

第I章 緒論

第1節 背景

1) 北海道におけるテンサイの位置付け

テンサイはサトウキビに次ぐ世界の2大甘味資源作物の1つであって、現在、全世界の砂糖(分蜜糖)生産量約14,827万tのうちの約25%を占めている(北海道てん菜協会, 2006)。我が国におけるテンサイの作付けは北海道においてのみ行われ、その作付け面積は約7万haであり(北海道てん菜協会, 2006)、全道の畑地面積約44万haの約16%を占め(西宗・関矢, 1999)、ジャガイモ、麦類、豆類とともに畑輪作を構成する重要な基幹作物である。

2) 北海道へのテンサイの導入と発達

テンサイが我が国に導入されたのは明治維新直後の1871年(明治4年)である(北海道てん菜協会, 2006)。明治政府は殖産興業策を掲げ、テンサイ糖業を近代的基

幹産業の一つと位置付け重要視したこと、また北海道開拓使が、北海道の開拓に当たり稲単作を危険視し、寒冷地に適するテンサイを取り入れた欧米型畑畜混同輪作方式の構築を目指したこと、等がテンサイを導入・奨励した理由として挙げられる(北海道てん菜協会, 2006)。

導入直後(1871年)から第2次世界大戦前後(1940年代)までの約70年間は、テンサイ糖業は極めて不安定な時代であった。導入初期(1871~1896年)には、生産体制や栽培技術が未熟であったことに加え、日清戦争の戦勝に伴う台湾領有(1895年)が多量の甘蔗糖をもたらしたためにテンサイ糖業が不要となり、テンサイ糖業は導入後わずか25年後(1896年)に一時的な廃業に追い込まれた(北海道てん菜協会, 2006)。その後、第1次世界大戦によるヨーロッパの荒廃に伴うテンサイ糖不足が世界的な糖価高騰を招き、このことが、一時的廃業(1896年)から24年後の1920年に、北海道のテンサイ糖業を復興させた(北海道てん菜協会, 2006)。しかし、復興か

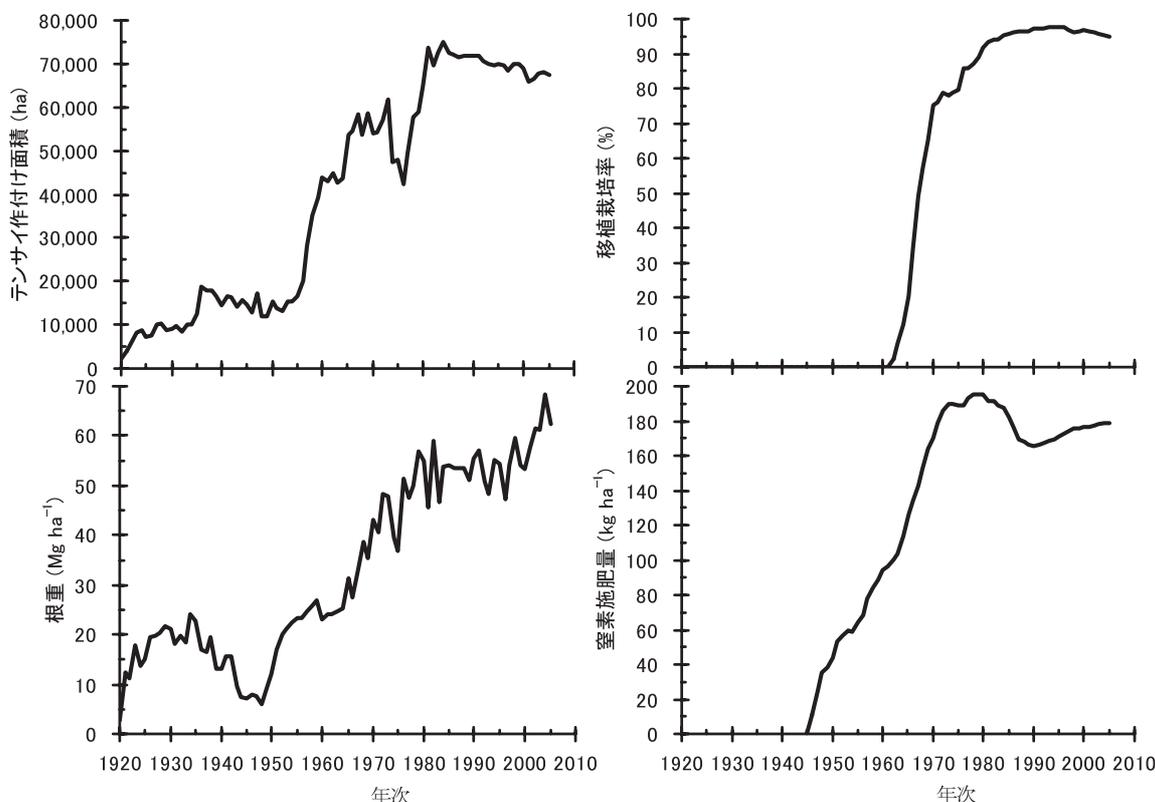


図 I-1 1920~2005 年における北海道のテンサイ作付け面積、根重、移植栽培率、窒素施肥量の推移 (本図は北海道てん菜協会(2006)および井村(1999)からの引用に基づいて作成した。)

ら約20年後の第2次世界大戦前後(1940年代)には、戦況の悪化に伴う資材と労働力の不足によってテンサイ栽培は再び低調を極めた(図I-1)。

第2次世界大戦後(1940年代)から1980年代にかけての約40年間には、テンサイ糖業は飛躍的に発展した。第2次世界大戦直後には各種の助成・法整備が急がれたのと同時に、資材や優良品種が順調に輸入・普及し、テンサイ栽培の振興が図られた(北海道てん菜協会, 2006)。さらに1962年には、それまでテンサイの栽培法は全て直播栽培であったのに対し、日本甜菜製糖株式会社が開発した紙筒移植栽培が普及に移された(北海道てん菜協会, 2006)。紙筒移植栽培は安定多収をもたらしたことから急速な勢いで直播栽培に置き換わり、テンサイの作付け面積、収量は飛躍的に成長した(図I-1)。

テンサイの生産体制がほぼ整った1980年代には、皮肉にも国内における砂糖需要の停滞が始まり、またガット・ウルグアイラウンド農業交渉等の国際的な貿易自由化の動きが活発化したことによって、テンサイの生産面積を引き下げざるを得ない事態が生じた(図I-1; 北海道てん菜協会, 2006)。

このような動きに対応すべく、1990年代以降の農政は変化した。1998年に出された農政改革大綱の中では、国産砂糖の価格競争力の回復を目標とする方向が示され、また食料・農業・農村基本法(1999年施行)および同基本計画(2000年)では、食糧自給率の向上、食糧の安定供給確保、市場原理を重視した価格形成、などの理念が明確に示されている(北海道てん菜協会, 2006)。さらに2005年には同基本計画が改訂され、この中でテンサイについての目標として、需要動向に応じた作付け指標による計画的な生産の推進、直播栽培技術等による省力・低コスト化、高性能機械化体系の確立、などが明確に示された(北海道てん菜協会, 2006)。

3) 直播栽培技術によるテンサイの省力・低コスト化の推進にあたっての課題

以上のように、北海道の開拓以来、戦争や国際的な社会・経済情勢にテンサイ生産はつねに翻弄されてきた経緯があり、現在もその最中にある。中でも喫緊の課題は、テンサイ生産を需要に見合った適正生産とするとともに省力・低コスト化を図り、国際競争力を強化することである(花岡, 2007)。

そこで現在、直播栽培技術の積極的導入による、テンサイの適正生産と省力・低コスト化の推進が注目されている。近年におけるテンサイの直播栽培技術の生産コストに関する研究(箱山ら, 1998; 原, 1999; 平石, 2005; 梶山, 2000; 須田, 2007)から、直播栽培では移

植栽培に比べて紙筒播種、育苗、移植等の作業に費やされる資材費、機械費、労働費等の削減効果が大きく、所得向上が見込める可能性があるが、そのためには発芽率の向上や、発芽直後の病害虫(立枯病、テンサイトビハムシ・テンサイモグリハナバエによる虫害)防除対策、多大な労力を要する間引き作業の省略、除草法の改良、栽植密度の最適化、施肥改善等による初期生育の向上、等が必要であることが示された。発芽率の向上に関しては、稲野ら(2006a; 2006b; 2007)および吉村・白旗(1997)によって播種時の鎮圧の改良法が提案されており、また発芽直後の病害虫防除については、立枯病にはヒドロキシイソキサール剤、虫害にはイミダクロプリド剤、の種子粉衣が有効であることが示され(佐藤ら, 1995; 妹尾ら, 1996; 1998)、さらにこれらの技術を組み合わせた点播播種機による無間引栽培が可能であることが明らかにされた(箱山・川口, 1994; 新妻ら, 1997; 妹尾ら, 1996; 杉山ら, 1994; 山田ら, 1995; 吉村ら, 1997)。除草法の改良については、農家実態としては手取り除草が多い問題点が指摘され(大野ら, 1993)、これを受けて最適な薬剤の組み合わせや散布タイミング、中耕法などが示された(梶山, 1997; 妹尾ら, 1998; 手塚ら, 1997; 有田・越智, 2002)。栽植密度については、北海道で一般的な畦幅60~66cmに対し、ヨーロッパで広く普及している45~50cmと畦幅を狭くした栽培法(狭畦栽培)の最適な栽植密度と増収効果が明らかにされた(有田ら, 1999; 柏木ら, 1999)。

ところが施肥改善等による初期生育の向上については、むしろ近年道内各地において初期生育障害の発生が多数報告され(堂本ら, 1994; 伊槻ら, 1998; 新妻ら, 1997)、被害程度が甚だしく廃耕にいたる場合もしばしば認められたことから、原因究明と改善のための研究を行う必要が生じた。

直播栽培テンサイの初期生育障害に関する既往の報告では、いずれも初期生育障害の発生要因は主に土壤酸性ではないかと推察されている(堂本ら, 1994; 伊槻ら, 1998; 新妻ら, 1997)。田中・早川の研究では(1974; 1975a; 1975b)、テンサイの耐低pH性は“最弱”で、耐Al性は“弱”であり、これらを総合した耐酸性は“弱”と分類されていることから、初期生育障害の主要因は土壤酸性である可能性がある。しかし、酸性土壤に当てはまらない圃場で初期生育障害が発生した場合があることや(堂本ら, 1994)、直播栽培テンサイは条作施肥による濃度障害に弱いことが指摘されていることから(増田, 1997)、濃度障害を併発している場合も考えられるので、これらのことを詳細な調査研究によって明らかにする必要がある。

さらに、土壤酸性や濃度障害が初期生育障害の原因であると仮定すれば、両者に対する改善法に関する研究が必要である。土壤酸性については、北海道では酸性矯正法が普及し石灰質資材が潤沢であるはずなのに土壤が酸性化しているとの指摘があり、この原因はジャガイモそうか病等の、高pHで発生が助長される土壤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ためと見られている（二口ら，1997；佐藤，1994；山神，1997）。すなわち、土壤酸性に弱いテンサイと土壤酸性が望ましいジャガイモを含んだ輪作体系内で、いかに土壤pHを制御すべきかは大きな問題であり、検討が必要である。次に濃度障害については、直播栽培テンサイは作条施肥による濃度障害に弱いことが指摘されており（増田，1997）、ヨーロッパで採用されている全層施肥や分施などの根圏域の肥料濃度が極端に高まらない施肥法によって初期生育を改善できる可能性があるが（笛木・有田，2003）、北海道においては十分検討されていない。

第2節 目的

前述の第1節3)で述べたことから、本研究では、道内各地で多発した、移植および直播栽培テンサイの初期生育障害の発生要因を明らかにするとともに、その改善技術を打ち出すことを目的とし、以下の検討を行った。

1) テンサイにおける初期生育障害の発生要因の解明

まず第1に、移植および直播栽培テンサイの初期生育障害について実態調査やいくつかの実験を行い、その発生要因を検討した。その結果、初期生育障害の主な発生要因は、第1に土壤酸性、直播テンサイの場合はさらに作条施肥による濃度障害、が指摘された。ここでは特に土壤酸性に着目し、土壤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に着目し、直播テンサイの初期生育に及ぼす土壤要因の影響を詳細に検討した。

2) 施肥窒素の硝酸化成に影響を及ぼす要因の解析

直播テンサイにおいては作条施肥による濃度障害も初期生育障害の一因と考えられたことから、直播テンサイの窒素施肥改善の必要性が指摘された。窒素施肥を改善する上で重要とみなされた硝酸化成について培養実験を行い、硝酸化成に与える添加窒素濃度、窒素の種類、土壤pH、土壤有機物含量の影響について検討した。

3) 全層施肥による直播テンサイの窒素施肥改善

直播テンサイの作条施肥による濃度障害を回避するために、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。ここでは解析試験（コンクリート杯試験）や現地実証試験を行い、全層施肥の初期生育改善効果や収量性・窒素吸収特性について検討した。

4) 分施による直播テンサイの窒素施肥改善

直播テンサイの濃度障害回避に有効なもう一つの施肥法・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施肥法）を確立するために、杯試験によって最適な基肥窒素量（作条基肥窒素量）および最適な施肥位置を検討した。ついで通気培養実験によって、表面施肥した窒素のアンモニア揮散による損失程度を検討した。以上により得られた分施の手順（播種時の作条基肥窒素量：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）に基づいて現地試験を行い、分施の初期生育改善効果や収量性・窒素吸収特性について検討した。

5) 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

直播テンサイの窒素施肥改善に有効と判断された全層施肥と分施の有効性は、降水条件によって左右される可能性がある。特に全層施肥は多量の降水によって窒素が流亡しやすい可能性がある。そこで、灌水によって2つの降水条件を設け、全層施肥、分施、作条施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。

第3節 砂糖原料作物テンサイの誕生と我が国への導入・発達史

1) 砂糖原料としてのテンサイの誕生（北海道てん菜協会，2006；増田，1997；津田，1988より引用）

テンサイが砂糖の原料として利用可能となったのは200年以上前のことである。ドイツの化学者A. S. Marggrafは1747年に初めてテンサイから砂糖を分離することに成功し、次いでF. C. Achardが1799年に11ポンドの砂糖の製造試験に成功したのに続き、1802年にはシレジアにテンサイ工場が建設された。

その後、ナポレオンの大陸封鎖令（1806～1813年）によって西インド諸島からの砂糖輸入が途絶えたドイツ、フランスなどで砂糖を自給する必要が生じたのがテンサイ糖業の振興につながり、1850年頃までにテンサイ糖業

の基礎が確立された。

2) 明治時代におけるテンサイ糖業の導入と破綻 (北海道てん菜協会, 2006より引用)

北海道において最初にテンサイが栽培されたのは1871年(明治4年)、札幌官園においてである。開国直後の当時、明治政府は富国強兵策と殖産興業策の2大方針を掲げ、この方針に沿った近代的基幹産業育成の一環として製糖産業を計画した。また北海道開拓使も、北海道の開拓に当たり稲単作を危険視し、欧米型の畑畜混同輪作方式の積極的導入を掲げ、テンサイを寒冷地畑作の適地作物と位置付けた。これらに基づき、北海道への官営製糖工場の設置とテンサイの栽培奨励が行われた。

しかし、当時の粗放的な農業経営では、高度集約的なテンサイ栽培は容易でなかったこと、多労作物の割に価格が安かったため農家の栽培意欲が低かったこと、道路事情(特に秋口の泥濘)が悪く運搬の出費が多かったこと、家畜が少なく副産物であるビートパルプやビートトップの飼料利用も進まなかったこと、などのため、栽培面積は振るわなかった。また、1891~1892年(明治24~25年)には干ばつ・虫害・輸入種子の遅着など災害が続いた。さらに金融機関の破綻(1892年:明治25年)に続き、戦勝(日清戦争)に伴う台湾領有(1895年:明治28年)によって砂糖産業が甘蔗糖へ移行したことによって、1896年(明治29年)をもって一般農家によるテンサイの栽培は道内から一旦姿を消した。

3) 大正時代におけるテンサイ糖業の再開(北海道てん菜協会, 2006より引用)

1914年(大正3年)、第1次世界大戦が勃発し、当時世界の産糖量の半ばを占めていたテンサイ糖の生産地であるヨーロッパが戦場となり、主産地各国は荒廃を極めた。このため、砂糖は世界的に不足を招き、糖価は日を追って異常な高騰を続けた。我が国でも精糖各社は増産に関心を強めたが、耕地が狭小な台湾は既に生産の限界にきていたため、砂糖の生産拡大を目指して、再び北海道のテンサイが注目された。

第1次大戦終了直後の1920年(大正9年)、十勝農事試験場におけるテンサイ栽培試験の好成績と、同地方の広大で輪作可能な土地資源を背景に、十勝国河西郡大正村河西(現・帯広市)には北海道製糖株式会社帯広工場、同国上川郡人舞村(現・清水町)には日本甜菜製糖株式会社(旧)清水工場が設立された。この両社は、明治時代の失敗を教訓として活かし、工場付属の直営農場を経営、これを核として工場に近接する一般農家にも栽培を委託することで集中的な原料確保を可能にし、さらに専

用鉄道を敷設することで輸送を容易にした。この結果、テンサイの作付面積と収量(根重)は順調に増え(図I-1)、テンサイ生産は軌道に乗り始めた。

しかし、第1次大戦後の世界恐慌により砂糖価格が暴落し、両社は設立当初から経営困難に陥った。1923年には日本甜菜製糖株式会社(旧)が明治製糖株式会社に吸収合併され、北海道製糖株式会社も1930年(昭和5年)には規模縮小を余儀なくされた。このような事態の最中、北海道庁は、テンサイは従来の取奪粗放的な北海道農業を改善するための有畜畑作農業を推進する上で重要な作物であるとし、1922年(大正11年)産業部に糖務課を設置するとともに、北海道農事試験場にも糖務部を新設し、さらに甜菜耕作改良補助金を交付するなど、多額の予算をつぎ込んで試験研究調査や指導奨励・助成業務を推進し、テンサイ糖業の破綻を防いだ。

4) 昭和初期におけるテンサイ糖業の発展(北海道てん菜協会, 2006より引用)

1927年(昭和2年)、20カ年にわたる北海道第二期拓殖計画がスタートしたが、この中で農業政策は、土地改良・有畜奨励と並んで糖業奨励が三本の柱として挙げられ、これに基づき、土地改良によるテンサイ作付け可能地の拡大、ビートトップ・ビートパルプによる有畜農業の推進、ライムケーキの施用と家畜の糞尿など有機物の土地還元による土地改良および栽培改善、の3つが取り組まれた。

その後1930年(昭和5年)には農業恐慌によって農産物価格が暴落したが、テンサイの低落率は軽微であった。さらに1931~1935年(昭和6~10年)には連続的な冷害凶作に見舞われたにもかかわらず、テンサイには被害が少なかった。これらのことから、テンサイは価格安定作物かつ耐冷作物であると広く認知され、全道的に栽培面積が急増し、1936年(昭和11年)には18,900haにまで栽培は拡大した(図I-1)。

5) 日華事変・太平洋戦争下そして終戦時におけるテンサイ糖業の衰退(北海道てん菜協会, 2006より引用)

1937年(昭和12年)に始まった日華事変と1941年(昭和16年)に勃発した太平洋戦争により、農村労働力は徴用され、肥料等農業資材も窮迫し、多労・多肥作物とされたテンサイ栽培は大きな打撃を受け、栽培面積・収量(根重)ともに著しく低落した。この間、製糖工場を航空機燃料用ブタノール製造工場に転換することにも着手されたが、その途中で終戦(1945年;昭和20年)を迎えた。その後1949年(昭和24年)までは厳しい食糧難のた

め配給肥料と労働力は主食の確保に当てられ、テンサイ栽培は資材と労働力の不足によって低調を極めた（図 I—1）。

6) 戦後のテンサイ栽培の復興（北海道てん菜協会，2006より引用）

太平洋戦争後、台湾・南洋諸島を失い、奄美大島・沖縄も米国の占領下にあった我が国は、砂糖需要のほとんどを輸入に依存しなければならなくなったため、国内における砂糖生産の増大が極めて重要となり、テンサイの生産振興が本格的に取り組みされた。テンサイに対する助成制度が1949年（昭和24年）に復活したのを始め、各種法整備が急がれたのと同時に、1951年（昭和26年）にはチリ硝石の輸入が再開され、さらに多収で褐斑病抵抗性の強いGW系品種が導入されるとともに生産者の栽培意欲も向上し、1960年（昭和35年）頃には栽培面積は約40,000ha、収量（根重）は約25t ha⁻¹に達した（図 I—1）。

7) 紙筒移植栽培の開発と普及による飛躍的進歩（北海道てん菜協会，2006より引用）

それまでテンサイの栽培法は全て直播栽培であったが、日本甜菜製糖株式会社が研究開発を続けていた紙筒による移植栽培が1962年（昭和37年）に普及に移された。この紙筒移植栽培は安定多収をもたらしたことから急速に普及し、1973年（昭和48年）には、移植率は78%、収量（根重）は約48t ha⁻¹、栽培面積は61,000haを越えるなど飛躍的な進歩を遂げた（図 I—1）。その後は、オイルショックと狂乱物価のあおりで一時的（1974～1977年；昭和49～52年）作付け面積が40,000ha代に落ち込んだものの、以降は回復し、1984年（昭和59年）には、作付け面積は最高の75,117haを記録し、収量（根重）は約54t ha⁻¹と世界の最高水準に達した（井村，1999）。

8) 砂糖需要の停滞・農業の国際化の進展と計画的テンサイ生産へのシフト（北海道てん菜協会，2006より引用）

テンサイ生産体制がほぼ整った1980年代には、皮肉にも国内における砂糖需要の停滞が始まった。また、国際的な貿易自由化の動きが活発化し、1986年にはガット・ウルグアイ・ラウンド農業交渉が開始された。このうち加糖調整品については、「農作物12品目に関する日米合意」により「その他の加糖調整品」が1990年（平成2年）に自由化され、加糖ソルビトールの輸入が急増したために国内砂糖需要を圧迫した結果、テンサイ生産目標面積を引き下げざるを得なくなり、栽培面積の減少につ

ながった（図 I—1）。また1998年（平成10年）に政府が公表した「農政改革大綱」において、砂糖・甘味資源作物に関しては、「国産砂糖の価格競争力の回復を図るため、価格形成の仕組みにおける関係者の協同した取り組みを具体化するとともに、その状況に応じた担い手の経営安定対策を検討する」との方向が示された。さらに1999年（平成11年）に施行された「食料・農業・農村基本法」では、食糧自給率の向上・食料の安定供給確保・市場原理を重視した価格形成などの理念が明確にされており、2000年（平成12年）には同法を具体化する基本的な計画（食料・農業・農村基本計画）も示された。同基本計画は2005年（平成17年）に改訂され、この中でテンサイの「平成27年度における生産努力目標」を、作付け面積66,000ha、生産量366万t、テンサイ糖生産量64万t程度とし、この目標達成に向けて関係者が取り組むべき課題として、①直播栽培技術等による省力・低コスト化、②高性能機械化体系の確立、③需要動向に応じた作付け指標による計画的な生産の推進、が掲げられている。

9) 品目横断的経営安定対策と日豪FTA交渉の開始がテンサイ生産に与える影響

そして最近では、2007年度から経営所得安定対策等大綱に基づく品目横断的経営安定対策が実施され、てん菜生産者に対する政策支援は、これまでの全農家を対象とした品目別の価格対策から、支援を担い手に限定し経営全体に着目した対策に移行した。品目横断的経営安定対策には、諸外国との生産条件の格差を是正するため、「過去の生産実績に基づく支払い」と「毎年の生産量・品質に基づく支払い」が導入されており、またこれら「支払い」の財源は、国際的に合意が形成されている重要品目に関する関税である（花岡，2007）。このような中、特定の国の間で交渉を進めるFTA（Free Trade Agreement）/EPA（Economic Partnership Agreement）について、2006年12月、砂糖をはじめ、小麦、牛肉、乳製品など北海道の重要品目と競合が強いオーストラリアとの政府間交渉（日豪FTA交渉）の開始が合意された。この交渉の末、仮に重要品目の関税が撤廃されると、砂糖ではテンサイの生産、製糖工場、地域雇用を含め約2,500億円程度の生産が減少し、さらに乳製品や小麦等を含めると合計で1兆4,000億円程度の生産が減少すると試算され、本道農業が甚大な打撃を受けるだけでなく、土壌や土地資源ならびに地域経済や社会の崩壊につながるものが危惧されている（花岡，2007）。

第4節 研究史

1) 道内畑土壌における土壌酸性の実態に関する既往の研究

北海道には強酸性土壌が広く分布し、古くから酸性矯正の必要性が認知されてきた。既に第2次大戦前には酸性土壌改良補助事業・石灰配給事業により31万haの酸性改良が実施された(斉藤, 1987)。その後、1948年頃に行われた全道にわたる酸性土壌の程度別分布面積調査では、酸性矯正を要する弱酸性以上の畑地は約14万haで畑地全面積の約23%、このうち矯正を急ぐ強酸性の畑地は約7万haで12%を占めることが明らかになった(小川, 1982)。この調査を受け、1947~1967年には酸性土壌改良事業により56万haの酸性改良が実施され、さらに開拓地土壌改良事業、各種の基盤整備事業や営農努力により酸性改良は進んだ(斉藤, 1987)。その結果、1977年時点での道内畑土壌の土壌pHの平均値は、沖積土で6.0、火山性土で5.9、洪積土5.8、泥炭土5.8であり(水野ら, 1977)、現行の北海道施肥ガイドにおける基準値5.5~6.5(北海道農政部, 2002)からみても適正範囲内に達していたことが窺われた。

ところが、1990年代には、土壌の酸性化によると思われるテンサイの生育障害が、十勝地方の直播栽培を中心に頻発した(堂本ら, 1994; 二口ら, 1997; 早坂ら, 1994; 伊槻ら, 1998; 新妻ら, 1997)。これらの調査結果をみると、生育障害の発生した圃場のpHは概して5.5未満と低く、5.0を下回る場合も少なくなかった。山神(1997)は、十勝地方の火山性土のpHが、1983年には平均5.9であったのが、1995年には平均5.4に低下したことを報告している。これは、高pHで発生が助長されるジャガイモそうか病やテンサイそう根病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たためと見られている。

2) 酸性土壌の改良法に関する既往の研究

我が国では、酸性土壌の改良法について古くから研究が行われてきた。大工原(1911; 1912)は、土壌酸性の本体がアルミニウムであることと、全酸度(3y_i)を測定しこれを中和する石灰質資材量を求める方法(大工原法)を示した。大工原法は国内外を問わず普及し(熊沢, 1982)、天野(1921; 1929)も酸度を測定しこれを中和する石灰質資材の施用がテンサイの増収に有効であることを述べている。

ところが、1950年代に酸性土壌に関する全国的な調査が進められる中で、大工原法では投入すべき石灰質資材量を過少評価する事例が全国各地から報告され、より精

度の高い緩衝曲線による石灰質資材所要量の算出法(緩衝曲線法)が採用されるようになった(今井ら, 1984)。この当時(1950~1970年代)の緩衝曲線法は、土壌の水懸濁液に水酸化ナトリウム溶液を添加して緩衝曲線を作成し、水酸化ナトリウムの中和所要量を炭酸カルシウムに換算するものであった。この後、千葉・新毛(1977)は、当時(1950~1970年代)の緩衝曲線法には、水酸化ナトリウムと炭酸カルシウムの土壌中での中和反応の違いに由来する誤差が生じることを指摘し、炭酸カルシウム添加・通気法による中和石灰量の測定法を提案した。この方法は、労力がかかるが目標pH値とする炭酸カルシウム量を精度良く決定することが可能である。その他、袴田ら(1980)は道東の未耕地と草地を対象に、pH(H₂O)、腐植含量、地域、リン酸吸収係数の4要因を使用する数量化。類の導入により、炭酸カルシウム所要量の簡易な予測が可能であることを示した。

一方、海外においても酸性土壌の改良法に関する研究は多数行われた。これらを大別すると、①換算図表を用いる方法、②土壌酸度による方法、③土壌中のアルミニウムの測定による方法、の3つである。

①：換算図表とpH(H₂O)値から石灰質資材所要量を算出する方法としては、日本でも用いられるArrhenius氏表やオランダで用いられる石灰施用係数が提案されている(今井ら, 1984)。これらは簡便ではあるが、その精度には限界がある。

②：Mehlich(1942a; 1942b)は土壌のpHと塩基飽和度の関係を類型化し、この関係を利用して炭酸カルシウム所要量を求める方法を提案した。その後、各種の緩衝液を用いて炭酸カルシウム所要量を求める方法がAdams and Evans(1962)、McClean et al.(1978)、Shoemaker et al.(1961)、Woodruff(1947)、Yuan(1974; 1976)などによって多数考案された。

③：Kamprath(1970a)は1N塩化カリウム溶液で抽出される交換性アルミニウム量、Evans and Kamprath(1970)、Adams and Lund(1966)、Pavan et al.(1982)は土壌溶液中のアルミニウム濃度(活動度)、を基準に炭酸カルシウム所要量を定めるべきであることを提唱している。

以上の研究結果を勘案し、現在、北海道の営農指導では炭酸カルシウム添加・通気法による中和石灰量の測定法が採用されており、簡便法としてArrhenius氏表も補助的に用いられている(北海道立中央農業試験場・北海道農政部農業改良課, 1992)。

3) 土壤酸性の改良目標値の設定に関する既往の研究

土壤酸性の改良目標値は、多くの場合pH値で設定されてきた。Mehlich (1942a; 1942b), Woodruff(1947) およびYuan (1974; 1976) はpH7.0, Shoemaker et al. (1961) はpH6.8, Adams and Evans (1962) はpH6.5, を改良目標pH値として提案している。これらはいずれも、pHが中性付近に作物の最適pHがあり、さらに土壤中の養分の有効化や硝酸化成等の微生物活動が活発化し作物生育に有利である、という考えに基づいている。

これに対し、Kamprath (1970a) およびReeve and Sumner (1970) が提案した交換性アルミニウム量またはEvans and Kamprath (1970) が提案した土壤溶液中アルミニウム濃度を用いる方法の場合は、酸性土壤の作物生育阻害要因はアルミニウムであって、これを除去するために酸性矯正を行うという考えに基づいており、pHの場合とは根本的に考え方が異なる。

この異なる2つの考え方について、Mclean (1970) とKamprath (1970b) は1970年にSoil Science Society of America誌上において論争を展開している。Mclean (1970) はアルミニウムの不活性化だけでなく、リン酸・銅・亜鉛等の養分の有効化や窒素代謝等の微生物活動を活発にするためにも土壤のpHを中性付近(pH6.5)にすべきであると主張したのに対し、Kamprath (1970b) はpHを6.5に引き上げるのを目標とすべきでなく、あくまでアルミニウム等の毒性を中和することを酸性改良の目標とすべきであると主張した。

このような意見の対立が存在することに対し、1984年に田中(1984)は、酸性改良においてアルミニウム障害を消去することは第一条件であり、pHを5.5程度にすれば交換性アルミニウムは中和されアルミニウム障害は解消でき、それによって一応の作物栽培は可能となるが、さらに作物の最高収量を得ようとすれば、pHをより高めて土壤条件を理想的にする必要がある、と述べている。以上の経緯を踏まえ、北海道農政部(2002)は畑土壤のpHの基準値を5.5~6.5に設定している。

4) 酸性土壤の作物生育阻害要因とそれらに対する作物の耐性に関する既往の研究

但野・安藤(1984)は、酸性土壤における作物の生育阻害要因を整理し、(a)酸性そのものによる阻害;酸性条件下で土壤中の溶解度が高まる(b)アルミニウムや(c)Mnなどによる高濃度阻害;酸性土壤が生成する環境条件に加えて、酸性条件そのものによって、その土壤における存在量が減少し、または、その作物に対する可給度が低下する(d)リン酸や(e)カルシウム・マ

グネシウム・カリウムなどの塩基の不足;および、(f)亜鉛、銅、ホウ素、モリブデンなどの微量元素の欠乏;さらに酸性条件下で微生物の活性が変化するため起こる(g)硝酸化成作用や窒素固定作用の減退など、に分けている。さらに但野・安藤(1984)は、膨大な文献を引用し、耐酸性の作物種間差を上記の要因ごとに整理した。その結果のうち、テンサイについては、田中・早川の研究(1974; 1975a; 1975b)が引用されており、これを見るとテンサイの耐低pH性は“最弱”で、耐Al性は“弱”であり、これらを総合した耐酸性は“弱”と分類された。他の畑作物の耐酸性については、イネ科のエンバク、コムギ、トウモロコシはいずれも“中”、マメ科のダイズ、菜豆も“中”であったが、ショウズは“弱”に分類された(田中・早川1975b)。すなわち、テンサイは畑作物の中でも耐酸性が弱いことが明らかにされている。

5) 土壤酸性と土壤病害に関する既往の研究

ジャガイモそうか病は北海道で古くから発生が認められるジャガイモの代表的な難防除土壤病害の1つであり、北海道では1980年代以降の発生地域の拡大、被害の増加に伴い、発生実態や病原放線菌の同定・定量法、防除法などに関する試験研究が取り組まれてきた(水野・吉田, 1994; 鈴木ら, 2000; 田中, 2000)。従来、そうか病の発生は土壤pHの上昇によって著しく助長されることから、そうか病を助長する主たる要因は高pHと考えられてきた(Odland and Allbritten, 1950)。これに対し水野・吉田(1994)は、そうか病の発生が土壤pH5.2~5.3で抑制される土壤(抑制土壤)もあれば、土壤pH5.0以下でも発生する土壤(多発土壤)が存在することに注目し、これらを比較したところ、抑制土壤では土壤pH5.3で置換酸度 y_1 が7~8に達するのに、多発土壤では置換酸度 y_1 が7~8に達する土壤pHは4.5と低かったことから、置換酸度 y_1 を塊茎肥大期(そうか病感染期)に7~8に上げればそうか病の防除は可能であることと、硫酸第1鉄や硫酸アルミニウムなどの酸度調節資材が有効であることを報告した。また、志賀ら(2000)は、 y_1 が5以上ではそうか病発生圃場の出現頻度が低いことと、pHと y_1 の関係は土壤型ごとに指数関数で近似できること、に基づき、酸度調節資材によって y_1 を5以上にするための目標pH値を道内の主要土壤型ごとに検討した。その結果、洪積土・沖積土・泥炭土についてはpHを5付近まで下げれば y_1 は5以上となるが、火山性土については y_1 を5以上とするためのpHは5よりも大幅に低いことが明らかになった。

他方、テンサイの重要土壤病害の一つであるテンサイ

そう根病は、1970年に道内各地に突然多発し、局地的にその被害が極めて大きく壊滅的であったため、原因および発生実態の解明、並びに防除法に関する試験研究が取り組まれた(阿部, 1987; 神沢, 1975)。発生実態を解析した結果、発生源は主として育苗時の感染によるものであり、また土壌pHの高い地点で発病度が高かったことから、高pHが同病の発生を助長することが推察された(阿部, 1987)。この対策として、育苗土に対する防除技術が確立され、また本圃については土壌pHを5.3まで低下させるとそう根病菌の感染がなくなることが認められた(阿部, 1987)。

現在、北海道施肥ガイド(北海道農政部, 2002)では畑土壌におけるpHの基準値を5.5~6.5とし、ジャガイモそうか病やテンサイそう根病の恐れがある場合はpHを5.5~6.0とするよう推奨している。しかし、上記土壌病害を抑制する観点からするとpH5.5は高過ぎ、逆にアルミニウム障害を消去する観点からするとpH5.5は下限値である(田中, 1984)。これらのことは、畑輪作において土壌pHを適正に管理することが容易ではないことを示唆している。

6) 窒素施肥による土壌の酸性化に関する既往の研究

窒素施肥による土壌の酸性化に関する研究としてはジャガイモ(早田・矢野, 1982; 矢野ら, 1982)、クワ(稲松ら, 1991)、トウモロコシ(Jolley and Pierre, 1977; Pierre et al., 1971; Robbins and Voss, 1989)、コムギ(Rasmussen and Rohde, 1989)、テンサイ(古館ら, 2000; 早坂ら, 1994; 井村, 1999; 伊槻ら, 1998)、牧草(寶示戸, 1994)など多くの報告がなされており、いずれの場合にも施用する窒素肥料が土壌の酸性化の主原因である点が共通している。

橋本・中村(1971)および橋本ら(1974a, 1974b)は、施肥による土壌酸性化の影響を、施肥直後に起こる土壌と肥料との化学的反応、続いて起こるアンモニウム態窒素の硝酸化成、さらに続いて起こる水による酸性物質の溶脱、の3過程に分け、体系的に論じた。すなわち、硫酸塩・硝酸塩・塩化物のような塩類肥料を土壌に施用した場合、肥料の組成成分である陽イオンによって土壌固相の交換基からプロトンが交換・放出されて一時的にpH(H₂O)が低下するが、水による酸性物質の溶脱によって元のpH(H₂O)レベルに回復する。一方、尿素も含めたアンモニウム態窒素が硝酸化成すると新規のプロトンが生じるためpH(H₂O)およびpH(KCl)ともに低下し、酸性物質が水で溶脱されても元のpH(H₂O)レベルにまでは回復せず、さらに、窒素施肥—

硝酸化成—溶脱が繰り返されることによって土壌の酸性化が進行することを述べている。一方、硝酸化成によるプロトンの放出量は、外部から添加されたアンモニウム態窒素と土壌中の有機態窒素では異なることが報告されている(切替・波多野, 2000; Schmel et al., 1984; Van Breemen et al., 1983)。すなわち、



1 MのNH₄⁺を基質とした硝酸化成は2 MのH⁺を放出し(式(1); Van Breemen et al., 1983)、有機態窒素を基質とした硝酸化成は1 MのH⁺を放出する(式(2); 切替・波多野, 2000; Schmel et al., 1984)。また、有機態窒素からアンモニア化成を経て硝酸化成した場合も、結果的に1 MのH⁺を放出する(Schmel et al., 1984)。さらに、これら2つの硝酸化成は土壌中で同時に進行し、硝酸化成由来のプロトン放出量は、pH(KCl)および交換性カルシウムと正の相関を持つことが明らかにされている(切替・波多野, 2000)。これらは森林土壌に関する知見ではあるが、畑土壌にアンモニウム態窒素を施肥することは有機物由来窒素を施用するよりも土壌の酸性化に対するインパクトが大きいことが窺われる。

ところで、テンサイの現在の窒素施肥量は約180 kg ha⁻¹と畑作物の中で最も多く(図 I—1)、また根の近傍に条施(作条施肥)されるため、施肥後1~2ヶ月すると硝酸化成作用によって株間土壌のpHが最大で1程度低下することが報告されている(古館ら, 2000; 石丸ら, 1997)。さらにこの対策として、防散炭カルや粒状生石灰等の石灰質資材の作条施用は、株間土壌のpH上昇や石灰欠乏症状の改善、そして収量の増加に有効なことも報告されている(古館ら, 2000; 井村, 1999; 石丸ら, 1997)。

7) 施肥窒素の硝酸化成に関する既往の研究

施肥窒素の硝酸化成に関する研究の歴史は古く、既に1929年の時点で、土壌中の硝酸化成作用が緩慢な場合に硝酸態窒素肥料(チリ硝石)の施用が有効であると述べられている(天野, 1929)。このように、寒地北海道の畑作では施肥窒素の硝酸化成が初期生育の良否に大きく影響するため、1950~1960年代には硝酸化成に関する一連の研究が行われた(坂井, 1956; 1959; 1960a; 1960b; 1960c; 1960d; 1960e; 1960f; 坂井・竹内, 1961; 坂井ら, 1959)。坂井ら(1959)は、北海道農業試験場圃場(当時、札幌市琴似に所在)の沖積土壌を用いた実験で、堆肥が20年以上連用された土壌は堆肥施用のない土壌よりも約50%硝酸化成が進みやすいこと、

および石灰質資材の施用によって硝酸化成とテンサイの初期生育の両方が促進されること、を報告した。ついで、十勝地方の火山灰土壌の硝酸化成について重点的に研究がなされ、pHが中性付近で硝酸化成は良好であること（坂井, 1959）、硝酸化成は乾性火山性土壌（原著では乾燥地型）と湿性火山性土壌（原著では湿潤地型）で明らかに異なり、未開墾条件では乾性火山性土壌の硝酸化成は湿性火山性土壌よりも明らかに劣るが、既に開墾された条件では両土壌に差はなく、未開墾条件における硝酸化成の差は硝酸化成菌数の差によるものであること、が報告された（坂井, 1960a）。さらに坂井（1960b；1960c）は、硝酸化成能が低く硝酸化成菌数の少ない乾性火山性土壌においても、硝酸化成菌の接種や石灰質資材の施用などによって硝酸化成能を高めることが可能なことを明らかにした。

一般的に、硝酸化成菌は環境条件の変化に極めて敏感なため、土壌の硝酸化成能の大小はその土壌の理化学的性質の総合的な状況を反映するので、硝酸化成の旺盛な畑土壌はよい土壌であると考えられている（土壌微生物研究会, 1981）。硝酸化成を規制する主な環境要因は、

(a) 酸素, (b) 土壌水分, (c) pH, (d) 温度, (e) 硝酸化成菌数, (f) 添加窒素源の濃度, (g) 添加窒素源の種類, のように整理されている（Alexander, 1977；土壌微生物研究会, 1981；Follet et al., 1981）。(a) 酸素；硝酸化成菌は好気性菌であるから、土壌の通気性は重要な要因の一つであり、酸素分圧が約2.1%の時に硝酸生成量は半減する（土壌微生物研究会, 1981）。(b) 土壌水分；硝酸化成の最適土壌水分は最大容水量の50～60%で、これより多くても少なくとも硝酸化成速度は低下する（Alexander, 1977；土壌微生物研究会, 1981）。(c) pH；一般に最適pHは7前後であり、pH5以下および10以上では著しく阻害される（土壌微生物研究会, 1981）。(d) 温度；硝酸化成の適温は一般に25～30℃とされ、15℃以下あるいは40℃以上では著しく阻害される（土壌微生物研究会, 1981）。

(e) 硝酸化成菌数；硝酸化成は硝酸化成菌数に大きく影響され、例えば低温でも硝酸化成菌数が多い場合には硝酸化成が比較的早く進む場合がある（土壌微生物研究会, 1981）。(f) 添加窒素源の濃度；土壌にアンモニウム態窒素が高濃度に添加されると硝酸化成が阻害されることは古くから知られており（Duisberg and Buehrer, 1954；Eno et al., 1955；坂井, 1956）、Eno et al.（1955）は添加窒素濃度が300mg kg⁻¹を越えると硝酸化成が阻害されることを報じた。Wetselaar et al.

（1972）は、作条施肥（Band application）による窒素肥効の最適化に資するために尿素と硫酸アンモニウムを

用いた培養実験を行い、添加窒素濃度が3,000mg kg⁻¹を越えると硝酸化成は全く生じず、3,000mg kg⁻¹以下でかつ土壌pHが7以下なら硝酸化成が生じることを示し、さらにこれらの知見は硝酸化成を作条施肥によって制御する上で有用であるとした。Grewal et al.（1999）は、作条施肥（Band application）やLarge pellet, Nest placementなどの手法（Yadvinder-Singh and Beauchamp, 1987；Yadvinder-Singh and Beauchamp, 1988；Yadvinder-Singh et al., 1994）は、土壌中で窒素が局所的に高濃度となるため硝酸化成の抑制に有効であり、窒素の損失を回避し作物による窒素利用率を向上するために有効な技術に成り得るが、その適用に際しては、窒素の種類や気象、土壌、温度、作物種などの条件に応じて最適な方法を研究する必要があると報告している。

8) 畑作物の施肥位置に関する既往の研究

我が国の畑作においては、古くから鋤を用い、あるいは馬に引かせた畦立て機を用いて作条を切り、この作条に施肥し、その上に多少覆土するか、または土壌と肥料を混合した後、その上に播種する作条施肥が一般的であった（天野, 1929；石塚ら, 1962）。作条施肥は少量の肥料を作物に効果的に吸収利用させるためには合理的であるが（石塚ら, 1962）、多量の施肥を行う場合、種子と肥料が混合あるいは接触することにより濃度障害を引き起こし、発芽や初期生育を害する可能性があることが古くから知られていた（天野, 1929）。アメリカにおいては、既に農業の機械化が進んでいた1930年代から1950年代にかけて、肥料の成分濃度が最高で約3倍に高くなったため、作物の濃度障害を回避するための研究が必要になった（Werner and Stanford, 1958）。このように、施肥位置を最適化するための研究は古くから盛んに行われてきた。

Werner and Stanford（1958）は、アメリカにおける研究事例をまとめて各作物の最適な施肥位置を提示しており、それぞれ、コムギでは種子側方2.5～5.0cmで種子のやや下方、エンバクでは種子側方2.0cmで種子の下方4cmの位置、トウモロコシでは種子側方5cmの位置で種子の下方5cm、牧草類では種子の下方2.5cm、と報告している。ポット試験による研究では、コムギの施肥深さは5cmよりも25cmで高い収量が得られており（Alston, 1976）、またダイズ（Takahashi et al., 1991）や、コムギおよびソルガム（Strong et al., 1992）でも窒素の施肥位置を深くすることで作物の窒素吸収が向上したとする研究例がある。天野（1929）は、テンサイ（直播）は根が1.5mに達するほどの深根性作物であるが故

に施肥位置を深くする必要があり、施肥深さは12~18cmが最適であるとしている。林・古畑（1966）は、テンサイ（直播）の全施肥量の10分の1程度をスターターとして深さ5cm、残りを深さ12.5cm、に作条施肥すれば、発芽時の濃度障害を回避でき、増収に結びつくことを報告した。また林・古畑（1966）は、深さを2段階に分けて作条施肥する機械が存在しない問題点を指摘したが、後に村井ら（1980）はこれを可能にする分層施肥法を提案している。尾崎・桜庭（1963）は、施肥機を用いる場合のテンサイ（直播）の施肥位置は、種子位置に対して側方2.5~5.0cm、下方6.0cmが望ましいことを報告した。石塚ら（1962；1963；1964；1965；1967）は畑作物の施肥位置に関する体系的な研究を行い、北海道の春先1ヶ月間程度では、降水量に対して蒸発散量がやや多いため、施肥位置が浅い（深さ8cm未満）場合には肥料成分（カルシウム、カリウム、アンモニウム態および硝酸態窒素）が表層に集積する可能性があること（石塚ら、1962）、作物根の伸長状況は、土壤中の肥料濃度と関連が深く、ある限界濃度以上においては作物根の伸長は抑制され、根系は肥料濃度の高い施肥位置を避けて発達すること（石塚ら、1963）、窒素（硫酸アンモニウム）はリン酸・カリよりも低い濃度で作物根の発達を妨げ、大豆やテンサイでは種子直下に帯状施肥した場合、窒素施肥量150kg ha⁻¹以上で根の発達が阻害されること（石塚ら、1964）、施肥位置からのアンモニウム態窒素の拡散による作物根系の発達阻害範囲は、塩化アンモニウムの場合が最も広範囲で、硫酸アンモニウムの場合が最も範囲が狭く、尿素の場合は温度の高低によって範囲の広さが異なること（石塚ら、1965）、窒素施肥量が少ない場合には局所施肥（作条施肥）、窒素施肥量が多い場合には全層施肥、の場合に根の発達が良好であること（石塚ら、1967）、を示した。

他にも全層施肥と作条施肥の比較は多数行われている。古くPrummel（1957）は、一般的に作条施肥は全層施肥よりも収量が高いことを示した。具体的には、窒素の作条施肥によって全層施肥よりも、麦類、ジャガイモ、テンサイで1.2倍の増収、リン酸の作条施肥によって全層施肥よりも、豆類で7.5倍、トウモロコシで2.9倍、麦類で2.4倍、ジャガイモで1.9倍、テンサイで1.2倍の増収、カリの作条施肥によって全層施肥よりも、麦類で3.65倍、土壌pHの低い場合のジャガイモで1.0倍、土壌pHの高い場合のジャガイモで1.6倍、テンサイで1.0倍の増収、であった。この他、Westermann and Sojka（1996）はジャガイモ、Lehrsch et al.（2000）はトウモロコシについて、畑地かんがいを行う条件下では全層施肥よりも作条施肥が窒素吸収量と収量を向上させるのに有効で

あることを述べている。

ただし、比較的近年の直播栽培テンサイに関しては、全層施肥の収量は作条施肥と同等以上と報告されており（Christenson, 1992；永田, 1971；関口・和田, 1975）、これは後述するようにテンサイへの窒素施肥量が増加してきた経緯を反映した結果かもしれない（図I-1）。

近年の施肥位置に関する研究には、不耕起栽培における、コムギ（Fowler and Brydon, 1989；Kirkland and Beckie, 1998）、トウモロコシ（Bordoli and Mallarino, 1998；Chassot et al., 2001；Mallarino et al., 1999；Riedell et al., 2000；Vetsch and Randall, 2000；Yibirin et al., 1993）、ダイズ（Borges and Mallarino, 2000；Buah et al., 2000）について行われたものが多数ある。これらはいずれも、不耕起栽培条件における生育遅延や減収を、作条施肥によって改善しようとした研究である。また、作条施肥や点滴施肥のような局所施肥によって、コムギの生育の促進と雑草による肥料競合の抑制を狙った研究（Blackshaw et al., 2002；Kirkland and Beckie, 1998；Melander et al., 2003）や、作条施肥によるトウモロコシの根系発達の促進がネグサレセンチュウ被害の抑制につながることを示した研究（Riedell et al., 1996）、施肥位置と土壤断面内の肥料成分の分布の関係を調査した研究（Rehm et al., 1995；；Zebarth et al., 1999）、などがある。

9) 施肥窒素の施用時期がテンサイの収量と品質に与える影響に関する既往の研究

古く天野（1929）は、テンサイに施用する年間の総窒素施肥量（この場合60kg ha⁻¹）を全て基肥として与えるよりも、基肥・追肥に半量ずつ配分して分施した方が高い収量が得られ、また追肥の施用時期は6月5~10日の場合に効果が高かったが、7月以降の追肥は効果的でないことを示した。

その後増田ら（1975；1980）、井村・増田（1976；1977）および井村ら（1978）は、礫耕栽培施設を用い、窒素の給与期間がテンサイの収量と品質に与える影響を研究し、①根重においては生育期間の長短に関係なく、7月30日までの窒素給与によりほぼ最大値に達し、それ以降の窒素給与はほとんど増収に結びつかず、あるいはかえって減収する、②根中糖分については、窒素給与期間が60日以上になれば、窒素給与停止期間が遅れるほど低下する、③糖量は生育後半（8月1日~11月1日）までの窒素給与により大きく減少する、ことを明らかにした。Carter and Traveller（1981）も7月末から9月上旬は根への糖の集積が最大となる時期であるため、この

時期の窒素施肥および窒素吸収は糖量を減少させることを明らかにしている。沢田ら（1982）は重窒素を利用した圃場試験結果から、テンサイによる施肥窒素の吸収は7月中旬まででほぼ終了し、その後土壌からの窒素吸収量が増加することを明らかにした。

以上の知見から、テンサイの窒素施肥はできるだけ早期に行い、7月以降の窒素供給は抑えるべきことは明らかであるが、作付け前年の秋に施肥すると、越冬後の融雪水等によって窒素が流亡するため減収することも報告されている（石丸ら、1995）。

今野（2001）は北見農試圃場で移植栽培テンサイの窒素分施（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。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）。

10) 施肥窒素のアンモニア揮散に関する既往の研究

施肥窒素のアンモニア揮散による損失は、窒素の施肥効率（利用率）を左右する重要事項であるため研究の歴史は古く、大工原（1919）は施肥窒素がアンモニア揮散によって損失すること、その損失量は極めて大きいこともあれば無視しうるほど小さいこともあること、一般的には比較的寒冷な地域ではアンモニア揮散による窒素損失量は極めて小さく、温暖で乾燥しがちな地域では窒素損失量が大きいことを述べている。Sreenivasan and Subrahmanyam（1935）はインドの土壌を水田状態とし尿素・血粉等を施用した場合のアンモニア揮散による窒素損失は著しいことを認めたが、他方、岩田・奥田（1937）は日本の土壌（農事試験場鴻巣試験地水田および西ヶ原官舎裏畑より採取）を水田・畑両状態として硫酸アンモニウム、石灰窒素、大豆粕等を施用した場合のアンモニア揮散による窒素損失は、表面散布後放置せずに土壌と混合すれば極少ないので特に配慮する必要はないとしている。その後奥田ら（1959）は、多量のアンモニア揮散が発生すると発芽障害が生じうることを報告したが、他方ではアンモニア揮散量は施肥窒素の0～7%に過ぎないこと（三井ら、1954；阿江・尾形、1982；三木・高尾、1985）、土壌pHが7以上の場合にアンモニ

ア揮散量が著しかったが、施肥窒素の土壌混和あるいは覆土等の対策で回避可能なこと（奥田ら、1960）が示された。

一方、海外においては中国（Duan and Xiao, 2000；郝ら、1994）や欧米（Cabrera et al., 1994；Ernst and Massey, 1960；Fenn et al., 1982；Ferguson et al., 1984；Gould et al., 1986；Harrison and Webb, 2001；He, 1999；Mills et al., 1974；O' toole et al., 1985；Rawluk et al., 2001；Reynolds and Wolf, 1987；Terman, 1979；Terman and Hunt, 1964；Vlek and Stumpe, 1978；Watkins et al., 1972；Whitehead and Raistrick, 1990；1993）など高pH土壌を有する国や地域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、単に施肥窒素の損失という観点のみならず、酸性雨や水系の富栄養化といった環境問題の原因という観点からも関心が持たれている（Harrison and Webb, 2001）。

近年、日本においても家畜糞尿からのアンモニア揮散に関する報告が増えている（松村、1988；松中ら、2003；湊ら、2000、宮田・池田、2006）。

11) 北海道におけるテンサイ窒素施肥量の推移に関する既往の研究

北海道におけるテンサイの窒素施肥量は、その生産が軌道に乗り始めた1920年代には窒素として40kg ha⁻¹程度が適量とされていた（天野、1921；1929）。その後戦争が勃発する中で物資が不足し、肥料も窮迫を極めたが（北海道てん菜協会、2006）、1945年の終戦以降には肥料が流通し始め、窒素施肥量も急速に増加し、1960年代前半には平均窒素施肥量は100kg ha⁻¹に達した（図I-1）。1960年代までは直播栽培が前提であったので、窒素施肥量の増加に伴う濃度障害発生への懸念から、濃度障害を回避するための施肥位置が研究された（林・古畑、1966；尾崎・桜庭、1963）。なお1960年代の窒素の施肥標準量は100～120kg ha⁻¹である（井村、1999；増田、1997；西宗、1984）。ところが1962年以降、紙筒による移植栽培が急速に普及し直播栽培に置き換えると、窒素施肥量はさらに急速に増加し始めた（図I-1）。移植栽培は直播栽培と異なり施肥による濃度障害を受けにくく、生育期間の延長による増収効果も著しいことから（井村、1999；増田、1997）、窒素の施肥標準量も1971年には160kg ha⁻¹に増加した（井村、1999；増田、

1997；西宗，1984）。さらに長谷川・野村（1973）は、窒素施肥量を新たに見直すべく窒素用量試験を行い、窒素の施肥標準量は乾性火山性土で 200kg ha^{-1} 、湿性火山性土で $100\sim 150\text{kg ha}^{-1}$ 、沖積土で $150\sim 200\text{kg ha}^{-1}$ にすべきであると報告した。このような背景もあって、その後も窒素施肥量は増加を続け、1978～1979年には平均窒素施肥量は 196kg ha^{-1} に達した（図 I—1）。

このような窒素多肥化は、テンサイ根中の糖分を低下させるとともに、製糖上有害なアミノ態窒素を上昇させ、テンサイの品質低下をもたらしたため、1970年代後半～1980年代前半には窒素多肥を是正するための研究が多数取り組まれ（石川ら，1983；早坂・井村，1986；五十嵐・中村，1983；井村・早坂，1980；1982；1983；加川・井村，1976；向山ら，1980；増田ら，1979；西宗ら，1982a；大崎・横井，1983；秦泉寺ら，1984；堤ら，1979；吉田ら，1980），1986年の糖分取引制度移行後には、さらに多数の研究が行われた（早坂・井村，1989；井村・早坂，1987；梶山ら，1993；川村ら，1989；今野，2001；今野ら，1989；野村ら，1987；成田ら，1989；奥村ら，1989；佐藤ら，1987；高橋ら，1989；手塚ら，1993；上野ら，1986；柳沢，1989；柳沢ら，1988；吉村・野村，1989；吉澤ら，1992；1993）。これらの知見を参考に生産現場への施肥指導がなされた結果、窒素施肥量は1980年以降低下し始め、1990年には 166kg ha^{-1} まで低下したが、以降は再び微増傾向が続いている（図 I—1）。このような現状を受け、近年ではテンサイの茎葉鋤込みが大きな硝酸汚染源であり、適正な窒素施肥管理への再認識が必要であることが指摘されている（笛木ら，2005）。

12) 施肥窒素の流れ易さに関する既往の研究

数十年前から先進各国において地下水の硝酸汚染が顕在し（波多野，1999），またその主な原因は農業現場における施肥窒素や家畜糞尿等であると指摘された経緯から（波多野，1999；2002；北海道農政部，2003；三木，2002），施肥窒素の流れ易さや硝酸汚染防止に関する研究が盛んに取り組まれてきた。

施肥窒素の流れ易さについては、西宗ら（1980）が、北海道十勝地方の火山灰土壌で作期中の降雨が 543mm の条件において施肥窒素のほぼ全量が作土層（ $0\sim 18\text{cm}$ ）から流出したが、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、また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報告している。

地下水の硝酸汚染防止については、道内5支庁58地点

の農耕地浅層地下水中硝酸態窒素濃度が調べられ、土地利用状況別には水田で低く酪農や畑作で高いことが明らかにされ（佐藤・甲田，1995），また浸透流出水中の全窒素濃度も草地や水田より畑地で高いことが報告された（大村，1995）。また道央の、年間窒素施肥量 220kg ha^{-1} の灰色低地土タマネギ畑における暗渠排水中硝酸態窒素濃度の年平均値は $7.2\sim 19\text{mg L}^{-1}$ で、硝酸化成抑制剤等の濃度低減効果は判然とせず、硝酸態窒素濃度の低下には窒素施肥量を減らすことが基本であることが示された（甲田ら，1996）。三木ら（2000）は、余剰水量（年間平均降水量一年間平均蒸発散量）から、地下浸透水の硝酸態窒素濃度を 10mg L^{-1} 以下に維持しうる「硝酸態窒素残存許容量」を全道的に概算して地図化し、さらに全道的に実施した硝酸態窒素の動態調査結果から、硝酸態窒素の流れ易さを余剰水量、土性（土壌型）によって区分した。さらに鈴木・志賀（2004）は、網走地域の黒ボク土畑において、深根性作物を含む作付体系で浸透水の年平均硝酸態窒素濃度を 10mg L^{-1} 以下とするための投入窒素限界量を、 $150\text{kg ha}^{-1}\text{ year}^{-1}$ と見積もった。

ところが、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、各施肥法と窒素肥効等を比較検討した例はない。例えば、降水量が多い場合には、全層施肥では硝酸態窒素の下層土への流出を助長し窒素肥効が低下する恐れがあるが、分施はこれと逆の可能性がある（北海道農政部，2003）。これに対して、作条施肥の窒素肥効は局所施肥であるため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低下するとの指摘がある（北海道農政部，2003）。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日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する必要がある。