

粘土質転換畑のダイズ増収を目的とした土壌特性 および耕うんに対する生育反応の解明

高橋智紀*

目 次

I. はしがき	24	3. 水田輪作体系下での遊離酸化鉄の形態変化と 耕うんおよび代かき特性の関係	48
1. 研究の背景	24	1) はじめに	48
2. 既往の研究	26	2) 材料と方法	48
1) 土壌の碎土性と畑地化現象	26	3) 結果	50
2) 耕うん整地に対するダイズの生育反応	28	4) 考察	53
3) 研究の目的	29	5) まとめ	56
II. 転換畑におけるダイズの収量構成要素と 土壌特性との関係	31	IV. 耕うんによる土壌水分環境の制御と ダイズの発芽および生育反応	56
1) はじめに	31	1. 粘土質転換畑での土壌鎮圧による ダイズ種子の吸水促進効果	56
2) 材料と方法	31	1) はじめに	56
3) 結果と考察	32	2) 材料と方法	57
4) まとめ	37	3) 結果	58
III. 畑地化・水田化にともなう土壌微細構造の 変化と遊離酸化鉄の形態変化	37	4) 考察	61
1. 乾燥と還元処理による土壌の微細構造の 変化に対する遊離酸化鉄の影響	37	5) まとめ	64
1) はじめに	37	2. 粘土質転換畑で畝立て栽培を行った際の ダイズの窒素吸収集積特性	65
2) 材料と方法	37	1) はじめに	65
3) 結果と考察	39	2) 材料と方法	65
4) まとめ	44	3) 結果と考察	67
2. 水田転換畑において形態変化する 遊離酸化鉄成分の指標化	44	4) まとめ	72
1) はじめに	44	V. 総括	72
2) 材料と方法	45	1. 摘要	72
3) 結果と考察	45	2. 転換畑土壌の物理性改善とダイズの 安定生産に関する課題	74
4) まとめ	48	引用文献	75
		Summary	81

I. はしがき

1. 研究の背景

日本の熱量ベースでの食料自給率は近年では40%付近で推移しており、自給率の維持・向上は日本の農業政策の大きな目標となっている。自給率の向上を図るための手段としては、土地利用率を高め自給率が低いムギ類、豆類の作付面積および収量水準を高めることが考えられる。農林水産省⁽⁷⁴⁾によると、畑地においては土地利用率の増大の余地が小さく、主に水田での輪作の活用等によって上記の要求を満たしていく必要があるとされている。

北陸地域の農耕地の89%は水田^(19, 38, 71, 116)であり、面積の35~42%は粘土質土壌が占めている^(注)。これらの土壌は保水性・排水性が劣るために植物の易有効性水分量が少なく、畑転換作物の大きな低収要因である^(41, 65, 125)。また機械作業時の碎土性が悪いため作業可能日数が制限され、これは安定生産の妨げになっている。このような土壌において水田転作を行うためには、作物の生育に対応した水分制御技術および土壌の物理性改善技術が重要だと考えられる。また、冬作の導入が難しい日本海側の水田転作の主体を担う作物はダイズであり、ダイズの生育に適した水分制御技術の開発が特に求められている。

図1に北陸地域(新潟県上越市)における土壌水分の推移をペンマン式^(59, 60)をもとに指標化したものを示す。同地域のダイズ作を考えた場合、水分制御が重要になる時期は次の3つに分けられる。第一の時期は気象的に土壌の乾燥が進みやすい5月下旬~6月上旬である⁽¹²⁵⁾。同地域の慣行栽培ではダイズの播種時期に相当し、この時期に播種床が過乾燥になると出芽が遅れ、ダイズの生育の遅延がしばしば問題となる。碎土性が悪い粘土質土壌では播種深度の調節や種子と土壌との十分な接触を確保することが難しい。さらにダイズ種子は他の作物に較べて粒が大きく、発芽に必要な一粒当たりの吸水量が大きい⁽³⁵⁾。乾燥が進みやすい気象条件だけではなく、このような土壌条件および種子の物理的特性も過乾燥による発芽不良を助長していると考えられる。

第二に重要な時期は梅雨期である。梅雨時期に相

当するため土壌が過湿となる6月下旬~7月中旬はダイズの栄養生長期から開花期に当たり、湿害による低収の危険性が最も高い時期とされている⁽⁹⁷⁾。

第三は8月中旬の乾燥が進む時期である。ダイズは要水量が高い作物であり、着莢期の水分ストレスは莢不足の原因となることが知られている⁽⁵²⁾。面積当たりの莢数の不足は子実生産に大きく影響する⁽¹⁷⁾。以上のようにそれぞれの時期に求められる水分制御は異なっており、播種時および開花~着莢期では過乾燥に対する対策が、初期生育では過湿による湿害の回避または軽減が必要となる。

上で見たようなダイズの生育に適した水分制御を行う上で、転換畑の耕うん特性は重要な要素である。一般的に水田土壌は代かきなどの影響により壁状構造と呼ばれる無構造を呈し、碎土が劣る。しかし畑転換後の年数を経るにしたがい、土壌構造が徐々に発達し、これにともない碎土性が改善する⁽⁶⁵⁾。これとは逆に長期にわたり畑転換した土壌を水田に戻した直後は、代かきの不良や「いつき」と呼ばれる土壌硬化⁽⁴⁶⁾がしばしば問題となる。こうした畑地化または水田化による物理性の変化は水田輪作での作業性や収量の安定性を妨げる要素であるが、このメカニズムは十分に解明されたとは言いがたい。

そこで、本論文では水田転換畑でのダイズの増収を目的とし、土壌側の因子として土壌の耕うん整地に影響する畑地化現象のメカニズムを明らかにする。また、いくつかの問題に対して土壌の物理的性質とダイズの生育反応の関係を明らかにし、生育に適した水分制御を実現するための耕うん整地技術に関する基礎的な知見を得るものとする。

本論文のとりまとめに当たり東北大学大学院南條正巳教授には懇切なご指導とご助言、ならびに励ましを頂いた。また東北大学大学院国分牧衛教授、同金濱耕基教授には本論文の取りまとめに際して貴重なご指導とご助言を頂いた。また同大学高橋正准教授、菅野均志助教、附属複合生態フィールド教育研究センター伊藤豊彰准教授には終始暖かい励ましを頂いた。

(注) 農耕地土壌分類⁽⁷²⁾では粘土含量が25%以上の土壌を強粘質、15%以上の土壌を粘質としており、北陸地域においては強粘質、粘質、および強粘~粘質に区分される土壌が水田土壌のそれぞれ35、22、7%である^(19, 38, 71, 116)。したがって粘土含量が25%以上の土壌は水田土壌の35~42%を占めると計算される。

本研究は旧北陸農業試験場、現農業・食品産業技術総合研究機構中央農業総合研究センター北陸研究センター土壌管理研究室および総合研究第2チームで実施したものであり、本研究の遂行に当たり、土壌管理研究室鳥山和伸室長（当時）ならびに総合研究第2チーム細川寿チーム長（当時）には実験の端緒を頂くと共に、多くのご助言と、ご協力、示唆に富むアイデア、そして激励を頂いた。

旧北陸研究センター土壌管理研究室の関矢博幸主

任研究員（当時）、原義隆主任研究員（当時）、中島秀治主任研究員（当時）ならびに旧北陸研究センター総合研究第2チーム片山勝之チーム長（当時）、松崎守夫主任研究員（当時）、細野達夫主任研究員（当時）には実験の遂行にご協力頂き、また多くの議論の機会を得ることができた。

また旧北陸研究センター水田整備研究室の足立一日出室長（当時）ならびに吉田修一郎主任研究員（当時）には土壌の物理性や水田での水移動に関して多

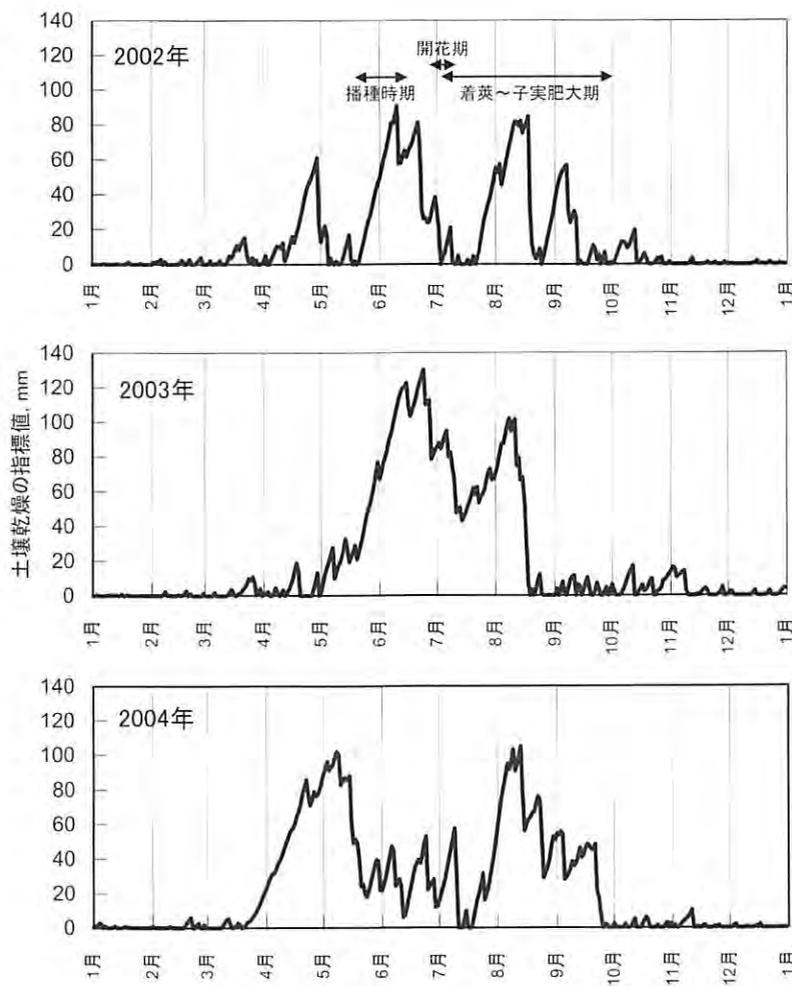


図1 新潟県上越市の2002～2004年における土壌乾燥の指標値の推移

横軸のグリッドは各月の1日。2002年の上部の矢印は上越地域のダイズ（エンレイ）のおおよその作業時期と生育ステージを示している。土壌乾燥の指標値は1月1日からの日平均ポテンシャル蒸発散量から降水量を引いた値を積算したもの。ただし、指標値はゼロ以下にならないとした（下の式参照）。ポテンシャル蒸発散量は北陸研究センターの気象観測データをもとにペンマン式^(59, 60)から計算した。

$$D_i = \text{Max} (D_{i-1} + ET_i - P_i, 0)$$

ここでD：土壌の乾燥の指標値，ET：日ポテンシャル蒸発散量，P：日降水量，i：1月1日からの日数である。またD₀ = 0と仮定した。

くの有益なご助言を頂いた。

第II章の現地調査における生産者の管理ほ場の情報収集には北陸研究センター旧農業経営研究室塩谷幸治主任研究員のご協力を頂いた。

ほ場試験では同センター業務科の猪浦俊之氏、朝岡淳一氏、小竹剛志氏、矢崎孝司氏、横山雄司氏、斉藤進氏、清水宏彰氏、関口誠氏にご支援、ご協力を頂いた。

SEMによる粘土の微細構造の撮影では同センター水田病害研究室荒井治喜主任研究員(当時)にご指導頂いた。また農業気象研究室(当時)小南靖弘主任研究員(当時)には気象データを提供して頂いた。水中沈定容積、塑性限界、液性限界の測定法は大韓民国密陽嶺南農業研究所朴昌榮博士(当時)にご指導頂いた。相対ウレイド法による根粒活性の測定法については新潟県農業試験場の高橋能彦主任(現新潟大学農学部耕地生産部長)から多くのアドバイスを頂いた。

東北農業研究センター水田作研究領域の土屋一成グループ長(当時)、西田瑞彦グループ長には論文の提出に際して多大なご協力を頂いた。

本研究は、これらの方々をはじめとした諸氏のご指導、ご援助がなくては果たせなかったものであり、ここに記して謝意を表したい。

なお、本論文は東北大学審査学位論文に一部加筆修正したものであることを付記する。

2. 既往の研究

1) 土壌の砕土性と畑地化現象

砕土性とは土壌を耕うんした際の土塊の小さくなりやすさである。一般的に土塊が小さくなると単位土壌重量当たりの作物の有効水分量が増加し、透水係数は小さくなる^(8,22)。また播種床では種子と土塊の接触率が高まり^(8,24)、あるいは土壌マルチが生成されることで蒸発による作土の乾燥が抑えられることが知られている⁽²²⁾。

耕うんによる砕土のメカニズムに関しては多くの研究蓄積がある。砕土とは土塊の破壊であるが、破壊を記述する破壊力学では欠陥(土壌の例ではクラック)が大きな役割を持つ⁽⁵¹⁾。土壌に負荷がかかると土壌構造に起因するクラックに応力が集中する。クラックの歪みエネルギーが先端部の凝集力を超えるとクラックは伸張し、クラックが土塊を横断

した際に土塊が破断され、より小さな土塊となる。これは砕土性には土塊中のクラックが大きく関与していることを示している。土塊の中ではクラックがランダムに生成されていると仮定すると、大きな土塊ほど大きなクラックを含有する確率が高く、砕土による破壊が生じやすいことが予想される。Utomo and Dexter⁽¹⁸⁾は様々な大きさの土塊の引張強度を測定し、砕土に要する力は土塊の大きさと負の関係があることを明らかにした。さらに両者の関係から土壌の脆弱性(soil friability)を定量化することを提案している。

砕土を決定するもう一つの大きな因子は土壌の含水比である^(41,49,95)。湿った土壌に力を加える場合には孔隙の増加をとともなう脆性破壊(brittle failure)が生じず、体積変化が生じない塑性流動(plastic flow)あるいは、孔隙の減少をとともなう圧縮(compression)が引き起こされることがある。後者2つは砕土に至らない変形であり、砕土性の向上には望ましくない変形様式といえる。このような湿った土壌のせん断による変形様式を説明するものとして、2つの説が一般的である。

水膜説(water film theory)では土壌粒子と周囲の水が形成する付着力に注目する⁽⁶⁾。塑性限界より低水分状態では土壌粒子間にはファンデルワールス力、陽イオンによる架橋、表面張力、有機物や三二酸化物による結合などの付着力で構造を成し、脆性破壊を生じやすい構造を形成している。含水比が塑性限界付近まで高まると拡散二重層が拡張し、拡散二重層による反発力と上記の付着力が釣り合った状態となる⁽⁷⁰⁾。この状態では力が加えられた際に土壌粒子が容易に再配列され、塑性的に変形する。さらに含水比が増加すると自由水が増加し、懸濁体は液体のように振る舞う。

2つめの説は土質力学で発展した限界状態理論(critical state theory)である^(33,94,96)。この理論では土壌の状態を、応力、歪み、体積の3要素で整理することにより、変形による体積変化を定量的に扱うことを可能にしている。土壌に荷重を加えると正規圧密線に従い主応力の増加と体積の減少が生じる(図2のaからbへのパス)。土壌のような弾塑性的な材料では、ここで除荷された時の体積の増加はわずかである(図2のbからcのパス)。この正規圧密線の内側の状態は過圧密状態と呼ばれる。限界状態

理論では限界状態線が正規圧密線と並行し過圧密側に存在すると考え、土壌がこの線より正規圧密側にある状態でせん断されると圧縮（例えば図2のbからdのパス）が、過圧密側にある状態では体積の増加（例えば図2のcからeのパス）が生じるとしている。また、せん断により限界状態線に達した土壌は体積変化がない状態で変形していく（図2の下bとe以降）。耕うん時の碎土性にこれを当てはめたとき、変形時の圧縮は好ましくないため、限界状態線よりも土壌が過圧密側に位置することが望ましい⁽⁹⁶⁾。限界状態理論が発展した土質力学は主に飽和土壌を対象とするため、メニスカスが存在する農耕地の不飽和土壌の扱いがまだ定まっていない。また農耕地土壌では水以外の結合物質による粒子間の結合力や特有な微細構造が存在しており、これらは限界状態理論の適用上の隘路になっていることが指摘されている⁽³²⁾。以上のように破壊力学をもとにした脆性破壊、あるいは湿った土壌での変形様式のいずれにおいても微細なクラックや粒子間の結合物質が形成する微細構造などが碎土性に大きく関与し

ていることが示唆され、これが定量的な扱いを困難にしている。

土壌の微細構造は粘土鉱物を最小単位とした階層構造を持つ。Quirk⁽⁸²⁾の総説をもとにスメクタイトの形成する構造を概観すると、スメクタイト鉱物は配向した複数枚のシート（elementary layer）からquasi-crystalを構成している（図3）。quasi-crystalを構成するシート間の距離はイオン種やイオン濃度の影響を受けて最小ポテンシャルエネルギーをとるように可逆的に変化する。さらにCa型のスメクタイトではquasi-crystalが複数集合してdomain構造が形成される。domain構造も配向したシートの集合体という点ではquasi-crystalと同様だが、domain構造内ではイオン結合によりシート間の膨潤が制限されている。（図3）。Quirk and Alymore⁽⁸³⁾によれば、水分と粘土粒子間エネルギーの関係や土壌の力学的なふるまいにおいてdomain構造は安定した基本単位である。quasi-crystalを構成するシート数は8～11、domain構造を構成するquasi-crystal数は11～36⁽²⁾、domainの粒子径は20 μm以下⁽⁷⁵⁾とする研究事例が存在する。Domain構造より高次な土壌構造に関しては様々なモデルが存在するが⁽⁵³⁾、いずれも有機物や三二酸化物といった結合物質が粒子間を結合している点で共通している。

壁状構造に代表されるように水田土壌では巨視的な土壌構造がほとんど発達していない^(43, 89)。しかし、畑転換後の土壌の乾燥により土壌構造は徐々に発達し、土壌構造の発達は碎土性などの作業特性の改善に貢献する⁽⁶⁵⁾。畑地化による土壌構造の変化に着目すると、-6.3 kPa（pF1.8）含水比の低下⁽⁶⁵⁾、液性限界の減少⁽⁴²⁾、水中沈定容積の減少^(45, 63)などが認められる。乾燥はメニスカスの発達を介して圧密を進めるので、-6.3 kPa含水比の低下は圧密の結果であると考えられる。中野⁽⁶⁵⁾はこのような圧密の結果、ほ場含水量が塑性限界値に近づくために碎土性が畑地化によって向上するのだと考えた。また、乾燥はクラックを発達させるために、このことも畑地化による碎土性の向上に寄与していることが予想される。一方で畑地化による塑性限界、液性限界、水中沈定容積の低下は練り返した土壌での測定値であり、このときの試料は巨視的な構造をもたない。したがってこれらの値の減少は微細な土壌構造の変化が畑地化で生じ、練り返しを経て

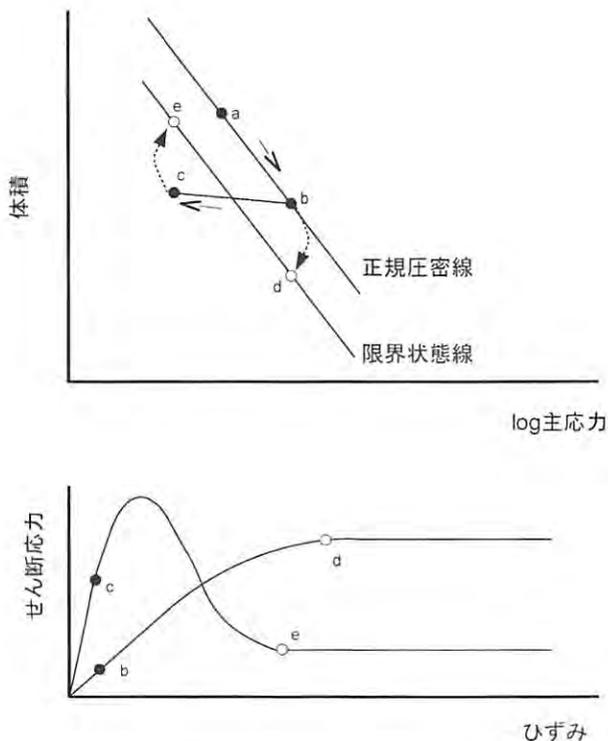


図2 限界状態理論による体積と主応力の関係（上）と2つの変形様式（下）の模式図

もこれが維持されていることを示している。Katou et al.⁽⁴²⁾は繰り返して消失しない微細構造の変化は-1.5 MPa以上の乾燥によって生じることを明らかにした。-1.0 MPa以上の乾燥はdomain構造を構成するquasi-crystalの数を増加させること⁽²⁾が知られており、上述の物理性の変化にはこのような粘土鉱物の構成する微細構造の変化が影響すると考えられる。しかし、このように生成された微細構造は容易には破壊されない⁽⁴²⁾と考えられており、復元田での塑性限界、液性限界、水中沈定容積の上昇⁽⁴⁶⁾をうまく説明することはできない。一方で齊藤・川口^(89,90)は土壌の還元が微細構造に影響を与えるという考えを示した。彼らは還元処理により懸濁液中での土壌の凝集性が増加することから、還元によって溶出した「結合物質（鉄化合物、アルミニウム、ケイ酸塩化合物、有機物）」が懸濁液中で凝集剤として働くと考察している⁽⁸⁹⁾。さらに風乾による分散性の増加の原因を乾燥処理によって溶出する有機物が結合物質と反応するためとしている⁽⁹⁰⁾。彼らの実験による乾燥は畑地化、還元は水田化に対応することが期待されるが、この場合Katou et al.⁽⁴²⁾やBen Rhïem et al.⁽²⁾が示した粘土鉱物のdomain構造の変化との対応関係は明らかではない。

以上のように水田輪作での碎土性の変化のうち、畑地化過程については乾燥による圧密や亀裂の生成で定性的に説明が可能である。しかし復元田による水中沈定容積の増加といった再水田化をも含めた全

体のサイクルを十分に説明するだけの知見は得られておらず、これを試みた研究は少ない。

2) 耕うん整地に対するダイズの生育反応

図1で示したように、北陸地域のダイズの水分環境の改善が必要な時期は、吸水・発芽時の過乾燥、梅雨時期の湿害、開花期以降の水ストレスの3つに大別される。本研究ではこのうち、発芽時の過乾燥と梅雨時期の湿害を対象とするため、以下、この2つの時期について改善技術の開発を中心に既往の知見をまとめる。

過乾燥時の吸水不良に関する日本の研究事例はほとんどない。金谷・倉田⁽⁴¹⁾は乾燥による出芽の不揃いを抑えるためには碎土率を高めることが必要としているが、ほ場においてこのような関係を定量的に確認した例は極めて少なく、碎土性と出芽率には直接的な相関関係がないとする報告も存在する⁽²⁵⁾。これは碎土性が必ずしも吸水促進の十分条件になっておらず、吸水過程に関与する他の因子との関係を解析する必要があることを意味する⁽²⁸⁾。Hadas and Russo^(23,24)は、作物には種特異の発芽に必要な水ポテンシャルの閾値があり、土壌がこれを上回る水分ポテンシャルであれば発芽率は低下しないことを明らかにした。さらに彼らは、エンドウマメの吸水速度は、浸透圧が0 kPaの溶液中と-400 kPaの溶液中では等しいが、マトリックポテンシャルが-400 kPaの土壌中では溶液に比べ小さくなることから、種子

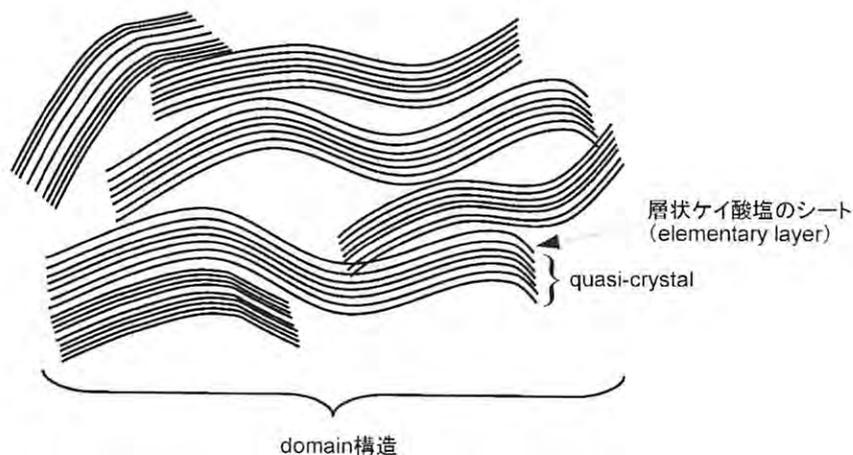


図3 土壌中でスメクタイトが形成する微細構造の模式図

Quirk and Alymore⁽⁸³⁾およびYuan et al.⁽¹²⁸⁾をもとに作図

の吸水速度を律速しているのは水分ポテンシャルではなく種子と土壌水分の接触面積であるとした。以上から吸水が発芽を律速している場合、改善すべき因子はより重要な順に、①閾値以上の水分ポテンシャルを保つこと、②種子と土壌水とを接触させること、の順になると考えられる。実用的な観点からは耕うん等により毛管連結を切断した表層を作成し、播種床からの蒸発を抑制することが種子の吸水促進に効果的であることが明らかになっている⁷⁹⁾。こうした知見は海外の乾燥地帯で得られたものであり、転換畑の播種条件において播種床の水分状態を詳しく検討した例はない。

梅雨時期の湿害に関しては多くの研究蓄積があり、湿害による減収のメカニズムは図4のようにまとめられている。過湿条件下では根粒活性および窒素吸収量が著しく低下し⁹⁷⁾、収量構成因子では莢数の減少、または粒重の低下が減収の主因となる。また生育段階が早い時期に湿害にあう程減収程度が大きいことが明らかになっている⁹⁷⁾。生育初期の湿害は根系の発達を妨げ、中期以降の干害を誘発するおそれがある⁹⁷⁾。このため初期生育における湿害防止は後半の水ストレス回避の観点からも重要であると思われる。湿害を防止する最も有効な対策は排水性の改善であり、排水性の改善技術には畝立て栽培^{36, 64, 77, 126)}、暗渠や明渠の施工¹²⁴⁾、転換畑の団地化などがある。後者2つは作業労力の問題や地権者との調整の必要性があるのに対し、畝立て整形は耕うんや播種作業と同時にできるために省力的であり近年広く普及している。また湿害後の緩和策として窒素の葉面散布⁹⁷⁾、湿害時の窒素追肥^{97, 120)}、培土¹²⁰⁾などが提案されている。いずれの緩和策においても窒素栄養環境を改善し、莢数の増加を図る点が共通する。近年では畝立て栽培による湿害防止と施肥による窒素栄養環境の改善を組み合わせた栽培体系も提案されているが⁶⁴⁾、畝立て栽培による湿害回避が窒素栄養環境へ及ぼす影響については、まとまった知見はない。

3) 研究の目的

これまでに述べたように北陸地域の転換畑におけるダイズ作では営農的な水分制御技術の開発が求められている。また耕うんなどにより営農的に水分制

御を行うためには、その作業効率を考えると畑地化を促進し、土壌のハンドリング特性を改善することで耕うん整地作業を効率化することが重要である。このような考えのもと、本研究では大きく3つの目的を設定した。第一の目的は営農ほ場において転換畑での土壌特性とダイズ収量との関係の実態を整理し、技術開発に資する知見を得ることである。第二は転換畑の物理性改善を最終的な目的とし、畑地化による土壌の微細構造の変化機構を明らかにすることである。そして第三の目的は北陸地域の転換畑におけるダイズ作において耕うん方法等の工夫による水分制御がダイズの生育に与える影響を明らかにすることである。第一の目的を達成するために、以下の①を、第二、第三の目的についてはそれぞれ②～③および④、⑤の個別研究を行った。なお、それぞれの試験を設定した背景等の詳細は該当部分で改めて述べることとする。

- ① 同地域のダイズ研究のほとんどは試験研究機関の集約的に管理されたほ場から得られたデータに基づいており、実際の営農現場からデータを収集し、解析した例は非常に少ない。そこで、栽培法や品種、気象条件が同一であるほ場のダイズの収量構成要素を土壌特性から解析し、同地域の土壌の物理性と化学性がダイズの収量構成要素に及ぼす影響を解析した。
- ② 次に耕うん作業時の碎土性を決定する因子の一つである「畑地化現象」について解析を試みた。ここでは畑地化による水中沈定容積の減少が不可逆的である点に着目し、この機構に遊離酸化鉄が寄与している可能性について検討した。Katou et al.⁴²⁾は乾燥による水中沈定容積の減少と復元田における水中沈定容積の増加について、遊離酸化鉄が結合物質として微細構造の生成に影響し、遊離酸化鉄の還元が微細構造の不安定化と水中沈定容積の増加に寄与する可能性を論じている。また、土壌構造を形成する代表的な結合物質である有機物について、含有量の大小にかかわらず物理性の変化は同等に生じることから関与の可能性は疑わしいとしている。しかし、遊離酸化鉄の還元が土壌の微細構造に与える影響は明らかとなっていない。そこで本研究においては水田土壌と実験室内で合成した酸化鉄-スメクタイトの複合体を用い、遊離酸化鉄

を含む土壌の乾燥および還元が土壌の微細構造に与える影響を明らかにすることを目的とした。

- ③ 復元田における遊離酸化鉄の形態は水田履歴によって大きく変化することが知られている^(20, 86, 121)。しかし、日本の水田輪作での形態変化は明らかではなく、これを評価するための抽出法を包括的に検討した例はない。ここでは転換畑に特異的に存在すると考えられる遊離酸化鉄を指標化するための抽出法を策定することを目的とした。

- ④ 次に③の結果を受け、短中期の畑転換あるいはその後の復元田における遊離酸化鉄の形態変化の詳細を検討した。さらに、遊離酸化鉄の形態変化と微細構造の変化との関係をほ場において観察することを目的とした。また、機械作業特性として土壌の碎土性または代かき特性と微細構造、遊離酸化鉄の形態との関連についても検討した。
- ⑤ 播種時の過乾燥はダイズの苗立ちを遅延あるいは低下させるために、安定生産を実現する最初

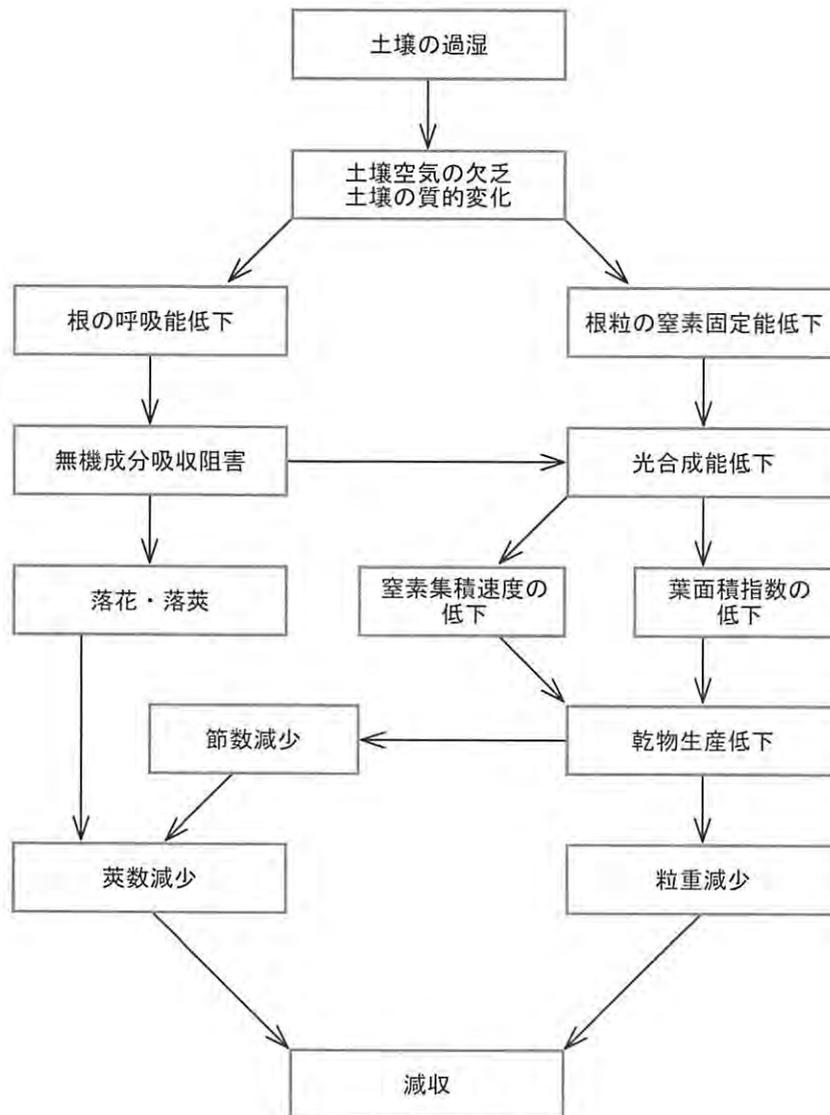


図4 土壌の過湿によるダイズの減収機構⁽⁹⁷⁾の模式図

著者からの情報により一部出典から修正を加えた

の関門となっている。営農現場では経験的に耕うん深度、砕土、播種深度、播種後の鎮圧等の工夫によって吸水・発芽の制御を試みており、実際の種子の吸水過程では、こうした営農作業上の諸因子が複雑に関与していることが推察される。しかし国内では上に挙げた営農作業上の諸因子のうち砕土性と発芽の関係に関する研究例は散見される⁽⁴¹⁾が、耕うん深度、播種深度、播種後の鎮圧等に関する検討例はほとんど見当たらない。そこで、本研究では播種後の鎮圧処理が播種床の水分環境およびダイズ種子の吸水特性に与える影響を検討した。

⑥ 近年急速に普及しているダイズ畝立て栽培^(36, 64, 77, 126)は排水性の悪い転換畑でのダイズ収量を増加させることが知られている。これは高畝にすることにより地下水位を相対的に下げ、湿害を回避することを目的としたものであるが、湿害との関連が深いダイズの窒素栄養環境に対する知見はほとんどない。そこで本実験では、畝立て栽培がダイズの窒素集積特性、根系発達への影響を明らかにすることを目的とした。

本研究は中央農業総合研究センター北陸研究センター（旧北陸農業試験場）において行ったものである。

II. 転換畑におけるダイズの収量構成要素と土壌特性との関係⁽¹⁰³⁾

1) はじめに

試験研究機関で蓄積された湿害対策技術や肥培管理技術を営農現場で活用するためには、営農現場における低収要因を明確にすることが必要である。しかしながらダイズ研究のほとんどは試験研究機関内の集約的に管理されたほ場から得られたデータに基づいており、実際の営農現場からデータを収集し、解析した例は非常に少ない。転換畑における土壌管理上の課題は大きく2つ存在すると思われる。1点目は排水対策である。北陸地域は粘土含量が25%以上である強粘質土壌が水田面積の35%以上を占めるため排水性が悪く、湿害によるダイズ収量の低下または不安定化が問題となりやすい。2点目は地力の維持である。畑転換によって土壌の全窒素量^(87, 98)、あるいは潜在的窒素供給力が減少する⁽¹¹⁾ため、近年では地力窒素の減耗によるダイズ収量の減少が指摘されている^(76, 98)。しかし、両者がこの地域のダイズの収量にどのように影響しているかを整理した例はない。そこで、これらのデータをもとに営農現場において上述した排水性や地力窒素といった土壌特性がダイズ収量に及ぼす影響について検討した。

2) 材料と方法

(1) 調査対象ほ場および耕種概要

調査は2002年に行い、新潟県上越地域の単一生産組織が耕作する33筆の転換畑ほ場を対象とした。ほ場は、生産組織周辺の平野部に位置しているため

気象的な変異は小さい。また、単一生産組織が管理しているため耕種概要は同一であることが確認されている。この2つの理由から、各ほ場における収量のばらつきは主にほ場の土壌条件の相違に由来すると考えられる。

対象ほ場の耕種概要は以下のとおりである。すべてのほ場において周囲明渠を施行されていたが、ほ場によっては排水の高さが明渠に較べて高く、明渠が正常に機能していないほ場も存在した。耕うん前に苦土生石灰を 40 g m^{-2} 散布し、5月27日～6月1日に耕うん・播種を行った。播種時には同時に速効性肥料を側条施用した。成分はN, P_2O_5 , K_2O 換算でそれぞれ1.6, 6.0, 8.0 g m^{-2} であった。中耕培土は7月中下旬に2回行い、収穫は10月10日～26日であった。品種はすべてエンレイであった。なお、上述の耕種概要は新潟県の栽培指針とほぼ等しく、地域の一般的な栽培法であると思われる。

対象ほ場において耕うん直前の5月16日に深さ10 cmまでの土壌を採取し、同時に暗渠の有無と前作の作物種を調査した。対象ほ場の土壌型は斑鉄型グライ低地土または還元型グライ低地土であった⁽⁷²⁾。

(2) 土壌分析と収穫期におけるダイズの形質の調査

採取した土壌について、採取時の含水比、pH、全窒素含量、粒径組成⁽¹⁰⁾、4週間と12週間の畑培養による可給態窒素量¹⁰⁾、EDTA-NaF可溶態リン量⁽⁶⁹⁾を測定した。pHと可給態窒素量の測定には未

風乾の土壌を用いた。

10月4日～10日にかけて対象ほ場においてダイズ地上部を1.5 m²の面積、2反復でサンプリングし、収穫期のダイズの形質を調査した。調査項目は収量、株数、全重、主茎長、主茎節数、莢数、百粒重、子実のタンパク含量とした。収量には含水率を14%とした子実重を、子実のタンパク含量には子実の乾燥重をベースとした窒素含量に6.25をかけた値を用いた。

3) 結果と考察

(1) 作付け期間中の気象の推移

調査を行った2002年の旬別の日平均気温および日射量の推移は1998年から2007年までの10年間の平均値にはほぼ等しく(図5)、平年並みに推移した。2002年の梅雨入りは6月11日頃、梅雨明けは7月23日頃であり、梅雨後半に相当する7月上中旬の降水量は10年間の平均の2.1倍と顕著に多かった。ダイズの開花期は7月23日頃であり、梅雨明けにはほぼ一致した。以上、2002年は気象的には特異年

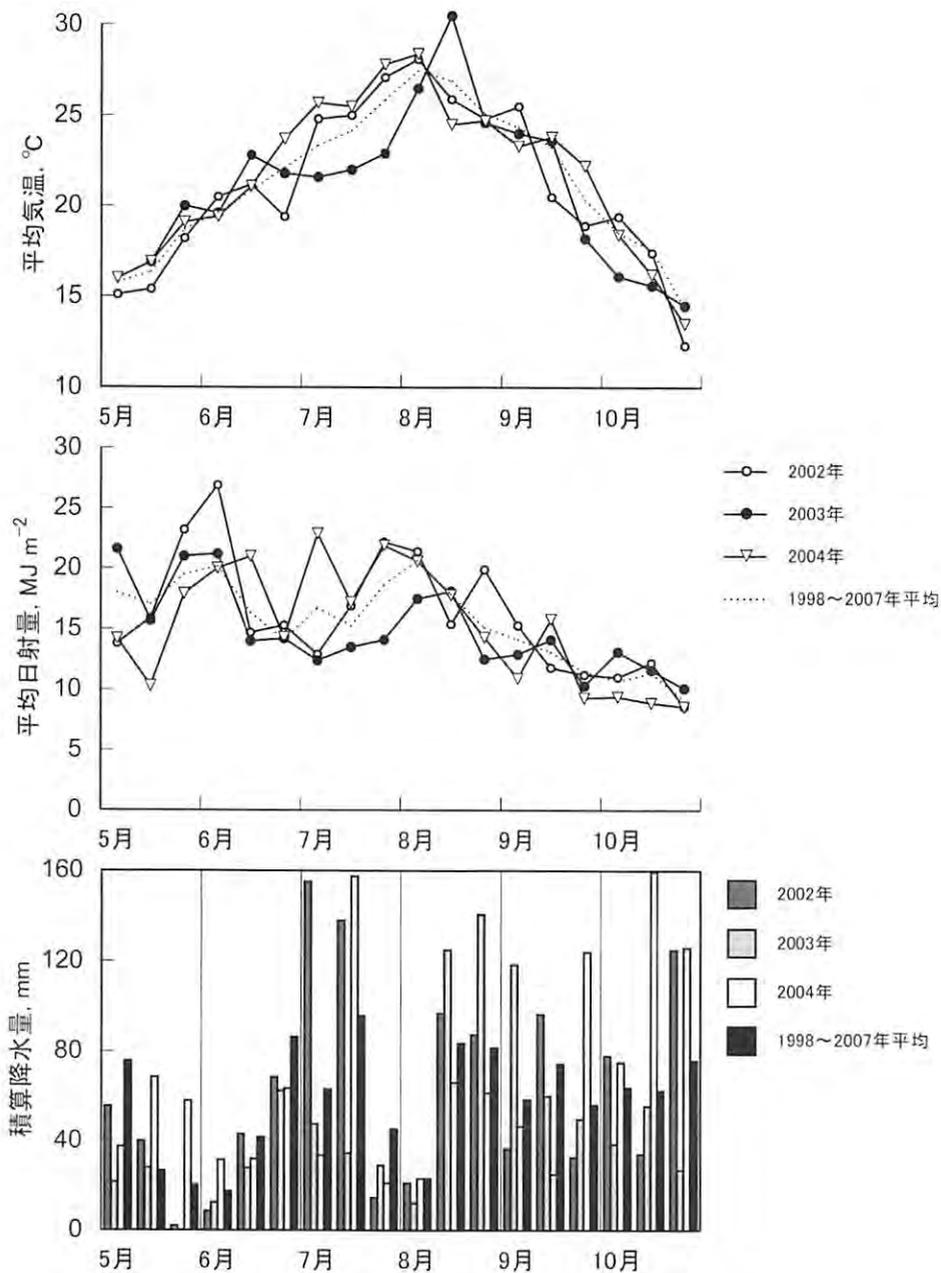


図5 2002, 2003, 2004年の旬別平均気温、平均日射量、積算降水量の推移と1998～2007年の平均値との比較

ではないが、梅雨後半の降水量が多く、開花期頃に比較的湿害があらわれやすい年であった。

気温が地温に等しいと仮定し、播種日からの気温を積算すると4週間培養、12週間培養の窒素無機化量はそれぞれ、7月上旬頃、9月中旬頃までの窒素無機化量に相当した。

(2) 収量と土壌特性との関係

対象ほ場を暗渠の有無で2グループに分けると、それぞれのほ場の含水比には有意差が認められた(表1)。このことは耕うん前の土壌の含水比は、暗渠の有無により異なる2つの母集団に分けられることを意味する。また、すべてのほ場において冬作や秋耕は行われていなかったため、耕うん前の含水比

はほ場の排水性を反映しているものと考えられた。作付け期間中のほ場含水比データが得られなかったため、以後は作付け期間中もほ場の排水性が暗渠の有無により2グループに分けられると仮定し、解析を行った。

収量は耕うん時の含水比と負、粘土含量とは有意な正の相関関係が認められた(表2、図6)。粘土含量と収量との間には正の相関があるが、これは排水性が高い暗渠整備済みほ場において両者に有意な相関がみられるためであった(図6)。また4週間培養の可給態窒素量と収量との間には有意な相関は認められなかった。これらの結果から、この地域では地力窒素は収量を決定する因子ではなく、むしろ排水性が劣るために湿害が発生したことが収量低下の

表1 排水性がダイズの形質に及ぼす影響

	暗渠整備済み [†]	暗渠未整備 [†]	有意差検定の危険率 [‡] (%)
ほ場含水比, %	50	73	0.03
収量, g m ⁻²	420	330	0.004
主莖長, m	0.60	0.51	0.2
収穫指数	0.57	0.59	20
莢数, m ⁻²	820	690	0.2
百粒重, g	31.0	29.8	3
全重, g m ⁻²	620	490	0.003
粒数, m ⁻²	1400	1100	0.03
一莢粒数	1.7	1.6	40
株数, m ⁻²	14	14	10
タンパク含量, %	43	41	0.01
n	12	21	

[†]それぞれのほ場の平均値, [‡]Mann-Whitney検定による。

表2 土壌の諸特性およびダイズ収量との相関係数

土壌特性	単位	最小値~最大値	平均値	相関係数
ほ場含水比	%	35.4 ~ 92.5	64.8	-0.40 *
最大容水量	%	62 ~ 128	93	-0.04
窒素無機化量(4週)	g kg ⁻¹	0.025 ~ 0.124	0.069	-0.29
pH		4.8 ~ 6.2	5.1	-0.06
全窒素含量	g kg ⁻¹	1.1 ~ 3.4	0.25	-0.16
粘土含量	%	20.5 ~ 57.8	38.8	0.36 *
シルト含量	%	22.0 ~ 46.9	33.1	0.21
砂含量	%	12.6 ~ 56.3	29.3	-0.25
無機態リン量	g-P ₂ O ₅ kg ⁻¹	0.59 ~ 3.17	1.55	-0.15

* 5%以下の危険率で有意 (n = 33)

主因であること、排水性が比較的高いほ場では粘土含量に反映されるなんらかの土壤特性が収量に影響を与えていること、が推察された。

耕うん時の含水比と4週間培養の可給態窒素量との間には高い正の相関が認められ(データ省略, $r = 0.74$, $p < 0.001$)、排水の悪いほ場では可給態窒素含量が高い傾向だった。一般的に転換畑は土壌が好気的な条件になることによって窒素の無機化が促進され⁽⁸⁷⁾、中粗粒灰色低地土では、これが地力窒素の減少としてあらわれる⁽¹¹¹⁾。また高収量のダイズを得た例ではほ場の窒素収支がマイナスとなることが報告されている⁽¹¹²⁾。近年では、こうした可給態窒素量の減少がダイズ収量を減少させる可能性が指摘されている^(76,98)。しかしこの結果からは上述の相関関係が土壌の好気化による地力窒素の減少で

あるとする直接的なデータは得られず、両者の因果関係は必ずしも明らかではなかった。

(3) ダイズの諸形質に対する排水性および可給態窒素の影響

暗渠の有無を基準には場の排水性を2グループに分類し、排水性が各形質に与える影響を検討すると、株数、一莢粒数、収穫指数を除くすべての形質において暗渠未整備ほ場での数値の減少が有意に認められた(表1)。ダイズの収量決定過程を構成要素に分解し、各構成要素と収量との決定係数(r^2)を求めたものが表3である。ダイズの収量は株数、莢数、粒数、百粒重の順に決定されるが、暗渠整備済みほ場においては粒数の決定までの回帰の寄与率が52%であり、残りの48%は粒数決定以降の形質が

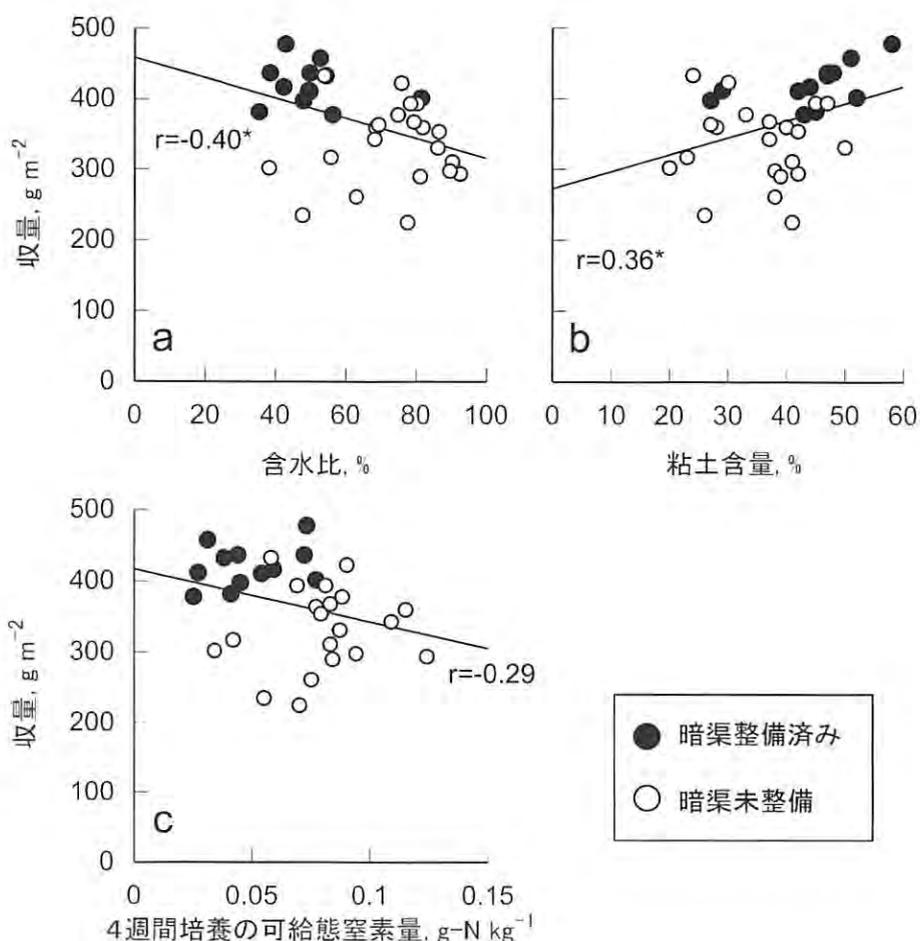


図6 収量と含水比、粘土含量および4週間培養の可給態窒素量との関係

*はすべてのプロットに対する相関係数が5%の水準で有意であることを示す。

寄与したものと計算された。これは百粒重がほ場の収量差を決定する最も大きな因子だったことを意味し、百粒重と収量との間には有意な相関関係が認められた(表3, $r^2 = 0.35$, $p < 0.05$)。これに対し未整備ほ場では莢数および粒数の回帰の寄与率がそれぞれ82, 93%であった。すなわち排水性が悪いほ場においては莢数のばらつきが収量差の主因であるのに対し、排水性がよいほ場では子実の肥大過程が収量差に反映されていた。

排水性が収量決定過程に与える影響をさらに詳しく検討するため、収量構成要素の各段階と次の段階の要素との関係を見た(図7)。暗渠整備済みほ場では面積当たりの株数が少ないほど株当たりの莢数が多く(図7a)、これは莢数が株数に対して補償的に働いたためと考えられた。これに対して暗渠未整備

ほ場では相関係数は有意でなく、補償的な作用は認められなかった。莢数に対する一莢粒数においても同じ傾向が認められた(図7b)。これらの結果、暗渠未整備ほ場の粒数は少なく、ばらつきは大きかった(図7c)。つまり、排水性の低いほ場においては、粒数決定までの各段階において補償的な作用

表3 ダイズの形質と収量との決定係数 (r^2)[†]

大豆の形質	暗渠整備済み	暗渠未整備
株数, m^{-2}	0.69	20
莢数, m^{-2}	20	82
粒数, m^{-2}	52	93
百粒重, g	35	0.08
n	12	21

[†]単位は%

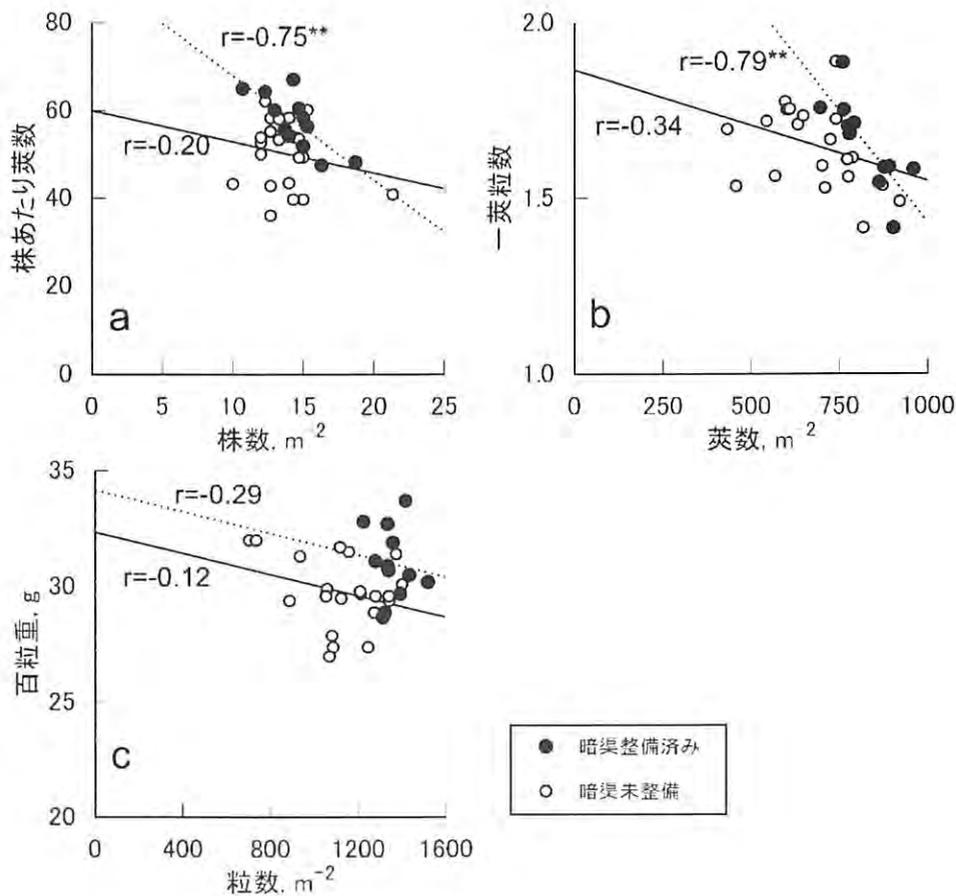


図7 各収量構成要素の補償的作用

**は1%の危険率で相関係数が有意であることを示す。

が十分発揮されない結果、莢数および粒数が収量差の主因となり、全体の収量も暗渠整備済みほ場に比べ低い傾向となった。杉本⁽⁹⁷⁾は人為的な過湿処理によるダイズの湿害に関して詳細な研究を行い、早期に湿害を被るほど減収割合が大きく、特に莢数の減少が収量減を引き起こすことを示している。さらに莢数減少の主な原因として、乾物生産が不足することによる総節数の減少と、根の呼吸阻害による落花・落莢の2つを挙げている。今回の結果においても排水性の低いほ場において、莢数または粒数の差が収量差の主な原因である点、株数に対して莢数に補償的な作用が働いていない点、が杉本の報告と一致し、杉本の過湿処理と同様の現象が営農ほ場で生じていたといえる。総節数の増加には下位節から発生する分枝が大きく寄与する⁽¹¹⁴⁾が、対象とした地域では降水量が多い梅雨時期が下位分枝の発生時期と重なり、分枝の発生が抑えられたことが莢数が補償されなかった原因であると思われる。また、一莢粒数の決定に関して暗渠整備済みほ場においては補償的な作用が認められるのに対し、未整備ほ場でそれが認められなかった(図7b)。一莢粒数は開花期までの窒素栄養の影響を大きく受ける⁽¹⁸⁾ため、莢数と同様に乾物生産の不足や湿害による根の伸長あるいは根粒活性の阻害が一莢粒数を決定したと考えられる。しかし一莢粒数決定に関する研究蓄積は少なく、その詳細については明らかではなかった。

次に暗渠整備済みほ場において収量差の主因となったほ場間の百粒重の差について検討した。百粒重は粒数に対して補償的な関係は認められず、その決定は粒数には依存していないと考えられた(図7c)。土壌条件との関連をみると、4週間培養における可給態窒素量と百粒重との間に有意な相関が認められた(表4)。12週間培養との相関も有意であったが、4週から12週間の窒素無機化量との間には相関はなく、4週間以降の窒素無機化量は百粒重に影響しないようだった。4週間培養の可給態窒素量は開花期前までの無機化量に相当すると考えられるため、この時期に無機化した窒素が直接百粒重に影響を与えたとは考えにくい。しかし、この時期の環境や形質と百粒重との相関が高いという例はいくつか存在する。藤本ら⁽¹⁸⁾は根粒非着生系統を用い、百粒重は播種後1ヶ月から開花期の間の窒素追肥で増大するとしている。また、佐々木⁽⁹¹⁾は開

花期の主茎長と百粒重(千粒重)との間に高い相関があることを報告している。シンクとソースの関係では光合成産物・集積窒素ともにシンク(粒数)の決定以降はソースが百粒重を規定するとされている^(88,110)。4週間培養以降の可給態窒素量と百粒重との相関が認められないこと(表4)、葉の切除によって百粒重は顕著に低下すること⁽⁸⁸⁾、窒素固定が期待できない根粒非着生系統においても開花期以降よりも開花期以前の追肥が百粒重の増加に効果的であること⁽⁴⁸⁾、から百粒重の増加には集積窒素よりも光合成産物が制限となっている可能性が高い。これらから暗渠整備済みほ場においては初期に無機化される窒素が葉面積の増大などを介して子実肥大に影響を与えている可能性が考えられるが、これを検証するデータは無く、今後の検討が必要である。排水性が低い暗渠未整備ほ場において百粒重と可給態窒素量との相関が認められなかった(表4)のは、前述のように排水性が低いほ場では、初期生育の不良によって粒数のばらつきが大きく(図7c)、地力の影響がマスクされてしまったためと考えられる。

(4) 増収のための土壌管理技術

以上の結果は、莢数の確保および百粒重の増加がダイズの増収に向けた土壌管理技術を考える上での2つの大きなポイントであることを示している。

排水性が低く、莢数不足が収量を律しているほ場においては、増収のためには莢数の確保が求められる。株数が収量の20%を決定した(表3)ことから第一には安定した出芽・苗立ちを図り、株数を確保することが重要である。第二には莢数の確保が挙げられる。近年、畝立て栽培によって見かけの地下水位を下降させること⁽³⁶⁾、あるいは湿害を被ったダイズへの肥効調節型肥料を施用することで湿害を回避ないしは軽減する技術が報告⁽⁵⁷⁾されているが、

表4 可給態窒素量と百粒重との相関係数(r)

可給態窒素量	暗渠整備済み	暗渠未整備
4週間培養(a)	0.71**	0.13
12週間培養(b)	0.62*	0.03
(b)-(a)	0.42	0.25
n	12	21

*, **はそれぞれ5%, 1%の危険率で有意であることを示す。

両技術ともに分枝数の増加を促し、節数および莢数の確保を図っている。排水性が低い莢数減少型のほ場ではこれらの技術の導入が特に有効であると考えられるが、今回のデータでは窒素肥沃度と収量との相関は低く（表2）、排水性の改善が優先されるべきであるという結果となった。

比較的排水性が高いほ場においては百粒重の増大が収量に寄与した（表3）。さらに百粒重と4週間培養の可給態窒素量は正の有意な相関があった（表4）。この詳しい機作は不明であるが、この結果は近年指摘されているダイズの地力問題と照らし合わせて考えると重要な意味を持つ。田村⁽¹¹¹⁾は同一土壌を比較した場合、過去において夏作に畑利用した割合が高い水田ほど4週間畑培養での乾土効果が減少することを示している。このことは、畑転換による地力窒素の減少は4週間培養での窒素無機化量の減少において顕著にあらわれることを示している。前

述の結果から考えると、田村の指摘するような畑転換による地力の減耗が生じた際、生育前半に湿害を受けず、一定の粒数が確保される土壌においては百粒重を通じて収量低下があらわれることが懸念される。地力窒素とダイズの収量との関係についてはさらなる検討が必要だと考える。

4) まとめ

- ① 当地域のダイズ収量は作土中の可給態窒素量よりも土壌の排水性に強く影響を受けていた。
- ② 湿害強度の高い暗渠未整備ほ場では粒数の決定までの過程に粒数決定要素の補償作用が機能せず、これが収量を強く制限した。
- ③ 比較的排水性が高い暗渠整備済みほ場では百粒重が収量に最も強く影響し、百粒重と4週間培養の窒素無機化量との間に有意な相関が認められた。

Ⅲ. 畑地化・水田化にともなう土壌微細構造の変化と遊離酸化鉄の形態変化

1. 乾燥と還元処理による土壌の微細構造の変化に対する遊離酸化鉄の影響⁽¹⁰⁴⁾

1) はじめに

第Ⅱ章でみたように水田転換畑でのダイズの安定生産には初期生育の改善が重要であり、耕うん・整地の工夫による改善の余地が大きいように思われる。しかし、粘土質土壌はハンドリングが悪く、良い耕うん状態（soil tilth）を得ることが難しい。碎土性は土壌構造に大きく影響されるが、畑地化での土壌構造変化のメカニズムは十分明らかになっていない。

第Ⅲ章では土壌中の遊離酸化鉄に着目して畑地化・水田化による微細構造の変化を解析する。鉄やアルミニウムの遊離（水）酸化物が土壌構造の不可逆的变化に寄与するという報告は過去にいくつか存在する。Kubota⁽⁴⁷⁾は水分ポテンシャル-1.5 MPa以上の乾燥において黒ボク土が不可逆的に凝集することを明らかにし、これはアロフェン鉱物の脱水とoliationによると推察している。さらにIwata et al.⁽³⁹⁾はこのような不可逆的な変化はアロフェンを含む土壌に特有の現象ではなく、三二酸化物を含む土壌において普遍的に生じる現象であることを明らかにしている。このような研究蓄積があるにも関わらず転

換畑土壌またはこれを再び水田に還元した還元田土壌における微細構造に関しては研究例が極めて少ない。Katou et al.⁽⁴²⁾は畑転換によって生じる水中沈定容積の減少と還元田における水中沈定容積の増加は単純な可逆的な過程でないことを議論している。彼らは遊離酸化鉄が結合物質として土壌構造の生成に影響し、鉄の還元が微細構造の不安定化と水中沈定容積の増加に寄与する可能性を指摘し、同時に結合物質の一つである有機物については含有量と力学性の変化の間に関連性が認められないことからその重要性に疑問を呈している。彼らの議論をさらに進めるためには、遊離酸化鉄の還元が土壌の微細構造に与える影響を明らかにし、水田輪作での微細構造の変化を畑地化と水田化の両面から検討する必要がある。そこでこの節では主に実験室内で合成した遊離酸化鉄-スメクタイトの複合体を用い、遊離酸化鉄を含む土壌の乾燥および還元が土壌の微細構造に与える影響を明らかにすることを目的とした。

2) 材料と方法

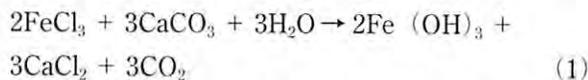
(1) 土壌

実験に供試した土壌（以下、この節では水田土壌とする）は北陸農業試験場（現在、中央農業総合研

究センター北陸研究センター)内の水稲連作土壌である。0~10 cmの土壌を採取し、採取土壌はただちに2 mmのふるいを通し、ほ場水分の状態、4℃条件下で保存した。土壌型は農耕地土壌分類第3次改訂版⁽⁷²⁾では斑鉄型グライ低地土、USDAによる分類⁽¹¹⁷⁾ではEpiaqueptsである。水田土壌の粘土含量は 380 g kg^{-1} であり、土性は軽埴土(LiC)に分類された。この土壌の粘土鉱物のほぼスメクタイトで占められ、X線回折ではその他の粘土鉱物のピークは観察されなかった。遊離酸化鉄含量⁽³⁴⁾は 13 g kg^{-1} であった。

(2) スメクタイト-酸化鉄複合体の精製

Blakemore⁽³⁾をもとに遊離酸化鉄を合成し、スメクタイトに混和することで様々な量の遊離酸化物を含むスメクタイト-酸化鉄複合体を作出した。105℃乾燥重で10 gの市販ベントナイト(和光純薬)を遠沈管にとり500 mLの 1 mol L^{-1} NaCl水溶液中で超音波処理と1時間の振とう処理を行った。このうち、試料を2000 rpm ($r = 30 \text{ cm}$)で10分間遠心分離し、上澄みをデカントした。この処理を2回繰り返す。分散したスメクタイトを得た。次に様々な濃度の 1 mol L^{-1} の塩化鉄(III)と炭酸カルシウムをモル比が2:3となるように加えた。このとき、以下の反応により $\text{Fe}(\text{OH})_3$ の沈殿が生じる。



得られた試料は500 mLの 0.01 mol L^{-1} CaCl_2 で16時間振とう・遠心分離の操作を5回繰り返す。余分な塩を除いた。洗浄した試料の一部については風乾後に後述する分析に用いた。残りの試料は水分を含んだままの状態を実験まで保存した。精製した複合体の遊離酸化鉄含量⁽³⁴⁾を測定したところ、0~ 85 g kg^{-1} の範囲であった。

(3) 実験1: 水田土壌の水中沈定容積の変化

最初に水田土壌を様々な水分ポテンシャルに調整した。-31 kPaから-1.0 MPaまでは加圧盤法を、-2.9 MPaから-229 MPaまでは水蒸気平衡法^(42,66)を用いた。水分ポテンシャルはマトリックポテンシャルと浸透ポテンシャルの和であり、加圧盤法ではマトリックポテンシャルのみが、水蒸気平衡法は両者とも調整されるために2つの測定法は厳密には

一致しない。しかし、この論文の測定条件においては浸透ポテンシャルはマトリックポテンシャルに比べ無視しうる値であることから⁽⁶⁶⁾、両測定法の結果を同一に扱うこととした。調整を施した試料の一部を用いて含水比を測定し、残りの試料は水中沈定容積の測定に用いた。水中沈定容積は以下の方法で測定した。乾土換算で1.0 gの土壌を10 mL容の目盛り付きポリエチレンチューブに秤り取り9 mLの 55.5 mmol L^{-1} のNaCl溶液を加えた。試料を16時間振とう後、蒸留水を用いて懸濁液の容積を10 mLとした。遠沈管を48時間後静置後沈定した懸濁土壌の容積を目盛りから読み取った。

湛水が水中沈定容積に及ぼす影響を検討するため試料の湛水培養を行った。乾土換算で1.0 gの土壌を10 mL用の目盛り付きポリエチレンチューブに秤り取り8 mLの蒸留水を加えた。チューブは密栓し微生物活性を制御するために温度条件を20℃、30℃、40℃の3段階とし、湛水培養を行った。また、微生物の基質となる0.1 gのデキストロースを加えたうえで30℃で培養する処理も設けた。培養試料は定期的に取り出しpH、pH2.8酢酸緩衝液可溶二価鉄⁽⁴⁸⁾、および水中沈定容積を測定した。水中沈定容積の測定には1 mLの 0.5 mol L^{-1} NaClを加え16時間振とうし、静置後の容積を読み取った。pH2.8酢酸緩衝液可溶二価鉄の主体は二価の遊離酸化鉄画分であるとされている。また、二価鉄の定量は1-10 オルトフェナントロリンによる比色法を用いた⁽⁵⁵⁾。

土壌還元の影響は還元剤を添加する化学的還元の場合についても検討した。乾土換算で1.0 gの土壌を10 mL容の目盛り付きポリエチレンチューブに秤り取り、9 mLのNaClとアスコルビン酸ナトリウムの混合液を加えた。この混合液は 55.5 mmol L^{-1} の塩化ナトリウムと様々な濃度のアスコルビン酸を含む。これらの試料について16時間振とうを行い、10 mLに定容し、水中沈定容積、pH、pH2.8酢酸緩衝液可溶二価鉄を測定した。

(4) 実験2: スメクタイト-遊離酸化鉄複合体の水中沈定容積の変化

スメクタイト-遊離酸化鉄複合体についても乾燥と還元処理による水中沈定容積の変化を測定した。測定手法は上述のとおりであるが供試した試料の量

は 105°C 乾土ベースで 0.5 g とした。

粘土鉱物が形成する微細孔隙の半径は水分特性曲線をもとに以下の Young-Laplace 式⁽⁸²⁾によって計算した。

$$r = \frac{2\gamma}{P_d} \cos\theta \quad (2)$$

ただし r , γ , P_d , および θ はそれぞれスリット様の孔隙を仮定した際の孔隙半径, 水の表面張力, マトリックポテンシャルの減少量および水と粘土鉱物の接触角を示す。水の表面張力には $73 \times 10^{-3} \text{N m}^{-1}$ を, 接触角度には 0° を用いた。

風乾した試料は白金によってコートし, 走査型電子顕微鏡 (SEM) によって試料の観察を行った。

(5) 実験 3: 遊離酸化鉄の添加後の水中沈定容積の変化

土壌の微細構造の変化への影響を検討するために乾燥と遊離酸化鉄の添加の順番を入れ替える実験を行った。すなわち上述した遊離酸化鉄とスメクタイトの精製を別々に行い, 室温条件下で 1 週間乾燥させた。これを混合することで 85g kg^{-1} の遊離酸化鉄を含む試料を作成し, 上述と同様の方法で測定した。

3) 結果と考察

(1) 乾燥にともなう水中沈定容積の変化

スメクタイト-遊離酸化鉄複合体の水中沈定容積は -1.5 MPa 以上の乾燥によって減少し, この傾向は水田土壌と等しかった (図 8)。水中沈定容積の減少量は遊離酸化鉄を添加していないスメクタイトに比較し鉄を添加したスメクタイトで大きかった。この傾向を示したものが表 5 の d/f 比である。d/f 比は未乾燥と乾燥試料の水中沈定容積の比を求めたものであり, スメクタイト-遊離酸化鉄複合体中の鉄含量が増加するにつれてこの比は減少した。

粘土粒子の形成する微細構造の変化は乾燥による水中沈定容積の減少の主因の一つとされている。Katou et al.⁽⁴²⁾ は乾燥による水中沈定容積の減少は層状ケイ酸塩の空間的配置の変化によるとしている。彼らの説明にしたがうと乾燥によって層状ケイ酸塩の domain 構造の形成が促進され, 浸水による再膨潤でもこの構造は変化しない, したがって「水中で」測定する水中沈定容積において過去の乾燥履歴による domain 構造の発達を観測される。しかし一方で -1.5 MPa は三二酸化物⁽⁴⁷⁾ および土壌有機物⁽⁶⁷⁾ が疎水的に変化する閾値の水分ポテンシャルとしても知られており, これらの結合物質の影響については十分な解釈が与えられていない。今回の結果では層状

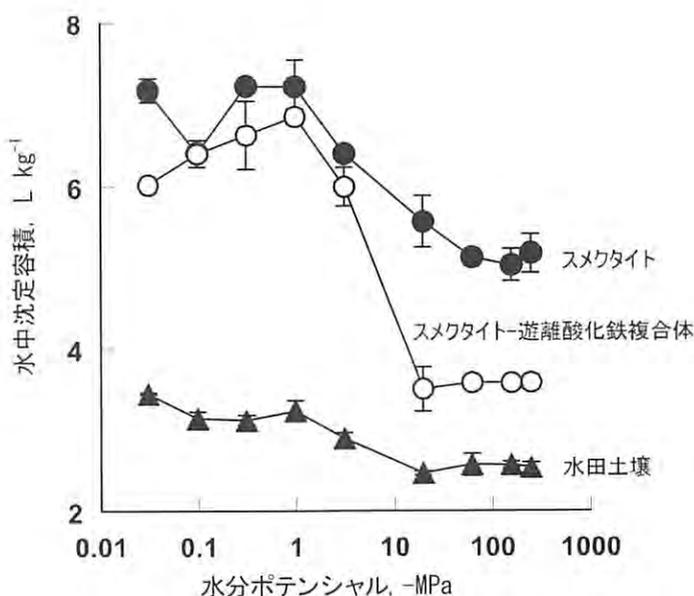


図 8 水田土壌, スメクタイトおよびスメクタイト-遊離酸化鉄複合体の乾燥過程による水中沈定容積の変化

スメクタイト-遊離酸化鉄複合体の鉄含有量は 85g kg^{-1} 。誤差線は 2 反復の範囲を示す。

ケイ酸塩単体、あるいは層状ケイ酸塩に遊離酸化鉄を添加した系のいずれにおいても-1.5 MPa以上の乾燥によって水中沈定容積は減少した。さらに遊離酸化鉄の添加はより大きな水中沈定容積の減少を引き起こした。この結果では遊離酸化鉄の存在は乾燥による微細構造の「畑地化」を妨げるものではなく、むしろ水中沈定容積として表現される畑地化の程度を強める働きをもつと考えられる。また、用いた水田土壌は粘土含量と遊離酸化鉄の比は 34 g kg^{-1} であり、少なくともモデル物質においてはこの含有割合は遊離酸化鉄が水中沈定容積を減少させるに十分な割合であったといえる (表5)。

(2) 湛水培養と化学的還元による水中沈定容積の変化

湛水培養により水田土壌の水中沈定容積は増加した。水中沈定容積の増加は培養条件に影響を受け、その順番は大きい方から $30^\circ\text{C} + \text{デキストロース} > 40^\circ\text{C} = 30^\circ\text{C} > 20^\circ\text{C}$ の順であった (図9a)。この結果は微生物活性が高まる等の理由で土壤還元が進むことが水中沈定容積の増加に寄与することを示している。北川ら⁽⁴⁶⁾は輪換田 (ここでいう還元田) では還元後の年数の増加に対して水中沈定容積が増加することを見出しており、長野間・諸遊⁽⁶³⁾は土壤還元によって水中沈定容積が増加するとしている。図9の結果はこれらの知見を裏付けるものである。さらに $20^\circ\text{C} \sim 40^\circ\text{C}$ での pH の推移はほぼ等しく、 $30^\circ\text{C} + \text{デキストロース}$ とは大きく異なった (図9b)。しかし水中沈定容積の増加速度はこれらを反映しておらず、pH は水中沈定容積の変化に寄与する大きな因子でないことと考えられた。

pH2.8 酢酸緩衝液可溶二価鉄含量は培養の初期に大きく、後半に減少する傾向であった (図9c)。二価鉄の再酸化はチューブの密栓が完全でなく酸素の

流入があったことが原因であると思われる。 $30^\circ\text{C} + \text{デキストロース}$ と 40°C において逆転が認められるが、培養初期における二価鉄含量の増加は水中沈定容積とおおよそ相関していた (図9a, c)。湛水処理後期において遊離酸化鉄が再酸化されているにも関わらず水中沈定容積が減少しなかった (図9)。これは乾燥が伴わない環境での遊離酸化鉄の酸化は水中沈定容積の減少を引き起こさないことを意味している。一方で-1.5 MPaを超える乾燥の履歴は懸濁状態で測定される水中沈定容積を減少させた (図8)。これらから、水中沈定容積はその時点での乾燥程度 (水分含量) あるいは還元程度で決定されるのではなく、土壤の乾燥または還元の履歴によって変化することが強く示唆される。

アスコルビン酸ナトリウムを添加することで風乾処理したスメクタイト-遊離酸化鉄複合体および水田土壌の水中沈定容積は増加した (表6)。特に水中沈定容積の増加は 85 g kg^{-1} の鉄を含んだ試料において著しかった。次に d/f 比をみるとスメクタイト区ではアスコルビン酸ナトリウム無添加の d/f 比は 0.84 であり、この値はアスコルビン酸ナトリウムの添加量が増えるにしたがって減少したが、スメクタイト-遊離酸化鉄複合体では増加傾向だった。この実験系のスメクタイト区とスメクタイト+遊離酸化鉄区は遊離酸化鉄の有無以外の違いはないため、アスコルビン酸ナトリウム添加による水中沈定容積の増加に遊離酸化鉄が関与していることは明らかであった。なお、遊離酸化鉄の還元量と d/f 比の間に定量的な関係は認められなかった (表6)。

(3) 乾燥過程におけるスメクタイトと遊離酸化鉄の相互作用の重要性

スメクタイト-遊離酸化鉄複合体の合成方法を変

表5 鉄の添加が pH, 水中沈定容積, pH2.8 酢酸緩衝液可溶二価鉄 (Fe(II)) に与える影響

鉄含量 g kg^{-1}	風乾試料			未風乾試料			d/f比
	pH	水中沈定容積 L kg^{-1}	Fe(II) g kg^{-1}	pH	水中沈定容積 L kg^{-1}	Fe(II) g kg^{-1}	
0	6.9	5.39	0.102	6.9	6.39	0.133	0.84
13	7.5	4.69	0.605	7.6	6.15	0.570	0.76
27	7.0	3.18	1.601	7.3	4.54	0.700	0.70
47	7.2	3.65	2.478	7.1	6.36	2.421	0.57
85	7.5	3.25	2.422	7.5	5.91	1.854	0.55

えた2つの試料において水中沈定容積の挙動の比較を行った。図10のD-M試料はスメクタイトおよび酸化鉄を別々に調整・乾燥後混和した試料であり、M-D試料はスメクタイト懸濁液中で酸化鉄を沈殿・精製し、乾燥させた試料である。

M-D試料とD-M試料の水中沈定容積の挙動には差があり、D-M試料の水中沈定容積は乾燥によっても大きく変化せず、M-D試料では水中沈定容積の大きな減少が認められた。さらにアスコルビン酸ナトリウムの添加はM-D試料においてのみ、水中沈定容積を増加させた。換言すればD-M試料の水中沈定容積の変化はスメクタイト単体の水中沈定容積の変化に類似しているのに対し、M-D試料は特異な変化を示した。これらの結果は還元による水中沈定容積の増加のメカニズムを示唆しているといえ

る。すなわち水中沈定容積の増加は単純な酸化鉄の還元溶解^(90,94)またはスメクタイトの結晶格子中の鉄の還元⁽³⁷⁾によるものではなく、乾燥時に層状ケイ酸塩粒子と遊離酸化鉄が何らかの相互作用をしている必要があることを示している。

(4) 水中沈定容積の変化に関与する微細構造

スメクタイトと遊離酸化鉄の相互作用を検討するために水分特性曲線と走査型電子顕微鏡 (SEM) から遊離酸化鉄の添加が微細構造に与える影響を調べた。乾燥過程の水分特性曲線と式(2)から求めた孔隙半径の関係を整理すると遊離酸化鉄を添加しないスメクタイトでは1 μm以上の半径の孔隙が相対的に多いのに対し、85 g kg⁻¹の遊離酸化鉄を加えた試料では10-100 nm付近の孔隙が増加する傾向

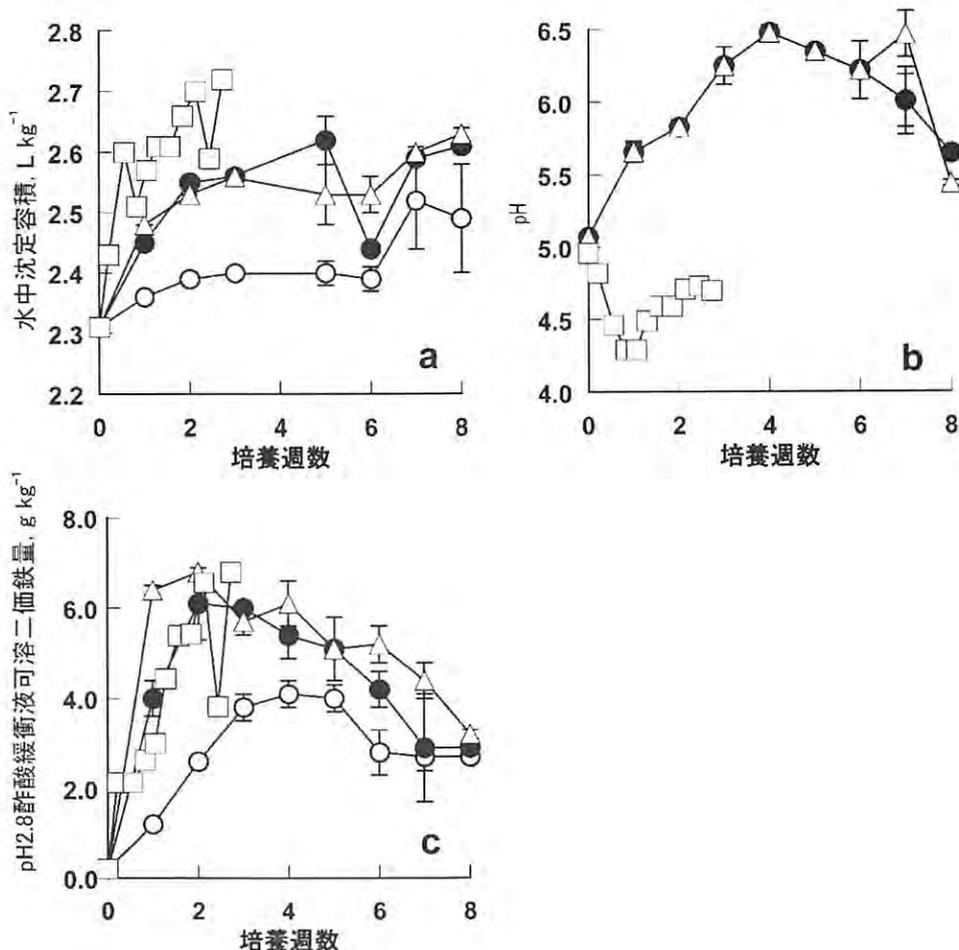


図9 水田土壌を20°C (○), 30°C (●), 40°C (△) および30°C+10%デキストロース添加条件 (□) で湛水培養した際の水中沈定容積, pHおよびpH2.8酢酸緩衝液可溶二価鉄量の変化

誤差線は2反復の平均との差を示す。bにおいて20°Cと30°Cのプロットが重なっていることに注意。

表6 スメクタイト-酸化鉄複合体へのアスコルビン酸ナトリウム添加によるpH, 水中沈定容積, およびpH2.8 酢酸緩衝液可溶二価鉄量 (Fe (II))

アルコールビン酸 ナトリウム mmol L ⁻¹	風乾試料			未風乾試料			d/f比
	pH	水中沈定容積 L kg ⁻¹	Fe (II) g kg ⁻¹	pH	水中沈定容積 L kg ⁻¹	Fe (II) g kg ⁻¹	
スメクタイト							
0	6.9	5.39	0.10	6.9	6.39	0.13	0.84
10	5.8	4.43	0.27	6.0	5.40	0.31	0.82
20	5.8	4.28	0.30	5.8	5.71	0.40	0.75
25	5.7	4.47	0.31	5.8	5.80	0.38	0.77
30	5.7	4.35	0.32	5.8	5.50	0.43	0.79
40	5.7	4.24	0.32	5.8	5.44	0.41	0.78
50	5.7	4.36	0.34	5.8	5.59	0.44	0.78
スメクタイト-酸化鉄複合体 (85 g-Fe kg ⁻¹)							
0	7.5	3.25	2.42	7.5	5.91	1.85	0.55
10	7.0	3.58	16.48	6.8	4.50	14.49	0.80
20	7.1	3.64	37.25	6.9	4.60	32.65	0.79
30	7.1	3.61	51.79	6.9	4.29	38.52	0.84
40	7.1	3.84	72.60	6.9	4.54	45.77	0.85
50	7.1	3.84	75.44	7.0	4.65	47.28	0.83
水田土壌							
0	5.0	2.71	8.91	5.1	3.38	14.29	0.80
10	5.0	3.29	27.69	5.3	3.30	23.48	1.00
20	5.8	3.39	57.75	5.7	3.59	52.91	0.94
30	5.8	3.56	62.53	5.9	3.69	54.30	0.96
40	5.9	3.69	68.86	5.9	3.68	59.25	1.00
50	5.9	3.83	69.30	6.0	3.80	69.52	1.01

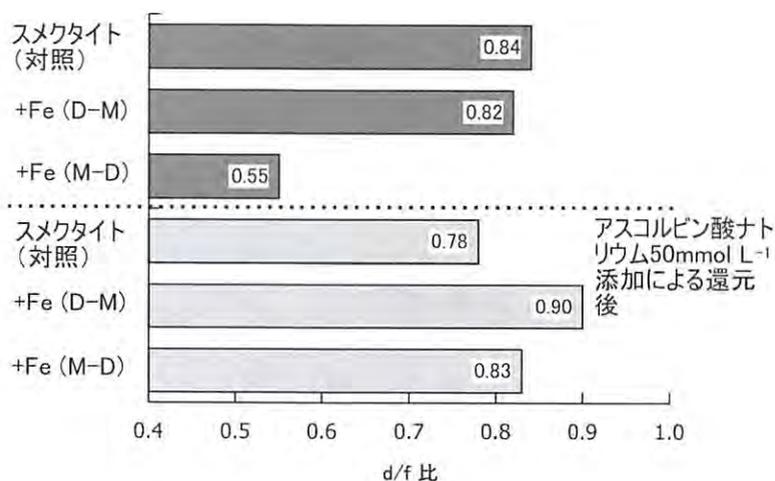


図10 スメクタイトと酸化鉄の混合方法がd/f比に与える影響

D-M区 (乾燥後混和) は個々に調整し乾燥させたスメクタイトと酸化鉄を混合した処理 (実験3), M-D区 (混和後乾燥) はスメクタイト懸濁液中で酸化鉄を沈殿させた後に混和した処理区 (実験2) を指す。85 g kg⁻¹ となるように鉄を添加した。

だった(図 11)。このような遊離酸化鉄の存在による微細構造の変化はSEMによる検鏡でも観察された。SEMでは遊離酸化鉄を含まないスメクタイトではdomain構造⁽⁸²⁾が良く発達しており、層状ケイ酸塩が重なり、大きな孔隙を形成していることが観察された(写真1左)。Ben Rhaim et al.⁽²¹⁾による

とスメクタイトの乾燥過程では-1.0 MPa(孔隙半径220 nmに相当)以上の乾燥により層状ケイ酸塩のquasi-crystalの数が増加しdomainの大きさが大きくなる。この実験結果においても-1.5 MPa(孔隙半径150 nmに相当)以上の乾燥では孔隙の脱水量が増加し(図 11)、SEMの写真では層状ケイ酸塩が配

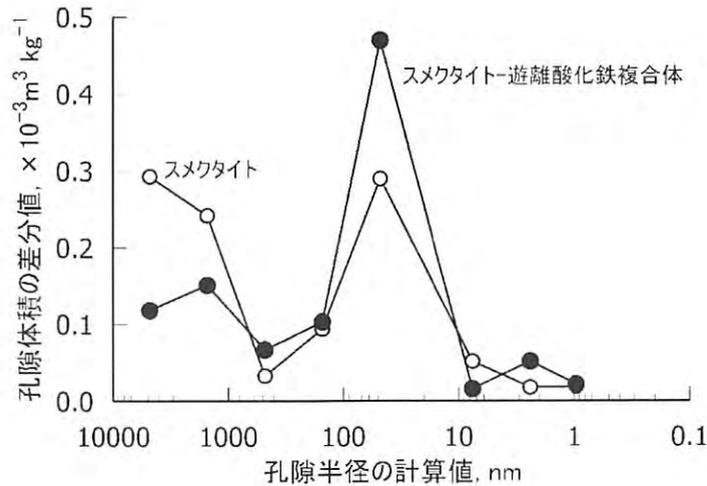


図 11 遊離酸化鉄の存在が乾燥過程におけるスメクタイト粒子間の孔隙生成に与える影響

孔隙径の計算は本文中の式(2)によった。

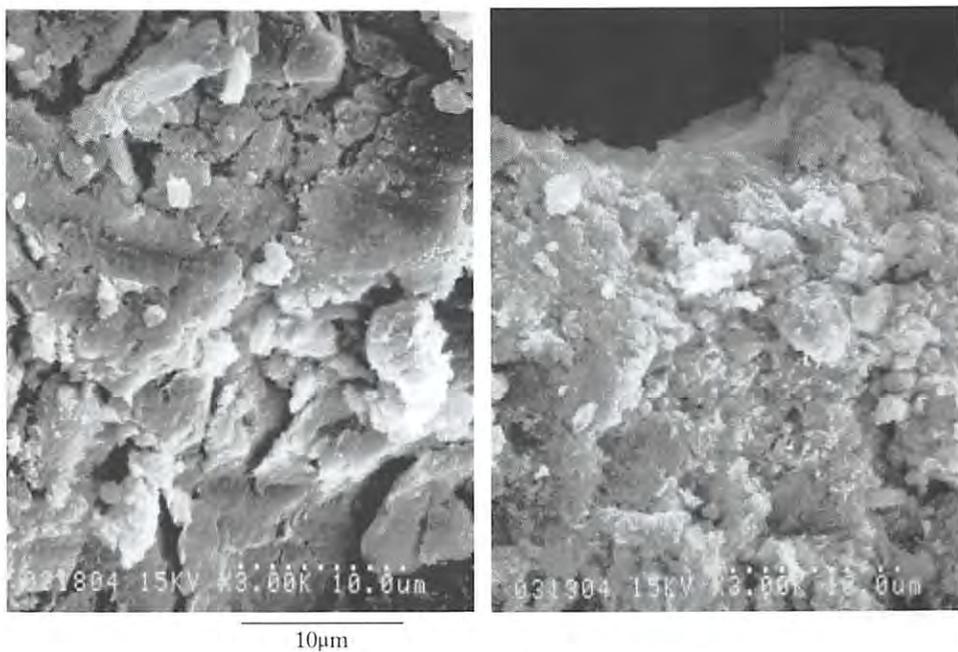


写真1 スメクタイトに酸化鉄の添加処理を行った試料と行わなかった試料の走査電子顕微鏡 (SEM) 写真

左:スメクタイト 右:スメクタイト-遊離酸化鉄複合体 (85 g-Fe kg⁻¹の遊離酸化鉄を含む)

向した構造が明瞭に観察できた(写真1左)。これに対し、遊離酸化鉄を含んだ試料ではdomain構造は明確に観測できず、層状ケイ酸塩は遊離酸化鉄の粒子で覆われているようだった(写真1右)。遊離酸化鉄を含む試料において-1.5 MPa付近の脱水量が相対的に小さいこともこの傾向を裏付けている(図11)。Oades and Waters⁽⁷⁵⁾はカオリナイトと遊離酸化鉄が卓越したOxisolにおいて同様のSEM写真を示し、このような団粒構造は非常に安定で激しい振とうなどの分散処理に対して高い安定性を示すとしている。彼らの振とう処理は水中沈定容積測定時の振とう処理に類似しており、粘土鉱物種の相違はあるものの、層状ケイ酸塩と遊離酸化鉄の相互作用により分散に強い団粒構造^(3,16)が生成されることを示している点で興味深い。このような相互作用が遊離酸化鉄の沈殿と乾燥が急激に進行する転換畑土壌において生じている可能性は今後さらに検討していく必要がある。

これまでの結果は還元過程における水中沈定容積の増加は乾燥による微細構造の発達を前提に考察すべきものであることを示している。Katou et al.⁽⁴²⁾が示すようにCa型粘土が乾燥することによって生成されたdomain構造はNaなどの一価の陽イオンによる置換がない限り容易には壊れないと考えられる。しかし、遊離酸化鉄が夾雑した系においてはdomain構造の生成は一部阻害され、層状ケイ酸塩の間に遊離酸化鉄粒子が挟まれる可能性が高い。図11における脱水過程の微細構造の相違にはこのことが影響していると考えられる。このような構造がある場合、還元過程における遊離酸化鉄の還元・溶解⁽⁹⁴⁾は微細構造に大きな影響を及ぼす可能性は十分に考えられる。

4) まとめ

- ① 水田土壌およびモデル物質(スメクタイト-酸化鉄複合体)の微細構造の変化を比較したところ、水田土壌では、-1.5 MPa以上の乾燥によって水中沈定容積が減少し、湛水培養によって再び水中沈定容積は増加した。水中沈定容積の増加は土壌の還元履歴に規定されているようだった。
- ② 土壌中の鉄成分の還元が水中沈定容積の増加に及ぼす影響をみるため、スメクタイト-遊離

酸化鉄複合体を用いて同様の検討をした。スメクタイトへの酸化鉄の添加の有無に関わらず、-1.5 MPa以上の乾燥によって試料の水中沈定容積は減少し、水中沈定容積の減少量は鉄を添加した区で大きかった。また、これにアスコルビン酸ナトリウムを加え還元処理を施したところ、遊離酸化鉄を含んだサンプルのみで水中沈定容積が増加した。

- ③ 乾燥過程における水分特性曲線およびSEMによる観察は、試料中の酸化鉄が粘土の構造をセメント的に結合しdomain構造の発達を阻害していることを示しており、これが水中沈定容積のより大きな低下と還元による増加の要因となっていることが推察された。
- ④ 以上から田畑輪換における土壌の微細構造の変化の要因として、-1.5 MPa以上の乾燥と遊離酸化鉄の還元があると考えられた。

2. 水田転換畑において形態変化する遊離酸化鉄成分の指標化^(99,105)

1) はじめに

水田を畑転換すると水溶性鉄(II)、交換性 Fe^{2+} 、遊離酸化鉄(II)の酸化と加水分解によるFe(III)の多核化が進行するが、この時共存化学種の影響で核の成長が抑制されるため結晶化が十分に進まず、不安定な非晶質鉄化合物が生成されると考えられている⁽²⁰⁾。第三章1節で示したように水中沈定容積は乾燥と遊離酸化鉄の還元の2つの因子に影響されることから、この非晶質鉄化合物が転換畑土壌の微細構造に影響を与えている可能性が考えられる。

一般的に、非晶質鉄化合物は酸性シュウ酸塩可溶鉄量(以下、 Fe_0)を用いて評価されており^(55,78)、この画分は比表面積が大きく、リン酸イオンとの反応性が高い⁽⁵⁾。しかし転換畑では酸性シュウ酸塩処理により遊離酸化鉄のほぼ全量が抽出されてしまい⁽²⁰⁾、畑地化に伴う遊離酸化鉄の形態変化を評価するには適さない。このような理由から、よりマイルドな処理による分画が試みられている^(86,121)が、抽出条件の検討はなされていない。

本研究では上述の非晶質鉄化合物の抽出法を策定するとともに、種々の試料への適用結果からその性質を明らかにすることを目的とした。

2) 材料と方法

(1) 試料

中央農業総合研究センター北陸研究センター内(上越市稲田)の水田および転換畑7ほ場の作土を1ほ場当たり3ヶ所ずつ採取し分析に用いた。7ほ場のうちの1ほ場は同一ほ場内に畑転換年数0(連用水田)~5年の来歴のサブプロットを持ち、このほ場については各来歴の土壌を1点ずつ採取し分析した(つまり1筆で6試料)。用いた土壌の種類および性質は第三章1節で示した。

(2) 非晶質鉄化合物の抽出定量法

酢酸ナトリウムによる鉄抽出法について、抽出液のpH、抽出液の濃度、振とう時間、抽出液/土壌比を変化させ、主に連用水田と転換5年目の土壌につ

いて抽出量への影響を検討した。また、抽出温度、風乾処理および風乾後の経過年数の影響についても調べた。抽出液中の鉄は 100 g L^{-1} 塩酸ヒドロキシルアミンで還元し、o-フェナントロリン法⁽¹¹⁾を用いて比色・定量した。なおリン保持量⁽⁴⁾、酸性シュウ酸塩可溶鉄含量⁽⁴⁾および30℃で1週間湛水培養した際のpH2.8酢酸緩衝液可溶二価鉄量⁽⁴⁸⁾を測定し、抽出された遊離酸化鉄の性質について考察した。

3) 結果と考察

(1) 抽出条件の検討

抽出液の平衡pH小さくするほど、また、酢酸ナトリウム濃度、振とう時間、および抽出液/土壌比を大きくするほど、抽出鉄含量が高まる傾向があり(図12)、特定の鉄化合物を抽出するための固液間

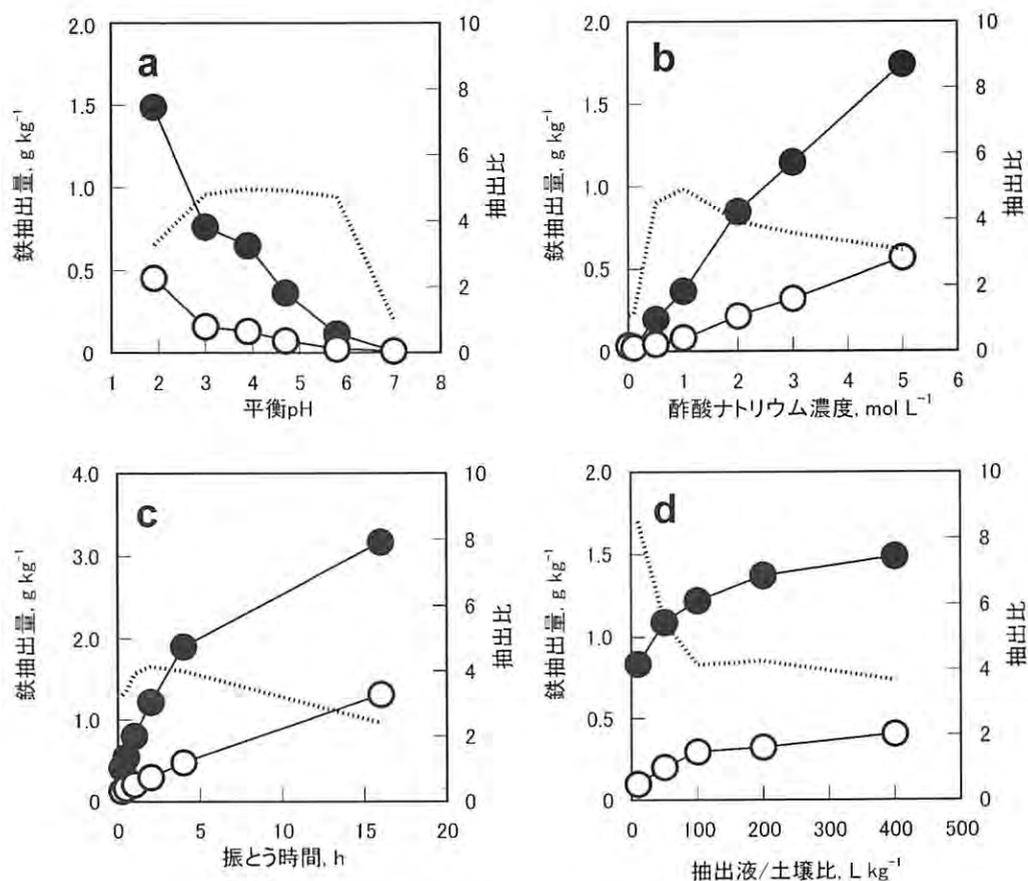


図12 抽出条件と畑転換年数が土壌の鉄抽出量に与える影響の検討

○は畑転換年数5年目の土壌、●は連用水田、点線は抽出比(連用水田土壌の抽出量/畑転換5年目土壌の抽出量)。a~dのそれぞれの検討対象とした条件以外について 1 mol L^{-1} 酢酸ナトリウム、pH3.0、振とう時間2h、抽出液/土壌比は 100 L kg^{-1} を用いた。

の平衡条件を策定することはできなかった。そこで連用田と畑転換5年目における鉄の抽出量の比を求め、この比が高くなる抽出条件を指標として抽出法を検討した。その結果、抽出液のpHが3~6、抽出濃度 1 mol L^{-1} 、振とう時間2時間、抽出液/土壌比は小さいほど良いという条件が適切と判断された。ただし湿潤原土を用いて測定を行う場合を考慮すると、抽出液/土壌比が小さい場合、土壌水分に由来する誤差が大きくなることが懸念されたので、抽出液/土壌比については比較的安定した抽出比となる 100 L kg^{-1} を採用することにした。また抽出液のpHに関しては抽出比が高く、かつ安定しているpH3.0~6.0のうち抽出量が最も大きいpH3.0を採用した。Kumada and Asami⁽⁴⁸⁾はpH2.8酢酸緩衝液を用いて遊離酸化鉄中の二価鉄(活性二価鉄)を抽出することを提案しているが、条件の検討においてpH2.5とpH3.0では抽出量に差がないことを認めている。したがって、ここで定めた抽出条件はKumada and Asami⁽⁴⁸⁾による活性二価鉄の抽出条件とほぼ等しいという結果になった。

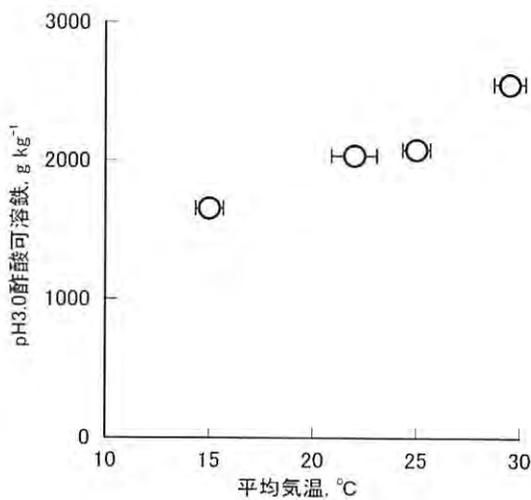


図13 抽出温度とpH3.0酢酸可溶鉄量の関係

誤差線は抽出中の気温の標準偏差

(2) 抽出温度、風乾処理および保存期間の影響

抽出温度の影響を検討した結果、抽出温度を高めると鉄抽出量が大きくなり、平均気温を15℃から29℃に高めると抽出量は1.5倍高まった(図13)。抽出時の室温はあらかじめ決めておく必要がある。次に試料の風乾処理および風乾後の保存期間の影響を検討した。風乾土壌では二価鉄として抽出される割合はほぼゼロとなったが(データ省略)、湿潤原土と風乾直後の土壌の間で二価鉄と三価鉄を合わせた全抽出量に有意な差は認められなかった(図14)。また、風乾後室温で1年間保存した試料を用いても風乾直後と抽出値に変化はなかったが、風乾後室温でさらに6年経過したものでは有意に抽出量が増加した。風乾後1年程度保存された試料を供試しても問題はないと判断されたが、長期保存による抽出量増加の理由は不明である。

(3) 提案する転換畑の非晶質鉄化合物の抽出方法

以上の結果から転換畑の非晶質鉄化合物の抽出方法を以下のように定めた。ほ場から採取してきた湿潤原土あるいはその風乾土壌を乾土換算で 1.0 g

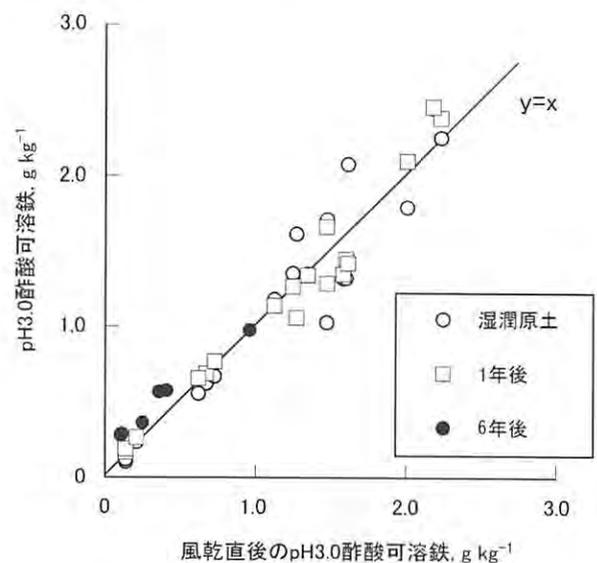


図14 風乾直後の試料と湿潤原土、風乾後1年、風乾後6年の試料のpH3.0酢酸可溶鉄量の関係

Wilcoxonの符号順位検定法での風乾土の抽出鉄量に対して湿潤原土 ($n = 18$)、風乾1年後 ($n = 18$)、風乾6年後 ($n = 6$)のpH3.0酢酸抽出鉄量に有意差があったときの危険率はそれぞれ、95%、35%、2.8%。

秤り取り、pH3.0に調整した1 mol L⁻¹酢酸ナトリウム溶液 100 mLを加え、決められた室温で正確に120分間振とうする。振とう後すみやかに固液分離し、抽出液中の鉄濃度を測定する。測定結果は単位重量当たりの鉄抽出量（以下、pH3.0酢酸可溶鉄と呼び、Fe_{ac}と略す）として表す。

(4) Fe_{ac}の化学的特徴

Fe_{ac}とリン保持量との間には高い相関が認められた（図15a）。これに対しFe_oとリン保持量との相関は低く、畑転換におけるリン酸イオンとの反応性の変化を十分に評価できなかつた（図15b）。同一ほ場において畑転換年数を異にした土壌のリン保持量は他のサンプルに比べ値が大きい傾向だったが、これは振とう機や実験中の室温が異なったためだと考えられる。遊離酸化鉄へのリン酸の保持量は一般に遊離酸化鉄の結晶化程度を示す指標として用いられる¹⁹²⁾。したがって図15で得られた関係はFe_{ac}画分の結晶度はFe_o画分よりも低いことを示していると考えられる。ただしリン保持量は風乾土から測定しているため、ここでの結晶度はFe_{ac}画分が三価鉄と

して存在することを前提としている。

湛水培養により生成されたpH2.8酢酸緩衝液可溶二価鉄量はFe_{ac}が大きい程大きくなる傾向だった（図16）。この結果は土壌微生物による鉄の還元には選択性があり、Fe_{ac}で代表される結晶性の低い遊離酸化鉄が還元を受けやすいことを示している。Munch and Ottow¹⁹²⁾はFe_o画分とFe_d画分（ジチオナイトークエン酸可溶画分）の比較から非晶質画分（Fe_o）は結晶性の高い画分（Fe_d-Fe_o）よりも容易に還元されることを示している。本研究での結果はこのような還元を選択性がFe_o中のFe_{ac}というMunch and Ottow¹⁹²⁾が示したものよりもさらに結晶性が低い画分においても成り立っていることを新たに示したものである。40年間有機物を施用していない土壌では全体の傾向に比べpH2.8酢酸緩衝液可溶二価鉄生成量が小さかったが、これは土壌中の有機物が微生物による土壌還元の制限因子となったためと考えられる。

既往の抽出法と比較すると、Fe_{ac}の抽出条件は遊離酸化鉄中の二価鉄量を抽出するpH2.8酢酸緩衝液抽出⁴⁸⁾と抽出条件が酷似しており、この画分

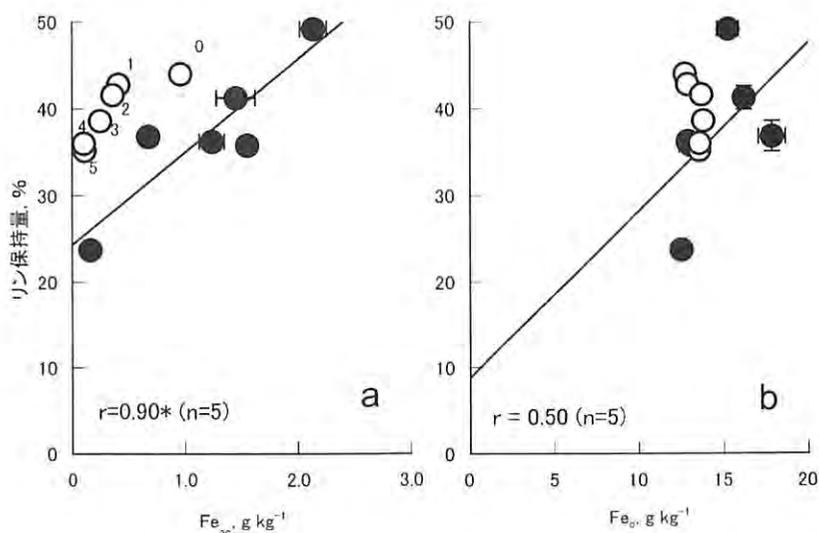


図15 pH3.0酢酸可溶鉄量 (Fe_{ac}) および酸性シュウ酸塩可溶鉄 (Fe_o) とリン保持量の関係

○は同一ほ場内の畑転換年数を変えた土壌。誤差線は2反復の差。添字は畑転換後年数を示す。*は●の試料について相関係数が危険率5%以下で有意。

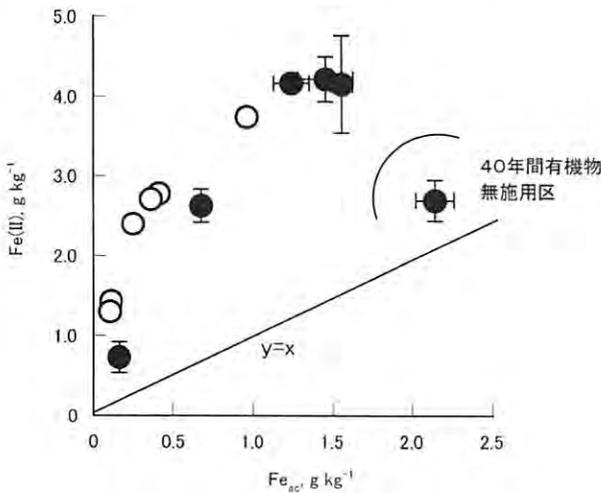


図16 pH3.0酢酸可溶鉄量 (Fe_{ac}) と湛水培養による pH2.8酢酸緩衝液可溶鉄量 ($Fe(II)$) との関係

誤差線の長さは2連の範囲を示す。
湛水培養の条件は1週間、30℃。

はほぼ抽出されることが予想される。また、pH3.0 1 mol L^{-1} 酢酸塩は可給態鉄の評価に用いられる⁽⁷⁸⁾ ため、土壤溶液中の鉄濃度を支配する溶解度が高い三価鉄画分を抽出していると考えられることができる。

以上のように Fe_{ac} は、リン酸イオンとの反応性が高く、湛水時の還元の前が早い遊離酸化鉄画分を抽出している。これは比表面積が大きく溶解性の高い三価鉄画分および二価鉄画分に相当すると考察した。

4) まとめ

- ① 畑転換直後の水田転換畑に特異に存在する結晶性が低い非晶質遊離酸化鉄の抽出方法を定めた。
- ② 定めた手法を用い、この画分の抽出量はリン保持量および短期の湛水処理での遊離酸化鉄の還元量との相関が高いことを明らかにした。

3. 水田輪作体系下での遊離酸化鉄の形態変化と耕うんおよび代かき特性の関係⁽¹⁰⁶⁾

1) はじめに

これまでで、スメクタイト-遊離酸化鉄複合体を用いて、層状ケイ酸塩と遊離酸化鉄の相互作用により独自の微細構造が生成され、こうした微細構造が

乾燥または還元における水中沈定容積の変化に影響していることを示した。また、水田輪作体系下での遊離酸化鉄の形態変化に注目し、酸性シュウ酸塩可溶画分よりもさらに比表面積が大きく非晶質の遊離酸化鉄画分を抽出する条件を明らかにした。

この節では、遊離酸化鉄の形態変化が土壤の微細構造変化や碎土性の変化に与える影響を検討した。Shanmuganathan and Oades⁽⁹³⁾ は鉄化合物含量が土壤の碎土性の指標である土壤の脆性 (friability⁽¹¹⁸⁾) をはじめとする多くの巨視的な物理性に影響を与えていることを明らかにしている。彼らの結果によると Fine sandy loam に $Fe(III)$ ポリカチオンを $0.1 \sim 3.2 \text{ g-Fe kg}^{-1}$ 添加することで $40 \sim 100 \text{ nm}$ の孔隙が発達し、 $5 \sim 20 \text{ mm}$ の土塊の碎土性が発達した。これは遊離酸化鉄の添加による微細構造の変化が碎土性に及ぼす影響を明らかにしたものであるが、酸化還元の変化による遊離酸化鉄の形態変化が土壤の物理性に与える影響は明らかになっていない。ここでは第一に転換畑における遊離酸化鉄の形態変化の詳細を検討し、形態変化と碎土性の変化をほ場における観察から明らかにすることを目的とした。第二に長期畑転換を行ったほ場を復元田とし、水中沈定容積および代かき特性に対する遊離酸化鉄の影響を検討した。

2) 材料と方法

(1) 土壌と気象

中央農業総合研究センター北陸研究センターの実験ほ場にて短期および中期の畑転換試験を行った。土壤条件は第3章1節で示したとおりである。また以下に記す短期畑転換試験の測定期間における気象データを図17に示した。

(2) 中期畑転換試験

1990年に連用水田 (700 m^2) を6区に分割し、1年に1区ずつ畑転換を行い、転換畑においてはダイズを作付けした。水田と転換畑の境界は波板を深さ30 cm程度まで入れ、遮水した。暗渠は各区の境と平衡して敷設されており、作付期間は水田に影響がない範囲に対しては開放とした。1994年の5月に耕うん試験を行い畑転換1~4年までの土壤の碎土性を評価した。また6区の処理が畑転換5年から0年(連用水田)となった同年作付期間(8月)に作

土（0～20 cm）を採取した。試料はただちに5℃以下条件で採取時の水分状態のまま保存し、土壌の物理的および化学的性質の分析に供試した。耕うん試験の詳細は後述する。

土壌の物理的および化学的性質は土壌の微細構造と遊離酸化鉄の形態の分析を中心に行った。採取した土壌の一部については乾燥を行わず、水中沈定容積⁽¹⁰⁾の測定を行った。ただし供試土壌量は乾土換算で12.5 gとした。残りの試料は風乾し、pH、リン保持量⁽⁴⁾、遊離酸化鉄⁽³⁴⁾（以下 Fe_d ）、シュウ酸塩可溶鉄⁽⁴⁾（以下 Fe_o と略）、pH3.0酢酸可溶鉄（以下 Fe_{ac} ）、および湛水培養におけるpH2.8酢酸緩衝液可溶二価鉄量⁽⁴⁸⁾（以下、 $Fe(II)$ ）を測定した。

湛水培養における $Fe(II)$ の測定には乾土換算で1.0 gの土壌を10 mL容のチューブに秤り取り、10 mLの蒸留水を加えた。チューブは密栓し30℃条件で恒温培養した。1週間後および3週間後にサンプルを取り出しpH2.8酢酸緩衝液によって抽出される $Fe(II)$ を測定した。

Fe_{ac} は以下の手順で測定した。乾土換算で1.0 gの土壌に1 mol L⁻¹ pH3.0酢酸緩衝液100 mLを加え2時間振とうした。その後濾過により上澄みを得、1, 10 オルトフェナントロリン法^(55, 78)によって抽出液中の鉄の濃度を測定した。測定時に塩酸ヒドロキシルアミンの添加の有無により二価鉄および三価鉄を含めた全抽出量を求めた。

(3) 短期畑転換試験

1996年9月の水稲収穫後、1998年まで調査ほ場である連作水田を裸地状態で落水管理し落水が物理性および化学性に与える影響を調べた。1996年10月から1997年10月までの期間において圃場内の未耕うん部分を部分的に耕うんする耕うん試験を7回行い、同日にコアサンプラーによって深さ10 cmまでの土壌を採取した。採取した土壌は仮比重、水中沈定容積、pH、 Fe_{ac} の測定を行った。土壌は採取後すみやかに5℃以下の環境で保存し、空気酸化の影響を最小限にするためにただちに測定を行った。また Fe_{ac} および水中沈定容積の測定は1998年4月まで継続した。さらに測定期間中はほ場にテンションメーターを設置し10 cmの深さのマトリックポテンシャルを継続的に測定した。すべての測定3反復で行った。

なお、試験に供試したほ場には雑草の繁茂をさけるため適時除草剤を散布して管理した。

(4) 耕うん試験

土壌の碎土性を評価するためにダウンカットロータリを装着したトラクター（ヤンマー AF-22 MH 16 kW）で耕うんを行い、平均土塊径を求めた。耕深および耕うんピッチはそれぞれ13～15 cmおよび1.7～2.0 cmとなるように調整した。耕うん後、30 cm × 30 cmの枠を耕うん深さまで挿入し、形を壊さないように枠内のすべての土塊を採取した。採

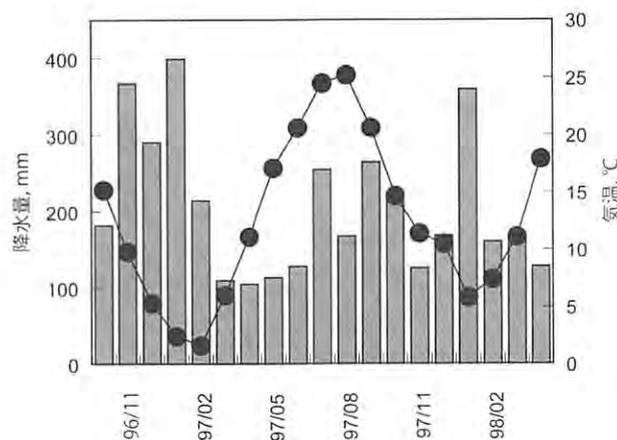


図 17 短期畑転換試験を行った期間の降水量（棒グラフ）と気温（折れ線グラフ）の推移

取した土塊は > 4 cm, 2 ~ 4 cm, 1 ~ 2 cm, 0.5 ~ 1.0 cm および 0.5 cm 以下にふるい分け, それぞれの画分の重量を測定した. 得られた各直径毎の重量データは粉体の平均直径を求めるために使われる経験式である Rosin-Rammler 式にあてはめ, 平均直径を求めた. Rosin-Rammler 式の耕うん後の土塊の分布への適用性についてはいくつかの報告で検討され, その有効性が認められている^(50, 61, 81).

$$R(x_p) = 100 \exp \left[- \left(\frac{x_p}{x_c} \right)^n \right] \quad (3)$$

ここで, x_p はふるい目の直径 (cm), $R(x_p)$ は直径 x_p よりも大きな土塊の積算重量を示す. また x_c , n はそれぞれ土塊の大きさおよび粒径分布を決定するパラメータである. x_c および n は式 (3) の常用対数を 2 回とり, その直線回帰から求めることができる.

$$\log\{2 - \log R(x_p)\} = n \log x_p + \log(\log e) - n \log x_c \quad (4)$$

平均土塊径 x_m は式 (4) によって求められた x_c および n を用いて以下の式によって計算される⁽⁶¹⁾.

$$x_m = x_c \Gamma \left(\frac{1}{n} + 1 \right) \quad (5)$$

ここで Γ はガンマ関数で以下のように定義されている.

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} (e^{-t} t^{x-1}) dt \quad (x > 0)$$

(5) 復元田の代かき特性に対する土壌管理の影響

土壌還元が代かき特性に与える影響を検討するため, 2001 年, 6 年以上畑転換していたほ場を復元田とした. 4 月 12 日に有機物を施用し, 5 月 3 日に入水, 5 月 11 日に代かきを行った. 施用した有機物と施用量は, 牛糞たい肥 650 g m^{-2} , 豚ふんたい肥 650 g m^{-2} , 鶏糞たい肥 650 g m^{-2} , 鶏糞たい肥 1300 g m^{-2} , 稲わら 650 g m^{-2} , ショ糖 650 g m^{-2} とした. ただし稲わらとショ糖は 5 月 4 日に一度落水し施用した. 稲わら区とグラニュー糖区は 1 区, それ以外の処理および何も施用しない対照区は 2 反復とした. 5 月 21 日 $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ の枠を挿入し枠内のすべての作土をサンプリングした. サンプリングした土壌の一部について水中し別による 2 mm 以下の土壌の割合を乾土換算で求め, これを代かき特

性とした. また, 残りの試料について水中沈定容積, pH2.8 酢酸緩液可溶銻二価鉄量を同時に測定した.

3) 結果

(1) 耕うん後の土塊分布の Rosin-Rammler 式によるあてはめ

耕うん後の土塊分布は Rosin-Rammler 式によってよく記述された (図 18). 式 (4) を当てはめた際の決定係数 (r^2) は 0.949 ~ 1.000 であり, 平均値および最頻値は 0.990 および 0.998 であった ($n = 26$, うち中期畑転換試験 5 試料, 短期畑転換試験 21 試料). 以上より Rosin-Rammler 式から耕うん後の平均土塊径を精度良く求めることができると判断した.

(2) 中期畑転換試験

遊離酸化鉄の総量を示す Fe_d と非晶質画分量を示す酸性シュウ酸塩可溶鉄 Fe_o はほぼ同量であり, 畑転換後は Fe_o がやや増加, Fe_d はやや減少する傾向だった. これに対して Fe_{ac} は急激に減少した (図 19). 1 または 3 週間湛水培養後の pH2.8 酢酸緩液可溶二価鉄量は畑転換後の期間が長いほど小さくなる傾向だった. このような二価鉄生成に対する畑転換期間の影響は 1 週間培養で顕著に見られ, この傾向は 3 週間培養においても維持された. 畑転換年数と Fe_{ac} , Fe_d , Fe_o , および 1 週間培養時の $\text{Fe}(\text{II})$, 3 週間培養時の $\text{Fe}(\text{II})$ 生成量との相関はそれぞれ -0.892^{**} , -0.353 , 0.687^* , -0.875^{**} , および -0.920^{**} となり, 特に Fe_{ac} と $\text{Fe}(\text{II})$ において高い負の相関が認められた (*, ** はそれぞれ $p < 0.05$, $p < 0.01$ の危険率で有意であることを示す).

リン保持量は畑転換年数との間に負の関係がみられた (図 20). 式 (5) から計算された耕うん後の平均土塊径と水中沈定容積は類似の傾向を示した. すなわち畑転換後 3 年までは減少傾向を示し, その後 2 年は大きな変化はなかった (図 20).

(3) 短期畑転換試験

中期畑転換試験と同様, Fe_{ac} の値は畑転換後減少傾向を示したが, 二価鉄と三価鉄の比率には一定の傾向は認められなかった (図 21). 水中沈定容積は 1997 年 9 月に減少が認められ, これは土壌の乾燥が進んだ時期に一致した. また 10 月以降の土壌

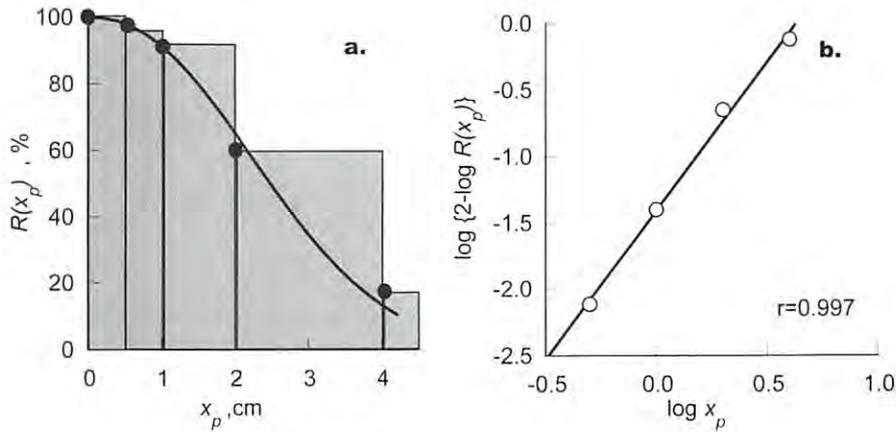


図 18 耕うん後の土塊径の分布に対する Rosin-Rammler 式の当てはめ例

- a) ふるい目の直径 (x_p) と直径 x_p 以上の耕うん後の土塊の積算重量 $R(x_p)$ の関係。棒グラフは実測値、曲線は Rosin-Rammler 式から得られた関数。
- b) Rosin-Rammler 式から得られた回帰直線の例。

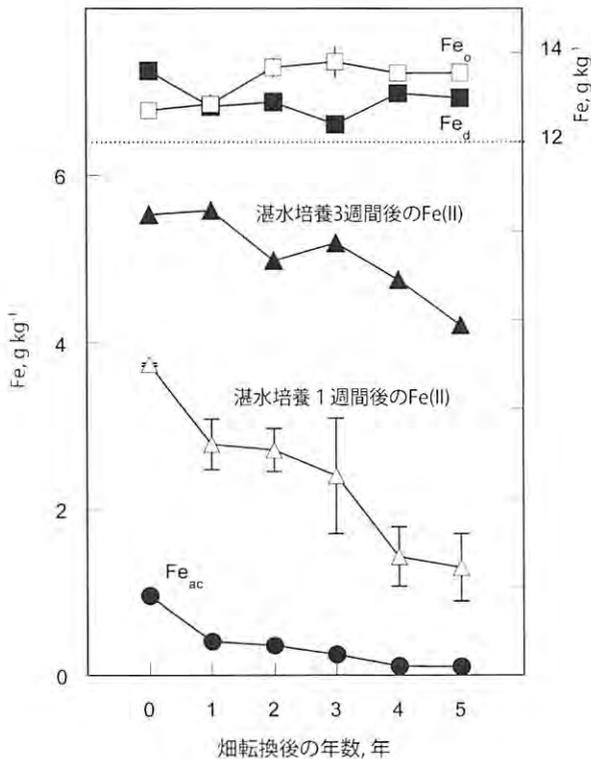


図 19 水田の畑転換が様々な抽出方法による抽出鉄量に与える影響

Fe_d , Fe_o , Fe(II) および Fe_{ac} はそれぞれジチオナイトロクエン酸可溶鉄、酸性シュウ酸塩可溶鉄、pH2.8 酢酸緩衝液可溶二価鉄、および pH3.0 酢酸可溶鉄を示す。 Fe_d と Fe_o の値は右側の軸に示した。誤差線は 2 連の平均との差を表している。

水分が高まる時期に再び増加した (図 21)。測定後半の 2 つの時期においては測定初期に比べ水中沈定容積は小さく、0.1% 以下の危険率で有意であった。これらの結果として年間を通してみた場合、水中沈定容積は減少する傾向であった。

単回帰による解析結果では含水比および水中沈定容積と平均土塊径の間には有意な相関が認められ (表 7)、 Fe_{ac} および平均土塊径の間には有意な相関は認められなかった。耕うん後の平均土塊径は転換後の日数に対して減少する傾向を示した。平均土塊径、 Fe_{ac} 、水中沈定容積、pH および仮比重は類似の傾向を示し、これらを独立変数とし重回帰によって個々の寄与を解析することはできなかった。

(4) 復元田の代かき特性試験

復元田の pH2.8 酢酸緩衝液可溶二価鉄量は低く、ほとんどが 1 g kg^{-1} 以下であった (図 22)。水田で湛水を開始してから土壌を採取するまでの積算気温は 337°C であった。遊離酸化鉄の還元量は連用 5 年畑転換した土壌とほぼ同程度であった (図 9)。pH2.8 酢酸緩衝液可溶二価鉄量と代かき後の 2 mm の土壌割合、水中沈定容積の間には有意な相関関係が認められ (いずれも $p < 0.01$)、遊離酸化鉄の還元が進んだ処理区ほど微細構造が水田化し、代かき

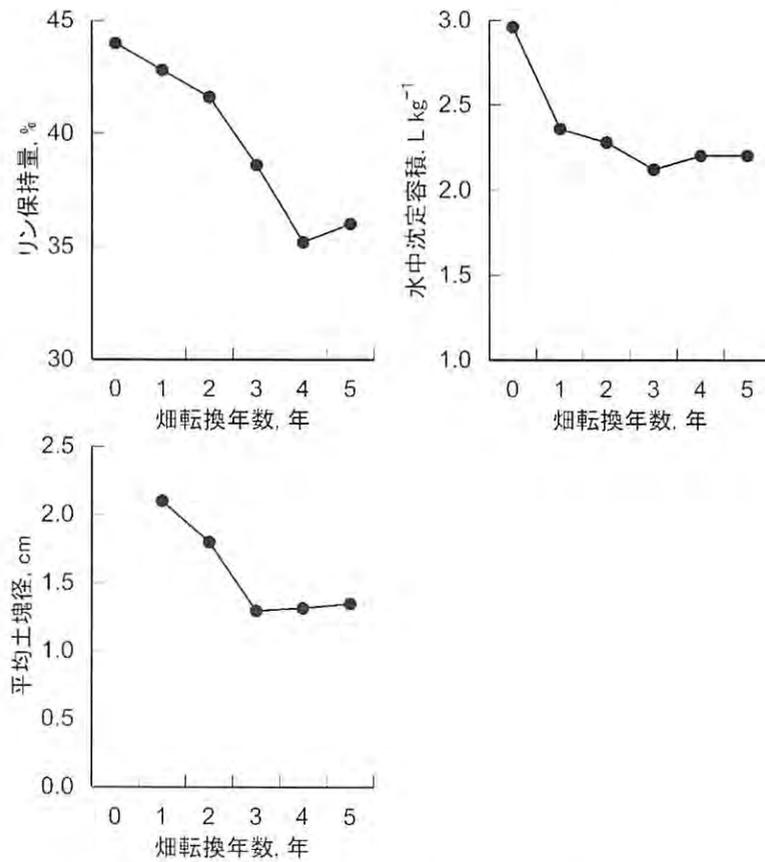


図20 畑転換年数がリン保持量, 水中沈定容積および耕うん後の平均土塊径に与える影響

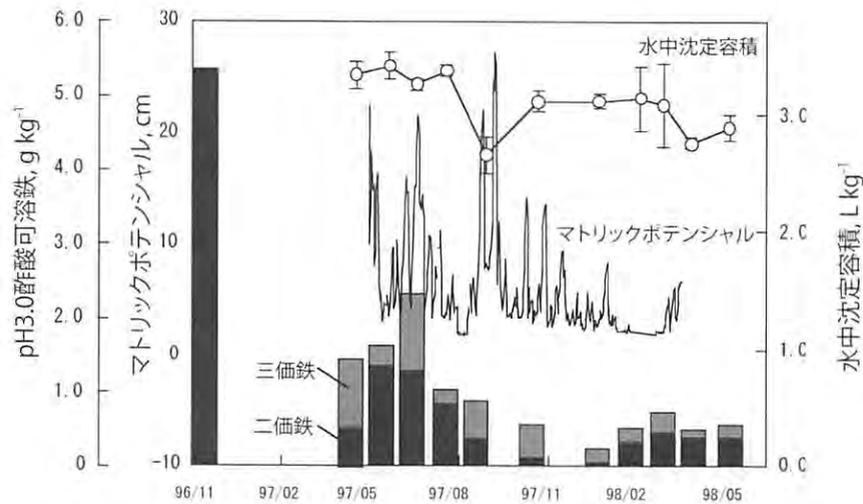


図21 水田を落水管理した後のpH3.0酢酸可溶鉄 (Fe_{ac}), マトリックポテンシヤルおよび水中沈定容積の推移

pH3.0酢酸可溶鉄, マトリックポテンシヤルおよび水中沈定容積の変化は3反復の平均値. マトリックポテンシヤルは8測定値の日平均を示した.

表7 転換畑土壌における平均土塊径とその他の土壌の形質との相関係数

	単位	n	最小値	最大値	平均土塊径との相関係数
平均土塊径	cm	21	1.47	27.7	1.000
積算日数	日	21	0	356	-0.269
含水比	kg kg ⁻¹	21	0.32	0.68	0.683**
マトリックポテンシャル	log (cm)	18	1.36	2.05	-0.087
pH		21	5.31	5.94	-0.340
水中沈定容積	L kg ⁻¹	18	2.56	3.53	0.515*
仮比重	kg L ⁻¹	18	0.96	1.31	-0.423
Fe _{ac}	g kg ⁻¹	21	0.414	5.35	-0.145
うちFe(Ⅱ)	g kg ⁻¹	21	0.0087	5.35	-0.023
うちFe(Ⅲ)	g kg ⁻¹	21	tr.	1.14	-0.234

*および**はそれぞれ5%, 1%の危険率での有意差があることを示す。

Fe_{ac}: pH3.0 酢酸可溶鉄, n: 測定数

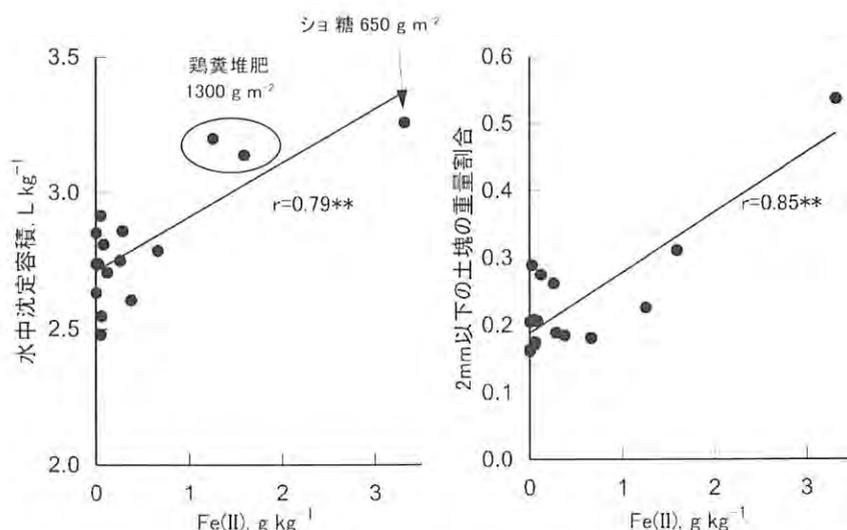


図22 復元田における活性二価鉄生成量 (Fe(Ⅱ)) と水中沈定容積および代かき特性 (代かき後の2mm以下の土塊の重量割合) の関係

により土塊が泥状化しやすくなるという傾向を示した。

4) 考察

(1) 転換畑における遊離酸化鉄の形態変化

ここで得られたFe_{ac}とリン保持量の関係はWillet and Higgins⁽¹²¹⁾の結果と極めて近いものである。彼らはpH4.8の酢酸緩衝液を用いて鉄を抽出し、畑転換2年目までの鉄の抽出量が次第に減少していくこ

とを明らかにしている。彼らは同時にリン酸イオンの土壌への保持量も減少傾向を示すが、Fe_oには一定の傾向がみられないことを明らかにし、こうした化学性の変化には遊離酸化鉄の形態変化が影響していると結論している。すなわち水田土壌を落水すると結晶性の低い非晶質の遊離酸化鉄画分が生成され、畑転換年数が経過するとこうした画分は次第に結晶化する。この結晶化がリン保持量の低下とpH4.8の酢酸緩衝液による抽出量が減少の原因とな

ると考察している。Sah et al.⁽⁸⁶⁾も同様の結論を得、落水直後の水田の遊離酸化鉄は反応性が高く、多量のリン酸イオンを保持すること、 Fe_0 ではこのような遊離酸化鉄の形態変化が正しく評価できないことを報告している。図19、20の結果は基本的に彼らの結論に一致しており、このような形態の変化が日本の水田でも観測され、これが5年という長期にわたって継続して観測されることを新たに明らかにしたといえる。

遊離酸化鉄の形態変化は微生物による還元特性にも影響を与えている。図16、図19が示すように遊離酸化鉄の比表面積が大きいと考えられる転換初期においては湛水処理によって遊離酸化鉄は容易に還元した。また Fe_{ac} は顕著に減少し(図19)、この傾向は湛水時の二価鉄の生成量と一致した。これらの結果は上述した遊離酸化鉄の形態変化の傾向と矛盾がなく、畑地化にともなう遊離酸化鉄の結晶度の安定化により湛水時の還元の進行は緩慢になることを示している。

ここで注意しなければならないのは Fe_{ac} の量は特定の遊離酸化鉄の含有量を示しているとはいえないという点である。例を挙げれば湛水培養1週間後の二価鉄量は Fe_{ac} よりも高く(図19)、 Fe_{ac} がそれ以外の遊離酸化鉄画分と不連続に還元しやすい画分であることを示すものではない。 Fe_{ac} はリン酸イオンとの反応性や湛水時の還元の進行の指標としては有効であるが、鉱物的にはある特定の画分を示しているかどうかは不明であり、これを明らかにすることは今後の課題であろう⁽⁹⁹⁾。

短期畑転換の結果から Fe_{ac} は減少傾向を示すが二価鉄と三価鉄の比率には一定の傾向が見られなかった。また、 Fe_{ac} の総量も短期的には増減があり、単調には減少しなかった(図21)。これらの結果は排水性の悪い粘土質転換畑の畑転換初年目においては短期的な滞水などが原因で土壌中の遊離酸化鉄は短期間で再還元を受けることを示している。しかし Fe_{ac} の減少傾向は明らかであり、長期的には微生物の還元を受けにくい形態への変化が生じた(図14)。結晶の安定化のメカニズムを明らかにすることはできなかったが、実験室内の制御された系では酸化還元の周期的な繰り返しは溶解・再沈殿のサイクルを促進し、遊離酸化鉄の結晶化を進めることが報告されている^(80,113)。Thompson et al.⁽¹¹²⁾はこれを

粒子径が小さな酸化鉄が大きな粒子に統合されるオストワルド熟成によるものと考察しており、これと同様の反応が転換畑で生じた可能性が高い⁽¹⁰⁰⁾。

(2) 鉄の形態変化が土壌の微細構造および碎土性に及ぼす影響

畑転換後の水中沈定容積の減少は、土壌の微細構造が畑転換年数の経過に対して徐々に畑土壌に近い形態へと変化したことを示している(図20)。Katou et al.⁽⁴²⁾によれば水中沈定容積は-1.5 MPa以上の乾燥で不可逆的に減少し、土壌の乾燥によって生成される微細構造を反映している。-1.5 MPaはほ場条件においては極めて強い乾燥条件であり、長野間・諸遊⁽⁶³⁾は、こうした強い乾燥は土壌表面などで引き起こされるとしている。図21で示したように土壌の乾燥と水中沈定容積の変化は定性的には一致したが、深さ10 cmのマトリックポテンシャルの値-1.5 MPaという強い乾燥を記録しなかったのは、このような理由からであると考えられる。

また、水中沈定容積は2 mm以上の耐水性団粒と負の相関を持ち⁽¹³⁾、乾燥によって形成される構造は比較的安定な構造を持つことが予想されていた。しかしながら、第三章1節でみたように遊離酸化鉄と層状ケイ酸塩が相互作用している系では遊離酸化鉄の還元によって水中沈定容積は増加した。さらに長期畑転換したほ場を水田に還元する際に有機物を施用した試験((4)復元田の代かき特性試験)では、微生物の基質を添加することで遊離酸化鉄の還元の促進と微細構造への影響をみたが、土壌の還元が進行したいくつかの処理区においては水中沈定容積が増加した(図22)。これらの結果は復元田等での還元の進行は水中沈定容積の増大を引き起こし、乾燥によって生成された構造を不安定化させることを示したものだといえる。一方で多くの処理区において還元の進行は緩慢で5年畑転換した土壌を30℃1週間培養した値と同程度であった(図19、22)。これは転換畑土壌では還元の進行が進みにくいとする図19の結果が圃場条件で再現されたものである。

以上から水田輪作体系において土壌の微細構造に影響を与える因子は2つ考えられる。1つは乾燥による構造の安定化(図23のプロセス1)であり、もう1つは遊離酸化鉄の還元による構造の不安定化である。さらに後者の因子については、畑地化年数を

経た遊離酸化鉄では還元が進行しにくくなり、これが間接的な影響を与える（図 23 のプロセス 3 および 2）。

中期畑転換試験において水中沈定容積と平均土塊径の変化が同様の傾向を示したことは両者には何らかの因果関係があることを伺わせる（図 20）。この実験から砕土性と微細構造の関係に関してメカニスティックに論じることは難しいが、水中沈定容積の減少は単位重量当たりの保水性の減少であり、疎水性の増加であると指摘しておきたい。疎水性の増加は第 I 章で述べた水膜説⁽⁶⁾ (water film theory) による脆性破壊が生じやすい状態と一致する。水膜説に依拠すると、水中沈定容積の減少が砕土性の上昇に寄与することは定性的には自然に思われるが、ここでは可能性を提示するにとどめる。一方で短期畑転換試験においては平均土塊径と含水比および水中沈定容積との間には正の有意な相関が認められたのに対し、遊離酸化鉄の形態変化と平均土塊径の推移には単純な相関関係が認められなかった（表 6）。水中沈定容積の減少は -1.5 MPa 以上の乾燥履歴を反映したものであり⁽⁴²⁾、-1.5 MPa を超える乾燥は土壌表面のごく近傍でのみ観測されるが、毎年の周期的な耕うんは -1.5 MPa 以上に乾燥が進んだ土壌の割合の増加に寄与させる⁽⁶³⁾。したがって短期畑転換試験では土壌の乾燥が十分に進まなかったことが還元による水中沈定容積の増加を観測できなかった一因であると考えられた。

次に湛水時の代かき特性をみると土壌の還元が進行した処理区においては代かき後の 2 mm 以上の画分が減少した（図 22）。これは有機物の施用により

図 23 のプロセス 2 が促進され、土壌構造が不安定化しやすくなり、代かきによる泥状化が促進されたと考えられる。

既報^(56, 115) から各処理において土壌に添加された鉄含量を推定すると牛糞たい肥 650 g m^{-2} 、豚ふんたい肥 650 g m^{-2} 、鶏糞たい肥 650 g m^{-2} 、鶏糞たい肥 1300 g m^{-2} 、稲わら 650 g m^{-2} 、ショ糖 650 g m^{-2} での鉄の施用量はそれぞれ 28, 41, 14, 28, 3, 0 mg kg^{-1} であった。仮比重 1.0、作土を 13 cm と仮定した場合最大で 0.3 mg kg^{-1} の鉄が添加されたことになるが、二価鉄生成量に較べ小さな値であり、ここでの考察では無視しうるものと判断した。

(3) 畑地化の指標としての pH3.0 酢酸可溶鉄 (Fe_{ac}) 利用の可能性

代表的な畑地化指標である畑地土壌化指数⁽⁶³⁾ は土壌の微細構造の安定性をもとにした指標であり、リン保持量のような化学性の変化をうまく評価できないという欠点がある。さらに畑地土壌化指数では十分に還元した土壌の畑地土壌化指数を 0 とするが、今まで述べてきたように遊離酸化鉄の還元されやすさは畑地化とともに減少するため、実際には同じ畑地土壌化指数であっても水田土壌化が進みにくい土壌が存在することになる。このような畑地土壌化指数の 2 つの欠点は土壌中の遊離酸化鉄の形態変化を考慮していないことに起因しており、 Fe_{ac} の活用はこうした欠点を補うことができると考えられる。転換畑では遊離酸化鉄中の Fe_{ac} 画分は酸化と還元を繰り返しながらも総量は徐々に減少する（図 21）。急激な乾燥によって Fe_{ac} は低下せず（図 14）、

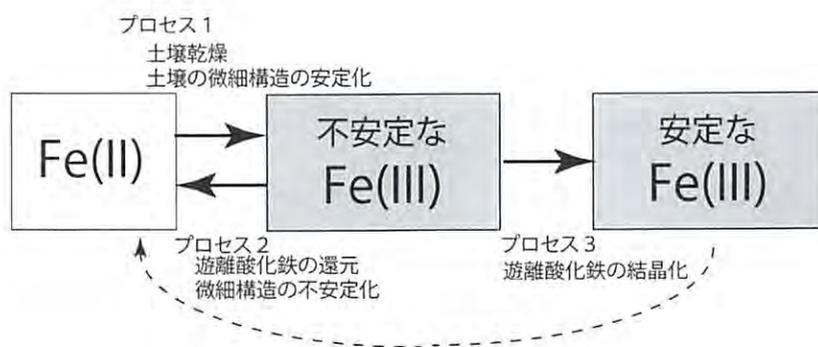


図 23 遊離酸化鉄の形態変化と土壌の微細構造、土壌乾燥、土壌還元の関係の模式図

還元によって Fe_{ac} よりも多くの鉄が二価鉄へと還元すること (図 16) を考え合わせると、 Fe_{ac} は急激な乾燥の影響を受けないが、転換畑では徐々に減少し、還元条件下では増加することが推察される。このような特徴は Fe_{ac} が転換畑あるいは還元田化による水分環境履歴に敏感に反応することを裏付けており、畑地土壌化指数を補うには十分な指標である。また、この指標を用いて土壌が水田履歴を持っているかどうか判断する⁽¹²³⁾ ことも可能であろう。 Fe_{ac} と畑地土壌化指数とを併用することにより、畑地化・水田化作用の総合的な解明が可能になると思われる。

5) まとめ

- ① 耕うん後の土塊の粒径分布は Rosin-Rammler 式でよく記述できた。Rosin-Rammler 式によって耕うん後の土塊の分布および平均土塊径といった代表値を表現することが可能である。
- ② 転換畑風乾土の遊離酸化鉄はリン酸イオンとの反応性が高く、畑転換年数を減るにしたがって

活性は低下した。同様に湛水時の還元の進行速度は畑転換年数を減るにしたがって低下した。

- ③ 中期畑転換試験 (畑転換 0 ~ 5 年) では土壌の碎土性と水中沈定容積、pH3.0 酢酸緩衝液可溶二価鉄含量は類似の傾向を示した。短期畑転換試験 (畑転換後 1 年) では碎土性と水中沈定容積は有意な相関関係を示し、pH3.0 酢酸可溶鉄含量は変動を繰り返しながらも減少する傾向だった。
- ④ 6 年以上畑転換した水田を還元田としたところ、二価鉄生成量が多い処理区において、水中沈定容積が大きくなり、代かき後の 2 mm 以下の土壌割合が小さくなる傾向が有意に認められた。
- ⑤ 以上から、畑地化により遊離酸化鉄の結晶構造は徐々に安定化し、短期的な滞水などによる還元が進行しにくくなると考えた。畑地化過程ではこのことが微細構造の維持に貢献し、還元田による遊離酸化鉄の還元の進行は代かき時の土壌の泥状化割合を高めると考えた。

IV. 耕うんによる土壌水分環境の制御とダイズの発芽および生育反応

1. 粘土質転換畑での土壌鎮圧によるダイズ種子の吸水促進効果⁽¹⁰²⁾

1) はじめに

第 II 章でみたように転換畑のダイズの収量を安定的に高いレベルで維持するためには十分な苗立ち数を確保することが重要である。

国内での転換畑におけるダイズの発芽不良に関する研究は、湿害対策を中心に進められており⁽⁶⁸⁾、過乾燥に起因する発芽不良を対象とした研究事例はほとんど見当たらない。そのため対策技術の開発も進んでいない。営農現場においては水田のかんがい施設を利用して、播種後の転換畑へかん水するといった試みが行われているが、排水性の劣る粘土質転換畑では、かん水が湿害を引き起こす恐れがあり、有効な解決策とは言い難い。

一方、営農現場では経験的に耕うん深度、碎土、播種深度、播種後の鎮圧等によって吸水・発芽の制御が可能であると考えられている。実際の種子の吸水過程では、こうした営農作業上の諸因子が複雑に関与していることが推察される。日本では上に挙げ

た営農作業上の諸因子のうち碎土性と発芽の関係に関する研究例⁽⁴¹⁾ は散見されるが、耕うん深度、播種深度、播種後の鎮圧等に関する検討例はほとんど見当たらない。

海外の半乾燥地の事例では、耕うん等により毛管連結を切断した表層を作成し、播種床からの蒸発を抑制することが種子の吸水促進に効果があるとされている⁽⁷⁹⁾。毛管水の切断によって表層に作成された乾燥した土壌の層は土壌マルチ (soil mulch) と呼ばれ、より深くに存在する種子周辺の土壌の乾燥を抑制する。土壌マルチを活用するには土壌マルチより深い位置へ播種する必要がある。耕うん後のどの時期にどの程度の厚さの土壌マルチが生成されるか、という知見が必要となる。土壌マルチの厚さは土壌や気象条件に依存する⁽⁷⁹⁾ が、転換畑の播種条件においてこれらを検討した例はない。一方、播種後の土壌の鎮圧が吸水に有利に働くことを示唆する報告も存在する。Hadas et al.⁽²³⁾ は種子と土壌水分との接触面積を増加させることが吸水促進に有効であり、営農的には播種後の鎮圧ローラーによる鎮圧

作業が重要であることを示唆している²⁴⁾。

上述の2つの研究事例は種子の吸水を促進するために有効な技術を示唆している。しかし両者は互いに独立ではなく、鎮圧は土壌マルチの生成に関わる土壌水分環境に影響を及ぼす事が予想される。また転換畑では排水性が低く降雨による湿害の危険性から播種深度を浅くとらざるを得ない。そのため転換畑でのダイズ種子の吸水を促進する技術を開発するためには、鎮圧処理が深さ20～30mmといった播種位置の水分環境と種子の吸水に与える影響を明らかにする必要がある。

ここでは播種後の鎮圧処理が播種床の水分環境およびダイズ種子の吸水特性に与える影響を明らかにする。また、これらの結果から種子の吸水に適した耕うん・播種方法を提示する。

2) 材料と方法

(1) ほ場試験

耕うんおよび鎮圧が播種床の水分環境に与える影響を明らかにするために、2003年と2004年に播種床の乾燥速度を、2004年には播種床における種子の吸水速度を求めた。実験の実施には中央農業総合研究センター北陸研究センター内の転換畑を用いた。用いた土壌の化学的・物理的性質は第Ⅲ章1節で示したとおりである。

耕うんおよび播種床の整地は2003年5月27日、2004年5月28日に行い、耕うん・播種・鎮圧を一行程で行うアップカッターロータリーを用い、播種機の鎮圧ローラー部の有無により鎮圧区と無鎮圧区を設けた(写真2)。鎮圧ローラーの鎮圧強度は6kPaであった。耕深は130mm、播種深度は20～30mmとした。供試したダイズ品種はエンレイである。

耕うん前後の播種床の土壌を深さ50mmまで2反復で採取し、乾熱法で含水比を測定した。また、2004年には播種床中での種子の含水比の推移を調査するとともにTDRを用いて播種床の異なる深度(10-100mm)の土壌の含水比の推移を測定した。種子の吸水速度の測定に当たり播種後3時間後、および1, 2, 3, 4, 5日後の種子を4粒採取し、ただちに重量を測定し105℃に乾熱したものを乾燥重として含水比を求めた。TDRは深さ10, 40, 70, 100mmに水平に挿入し、播種床表層土壌の乾燥速度を求めた。播種深度にあたる20～30mmにはセンサーを挿入しなかったが、用いたTDRセンサーの測定範囲はプローブの周囲20～30mmに及ぶため、播種深度の土壌水分は10, 40mmに挿入したセンサーに反映されていると考えた。TDRの測定値をそのまま使うには2つの問題が懸念された。第一に10mmに挿入したプローブは測定範囲が地表

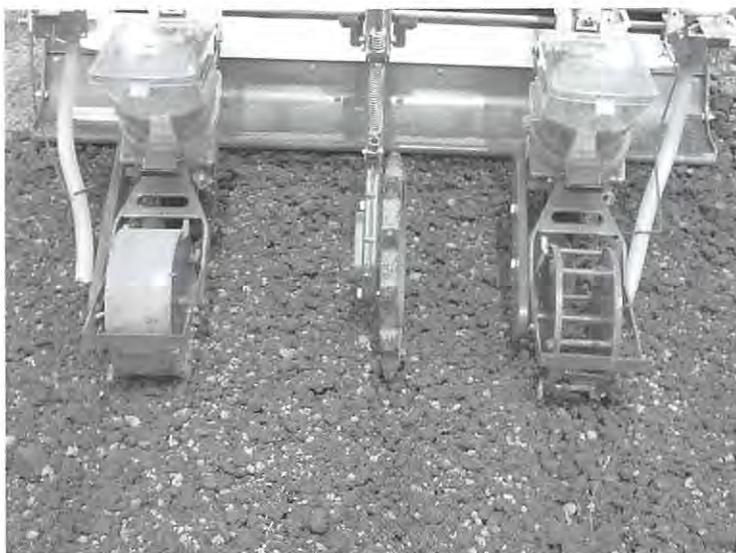


写真2 鎮圧の影響を検討するために用いた播種機鎮圧ローラーの形状

左：鎮圧区、右：無鎮圧区

面以上に及んでしまうため、正確に挿入部位の含水率を測定できない恐れがある。第二に、TDRで得られる値は体積含水率であるが、播種床の土塊は粗く孔隙の気相率が大きいために、この値は碎土状態に大きく依存してしまい、含水比等と合わせた考察が難しくなる。また、種子と接触する部位の土壤水分が吸水に大きく寄与するという既存の知見^(23,24)から、土塊のマトリクスの含水比が重要であると考えられる。そこでTDRから得られた値を重量をベースとする含水比に換算することで上述の問題点を解決した。すなわち播種床土壌を高さ25 mmの50 mL容採土管により採取し体積含水率および重量含水比を求め、両者の関係を用いてTDRによって得られた体積含水率を重量含水比に換算した。TDRには温度依存性が存在することが指摘されている⁽¹²²⁾が、温度の補正は行わなかった。

(2) 室内実験

ほ場においては蒸発による土壌の乾燥が進行するため、乾燥過程での水移動がダイズ種子の吸水に影響を与えることが予想される。そこでダイズ種子の吸水速度に及ぼす各因子の影響を独立して解析するために室内実験での密閉系において土壤水分を一定に保ち、水分、碎土性、鎮圧強度が種子の吸水速度に及ぼす影響を解析した。

実験には、ほ場試験において耕うんを行った際に採取した土塊を用いた。採取した土塊を未乾燥のまま直径0~5、5~10、10~20 mmにふるい分け、それぞれの土塊を乾土で380 g秤り取り、150 × 100 × 50 mmのポリプロピレン製の容器に詰めた。土壌の水分ポテンシャルが-0.01、-0.1、-0.32 MPaとなるように水を加え、容器にふたをし室温で2日間静置することで水分を均質化させた。各水分ポテンシャルとするのに必要な水の量は後述する土塊の水分特性曲線から求めた。静置後8粒のダイズ種子を15 mmの深さに播種し、土塊の表面に平らな板を置き、圧力が0、4.0、14 kPaとなるように板に30秒の負荷を与えることで鎮圧処理とした。この時、仮比重および三相分布を鎮圧処理後の土塊の占める体積から求めた。鎮圧後、容器に再びふたをし、播種時期の日平均地温と等しい22℃の条件で吸水試験を行った。播種から1、3、5、7日後に種子を順次取り出し、種子の体積、種子根の長さおよび種子

の含水比を測定した。種子の体積は種子を楕円球と仮定し3軸の長さから計算した。種子の含水比は種子を105℃に乾熱した際の重量を乾燥重として求めた。種皮をやぶり突出した根の長さが2 mmを超えたものを発芽した種子と見なした。ダイズ種子はほ場試験と同様にエンレイを用い、粒径が7.9 mm以上のものを選び実験に供試した。

種子の水分特性曲線を得るために、浸透圧が-10 kPaのポリエチレングリコール⁽⁵⁸⁾溶液中において上記の試験と同様の培養条件でダイズ種子を吸水させた。吸水過程の種子を定期的に採取し、軽く潰した後にただちにサイクロメーター⁽⁸⁵⁾を用いて水分ポテンシャルを測定した。測定後の試料の含水比を上述の条件で測定した。

用いた土壌の土塊径10-20 mmの試料について100 mLのコアに薄く詰め、-0.01 MPaから-0.3 MPaまでの乾燥過程での水分特性曲線を加圧盤法⁽⁹⁾で測定した。また用いた土壌の一部を風乾し、2 mmのふるいを通した後に-0.3 MPa程度まで湿潤させ、乾燥過程での水分特性曲線をサイクロメーターで求めた。

3) 結果

(1) ほ場試験

耕うん後の土壌の碎土状態および鎮圧処理の有無が播種床の土壌物理性に与える影響について2004年の結果を表8に示した。表層0~50 mmの平均土塊径は12 mmであり20 mm以下の土塊の碎土率は87%であった。鎮圧処理により気相率は減少し、液相率および固相率は増加した。

2003、2004年における旬別の日平均気温、日平均日射量、積算降水量を図5に、土壌の乾燥指標値を図1に示した。2003年の6月上旬の積算降水量は1998~2007年の平均値とほぼ等しく、この年の気象条件が平年並みであることを示した。これに対して2004年は積算降水量が大きく、土壌の乾燥指標値をみても2004年は2003年ほど強い乾燥条件ではなかった(図1)。

鎮圧が土壌の含水比の推移に与える影響を図24に示した。2003年、2004年共に鎮圧区の播種床表層の含水比は無鎮圧区よりも高く維持された。2004年のデータでは、耕うん2日前の含水比は耕うん直後とほとんど変化がなく、耕うんによって土壌の乾

燥が急速に進んだ。耕うん後の土壌の含水比を指数関数で回帰すると、相関係数は0.90～0.98と両者の関係をよく近似できた。

播種床内各深さでの含水比推移（図25）から鉛直方向の水分分布を考えると、鎮圧区では表層100 mmから10 mmにかけて含水比は地表部に向

かって緩やかに減少しており、含水比の不連続な変化は認められなかった（図25）。これに対し無鎮圧区では表層100 mm深から40 mm深にかけての含水比は鎮圧区に比べて高く、10 mmにおいて含水比は不連続に減少していた。

播種床における種子の含水比の変化を図26に示

表8 ほ場試験における鎮圧が表層50 mmの播種床の物理性に与える影響（2004年）[†]

	無鎮圧	鎮圧
仮比重, kg L ⁻¹	0.61 (± 0.01)	0.69 (± 0.05)
三相分布, m ³ m ⁻³		
液相率	0.16 (± 0.03)	0.21 (± 0.02)
気相率	0.60 (± 0.03)	0.53 (± 0.04)
固相率	0.24 (± 0.00)	0.26 (± 0.02)

[†]カッコ内の数字は2連の測定値のばらつきを示す。

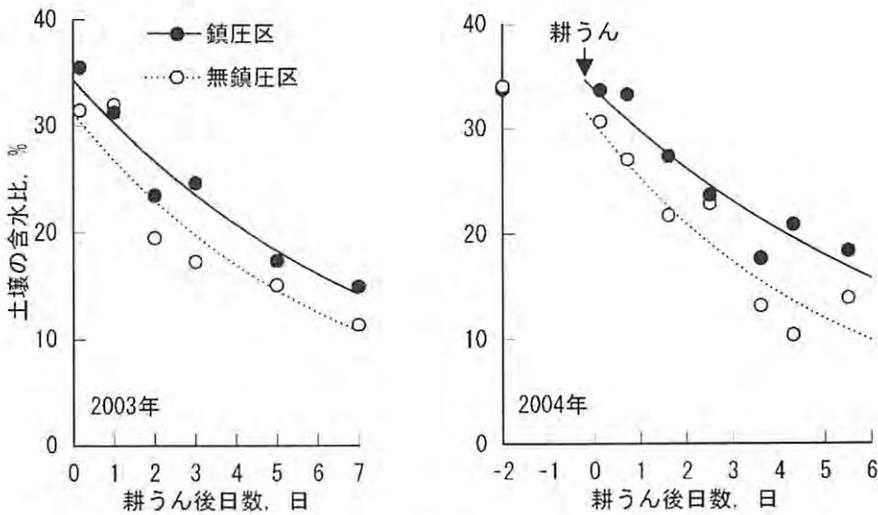


図24 耕うん後の播種床表層（0～50 mm）の含水比に及ぼす土壌鎮圧の影響と乾燥速度の平均値

深さ0～50 mmの播種床土壌を採土管により採取し、乾熱法により測定した。プロットのない実線及び破線はそれぞれ鎮圧区および無鎮圧区の乾燥速度を示す。回帰には $y = a \exp(-bx)$ の式を用い、回帰したときの回帰係数 a 、 b は以下のとおり、ただし y は含水比（%）、 x は播種後日数（日）を示す。

年	処理	a	b	相関係数
2003	無鎮圧	31.2	-0.152	0.95
2003	鎮圧	34.3	-0.126	0.98
2004	無鎮圧	30.5	-0.287	0.90
2004	鎮圧	33.8	-0.126	0.93

した。播種床の鎮圧によって種子の含水比は高まる傾向であり、*t*検定によると播種3時間後、3、5日後についてはそれぞれ1、10、10%の危険率で有意だった。これは鎮圧により播種床の乾燥速度が低下した、という図24の結果と一致しており、これは乾燥の遅れが種子の吸水に有利に働いているという結果を裏付けるものだった。

(2) 室内実験

室内での鎮圧処理による仮比重の変化を表9に示した。ほ場試験時の仮比重0.61～0.69に較べ仮比重はやや高いが鎮圧による仮比重の増加率は113～144%であり、ほ場試験時の増加率である113%と同等かそれ以上の鎮圧効果が得られた。

播種直後の種子の吸水速度は高く、その後吸水速度は徐々に低下する傾向だった(図27)。そこで発芽までの吸水過程を一次反応式(6)によって定量化した。

$$W = a\{1 - \exp(bt)\} + c \quad (6)$$

ここで W は種子の含水比(%), t は播種後日数(日), a , b , c はパラメータである。相関係数は0.96から0.99990と高く、式(6)は種子の吸水をよく表現で

きた。種子個体の根の伸長量および個体群としての発芽率とともに含水比130%以上の吸水を境に急速に高まった(図28)。次に種子の吸水過程の水分特性曲線を見ると、水分ポテンシャル-5～-1 MPa付近からは吸水により含水比は増加するが水分ポテンシャルの増加はわずかであった(図29)。図29から吸水過程の種子の含水比130%に相当する水分ポテンシャルは-1.4 MPaと読み取れた。この値はKim and Minor⁽⁴⁴⁾が4品種のダイズの発芽限界水分ポテンシャルとして求めた-1.2 MPaによく一致し、ダイズの発芽限界水分ポテンシャルの品種間差異は小さい事が示唆された。そこで式(6)と表9から-1.4 MPaに達するまでの時間($T_{-1.4}$)を計算し、これを発芽に要する日数とした。 $T_{-1.4}$ を従属変数とし、水分ポテンシャル(-MPa)・平均土塊径(mm)・鎮圧強度(MPa)の各因子について重回帰分析をしたところ、

$$T_{-1.4} = 4.3 + 2.0 \times \text{水分ポテンシャル} + 0.059 \times \text{平均土塊径} - 0.0014 \times \text{鎮圧強度}$$

の関係が得られた($r = 0.95$, $p < 0.01$)。水分ポテンシャルと土塊径の重回帰係数は、 $T_{-1.4}$ に対して危険率1%以下の有意な寄与が認められたが、鎮圧

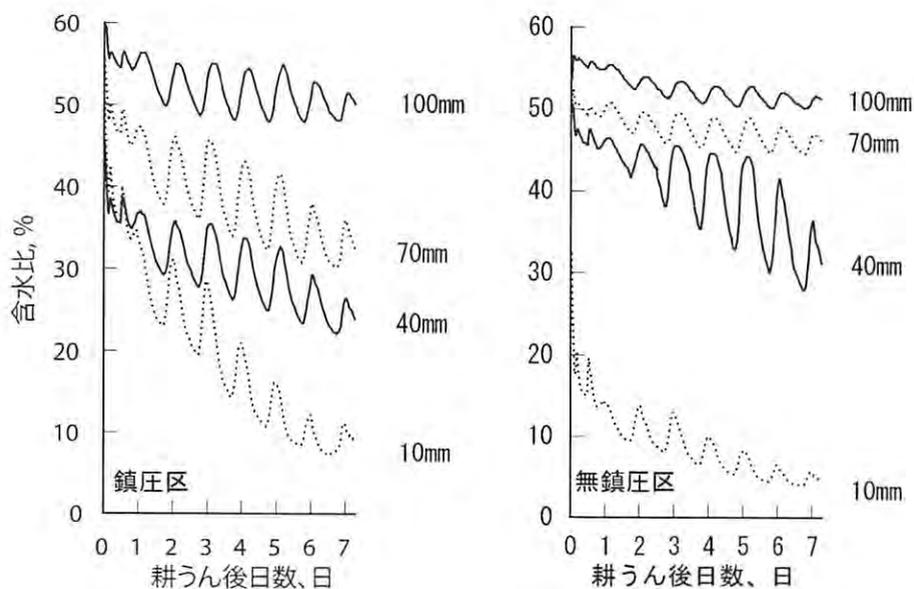


図25 鎮圧の有無による耕うん後の播種床(10～100 mm)における土壤含水比の変化

グラフ右の数字は測定した土壌深度。TDRによって測定した体積含水率を重量含水比に変換した値で示した。

強度に関しては寄与は有意ではなかった。実験条件の水分ポテンシャルおよび土塊径の範囲では $T_{-1.4}$ はそれぞれ、0.62日、0.74日の範囲で値が変動すると計算され、感度はほぼ同等であった。

また三相分布と $T_{-1.4}$ の相関係数をみたところ、液相、気相、固相の相関係数はそれぞれ -0.86^{**} 、 0.73^{**} 、 -0.42 となり、液相とは負の、気相とは正の有意な相関が認められた。

4) 考察

(1) 鎮圧処理が種子の吸水に与える影響

は場実験では鎮圧により種子の吸水速度は高まった(図26)。これは鎮圧によって耕うん後の播種床の含水比が高い状態で保たれるという結果(図24)と一致した。また、無鎮圧区では鎮圧区に比べ深さ10mmの乾燥が急激に進行し、40mm以深の土壌の含水比はむしろ高いままで維持された。すなわち無鎮圧区では毛管連結が切断され、表層に土壤マルチの生成が認められた(図25)。一般に裸地条件で土壌が乾燥する場合、初期段階においては下層からの土壌水の毛管上昇の速度が土壌表面からの蒸発速度を上回るため、土壌表面からの蒸発が乾燥の律速段階となる。この初期段階においては乾燥速度はほ

ぼ一定である。さらに乾燥が進行すると土壌表面からの蒸発に比べて、下層からの土壌水の毛管上昇あるいは水蒸気による上昇が律速となり、乾燥速度は徐々に低下する⁽⁵³⁾。今回の実験では乾燥速度が低

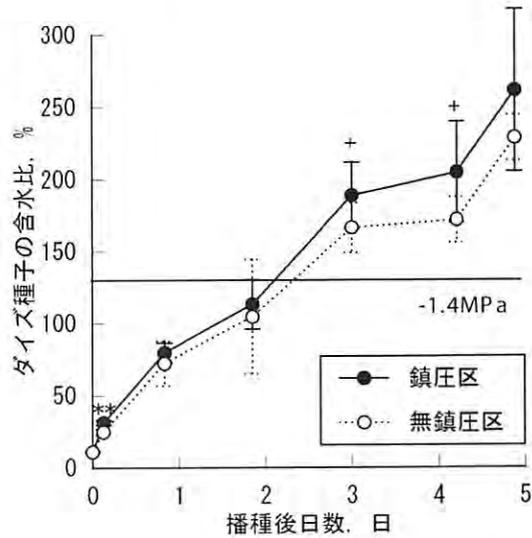


図26 土壌の鎮圧による播種後のダイズ種子の含水比の推移

**と+は検定によってそれぞれ1, 10%の危険率で有意差があることを示す。図中の-1.4MPaを示す直線は図29より求めた。

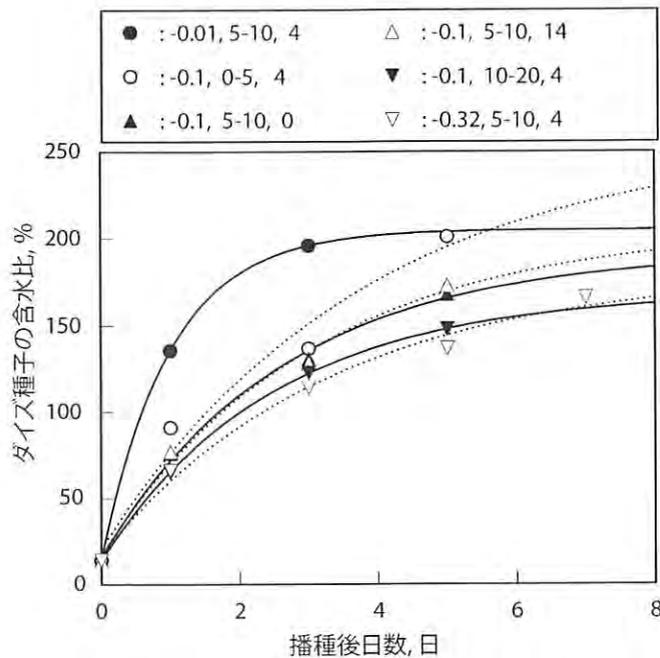


図27 土壌水分ポテンシャル、土塊径、鎮圧強度と播種床におけるダイズ種子の吸水パターン例(室内実験)

回帰曲線は式(6)で回帰した際の回帰曲線。凡例の数字は順に水分ポテンシャル(-MPa)、土塊径(mm)、鎮圧強度(kPa)を示す。

下傾向を示し、指数関数による回帰に良くしたがったことから、鎮圧区・無鎮圧区ともに下層からの土壌水の上昇が乾燥の律速段階となっていたといえる。土壌が膨軟な無鎮圧区では土塊同士の接触面積が小さく、下層からの水の供給量が小さいために、表層において乾燥した土壌マルチの層が生成され、土壌マルチより深い土壌の含水比は高く保たれた。これに対して土塊同士の接触が大きい鎮圧区では水の供給量が大きかったために、土壌マルチが生成されなかったと考えられる。Fyfield et al.⁽²¹⁾は不耕起土壌と耕起土壌の比較において、耕起土壌においては表層(50 mm)の乾燥がその下層(100 mm)に比べ速いことを示し、上述と同様なメカニズムで説明している。またHammel et al.⁽²⁶⁾はシルト質土壌を用いた実験によって仮比重の大きな不耕起土壌は仮比重が小さい耕起土壌に比べ不飽和状態での毛管水の拡散係数が5倍速いという結果を得ている。今回の結果は播種機の鎮圧ローラーによる鎮圧処理においても、不耕起の場合と同じメカニズムが働き、表層の水分が無鎮圧区に比べ高く維持されることを示している。

半乾燥地を中心とした海外の事例^(21, 26, 79)では、土壌マルチの生成は播種床の乾燥を抑制するこ

とが種子の吸水促進に効果があるとされている。Papendick et al.⁽⁷⁹⁾は耕深を大きくとることによって、表層の毛管水が切断され、下層からの土壌水分の毛管上昇と蒸発が妨げられるとし、その結果コムギ種子の出芽率が高まることを認めている。彼らの実験条件は150 mmの耕深をとり、130 mmに播種したものである。これに対し日本の転換畑では湿害の懸念があるために深い位置への播種が難しく、播種深度は20~30 mm程度とすることが一般的である。今回の結果では、無鎮圧区の40 mmの含水比が鎮圧区と比べて高いことから土壌マルチの下方の境界は10~40 mmの間に存在すると考えられた。播種深度が20~30 mmの条件では播種位置が土壌マルチの生成部位と等しくなってしまうため、鎮圧処理を行い強く乾燥する表層を作らない方が吸水に有利であるといえる。

ほ場試験における種子の吸水量は鎮圧区で有意に高く(図26)、鎮圧によって乾燥が抑制されるという結果とよく一致した。種子の吸水は土壌と種子の水分ポテンシャルの差によって引き起こされる^(23, 24)。そこで図29の関係がほ場においても成り立つと仮定し、播種床における土壌と種子の水分ポテンシャルの変化をみた。図24から土壌が種子の

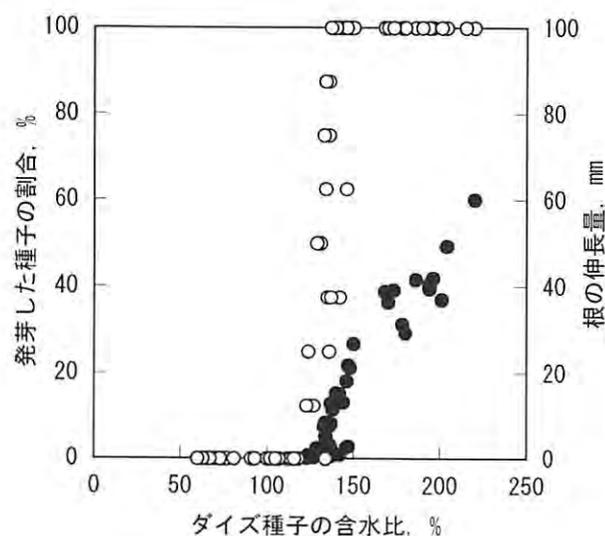


図28 ダイズ種子の含水比と発芽した種子割合および根の伸長量の関係

○は発芽したダイズ種子の割合、●は根の伸長量の平均値を示す。培地にポリエチレングリコールを利用したものも含め、実験に用いたすべてのデータから作成した。

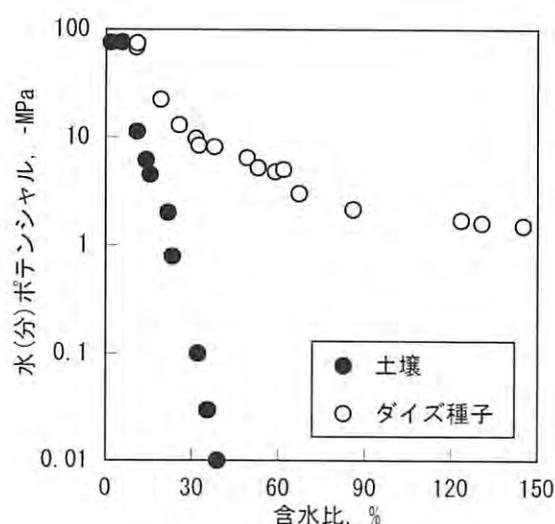


図29 ダイズ種子と供試土壌の水分特性曲線

土壌は乾燥過程、土壌の-0.1MPaダイズ種子は吸水過程のデータ。

表9 実験室で調整した播種床の仮比重とダイズ種子の吸水速度

水分ポテンシャル -MPa	篩別土壌の土塊径φ mm	鎮圧強度 kPa	仮比重 kg L ⁻¹	係数			T _{-1.4} 日	相関係数
				a %	b 日 ⁻¹	c %		
0.01	0～5	0	1.00	219	-0.82	14.1	0.92	0.996
		4	1.14	195	-1.3	14.1	0.72	0.998
		14	1.31	184	-1.3	14.1	0.76	0.998
	5～10	0	0.93	199	-0.84	14.1	1.04	0.997
		4	1.06	191	-1.0	14.1	0.90	0.99990
		14	1.25	187	-1.1	14.1	0.85	0.999
	10～20	0	0.84	182	-0.91	14.1	1.12	0.994
		4	1.00	165	-1.5	14.1	0.84	0.998
		14	1.21	172	-1.1	14.1	1.01	0.995
0.1	0～5	0	0.90	179	-0.65	19.3	1.48	0.962
		4	1.01	236	-0.27	20.5	2.31	0.973
		14	1.12	327	-0.17	23.2	2.38	0.964
	5～10	0	0.86	173	-0.4	15.9	2.71	0.996
		4	0.94	192	-0.3	17.1	3.01	0.991
		14	1.01	189	-0.33	16.8	2.75	0.992
	10～20	0	0.77	143	-0.45	15.4	3.56	0.996
		4	0.87	153	-0.41	14.1	3.42	0.999
		14	0.95	142	-0.59	14.3	2.84	0.99988
0.32	0～5	0	0.92	171	-0.29	22.2	3.47	0.965
		4	0.99	274	-0.14	22.3	3.64	0.975
		14	1.04	217	-0.2	21.4	3.51	0.978
	5～10	0	0.86	148	-0.37	18.1	3.79	0.987
		4	0.91	163	-0.31	17.2	3.86	0.991
		14	0.97	178	-0.27	17.7	3.72	0.989
	10～20	0	0.79	169	-0.25	19.2	4.20	0.985
		4	0.83	154	-0.3	17.3	4.46	0.993
		14	0.90	163	-0.26	16.9	4.52	0.994

T_{-1.4}：ダイズ種子の水分ポテンシャルが-1.4 MPaに達するまでの日数。係数a, b, cはダイズ種子の含水比を式(6)で回帰したときの各係数。このときWは種子の含水比(%), tは播種後日数(日)を示す。相関係数は四捨五入後に1にならない範囲まで表示した。

発芽に必要な水分ポテンシャルである-1.4 MPa以下に乾燥するまでの日数は、2004年の鎮圧区、無鎮圧区でそれぞれ、4.0、2.1日と試算された。これに対して種子の水分ポテンシャルが-1.4 MPaに達する日数は、図26から2004年の鎮圧区、無鎮圧区でそれぞれ、2.1、2.4日であった。後述するように、この数字を比較することはやや粗い議論となるが、この結果は無鎮圧区では土壌が-1.4 MPa以下に乾燥する期間と種子が-1.4 MPaに達するまでの期間がほぼ等しいのに対し、鎮圧区では土壌の乾燥よりも十分早く-1.4 MPaまで種子の吸水が完了していることを示しており、鎮圧処理が安定した吸水・発芽に重要

な役割を果たしていることが示唆された。ただし、この試算では土壌の水分ポテンシャルの測定値は図24の表層から深さ50 mmまで範囲の値を用いており、実際に種子への水分の移動が生じる種子の極近傍の土壌の値を測定したわけではない。また、ほ場での観察では地温の日較差によって種子周辺での結露がしばしば認められ、日中と夜間の温度環境の差は吸水に大きな影響を与えていることは否定できない。ほ場での種子の吸水速度を定量的に把握するためには、今後これらの点について仔細に検討する必要がある。

Hadas and Russo⁽²⁴⁾は鎮圧が種子の吸水を促進さ

せる理由として種子と土壌水の接触面積が増加することを挙げている。そこで鎮圧による効果が下層からの水分供給によるものか、接触面積の増加によるものか、を考察してみたい。室内実験においてはいずれの土塊径および水分ポテンシャルに対しても鎮圧処理によって仮比重が増大していることから、鎮圧によって気相率が小さくなり、種子表面と土壌粒子との接触面積を増大したことが推察された(表9)。しかし室内実験での土壌の乾燥が進行しない条件では鎮圧による吸水促進の効果は有意ではなかった。また気相率と $T_{-1.4}$ の間に正の相関があることから、密閉系における酸素量の不足が鎮圧区の発芽を遅らせた可能性は低いと考えられた。これらのことから、ほ場試験で認められた鎮圧区の吸水促進の主体は、鎮圧によって種子表面と土壌粒子との接触面積を増大したためであるとは考えにくく、前述した下層からの水分供給による土壌乾燥の抑制が主たるメカニズムであると思われる。今回のほ場試験の結果は作土の土壌水分の変化を示したのみで、下層からの水分供給量を実測することは出来なかった。そこで今回の実験条件に比較的近い裸地の極表層の水移動を扱った報告を参考に議論を行ってみたい。Jackson et al.⁽⁴⁰⁾は広い範囲の体積含水率を対象にごく表層での下から上への液状水の移動を検討した。彼らによると裸地における深さ10 mmでの下層からの水分移動を液状水の移動、水蒸気の移動、液状水の温度勾配による移動、水蒸気の温度勾配による移動に分けて解析した結果、下層からの液状水の移動による水分供給量は体積含水率4%で 0.2 mm 日^{-1} 、体積含水率18%では 2.6 mm 日^{-1} であった。この結果は下層からの水分供給量が無視できないものであることの傍証となる。鎮圧による種子表面と土壌粒子との接触面積の増大が吸水促進に寄与しない原因は明らかではなかった。この詳しいメカニズムを明らかにするにはダイズ種子と土壌粒子との接触面積に関する子細な解析が必要であると考えられ、未解明な点として残った。

(2) 播種後のすみやかな吸水のための土壌の耕うん整地技術

播種深度を20~30 mmとした場合、播種後に鎮圧をした方が鎮圧によって下方からの水分の供給が維持され、播種位置の土壌水分が比較的高い状態で

保たれるために種子の吸水には有利であった。また鎮圧による吸水性の向上は、種子と土塊表面の接触面積の増加によるものではないようだった。これらの結果は吸水促進には播種床の土壌水分の維持が重要であることを示している。

播種床の土壌水分を高い状態で維持するためには鎮圧の時期も重要である。耕うん後の土壌は急速に乾燥が進行し、乾燥が進行するほど不飽和透水係数は減少し、下層からの水移動速度が低下すること⁽²⁶⁾から、乾燥が進んでから鎮圧を行っても鎮圧の効果は小さく、耕うん後すみやかに播種・鎮圧を行う体系が最も吸水に適していると考えられる。また、表9において水分ポテンシャルが高い土壌では鎮圧によって仮比重が高まっているように、湿潤な土壌は鎮圧により変形しやすく、毛管の連結効果も高まることが期待される。この面からも耕うん直後の鎮圧が吸水促進に適すると考えられる。営農現場においては播種後に播種機の鎮圧ローラーで鎮圧する事はすでに一般的であるが、耕うん作業と播種・鎮圧作業は別の行程で行われる事が多い。吸水促進には近年開発された耕うん・播種・鎮圧を一行程で行う作業機⁽³⁶⁾を導入することが効果的であると考えられる。

5) まとめ

- ① 土壌の鎮圧処理によって表面から深さ50 mmまでの土壌水分が相対的に高い値で維持された。この結果、ダイズ種子の吸水量が有意に高まった。この時無鎮圧区では土壌表面10~40 mmにおいて急激な乾燥が認められたが鎮圧区ではこのような現象が認められなかった。
- ② 播種床が乾燥しないよう閉鎖系とした室内実験においては鎮圧してもダイズ種子の吸水促進効果は認められなかった。このことからほ場において播種床を無鎮圧のままにすると毛管の連結効果が小さく、下方からの水分の供給量が小さくなるためにダイズ播種位置(20~30 mm)の土壌の乾燥が速まり、蒸発がない室内実験においては鎮圧の効果が認められなかったと考察した。
- ③ 以上の結果から、湿害の恐れから種子を比較的浅い20~30 mmの位置に播種する転換畑においては、播種後に鎮圧し、下方からの水分の供

給を促す体系が吸水に有利である結論した。また、耕うん後により土壌の乾燥が加速することから耕うん直後の播種が吸水に有利であると考察し、耕うん・播種・鎮圧を一行程で作業する機械体系が吸水促進に効果的であることを実験的に裏付けた。

2. 粘土質転換畑で畝立て栽培を行った際のダイズの窒素集積特性⁽¹⁰¹⁾

1) はじめに

第Ⅱ章でみたように排水性の劣る水田では湿害がダイズ作における最も大きな障害となっている。転換畑では水稻作付時に代かきが行われ、還元によって微細構造が不安定化するために、土壌構造は未発達となる。さらに耕盤の存在も排水を妨げる因子である。北陸地域ではダイズの初期生育は梅雨期間に重なるため(図1)、湿害は初期生育の阻害の原因となる。杉本⁽⁹⁷⁾によるとダイズ生育の初期段階で湿害にあうほど収量の低下は著しく、収量低下に最も寄与するのは窒素欠乏による莢数不足である。第Ⅱ章ではこのような生育反応が実際の営農現場において生じていることを確認した。

近年急速に普及している畝立て栽培は排水性の悪い転換畑でのダイズ収量を増加させる効果がある⁽³⁶⁾。アメリカのコーンベルトで展開されている土壌浸食防止を目的とした畝立て栽培⁽²⁷⁾と異なり、細川⁽³⁶⁾の開発した畝立て栽培は土地利用型作物においても野菜と同様に湿害回避を目的としている点が大きな特徴である。細川は播種位置が慣行栽培に比べ15 cm高い畝立て栽培では見かけの地下水位が減少し、根圏の酸素濃度が上昇することにより、収量が110～120%と増加するとしている。しかし畝立て栽培をした場合のダイズの窒素集積特性について検討した知見はない。ダイズの湿害は根および根粒の活性低下による窒素栄養環境の悪化が主因と考えられる⁽⁹⁷⁾ため、窒素栄養環境に関する知見は重要だと思われる。

ダイズの窒素集積には根粒菌との共生による窒素固定が関与するため他の作物に比べ複雑である。窒素固定による集積量を推定するためには、非根粒着生品種との比較、¹⁵N希釈法、アセチレン還元法、相対ウレイド法などのいくつかの方法が存在する^(30,31)。これらの手法の中で、相対ウレイド法は

①ほ場での測定に適している、②広い生育ステージで活用できる、③特殊な装置や器具を必要としない、といった長所があり^(30,109)、今回の目的には適した手法である。

そこで本実験では、畝立て栽培を行ったダイズの窒素集積特性を相対ウレイド法によって明らかにすることを第一の目的とした。また、畝立て栽培を行ったダイズの根系発達の特徴についても知見を得ることとした。

2) 材料と方法

(1) ほ場と土壌

ほ場の排水性が異なり、近接する2つのほ場(以下、ほ場A、Bとする)を試験に供試し、畝立て栽培と慣行栽培での窒素集積量を検討した。この2ほ場の距離は100 m程度であり気象的な相違はないと考えられた。実験は2002、2003年の2年間行った。ほ場の土壌型、pH、土性、窒素無機化量を表10に示した。また、図30には2ほ場の体積含水率の推移を示した。ほ場Bは暗渠が整備されておらず、粘土含量が高いために排水性が極めて悪く、明瞭な湿害が認められた。ほ場Aは暗渠が整備されているため、相対的に土壌が過湿になりにくいことが観察からも明らかであった。ただし、いずれのほ場においても梅雨時期には葉の黄化が認められ、湿害の症状を示した。

(2) ほ場試験

a) 畝立て栽培したダイズの窒素集積特性

ダイズの窒素集積特性は以下のように測定した。2002年と2003年においてはエンレイをそれぞれ6月2日および3日に播種し、10月1日および2日に収穫した。条間は75 cmとし、18 cm間隔に2粒を播種した。畝立て区での畝の高さは15 cmとし、播種位置を高めたが、それ以外は慣行と同様とした。窒素、リン酸、カリウムの施肥は元肥のみで行い、播種時にそれぞれ1.6、6.0 (P₂O₅として)、8.0 (K₂Oとして) g m⁻²とした。堆肥などの有機物散布は行わなかった。

b) 土壌分析

窒素無機化量を測定するための土壌は2002年3月に約13 cmまでの作土層から採取した。窒素無

表10 供試した2ほ場の土壌型, 土性, pH, 窒素含量, 窒素無機化量および地下水位

	ほ場A	ほ場B
農耕地土壌分類 [†]	斑鉄型グライ低地土	還元型グライ低地土
Soil Taxonomy [‡]	Typic Hydraquents	Typic Hydraquents
粘土含量, %	27	45
シルト含量, %	30	41
砂含量, %	44	19
pH (H ₂ O)	5.5	5.0
全窒素含量, %	0.15	0.28
4週間畑培養での窒素無機化量, g-N kg ⁻¹	0.0503	0.0693
地下水位 ^{††} , m	0.7	0.4

[†]農耕地土壌分類委員会⁽⁷²⁾, [‡]USDA⁽¹¹⁷⁾, ^{††}2003年10月の測定値

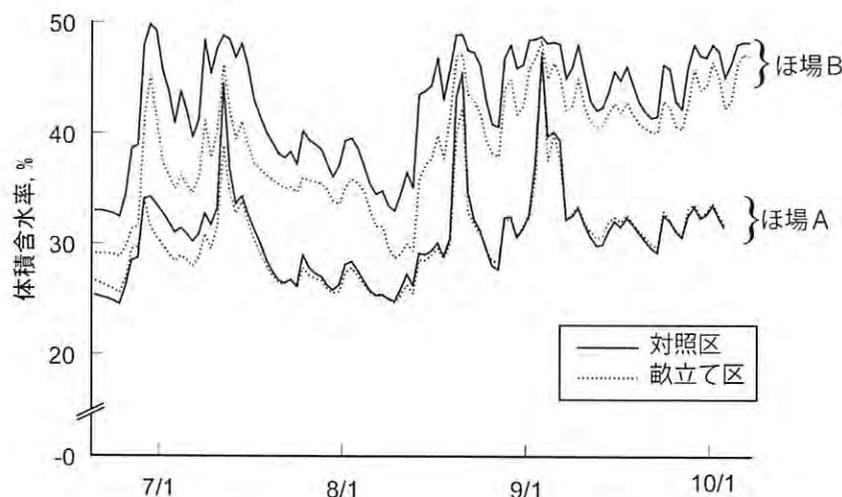


図30 2ほ場での耕うん方法の違いが体積含水率に与える影響

2003年に畝表面から50mmの深さで測定した体積含水率の推移。

機化量は未風乾の土壌を用い土壌水分がほ場容量, 温度が30℃の条件で4週間培養することで求めた⁽¹⁰⁾。窒素無機化量は培養により生成された硝酸態窒素, 亜硝酸態窒素およびアンモニア態窒素の和とした。ダイズの根系を解析するために類似元素吸収比法⁽¹⁰⁷⁾を用いた。これは植物根によるルビジウムとカリウムの吸収には選択性がないこと, 施肥の影響により作土のカリウム濃度が相対的に高いことを利用する手法である。この手法では作物体中のRb/Kが高まるということは土壌深部に伸張した根からの吸収割合が高いことを示すと考える。2002年10月には土壌の深さ方向に対するRbとKの分布を確認するため0~10, 10~20, 20~30cmの土壌を採取した。交換性のKとRbは1 mol L⁻¹のpH7

酢酸アンモニウム緩衝液で1時間抽出を2回行い, 交換・抽出された上澄み液中のRb, Kを測定した。抽出時の液比は1/50 g mL⁻¹とした。

c) ダイズ試料の採取と分析方法

それぞれの区のダイズはV4 (2003年のみ), V5, R1, R3, R5, R7期に0.75 m²の面積を採取し, 乾物重, N, K, Rb含量の分析に供試した。ダイズの生育ステージの表現方法はFehr et al.⁽¹⁵⁾に準じた。なお従来国内で使用されてきた表現方法との関係は概ね表11のとおりである。採取時に4株を選び, 地面に近い高さで主茎を切断し導管液を採取した。導管液の採取には脱脂綿を用い, 採取時間は2時間とした。採取した導管液はただちに-20℃の室内に

移し分析まで保存した。以上の採取は総て2反復で行った。サンプリングした植物体はただちに80℃で乾燥し、乾物重を測定後N、K、Rbの分析に用いた。窒素の分析は乾式法によった(エレメンタール社、Rapid-N III)。ダイズ地上部のRbおよびKの吸収量は液比を1/50 g mL⁻¹とした0.1M HClで30分振とう後の抽出液から求めた⁽¹⁰⁷⁾。各イオン濃度を原子吸光を用いて測定した。

相対ウレイド法による窒素固定量の推定方法はTakahashi et al.⁽¹⁰⁹⁾の方法によった。概略を示すと、採取した導管液中の硝酸態窒素、アミド態窒素、ウレイド態窒素をそれぞれCataldo et al.⁽⁷⁾、Herridge⁽²⁹⁾、およびYoung and Conway⁽¹²⁷⁾の方法に従い比色法で定量した。相対ウレイド法では硝酸態窒素とアミド態窒素は土壌由来または肥料由来の窒素、ウレイド態を根粒による窒素固定に由来するとする。各生育ステージの作物体中の窒素集積量は上述のように測り、窒素固定および土壌または肥料に由来する窒素を以下の式から推定した。

$$NF_i = NF_{i-1} + (TN_i - TN_{i-1}) FF_i \quad (7)$$

$$NS_i = NS_{i-1} + (TN - TN_{i-1})(1 - FF_i) \quad (8)$$

上の式においてNS、NF、TNはそれぞれ土壌または肥料に由来する集積窒素、窒素固定に由来する集積窒素および作物の全集積窒素である。FFは導管液中の窒素のうち窒素固定に由来する窒素の割合を示し、iはサンプリングを行ったダイズの各ステージである。この式では落葉などによる生育中の窒素のロスを考慮していない。以後、簡略化のため、ダイズに集積された窒素を「集積窒素」、根粒の窒素固定に由来する窒素を「固定窒素」、肥料または土壌に由来し根から吸収された窒素をする「吸収窒素」と表記することとする。

収穫期においては1.5 m²を採取し子実収量、乾物重、莢数、粒数、百粒重を求めた。収穫期の採取は2002年には2反復、2003年には3反復で行った。また、子実収量は14%含水率に換算して表示した。

3) 結果と考察

(1) 気候とダイズの収量

2002年から2003年の日平均気温、日射量および降水量の推移は図5のとおりである。2002年の北陸地域は6月11日に入梅し、梅雨明けは7月23日だった。2003年の梅雨期間は6月12日から8月1日だった。2003年は梅雨期間の降水量は比較的少

表 11 Fehr et al.⁽¹⁵⁾の生育ステージの表現方法とダイズ調査基準⁽⁷³⁾とのおおよその対応

Fehr et al. ⁽¹⁵⁾ (日本での慣用表現との対応 [*])	定義	ダイズ 調査基準	定義
V(N) (N-1 葉期)	N nodes on the main stem beginning with the unifoliate node.		
R1 (開花期)	One flower at any node.	開花始	初めて開花を認めた日
R3 (最繁期)	Pod 0.5 cm long at one of the four uppermost nodes with a completely unrolled leaf.		
R5 (子実肥大期)	Beans beginning to develop (can be felt when the pod is squeezed) at one of the four uppermost nodes with a completely unrolled leaf.		
R7 (黄葉期)	Pods yellowing; 50% of leaves yellow. Physiological maturity.	莢黄変期	全株数の40~50%の莢が変色した日
R8 (成熟期)	95% of pods brown, Harvest maturity.	成熟期	全株数の80~90%の莢の大部分が変色し、粒の大部分が品種固有の色を表し、振って音のする日をもって示す

^{*} V(N) 以外は高橋⁽¹⁰⁷⁾より引用

なく、8月下旬から9月上旬にかけて多くの降水を記録した。図30に2003年の体積含水率の推移を示した。ほ場Bの体積水分率は常にほ場Aよりも高かった。ほ場Bとは対照的にほ場Aにおいては畝立ての有無による土壌水分の違いは梅雨時期にのみ明瞭に現れた。ほ場Bでのこのような劣悪な排水性は暗渠が未整備であること、粘土含量が高いことに由来すると考えられた。播種後の各生育ステージまでの日数は2002年は31日(V5)、50日(R1)、66日(R3)、79日(R5)、98日(R7)、121日(収穫期)、2003年は21日(V4)、31日(V5)、50日(R1)、66日(R3)、79日(R5)、98日(R7)そして121日(収穫期)であった。両年とも開花期(R1)は梅雨期間の終期に相当した。

収量および収量構成要素を表12に示した。分散分析の結果によると、気象条件を反映し両年の収量レベルは大きく異なったにも関わらず、畝立て栽培

での子実収量は年次、ほ場を通して常に対照区よりも有意に高かった(表13)。また、ほ場Bはほ場Aに比べ土壌水分が高く推移したにも関わらず、ほ場Bの畝立て栽培区の収量はほ場Aの慣行栽培区を上回った。両ほ場を比較すると乾物重、莢数、百粒重には危険率5%で有意な差が認められ、子実収量に関しては危険率7.4%で有意傾向が認められた。畝立て区での子実収量の増加は両ほ場で認められ、ほ場間の明確な有意差が得られなかった一因になったと考えられる。細川⁽³⁶⁾は見かけの地下水位は畝立て区において対照区の10~15cm低いことを示している。この地下水位の差は畝の高さに一致する。さらに細川⁽³⁶⁾は畝立て区では土壌中の酸素濃度が13%以下にならなかったのに対し、対照区では3%にまで低下するとしている。これらの結果は梅雨期において畝立て区では土壌の酸素濃度が改善され、これが子実重の増加に結びついた可能性を示してい

表12 収穫期におけるダイズの収量および収量構成要素

			子実収量 g m ⁻²	乾物重 g m ²	莢数 m ⁻²	粒数 m ⁻²	百粒重 g
2002	ほ場A	対照	353	539	755	1260	28.0
		畝立て栽培	378	577	786	1270	29.6
	ほ場B	対照	348	515	734	1210	28.6
		畝立て栽培	375	586	800	1310	28.7
2003	ほ場A	対照	317	506	668	1090	28.9
		畝立て栽培	398	601	742	1250	32.0
	ほ場B	対照	292	435	519	941	31.1
		畝立て栽培	331	481	537	943	35.1

表13 年次、ほ場および畝立ての有無を因子とした収穫期におけるダイズの形質の分散分析

因子	自由度	平均平方							
		子実収量	乾物重	莢数	百粒重				
年次 (Y)	1	5687 *	16114 *	159198 ***	63.075 ***				
ほ場 (S)	1	3278 +	14197 *	42101 **	7.253 *				
Y × S	1	3060 +	13144 *	51482 **	13.872 **				
耕うん方法 (C)	1	11618 **	25980 **	16032 +	27.195 ***				
Y × C	1	1992	468	11	12.826 **				
S × C	1	493	11	38	0.373				
Y × S × C	1	886	2918	3504	2.751				
誤差	20	936	2025	4813	1.333				

+, *, **, ***は危険率がそれぞれ0.1, 0.05, 0.01, 0.001レベルで有意差があることを示す。

る。

既往の多くの報告では畝立て栽培はダイズの増収効果は認められていない^(12,14,119)。これらの報告と今回の結果あるいは細川⁽³⁶⁾の結果が異なった原因としてほ場の水分環境の相違が考えられる。例えば Hatfield et al.⁽²⁷⁾は畝立て栽培を行ったほ場の地下水位は0.7から6mで推移し、平均は3mとしている。これに対してほ場A, Bにおける10月の地下水位はそれぞれ0.7, 0.4mであり(表10)、周囲の水田が湛水する夏期においては地下水位はさらに上昇すると考えられる。地下水位が高い環境は水田転換畑では一般的にみられ、このような環境では畝立て栽培が湿害軽減に有効だと考えられる。

(2) 畝立て栽培による初期成育と窒素集積特性の改善

導管液組成から求めた窒素固定による窒素集積量(式7, 式8のFF)の推移を図31に示した。2003年がピークは早期に移動したものの、図31の傾向は年次、ほ場に関わらず類似していた。すなわちV5期にはこの値は小さく、R1からR5にかけて極大に達し、R5以降は再び小さくなった。畝立て区と慣行区の間に明確な差は認められなかった。

畝立て栽培によって初期を除くほぼすべての生育ステージにおいて窒素集積量は増加する傾向だった

(表14)。またR7期以降落葉がみられたため、ここで表示した収穫期の窒素集積量はみかけの集積量であり、総窒素集積量を見積もることはできなかった。また、このような理由から収穫期の値は固定窒素と吸収窒素に分けられなかった。

R1(梅雨の終期)とR7期(窒素集積量を評価できた最後のステージ)の窒素集積量の分散分析の結果を表15に示した。梅雨の終期においてはほ場Bの窒素集積量はほ場Aに比較して有意に小さかった(表14)。このような条件においても畝立て栽培では固定窒素および吸収窒素量が有意に高かった(表14)。換言すれば畝立て栽培はFFの値を変化させるのではなく、その比を変えることなく、固定窒素および吸収窒素をともに増加させた。畝立て栽培による初期生育改善のメカニズムとしては、湿害の軽減と播種床の地温上昇の可能性がある。Radke⁽⁸⁴⁾は畝の成形は播種床を暖めるため早春の発芽と初期生育の改善に寄与することを報告している。このようなメカニズムの可能性を否定することは出来ないが、今回の結果はむしろ湿害の軽減の効果が大きいと考えた。ほ場Aの結果を予細にみると2002年のV5あるいは2003年のV4期では畝立て栽培による窒素集積量の増加は認められず、有意な差が生じるのは各々の次の採取ステージである。この傾向は畝立て栽培

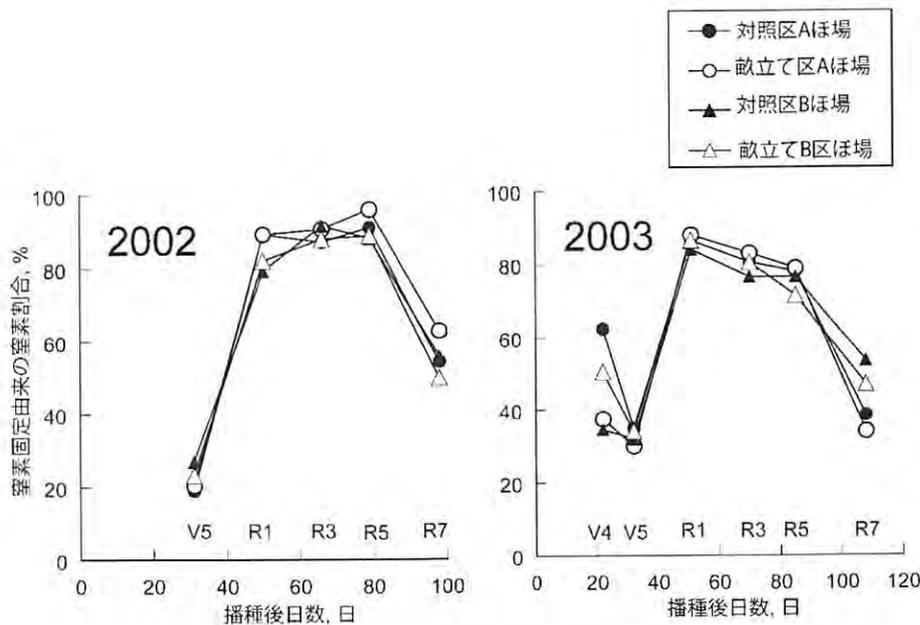


図31 異なる年次およびほ場での集積窒素に対する根粒による固定窒素割合の推移

横軸上の記号はダイズの生育ステージを示す。

は入梅前あるいは入梅直後の窒素集積量を必ずしも増やさず、湿害後に畝立てによる効果が現れることを示している。これは湿害軽減が初期生育の改善に寄与したという一つの根拠であろう。鳥越ら⁽¹¹⁴⁾によると、生育の初期に分化する下位の分枝は多くの莢をつけ、このような分枝の分化は環境に敏感に反応する。彼らの分類法で下位分枝に相当するⅡ、Ⅲ、Ⅳ分枝は多くの節を作るが、この分枝が分化する時期はV5～V7期に相当し、北陸地域においては梅

雨期に一致する。鳥越ら⁽¹¹⁴⁾の考察と今回得た結果を考え合わせると畝立てによる梅雨期間の湿害回避がダイズの窒素栄養環境を改善させ、初期に分化する下位分枝の生成および単位面積当たりの莢数の増加に寄与した(表12)と考えられる。

R7期をみると、畝立て栽培は固定窒素を有意に増加させたが、吸収窒素については有意な差は認められなかった(表15)。特に2003年のほ場Aにおいてこの傾向が大きかった。2002年のほ場Aおよ

表14 根粒により固定された窒素(固定窒素)および根から吸収された窒素(吸収窒素)の推定値

	ほ場A						ほ場B						
	合計		固定窒素		吸収窒素		合計		固定窒素		吸収窒素		
	対照	畝立て											
2002													
V5	1.3	1.3	0.25	0.26	1.1	1.0	0.41	0.83	0.11	0.19	0.30	0.64	
R1	4.6	5.7	3.2	4.2	1.4	1.5	4.5	5.0	3.3	3.6	1.1	1.4	
R3	7.3	7.6	5.6	6.0	1.8	1.6	9.6	11	8.0	9.3	1.6	2.1	
R5	16	14	14	13	2.6	1.9	19	21	16	17	2.7	3.2	
R7	18	23	14	18	3.1	5.2	26	26	20	20	5.6	6.0	
2003													
V4	0.29	0.29	0.18	0.11	0.11	0.18	0.21	0.25	0.07	0.13	0.14	0.12	
V5	1.2	1.7	0.31	0.42	0.9	1.3	0.65	0.76	0.15	0.18	0.50	0.59	
R1	4.8	5.9	3.4	4.1	1.3	1.8	2.8	2.9	2.0	2.0	0.84	0.90	
R3	11	11	8.5	8.5	2.6	2.8	8.2	9.7	6.0	7.5	2.2	2.2	
R5	14	19	11	15	3.4	4.5	12	15	8.8	11	3.1	3.8	
R7	19	21	12	15	6.0	5.6	18	26	12	16	5.7	9.8	

単位: g-N m⁻²

表15 年次、ほ場および畝立ての有無を因子としたR1, R7期における窒素固定量および窒素吸収量の分散分析

因子	自由度	平均平方											
		R1期					R7期						
		合計	固定窒素	吸収窒素	合計	固定窒素	吸収窒素						
年次 (Y)	1	0.06	+	2.04	**	0.06	*	25.2	74.6	***	13.1	+	
ほ場 (S)	1	2.05	***	3.94	**	0.82	***	54.1	*	14.5	***	12.7	+
Y × S	1	0.0		2.45	**	0.27	***	12.8		15.3	*	0.11	
耕うん方法 (C)	1	0.27	**	0.980	*	0.17	**	75.9	*	31.2	**	9.78	
Y × C	1	0.02		0.102		0.02		4.87		2.63		0.33	
S × C	1	0		0.456		0.02		0.1		1.23		2	
Y × S × C	1	0.17		0.009		0.1	*	30.2		5.7		9.63	
誤差	8	0.11		0.165		0.01		8.27		1.98		3.08	

+, *, **, ***は危険率がそれぞれ0.1, 0.05, 0.01, 0.001レベルで有意差があることを示す。

び2003年のほ場Bでは畝立て区での吸収窒素量が対照区に勝った。このことから畝立て栽培による窒素集積量の増加は主に窒素固定量の増加に起因することが示唆された。根粒菌による窒素固定の促進には土壌中の酸素濃度が重要な因子であることはよく知られており¹¹⁾、このことは畝立て栽培が窒素固定能を増加させる可能性を支持する。Takahashi et al.¹⁰⁹⁾はR1期とR2期の高い葉面積指数(LAI)は光合成産物の増加を通して百粒重の増加に寄与すると考察している。彼らはR5期以降に窒素固定量の減少が始まり、これは葉の老化に伴い子実生産と根粒との間で光合成産物の競合が始まるためだとしている。第II章でみたように湿害が軽微で莢数が減少していない場合はR1期までの土壌の窒素無機化量と百粒重の間には正の相関が認められた(表4)。これらの結果は今回の結果と良く一致している。以上から湿害の回避による初期生育の促進がLAIを増加させ、その結果、窒素固定量が増加し、百粒重の増加に結びついたと考えられる。

最後に今回の実験において吸収窒素量を過小評価した可能性について議論する。ダイズの窒素集積量は畝立て区で対照区に比べ有意に増加しており(表14、表15)、両者の窒素固定割合には明確な差はなかった(図31)。このことは表15では有意ではないものの畝立て区の吸収窒素量増加していることを示している。窒素固定の割合はR5からR7の間で最大となるが、ダイズの窒素集積量はR7以降も単調に増加する(表14)。このためR5期以降は窒素吸収量の寄与が相対的に高まる。今回の実験では落葉などを考慮できないことからR7期以降の窒素吸収量を評価できなかったが、もしこれを考慮できれば畝立て栽培では後半の窒素吸収量の増加が有意差として検出された可能性は高いと考えられる。一方で2003年のほ場Aは、畝立て栽培では吸収窒素量が必ずしも増加するとはいえないことも示している。次項ではこの問題に関連して畝立て栽培と根の伸張に関して考察したい。

(3) 畝立て栽培が根系形成に与える影響

図32に示すように土壌中の交換性KとRbの比(以下、Rb/Kと表現する)は土壌の深さに対して一様に増加した。高橋^{107, 108)}はこのような傾向はカリウム施用によって作土のカリウム含量が高まって

いることが原因であるとし、これをダイズの根系の平均深さを示す指標として用いることを提案している。一般に作物はRb吸収とK吸収の機構は等しく両者に選択性はないと考えられている。したがって、作物中のRb/Kが小さいほど根系は浅い土層からKまたはRbを吸収しており、根系が浅い部分に分布していることが推定される。

R1期では畝立て栽培区のダイズのRb/Kは対照区に比べ有意に低かった(表16、表17)。この結果はこの時点での下層土に到達した根の割合は対照区に比べ相対的に少ないことを示しており、畝立て栽培では作土を用いて畝が成形されているため作土が厚いことがその原因であると考えられる。このような根系では下層土に達した根量が比較的小さく、湿害の影響を受けにくいと考えられる。R7期をみると、いずれの区においてもRb/Kは上昇し、R1期に比べ根が深部に伸張していることが推察された。ほ場Aとほ場BのRb/Kの有意差は両ほ場の水分環境の違いではなくRb/Kの違い(図32)を反映していると考えられる。畝立て栽培と対照区においてRb/Kの有意な差はみられなかった。この結果は少なくともR7期までには根はより深部に発達し、畝立て栽培区と対照区の相対的な根の深さに差がみられなくなっていることを示している。すなわち畝立て栽培区ではR1期以降、R7期までの期間に根を積極的に深部へ伸ばし、その結果対照区との差が認められな

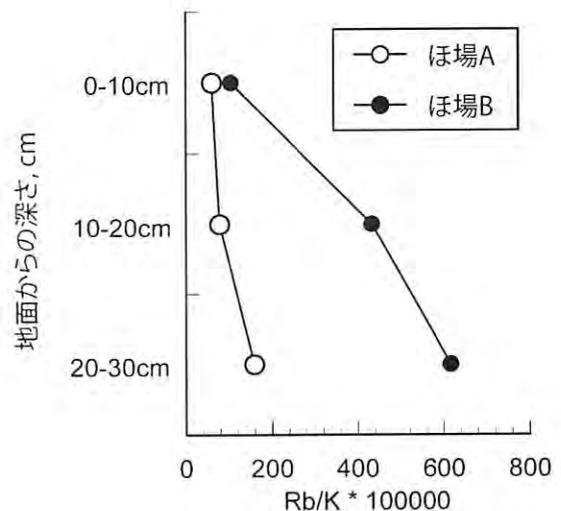


図32 交換性ルビジウムとカリウム比 (Rb/K) の鉛直分布
比は重量ベース

表 16 R1 期およびR7 期のダイズのRb/K比

	ほ場A		ほ場B	
	対照	畝立て	対照	畝立て
2002				
R1	14	8.8	11	12
R7	13	13	19	25
2003				
R1	15	13	16	13
R7	20	17	24	29

単位：重量比×100,000

くなったと考えられる。2003年のほ場Aにおいて、畝立て栽培のRb/Kが対照区に比べて小さいことは、先のR5～R7期において畝立て区の吸収窒素量が高まらなかった事実と良く一致する。この原因は明らかではないが、畝立て栽培において根の深部への伸張が必ず生じるわけではなく、これが吸収窒素量に影響を与える可能性が示唆される。高橋ら⁽¹¹⁰⁾が強調するようにダイズの収量を増加させるためにはR5期以降の窒素集積は特に重要である。今回の結果はRb/Kからの間接的な考察にとどまったが、登熟期間における畝立て栽培とダイズ根系、および窒素集積に関してはさらなる研究が求められる。

表 17 年次、ほ場および畝立ての有無を因子としたR1 期およびR7 期のダイズのRb/K比の分散分析

	自由度	R1	R7
年次 (Y)	1	36.6 ***	81.9 **
ほ場 (S)	1	0.12	274 ***
Y×S	1	0.12	0
耕うん方法 (C)	1	19.8 ***	15.6
Y×C	1	0.2	0.666
S×C	1	8.12	8.45
Y×S×C	1	15.6	0.193
誤差	8	0.13	5.72

と*はそれぞれ1%、0.1の危険率で有意であることを示す。

4) まとめ

- ① 湿害程度が異なる2つのほ場で2カ年間にわたり、畝立て栽培と慣行栽培の比較を行った。畝立て栽培では莢数、百粒重、子実重が有意に増加した。
- ② 畝立て栽培では開花期において根粒菌に由来する窒素固定量および土壌または肥料に由来する窒素吸収量が有意に増加した。根の平均深さは慣行区に比べ浅い位置に分布していると考えられ、この時期の湿害の回避が収量増加等に結びついたと考えられた。
- ③ R7期までのすべての生育ステージにおいて畝立て栽培区では窒素固定量が有意に高かった。窒素吸収量に関しては有意な違いは認められな

V. 総括

1. 摘要

北陸地域ではダイズ収量が低迷しており、年次間変動も大きい。この地域の農耕地の89%が水田であり、ダイズのほとんどは水田転換畑で作付けられている。また農耕地土壌の3分の1以上は排水性・保水性が悪い強粘質土壌である。このような環境下では耕うん整地作業が困難だけでなく、作物の生育に最適な水分環境を維持することが難しい。ダイズの高位安定生産のためには上述の土壌の物理的特性と大豆の生育反応に関する知見の深化が望まれる。そこで本研究では、まずはじめに実際の営農ほ場におけるダイズの収量と土壌条件の関係を明らかにし、高位安定生産の隘路となる土壌因子を整理

することを目的とした。第二に耕うん法の改善によるダイズの増収技術の開発を念頭に、畑転換が土壌の耕うん特性に与える影響を遊離酸化鉄の形態変化の面から明らかにしようとした。第三に北陸地域のダイズ栽培においてしばしば問題となる過乾燥による発芽不良および初期生育時の湿害を軽減するため、それぞれ播種床の耕うん状態 (soil tilth) と種子の吸水・発芽の関係、および畝立て栽培での窒素集積特性の解明を試みた。

最初に土壌特性が北陸地域のダイズ収量に与える影響を明らかにするため、主な収量の変異はほ場条件によるものと推察される新潟県上越市の33筆の

ほ場において、土壤特性とダイズ収量の関係を調査した。ダイズの収量およびほ場の排水性は暗渠の有無で明確に分かれ、暗渠未整備ほ場では耕うん前の土壤含水比が有意に高く、排水性が劣ることが示された。収量と収量関連形質との決定係数をみると、暗渠整備済みほ場では収量の変動の48%は百粒重の変異によるものであり、百粒重と窒素無機化量との間には有意な正の相関があった。これに対し、暗渠未整備ほ場では莢数が収量の変異に大きく寄与した。以上から営農ほ場におけるダイズ収量の変動要因は、排水性が劣るほ場では苗立ちの改善と莢数決定までの初期生育であり、相対的に排水性が良いほ場では土壤の窒素肥沃度が百粒重を通して収量の変動に寄与すると整理された。

第二に田畑輪換により土壤の微細構造が変化すると、その変化には遊離酸化鉄の酸化還元反応が影響することを明らかにした。水田土壤（粘土含量は38%、主な粘土鉱物はスメクタイト、遊離酸化鉄含量は1.3%）、およびこれを単純化したモデル物質としてスメクタイトおよびスメクタイト-遊離酸化鉄複合体を用い、乾燥と還元処理に伴う微細構造の変化について水田土壤とモデル物質とを比較した。スメクタイトへの遊離酸化鉄の添加の有無に関わらず、-1.5 MPa以上の乾燥によって試料の水中沈定容積は減少し、乾燥による水中沈定容積の減少はモデル物質においても土壤と同様であった。これに還元処理を施したところ、遊離酸化鉄を含んだスメクタイトのみで還元による水中沈定容積の増加が再現され、遊離酸化鉄の関与が示唆された。

水田に存在する遊離酸化鉄は結晶度が低く、反応性が高いことが知られている。この画分は還元による土壤の微細構造の不安定化や各種イオンの収着特性といった転換畑土壤に特有の物理性・化学性に影響を与えている可能性が高い。そこでこの画分の遊離酸化鉄の抽出法を検討し、pH3.0酢酸可溶鉄による評価法を策定した。また、この画分はリン酸イオンとの反応性および湛水時の還元進行との相関が高いことを明らかにした。

転換畑での碎土性と遊離酸化鉄の形態変化との関係を調べたところ、畑転換年数を経る（連用田～転換5年）に伴い、耕うん後の平均土塊径は減少し、碎土性は高まった。この時、pH3.0酢酸可溶鉄含

量、リン保持量、湛水培養時の活性二価鉄含量は畑転換年数とともに減少した。これは土壤中の遊離酸化鉄の結晶化が進み、湛水時に還元されにくい形態へと変化していることを示す。落水1年目のほ場についてpH3.0酢酸可溶鉄含量の推移をみると、抽出される画分の二価鉄と三価鉄の割合には一定の傾向は見られなかったが、その合計量は畑地化日数とともに減少し、遊離酸化鉄が反応性の低い画分へ移行していることが示唆された。また、6年以上畑転換した水田を還元する際、有機物を施用し土壤の還元を促進させた後に代かきを行ったところ、二価鉄生成量が高い区で水中沈定容積が高まり、代かき時に2 mm以上の土塊の割合が有意に小さくなった。以上から、転換畑における土壤の微細構造の変化のメカニズムを以下のように考察した。落水後、遊離酸化鉄は乾燥時に土壤中の粘土鉱物と相互作用し土壤微細構造の発達に寄与する。畑地化直後の遊離酸化鉄は還元されやすく、降雨による湛水等で還元され、この時土壤構造は不安定になる。畑転換年数が経過すると土壤中の遊離酸化鉄の結晶化が進み、還元されにくくなるため土壤構造は安定に保たれる。これが土壤の微細構造の安定化の一因となる。

土壤の乾燥による苗立ちの不安定化を改善するために耕うん後の播種床の水分環境がダイズ種子の吸水に及ぼす影響を検討した。この結果、播種床を無鎮圧のままとすると毛管の連結効果が小さく、下方からの水の供給量が小さくなるためにダイズ播種位置の土壤の乾燥が速まること、鎮圧により下方からの水分供給を促すことができ、地表面からの蒸発が著しい気象条件下で種子の吸水促進効果が顕著に現れることを明らかにした。以上から、湿害を避けるために種子を比較的浅い20～30 mmの位置に播種する転換畑においては、播種後に鎮圧し、下方からの水分の供給を促す方法が発芽時のダイズ種子による吸水に有利であると結論した。

高畝上へのダイズの播種は転換畑におけるダイズの湿害回避に効果的であることが知られている。そこで畝立て栽培時のダイズの窒素集積特性を明らかにしようとした。畝立て栽培は年次間差があるなかで2年間とも子実収量を慣行の106%～129%に増加させた。収量構成要素からの解析によると莢数と百粒重の増加が主な増収要因だった。窒素集積量を

比較すると畝立て栽培はR1期までの窒素固定量および窒素吸収量を有意に増加させた。類似元素吸収比法の結果から、この時期の根系は対照（平畝）区に比較して浅い位置にあると考えられ、北陸地域では開花期に重なる梅雨による湿害に有利な根系を形成していることが示唆された。R7期までの畝立て区の窒素固定量は慣行区に比べ有意に高く、開花期に湿害を回避したことが根粒による窒素固定活性を高め、初期生育の改善と莢数の増加に結びついたと考えられた。R7期においては根の平均深さに有意な差はなく、開花期以降は畝立て栽培での浅根傾向は認められなくなるようだった。以上の知見は近年普及が進んでいる「耕うん同時畝立て播種」体系の有効性を実証的に理論づけるものである。

2. 転換畑土壌の物理性改善とダイズの安定生産に関する課題

第1章2節でみたように碎土性には2つの大きな因子の関与が考えられている。1つは微少な亀裂による脆性の付与、2つめは土壌含水比、結合物質による付着力などが関与する脆性破壊または塑性変形といった変形様式の変化である。本論文では水中沈定容積を指標値として微細構造の変化に着目し、耕うん後の土塊径や代かき特性との関連を解析した（第2章3節）。しかし、両者のメカニスティックな関係の解明には至らなかった。ここでは北陸研究センターの土壌のみを対象に研究を進めたが、土壌特性の変異が大きい場合、粘土含量、遊離酸化鉄含量、ほ場の乾燥履歴の強度、有機物含量などの因子により、畑地化あるいは水田化による物理性の変化の程度は大きく異なることが予想される。メカニスティックなアプローチをとることでこれらの関係が普遍化されれば、水田輪作体系下での土壌のハンドリングを最適化するための知見が深まるであろうと思われる。このためには光学的手法⁽²⁾やポロシメトリ⁽⁵⁴⁾を活用した微細構造に関する詳細なデータの収集、および土質力学的なアプローチによる田畑輪換土壌の力学的応答に関する研究が必要になるとと思われる。

耕うん方法が畑地化の進行に影響を与えることも考えられる。第4章2節でみたように畝立て栽培では畝上は土壌の含水比が低い状態が保たれ、短期的な湛水などによる土壌の再還元（第3章3節）が生

じにくい環境だといえる。このような環境が畑地化の進行へ及ぼす影響は実学的な面からも検討すべき課題である。

本研究では耕うん後の播種床における土壌水分の推移から播種直後に播種し、鎮圧する作業体系が望ましいことを論じた（第4章1節）。しかし、含水比は碎土性に大きく関与する因子であり、湿った土壌を細かく碎土することは難しい⁽⁴¹⁾。また、畑地化により微細構造が変化し碎土性が高まった土壌では、ほ場容水量（-6.3 kPaに相当する含水比）が小さくなるため⁽⁶⁵⁾、畑地化した土壌の含水比は小さく、一概に畑地化が進んだ土壌の吸水・発芽適性が高いとはいえない。このことは、耕うん状態（soil tith）、畑地化の進行、土壌の乾燥速度という3者の関係において発芽に適した耕うん方法が変化することを示していると思われる。これらの関係に関して知見を得、技術へと高めていくためには、播種床での水移動に関する情報が不可欠であろう。畑地化・水田化による土壌の不飽和透水係数の変化、土塊群によって構成される播種床の乾燥挙動の定量化などに関する基礎的な知見が求められる。また、畝立て栽培による湿害回避技術は副次的効果として播種深度を深めることを可能にしている。第4章1節でアメリカの半乾燥地では播種深度を深くとり、無鎮圧とすることで土壌マルチを作るという発芽促進技術が一般的であること⁽⁷⁹⁾について言及したが、このような畝立て栽培と播種深度の関係についても今後技術の深化が必要であろう。

莢数決定時期の乾燥ストレスに関しては研究の対象としなかったが、北陸地域の転換畑でのダイズの安定生産を考えた際は、やはり大きな課題である。特に畝立て栽培では根が相対的に高い位置にあるため、ほ場や栽培条件によっては平畝栽培に比べ乾燥ストレスを被りやすい可能性がある。第4章2節においては畝立て栽培でのR7期の根の平均深度は対照区と有意な差がないという結果を得た。しかし北陸地域において最も土壌が乾燥するのは8月中旬（図1）であり、この時期の根の平均深度あるいは根量の調査は行わなかったため、乾燥ストレスの可能性が否定されたわけではない。生育中期の過乾燥に対する畝立て栽培の影響は今後の課題として残されたといえる。

以上、水田輪作体系下では畑地化、水田化により生産基盤である土壌の性質が変化し、このような環境の中で栽培に適した水分制御を行う必要がある。最適な管理を行うには畑地化現象や耕うんに対する作物の反応に関する多くの知見が必要である。本論文では畑地化、水田化での構造変化に対する遊離酸

化鉄の寄与を明らかにし、この画分の定量的評価法を提案した。また、耕うん同時畝立て栽培³⁶⁾によるダイズの増収効果を、出芽の安定性向上および湿害回避による根粒活性の増大の面から実験的に裏付けた。今後の技術開発において本論文が有益な情報を提供することができれば幸いである。

引用文献

1. 阿江教治・仁紫宏保 (1983) ダイズ根系の酸素要求特性および水田転換畑における意義, *土肥誌*, **54**, 453-459
2. Ben Rhaïm, H., Pons, C. H., and Tessier, D. (1987) "Factors affecting the microstructure of smectites: role of cation and history of applied stresses", Proc. Int. Clay Conf., Denver, 1985, L. G. Schultz, H. van Olphen, and F. A. Mumpton, eds., Clay Miner. Soc., Indiana, 292-297
3. Blakemore, A. V. (1973) Aggregation of clay by the products of iron (III) hydrolysis, *Aust. J. Soil Res.*, **11**, 75-82
4. Blakemore, L. C., Searle, P. L., and Daly, B. K. (1981) Soil bureau laboratory methods: A. Methods for chemical analysis of soils, *NZ Soil Bureau Sci.*, Report 10A, A8.1-A8.8
5. Borggaard, O. K. (1983) Effect of surface area and mineralogy of iron oxides on their surface charge and anion adsorption properties, *Clays and Clay Minerals*, **31**, 230-232
6. Campbell, D. J. (2000) "Liquid and plastic limits", Soil and Environmental analysis physical methods second edition revised and expanded, K.A. Smith and C.E. Mullins, eds., Marcel Dekker, Inc., New York, 349-376
7. Cataldo, K. A., Schrader, L. E., and Youngs, V. L. (1974) Analysis by digestion and colorimetric assay of total nitrogen in plant tissues high in nitrate. *Crop Sci.*, **14**, 854-856
8. Dexter, A. R. (1988) Advances in characterization of soil structure, *Soil Tillage Res.*, **11**, 199-238
9. 土壌物理性測定法委員会編 (1979) 土壌物理性測定法, 養賢堂, 128-157.
10. 土壌環境分析法編集委員会編 (1997) 土壌環境分析法, 博友社, 427p.
11. 土壌養分測定法委員会編 (1981) 土壌養分分析法, 養賢堂, 301p.
12. Eckert D. J. (1987) Evaluation of ridge planting systems on a poorly drained lake plain soil. *J. Soil Water Conv.*, **42**, 208-211
13. 江頭和彦・中山正登 (1979) 乾燥および分散処理による有明海粘性土の水中沈定容積の変化, *土肥誌*, **50**, 98-102
14. Fausey N. R. (1990) Experience with ridge-till on slowly permeable soils in Ohio. *Soil Tillage Res.*, **18**, 195-205
15. Fehr W. R., Caviness C. E., Burmood D. T., and Pennington J. S. (1971) Stage of development descriptions for soybeans, *Glycine max (L.) Merrill. Crop Sci.*, **11**, 929-931
16. Frenkel, H. and Shainberg, I. (1980) The effect of hydroxy - Al and hydroxy - Fe polymers on montmorillonite particle size, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **44**, 626-629
17. 藤井弘志・荒垣憲一・中西政則・佐藤俊夫 (1987) ダイズ多収への挑戦 [1], *農圃*, **62**, 527-616
18. 藤本堯夫・A.C.Suriadinata・西尾隆・金森哲夫 (1988) 窒素供給時期とダイズの収量形成, *北農*, **55**, p41-49
19. 福井県農業試験場編 (1978) 地力保全基本調査総合成績書, 572p.
20. 古川秀顕 (1984) "水田土壌におけるリン酸の挙動—主として室内実験からの接近—", 水田土壌とリン酸—供給力と施肥—, 日本土壌肥料学会編, 博友社, 5-58
21. Fyfield, T. P., Gregory, P. J., Woodhead, T., and Pasuquin, E. M. (1990) Effects of

- tillage, seeding method and time of sowing on the establishment of mungbean in drying, previously paddled soil. *Soil Tillage Res.*, 18, 333-346
22. Hadas, A. (1997) Soil tilth - the desired soil structural state obtained through proper soil fragmentation and reorientation process, *Soil Tillage Res.*, 43, 7-40
23. Hadas, A. and Russo, D. (1974) Water uptake by seeds as affected by water stress, capillary conductivity, and seed-soil water contact. I. experiment study. *Agron. J.*, 66, 643-647
24. Hadas, A. and Russo, D. (1974) Water uptake by seeds as affected by water stress, capillary conductivity, and seed-soil water contact. II. Analysis of experimental data. *Agron. J.*, 66, 647-654
25. Hadas, A., Wolf, D., and Meirson, I. (1978) Tillage implements - soil structural relationships and their effects on crop stands. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48, 1157-1164
26. Hammel, J. E., Papendick, R. I., and Campbell, G. S. (1981) Fallow tillage effects on evaporation and seed zone water content in a dry summer climate. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45, 1016-1022
27. Hatfield J. L., Allmaras R. R., Rehm G. W., and Lowery, B. (1998) Ridge tillage for corn and soybean production: environmental quality impacts. *Soil Tillage Res.*, 48, 145-154
28. Helms, T. C., Deckard, E. L., Goos, R. J., Enz, J. W. (1996) Soil moisture, temperature, and drying influence on soybean emergence. *Agron. J.*, 88, 662-667
29. Herridge, D. D. (1984) Effect of nitrate and plant development on the abundance of nitrogenous solutes in root-bleeding and vacuum-extracted exudates of soybean. *Crop Sci.*, 24, 173-179
30. Herridge, D., Bergersen, F. J., and Peoples, M. B. (1990) Measurement of nitrogen fixation by soybean in the field using ureide and natural ^{15}N abundance method. *Plant Soil*, 93, 708-716
31. Herridge, D. and Peoples, M. B. (1990) Ureide assay for measuring nitrogen fixation by nodulated soybean calibrated by ^{15}N methods. *Plant Soil*, 93, 495-503
32. Hettiaratchi, D. R. P. (1987) A critical state soil mechanics model for agricultural soils, *Soil Use Manag.*, 3, 94-105
33. Hettiaratchi, D. R. P. and O'Callaghan, J. R., (1980) Mechanical behaviour of agricultural soils. *Agric. Engng Res.*, 25, 239-259
34. Holmgren, G. G. S. (1967) A rapid citrate - dithionite extractable iron procedure, *Soil Sci. Am. Proc.*, 31, 210-211
35. 星川清親 (1980) "ダイズ", 新編食用作物, 養賢堂, 431
36. 細川寿 (2004) 大豆の耕うん同時畝立作業機による重粘土転換畑の湿害回避技術, *農機誌*, 66, 14-16
37. Huo, D., Fialips, C-I., Yan, L., and Stucki, J. W. (2004) Effects of structural Fe oxidation state on physical-chemical properties of smectites: Evidence from infrared spectroscopy. *土壤の物理性*, 96, 3-10
38. 石川県農業試験場編 (1978) 地力保全基本調査総合成績書, 496p.
39. Iwata, S., Yamamoto, K. and Sato, T. (1990) Amorphous inorganic material contents and changes in plasticity indexes by air drying, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54, 558-559
40. Jackson, R. D., Reginato, R. J., Kimball, B. A., and Nakayama, F. S. (1974) Diurnal soil-water evaporation: comparison of measured and calculated soil-water fluxes, *Soil Sci Soc. Am. Proc.*, 38, 861-866
41. 金谷豊・倉田勇 (1989) 重粘土水田及びその転換畑における耕うん方法に関する研究, *北陸農試報*, 31, 29-78
42. Katou, H., Nakaya, N., and Maeda, K. (1985) Changes in sediment volume, liquid limit, and plastic limit of alluvial soils upon drying, *Soil Sci. Plant Nutri.*, 31, 215-226
43. 喜田大三・川口桂三郎 (1960) たん水・還元・脱水条件の土壤構造への影響 (第1報) - 構造の安定性一, *土肥誌*, 31, 375-379
44. Kim, Y. W. and Minor, H. C. (1981) Responses

- of soybeans to water stress during germination
II. Water uptake and osmotic potential of soybeans during germination. *Korean J. Crop Sci.*, **26**, 157-166
45. 北田敬宇・亀川健一・秋山豊 (1992) 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
46. 北川靖夫・岡山清司・東城真治 (1988) 輪換田における「いつき」現象の発現. *土肥誌*, **59**, 149-155
47. Kubota, T. (1972) Aggregate formation of allophanic soils: Effect of drying on the dispersion of the soils, *Soil Sci. Plant Nutri.*, **18**, 79-87
48. Kumada, K. and Asami, T. (1958) A new method for determining ferrous iron in paddy soils, *Soil Plant Food*, **3**, 187-193
49. 久津那浩三・新村義男・上森晃 (1974) 耕耘碎土に関する研究 (第1報) 土壌物理性の碎土におよぼす影響. *土肥誌*, **45**, 37-41
50. 久津那浩三・新村善男 (1975) 耕耘碎土に関する研究 (第3報) 碎土土塊の分布について. *土肥誌*, **46**, 447-452
51. 小林英男 (1993) 破壊力学. 共立出版, 193p.
52. 国分牧衛 (2001) ダイズ多収化の生理学的アプローチ. *日作紀*, **70**, 341-351
53. Lal, R. and Shukla, M. K. (2004) Principles of Soil Physics, Marcel Dekker, Inc., New York, 430-448
54. Lawrence, G. P. (1977) Measurement of pore sizes in fine-textured soils: A review of existing techniques, *J. Soil Sci.*, **28**, 527-540
55. Loepfert, R. H. and Inskeep, W. P. (1996) "Iron", *Methods of Soil Analysis Part 3*, D. L. Sparks, ed. American Society of Agronomy, Inc., Publisher, Madison, U.S.A., 639-664
56. 松波寿弥・小川泰正・山崎慎一・三浦吉則 (2009) 福島県内に流通する家畜ふん堆肥中の微量元素濃度の実態. *土肥誌*, **80**, 250-256.
57. 松崎守夫・高橋智紀・細川寿 (2006) 北陸地方の重粘土転換畑におけるダイズの収量. 窒素集積に及ぼす過湿条件. 被覆尿素の影響. *日作紀*, **75**, 13-22
58. Michel, B. E. and Kaufmann, M. R. (1973) The osmotic potential of polyethylene glycol 6000. *Plant Physiol.*, **51**, 914-916
59. 三浦健志・奥野林太郎 (1993) ペンマン式の計算を容易にするための工夫と提案. *農土論集*, **164**, 165-170
60. 三浦健志・奥野林太郎 (1993) ペンマン式による蒸発散位計算方法の詳細. *農土論集*, **164**, 157-163
61. 森泉昭治・林尚孝 (1988) 耕うんによる層別土塊分布の評価法に関する研究 (第2報) —諸分布式による土塊分布の近似—, *農業機械学会誌*, **50**, 17-24
62. Munch, J. C. and Ottow, J. C. G. (1980) Preferential reduction of amorphous to crystalline iron oxides by bacterial activity, *Soil Sci.*, **129**, 15-21
63. 長野間宏・諸遊英行 (1983) 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. 研究成果情報, No1, 46-53
64. 南雲芳文・佐藤徹・服部誠・土田徹・細川寿・高橋能彦・大山卓爾 (2010) 排水不良転換畑における畝立栽培およびシグモイド型被覆尿素肥料の施用によるダイズの窒素集積量増加とちりめんじわ粒発生軽減効果. *土肥誌*, **81**, 360-366
65. 中野啓三 (1978) 低湿重粘土水田の畑転換に伴う土壌物理性の推移. *北陸農試報*, **21**, 63-94
66. 中野政詩・塩沢昌・宮崎毅・西村拓 (1995) "水分ポテンシャルの測定". 土壌物理環境測定法. 東京大学出版会, 79-87
67. 仲谷紀男 (1981) 有機物が関与する土壌の水分特性について—とくに、土壌有機物の存在意様式と撥水性を中心にして—, *農技研報*, **B32**, 1-74
68. 中山則和・橋本俊司・島田信二・高橋幹・金榮厚・大矢徹治・有原文二 (2004) 冠水ストレスが発芽時のダイズに及ぼす影響と種子含水率調節による冠水障害の軽減効果. *日作紀*, **73**, 323-329
69. 南條正己 (1991) 土場蓄積りんの測定法の確立. *農林水産技術会議事務局研究成果*, **259**, 11-16

70. Nichols, M. L. (1931) The dynamic properties of soil, I. An explanation of the dynamic properties of soils by means of colloidal films. *Agric. Eng.*, **12**, 259-264
71. 新潟県農林部編 (1978) 地力保全基本調査総合成績書. 新潟, 757p.
72. 農耕地土壌分類委員会編 (1995) 農耕地土壌分類第3次改訂版. *農環研資*, **17**, 78p.
73. 農林水産技術会議事務局・農林水産省農事試験場編 (1975) 大豆調査基準, 農林水産技術会議事務局, 15p.
74. 農林水産省 (2010) 自給率目標の考え方及び食料安全保障について.
入手先 < <http://166.119.78.61/j/council/seisaku/kikaku/bukai/18/pdf/data1-1.pdf> > , (参照 2014-08-11)
75. Oades, J. M. and Waters, A. G. (1991) Aggregate hierarchy in soils, *Aust. J. Soil Res.*, **29**, 815-828
76. 小田原孝治・福島裕助・荒木雅登・兼子明・荒巻幸一郎 (2012) 筑後川流域の田畑輪換圃場における土壌肥沃度とダイズ子実収量性の実態, *土肥誌*, **83**, 405-411
77. 及川一也 (2010) 転換畑ダイズ栽培技術及び水稲湛水直播栽培技術の開発と普及, *農業技術*, **65**, 448-455
78. Olson, R. V. (1965) Iron, in *Methods of Soil Analysis, Part 2*, ed. C. A. Black, D. D. Evans, L. E. Ensminger, J. L. White, F. E. Clark, and R. C. Dinauer, American Society of Agronomy, Inc., Publisher, Madison, U.S.A, 963-973
79. Papendick, R. I. Lindstrom, M. J., Cochran, V. L. (1973) Soil mulch effects on seedbed temperature and water during fallow in eastern Washington. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **37**, 307-314
80. Pedersen, H. D., Posma, D., Jakobsen, R., Larsen, O. (2005) Fast transformation of iron oxyhydroxides by the catalytic action of aqueous Fe (II). *Geochim. Cosmochim. Acta.*, **69**, 3967-3977
81. Perfect, E., Kay, B. D., Ferguson, J. A., da Silva, A. P., Denholm, K. A. (1993) Comparison of functions for characterizing the dry aggregate size distribution of tilled soil, *Soil Tillage Res.*, **28**, 123-139
82. Quirk, J. P. (1994) Interparticle forces: A basis for the interaction of soil physical behavior, *Adv. Agron.*, **53**, 121-183
83. Quirk, J. P. and Alymore, L. A. G. (1971) Domains and quasi-crystalline regions in clay systems, *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **35**, 652-654
84. Radke, J. K. (1982) Managing early season soil temperatures in the northern corn belt using configured soil surfaces and mulches. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **46**, 1067-1071
85. Rawlins, S. L. and Campbell, G. S. (1986) Water Potential: Thermocouple psychrometry; in *Method soil Analysis Part 1 -Physical and mineralogical methods second edition*, ed. A. Klute, SSSA, Wisconsin, 597-618.
86. Sah, R. N., Mikkelsen, D. S., and Hafez, A. A. (1989) Phosphorus behavior in flooded - drained soils. II. Iron transformation and phosphorus sorption, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **53**, 1723-1729
87. 西天浩 (1987) 汎用化水田における窒素の動向と作物による吸収—低湿重粘土水田を中心に—, *新潟アグロノミー*, **23**, 17-37
88. 齋藤邦行・磯部祥子・瀬口由美香・黒田俊郎 (2001) ソース/シンクの切除がダイズの生育収量, 乾物生産に及ぼす影響, *日作紀*, **70**, 365-372
89. 齋藤万之助・川口桂三郎 (1971) 水田土壌の凝集性 (第1報) 稲作期間中における水田作土の物理性の経時変化, *土肥誌*, **42**, 1-6
90. 齋藤万之助・川口桂三郎 (1971) 水田土壌の凝集性 (第6報) 還元土壌の凝集性におよぼす風乾の影響, *土肥誌*, **42**, 413-420
91. 佐々木紘一 (1974) 大豆の一莢内粒数について—1. *北海道農試集*, **29**, 17-26
92. Schwertmann, U. and Taylor, R. M. (1989) "Iron Oxides", *Minerals in soil, Soil Environment*, J. B. Dixon and S. B. Weed eds., Soil Science Society of America, Inc., Madison, 379-438
93. Shanmuganathan, R. T. and Oades, J. M. (1982) Modification of soil physical properties by manipulating the net surface change on colloids through addition of Fe (III) polycations, *J. Soil*

- Sci.*, 33, 451-465
94. Sparks, D. L. (1995) "Redox chemistry of soils". Environmental soil chemistry. Academic press, Inc., San Diego, 187-202.
 95. Spoor, G. and Godwin, R. J. (1979) Soil deformation and shear strength characteristics of some clay soils at different moisture contents, *J. Soil Sci.*, 30, 483-498
 96. Stafford, J. V. (1981) An application of critical state soil mechanics: The performance of rigid tines, *J. Agric. Engng Res.*, 26, 387-401
 97. 杉本秀樹 (1994) 水田転換畑におけるダイズの湿害に関する生理・生態学的研究. *愛媛大農紀*, 39, 75-134
 98. 住田弘一・加藤直人・西田瑞彦 (2005) 田畑輪換の繰り返しや長期畑転換に伴う転作大豆の生産力低下と土壌肥沃度の変化. *東北農研報*, 103, 39-52
 99. 高橋智紀 (2002) 非晶質鉄化合物の形態変化を利用した水田転換畑の畑地土壌化指標. *土肥誌*, 73, 41-44
 100. 高橋智紀 (2012) 酸化還元研究の新展開—土壌の酸化還元がもたらす現象を追う— 5. 水田輪作体系での鉄の形態変化と土壌特性との関係. *土肥誌*, 83, 714-720
 101. Takahashi, T., Hosokawa, H., Matsuzaki, M. (2006) N_2 fixation of nodules and N absorption by soybean roots associated with ridge tillage on poorly drained upland fields converted from rice paddy fields, *Soil Sci. Plant Nutri.*, 52, 291-299
 102. 高橋智紀・細川寿・松崎守夫 (2008) 重粘質転換畑における土壌鎮圧によるダイズ種子の吸水促進効果. *土肥誌*, 79, 1-8
 103. 高橋智紀・松崎守夫・塩谷幸治・細川寿 (2005) 転換畑におけるダイズの収量構成要素と土壌特性との関係—新潟県上越地域的事例—. *中央農研報*, 6, 51-58
 104. 高橋智紀・鳥山和伸 (1998) Role of iron oxides in changes in soil microstructure with drying and reducing treatments, *土壌の物理性*, 78, 35-43
 105. Takahashi, T. and Toriyama, T. (2004) Method to evaluate "Uplandization" in converted field from a paddy based on crystallinity of free iron oxides, *JARQ*, 38, 155-159
 106. Takahashi, T., Park, C. Y., Nakajima, H., Sekiya, H., and Toriyama, K. (1999) Ferric iron transformation in soils with rotation of irrigated rice - upland crops and effect on soil tillage properties, *Soil Sci. Plant Nutri.*, 45, 163-173
 107. 高橋能彦 (1996) 水田転換畑におけるダイズに対する深層施肥法の開発と安定多収効果の解析. *新潟農試研報*, 41, 42-104
 108. Takahashi, Y., Chinushi, T., Nagumo, Y., Nakano, T., and Ohyama, T. (1991) Effect of deep placement of coated urea fertilizer on root growth and rubidium uptake activity in soybean plants. *Soil Sci. Plant Nutri.*, 37, 735-739
 109. Takahashi, Y., Chinushi, T., Nakano, T., and Ohyama, T. (1992) Evaluation of N_2 fixation and N absorption activity by relative ureide method in field grown soybean plants with deep placement of coated urea. *Soil Sci. Plant Nutri.*, 38, 699-708
 110. 高橋能彦・土田徹・大竹憲邦・大山卓爾 (2003) シグモイド型被覆尿素側条施肥によるダイズの増収効果. *土肥誌*, 74, 55-60
 111. 田村有希博 (1996) 土壌の畑培養乾土効果を指標とした中粗粒灰色低地土水田の適正な輪換利用. *北陸農業の新技术*, 9, 37-41
 112. Takakai, F., Takeda, M., Kon, K., Inoue, K., Nakagawa, S., Sasaki, K., Chida, A., Sekiguchi, K., Takahasshi, T., Sato, T., and Kaneta, Y. (2010) Effects of preceding compost application on the nitrogen budget in an upland soybean field converted from a rice paddy field on gray lowland soil in Akita, Japan. *Soil Sci. Plant Nutri.*, 56, 760-772
 113. Thompson, A., Chadwick, O. A., Rancourt, D. G., and Chorover, J. (2006) Iron-oxide crystallinity increases during soil redox oscillations. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 70, 79-781
 114. 鳥越洋一・進士宏・栗原浩 (1981) ダイズの発育形態と収量成立に関する研究 第1報 主茎の節間伸張と分枝の発育との関係. *日作紀*, 50, 191-198
 115. 鳥居伸一郎・松井徹・鶴田茜・櫻井孝志

- (2010) 肉用牛の飼養現場で給与されている飼料の鉄含量の実態. *日畜会報*, **81**, 47-52
116. 富山県農業試験場編 (1983) 地力保全基本調査総合成績書. 富山.
117. USDA (1994) Keys to soil taxonomy sixth edition, United States Department of Agriculture, Washington, 306p.
118. Utomo, W. H. and Dexter, A. R. (1981) Soil friability, *J. Soil Sci.*, **32**, 203-213
119. Vyn, T. J., Stone, J. A., and Raimbault, B. A. (1990) Corn development and crop yield response to ridge-planting systems on a poorly drained soil in southwestern Ontario. *Soil Tillage Res.*, **18**, 207-217
120. 渡辺敏弘・酒井孝雄・松下浩二 (1989) 湿害を受けた大豆に対する窒素追肥と培土の効果, *東北農業研究*, **42**, 117-118
121. Willet, I. R. and Higgins, M. L. (1980) Phosphate sorption and extractable iron in soils during irrigated rice - upland crop rotations, *Aust. J. Exp. Agric. Anim. Husb.* **20**, 346-353
122. 山中勤・開発一朗・ウウインバータル・ダムバラヴィア (2003) TDRによる土壌水分量測定値の温度依存性とその現位置測定データに基づく補正, *水文・水資源学誌*, **16**, 246-254
123. 柳井政史・上沢正志・金野隆光・清水善昭 (1998) リン酸緩衝液による土壌窒素の抽出条件と湛水培養可給態窒素量の関係—土壌群, 土壌化学性および土壌管理来歴の指標による土壌のグループ化—, *土肥誌*, **69**, 365-370
124. 屋代幹雄 (2002) “1. 播種床造成・播種技術”. 大豆 自給率向上に向けた技術開発, 農林水産技術会議事務局編, *農林水産研究文献改題*, **27**, 510-513.
125. 吉田修一郎・伊藤公一・足立一日出 (1997) 重粘土転換畑への冬期作物の導入による圃場の排水性の改善, *土壌の物理性*, **76**, 3-12
126. 吉永悟志・河野雄飛・白土宏之・長田健二・福田あかり (2008) 転換畑ダイズ作における有芯部分耕が土壌水分および生育・収量に及ぼす影響, *日作紀*, **77**, 299-305
127. Young, E. and Conway, C. F. (1942) On the estimation of allantoin by the Remini-Shryver reaction. *J. Biol. Chem.*, **142**, 839-885
128. Yuan, P., Annabi-Bergaya, F., Tao, Q., Fan, M., Liu, Z., Zhu, J., He, H., and Chen, T. (2008) A combined study by XRD, FTIR, TG, and HRTEM on the structure of delaminated Fe-intercalated/pillared clay, *J. Colloid Interface Sci.*, **324**, 142-149

Soil tillage properties in clayey upland fields after conversion from rice paddies and the effects of soil tillage on soybean (*Glycine max*) growth

Tomoki Takahashi*

Summary

The self-sufficiency rate of soybeans in Japan has been determined to be only 5-7%. More specifically, in the Hokuriku region comprising Niigata, Toyama, Ishikawa, and Fukui Prefectures, soybean yields are low and unstable. The low productivity in the Hokuriku region may be due to soil characteristics in addition to climatic factors. Paddy fields occupy 89% of the croplands in this region and almost all soybean cultivation takes place in upland fields converted from rice paddies. Typical cropping systems employ rotation between rice paddy cropping and short-term upland soybean cropping using rotation patterns such as rice-rice-soybean-rice-rice-soybean. Furthermore, one-third of the farmland in this region contains clayey soils with low soil drainage and water retention capacity; obtaining ideal soil tillage and suitable water management for soybean growth is difficult under these environmental conditions. Knowledge of the physical characteristics of the soils in which upland crop-rice paddy field rotation systems are used and the effects of these soils on soybean growth is needed to attain high and stable yields in this region.

The first objective of this study was to investigate the relationship between soybean yield and soil characteristics in the farmlands of the Hokuriku region to identify limiting factors that prevent high soybean yields. The second objective was to determine the effect of the transformation of iron oxides on soil microstructure and tillage properties. The third objective was to evaluate the effects of using recently developed machinery designed to achieve

high seedling establishment and mitigation of water damage by tilling, ridge seeding, and compressing soil in a single process on seed imbibition and nitrogen (N) accumulation during the dry season.

Soil properties and soybean growth were investigated in 33 upland fields converted from rice paddy fields in Joetsu City, Niigata Prefecture. Variations in soybean yield could be attributable specifically to soil characteristics because the subject fields were concentrated in a small plateau area with a homogeneous climate, planted with the same cultivar (*Glycine max* Merr. cv. Enrei), and managed by the same farmer. Fields equipped with underdrains showed significantly ($P < 0.01$) higher yields and a lower soil water content than fields without underdrains: the mean yields were 420 g m^{-2} for fields with underdrains and 330 g m^{-2} for fields without underdrains. Based on the coefficient of determination, 48% of the yield variance in the fields with underdrains was accounted for by differences in 100-seed-weight (Table 3). A significant correlation was also observed between 100-seed-weight and the amount of mineralized N in the soil ($P < 0.01$). In contrast, pod number accounted for 82% of the yield variance in fields without underdrains (Table 3). The yields from fields without underdrains were determined mainly by the initial growth during the period from seedling establishment to the determination of pod number. The relatively high yields from the fields with underdrains demonstrates a strong relationship between soybean 100-seed-

* Present address: NARO Tohoku Agricultural Research Center

weight and soil mineralized N.

A comparison of paddy soil (Typic Endoaquepts) that contained 38% clay (mainly smectite) and 1.3% free iron oxide with a model substance that was a mixture of smectite with 85g of iron per kilogram of iron oxide revealed that the transformation of soil iron oxide affected the soil microstructure of upland crop-paddy rice rotation soils. The sediment volume (SV) of paddy soil decreased when the matric potential of the soil was less than -1.5 MPa and increased again with flooding after drying. The amount of reduced iron associated with flooding indicates that the increase in SV was dependent upon the soil reduction history and not on the state of reduction. The effect of soil drying on SV was reproduced in the model substance when the matric potential of the sample was less than -1.5 MPa (Fig. 8). Furthermore, drying reduced the SV of smectite that contained iron oxide more than smectite without iron oxide. When samples were reduced by the addition of sodium ascorbate, the SV increased only for the smectite that contained iron oxide (Fig. 10). An analysis of pore distribution and scanning electron micrographs showed that the addition of iron oxide decreased the volume of 1- μ m diameter pores and increased the volume of 100-nm diameter pores (Fig. 11). These results indicate that the aggregation of layered silicates in the presence of iron oxide caused by drying was a contributing factor to the decrease in SV and that the decreased volume could be restored by the reductive dissolution of iron oxides in the soil.

Free iron oxides have a poor crystalline order in paddy fields. Poorly ordered iron has properties that allow it to react with some species of anions and change the soil microstructure by reductive dissolution. These chemical properties are unique to upland fields converted from rice paddy fields. A new method for evaluating the status of free iron oxide crystallinity was developed in this study. Free iron crystallinity was defined as the amount of iron extracted over 120min in 1M sodium acetate buffer (pH 3.0) at a solution to soil ratio of 100: 1 (Fe_{ac}).

The soil Fe_{ac} decreased in proportion to the length of time after conversion from rice paddy to upland cultivation. The Fe_{ac} was correlated significantly with phosphate retention properties (Fig. 15) and the iron reducibility of soils under submerged conditions (Fig. 16), but did not correlate with the amount of acid oxalate-extracted iron, which is generally used to extract amorphous free iron.

The relationship between the transformation of iron oxide crystallinity and soil tillage properties was analyzed in upland crop-paddy rice rotation fields. Soil friability increased with time (0-5 years) after the conversion from paddy field to upland field (Fig. 20). The amounts of dithionite-citrate-extractable free iron and oxalate extractable iron did not change over time after conversion, but the Fe_{ac} , phosphate retention, and ferrous iron content under flooded conditions decreased gradually (Fig. 19). These results imply that the iron oxide crystallinity increased with time after conversion, and that this resulted in a decrease in reactivity with phosphate and reductive dissolution under flooded conditions. During the first year after conversion to an upland field, the Fe_{ac} decreased gradually, but irregularly, and the changes in the ratio of ferric to ferrous iron in the Fe_{ac} fraction did not show an obvious trend (Fig. 21). After 6 years as an upland field, the addition of organic matter before flooding increased the content of reduced iron after conversion to a paddy field. A statistically significant relationship was observed between the ferrous iron content and SV and the proportion of clods < 2 mm in size after paddling (Fig. 22).

The following model is proposed for the change in soil microstructure in upland crop-paddy rice rotation fields (Fig. 23). The soil microstructure is altered in converted upland fields by the process of drying after drainage. In this soil environment, free iron oxides interact with layered silicate to form a unique microstructure. Because free iron oxides are easily reduced immediately after oxidation, flooding for a short period such as after a period of rainfall could reduce iron oxides and cause the soil microstructure to be unstable. The iron oxides and

soil microstructure that are formed become more stable with time after the paddies are converted to upland fields.

Soybean seed imbibition is poor in the heavy clay of upland fields after conversion from rice paddy fields due to the severe conditions of drought in the soil. These conditions are due to low water availability caused by physical properties of the soil and planting during late May to early June when the soil is very dry. The effects of soil compression on soil drying and soybean seed imbibition were examined to identify methods for improving seed imbibition. Tillage promoted soil drying. The soil water content remained higher in soil compressed by a seeder (6 kPa) to a depth of 50 mm than in uncompressed soil, and the rate of soybean seed imbibition increased significantly (Fig. 26). Furthermore, an extremely dry layer was present at a depth of 10-40 mm in the uncompressed soil. Soybean seeds are typically sown at a depth of 20-30 mm, placing them in the dry layer. Such a dry layer was not observed in compressed soils (Fig. 25), which indicates that the movement of soil water from lower to upper layers was inhibited in seedbeds with no compression due to small contact areas of soil clods. In conclusion, soil compression facilitates imbibition by promoting the movement of water from lower soil layers, and soil compression immediately after tillage promotes seed imbibition for seeds sown at depths of 20-30 mm. These results also imply that machine tilling and compressing the soil in a single process is an effective approach to improve soybean seed imbibition.

Sowing on elevated ridges reduces water damage to soybean plants cultivated in upland fields converted from rice paddy fields. Therefore, the effect of ridge tillage (RT) on soybean N accumulation was investigated. The amounts of plant N derived from N₂ fixation in nodules, from soil, or from fertilizer were compared between RT and conventional tillage (CT) in two replicate fields during 2002-2003. Both fields were upland fields converted from rice paddies (Typic Hydraquents). The main difference between

the two fields was the presence or absence of field underdrains. The amounts of rubidium (Rb) and potassium (K) that accumulated in the shoots were also determined as an indicator of root distribution in the soil. The yields in the two fields were higher with RT by 106 and 129%, respectively, than with CT. An increased pod number and seed weight were the major factors contributing to the increased yield. An analysis of variance indicated that N₂ fixation by nodules and N absorption by roots increased significantly with RT until the R1 (flowering) stage. The amounts of Rb and K that accumulated in the shoots indicate that the roots were distributed more abundantly in the upper soil layers with RT than with CT. Consequently, RT resulted in reduced water damage during the part of the rainy season that overlapped with the flowering stage. N accumulation from N₂ fixation through the R7 (maturity) stage was significantly higher with RT than with CT. RT was an effective method for increasing N₂ fixation by nodules in poorly drained upland fields converted from rice paddies.

In conclusion, improvements to the initial stage of soybean growth are required to obtain high and stable yields from soybean grown in poorly drained heavy clay soil in the Hokuriku region. One of the best practices for improving initial growth is the modification of soil till in seedbeds, and high soil friability is desirable to permit the modification of tillage practices. The soil microstructure, which affects soil friability, changes gradually during the period after conversion from paddy field to upland field. This study shows that the transformation of iron oxide in upland crop-paddy rice rotation soil affected the soil microstructure, and a new method for evaluating the transformation of iron oxides was presented. This study also demonstrates that seeding and compressing the soil immediately after tilling promotes imbibition and that RT can mitigate water damage during the initial growth stage and increase N accumulation in plants. These results support the use of machinery that tills, ridges, seeds, and

compresses the soil in a single process as one of the best approaches to improve soil tilth and the initial growth of soybeans.