

第3章 小豆の施肥反応と多収要因解析

作物の収量は当然のことながら成熟に至るまでの生育過程と密接に関係している。作物生育は施肥条件によって変化するが、施肥法を考察する場合、まず、施肥処理に伴う作物の生育反応を把握し、その生育変化が収量とどのように関係しているかを理解しておくことは重要であろう。

また、施肥に伴う生育変化は作物体内での養分集積変化と密接に関連する。作物の生育、収量に最も大きな影響を持つ窒素についてみるならば、前章で小豆根粒の窒素固定能は大豆より低く、固定窒素のアラントインとしての集積は総窒素集積量中で大きな比重を占めず、他方、窒素施肥によって硝酸態窒素、アミノ酸態窒素の集積がみられることを示した。これらの窒素集積が生育、ひいては収量とどのように係っているかを把握することは窒素施肥法を図る上で必要である。佐藤ら¹²⁴⁾は小豆に対する窒素施肥反応を検討して、増収のために肥料依存と根粒・地力依存の2つの方向性を指摘している。

ここでは、小豆の施肥反応と併せて、前章で設定した小豆の生育期を基本に各期の生育状況が収量とどのように関連しているか、また、養分集積が生育にどのように反応し、収量に反映しているかを検討し、小豆増収に対する施肥の意義および増収に至る生育、養分集積要因を考察した。

第1節 施肥に伴う生育反応と収量との相互関係

作物の生育、収量に最も影響が大きい窒素とリン酸について、その施用量を組合せた処理を設け、小豆を栽培して生育差を現出させ、生育期別の生育量と収量との相互関係を検討した。同

時に、施肥に伴って土壤中の養分水準も変化するるので、土壤養分水準と生育、収量との関係も併せて検討した¹²⁷⁾。

1. 実験方法

本実験は1977年に圃場条件で実施した。

供試品種として「栄小豆」を用い、前章第1節と同じ栽植密度で5月21日に播種し、成熟期に達した区より9月22日から9月27日にかけて収穫し、収量調査を行った。

施肥処理として、窒素施用量は10a当り0, 3, 10, 20, 30Nkg (各N0, N3, N10, N20, N30と略称)の5段階とし、N3は作条施肥としたが、N10以上は発芽障害を回避するため全面全層施肥とし、それぞれ硫酸で施用した。リン酸施用量は10a当り0, 12.5, 25, 50 P₂O₅kg (各P0, P12.5, P25, P50と略称)の4段階として、過リン酸石灰、熔成リン肥半量ずつで作条施肥した。窒素用量とリン酸用量を組合せた20処理を設け、実験を行った。なお、共通施肥としてはK₂O 8kg/10aを硫酸加里で、苦土は熔成リン肥で補うこととし、P0区のみMgO 4kg/10aを硫酸マグネシウムで施用した。

生育期間中、7月14日(I期、生育初期)、7月28日(II期、開花始)、8月11日(III期、実肥大始)、8月26日(IV期、最大生育期)、9月9日(V期、登熟盛期)、成熟期(VI期)の計6回地上部作物体を採取し、葉面積、草丈を調査後、乾物重を測定した。

さらに、生育期間中7月18日、8月2日、8月22日、9月13日の4回にわたって各処理の株間より畦に直角に幅30cm、深さ10cmの土壌を採取し、風乾土壌について可給態窒素およびリン酸を測定した。可給態窒素は熱水抽出法^{2,125)}により、リン酸はTruog法^{84,153)}で求めた。なお、熱水抽出法の抽出液中には硝酸態窒素も含まれるので、還元鉄法(第1章第1節)によって抽

出液中の全窒素を測定した。

2. 実験結果

1) 生育反応

発芽はP0処理でやや遅延し、窒素施用量が多いほどやや不整であり、逆に、磷酸施用量を増すことによって発芽の促進される傾向がみられた。最終的に各処理とも80%以上の発芽率を示した。

施肥処理によって小豆生育に差が生じた。各時期の生育量を乾物重で表わし、窒素、磷酸の各施肥成分について同一施用量での平均乾物重を求め、窒素についてはN0処理、磷酸についてはP0処理に対する乾物重比（相対生長率）を算出し、時期別に図14に示した。

各時期とも窒素、磷酸の施用量増加によって乾物重は増大したが、増大の程度が時期によって異なり、また、窒素と磷酸では様相を異にした。すなわち、窒素施用量間で比較すると、生育初期のⅠ期ではN3kg以上の窒素施用量間の差が小さく、開花始のⅡ期以降に差が明らかとなり、窒素施用量が多いほど乾物重は著しく増大した。この傾向はⅢ期の英実肥大始頃が最も顕著で、Ⅳ期、Ⅴ期と生育が進むにつれて用量間差は小さくなった。一方、磷酸施用量間では、Ⅰ、Ⅱ期の生育前半の時期での差が大きく現われ、 P_2O_5 50kg施用は無磷酸（P0）処理と比較して約2倍量の乾物重を示した。しかしながら、Ⅲ期以後は差が小さくなった。

次に、葉面積指数（LAI）および各生育期

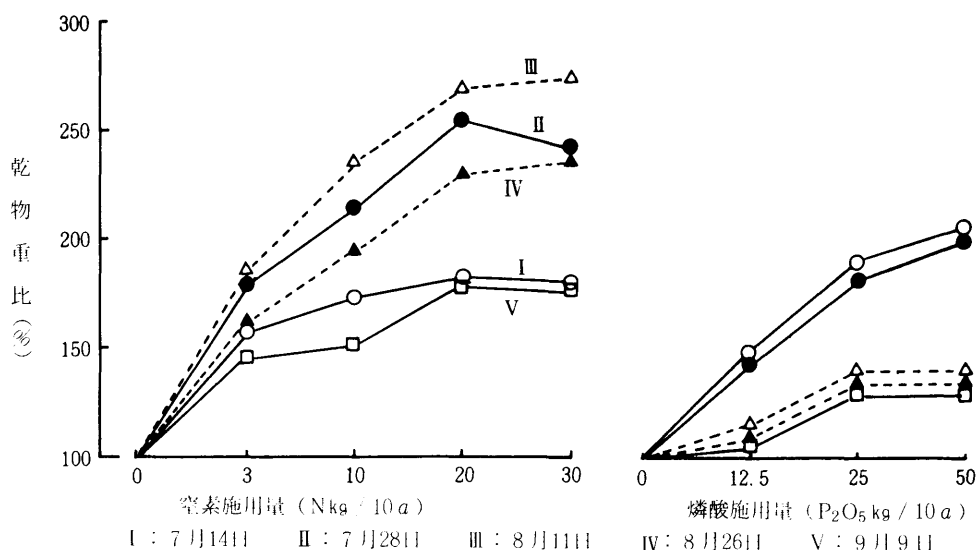


図14 窒素、磷酸施肥処理に伴う時期別生育反応（無窒素、無磷酸処理乾物重を100とした比）

の個体群生長率（CGR）をみると（表15）、まず、LAIでは各処理とも最大生育期（Ⅳ期）に最高値を示し、かつ、乾物重と同様に、窒素、磷酸施用量が増加するほど高まる傾向であり、処理、時期を通して最高値はN20-P25（N20処理にP25処理を組合わせた区、以下同じ）区の7.14で、N30-P25、N30-P50区も6以上の値であった。

CGRの時期別推移をみると、各区ともⅣ期

まで高まり、Ⅳ～Ⅴ期は窒素施用量の低い水準でやや高まるが、高い水準では低下した。用量間では、Ⅱ期までは窒素増肥効果が小さく、Ⅱ～Ⅲ期以降に差が開いて、窒素施用量が多いほどCGRも高まった。一方、磷酸用量間では、Ⅰ～Ⅱ期に磷酸施用量増加に伴ってCGRも明らかに高まるが、Ⅱ期以降は一応上昇傾向はみられるもののバラつきが大きくなり、用量間差も小さくなった。

表15 施肥処理に伴うL A I, C G Rの変動

処 理		L A I				C G R (g / m ² / 日)				
磷酸施用量 (P ₂ O ₅ kg / 10 a)	窒素施用量 (Nkg/10a)	I	II	III	IV	* I ~ I	I ~ II	II ~ III	III ~ IV	IV ~ V
0	0	0.15	0.66	1.49	2.34	0.16	1.35	2.98	6.34	8.75
	3	0.17	0.88	2.75	3.69	0.20	1.95	6.65	7.40	7.66
	10	0.16	0.85	3.04	4.33	0.18	1.96	7.17	8.05	11.31
	20	0.18	1.05	3.36	4.83	0.21	2.58	8.79	11.33	10.07
	30	0.16	0.87	3.52	5.85	0.18	1.99	10.05	14.39	9.14
12.5	0	0.17	0.66	1.62	2.83	0.18	1.32	3.31	8.01	7.79
	3	0.26	1.15	2.87	3.90	0.27	2.61	6.27	8.29	11.71
	10	0.25	1.37	3.83	5.38	0.28	3.22	9.19	10.52	6.06
	20	0.29	1.59	4.26	4.59	0.31	3.94	8.54	10.29	12.05
	30	0.29	1.35	4.86	6.14	0.32	3.32	10.39	12.54	8.99
25	0	0.21	0.78	1.95	3.05	0.21	1.65	3.59	7.42	10.21
	3	0.33	1.29	3.28	4.75	0.35	2.99	7.35	10.18	15.70
	10	0.36	1.67	4.45	5.67	0.40	3.62	10.17	13.60	6.66
	20	0.37	1.87	4.99	7.14	0.41	4.49	11.62	20.55	10.01
	30	0.39	1.83	5.29	6.92	0.40	4.89	10.63	16.23	10.24
50	0	0.18	0.78	1.95	2.94	0.18	1.60	4.19	6.81	11.49
	3	0.36	1.40	3.26	5.51	0.38	3.45	6.46	13.63	13.21
	10	0.37	1.91	4.29	5.72	0.41	4.70	8.52	15.35	9.99
	20	0.34	1.96	5.16	5.88	0.41	5.44	10.39	15.15	11.71
	30	0.38	1.82	4.92	6.66	0.43	4.65	11.21	15.06	10.56

注) * : 発芽期 (6月7日)

なお、開花始は各区ともほとんど同じであったが、成熟期は窒素施用量の多いほど遅く、また、同一窒素施用量内では磷酸施用量が多い処理ほど早い傾向がみられた。

2) 収量反応と生育との相互関係

各区の収量および収量構成要素について表16に示した。

子実重は窒素施用量の増加に伴って増大し、N30処理はN0処理に比べて31~41%増収した。

磷酸施用量間では窒素施用量の多少にかかわらずP25処理まで増収効果がみられた。しかしながら、その増収率は最高26%で、窒素施用に伴う増収率よりは劣った。また、P50処理はP25処理より子実収量が低い傾向であった。結果的にN30-P25区が330kg/10aで、N0-P0区に比べて70%増の最高収量を示した。

莢数は窒素、磷酸の施用量増加によって増加し、また、粒重は窒素増肥によって増大するが、磷酸施用量間では一定の傾向が認められなかつた。

た。

Harvest Indexとしての子実重歩合は窒素の施用量増加によって低下し、逆に、磷酸増肥によって高まった。

次に、生育と収量との相互関係を各生育期の生育因子と子実収量との相関関係でみた（表17, 18）。

まず、各時期の草丈、LAI、乾物重と子実重との間にそれぞれ高い相関関係が認められた。この中で、LAI、乾物重については開花始後の生育後期での相関係数が開花前の係数より高い傾向であった。

各生育期の生長速度（CGR）と子実収量との関係を見ると（表18）、IV期の最大生育期までの各生育期とも有意の相関関係がみられ、各生育期の生長程度がそれぞれ子実形成と密接に関係していることが認められた。しかも、各生育期別に相関係数を比較すると、早い生育期の係数ほど高い傾向がみられた。

3）土壤中の可給態窒素、磷酸水準と生育、収量との関係

土壤中の可給態窒素および磷酸の測定法としては種々あるが、ここでは、北海道で広く用い

表16 施肥処理に伴う収量反応

処 理		成熟期 莢 数 (英 / 株)	収 量 (kg / 10 a)		子実収量比 (%)			子実重 歩 合 (%)	1,000 粒 重 (g)
磷酸施用量 (P_2O_5 kg / 10 a)	窒素施用量 (Nkg/10a)		総 重	子実重	対N0・P0 比	対N0 比	対P0 比		
0	0	33	301	194	100	100	100	64.5	132
	3	38	416	259	134	134	100	62.3	135
	10	42	427	255	131	131	100	59.7	141
	20	43	438	260	134	134	100	59.4	142
	30	43	474	262	135	135	100	55.3	145
12.5	0	33	339	227	117	100	117	67.0	131
	3	42	436	263	136	116	102	60.3	130
	10	42	470	283	146	125	111	60.2	136
	20	45	500	298	154	131	115	59.6	138
	30	46	497	298	154	131	114	60.0	143
25	0	36	348	234	121	100	121	67.2	132
	3	43	444	284	146	121	110	64.0	133
	10	43	466	285	147	122	112	61.2	140
	20	46	532	324	167	138	125	60.9	140
	30	47	540	330	170	141	126	61.1	142
50	0	36	345	229	118	100	118	66.4	133
	3	42	454	287	148	125	111	63.2	136
	10	42	471	285	147	124	112	60.5	141
	20	46	490	300	155	131	115	61.2	139
	30	47	536	308	159	134	118	57.5	146

表17 各時期の生育因子と子実収量との
相関関係

時 期	相 関 係 数		
	草 丈	L A I	乾 物 重
I	0.901 **	0.797 **	0.856 **
II	0.905 **	0.889 **	0.892 **
III	0.917 **	0.939 **	0.931 **
IV	0.943 **	0.919 **	0.905 **
V	0.900 **	0.897 **	0.911 **
VI	0.901 **	—	—

注) **: 1%水準で有意。

表18 各生育期のCGRと子実収量との
相関関係

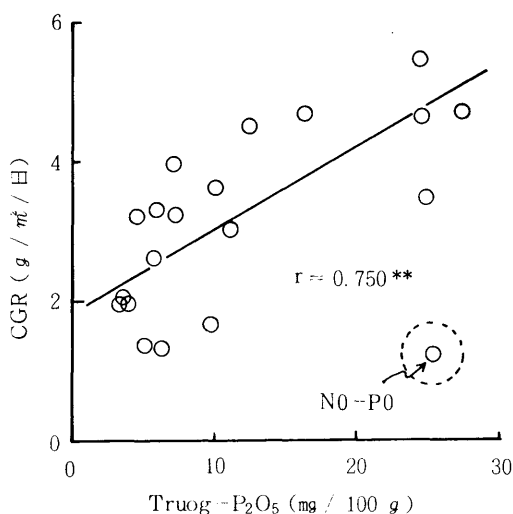
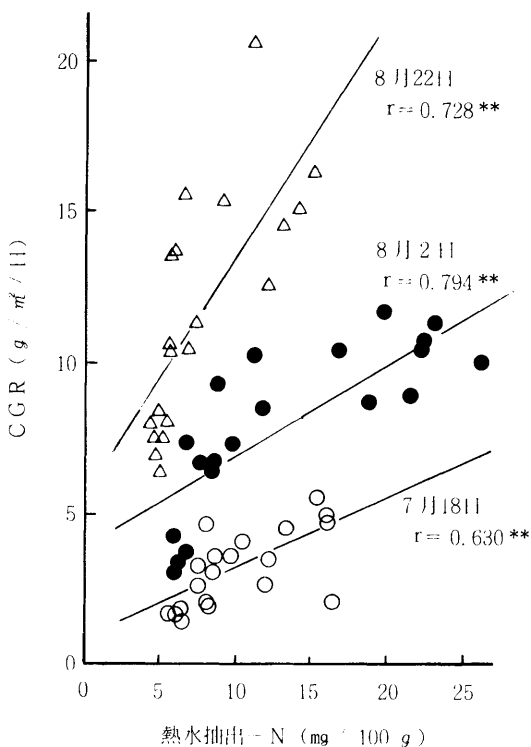
時 期	相 関 係 数
I' ~ I	0.854 **
I ~ II	0.888 **
II ~ III	0.876 **
III ~ IV	0.823 **
IV ~ V	0.177 **

注) *: I' (発芽期 6月7日)

**: 1%水準で有意。

られている熱水抽出法(熱水抽出-N)とTruog法($\text{Truog-P}_2\text{O}_5$)を用いて測定した。

採取土壌は施肥層も含んでいるため、当然ながら施肥量増加に伴って窒素、磷酸水準は高まり、熱水抽出-Nは4.5~23.1mg/100g、 $\text{Truog-P}_2\text{O}_5$ は3.0~28.2mg/100gの範囲で変化した。土壌中の $\text{Truog-P}_2\text{O}_5$ 水準と土壌採取時期前後の生育(CGR)との関係を求めてみると、図15に示したように、7月18日の $\text{Truog-P}_2\text{O}_5$ 水準とI~II期のCGRとの間に高い相関関係が得られ、開花前の初期生育に対する磷酸効果が土壌養分の面からも裏付けられた。しかしながら、開花始以降の時期におけるCGRと $\text{Truog-P}_2\text{O}_5$ の間には有意の関係が得られなかった(図表省略)。一方、熱

図15 $\text{Truog-P}_2\text{O}_5$ 水準 (7月18日) と
CGR (I~II期) との関係図16 時期別熱水抽出-N水準と
CGR との関係

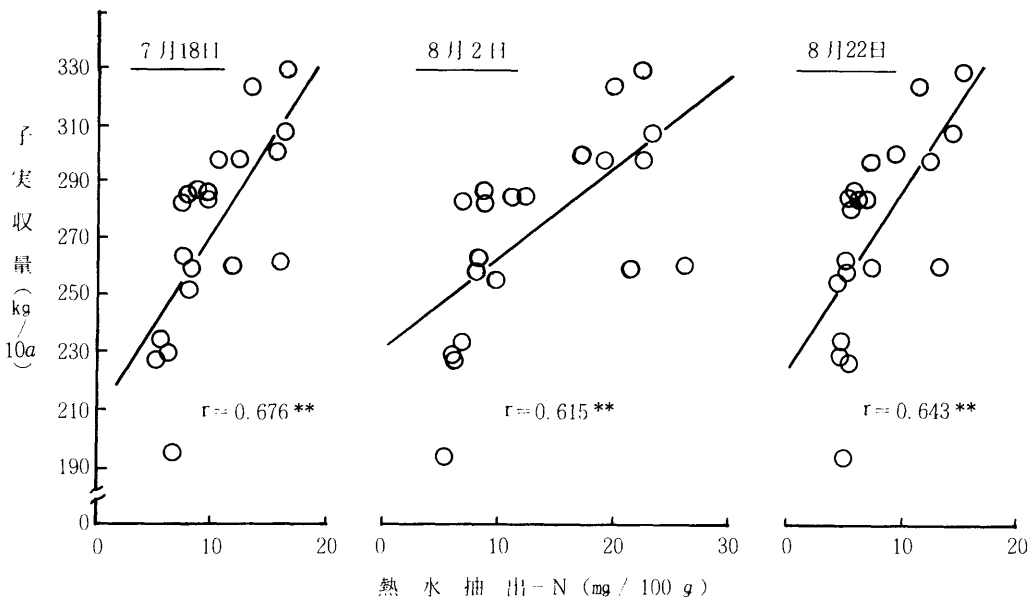


図17 時期別熱水抽出-N水準と子実収量との関係

水抽出-N水準とCGRとの間(図16)にも有意の相関関係が得られたが、7月18日ではTruog-P₂O₅の場合より低い相関係数(0.630)で、開花始以降の時期に高い相関係数(8月2日:0.794, 8月24日:0.728)を示した。

次に、土壤中の各養分水準と子実収量との関係をみると、Truog-P₂O₅水準との間には各時期とも有意の関係は認められなかったが、熱水抽出-N水準との間には各時期とも有意の関係が得られた(図17)。

このように、熱水抽出-N水準と子実収量とは密接に関係しており、さらに、図17より300 kg/10 a以上の収量をあげた処理は8月以降も熱水抽出-N水準で10 mg/100 g以上を示した。

3. 考 察

小豆に対する窒素、リン酸の施用効果は明らかに認められ、窒素、リン酸ともその施用量増加に従って生育量、収量は増大した。とくに、収量増加に対しては窒素の効果がリン酸よりも高く現われ、子実形成に窒素が最も大きく貢献してい

ることが認められた。

一般に、豆類は根粒による固定窒素の供給があるため、窒素施肥に対する反応は低いとされているが、窒素固定能の低い菜豆では窒素施肥反応が豆類の中でも高く、窒素増肥によって増収することが報告されている^{50-52, 148)}。また、窒素固定能の高い大豆については窒素施肥反応が低く、多収を得るためには固定窒素に依存するのが効率的であるとの報告^{161, 162)}が多い。小豆については佐藤ら¹²⁴⁾が窒素施肥反応を認めており、本実験でも同様の結果が得られ、小豆の窒素施肥反応は菜豆に及ばないまでも大豆よりは高いものと推定される。

一方、リン酸施肥反応も比較的高く現われ、生育増大、増収に作用した。また、リン酸施用が発芽を良好にすること、施用量の多い場合に成熟期を早める傾向のあること、さらに、リン酸増肥によってHarvest Index(子実重歩合)の高まる現象がみられたことは興味深い。

これらの各施肥処理に伴う各生育期別の生育反応と収量との関係を求めた結果、最大生育期

までの各生育期とも生育 (CGR) と子実収量間に有意の高い相関関係が認められた。しかも、相関係数は開花前の生育初期が最も高い値を示した。したがって、各生育期の生育程度はそれぞれ収量と密接に関係しており、初期生育も緩慢とはいえ子実形成に重要であることは明らかである。すなわち、増収のためには開花始以後の栄養、生殖両生長重複期における生育の増進、確保が必要であると同時に、初期生育の増進も重要な要因である。

さらに、各生育期の生長量に対する施肥の影響が窒素とリン酸では異なって発現した。リン酸は初期生育に対して効果があり、開花以降の生育に対しては増肥効果が開花前より劣った。他方、窒素は初期生育に対して若干の生育増進効果を示したが、むしろ、開花始以後の生育を増大させる傾向が強くみられた。これらの結果は土壌中の可給態窒素、リン酸水準と生育との関係でも裏付けられた。

村山ら^{94, 95)}は大豆に対するリン酸供給の効果を検討し、生育初期のリン酸供給が栄養体の形成に重要であることを報告し、野本ら¹⁰⁵⁾も大豆の生育初期におけるリン酸欠乏は葉中の核酸態リン酸を不足させ、細胞の形成および分化に支障が生じ、その後の生育に重大な影響を及ぼすと推定している。

小豆の初期生育は大豆よりさらに緩慢であり、この初期生育を増進させるためにもリン酸の重要性が一層高いものと推察される。

なお、土壌中の熱水抽出-N水準と収量との間に密接な関係が認められ、さらに、生育後半における生育量確保も含めて、多収をあげるためには、開花始以後も熱水抽出-Nとして10mg/100g以上の水準を維持する必要があることを認めた。土壌の窒素肥沃度診断に関しては測定法も含めてまだ手法が確立していないが、小豆の根圏域における窒素水準の一つの目安になると考えられる。

第2節 施肥に伴う体内養分集積反応と生育、収量との関係

施肥に伴って作物体内の栄養状態は当然変化する。この栄養状態の変化が作物の生育、収量とどのように関係しているかを究明することは栄養診断上必要であり、施肥対策上の基礎的知見として重要なことと判断される。

ここでは、窒素およびリン酸の施肥処理に伴って小豆各器官における窒素、リン酸の集積状態がどのように変化し、同時に、それが生育にどのように係り、収量形成に影響しているかを検討した¹³⁰⁾。

1. 実験方法

本実験は前節と同一実験で行われた。

生育期間中、7月14日 (Ⅰ期)、7月28日 (Ⅱ期)、8月11日 (Ⅲ期)、8月26日 (Ⅳ期)、9月9日 (Ⅴ期) の5回にわたって採取した地上部作物体につき、葉身、葉柄、茎、莢実の4器官に分別し、乾燥後粉碎して全窒素 (全-Nと略称)、全リン酸 (全-P) を定量し、さらに、N0、N3、N30の窒素3水準とP0、P12.5、P25のリン酸3水準との組み合わせ9処理の葉柄、茎について、水溶性窒素 (水溶性-N)、アミノ酸態窒素 (アミノ酸-N)、硝酸態窒素 (硝酸-N)、アラントイン態窒素 (アラントイン-N) を測定した。

分析法として、各窒素化合物は第1章第1節と同じ方法で測定し、全-Pは湿式灰化後メーテル法で求めた。

2. 実験結果

1) 施肥処理に伴う窒素動態と生育、収量との関係

窒素施肥に伴う葉身、葉柄、茎各器官の全-N濃度を時期別にみると (図18)、葉身、茎では時期が進むにつれて各窒素用量区とも低下したが、葉柄のみ開花始のⅡ期における濃度が生育初期のⅠ期より高い値を示した。時期、器官

を問わず、窒素施用量が多いほど全-N濃度は高まったが、その高まる程度は早い時期ほど大きい傾向がみられ、とくに、葉柄のⅡ期、茎のⅠ期で急激な濃度上昇がみられた。

窒素施肥に対する全-N濃度変化の激しい葉柄、茎について、水溶性-N、アミノ酸-N、硝酸-N、アラントイン-Nの各濃度を求め、図19に示した。

前章で述べたのと同様に、水溶性-N、アミノ酸-N、硝酸-Nは窒素施用量増加に伴って各時期とも明らかに濃度上昇がみられた。中でも、葉柄のアミノ酸-N、硝酸-N、茎のアミノ酸-Nの上昇が大きく、葉柄の硝酸-N濃度はN30kg処理で1%前後を示し、また、Ⅱ、Ⅲ期の時期でも高濃度であった。アラントイン-N濃度はⅠ期で窒素増肥によって高まったが、Ⅱ期ではN30kg施用処理のみ高く、Ⅲ期では逆に低下した。一方、同一窒素施用量内における磷酸施用量間で比較してみると、葉柄、茎とも磷酸増肥に伴って低下する場合が多かった。

各時期における各処理区の窒素集積量をN0処理に対する比で表わし、図20に示した。

各時期とも窒素施用量の増加と共に集積量は増大したが、その増大の傾向は時期によって異なった。すなわち、Ⅱ、Ⅲ期において窒素増肥に伴う集積量増大の程度が最も大きく、次いでⅠ期で、Ⅳ期以降は次第に勾配が低下した。

以上の窒素吸収、集積の程度と生育、収量との関係を検討してみた。

まず、各時期の各窒素化合物濃度とその時期以後の生育状況(CGR)との関係より(表19)、全-NはⅡ、Ⅲ期の葉柄で、水溶性-NもⅡ、Ⅲ期の葉柄、茎でそれぞれ1%水準の高い相関関係を示した。アミノ酸-Nも、Ⅱ、Ⅲ期の葉柄、茎で有意であり、硝酸-NはⅠ期からⅢ期にかけて有意の相関関係が得られた。とくに、葉柄での硝酸-Nの相関係数は高かった。アラントイン-Nは僅かにⅡ期の葉柄で正の相関が、Ⅲ期の茎で負の相関関係がそれぞれ5%水準でみられた。

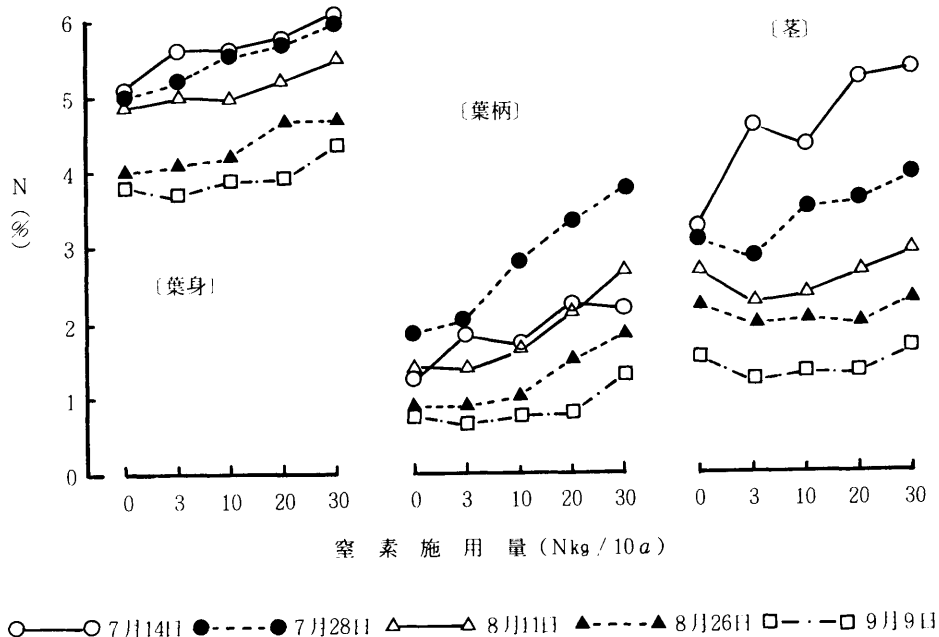


図18 窒素施用量と時期別、器官別全窒素濃度

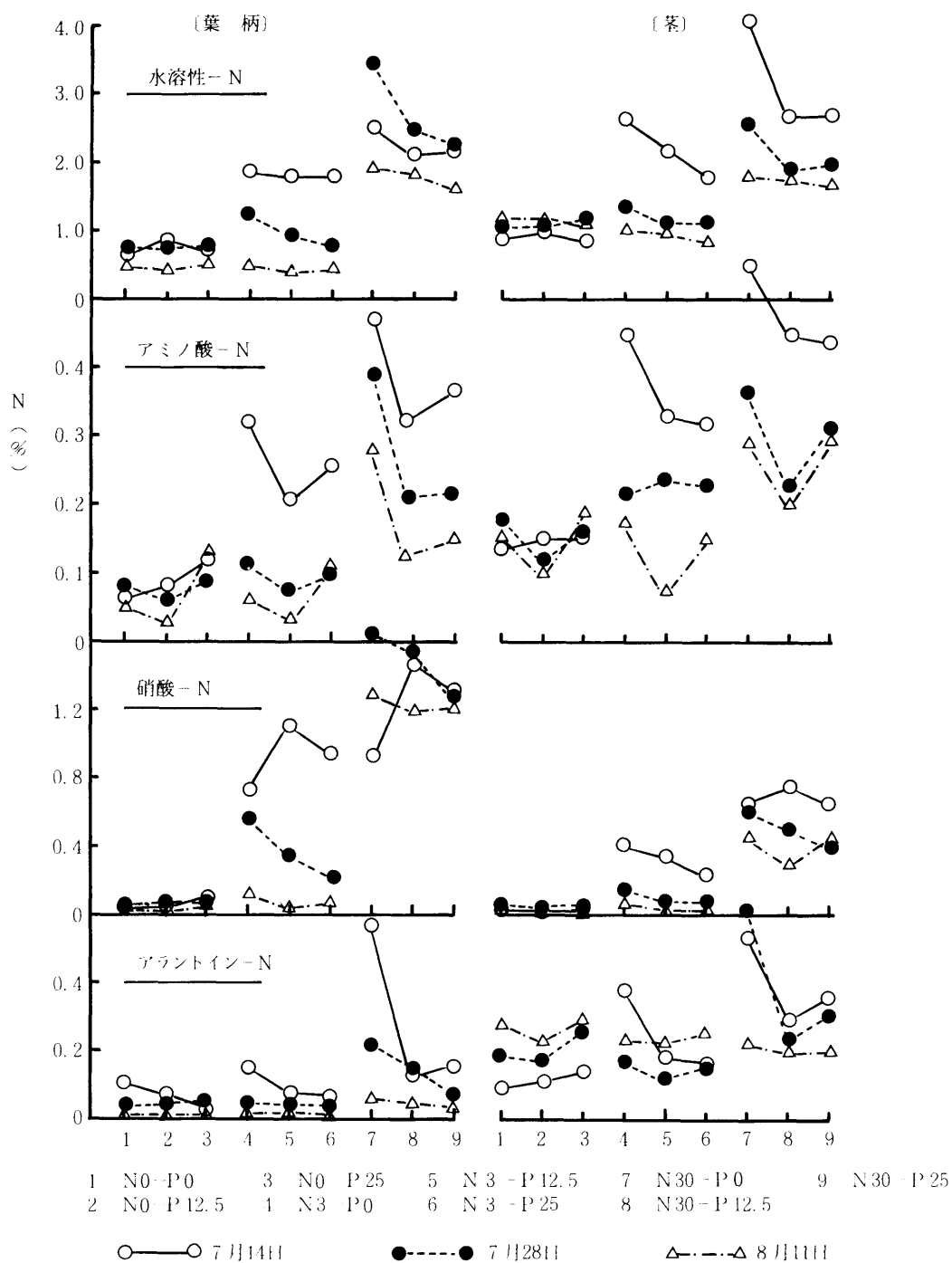


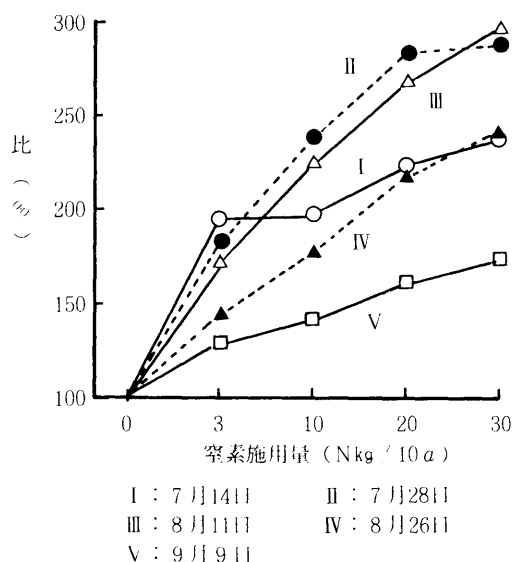
図19 施肥処理に伴う葉柄・茎中の各種窒素化合物濃度の変動

表19 各時期における器官別各種窒素化合物濃度と生育 (CGR) との関係

因子	N濃度	CGR	器官	相 関 係 数				
				全 - N	水溶性 - N	アミノ酸 - N	硝酸 - N	アラントイン - N
I	I ~ II		葉柄	0.625	0.636	0.551	0.823 **	- 0.026
			茎	0.512	0.423	0.535	0.694 *	0.347
II	II ~ III		葉柄	0.838 **	0.843 **	0.775 *	0.919 **	0.673 *
			茎	0.647	0.823 **	0.750 *	0.889 **	0.509
III	III ~ IV		葉柄	0.866 **	0.892 **	0.722 *	0.918 **	0.544
			茎	0.574	0.819 **	0.801 **	0.895 **	- 0.734 *

注) I : 7月14日, II : 7月28日, III : 8月11日, IV : 8月26日。

* : 5%水準, ** : 1%水準。


 図20 窒素施肥に対する窒素集積反応の時期別比較
 (無窒素処理の集積量を100とした比)

時期ごとの窒素集積量とその時期以後の生育 (CGR) および収量との関係では (表20), CGRとの間にⅢ期まで高い相関関係が認められ, また全期を通して子実収量と窒素集積量との間に有意の相関が得られた。しかも, CGR, 収量とも早い時期ほど相関係数は高くなる傾向がみられた。

表20 各時期の窒素集積量とその後の生育 (CGR) および子実収量との関係

窒素集積量	相 関 係 数		
	C G R		子実収量
時 期	時 期	係 数	
I	I ~ II	0.949 **	0.914 **
II	II ~ III	0.867 **	0.910 **
III	III ~ IV	0.859 **	0.897 **
IV	IV ~ V	0.006	0.881 **
V	V ~ VI	-	0.881 **

注) I : 7月14日 II : 7月28日

III : 8月11日 IV : 8月26日

V : 9月9日 VI : 成熟期

* : 5%水準 ** : 1%水準

2) 燐酸の吸収, 集積状況と生育, 収量との関係

各燐酸施肥処理の作物体全-P濃度を時期別, 器官別に図21に示した。

全-P濃度を器官別にみると, 葉身と茎とは各時期ともほぼ同程度の濃度で, 葉柄は低い方であった。また, 時期別では, 各器官とも時期が

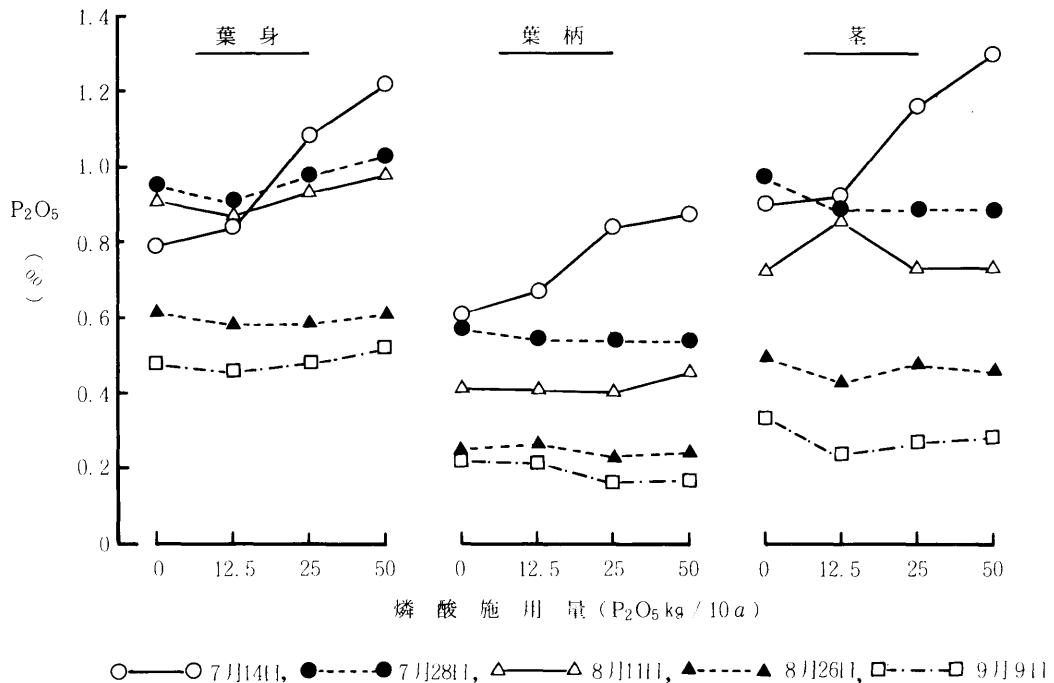


図21 磷酸施用量と時期別、器官別全磷酸濃度

進むに従って低下する傾向がみられた。

磷酸施用量との関係では、葉身ではⅠ、Ⅱ、Ⅲ期とも施用量増加に伴って全-P濃度は高まり、葉柄、茎のⅠ期も同様であったが、その他の時期では施用量間にはほとんど差がみられなくなった。また、磷酸増肥に伴う濃度上昇の勾配は葉身、葉柄、茎ともⅠ期で最も急であった。

磷酸集積量を時期別にP0処理を100とした集積量比でみると(図22)、生育量も反映して、各時期とも磷酸施用量の増加に従って磷酸集積量も増大した。しかも、増大する程度は初期ほど高く、時期の経過と共に勾配はゆるやかとなった。

各器官における磷酸濃度と生育(CGR)との関係は生育初期(Ⅰ期)で葉身、葉柄にみられた(図23)が、その他の時期ではいずれも有意の関係が得られなかった。

また、磷酸集積量と生育(CGR)、子実収量との間には(表21)、CGRとはⅢ期まで、子実収量とは全期にわたってそれぞれ1%水準で有意の相関関係がみられた。

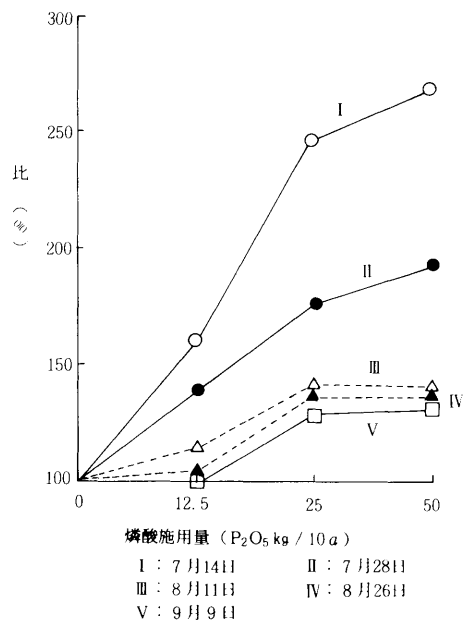


図22 磷酸施肥に対する磷酸集積反応の時期別比較(無磷酸処理の集積量を100とした比)

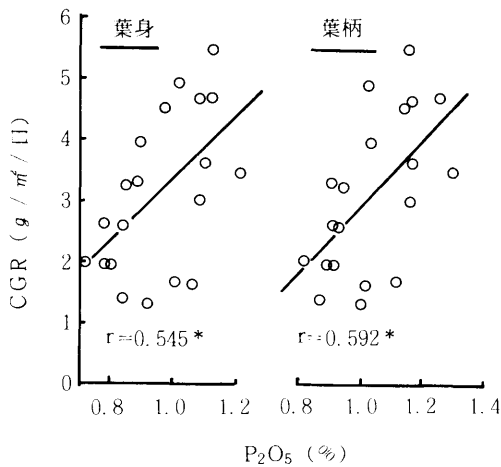


図23 7月14日の葉身・葉柄の磷酸濃度とCGR
(7月14日～7月28日)との関係

表21 各時期の磷酸集積量とその後の生育
(CGR)および子実収量との関係

磷酸集積量 時 期	相 関 係 数		
	C	G	R
時 期	時 期	係 数	子実収量
I	I ~ II	0.872 **	0.758 **
II	II ~ III	0.781 **	0.897 **
III	III ~ IV	0.887 **	0.935 **
IV	IV ~ V	-0.021	0.871 **
V	V ~ VI	-	0.796 **

注) I : 7月14日 II : 7月28日
 III : 8月11日 IV : 8月26日
 V : 9月9日 VI : 成熟期

3. 考 察

窒素あるいは磷酸施肥量の増加に伴って作物体中の窒素、磷酸濃度は高まり、集積量も増大した。しかしながら、施肥量増加に対する濃度あるいは集積量増大の傾向は時期によって、また、窒素と磷酸それぞれでやや異なった様相を示した。すなわち、窒素、磷酸とも増肥に伴う濃度上昇の程度は大よそ生育初期が最も大きく、時期が

進むに従って用量間の差は小さくなった。また、磷酸集積量についてみると、生育初期での増大程度が最も大きく、その後の時期は次第に磷酸施肥量間の差が小さくなった。一方、窒素では開花始以後の時期で窒素増肥に対する集積増加反応が最も高くみられた。

前節で、生育に対する磷酸施肥効果は生育初期で最も高いことを述べたが、増肥に対する磷酸集積反応も生育初期で高く現われるといえる。しかも、生育初期における葉身、茎の磷酸濃度、あるいは磷酸集積量とその後の生育、さらに子実収量との間に有意の相関が認められ、初期段階における磷酸吸収の確保が初期生育の増進に加えて、その後の生育、ひいては子実形成にも大きな影響を持っているものと考えられる。磷酸集積量と生育との関係では、英実肥大始まで有意の相関が得られ、また、子実収量との間には全期にわたって高い相関関係が示された。したがって、磷酸吸収の重要性は各時期ともあるといえるが、磷酸濃度との相関は生育初期以外では有意の関係がみられず、前述の磷酸集積反応が最も顕著であることと併せて、磷酸の重要度は生育初期で最も高いと判断される。

窒素についてみると、生育初期では窒素増肥に伴う吸収窒素が濃度上昇の形で集積するものの、生育量が小さいため集積量としては増加程度が低く現われたものであろう。これが開花始以後になると、急激な生長と共に窒素吸収も急増し、増肥による窒素集積反応としては最も高く発現した。しかしながら、窒素集積量と生育、収量との関係から、窒素についても磷酸と同様に、生育との間には英実肥大始までの時期、また、子実収量とは全期にわたって有意の相関関係が得られ、しかも、初期ほど相関係数は高い傾向であった。したがって、開花前の生育初期における窒素集積も量的に少ないとはいえ、開花後の生育と密接に関係していることがうかがえる。

この集積窒素の形態は、前章第4節でも示したが、主にアミノ酸-N、硝酸-Nであり、窒

素多肥によってこれら形態の窒素が葉柄、茎中に高濃度で集積する。とくに、葉柄における硝酸-Nの集積が顕著で、生育初期のみならず、開花始、英実肥大始の時期でも高濃度に維持された。茎、葉柄における各窒素化合物濃度とその後の生育との関係を見ると、水溶性-N、アミノ酸-Nは開花始以後の時期で茎、葉柄とも有意の相関関係が得られたが、硝酸-Nは生育初期から高い相関関係を示し、しかも、茎より葉柄の方が高い相関係数を示した。

これらのことから、小豆においては窒素増肥に伴って吸収された窒素の一部分が硝酸-Nとして葉柄に集積し、逐次その後の生育に利用されている事が推定され、前章で述べた糖の集積と併せて英実肥大始までの小豆栄養診断上、葉柄は重要な役割を担っているものと考えられる。

アラントイン-Nについては開花始の葉柄でその濃度と生育との間にやや有意な関係がみられたものの、英実肥大始の時期では逆に負の相関関係がみられた。前章での結果と同様に、開花始までの生育前半の時期では窒素多肥によってアラントイン-N濃度の高まる現象がみられ、生育との間にみかけの相関が得られたものと思われる。生育中期になって窒素固定能が高まり、

窒素施用量が低い水準でのアラントイン-N濃度が上昇したが、生育増進には結びつかず、反面、窒素多肥処理ではアラントイン-N濃度が低下しても生育は増大し、結果的にアラントイン-Nと生育との関係が負相関になったものであろう。

大豆において、アラントインは栄養生長の窒素源とならずむしろ生殖生長の窒素源の役割を持ち、アミノ酸-N、硝酸-Nは栄養生長に主として作用し、窒素の多用は過度の栄養生長をまねいて、子実生産には効率が悪いとの報告^{42, 43)}がある。しかしながら、小豆の窒素固定能は大豆より低く、アラントインの集積も総集積量中での比率は小さく、子実形成にとっての重要性は大豆より低いと推察される。むしろ、各時期の生育量が子実収量と密接に関係していることから、生育を積極的に増進させるため、硝酸-Nあるいはアミノ酸-Nの集積を促すことが増収に繋がると考えられる。大豆についても、子実生産能率や茎葉より子実への窒素再転流に固定窒素と化合窒素の差がほとんどないとの報告^{13, 148, 150)}があり、小豆の場合、窒素施肥による増収の可能性は高く、とくに、開花以降の窒素集積確保の方策を考慮する必要がある。

第4章 磷酸施肥の意義とその施用法

前章において、小豆増収のためにはまず初期生育の増進が重要であり、初期生育に対しては窒素より磷酸施肥の効果が高いことを述べた。

磷酸多施によって作物の生育、収量が増大することは一般に認められており、北海道のように畑作耕地面積の50%以上が磷酸肥沃度の低い火山性土で覆われている¹⁰⁹⁾場合、磷酸の補給は一層重要である。北海道十勝地方における小豆多収獲農家の土壌分析結果によると $\text{Truog-P}_2\text{O}_5$ 水準は平均で $22.6 \text{ mg}/100\text{g}$ を示し、火山性土でも平均 $16\text{mg}/100\text{g}$ の高い値で、多収獲圃の土壌磷酸が高い水準にあることが認められている¹³²⁾。

また、北海道の宿命とも言える冷害に対する技術対策で、磷酸多施の有効性が報告されており^{15,26)}、水稻三要素試験でも冷害年の磷酸欠除による減収率が最も大きいことが示されている¹⁶³⁾。

小豆の初期生育は極めて緩慢で、かつ、低温に最も弱い作物の部類に含まれており、小豆に対する磷酸多施の効果は十分予想される。ここでは小豆に対する磷酸施肥の生育、収量に及ぼす影響を磷酸の形態および施用法の面で検討し、さらに、根粒着生に対する影響についても検討した。

第1節 初期生育に対する施肥磷酸形態の影響

一般に、磷酸質肥料の磷酸形態として、水溶性磷酸、可溶性磷酸、く溶性磷酸などがあり、水溶性磷酸が最も速効的で、く溶性は緩効的とされている。現在、小豆の磷酸施肥は水溶性、く溶性磷酸の比率が大よそ1:1となっているが、初期生育の重要性が高い小豆においては磷酸の施肥効率を再検討する必要があると考えられる。また、磷酸施肥に伴う生育増進効果につ

いて現象的には認められているものの、その解析はほとんどなされていない。

そこで、小豆の初期生育に対する磷酸効果を施肥磷酸の形態を変えて検討し、さらに、効果の解析として地上部、地下部の生育反応と併せて根活性に及ぼす影響をみた¹³⁶⁾。

1. 実験方法

本実験は $\alpha/5,000$ ポットを用いて行った。

ポットに農試土壌を詰め、施肥磷酸の形態区分は、水溶性磷酸単用(WPと略称、以下同)水溶性、く溶性磷酸半量ずつ(WP/CP)、く溶性磷酸単用(CP)の3形態として、水溶性磷酸は過磷酸石灰を、く溶性磷酸は熔成磷酸を用いて調整した。磷酸施用量として、各磷酸形態区分とも P_2O_5 1, 2 g/ポットの2段階を設け、WPのみさらに3, 4 g/ポットの2区を加え、対照として無磷酸区(-P)も併設した。各磷酸用量の所定量および共通肥料として硫酸で $\text{N } 0.2 \text{ g}/\text{ポット}$ 、硫酸加里で $\text{K}_2\text{O } 0.5 \text{ g}/\text{ポット}$ を深さ8 cmまでの土壌と混和して施用した。

小豆(ハヤテショウズ)を1ポット当り10粒播種し、発芽後間引いて5本立としてガラス室で栽培した。

播種後10, 22, 38日目の3回にわたって根部も含めた作物体を採取し、地上部は直に水洗、乾燥して、乾物重を測定し、粉碎後磷酸含量を求めた。地下部は水洗後濾紙で水分を取り、全量を秤量後、1~2 gを採取してTTC還元法⁶³⁾により根活性を測定した。

また、作物体採取と同時に土壌を採取し、生土壌について水溶性- P_2O_5 を、風乾土について $\text{Truog-P}_2\text{O}_5$ を測定した。水溶性- P_2O_5 は土壌20 gに水100 mlを添加して1時間振とうし、濾過抽出液中の磷酸を定量した。

2. 実験結果

発芽始は各区とも播種後7日目で、処理間に差はみられなかったが、CP系列の発芽揃は他

系列より1日ほど遅れた。

地上部乾物重、作物体磷酸含量および土壌磷酸水準を示した表22より、生育量は発芽直後か

表22 磷酸処理に伴う地上部生育反応、磷酸吸収状況
および土壌磷酸水準の変化

磷酸形態	磷酸施用量 (P_2O_5 g/ポット)	地上部乾物重 (g/ポット)			作物体磷酸含量 (P_2O_5 mg/ポット)		土 壌 磷 酸 水 準			
		10日目	22日目	38日目	22日目	38日目	水溶性- P_2O_5 (ppm)		Truog- P_2O_5 (mg/100g)	
							22日目	38日目	22日目	38日目
WP	0	0.15	0.75	2.03	2.2	4.9	0.06	0.12	3.4	3.2
	1	0.16	0.96	3.88	3.8	9.3	0.21	0.24	8.3	9.0
	2	0.18	1.07	5.10	7.7	14.3	0.35	0.30	15.4	14.6
	3	0.18	1.29	6.25	11.1	20.0	0.62	0.48	22.4	20.5
WP/CP	4	0.20	1.25	7.55	10.5	30.9	0.81	0.66	28.2	27.0
	1	0.16	0.90	3.29	4.0	7.2	0.09	0.09	11.4	8.8
CP	2	0.17	1.05	4.11	4.6	10.7	0.12	0.15	16.6	14.9
	1	0.12	0.89	2.50	3.3	5.2	0.06	0.06	11.0	7.1
"	2	0.13	1.01	3.00	4.1	6.3	0.06	0.09	13.4	13.5

ら処理間に差がみられ、各磷酸形態とも磷酸施用量が多いほど乾物重は増大し、時期が進むにつれて差は大きく開いた。施用磷酸の形態別に比較すると、播種後10日目の発芽直後ではWPとWP/CPとの間にはほとんど差がなかったものの、22日目では明らかにWP系列がWP/CP系列を上回る生育を示し、38日目ではその差がさらに大きくなった。CP系列は発芽直後から他の磷酸形態に比べ最も低い生育量で推移し、CP2 g区はWP1 g区にも及ばなかった。これらの生育傾向を反映して、作物体の磷酸含量はWP系列が最も高く、次いで、WP/CP、CP系列の順に低下し、かつ、各磷酸形態系列と

も磷酸施用量が多いほど磷酸含量は増大した。

磷酸施用によって当然土壌中の磷酸水準は高まるが、水溶性- P_2O_5 、Truog- P_2O_5 量ともWP>WP/CP>CPの順に低い傾向で、その差は水溶性- P_2O_5 で一層明らかに認められ、CP系列の水溶性- P_2O_5 量は-P区と大差なかった。なお、水溶性- P_2O_5 、Truog- P_2O_5 とも全般に38日目の方が22日目より低い水準で時間の経過と共に非可給態に変化する傾向がうかがわれた。

根の生育量およびTTC還元法による根活性の測定結果を表23に示した。

根の生育は地上部の生育とほぼ同様の傾向を

表23 磷酸処理による根の生育および活性の変化

磷酸形態	磷酸施用量 (P_2O_5 g/ポット)	乾物重 (g/ポット)			根 活 性 (Formazan μ moles / hr / 乾根)					
		10日目	22日目	38日目	10日目		22日目		38日目	
					1 g 当り	個体当り	1 g 当り	個体当り	1 g 当り	個体当り
WP	0	0.083	0.35	0.59	7.86	0.13	4.90	0.34	4.56	0.54
	1	0.095	0.35	0.80	9.09	0.17	6.30	0.44	4.82	0.77
	2	0.097	0.45	1.10	9.21	0.18	6.34	0.57	5.08	1.12
	3	0.088	0.50	1.43	9.24	0.16	7.08	0.71	5.04	1.44
WP/CP	4	0.091	0.49	1.64	9.15	0.17	6.63	0.65	5.20	1.71
	1	0.079	0.36	0.79	9.00	0.14	5.87	0.42	4.71	0.74
CP	2	0.092	0.43	0.97	9.01	0.17	6.38	0.55	5.00	0.97
	1	0.069	0.39	0.58	9.11	0.13	6.03	0.47	3.10	0.36
"	2	0.076	0.50	0.67	9.04	0.14	6.30	0.63	3.10	0.42

示し、22日目では施用磷酸形態間の差が不明瞭であったが、38日目では明らかに $WP > WP/CP > CP$ の順に乾物重は低下した。

根活性は乾根 1 g 当りの比活性と作物 1 個体当りの活性について比較した。まず、g 当り活性についてみると、10日目では -P 区が低い値を示した以外、磷酸の施用量、形態間では大差ない値であった。しかしながら、22日目以後は磷酸施用量の増加に伴って各磷酸形態とも活性の高まる傾向がみられ、また、形態間でも WP 系列が全般に高い値で、次いで、WP/CP、CP の順に低くなる傾向が認められた。一方、個体当りの活性は根の生育量も大きく影響して、10日目では磷酸用量、形態間差が不明瞭であったものの、22日目以後は磷酸施用量増加によって活性は高まり、かつ、形態間でも WP 系列は最も高く、CP 系列は低く、WP/CP 系列は中間の値を示した。

これら根の生育量、活性が地上部とどの程度関係しているかを相関関係でみると（表24）,

表24 地上部生育量と根重、根活性との相関関係

項 目	相 関 係 数	
	22 日 目	38 日 目
根 重	0.827 **	0.990 **
根活性 (g 当り)	0.917 **	0.633
" (個体当り)	0.927 **	0.971 **

注) ** : 1%水準で有意

根重は時期に関係なく地上部重と有意の相関関係が得られ、根活性も個体当りでは22日目、38日目とも有意の関係が得られ、g 当りでは22日目で有意であった。いずれにしても、根の生育状況、活性とも地上部の生育と密接に関係していることが認められた。また、土壤中の磷酸水準と地上部、根の生育量、磷酸含量との間には有意の相関関係があり（表25）、個体当り根活性との間にも高い相関係数が得られた。g 当り根活性は22日目で $Truog - P_2O_5$ と有意の関係がみられたのみで、土壤磷酸水準との関係はや

や低いと判断された。

表25 土壤中の磷酸水準と地上部重、根重、作物体磷酸含量、根活性との相関関係

項 目	相 関 係 数			
	水溶性 - P_2O_5		$Truog - P_2O_5$	
	22日目	38日目	22日目	38日目
地 上 部 重	0.866 **	0.956 **	0.940 **	0.944 **
根 重	0.608	0.955 **	0.804 **	0.935 **
作物体磷酸含量	0.947 **	0.977 **	0.902 **	0.930 **
根活性 (g 当り)	0.656	0.617	0.810 **	0.427
" (個体当り)	0.686 *	0.943 **	0.865 **	0.880 **

注) * : 5%水準で有意, ** : 1%水準で有意

3. 考 察

小豆の初期生育に対する磷酸効果を解析的にみるため、施肥磷酸の施用量および形態を変えて検討した。

WP, WP/CP, CP の3形態とも施用量を増すほど地上部、根の生育量は増大し、根活性も高まる傾向がみられた。しかしながら、形態間で比較すると、生育増大効果はWPが最も高く、CPは終始劣って、WP/CP はその中間であった。地上部生育量と根の生育量との間には密接な関係が認められ、根活性と地上部生育との間にも有意の相関関係が得られた。

磷酸施用量を増すことによって土壤中の磷酸水準は高まるが、可給態磷酸としてはWPが最も高く、WP/CP, CP の順に低い値で、当然のことながら水溶性磷酸の可給化程度の高ことが認められた。この土壤中の可給態磷酸としての水溶性 - P_2O_5 、 $Truog - P_2O_5$ 量と地上部、根の生育、磷酸含量、および根活性（個体当り）との間には高い相関関係がみられ、土壤の磷酸水準が各生育因子に大きく影響していることが認められた。

このように土壤中の可給態磷酸水準が高まることによって生育は増大するが、この生育増進の引き金として土壤磷酸がまず根の活性を高め、それが生育増大に反映するものと仮定してみた。

しかしながら、土壤中の可給態磷酸水準と根の比活性としての g 当り根活性との間にはほとんど有意の相関がみられなかった。したがって、土壤磷酸が直接根の活性増大に作用したとは考えにくく、土壤中の可給態磷酸量の増加によって作物の磷酸吸収が進み、生育増大に伴って根の生長も増進し、このため二次的に個体当りの根活性が高まったものと推定される。土壤の磷酸肥沃度増大に伴う生育増進現象は磷酸の吸収増加により磷酸代謝が活発となり、細胞分裂、組織の発達が促がされた結果としてみるのが妥当であろう。

いずれにしても、小豆の初期生育に対する磷酸効果は明らかであり、施用する磷酸形態としてはWPの効果が高く、生育増進のためには水溶性磷酸主体の施肥が重要と判断された。橋本ら²⁶⁾は大豆を用いて低温、磷酸施肥の生育、収量に及ぼす影響を検討し、初期生育に対しては過磷酸石灰の効果が高いが、最終的な収量では差がなかったことを報告している。本試験はあくまでも初期生育に対する磷酸効果をみたもので、収量に対する影響については次節で論議する。

第2節 磷酸の形態および施用法の差異が生育・収量に及ぼす影響

小豆の初期生育増進に対して水溶性磷酸の効

果が明らかとなったが、この効果が開花以降の生育中、後期の生育および子実形成の生殖生長にまで持続するものかどうかを明らかにしておく必要がある。村山ら⁹⁴⁾は大豆について、磷酸の生育初期における供給と同時に後期における供給も子実形成上重要であることを報告し、平井³⁴⁾は後期磷酸供給の上から熔成磷酸の有効性を述べている。

また、磷酸の施用法としては培地全体の磷酸水準をあげることが最もよいとされているが、そのためには投入される磷酸資材量が莫大となり、経営的に困難な場合があると想定される。したがって、磷酸の効率的施用法についても十分吟味しておかなければならない。

そこで、圃場条件で施肥磷酸の形態を変え、さらに、全面全層施用、作条施用の2方法を組合わせた試験を、気象条件も加味して、十勝地方で最も気象条件のよい中央地帯と冷涼とされる山麓地帯の2カ所で実施した。

さらに、火山性土における施肥磷酸の可給態としての持続性について形態別に比較検討した¹³⁸⁾。

1. 実験方法

試験は中央地帯（十勝農試圃場）と山麓地帯（十勝管内鹿追町、褐色火山性土）の2カ所で1982年に行われた。両試験地の土壤理化学性は表26に示したとおりで、土壤の磷酸条件には大きな差はみられなかった。

表26 試験地土壤の理化学性

試験地	土性	pH (H ₂ O)	CEC (me/100g)	置換性塩基 (mg/100g)			Truog - P ₂ O ₅ (mg/100g)	熱水抽出 - N (mg/100g)	磷酸吸 収係数
				K ₂ O	CaO	MgO			
中央地帯	S L	5.6	10.2	15.4	180.7	19.8	4.9	3.5	1,749
山麓地帯	S L	5.6	25.0	25.3	390.1	13.3	3.5	9.6	1,854

供試品種として「ハヤテショウズ」を用い、栽植密度は両試験地とも前章までの試験と同一として、中央地帯は5月21日、山麓地帯は5月25日に播種した。

磷酸施肥処理は全層施用量としてP₂O₅ 0, 50, 100 kg/10aの3段階、作条施用量として

P₂O₅ 0, 15, 30, 45 kg/10aの4段階を設け、さらに、作条施肥について水溶性磷酸単用(WPと略称)、水溶性磷酸とく溶性磷酸を1:1で併用(WP/CP)の施肥磷酸形態を変えた2系列を設け、磷酸施用法、磷酸形態をそれぞれ適宜組合わせた14~16処理(表27)とした。

表27 試験区の構成

区 No.	全層施肥量 (P_2O_5 kg/10a)	作条施肥量 (P_2O_5 kg/10a)		試験区の有無	
		W P	C P	中央地帯	山麓地帯
1	—	—	—	○	○
2	—	15.0	—	○	○
3	—	30.0	—	○	○
4	—	45.0	—	○	○
5	—	7.5	7.5	○	○
6	—	15.0	15.0	○	○
7	50.0	—	—	○	○
8	50.0	15.0	—	○	○
9	50.0	30.0	—	○	○
10	50.0	7.5	7.5	○	○
11	50.0	15.0	15.0	○	—
12	100.0	—	—	○	○
13	100.0	15.0	—	○	○
14	100.0	30.0	—	○	○
15	100.0	7.5	7.5	○	○
16	100.0	15.0	15.0	○	—

全層施肥には苦土重焼燐を用い、作条施肥でW Pは過燐酸石灰を、C Pには熔成燐肥を使用した。共通肥料として両試験地とも10a当りN 4kg(硫安), K_2O 8kg(硫酸加里), MgO 5.6~16.8kg(1区のみ硫酸マグネシウムを用い、他区は全て熔成燐酸中の MgO で充当)を施用した。

生育初期(播種後46日目)、開花始(同67日目)、最大生育期(同94日目)に作物体を採取し、乾物重を求め、粉碎後全燐酸を測定した。

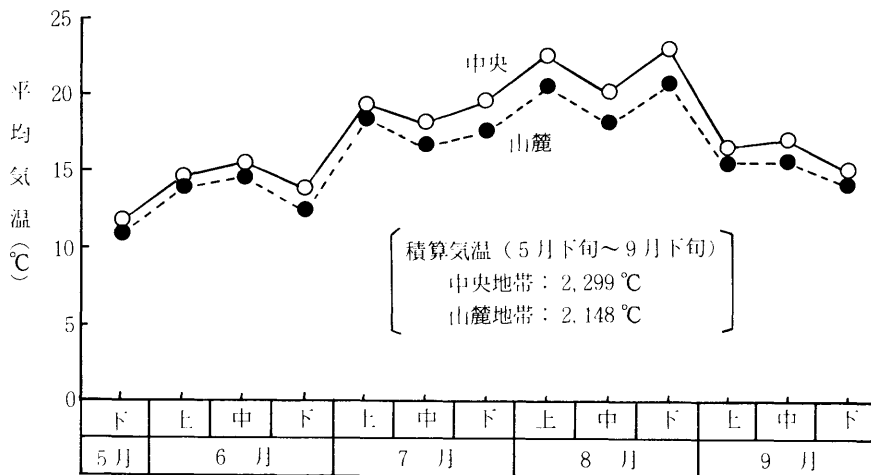


図24 中央・山麓地帯における平均気温の推移

また、播種後20日、105日目に株間より深さ10cm、幅20cmの範囲で土壌を採取し、常法によりpH, $Truog - P_2O_5$ を定量した。成熟期に達した時、中央地帯では9月20日、山麓地帯では9月29日に収穫し、収量調査を行った。

さらに、各種燐酸形態の土壌中における可給態としての持続性をみるため、中央地帯試験地の側に直径15cm、長さ30cmの無底円筒を埋設して実験を行った。すなわち、各円筒に農試土壌を充填し、表面より深さ10cmまで各燐酸資材の計算量を混和し、6月1日より自然状態で放置した。施用した燐酸形態として水溶性燐酸(W P, 過燐酸石灰)、く溶性燐酸(C P, 熔成燐肥)、W P : C P = 1 : 1 (W P / C P)の3形態とし、他に、無施用処理(- P)を設けた。各形態燐酸の施用量は10a当り換算で P_2O_5 100kgとした。施肥後は10日間隔で9月4日まで土壌を採取(深さ10cm)し、水溶性- P_2O_5 と $Truog - P_2O_5$ を測定した。

2. 実験結果

1) 生育反応および燐酸集積状況

本実験を実施した1982年は播種後低温に経過し、初期生育はやや停滞したものの7月に入って気温も上昇し、生育は回復して以後は順調な生育経過を示した。小豆栽培期間中の両地帯における旬別平均気温は図24に示したとおりで、

中央地帯が山麓地帯より常に1～2℃高く推移し、期間中の積算気温も山麓地帯が150℃ほど低く、冷涼さを裏付けた。

播種後46日目(生育初期), 67日目(開花始), 94日目(最大生育期)における生育量を無磷酸区(1区)の乾物重を100とした乾物重比で表わし、表28に示した。

表28 生育反応(1区(無磷酸区)の乾物重を100とした比率) (%)

区 No.	中 央 地 帯			山 麓 地 帯		
	46日目	67日目	94日目	46日目	67日目	94日目
1	(0.24)	(1.34)	(8.34)	(0.16)	(0.85)	(5.61)
2	167	273	199	238	242	179
3	237	399	247	213	358	220
4	283	471	252	294	405	299
5	133	245	129	169	195	178
6	183	243	150	219	252	191
7	100	169	113	169	181	144
8	179	319	246	194	341	225
9	250	420	241	213	331	259
10	158	269	176	188	236	228
11	208	304	209	—	—	—
12	104	232	124	181	258	188
13	200	328	222	213	360	225
14	267	437	250	306	424	302
15	187	263	200	225	316	239
16	217	372	220	—	—	—

注) () 内数字は実乾物重(g/個体)

磷酸施用量の増加に伴う生育増進効果は施肥磷酸の形態、施用法にかかわらず認められ、しかも、生育初期のみならず後の時期においても同様の効果がみられた。全区を通して中央地帯では4区が、山麓地帯では14区が終始最も生育量大で推移した。また、地帯間で比較すると、山麓地帯での生育量は中央地帯の%程度であったが、磷酸増肥による生育量増大の程度は山麓地帯の方が高い傾向であった。

施肥磷酸の形態、施用法別にみると、磷酸形態の初期生育増進に対する効果は地帯に関係なくWPがWP/CPより高く、67, 94日目について

も同様であった。施用法では、全層磷酸施用量増加による生育増進効果は中央地帯より山麓地帯で高く現われたが、中央地帯はもちろんのこと山麓地帯でも全層施肥による増肥効果は作条増肥のそれより低かった。全層、作条施肥を比較して、全層磷酸100kg施用(12区)の生育量は山麓地帯で作条WP15kg施用(2区)にほぼ匹敵したものの、中央地帯では及ばなかった。

磷酸集積状況(表29)も生育量とほぼ同様の傾向を示し、磷酸施用量増加に伴って磷酸含量

表29 作物体磷酸含量 (mg/個体)

区 No.	中 央 地 帯			山 麓 地 帯		
	46日目	67日目	94日目	46日目	67日目	94日目
1	1.5	9	57	0.8	6	46
2	2.7	29	104	2.8	17	76
3	4.8	41	123	3.4	26	92
4	7.0	50	128	5.1	30	125
5	2.0	21	67	1.6	12	77
6	3.1	23	77	2.5	17	97
7	1.4	17	68	1.7	11	68
8	3.1	34	138	2.4	24	104
9	5.6	45	142	3.2	26	112
10	2.6	27	98	1.8	17	107
11	4.0	32	120	—	—	—
12	1.6	23	70	1.9	17	83
13	3.7	33	126	2.8	25	103
14	6.0	45	135	4.9	35	138
15	3.1	26	118	2.7	22	112
16	4.2	37	130	—	—	—

は高まり、形態間でみると、46, 67日目は両地帯ともWP系列がWP/CP系列を上回ったが、山麓地帯の94日目において逆転する現象がみられた。施用法間で比較した場合、全層磷酸100kg施用区(12区)の磷酸含量は中央地帯では作条WP15kg施用(2区)より低く、山麓地帯では作条WP15kg施用区とWP30kg施用区(3区)との間であった。

2) 収 量 反 応

収量調査の結果を表30, 31に示した。

表30 中央地帯における収量構成要素および収量

区 No.	着 莢 数 (個/株)	収 量 (kg/10a)		子実収量比 (%)		子 実 重 歩 合 (%)	1,000 粒 重 (g)
		総 重	子実重	対無磷 酸 比	対 作 条 無磷酸比		
1	40.6	236	135	100	100	57.3	92
2	49.8	270	211	156	156	57.1	102
3	48.2	385	215	159	159	55.9	99
4	55.2	435	249	184	184	57.2	105
5	46.0	354	202	150	150	57.1	99
6	48.2	365	209	155	155	57.2	98
7	45.5	272	161	119	100	59.1	98
8	51.2	388	224	166	139	57.7	98
9	51.3	411	236	175	147	57.5	101
10	50.6	371	209	155	130	56.5	98
11	51.2	390	214	159	134	54.7	97
12	46.1	343	205	152	100	59.7	97
13	50.8	399	235	174	114	58.8	99
14	53.8	408	230	170	112	56.4	99
15	52.8	375	216	160	105	57.7	98
16	50.8	396	234	173	114	59.1	101

表31 山麓地帯における収量構成要素および収量

区 No.	着 莢 数 (個/株)	収 量 (kg/10a)		子実収量比 (%)		子 実 重 歩 合 (%)	1,000 粒 重 (g)
		総 重	子実重	対無磷 酸 比	対 作 条 無磷酸比		
1	33.1	242	164	100	100	67.9	138
2	46.4	356	247	151	151	69.6	134
3	53.3	387	265	162	162	68.6	132
4	56.8	406	277	169	169	68.1	134
5	51.8	317	219	134	134	69.3	133
6	52.4	340	240	146	146	70.4	134
7	44.7	323	225	137	100	69.7	133
8	55.6	383	269	164	120	70.2	137
9	54.4	392	271	165	120	69.1	132
10	47.0	336	235	143	104	70.0	133
12	46.0	346	239	146	100	69.0	131
13	57.0	417	289	176	121	69.3	137
14	55.7	448	312	190	131	69.6	137
15	49.5	406	279	170	117	68.5	135

中央地帯は試験圃全体が極く軽度の落葉病にかかったため、収量水準は山麓地帯よりやや低い結果となった。最高収量は中央地帯では作条 WP 45kg 施用区 (4 区) で、山麓地帯では全層 100 kg に作条 WP 30kg 施用を組合わせた処理 (14 区) で得られた。

中央地帯の全層 100 kg 施用の系列を除いて、両地帯とも 100 kg 施用によって収量は高まり、形態間では、WP が WP/CP より高い収量水準を示した。中央地帯の全層 100 kg 施用系列では 100 kg 施用によって枯上りが促進され、粒肥大が十分進まなかったためか、作条施肥で WP 30kg 施用区 (14 区) の収量は WP 15kg 施用区 (13 区) および WP/CP 30kg 施用区 (16 区) より低い値であった。

地帯別にみると、全層あるいは作条施肥の 100 kg 施用に伴う増収率は山麓地帯が高く現われ、かつ、全層 100 kg 施用量が低いほど作条 100 kg 施用の効果が明らかに高まったが、中央地帯ではその差が小さかった。

3) 100 kg 施用に伴う土壌 100 kg 水準の変化

播種後 (施肥後) 20 日目、105 日目の土壌 pH および Truog - P_2O_5 水準を測定した結果 (表 32), pH (20 日目のみ) は施肥層も含まれているため、全体に 5.0 ~ 5.4 の範囲の低い値で、処理間に一定の傾向はみられなかった。

Truog - P_2O_5 水準は当然のことながら 100 kg 施用の形態、施用法の違いにかかわらず 100 kg 施用量の多いほど高まった。時期間では大差なく、両地帯における最高値は中央地帯では全層 100 kg に作条 WP/CP 30kg 施用を組合わせた 16 区の 82.1 mg / 100 g で、山麓地帯では全層 100 kg + 作条 WP 30kg 施用 (14 区) の 58 mg / 100 g であった。形態間で比較すると、一般に WP 系列より WP/CP 系列の方が高いようであった。これは Truog 法が酸抽出のため 100 kg 施用中の可溶性 100 kg 施用をも溶解し、かつ、WP/CP 形態での土壌による固定作用が WP 形態

表 32 土壌の pH, 100 kg 水準

区 No.	中 央 地 帯			山 麓 地 帯		
	pH (H ₂ O)	Truog - P_2O_5 (mg / 100g)		pH (H ₂ O)	Truog - P_2O_5 (mg / 100g)	
	20 日目	20 日目	105 日目	20 日目	20 日目	105 日目
1	5.1	4.0	4.0	5.0	5.0	7.9
2	5.1	22.3	22.3	5.1	16.7	19.4
3	5.2	42.9	44.1	5.1	41.8	39.6
4	5.2	72.5	71.0	5.1	56.5	68.1
5	5.2	30.7	37.3	5.1	25.5	32.7
6	5.3	57.1	62.9	5.3	49.8	43.9
7	5.3	8.2	10.4	5.2	10.4	9.8
8	5.2	39.7	40.0	5.4	24.8	21.6
9	5.3	52.6	54.4	5.2	52.8	46.9
10	5.3	36.5	36.8	5.2	39.2	39.6
11	5.3	67.0	64.3	—	—	—
12	5.4	10.2	11.7	5.3	12.6	11.5
13	5.3	45.1	50.0	5.4	40.2	30.0
14	5.3	66.9	72.2	5.2	58.0	52.1
15	5.3	43.0	38.1	5.2	52.1	45.9
16	5.1	77.1	82.1	—	—	—

よりやや鈍いためと推定された。しかしながら、20 日目と 105 日目との差は WP, WP/CP 両形態を通してほとんどみられなかった。施用法間では、両地帯とも全層 100 kg 施用区 (12 区) の Truog - P_2O_5 量は WP, WP/CP を問わず作条 15kg 施用 (2, 5 区) より低い値であった。

4) 100 kg 施用形態別可給化持続性の比較

WP, WP/CP, CP の 3 形態について施肥後土壌中で可給態 100 kg として存在する量を経時的に測定した (図 25)。

可給態 100 kg 測定法の中で最も可給性が高いとされる水溶性 - P_2O_5 についてみると、施肥直後 WP の P_2O_5 量は他形態に比べ著しく高く、時期が進むにつれて次第に低下した。一方、CP は当初 - P と同様に 0 ~ 0.1 ppm の低い水準で推移し、8 月以降に高まった。WP/CP は両者のほぼ中間の値で推移した。9 月 5 日の最終

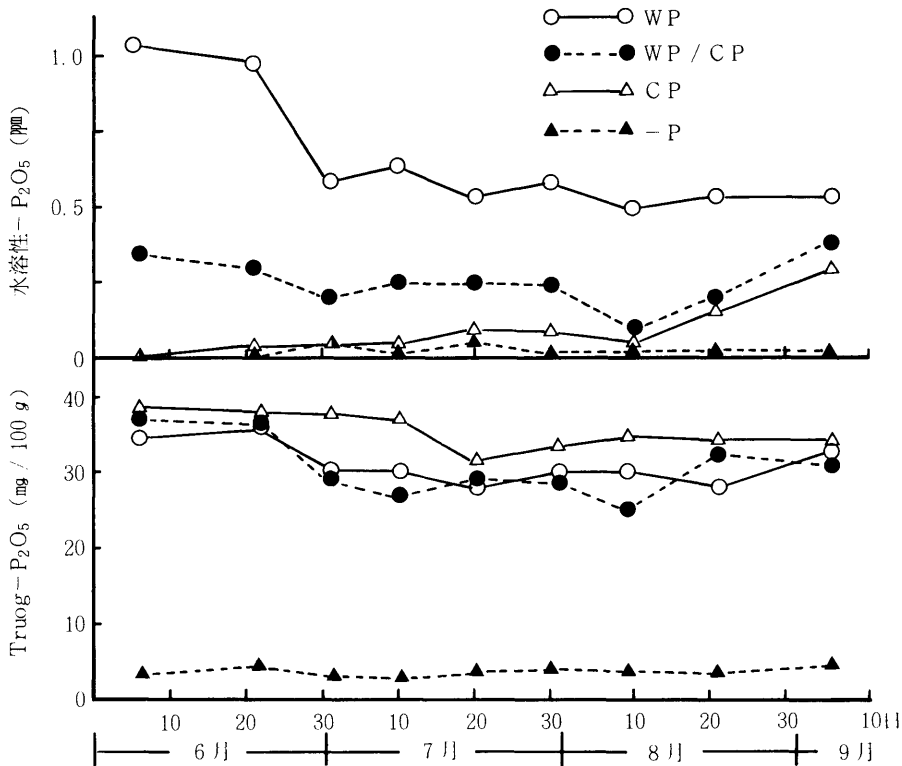


図25 施肥磷酸形態の土壌における可給態磷酸としての持続性比較

的な P_2O_5 量は $WP > WP/CP > CP$ の順に WP が最も高い値を示し、WP の可給態磷酸としての持続性は 9 月まで十分にあることが認められた。

Truog- P_2O_5 は終始 CP が最も高い量で推移したが、3 形態間の差は小さかった。

3. 考 察

施肥磷酸の形態および施用方法を変えて小豆の生育、とくに後半における生育さらに収量に及ぼす影響を検討した。その結果、磷酸形態では WP 単用の生育増進効果が明らかに認められ、しかも、生育初期のみならず開花以後の生育後期までその効果が持続した。収量についても、磷酸増肥による増収効果は明らかで、同時に、磷酸形態間の比較でも WP は WP/CP を上回った。すなわち、WP は生育全期間にわたって効果が発現するといえる。

一般に、WP は施肥後土壌中で速やかに固定され、非可給態の形態となるため、その肥効は生育初期のみで、作物の磷酸要求量が増大する生育後期の磷酸供給は緩効性の CP で補給する必要があるとされてきた。大豆の子実形成のためには開花期以後の磷酸供給が重要であるとの報告^{94, 95, 139)}があり、平井³⁴⁾は大豆の生育後半の磷酸吸収が土壌中の A 態磷酸を主体的に利用していることを認め、大豆に対する磷酸施肥として CP 重視を述べている。山本ら¹⁶⁶⁾も火山灰土壌で A 態磷酸の有効度が高いことを認め、磷酸肥沃度判定の指標として A 態磷酸 70 mg 以上を提案しており、高橋ら¹⁴⁶⁾も A 態磷酸が多い条件でとうもろこしの後期磷酸供給が図られることを報告している。このように、作物への磷酸供給として生育初期のみならず後半の供給も重要とされているのであるが、要は WP が実際に土壌中で速やかに非可給化するかどうか

かが問題となる。

圃場試験と併行して行った各磷酸形態の土壤中で可給態として存在する量の経時調査実験より、確かに WP は時間の経過と共に低下して行くものの、小豆の登熟盛期に当る 9 月の段階でも CP, WP/CP より高い水準を維持していることが示された。また、圃場試験の土壤分析結果においても、 $\text{Truog-P}_2\text{O}_5$ 水準としては WP が WP/CP よりやや低い値を示したが、その差は小さく、WP がとくに非可給態化したとは考えられない。作物生育、磷酸吸収の面からみても、WP 系列が WP/CP 系列を上回っており、生育後期においても WP 系列の磷酸供給が十分にあったことは明らかである。

これらの結果から、WP は小豆の生育期間の範囲内でみるならば十分に可給態の磷酸として維持され、生育初期段階における高水準の可給態磷酸としての存在による生育増進に加えて、後期生育さらに子実形成増進に最も有効な磷酸形態であるといえよう。

なお、本実験では WP として過磷酸石灰を用いたが、過磷酸石灰は強酸性であり、その多量施用は土壤 pH を低下させるとの報告^{97, 165)}があり、他方、圃場条件における一般的な磷酸施肥としての過磷酸石灰量では土壤 pH に影響しないとの報告^{48, 117)}がある。本実験での土壤 pH 反応は処理間にほとんど差がなく、磷酸(P_2O_5) 30kg 程度の施用量では pH に大きく影響しないものと判断される。

一方、磷酸施用法としては全般に作条磷酸増肥の効果が全層磷酸増肥より高く発現し、中央、山麓を通して、全層磷酸 100 kg 施用処理は作条磷酸 15kg 施用処理と同等かむしろ劣る傾向であった。したがって、小豆の磷酸施用法としては作条施肥主体が妥当と考えられる。磷酸は土壤中ではほとんど移動しないとされており^{45, 141)}、分散施用せずに根の近くに施用するのが有効であるとの報告が多い^{9, 46, 98, 140)}。しかしながら、本実験でも明らかなように、冷涼な山麓地帯での磷酸増肥効果が気象条件の比較的良好な中央地帯

より高いことと併せて、全層磷酸施肥効果が山麓地帯で認められたことから、低温に弱いとされる小豆では全層施肥による根圏域全体の磷酸富化も十分考慮する必要がある。

第 3 節 根粒着生に及ぼす磷酸施肥の影響

第 2 章第 4 節において、窒素施用量の増加は小豆の根粒着生を阻害することを述べたが、それでは、磷酸施肥は根粒に対してどのように影響するものであろうか。

磷酸は根粒の生理機能に深く関係し、磷酸の欠除は根粒着生を著しく低下させることが報告されている^{65, 105)}。また、筆者¹²⁸⁾も石灰、磷酸および堆肥などの資材を土壤に施用することにより、小豆の根粒着生がどのように影響されるかを調査し、その結果、磷酸多施用が最も根粒着生を増大させ、磷酸に堆肥を併用することによって着生量が一層高まることを認めた。

ここでは、磷酸の施用量を変えた処理を行い、根粒着生に対する影響、さらに、生育収量と根粒着生量との相互関係を検討した。

1. 実験方法

1 m² のコンクリート枠に農試土壤を充填し、小豆 2 品種（「茶殻早生」，「栄小豆」）を供試して、枠当たり 4 株（2 本立）ずつ 50 cm の畦幅で 2 列、計 8 株の密度で栽培した。

処理内容として、磷酸施用量を m² 当り P_2O_5 0, 50, 100, 150, 200 g (各々 P 0, P 50, P 100, P 150, P 200 と略称) の 5 段階とし、さらに、磷酸 100 g 施肥に堆肥 2 kg を併用した処理 (P 100 + 堆肥区)、および堆肥 2 kg のみを施用した処理 (堆肥区) の 2 処理を加えて計 7 処理で実験を行った。磷酸、堆肥は全面全層施用で作土 20 cm と混和し、用いた磷酸資材は過磷酸石灰と熔成磷酸を半量ずつとした。資材施用処理は播種前に行い、播種時に共通施肥として、m² 当り N 3 g (硫安)、 P_2O_5 12 g (過磷

酸石灰、熔成磷肥半量ずつ）、 K_2O 8 g（硫酸加里）を作条施肥した。

播種後60日目の7月29日に土壌を採取して土壌中の $Truog - P_2O_5$ 量を測定した。根粒着生量測定は開花前の7月23日（播種後54日目）と莢実肥大始の8月12日（播種後83日目）の2回行い、根粒の数および重量（乾物）を求めた。なお、8月12日の「栄小豆」についてアセチレン還元法による窒素固定能を測定した。根粒調査と同時に作物地上部を採取し、乾燥後粉碎して、全窒素含量をケルダール・ガンニング変法で測定した。

成熟期に達した時、「茶殻早生」は9月20日、

「栄小豆」は9月26日に収穫し、それぞれ収量調査を行った。

2. 実験結果

小豆根粒の窒素固定能は8月中旬の莢実肥大始頃に最大となるが、この時期と開花前の生育初期との2時期について根粒着生状況を調査し、結果を表33に示した。

品種別に比較してみると、7月23日では品種間差が小さく、ほぼ同程度の着生量であったが、8月12日調査では「栄小豆」の方が「茶殻早生」より数、重量とも優り、第2章第3節の結果を裏付けた。

表33 根粒の着生状況

品 種	処 理	7 月 23 日			8 月 12 日			
		根粒数 (個 / ml)	根粒重 (g / ml)	1 個重 (mg)	根粒数 (個 / ml)	根粒重 (g / ml)	1 個重 (mg)	窒 素 固定能 [*]
茶 殻 早 生	P 0	788	0.41	0.51	674	1.05	1.55	—
	P 50	1,102	0.64	0.58	1,075	3.27	3.04	—
	P 100	1,116	0.67	0.59	1,033	3.34	3.23	—
	P 150	1,186	0.78	0.65	1,316	3.85	2.92	—
	P 200	1,160	1.12	0.96	1,371	4.82	3.51	—
	P 100 + 堆肥	1,548	1.78	1.14	1,381	5.67	4.10	—
	堆 肥	1,209	0.95	0.78	1,080	4.10	3.79	—
栄 小 豆	P 0	1,292	0.49	0.37	1,038	1.53	1.47	16.4
	P 50	1,421	0.75	0.52	2,270	4.84	2.13	18.5
	P 100	1,336	0.84	0.63	2,410	5.53	2.29	20.4
	P 150	1,345	0.87	0.64	2,209	5.61	2.54	27.6
	P 200	1,420	0.88	0.61	2,282	6.21	2.72	21.8
	P 100 + 堆肥	1,618	0.83	0.51	2,409	5.51	2.28	—
	堆 肥	1,063	0.51	0.47	1,844	3.94	2.13	—

注) * : アセチレン還元量 ($\mu moles/hr./個体$)

処理別では、根粒着生に対する磷酸施用の効果が明らかに認められ、両品種とも P 0 区の着生状況が最も悪く、磷酸施用量の増加に伴って根粒数、重量は増大し、さらに、根粒 1 個重も高まる傾向がみられた。また、堆肥施用によっても着生量は増加し、堆肥と磷酸施用を併用することによって一層良好となり、「茶殻早生」では処理中最高の着生量を示した。

磷酸施用量を増すことによって土壌中の可給態磷酸水準は高まるが、土壌中の $Truog - P_2O_5$ 水準と 8 月 12 日の根粒重とを対比させてみると（図 26）、 $Truog - P_2O_5$ 水準が高まるに従って根粒重も増すことが認められた。しかしながら、 $Truog - P_2O_5$ 10 $mg/100g$ 以上では根粒重の増加割合が鈍化する傾向であった。

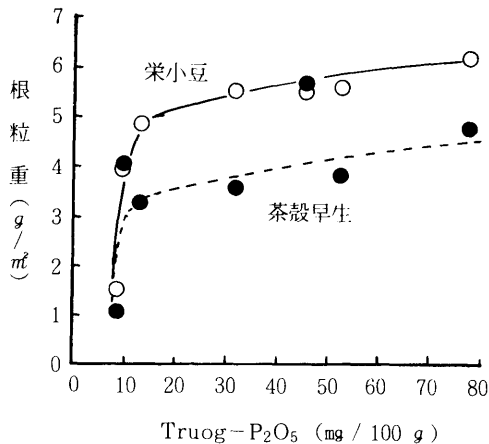


図26 土壌中の Truog-P₂O₅ 水準と
根粒着生との関係

表34に示したように、磷酸を増施することによって生育量が増大し、堆肥区も磷酸処理と遜色ない生育を示し、磷酸、堆肥併用の P 100 + 堆肥区の生育が両品種とも最も旺盛に堆移した。窒素集積量についてみると、磷酸施用処理の集積量は P 0 区より高いものの、施用量間の差は小さく、「栄小豆」の方で磷酸施用量増加により僅かに高まる傾向がみられた。堆肥区、P100 + 堆肥区の窒素集積量は高く、磷酸施用処理をほぼ上回り、品種間では「茶殻早生」でその傾向が強くみられた。

各処理の子実収量をみると（図27）、生育反応と同様に磷酸増施により収量は増加し、

表34 生育量と窒素集積量

品 種	処 理	乾物重 (g/m ²)		窒素集積量 (g/m ²)		
		7月23日	8月12日	7月23日	8月12日	成 熟 期
茶殻早生	P 0	15.7	134.4	0.70	4.68	10.49
	P 50	21.1	204.4	1.17	6.74	13.94
	P 100	22.7	196.7	1.11	6.63	14.81
	P 150	24.7	222.1	1.15	7.12	14.42
	P 200	26.0	198.1	0.89	6.70	14.66
	P 100 + 堆肥	31.8	237.4	1.43	8.08	17.07
	堆 肥	28.5	195.2	1.27	7.32	15.04
栄 小 豆	P 0	16.4	152.8	0.73	5.44	15.61
	P 50	22.1	191.6	1.08	6.50	20.52
	P 100	24.8	189.3	1.22	6.30	21.08
	P 150	25.5	198.9	1.23	7.01	21.85
	P 200	24.4	198.3	0.95	6.49	20.68
	P 100 + 堆肥	24.2	212.0	1.22	6.67	22.08
	堆 肥	21.4	195.6	1.25	8.98	20.25

P 100 + 堆肥区が両品種とも最高収量を示した。また、前述の根粒着生量と子実収量との関係（図28）より、両品種とも極めて高い相関関係が得られた。

3. 考 察

磷酸施用が大豆の根粒着生に有効であることは既に報告されている^{24, 74, 105)}。本実験の結果、小豆においても磷酸施用量を増すことによって

根粒着生量は増大し、根粒の着生に対する磷酸増施が根粒の肥大促進に作用することもうかがわれた。一方、磷酸施用量を増すことによって生育量も増大しており、磷酸が直接根粒菌の発育、増殖に作用したものか、あるいは作物の生育増進に作用して二次的に根粒形成を助長したものかは不明である。いずれにしても、根粒の肥大、増殖は宿主作物体内での代謝系と密接に関連しており、作物の生育状況と不可分の関係

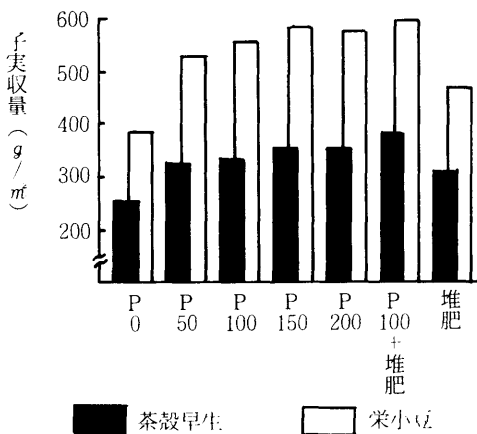


図27 子実収量の比較

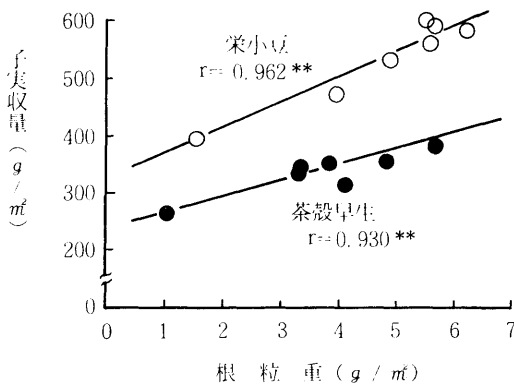


図28 根粒着生量と子実収量との関係

にあって、直接、間接を問わず根粒着生を一層高めるためには磷酸条件を十分にすることが必要と考えられる。

この磷酸条件を土壤中の可給態磷酸水準との関係でみると、 $\text{Truog-P}_2\text{O}_5$ で $10\text{mg}/100\text{g}$ 前後までは磷酸水準が高まるに従って根粒着生量も急激に増大するが、 $10\text{mg}/100\text{g}$ 以上では根粒重の増加する程度が停滞する現象がみられた。このことから、磷酸増施が無条件で根粒着生増進に作用するとは限らず、好適磷酸水準のあることが推定され、本実験結果では、土壤磷酸水準として開花始の時期まで $\text{Truog-P}_2\text{O}_5$ で $10\text{mg}/100\text{g}$ の水準に維持する程度で十分と

考えられた。しかしながら、この値には磷酸固定力の強い火山性土壌についてという限定条件が伴う。

本実験で、根粒着生増進に対する堆肥施用の効果も認められ、さらに、堆肥・磷酸を併用することによって着生量は一層高まった。この堆肥施用および磷酸・堆肥併用の効果は窒素固定能が低いとされる「茶殻早生」の方が「栄小豆」より高く現われた。

堆肥を添加することによって根粒着生が増加し、固定能が高まることは大豆について吉田¹⁷⁴⁾、橋本ら²⁵⁾が報告している。しかしながら、Trungら⁴⁾は、リョクトウの根粒着生は厩肥施用によって増加するものの単位根粒重当りの共生窒素固定能は低下することを認め、窒素固定能力が大豆より低いリョクトウでは厩肥施用効果を窒素固定増進に対してではなく、厩肥中の可給態窒素に求めるのが妥当であると報告している。この観点でみれば、小豆根粒に対する堆肥施用効果は堆肥中の窒素施用による生育増進が主要因であると考えることができる。事実、堆肥区の窒素集積量は根粒着生量で余り差のない磷酸多施区より高い傾向にあり、「茶殻早生」のように窒素固定能が低く、窒素施肥に対する反応が高い¹³¹⁾場合、堆肥中に含まれる窒素が生育を増進し、根粒着生を高めたのかもしれない。いずれにしても、堆肥施用は小豆の窒素供給にとって有効であることに変わりはない。

参考までに着生根粒重と子実収量との関係を求めた結果、両品種とも有意の高い相関関係が得られた。このことから、根粒が子実形成と密接に関係していることがうかがわれるが、本実験はあくまでも枠試験という準孤立条件での結果であり、群落条件でも適するか否かの検討は行っていない。いずれにしても、火山性土壌における磷酸増施は、生育増進のみならず根粒着生に対しても有効であり、小豆施肥上重要な意義を持っているといえよう。