

## 東北地域太平洋側の畑作ダイズの連作における減収要因並びに 牛ふん堆肥連用による増収および土壌理化学性改善に関する 土壌タイプ別解析

三浦 憲蔵<sup>\*1)</sup>・戸上 和樹<sup>\*1)</sup>・吉住 佳与<sup>\*2)</sup>・工藤 一晃<sup>\*1)</sup>  
青木 和彦<sup>\*1)</sup>

**抄 録**：東北地域太平洋側における畑作ダイズの収量の向上および安定性の確保が求められている。そこで、ダイズ連作における減収要因および牛ふん堆肥連用による増収効果を土壌タイプ別に調査し、気象条件を加味して土壌理化学性の観点から検討した。化学肥料単用で5年間連作すると、灰色低地土、黄色土、アロフェン質黒ボク土では「リュウホウ」および「おおすず」の収量は2年目を除き、連作年数に伴って次第に低下した。両品種は2年目で少雨による土壌水分の不足からおそらく根粒活性低下やカリウム吸収抑制によって低収となった。非アロフェン質黒ボク土では「リュウホウ」および「おおすず」の収量は連作年数に伴って低下し、3年目でマグネシウムの相対的な不足によってその他の土壌と比べて低かった。また、灰色低地土の化学性はダイズ生育に好適な水準であったことから、5年間の平均収量が比較的高かった。これと対照的に、黄色土は化学性だけでなく、物理性も不良であったため、気象条件によって収量が変動しやすく、連作に伴って土壌pHと可給態窒素が低下し、減収しやすかった。一方、各土壌タイプで牛ふん堆肥連用による増収、収量の安定化および土壌理化学性改善の効果が示された。牛ふん堆肥連用によって黄色土はその他の土壌と比べて増収しやすかったが、収量の年次変動が大きかった。灰色低地土と黄色土では土壌pHが低下しやすかったが、牛ふん堆肥連用によって低下が抑制された。各土壌タイプで牛ふん堆肥連用によって可給態窒素は高く維持された。また、年次によっては黄色土や非アロフェン質黒ボクで牛ふん堆肥連用によるマグネシウムの相対的な不足が収量に影響した。連作10年目の高温条件下では灰色低地土および黄色土の牛ふん堆肥区で「リュウホウ」と「おおすず」が著しく低収となり、非アロフェン質黒ボク土およびアロフェン質黒ボク土の牛ふん堆肥区で「おおすず」が低収となった。これは根粒窒素固定量が抑制され、地上部窒素集積量が低下したためと推察された。それ以外の年次でのダイズの低収は多雨または少雨による過度の湿潤または乾燥によって概ね説明された。

**キーワード**：畑作ダイズ、連作、牛ふん堆肥、土壌タイプ、土壌理化学性

**Causes of a Decrease in Soybean Yields by Continuous Cropping and Effects of Successive Application of Cattle Manure Compost on Soybean Yields and Soil Physicochemical Properties in Terms of Soil Types on the Pacific Seaboard of the Tohoku Region** : Kenzo MIURA<sup>\*1)</sup>, Kazuki TOGAMI<sup>\*1)</sup>, Kayo YOSHIZUMI<sup>\*2)</sup>, Kazuaki KUDO<sup>\*1)</sup> and Kazuhiko AOKI<sup>\*1)</sup>

**Abstract** : We studied a decrease in soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] yield during five years of continuous cropping and an increase in soybean yield by successive application of cattle manure compost during 15 years of continuous cropping by soil type from the viewpoint of soil physicochemical properties as well as meteorological conditions. In the cases of a gray lowland soil, a yellow soil and an allophanic andosol, soybean yields were gradually decreased by continuous cropping except in the second year, probably due to low soybean nodule activity and restriction of potassium uptake under low soil moisture conditions due to low rainfall. In the case of a non-allophanic andosol, soybean yields were gradually

\* 1) 農研機構東北農業研究センター (Tohoku Agricultural Research Center, NARO, Morioka, Iwate 020-0198, Japan)

\* 2) 現・宮城県農林水産部 (Miyagi Prefectural Agriculture, Forestry and Fisheries Department, Sendai, Miyagi 980-8570, Japan)

decreased and were the lowest among the four soils in the third year due to a relative deficiency of magnesium in relation to potassium. The chemical properties of the gray lowland soil were more favorable for soybean growth than those of the other three soils, and this soil produced a high average yield for five years. In contrast, both the chemical and physical properties of the yellow soil were unfavorable, causing fluctuations in soybean yields under different meteorological conditions and an overall decrease in yield due to decreases in soil pH values and available nitrogen content during the five years of continuous cropping. Nevertheless, under the successive application of cattle manure compost, each soil type showed increased soybean yields as well as stabilization of yields and improvement in the soil physicochemical properties. The soybean yields in the yellow soil tended to increase significantly compared to those in the other soils during the successive application of cattle manure compost, but the yields changed significantly from year to year. Soil pH values tended to decrease easily in the gray lowland soil and the yellow soil, but this lowering was controlled by the successive application of cattle manure compost. Available nitrogen content was increased by the successive application of cattle manure compost in each soil type. The opposite effects of a relative deficiency of magnesium on yields were seen in the yellow soil and the non-allophanic andosol in some years during the successive application of cattle manure compost. Nitrogen fixation amounts under the successive application of cattle manure compost were decreased by high temperatures in the tenth year, resulting in a decrease in the amounts of nitrogen accumulation in the above-ground parts and yields of "Ryuhou" and "Ohsuzu" in the gray lowland soil and the yellow soil, and of "Ohsuzu" in the non-allophanic andosol and the allophanic andosol. In the other years, relatively low yields were roughly explained by excessively wet or dry conditions due to relatively high or low rainfall.

**Key Words** : Soybean, Continuous cropping, Cattle manure compost, Soil type, Soil physicochemical properties.

## I 緒 言

ダイズは主として水田転換畑で生産され、最近10年間(2006~2015年)の田作の割合は都府県平均で92%、東北地域で91%に達している(農林水産省2016a)。一方、東北地域のダイズの10アール当たり収量は2000年に秋田県と山形県とともに200 kgを超え、東北地域平均で185 kgに達したが、その後は低下傾向にあり、最近では140 kg程度と低迷している(農林水産省2016b)。2000年以降の単収低下の一因として、田畑輪換の繰り返しの中でダイズの作付割合が高まり、転換畑の地力が低下したことが指摘されている(住田ら2005)。

「食料・農業・農村基本計画」(農林水産省2015)においては、2025年のダイズの生産努力目標が32万トン(2013年20万トン)に設定されたことから、収量・品質の高位安定化が今後の課題である。都府県の畑地は転換畑と比べて総じて地力が低いため、畑作ダイズの単収は田作ダイズと比べて低い(住田ら2005)。最近10年間で見れば、東北地域太平洋側の

宮城県の畑作ダイズの面積割合は4%に過ぎないが、岩手県で17%、福島県で46%をそれぞれ占めることから、岩手、福島両県では田作だけでなく畑作ダイズの単収向上が重要である。畑作物を連作すると、生育・収量が低下することから、連作を避け、輪作を行うことが原則である。ダイズを中心とした合理的な輪作体系の確立のためには、好ましい前作物と後作物を選ぶことが大切である(朝日1984)。しかし、生産者は技術的な課題などの理由によってダイズ連作を行う場合が多いことから、連作条件下で減収を回避する方策が求められる。

有機質資材の適正な施用は作物への養分供給に加えて、土壌の物理性、化学性、生物性の改善に有効である(橋元・松崎1976)。有機質資材を連用すると、ダイズの生育・収量が向上し、連作ダイズの生産力低下を抑制できる(松崎ら1988)。一方、ダイズは土壌の種類によって生育・収量が異なるだけでなく、連作に伴う減収程度も異なることが報告されたが、その原因は明らかにされていない(朝日1984)。また、ダイズ連作における有機質資材連用

による増収効果についても土壤の種類によって異なると考えられるが、こうした観点からの報告は見当たらない。さらに、東北地域太平洋側は日本海側と比べて日照時間が短く、気温の年次変動が大きいいため、ダイズの収量が低く、変動しやすい（高橋ら1990）。したがって、東北地域太平洋側では土壤条件だけでなく、気象条件もダイズの生育・収量の変動に強く関与していると考えられる。

本報告においては、東北地域太平洋側における畑作ダイズの収量の向上および安定性の確保に向けて、ダイズ連作における減収要因および牛ふん堆肥連用による増収効果を土壤タイプ別に明らかにし、気象条件を加味して土壤理化学性との関係から考察する。

本研究の遂行に当たり、東北農業研究センター業務第1科職員各位にはダイズ栽培試験について多大な支援をいただいた。また、元東北農業研究センター田村有希博博士には栽培試験に関するご助言とご指導をいただいた。これらの方々に深く感謝する。

## II 材料および方法

### 1. 供試圃場

東北農業研究センター（盛岡）構内のコンクリート枠圃場を用いてダイズの栽培試験を行った。農耕地土壤分類第3次改訂版（農耕地土壤分類委員会1995）によれば、多腐植質厚層黒ボク土（以下、アロフェン質黒ボク土）、腐植質普通非アロフェン質黒ボク土（以下、非アロフェン質黒ボク土）、細粒質山地黄色土（以下、黄色土）、細粒質普通灰色低地土（以下、灰色低地土）の4タイプの土壤が各枠に深さ30 cmまで充填されている。これらは東北地域の代表的な土壤であるが、アロフェン質および非アロフェン質黒ボク土は可給態リン酸が少なく、酸性が強いことから、リン酸肥沃度向上と塩基補給のための改良が実施された（大久保・栗原 1967；山本・高橋 1967）。また、両黒ボク土は有機物に富み、団粒構造が発達し、透水性や保水性に優れているが、黄色土は降雨によって透水性が悪くなり、乾燥によって固結する欠点がある。灰色低地土は化学性と物理性が概ね良好であり、土壤生産力が比較的高い。

### 2. 化学肥料単用によるダイズ5年連作試験

ダイズ1作目から5作目までの連作における減収程度および土壤理化学性の変動を土壤タイプ別に明

らかにするため、コンクリート枠圃場のうち土壤タイプが異なる4枠（1枠10×5 m、無底）を用いて、ダイズ用配合肥料を全面全層に基肥施用（N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O-CaO-MgO=3.0-12.5-9.0-4.9-1.5 g m<sup>-2</sup>）とし（以下、化学肥料区）、2005年から2009年まで5年連作試験を実施した。これらの4枠は過去5年間以上休閑とし、2005年にダイズ1作目の試験を行った。各年次の5月下旬に東北地域の主力品種である「リュウホウ」および「おおすず」に加え、根粒非着生系統「T201」を播種し、初生葉展開期に間引きし、1株1本立てとした（うね間70 cm×株間15 cm）。除草剤と殺虫剤は適期に散布して防除を行い、中耕培土は開花期までに2回行った。成熟期の10月上旬に各枠についてうね2 m分の13株程度を2連で採取した。なお、本試験期間における病害の発生は認められず、虫害の発生は軽微であった。

### 3. 牛ふん堆肥上乘せ施用によるダイズ15年連作試験

牛ふん堆肥連用による連作ダイズの減収回避効果と土壤理化学性の改善効果を明らかにするため、コンクリート枠圃場のうち上記のダイズ5年連作試験とは別の8枠（1枠10×20 m、無底）を用いて、2001年から2015年まで各土壤タイプについてダイズ用配合肥料に牛ふん堆肥（2 kg m<sup>-2</sup>）の上乗せ施用（以下、牛ふん堆肥区）および対照として化学肥料区の各1枠を設定した。なお、牛ふん堆肥は2001年に1作目後、2002年に2作目前と後にそれぞれ施用したが、2003年（3作目）から2015年（15作目）までは栽培前に施用した。各年次の5月下旬に「リュウホウ」、「おおすず」および「T201」を播種し、初生葉展開期に間引きし、1株1本立てとした（うね間70 cm×株間15 cm）。除草剤と殺虫剤は適期に散布し、中耕培土は開花期までに2回行った。成熟期の10月上旬に各枠についてうね2 m分の13株程度を2連で採取した。また、連作10年目の開花期（2010年7月27日）に各枠から「リュウホウ」および「おおすず」の連続5株を2連で採取し、根粒数および根粒乾物重を測定した。なお、本試験期間における病害の発生は認められなかったが、2010年における虫害の発生は顕著であった。

### 4. 土壤理化学性の分析

2003年から2015年までダイズ栽培前に各枠の対角線上の5点程度から作土を採取し、調製した風乾細

土 (<2 mm) について化学性の分析を行った。土壌pHは固液比1:2.5の水懸濁液についてガラス電極法によって測定した(以下、pH(H<sub>2</sub>O))。可給態窒素はビニール袋培養法(田村 1993)を用いて湛水・30℃ 4週間保温静置の後、100 g L<sup>-1</sup>塩化カリウム抽出液についてインドフェノール法でアンモニア態窒素を定量した。可給態リン酸はトルオグ法による抽出液についてアスコルビン酸還元法で測定した。交換性陽イオンは1 mol L<sup>-1</sup> (pH7.0) 酢酸アンモニウム抽出液についてICP発光分析法でカリウム、カルシウムおよびマグネシウムを測定し、陽イオン交換容量(CEC)は交換性陽イオン抽出後に100 g L<sup>-1</sup>塩化カリウム抽出液についてインドフェノール法でアンモニア態窒素を定量して求めた。全炭素は乾式燃焼法(全自動元素分析装置)で測定した。

2009年ダイズ収穫後に各枠から100 mL採土円筒に不攪乱試料を採取し、物理性の分析を行った。孔隙率と乾燥密度は実容積法で、飽和透水係数は変水位法でそれぞれ測定した。

### 5. ダイズの収量調査と養分分析

各年次の成熟期に採取したダイズ株について子実重、莢数および百粒重を測定した。また、2003年(3作目)から2015年(15作目)まで施用した牛ふん堆肥の微粉砕試料について窒素はケルダール法で分析し、リン酸、カリウム、カルシウムおよびマグネシウムはテフロン加圧分解容器による硝酸加圧分解法(後藤ら 1992)を用いて150℃・2時間分解液についてICP発光分析法で測定した。3作目から15作目までの牛ふん堆肥区の1作当たり養分投入量を表1に示した。なお、毎作後、ダイズの落葉以外の収穫残渣はできるだけ搬出した。

### 6. データ解析

収量、莢数および百粒重のデータは各区2連の平均値を解析に用いた。化学肥料単用によるダイズ5年連作試験では2005年(1作目)から2009年(5作目)までの収量、莢数、百粒重および土壌化学性データについて連作年数と土壌タイプを要因とし、繰り返しのない二元配置分散分析を行った。収量の平均値、変動係数および5年目の相対値については、品種・系統と土壌タイプを要因とする繰り返しのない二元配置分散分析を実施した。

牛ふん堆肥上乘せ施用によるダイズ15年連作試験では2001年(1作目)と2002年(2作目)のデータが欠落していた。そこで、牛ふん堆肥の施用時期をダイズ栽培前に固定した2003年(3作目)から2015年(15作目)までのデータを解析の対象とした。収量、収量の変動係数、莢数、百粒重および土壌理化学性データは牛ふん堆肥区と化学肥料区について、増収率(=牛ふん堆肥区の平均収量/化学肥料区の平均収量)は連作10年目除外の有無について対応のあるサンプルのt検定をそれぞれ実施した。また、増収率および収量の変動係数について品種・系統と土壌タイプを要因とする繰り返しのない二元配置分散分析を行った。2010年開花期の根粒数と根粒乾物重については、牛ふん堆肥区と化学肥料区の平均値の差をt検定により判定した。

### 7. 気象データ

解析の対象とした期間(2003~2015年)について盛岡地方気象台による観測データ(国土交通省気象庁 2016)に基づき、各年次のダイズ栽培期間中の気象条件の特徴を整理した(表2)。

表1 牛ふん堆肥中養分含量および1作当たり養分投入量

	牛ふん堆肥中養分含量		牛ふん堆肥区の1作当たり養分投入量 (g m <sup>-2</sup> )		
	平均 (g kg <sup>-1</sup> )	変動係数	牛ふん堆肥由来	化学肥料由来	合計
窒素 (N)	24.0	0.23	17.8	3.0	20.8
リン酸 (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	23.7	0.25	15.8	12.5	28.3
カリウム (K <sub>2</sub> O)	33.8	0.19	25.0	9.0	34.0
カルシウム (CaO)	25.0	0.34	15.9	4.9	20.8
マグネシウム (MgO)	11.4	0.16	8.6	1.5	10.1

2003年(3作目)から2015年(15作目)まで施用した牛ふん堆肥(2 kg m<sup>-2</sup>)の分析値に基づく。牛ふん堆肥中水分含量の平均値は現物当たり0.64 kg kg<sup>-1</sup>(変動係数0.14)。牛ふん堆肥中養分含量は乾物当たりの平均値を示す。牛ふん堆肥由来の養分投入量=牛ふん堆肥の乾物重×乾物当たりの養分含量。化学肥料由来は施肥量の値を示す。

表2 試験期間（2003～2015年）における主な気象条件の概略

5年連作 試験	15年連作 試験	平均気温		降水量合計		日照時間合計		播種日／収穫日
		期間平均	平年値との差	期間合計	平年値との比	期間合計	平年値との比	
2003年		18.8℃	-1.0℃	667mm	94%	561h	84%	5月27日／10月10日
-	3作目	7月上旬～9月上旬：平年値-2.1℃ 8月下旬～9月上旬：平年値の173% 7月上旬～9月上旬：平年値の58%						
2004年		20.2℃	0.5℃	1009mm	142%	663h	99%	5月25日／10月15日
-	4作目							
2005年		20.2℃	0.5℃	821mm	116%	631h	94%	5月25日／10月6日
1作目	5作目							
2006年		20.0℃	0.2℃	496mm	70%	644h	96%	5月25日／10月5日
2作目	6作目	5月下旬～9月下旬：平年値の57%						
2007年		20.4℃	0.7℃	769mm	108%	792h	118%	5月22日／10月10日
3作目	7作目	6月中旬～7月上旬：平年値の167%						
2008年		19.8℃	0.1℃	607mm	86%	695h	104%	5月22日／10月1日
4作目	8作目	6月中旬～下旬：平年値の29%						
2009年		19.6℃	-0.1℃	634mm	89%	638h	95%	5月20日／10月2日
5作目	9作目	7月、9月：平年値の159%、34%						
2010年		21.7℃	2.0℃	903mm	127%	688h	103%	5月18日／10月1日
-	10作目	6月上旬～9月中旬：平年値+2.5℃ 8月上旬、中旬：平年値の5%、387%						
2011年		20.8℃	1.0℃	800mm	113%	677h	101%	5月25日／10月5日
-	11作目	6月中旬～7月中旬：平年値+2.8℃						
2012年		21.8℃	2.1℃	392mm	55%	812h	121%	5月22日／10月3日
-	12作目	7月上旬～10月上旬：平年値+2.8℃ 8月下旬から9月上旬：平年値の33% 8月下旬：平年値の206%						
2013年		21.0℃	1.3℃	991mm	140%	676h	101%	5月22日／10月2日
-	13作目	8月中旬：平年値+2.5℃ 7月上旬～8月上旬：平年値の262%						
2014年		20.6℃	0.9℃	687mm	97%	767h	114%	5月20日／10月2日
-	14作目	5月下旬～8月上旬：平年値+2.0℃						
2015年		20.7℃	0.9℃	511mm	72%	788h	117%	5月22日／10月1日
-	15作目	5月下旬～8月上旬：平年値+2.0℃ 8月上旬：平年値の0%						

期間平均および期間合計は各年の5月下旬から10月上旬までの平均および合計を示す。

### Ⅲ 結果および考察

#### 1. ダイズ5年連作による土壤生産力の変化

##### 1) 収量と連作年数の関係

供試した4タイプの土壤についてダイズの5年連作における収量、莢数および百粒重の結果を図1に示した。各品種・系統の収量、莢数、百粒重はいずれも連作年数の違いによって異なった。すなわち、収量と莢数は1年目で最高となったが、百粒重は1年目または3年目で最も高かった。灰色低地土、黄色土およびアロフェン質黒ボク土については、「リュウホウ」および「おおすず」の収量は2年目を除くと、連作年数に伴って次第に低下したが、「T201」の収量は2年目を含めて次第に低下した。一方、非アロフェン質黒ボク土では「リュウホウ」および「おおすず」の収量は2年目を含めて連作年数に伴って次第に低下したが、「T201」の収量は連作3年目で最も低くなった。

連作2年目に当たる2006年の5月下旬から9月下旬までの降水量は平年の57%に過ぎなかったこと（表2）から、連作2年目の「リュウホウ」および「おおすず」では生育期間中の土壤水分の不足によって根粒活性が低下し（桑原 1988）、莢数や百粒重が低下して低収に至ったと推察される。一方、連作2年目の土壤水分条件下で根粒非着生系統「T201」の収量はほとんど影響を受けなかった。ダイズと共生関係にある根粒と比べてダイズ自体は土壤水分不足の影響を受けにくいことから（桑原 1988）、連作2年目で「T201」は大幅な減収とならなかったと考えられる。

##### 2) 収量と土壤タイプの関係

各品種・系統の収量は土壤タイプの違いによって異なり、灰色低地土で比較的高く、黄色土で低かった（図1）。「リュウホウ」および「おおすず」では莢数は土壤タイプの違いによって異なったが、百粒重は土壤タイプの違いと関係がなく、両品種の土壤

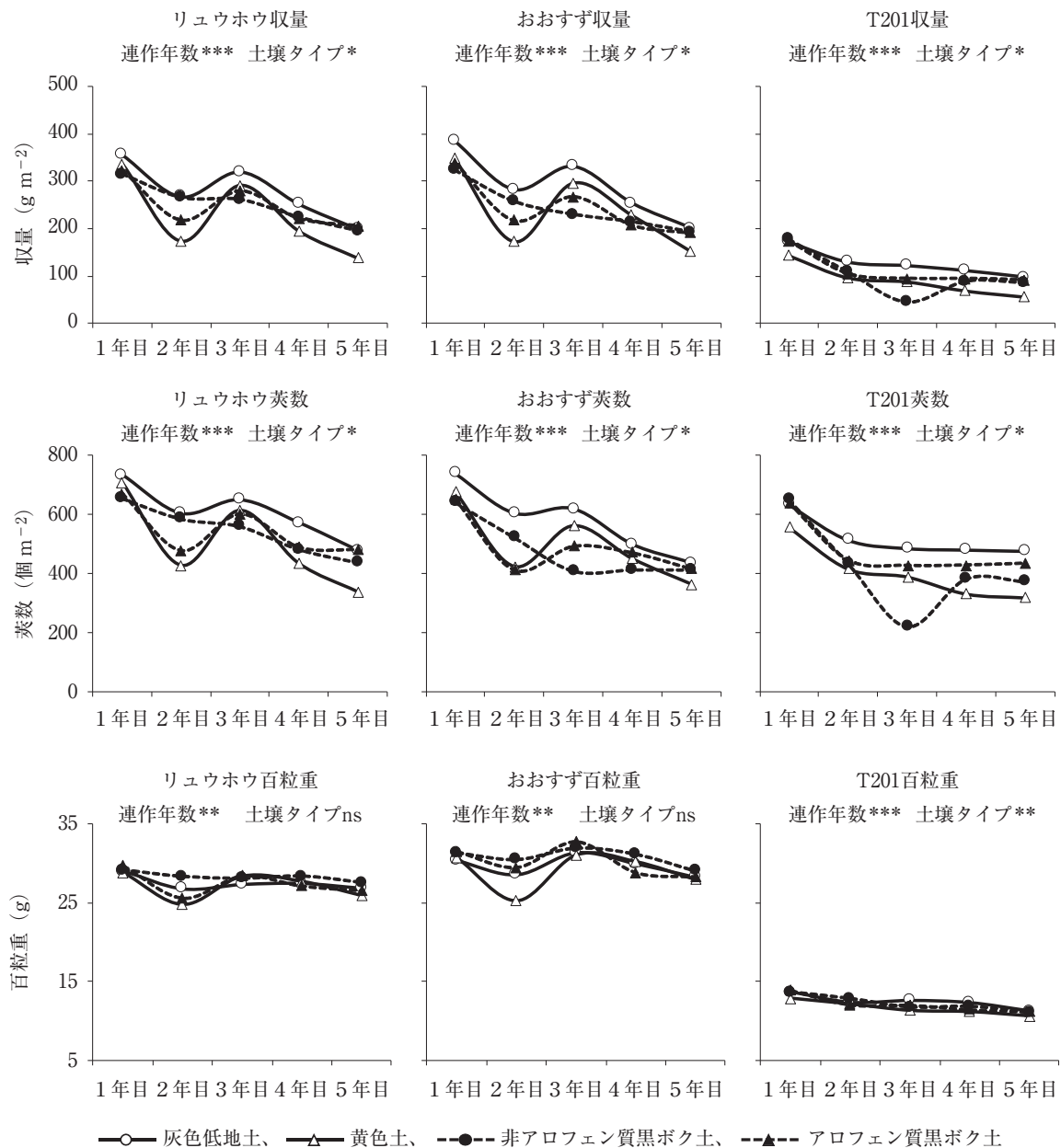


図1 ダイズ5年連作における収量、莢数および百粒重の推移  
 ns  $P > 0.05$ , \*  $P < 0.05$ , \*\*  $P < 0.01$ , \*\*\*  $P < 0.001$  (繰り返しのない二元配置分散分析)。

タイプ別の収量は莢数の違いとよく対応した。また、両品種の連作2年目の減収は黄色土で最も顕著であり、莢数だけでなく百粒重も低下したことから、黄色土ではその他の土壌と比べて土壌水分不足の影響が強かったと考えられる。一方、両品種とも連作3年目に非アロフェン質黒ボク土でその他の土壌と比べて低収となった。

「T201」では莢数と百粒重のどちらも土壌タイプの違いの影響を受けたことから、「リュウホウ」

や「おおすず」と異なり、「T201」の土壌タイプ別の収量は莢数と百粒重の両方の違いと対応した(図1)。また、連作3年目の「T201」の収量は非アロフェン質黒ボク土でその他の土壌と比べて低く、莢数の著しい低下が影響していた。

### 3) 土壌化学性と収量の関係

ダイズ5年連作における各土壌の化学性8項目の推移を図2に示した。pH(H<sub>2</sub>O)、可給態窒素、可給態リン酸、交換性カリウム、交換性カルシウム、

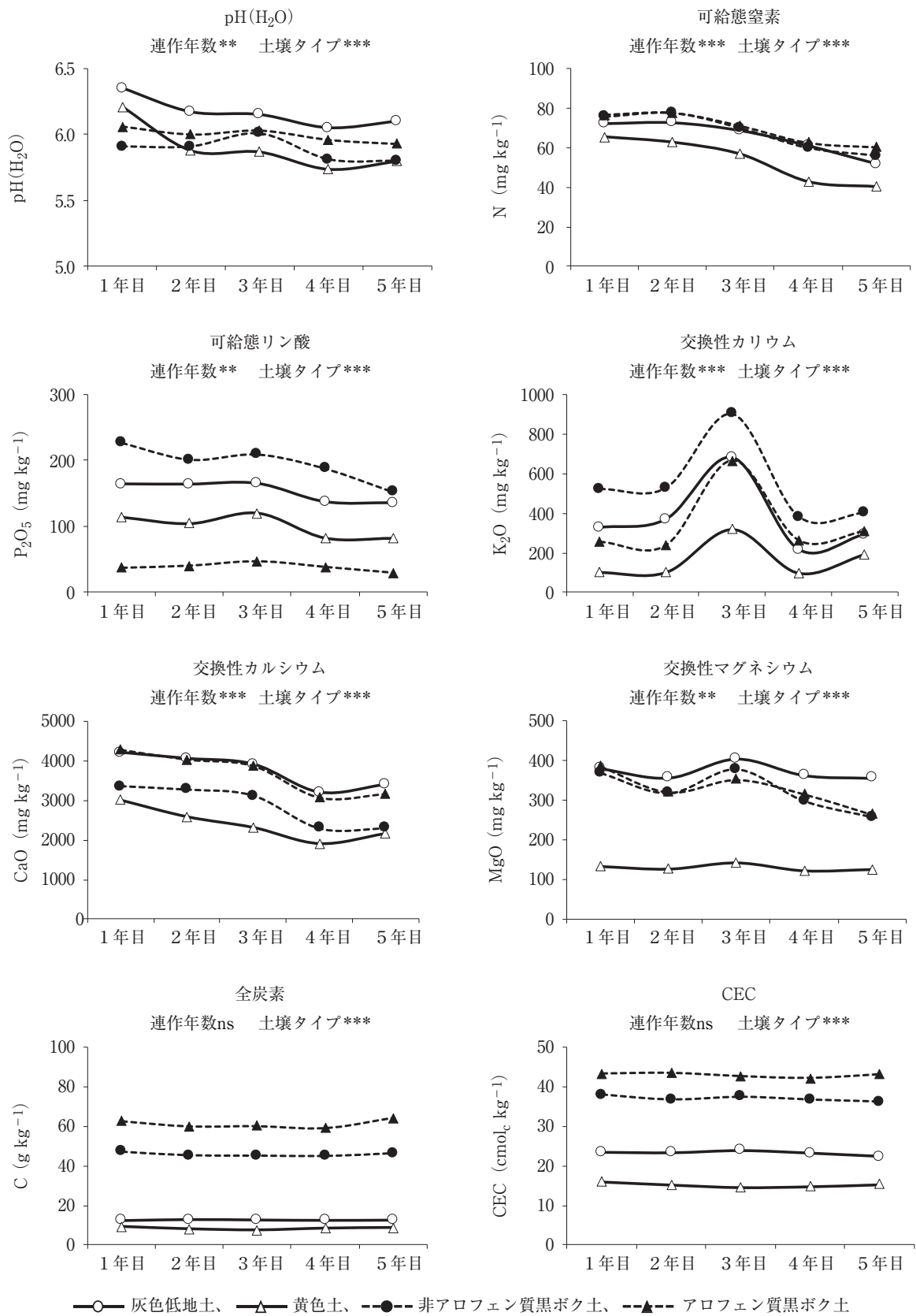


図2 ダイズの5年連作における土壤化学性の推移

ns  $P > 0.05$ , \*\*  $P < 0.01$ , \*\*\*  $P < 0.001$  (繰り返しのない二元配置分散分析)。

交換性マグネシウムはいずれも連作年数と土壌タイプの両方の違いによって異なった。一方、全炭素とCECは連作年数との関係が認められず、安定していたが、土壌タイプの違いによって異なり、アロフェン質および非アロフェン質の両黒ボク土で高く、灰色低地土および黄色土で低かった。

全炭素とCECを除く化学性6項目について連作年数との関係で見れば、各土壌で交換性カリウムは連作3年目で明瞭に高く、可給態リン酸や交換性マグネシウムも3年目で高まる傾向が見られた。しかし、pH(H<sub>2</sub>O)、可給態窒素および交換性カルシウムは1年目で比較的高く、その後は次第に低下する傾向となった。ここで、土壌化学性のデータは各年次のダイズ栽培前の状況を示すため、連作3年目で交換性カリウム等が高かったことは連作2年目のダイズ収穫後にカリウム等が土壌中に蓄積していたことを示す。前述のとおり連作2年目(2006年)は平年と比べて降水量が少なく、土壌水分が不足したことから、根粒活性の低下に加えて、水を介してのカリウム等の吸収が抑制され、施肥に伴うカリウム、リン酸およびマグネシウムの多くが土壌中に残存したと考えられる。また、連作3年目(2007年)は平年並の降水量があったこと(表2)から、灰色低地土、黄色土およびアロフェン質黒ボク土の場合、適度な土壌水分条件下で根粒活性が高く保たれるとともに、カリウム等の吸収が促進され、2年目と比べて増収したと推察される。カリウムは窒素に次いで吸収量が多く、カリウムの供給が不足すると、莢数や百粒重が低下することから(石井 1984)、連作2年目の減収にはカリウム不足も関与した可能性が

ある。一方、非アロフェン質黒ボク土の場合、連作3年目の栽培前に交換性カリウムは903 mg kg<sup>-1</sup>に達し、交換性カルシウム：マグネシウム：カリウムの当量比が76：13：13であったが、施肥後にカリウムの比率はさらに高まったと推定される。地力増進基本方針における塩基組成の改善目標は(65~75)：(20~25)：(2~10)とされているため(農林水産省 2008)、非アロフェン質黒ボク土での連作3年目で土壌中のカリウム過剰によるマグネシウム欠乏が誘発された可能性がある。マグネシウムが欠乏すると、根粒の着生不良や落花・落莢のため、著しく減収する(田村 2003)。このことは非アロフェン質黒ボク土で連作3年目の莢数が連作2年目と比べて少なく、収量が低下したこと(図1)と合致する。特に、「T201」の莢数は連作3年目で著しく低く、低収となったことから、土壌中のマグネシウムの相対的な不足による減収が示唆される。

全炭素とCECを除く化学性6項目について土壌タイプとの関係で見れば、5年間を通して灰色低地土はそれ以外の土壌と比べて6項目の水準が比較的高く(図2)、ダイズ生育に好適であったことから、5年間の平均収量が灰色低地土で最も高かった(表3)と推察される。逆に、黄色土は総じて化学性が不良であったこと(図2)に加え、物理性も不良であったため、5年間の平均収量が黄色土で最も低かった(表3)と考えられる。特に、連作2年目は降水量が少なかったことから、黄色土特有の乾燥によって固結するという物理性の欠陥がダイズ根の伸張を妨げてカリウム等の吸収を抑制し、減収を助長した可能性がある。一方、非アロフェン質黒ボク土は

表3 ダイズ5年連作における収量の平均値、変動係数および5年目の相対値

	品種・系統	灰色低地土	黄色土	非アロフェン質黒ボク土	アロフェン質黒ボク土
平均収量 (g m <sup>-2</sup> )	リュウホウ	279	227	252	249
	おおすず	291	239	244	244
	T201	127	90	101	112
変動係数	リュウホウ	0.22	0.37	0.18	0.20
	おおすず	0.25	0.34	0.21	0.24
	T201	0.22	0.37	0.48	0.31
5年目の相対値	リュウホウ	0.56	0.41	0.62	0.64
	おおすず	0.52	0.44	0.59	0.56
	T201	0.56	0.39	0.48	0.52

5年目の相対値 = 5年目の収量 / 1年目の収量。

平均収量は品種・系統 ( $P < 0.001$ ) および土壌タイプ ( $P < 0.01$ ) の違いによって異なる (繰り返しのない二元配置分散分析)。

5年目の相対値は土壌タイプ ( $P < 0.05$ ) の違いによって異なる (繰り返しのない二元配置分散分析)。



pH(H<sub>2</sub>O) が、アロフェン質黒ボク土は可給態リン酸がそれぞれ灰色低地土と比べて明瞭に低かったことから、これらが両黒ボク土の平均収量の低さ（表3）に影響したと推察される。また、「T201」の収量の変動係数が非アロフェン質黒ボク土で0.48と最も高くなった（表3）のは、連作3年目の土壤中のカリウム過剰によるマグネシウムの相対的な不足による低収が関係していた。

4) ダイズ連作に伴う減収要因

各品種・系統の連作5年目の収量の相対値（=5年目の収量/1年目の収量）は黄色土で0.4程度と最も低かったこと（表3）から、黄色土で減収しやすいことが示された。また、連作5年目のpH(H<sub>2</sub>O)および可給態窒素の相対値は黄色土でそれぞれ0.93、0.62と最も低かったこと（表4）から、これら2項目は黄色土で最も低下しやすかった。したがって、連作5年目に黄色土で最も減収した要因として、土壤pHと可給態窒素の低下が挙げられる。灰色低地土、非アロフェン質黒ボク土およびアロフェン質黒ボク土でも連作5年目の可給態窒素の相対値は0.71~0.79と低かったことから、可給態窒素の低下は主要な減収要因と考えられる。一方、これらの3土壤でpH(H<sub>2</sub>O)の相対値は0.96~0.98となり、土壤pHの低下は顕著ではなかった。しかし、交換性カルシウムの相対値が灰色低地土で0.81、非アロフェン質黒ボク土で0.69、アロフェン質黒ボク土で0.74と低かったことから、土壤pHの低下は著しく

なかったものの、土壤中のカルシウムの減少が示された。

一方、4土壤の交換性カリウムの変動係数は0.38~0.59となり、それ以外の化学性項目の変動係数と比べて高かったこと（表4）については、連作3年目の交換性カリウムの急激な増加（図2）が強く影響していた。これは、前述のとおり連作2年目の土壤水分の不足によってダイズによるカリウム吸収が抑制され、施肥したカリウムの多くが収穫後も土壤中に残存したためである。また、交換性カリウムが連作4年目と比べて5年目でやや増加傾向となったこと（図2）は連作4年目（2008年）の降水量が平年の86%とやや少なかったこと（表2）が影響したと考えられる。交換性カリウムは降水量が少ない年に蓄積しやすく、その翌年にマグネシウムの相対的な不足を招くことから、翌年のカリウム施肥量に留意する必要がある。連作5年目の交換性カリウムの相対値は黄色土で1.88と最も高かったこと（表4）から、黄色土で交換性カリウムが蓄積しやすいことが示された。黄色土では交換性カリウムがその他の土壤と比べて低かった（図2）が、5年間で塩基組成に占めるカリウムの比率が2%から5%に高まったことから、特に注意を払う必要がある。

2. 牛ふん堆肥連用による土壤生産力の変化

1) ダイズ収量

牛ふん堆肥区と化学肥料区におけるダイズ連作3年目から15年目までのダイズ収量を図3に示した。

表4 ダイズ5年連作における土壤化学性の変動係数および5年目の相対値

項目		灰色低地土	黄色土	非アロフェン質黒ボク土	アロフェン質黒ボク土
変動係数	pH(H <sub>2</sub> O)	0.02	0.03	0.01	0.01
	可給態窒素	0.14	0.21	0.14	0.11
	可給態リン酸	0.10	0.17	0.14	0.17
	交換性カリウム	0.47	0.59	0.38	0.52
	交換性カルシウム	0.11	0.18	0.18	0.15
	交換性マグネシウム	0.06	0.06	0.15	0.14
	全炭素	0.02	0.09	0.02	0.03
	CEC	0.02	0.04	0.02	0.01
	5年目の相対値	pH(H <sub>2</sub> O)	0.96	0.93	0.98
可給態窒素		0.71	0.62	0.74	0.79
可給態リン酸		0.83	0.73	0.67	0.79
交換性カリウム		0.90	1.88	0.77	1.21
交換性カルシウム		0.81	0.71	0.69	0.74
交換性マグネシウム		0.94	0.94	0.70	0.69
全炭素		1.02	0.94	0.98	1.03
CEC		0.95	0.96	0.95	1.00

5年目の相対値 = 5年目の化学性の値 / 1年目の化学性の値。

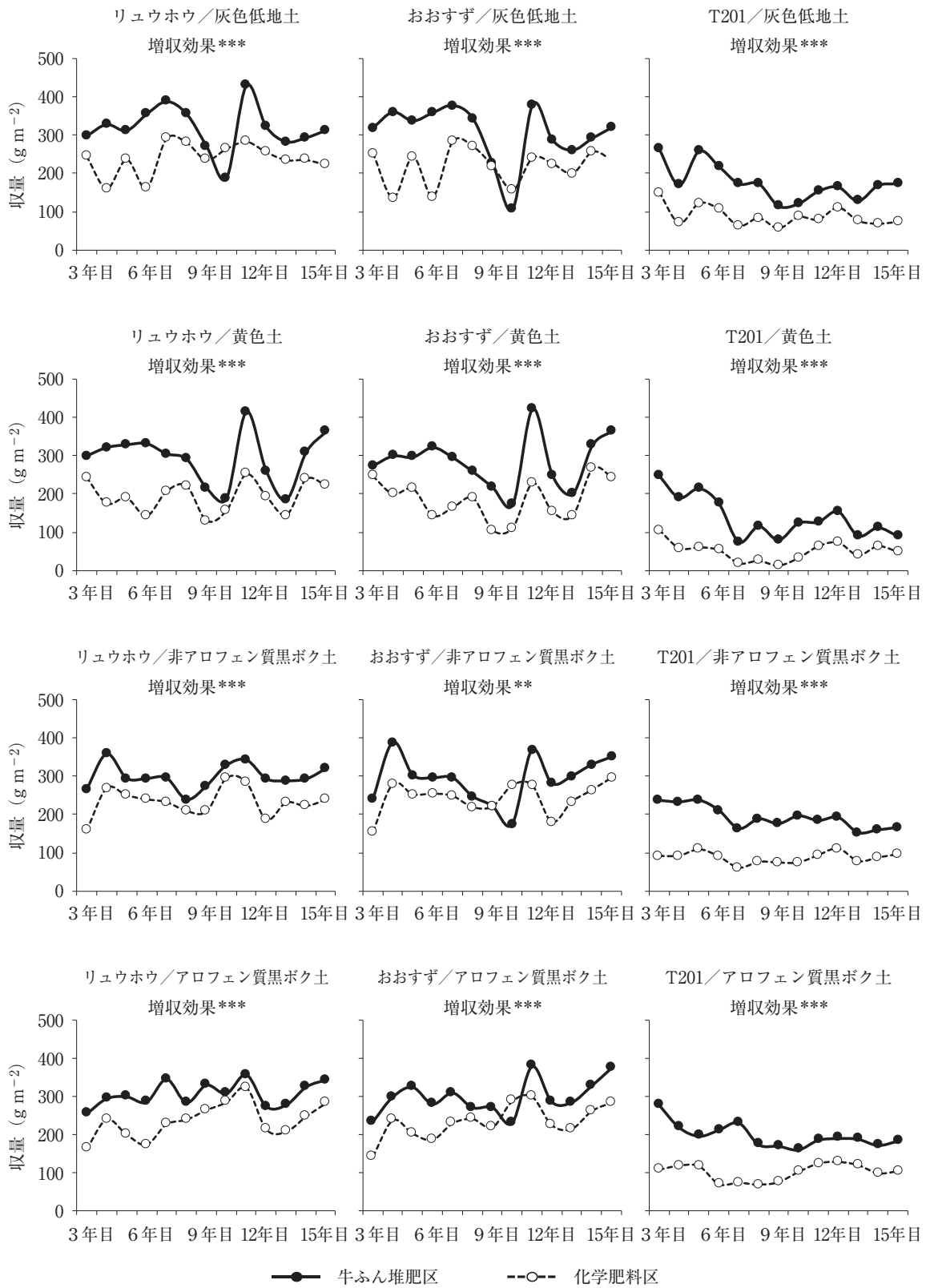


図3 牛ふん堆肥区および化学肥料区のダイズ収量の推移

増収効果は牛ふん堆肥区の収量と化学肥料区の収量について対応のあるサンプルのt検定の結果を示す (\*\*  $P < 0.01$ , \*\*\*  $P < 0.001$ )。

表5 各土壤の牛ふん堆肥連用によるダイズ増収率

品種・系統		灰色低地土	黄色土	非アロフェン質黒ボク土	アロフェン質黒ボク土	比較
リュウホウ	3~15年目	1.33	1.51	1.28	1.29	*
	10年目除外	1.39	1.53	1.30	1.32	
おおすず	3~15年目	1.39	1.54	1.20	1.27	*
	10年目除外	1.43	1.54	1.26	1.32	
T201	3~15年目	1.99	2.72	2.21	1.97	ns
	10年目除外	2.04	2.66	2.18	2.00	

数値は増収率（＝牛ふん堆肥区の平均収量／化学肥料区の平均収量）を示す。比較は連作 3～15 年目と 10 年目除外の増収率について対応のあるサンプルの *t* 検定の結果を示す（ns *P* > 0.05、\* *P* < 0.05）。連作 10 年目除外の増収率は品種・系統（*P* < 0.001）および土壤タイプ（*P* < 0.05）の違いによって異なる（繰り返しのない二元配置分散分析）。

「リュウホウ」と「おおすず」の場合、各土壤で牛ふん堆肥区および化学肥料区の収量は年次によってそれぞれ変動が大きかった。特に、両品種の連作10年目で灰色低地土の牛ふん堆肥区の収量は化学肥料区の収量を下回るほど著しく低下し、黄色土の牛ふん堆肥区の収量は化学肥料区の収量程度まで低下した。また、非アロフェン質黒ボク土およびアロフェン質黒ボク土の牛ふん堆肥区での連作10年目の「おおすず」の収量は化学肥料区の収量を下回り、「リュウホウ」の収量は化学肥料区の収量程度となった。しかし、試験期間全体を通して各土壤で牛ふん堆肥区の収量は化学肥料区の収量と比べて概ね高く、牛ふん堆肥連用による増収効果が認められた。一方、「T201」の場合も各土壤で牛ふん堆肥区および化学肥料区の収量は年次によって変動が大きかったが、灰色低地土および黄色土では連作3年目で両区の収量が比較的高く、非アロフェン質黒ボク土およびアロフェン質黒ボク土では連作3年目で牛ふん堆肥区の収量が比較的高かった。「T201」については、各土壤の牛ふん堆肥区の収量は化学肥料区と比べて各年次で高かったことから、牛ふん堆肥連用による増収効果が明瞭であった。特に、連作10年目に各土壤の牛ふん堆肥区で「T201」は低収とならなかったことから、「リュウホウ」および「おおすず」の著しい低収は根粒窒素固定能の低下が主因であったと考えられる。

牛ふん堆肥連用による増収率（＝牛ふん堆肥区の平均収量／化学肥料区の平均収量）を表5に示した。「リュウホウ」および「おおすず」の収量は連作10年目に牛ふん堆肥区で低下が著しかったことから、連作10年目を除外すると、各土壤で両品種の増収率は概ね高まったが、「T201」の増収率はほとん

ど変わらなかった。また、連作10年目を除外した増収率は品種・系統および土壤タイプの違いによって異なった。品種・系統別では「T201」の増収率が比較的高くなったことから、「T201」は「リュウホウ」や「おおすず」と比べて牛ふん堆肥連用による増収効果が現れやすいことが示された。土壤タイプ別では黄色土で増収率が比較的高くなったことから、黄色土はその他の土壤と比べて牛ふん堆肥連用によって増収しやすかった。

牛ふん堆肥区および化学肥料区の収量の変動係数を表6に示した。「リュウホウ」および「おおすず」の場合、連作3年目から15年目までについて牛ふん堆肥区と化学肥料区の収量の変動係数の差は認められなかったが、連作10年目を除外すると、牛ふん堆肥区の変動係数が化学肥料区と比べて低くなった。このことから、両品種では連作10年目を例外とすると、牛ふん堆肥連用によって収量が安定化することが示された。一方、「T201」の場合、連作3～15年目および10年目除外のいずれも牛ふん堆肥区の収量の変動係数が化学肥料区と比べて低く、牛ふん堆肥連用によって収量が安定化した。また、各品種・系統について連作10年目を除外すると、牛ふん堆肥区の収量の変動係数は黄色土で高かったことから、黄色土では牛ふん堆肥連用条件下でも収量が増収しやすかった。

牛ふん堆肥区および化学肥料区の莢数の推移を図4に、百粒重の推移を図5にそれぞれ示した。試験期間全体について各土壤で各品種・系統の莢数および百粒重は化学肥料区と比べて牛ふん堆肥区で高かったことから、牛ふん堆肥連用による莢数および百粒重の増加が認められ、これらが増収に結びついた。「リュウホウ」および「おおすず」の連作10年

表6 牛ふん堆肥区および化学肥料区のダイズ収量の変動係数

品種・系統	処理区	灰色低地土	黄色土	非アロフェン質黒ボク土	アロフェン質黒ボク土	比較
連作3年目から15年目まで						
リュウホウ	牛ふん堆肥	0.19	0.23	0.11	0.10	ns
	化学肥料	0.17	0.22	0.16	0.19	
おおすず	牛ふん堆肥	0.25	0.24	0.21	0.15	ns
	化学肥料	0.22	0.29	0.17	0.19	
T201	牛ふん堆肥	0.27	0.40	0.16	0.16	*
	化学肥料	0.30	0.49	0.17	0.22	
連作10年目を除外						
リュウホウ	牛ふん堆肥	0.14	0.20	0.11	0.11	*
	化学肥料	0.18	0.21	0.15	0.20	
おおすず	牛ふん堆肥	0.15	0.21	0.17	0.14	*
	化学肥料	0.21	0.26	0.17	0.19	
T201	牛ふん堆肥	0.25	0.41	0.16	0.15	*
	化学肥料	0.32	0.48	0.17	0.23	

比較は各品種・系統の牛ふん堆肥区と化学肥料区の収量の変動係数について対応のあるサンプルの  $t$  検定の結果を示す (ns  $P>0.05$ , \*  $P<0.05$ )。

連作10年目以外の牛ふん堆肥区の収量の変動係数は品種・系統 ( $P<0.1$ ) および土壌タイプ ( $P<0.05$ ) の違いによって異なる (繰り返しのない二元配置分散分析)。

目に着目すると、莢数および百粒重は化学肥料区と比べて牛ふん堆肥区で概して低いかまたは両区の差が小さかった。一方、連作10年目にはマメシンクイガによる食害粒が多く、虫害粒数率は全区平均で20%に達し、外観品質調査を行った連作6年目以降の平均値(9%)の約2倍となった。その他、連作10年目にしわ粒が多く、完全粒数率は牛ふん堆肥区で60%、化学肥料区で65%となり、連作6年目以降の平均値(牛ふん堆肥区、化学肥料区とも76%)を大幅に下回った。「リュウホウ」および「おおすず」の連作10年目の牛ふん堆肥区における低収には完全粒数率の低下も関与していた。

連作試験期間中の病虫害の発生については、上記のマメシンクイガによる被害を除き、特に著しくなかった。ダイズを連作すると、ダイズシストセンチュウによる被害が懸念されるが、抵抗性が弱の「おおすず」でも被害は認められなかった。また、連作試験を実施したコンクリート枠圃場は概して排水が良好であったことから、黒根腐病などが発生しにくかったと考えられる。一方、連作試験期間中、毎作後に落葉以外の収穫残渣はできるだけ搬出したことが病虫害発生を抑制した可能性がある。

## 2) 土壌理化学性と収量の関係

牛ふん堆肥区および化学肥料区の連作3年目から10年目までの栽培前の土壌化学性の推移を図6に示した。各土壌について化学性8項目はいずれも化学

肥料区と比べて牛ふん堆肥区で高くなったことから、牛ふん堆肥連用による化学性の改善効果が明瞭に認められた。連作9年目のダイズ収穫後の土壌物理性を表7に示した。4タイプの土壌全体で牛ふん堆肥区は化学肥料区と比べて孔隙率が高く、乾燥密度が低く、飽和透水係数が高くなったことから、牛ふん堆肥連用による土壌の膨軟化と透水性の向上が示された。したがって、各品種・系統の牛ふん堆肥連用による増収効果は土壌の化学性および物理性の改善によるものと解釈される。増収率が「リュウホウ」や「おおすず」と比べて「T201」で高かったこと(表5)は土壌理化学性の改善が「T201」の増収に結びつきやすかったためと理解される。また、4土壌のうち黄色土で増収率が最も高かったこと(表5)については、黄色土はその他の土壌と比べて化学性や物理性が元々不良であったこと(図6、表7)から、牛ふん堆肥連用による土壌理化学性の改善が収量に反映されやすかったためと考えられる。黄色土は排水不良のため、その他の土壌と異なり、降雨後に地面に水溜まりが生じやすかった。黄色土の飽和透水係数によれば、牛ふん堆肥区は化学肥料区と比べて排水性が2.7倍に高まったことから、牛ふん堆肥区では通気性が確保されやすく、降雨後に根粒に酸素が供給されやすかったと推察される(阿江・仁紫 1983)。

「リュウホウ」および「おおすず」の連作10年目

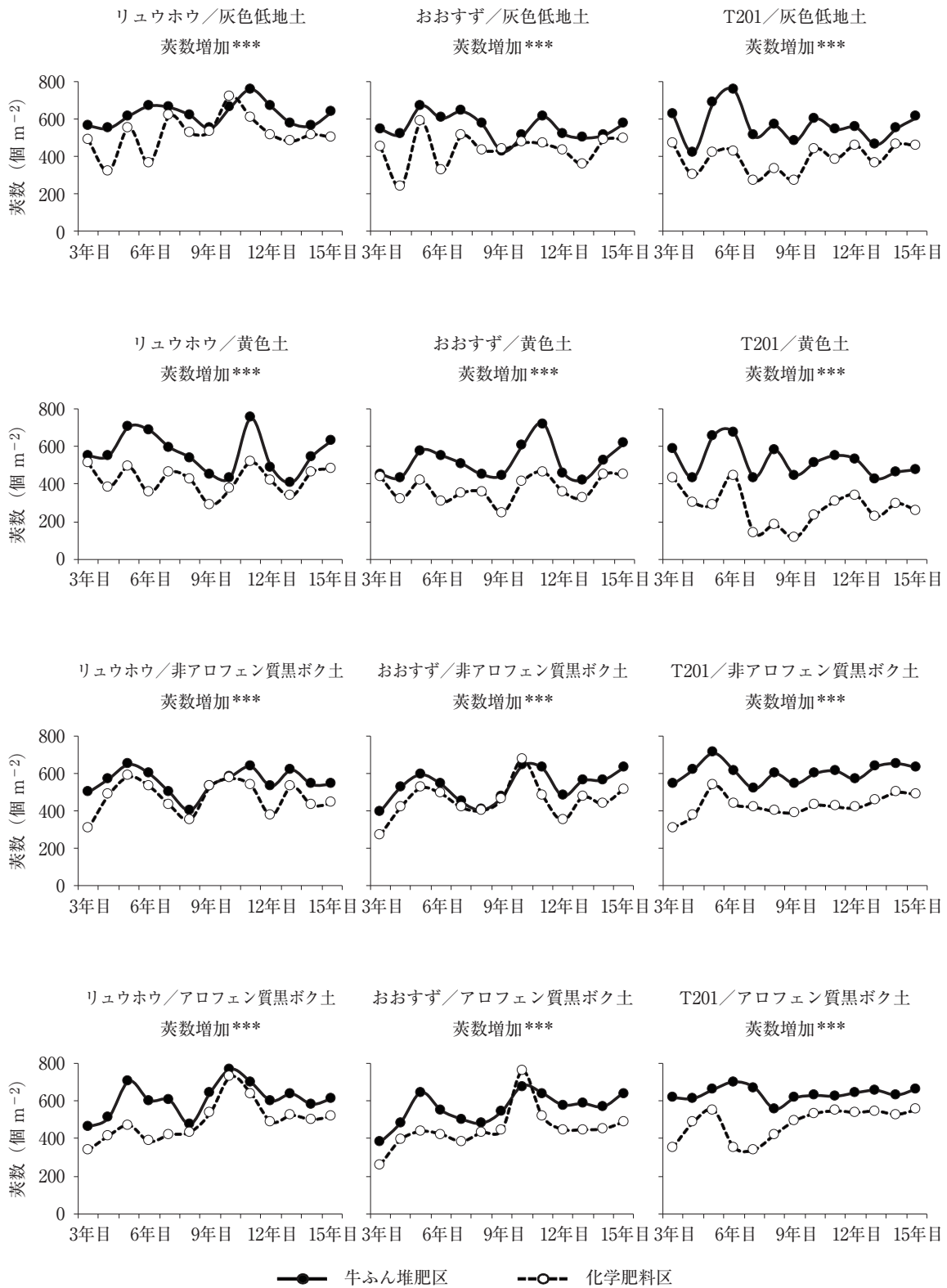


図4 牛ふん堆肥区および化学肥料区のダイズ莢数の推移

莢数増加は牛ふん堆肥区の莢数と化学肥料区の莢数について対応のあるサンプルの *t* 検定の結果を示す (\*\*\*)  $P < 0.001$ 。

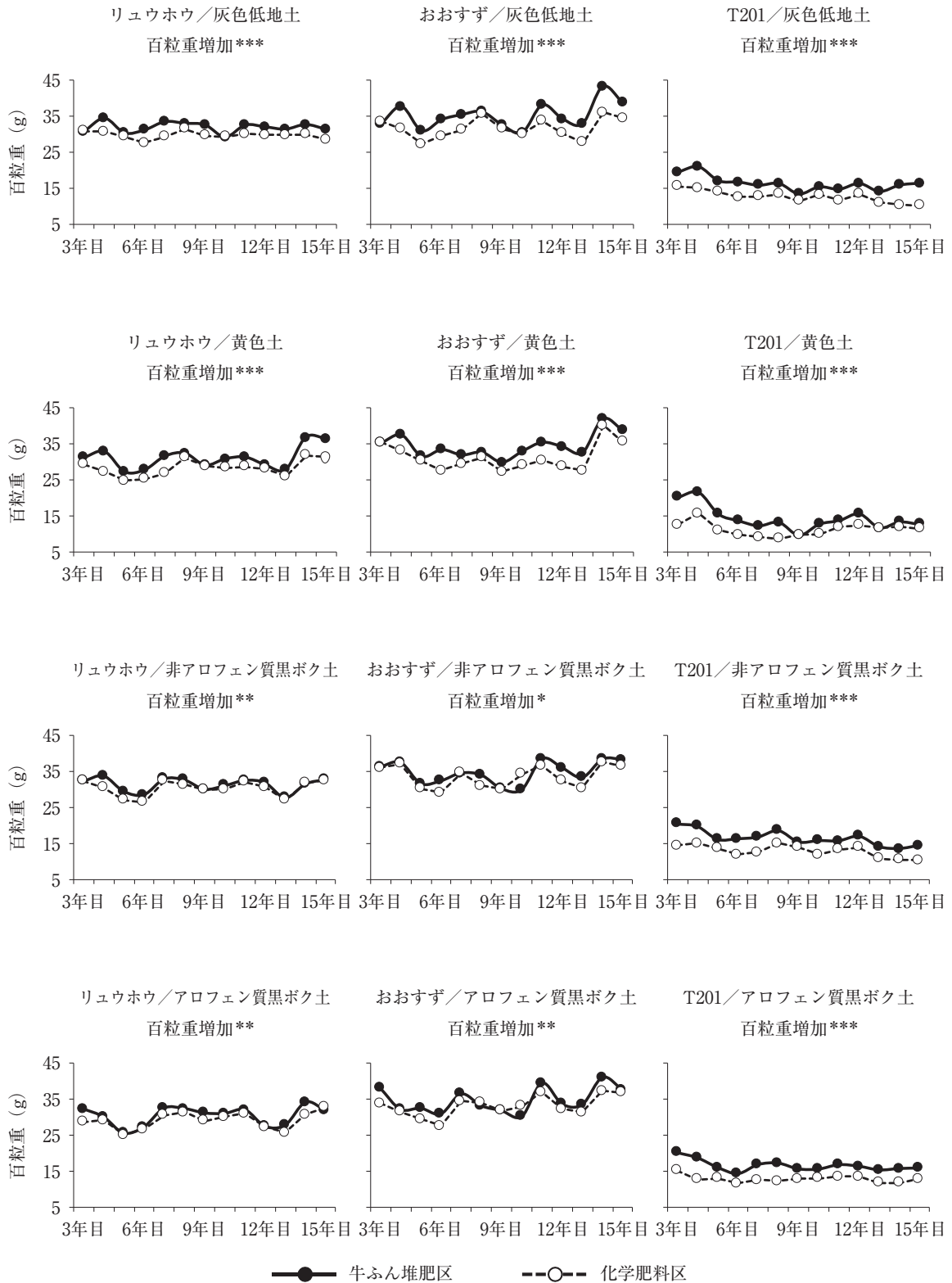


図5 牛ふん堆肥区および化学肥料区のダイズ百粒重の推移

百粒重増加は牛ふん堆肥区の百粒重と化学肥料区の百粒重について対応のあるサンプルの  $t$  検定の結果を示す (\* $P < 0.05$ , \*\* $P < 0.01$ , \*\*\* $P < 0.001$ )。

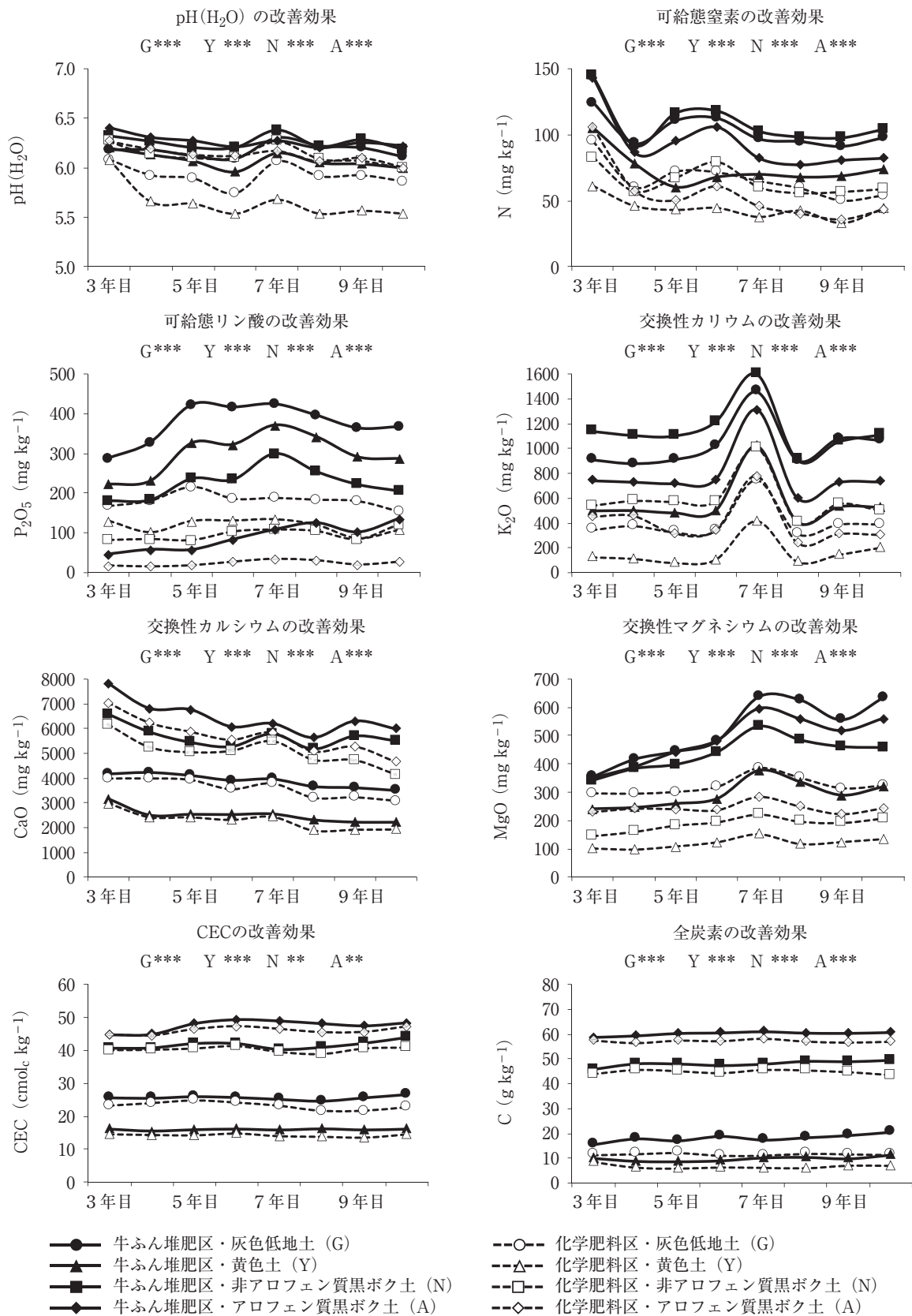


図6 牛ふん堆肥区および化学肥料区の土壤化学性の推移

改善効果は各土壤の牛ふん堆肥区と化学肥料区について対応のあるサンプルの *t* 検定の結果を示す (\*\* *P*<0.01, \*\*\* *P*<0.001)。

表7 牛ふん堆肥区と化学肥料区の孔隙率、乾燥密度および飽和透水係数

土壌タイプ	処理区	孔隙率 (%)	乾燥密度 (Mg m <sup>-3</sup> )	飽和透水係数 (cm s <sup>-1</sup> )
灰色低地土	牛ふん堆肥	66.4	0.93	1.2×10 <sup>-2</sup>
	化学肥料	60.3	1.10	8.1×10 <sup>-3</sup>
黄色土	牛ふん堆肥	59.8	1.10	6.4×10 <sup>-5</sup>
	化学肥料	58.3	1.14	2.4×10 <sup>-5</sup>
非アロフェン質黒ボク土	牛ふん堆肥	75.0	0.69	2.1×10 <sup>-2</sup>
	化学肥料	70.7	0.81	8.2×10 <sup>-3</sup>
アロフェン質黒ボク土	牛ふん堆肥	77.5	0.61	1.6×10 <sup>-2</sup>
	化学肥料	76.9	0.64	9.5×10 <sup>-3</sup>
比較		*	*	+

2009年10月5日(9作収穫後)に採取した円筒試料についての測定値を示す。

比較は4土壌の牛ふん堆肥区と化学肥料区について対応のあるサンプルのt検定の結果を示す(+P<0.1、\*P<0.05)。

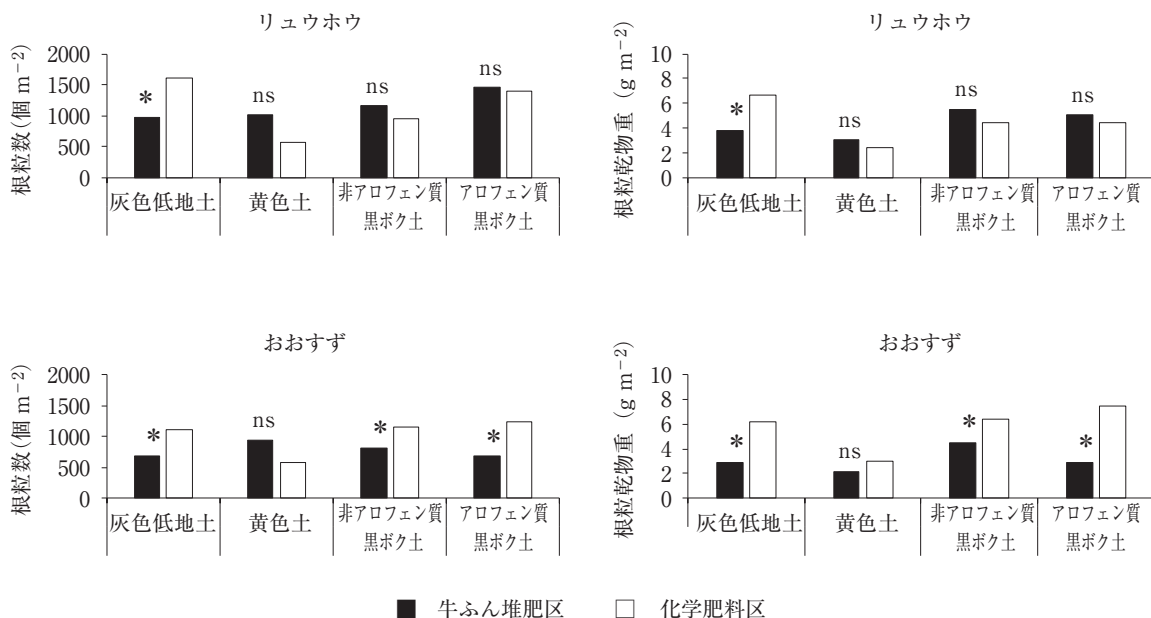


図7 「リュウホウ」および「おおすず」の2010年開花期の根粒数と根粒乾物重

2010年7月27日調査。棒の上に付けた記号は牛ふん堆肥区と化学肥料区の平均値の差についてt検定の結果を示す (ns P>0.05、\* P<0.05)。

(2010年)には各土壌で牛ふん堆肥区での低収が顕著となった(図3)。2010年6月上旬から9月中旬までの平均気温は平年と比べて2.5℃高く、しかも8月に極端な少雨と多雨が記録された(表2)。各土壌について連作10年目の栽培前の可給態窒素は化学肥料区と比べて牛ふん堆肥区で明瞭に高かったこと(図6)から、特に牛ふん堆肥区では土壌からの窒素供給量が高温の影響により平年と比べて多かったと推察される。窒素供給量が多いと、土壌中の硝酸態窒素濃度が高まり、根粒の着生および窒素固定

活性が抑制される(田村 1997)。2010年の「リュウホウ」および「おおすず」の開花期の根粒数と根粒乾物重の調査結果を図7に示した。両品種について根粒数と根粒乾物重は灰色低地土では化学肥料区と比べて牛ふん堆肥区で低かったが、黄色土では両区の差が認められなかった。非アロフェン質黒ボク土およびアロフェン質黒ボク土では「おおすず」は根粒数と根粒乾物重が牛ふん堆肥区で低かったが、「リュウホウ」は両区の差がなかった。根粒乾物重は根粒窒素固定量を左右することから、灰色低地土



では化学肥料区と比べて牛ふん堆肥区で根粒窒素固定量が少なかった可能性があり、これが牛ふん堆肥区での低収に関連したと推察される。一方、黄色土はその他の土壌と比べて物理性が不良であったため、連作10年目の登熟期の少雨と多雨は牛ふん堆肥区および化学肥料区の根粒窒素固定量およびダイズ生育を強く制限し、両区で低収に至ったと推察される。また、両黒ボク土の場合、「おおすず」では化学肥料区と比べて牛ふん堆肥区で根粒窒素固定量が少なかったが、「リュウホウ」では両区で変わらなかったことがそれぞれの収量に影響したと考えられる。

黄色土の化学肥料区の「リュウホウ」および「おおすず」の収量が連作10年目（2010年）と同程度に低かったのは、連作6年目、9年目および13年目となった（図3）。連作6年目（2006年）は5月下旬から9月下旬までの少雨、9年目（2009年）は7月の多雨と9月の少雨、13年目（2013年）は7月上旬から8月上旬までの多雨がそれぞれ特徴的であった（表2）。黄色土の牛ふん堆肥区の収量は連作9年目および13年目で連作10年目と同程度に低かった。物理性が良好な灰色低地土の牛ふん堆肥区でも連作9年目および13年目の収量は比較的低かったことから、両年の降雨条件下では牛ふん堆肥連用による物理性の改善によっても収量が高まりにくかったと考えられる。非アロフェン質黒ボク土およびアロフェン質黒ボク土の牛ふん堆肥区については、連作10年目以外では「リュウホウ」で3年目と8年目、「おおすず」で3年目、8年目、9年目の収量が比較的低かった。連作3年目（2003年）は7月上旬から9月上旬まで気温が平年と比べて2.1℃低く、日照時間が平年の58%と短かったことから、東北地域では1993年以来の水稲冷害が発生した（三浦 2004）。「リュウホウ」および「おおすず」の連作3年目で非アロフェン質黒ボク土およびアロフェン質黒ボク土の場合、化学肥料区では莢数が少なく、低収となったが、牛ふん堆肥区では莢数が多く、増収した（図4）。一方、灰色低地土および黄色土の場合、化学肥料区でも莢数が多く、収量が比較的高かったことから、両黒ボク土と比べて低温・寡照の影響を受けにくかったと考えられる。「T201」の連作3年目では各土壌の牛ふん堆肥区で莢数と百粒重が化学肥料区と比べて高く、増収した。また、連作8年目（2008年）は6月中旬から下旬までの少雨によって初期生育が抑えられ、両黒ボク土では牛ふん

堆肥区でも「リュウホウ」および「おおすず」で莢数が低下し、低収に至ったと考えられる。

一方、黄色土の牛ふん堆肥区で「リュウホウ」および「おおすず」の連作11年目に最も多収となった（図3）。連作11年目（2011年）の降水量が平年の約1割増かつ平均気温が平年と比べて1.0℃高かったこと（表2）から、好適な土壤水分および温度条件の下で土壤理化学的改善効果が加わり、莢数および百粒重が増加し（図4、図5）、収量が高まったと考えられる。その他の土壌の牛ふん堆肥区でも連作11年目に多収となったが、灰色低地土では連作7年目、非アロフェン質黒ボク土では連作4年目、アロフェン質黒ボク土では連作7年目と15年目でも比較的収量が高かったことから、土壤タイプによる差が認められた。

黄色土の牛ふん堆肥区で連作7年目は前年と比べてむしろ減収し、灰色低地土やアロフェン質黒ボク土とは異なった（図3）。連作7年目の栽培前には交換性カリウムが前年と比べて明瞭に高く（図6）、塩基組成に占めるカリウムの比率が16%となったことから、マグネシウムが相対的に不足し、増収に至らなかったと考えられる。非アロフェン質黒ボク土の牛ふん堆肥区でも7年目はカリウムの比率が13%と高く、マグネシウムの相対的な不足の影響で前年と収量が変わらない程度となったことから、塩基組成に占めるカリウムの比率は重要であることが示された。

### 3) 土壤化学性の変動

土壤化学性のうち、pH(H<sub>2</sub>O)、可給態窒素および交換性カルシウムについては、連作3年目から10年目まで概ね低下の傾向が認められた（図6）。このうち、pH(H<sub>2</sub>O)と可給態窒素について連作3年目から15年目までの平均値、変動係数および改善率（＝牛ふん堆肥区の平均値／化学肥料区の平均値）を表8に示した。pH(H<sub>2</sub>O)については、各土壌で牛ふん堆肥区の平均値は化学肥料区の平均値と比べて高かったことから、各土壌で牛ふん堆肥連用によって土壤pHが高く維持された。灰色低地土および黄色土での両区の変動係数は非アロフェン質黒ボク土およびアロフェン質黒ボク土での両区の変動係数と比べて高かったことから、灰色低地土と黄色土では牛ふん堆肥連用条件でも土壤pHが変動しやすかった。また、両黒ボク土での改善率1.03と比べて黄色土での改善率は1.11と高かったことから、黄色土では牛ふん堆肥連用によって土壤pHの低下が抑制

表8 牛ふん堆肥区および化学肥料区の pH(H<sub>2</sub>O) と可給態窒素の平均値、変動係数および改善率

	処理区	灰色低地土	黄色土	非アロフェン質黒ボク土	アロフェン質黒ボク土
pH(H <sub>2</sub> O)					
平均値	牛ふん堆肥	6.2	6.2	6.3	6.3
	化学肥料	5.9	5.6	6.1	6.1
変動係数	牛ふん堆肥	0.02	0.03	0.01	0.01
	化学肥料	0.03	0.04	0.01	0.01
改善率		1.06	1.11	1.03	1.03
可給態窒素					
平均値	牛ふん堆肥	97	72	100	89
(mg kg <sup>-1</sup> )	化学肥料	59	43	57	51
変動係数	牛ふん堆肥	0.12	0.19	0.18	0.22
	化学肥料	0.26	0.25	0.23	0.35
改善率		1.65	1.67	1.75	1.76

連作3年目から15年目までのデータを対象とした数値を示す。  
改善率 = 牛ふん堆肥区の平均値 / 化学肥料区の平均値。

されやすかったと考えられる。

可給態窒素については、各土壌で牛ふん堆肥区の平均値は化学肥料区の平均値と比べて高かったことから、牛ふん堆肥連用によって可給態窒素は高く維持された。また、各土壌で牛ふん堆肥区の変動係数は化学肥料区の変動係数と比べて低かったことから、牛ふん堆肥連用条件で可給態窒素は変動しにくいことが示された。さらに、4土壌の改善率は1.65～1.76の範囲であり、土壌間の差が小さかったことから、牛ふん堆肥連用によって可給態窒素を高める効果は土壌タイプの違いによっても変わらないと考えられる。

土壌pHの低下は交換性カルシウムの低下と連動していると考えられる。カルシウムが欠乏すると、根粒着生が不良となることから(田村 2003)、ダイズ連作で土壌pHが変動しやすい黄色土や灰色低地土では牛ふん堆肥連用によって土壌pHの低下を抑制し、適切な土壌pHの範囲内(6.0～6.5)に維持することが特に重要である。一方、ダイズ地上部に集積する窒素のうち50～80%が根粒による固定窒素に依存することから(Akao 1991)、「リュウホウ」や「おおすず」の場合、連作に伴う土壌pHや可給態窒素の変動だけでなく、気象条件による根粒窒素固定量の変動もまた地上部の窒素集積量に影響し、収量の年次変動に関与したと考えられる。

### 3. 総合考察

ダイズ連作において表1に示した牛ふん堆肥連用条件下で土壌理化学性の改善によって減収の回避と収量の安定化が図られることが明らかとなった。

本研究におけるダイズ連作3年目から9年目までの1作当たりの養分収支(=投入量-搬出量)によれば、化学肥料区で窒素とカルシウムがマイナスとなったが、牛ふん堆肥区でいずれもプラスと評価された(三浦ら 2013)。化学肥料区で窒素およびカルシウムの収支がマイナスとなったことはこれらが土壌からの収奪によって不足することを示し、ダイズの持続的な安定生産が困難となる。上記のとおりダイズ連作において土壌化学性のうちでpH(H<sub>2</sub>O)、可給態窒素および交換性カルシウムは特に化学肥料区で低下傾向となったことは養分収支の観点からも支持される。一方、牛ふん堆肥区では窒素とカルシウムだけでなく、これら以外の養分も収支がプラスとなったことから、長期的には土壌中にこれらの養分が次第に蓄積することを示す。ダイズ連作における減収回避と収量安定化のためには、牛ふん堆肥連用によって不足する養分を補給することが不可欠である。しかし、牛ふん堆肥連用に当たっては養分の土壌蓄積に留意する必要がある。牛ふん堆肥区では可給態リン酸および交換性マグネシウムは蓄積傾向が著しかった(図6)。ダイズ15年連作試験後の跡地(2016年栽培前)で各土壌の牛ふん堆肥区の可給態リン酸は岩手県農作物施肥管理指針(岩手県2009)に示された土壌改良目標値(160 mg kg<sup>-1</sup>)をいずれも超えていた。特に、灰色低地土および黄色土の牛ふん堆肥区では300 mg kg<sup>-1</sup>を超えたことから、リン酸施肥量50%削減が可能な水準に達したと考えられる。牛ふん堆肥連用に当たっては土壌診断に基づく適切な施肥管理がきわめて重要である。ま

た、交換性マグネシウムは交換性カルシウムや交換性カリウムとのバランスが重要である。各土壌の牛ふん堆肥区で塩基組成に占めるマグネシウムの比率は年次に伴って高まる傾向にあり、牛ふん堆肥の長期連用によってマグネシウムの相対的な不足を招きにくい状況に変わってきた。

気象条件は年次変動が大きく、ダイズ収量に強く影響するが、牛ふん堆肥連用による土壌条件の改善は気象条件による生育・収量への影響を緩和することが示された。特に、黄色土では牛ふん堆肥連用によって土壌理化学性が改善されやすく、ダイズ収量の向上が顕著となった。記録的な高温条件となった連作10年目（2010年）では牛ふん堆肥連用による可給態窒素の増加が逆に減収を招いた。土壌からの窒素供給量が高温の影響により平年と比べて多いと、土壌中の硝酸態窒素濃度が高まり、根粒窒素固定量および地上部窒素集積量を低下させると考えられるが、土壌タイプ間および品種間の差異が大きく、さらなる検証が必要である。本研究のダイズ連作10年目の牛ふん堆肥区の減収には莢数および百粒重の低下が関与していた。一方、関東以西ではダイズの登熟期の高温による百粒重低下の現象が報告されてきたが、山形県庄内地域でも登熟期の高温が百粒重低下要因となっていることが明らかとなった（松田ら2011）。岩手県の2010年産のダイズは、登熟期の高温と少雨により県中南部では莢数と百粒重が低下し、収量は平年を下回ったことから（岩手県農業研究センター 2010）、本研究の結果と概ね一致した。東北地域太平洋側については、今後やませによる夏期の低温だけでなく、地球温暖化による夏期の高温もまたダイズの収量低下の原因となる可能性がある。そのため、夏期の高温条件での低収要因の解明や適切な可給態窒素の水準の策定などについて土壌タイプや品種を考慮した取り組みが必要である。

近年、コメの価格低迷や生産調整の拡大によりコメだけに依存しない農業経営が求められている。これまでの転作ダイズは助成措置が前提となっていたため、収量・品質の向上が必ずしも追求されなかった。そこで、転作ダイズの圃場を固定化し、熟畑化により生産力を高める方式（水田畑地化）の推進によってダイズを中心とした畑輪作体系の確立が今後の課題である。しかし、畑輪作体系確立のためには技術的な課題が多いことから、ダイズ連作を選択せざるを得ない状況が想定される。本研究で得られた

成果は東北地域の太平洋側だけでなく、日本海側における水田畑地化によって永久転換した場合のダイズ連作での安定多収確保のための参考情報としても活用できる。

## 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) Akao, S. 1991. Nitrogen fixation and metabolism in soybean plants. JARQ 25: 83-87.
- 3) 朝日幸光. 1984. 作付体系の改善による安定多収技術 農林水産省農業研究センター編 地力維持・連作障害対策新技術. 総合農業研究叢書 2: 93-101.
- 4) 後藤逸男, 村本穰司, 蜷木 翠. 1992. テフロン加圧分解容器-ICP発光分光分析法による植物の無機成分分析. 土肥誌 63: 345-348.
- 5) 橋元秀教, 松崎敏英. 1976. 土づくり講座V 有機物の利用. 農山漁村文化協会. p.1-193.
- 6) 石井和夫. 1984. 合理的施肥管理による安定多収技術 農林水産省農業研究センター編 地力維持・連作障害対策新技術. 総合農業研究叢書 2: 102-114.
- 7) 岩手県. 2009. 岩手県農作物施肥管理指針. [http://www.pref.iwate.jp/dbps\\_data/\\_material/\\_files/000/000/029/027/100\\_sehi-shishin140925.pdf](http://www.pref.iwate.jp/dbps_data/_material/_files/000/000/029/027/100_sehi-shishin140925.pdf)
- 8) 岩手県農業研究センター. 2010. 平成22年岩手県産大豆の生育経過の概要と特徴・特に夏季高温の影響の解析. 平成22年度岩手県農業研究センター試験研究成果書. [http://www2.pref.iwate.jp/~hp2088/seika/h22/shidou\\_05.pdf](http://www2.pref.iwate.jp/~hp2088/seika/h22/shidou_05.pdf)
- 9) 国土交通省気象庁. 2016. 過去の気象データ・ダウンロード. <http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php>
- 10) 桑原真人. 1988. 大豆根の伸長・分布および根粒活性と土壌水分. 土壌の物理性 57: 15-21.
- 11) 松田裕之, 柴田康志, 森 静香, 藤井弘志. 2011. 山形県庄内地域における登熟期間の気温

- がダイズの百粒重に及ぼす影響. 日作紀 80: 43-48.
- 12) 松崎守夫, 濱口秀生, 下名迫寛. 1998. 普通畑作物の連作におけるきゅう肥施用・土壌燻蒸の効果. 北海道農試研報 166: 1-65.
- 13) 三浦憲蔵. 2004. 平成15年東北地域の水稲冷害と堆肥等の施用効果. 季刊肥料 98: 72-77.
- 14) 三浦憲蔵, 吉住佳与, 戸上和樹, 工藤一晃, 青木和彦. 2013. 大豆連作による減収要因の解明と安定生産のための土壌管理法の策定. 低コストで質の良い加工・業務用農産物の安定供給技術の開発 2系大豆. 研究成果 485: 82-84.
- 15) 農耕地土壌分類委員会. 1995. 農耕地土壌分類第3次改訂版. 農業環境技術研究所資料 17: 1-79.
- 16) 農林水産省. 2008. 地力増進基本方針の公表について.  
[http://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/hozen\\_type/h\\_dozyo/pdf/chi4.pdf](http://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/hozen_type/h_dozyo/pdf/chi4.pdf)
- 17) 農林水産省. 2015. 食料・農業・農村基本計画.  
[http://www.maff.go.jp/j/keikaku/k\\_aratana/pdf/1\\_27keikaku.pdf](http://www.maff.go.jp/j/keikaku/k_aratana/pdf/1_27keikaku.pdf)
- 18) 農林水産省. 2016a. 大豆関連データ集, 作付面積の推移.  
[http://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/daizu/d\\_data/pdf/003.pdf](http://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/daizu/d_data/pdf/003.pdf)
- 19) 農林水産省. 2016b. 大豆関連データ集, 単収の推移.  
[http://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/daizu/d\\_data/pdf/004.pdf](http://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/daizu/d_data/pdf/004.pdf)
- 20) 大久保隆弘・栗原 浩. 1967. 改良資材による畑土壌の肥沃化, 第1報 とうもろこしの生育よりみた土壌好適性の作物学的解析. 東北農試研報 35: 1-18.
- 21) 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. 東北農研研報 103: 39-52.
- 22) 高橋英博, 持田秀之, 執行盛之. 1990. 東北地域における大豆生産の地帯区分. 東北農業研究 43: 133-134.
- 23) 田村有希博. 1993. 湛水土壌中有機態窒素の無機化過程への逐次・可逆モデルの適用. 東北農試研報 86: 1-41.
- 24) 田村有希博. 1997. ダイズの根粒活性制御機構の解明 (第1報) ダイズの根粒活性に及ぼす窒素の影響. 土肥誌 68: 301-306.
- 25) 田村有希博. 2003. リン酸, カリ, その他. 海妻矩彦ら編 わが国における食用マメ類の研究. 総合農業研究叢書 44: 389-403.
- 26) 山本 毅, 高橋達児. 1967. 改良資材による畑土壌の肥沃化, 第2報 改良資材の施用が土壌および作物の要素吸収に及ぼす影響. 東北農試研報 35: 19-36.