第Ⅲ章　施肥窒素の硝酸化成に影響を及ぼす要因の解析―添加窒素濃度，窒素の種類，土壌pH，土壌有機物含量の影響―

はじめに

第Ⅱ章において，土壌の酸性矯正は，施肥窒素の硝酸化成を良好にし，直播テンサイの初期生育向上につながることが示されたことから，硝酸化成は直播テンサイの窒素施肥を改善する上で重要な検討事項である．

一般的に，硝酸化成を規制する要因としては，（1）添加窒素濃度，（2）施肥窒素の種類，（3）土壌pH，（4）硝酸化成菌数，（5）酸素供給量，（6）温度，（7）土壌水分，の7つが挙げられる（Alexander，1977；土壌微生物研究会，1981；Follet et al，1981）．これらの要因のうち，窒素施肥法によって直接的に影響を受けるのは（1）添加窒素濃度と（2）施肥窒素の種類，である．

第1に，添加窒素濃度に関しては，土壌中で高濃度であるほど硝酸化成が抑制されることが知られている（Grewal et al，1999；Wetselaar et al，1972）．さらにこの知見を基に，施肥位置（根の近傍）の窒素が極めて高い濃度となる作条施肥（Follet et al，1981；Wetselaar et al，1972）やNest placement（Grewal et al，1999）は，硝酸化成を適度に抑制することで窒素の損失を防ぎ，施肥窒素の利用率を向上するのに有効であることが示された．しかし，この“高窒素濃度下における硝酸化成の抑制程度”は土壌タイプによって異なる可能性があり，すなわち土壌化学性等によって抑制程度に違いを生じる可能性がある．にもかかわらず，このような研究報告は少ない．

次に窒素の種類に関しては，硫酸アンモニウムと塩化アンモニウムの硝酸化成は尿素よりも遅く，またこの差は添加窒素濃度が高いほど大きくなることが知られている（土壌微生物研究会，1981；越野，1994）．しかし，北海道の畑作でよく用いられるリン酸アンモニウムと，尿素および硫酸アンモニウムの三者に関する比較は明確にされていない．

以上の2つの事項について検討し，以降の窒素施肥改善の参考とするため，2種の室内培養実験を行った．培養実験（1）では，道内畑土壌22種類を，添加窒素濃度5水準（0，50，100，200，300mg kg^{-1}）で培養し，硝酸化成の抑制程度と土壌化学性（T-C，土壌pH，交換酸度y_1，リン酸吸収係数，T-N，交換性塩基含量（Ca，Mg，K，Na），CEC，塩基飽和度）との関係を検討した．培養実験（2）では，尿素・リン酸アンモニウム，硫酸アンモニウムを，添加窒素濃度4水準(0，300，500，1000 mg　kg^{-1}）で培養し，硝酸化成抑制程度の違いを検討した．

材料と方法

1）培養実験

（1）―高窒素濃度下における硝酸化成抑制程度に与える土壌化学性の影響

供試土壌は，2000年7月に道内の22圃場から採取した畑土壌である（**表Ⅲ―1**）．土壌試料採取時には，道内畑土壌の代表例が網羅されるよう配慮した．土壌試料は，各圃場の裸地部（無施肥）の深さ0～20㎝から採取した．各土壌試料は，硝酸化成菌の衰弱を防ぐため，風乾せずに生土のまま2㎜のふるいを通し，実験に供するまで5℃で貯蔵した．供試した22種の土壌は，農耕地土壌分類第3次改訂版（農耕地土壌分類委員会，1995）では，普通黒ボク土（Haplic Andosol），普通火山放出物未熟土（Haplic Volcanogenous Regosol），淡色黒ボク土（Low-humic Andosol），普通褐色低地土（Haplic Brown Lowland soil），の4種に分類される．

供試土壌をそれぞれ20ｇ（乾土として）ずつポリビンに秤取り，リン酸アンモニウム（リン酸1アンモニウム）を，乾土当たりの添加窒素量が0，50，100，200，300mg kg^{-1}となるように添加・混合した．なお，添加窒素量の最大値を300mg kg^{-1}とした理由は，予備実験の結果から，この値が供試土壌22試料間の違いを観察するのに最適な最大値と判断されたためである．また，添加窒素にリン酸アンモニウム（リン酸1アンモニウム）を用いたのは，北海道の畑作で最も良く用いられる窒素（リン酸）肥料種だからである．土壌水分は最大容水量の60％に調整した．供試土壌の入ったポリビンを小孔のあるポリエチレンフィルムで覆い，14日間30℃で培養した．なお，14日間の培養期間中に硝酸化成

表 Ⅲ-1 供試土壌の化学性

土壌タイプ	試料番号 試料採取地	土壌 pH	y_1 †	リン酸 吸収係数 (g kg^{-1})	T-C (g kg^{-1})	T-N (g kg^{-1})	交換性塩基 (mmol$_c$ kg^{-1}) Ca	Mg	K	Na	CEC (mmol$_c$ kg^{-1})	塩基 飽和度 (%)
普通 黒ボク土	S1, 倶知安町 後志支庁	5.2	1.5	8.40	34.0	3.0	64	17	11	4	275	34.7
	S2, 倶知安町 後志支庁	5.3	1.8	8.20	48.8	4.1	77	18	12	2	360	30.2
	S3, 新得町 十勝支庁	5.6	0.9	8.42	82.4	4.7	136	11	4	2	403	37.9
	S4, 新得町 十勝支庁	6.6	2.0	6.04	39.9	2.8	41	8	3	2	199	27.2
	S5, 上士幌町 十勝支庁	5.9	1.0	6.34	38.2	2.8	84	19	4	2	317	34.8
	S6, 士幌町 十勝支庁	5.9	0.9	5.63	45.7	3.7	118	9	5	1	239	56.0
	S7, 本別町 十勝支庁	5.5	1.4	6.83	44.9	3.4	94	12	7	3	288	40.0
	S8, 本別町 十勝支庁	5.1	1.6	4.84	33.3	2.2	99	21	5	4	277	46.8
	S9, 本別町 十勝支庁	5.0	1.9	5.40	31.4	2.7	85	15	7	8	277	41.5
	S10, 本別町 十勝支庁	5.5	2.4	4.77	34.1	2.9	75	15	11	2	289	35.6
	S11, 本別町 十勝支庁	5.9	1.0	6.82	59.1	4.1	124	20	8	2	400	38.3
普通 火山放出物 未熟土	S12, 早来町 胆振支庁	6.0	0.3	5.07	25.8	1.8	59	8	4	2	156	46.1
	S13, 早来町 胆振支庁	6.4	0.2	3.19	23.9	1.6	72	14	1	1	134	66.2
	S14, 厚真町 胆振支庁	5.2	4.4	1.93	13.6	1.3	40	13	2	2	107	53.1
	S15, 鵡川町 胆振支庁	5.5	1.8	1.51	14.0	1.1	38	24	1	2	97	67.9
淡色 黒ボク土	S16, 倶知安町 後志支庁	5.7	1.1	6.70	10.1	1.0	64	30	5	7	226	47.1
	S17, 芽室町 十勝支庁	6.0	0.5	7.11	17.4	1.7	27	5	3	2	132	28.0
	S18, 網走市 網走支庁	6.1	0.4	6.47	24.7	2.0	81	17	16	3	216	54.2
	S19, 網走市 網走支庁	6.5	0.2	6.38	24.4	2.1	112	20	14	5	230	65.4
普通 褐色低地土	S20, 本別町 十勝支庁	5.2	5.4	1.99	12.5	1.4	118	25	7	3	222	69.1
	S21, 本別町 十勝支庁	5.0	11.8	3.00	12.5	1.4	84	19	8	4	220	51.8
	S22, 池田町 十勝支庁	6.0	1.4	2.12	9.3	1.3	133	34	11	5	253	72.3

† 交換酸度 y_1.

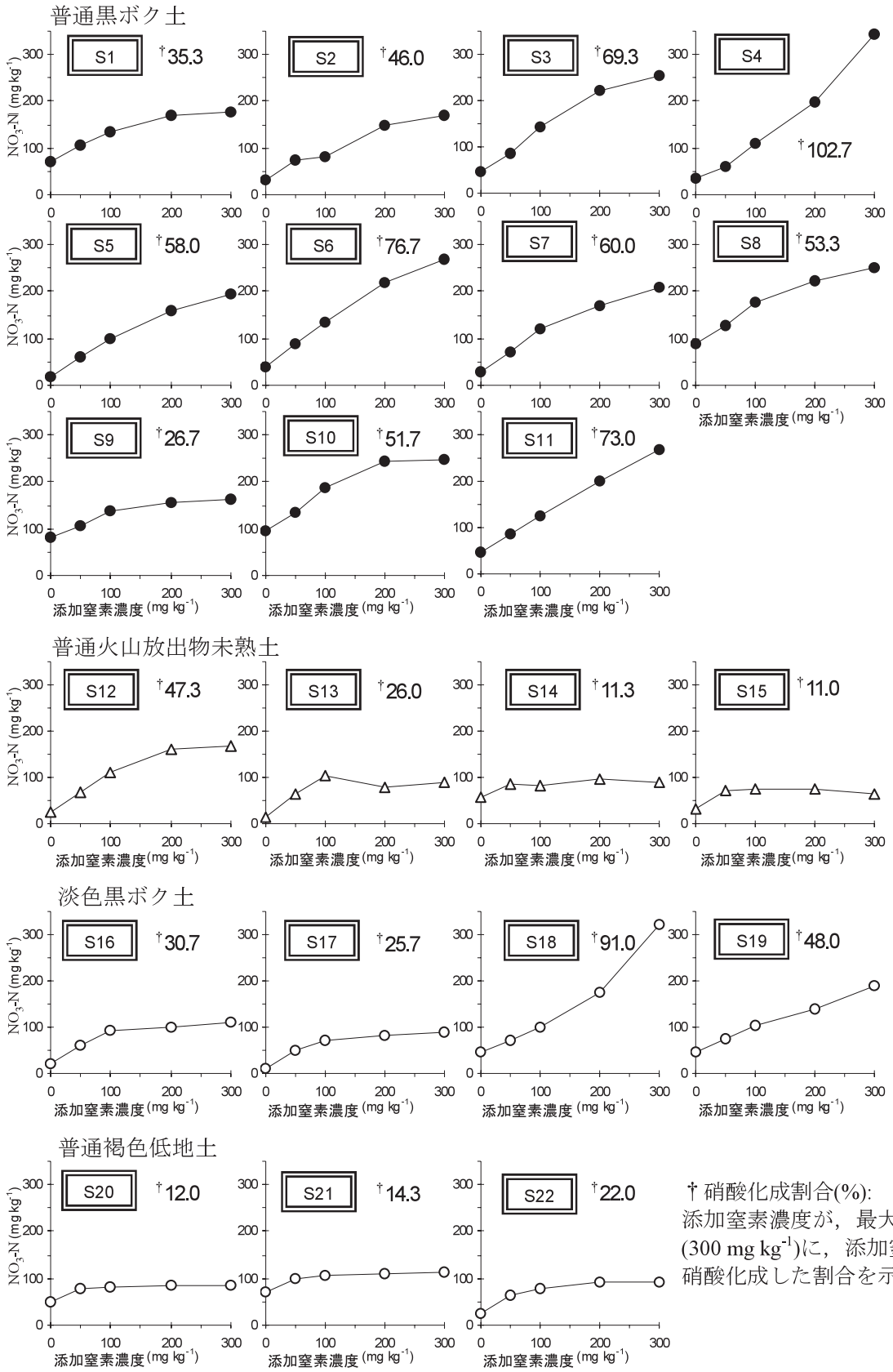
量が最大に達するので，培養日数は14日間で十分であることは予備実験によって確認済みである．培養期間中，２～３日に一度，乾燥によって失われた土壌水分を補った．培養終了後，硝酸態窒素の定量を，第Ⅱ章第２節と同様に行った．全ての処理は２反復で行った．

土壌の化学性の分析には，２㎜の篩いを通した風乾土を供試した．分析項目は土壌pH，交換酸度y_1，リン酸吸収係数，T-C，T-N，交換性塩基（Ca，Mg，K，Na），CEC，であり，第Ⅱ章第２節と同様に行った．

２）培養実験

（２）―高窒素濃度下における硝酸化成抑制程度に与える窒素の種類の影響

供試土壌は，2000年７月に網走市内の畑圃場において，裸地部（無施肥）の深さ０～20㎝から採取した．この土壌は，農耕地土壌分類第３次改訂版（農耕地土壌分類委員会，1995）では淡色黒ボク土に分類され，表Ⅲ―１のS18に相当する．本実験においてこの土壌（S18，**表Ⅲ―１**）を供試した理由は，結果と考察において後述するように，この土壌のT-Cと土壌pHが比較的高いため，添加窒素が高濃度でも硝酸化成が進みやすく，添加窒素の種類間差を比較しやすいと判断したからである．土壌試料は，硝酸化成菌の衰弱を防ぐため，風乾せずに生土の



† 硝酸化成割合(%):
添加窒素濃度が，最大の時(300 mg kg^{-1})に，添加窒素が硝酸化成した割合を示す.

図 Ⅲ-1 添加窒素濃度が硝酸化成に与える影響(30℃・14 日間培養)

まま２㎜のふるいを通し，実験に供するまで５℃で貯蔵した．

この供試土壌に，尿素，リン酸アンモニウム（リン酸１アンモニウム），硫酸アンモニウムを，それぞれ添加窒素量が乾土当たりで300，500，1000mg kg^{-1}となるように添加・混合した．なお，窒素添加量を300～1000mg kg^{-1}と，培養実験（１）よりも高く設定したのは，この土壌（S18，**表Ⅲ―１**）は硝酸化成が進みやすい土壌なので，培養実験（１）と同じ窒素添加量（50～300mg kg^{-1}）では窒素の種類間差を比較しにくいと判断したからである．また，本実験では窒素添加量の上限を1000mg kg^{-1}としたが，これは施肥位置（作条施肥）の中心から半径１㎝内のアンモニウム態窒素濃度が1000～2000mg kg^{-1}であったとする既往の報告（石塚ら，1965）の下限値を参考としたものである．なお，培養時には常に空試験（窒素添加量０mg kg^{-1}）を併行させた．土壌水分は最大容水量の60％に調整した．上記のように処理・調整した土壌試料を，乾土として20ｇずつポリビンに秤入れ，ポリビンを小孔のあるポリエチレンフィルムで覆い，30℃で42日間培養した．培養期間中，2～３日に一度，乾燥によって失われた土壌水分を補った．培養開始から0，7，14，21，28，35，42日後に，硝酸態窒素の定量を，第Ⅱ章第２節と同様に行った．全ての処理は２反復で行った．

３）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）高窒素濃度下における硝酸化成抑制程度に与える土壌化学性の影響

供試した22土壌（S１～S22，土壌化学性は**表Ⅲ―１**参照）における，添加窒素濃度が硝酸化成量に与える影響を**図Ⅲ―１**に示した．硝酸化成量は，以下に記すように供試土壌間で大きく異なっていた．

普通黒ボク土については，以下のように多様な場合があった．試料S４の場合には，添加窒素濃度が300mg kg^{-1}と最大であっても，添加窒素のほぼ全てが硝酸化成された．ところが，試料S３，S５，S６，S７，S８，S10，S11の場合には，添加窒素濃度の増加に伴って次第に硝酸化成が抑制された．さらに，試料S１，S２，S９の場合には，試料S３，S５，S６，S７，S８，S10，S11の場合よりもさらに硝酸化成が抑制された．ここで，供試土壌のpHをみると（**表Ⅲ―１**），試料S４のpHは6.6と最も高く，試料S３，S５，S６，S７，S８，S10，S11のpHは，それぞれ5.6，5，9，5.9，5.5，5.1，5.5，5.9と，いずれも試料S４より低かった．さらに，試料S１，S２，S９のpHは，それぞれ5.2，5.3，5.0で，S８がpH5.1だったことを除けば，試料S３，S５，S６，S７，S10，S11の場合よりも低かった．このように，硝酸化成は土壌試料間で大きく異なり，その違いは土壌pHの違いに概ね対応した．

普通火山放出物未熟土については，全体的に普通黒ボク土の場合よりも硝酸化成が抑制されていた．特に試料S12とS13の場合は，土壌pH値がそれぞれ6.0，6.4と比較的高いにもかかわらず，添加窒素濃度の増加に伴って硝酸化成が抑制されていた．試料S14とS15の土壌pHはそれぞれ5.2，5.5と低く，試料S12とS13の場合よりもさらに硝酸化成が抑制されていた．

淡色黒ボク土についても，土壌pHの低い試料S16とS17（pHはそれぞれ5.7，6.0）の場合の硝酸化成は，土壌pHの高い試料S18とS19（pHはそれぞれ6.1，6.5）の場合よりも硝酸化成は抑制されていた．

普通褐色低地土については，全般に硝酸化成が抑制されており，土壌pHが6.0と最も高い試料S22の場合の硝酸化成が，土壌pHが低い場合（試料S20とS21，pHはそれぞれ5.0と5.2）よりも僅かに促進されていた程度であった．

添加窒素濃度の増加によって硝酸化成が抑制を受けることは，他の研究報告においても示されている（土壌微生物研究会，1981；Wetselaar et al，1972）．例えば，Wetselaar et al（1972）は，添加窒素濃度が400mg kg^{-1}（硫酸アンモニウム）であれば，4週間の培養後には約10％の添加窒素が硝酸化成されるが，添加窒素濃度を1000～5000mg kg^{-1}に増やすと硝酸化成はほとんど生じなくなることを報告している．また，この高窒素濃度による硝酸化成の抑制効果は，土壌の低pHによって助長されることも知られている（土壌微生物研究会，1981）．

硝酸化成は基本的には硝酸化成菌数の増加によって促進されるが，硝酸化成菌数は環境要因の影響を受けやすい（土壌微生物研究会，1981）．もし土壌中の硝酸化成菌数が飽和状態に達したならば，硝酸化成は最大に達するが，自然界でこのような状態になることはほとんどない（土壌微生物研究会，1981）．したがって，実際の硝酸化成は，土壌化学性のような環境要因の影響を強く受ける．

そこで本研究では，高窒素濃度下における硝酸化成に与える土壌化学性の影響を検討するために，添加窒素量300mg kg^{-1}のうち，培養後に硝酸態窒素に変化した割合

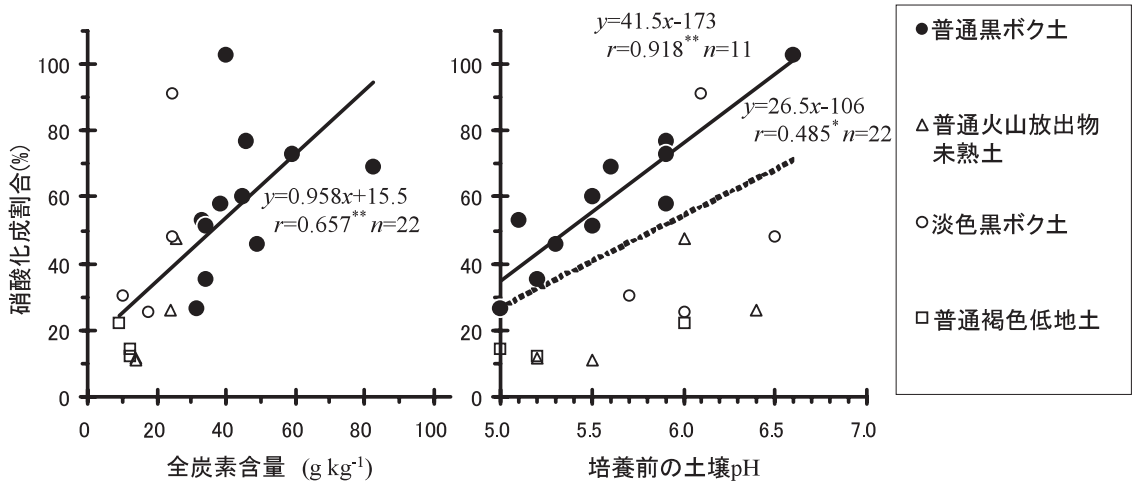


図 Ⅲ-2 全炭素含量および培養前の土壌 pH と硝酸化成程度の関係　(添加窒素濃度 300 mg kg^{-1})
右図中の実線(━)は普通黒ボク土のみの場合の回帰直線(●; n=11)を示し，点線(･･･)は全土壌を込みにした回帰直線を示す(●, △, ○, □; n=22).
**: 1%水準で有意, *: 5%水準で有意

表 Ⅲ-2 硝酸化成程度と土壌化学性の相関係数 (n=22)

項目	土壌pH	交換酸度 y_1	リン酸吸収係数	T-C	T-N	交換性塩基 Ca	Mg	K	Na	CEC	塩基飽和度
硝酸化成割合	0.485*	NS	0.602**	0.657**	0.628**	NS	NS	NS	NS	0.440*	-0.443*
T-C	NS	NS	0.682**	―	0.960**	NS	NS	NS	NS	0.759**	-0.536*

**：1%水準で有意，*：5%水準で有意，NS：有意性なし.

を硝酸化成割合（%）と定義し，**図Ⅲ―1**に示すとともに，硝酸化成割合と土壌化学性との相関係数を**表Ⅲ―2**に示した．硝酸化成割合は，T-Cとの相関係数が最も高く（r=0.657**，P<0.01），ついでT-N（r=0.628**，P<0.01），リン酸吸収係数（r=0.602**，P<0.01），土壌pH（r=0.485*，P<0.05；**図Ⅲ―2**），塩基飽和度（r=-0.443*，P<0.05），そしてCEC（r=0.440*，P<0.05）の順であった．また，T-CはT-Nとの相関係数がr=0.960**（P<0.01）と極めて高く，ついでCEC（r=0.759**，P<0.01），リン酸吸収係数（r=0.682**，P<0.01），そして塩基飽和度（r=-0.536*，P<0.05）の順であったことから，T-CとT-N，CEC，リン酸吸収係数，塩基飽和度は，統計学的には互いに独立でないことが示された．

T-Cと土壌pHは互いに無相関であったことから，統計学的には互いに独立である．したがって，以降の解析ではT-Cと土壌pHの２つを，硝酸化成に影響を及ぼす要因として扱うこととした．

なお，**表Ⅲ―2**において硝酸化成割合と塩基飽和度が有意な負の相関（r=-0.443*，P<0.05）を示したのは興味深い結果である．この理由は，塩基飽和度がT-Cと有意な負の相関関係（r=-0.556*，P<0.05）にあり，さらにT-CはCECと有意な正の相関関係（r=0.759**，P<0.01）にあったことに起因すると考えられる．すなわち，土壌有機物含量（T-C）が多いほどCECが高く，交換性塩基保持容量が大きくなるため相対的に塩基飽和度は概して低かったが，土壌有機物含量が多いことが硝酸化成を促進したために，硝酸化成割合と塩基飽和度が負の相関を示したと考えられる．

表Ⅲ―2および**図Ⅲ―2**に示したように，硝酸化成割合は土壌pHよりも土壌有機物含量（T-C）とより密接に関係した．このことは，一般的には硝酸化成は土壌pHと密接に関係するとされている（Alexander，1977；土壌微生物研究会，1981）ことと異なり，興味深い結果といえる．ただし，硝酸化成と土壌有機物含量が正の関係を持つことは坂井（1960）が示唆していることであり，またZebarth and Paul（1997）も，土壌有機物の供給源である堆肥が施用された土壌において，より硝酸化成が促進されることを示していることと，本研究の結果は符合するものである．このように硝酸化成と土壌有機物含

量が正の関係を持つ理由としては，次の２点が考えられる；（１）土壌有機物は，添加したアンモニウム態窒素および生成した硝酸態窒素の両者が硝酸化成活性を抑制する影響を緩衝する，（２）土壌有機物は，硝酸化成菌をも含めたあらゆる土壌微生物に“より大きな棲息空間”を提供する（土壌微生物研究会，1981；西尾，1988）．ただしこの２点は現段階での推測に過ぎないので，今後さらに検証し明らかにする必要があろう．

一方，硝酸化成割合は，T-Cの場合よりも相関係数および有意水準は低かったものの，土壌pHと有意な正の相関関係にあった（**表Ⅲ－２，図Ⅲ－２**）．ここでT-Cが他の土壌（普通火山放出物未熟土：13.6～25.8ｇ kg^{-1}，淡色黒ボク土：10.1～24.7ｇ kg^{-1}，普通褐色低地土：9.3～12.5ｇ kg^{-1}）よりも高い普通黒ボク土（31.4～82.4ｇ kg^{-1}）の場合のみをみると，硝酸化成割合と土壌pHは極めて高い正の相関関係にあった（r=0.918**，P<0.01）．このように，土壌有機物含量（T-C）の高い土壌条件において硝酸化成と土壌pHが密接に関係した理由については，詳細は不明ではあるが，土壌有機物含量が硝酸化成の制限要因にならないほど高いレベルにあったため，土壌pHとの関係が明瞭に現れたものと考えられる．

以上の結果に基づき，硝酸化成割合を目的変数Y（%），T-C（ｇ kg^{-1}）と土壌pHをそれぞれ説明変数X_1とX_2として重回帰分析を行ったところ，有意な以下の回帰式を得た．

$Y=-125+0.927X_1+24.9X_2$（$R^2=0.638$**，P<0.01）

X_1とX_2の標準偏回帰係数は，それぞれ0.636と0.455でX_1がX_2よりも高く，このことは，硝酸化成に影響を及ぼす要因として，土壌有機物含量（T-C）の寄与率は土壌pHよりも大きいことを示している．

以上で明らかにした，硝酸化成に及ぼす添加窒素濃度，土壌有機物含量（T-C），土壌pHの影響を**表Ⅲ－３**のように整理した．

２）窒素の種類の違いが高窒素濃度下における硝酸化成抑制程度に与える影響

培養期間中における各窒素（尿素，リン酸１アンモニウ

表 Ⅲ-3 添加窒素濃度、土壌有機物含量(T-C)、土壌 pH が硝酸化成に及ぼす影響

要因	(抑制) ←――― 硝酸化成 ―――→ (促進)
添加窒素濃度	(高) ←――――――――→ (低)
土壌有機物含量	(少) ←――――――――→ (多)
土壌 pH	(低) ←――――――――→ (高)

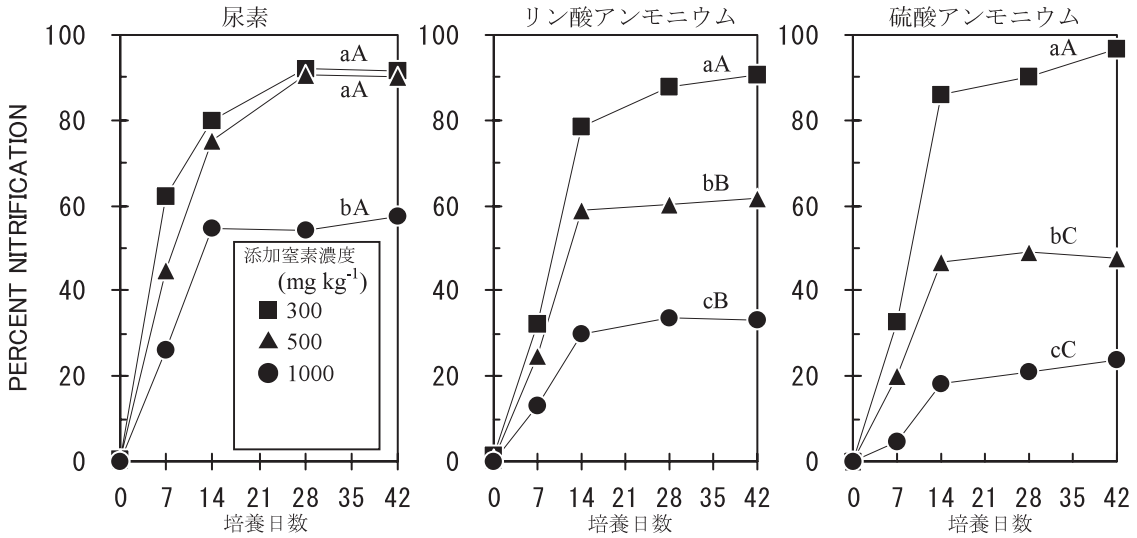


図 Ⅲ-3 窒素の種類と添加濃度が硝酸化成割合に与える影響(30℃培養)
同一図内(同一窒素種類内)で a-c の文字が異なる場合は，添加窒素濃度間(300,500,1000 mg kg^{-1})に有意差(LSD 法，P<0.05)があることを示す．
同一添加窒素濃度内(300,500,1000 mg kg^{-1})で A-C の文字が異なる場合は，窒素の種類間に有意差(LSD 法，P<0.05)があることを示す．

ム，硫酸アンモニウム）の硝酸化成割合を**図Ⅲ―3**に示した．窒素添加量が300mg kg^{-1}の場合，窒素３種類ともに培養開始14日後で添加窒素の約80％が硝酸化成され，窒素の種類間に差はなかった．しかし窒素添加量が500および1000mg kg^{-1}の場合には，硝酸化成割合は尿素で最も高く，ついでリン酸１アンモニウム，硫酸アンモニウムの順であり，これらの差は$P<0.05$で有意であった．また，尿素に関しては，窒素添加量1000mg kg^{-1}の場合における硝酸化成割合は，窒素添加量が300および500mg kg^{-1}の場合よりも有意に低かったが，窒素添加量300と500mg kg^{-1}の間に有意差はない．リン酸１アンモニウムおよび硫酸アンモニウムの両者に関しては，硝酸化成割合は窒素添加量1000mg kg^{-1}の場合に最も低く，ついで窒素添加量500，300mg kg^{-1}の順に高まり，これらの差は$P<0.05$で有意であった．すなわち，添加する窒素濃度が高まるほど，窒素３種類間の硝酸化成割合の差が大きくなった．

尿素の硝酸化成は硫酸アンモニウムよりも早く，その差は添加窒素濃度が高い場合により明瞭となることが，Wetselaar et al（1972）およびGrewal et al（1999）によって報告されている．本研究の結果からは，畑作の農業現場でよく用いられるリン酸１アンモニウムが，硝酸化成に関しては尿素と硫酸アンモニウムの中庸に位置付けられることが新たに分かった．

窒素の種類によって硝酸化成程度が異なる理由は，主に窒素の種類によってpH特性が異なるためと考えられる．尿素は土壌に施用された直後から加水分解反応が始まり，30℃条件ならば２～３日以内にほぼ全てが炭酸アンモニウムとなり，施用位置の周りのpHを上昇させる（越野，1994）．そのため，尿素の硝酸化成は自身の持つpH上昇能力によって促進されるので，生理的酸性肥料に属する硫酸アンモニウムよりも硝酸化成が早かったと考えられる．またリン酸１アンモニウムは尿素と硫酸アンモニウムの中庸に位置付けられたが，この理由は供試土壌がリン酸吸収係数の大きい（**表Ⅲ―1**参照，6.47 g kg^{-1}：約15ｇP_2O_5 kg^{-1}）淡色黒ボク土であるため，リン酸１アンモニウムを添加するとリン酸イオンの特異吸着が生じ，これに伴い水酸化物イオン（OH^-）が放出されることによってpHが上昇するため（和田，1981），尿素ほどではないが生理的酸性肥料である硫酸アンモニウムよりは硝酸化成が促進されたためと考えられる．

３）得られた結果の窒素施肥改善への応用

添加窒素濃度の上昇による硝酸化成の抑制は，主に土壌有機物含量の低い場合に助長された．反対に，高窒素濃度下における硝酸化成は，土壌有機物含量の多い土壌においては，土壌pHが硝酸化成を抑制するほど低くない限り，土壌有機物含量の少ない土壌よりも速やかであった．

以上の結果から，作条施肥やnest placementのような局所施肥の施肥位置における硝酸化成は，土壌pHが低くない限り，有機物含量の少ない土壌（例えば本研究における普通火山放出物未熟土，淡色黒ボク土，普通褐色低地土）よりも有機物の多い土壌（例えば本研究における普通黒ボク土）において速やかであることが示唆された．

さらに，以上の推察を裏返せば，全層施肥や分施の導入によって施肥位置の窒素濃度を低下させることにより，土壌有機物含量や土壌pHの違いに左右されずに硝酸化成を良好に保てる可能性も示唆された．

他方，窒素の種類の違いについては，添加窒素濃度が300mg kg^{-1}の場合には窒素肥料種間差はなかったが，500～1000mg kg^{-1}と添加窒素濃度がごく高い場合には，硫酸アンモニウムの硝酸化成が最も進みにくく，次いでリン酸１アンモニウムで，尿素の硝酸化成が最も進みやすかった．このことは，作条施肥やnest placementのような局所施肥の場合，施肥位置の硝酸化成には窒素肥料種によって以上のような違いが生じることを示唆するものである．

さらに以上の推察から，全層施肥や分施のように施肥位置の窒素濃度が低い場合には，窒素肥料種の違いは硝酸化成にはさほど影響を与えず，速やかに硝酸化成が進むことも読み取れる．

以上のことから，全層施肥や分施のように窒素を土壌中で分散させる施肥法においては，施肥窒素の硝酸化成は土壌タイプや土壌pH・土壌有機物，さらに窒素肥料種といった要因に左右されにくく，全量作条施肥の場合よりも硝酸化成しやすいことが示唆された．

まとめ

添加窒素濃度が高い条件における硝酸化成に影響を及ぼす要因について明らかにするため培養実験を行った．道内22圃場（過半は火山性土系土壌）から採取した土壌を供試し，リン酸１アンモニウムを０，50，100，200，300mg N kg^{-1}の量で土壌に添加し，14日間培養した結果，以下の４点が明らかになった．

（１）高濃度の窒素添加は硝酸化成を抑制する．

（２）最も添加窒素濃度の高い条件（300mg N kg^{-1}）における硝酸化成について土壌間差を比較したところ，有機物含量の高い土壌（普通黒ボク土，T-C：31.4-82.4ｇ kg^{-1}）における硝酸化成は，その他の有機物含量の低い

土壌（T-Cは，普通火山放出物未熟土で13.6-25.8ｇ kg^{-1}，淡色黒ボク土で10.1-24.7ｇ kg^{-1}，普通褐色低地土で9.3-12.5ｇ kg^{-1}）よりも速やかであった．（３）普通黒ボク土のみ見た場合，硝酸化成は土壌pHと密接に関係した．（４）22土壌全体でみれば，硝酸化成は第１にT-Cと有意な正の相関関係にあり，第２に土壌pHとの正の相関関係が有意であった．

次に，T-Cと土壌pHがともに比較的高い土壌を供試し，硫酸アンモニウム，リン酸１アンモニウム，尿素の硝酸化成を培養実験によって比較した．窒素添加量が300mg N kg^{-1}の場合には，3窒素種とも42日間で添加窒素の全てが硝酸化成された．ところが，窒素添加量が500および1000mg N kg^{-1}の場合には，全ての窒素種において硝酸化成の抑制が見られた．最も硝酸化成が抑制されたのは硫酸アンモニウムであり，ついでリン酸１アンモニウム，尿素の順であった．

以上のことから，施肥窒素の硝酸化成は，添加窒素濃度，土壌有機物含量，土壌pH，施用窒素種，そしてこれらの相互作用によって影響を受けることが明らかになった．これらの知見は，全層施肥・分施・作条施肥など施肥法間の違いを比較し理解する上で有効である．

第Ⅳ章　全層施肥による直播テンサイの窒素施肥改善

第Ⅱ章で述べたように，直播テンサイは全量作条施肥による濃度障害を受けやすいので，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なる可能性が示唆された．そこで第Ⅳ章では，まず第１に全層施肥の有効性について検討した．

第１節　直播テンサイにおける全層施肥による初期生育改善とその要因解析

はじめに

全層施肥は，肥料を全面散布した後に，砕土整地によって表層土壌と肥料を混和する施肥法であり，広く野菜および水稲栽培に用いられてきた（笛木ら，2000；北海道農政部，2003）．ただし，野菜や水稲さらにジャガイモ栽培においては，全層施肥は作条施肥よりも施肥利用率あるいは収量が低いことが知られている（笛木ら，2000；北海道農政部，2003；今野・宮森，1997；Westermann and Sojka，1996）．

これに対して，比較的近年の直播テンサイの場合，全層施肥の収量が作条施肥に比べて低いとの報告はなく（Christenson，1992；永田，1971；関口・和田，1975），むしろ全層施肥によって初期生育の改善が観察された事例がいくつかある（永田，1971；関口・和田，1975）．しかし，その改善効果については，体系的な試験で確認されてはいない．また，全層施肥および作条施肥における土壌中のpH，EC，無機態窒素等の挙動の違いが初期生育に与える影響も十分には明らかにされていない．従って，直播テンサイの施肥技術を確立するには，まず全層施肥における初期生育の改善機作を解明することが重要である．

以上の背景から，本研究では直播テンサイにおける全層施肥による初期生育の改善とその要因を明らかにすることを目的とし，褐色低地土，火山放出物未熟土，黒ボク土を用いて，全層施肥と作条施肥における初期生育量と土壌中の窒素等の化学性の推移を詳細に比較した．

材料と方法

１）試験規模および供試土壌

試験には，北海道立十勝農業試験場に設置された面積１㎡（１ｍ×１ｍ）の試験用コンクリート枠19個を用いた（1985年造成，図Ⅳ―１）．１個のコンクリート枠には１種類の土壌が深さ60㎝まで充填されており，60㎝以深は礫層である．供試土壌は３種類で，十勝地方の芽室町内から採取した，農耕地土壌分類第３次改訂版（農耕

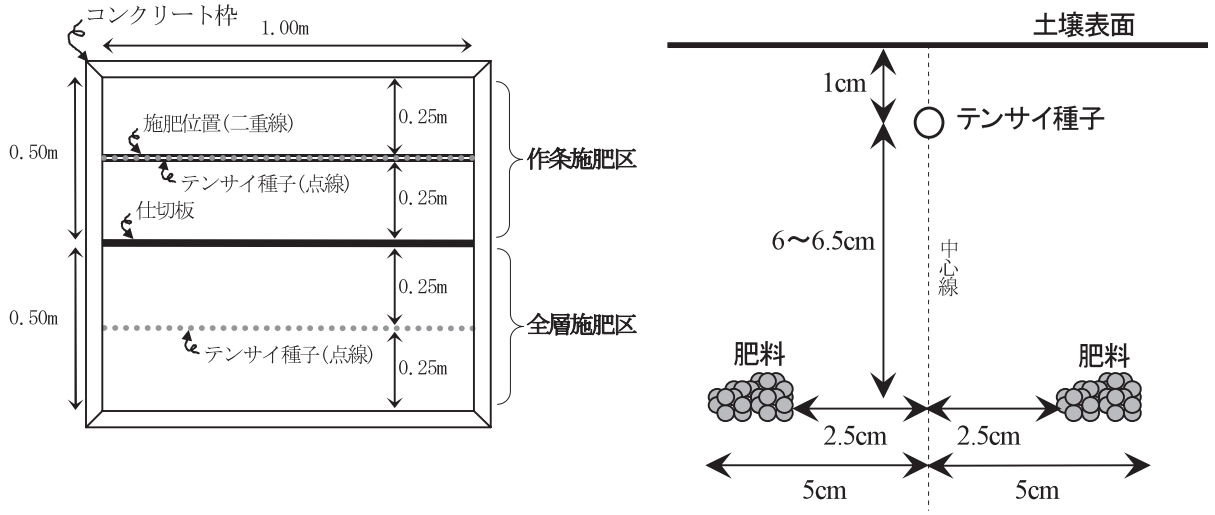


図 Ⅳ-1 コンクリート枠における作条施肥区と全層施肥区の配置
左図：コンクリート枠の全体図，右図：作条施肥区における種子と施肥の位置関係
全層施肥区では深さ 10㎝ までの土壌を掘り上げ，肥料と混合し埋め戻した．

地土壌分類委員会，1995）の分類体系による褐色低地土は９個のコンクリート枠に，同火山放出物未熟土は６個に，同黒ボク土は４個に，それぞれ容積重が1.0，0.7，0.7Mg m^{-3}となるよう充填されている．

各枠の土壌pH（土：水＝１：2.5）は，褐色低地土が5.2～5.8（平均5.5），火山放出物未熟土が5.4～5.7（同5.5），黒ボク土が5.1～5.6（同5.3）である．有効態リン酸（Truog法）は，褐色低地土が233mg kg^{-1}，火山放出物未熟土が183mg kg^{-1}，黒ボク土が184mg kg^{-1}であった．これらの値は2001年５月２日の施肥・播種前に作土を採取し測定したものである．

その他の土壌化学性は**表Ⅱ―８**に記載されている通りであり，褐色低地土，火山放出物未熟土，黒ボク土は**表Ⅱ―８**における普通褐色低地土，腐植質火山放出物未熟土，淡色黒ボク土，にそれぞれ該当する．

２）試験処理および栽培概要

各枠の試験区は**図Ⅳ―１**のように配置した．すなわち，各試験枠を仕切板（深さ約15cmまで挿入）で２分割し，全層施肥区は深さ10cmの土壌を一旦掘上げ，土壌と肥料を均一に混合して埋め戻し，均平整地後に播種した．作条施肥区は，深さ10cmの土壌をスコップで十分に砕土撹拌した後に均平整地し，**図Ⅳ―１**右のように施肥位置と播種深度を正確に設定した．本試験における作条施肥区の施肥位置は，現行の北海道の指導基準である種子下６cm，左右側方2.5～5.0cmに準拠した（梶山，2000）．

両試験区に共通する栽培概要は，以下の通りである．施肥・播種日は2001年５月２日，１区面積は0.5m^2，畦数は１区当たり１畦，供試品種はアーベント（直播栽培用ペレット種子），播種間隔は５cm（１畦当たり種子20粒），播種深度は１cmとした．1区当たりの施肥量は，窒素（N）が9.0g（尿素由来N：リン酸アンモニウム由来N：硝酸ナトリウム由来N＝2.7：6.0：1.3），リン酸（P_2O_5）が18.9g，カリウム（K_2O）が12.6g，マグネシウム（MgO）が4.5gで，各々，高度化成肥料を用いた．なお，株間の競合を避けるため，５月28日には１畦当たり10株，６月６日には同じく５株となるよう間引きした．

３）調査方法

テンサイの発芽率は５月21日に，草丈と葉数は６月６日，６月28日に，常法（農林水産省北海道農業試験場ら，1986）に従って調査した．

株間土壌は，上記の５月21日，6月６日，6月28日に**図Ⅳ―１**左のテンサイ種子（点線）および**図Ⅳ―１**右の中心線に沿った位置から，内径2.2cmの円柱型採土器を用いて深さ０～10cmの土壌を１区（１畦）につき４箇所から採取し，混合して分析に供した．これらの土壌試料は，生土のまま土壌pH（生土20g供試，土：水＝１：2.5），EC（同，土：水＝１：５），アンモニウム態窒素および硝酸態窒素（同，土：１mol L^{-1}塩化カリウム溶液＝１：５による抽出）を測定した．アンモニウム態窒素および硝酸態窒素の分析には，窒素の自動分析機器（AACSⅡ，ブランルーベ社製）を用いた．両窒素は，乾土当たり（mg kg^{-1}）で示した．硝酸割合（%）は，硝酸態窒素含量を無機態窒素含量（アンモニウム態窒素と硝酸態窒素の合計量）で除して算出した．体積水分率（m^3　m^{-3}）は，生土の105℃乾燥による重量法で求めた各土壌の水分（g　g^{-1}）と容積重（褐色低地土：1.0Mg m^{-3}，火山放出物未熟土：0.7Mg m^{-3}，黒ボク土：0.7Mg m^{-3}）から算出した．

４）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）株間土壌における土壌pH，EC，無機態窒素の挙動

株間土壌の化学性の推移を**図Ⅳ―２～６**に示したが，以下のように全般に施肥法の違いをよく反映していた．土壌pHは，いずれの土壌においても５月21日には作条施肥区（全平均値5.0）＜全層施肥区（同5.3）であったのが，６月６日～６月28日にはこの関係が逆転した（**図Ⅳ―２**）．ECは全般にいずれの土壌・測定日においても，全層施肥区（全平均値0.33～0.36dS m^{-1}）＜作条施肥区（同0.77～1.06dS m^{-1}）であった（**図Ⅳ―３**右下）．ECが0.7～1.1dS m^{-1}の時にテンサイ（直播）に濃度障害が発生することは第· 章第１節において認められ，本節の試験でも作条施肥区ではこれに近い値を示していた．このことは，後述するように，同区での濃度障害発生の指摘を支持するものである．

アンモニウム態窒素濃度や硝酸態窒素濃度も，ECと同様に，全層施肥区（全平均値がアンモニウム態窒素41～181mg kg^{-1}，硝酸態窒素99～172mg kg^{-1}）＜作条施肥区（同アンモニウム態窒素357～594mg kg^{-1}，硝酸態窒素163～244mg kg^{-1}）であった（**図Ⅳ―４～５**）．石塚ら（1964）は，作物の濃度障害は直接的にはアンモニウム態窒素濃度が高いことで生じることを指摘している．このことからも，後述の作条施肥区での初期生育抑制には，

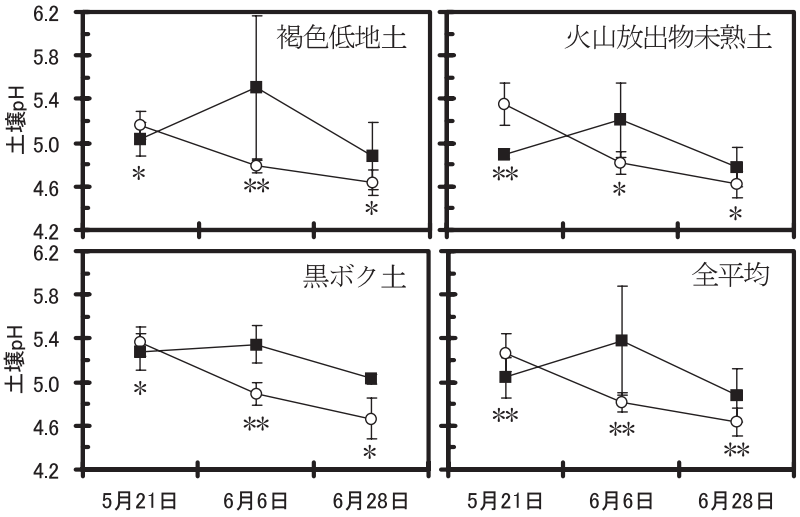


図 Ⅳ-2　株間土壌の土壌 pH の推移
○：全層施肥区，■：作条施肥区
それぞれの測定日における両区間の有意差(t 検定)は，**；1%水準，*；5%水準を示す(t 検定)．
施肥・播種日：2001 年 5 月 2 日．

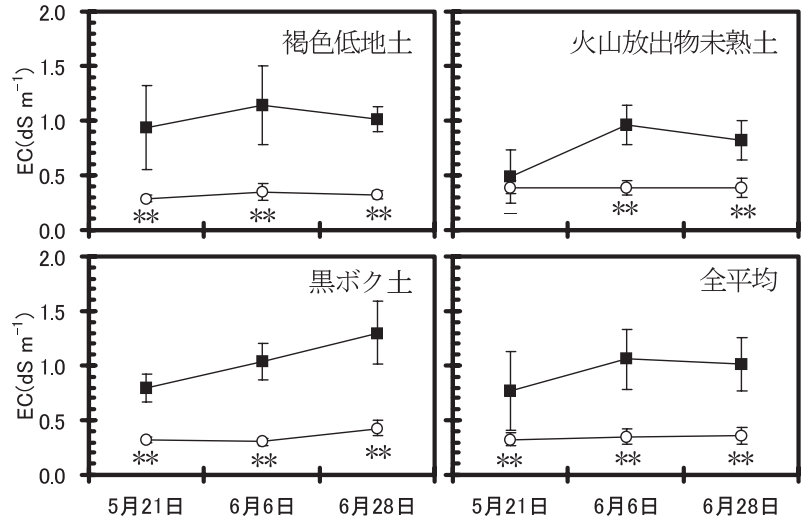


図 Ⅳ-3　株間土壌の EC の推移
○：全層施肥区，■：作条施肥区
それぞれの測定日における両区間の有意差(t 検定)は，**；1%水準，–；有意差なしを示す．
施肥・播種日：2001 年 5 月 2 日．

高濃度のアンモニウム態窒素が関与していたことが示唆される．

逆に硝酸割合は，概して作条施肥区（全平均値27～38%）＜全層施肥区（同37～80%）であった（**図Ⅳ―6**）．

このように，全層施肥と作条施肥における株間土壌の化学性は大きく異なった．特に，ECやアンモニウム態窒素濃度が，作条施肥区で著しく高いのは，施肥法の違いからみて当然と考えられる．以下では，土壌pH，硝酸態窒素濃度および硝酸割合の推移に注目し，これらの相互関係について言及する．

作条施肥区の土壌pHは，初期（5月21日）に低かったが，6月6日に上昇し全層施肥区よりも高まった．作条施肥により株間土壌の土壌pHが高まる現象は，第Ⅱ

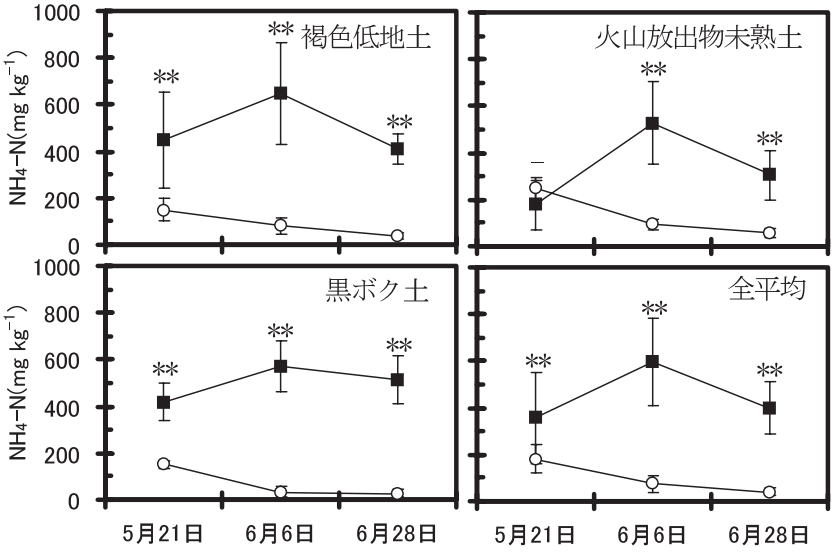


図 Ⅳ-4　株間土壌のアンモニウム態窒素濃度の推移
○：全層施肥区，■：作条施肥区
それぞれの測定日における両区間の有意差(t 検定)は，**；1%水準，
–；有意差なしを示す.
施肥・播種日：2001 年 5 月 2 日.

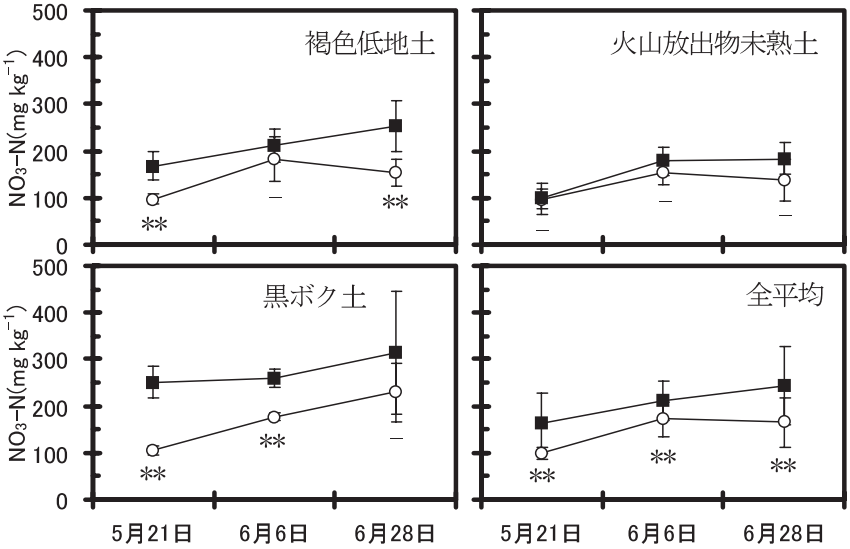


図 Ⅳ-5　株間土壌の硝酸態窒素濃度の推移
○：全層施肥区，■：作条施肥区
それぞれの測定日における両区間の有意差(t 検定)は，**；1%水準，
–；有意差なしを示す.
施肥・播種日：2001 年 5 月 2 日.

章第 2 節においても観察された（**図Ⅱ―8**）．作条施肥で土壌pHが高まる理由は，同区の株間土壌にはリン酸アンモニウムや尿素が高濃度で施用されており，これらの加水分解により炭酸アンモニウムが生成しpHが上昇するからである（越野，1994）．このことに伴い，アンモニウム態窒素濃度が高まっているが（**図Ⅳ―4**），アンモニウム態窒素濃度が高いと硝酸化成が抑制あるいは遅れる（第」章参照；Grewal et al，1999；Wetselaar et al，1972）ことからすると，それらが高い作条施肥区では，その分，アンモニウム態窒素が残存しやすかったことも考えられる（**図Ⅳ―4**）．なお，作条施肥区で硝酸化成の抑制あるいは遅延があったことは，**図Ⅳ―6**

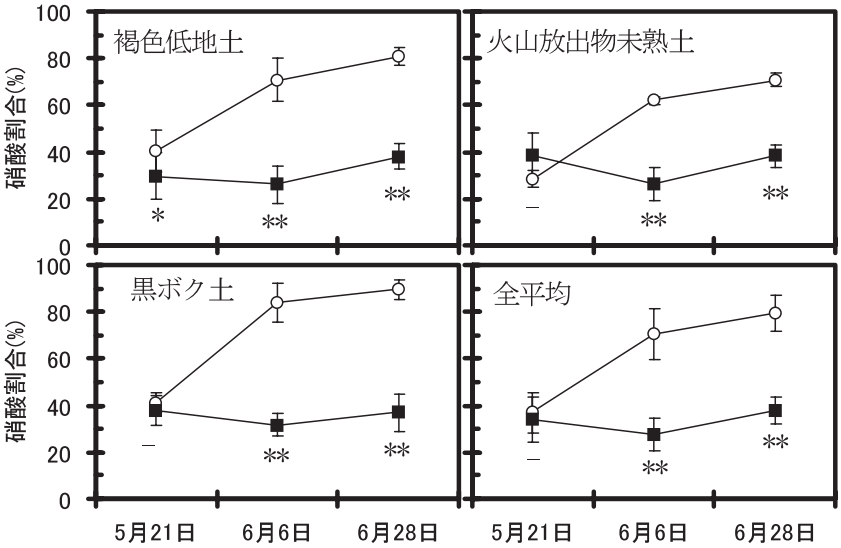


図 Ⅳ-6　株間土壌の無機態窒素に占める硝酸態窒素の割合の推移
○：全層施肥区，■：作条施肥区
それぞれの測定日における両区間の有意差(t 検定)は，**；1%水準，＊；5%水準，
−；有意差なしを示す．
施肥・播種日：2001 年 5 月 2 日．

の硝酸割合が同区で低いことからも明らかである．

以上のように，全層施肥と作条施肥における株間土壌の土壌pH，EC，アンモニウム態窒素，硝酸態窒素の挙動は大きく異なった．特にECやアンモニウム態窒素含量は作条施肥では著しく高く，逆に全層施肥では低いことが明らかとなった．これらの相違が，後述する両区の初期生育の差を生じさせる要因と考えられる．

2）初期生育

全層施肥区と作条施肥区の初期生育を**表Ⅳ―1**に示した．発芽率（5月21日）は，両区の各土壌とも85～96%と現在の技術目標である80%（梶山，2000）より高い水準にあり，火山放出物未熟土では全層施肥区が作条施肥区よりも有意に高かった．

草丈および葉数は6月6日（播種後35日）ではそれぞれ4.5～7.0㎝，2.0～2.9枚で，いずれも全層施肥区が作条施肥区より有意に優れていた．

さらに生育が進んだ6月28日（播種後57日）においては，草丈では16.7～21.9㎝で両区に有意差がなかった．しかし，葉数は7.2～9.6枚で，褐色低地土を除けば，全層施肥区が作条施肥区よりも有意に多かった．

このように，直播テンサイの初期生育は明らかに全層施肥が作条施肥を上回った．特にその差は，6月6日において明瞭であり，その後の6月28日にはやや小さくなる傾向にあった．尾崎・櫻庭（1963）および永田（1971）も，作条施肥における直播テンサイの生育について，発芽後50日（播種後56日）頃までは，根近傍の肥料濃度が高いことによる濃度障害に起因して生育の抑制が認められるものの，それ以後では抑制程度が小さくなることを報告している．また，前述したように，作条施肥区では株間土壌のアンモニウム態窒素濃度やECが著しく高かった．これらから判断すると，本試験の作条施

表 Ⅳ-1 全層施肥区と作条施肥区における直播テンサイの初期生育

調査月日[1]	調査項目	褐色低地土(n=9)			火山放出物未熟土(n=6)			黒ボク土(n=4)			全平均(n=19)		
		全層[2]	作条[2]	有意差[3]	全層[2]	作条[2]	有意差[3]	全層[2]	作条[2]	有意差[3]	全層[2]	作条[2]	有意差[3]
5月21日	発芽率(%)	86	85	−	96	89	**	85	87	−	89	86	−
6月6日	草丈(cm)	6.4	5.2	**	6.8	4.5	**	7.0	4.5	**	6.7	4.8	**
	葉数	2.5	2.0	**	2.6	2.0	**	2.9	2.1	**	2.6	2.0	**
6月28日	草丈(cm)	20.4	19.8	−	17.3	16.7	−	21.9	18.5	−	19.8	18.5	−
	葉数	8.6	8.0	−	9.3	7.2	**	9.6	7.3	**	9.0	7.6	**

1)播種日：5月2日．
2)全層：全層施肥区，作条：作条施肥区．
3)t-検定で，それぞれ**；1%水準，＊；5%水準，－；有意差なしを示す．

肥区で初期生育量が抑制されたのは，濃度障害によるものと推察される．なお，生育が進行するにつれ両施肥法間で生育差が小さくなる理由は，生育の進行に伴ってテンサイ個体が濃度障害への耐性を獲得すること（増田，1997），時間の経過とともに作条の施肥位置から肥料成分が拡散等の移動によって希釈されること（石塚ら，1965；尾崎・櫻庭，1963），などが考えられる．

表 Ⅳ-2 土壌体積水分率の推移(m^3 m^{-3}，深さ 0～10cm)

供試土壌	5月2日	5月21日	6月6日	6月28日
褐色低地土(n=4)	0.22a	0.19a	0.21a	0.15a
火山放出物未熟土(n=4)	0.17c	0.15c	0.17c	0.10b
黒ボク土(n=4)	0.20b	0.17b	0.18b	0.10b

同一日付内で a，b，c の文字が異なる場合は 5%水準で有意差がある(LSD 法).

次に，作条施肥による生育抑制の土壌間差について考察する．褐色低地土では，両区間の草丈と葉数に有意差があったのは６月６日のみであり，火山放出物未熟土や黒ボク土よりも作条施肥区での生育が抑制されにくい傾向を示した（**表Ⅳ―１**）．北海道上川地方における直播テンサイの試験事例（関口・和田，1975）でも，水分保持容量が少なく干ばつの生じやすい土壌（洪積土）では全層施肥の初期生育等が作条施肥より優れたのに対して，水分保持容量が多い土壌（沖積土）ではそのような傾向が明らかではなかった．すなわち，これらの土壌間の差には，土壌水分の保持容量の影響も関与している可能性がある．そこで，本試験における土壌体積水分率の推移（**表Ⅳ―２**）を見ると，生育差の出にくかった褐色低地土の体積水分率は0.15～0.22m^3 m^{-3}で，火山放出物未熟土および黒ボク土よりも常に有意に高かった．このことは，作条施肥区の初期生育の抑制には，土壌の水分保持容量の多寡に由来する土壌型の違いも関与していたことを示唆する．すなわち，火山放出物未熟土や黒ボク土のような，水分保持容量が少ない土壌においては乾燥によって肥料成分がさらに濃縮されるために，作条施肥では濃度障害による生育抑制が助長されるが，水分保持容量が多い褐色低地土ではこれが緩和されたと推察される．以上から，根近傍の肥料濃度が高い作条施肥区では濃度障害を受けやすく，逆に肥料濃度の低い全層施肥では生育が抑制されにくく，相対的に生育が改善したと考えられる．

３）全層施肥が直播テンサイの初期生育を改善させる要因

表Ⅳ―３には生育調査項目の相関行列を示した．６月６日の草丈は，発芽率を除く他の全ての項目と有意な正の相関があったため，同日の草丈から播種後57日までの初期生育の差を判断できると思われる．この結果を踏まえて，**表Ⅳ―４**では，６月６日の草丈と土壌化学性との関係を検討した．

表 Ⅳ-3 生育調査項目間の相関係数

調査項目	発芽率(5月21日)	草丈(6月6日)	葉数(6月6日)	草丈(6月28日)
草丈(6月6日)	－			
葉数(6月6日)	－	0.834**		
草丈(6月28日)	－	0.687**	0.417**	
葉数(6月28日)	－	0.807**	0.642**	0.639**

**；1%水準で有意．－；無相関を示す．

表 Ⅳ-4 草丈と株間土壌の化学性との相関係数

土壌pH	EC	NH_4-N	NO_3-N	硝酸割合
−0.346*	−0.602**	−0.625**	−	0.680**

全て６月６日の測定値．**は1%水準，*は5%水準で有意．−は無相関を示す．

草丈はアンモニウム態窒素濃度（r=-0.625**）やEC（r=-0.602**）と負の相関があった．このことは，既に述べたようにアンモニウム態窒素濃度とECが高いことは濃度障害の原因であり，これが初期生育を抑制したとの指摘を裏付けるものである．さらに，硝酸割合が草丈と正の相関を示した（r=0.680**）ことは，硝酸化成を促進させ株間土壌にアンモニウム態窒素をできるだけ残存させないことも，好硝酸性作物であるテンサイ（西宗ら，1980）の初期生育の改善につながる一因と考えられる．これらを総合的に判断すると，全層施肥が直播テンサイの初期生育を改善させる要因は，以下のように考察される．

作条施肥では，種子近傍の多肥に起因して株間土壌のアンモニウム態窒素濃度やECが高いため，濃度障害が生じ初期生育の抑制につながる．しかも，アンモニウム態窒素やECが高い条件では，硝酸化成が遅れ，アンモニウム態窒素を高濃度のまま残存させる．このことも濃度障害を助長する要因である．反対に全層施肥では，肥料を土壌全体に混和するため，株間土壌のアンモニウム態窒素濃度やECが低く，また硝酸化成も速やかでアンモニウム態窒素が残存しにくい．このことが濃度障害の回避を促し初期生育の改善につながったことが推察された．ただし，全層施肥は硝酸化成が速やかなので，多量の降雨によって硝酸態窒素が流亡しやすい側面がある．本試験期間中（2001年５～６月）の降水量（アメダス芽室）は80㎜と平年値157㎜（1979～2000年の平均値）の

約半分，と大幅に少なかったため硝酸態窒素の流亡は生じなかったものと考えられるが，全層施肥を生産現場に普及させるためには，今後この点を土壌間差も含めて明らかにしなくてはならない．

まとめ

直播テンサイにおける全層施肥による初期生育の改善とその要因を明らかにすることを目的とし，全層施肥と作条施肥における初期生育量や土壌中のEC，アンモニウム態窒素および硝酸態窒素等の化学性の推移を詳細に比較した．

作条施肥では，種子近傍の多肥に起因して株間土壌のアンモニウム態窒素濃度やECが全層施肥よりも高いため，濃度障害が生じ初期生育が抑制された．しかも，アンモニウム態窒素やECが高いために硝酸化成が遅れ，アンモニウム態窒素が高濃度のまま残存した．このことも濃度障害を助長する要因と考えられた．

反対に全層施肥では，肥料を土壌全体に混和するため，株間土壌のアンモニウム態窒素濃度やECが作条施肥よりも低く，また硝酸化成も速やかでアンモニウム態窒素が残存しにくく，このことが濃度障害の回避を促し初期生育の改善につながることが推察された．

第２節　直播テンサイに対する全層施肥の効果実証試験

はじめに

第Ⅳ章第１節で明らかにしたように，全層施肥は濃度障害の回避を促し，作条施肥よりも初期生育が改善され，直播テンサイに有効な施肥法である可能性が示唆された．本節では，十勝農試圃場や現地圃場において試験を行い，全層施肥が慣行の全量作条施肥より有効であることを実証しようとした．

材料と方法

試験は，**表Ⅳ―５**に示すように1998年と2000～2003年の計５年間，十勝地方の圃場のべ18カ所（芽室町：Me-１～8，本別町：Ho-１～3，鹿追町：Sk-１～2，幕別町：Ma-１～2，池田町：Ik，士幌町：Sh，新得町：St）にて実施した．供試圃場の土壌は，火山性土（淡色黒ボク土，普通黒ボク土，厚層多湿黒ボク土，普通多湿黒ボク土）と低地土（普通灰色低地土，普通褐色低地土）であった．供試土壌の理化学性は**表Ⅳ―６**に示した．土壌pHは5.6～6.2で，道の診断基準値（5.5～6.5）の範囲内にあった．

試験処理の概要は**表Ⅳ―７**に示した．播種日は４月下旬～５月上旬，窒素施肥量は143～208kg ha^{-1}，であった．対照区（全量作条施肥区）では，播種と同時に総合施肥播種機を用いて施用する全ての肥料（窒素，リン酸，カリウム他）を条施（作条施肥）した．全層施肥区では，施用する全ての肥料（窒素，リン酸，カリウム他）を砕土整地前に土壌表面に散布し，砕土整地により作土（深さ約15㎝）と肥料を混和した後，総合施肥播種機を用いて播種した．対照区と全層施肥区の施肥量は同一とした．なお対照区の施肥位置は，全ての圃場においてほぼ種子下６㎝，左右側方2.5～5.0㎝であり，現行の北海道の指導（梶山，2000）に準拠した．

生育初～中期（６月中旬～７月中旬）に，草丈・乾物重・窒素吸収量を調査した．草丈は常法（農林水産省北海道農業試験場ら，1986）に従って調査した．乾物重は，両区から５～10株を３～４反復抜き取って調査した．根部，葉部の乾物を粉砕調整し一部を作物体の分析試料とし，ケルダール法で窒素を定量した．

収穫時（10月上～下旬）には，根重・根中糖分・糖量・窒素吸収量を調査した．根重は，両区から１反復あたり４～６㎡を３～４反復抜き取り，根部重量を測定して求めた．根重測定後，直ちにSachs-Le Docte法（農林水産省北海道農業試験場ら，1986）により根中糖分を測定した．糖量は根重と根中糖分の積により算出した．同

表 Ⅳ-5 供試圃場の概要（北海道十勝支庁管内）

供試圃場†	市町村	年次	土壌タイプ	畦幅 (cm)	株間(cm)	テンサイ品種
Me-1	芽室町	1998	淡色黒ボク土	45	24.0	めぐみ
Me-2	〃	2000	〃	60	15.9	アーベント
Me-3	〃	2000	〃	45	21.5	〃
Me-4	〃	2001	〃	60	23.1	〃
Me-5	〃	2001	〃	45	27.7	〃
Me-6	〃	2002	〃	60	20.8	〃
Me-7	〃	2003	〃	〃	21.5	〃
Me-8	〃	2002	普通黒ボク土	45	21.0	のぞみ
Ho-1	本別町	2001	厚層多湿黒ボク土	66	18.3	スコーネ
Ho-2	〃	2002	普通黒ボク土	60	18.8	〃
Ho-3	〃	2003	〃	〃	18.8	〃
Sk-1	鹿追町	2002	普通褐色低地土	50	24.2	スタウト
Sk-2	〃	2003	〃	〃	22.5	アーベント
Ma-1	幕別町	2002	淡色黒ボク土	66	20.8	のぞみ
Ma-2	〃	2003	〃	〃	21.1	〃
Ik	池田町	2000	普通灰色低地土	48	23.7	フルーデン
Sh	士幌町	2001	普通多湿黒ボク土	66	21.2	アーベント
St	新得町	2001	普通褐色低地土	〃	21.4	〃

†“Me-1” ～ “Me-7” は十勝農業試験場内圃場，“Ma-1, Ma-2” は幕別町農業試験圃場．その他は現地農家圃場である．

表 Ⅳ-6 供試土壌の土壌理化学性

供試圃場	土性	土壌pH	T-C (g kg-1)	T-N (g kg-1)	有効態P† (mg kg^{-1})	交換性塩基 (mmol$_c$ kg^{-1})				CEC (mmol$_c$ kg^{-1})	塩基飽和度 (%)
						Ca	Mg	K	Na		
Me-1	L	6.0	25.1	2.4	52	56	12	4	1	160	45.3
Me-2	〃	6.1	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃
Me-3	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃
Me-4	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃
Me-5	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃
Me-6	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃
Me-7	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃
Me-8	〃	5.7	34.2	3.5	54	63	14	12	0	183	48.5
Ho-1	SiL	5.6	62.6	5.6	71	72	16	9	1	321	30.0
Ho-2	〃	5.8	39.4	3.7	158	106	21	13	0	245	57.2
Ho-3	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃
Sk-1	L	5.8	51.4	4.5	173	9.5	1.6	1	0	236	51.7
Sk-2	S	5.6	44.4	4.2	262	11.9	2.2	1	0	265	55.3
Ma-1	L	6.1	36	3.2	37	99	16	6	0	221	54.8
Ma-2	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃
Ik	SiCL	6.2	9.3	1.3	170	138	36	11	5	266	71.3
Sh	CL	5.8	75.2	5.6	151	89	13	4	1	328	32.7
St	〃	5.8	9.1	1.2	210	49	17	8	1	120	62.3

†Truog 法.

表 Ⅳ-7 各供試圃場における総施肥量

供試圃場	播種日	総施肥量† (kg ha^{-1})		
		N	P_2O_5	K_2O
Me-1	4/20	150	315	210
Me-2	5/1	174	365	244
Me-3	5/1	150	315	210
Me-4	4/24	157	330	220
Me-5	4/25	157	330	220
Me-6	5/7	164	344	230
Me-7	4/23	150	315	210
Me-8	4/21	180	300	180
Ho-1	4/29	208	437	208
Ho-2	4/23	143	234	143
Ho-3	4/29	160	336	160
Sk-1	4/23	162	342	144
Sk-2	5/2	162	342	144
Ma-1	4/22	168	326	130
Ma-2	4/25	170	357	238
Ik	5/4	168	238	154
Sh	4/22	160	272	128
St	4/20	176	299	141

†全層施肥区と作条施肥区の施肥量は同一である.

時に，根部，葉部はそれぞれの乾物重を測定後，粉砕調整した一部を作物体の分析試料とし，ケルダール法で窒素を定量した．

なお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

生育初～中期（6月中旬～7月中旬）における草丈・乾物重・窒素吸収量について，全層施肥区と対照区（全量作条施肥区）を比較するため，1：1プロットとして**図Ⅳ―7**に示した．また，各項目について，全層施肥区と対照区の有意差検定（対応のあるt-検定）を行ったところ，草丈・乾物重・窒素吸収量のいずれにおいても全層施肥区が対照区より有意に優った．すなわち，全層施肥は，全量作条施肥よりも初～中期の生育や窒素吸収を改善できることが示された．この理由は，第、章第1節で述べたように，根圏域の窒素濃度を低下させることによって濃度障害が回避され，生育等が改善されたためと考えられる．

収穫期（10月上～下旬）における根重・根中糖分・糖量・窒素吸収量についても**図Ⅳ―7**と同様に，1：1プロットとして**図Ⅳ―8**に示した．また，各項目について，全層施肥区と対照区の有意差検定（対応のあるt-検定）を行ったところ，根重・根中糖分・糖量はすべて全層施肥区が対照区に優り，窒素吸収量は両区で差がなかった．すなわち全層施肥は，全量作条施肥に比べ，窒素吸収量は同程度で，根重・根中糖分・糖量の増加が期待できることが明らかになった．

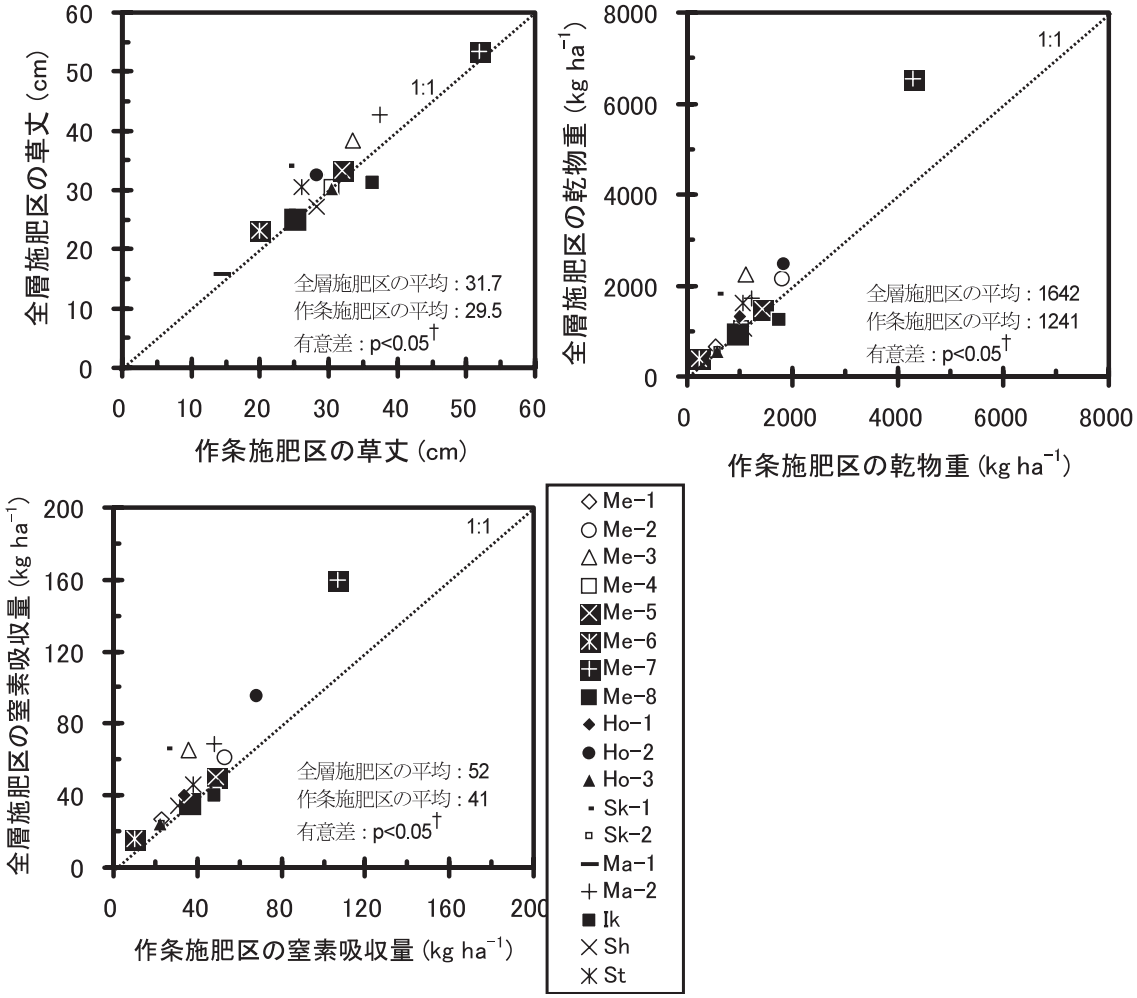


図 Ⅳ-7 生育初～中期(6 月中旬～7 月中旬)におけるテンサイ生育(草丈(LL)，乾物重(DW))および窒素吸収量(NU)に関する全層施肥区と作条施肥区の比較．
†有意差検定は対応のある t 検定で行った．
図中の点線は 1:1 の線．

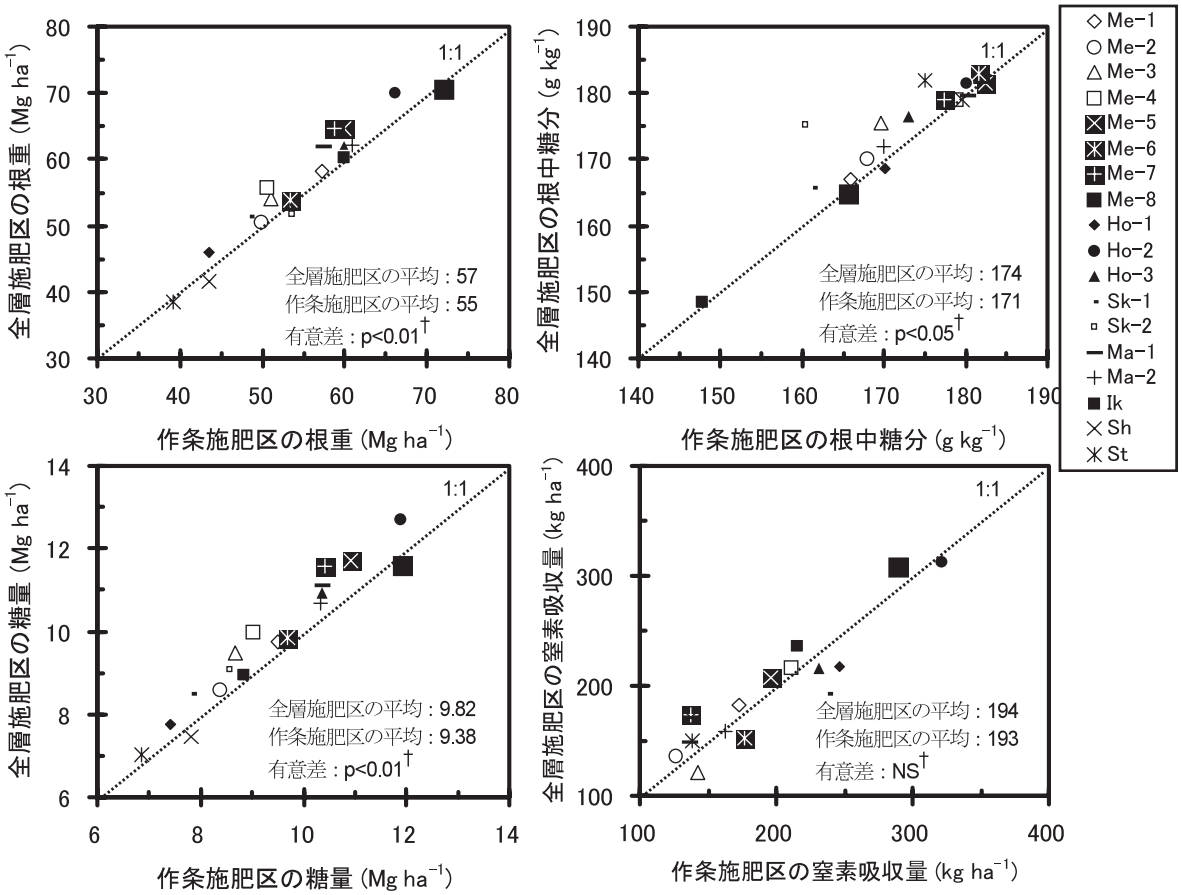


図 Ⅳ-8 収穫期(10 月上～下旬)におけるテンサイの根重(RW)，根中糖分(SC)，糖量(SY)および窒素吸収量(NU)に関する全層施肥区と作条施肥区の比較.
†有意差検定は対応のある t 検定で行った.
図中の点線は 1:1 の線.

テンサイにおいては，草丈等の初期生育量は収穫時の根重および糖量と密接な正の相関関係にあり（斉藤ら，1991），したがって初期生育の確保・促進が極めて重要である．全層施肥において根重や糖量が全量作条施肥に優った（図Ⅳ―８）理由としては，前述のように初～中期の生育や窒素吸収が優ったこと（図Ⅳ―７），が考えられる．

ところで，全層施肥区の根中糖分は，対照区（全量作条施肥区）よりも有意に高かった．この理由としては，全層施肥区においては土壌中のアンモニア態窒素濃度が対照区よりも低いため硝酸化成が速く進むので（第Ⅲ章，第Ⅳ章第１節），硝酸態窒素がより速くテンサイに供給された結果，施肥窒素の吸収もより速く終了したために，根中糖分が高まったものと考えられる．テンサイは播種約２ヶ月後に窒素供給を停止させると，生育後半の余分な窒素吸収がなくなるために根中糖分が高まることが報告されており（増田，1997），このことは上記推察を支持するものである．

まとめ

十勝農試圃場や現地圃場のべ18カ所において試験を行い，全層施肥は，慣行の全量作条施肥に比べ濃度障害の心配がなく，生育や根中糖分が改善され，根重・糖量の増加が期待できることを実証した．