に対する窒素施用法，土肥誌，57，604 ～606 (1986)

28) Kato, Y., A computerised soil information system for arable land in Japan. I. Concept,

objective, process, and structure. Soil Sci. Plant Nutr., 30, 287～297 (1984)

29) 加藤好武：山梨県におけるブドウ生育適地図の作成，土肥誌，57, 447 ～455 (1986)

30) 川西琢也・川島博之・尾崎保夫：地下水の硝酸態窒素濃度の上昇と農業生産－諸外国の研究事例のとりまとめと今後の課題－，用水と廃水，33(9), 17 ～28 (1991)

31) 木村　清：復元田の土壌環境と水稲生育，土壌の物理性，53, 20～24 (1983)

32) Kimura, M., Ando, H. and Haraguchi, H., Estimation of potential CO_2 and CH_4 production in japanese paddy fields, Environ. Sci., 4, 15 ～25 (1991)

33) Kimura, M., Miura, Y., Watanabe, A., Katoh, T. and Haraguchi, H., methane emission from paddy field(Part 1) Effect of fertilization, growth stage and midsummer drainage, Pot experiment, Environ. Sci., 4, 265 ～271 (1991)

34) 北田敬宇：灰色低地土における施用有機物の分解過程，石川農試研報，16, 67～80 (1988)

35) 北田敬宇：水田転作大麦の生育適性区分図の作成－金沢図幅の例－，土肥誌，60, 81～87 (1989)

36) 北田敬宇：コシヒカリの多収水準における窒素吸収パターン，土肥誌，61, 187 ～189 (1990)

37) 北田敬宇：灰色低地土とグライ土水田についての速度論的解析法による土壌窒素の無機化予測について，土肥誌，61，241 ～247 (1990)

38) 北田敬宇：輪換田における土壌管理，石川の農業と土壌・肥料，石川の農業と土壌・肥料編集委員会編，p. 31 ～ 34 (1990)

39) 北田敬宇：水田から発生する温室効果ガスの制御技術の試案，農業技術，46(7)，6～ 10 (1991)

40) 北田敬宇・亀川健一・秋山　豊：逐次上澄液法による輪換田土壌ケイ酸の有効化過程の解明，土肥誌，63，31～38 (1992)

41) 北田敬宇・亀川健一・秋山　豊・下田英雄・山縣真人：畑地土壌化指数による輪換田土壌の養分動態の評価，土肥誌，63，349 ～351 (1992)

42) 北田敬宇・宮川　修・塩口直樹：水稲の理想的な窒素吸収パターンと土壌窒素無機化予測によるシステム施肥法，土肥誌，62，585 ～ 592 (1991)

43) 北田敬宇・中屋滋夫：転換畑の排水改良対策（第 1 報）－組み合わせ暗渠の排水効果と麦の生育・収量－，中部土肥要旨集，6 (1984)

44) 北田敬宇・中屋滋夫：転換畑の排水改良対策（第 2 報）－組み合わせ暗渠の排水効果－，中部土肥要旨集，2 (1987)

45) 北田敬宇・尾崎保夫・秋山　豊・八木一行：灌漑水中の高濃度の硝酸態窒素および稲わらが水田からのメ

タン発生に及ぼす影響，土肥誌投稿中．
46) 北田敬宇・塩口直樹・丸山武雄：転換畑の排水改良と土壌管理，石川農試研報，13，39～53（1985）
47) 北田敬宇・田渕志良・喜多裕雄：転換畑におけるリン酸および有機物連用，石川農試研報，16，39～66（1988）
48) 小林　純：日本の河川の平均水質とその特徴に関する研究，農学研究，48，63～106（1961）
49) 駒澤　勉：数量化理論とデータ処理（第2版），p. 155～188，朝倉書店，東京（1984）
50) 甲谷　潤：スポット暗渠（縦型暗渠）による排水性技術，土肥誌，56，451（1985）
51) 金野隆光：透水条件下における水田土壌の物質変化－主として無機成分について－，東京大学学位論文，74～92（1968）
52) 丸田　勇・森田　康：水田における地下水位変化の予測（第2報），新潟農試研報，32，9～15（1983）
53) 松本　聰：地球環境と農業をとりまく諸問題(6) 土壌荒廃とその防止策，農及園，65，3～10（1990）
54) 松沢正知・井上準郎・前田博文：田畑輪換栽培における作物の収量性について，中国農業研究，36，34～37（1967）
55) 南　松雄・前田　要：水田転換畑の生産性向上に関する研究　第1報水田の畑地化に伴う土壌理化学性の変化，北海道立農試集報，29，72～85（1974）

56) 諸遊英行：水田転換に伴う土壌の理化学性の変化，土肥誌，54，434 ～441 (1983)
57) 長堀金造・高橋　強：畑作転換に伴う土壌物理性の変化，農土誌，45，605 ～ 610 (1977)
58) 中野啓三：低湿重粘土水田の畑転換に伴う土壌物理性の推移，北陸農試研報，21，63～94 (1978)
59) 中野啓三：土壌改良資材施用による転換畑土壌の改良，北陸農試研報，25，87～108 (1983)
60) 長野間　宏・諸遊英行：土壌の微細構造からみた畑地土壌化指数，転換畑を主体とする高度畑作技術の確立に関する総合的開発研究，研究成果集報，1，46 ～53 (1989)
61) 中島征夫：主要な汎用水田利用方式の現状と展開方式，研究ジャーナル，10 (9)，p.33～ 46 (1987)
62) 日本土壌協会編：土壌環境，農作物生育環境指標総集，p.19～25 (1986)
63) 日本土壌協会：作物生育適性診断システムの開発，平成2年度農業生産環境情報システム（ＡＳＹＳ）実用化事業報告書，p. 1～ 74 (1991)
64) 西川光一：北陸地域における田畑輪換に関する研究，石川農試特別研報，1，37 ～45 (1975)
65) 農業土木学会畑地転換対策調査委員会：畑地転換の技術的諸問題とその対策，農土誌，44，1007～1039 (1976)
66) 農林水産技術会議事務局編：重粘土地帯水田の土層

改良と用排水組織に関する研究，研究成果，56，30～46（1972）
67）農林水産技術会議事務局編：農耕地における土壌有機物変動の予測と有機物施用基準の策定，研究成果，166，115～138（1985）
68）農林水産省編：水田農業確立後期対策のための技術指針，全国農業改良普及協会発行（1990）
69）農林水産省北陸農業試験場編：北陸農業研究成果情報，8，24～25（1992）
70）農林水産省農業環境技術研究所編：地球環境変化と農業生態系に関する調査研究（1989）
71）農林水産省農蚕園芸局編：土壌環境基礎調査における土壌，水質および作物体分析法，p.75～88（1979）
72）農林水産省農蚕園芸局監修：日本の耕地土壌の実態と対策，p. 229～243（1979）
73）農林水産省統計情報部編：平成2年産作物統計，33（1992）
74）小川吉雄・酒井　一：畑地からの窒素の流出制御－環境保全・省資源的施肥への提言－，農及園，61(1)，15～20（1986）
75）荻原　漠：飼料作物の導入による田畑輪換に関する研究，山口農試研報，26，15～78（1971）
76）岡本　嘉：水稲におけるケイ酸の生理学的研究（第11報），供給量を異にしたケイ酸が水稲生育に及ぼす影響とケイ素の必須性について，日作紀，39，139～

143 (1970)

77) 岡山清司・鎌沖一夫・吉野　喬・飯田周治：水田土壌における珪酸の可溶化（第3報），土肥要旨集，27，93 (1981)

78) 岡山清司・吉野　喬：土壌溶液中のケイ酸濃度と水稲のケイ酸吸収，富山農技センター研報，5，1～14，(1989)

79) 奥田　東・高橋英一：作物に対するケイ酸の栄養生理的役割について（第6報），水稲の鉄吸収および根の酸化力に及ぼすケイ酸施用の影響，土肥誌，33，59～64 (1962)

80) 奥田　東・高橋英一：作物に対するケイ酸の栄養生理的役割について（第8報），水稲におけるケイ酸吸収の特異性，土肥誌，33，217～221 (1962)

81) 鬼鞍　豊：水中沈定容積，土壌物理性測定法，P. 385～391，養賢堂，東京 (1972)

82) 鬼鞍　豊・後藤重義：酸化還元電位，土壌養分分析法，土壌養分測定法委員会編，p. 53～69，養賢堂，東京 (1975)

83) 小野剛志・清原悦郎・高橋康利・高橋政夫：岩手県における復元田水稲栽培技術　第1報県南部沖積地帯での水稲生育収量，東北農業研究，37，51～52 (1985)

84) 小野剛志・高橋康利・村上芳子・長森克之・折坂光臣：岩手県における復元田水稲栽培技術　第3報前沢

町の台地土での復元田水稲ササニシキの事例，東北農業研究，39，83～ 84 (1986)
85) 大竹俊博：山形県におけるダイズ跡輪換田の施用法について，土肥誌，59，504 ～507 (1988)
86) 応用統計ハンドブック編集委員会編：応用統計ハンドブック，p.36～59 (1986)
87) Owen,TR. and Jurgens-Gschwind, S., Nitrates in drinking water - a review, Fertilizer Research, 10, 3 ～ 25 (1986)
88) 尾崎保夫：農業生産環境における水質保全対策と今後の課題，用水と廃水，32(2)，3～13 (1990)
89) 西天　浩・山室成一：低湿重粘土水田における田畑輪換，農業技術，43，385 ～ 389 (1988)
90) 作物分析法委員会編：栽培植物分析測定法，P.141 ～ 146，養賢堂，東京 (1976)
91) 桜井吉雄：農地排水による河川および地下水の汚染，農土誌，43(8)，518～524 (1975)
92) 関　稔・今井克彦・今泉諒俊：西三河洪積台地の重粘質田畑輪換圃場における空気噴出式弾丸暗きょ施工の排水改善，土肥誌，62，643 ～ 646 (1991)
93) 関矢信一郎：汎用水田における水稲栽培技術，研究ジャーナル，10(9)，p.14 ～ 19 (1987)
94) 島田義明・黒田　晃：セスバニアによる基盤整備田の地力増進効果，中部土肥要旨集，8 (1992)
95) 白倉治一・大滝　雅・太刀川洋一：新潟県における

粘土質水田高度利用に関する研究（第１報），新潟農試研報，23，50～68（1974）
96）城下　勉・石居企救男・高橋和夫・金子淳一：田畑輪換に関する土壌肥料学的研究，関東東山農試研報，16，50～96（1960）
97）住田弘一・大山信雄：水田土壌の湛水培養による上澄液ケイ酸，土肥誌，59，593～599（1988）
98）植物栄養実験法編集委員会編：植物栄養実験法 P. 152～159，博友社，東京（1990）
99）田渕俊雄：水田と環境問題，農土誌，59，19～23（1991）
100）立谷寿雄・池田孝男・和田山利明・館川　洋：水田高度利用の土壌肥料に関する研究，福島農試研報，3，27～46（1967）
101）高橋和平・須永静夫・菅家文左衛門：水田転換畑における土壌養分供給力の変動に関する研究　第１報作付体系が土壌理化学性におよび土壌微生物に及ぼす影響，福島農試研報，24，17～28（1985）
102）高橋和夫：鉱さいの水稲に対する肥効と水田土壌中の有効態珪酸に関する研究，四国農試研報，38，75～114（1981）
103）高橋和夫・野中邦彦：水田土壌中の有効態ケイ酸の測定法，土肥誌，57，515～517（1986）
104）高橋康利・折坂光臣・小野剛志：岩手県における小麦・大豆を基幹とする新体系化技術に関する研究

第 13 報小麦・大豆体系の連続と輪換および厩肥連用による多収維持，東北農業研究，37，161 ～162 (1985)

105) 高橋浩之・渋沢梅治郎・飯田克実：田畑輪換栽培に関する研究，第3報輪換田期間における水稲の生育並びに収量，関東東山農試研報，9，1～53 (1956)

106) 高橋浩之・飯田克実：田畑輪換栽培の生産力 第2報輪換水田における水稲及び麦の生育と収量，農及園，31，1325～1329 (1956)

107) 丹野文雄・武田敏昭：水稲の栄養診断と予測技術に関する研究（第5報），総合計量方式によるコシヒカリ，ササニシキの生育予測，福島農試研報，25，21～ 48 (1986)

108) 豊川良一・阿部 三・阿部典雄：田畑輪換による作物の増収性，青森農試研報，11，87～97 (1966)

109) 佃 和民・花井雄次・黒澤 健：田畑輪換における水田期間・畑期間の組合せと作物生産力，日作紀，58 (別1)，50～ 51 (1989)

110) Yagi, K. and Minami, K., Effect of organic matter application on methane emission from some japanese paddy fields, Soil Sci. Plant Nutr., 36, 599～610 (1990)

111) 上野正夫・熊谷勝己・富樫政博・田中伸幸：土壌窒素と緩効性被覆肥料を利用した全量基肥施肥技術，土肥誌，62，647 ～ 653 (1991)

112) 山田　忍：犂底盤について，土壌の物理性，39，31～38（1964）

113) 安田典夫：図式情報システムを利用した土壌診断による転換畑の排水対策の策定，土肥誌，62，171～177（1991）

114) 吉田昌一：水稲体内におけるケイ素の存在様式と生理的意義に関する研究，農技研報 B，15，1～58（1965）

115) 湯浅満之・境　忍・山本　博：リモートセンシング技術の応用（その 7）農土誌，55，251～257（1987）

116) 渡部幸一郎・高取　寛・桜田　博・下田英雄：田畑輪換栽培における良質米および大豆の生産安定，山形農試研報，20，1～22（1985）

117) 渡邊幸吉：北海道道央地域における復元田の土壌特性と施肥法，土肥誌，57，512～514（1986）

The Management of Sustainable Soil Productivity in the Rotation Crop System of Paddy Field

It is important to clarify how to maintain sustainable soil productivity in the rotation crop system of paddy field. This study dealds with the optimization of fertilizer application and rotation cycles in the upland-paddy rotation system. This study also presents an interpretative soil map of Kanazawa district in Ishikawa Prefecture, Japan, which supply informations for better upland-paddy rotations in this area.

1. Soil Fertility in the Upland-Paddy Field Rotation System

The silica dissolution from fields was measured by a continuous water-immersing method. However, in this method the conditions of the silica dissolution are apparently different from those in the natural dissolution. A modified surface dissolution method (SWD) which exchanged immersion water every week was compared with the continuous water-immersing method. The SWD method gave larger amounts of silica dissolution in every sample, and this method seemed to be better than the continuous water-immersing method.

The dissolution of inorganic nitrogen, phosphorous, and silica was measured by the SWD method for soils of various kinds of upland-paddy rotations. The amounts of dissolved these minerals (soil fertility

for paddy field) were correlated with "the soil drying index". Therefore, soil fertility of paddy field could be estimated by this index.

2. Optimization of Rotations in the Upland-Paddy Rotation System

Soil fertility and crop yields were compared among experimental fields with various kinds of upland-paddy rotations. The soil types of experimental fields were the Gray Lowland soil or Gley soil.

Comparing with continuous upland or paddy plantation, the upland-paddy rotations increased available soil nutrients such as nitrogen, phosphorus, and silica. The upland-paddy rotations also increased yields of paddy, barley, and soybean. Short term rotations, e.g. rotations every two or three years, were better than the other rotations systems, e.g. longer term rotations or annual rotations, to keep sustainable soil fertility. In conclusion, rotations of 2 to 3 years upland and 2 to 3 years paddy are recommended for Gray Lowland soil, and rotations of 3 to 4 years upland and 2 to 3 years paddy are for Gley soil.

3. Soil Map of Kanazawa District in Ishikawa Prefecture, Japan

It is important to construct an interpretative soil map to promote better upland-paddy rotations in Kanazawa district. Therefore, a soil map was drawn using Soil Information System in Japan (JAPSIS). In

order to draw the map, a statistical analysis (multidimensional quantification I analysis) between the suitability rank data for barley cultivation and soil survey data was carried out using a computer. According to this analysis, the suitability for barley cultivation was estimated for each area, and the areas are divided into the following three classes.

1) Suitable areas for barley cultivation

2) Moderately suitable areas for barley cultivation

3) Unsuitable areas for barley cultivation

The soil map and suitability map were combined, and printed out using an autodrafter. This map will provide useful informations for the management of upland-paddy rotations of Kanazawa district.

inches
cm
Kodak Color Control Patches
© Kodak, 2007 TM: Kodak
Blue
Cyan
Green
Yellow
Red
Magenta
White
3/Color
Black
Kodak Gray Scale
C
Y
M
© Kodak, 2007 TM: Kodak
A 1 2 3 4 5 6 M 8 9 10 11 12 13 14 15 B 17 18 19