

第V章 分施による直播テンサイの窒素施肥改善

第IV章で述べたように、直播テンサイにおいては従来慣行的に行ってきた全量作条施肥よりも、全層施肥の方が濃度障害の回避を促し初期生育が改善され、増収も期待できることが明らかになった。本章では、根圏域の肥料濃度を高めないもう一つの施肥法として分施を取り上げ、その有効性について検討した。なお、ここでの分施は、作条施肥による基肥と表面施肥による追肥の組み合わせ施肥法を採用し、表面施肥による追肥の時期はヨーロッパの指導(笛木・有田, 2003)に準拠し、発芽揃い～本葉2葉期とした。

第1節 発芽および初期生育に対する作条基肥窒素量と施肥位置の影響

はじめに

直播テンサイにおける窒素分施の組み立てに際し、まず始めに作条施肥による最適な基肥窒素量(作条基肥窒素量)および最適な施肥位置を設定する必要がある。

濃度障害の危険性のある直播テンサイの作条施肥(基肥)に関しては、永田(1971)は各種施肥位置の試験からスターターとしての作条施肥は必要であると指摘している。これに対し、Christenson(1992)はスターター

としての作条施肥の必要性を否定している。また、イギリスにおける直播テンサイの窒素施肥指導では、播種直後と本葉2葉期の2回に分けた表面施肥を基本技術としており、スターターとしての作条基肥窒素は特に重要視されていない(笛木・有田, 2003)。このように、世界的に見ても播種時の作条基肥窒素の要否については統一的な見解が今のところない。

さらに、濃度障害を回避するには作条施肥の施肥位置も重要である。最適な施肥位置は種子から深さ6cm、左右側方に2.5～5.0cm程度とされている(尾崎・桜庭, 1963)。ただし、これは年間施肥量の全量を作条施肥することを前提としたものである。最適施肥位置は、分施等の導入により条施する窒素施肥量が変わると変動する可能性があることから、再評価が必要である。

以上のことから、本節では直播テンサイの窒素分施技術の開発に資するため、モデル試験(コンクリート枠試験)で、直播テンサイの発芽および初期生育に対する作条基肥窒素量と施肥位置の影響を検討した。

材料と方法

試験は十勝農業試験場内の1㎡(1m×1m)のコンクリート枠(無底)で実施した。枠内に充填した土壌は淡色黒ボク土で、充填方法等は第II章第2節と同様であ

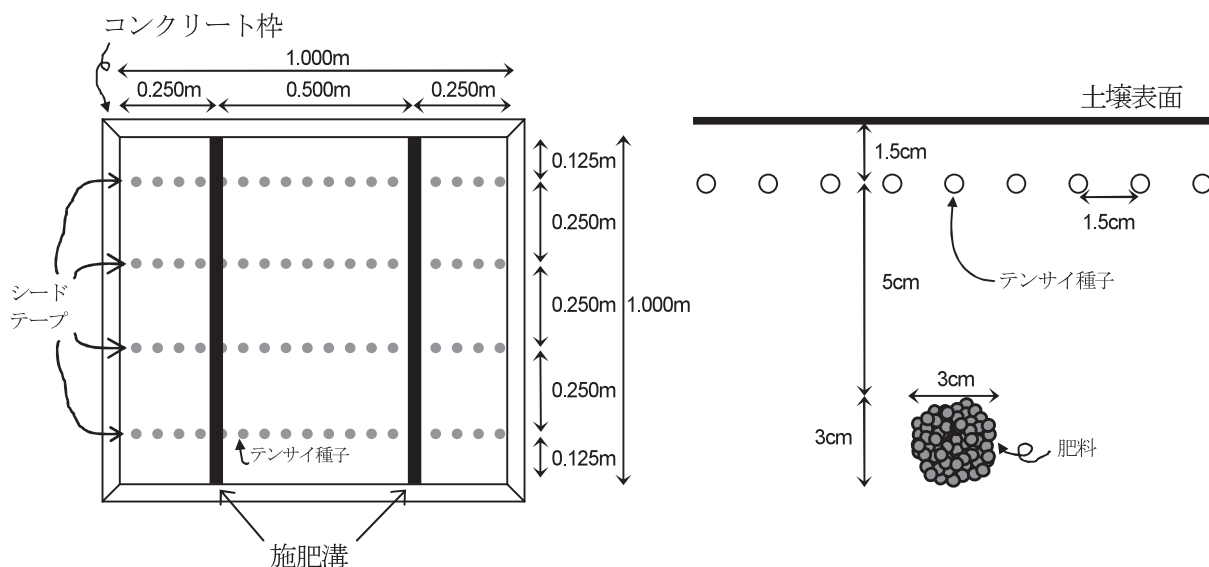


図 V-1 コンクリート枠試験におけるテンサイ種子と肥料の配置
左：コンクリート枠の全体図，右：施肥溝に直交する横断面図

る。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）に従って分析した土壌の理化学性は、pH：5.9，有効態リン酸：119mg kg⁻¹（P₂O₅として），土性：L，CEC：160mmolc kg⁻¹，全炭素含量：25.1g kg⁻¹，全窒素含量：2.4g kg⁻¹，であった。

試験処理は1999年6月8日に，以下のように行った。まず，枠内土壌を深さ10cmまでスコップで掘り起こし十分に砕土した後，均平・整地した。次に，深さ9.5cm・幅3cmの溝（図V-1左の施肥溝に相当）を2本掘削し，図V-1右に示した施肥位置になるよう肥料を条施したのち，土を埋め戻した。テンサイのペレット種子（供試品種：めぐみ）を用いて一粒1.5cm間隔のシードテープを作成し，これを枠一つあたり4本，播種深度1.5cmで施肥溝と直交するように播種した（図V-1）。

処理区は，総窒素施肥量を160kg ha⁻¹とし，作条基肥窒素量（6月8日）と本葉2葉期の窒素分施肥量（6月25

日）の配分を変えた4処理区（各3反復）を設けた（表V-1）。すなわち，①窒素全量を基肥として作条施肥した区（N 160-0-0区；それぞれ，作条基肥-播種直後表面施肥-本葉2葉期表面施肥），②作条基肥と本葉2葉期表面施肥に同量配分した区（同N 80-0-80区），③作条基肥と本葉2葉期表面施肥の配分を1：3とした区（同N 40-0-120区），④基肥は無施用とし，表面施肥を播種直後と本葉2葉期の2回に分けた区（同N 0-40-120区，2段表面施肥）である。なお，2段表面施肥は，作条基肥窒素が無施用なので初期生育を確保するために設定した。作条基肥および播種直後の窒素施肥にはチリ硝石（硝酸ナトリウム）と尿素を1：7の割合で用いた。播種時にチリ硝石を用いた理由は，初期生育の確保に硝酸態窒素とナトリウムの施用が必要なためである（増田，1997）。本葉2葉期の表面施肥には尿素を用いた。いずれの処理区もリン酸施肥およびカリ施肥にはそれぞれ重

表 V-1 窒素施肥処理(kg ha⁻¹)

処理区 ¹⁾	作条基肥窒素量 ²⁾			表面施肥窒素量		
	NN	UN	計	播種直後 ²⁾		本葉2葉期 ³⁾
				NN	UN	UN
N 160-0-0	20	140	160	0	0	0
N 80-0-80	20	60	80	0	0	80
N 40-0-120	20	20	40	0	0	120
N 0-40-120	0	0	0	20	20	120

1) 総窒素施肥量は全て160 kg ha⁻¹。

2) 播種日と同日(6月8日)に施用。NN;硝酸態窒素，UN;尿素態窒素

3) 6月25日施用。

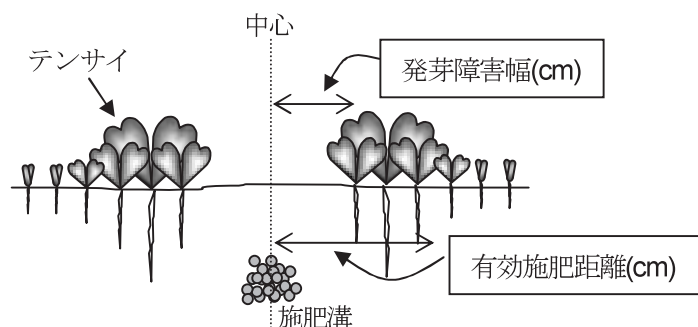


図 V-2 発芽障害幅と有効施肥距離の模式図

発芽障害幅：濃度障害によって枯死したテンサイ個体と施肥溝の中心との左右側方距離である。濃度障害で枯死しなかったテンサイ個体のうち，最も施肥溝に近いものと施肥溝の中心との左右側方距離で表した。本葉2～3葉期の6月29日に測定。

有効施肥距離：作条基肥溝の左右側方へ正常な生育に必要な窒素肥料が届く距離である。施肥溝の中心から，生育が中庸なテンサイ個体までの距離で表した。同一シードテープ内での草丈の平均値を示す個体を中庸なテンサイ個体とした。本葉2～3葉期の6月29日に測定。

焼リン，硫酸カリウムを用い，基肥窒素と同時に作条施肥した．リン酸とカリの施肥量はそれぞれ P_2O_5 として 200kg ha^{-1} ， K_2O として 160kg ha^{-1} ，とした．

生育調査として，草丈を7月2日と7月6日に，乾物重を8月6日に測定した．本葉2～3葉期に相当した6月29日には，本試験で定義した発芽障害幅と有効施肥距離を測定した（図V-2）．

発芽障害幅（cm）とは，濃度障害によって枯死したテンサイ個体と施肥溝の中心との左右側方距離である．これは，作条基肥による濃度障害の影響が及ぶ範囲を評価するものであり，枯死しなかったテンサイ個体のうち，最も施肥溝に近いものと施肥溝の中心との左右側方距離で表した（図V-2）．

有効施肥距離（cm）は，施肥溝の左右側方へ正常な生育に必要な量の肥料が届く範囲を評価するものである．施肥溝の中心から，生育が中庸なテンサイ個体までの距離で表した．生育が中庸なテンサイ個体とは，同一シートテープ内での草丈の平均値を示す個体とした．

さらに6月29日には，施肥溝の中心（図V-2）から，

施肥溝

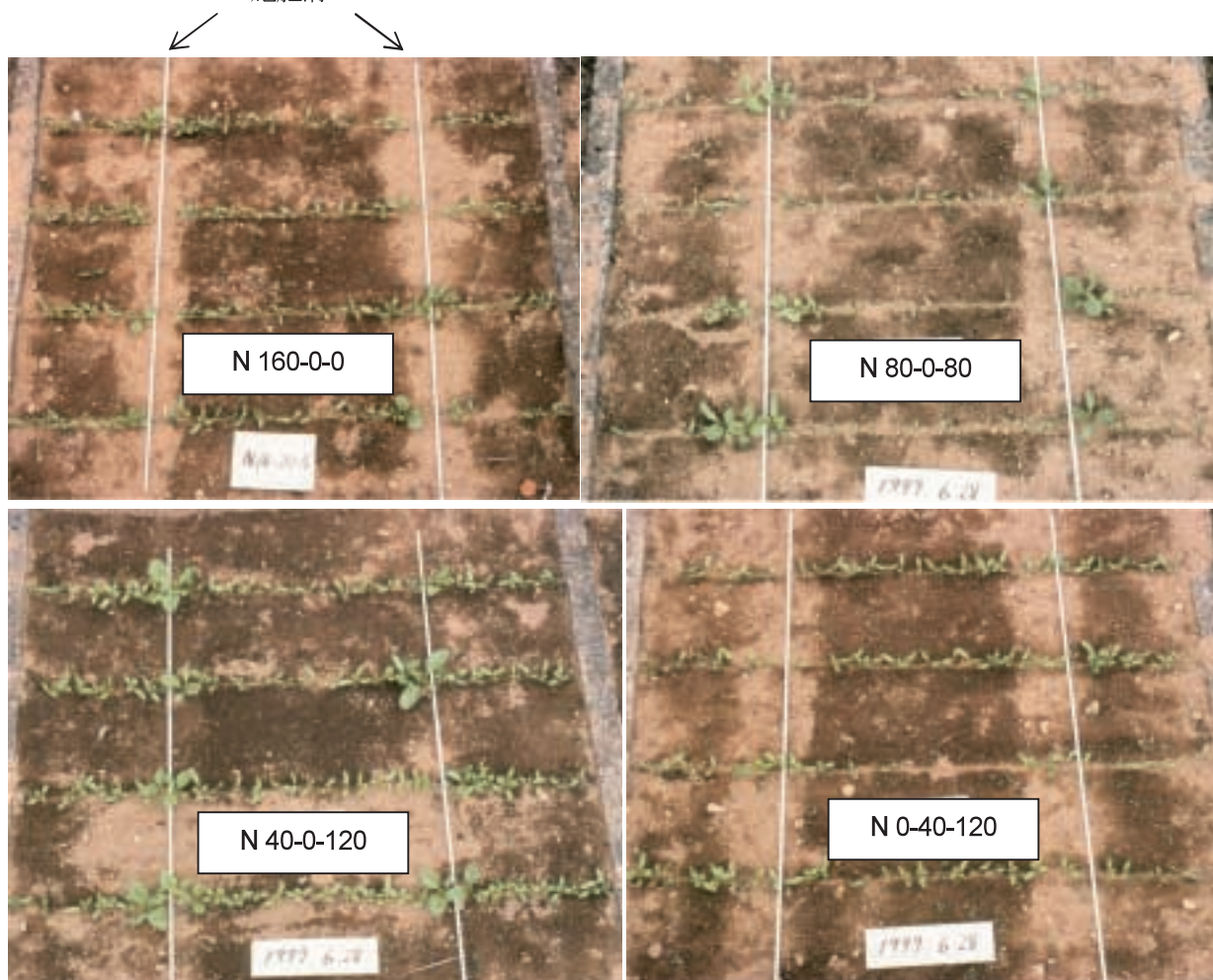


図 V-3 本葉2葉期における各枠試験区のテンサイ生育状況(6月28日撮影)

内径2.2cmの採土器を用いて深さ0～15cmの土壌を1区（1枠）につき4つ採取・混合し，生土のままEC（生土20g供試，生土：水＝1：5），アンモニウム態窒素および硝酸態窒素（生土20g供試，生土： 1mol L^{-1} 塩化カリウム＝1：5）の測定に供した．アンモニウム態窒素および硝酸態窒素の測定には窒素の自動分析機器（AACS II，ブランルーベ社製）を用いた．なおアンモニウム態窒素および硝酸態窒素の測定時には生土の土壌水分測定を併行し，乾土当たりの窒素量（ mg kg^{-1} ）とした．

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

1) 発芽障害（欠株）の発生と作条基肥の施肥位置・窒素量との関係

各試験区の典型的状況を図V-3に示した．これによ

表 V-2 発芽障害幅、有効施肥距離およびテンサイの初期生育¹⁾

処理区	発芽障害幅 ²⁾ (cm)	有効施肥距離 ²⁾ (cm)	草丈 ³⁾ (cm)		乾物重 ⁴⁾ (g 個体 ⁻¹)		
			7月2日	7月6日	葉部	根部	合計
N 160-0-0	2.5 a	8.7 a	5.1 b	8.6 c	23.6 b	7.7 b	31.3 b
N 80-0-80	2.3 a	8.3 a	5.3 b	9.9 b	21.7 b	7.5 b	29.2 b
N 40-0-120	-	7.1 b	7.2 a	12.1 a	27.5 a	10.7 a	38.1 a
N 0-40-120	-	-	3.3 c	7.7 d	15.6 c	4.3 c	19.9 c

1)同一カラム内で a-d の文字が異なる場合は、LSD 法による有意差(P<0.05)があることを示す。

2)6月29日(本葉2~3葉期)測定。

3)施肥の中心から2.5~5.0cmの距離にある個体。

4)施肥の中心から2.5~5.0cmの距離にある個体。8月6日測定。

表 V-3 施肥溝中心における EC と窒素量¹⁾

処理区	EC (dS m ⁻¹)	窒素量(mg kg ⁻¹)	
		アンモニウム態	硝酸態
N 160-0-0	1.1 a	796 a	299 a
N 80-0-80	0.7 b	307 b	253 a
N 40-0-120	0.6 c	123 c	293 a
N 0-40-120	0.3 d	54 c	47 b

1)同一カラム内で a-d の文字が異なる場合は、LSD 法による有意差(P<0.05)があることを示す。

6月29日に測定。

ると、N160-0-0区およびN80-0-80区の施肥溝直上で濃度障害と考えられる発芽障害(欠株)の発生が観察された。これらの区における発芽障害幅はそれぞれ2.5, 2.3cmで、両者の間に有意差はなかった(表V-2)。これに対し、N40-0-120区およびN0-40-120区では施肥溝直上においても欠株が認められなかった(図V-3, 表V-2)。

一方、各試験区の施肥溝中心におけるEC(表V-3)は、N160-0-0区>N80-0-80区>N40-0-120区>N0-40-120区であり、またアンモニウム態窒素量(表V-3)もN160-0-0区>N80-0-80区>N40-0-120区>N0-40-120区で、上記発芽障害発生の有無とほぼ対応した。

以上のことから、コンクリート枠で播種深度1.5cmおよび施肥深さが種子下5~8cm(図V-1)の条件で実施した本試験では、種子位置が施肥溝の中心から側方約2.5cm以内で、かつ作条基肥窒素量が80kg ha⁻¹以上の場合に濃度障害による発芽障害が発生する恐れがあることが示唆された。尾崎・桜庭(1963)が行った直播テンサイの施肥位置の研究例(施肥位置:種子側方0~2.5cm, 種子下6~8.5cm)では、作条の窒素施肥量を80kg ha⁻¹とした場合に6~28%の欠株が発生している。また、施肥幅15cm×深さ10cmで実施した増田(1997)の報告においても、窒素施肥量が80, 160kg ha⁻¹でそれぞれ

11, 22%の欠株が発生した。これらは基本的に本研究結果と符合する。

2) 有効施肥距離に与える作条基肥の窒素量の影響

有効施肥距離を見ると、発芽障害が起きたN160-0-0区とN80-0-80区がそれぞれ8.7, 8.3cmであったのに対し、同障害がないN40-0-120区は7.1cmと前二者に比べ有意に小さかった(表V-2)。これは、作条の窒素施肥量が少ないと、施肥位置のアンモニウム態窒素量が少なくなり(表V-3)、施肥窒素の影響が及ぶ距離が短くなるためと考えられる。

3) 最適な種子側方の施肥位置

尾崎・桜庭(1963)は、稚苗~発芽50日後の直播テンサイの生育は施肥位置から側方へ0, 2.5, 5cmと離れるに従って劣り、発芽障害のリスク回避を考慮すると、施肥位置は種子側方の2.5~5.0cmが最適であると結論している。表V-3の発芽障害幅と有効施肥距離を見ると、本研究の作条基肥の窒素量が、40kg ha⁻¹(N40-0-120区)と少ない場合でも、側方7.1cmまでは施肥窒素が届き、かつ発芽障害もなかったことから、上述の尾崎・桜庭(1963)が明らかにした最適な施肥位置は概ね妥当と考えられた。

4) テンサイの初期生育に与える作条基肥窒素量の影響

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。

施肥溝の中心から側方2.5～5.0mmにある個体の初期生育（表V—2）は，スターターである作条基肥窒素量が少ないN40- 0-120区の草丈・乾物重が，同窒素量の多いN80- 0-80区およびN160- 0- 0区よりも優った。この結果は，作条基肥窒素の施肥位置が適正（種子側方2.5～5.0cm，種子下5～8cm）であっても，窒素施肥量が多いとECおよびアンモニウム態窒素量が過大となり（表V—3），濃度障害によって初期生育が抑制されることを示唆している。永田（1971）も作条基肥窒素量120kg ha⁻¹よりも36kg ha⁻¹の場合に発芽10日後の直播テンサイの乾物重が多いことを報告している。

一方，N 0-40-120区の初期生育が他の全ての区より劣ったことから（表V—2），永田（1971）が指摘しているようにスターター窒素が初期生育促進に必要であることは明らかである。

以上から，直播テンサイの初期生育促進にはスターターとして40kg ha⁻¹程度の作条基肥窒素量が必要であることが示された。

まとめ

淡色黒ボク土を充填したコンクリート枠試験から，直播テンサイにおける初期生育確保にはスターター窒素として，作条基肥窒素量が40kg ha⁻¹程度必要であることを明らかにした。またその作条基肥窒素量の場合も，施肥位置は現行の種子から側方2.5～5.0cm，深さ6cm，が適切であることを確認した。

第2節 表面施肥した窒素のアンモニア揮散に及ぼす土壌pH・温度・施用窒素形態の影響

はじめに

畑作における窒素の表面施肥は、秋まき小麦の起生期追肥（渡辺，1999）やデンブンプン原料用ジャガイモの開花期追肥（東田・佐々木，1999）などで用いられ，作物が窒素を要求するタイミングに合わせて効率的に施肥できる長所を持つ。そのため，本研究においても直播テンサイの窒素分施に表面施肥を採用することとした。

しかし，表面施肥はアンモニア揮散によって窒素が損失する短所も持つ。アンモニア揮散は物理化学反応であり，土壌pHや温度の上昇等の要因によって促進され，また窒素の形態によって異なる（Duan and Xiao, 2000；郝ら，1994；Harrison and Webb, 2001；He et al, 1999；Terman, 1979；Whitehead and Raistrick, 1990）。すなわち，酸性矯正等のpH管理や施肥のタイミング（施肥時の温度），あるいは窒素肥料種を選択，を誤ればアンモニア揮散により施肥効率が低下する可能性がある（Duan and Xiao, 2000；郝ら，1994；Harrison and Webb, 2001），表面施肥を行う際にはアンモニア揮散をできるだけ少なくするよう配慮することが望ましい。

アンモニア揮散に関しては，中国（Duan and Xiao, 2000；郝ら，1994）や欧米（Harrison and Webb, 2001；He et al, 1999；Terman, 1979；Whitehead and Raistrick, 1990）など海外の高pH条件において豊富な研究事例がある。中国黄土高原のアルカリ性土壌における研究事例（郝ら，1994）では，施肥窒素（炭酸アンモニウムや尿素の場合）の30%以上がアンモニア揮散によって消失すると報告されており，ヨーロッパでもアンモニア揮散の80—90%は農業由来で，このうち10-20%は施肥窒素に由来すると報告されている（Harrison and Webb, 2001）。

日本においては，家畜糞尿に関連したアンモニア揮散の研究が多数行われている（松村，1988；松中ら，2003；湊ら，2000；宮田・池田，2006）。しかし施肥窒素のアンモニア揮散については，一般に日本の土壌は酸性土壌であること，またいくつかの研究事例（阿江・尾形，1982；三木・高尾，1985）によれば，表面施用した窒素のうちアンモニア揮散によって消失したのは0～7%と少なく，問題視されることは少なかった。実際第II章第1節（図II—5）で示したように，北海道十勝地方の例を挙げると，今のところ畑土壌のpHは5.5程度と

低く，pHが7を超えるような土壌は少ない。

しかし，前述のように畑作における今後の施肥技術において窒素の表面施肥が用いられる場面が増える見込みがあることから，北海道の畑土壌においてアンモニア揮散による窒素損失が生じうる土壌pH，温度，施用窒素形態等について明らかにする必要がある。

また，黒ボク土は北海道の代表的畑土壌の一つであるが，黒ボク土はリン酸イオンの特異吸着等に見られるように特異な物理化学的性質を持つことが知られている（和田，1981）。このことから，黒ボク土は既往の知見とは異なるアンモニア揮散反応を示す可能性がある。

以上の背景から，本節では黒ボク土における表面施用窒素のアンモニア揮散に及ぼす，土壌pH，温度，施用窒素形態の影響について，培養実験（通気法）を行い明らかにしようとした。

材料と方法

1) 供試土壌

北海道立十勝農試圃場より採取した黒ボク土の作土（深さ0—20cm）を，風乾・砕土後2mmのふるいを通して供試した。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）により分析した供試土壌の化学性は，土壌pH（土：水＝1：2.5）が5.9，交換酸度 y_1 が0.3，全炭素含量（チューリン法）が25.0g kg⁻¹，全窒素含量（ケルダール法）が2.5g kg⁻¹，CEC（ショーレンベルガー法）が154mmolc kg⁻¹であった。交換性のカルシウム・マグネシウム・カリウムはそれぞれ1580mg kg⁻¹（CaOとして），192mg kg⁻¹（MgOとして），197mg kg⁻¹（K₂Oとして），有効態リン酸（トルオーグ法）は120mg P₂O₅ kg⁻¹（P₂O₅として），リン酸吸収係数は17.7g kg⁻¹（P₂O₅として）であった。なお，pH7の試料は以下の手順で調整した。原土（pH5.9）1kgに炭酸カルシウム7gを加えて十分混合し，さらに1Lの蒸留水を加えて混合後，再び風乾・砕土し2mmのふるいを通した。

2) 通気法によるアンモニア揮散培養実験

供試土壌を円柱型の密閉フタ付ポリエチレンボトル（内径8.8cm，底面積60.8cm²，高さ12.3cm，図V—4）に乾土として100g入れ，容積重が0.8Mg m⁻³になるよう充填・均平後，噴霧器で蒸留水41.9mLをできるだけ均一に加え，さらに水分を土壌中によく行き渡らせるため一昼夜4℃で静置した。次に，土壌表面に各形態の窒素（尿素，硫酸アンモニウム，リン酸1アンモニウム，リン酸2アンモニウム，以下ではそれぞれURA，ASF，

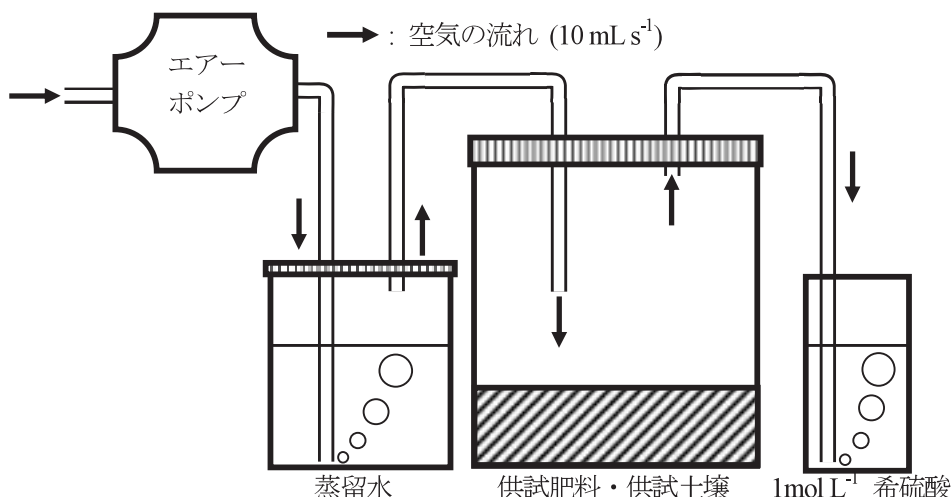


図 V-4 通気法によるアンモニア揮散実験の概念図

MAP, DAPと略記) をNとして6.08mgになるように, 各窒素の10,000mgN L⁻¹溶液6.08mLを, ガラス製噴霧器を用いて噴霧し, 土壌水分を最大容水量の60%, 窒素施用量がNとして10 g m⁻² (ポリエチレンボトルあたり60.8 mg) となるよう, 各処理区を設定した. なお, 各窒素の10,000mgN L⁻¹溶液は特級試薬を用いて作成した.

上記処理の後, Terman (1979) を参考にして組み立てた実験装置 (図V-4) により, 直ちに通気法による培養実験を開始した. 通気流量は10mL s⁻¹とし, 試料の乾燥を防ぐため一旦蒸留水を通過させてから, 供試土壌の入った密閉フタ付ポリエチレンボトルへ流入させた. ボトルからの流出空気中のアンモニアは, 100mLの1 mol L⁻¹希硫酸を通過させて捕捉した. この希硫酸は適宜回収・交換し, オートアナライザー (AACS II, ブラン・ルーベ社製) によりアンモニア捕捉量を定量しその累積値をアンモニア揮散量とした. 培養日数は14日間とし, 培養開始後のアンモニア補足量の測定精度は3~6回とした. なお, 培養実験の際には, 窒素を添加しない空試験区を併置した. 培養温度は15または30℃, 反復は2とした.

得られたデータを以下の式により, アンモニア揮散率 (施用窒素量に対するアンモニア態窒素揮散量の割合) として算出した.

$$(\text{アンモニア揮散率, \%}) = \{(\text{各試験区における, その時点までの累積アンモニア態窒素揮散量, mgN}) - (\text{空試験区における, その時点までの累積アンモニア態窒素揮散量, mgN})\} / (\text{窒素施用量, 60.8mgN}) \times 100$$

3) 窒素添加24時間後の土壌pH

供試土壌10 g とURA, ASF, MAP, DAPの10,000

mgN L⁻¹溶液を0.608mL (Nとして6.08mg), 蒸留水4.19mL (最大容水量の60%相当) を125mLポリエチレンボトルに入れてよく混合し, 15℃または30℃で24時間静置後にさらに蒸留水20.2mLを加え, 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) により土壌pHを測定した. 反復は3とした. Whitehead and Raistrick (1990) はこの窒素添加24時間後の土壌pHがアンモニア揮散程度を説明するのに有効であるとされている.

なお, URA, ASF, MAP, DAP溶液 (10,000mgN L⁻¹) のpHは, それぞれ7.1, 5.1, 4.0, 7.8であった.

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

通気培養法による各処理区におけるアンモニア揮散率の推移を図V-5に示した. なお, すべての処理区において培養14日目以降のアンモニア揮散が無視しうほど小さいことが確認された.

アンモニア揮散率はどの処理区においても, 土壌pHの上昇 (pH5.9→7.0) と培養温度の上昇 (15→30℃) により促進されており, この傾向は既往の報告 (Duan and Xiao, 2000; 郝ら, 1994; Harrison and Webb, 2001; He et al, 1999; Terman, 1979; Whitehead and Raistrick, 1990) と一致した. 以下では, アンモニア揮散率の各処理区間における違いを, 窒素添加24時間後の土壌pH (表V-4) と併せて考察した.

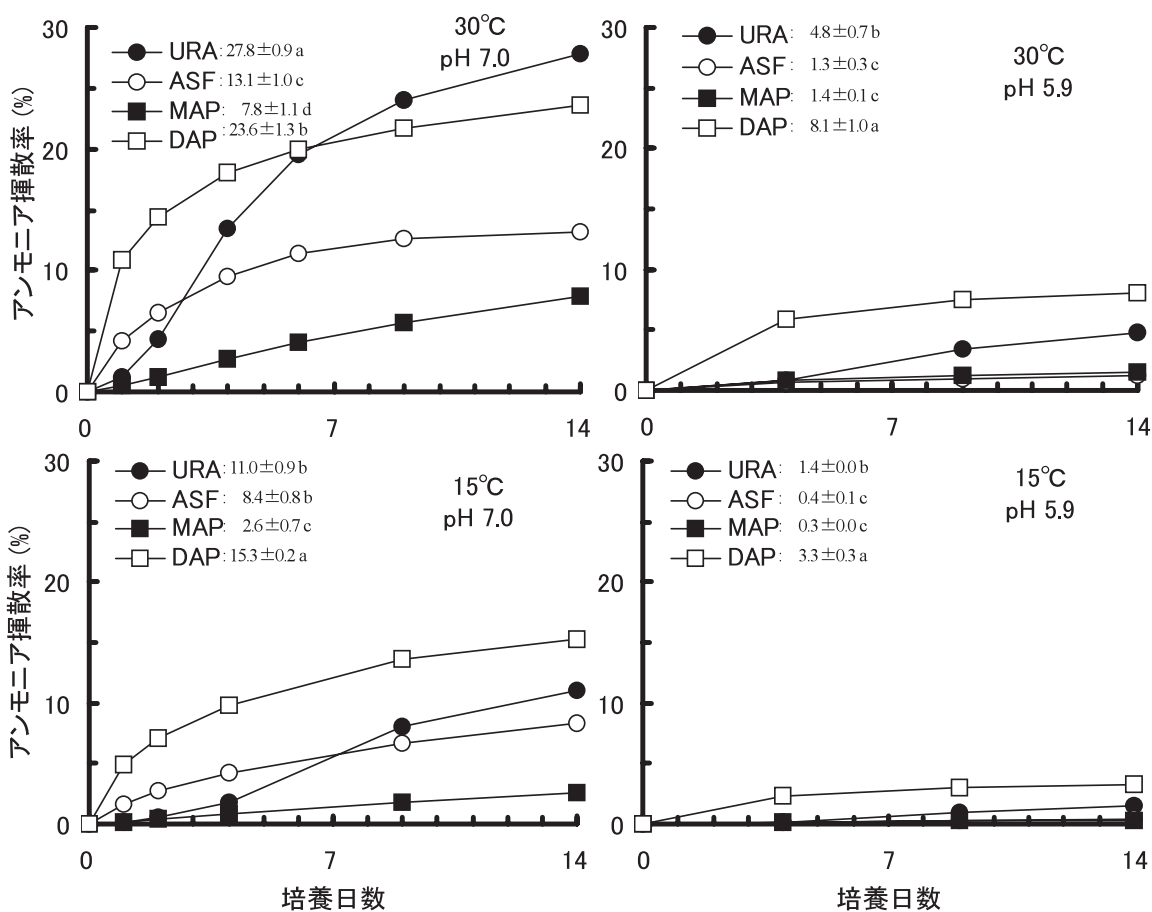


図 V-5 アンモニア揮散率に及ぼす土壌 pH および培養温度の影響

URA=尿素, ASF=硫酸アンモニウム, MAP= リン酸 1 アンモニウム, DAP=リン酸 2 アンモニウム.
各凡例の右の数字は培養 14 日目のアンモニア揮散率(平均±標準偏差, n=2).

培養 14 日目のアンモニア揮散率の比較: 同一図内(同一 pH かつ同一培養温度)で a-d の文字が異なる場合は, LSD 法による有意差(p<0.05)があることを示す.

表 V-4 各窒素添加 24 時間後の土壌 pH

培養温度	窒素形態	炭酸カルシウム添加土(pH7.0)	原土(pH 5.9)
30°C	URA	7.2 ± 0.1 a	6.3 ± 0.0 b
	ASF	7.0 ± 0.0 b	6.1 ± 0.0 d
	MAP	7.0 ± 0.0 b	6.2 ± 0.0 c
	DAP	7.2 ± 0.0 a	6.9 ± 0.0 a
15°C	URA	7.2 ± 0.0 b	6.3 ± 0.0 b
	ASF	7.0 ± 0.0 c	6.1 ± 0.0 c
	MAP	6.8 ± 0.0 d	6.1 ± 0.0 c
	DAP	7.3 ± 0.0 a	7.1 ± 0.0 a

URA=尿素, ASF=硫酸アンモニウム, MAP= リン酸 1 アンモニウム, DAP=リン酸 2 アンモニウム.
データは平均±標準偏差(n=3)で示した. 窒素形態間の比較: 同一培養温度(30°Cか15°C)かつ同一供試土壌内(炭酸カルシウム添加土か原土)で a-d の文字が異なる場合は, LSD 法による有意差(p<0.05)があることを示す.

DAP区およびURA区のアンモニア揮散率は、いずれの条件においてもASF区およびMAP区より高く (図V-5) , また窒素添加24時間後の土壌pHについても、DAP区およびURA区がASF区およびMAP区より高かった (表V-4) .

DAP区のアンモニア揮散率は、高温・高pH (30℃・pH7.0) 以外の条件ではURA区よりも高く、このことはDAPがアルカリ性 (pH7.8, 前述) であり、添加24時間後の土壌pH (表V-4) がURA区よりも高かったことと対応した.

一方、URA区のアンモニア揮散率は高温・高pH (30℃・pH7.0) 条件ではDAP区よりも高く (図V-5) , このことは高温・高pH (30℃・pH7.0) 条件における、添加24時間後のpH (表V-4) が URA区≒DAP区であったことと対応した. URAはほぼ中性 (pH7.1, 前述) であるが、土壌中では土壤微生物の持つウレアーゼの作用により加水分解して炭酸アンモニウムとなってpHが上昇し (越野, 1994) , アンモニア揮散が促進される (Harrison and Webb, 2001) . またこのウレアーゼによる加水分解反応は7~32℃の範囲では温度の上昇によって著しく促進されることが知られている (Ernst and Massey, 1960) . すなわち高温 (30℃) と高pH (pH7.0) の相乗効果によって、URA区のアンモニア揮散率がDAP区よりも高まったものと考えられる. なお

URA区のアンモニア揮散速度は最大化するまでに4日程度を要し、他の処理区と異なる傾向を示した (図V-5) . このことはウレアーゼ活性が最大化するまでに2~4日を要すること (Whitehead and Raistrick, 1990) に起因すると考えられる.

ASF区のアンモニア揮散率は、高pH (pH7.0) 条件では温度の高低によらずMAP区より高く、低pH (pH5.9) 条件では温度の高低によらずMAP区と同等に低かった. ASFは酸性土壌 (pH<7) ではアンモニア揮散の生じにくい窒素であることが知られている (Terman, 1979; Harrison and Webb, 2001; Whitehead and Raistrick, 1990) が、逆に石灰質土壌などpHが高く (pH>7) , 炭酸カルシウム (CaCO₃) を多量に含む土壌にASFが施用されると石膏 (CaSO₄) と炭酸アンモニウム ((NH₄)₂CO₃) が生成し、URA施用時よりもアンモニア揮散率が高くなる (Terman, 1979; Harrison and Webb, 2001; Whitehead and Raistrick, 1990) . このことは、炭酸カルシウムを添加した条件 (pH7.0) におけるアンモニア揮散率がASF区>MAP区であったこと (図V-5) , さらに15℃・pH7.0条件ではURA区とASF区のアンモニア揮散率に有意差がなかったこと (図V-5) と符合すると考えられた.

一方、MAP区のアンモニア揮散率が低いのは、既往の報告 (Whitehead and Raistrick, 1990) ではMAPが

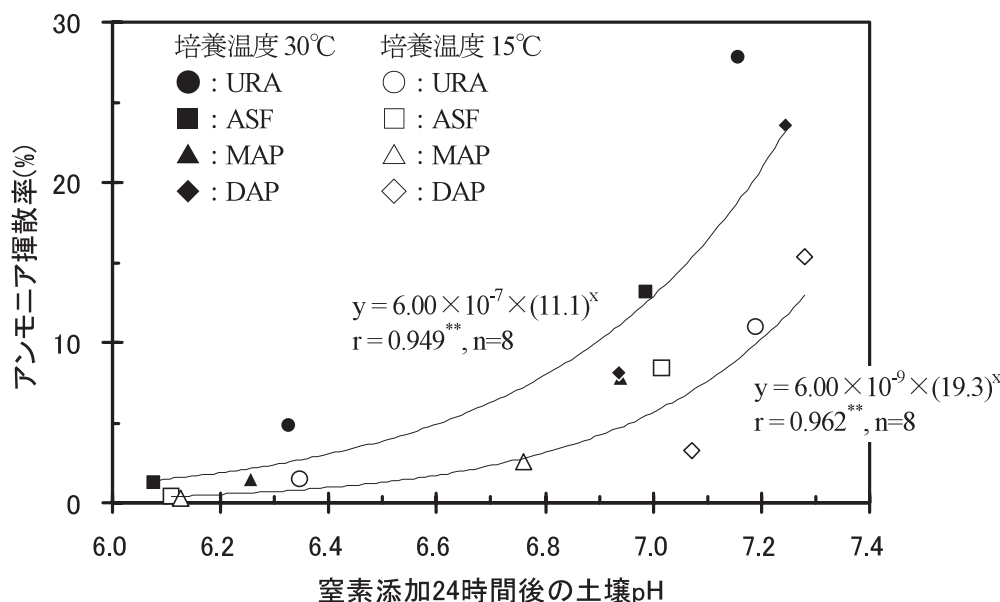


図 V-6 培養14日間でのアンモニア揮散率と土壌pHの関係
 URA=尿素, ASF=硫酸アンモニウム, MAP=リン酸1アンモニウム, DAP=リン酸2アンモニウム.
 土壌pHは窒素添加24時間後に測定.
 **: p<0.01で有意な相関であることを示す.

強酸性 (pH4.0, 前述) であり土壌に施用した直後から土壌pHが大きく低下するためとされている。しかし、表V—4の結果では、MAP添加24時間後の土壌pH値は、0~0.2低下する程度 (炭酸カルシウム添加土 (pH7.0) の場合) か、むしろ0.2~0.3上昇しており (原土 (pH5.9) の場合)、弱酸であるASFの添加 (pH5.1, 前述) と大差なかった。このように本研究におけるMAP添加24時間後のpHが既往の知見 (Whitehead and Raistrick, 1990) と異なったのは、供試土壌がリン酸吸収係数の大きい (17.7g P₂O₅ kg⁻¹) 黒ボク土であるため、MAP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が上昇するためと考えられる (和田, 1981)。

なお、MAPにおいて推察されたリン酸イオンの特異吸着に伴うpH上昇は、DAPにおいても生じたものと考えられるが、DAPは元々アルカリ性 (pH7.8, 前述) であるために特異吸着によるpH上昇はマスクされ、観察できなかったと考えられる。

次に培養14日目の各処理区からのアンモニア揮散率と窒素添加24時間後の土壌pHの関係を図V—6に示した。両者は培養温度 (30℃, 15℃) ごとに有意な指数関数の関係にあり、この結果はWhitehead and Raistrick (1990) が窒素添加24時間後の土壌pHとアンモニア揮散率が高い正の相関を示すことを見いだしたのとほぼ同様の傾向であった。

以上のことから、黒ボク土にはリン酸イオンの特異吸着に伴うpH挙動に特徴があるにせよ、他の土壌と同様に窒素添加24時間後の土壌pHを測定することによって黒ボク土におけるアンモニア揮散の窒素形態間差は説明

できることが明らかとなった。

まとめ

黒ボク土における表面施用窒素のアンモニア揮散に及ぼす、土壌pH、温度、施用窒素形態の影響について、以下のことを明らかにした。

窒素のアンモニア揮散率は高温・高pH (30℃, 土壌pH7.0) 条件で8~28%と大きく、尿素 (URA, 約28%) >2リン酸アンモニウム (DAP, 約24%) >硫酸アンモニウム (ASF, 約13%) >1リン酸アンモニウム (MAP, 約8%) であった。

次に低温・低pHの場合 (15℃, 土壌pH5.9) のアンモニア揮散率は、DAPで約3%, URAで約1%, ASFとMAPではほとんどアンモニア揮散は認められなかった。また、温度が高くともpHが低い場合 (30℃, 土壌pH5.9) のアンモニア揮散率は、DAPで約8%, URAで約5%, ASFとMAPでは約1%と低かった。

これらの窒素形態間差は、窒素添加24時間後の土壌pHによって説明できた。

以上の結果に基づき、営農場面において表面施肥を行う場合、アンモニア揮散をできるだけ抑制するための留意点として以下のことが指摘できる：

土壌pHを高くし過ぎない。ただし、本研究における土壌pH5.9条件でのアンモニア揮散率は、DAPを除けば数%以下と低かったので、極度に低pHとする必要はない。

また低pHの場合 (土壌pH5.9程度) には、URA, ASF, MAPのいずれもアンモニア揮散率は低いので、表面施肥への適用は可能と考えられる。

第3節 直播テンサイに対する分施の効果実証試験

はじめに

第V章第1節と第2節で明らかにしたように、播種時の作条基肥窒素量を40kg ha⁻¹程度、残りの窒素施肥量を発芽揃い～本葉2葉期に表面施肥する分施は、作条施肥窒素による濃度障害の心配がなく、また土壌pHが高くなければ、アンモニア揮散による表面施肥窒素損失の心配も少なく、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、分施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V-5に示すように2000～2003年の4年間、十勝地方の圃場のべ11カ所（芽室町：Me-1～4、本別町：Ho-1～3、池田町：Ik、士幌町：Sh、新得町：St、幕別町：Ma）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V-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）の範囲内であった。

試験処理の概要は表V-7に示した。播種日は4月下旬～5月上旬、年間の総窒素施肥量は150～208kg ha⁻¹であった。対照区（全量作条施肥区）では、播種と同時に

表 V-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	2001	淡色黒ボク土	60	23.1	アーベント
Me-2	"	2002	"	"	20.8	"
Me-3	"	2003	"	"	21.9	"
Me-4	"	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	"
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	"	普通褐色低地土	66	21.4	"
Ma	幕別町	2003	淡色黒ボク土	"	21.1	のぞみ

[†]“Me-1”～“Me-3”は十勝農業試験場内圃場，“Ma”は幕別町農業試験圃場。その他は現地農家圃場である。

表 V-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	5.9	25.1	2.4	52	56	12	4	1	160	45.3
Me-2	"	6.1	"	"	"	"	"	"	"	"	"
Me-3	"	6.1	"	"	"	"	"	"	"	"	"
Me-4	"	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	"	5.8	"	"	"	"	"	"	"	"	"
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
Ma	L	6.1	36	3.2	37	99	16	6	0	221	54.8

[†]Truog 法。

表 V-7 各供試圃場における施肥処理(対照区は全量作条施肥区)

供試圃場	播種日	総施肥量† (kg ha ⁻¹)			分施肥区における窒素施肥配分量 (kg ha ⁻¹)		分施肥区の表面施肥に用いた窒素の種類と表面施肥日	
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	作条基肥	表面施肥	窒素の種類	表面施肥日
Me-1	4/24	157	330	220	50	107	尿素	5/29
Me-2	5/7	164	344	230	57	107	尿素	5/28
Me-3	4/23	150	314	210	45	105	尿素	5/26
Me-4	4/21	180	300	179	56	124	尿素	5/28
Ho-1	4/29	208	438	208	62	146	尿素	5/9
Ho-2	4/23	166	348	166	53	113	硫酸アンモニウム	5/20
Ho-3	4/29	160	337	160	50	108	硫酸アンモニウム	5/26
Ik	5/4	168	238	154	50	118	尿素	5/31
Sh	4/22	160	273	128	48	112	尿素	5/29
St	4/20	176	298	141	55	121	尿素	5/9
Ma	4/25	170	357	239	51	119	硫酸アンモニウム	5/26

†分施肥区と対照区(全量作条施肥区)の総施肥量は同一である。

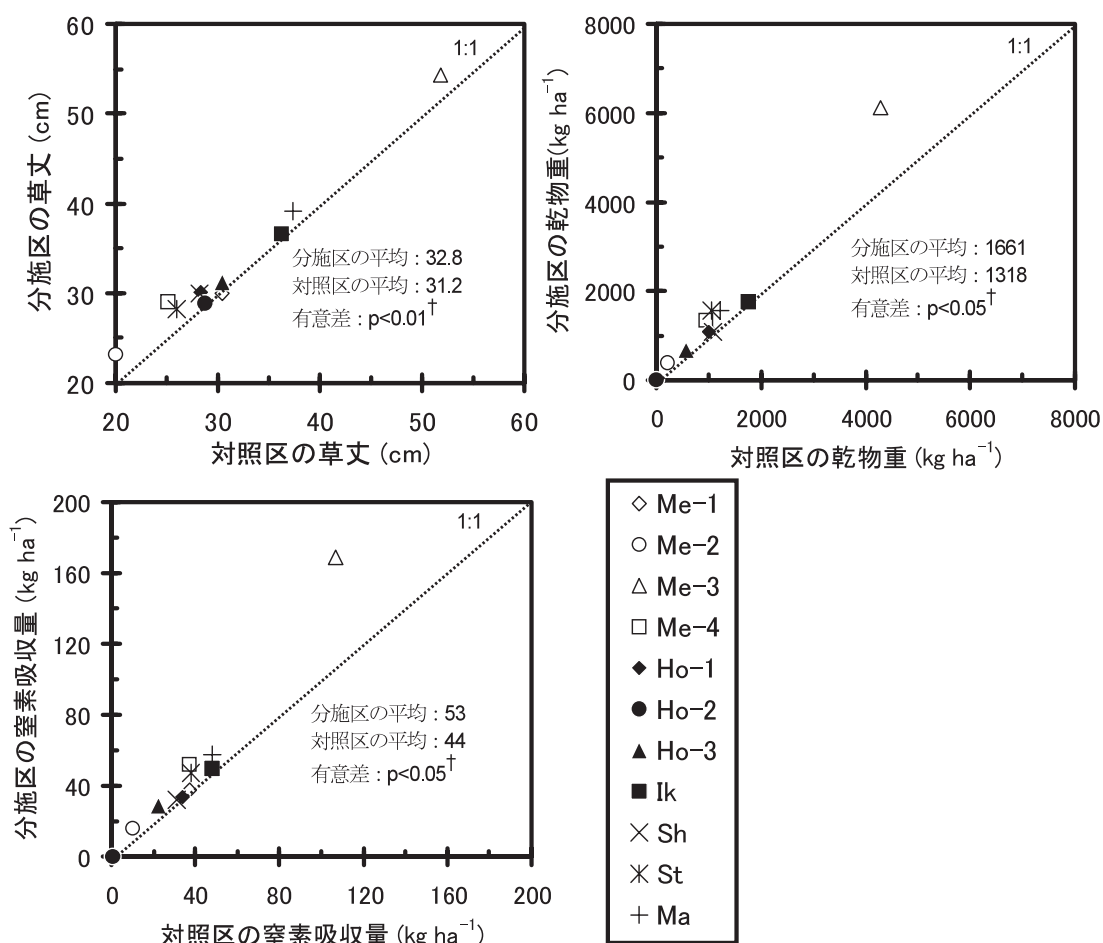


図 V-7 生育初～中期(6月下旬～7月中旬)におけるテンサイ生育(草丈(LL), 乾物重(DW))および窒素吸収量(NU)に関する分施肥区と対照区(全量作条施肥区)の比較。

†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。

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。分施肥区では，播種と同時に総合施肥播種機を用いて，45～62kg ha⁻¹の窒素とリン酸およびカリウムの全量を条施（作条施肥）し，必要な残りの窒素（105～146kg ha⁻¹）を，出芽揃い～本葉2葉期（5月9～31日）に尿素または硫酸アンモニウムで表面施肥した。対照区と分施肥区の施肥量は同一とした。

なお施肥位置は，全ての圃場において両区ともほぼ種子下6cm，左右側方2.5～5.0cm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月下旬～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，葉部の乾物を粉碎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月中～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4～6m²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。同時に，根部，葉部はそれぞれの乾物重を測定後，粉碎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月下旬～7月中旬）における草丈・乾物重・窒素吸収量について，分施肥区と対照区（全量作条施肥区）を比較するため，1：1プロットとして図V-7に示した。また，各項目について，分施肥区と対照区

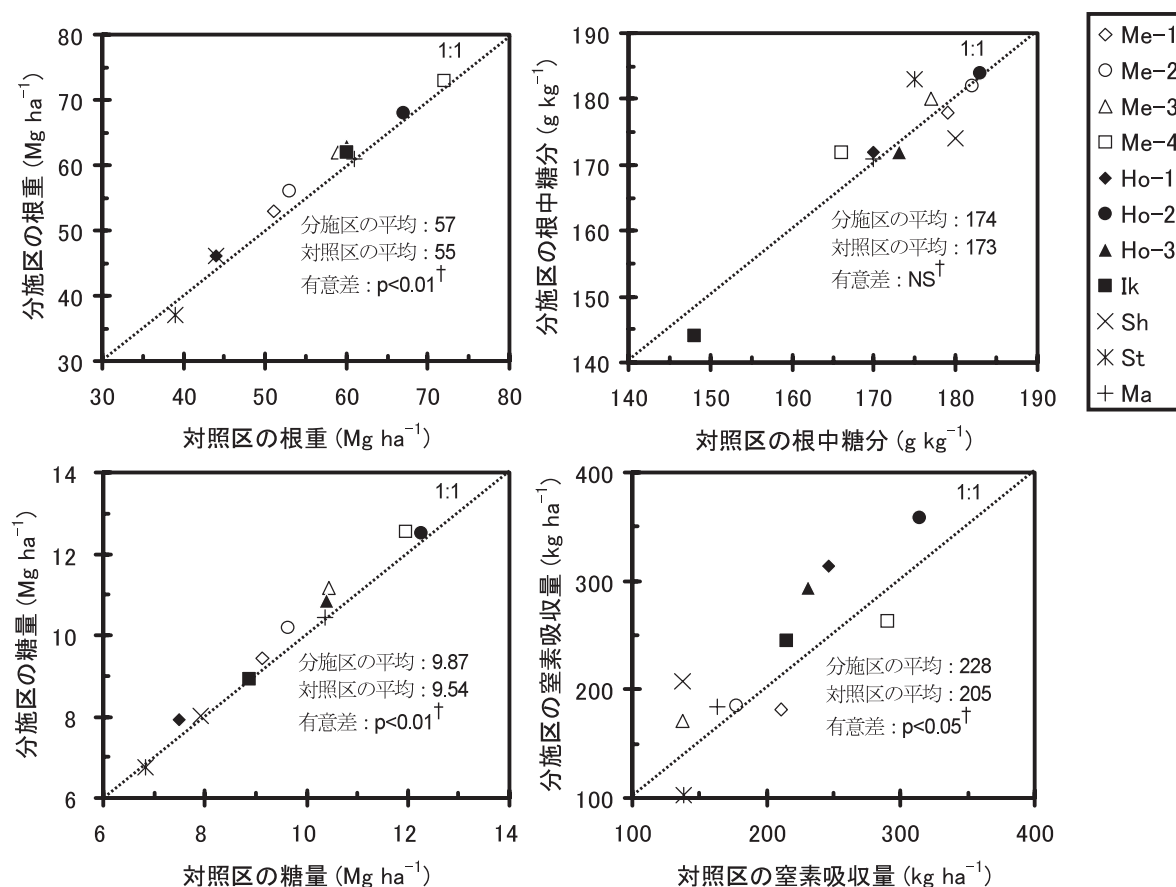


図 V-8 収穫期(10月中～下旬)におけるテンサイの根重(RW)，根中糖分(SC)，糖量(SY)および窒素吸収量(NU)に関する分施肥区と対照区(全量作条施肥区)の比較。

†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。

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分施肥が対照区より有意に優った。すなわち、分施肥は、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V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月中～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V-7と同様に、1：1プロットとして図V-8に示した。また、各項目について、分施肥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、根中糖分には有意差がなかったが、その他の項目（根重・糖量・窒素吸収量）はすべて分施肥が対照区に優り、すなわち分施肥は、全量作条施肥に比べ、窒素吸収が改善され、根重や糖量の増加が期待できることが明らかになった。

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。分施肥において根重や糖量が全量作条施肥に優った（図V-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V-7），が考えられる。

窒素吸収量については、分施肥が全量作条施肥に有意に優り、すなわち施肥窒素利用率が高いことが示された（図V-8）。窒素の全量を基肥とするよりも分施肥とした方が、施肥窒素利用率は高いことが一般に知られており（北海道農政部，2003），本試験によってこのことが実証された。

ところで、分施肥の表面施肥（追肥）は、発芽揃い～本葉2葉期に尿素または硫酸アンモニウムを用いて行った（表V-7）。供試圃場の土壌pHは5.6～6.2と、第V

章第2節の供試土壌のpHである5.9に近かったこと、および分施肥区の窒素吸収量は対照区に有意に優ったこと（図V-8）から、表面施肥した窒素のアンモニア揮散による損失は、尿素・硫酸アンモニウムともにほとんどなかったものと推察される。

また、分施肥の表面施肥（追肥）の時期についても、発芽揃い～本葉2葉期（5月上旬～下旬）で特に問題はなかった。今野（2001）は北見農試圃場で移植栽培テンサイの窒素分施肥（基肥窒素量；100kg ha⁻¹，追肥窒素量；50kg ha⁻¹）を検討し、6月上旬までに追肥すれば糖分や糖量が総窒素施肥量150kg ha⁻¹を全て基肥として与えた場合と同等であることを認めた。また、テンサイは100%直播栽培で栽培されるヨーロッパでは、種子～幼苗への濃度障害と追肥時期の遅れによる糖分低下の両方を回避する窒素施肥法として、播種後ただちに総窒素施肥量の1/3～1/4を表面施肥し、その後本葉が2枚抽出した時期（2葉期）に残りの2/3～3/4の窒素を表面施肥する分施肥技術が広く用いられている（笛木・有田，2003；増田，1997）。これらの知見は、本試験において採用した分施肥における表面施肥（追肥）の方法に問題がないこと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11カ所において試験を行い、播種時の作条基肥窒素量を40kg ha⁻¹程度、残りの窒素施肥量を発芽揃い～本葉2葉期に表面施肥する分施肥は、慣行の全量作条施肥に比べ作条施肥窒素による濃度障害やアンモニア揮散による表面施肥窒素損失の心配がなく、生育や窒素吸収が改善され、根重・糖量の増加が期待できることを実証した。

第Ⅵ章 降水条件の違いが全層施肥と分施の有効性に与える影響

はじめに

前章までで、直播テンサイは土壤酸性や濃度障害に弱い(第Ⅱ章)ため、慣行の作条施肥よりも根圏域の肥料濃度を低く抑えた全層施肥(第Ⅳ章)および分施(第Ⅴ章)が初期生育の向上に有効であり、増収が期待できることを明らかにしてきた。ただし、これらの施肥法の窒素肥効は、降水量の影響を受けることが予想される。例えば、降水量が多い場合には、全層施肥(全量基肥施肥)は硝酸態窒素の下層土への流出を助長し窒素肥効を低下させる恐れがあるが、分施はこれと逆に窒素肥効を向上させる可能性がある(北海道農政部, 2003)。これに対して、全量基肥で作条施肥を行った場合の窒素肥効は、局所施肥であるため全層施肥を行った場合より高まるとも考えられるが、反対に基肥のみであることから分施を行った場合より低下するとの指摘がある(北海道農政部, 2003)。

降水に伴う施肥窒素の下層への流出に関する研究は、数多く行われている。西宗ら(1980)は、北海道十勝地方の火山灰土壌(裸地)において、施肥後163日間(5月7日~10月17日)の施肥窒素の移動を調査し、同期間中の総降雨量が616mmの条件において施肥窒素のほぼ全量が作土層(0~20cm)から流出したものの、このうち50%以上は深さ40cmまでの土層に止まったことを報告している。Kowalenko(1989)は、カナダのシルトローム~ローム質土壌では施肥窒素の45cm以下土層への流出は冬期間中に起きることを明らかにしている。また、土壌的要因との関連で三木ら(2000)は、土性と余剰水量(降水量-蒸発散量)別の硝酸態窒素の流れ易さ区分図を具体的に示している。

しかし、各種作物、特に直播テンサイを対象に降水量

と窒素流出の視点から、施肥法と窒素肥効等の関係を比較検討した例はない。今後、初期生育の向上に有効な全層施肥および分施を生産現場に普及するには、降水条件によって窒素肥効の目安である窒素吸収量や収量がどの程度影響を受けるのか明らかにしておく必要がある。

そこで、本研究では降水条件と施肥法の違いが直播テンサイの根重および糖量に与える影響を明らかにするために、灌水によって2つの降水条件を設け、全層施肥(全量基肥)、分施(作条施肥による基肥と表面施肥による追肥の組み合わせ)、作条施肥(全量基肥)での生育量や窒素吸収量と窒素流出との関係を比較検討した。

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1m²(1m×1m)の試験用コンクリート枠を用いた。コンクリート枠には淡色黒ボク土の下層土(30cm以深、芽室町から採取)が深さ60cmまで充填されており(容積重0.7Mg m⁻³)、それ以深は礫層である。造成作業は2002年8月、試験は2003年4月から10月まで実施した。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)により分析した供試土壌の理化学性は表Ⅵ-1に示した。

2) 施肥処理および栽培概要

施肥処理として全層施肥、分施、作条施肥の3処理区を設けた(表Ⅵ-2)。作付期間中の施肥量は、全ての処理区で窒素(N)20g m⁻²、リン酸(P₂O₅)42g m⁻²、カリウム(K₂O)28g m⁻²とした。全層施肥区は基肥のみの施肥法(4月30日のみ施用)で、分施区は追肥重点

表 VI-1 供試土壌の理化学性

土性 ¹⁾	pH	腐植 (g kg ⁻¹)	有効態 リン酸 ²⁾ (mg kg ⁻¹)	リン酸 吸収 係数	CEC (cmol _c kg ⁻¹)	熱水抽出性 窒素 (mg kg ⁻¹)	交換性塩基		飽和透水 係数 (cm s ⁻¹)
							K ₂ O	MgO	
SL	5.9	5	8	1147	7.1	20	169	113	7.3×10 ⁻³

1)80.2%は砂

2)Tuog 法

表 VI-2 施肥処理

処理区 ¹⁾	基肥(4月30日施用)				追肥(5月20日施用)		
	UN	APN	NN	合計	P ₂ O ₅ ⁴⁾	K ₂ O ⁵⁾	N ³⁾ (ASN)
全層施肥区	5.4	12.0	2.6	20.0	42.0	28.0	0.0
分施肥区	0.0	3.4	2.6	6.0	42.0	28.0	14.0
作条施肥区	5.4	12.0	2.6	20.0	42.0	28.0	0.0

1)総N施肥量は全て20 g m⁻².

2)UN:尿素由来, APN:リン酸アンモニウム由来, NN:硝酸ナトリウム(チリ硝石)由来.

3)ASN:硫酸アンモニウム由来.

4)リン酸アンモニウムおよび重過リン酸石灰由来.

5)硫酸カリウム由来.

施肥で基肥窒素量 6 g m⁻²を4月30日に、追肥窒素量14 g m⁻²(表面施肥, 硫酸アンモニウム使用)を5月20日に施用した。作条施肥区は基肥のみの慣行施肥(4月30日のみ施用)である。

各枠(区)は畦長1m×畦幅50cmを2畦とした。施肥および播種作業は以下のように行った。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。分施肥区および作条施肥区は、深さ10cmの土壌をスコップで十分に碎土攪拌した後に均平整地し、施肥位置を第1章第1節(図VI-1)と同様に、種子の側方両側2.5~5.0cm, 種子下6.0~6.5cmの位置に施肥し、施肥溝に土壌を埋め戻した後に播種した。播種はいずれの処理区でも施肥直後の4月30日に実施した。供試品種はアーベント(直播栽培用

ペレット種子)で、播種間隔3cm, 播種深度1cmである。株間の競合を避けるため、6月4日には1畦当たり10株、6月18日には1畦当たり5株となるよう間引きした。処理区は全て3反復とした。

3) 降水量と灌水処理

試験実施年(2003年)の芽室町における4月30日~6月30日の自然降水量は105mmで(図VI-1), 平年値180mm(アメダス, 芽室)よりも著しく少なかった。特に5月中~下旬の降水量は2mmと極めて少なく干ばつ気味に推移したので、全ての処理区に灌水を2回行った(5月14日と5月27日に25mmずつ)。

その後、各施肥処理区に次の2つの灌水処理区を設けた。少雨条件は5月27日以降が無灌水の区、多雨条件は6月下旬に計60mm(6月23日と6月30日に30mmずつ)を灌水した区である(図VI-1)。灌水は1時間当たり約10mmの強度で行った。なお、本試験の少雨条件とは4月30日~6月30日の総降水量が155mm, 多雨条件とは同期間の総降水量と灌水量の和が215mmである。

なお、2003年は、7~9月の総降水量が476mmで、同期間の平年値(1979~2000年)514mmよりもやや少なく、やや干ばつ気味の年であった。

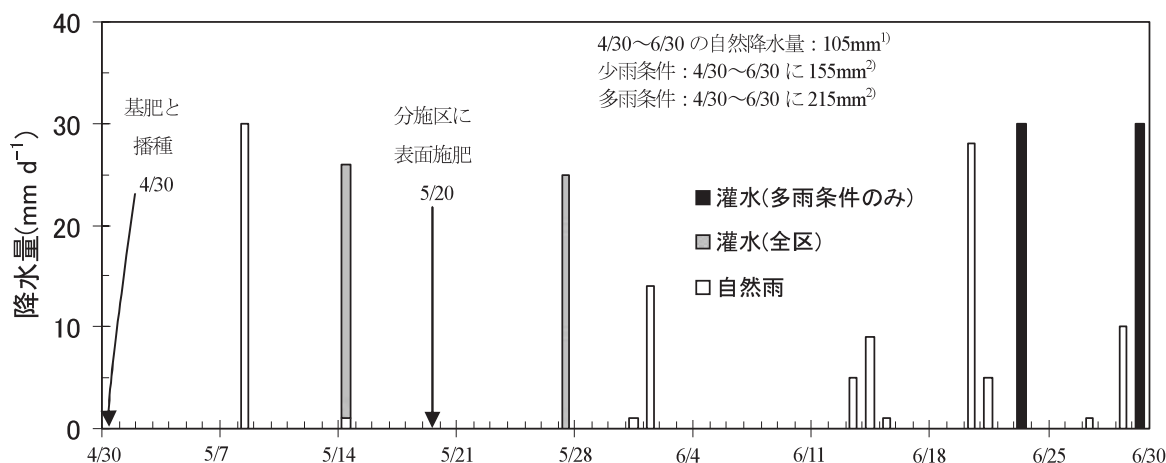


図 VI-1 降水量と灌水処理(2003年4月30日~6月30日)

1)アメダスデータ(芽室)による。

2)5月27日までは全処理区灌水, それ以降は多雨条件のみ灌水。

4) 調査方法

テンサイの草丈および葉数は、最後の灌水処理から7日後の7月7日、常法(農林水産省北海道農業試験場, 1986)に従って調査した。葉色値はUchino and Kanzawa (1995)の方法に準じ、最大展開葉の葉先から1cm内側を測定部位とし、クロロフィルメーター

(SPAD502, ミノルタ社製)を用いて1区あたり40点(1株あたり4葉, 10株を調査)測定した値を平均した。

畦間における硝酸態窒素の垂直分布を、最後の灌水処理から4日後の7月4日に測定した。土壌試料は内径2.2cm, 長さ110cmのステンレス製採土器を用いて1区当たり4箇所, 畦間から採取し、深さ0~20cm, 20~40cm,

40～60cmごとに分取した。各土壌試料は十分に混合し4.75mmの篩を通した後、生土20gを1 mol L⁻¹KCl溶液100mLで1時間振とうし、濾液中の硝酸態窒素濃度を第Ⅱ～Ⅴ章と同様にオートアナライザー（AACS-Ⅱ，ブランルーベ社製）で定量した。

テンサイの根重は、10月14日に1区当たり10株を調査した。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。同時に、根部、葉部はそれぞれの乾物重を測定後、粉碎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。

5) 蒸発散量の推定

2003年5～6月の蒸発散量は、緯度と月平均気温から蒸発散量を推定するソーンスウェイト法（大槻，1989）によって求めた。

6) 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) 直播テンサイの生育と硝酸態窒素の下層土への流出

少雨および多雨条件における、7月7日の各処理区の草丈、葉数ならびに葉色値を図Ⅵ-2に示した。

少雨条件では、草丈は全層施肥区が分施肥区や作条施肥区よりも有意に大きかった（図Ⅵ-2）。分施肥区の葉数は作条施肥区よりも有意に多かった。葉色値は、3区で差がなかった。すなわち、少雨条件においては、全層施肥区および分施肥区の生育が作条施肥区よりも向上することが窺われた。この理由は、第Ⅳ～Ⅴ章で述べたように両区では、根圏域における施肥由来窒素の局所的集中が緩和されたことによって濃度障害やアンモニア障害が軽減され、初期生育の向上につながったためと推察される。

多雨条件では、全層施肥区の草丈は作条施肥区よりも有意に大きかったが、葉数に処理間差は認められなかった（図Ⅵ-2）。葉色値については、全層施肥区が分施肥区および作条施肥区よりも有意に低かったことから、葉

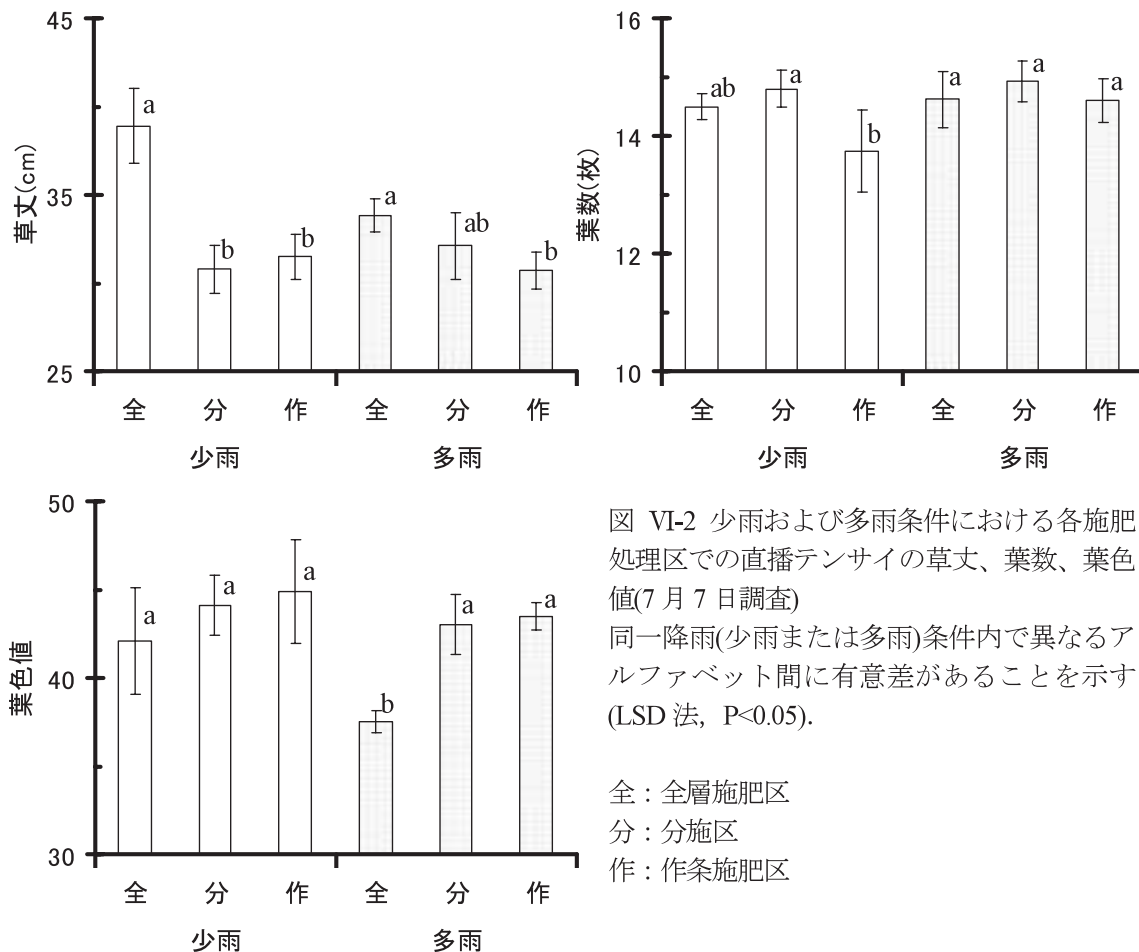


図 VI-2 少雨および多雨条件における各施肥処理区での直播テンサイの草丈、葉数、葉色値(7月7日調査) 同一降雨(少雨または多雨)条件内で異なるアルファベット間に有意差があることを示す(LSD法, P<0.05).

全：全層施肥区
分：分施肥区
作：作条施肥区

の窒素濃度が低下した徴候があった点が注目される。

そこで、葉の窒素濃度低下の原因を土壌中の窒素動態から把握するため7月4日（最後の灌水処理から4日後）の硝酸態窒素の垂直分布（畦間）を調べた結果（図VI-3）、全層施肥区の多雨条件における硝酸態窒素濃度は、少雨条件より、0~20cm土層では有意に減少し、逆に20~40cm土層では有意に増加していた。すなわち、多雨条件を想定した灌水処理による硝酸態窒素の0~20

cm土層から下層20~40cmへの流出が観察された。

このような硝酸態窒素の下層土への流出程度は、降水量から蒸発散量を差し引いた余剰水量に比例して大きくなる（三木ら、2000）。本試験を実施した2003年5、6月の余剰水量を算出したところ（表VI-3）、5月の余剰水量は少雨・多雨条件とも19mmであった。6月の余剰水量は、少雨条件では4mmと少なかったのに対し、多雨条件では64mmと多かった。三木ら（2000）の報告によれ

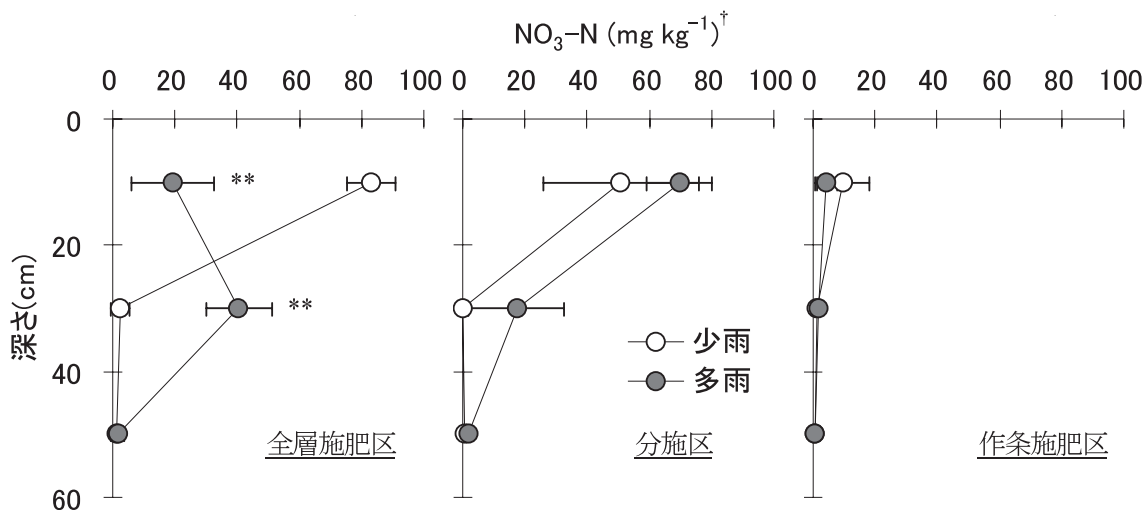


図 VI-3 各施肥処理区の畦間における硝酸態窒素の垂直分布
(7月4日測定，基肥施用日：4月30日，追肥施用日：5月20日，灌水処理終了日：6月30日。)
**：当該深さにおいて少雨・多雨条件間に有意差(t-検定，P<0.01)があることを示す。
† 乾土当たりの濃度。

表 VI-3 2003年5~6月の降水量、灌水量、蒸発散量と余剰水量

条件	蒸発散量 ^{*1} (mm)	降水量 (mm)	灌水量 (mm)	余剰水量 ^{*2} (mm)
少雨 5月	63	32	50	19
6月	69	73	0	4
多雨 5月	63	32	50	19
6月	69	73	60	64

*1 蒸発散量はソーンスウェイト法¹²⁾によって推定した。

*2 余剰水量=降水量+灌水量-蒸発散量

ば、土性SL（本供試土壌と同じ）の土壌における硝酸態窒素の作土層（0~20cm）からの流出は、窒素施肥後1ヶ月当たりの余剰水量が20mm未満ならば10%未満と少ないが、50mmを超えると50%以上になることが指摘されている。このように余剰水量からみても、全層施肥区では硝酸態窒素が下層へ流出したとの見解が支持できる。

一方、丹羽ら（1999）は、北海道十勝地方の6月下旬の時点ではテンサイ根系のほとんどがまだ0~20cm土層

に分布し、20~40cm土層には少ないことを報告している。このことから、本研究においても6月下旬~7月上旬の20~40cm土層の根系はまだ少なかったものと考えられる。

したがって、20~40cm土層の硝酸態窒素量が高いこと、および同層の根系が少ないことから判断すると、全層施肥区の高雨条件で葉色値が低下したのは、硝酸態窒素が根系が多い0~20cm土層から下層へ流出したことによる窒素不足のためと推察される。

他方、分施肥区および作条施肥区では、株間（施肥位置）に施肥窒素が集中していることから、畦間の硝酸態窒素の垂直分布（図VI-3）だけでは硝酸態窒素の流出程度を評価するには不十分で、硝酸態窒素の流出を完全には把握できなかった。得られたデータからの推察を以下に述べる。

総窒素施肥量の70%が表面施肥された分施肥区においては、多雨条件における0~20cm土層（畦間）からの硝酸態窒素の流出が全層施肥区よりも少ないことが窺われた。この理由は、分施肥区において表面施肥された窒素は土壌表面（深さ0cm）から下層へ流出するので、0~10cmに窒素を混和した全層施肥区よりも施用位置が浅く、また窒素の表面施肥を行ったのは5月20日で、全層施肥区の基肥を施用した4月30日より20日遅かったために、硝酸態窒素の到達する深さも浅い位置に留まったためと思われる。

また、分施肥区、作条施肥区ではそれぞれ6, 20g m²の窒素が作条施肥されており、この窒素は全層施肥された窒素に比べ硝酸化成を受けにくいことが第Ⅲ~Ⅳ章で明らかにされており、したがって下層への流出は生じにくかったものと考えられる。さらに本試験結果では、多雨条件において分施肥ならびに作条施肥区の葉色値が全層施肥区よりも有意に高く保たれており、窒素不足の傾向もなかった（図VI-2）。

これらのことを総合すると、分施肥区および作条施肥区における硝酸態窒素の下層土への流出程度は、全層施肥区よりも少なかったことが推察される。

2) 直播テンサイの窒素吸収量および根重・糖量

収穫期（10月14日）における、各処理区の窒素吸収量、根重、根中糖分、糖量を図VI-4に示した。

窒素吸収量は、少雨・多雨条件ともに処理区間差はな

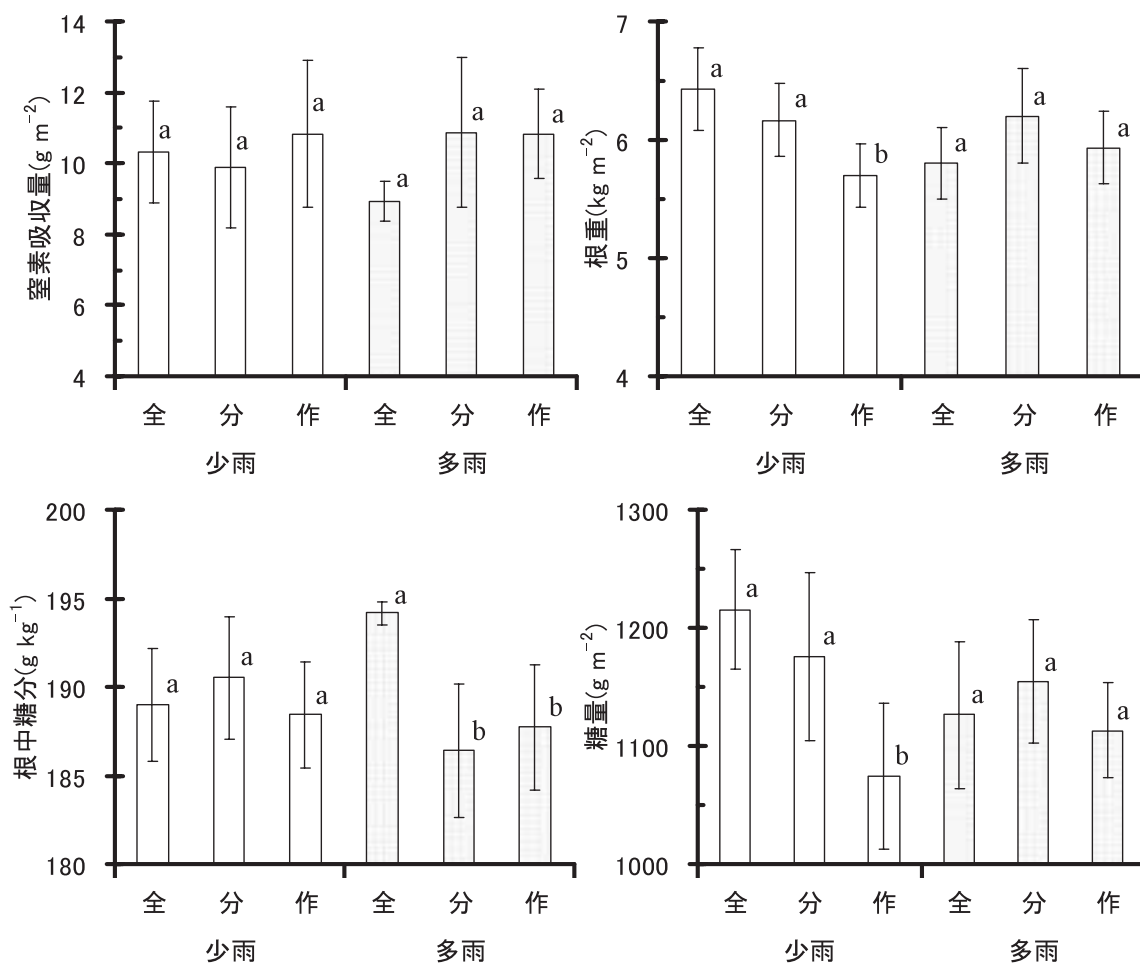


図 VI-4 少雨および多雨条件における各施肥処理区での直播テンサイの窒素吸収量、根重、根中糖分、糖量(10月14日)

同一降雨(少雨または多雨)条件内で異なるアルファベット間に有意差があることを示す(LSD 法, P<0.05).

かった。前述したように、7月7日時点の多雨条件における全層施肥区では、20cm以深への硝酸態窒素の流出による窒素不足が認められたが、収穫期には窒素吸収量が分施肥区や作条施肥区と同等であった。深根性作物であるテンサイは、9月には深さ80~100cmまで根系が発達し（西宗ら, 1982b）、余剰水によって作土層以深に流出した硝酸態窒素を吸収利用できることが知られている（増田, 1997；西宗ら, 1980）。したがって、全層施肥区では、下層に流出した硝酸態窒素もテンサイ根の伸張に伴い吸収利用されたものと推察される。

根中糖分は、少雨条件では処理区間差がなかったが、多雨条件では全層施肥区が分施肥区および作条施肥区よりも有意に高かった。根中糖分は、窒素吸収量が増加すると根重が増加するために低下すること（北海道農政部, 2003）、また播種約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、が報告されている（増田, 1997）。これらの知見と本結果とは一致する。すなわち、多雨条件の全層施肥区で根中糖分が上昇した理由として、有意差がないものの窒素吸収量が他区より低い傾向にあったこと（10月14日）、および生育途中で窒素不足（図Ⅵ-2）、すなわち窒素供給が停止された状態に置かれたことが指摘される。

根重と糖量は、同様の傾向であり、多雨条件では処理区間差がなかったのに対し、少雨条件では全層施肥区と分施肥区が作条施肥区よりも有意に高かった。このことは、多雨条件よりも少雨条件で7月7日時点の全層施肥区・分施肥区の初期生育が作条施肥区より優っていたこと（図Ⅵ-2）と符号する。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正の相関関係にあることが知られている（斉藤ら, 1991）ので、両区の根重および糖量が多かったのは、初期生育時の生育差を反

映したものと考えられる。

次に、根重・糖量を硝酸態窒素流出との関係で総括的に述べると、少雨条件においては、いずれの施肥法でも下層への窒素流出が少ないが、全層施肥区と分施肥区では初期の生育が旺盛なことに起因して根重・糖量が高まる。これに対して、多雨条件における初期生育は、全層施肥区では下層への窒素流出による窒素不足が認められるものの、根の伸長に伴いテンサイが下層土の窒素を吸収するため、同区の収穫期の窒素吸収量および根重・糖量は分施肥区や作条施肥区と大差がなくなる。

ただし、本研究の多雨条件において、有意差はないものの全層施肥区の窒素吸収量が他区より低い傾向にあったことから、本研究の多雨条件を超える降水量（余剰水量）が見込まれる場合には、全層施肥を行うと流出窒素量が多くなり窒素肥効が低下する恐れがある。したがって、土性がSL以上の粗粒質で、かつ表Ⅵ-3の多雨条件程度以上の余剰水量が頻繁に観測される地域では、安全性を考慮して全層施肥ではなく分施を積極的に採用すべきであろう。

まとめ

十勝地方の淡色黒ボク土（土性SL）でのテンサイ直播栽培において、本試験の少雨条件（6月の余剰水量4mm）では、全層施肥および分施肥は、慣行の作条施肥より初期生育が改善され、増収が期待できる。一方、多雨条件では（同64mm）、根重・糖量には全層施肥・分施肥・作条施肥間で大きな差はなかったが、全層施肥では硝酸態窒素の下層土への流出と葉色値の低下が認められ、収穫時の窒素吸収量もやや少ない傾向があり、施肥法によって流れ易さに違いがあった。