

Studies on Crop Rotation Systems and Injury caused by Continuous Cropping of Field Crops in Central Tokachi District

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2019-03-22 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 松崎, 守夫 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24514/00001389

十勝地方中央部における畑作物の輪作体系と連作障害発生の解析

松崎守夫¹⁾

目次

I. 緒論	1	4) ダイズ	26
II. 十勝地方における輪作体系の解析	4	5) アズキ	29
1. 緒言	4	6) 春播コムギ	30
2. 調査・解析方法	4	4. 考察	32
1) 調査地点の1戸当たり耕地面積, 作付け比率	5	1) テンサイ	32
2) 3年作付けの面積の集計	6	2) ジャガイモ	36
3. 結果	8	3) ダイズ	38
1) 各調査地点の主要な3年作付け	8	4) アズキ	41
2) 輪作体系の推定	8	5) 春播コムギ	42
4. 考察	11	6) 連作障害の様相と原因	44
1) 土壌が作付け比率に及ぼす影響	11	7) 有機物施用の効果	49
2) 推定した輪作体系の評価	11	8) 土壌燻蒸の効果	50
III. 連作障害の実態とその軽減技術の検討	12	IV. 総合考察	50
1. 緒言	12	1. 連作障害・輪作体系と土壌の生物性	50
2. 材料と方法	12	2. 輪作体系に対する連作障害の影響	50
1) 供試作物と栽培方法	12	3. 輪作体系の改善方策	52
2) 処理方法	13	V. 要約	52
3) 土壌の窒素, リン酸, カリウムの分析	15	1. 十勝地方における輪作体系の解析	52
4) 収量調査	15	2. 連作障害の実態とその軽減技術の検討	53
5) 土壌病害虫	16	3. 十勝地方の輪作体系の改善方策	55
3. 結果	17	謝辞	55
1) 土壌の窒素, リン酸, カリウム	17	引用文献	56
2) テンサイ	19	英文摘要	65
3) ジャガイモ	22		

I. 緒 論

畑作物栽培では、連作を続けると生育、収量が低下し、このような連作による生産性の減少は、連作

障害と言われる（北海道立北見農業試験場, 1981；松田ら, 1980；松口・新田, 1988；大久保, 1973；奥村ら, 1997；佐々木ら, 1985）。連作障害の原因としては、①土壌理化学性の変化、②アレロパシー、③生物的要因があげられている（松実, 1969）。地力維持を目的として行われる輪作は、連作障害を回避

平成25年8月20日 原稿受理

1) 北海道農業研究センター

現：農研機構 中央農業研究センター

するために有効であると言われ、畑作物の栽培では輪作が奨励されている。輪作の効果としては、①土壤有機物の供給・維持、②土壤物理性の改善、③土壤の養分吸収圏の拡大、④土壤養分のバランス維持、⑤病害虫発生抑制などがある(大久保, 1976)。これらの輪作の効果は、連作が作物の生産性を抑制する(≡連作障害)ことの裏返しと考えることができる。もし、連作障害の原因が土壤理化学性の変化であれば、施肥や有機物施用などによって連作障害を軽減できる可能性がある。また、連作障害の原因がアレロパシーであれば、原因物質を分解した後に作付けすることで、そして生物的要因の場合には、土壤燻蒸による殺菌で、それぞれ対処できる可能性があるが、いずれの要因が原因であったとしても、輪作は有効な対処法と考えられる。

作付けされる作物の種類は立地条件によって異なるため、連作障害の現れ方、連作障害を抑制する輪作体系も立地によって異なってくると考える。したがって、持続的な輪作体系を構築していくためには、それぞれの立地で連作障害の発生実態を解明し、その結果をもとに持続的な輪作体系を考えることがまず最初のステップと考える。そして、各立地の解析を重ねていくことによって、持続的輪作体系の理論化が可能になるものとする。そこで、本研究は日本有数の大規模畑作地帯である北海道十勝地方における輪作の実態を解析し、輪作体系を明らかにし、併せて、輪作体系に導入されている各作物の連作障害の実態を明らかにし、それらをもとに、今後の十勝地方の持続的輪作体系を考察することを目的として行った。

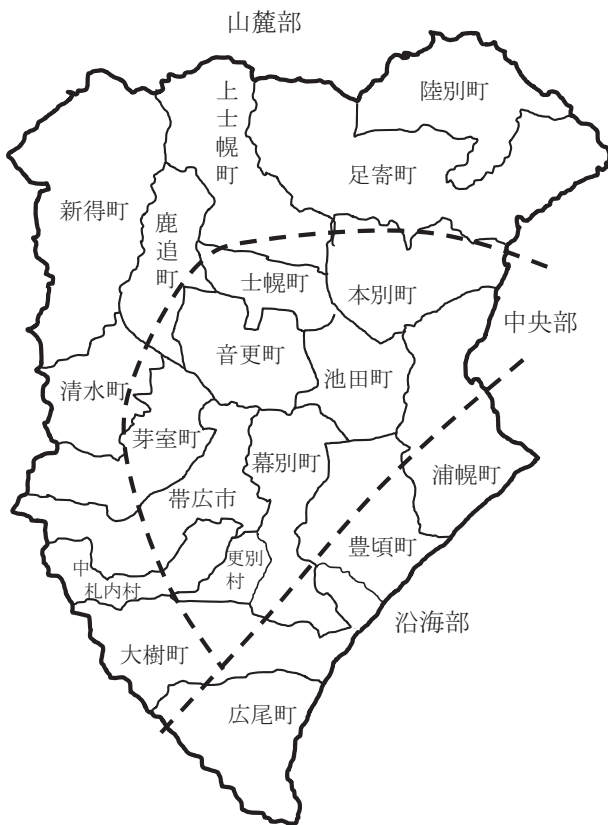
連作障害に関してはこれまで多くの知見があるので、研究を開始するにあたって、まず、これまでの知見を整理したい。連作障害には、「ある作物の後に同種の作物を栽培した場合に、普通に考えられる栽培管理を充分行っても、生育、収量、品質などが劣ること」という定義が与えられており、1950年代以前には「いや地」という用語が使用されていた(平野, 1977)。連作障害の原因には、土壤理化学性の変化、アレロパシー、生物的要因があげられている(松実, 1969; 西尾, 1983; 鈴木, 1972; 瀧嶋, 1965; 徳永, 1967)。しかし、現在の多肥農業では土壤養分の欠乏が連作障害の原因となることは少なく、逆に野菜類のハウス栽培などでは、多肥による塩類集積によって、養分過剰による生育障害が起こ

ることがある(西尾, 1983)。また、陸稲などでは、アレロパシー物質の一つである前作物由来のフェノール類は、次の作物の作付け前に分解するため、直接の要因とは考えられない。したがって、連作障害の主たる原因は土壤理化学性の変化やアレロパシーではなく、生物的要因であると考えられる(西尾, 1976)。

生物的要因では、作物が分泌する物質によって土壤微生物性が変化することが、要因として重視されている。作物の根は糖、アミノ酸などの物質を分泌するが、それらの物質の影響が及ぶ範囲は根圏土壤(Rhizosphere)として、それ以外の土壤と区別される。根圏土壤には根からの分泌物質を栄養源とする微生物が繁殖するが、分泌物質の構成は作物によって異なるため、根圏で繁殖する微生物の種類も作物によって異なる(鈴木ら, 1980)。ある作物の連作によって、その作物の分泌物質を好むセンチュウ、土壤病原菌などが増加して、その作物の生育を阻害する場合には、土壤病害虫による連作障害が発生する。

具体的な研究例として、埼玉県鴻巣市や同北本市で栽培された陸稲の連作障害の原因についての研究がある(松本ら, 1978; 西尾, 1976, 1981; 渡辺ら, 1963; 山田, 1981)。渡辺ら(1963)は、鉄、マンガンなどの土壤養分、アレロパシー、*Fusarium* 属菌などの土壤微生物、センチュウなどの様々な要因を検討し、センチュウの影響が最も著しいと結論した。鴻巣市ではイネ(オカボ)シストセンチュウ(*Heterodera elachista*)、鴻巣市に隣接する北本市ではミナミネグサレセンチュウ(*Pratylenchus coffeae*)が連作障害の原因とされた(西尾, 1976)。しかし、センチュウ害が目立たない場合には、土壤病原菌ではないものの *Fusarium*, *Pyrenchaeta*, *Penicillium* 属菌などの糸状菌も連作障害の原因となっており(松本ら, 1978; 西尾, 1976)、連作障害をもたらす生物的要因は単一とは限らなかった。連作障害の主な原因は土壤病害虫と考えられる(大畑ら, 1985)が、陸稲の場合のように連作障害に複数の土壤病害虫が関係することがあるので、特定の土壤病害虫のみの検討では、連作障害の全体像を理解することは困難である。

次に本研究の場である北海道十勝地方の立地と農業について、その概略を述べる。十勝地方は、年平均気温が6.5℃、夏作物の生育期間に相当する5～9月の平均気温が16.0℃と冷涼な地域である。また、年間降水量は923mm、5～9月の降水量は540mm



第1図 気象による十勝地方の地域区分。
尾崎(1969)より作図。

と比較的少ない。

十勝地方は北海道東南部に位置し、第1図に示すように、大まかに沿海部、山麓部、中央部に分けられる(尾崎, 1969)。沿海部は千島寒流と夏季の南東風により濃霧を形成し、山麓部は標高が高いため、いずれも冷涼であるが、中央部は、札幌と大差ない夏季の気温推移を示す(尾崎, 1969)。

十勝地方の耕地は、約80%が火山灰土壌によって占められる(岡, 1976a)が、河川流域に分布する褐色低地土は、土壌養分、排水性がともに優れ、生産性が高い(菊地, 1981)。火山灰土壌は、土壌下層に礫層があるため透水性がよく、有機物の分解が進んでいる淡色黒ボク土(北海道では乾性火山性土または褐色火山性土と呼称される)と、難透水層の存在により排水性が悪いが、有機物の分解が進んでおらず土壌養分が豊富な黒ボク土(同じく湿性火山性土または黒色火山性土と呼称される)に分類することができる(西宗ら, 1982b)。これらの火山灰土壌の分布は、下層土の状況、地形などにより複雑に入り組んでおり(菊地, 1981)、黒ボク土では、春先に融雪水が滞水するため、根菜類の植付時期が遅れるな

どの問題がある(天野, 1983)。

北海道の農業は本州以南からの移住者によって開始され、十勝地方では寒冷で火山灰土壌が多いため、水稲作ではなく主に畑作農業が発展した(尾崎, 1969)。宇井(1983)は、北海道開拓使の設置から北海道庁の設置までの期間(1869～1885)を北海道農業の黎明期、北海道庁の設置から第1次世界大戦まで(1886～1919)を形成期、第一次世界大戦から第二次世界大戦まで(1920～1945)を再形成期、第二次世界大戦終了から25年間(1946～1969)を戦後転換期、その後約10年間(1970～1982)を現代とし、北海道農業の動きを概括している。

黎明期には、十勝開拓の始まりとされる依田勉三の晩成社が設立された(岡, 1976a)。形成期の農業は、穀類や豆類を中心とし、プラウ馬耕による大面積の農業経営を特色とするが、森林原野を拓き、そこに無肥料連作栽培を行う略奪的農業が主であった。特に十勝地方では豆類が偏作され(尾崎, 1969)、エンドウ(*Pisum sativum* L.)やアズキ(*Phaseolus angularis* L.)の土壌病害、地力の損耗が問題となった。再形成期にはそれまでの反省から、穀類と他の作物を交互に作付けするNorfolk式輪作(大久保, 1976)が導入され、北海道に根をおろしたテンサイ(*Beta vulgaris* L.)、アマ(*Linum usitatissimum* L.)を含む作付け体系も検討された(尾崎, 1969)。しかし、畑作物の収量は増加したとは言えず、また、この期間の末期は戦時であったため、肥料、労力の不足により畑作生産は著しく疲弊した。

戦後転換期には、農林省馬鈴薯原種農場の設置(1947)、てん菜振興法の施行(1950)などにより、畑作物生産のための基盤が整備された。しかし、ハッカ(*Mentha arvensis* L.)、ナタネ(*Brassica napus* L.)、アマなどの特用作物が姿を消し、安価なコムギ(*Triticum aestivum* L.)の輸入により1970年代前半にはコムギの栽培面積も減少した。また、大型機械化の進行に伴い、ジャガイモ(*Solanum tuberosum* L.)、テンサイ、マメ類による短期輪作が一般化した。

1970年代後半からコムギ作が水田転換畑で奨励されるとともに、大型コンバインなどによる省力化によって、十勝地方でもコムギの栽培面積が再び増加した。また、1960年代以降、気候が寒冷な十勝地方の沿海、山麓部では牧草作による酪農や畜産の比率が高まり、畑作中心の農業は主に十勝中央部で行われている(天野, 1983)。2006年の十勝地方における

第1表 十勝地方における主要作物の作付け面積.

	面積(ha)	耕地	畑	普通畑
水田	817	(0.3)		
畑(飼料作を含む)	254,900	(99.7)		
飼料作	82,840	(32.4)		
普通畑	172,138	(67.3)		
計	255,770			
テンサイ	29,431		(11.5)	(17.1)
ジャガイモ	23,630		(9.3)	(13.7)
コムギ	47,662		(18.7)	(27.7)
ダイズ	5,139		(2.0)	(3.0)
アズキ	10,684		(4.2)	(6.2)
計	116,546		(45.7)	(67.7)

*2006年度作物統計、野菜生産出荷統計より。
普通畑は畑作物・野菜等を作付けする圃場。
畑は普通畑+飼料(牧草等)を作付けする圃場。
()内の数値は比率(%)。

主要作物の耕地面積を第1表に示した。水田はほとんどなく、普通畑が全耕地面積の7割程度、そして飼料畑が3割程度を占めている。普通畑では、コムギ(秋播コムギ)、テンサイ、ジャガイモの順に作付け比率が高く、コムギは普通畑の約3割に作付けされている。一方、ダイズ(*Glycine max* (L.) Merr.)、アズキの作付け比率は10%以下で、近年、水田利用再編対策により転換畑での作付けが増大し、普通畑の重要性が低下しているダイズの作付け比率は、特に低くなってきている。

以上の連作障害に関する知見、十勝地方の農業の状況を踏まえ、本研究は、まず、十勝地方中央部の芽室町で、1983年から8年間の作付け調査を行い、輪作体系の出現面積に対する数量的な評価を行った(第II章)。ついで、1980年より、十勝地方の主要畑作物であるテンサイ、ジャガイモ、ダイズ、アズキ、コムギ(春播)の連作試験(以下、連作試験とする)が、有機物施用や土壌燻蒸などを組み合わせて16年間実施されているので、この連作試験の結果を、連作障害の程度と有機物施用、土壌燻蒸による連作障害の軽減効果に着目して解析し、各作物の連作障害の実態を明らかにした(第III章)。そして、最後に、これらの調査、解析結果を基に、連作障害が輪作体系に及ぼす影響、輪作体系の改善方策を考察した(第IV章)。

II. 十勝地方における輪作体系の解析

1. 緒言

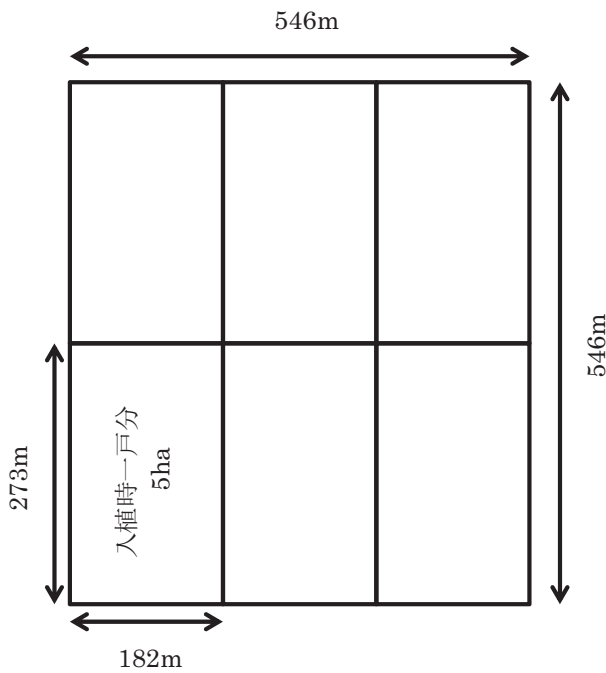
十勝地方の作付け順序については、1950年～1955年のマメ類中心の時代(尾崎, 1969)、1970年代のテンサイ、ジャガイモ、コムギ中心の時代(大久保, 1982)で検討されている。しかし、それらの調査では輪作体系を検討していないため、調査した作付け順序が繰り返されているとは限らず、それらの作付け順序が一般的に行われていたものかどうかは明らかにはなっていない。

例えば、3年輪作を繰り返していることを確認するには、最低でも6年間の作付け順序を検討する必要がある。もし、10種類の作物が作付けされている場合、6年間の作付け順序は 10^6 種類、すなわち100万種類存在することになるため、実際の作付け調査から輪作体系を検討することは困難である。ここでは、①作付け期間を短く区分して検討する作付け順序を類型化し、②それらを共通する前後作関係に基づいて連結することによって、輪作体系を推定することを試みた。

大久保(1982)は、作付け順序は、作付け面積の大きい作物によって構成され、他の作物と作期が異なる秋播コムギの前作物が限定されるため、作付け順序が限定されるとした。第1表に示したように、近年でも十勝地方では、テンサイ、ジャガイモ、コムギの作付け面積が大きく、コムギとしては秋播コムギが広く栽培されている。ここでは大久保(1982)にならって、最近の8年間の作付け調査を行い、その結果から十勝地方の輪作体系を数量的に評価した。併せて、その結果と既往の知見を基に、輪作体系の規制要因と時代による変化についても検討した。

2. 調査・解析方法

調査は、十勝地方中央部の芽室町で、1983～1990年の8年間の作付け作物について行った(松崎ら, 1994a)。作付けされる作物は土壌によって大きく影響を受けるので、土壌に着目して調査地点を選定することとし、淡色黒ボク土は芽室町新生(北緯42°51′, 東経143°03′)、黒ボク土は同美生(北緯42°52′, 東経142°59′)、褐色低地土は同西土狩(北緯42°56′, 東経143°04′)を選定した。今回調査した圃場は546×546m(約30ha)に整備されており、それらがさらに182×273m(約5ha)の大きさに6等分されていた(第2図)。この5haが入植時の



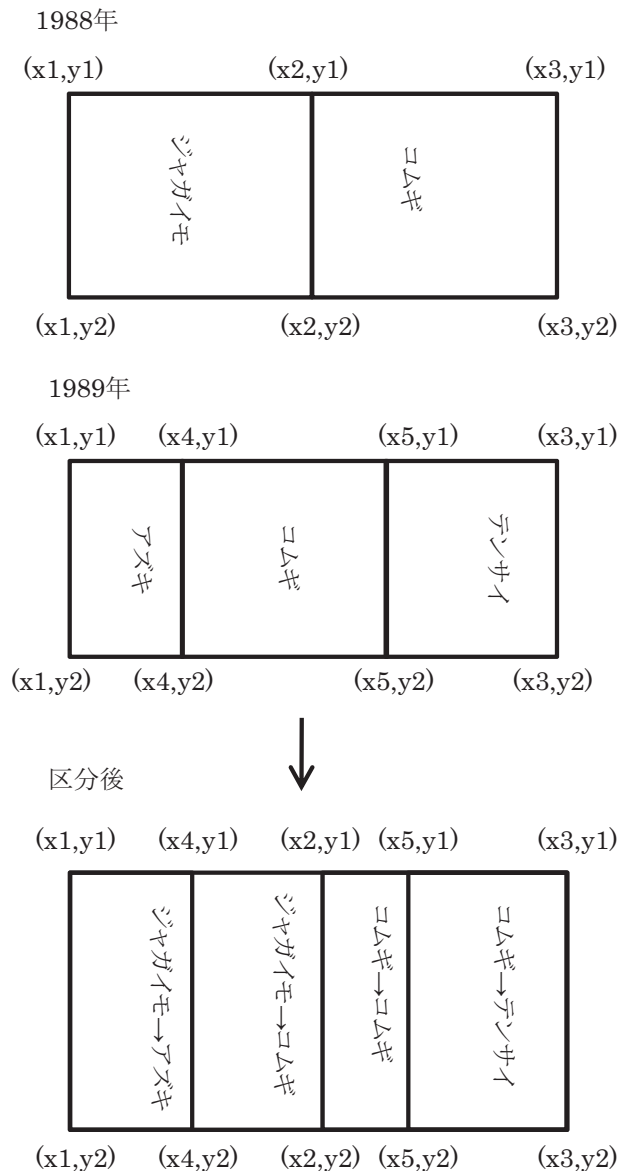
第2図 農家圃場の区画 (30ha).

1戸分の割り当て面積であったとされている。ほとんどの場合、畑作物は圃場の長辺方向に作付けされているため、各作物の境界点を計測することで、各作物栽培地点の面積を推定できる。隣接した4圃場(計120ha)について、1983年～1987年については畑作物共済の作付け図から、1988年～1990年については、1m単位の実測調査から、各年度の作付け図を作成した。1983年～1987年については、作付け作物を特定できない場所があったため、その部分は作付け不明として作図した。

8年間の作付け調査によって作成した8枚の作付け図を相互に比較し、圃場図を単一の作付け順序を持つ区画に区分した(第3図)。区分後の各区画のデータは8年間の作付け順序、四つの座標(x,y)の値であり、各区画は、座標から面積を算出しやすいよう、四角形、あるいは三角形に区分した。各区画のデータをデータベースへ入力し、座標から面積を算出した。

1) 調査地点の1戸当たり耕地面積、作付け比率

調査時の耕地面積は、1988年の畑作物共済記録より集計した。生産力に優れるとされる褐色低地土(西宗ら、1982b)の調査地点である西士狩で農家戸数が多く、1戸当たり耕地面積が狭かった(第2表)。淡色黒ボク土の調査地点である新生がこれに次ぎ、黒ボク土の調査地点である美生は最も農家戸数が少



第3図 作付け調査図の区分例。

各圃場を単一の作付け順序を持つ区画に区分。
 各区画の頂点のxy座標(0～546)を入力。
 xy座標から、各区画の面積を計算。
 ジャガイモ→アズキの面積は $(x4-x1) \times (y2-y1)$ 。

第2表 各調査地点の農家戸数と平均耕地面積。

地点名	新生	美生	西士狩
土壌	淡色黒ボク土	黒ボク土	褐色低地土
農家戸数(戸)	10	9	22
平均耕地面積(ha)	22.5	29.1	15.1

*1988年の畑作物共済記録から算出。

第3表 各調査地点の畑作物の作付け比率(%)

地点名 土壌	新生 淡色黒ボク土	美生 黒ボク土	西士狩 褐色低地土
コムギ	26.3	29.0	21.9
テンサイ	21.1	17.8	19.2
ジャガイモ	25.1	22.5	15.2
スイートコーン	9.6	2.9	6.5
アズキ	2.5	7.6	11.3
インゲン	0.1	4.7	1.9
ダイズ		2.5	0.9
野菜類	2.1	0.8	13.8
飼料作物	0.4	6.3	0.9
不明	12.7	5.8	7.6
合計	99.8	100	99.2

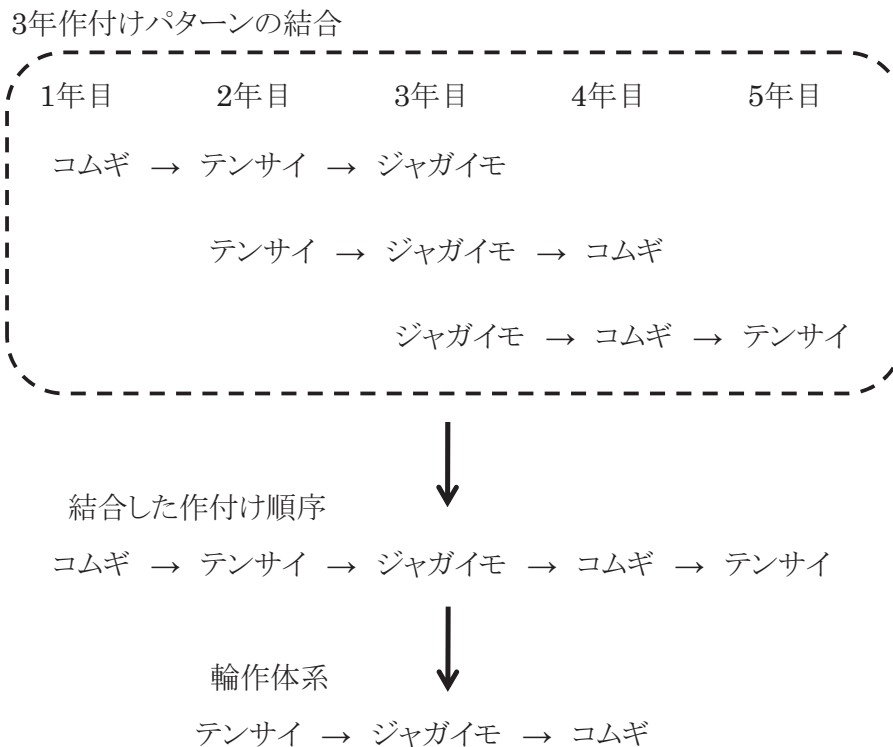
なく、農家1戸当たりの耕地面積も広がった。なお、今後、各調査地点は単に土壌名で示すこととする。

各調査地点について、各作物の作付け面積の8年間の平均値を耕地面積で除算し、作付け比率を計算した(第3表)。いずれの地点でも、コムギ、テンサイ、ジャガイモが高い比率を占めた。それ以外の作物としては、スイートコーン、アズキ、インゲン、ダイズがあり、野菜(ナガイモ、タマネギなど)、飼料作物(デントコーンなど)、作付け不明を含めると、

10作物以上が作付けされていた。各地点で共通して作付け比率の高いテンサイ、ジャガイモ、コムギ以外では、淡色黒ボク土ではスイートコーン、黒ボク土ではアズキ、飼料作物、褐色低地では野菜、アズキ、スイートコーンが多く作付けされていた。

2) 3年作付けの面積の集計

既に述べたように、検討する作付け順序の年数が長いほど、その種類が多くなり、検討が煩雑になる。3年間の作付け順序(以下、3年作付けとする)は輪作体系を推定するために利用できる、最も短い作付け順序である。ここでは、以下のように、共通する作物間の前後作関係を連結することで輪作体系を推定することを試みた(松崎ら, 1994b)。例えば、テンサイ-ジャガイモ-コムギという3年作付けがあった場合、テンサイ-ジャガイモとジャガイモ-コムギという前後作関係を持つ作付け順序が連続していたと考えることができる。テンサイ-ジャガイモ-コムギ、コムギ-テンサイ-ジャガイモ、ジャガイモ-コムギ-テンサイという3年作付けがあった場合、第4図のように共通する前後作関係をつなげることで、コムギ-テンサイ-ジャガイモ-コムギ-テンサイという5カ年の作付け順序を考えるこ



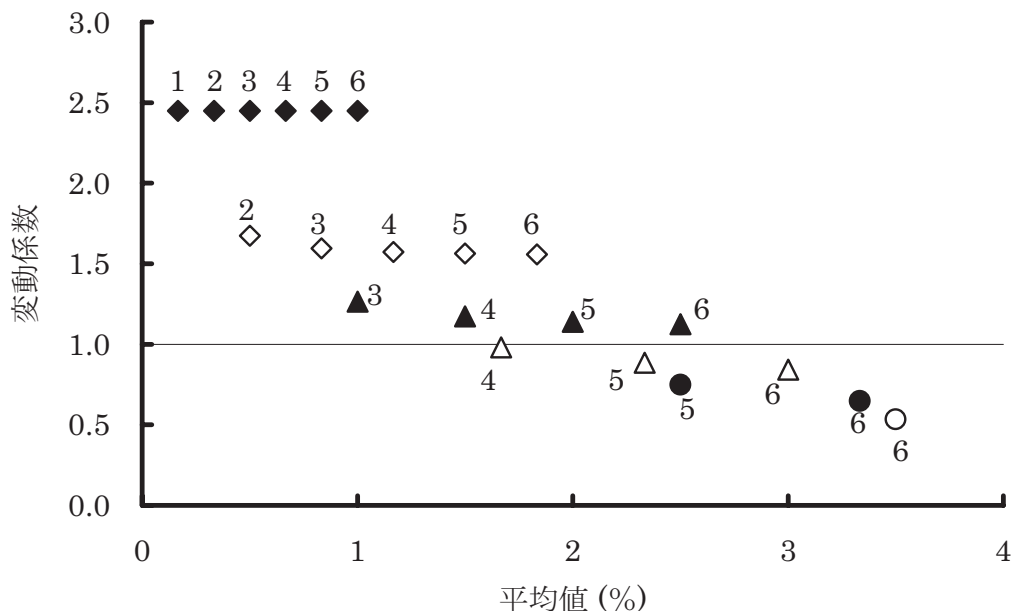
第4図 3年作付けパターンからの輪作体系の推定。

とができる。この作付け順序では、最初と最後の前後作関係コムギ-テンサイは共通となるので、テンサイ-ジャガイモ-コムギという輪作体系を考えることができる。

8年間の作付け順序を3年毎に区切ると、1983年～1988年を初年度とする6反復のデータが得られる。各3年作付けパターンの集計面積を全面積に対する比率に換算し、6反復の出現比率について平均値、変動係数(標準偏差÷平均)を算出した。1回でも出現した3年作付けパターンについて、6反復の出現比率を算出したが、3年作付けパターンが出現しなかった年度の出現比率は0とした。

輪作体系を推定するには、これら多数の3年作付けパターンの中から主要なものを抽出する必要がある。その際、出現面積の平均値だけを抽出する基準とすると、6反復のうち1回だけ大面積で出現した3年作付けパターンを抽出する危険性がある。したがって、安定して出現する3年作付けパターンを抽出するためには、出現頻度(出現回数/6×100)についても考慮する必要がある。出現比率が高く、出現頻度も高い3年作付けパターンを抽出する基準として、出現比率の変動係数が使用できる(第5図)。

出現回数が6回中1～6回(出現頻度17～100%)の3年作付けがあると仮定し、出現回数が1回の3年作付けパターンが、1、2、3、4、5、6%の各値で出現するとしたところ、その出現比率の平均値は0.1～1%の間を変動し、変動係数は常に2.0以上であった。出現回数が2回の3年作付けパターンが出現比率1～2%、2～3%、3～4%、4～5%、5～6%で出現する場合、出現比率の平均値は0.5～1.8%とやや高く、変動係数は常に2.0以下となった。3年作付けパターンの出現回数を3～6回まで増やしてもこの関係は同様であり、出現回数が多いほど、出現比率の平均値が高く、変動係数が低い値を示した。出現回数が6回中3回以下(出現頻度50%以下)の場合、変動係数が1.0以下になることはなかったが、出現回数が6回中4回以上の場合、出現比率の変動係数は常に1.0以下となった。すなわち、変動係数1.0を基準とし、それ以下の3年作付けパターンを抽出することで、50%以上の確率で出現する3年作付けパターンを抽出できると考えられた。ここでは、変動係数1.0以下の3年作付けパターンを主要な3年作付けとし、輪作体系推定に用いた。



第5図 3年作付けパターンの出現頻度が出現比率の平均値と変動係数に及ぼす影響。

- ：出現頻度100% (6回中6回出現), ●：出現頻度83% (6回中5回出現),
 - △：出現頻度66% (6回中4回出現), ▲：出現頻度50% (6回中3回出現),
 - ◇：出現頻度33% (6回中1回出現), ◆：出現頻度17% (6回中1回出現).
- 出現比率の値は1～6%の間1%刻みで変化させた。
各シンボルの添え字は出現比率の最大値。

3. 結果

1) 各調査地点の主要な3年作付け

各調査地点で集計した①全ての3年作付けパターン、②普通畑作物のみで構成される3年作付けパターン、③主要な3年作付けパターンについて、数と面積比率を示した(第4表)。全ての3年作付けパターンの数は $10^3=1,000$ 種類存在しうるが、褐色低地土で549種類、最も種類の少ない淡色黒ボク土で145種類の3年作付けパターンが存在した。

普通畑作物のみの3年作付けパターンの数は、淡色黒ボク土で66種類と少なかったが、他の2土壌では100種類以上存在した。普通畑作物のみの3年作付けの面積は、黒ボク土で全面積の81%を占めたが、淡色黒ボク土では69%、褐色低地土では53%と低い値を示した。これは、褐色低地土では野菜を含む3年作付けパターンが多く、淡色黒ボク土では作付け不明を含む3年作付けパターンが多かったためと考えられた。

主要な3年作付けパターンは、いずれの土壌でも10～12種類しか存在しなかったが、耕地面積の約20～52%を占めた。普通畑作物のみの3年作付けパターン(A)に占める主要な3年作付け(B)の比率(B/A)も、数では8～18%に過ぎなかったが、面積では39～76%を占めた。すなわち、主要な3年作付けは、少数しか存在しないが、各土壌で広く行われている作付け順序と考えることができた。B/Aは黒ボク土では約48%、褐色低地土では約39%と、50%に満たなかったが、淡色黒ボク土では約77%と高い値を示した。このことは、淡色黒ボク土では、主要な3年作付けパターンで示される特定の作付け順

序が、意識的に採用されていることを示唆する。

各調査地点における、個々の主要な3年作付けパターンを第5表に示した。3土壌ともに存在するのは、コムギ-テンサイ-ジャガイモ、コムギ-コムギ-テンサイ、テンサイ-ジャガイモ-コムギの3種類のみであった。これらの主要な3年作付けパターンは、淡色黒ボク土と黒ボク土、特に淡色黒ボク土で比率が高かった。褐色低地土では、主要な3年作付けパターンでも比率の低いものが多く、その場合もアズキを含むパターンが多かった。

2) 輪作体系の推定

第5表の主要な3年作付けを連結し、輪作体系を推定した(第6～8図)。淡色黒ボク土ではコムギ-テンサイ-ジャガイモ(11.8%)、テンサイ-ジャガイモ-コムギ(7.6%)、ジャガイモ-コムギ-コムギ(4.3%)、コムギ-コムギ-テンサイ(2.9%)を連結し、コムギ-テンサイ-ジャガイモ-コムギ-コムギ-テンサイという作付け順序があったと考えることができた(第6図)。この作付け順序は最初と最後にコムギ-テンサイという同一の前後作関係を含むため、テンサイ-ジャガイモ-コムギ-コムギという4年輪作とみなすことができた。同様に、テンサイ-ジャガイモ-コムギ、テンサイ-ジャガイモ-スイートコーン-コムギも、輪作体系とみなすことができた。これらの輪作体系を構成する主要な3年作付けパターンの面積の合計は約50%であり、第4表で集計した主要な3年作付けの大部分(77%)を占めていた。

黒ボク土でも、淡色黒ボク土と同様に、テンサイ

第4表 3年作付けパターンの数と面積

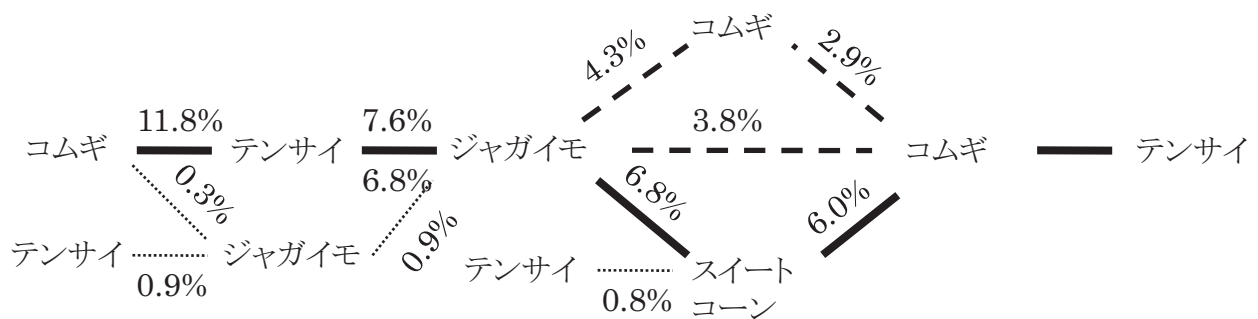
地点 土壌	新生		美生		西士狩	
	淡色黒ボク土		黒ボク土		褐色低地土	
	数	面積 (%)	数	面積 (%)	数	面積 (%)
全ての3年作付け	145	98.9	201	100	549	98.9
普通畑作物のみの3年 作付け (A)	66	68.5	118	80.8	137	53.3
主要な3年作付け (B)	12	52.6	10	38.4	12	20.9
B/A (%)	(18.2)	(76.8)	(8.5)	(47.5)	(8.8)	(39.2)

*普通畑作物のみの3年作付けは、野菜類、飼料作物を含まない。

主要な3年作付けは、普通畑作物のみの3年作付けのうち、面積の変動係数が1.0以下のもの。

第5表 主要な3年作付けパターンの出現比率(%)

作付け作物			新生	美生	西士狩
1年目	2年目	3年目	淡色黒ボク土	黒ボク土	褐色低地土
コムギ	テンサイ	ジャガイモ	11.8	7.1	2.0
コムギ	コムギ	テンサイ	2.9	8.6	2.0
コムギ	アズキ	ジャガイモ		1.2	2.2
コムギ	ジャガイモ	ジャガイモ	0.3		
コムギ	コムギ	アズキ			2.2
コムギ	アズキ	テンサイ			1.6
コムギ	テンサイ	アズキ			0.9
テンサイ	ジャガイモ	コムギ	7.6	5.9	4.0
テンサイ	ジャガイモ	スイートコーン	6.8	2.4	
テンサイ	ジャガイモ	ジャガイモ	0.9		
テンサイ	スイートコーン	コムギ	0.8		
ジャガイモ	コムギ	コムギ	4.3	7.5	
ジャガイモ	スイートコーン	コムギ	6.6	1.5	
ジャガイモ	コムギ	テンサイ	3.8		
ジャガイモ	ジャガイモ	コムギ	0.9		
ジャガイモ	テンサイ	ジャガイモ		1.4	1.0
スイートコーン	コムギ	テンサイ	6.0		
スイートコーン	コムギ	コムギ		1.5	1.6
アズキ	テンサイ	ジャガイモ			1.5
アズキ	ジャガイモ	コムギ			1.3
アズキ	ジャガイモ	テンサイ		1.3	
インゲン	コムギ	コムギ			0.5



第6図 淡色黒ボク土(新生)で抽出した主要な3年作付けパターンを連結した輪作体系

実線：占有面積5%以上の3年作付け，破線：2.5～5%の3年作付け，

点線：2.5%以下の3年作付け

数値は3年作付けの前半の作付け順序に表示

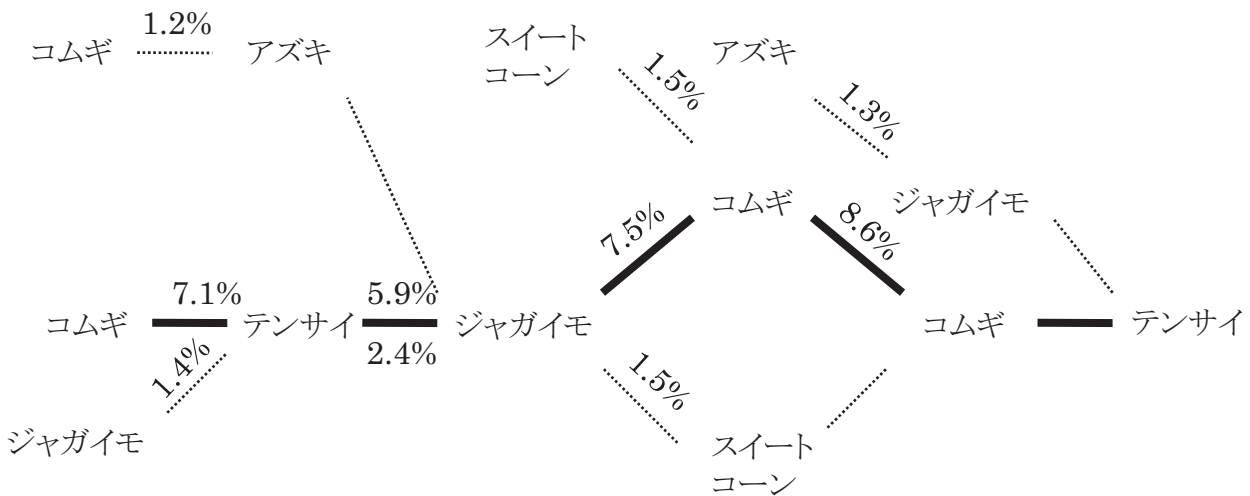
数字が2つある場合，上の数字は上へ分岐する3年作付け，下は下に分岐する3年作付け

輪作体系は，図の左端から数字が連続して表示してある作付け順序

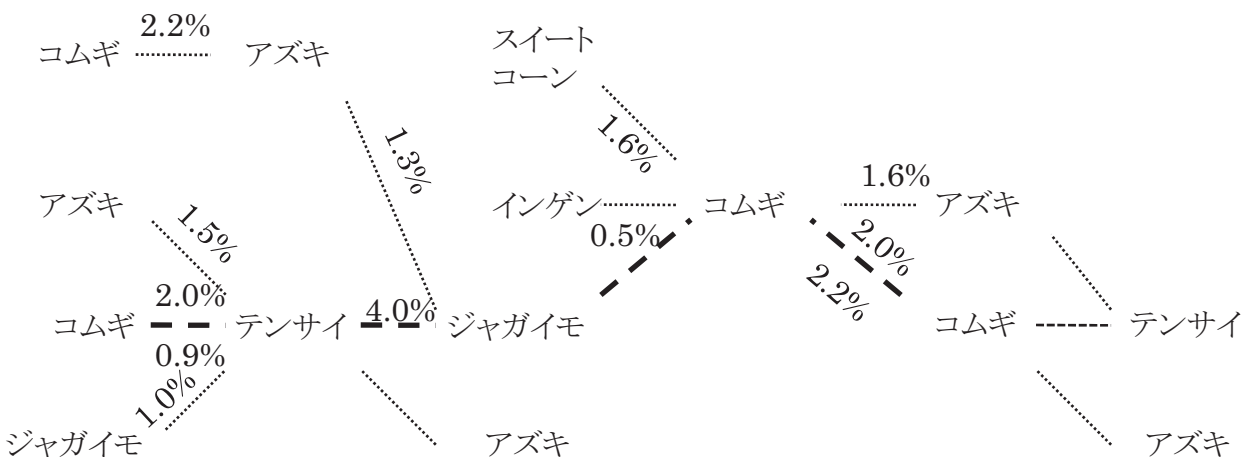
ージャガイモーコムギーコムギという4年輪作が推定できた(第7図)。コムギーテンサイージャガイモースイートコーンーコムギという作付け順序も比較的大きな面積を占めたが、スイートコーンーコムギーテンサイという3年作付けパターンが主要なものではなかったため、輪作体系とみなすことはできなかった。輪作体系を構成する主要な3年作付けの面積は29%に過ぎなかったが、主要な3年作付けの面

積も約38%と低く、主要な3年作付けの大部分で、この輪作体系が行われていたと考えられた。

褐色低地土では、コムギーテンサイージャガイモーコムギーコムギーテンサイという作付け順序の出現比率が高く、テンサイージャガイモーコムギーコムギという輪作体系が存在する可能性があったが、ジャガイモーコムギーコムギが主要な3年作付けパターンではなかったため、輪作体系とみなせる作付



第7図 黒ボク土(美生)で抽出した主要な3年作付けパターンを連結した輪作体系。
 実線：占有面積5%以上の3年作付け，破線：2.5～5%の3年作付け，
 点線：2.5%以下の3年作付け。
 数値は3年作付の前半の作付け順序に表示。
 数字が2つある場合，上の数字は上へ分岐する3年作付け，下は下に分岐する3年作付け。
 輪作体系は，図の左端から数字が連続して表示してある作付け順序。



第8図 褐色低地土(西士狩)で抽出した主要な3年作付けパターンを連結した輪作体系。
 実線：占有面積5%以上の3年作付け，破線：2.5～5%の3年作付け，
 点線：2.5%以下の3年作付け。
 数値は3年作付の前半の作付け順序に表示。
 数字が2つある場合，上の数字は上へ分岐する3年作付け，下は下に分岐する3年作付け。
 輪作体系は，図の左端から数字が連続して表示してある作付け順序が輪作体系。

け順序は存在しなかった(第8図)。

以上のように、1983年～1990年においては、テンサイ-ジャガイモ-コムギ-コムギが最も普遍的な輪作体系であり、輪作体系を推定できなかった場合にも、同様の作付け順序が行われていたと考えられた。

4. 考察

1) 土壌が作付け比率に及ぼす影響

異なる土壌にある3つの調査地点では作付け比率が異なった。同一町内の3地点であることから、気象要因の影響は少なく、この相違は土壌の性質に基づくと考えられた。どの地点(土壌)においても、コムギ、テンサイ、ジャガイモが主要作物であったが、黒ボク土では主要3作物以外にマメ類が多く作付けされ、褐色低地土では主要3作物の比率が低く、マメ類、野菜が多く作付けされていた。

テンサイ、ジャガイモは生育期間を確保するために4月下旬に植えつけられるが、十勝地方の融雪は4月までずれ込むことがあるため、排水性の悪い黒ボク土では、これらの根菜類を適期に植えつけられないことがある。そのため、播種期が5月となるマメ類が多く作付けされるが、暗渠、心土破碎などで排水性を改善することで、テンサイ、ジャガイモの作付け比率を向上させることが可能である(天野, 1983)。今回、黒ボク土で、淡色黒ボク土よりもマメ類が多く作付けされていた(第3表)ことは、黒ボク土の排水不良の影響と考えられた。しかし、黒ボク土のテンサイ、ジャガイモの作付け比率が、褐色低地土よりも高かったことは、暗渠などの排水性を向上させる技術の普及が、作付け比率に影響していることを示唆した。

褐色低地土では、コムギ、テンサイ、ジャガイモの主要3作物の作付け比率が低く、マメ類、野菜の作付け比率が高かった。また、褐色低地土の農家1戸当たりの耕地面積は、他の地区と比べても小さかった。褐色低地土は排水性が良いだけでなく、養分供給力も高く、生産性の高い土壌とされている(西宗ら, 1982b)。そのため、離農が少なく、農家1戸当たりの耕地面積も狭いままとなり、多くの労働を要するが、収益性が高い野菜などが多く作付けされるようになっていた可能性が考えられた。

以上のように、今回調査した3地点の作付け比率は、それぞれの土壌の性質に影響されていたと考え

られた。大久保(1982)は、作付け順序は作付け比率の高い作物によって構成されるため、作付け比率によって大きく影響されるとしている。したがって、上記の作付け比率の相違は、各地点(土壌)の輪作体系にも影響したと考えられた。

2) 推定した輪作体系の評価

本研究では、単なる作付け順序ではなく、繰り返される作付け順序である輪作体系の出現面積を推定したため、比較的普遍に行われている作付け順序を推定できたと考えられた。しかし、輪作体系は全ての地点(土壌)で推定できたわけではなく、また、多い場合でも全面積の50%を占める程度であったことから、全ての面積で輪作体系が行われているわけではなく、連作や交互作、あるいは規則性のない作付け順序も行われている可能性があった。

調査地点(土壌)によって作付け比率が異なったため、主要な3年作付けパターン、それらを連結した輪作体系も土壌によって異なった。コムギ、テンサイ、ジャガイモの作付け比率が最も高かった淡色黒ボク土では、テンサイ-ジャガイモ-コムギ、テンサイ-ジャガイモ-コムギ-コムギ、テンサイ-ジャガイモ-スイートコーン-コムギを輪作体系として推定することができたが、マメ類の多い黒ボク土ではテンサイ-ジャガイモ-コムギ-コムギを推定できただけであった。また、マメ類、野菜が多く、コムギ、テンサイ、ジャガイモの作付け比率が低い褐色低地土では、コムギ-テンサイ-ジャガイモ-コムギ-コムギ-コムギ-テンサイという作付け順序を作図することはできたものの、その中のジャガイモ-コムギ-コムギという3年作付けパターンが主要なものではなかったため、テンサイ-ジャガイモ-コムギ-コムギという輪作体系を推定することはできなかった。すなわち、テンサイ-ジャガイモ-コムギ-コムギという作付け順序が3土壌で共通して存在し、二つの土壌で輪作体系として推定することができる、最も一般的な作付け順序であった。

大久保(1982)は、作付け順序は作付け比率の高い作物によって構成され、また、秋播コムギの前作物は、ジャガイモ、スイートコーン、インゲンやコムギなど、秋播コムギを播種する以前に収穫できる作物に限定されるとしている。今回の結果でも、輪作体系を構成する作物は作付け比率の高いものであり、また、コムギの前作物となるのはコムギ、ジャ

ガイモ、スイートコーン、あるいはインゲンであり、輪作体系の規制要因は大久保の考察とよく一致していたと考えられた。本研究の結果は、マメ類の作付け比率が低く、輪作体系にマメ類が含まれなかった点を除いては、大久保の結果(1982)とよく一致したため、通常の作付け順序の調査によって、輪作体系の考察を行っても問題ないと考えられた。また、今回推定した輪作体系は、大久保の結果(1982)と比べて主要作物の数が減少したことにより、単純化していたと考えられた。

大久保(1976)は寒地の輪作体系として、根菜類－マメ科作物－イネ科作物－赤クローバー (*Trifolium pratense* L.)が望ましいとしている。これは、コムギ－テンサイ(飼料カブ)－オオムギ－クローバーのNorfolk式輪作を念頭に置いたものと考えられるが、根菜類は深耕によって作土をひろげ、ダイズなどのマメ科作物は茎葉の繁茂により雑草を抑制し、イネ科作物や赤クローバーは土壤に有機物を供給する働きがある(大久保, 1976)。今回推定できた輪作体系は、イネ科作物と根菜類のみによって構成されており、輪作年数が短いだけでなく、構成する作物の種類も少ない結果となった。

根菜類は作土を深くする働きがあるものの、中耕を行うため、土壤有機物の減耗を促進すると考えられる(大久保, 1976)。コムギは多量の作物残さを土壤に還元するものの、茎葉のC/N比が高いため、作物残さをすき込んだ場合、微生物による残さの分解にともなって土壤中の窒素が吸収され、作物の吸収できる窒素が欠乏する(窒素飢餓)可能性もありうる。以上のような影響だけでなく、今回推定した輪作体系では、輪作年数が短いこと、コムギの連作を含むことから、連作障害が発生する可能性も考えられた。そこで、各作物についての連作障害発生メカニズムの解析を行った。

Ⅲ. 連作障害の実態とその軽減技術の検討

1. 緒言

前章で示したように、十勝地方ではテンサイ、ジャガイモ、コムギの作付け比率が高く、これらの作物で連作障害が発生する可能性が考えられた。本章では、テンサイ、ジャガイモ、ダイズ、アズキ、春播コムギを供試した連作試験(松口・新田, 1988)から、連作障害の実態、原因について検討した(松崎, 2009; Matsuzaki, 2011; 松崎ら, 1998)。連作試験は、

北海道農業試験場畑作部(河西郡芽室町: 北緯42°53′ 東経143°04′, 現在北海道農業研究センター畑作研究センター)で1980年に開始され、1995年まで16年間継続して実施された。国内の他の長期連作試験が主に作付け間隔に着目して行われている(北海道立北見農業試験場, 1981; 松田ら, 1980; 成田, 1984; 奥村ら, 1997)のに対し、本試験では連輪作だけでなく、有機物施用、土壤燻蒸など、土壤生物に影響する処理も併設している。そして、本試験では根面糸状菌相や土壤病害虫(松口・新田, 1988, 新田・松口, 1989), 土壤養分(松崎ら 1998)についても検討されてきた。しかし、作物収量と土壤養分(松崎 2009), 土壤病害虫との関係についてはさらに検討する余地があった。本研究では、北海道農業試験場畑作部での連作試験で供試された各作物の連作障害の実態を明らかにし、土壤養分や土壤病害虫と収量の関係から連作障害が発生する原因を考察した。

2. 材料と方法

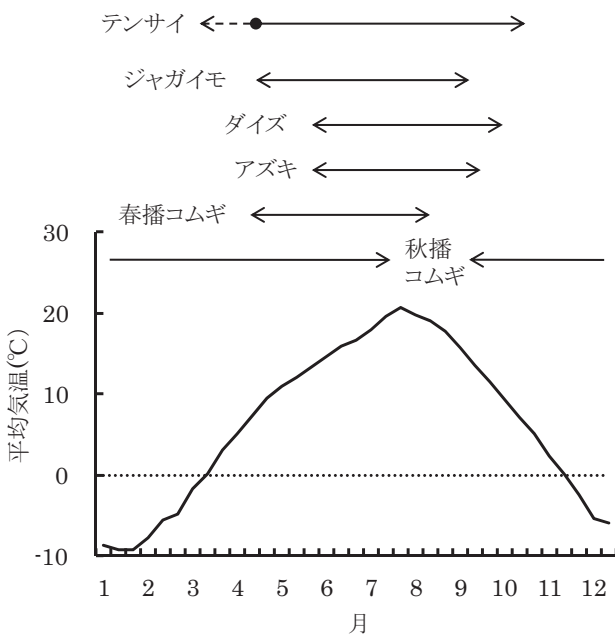
1) 供試作物と栽培方法

連作試験にはテンサイ、ジャガイモ、ダイズ、アズキ、春播コムギの5作物を供試した。十勝地方では秋播コムギが広く栽培されているが、ここでは、他の作物と作期をそろえるために春播コムギを供試した。供試品種は、試験実施当時、広く栽培されていた品種を用い、極力その品種を継続して使用した(第6表)。テンサイは芽室町付近での品種変遷に伴い、「ソロラーベ」→「モノエース」→「モノエースS」と品種を変更した。春播コムギは、長稈で倒伏しやすい「ハルヒカリ」を供試したが、後に短稈品種「ハルユタカ」(尾関ら, 1988)に変更した。ダイズおよびアズキは、1992年から、それぞれダイズシストセンチュウ (*Heterodera glycines*) 抵抗性の「トヨムスメ」(佐々木ら, 1988), 冷害耐性の強い「エリモショウズ」(村田ら, 1985)に変更した。

各作物の生育期間を、平均気温とともに第9図に示した。テンサイ、ジャガイモ、春播コムギは、4月下旬に播種あるいは移植した。ただし、テンサイは、慣行栽培法である移植栽培としたため、3月上旬に播種し育苗した苗を使用した。ダイズ、アズキは霜害の恐れが少ない5月下旬に播種した。収穫期は春播コムギが8月中旬、ジャガイモ、アズキが9月中下旬、ダイズ、テンサイが10月上中旬であった。

第6表 各作物の供試品種.

年	1980	1981	~	1985	1986	1987	~	1990	1991	1992	~	1994	1995
テンサイ	← ソロラーベ →			← モノエース →			← モノエースS →						
ジャガイモ	← 農林1号 →												
春播コムギ	← ハルヒカリ →				← ハルユタカ →								
ダイズ	← 北見白 →				← トヨムスメ →								
アズキ	← 宝小豆 →				← エリモシヨウズ →								



第9図 芽室町の旬別平均気温と作物生育期間.
1981～2010年のアメダスデータから算出した.
テンサイの点線は育苗期間.
連作試験では春播コムギを供試したが、十勝地方で一般に栽培される秋播コムギの生育期間も併記した.

各作物の作業時期、栽培方法も、16年間極力変更しないようにした。

各作物の畦幅は65cmとし、春播コムギのみ畦幅34cmのドリル播きとした。肥料は全て基肥施用したが、第7表に示すように、テンサイに対する施肥量が最も多く、ジャガイモがこれに次いだ。春播コムギ「ハルヒカリ」では窒素施肥量を5g/m²としたが、耐倒伏性の強い「ハルユタカ」に変更した後、窒素施肥量を7g/m²に増やした。試験区は10月と4月にプラウで深さ約25cmに耕起した。播種前の整地は、子実の小さい春播コムギは整地深度の浅いスプリングハロー、若干子実の大きいダイズ、アズキはパディハロー、ジャガイモ、テンサイは整地深度の深いロータリーハローを用いた。

2) 処理方法

試験区数は55区(5作物×11処理×1反復)であり、各作物に連作区10区、輪作区1区を設けた(第8表、第10図)。作物ごとに連作区を隣接して配置し、輪作区は圃場の中央に配置した。1区面積は52m²(5.2×10m)とし、土壌の混和を防ぐため、耕起方向に向かって、試験区間に3mの通路を設けた。

第7表 各作物の耕種概要.

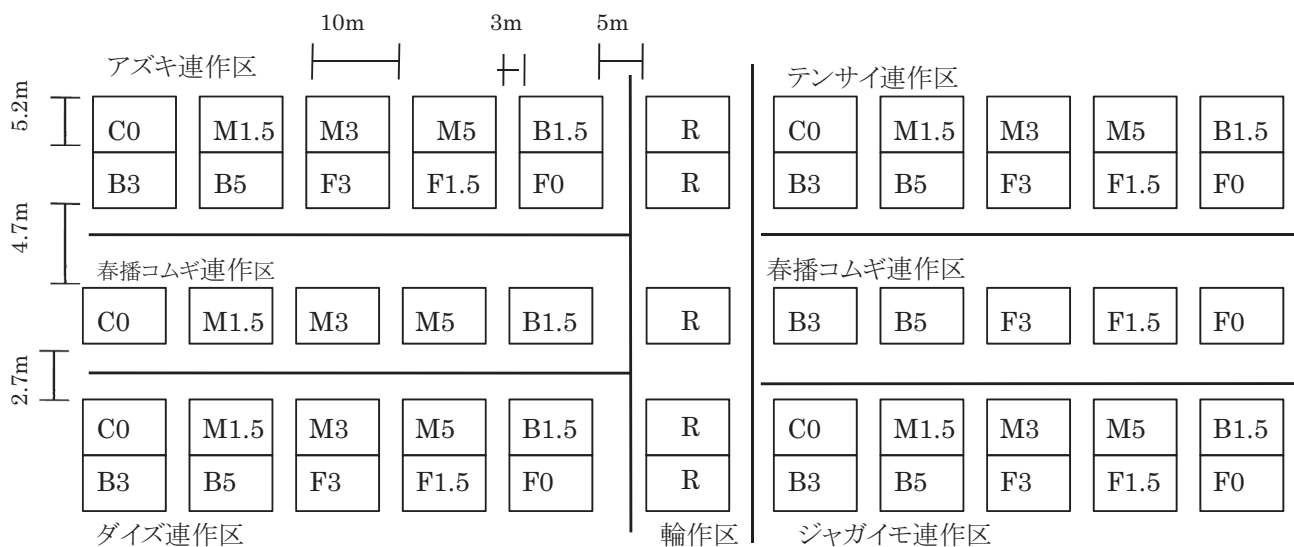
	畦間 (cm)	株間 (cm)	施肥量(g/m ²)			整地用作業機
			窒素	リン酸	カリウム	
テンサイ	65	22.5	16.0	26.6	16.0	ロータリーハロー
ジャガイモ	65	30	10.0	15.7	12.9	ロータリーハロー
春播コムギ	34	条播	7.0	14.0	8.4	スプリングハロー
ダイズ	65	20(2粒)	4.0	13.0	10.0	パディハロー
アズキ	65	20(2粒)	4.0	13.0	10.0	パディハロー

*テンサイには、硝酸態窒素、ホウ素、マンガンを含む肥料を施用。
春播コムギの播種量は14g/m²。
春播コムギの施肥量は、1989年まで窒素：リン酸：カリウム = 5.0 : 6.0 : 5.0g/m²。

第8表 試験区と処理内容.

区	略称	連作	輪作	施肥		土壌燻蒸
				麦稈厩肥	バーク堆肥 (施用量kg/m ²)	
連作対照区	C0	○				
厩肥1.5kg/m ² 区	M1.5	○		1.5		
厩肥3kg/m ² 区	M3	○		3		
厩肥5kg/m ² 区	M5	○		5		
バーク1.5kg/m ² 区	B1.5	○			1.5	
バーク3kg/m ² 区	B3	○			3	
バーク5kg/m ² 区	B5	○			5	
土壌燻蒸3kg/m ² 区	F3	○		3		○
土壌燻蒸1.5kg/m ² 区	F1.5	○		1.5		○
土壌燻蒸区	F0	○				○
輪作区	R		○			
処理期間			← 1980~ →		1981~	1990~

*テンサイ、ジャガイモ、春播コムギに対する土壌燻蒸は1991年に開始。
土壌燻蒸区に対する有機物施用は1980年に開始。



第10図 試験区配置.

試験区の内容は8表に示した.

輪作区の作付け順序はテンサイ→ジャガイモ→アズキ→春播コムギ→ダイズ.

圃場外周は144m × 36m.

なお、連作区と輪作区間の通路は5mとした。

輪作区の作物残さはすき込んだが、連作区の作物残さは、土壌病害虫対策のため持ち出した。輪作区の作付け順序はテンサイ→アズキ→ジャガイモ→春播コムギ→ダイズとした。輪作区(R)と連作対照区

(C0)は、化学肥料のみで栽培した。有機物の効果を検討するため、連作区には麦稈厩肥、バーク堆肥を各1.5, 3, 5 kg/m²施用する区(M1.5, M3, M5, B1.5, B3, B5)を設けた。麦稈厩肥、バーク堆肥は1年程度切り返したのものを使用し、麦稈厩肥は試験

第9表 施用有機物の成分(1981年).

	pH	全炭素	全窒素	リン酸	カリウム	苦土	石灰	C/N比
(%)								
麦稈厩肥	7.2	23.5	2.4	1.3	2.8	0.9	0.4	9.9
バーク堆肥	7.0	21.8	1.1	1.0	1.2	1.2	0.4	19.4

*松口・新田(1988)より引用.

初年目(1980年)から、バーク堆肥は試験2年目(1981年)から施用した。1981年に施用した有機物の成分を第9表に示した。有機物の窒素、カリウムは麦稈厩肥で高く、C/N比はバーク堆肥で高かったが、いずれの有機物もC/N比は10~20程度であった。C/N比が10~20程度の値の有機物は、土壤中でゆるやかに窒素を放出すると考えられる(志賀ら, 1985)。

土壤燻蒸区では、1989年以前は石灰窒素を施用したが、1990年以降は土壤燻蒸剤を使用した。土壤燻蒸剤は、ダイズ、アズキにはD-D剤(1,3-dichloropropene)を、テンサイ、ジャガイモ、春播コムギには1993年までクロルピクリン(Trichloronitromethane: Cl₃CNO₂)を、1994年からD-D剤を使用した(第10表)。土壤燻蒸剤の処理間隔は60×30cm、1穴当りの処理量は約3mlとし、播種2週間前には、耕うんしてガス抜きを行った。なお、5月下旬に播種するマメ類は、4月に燻蒸処理を行ったが、テンサイ、ジャガイモ、春播コムギは4月下旬に作付けするため、融雪後の土壤燻蒸では、播種(移植)前にガス抜きすることができない。これらの作物に対する土壤燻蒸は、前年10月に行うこととしたため、テンサイ、ジャガイモ、春播コムギでは1990年の作付け以前に土壤燻蒸を行うことができなかった。これらの作物では処理開始が1年遅れ、1991年からの処理となった。

3) 土壤の窒素, リン酸, カリウムの分析

試験圃場は淡色黒ボク土に設置した。試験開始前(1979年)、試験開始後5年目(1984年)の土壤分析値は既往の報告(松口・新田, 1988)から引用した。試験開始後14~15年目にあたる1993年、1994年の測定値は、各試験区の作物収穫後に、賽の目5点(試験区の4隅と中央から各1点)について表層15cmの土壤を採取し、混合・風乾した後、窒素は、培養法で測定した可給態窒素(≡バイオマス窒素)と高い相関を示す熱水抽出法(赤塚・坂柳, 1964)、可給態リン酸はTrough法による比色定量法(関谷, 1970)、可給態カリウムは1N酢酸アンモニウムで抽出したものを蛍光分析法(三須・宮里, 1970)で分析した。各養分は、以下、窒素、リン酸、カリウムと表記する。

4) 収量調査

収穫調査は1区2㎡(1980~1990年)、あるいは、1区1㎡×2反復(1991~1995年)で行った。テンサイは、第1葉痕の位置で根と地上部を切断し、根の生重(g/㎡)を測定し、根重とした。糖分(%)は冷水浸出法で測定し(農林水産省北海道農業試験場他, 1986)、根重×糖分を糖量(g/㎡)とした。

ジャガイモは、面積当たりの上いも重(g/㎡)、デンプン価(%)を測定し、それらの値からデンプン収量(g/㎡)を算出した。上いもは20g以上の塊茎

第10表 各年度における土壤消毒処理.

年	1980	1981	1982	~	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995
テンサイ	←—————			石灰窒素	—————→				クロルピクリン			D-D	
ジャガイモ	←—————			石灰窒素	—————→				クロルピクリン			D-D	
春播コムギ	←—————			石灰窒素	—————→				クロルピクリン			D-D	
ダイズ	←	←	←	石灰窒素	—————→	←	←	←		D-D	—————→		
アズキ	←	←	←	石灰窒素	—————→	←	←	←		D-D	—————→		

である。岡(1976b)の提示した式(1)にしたがってデンプン価を算出し、デンプン収量は式(2)により算出した。なお、比重は、ライマン比重計によって計測した。

デンプン価 = $214 \times \text{比重} - 217.184$ ……式(1)

デンプン収量 = $\text{上いも重} \times (\text{デンプン価} - 1)$ ……式(2)

ダイズ、アズキ、春播コムギの収量は、収穫物を風乾、脱穀、風選した後、子実重(g/m³)を測定した。収量構成要素は、ダイズ、アズキは面積当たり粒数と百粒重、春播コムギは面積当たり粒数と千粒重を測定した。

連作による減収は、連作対照区、土壤燻蒸区について、輪作区に対する指数を算出し(式3, 4)、輪作区の収量と併記した。

連作の影響 =

連作対照区の収量 ÷ 輪作区の収量 × 100 ……式(3)

連作と土壤燻蒸の影響 =

土壤燻蒸区の収量 ÷ 輪作区の収量 × 100 ……式(4)

連作、有機物施用、土壤燻蒸の影響を検討するため、各処理区の収量について年度を反復とする分散分析を行った。その際、試験途中で品種、施肥量、土壤燻蒸剤の種類が変わることがあったため、分散分析は同じ条件の年度について行った。テンサイでは、品種(ソロラーベ→モノエース→モノエースS)、土壤燻蒸処理(無→クロルピクリン→D-D剤)が年度によって異なったため、ソロラーベを供試した1981～1985年、モノエースを供試した1986～1990年、モノエースSを供試し、クロルピクリンを施用した1992～1993年、モノエースSを供試し、D-D剤を施用した1994～1995年について、年度を反復とする分散分析を行った。分散分析でF値が有意となった場合、スチューデント化した範囲を用いた最小有意差も算出し(廣崎, 1978)、輪作区の値を基準として示した。なお、連作試験では反復がないため、この分散分析は処理間差ではなく、試験区間差を評価したことになる。したがって、解析結果には処理の影響だけではなく、場所の影響も含まれると考えられた。

連作により収量が減少するかどうか、特定の処理によりその減少を回復できるかどうかを判定するには、連作区(O: Old soil)、連作処理区(Ot: Old soil+treatment)、輪作区(V: Virgin soil)、輪作処理区(Vt: Virgin soil+treatment)が必要である(平野, 1977; 山田, 1981)。連作により収量が減少す

る時には、①連作区の収量が輪作区より減少する($O < V$)。また、ある処理によって連作による減収の原因が除去された時には、②処理によって連作区の収量が増加し($O_t > O$)、③連作処理区の収量は輪作区と等しくなり($O_t = V$)、④輪作処理区の収量は輪作区と等しくなる($V_t = V$) (平野, 1977)。しかし、連作試験では、輪作処理区を設けていないため、①輪作区に対する連作区の減収が有意かどうか、②処理によって連作区の収量が輪作区並に回復したかどうかのみを検討した。連作対照区の収量が、輪作区-最小有意差より低い値であれば、その作物は連作によって減収したと考えられた。また、有機物施用区、土壤燻蒸区の収量が、輪作区-最小有意差よりも高い値であれば、それらの処理によって連作による減収は軽減されたと考えられた。なお、連作障害の原因については、土壤病害虫、土壤養分と収量の関係から検討することとした。

5) 土壤病害虫

テンサイ根腐病(*Rhizoctonia solani*)罹病程度の調査は1985年に開始した。罹病程度は、0～5の6段階(NAIKI and UI, 1977)で評価した。収穫約1か月前に試験区の全個体の地上部を達観調査し、その平均値を算出した。

ジャガイモそうか病(*Streptomyces* spp.)罹病程度は収量調査に用いた1～2 m²の面積の全塊茎について行い、塊茎の外観を0～5の6段階で評価し、その平均値を算出した。そうか病罹病程度が5の塊茎は、ほぼ全表面が病斑におおわれていた。

ダイズのダイズシストセンチュウ(*Heterodera glycines*)は、試験区ごとに跡地土壌を採取し、常法により卵密度を測定した(相場, 2004)。なお、1992年にダイズ品種をセンチュウ抵抗性の「トヨムスメ」に変更したため、それ以降の測定は行わなかった。アズキでは、ダイズと同様に、ダイズシストセンチュウ卵密度を1990年、1991年に調査し、その値について年度を反復とする分散分析を行った。

春播コムギでは、1991年の跡地土壌の立枯病抑止性を調査した。各試験区の土壌にコムギ種子を33粒播種し、立枯病菌(*Gaeumannomyces graminis*)を接種して、立枯病の発病株率を調査した。実験は10反復行い、それらのデータから分散分析を行った。

3. 結果

1) 土壌の窒素, リン酸, カリウム

試験の経過に伴う土壌理化学性の推移を第11表に示した。連作試験の全試験区を平均すると、毎年有機物を 2 kg/ m²程度施用していたことになる。試験圃場が養分供給力の低い淡色黒ボク土(西宗ら, 1982b)であったため、試験開始前(1979年)の土壌養分は、北海道施肥標準と比べて低かった。試験の経過にともなって、窒素、リン酸等の土壌養分は増加し、土壌の養分保持力の指標となる塩基置換容量

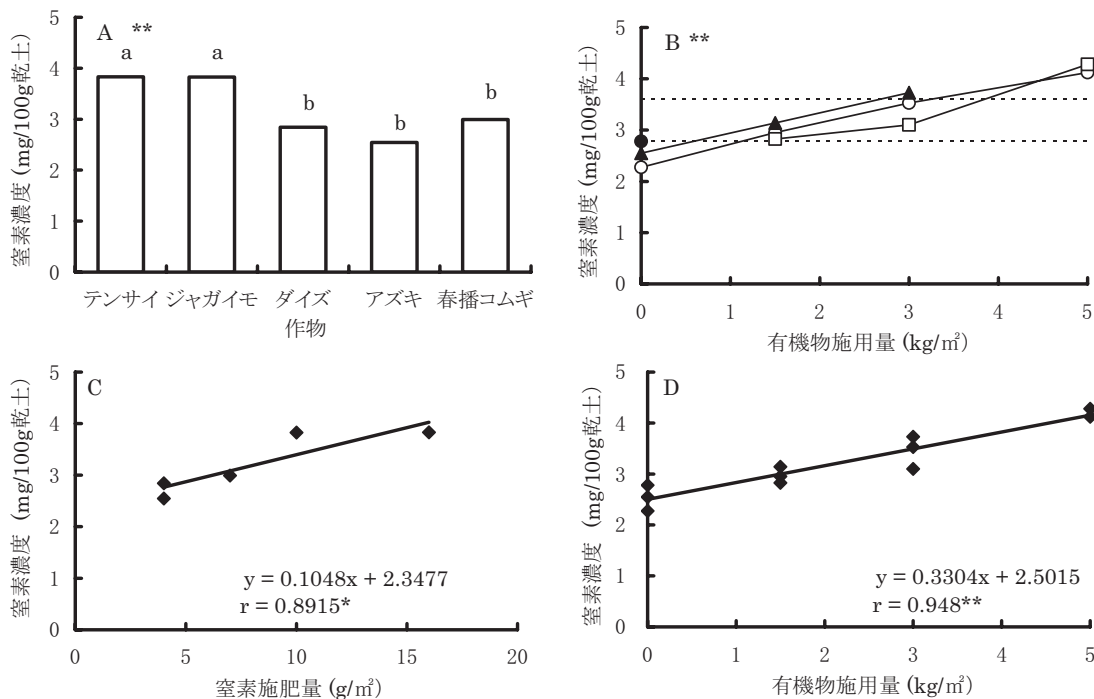
(Cation Exchange Capacity : CEC)も増加したが、1993年になっても、リン酸の平均値は北海道施肥標準における基準値よりも若干低いままであった。

1993年、1994年の土壌分析値について、年度を反復とする分散分析を行ったところ、各養分とも作物間差、処理間差が有意となった。しかし、交互作用は認められなかったため、作物・処理毎に、窒素、リン酸、カリウムの平均値を示した(第11図～第13図)。各養分とも施肥量が多いテンサイ、あるいはジャガイモで高い値を示し、各作物の施肥量と跡地

第11表 土壌化学性の推移.

	窒素	リン酸	カリウム	苦土	石灰	CEC
	(mg/100g乾土)					(me/100g乾土)
試験開始前(1979秋)	1.9	1.4	16.0	6.2	100.2	15.5
試験5年目(1984秋)	1.9	5.5	27.5	12.4	145.5	16.9
試験14年目(1993秋)	2.5	9.3	36.3	18.3	161.4	19.7
北海道施肥標準		10～30	11～24	14～26	140～200	

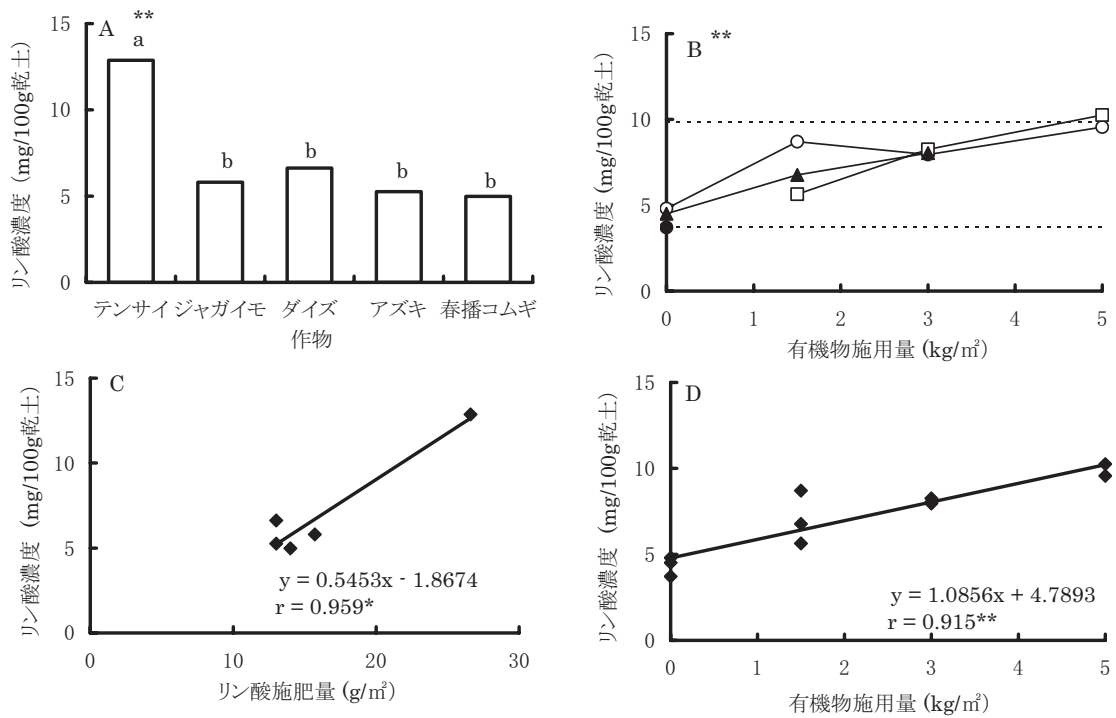
*試験開始前、試験5年目の値と北海道施肥標準は松口・新田(1988)より引用。
 試験5年目、同14年目の値は、有機物施用区を含む全試験区の平均値。
 全試験区有機物施用量を平均すると約 2 kg/ m²となる。



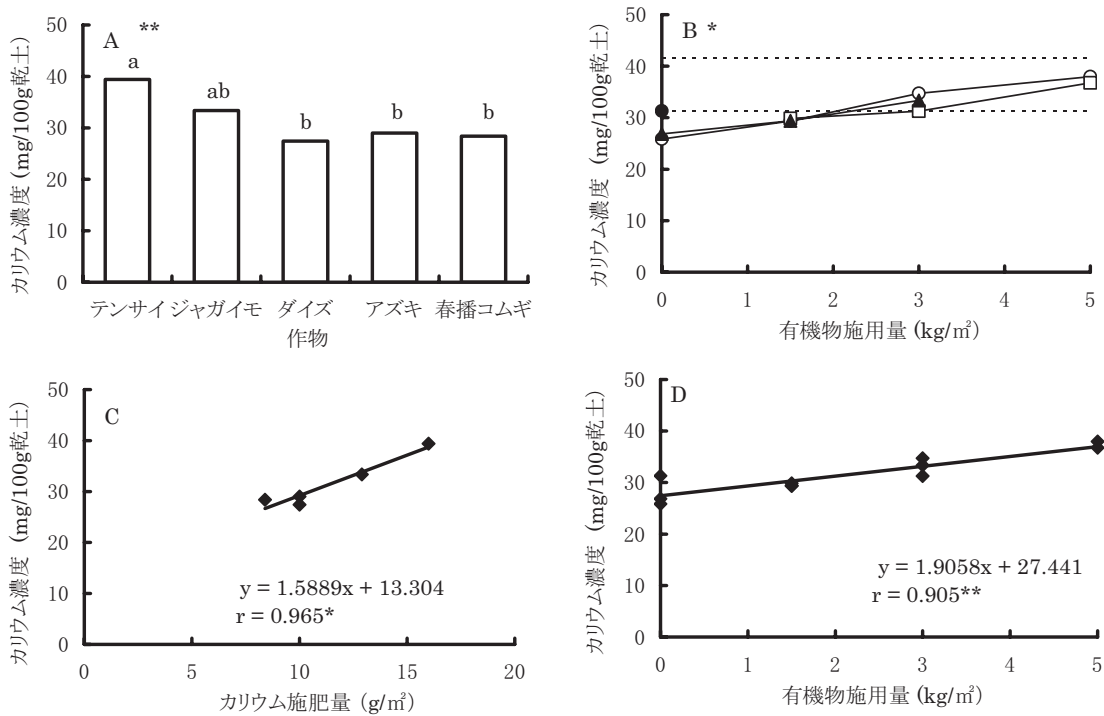
第11図 作物(A, C), 有機物施用量(B, D)が跡地土壌の窒素濃度に及ぼす影響(1993～1994年).

A, B では年度を反復とした分散分析を行い、スチューデント化した範囲を用いた最小有意差を算出した。A ではアルファベットで最小有意差を示し、B では輪作区の値、輪作区+最小有意差の値を点線で示した。C では各作物に対する窒素施肥量、D では有機物施用量と跡地土壌の窒素濃度の相関分析を行った。

**は 1%, *は 5% 水準で有意。



第12図 作物(A, C), 有機物施用量(B, D)が跡地土壌のリン酸濃度に及ぼす影響(1993 ~ 1994年).
 A, Bでは年度を反復とした分散分析を行い, スチューデント化した範囲を用いた最小有意差を算出した.
 Aではアルファベットで最小有意差を示し, Bでは輪作区の値, 輪作区+最小有意差の値を点線で示した.
 Cでは各作物に対するリン酸施肥量, Dでは有機物施用量と跡地土壌のリン酸濃度の相関分析を行った.
 **は1%, *は5%水準で有意.



第13図 作物(A, C), 有機物施用量(B, D)が跡地土壌のカリウム濃度に及ぼす影響(1993 ~ 1994年).
 A, Bでは年度を反復とした分散分析を行い, スチューデント化した範囲を用いた最小有意差を算出した.
 Aではアルファベットで最小有意差を示し, Bでは輪作区の値, 輪作区+最小有意差の値を点線で示した.
 Cでは各作物に対するカリウム施肥量, Dでは有機物施用量と跡地土壌のカリウム濃度の相関分析を行った.
 **は1%, *は5%水準で有意.

土壌の養分濃度は有意な正の相関を示した。また、有機物施用量が多いほど各養分は高い値を示し、有機物施用量と跡地土壌の養分濃度も有意な正の相関を示した。土壌へ施用した養分は作物によって吸収され、雨水等による溶脱によって失われる可能性があるため、跡地土壌に残存するとは限らない。しかし、10年以上同様の肥料、有機物を連用した後の1993年、1994年においては、跡地土壌の養分は施肥量、有機物施用量をよく反映していた。次に、それぞれの作物の収量、収量構成要素と土壌病害虫の発生を検討する。

2) テンサイ

(1) 収量と収量構成要素

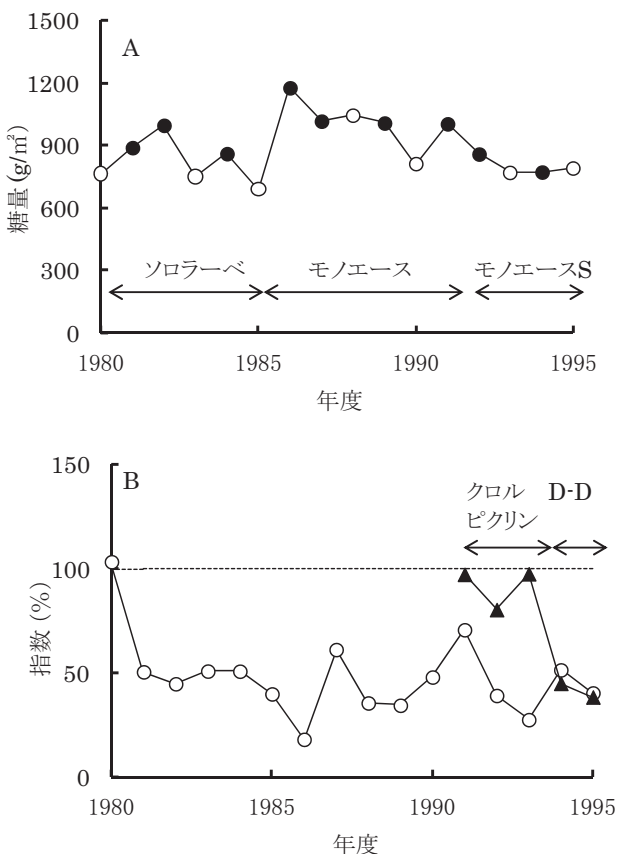
テンサイの糖量の推移を第14図に示した。輪作区の収量は、輪作区が連作区と隣接し、土壌混和によって連作の影響を受けた可能性がある年度(○)、それ

以外の年度(●)に分けて示した。輪作区の収量は年度によって変動し、ソロラーベからモノエースへの品種変更の際にやや増加する傾向があった。しかし、輪作区と連作区が隣接した年度や、冷害によりマメ類が大きく減収した1983年(畑作部, 1984), 1993年(豊田, 1994)であっても、テンサイが減収することはなかったため、輪作区を基準として連作の影響を検討できると考えた。連作対照区の指数は、ほとんどの年度で50%程度まで減少したが、土壌燻蒸区ではクロルピクリン施用年度の指数が100%近い値を示した。

連作、有機物施用、土壌燻蒸がテンサイの糖量におよぼす影響を第15図に示した。試験条件の異なるソロラーベ供試期間(1981年～1986年:A), モノエース供試期間(1987年～1989年:B), モノエースSにクロルピクリンを施用した期間(1992年～1993年:C), モノエースSにD-D剤を施用した期間(1994年～1995年:D)について、年度を反復とした分散分析を行った。いずれの場合にも、連作対照区の糖量は輪作区より有意に減少した。有機物施用量の増加にともなって、糖量は増加する傾向を示し、その傾向は試験後期ほど明瞭となった。すなわち、1990年まで(A, B)は有機物施用によって糖量が輪作区と有意差がなくなるまで回復することはなかったが、1992年～1993年(C)は有機物を3kg/m²以上施用した区、1994年～1995年(D)は1.5kg/m²以上施用した区で、糖量が輪作区と有意差がなくなるまで増加した。その際、有機物の種類による大きな相違は認められなかった。土壌燻蒸の効果は薬剤によって異なり、クロルピクリンを施用した年度には、糖量は輪作並に回復したが、D-D剤を施用した年度に効果は見られなかった。

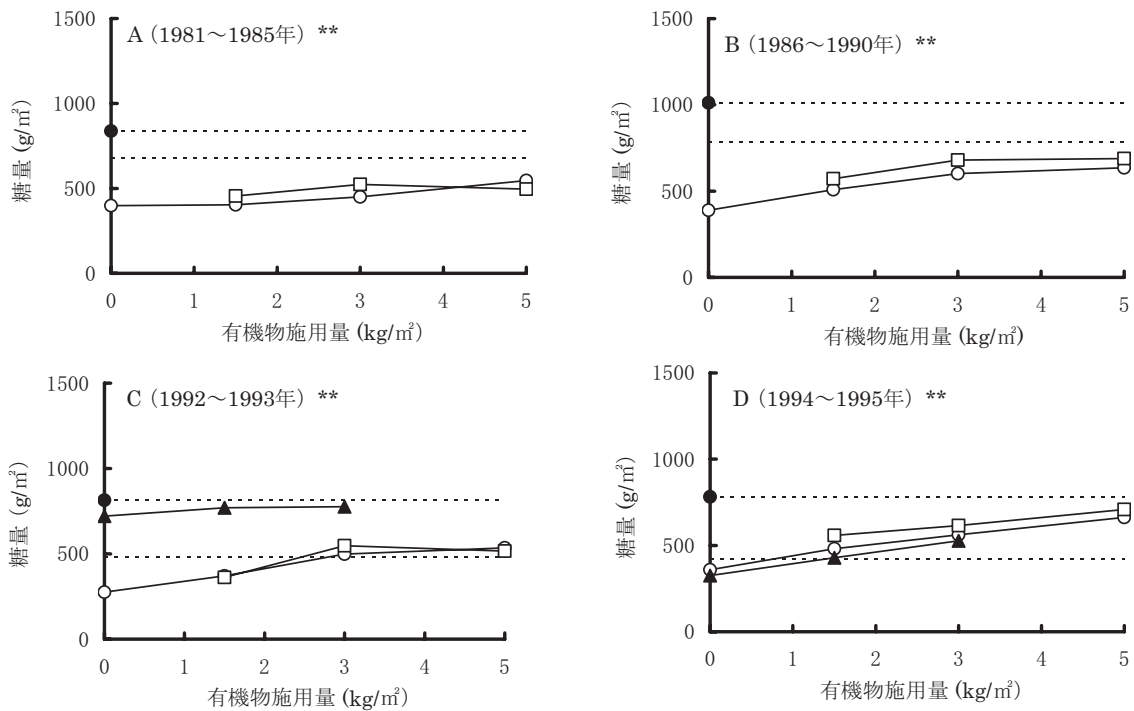
収量構成要素である根重と糖分の推移を第16図に示した。糖量と同様、根重、糖分が輪作区と連作区が隣接した年度や冷害年に減少することはなかった。連作区の根重の指数は、糖量と同様に50%程度まで減少したが、糖分の指数は80%程度で推移し、連作による糖分の減少は根重と比べると小さかった。糖分の指数はクロルピクリン施用によって増加する傾向を示したが、クロルピクリン施用1年目の1991年には、土壌燻蒸区だけでなく、連作対照区の指数も輪作区より高い値を示した。

糖分は、他の年度と異なる傾向を示した1991年(B)、および、他の年度とほぼ同様の傾向を示した



第14図 テンサイの糖量の推移。

- A は輪作区の値を示した。
- ：通常年，○：輪作区が連作区と隣接した年。
- B は輪作区の値に対する指数を示した。
- ：連作対照区(C0)÷輪作区(R)×100,
- ▲：土壌燻蒸区(F0)÷輪作区(R)×100.

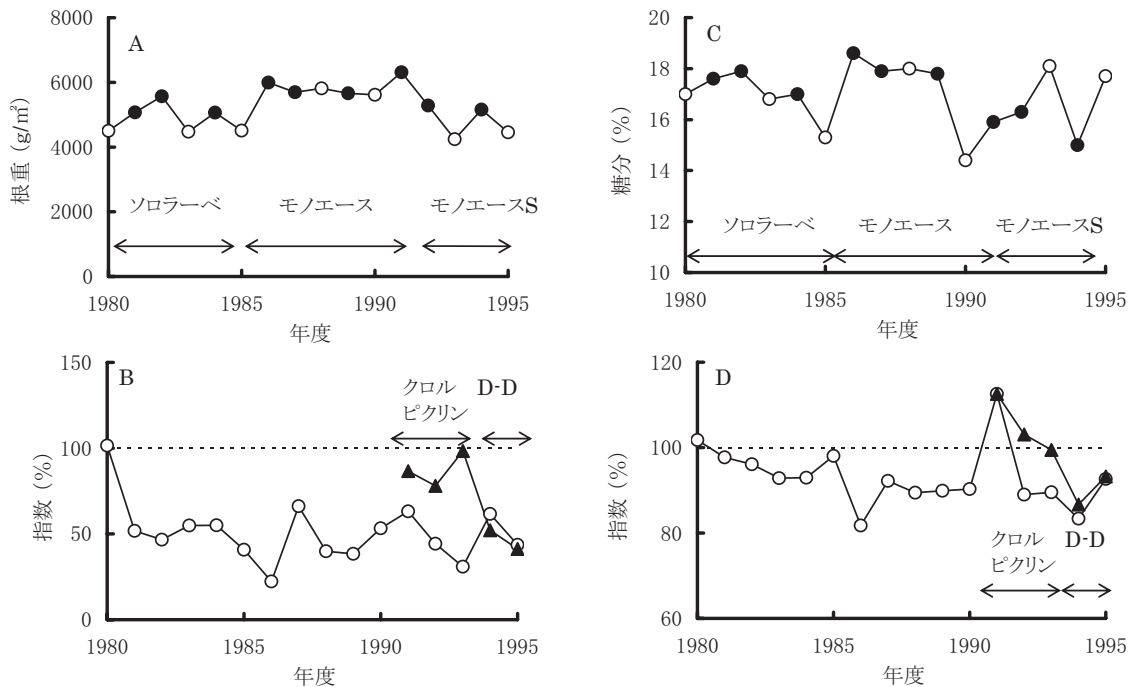


第15図 連作、有機物施用量、土壌燻蒸がテンサイの糖量におよぼす影響。

A：「ソロラーベ」供試年，B：「モノエース」供試年，C：「モノエースS」+クロロピクリン施用年，
D：「モノエースS」+D-D剤施用年。

○：連作対照区と麦稈既肥施用区(C0, M1.5, M3, M5)，□：バーク堆肥施用区(B1.5, B3, B5)，
▲：土壌燻蒸区(F0, F1.5, F3)，●：輪作区(R)。

分散分析からスチューデント化した範囲を用いた最小有意差を算出し、輪作区の値、輪作区-最小有意差の値を点線で示した。**は1%水準で有意。



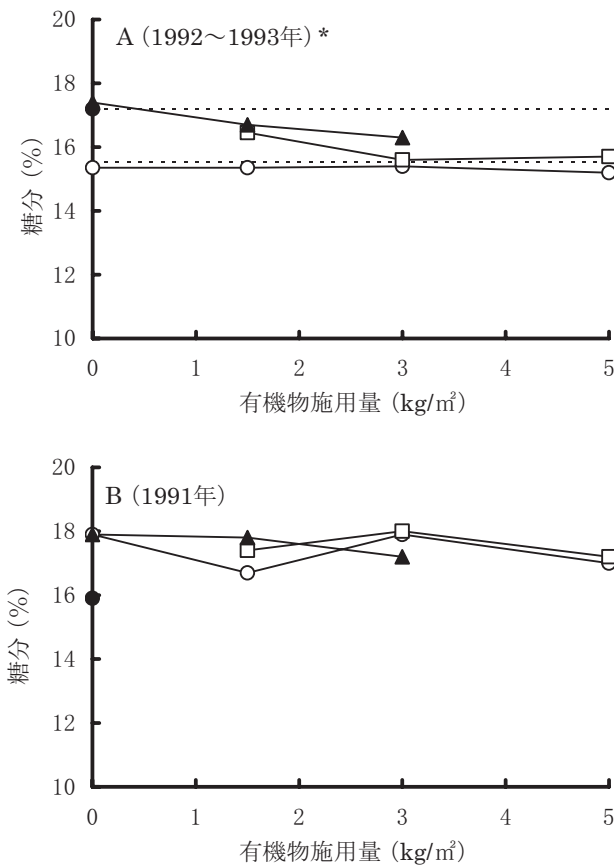
第16図 テンサイの根重(A, B)，糖分(C, D)の推移。

A, Cは輪作区の値を示した。●：通常年，○：輪作区が連作区と隣接した年。

B, Dは輪作区の値に対する指数を示した。

○：連作対照区(C0)÷輪作区(R)×100，▲：土壌燻蒸区(F0)÷輪作区(R)×100。

1992年～1993年(A)について示した(第17図)。1992年～1993年の糖分は、輪作区より連作対照区の値が有意に減少し、有機物施用量が増加しても、糖分はほとんど変化しなかった。クロルピクリン施用によって糖分が有意に増加したが、その場合には、有機物施用量にともなって糖分が減少する傾向が認められた。それに対し、1991年の糖分では、クロルピクリン施用区を含めた連作10区の値が、輪作区より高い値を示した。また、連作区において、有機物施用量、クロルピクリン施用の影響は見られなかった。



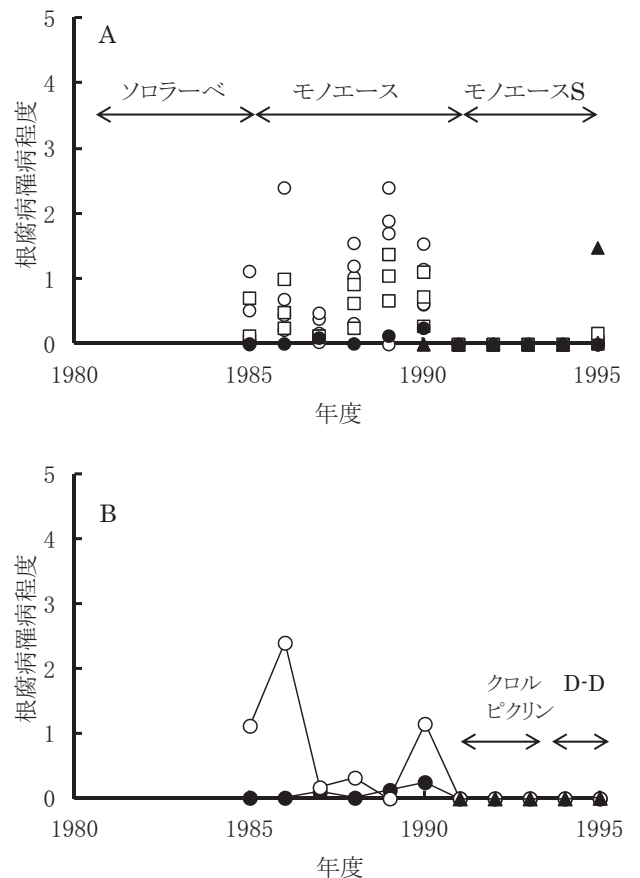
第17図 クロルピクリン施用年度における、連作、有機物施用量、土壤燻蒸がテンサイの糖分におよぼす影響。

A は通常年、B は連作区の糖分が高い値を示した年。
 ○：連作対照区と麦稈厩肥施用区(C0, M1.5, M3, M5),
 □：パーク堆肥施用区(B1.5, B3, B5),
 ▲：土壤燻蒸区(F0, F1.5, F3), ●：輪作区(R).
 A では分散分析を行い、スチューデント化した範囲を用いた最小有意差を算出した。
 *は5%水準で有意。
 A では、輪作区の値、輪作区-最小有意差の値を点線で示した。

(2) 土壤病害虫

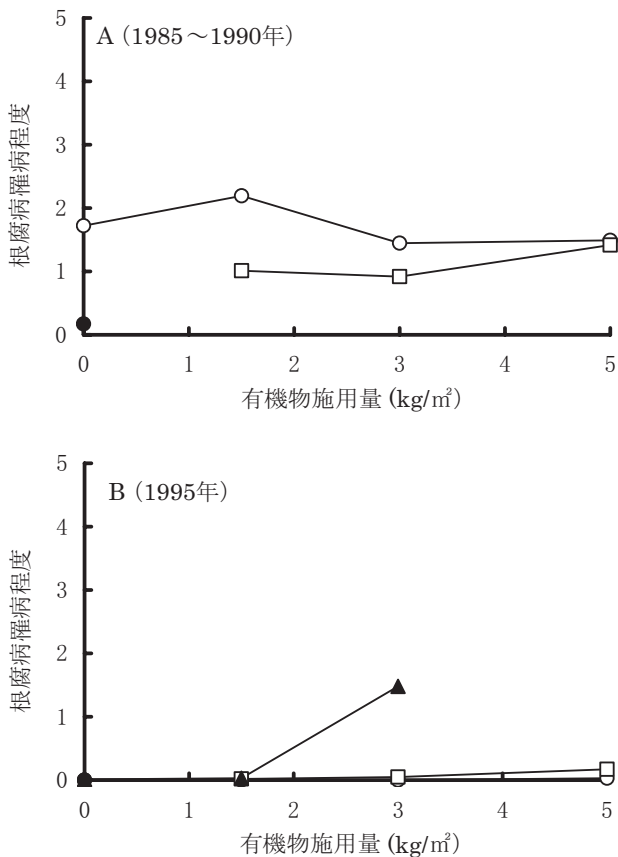
テンサイ根腐病の罹病程度について、全試験区の値の推移(第18図A)、および、連輪作の影響を把握するため、輪作区(R)、連作対照区(C0)、土壤燻蒸区(F0)の値のみの推移(第18図B)を示した。全試験区における根腐病の罹病程度では、輪作区の値はほぼ0であったが、連作各区で高い値を示した。しかし、連作12～15年目にあたる1991年～1994年には、連作区でも全く発病が認められなかった。その後、1995年には、土壤燻蒸+麦稈厩肥3kg/m²施用区(F3)のみで根腐病が発生した。

根腐病の試験区間差を検討するため、根腐病の発生が著しかった1985年～1990年の罹病程度(第19図A)、根腐病がほとんど見られなくなった後、土壤



第18図 テンサイ根腐病の罹病程の推移。

A は全試験区の値を示した。
 ○：連作対照区と麦稈厩肥施用区(C0, M1.5, M3, M5),
 □：パーク堆肥施用区(B1.5, B3, B5),
 ▲：土壤燻蒸区(F0, F1.5, F3), ●：輪作区(R).
 B は連作対照区(C0)、土壤燻蒸区(F0)、輪作区(R)の値を示した。



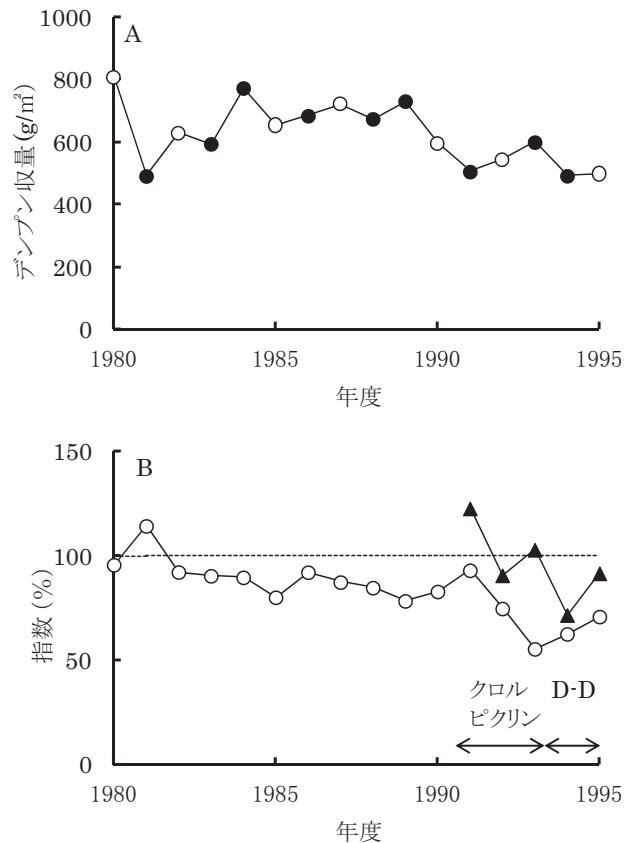
第19図 連作, 有機物施用量, 土壌燻蒸がテンサイ根腐病の罹病程度におよぼす影響。
 Aは根腐病罹病程度が減少する以前の年。
 ○: 連作対照区と麦稈厩肥施用区(C0, M1.5, M3, M5),
 □: バーク堆肥施用区(B1.5, B3, B5),
 ▲: 土壌燻蒸区(F0, F1.5, F3), ●: 輪作区(R).
 Bは罹病程度が減少した後, 根腐病が再発生した年.

燻蒸 + 麦稈厩肥 3 kg/ m²施用区(F3)で根腐病が再び発生した1995年(第19図 B)の罹病程度を検討した。1985年～1990年の罹病程度に対する分散分析(A)では, 年度間差が大きいこともあり, F値は有意にはならなかった。罹病程度は, 輪作区に比べ連作各区で高い傾向があったが, 有機物施用量による明瞭な傾向は認められなかった。なお, この期間はクロルピクリンによる土壌燻蒸を開始する前であった。根腐病が再発した1995年には, 土壌燻蒸 + 有機物 3 kg/ m²施用区のみで罹病程度が約1.5となった。

3) ジャガイモ

(1) 収量と収量構成要素

デンプン収量の推移を第20図に示した。輪作区の収量は年度によって変動したが, 連作区と輪作区が

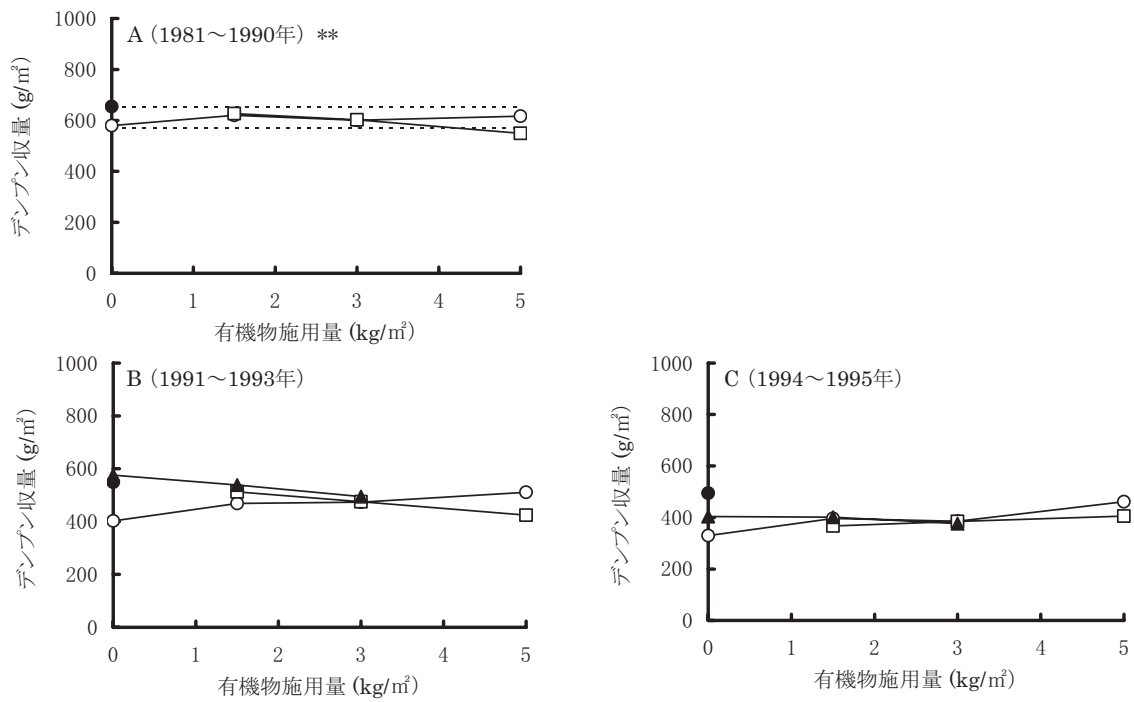


第20図 ジャガイモのデンプン収量の推移。
 Aは輪作区の値を示した。
 ●: 通常年, ○: 輪作区が連作区と隣接した年。
 Bは輪作区の値に対する指数を示した。
 ○: 連作対照区(C0) ÷ 輪作区(R) × 100,
 ▲: 土壌燻蒸区(F0) ÷ 輪作区(R) × 100.

隣接した年度の値が, それ以外の年度より大きく減少することはなかった。連作対照区の指数は, 連作3年目の1982年から80%程度で推移したが, 1993年以降は70%以下で推移した。土壌燻蒸区の指数は連作対照区よりもやや高く推移し, クロルピクリン施用期間にその傾向が著しかった。

連作, 有機物施用, 土壌燻蒸がデンプン収量におよぼす影響を第21図に示した。デンプン収量は, 試験条件の異なる土壌燻蒸開始以前(1981年～1990年:A), クロルピクリン施用期間(1991年～1993年:B), D-D剤施用期間(1994年～1995年:C)に分けて検討した。F値は土壌燻蒸を行わなかった場合(A)のみに有意となった。連作対照区の値が, 輪作区より有意に減少することはなかったが, バーク堆肥を5 kg/ m²施用した区では, 輪作区より有意に減収した。

土壌燻蒸の影響は薬剤によって異なり, D-D剤は



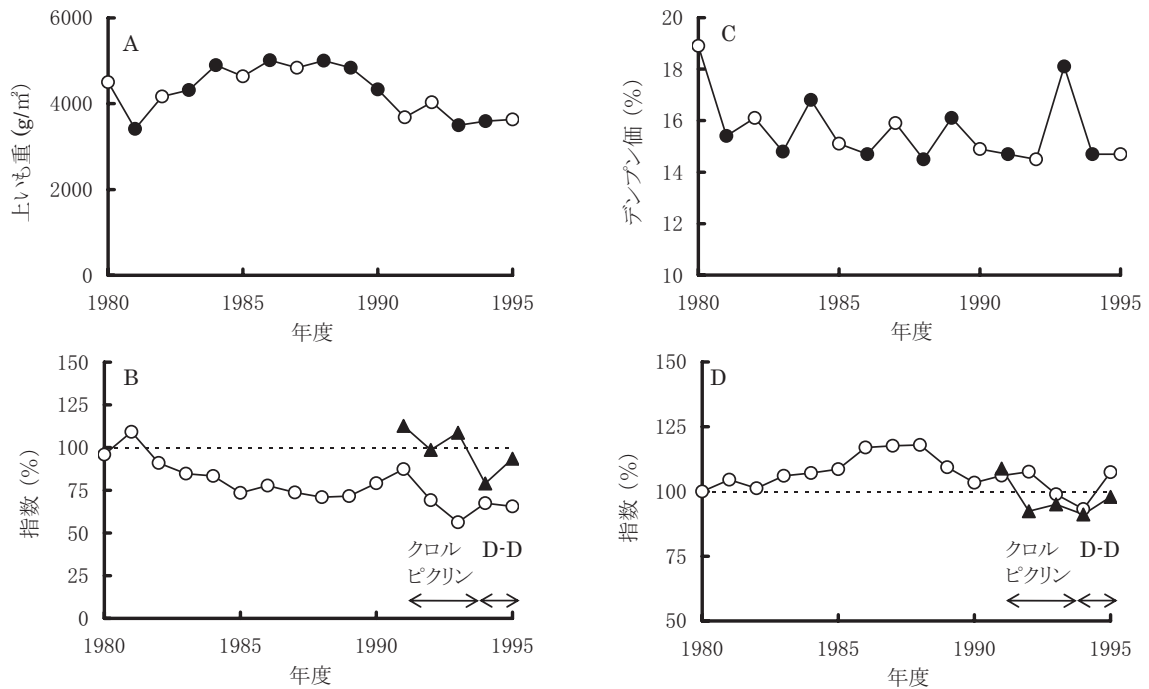
第21図 連作，有機物施用量，土壌燻蒸がジャガイモのデンプン収量におよぼす影響。

A：土壌燻蒸を行わなかった年，B：クロルピクリン施用年，C：D-D 剤施用年。

○：連作対照区と麦稈厩肥施用区(C0, M1.5, M3, M5)，□：バーク堆肥施用区(B1.5, B3, B5)，

▲：土壌燻蒸区(F0, F1.5, F3)，●：輪作区(R)。

分散分析からスチューデント化した範囲を用いた最小有意差を算出し，輪作区の値，輪作区－最小有意差の値を点線で示した。 **は1%水準で有意。

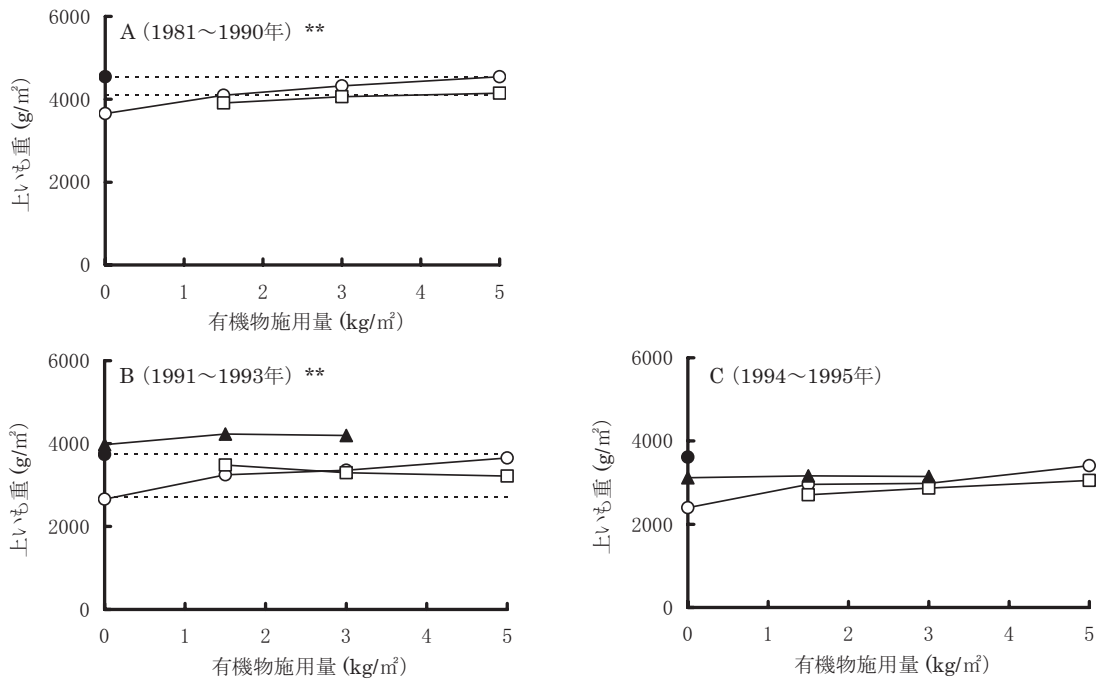


第22図 ジャガイモの上いも重(A, B)，デンプン価(C, D)の推移。

A, Cは輪作区の値を示した。●：通常の年，○：輪作区が連作区と隣接した年。

B, Dは輪作区に対する指数を示した。

○：連絡対照区(C0)÷輪作区(R)×100，▲：土壌燻蒸区(F0)÷輪作区(R)×100。



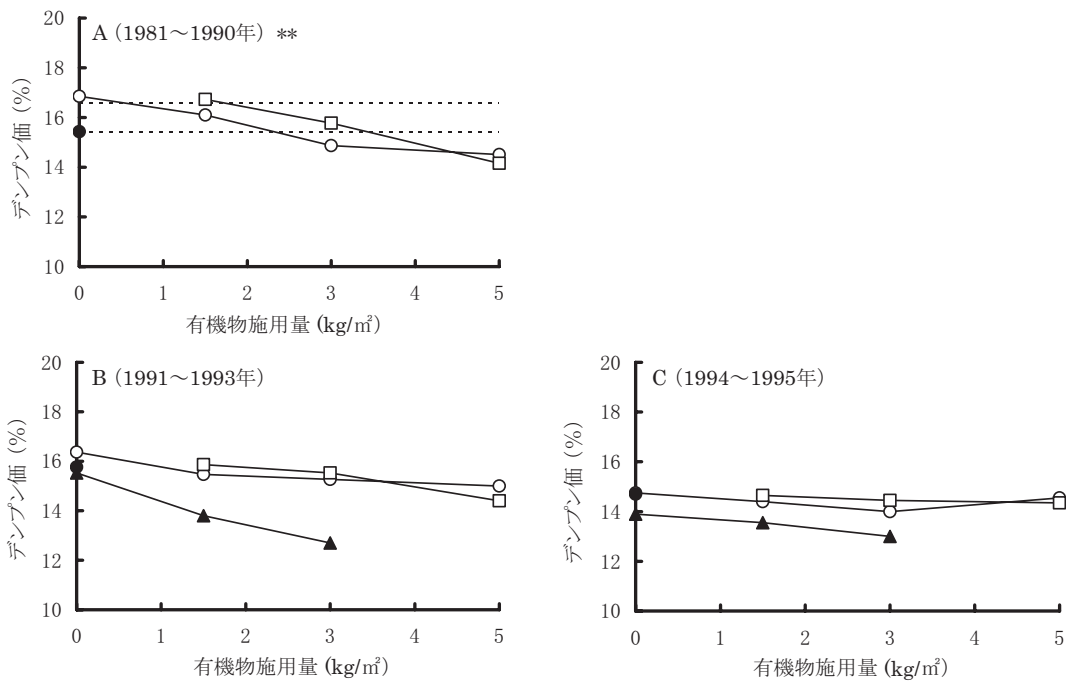
第23図 連作，有機物施用量，土壌燻蒸がジャガイモの上いも重におよぼす影響。

A：土壌燻蒸を行わなかった年，B：クロルピクリン施用年，C：D-D 剤施用年。

○：連作対照区と麦稈厩肥施用区(C0, M1.5, M3, M5)，□：パーク堆肥施用区(B1.5, B3, B5)，

▲：土壌燻蒸区(F0, F1.5, F3)，●：輪作区(R)。

分散分析からスチューデント化した範囲を用いた最小有意差を算出し，輪作区の値，輪作区－最小有意差の値を点線で示した。 **は1%水準で有意。



第24図 連作，有機物施用量，土壌燻蒸がジャガイモのデンプン値におよぼす影響。

A：土壌燻蒸を行わなかった年，B：クロルピクリン施用年，C：D-D 剤施用年。

○：連作対照区と麦稈厩肥施用区(C0, M1.5, M3, M5)，□：パーク堆肥施用区(B1.5, B3, B5)，

▲：土壌燻蒸区(F0, F1.5, F3)，●：輪作区(R)。

分散分析からスチューデント化した範囲を用いた最小有意差を算出し，輪作区の値，輪作区－最小有意差の値を点線で示した。 **は1%水準で有意。

ほとんど影響しなかった(B)が、クロルピクリンはデンブン収量を増加させる傾向があった(C)。しかし、同量の麦稈厩肥を施用したクロルピクリン施用区、無施用区を比較すると、施用量が多いほど、クロルピクリンの効果は小さくなる傾向があった。

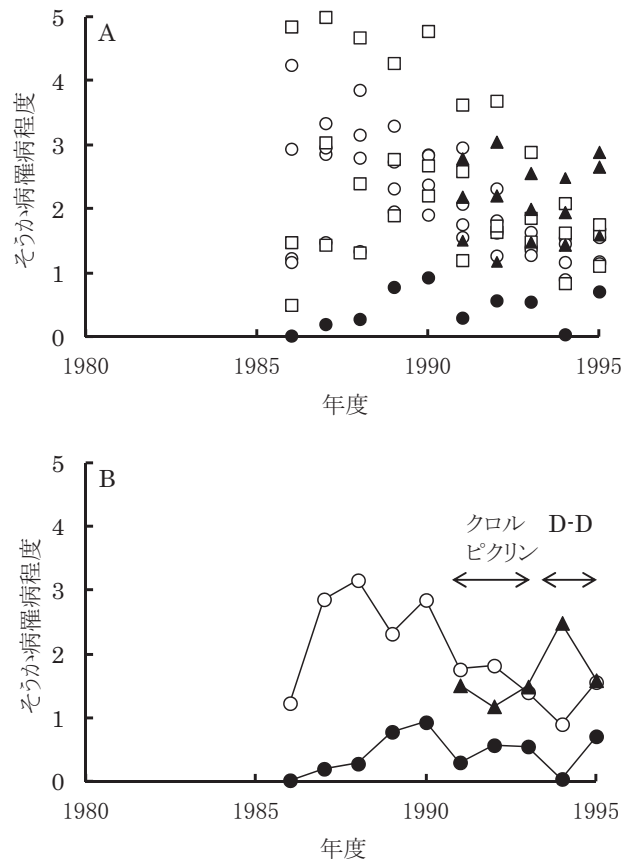
収量構成要素である上いも重、デンブン価の推移を第22図に示した。輪作区の値は、試験開始年度である1980年と、冷害年である1993年にデンブン価が高い値を示した以外、特に大きな変動は示さなかった。上いも重の連作対照区の指数は、デンブン収量よりやや大きく減少した。それに対し、デンブン価の指数は、ほとんどの年度で100%以上となった。クロルピクリン、D-D剤のいずれを施用した場合にも、上いも重の指数は増加する傾向を示したが、デンブン価ではその傾向は認められなかった。

連作、有機物施用、土壌燻蒸が上いも重、デンブン価におよぼす影響も、デンブン収量と同じ年度に分けて解析した。上いも重では1993年以前(AとB)にF値が有意となり、それらの場合、上いも重は連作対照区で有意に減少した(第23図)。また、上いも重は有機物を5 kg/ m²以上施用することによって、輪作区と有意差がなくなるまで回復した。土壌燻蒸の効果は薬剤によって異なり、クロルピクリンを施用した場合(B)の上いも重は輪作区より高い値を示したが、D-D剤を施用した場合(C)、上いも重の増加は明瞭ではなかった。

デンブン価では土壌燻蒸開始以前(A)のみでF値が有意となった(第24図)。土壌燻蒸開始以前(A)のデンブン価は、連作対照区で輪作区よりも有意に増加したが、有機物施用量の増加にともなって減少する傾向を示した。特にバーク堆肥5 kg/ m²施用区のデンブン価は、輪作区より有意に減少した。土壌燻蒸を行った年度(B, C)ではF値は有意ではなかった。デンブン価はクロルピクリン、D-D剤のいずれの土壌燻蒸剤によっても、減少する傾向を示した。

(2) 土壌病害虫

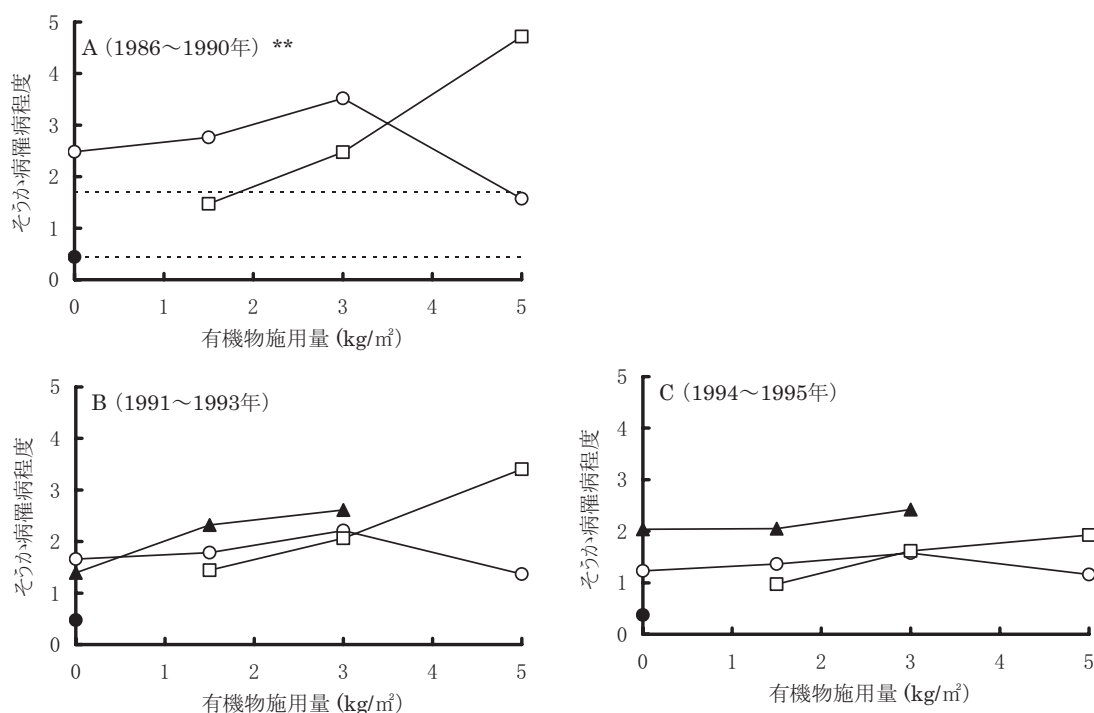
ジャガイモでは、ジャガイモシストセンチュウ(*Globodera rostochiensis*) (森, 2009)や、塊茎表面にかさぶたを作り、生食用ジャガイモの品質を低下させるそうか病(船越・松浦, 1983; 水野・吉田, 1994; 田中, 2000)が重要な土壌病害虫である。連作試験では試験途中からそうか病が発生したが、センチュウの被害は見られなかった。そうか病の罹病



第25図 ジャガイモそうか病の罹病程度の推移。
 Aは全試験区の推移を示した。
 ○：連作対照区と麦稈厩肥施用区(C0, M1.5, M3, M5),
 □：バーク堆肥施用区(B1.5, B3, B5),
 ▲：土壌燻蒸区(F0, F1.5, F3), ●：輪作区(R).
 Bは連作対照区(C0), 土壌燻蒸区(F0), 輪作区(R)の値を示した。

程度について、全試験区の値の推移(第25図 A), および、輪作区(R), 連作対照区(C0), 土壌燻蒸区(F0)の値の推移(第25図 B)を示した。そうか病の罹病程度は、1991年以降減少する傾向があった(A)。罹病程度は連作区で高かったが、クロルピクリンやD-D剤によって、罹病程度が大きく減少することはなかった(B)。

連作、有機物施用、土壌燻蒸がそうか病罹病程度におよぼす影響も、デンブン収量と同様の年度に分けて検討した(第26図)。土壌燻蒸開始以前(A)のみにF値が有意となり、輪作区に対し、連作対照区の罹病程度が有意に高くなった。有機物施用によっても罹病程度は増加する傾向があったが、麦稈厩肥5 kg/ m²施用区、バーク堆肥1.5kg/ m²施用区では、罹病程度が輪作区と有意差がなくなるまで低下した。



第26図 連作，有機物施用量，土壤燻蒸がジャガイモそうか病の罹病程度におよぼす影響。

A：土壤燻蒸を行わなかった年，B：クロルピクリン施用年，C：D-D 剤施用年。

○：連作対照区と麦稈厩肥施用区(C0, M1.5, M3, M5)，□：パーク堆肥施用区(B1.5, B3, B5)，

▲：土壤燻蒸区(F0, F1.5, F3)，●：輪作区(R)。

分散分析からスチューデント化した範囲を用いた最小有意差を算出し，輪作区の値，輪作区－最小有意差の値を点線で示した。**は1%水準で有意。

クロルピクリン施用年度(B)，D-D 剤施用年度(C)でF値は有意にならなかったが，罹病程度が連作，有機物施用によって増加する傾向を示したことから，麦稈厩肥施用量を5 kg/m²まで増加させることによって，かえって罹病程度が減少する傾向を示したことは，土壤燻蒸以前(A)と同様であった。土壤燻蒸剤では，クロルピクリンは罹病程度に影響せず，D-D 剤は逆に罹病程度を増加させる傾向を示した。

4) ダイズ

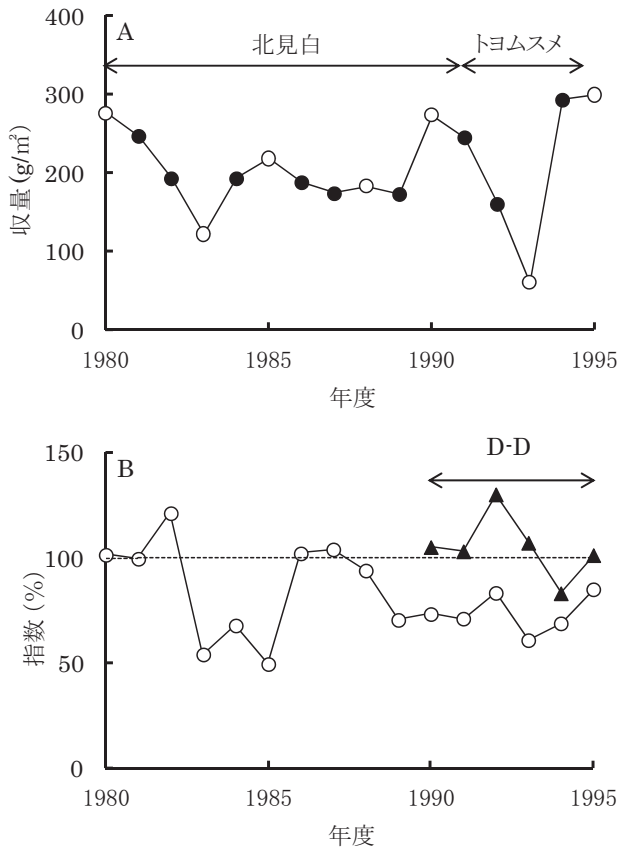
(1) 収量

輪作区のダイズ収量は，冷害年である1983年(畑作部，1984)，1993年(豊田，1994)に著しく減少したが，それ以外の年度で，輪作区と連作区が隣接した場合に大きく減少することはなかった(第27図A)。また，ダイズシストセンチュウ感受性品種である「北見白」から抵抗性品種である「トヨムスメ」への品種変更による明瞭な相違も認められなかった。連作対照区の指数は1982年までは100%以上で推移したが，1983年～1985年に50%程度まで減少

し，その後回復した後，1989年から再び70%程度まで減少した(第27図B)。ただ，1983年の指数減少には，冷害が影響した可能性もあった。土壤燻蒸剤はD-D 剤を使用した「北見白」，「トヨムスメ」とも土壤燻蒸区で指数が増加した。

連作，有機物施用，土壤燻蒸がダイズの収量におよぼす影響は，連作対照区で著しく減収した1984年～1985年(A：冷害年の1983年は除外した)，減収が軽減された1986年～1988年(B)，「北見白」にD-D 剤を施用した1990年～1991年(C)，「トヨムスメ」にD-D 剤を施用した1992年～1995年(D：冷害年の1993年は除外した)について検討した(第28図)。なお，連作対照区の指数が100%以上であった1981年～1982年は検討から除外した。1984年～1985年(A)，1986年～1988年(B)，1990年～1991年(C)でF値が有意となったが，連作対照区の収量が輪作区より有意に減少したのは1984～1985年(A)のみであった。

収量は，麦稈厩肥施用量にともなって増加する傾向があったが，1986年～1988年は，麦稈厩肥によ



第27図 ダイズの収量の推移.

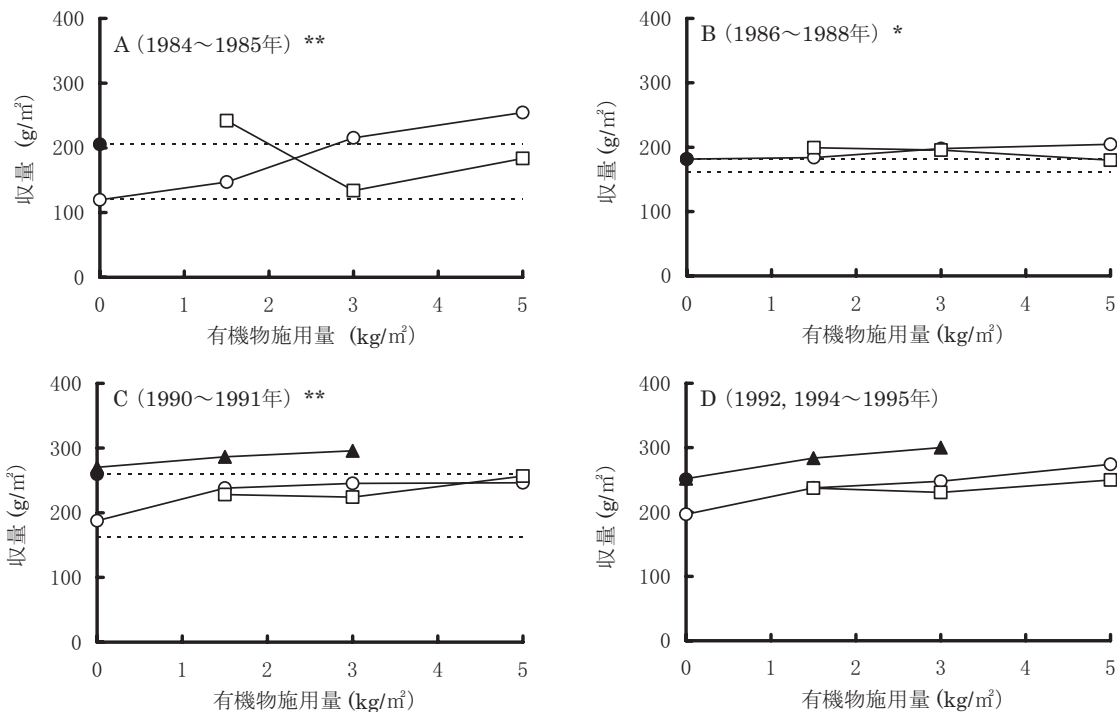
A は輪作区の数

●：通常年, ○：輪作区が連作区と隣接した年.

B は輪作区の数に対する指数

○：連作対照区 (C0) ÷ 輪作区 (R) × 100

▲：土壌燻蒸区 (F0) ÷ 輪作区 (R) × 100.



第28図 連作, 有機物施用量, 土壌燻蒸がダイズの収量におよぼす影響.

A：連作初期の減収年, B：減収回復年, C：「北見白」 + D-D 剤施用年, D：「トヨムスメ」 + D-D 剤施用年.

○：連作対照区と麦稈厩肥施用区 (C0, M1.5, M3, M5), □：バーク堆肥施用区 (B1.5, B3, B5),

▲：土壌燻蒸区 (F0, F1.5, F3), ●：輪作区 (R).

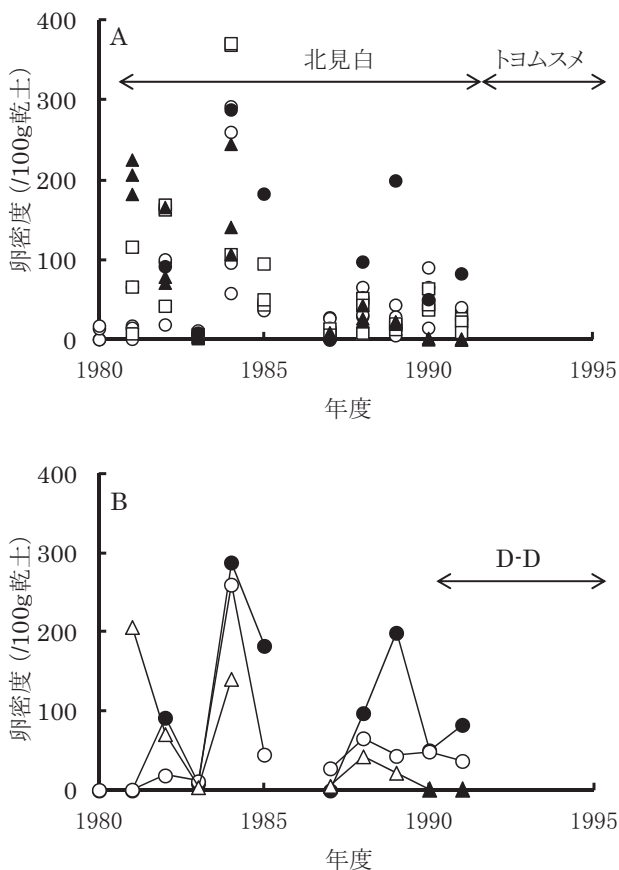
分散分析からスチューデント化した範囲を用いた最小有意差を算出し, 輪作区の数, 輪作区 - 最小有意差の値を点線で示した. **は 1% 水準, *は 5% 水準で有意.

る変動もわずかだった(B)。D-D 剤は「北見白」,「トヨムスメ」のいずれの品種に対しても, 収量を増加させる傾向があり, 有機物施用を併用しても土壤燻蒸の効果はそのまま認められた(C, D)。「トヨムスメ」に対する D-D 剤の効果は有意ではなかったが, 「北見白」では, 土壤燻蒸+有機物施用区の収量が輪作区より高い値を示した。

収量構成要素として面積当たり粒数, 百粒重の検討を行ったが, 収量と面積当たり粒数はほぼ同じ挙動を示し, 百粒重の変動はわずかだったため, データは示さなかった。

(2) 土壤病害虫

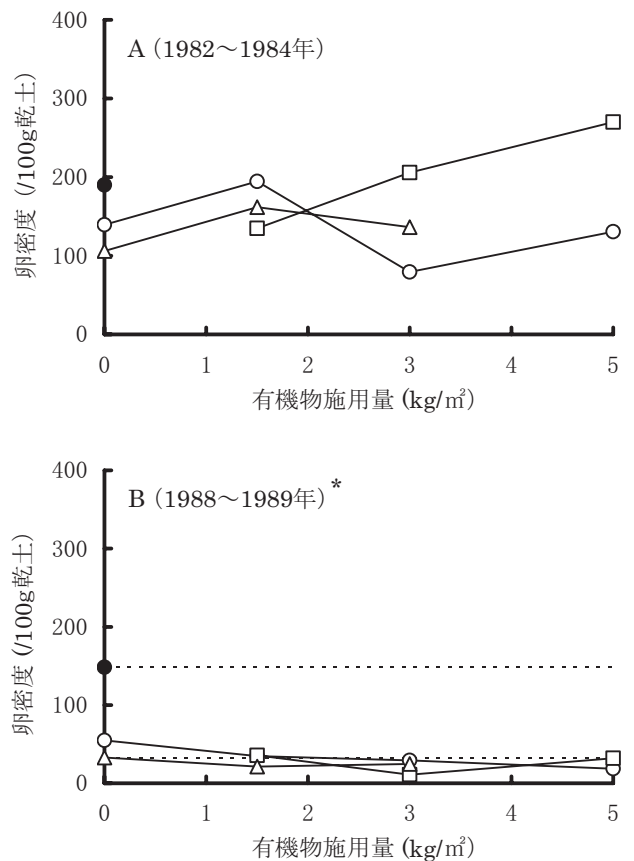
ダイズでは, 本州以南で黒根腐病などの土壤病害が報告されている(仲川・島田, 1995; 西ら, 1999)



第29図 ダイズ栽培跡地のダイズシストセンチュウ卵密度の推移。

A は全試験区の値を示した。
 ○: 連作対照区と麦稈厩肥施用区(C0, M1.5, M3, M5),
 □: バーク堆肥施用区(B1.5, B3, B5),
 ▲: 土壤燻蒸区(F0, F1.5, F3), ●: 輪作区(R)。
 B は連作対照区(C0), 土壤燻蒸区(F0), 輪作区(R)の値を示した。

が, 北海道で問題となるのは主にダイズシストセンチュウである(一戸, 1995a; 尾崎, 1969)。ダイズシストセンチュウはダイズを30%程度減収させることがある(DONALD *et al.*, 2006)。ダイズシストセンチュウの卵密度について, 全試験区の値の推移(第29図 A), および, 輪作区(R), 連作区対照(C0), 土壤燻蒸区(F0)の値の推移(第29図 B)を示した。ダイズシストセンチュウ卵密度は年度によって大きく変動し, 冷害年であった1983年に低い値を示した(A)。輪作区と連作対照区を比較すると, 連作対照区の卵密度は1987年以降低い傾向を示した(B)。土



第30図 連作, 有機物施用量, 土壤燻蒸がダイズ跡地のダイズシストセンチュウ卵密度におよぼす影響。

A は連作区の卵密度が多い時期(冷害年の1983年は除外),
 B は連作区の卵密度が少ない時期での, 年度を反復とした分散分析結果。
 ○: 連作対照区と麦稈厩肥施用区(C0, M1.5, M3, M5),
 □: バーク堆肥施用区(B1.5, B3, B5), ●: 輪作区(R),
 △: 土壤燻蒸処理開始以前の土壤燻蒸区(F0, F1.5, F3)。
 *は5%水準で有意。
 輪作区, 輪作区-最小有意差を点線で示した。

壤燻蒸区の卵密度は、土壤燻蒸開始以前は連作対照区とほぼ同様であったが、D-D 剤を施用した1990年～1991年には、卵密度はほとんど皆無となった。

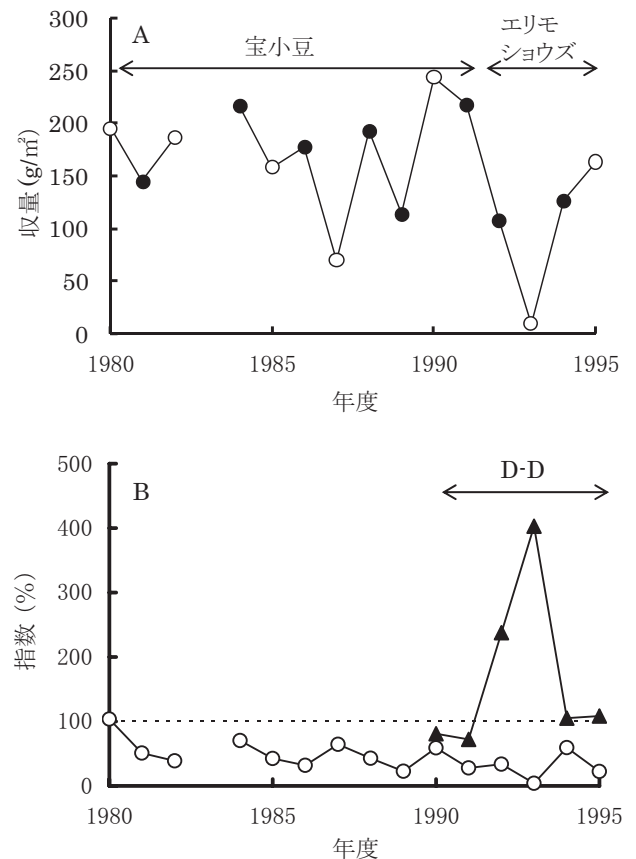
連作、有機物施用、土壤燻蒸がダイズシストセンチュウ卵密度におよぼす影響は、卵密度が高い時期で欠測区がなかった1982年～1984年(第30図 A)、卵密度が低下し、かつ土壤燻蒸を開始する以前の1988年～1989年(第30図 B)について検討した。1982年～1984年(A)は年度間差が大きかったため、F 値は有意とはならず、輪作区と連作対照区の卵密度に大きな相違は認められなかった。有機物施用による卵密度への影響には、一定の傾向は認められなかった。1988年～1989年(B)の F 値は有意となり、また、輪作区よりも連作対照区の卵密度が低い値を示したが、輪作区と連作対照区の差は有意ではなかった。有意な差は、輪作区と有機物施用区の間認められたが、連作対照区と有機物施用区の値はほとんど変わらなかった。

5) アズキ

(1) 収量

アズキの輪作区の収量は、ダイズと比べ年度によって大きく変動し、特に冷害年の1983年(畑作部, 1984), 1993年(豊田, 1994)に著しく減少した。しかし、輪作区と連作区が隣接した年度に特に減収が著しいことはなかった(第31図 A)。なお、1983年は、収量調査を行わなかった。連作対照区の指数は、テンサイの場合と同様に、常に50%程度まで減少した(第31図 B)。土壤燻蒸区の指数は、常に連作対照区よりも高くなり、1992年、1993年には200～400%まで増加した。

連作、有機物施用、土壤燻蒸がアズキの収量におよぼす影響は、「宝小豆」を供試した1981年～1989年(A), 「宝小豆」にD-D 剤を施用した1990年～1991年(B), 耐冷性の「エリモシヨウズ」にD-D 剤を施用した1992年～1995年(C: 冷害年の1993年は除外した)に分けて検討した(第32図)。いずれの場合にも F 値は有意となったが、「エリモシヨウズ」(C)では最小有意差が大きかったため、輪作区と連作対照区の差は有意にはならなかった。「宝小豆」の収量は、連作対照区で輪作区より有意に減少し、有機物を施用しても、輪作区より有意に低い値のままであった(A, B)。しかし、D-D 剤で土壤燻蒸することで「宝小豆」, 「エリモシヨウズ」の収量は増



第31図 アズキ収量の推移。

A は輪作区の値を示した。

●：通常年, ○：輪作区が連作区と隣接した年。

B は輪作区に対する指数を示した。

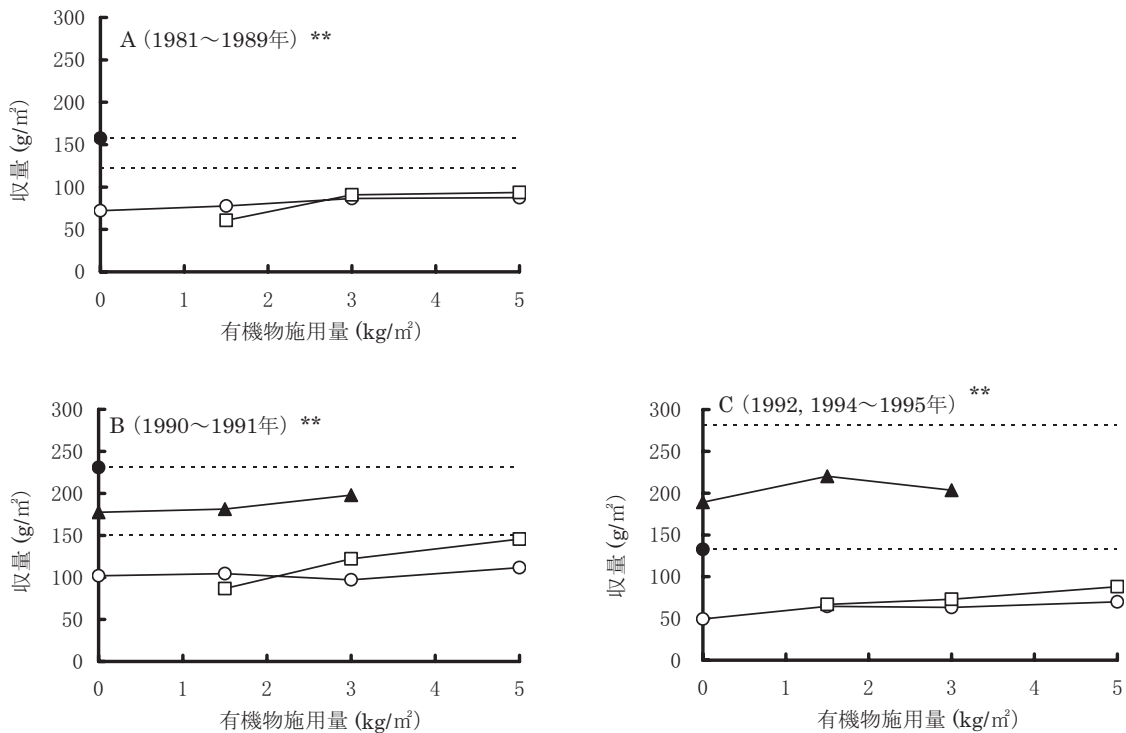
○：連作対照区(C0)÷輪作区(R)×100,

▲：土壤燻蒸区(F0)÷輪作区(R)×100。

加し、輪作区と有意差がない値まで回復した。なお、「エリモシヨウズ」のD-D 剤施用区の収量は、輪作区より高い値を示した。また、アズキでも、収量は面積当たり粒数のみと密接に関係していたため、収量構成要素の検討は行わなかった。

(2) 土壤病害虫

連作アズキでは落葉病が問題となる(関口ら, 1976; 土屋, 1983)が、この病害は落葉病菌(*Cepharosporium gregatum*)のみでは発病が少なく、ダイズシストセンチュウやキタネグサレセンチュウ(*Pratylenchus penetrans*)が存在する場合に被害が著しくなる(根岸・小林, 1984; 山田ら, 2005)。本研究では落葉病の罹病程度は調査しなかったが、連作試験の試験初期に落葉病が発生していること(新田・松口, 1989), 試験期間を通して落葉病の病徴の一



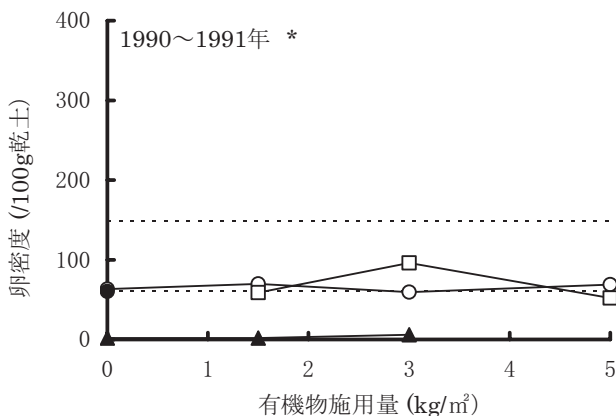
第32図 連作，有機物施用量，土壌燻蒸がアズキの収量におよぼす影響。

A：「宝小豆」に土壌燻蒸をしなかった年，B：「宝小豆」+ D-D 剤施用年，C：「エリモシヨウス」+ D-D 剤施用年。

○：連作対照区と麦稈厩肥施用区(C0, M1.5, M3, M5)，□：バーク堆肥施用区(B1.5, B3, B5)，

▲：土壌燻蒸区(F0, F1.5, F3)，●：輪作区(R)。

分散分析からスチューデント化した範囲を用いた最小有意差を算出し，輪作区の値，輪作区-最小有意差の値を点線で示した。**は1%水準で有意。



第33図 連作，有機物施用量，土壌燻蒸がアズキ跡地のダイズシストセンチュウ卵密度におよぼす影響。

○：連作対照区と麦稈厩肥施用区(C0, M1.5, M3, M5)，

□：バーク堆肥施用区(B1.5, B3, B5)，

▲：土壌燻蒸区(F0, F1.5, F3)，●：輪作区(R)。

分散分析を行い，スチューデント化した範囲を用いた最小有意差を算出した。*は5%水準で有意。

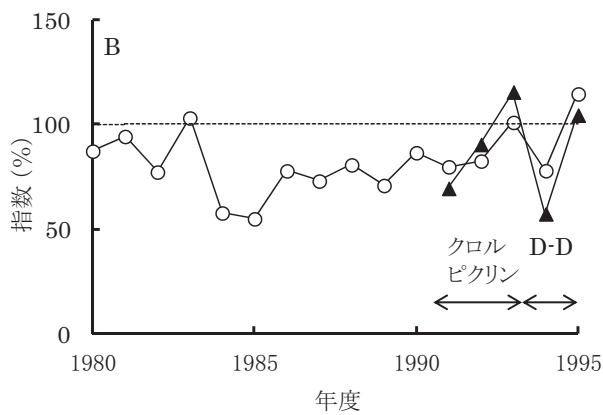
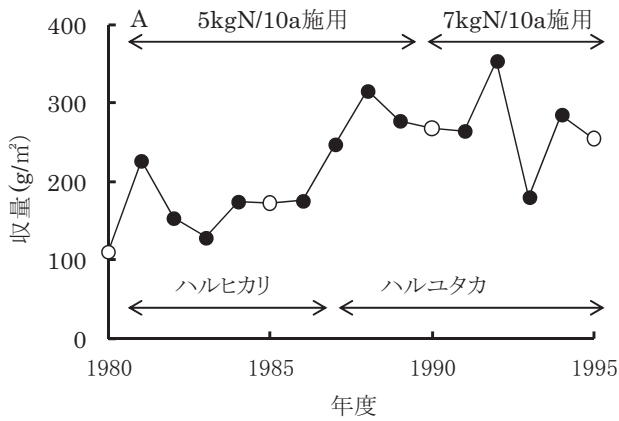
輪作区の値，輪作区+最小有意差の値を点線で示した。

つである生育量の減少(千葉, 1982)が認められたことなどから，試験期間を通して落葉病は発生していたと考えられた。落葉病の発生に必要なセンチュウについては，ダイズシストセンチュウ卵密度を1990年～1991年に測定した。ダイズシストセンチュウ卵密度は，同時期のダイズの場合と同様に低い値を示した(第33図)。F値は有意であったが，輪作区と他の試験区との有意な差は認められず，有意な差は土壌燻蒸3区とバーク堆肥3kg/m²施用区の間のみ認められた。

6) 春播コムギ

(1) 収量

輪作区の春播コムギの収量は，長稈品種「ハルヒカリ」から短稈品種「ハルユタカ」への変更にもなって増加したが，基肥窒素量5g/m²から7g/m²への増加にもなう変化は明瞭ではなかった(第34図A)。冷害年である1983年，1993年に，特に春播コムギが減収することはなく，輪作区と連作区が隣接する年度に輪作区の収量が大きく低下することも



第34図 春播コムギ収量の推移.

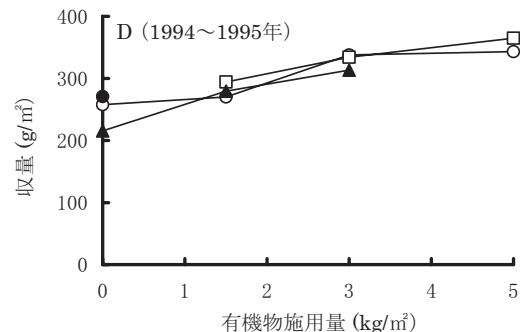
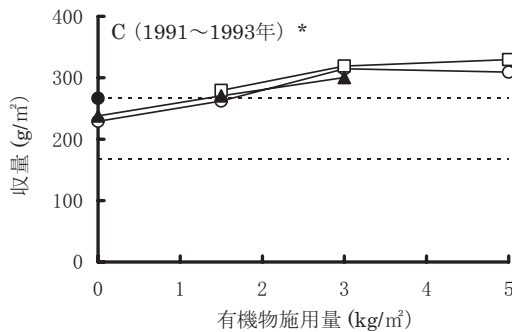
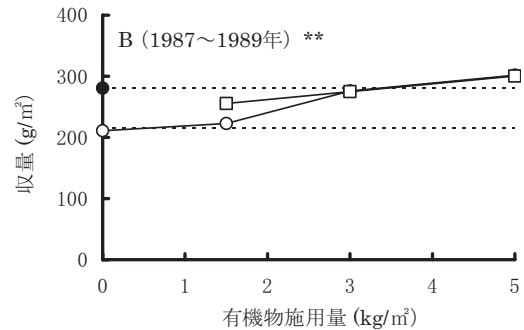
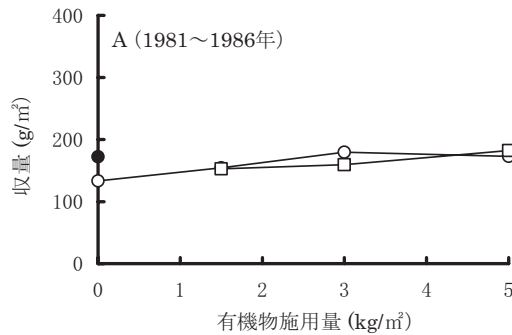
A は輪作区の値を示した.

●：通常の年, ○：輪作区が連作区と隣接した年.

B は輪作区の値に対する指数を示した.

○：連作対照区 (C0) ÷ 輪作区 (R) × 100,

▲：土壤燻蒸区 (F0) ÷ 輪作区 (R) × 100.



第35図 連作, 有機物施用量, 土壤燻蒸が春播コムギの収量におよぼす影響.

A：「ハルヒカリ」供試年, B：「ハルユタカ」供試年, C：「ハルユタカ」＋クロルピクリン剤施用年,

D：「ハルユタカ」＋D-D 剤施用年.

○：連作対照区と麦稈厩肥施用区 (C0, M1.5, M3, M5), □：バーク堆肥施用区 (B1.5, B3, B5),

▲：土壤燻蒸区 (F0, F1.5, F3), ●：輪作区 (R).

分散分析からスチューデント化した範囲を用いた最小有意差を算出し, 輪作区の値, 輪作区－最小有意差の値を点線で示した. **は1%水準, *は5%水準で有意.

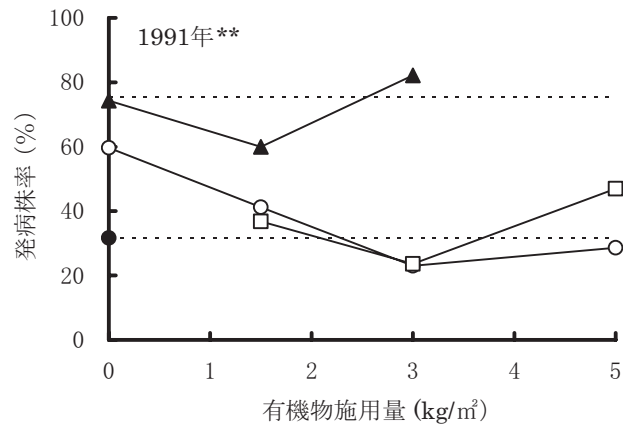
なかった。連作対照区の指数は、「ハルヒカリ」を供試した1984年～1985年に50%近くまで減少したが、それ以外の年度の指数は80%程度であった(第34図B)。土壤燻蒸区の指数が連作対照区の指数と大きく異なることはなく、クロルピクリン、D-D剤による収量の増加は認められなかった。

連作、有機物施用、土壤燻蒸が春播コムギの収量に及ぼす影響は、「ハルヒカリ」を供試した1981年～1986年(A)、「ハルユタカ」に窒素5 g/㎡を施用した1987年～1989年(B)、「ハルユタカ」に窒素7 g/㎡を施肥し、クロルピクリンを施用した1991年～1993年(C)、「ハルユタカ」に窒素7 g/㎡を施肥し、D-D剤を施用した1994年～1995年(D)に分けて検討した(第35図)。「ハルユタカ」を供試した1987年～1989年(B)、「ハルユタカ」にクロルピクリンを施用した1991年～1993年(C)にF値は有意となった。連作対照区の収量が輪作区より有意に減少したのは1987年～1989年(B)のみであったが、その減収は有機物5 kg/㎡施用によって、輪作区並に回復した。収量が連作によって減少し、有機物施用によって増加する傾向は、他の年度においても同様であった。春播コムギでは土壤燻蒸の効果は認められず、クロルピクリン(C)、D-D剤(D)とも、収量に影響しなかった。春播コムギでも、収量構成要素のデータは示さなかった。

(2) 土壤病害虫

コムギでは、立枯病が重要な土壤病害である(COOK, 2003; 宮島・坪木, 1981)が、北海道など日本北部の積雪地帯では、秋播コムギの雪腐病も問題になる(北海道立北見農業試験場, 1981)。連作試験では春播コムギを供試したため、雪腐病は問題とはならなかったが、クロルピクリン施用を開始した1991年の土壤燻蒸区に、立枯病がスポット状に発生した。

立枯病は一般的なコムギの連作病害であり、幼苗の立枯を起こすばかりでなく、収穫期に白穂症状、根の黒変なども起こし、著しい減収をもたらすことがある(本間, 1983)。5年程度の連作により、立枯病は衰退し(宮島・坪木, 1981)、その原因としては、糸状菌(NARITA and SUZUKI, 1991; SIMON, 1989)、細菌(CHAPO *et al.*, 2002; LIU *et al.*, 2009; RYDER *et al.*, 1999)などが報告されている。立枯病衰退現象は他の作物を1回作付けする、あるいは土壤燻蒸



第36図 連作、有機物施用量、土壤燻蒸が春播コムギ試験区土壌の立枯病抑止性におよぼす影響。

○：連作対照区と麦稈厩肥施用区(C0, M1.5, M3, M5),
□：バーク堆肥施用区(B1.5, B3, B5),
▲：土壤燻蒸区(F0, F1.5, F3), ●：輪作区(R).
分散分析を行い、スチューデント化した範囲を用いた最小有意差を算出した。**は1%水準で有意。
輪作区の値、輪作区+最小有意差の値を点線で示した。

することで消失する(COOK 2003)。

1991年における立枯病発生に土壤燻蒸処理の影響が考えられたため、1991年の春播コムギ跡地土壌の立枯病抑止性を検討した(第36図)。この分散分析ではF値は有意となり、立枯病発病株率は、輪作区より土壤燻蒸+麦稈厩肥3 kg/㎡施用区(F3)で有意に増加した。立枯病発病株率は連作対照区で増加し、有機物施用区で減少する傾向があったが、それらの変動は有意ではなかった。

4. 考察

1) テンサイ

テンサイは、連作、有機物施用、土壤燻蒸によって糖量が大きく変動したため、各処理の影響を検討するために適した作物と考えられた。ここでは、テンサイの糖量に対する連作、有機物施用、土壤燻蒸の影響を、既往の知見、根腐病罹病程度、土壤養分との関係から考察した。また、それらの考察を基に、テンサイの連作障害の原因についても考察した。

(1) 連作の影響

連作によるテンサイの減収程度は10% (加藤・大久保, 1967; 奥村, 1997)～20% (北海道立北見農業試験場, 1981; 奥山, 1972)程度とされている。

連作による減収程度は、どのような土壌病害虫が発生するかによって異なると考えられるが、連作試験における減収は既往の報告よりも著しかった。また、連作による減収程度は、試験期間を通してほぼ一定であった。

テンサイの連作区では根腐病が発生したものの、連作12年目(1991年)には発病が全く見られなくなった。根腐病が激発した圃場では、連作の継続にともなって発病程度が低下する「衰退現象」が認められることがある(百町, 1983)ため、これは根腐病の衰退現象と考えられた。根腐病罹病株の近くには、*Rhizoctonia solani* の菌核が耐久器官として存在し、翌年の発病源となる(百町・宇井, 1982a; 内記, 1983)が、衰退時には、生存菌核数が少なくなる(百町・宇井, 1982b)。

この現象は *Trichoderma* 属菌, *Pseudomonas* 属菌(渡邊, 1998)や *Verticillium* 属菌(佐山ら, 2001)など土壌微生物の影響と考えられている。テンサイ根腐病の衰退現象は1~2年で消失する(百町, 1983)が、今回、衰退現象は少なくとも4年間継続した。また、根腐病衰退が始まった1991年には連作各区の糖分も増加し、この現象も根腐病衰退現象の開始と何らかの関係がある可能性が考えられた。

根腐病が衰退する以前の1985年~1990年には、根腐病罹病程度と糖量は有意な相関を示し、罹病程度が高いほど糖量は低下した(第37図)ため、根腐病は連作テンサイの減収要因の一つと考えられた。しかし、根腐病が衰退した1991年以降でも、連作テンサイは著しく減収したため、連作テンサイの減収に

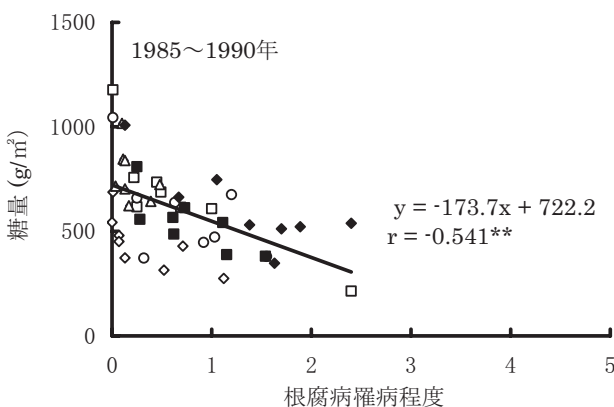
は根腐病以外の要因も関与したと考えられた。

(2) 有機物施用の影響

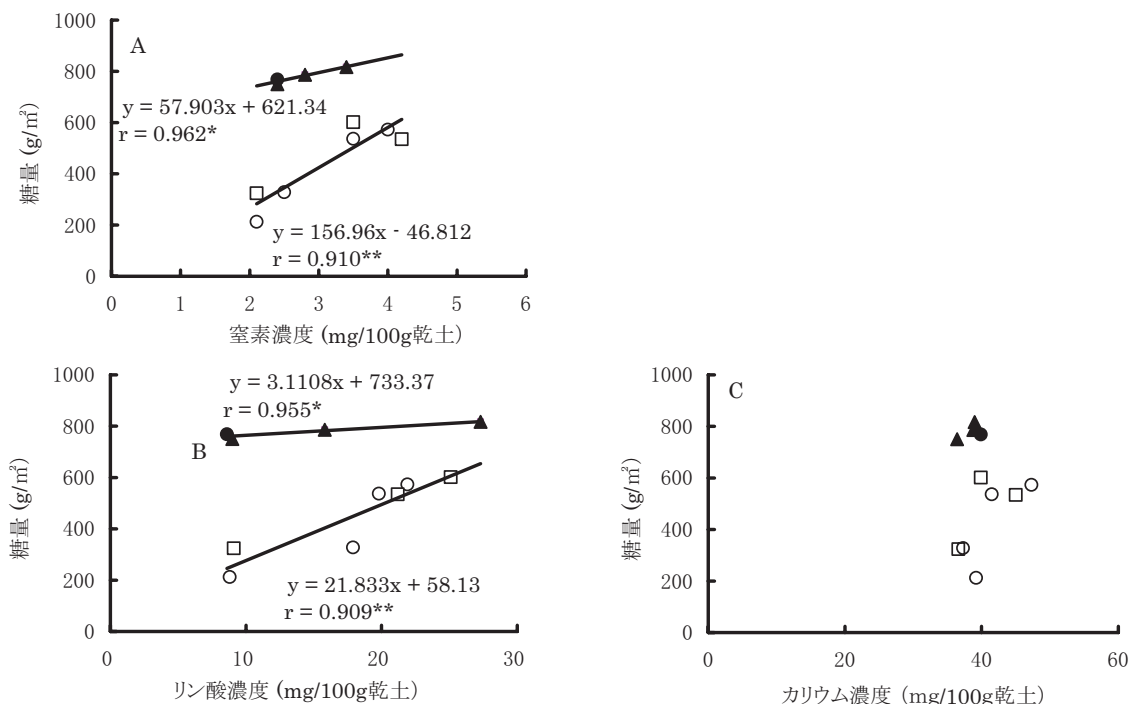
施用有機物の性質にもよるが、一般的に有機物は①土壌養分を富化させる(橋本ら, 1971; 樋口, 1982; 片峯ら, 2001; 松口・新田, 1987a; 村田ら, 1997ab; 長坂ら, 1999; 六本木ら, 1993; 杉原ら, 1979; 住田ら, 2002)だけでなく、②土壌・根面微生物相にも影響する(松口・新田, 1987b, 1988; 村田ら, 1997ab; 新田・松口, 1989; 吉田・坂井, 1962)。また、③作物の根系に作用し(松口・新田, 1987a, 1988; 新田・松口, 1989)、④収量を増加させる(橋本ら, 1971; 松口・新田, 1987a; 大久保, 1973)。さらに、⑤土壌病害(松口・新田, 1988; 新田・松口, 1989; 下長根, 1992)やセンチュウ(OKA, 2010; 鳥越ら, 2002)の防除に効果的な場合もある。

上記のうち、①の効果はリン酸などの養分供給効果によるが、有機物を施用した場合でも、降雨による無機養分の流亡、作物による養分吸収などにより、必ずしも土壌養分が豊富になるとは限らない。しかし、有機物を連用した場合、土壌に養分が蓄積される(橋本ら, 1971; 樋口, 1982; 片峯, 2001; 村田ら, 1997ab; 長坂ら, 1999; 六本木ら, 1993; 杉原ら, 1979; 住田ら, 2002)。また、③~④の効果は、①~②の効果や、有機物からのホルモン生成(松口・新田, 1987a)などによると考えられる。⑤の効果としては、C/N比の低い有機物に含まれるアンモニアの効果、キチン質を含んだ有機物によるキチナーゼ活性の増加、有機物の腐熟にともなって増加する拮抗菌の効果も報告されている(BAILY and LAZAROVITS, 2003; OKA, 2010)。

施用有機物のC/N比が10~20程度であれば、年間20~60%の窒素を放出する(志賀ら, 1985)ため、連作試験で施用した有機物は緩やかに窒素を放出する資材と考えられた。連作試験の有機物施用区で土壌養分が増加したこと(第11図~第13図)は、上記①の効果と考えられ、糖量が増加したこと(第15図)は④の効果と考えられた。ただ、有機物施用区で根腐病罹病程度が低下したとは言えず(第19図)、⑤の効果は不明瞭であった。有機物施用による①の効果と④の効果の関係を検討するため、試験区毎に土壌養分を測定した1993年に、窒素、リン酸、カリウム濃度と糖量の関係を検討した(第38図)。なお、1993年は麦稈肥連用14年目、パーク堆肥の連用13年目に



第37図 テンサイの根腐病罹病程度と糖量の関係。
 ◇: 1985年, □: 1986年, △: 1987年, ○: 1988年,
 ◆: 1989年, ■: 1990年。
 **は1%水準で有意。



第38図 テンサイ跡地土壤の窒素(A), リン酸(B), カリウム濃度(C)と糖量の関係(1993年).

○：連作対照区と麦稈既肥施用区(C0, M1.5, M3, M5), □：バーク堆肥施用区(B1.5, B3, B5),

▲：土壤燻蒸区(F0, F1.5, F3), ●：輪作区(R).

白抜きのシンボルは連作条件, 黒抜きのシンボルは輪作条件. **は1%, *は5%水準で有意な相関を示す.

あたる。

1993年の窒素, リン酸の濃度と糖量は, 連作による減収が認められた連作対照区と有機物施用区(○, □:以下, 連作条件とする)で有意な正の相関を示し, 連作による減収が認められなかった輪作区と土壤燻蒸(クロルピクリン施用)区(●, ▲:以下, 輪作条件とする)でも有意な正の相関を示した。すなわち, 連作条件と輪作条件という二つのグループが存在したものの, 1993年には, 土壤の窒素, リン酸濃度が高いほど, 糖量も高い値を示した。カリウム濃度と糖量でも有意な相関は認められなかったものの, 同様の関係が認められ, 輪作条件と連作条件の相違はあるものの, 土壤養分が豊富なほどテンサイは増収するという, 既往の報告(奥村ら 1989)と同様の傾向が認められた。

連作試験で施用した有機物は窒素, リン酸, カリウムを含むため, いずれの養分がテンサイ糖量に大きく影響したかは不明であった。これらの養分のうち, リン酸, カリウムは土壤に保持されるが, 無機態窒素(アンモニア態, 硝酸態窒素など)は土壤に保持されるとは限らない(川口, 1981)。アンモニア態窒素は土壤に保持されるが, 畑状態では, アンモニ

ア態窒素は土壤微生物によって硝酸態窒素に変化し(川口, 1981), 降雨によって流亡しやすくなる。一方, 地力窒素と高い相関を示すバイオマス窒素(村田ら, 1997a; 西尾, 1986; 坂本・大羽, 1993)は, 微生物が保持するため流亡等の影響は受けにくく, 微生物のエネルギー源となる炭素が供給されている限り, 土壤に保持されると考えられる。有機物施用は, 窒素だけでなく, 炭素も供給するため, バイオマス窒素を維持増進させると考えられる。なお, 本研究ではバイオマス窒素と高い相関を示す熱水抽出窒素を測定したが, 窒素濃度は試験経過にともなって増加したものの, 他の養分と比べるとその増加はわずかであった(第11表)。すなわち, 土壤に保持されるリン酸, カリウムなどと異なり, 窒素は土壤に保持されにくい養分であると考えられた。

テンサイの生育量は土壤窒素吸収量によって影響される(西宗ら, 1982a)ため, 10年以上有機物を連用した1993年においては, 有機物施用によってバイオマス窒素が増加し, それにともなってテンサイが増収した可能性が考えられた。

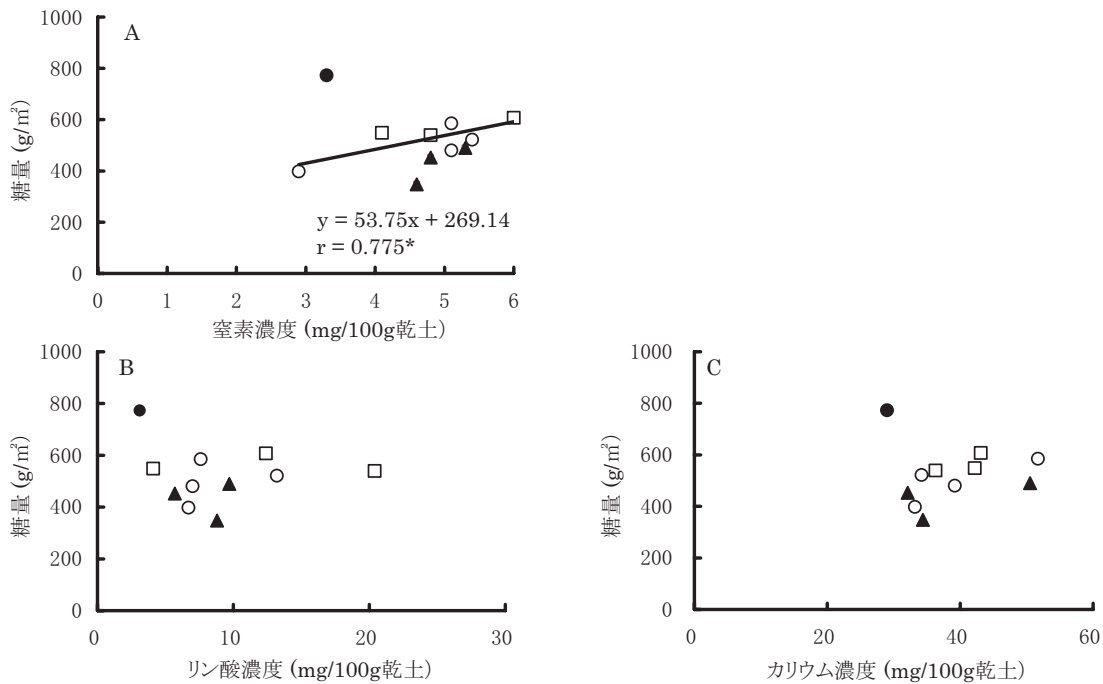
(3) 土壌燻蒸の影響

連作障害の原因となる土壌生物の防除には、土壌燻蒸が一般的に使用されてきた(GULLINO *et al.*, 2002; 大林, 1983)。D-D 剤はセンチュウ(福井ら, 1953; 岡田・森, 1963)に効果があり、クロルピクリンは土壌病原菌の耐久体に作用することを目的とし(宇井, 1980)、土壌病害(GULLINO *et al.*, 2002)に効果がある。土壌燻蒸剤は病原性のない細菌、糸状菌、放線菌も殺菌する(浅野ら, 1983; KLOSE *et al.*, 2006; 小野・矢野, 1993)。また、土壌窒素の無機化を促進し(De NEVE, 2004; 加藤ら 1985)、無機化されたアンモニア態窒素の硝酸化成を抑制する(有沢・加藤, 1982; De NEVE, 2004; 小野・矢野, 1993)ため、土壌中の無機態窒素を豊富にする。

クロルピクリンを施用した1991年～1993年には、土壌燻蒸区の糖量は輪作区並に回復したが、D-D 剤を施用した1994年～1995年に効果は認められなかった。この二つの薬剤は一般の糸状菌、細菌などに対してはほぼ同様の効果を示す(浅野ら, 1983)が、クロルピクリンは土壌病害、D-D 剤はセンチュウに作用する薬剤であるため、連作テンサイに対するクロルピクリンの効果は、センチュウや一般の微生物で

はなく、土壌病害に作用することで得られた可能性が高かった。

1993年の土壌養分と糖量の関係(第38図)では、土壌養分と糖量に正の相関がみられたものの、その関係は連作条件と輪作条件で異なった。輪作条件、連作条件の窒素、リン酸と糖量は、それぞれ有意な正の相関を示したが、土壌養分が同じ値であれば、輪作条件の糖量は連作条件より高い値を示した。これらのことは、テンサイは連作によって、窒素やリン酸などの土壌養分が充分あっても糖量が増加できなくなることを示唆する。大久保(1976)は、これと同様の現象を報告し、その原因として、①土壌病害虫による養分吸収の抑制、②輪作による土壌養分の有効化をあげている。しかし、連作試験では、連作による減収がクロルピクリンのみによって回避されたため、土壌生物、おそらくセンチュウではなく土壌病原菌によってテンサイの養分吸収力が低下したものと考えられた。1994年に、D-D 剤施用区の養分と糖量の関係が、輪作区よりも、連作条件の試験区と近い関係を示した(第39図)ことも、以上の考察を裏付けると考えられた。



第39図 テンサイ跡地土壌の窒素(A)、リン酸(B)、カリウム濃度(C)と糖量の関係(1994年)。
○：連作対照区と麦稈厩肥施用区(C0, M1.5, M3, M5), □：バーク堆肥施用区(B1.5, B3, B5),
▲：土壌燻蒸区(F0, F1.5, F3), ●：輪作区(R)。
白抜きのシンボルは連作条件, 黒抜きのシンボルは輪作条件. *は5%水準で有意な相関を示す。

テンサイ根腐病に対する土壌燻蒸の影響は、クロロピクリン施用期間に根腐病が衰退していたため、検討できなかった。ただ、土壌燻蒸剤をクロロピクリンからD-D剤へ変更した2年後の1995年に、土壌燻蒸+麦稈厩肥3kg/m²施用区で根腐病が再発したことから、D-D剤は根腐病に効果を示さなかったと考えられた。また、根腐病が再発したのが、土壌燻蒸を行った区のみだったことは、クロロピクリン、あるいはD-D剤による土壌燻蒸が、根腐病衰退の原因となる土壌微生物を殺菌したことを示唆した。

(4) 連作による減収の原因

連作試験では、連作テンサイは大きく減収し、その原因として生物的要因(おそらく土壌病害)が考えられた。しかし、根腐病(*Rhizoctonia solani* AG-2-2)が衰退した時期にも連作テンサイは減収し、かつ、土壌燻蒸によってその減収は認められなくなったため、根腐病以外に、連作による減収を引き起こす生物的要因が存在すると考えられた。

テンサイの連作障害の原因は、北見では *Aphanomyces cochlioides* による苗立枯病、帯広では *Rhizoctonia solani* による根腐病とされている(成田, 1983)。*Aphanomyces* 属菌のうち、*A. cochlioides* は直播栽培で苗立枯病の原因となるだけでなく、湿潤条件で黒根病の原因となり、それ以外の場合にも、側根に寄生してテンサイの収量を低下させる(清水, 1994)。連作テンサイの生育抑制には、*A. cochlioides* が関与する可能性がある(奥山, 1972; 清水, 1994)が、クロロピクリンは病原菌の耐久体に作用する(宇井, 1980)ため、卵胞子が耐久体である *Aphanomyces* 属菌(渡邊, 1998)が連作による減収の原因であるならば、連作による減収がD-D剤ではなく、クロロピクリンによって除去されたことを説明しやすい。

なお、連作テンサイの減収に影響する生物的要因として、根面糸状菌相の多様性低下(松口・新田, 1987ab, 1988; 新田・松口, 1989)も報告されているが、今回、その点について検討することはできなかった。

2) ジャガイモ

ジャガイモの上いも重、デンプン価は、連作、有機物施用、土壌燻蒸に影響されたが、デンプン収量はそれらの処理に大きな影響を受けなかった。ジャガイモのデンプン収量は、窒素を14g/m²程度施用

した場合に最高になるが、それ以上窒素を施用しても、デンプン価の減少により必ずしも増収するとは限らず(岡, 1969)、ある程度以上の収量条件では、塊茎重とデンプン価には負の相関がある(伊藤・浅間, 1980)。連作試験でも、収量構成要素(上いも重、デンプン価)の補償作用によって、デンプン収量の変動がわずかだった可能性が考えられた。ここでは、テンサイの場合のように処理に対する考察は行わず、収量構成要素の補償作用、そうか病、土壌養分の影響について検討した。

(1) 収量構成要素の補償作用

ジャガイモの連作による減収は塊茎重や上いも重(北海道立北見農業試験場, 1981; 松田ら, 1980; 松口・新田, 1987; 佐々木ら, 1985)について検討されている。塊茎重の結果でも、連作によるジャガイモの減収は、テンサイ(北海道立北見農業試験場, 1981)、ダイズ(松田ら, 1980; 佐々木ら, 1985)と比べて少ない。ジャガイモに対する有機物施用は、土壌の無機態窒素を増加させるが、過度の窒素施用は塊茎の生育を遅らせ、塊茎重を減少させる(Sharifi *et al.*, 2008)。

連作試験では、ジャガイモの上いも重は連作によって減少し、有機物施用、土壌燻蒸によって増加する傾向を示した(第22図~第23図)。一方、デンプン価は連作によって増加し、有機物施用、土壌燻蒸によって減少する傾向を示した(第22図, 第24図)。デンプン収量が連作、有機物施用、土壌燻蒸によって大きな影響を受けなかった(第20図~第21図)ことは、この上いも重とデンプン価の相反する反応のためと考えられた。連作試験の基肥窒素施用量は10g/m²であったが、さらに有機物を施用しても増収につながるとは限らなかった。

(2) そうか病の影響

北海道のジャガイモそうか病は、日高山脈より西では *Streptomyces scabies* が、東では *Streptomyces turgidiscabies* が原因となる(田中, 2000)。そうか病の病徴はpHが低い方が軽微になる(船越・松浦, 1983; 美濃・西脇, 2001; 田村ら, 1997)が、そうか病の発病はpHよりは置換酸度(y1)に影響され、置換酸度が高くなる(土壌のAlイオンが多くなる)と、罹病程度も軽微となる(水野・吉田, 1994; 吉田ら, 1994)。パーク堆肥施用は置換酸度を減少させ、

そうか病の罹病程度を増加させる(鈴木ら, 2000)。クロルピクリンは pH が5以下の場合にのみ、そうか病防除に効果を発揮する(植松・片山, 1990)。

そうか病でも衰退現象が報告されており、アメリカのミネソタ州 Grand Rapids の30年間継続したそうか病検定圃場では、病原物質である Thaxtomin の生産能力が欠如し、抗生物質によって他の *Streptomyces scabies* を抑制する (NEENO-ECKWALL and SCHOTTEL, 1999) 非病原性の *Streptomyces* 属菌が優占するため、そうか病が発病しない (SCHOTTEL *et al.*, 2001)。

連作試験でも、試験後期にはそうか病罹病程度が軽微となる傾向があり、衰退現象の可能性が考えられた。また、そうか病罹病程度がパーク堆肥施用量にともなって増加したことは、置換酸度の影響と考

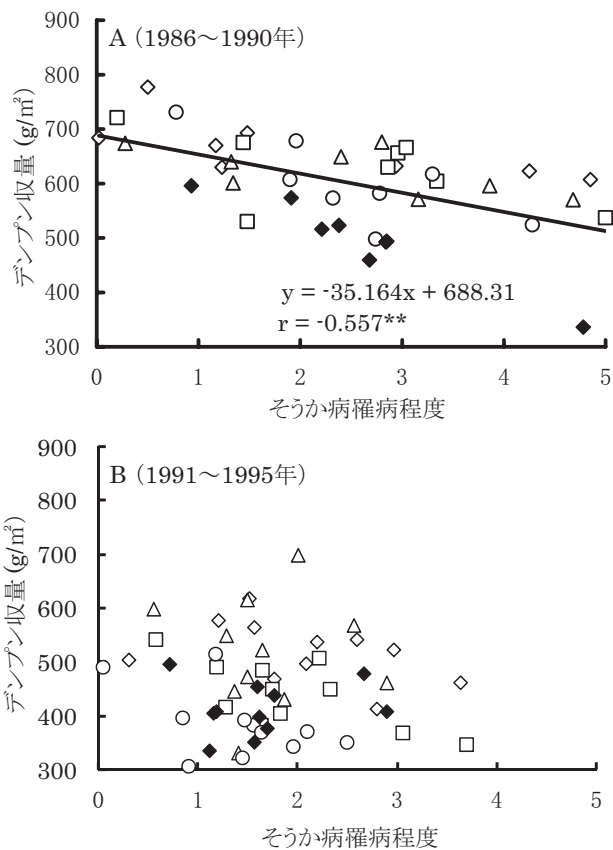
えられた。土壌病害を抑制すると考えられるクロルピクリン施用によっても、そうか病罹病程度が大きく減少することはなかったが、これは、土壌 pH が 5.6 であった(データ省略)ためと考えられた。

そうか病罹病程度とデンプン収量の関係を、発病が激しかった1986年～1990年、衰退傾向にあった1991年～1995年に分けて示した(第40図)。1986年～1990年には、そうか病罹病程度の増加にともなってデンプン収量が減少する傾向があったが、1991年～1995年には、そのような傾向は認められなかった。すなわち、そうか病はデンプン収量を減少させることがあるものの、常にその影響が見られるわけではなかった。また、そうか病が衰退傾向にあった1991年以降は、デンプン収量、上いも重の減少が著しくなった時期であり(第20図, 第22図)、連作によるデンプン収量の減少には、そうか病以外の要因が関与した可能性が考えられた。ただ、そうか病による塊茎外観の劣化は生食用ジャガイモの商品価値を著しく低下させるため、営農上大きな問題である。

(3) 土壌養分の影響

クロルピクリンを施用した1993年の土壌養分とデンプン収量の関係を示した(第41図)。ほとんどの場合に有意な相関は認められなかったが、テンサイと同様、1993年には①土壌養分が豊富なほどデンプン収量が高い傾向があり、②土壌養分が同程度であれば、輪作条件のデンプン収量は、連作条件よりも高い傾向があった。既に述べたように、デンプン収量の変動はわずかであったが、土壌養分とデンプン収量にはある程度関係が認められ、特に連作条件のリン酸濃度とデンプン収量の間には有意な正の相関が認められた。なお、D-D 剤を施用した1994年のデータは示さなかったが、テンサイの場合と同様に、D-D 剤施用区を含めた連作10区と、輪作区で、土壌養分とデンプン収量の関係は異なる傾向があった。

以上のように、ジャガイモでもテンサイと同様の傾向が認められ、連作による減収は、養分吸収力が低下することによってもたらされ、その低下は土壌微生物に起因したと考えられた。なお、土壌養分とデンプン収量の関係は連作14年目のデータから検討したが、デンプン収量の減少は連作10年目以降著しくなったことから、この傾向は、それ以前には認められなかった可能性も考えられた。



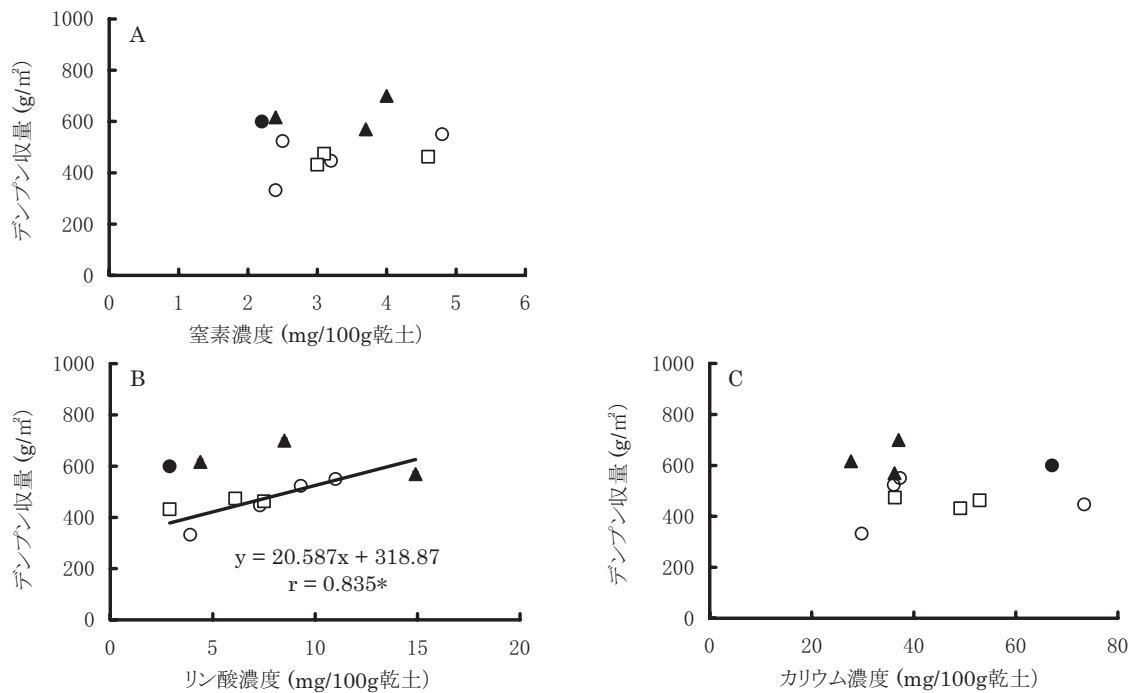
第40図 そうか病罹病程度とデンプン収量の関係。

A 図は罹病程度が高い時期、B 図は罹病程度が低下した時期。

A:◇:1986年, □:1987年, △:1988年, ○:1989年, ◆:1990年。

B:◇:1991年, □:1992年, △:1993年, ○:1994年, ◆:1995年。

**は1%水準で有意。



第41図 ジャガイモ跡地土壌の窒素(A), リン酸(B), カリウム濃度(C)とデンブンプン収量の関係(1993年).
○: 連作対照区と麦稈既肥施用区(C0, M1.5, M3, M5), □: バーク堆肥施用区(B1.5, B3, B5),
▲: 土壌燻蒸区(F0, F1.5, F3), ●: 輪作区(R).
白抜ききのシンボルは連作条件, 黒抜ききのシンボルは輪作条件. *は5%水準で有意な相関を示す.

3) ダイズ

ダイズでは, テンサイと同様, 連作による減収, 有機物施用, 土壌燻蒸による増収傾向が認められ, 連作による減収が土壤生物に起因した可能性があると考えられた。ただ, ダイズでは, ダイズシストセンチュウについてさらに解析する必要があった。また, センチュウ抵抗性品種「トヨムスメ」でも, 殺センチュウ剤であるD-D剤の効果が認められたため, ダイズシストセンチュウ以外の要因がダイズに影響した可能性も考えられた。ダイズについては, ダイズシストセンチュウと土壤養分の二つの面から解析を行った。

(1) ダイズシストセンチュウとその影響

ダイズシストセンチュウは, ダイズ, アズキ, インゲンに寄生するが, 特にダイズ, アズキに対する着生が著しい(一戸, 1953)。ダイズシストセンチュウの卵を内蔵するシストは, -10°C の低温でも耐えられ, 札幌の気象条件では, ダイズ栽培期間にダイズシストセンチュウは3世代生育できる(一戸, 1955a)。ダイズの被害は, ダイズシストセンチュウ

が播種後2週頃に侵入した場合が最も著しい(岡田, 1968)。ダイズの生育が良ければダイズシストセンチュウの密度も高くなるため, ダイズの生育が悪い場合, 常に栽培後のセンチュウ密度が高いとは限らない(一戸, 1955b)。

ダイズシストセンチュウのシスト密度は連作によって増加するだけでなく, マメ類の隔年作付けによっても増加する(浅井・尾崎, 1965; 尾崎・浅井, 1963)ため, マメ類の2年輪作でダイズシストセンチュウを防除することはできない。一方, ダイズの連作を継続した場合に, ダイズシストセンチュウ密度が低下する衰退現象が報告されている(橋本ら, 1988)。ダイズシストセンチュウはダイズ-コムギ体系で減少し, その原因は *Fusarium* 属菌などの糸状菌とされている(BERNARD *et al.*, 1996)。また, *Verticillium* 属菌(CHEN and CHEN, 2002), *Hirsutella* 属菌(CHEN and LIU, 2005)などの糸状菌もダイズシストセンチュウ密度を低下させる。したがって, ダイズシストセンチュウの衰退現象も, これらの微生物に起因する可能性がある。

ダイズシストセンチュウの卵密度は, 1987年以降

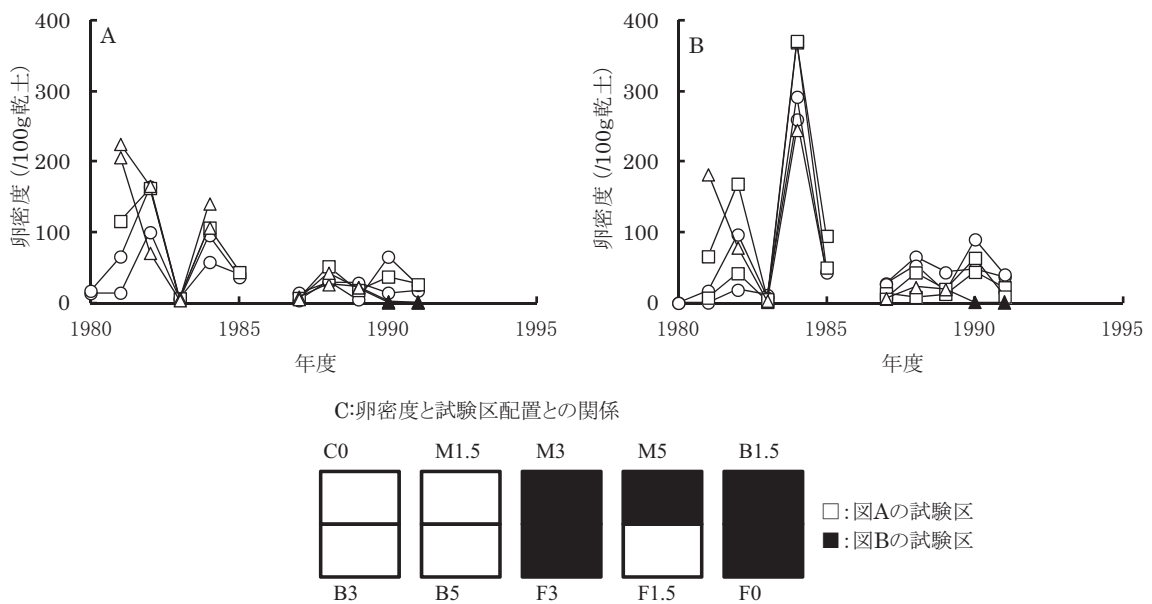
連作各区で低下し(第29図), ダイズシストセンチュウは連作によって衰退したと考えられた。有機物施肥量が卵密度に及ぼす影響は明瞭ではなかった(第30図)が, 試験区を, 卵密度のピークが1981年~1982年のグループ(A), 1984年のグループ(B)に分けると, 各グループ内の卵密度は同様の推移を示した(第42図)。また, 1981年~1982年にピークのある試験区は圃場の北側, 1984年にピークのある試験区は圃場の南側に位置していた。すなわち, 連作の継続にともなって卵密度は増加した後速やかに減少したことが示された。

ダイズシストセンチュウの卵密度とダイズの収量の関係を, 連作初期の1980年~1984年(A), 衰退現象が認められた1985年~1991年(B)について示した(第43図)。1980年~1984年(A)には, 連作による減収が見られなかった時期(1980年~1982年)と, ダイズシストセンチュウが増加し, かつ連作による減収が著しくなった時期(1983年~1984年)が含まれる。1980年~1984年(A)においては, 卵密度と収量は負の相関を示し, 連作による減収はダイズシストセンチュウに影響されたと考えられた。ただ, 冷害年であった1983年はその限りではなく, この年は, 冷害によってダイズの生育量が減少したため,

跡地土壌の卵密度も減少したと考えられた。それに対し, ダイズシストセンチュウの衰退が認められた1987年以降に有意な相関は認められず, この時期には, ダイズシストセンチュウが連作による減収に寄与したとは考えられなかった。

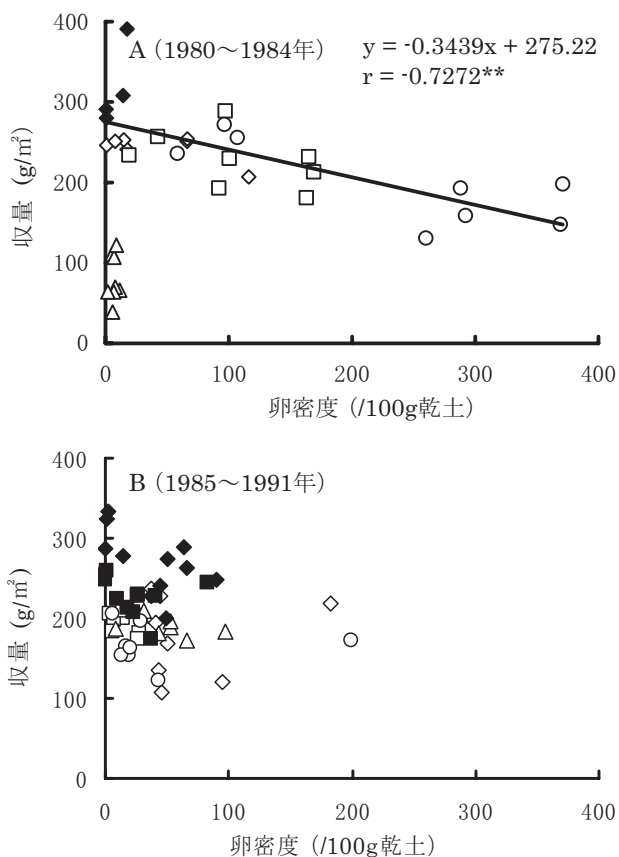
ダイズシストセンチュウ衰退後, 1990年から施用したD-D剤は, 連作により減少したダイズの収量を輪作区並に回復させた。しかし, ダイズシストセンチュウはこの時期には衰退しており, また, センチュウ抵抗性品種「トヨムスメ」(佐々木ら, 1988)でもD-D剤の効果が認められたことから, D-D剤は, センチュウ防除とは異なる効果によって連作の影響を排除したと考えられた。

D-D剤は, センチュウ防除に使用される(福井, 1953; 岡田・森, 1963)だけでなく, 土壌微生物に対する殺菌作用を示す(小野・矢野, 1993)。北海道におけるダイズの連作では, *Pythium* 属菌(景山ら, 1982)や根糸状菌相の多様性低下(松口・新田, 1987b, 1988)が連作障害に関与するため, D-D剤の殺菌効果によって減収が回避された可能性が考えられた。また, D-D剤は地力窒素の無機化を促進し(De NEVE, 2004; 加藤ら, 1985), アンモニア態窒素の硝酸化成を抑制する(有沢・加藤, 1982; De NEVE, 2004; 小野・矢野, 1993)ため, 土壌中にア



第42図 ダイズ跡地のダイズシストセンチュウ卵密度の推移と試験区配置。

- Aは1981~1982年に卵密度がピークとなった試験区, Bは1984年に卵密度がピークとなった試験区。
- : 連作対照区と麦稈厩肥施用区(C0, M1.5, M3, M5), □: パーク堆肥区(B1.5, B3, B5),
- ▲: 土壌燻蒸区(F0, F1.5, F3), ●: 輪作区(R), △は土壌燻蒸処理開始以前の土壌燻蒸区。



第43図 ダイズ跡地のダイズシストセンチュウ卵密度とダイズ収量の関係。

A 図はダイズシストセンチュウの卵密度が低下する以前、B 図は低下した後の年度について示した。

A: ◆:1980年, ◇:1981年, □:1982年, △:1983年, ○:1984年。

△:1983年は冷害年のため相関分析から除外した。

B: ◇:1985年, □:1986年, △:1988年, ○:1989年, ◆:1990年, ■:1991年, (1987年は欠測)。

**は1%水準で有意。

ンモニア態窒素を保持し、ダイズへの窒素供給を増加させた可能性も考えられた。D-D 剤による硝酸化成抑制は短い場合でも1～2カ月程度持続する(有沢・加藤, 1982)ため、マメ類生育期間の前半には土壤にアンモニア態窒素が蓄積していたと考えられる。

(2) 土壤養分と収量の関係

作物が収量を確保するには、土壤に由来する窒素を吸収する必要がある。ダイズは子実の窒素含有率が高いため、窒素1kgから生産できる子実kg数(窒素利用効率:N use efficiency)が7～20程度、平

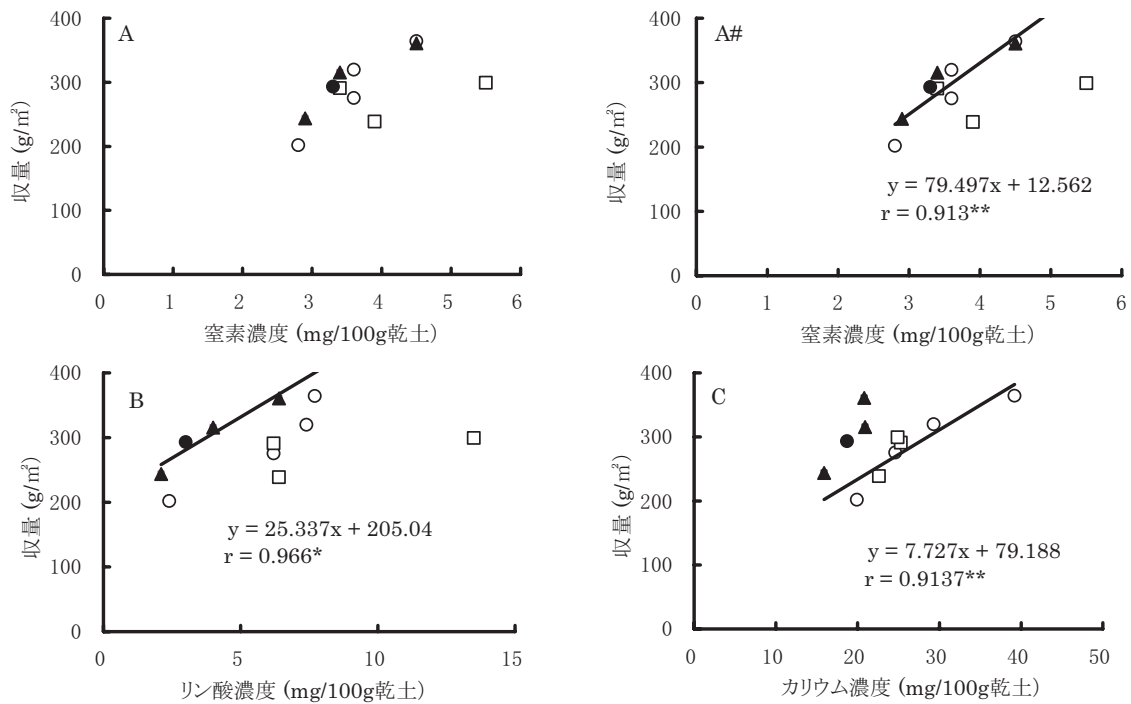
均で13である(SALVAGIOTTI *et al.*, 2008)。北海道のダイズ平均収量250kg/10a(平成22年度作物統計)を生産するためには、窒素利用効率を13と仮定した場合、窒素約20kg/10aが必要となる。しかし、十勝地方におけるダイズの窒素固定量の推定値は最大で12kg/10a程度であり(西宗ら, 1983)、ダイズが施肥窒素量2～4kg/10aを全て吸収したとしても、上記の収量をあげるためには、土壤に由来する窒素(以下、地力窒素とする)を吸収する必要がある。

地力窒素は、微生物の保持するバイオマス窒素と関係が深い(村田ら, 1997a; 西尾, 1986; 坂本・大羽, 1993)ため、有機物施用によって増加すると考えられる。また、D-D 剤によってバイオマス窒素が無機化され、無機化されたアンモニア態窒素の硝酸化成が抑制されたとすると、土壤にアンモニア態窒素が保持されたと考えられる。すなわち、有機物施用はバイオマス窒素を、D-D 剤は無機態窒素を増加させる効果により、ダイズの窒素吸収を増加させた可能性が考えられる。

以上の土壤窒素に関する効果によってダイズが増収した場合、窒素と収量の関係が連作条件と輪作条件で異なるとは限らない。一方、D-D 剤による増収効果が *Pythium* 属菌などに対する殺菌作用に基づく場合、テンサイの場合と同様に、輪作条件と連作条件で窒素と収量の関係は異なるものと考えられる。

跡地土壤の窒素、リン酸、カリウム濃度とダイズ収量の関係の解析は、冷害年の1993年については行わず、1994年について行った(第44図)。この時期は、ダイズシストセンチュウによる減収が回復した後、再びダイズが減収した時期に当たる。いずれの養分の増加によっても収量が増加する傾向を示したが、窒素濃度と収量の間には有意な相関は認められず、輪作条件と連作条件で両者の関係が明瞭に異なることもなかった(第44図A)。それに対し、リン酸濃度は輪作条件、カリウム濃度は連作条件で収量と正の相関があり(第44図B, C)、リン酸、カリウム濃度に対する収量は、連作条件よりも輪作条件でやや高い傾向を示した。

これらの結果は、北海道のダイズはリン酸吸収を助ける Arbuscular Mycorrhizal (AM) 菌が存在する時に生育が良好になること(唐澤, 2004)、ダイズの収量はカリウムに大きく影響されること(SALE and CAMPBELL, 1986)とよく一致した。連作試験では、有機物連用による養分の蓄積のため、特に明瞭な傾



第44図 ダイズ跡地土壌の窒素(A), リン酸(B), カリウム濃度(C)と収量の関係(1994年).

○：連作対照区と麦稈既肥施用区(C0, M1.5, M3, M5), □：バーク堆肥施用区(B1.5, B3, B5),
▲：土壌燻蒸区(F0, F1.5, F3), ●：輪作区(R).

白抜きは連作条件, 黒抜きは輪作条件. **は1%, *は5%水準で有意な相関を示す.
図A#は、窒素濃度と収量の関係を、バーク堆肥施用区(□)以外の試験区について相関分析を行った。

向が認められた可能性があったが、ダイズの生育収量はこれらの養分に大きく影響されると考えられた。カリウム濃度が収量に影響するため、カリウム含有率が低いバーク堆肥(第9表)施用区を除外して窒素濃度と収量の関係を検討したところ、両者の間に有意な正の相関が認められ(第44図 A#), ダイズの収量は土壌窒素(熱水抽出窒素≒バイオマス窒素)にも影響されていたと考えられた。

これらのことから、試験開始後15年目には、ダイズの収量が主に土壌養分に影響されたこと、輪作条件に対し、連作条件でリン酸とカリウムの吸収力が低下したことが示唆されたが、連作条件で窒素吸収力が低下したと判断することはできなかった。

ダイズ栽培における肥培管理として、トウモロコシなどのイネ科作物とダイズを組み合わせることで、イネ科作物に対する窒素施肥量を6 kg/10a程度を減らすことが可能とされる(VARVEL and WILHELM, 2003)。ダイズは土壌有機物を分解しやすい作物である(CHENG *et al.*, 2003)ため、有機物を分解し、その中の窒素を土壌中に放出すると考え

られる。すなわち、ダイズを連作した際には、その効果によって土壌有機物が減耗する可能性が考えられ、連作試験で10年程度ダイズを連作した際に見られる減収は、土壌有機物の減少→微生物のエネルギー源となる土壌炭素の減少→微生物バイオマス(地力窒素)の減少に基づく可能性があった。ただ、この減収は、短期間の連作では発現しない可能性があった。また、連作試験では、連作区の作物残さを持ちだしているため、作物残さをすき込んだ条件でも同じ現象がみられるかどうかは考察できなかった。

4) アズキ

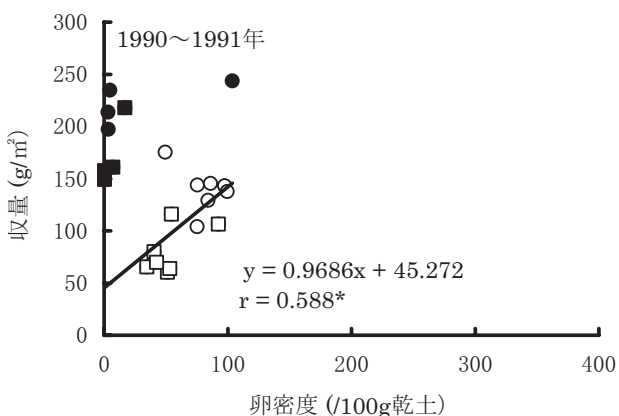
アズキでも、テンサイと同様、連作による減収、有機物施用、土壌燻蒸による増収傾向が認められ、連作による減収が土壌生物に起因した可能性が考えられた。アズキも、ダイズと同様に、土壌病害虫と土壌養分の二つの面から解析を行った。

(1) センチュウと落葉病の影響

連作試験では落葉病の罹病程度の調査は行わなかつ

たものの、試験期間を通して連作区の生育量が著しく低下したことから、アズキでは落葉病が発生し、かつ、途中で衰退現象は起こらなかったと考えられた。落葉病の発生に必要なセンチチュウについては、ダイズシストセンチチュウ卵密度を1990年～1991年に測定したが、ダイズと同様、卵密度は低い値を示し(第33図)、ダイズシストセンチチュウは衰退していたと考えられた。落葉病菌は罹病残さの分解を抑制する化学物質を生成し(小林, 1983)、おそらくそのために罹病残さが長期間残存する(田中, 1983)ため、落葉病菌は長期間土壤中で生存しうる。また、ダイズシストセンチチュウ(根岸・小林, 1984)だけでなく、キタネグサレセンチチュウも落葉病の感染を助長する(山田ら, 2005)ため、ダイズシストセンチチュウが衰退しても、落葉病は衰退しなかったと考えられた。

ダイズシストセンチチュウ卵密度とアズキの収量との関係を、輪作条件、連作条件に分けて示した(第45図)。輪作条件では相関は認められず、連作条件では卵密度と収量が正の相関を示した。このことは、連作条件では、アズキの生育が良好な場合にダイズシストセンチチュウが増加したことを示唆し、ダイズシストセンチチュウが連作による減収をもたらしたわけではないことが確認された。したがって、アズキの落葉病発生、減収には、キタネグサレセンチチュウが関与したと考えられた。D-D 剤はキタネグサレセンチチュウの密度を低下させることで、落葉病を防除し、アズキの連作による減収を回復させた可能性が



第45図 アズキ跡地のダイズシストセンチチュウ卵密度とアズキ収量の関係。

○, ● : 1990年, □, ■ : 1991年.

白抜きは連作条件 (C0, M1.5 ~ 5, B1.5 ~ 5),

黒抜きは輪作条件 (F0 ~ F3, R).

連作条件では、5%水準(*)で有意な相関が見られた。

あった。

アズキも連作による根面糸状菌の多様性低下が著しい作物であり(松口・新田, 1987b, 1988), D-D 剤の糸状菌等へ対する殺菌効果(小野・矢野, 1993)が、連作による減収を除去した可能性もあった。しかし、今回の結果からは、その点について考察することはできなかった。

(2) 土壌養分と収量の関係

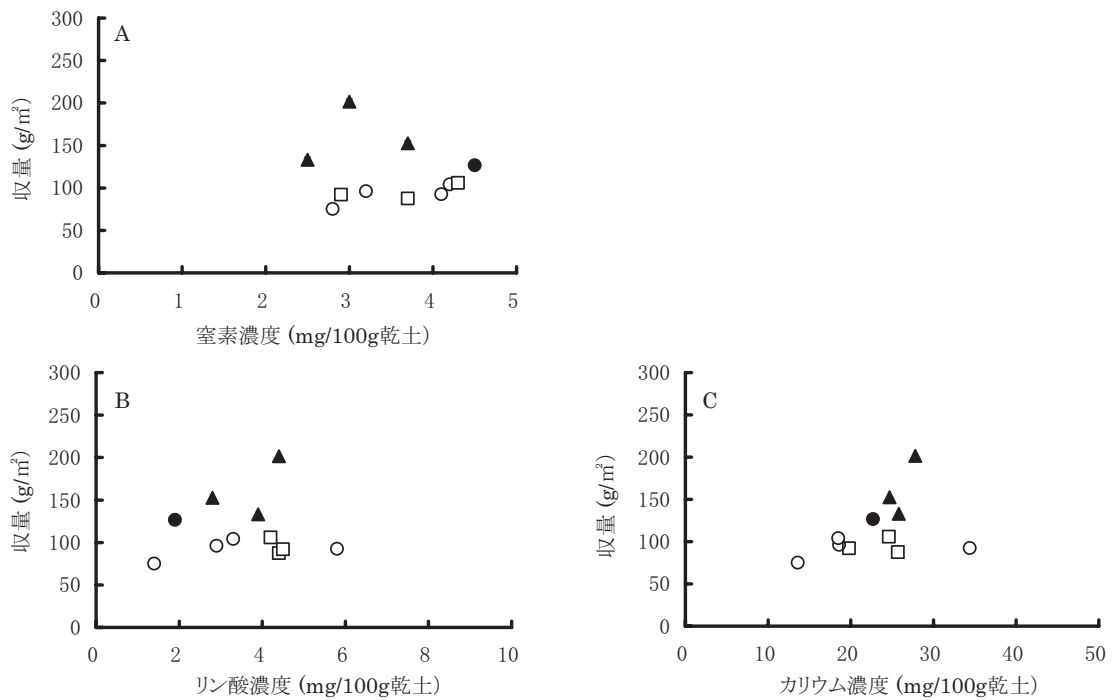
1994年のアズキ跡地土壌の窒素, リン酸, カリウム濃度と収量の関係を第46図に示した。アズキでも冷害年である1993年のデータは除外した。アズキでは養分の増加に伴う増収傾向は明瞭ではなかったが、土壌養分が同程度であれば、輪作条件の収量は連作条件よりも高い値を示した。このことから、テンサイと同様に、アズキでも連作によって養分吸収力が低下し、その原因は生物的要因であることが示唆された。生物的要因としては、ダイズシストセンチチュウやキタネグサレセンチチュウと落葉病菌が考えられた。

5) 春播コムギ

春播コムギは、1987年～1989年にのみ連作による有意な減収が認められ、土壌燻蒸の効果も認められなかったが、有機物施用によって増収する傾向があった。また、連作試験では立枯病、雪腐病等の土壌病害の影響も軽微だったが、試験区土壌の立枯病抑止性はクロルピクリン施用によって消失した可能性があった。ここでは土壌養分と土壌病害の抑止性の両面から解析を行った。

(1) 土壌養分と収量の関係

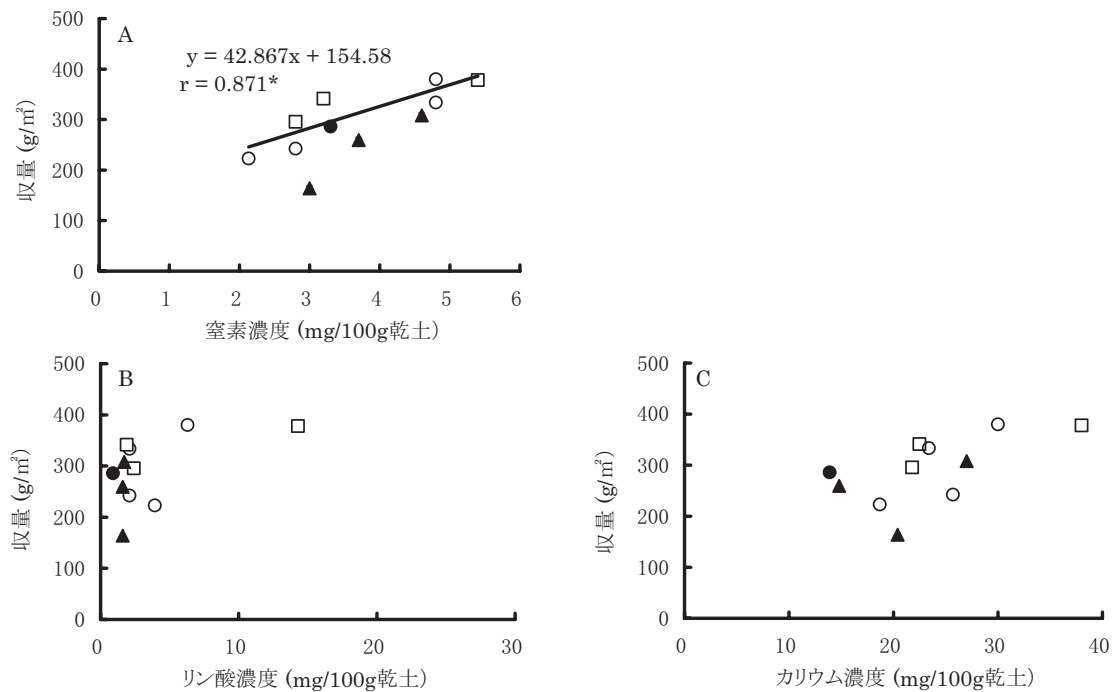
土壌養分と春播コムギの収量の間では、クロルピクリンを施用した1993年とD-D 剤を施用した1994年は同様の傾向を示したため、1994年の結果を示した(第47図)。有意な相関は、連作条件の窒素濃度と収量の間にも見られたが、いずれの場合も、養分の増加にともなって収量が増加する傾向があった。また、連作条件と輪作条件との相違は認められなかった。これらのことは、1994年には、連作による養分吸収力の低下は見られず、春播コムギの収量は主に土壌養分に影響されたことを示唆した。なお、連作対照区の減収が有意だった1987年～1989年には、他の作物のように、土壌生物によって減収した



第46図 アズキ跡地土壌の窒素(A), リン酸(B), カリウム濃度(C)と収量の関係(1994年).

○：連作対照区と麦稈厩肥施用区(C0, M1.5, M3, M5), □：パーク堆肥施用区(B1.5, B3, B5), ▲：土壌燻蒸区(F0, F1.5, F3), ●：輪作区(R).

白抜きのはしらは連作条件, 黒抜きのはしらは輪作条件.



第47図 春播コムギ跡地土壌の窒素(A), リン酸(B), カリウム濃度(C)と収量の関係(1994年).

○：連作対照区と麦稈厩肥施用区(C0, M1.5, M3, M5), □：パーク堆肥施用区(B1.5, B3, B5), ▲：土壌燻蒸区(F0, F1.5, F3), ●：輪作区(R).

白抜きのはしらは連作条件, 黒抜きのはしらは輪作条件. *は5%水準で有意な相関を示す.

可能性があったが、今回の結果から、その点について検討することはできなかった。

(2) 土壌の立枯病抑止性

春播コムギにおける立枯病は発生しなかったが、1991年の土壌燻蒸区(クロルピクリン施用)のみでスポット状に発生した。その試験区土壌を採取し、室内実験においてコムギを播種して再現性を確認するため、立枯病菌を接種したところ、立枯病の発病株率は、土壌燻蒸区で明らかに高かった。このことは、連作試験の土壌は立枯病の発生を抑制したこと、クロルピクリンによって抑止性が消失したことを示唆した。すなわち、連作試験では、生物的要因によって立枯病が抑制されていたと考えられたが、立枯病発病株率は輪作区土壌で最も低かった。

コムギ立枯病性は連作によって衰退し(COOK, 2003; WELLER *et al.*, 2002), その原因として *Pseudomonas* 属菌(CHAPON *et al.*, 2002; WELLER *et al.*, 2002), *Bacillus* 属菌(LIU *et al.*, 2009; RYDER *et al.*, 1999)などが報告されている。また、牧草-牧草-コムギ輪作で立枯病が抑制され、その原因としてアメーバが考えられている(CHAKRABORTY, 1983)。本試験では、立枯病が輪作区で最も抑制されており、CHAKRABORTY(1983)の報告と近い事例の可能性が考えられた。

6) 連作障害の様相と原因

連作試験では、テンサイ、アズキなど連作による減収が著しい作物では、土壌病害などの生物的要因によって養分吸収力が低下したと考えられた。連作による減収が比較的軽微であったジャガイモではそうか病と他の生物的要因、ダイズではダイズシストセンチュウとバイオマス窒素の減少によって減収したと考えられたが、土壌病害虫が試験途中で衰退した可能性があった。春播コムギでは土壌病害、連作による減収ともほとんど認められなかった。以上のように、連作による減収程度は作物によって異なったが、連作障害は、主に土壌病害虫などの生物的要因によると考えられた。以下、連作試験で供試した作物以外にも着目し、連作障害の全体像を把握することを試みた。

(1) 生物的要因の多様性

連作試験における連作による減収は、テンサイで

は根腐病菌(*Rhizoctonia solani* AG-2-2)とそれ以外の生物的要因(おそらく *Aphanomyces* 属菌), アズキでは落葉病菌(*Cephalosporium gregatum*)とセンチュウ(*Heterodera glycines* や *Pratylenchus penetrans*)によって引き起こされたと考えられ、連作障害には、複数の土壌病害虫が関与することがあると考えられた。土壌病害虫は土壌病原菌とセンチュウに分けられ、土壌病原菌は土壌微生物(soil microbes), センチュウは大きさ0.2~2 mmの中型動物(mesofauna)に分類される(仁王, 1994)。第12表~第13表に示したように、センチュウ、土壌病原菌は、さらに多様な種に分けられる。

植物に寄生するセンチュウとしてはシストセンチュウ(*Heterodera* 属, *Globodera* 属), ネコブセンチュウ(*Meloidogyne* 属), ネグサレセンチュウ(*Pratylenchus* 属)が重要である(石橋, 2003)。ダイズシストセンチュウ(*Heterodera glycines*)は、十勝地方で問題となり(尾崎, 1969), 現在も世界各地(LIU and HERBERT, 2002; PORTER *et al.*, 2001)でダイズの減収の原因となっている。また、国内での発生はまだ少ないものの、ジャガイモシストセンチュウ(*Globodera rostochiensis*)が今後問題となる可能性がある(森, 2009)。ネコブセンチュウでは、サツマイモネコブセンチュウ(*Meloidogyne incognita*)による被害が大部分を占める(石橋, 2003)が、このセンチュウはサツマイモ(上田・渡辺, 1997)だけでなく、モモ(木村ら, 1990)やイチジク(鎌田ら, 1998)などの木本も加害する。ネグサレセンチュウは多犯性であり(後藤, 1974), ダイコンなどの品質を低下させる(水久保, 2003)。

土壌病原菌には、原核生物である細菌類, 真核生物である糸状菌などがある。放線菌は細菌の1種であり(仁王, 1994), 放線菌 *Streptomyces* 属菌によるジャガイモそうか病は大きな問題となっている(田中, 2000)。真核生物には、子のう菌, 担子菌, 不完全菌などからなる糸状菌だけでなく、原生生物や卵菌(渡邊, 1998)も含まれる(第13表)。原生生物には、テンサイそう根病(杉本, 1983)やムギ類縞萎縮病(大藤, 2005)に関与する *Polymyxa* 属菌, アブラナ科作物根こぶ病の原因となる *Plasmodiphora* 属菌(渡邊, 1998)などがある。卵菌は、かつては糸状菌の一種とされており(渡邊, 1998), *Aphanomyces* 属菌, *Phytophthora* 属菌, *Pythium* 属菌などが含まれる。*Aphanomyces* 属菌では、厚い細胞壁を持つ卵胞子が

第12表 主な作物加害センチュウとその寄主作物、非寄主(対抗)作物.

	イネ科			マメ科			ナス科	木本	その他			引用文献
	コムギ	トウモロコシ ソルガム類 リクトウ	エンバク	ダイズ	アズキ	インゲン	ジャガイモ ナス クロタラリア ラッカセイ	イチジク モモ	テンサイ	サツマイモ	ダイコン ニンジン マリーゴールド	
シストセンチュウ												
ダイズシストセンチュウ <i>Heterodera glycines</i>	×	×	×	○	○	○	×			×	×	1) 6) 14)
イネシストセンチュウ <i>Heterodera elachista</i>		○										11)
ジャガイモシストセンチュウ <i>Globodera rostochiensis</i>							○					7)
ネコブセンチュウ												
サツマイモネコブセンチュウ <i>Meloidogyne incognita</i>							○		○			4) 8) 9) 12) 13) 16)
キタネコブセンチュウ <i>Meloidogyne hapla</i>				○			○					1) 10)
ネグサレセンチュウ												
キタネグサレセンチュウ <i>Pratylenchus penetrans</i>		○		○						○	○	2) 3) 5) 10) 17) 18)
ミナミネグサレセンチュウ <i>Pratylenchus coffeae</i>		○								○	×	11) 15)

1)赤司・高倉 2002, 2)藤村 1990, 3)萩谷ら 1982, 4)原ら 1983, 5)星野ら 2000, 6)一戸 1953, 7)Inagaki 1984, 8)鎌田ら1998, 9)木村ら 1990, 10)松田ら 1980, 11)松本ら 1978, 12)水久保ら 2004, 13)佐野 1995, 14)諏訪ら 2005, 15)鳥越 2002, 16)上田・渡辺 1997, 17)浦上ら 2003, 18)山田ら 2005.

○：寄主作物，×非寄主作物あるいは対抗植物。

耐久生存器官となる(生越, 1983a)。糸状菌では, *Cephalosporium gregataum* によるアズキ落葉病(根岸・小林, 1984), *Fusarium solani* によるインゲン根腐病(奥村, 2000), *Rhizoctonia solani* によるテンサイ根腐病(内記, 1983)など, 不完全菌類に重要な土壤病害が多く含まれる。土壤中では, 糸状菌は菌核(百町・宇井, 1982a; 内記, 1983)や罹病残さ中の菌糸(田中, 1983)などで生存し, 作物栽培とともに増殖する。

陸稲の連作障害の原因となる糸状菌 *Pyrenchaeta* 属菌は, 通常病徴を示すことはないが, 連作時など植物の状態が悪化した時に障害を起こす, いわゆる「弱い病原菌」(駒田, 1978)と考えられる。移植テンサイに対する *Aphanomyces* 属菌(清水, 1994), ダイズに対する *Pythium* 属菌(景山, 1982)なども「弱い病原菌」と考えてよいであろう。また, 連作によ

る減収が著しいテンサイ, アズキ, ダイズでは, 根面に *Fusarium* 属菌など特定の糸状菌が優占して, 糸状菌相の多様性指数が低下する(松口・新田, 1987ab, 1988)。この場合, *Fusarium* 属菌の増加による根面糸状菌相の多様性低下が「弱い病原菌」と同様の作用をしたと考えることができよう。以上のように, 連作障害の原因生物としては, センチュウ, 土壤病原菌などの土壤病害虫だけでなく, 通常は病原性を持たない「弱い病原菌」も関与しうると考えられた。

(2) 衰退現象

連作試験では, 連作によるテンサイの減収が著しかったが, 隣接する北海道立十勝農業試験場では, 連作テンサイの減収はわずかであった(奥村ら, 1997)ように, 近接する試験地でも, 連作障害の程

第13表 作物に被害する土壌微生物.

学名	イネ科		マメ科		その他			病名	英名	引用文献
	リクトウ	コムギ	ダイズ	アズキ	ジャガイモ	テンサイ	サツマイモ			
細菌類					○			そうか病	Common scab	15)
(放線菌を含む)					○			そうか病	Common scab	15)
原生生物						○		そう根病	Rhizonamia	14)
		○						縞萎縮病	Yellow mosaic	11)
					○			粉状そうか病	Powdery scab	6)
卵菌						○		立枯病	Dumping-off	17)
						○		黒根病	Black root	13)
						○		弱い病原菌		13)
	○						○	褐色雪腐病	Browning	5)
			○					立枯病	Dumping	16)
								弱い病原菌		2)
子のう菌			○					黒根腐病	Root necrosis	8)
		○						立枯病	Take-all	7)
		○						紅色雪腐病	Snow mold	5)
		○						雪腐大粒菌核病	Sclerotinia snow blight	5)
担子菌		○						雪腐小粒菌核病	<i>Typhula</i> snow blight	5)
不完全菌類			○	○				落葉病	Brown stem rot	9)
		○						条斑病	<i>Cephalosporium</i> stripe	12)
			○	○	○			(弱い病原菌)		3)
						○		つる割病	<i>Fusarium</i> wilt	10)
							○	根腐病	Root rot	1)
					○			黒あざ病	Black scarf	2)
	○							弱い病原菌		4)

1)馬場 1981, 2)景山ら 1982, 3)松口・新田 1988, 4)松本ら 1978, 5)松本 2009, 6)美濃ら 2009, 7)宮島・坪木 1981, 8)西ら 1999, 9)根岸・小林 1984, 10)小川 1988, 11)大藤 2005, 12)尾崎 1994, 13)清水 1994, 14)杉本 1983, 15)田中 2000, 16)山口 1977.

学名は、岸(1998)に準拠した。弱い病原菌は、生育抑制の原因菌が確認されているものの、病害として提案されていない場合。(弱い病原菌)は、根面糸状菌相の多様性低下による生育抑制。

度が異なる,あるいは,連作障害の原因となる生物が異なる例がある。これらの事例間の相違の原因の一つとして,土壌病害虫の抑止土壌,あるいは衰退現象の存在が考えられる(第14表)。

抑止土壌や衰退現象は,①病原菌が定着できないため発病がみられない土壌,②病原菌は定着するが,発病が起きない土壌,③病原菌が定着し,激しく発病するが,連作にともなって発病が漸減する土壌に分けることができる(駒田,1983)。①としては,*Fusarium*病に対する抑止土壌があり,北見農試周辺のインゲン根腐病抑止土壌について詳細な報告がある(古屋・宇井,1981;古屋ら,1979)。北見農試周辺の土壌からはインゲン根腐病菌(*Fusarium solani*)が検出されず,病原菌を接種しても激しい発病は見られない。北見農試の土壌では,大型分生孢子や厚膜孢子の発芽などが劣るが,土壌を高圧殺菌した場合,この現象は見られなくなる。しかし,殺菌土壌に北見農試,あるいは抑止性のない十勝農試

の土壌を加えると抑止性は回復する。すなわち,インゲン根腐病の抑止性は微生物的要因に起因していたと考えられるが,その微生物的要因は北見農試以外の土壌にも存在し,北見農試土壌はその微生物的要因が増加しやすい条件にあったと考えられる。

②としては,群馬県嬬恋村のアブラナ科根こぶ病(*Plasmodiphora brassicae*)の抑止土壌がある(村上ら,2004a)。この事例では,休眠孢子が陰荷電を持つものに対し,下層土のアロフェンが正荷電を持つため,下層土に休眠孢子が引き付けられ,表層土の孢子密度が低下する。しかし,リン酸の過剰施肥によりアロフェンの正荷電にリン酸が結合すると,アロフェンに遊走子が結合できなくなり,根こぶ病が発病するようになる(村上ら,2004b)。

③衰退現象は,連作の継続により土壌病害虫の被害が減少する現象であり,テンサイ根腐病(百町・宇井,1982b),ジャガイモそうか病(SCHOTTEL *et al.*, 2001),コムギ立枯病(COOK, 2003; NARITA and

第14表 土壤病害虫の抑止土壤、衰退現象の例.

	学名	作物	病名	場所	ケース	引用文献
細菌類(放線菌を含む)	<i>Strrptmyces scabies</i>	ジャガイモ	そうか病	Grand Rapids (アメリカ)	衰退	8)
原生生物	<i>Plasmiodiphora brassicae</i>	アブラナ科	根こぶ病	群馬県嬲恋村	抑止2	5)
卵菌	<i>Aphanomyces cochlioides</i>	テンサイ	立枯病	北海道札幌市等	衰退	9)
子のう菌	<i>Gaeumannomyces garaminis</i>	コムギ	立枯病	Glen Osmond (オーストラリア)	抑止1	1)
				北海道	衰退	6)
不完全菌	<i>Fusarium solani</i>	インゲン	根腐病	北海道訓子府町	抑止1	2)
				〃 芽室町	衰退	7)
	<i>Rhizoctonia solani</i>	テンサイ	根腐病	北海道網走市・本別町	衰退	4)
センチュウ	<i>Heterodera glycines</i>	ダイズ	シストセンチュウ	秋田県大仙市	衰退	3)

1) Chakraborty 1983, 2) 古谷・宇井 1981, 3) 橋本ら 1988, 4) 百町・宇井 1982b, 5) 村上ら 2004, 6) Narita と Suzui 1991, 7) 奥村 2000, 8) Schottelら 2001, 9) 山口 1977.

ケースは駒田(1983)に従い, 抑止1, 抑止2, 衰退に分類した. 抑止1: 病原菌がすみつけない土壤, 抑止2: 病原菌が存在するが発病しない土壤, 衰退: 連作により土壤病害虫が衰退する土壤.

SUZUI, 1991), ダイズのダイズシストセンチュウ(橋本ら, 1988)などで知られている。土壤病害虫の抑止性, 衰退現象は, 土壤から土壤へと移動できない一般的拮抗作用, 移動できる特異的拮抗作用に分けることができ, ジャガイモそうか病, コムギ立枯病の衰退現象は特異的拮抗作用である(WELLER *et al.*, 2002)。特異的拮抗作用は拮抗菌に起因すると考えられ, 非病原性病原菌(小川, 1988; SCHOTTEL *et al.*, 2001), 不完全菌類の *Trichoderma* 属菌(VINALE *et al.*, 2008), グラム陰性細菌の *Pseudomonas* 属菌(WELLER *et al.*, 2002), グラム陽性細菌の *Bacillus* 属菌(LIU *et al.*, 2009)などが拮抗菌として報告されている。また, センチュウに対する拮抗菌としては, シストセンチュウの2期幼虫に寄生する糸状菌 *Hirustella* 属菌(CHEN and LIU, 2005), 卵に寄生する *Fusarium* 属菌(清水, 1994), サツマイモネコブセンチュウに対する細菌 *Pasteuria* 属菌(鎌田ら, 1998)などが報告されている。

北見農試の例からも明らかなように, 以上の現象には, 起りやすい土壤, 起りにくい土壤があると考えられる。土壤病害虫の抑止性, 衰退現象の起りやすさが圃場によって異なることが, 既往の報告間で連作障害に対する結果が一致しない原因の一つであると考えられた。

(3) バイオマス窒素の関与

連作試験の試験後期では, 連作ダイズが土壤養分, 特に地力窒素の減耗によって減収したと考えられた。地力窒素はバイオマス窒素と強い関係がある(坂

本・大羽, 1993)ため, この現象は, ①ダイズ連作によって土壤有機物が減耗し, ②土壤微生物のエネルギー源である炭素が減少することによって土壤微生物も減少し, ③土壤微生物に由来するバイオマス窒素が減少し, ④土壤から供給される窒素(地力窒素)が減少することによってダイズが減収した, と考えられた。バイオマス窒素は土壤微生物の量に左右されると考えられるため, この現象も作物と土壤生物の相互関係と考えられた。

輪作の効果のうち, 土壤有機物の維持と連作障害の軽減は, 化学肥料では代替できないと考えられる。本論文では連作障害軽減効果について主に検討してきたが, ダイズの場合のように, 連作によって地力窒素が減少したと考えられる場合もあった。地力窒素は地力を構成する要因の一つに過ぎないが, 窒素は作物にとって最も重要な養分の一つであり, 土壤微生物によって保持される地力窒素は土壤有機物(炭素と窒素)の供給によって維持増進されると考えられる。もし, 輪作による土壤有機物の維持が, 地力窒素の維持を通して畑作物の生産性増大に寄与しているならば, この効果にも土壤微生物が関与したと考えることができる。すなわち, 輪作の効果である土壤有機物の維持や連作障害軽減効果には, 土壤の生物性が関与していると考えられた。

(4) アレロパシー現象としての連作障害

本研究では, 連作障害がアレロパシーに起因するかどうかは検討できなかった。作物残さの分解によって生成されるフェノール類などの化学物質は土壤中

で無害化されるため、前作物の収穫直後に次の作物を作付けしない限り、アレロパシーは連作障害の原因になりにくい(西尾, 1976)。それに対し、センチュウ、土壤病原菌などの生物的要因は、ダイズシストセンチュウではシスト(一戸, 1955a), *Aphanomyces* 属菌では胞子(渡邊, 1998), *Rhizoctonia solani* では菌核(百町・宇井, 1982a; 内記, 1983), *Cephalosporium gregatum* では罹病残さ中の菌糸(田中, 1983)などによって、土壤中で長く生存できるため、1年1作地帯である十勝地方でも連作障害の原因となりうると考えられる。

植物によるセンチュウのふ化促進物質、病原菌による病原物質、拮抗菌が生産する抗生物質など、連作障害や衰退現象にも多くの化学物質が関与している(第15表)。かつてのアレロパシーの定義は、「ある植物が生産する化学物質によって他の植物(微生物を含む)が何らかの作用を受ける現象」であり(藤井 2000)、微生物が生産する化学物質の影響はアレロパシーには含まれていなかった。

しかし、現在のアレロパシーの定義は、「高等植物、微生物、動物などのある生物個体によって、能動的、あるいは拡散的に放出される化学物質が、同種の個

体を含む別の個体における発生、生育、健康、行動、栄養状態、繁殖力、個体数、あるいはこれらの要因となる生理・生化学的機構に対して、何らかの作用や変容を引き起こす現象」である(藤井, 2000)。この定義に従えば、第15表に示したような連作障害における植物と土壤生物、土壤生物間の相互作用も、アレロパシー現象と考えることができる。

(5) 供試作物に発生しうる土壤病害虫

以上、連作試験の結果や既往の知見から、①畑作物の連作障害が主として土壤病害虫に起因すること、②衰退現象などにより圃場によって土壤病害虫の発生程度が異なること、③作物によっては土壤微生物(地力窒素)の減少によって減収することがあること、④生物的要因による連作障害はアレロパシー現象の1種と考えるると考察された。すなわち、連作障害は作物と複数の土壤生物が関与する複雑な生命現象であり、常に一定の試験結果が得られるわけではないと考えられた。以下、本研究の結果と異なる土壤病害虫が発生する可能性について述べる。

連作テンサイでは根腐病が発生しただけでなく、病徴は認められなかったものの、おそらく

第15表 植物と土壤生物間のアレロパシーの例。

分泌生物	対象生物	作用物質	ベ ン ゼ ン 環 配 糖 体	作用	引用 文献		
植物から土壤 生物	エンドウ	<i>Aphanomyces euteiches</i>	Prunetin	○	遊走子誘引	11)	
	テンサイ	<i>Aphanomyces cochlioides</i>	NO ₃ ⁻ 、Cl ⁻		遊走子誘引	12)	
	インゲン	<i>Heterodera glycines</i>	glycinoeclepin A		ふ化促進	1)	
	ライ麦	<i>Gaeumannomyces graminis</i>	DIBOA	○	○	防御	10)
	アルファルファ	<i>Fusarium solani</i>	サポニン類	○		抗菌	7)
	マリーゴールド	<i>Pratylenchus</i>	α-terthienyl			防除?	3)
	アブラナ科	<i>Globodera rostochiensis</i>	Glucosinolates	○		ふ化阻害	1)
土壤生物から 植物	ソルガム	<i>Meloidogyne hapla</i>	dhurrin	○		防除	6)
	<i>Streptomyces</i>	ジャガイモ	Thaxtomin	○		病斑形成	4)
	<i>Cephalosporium gramineum</i>	コムギ	Graminin A			条斑形成	5)
	<i>Bacillus</i>	作物	ペプチド抗生物質			病原菌抑制	2)
土壤生物から 土壤生物	<i>Psuedomonas</i>	<i>Gaeumannomyces graminis</i>	2,4-DAPG	○		抗菌	9)
	<i>Trichoderma</i>	卵菌、真菌(不完全菌など)	セルラーゼなど			細胞壁分解	8)

1)Chitwood 2002, 2)Choudhary と Johri 2009, 3)Cooper ら 1985, 4)King と Calhoun 2009, 5)Kobayashi と Ui 1979, 6)Oka 2010, 7)奥村 2000, 8)Vanile ら 2008, 9)Weller ら 2002, 10)Wilkes ら 1999, 11)Yokosawa ら 1986, 12)Yokosawa

DIBOA は2,4-dihydroxy-1,4-benzoxazin-3-one.

2,4-DAPG は2,4-diacetylphloroglucinol.

Aphanomyces 属菌による減収が認められた。根腐病だけでなく、*Aphanomyces* 属菌でも抑止土壤 (PERSSON and OLSSON, 2000) や拮抗菌 (ISLAM, 2008) が報告されているため、テンサイに対する *Aphanomyces* 属菌の被害も土壤によって異なる可能性があった。本試験では連作テンサイの減収程度が著しかったのに対し、隣接する十勝農業試験場では連作テンサイの減収がわずかだった (奥村, 1997) が、この事例間の相違が *Aphanomyces* 属菌に対する土壤の反応の相違に基づいた可能性も考えられた。また、立枯病は直播栽培で発生しやすい (石塚・横田, 1967) ため、栽培法でも連作障害の程度は異なると考えられる。

連作ジャガイモではそうか病が発生したが、連作による減収は比較的軽微だった。しかし、イギリスの Rotherhamstead では、コムギ連作試験を100年以上継続しているが、ジャガイモ連作試験は、土壤病害虫、おそらくはセンチュウの影響によって中止されており (JENKINSON, 1991)、連作によってセンチュウが発生した場合、ジャガイモでは著しく減収する可能性がある。国内におけるジャガイモシストセンチュウの発生地帯は北海道の一部地域に限られていた (INAGAKI, 1984) が、近年ではその被害面積がジャガイモ栽培面積の1割程度に増加しており (森ら, 2009)、連作ジャガイモでは今後センチュウ害も警戒する必要があると考えられる。

連作試験のダイズではダイズシストセンチュウのみが認められたが、北見農試では *Pythium* 属菌の被害が観察され (景山ら, 1982)、本州以南の地域では *Calonectria crotalariae* による黒根腐病なども問題となるなど (西ら, 1999)、連作ダイズでは土壤病害が問題となることが多い。アメリカではダイズシストセンチュウと *Fusarium* 属菌による Sudden death syndrome (突然死症候群) が報告されている (XING and WESTPHAL, 2009) が、この病害はセンチュウと糸状菌によって発生すること、生育中期に落葉し、甚大な被害をもたらすことなどが、アズキ落葉病と類似している。

連作アズキは、おそらく落葉病の被害により甚大な被害を受け、その被害はキタネグサレセンチュウによって助長されたと考えられた。しかし、連作アズキについての文献は少なく、これ以上考察することはできなかった。

春播コムギでは、連作による減収はわずかで、立

枯病も抑制されており、少なくとも連作10年目以降は、土壤病害虫の影響を受けなかったと考えられた。コムギの連作病害としては立枯病の影響が大きい (宮島・坪木, 1981) が、連作を4~5年継続することで立枯病は衰退する (COOK, 2003) こともあり、コムギは世界的に連作されている (REEVES, 1997)。一方、積雪地帯で行われた北見農試連作試験では、秋播コムギの収量が冬損 (≡雪腐病) によって不安定となった (北海道立北見農業試験場, 1981)。日本北部は、アジア陸塊で生成した寒気がチベット高原などに遮られて南下できず、東海上に押し出され、日本海で水分を吸収して積雪をもたらすため、世界でも有数の積雪地帯である (松本, 2002)。したがって、雪腐病が秋播コムギの連作病害となりうるのは、日本北部の特異的な条件と考えられ、連作試験でも春播コムギではなく秋播コムギを供試していれば、雪腐病によって減収した可能性があった。

7) 有機物施用の効果

連作試験では、おそらく落葉病によって養分吸収力が低下したアズキ、上いも重とデンプン価の補償的關係によってデンプン収量の変動がわずかだったジャガイモを除き、有機物施用によって収量が増加する傾向があった。有機物施用の効果は試験後期に著しく、連作による養分の蓄積が、その効果をもたらしたと考えられた。機械化される以前の十勝地方の農家は、労働力として家畜を飼養していたため、各農家で堆肥を生産しており (大久保, 1982)、また、比較的小規模経営であったため、各圃場に現在より多量の有機物が施用されていたと考えられる。しかし、現在の大規模機械化経営では、全ての耕地に有機物を施用することは困難であり、テンサイなどへの重点的な施用が行われている (大久保, 1982, 沢口・鱈場, 1991)。有機物の単年施用では、全ての養分が可給化されるわけではなく、可給化された養分も作物によって吸収され、さらに、養分が溶脱等で失われる可能性も考えられる。連作試験で見られたような効果は、長期間連用することによって得られるもので、単年度の施用で得ることは難しいと考えられた。

有機物施用には土壤病害虫抑制効果もある (BAILY and LAZAROVITS, 2003; OKA, 2010) が、今回、土壤病害虫に対する明確な抑制効果は認められなかった。連作試験における土壤の重量は、作土

深20cmとして200L×仮比重約0.8により、160kg乾土/m²と計算される。連作試験では最大で5kg生重/m²の有機物を施用したが、これは、乾重に換算すると1kg/m²以下となる量であり、5kg/m²の有機物は、土壤重量の1%以下に相当する量に過ぎない。土壤による希釈によって有機物の効果が見られなくなることを想定し、新田・松口(1989)は、有機物を充てんしたペーパーポットにアズキを播種し、そのポットを圃場に移植することで、落葉病を抑制した。このことは、有機物を多量に施用することで土壤病害虫を抑制しうることを示唆するが、有機物の多量施用では硝酸態窒素の流亡などによる地下水汚染も懸念されるため、十勝地方のような大規模畑作地帯では、このような集約的な技術を採用することは難しいと考えられる。

以上、連作障害は有機物施用では軽減できない場合があり、また、軽減できる場合でも、連年施用や多量施用が必要と考えられた。したがって、十勝地方の大規模畑作地帯において、有機物施用によって連作障害を軽減することは、現実的には難しいと考えられた。

8) 土壤燻蒸の効果

クロルピクリンはテンサイ、D-D剤はアズキの連作障害に著しい効果を示した。これらの効果は、土壤燻蒸による殺菌、殺センチウ効果によると考えられ、連作障害に対する土壤燻蒸の効果が確認された。しかし、土壤燻蒸剤は価格が高く、土壤に灌注する作業に時間がかかる。さらに、土壤燻蒸の効果は連年施用によって減少すること(VERHAGEN *et al.*, 1996)、目的とする生物以外にも作用すること、土壤病害虫の防除のためには毎作施用する必要があることなどから、普通畑作物に対して使用することは難しい。

土壤燻蒸剤としてはクロルピクリン、D-D剤だけでなく、メチルイソチオシアネートを生成するmetam-sodium(C₂H₄NaS₂)などもある(Li *et al.*, 2006)。イソチオシアネートは、アブラナ科作物に含まれるグルコシノレートからも生成される(MORANT *et al.*, 2008)ため、アブラナ科作物の作付けや、その残さのすき込みなどによって土壤病害(LARKIN and GRIFFIN, 2007)やセンチウ(LORD *et al.*, 2011)を抑制できることが報告されている。ANGUSら(1994)は、ナタネによるコムギ立枯病の

抑制効果をBio-fumigation(生物燻蒸)と名付けた。今後の研究開発が必要であるが、ナタネなどのアブラナ科作物の輪作への導入により、土壤燻蒸を代替できる効果が得られる可能性も考えられた。

以上、有機物施用のみ、もしくは土壤燻蒸は、普通畑作物の連作障害を回避するための手段としては、現実的ではないと考えられ、畑作物の生産性を維持するためには、輪作を行うことが有効と考えられた。その際、ナタネのように連作障害軽減効果を持つ可能性のある作物を導入する選択肢もありえると考えられた。

IV. 総合考察

1. 連作障害・輪作体系と土壤の生物性

既に考察したように、連作障害は作物と複数の土壤生物(センチウ、土壤病原菌、拮抗菌や、それ以外の土壤微生物)との相互作用によって起こると考えられた。ダイズのように、連作によって地力窒素(バイオマス窒素)が減耗すると考えられた作物もあったが、この場合も、土壤有機物の減耗によって土壤微生物の栄養源となる炭素が減少し、それにもなつて微生物バイオマスが減少した可能性が考えられた。すなわち、今回認められた連作による減収は、いずれも作物と土壤生物の相互作用とみなせた。

以上のことから、畑作物栽培における土壤生物研究の重要性とともに、輪作を行うことの重要性が示唆された。土壤燻蒸、有機物施用も土壤の生物性に影響する処理であるが、大規模畑作地帯において広域で施用することは難しいと考えられる。それに対し、植物による光合成量は、その20~40%が、根の浸出液、根から剥離した細胞などとして根圏に放出されるという試算もあり(JOHNSON *et al.*, 2006)、作物栽培では、作物の生育期間中、常に土壤に糖などの物質が作物自体から供給されると考えられる。さらに、作物残渣も土壤中へ還元されるとすれば、作物栽培が土壤の生物性に及ぼす影響は非常に大きいと考えられる。

2. 輪作体系に対する連作障害の影響

推定した輪作体系(第6図~第8図)を基に、テンサイ、ジャガイモ、コムギの作付け間隔を集計した(第16表)。この場合、2年輪作の作付け間隔は1年、3年輪作の作付け間隔は2年とした。テンサイは作付け間隔3年(4年輪作に1回出現)の場合がほとん

第16表 テンサイ、ジャガイモ、コムギの作付け間隔.

		連作	1年	2年	3年
テンサイ	淡色黒ボク土			○	○
	黒ボク土				○
	褐色低地土				○
ジャガイモ	淡色黒ボク土	○		○	○
	黒ボク土		○		○
	褐色低地土		○		○
コムギ	淡色黒ボク土	○		○	
	黒ボク土	○		○	
	褐色低地土	○		○	

* 第6図～第8図から作表.

どであり、ジャガイモは作付け間隔1～3年、コムギは連作～作付け間隔2年の場合が多かった。したがって、今回の調査から推定された輪作体系であるテンサイ-ジャガイモ-コムギ-コムギの作付け順序は、各作物の連作障害の発生実態を考慮して決められた体系であると考えられた。

4年に1回作付けされていたテンサイは、連作試験でも連作障害の著しい作物であり、4年輪作が必要な作物(北海道立北見農業試験場, 1981)とされている。テンサイの作付け間隔が長かったことは、これらの知見に基づく研究、普及、実需関係者の指導と農家の経験によるものであろう。一方、連作試験で連作障害が軽微だったコムギは、2年連作として輪作体系に組み込まれていた。世界のコムギ産地では、日本北部のような多雪地帯は少ない(松本, 2002)ため、雪腐病が問題となることは少ないと考えられる。また、重要な連作病害である立枯病は、連作の継続によって衰退するため、コムギは連作されることが多い作物である。

以上のように、十勝地方の輪作体系は連作障害を考慮して組み立てられたいたと考えられたが、1960年代には、ダイズシストセンチュウによる連作障害が発生しやすいマメ類中心の作付け体系が行われていた(尾崎, 1969)。この時代には、マメ類(ダイズ、アズキ、インゲン)の作付け頻度が50%を越え、マメ類の4～6年連作も行われていたため、ダイズシストセンチュウが問題となっていた。しかし、いずれもダイズシストセンチュウの寄主であるダイズ、

アズキ、インゲンの連作(一戸, 1953)では、本試験と同様に、ダイズシストセンチュウが衰退した可能性が考えられた。アズキでは落葉病(*Cepharosporium gregatum*)、インゲンでは根腐病(*Fusarium solani*)が問題となるが、ダイズ、アズキ、インゲンに共通する病原菌はなく、ダイズシストセンチュウが問題とならなければ、これらのマメ類の連作によっても著しい減収は起こらない可能性がある。ただ、既に述べたように、衰退現象の起こりやすさは圃場(土壌)によって異なる可能性があり、また、当時の農家圃場における厳密な連輪作による減収程度の評価結果は残っていないため、この点について、これ以上の考察することはできなかった。

また、当時の作付け順序では、マメ類連作の後に、コムギと赤クローバーが作付けされることが多く(尾崎, 1969)、このこともダイズシストセンチュウの被害を軽減した可能性があった。ダイズシストセンチュウは赤クローバーに侵入することができるが、成虫となることができないため、ダイズシストセンチュウの卵密度が高い圃場に赤クローバーを作付けすることで、ダイズシストセンチュウの卵密度は低下する(KUSHIDA *et al.*, 2002)。赤クローバーは緑肥作物でもあるため、マメ類の作付けによって減耗した有機物を供給した可能性もある。以上のように、1960年代に行われたマメ類連作を含め、十勝地方の輪作体系は、連作障害による被害を最小にするように工夫されていると考えられた。

3. 輪作体系の改善方策

十勝地方では、テンサイ-ジャガイモ-コムギ-コムギを主体とする輪作体系が主に採用されており、それらの輪作体系は、①作付け比率、②秋播コムギの前作物が少ないことに加え、③連作障害にも影響されていたと考えられた。テンサイ、ジャガイモ、コムギの3作物が主要作物である状況では、現在の輪作体系は合理的なものと考えられるが、輪作年数が4年程度と短いため、何らかのきっかけで土壤病害などの連作障害が発生する可能性も否定できない。輪作年数を長くするには、新作物を導入し、その作物の作付け比率を高くする必要がある。作付け比率の高い作物としては、①機械化適性があり、省力化が可能で大規模に栽培できること、②収益性が高いことが望ましい。十勝地方では、アズキ、野菜など収益性の高い作物が栽培されているが、労力がかかることもあり、輪作体系を変化させるほどの面積で栽培されていない。

将来的に輪作体系を改善していくためには、上記の条件に合致した作物を導入する必要があるが、その候補としては、現在栽培されているダイズ、スイートコーンとともに、新規作物であるナタネ、ヒマワリも考えられる。ダイズは機械化が進んでいるだけでなく、土壤微生物を活性化(プライミング効果)すること(CHENG *et al.*, 2003)で、窒素を有効化する働きがあると考えられ、ソルガム-ダイズ体系ではダイズの導入によりソルガムへの基肥窒素を6 kg/10a程度削減することができる(VARVEL and WILHELM, 2003)。また、ダイズ、スイートコーンやヒマワリはAM菌との共生によりリン酸吸収が旺盛となる(唐澤, 2004)ため、これらの作物の導入は他の作物の生育収量を向上させる可能性もある。ナタネでは、グルコシノレートなどの成分が土壤病害虫を抑制する“Bio-fumigation”が研究されており(ANGUS *et al.*, 1994)、ナタネを輪作に導入することにより土壤病害虫の被害軽減につながる可能性もある。輪作によって連作障害を軽減するためには、新作物を導入して輪作年限を長くすること、ナタネなど土壤微生物性に影響しうる作物を導入することが有効と考えられた。

輪作の効果の一つである地力維持については、残さ還元量の多いテンサイやコムギの作付けが有効であろう。ただ、コムギ残さはC/N比が高いため、過剰投与による窒素飢餓に注意が必要である。また、

コムギ収穫直後にコムギを作付けしない場合には、コムギと赤クローバーの混播も、土壤有機物の供給に有効であると考えられる。ただ、今回の結果にあったように、ダイズの窒素固定能力によって跡地土壤の窒素が富化されるという考え方には、現在では疑問が呈されており、窒素固定量とダイズ子実による窒素収奪量を比較した場合、ダイズ作付けによって土壤窒素が低下する可能性もありうる。

今回、具体的な輪作体系を提示することはできなかったが、新作物を導入するなどして輪作年数を長くすることができれば、より土壤病害虫に対して安定した輪作体系を構築できる可能性があると考えられた。また、作物選択の際には、残さによる有機物還元量にも留意する必要があると考えられた。

V. 要 約

地力維持を目的として行われる輪作には、化学肥料では代替できない効果があり、その大きな部分は連作障害の軽減にあると考えられる。本研究は、連作障害の原因と輪作体系への影響を明らかにすることを目的として行った。北海道の十勝地方中央部において、①作付け調査から輪作体系を数量的に評価するとともに、②16年間行った畑作物連作試験から連作障害の様相と原因を検討し、③連作障害が輪作体系に及ぼす影響について検討した。

1. 十勝地方における輪作体系の解析

輪作体系を数量的に推定するため、十勝中央部の芽室町の淡色黒ボク土(新生地区)、黒ボク土(美生地区)、褐色低地土(西士狩地区)で作付け調査を行った。各地点について、約120ha(576×576m×4区画)の作付け作物を、1983年～1990に調査した。各年度の作付け図を相互に比較し、単一の作付け順序を持つ区画に区分した後、各区画の面積を算出し、それらをデータベース化した。

農家1戸当たりの耕地面積は淡色黒ボク土で約23ha、黒ボク土で約29ha、沖積土で約15haであり、生産力の高い土壤ほど耕地面積は小さかった。各土壤ともテンサイ、ジャガイモ、コムギの作付け比率が高かったが、淡色黒ボク土ではスイートコーン、黒ボク土ではアズキ、インゲン、褐色低地土では野菜類、アズキの作付け比率も高かった。

この調査において、存在しうる作付け順序の数は、作物数を作付け順序の年数で累乗することで算出で

きる。作付け順序の年数が減少することで、存在する作付け順序の数は減少し、以後の解析が容易となるため、8年間の作付け順序を、3年間の作付け順序(以下、3年作付けパターンとする)に分割して解析を行った。3年作付けパターンは二つの前後作関係(例えば、①テンサイ-ジャガイモ-コムギは、テンサイ-ジャガイモ、ジャガイモ-コムギ)によって構成される。さらに、②ジャガイモ-コムギ-テンサイ、③コムギ-テンサイ-ジャガイモという3年作付けパターンが存在する場合、①、②、③を相互に連結することで、コムギ-テンサイ-ジャガイモ-コムギ-テンサイという作付け順序が存在する可以考虑することができる。この作付け順序は、最初と最後の前後作関係コムギ-テンサイが共通しているため、輪作体系とみなすことができる。この考え方にに基づき、相互に連結可能な3年作付けパターンを連結することで輪作体系を推定した。

各3年作付けパターンの面積は、年度ごとに集計した。本調査では8年間の作付け順序とその面積が集計されるため、そこから3年作付けパターンの面積が6反復算出された。6反復の3年作付けパターンの面積について、平均値と変動係数を算出した。変動係数が低い3年作付けパターンは、出現回数が多く、かつ、面積も高い値を示した。変動係数1.0以下の3年作付けパターンを抽出し、主要な3年作付けパターンとした。

各土壌とも多数(145～549種類)の3年作付けパターンが存在したが、主要な3年作付けパターンは、淡色黒ボク土で12種類、黒ボク土で10種類、褐色低地土で12種類しか存在しなかった。これらの主要な3年作付けパターンの面積は、淡色黒ボク土で約53%、黒ボク土で約38%、褐色低地土で約20%を占めた。これらの3年作付けを連結したところ、淡色黒ボク土では①テンサイ-ジャガイモ-コムギ、②テンサイ-ジャガイモ-コムギ-コムギ、③テンサイ-ジャガイモ-スイートコーン-コムギを、黒ボク土では②テンサイ-ジャガイモ-コムギ-コムギを輪作体系として推定することができた。しかし、褐色低地土では輪作体系とみなせる作付け順序は存在しなかった。これらの輪作体系を構成する主要な3年作付けの面積を集計すると、淡色黒ボク土で約50%、黒ボク土で約32%となった。

推定した輪作体系は、既往の報告と同様に、①作付け面積の大きい作物によって構成され、②コムギ

の前作物が限定されることに規制されたと考えられた。ただ、既往の報告よりもテンサイ、ジャガイモ、コムギの作付け比率が高かったため、輪作体系もより単純化していた。この輪作体系はコムギの連作を含むため、連作障害が発生する可能性も考えられた。

2. 連作障害の実態とその軽減技術の検討

作付け調査で比較的作付け比率の高かったテンサイ、ジャガイモ、ダイズ、アズキ、コムギ(春播コムギ)を、1980年～1995年に芽室町で栽培した。各作物に対して11処理区を設け、1区は輪作区、10区は連作区とした。輪作区と連作対照区は、化学肥料のみで栽培した。連作区には、麦稈厩肥とパーク堆肥をそれぞれ1.5、3、5 kg/m²施用する区を設けた。10年以上の有機物連用で、土壌の熱水抽出窒素、リン酸などの養分濃度は増加した。

土壌燻蒸処理は1990年以降に開始した。土壌燻蒸区には、麦稈厩肥をそれぞれ0、1.5、3 kg/m²施用した。ダイズ、アズキでは1990年～1995年にD-D剤を施用し、テンサイ、バレイシヨ、コムギでは1991年～1993年にクロロピクリン、1994年～1995年にD-D剤を施用した。

作物ごとに収量、土壌病害虫罹病程度と1993～1994年の土壌の可給態養分(熱水抽出性窒素、リン酸、カリウム)を測定した。熱水抽出性窒素は、地力窒素(≡バイオマス窒素)と関係が深い。連作によって収量が減少した、あるいは土壌病害虫が発生した時に、連作障害が起こったとみなした。各作物の連作による減収は、収量指数(連作対照区÷輪作区×100)で検討した。

連作、有機物施用と土壌燻蒸の影響を検討するため、年度を反復とした分散分析を行った。分散分析の処理は11の試験区であり、反復は同じ状況(品種、施肥量など)の年度であった。この分散分析は処理の影響ではなく、試験区の影響を検討したことになる。

テンサイの連作障害は著しく、連作対照区の糖量は、輪作区に比べ約50%減少した。また、連作10区では根腐病(*Rhizoctonia solani* AG-2-2)が1985～1990年に発生した。糖量はクロロピクリンによる土壌燻蒸区で回復したが、D-D剤を施用した年度では、連作対照区と比べて収量の回復は見られなかった。有機物施用区における糖量の増加は、試験後期ほど著しく、この影響は、有機物の連年施用によって、土

壤に養分が蓄積したためと考えられた。

輪作条件(輪作区とクロルピクリン施用区)、連作条件(連作対照区と有機物施用区)のいずれにおいても、テンサイの糖量は、土壤の熱水抽出窒素の増加にもなって増加した。しかし、輪作条件と連作条件では、熱水抽出窒素と糖量の関係は明らかに異なった。土壤養分が同程度の場合、糖量は輪作条件よりも、連作条件で常に低くなった。従って、連作による糖量の減少は、土壤養分の低下ではなく、テンサイの養分吸収力が低下したこと由来したと考えられた。この養分吸収力の低下はクロルピクリンによって軽減されたことから、生物的要因に起因すると考えられた。

テンサイの連作区では、*Rhizoctonia solani* AG-2-2による根腐病が発生したが、連作12年目以降、発病は見られなくなり、衰退現象が発生したと考えられた。しかし、根腐病が衰退した時期にも、連作区の糖量は減少し、クロルピクリン施用区でその減収は回復した。したがって、連作による減収は、根腐病菌以外の土壤微生物に影響されたと考えられた。既往の報告から、この時期の減収の原因の一つとして、*Aphanomyces* 属菌の影響が考えられた。

ジャガイモでは、デンプン収量の変化は試験期間を通じてわずかだった。上いも重は連作区で減少し、有機物施用区、土壤燻蒸区で増加したが、デンプン価は逆の傾向を示した。デンプン収量の変動がわずかだったことは、この上いも重とデンプン価に補償的な関係の影響と考えられた。土壤養分とデンプン収量との関係は、テンサイと同様であり、連作条件で収量が減少する傾向があった。すなわち、ジャガイモを連作することによる減収も、生物的要因に起因したことが示唆された。

ジャガイモの連作区でそうか病が発生したが、試験後期にはやや罹病程度が軽微となり、衰退現象の可能性が考えられた。そうか病罹病程度はバーク堆肥施用にもなって増加したが、これは置換酸度(y1)の低下に影響されたと考えられた。クロルピクリンはそうか病に効果を示さなかったが、これは土壤 pH が高かったためと考えられた。

ダイズでは、1983年～1985年、および1989年以降に連作対照区の減収が著しくなった。1983年～1984年は、ダイズシストセンチュウの卵密度が高く、センチュウ害によって連作区のダイズの収量が減少したと考えられた。しかし、1987年以降、ダイズシ

ストセンチュウの卵密度は減少しており、それにもなって連作区のダイズの収量も回復したと考えられた。

1989年以降、ダイズの収量は連作対照区で再び減少した。D-D 剤施用区の収量は輪作区並の値を示したが、D-D 剤施用区の増収は、センチュウ抵抗性品種「トヨムスメ」を供試した年度にも認められた。したがって、D-D 剤は殺センチュウ以外の効果によって、ダイズの収量を増加させたと考えられ、このD-D 剤の増収効果は、土壤窒素の無機化を促進する効果と無機化されたアンモニア態窒素の硝酸化成を抑制する効果に基づくと考えられた。ダイズの収量は土壤のカリウム含量と相関が高かったが、カリウム含量が低いバーク堆肥を施用した区を除外すると、窒素とダイズ収量に有意な相関がみられた。すなわち、この時期のダイズの収量は土壤養分に大きく影響され、D-D 剤は土壤窒素に作用することで連作ダイズの減収を軽減したと考えられた。これらのことから、10年以上連作したダイズでは、地力窒素(バイオマス窒素)の減少によって減収した可能性が考えられた。

アズキ連作区の減収は、テンサイと同程度に著しく、この減収は落葉病に由来すると考えられた。D-D 剤施用区で、アズキの収量は輪作区並に回復したことから、D-D 剤が、落葉病の発病を助長するセンチュウ密度を低減することで落葉病の発生を抑え、その結果、収量も回復したと考えられた。なお、D-D 剤施用時期には、ダイズシストセンチュウは既に衰退していたため、その効果は主にキタネグサレセンチュウに作用したと考えられた。

春播コムギでは、連作区の減収は軽微であった。また、クロルピクリン施用の影響も見られなかったため、10年以上の連作の後では生物的要因による収量への影響は少なかったと考えられた。コムギにおける立枯病の発生はほとんど見られなかったが、1991年のクロルピクリン施用によって立枯病が発生したことから、春播コムギの立枯病は生物的要因により抑制されていたと考えられた。コムギは連作によって減収しにくい作物と考えられるが、北海道は世界有数の積雪地帯であるため、秋播コムギを連作した場合には、雪腐病が問題となる可能性があった。

以上のように、テンサイ、ジャガイモ、アズキの連作による減収は土壤の生物的要因に起因したと考えられた。一方、ジャガイモでは、連作による減収

は比較的軽微だったが、塊茎の商品価値を低下させるような病が発生した。ダイズは、連作初期にはダイズシストセンチュウによって減収したが、10年以上連作した後では土壌窒素、すなわち、土壌微生物の保持する窒素(バイオマス窒素)の減少によって、減収したと考えられた。春播コムギでは、減収程度は軽微であり、連作10年目以降では土壌燻蒸の影響も見られなかった。しかし、連作11年目に土壌燻蒸区で立枯病が発生したことは、試験区土壌の微生物性によって立枯病が抑制されていたことを示唆し、連作した春播コムギも土壌の生物性によって影響されていたと考えられた。すなわち、連作による減収の程度は異なったが、いずれの作物を連作した場合でも、土壌の生物性に影響されたと考えられた。本研究での連作による減収程度は、必ずしも既往の報告と一致しなかったが、その原因の一つとして、減収に関わる土壌病害虫の影響を低減する抑止土壌や衰退現象の関与が考えられた。

作物は多様な物質を根から土壌に放出し、これらの物質によって影響される範囲は「根圏」と呼ばれる。放出される物質の種類は、作物によって異なるため、特定の作物を連作することによって、特定の土壌生物が増加する可能性があり、連作によって土壌病害虫などの有害な微生物が増加した時に、連作障害が起こると考えられる。土壌病害虫は、卵などの耐久生存器官によって生き残ることができ、同じ作物が再び作付けされた際に、増殖することができる。従って、連作障害の原因の1つは、土壌病害虫である。土壌病害虫は、土壌の特性(例えば衰退現象や抑止土壌などの生物学的要因)によっては、発生が抑えられる場合がある。また、大豆を連作した場合のように、微生物が保持するバイオマス窒素の減少によって、減収したと考えられる場合もあった。以上のように、通常の肥培管理条件下で発生する連作障害は、土壌病害虫や、他の生物学的要因に起因する現象と考えられた。

有機物施用によって連作作物の収量が増加したが、この効果は連用することで安定的に発現したと考えられた。有機物は窒素、リン酸、カリウムなどの養分を供給するだけでなく、微生物のエネルギー源となる炭素も供給するため、その結果としてバイオマス窒素を維持する効果もあると考えられた。また、土壌燻蒸も、作物と使用薬剤の組み合わせによっては、連作障害対策として効果的であった。しかし、

これらの処理は手間がかかるため、十勝地方の大規模農家で連作障害を回避する恒常的な手段として利用することを難しいと考えられた。現時点では、連作障害を回避する方法としては、輪作体系を採用することが現実的と考えられた。

3. 十勝地方の輪作体系の改善方策

本研究で推定した輪作体系での作付け間隔は、テンサイ(3年)>ジャガイモ(1~2年)>コムギ(連作~2年)であった。すなわち、連作障害の著しいテンサイでは作付け間隔が長く、そうではないコムギでは2年連作もみられるなど、輪作体系は、各作物の連作障害の程度に大きく影響されたと考えられた。

1960年代には、連作障害が問題となるマメ類の4~5年連作を含む作付け順序が採用されていた。しかし、①マメ類の長期連作では、ダイズシストセンチュウが衰退する可能性があること、②マメ類連作の後に、ダイズシストセンチュウの密度を低下させ、後作物に有機物を供給しうる赤クローバーなどのマメ科緑肥が栽培されていたことなどから、1960年代のマメ類連作も、連作障害を考慮した作付け順序だった可能性が考えられた。

本研究で推定した輪作体系は、①周期が4年と短く、②コムギ連作を含むため、連作障害が発生する可能性があると考えられた。輪作体系を改善するには、輪作体系に大規模栽培が可能な新たな作物を導入し、輪作年数を長くする必要があると考えられた。その候補としてはダイズ、スイートコーン、ヒマワリ、土壌燻蒸的な効果が研究されているナタネなどが考えられた。地力を維持するためには、マメ科緑肥の導入も効果的であると考えられた。

謝 辞

本論文は著者の学位論文(東京農工大学大学院連合農学研究科博農乙第335号)を基に起草したものである。

学位論文の取りまとめにあたっては、東京農工大学農学部教授平澤正博士には終始懇切なるご指導を賜り、茨城大学農学部教授新田洋司博士、宇都宮大学農学部准教授和田義春博士、東京農工大学農学部教授寺岡徹博士、同准教授大川泰一郎博士には御校閲ならびに有益な御助言をいただいた。

連作試験は、当初畑作物部作付体系第1研究室が担

当したが、以後組織改変に伴い、畑作管理部作付体系研究室(1989年～1992年)、畑作研究センター生産技術研究チーム(1993年～1995年)が担当した。試験担当者は松口龍彦、新田恒雄、片岡健治、昆忠男、橋本知義、豊田政一、濱口秀生、下名迫寛、松崎守夫であり、テンサイ根腐病は内藤繁夫、ダイズシストセンチュウは三井康、清水啓、相場聡、コムギ立枯病は本間善久、田澤純子の各氏が調査した(敬称省略)。また、テンサイの糖分分析は北海道立十勝農業試験場てん菜科に、土壌分析は十勝農業協同組合連合会農産科学研究所に依頼した。圃場管理に関しては畑作部(→畑作管理部→畑作研究センター)の業務科各氏にご協力いただいた。また、連作試験遂行に当たっては、予算面において北海道農業試験場場特定課題として、ご配慮をいただいた。ここに記して謝意を表する。

引用文献

- 1) 相場聡(2004)：シストセンチュウの分離法。線虫学実験法。日本線虫学会編。つくば。P.94-95.
- 2) 赤司和隆、高倉重義(2002)：北海道における畑作物の長期連・輪作圃場の植物寄生性線虫と望ましい輪作年限。土と微生物, 56, 109-115.
- 3) 赤塚恵、坂柳迪夫(1964)：畑土壌における窒素供給力の検定方法に関する2, 3の考察。北農試彙報, 83, 64-70.
- 4) 天野哲郎(1983)：十勝畑作経営における土壌条件と作物編成。北農試研報, 136, 63-85.
- 5) ANGUS, J. F., P. A. GARDNER, J. A. KIRKEGAARD and J. M. DESMARCHELIER (1994)：Biofumigation：Isothiocyanates released from *Brassica* roots inhibit growth of the take-all fungus. *Plant and Soil*, 162, 107-112.
- 6) 有沢道雄、加藤俊博(1982)：土壌消毒方法が土壌養分並びにトマトの生育収量に及ぼす影響。第1報 土壌消毒方法が土壌養分ならびにトマトの生育収量に及ぼす影響。愛知農総試研報, 14, 154-161.
- 7) 浅井三男、尾崎薫(1965)：畑輪作における前後作組み合わせ様式に関する研究 第6報 作付順序の相違によるダイズシストセンチュウの消長。北農試彙報, 87, 66-73.
- 8) 浅野峯男、加藤俊博、木下忠孝、有沢道雄(1983)：土壌消毒方法が土壌養分並びにトマトの生育収量に及ぼす影響。第2報 消毒歴が土壌微生物相の変化及び果菜類の生育・収量に及ぼす影響。愛知農総試研報, 15, 216-222.
- 9) 馬場徹代(1981)：テンサイ根腐病およびジャガイモ黒あざ病の防除に関する研究。北海道立農試報, 35, 1-74.
- 10) BAILEY, K. L. and G. LAZAROVITS(2003)：Suppressing soil-borne diseases with residue management and organic amendments. *Soil & Tillage Research*, 72, 169-180.
- 11) BERNARD, E. C., L. H. SELF and D. D. TYLER(1996)：Fungal parasitism of soybean cyst nematode, *Heterodera glycines* (Nemata：Heteroderidae), in differing cropping-tillage regimes. *Applied Soil Ecology*, 5, 57-70.
- 12) CHAKRABORTY, S. (1983)：Population dynamics of Amoebae in soils suppressive and non-suppressive to wheat take-all. *Soil Biology & Biochemistry*, 15, 661-664.
- 13) CHAPON, A., A. GUILLERM, L. DELALANDE, L. LEBRETON and A. SARNIGUET(2002)：Dominant colonisation of wheat roots by *Pseudomonas fluorescens* Pf29A and selection of the indigenous microflora in the presence of the take-all fungus. *European Journal of Plant Pathology*, 108, 449-459.
- 14) CHEN, F. and S. CHEN(2002)：Mycofloras in cysts, females, and eggs of the soybean cyst nematode in Minnesota. *Applied Soil Ecology*, 19, 35-50.
- 15) CHEN, S. and X. Z. LIU(2005)：Control of the soybean cyst nematode by the fungi *Hirsutella rhossiliensis* and *Hirsutella minnesotensis* in greenhouse studies. *Biological Control*, 32, 208-219.
- 16) CHENG, W., D. W. JOHNSON and S. FU(2003)：Rhizosphere effects on decomposition controls of plant species, phenology, and fertilization. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 67, 1418-1427.
- 17) 千葉一美(1982)：アズキ落葉病抵抗性の育種学的研究 I 抵抗性の品種間差異。道立農試集報, 48, 56-63.
- 18) CHITWOOD, D. J. (2002)：Phytochemical

- based strategies for nematode control. Annual Review of Phytopathology, 40, 221-249.
- 19) CHOUDHARY, D. K. and B. N. JOHRI(2009): Interactions of *Bacillus* spp. and plants - With special reference to induced systemic resistance (ISR). Microbiological Research, 164, 493-513.
- 20) COOK, R. J. (2003): Take-all of wheat. Physiological and Molecular Plant Pathology, 62, 73-86.
- 21) COOPER, G. K. and C. I. NITSCHKE(1985): α -Terthienyl, phototoxic allelochemical: Review of research on its mechanism of action. Bioorganic Chemistry, 13, 362-374.
- 22) DE NEVE, S., G. CSITÁRI, J. SALOMEZ and G. HOFMAN(2004): Quantification of the effect of fumigation on short- and long-term nitrogen mineralization and nitrification in different soils. J. Environ. Qual, 33, 1647-1652.
- 23) DONALD, P. A., P. E. PIERSON, S. K. ST. MARTIN, P. R. SELLERS, G. R. NOEL, A. E. MACGUIDWIN, J. FAGHIHI, V. R. FERRIS, C. R. GRAU, D. J. JARDINE, H. MELAKEBERHAN, T. L. NIBLACK, W. C. STIENSTRA, G. L. TYLKA, T. A. WHEELER and D. S. WYSONG(2006): Assessing *Heterodera glycines* - Resistant and susceptible cultivar yield response. J. Nematol, 38, 76-82.
- 24) 藤井義晴(2000): 自然と科学技術シリーズ アレロパシー 他感物質の作用と利用. 農文協. 東京.
- 25) 藤村建彦(1990): キタネグサレセンチュウによる大根の被害の特徴と防除法. 青森農試研報, 31, 43-58.
- 26) 福井重郎, 鎗水寿, 飯島鼎, 田中正, 泉清一(1953): 大豆の根瘤線(*Heterodera marioni*(Conu) Goody)の防除に関する研究 第I報 DDの殺虫効果について. 関東東山農試研報, 4, 19-22.
- 27) 船越建明, 松浦謙吉(1983): バレイショそうか病の耕種的防除法に関する研究. 第2報 完熟堆肥と硫黄華の併用による発病抑制効果. 広島農試報, 46, 63-70.
- 28) 古屋広光, 宇井格生(1981): インゲン根腐病発病抑止土壌における病原菌大型分生胞子の発芽阻害と土壌微生物. 日植病報, 47, 42-49.
- 29) 古屋広光, 大和田正幸, 宇井格生(1979): 北海道北見地方に存在するインゲン根腐病発の病抑止型土壌. 日植病報, 45, 608-617.
- 30) 後藤昭(1974): 本邦におけるネグサレセンチュウ *Pratylenchus* spp. の地理的分布. 九州農試報, 17, 139-224.
- 31) GULLINO, M. L., A. MINUTO, G. GILARDI, A. GARIBALDI, H. AJWA and T. DUAFALE(2002): Efficacy of preplant soil fumigation with chloropicrin for tomato production in Italy. Crop Protection, 21, 741-749.
- 32) 萩谷俊一, 篠原茂幸, 白崎隆夫(1982): ニンジン栽培畑におけるキタネグサレセンチュウの発生消長とマリーゴールドの導入効果. 千葉農試研報, 23, 21-29.
- 33) 原忠彦, 百田洋二, 草刈真一, 阿部一博, 山田貴義(1983): ハウスナスの連作障害に関する研究(1) - 連作障害の発生状況について -. 大阪農技セ研報, 20, 1-10.
- 34) 橋本秀教, 小浜節雄, 辻藤吾(1971): 腐植質火山灰土壌における厩肥連用の効果. 九州農試報, 16, 25-61.
- 35) 橋本鋼二, 稲垣春郎, 百田洋二, 酒井真次, 長沢次男, 国分喜治郎(1988): 抵抗性程度の異なるダイズ品種の連作による生育・収量ならびにダイズシストセンチュウ密度の変動. 東北農試研報, 78, 1-14.
- 36) 畑作部(1984)十勝地方における昭和58年の畑作物冷害. 北農試研究資料, 26, 55-106.
- 37) 樋口太重(1982): 有機物連用土壌の地力窒素的な評価. 土肥誌, 53, 214-218.
- 38) 平野暁(1977): 作物の連作障害. 農文協. 東京. P. 13-27.
- 39) 廣崎昭太(1986): 乱塊法. 応用統計ハンドブック編集委員会編. 応用統計ハンドブック. 養賢堂. 東京. P. 202-210.
- 40) 北海道立北見農業試験場(1981): 畑作物の連・輪作に関する長期試験. 北見農試資料, 3, 1-89.
- 41) 本間善久(1983): *Gaeumannomyces*(コムギ立枯

- 病菌)総論. 北海道畑作物の土壤病害. 北海道畑作物の土壤病害刊行会. 札幌. P. 117-126.
- 42) 星野滋, 那波邦彦, 松浦謙吉(2000): 対抗植物によるダイコンのキタネグサレセンチュウ密度抑制効果の検討. 広島農技セ研報, 68, 13-19.
- 43) 百町満朗(1983): *Rhizoctonia*(リゾクトニア病菌)テンサイ根腐病の衰退現象. 北海道畑作物の土壤病害. 北海道畑作物の土壤病害刊行会. 札幌. P. 369-378.
- 44) 百町満朗, 宇井格生(1982a): テンサイ根腐病発生ほ場における越冬植物残渣および菌核の感染源としての役割. 日植病報, 48, 628-633.
- 45) 百町満朗, 宇井格生(1982b): 連作に伴うテンサイ根腐病の衰退. 北大農学部邦文紀要, 13, 445-454.
- 46) 百町満朗, 山本好伸, 宇井格生(1983): 発病程度の異なる地域におけるテンサイ根腐病菌の菌核の生存と病原性. 日植病報, 49, 18-21.
- 47) 一戸稔(1953): 大豆線虫 *Heterodera glycines* の植物寄生性について. 北農試彙報, 64, 113-124.
- 48) 一戸稔(1955a): 大豆線虫の形態ならびに生態に関する研究. 北農試彙報, 68, 1-64.
- 49) 一戸稔(1955b): 大豆線虫の棲息密度に関する研究 1. 大豆の被害と寄生雌成虫数についての一観察. 北農試報, 48, 67-70.
- 50) INAGAKI, H. (1984): Studies on the ecology and control of the potato cyst nematode, *Globodera rostochiensis*. 北農試研報, 139, 73-144.
- 51) 石橋信義(2003): 寄主-寄生者関係. 石橋信義編. 線虫の生物学. 東京大学出版会. 東京. P. 225-237.
- 52) 石塚喜明, 横田勝徳(1967): 甜菜の連作障害に関する研究(第1報)甜菜の連作による収量低下の実態と立枯病との関連. 土肥誌, 38, 345-350.
- 53) ISLAM, M. T. (2008): Disruption of ultrastructure and cytoskeletal network is involved with biocontrol of damping-off pathogen *Aphanomyces cochlioides* by *Lysobacter* sp. strain SB-K88. Biological Control, 46, 312-321.
- 54) 伊藤武, 浅間和夫(1980): ばれいしょでんぷん収量構成要素の分解からみた多収穫技術の追及. 北農, 47 (6), 13-22.
- 55) JENKINSON, D. S. (1991): The rothamsted long-term experiments: Are they still of use? Agron. J., 83, 2-10.
- 56) JOHNSON, J. M. -F., R. R. ALLMARAS and D. C. REICOSKY(2006): Estimating source carbon from crop residues, roots and rhizodeposits using the National Grain-Yield Database. Agron. J., 98, 622-636.
- 57) 景山幸二, 宇井格生, 成田保三郎, 山口宏(1982): ダイズの連作障害と *Pythium* spp. の関係. 日植病報, 48, 333-335.
- 58) 鎌田憲昭, 岡田正道, 安間貞夫(1998): 寄生菌の利用によるイチジクのネコブセンチュウ防除. 静岡柑試報, 27, 53-60.
- 59) 唐澤敏彦(2004): 輪作におけるアーバスキュラー菌根菌の動態と作物の生育に関する研究. 北海道農研研報, 179, 1-71.
- 60) 片峯美幸, 亀和田國彦, 鈴木康夫, 伊藤良次, 中山喜一, 内田文雄(2001): 黒ボク土畑における各種有機物の20年間連用が作物生育ならびに土壤理化学性に及ぼす影響. 栃木農試研報, 50, 79-91.
- 61) 加藤勝信, 大久保甲子(1967): てん菜の連作に関する試験. 北農, 34 (8), 1-19.
- 62) 加藤俊博, 有澤道雄, 浅野峯男, 武井昭夫(1985): 土壤消毒方法が土壤養分並びにトマトの生育収量に及ぼす影響 第4報 土壤消毒が土壤養分および露地野菜の生育・収量に及ぼす影響. 愛知農総試研報, 17, 296-305.
- 63) 川口桂三郎(1977): 土壤学概論. 養賢堂. 東京.
- 64) 菊地晃二(1981): 十勝地方における土壤類型区分図とその土壤改良対策への応用. 道立農試報, 34, 1-118.
- 65) 木村伸人, 岡田詔男, 真子伸生, 青木松信, 金原敏治, 榊原正義(1990): モモのネコブセンチュウ抵抗性台木に関する試験(第2報)台木が穂品種の生育, 果実品質, 収量に及ぼす影響. 愛知農総試研報, 22, 231-239.
- 66) KING, R. R. and L. A. CALHOUN(2009): The thaxtomin phytotoxins: Sources, synthesis, biosynthesis, biotransformation and biological activity. Phytochemistry, 70,

- 833-841.
- 67) 岸國平編(1998) : 日本植物病害大事典. 全国農村教育協会. 東京.
- 68) KLOSE, S., V. ACOSTA-MARTÍNEZ and H. A. AJWA(2006) : Microbial community composition and enzyme activities in a sandy loam soil after fumigation with methyl bromide or alternative biocides. *Soil Biology & Biochemistry*, 38, 1243-1254.
- 69) 小林喜六(1983) : *Cephalosporium*(アズキ落葉病菌とコムギ条斑病菌)病態生理. 北海道畑作物の土壤病害. 北海道畑作物の土壤病害刊行会. 札幌. P. 203-213.
- 70) KOBAYASHI, K. and T. UI(1979) : Phytotoxicity and antimicrobial activity of Graminin A, produced by *Cephalosporium gramineum*, the causal agent of *Cephalosporium* stripe disease of wheat. *Physiological Plant Pathology*, 14, 129-133.
- 71) 駒田旦(1978) : 連作障害の原因と対策 その現状と将来展望. 農林水産技術研究ジャーナル, 1 (3/4), 25-28.
- 72) 駒田旦(1983) : 土壤病害に対する発病抑止土壤とその利用. 農林水産技術研究ジャーナル, 6 (7), 11-15.
- 73) KUSHIDA, A., T. UEHARA and Y. MOMOTA (2002) : Effect of red clover on hatching and population of *Heterodera glycines* (*Tylenchida* : *Heteroderidae*). 日本線虫学会誌, 32, 69-76.
- 74) LARKIN, R. P., T. S. GRIFFIN(2007) : Control of soilborne potato diseases using *Brassica* green manures. *Crop Protection*, 26, 1067-1077.
- 75) LI, L. Y., T. BARRY, K. MONGAR and P. WOFFORD(2006) : Modeling methyl isothiocyanate soil flux and emission ratio from a field following a chemigation of metam-sodium. *J. Environ. Qual*, 35, 707-713.
- 76) LIU, B., H. QIAO, L. HUANG, H. BUCHENAUER, Q. HAN, Z. KANG and Y. GONG(2009) : Biological control of take-all in wheat by endophytic *Bacillus subtilis* E1R-j and potential mode of action. *Biological Control*, 49, 277-285.
- 77) LIU, X. and S. J. HERBERT(2002) : Fifteen years of research examining cultivation of continuous soybean in northeast China : A review. *Field Crops Research*, 79, 1-7.
- 78) LORD, J., S. L. LAZZERI, H. J. ATKINSON and P. E. URWIN(2011) : Biofumigation for control of pale potato cyst nematodes : Activity of *Brassica* leaf extracts and green manures on *Globodera pallida* in vitro and in soil. *J. Agric. Food Chem.*, 59, 7882-7890.
- 79) 松田幹男, 堀江正樹, 本田勝雄, 志村英二(1980) : 畑輪作に関する研究 第11報 42年間にわたる連・輪作方式における畑作物の収量の推移について. 日作紀, 49, 548-558.
- 80) 松口龍彦, 新田恒雄(1987a) : きゅう肥, 作物残渣の施用が畑作物の根群発達および生育に及ぼす影響. 土肥誌, 58, 653-660.
- 81) 松口龍彦, 新田恒雄(1987b) : きゅう肥, 作物残渣の施用が畑作物の根群発達および根の糸状菌フロラに及ぼす影響. 土肥誌, 58, 661-670.
- 82) 松口龍彦, 新田恒雄(1988) : 連作に伴う根の糸状菌フロラの変動と根群発達に及ぼす堆きゅう肥施用効果. 土肥誌, 59, 1-11.
- 83) 松実成忠(1969) : 連作障害-いわゆる“いや地”問題について-. 農及園, 44, 309-312.
- 84) 松本淳(2002) : 冬季の特徴. 気候影響・利用研究会編. 日本の気候 I - 最新データでメカニズムを考える -. 二宮書店. 東京. P. 71-80.
- 85) 松本満夫, 西尾道徳, 草野秀(1978) : 異なる地域で連作した陸稲の根面糸状菌フロラ. 土肥誌, 49, 443-447.
- 86) 松本直幸(2009) : 雪腐病(1). 北農, 76, 143-149.
- 87) 松崎守夫(2009) : 10年以上連作した畑作物の収量に及ぼす土壤燻蒸と有機物施用の影響. 日作紀, 78, 312-323.
- 88) MATSUZAKI, M. (2011) : Farming System and Management. Edited by Dora Krezhova. Recent Trends for Enhancing the Diversity and Quality of Soybean Products. P. 251-264. (<http://www.intechopen.com/articles/show/title/farming-system-and-management>.)
- 89) 松崎守夫, 橋本知義, 昆忠男, 豊田政一(1994a) : 面積データに基づく輪作体系の解析手法 第1

- 報 主要な3年作付の抽出. 日作紀, 63, 9-14.
- 90) 松崎守夫, 橋本知義, 昆忠男, 豊田政一(1994b): 面積データに基づく輪作体系の解析手法 第2報 輪作体系の確認結果及びその検定. 日作紀, 63, 15-20.
- 91) 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. 北農試研報, 166, 1-65.
- 92) 美濃健一, 西脇由恵(2001): 土壌酸度調整と灌水によるジャガイモそうか病(*Streptomyces scabies*)の抑制. 北海道立農試集報, 80, 73-76.
- 93) 美濃健一, 西脇由恵, 相馬潤, 池谷美奈子, 田中文夫(2009): 北海道における粉状そうか病の発生状況. 北農, 76, 14-20.
- 94) 宮島邦之, 坪木和男(1981): *Gaeumannomyces graminis* (Sacc.) Arx & Oliver var. *tritici* Walker によるコムギ立枯病の発生. 道立農試集報, 45, 38-46.
- 95) 三須昇, 宮里愿(1970): カリウム. 土壌養分分析. 養賢堂. 東京. P. 258-277.
- 96) 水久保隆之(2003): 線虫による農作物の被害. 石橋信義編. 線虫の生物学. 東京大学出版会. 東京. P. 265-281.
- 97) 水久保隆之, 清水啓, 相場聡, 伊藤賢治, 奈良部孝(2004): サツマイモネコブセンチュウ防除に及ぼす市販線虫対抗植物の持続効果並びに対抗植物と線虫天敵細菌 *Pasteuria penetrans* との組み合わせ効果の検討. 中央農研研報, 4, 1-16.
- 98) 水野直治, 吉田穂積(1994): 土壌 pH, 置換酸度 y1 とバレイショそうか病との相互関係. 土肥誌, 65, 27-33.
- 99) MORANT, A. V., K. JORGENSEN, C. JORGENSEN, S. M. PAQUETTE, R. SANCHEZ-PEREZ, B. L. MOLLER and S. BAK(2008): b-Glucosidases as detonators of plant chemical defense. *Phytochemistry*, 69, 1795-1813.
- 100) 森元幸(2009): 日本におけるジャガイモシストセンチュウ抵抗性品種の育成. 北農, 76, 7-13.
- 101) 村上圭一, 篠田英史, 中村文子, 後藤逸男(2004): アブラナ科野菜根こぶ病の発病に及ぼす土壌の種類と pH の影響. 土肥誌, 75, 339-345.
- 102) 村上圭一, 中村文子, 後藤逸男(2004): 土壌のリン酸過剰とアブラナ科野菜根こぶ病発病の因果関係. 土肥誌, 75, 453-457.
- 103) 村田吉平, 成河智明, 千葉一美, 佐藤久泰, 足立大山, 松川勲(1985): あずき新品種「エリモシヨウズ」の育成について. 道立農試集報, 53, 103-113.
- 104) 村田智吉, 田中文夫, 坂上寛一, 安積大治, 浜田龍之介(1997a) 麦かん・堆肥の連用が土壌微生物バイオマス量・可給態窒素量および中性糖組成に及ぼす影響. 土肥誌, 68, 249-256.
- 105) 村田智吉, 田中文夫, 坂上寛一, 六本木和夫, 浜田龍之介(1997b): 沖積土における稲わら堆肥連用と四要素試験が土壌微生物バイオマス量・可給態窒素量および中性糖組成に及ぼす影響. 土肥誌, 68, 257-264.
- 106) 長坂克彦, 中村保一, 松野篤(1999): 有機物の長期連用が淡色黒ボク土の理化学性及び物理性に及ぼす影響. 山梨総農試研報, 9, 1-10.
- 107) 内記隆(1983): *Rhizoctonia* (リゾクトニア病菌) テンサイ根腐病. 北海道畑作物の土壌病害. 北海道畑作物の土壌病害刊行会. 札幌. P. 359-368.
- 108) NAIKI, T. and T. UI(1977): Population and distribution of sclerotia of *Rhizoctonia solani* Khun in sugar beet field soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 9, 377-381.
- 109) 仲川晃生, 島田信二(1995): 近畿中国地域におけるダイズ立枯性病害の発生実態. 中国農研報, 15, 19-27.
- 110) 成田保三郎(1983): 連作障害の対策について. 土肥誌, 54, 170-179.
- 111) 成田保三郎(1984): 網走地方の黒色火山性土における連・輪作畑の土壌微生物特性と連作障害の要因解明およびその対策に関する研究. 道立農試報, 50, 1-44.
- 112) NARITA, Y. and T. SUZUI(1991): Influence of a sterile dark mycelia fungus on take-all of wheat. 日植病報, 57, 301-305.
- 113) NEENO-ECKWALL, E. C. and J. L. SCHOTTEL (1999): Occurrence of antibiotic resistance in the biological control of potato scab disease. *Biological Control*, 16, 199-208.
- 114) 根岸秀明, 小林喜六(1984): アズキ落葉病の発病に及ぼすダイズシストセンチュウの影響. 日

- 植病報, 50, 500-506.
- 115) 仁王以智夫(1994): 土壌の生化学反応と微生物. 土壌生化学. 朝倉書店. 東京. P. 21-33.
- 116) 西和文, 佐藤文子, 唐澤哲二, 佐藤剛, 福田徳治, 田中廣治(1999): ダイズ黒根腐病の発生生態と防除. 農研センター研報, 30, 11-109.
- 117) 西宗昭, 藤田勇, 金野隆光(1982a): 十勝地方の畑作物の窒素利用 第2報 土壌別にみたテンサイの肥料および土壌窒素の利用. 北農試研報, 133, 17-29.
- 118) 西宗昭, 斎藤元也, 金野隆光, 藤田勇, 宮沢数雄(1982b): 十勝に分布する肥沃度の異なった土壌におけるテンサイの生育解析. 北農試研, 133, 31-60.
- 119) 西宗昭, 金野隆光, 斎藤元也, 藤田勇(1983): 十勝地方の主要土壌に栽培された豆類の窒素固定量と子実収量. 北農試研報, 137, 81-106.
- 120) 西尾道徳(1976): 陸稲の連作障害の原因をめぐって. 化学と生物, 14, 718-721.
- 121) 西尾道徳(1981): 連作した陸稲根面での顕微鏡で観察した微生物密度. 土肥誌, 52, 413-419.
- 122) 西尾道徳(1983): 連作障害の発生について. 土肥誌, 54, 64-73.
- 123) 西尾道徳(1986): 植物養分の貯蔵源・供給源としての土壌微生物菌体. 農業技術, 41, 307-311.
- 124) 新田恒雄, 松口龍彦(1989): 有機物施用による根圏生態系の改善が畑作物の生育・収量に及ぼす影響に関する研究. 北農試研報, 152, 33-89.
- 125) 農林水産省北海道農業試験場他編(1986): てんさいに関する調査基準および用語集. 札幌. P. 96.
- 126) 小川奎(1988): サツマイモつる割病に関する研究. 農研センター研報, 10, 1-125.
- 127) 生越明(1983) *Aphanomyces* (苗立枯病など) 総論. 北海道畑作物の土壌病害. 北海道畑作物の土壌病害刊行会. 札幌. P. 53-62.
- 128) 大林延夫(1983): D-D 油剤とダゾメット粒剤の組み合わせによるダイコンのキタネグサレセンチュウ防除法. 神奈川園試研報, 30, 81-84.
- 129) 大畑貫一, 門間敏幸, 北川靖夫, 伊藤純雄, 駒田旦(1985): 連作障害防止のためのほ場カルテシシステムの開発. 第1報 連作障害の実態解析とほ場カルテシシステム開発の意義. 農研センター研報, 4, 1-50.
- 130) 大久保隆弘(1973): 輪作の栽培学的意義に関する研究. 東北農試研報, 46, 1-61.
- 131) 大久保隆弘(1976): 作物輪作技術論. 農山漁村文化協会. 東京.
- 132) 大久保隆弘(1982): 北海道畑作農業の実態と技術的課題. てん研報, 24, 203-213.
- 133) 大藤泰雄(2005): コムギ萎縮病の発生生態に関する研究. 東北農研研報, 104, 17-74.
- 134) 岡啓(1969): 十勝地方におけるばれいしょの生産性向上に関する研究 第2報 磷酸多施肥条件下におけるN用量とばれいしょの生育反応. 北農試彙報, 95, 54-64.
- 135) 岡啓(1976a): 十勝の畑作と技術の歩み. 農業技術, 31, 400-404.
- 136) 岡啓(1976b): ばれいしょ塊茎の粒大別でん粉価とその変異. 北農, 43 (5), 23-30.
- 137) OKA, Y. (2010): Mechanisms of nematode suppression by organic soil amendments - A review. *Applied Soil Ecology*, 44, 101-115.
- 138) 岡田利承(1968): ダイズシストセンチュウの寄生時期とダイズの生育. 北農試彙報, 93, 32-38.
- 139) 岡田利承, 森哲郎(1963): 土壌燻蒸剤の拡散に関する研究 第1報 土壌中におけるDDの拡散とダイズシストセンチュウに対する防除範囲. 北農試彙報, 82, 1-7.
- 140) 奥村正敏(2000): 十勝地方における連輪作土壌の微生物特性とインゲン根腐病の生態的制御に関する土壌肥料学的研究. 道立農試報, 97, 1-102.
- 141) 奥村正敏・松崎康範・野村信史・相馬暁(1989): テンサイの糖分向上と施肥窒素および堆肥の相互関係. 道立農試集報, 59, 21-29.
- 142) 奥村正敏, 山神正弘, 東田修司(1997): 主要畑作物の輪作年限ならびに作付組み合わせ. 土肥誌, 68, 331-335.
- 143) 奥山善直(1972): 連作条件におけるてん菜の生育相と関与要因について2, 3の考察. 北農, 39 (8), 19-37.
- 144) 小野忠, 矢野輝人(1993): 土壌消毒が土壌微生物相と野菜の生育に及ぼす影響. 大分農技セ研報, 23, 89-114.
- 145) 尾崎薫(1969): 北海道畑作中心地帯における輪

- 作, 特に前後作組み合わせ様式に関する研究. 北農試報, 74, 1-158.
- 146) 尾崎薫, 浅井三男(1963): 畑輪作における前後作組み合わせ様式に関する研究 第2報 ダイズシストセンチュウと前後作との関係. 北農試報, 81, 11-21.
- 147) 尾崎政春(1994): 北海道におけるコムギ条斑病の発生生態と防除に関する研究. 道立農試報, 82, 1-60.
- 148) 尾関幸男, 佐々木宏, 天野洋一, 土屋俊雄, 前野真司, 上野賢司(1988): 春播小麦新品種「ハルユタカ」の育成について. 道立農試集報, 58, 41-54.
- 149) PERSSON, L. and S. OLSSON(2000): Abiotic characteristics of soils suppressive to *Aphanomyces* root rot. *Soil Biology & Biochemistry*, 32, 1141-1150.
- 150) PORTER, P. M., S. Y. CHEN, C. D. REESE and L. D. KLOSSNER(2001): Population response of soybean cyst nematode to long term corn-soybean cropping sequences in Minnesota. *Agron. J.*, 93, 619-626.
- 151) REEVES, D. W. (1997): The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems. *Soil & Tillage Research*, 43, 131-167.
- 152) 六本木和夫, 石上忠, 武田正人(1993): 稲わら堆肥の連用が沖積畑土壌の理化学性に与える影響. 土肥誌, 64, 27-33.
- 153) RYDER, M. H., Z. YAN, T. E. TERRACE, A. D. ROVIRA, W. TANG and R. L. CORRELL (1999): Use of strains of *Bacillus* isolated in China to suppress take-all and rhizoctonia root rot, and promote seedling growth of glasshouse -grown wheat in Australian soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 31, 19-29.
- 154) 坂本一憲, 大羽裕(1993): 畑土壌における可給態N量と土壌バイオマス量との関係. 土肥誌, 64, 42-48.
- 155) SALE, P. W. G. and L. C. CAMPBELL(1986): Yield and composition of soybean seed as a function of potassium supply. *Plant and Soil*, 96, 317-325.
- 156) SALVAGIOTTI, F., K. G. CASSMAN, J. E. SPECHT, D. T. WALTERS, A. WEISS and A. DOBERMANN(2008): Nitrogen uptake, fixation and response to fertilizer N in soybeans: A review. *Field Crops Research*, 108, 1-13.
- 157) 佐野善一(1995): サツマイモネコブセンチュウの密度抑制に有効な輪作用植物の探索. 九州農試報, 28, 175-193.
- 158) 佐々木健治, 高橋康利, 佐藤忠士(1985): 畑作物の連作障害と作付体系に関する研究. 岩手農試研報, 25, 163-180.
- 159) 佐々木紘一, 砂田喜与志, 土屋武彦, 酒井真次, 紙谷元一, 伊藤武, 三分一敬(1988): だいず新品種「トヨムスメ」の育成について. 道立農試集報, 57, 1-12.
- 160) 沢口正利, 鱈場尊(1991): 十勝畑作地帯における土壌・施肥管理の実態 第2報 有機物管理のの実態. 北農, 58, 161-166.
- 161) 佐山充, 本間善久, 竹中重仁(2001): *Verticillium biguttatum* を用いた *Rhizoctonia solani* によるテンサイ苗立枯病および根腐病の生物的防除. 日植病報, 67, 12-18.
- 162) SCHOTTEL, J. L., K. SHIMIZU and L. L. KINKEL(2001): Relationships of in vitro pathogen inhibition and soil colonization to potato scab biocontrol by antagonistic *Streptomyces* spp. *Biological Control*, 20, 102-112.
- 163) 関口明, 藤原耕治, 前田要(1976): 水田転換畑における豆類の連作栽培について 第1報 小豆の連作栽培. 北農, 43 (6), 24-38.
- 164) 関谷宏三(1970): Trough 法. 土壌養分分析. 養賢堂. 東京. P. 414-415.
- 165) SHARIFI, M., B. J. ZEBARTH, D. L. BURTON, C. A. GRANT and G. A. PORTER (2008): Organic amendment history and crop rotation effects on soil nitrogen mineralization potential and soil nitrogen supply in a potato cropping system. *Agron. J.*, 100, 1562-1572.
- 166) 志賀一一, 大山信雄, 前田乾一, 鈴木正昭(1985): 各種有機物の水田土壌中における分解過程と分解特性に基づく評価. 農研センター研報, 5, 1-19.
- 167) 清水啓(1994): 土壌温度及び土壌酸度が卵寄生

- 菌 (*Fusarium* sp.) のダイズシストセンチュウ卵数及び卵寄生率に及ぼす影響. 日本線虫学会誌, 24, 76-78.
- 168) 清水基滋(1994) : *Aphanomyces cochlioides* による連作テンサイの生育阻害について I 側根への感染がテンサイの生育に及ぼす影響. 道立農試集報, 67, 55-63.
- 169) 下長根鴻(1992) : 土壤中におけるフザリウム菌の生態ならびに輪作と有機物施用によるキュウリつる割病の防除. 茨城農試特別研報, 6, 1-115.
- 170) SIMON, A. (1989) : Biological control of take-all of wheat by *Trichoderma koningii* under controlled environmental conditions. *Soil Biology & Biochemistry*, 21, 323-326.
- 171) 杉原進, 石井和夫, 近藤熙(1979) : 畑地に対する牛ふん厩肥の連年多量施用 第1報 厩肥の多量施用が畑作物の生育収量および土壤に及ぼす影響. 東北農試研報, 60, 17-40.
- 172) 杉本利哉(1983) : *Polymyxa* (テンサイそう根病など) 総論. 北海道畑作物の土壤病害. 北海道畑作物の土壤病害刊行会. 札幌. P. 27-35.
- 173) 住田弘一, 加藤直人, 西田瑞彦(2002) : 寒冷地灰色低地土水田における堆肥長期連用試験からみた化成肥料及び堆肥中の窒素の行方. 東北農研研報, 100, 49-59.
- 174) 諏訪順子, 上田康郎, 串田篤彦(2005) : 線虫対抗植物クロタリアの輪作によるダイズシストセンチュウの耕種防除. 茨城農総七農業研究所研報, 8, 43-46.
- 175) 鈴木慶次郎, 東田修司, 志賀弘行(2000) : ジャガイモそうか病の発病に及ぼす有機物施用および耕土処理の影響. 北海道立農試集報, 79, 37-44.
- 176) 鈴木達彦(1972) : 畑作物の連作障害と無菌栽培の将来(1). 農及園, 47, 689-694.
- 177) 鈴木達彦, 設楽惣助, 福田修一, 辰巳弘祐, 松田幸久, 塚内芳巳(1980) : 作物根圏の微生物. 土と微生物, 22, 47-63.
- 178) 瀧嶋康夫(1965) : いや地—毒素説の進展と問題点一. 化学と生物, 3, 530-535.
- 179) 田村元, 竹内晴信, 田中文夫(1997) : ジャガイモそうか病に対する土壤酸度調整資材の抑制効果と残効性. 北海道立農試集報, 73, 57-62.
- 180) 田中文夫(1983) : *Cephalosporium* (アズキ落葉病菌とコムギ条斑病菌) 発生生態・検出・定量. 北海道畑作物の土壤病害. 北海道畑作物の土壤病害刊行会. 札幌. P. 196-202.
- 181) 田中文夫(2000) : ジャガイモそうか病菌の同定と識別・定量ならびに土壤環境制御による防除に関する研究. 北海道立農試報, 96, 1-66.
- 182) 徳永美治(1967) : 畑地の連作障害を考える(1). 農業技術, 22, 301-304.
- 183) 鳥越博明(2002) : サトイモの枯れ上がり症状の防止対策 第2報 線虫による被害実態と被害回避のための線虫対抗植物の利用. 鹿児島農試研報, 30, 37-58.
- 184) 鳥越博明, 福永求, 牟田辰朗(2002) : サトイモの枯れ上がり症状の防止対策. 第3報 有機物利用によるミナミネグサレセンチュウの密度抑制. 鹿児島農試研報, 30, 59-72.
- 185) 豊田政一(1994) : 十勝の作付及び被害の概況. 北農試研究資料, 52, 5-6.
- 186) 土屋貞夫(1983) : *Cephalosporium* (アズキ落葉病菌とコムギ条斑病菌) 総論. 北海道畑作物の土壤病害. 北海道畑作物の土壤病害刊行会. 札幌. P. 185-195.
- 187) 上田康郎, 渡辺健(1997) : 線虫対抗植物等の輪作および生態的手法によるかんしょのネコブセンチュウ防除. 茨城農業総合センター農業研究所研報, 4, 27-38.
- 188) 植松勉, 片山克己(1990) : ジャガイモの連作下におけるそうか病の発生生態と防除対策. 長崎総農林試研報(農業部門), 18, 61-115.
- 189) 宇井格生(1980) : 植物病理学と土壤微生物学の接点. 土と微生物, 22, 31-37.
- 190) 宇井格生(1983) : 北海道畑作物の土壤病害. 北海道畑作物の土壤病害刊行会. 札幌. P. 1-13.
- 191) 浦上敦子, 浦嶋泰文, 佐藤文生, 森下昌三(2003) : ニンジンを中心とした作付体系と施肥処理がニンジンの収量, 品質, 土壤溶液硝酸態窒素濃度およびキタネグサレセンチュウ密度に及ぼす影響. 中央農研研報, 3, 51-58.
- 192) VARVEL, G. E. and W. W. WILHELM(2003) : Soybean nitrogen contribution to corn and sorghum in western corn belt rotations. *Agron. J.*, 95, 1220-1225.
- 193) VERHAGEN, C., G. LEBBINK and J. BLOEM

- (1996) : Enhanced biodegradation of the nematicides 1,3-dichloropropene and dichloropropene nad methyl isothiocyanate in variety of soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 28, 1753-1756.
- 194) VINALE, F., K. SIVASITHAMPARAM, E. L. GHISALBERTI, R. MARRA, S. L. WOO and M. LORITO(2008) : *Trichoderma*-plant-pathogen interactions. *Soil Biology & Biochemistry*, 40, 1-10.
- 195) 渡辺敏夫, 安尾正元, 石井和夫, 永井政雄, 市来小太郎(1963) : 陸稲の連作障害に関する研究. 農事試研報, 5, 1-44.
- 196) 渡邊恒雄(1998) : 植物土壤病害の事典. 朝倉書店. 東京.
- 197) WELLER, D. M., J. M. RAAIJMAKERS, B. B. M. GARDENER and L. S. THOMASHOW(2002) : Microbial populations for specific soil suppressiveness to plant pathogens. *Annual Review of Phytopathology*, 40, 309-348.
- 198) WILKES, M. A., D. R. MARSHALL and L. COPELAND(1999) : Hydroxamic acids in cereal roots inhibit the growth of take-all. *Soil Biology & Biochemistry*, 31, 1831-1836.
- 199) XING, L. and A. WESTPHAL(2009) : Effects of crop rotation of soybean with corn on severity of sudden death syndrome and population densities of *Heterodera glycines* in naturally infested soil. *Field Crops Research*, 112, 107-117.
- 200) 山田英一, 佐久間太, 橋爪健, 高橋穰, 福原暢一郎, 小林喜六, 近藤則夫(2005) : アズキ落葉病の感染に及ぼすキタネグサレセンチュウの影響. 日本線虫学会誌, 35, 71-77.
- 201) 山田楯(1981) : 陸稲・畑水稻の連作障害の発現要因とその防除法に関する研究. 農事試研報, 35, 235-265.
- 202) 山口武夫(1977) : てん菜の苗立枯病に関する研究 - 特に *Pythium* 属菌について -. 北農試研報, 118, 9-62.
- 203) YOKOSAWA, R., S. KUNINAGA and H. SEIZAKI(1986) : *Aphanomyces euteiches* zoospore attractant isolated from pea root ; Prunetin. 日植病報, 52, 809-816.
- 204) YOKOSAWA, R., H. SEIZAKI and S. KUNINAGA(1988) : Attractants of *Aphanomyces cochlioides* zoospores contained in sugar beet seedlings. 日植病報, 54, 133-140.
- 205) 吉田穂積, 山田武志, 水野直治(1994) : ジャガイモそうか病の発生における土壤の交換性アルミニウムと可溶性ケイ酸の影響. 日植病報, 60, 630-635.
- 206) 吉田富男, 坂井弘(1962) : 北海道における各種土壤の微生物学的研究 第2報 土壤微生物相の季節変化と有機物添加の影響. 北農試彙報, 79, 45-50.

Studies on Crop Rotation Systems and Injury caused by Continuous Cropping of Field Crops in Central Tokachi District

Morio MATSUZAKI ¹⁾

Summary

Crop rotation is carried out for maintenance of soil fertility, and some of effects of crop rotation cannot substitute in the chemical fertilizer. It is thought that most of crop rotation effects are due to the reduction of injury by continuous cropping (ICC) . This study was conducted to determine cause of ICC and the effects of ICC on a crop rotation system. The study was conducted in central Tokachi District of Hokkaido, and 1) the crop rotation system was estimated quantitatively from cropping surveys, 2) the characteristics and causes of ICC were investigated by a continuous cropping experiment of field crops conducted for 16 years, and 3) the effects of ICC on a crop rotation system were discussed.

1. Analysis of crop rotation systems in central Tokachi District

For quantitative analysis of crop rotation systems, cropping surveys were conducted on light-colored Andosols (Shinsei) , Andosols (Bisei) and brown lowland soil (Nishishikari) in Memuro Town of central Tokachi District. The each survey site was about 120 ha (4 divisions of 576×576 m) . Crops cultivated in the period from 1983 to 1990 were investigated. The survey maps for the 8-years period were compared, and they were divided into fragments that had a single cropping sequence. The area of each fragment was calculated, and these values were input into a

database.

The cultivated areas per farm were about 23, 29 and 15 ha for light-colored Andosols, Andosols and brown lowland soil, respectively. The cultivated area per farm was small for soil of high fertility. In each soil, sugar beet (*Beta vulgaris* L.) , potato (*Solanum tuberosum* L.) and winter wheat (*Triticum aestivum* L.) were the main crops cultivated. Other crops included sweet corn (*Zea mays* L.) in light-colored Andosols, adzuki bean (*Phaseolus angularis* L.) and kidney bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in Andosols, and vegetables and adzuki bean in brown lowland soil.

In this investigation, the number of cropping sequences (NCS) was calculated as,

$$\text{NCS} = X^n,$$

where X is the number of cultivated crops and n is the year period of cropping sequence. Since NCS decreases with a decrease in n, the cropping sequence for the 8-year period was divided into cropping sequence for the 3-year period (CS3) . The shortest cropping sequence is a combination of 2 crops, and CS3 is composed by two combinations of 2 crops. For example, CS3 of 1) sugar beet - potato - wheat (S-P-W) is composed by the combination of sugar beet - potato (S-P) and potato - wheat (P-W) . When CS3 of 2) potato - wheat - sugar beet (P-W-S) and 3) wheat - sugar beet - potato (W-S-P) exist, the combination of sugar beet - potato (S-P) exists in 1) and 3) , the combination of potato - wheat (P-W) exists in 1) and 2) , and the combination of wheat - sugar beet (W-S) exists in 2) and 3) . Therefore, CS3 of

1) NARO Hokkaido Agricultural Research Center
Present address: NARO Agricultural Research Center

3) W-S-P and 1) S-P-W that have combination of S-P may be cropped continuously, and it is considered that a crop sequence of W-S-P-W exists. Similarly, it is considered that a crop sequence of S-P-W-S-P exist with CS3 of 1) , 2) and 3) . In this crop sequence, combination of S-P is located at beginning and end of it. Therefore, it is considered that this crop sequence is repeated, and it is probably crop rotation system. Based on above consideration, crop rotation systems were estimated from CS3.

The area of each CS3 was totalized every year. From the cropping sequence for the 8-year period in this investigation, the area of CS3 was calculated as 6 replications. From data for the 6 replications, the mean and coefficient of variation were calculated. CS3 that had a low coefficient of variation was cropped in high frequency, and they occupied large area. CS3 that had a coefficient of variation less than 1.0 was assumed to be the major cropping sequence for 3 years (MCS3) , and the major cropping sequences were used for estimation of crop rotation. Many kinds of CS3 (145 - 549 kinds) existed. However, there were only 12 kinds of MCS3 in light-colored Andosols, 10 kinds in Andosols, and 12 kinds in brown lowland soil. The area of MCS3 occupied approximately 53% of the light-colored Andosols, 38% of the Andosols, and 20% of the brown lowland soil.

From MCS3 in light-colored Andosols, crop rotation systems were estimated as 1) sugar beet - potato - wheat (S-P-W) , 2) sugar beet - potato - wheat - wheat (S-P-W-W) and 3) sugar beet - potato - sweet corn - wheat (S-P-C-W) . 2) Sugar beet - potato - wheat - wheat (S-P-W-W) was estimated in Andosols. The crop rotation system could not be estimated in brown lowland soil. The total areas of MCS3 that composed these crop rotation systems were approximately 50% in light-colored Andosols and 32% in Andosols. As reported previously, 1) crop rotation systems were composed by crops that cultivated area was large, and 2) previous crops of winter wheat were

a few, and crop rotation systems were limited. Since the cultivated area of sugar beet, potato and wheat was larger than that in past studies, crop rotation systems were simplified more. Because some crop rotation systems included continuous cropping of wheat, injury by continuous cropping (ICC) might occur.

2. Investigations of symptoms of ICC and methods for reducing ICC

Sugar beet, potato, soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) , adzuki bean and wheat (spring wheat) were cultivated in Memuro Town from 1980 to 1995. Eleven plots were established for each crop. One plot was a crop rotation plot and the other 10 plots were continuous cropping plots. In the rotation plot and one continuous cropping plot (control plot) , crops were cultivated with only chemical fertilizer. In the other continuous cropping plots, used as plots for application of organic matter, wheat culm manure or bark compost was applied at a rate of 1.5, 3 or 5 kg/m². After successive applications of organic matter for more than 10 years, the concentrations of soil nutrient such as hot water-extractable nitrogen and phosphoric acid were increased.

For 3 soil fumigation plots, soil was fumigated after 1990 and wheat straw manure was applied at a rate of 0, 1.5 or 3 kg/m². For soybean and adzuki bean, D-D (1,3-dichloropropene) was applied from 1990 to 1995. For sugar beet, potato and wheat, chloropicrin (trichloronitromethane) was applied from 1991 to 1993 and D-D was applied from 1994 to 1995.

Yield, degree of infection by soil-borne diseases or nematodes, and soil available nutrients (hot water-extractable nitrogen, phosphoric acid and potassium) were measured for each crops. Hot water-extractable nitrogen is correlated with biomass nitrogen. ICC was thought to have occurred when yield decreased or when the crop was infected with soil-borne diseases or nematodes. The time course of yield decrease by continuous cropping (YDCC) was examined by a

yield index (control plot / rotation plot $\times 100$) . Analysis of variance (ANOVA) was used to examine the effects of continuous cropping, organic matter application and soil fumigation. In ANOVA, treatments were 11 plots and replications were years of same conditions, i.e., same cultivars, same rate of fertilizer application and etc. This replication is a temporal pseudoreplication. Therefore, the effects of experimental plots, not the effects of treatments, would be examined by the ANOVA.

Severe ICC occurred in sugar beet. Sugar yield of the control plot decreased by about 50% in comparison with that of the rotation plot throughout the experimental period. In the 10 continuous cropping plots, root rot (*Rhizoctonia solani* AG-2-2) occurred from 1985 to 1990. Sugar yield recovered with fumigation of chloropicrin application but was not influenced by D-D application. Sugar yield increased with organic matter application, and the effect became clearer with increase in the number of application years. It was thought that sugar yield was increased by accumulation of soil nutrients.

In high yield plots (rotation plot and chloropicrin fumigation plots) , the relationship between sugar yield and hot water-extractable nitrogen was significant. The relationship was also significant in low yield plots (control plot and organic matter application plots) . However, the two regression lines were clearly different. When soil nutrients were at the same level, sugar yield was always low in the control plot and organic matter application plots. ICC was probably caused by inhibition of soil nutrient uptake by the crop, not by decline of soil nutrients. Since inhibition of soil nutrient uptake recovered with soil fumigation, it was thought that this phenomenon was caused by soil biologic properties.

After continuous cropping for 12 years, sugar beet was not damaged by root rot. This phenomenon is called "decline of soil-borne disease". However, when root rot declined, sugar yield decreased in continuous cropping plots and

it was recovered in soil fumigation plots by application of chloropicrin. Therefore, it was thought that ICC of sugar beet was influenced by soil biological properties except for root rot (*Rhizoctonia solani* AG-2-2) . From previous reports, it is thought that this cause of YDCC is *Aphanomyces cochlioides*.

In continuous cropping of potato, starch yield decreased slightly, but common scab (*Streptomyces* spp.) occurred. Starch yield is the product of marketable potato weight and starch value. In continuous cropping plots, marketable potato weight decreased, but starch value increased. Marketable potato weight increased in organic matter application plots and soil fumigation plots, but starch value decreased in both of these treatment plots. Slight change of starch yield was probably caused by the compensatory relation of marketable potato weight and starch value. Starch yields increased with increase in soil nutrient. When soil nutrients were at the same level, starch yields of the rotation plot and chloropicrin fumigation plots were higher than those of the control plot and organic matter application plots. As in the case of sugar beet, YDCC was probably caused by soil biological properties.

Common scab declined slightly in the last four years of the experimental period. With increase in the amount of bark compost application, scab became severe. This was probably caused by soil exchange acidity (y1) , which correlated with aluminum ion concentration. Chloropicrin did not affect common scab. This result agrees with the results of a previous study showing that chloropicrin did not affect common scab when soil pH was more than 5.

The yield of soybean markedly decreased from 1983 to 1985 and after 1989. From 1983 to 1984, the egg density of soybean cyst nematode (SCN: *Heterodera glycines*) was high in continuous cropping plots, and it was thought that YDCC was caused by SCN. However, after 1987, the egg density of SCN decreased (decline phenomenon) , and soybean yield recovered in continuous

cropping plots. Although egg density of SCN declined after 1987, soybean yield decreased again in the control plot after 1989. Soil was fumigated by D-D after 1990, and fumigation by D-D resulted in recovery of the yields of both the SCN-sensitive cultivar "Kitamishiro" and the SCN-resistant cultivar "Toyomusume". D-D is a nematocide, but D-D application probably resulted in recovery of soybean yield by other effects.

The effect of D-D on yield might be based on its effect on soil nitrogen. D-D promotes mineralization of soil organic nitrogen and inhibits nitrification of ammonia nitrogen. Therefore, D-D causes accumulation of ammonia nitrogen in soil. It is thought that soybean yield was increased by these effects on soil nitrogen. Soybean yield was not correlated with hot water-extractable nitrogen but was significantly correlated with potassium. Except for bark compost (low potassium concentration) application plots, however, soybean yield was significantly correlated with hot water-extractable nitrogen. Therefore, soybean yield is probably influenced by soil biomass nitrogen. It is thought that soil biomass nitrogen was decreased by long-term continuous cropping of soybean.

For adzuki bean, YDCC was remarkable as in the case of sugar beet. This yield decrease was probably caused by brown stem rot (*Cephalosporium gregatum*). For infection of brown stem rot, nematodes (*Heterodera glycines* or *Pratylenchus penetrans*) are necessary as well as *Cephalosporium gregatum*. Application of D-D resulted in recovery of the yield of adzuki bean, and it was thought that D-D suppressed infection by nematodes and brown stem rot and increased the yield. Since SCN had already declined at D-D application time, D-D probably suppressed to *Pratylenchus penetrans*.

The yield of spring wheat decreased slightly in the control plot and was not affected by soil fumigation. In 1993, the yield increased with increase in soil nutrients, and the relationships between soil nutrients and yield were not different in continuous cropping plots and the rotation plot. Therefore, it was thought that spring wheat was

not affected by soil biological properties. When spring wheat was cultivated continuously for more than ten years, infection by soil-borne diseases or nematodes did not occur. However, in the chloropicrin application plot in 1991, take-all (*Gaeumannomyces graminis*) occurred in the patch. Take-all of spring wheat declined with long-term continuous cropping. Since take-all occurred again with soil fumigation, it was thought that this decline was caused by biologic factors such as antagonist microorganisms. However, it is possible that snow mold decreases wheat yield by continuous cropping, because the northern part of Japan is an area with much snow.

As described above, YDCC of sugar beet, potato and adzuki bean was probably caused by soil-borne diseases or nematodes. In continuous cropping of potato, yield decrease was slight, but common scab occurred. The yield of soybean was decreased by SCN in the early period of continuous cropping, and the decline in yield was probably caused by a decrease in soil nitrogen (biomass nitrogen) in continuous cropping for more than ten years. In continuous cropping of spring wheat, yield decrease was slight, and then take-all infection was decreased by soil biological factors. In all crops, infection by soil-borne diseases or nematodes occurred, but yield decrease was slight in some crops. In some crops, infection by soil borne-diseases or nematodes was decreased by long-term continuous cropping. The severity of ICC was probably influenced by the decline phenomenon of soil borne-diseases or nematodes.

Crops release various compounds such as carbohydrates from their roots, and the region of soil influenced by these compounds is called the rhizosphere. The kinds of released compounds vary with crops. By continuous cropping of a specific crop, specific soil organisms may increase. ICC will occur when soil-borne diseases or nematodes are increased by continuous cropping. Soil-borne diseases or nematodes can survive by survival organs (eggs etc.), and they can be increased by cultivation of the same crop again.

Therefore, one of the causes of ICC is soil-borne diseases or nematodes. However, soil-borne diseases or nematodes were suppressed by soil biological factor (decline phenomenon or suppressive soil) in some cases. In soybean continuous cropping for more than ten years, yield probably decreased due to a decrease in biomass nitrogen, i.e., unharmed microorganisms. As described above, ICC was thought to be caused by soil-borne diseases or nematodes and other biological factors.

In continuous cropping of sugar beet, soybean and spring wheat, yield was increased by organic matter application. The effects of organic matter were clear with its successive application. Organic matter supplies not only nutrients such as nitrogen, phosphoric acid and potassium but also carbon, which is an energy source of soil microbes. Carbon supply by organic matter application is probably effective in maintaining biomass nitrogen. For sugar beet, soybean and adzuki bean, soil fumigation reduced ICC. However, organic matter application and soil fumigation need much labor and are costly, and these treatments for reduction of ICC would be difficult in large-scale farms in Tokachi District. At present, as a method to reduce ICC, it is probably realistic to adopt a crop rotation system in which many crops can be cultivated.

3. Improvement in crop rotation in Tokachi District

The cropping interval of each crop in the estimated crop rotation in this study was sugar beet> potato> wheat. The cropping interval was long for sugar beet, in which ICC was remarkable, but wheat, in which there was only slight ICC, was cultivated continuously for 2 year. Therefore, it was thought that crop rotation was influenced by the degree of ICC of each crop.

In the 1960's, cropping sequences that included continuous cropping of beans (soybean, adzuki bean and kidney bean) for 4-5 years were used in Tokachi District. SCN probably became a problem

in these cropping sequences, but SCN might have been decreased by long-term continuous cropping of beans. Soybean, adzuki bean and kidney bean are infected by soil-borne disease, but those diseases don't infect other beans. In these cropping sequences, red clover (*Trifolium pratense* L.) was often cultivated after continuous cropping of beans. This green manure crop not only reduces the density of SCN but also supplies organic matter that has been decreased by beans. Therefore, it is thought that past cropping sequences were devised to reduce ICC. In the estimated crop rotation systems in this study, the rotation cycle was short (4 years), and it is possible that ICC occurs in these crop rotations.

To improve crop rotations, it is necessary to increase the number of cultivated crops by introducing new crops. In Tokachi District, where farms are large, the crops to be introduced must be a crop for which mechanical cultivation is possible. Oilseed rape (*Brassica napus* L.), which have soil fumigation-like effect (bio-fumigation), soybean, sweet corn and sunflower (*Helianthus* spp.) are thought to be suitable crops. Introduction of leguminous green manure is probably effective for maintaining soil fertility.