第Ⅱ章　テンサイにおける初期生育障害の発生要因の解明

第Ⅰ章第１節で述べたように，近年道内各地の移植および直播栽培のテンサイ圃場において初期の生育が障害を受ける現象（初期生育障害）がしばしば全道的に問題となり（堂本ら，1994；伊槻ら，1998；新妻ら，1997），原因究明のための研究が必要となった．移植栽培における初期生育障害は，明らかな生育停滞と減収をもたらすが，直播栽培ではさらに被害程度が甚だしく，廃耕に至るケースも多々あった．そこで第Ⅱ章では，北海道における移植および直播栽培テンサイの初期生育障害について調査・解析を行い，その発生要因を明らかにしようとした．

第１節　現地実態調査による移植および直播テンサイの初期生育障害の発生要因

はじめに

全道的に発生したテンサイの初期生育障害について，現地実態調査を行うとともに根箱による栽培試験や炭酸カルシウム施用試験を行い，その発生要因を明らかにしようとした．

調査および実験方法

１）移植テンサイ圃場の調査

1997年７月中旬に十勝管内帯広市の移植テンサイ作付け圃場（移植時期：４月中旬～５月上旬）で初期生育障害が発生した12地点と，それに近接する正常な生育を示した圃場11地点について調査を行った．調査した土壌は火山性土（黒ボク土または多湿黒ボク土）が19地点（障害９地点，正常10地点），沖積土（褐色低地土）が４地点（障害３地点，正常１地点）であった．なお土壌の分類は北海道土壌区一覧（北海道立中央農業試験場，1993）に準拠した．調査内容は圃場管理状況の聞き取り，障害発生状況および植物体の観察，土壌調査等である．土壌試料は畦間および株間の表層０―15㎝から内径3.5㎝の採土器を用いて４カ所から採取したものを混合して１試料とした．土壌試料は風乾後，土壌pH（ガラス電極法，土：水＝１：2.5），交換酸度（y_1）（以下y_1と略記，土：１N-KCl溶液＝１：2.5で振とう・濾過，濾液10㎖を，フェノールフタレインを指示薬として煮沸直後に0.1N-NaOHで滴定），EC（１：５水浸出法），CEC（Schollenberger法），交換性CaO，MgO，K_2O（常法・浸透法），有効態リン酸（Truog法）の分析を行った．また，10月15日に収量調査を実施し，さらにテンサイの地上部（葉）と根部（根）についてCaO，K_2O含有率を，硫酸－過酸化水素分解法により分析した．なお，分析は常法（土壌養分測定法委員会編，1981；北海道立中央農業試験場・北海道農政部農業改良課，1992）により行った．

表 Ⅱ-1 直播テンサイにおける調査地点数の内訳 (1997～2000 年).

支庁	調査地点数 障害	調査地点数 正常	合計	土壌*	調査地点数 障害	調査地点数 正常	合計
十勝	76	91	167	火山性土	112	190	302
網走	4	106	110	沖積土	18	37	55
後志	27	26	53	洪積土	13	21	34
胆振	19	13	32				
石狩	9	4	13				
檜山	6	6	12				
渡島	1	1	2				
日高	1	1	2				
合計	143	248	391	合計	143	248	391

*火山性土は黒ボク土，多湿黒ボク土，火山放出物未熟土を，沖積土は褐色低地土，灰色低地土を，洪積土は褐色森林土，灰色台地土をそれぞれ総称した(北海道立中央農業試験場, 1993；農耕地土壌分類委員会, 1995).

2）直播テンサイ圃場の調査

1997～2000年の６～８月に北海道内で初期生育障害が発生した直播テンサイ作付け圃場（播種時期：４月中旬～５月上旬）延べ143地点と，それに近接する正常な生育を示した圃場延べ248地点について調査を行った．調査地点数の支庁および土壌別の内訳は**表Ⅱ―１**に示した．調査内容は移植テンサイの場合とほぼ同様であるが，収量調査を実施したのは1999年の十勝支庁管内新得町（障害10地点，正常15地点）のみであり，また収量調査時の葉と根の分析は行わなかった．また，1998年には直播テンサイの慣行栽培圃場（北海道立十勝農業試験場内の淡色黒ボク土，施肥播種日：４月20日，施肥量　N-P_2O_5-K_2O：150-315-210kg ha^{-1}，作条施肥）において，5月７日，5月27日，6月22日に表層０―15㎝の土壌試料を株間，畦間それぞれから採取し，土壌pHと土壌中無機態窒素含量を生土のまま常法（北海道立中央農業試験場・北海道農政部農業改良課，1992）で測定した．なお，この圃場では初期生育障害は発生しなかった．

3）根箱を用いたテンサイ栽培実験

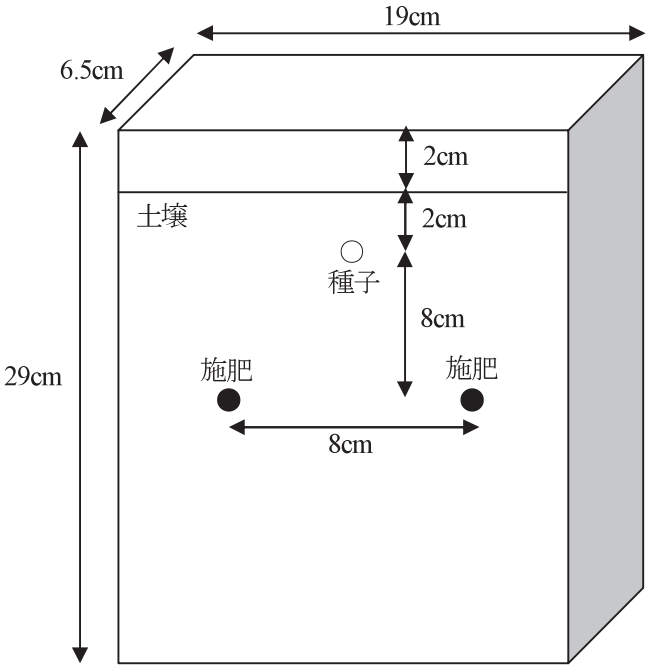

図 Ⅱ-1 根箱実験の播種および施肥位置

直播テンサイの同一圃場内で初期生育障害が発生した地点と正常な生育であった地点の作土０―15㎝（畦間）から採取した土壌を根箱に充填し，テンサイ（品種：ユーデン）を栽培した．供試土壌は多湿黒ボク土（十勝管内清水町より採取）である．使用した根箱は縦6.5㎝×横19㎝×深さ29㎝で容量は約3.5Ｌであった．深さ約17㎝まで土壌を詰めた後，N-P_2O_5-K_2O：0.63-1.03-0.68ｇの化成肥料を２本筋まきした（**図Ⅱ―１**）．さらに，土壌を８㎝詰めた後，種子２粒を播き，さらに２㎝覆土した．土壌水分と充填程度は圃場条件と同程度になるよう調整した．播種は1997年10月８日に行い，その後人工気象室（昼間20℃／夜間10℃，光条件は屋外と同等）で12月21日まで75日間栽培した．なお，この時期（10月８日から12月21日まで）の日平均日射量は7.1 MJ m^{-2}，日平均日照時間は4.8hであった．12月21日には植物体を採取・洗浄し，ピロカテコールバイオレット・ヘキサミン緩衝液（Watanabe et al.，1998）を用いて根部のアルミニウム濃度を調査した．また，植物体採取後の土壌をテンサイ栽植部位の０―７㎝より採取し，風乾後に土壌pHおよびy_1を測定した．

4）炭酸カルシウム施用試験

1998年に十勝管内清水町のテンサイ直播栽培圃場において，炭酸カルシウムの施用試験を実施した．供試土壌は多湿黒ボク土であり，施肥は全ての処理区でN-P_2O_5-K_2O：180-306-144kg ha^{-1}の化成肥料を作条施肥した．試験処理は，炭酸カルシウム無施用（無処理区），炭酸カルシウム３Mg ha^{-1}全面全層施用（全層３Mg区），炭酸カルシウム0.8Mg ha^{-1}作条施用（作条0.8Mg区）を設けた．処理区はすべて１連制であった．炭酸カルシウムの全面全層施用は４月上旬に行い，後に深さ10㎝程度まで砕土し作土と混和した．炭酸カルシウムの作条施用は４月下旬の播種時の施肥と同時に実施した．処理区それぞれについて，6月には初期生育障害状況の観察，土壌pH・植物体の乾物重の調査を，10月には収量調査を実施した．なお，無処理区，作条0.8Mg区については1999年にも同様の試験・調査を実施した．ただし初期生育時の植物体の乾物重測定は行わなかった．

5）統計解析

本研究における統計解析は，統計解析アドインソフト・エクセル統計2000 for Windows　（株式会社　社会情報サービス製）を用いて行った．

結果

1）移植テンサイ圃場の初期生育障害

移植テンサイにおける初期生育障害の症状は，移植直後では障害はなく，その後６月以降にスポット状あるいは圃場全体で生育が停滞する特徴があった（**図Ⅱ―２**）．ただし枯死個体は少なく，裸地化するほどではなかった．７月中には特に生育遅延が目立ったが，その後多くの圃場で地上部の生育は回復し，障害発生地点と正常地点の

図 Ⅱ-2 移植テンサイ圃場における初期生育障害
（中央から左下にかけて生育が停滞，1997 年 7 月 15 日撮影）

表 Ⅱ-2 移植テンサイ圃場における土壌の化学性 (1997 年 7 月採取).

項目	採取位置	初期生育障害発生地点	n	正常地点	n	有意差 (LSD 法)
土壌 pH	株間	4.36±0.17	12	5.07±0.31	11	**
	畦間	4.80±0.29	12	5.52±0.15	11	**
y_1	株間	7.43±4.38	12	1.59±1.14	11	**
	畦間	6.28±4.03	12	1.16±0.97	11	**
Truog-P_2O_5(mg kg^{-1})	畦間	197±134	12	178±69	11	—
交換性 CaO(mg kg^{-1})	畦間	610±300	12	1940±810	11	**
交換性 MgO(mg kg^{-1})	畦間	67±28	12	219±81	11	**
交換性 K_2O(mg kg^{-1})	畦間	226±56	12	374±153	11	**
Ca 飽和度(%)	畦間	10.7±4.5	12	29.9±6.7	11	**
塩基飽和度(%)	畦間	14.9±5.6	12	39.1±8.9	11	**
CEC(cmol(+) kg^{-1})	畦間	21.8±9.4	12	23.3±8.6	11	—
EC(dS m^{-1})	株間	0.83±0.17	12	0.57±0.15	11	**
	畦間	0.13±0.04	12	0.12±0.03	11	—

*は 5%水準，**は 1%水準，で有意差あり．

外観上の見分けはつかなくなった．これらの症状は，程度の違いはあったものの，初期生育障害が発生した12地点の全てに当てはまった．目視観察と各農家からの圃場管理状況の聞き取り結果を合わせても，単に前作物の影響や連作障害，排水不良による湿害，不適当な防除による薬害，強風害などが初期生育障害の原因とは考えにくかった．また典型的な病害・虫害の症状（Broom’s Barn Experimental Station，1982）にも当てはまらなかった．なお窒素施肥量は概ね150～160kg ha^{-1}であった．

調査圃場における土壌の化学性は**表Ⅱ―2**に示した．障害発生地点の土壌pHは正常地点に比べて有意に低く，y_1は有意に高かった．また，障害発生地点の交換性CaO，MgO，K_2O，Ca飽和度，塩基飽和度は正常地点よりも有意に低く，株間のECは有意に高かった．有効態リン酸（Truog-P_2O_5），CEC，畦間のECには有意な差は認められなかった．

表Ⅱ―2において障害発生地点と正常地点に有意な差があった項目と，7月15日の草丈，10月15日の根重，10月15日の葉および根のCaO・K_2O含有率との相関係数（直線回帰）を**表Ⅱ―3**に示した．7月15日の草丈は**表**

表 Ⅱ-3 移植テンサイ圃場における調査・分析結果の各項目間の相関係数 (n=23)†

		草丈	根重	葉の含有率		根の含有率		土壌pH		y_1	
				CaO	K_2O	CaO	K_2O	株間	畦間	株間	畦間
土壌pH	株間	0.841**	0.851**	NS	0.505*	NS	NS	1.000	−	−	−
	畦間	0.871**	0.838**	NS	0.507*	NS	NS	0.850**	1.000	−	−
y_1	株間	-0.822**	-0.885**	NS	-0.620**	NS	NS	-0.793**	-0.863**	1.000	−
	畦間	-0.801**	-0.837**	NS	-0.622**	NS	NS	-0.738**	-0.891**	0.962**	1.000
EC	株間	-0.624**	-0.429*	NS	NS	NS	NS	0.621**	0.566**	0.533**	0.539**
交換性塩基	CaO	0.639**	0.481*	NS	NS	NS	NS	0.578**	0.694**	-0.494*	-0.487*
	MgO	0.712**	0.602**	NS	NS	NS	NS	0.657**	0.770**	-0.558**	-0.554**
	K_2O	0.431*	0.471*	NS	0.454*	NS	NS	0.659**	0.518*	NS	NS
Ca飽和度		0.800**	0.798**	NS	0.478*	NS	NS	0.832**	0.896**	-0.732**	-0.730**
塩基飽和度		0.799**	0.839**	NS	0.545**	NS	0.441*	0.858**	0.894**	-0.751**	-0.745**

† 土壌採取(0-15cm)は7月15日．交換性塩基，Ca飽和度，塩基飽和度は畦間の分析値．草丈は7月15日，根重は収量調査時（10月15日）に測定し，葉の含有率・根の含有率は収量調査時の試料について測定した．

** ：1%水準で有意，* ：5%水準で有意，NS：有意性なし．

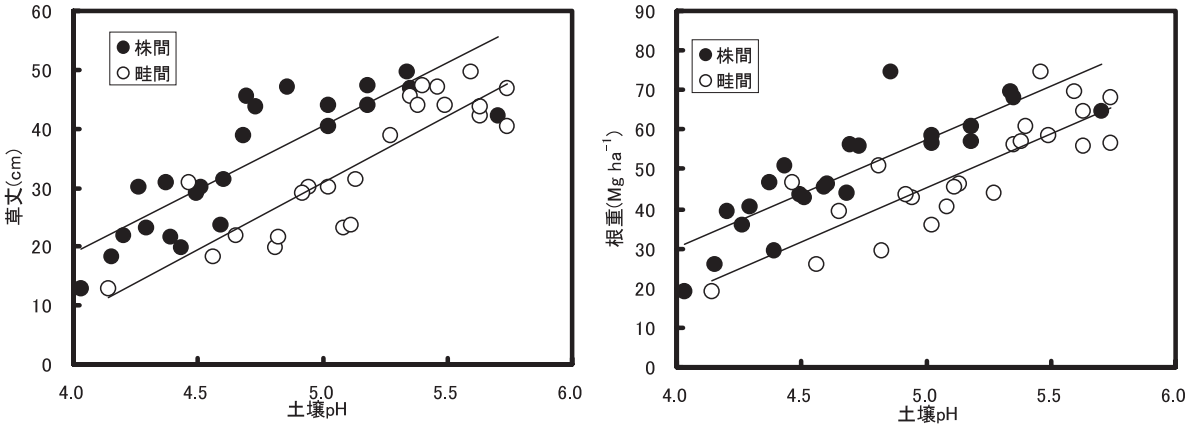

図 Ⅱ-3 移植テンサイ圃場における土壌pH(7月15日)と草丈(7月15日)および根重(10月15日)の関係 (1997年).

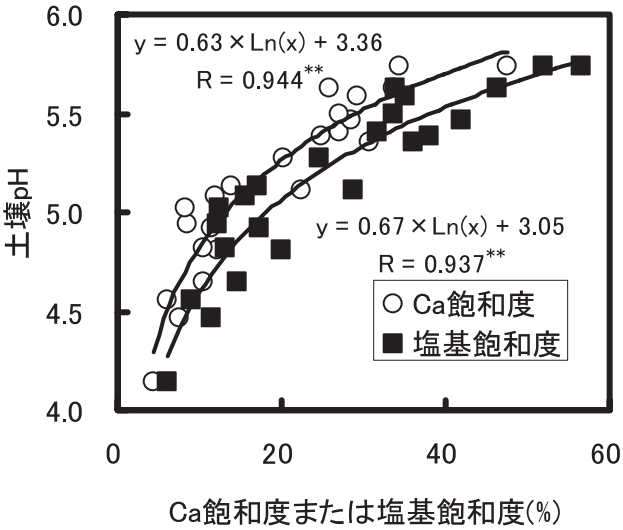

図 Ⅱ-4 Ca飽和度および塩基飽和度と土壌pHの関係
**は相関関係が1%水準で有意であることを示す.

Ⅱ―3中の全ての項目と有意な相関関係にあり，このうち相関係数の絶対値が最も大きかったのは土壌pHとy_1で，次いでCa飽和度と塩基飽和度であった．収量調査時の根重と各項目との相関関係についても7月15日の草丈の場合と同様であった．図Ⅱ―3に，7月15日の草丈および収量調査時の根重と土壌pHの関係を示した．一方，葉のK_2O含有率は土壌pH，y_1，交換性K_2O，Ca飽和度，塩基飽和度と有意な相関関係があったが，相関係数の絶対値は0.45*～0.62**であり，草丈，根重の場合と比較し小さかった（表Ⅱ―3）．根のK_2O含有率と有意な相関関係があったのは塩基飽和度（相関係数0.441*）のみであった（表Ⅱ―3）．また，CaO含有率については，葉，根ともにいずれの項目とも有意な相関関係はなかった（表Ⅱ―3）．土壌pHは，y_1，Ca飽和度，塩基飽和度と高い相関関係にあり，またy_1はCa飽和度，塩基

飽和度と高い相関関係にあった（**表Ⅱ―3**）．Ca飽和度および塩基飽和度と土壌pHの関係を対数回帰としたところ（**図Ⅱ―4**），相関係数がそれぞれ0.944**，0.937**と直線回帰の場合（それぞれ0.896**，0.894**，**表Ⅱ―3**）よりも高まった．

2）直播テンサイ圃場の初期生育障害

直播テンサイにおける初期生育障害の典型的症状は，①発芽にはほとんど問題なく，②その後6月以降にスポット状（**図Ⅱ―5**）あるいは圃場全体（**図Ⅱ―6**）に発生，③本葉2～5葉・草丈5～10㎝で生育が停滞（**図Ⅱ―7**），④葉色はやや薄い（**図Ⅱ―7**），⑤葉縁部が赤～赤褐色を呈する（**図Ⅱ―7**），⑥根はわい化し褐色を呈する，⑦甚だしい場合には個体が枯死して裸地化する（**図Ⅱ―6**），であった．これらの症状は程度の差はあったが調査した初期生育障害発生地点143地点のうち

図 Ⅱ-5 直播テンサイ圃場における初期生育障害
（スポット状に発生，1997年8月6日撮影）

図 Ⅱ-6 直播テンサイ圃場における初期生育障害
（圃場全体に発生，1997年7月23日撮影）

図 Ⅱ-7 初期生育障害を受けたテンサイ
（直播圃場にて撮影．本葉２～５葉・草丈５～10cm で生育が停滞し，葉色はやや薄く，葉縁部が赤～赤褐色を呈する．1998 年 7 月 14 日撮影）

表 Ⅱ-4 直播テンサイ圃場における土壌の化学性 (1997～2000 年).

項目	採取位置	初期生育障害発生地点	n	正常地点	n	有意差 (LSD 法)
土壌 pH	株間	4.87±0.42	143	5.03±0.36	223	**
	畦間	5.35±0.36	143	5.65±0.41	248	**
y_1	株間	5.15±3.65	141	2.62±2.12	221	**
	畦間	3.63±2.93	141	1.52±1.45	246	**
Truog-P_2O_5 (mg kg^{-1})	株間	273±214	97	444±333	177	**
	畦間	164±112	142	265±192	241	**
交換性 CaO (mg kg^{-1})	株間	1700±860	97	2360±920	177	**
	畦間	1670±820	142	2460±1360	241	**
交換性 MgO (mg kg^{-1})	株間	301±137	97	399±158	177	**
	畦間	232±125	142	337±144	241	**
交換性 K_2O (mg kg^{-1})	株間	629±293	97	769±305	177	**
	畦間	340±181	142	497±256	241	**
Ca 飽和度 (%)	株間	34.7±18.5	69	41.9±17.0	72	**
	畦間	30.4±14.5	114	39.1±14.3	111	**
塩基飽和度 (%)	株間	53.3±28.8	69	61.6±24.7	72	*
	畦間	41.1±19.7	114	52.0±20.0	111	**
CEC (cmol(+) kg^{-1})	株間	21.3±8.9	69	22.0±9.2	72	―
	畦間	22.5±10.1	114	23.0±9.1	111	―
EC (dS m^{-1})	株間	0.42±0.20	141	0.45±0.21	213	―
	畦間	0.11±0.08	139	0.10±0.06	240	―

*は 5%水準，**は 1%水準，で有意差ありを示す.

約80%に当てはまり，残り約20%の症状は目視観察，各農家からの圃場管理状況の聞き取り結果と，既往の資料（Broom's Barn Experimental Station，1982；増 田，1997；Ulrich et al.，1993）とから，砕土整地・播種深度の不具合による出芽不良，排水不良による湿害，不適切な防除による薬害，強風による風害，霜害，などのいずれかに当てはまった．

調査圃場における土壌の化学性を**表Ⅱ―4**に示した．なお，直播テンサイの初期生育障害調査は広域にわたって実施したが，地域ごとや土壌型ごとでの傾向の違いは判然としなかったため，一括して示した．初期生育障害発生地点の土壌pH，交換性CaO，MgO，K_2O，Ca飽和度，塩基飽和度は正常地点に比べて有意に低く，y_1は有意に高かった．また，初期生育障害発生地点の有効態リン酸（Truog-P_2O_5）は正常地点よりも有意に低かった．CEC，ECには有意な差は認められなかった．

表Ⅱ―5には1999年新得町で行った直播テンサイの初期生育・収量調査結果を示した．6月9日の初期生育障害発生地点の土壌pHは正常地点に比べて有意に低く，また7月6日の草丈・葉数も有意に劣った．収量調査時には，初期生育障害発生地点の収穫本数は正常地点に比べて有意に少なく，根重も有意に劣り，対正常比は平均で65%であった．1個体根重と根中糖分には有意な差はなかったが，糖量は初期生育障害発生地点で有意に劣り，対正常比は平均で66%であった．

図Ⅱ―8には直播テンサイ圃場における土壌pHと土壌中の無機態窒素含量の推移を示した．畦間では土壌pH，NO_3-N，NH_4-Nともほとんど変化しなかった．これに対し，株間の土壌pHは5月7日の段階で6.0と畦間より0.3低く，5月27日には5.3にまで低下し，6月22日には5.5に上昇した．株間のNH_4-Nは時間経過とともに減少したが，NO_3-Nは5月7日から5月27日にかけて増加し，その後6月22日にかけて減少した．

表 Ⅱ-5 直播テンサイの初期生育・収量調査結果 (1999 年 新得町).

調査地点	土壌pH (6/9測定)		初期生育 (7/6測定)		収穫調査(10/13～10/15)				
					収穫本数	1個体根重	根重	根中糖分	糖量
	株間	畦間	草丈(cm)	葉数(枚)	(本 ha^{-1})	(g 本$^{-1}$)	(Mg ha^{-1})	(g kg^{-1})	(Mg ha^{-1})
障害(n=10)	4.97±0.14	5.63±0.17	18.9±7.6	8.1±2.0	47640±12800	569±149	26.9±7.5	157±5	4.18±1.12
正常(n=15)	5.41±0.34	6.08±0.37	36.7±5.8	12.1±1.9	64800±7850	641±101	41.1±6.2	153±11	6.32±1.14
有意差†	**	**	**	**	**	—	**	—	**
対正常比			51	67	74	89	65	103	66

†有意差はLSD法による．*:5%水準，**:1%水準，で有意差あり．

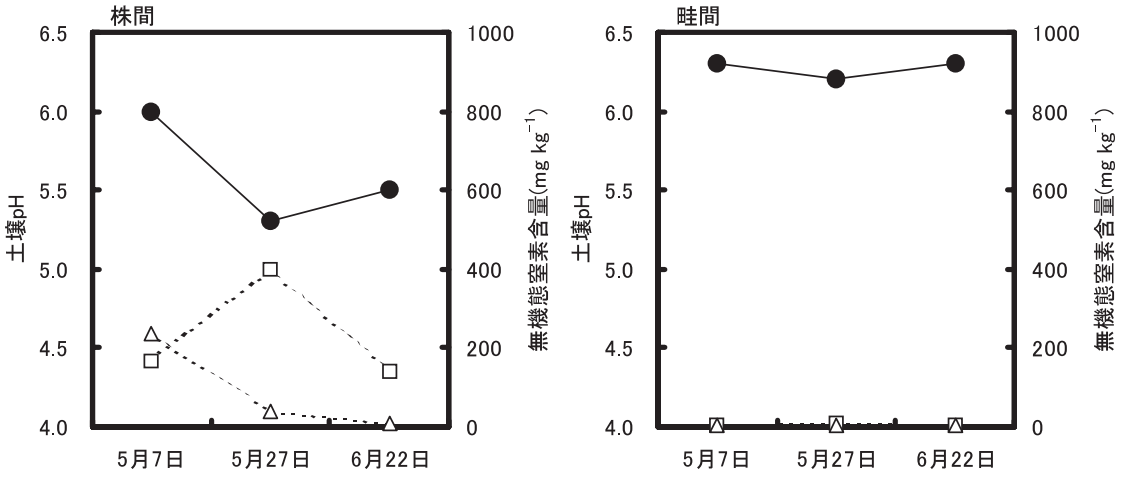

図 Ⅱ-8 直播テンサイ圃場の施肥位置(株間，畦間)における土壌 pH，アンモニウム態窒素量，硝酸態窒素量の推移の違い

●：土壌 pH，△：NH_4-N，□：NO_3-N

3）根箱実験

根箱を用いたテンサイ栽培実験の結果を**表Ⅱ―6**に示した．実験前の土壌pHは障害土壌で5.20，正常土壌で5.40であった．実験後のテンサイ乾物重は，障害土壌が正常土壌よりも有意に劣り，1個体当たりそれぞれ0.40，1.45ｇであった．実験後のテンサイは**図Ⅱ―9**に示した．跡地土壌のpHは障害土壌が正常土壌よりも有意に低く，それぞれ4.48，4.78であった．y_1は障害土壌が正常土壌よりも有意に高く，それぞれ8.88，3.88であった．テンサイ根部のアルミニウム染色（Watanabe et al.，1998）では，障害土壌は濃青紫に染色されたが，正常土壌は全く染色されないか，薄い青紫に染まる程度であった．

表 Ⅱ-6 根箱実験におけるテンサイ乾物重と土壌 pH，y_1，PCVH 緩衝溶液‡による根面の染色状況.

供試土壌	実験前の土壌pH	テンサイ乾物重 g 個$^{-1}$	跡地土壌(0-7cm) pH	跡地土壌(0-7cm) y_1	根のAl染色状況
障害(n=4)	5.20	0.40±0.23	4.48±0.08	8.88±0.29	濃青紫
正常(n=4)	5.40	1.45±0.21	4.78±0.08	3.88±0.25	薄青紫～なし
有意差*		**	**	**	

有意差はLSD法による．:5%水準，**:1%水準，で有意差あり．
‡0.02%ピロカテコールバイオレット(PCV), 2.5%ヘキサミン-NH_4OH 緩衝溶液(pH6.2) (Watanabe et al., 1998).

図 Ⅱ-9 根箱実験後のテンサイ個体
（低 pH は障害土壌, 中 pH は正常土壌に相当する．1997 年 12 月 21 日撮影）

4）炭酸カルシウム施用試験

表Ⅱ―7に炭酸カルシウム施用が土壌pHとテンサイの初期生育，収量に与える影響を示した．無処理区では株間，畦間の土壌pHがそれぞれ5.3，5.7であり，中程度の典型的な初期生育障害が認められた．炭酸カルシウム全層３Mg区では，無処理区に対し土壌pHが上昇し，初期生育障害は認められず正常な生育であった．さらに，初期生育時のテンサイ乾物重は無処理区に対し101％増加し，さらに収量調査時の根重と糖量は無処理区に対し18％増加した．炭酸カルシウム作条0.8Mg区では，無処理区と比較して株間の土壌pHはやや上昇し，初期生育障害が軽減された．また初期生育時の乾物重，収量調査時の根重，糖量は無処理区に対しそれぞれ19％，5～６％，6～７％増加した．

考察

移植テンサイにおいて，初期生育障害が発生した圃場とそうでない圃場では，土壌の化学性の諸項目について有意な差が認められ（**表Ⅱ―2**），さらに初期生育時の草丈および収量調査時の根重はそれぞれ土壌pH（株間，畦間），y_1（株間，畦間），交換性CaO（畦間），MgO（畦間），K_2O（畦間），Ca飽和度（畦間），塩基飽和度（畦間），EC（株間）と有意に関係したこと（**表Ⅱ―3**）から，初期生育障害の発生には土壌の化学的要因が強く関与したと推察できる．土壌の化学的要因のうち，草丈および根重との相関関係が特に密接であったのは土壌pH，y_1，Ca飽和度，塩基飽和度であり，またこれら４項目はそれぞれ相互に密接に関係した（**表Ⅱ―3**，**図Ⅱ―3**）．Ca飽和度ならびに塩基飽和度の低下が土壌pHの低下をもたらすことは一般に知られており（今井ら，1984），また水野ら（1994）および志賀ら（2000）

表 Ⅱ-7 炭酸カルシウム施用が土壌 pH とテンサイの初期生育・収量に与える影響

処理区[1)]	土壌 pH (6 月下旬)		初期生育障害状況[2)]	初期生育時の乾物重 (6/23，kg ha^{-1})			収量調査	
	株間	畦間		茎葉	根	茎葉+根	根重 Mg ha^{-1}	糖量 Mg ha^{-1}
無処理区	5.3	5.7	++	283	61	344 (100)	42.7 (100)	6.83 (100)
全層 3Mg 区	5.6	6.1	―	568	122	690 (201)	50.2 (118)	8.07 (118)
作条 0.8Mg 区	5.4	5.7	+	341	67	408 (119)	45.3 (106)	7.25 (106)
無処理区[3)]	5.3	6.1	―				36.3 (100)	5.68 (100)
作条 0.8Mg 区[3)]	5.8	6.2	―				38.1 (105)	6.08 (107)

1)炭酸カルシウム現物の ha 当たり施用量を Mg(3，0.8)で示した.
2)6 月の観察結果. ＋＋：中程度の障害，＋：軽度の障害，－：障害なし.
3)1999 年における試験結果. 他は 1998 年の試験結果.

は土壌pHの上昇はy_1の減少，土壌pHの低下はy_1の増大をもたらし，個々の土壌についてみると両者は関数関係にあることを示している．さらにテンサイはもともと低pH耐性・A１耐性の弱い作物であることが知られている（田中・早川，1975a；1975b） ことから，移植テンサイにおける初期生育障害は，主に土壌pHの低下，y_1の上昇，Ca飽和度・塩基飽和度の低下に由来した酸性障害の可能性がある．

田中（1984）は酸性土壌の作物生育阻害要因として，①低pHそのものの害，②土壌のpHが低い場合可溶化するAlの害作用，③Pの不足，④塩基類（特にK，Mgなど）の不足，等を挙げている．本報告における移植テンサイの初期生育障害については，まず①低pHそのものの害は土壌pHが4.0を下回るような極端な場合に現れるとされており（但野・安藤，1984；田中，1984），当該結果にはそのような場合がないため（**図Ⅱ―3**）ほとんど関与しないと考えられる．②Al害（但野・田中，1985）の関与については十分に考えられる．但野・安藤（1984）は土壌による違いはあるものの，Al障害が発生する土壌pHは５以下と考えて差し支えないとしており，本報告においても初期生育障害発生地点の土壌pHは株間，畦間ともに5.0を下回った（**表Ⅰ―2**）．しかし上記③，④の関与については十分には明らかにできなかった．ただし，初期生育障害発生地点の交換性K_2Oは有意に低かったこと（**表Ⅱ―2**），土壌pH，交換性K_2Oが低いほど葉のK_2O含有率は有意に低かったこと（**表Ⅱ―3**）から，酸性障害の１要因として④の塩基類の不足が関与した可能性はあるものと思われる．また初期生育障害発生地点の株間のECが有意に高かったこと（**表Ⅱ―2**），株間のECが高いほど草丈・根重は有意に低かったこと（**表Ⅱ―3**）から，濃度障害も初期生育障害の発生に補足的に関与した可能性がある．ただしこの場合の濃度障害は施肥量の違いではなく，施肥位置の違いから生じたものと考えられる．現在の移植栽培は機械の大型化に伴い，作条施肥作業と機械移植作業を分けて行う例が圧倒的に多く，このため移植位置がずれて紙筒苗と施肥位置とが接近し，濃度障害をも併発したケースがあったと推察できる．ただし相関係数（**表Ⅱ―3**）の絶対値は有意とはいえそれほど高くないことを勘案すると，カリウム不足や濃度障害はあくまで補足的に初期生育障害に関与したものと思われた．

一方，直播テンサイにおいても，初期生育障害が発生した圃場とそうでない圃場には，土壌の化学性の諸項目について有意な差が認められた（**表Ⅱ―4**）．しかし，移植テンサイでは初期生育障害発生地点と正常地点の土壌pHの平均値±標準偏差（**表Ⅱ―2**）はそれぞれ株間で4.36±0.17，5.07±0.31，畦間で4.80±0.29，5.52±0.15と，障害と正常の差が約0.7と大きかったのに対し，直播テンサイでは（**表Ⅱ―4**）それぞれ株間で4.87±0.42，5.03±0.36，畦間で5.35±0.36,5.65±0.41と，障害と正常の差が0.2～0.3で，有意差はあったがその差は小さかった．このように差が小さい傾向はy_1など他の土壌化学性についても同様であった．さらに，**表Ⅱ―7**の無処理区のように畦間の土壌pHが5.7と正常圃場の平均値程度（**表Ⅱ―4**）であっても初期生育障害が発生した場合があった．加えて直播テンサイでは，欠株や裸地化，廃耕などのために草丈などの生育量を定量的に把握することが困難な場合が多かったこともあって，移植テンサイと同様な要因解析（**表Ⅱ―3**）は不可能であった．このように直播テンサイにおける初期生育障害の発生要因の解析は移植テンサイと異なり単純ではなかった．

直播テンサイの初期生育障害の発生要因を複雑にした理由の一つとして，濃度障害の影響が考えられる．テンサイの施肥法は作条施肥が最も一般的である（増田，

1997）．作条施肥は，移植においては前述のような施肥位置と紙筒苗位置のズレさえなければ問題ないものの，直播では株間において局所に高濃度に集中した肥料と幼苗が接近するため常に濃度障害の危険にさらされることが増田（1997）によって指摘されている．

一方，施肥窒素の硝酸化成は土壌pHを低下させる（橋本・中村，1971；橋本ら，1974）が，古館ら（2000）は北海道の畑作物の中で最も窒素施肥量の多いテンサイ（移植）では，施肥後１～２ヶ月すると施肥窒素の硝酸化成によって株間のpHが最大0.7低下するとしており，本報告においても同様のことを認めた（**表Ⅱ―2**，**表Ⅱ―4**，**図Ⅱ―8**）．直播テンサイにおける初期生育障害発生地点の株間の土壌pH（平均値）は5.0以下であった（**表Ⅱ―4**）ことから，局所的なAl溶出による酸性障害があったものと思われ，このことは根箱実験（**表Ⅱ―6**）において再現された．これらのことから，全体の傾向としては直播においてもAl害を中心とした酸性障害が初期生育障害の主な発生要因と推察できる．

一般的には土壌pHが5.5以上であれば作物へのAl害は防げるものとされている（田中，1984）．本調査においても，移植テンサイではほぼこのことが当てはまった（**表Ⅱ―2**）が，直播テンサイでは畦間pHが5.5以上であっても障害が発生した場合があり（**表Ⅱ―7**），また炭酸カルシウム施用による生育改善・増収効果も認められた．この理由は直播テンサイでは幼苗段階から圃場条件にさらされるために，作条施肥による局所的なストレス（酸性障害，濃度障害）を受けやすいことの他に，播種時の覆土・鎮圧の不具合や強風，霜などによるストレスを受けやすく，これらのことが併発した場合には初期生育障害の被害程度が大きくなると考えられる．

ところで**表Ⅱ―4**に示したように，直播テンサイにおける調査結果では初期生育障害発生地点の有効態リン酸（Truog法）は株間，畦間ともに正常地点に対し有意に低かった．北海道土壌診断基準（北海道農政部，2002）では有効態リン酸の基準値を100～300mg kg^{-1}としており，本調査における初期生育障害発生地点の畦間では164±112mg kg^{-1}で，診断基準値の下限値を下回る場合があった．直播テンサイの初期生育障害は，葉縁部が赤～赤褐色を呈するのが典型的であり（**図Ⅱ―7**），またこの症状はリン酸欠乏症状（Broom's Barn Experimental Station，1982；増田，1997；Ulrich et al.，1993）の特徴と類似した．前述のように低pH条件下では施肥リン酸はFeやAlの含水酸化物や１：１型層状ケイ酸塩との反応によって無効化されやすく（加藤，1994），また初期生育時の根域は直播で移植よりも狭いことが推察されることからも，直播テンサイでは初期生育障害の１要因としてリン酸欠乏もあったものと思われる．

また，前述のように初期生育障害は移植，直播ともに圃場内でスポット状に発生した場合があった．大江ら（2001）は土壌pHなどの土壌特性値が１筆圃場内で大きな空間変動を持つことを報告している．初期生育障害がスポット状に発生したのは，このような土壌特性値の空間変動によるものと思われた．

以上のことから，移植・直播ともに初期生育障害は，第１に酸性障害であり，次に濃度障害，リン酸・カリウムなどの養分欠乏や，その他前述のような要因が加わっ

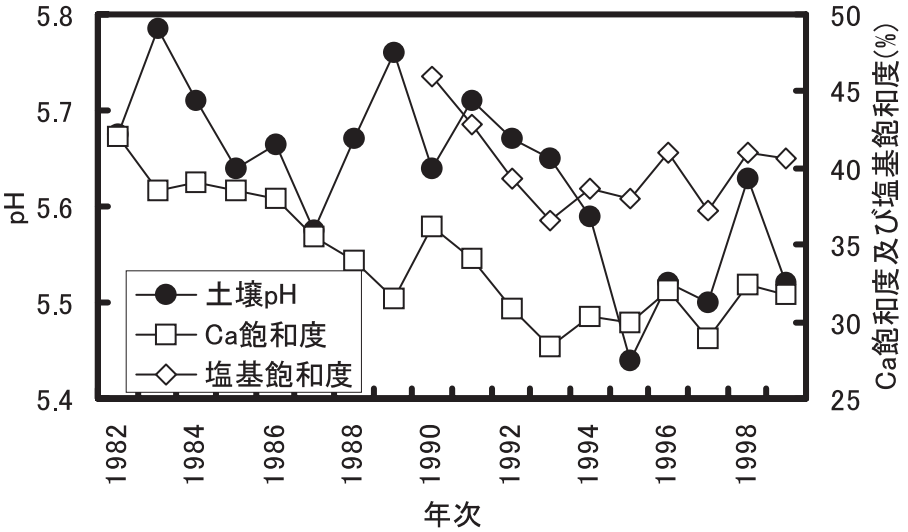

図 Ⅱ-10 北海道十勝地方における畑土壌のpH，Ca飽和度，塩基飽和度の推移
†十勝農業協同組合連合会農産化学研究所よりデータを提供して頂いた．
農家圃場の作土4000～7000点（各年次ごと）の平均値．

て発生した可能性がある．十勝農業協同組合連合会農産化学研究所から分析データの提供を受けて作図した**図Ⅱ―10**によると，北海道十勝地方における畑土壌のpHは，1995年以降やや上昇する傾向にあるものの，Ca飽和度・塩基飽和度の低下とともに依然として低下傾向にある．テンサイの初期生育障害が近年に至って顕在化した理由は，このような畑土壌全体の酸性化のためと考えられる．

輪作を基本とする北海道の畑作では，高pHで発生が助長されるジャガイモそうか病（水野・吉田，1994）やテンサイそう根病（阿部，1987）などの土壌病害の蔓延を恐れるあまり，石灰質資材の投入を控えている現状がある．石灰質資材の投入を控えてpHを低下させることは，これら病害の発生を一時的に軽減しても，輪作体系を維持していく上で大きな問題となり，他の作物の生育阻害要因となる．本調査ではテンサイにおいて酸性障害が確認されたが，さらに酸性化が進行すればコムギやマメ類でも生産性の低下が危惧される．したがって，根本的な問題解決は石灰質資材の投入による作土層の酸性矯正が不可欠である．前述のように，移植テンサイでは酸性矯正目標をpH5.5とすれば問題はほぼ解決できるものと判断できるが，直播テンサイではpH5.5以上でも障害が発生した場合がある（**表Ⅱ―4**，**表Ⅱ―7**）ことから，さらなる酸性矯正が必要と思われる．しかし，病害発生の懸念が拭えない圃場では，根本的な酸性矯正には限界があると思われ，対症療法的な対策の確立も必要である．その一つとして，古館ら（2000）は移植テンサイにおいて作条施肥位置での土壌pHの低下を緩和する目的で，施肥と同時に石灰質資材を0.8Mg ha^{-1}作条施用したところ，好結果を得た．本報告においても，直播テンサイにおいて同様の処理を実施したところ，生育改善・増収効果が認められた（**表Ⅱ―7**）．また，特に作条施肥による濃度障害を受けやすいと考えられた直播については，全層施肥や分施など根圏域での窒素濃度が極端に高まらない施肥法が有効と思われ，このことについては後述することとした．なお，本節では初期生育障害の主な発生要因は酸性障害と判断できたものの，土壌による発生程度の違いについては明らかにできなかったので，このことについて第Ⅱ章第２節で検討する．

まとめ

近年，移植および直播栽培テンサイにおいて発生した初期生育障害について調査するとともに，いくつかの実験を行い，その発生要因を以下のように明らかにした．

１）移植テンサイにおける初期生育障害は，移植直後（移植時期：４月中旬～５月上旬）には障害はなく，その後６月以降にスポット状あるいは圃場全体で生育が停滞する特徴があった．ただし枯死個体は少なく，裸地化するほどではなかった．直播テンサイにおける初期生育障害の特徴は，発芽にはほとんど問題なく（播種時期：４月中旬～５月上旬），その後６月以降にスポット状あるいは圃場全体に発生，本葉２～５葉・草丈５～10㎝で生育が停滞，葉色がやや薄い，葉縁部が赤～赤褐色を呈する，根はわい化し褐変する，甚だしい場合には個体が枯死し圃場は裸地化する，であった．

２）移植テンサイにおける初期生育障害発生地点は，土壌pH，Ca飽和度，塩基飽和度が正常地点よりも有意に低く，y_1は有意に高かった．また初期生育時の草丈および収量調査時の根重はこれらと密接に関係したことから，移植における初期生育障害の発生要因は，主に酸性障害である可能性があった．

３）直播テンサイにおける初期生育障害発生地点においても，土壌pH，Ca飽和度，塩基飽和度が正常地点よりも有意に低く，y_1は有意に高かった．ただし，直播の場合は土壌pHが5.7と比較的高い場合にも初期生育障害が発生し，また播種時の石灰の作条施用が生育を改善する，という特徴があった．全体傾向としては，直播においても初期生育障害の発生要因は第１には酸性障害であり，次に作条施肥による濃度障害が複雑に関与すると考えられた．

４）テンサイの初期生育障害が顕在化した理由として，畑土壌全体の酸性化が進行していることが挙げられた．また，酸性化が進行している理由としては，ジャガイモそうか病等の高pHで発生が助長される土壌病害の蔓延に対する恐れから，石灰質資材の施用が控えられてきたことが挙げられる．

５）作条施肥による濃度障害を受けやすいと考えられた直播テンサイについては，全層施肥や分施など根圏域での窒素濃度が極端に高まらない施肥法が有効な対策となる可能性が示唆された．

第２節　直播テンサイの初期生育に及ぼす土壌要因の影響―土壌pH，交換酸度y_1，作条施肥窒素の硝酸化成の寄与と相互関係

はじめに

第Ⅱ章第１節で述べたように，近年道内各地で発生の見られたテンサイの初期生育障害の発生要因は主に酸性障害と考えられた．また，直播栽培においては作条施肥による局所的な酸性障害や濃度障害が初期生育障害の発生を助長している可能性も指摘された．ただし前節では，①土壌型による酸性障害の発生程度の違い，および②作条施肥された窒素の硝酸化成や，土壌pHおよび交換酸度y_1がテンサイ（直播栽培）の初期生育に及ぼす影響の詳細，を明らかにできなかった．そこで本節では，上記①と②の事項について，４種の供試土壌を用いて，土壌化学・粘土鉱物学的側面も含めて詳細に検討した．

材料と方法

１）コンクリート試験枠内土壌を用いた試験の概要

北海道立十勝農業試験場内に設置されたコンクリート枠内土壌を供試した（**図Ⅱ―11**）．供試土壌は４種あり，農耕地土壌分類第３次改訂版（農耕地土壌分類委員会，1995）による分類では，（１）普通褐色低地土，（２）腐植質灰色台地土，（３）腐植質火山放出物未熟土，（４）淡色黒ボク土，に該当する４種を供試土壌とした．なお，（１）と（４）は河西郡芽室町新生，（２）は滝川市東滝川，（３）は河西郡芽室町雄馬別から，それぞれ採取した．

供試土壌は，1985年にそれぞれの圃場から掘削機を用いて表層０～30㎝の必要量を採取し，コンクリート枠（深さ約50㎝，無底）にそれぞれ充填し試験枠を造成した．試験枠の造成後から，本試験を実施した2000年までの間に，酸度調節資材（硫酸第一鉄）や炭酸カルシウムを用い，土壌pHの高い枠と低い枠が得られるよう土壌pHを調整した．本試験では，普通褐色低地土：３枠，腐植質灰色台地土：10枠，腐植質火山放出物未熟土：２枠，淡色黒ボク土：７枠，の合計22個の試験枠を供試した．播種前の土壌pH（土：水＝１：2.5，2000年４月20日に測定）は，普通褐色低地土：4.8～4.9，腐植質灰色台地土：4.7～5.3，腐植質火山放出物未熟土：5.3～5.4，淡色黒ボク土：4.5～6.4，であった．

テンサイ（供試品種：アーベント，ペレット種子）の播種は2000年４月25日に実施した．播種深度と施肥位置は**図Ⅱ―11**に示した．畦幅は60㎝とし，各枠とも２畦とした．播種間隔は7.5㎝とし，６月25日には個体競合を避けるため，株間15㎝となるよう間引きした．

それぞれの畦に，９ｇのN（尿素由来のN：リン酸アンモニウム由来のN：硝酸ナトリウム由来のN＝2.7：6.0：1.3），18.9ｇ のP_2O_5，12.6ｇ のK_2O，4.5ｇ の MgO，0.54ｇのMn，そして0.27ｇのBを，化成肥料を用いて４月25日（播種の直前）に作条施肥した．なお，コンクリート枠１つ（１㎡）あたりの施肥量は，N：18ｇ m^{-2}，P_2O_5：37.8ｇ m^{-2}，K_2O：25.2ｇ m^{-2}，MgO：９ｇ m^{-2}，Mn：1.1ｇ m^{-2}，B：0.5ｇ m^{-2}，に相当する．

２）テンサイの生育調査

発芽率は５月10日，苗立ち率は５月30日，に調査した．草丈は５月30日，６月23日，７月27日，に調査した．これらの生育調査は全て畦ごとに行った．

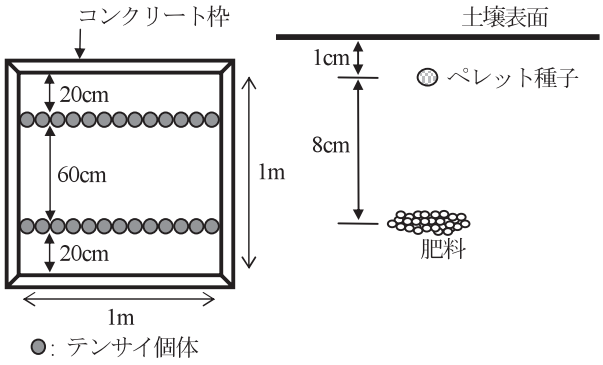

図 Ⅱ-11 供試枠の概略図.
左図は供試コンクリート枠，右図は種子位置と施肥位置，をそれぞれ示した.

3）土壌の採取法と分析法

2000年4月20日（テンサイの播種前）に，各試験枠から，0〜15㎝の土壌試料を採取し，生土のまま土壌pH（土：水=1：2.5）と交換酸度y_1の分析に供した．これらの分析の後，各々の土壌型から土壌pHが5.1の試料を選び，風乾・砕土後2㎜の篩いを通過させて風乾土試料とした（普通褐色低地土と腐植質火山放出物未熟土にもpH5.1の土壌試料があり分析には供したが，テンサイの試験には用いなかった．）．これらの試料（土壌型ごとのpH5.1の試料）は，全窒素含量，リン酸吸収係数，CEC，腐植含量，土性，アロフェン含量，フェリハイドライト含量の分析と，粘土鉱物種の同定に供した．

5月30日，6月23日，7月27日には，株間土壌（畦上）を0〜7㎝から採取し，生土のまま土壌pHと硝酸態窒素量の分析に供した．

土壌pH（土：水＝1：2.5）はガラス電極を用いて測定した．交換酸度y_1はSaigusa et al.（1980）の方法に準じた．全窒素含量はケルダール法によって分析した．リン酸吸収係数，CEC，腐植含量，土性は常法（北海道立中央農業試験場・北海道農政部農業改良課，1992）によって分析した．アロフェン含量およびフェリハイドライト含量はParfitt and Wilson（1985）およびParfitt and Childs（1988）の方法に従い分析した．粘土鉱物種の同定はX線回折によって行った．硝酸態窒素量は，生土20ｇと1 mol L^{-1} KCl溶液100mLをポリエチレンボトル内で混合し，密栓して1時間振とう後濾過して得られた濾液について硝酸態窒素濃度をオートアナライザー（BRAN+LUEBBE社製AACS-Ⅱ）によって定量して求めた．

4）培養実験

上記で供試した4種の土壌それぞれの，土壌pHの低下に伴うAlの溶出パターンの違いを明らかにするため，培養実験を行った．風乾した普通褐色低地土，腐植質灰色台地土，腐植質火山放出物未熟土，淡色黒ボク土（土壌pHはそれぞれ，5.1，5.3，5，3，5.3）を50ｇポリエチレンボトルに秤取り，これに0，0.125，0.25，0.5，1.25mol L^{-1}の硝酸溶液0.5mLを添加し，土壌水分を最大容水量の80%に調整した後，4℃で7日間培養した．培養終了後，土壌試料のうち20ｇは土壌pHの測定に供し，30ｇは遠心分離（10,000rpm，30分）によって土壌溶液採取に供した．土壌溶液中のAl濃度はICP発光分析機（Perkin Elmer Japan社製Optima 3300DV）によって定量した．

5）統計解析

本研究における統計解析は，統計解析アドインソフト・エクセル統計2000 for Windows（株式会社 社会情報サービス製）を用いて行った．

結果と考察

1）土壌酸度と化学性および粘度鉱物組成の関係

本研究において供試した4種の土壌酸度を詳細に比較するにあたり，その指標として交換酸度（y_1）を採用した．y_1はそもそも土壌酸性を表す指標として有効であり（Saigusa et al.，1980），また土壌pHとは土壌型ごとに指数関数の関係にあって（志賀ら，2000），さらに交換性Alとも極めて高い正の相関関係があり，交換性Alの指標としても重要なことが報告されていることから（三枝ら，1992），近年指標値としての価値が再評価されている．

4種の供試土壌のy_1を，土壌pHを5.1，塩基飽和度を11.9〜13.9%に揃えて比較した結果，その値は2.2〜18.0と極めて異なった（**表Ⅱ―8**）．最もy_1が高かったのは腐植質灰色台地土（y_1：18.0）であり，ついで腐植質火山放出物未熟土（y_1：6.9），普通褐色低地土（y_1：5.3），淡色黒ボク土（y_1：2.2），の順であった．y_1等によって表される土壌酸度は，土壌の化学性および粘土鉱物組成を反映することが知られているので（Saigusa et al.，1980；志賀ら，2000），これを踏まえ以下に本研究の結果について考察した．

腐植質灰色台地土：CEC，腐植含量，粘土含量はその他の土壌よりも高かった（**表Ⅱ―8**）．粘土含量は334ｇ kg^{-1}であったのに対し，アロフェンは含まれず，フェリハイドライト含量も19ｇ kg^{-1}と少なかった．このことから，本土壌中の粘土の主体は結晶性粘土鉱物であると推察された．X線回折の結果をみると（**表Ⅱ―9**），本土壌は1：1型粘土鉱物（カオリナイトまたはハロイサイト），2：1型粘土鉱物（イライト），そして2：1：1型粘土鉱物（クロライト）を含有していた．吉田（1979）はカチオン交換基の酸的性格を粘土鉱物種の違いによって区分し，モンモリロナイトやハロイサイトは強酸的な交換基を主とするのに対し，アロフェンとイモゴライトは全て弱酸的な交換基から成り，カオリナイトや腐植酸はその中間的な交換基からなる，とした．また加藤（1989）は，塩基飽和度が同程度であっても腐植酸の多い土壌の方が，少ない土壌よりも強酸的であるとしている．これらのことから，本研究における腐植質灰色台地土は，ハロイサイトやカオリナイト，そして腐植（腐植酸）を多く含むためにy_1値が高かったものと考え

表 Ⅱ-8 供試土壌の化学性，土性，アロフェン含量とフェリハイドライト含量.

項目	土壌タイプ			
	普通 褐色低地土	腐植質 灰色台地土	腐植質 火山放出物未熟土	淡色 黒ボク土
交換酸度 (y_1)*	5.3	18.0	6.9	2.2
リン酸吸収係数 ($gP_2O_5\ kg^{-1}$)	9.2	13.9	9.0	17.7
CEC ($cmol_c\ kg^{-1}$)	13.8	34.1	24.4	14.3
交換性 Ca ($cmol_c\ kg^{-1}$)	1.6	3.2	3.0	1.5
交換性 Mg ($cmol_c\ kg^{-1}$)	0.1	0.5	0.2	0.1
交換性 K ($cmol_c\ kg^{-1}$)	0.1	0.4	0.0	0.0
交換性 Na ($cmol_c\ kg^{-1}$)	0.1	0.3	0.2	0.1
塩基飽和度 (%)	13.8	12.9	13.9	11.9
腐植含量 ($g\ kg^{-1}$)	33	86	86	37
全窒素含量 ($g\ kg^{-1}$)	1.7	3.1	3.3	1.9
粗砂含量 (0.2-2.0mm, $g\ kg^{-1}$)	152	23	442	180
細砂含量 (0.02-0.2mm, $g\ kg^{-1}$)	514	166	214	413
シルト含量 (0.002-0.02mm, $g\ kg^{-1}$)	193	391	221	218
粘土含量 (<0.002mm, $g\ kg^{-1}$)	109	334	37	152
土性	SL	LiC	SL	CL
シュウ酸塩可溶性 Al (Al_o, $g\ kg^{-1}$)	14.2	10.0	8.6	32.3
シュウ酸塩可溶性 Si (Si_o, $g\ kg^{-1}$)	6.5	0.9	2.0	16.8
シュウ酸塩可溶性 Fe (Fe_o, $g\ kg^{-1}$)	7.3	11.5	6.3	11.3
ピロリン酸塩可溶性 Al (Al_p, $g\ kg^{-1}$)	2.5	5.4	4.0	2.5
(Al_o-Al_p)/Si_o 比	1.9	5.3	2.4	1.9
Al_o+1/2Fe_o ($g\ kg^{-1}$)	18	16	12	38
アロフェン含量 ($g\ kg^{-1}$)	46	No data**	18	118
フェリハイドライト含量 ($g\ kg^{-1}$)	12	19	11	19

*土壌 pH (土：水＝1：2.5) は全て 5.1 に統一した.
**この土壌試料は本測定法(Parfitt and Wilson，1985；Parfitt and Childs，1988)は適用できなかった.

表 Ⅱ-9 X 線回折による，4 供試土壌中の粘土鉱物種の同定

粘土鉱物種*		土壌タイプ			
		普通 褐色低地土	腐植質 灰色台地土	腐植質 火山放出物未熟土	淡色 黒ボク土
1:1 型粘土鉱物	Kt or Ht(7 Å)	＋	＋＋	No data	－
2:1 型粘土鉱物	It(mica)	＋	＋	No data	－
2:1-2:1:1 型粘土鉱物中間体	HyA-Vt	＋＋	±	No data	－
2:1:1 型粘土鉱物	Ch	±	＋＋	No data	－

－: なし，±: あり，＋: 含む，＋＋: 富む，　No data ： 粘土含量が少ないため粘土鉱物種の同定は不可能であった.
*Kt：カオリナイト, Ht：ハロイサイト(d00l=7 Å), It(mica)：イライト(mica), HyA-Vt：ヒドロキシアルミニウムーバーミキュライト複合体, Ch：クロライト.

られる．

腐植質火山放出物未熟土：CECと腐植含量は普通褐色低地土および淡色黒ボク土よりも高かったが，粘土含量はその他の土壌よりも低く，また主たる粘土鉱物種はアロフェンとフェリハイドライトであった．（**表Ⅱ―8**，**表Ⅱ―9**）．これらのことから，この土壌の主たるカチオン交換基は腐植（腐植酸）に由来すると推察される．上述のように，腐植（腐植酸）は決して強酸的ではないが，少なくともアロフェンやイモゴライトよりは強い酸的性格を有する（加藤，1989；吉田，1979）．すなわち，腐植質火山放出物未熟土のy_1値が２番目に高かったのは，普通褐色低地土や淡色黒ボク土よりも腐植（腐植酸）が多かったためと考えられる．

普通褐色低地土：粘土鉱物の優占種としては，2：1－2：1：1型粘土鉱物中間体（ヒドロキシアルミニウムーバーミキュライト複合体）や1：1型粘土鉱物（カオリナイトまたはハロイサイト），2：1型粘土鉱物（イライト）等の，結晶性粘土鉱物が見出され，このうち一部（ハロイサイト等）は強酸的な交換基からなるものであった（**表Ⅱ―9**）．しかし，本土壌の粘土含量は淡色黒ボク土よりも低く，かつ腐植含量は淡色黒ボク土と同程度に低かったため，CECが腐植質灰色台地土および腐植質火山放出物未熟土よりも低い（**表Ⅱ―8**）．そのため，この土壌（普通褐色低地土）は強酸的な粘土鉱物種を含むにもかかわらず，y_1値が低かったものと考えられる．

淡色黒ボク土：y_1値は2.2と最も低かった（**表Ⅱ―8**）．この土壌が含有する粘土の80％はアロフェンで占められ，また結晶性粘土鉱物は全く見出されなかった（**表Ⅱ―9**）．前述のようにアロフェンは全て弱酸的な交換基からなる粘土鉱物であるため（吉田，1979），このことがこの土壌（淡色黒ボク土）のy_1値が最も低かった理由と考えられる．

以上のように，供試した４土壌について，土壌pHを5.1に揃えて比較した結果，交換酸度y_1は大きく異なり，その違いは個々の土壌化学性・粘度鉱物組成に由来することが明らかになった．

２）土壌溶液へのAl放出パターンの違い

供試した４土壌の土壌pH（土：水＝１：2.5）と土壌溶液中Al濃度の関係を**図Ⅱ―12**に示した．すべての土壌において，土壌pHがほぼ4.8以下になると土壌溶液へのAlの放出が生じることと，土壌溶液中Al濃度は，土壌pHの低下に伴って増加すること，が観察された．

しかし，淡色黒ボク土においては，土壌溶液中Al濃度はその他の３土壌と比較し大幅に低く，このことは淡色黒ボク土のみが典型的なアロフェン質土壌であることに起因すると考えられた（**表Ⅱ―8**）．アロフェンは非晶質の粘土鉱物であり，そのカチオン交換基は弱酸的である（吉田，1979）．アロフェンは，pH４～７の範囲では，pHの低下にともなって生じるH^+を吸着することができる（いわゆる“酸吸着”）．このため，アロフェンの陰イオン交換容量（AEC）はpHの低下にともなって増加し陰イオンをOH^-と交換して吸着するので，pH４～７の範囲ではAlの溶出が生じないと考えられており（吉田・川畑，1988），したがってアロフェンは高い酸中和能を持つものと理解されている．本培養実験においても，pHは４～5.2の範囲であったために，アロフェン質土壌である淡色黒ボク土からのAlの溶出はほとんど生じなかったものと考えられた．

以上の培養実験結果から，アロフェン質土壌である淡色黒ボク土からのAl溶出は，pHが４以上であったために生じなかったが，その他の土壌（普通褐色低地土，腐植質灰色台地土，腐植質火山放出物未熟土）ではpHが

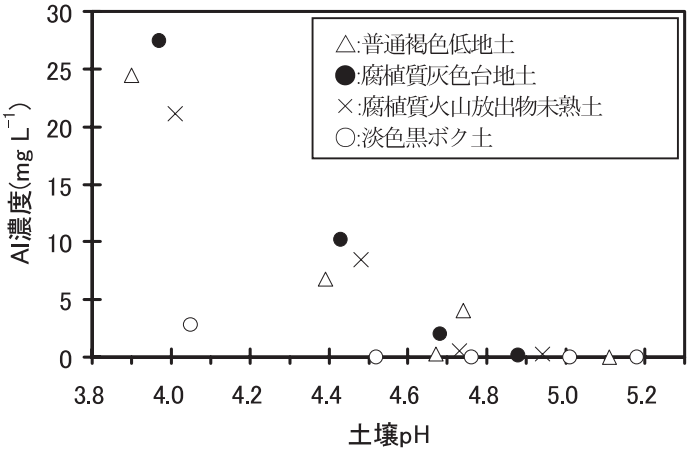

図 Ⅱ-12 土壌pH(土：水＝1:2.5)と土壌溶液中のアルミニウム濃度の関係

約4.8以下でAlが溶出することが示された．

3）作条施肥した窒素の硝酸化成による土壌pHの低下程度の違い

第Ⅱ章第１節で述べたように，作条施肥した窒素の硝酸化成は，株間において局所的な土壌pHの低下を引き起こし，種子や根の近傍において局所的にAl害を生じさせるものと考えられる．本試験では，このような土壌pHの低下程度の違いを，４種の供試土壌について明らかにしようとした．

株間における土壌pHの変化を**図Ⅱ― 13**に示した．土壌間差を詳細に比較するため，土壌pHの初期値（播種前の土壌pH，４月20日測定）を，4.7～5.0（平均4.8）と5.2～5.4（平均5.3）の２つの範囲に分類し，それぞれ**図Ⅱ― 13a**（普通褐色低地土，n=６；腐植質灰色台地土，n=８；淡色黒ボク土，n=２）と**図Ⅱ― 13b**（腐植質灰色台地土，n=４；腐植質火山放出物未熟土，n=４；淡色黒ボク土，n=４）に分けて示した．

腐植質灰色台地土においては，初期土壌pH（４月20日）が4.8，5.3のどちらの場合も，土壌pHは４月20日から６月23日にかけて4.4にまで低下し，その後７月27には上昇に転じた（**図Ⅱ― 13a**，**図Ⅱ― 13b**）．腐植質火山放出物未熟土および淡色黒ボク土においては，顕著な土壌pHの低下は６月23日に見られたが，両土壌のpH低下程度は腐植質灰色台地土に比べて有意に小さかった（**図Ⅱ― 13b**）．普通褐色低地土および淡色黒ボク土においては，５月30日に土壌pHが一旦上昇し，その後低下する現象がみられた（**図Ⅱ― 13a**）．このように一時的にpHが上昇したのは，供試した肥料が尿素を含有しており，その加水分解によってpHが上昇したためと考えられる（渡辺ら，1965）．

以上のことから，腐植質灰色台地土はその他の３土壌よりも作条施肥した窒素の硝酸化成によって土壌pHが低下しやすいと考えられた．この特徴は，交換酸度y_1が高く，強酸的な結晶性粘土鉱物や腐植を多く含むことに由来すると思われる（**表Ⅱ― 8**，**表Ⅱ― 9**；吉田，1979）．またこの腐植質灰色台地土においては，土壌pHが4.8または5.3から4.4以下にまで低下した（**図Ⅱ― 13**）が，前述のように土壌pHが4.8以下に低下すると土壌溶液中にAlが溶出するので（**図Ⅱ―12**），このような一時的なpH低下によって作物へのAl障害が助長される恐れがあることも分かった．

4）テンサイの生育に影響を及ぼす要因

上述の結果から，供試した４種の土壌は土壌酸性に関する性質（土壌化学性，粘土鉱物組成，Al溶出特性，作条施肥した窒素の硝酸化成による土壌pHの低下程度）が大きく異なることが詳細に明らかになった．このように異なる４種の土壌を用いて，テンサイの生育に影響を及ぼす土壌要因を明らかにしようとした．

初期土壌pH（播種前，４月20日）とテンサイの生育に関する調査項目（発芽率，５月10日測定；苗立ち率，５月30日測定；草丈，測定日は５月30日；６月23日；７月27日）との関係を**図Ⅱ― 14**に示した．なお斉藤ら

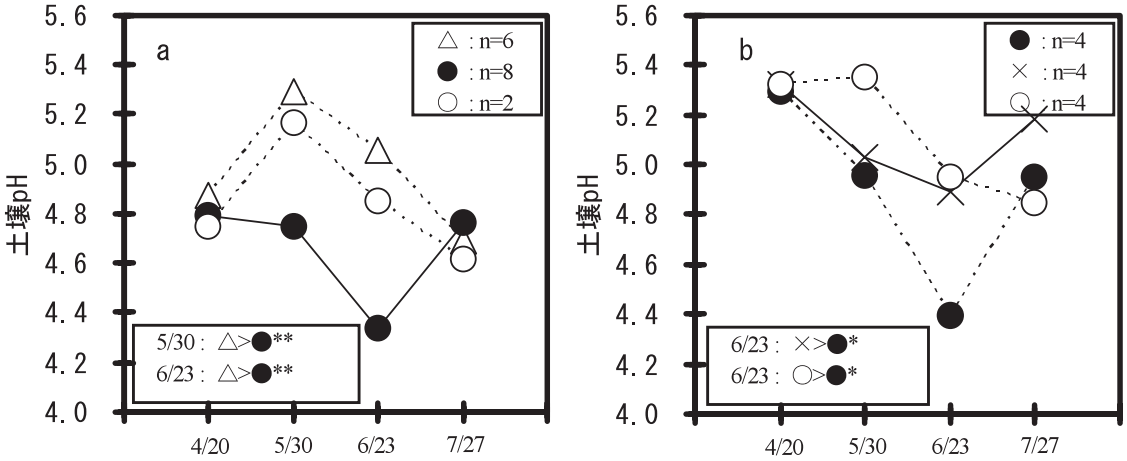

図 Ⅱ-13 株間土壌(0-7cm)の土壌 pH の推移
(a) 初期土壌 pH(4 月 20 日)は 4.8, (b) 初期土壌 pH(4 月 20 日)は 5.3.
△:普通褐色低地土,　●:腐植質灰色台地土,
×:腐植質火山放出物未熟土，　○:淡色黒ボク土.
有意差はLSD 法により検定した.
**,* : それぞれ，1%水準，5%水準で有意差があることを示す.

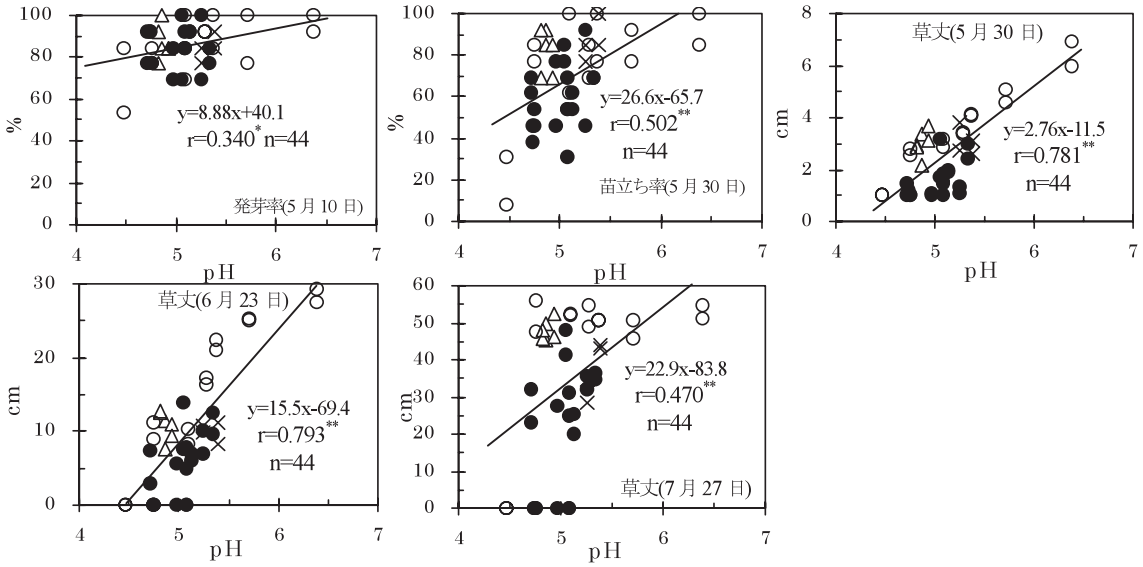

図 Ⅱ-14 播種前の土壌 pH と，テンサイの発芽率(%)・苗立ち率(%)・草丈(cm)の関係
△:普通褐色低地土　　●:腐植質灰色台地土
×:腐植質火山放出物未熟土　　○:淡色黒ボク土
**,* : それぞれ，1%水準，5%水準で有意な相関であることを示す.

表 Ⅱ-10 テンサイ生育の供試土壌間差の検定.

日付	5 月 30 日		6 月 23 日		7 月 27 日	
播種前の土壌 pH	4.7-5.0	5.2-5.4	4.7-5.0	5.2-5.4	4.7-5.0	5.2-5.4
苗立ち率	褐低土>灰台土** 淡黒土>灰台土*	NS				
草丈	褐低土>灰台土** 淡黒土>灰台土**	淡黒土>灰台土** 未熟土>灰台土*	褐低土>灰台土** 淡黒土>灰台土**	淡黒土>灰台土** 淡黒土>未熟土**	褐低土>灰台土** 淡黒土>灰台土**	淡黒土>灰台土** 淡黒土>未熟土**

有意差はLSD 法により検定. **,* : それぞれ，1%水準，5%水準，で有意差あり.
褐低土: 普通褐色低地土, 灰台土: 腐植質灰色台地土, 未熟土: 腐植質火山放出物未熟土, 淡黒土: 淡色黒ボク土.

（1991）は，テンサイの生育調査項目のうち，6月下旬の草丈は，収穫時の根重および糖量と密接な正の相関関係にあるので，収量を表す指標として有効であるとしている.

全ての調査項目は，初期土壌pHと有意な正の相関関係にあった（**図Ⅱ—14**）．中でも，５月30日および６月23日の草丈の場合は，相関係数が他の調査項目の場合よりも明らかに高かった．しかしこれらの場合であっても，土壌pH4.7～5.4の範囲では，pHと草丈の相関関係には土壌型の違いに由来すると思われるばらつきが見られた.

そこで，このばらつきが土壌型の違いによるものかを詳細に検討するため，初期土壌pH4.7～5.4の範囲を，pH4.7～5.0域（普通褐色低地土：n=６；腐植質灰色台地土：n=８；淡色黒ボク土：n=２）およびpH5.2～5.4域（腐植質灰色台地土：n=４；腐植質火山放出物未熟土：n=４；淡色黒ボク土：n=４）の２つに分け，pH域ごとに土壌間差を検討した結果を**表Ⅱ—10**に示した.

苗立ち率については，pH4.7～5.0域において，腐植質灰色台地土が普通褐色低地土および淡色黒ボク土よりも有意に低かった（**表Ⅱ— 10**）．草丈についても，pH4.7～5.0域において，腐植質灰色台地土が普通褐色低地土および淡色黒ボク土よりも有意に短かった．pH5.2～5.4域においては，腐植質灰色台地土の草丈は腐植質火山放出物未熟土および淡色黒ボク土よりも有意に短く，また腐植質火山放出物未熟土の草丈は淡色黒ボク土よりも有意に短かった．これらの結果を以下のように総括した：

土壌pHが同程度であっても，テンサイの生育は，腐植質灰色台地土で最も劣り，次いで腐植質火山放出物未熟土，普通褐色低地土，淡色黒ボク土，の順に生育が

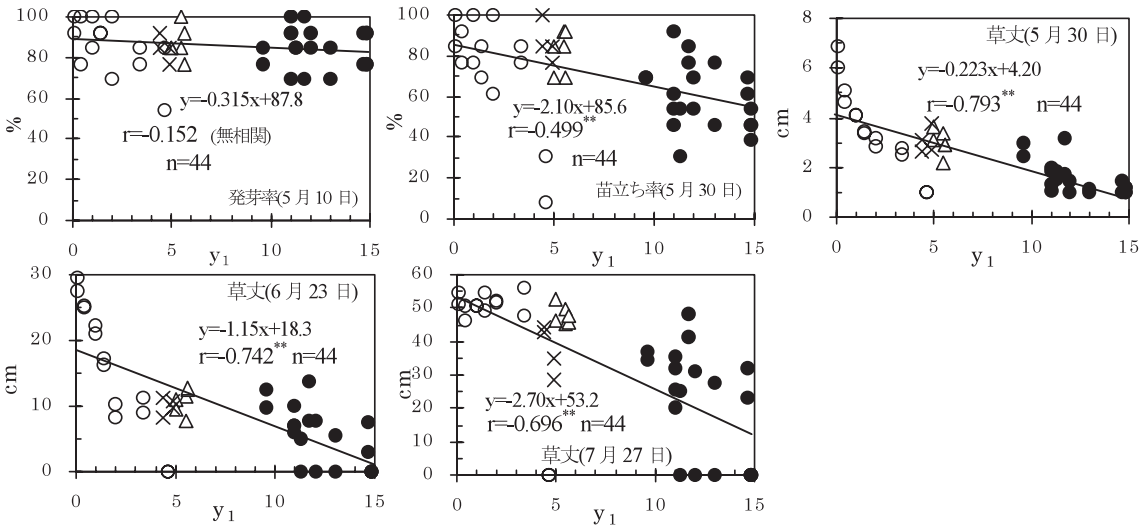

図 Ⅱ-15 播種前のy_1値と，テンサイの発芽率(%)・苗立ち率(%)・草丈(cm)の関係
△:普通褐色低地土　　●:腐植質灰色台地土
×:腐植質火山放出物未熟土　　○:淡色黒ボク土
**,*：それぞれ，1%水準，5%水準で有意な相関であることを示す.

優った．なお，普通褐色低地土と淡色黒ボク土でのテンサイの生育は同程度であった．

またこれらの結果から，腐植質灰色台地土のようにy_1が高く，強酸性の粘土鉱物や腐植を多く含む土壌でのテンサイの生育は，淡色黒ボク土のようなy_1が低く，弱酸性の粘土鉱物を多く含む土壌の場合よりも明らかに劣ることが示された．

Saigusa et al.（1980）は，土壌pHよりも交換酸度y_1が根の伸張程度と密接に関係したことから，交換酸度y_1はAl障害の指標として最も有効であることを報告している．そこで本研究においても，土壌酸性の指標としての土壌pHとy_1を以下のように比較した．

発芽率以外の全ての生育調査項目は，土壌間差を考慮しなくともy_1値（播種前，４月20日測定）と有意な負の相関関係にあり，特に５月30日および６月23日の場合には，両者の関係は他の生育調査項目の場合よりも密接であった（**図Ⅱ—15**）．しかし，相関係数の絶対値は土壌pHの場合（**図Ⅱ—14**）と概ね同程度であり，また**図Ⅱ—15**をみると，５月30日および６月23日の草丈とy_1の関係は，腐植質灰色台地土と淡色黒ボク土，のそれぞれに成立すると観察されたことから，必ずしもpHに比べy_1が指標としてより有効とは考えにくかった．

以上の結果からは，土壌pHとy_1のどちらが，土壌酸性に対する作物の反応をより正確に評価する指標として有効であるかを決定するのは困難と考えられた．

Kamprath（1970a）は，交換性Alによる作物への害を消去することを第一義とする観点から，交換性Alが指標としてより優れていると主張した．このKamprath（1970a）の主張に対しMclean（1970）は，石灰質資材施用には単にAl害を消去する目的だけでなく，（１）塩基飽和度が高いとCaやMgがpH依存負荷電に吸着され，このCaやMgは加水分解されやすいため可給性が高まる，（２）Al，MnやFeを不活性化する高pH条件では，Ca，Mg，P，KそしてSの土壌中における可給度が高まること，（３）中性付近で塩基飽和度が高いと硝酸化成等の微生物活性が良好になる，の３つの意義があるので，土壌pHが指標として適しており，pH6.5程度にまで上昇させる必要があると反論している．

他方では，Adams and Lund（1966）やPavan et al.（1982）は，土壌溶液中のAl^{3+}の活動度は，土壌酸性に対する作物の反応を最もよく説明する指標だと主張している．ただし，本研究で得た結果では，土壌pHが4.8以下にならないと土壌溶液にAlが溶出しないので（**図Ⅱ—12**），Al^{3+}の活動度は，土壌pHが4.8以上の場合には土壌酸性を表す指標としては不適当と考えられる．

このように，土壌酸性の最適な測定法や指標値については数多くの議論がなされたが，未だに世界的な見解の一致には至っていない（三枝，1991）．このように統一見解が得にくい理由としては，前述のMclean（1970）の主張にあるように，土壌pHはAl害のみならずCa，Mg等の養分の可給性を左右するだけでなく，硝酸化成等の微生物活性にも影響を与え，さらに今井ら（1984）が指摘するように，土壌pHは施肥の影響も受けて変動するので，これらの要因が複雑に絡み合うためと考えられる．

施肥の影響については，前述のように作条施肥した窒素の硝酸化成が土壌pHを低下させ，その低下程度には土壌間差があることを明らかにした．そこで，施肥窒素の硝酸化成がテンサイの生育におよぼす影響に着目し，株間土壌の硝酸態窒素量（５月30日）とテンサイの草丈（５月30日および６月23日）の関係を**図Ⅱ―16**に示した．なお，５月30日の硝酸態窒素量を解析に用いた理由は，５月30日の時点ではテンサイはまだ小さく，テンサイの窒素吸収による硝酸態窒素量の減少分は無視しうるほど小さいので，５月30日の硝酸態窒素量は施肥窒素の硝酸化成程度をよく反映した値と見なせるためである．硝酸態窒素量とテンサイの草丈の関係は，相関係数が r=0.850**（５月30日）または r=0.845**（６月23日）と，土壌pH（**図Ⅱ―14**）やy_1（**図Ⅱ―15**）の場合よりも相関係数が高く，また土壌間差に由来するばらつきも小さかった．

硝酸化成が低pHやAl害による抑制を受けやすいことは既に知られており（三枝，1991；切替・波多野，2000），また硝酸化成の至適pHは6.6～8.0で，4.5を下回ると完全に抑制されることも報告されている（三枝，1991）．本研究においても，**図Ⅱ―17**に示したように土壌pHおよびy１の両者とも５月30日の硝酸態窒素量と密接に関係し（それぞれ，r=0.805**，r=－0.837**），またy_1の場合が土壌pHの場合よりも若干相関が高いと思われた．

これらの密接な相関関係（**図Ⅱ―16**，**図Ⅱ―17**）から，２つの重要な示唆が読み取れる．第１に，硝酸態窒素量は窒素の養分供給状況を示す，ということである．テンサイは好硝酸作物であることが知られており（西宗ら，1980），そのため硝酸態窒素は直接的にテンサイの生育を促進する要因である．第２に，硝酸態窒素量は，特にy_1値によって表される土壌酸度を反映する，ということである．例えば硝酸態窒素量が不十分であれば，テンサイの生育は土壌酸性による抑制を受けていることを間接的に表している．これらの２つの側面から，本研究においては，硝酸態窒素量で表される施肥窒素の硝酸化成程度は，土壌間差を考慮しなくてもテンサイの生育状況を説明できる有効な指標であることが示された．

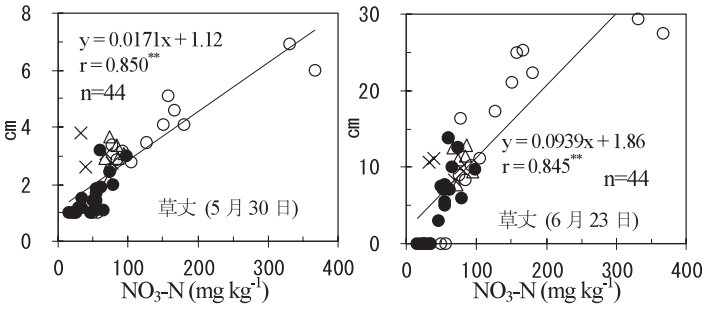

図 Ⅱ-16 テンサイの草丈と株間土壌の硝酸態窒素量(5 月 30 日)の関係
△:普通褐色低地土　　●:腐植質灰色台地土
×:腐植質火山放出物未熟土　　○:淡色黒ボク土
** : 1%水準で有意な相関であることを示す.

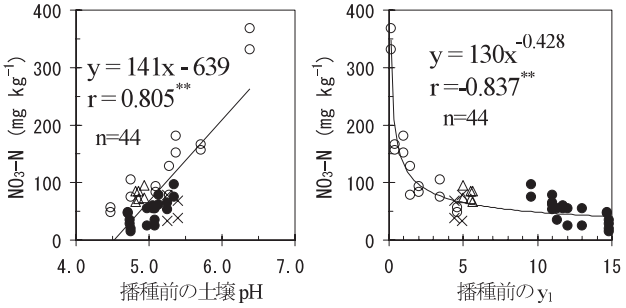

図 Ⅱ-17 土壌 pH および交換酸度 y_1 と株間土壌の硝酸態窒素量(5 月 30 日)の関係
△:普通褐色低地土　　●:腐植質灰色台地土
×:腐植質火山放出物未熟土　　○:淡色黒ボク土
** : 1%水準で有意な相関であることを示す.

以上のことから，土壌酸性によるAl害を消去し，さらに施肥窒素の硝酸化成を促進することからも，土壌pHを低いままにしておくのは避けるべきであることが示された．

まとめ

4種の土壌を用いて，直播テンサイの初期生育に及ぼす土壌要因の影響について検討した．土壌要因としては，土壌酸性（土壌pH，交換酸度y_1）と作条施肥された窒素の硝酸化成に着目した．

4種の供試土壌をpH5.1に統一して比較すると，最も交換酸度y_1が高いのは腐植質灰色台地土（y_1：18.0）であり，2番目は腐植質火山放出物未熟土（y_1：6.9），3番目は普通褐色低地土（y_1：5.3）で，最低は淡色黒ボク土（y_1：2.2）であった．土壌溶液へのAl放出が始まる土壌pHは約4.8であったが，淡色黒ボク土にはこれが当てはまらず，土壌溶液中のAl濃度も他の3土壌より低かった．一方，土壌pHは作条施肥された窒素の硝酸化成によって一時的に低下したが，このことは腐植質灰色台地土で最も著しく，土壌pHはAl放出が生じるレベル（4.8以下）にまで低下した．

このように土壌酸性に関わる性状が全く異なる供試土壌でテンサイを栽培したところ，生育は土壌pHおよび交換酸度y_1の両者と有意に関係した．しかしどちらの場合も土壌タイプの違いに由来するばらつきがあった．

一方，株間の土壌中硝酸態窒素量は，土壌pHおよび交換酸度y_1よりもテンサイの生育（草丈）と密接に関係した．さらに，この株間の土壌中硝酸態窒素量は土壌pHおよび交換酸度y_1と密接に関係し，特に交換酸度y_1の方が土壌pHよりもやや密接であった．

以上のことから，まず第1に硝酸態窒素はテンサイの直接的な窒素栄養源であることから，土壌中の硝酸態窒素量はテンサイの窒素栄養状態を表し，テンサイの生育と直接的な関係をもつと考えられ，次に硝酸化成程度（土壌中の硝酸態窒素量）は土壌の酸性状態（交換酸度y_1）に支配されるため，間接的に土壌酸性と関係すると考えられた．すなわち施肥窒素の硝酸化成程度は土壌の種類によらずテンサイの生育を理解する上で重要な意味を持つことが明らかとなった．

さらに窒素肥料の硝酸化成を促進し，また窒素肥料の硝酸化成に伴うpHの低下によって助長されうるAl害のリスクを最小とする視点から，土壌pHが低いことを放置すべきでないことが再認識された．