

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

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。ダイズの高収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、高収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に、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壤の性質が変化し、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. 土壤物性測定法委員会編 (1979) 土壤物性測定法, 養賢堂, 128-157.
10. 土壤環境分析法編集委員会編 (1997) 土壤環境分析法, 博友社, 427p.
11. 土壤養分測定法委員会編 (1981) 土壤養分分析法, 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], *農園*, **62**, 527-616
18. 藤本亮夫・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) "水田土壤におけるリン酸の挙動—主として室内実験からの接近—", 水田土壤とリン酸—供給力と施肥—, 日本土壤肥料学会編, 博友社, 5-58
21. Fyfield, T. P., Gregory, P. J., Woodhead, T., and Pasuquin, E. M. (1990) Effects of

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.