

第Ⅳ章 輪作および連作栽培下における主要作物の根圏ならびに非根圏土壌の微生物特性

本章では、輪作体系下における主要作物の根圏ならびに非根圏土壌の微生物相、バイオマス、酵素活性など微生物特性とそれによぼす輪作年限、前作物の影響を、土壌微生物特性の季節変化、経年変化を解析することにより検討した。

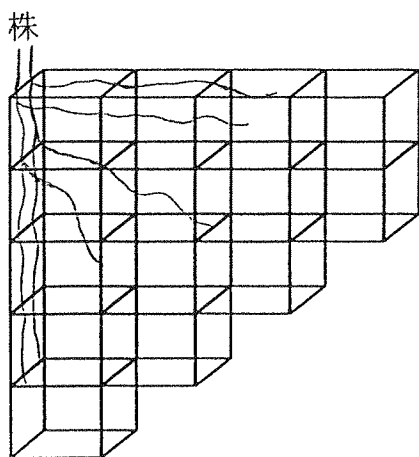
第1節 主要畑作物の根系分布ならびに根圏微生物特性

畑作物の根系分布と根圏微生物相には作物固有の特徴があると考え、第Ⅲ章の連輪作試験で供試した4作物の根系分布と根圏微生物特性を調査した。

1. 実験方法

1) 主要作物の根系分布と根の部位別根圏微生物相

連輪作試験2年目(1986年)の7月22日に、各作物の根系調査を土層別に行った。なお、コムギは春播コムギである。前作物はすべてインゲンマメとした。調査土層断面図を図Ⅳ-1に記載した。条播したコムギを除く各作物では調査畦の両脇畦と重ならない株、またコムギは調査畦において、それぞれ10cm×10cm×10cmのブロックで根群域土壌を採取し、根を拾い洗浄せずにそのまま希釈平板法による根圏微生物相の測定に供試した。微生物相の項目は細菌、C V耐性菌、放線菌、糸状菌である。希釈平板処理後、層位別の根重、根長を測定した。なお、テンサイは細根を供試した。



図Ⅳ-1 根系分布および根圏微生物相の調査土層
(10×10×10cmのブロック)

2) 各作物根圏糸状菌相の季節変化

試験2年目(1986年)に、土層深15cmまでの各作物根圏糸状菌相の季節変化を経時的に調査した。テンサイの前作物はコムギ(春播)、以下同様にバレイショはインゲンマメ、インゲンマメはテンサイ、コムギはバレイショであった。採取時期は6月13日、6月23日、7月25日、8月27日の4回とした。春播コムギの8月27日は刈り株である。なお、テンサイは前項同様、細根を供試した。根を採取後、洗浄せずに地際0~2cmと深さ2cm以下の部位に分け、希釈平板法により 10^{-4} レベルで得られたコロニーを分離し、検鏡によりそれぞれの糸状菌相を調査した。

3) 微生物相、バイオマス、微生物活性の根圏、非根圏土壌間比較

試験9年目(1993年)の7月22日に、4年輪作圃場b系列において、土層深15cmの部位までスコップで各作物の根を掘り上げ、根近傍および根に付着した根圏土壌を採取した。また、畦間の非根圏土壌を採取した。その後、それぞれ土壌呼吸量、バイオマスC、N、酵素活性(フォスファターゼ活性、セルラーゼ活性)の分析に供試した。また8月3日には、上記と同様の方法で根圏土壌および畦間の非根圏土壌を採取し、微生物相(細菌、C V耐性菌、蛍光性*Pseudomonas*属菌、糸状菌)を測定した。*Fusarium*属菌数は駒田培地¹⁴⁾、蛍光性*Pseudomonas*属菌はKatohらのP-1培地⁷²⁾による。

2. 実験結果

1) 主要作物の根系分布と根の部位別根圏微生物相

調査土層部位の範囲内における根重および根長を単位圃場面積あたりでみると、コムギ>テンサイ細根>インゲンマメ>バレイショの順であった。テンサイの細根とコムギの根は深さ50cm以下まで多く分布し、4作物の中では深根性といえることができる(図Ⅳ-2)。根系の層位別分布割合をみると、テンサイ、バレイショは土層深30cm程度までに多く分布し、コムギは比較的深く50cmまでの広範囲に分布したのに対し、インゲンマメは浅く10cm程度に多く分布した。土層深30cmまでの根圏微生物相をみると(図Ⅳ-2、表Ⅳ-1)、細菌数はテンサイが4作物の中で最も多く、深い部位まで高い菌数で生息し

ており、次いで菌数の平均値でみるとテンサイ $\geq$ バレイショ $>$ コムギ $\geq$ インゲンマメの順に多い傾向を示した。また細菌相のうち、根に多く生息するとされるCV耐性菌数は、バレイショ、テンサイで多く、以下インゲンマ

メ、コムギの順であった。放線菌数は図示していないが、バレイショでやや多かった。糸状菌数はインゲンマメが土層30cm深まで多く生息し、4作物の中でもやや多い傾向を示した。

根重および根長の土層別分布割合(%)

右下の数字は調査土層における実数 (kg 10a⁻¹またはm/株)

テンサイ

根重				
32.1	17.0	2.8	0.9	
23.6	3.8	0.9	0.9	
4.7	1.9	0.9		
5.7	0.9			
3.8				76.8

根長				
33.7	8.6	4.0	1.2	
35.4	2.5	0.3	0.2	
9.5	0.9	0.9		
1.0	0.3			
1.4				383

細菌(10 ⁶)			
99.0	81.0	154.0	
209.0	77.0	33.0	
80.0	30.0		

CV耐性菌(10 ⁶)			
27.0	31.0	87.0	
135.0	55.0	16.0	
72.0	16.0		

糸状菌(10 ⁴)			
25.3	56.1	8.3	
9.7	8.8	6.0	
1.9	6.1		

バレイショ

根重				
26.1	8.7	7.2		
18.8	8.7	5.8	1.4	
10.1	4.3	1.4	4.3	
1.4	1.4			30.7

根長				
33.2	14.7	10.4		
12.5	3.5	6.3	2.2	
9.5	3.0	0.5	2.2	
0.9	1.3			171

細菌(10 ⁶)			
312.0	50.0	84.0	
33.0	34.0	96.0	
97.0	21.0		

CV耐性菌(10 ⁶)			
253.0	28.0	42.0	
12.0	21.0	73.0	
70.0	13.0		

糸状菌(10 ⁴)			
17.8	15.8	7.1	
17.7	5.0	9.3	
6.4	26.0		

インゲンマメ

根重				
54.7	17.0	12.2	1.2	
2.4	1.2	1.2	1.2	
4.9	0.2	1.2		
1.2	1.2			68.3

根長				
27.8	25.3	25.5	2.6	
3.4	1.1	0.3	0.8	
11.0	0.1	0.5		
1.2	0.3			219

細菌(10 ⁶)			
142.0	36.0	60.0	
50.0	40.0	43.0	
35.0	49.0		

CV耐性菌(10 ⁶)			
147.0	39.0	28.0	
24.0	8.0	12.0	
25.0	21.0		

糸状菌(10 ⁴)			
84.8	4.2	6.8	
26.9	14.6	33.8	
51.3	5.7		

コムギ

根重				
50.9	7.5	1.9	1.9	
3.8	3.8	1.9	5.7	
3.8	3.8	3.8		
3.8	3.8			
3.8				176.7

根長				
27.4	10.3	8.4	3.6	
5.4	4.6	3.3	9.6	
4.6	3.9	5.3		
3.4	5.3			
4.6				154

細菌(10 ⁶)			
79.0	80.0	56.0	
60.0	49.0	27.0	
24.0	28.0		

CV耐性菌(10 ⁶)			
31.0	36.0	47.0	
26.0	20.0	18.0	
16.0	12.0		

糸状菌(10 ⁴)			
28.0	17.1	9.2	
11.7	23.5	8.4	
6.7	9.6		

図IV-2 各作物根圏の層位別微生物数(試験2年目, 1986年7月22日)
枠内は10×10×10cmのブロック

表IV-1 根圏微生物相の作物間差*

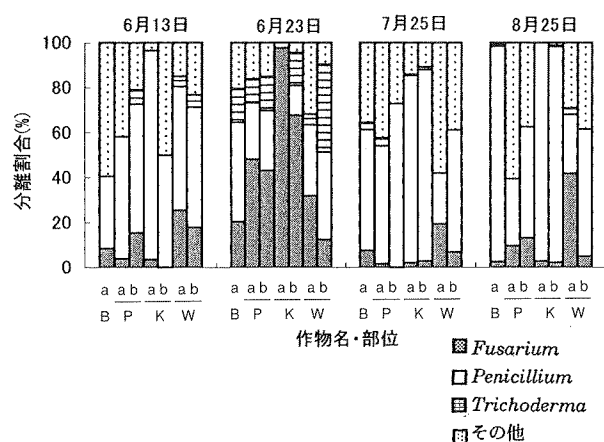
作物	細菌数(B) (10 ⁶ g ⁻¹)	CV耐性菌数(C) (10 ⁶ g ⁻¹)	放線菌数 (10 ⁶ g ⁻¹)	糸状菌数(F) (10 ⁴ g ⁻¹)	B/F	C/F
テンサイ	95.4	54.6	8.8	15.3	624	357
バレイショ	90.6	63.8	18.9	19.3	469	331
インゲンマメ	56.8	37.7	3.9	28.5	199	132
コムギ	50.3	25.6	5.3	14.3	352	179

*7月22日の根を調査。根群域を10×10×10cmのブロックに分け調査したものの平均値。
図IV-2参照。

またB/F値（細菌数/糸状菌数），C/F（CV耐性菌数/糸状菌数）にも作物間差があり，テンサイ＞バレイショ＞コムギ＞インゲンマメの順であった（表Ⅳ－1）。

2) 各作物根圏糸状菌相の季節変化

各作物根圏の希釈率 10^{-4} レベルにおける糸状菌相は（図Ⅳ－3），6月13日には全般に*Penicillium*属が優占し，以下*Fusarium*属が多かった。作物別にはコムギ根圏で*Fusarium*属が多かった。またその他の属では，*Trichoderma*，*Mucor*，*Actinomucor*，*Gliocladium*，*Humicola*等が検出された。6月23日には，全般に*Fusarium*属，*Trichoderma*属の割合が高まり，とくに*Fusarium*属はインゲンマメ根圏が4作物中最も多く，また地際の部位で多かった。しかし，7月25日には各作物



図Ⅳ－3 各作物の根圏糸状菌相の推移

作物名；
B：テンサイ P：バレイショ K：インゲンマメ W：コムギ
根の部位；
a：地際 b：2 cm以下
テンサイは地際の細根のみ 8月25日のコムギは刈り株根

とも*Fusarium*属が減少し，再度*Penicillium*属が優占するようであった。コムギ根圏では*Fusarium*属が引き続きやや多く，分離割合は刈り株である8月25日には地際の部位でかなり高まった。

3) 微生物相，バイオマス，微生物活性の根圏，非根圏土壤間比較

8月上旬の土層深15cmまでの各作物の根圏および土壤（非根圏）微生物相を検討した（表Ⅳ－2）。前項までの結果から，これまでの微生物相項目に加え，細菌相のうちとくに根圏での機能が注目されている蛍光性*Pseudomonas*属菌数^{13, 95)}，および糸状菌相のうち根圏土壤でかなり季節変化が大きかった*Fusarium*属菌数も併せて測定し，畦間の非根圏土壤との比較を行った（表Ⅳ－2）。細菌数は各作物で非根圏に比べ根圏で多く，作物別にはテンサイ＞バレイショ＞コムギ＝インゲンマメの順に多かった。またCV耐性菌数も根圏で多く，やはりテンサイ，バレイショで高かった。蛍光性*Pseudomonas*属菌数も根圏で明らかに多く，テンサイ，バレイショで高かった。放線菌数は作物別には明瞭な傾向を示さなかった。糸状菌数もインゲンマメの根圏で非根圏に比べやや多い傾向であった。*Fusarium*属菌数はインゲンマメで根圏，非根圏ともに多く，コムギの非根圏でも多い傾向にあった。根圏土壤の微生物数（R）と非根圏土壤の微生物数（S）の比（R/S）で示される根圏効果は，細菌数で高く，中でもCV耐性菌数および蛍光性*Pseudomonas*属菌数ではかなり高まることから，これらは根圏に特有の微生物相といえる。糸状菌，放線菌の根圏効果は小さかった。

表Ⅳ－2 各作物の根圏および非根圏土壤微生物相比較

作物	部位	細菌数 (10^6 g^{-1})	CV耐性菌数 (10^6 g^{-1})	FP-1 (10^4 g^{-1})	放線菌数 (10^6 g^{-1})	糸状菌数 (10^4 g^{-1})	<i>Fusarium spp.</i> (10^2 g^{-1})
テンサイ	根圏	92.3	6.7	106.7	7.3	12.8	29.5
	非根圏	32.8	1.8	10.2	7.7	10.1	48.9
バレイショ	根圏	52.4	5.8	69.2	5.8	13.5	34.6
	非根圏	18.4	0.5	1.5	4.4	11.4	37.8
インゲンマメ	根圏	24.7	4.0	15.6	8.1	14.2	67.4
	非根圏	23.3	0.4	1.5	5.6	8.2	50.5
コムギ	根圏	26.0	2.9	5.8	3.2	8.1	17.1
	非根圏	18.2	2.2	1.0	4.2	9.6	63.2

作物	根圏土壤／非根圏土壤の比 (R/S)					
	細菌数	CV耐性菌数	FP-1	放線菌数	糸状菌数	<i>Fusarium spp.</i>
テンサイ	2.8	3.7	2.8	0.9	1.3	0.6
バレイショ	2.8	11.81	2.8	1.3	1.2	0.9
インゲンマメ	1.1	10.9	1.1	1.4	1.7	1.3
コムギ	1.4	1.43	1.4	0.8	0.9	0.3

*1993年8月3日調査

FP-1：Pseudomonas 蛍光性属菌（P-1培地）

コムギは刈り株

表Ⅳ-3 各作物の根圏および非根圏土壌微生物活性比較

作物	部位	土壌呼吸量 (mgC 100g ⁻¹)	バイオマスC (mgC 100g ⁻¹)	バイオマスN (mgN 100g ⁻¹)	フォスファターゼ	セルラーゼ
					活性 (nmol g ⁻¹ min ⁻¹)	活性 (nmol g ⁻¹ min ⁻¹)
テンサイ	根圏	32.8	13.6	5.8	15.7	3.6
	非根圏	24.1	13.3	3.0	15.9	3.3
バレイショ	根圏	44.6	13.2	2.2	12.9	2.5
	非根圏	10.9	10.8	0.5	12.0	2.3
インゲンマメ	根圏	23.5	14.8	1.7	12.6	2.6
	非根圏	12.6	10.4	1.5	12.7	2.4
コムギ	根圏	26.0	14.5	1.7	15.7	4.5
	非根圏	22.9	16.4	1.5	16.9	4.5

作物	根圏土壌／非根圏土壌の比(R/S)				
	土壌呼吸量	バイオマスC	バイオマスN	フォスファターゼ活性	セルラーゼ活性
テンサイ	1.36	1.02	1.93	0.99	1.09
バレイショ	4.09	1.22	4.40	1.08	1.09
インゲンマメ	1.87	1.42	1.13	0.99	1.08
コムギ	1.14	0.88	1.13	0.93	1.00

*1993年7月22日調査

一方、微生物活性関連項目では、バレイショ、テンサイで根圏の土壌呼吸量が高かった。バイオマスC量はいずれの作物でも根圏で高いが、作物別の差は小さかった。バイオマスN量はテンサイ根圏、非根圏およびバレイショ根圏で高い傾向を示した。フォスファターゼ活性、セルラーゼ活性などの酵素活性は、テンサイおよびコムギの根圏、非根圏土壌で高い傾向を示した（表Ⅳ-3）。これらの微生物活性関連項目の根圏効果は、土壌呼吸量およびバイオマスN量で高まる傾向を示した。

第2節 主要作物栽培土壌の微生物特性におよぼす前作物ならびに当作物の影響

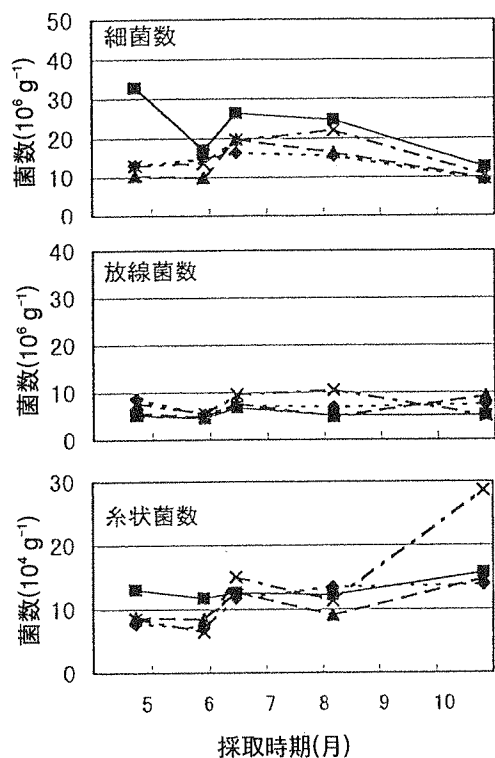
前章までの輪作体系下における各種作付様式と収量変動の結果から、輪作年限の短縮および前作物の違いにより各種輪作体系圃場の作物収量反応が異なることが明らかとなり、また輪作の継続により試験の前期と後期でその反応が変化する様相を示した。このような輪作継続条件下での土壌微生物特性の変動を解析する前段として、単年度における土壌微生物特性の変動を調査した。この際、微生物特性の変動には微生物基質としての作物根および残渣の影響が大きいと考える、非根圏土壌の微生物特性におよぼす前作物の影響と当作物の非根圏土壌の微生物特性を検討した。

1. 実験方法

インゲンマメと各作物の交互作用および4年輪作b系列について、それぞれ試験3、4年目（1987、88年）に土壌微生物相の季節変化を調査した。また4年輪作a、b系列については試験9年目（1993年）に土壌呼吸量、微生物バイオマス、酵素活性も加えた季節変化を調査した。採取時期は春4月中旬の作付前（コムギ栽培圃場は作付済み）から収穫後の9～10月下旬まで、試験3年目は年4回、4年目は年5回、9年目は年7回調査した。なお、交互作用では、輪作の経過に伴い前作そのものの影響が不明瞭となるため、試験9年目にあっては4年輪作下で検討した。また、4年輪作のコムギ跡地は当作物がテンサイの土壌のみであり、4b(W)区の結果について検討した。以下、当作物を一定にした場合の土壌微生物特性におよぼす前作物の影響および前作物を一定にした場合の当作物栽培土壌の微生物特性を経時的に調査した。

2. 実験結果

当作物をインゲンマメに一定にした場合の土壌微生物相の季節変化を試験4年目（1988年）の交互作用区土壌で見てみる（図Ⅳ-4）。細菌数は春のテンサイ（前作）跡地土壌で多く、バレイショ、コムギ跡地は同等で、インゲンマメ跡地でやや少なかった。その後、テンサイ跡地では減少し、他の前作跡地土壌を含めて夏にやや高まる様相を示したがその差は小さくなく、秋には全跡地土壌とも減少した。放射線は全般に季節変化は小さく、前

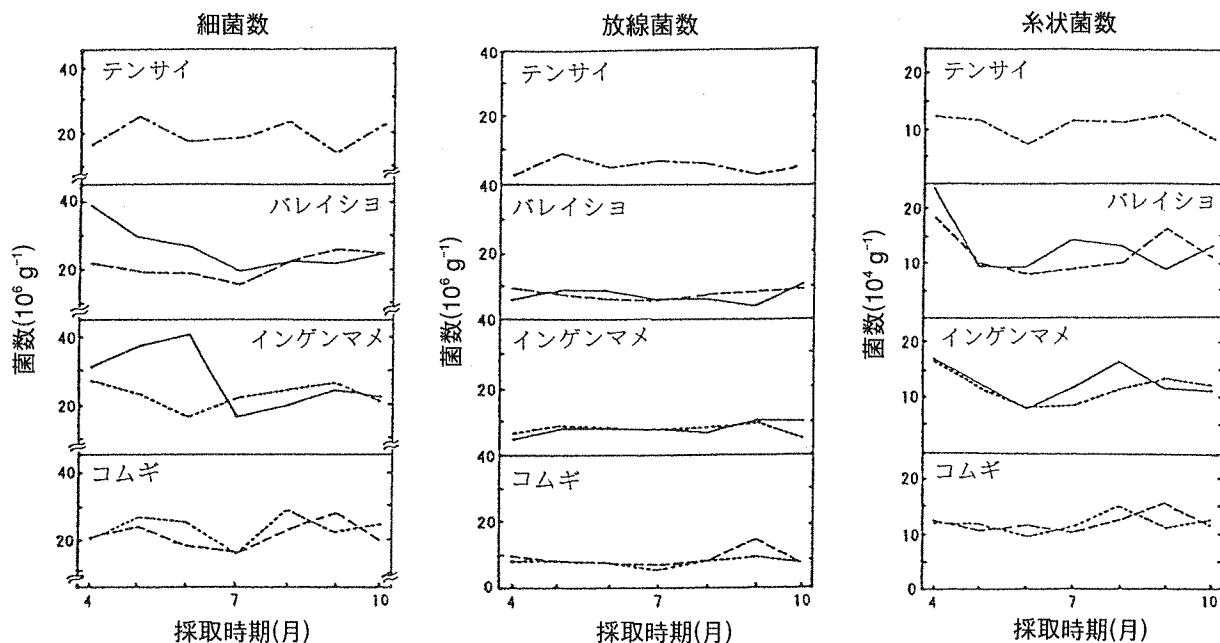


図IV-4 前作物を異にするインゲンマメ栽培土壌微生物相の季節変化(試験4年目, 1988年)

—■— テンサイ --◆-- バレイシヨ
—▲— インゲンマメ --×-- コムギ

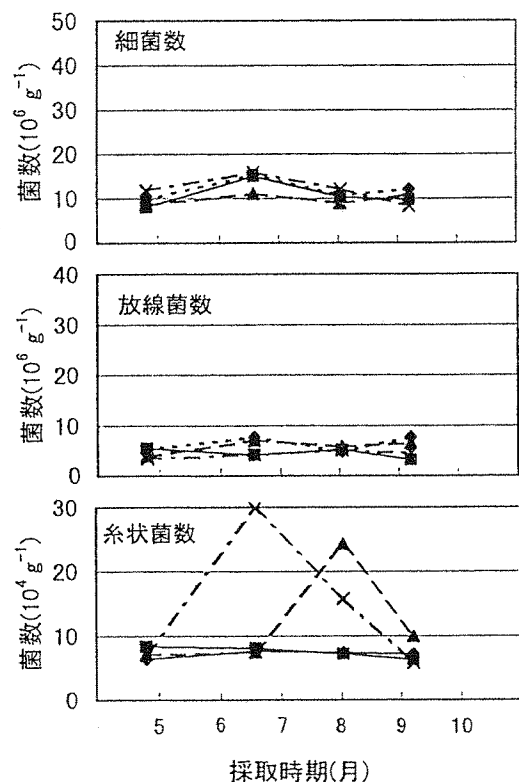
作物間の差も認められなかった。糸状菌数の季節変化も各跡地土壌でそれほど大きくはないが、春のテンサイ跡地でやや多く、夏から秋にかけてコムギ跡地で高まった。

また試験9年目の結果から、4年輪作下の土壌微生物相をみると(図IV-5), 細菌数ではいずれの当作物栽培土壌においても、テンサイ跡地で他の前作に比べ春から多く、夏にはほぼ一定となった。またバレイシヨ跡地、インゲンマメ跡地ともいずれも春には多くなく、夏に一旦低下するが季節変動は小さく、コムギ栽培土壌でみた場合、前作物間ではバレイシヨ跡地でインゲンマメ跡地より春にやや多いがその差は小さかった。コムギ跡地は、当作物のテンサイ栽培土壌であるが季節変化は大きくなかった。放線菌数はいずれの跡地土壌においてもほぼ同等で、季節変化が認められなかった。糸状菌数は、春にやや多く、前作物別にはテンサイ跡地、バレイシヨ跡地、インゲンマメ跡地とも差がなく、細菌数よりやや早くいずれも6月頃に一旦低下し、夏以降、秋にかけてまた全般に増加する傾向であったが、前作物間差は判然としなかった。夏にはテンサイ跡地でやや高いが、前作物間差はそれほど大きくなかった。コムギ跡地は当作物のテンサイ栽培土壌であるが、季節変化は小さかった。これらのことから、前作物を異にする土壌微生物相の季節変化は、細菌数および糸状菌数で春に大きく、細菌数はテンサイ

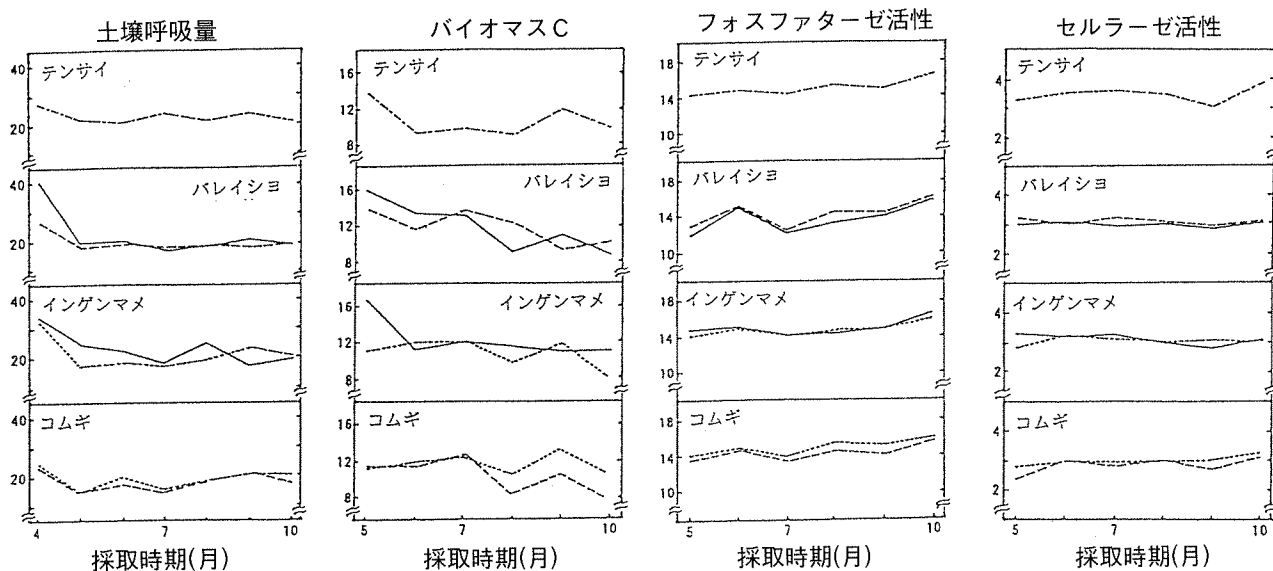


図IV-5 各作物栽培土壌微生物相の季節変化の前作物間比較
4年輪作2系列を調査。試験9年目, 1993年

図中の作物名は当作物を示す。図中の線は前作物を示す
前作物 テンサイ — バレイシヨ - - - インゲンマメ . . . コムギ - . - . -



図IV-6 各作物栽培土壌の微生物相の季節変化
(試験3年目 1987年前作物インゲンマメ)
—■— テンサイ --◆-- バレイショ
—▲— インゲンマメ --×-- コムギ



図IV-7 各作物栽培土壌微生物相の季節変化の前作物間比較
4年輪作2系列を調査。試験9年目, 1993年

図中の作物名は当作物を示す。図中の線は前作物を示す
前作物 テンサイ — バレイショ インゲンマメ ---- コムギ -----
単位 土壌呼吸量、バイオマスC mgC 100g⁻¹
 酵素活性 nmol g⁻¹ min⁻¹

跡地土壌で明らかに多かった。糸状菌数もテンサイ跡地土壌でやや増加する傾向を示し、その後、夏にかけてその影響が持続するが、前作物の違いによる差は大きくなかった。

次に、試験3年目に前作をインゲンマメに統一した場合の当作物(後作物)栽培土壌の微生物相を調査した(図IV-6)。この結果、細菌数では全般に季節変化は小さいが、作付作物別にはインゲンマメ栽培土壌でやや少ない傾向であった。放線菌数は季節変化、作付作物間差ともに認められなかった。糸状菌数はテンサイ、バレイショ栽培土壌では季節変化が認められず、インゲンマメおよびコムギ栽培土壌で変動が大きいものの、夏に高まる傾向が認められた。

一方、土壌微生物活性に関連する諸特性の季節変化は、試験9年目のみの結果であるが(図IV-7)、土壌呼吸量をみるといずれの前作においても春に高く、その後低下しほぼ一定となった。前作物別にはテンサイ跡地で高く、インゲンマメ跡地とバレイショ跡地の差は認められなかった。バイオマスC量は、細菌数同様、テンサイ跡地のバレイショ、インゲンマメいずれの栽培土壌においても春に他の前作物より高く、バレイショ栽培土壌でみた場合には春に高く、その後秋まで漸減傾向にあり、インゲンマメ栽培土壌では6月までに低下し、その後ほぼ

一定であった。バレイショ跡地は、インゲンマメ、コムギ両土壌で季節変化が小さいが、インゲンマメ跡地は秋にやや低下するようであった。コムギ跡地は春にやや高いが、その後はほぼ一定であった。セルラーゼ活性は、いずれの前作においてもほぼ同等で、季節変化が認められなかった。フォスファターゼ活性もいずれの前作においてもほぼ同等で、季節変化は認められなかった。

以上のことから、土壌微生物相におよぼす前作物間の影響は、細菌数、土壌呼吸量、バイオマス量では全般に、前作テンサイ>バレイショ≧インゲンマメであり、前作がコムギの場合もそれほど高まらなかった。糸状菌数の前作物間差は小さかった。放線菌数、酵素活性は季節変化が認められず、他の項目では秋に向かって減少するものが多かったが、前作物間の差は秋には比較的小さくなった。このように試験3、4年目および9年目においてほぼ同様の季節変化とそれにおよぼす前作物の影響が認められた。また、当作作物の影響として、細菌数がインゲンマメ栽培土壌で少なく、糸状菌数はインゲンマメおよびコムギ栽培土壌で多い傾向が認められた。

第3節 土壌微生物特性におよぼす輪作年限の影響

連作および交互作のように作付間隔が短縮され、作付歴がある作物に偏った場合の各作物栽培土壌における土

壌微生物特性の経年変化について検討した。

1. 実験方法

連輪作試験年次の前期4、5年目(1988、89年)、後期9、10年目(1993、1994年)に分けて、交互作および連作における非根圏土壌の微生物特性を4年輪作(4b系列)と比較して述べる。土壌微生物相は前作物間の影響が比較的小さい10月下旬の測定値を用いた。土壌呼吸量は6~7月下旬の測定値、バイオマスC、N量、酵素活性等は試験9、10年目に年間数回測定した平均値を用いた。

2. 実験結果

第Ⅲ章で述べたように、連作および輪作年限の短縮にともない、連輪作試験の前、後期で異なる作物収量反応が見られたことから、当該時期別の土壌微生物特性の変化も予想される。4年輪作に比べ、テンサイ栽培土壌では試験後期に細菌、放線菌、糸状菌などの土壌微生物数が増加し、土壌呼吸量も試験後期にやや増加した(表Ⅳ-4)。バレイショ栽培土壌では試験前期から細菌数が減少し、試験後期に糸状菌が増加し、呼吸量は前期には差がないが後期に減少した。

インゲンマメ栽培土壌では、バレイショ栽培土壌に類似するが、試験前期から呼吸量が減少し、糸状菌数が増加し、細菌数は減少した。コムギ栽培土壌は試験前期から糸状菌数が増加し、呼吸量は前期では変わらないが、

表Ⅳ-4 連作および輪作年限短縮による各作物土壌の微生物性の経年変化*

項 目 ¹⁾	テンサイ						バレイショ					
	前期 ²⁾			後期			前期			後期		
	4b(W)	2(K)	連作	4b(W)	2(K)	連作	4b(K)	2(K)	連作	4b(K)	2(K)	連作
細菌数	(15.5)	96	100	(16.6)	113	142	(10.1)	93	79	(22.2)	73	83
放線菌数	(7.2)	104	92	(5.4)	156	174	(5.8)	157	90	(7.1)	100	94
糸状菌数	(12.5)	121	167	(8.9)	272	111	(12.0)	102	110	(9.5)	168	147
B/F値	(124)	79	60	(187)	42	128	(84)	91	72	(233)	43	56
土壌呼吸量	(23.9)	89	87	(18.4)	103	116	(20.8)	96	95	(14.7)	83	72

項 目	インゲンマメ				バレイショ					
	前期		後期		前期			後期		
	4b(B)	連作	4b(B)	連作	4b(P)	2(K)	連作	4b(P)	2(K)	連作
細菌数	(12.5)	74	(19.4)	88	(10.0)	98	77	(19.3)	89	99
放線菌数	(7.6)	212	(10.6)	102	(5.9)	90	121	(6.1)	110	90
糸状菌数	(10.0)	181	(15.5)	115	(11.2)	161	131	(11.5)	146	96
B/F値	(125)	41	(125)	77	(89)	61	59	(168)	61	103
土壌呼吸量	(23.7)	76	(18.0)	71	(24.2)	94	88	(13.9)	137	140

*4年輪作4b系列、インゲンマメとの交互作および各作物の連作区について表示した。

1) 項目の単位 4b系列の()は実数。その他は4b系列を100とする比。

細菌数、放線菌(10^6 g^{-1})、糸状菌(10^4 g^{-1}) いずれも乾土あたり。10月下旬の数値。

土壌呼吸量($\text{mgC } 100\text{g}^{-1}$)は6下~7月下旬の数値。

2) 前期：試験4、5年目、後期：9、10年目。それぞれ2か年の平均値。

表Ⅳ－5 連作および輪作年限短縮による各作物土壌の微生物活性（試験9，10年目）*

項 目 ¹⁾	テンサイ			バレイショ		
	4b(W)	2(K)	連作	4b(K)	2(K)	連作
土壌呼吸量	(21.0)	100	125	(20.1)	71	65
バイオマス	(11.7)	107	107	(12.5)	71	73
フォスファターゼ活性	(15.1)	98	110	(14.3)	91	90
セルラーゼ活性	(3.4)	82	97	(3.0)	77	73

項 目	インゲンマメ		連作	コムギ		連作
	4b(B)			4b(P)	2(K)	
土壌呼吸量	(25.3)		55	(18.0)	142	138
バイオマス	(12.1)		78	(11.0)	118	136
フォスファターゼ活性	(15.3)		89	(14.6)	109	118
セルラーゼ活性	(3.2)		75	(2.9)	121	145

*4年輪作4b系列，インゲンマメとの交互作用，各作物の連作区について表示した。

1)4～10月まで年間数回測定したものの平均値。

2) () は実数。単位：土壌呼吸量，バイオマス $\text{mgC } 100\text{g}^{-1}$ ，
 酵素活性 $\text{nmol g}^{-1} \text{min}^{-1}$ ，その他は4年輪作を100とする比。

後期に増加した。放線菌数はテンサイ栽培土壌が後期に高まるようであり，バレイショ，インゲンマメ栽培土壌は試験前期に増加するが後期に差がなく，コムギ栽培土壌はどちらの時期もほぼ4年輪作区と同等であった。B/F（細菌数/糸状菌数）値は，いずれの作物でも輪作年限短縮にともなって試験前期には低下し，なかでもバレイショ，インゲンマメ栽培土壌での低下が大きい。しかし，テンサイ，コムギ栽培土壌では試験後期には交互作用では低下するものの連作では増加する傾向を示した。このようにインゲンマメと各作物の交互作用ならびに連作という限定された作付様式での比較ではあるが，輪作年限の短縮により作物間で土壌微生物相，呼吸量が異なることが認められ，その傾向は試験の前期と後期で変動した。

輪作年限の短縮にともなって，試験9，10年目の年間を通してみた土壌呼吸量は，4年輪作に比べ，インゲン

マメ，バレイショ栽培土壌での減少程度が大きかった（表Ⅳ－5）。テンサイ栽培土壌でバイオマスC量はやや増加したが，フォスファターゼ活性，セルラーゼ活性の変動は小さかった。バレイショ栽培土壌では，バイオマスC量は減少し，酵素活性も低下した。インゲンマメ栽培土壌でもバレイショ栽培土壌とほぼ同様の傾向を示し，これらの値が低下した。コムギ栽培土壌では4年輪作に比べ，バイオマスC量は増加し，酵素活性も増加した。バイオマスN量はバイオマスC量とほぼ同様の傾向を示した。培養無機態N量は，テンサイ栽培土壌で増加し，バレイショ，インゲンマメ栽培土壌では減少した。またコムギ栽培土壌では，バイオマスN量が増加するものの培養無機態N量はやや減少した（表Ⅳ－6）。

以上，連作や交互作用のように作付作物が偏ると各作物ごとに特徴的な土壌微生物特性の経年変化を示した。

表Ⅳ－6 連作および輪作年限短縮による各作物土壌のバイオスN，培養無機態N量*

項 目 ¹⁾	テンサイ			バレイショ		
	4b(W)	2(K)	連作	4b(K)	2(K)	連作
バイオマスN	(1.68)	118	142	(1.87)	81	65
培養無機態N	(1.13)	189	304	(1.75)	66	82

項 目	インゲンマメ		連作	コムギ		連作
	4b(B)			4b(P)	2(K)	
バイオマスN	(2.14)		75	(1.85)	104	122
培養無機態N	(1.63)		94	(1.62)	80	94

*4年輪作4b系列，インゲンマメとの交互作用および各作物の連作区について表示した。

1)バイオマスNは試験9年目，培養無機態Nは試験9，10年目にそれぞれ年間数回測定したものの平均値。() は実数。単位：いずれも $\text{mgN } 100\text{g}^{-1}$
 その他は4年輪作を100とする比。

第4節 連輪作条件下における土壌微生物特性の変動要因ならびに作物生育との関係

連輪作条件下における土壌微生物特性の変動要因を、微生物基質の質および量の面から検討した。また、根圏土壌におけるこれら微生物特性の変動要因としては、前作としてすき込まれる各作物残渣の質、量および分解特性の違いに加えて、当作栽培作物の根の影響が考えられることから、これら根圏ならびに土壌微生物特性の変化と作物生育との関連についても考察を行った。

1. 実験方法

1) 微生物基質量と土壌微生物相、活性の相互関係

微生物基質量と微生物相およびバイオマス、酵素活性などの微生物活性関連項目の相関関係を、前述した試験9年目（1993年）の数値を用いて解析した。

2) 微生物基質としての作物残渣上の微生物相

試験4年目（1988年）の6月中旬に、前作物を異にするインゲンマメ交互作圃場より、土層深2～15cm部位の各前作残渣を採取し、微生物数を測定した。

3) 作物残渣、残根の有機構成成分特性分析

微生物基質となる作物残渣、残根の質について検討した。試験4年目（1988年）の7月に4年輪作圃場から各作物の根および収穫後に地上部残渣を採取し凍結保存した。これらの試料を乾燥後、100メッシュ以下に微粉碎し、第Ⅱ章に記載した方法により、全糖、水溶性窒素および炭水化物等の有機構成成分の特性分析を行った。

4) 各種作物残渣の添加が土壌微生物特性におよぼす影響

連輪作試験圃場より採取した生土壌30gに、前項3)で供試した各種残渣の粉碎物250mgを添加混合し、30℃

で3週間、ビン培養した。系時的に土壌呼吸量を測定し、培養終了後、土壌中の細菌数、糸状菌数を測定した。無添加を対照とした。

5) 圃場に還元される作物残渣量

作付様式間での微生物の変動要因を明らかにするために、4年輪作a系列の作物体地上部の平均残渣還元量を基に、作付様式別の残渣還元量を算出した。

6) 根活性の連輪作間比較

第Ⅲ章の結果から、連作による減収程度が比較的小さかったバレイショと著しかったインゲンマメについて、試験7年目（1991年）の4年輪作および連作7年目の作物根を圃場より採取して、 α -ナフチルアミン法により根活性を測定した。

7) 根圏糸状菌数、糸状菌菌糸長の連輪作間比較

試験3年目（1987年）および試験7年目（1991年）の連作区（テンサイ、コムギは連作2、6年目、バレイショ、インゲンマメは連作3、7年目）および4年輪作区の根を圃場より採取し、根圏糸状菌数を測定した。また試験10年目（1994年）には連作区および4年輪作の糸状菌菌糸長を測定した。

2. 実験結果

1) 微生物基質量と土壌微生物相、活性の相互関係

微生物基質量と微生物相およびバイオマス、酵素活性などの微生物活性関連項目の相関関係を解析した（表Ⅳ－7）。本法での土壌呼吸量（土壌炭酸ガス放出量）は、培養条件が実際の土壌温度より高く、また20日間程度と長いので、微生物によって分解される易分解性基質（炭素）量の指標と考えることができる³⁵⁾。土壌炭酸ガス放出量すなわち易分解性基質量はバイオマスCおよびN

表Ⅳ－7 土壌呼吸量（易分解性炭素量）と微生物活性、微生物相関連項目の相関係数

項 目	土壌呼吸量	バイオマス C	フィスファターゼ 活性	セルラーゼ 活性	バイオマス N	培養 無機N	細菌 数	糸状菌 数
バイオマスC	0.818**							
フィスファターゼ活性	0.715**	0.526*						
セルラーゼ活性	0.824**	0.794**	0.772**					
バイオマスN	0.824**	0.743**	0.759**	0.687**				
培養無機態窒素	0.547*	0.265	0.458	0.113	0.648**			
細菌数 (B)	0.692**	0.629**	0.362	0.406	0.713**	0.648**		
糸状菌数 (F)	-0.049	0.127	-0.416	-0.240	0.096	0.082	0.378	
B/F値	0.743**	0.528*	0.741**	0.652**	0.664**	0.553*	0.665**	-0.426

(n=16) **1%有意 *5%有意

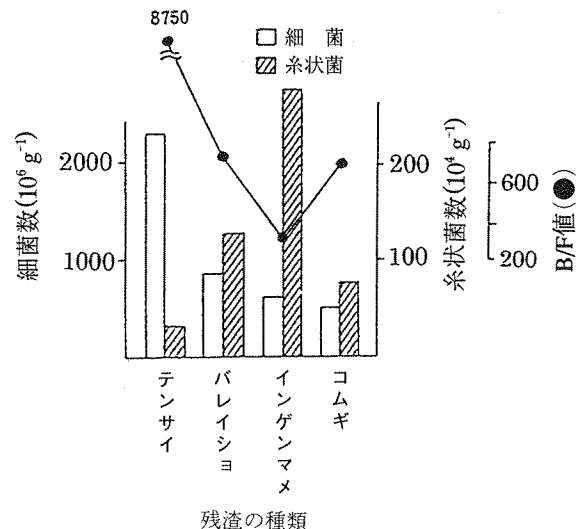
量と正の相関が認められ、地力窒素の一指標とされる培養無機態N量とも正の相関が認められた。土壌呼吸量はバイオマスだけでなくフォスファターゼ活性やセルラーゼ活性などの酵素活性や微生物数のうち細菌数とも正の相関を有した。しかし、糸状菌数とは相関を示さなかった。この理由として、本調査結果では、糸状菌は主に孢子態のものを測定しているということも考えられるが、表Ⅳ－４の結果から、連作など輪作年限の短縮によって、バイオマス量、酵素活性が低下しているにも関わらず、糸状菌数の増加が認められることにあると考えられる。以上のことから、連輪作圃場の土壌において、これら微生物測定値間は相互に密接な関係を示しているといえる。

2) 微生物基質としての作物残渣上の微生物相

各作物残渣の微生物相は(図Ⅳ－８)、細菌数ではテンサイ残渣がとりわけ多く、以下、バレイショ>インゲンマメ>コムギの順であり、糸状菌数はインゲンマメ>バレイショ>コムギ>テンサイであった。細菌数と糸状菌数の相対的な比であるB/F値はテンサイで極めて高く以下、バレイショ≧コムギ>インゲンマメであった。

3) 作物残渣、残根の有機構成成分特性分析

土壌微生物相、活性の差異は、作物残渣および残根の有機構成成分間差に起因する可能性がある。有機物分解速度の規制要因の一つであるC/N比、および微生物の基質になりやすい易分解性成分である水溶性窒素、全糖と、反対に難分解性成分であるセルロース、リグニンなどの含有率には顕著な作物残渣間差が認められ(表Ⅳ－８)、残根の成分特性も大きな違いはなかった。さらに圃場に



図Ⅳ－８ 前作残渣上の微生物相*

*1986年6月上旬の交互作インゲンマメ作付土壌より採取

すき込まれる還元量によって大きく成分量が異なった(表Ⅳ－９)。すなわち、テンサイでは易分解性成分、圃場還元量ともに多く、バレイショは比較的易分解性であるが還元量が少なく、インゲンマメはやや難分解性で還元量が極端に少なく、コムギでは易分解性成分もやや含まれるが全般的には難分解性で還元量も多いなどの特性が認められた。なお、本連輪作試験条件においてインゲンマメは収穫後、刈株を残し茎を搬出したが、その量は4年輪作で80kg10a⁻¹、連作で30~40kg10a⁻¹程度であり、微生物基質としての意義は大きくないものと推察された。

表Ⅳ－８ 各作物茎葉および根に含まれる構成成分特性

作物名 部位	4年輪作作物体中の成分特性(C/N比以外は%)							
	C/N比	T-C	T-N	水溶性 N	全糖	ヘミセル ロース	セル ロース	リグ ニン
茎葉								
テンサイ	7.3	34.0	4.87	0.64	14.8	15.2	9.9	2.9
バレイショ	23.7	33.9	1.43	0.19	6.8	20.2	34.5	8.4
インゲンマメ	37.3	38.8	1.04	0.15	3.4	19.9	44.5	9.1
コムギ	74.8	36.0	0.48	0.05	6.1	29.6	36.5	4.3
根								
テンサイ	12.2	36.5	3.00	0.59	36.9	10.1	9.9	2.9
バレイショ	16.7	39.3	2.36	0.24	8.3	39.0	17.5	6.5
インゲンマメ	14.0	32.8	2.35	0.58	1.9	13.7	21.4	10.8
コムギ	24.8	28.0	1.13	0.08	2.3	32.3	17.9	22.4

1) 茎葉試料は、テンサイ9月上旬、バレイショ8月中旬、インゲンマメ9月上旬、コムギ7月下旬採取。インゲンマメは刈り株

2) 根試料は7月上旬採取。テンサイは側根。

表Ⅳ－9 圃場に還元される各作物残渣および残根中の構成成分量

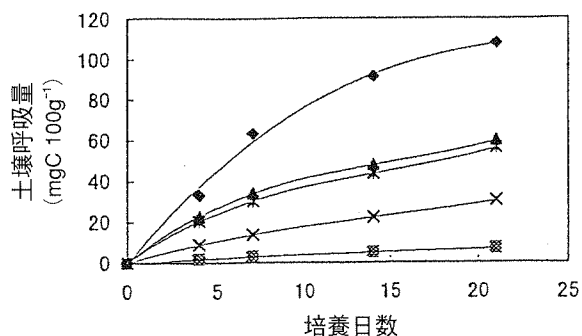
作物名 部位	乾物重 ¹⁾ (kg 10a ⁻¹)		4年輪作作物体中の成分還元量(kg 10a ⁻¹)						
	4年輪作	連作	T-C	T-N	水溶性 N	全糖	ヘミセル ロース	セル ロース	リグ ニン
茎葉									
テンサイ	660	620	224.0	32.2	4.2	97.7	100.3	65.4	19.1
バレイショ	160	140	54.2	2.3	0.3	10.9	32.3	55.2	13.4
インゲンマメ	20	5	7.8	0.2	<0.1	0.6	4.0	8.9	1.8
コムギ	670	560	241.0	3.4	0.4	42.7	207.2	255.5	28.8
根									
テンサイ	77		28.1	2.3	0.5	28.4	7.8	7.6	2.2
バレイショ	31		12.2	0.7	0.1	2.6	12.1	5.4	2.0
インゲンマメ	68		22.3	1.6	0.4	1.3	9.3	14.6	7.3
コムギ	180		50.4	2.0	0.1	4.1	58.1	32.2	40.3

1) 茎葉残渣量は試験3～10年目の平均値、インゲンマメは刈り株。

根残渣量は図Ⅳ-2の根系調査の数値を使用した。連作は測定せず。

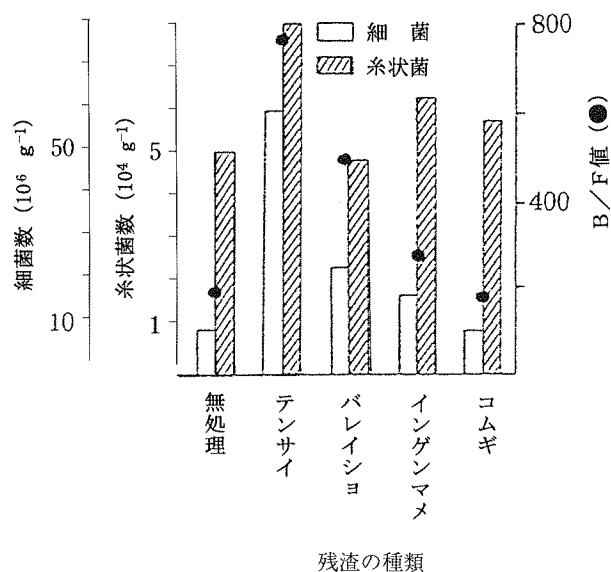
4) 各種作物残渣の添加が土壌微生物特性におよぼす影響

各種作物残渣の添加により、土壌呼吸量はテンサイ>インゲンマメ>バレイショ>コムギの順に高まり(図Ⅳ-9), 前項で示した分解性の難易をほぼ裏付けた。また、微生物相では(図Ⅳ-10)、細菌数はテンサイ残渣添加土壌で4作物中最も増加し、以下バレイショ>インゲンマメ>コムギの順であり、糸状菌数はテンサイで多く、以下インゲンマメ>コムギ>バレイショの順であった。B/F値でみるとテンサイが最も高く、以下、バレイショ>インゲンマメ>コムギの順であり、テンサイ残渣添加土壌では糸状菌数自体は多いが細菌数も極端に多いため、糸状菌の相対的な割合は大きくなく、逆にインゲンマメやコムギでは糸状菌の占める相対的な割合は高まっており、残渣上の微生物相の傾向と残渣添加後の土壌微生物相の傾向が一致した。



図Ⅳ－9 各種残渣の添加が土壌呼吸量に及ぼす影響

■ 無処理 ◆ テンサイ × バレイショ
▲ インゲンマメ × コムギ



図Ⅳ－10 各種残渣添加が土壌微生物相におよぼす影響

5) 圃場に還元される作物残渣量

4年輪作間の2系列では、残渣還元量はほぼ同等であり、3年輪作ではコムギの入らない3a, 3b系列では減少した。このように残渣量が多い作物と少ない作物の作付比率により、試験10年目までの残渣還元量は異なった(表Ⅳ-10)。このことから作付様式間の土壌微生物特性の変動には残渣の質的分解特性に加えて、還元される微生物基質量の差異が経年的に大きく関与していると考えられた。

表IV-10 各種作付様式における試験10年目までの作物残渣還元量

系列	作付様式	残渣還元量 (kg 10a ⁻¹)	系列	作付様式	残渣還元量 (kg 10a ⁻¹)
4年a	B-P-K-W	3600	2年	B-P	3800
4年b	B-K-P-W	3500		W-P	3550
3年a	B-P-K	3000		P-K	860
3年b	B-K-P	3000		B-K	3100
3年c	K-W-B	3600		W-K	2800
			連作	B	5400
				P	1600
				K	100
				W	4900

*テンサイ(B)、コムギ(W)、インゲンマメ(K)は収穫期、バレイショ(P)は7月下～8月上旬の値から推定。テンサイ、コムギの連作は1年少ない。

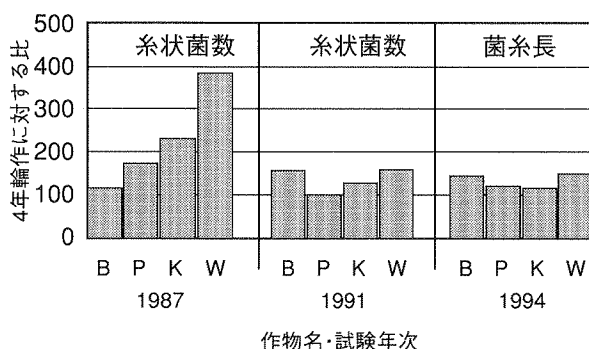
6) 根活性の連輪作間比較

連作による減収程度が比較的小さかったバレイショでは、単位根重あたりの α -ナフチルアミン酸化力の低下は認められず、根重の減少に伴う根全体の活性低下にとどまった。これに対し、減収の著しかったインゲンマメでは、単位根重あたりおよび根全体についても活性低下が大きかった(表IV-11)。

表IV-11 根活性の作物間、連輪作間比較

作物	処理	根活性	
		$\mu\text{g gdw}^{-1} \text{hr}^{-1}$	$\mu\text{g 株}^{-1} \text{hr}^{-1}$
バレイショ	4年輪作	202	509
	連作7年目	208	404
インゲンマメ	4年輪作	427	1016
	連作7年目	270	378

α -ナフチルアミン法による。



図IV-11 根圏糸状菌数、菌糸長の連輪作間比較
各々の項目について連作区の数値を4年輪作を100とした比で示した。

B: テンサイ P: バレイショ
K: インゲンマメ W: コムギ

7) 根圏糸状菌数、糸状菌菌糸長の連輪作間比較

連作2年目(テンサイ、コムギ)、3年目(バレイショ、インゲンマメ)には、各作物とも糸状菌数が増加し(図IV-11)、その程度はインゲンマメ、コムギで大きかった。この傾向は、それぞれ連作6、7年目でやや小

さくなるが、テンサイ、コムギ連作土壌での増加程度が大きかった。一方、それぞれ連作9、10年目の各作物根圏の糸状菌菌糸長も増加しており、テンサイ、コムギでやや大きく、バレイショ、インゲンマメで小さかった。

第5節 考 察

1) 輪作年限、前作物を異にする作物栽培土壌の微生物活性とその変動要因

既往の報告には、土壤微生物活性の発現には微生物の栄養源である有機物の質と量が重要であって、それが微生物相にも影響することが示されている¹⁸⁸⁻¹⁹³⁾。本研究での連輪作下の土壤微生物活性の変動においても、このことが確認された。土壤微生物活性の変動には、土壤物理性も関与するが、火山性土では微生物基質(有機物)の影響がより大きいことも報告されている^{32, 33, 126)}。連輪作試験では、作付様式による物理性の影響は、より小さく、バイオマス量、酵素活性などで示される土壤微生物活性の違いは、当作物栽培土壌の微生物活性の変化と、すき込まれる微生物基質が後作の微生物活性におよぼす影響が重要である。すなわち、根系分布および根圏微生物活性の大小とその根圏効果が異なる各作物が輪作に導入されることによって、まず当作物栽培土壌の微生物活性が変動する。さらに、作物の分解特性として、テンサイは易分解性有機物が多く、分解が早く、残渣量も多く、連作でもそれほど残渣還元量は減少しない特性があり、バレイショは比較的易分解性であるが、やや分解が遅く、もともと残渣量が少ない、インゲンマメは基質の分解も遅く、残渣量も著しく少ない、秋播コムギは分解が非常に遅い残渣量が多く、連作をしても残渣量はそれほど減少しないなどの特徴を持っていた。

これらの作物残渣、残根の質・量的差異が、後作物の土壤微生物活性に大きく影響を及ぼし、テンサイは直後

表Ⅳ-12 主要作物根圏ならびに残渣と跡地土壌の微生物評価

評価の要因	テンサイ	バレイショ	インゲンマメ	コムギ
根圏微生物性	細菌型	中間型	糸状菌型	糸状菌型
残渣の分解特性	細菌型	中間型	糸状菌型	糸状菌型
残渣の分解速度	速	中	遅い	非常に遅い
残渣中の微生物基質量	多	中	少	多
跡地の土壌微生物活性	大	中	小	小
連作区における収量低下	小	小	大	中

の後作の微生物活性に対して大きな影響を及ぼすが、減耗の速度が速いために次々作までの影響は比較的少ない。反対にコムギでは、基質量は多いが分解が進まず、直後の後作には影響が小さいが、蓄積効果によって、より輪作回数の後期に微生物活性が高まるなどの特徴を有すると推定される。

作付様式の違いあるいは輪作年限の短縮により、土壌微生物活性は変動した。テンサイ、コムギでは上述の特徴から、輪作年限の短縮によって微生物活性は経年的に増加する傾向にあり、バレイショとインゲンマメでは減少傾向にあった。後者の土壌では、微生物基質量の減少がバイオマスC、N量および酵素活性の低下を招き、熱水抽出N量あるいは培養無機態N量で表される窒素肥沃度の低下と減収に結びついたものと理解される。インゲンマメ連作土壌における微生物活性は、4年輪作土壌に比べ70%程度まで低下した。しかし、テンサイおよびコムギではこのような微生物活性の変化は必ずしも減収傾向と一致しなかった。このことについては、後述するように土壌微生物相の変化による影響などを考慮に入れる必要があろう。

土壌の微生物活性および微生物代謝量を把握する手段として、バイオマス、ATP含量、各種の酵素活性など多くの定量法が確立され⁵⁾、理化学性とも関連するバイオマスの評価法が提示されているが⁷⁾、農業生産現場での土壌管理に向けた具体的かつ簡便な評価法はこれまでに見あたらない。しかし最近、土壌の微生物活性を表す一指標として α -グルコシダーゼ活性を用いる方法が報告され、北海道内の火山性土を中心としてその標準的な値が調査されている^{36, 128)}。本法は土壌有機物量を反映し、微生物が活動するための理化学的環境条件を評価し得る。本研究で用いたセルラーゼ活性、フォスファターゼ活性は α -グルコシダーゼ活性との相関が高く、このうち前者は土壌の種類に関わらず、 α -グルコシダーゼ活性との読み替えが可能である^{32, 33)}。従来まで、土壌に対する有機物投入、管理の技術的指針は必ずしも明

確ではなかったことから、土壌有機物量の多寡を判定できるこれらの酵素活性数値を用いて、輪作体系下の有機物管理の技術的指針を策出することは可能であろう。また、第Ⅲ章で述べたように、輪作年限、前作物の異なる作付様式における収量性維持についてみた場合、テンサイとコムギを作付様式の中にどのように配置するかがポイントとなる。このことは輪作体系下の土壌微生物活性からみても重要であり、微生物基質の減耗の大きい作物との組み合わせを効果的に行う必要がある。また、土壌間での標準的な測定値を集積、把握することにより、輪作体系下において補給すべき有機物の種類と量の判断も可能といえる。

2) 輪作年限を異にする土壌微生物特性と作物生育の関係

輪作体系下の各種作付様式では、土壌微生物量、土壌微生物活性の変化とともに土壌微生物相も大きく変動し、これについても輪作年限と作物組み合わせが大きく影響するといえる。そこでまず、主要作物根圏の微生物性比較結果と作物残渣の成分特性および跡地土壌における微生物性の比較結果から、輪作体系下の土壌微生物性評価を相対的に試みたのが、表Ⅳ-12である。

すなわち、まず主要作物の根圏微生物性を、層位別に調査した微生物相の結果などからテンサイが細菌型、インゲンマメ、コムギが糸状菌型、馬鈴しょはその中間型と類別した。これについて、作物の根からは有機物が浸出され^{142, 174)}、その作物特有の根の浸出物などによって固有の微生物相を持つことが認められている^{138, 161, 162)}。根圏土壌においては、糸状菌に比べ細菌の根圏効果が高く^{114, 194)}、根から分泌される低分子の糖や有機態の窒素などを利用しやすいことが推測され、B/F値の大小および細菌相の根圏効果などが根圏微生物性の違いを示す指標として利用できると考えられる。根の伸長域に根浸出物が多いことが認められていることから¹⁴¹⁾、根系分布の拡大と相まって特徴的な微生物

物相に反映されたのであろう。

さらに残渣の微生物的な分解特性として、前項1)の分解特性評価に加えて、残渣上の微生物相および跡地土壤における微生物相の変化から、各作物跡地土壤の微生物性を同様に類別した。前作として各作物がすき込まれた場合、跡地土壤の微生物性も変化すること^{114, 185)}、C/N比が大きく難分解性成分を多く含んだ有機物の分解過程では細菌に比べて糸状菌が相対的に増加すること^{120, 184)}が既に示されており、土壤微生物相にも大きな影響を与えたと考えられる。

一方、根圏、特に根面は生理活性の高い場であり、多くの糸状菌が菌糸状態で生息し、連作によって根圏の糸状菌割合が増加することが示されており^{88, 161, 177)}、連作障害にかかった根では糸状菌バイオマスの増加も顕著である¹¹⁴⁾。希釈平板法における糸状菌数は主に孢子状態のものを測定していると考えられるが、東田³⁵⁾、堀ら⁵⁸⁾らは糸状菌数と糸状菌菌糸長はおおむね対応関係があることを認めており、孢子数をもって活動状態にある菌糸長の目安とすることが可能である。本研究でも、連作により4作物全部で糸状菌数、菌糸長が増加するが、テンサイ、コムギではその増加程度が大きかった。また、インゲンマメ、バレイショにおいても、連作により土壤微生物活性が低下するものの根圏の糸状菌数は増加傾向にあった。これについては、連作によって宿主特異性の高い糸状菌が集積し、分泌物質や根自体を基質にして増加したことが考えられ、連作によって根圏糸状菌バイオマスが増加した報告¹¹⁴⁾とも一致する。また、連作によって根の呼吸率との相関が高い¹⁸⁷⁾根活性が低下することを認め、今後さらに根圏での糸状菌相、糸状菌バイオマス量と根活性との関係を解明する必要がある。また各作物根圏の糸状菌相をみると、*Fusarium*属菌がコムギを除く比較的生育の早い時期に優占しており、連作障害菌として報告されることの多い本菌の動態が注目される。

これらの微生物評価と作物生育の関係について、とくに輪作年限短縮による収量低下が最も大きかったインゲンマメ栽培土壤についてまとめてみると、連作、短期輪作の初期の段階で細菌数の減少と糸状菌数の増加が認められ、その中でも*Fusarium*属菌が多く、その後、連作、短期輪作が継続されるにしたがい微生物基質の還元量が減少して、連作およびインゲンマメを含む輪作におけるバイオマスの減少と微生物活性の低下が大きいことが認められた。

以上のように、本章では主要4作物の根圏および非根圏土壤の微生物特性を相対的にではあるが把握した。輪

作年限の短縮による微生物基質の変動は、微生物活性の変動と微生物相の変化をもたらす。基質量が減少した場合には、バイオマス、有機物分解活性の減少、低下などを通して直接的には窒素肥沃度の低下につながっていくのであろう。また微生物相の変化については、土壤病害との関係を考慮する必要がある、これについては次章に述べることにしたい。

第6節 ま と め

1) 主要畑作物の根圏微生物特性

- (1) 単位圃場面積あたりの根重および根長は、50cm深の土層においてコムギ>テンサイ>インゲンマメ>バレイショの順であった。
- (2) 根圏微生物相の特徴として、細菌、CV耐性菌数、蛍光性*Pseudomonas*属菌数はテンサイ、バレイショで多く、インゲンマメ、コムギで少なく、糸状菌数はインゲンマメでやや多かった。B/F値(細菌数/糸状菌数)、C/F値(CV耐性菌数/糸状菌数)および細菌数の根圏効果(根圏/非根圏菌数)は、テンサイ、バレイショで高く、コムギ、インゲンマメで小さかった。糸状菌相は、インゲンマメで*Fusarium*属菌が多く、コムギでもやや多かった。
- (3) 微生物活性関連項目では、土壤呼吸量、バイオマスN量がバレイショ、テンサイ根圏で他2作物に比べて多く、根圏効果も高かった。フォスファターゼ活性およびセルラーゼ活性の根圏効果は小さいが、両活性ともコムギ、テンサイで高かった。

2) 輪作体系における非根圏土壤の微生物特性の変動

- (1) 前作物が非根圏土壤の微生物特性におよぼす影響として、細菌数はテンサイ跡地土壤で多く、糸状菌数もテンサイ跡地でやや多いが前作による差は小さかった。土壤呼吸量、バイオマスC量もテンサイ跡地で高かったが、酵素活性には前作間差が認められなかった。
- (2) 前作物を一定にして当作物の非根圏土壤微生物相の特徴をみると、細菌数はインゲンマメで最も少なく、糸状菌数はインゲンマメ、コムギで多かった。
- (3) 当作物の非根圏土壤では連作および輪作年限短縮により、輪作回数の経過に伴って、テンサイで土壤呼吸量、バイオマス量がやや増加し、微生物数が増加した。バレイショでは呼吸量、バイオマス、酵素活性などの微生物活性関連数値は減少し、細菌数は減少したが糸状菌数は増加した。インゲンマメでは上記の活性関連数値が大きく減少し、糸状菌数が増加した。コムギでは微生物

活性関連数値が増加し、糸状菌数が増加した。

(4) 各作物の根圏と、各作物の残渣を圃場に還元した後作物の非根圏土壌微生物相の特徴からテンサイを細菌型、インゲンマメ、コムギを糸状菌型、バレイショを中間型に類別した。

3) 土壌微生物特性の変動要因と作物生育の関係

(1) 土壌呼吸量とバイオマスC、N量および酵素活性との間には正の相関が認められ、地力窒素の指標である培養無機態N量と細菌数との間にも正の相関が存在し、微生物の基質量と微生物量および活性の間には密接な関係があった。

(2) 輪作年限の短縮により作物別の土壌微生物活性が上昇した場合には収量低下が小さく、活性が低下した場合には大きかった。

(3) 各作物残渣の分解特性から、テンサイ残渣は直後の後作の、コムギ残渣はより長期的に輪作回数の経過にともなって土壌微生物活性を高めた。したがって、テンサイ、コムギを含む作付様式が長期的にみて収量性が高かったことについては、これらの作付様式で土壌微生物活性が高く維持されたことが一要因と推察した。

(4) 土壌微生物活性には圃場に還元される残渣、残根の量と分解の遅速が関与すると考えられ、易分解性の糖、窒素がテンサイで多く、難分解性のセルロース、リグニ

ンなどがコムギで多いなど、顕著な作物間差を認めた。

(5) 残渣物を土壌に添加した短期間の培養試験では、細菌数はテンサイ残渣で、以下、バレイショ>インゲンマメ>コムギの順であった。糸状菌数もテンサイで高まるが、B/F値はテンサイ>バレイショ>インゲンマメ>コムギの順であり、圃場から採取した残渣上の微生物相の結果と一致した。土壌呼吸量はテンサイ>インゲンマメ $\geq$ バレイショ>コムギの順に高かった。

(6) 連作を継続すると根活性は減収率の大きなインゲンマメで他作物に比べ大きく低下した。連作によって各作物根圏で糸状菌数が増加し、微生物活性が低下した場合でもインゲンマメやバレイショ根圏では糸状菌数、菌糸長が増加したことから、連作による根圏の糸状菌数増加と連作障害との関連が示唆された。

(7) 輪作年限短縮による収量低下が最も大きいインゲンマメ栽培土壌では、連作、短期輪作の初期の段階で細菌数の減少と糸状菌数の増加が認められ、その中でも根圏の*Fusarium*属菌が多いこと、その後、連作、短期輪作が継続されるにしたがい微生物基質の還元量が減少して、連作およびインゲンマメ含む輪作におけるバイオマスの減少と微生物活性の低下が大きいことが認められ、連作土壌の微生物活性は4年輪作土壌の70%程度に低下した。

第V章 輪作体系下におけるインゲン根腐病の発生と土壌管理による制御

第Ⅲ章で述べたように、連作および短期輪作年限におけるインゲンマメの収量低下は供試作物の中で最も著しかった。インゲンマメの連作圃場では、当初よりインゲン根腐病が多発生し、収量に大きく影響を与えたものと推察される。インゲン根腐病の発生は交互作、3年輪作でかなり減少し、前作物の違いによって後作インゲンマメの根腐病発生に差異が認められた。

本章では、インゲン根腐病の発生におよぼす作付様式の影響と根腐病発生程度を異にした作付様式の土壌微生物特性を解析することにより、インゲン根腐病におよぼす土壌微生物および理化学的要因を明らかにし、根腐病の生態的制御法を検討した。

第1節 インゲン根腐病の発病指数に関与する土壌微生物的要因

第Ⅳ章ではインゲンマメの連作土壌において、土壌呼吸量の減少、すなわち土壌微生物の基質である易分解性有機物量の減少とともにバイオマスの減少、土壌微生物活性の低下を認めた。これらの土壌微生物的要因も土壌静菌作用として、短期輪作年限下のインゲン根腐病の発生および大幅な減収に相乗的に作用している可能性が考えられる。したがって本節では、インゲン根腐病の発病指数と土壌微生物特性との関連性について検討を加えた。

1. 実験方法

1) インゲンマメ根圏の*Fusarium*属菌数と根褐変指数の関係

試験4年目(1988年)の連輪作圃場の各作付様式区におけるインゲンマメ作付前(4月22日)およびインゲンマメ根圏土壌(6月21日)の*Fusarium*属菌数を駒田培地により測定し、6月17日の根褐変指数との関係を調査した。

2) 土壌微生物活性の異なる圃場における土壌微生物相の形成

バイオマス量、酵素活性値を異にした土壌を得る目的で、1994年5月中旬に連輪作圃場よりインゲンマメ4年輪作土壌、テンサイ連作土壌、インゲンマメ連作4年目土壌、同連作10年目土壌を採取し、原土のまま土壌呼吸量、バイオマス量、フォスファターゼ活性、セルラー

ゼ活性を測定した。さらにバイオマスを測定した後の土壌について、土壌微生物数を測定した。なお、これまでの細菌、放線菌、糸状菌の項目に加え、C V耐性菌、蛍光性*Pseudomonas*属菌(以下FP-1菌)および*Fusarium*属菌を測定した。

3) 土壌微生物活性の異なる土壌におけるインゲン根腐病の発生

バイオマス量、酵素活性等の異なる土壌において、病原菌を接種し、根腐病の発病程度を調査した。供試土壌には、前項と同様、1994年5月中旬に連輪作圃場より採取した4土壌を用いた。1994年6月上旬に前記の土壌を500g容の素焼き鉢に充填し、オートクレーブ滅菌した。放冷後、根腐病の発生が認められない隣接圃場の休閑土壌10gを100mlの滅菌水で振とうし、ろ過した土壌浸出液を鉢あたり10ml接種し、アルミ箔でふたをして10日間温室内で前培養した。培養後、第Ⅱ章に述べたインゲンマメ連作根より分離した*F. solani* f. sp. *phaseoli*株(以下、Fs菌株)を接種した。Fs菌株はV8ジュース培地にて静置培養し、摩砕洗浄を繰り返したもの⁷⁷⁾を、約 10^4 g⁻¹土になるように接種し、表面殺菌した大正金時種子を一鉢あたり3粒播種し、4反復でガラス室内で約30日間栽培した。施肥は行わなかった。なお、本菌株は滅菌土壌あるいは滅菌したバーミキュライトを使用した接種試験において、菌濃度条件にもよるが根褐変指数平均1.5~3の強い病原性を示した。

2. 実験結果

1) インゲンマメ根圏の*Fusarium*属菌数と根褐変指数の関係

4年輪作から連作までの各作付様式区における4月の土壌*Fusarium*属菌数と6月の根圏土壌*Fusarium*属菌数との間には高い正の相関があり、6月の根圏*Fusarium*

表V-1 インゲンマメ作付前土壌ならびに根圏の*Fusarium*属菌数と根褐変指数の相関係数

日付	部位	6月21日 根圏菌数	6月17日 根褐変指数
4月22日	土壌菌数	0.806**	0.672**
6月21日	根圏菌数	—	0.691*
n=12 *5%有意 **1%有意			

表V-2 供試土壌（原土）の微生物活性とくん蒸培養後の土壌微生物相

土 壤	原土の微生物活性			
	土壌呼吸量 (mgC 100g ⁻¹)	バイオマスC (mgC 100g ⁻¹)	フォスファターゼ活性 (nmol g ⁻¹ min ⁻¹)	セルラーゼ活性
①インゲンマメ4b系列	29.2	11.8	19.3	3.3
②テンサイ連作	21.6	11.4	19.9	3.3
③インゲンマメ連作4年目	16.1	8.8	16.6	2.8
④ 同 連作10年目	14.4	7.3	16.3	2.2

土 壤	くん蒸培養後の土壌微生物相					
	細菌 (10 ⁶ g ⁻¹)	CV耐性菌 (10 ⁵ g ⁻¹)	FP-1 ¹⁾ (10 ⁴ g ⁻¹)	放線菌 (10 ⁶ g ⁻¹)	糸状菌 <i>Fusarium spp.</i> (10 ⁴ g ⁻¹)	<i>Fusarium spp.</i> (10 ² g ⁻¹)
①インゲンマメ4b系列	26.5	6.5	1.5	1.2	10.1	7.9
②テンサイ連作	21.7	9.3	19.4	0.3	2.1	19.1
③インゲンマメ連作4年目	17.8	3.2	0.3	0.9	21.7	25.4
④ 同 連作10年目	13.5	3.4	6.5	0.9	4.9	30.2

1)FP-1：蛍光性*Pseudomonas*属菌数

属菌数と根褐変指数の間には正の相関が認められた（表V-1）。駒田培地による*Fusarium*属菌のコロニー数は、ほぼ厚膜胞子由来のものとされている⁷⁹⁾。本調査では、それら個々の病原菌の確認および平板中の全*Fusarium*属菌に対する病原菌の割合の算出は行っていないが、*F. solani* f. sp. *phaseoli*と*Fusarium spp.*の菌数がインゲンマメ根圏土壌中および病斑組織内ではほぼ対応したことが認められており⁶⁷⁾、この場合には、駒田培地による*Fusarium*属菌数の変動によっても根腐病発生下の病原菌の動態を判断する指標になりうると考えられた。

2) 土壌微生物活性の異なる圃場における土壌微生物相の形成

インゲンマメ連作土壌ではバイオマス量、酵素活性が減少しており、連作10年目土壌では、かなりバイオマス量が少なく、土壌呼吸量も減少した（第IV章）。また細菌数が減少し、糸状菌数がやや増加する傾向にあった。インゲンマメ連作4年目土壌では、連作10年目よりはやや高いが、各微生物特性項目の数値が4年輪作土壌よりも減少し、インゲンマメの連作によって経年的にバイオマス、活性値が低下する傾向があった（表V-2）。バイオマス測定後の土壌微生物相では、原土で微生物活性の低かった土壌で細菌数は減少し、放線菌数はどの土壌もあまり変化しなかったが、糸状菌数は連作4年目の土壌で増加し、これまでに述べたインゲンマメ連作土壌における土壌微生物相の傾向とほぼ一致した（表V-2）。これらの微生物相の他に、土壌病原菌に対して拮抗能を持つ

ことが多いとされている蛍光性*Pseudomonas*属菌数は連作4年目の土壌で低下するようであった。また*Fusarium*属菌数はバイオマスの低い土壌で増加する傾向であった。

3) 土壌微生物活性の異なる土壌におけるインゲン根腐病の発生

全般に根腐病の発病程度は小さかったが、インゲンマメ4年輪作土壌、テンサイ連作土壌のような、原土で微生物活性が高かった土壌では、根腐病の発病程度は少なく、インゲンマメの生育量も増加したのに対し、インゲンマメ連作4年目、同10年目土壌では根腐病の発生は有意に増加した。ただし、インゲンマメ連作4年目、同10年目の差は認められなかった（表V-3）。これらのことから、インゲン根腐病の発病程度の変動には、土壌呼吸量、バイオマス量、酵素活性の大小および土壌微生物相の形成が関与すると推察された。

表V-3 土壌浸出液接種後の病原菌接種がインゲン根腐病におよぼす影響

土 壤	根褐変指数 ¹⁾	茎葉+根重 ¹⁾ (mg乾物/本)
①インゲンマメ4b系列	0.46a	428c
②テンサイ連作	0.83b	360b
③インゲンマメ連作4年目	1.28c	274a
④ 同 連作10年目	1.37c	285a

1)異なる文字間で5%水準での有意差あり(t検定)。

第2節 前作物残渣の分解とそれに伴う微生物相の変化がインゲン根腐病の発生におよぼす影響

1. 実験方法

1) 前作物を異にするインゲンマメ根圏糸状菌相の推移

試験2年目(1986年)に、土層深15cmまでの前作物を異にするインゲンマメの根圏糸状菌相の季節変化を経時的に調査した。採取時期は6月13日、6月23日、7月25日の3回とした。根を採取後洗浄せずに地際0~2cmと2cm以下の部位に分け、ローズベンガル寒天培地 10^{-4} レベルの希釈平板法により得られたコロニーを分離し、検鏡によりインゲンマメ根圏の糸状菌相を調査した。

2) 交互作区におけるインゲンマメの根圏微生物相に及ぼす前作物の影響

インゲンマメと各作物の交互作区において、試験4年目(交互作2周目、1988年)のインゲンマメ地際0~2cmの根圏微生物相(細菌数、糸状菌数および*Fusarium*属菌数)を測定し、前作物の影響を調査した。

3) 交互作区におけるインゲンマメの作付前の土壤微生物相

インゲンマメと各作物の交互作区において、試験4年目(交互作2周目、1988年)のインゲンマメ作付前に土壤微生物相(細菌数、糸状菌数および*Fusarium*属菌数)を調査した。さらに試験8年目(交互作4周目、1992年)にも同様の調査を行った。

4) 前作物残渣上の微生物相

4年輪作圃場において、試験4年目(1988年)の6月中旬に、土層深2~15cmにおける各作物の残渣を採取し、付着する土壤を大まかに払い落した後、微生物数の測定に供試した。

5) 前作物残渣の添加がインゲン根腐病菌の活性ならびに土壤微生物相におよぼす影響

まず、連輪作圃場の土壌10gに4作物の茎葉残渣粉砕物各250mgを添加混合し、オートクレーブで滅菌した。これにPDB(ポテトデキストロース)液体培地で培養した*F. solani* f. sp. *phaseoli* (Fs菌株)を約 10^4 g $^{-1}$ 個接種し、30℃で3週間培養し、炭酸ガス発生量(土壤呼吸量)を測定した。次に、連輪作圃場の生土30gに各残渣粉砕物250mgを添加し、Fs菌株を約 10^5 g $^{-1}$ 接種し、30℃で3週間培養し、土壤呼吸量ならびに*Fusarium*属菌

を含む土壤微生物相を調査した。また、土壌中における分解性の難易度の異なる基質として、市販試薬のグルコース、ガラクトース、グルタミン、アスパラギン、セルロース、リグニン100mgを同量の生土に添加し、Fs菌株を約 10^5 g $^{-1}$ 接種し培養した場合の土壤呼吸量、土壤微生物相も併せて調査した。また後者の実験については、第II章に述べたインゲンマメ褐変部位より分離した*F. oxysporum*も同様の方法で供試した。

6) インゲン根腐病菌に対する細菌添加の影響

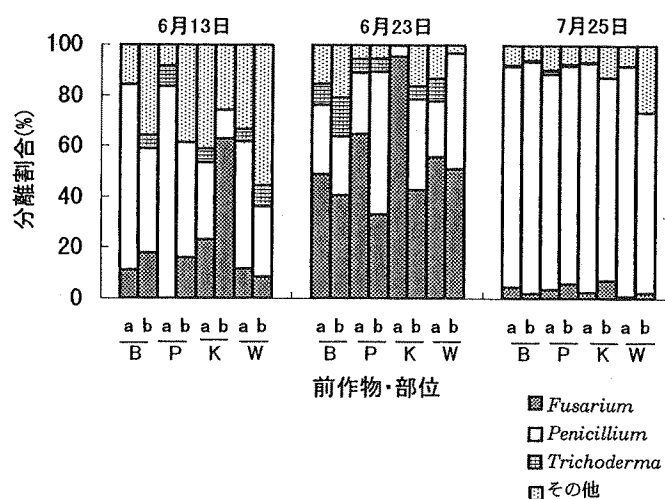
生土壌10gにインゲンマメ残渣250mgを加え滅菌した後、*Bacillus megaterium* 1-1株を 3.6×10^6 g $^{-1}$ 、Fs菌株を 10^4 g $^{-1}$ となるよう接種し、30℃で35日間培養し、*F. solani* f. sp. *phaseoli*菌数および土壤呼吸量を調査した。なお、この細菌株はコムギ根圏より分離し同定した菌株である⁷¹⁾。本菌株については、PDA培地上の対峙培養において、病原菌に対する特異的な拮抗能は認められなかった。

7) インゲン根腐病におよぼす堆きゅう肥施用の影響

1994年5月9日に、インゲンマメ9年連作枠土壌に、牛糞麦稈堆きゅう肥(C/N 15 2kgm $^{-2}$ を15cmの深さに混合施用し、同時に無施用区も設定した。5月27日に播種し、8月1日まで栽培して根腐病の発病程度を調査した。1区1m 2 で2反復で行った。

2. 実験結果

1) 前作物を異にするインゲンマメ根圏糸状菌相の推移



図V-1 前作物を異にするインゲンマメの根圏糸状菌相の推移

前作物名:
B: テンサイ P: バレイショ K: インゲンマメ W: コムギ
根の部位:
a: 地際 b: 2cm以下

試験2年目の交互作区においては、6月13日にはインゲンマメ跡(連作)を除く前作物区で、全般に*Penicillium*属が優占し、以下*Fusarium*属も多かったが(図V-1)、インゲンマメ連作区では地際2 cm以下の部位で*Fusarium*属がとくに多かった。その他の属では、*Trichoderma*, *Mucor*, *Actinomucor*, *Gliocladium*, *Humicola*等が検出された。6月23日には、全般に*Fusarium*属の割合が高まり、連作区の地際の部位でとくに多かった。しかし、7月25日には各前作物区とも*Fusarium*属が減少し、再度*Penicillium*属が優占した。

2) 交互作区におけるインゲンマメの根圏微生物相に及ぼす前作物の影響

前作物間の比較をインゲンマメの連作区を含む交互作区2周目のインゲンマメ根圏の微生物相でみると、細菌数はテンサイ跡でやや高く、糸状菌数はコムギ跡およびインゲンマメ跡で高まるようであった。*Fusarium*属菌数は、根褐変の激しいインゲンマメ跡、コムギ跡で高まった(表V-4)。

3) 交互作区におけるインゲンマメの作付前の土壌微生物相

インゲンマメの連作区を含む交互作区2周目におけるインゲンマメ作付前の土壌微生物相は(図V-2)、糸状菌数にはあまり差がないが、*Fusarium*属菌数はインゲンマメ跡>コムギ跡>バレイショ跡>テンサイ跡の順

表V-4 交互作区におけるインゲンマメ根圏微生物相におよぼす前作物の影響*

前作物	細菌数 (10^6 g^{-1})	糸状菌数 (10^4 g^{-1})	<i>Fusarium</i> 属菌数 (10^6 g^{-1})
テンサイ	20.5	21.1	23.2
バレイショ	15.3	17.5	57.8
インゲンマメ	15.7	26.5	91.1
コムギ	16.9	28.0	88.2

*交互作2週目の6月22日の値。

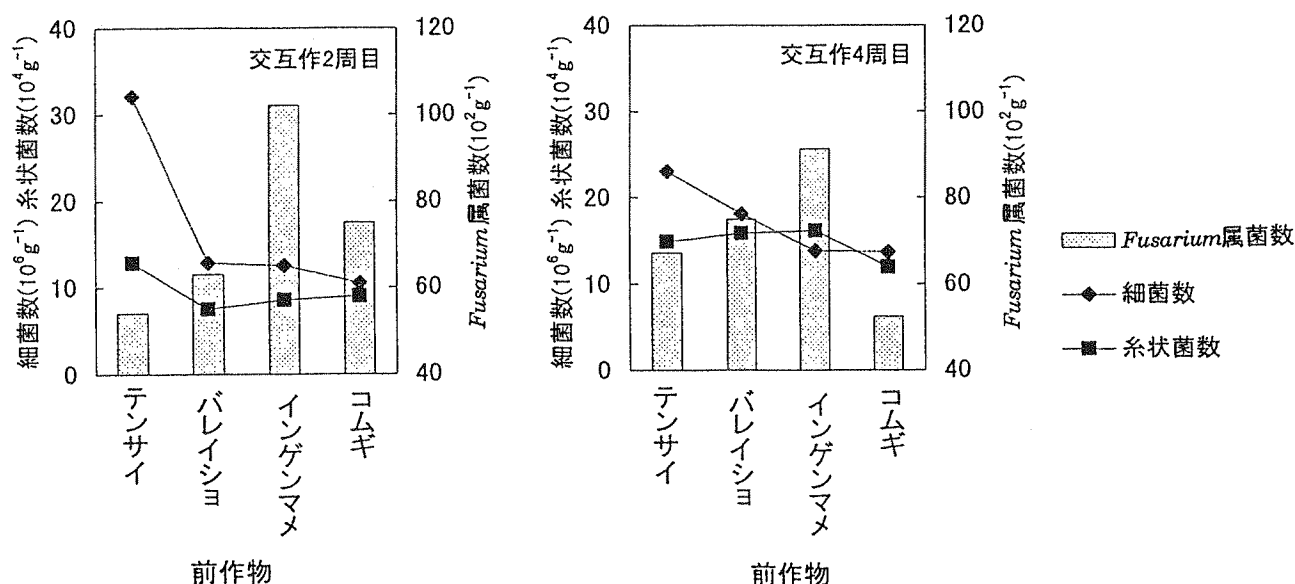
インゲンマメは連作4年目。

に高かった。細菌数はテンサイ跡>バレイショ跡≧インゲンマメ跡>コムギ跡であった。

しかし、その後交互作の継続により4周目では、*Fusarium*属菌数はインゲンマメ跡>バレイショ跡>テンサイ跡>コムギ跡の順に多く、細菌数はテンサイ跡>バレイショ跡>インゲンマメ跡≧コムギ跡であった。このような*Fusarium*属菌数の増減は、1、2周目および4、5周目の交互作区における根腐病発生の大小にほぼ反映した。

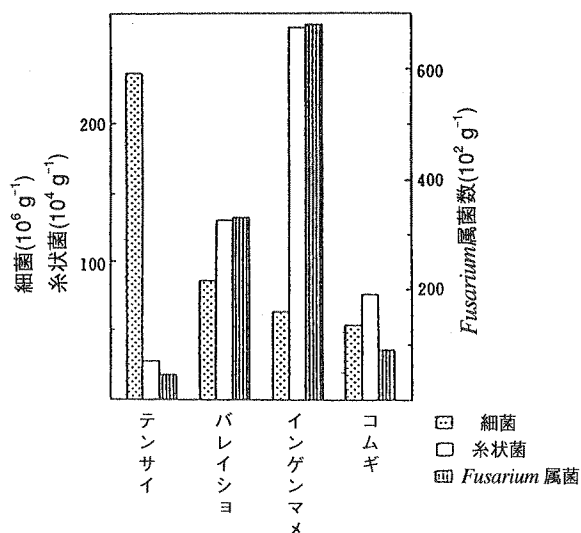
4) 前作物残渣上の微生物相

各作物残渣の微生物相をみると、細菌数はテンサイで極めて多く、以下バレイショ、インゲンマメ、コムギの順であり、糸状菌数はインゲンマメで多く、以下バレイショ、コムギ、テンサイであった。これらの結果は第四章で示したものと同様であった。*Fusarium*属菌数は



図V-2 交互作区におけるインゲンマメ作付前の土壌微生物相
(左：交互作2周目、右：交互作4周目)

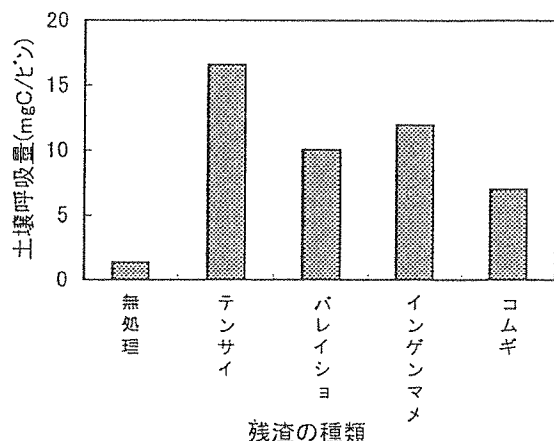
糸状菌数の傾向に対応し（図V-3），インゲンマメで極めて多く，バレイショも多かった。コムギ残渣の微生物数は全般的に少なかった。



図V-3 前作物残渣上の微生物相
6月中旬の土層深2～15cmの残渣を供試。

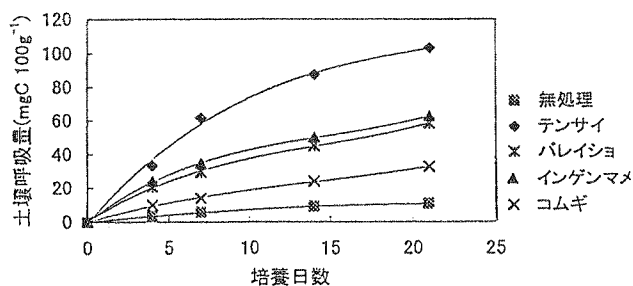
5) 前作物残渣の添加がインゲン根腐病菌の活性ならびに土壤微生物相におよぼす影響

各作物の残渣物を土壤に混合し，滅菌後に根腐病菌を接種して培養試験を行った結果（図V-4），土壤呼吸量はテンサイ残渣で最も多く，次にインゲンマメであり，以下バレイショ，コムギの順であった。このことからインゲンマメ残渣が根腐病菌単独の条件下では，根腐病菌に利用されやすいことが理解されるとともに，テンサイ残渣も利用されやすいことが窺えた。

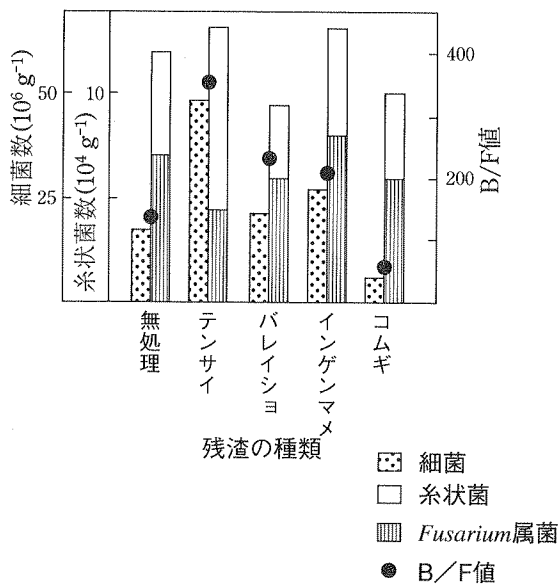


図V-4 殺菌土を用いた病原菌接種条件における各種作物残渣の添加が土壤呼吸量におよぼす影響

連輪作圃場の生土壤(未殺菌土壤)に各残渣を添加し，*F. solani*を通常の菌レベルよりやや高めて接種した場合の土壤呼吸量は（図V-5），テンサイ残渣で高く，以下，インゲンマメ，バレイショがほぼ同等であり，コムギ残渣で少なかった。培養終了後の土壤微生物相を調査した結果（図V-6），細菌数はテンサイ残渣で高く，以下インゲンマメ，バレイショ，コムギであり，糸状菌数はインゲンマメ，テンサイで高く，以下コムギ，バレイショであり，この結果は実験の時期を変えて行った第IV章第4節の結果と同様の傾向であった。一方，*Fusarium*属菌数は，インゲンマメで高く，以下コムギ，バレイショであり，テンサイ残渣が最も少なく前作物間差が認められ，前項4)の結果と一致した。



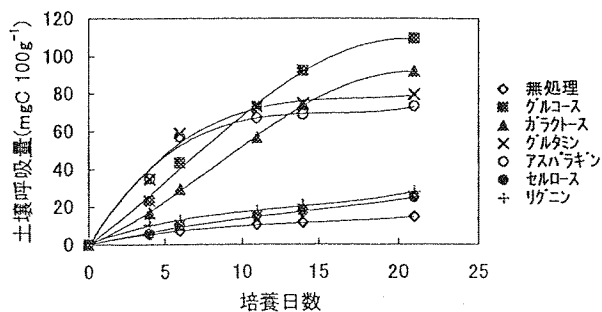
図V-5 未殺菌土壤における各種作物残渣の添加が土壤呼吸量におよぼす影響



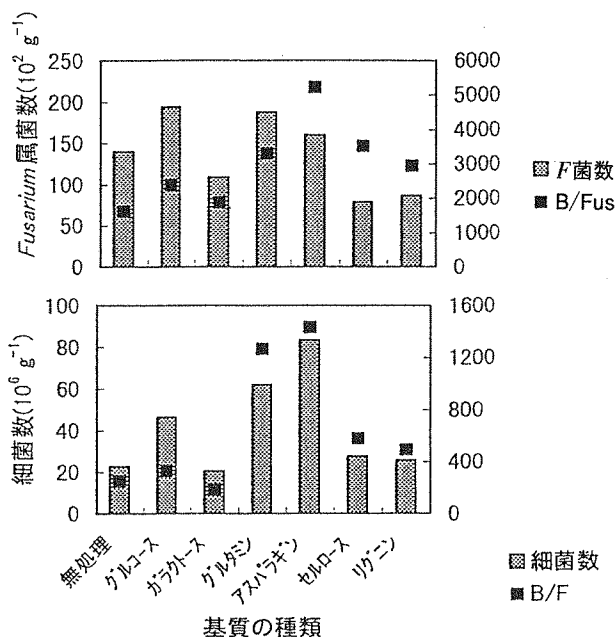
図V-6 未殺菌土壤における各作物残渣の添加が土壤微生物相におよぼす影響

未殺菌土壤に対するグルコース，アミノ酸，セルロース等，炭素，窒素源の質を異にする基質の添加処理にお

ける土壌呼吸量、土壌微生物相も併せて調査した（図V-7, 8）。なお、接種菌が*F. solani*および*F. oxysporum*ともほぼ同様の結果であり、*F. solani*の結果のみ記載することとした。培養10日目頃までに、グルタミンおよびアスパラギンなどのアミノ酸類の添加土壌では最も呼吸量が高まり、その後20日目までにはやや収まった。グルコースおよびガラクトースなどの単糖類では、アミノ酸類よりもやや遅く呼吸量が高まり培養20日目頃まで持続した。しかし、セルロースおよびリグニン、無処理（基質無添加）よりもやや高まるにとどまり、呼吸のための基質として利用されにくいことが推測された。なお、基質として用いた試薬リグニンには易分解性の成分がやや含まれていることが窺えた。



図V-7 各種基質の添加が土壌呼吸量におよぼす影響

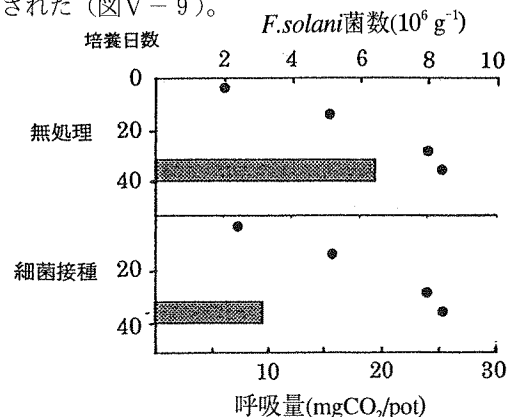


図V-8 各種基質の添加が土壌微生物相におよぼす影響

一方、これらの基質試薬を添加した場合の培養21日後の土壌微生物相をみると（図V-8），無処理に比べて、アミノ酸類で細菌数が増加し、グルコースでも高まるが、その他の基質では高まらなかった。B/F値は細菌数の高まったアミノ酸添加土壌で著しく高まり、これらの土壌は相対的に細菌が増加する土壌であることが窺えた。*Fusarium*属菌数は、細菌数の高まったアミノ酸類およびグルコース添加土壌で無処理区に比べやや高まり、セルロース、リグニン添加では減少するようであった。しかし、B/Fus（細菌数/*Fusarium*属菌数の比）をとってみると、アミノ酸類を添加した土壌で、この値が高まっていた。すでに、第四章第4節で各作物残渣中の炭水化物および水溶性窒素類を調査しており、各残渣を直接土壌に添加した場合と、分解性の異なる代表的なこれらの成分を基質として添加した場合の、土壌微生物活性および*Fusarium*属菌数を始めとする土壌微生物相への影響の傾向が一致した。

6) インゲン根腐病菌に対する細菌添加の影響

殺菌土における病原菌と細菌の混合接種により、病原菌のみの無処理に比べ、土壌呼吸はやや早まるが、35日培養後の積算量はほぼ同等であった。しかし、培養35日後の*F. solani*菌数は混合接種区が無処理に比べ半分程度に減少した。このことから、一定の基質の存在下で、*F. solani*菌数は微生物間競争の影響を受けることが示唆された（図V-9）。



図V-9 インゲン根腐病菌と細菌*の混合接種が土壌呼吸量および根腐病菌数におよぼす影響

**Bacillus megaterium* ●呼吸量

7) インゲン根腐病におよぼす堆きゅう肥施用の影響

堆きゅう肥などの有機物施用によってバイオマスが増加することはよく知られている。本実験でもそれによる根腐病の回復を期待したが、堆きゅう肥の単用ではバイオマス量ならびに酵素活性の向上に至らず、根腐病は軽減されなかった（表V-5）。

表V-5 インゲン根腐病ならびに土壤微生物特性におよぼす堆きゅう肥施用の影響

処理	根褐変指数	茎葉重 g乾物/本	土壤微生物特性			
			バイオマス C (mgC 100g ⁻¹)	土壤呼吸量 活性 (nmol g ⁻¹ min ⁻¹)	フォスファターゼ 活性 (nmol g ⁻¹ min ⁻¹)	セルラーゼ 活性 (nmol g ⁻¹ min ⁻¹)
無施用	1.66	6.59	12.9	17.6	19.7	3.3
堆きゅう肥施用	1.65	8.67	12.6	19.0	20.5	3.1

第3節 連作の継続に伴うインゲン根腐病の衰退性と土壤微生物特性の関係

インゲンマメの連作圃場では、連作3～4年目までに著しく減収するが、それ以降、根腐病の発生程度および収量はやや回復し、10年目までは4年輪作区(4a(P)区)の6～7割で推移しており、これらの現象下の土壌では、病原菌に対して拮抗的に作用する土壤微生物相が形成されている可能性が考えられる。そこでインゲン根腐病の衰退現象を確認するとともに、土壤微生物的観点から根腐病の発生変動におよぼす要因について検討した。

1. 実験方法

1) 輪作年限、連作年数と根腐病衰退性の関係

連作年数の異なる圃場におけるインゲン根腐病発生変動を確認するために、連輪作圃場に近接する土壌において、第II章に述べたようなインゲンマメの連作年数の異なる試験区を設置した。この圃場にインゲンマメを栽培し、全連作年数区で7月中旬に一斉にインゲンマメを採取し、根腐病の発病程度(根褐変指数)を調査した。1区4㎡で2反復で行った。この調査を1990年から93年まで連続して実施した。

2) インゲンマメの連作年数を異にする圃場における土壌理化学性

前項1)の試験圃場におけるインゲンマメ作付前土壌の理化学性を調査した。

3) インゲンマメ連作年数の経過に伴う土壤微生物相の推移

1992、1993年の2カ年にわたりインゲンマメ連作圃場における土壤微生物相を調査した。インゲンマメの作付前に土壌を採取し、通常の土壤微生物相の分析項目に加え、P-1培地で分離した蛍光性*Pseudomonas*属菌(FP-1菌と略称)および*Fusarium*属菌を測定した。

4) インゲン根腐病菌に対して拮抗能を示した細菌相

根腐病の発生変動と関連する特異的土壤微生物相の有無の確認試験を行い、前項3)での根腐病の発生推移との関連が考えられる細菌相と病原菌の相互関係を解析した。1994年6月下旬のインゲンマメ連輪作圃場の根を輪作年限別にグループごと採取し、希釈平板法により細菌、CV耐性菌を、P-1、P-2培地⁷²⁾で蛍光性*Pseudomonas*属菌をそれぞれ培養後、無作為に分離した。蛍光性*Pseudomonas*属菌はUVランプで波長265nmにおける蛍光性を確認した。これらの菌株を純粋分離し、YG(イーストエクス・グルコース寒天培地)¹⁴⁾に保存した。蛍光性*Pseudomonas*属菌は(それぞれFP-1、FP-2と略称)は、一旦、KingB培地¹⁴⁾(栄研化学製)で培養し、蛍光性を再確認した。PDA培地で前培養しておいた病原菌*F. solani*(Fs)菌株の寒天片を、1/4濃度に調整したKingB培地のシャーレの中央に置き25℃で5日間培養後、上記の分離細菌株を25℃で1週間対峙培養し、気中菌糸を抑制した距離(1mm以上)によって拮抗性を判定した。

5) 蛍光性*Pseudomonas*属菌のインゲンマメ栽培土壌および根圏における変動

連作7年目(1991年)にインゲンマメ栽培土壌および根圏における蛍光性*Pseudomonas*属菌数(P-1培地)の4年輪作、連作間比較を経時的に行った。

6) 前作物を異にするインゲンマメ作付前土壌の蛍光性*Pseudomonas*属菌数

本章第2節で述べた前作物による根腐病発生程度とインゲンマメ作付前土壌の蛍光性*Pseudomonas*属菌数(P-1培地)の関係を交互作用4、5周目(1992、94年)に調査した。

2. 実験結果

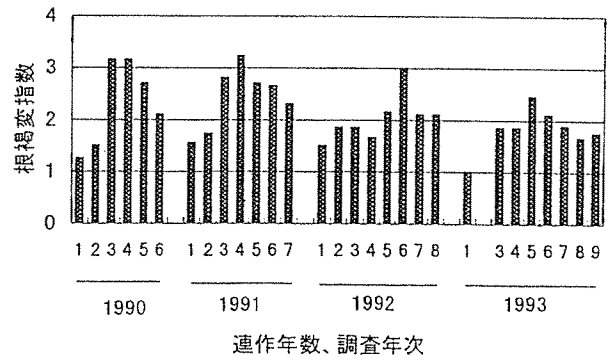
1) 輪作年限、連作年数と根腐病衰退性の関係

連輪作試験における根腐病の年次間の発生変動は、同一年次の連作年数を異にする圃場における調査でも認め

られ (図V-10) (写真3), 連作年数の経過に伴って認められた傾向とほぼ一致し, 連作3~6年目をピークに根腐病の衰退現象が認められた。

2) インゲンマメの連作年数を異にする圃場における土壌理化学性

連作年数を異にする圃場の土壌理化学性は, いずれの分析項目でも連作年数間に差は認められなかった (表V-6)。



図V-10 連作年数の異なる圃場におけるインゲン根腐病の発生*

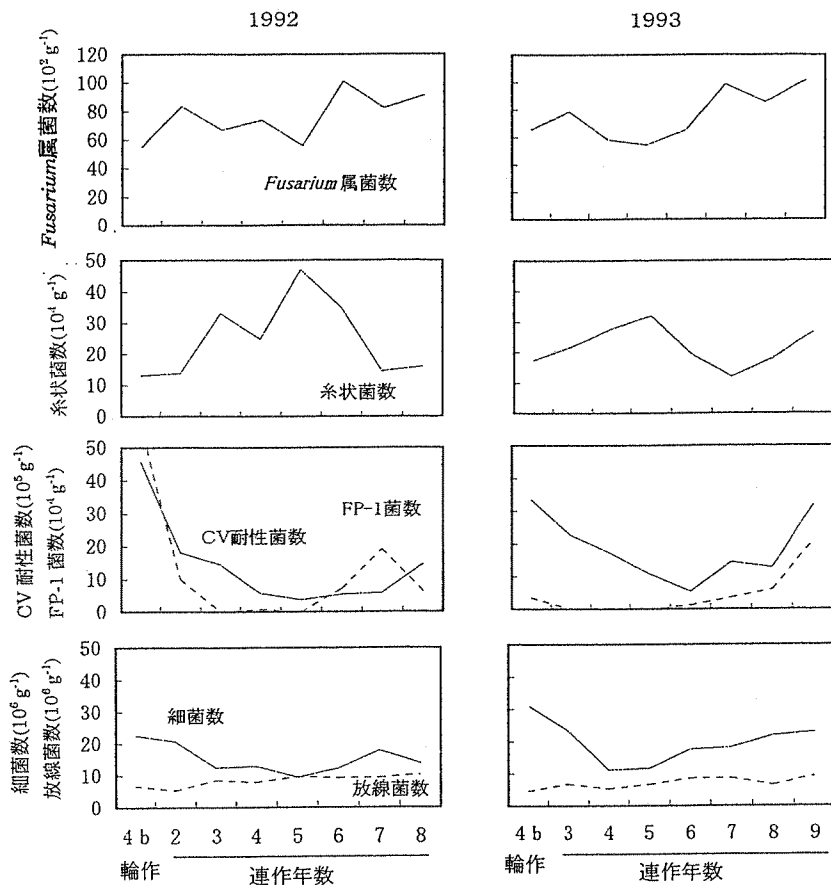
*調査年次の7月中旬調査

表V-6 連作年数を異にするインゲンマメ作付前土壌の理化学性*

処理区 土壌	pH	T-C %	T-N %	C/N	熱水抽出N (mg 100g ⁻¹)	培養無機N (mg 100g ⁻¹)	トルオーグP ₂ O ₅ (mg 100g ⁻¹)	交換性K ₂ O (mg 100g ⁻¹)
4年輪作 4b(B)	6.2	2.1	0.21	9.8	3.4	1.7	4.1	30.3
連作 2年目	6.1	2.1	0.21	10.3	3.3	-	5.5	23.1
3	5.9	1.8	0.19	9.6	3.3	0.5	2.6	17.9
4	5.8	1.8	0.19	9.5	3.9	0.9	5.9	18.4
5	5.8	2.2	0.16	13.6	3.8	0.7	5.1	17.4
6	6.3	2.2	0.25	8.7	3.7	0.7	3.9	21.4
7	6.5	2.0	0.21	9.5	3.8	1.0	2.1	19.3
8	6.2	1.9	0.21	8.9	3.3	0.7	3.2	20.0
9	6.2	2.0	0.21	9.6	3.2	0.9	4.1	20.9

*1993年調査

-は分析値なし



図V-11 連作年数を異にするインゲンマメ作付前土壌における土壌微生物相の変動

表V-7 Fs菌株に対し拮抗性を示した根圏細菌相とその拮抗能

試験区 (分離場所)	細菌	CV耐性菌	FP-1菌	FP-2菌
4年輪作	9.1(1.0 a)	35.3(3.1 a)	95.5(3.1 bc)	100.0(7.1 b)
3年輪作	—	—	84.6(3.5 bc)	100.0(6.6ab)
交互作	—	—	75.0(2.9 b)	100.0(5.0 a)
連作4,5年目	12.5(1.3 a)	40.0(4.2 a)	76.0(1.8 a)	—
連作9,10年目	13.5(2.8 b)	37.3(3.3 a)	96.0(3.0 b)	100.0(5.3 a)
計 拮抗菌株率(%) (拮抗株/分離株)	11.7 (19/163)	38.0 (57/150)	86.0 (123/143)	100.0 (45/45)

1)数値は左から拮抗菌株率, () 拮抗性を示した菌株の平均の阻止距離。異なる文字間で有意差(5%)あり。

2)ーは分離せず

3)FP-1、FP-2はそれぞれP-1、P-2培地で分離される蛍光性*Pseudomonas*属菌

4)4年輪作: 4a, 4b 3年輪作: 3a, 3b 交互作: 2(B), 2(P)より分離

3) インゲン連作年数の経過に伴う土壤微生物相の推移

1992, 93年の2か年について検討した(図V-11)。まず1992年をみると, 連作を続けるにしたがい, 細菌数がやや減少し, 連作6年目以降やや増加するようであったが, その変動はあまり大きくなかった。放線菌数は連作してもあまり変わらなかった。CV耐性菌数および蛍光性*Pseudomonas*属菌数(FP-1菌数)は4年輪作で高く, 連作にともなって著しく減少し, 6, 7年目以降にまた増加した。一方, 糸状菌数は連作を続けるにしたがい, 5, 6年目に最も高くなり, その後減少した。*Fusarium*属菌数は, 変動は大きいが連作にともなって増加する傾向を示した。1993年についても細菌数, 放線菌数, CV耐性菌数は, 1992年とほぼ同様の傾向を示し, FP-1菌数は4年輪作下の菌数も少ないが, 連作3~5年目までは, この菌数レベルでは希釈平板法で検出されず, 6年目以降増加した。これらの結果から, 糸状菌相と根腐病の発生変動はほぼ一致しているが, 各種の細菌相は, 根腐病の発生の多いときに少なく, 少ないときに増加するという傾向を示していた。

4) インゲン根腐病菌に対して拮抗能を示した細菌相

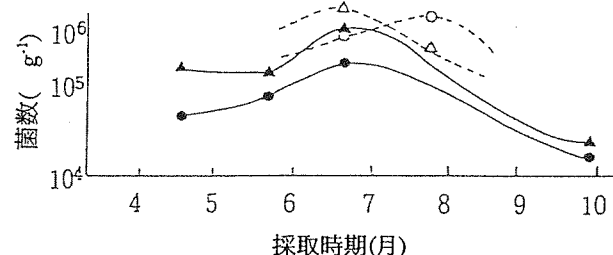
前項の結果から, 根腐病の発生推移とは逆の推移を示した細菌相について病原菌に対する抗菌性を対峙培養で検討した(表V-7)。この結果, 一般細菌は4者のなかでは全般に拮抗菌株率が低いが, 4年輪作に比べ, 連作9, 10年目の分離菌で抗菌性が高まった。CV耐性菌は細菌より高い拮抗菌株率を示すが, 輪作年限間に抗菌性の差は認められなかった。FP-1菌は蛍光性*Pse-*

*udomonas*属菌のうち*P.fluorescens*と*P.putida*の両者を示すものとされており, 本菌は全般にかなり高い抗菌性を示し, 拮抗菌株率は交互作, 連作4, 5年目分離で低く, 抗菌性もその年次に低下した。FP-2菌株は*P.putida*を示すものとされており, この培地による分離株数は少ないが, すべてが高い抗菌性を示した。

5) 蛍光性*Pseudomonas*属菌のインゲンマメ栽培土壌および根圏における変動

抗菌性を示すことがわかった土壌の蛍光性*Pseudomonas*属菌数は(図V-12), 作付前には4年輪作に比べ連作で高く, それ以降も収穫後までやや高く推移した。一方, 根圏では, 6月中旬には連作区で高く, 4年輪作では7月下旬にやや遅れて高まった。

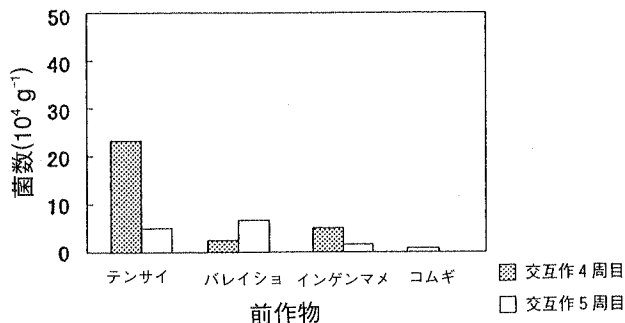
6) 前作物を異にするインゲンマメ作付前土壌の蛍光性*Pseudomonas*属菌数



図V-12 インゲンマメ栽培土壌および根圏における蛍光性*Pseudomonas*属菌の変動

● 4年輪作土壌 ○ 4年輪作根圏
▲ 連作7年目土壌 △ 連作7年目根圏

交互作区におけるインゲンマメ作付前土壌の蛍光性 *Pseudomonas* 属菌数はテンサイ跡およびバレイショ跡で高く、インゲンマメ跡（連作）は根腐病の衰退性が認められている年次ではあるが、これらの前作物（交互作）よりは小さく、コムギ跡はほとんど検出できなかった（図V-13）。



図V-13 前作物を異にする交互作インゲンマメ作付前栽培土壌の蛍光性 *Pseudomonas* 属菌数

第4節 インゲン根腐病の土壌間差異とその土壌微生物的要因

これまで、淡色黒ボク土におけるインゲン根腐病の発生を土壌微生物特性との相互関係で検討してきた。しかし土壌病害の発生程度には土壌間差のあることが認められており、インゲン根腐病についても、第Ⅲ章に述べた土壌の種類を異にした連作試験の中で、相対的に乾性型の淡色黒ボク土、褐色低地土で当初から連作による減収程度が大きく、インゲン根腐病はこれらの土壌で多発生するのに対し、多湿黒ボク土、灰色台地土では連作3年目まではほとんど発生しないなど、土壌間差の存在が確認された。このことから、インゲン根腐病の発生におよぼす土壌間差とその要因について、土壌微生物性とその変動に関与する土壌理化学性の両面から検討した。

1. 実験方法

1) 土壌理化学性および微生物性が根腐病の発生におよぼす影響

インゲン根腐病発生の土壌間差と土壌微生物の影響を把握する目的で、枠圃場連輪作試験の淡色黒ボク土、多湿黒ボク土、褐色低地土、灰色台地土における連作2、3年目の6月下旬～7月上旬の根褐変指数調査値と室内における各供試土壌の滅菌土を用いた接種試験の根褐変指数を対比させた。接種試験方法は以下の通りである。100ml容ステンレス採土管を2個連結、200ml容とし、土壌物理性を変えないよう各連作土壌を春耕起前の枠土壌

より採土した。オートクレーブで121℃ 2時間滅菌し放冷後、Fs菌を約10⁴g⁻¹になるよう接種し、表面殺菌したインゲンマメ種子を1缶あたり2粒播種した。播種2日後に解体し根褐変指数を調査した。

2) インゲンマメ連作区における土壌糸状菌相の土壌間比較

連作3年目（1988年）のインゲンマメ作付前土層深2～10cmの土壌糸状菌相を調査した。

3) 供試土壌の理化学性および連作に伴う土壌微生物活性の変動

枠連輪作試験圃場の一般土壌理化学性の差異を調査した。土壌の採取部位は層位2～10cmである。さらに連作に伴う土壌微生物活性（土壌呼吸量）の変化を検討した。

4) 各種土壌における水分条件と土壌微生物相の関係

枠圃場4年輪作区のインゲンマメ収穫後に上記4土壌の層位2～15cmの部位より、100ml容採土管で土壌を採取し、pF1.5, 2.7, 4.2の土壌水分になるよう、殺菌水を添加または風乾する処理を行って調整し、10日間、30℃で培養後、細菌、C V耐性菌、*Fusarium*属菌数を測定した。

5) 灰色台地土における土壌pHが根腐病におよぼす影響

根腐病に対する理化学性の影響が大きい灰色台地土における本病発生要因の解析の一つとして、pHを6.0前後に矯正して接種試験を行った。150ml容ガラスビンに180gの土壌を充填し、炭カルで淡色黒ボク土以外の各土壌pHを調整し、滅菌後、Fs菌を10⁴g⁻¹になるよう接種した。この処理ビンに1ビンあたり2粒のインゲンマメ種子を播種し、播種15日目の根褐変指数を調査した。

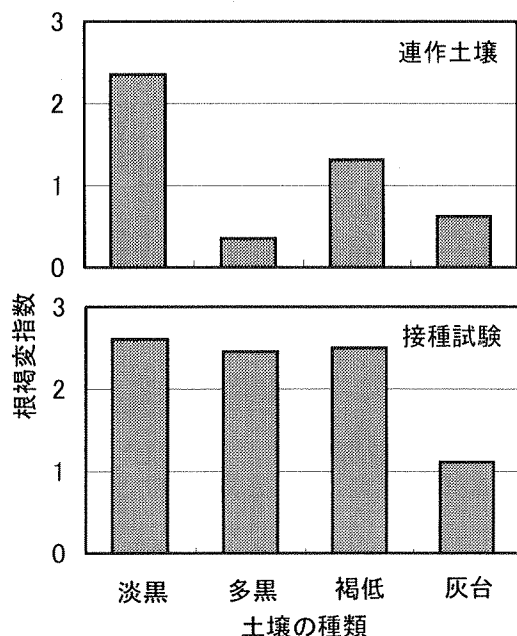
6) 灰色台地土における土性の粗粒化が根腐病におよぼす影響

灰色台地土における根腐病発生要因の解析として土性の検討を行った。灰色台地土と、よく洗浄しオートクレーブ殺菌した砂とを100:0, 80:20, 50:50, 20:80で混合し、それぞれ土性SiC, CL, L, SLに変更して、炭カルでpHを6.0に調整し、100mlの採土管2個を連結した200ml容の容器に充填した。滅菌後、原土とほぼ同一になるよう殺菌水で水分補正し、病原菌を前項実験5)と同様に接種して1容器あたり2粒のインゲンマメ種子を播種し、播種15日目の根褐変指数を調査した。

2. 実験結果

1) 土壤理化学性および微生物性が根腐病の発生におよぼす影響

前述したように連作年数の経過にともない淡色黒ボク土、褐色低地土で発病が多くなるが多湿黒ボク土、灰色台地土では少なかった。また滅菌土壤に対する病原菌の



図V-14 インゲンマメ連作にともなう根腐病の土壤間比較
ならびに殺菌土壤における病原菌接種試験の対比

上段：連作2～3年目土壤の根褐変指数平均値

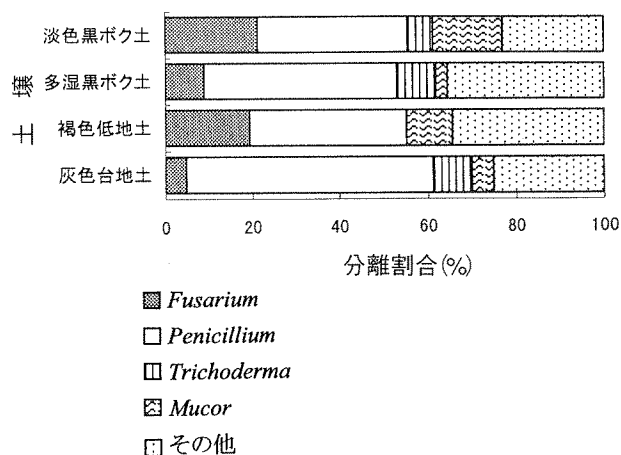
下段：採土管充填土壤における接種試験

淡黒：淡色黒ボク土 多黒：多湿黒ボク土 褐低：褐色低地土 灰台：灰色台地土

接種試験では(図V-14)、淡色黒ボク土、褐色低地土、多湿黒ボク土では激しく発病するが、灰色台地土ではあまり発病せず、病原菌に対する土壤固有の理化学性の影響と、抑止性に関する土壤微生物相の影響が土壤間で異なることが示唆され、前3土壤では土壤微生物性の影響が、灰色台地土では土壤微生物性よりも理化学性の影響が大きいことが推測された。

2) インゲンマメ連作区における土壤糸状菌相の土壤間比較

根腐病の激しい淡色黒ボク土、褐色低地土では、糸状菌相に占める*Fusarium*属菌の割合が高く、多湿黒ボク土、灰色台地土では低かった(図V-15)。



図V-15 インゲンマメ連作区における土壤糸状菌相の土壤間比較

表V-8 供試4土壤の土壤理化学性比較

土 壤	pH	交換酸度 (Y ₁)	T-C (g 100g ⁻¹)	T-N (g 100g ⁻¹)	C/N (%)	熱抽N (mg 100g ⁻¹)	トルオーグP (mg 100g ⁻¹)	交換性K ₂ O (mg 100g ⁻¹)
淡色黒ボク土	6.0	0.4	2.2	0.24	9.3	5.6	15.2	29.8
多湿黒ボク土	5.7	2.2	4.4	0.44	10.1	13.8	31.9	15.0
褐色低地土	5.8	1.1	2.3	0.19	12.4	7.0	47.0	31.5
灰色台地土	5.2	11.2	5.4	0.36	14.9	9.0	41.2	43.6

	現地三相分布 (%)			容積重 (g 100ml ⁻¹)	土性	水分量(ml 100ml ⁻¹)	
	固相	液相	気相			pF0-1.5	1.5-2.7
淡色黒ボク土	30.6	29.7	39.7	73.6	SL	28.4	19.6
多湿黒ボク土	24.9	31.9	43.2	68.1	SL	28.3	17.9
褐色低地土	38.7	26.5	34.8	82.6	SL	24.4	17.8
灰色台地土	28.6	31.5	39.9	69.9	SiC	28.4	12.7

注) 土壤採取位置は表土2～10cm

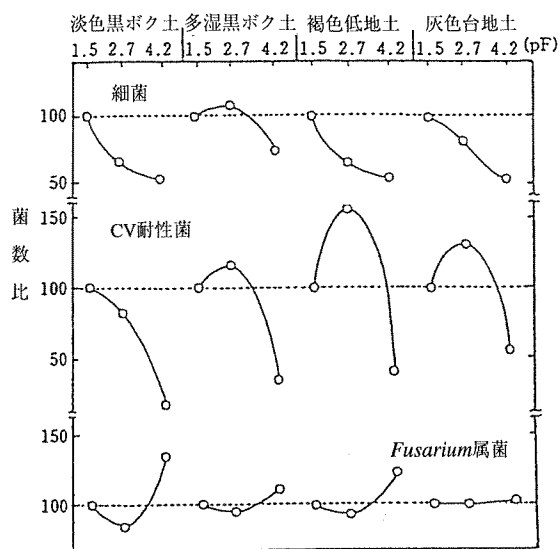
3) 供試土壌の理化学性および連作に伴う土壌微生物活性の変動

根腐病の激しい土壌のうち、淡色黒ボク土ではpHが中庸で、交換酸度は低く、腐植が少なく、熱抽Nおよび有効態リン酸が少ない(表V-8)。土性はSLでやや粗く、保水性は比較的高かった。褐色低地土においてもpHは中庸であるが、同様に腐植が少なく、熱抽N、リン酸、カリは中庸であり、土性はSLでやや粗かった。

一方、発病の少ない土壌を見ると、多湿黒ボク土では、腐植が多く、熱抽N量が高く、カリが少なかった。また固相率が小さく、容積重が小さいなどの傾向があった。灰色台地土では、pHが低く、交換酸度が4土壌の中では極端に高く、交換性のアルミニウムを多量に含有した土壌であると考えられ、腐植が多く、熱抽N量は中庸で、カリが多かった。また固相率が小さく、容積重も小さく、土性はSiCと最も細粒質であった。次に、各土壌におけるインゲンマメ連作に伴う土壌微生物活性の変化を土壌呼吸量の変化でみる(表V-9)。4年輪作区における土壌呼吸量は多湿黒ボク土>灰色台地土>褐色低地土>淡色黒ボク土であった。連作に伴い土壌呼吸量はいずれの土壌でも減少していた。

表V-9 枠土壌連作試験インゲンマメ栽培土壌における土壌呼吸量の連・輪作間比較(試験4年目)

土壌	土壌呼吸量(mgC 100g ⁻¹)		
	輪作	連作	連/輪比*
淡色黒ボク土	27.4	25.6	94
多湿黒ボク土	43.4	37.3	86
褐色低地土	30.7	25.9	84
灰色台地土	37.7	27.2	72



図V-16 各種土壌における水分条件と微生物相の関係*
*pF1.5における菌数を100とした。

4) 各種土壌における水分条件と土壌微生物相の関係

pF1.5の水分条件で培養した処理区における各々の菌数を100として表示した(図V-16)。土壌の乾燥にともない細菌数はいずれの土壌でも減少するがその程度は淡色黒ボク土、褐色低地土で大きかった。CV耐性菌数は、淡色黒ボク土を除き、土壌水分の中庸なpF2.7で増加するがpF4.2の乾燥条件では減少した。このことからCV耐性菌は細菌数よりも土壌水分により変動しやすいことが窺われた。一方、糸状菌数は*Fusarium*属菌数の傾向と同様なので省略するが、*Fusarium*属菌数は土壌の乾燥により淡色黒ボク土、多湿黒ボク土で増加した。

5) 灰色台地土における土壌pHが根腐病におよぼす影響

pHを6.0前後に調整した場合でも、多湿黒ボク土、褐色低地土ではpHを未調整のまま行った接種試験と同程度の根褐変指数であった(表V-10)。しかし、原土でpHが5.2と低かった灰色台地土では、pH6.2まで高めたことにより、4土壌の中で最も指数が高まった。なお、炭カルの施用により、灰色台地土のY₁は低下した。このことから灰色台地土においてインゲン根腐病の発生が少ない要因の一つはpHであることが示唆された。

表V-10 pH調整後の滅菌土壌における病原菌の接種がインゲン根腐病におよぼす影響¹⁾

土壌	根褐変指数	調査時pH ²⁾	同Y ₁ ²⁾
淡色黒ボク土	1.92	6.41	0.8
多湿黒ボク土	2.08	6.25	1.1
褐色低地土	1.88	6.48	0.8
灰色台地土	2.63	6.16	1.3

1)pH6.0を目標に調整した。

2)根褐変指数調整時のpHおよびY₁。

6) 灰色台地土における土性の粗粒化が根腐病におよぼす影響

表V-11 灰色台地土に対する砂の添加が根腐病におよぼす影響

混合割合(%)		土性	容積重 (g 100ml ⁻¹)	根褐変指数
灰色台地土	砂			
100 (原土)	0	SiC	68.9	1.58
80	20	CL	82.5	2.33
50	50	L	103.2	2.58
20	80	SL	131.3	3.00

土性SiCの原土に対し、砂の割合を高め土性をSLまで粗くすると、根腐病は増加する傾向を示した(表V-11)。三相分布および容積重などからの詳細な検討は行っていないが、淡色黒ボク土、褐色低地土での発病程度と考え合わせると、土性が粗い土壌では発病が増加することが推測された。

第5節 土壌化学性改善によるインゲン根腐病の制御

これまでに、インゲン根腐病と土壌pHおよび窒素施肥の関連が検討されている^{20, 63, 76, 144)}。そこで本節では、淡色黒ボク土における根腐病軽減のための土壌化学性からみた肥培管理法を検討する。

1. 実験方法

1) 土壌pHが根腐病におよぼす影響

インゲンマメ連作2年目(1986年)の枠圃場において、硫酸含有pH低下資材および炭カルを全層に施用し、表層0~15cmの土壌pHを4.8, 5.8(原土), 6.2, 6.8として、根腐病の発生程度と生育を調査した(実験a)。処理区は1区1㎡, 2反復とし、化成S644($N-P_2O_5-K_2O=4-16-9.3g\cdot m^{-2}$)を全面に共通施用した。また、インゲンマメ連作3年目圃場(1988年)においては、上記の資材を条に施用し、株間表層0~10cm層位の土壌pHを5.6, 5.9(原土), 6.3として根腐病の発生程度と生育を調査した(実験b)。処理区は1区9.6㎡, 2反復とし、化成S644($N-P_2O_5-K_2O=4-16-9.3g\cdot m^{-2}$)を条に共通施用した。

2) 三要素施肥が根腐病におよぼす影響

インゲンマメ連作3年目圃場(1987年)の土壌を1/5000aポットに充填し、無肥料(-F), 無窒素(-N), 無リン酸(-P), 無カリ(-K)およびNPK, NPK各倍量区(NPK倍量)を設定した。施肥は硫安, 過石, 硫加を用い, NPK区には $N-P_2O_5-K_2O=0.15-0.6-0.2g/pot$ を施用した。インゲンマメを3粒/pot播種し、播種後50日目の根褐変指数, 生育を調査した。

3) 各種形態窒素の条施用が根腐病におよぼす影響

連輪作圃場に隣接して設けた、インゲンマメ連作3年目(1988年)の圃場において、各種形態の異なる窒素を条に施用混和し、根腐病におよぼす影響を調査した。供試肥料は、チリ硝石, 石灰窒素, CDU, 尿素とし、施用量は4, 8kgN $10a^{-1}$ の2段階とした。標

準(対照)にはりん安系の化成S644を用いた。リン酸($16kgP_2O_5\ 10a^{-1}$), カリ($9.3kgK_2O\ 10a^{-1}$)は共通施肥した。インゲンマメを5月25日に播種し、根褐変指数, 収量を調査した。1区9.6㎡で、2反復とした。

4) 各種形態窒素の添加が土壌微生物活性および微生物相におよぼす影響

連輪作圃場の生土壌30gを150ml容ガラスビンに充填し、各種形態の窒素として、乳鉢ですりつぶした硫安, チリ硝石, 石灰窒素, CDUおよび尿素を、それぞれNとして30mg添加し、対照を無処理とした。これを30℃で21日間培養し、土壌呼吸量および培養終了後の土壌微生物数を調査した。

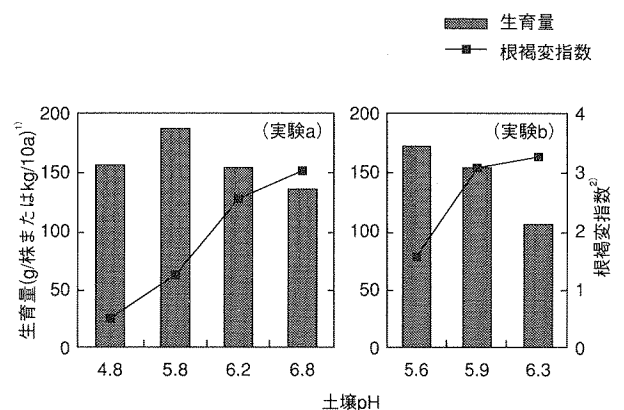
5) リン酸, カリの施用が根腐病におよぼす影響

連輪作圃場に隣接して設けた、インゲンマメ連作3年目(1988年)圃場において、リン酸, カリの無施用, 標準, 増肥の処理区を設置し、根腐病, 収量におよぼす影響を調査した。施肥は、過石, 硫加を用い, 増肥区はそれぞれ $50kgP_2O_5\ 10a^{-1}$, $30kgK_2O\ 10a^{-1}$ とした。1区9.6㎡, 2反復とした。

2. 実験結果

1) 土壌pHが根腐病におよぼす影響

pH調整資材を全層に処理して行った実験aにおいては、pH4.8区ではpH5.8(対照区, 原土)に比べ根褐変指数は低下し、逆にpHを高めると指数は高まった。生育量はpH5.8区で最も多かった(図V-17)。また、資材を条に施用して行った実験bにおいても、pHを原土の5.9より低下させたpH5.6区で指数は低下し、生育

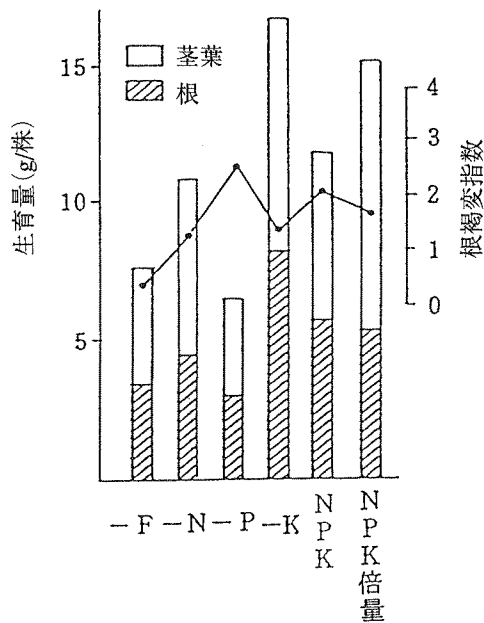


図V-17 インゲンマメ連作土壌における土壌pHが生育, 根腐病におよぼす影響

- 1) 実験a : pH全層処理, 生育量は8月1日の茎葉+根重g/株
 実験b : pH条処理, 生育量は収穫期総重kg $10a^{-1}$
 2) 根褐変指数: 実験a 8月1日, 実験b 6月30日

量は増加した。なお、実験bにおいては株間土壌0～10cm層位のpHを測定したが、資材が施用された種子下部の局所ではもう少し低かったと推測される。これらの結果から、pHを5.5程度に抑えると根腐病は軽減されたが、5.0以下では生育が抑制される傾向にあり、無制限なpH低下は望ましくないと考えられた。

2) 三要素施肥が根腐病におよぼす影響



図V-18 インゲンマメ連作土壌における三要素施肥が生育、根腐病におよぼす影響*
*播種後50日

インゲンマメを連作したポットで三要素試験を行った結果（図V-18、表V-12）、根褐変指数は、 $-P > NPK > -K \geq -N > -F$ であった。根褐変指数はリン酸を欠除すると最も高まり、カリを欠除すると低下する傾向が認められ、生育量もそれを反映して $-P$ で低く、 $-K$ 区で高かった。また窒素を欠除すると根褐変指数はわずかに低下するが、生育量も減少した。このことから、根腐病の発生病程度に対してこれらの施肥養分が影響していることが示唆され、以降の実験により圃場レベルでの効果確認をする。

3) 各種形態窒素の作条施用が根腐病におよぼす影響

インゲンマメの生育に対して、窒素が最も大きく影響するものと考え、根褐変指数および生育におよぼす

効果を窒素源の種類、施用量を変えて検討した（図V-19）。

リン安系化成肥料を用いた標準区と比べると、チリ硝石区は4、8 kg N施用区とも根褐変指数は初期生育時点からほぼ同等に激しく、収量は標準区と同等かやや劣った。石灰窒素区では根褐変が軽減され、4 kg N区では収量は増加した。CDU区においても根褐変は4 kg N、8 kg N区とも軽減され、増収した。尿素区でも根褐変が軽減され、8 kg N区の収量は標準区を上回った。

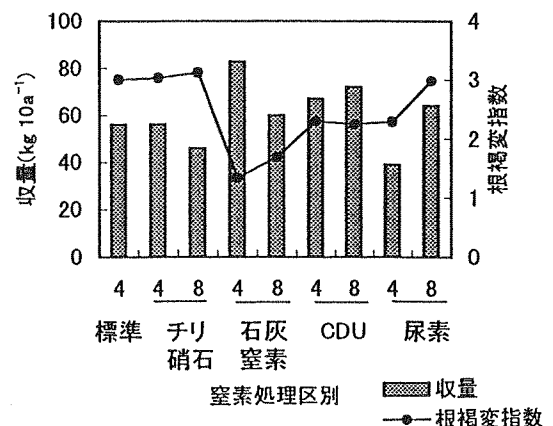
4) 各種形態窒素の添加が土壌微生物活性および微生物相におよぼす影響

各種形態窒素の添加により土壌微生物活性および微生物相は変動した（図V-20、21）。

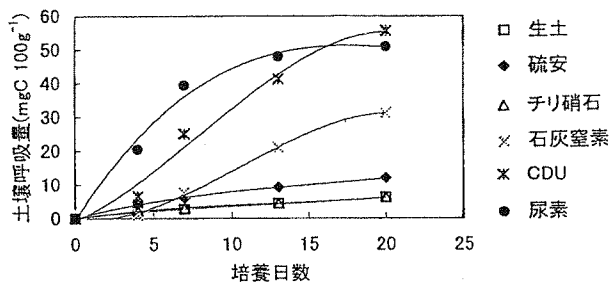
すなわち、尿素、CDU、石灰窒素など炭素源を含む窒素肥料で土壌呼吸量が増加した。硫酸およびチリ硝石の添加では、細菌数が減少し、B/F値も低下するようであり、*Fusarium*属菌数も無処理区と変わらなかった。石灰窒素の添加で細菌数およびB/F値は大きく増加し、*Fusarium*属菌数もやや減少した。CDU区では添加後

表V-12 三要素試験における土壌分析値

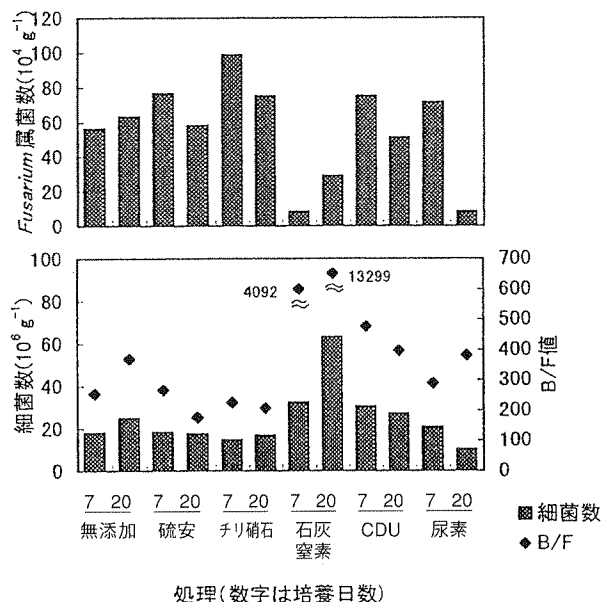
処理	pH	トルオーグ		
		無機態N (mg 100g ⁻¹)	P ₂ O ₅ (mg 100g ⁻¹)	交換性 K ₂ O (mg 100g ⁻¹)
-F	6.3	0.1	1.5	20.4
-N	6.0	0.4	36.4	45.2
-P	6.2	25.8	1.5	45.2
-K	6.0	25.6	36.4	20.4
NPK	6.0	26.7	42.3	58.3
NPK 倍量	5.9	53.2	90.4	102.0



図V-19 各種形態窒素の作条施用がインゲン根腐病および収量におよぼす影響
処理区別の数字は窒素施肥量 (kg 10a⁻¹)
石灰窒素区は6月6日播種、その他は5月31日播種



図V-20 各種形態窒素の添加が土壌呼吸量におよぼす影響



図V-21 各種形態窒素の添加が土壌微生物相におよぼす影響

1週間では細菌数，B/F値ともに増加した。尿素区においても活性が高まり，*Fusarium*属菌数も減少した。

培養終了時点での土壌pHは（表V-13），硫安，チリ硝石およびCDUの添加では無処理区よりやや低下し，石灰窒素，尿素添加区では8前後と高まった。土壌ECは窒素添加処理全区で高まるが，硫安，チリ硝石区での増加程度が大きかった。

5) リン酸，カリ等の施用が根腐病におよぼす影響

リン酸増肥区，無カリ区で生育初期の根褐変指数が低下し，生育は良好であった（表V-14）。しかし，収量はリン酸増肥で増加したものの無カリ区では増収しな

表V-13 各種形態窒素の添加培養実験収量時の土壌pH，EC

処理区	pH	EC ($\mu\text{S cm}^{-1}$)
無処理	6.0	40
硫安	5.3	1140
チリ硝石	5.6	1260
石灰窒素	8.1	340
CDU	4.6	590
尿素	8.1	300

*土壌30gに30mgN添加

った。本圃場の交換性カリ含量が $30\text{mg } 100\text{g}^{-1}$ 程度あることから，根腐病の軽減要因とならなかったことが考えられる。一方，無リン酸区，カリ増肥区は褐変が激しく，大きく減収し，三要素試験の結果が確認された。以上の土壌有効態リン酸，カリと根腐病の関係を整理したところ（図V-22，23），根褐変指数は土壌の有効態リン酸を $20\text{mg } 100\text{g}^{-1}$ 以上に高めるとやや減少し，バラツキのある点はカリの多い土壌であった。一方，交換性カリについては，根腐病とカリ含量との間に正の有意な関係が認められ，とくにリン酸含量が多かった土壌を除くと， $30\text{mg } 100\text{g}^{-1}$ 以上に高まった場合に根腐病がやや増加する傾向を示した。

第6節 考 察

1) 輪作体系がインゲン根腐病におよぼす土壌微生物的 要因

本研究では，連作による収量低下が最も著しかったインゲンマメについて，その直接の減収要因と考えられたインゲン根腐病の発生程度と連，輪作の関係を調査した結果，前作物および連作の継続により根腐病の発生程度が異なることが示唆された。これについて，前章で述べた主要作物残渣・跡地土壌の土壌微生物的評価を応用することとし，病害の発生程度に土壌微生物がどの程度関与するのかを考察する。

まず，インゲンマメの根圏では4年輪作下であっても，6月下旬の根では，*Fusarium*属菌が糸状菌に占める割合が高く，インゲンマメの作付自体が，*Fusarium*属菌の繁殖に好適な条件を与えているものと考えられる。これに関しては，インゲンマメの種子および根から分泌される糖とアミノ酸が根腐病菌の厚膜胞子の発芽を促進することが認められている¹⁴⁶⁾。

根腐病は，輪作年限が短くなるに従い増加した。また，前作物による影響は4年輪作区間では根褐変指数の相違は認められないものの，交互作区では，2周目まで根褐

変指数の高い順にインゲンマメ跡（連作）＞コムギ跡＞バレイショ跡≧テンサイ跡の順であり、その後、交互作の継続によりコムギ跡地で最も改善された。このことは、より長期の輪作年限が根腐病の抑止に必要であることを示すとともに、前作物（交互作物）による抑制効果も大きいことを示している。前章の結果から前作物および作付組み合わせにより土壌微生物の活性および微生物相が低下することが示されており、これがインゲン根腐病の発生に影響した可能性もある。このことを確認するために、土壌呼吸量、バイオマス、酵素活性など異なる土壌で根腐病菌の接種試験を行ったところ、これらの数値の高い土壌で根褐変指数が軽減された。これは *F. oxysporum* による萎凋病においてバイオマスと拮菌作用の間に正の相関を認めたとする Isakeit らの見解⁶⁵⁾ と一致する。

なお、この実験を行うために一旦殺菌し、再度土壌微生物相を復活させた土壌では、微生物活性が小さい場合に細菌数が減少し、*Fusarium* 属菌数が増加するなど、滅菌前の傾向が再現された。この現象に関しては、Garret²¹⁾ が述べた、土壌には特有の微生物相が存在する必然性からも理解される。なお、一般に連作による減収要因を解明する際には、滅菌した土壌では作物生育が回復することを示すことにより、土壌微生物が減収に関与していること推定する場合が多い。本研究では、土壌微生物全体の活性低下が土壌病害の発病程度に二次的に関与していることをより具体的に説明できたと考える。

前作物間の比較をインゲンマメの連作区を含む交互作区におけるインゲンマメ作付前の土壌微生物相でみると、交互作 1、2 周目では糸状菌数には大きな差がないが、*Fusarium* 菌数はインゲンマメ跡＞コムギ跡＞バレイショ跡＞テンサイ跡の順に高く、細菌数はテンサイ跡＞バレイショ跡≧インゲンマメ跡＞コムギ跡であっ

た。このような作付前の土壌微生物相が後作インゲンマメの根圏にも影響をおよぼし、根圏での *Fusarium* 属菌数がインゲンマメ跡、コムギ跡で高まったものと推察される。しかし、交互作の継続により、*Fusarium* 属菌数はインゲンマメ跡＞バレイショ跡＞テンサイ跡＞コムギ

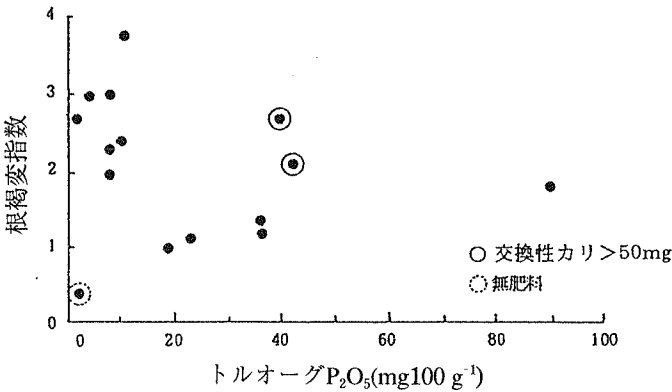


図 V-22 土壌有効態リン酸含量とインゲン根腐病の関係*
*淡色黒ボク土、インゲンマメ連作土壌

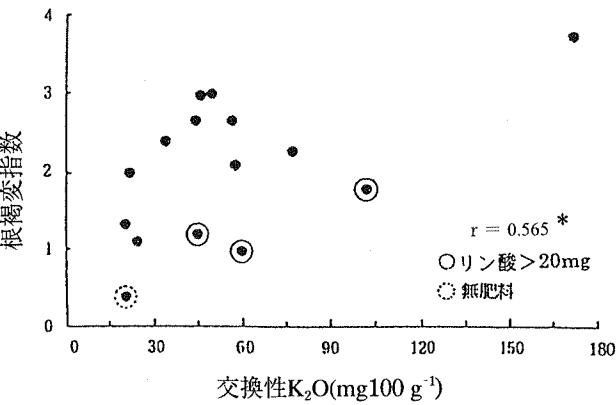


図 V-23 土壌交換性カリ含量とインゲン根腐病の関係*
*淡色黒ボク土、インゲンマメ連作土壌

表 V-14 リン酸およびカリ施肥（作条施用）がインゲン根腐病および収量におよぼす影響

処理区	土壌分析値*		根褐変指数 6月30日	収量 (kg 10a ⁻¹)	同左比
	トルオーグ	交換性			
	P ₂ O ₅ (mg 100g ⁻¹)	K ₂ O (mg 100g ⁻¹)			
標準(化成)	8	46	3.00	56	100
リン酸無施用	4	47	2.97	24	43
リン酸増肥(+50kgP ₂ O ₅)	40	57	2.58	71	127
カリ無施用	10	34	2.42	47	84
カリ増肥(+20kgP ₂ O ₅)	11	173	3.75	41	73

跡の順に高まった。一方、作付前の土壤微生物活性についてみると、交互作2周目(1988年)の時点では、テンサイ跡>バレイショ跡>コムギ跡>インゲンマメ跡であったが、その後交互作の継続により、テンサイ跡地、コムギ跡地は土壤呼吸量、バイオマスが増加傾向にあり、バレイショ、インゲンマメ跡地は減少傾向にあった。したがって土壤微生物活性の大小と微生物相の変化が根腐病に関与することがここでも示された。しかし、連作土壌での微生物活性を高める目的で施用した完熟堆きゅう肥の単用ではバイオマスに対する負荷が小さく効果が認められなかった。このことは土壤病害に対する有機物施用効果を論ずる際に考慮すべき重要な事項である。

前作物が後作の根圏微生物相におよぼす影響を解析するに当たっては、まず圃場にすき込まれる作物残渣を問題にしなければならないが、残渣上の微生物相は、テンサイでは細菌数が非常に多く、糸状菌、*Fusarium*属菌が少なく、インゲンマメでは糸状菌や*Fusarium*属菌が非常に多いことが判明した。殺菌土を用いた残渣物の培養試験では根腐病菌がインゲンマメ残渣だけでなく、テンサイ残渣を最もよく利用することが示された。しかし、未殺菌土壌では、細菌など土壤微生物の影響を受け、テンサイ残渣物では*Fusarium*属菌数が減少した。なお、B/F値はテンサイ>バレイショ>インゲンマメ>コムギであった。前章では、各作物の残渣物の質を示しているが、この原因について、易分解性成分および難分解性成分の多少で微生物活性および*Fusarium*属菌数が変動すると考え、基質試薬を用いて培養実験を行ったところアミノ酸類および単糖類で微生物活性が高まり、アミノ酸類では*Fusarium*属菌もやや増加するもののB/FおよびB/Fusが高まった。一方、単糖類ではB/F値は低下し、B/Fusもそれほど高まらなかった。また難分解性であるセルロースでは微生物活性そのものが低く、B/FおよびB/Fusは高まらなかった。Schloth¹⁴⁶⁾は、本研究で供試したものと同一2種のアミノ酸類とグルコースは土壌中で同程度の厚膜胞子発芽率を有するとしており、同程度の菌数の増加を認めた本研究の結果と傾向が一致するが、これらの栄養源の種類によって細菌など他の土壤微生物におよぼす影響が大きく異なることが考えられる。B/FやB/Fus値を利用して、*Fusarium*属菌に対する土壤微生物による緩衝力的評価をおこなうことについては、同様の見解^{98, 102, 120, 161)}が得られている。

これらの結果から、前作物が異なると、跡地土壌の微生物活性、微生物相はその残渣特性に応じて変化し、*Fusarium*属菌のような腐生性を持つ病原糸状菌¹⁷⁹⁾に

影響を及ぼし、後作インゲンマメの生育、収量にも影響を与えるのであろう。この理由として、残渣上において耐久体である厚膜胞子化する際に、土壤微生物との養分競合¹²⁶⁾が起きることが推察される。このことは細菌の存在で微生物基質の競合が起こり、*F. solani*の菌数が減少した実験からも推察することができる。Toyota^{171, 172)}も、ダイコン萎黄病菌*F. oxysporum* f. sp. *raphani* (F. o. r) の生態に関して、発病抑止土壌では、グラム陰性菌がF. o. r胞子の出芽抑制に関与していることを見だし、土壌中におけるF. o. rの菌数を低下させる土壤微生物の先住効果を述べており、これらの現象が静菌作用の一つとなっている可能性が強い。

テンサイやバレイショが前作物の場合には、その残渣物の分解過程で、細菌相が相対的に優勢になって、一般的拮抗作用が働き、糸状菌相は競合的に衰退したと考えることもできる。このことは、①C/N比が大きな有機物や、有機炭素を多く含んだ有機物の分解過程では、糸状菌が細菌に比べ相対的に優勢となるのに対し、②タンパク質が多い有機物では逆に細菌が優勢となり、さらに③*Fusarium*属菌数とほとんどのアミノ酸含量との間には負の相関があることなどの報告¹²⁰⁾からも推察できる。

インゲン根腐病においてはオオムギなどムギ類との輪作や高いC/N比の残渣物のすき込みが、根腐病を抑制することが報告されている^{92, 97, 153, 178)}。しかし本研究では、供試4作物の比較の中で、テンサイ跡やバレイショ跡においてもインゲン根腐病が軽減される効果を認めた。ただし、インゲンマメとバレイショの交互作の継続においては微生物活性の低下程度が大きく、根腐病が増加することが考えられる。またコムギ跡では、交互作およびコムギを含む短い年限の輪作の継続により、根腐病の抑制効果が高いことを認めた。したがって根腐病抑止のためには、異なる作付様式間での残渣すき込みによる微生物活性、微生物相の変化を考慮することが重要である。

微生物基質としての作物残渣は、単にC/N比の大小でそのすき込み効果の良否が判定される事例が多いが、この作物のC/N比は施肥量、土壌肥沃度、あるいはすきこまれる時期によって変動しやすいものであり、その構成成分にも差異が生じる可能性が強く、土壤微生物相の多様性やバランスを保つには、微生物のえさとなる基質の性質が重要な意味を持つ。土壤病害軽減のための有機物施用に関連して、未熟有機物の施用やC/N比の低い有機物の施用が発病を助長するといった見解があるが、未熟有機物が常にC/N比が低いわけではなく、腐

熟度の低い堆きゅう肥は一般にC/N比は高いなどの理由から、C/N比や腐熟度だけの質的差異で一律に効果の有無を論ずるのは必ずしも適切でない。C/N比の低い鶏糞や油かすでも*Fusarium*病が抑制されること¹⁷⁶⁾や、C/N比の低い青刈り作物の春施用は病害を助長するが、前年の秋施用により回避されることも認められている¹⁰²⁾。さらに、同種の病原糸状菌でも有機物、作物の種類によって軽減効果に差異が認められている¹⁰²⁾。したがって、土壌病害抑止のためには、作物、病原菌に対応した有機物の質的評価が望まれるとともに、系外から施用される有機物と同様に、残渣物のすき込み効果についても、その分解特性を十分考慮に入れる必要があると考えられる。

2) インゲン根腐病の衰退性ならびに抑止性と拮抗性微生物相の関係

本研究では、インゲンマメの連作の継続により土壌微生物活性は低下していることが明らかとなった。前述のように淡色黒ボク土における根腐病は、連作3～6年目で激化するが、5年目以降は回復傾向にある。この傾向は連作継続年数の異なる圃場試験においても確認され、インゲン根腐病にはコムギ立枯病¹²⁾などと同様に、発病の衰退性のあることが認められた。連作2～7年目圃場の土壌微生物相を調査したところ、細菌数は、連作2年目で減少し、5年目までその水準を維持するが、6年目以降は4年輪作とほぼ同等になり、根腐病の衰退傾向とほぼ一致した。細菌数の中では蛍光性*Pseudomonas*属菌数に特徴的な年数間差があった。蛍光性*Pseudomonas*属菌は*F. solani*に対する拮抗能が強く、根腐病の衰退性が高まるとともに拮抗能も増大し、根圏でも菌数は高まった。すでに蛍光性*Pseudomonas*属菌については、連作土壌における挙動⁷³⁾とその微生物的緩衝力との関連が指摘されている⁵⁸⁾。また本菌は鉄キレート物質や抗生物質を産出するため、拮抗菌としてバクテリゼーションに用いられる試みが数多く認められ^{13, 107, 159)}、さらに生理活性物質を産出し作物生育の促進等の有用な機能(PGPR)を持つこと⁹⁸⁾も報告されており、本菌の土壌中における行動は非常に興味深い。ただ、今回の実験では、拮抗能の判定は一培地における対峙培養の結果であり、今後さらに菌株数を増やし、細菌株の栄養要求性に基づく検討を行う必要がある。さらに、土壌と根圏における本菌と根腐病菌との拮抗関係を精査することが重要である。しかし少なくとも、連作を継続しバイオマス、微生物活性が低下するにも関わらず、拮抗菌数は増大し、病原菌に対する特異的拮抗作用が発現した可能性が高

い。また、交互作区における前作物を異にした場合の根腐病発病程度の違いに関しても蛍光性*Pseudomonas*属菌数に注目すると、前作物がテンサイ、バレイショの場合には比較的多く認められ、本菌による抑止性の発現が推測される。しかし、コムギ跡地土壌における根腐病の軽減効果については、交互作下で経年的に細菌数の増加が認められた場合であっても、本菌の増加程度は小さく、テンサイ、バレイショの前作と比べ本菌による抑止性の発現程度は相対的に小さいものと推察される。

土壌病害の衰退性および抑止性を考察するにあたり、蛍光性*Pseudomonas*属菌を始めとする拮抗性土壌微生物の動向を解析することが、輪作体系下の土壌管理、あるいは連作耐性⁸⁴⁾の土壌環境を考えるうえで非常に重要と考える。

3) インゲン根腐病発生の土壌間差と化学性改善による制御

本項では、異なる土壌の種類とインゲン根腐病の関係を検討し、発病の土壌間差異を土壌の理化学性と微生物性の両面から考察する。次に、N施肥あるいはpHなど土壌化学性の改善による根腐病制御を目的とした肥培管理対策について述べる。

これまでインゲン根腐病の土壌間差異の要因解明にあたって、同じ*Fusarium*属菌である*F. oxysporum*について、腐植の多い、あるいは土性の細かい乾燥にくい土壌での病害の発生が少ないことが報告されており^{79, 155)}、本研究もこの要因に注目した。土壌の種類を変えて行った連作試験の結果、供試した土壌の中でインゲン根腐病の発生程度には差異が認められ、淡色黒ボク土、褐色低地土での発生が多く、多湿黒ボク土、灰色台地土で少なかった。これらの要因について土壌微生物的にいくつかの項目で検討した結果、まず灰色台地土を除く3土壌では土壌微生物が根腐病の発生に大きな影響を与えていることが認められ、淡色黒ボク土、褐色低地土においては糸状菌に占める*Fusarium*属菌の分離割合が高く、多湿黒ボク土や灰色台地土では低いことが認められた。さらに、淡色黒ボク土、褐色低地土では、土壌の乾燥により、細菌が減少しやすいのに対し、*Fusarium*属菌は増加しやすいことも認められた。発生の多かった淡色黒ボク土、褐色低地土では、*Fusarium*属菌が根圏で高まる6月中旬頃の、土壌が乾燥しやすくなる条件(10 cm程度の作土深でpF 3前後)で一般的拮抗作用が低下するのであろう。このように土壌の水分環境が拮抗作用に関与したとする報告例がある¹⁰⁹⁾。これに対し、発生が比較的少なかった多湿黒ボク土では、2土壌に比べて

土壤乾燥による細菌相への影響が小さく、加えて微生物基質量が多く、微生物活性の高いことが、根腐病発生が少なかった一要因として考えられる。

一方、微生物活性が比較的高かった灰色台地土では、殺菌土壌を使用した接種試験においても根腐病の発生が少なく、土壤理化学性の影響が大きいことが推測されるが、発生の少ない灰色台地土および多湿黒ボク土では、土壤固有のものとして腐植が多い共通点があった。駒田⁷⁸⁾は、*F. oxysporum*によるダイコン萎黄病が同じ洪積土でも腐植の少ない乾燥しやすい土壌で激しいことと、このような土壌では、厚膜胞子の形成が多く、発芽率も高いのに対し、根圏の細菌と放線菌数は少ないことを指摘している。土壌の種類を異にした場合の、土壤微生物による一般的拮抗作用と土壤理化学性の関連についてみると、本研究で供試した2火山性土壌は、4土壌の中では相対的に保水性が大きい。保水性の点だけからみれば、保水性の小さい褐色低地土および灰色台地土に比べて、乾燥条件に弱いとされる細菌数の減少程度は小さいと考えられるが、淡色黒ボク土では、腐植の多い多湿黒ボク土に比べ土壤微生物活性が低いことから、病原菌に対する拮抗能が低下したことが推測される。多湿黒ボク土の滅菌土における接種試験の結果からは、拮抗作用に対する腐植の影響は直接的には大きくないものと推測される。

土壌の保水性に関する理化学性としては、腐植だけでなく土性の影響も大きい。発生の少なかった灰色台地土の理化学的特徴として、粒径が小さく腐植が多く、pHが低いことなどが上げられる。このうち、前述した腐植を除く、pHと土性について検討した。一般的拮抗作用の小さい本土壌では、これらの理化学的性質もインゲン根腐病に影響を及ぼした可能性がある。まずpHを5.2から6.2まで高めた結果、灰色台地土における根腐病の抑止性は失活した。古屋らは、インゲン根腐病の十勝土壌（淡色黒ボク土）と北見土壌（多湿黒ボク土）における発生を比較するなかで、発生が非常に少ない北見土壌では、相対的に病原菌がきわめて少なく、これは大型分生孢子、厚膜胞子の形成とその発芽に対する阻害作用を有することに起因するとし¹⁹⁾、この要因としては病原菌に対して阻害作用を持つ土壤交換性アルミニウムの影響が示唆されている²⁰⁾。このような病原菌に対して阻害作用を持つ土壤交換性アルミニウムについては、バレイショそうか病菌に対しても認められている¹¹⁰⁾。本研究においても、土壤交換性アルミニウムの指標となる土壌Y1は灰色台地土の原土で極端に高く、これが病原菌に対して抑止性を発現させた可能性が示唆された。一方、

土性については、粗粒化するにしたいが、根腐病は増加した。本実験では、微生物基質を含まない砂で希釈し基質量が減少したにも関わらず根腐病は増加しており、粗粒化が病原菌の生育に適した条件であると考えられる。*F. oxysporum*においては土壌の粘土鉱物と病原性の関係が検討されており、1:1型鉱物の多い粗粒質土壌で病害が増加することが示唆されている¹⁵⁵⁾。本研究で供試した灰色台地土の粘土鉱物組成については未同定であるが、採取地点と近隣の灰色台地土の数値では、2:1型のAl-バーミキュライトの存在が特徴的で、他に1:1型のイライト、カオリナイトが含まれ、2:1型のモンモリロナイトは少ないことが認められている⁴⁴⁾。以上のことから、土壌の水分特性に関する粒径組成や腐植、粘土の形態およびpH、土壤交換性アルミニウムなどの理化学的諸特性も病原菌ならびに拮抗能を発現する土壤微生物の動態に関与していると指摘できる。

次に、pH、窒素、リン酸、カリなど土壤化学性からみた根腐病制御対策を検討する。土壌の化学性も、土壤微生物活性および微生物相を人為的に変化させ、根腐病に影響を与える要因の一つであるが、筆者らはすでに火山性土壌においては、微生物の基質として土壤有機物の影響がより大きいことを推察している¹²⁸⁾。本研究では、淡色黒ボク土において土壌pHを5.5程度に抑えたと根腐病の発生が減少し、pH5.0以下の低pH下でかなり減少することを認め、小林らの報告^{20, 76)}と一致した。これについては前述のように灰色台地土の結果でも得られている。インゲン根腐病は低pH条件で発病が少ないことと、石灰施用による高pH条件でも発生が少ない¹⁴⁴⁾ことの相対する見解があり、低pH条件下の抑止性に関しては、前述したように病原菌に対する土壤交換性アルミニウムの影響がその要因とされている。高pH条件下では*Fusarium*属菌の厚膜胞子化が不良となること¹⁰³⁾と、細菌数などの微生物活性が高まることにより抑止性が発現する可能性が考えられるが、本病に対するpHの影響の違いにおいては、病原菌対土壤微生物の相互関係が土壌によって異なることが推測される。根腐病制御のための土壌pH管理については、無制限なpH低下はインゲンマメの生育を抑制するため望ましくなく、現行の土壌診断基準のpH5.5~6.0に照らしてみてもこの下限値であるpH5.5に近づけるのが妥当と考えられる。

窒素は微生物の基質としても重要で、本試験ではアンモニア態N、硝酸態Nだけでなく炭素源を含み微生物基質としても有効と考えられる石灰窒素、CDU、尿素も供試した。この結果、炭素源を含まない窒素肥料はいずれも根腐病抑止効果は認められず、微生物全体の活

性も高めないことがわかった。一方、炭素源を含んだ場合いずれも生育初期の根腐病を軽減し、収量をやや高めた。この理由として、これらの肥料の施用で微生物全体の活性およびB/F値が高まっており、一般的拮抗作用が発現した可能性が高い。これについては、キュウリつる割れ病を軽減するCDUの作用として同様の見解が得られている¹⁶⁴⁾。また、石灰窒素区および尿素8 kg N区では*Fusarium*属菌数も明らかに減少した。石灰窒素区では本肥料の持つ殺菌作用が発現したことが考えられ、また両者の窒素施用区ではpHが8前後と高まったことから、前述した厚膜孢子化の不良による菌数の減少も考えられる。しかし本実験は、根腐病の発生が激しい圃場で行われたために総じて抑制効果が高いとはいえず、また窒素施用量別の傾向は明瞭でなかった。発生の激しい圃場での窒素作条施用は、場合によっては根が濃度障害を受けた可能性もあり、多肥条件下における発生が指摘されている栄養病理複合障害⁵⁸⁾を招く可能性もある。

これまで硝酸態Nが根腐病を抑制したとの報告⁶³⁾があるが、本実験ではこのような窒素源の相違が根腐病に与える影響は全般に小さかった。今後はさらに作土層の微生物活性を高めつつ、窒素を供給する施肥法の開発が必要であろう。なお、最近、十勝地方で発生が報告されたインゲンマメのアファノミセス根腐病⁶⁰⁾に対しては、筆者らは速効性窒素を播種前10 kg N全層に施用し、播種時には通常に4 kg Nの化成肥料を施用する全層・作条施用法の抑止効果が高いことを認めており^{50, 130)}、フザリウム菌との混発圃場においても本法による増収効果を認めている。

次にリン酸およびカリについて考察する。三要素試験および圃場での施用試験結果から、根腐病におよぼすリン酸、カリの影響は小さいが、リン酸が多く、カリが少ない条件で発病がやや少ないことを認め、根腐病を軽減するための具体的な土壌条件としては有効態リン酸20 mg 100 g⁻¹以上、交換性カリ30 mg 100 g⁻¹以下が望ましいと考えられた。とくにリン酸肥沃度が低い場合には、まず生育そのものを改善する必要がある。4土壌を用いて行った梓連作試験においても、リン酸肥沃度と根腐病の発生との関連は直接的には明らかでないが、同一土壌を用いた場合はリン酸肥沃度が高いほうが望ましいといえる。

土壌化学性による制御対策については、今後、微生物基質となる有機物資材と施肥を連動させた長期的検討が必要と考えられる。しかしながら、根腐病を制御するためには、土壌診断に基づいた適正な土壌・施肥管理を行うことが前提となろう。

第7節 ま と め

1) インゲン根腐病におよぼす輪作体系の影響

(1) 連作および短い輪作年限におけるインゲンマメの収量低下は、*Fusarium solani* f. sp. *phaseoli*によってもたらされるインゲン根腐病に主に起因し、地際胚軸の1/4から1/2程度が褐変すると減収率が大きくなった。輪作年限が短くなるにしたがい根腐病は増加した。

(2) 各種作付様式におけるインゲンマメの根褐変指数と、土壌ならびに根圏の*Fusarium*属菌数との間には正の相関が認められた。

(3) 根腐病の発生におよぼす前作物の影響は4年輪作では認められないが、交互作区における発生は2周目までインゲンマメ跡(連作) > コムギ跡 > バレイシヨ跡 ≥ テンサイ跡の順に高く、テンサイ跡で最も発生が抑制され、4周目以降には、コムギ跡で最も抑制された。

(4) 交互作区における1, 2周目のインゲンマメ作付前の土壌微生物相をみると、糸状菌数にはあまり差がないが、*Fusarium*属菌数はインゲンマメ跡 > コムギ跡 > バレイシヨ跡 > テンサイ跡の順に多く、細菌数はテンサイ跡 > バレイシヨ跡 ≥ インゲンマメ跡 > コムギ跡であった。また、根圏の*Fusarium*属菌数はインゲンマメ跡、コムギ跡で多かった。

(5) その後の交互作の継続により4, 5周目の土壌微生物相をみると、*Fusarium*属菌数はインゲンマメ跡 > バレイシヨ跡 > テンサイ跡 > コムギ跡の順に多く、細菌数はテンサイ跡 > バレイシヨ跡 > インゲンマメ跡 ≥ コムギ跡であった。

(6) 土壌微生物活性を異にした土壌における接種試験により、微生物活性の低い土壌では根腐病が増加することを認め、土壌微生物活性の低下と土壌微生物相の変化が、根腐病の発生程度に2次的に関与することを認めた。このことは、交互作区の土壌微生物活性を反映する土壌呼吸量が、2周目の時点でテンサイ跡 > バレイシヨ跡 > コムギ跡 > インゲンマメ跡であったが、その後の交互作の継続により、テンサイ跡、コムギ跡では土壌呼吸量、バイオマス量が増加し、バレイシヨ、インゲンマメ跡では減少したことから確認された。

(7) 完熟堆きゅう肥の単年施用では、根腐病抑止効果が認められなかった。

(8) *Fusarium*属菌の生育に影響をおよぼす土壌微生物相を形成する要因としては、作物残渣の質的差異が大きく関与すると考えられた。残渣の微生物相は、テンサイでは細菌数が非常に多く、糸状菌、*Fusarium*属菌が少なく、インゲンマメでは糸状菌や*Fusarium*属菌が非常

に多かった。

(9) 殺菌土壌を用いた残渣物の培養試験では、根腐病菌はインゲンマメ残渣だけでなく、テンサイ残渣をもよく利用したが、未殺菌土壌では、テンサイ残渣の添加で *Fusarium* 属菌数が低下した。

(10) 基質試薬を用いた培養試験では、アミノ酸類および単糖類の添加で土壤微生物全体の活性が高まり、アミノ酸類では *F. solani* f. sp. *phaseoli* および *F. oxysporum* を含む *Fusarium* 属菌もやや増加するものの、B/F 値および B/Fus 値 (細菌数/*Fusarium* 属菌数) が高まった。一方、単糖類では B/F 値が低下し、B/Fus 値も高まらなかった。セルロースでは活性そのものが低く、B/F、B/Fus は高まらなかった。

(11) 圃場に還元される残渣、残根の質および量的差異として、テンサイでは易分解性の糖、窒素が多く、コムギでは難分解性のセルロース、リグニンなどが多い、インゲンマメでも分解が遅く還元量も著しく少ない、などの顕著な作物間差を認めた。

(12) ある特定の細菌 (*Bacillus megaterium*) と *F. solani* f. sp. *phaseoli* を混合接種した条件で、*F. solani* f. sp. *phaseoli* 菌数が減少した。

(13) 以上の結果から、土壤微生物活性、微生物相は各種作付様式における前作物残渣の特性に応じて変化し、微生物的緩衝力、いわゆる一般的拮抗作用によって病原菌に競合的に影響を及ぼしたものと推察した。

2) インゲン根腐病の衰退性ならびに抑止性と拮抗性微生物相

(1) インゲン根腐病は連作 3～6 年目に激化したが、その後やや回復し、衰退現象が確認された。土壤細菌数は、連作 5 年目まで減少したが、6 年目以降は 4 年輪作とほぼ同等となり、蛍光性 *Pseudomonas* 属菌数は衰退性の増大と対応して増加した。*Fusarium* 属菌数は連作の継続でやや増加したが、全体の糸状菌数は根腐病の発生変動とほぼ一致した。

(2) 連作の根圏土壌より分離した蛍光性 *Pseudomonas* 属菌では、*F. solani* f. sp. *phaseoli* の拮抗菌が高い割合で認められ、根腐病の衰退性とともその拮抗能も増大した。

(3) インゲンマメ根圏の蛍光性 *Pseudomonas* 属菌数は、衰退性のみられた連作 7 年目では、4 年輪作より、生育の早い時期に高まった。

(4) インゲンマメ連作下では土壤微生物全体の活性が低下したが、このような土壤微生物による特異的拮抗作用の発現が衰退現象の一要因であった。

(5) 前作物の違いによる根腐病の抑止性についても、前作がテンサイ、バレイショの場合には蛍光性 *Pseudomonas* 属菌による特異的拮抗作用の関与が示された。

3) インゲン根腐病におよぼす土壤理化学性の影響と土壌管理による制御

(1) インゲン根腐病の発生は、淡色黒ボク土、褐色低地土で多く、多湿黒ボク土、灰色台地土で少なく、供試した 4 土壌間で差異が認められた。

(2) 灰色台地土を除く 3 土壌では土壤微生物が根腐病の発生に大きな影響を与えていた。淡色黒ボク土、褐色低地土では糸状菌に占める *Fusarium* 属菌の割合が高く、多湿黒ボク土や灰色台地土では低かった。

(3) 灰色台地土では、土壤殺菌の有無を問わず根腐病を接種しても根腐病の発生が少なく、細粒質の土性および低 pH が発病の抑止性をもたらす要因であった。

(4) 淡色黒ボク土、褐色低地土では多湿黒ボク土、灰色台地土に比べて土壌の乾燥により細菌が減少しやすく、根圏で *Fusarium* 属菌数が高まる 6 月中旬頃の土壌が乾燥しやすい条件で、他の土壤微生物による一般的拮抗作用が低下すると推察された。

(5) 多湿黒ボク土では、土壌乾燥に対する細菌数の減少が小さく、加えて微生物基質量が多く土壤微生物活性の高いことが、発生が低かった要因として考えられる。

(6) このように、インゲン根腐病の発病抑止性の土壌間差異には、土壤微生物による一般的拮抗作用と、pH、土性など土壤理化学性単独の要因が関与することを認めた。

(7) 淡色黒ボク土において土壌 pH を改変した実験を行った結果、pH 5.5 以下の低 pH 条件で根腐病の発生が抑制された。

(8) インゲンマメ連作土壌における三要素試験の結果から、インゲン根腐病に対する窒素欠除の影響は小さく、リン酸欠除により増加し、カリ欠除により抑制された。

(9) 炭素源を含む石灰窒素、CDU、尿素とこれを含まない硫酸、チリ硝石を条に施用して根腐病抑止効果を検討した結果、前 3 者ではいずれも生育初期の根腐病を抑制しやや増収したが、後 2 者では抑制されなかった。この抑制要因として、土壤微生物活性の増加による一般的拮抗作用が発現した可能性が高い。なお、石灰窒素および尿素区では *Fusarium* 属菌数が減少した。

(10) 三要素試験およびリン酸とカリの施用試験から、連作圃場においてはリン酸が多く、カリが少ない条件で根腐病の発生がやや少ないことを認めた。根腐病を軽減するための土壌条件として有効態リン酸 $20\text{mg } 100\text{g}^{-1}$ 以上、交換性カリ $30\text{mg } 100\text{g}^{-1}$ 以下が望ましい。