

寒冷地の施設栽培における
土壌診断と肥培管理法に関する研究

林 哲央

「寒冷地の施設栽培における土壌診断と肥培管理法に関する研究」

	頁
第1章 緒論	
第1節 背景と目的	1
第2節 既往の研究	6
第2章 北海道の主要産地における土壌養分と肥培管理の実態	
第1節 土壌養分の実態と問題点	12
第2節 堆肥施用の実態と土壌肥沃度への影響	28
第3章 土壌養分，特に硝酸態窒素の診断技術の改善	
第1節 空間変動に基づく土壌診断のための採取点数	33
第2節 果菜類，特にトマトの作物生育特性に基づく下層土診断法	46
第3節 葉菜類，特にホウレンソウの硝酸イオン濃度を低減するための下層土診断法	56
第4章 軟白ネギの生育特性に基づいた施肥法と土壌管理法	
第1節 軟白ネギの乾物生産および無機養分吸収特性	64
第2節 土壌硝酸態窒素に対応した窒素施肥法	75
第3節 土壌可給態リン酸に対応したリン酸施肥量	85
第5章 家畜糞尿由来堆肥の養分評価に基づく施用法	
第1節 堆肥の連用が施設土壌の理化学性に与える影響	95
第2節 堆肥の連用効果に基づく窒素減肥量	107
第3節 堆肥の施用法改善による亜酸化窒素の発生抑制	115
第6章 総合考察	121
第7章 摘要	129
謝辞	135
引用文献	137

第1章 緒論

第1節 背景と目的

1. 寒冷地の施設栽培

農業は植物の光合成産物を効率良く獲得しようとする技術であり、育種のように植物を改変したり土壌改良のように培地を改変することが、昔から今に続く主要な方法である。近代以降、ガラス等で温室を作り地上部を隔離して太陽エネルギーを閉じこめ気温を高める方法として施設栽培が考案されると、それが次第に農業技術として普及するようになった。

施設栽培ではガラスやビニールなどを用いて地上部を被覆するが、温度や土壌水分などの環境を作物生育に適した条件に維持しやすい反面、降雨を遮断するために蒸発散量が灌水量を上回り、作土層に塩類を集積しやすい。我が国における施設栽培の原型は16世紀後半、天正年間の京都に求められ、その頃に竹等の骨組みに油紙を貼り付けて被覆した場所で、茄子が栽培されるようになったとされている。現代の日本における施設栽培の隆盛は、1951年に農業用の塩化ビニールフィルムが生産されたことに始まり、1950年代を通じてビニールハウス骨材の規格化が進展したことで相まって施設栽培面積が増加し、1990年代には50,000 haを超え世界最大の栽培面積を持つに至った。この間、面積の増加に従って余剰養分による塩類集積が徐々に顕在化し、1950年代後半には早くも米田ら（1958）がブドウ栽培施設における塩類集積の現状を指摘している。その後、1970年に水田転作が本格化してから全国的に塩類集積問題も大きくなり、各地で対策が施された。

日本の施設栽培の特徴として、その95%以上が軟質のプラスチックフィルムで被覆されたハウスであることが挙げられる。一方、施設園芸の先進国とされるオランダをはじめ欧州諸国では、設置面積の大半をガラス温室が占める（豊田ら1995）。このように日本における施設栽培が世界的に特異な発達を遂げた背景には、我が国に台風の季節があり、骨材が脆弱だった時代には施設を周年被覆することが難しかったことがある。しかし、簡易な施設は被覆を剥がすことと骨材の移動が容易であるため、毎年それを繰り返して雨で除塩することが、塩類集積の対策として安易に技術化されたことも指摘すべきであろう。

北海道でも水田転作の進行に従って施設栽培面積が増加し、これまでに除塩によって塩類集積を緩和する方法が技術化されてきた。しかし、北海道のような寒冷地では春から秋までの間にビニールを被覆して栽培するため、主に冬期間に被覆を剥がすことになり、積雪下で除塩する。

北海道は我が国の最北に位置し寒冷である。このため中部・四国以南のいわゆる西南暖地が冬から春にかけて、または秋から冬にかけて被覆条件下で栽培するのに対して、北海道では春から秋までに栽培し、冬期間に被覆を剥がすことが多い。冬期間には積雪下にあるが、年降水量の少ない北海道で主に積雪による12月～3月の降水量は150～600mm程度である。中でも施設栽培の盛んな渡島、檜山、胆振および日高地方の北海道南西部は冬期間にも比較的少雪温暖なため、年降水量は1,000～1,300mm程度、このうち雪による降水量は150～300mm程度である。また、このような少雪温暖地域では周年被覆されることもあり、この場合、雨や雪による除塩は行われぬ。一方、四国・九州等のいわゆる西南暖地における年降水量は1,500～2,500mm程度あり、季節的には盛夏の被覆を剥がしている時期に降雨が多い(表1-1)。

表 1-1 地域別の年降水量

地域	観測点	年降水量 (mm)
北海道	旭川	1,074
	札幌	1,128
	函館	1,160
東北	盛岡	1,254
関東	千葉	1,294
東海	静岡	2,322
中部	名古屋	1,565
	南伊勢	2,271
四国	徳島	1,541
	高知	2,627
九州	熊本	1,993
	宮崎	2,457
	鹿児島	2,279

注) 1971～2000の平均値

このため、暖地の施設栽培では夏期の雨によって、あるいは水田化して十分に除塩できるのに対して、夏に被覆する北海道の施設栽培では降水による十分な除塩は難しい。その結果、残存塩類は言わば中途半端に除塩され、特に硝酸イオンが春の被覆および栽

培開始時に下層の根域内に残存することになる。しかし、現状のハウス土壌診断は作土層を対象としており、下層に残存する窒素は評価できない。

2. 施設栽培における土壌養分の負荷

作物生産を高めるために環境を改変することは重要な農業技術であり、農業は本質的に環境に負荷を与えるものであるが、中でも施設栽培は単位面積当たりの施肥量や堆肥施用量が多く、各種の農業形態の中でも特に土壌に負荷を与えやすい。しかし、施設栽培で生産性を長期的に維持するためには土壌を塩類集積させずに管理する必要があり、そのためには施肥と有機物施用を適切に行う必要がある。

施設栽培では窒素が必要以上に多量施肥される傾向にある。これは、北海道における代表的なハウス野菜であるトマト、キュウリ、メロン、ホウレンソウ、ネギ等が何れも水稲や畑作物と比較すると多窒素で栽培される作物であり、水田を転換して施設栽培を始めたときには上記の野菜類が多窒素により増収すること、水稲栽培と異なり多窒素による倒伏の恐れも少ないことによる。

また、施設栽培では単位面積当たりの堆肥施用量が多くなる傾向にある。これは主に、一圃場当たりの面積が小さいため堆肥の散布が手作業になり少量を均一に散布することが難しいことと、入手した堆肥を露地畑よりも少面積に集中させられるために多量施用が可能になることによる。加えて、わが国では高度経済成長期以降のハウスの大型化と固定化が連作傾向をもたらし（橋田 1965）、連作障害を回避するために堆肥の多量施用が有効であると考えられることがあり（嶋田 1977, 荒木ら 1985）、これがもう一つの大きな理由となっている。即ち、施設栽培では各作物を栽培するために用いられる資材が作物毎に異なり、栽培作物を変更する度に何らかの設備投資が必要になることが多い。また、各産地では市場からの信頼を維持するために、限られた栽培面積で単一作物の販売量を増やそうとする。これらのことから、施設栽培では連作を指向する農家が多く、そのような農家が連作障害を緩和させることを目論んで有機物を多量施用する傾向にあることが指摘できる。

北海道のような積雪寒冷地におけるハウスでは春から秋までの期間に被覆して、冬季には被覆を剥がして積雪下にあることが多いので、暖地とは温度や水分条件が大きく異なる。このため有機物分解が遅いものとされ、北海道では堆肥施用に伴う施肥対応として長らく水田、露地畑に準じて堆肥 1 kg の単年施用につき窒素を 1 g 減肥することが定

められてきた。しかし、施設栽培では被覆により地温が高まり、且つ近年の北海道では被覆期間が長くなり、露地畑よりも有機物の分解が進行しやすいことが指摘される。露地畑については堆肥中の窒素評価についての報告が多くあり、堆肥からの窒素無機化量は主に温度に依存すると考えられる。寒冷地のハウスについても施用後の積算温度により無機化量を推定することは可能であるが、露地とハウスとでは周年的な土壤水分等の条件も異なる。これらのことから、ハウス土壤の生産性を維持するためには、適切な堆肥の施用量と堆肥からの養分供給量を明らかにして、塩類を集積させないような栽培管理に資する必要がある。

さらに、施設栽培では土壤可給態リン酸が必要以上に高まる傾向にある。これは、寒冷地では初期生育を高めるためのリン酸多量施肥が基本技術であり、建設後年数の浅いハウスにおける促成栽培でリン酸多量施肥が有効なこと、一圃場当たりの面積が小さいため土壤改良資材を小面積に集中させられること等による。これらの理由の他に、施設栽培では単位面積当たりの堆肥施用量が多いため堆肥に由来するリン酸が富化されるが、寒冷地における有機物中養分についての研究の多くは窒素を対象としており、リン酸を対象とした知見には乏しい。このため、北海道では堆肥施用に伴う施肥対応としてリン酸を評価せず、年々リン酸が富化されることになる。今後は寒冷地においても堆肥に含まれるリン酸を評価する必要がある。

3. 作物の乾物生産と養分吸収特性に基づいた施肥法

ハウス土壤の生産性を長期的に維持するためには、土壤への養分投入量と作物による養分持ち出し量とを近づける必要がある。このためには、上述したような土壤診断の高度化、施用有機物に含まれる養分評価の精密化を目指すとともに、各作物について生育特性に基づいた適当な施肥法を構築することも必要である。本研究では北海道における代表的なハウス野菜のひとつであり、施肥量が過剰傾向にあること（林ら 2003 a, 2003 b）で知られる軟白ネギを対象に、その乾物生産特性および養分吸収特性に基づき、かつ土壤中の窒素およびリン酸レベルに対応した施肥法を検討した。

軟白ネギは我が国において約 1,100 年前から栽培されている葉菜である。露地では連作可能な作物とされることや面積当たりの収益が高いことから、1970 年代に水田転作が開始されて以降、施設栽培作物として北海道の各地で作付けされており、露地と施設栽培とを合わせた収穫量は 2000 年には 36,700 t に達した。これは全国 4 位の生産量で

あり、軟白ネギは北海道にとって重要な移出野菜である。現在、このうちの2割程度が施設栽培による生産であり、外国産品の輸入量が一定割合を占める中、高品質のネギが生産される施設栽培は今後とも重要な栽培形態である。

軟白ネギは一般に連作可能な作物とされ、また、施設軟白ネギを栽培するに当たっては、新規導入時に軟白フィルム被覆のための資材一式を購入すること、産地として市場の信頼を得るために限られた施設栽培面積で生産量を確保し周年出荷を目指すことから、連作に陥りやすい。そのため、軟白ネギを栽培する多くのハウスは軟白ネギ専用のハウスになり、雨による溶脱がないため土壌養分の集積や不均衡が発生しやすく過剰な施肥がさらにこれを助長している。施設軟白ネギを持続的に生産するためには土壌養分の濃度を適正レベルに維持することが必要であり、このためには、施設栽培条件での生育や養分吸収特性に対応した合理的な肥培管理を行う必要がある。

4. 本研究の目的

以上のような理由で、近年の北海道における施設栽培では毎年定められた通りに栽培しているにも関わらず、土壌診断法や有機物評価が不十分なために年々土壌養分が蓄積し、施肥管理に支障を来し生産性が低下または環境に負荷を与えている事例が認められる。また、近年の施設栽培では施肥や有機物に起因する浅層地下水への硝酸汚染などの環境負荷が問題化しており（糸川 1997）、農業と環境との調和が重視される中で、施設栽培で土壌診断および施肥法や堆肥施用法を新たに技術化する際には、生産性を維持するとともに栄養塩類の流亡を抑制して環境負荷を軽減する方法を構築する必要がある。

そこで、本研究では寒冷地において夏期に被覆および栽培する施設栽培、特に北海道の中では少雪温暖な地域に見られる周年利用型施設栽培も含めて、作土層および下層土の養分動態、堆肥からの養分供給特性を解明し、これらに基づいた土壌診断法、有機物中養分の評価法、施肥法を構築し、寒冷地のハウス生産を持続させ環境負荷を軽減させるための土壌および肥培管理法を技術化することを目的とした。

近年の我が国における施設栽培の動向を見ると、養液栽培や隔離床のように閉鎖された環境で栽培するものが増える傾向にある（塚澤 2008, 藤村ら 2007, 山田ら 2005）。しかし、北海道では肥培管理を適正化して土壌の生産性を維持し、土耕によるハウス栽培、言わば土地利用型ハウス栽培を持続させていきたいと考えている。

第2節 既往の研究

1. 施設土壌における余剰養分の集積と土壌診断

暖地では北海道よりも早くから施設栽培が行われ、余剰養分による塩類集積問題にも早くから除塩による対策が施されてきたが、暖地で行われる対策は主に夏期の降雨や水田化により溶脱させるものである（谷本 1991）。北海道では夏期にハウスを被覆して栽培し、被覆を剥がす冬期には積雪下にあり、冬期の雪による降水量は暖地における夏期の降水量よりも少ない。また、多雪地帯では春にハウスを被覆する前に排雪してから被覆することもあり、このような場合は雪で十分に除塩することは出来ない（土岐ら 1991）。

ハウスにおける土壌診断は多くの場合、作土層を対象としており、50～60 cm 程度の深さ以下に移動した硝酸態窒素は系外に排出されたと見なした報告が多い（嶋田ら 1964, 景山ら 1968, 吉村ら 1972, 水田ら 1978, 柳井 1978, 石川ら 1985, 荒垣ら 1986, 池田ら 1990）。これらの中には、かん水量と硝酸イオンの移動距離との関係について論じた報告も多くあるが、何れも溶脱を説明するためのものである。近年の西南暖地では長友ら（2001）がピーマンを10月から翌年5月まで栽培して深さ1 mまでの土壌無機態Nを追跡したが、栽培終了後の土壌硝酸態Nはやはり系外に溶脱することを前提としている。これらは夏期に十分に除塩できる暖地の状況を基に報告されたものであり、北海道では作土層の下に硝酸態窒素が残存する可能性が高い。

一方、下層土から作土層への塩類移動についての報告は数多いが、それらは乾燥地帯における沙漠化現象を説明するためのものが主である（Wetselaar 1961 b, Robinsonら 1962, 野口 1977, 松本 1993）。乾燥地域の土壌で認められる下層から表層へ硝酸塩が上昇する現象は、降雨が遮断されるハウスでも起こることが知られている（嶋田ら 1964, 景山ら 1968）。これらのことは、主に作土を対象とする現在の土壌診断法では、下層土に存在する硝酸態Nの評価が不十分なため、過剰な施肥につながりやすいことを意味する。

2. 施設栽培における窒素施肥法

一般に過剰な土壌養分の集積は作物体の病害に対する抵抗力を弱め、各種の障害発生の誘因となり生産性を低下させるため、更なる増肥を招きやすい（西尾 1983, 平岡ら 1

990)。一例として、ハウス栽培で発生するネギ根腐萎ちょう病は塩類濃度の高い土壌において発症しやすいことが報告されており（新村ら 1998）、これらの研究については栄養と病害との複合障害として整理されている（西尾 1985）。ハウス土壌は栽培期間中に降雨の影響を受けず、養分の溶脱も少ないため、施設栽培で持続生産するためには養分を集積させないように施肥する必要があるが、これまでのハウス野菜への施肥法は特に窒素施肥法において土壌に残存する窒素との関係が不十分なものも多かった。

また、土壌に残存する窒素に対応した施肥法についても、従来の技術は何れも作土層を対象として構築されていた。これは、上述のようにハウス土壌の除塩を報告したものの多くが、深さ 50～60 cm 以下に移動した硝酸態窒素を系外に排出されたと見なしていることから指摘できる。

農業生産にとって下層土が重要であることは古くから知られているが、ハウス作物に関しては、生育に対する下層土の重要性を指摘した報告自体が少ない。その中でトマトについては従来から地力窒素の重要性を指摘した報告が多い。これらの内には、地力窒素の正体には踏み込まず、その重要性のみを指摘した報告も見られるが（Miller ら 1981, Hills ら 1983, 柘田ら 1984, 柘田 1989）、下層土の重要性を明確に指摘した報告も幾つか見られる（Doss ら 1977, 伊藤ら 1984, Jackson ら 1990）。ただし、技術化に至った報告は見当たらない。

一方、露地栽培を対象とした研究では、作物生育における下層土の重要性を指摘した知見が多く見られ、水稻（松浦ら 1977, 鳥山 2001）、畑作物（Hills ら 1983, 三枝ら 1983, 喜多村ら 1986, 新良ら 1998, Fueki ら 2010）、園芸作物（小沢 1998）などで報告がある。しかし、下層土に残存する窒素を評価した上で具体的に施肥量を決定する方法を提案した報告は、水稻（佐藤ら 1990）、畑作物の小麦（佐藤ら 2008）、テンサイ（今野 2001）、菜豆（加藤ら 2009）の各々について見られるものの極めて少ない。

3. 施設栽培における堆肥に含まれる養分の評価

土壌に施用された堆肥から放出される無機養分の評価については既に多くの研究があるが、施設栽培を対象とした、あるいは対象に含めた報告は多くない。これらは主に実態解析から堆肥が土壌無機養分濃度を高めるとしたもの（西尾 2001, 上沢 1991）、堆肥を施用したハウスにおける土壌化学性を追跡したもの（大西ら 1980 a, 大西ら 1984 a）、環境への負荷を検討したもの（大西ら 1984 b, 丸尾ら 2002）、作物生育との関係

を検討したもの（大西ら 1980 b, 大西ら 1983 a, 棚橋ら 1999, 大前ら 2003）などに集約することができる。

堆肥などの有機物を施用したときの施肥対応、即ち具体的な施肥量の設定についても、これまでにいくつかの一連の研究（大西 1984, 江口 1994）、周年栽培を対象にした報告（三好ら 2001）、果菜類栽培時の施肥量（徳永ら 2002）やホウレンソウの硝酸イオン濃度を低減させるための施肥対応（杉田ら 2007）を明らかにした報告などがあるが、これらは何れも中部以南の暖地における研究であった。堆肥から放出される無機養分量は、主に施用後の温度に依存して増加するため、地域毎に試験結果に基づいて施肥対応することが重要であるが、北海道のような寒冷地における施設栽培を対象とした現場研究の事例は極めて少ない。

4. 施設栽培における土壌の可溶性有機態窒素

堆肥の施用が土壌の可溶性有機態Nを高めることは、これまでに多くの露地畑において認められているが（樋口 1982, 峰岸ら 1984, 北村ら 1985, Pascholdら 2008）、寒冷地の施設栽培では堆肥施用と土壌可溶性有機態Nとの定量的な関係を検討した事例が極めて少ない。露地畑土壌における窒素肥沃度は従来から可溶性有機態Nを中心に評価され、近年に無機態Nとの両方を評価する方法が行われるようになった（今野 2001）。これに対して施設栽培では、硝酸態Nが溶脱せずに残存しやすいことから、また、余剰養分による塩類集積を回避する点からも無機態Nを評価することが優先され、これまで可溶性有機態Nの評価は相対的に重視されなかった。しかし、土壌診断技術が高度化されて土壌に残存する無機態Nが少なくなると、施設栽培においても作物生育に対する可溶性有機態Nの影響が大きくなると考えられ、それを評価することが必要である。

土壌可溶性有機態Nの評価方法には一般的な培養法の他に、リン酸緩衝液で抽出する方法（Stanford 1968）、オートクレーブで熱水抽出する方法（Keeneyら 1966, Stanfordら 1969, Stanford 1969, Stanfordら 1970）などが知られる。本研究では北海道の畑地で最も一般的に採用されているオートクレーブ抽出法により分析した。

5. 施設栽培における土壌可給態リン酸

土壌可給態リン酸の富化を論じた報告は数多くあり、施設栽培についても主に化学肥料や土壌改良資材に起因して高まったとするもの（吉川ら 1980, 相馬 1986, 佐々井 19

95, 今泉 1988, 小原ら 2004), 堆肥などの有機物施用に起因するとしたもの (Abbott 1968, 大西ら 1984 a, 峰岸ら 1995, 堀ら 2002, 堀ら 2003), 化学肥料と有機物の両方に起因するとしたもの (江口ら 1983, 井上ら 1999, 内野ら 2001, 西尾 2003) 等の多くの報告がある。

過剰なリン酸がハウス栽培作物に与える影響についても, 主に暖地において検討されており, 一例として作土の可給態リン酸が $1,500 \sim 3,000 \text{ mg kg}^{-1}$ 程度のハウスでバラの葉に鉄欠乏クロロシスが現れたとの報告がある (大橋 1989)。その他にもメロン (鈴木ら 1983, 中神ら 1984, 加藤ら 1988), ホウレンソウとシュンギク (佐々井 1993) 等の様々なハウス作物を対象とした報告が見られる。また, 適正な土壤リン酸水準や減肥について論じた報告 (細谷ら 1982, 中神ら 1983, 東ら 1983, 小川 1988, 黒柳ら 1991) も多い。これらの報告を概括すると, ハウス栽培作物の生育にとって適正な土壤可給態リン酸 (トルオーグ法 P_2O_5 , Truog 1930, 以下同じ) 濃度は $300 \sim 500 \text{ mg kg}^{-1}$ 程度であり, それ以上に土壤中のリン酸濃度が高まると施肥リン酸の肥効が低下し, $3,000 \text{ mg kg}^{-1}$ 程度になると収量が低下する, あるいは微量要素欠乏などの症状が現れるとされる。なお, 露地野菜では可給態リン酸が $1,000 \text{ mg kg}^{-1}$ を超えるとブロッコリー根こぶ病の発病度が高くなることが知られ (村上ら 2007), 土壤溶液中のリン酸濃度から見た可給態リン酸の適正上限値が $1,000 \text{ mg kg}^{-1}$ 程度とした報告がある (加藤ら 1987 a, 1987 b)。

土壤からのリン供給量, 作物根の伸長速度とリン吸収能は, いずれも低地温で抑制されるため, 北海道の畑作では低温期の生育を確保するためにリン酸を多量施肥すること (岡島ら 1979) が技術化されてきた。露地野菜では相馬ら (1982) がタマネギ収量と土壤可給態リン酸との関係を研究し, リン酸の多量施肥が収量増をもたらすことを明らかにした。しかし, 北海道では他の野菜での同様なリン酸施肥についての研究がこれまで不十分であり, 土壤リン酸肥沃度を十分考慮せずに野菜への施肥量が決定されてきた。このためハウス野菜を含む多くの野菜でタマネギに準じてリン酸が多量施肥されることになった (林ら 2003 a)。

一方, 暖地では北海道のような極低温条件下で作物栽培することが少ないため, 生育初期の土壤からのリン酸溶出が作物栽培上の制限要因になりにくく, その上, 栽培期間中の温度が高く有機物の分解が早いため, 有機物施用に伴うリン酸減肥が技術化されてきた (牛尾ら 2004)。

以上のことから、施設栽培におけるリン酸過剰蓄積が特に寒冷地において大きな問題として残されるに至った。

6. 土壌採取における圃場内偏倚の影響

土壌は元来物理的にも化学的にも不均一なものであるが、土壌化学性を診断するには僅かな量のサンプルから一筆の圃場全体を代表できる診断値を求めなければならない。農業技術大系土壌施肥編（鎌田 1986）では、化学性の土壌診断に当たって、一筆の圃場からの採取点数を対角線上に 5 カ所としており、また、北海道の普及現場においてもこれと同様の方法が行われている。しかし、これは水田または畑地において pH や可給態リン酸を測定し、土壌改良資材等の投入量を決めるための方法として採用されてきたものと思われる。

施設栽培においては 1 作ごとに前作跡地の残存窒素または電気伝導率による施肥対応を行うことが多い。その際の適切な採取点数に言及したものとして、‘土壌養分分析法’では施設土壌における採取点数を 5 ～ 6 カ所としているが（関谷 1970）、その出典は判然としない。

一筆圃場内における土壌分析値の空間変動を詳細に検討した報告は数多くある。水田では近年の大区画化により一筆内の地カムラが問題化しており（鳥山 2001）、空間変動の実態に基づく局所施肥の必要性（Yanai ら 2000）が報告されている。また、変動を生じる要因として養分の土壌中での溶解性、吸着性や可動性、圃場の微地形や水の動きとともに、過去の肥培管理が影響し、その変動が水稻生育に影響を与えること（矢内ら 2002）が明らかにされた。畑作物では綿花（Iqbal ら 2005）、トウモロコシと大豆（Cahn ら 1994, Mallario 1996）、ソルガム（Cambardella ら 1994）栽培において窒素、リン酸、カリウム等の肥料成分は、主に人為的な管理に起因して不均一を生じることが明らかにされた。また、牛糞尿由来堆肥の施用ムラが pH と可給態リン酸の不均一を生じる（金沢ら 1979）との指摘がある。具体的な採取すべき点数については、露地畑（藤本ら 1987）、水田（金沢ら 1981, 矢内ら 2008）および草地（草野ら 1974）の各々について報告等がある。これらを概括すると、pH やリン酸吸収係数、即ち土壌改良資材の投入量を決めるための分析項目は 1 筆圃場から 5 点の採取で問題ないが、無機態窒素や交換性塩基を診断するためには 5 点採取では不十分であると指摘されている。

一方、施設栽培を対象とした報告としては、暖地において伊藤（1984）が土壌溶液中

の塩類濃度は測定場所による変動が大きいことを、細谷（1982）が無機態窒素を診断するためには18～32地点の土壌を採取する必要があることを各々指摘しているが、空間変動の生じる原因については十分に検討されていない。また、細谷ら（1980）は必要採取点数が、主に硝酸態窒素>電気伝導率>交換性カリウム>交換性マグネシウムおよびカルシウム・可給態リン酸>pHの順になることを報告しているが、これは栽培終了後の夏期に被覆を剥がし湛水除塩と太陽熱消毒を行う1,600 m²程度の大型ハウスを対象にした暖地特有の事例である。これに対して、溶脱の少ない寒冷地のハウスを対象に変動要因や採取点数を検討した報告は見当たらない。

7. 施設栽培における軟白ネギの施肥法

軟白ネギの生育および養分吸収特性については石居ら（1967 a, 1967 b, 1967 c, 1968）による一連の報告を始め、施肥に言及した報告が数多く見られる（石黒1967, 田中ら2000, 山崎ら2005, 白岩ら2005）。また、近年はネギに対する肥効調節型肥料の利用について多くの報告が見られる（今野ら2001, 鎌田2005, 西畑2006, 井上ら2006, 山本ら2007 a, 山本ら2007 b）。一方、施設栽培を対象とした施肥に関わる報告は少ない。これは、軟白ネギが一般に施肥反応に乏しいと考えられ（小林ら1990）、我が国で昔から伝統的に栽培されている作物であることもあり、農業現場において具体的な問題が生じにくいと考えられていたことによる。しかし、露地栽培と施設栽培とでは、収量レベルや軟白化方法が大きく異なることから、面積当たりの養分吸収量や養分吸収パターンが異なる。また、近年の北海道南部ではハウス栽培で1年に2回作付ける産地があるが、そのようなハウス栽培では土壌塩類濃度の上昇に起因してネギ根腐萎ちょう病が発症しやすくなるため、施肥の適正化が重要であることが指摘されている（新村ら1998）。

また、軟白ネギと同じユリ科ネギ属（*Allium*）作物であるタマネギは、土壌可給態リン酸を高め、またはリン酸肥料を多量に施肥することが多収につながる（南ら1968, 古山ら1968, 相馬ら1982）。これまでは軟白ネギについてもこの技術が準用され、専用化された軟白ネギ栽培ハウスでもリン酸が多量施肥された。しかし、タマネギではリン酸の多量施肥が病害を誘発するとの報告がある（Nelsenら1981）。露地栽培では軟白ネギに対するリン酸施肥についていくつかの報告があるが（石居ら1967 b, 石居ら1968, 八槇ら1997）、土壌リン酸肥沃度（可給態リン酸レベル）と施肥量との関係を検討した報告は少なく（黒柳ら1989）、施設栽培を対象にした報告は見当たらない。

第2章 北海道の主要産地における土壌養分と肥培管理の実態

第1節 土壌養分の実態と問題点

1. はじめに

北海道のような積雪寒冷地のハウスでは、春から秋までの作付け期間には被覆され、栽培が終了した後には被覆が剥がされて冬季は積雪下にあることが多い。しかし、近年に見られる傾向として少雪地帯では春の被覆時期が早まったり、施設の大型化で周年被覆が行われるようになった。このような積雪条件あるいはハウスの被覆期間の違いは、融雪による作土層からの養分の溶脱程度に影響すると推測される。よって、ハウスにおける肥培管理を適正化するためには、地域やハウス管理で異なると考えられる下層土に残存する養分実態の特徴をまず明らかにする必要がある。

本節では、北海道の代表的あるいは特徴的な産地における野菜栽培ハウス土壌を対象に、深さ1 mまでの層位別に無機養分、特に硝酸態Nの残存実態を調査して栽培管理方法との関係を検討する。

2. 調査方法

1) 調査地域

北海道中央部の少雪地域の平取町で2～8月および5～11月に栽培されるトマト、同日本海沿岸部の多雪地域の余市町で4～10月に栽培されるトマト、同南部の中雪地域の厚沢部町で5～10月に栽培されるキュウリ、同中雪地域の知内町で4～11月に連作されるハウレンソウおよび周年栽培ニラを対象として、各品目が栽培されるハウス圃場を調査した(図2-1)。

2) 栽培管理実態調査

各調査対象ハウスについて栽培年数、1年当たりの堆肥施用量および施用した堆肥の種類を聞き取った。堆肥の原材料のうち家畜糞尿の由来は牛糞とそれ以外(馬糞、鶏糞および豚糞)とに分けて集計した。土壌型は褐色低地土および灰色低地土を低地、黒ボク土および灰色台地土を黒ボク等、泥炭土および泥炭質グライ低地土を泥炭として集計した。各地域の降水量と平均気温、調査対象作物の作型と栽培時期を表2-1に示した。

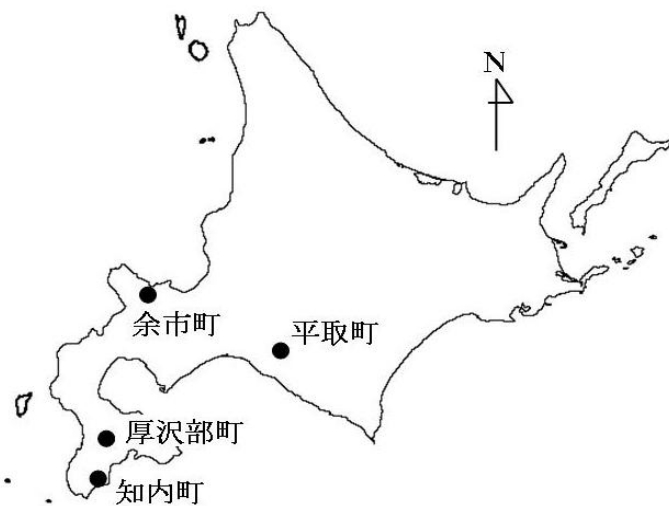


図 2-1 調査地域

表 2-1 調査地域の気象概要および対象ハウスの栽培概要

調査地域	5~10月		11~4月		対象品目 および作型	栽培時期 (定植~収穫終)	調査棟数	調査日
	降水量 ^a (mm)	平均気温 ^b (°C)	降水量 (mm)	平均気温 (°C)				
平取町	666	14.8	281	-0.8	トマト (夏秋どり)	5月~11月	28	1998年4月30日, 11月17日
〃					トマト (促成)	2月~8月	16	1999年1月29日, 9月9日
余市町	625	15.9	748	0.1	トマト (夏秋どり)	4月~10月	31	2000年4月13日, 10月30日
厚沢部町	790	15.7	587	0.4	キュウリ (夏秋どり)	5月~10月	35	1996年4月19日, 10月24日
知内町	763	15.7	569	1.3	ホウレンソウ (連作)	4月~11月 ^b	18	1998年4月15日, 11月6日
〃					ニラ (促成)	7月 ^c ~5月	10	1998年11月6日, 1999年5月26日

^a1979~2000年の平年値。^b栽培期間中に平均4回栽培。^c定植年の定植期, 収穫期は2月~5月。

3) 土壌の化学性

各々の土壌は基肥前に直径 25 mm の採土器を用いて 20 cm 毎の層位別に深さ 1 m まで、ハウス 1 棟につき 3 カ所ずつ採取した。ただし、ホウレンソウ栽培ハウスでは 1 作目の施肥前に採取した。下層土を採取するための採土器には主にスクリュウ型 (Shaw 1962) とチューブ型 (Wetselaar 1961 a) とがあるが、本調査では層位間の試料の混入を避けるため、チューブ型のみを用いた。

採取した土壌は風乾後に 2 mm 以下に粉碎して、土壌中の硝酸態 N をフェノール硫酸法で、可溶性有機態 N をオートクレーブ抽出法 (105 °C, 60 分間蒸留水で抽出した後に硫酸分解してアンモニウム態 N を定量) で、pH, 可給態リン酸 (Truog 法), 交換性陽イオンの各々を定法に従って分析した (亀和田ら 1997)。さらに、硝酸態 N については収穫終了後にも同様に調査した。

土壌硝酸態 N について、平取町では作型別に、余市町では土壌型別に、厚沢部町では

栽培年数別に、知内町では品目別に整理した。この主な理由は、平取町は少雪地域にあることを生かして促成栽培と抑制栽培とを繰り返す周年利用型ハウスが見られること、余市町は果樹園から転換したハウスが多く、それらの多くは台地にあるため、水田転換畑の低地土に立地するハウスとの比較ができたこと、厚沢部町は調査当時に農業関係機関の指導でハウス栽培が増加しつつあり、新規ハウスの土壌養分の変化を調査できたこと、知内町は夏季に被覆を剥がすニラ栽培ハウスが多く、一般的な北海道のハウスとは土壌硝酸態Nの動態が異なると想定されたためである。

4) 窒素の収支

各ハウスへの窒素投入量と持出量を算出した。投入量については、北海道で行われたハウス栽培の試験結果に基づき（北海道立道南農業試験場 2003）、堆肥中の窒素はその一部が無機化すると考え堆肥 1 kg の施用につき建設後 5 年未満のハウスでは窒素を 2 g、5 年以上のハウスでは同 3 g 施用したと仮定した。有機質肥料では窒素全量が無機化するものとみなした。また、持出量については、各調査地域における平均収量と各作物の一般的な窒素吸収量（川原ら 1985、坂口ら 2004、建部ら 2006、石井ら 2007）とで推定した。

深さ 0～1 m までの硝酸態N量は、各層位における硝酸態N (mg kg^{-1}) に基肥前の土壌含水率から推定した容積重（林ら 2004）を乗じて各層位（厚さ 20 cm 当たり）が保有するN量 (g m^{-2}) を算出し、これらを合計した。

5) 土壌可給態リン酸の経年変化

各ハウスの深さ 0～20 cm（作土層）における可給態リン酸と、聞き取り調査による栽培年数との関係を検討し、1 年当たりの可給態リン酸の増加程度を算出した。

3. 調査結果

1) 栽培管理に関する実態

(1) 地域の概略

各地域における調査ハウスの栽培年数、土壌型、主に施用された堆肥の種類と堆肥施用量を表 2-2 に示した。栽培年数は 0～4 年、5～9 年、10 年以上が各々 35、29、36 %であった。土壌型は調査ハウスのうち低地土が 66 %と多く、他の土壌では黒ボク土および台地土、泥炭土が各々 17 %と少なく、道内のハウスは主に低地の水田転換畑に集中していることが伺われた。施用された堆肥のほとんどは家畜糞尿由来で、その大半

は牛糞尿由来堆肥であった（表 2-2）。自家製の堆肥が用いられた事例はなく、何れも購入した堆肥が施用されていた。なお、道内におけるハウス野菜栽培の面積は 2,914 ha（2004 年時点）で、そのうち平取町が 98 ha、余市町および近隣町が 142 ha、厚沢部町および近隣町が 32 ha、知内町が 59 ha で、本調査地域は全体の 11 %を占めた。

表 2-2 調査対象ハウスの栽培年数，土壌型，年間堆肥施用量および堆肥の種類

調査地域	(対象品目)	栽培年数 (年)			土壌型			年施用量(kg m ⁻²)			平均施用量 kg m ⁻²	堆肥の種類 (由来)				
		~4	5~9	10~	平均年数	低地 ^a	黒ボク等 ^b	泥炭 ^c	~5	5~10		10~	牛ふん	馬ふん等 ^d	植物	無施用
		調査棟数				調査棟数		調査棟数				調査棟数				
平取町	(トマト)	5	22	17	9.0	40	4	0	6	36	2	6.5	19	21	0	4
余市町	(トマト)	2	3	26	15.4	13	11	7	29	2	0	2.0	11	10	4	6
厚沢部町	(キュウリ)	26	9	0	2.7	29	6	0	3	21	11	10.8	32	3	0	0
知内町	(ホウレンソウ)	13	5	0	4.1	5	0	13	0	8	10	10.7	18	0	0	0
〃	(ニラ)	2	1	7	12.1	5	2	3	5	5	0	4.7	10	0	0	0
合計		48	40	50	8.4	92	23	23	43	72	23	7.0	90	34	4	10
割合 (%)		35	29	36	—	67	17	17	31	52	17	—	65	25	3	7

^a褐色低地土+灰色低地土。^b黒ボク土+灰色台地土。^c泥炭土+泥炭質グライ低地土。^d馬ふん+鶏ふん+豚ふん。

(2) 平取町

平取町はトマトが水田転換作物として組織的に導入され、道内における市町村別トマト生産量が第 1 位である。生産面積が年々増加しているため、15 年以上栽培したハウスと 5 年未満のハウスとが混在するが、調査した全ハウスで定植前に土壌診断が行われていた。同町は道内の中では少雪地帯であり、夏秋どり栽培のハウスでは 79 %が冬期間に被覆を剥がしている一方、促成栽培のハウスは全て周年被覆していた。堆肥の年間施用量は平均 6.5 kg m⁻²であり、地域の農業関係機関が年間 5.0 kg m⁻²程度の施用を奨励していた。

(3) 余市町

余市町は道内における市町村別トマト生産量が第 3 位であり、トマトは水田転換作物として早くから栽培され、そのようなハウスでは 15 年以上栽培していた。一方、果樹園から転換したハウスが 45 %もあり、それらの栽培年数は 3 年～30 年の幅があった。本調査の範囲では、定植前に土壌診断したハウスはなかった。また、周年被覆したハウスはなく、32 %のハウスで融雪の 1～2 ヶ月前にハウス内を排雪した後に被覆していた。このようなハウスでは被覆から定植までの期間が短いことが、定植前の土壌診断が行われない一因となっていた。家畜糞尿等に由来する堆肥の施用量が年間 2.0 kg m⁻²程度と少なく、土壌への有機物の補給を目的に、施肥が魚粕やナタネ粕等の有機質肥料を

主体に行われていた。

(4) 厚沢部町

厚沢部町はハウス栽培のいわゆる新興産地で、キュウリは栽培年数が5～6年以内のハウスで栽培され、早期の熟畑化を指向して施肥量および堆肥施用量の多いハウスが多かった。調査した全ハウスで栽培終了後にビニールを剥がし、翌春の自然融雪後に被覆しており、土壌診断は定植前に行われていた。

(5) 知内町

知内町は道内の市町村別ニラ生産量が第1位であり、ホウレンソウ、ニラはともに水田転換作物として導入され、各ハウスで数年おきに両品目が交互に栽培されていた。畜産産業が盛んな地域にあり、家畜糞尿由来堆肥の施肥量がホウレンソウで年平均 10.7 kg m^{-2} と多かった。ホウレンソウの播種前には65%のハウスで土壌診断が行われていた。ニラ栽培では11月頃～翌春の5月頃までハウスを被覆、2月～5月に収穫する。この11月～5月の期間には施肥せず、収穫後、ビニールを剥ぎ取り、施肥して露地状態で6月～10月頃までにニラの株を養成していたが、この間に土壌診断が行われたハウスはなかった。

2) 作土層の土壌化学性

栽培前の作土層（深さ0～20 cm）における化学性の平均値はpHが5.9～6.3、可溶性有機態Nが $66 \sim 108 \text{ mg kg}^{-1}$ 、可給態 P_2O_5 （以下、リン酸）が $758 \sim 2,568 \text{ mg kg}^{-1}$ 、交換性 K_2O （以下、カリウム）、 CaO （以下、カルシウム）および MgO （以下、マグネシウム）が各々461～817、2,991～7,139および $368 \sim 910 \text{ mg kg}^{-1}$ の範囲であった（表2-3）。pHは概ね適正であったが、可給態リン酸と交換性陽イオンは北海道における土壌診断基準値（北海道農政部2002）よりも明らかに高かった。

また、可溶性有機態N、可給態リン酸および交換性カリウムは、いずれの町のハウスでも作土層で高く、下層土（深さ20 cm以下）では深くなるほど低下した（図2-2）。産地間を比較すると、ひとつの養分の高い産地では他の養分も高い傾向が認められ、可溶性有機態N、可給態リン酸および交換性陽イオンの各養分とも、知内町の可給態リン酸の他は、概ね余市町>知内町>平取町>厚沢部町の順で高かった（表2-3）。

表 2-3 各調査地域における作土層（深さ 0～20 cm, 施肥前）の土壌化学性

調査地域（棟数）	pH	可溶性有機態N mg kg ⁻¹	可給態P ₂ O ₅ mg kg ⁻¹	交換性塩基（mg kg ⁻¹ ）		
				K ₂ O	CaO	MgO
平取町 (n=44)	6.3±0.3 ^a	76±24	1,206±458	514±284	3,021±700	684±314
余市町 (n=31)	5.9±0.6	107±42	2,568±1,206	817±368	7,139±2,560	910±336
厚沢部町 (n=35)	6.0±0.6	66±28	758±460	461±131	2,991±1,216	368±154
知内町 (n=28)	6.2±0.5	108±54	799±478	634±335	4,877±1,607	613±227
平均	6.1±0.5	87±35	1,249±644	593±275	4,315±1,433	640±261
土壌診断基準値 ^b	6.0～6.5	—	150～300	150～300	1,800～3,500	250～400

^a ±標準偏差。表2-4以下も同じ。^b 北海道施肥ガイド（北海道農政部 2002）による。

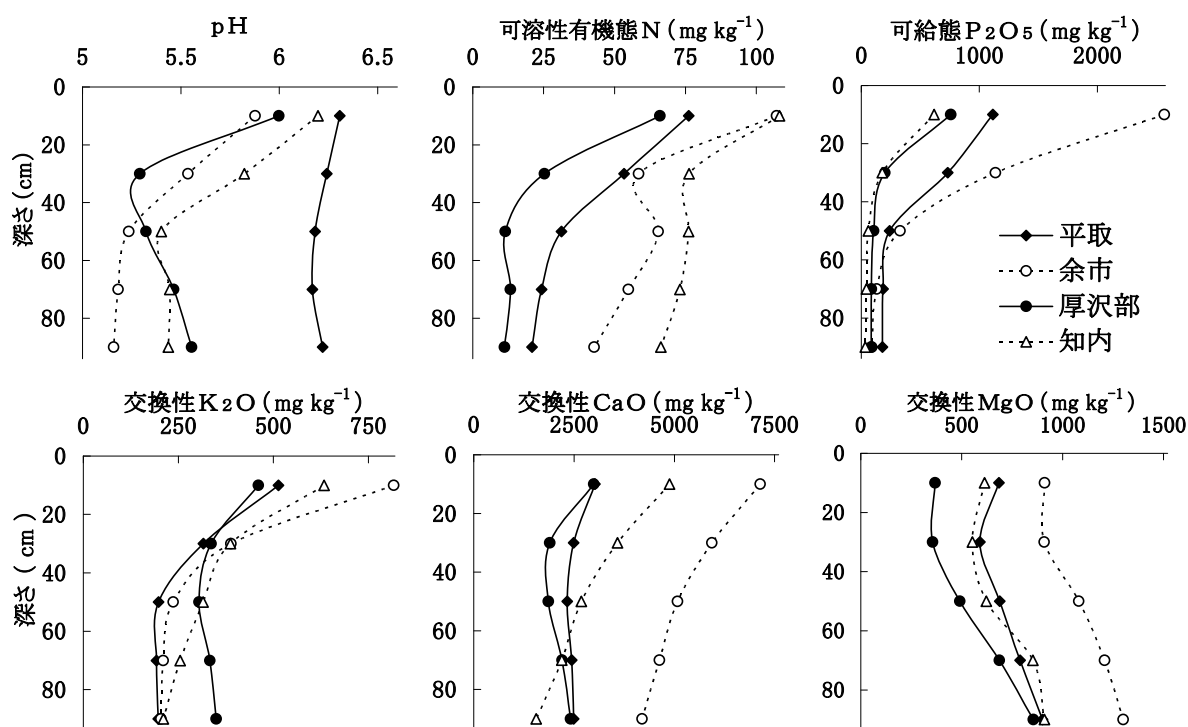


図 2-2 各調査地域における深さ別の土壌化学性（施肥前）

3) 作土層と下層の土壤硝酸態窒素含量

全調査地点の層位別の硝酸態Nを平均値で表 2-4 に示した。収穫終了後の作土層（0～20 cm）が 94 mg kg^{-1} 、下層土では深さ 20～40 cm が 64 mg kg^{-1} 、40～60 cm が 52 mg kg^{-1} で、本調査における各地域の多くのハウスでは、深さ 20～60 cm の下層土に硝酸態Nが残存していた。

表 2-4 調査ハウス平均の土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$

深さ cm	mg kg^{-1}	
	基肥前	収穫後
0～20	35 ± 41	94 ± 111
20～40	36 ± 46	64 ± 87
40～60	48 ± 69	52 ± 79
60～80	39 ± 52	35 ± 57
80～100	24 ± 26	30 ± 48

平取町では基肥前の硝酸態Nが作土層で下層の各層よりも高かった（表 2-5）。これは、少雪地域であるとともに促成栽培で周年被覆したハウスが多く、融雪水による硝酸態Nの下層移動が少なかったためである。ただし、下層土でも $18 \sim 115 \text{ mg kg}^{-1}$ の硝酸態Nが残存していた。基肥前と収穫終了後との変化は、促成栽培の 0～40 cm を除くと、作土層、下層とも小さかった。また作型別に見ると、各層位とも促成作型で高く、例えば基肥前の作土層では 121 mg kg^{-1} と夏秋どり作型の 3 倍程度あった。

余市町では硝酸態Nは基肥前にはいずれの土壤型でも作土層で $10 \sim 22 \text{ mg kg}^{-1}$ と少なかったが、下層において高かった（表 2-6）。収穫終了後には各層位とも概ね基肥前よりも高まり、特に作土層では著しく上昇し、低地土、黒ボク土、泥炭土で各々 67, 78, 224 mg kg^{-1} であった。

厚沢部町でも基肥前の硝酸態Nは、作土層で $5 \sim 9 \text{ mg kg}^{-1}$ と低いが、下層では栽培年数が経過するとやや高まる傾向にあった（表 2-7）。

知内町におけるハウレンソウ栽培での硝酸態Nは、基肥前では作土層より下層で高かったが、栽培終了後では作土層と深さ 60 cm までの下層で $152 \sim 308 \text{ mg kg}^{-1}$ と著しく高まった。これに対して、ニラ栽培では下層の硝酸態Nの残存量は $10 \sim 29 \text{ mg kg}^{-1}$ 程度であり、作土層より少なく、また各層とも施肥前と収穫終了後との変化が小さかった（表 2-8）。

表 2-5 平取町（トマト）の土壌NO₃-Nおよび含水率

作型	深さ cm	NO ₃ -N (mg kg ⁻¹)		基肥前の含水率
		基肥前	収穫後 ^a	g kg ⁻¹
夏秋 (n=28)	0～20	41±37	33±41	199±44
	20～40	24±19	23±29	203±51
	40～60	23±30	16±27	210±66
	60～80	23±26	15±32	255±100
	80～100	18±17	15±29	250±79
促成 (n=16)	0～20	121±72	73±33	232±22
	20～40	115±75	67±39	246±41
	40～60	60±35	51±29	244±36
	60～80	42±29	39±22	251±37
	80～100	36±27	35±20	272±39

^a 調査日（基肥前，収穫後）は夏秋どり作型で4月30日，11月17日，促成作型で1月29日，9月9日。

表 2-6 余市町（トマト）の土壌NO₃-Nおよび含水率

土壌型	深さ cm	NO ₃ -N (mg kg ⁻¹)		基肥前の含水率
		基肥前	収穫後	g kg ⁻¹
低地 (n=13)	0～20	12±12	67±57	327±24
	20～40	25±18	45±32	308±24
	40～60	27±15	26±15	319±44
	60～80	23±12	20±11	338±43
	80～100	19±9	21±21	360±80
黒ボク (n=11)	0～20	22±17	78±61	298±58
	20～40	22±18	61±47	313±45
	40～60	28±21	33±23	329±59
	60～80	25±13	24±18	318±57
	80～100	24±12	20±13	329±64
泥炭 (n=7)	0～20	10±7	224±194	388±61
	20～40	44±38	147±131	428±91
	40～60	235±226	191±180	708±247
	60～80	171±150	193±171	749±264
	80～100	43±35	138±176	792±146

表 2-7 厚沢部町（キュウリ）の土壌NO₃-Nおよび含水率

建設後 年数	深さ cm	NO ₃ -N (mg kg ⁻¹)		基肥前の含水率
		基肥前	収穫後	g kg ⁻¹
新規 (n= 8)	0～ 20	5± 3	42±44	425±40
	20～ 40	7± 6	28±37	416±31
	40～ 60	5± 3	14±10	347±55
	60～ 80	6± 5	16±22	275±21
	80～100	5± 3	15±21	291±20
1～4年 (n=18)	0～ 20	9± 6	35±67	413±39
	20～ 40	16±16	33±66	416±25
	40～ 60	27±31	28±37	356±68
	60～ 80	28±27	26±35	300±26
	80～100	24±24	26±39	292±18
5～6年 (n= 9)	0～ 20	9± 3	54±42	411±29
	20～ 40	28±29	42±50	422±23
	40～ 60	59±71	31±34	351±57
	60～ 80	75±60	34±37	299±75
	80～100	67±46	35±32	298±45

表 2-8 知内町（ハウレンソウ，ニラ）の土壌NO₃-Nおよび含水率

品目	深さ cm	NO ₃ -N (mg kg ⁻¹)		基肥前の含水率
		基肥前	収穫後 ^a	g kg ⁻¹
ハウレンソウ (n=18)	0～ 20	9± 7	308±313	386± 39
	20～ 40	27±21	191±244	459±106
	40～ 60	72±56	152±212	601±158
	60～ 80	44±49	55± 92	589±173
	80～100	21±29	34± 54	605±159
ニラ (n=10)	0～ 20	51±97	68± 81	421± 75
	20～ 40	21±49	29± 47	409± 82
	40～ 60	18±29	24± 30	463±136
	60～ 80	16±22	14± 14	447± 60
	80～100	10±17	13± 18	492±108

^a 調査日（基肥前，収穫後）はハウレンソウで4月15日，11月6日
ニラで11月6日，5月26日。ハウレンソウの収穫後は概ね4作後に相当。

4) 窒素投入量と窒素収支

各地域における年間の平均窒素投入量を表 2-9 に示した。平取町では促成作型で 41.2 g m⁻²あり，夏秋どり作型の 27.9 g m⁻²よりも多かった。両作型の違いは堆肥施用量にあり，有機質肥料および化成肥料による投入量に差は認められなかった。

余市町における窒素投入量は低地土、黒ボク土で各々 57.8, 65.2 g m⁻²に対して、泥炭土で 35.6 g m⁻²と少なかった。泥炭土では有機質肥料による投入量が少なかった。

厚沢部町における窒素投入量は新規建設ハウスで 49.6 g m⁻²、栽培年数が5年以上のハウスで 56.8 g m⁻²と両者に大差がなかった。

知内町では窒素投入量に作物間差が認められなかった。ニラ栽培では堆肥は定植時のみ施用され、栽培期間が3～4年にわたるため、1年当たりの堆肥由来の窒素投入量がハウレンソウ栽培よりも少なかったが、その分、有機質肥料と化成肥料による投入量がハウレンソウ栽培よりも多かった。

各産地の調査ハウスにおける窒素収支を表 2-10 に示した。跡地の深さ 0～1 m までに存在する硝酸態Nの平均値を見ると、平取町では基肥前より低下したが、他の地域では基肥前より高まった事例が多かった。窒素の投入量と持出量との差を見ると、平取町では大差がなかったが、他の地域では明らかに投入量が持出量を上回った。知内町のハウレンソウ栽培で栽培期間中の窒素動態を見ると、窒素の投入量と持出量に土壌間差は認められなかったが、跡地に存在する硝酸態Nは、泥炭土が灰色低地土の約2倍であった(表 2-11)。

表 2-9 各ハウスにおける年間平均窒素投入量

調査地域	(棟数)	g m ⁻²			合計
		堆肥	有機質肥料	化成肥料	
平取町	夏秋 (n=28)	12.9 ± 7.8	0.2 ± 0.8	14.9 ± 5.5	27.9 ± 9.1
	促成 (n=16)	24.3 ± 5.1	1.9 ± 2.8	14.9 ± 6.0	41.2 ± 4.9
余市町	低地 (n=13)	7.1 ± 8.9	42.7 ± 19.7	8.0 ± 5.7	57.8 ± 22.5
	黒ボク (n=11)	4.2 ± 5.0	38.0 ± 25.8	23.0 ± 35.5	65.2 ± 20.3
	泥炭 (n= 7)	9.9 ± 4.7	21.0 ± 9.9	4.7 ± 3.6	35.6 ± 8.0
厚沢部町	新規 (n= 8)	20.0 ± 0.0	0.0	29.6 ± 0.7	49.6 ± 0.7
	1～4年 (n=18)	21.3 ± 8.1	0.0	31.6 ± 2.3	52.8 ± 9.6
	5～6年 (n= 9)	25.3 ± 13.9	0.0	31.4 ± 2.9	56.8 ± 11.4
知内町	ハウレンソウ (n=18)	24.6 ± 6.0	0.5 ± 1.6	44.3 ± 8.6	69.5 ± 10.7
	ニラ (n=10)	9.5 ± 4.8	4.1 ± 4.6	55.2 ± 35.7	68.8 ± 35.6

表 2-10 各産地の調査ハウスにおける窒素収支

調査地域	(棟数)	深さ 0~1 m までの ^a		施肥と堆肥の ^b N投入量 (g m ⁻²)	作物体の ^c N持出量 (g m ⁻²)
		NO ₃ -N (g m ⁻²) 基肥前	跡地		
平取町	夏秋 (n=28)	34.2	27.4	27.9	24.9
	促成 (n=16)	94.6	67.0	41.2	36.5
余市町	低地 (n=13)	22.6	38.2	57.8	16.4
	黒ボク (n=11)	26.2	47.6	65.2	16.4
	泥炭 (n= 7)	34.3	93.4	35.6	16.4
厚沢部町	新規 (n= 8)	5.7	21.9	49.6	26.0
	1~4年 (n=18)	21.6	29.1	52.8	26.0
	5~6年 (n= 9)	50.4	38.4	56.8	26.0
知内町	ホウレンソウ (n=18)	17.7	118.9	69.5	23.7
	ニラ (n=10)	19.3	24.4	68.8	23.0

^a 各層位の硝酸態N (mg kg⁻¹) に基肥前の土壌含水率から推定した容積重 (林ら 2004) を乗じて各層位が保有するN量を算出し、これらを合計。表2-11も同じ。

^b 堆肥からのN供給量を1kgにつき2~3g (北海道農政部 2002) として算出。表2-11も同じ。

^c 各調査地域における平均収量から推定して算出。

表 2-11 知内町のホウレンソウ栽培ハウスにおける窒素収支

土壌型	(棟数)	深さ 0~1 m までの		施肥と堆肥の ^a N投入量 (g m ⁻²)	作物体の ^a N持出量 (g m ⁻²)
		NO ₃ -N (g m ⁻²) 基肥前	跡地		
灰色台地土	(n= 5)	18.1	74.9	77.9	22.8
泥炭土	(n=13)	17.6	135.8	66.2	24.0

^a ホウレンソウのN吸収量を1作当たり6g m⁻² として算出。

5) 土壌可給態リン酸の経年変化

二つのトマト産地における可給態リン酸レベルを比較すると余市町で高かった (表 2-3)。余市町のハウスでは土壌診断を実施せずに長期にわたりリン酸施用を続け、特に果樹畑から転換したハウスでは以前から多量施肥したため、それが同じトマト産地でも土壌診断を実施している平取町と比較して可給態リン酸を高めたものである。また、建設後数年以内のハウスを調査した厚沢部町では年数を経過したハウスほど可給態リン酸が高かった (表 2-12)。新興産地である厚沢部町では施肥および有機物管理の生産者間差が小さいこと、また、高知県でも建設後 1~4 年の水田転換ハウスで同様の現象が認められており (山本ら 1970)、このような短期間での富化も施肥に起因したものとと言える。

本節で調査した全ハウスについて建設後年数と可給態リン酸との関係を見ると有意な相関 ($p < 0.01$) が認められ (図 2-3) , 1 年当たりの増加量は 103 mg kg^{-1} であった。

表 2-12 厚沢部町における建設後年数別に見た作土の化学性

建設後年数	(棟数)	可給態 N	可給態 P_2O_5	交換性陽イオン	
				K_2O	CaO
mg kg^{-1}					
新規	(n= 8)	43±19	370±304	387± 83	1832± 668
1~4年	(n=18)	62±26	770±425	467±146	3267±1278
5~6年	(n= 9)	82±23	1076±347	514± 94	3471± 589

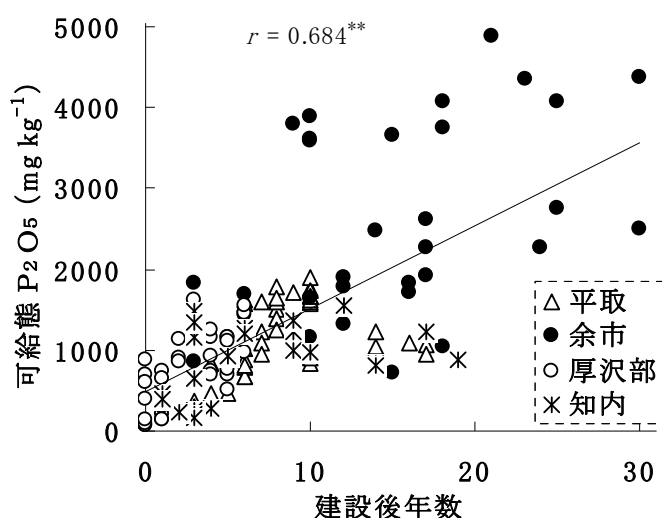


図 2-3 建設後年数と可給態リン酸との関係

4. 考察

1) 寒冷地のハウス栽培における窒素収支の特徴

平取町と余市町はともに古くからのハウストマト産地であるが、平取町では年間窒素投入量が余市町よりも少なく (表 2-9) , 窒素の投入量と持出量との差は $3.0 \sim 5.0 \text{ g m}^{-2}$ 程度で窒素収支のバランスは比較的良好であった (表 2-10) 。平取町では周年被覆の促成作型のハウスのほうが夏秋どり作型よりも土壌の硝酸態 N が高かったが、これは雨や雪による溶脱がなかったことによると考える。

一方、余市町では窒素投入量が多かったため、窒素投入量と持出量との差 (表 2-10 より算出) は施肥前に深さ $20 \sim 60 \text{ cm}$ に残存して下層土診断で評価される窒素量 (表

2-6より算出) に対して、低地土、黒ボク土、泥炭土の順に 3.6 倍、4.5 倍、0.9 倍と大きく、余剰に投入された窒素が農業系外にも負荷を与えている(竹内 1997) と推察する。

なお、両町における調査年の平均収量を北海道農林水産統計年報により比較すると、平取町が 10.40 kg m^{-2} 、余市町が 6.56 kg m^{-2} で、平取町が余市町よりも 1.5 倍以上多かった。平取町の単収が著しく高い要因は、作型の違いや病虫害発生程度あるいは栽培管理の違いはあると考えられるが、平取町では余市町と比べて窒素施肥量が少なく、土壌診断に基づいて土壌 pH や可給態リン酸と交換性陽イオンを比較的適正なレベルに維持しており、そのような土壌管理の違いも収量の違いに影響した要因の一部であったものと推察する。

厚沢部町のキュウリ栽培ハウスでは栽培年数が経過するほど硝酸態 N が高まる傾向にあり、下層にも残存していた。年間窒素投入量はキュウリ 1 作で持ち出される窒素量の約 2 倍に相当し(表 2-10)、このような多量施肥が繰り返されたため短期間のうちに下層にまで硝酸態 N が多量に残存するようになったと考える。ただし、融雪後に被覆するので、施肥前の作土層に残存する硝酸態 N は少なかった。

知内町のハウレンソウ栽培ハウスでも、年間窒素投入量が 1 年間の栽培による持ち出し量の約 3 倍と多く(表 2-10)、キュウリの場合と同じように多量施肥栽培により栽培期間中の硝酸態 N が作土層と下層ともに高まり続けたものと考えられる。

一方、知内町のニラ栽培ハウスの硝酸態 N は下層土にも $10 \sim 29 \text{ mg kg}^{-1}$ と僅かに残存していたが(表 2-8)、被覆開始時から収穫終了時まで作土を含めて各層位ともほとんど変動せず、ハウレンソウ栽培よりも低く推移した。これは上記の期間中に追肥がなかったことと、ニラは 5 月～11 月頃までの株養成期に被覆を剥がした露地状態で栽培され、調査を開始した 11 月には施肥窒素が深さ 1 m 以下に溶脱していたためと考える。

このように、北海道の周年およびこれに近い期間が被覆されるハウス土壌では、いずれも栽培期間中に作土層のみならず下層にまで硝酸態 N が蓄積していた。硝酸態 N の蓄積を起こさないためには、窒素投入量を作物体による持ち出し量と同程度にする必要がある。そのためには各作物について生育と窒素吸収特性に基づいた窒素施肥法を構築する必要がある。また、冬期に被覆を剥がすと雨や雪で溶脱して作土層の硝酸態 N は低下するが、多くの場合は下層には残存している。すなわち、秋の栽培終了時に被覆を剥がし、春の栽培開始前に再び被覆するという寒冷地の一般的なハウス栽培様式では、冬の

期間のみで根域の硝酸態Nを十分に低下させることは困難と考える。

2) 北海道と暖地との窒素動態の相違

ハウス土壌の養分管理については、これまでに一連の研究（大西 1984, 江口 1994）をはじめ数多くの報告があるが、それらの多くは暖地を対象としたものである。例えば江口は、鹿児島県で5月末に栽培を終えたハウスの被覆を剥がして11月に再び被覆するまでの間に深さ0～60 cmの無機態窒素が下層へ溶脱することを示している。しかし、本調査の各地域における硝酸態Nは基肥前に作土層および深さ20～60 cmの下層土に残存している事例が多く、栽培終了時に全調査地点の平均は作土層が 94 mg kg^{-1} 、下層の深さ20～40 cmが 64 mg kg^{-1} 、40～60 cmが 52 mg kg^{-1} であった（表 2-4）。

前章で述べたように、北海道と暖地とでは年降水量が大きく異なり、北海道では被覆を剥がしている期間の降水量が150～300 mm程度と極めて少ない。また、少雪地域では周年被覆される例もあり、この場合は雨や雪により養分が溶脱することが少ない。したがって、北海道のような積雪寒冷地では降水による溶脱量の少ないことが、下層に硝酸態Nが残存する主因であると考えられる。さらに、その残存窒素を評価した施肥対応が十分に行われないうまま分肥あるいは追肥を行うと、その分は過剰に施肥されることになり、これも下層に硝酸態Nが残存するのを助長すると考える。

以上のことから、寒冷地のハウスでは硝酸態Nが下層に残存しやすくなっているものと考えられる。

3) 現在の土壌診断法における問題点

北海道のハウス栽培における窒素施肥法は主に基肥窒素を減肥することに重きを置いており、追肥窒素については基肥前の作土層に硝酸態Nが 150 mg kg^{-1} 以上あるときのみ減肥することになっている（北海道農政部 2002）。しかし、この方法では多くのハウスが追肥窒素を減肥する対象にならない。

本調査地域では現行の作土層に対する土壌診断で追肥窒素を減肥すべきハウスは殆ど存在しなかったが、下層に硝酸態窒素の残存するハウスが多く見られた。即ち、下層に残存する硝酸態Nを診断して一定の評価を与えることにより窒素減肥できるハウスが、北海道において実際に数多く存在することを示している。したがって、下層土を診断して追肥量を決定することが肥培管理を適正化する上で重要になることが明らかになった。

なお、余市町と知内町において硝酸態Nの残存量は泥炭土で他の土壌型よりも多かった（表 2-6, 表 2-11）。これは作土層や下層に混在している泥炭が分解するため（石塚

ら 1962 a, 坂柳ら 1963) と解釈できる。また, 北海道の泥炭土では地下水位が 0.5 ~ 1.0 m 付近にある (上野ら 1986, 宮地ら 1995)。乾燥地帯では一般に地下水位が 0.7 ~ 2.0 m にあるときに最も塩類土壌が生成されやすく (松本 1993), 下層深くにある硝酸塩も上昇しやすい。また, 寒冷地においても河川流域の低地土では下層から塩類が上昇することがある (Al-Janabi ら 1982)。これからすると, 両町の泥炭ハウスでは深さ 1 m 以下に存在する泥炭由来の窒素が, 被覆期間中に上昇して下層や作土層に供給されたとの解釈もできる。

余市町の泥炭土で栽培期間中に深さ 0 ~ 1 m に土壌から供給されたと考えられる窒素量が 39.9 g m^{-2} (表 2-10 より算出), 知内町では 76.0 g m^{-2} (表 2-11 より算出) であり, これに対して, 近年の北海道の泥炭土における水田で土壌から 1 年間に供給される窒素量は 4.0 g m^{-2} 程度 (笛木ら 2002) である。このことから, 本調査地域で泥炭土から供給される窒素量のうちの多くは, 前年までに無機化した窒素に由来する可能性が高いものと推察する。同様の現象は北海道南部の北檜山町の泥炭地域でも認められており (林ら 2001), 北海道では泥炭地で栽培するハウスも多いことから, 泥炭地の下層から供給される窒素を評価 (石塚ら 1962 b, 林ら 2001) することは重要な課題である。

4) 土壌可給態リン酸の経年変化

ハウス建設後年数と可給態リン酸との相関は 1980 ~ 1982 年に北海道で調査した相馬も認めており (相馬 1986), この当ても水田転換ハウスを対象に解析し, 可給態リン酸が 1 年当たり 248 mg kg^{-1} 増加していた。一方, 本節の調査では増加速度がその半分程度に低下しており (図 2-3), これは北海道でこの 20 年間に土壌診断技術が普及したことを意味している。全国的にも近年農耕地の可給態リン酸の増加が鈍化する傾向にあり (小原ら 2004), 土壌環境にとって望ましい方向にある。ただし, 暖地のハウス土壌のリン酸蓄積を見ると, 1977 年頃に鹿児島県の畑地転換ハウスで可給態リン酸が 1 年当たり $67 \sim 79 \text{ mg kg}^{-1}$ 増加し (江口 1994), 上述した高知県の水田転換ハウスで 1 年当たり 49 mg kg^{-1} 増加, 神奈川県の実菜類栽培ハウスで 1976 ~ 1986 年に 1 年当たり 54 mg kg^{-1} 増加したが (藤原 1989), 当時の北海道での増加量 (相馬 1986) はそれらの 3 ~ 5 倍だったことになる。暖地でも北海道と同程度に可給態リン酸の増加する事例はあるが (岩崎ら 2001), 近年の北海道でのリン酸増加の速度は, 20 年前の暖地のレベルに近づいた程度である。前章で述べたように, ハウス土壌のリン酸過剰蓄積は寒冷地により大きな問題であることから, 今後とも可給態リン酸の過剰蓄積を抑制していく必

要がある。

5. 要約

北海道のハウス土壌を対象に、深さ 1 m までの層位別に無機養分、とくに硝酸態Nの残存実態を明らかにして栽培管理方法との関係を検討した。

1) 作土層の各養分の平均値はpHが6.1、可溶性有機態Nが 87 mg kg^{-1} 、可給態リン酸が $1,249 \text{ mg kg}^{-1}$ 、交換性カリウム、カルシウムおよびマグネシウムが各々593, 4,315および 640 mg kg^{-1} であり、可給態リン酸と交換性陽イオンは北海道における土壌診断基準値よりも明らかに高かった。ただし、北海道のハウス土壌における可給態リン酸の増加速度は1990年代に入り鈍化してきた。

2) いずれの作物のハウスでも作土や下層土での硝酸態Nの残存が認められた。深さ0～1 mまでに存在する硝酸態Nが基肥前より栽培終了時で高く、窒素投入量が窒素持出量を大きく上回っているハウスが多かった。北海道のハウスでは非栽培期間の降水量が少ないため、硝酸態Nが根域全体から溶脱し切らず、作土層の他に下層にも残存しやすいと考えた。

3) 可給態リン酸の増加速度は1990年代に入り鈍化していたものの依然増加傾向にあり、ハウス建設後年数と土壌可給態リン酸との間に正の相関が認められた。

4) 以上のことから、雨や雪による溶脱の少ない条件で深根性の果菜類を栽培する場合に下層土の硝酸態Nを評価すること、また、寒冷地においては作土の可溶性有機態Nを評価することが、適正な施肥量を決定する上で重要であることを明らかにした。

第2節 堆肥施用の実態と土壌肥沃度への影響

1. はじめに

積雪寒冷地におけるハウスは、春から秋までの作付け期に被覆され、作付けを終了した後に被覆を剥がして冬季には積雪下にあることが多い。近年は春の被覆時期が早まり、少雪地帯では周年被覆することもあり、養分の放出程度は栽培体系により様々に異なる。ハウスの肥培管理を適正化するためには、これらの養分動態を明らかにする必要がある。また、被覆を剥がしたときに雨や雪により溶脱した養分は農地系外に負荷を与えるため、堆肥からの養分放出特性を明らかにすることは、生産性の向上のみならず周辺環境への負荷を軽減するためにも重要である。さらに、堆肥を大量に施用すると作物の施肥反応が低下することが知られており（Lucus ら 1960）、露地畑より堆肥の施用量の多い施設栽培ではそのときの施肥対応（橋田 1965）をより精密にする必要がある。

そこで、積雪寒冷地である北海道のハウス土壌を対象に、堆肥の施用実態を明らかにするとともに栽培管理方法との関係を検討した。

2. 調査方法

1) 各地域でハウスに施用される堆肥の性状

前節と同じ調査ハウスで施用されていた家畜糞尿由来堆肥またはそれに近似した堆肥のうち 64 点を採取し、風乾後に定法（原ら 2000）に従って分析した。

2) 堆肥施用による土壌化学性の変化

前節と同じ調査ハウスにおいて堆肥施用と土壌可溶性有機態窒素、可給態リン酸、交換性カリウムとの関係を検討した。土壌採取および分析法は前節と同じである。

3. 調査結果

1) 各地域でハウスに施用される堆肥の性状

堆肥原料の由来別に分析した一覧を表 2-13 に示した。C/N の大きさは牛糞堆肥 > 馬糞堆肥 > 豚糞堆肥であった。牛糞堆肥の平均分析値を昭和 50 年代に北海道内で生産されていた牛糞尿由来堆肥（高田ら 1985）と比較すると、C/N は大差なかったが、窒素およびカリウムがやや低く、リン酸が高かった。

表 2-13 北海道内の施設栽培で施用されていた堆肥の性状（乾物当たり）

種類	乾物率 g kg ⁻¹	C/N	g kg ⁻¹						
			C	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	Na ₂ O
牛糞 (n=56)	262±80	18.9±6.0	292±78	15.5±3.7	16.5±8.4	14.4±8.9	20.9±9.6	5.5±2.6	6.0±5.7
馬糞 (n=5)	337±64	13.2±2.3	135±61	12.6±5.2	9.0±2.7	16.9±9.6	19.7±13.0	3.6±1.0	3.4±0.9
豚糞 (n=3)	—	9.1±0.3	257±130	27.9±13.7	44.4±1.3	16.8±11.3	40.5±0.3	16.0±0.6	5.4±3.5

2) 堆肥施用による土壌化学性の変化

全調査ハウス毎に見た栽培前の作土層（深さ 0～20 cm）における可溶性有機態 N，可給態リン酸，交換性カリウムの各々と年間堆肥施用量との間に一定の関係は認められなかった（データ省略）。ただし，ハウス栽培開始後の堆肥施用合計量（ハウス栽培年数×年間堆肥施用量）と可溶性有機態 N，交換性カリウムの各々との間に有意な相関（ $p<0.01$ ）が認められ（図 2-4），その回帰直線に基づき，施用堆肥 1 kg m⁻² 当たりの可溶性有機態 N と交換性カリウムの増加程度は各々 0.64 mg kg⁻¹，3.40 mg kg⁻¹ 程度と算出された。

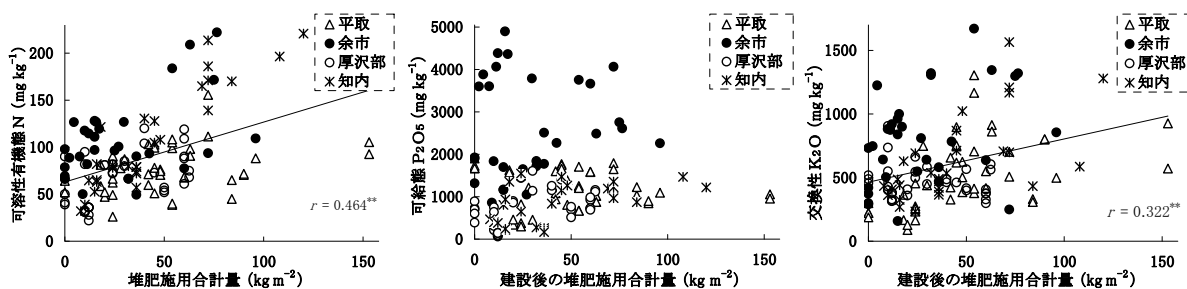


図 2-4 ハウス栽培開始後の堆肥施用合計量と可溶性有機態窒素，可給態リン酸，交換性カリウムとの関係

4. 考察

1) 各地域でハウスに施用される堆肥の性状

北海道における 2003 年の家畜糞尿の産出量は，牛糞尿が乳牛と肉牛とを合わせて 18,440 Gg，豚糞尿が 1,260 Gg である（北海道立農・畜産試験場 2004）。主要なハウス産地において有機物源として主に牛糞尿由来堆肥が施用されていたことは，この畜種構成を反映している。本州の例では，岩手県において施用される家畜糞尿由来堆肥の 8 割が牛糞尿由来とされ（小田島ら 2006），北海道ではこれよりやや牛糞尿由来の割合が高いことになる。次章以下において堆肥施用にかかる各試験では，全て牛糞尿由来堆肥を

施用した結果を論じているが、これは北海道における施用堆肥中の養分評価を論じる上で、適当な判断であると考ええる。

本調査で得られた牛糞尿由来堆肥中の各養分および乾物率の平均値から（表 2-13）、堆肥を 1 kg 施用したときの土壌への窒素、リン酸、カリウムの負荷量を算出すると、各々 4.1 g, 4.3 g, 3.8 g であった。これに対して、北海道施肥ガイド（北海道農政部 2002）ではハウスに堆肥を施用したときの各養分の減肥可能量として、堆肥 1 kg につき窒素を 2 g, リン酸をゼロ、カリウムを 4 g と評価している。

即ち、窒素については土壌に施用された堆肥中の窒素のうち約 50 %が無機化するものと見積もっていることに相当する。暖地の事例ではハウス栽培で牛糞堆肥中の窒素の 50 %が約 100 日弱で無機化したこと（郡司掛ら 1996）、露地野菜畑に牛糞堆肥を施用したときの窒素利用率が施用初年目には 30 %程度であったものが、15 年間連用すると平均で 50 ~ 57 %に高まったこと（上山ら 1995）、などの報告がある。これらのことから、寒冷地のハウス栽培においても堆肥を連用し、かつ 1 年当たりの栽培日数が長期に亘る場合は、堆肥中の窒素評価量を現状より高められる可能性があるものと考ええる。

リン酸については北海道施肥ガイドでは土壌に施用された堆肥中のリン酸を評価していないが、暖地では露地野菜畑でも牛糞堆肥の連用により可給態リン酸の高まることが知られており（大橋ら 1985 a）、平均的な乳牛糞尿由来堆肥に含まれるリン酸のうち 75 %が、水あるいは重炭酸ナトリウムで抽出される易溶性であるとの報告がある（横田ら 2003）。従って、積雪寒冷地でも堆肥に含まれるリン酸のうちの一定量を養分として評価する必要があるものと考ええる。

カリウムについては北海道施肥ガイドでは土壌に施用された堆肥中の概ね全量を評価していることに相当する。牛尾ら（2004）は家畜糞堆肥中のカリウムの肥効率を 90 ~ 95 %と見積もっており、植物体中のカリウムの大部分は水溶性であることから（高橋 1993）、北海道における現行の基準は妥当であると推察する。

2) 堆肥施用による土壌可溶性有機態窒素の増加

本調査では堆肥の施用により土壌可溶性有機態 N の高まることが認められた。一般にハウス土壌では露地栽培土壌よりも無機態 N 濃度のはるかに高いレベルにあるため、作物生育に影響を与える窒素供給において可溶性有機態 N の影響が相対的に小さいと考えられており、これまで、ハウス土壌における可溶性有機態 N についての知見は少なかった。このため、ハウス土壌の可溶性有機態 N について寒冷地と暖地との比較をするため

の事例数は少ないが、寒冷地では、暖地よりも有機物の分解が遅いにもかかわらず、1年当たりの堆肥施用量は暖地における実態（大西 1984, 江口 1994, 三好ら 2001）と大差ないので、経年的に堆肥由来の可溶性有機態Nが高まりやすい可能性がある。堆肥を施用したときには、そこに含まれている化学肥料相当分の施肥窒素を減らすが（北海道農政部 2002）、堆肥中の窒素全量を評価しているわけではないので、堆肥を連用すると徐々に可溶性有機態Nが高まることになる。

しかし、北海道のハウス栽培では暖地の場合と同様に、栽培前に無機態Nを診断するのみで、可溶性有機態Nを評価した施肥対応を行わないため、可溶性有機態Nの高まったハウスで分肥あるいは追肥を行うと、前述したようにその分が過剰に施肥されることになる。

現状ではハウスの可溶性有機態Nの評価基準が存在しないので、北海道の露地野菜畑の基準を適用してトマト栽培ハウスで可溶性有機態Nを評価してみると、作土の可溶性有機態Nが 50 mg kg^{-1} 以上あるときに、栽培品目別に $3 \sim 5 \text{ g m}^{-2}$ 程度の施肥窒素を減肥するので（北海道農政部 2002）、前節の調査結果から算出すると、平取町で 86 %、余市町で 97 % のハウスが窒素減肥の対象になる。ハウス栽培では露地畑よりも地温が高く栽培期間が長いため、露地畑以上に減肥が可能になるものとする。仮に可溶性有機態Nが 50 mg kg^{-1} 以上あるハウスで、窒素を 5 g m^{-2} 減肥した場合、平取町で平均 4.3 g m^{-2} 、余市町で同 4.9 g m^{-2} の窒素を減肥できることになる。ところが、本調査の範囲では両町において各ハウスの土壌可溶性有機態Nと窒素施肥量との間に一定の相関は認められず、窒素を施肥する上で可溶性有機態Nが考慮されていないことは明らかであった。

以上のことから、適正な施肥管理を行うためにはハウス栽培においても、堆肥の施用によって高まった可溶性有機態Nを評価して施肥量を決定すべきである。土壌の可溶性有機態N濃度と窒素施肥量との関係を明らかにするためには数多くの栽培試験を行うことが望ましいが、当面の実用技術としては、土壌に一定濃度以上の可溶性有機態Nがあるときに施肥窒素を減肥できるような基準を作成すべきと考える。

3) 土壌交換性カリウム、可給態リン酸との関係

堆肥の施用により土壌交換性カリウムも高まったが、その相関係数は可溶性有機態Nのそれより低かった。カリウムは堆肥よりも化学肥料や有機質肥料からの投入量が多く、かつ作物体による吸収量も多いので、堆肥の施用量と土壌交換性カリウムとの関係が明瞭でなかったものとする。

また、本調査では堆肥施用と土壤可給態リン酸の増加との関係は認められなかった。江口（1994）は鹿児島県の農家ハウスを実態調査して、堆肥の質が農家毎に大きく異なるために堆肥施用量と土壤可給態リン酸との関係が認められなかったとしている。これに加えて、本調査では土壤リン酸が主に施肥や土壤改良資材の施用に起因して富化したために関係が認められなかったと考える。堆肥施用によって土壤中のリン酸が増加するとの知見は主に暖地において多いが（大西ら 1984 a, 峰岸ら 1995, 堀ら 2003），北海道のハウス栽培ではリン酸の施肥量や資材投入量が多いため、一般的な農家ハウスでは堆肥に起因する増加が明瞭に見られなかったものとする。

5. 要約

北海道のハウス土壤を対象に、施用されている堆肥の性状と、堆肥施用が土壤に与える影響を検討した。

1) 平均的な牛糞尿由来堆肥を 1 kg 施用したときの土壤への窒素，リン酸，カリウムの負荷量は、各々 4.1 g, 4.3 g, 3.8 g と算出された。ハウスに堆肥を施用したときの北海道における施肥基準は、このうち窒素を約半分、カリウムを概ね全量評価していることに相当した。

2) 堆肥の連用に起因して土壤の可溶性有機態Nが高まっており、ハウス栽培においても可溶性有機態Nを評価して施肥量を決定する必要があると判断した。

3) 堆肥の連用に起因して土壤の交換性カリウムが高まる傾向が認められたが、可給態リン酸については一定の傾向は認められなかった。

第3章 土壌養分，特に硝酸態窒素の診断技術の改善

第1節 空間変動に基づく土壌診断のための採取点数

1. はじめに

施設栽培と露地栽培とでは施肥量，時期などの肥培管理方法が大きく異なっており，施設土壌において施肥設計のための土壌診断値を得るためには，肥培管理方法の特徴を考慮した試料採取を行うことが望ましい。しかし，寒冷地の施設栽培において土壌養分のハウス内偏倚や望ましい採取点数を論じた報告は見当たらない。

そこで，ハウス圃場内の空間変動を調査し，ハウス1棟を代表する適正な土壌診断値を得るために必要な採取方法について検討した。

2. 調査方法

1) 土壌採取および分析，採取点数の算出方法

土壌サンプルは各畦上を1畦につき16点ずつ直径25 mmの円筒状の採土器を用い深さ0.2 mまで採取した(図3-1)。採取した土壌は風乾後にpH，電気伝導率，硝酸態N，アンモニウム態N，可溶性有機態N(オートクレーブ抽出法)，可給態リン酸(Truog法)，交換性陽イオン(カリウム，カルシウム，マグネシウム)を測定した。ただし，農業試験場のハウスではアンモニウム態および可溶性有機態Nを分析しなかった。分析方法は前章と同じである。

各分析項目値が95%信頼限界で許容誤差の範囲内になる採取点数を求めるため，各項目の許容誤差を以下の通りとした。

- ・ pH : 0.2
- ・ 電気伝導率，硝酸態N，アンモニウム態N，可溶性有機態N，可給態リン酸および交換性陽イオン : 分析値の10%

計算式は以下のとおりとした。

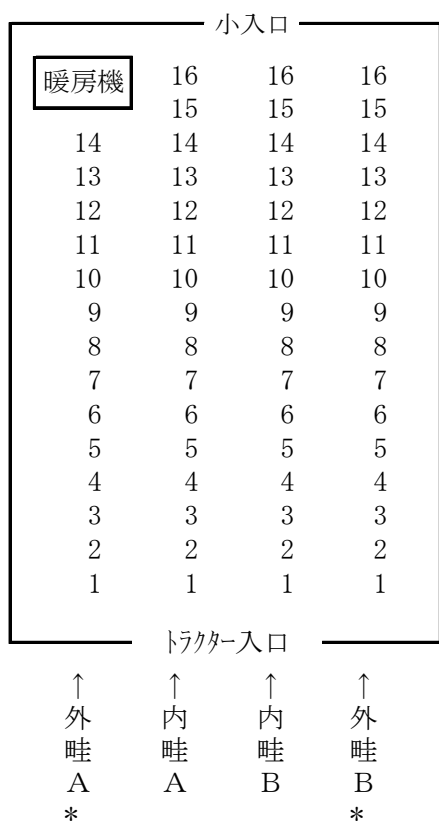
$$n = t^2 \times s^2 / d^2 / (1 + (t^2 \times s^2) / (N \times d^2))$$

(ただし，n : 採取点数，t : 1.96，s : 標準偏差，d : 許容誤差，N : 母集団の大きさ $\approx \infty$ とした。)

次項の2) 農業試験場ハウスでは全採取地点と中央部分（内側畦で出入口の各2地点ずつを除いた）とのそれぞれについて各項目の許容誤差を算出した。同様に3) 農家ハウスでは、全採取地点と出入口側の各2地点を除いた中央部分とで比較した。

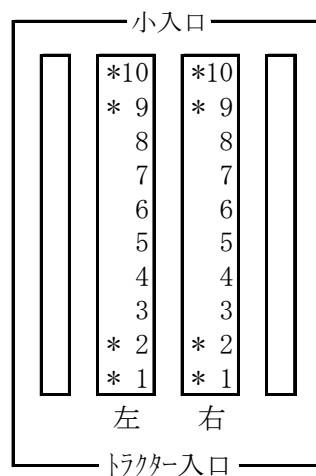
2) 農業試験場のハウスにおける栽培管理履歴

供試土壌は1996年8月上旬に道南農業試験場（北海道南部，北斗市）のデルフィニウム栽培ハウス跡地において採取した。このハウスでは1995年以前の数年間には野菜を栽培していたが，いずれの作も野菜用高度化成肥料を均一に施肥し，仕立て法や品種比較等の栽培試験を行っていた。土壌型は普通褐色低地土であった。リン酸質資材は無施用で，pH矯正資材として炭酸カルシウムを施用していた。堆肥は毎年春の作付け前に 4 kg m^{-2} をトラクターのフロントバケットによってハウス内の両出入口側に堆積し，人力で散布していた。ハウスは周年被覆され，デルフィニウムは1.8 m 間隔の4畦で栽培されていた（図3-1）。



注) *は，中央部分の計算から除外。

図3-1 採取場所見取り図（農業試験場ハウス）



注1) *は，中央部分の計算から除外。

注2) 農家ハウス③には畦はなし。

図3-2 採取位置見取り図

（農家ハウス①、②および③）

3) 農家ハウスにおける栽培管理履歴

(1) トマト収穫中の農家ハウス①

1997年7月上旬に北斗市のトマト収穫後期ハウスにおいて調査を行った（以下、農家ハウス①）。当ハウスは1970年代前半に建設され、この数年間は2月末～3月初旬定植のトマトと夏～秋のハウレンソウ2作とが交互に作付けされ、天井は毎年2月上旬～12月上旬まで被覆されていた。土壌型は褐色低地土であった。土壌改良資材として過磷酸石灰および苦土炭酸カルシウムを毎年トマト定植前に各 100 g m^{-2} 程度施用していた。堆肥は毎年トマト定植前に $7\sim 8\text{ kg m}^{-2}$ をトラクターのバケットによってハウス内の出入口側に堆積し、人力で散布していた。基肥は有機入り化成肥料で $\text{N-P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O}$ を $19\text{-}15\text{-}14\text{ g m}^{-2}$ 程度を手まきで散布し、栽培期間中の追肥は硝酸カルシウム肥料（ノルチッソ）で1回当たり硝酸態 N -アンモニウム態 N-C a O を $3.6\text{-}0.2\text{-}6.8\text{ g m}^{-2}$ 程度を5回通路に人力で散布した後、通路上に畦間かん水を行ってベッドに養分供給していた。トマトは両外側畦が各1条植え、内側畦が各2条植えの2畦で、合計4畦で栽培されていた。土壌サンプルは各内側畦上で 3.5 m 間隔に10点ずつの合計20点を採取した（図3-2）。

(2) トマト収穫中の農家ハウス②

1997年8月上旬に北海道の日本海沿岸南部にある江差町のトマト収穫前期ハウス（以下、農家ハウス②）において土壌採取した。当ハウスは1987年頃に建設され、2月下旬定植のレタスと6月上旬定植のトマトとが交互に作付けされ、天井は建設以来周年被覆されていた。土壌型はグライ低地土であった。土壌改良資材として約 50 g m^{-2} の重焼燐および約 200 g m^{-2} の苦土炭酸カルシウムを毎年トマト定植前に施用していた。堆肥は毎年トマト定植前に $8\sim 10\text{ kg m}^{-2}$ をトラクターのバケットによってハウス内の両出入口側に堆積し、人力で散布していた。トマト栽培時の基肥は、建設当初には野菜用化成肥料で $\text{N-P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O}$ を $10\text{-}10\text{-}10\text{ g m}^{-2}$ 程度を手まきで散布し、1995年以降は無施用であった。栽培期間中の追肥はベッド上に液肥で1回当たり $\text{N-P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O}$ を $4.0\text{-}1.1\text{-}2.7\text{ g m}^{-2}$ 程度を2回施用していた。トマトは農家ハウス①と同じ様式に栽培されていた。土壌サンプルは各内側畦上で 5 m 間隔に10点ずつの合計20点を採取した（図3-2）。

(3) ハウレンソウ作付け前の農家ハウス③

1998年5月上旬に北海道の日本海沿岸南部にある北檜山町のハウレンソウ作付け前

のハウス（以下、農家ハウス③）において土壌採取した。当ハウスは1989年に水田跡地に建設されて以来、ハウレンソウが1年当たり3作連作されており、天井は毎年4月上旬～11月上旬まで被覆されていた。土壌型はグライ低地土であった。施肥として各作毎に野菜用化成肥料で、N-P₂O₅-K₂Oを1年当たり合計28-37-28 g m⁻²程度、土壌改良資材として毎年ビニール被覆後に約100 g m⁻²の苦土炭酸カルシウムを施用していた。堆肥は数年前から無施用であったが、魚粕が毎作180～300 g m⁻²連用されていた。暗渠はハウス長辺方向と直角に数本埋設されていたが、1993年7月の北海道南西沖地震の後、出入口側の排水効果が見られなくなっていた。土壌サンプルはハウス長辺方向に2列、各列5 m 間隔に10点ずつの合計20点を採取した（図3-2）。

3. 調査結果

1) 農業試験場のハウスにおける分散偏倚

全採取地点における変動係数は硝酸態Nでは大きく、可給態リン酸では小さかった（表3-1）。交換性塩基ではカリウムの変動係数が大きく、カルシウムで小さかった。

pHは入口側よりも中央側で、外畦よりも内畦で、わずかに高かった。硝酸態Nは入口側で高く、可給態リン酸は内畦で高かった。交換性カリウムは入口側で、かつ内畦で高かった。交換性マグネシウムおよびカルシウムは中央側で高く、交換性マグネシウムは内畦で高かった（図3-3）。

表3-1 施設土壌分析項目の平均値および変動係数

調査ハウス	計算項目	pH (H ₂ O)	電気伝導率 dS m ⁻¹	硝酸態	アンモニウム態	可給態	可給態 P ₂ O ₅ mg kg ⁻¹	交換性陽イオン		
				N				K ₂ O	MgO	CaO
農試	平均	5.70	0.13	11	—	—	484	361	3151	509
	標準偏差	0.20	0.05	12	—	—	70	69	193	66
	変動係数%	3.5	37.1	111.0	—	—	14.5	19.1	6.1	13.1
農家①	平均	6.27	0.98	377	35	206	2225	1333	6473	1005
	標準偏差	0.32	0.61	383	31	49	133	257	636	83
	変動係数%	5.2	61.7	102	89	24	6	19	10	8
農家②	平均	5.36	1.02	297	14	89	378	524	4368	1067
	標準偏差	0.08	0.17	87	3	14	41	151	234	104
	変動係数%	1.5	17.0	29.2	21.8	15.2	10.8	28.7	5.4	9.7
農家③	平均	6.07	0.36	152	17	138	1134	548	4553	359
	標準偏差	0.36	0.12	63	14	48	256	100	563	25
	変動係数%	5.9	32.2	41.2	79.5	34.9	22.5	18.2	12.4	7.0

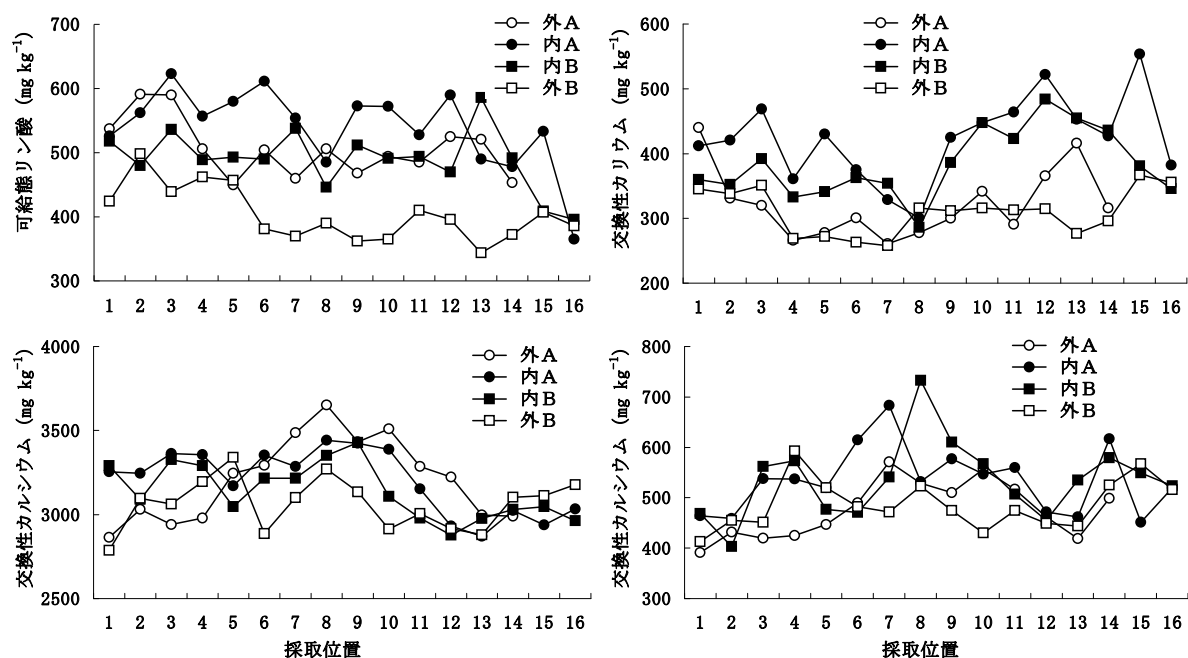


図 3-3 農業試験場ハウスにおける採取位置ごとの各項目の分析値

可給態リン酸および交換性塩基の許容誤差を 10 % 以内にする採取点数は、中央側の分散から算出した場合に 1 ~ 9 点と少なかった (表 3-2)。電気伝導率および硝酸態 N についてはともに採取点数が 60 ~ 400 点と著しく多く算出された。pH については全地点の分散から算出した場合に 3.8 点、中央部分で 4.0 点であり大きな差は認められなかった。

表 3-2 施設土壌分析項目が許容誤差の範囲内となる採取点数

調査ハウス	採取地点	pH (H ₂ O)	電気伝導率	硝酸態 N	アンモニウム態 N	可給態 P ₂ O ₅	交換性陽イオン			
							K ₂ O	MgO	CaO	
農試	全地点	3.8	52.7	473.4	—	—	8.0	14.0	1.4	6.6
	中央部	4.0	66.4	413.9	—	—	3.2	8.5	1.3	5.4
農家①	全地点	10.0	146.1	398.4	306.6	21.3	1.4	14.3	3.7	2.6
	中央部	3.3	136.6	356.2	306.7	13.8	0.9	4.8	3.9	1.2
農家②	全地点	0.6	11.2	32.7	18.3	2.4	4.5	31.7	1.1	3.6
	中央部	0.2	8.6	16.2	23.4	2.2	5.6	6.0	1.1	2.5
農家③	全地点	12.3	39.9	65.3	243.1	46.8	19.5	12.7	5.9	1.9
	中央部	4.6	27.1	32.4	201.4	53.8	17.8	5.9	1.8	1.7

2) 農家ハウスにおける分散偏倚

(1) トマト収穫中の農家ハウス①

硝酸態Nが高く、その分散幅は 23 ~ 1,550 mg kg⁻¹、変動係数は 101.8 %と大きかった。各形態Nの変動係数は、硝酸態>アンモニウム態>可溶性有機態Nの順に大きかった。可給態リン酸の変動係数は小さかった。交換性塩基の変動係数はカリウムが、マグネシウムおよびカルシウムよりも大きかった（表 3-1）。

硝酸態Nとアンモニウム態Nとは偏在場所が一致し、両者間に高い正の相関 ($p < 0.001$, $r = 0.965$) が認められたが、採取位置による一定の傾向は認められなかった。可溶性有機態N、可給態リン酸、交換性カリウムおよびマグネシウムはそれぞれハウス出入口側において高かった。可給態リン酸は交換性マグネシウムが高い位置において僅かに高かった（図 3-4）。交換性カルシウムは硝酸態Nが高い位置において高く、両者間には正の相関 ($p < 0.01$, $r = 0.786$) が認められた。

各分析項目の値が許容誤差の範囲内になる採取点数は、中央部分の分散から算出した点数が全採取地点からの点数よりも少なかった。電気伝導率および無機態Nについてはともに採取点数が顕著に多かった（表 3-2）。

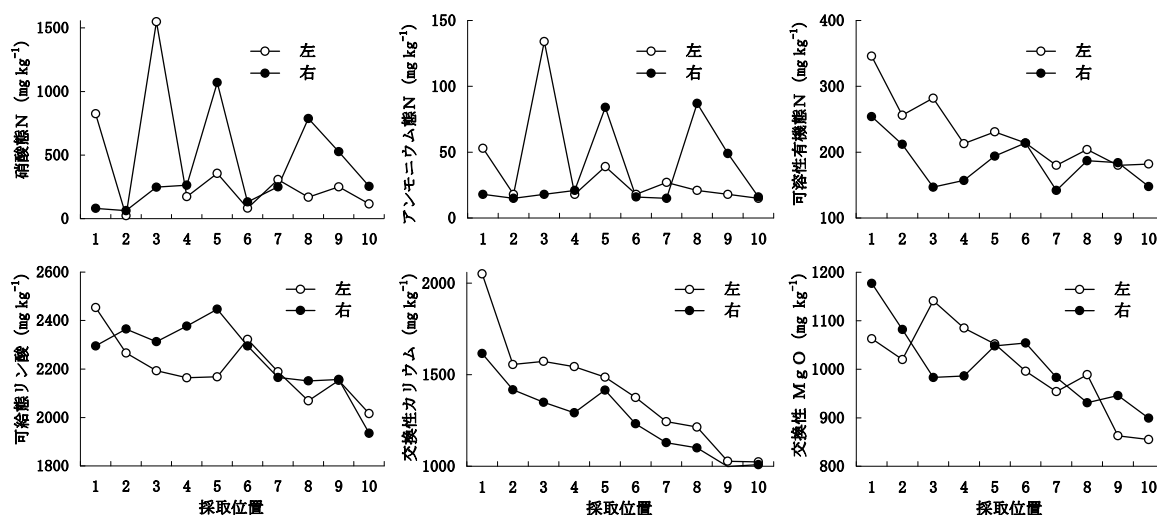


図 3-4 農家ハウス①における採取位置ごとの各項目の分析値

(2) トマト収穫中の農家ハウス②

硝酸態Nが高く、その分散幅は 93 ~ 415 mg kg⁻¹、変動係数は 29.2 %と大きかった（表 3-1）。交換性塩基の変動係数はカリウムがマグネシウムおよびカルシウムよりも

大きかった。

可溶性有機態Nおよび交換性カリウムはハウス出入口側において高かった（図 3-5）。可給態リン酸，交換性マグネシウムおよびカルシウムには採取位置による傾向は認められなかった。

各分析項目の値が許容誤差の範囲内になる採取点数は，アンモニウム態Nを除いて中央部分の分散から算出した点数が全採取地点からの点数よりも少なかった（表 3-2）。硝酸態Nについては採取点数が多かった。

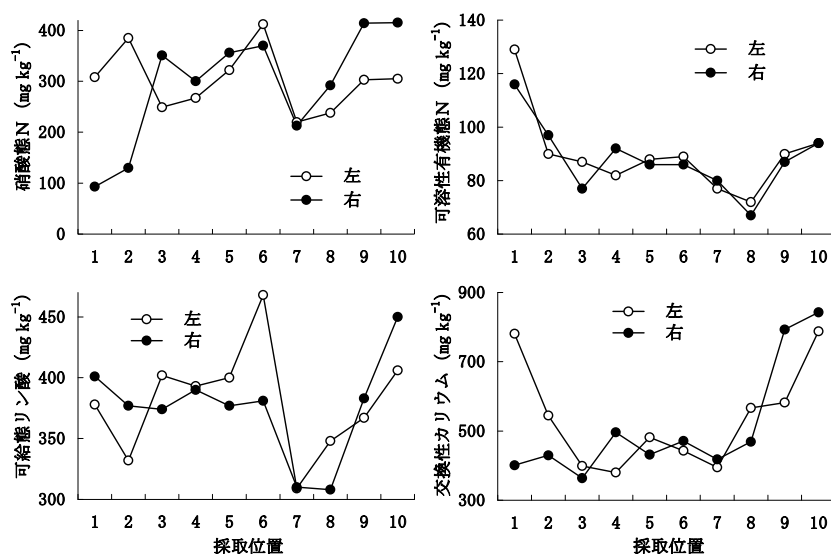


図 3-5 農家ハウス②における採取位置ごとの各項目の分析値

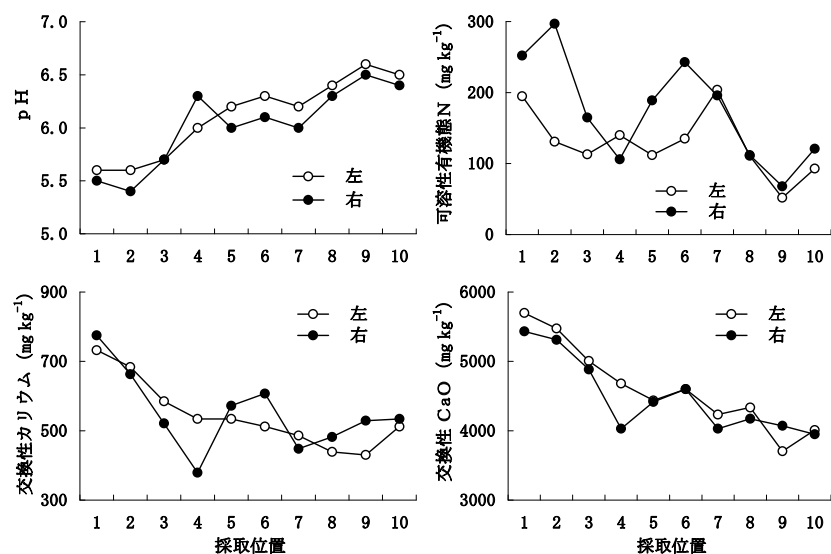


図 3-6 農家ハウス③における採取位置ごとの各項目の分析値

(3) ホウレンソウ作付け前の農家ハウス③

pHはハウス出入口側において低く、硝酸態Nおよび交換性カルシウムは出入口側で高かった（図 3-6）。可溶性有機態N，交換性カリウムおよびマグネシウムには採取位置による傾向は認められなかった。

各分析項目の値が許容誤差の範囲内になる採取点数は、可溶性有機態Nを除いて中央部分の分散から算出した点数が少なかった。電気伝導率，無機態および可溶性有機態Nについてはともに採取点数が多かった（表 3-2）。

4. 考察

1) 施設土壌診断における許容誤差

土壌診断を行う上で施設畑と水田・畑地等とが異なる点は採取時期，天井被覆の有無，肥料および土壌改良資材の投入量などである。すなわち，水田または畑地等における採取時期は多くの場合，収穫後の秋から翌年春までの間であり，無機態Nおよび交換性塩基はこの間に溶脱作用を受けている。一方，施設畑では栽培終了直後に診断し，すぐに次作の施肥が行われる場合が多く，降雨による溶脱がないため前作の肥料成分がそのまま残存していることが多い。したがって，施設畑では一般に施肥量が多く，中でも堆肥施用量は年当たりで畑地の数倍以上となる場合が多いため，土壌診断はそれらの残存量を評価することが主な目的となる。

本調査ではpHの許容誤差を0.2以内に，電気伝導率，無機態および可溶性有機態N，並びに可給態リン酸および交換性塩基の許容誤差を分析値の10%以内にするための採取点数を算出した。酸性矯正のための炭酸カルシウム所要量を求める際に北海道で従前から使用されているアレニウス氏表ではpHは0.2刻みで記載されている（北海道立中央農業試験場1981）。北海道では施設園芸作物に対して土壌診断に基づく施肥対応を行う際に，窒素施用量は土壌診断値の 50 mg kg^{-1} 単位で，リン酸施用量は $100 \sim 200 \text{ mg kg}^{-1}$ 単位で，カリウム施用量は $150 \sim 300 \text{ mg kg}^{-1}$ 単位で行うこととしている（北海道農政部2002）。また，金沢ら（1979，1981）は水田および畑地圃場における化学性分析値のバラツキを評価する際に，許容誤差を10%として必要試料数を算出している。藤本ら（1987）も畑土壌において同様の評価を行っている。以上のことから，各分析項目における上記の許容誤差は妥当と考える。

2) 化学肥料および土壌改良資材の施用に起因する偏倚

(1) pH

各ハウスにおいて許容誤差を 0.2 以内として算出した採取点数は全地点で 1～12 点であったが、中央部分では 5 点以内となり、従来から北海道の普及現場において行われているハウス 1 棟から 5～6 点を採取する方法は、pH を診断する上で適当である。

(2) 電気伝導率および無機態 N

農家ハウス①における窒素追肥の方法は水に溶けやすい形態の硝酸カルシウム肥料の通路への散布であることが多いため、土壌分析値は硝酸態 N が高い地点では交換性カルシウムが高く、また、硝酸態 N とアンモニウム態 N とはハウス内における偏在場所が一致していた。当ハウスでは無機態 N の変動係数が他の項目の係数よりもはるかに大きく、この無機態 N の偏在要因の第一は、追肥された肥料が原因していると考えられる。農家ハウス②における追肥は液肥で施用されていることと、追肥量が少なかったため、このような偏在が起らなかったと考えられる。農家ハウス③における硝酸態 N は出入口側において高かったが、この原因は出入口側の暗渠の排水機能が低下し、冬期間の溶脱量が入り側で少なかったものと考えられる。

電気伝導率および硝酸態 N が許容誤差（分析値の 10 %）の範囲内になる採取点数は、ハウス毎に大きく異なり、電気伝導率では 9～140 点、硝酸態 N では 16～400 点であった。トマト栽培期間中の追肥に起因するムラが現れた農家ハウス①では、採取点数が顕著に多くなり、診断値を得ることは実際上不可能であった。一方、液肥で追肥された農家ハウス②および冬期間の溶脱後の施肥前に採取した農家ハウス③においては、採取点数が比較的少なかった。これらの採取点数は許容誤差を分析値の 10 % として算出したが、相馬（1986）はハウレンソウに対する窒素施肥量を適正化するために、電気伝導率（EC 値）による土壌診断を行い、このとき EC 値を 0.25 dS m^{-1} 単位で窒素減肥を行っている。また、北海道において園芸作物に対する土壌診断に基づく施肥対応では、窒素施肥量は硝酸態 N 診断値の 50 mg kg^{-1} 単位で行うこととしている（北海道農政部 2002）。したがって、実用上の許容誤差はそれらの 2 分の 1 である EC 値で 0.125 dS m^{-1} 、硝酸態 N で 25 mg kg^{-1} を妥当と判断した。これで算出した採取点数は農家ハウス③の中央部分で 12.0 点と少なくなり、分析値の絶対値や分散の小さい農試ハウスでは顕著に少なくなった（表 3-3）。

作土の電気伝導率、または無機態 N を評価して次作の基肥量を決定することは、施設

栽培における重要な基本技術である。本調査から得られた結果から、農家ハウス③のように全面全層施肥で前作の施肥ムラが小さい場合や天井被覆が排除されて溶脱を受けた場合などでは、分析値の変動係数が小さく、栽培跡地または春先の施肥前の作土を採取して診断することは可能と考えられた。一方、栽培期間中の追肥については、農家ハウス②のように一般的な方法（ベッド上への液肥）で追肥する場合でも、ベッド表面には必ず高低差があり、施用された追肥窒素は凹部などに偏在する。そのため、多肥・多回施用栽培する作物では、追肥前の作土の電気伝導率または無機態N診断による次の窒素追肥の判断は、栽培前の土壌窒素のムラが小さい場合に適用すべきであり、この場合でも採取点数を20点程度と多くする必要がある。

表 3-3 許容誤差が電気伝導率で 0.125 dS m^{-1} ，
無機態Nで 25 mg kg^{-1} の範囲内となる採取点数

調査 ハウス	採取 地点	電気 伝導率	無機態 N	
			硝酸態	アンモニウム態
農試	全地点	0.6	0.9	—
	中央部	0.7	0.7	—
農家①	全地点	90.3	903.8	6.0
	中央部	98.9	1149.9	8.5
農家②	全地点	7.5	46.2	0.1
	中央部	5.7	23.2	0.1
農家③	全地点	3.3	24.0	1.1
	中央部	2.3	12.0	1.5

(3) 可給態リン酸

リン酸は自然状態での存在量が少なく、かつ土壌中では殆ど移動しない成分である上に、施設栽培では‘施用量>持ち出し量’となる場合が多く、散布ムラの指標になると考えられる (Mallarino 1996)。

土壌可給態リン酸は農試ハウスでは内側の畦で僅かに高く、農家ハウス①では出入口側が、③では奥側が高かった。リン酸は農試ハウスおよび農家ハウス③においては野菜用化成肥料の成分として、農家ハウス①においては加えて土壌改良資材として、それぞれ散布され、ハウス内の周辺部に散布ムラが現れていた。

土壌可給態リン酸が許容誤差の範囲内となる採取点数は、中央部分の分散から算出す

ると、農家ハウス③を除いて6点以下であった。そのため、ハウス1棟から5～6カ所を採取する方法は可給態リン酸を診断する上で概ね適当である。

(4) 交換性塩基

マグネシウムとカルシウムは土壌改良資材として大量に施用され、かつ冬期間に溶脱を受けやすいことから、施用ムラとともに溶脱ムラの指標になると考えられる。

土壌交換性マグネシウムは農試ハウスにおいて内側の畦で僅かに高く、農家ハウス①では出入口側が高かった。マグネシウムは農試ハウスにおいて野菜用化成肥料の成分として、農家ハウス①では加えて土壌改良資材としてもそれぞれ散布され、ハウス内の周辺部に散布ムラが現れていた。

交換性マグネシウムおよびカルシウムが許容誤差の範囲内となる採取点数は、各ハウスとも概ね5～6点以下であった。

なお、土壌交換性カルシウムは農家ハウス③において出入口側が高く、この原因は出入口側の暗渠の排水機能が低下し、冬期間の溶脱量が出入口側において少なかったためと考えられる。したがって、暗渠の排水効果ムラと溶脱ムラを避けるためにはハウスの手前側から奥側までを採取することが望ましく、併せて暗渠機能の維持が必要である。

3) 堆肥の施用に起因する偏倚

放牧地において糞尿の局部的還元が土壌窒素およびカリウム存在量の偏倚を引き起こすこと（早川ら1964）、可溶性有機態N（山田ら1989）、並びに交換性カリウム（久野1997）は堆肥施用により増加することから、両分析値は堆肥施用ムラの指標になると考えられる。

可溶性有機態Nは農家ハウス①および②において出入口側で高かった。土壌交換性カリウムは農試ハウスにおいて出入口側および内側の畦で高く、農家ハウス①および②において出入口側で高かった。一方、農家ハウス③では同様な傾向は見られなかった。農試ハウスおよび農家ハウス①②では堆肥が毎年連用されており、その施用方法はトラクターのバケットによってハウス内の出入口付近に堆積して、人力で散布していたことから、出入口側に多く施用され、堆肥に由来する可溶性有機態Nと交換性カリウムが富化したと考えられる。窓際には堆肥を散布しにくいため、交換性カリウムは農試ハウスの内側の畦で高く、一年当たりの堆肥施用量が多い農家ハウス①②では出入口側で顕著に高かったと考えられる。一方、農家ハウス③では堆肥を施用していないことから、このような偏在は見られなかった。

可溶性有機態Nが許容誤差の範囲内になる採取点数は、出入口側を除いた中央部分の分散から算出して2.2～53.8点と農家ハウス毎に違いが見られたが、交換性カリウムについては、概ね6点以下であった。したがって、出入口側を避けて土壌採取することにより堆肥散布のムラを避けることができる。

4) 採取上の注意点

各項目の診断値が許容誤差の範囲内になる採取点数は、ほとんどの場合、出入口側を除いた中央部分の分散から算出すると少なくなった。堆肥、土壌改良資材および化学肥料の施用ムラが現れやすい出入口付近の採取を避けることで採取の精度が高まったと考えられる。

pHが許容誤差の範囲内になる採取点数は各ハウスにおいて5点以下、窒素以外の主要な施肥成分についても前述の通り5～6点以下である。作土の化学性を診断する際に一般に行われる‘一筆の圃場から5～6カ所’は窒素以外についての採取点数として適当である。

窒素について硝酸態Nが 25 mg kg^{-1} の誤差範囲内になる採取点数は冬期間の溶脱を受けた後に土壌採取した農家ハウス③において12点であり、従来の5～6点では不十分である。施肥前の硝酸態Nを診断するには10点程度の採取が必要と考える。

また、農家ハウス①のように通路に多量の粉状もしくは粒状肥料を追肥して、栽培終了直後や周年天井被覆のため溶脱を受けない場合には、次作の施肥診断を行う時に残存窒素のムラが生じていることが多い。このような追肥法の場合、数百点の採取が必要となり診断値を得ることは実際上不可能である。

土壌診断に基づく施肥法は、このような追肥法を行っているハウスには適用できない。

以上のことから、施設土壌診断のために作土を採取する際には以下の注意が必要である。

- ① 出入口側と窓際を避け中央側を採取すること。
- ② ハウスの手前側から奥側までを5～6カ所にわたって採取すること。ただし、施肥前の硝酸態Nを診断するには、10点程度の採取が必要である。
- ③ 前作で粉状もしくは粒状肥料を通路に施肥して通路かん水によりベッドに養分供給する追肥法を行っている場合には、電気伝導率と無機態Nについて信頼性の高い診断値を得ることは困難である。

なお、本報告では土壌養分の分散と栽培作物生育との関係を検討できなかった。土壌養分の中でも特に無機態Nの分散は、作物生育ムラの原因となり、作物生育ムラは養分の偏在を助長する。これらの関係を是正するための施肥技術の向上が必要である。

5. 要約

施設栽培においてハウス1棟を代表する適正な土壌診断値を得るための土壌採取方法について検討した。

1) 作土を採取する際には、施肥や堆肥施用のムラを避けるために出入口側および窓際を避け中央側を採取すること、暗渠の排水効果ムラおよび溶脱ムラを避けるためにハウスの手前から奥側までを数カ所にわたって採取することが望ましい。

2) 各分析項目についての採取による許容誤差をpHで0.2以内、可給態リン酸および交換性塩基で分析値の10%以内にするには、ハウス1棟からの採取点数を5～6カ所とするのが適当であった。

3) 施肥前の硝酸態Nについて許容誤差を 25 mg kg^{-1} 以内に診断するには、10カ所程度の採取が必要であった。ただし、前作で通路に施肥をして通路かん水によりベッドに養分供給する追肥法を行っている場合には、電気伝導率と無機態Nについて信頼性の高い診断値を得ることは困難であった。

第2節 果菜類，特にトマトの作物生育特性に基づく下層土診断法

1. はじめに

前章で明らかになった通り，寒冷地における建設後年数の長いハウスでは下層土に硝酸態Nが残存しているが，従前の土壌診断法では施肥前の作土に残存した硝酸態Nを評価して施肥量を決めているため，下層土に存在する硝酸態Nを評価することができず，結果的に過剰な施肥が行われている恐れがある。また，長期にわたり栽培される果菜類等は追肥を行うのが一般的であるが，追肥時期における作物根は下層土に達し，そこに存在する硝酸態Nを吸収するものと想定される。

そこで，本節ではハウス土壌の下層土における硝酸態Nの残存特性および作物体による利用特性を明らかにし，下層土に残存する硝酸態Nを評価した施肥改善法を構築することを目的とする。

2. 試験方法

1) 下層に残存する硝酸態窒素の作物による利用特性

北海道における代表的なハウス作物であるトマト（品種；ハウス桃太郎）および軟白ネギ（品種；元蔵）について下層に残存する硝酸態Nの吸収時期と深さを2002年5～9月に中粒質普通褐色低地土（北海道北斗市，道南農業試験場）のハウスにおいて検討した。供試土壌における跡地の一般化学性を表3-4に示した。

表3-4 供試土壌の化学性（栽培跡地）

深さ cm	含水率 g kg ⁻¹	pH	EC dS m ⁻¹	可溶性有機態N mg kg ⁻¹	可給態P ₂ O ₅ mg kg ⁻¹	交換性塩基 (mg kg ⁻¹)		
						K ₂ O	CaO	MgO
0～20	175	6.2	0.12	25.0	272	462	3695	488
20～40	180	6.1	0.07	23.7	239	469	3380	476
40～60	186	6.1	0.07	23.1	244	471	3375	482
60～80	191	6.0	0.10	23.9	242	465	3386	486
80～100	215	6.0	0.09	21.4	226	433	3410	500

注) 可溶性有機態Nはオートクレーブ抽出法 (105℃, 60 min) , 可給態P₂O₅はトルオーグ法。

直径0.4 m，深さ1 mの円型枠を埋設して2反復で試験した。トマトで深さ90 cmまたは60 cmの何れかに50 g m⁻²の硝酸態Nを，軟白ネギでは深さ80 cmまたは40 cmの何れかに25 g m⁻²の硝酸態Nを各々硝酸カルシウムで定植前に施肥し，各作物毎に生育

を対照区（基肥は無施用，定植後 28 日目から同量の硝酸態 N を表層から追肥）と比較した。両作物とも 4 月定植夏秋どり作型で，栽植密度はトマトが 8.0 本 m^{-2} ，軟白ネギが 79.6 本 m^{-2} とした。かん水は作土層の水分ポテンシャルがトマトで 98.1 kPa ，軟白ネギで 19.6 kPa になったときを目安にして 1 回につき 10 L m^{-2} を全面に行った。栽培期間中は枠全面を白黒二層マルチで被覆した。リン酸およびカリウムはトマト，軟白ネギともに $\text{P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O}$ を基肥で $20\text{-}25 \text{ g m}^{-2}$ を各々施肥した。

土壌は 20 cm 毎の層位別に採取し，風乾後に土壌硝酸態 N をフェノール硫酸法で分析した。トマトの収量は全収量であり，トマトおよび軟白ネギの生育は生育指数「草丈 (cm) \times 平均茎径または葉鞘径 (cm)」で示した。

2) トマトおよび軟白ネギの根系

トマトおよび軟白ネギを一般的な条件で栽培したときの根系を調査した。場所は前項と同じである。施肥はトマトで基肥 $\text{N-P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O}$ を $10\text{-}20\text{-}20 \text{ g m}^{-2}$ ，追肥 $\text{N-K}_2\text{O}$ を定植後 30 ~ 70 日目頃に合計 $20\text{-}20 \text{ g m}^{-2}$ ，軟白ネギで基肥 $\text{N-P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O}$ を $10\text{-}10\text{-}8 \text{ g m}^{-2}$ ，分肥 $\text{N-K}_2\text{O}$ を定植後 30 日，60 日目頃に各々 $5\text{-}4 \text{ g m}^{-2}$ とした。栽植密度はトマトで 3.3 本 m^{-2} ，軟白ネギで 83.3 本 m^{-2} とした。その他は前項と同様である。

根系の密度はライン交差点法（山内，1998）に基づき 50 mm 四方の枠と交差する根の本数により調査した。

3) 土壌物理性がトマトの下層窒素吸収に与える影響

トマトの根が下層の硝酸態 N を吸収するときに，下層土における耕盤や砂礫の存在が物理的な障害要因となる可能性があるため，その影響を検討した。

前項と同様の枠試験において，耕盤層の存在を想定し，遮根布を深さ 40 cm または 80 cm に敷いた処理と，砂礫層の存在を想定し，直径 $5 \sim 10 \text{ mm}$ の軽石を深さ 40 cm 以深または 80 cm 以深に厚さ 10 cm に敷いた処理を設け，根域制限条件を作出した。各枠に深さ 90 cm に 50 g m^{-2} の硝酸態 N を施肥して夏秋どり作型でトマト栽培し，対照区（根域制限なし）と生育を比較した。その他の試験条件は前項と同じである。

4) 下層土の容積重の推定

北海道におけるハウス土壌の下層土は泥炭や重粘土があり，その容積重は 0.2 Mg m^{-3} 程度から 1.4 Mg m^{-3} を超えるものまで様々である。このため，下層に残存する硝酸態 N を評価して施肥量を算出するためには下層土の容積重を推定し乗じる必要がある。

北海道の融雪期（主に 3 月下旬から 4 月中旬頃）において，冬期に積雪下にあったハ

ウスの下層土は概ね飽水状態にあると想定できる。そこで、北海道南部の低地土（n=91），泥炭土（n=51），台地または黒ボク土（n=28）を対象に1998年～2000年に亘り各4月中旬頃に次表層以下の土壌を採取し、土壌含水率と容積重との関係を調査した。

3. 試験結果

1) 下層に残存する硝酸態窒素の作物による利用特性

トマト栽培では定植前に深さ60 cmに硝酸態Nを施肥した区の生育および収量が対照区と同等であり、深さ90 cmに施肥した区では対照に劣った。軟白ネギでは深さ40および80 cmに硝酸態窒素が残存する区で対照よりも生育が劣った（表3-5）。深さ60 cm施肥トマト栽培区における層位別の土壌硝酸態Nは、栽培期間を通じて深さ40～80 cmにおいて増減を繰り返しながらトマトの生長に従って減少した。深さ40 cmより上の層位における濃度は栽培期間を通じて低く推移した（表3-6）。深さ40 cm施肥軟白ネギ栽培区における層位別の土壌硝酸態Nは、定植後84日目頃までは徐々に深さ40～60 cmから深さ20～40 cmに上昇したが、その合計量は減少せず、それ以降は軟白ネギの生長に従って各層位で徐々に減少した（表3-7）。

表3-5 窒素施肥位置が各作物の生育・収量に与える影響

処理	トマト		軟白ネギ
	生育指数 ^b	全収量 (kg m ⁻²)	生育指数 ^b
深さ90 cm (80 cm ^a) に施肥	379	18.6	151
深さ60 cm (40 cm ^a) に施肥	434	23.7	155
定植後28日目から追肥 (対照区)	436	24.8	178

^a カッコ内は軟白ネギの場合。^b 生育指数=草丈 (cm) × 平均茎径または葉鞘径 (cm)。

表3-6 深さ60 cmに施肥したトマト栽培区における層位別土壌硝酸態Nの推移

採取層 (cm)	層位別の土壌硝酸態N (mg kg ⁻¹)										
	14 ^a	28	42	56	70	84	98	112	126	140	156
0～20	4	3	3	3	3	4	5	4	6	7	8
20～40	5	4	3	2	3	4	5	4	5	5	8
40～60	18	38	70	54	92	70	60	41	53	46	32
60～80	148	134	116	111	63	43	69	69	44	43	63
80～100	12	11	11	14	7	6	8	7	6	7	8

^a 定植後日数。^b 処理；定植前に深さ60 cmに硝酸態Nを施肥した。

表 3-7 深さ 40 cm に施肥した軟白ネギ栽培区における層位別土壤硝酸態Nの推移

採取層 (cm)	層位別の土壤硝酸態N (mg kg ⁻¹)									
	28 ^a	42	56	70	84	98	112	126	140	156
0～ 20	7	6	2	3	4	5	2	3	2	1
20～ 40	21	28	32	44	47	28	26	40	32	27
40～ 60	79	78	68	57	51	38	51	33	25	23
60～ 80	9	15	16	15	15	11	10	8	7	7
80～100	6	10	10	11	12	11	5	6	13	4

^a 定植後日数。 ^b 処理；定植前に深さ 40 cm に硝酸態Nを施肥した。

2) トマトおよび軟白ネギの根系

トマトの根系は追肥時期の前半には既に深さ 60 cm 程度に到達したが（表 3-8），軟白ネギの根系は栽培終了時でも殆どが深さ 20 cm 以内の作土層に存在した（表 3-9）。

表 3-8 定植以降のトマトの根系伸長

深さ (cm)	定植後日数				
	0日目	14日目	28日目	42日目	56日目
0～ 10	46.6 ± 7.3	45.8 ± 12.3	38.1 ± 9.5	44.7 ± 8.9	56.4 ± 17.8
10～ 20		19.8 ± 8.4	16.7 ± 7.1	28.8 ± 9.4	31.6 ± 21.6
20～ 30		6.5 ± 2.7	2.9 ± 1.0	5.1 ± 1.2	17.2 ± 10.2
30～ 40		0.2 ± 0.3	0.8 ± 1.0	2.6 ± 1.8	25.9 ± 9.3
40～ 50				2.5 ± 1.0	36.4 ± 2.0
50～ 60				1.0 ± 1.0	24.2 ± 11.1
60～ 70				0.2 ± 0.3	11.5 ± 11.0
70～ 80					2.5 ± 2.3
80～ 90					1.1 ± 1.0
90～100					1.0 ± 1.2

注) ライン交差点法による推定根長 (m m⁻³)

表 3-9 収穫時のトマトと軟白ネギの根系

深さ (cm)	推定根長 (m m ⁻³)	
	トマト	軟白ネギ
0～ 10	53.9	372.9
10～ 20	55.0	161.7
20～ 30	45.1	52.8
30～ 40	39.6	6.6
40～ 50	20.9	3.3
50～ 60	25.3	0.0
60～ 70	26.4	
70～ 80	15.4	
80～ 90	23.1	
90～100	11.0	

3) 土壌物理性がトマトの下層窒素吸収に与える影響

トマトの生育は何れの根域制限条件でも対照区と比較して抑制され、根域を浅く制限するほど著しかった。制限方法を比較すると、軽石層のほうが遮根布よりも生育を抑制した（表 3-10）。栽培終了時の土壌硝酸態Nは軽石層系列では深さ 60 cm よりも浅い層には殆ど認められなかった（表 3-11）。

表 3-10 根域制限がトマトの生育に与える影響

処理	制限深さ (cm)	生育 ^a 指数	全収量 (kg m ⁻²)
遮根布	40	335	23.0
	80	351	25.9
軽石層	40	284	20.9
	80	296	23.0
対照区	(無制限)	441	37.3

^a 生育指数 = 草丈 (cm) × 平均茎径 (cm)。

表 3-11 トマトの根域制限処理別の跡地土壌における層位別硝酸態窒素

深さ (cm)	土壌硝酸態N (mg kg ⁻¹)				
	遮根布		軽石層		対照 (無制限)
	深さ40cm	深さ80cm	深さ40cm	深さ80cm	
0~ 20	11 ± 6	11 ± 2	9 ± 3	13 ± 2	11 ± 5
20~ 40	7 ± 4	5 ± 0	5 ± 1	6 ± 2	6 ± 1
40~ 60	45 ± 25	31 ± 25	12 ± 4	3 ± 1	13 ± 3
60~ 80	83 ± 77	33 ± 27	65 ± 31	55 ± 23	86 ± 37
80~100	10 ± 9	20 ± 19	21 ± 9	66 ± 26	5 ± 0

4) 下層土の容積重の推定

土壌タイプ別に土壌含水率を見ると、泥炭土で低く低地、台地等の膠質土で高い傾向にあった。融雪期の土壌含水率と容積重との間には高い相関が得られ ($R^2=0.957$)、土壌含水率 ($g\ kg^{-1}$) を x として「容積重 ($Mg\ m^{-3}$) = $10^{-6}x^2 - 0.003x + 1.94$ 」の関係が得られた（図 3-7）。

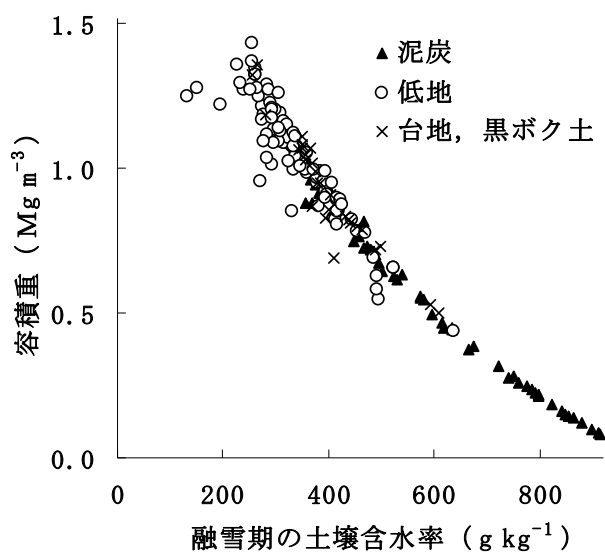


図 3-7 融雪期における下層土の含水率と容積重との関係 (n=170)

4. 考察

1) 下層に残存する硝酸態窒素の作物による利用

本節におけるトマト栽培では、一般的なトマト栽培法に従ってかん水量を少なく管理したが（荒木 1994），層位別の土壌硝酸態Nの推移を見ると，下層から作土層に向かって上昇したN量は少なかったものと考えられる。また，トマトの窒素吸収と根系の伸長程度との間に関係のあることが知られる（Jackson ら 1990）。これらのことから，下層に残存する硝酸態Nがトマトに吸収されるのは，主にトマトの根が到達する深さに依存すると考えた。トマトの根系は，北海道における夏秋どり作型で一般的に追肥時期の前半に相当する定植後 42 日目には深さ 60 cm 程度に到達していたが，軟白ネギの根系は栽培終了時でも作土層より深くには到達していなかった。ネギと同じ *Allium* 属作物であるタマネギも浅根性作物であり（Greenwood ら 1982），従って，両作物が下層に残存する硝酸態Nに対して異なる反応を示したのは両作物の根系が異なるためと考える。下層に存在する硝酸イオンは作土層が乾燥するとマスフローにより上に向かって移動するものと考えられるが（飯塚ら 1982），ハウス栽培のように適当なかん水を行い，かつマルチを被覆して土壌の乾燥を避ける条件では，下層に存在する硝酸イオンの吸収は，到達した根系の深さに主に依存するものとする。ただし，軟白ネギ栽培においても生育後半に土壌硝酸態Nが僅かな減少傾向を示したが，これは作土層の乾燥に伴い下層から徐々に上昇した硝酸態窒素が作物体に吸収されたものとする。なお，深さ 90 cm に

施肥した硝酸態Nも、生育後期にはトマトの根が到達して吸収されていたと推察するが、吸収時期が遅かったため生育および収量に反映しなかったものと考えられる。

以上のことから、トマト等の深根性作物を栽培する場合には定植前に深さ 60 cm までの下層に残存する硝酸態Nを追肥窒素と同様に評価することができると結論した。

2) 下層土診断を可能にする土壌条件等

下層土に残存する窒素を利用するためには、下層の物理的性質が根系の伸長を阻害しないことが条件になる。

本節では軽石層のほうが遮根布よりも生育を抑制したが、軽石層では下層から供給される水が遮断されたことに加え、水移動に伴う硝酸態Nの移動も抑制されたためと考えた。ただし、実際の硬盤層での水移動は遮根布のモデルよりも制限されると想定されるので、この結果から砂礫層のほうが硬盤層よりも作物の生育を阻害するとは結論できない。

このように、本項で想定した物理的阻害要因である砂礫層や硬盤層の存在は、その下の層に残存する硝酸態窒素のトマトによる吸収を制限することから、根の伸長を阻害する堅密固結層やグライ層なども同様に下層窒素の吸収を阻害すると推定できる。なお、硬盤層が根の伸長を阻害する程度はその硬度により異なるが、実際の診断では細根の発達を阻害する 981 k Pa 以上（三好 1972）の場合に阻害要因と見なすことが妥当であろう。

なお、北海道の代表的ハウス産地では、土壌診断に基づく施肥対応を行っていないハウスにおいて施肥前の下層に残存する硝酸態Nが、土壌診断を例年実施するハウスより平均で約 2 倍高い傾向にあり、また、暗渠のないハウスでは下層の硝酸態Nが暗渠の埋設されたハウスよりも高かったとの報告がある（林ら 2004）。農業現場において施肥前に下層土を診断することは作業負担を増加させることになるため、実用場面では、下層土診断を行うべきハウスの条件をある程度限定することが望まれる。従って、下層土診断の前提として、土壌診断に基づく施肥対応を実施していないハウス、暗渠の設置されていないハウスを対象にすることが妥当と判断する。

3) 下層土の容積重の推定

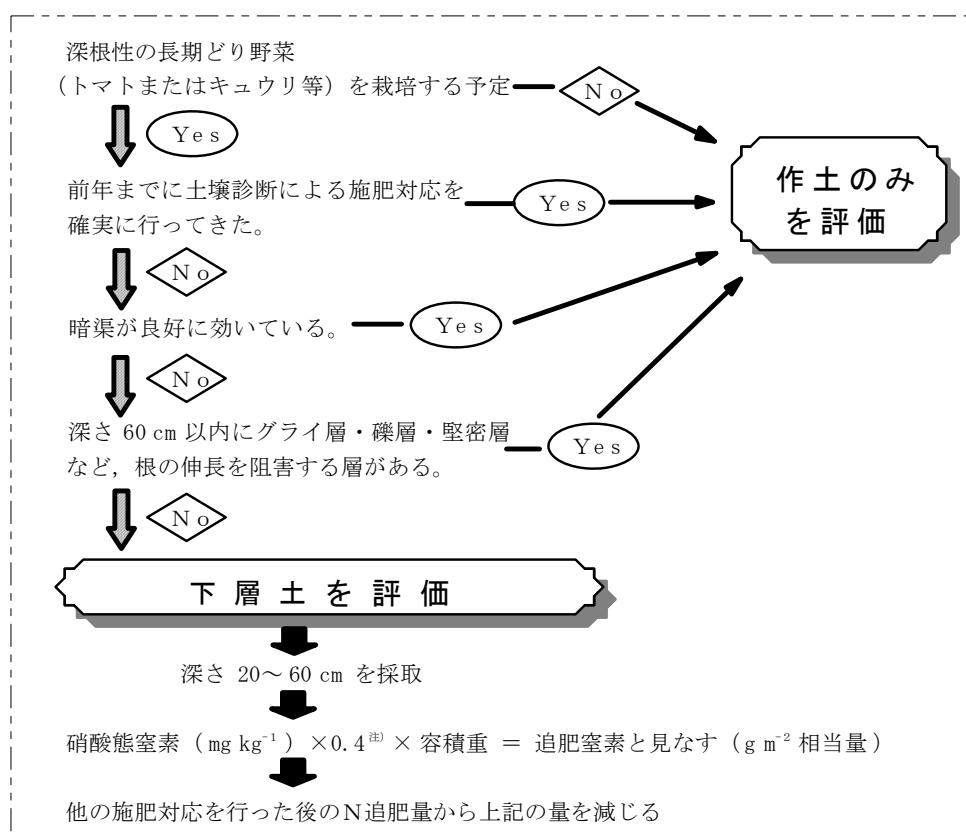
一般に土壌中の硝酸態Nと施肥窒素とは、ほぼ同等の肥効があるものとの前提があるが、層位別に測定した土壌硝酸態Nを施肥窒素量に相当させるためには、土壌の容積重を乗じて面積当たりの量に換算した上で比較することが望ましい。

容積重を他の分析項目から推定する方法としては、土壤有機物含量と容積重との間に密接な関係があることから（仲谷ら 1974），有機物含量からの推定法（Ruehlmann ら 2009）が有効である。一方、積雪寒冷地では融雪期の土壤水分が概ね飽和状態にあると想定され、容積重から有効水分容量を推定した事例（神山ら 1993）があることから、本節では融雪期の含水率を用いて推定した。その結果、多くの下層土において容積重レベルを推定することが十分に可能であることが明らかになった。

なお、実際の診断では、仮に容積重を 1 Mg m^{-3} とすると窒素 $1 \text{ mg kg}^{-2} \times 1 \text{ Mg m}^{-3} = 1 \text{ mg L}^{-1}$ となり、深さ 10 cm 当たり 1 m^2 当たりの窒素は 100 mg m^{-2} である。即ち、土壌中の窒素を 1 mg kg^{-2} 増加させるための施肥量は窒素 0.1 g m^{-2} に相当する。深さ $20 \sim 60 \text{ cm}$ の土層を採取すると、この 4 倍量が追肥と同様に利用可能な窒素となる。

4) ハウス下層土診断法の作成と有効性

以上の結果から、北海道のハウス栽培における下層土診断法を図 3-8 のように提案した。



注) 深さ 10 cm 当たり土壌中の窒素 1 mg kg^{-2} は、容積重を 1 Mg m^{-3} とすると窒素 0.1 g m^{-2} に相当。
深さ $20 \sim 60 \text{ cm}$ (厚さ 40 cm 分) の土層を採取して、この 4 倍量を評価。

図 3-8 ハウス下層土診断法

本診断法を実際の営農現場に適用した際の有効性を明らかにするため、第2章第1節における実態調査のデータから、窒素減肥可能量を算出した。下層土診断法はトマト等の深根性作物を対象にした方法であるが、一般にハウス栽培では輪作や交互作が行われ、トマトの前後作に他の品目を栽培する事例が多い（林ら2009）。従って、トマト栽培が行われている平取町と余市町はもとより、他の地域についても深根性作物が栽培されることを想定して試算を行った。

各地域における基肥前の土壌硝酸態Nから追肥窒素の減肥量を算出すると、現行法では各産地とも少なく、 $0 \sim 0.7 \text{ g m}^{-2}$ であった（表3-12）。図3-8に示した下層土診断法により深さ20～60 cmの硝酸態Nを評価すると、トマト産地である平取、余市両町で24.2および13.6 g m^{-2} 、厚沢部町および知内町では9.0および9.6 g m^{-2} の減肥量になった。平取町では促成作型のハウスにおいて下層土にも硝酸態Nが蓄積しており、このため、下層土診断に基づいた追肥窒素の減肥可能量が多かったが、平取町の夏秋どり作型と余市町の低地土、黒ボク土とで比べると、それぞれ12.8、11.4、10.8 g m^{-2} で大差はなかった。北海道における夏秋どりトマト1作当たりの追肥窒素量は、一般的な7段どりの場合に20 g m^{-2} であり（北海道農政部2002）、これを基に試算すると、上記の減肥可能量はトマト1作当たりの追肥窒素量の45～121%に相当した。従って、本技術の導入によりハウス栽培における窒素追肥量を減らし、下層に残存する硝酸態窒素を低減させ、その結果として農地系外への硝酸負荷を軽減できることが明らかになった。

表3-12 土壌窒素診断の改善による追肥の減肥効果

調査地域	(棟数)	基肥前の作土の $\text{NO}_3\text{-N}$			深さ20～60cm層の $\text{NO}_3\text{-N}$			診断法別の追肥N減肥量 ^a			
		濃度 (mg kg^{-1}) 別棟数			(g m^{-2}) 別棟数			現行法	下層土診断法	改善法 ^b	
		0～150	150～200	200～	0～10	10～20	20～	(g m^{-2})			
平取町	夏秋	(n=28)	28	0	0	15	9	4	0	12.8 (6.4) ^c	12.8
	促成	(n=16)	9	6	1	0	3	13	2.0	44.1 (22.1)	46.1
	全体	(n=44)	37	6	1	15	12	17	0.7	24.2 (12.1)	24.9
余市町	低地	(n=13)	13	0	0	5	7	1	0	11.4 (5.7)	10.4
	黒ボク	(n=11)	11	0	0	8	1	2	0	10.8 (5.4)	10.8
	泥炭	(n=7)	7	0	0	2	2	3	0	22.2 (11.1)	22.2
	全体	(n=31)	31	0	0	15	10	6	0	13.6 (6.8)	13.6
厚沢部町	新規	(n=8)	8	0	0	8	0	0	0	2.3 (1.2)	2.3
	1～4年	(n=18)	18	0	0	14	2	2	0	8.1 (4.0)	8.1
	5～6年	(n=9)	9	0	0	6	1	2	0	16.7 (8.3)	16.7
	全体	(n=35)	35	0	0	28	3	4	0	9.0 (4.5)	9.0
知内町	おひつり	(n=18)	18	0	0	11	5	2	0	11.3 (5.7)	11.3
	ニラ	(n=10)	8	1	1	9	0	1	1.2	6.6 (3.3)	7.8
	全体	(n=28)	26	1	1	20	5	3	0.4	9.6 (4.8)	10.0

^a 各ハウスごとの減肥量の平均値。 ^b 改善法は現行法と下層土診断法との合計。

^c 夏秋どり（7段）トマトの追肥窒素量（ 20 g m^{-2} ）に対する減肥割合（%）。

なお、これらの地域における12～3月の冬期間の降水量は概ね200～400 mm程度である。土壌の孔隙率を概ね60%，降水により土層内の全ての硝酸態Nが移動すると想定すると、栽培終了時に作土層の深さ10 cmに存在した硝酸態Nは、冬期間に深さ43～77 cmまで移動することになる。実際の土壌中の硝酸態Nは土壌に保持されながら移動することを勘案すると、深さ60 cmまでを残存窒素として評価することは、前年の作物が利用し切れなかった窒素を次作に利用させる方法としても概ね妥当であろう。長期どりトマトでは収穫段数が増えると根系が深くなり、診断できる層位が更に深くなる可能性があるが、この下層土診断法は積雪寒冷地において概ね普遍的に利用されるものと考えられる。

5. 要約

北海道のハウス栽培における下層土に残存する硝酸態Nの作物体による利用特性を明らかにし、トマト等の深根性果菜類を対象にして、下層土に残存する硝酸態Nを評価した施肥改善法を明らかにした。

1) 下層に残存する硝酸態Nの作物体による利用は、マルチを全面被覆して乾燥を避けたハウス栽培条件では、主に作物根系の深さに依存し、深根性作物であるトマトの根系は追肥時期の前半に深さ60 cm程度に到達し、その深さまでの硝酸態Nを追肥窒素と同様に利用したが、浅根性作物である軟白ネギは下層の窒素を十分に利用しなかった。

2) 下層に遮根布あるいは軽石層を敷設し、その下に硝酸態Nを施肥すると、トマトはその硝酸態Nを利用しなかった。施肥した硝酸態Nは栽培終了時に遮根布の上に僅かに見られたが、軽石層の上には殆ど見られなかった。

3) 層位別に測定した土壌硝酸態N含量を施肥窒素量に相当させるためには、土壌の容積重を乗じる必要があるため、融雪期の含水率から下層土の容積重レベルを推定する方法を明らかにした。

4) 以上の結果から、北海道のハウス栽培における下層土診断法を提案した。この方法により北海道の多くのハウス栽培において従来の作土による診断法より窒素追肥量を減らし、下層に残存する硝酸態Nを低減させられる。

第3節 葉菜類，特にホウレンソウの硝酸イオン濃度を低減するための下層土診断法

1. はじめに

ホウレンソウは北海道における代表的なハウス作物であり栽培面積が最も大きい葉菜類である。ホウレンソウ栽培では栄養生長の途中に葉を可食部として収穫するが，一般に生育盛期の葉柄は硝酸イオンを蓄積しやすく（建部ら 2006），収穫物の硝酸イオン濃度が高まりやすい。そのため，北海道ではホウレンソウのハウス作型において，これまで夏どり栽培での硝酸イオン濃度について独自の指標値（新鮮重当たり 3.0 g kg^{-1} 以下）および指標値を達成するための作土の窒素評価などの栽培指針が示されてきた（目黒ら 1991）。

しかし，近年の北海道内を対象とした実態調査では，土壌の硝酸態Nが $20 \sim 30 \text{ mg kg}^{-1}$ 程度と低い場合にも，ホウレンソウ中の硝酸イオン濃度が指標値を超える事例が多く認められた（花・野菜技術センター・中央農業試験場 2006）。このとき，土壌の硝酸態Nとホウレンソウの硝酸イオン濃度との間には一定の傾向が認められず，作土の硝酸態Nを対象とする従来の土壌診断に基づいた窒素施肥技術では，ホウレンソウの硝酸イオンを指標値以下にできない場合のあることが示された。第2章第1節では下層に硝酸態Nの残存したホウレンソウ栽培ハウスが多く認められており，これに起因してホウレンソウの硝酸イオン濃度を高めている可能性があるが，そのことについてはこれまで検討されていなかった。また，同節ではホウレンソウ栽培ハウス産地における年間の平均窒素施肥量が窒素持出量より $40 \sim 50 \text{ g m}^{-2}$ 多かったことから，窒素収支の面からも施肥を改善する必要がある。

前節ではハウス栽培において下層に残存する窒素の利用は，主に作物根系の深さに依存し，根系の到達した深さまでに残存する硝酸態Nを吸収することが明らかになった。そこで，本節ではホウレンソウの根系の特性および下層に残存する窒素の利用特性に基づき，収穫物の硝酸イオン濃度を低下させるために，下層土に残存する硝酸態Nを評価した施肥改善法を構築することを目的とする。

2. 試験方法

1) 現地実態調査

市町村別ホウレンソウ生産面積が北海道内で第2位である旭川市において，2007年2

～11月に4棟のハウスでハウレンソウの硝酸イオン濃度（新鮮重当たり，以下同じ）および土壌硝酸態Nを周年調査した。土壌型は何れも褐色低地土であり，各ハウスの栽培跡地における一般化学性の平均値を表3-13に示した。土壌はφ30mmの検土杖で採取し風乾後に分析した。土壌分析法は前章と同じである。ハウレンソウの硝酸イオン濃度はフードプロセッサで粉碎した後，蒸留水を添加してホモジナイザーで微粉碎して分析した。

表3-13 実態調査したハウス土壌の化学性（栽培跡地）の平均値

深さ cm	pH	EC dS m ⁻¹	可溶性有機態N mg kg ⁻¹	可給態P ₂ O ₅ mg kg ⁻¹	交換性塩基 (mg kg ⁻¹)		
					K ₂ O	CaO	MgO
0～20	6.3	0.53	125	3392	630	5547	680
20～40	6.1	0.29	55	1295	411	3783	500
40～60	6.0	0.28	38	1326	406	3235	458

2) 根系の窒素吸収特性調査

ハウレンソウの収穫時の根系を細粒質普通灰色台地土（北海道滝川市，花・野菜技術センター）のハウスにおいて2007年7月に，ライン交差点法（山内1998）に基づき前節と同様に調査した。

土壌の深さ別の硝酸態Nの吸収パターンを2007年秋まき（9月11日播種）と2008年夏まき（7月4日播種）との作型別に調査した。栽植密度を100株 m⁻²，1区面積を0.04 m²として2反復で各々の発芽始期に株間にφ30mmの穴を開けて，深さ10～70cm（秋まき作型では深さ50cmまで）の範囲に10cm刻みで埋設位置を変えて¹⁵N 5% at omで標識した硝酸カルシウムにより硝酸態Nを5 g m⁻²施用し，穴を埋め戻した後に各区でハウレンソウを栽培した。収穫物は地上部の全量を通風乾燥した後に微粉碎して硫酸一過酸化水素法で湿式分解した後，インドフェノール青法で全窒素濃度を測定して窒素吸収量を算出し，質量分析法により（米山1996），EA1110-DELTAplus Advantage Con Flo III System（昭光通商株式会社杉戸研究所）を用いて¹⁵N atom %を測定して，各区における¹⁵Nの回収率を算出した。

供試土壌における跡地の一般化学性を表3-14に示した。ハウレンソウの栽培期間は各調査とも33日間とした。

表 3-14 供試土壌の化学性（栽培跡地）

深さ cm	pH	EC dS m ⁻¹	可溶性有機態N mg kg ⁻¹	可給態P ₂ O ₅ mg kg ⁻¹	交換性塩基 (mg kg ⁻¹)		
					K ₂ O	CaO	MgO
0~20	6.1	0.48	119	1269	905	3867	990
20~40	6.1	0.49	95	930	811	3541	920

3) 窒素診断の対象土層の検討

2007年2月～2008年10月の2年間に旭川市内の4棟の農家ハウス（何れも褐色低地土）においてハウレンソウを1年当たり5回栽培し、窒素施肥試験を行った。試験は2007年には上述の1)で実態調査したハウスの一部、2008年には新たに選定したハウスを用いて行った。2008年の供試ハウスにおける土壌の一般化学性の平均値は、2007年のハウスと概ね同程度であった。処理は各作期の施肥前に、①作土（深さ0～20 cm）、②深さ0～40 cm、③深さ0～60 cmの各々に存在する硝酸態Nに基づいて窒素施肥量を決定した区、および④無窒素区を設定し、各区におけるハウレンソウの硝酸イオン濃度および粗収量を調査した。

処理区③における窒素施肥量は、深さ0～20 cm (a)、20～40 cm (b)、40～60 cm (c)の各層位における土壌硝酸態N含量を0～40 cmまで (a + b)、あるいは0～60 cmまで (a + b + c) 足し合わせた数値 (d) を各区における残存窒素量と見立て、表3-14により行った。表3-15の右半分において土壌硝酸態Nの区分と窒素施肥量との対応関係は、既存の北海道施肥ガイドにおける窒素施肥対応表（北海道農政部2002）の区分に準じて作成した。なお、調査期間中の1作当たりの平均栽培日数は36.9 ± 4.9日であり、品種は当該農家が各作期に栽培したものをを用いた。

表 3-15 土壌硝酸態窒素に基づいた窒素施肥量決定における評価対象土層深の検討方法

深さ (cm)	土壌硝酸態窒素 (mg kg ⁻¹)	評価対象土層 深さ (cm)	各層位での 濃度を足し算	左記の数値 d (土壌硝酸態窒素)					
					~50	50~100	100~150	150~200	200~
0~20	a	} →	a = d	⇒ 施肥量 (g m ⁻²)	12	9	6	3	0
20~40	b		a+b = d						
40~60	c		a+b+c = d						

注) dの区切りは、北海道施肥ガイドにおけるハウレンソウ施肥時の区分に基づき設定した。

3. 試験結果

1) 現地実態調査

調査対象とした各ハウスは2～11月頃にビニール被覆され、冬期間は積雪下にあった。これは当該地域における一般的なハウス管理形態である。各ハウスでは13～31年にわたりハウレンソウが連作されており、調査期間中に各々で年間5回栽培された。年間の窒素施肥量は北海道施肥ガイド（北海道農政部 2002）に基づき $39 \sim 51 \text{ g m}^{-2}$ の範囲で行われていた。土壤可給態Nは $57 \sim 196 \text{ mg kg}^{-1}$ の範囲にあった。各ハウスにおける収穫時のハウレンソウの硝酸イオン濃度、深さ0～20 cm（作土層），同20～40 cmの土壤硝酸態Nは何れも1作目で低く，栽培回数を経過するほど高まった（図3-9）。

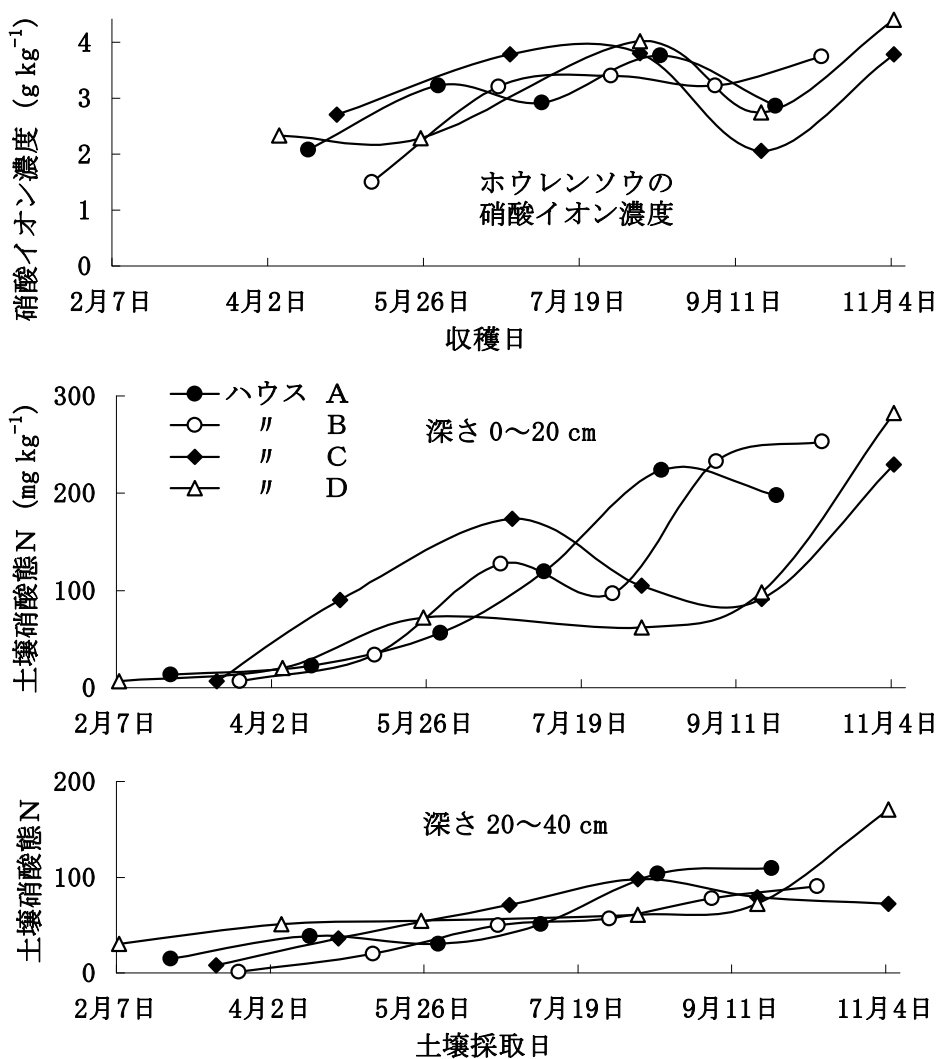


図 3-9 農家ハウスにおけるハウレンソウの硝酸イオン濃度と土壤硝酸態窒素の季節推移

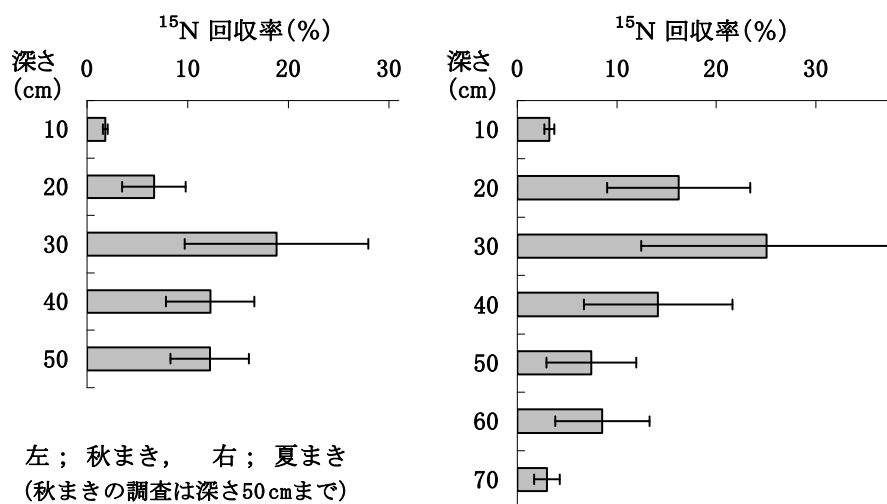
2) 根系の窒素吸収特性調査

ハウレンソウの根系は収穫時点で深さ 40～50 cm に達しており、主要な根群は主に深さ 10～30 cm に存在した（表 3-16）。また、深さ 10～60 cm の土壤に埋設された硝酸態Nを吸収しており、深さ 20～30 cm から相当の窒素を吸収した（図 3-10）。夏まき・秋まきの両作型ともに同様の傾向にあった。

表 3-16 ホウレンソウ根の土壤深さ別分布

深さ (cm)	根長密度 (m m^{-3})
0～10	157 ± 51
10～20	373 ± 105
20～30	231 ± 97
30～40	69 ± 50
40～50	20 ± 21
50～60	5 ± 14

±以下は標準誤差.



注) 発芽始期に株間に ϕ 30 mm の穴を開け、深さ 10 cm 刻みで ^{15}N 標識硝酸カルシウムを施用。

図 3-10 深さ別に施肥した ^{15}N 標識硝酸カルシウム中窒素のハウレンソウによる回収率

3) 窒素診断の対象土層の検討

各年における施肥前の土壤硝酸態Nを深さ別に見ると（表 3-17），1作目の作土では殆どのハウスで 10～30 mg kg^{-1} 程度であったが、深さ 20～40 cm には 100 mg kg^{-1} 以上あるハウスも見られ、2作目以降には各層位とも作期が進むに従い徐々に高まった。深

さ 20 cm 以下の土層に残存する硝酸態窒素を作土と合わせて評価すると、深い土層まで評価するほどハウレンソウの硝酸イオン濃度が低下する傾向が認められた（表 3-18）。評価対象土層を深さ 40 cm までとすると、硝酸イオン濃度の年平均値が北海道における独自指標値（3.0 g kg⁻¹以下）を下回った。このときの粗収量は作土の診断のみで窒素施肥量を定める現行法よりやや低かったものの、年平均で 1.2 kg m⁻²程度得られた。評価対象土層を深さ 60 cm までとすると、硝酸イオン濃度はさらに低下したが、7月以降の粗収量も低下する傾向が見られた。ハウレンソウでは粗収量のうち 70～80%が調整後収量になるため（黒島 2004），評価対象土層を深さ 40 cm までとしたときの粗収量 1.2 kg m⁻²は概ね 0.9 kg m⁻²の出荷時収量に相当する。これは北海道の春夏～夏まき作型における一般的な目標収量が 0.8 kg m⁻²であることから見て（北海道農政部 2002），良好な収量レベルといえる。

下層まで土壌硝酸態Nを評価したときの年合計窒素施肥量を、作土層のみを評価する現法と比較すると、深さ 0～40 cm を評価した場合で 15～16 g m⁻²，0～60 cm で 23～27 g m⁻²の減肥になった。深さ 0～40 cm まで評価したときの窒素施肥量はハウレンソウによる吸収量と概ね同程度かあるいは下回った（表 3-18）。

表 3-17 各作期の施肥前における深さ別の土壌硝酸態窒素量¹

調査年	深さ (cm)	硝酸態N (mg kg ⁻¹)							平均	可溶性有機態N ² (mg kg ⁻¹)
		3月	5月	7月	8月	9月	跡地	平均		
2007	0～20	8±5	42±34	108±67	96±48	162±98	241±112	109±51	123±71	
	20～40	14±12	36±20	51±27	67±35	83±39	111±62	60±28	69±24	
	40～60	38±31	54±36	50±25	71±41	106±57	107±62	71±38	34±13	
2008	0～20	24±23	126±59	139±44	187±107	243±194	227±164	155±92	157±105	
	20～40	102±111	91±82	139±59	126±64	162±129	172±100	128±87	68±25	
	40～60	135±100	152±104	311±114	230±142	197±164	131±78	182±111	36±15	

¹ 試験した4ハウスの各調査年ごとの平均値。±以下は標準誤差。

² 1作目の施肥前，オートクレーブ抽出法（105℃，60分）。

表 3-18 評価対象とする土層の範囲と窒素収支，ハウレンソウの硝酸イオン濃度および収量¹

調査年	評価対象土層の深さ (cm)	年合計N (g m ⁻²)		硝酸イオン濃度 (g kg ⁻¹)						粗収量 (kg m ⁻²)					
		施肥量	吸収量	3月	5月	7月	8月	9月	平均	3月	5月	7月	8月	9月	平均
2007	0～20	45	25.4	2.16	3.12	3.54	2.95	3.70	3.09	1.33	1.76	1.23	0.94	1.03	1.26
	0～40	29	24.4	2.16	3.29	2.93	2.77	3.36	2.91	1.33	1.84	1.05	0.79	1.01	1.20
	0～60	18	21.0	1.89	2.82	2.73	2.85	3.05	2.64	1.22	1.57	0.84	0.66	0.90	1.04
	-N	0	16.4	0.65	1.27	1.79	1.62	3.05	1.67	0.65	1.00	0.67	0.67	0.90	0.78
2008	0～20	29	25.2	2.52	2.69	2.91	3.60	3.72	3.09	1.64	1.43	0.96	1.38	1.23	1.35
	0～40	14	23.8	2.41	2.00	2.40	3.40	2.66	2.58	1.45	1.26	0.84	1.19	1.05	1.18
	0～60	6	22.9	2.42	1.96	2.11	3.40	3.01	2.58	1.44	1.24	0.64	1.19	0.98	1.12
	-N	0	22.3	2.32	1.96	2.11	3.00	2.41	2.36	1.32	1.24	0.55	1.02	0.98	1.04

4. 考察

1) ホウレンソウの硝酸イオン濃度と土壤硝酸態Nの実態

市販ホウレンソウの硝酸イオン濃度は夏に高まり秋に低下する傾向にあるが（藤原ら 2005），同一圃場内では窒素施肥量による差のほうが季節間差より大きく（建部ら 2006），硝酸イオン濃度は主に窒素施肥や土壤窒素レベルにより変動するものと考えられる（亀野ら 1990）。本調査では11月に収穫した5作目の硝酸イオン濃度が最も高かったが，これは当作の生育期間中における土壤硝酸態Nが高かったことに起因すると考える。本調査における窒素施肥量は作土層に残存する硝酸態Nに対応して減肥したが，作土層に加えて深さ 20～40 cm の硝酸態Nが栽培期間中に高まる傾向を示したことが，ホウレンソウの硝酸イオン濃度を高めた要因のひとつであろう。

2) ホウレンソウ根系の窒素吸収特性

ホウレンソウの原産地は中央あるいは西アジアの乾燥地帯と考えられており，根系は播種後 70 日で深さ 1.2 m に達する（香川 1989）。北海道におけるホウレンソウの平均的な栽培日数は 35 日程度であり，本試験でも同様の日数であったが，本試験における収穫時の主要な根群域が深さ 10～30 cm にあり，硝酸態Nを相対的に最も多く吸収した深さが 30 cm であった。これらのことから，ホウレンソウの根系が収穫時点で作土層より下に伸長し，下層の窒素を吸収していることは明らかであった。松本（1998）はハウス栽培ホウレンソウ産地における平均的な施肥窒素利用率が 15 % 程度であることを指摘しているが，その一因は経年化したハウスの下層に残存する硝酸態Nがホウレンソウに吸収されることによるものと考えられる。

前節で試験したトマトについても，根系の伸長した深さまでの下層土に存在する硝酸態Nを吸収していたが，本来は深根性作物であるホウレンソウにおいても，収穫時の硝酸イオン濃度を低下させるためには，下層土に存在する硝酸態Nを評価する必要があると考えられた。

3) 下層土に存在する硝酸態窒素に対応した窒素施肥

以上のように，根系の特性と窒素診断の対象土層を検討した結果，ホウレンソウにおいて収量性を維持しながら硝酸イオン濃度を低下させるためには，施肥前（あるいは前作の栽培終了時）の深さ 40 cm までの土壤硝酸態Nに基づいて施肥量を決めることが適当と結論した。具体的には，深さ 0～20 cm，20～40 cm の各々の土壤硝酸態Nを算出し，前掲（表 3-15）の方法で窒素施肥量を決める。農業現場における診断時の状況に

より、深さ 0～40 cm を一括分析して得られた値 (mg kg^{-1}) を 2 倍した数値に基づいて決めることも可能である。

このときの窒素施肥量は、土壤硝酸態Nの蓄積したハウスではハウレンソウの窒素吸収量と同程度あるいは下回ることから、本診断法を続けることにより長期的には土壤硝酸態Nレベルが低減し、地下水などの環境への負荷が軽減されるものと考ええる。

なお、本試験を行った農家ハウスでは夏期に窒素施肥量を減らした区で、土壤病害に起因してハウレンソウが出芽後に枯死して欠株を生じ、収量の低下した事例が数回みられた。ハウレンソウ根腐病は土壤の硝酸イオン濃度が高い条件下で発病が抑制されるため (Akashi et al. 1987) , 作土の硝酸態Nの減少が発病を助長した可能性がある。従って、北海道内のハウレンソウ産地で下層土窒素診断を推進するためには、連作を避ける、あるいは土壤消毒するなどの基本技術を並行して進める必要がある。また、本診断法を適用する前提として、前節と同様の理由で有効土層が深さ 40 cm 以上確保されたハウス土壤を対象とする。

5. 要約

ハウス栽培ハウレンソウの硝酸イオン濃度を低下させるために、下層土に残存する硝酸態Nのハウレンソウによる利用特性に基づき、下層窒素を評価した施肥改善法を明らかにした。

- 1) 現地で収穫調査したハウレンソウの硝酸イオン濃度、深さ 0～20 cm, 同 20～40 cm の土壤硝酸態Nは何れも 1 作目で低く、栽培回数を経過するほど高まった。
- 2) ハウレンソウの収穫時の根系は主に深さ 10～30 cm にあり、深さ 20～30 cm の層位に存在する相当量の硝酸態Nを吸収した。
- 3) 栽培前に深さ 0～40 cm の土壤に存在する硝酸態N量に基づいて、窒素施肥量を $0 \sim 12 \text{ g m}^{-2}$ の範囲で増減することにより、夏どりハウレンソウの硝酸イオン濃度を低下させつつ、一般的な収量を確保することができた。このとき窒素施肥量はハウレンソウによる窒素吸収量と同程度以下になった。

第4章 軟白ネギの生育特性に基づいた施肥法と土壌管理法

第1節 軟白ネギの乾物生産および無機養分吸収特性

1. はじめに

前章において、軟白ネギは根系が浅いために下層土に存在する窒素を十分に利用できないことを示した。このことは、軟白ネギ栽培では下層土診断法により土壌診断技術を高度化させられないことを意味する。このような作物では生育特性に基づく施肥法を構築することが一層重要である。そこで本章では、北海道における施設栽培軟白ネギを対象に合理的な施肥法を明らかにすることとした。

北海道の施設栽培では軟白ネギは様々な作型で周年栽培され、作型によって養分吸収パターンがやや異なると考えられる。中でも近年の施設利用の周年化によって主に道南地域に見られる冬春どり作型では、温度が低く日長が短い時期に栽培されるため、一般的な作型である夏秋どり作型とは施肥管理法が異なると想定される。そこで本節では、軟白ネギを合理的に肥培管理するための基礎的知見を得るため、夏秋どりおよび冬春どり栽培条件における乾物生産および養分吸収特性について、両作型を比較検討しながら明らかにすることを目的とした。

2. 試験方法

道南農業試験場のビニールハウスで慣行栽培を行った軟白ネギ（品種；元蔵）を供試し、北海道における一般的な作型（林ら 2003 b）である5月定植した夏秋どり作型および9月定植した冬春どりの2作型で栽培した。夏秋どり作型では80日間育苗した苗を1998年5月27日に定植し、11月4日の収穫まで164日間栽培し、冬春どり作型では66日間育苗した苗を1999年9月3日に定植し、2000年4月5日の収穫まで214日間栽培した。施肥量は北海道施肥ガイド（北海道農政部 2002）に従い基肥は深さ0.15 mまで全面全層に、分施はかん水用チューブによって液肥で全面に施肥した。基肥および分施は何れも窒素およびカリウムを施用し、窒素は硝酸アンモニウムを、カリウムは硫酸カリウムを用いて施肥した。夏秋どり作型における基肥は各 5 g m^{-2} 、分施は2回（定植後60、90日目）施肥し、各 4 g m^{-2} とした。冬春どり作型における基肥は各 8 g m^{-2} 、分

施は定植後 143 日目に各 5 g m^{-2} とした。土壌条件は前章第 2 節と同じである。ただし、可給態リン酸含量が 760 mg kg^{-1} であったのでリン酸は何れも無施肥とした。

栽植密度は 83.3 株 m^{-2} (畦間 0.3 m , 株間 0.04 m) とした。栽培期間中は白黒二層ポリエチレンフィルムで全面をマルチし、かん水は作土層の水分ポテンシャルが 19.6 kPa になった時を目安にして 1 回につき 10 L m^{-2} をマルチの下に各畝間に敷設したかん水用チューブを用いて全面に行った。葉鞘部の軟白化は草丈が $80 \sim 90 \text{ cm}$ 程度になった頃にプラスチックのフィルム資材で両側から高さ 0.4 m まで挟んで行った (図 4-1, 写真 4-1, 写真 4-2)。これは北海道のハウス栽培ネギにおける標準的な軟白化方法である (林ら 2003 b)。本試験では夏秋どり作型で定植後 80 日目から、冬春どり作型で 132 日目から各々軟白化を開始した。

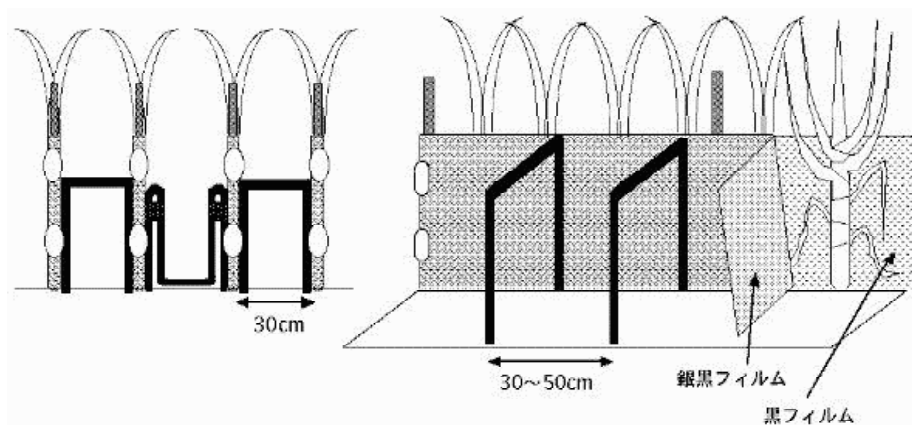


図 4-1 フィルム資材を用いて行う施設栽培ネギの軟白化方法



写真 4-1 ビニールハウス内で栽培されている軟白ネギ



写真 4-2 フィルム資材を用いて軟白化している施設栽培ネギ

乾物重は夏秋どり作型では定植後 10 日目から約 10 日毎に、冬春どり作型では定植後 24 日目から 68 日目までは概ね 10 日毎に、その後は 25 ～ 50 日毎に、各々の地上部を 10 株ずつを 2 反復で掘り取り、葉身と葉鞘とに分けて通風乾燥した後に測定した。粉碎した乾物試料を硫酸－過酸化水素法で湿式分解した後、インドフェノール青法で窒素を、モリブデン青法でリン酸を、原子吸光光度法でカリウム、カルシウム、マグネシウムを各々測定した。調査期間毎の乾物の生長速度（以下、CGR）は以下の式で算出した（山口ら 2000）。

$$\text{CGR} = 1/F \times dW/dT = 1/F \times (W_1 - W_2)/(t_1 - t_2)$$

（ただし、F：調査面積，W：乾物重，t：時間）

3. 試験結果

1) 乾物生産特性

夏秋どり作型における乾物重は葉身、葉鞘とも定植後 30 日目頃までは少なく、その後増加し、軟白化のために資材で葉鞘を被覆した定植後 80 日目頃に下位葉の一部が枯死して一時的に生育が停滞し、それ以降は乾物重の増加は少なくなった（図 4-2）。収穫時の乾物重は葉身で 0.79 kg m^{-2} 、葉鞘で 0.62 kg m^{-2} 、地上部全体で 1.41 kg m^{-2} であった。CGR は葉身、葉鞘とも定植時から増加し続け定植後 50 ～ 70 日目頃に最も高く、葉身のほうが高く推移していた（図 4-2）。軟白化開始により一時的に落ち込んだ。90 日目以降は低い値で概ね一定となり部位毎の違いは認められなかった。乾物率は定植時の苗で最も高く、その後低下し定植後 30 日目以降には大きな変化は見られず、葉身が $70 \sim 80 \text{ g kg}^{-1}$ 、葉鞘が $80 \sim 90 \text{ g kg}^{-1}$ 程度で推移した（図 4-2）。部位別に見ると、定植後 80 日目頃を除いて葉鞘が高く推移した。

収穫時の葉身、葉鞘合計の新鮮重は 15.8 kg m^{-2} であった。これは製品歩留まりを 50 ～ 60 %程度とすると（阿部ら 2000）， $7.9 \sim 9.5 \text{ kg m}^{-2}$ 程度の商品収量に相当し、北海道施肥ガイド（北海道農政部 2002）の目標収量 10.0 kg m^{-2} よりも 5 ～ 20 %程度低かった。

冬春どり作型における乾物重は葉身、葉鞘とも定植後 45 日目以降に大きく増加し、軟白化開始後の定植 130 ～ 140 日目頃以降は葉身では減少したが、葉鞘は収穫期まで増加し続けた（図 4-2）。収穫時の乾物重は地上部全体で 1.47 kg m^{-2} であった。また、CGR は葉身、葉鞘とも生育初期から増加し、葉身では定植後 45 ～ 60 日目頃に最も高く

なったが、140日目頃まではいずれも $5 \text{ g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ 程度を維持した。花芽が生長した180日目頃以降にはいずれも低下し、葉身ではゼロ以下となった（図4-2）。

収穫時の葉身と葉鞘の合計新鮮重は 14.8 kg m^{-2} であった。規格内収量は調査しなかったが、商品歩留まりを夏秋どり作型に準じて50～60%程度とすると、これは $7.4 \sim 8.9 \text{ kg m}^{-2}$ 程度の商品収量に相当する。ただし、花蕾抽出した株があったため、実際の商品収量はこれよりもやや低かったものと推察されるが、それを考慮しても北海道施肥ガイドにおける冬春どり作型での目標収量 5.0 kg m^{-2} よりも高く、十分な生育が得られた。

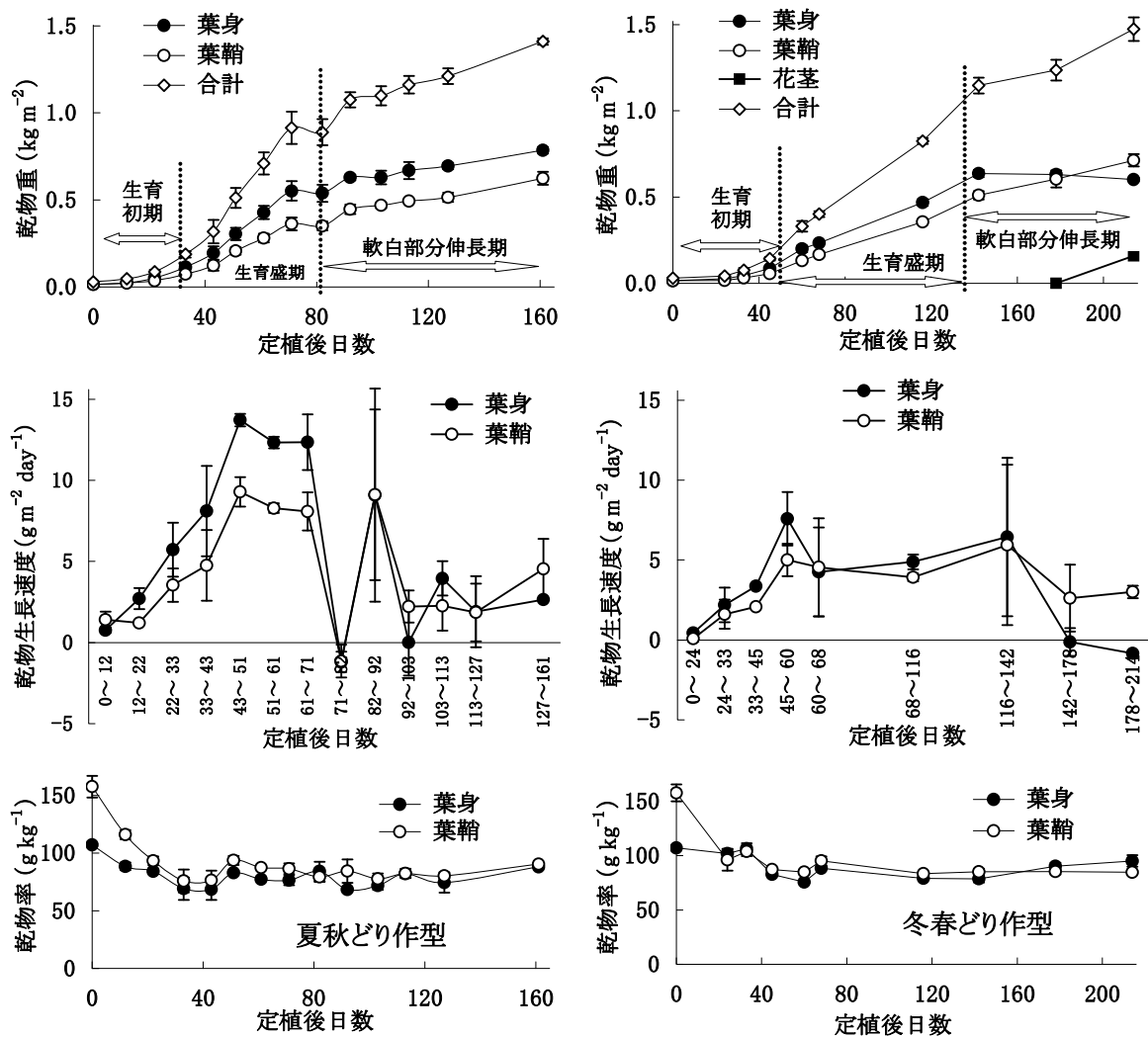


図4-2 軟白ネギの作型別の乾物重，乾物生長速度（CGR），乾物率の推移

注1) 左；夏秋どり作型，右；冬春どり作型。垂線は標準誤差，図4-3も同じ。

注2) 軟白化開始は夏秋どり作型で定植後80日目，冬春どり作型で132日目。

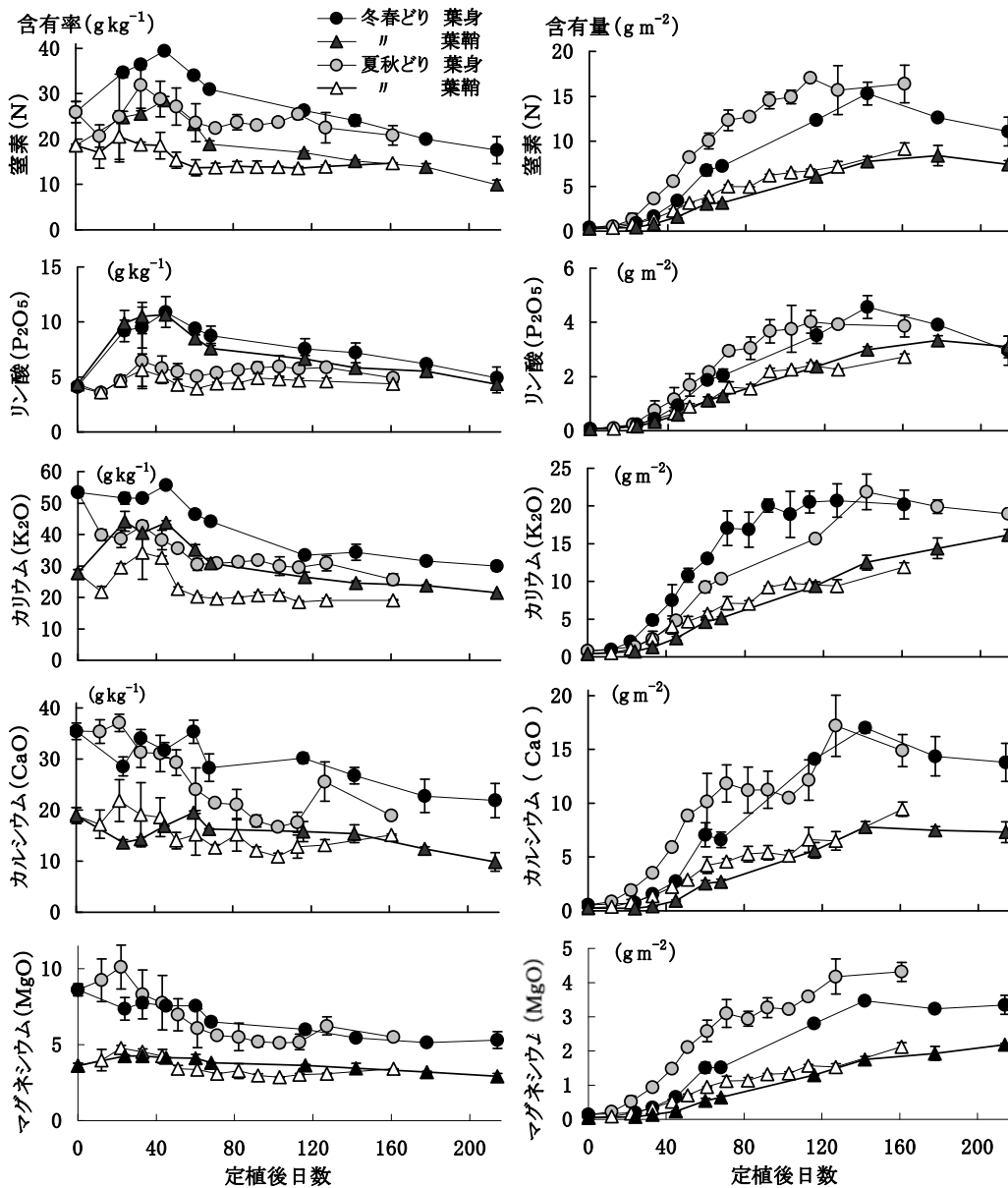


図 4-3 軟白ネギの作型別の無機養分含有率および含有量

2) 窒素吸収特性

夏秋どり作型における窒素含有率は葉身、葉鞘ともに定植直後に一時的に低下した後、40日目頃までやや高まり、それ以降は葉身で 23 g kg^{-1} 内外、葉鞘で 14 g kg^{-1} 内外で推移した（図 4-3）。窒素含有量は乾物重と同様のパターンで増加し、葉身では定植後 30 日目頃から軟白化開始期である 80 日目頃までの生育盛期に最も増加し、その後の軟白部分伸長期には僅かに増加しながら推移した。葉鞘における含有量は定植後 30 日目頃から収穫時まで徐々に増加した（図 4-3）。収穫時に葉身、葉鞘を合わせた窒素含有

量は 25.5 g m^{-2} であった。

冬春どり作型における窒素含有率は生育初期から生育盛期まで高まり、生育盛期に入ると低下し、軟白部分伸長期もゆるやかに低下し続け、収穫時には定植後 45 日目の半分以下に低下した（図 4-3）。窒素含有量は夏秋どり作型では収穫時まで概ね増加し続けながら推移したのに対して、冬春どり作型では軟白化を開始する 132 日目頃までは増加したものの、それ以降は葉身で減少、定植後 180 日目頃以降には花茎の伸長に従って葉鞘でも減少傾向となった（図 4-3）。収穫時に葉身、葉鞘を合わせた窒素含有量は 18.5 g m^{-2} であった。

3) リン酸吸収特性

リン酸含有率は夏秋どり作型では生育初期には増加傾向にあるが葉身、葉鞘とも生育期間を通してほぼ一定であり、葉身で $5 \sim 6 \text{ g kg}^{-1}$ 、葉鞘で $4 \sim 5 \text{ g kg}^{-1}$ であった（図 4-3）。冬春どり作型では窒素と同様に生育初期から生育盛期に入るまで高まり、葉身・葉鞘とも $10 \sim 11 \text{ g kg}^{-1}$ になったが、それ以降は低下し続け、収穫時には定植後 45 日目の半分以下にまで低下した。即ち、栽培期間を通じて夏秋どり作型が冬春どり作型より低く推移した

リン酸含有量は両作型とも主に生育盛期に大きく増加した。それ以降は夏秋どり作型では葉身で増加が止まり葉鞘で収穫まで緩やかに増加し続け、冬春どり作型では花芽形成が始まった軟白部分伸長期以降に葉身で減少し葉鞘で増加がほぼ止まった（図 4-3）。

4) カリウム吸収特性

カリウム含有率は夏秋どり作型では生育初期の前半に低下した後、生育初期後半に増加、生育盛期に低下し、軟白化を開始した時に定植時の 6 割程度になり、その後も僅かに低下し収穫時には定植時の半分程度になった。冬春どり作型では生育初期の定植後 45 日目頃に最も高く、それ以降は徐々に低下したが、葉身、葉鞘とも栽培期間を通じて夏秋どり作型よりも高く推移した（図 4-3）。カリウム含有量は夏秋どり作型では葉身で軟白部分伸長期以降に増加が止まり、葉鞘で収穫まで僅かに増加し続けた。冬春どり作型では地上部全体の含有量は収穫まで増加し続けたが、花芽が形成された軟白部分伸長期以降に葉身で減少し葉鞘で増加し続けた（図 4-3）。

5) カルシウムおよびマグネシウム吸収特性

葉身のカルシウム含有率は、両作型とも栽培期間を通して漸減し、収穫時には定植時の半分程度に低下した。葉鞘でも同様に低下したがその程度は葉身よりもやや小さかつ

た（図 4-3）。カルシウム含有量は、夏秋どり作型では軟白化開始後に一時停滞しながらも葉身、葉鞘とも収穫まで増加し続けたが、冬春どり作型では軟白部分伸長期に葉身・葉鞘とも減少し（図 4-3）、花茎と合わせた作物全体の含有量も減少傾向にあった。また、花茎のカルシウム含有率は他の部位よりも著しく低かった。

マグネシウム含有率は両作型とも葉身で栽培期間を通じて徐々に低下し、葉鞘では生育期間を通じて概ね一定であり、作型による大きな違いは認められなかった（図 4-3）。マグネシウム含有量は両作型とも同様のパターンで収穫まで増加し続けた（図 4-3）。

4. 考察

1) 乾物生産特性からみた生育ステージ

夏秋どり作型において軟白ネギの生育ステージを乾物生産量の変化から、増加量が少ない定植後 30 日目頃までの生育初期、定植後 30 日目頃から軟白化を開始する 80 日目頃までの生育盛期、それ以降の CGR が低く推移する軟白部分伸長期の 3 期に分けることが適当と考える。石居ら（1967 a）は 5～7 月定植した露地ネギの生育と養分吸収経過を調査し、定植後 1 ヶ月頃までは全重、葉鞘重とも殆ど変化せず、その後の 1～2 ヶ月間に急生長し、それ以降の生長は緩やかになると報告しており、田中ら（2000）もセル成型苗を 5 月定植した作型において同様の報告をしている。

軟白ネギ（いわゆる Japanese bunching onion）の花芽形成前の生育期を細分化した呼称は他に見当たらない。軟白化開始後の生育の変化は、いわば人為的な生育相の作出に当たるとは、軟白後の葉鞘の CGR はそれ以前よりも小さいため、‘拡大期’や‘肥大期’等の呼称は不適当と考えられ、葉身と葉鞘とは定植時に既に分化していることから、‘形成期’も不適当である。軟白フィルム被覆後の葉鞘を見ると、葉鞘径は太くならず葉鞘長のみが伸長し、葉鞘長はこの時期に最も伸長することから、‘伸長期’の呼称が適当と考える。

冬春どり作型における生育ステージも期間は異なるが、夏秋どり作型と同様に 3 期に分けられるものとする。即ち定植後 45 日目頃までを生育初期、45 日目頃から軟白化を開始した 130～140 日目頃までを生育盛期、それ以降収穫までを軟白部分伸長期とした（図 4-2）。

夏秋どり作型では収穫まで栄養生長が持続したが、冬春どり作型では軟白化を開始した定植後 140 日目頃から花芽が形成されたため新葉は展開せず、花茎の伸長に従って葉

身の乾物重が減少し、軟白部分伸長期には生育相が生殖生長に転換した。花茎の伸長はネギの商品価値を下落させるため、花芽形成の前に収穫する必要がある、花芽形成までの生育が収量を決定する。本調査で供試した品種‘元蔵’は北海道の夏秋どり作型では主要な品種であるが、低温に感応して抽だいしやすい（阿部ら 2004）。冬春どり作型では抽だいを起こしにくい品種を栽培して収穫まで栄養生長を持続させること、もしくは、抽だいまでに十分な生育量を確保して軟白部分を伸長させることが多収につながる と考える。

2) 窒素吸収特性

夏秋どり作型では生育盛期の前半に CGR が最も高く、生育盛期の前半に分施することで多収を得られると考えられる。一方、短日条件で発生葉数と草丈が抑制される冬春どり作型では（八畝 1989），CGR が高く維持されていた生育盛期の後半に窒素を分施することで葉身の伸長を促進し多収を得られると考える。ただし、この場合は抽だいしにくい品種を栽培することが前提となる。

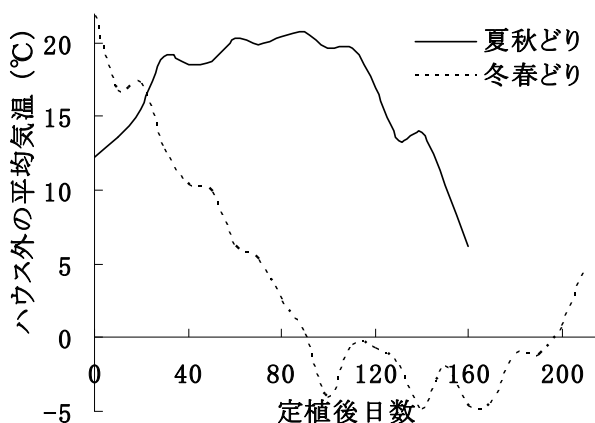


図 4-4 栽培期間中のハウス外の平均気温

一般に窒素不足は花芽分化の誘因の一つとされるが、ネギの花芽分化に対する窒素不足の影響は低温遭遇量が不十分なときに限り起こる（山崎ら 2005）。冬春どり作型では定植後 70 日目頃から平均気温が 5 °C 以下になり（図 4-4），花芽分化のための低温遭遇量は十分あったこと、また、花芽分化前の窒素含有率が夏秋どり作型よりも高かったことから（図 4-3），花芽分化は体内の窒素不足に起因して誘導されたものではなく、Yamasaki ら（2000）の報告と同様に低温条件により誘導された と考える。花芽分化以降

は、生殖生長に転換したことにより新たな窒素吸収が十分に行われなくなり、その結果として体内窒素含有率が低下したものと推察する。従って、冬春どり作型では花芽分化前後の窒素施肥によって花芽分化が抑制され品質を回復できる可能性は低いと考えられ、花芽分化前に十分に窒素吸収させるべきである。

3) リン酸吸収特性

既往の知見におけるリン酸含有率をみると、5～11月に栽培した露地ネギの乾物中リン酸含有率は葉身、葉鞘とも5～10 g kg⁻¹であるとの報告（石居ら 1967 a）や、ネギ地上部全体のリン酸含有率が5～8 g kg⁻¹で推移したとの報告（田中ら 2000）もあり、本試験の結果は両作型とも軟白ネギにおける一般的なリン酸含有率レベルの範囲にあると考える。

ネギと同じ *Allium* 属作物であるタマネギでは、旺盛な初期生育を示す個体の乾物中リン酸含有率は10～13 g kg⁻¹程度であり、土壤中の可給態リン酸含量の増加に従って乾物中リン酸含有率は増加する（相馬ら 1982）。一方、本試験で得られた北海道の夏秋どり作型における軟白ネギのリン酸含有率は生育期間を通してタマネギより明らかに低く推移しており、初期生育期における軟白ネギのリン酸要求性はタマネギよりも低いことが想定される。しかし、冬春どり作型では生育初期の葉鞘におけるリン酸含有率が10 g kg⁻¹程度まで増加し、これはタマネギにおける生育初期の体内リン酸含有率に近い。初期生育の確保が重要（相馬ら 1982）なタマネギと同様に、低温で生育が停滞する中で出来る限り生育を高めて花芽分化前に収穫する必要がある冬春どり作型では初期生育を高めることが多収に結びつくと考えられる。

したがって、夏秋どり作型と冬春どり作型とでは収量に対する初期生育の影響が異なり、夏秋どりではリン酸多量施肥または高濃度の土壌リン酸によって初期生育量を高めても多収とはならないものと想定されるが、冬春どりでは土壌の可給態リン酸が夏秋どりで初期生育を高める1,000 mg kg⁻¹程度（林ら 2003 a）あっても増収効果が得られるものと推察する。ただし、可給態リン酸含量が1,000 mg kg⁻¹以上あると、夏秋どり作型で初期生育は高まるが収量が低下（林ら 2003 a）するため、夏秋どりと冬春どり作型とに兼用するハウスでは土壌の可給態リン酸をより低く維持すべきである。

4) カリウム吸収特性

カリウム含有率は両作型とも定植後日数の経過とともに低下する傾向にあったが、夏秋どり作型で同様の傾向を得た報告もあり（石居ら 1967 a, 田中ら 2000），本試験の

結果は軟白ネギにおける一般的なカリウム吸収の傾向であると考える。

冬春どり作型では栽培期間を通して含有率が高く推移し、特に生育初期で葉身、葉鞘とも夏秋どり作型よりも明らかに高かった。カリウムの植物体内における機能のひとつは細胞内の浸透圧を維持することであり、降霜への抵抗性を高めることが知られる（村山ら 1984）。カリウム増肥により体内カリウム含有率を高めるとウンシュウミカンの耐寒性が向上した報告（高辻ら 1980）や、カリウム施肥の少ないときにカンキツが凍害を受けやすいことを認めた報告（中川 1963）があることから、ネギの冬春どり作型でカリウム含有率が高く推移したのも、耐寒性を向上させる機作のひとつとして細胞内の浸透圧を高めたものと推察できる。また、カリウムイオンはアンモニウムイオンの同化を促進するため（平岡ら 1990）、低温で日照が少ない冬期に体内にカリウムが豊富に存在することは、同化効率と生長を維持する上で望ましい状態にあると推察する。

ただし、能動的に吸収される成分であるカリウムを蒸散の少ない冬期に過剰施肥することは、マスフロー等によって受動的に吸収されるカルシウムの吸収量を減少させ欠乏を引き起こす可能性がある。したがって、冬春どり作型でのカリウム施肥は、土壌中の交換性カリウムの存在量だけでなく交換性塩基バランスにも留意する必要がある。

5) カルシウム吸収特性からみたネギ栽培の注意点

カルシウムは本稿で検討した多量要素の中では唯一蒸散速度に依存して非代謝的に吸収される側面の強い要素であり（間藤 1990）、特に葉身部において漸減し続けたのは、乾物生産速度に吸収速度が追いつかなかったことに起因すると考える。一般に葉菜の心枯れや葉先枯れは作物体内のカルシウム欠乏または他の無機成分との拮抗作用によるカルシウム含量の相対的な低下によって引き起こされることが多い（飯塚 1991）。施設栽培では軟白ネギの葉身は葉先枯れが起こりやすく（渡辺ら 1994）、栽培後期に起こる葉先枯れは葉身のカルシウム含有率の低下に起因すると思われ、軟白ネギ栽培に当たっては土壌 pH 矯正による土壌へのカルシウム補給、土壌交換性マグネシウムとカルシウムとの適正バランスの維持に特に努め、作物体による土壌水分吸収と蒸散を制限しないように栽培期間中のかん水管理（小野寺ら 1994）にも留意すべきである。

また、カルシウムは体内を再移動しにくいいため、冬春どり作型では下位葉の枯死とともに脱落して含有量が減少した上に、冬期間のため活発な蒸散が行われず土壌からのカルシウム吸収が抑制され、花茎には十分に吸収されなかったものと考えられる。ただし、軟白ネギは花芽が形成されると商品価値が下落するため、その前に収穫すべきであり、冬

春どり作型における花芽形成後のカルシウム含有率の低下は、実際の栽培では大きな問題ではないと考える。

5. 要約

夏秋どりおよび冬春どり作型でハウス栽培軟白ネギの乾物生産特性と無機養分吸収特性を明らかにし、施肥管理上の問題点を検討した。

1) 生育ステージを生育初期、CGRの高まる生育盛期、軟白化を開始した後でCGRの低下している軟白部分伸長期に分割した。冬春どり作型では軟白部分伸長期に生育相が生殖生長に転換することから、収量は花芽形成までの生育量により決定される。従って、抽だいを起こしにくい品種を栽培すること、もしくは抽だいままでに十分な生育量を確保することが必要である。

2) CGRの推移からみて、窒素施肥法は夏秋どり作型では生育初期に分施し、冬春どり作型では生育盛期の後半に分施することで各々多収を得られるものと推察した。本試験における1作の軟白ネギによる窒素吸収量は、夏秋どり作型で 25.5 g m^{-2} 、冬春どり作型で 18.5 g m^{-2} であった。

3) 生育初期の葉鞘におけるリン酸含有率からみて、冬春どり作型では収量に対する初期生育の影響が夏秋どりより大きく、土壌の可給態リン酸を高めて初期生育を確保することが増収につながるものと推察した。

4) 冬春どり作型ではカリウム含有率が耐寒性を向上させるために高く推移したことから、土壌の交換性カリウムが診断基準値を下回らないようにする必要がある。

5) 両作型とも栽培期間を通して葉身のカルシウム含有率が漸減することから、栽培後期に起こる葉先枯れを軽減させるため、土壌pH矯正による土壌へのカルシウム補給、土壌交換性マグネシウムとカルシウムとの適正バランスの維持等に留意すべきである。

第2節 土壤硝酸態窒素に対応した窒素施肥法

1. はじめに

ハウス作物を持続的に生産するためには土壤の塩類濃度を適正レベルに維持することが必要であり、このためには、施設栽培条件での生育や養分吸収特性に対応した合理的な肥培管理を行う必要がある。また、近年は過投入された窒素が農地系外に負荷を与えないよう、周辺環境への配慮の点からも窒素施肥の適正化が重要である。

そこで、前節で明らかにした施設軟白ネギの乾物生産および窒素吸収特性に基づき、本節では北海道において最も主要な作型である夏秋どり作型を対象に、軟白ネギの窒素吸収パターンと土壤硝酸態窒素の残存量に対応した窒素施肥法を検討した。

2. 試験方法

1) 基肥窒素量の検討（試験1）

基肥窒素量が施設軟白ネギの生育に与える影響を明らかにするため、基肥窒素0, 5, 10, 15, 20 g m⁻²の5水準を設けた。なお、基肥の他に定植後70日目に全処理共通に窒素5 g m⁻²を分施した。場所は道南農業試験場内のビニールハウスで、試験開始前の土壤の残存硝酸態Nは2.0 mg kg⁻¹と殆どなく、他の土壤条件は前節と同じである。1区面積は4.5 m²で、3反復である。64日間育苗した苗を1997年7月1日に定植し、12月18日の収穫まで170日間栽培した。葉鞘部の軟白化は定植後70～80日目頃に前節と同じ方法で行った。なお、リン酸およびカリウム（K₂O）は基肥に各々10 g m⁻²、分施にはカリウムを2回（定植後60, 90日目）各5 g m⁻²を共通施肥した。堆肥は施用しなかった。窒素施肥方法、栽植密度、かん水・マルチ等の栽培条件は前節と同じである。

栽培期間中の生育調査および収量調査における生育指数（草丈 cm × 葉鞘径 cm）、葉色、一本重、軟白長、軟白径、乾物重、生重、規格内収量は各々20個体について調査した。葉色は上位葉側から3葉目を野菜用葉色カラースケールで目測した。収量調査では高さ0.8 mに切り揃えた葉身を3～4枚残して表皮を剥き、軟白部分の長さが0.4 m以上得られた個体を規格内品とした。土壤試料の採取方法および分析方法は第2章と同じである（以下同様）。

2) 基肥・分施割合の検討（試験2）

合計窒素施肥量を20 g m⁻²として基肥・分施割合が生育に与える影響を検討した。処

理区は①基肥 5 g m^{-2} と分施 15 g m^{-2} ($5 \text{ g m}^{-2} \times 3$, 定植後 30, 60, 90 日目), ②基肥 10 g m^{-2} と分施 10 g m^{-2} ($5 \text{ g m}^{-2} \times 2$, 定植後 60, 90 日目), 基肥 15 g m^{-2} と分施を定植後 90 日目に 50 g m^{-2} の 3 処理区および無窒素区とした。試験開始前の土壌の残存硝酸態Nは 9.0 mg kg^{-1} と殆どない条件であった。69 日間育苗した苗を 1998 年 5 月 18 日に定植し, 11 月 19 日の収穫まで 185 日間栽培した。窒素施肥方法および他の試験方法は前項と同じである。

3) 分施時期の検討 (試験 3)

同一基肥量において分施開始時期が生育に与える影響を検討した。合計窒素施肥量を 200 kg ha^{-1} として基肥窒素量を 10, 15 g m^{-2} の 2 水準, 分施開始時期を定植後 30 日目 (早), 同 60 日目 (遅) の 2 時期とした (表 4-1)。定植後 30 日目に分施を開始した場合の適正な基肥窒素量を検討するため, 試験 2 において最も多収が得られた処理 (基肥 5 g m^{-2} , 定植後 30 日目から合計 15 g m^{-2} 分施) を対照区とした。試験開始前の土壌の残存硝酸態Nは 4.0 mg kg^{-1} と殆どない条件であった。64 日間育苗した苗を 1999 年 5 月 12 日に定植し, 11 月 1 日の収穫まで 173 日間栽培した。窒素施肥方法および他の試験方法は前項と同じである。

表 4-1 「分施時期の検討 (試験 3)」における処理

処理区名 基肥+分施	基肥 g m^{-2}	分施 (定植後日数)			合計 g m^{-2}
		30日	60日	90日	
0	0				0
対照区	5	5	5	5	20
10 + 早	10	5	5	—	20
15 + 早	15	5	—	—	20
10 + 遅	10	—	5	5	20
15 + 遅	15	—	5	—	20

注) ‘早’ は分施開始時期が定植後30日目, ‘遅’ は同60日目, 表4-4, 表4-5も同じ。

4) 施肥前の土壌硝酸態窒素に対応した施肥量の検討 (試験 4)

施肥前の土壌硝酸態Nが, ハウス① 301 mg kg^{-1} , ハウス② 63 mg kg^{-1} の 2 水準の農家ハウスにおいて, 基肥窒素量を① 0, 5, 10, 20 g m^{-2} , ② 0, 10 g m^{-2} とし, 窒素分施量を②において 2 回 (定植後 30, 60 日目) 各 5 g m^{-2} とした。堆肥は施用しなかった。栽培期間は① 1997 年 7 月 20 日～12 月 16 日, ② 1999 年 3 月 28 日～8 月 10 日, 試験規模

は① 1区面積を 13.3 m², 2反復, ②同 60.1 m², 2反復とした。他の条件は①, ②とも窒素施肥方法, 品種および栽植密度は前項と同じ, 場所は北海道太平洋岸南部の八雲町, 土壌は褐色低地土である。

5) 北海道の主要生産地における土壌硝酸態窒素の実態

1995年11月2～3日に北海道の日本海沿岸南部にある今金町の85棟の農家ハウス土壌において硝酸態Nの実態調査を行った。町内のほとんどのハウスは小河川沿いに形成された低地の転換畑に建設されており, 軟白ネギ生産に専用化されたハウスが多かった。調査に供試したハウスの土壌は褐色低地土および灰色低地土が多く, 表層無機質泥炭土が数点あり, 黒ボク土はなかった。各調査ハウスで肥料および土壌改良資材は全面全層施用されており, 6～8月に定植したネギが栽培途中でであった。

3. 試験結果

1) 基肥窒素量の検討 (試験1)

定植後30日目までの初期生育を見ると, 基肥窒素0～15 g m⁻²の範囲では基肥量が多いほど生育指数(草丈 cm × 葉鞘径 cm)が高く葉色も濃いものの, 15 g m⁻²区と20 g m⁻²区との差は認められなかった(表4-2)。乾物重および窒素含有量は, 収穫時には基肥窒素15 g m⁻²区で最大となり20 g m⁻²区よりも多かった。規格内収量は基肥窒素15 g m⁻²区で最大であった。基肥量が多くなると収穫時の窒素乾物生産効率(乾物重/窒素含有量)が低下し, 両者の間に有意な負の相関($p < 0.01$, $r = 0.983$)が認められた。また, 土壌硝酸態Nは定植後30日目頃から収穫まで1～4 mg kg⁻¹程度と低く推移した(表4-2)。

表4-2 基肥窒素量と軟白ネギの生育, 収量および窒素含有量, 土壌硝酸態窒素の推移 (試験1)

基肥量 g m ⁻²	定植後 30日目		全 収量	規格内 収量	収穫時 乾物重 kg m ⁻²	収穫時 窒素含有量 g m ⁻²	収穫時の窒素 乾物生産効率 kg kg ⁻¹	土壌硝酸態N mg kg ⁻¹	
	生育指数	葉色						30日目	跡地
0	43.9±4.7	3.1±0.1	13.3±0.8	7.5±0.5	1.06±0.05	16.9±1.4	65.0±5.7	1.3	0.8
5	52.0±1.4	4.2±0.7	15.3±0.3	8.6±0.3	1.13±0.04	18.3±2.7	62.9±7.4	1.3	1.7
10	52.3±4.3	4.9±0.3	16.7±0.9	8.7±0.9	1.27±0.06	22.3±2.5	57.3±5.5	1.0	4.0
15	58.1±1.8	5.5±0.1	18.8±0.5	9.9±0.4	1.60±0.10	27.3±2.8	59.0±3.6	1.7	3.7
20	57.3±1.5	5.4±0.3	16.5±1.2	7.5±2.3	1.35±0.07	24.9±1.9	54.4±2.2	4.0	4.3

注) 生育指数=草丈 (cm) × 葉鞘径 (cm)。±以下は標準誤差, 表4-3以下も同じ。

2) 基肥・分施割合の検討 (試験 2)

葉身の乾物重および窒素含有量の推移を見ると、基肥 5 g m^{-2} + 分施 15 g m^{-2} 区において定植後 30 ~ 90 日目までの増加量が他区よりも多かった (図 4-5)。葉鞘の乾物重および窒素含有量の処理間差は定植後 60 日目頃までは見られず、60 日目以降に基肥 5 g m^{-2} + 分施 15 g m^{-2} 区において窒素含有量の増加量が多かった。

規格内収量は基肥 5 g m^{-2} + 分施 15 g m^{-2} 区において最大であり、このときの土壤硝酸態Nは定植後 30 日目頃から収穫まで $4 \sim 11 \text{ mg kg}^{-1}$ 程度に低く推移した (表 4-3)。収穫時の窒素含有量は基肥 5 g m^{-2} + 分施 15 g m^{-2} 区において最も多く 24.2 g m^{-2} であり、無窒素区との差し引きによる施肥窒素利用率は 74.8 %であった。

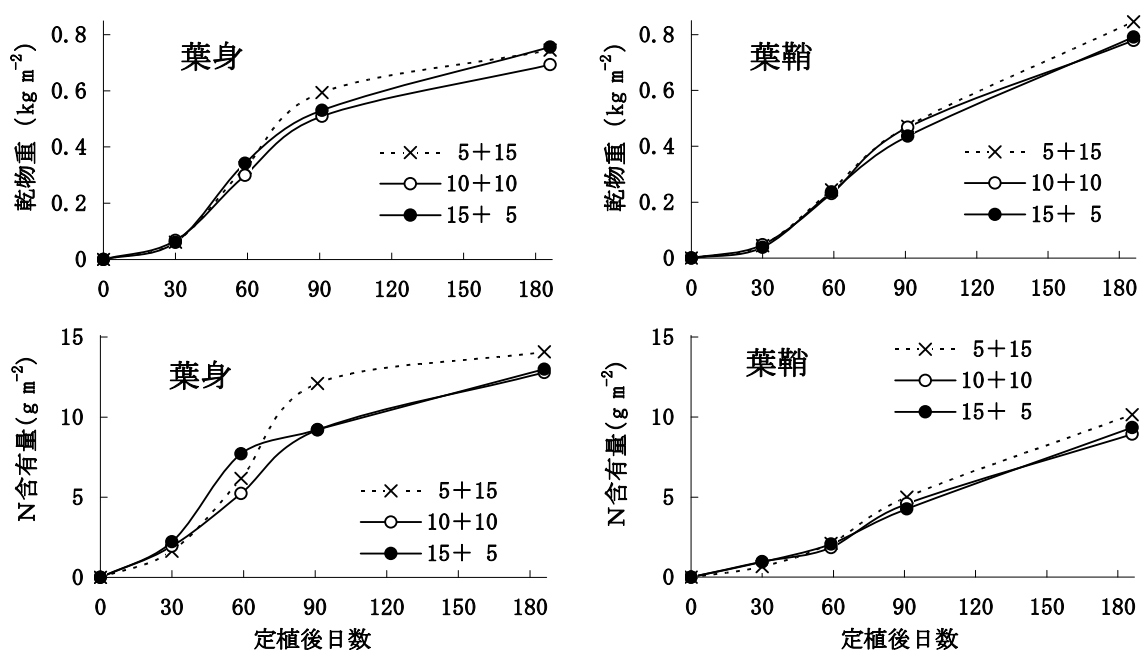


図 4-5 基肥・分施割合と乾物重および窒素含有量の推移 (試験 2)

表 4-3 基肥・分施割合と収量および窒素含有量, 土壤硝酸態窒素の推移 (試験 2)

処理区名 基肥+分施	全収量	規格内収量	窒素含有量	土壤硝酸態N (mg kg^{-1})			
				30日	60日	90日	跡地
0	9.8 ± 2.0	1.58 ± 0.60	9.3 ± 0.3	4.3	4.6	3.5	9.7
5+15	22.1 ± 0.9	12.57 ± 0.22	24.2 ± 0.5	8.3	4.7	4.3	11.2
10+10	20.6 ± 1.4	11.66 ± 0.77	21.7 ± 2.5	11.5	4.0	4.8	9.7
15+5	21.0 ± 1.7	11.80 ± 0.96	22.3 ± 0.5	35.1	6.6	4.1	10.6

3) 分施肥時期の検討 (試験 3)

時期別の乾物重を部位毎に見ると、葉身の乾物重は定植後 90 日目までは定植後 30 日目の分施肥 (早期分施肥系列) で多かったが、収穫時の処理間差は小さかった (表 4-4)。一方、葉鞘の乾物重は定植後 90 日目までは処理間差が小さかったが、収穫時点では早期分施肥系列で多かった。窒素含有量の処理間差は乾物重と同じ傾向を示した。

早期分施肥系列の乾物重を対照区と比較すると、葉身の乾物重は早期分施肥系列においてやや多く推移する傾向があり、葉鞘では定植後 90 日目までは処理間差が小さかったが収穫時には早期分施肥系列において多かった。また、窒素含有量は葉身・葉鞘ともに基肥 10, 15 g m⁻²区において多かった (表 4-4)。

規格内収量は早期分施肥系列で多かった (表 4-5)。このときの処理間差は全収量よりも規格内収量において大きく、遅く分施肥開始した系列では規格内品の製品一本重、軟白長および軟白径が小さかった。早期分施肥系列内の基肥 10 g m⁻²区と 15 g m⁻²区との間に生育および収量差は認められなかった。

土壌硝酸態 N は各処理区において低く推移し、多収を得た早期分施肥系列の基肥 10 g m⁻²区において定植後 30 日目に 33.3 mg kg⁻¹、跡地で 11.1 mg kg⁻¹であった (表 4-5)。

表 4-4 分施肥時期と時期別の部位別乾物重, 窒素含有量 (試験 3)

処理区名 基肥+分施肥	乾物重 (kg m ⁻²)						窒素含有量 (g m ⁻²)					
	葉身			葉鞘			葉身			葉鞘		
	60日目	90日目	収穫	60日目	90日目	収穫	60日目	90日目	収穫	60日目	90日目	収穫
0	0.143	0.183	0.544	0.158	0.199	0.458	1.8	2.9	9.5	0.8	1.5	4.2
対照区	0.328	0.578	0.923	0.237	0.497	0.795	6.3	9.3	16.1	2.2	3.9	7.6
10 + 早	0.350	0.614	0.954	0.247	0.501	0.882	9.8	12.3	17.3	2.6	4.9	8.9
15 + 早	0.399	0.628	0.991	0.263	0.515	0.873	10.5	12.9	18.0	3.7	4.8	8.8
10 + 遅	0.346	0.583	0.952	0.235	0.496	0.797	6.7	10.3	16.1	2.2	4.2	8.0
15 + 遅	0.359	0.571	0.955	0.238	0.471	0.792	8.3	11.6	16.4	2.7	5.0	8.1

表 4-5 分施肥時期と外観品質, 収量, 収穫時の窒素含有量, 土壌硝酸態窒素の推移 (試験 3)

処理区名 基肥+分施肥	一本重 (g)	軟白長 (mm)	軟白径 (mm)	全収量 (kg m ⁻²)	規格内収量 (kg m ⁻²)	窒素含有量 (g m ⁻²)	土壌硝酸態 N (mg kg ⁻¹)	
							30日目	跡地
0	99.3±12.7	359±23	12.2±0.6	11.8±0.8	2.42±1.73	13.7±2.4	7.6	14.1
対照区	144.9± 3.6	419± 7	13.5±0.4	21.3±1.1	10.24±1.16	23.7±1.3	23.0	11.9
10 + 早	146.1± 5.0	437±13	13.8±0.7	22.8±1.4	11.19±0.41	26.2±1.9	33.3	11.1
15 + 早	143.0±13.4	435± 4	14.0±0.5	22.5±1.0	11.13±0.94	26.8±1.1	56.0	12.5
10 + 遅	132.4±15.9	412±11	13.0±0.8	21.4±0.4	9.61±0.54	24.1±2.5	34.3	15.6
15 + 遅	136.6± 4.0	417± 5	13.0±0.4	21.4±0.5	9.56±0.75	24.5±2.2	54.9	15.4

4) 施肥前の土壌硝酸態窒素に対応した施肥量の検討 (試験 4)

施肥前の土壌硝酸態Nが 301 mg kg⁻¹と高かったハウス①では、施肥量が少ないほど栽培期間中の生育指数で見た生育量が多く収量も多かった (表 4-6)。施肥量と葉身・葉鞘を合わせた乾物重との間には有意な負の相関 ($p < 0.05$, $r = 0.974$) が認められた。定植時に大量のかん水が行われ、基肥 0 g m⁻² (無窒素) 区における土壌硝酸態Nは生育初期 (定植後 30 日目) に 127 mg kg⁻¹, 跡地で 55 mg kg⁻¹であった。

施肥前の土壌硝酸態Nが 63 mg kg⁻¹のハウス②では、定植後 30 日目, 60 日目の生育指数および収量に処理間差が認められなかった (表 4-7)。定植後 30 日目の土壌硝酸態Nは基肥 0 g m⁻²区において 20 mg kg⁻¹, 10 g m⁻²区において 42 mg kg⁻¹であった。

表 4-6 土壌硝酸態Nの推移および生育, 収量 (施肥前土壌硝酸態N ; 301 mg kg⁻¹) ,
(試験 4)

窒素基肥量 g m ⁻²	土壌硝酸態N (mg kg ⁻¹)			生育指数 ^a		収穫時乾物重 (kg m ⁻²)		全収量 kg m ⁻²
	30日	60日	跡地	30日目	60日目	葉身	葉鞘	
0	127±17	62±13	55±9	51.7±2.7	118.6±9.7	0.600±0.026	0.517±0.011	17.5±1.0
5	191±24	131±21	114±6	51.5±1.4	112.1±2.7	0.535±0.018	0.487±0.051	15.9±0.6
10	232±79	189±23	180±17	49.7±0.8	109.6±6.8	0.537±0.045	0.458±0.050	15.3±1.5
20	322±44	376±91	313±54	47.2±4.1	101.3±4.2	0.507±0.012	0.401±0.013	14.4±0.1

^a 生育指数=草丈 (cm) × 葉鞘径 (cm)

表 4-7 土壌硝酸態窒素の推移および生育, 収量 (施肥前土壌硝酸態窒素 ; 63 mg kg⁻¹) ,
(試験 4)

窒素施肥量 g m ⁻²	土壌硝酸態N (mg kg ⁻¹)			生育指数 ^a		収穫時乾物重 (kg m ⁻²)		全収量 kg m ⁻²
	30日	60日	跡地	30日目	60日目	葉身	葉鞘	
0+10	20±4	9±1	5±0	20.6±1.1	81.2±0.3	0.677±0.075	0.659±0.036	16.6±0.4
10+10	42±11	20±4	46±1	22.8±1.7	83.0±2.6	0.687±0.090	0.671±0.069	16.8±1.3

^a 生育指数=草丈 (cm) × 葉鞘径 (cm)

5) 北海道の主要生産地における土壌硝酸態窒素の実態

栽培期間中の土壌の硝酸態Nは最高値が 732 mg kg⁻¹, 最低値が 3 mg kg⁻¹, 平均値が 178 mg kg⁻¹であり, 200 mg kg⁻¹以上のハウスが全体の 39%であった (図 4-6)。ハウス建設後の経過年数との関係では, 年数が経過するとばらつき範囲が広くなり高い値のハウスも見られるようになったが, 中には, 建設後 1 年で 200 mg kg⁻¹を超えたハウスが見られた (図 4-7)。

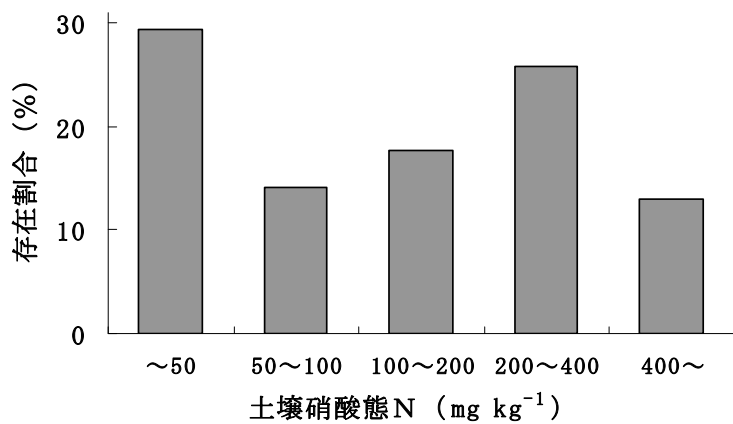


図 4-6 主要生産地における施肥前土壌硝酸態窒素の実態 (n=85)

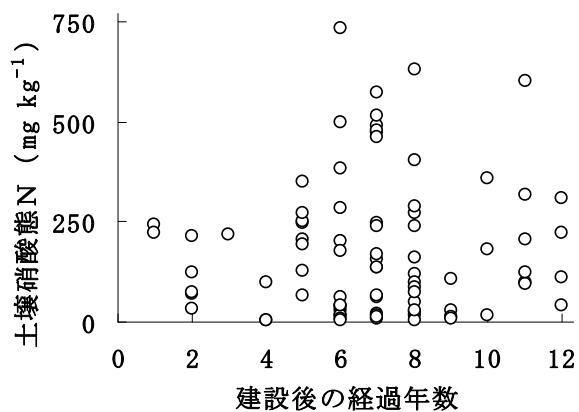


図 4-7 ハウス建設後年数と施肥前土壌硝酸態窒素レベル

4. 考察

1) 基肥窒素の必要性

前節でみた生育初期の CGR が葉身、葉鞘ともに定植直後から増加傾向にあり、試験 1 の基肥窒素用量試験では基肥 15 g m⁻²までは窒素量が多いほど初期生育が高まり、これが収穫時まで影響し基肥 15 g m⁻²区の収量が最も多かった。このように、良好な初期生育を得るためには初期の十分な窒素供給が必要であり基肥窒素は重要と考えられた。ただし、この試験では生育盛期の窒素吸収量に対して分施量が 5 g m⁻²と少なく、適当な分施を行った場合、基肥窒素の適量は 15 g m⁻²よりも少なくなる可能性がある。

なお、露地ネギ栽培についての一般書（小林ら 1989、関口 1989）の中には定植時の基肥は不必要と書かれたものもあるが、北海道の施設栽培で多収を得るためには初期生育を高めることが重要であり、基肥窒素は必要と判断した。

2) 乾物生産および窒素吸収特性に対応した窒素施肥時期

試験 1 では基肥 15 g m^{-2} 区（全処理区に分施した 5 g m^{-2} と合わせた合計施肥量が 20 g m^{-2} ）において収量および窒素含有量が最大となり，前節の夏秋どり作型における 1 作当たりの窒素含有量が 25.5 g m^{-2} であったことから（図 4-3），基肥・分施の合計窒素施肥量は 20 g m^{-2} が適当と判断した。

軟白部分伸長期には葉身の乾物重は増加し続けたが窒素含有量の増加は僅かであり，生育日数の経過とともに葉身に炭水化物が蓄積したと考えた。石黒（1967）は露地軟白ネギにおいて軟白化開始後に葉身長は変化せず葉鞘長のみが伸長し，このとき葉鞘における細胞数は増加せず各細胞が大きくなると報告している。軟白ネギは収穫まで栄養生長を持続し，軟白部分伸長期は葉鞘部を被覆することで作られた人為的な生育ステージである。この時期には葉鞘部が被覆フィルム等によって高さ 40 cm 以上まで遮光され（阿部 1999），同化産物は葉身部分から被覆された葉鞘部に転流すると考えられることから，葉身部の大きさと葉鞘部の細胞数を十分に高めた後に軟白化フィルムで被覆することが重要と考える。そこで，生育盛期の乾物生産を高めるための基肥・分施割合と分施開始時期を検討した。

試験 2 で，分施割合を多くした処理区では軟白フィルム被覆までの生育盛期の葉身重が大きくなり，その後の軟白部分伸長期に葉鞘部分への同化産物の転流量が増加して葉鞘重が大きくなり多収となった。従って基肥窒素量が少ない場合でも，分施時期を早めるか，または分施割合を多くすることで十分な収量が得られると考える。しかし，試験 2 では分施量が少ない処理区に分施開始時期が遅いため，多収効果が分施割合の多いことによるか分施開始時期の早いことによるかが判断できなかった。

試験 3 で，早期に分施して軟白化開始までの生育盛期に葉身を大きくすると，基肥 10 g m^{-2} 以上では同等に多収が得られた。従って，分施開始時期を定植後 30 日目頃まで早めると，基肥は 10 g m^{-2} が適当であり，このときの分施量は 10 g m^{-2} であった。基肥 15 g m^{-2} 区においても同等の収量が得られたが，基肥は必要最少量とし，栽培期間中の土壌からの窒素供給を考慮して作物生育状況を診断しながら分施することが合理的である。対照区（基肥 5 g m^{-2} + 分施 15 g m^{-2} ）における収量は早期分施開始系列よりも少なかったが，遅く分施開始した系列の収量よりも多かったことから試験 2 の結果とは矛盾しない。収量レベルがやや低かった原因は栽培期間が試験 2 よりも 10 日以上短かったため，および 1999 年 8 月に記録的な猛暑（8 月上旬の平均気温が 1998 年： $19.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ，

1999年：25.4℃）があり本来冷涼な条件を好む軟白ネギの生育が停滞したためであると思われる。

以上のことから、施設軟白ネギに対する窒素施肥は基肥を 10 g m^{-2} として、 10 g m^{-2} 程度の分施を定植後 30 日目頃の生育前期から開始することが適当である。

3) 施肥前の土壌硝酸態窒素レベルに対応した施肥量

北海道内の代表的施設軟白ネギ産地の一つである今金町において、土壌硝酸態Nレベルは調査したハウスの 39 %で 200 mg kg^{-1} を超えていた。北海道施肥ガイド（北海道農政部 2002）では施肥前の残存硝酸態Nが 100 mg kg^{-1} 以上あると窒素減肥の対象となる。一方、同地域における施設軟白ネギへの平均窒素施肥量は 30.7 g m^{-2} であり（新村ら 1998）、これは北海道施肥ガイドにおける標準施肥量の約 2 倍量であった。すなわち、施設軟白ネギ生産地では多くのハウスにおいて窒素施肥量が過剰傾向にある。しかし、建設後 1 年で 200 mg kg^{-1} を超えたハウスや、建設後 12 年で 40 mg kg^{-1} 程度のハウスが見られたことから、農家間による施肥量の差が大きいと考えられ、土壌の残存窒素レベルに対応して施肥量を減らすことがハウス土壌を健全に保ち生産性を維持するために必要と考える。

そこで、施肥前に残存する土壌硝酸態Nレベルと基肥量との関係を検討した。道南農業試験場内で実施した各試験における施肥前の土壌硝酸態Nは $2 \sim 9 \text{ mg kg}^{-1}$ とわずかであり、前項で適当とした窒素施肥法は土壌硝酸態Nが低い圃場にも適用される。

施肥前の土壌硝酸態Nが 301 mg kg^{-1} と高い農家ハウス土壌では（表 4-6）、基肥窒素量が少ないほど生育量が多く、定植後 30 日目の土壌硝酸態Nは無窒素区で 127 mg kg^{-1} 、基肥窒素 5 g m^{-2} 区では 191 mg kg^{-1} であり、 5 g m^{-2} 区の収量は無窒素区よりも少なかった。また、基肥窒素量を増やすほど全収量は低下し、無窒素区において最も多収であった。これらのことから、定植時に土壌硝酸態Nが 100 mg kg^{-1} 以上ある圃場では基肥窒素を施肥する必要はなく、 200 mg kg^{-1} 以上ある圃場では定植後 30 日目頃の分施は必要ないと考える。

また、施肥前の土壌硝酸態Nが 63 mg kg^{-1} と本調査における農家ハウスの平均レベルよりもやや低い土壌では（表 4-7）、基肥窒素 10 g m^{-2} 区と無窒素区との間に処理間差が認められなかった。このことから、施肥前の土壌硝酸態Nが $50 \sim 100 \text{ mg kg}^{-1}$ 程度残存する圃場では基肥窒素を施肥しなくてもよい可能性がある。しかし、基肥 0 区における定植後 30 日目の土壌硝酸態Nは 20 mg kg^{-1} とやや低く、確実に多収を得るためには 5

g m^{-2} 程度の基肥が必要と考える。

以上のことから、施肥前に残存する土壤硝酸態Nに対応した窒素施肥法を表 4-8 のように作成した。なお、ここに示した窒素施肥量はネギ 1 作の窒素吸収量よりもやや少ないため、一般的な窒素地力を持った土壤であることを前提とする。本施肥法を導入することにより、軟白ネギ栽培ハウスの土壤に残存する硝酸態Nは確実に低減できる。

表 4-8 施肥前の残存土壤硝酸態窒素に対応した窒素施肥法

土壤硝酸態窒素 mg kg^{-1}	基肥窒素量 g m^{-2}	分施窒素量 (g m^{-2})		跡地の窒素 残存量の変化
		定植後30日目頃	同60日目頃	
～ 50	10	5	5	維持
50 ～ 100	5	5	5	僅かに減少
100 ～ 200	0	5	5	減少
200 ～	0	0	5	大きく減少

5. 要約

北海道における夏秋どり栽培軟白ネギの乾物生産および窒素吸収特性に基づく窒素施肥法を検討した。

1) 生育初期には CGR を高く保ち多収を得るために 10 g m^{-2} 程度の基肥窒素を施肥して初期生育を高める必要があった。生育盛期には CGR が最も高い定植後 30 日目頃から窒素を 10 g m^{-2} 程度分施することにより高い収量が得られた。また、生育盛期に葉身重を高めると軟白部分伸長期に葉鞘部分の生育が高まり多収となった。1 作当たりの窒素施肥量は 20 g m^{-2} 程度が適量であった。

2) 施肥前に残存する土壤硝酸態Nと窒素施肥量との関係から、土壤硝酸態Nが 50 mg kg^{-1} 未満では基肥窒素量を 10 g m^{-2} 、 $50 \sim 100 \text{ mg kg}^{-1}$ では同 5 g m^{-2} 、 100 mg kg^{-1} 以上では同ゼロ、 200 mg kg^{-1} 以上では基肥と定植後 30 日目頃の分施をともにゼロと設定した。

3) 栽培期間中に調査した農家ハウスの 39 %で土壤硝酸態Nレベルが 200 mg kg^{-1} を超えており過剰に蓄積していた。従って、本施肥法は多くの軟白ネギ栽培ハウスの土壤に残存する硝酸態Nを低減できる。

第3節 土壤可給態リン酸に対応したリン酸施肥量

1. はじめに

ハウス土壤の永続的利用のためにはリン酸肥沃度を適正に維持する必要がある。また、近年は過剰に投入されたリン酸が農地系外に流出し環境に負荷を与える事例も見られ（竹内 1997）、環境保全の視点からも土壤リン酸肥沃度の適正化が重要である。

第1節において北海道の主要作型である夏秋どりの軟白ネギでは、初期生育の確保が重要なタマネギと異なり、リン酸多量施肥または高濃度の土壤リン酸によって初期生育量を高めても多収とはならないものと想定した。そこで本節では夏秋どりを対象に、生育・収量と土壤の可給態リン酸との関係、並びに土壤可給態リン酸に対応した適正なリン酸施肥量について検討した。

2. 試験方法

1) 北海道の主要生産地における土壤可給態リン酸の実態

前節で調査した今金町の85棟の農家ハウスで採取した土壤において可給態リン酸を分析した。

2) 夏秋どり作型における土壤可給態リン酸と生育

5月定植作型における土壤可給態リン酸量とネギ生育との関係を栽培期間別に検討した。1997年の試験は5月29日（定植）～10月9日（収穫）の133日間栽培した。北海道の施設軟白ネギ栽培において年2作付けする場合の夏秋どり作型を想定した。定植時の土壤可給態リン酸量は390～3820 mg kg⁻¹の範囲に5水準を設定した。1998年の試験は5月19日（定植）～11月19日（収穫）に184日間栽培した。年1作栽培する場合の秋どり作型を想定した。定植時の土壤可給態リン酸量は180～4440 mg kg⁻¹の範囲で5水準を設定した。土壤の可給態リン酸はトルオーグ法（Truog 1930）で抽出し、モリブデン青法で比色定量しP₂O₅態で示した。以下の試験でも同様である。

両試験とも道南農業試験場内のビニールハウスで行い、土壤は中粒質普通褐色低地土（リン酸吸収係数は8.3 g kg⁻¹）である。他の土壤条件は前節と同じである。また、可給態リン酸水準の調整のために、試験する前年の10月に重焼燐、重過燐酸石灰、リン酸1水素カリウム、リン酸2水素ナトリウムを混合して0.15 mの深さの土壤と混和した。施肥は窒素およびカリウムのそれぞれを基肥10 g m⁻²、分施2回各5 g m⁻²（定植

後 60, 90 日目) とした。品種は‘元蔵’を用いた。試験規模は、直径 0.4 m, 深さ 0.4 m の円形無底枠を上記のハウス土壌に打ち込み、栽植密度は 79.6 株 m^{-2} (1 枠当たり 10 株, 株間 0.04 m) とした。栽培期間中は全面を白黒二層ポリエチレンフィルムでマルチし、かん水は作土層の水分ポテンシャルが 19.6 k Pa 以上になったときを目安にして 1 回につき 10 L m^{-2} を枠内の全面に行った。栽培期間中の生育調査は、生育指数 (草丈 $\text{cm} \times$ 葉鞘径 cm) および葉数 (2.5 cm 以上に展開した葉を 1 枚と数えた) を測定し、各々 10 個体の平均値を示した。作物体の乾物重、リン酸含有率および吸収量は収穫物を 10 個体合わせて調査した。作物体のリン酸含有率は通風乾燥後に硫酸分解し、モリブデン青法で比色定量し P_2O_5 態で示した。試験はいずれも 2 反復で実施した。以下の試験でも同様である。

3) 土壌可給態リン酸レベル別のリン酸施肥量の検討

5 月定植夏秋どり作型において、ネギ生育に対する土壌可給態リン酸レベルとリン酸施肥量との関係を 1999 年に検討した。土壌可給態リン酸 2 水準 ($200, 500 \text{ mg kg}^{-1}$) とリン酸施肥量 3 水準 (0, 5, 10 g m^{-2}) を組み合わせた。土壌可給態リン酸量 200 mg kg^{-1} 系列における施肥前の可給態リン酸量は $209 \sim 222 \text{ mg kg}^{-1}$, 500 mg kg^{-1} 系列では $508 \sim 529 \text{ mg kg}^{-1}$ であった。リン酸施肥は重過リン酸石灰で行った。栽培期間は 5 月 12 日 (定植) ~ 11 月 1 日 (収穫) の 173 日間であった。その他の試験方法は前項と同様である。試験は 2 反復で実施した。

3. 試験結果

1) 北海道の主要生産地における土壌可給態リン酸の実態

調査ハウスの土壌可給態リン酸量は最高値が $4,355 \text{ mg kg}^{-1}$, 最低値が 388 mg kg^{-1} , 平均値が $1,633 \text{ mg kg}^{-1}$ であり、ほとんどが 500 mg kg^{-1} 以上であった (図 4-8)。

ハウス建設後の経過年数との関係を見ると、年数が経過するとともに土壌可給態リン酸量の高いハウスが増加する傾向を示したが、中には建設後 2 年で $4,000 \text{ mg kg}^{-1}$ を超えるハウスや建設後 11 年で $1,000 \text{ mg kg}^{-1}$ 程度のハウスも見られた (図 4-9)。

各農家では、いくつかの作型を同時に複数のハウスで栽培しており、その年の出荷計画によって各ハウスにおける作型が毎年様々に変わっていた。

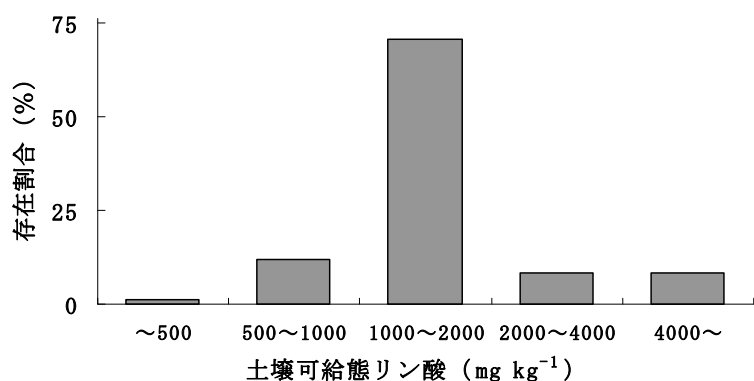


図 4-8 主要生産地における施肥前土壌可給態リン酸の実態 (n=85)

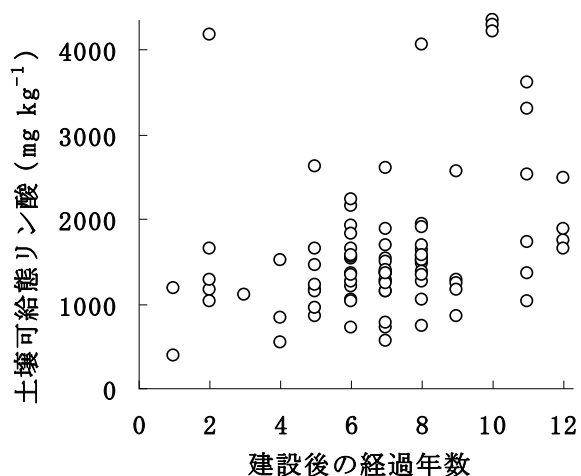


図 4-9 ハウス建設後年数と施肥前の土壌可給態リン酸

2) 土壌可給態リン酸量と生育との関係

1997年の試験において生育指数（草丈×葉鞘径）は定植後60日目までは土壌可給態リン酸量1970 mg kg⁻¹区において最大であったが、133日目には1010 mg kg⁻¹区においてやや大きくなった（表4-9）。3820 mg kg⁻¹区では定植後60日目までの生育指数は1970 mg kg⁻¹区と同程度であったが、収穫時の133日目には他の区より小さかった。葉数によって比較した初期生育は、定植後30日目には1970 mg kg⁻¹区において最大であったが、定植後60日目には相対的な処理間差が小さくなった。収穫時の乾物重は可給態リン酸量1010 mg kg⁻¹区において最大となり、それ以上可給態リン酸量が増加すると徐々に低下する傾向を示した。収穫時の作物体のリン酸含有率およびリン酸吸収量の処理間差は判然としなかった。

1998年の試験において生育指数は定植後日数が経過するほど相対的な処理間差が小さくなり、90日目までは1340 mg kg⁻¹区において最大であったが、収穫時の184日目には580 mg kg⁻¹区で最大となり（図4-10）、2660 mg kg⁻¹以上の区では明らかに小さかった（表4-10）。可給態リン酸量が580～4440 mg kg⁻¹の範囲では可給態リン酸量と収穫時（184日目）の生育指数との間に有意な負の相関（ $p < 0.01$, $r = 0.997$ ）が認められた（図4-11）。定植後30日目から60日目までの葉数は1340 mg kg⁻¹区において最大であり、それ以上に可給態リン酸量が高くなると低下した。葉数の処理間差を見ると、180 mg kg⁻¹区と1340 mg kg⁻¹区との差は定植後日数が経過するほど小さくなり、1340 mg kg⁻¹区と4440 mg kg⁻¹区との差は定植後日数が経過するほど大きくなった。収穫時の乾物重は580 mg kg⁻¹区において最大であり、それ以上可給態リン酸量が高まると減少した。作物体のリン酸吸収量は可給態リン酸量1340および2660 mg kg⁻¹区においてやや多い傾向が見られた。

両年を通じて収穫時の生育指数および乾物重は、およそ1000 mg kg⁻¹以上では可給態リン酸量が高まるほど漸減した。

表4-9 夏秋どり作型における土壌可給態リン酸量と生育の推移、収穫時の乾物重、リン酸含有率およびリン酸吸収量（1997年）

可給態リン酸 mg kg ⁻¹	生育指数 ^a				葉数(枚)		乾物重(kg m ⁻²)			リン酸含有率(g kg ⁻¹)		リン酸吸収量(g m ⁻²)		
	30日	60日	133日 ^b		30日目	60日目	葉身	葉鞘	合計	葉身	葉鞘	葉身	葉鞘	合計
390	26±0	56±3	149±4	4	3.6±0.0	5.5±0.2	0.633	0.395	1.03±0.02	5.0±1.4	4.9±1.4	3.31	2.00	5.31±1.33
540	27±3	54±2	152±12		3.8±0.1	5.6±0.1	0.650	0.387	1.04±0.10	5.0±0.1	3.7±0.3	3.40	1.50	4.90±0.31
1010	25±1	60±3	159±11		4.1±0.2	5.6±0.1	0.675	0.402	1.08±0.07	4.6±0.6	4.7±0.1	3.25	1.98	5.23±0.65
1970	27±2	66±1	156±10		4.3±0.1	6.1±0.3	0.679	0.391	1.07±0.07	5.4±0.2	4.9±1.1	3.80	1.98	5.78±0.15
3820	26±1	64±3	134±2		4.0±0.3	5.9±0.0	0.638	0.391	1.03±0.09	5.4±1.3	5.4±0.6	3.58	2.21	5.78±1.02

^a 生育指数=草丈(cm)×葉鞘径(cm), ±以下は標準誤差, ^b 定植後日数。以上, 表4-10と表4-12も同じ。

表4-10 秋どり作型における土壌可給態リン酸量と生育の推移、収穫時の乾物重、リン酸含有率およびリン酸吸収量（1998年）

可給態リン酸 mg kg ⁻¹	生育指数 ^a				葉数(枚)		乾物重(kg m ⁻²)			リン酸含有率(g kg ⁻¹)		リン酸吸収量(g m ⁻²)		
	30日	60日	90日	184日	30日目	60日目	葉身	葉鞘	合計	葉身	葉鞘	葉身	葉鞘	合計
180	15±1	77±3	126±1	184±26	3.3±0.4	6.5±0.3	0.750	0.638	1.39±0.29	5.9±0.5	4.9±0.6	4.38	3.05	7.43±0.88
580	28±2	103±10	160±5	235±10	4.8±0.2	7.3±0.3	1.027	1.040	2.07±0.31	5.4±0.7	4.1±0.2	5.36	4.22	9.59±0.62
1340	40±4	118±3	162±0	223±4	5.0±0.2	7.8±0.1	0.958	0.858	1.82±0.13	7.2±0.3	5.2±0.4	6.89	4.48	11.37±0.28
2660	31±3	98±8	150±4	206±4	4.8±0.2	7.3±0.2	0.979	0.844	1.82±0.04	6.4±0.2	6.1±0.4	6.21	5.09	11.31±0.38
4440	25±1	71±3	117±7	173±5	4.6±0.1	6.3±0.2	0.837	0.842	1.68±0.12	6.7±0.4	5.1±0.2	5.55	4.30	9.85±0.24

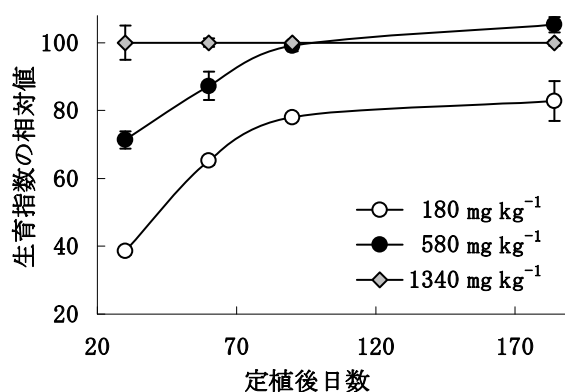


図 4-10 生育指数の相対値（1340 mg kg⁻¹区を 100 とした指数）の推移（1998 年）

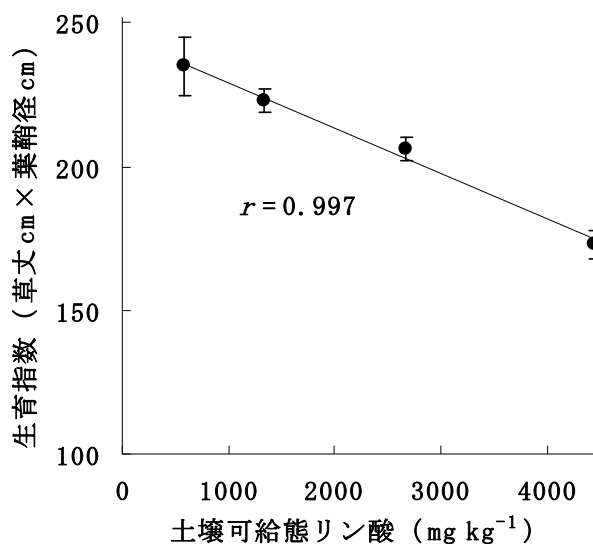


図 4-11 土壤可給態リン酸量と収穫時の生育指数との関係（1998 年）

3) 土壤可給態リン酸レベル別のリン酸施肥量の検討

定植後 60 日目および収穫跡地の土壤可給態リン酸量は、各施肥区において施肥前と同程度であり、無施肥区では僅かに低下する傾向が見られた（表 4-11）。

可給態リン酸量 200 mg kg⁻¹ 系列では、リン酸施肥により生育指数および乾物重が増加し、5 g m⁻² 以上の施肥によって土壤可給態リン酸量 500 mg kg⁻¹ 系列と同程度となった（表 4-12）。このときの作物体中リン酸含有率は高まり、リン酸吸収量も増加した。可給態リン酸量 500 mg kg⁻¹ 系列では、定植後 30 日目まではリン酸施肥によって生育指数の増加がみられたが、定植後 60 日目以降は施肥処理間差が認められなかった。

定植後 30 日目の生育指数および葉数は、可給態リン酸量が高い 500 mg kg⁻¹系列において多かったが、各系列内での施肥処理間差は小さかった。すなわち初期生育に与える影響は施肥リン酸よりも土壤可給態リン酸量の違いが大きかった。

以上のことから、収穫時の生育指数および乾物重の増加、即ち収量増加に対して可給態リン酸量 200 mg kg⁻¹系列では 5 ~ 10 g m⁻²程度のリン酸施肥効果が認められ、500 mg kg⁻¹系列では施肥効果は認められなかった。

表 4-11 リン酸施肥後の土壤可給態リン酸量の推移

処理区 土壤 ^a - 施肥 ^b	土壤可給態リン酸 (mg kg ⁻¹)	
	定植後60日目	収穫跡地
200 - 0	202 ± 11	193 ± 7
200 - 5	214 ± 5	209 ± 5
200 - 10	213 ± 10	210 ± 12
500 - 0	502 ± 21	486 ± 22
500 - 5	506 ± 42	489 ± 41
500 - 10	530 ± 39	526 ± 32

^a mg kg⁻¹, ^b g m⁻², 表4-12も同じ。

表 4-12 土壤可給態リン酸量とリン酸施肥量との組み合わせが生育の推移、収穫時の乾物重、リン酸含有率およびリン酸吸収量に与える影響

処理区 土壤-施肥	生育指数 ^a				葉数 (枚)		乾物重 (kg m ⁻²)			リン酸含有率 (g kg ⁻¹)		リン酸吸収量 (g m ⁻²)		
	30日	60日	90日	184日	30日目	60日目	葉身	葉鞘	合計	葉身	葉鞘	葉身	葉鞘	合計
200 - 0	14 ± 1	75 ± 4	121 ± 1	197 ± 4	3.3 ± 0.1	6.9 ± 0.0	0.946	0.832	1.78 ± 0.09	5.3 ± 0.3	4.0 ± 0.1	4.99	3.34	8.32 ± 0.67
200 - 5	15 ± 1	81 ± 4	135 ± 6	219 ± 1	3.3 ± 0.1	7.0 ± 0.1	0.971	0.971	1.94 ± 0.05	5.8 ± 0.9	4.5 ± 0.0	5.63	4.35	9.98 ± 0.56
200 - 10	16 ± 1	78 ± 2	133 ± 3	213 ± 0	3.3 ± 0.1	7.2 ± 0.3	1.030	0.930	1.96 ± 0.01	6.6 ± 0.0	4.4 ± 0.0	6.76	4.10	10.87 ± 0.01
500 - 0	16 ± 0	86 ± 3	138 ± 3	215 ± 7	3.8 ± 0.1	7.1 ± 0.0	1.057	0.914	1.97 ± 0.23	6.2 ± 0.0	4.8 ± 0.3	6.50	4.32	10.82 ± 0.89
500 - 5	18 ± 1	86 ± 3	135 ± 1	213 ± 18	3.8 ± 0.1	7.1 ± 0.0	0.999	0.942	1.94 ± 0.00	6.6 ± 0.2	4.3 ± 0.3	6.59	4.05	10.64 ± 0.49
500 - 10	19 ± 0	82 ± 2	128 ± 4	204 ± 11	3.9 ± 0.1	7.2 ± 0.1	1.010	0.855	1.87 ± 0.21	5.8 ± 0.0	4.4 ± 0.3	5.86	3.76	9.62 ± 0.89

4. 考察

1) 施設軟白ネギ産地の可給態リン酸量の実態と問題点

北海道内の主要な施設軟白ネギ産地の一つである今金町において、殆どの調査ハウスの土壤可給態リン酸が、北海道施肥ガイド (北海道農政部 2002) でリン酸を施肥ゼロ対応するレベル (600 mg kg⁻¹以上) を超えていた。このように可給態リン酸量の高い理由の一つは、北海道のタマネギ畑における土壤可給態リン酸量の旧土壤診断基準値が 800 ~ 1,300 mg kg⁻¹と野菜一般の基準値よりも高く (北海道農業試験会議 1989), タマネギの施肥に倣った軟白ネギ農家の間でリン酸多量施肥が一般的となっていたことが考

えられる。同地域における施設軟白ネギへの平均リン酸施肥量は 28.1 g m^{-2} であり（新村ら 1998），一方，軟白ネギが 1 作で持ち出すリン酸量は各試験における吸収量を北海道のハウス夏秋どり栽培における収量水準（北海道立道南農業試験場 2000）と比較して換算するとおおむね 10 g m^{-2} 程度である（石居ら 1967 b, 田中ら 2000）。この施肥量と持ち出し量との差である 18 g m^{-2} /作が年 1～2 作ずつ土壤に蓄積された結果，可給態リン酸量が短期間に高まったと考えられる。なお，この地域におけるハウスの多くは転換畑に建設され，建設後経過年数に対応して可給態リン酸量が高まるが，建設後年数が短くても土壤可給態リン酸量が著しく高いハウスや年数が経過しても高まらないハウスもあったことから（図 4-9），農家間によるリン酸施肥管理の差が大きいと考えられる。

北海道のタマネギ畑での土壤可給態リン酸量の基準は，露地畑で早春の低温時期に定植することを前提として，初期生育の確保による増収を主要な目標として設定されている。しかし，施設軟白ネギでは様々な作型による栽培が行われ，いずれもある程度のハウス内温度・地温を確保して栽培される。また，タマネギではリン酸施肥反応性が高く土壤可給態リン酸の適正上限値が高い（亀和田ら 1987）とされているが，軟白ネギではリン酸施肥量の増加による増収が得られにくい（石居ら 1967 b, 1968）。従って，施設軟白ネギ畑の適正な土壤可給態リン酸量はタマネギ畑における土壤基準値より低く設定することが適当と考える。

2) 適正な土壤可給態リン酸量の設定

土壤可給態リン酸量別に施設軟白ネギ栽培を行ったところ，1997 年における初期生育（葉数）および収穫時の生育指数・乾物重は土壤可給態リン酸量 $1010 \sim 1970 \text{ mg kg}^{-1}$ 区でやや優れたものの，明らかな処理間差は認められなかった（表 4-9）。1998 年において初期生育（葉数および生育指数）は 1340 mg kg^{-1} 区で優れたものの，収穫時の生育指数および乾物重は 580 mg kg^{-1} 区で大きかった（表 4-10，図 4-10）。このとき可給態リン酸量が $580 \sim 4440 \text{ mg kg}^{-1}$ の範囲では可給態リン酸量と生育指数との間に有意な負の相関が認められ（図 4-11），両年を通じて収穫時の生育指数および乾物重は，およそ 1000 mg kg^{-1} 以上では可給態リン酸量が高まるほど漸減した。1998 年には栽培期間が 1997 年よりも 50 日以上長かったため，後期の生育が優れた 580 mg kg^{-1} 区において収穫時の生育指数が多くなり，可給態リン酸量と生育指数との間に有意な負の相関が得られたものとする。

このことから、初期生育の確保には栽培前の土壤可給態リン酸量が 1000 mg kg^{-1} 程度であることが望ましいが、最終的な収量確保のためには 500 mg kg^{-1} 程度で十分であると考えられた。

軟白ネギと同じユリ科ネギ属 (*Allium*) 作物では、タマネギ、ニンニクについて適正土壤可給態リン酸量を検討した報告がいくつかある。相馬ら (1982) はタマネギの収量を増加させるには土壤可給態リン酸量を $800 \sim 1,000 \text{ mg kg}^{-1}$ に高めて初期生育を早める必要があるとし、玉川ら (1992) は青森県においてニンニクの最高収量が $1,200 \text{ mg kg}^{-1}$ 程度で得られるとした。これらの作物はいずれも生育相が栄養生長期の終期から結球肥大期に変化する。土壤可給態リン酸量が高いことは初期生育の増加に有効であり、上記の2作物は初期生育を旺盛にすることが結球肥大期における球肥大を促進させ収量が高まる (古山ら 1968)。一方、軟白ネギには前出の作物のような生育相の転換はなく、収穫まで栄養生長が持続することから、初期生育が多少遅れてもその後の栽培後期における生育を増加させることで十分に収量が確保できると考える。通常の収量レベルでの軟白ネギの乾物中リン酸含有率は生育期間を通して $4 \sim 6 \text{ g kg}^{-1}$ 程度であるが (石居ら 1967 b, 石居ら 1968, 黒柳ら 1989), 旺盛な初期生育を確保するためのタマネギの乾物中リン酸含有率は $10 \sim 13 \text{ g kg}^{-1}$ である (相馬ら 1982)。このため、初期生育期における軟白ネギのリン酸要求性はタマネギよりも低いと考えられ、軟白ネギはタマネギよりも低い土壤可給態リン酸量で良好な初期生育が可能と考える。

本節で調査した軟白ネギ農家ハウスの多くは土壤可給態リン酸量が高く、これらのハウスでは、とくに夏期において土壤交換性カルシウムが十分にあり、かん水を適度に行っているにも関わらず葉先枯れが起こる事例が見られる (阿部 1999)。また、軟白ネギと同様に栄養生長型作物であるシュンギクの心枯れ症は、土壤可給態リン酸量が高すぎる圃場におけるカルシウムの吸収阻害であるとした報告がある (二見ら 1986, 小野寺ら 1994)。本試験においても 1998 年に可給態リン酸量が 580 mg kg^{-1} 以上では可給態リン酸量と収穫時の生育指数との間に有意な負の相関が認められ、これらのことから、施設軟白ネギ栽培における土壤可給態リン酸量は収量が最大となる範囲に維持することが安定生産を持続させるために不可欠である。

土壤からのリン酸供給量、作物根の伸長速度およびリン酸吸収能は、いずれも低地温で抑制されるため、低温期のリン酸肥効を確保するために多量施肥することがある (位田 1958, 景山ら 1958, 橋本ら 1974, 沢口 1986)。しかし、ハウスにおいて早春等の低

温期に定植する場合は地中暖房によって地温を高めることが一般的であり、また、多くの軟白ネギハウスは年間2回作付けして周年利用される。このことから、土壤可給態リン酸量を高めて低温期の初期生育を多少増加させても、高温期に定植する作型においてリン酸過剰のために生育が抑制されると、年間2回作付けした場合の年間生産量はリン酸多量施肥によって増加しないと考えられる。従って、第1節において冬春どり作型ではリン酸多量施肥により増収する可能性のあることを指摘したが、土壤可給態リン酸量および施肥量の適正值は、作型を区分せずに設定しても良いと考えた。

3) 土壤可給態リン酸量に対応したリン酸施肥量の設定

作物に対して供給されるリン酸は土壤と施肥に由来する。このため、リン酸施肥量は土壤可給態リン酸量に対応して増減する必要がある。

土壤可給態リン酸量とリン酸施肥効果との関係を検討したところ、収穫時の生育指数および乾物重の増加、即ち収量増加に対して土壤可給態リン酸量 200 mg kg^{-1} 系列では $50 \sim 100 \text{ kg ha}^{-1}$ 程度のリン酸施肥効果が見られた。土壤可給態リン酸量を現状レベルに維持するためには、少なくとも作物体による吸収量と同程度の量を施肥する必要がある、リン酸施肥量は 100 kg ha^{-1} が適当と考えられる。 500 mg kg^{-1} 系列では施肥効果が認められなかった。可給態リン酸量が 200 mg kg^{-1} 未満の低い条件については検討できなかったが、土壤可給態リン酸量を高めるためには作物体による吸収量よりも施肥量を多くする必要がある。北海道施肥ガイドでは可給態リン酸量が 200 mg kg^{-1} 未満の低リン酸レベルの畑への施肥量を 25 g m^{-2} としており、これを準用することが妥当であろう。

以上のことから、土壤可給態リン酸量に対応したリン酸施肥量を表 4-13 のように設定した。すなわち、土壤可給態リン酸量が 200 mg kg^{-1} 未満ではリン酸施肥量を 25 g m^{-2} 、 $200 \sim 500 \text{ mg kg}^{-1}$ では 10 g m^{-2} 、 500 mg kg^{-1} 以上では無施肥とした。本結論の対象は主に褐色低地土であり、リン酸吸収係数の高い黒ボク土では十分なリン酸施肥効果が得られない可能性があり、また、本研究で検討していないため、黒ボク土はこの結論の対象から除いた。ただし、前節で示した通り、北海道の主要産地における軟白ネギ栽培ハウスの多くは低地土にあり、本結論は十分な普遍性を有するものとする。各施肥区の収穫跡地における土壤可給態リン酸量は施肥前のレベルと同程度であり、この施肥法によって、軟白ネギ栽培ハウスの土壤可給態リン酸量は 500 mg kg^{-1} 以内に抑制される。また、土壤可給態リン酸量に対応して施肥量を決定する本施肥法は、多くの農家ハウスにおいて土壤可給態リン酸量を長期的に適正な範囲で維持することを可能にすると考えられる。

表 4-13 北海道の施設軟白ネギ栽培における土壤可給態リン酸量に対応したリン酸施肥量

土壤可給態リン酸 mg kg ⁻¹	リン酸施肥量 g m ⁻²	跡地土壤の 可給態リン酸
～ 200	25	ゆるやかに上昇
200 ～ 500	10	維持
500 ～	0	ゆるやかに低下

注) 主に褐色低地土を対象とし、黒ボク土を除く。

5. 要約

北海道の施設栽培条件において軟白ネギのリン酸施肥量を検討した。

1) 初期生育を高めるためには 1,000 mg kg⁻¹程度の土壤可給態リン酸量が望ましいが、その後の生育は可給態リン酸量が 500 mg kg⁻¹程度で大きく、この量で十分な収量が得られた。これは同じ *Allium* 属作物のタマネギ栽培における可給態リン酸量よりも低水準である。

2) 土壤可給態リン酸量とリン酸施肥量との関係を検討し、可給態リン酸量が 200 mg kg⁻¹未満ではリン酸施肥量は 25 g m⁻²、200 ～ 500 mg kg⁻¹では 10 g m⁻²、500 mg kg⁻¹以上では無施肥と設定した。本結論の対象は主に褐色低地土であり、黒ボク土は対象から除いた。

3) 北海道の主要な施設軟白ネギ生産地における農家ハウスの土壤可給態リン酸量は多くの場合 500 mg kg⁻¹より高く、多量施肥されている圃場も多い。従って、本施肥法は軟白ネギ栽培ハウスの土壤可給態リン酸量を 500 mg kg⁻¹以内に抑制し、多くの農家ハウスにおいて可給態リン酸量を長期的に適正な範囲で維持することを可能にする。

第5章 家畜糞尿由来堆肥の養分評価に基づく施用法

第1節 堆肥の連用が施設土壌の理化学性に与える影響

1. はじめに

施設栽培における生産性を持続させるためには、第3章あるいは第4章で示したように土壌診断や施肥法を高度化することに加え、堆肥等の有機物に含まれる養分を精密に評価することも必要である。

堆肥の分解および堆肥に含まれる無機養分、とくに窒素の可給化は主に温度に依存するため、積雪寒冷地である北海道においても、実規模の施設栽培で土壌に施用された堆肥の消長を明らかにする必要があるが、これらについて報告された事例は見られない。そこで本節では、北海道の施設栽培における堆肥の施用効果を評価するために、第2章の調査で最も多く施用されている堆肥であった牛糞尿由来堆肥の連年施用と土壌理化学性の経年変化との関係を検討し、堆肥中養分の評価と適切な堆肥施用量を明らかにすることを目的とした。

2. 試験方法

施用した堆肥の性状は表5-1に示した。土壌化学性の分析法は第2章と同じである。

表5-1 供試した牛糞尿由来堆肥の性状（試験期間中の平均値，乾物当たり）

場所	乾物率 g kg ⁻¹	C/N	C	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
			g kg ⁻¹			
場内 枠試験	259±18	19.4±2.3	276±61	14.2±1.6	23.2±8.4	16.4±3.9
農家 グライ土	280±59	18.4±6.6	213±88	11.4±0.7	10.1±1.2	8.3±2.6
農家 黒ボク土	269±34	18.7±4.5	256±45	13.7±0.6	15.0±8.2	8.2±3.5
場内 長期試験	276±22	19.7±1.0	292±11	14.8±1.2	20.2±7.0	16.1±4.7

1) 枠条件における堆肥連用の影響

道南農業試験場内の周年被覆ハウス（中粒質普通褐色低地土）で行った。堆肥は0, 4, 8, 16 kg m⁻²を、2000年～2003年の4年間に各年の5月上旬に施用し、毎年10月中旬に土壌採取した。試験期間中の年平均地温は13.1～14.8℃であり、試験規模は直径0.15 m、深さ0.2 mの円形無底枠で3反復で実施し、堆肥施用および土壌採取は深さ0.

15 m まで行った。土壌の易有効性水分 (3.1 ~ 98.1 k Pa) , 容積重および粒子密度は容積 0.1 L の採土管で採取して測定した。

栽培期間中は全面を白黒二層フィルムでマルチし、土壌水分ポテンシャルが 98 k Pa 以上になったときを目安にして 1 回につき 20 L m⁻² をかん水した。

2) 農家ハウスにおける堆肥連用の影響

北海道の日本海沿岸南部にある江差町の泥炭質グライ低地土 (以下, グライ土) , 並びに江差町の内陸側に隣接する厚沢部町の腐植質普通黒ボク土 (以下, 黒ボク土) に立つ 2 件の農家ハウスで行った。堆肥はグライ土で 0, 4, 10 kg m⁻² , 黒ボク土で 0, 4 kg m⁻² を 1998 年 ~ 2002 年の 5 年間に各年の 5 月上旬に施用し、毎年 10 月中旬に土壌を深さ 0.2 m まで採取した。試験期間中の年平均地温はグライ土で 13.5 ~ 14.3 °C , 黒ボク土で 12.0 ~ 12.6 °C であり、試験規模はグライ土で 34 m² , 黒ボク土で 50 m² で 2 反復で実施した。試験期間中はグライ土で夏秋どりトマトあるいはキュウリと冬春どりレタスとの交互作が、黒ボク土でハウレンソウが各々の農家の慣行により栽培された。施肥はグライ土では概ね北海道施肥ガイド (北海道農政部 2002) に従って農家がハウス全面に一律に行い、黒ボク土では窒素を無施用、リン酸を概ね北海道施肥ガイドに従いハウス全面に一律に、カリウムを堆肥 1 kg の施用につき 4 g 減肥して行った。

3) 試験場内長期連用ハウスにおける堆肥連用の影響

道南農業試験場内の周年被覆ハウス (中粒質普通褐色低地土) に 1987 年から毎年 1 回、春季に牛糞尿由来堆肥を深さ 0.15 m まで 4 kg m⁻² を施用した区 (以下, 4 kg 水準) と堆肥を施用しなかった区 (以下, 堆肥 0 水準) を設定し、1998 年から 4 kg 水準の一部に 4 kg m⁻² を上乗せして 8 kg m⁻² を施用した区 (以下, 8 kg 水準) を設定した (図 5-1) 。施用された堆肥は毎年同じ時期に同一の畜産農家から購入したものである。作物はハウレンソウまたはトマトの栽培試験と緑肥エンバク栽培とを繰り返し、残渣は持ち出した。4 kg および 8 kg 水準の面積は各々 70 m² , 堆肥 0 水準は 170 m² と各水準の面積を広く確保したので堆肥処理の反復は設定しなかった。1987 ~ 2002 年の年平均気温は 8.4 ± 0.6 °C であった。

土壌試料は 2002 年の栽培終了時に 0.1 L の採土管で深さ 0.1 m 付近を各水準につき 6 反復採取して、三相分布を砂柱法により水分ポテンシャルを 3.1 k Pa にして測定した。作土層のち密度は 2002 年の栽培終了時に自記式貫入硬度計で深さ 0 ~ 0.25 m を 6 反復で測定した。他の分析項目は前項 1) と同様に行った。

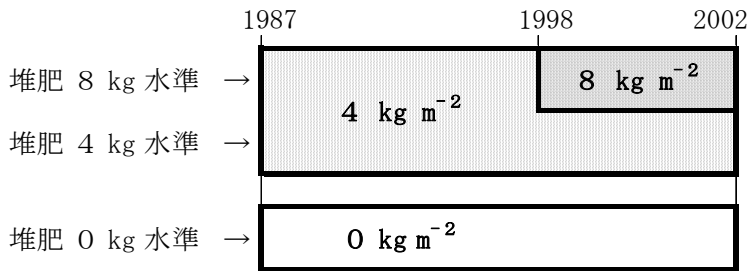


図 5-1 長期連用ハウスにおける堆肥施用処理

3. 試験結果

1) 枠条件における堆肥連用の影響

土壌の化学性をみると、可溶性有機態N、可給態リン酸および交換性カリウムは何れも堆肥施用量が多いほど、かつ連用年数が経過するほど高まった（図 5-2）。このとき施用堆肥 1 kg 当たりの増加量が、可溶性有機態Nおよび可給態リン酸において1年当たりの堆肥施用量が多いほど大きく（表 5-2）、交換性カリウムについては一定の傾向が認められなかった。堆肥中の窒素、リン酸およびカリウムのうち、土壌において可溶性有機態N、可給態リン酸および交換性カリウムの形で蓄積した割合は、土壌容積重を大凡 1 Mg m⁻³ と想定すると、各々 8～10%、74～107%、55～67%であった（表 5-2）。各年の秋に土壌採取した時の硝酸態Nは堆肥施用量が多いほど高かったが、連用3年目以降には堆肥施用量に関わらず頭打ちになる傾向が認められた（図 5-3）。アンモニウム態窒素と堆肥施用量との一定の関係は認められなかった。

土壌の物理性をみると、易有効性水分は堆肥施用量が多いほど、かつ連用年数が経過するほど高まり、容積重および粒子密度は低下した（図 5-4）。

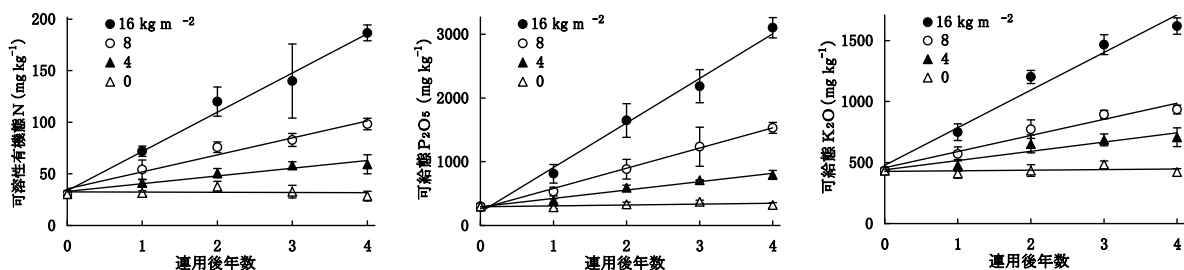


図 5-2 牛糞尿由来堆肥の連用による土壌の化学性（可溶性有機態N、可給態リン酸、交換性カリウム）の経年変化（枠条件）

表 5-2 施用堆肥 1 kg 当たりの土壌化学性分析値の増加（枠条件）

土壌化学性	堆肥施用量 kg m ⁻²	堆肥 1 kg m ⁻² 当たりの 増加程度 (mg kg ⁻¹)	堆肥中成分のうち 左記の割合 (%)
可溶性有機態 N	16	2.4	10
	8	2.1	9
	4	1.9	8
可給態 P ₂ O ₅	16	42.8	107
	8	37.9	95
	4	29.5	74
交換性 K ₂ O	16	19.0	67
	8	15.5	55
	4	17.7	63

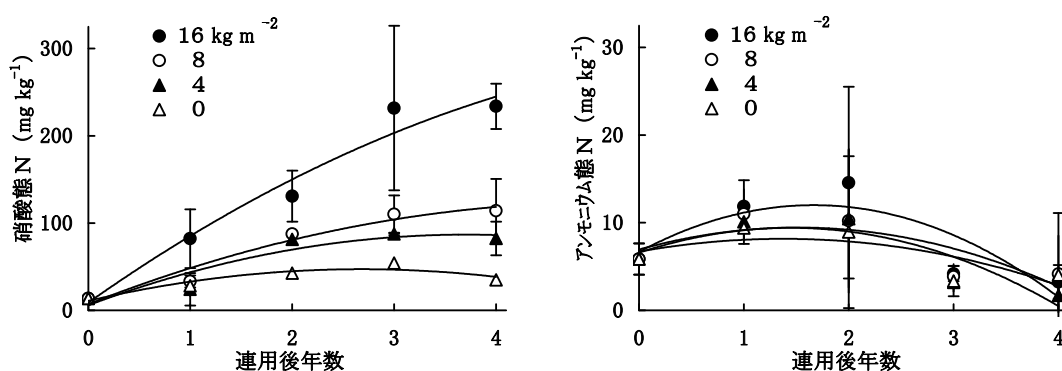


図 5-3 各年秋に土壌採取したときの無機態窒素（枠条件）

左：硝酸態，右：アンモニウム態

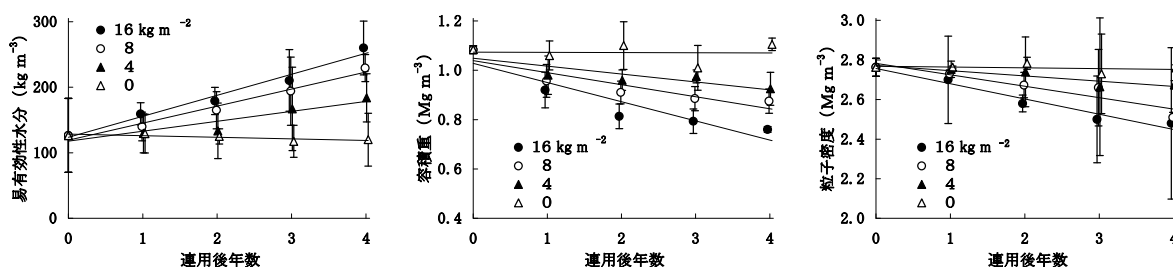


図 5-4 牛糞由来堆肥の連用による土壌の物理性（易有効性水分，容積重，粒子密度）の経年変化（枠条件）

2) 農家ハウスにおける堆肥連用の影響

土壌型別に土壌の化学性をみると，グライ土では可溶性有機態 N，可給態リン酸および交換性カリウムは何れも堆肥施用量が多いほど，かつ連用年数が経過するほど高まった（図 5-5）。このとき施用堆肥 1 kg 当たりの土壌化学性の変化量は，各項目とも 1 年

当たりの堆肥施用量 4 kg m^{-2} と 10 kg m^{-2} との間に差が認められず、また、何れの項目でも柞条件より小さかった（表 5-3）。黒ボク土では土壤の化学性に堆肥施用の影響は認められなかった（図 5-6）。グライ土において堆肥中の窒素、リン酸およびカリウムのうち土壤に可溶性有機態N、可給態リン酸および交換性カリウムの形で蓄積した割合は、土壤容積重を大凡 1 Mg m^{-3} と想定すると、各々約 4 %、44～45 %、25～26 %であった（表 5-3）。調査期間中の土壤硝酸態Nは両土壤型とも概ね堆肥施用量が多いほど高い傾向に推移したが、連用年数との関係は一定ではなかった（図 5-7）。

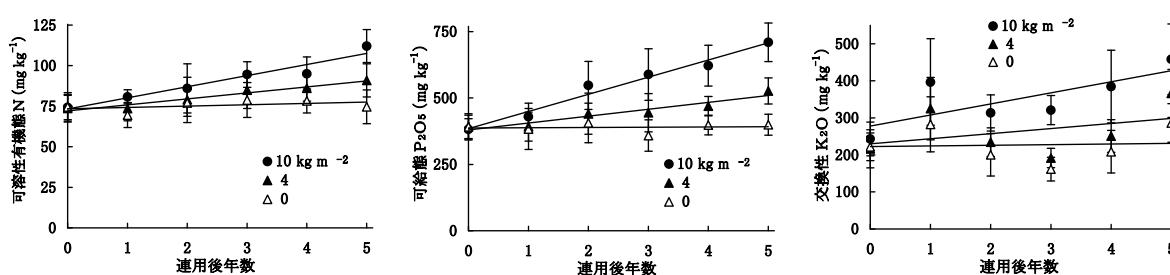


図 5-5 牛糞尿由来堆肥の連用による土壤の化学性（可溶性有機態N，可給態リン酸，交換性カリウム）の経年変化（グライ土ハウス）

表 5-3 施用堆肥 1 kg 当たりの土壤化学性分析値の増加（農家ハウス）

土壤化学性	堆肥施用量 kg m^{-2}	堆肥 1 kg m^{-2} 当たりの増加 (mg kg^{-1})		堆肥中成分のうち左記の割合 (%)	
		グライ土	黒ボク土	グライ土	黒ボク土
可溶性有機態N	10	0.6	—	4	—
	4	0.7	0.1	4	1
可給態 P_2O_5	10	6.3	—	45	—
	4	6.2	0.4	44	2
交換性 K_2O	10	2.8	—	25	—
	4	3.0	-1.4	26	-13

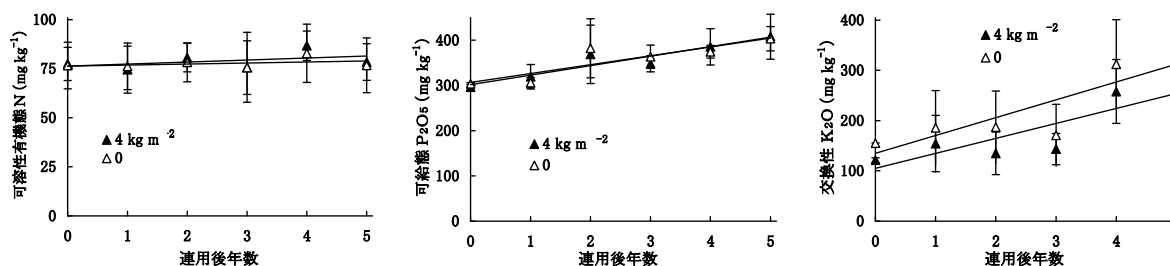


図 5-6 牛糞尿由来堆肥の連用による土壤の化学性（可溶性有機態N，可給態リン酸，交換性カリウム）の経年変化（黒ボク土ハウス）

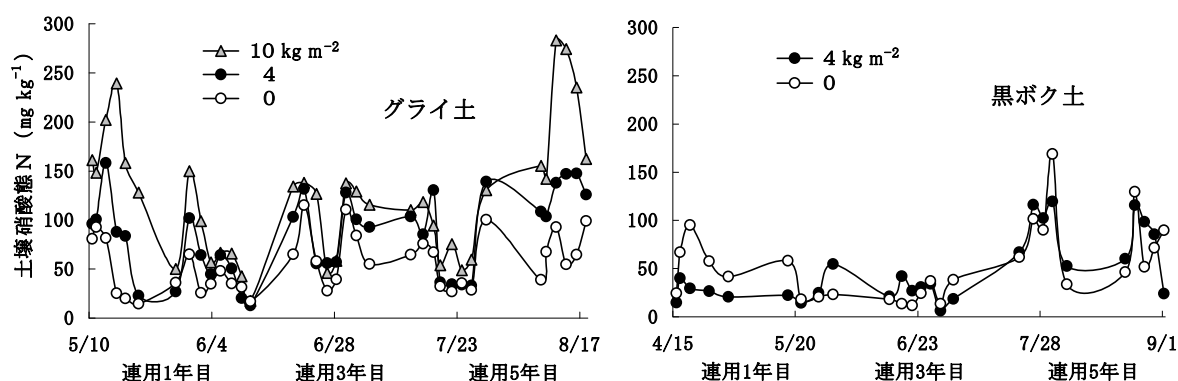


図 5-7 試験期間中の土壌硝酸態窒素の推移（農家ハウス）

グライ土のハウスで栽培された各作物の収量をみると、堆肥 4 kg および 10 kg m⁻² 区とも概ね堆肥無施用区より多い傾向にあったが、4 kg m⁻² 区と 10 kg m⁻² 区とを比べると、冬春どりレタスには収量差は認められなかったが、夏秋どりのトマトおよびキュウリは 10 kg m⁻² 区でやや低い傾向にあった（表 5-4）。

表 5-4 農家ハウス（グライ土）における各年の作物収量（kg m⁻²）

堆肥施用量 kg m ⁻²	連用1年目		連用2年目		連用3年目		連用4年目	連用5年目
	トマト	レタス	トマト	レタス	トマト	レタス	キュウリ	キュウリ
0	5.93	3.78	4.85	5.02	5.50	3.74	8.4	10.6
4	5.59	4.36	5.27	5.24	5.54	3.80	9.3	11.4
10	4.66	4.31	5.11	5.30	5.48	4.04	9.3	11.1

3) 試験場内長期連用ハウスにおける堆肥連用の影響

土壌の物理性として表 5-5 に三相分布、有効水分量および密度を、図 5-8 に深さ別の硬度を示した。試験最終年である 2002 年の栽培終了時に堆肥 4 および 8 kg 水準の容積重が堆肥 0 水準よりも低下した（Tukey 法, $p < 0.05$ ）。また、他の土壌物理性を見ても、堆肥の施用により気相率、易有効性水分率が高まり、固相率、粒子密度および作土層のち密度が低下する傾向が見られた。堆肥 4 kg 水準と 8 kg 水準とを比べると、作土層の硬度が僅かに 8 kg 水準のほうが低かったものの、両水準間に大きな違いは認められなかった。

表 5-5 堆肥の連用が土壌の物理性に与える影響（試験場内長期連用ハウス）

堆肥 kg m ⁻²	三相分布 (%)			易有効性* 水分 (%)	容積重** Mg m ⁻³	粒子密度 Mg m ⁻³
	固相	液相	気相			
0	40.2 ± 5.2	34.0 ± 2.7	25.8 ± 3.9	8.0 ± 0.4	1.08 ± 0.09 a	2.71 ± 0.11
4	37.1 ± 3.9	35.2 ± 2.1	27.7 ± 5.2	8.3 ± 0.6	0.97 ± 0.04 b	2.64 ± 0.22
8	37.1 ± 3.2	36.7 ± 1.2	26.1 ± 2.8	8.6 ± 0.6	0.96 ± 0.02 b	2.61 ± 0.23

* 3.1~98.1 k Pa

** 異符号間に有意差あり (Tukey法, $p < 0.05$)。

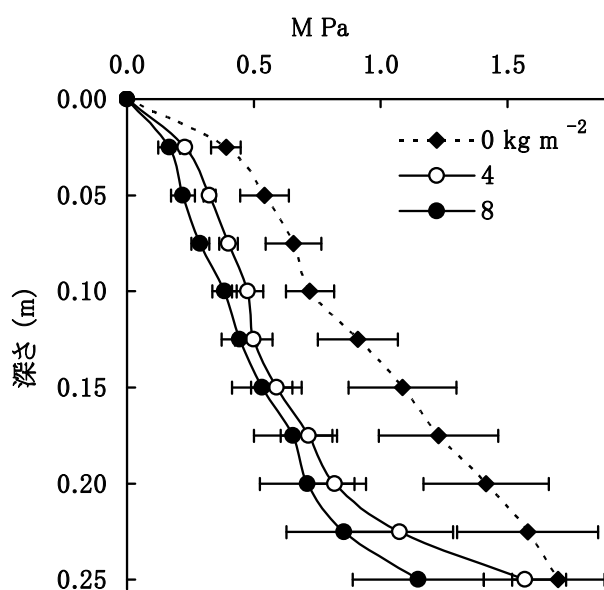


図 5-8 堆肥の連用が深さ別の土壌硬度に与える影響（試験場内長期連用ハウス）

土壌の化学性をみると、可溶性有機態N、可給態リン酸および交換性カリウムは何れも堆肥施用量が多いほど、かつ連用年数が経過するほど高まった（図 5-9）。このとき施用堆肥 1 kg 当たりの土壌化学性の変化量は、可溶性有機態Nと可給態リン酸では 1 年当たりの施用量による差が認められず、交換性カリは 8 kg m⁻² 区で多い傾向にあった（表 5-6）。また、何れの変化量も悴条件より小さかった。堆肥中の窒素、リン酸およびカリウムのうち土壌に可溶性有機態N、可給態リン酸および交換性カリウムの形で蓄積した割合は、土壌容積重を大凡 1 Mg m⁻³ と想定すると、各々約 5 ~ 6 %、47 ~ 50 %、12 ~ 22 %であった（表 5-6）

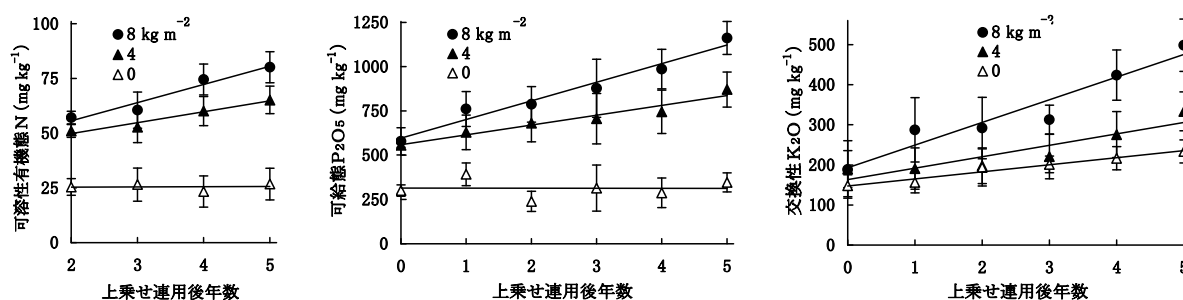


図 5-9 牛糞尿由来堆肥の連用による土壌の化学性（可溶性有機態N，可給態リン酸，交換性カリウム）の経年変化（試験場内長期連用ハウス）

表 5-6 施用堆肥 1 kg 当たりの土壌化学性分析値の増加（試験場内長期連用ハウス）

土壌化学性	堆肥施用量 kg m ⁻²	堆肥 1 kg m ⁻² 当たりの 増加程度 (mg kg ⁻¹)	堆肥中成分のうち 左記の割合 (%)
可溶性有機態 N	8	1.0	5.0
	4	1.2	6.0
可給態 P ₂ O ₅	8	13.2	47.3
	4	13.9	49.9
交換性 K ₂ O	8	4.9	21.9
	4	2.7	12.2

4. 考察

1) 土壌可溶性有機態窒素の変化

堆肥の施用が施設栽培における土壌可溶性有機態Nを高めることは第2章で既に示したが、このときの実態調査で施用堆肥 1 kg m⁻² 当たりの可給態Nの増加量が 0.64 mg kg⁻¹ であり（図 2-4），本節のグライ土における増加量は、これと同程度になった。枠条件ではこれより多かったものの、実際に作物を栽培しているハウス土壌において、堆肥施用による可溶性有機態Nの増加程度は、堆肥 1 kg m⁻² につき平均で 0.6 ~ 1.2 mg kg⁻¹ 程度であり（表 5-3，表 5-6），堆肥中に含まれる窒素のうち可溶性有機態の形で土壌に蓄積する割合は、僅か数%程度であると考えられる。

グライ土において夏秋期に栽培された果菜類の収量を見ると、堆肥 10 kg m⁻² 区でやや低い傾向にあり、夏期の土壌硝酸態Nも高かったことから（図 5-5），堆肥 10 kg m⁻² の連用が養分過剰を引き起こしたものと推察する。また、堆肥無施用区と 4 kg m⁻² 区との間に収量差は殆ど認められなかった。各区の土壌可給態Nは施用開始時点で 75 mg kg

⁻¹程度あり、そのように窒素肥沃度の高い土壌では、夏秋期の栽培において窒素施肥の効果は期待できないものと推察される。Kayamaら（1978）は施設栽培で家畜糞尿由来堆肥を 20 kg m^{-2} 施用したときに、トマトの収穫期における生育が抑制されたことを示している。施設栽培においても過剰な堆肥の施用は制限されるべきと考える。

なお、黒ボク土では堆肥施用による可溶性有機態Nの増加が認められなかった。堆肥中の窒素の多くはバイオマスを通過して可溶性有機態あるいは無機態に変化するものと想定されるが、火山性土壌におけるバイオマスの代謝回転速度は非火山性土より遅いため（丸本 1996）、寒冷地の黒ボク土では施用された堆肥中窒素の一部が不可給態のまま存在している可能性があり、堆肥施用と可溶性有機態Nとの関係について、さらに研究事例を積み重ねることが望まれる。

2) 土壌可給態リン酸の変化

近年の暖地では家畜糞堆肥に含まれるリン酸の全量が可給態であるとの報告があり（小柳ら 2005）、西尾（2003）はリン酸施肥量を決定する際に、堆肥から持ち込まれるリン酸を考慮することが重要であると指摘している。しかし、寒冷地の施設栽培では堆肥の連用と土壌可給態リン酸との関係について、これまで十分な検討事例がなかった。

枠試験における施用堆肥 1 kg 当たりの土壌可給態リン酸の増加量は、単位施用量が多いほど大きかったが、同様の現象は露地畑においても認められる（Abbottら 1973、大橋 1991）。これは堆肥施用量を多くすると土壌中で Fe 型および Al 型リン酸濃度が頭打ちになりリン酸吸着量が増加せず、Ca 型リン酸濃度のみが高まること（宗林ら 1992）に起因するものと考えられる。堆肥施用量が 8 kg m^{-2} 以上になると、堆肥中リン酸のほぼ全量が可給態リン酸の形で蓄積したことになった。北海道の施設栽培では堆肥に含まれるリン酸を評価していないが、土壌の可給態リン酸レベルを不必要に高めないためにも、今後は堆肥中リン酸の肥効を考慮することが必要である。

実際に作物を栽培している農家のグライ土ハウスおよび試験場内長期連用ハウスでは、堆肥中リン酸のうち土壌に可給態リン酸の形で蓄積した割合は約半分であったが、農家グライ土ハウスにおいて残りの半分は 4 kg m^{-2} 区では作物により吸収され、 10 kg m^{-2} 区では、それに加えて次層（深さ $20 \sim 40 \text{ cm}$ ）の可給態リン酸が試験開始前 ($145 \pm 52 \text{ mg kg}^{-1}$) から連用 5 年後 ($451 \pm 58 \text{ mg kg}^{-1}$) に高まっており、作土層が堆肥中リン酸を保持し切れなかったものと考えられる。これらを勘案すると、堆肥の含まれるリン酸のほぼ全量が作物に供給される形態であったと考えられ、過剰な堆肥施用は土壌へのリン酸

負荷を軽減するためにも避けられるべきである。黒ボク土では堆肥を年間 4 kg m^{-2} 連用しても可給態リン酸が高まらなかったが、これは土壤に多くのリン酸が吸着されたことに起因するものと推察する。

堆肥施用量と土壤可給態リン酸との関係を畑地への施用試験に基づき定量的に検討した報告は多く（Herron ら 1965，峰岸ら 1984，北村ら 1985），概括すると本節における結果と大きな違いは見られない。家畜糞尿由来堆肥に含まれるリン酸の多くは易溶性なので，露地畑と施設栽培との違いは窒素の場合より小さいものとする。ただし，北海道で一般に用いられる堆肥の多くは乳牛の糞尿に由来するものであり，これは肉牛の糞尿に由来する堆肥よりリン酸肥効がやや劣る可能性がある（横田ら 2003）。北海道の施設栽培において堆肥を施用したときのリン酸の減肥基準は，北海道の実情に基づいて設定する必要がある。

枠試験では堆肥中のリン酸のうち，土壤に可給態リン酸の形で蓄積した割合は少なくとも 70 % 以上あるものと算出され（表 5-2），これは乳牛の糞尿に由来する堆肥に含まれるリン酸のうち 75 % が易溶性とした横田ら（2003）の報告とも一致する。第 2 章において北海道の平均的な牛糞堆肥を 1 kg 施用したときのリン酸投入量が 4.3 g であったことから（表 2-13 より算出），その 70 % を評価すると牛糞堆肥 1 kg につきリン酸を 3 g 減肥することが可能になるものとする。

3) 土壤交換性カリウムの変化

細胞に含まれるカリウムの殆どは水溶性であり化学肥料と同等の肥効を持つと考えられている。枠試験では堆肥中のカリウムのうち，土壤に交換性カリウムの形で蓄積した割合は 60 % 程度と算出されたが（表 5-2），牛糞堆肥としてハウスに投入されたカリウムの内 40 ~ 50 % が溶脱したとの報告もあり（大西ら 1984 b），本試験でも同様の溶脱を受けたものと推察する。実際に作物を栽培している農家のグライ土ハウスおよび試験場内長期連用ハウスではカリウムは作物に贅沢吸収されるため，単位堆肥施用量が増加しても，土壤に交換性カリウムの形で蓄積した割合が高まらなかったものとする。

4) 土壤物理性の変化から見た適当な年間堆肥施用量

枠条件，長期連用条件とも堆肥の連用により土壤の容積重やち密度などの物理性が改善されたが，長期連用試験の終了時点（上乘せ施用 5 年目）に 8 kg m^{-2} 施用と 4 kg m^{-2} 施用との違いは認められなかった。このことから，堆肥の連用による土壤物理性の改善効果は長期間連用すると 1 年当たり 4 kg m^{-2} 程度の量で認められ（表 5-5，図 5-8），

その2倍量を施用しても5年程度の短期間では大量施用に見合う改善効果が現れにくかったものとする。Meekら(1982)は堆肥施用量が多くなるほど土壌の水浸透速度が速くなるが、 9 kg m^{-2} 以上連用してもその変化が頭打ちになることを報告している。大橋(1989)は暖地の露地畑における事例であるが、 8 kg m^{-2} の連用により気相率が高まり過ぎて干害の恐れが生じることを報告している。第2章で示したように、北海道では新規に建設されたハウスに対して、土壌物理性の早急な改善を目的として堆肥を大量に施用する事例が見られるが、そのような場合、大量施用の弊害として養分負荷が起こる可能性が高い。施設栽培で持続的な生産を目指すためにも、堆肥の1年当たりの施用量は建設当初から 4 kg m^{-2} 程度にすべきである。

家畜糞尿由来堆肥を連用したときの土壌の物理的な改善効果を論じた報告は暖地の露地畑では多く(大橋ら1985b, 加藤ら2001, 北村ら1985, 峰岸ら1984), 何れも上述した施用量と同程度である $2\sim 4\text{ kg m}^{-2}$ の牛糞由来堆肥を連用して土壌の物理的な改善効果を認めている。一方、施設栽培を対象にしたものは暖地においても数少ないが、大西ら(1983b)は 5 kg m^{-2} の、宇田川ら(1979)は 2 kg m^{-2} の家畜糞堆肥を各々連用して、土壌物理的な改善効果が十分に得られなかったことを報告している。これらの結果から、暖地の施設栽培では露地畑や寒冷地の施設栽培よりも有機物の減耗が早く、1年当たり $2\sim 5\text{ kg m}^{-2}$ 程度の堆肥では土壌の物理的な改善効果が認められないことが示唆される。しかし、北海道のような寒冷地では有機物が比較的蓄積しやすく、1年当たり 4 kg m^{-2} 程度の施用量で改善効果が得られた。北海道の施設栽培では地力維持のために堆肥を1年当たり 4 kg m^{-2} 施用することが奨励されており(北海道農政部2002), これは基準値として合理的であるとする。なお、本節では 4 kg m^{-2} より少ない処理を設定しなかったため、改善された土壌物理性を維持し続けるために必要な下限施用量については検討できなかった。土壌物理性を維持する上で必要最低限の堆肥施用量を明らかにすることは今後に残された課題であろう。

5. 要約

北海道の施設栽培で牛糞尿由来堆肥を連年施用したときの土壌理化学性の変化を明らかにし、適切な堆肥施用量と堆肥施用時の養分評価について提案した。

1) 堆肥中の窒素のうち可給態Nの形で土壌に蓄積する割合は数%程度と考えられた。土壌可給態Nが 75 mg kg^{-1} 程度ある肥沃度の高い土壌では、夏秋期の栽培において窒素

施肥の効果は期待できない。

2) 堆肥中のリン酸のうち、土壤に可給態リン酸の形で蓄積した割合は少なくとも70%以上あり、北海道の平均的な牛糞尿由来堆肥を現物1 kg 施用したときにリン酸を3 g 減肥できる可能性があるものと考えられた。

3) 堆肥を毎年 4 kg m^{-2} 連用すると土壤の容積重、ち密度および貫入硬度などの物理性が改善されたが、 8 kg m^{-2} を5年間連用しても大量施用に見合う改善効果が現れなかった。北海道の施設栽培における年間堆肥施用量は 4 kg m^{-2} 程度が適当と考えた。

第2節 堆肥の連用効果に基づく窒素減肥量

1. はじめに

堆肥から無機化した窒素が作物の生育や収量に与える影響を明らかにするためには、実際の圃場で堆肥を連用した場合の経年的な作物生育への影響について検討する必要があるが、寒冷地のハウス栽培において、そのような報告は極めて少ない。

トマトは暖地では冬春どり栽培されることが多いが、北海道では殆どが夏秋どり栽培であり、ハウス栽培トマトは北海道の全ハウス栽培面積のうち20%近くを占める重要な野菜である。しかし、生産現場では施用した堆肥から供給される窒素を十分考慮せずに栽培されることが多く、そのため生育中に窒素栄養が過多になり草勢を管理できなくなることもある。ハウスで果菜等を長期栽培する場合は追肥を行うが、堆肥から供給される緩効的な窒素については、追肥と同様に評価する必要がある。

そこで、北海道のハウス土壌において牛糞尿由来堆肥の連用がトマトの生育および収量に与える影響を検討し、適当な堆肥施用量と堆肥連用条件における窒素施肥法を明らかにすることを目的とした。

2. 試験方法

1) 堆肥施用および土壌条件

前節の試験方法3)に示した試験場内長期連用ハウスを用いた。トマトの栽培は2000～2002年に行い、1年当たり堆肥 4 kg m^{-2} を施用した区(以下、4 kg水準)は堆肥連用14～16年目、4 kg水準の一部に 4 kg m^{-2} を上乗せして1年当たり 8 kg m^{-2} を施用した区(以下、8 kg水準)は連用3～5年目であった(図5-1)。

施用した堆肥の性状は、前節の表5-1に示された長期試験に用いたものと同じである。堆肥の施用時期は1998～1999年に5月上旬、2000～2002年に4月上旬であった。土壌pHは6.0～6.5を維持するように毎年春の堆肥施用と同時期に炭酸カルシウムで矯正した。試験期間中の土壌養分に大きな過不足は認められなかった(表5-7)。

表 5-7 試験跡地の土壌化学性（試験期間中の各年の平均値）

堆肥 kg m ⁻²	全炭素* g kg ⁻¹	硝酸態N mg kg ⁻¹	可給態P ₂ O ₅ mg kg ⁻¹	交換性塩基 (mg kg ⁻¹)		
				K ₂ O	CaO	MgO
0	13.9 ± 1.5	8.32 ± 9.71	306 ± 56	183 ± 30	4923 ± 593	459 ± 55
4	20.0 ± 1.3	4.51 ± 3.67	663 ± 73	215 ± 36	5146 ± 595	598 ± 53
8	21.9 ± 1.4	4.59 ± 6.42	798 ± 151	301 ± 84	5020 ± 487	673 ± 18

* 2002年の試験終了時に採取。

2) 窒素施肥処理

2000～2002年の各年に堆肥を施用しなかった区（以下，堆肥0水準）に基肥N（0，5，10 g m⁻²）と追肥N（0，10，20 g m⁻²），堆肥4，8 kgの各水準に基肥N（0，5 g m⁻²）と追肥N（0，5，10 g m⁻²）とを組み合わせた窒素施肥処理を行った。ただし，2000年には一部の処理を行わず，表5-8でデータのない組み合わせは実施しなかった処理である。堆肥0水準の基肥10 + 追肥20 g m⁻²が北海道でトマトを7段目の果実まで収穫するときの施肥標準量（以下，標準区）である。堆肥0水準では2反復で，4，8 kg水準では1反復で処理した。各処理の規模は8 m²である。

基肥は深さ0.2 mまで全面全層に，追肥は1～5段果の開花期までに各量を5回に分けてかん水チューブによって液肥で全面に，各々硝酸アンモニウムで施用した。

3) 栽培および調査法

トマト（品種；ハウス桃太郎）は夏秋どり作型で栽培した。播種から約60日間育苗した苗を定植し，4月下旬～9月上旬に栽培して，主枝1本仕立てで7段果まで収穫した。栽植密度は3.33 株 m⁻²である。栽培期間中は全面を白黒二層フィルムでマルチし，かん水は作土の水分ポテンシャルが98 k Pa以上になったときを目安にして1回につき20 L m⁻²をマルチの下に各畝間に敷設したかん水用チューブを用いて全面に行った。リン酸およびカリウムは北海道における標準施肥量（北海道農政部2002）に従って施肥した。各年の栽培終了後に野生種エンバクを栽培し，翌年の3月下旬にすき込んでトマトの連作を避けた。トマトの茎葉残渣は全て施設外に持ち出した。

土壌試料は各年の基肥前に各水準につき6ヶ所を深さ0.2 mまで採取し，栽培期間中の無機態Nは各処理につき4ヶ所を深さ0.2 mまで採取して各々を分析した。分析方法は第2章と同じである。

初期生育量としてトマトへの追肥開始時期である定植後30日目頃に草丈と茎径（果房枝の直下の節間で測定）を堆肥0水準で6反復，4 kgおよび8 kg水準は3反復で測

定した。規格内収量は乱形果，尻腐果および 90 g 未満の果実を除いて算出した。トマトのN吸収量は収穫した全果実と収穫終了時の茎葉とを合わせて算出した。その分析法は第4章と同じである。

3. 試験結果

1) トマトの初期生育

表 5-8 に堆肥の連用がトマトの初期生育に与える影響を示した。定植後 30 日目頃の草丈および果房枝直下の茎径を見ると，堆肥 0 水準では基肥 N 量が多くなると生育が高まり (Tukey 法, $p < 0.05$)，4 kg 水準でも有意差はなかったものの同様の傾向が見られたが，8 kg 水準では基肥 N 量による生育差は認められなかった。堆肥施用した各処理の生育を標準区と比較すると，2001 年の 4 kg 水準における基肥 0 g m^{-2} 区でやや劣った他は，4 および 8 kg 水準の各区とも標準区と同等以上であり (t 検定, $p < 0.05$)，堆肥 4 kg m^{-2} の施用で基肥を 5 g m^{-2} ，堆肥 8 kg m^{-2} の施用で基肥を 10 g m^{-2} を減肥した処理区と，堆肥無施用の標準区における初期生育量はほぼ同等であった (表 5-9)。

表 5-8 堆肥の連用がトマトの初期生育 (定植後 30 日目頃) に与える影響

堆肥 kg m^{-2}	基肥 g m^{-2}	草丈 cm			1段果房直下の茎径 mm			2段果房直下の茎径 mm		
		2000年 a	2001年	2002年	2000年	2001年	2002年	2000年	2001年	2002年
0	0	68.2±6.0 a	66.6±9.8 a	73.3±5.0 a	9.6±0.6 a	8.3±0.8 a	9.3±0.3 a	6.1±1.0 a	5.3±2.0 a	6.8±0.9 a
	5	82.7±5.1 b	86.1±4.9 b	83.4±2.5 b	11.2±1.2 b	9.5±0.6 b	9.6±0.2 ab	11.0±2.6 b	8.9±1.0 b	8.9±1.0 b
	10	89.1±2.5 c	89.6±3.9 b	84.8±1.9 b	11.5±0.6 b	10.0±0.5 b	9.6±0.4 b	12.6±1.1 b	9.8±0.8 b	9.7±0.8 b
4	0	—	85.7±9.2	84.7±3.0	—	9.2±0.1 *	9.8±0.4	—	9.0±1.1	9.6±0.5
	5	94.1±3.6 *	91.6±5.1	88.2±2.7	12.5±1.4	10.2±0.7	10.3±0.2 *	14.5±1.1 *	9.8±0.4	10.7±1.2
8	0	—	89.7±4.2	88.2±2.3 *	—	9.9±0.4	10.3±0.2 *	—	10.6±0.1 *	10.8±0.4
	5	100.6±2.3 *	91.7±4.3	90.5±2.2 *	13.2±0.6 *	10.2±0.3	10.4±0.3 *	14.8±1.3 *	11.4±0.2 *	11.5±0.6 *

a 2000～2002年は4 kg m^{-2} 区で連用14～16年目，8 kg m^{-2} 区で上乗せ連用3～5年目。

b 堆肥0 kg m^{-2} 区内での異符号間に有意差あり (Tukey法, $p < 0.05$)。

堆肥4, 8 kg m^{-2} 区での符号*は，標準区 (堆肥0 kg m^{-2} +基肥10 g m^{-2}) との有意差あり (t 検定, $p < 0.05$)。

表 5-9 堆肥施用による基肥窒素の減肥とトマトの初期生育

堆肥 kg m^{-2}	堆肥連用 年数	基肥 g m^{-2}	草丈 cm	果房直下の茎径 (mm)		減肥可能基肥 g m^{-2}
				1段果下	2段果下	
0	—	10	87.2	9.8	9.7	—
4	15～16	5	89.9	10.2	10.2	5
8	4～5	0	89.0	10.1	10.7	10

* 2001～2002年の平均値，8 kg m^{-2} 区の連用年数は上乗せ開始後の年数。

2) トマトの規格内収量

堆肥施用と規格内収量との関係を見ると、同一の施肥N量（基肥および追肥）のときの収量は、堆肥施用量が多いほど多かった（表 5-10）。堆肥 0 および 4 kg 水準では基肥N量が多いほどかつ追肥N量が多いほど収量が多かった。堆肥 8 kg 水準では追肥量が 5 g m⁻²で収量が頭打ちになる年次が認められた。

標準区（堆肥 0 水準，基肥 10 + 追肥 20 g m⁻²）における収量を目標にして堆肥施用の効果を見ると，堆肥 4 kg 水準では基肥 5 + 追肥 10 g m⁻²区で 15 g m⁻²の窒素を減肥したときに標準区と同等の収量が得られ，また，堆肥 8 kg 水準では基肥 5 + 追肥 5 g m⁻²区および基肥 0 + 追肥 10 g m⁻²区で 20 g m⁻²の窒素を減肥したときに標準区と同等以上の収量が得られた（表 5-11）。

N吸収量は堆肥 4 kg，8 kg 水準とも基肥N量が多いほどかつ追肥N量が多いほど高まる傾向が見られ，同一の施肥N量の際には，堆肥施用量が多いほどN吸収量が多かった（表 5-10）。

各年の栽培期間中の土壌無機態N濃度は，同一施肥量では堆肥施用量が多いほど高い傾向にあり，跡地では堆肥 0 水準で堆肥施用系列より高い傾向にあった（表 5-10）。

表 5-10 堆肥の連用がトマトの規格内収量，窒素吸収量と栽培期間中の土壌無機態窒素に与える影響

堆肥 kg m ⁻²	基肥 g m ⁻²	追肥 g m ⁻²	規格内収量 (kg m ⁻²)			N吸収量 (g m ⁻²)			無機態N (mg kg ⁻¹); 2000年				無機態N (mg kg ⁻¹); 2001年				無機態N (mg kg ⁻¹); 2002年			
			2000	2001	2002	2000	2001	2002	定植後	追肥始	収穫始	跡地	定植後	追肥始	収穫始	跡地	定植後	追肥始	収穫始	跡地
0	0	0	5.7	4.2	6.4	8.8	6.7	7.1	13	10	8	4	5	5	6	5	9	5	5	6
		10	11.3	8.2	11.5	17.7	12.4	14.5	14	9	9	5	5	5	5	4	9	5	7	5
		20	10.5	10.6	12.4	22.1	17.5	22.4	14	14	31	10	8	6	8	3	14	5	18	8
	5	0	8.7	5.1	7.9	13.0	9.3	9.8	30	10	9	5	21	5	11	6	18	5	5	5
		10	11.5	10.5	11.8	20.4	14.6	16.9	34	8	11	4	12	6	6	4	21	6	6	5
		20	10.6	12.4	12.4	22.8	20.4	22.0	30	12	40	18	13	7	7	5	23	5	76	20
	10	0	9.3	7.0	9.8	14.9	11.6	11.4	39	13	16	5	38	7	7	5	24	12	6	6
		10	11.6	10.1	12.3	22.8	15.6	16.9	44	13	21	5	24	5	5	6	24	6	6	6
		20	12.6	12.9	12.9	28.1	22.3	23.9	39	28	29	26	32	8	17	5	34	6	38	42
4	0	0	—	5.2	8.3	—	10.8	10.7	—	—	—	—	17	8	6	8	30	7	5	6
		5	—	10.1	11.7	—	17.9	13.7	—	—	—	—	34	10	6	6	17	7	6	5
		10	—	12.1	12.9	—	20.4	20.7	—	—	—	—	11	7	6	5	19	5	9	5
	5	0	9.2	7.6	9.3	16.7	12.5	11.9	44	13	11	6	23	10	9	6	20	14	7	6
		5	—	8.3	12.4	—	13.4	15.4	52	15	11	5	12	8	6	6	25	8	7	6
		10	11.0	12.8	13.2	22.4	24.7	19.6	40	26	9	8	21	10	7	5	38	8	7	5
8	0	0	—	7.1	9.7	—	14.9	16.5	—	—	—	—	24	8	7	5	10	9	7	6
		5	—	10.6	14.0	—	19.2	19.8	—	—	—	—	21	9	12	6	23	8	6	5
		10	—	13.6	13.9	—	27.7	20.9	—	—	—	—	31	15	10	9	27	5	9	5
	5	0	10.5	8.3	11.0	18.5	15.1	16.4	53	12	17	7	24	11	7	8	24	23	9	6
		5	—	13.1	13.8	—	23.6	17.3	46	15	14	8	42	23	9	6	29	8	6	6
		10	11.7	13.6	14.8	23.7	28.9	25.6	49	21	32	10	47	29	27	7	45	12	13	6

* 2000～2002年は4 kg m⁻²区で連用14～16年目，8 kg m⁻²区で上乗せ連用3～5年目。

表 5-11 堆肥施用による施肥窒素の減肥とトマトの収量

堆肥 kg m ⁻²	堆肥連用 年数	基肥 追肥		規格内収量 kg m ⁻²	N吸収量 g m ⁻²	跡地の無機態N mg kg ⁻¹	減肥可能量 (g m ⁻²)	
		g m ⁻²					基肥	追肥
0	—	10	20	12.9	23.1	23.5	—	—
4	15~16	5	10	13.0	22.2	4.9	5	10
8	4~5	0	10	13.8	24.3	7.2	10	10
8	4~5	0	5	12.3	19.5	5.4	10	15

* 2001~2002年の平均値, 8 kg m⁻²区の連用年数は上乗せ開始後の年数。

4. 考察

1) トマトの初期生育からみた堆肥施用時の基肥窒素減肥

土壌に堆肥を施用する目的のひとつに肥料成分, 特にNを減肥することがある。トマトのN施肥は基肥と追肥とに分けられるが, 基肥は主に定植後の活着と初期生育を高めるために施用され, 追肥は果実の肥大が始まって以降に草勢を維持しつつ長期に亘り収穫を継続するために施用される。以下に堆肥施用による基肥Nの代替効果を初期生育量から検討した。

北海道の施設栽培トマトでは基肥Nの標準量が 10 g m⁻²であるため, 無堆肥で基肥N 10 g m⁻²を施用した区と堆肥を施用して基肥Nを減肥した各処理区とを比較すると, 初期生育量は堆肥 4 kg m⁻²の施用で基肥Nを 5 g m⁻², 8 kg m⁻²の施用で 10 g m⁻²を減肥したときに同等であった (表 5-9)。これらの結果から, 堆肥 4 kg m⁻²を施用すると基肥Nを 5 g m⁻²減肥することが可能になると考える。また, 堆肥 8 kg 水準では上乗せ3年目である 2000年に基肥N 5 g m⁻²での初期生育が標準区を上回っており (表 5-8), 連用3年目には既に減肥が可能になっていた可能性がある。本試験では毎年4月頃に堆肥を施用してトマトを定植していたことから, 寒冷地の低温期でも連用3~4年目頃には基肥Nの減肥が可能になるものと推察する。

2) トマトの収量からみた堆肥施用時の追肥窒素減肥

前項で堆肥 4 kg m⁻²の連用下では基肥Nを 5 g m⁻²減肥できることを明らかにした。そこで同堆肥水準, 基肥減肥区での規格内収量を見ると, 追肥を 10 g m⁻²減肥した場合に概ね標準区と同等であった (表 5-11)。このことから, 堆肥を十数年間連用すると堆肥 4 kg m⁻²につき追肥Nを 10 g m⁻²減肥することが可能になるものと考えられる。

堆肥 4 kg 水準に 4 kg m⁻²を上乗せした 8 kg 水準では 10 g m⁻²の基肥Nを減肥できたこ

とから、同堆肥水準、基肥減肥量（堆肥 8 kg + 基肥 0 g m⁻²）における規格内収量を見ると、追肥 15 g m⁻²減肥区では上乘せ 4 年目の 2001 年には標準区よりやや減収したが、上乘せ 5 年目の 2002 年には同等であった。本試験の行われた地域では 2001 年が低温年であり、平常年には上乘せ 4 年目でも追肥 N を 15 g m⁻²減肥できた可能性があるが、農業現場で N 減肥基準を設定する上では、そのような低温年に遭遇したときのリスクをも見越して基準を設定することが適当であろう。

以上のことから、堆肥 8 kg m⁻²につき減肥できる追肥 N 量は、連用 4 年目までは 10 g m⁻²、5 年目以降は 15 g m⁻²になり、さらに連用年数を重ねると徐々に増加し、十数年間連用すると堆肥 4 kg m⁻²につき追肥 N 10 g m⁻²を減肥することが可能になると考える。

基肥と追肥とを合わせた減肥可能な N 量は堆肥 8 kg m⁻²につき連用 4～5 年目で 20～25 g m⁻²になった（表 5-11）。この結果により、堆肥 1 kg につき連用 4～5 年目で窒素 2.5～3.1 g の減肥が可能であると考えられる。これにより、栽培期間中に供給される堆肥由来の N 量が推定できるため、作物の施肥管理が容易になり、生産の安定化に寄与できる。また、連用年数がこれより少ないときには、低温年に遭遇したときのリスクを勘案して減肥量をやや少なくすることが適当であろう。

北海道の野菜畑では積算気温と土壌中での N 無機化率からみた施用当年の堆肥 1 kg からの N 放出量は 0.8～3.1 g と見積もられ、そのうちの約 70 % が作物体に利用される（小野寺ら 1998）。従って、上記の減肥可能な N 量はこの点から見ても妥当である。また、暖地の施設栽培では施用当年の牛糞堆肥中 N の 58 % が作物に吸収されたとの報告（三好ら 2001）、あるいは牛糞堆肥中 N の 6 割程度が栽培期間中に無機化するとの報告（大前ら 2003）があるが、本試験で供試した堆肥の場合、乾物率と窒素含有率に基づき算出すると（表 5-1、場内長期試験）、堆肥現物 1 kg の施用につき N が 4.1 g 投入されることから、堆肥 1 kg につき N を 2.5 g 減肥すると堆肥中の全 N のうち 61 % を評価したことになり、堆肥中 N の利用率が、暖地の施用当年における事例と同程度になった。即ち、地温の低い寒冷地で暖地と同様に堆肥中の N を利用するためには、連年施用により N 供給を安定させることが望ましいものとする。

なお、北海道における堆肥施用時の N 施肥対応は基肥で行う（北海道農政部 2002）。また、施設栽培で堆肥を施用したときの N 施肥については全国的に多くの技術があるが、施用後の減肥時期を検討した報告は見当たらなかった。本報告では連用条件における堆肥の施用効果を基肥と追肥との時期別に明らかにしたが、今後は単年施用した場合につ

いてもN減肥量を基肥と追肥とに分けて技術化することが、残された問題であろう。

3) 環境への負荷から見た堆肥年間施用量の上限

堆肥に含まれるNは施用後数年以上かけて分解され、連用年数が経過すると徐々に見かけの肥効率が高まる。仮に本試験に供試された堆肥（表 5-1, 場内長期試験）に含まれる全Nが全て分解された場合、前項で算出した通り、堆肥現物 1 kg につき 4.1 g のNが放出されることになり、堆肥を 4 kg m^{-2} 施用すると 16.4 g m^{-2} 程度のNが投入される。一方、本試験で北海道における一般的な目標収量（北海道農政部 2002）である 10 kg m^{-2} 程度の規格内収量が得られたときのトマトのN吸収量は概ね $15 \sim 23 \text{ g m}^{-2}$ であった。一般にトマト栽培では草勢を維持するために土壌Nの管理が重要になるが、堆肥の性状や堆肥からのNの放出は一定ではないため、堆肥を施用するときには施肥Nの全量を堆肥で代替するよりも、化学肥料等の速効性肥料を併用することが望ましい。このため、1年当たりの堆肥施用量は、堆肥由来のN投入量がトマトのN吸収量よりも少なくなるように設定すべきである。

本試験では堆肥 8 kg m^{-2} を連用する処理を設定したが、この場合、堆肥由来のN投入量が 32.7 g m^{-2} になり、トマトのN吸収量よりも明らかに多かった。その全量が無機化されるわけではないものの、余剰に投入されたNは土壌とハウス周辺環境に負荷を引き起こす恐れがある（大村ら 2000）。また、本稿における試験処理では堆肥を施用した区のN施肥量をトマトのN吸収量より少なく設定したこともあり、跡地土壌の無機態Nは堆肥 8 kg m^{-2} 水準でも高まらなかったが、過剰な堆肥施用は、長期的には養分N過剰のために作物の生産性を低下させる（嶋田 1977）ことになる。

以上のこと、並びに前節で年間 4 kg m^{-2} 程度の堆肥連用で土壌の物理的な改善効果が得られたことも勘案し、作物生産性を維持し周辺環境に負荷を起こさないためには、堆肥の年間施用量は 4 kg m^{-2} 程度が適当と考えるが、さらに詳細な試験を行うことが望ましい。なお、施肥Nの全量を堆肥で施用すると、N収支からみて年間 6 kg m^{-2} 程度の連用が可能になる。本節では施用量の上限値は設定しなかったが、これを明らかにすることは残された課題であろう。

5. 要約

北海道の施設栽培でトマトを栽培して、牛糞尿由来堆肥の連用が土壌に与える効果と、1年当たりの望ましい堆肥施用量、堆肥施用時の窒素減肥量を明らかにした。

1) 表 5-9 におけるトマトの初期生育から見て、堆肥 4 kg m^{-2} の施用につき 5 g m^{-2} の基肥窒素を減肥することが可能であった。

2) 表 5-11 におけるトマトの規格内収量から見て、堆肥を連用したときに減肥できる追肥窒素量は連用 4 年目までは堆肥 8 kg m^{-2} につき 10 g m^{-2} ，連用 5 年目以降は堆肥 8 kg m^{-2} につき 15 g m^{-2} ，十数年間連用すると堆肥 4 kg m^{-2} につき 10 g m^{-2} であった。

3) 以上の結果に基づき、基肥と追肥とを合わせると、堆肥現物 1 kg の施用につき連用 4～5 年目では窒素を $2.5 \sim 3.1 \text{ g}$ 減肥することが可能であると考えられた。

4) 1 年当たり堆肥 8 kg m^{-2} を施用すると、堆肥に由来する窒素投入量がトマトによる窒素吸収量を大きく上回り、土壌への窒素負荷を引き起こす恐れがある。施設栽培で堆肥の 1 年当たりの施用量は 4 kg m^{-2} 程度が適当と結論した。

第3節 堆肥の施用法改善による亜酸化窒素の発生抑制

1. はじめに

成層圏におけるオゾンの破壊に関与するとともに温室効果ガスである亜酸化窒素 (N_2O) は (OECD 1997, Sahrawat ら 1986), 主に硝化細菌・脱窒菌等の土壤細菌によって窒素が代謝される際に生成されるので (Anderson ら 1986, Bremner ら 1978, Yoshida ら 1970), 投入する窒素量と有機物量を削減し土壤 pH を低下させると (Blackmer ら 1978, Egginton ら 1986, Goodroad ら 1984 a, Linn ら 1984, Nishio ら 1988), 発生量は減少する。しかし, これらの方法では作物の収量が低下し生産者からの同意が得られ難いため, 現行の収量レベルを維持できる範囲で N_2O を抑制する技術を開発する必要がある。

N_2O の主要な発生源は自然土壤や海洋等であるが (Khalil ら 1992), 全発生源に占める施肥土壤からの発生割合は工業的発生源 (化石燃料の燃焼等) を上回る。1996 年の IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 第2次報告書では, 大きな誤差を伴った推定値ではあるが, 施肥土壤からの発生割合を 20 % 程度と見積もった (鶴田 2000)。この最大の人為的発生源を抑制することが農業分野での重要な課題である。そのため, 我が国では 1991 年から農林水産省を中心に施肥土壤からの発生量が全国的に調査され, 北海道においても露地畑からの発生量 (大橋ら 1995, 澤本ら 2000) と発生を抑制する化学肥料や有機物の施用法が示された (大橋 2000)。しかし, 施設栽培を対象にして抑制対策を示したものは世界的に極めて少ない。

露地畑栽培と施設栽培との間には土壤管理方法についていくつかの大きな違いがあるが, 殊に施設栽培ではマルチの使用や人為的かん水により地温が高まり土壤水分も保持されるので, 硝化および脱窒が促進され (Beauchamp ら 1989, Goodroad ら 1984 b, Bremner ら 1958, Folorunso ら 1985), それらが N_2O の発生に影響すると想定される。このため, 露地畑栽培で得られた既往の N_2O 発生に関する知見が, そのまま施設栽培にも適用できるとは限らない。そのような条件において, 第2章で明らかにしたように施設栽培では堆肥が年間 10 kg m^{-2} 以上と大量に施用されることも多く, また, 施用堆肥の腐熟度と施用時期 (前年秋～定植直前) が農家毎に大きく異なる。

そこで本報告では施設栽培条件において N_2O 発生と堆肥施用法との関係を明らかにし, 現行の収量レベルを維持しながら N_2O の発生を抑制する方策を検討した。

2. 試験方法

1) 供試圃場とガス分析法

供試圃場は道南農業試験場内の中粒質普通褐色低地土で、容積重は 1.29 Mg m^{-3} 、最大容水量は 492 g L^{-1} 、全炭素は 23 g kg^{-1} 、全窒素は 1.9 g kg^{-1} であり、その他の土壌条件は第3章第2節と同じである。土壌はガス採取と同時に深さ $0 \sim 0.15 \text{ m}$ から採取し、第2章と同じ方法で pH と硝酸態 N を分析した。調査期間中の土壌 pH は各試験において $5.8 \sim 6.4$ の範囲で推移した。また、各試験の規模は1区面積 3.6 m^2 、2反復であり、裸地条件で測定した。

N_2O ガス採取とそのフラックス算出はクローズドチャンバー法 (Jury ら 1982) で行った。採取チャンバー (底面積が 0.097 m^2 、体積が 25.2 L) を設置した直後および 10 分後にチャンバー内から約 1 L の空気を採取し、各々の N_2O ガス濃度を測定し、その濃度差からフラックスを算出した。 N_2O ガス濃度は ^{63}Ni -ECD 付きガスクロマトグラフ (島津製作所 GC-14A、カラムは Porapak Q、キャリアガスは C H_4 を 50 mL L^{-1} 含有した Ar) で定量した。 N_2O フラックスは全て N_2O 態窒素 ($\mu \text{ g m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$) で表示した。

2) 牛糞稲わら堆肥の腐熟度

牛糞稲わら堆肥を施用したときの腐熟度がフラックスに及ぼす影響を明らかにするため、堆積期間の異なる堆肥の施用区および堆肥無施用区 (対照) を設定した。供試した各堆肥は同じ材料 (牛糞と稲わらの混合物) から作り、3 カ月間堆積して、強い糞臭が残り黄～黄土色のもの (3 カ月区)、1 年間堆積して、糞臭がなく黒褐色のもの (1 年区) とした。施用した堆肥の性状を表 5-12 に示した。各堆肥を 4 kg m^{-2} を調査開始前日に施用し混和、かん水した。1997 年 6 月 25 日～7 月 7 日および 1998 年 7 月 6 日～7 月 17 日の 2 カ年調査した。

表 5-12 供試した牛糞稲わら堆肥の性状 (乾物当たり)

堆積期間	乾物率 g kg^{-1}	C/N g g^{-1}	全C g kg^{-1}	全N g kg^{-1}	$\text{NH}_4\text{-N}$ mg kg^{-1}	$\text{NO}_3\text{-N}$ mg kg^{-1}	pH (H_2O)	電気伝導率 dS m^{-1}
3カ月	185	20.7	359	17.3	148	460	8.5	1.78
1年	188	18.1	234	12.9	134	776	9.2	3.08

注) pH および電気伝導率は乾物:水を1:5で抽出して測定。

3) 化学肥料窒素施肥前の堆肥施用時期

化学肥料窒素施肥前の堆肥施用時期とフラックスとの関係を検討した。堆肥の施用時期は化学肥料窒素施肥の2週間前(2週間区), 1週間前(1週間区)および化学肥料窒素と同時施用(同時施肥区)とし, また, 堆肥無施用で化学肥料窒素施肥のみ行った区(窒素施肥のみ区)も対照として設けた。堆肥は前項と同じ牛糞稲わら堆肥(1年間堆積)を 4 kg m^{-2} 施用し, 化学肥料窒素は 10 g m^{-2} を硝酸アンモニウムで施肥した。1997年6月25日~8月7日および1998年7月8日~8月18日の2カ年調査した。

3. 試験結果

1) 牛糞稲わら堆肥の腐熟度がフラックスに及ぼす影響

2カ年の平均フラックスは堆肥無施用区, 1年区, 3カ月区が各々 $6, 76, 608 \text{ } \mu\text{g m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ であった。堆肥施用直後に高まったフラックスは急激に低下し, 5~10日で処理区間差はなくなり, また, 1年区よりも3カ月区のほうが常に高く推移した(図5-10)。調査期間中の土壌硝酸態Nは各区とも $1 \sim 25 \text{ mg kg}^{-1}$ と低かった。

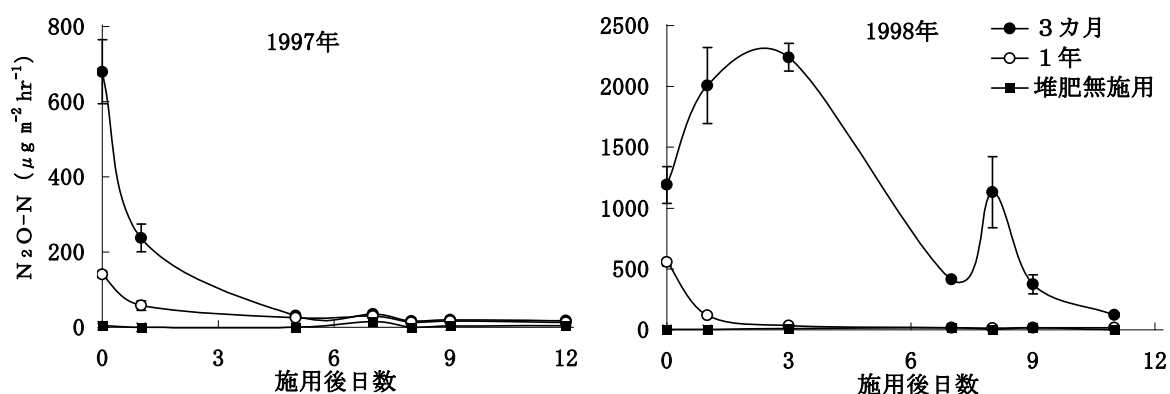


図5-10 堆肥の腐熟度と亜酸化窒素($\text{N}_2\text{O-N}$)フラックスとの関係

注) '3カ月'は3ヶ月間堆積した堆肥を施用, '1年'は1年間堆積した堆肥を施用, '堆肥無施用'は窒素施肥のみ。垂線は標準誤差。各堆肥施用量は 4 kg m^{-2} 。

2) 窒素施肥前の堆肥施用時期がフラックスに及ぼす影響

同時施肥区では2カ年とも化学肥料窒素施肥直後に著しく大きなフラックスが出現し, その後急減した(図5-11)。また, 同区の化学肥料窒素施肥後の2カ年平均フラックスは $216 \text{ } \mu\text{g m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ で, 窒素施肥のみ区の $30 \text{ } \mu\text{g m}^{-2} \text{ hr}^{-1}$ よりも有意に高かった(Tukey

法, $p < 0.05$)。しかし, 2週前区または1週前区の化学肥料窒素施肥後の2カ年平均フラックスは各々 $40 \mu\text{g m}^{-2} \text{hr}^{-1}$ であり, 窒素施肥のみ区との差は認められなかった。すなわち, 堆肥を施用する際に化学肥料窒素施肥よりも1週間以上前に予め施用すると, 化学肥料窒素施肥時のフラックスが施肥のみ堆肥無施用条件と同程度で推移した。さらに, 全調査期間の2カ年平均フラックスを見ても, 同時施肥区 ($216 \mu\text{g m}^{-2} \text{hr}^{-1}$) $>$ 2週前, 1週前区 ($57, 53 \mu\text{g m}^{-2} \text{hr}^{-1}$) $>$ 窒素施肥のみ区 ($19 \mu\text{g m}^{-2} \text{hr}^{-1}$) で, 同時施肥区が有意に高かった (Tukey 法, $p < 0.05$)。窒素施肥後の排出係数を算出すると1997年には同時施肥区 (0.51%) $>$ 窒素施肥のみ区 (0.20%) $>$ 2週前, 1週前区 (0.15, 0.14%), 1998年には同時施肥区 (1.01%) $>$ 1週前区 (0.45%) $>$ 2週前区 (0.30%) $>$ 窒素施肥のみ区 (0.12%) であった。

土壌硝酸態Nは堆肥施用によって僅かに高まり, 窒素施肥後の2カ年平均が, 同時施肥区, 2週前区, 1週前区で各々 $51, 58, 49 \text{mg kg}^{-1}$, 窒素施肥のみ区で 36mg kg^{-1} であった。

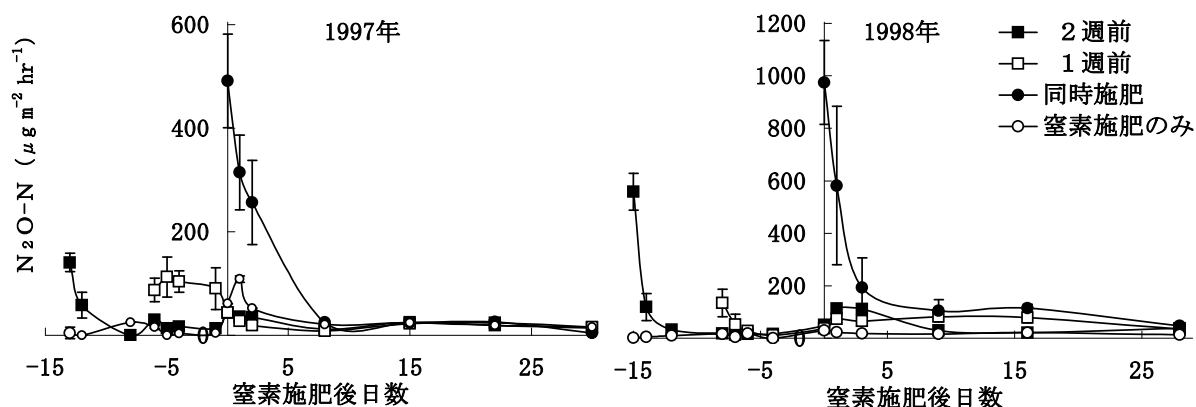


図 5-11 堆肥施用時期と亜酸化窒素 ($\text{N}_2\text{O-N}$) フラックスとの関係

注) ‘2週前’は化学肥料窒素施肥の2週間前に堆肥施用, ‘1週前’は同1週間前に堆肥施用, ‘同時施肥’は化学肥料窒素と堆肥を同時施用。垂線は標準誤差。化学肥料窒素施肥量は 10kg m^{-2} で各区とも共通, 各堆肥施用量は 4kg m^{-2} 。

4. 考察

1) 堆肥の腐熟度と N_2O フラックス

3カ月区における2カ年の平均フラックスは1年区の8倍であったが, このとき堆肥によって施用した全窒素量は1年区より1.3倍多い程度であった。供試堆肥は牛糞と稲

わらを混合して堆積したものであることから、堆積期間の短いほうが易分解性有機物に富み、土壌施用後にアンモニウム態Nも集積しやすいものと推察できる。従って、硝化細菌・脱窒菌等がこれらを消費して硝化・脱窒が進行し、それに伴ってN₂Oが多く発生したと考える。すなわち、牛糞稲わら堆肥の施用に当たって腐熟を進行させてから施用することが、N₂Oの抑制に見かけ上有効と言える。しかも、いわゆる完熟堆肥の施用は施設栽培における基本技術であるため、腐熟の不十分な堆肥の施用は避けるべきである。ただし、家畜糞尿等が腐熟する過程においてもN₂Oが発生するので（Willersら1996, Petersenら1998）、牛糞尿由来堆肥の堆肥化過程において通気量を高め好氣的にすることによりN₂Oの発生が抑制されるとの知見はあるものの（白石ら2004）、堆肥施用時のN₂Oの発生量については、堆肥化過程も含めて論じる必要がある。さらに、地下浸透した水に溶存するN₂Oが最終的に大気中に放出される事例も報告されている（Minamiら1984, Sawamotoら2003, 澤本ら2010）。家畜糞尿堆肥に由来するN₂Oによる環境負荷を論じるためには、堆肥化の過程で地下水中に排出された後、言わば間接的に大気中に放出される量も含めて検討する必要がある、今後の課題として残される。なお、C/Nの大きい堆肥を施用すると土壌無機態Nの有機化が起こることから、堆肥の腐熟度とN₂O発生量との関係は堆肥に用いる材料によって異なる可能性がある。

2) 窒素施肥前の堆肥施用によるN₂Oフラックスの抑制

堆肥施用と化学肥料窒素施肥を同時に行うと、化学肥料窒素施肥後のフラックスは化学肥料窒素施肥のみの堆肥無施用区よりも著しく高まったが、野菜畑での既存技術である化学肥料窒素施肥の2週間前または1週間前に堆肥を施用すると、化学肥料窒素施肥後のフラックスが堆肥無施用区と同程度になった（図5-11）。これらの理由は、次のように理解できる。堆肥と化学肥料を同時に施用すると、堆肥に含まれる硝化細菌や易分解性有機物等が化学窒素肥料に加わる。このため、硝化細菌の増加が硝化を促進させるとともに、易分解性有機物の供給が脱窒を促進させ、結果的にN₂O発生を著しく高める。しかし、堆肥を窒素施肥の2～1週間前に予め施用しておく、窒素施肥時には堆肥中のそれらが既にある程度減少・消費されており、その分硝化および脱窒が促進されずフラックスも低下したのであろう。ただし、この結論は腐熟の進んだ堆肥を施用することが前提になり、腐熟の不十分な堆肥では1週間前に施用しても窒素施肥後のフラックスが高まる可能性がある。

これらのことから、C/Nの比較的小さい堆肥の場合、腐熟の進んだ堆肥を化学肥料

窒素施肥よりも1週間以上前に施用することで、化学肥料窒素施肥時のN₂O発生を堆肥無施用条件と同程度にまで低下させることができる。従って、堆肥施用に係わるこのような野菜畑の基本技術を順守すると、現行の収量水準を維持しながらN₂Oの発生を抑制できる。

5. 要約

北海道の施設栽培において亜酸化窒素（N₂O）発生と堆肥施用法との関係を検討し、現行の収量レベルを維持しながらN₂Oの発生を抑制する方策を明らかにした。

1) 3カ月間堆積した牛糞稲わら堆肥を施用したときの2カ年平均フラックスは、1年間堆積した堆肥より約8倍高い608 $\mu\text{g m}^{-2} \text{hr}^{-1}$ であった。

2) 堆肥施用と窒素施肥を同時に行うと、窒素施肥後の2カ年平均フラックスは216 $\mu\text{g m}^{-2} \text{hr}^{-1}$ で、施肥のみで堆肥無施用よりも約7倍高かった。しかし、窒素施肥の1週間以上前に予め堆肥を施用すると、フラックスは著しく低下した。

3) 以上の結果から、腐熟の進んだ堆肥を化学肥料窒素施肥よりも1週間以上前に施用すると、N₂O発生量は堆肥無施用で化学肥料窒素のみ施肥した条件と同程度になることが明らかとなった。これらの方法は栽培管理上の基本技術でもあり、かつN₂O発生の抑制に貢献している。

第6章 総合考察

施設栽培では一般に単位面積当たりの施肥量が多く、栽培期間中の降雨により土壌成分が溶脱しないため、土壌の余剰養分による塩類集積が起りやすい。塩類集積は作物の生産性を低下させ施設栽培の維持を困難にするため、土壌の生産力を長期的に維持するためには、土壌に塩類を集積させないように栽培管理する必要がある。

そこで、本研究では積雪寒冷地である北海道の施設栽培を対象に土壌管理の実態と問題点を明らかにし、その生産性を長期的に持続させるための対策として、土壌診断法、土壌診断と作物生育特性に基づく施肥法、並びに堆肥の施用法と堆肥施用時の施肥管理の各々を高度化させることが必要であると考え、それらについて検討した。

1. 我が国と北海道におけるビニールハウス栽培の問題

施設栽培は世界的に広く行われる農業形態のひとつであるが、欧米諸国における施設が一般にガラス温室を指すのに比して、我が国ではビニールハウスによる方式が特異的に発展した。ビニールハウスは、ガラス等で被覆した温室と比較して被覆の排除や移設が極めて容易である。このため、施設栽培では上述した通り土壌に余剰養分による塩類が集積しやすいが、我が国では被覆を剥がして土壌を雨に晒す、あるいは別の場所に移設することで塩類集積を避けることが行われてきた。しかし、施設栽培で起こる塩類集積において肥料や土壌改良資材に由来する余剰養分は、主に硝酸イオンとそれに随伴するカルシウムイオンと考えられるが、このうち硝酸態窒素は容易に溶脱され浅層地下水に達しこれを汚染する。環境と調和しながら農業活動を行うべき現代では、上記のような従来型の除塩技術は避けられる必要がある。

また、被覆を剥がして土壌を雨に晒す除塩法は、地域別にその効果が異なるものと想定された。暖地、中でも西南暖地では、夏季に暑さと台風を避けるため被覆を剥がすことが通常であり、夏の間豊富な降水量により高い除塩効果が得られる。一方、積雪寒冷地である北海道では暖地とは逆に夏季に被覆して栽培される。特に近年は周年被覆あるいは被覆を剥がすのを冬の僅かな短期間に限るハウスが増加しており、そのようなハウスでは雨や雪による除塩が不十分になることが想定された。

本研究の端緒は、北海道の道南地域において‘栽培前の作土による土壌診断に基づい

た施肥対応を行っているにも関わらず、栽培期間中に土壌の硝酸態窒素が増加し、果菜類の草勢が強まるハウス’を多く認めたことに始まる。そこで、第2章において北海道の代表的な施設栽培産地を抽出して、土壌管理についての実態を調査した。深さ1 mまでの層位別に土壌硝酸態Nを見ると、いずれの作物のハウスでも下層土に硝酸態Nの残存が認められ、冬期間の非栽培期間が短く降水量が少ないため、硝酸態Nが根域全体から溶脱し切らず、作土層の他に下層にも残存しやすい状態にあった。また、栽培期間中に土壌の硝酸態Nが高まるのは、窒素投入量が窒素持出量を大きく上回っていることに起因しており、このときの窒素投入源として、化学肥料の他に堆肥に由来する量の多いことを明らかにした。

これらのことから、北海道の施設栽培において土壌の余剰養分による塩類集積を避け生産性を持続させるためには、図6-1に示したように、

- ①. 下層土を対象にした土壌診断の高度化
- ②. 作物の生育特性に基づいた施肥法の開発
- ③. 堆肥の施用量と堆肥施用時の養分評価の適正化

以上の技術を開発することが有効であると考え、第3章以下で各々について検討した。

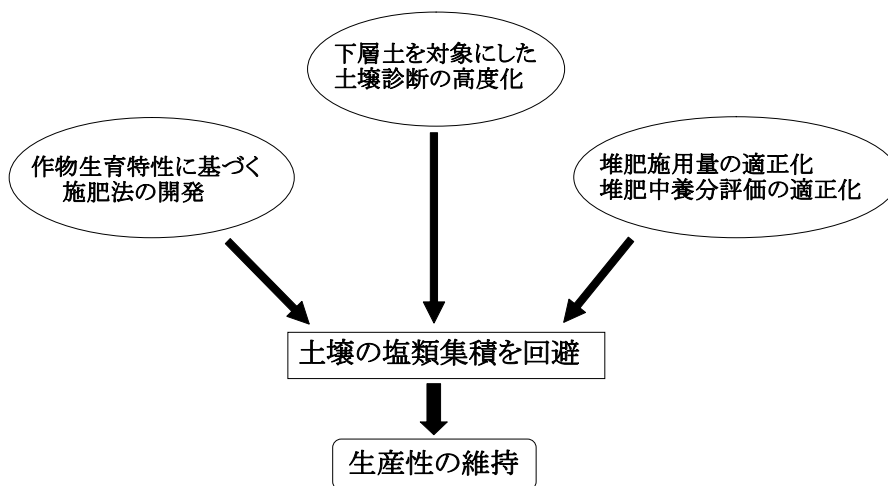


図6-1 ハウス土壌の生産性を維持するための方策

2. 各作物の特性に基づいた下層土窒素の診断技術

第3章では北海道の施設栽培における代表的作物であるトマト、軟白ネギ、ホウレンソウの各々を対象に、根系が到達する深さと下層に存在する硝酸態Nの生育への影響に基づき、各作物について、土壌診断の対象とすべき下層の深さを明らかにした。

施設栽培に限らず多くの作物が下層に残存する硝酸態Nを吸収するが、このとき根系が下層に到達して下層に存在する硝酸態Nを吸収する場合と、下層から硝酸態Nが上昇して吸収される場合とがあるものと想定される。塩類集積土壌では下層から塩類が上昇することが知られるが、降雨が遮断される施設栽培土壌でも同様の現象が起こる可能性がある。

第2節でトマトと軟白ネギとの各々について層位別の土壌硝酸態Nの推移を見ると、下層から作土層に向かって上昇したN量は少なく、また、下層に残存する硝酸態Nの生育への影響は根系が深くに到達するトマトでのみ認められた。下層に存在する硝酸イオンは作土層が乾燥したときにマスフローにより上に向かって移動するが、実際のハウス栽培ではトマト、軟白ネギともに適当なかん水が行われ、かつマルチを被覆して作土層の乾燥を避けるので、下層に存在する硝酸イオンの吸収は、到達した根系の深さに主に依存したものと考える。従って、ハウス栽培において定植前に下層に残存する硝酸態Nを追肥窒素と同様に評価できるのは、トマトのように根系が下層に到達する深根性作物を栽培する場合であり、軟白ネギのように根系が作土層に集中する浅根性作物では、下層に存在する硝酸態Nを利用することは難しいとの結論を得た。

第3節ではハウレンソウを対象に検討した。ハウレンソウは深根性作物であり、収穫時には根系が深さ40～50 cm程度に到達する。一般にハウス栽培ハウレンソウでは、播種時以降にかん水が行われることは少なく、またマルチで被覆しないため作土層が乾燥しやすく、従って下層に存在する硝酸態Nの一部は栽培期間中に起こる水移動に伴い作土層に上昇する（花・野菜技術センター2009）。本研究では、ハウレンソウに吸収された下層土由来の硝酸態Nが、下層に到達した根系により吸収されたものか、あるいは水移動に伴って作土層に上昇した後に吸収されたものかは特に検討しなかったが、いずれにせよ播種前に深さ40 cmまでの下層に残存する硝酸態Nに基づいて施肥量を決めることが合理的との結論を得た。ハウレンソウは第2節で検討した他の作物とやや異なり、収量を確保するとともに高品質な、即ち硝酸イオン濃度の低い収穫物を得る必要がある。このため、収穫直前に吸収される硝酸態Nをも土壌診断の評価対象にする必要があるものと考えられる。

以上のことから、ハウス栽培で下層土診断できる作物の条件を表6-1にまとめた。診断の可否は主に根系の深さに依存しており、実際の農業場面で下層土に残存する窒素を利用するためには、下層の物理的性質が根系の伸長を阻害しないことが条件になる。今

後はこれら以外のハウス栽培作物についても根系の深さ，栽培期間，診断の目的に従って，下層土窒素診断の可能性を整理できるものと考ええる。

表 6-1 各ハウス栽培作物の下層土診断への適用性

作物	下層土診断	根系	下層Nの吸収時期	診断の主目的
トマト	可	深根性	追肥時期	追肥Nの減肥
ハウレンソウ	可	深根性	収穫期	品質の向上
軟白ネギ	不可	浅根性	—	—

なお，施設栽培土壌における塩類集積の原因物質，即ち水で容易に浸出されて土壌溶液中の塩類濃度を高める物質としては，硝酸イオンの他に硫酸イオンや塩化物イオン等があり（伊藤 1984，宗林ら 1990，和田ら 1994），有機物を多量に施用した履歴のあるハウスではナトリウムイオンが蓄積していることもある（瀧 1992）。これらを総合して土壌における塩類集積の程度を評価するには土壌の電気伝導率（EC値）を測定することが有効である。一方，土壌EC値から土壌中の硝酸態窒素量を推定する方法は数多く考案されているが（鈴木ら 1991，藤井ら 1987），何れも土壌の水抽出液に含まれる多種の溶存イオンの共存下で硝酸イオン濃度を推定するには，その精度がやや不十分であったり，煩雑な操作を必要とするものであった。近年は小型反射式光度計が土壌硝酸態窒素の簡易分析に用いられ精度良く測定されており（森田ら 1999，建部ら 2009），農業現場において土壌窒素を診断するには，これを利用して硝酸態窒素含量を推定することが適当であろう。

3. 生育特性に基づいた合理的な施肥法と土壌管理法

浅根性作物については下層土診断法で土壌診断を高度化することができないため，生育特性および養分吸収特性に基づいた合理的な施肥を行うことが一層重要である。第4章では北海道のハウス栽培作物の中では栽培面積が多く，かつ第3章で浅根性作物であることが確認された軟白ネギを対象に，養分吸収特性と土壌養分レベルに対応した施肥法を明らかにした。

軟白ネギは収穫まで栄養生長を持続する植物であり，栽培期間中は明瞭な生育相の変化が認められないため，これまで花芽形成前の生育期を細分化した呼称は特に見られなかった。しかし，農作物としては軟白化により人為的な生育相が作出されるため，乾物

増加量の少ない生育初期，定植後 30 日目頃から軟白化を開始するまでの生育盛期，それ以降の CGR が低く推移する軟白部分伸長期の 3 期に分けることが適当と考えた。

以上の特性を踏まえた窒素施肥法として，初期生育を高めるための基肥量と，CGR の高い生育盛期に過不足なく窒素供給するための分施時期および量を明らかにし，かつ合計窒素施肥量を標準的な収量水準のときの軟白ネギ 1 作の窒素吸収量と同程度に設定し，その施肥量を土壤に存在する硝酸態 N 量に対応して増減することを提起した。

作物の生育特性に基づき，かつ土壤の養分水準に対応した施肥法については，水稻や畑作物では多くの研究事例が見られるが，ハウス野菜を対象にしたものは少ない。ハウス土壤の生産性を持続させるためには，土壤診断技術の高度化と作物特性に基づいた施肥法の高度化との両方が必要であり，今後とも様々な野菜について，そのような合理的な施肥法を開発することが望まれている。

4. 堆肥施用に起因した土壤窒素の負荷

ハウス栽培で堆肥が多投入される傾向にあることは第 1 章で述べた通りであるが，このため，ハウス土壤の生産性を維持するためには，施用堆肥に含まれる養分を精密に評価することもまた，不可欠な技術である。

そこで，堆肥中の窒素の肥効を栽培試験に基づいて評価し，堆肥 1 kg につき連用 4～5 年目に窒素を 2.5～3.1 g 減肥できることを明らかにした。この‘1 kg につき 2.5 g 減肥’の肥効率は，暖地の施設栽培における当年施用された堆肥の肥効率と同程度であった。地温の低い寒冷地で暖地と同様に堆肥中の窒素を利用するためには，連年施用により経年的な無機化窒素を上乗せして肥効を安定させることが望ましい。また，年間堆肥施用量の上限値を土壤への窒素投入量と作物体による持出量との収支から 6 kg m^{-2} 程度であろうと指摘したが，寒冷地では堆肥中窒素のうち土壤中に不可給化して留まる画分が多いことを考慮すると，上限量をやや高められる可能性がある。ただし，環境への負荷を検証する試験が行われる必要がある。

また，北海道内のハウス産地の実態を調査したところ，堆肥の連用に起因して作土の可給態 N が高まっていた。北海道では堆肥施用当年の窒素肥効が低いことから，堆肥中の成分が土壤に残存しやすく，堆肥施用が土壤可溶性有機態 N に与える影響は暖地より大きいものと推察される。前項までの技術により土壤診断技術が高度化され，且つ施肥法が適正化されて土壤中に存在する無機態 N が少なくなると，作物生育に対する可溶性

有機態Nの影響が相対的に大きくなると考えられ、今後は北海道のハウス栽培でもそれを評価することが必要になるろう。

5. 北海道のハウス栽培における土壌可給態リン酸

積雪寒冷地である北海道では作物の栽培期間が短く、このため初期生育の重要性が相対的に暖地より高い。第1章で述べた様々な理由により、これまで北海道では初期生育を高めるためにリン酸を多量施肥することが技術化され、農業現場では、土壌リン酸肥沃度の十分に高まった圃場においても、所謂‘リン酸神話’が長く信じられてきた。ハウス栽培でも化学肥料の多量施肥と堆肥中のリン酸を評価していないことの両方に起因して、土壌可給態リン酸は依然増加傾向にある。

第4章では、従来の北海道のハウス栽培でリン酸が多量施肥されていた軟白ネギを対象に、土壌可給態リン酸レベルに対応してリン酸施肥量を適正化できることを明らかにしたが、このとき‘年間を通しての生産性’を維持する観点で土壌リン酸レベルとリン酸施肥量を設定すべきであることを提起した。即ち、低温期の生育を高めるために土壌可給態リン酸を高めリン酸施肥量を増加させても、高温期に栽培する作型においてリン酸過剰のために生育が抑制されると、年間を通しての生産性はリン酸を多量施肥しても増加しないと考えられる。ハウス栽培で安定生産を維持するためには、土壌リン酸レベルが‘年間を通して高い作物生産性を得られる範囲’に収束するようにリン酸施肥量を設定すべきである。

軟白ネギ栽培に限らず、近年の北海道ではハウスの被覆時期が長期に亘っており、今後はハウスの周年利用化に対応して、年間を通しての生産性を維持する方向を目指す必要がある。従って、北海道の施設栽培における土壌可給態リン酸とリン酸施肥量との関係は、作型を区分せずに設定すべきであろう。今後は、本研究の方法をモデルにして各作物における研究を進め、ハウス栽培における土壌リン酸レベルを適正化することが望まれる。

第5章では、堆肥の連用に起因して土壌の可給態リン酸が高まることと、牛糞堆肥1 kgの施用につき施肥リン酸を3 g程度減肥できる可能性のあることを指摘した。暖地では栽培期間中の温度が高く堆肥の分解が速いため、早くから堆肥中のリン酸を評価すべきと考えられ、有機物施用に伴うリン酸減肥が既に技術化（牛尾ら2004）されている。しかし、北海道では伝統的に農業現場におけるリン酸多量施肥への信頼が厚かった

ことも手伝い、これまで堆肥中のリン酸評価をやや軽視する傾向が見られた。一方、近年の牛糞堆肥中に含まれるリン酸濃度を見ると、1990年代以降の北海道ではそれ以前より高まっており（高田ら 1985, 北海道農政部 2005）、愛知県でも近年に高まっている事例が見られる（日置ら 2001）。これらは牛のエサが粗飼料主体からトウモロコシ子実等の濃厚飼料主体に変化したことや、堆肥の製造が屋根付き施設で行われるようになったことを反映しているものと推察される。従って、堆肥施用による土壌へのリン酸負荷量は近年増加していることになり、堆肥中のリン酸を評価する必要がある、近年さらに高まっているものとする。なお、牛糞堆肥の施用によるリン酸負荷量は、上述の北海道と愛知県、即ち寒冷地と暖地とで大差はなかった。

6. 窒素負荷の軽減を視点とした土壌管理技術

太古の地球上に生命が誕生して以来、土壌圏・水圏・大気圏を巡って窒素が循環している。それは現在においても全ての生命を維持する上で不可欠な現象であり、一瞬も絶えることがない。このため、土壌から硝酸イオンが溶脱し、大気に亜酸化窒素が放出されることは、地球上に生命が存在する以上、ある程度までは必然である。

しかし、1913年に Fritz Haber の理論に基づくアンモニア合成法が実用化されて以降、土壌に存在する窒素量は大きく増加し、食糧増産の副産物として窒素による環境負荷を招くことになった。世界の窒素肥料の使用量は今日にも増加し続けており、人口増加に伴う食糧需要を満たすために、今後とも窒素肥料の使用量は増加するものと予想される。従って、現代の農業生産を技術支援する上において、窒素による環境負荷を軽減させつつ研究開発を行うことが必要であり、ハウス栽培では窒素投入量が多いため、特にそれが重要である。

環境負荷の軽減は、一見すると個々の農家経営とは無関係に思われるが、農業がひとつの産業として存在する以上、廃棄物処理の生産者責任が問われる現代において、農業系外への窒素の排出対策は当然の責務と見なされる。このことを無くしては、国民の間に農業を環境保全型産業であるとのコンセンサスは得られず、諸外国に対して日本農業の存続をアピールすることも困難になる。農業が産業として存在し続けるためには、環境負荷の軽減は不可欠であり、産業としての生き残りなくしては個々の農家の存続も困難になろう。

その一方で、農業が産業である以上は、当然の前提として生産性と利潤を高める必要

がある。生命活動からエネルギーを取り出す産業において、生命維持に不可欠な物質を抑制しなければならない点に、窒素負荷問題の困難がある。即ち、土壤に投入する窒素を減らすと廃棄物、即ち農業系外に排出される窒素も少なくなるが、窒素を減らすと収量も低下することがあり、その場合は生産者の合意が得られない。そこで、現行の収量レベルを維持できることを前提として窒素負荷を軽減する技術の開発が求められる。

本研究における第3章では、前作までの過剰投入に起因して下層土に残存した窒素を、通常の収量レベルを維持できる程度まで評価する技術を開発した。また、第4章では作物の生育特性に基づいて施肥を合理化し、第5章では堆肥に含まれる窒素を精密に評価し、それらによってハウス栽培における窒素の投入量と持出量とのバランスを維持できる方策を提示した。さらに、やや不完全な点は残るものの、第5章において堆肥を連年施用するときの1年当たりの適切な施用量と、土壤に通常量の堆肥を投入しつつ亜酸化窒素の排出量を抑制できる方法を示した。これらの技術は何れも従来の収量レベルを維持しながら実施できるため、今後の北海道におけるハウス栽培が合理的な土壤および施肥管理に基づいて行われ、環境負荷が軽減されることを期待する。

以上に示した環境負荷を軽減する各技術は、同時にハウス土壤の養分レベルを健全に維持する技術でもある。これらの技術によって寒冷地におけるハウス土壤の生産性が長期的に維持され、土地利用型ハウス栽培が持続されることを期待する。

第7章 摘要

積雪寒冷地である北海道では施設栽培は主に春から秋まで行われ、一部の少雪温暖な地域では周年利用されることもあり、温暖地とは利用形態が大きく異なる。このため、その特性に対応した土壌および肥培管理技術の開発が求められていた。そこで、北海道の施設栽培を対象に、土壌管理の実態と問題点を明らかにし、その生産性を長期的に持続させるための対策を明らかにした。

本研究は、施設栽培の生産性を維持しつつ環境負荷を軽減させられる技術として、下層土評価に基づいた土壌窒素診断法の高度化、土壌診断と作物生育特性に基づく施肥法の開発、堆肥からの養分供給特性に基づいた堆肥の施用法と堆肥施用時の施肥管理法を構築したものである。

1. 土壌養分、肥培管理および堆肥施用の実態と問題点

北海道のハウス土壌を対象に、深さ1 mまでの層位別に無機養分、とくに硝酸態Nの残存実態を明らかにして栽培管理方法との関係を検討した。また、施用されている堆肥の性状と、堆肥施用が土壌に与える影響を検討した。

1) 作土層（深さ0～20 cm）における各養分の平均値はpHが6.1、可溶性有機態Nが87 mg kg⁻¹、可給態リン酸が1,249 mg kg⁻¹、交換性カリウム、カルシウムおよびマグネシウムが各々593, 4,315および640 mg kg⁻¹であり、可給態リン酸と交換性陽イオンは北海道における土壌診断基準値よりも明らかに高かった。ただし、北海道のハウス土壌における可給態リン酸の増加速度は1990年代に入り鈍化してきた。

2) いずれの作物のハウスでも作土や下層土での硝酸態Nの残存が認められた。深さ0～1 mまでに存在する硝酸態Nが基肥前より栽培終了時で高く、窒素投入量が窒素持出量を大きく上回っているハウスが多かった。北海道のハウスでは非栽培期間の降水量が少ないため、硝酸態Nが根域全体から溶脱し切らず、作土層の他に下層にも残存しやすいと考えた。

3) 可給態リン酸の増加速度は1990年代に入り鈍化していたものの依然増加傾向にあり、ハウス建設後年数と土壌可給態リン酸との間に正の相関が認められた。

4) 以上のことから、雨や雪による溶脱の少ない条件で深根性の果菜類を栽培する場

合に下層土の硝酸態Nを評価することが、適正な施肥量を決定する上で重要であることを明らかにした。

5) 平均的な牛糞尿由来堆肥を1 kg 施用したときの土壌への窒素、リン酸、カリウムの負荷量は、各々 4.1 g, 4.3 g, 3.8 g と算出された。ハウスに堆肥を施用したときの北海道における施肥基準は、このうち窒素を約半分、カリウムを概ね全量評価していることに相当した。

6) 堆肥の連用に起因して土壌の可溶性有機態N（オートクレーブ抽出法）が高まっており、寒冷地ではハウス栽培においても可溶性有機態Nを評価して施肥量を決定する必要があるものと判断した。

7) 堆肥の連用に起因して土壌の交換性カリウムが高まる傾向が認められたが、可給態リン酸については一定の傾向は認められなかった。

2. 空間変動に基づく土壌診断のための採取点数

施設栽培においてハウス1棟を代表する適正な土壌診断値を得るために、作土の採取方法を明らかにした。

1) 施肥や堆肥施用のムラを避けるために出入口側および窓際を避け中央側を採取すること、暗渠の排水効果や溶脱のムラを避けるためにハウスの手前から奥側までを数カ所にわたって採取することが望ましい。

2) 各分析項目についての採取による許容誤差をpHで0.2以内、可給態リン酸および交換性塩基で分析値の10%以内にするには、ハウス1棟からの採取点数を5～6カ所とするのが適当である。

3) 施肥前の硝酸態Nを許容誤差を 25 mg kg^{-1} 以内に診断するには、10カ所程度の採取が必要である。ただし、前作で通路に施肥をして通路かん水によりベッドに養分供給する追肥法を行った場合には、電気伝導率と無機態Nについて信頼性の高い診断値を得ることは困難である。

3. 各作物の生育特性に基づく下層土窒素の診断法

北海道のハウス栽培における下層土に残存する硝酸態Nの各作物による利用特性と、下層窒素の生育および収量や品質への影響を明らかにし、果菜類を代表するトマト、並びに葉菜類を代表するホウレンソウを対象にして、下層土に残存する硝酸態Nを評価し

た施肥改善法を開発した。

1) 下層に残存する硝酸態Nの作物による利用は、マルチを全面被覆して乾燥を避けたハウス栽培条件では、主に作物根系の深さに依存し、深根性作物であるトマトの根系は追肥時期の前半に深さ 60 cm 程度に到達し、その深さまでの硝酸態Nを追肥窒素と同様に利用したが、浅根性作物である軟白ネギは下層の窒素を十分に利用しなかった。

2) 下層に遮根布あるいは軽石層を敷設し、その下に硝酸態Nを施肥すると、トマトはその硝酸態Nを利用しなかった。施肥した硝酸態Nは栽培終了時に遮根布の上に僅かに見られたが、軽石層の上には殆ど見られなかった。このため、実際の農業場面で下層土に残存する窒素を利用するためには、下層の物理的性質が根系の伸長を阻害しないことが条件になるものと考えられた。

3) 層位別に測定した土壌硝酸態N含量を施肥窒素量に相当させるためには、土壌の容積重を乗じる必要があるため、融雪期の含水率から下層土の容積重レベルを推定する方法を明らかにした。

4) 農家ハウスで収穫調査したハウレンソウの硝酸イオン濃度、深さ 0 ~ 20 cm, 同 20 ~ 40 cm の土壌硝酸態Nは何れも各年の 1 作目で低く、栽培回数を経過するほど高まった。ハウレンソウの収穫時の根系は主に深さ 10 ~ 30 cm にあり、深さ 20 ~ 30 cm の層位に存在する相当量の硝酸態Nを吸収した。

5) 栽培前に深さ 0 ~ 40 cm の土壌に存在する硝酸態N量に基づいて、窒素施肥量を $0 \sim 12 \text{ g m}^{-2}$ の範囲で増減することにより、夏どりハウレンソウの硝酸イオン濃度を低下させつつ、一般的な収量を確保することができた。このとき窒素施肥量はハウレンソウによる窒素吸収量と同程度以下になった。

6) 以上の結果から、北海道のハウス栽培における下層土診断法を提案した。下層土診断できる作物の条件は主に根系の深さに依存した。この方法により北海道の多くのハウス栽培において従来の作土による診断法より窒素施肥量を減らし、下層に残存する硝酸態Nを低減させられる。

4. 軟白ネギの生育特性に基づいた施肥法と土壌管理法

北海道における代表的なハウス野菜のひとつであり、施肥量が過剰傾向にあることで知られ、且つ根系が浅いために下層土の窒素を評価できない軟白ネギを対象に、その乾物生産特性および養分吸収特性に基づく施肥法を開発した。加えて、その施肥量を土壌

中の窒素およびリン酸レベルに対応して増減することとした。

1) 夏秋どりおよび冬春どり作型ともに、生育ステージを乾物増加量の少ない生育初期、軟白化を開始する頃までの生育盛期、それ以降のCGRの低下している軟白部分伸長期に分割した。冬春どり作型では軟白部分伸長期に生育相が生殖生長に転換することから、収量は花芽形成までの生育量により決定される。従って、抽だいを起こしにくい品種を栽培すること、もしくは抽だいまでに十分な生育量を確保することが必要である。

2) CGRの推移からみて、窒素施肥法は夏秋どり作型では生育初期に分施し、冬春どり作型では生育盛期の後半に分施することで各々多収を得られるものと推察した。本試験における1作の軟白ネギによる窒素吸収量は、夏秋どり作型で 25.5 g m^{-2} 、冬春どり作型で 18.5 g m^{-2} であった。

3) 夏秋どり作型における窒素施肥法として、初期生育を高めるための基肥量と、CGRの高い生育盛期に過不足なく窒素供給するための分施時期および量を検討した。生育初期には 10 g m^{-2} 程度の基肥窒素でCGRが高く保たれた。生育盛期にはCGRが最も高い定植後30日目頃から窒素を 100 kg ha^{-1} 程度分施することにより高い収量が得られた。また、生育盛期に葉身重を高めると軟白部分伸長期に葉鞘部分の生育が高まり多収となった。1作当たりの窒素施肥量は 20 g m^{-2} 程度が適量であった。

4) 施肥前の土壌硝酸態Nに対応して窒素施肥量を設定し、土壌硝酸態Nが 50 mg kg^{-1} 未満では基肥窒素量を 10 g m^{-2} 、 $50 \sim 100 \text{ mg kg}^{-1}$ では同 5 g m^{-2} 、 100 mg kg^{-1} 以上では同ゼロ、 200 mg kg^{-1} 以上では基肥と定植後30日目の分施をともにゼロとした。

5) 夏秋どり作型におけるリン酸施肥量を検討したところ、初期生育を高めるためには $1,000 \text{ mg kg}^{-1}$ 程度の土壌可給態リン酸が望ましいが、その後の生育は可給態リン酸が 500 mg kg^{-1} 程度で大きく、この量で十分な収量が得られた。これは同じ*Allium*属作物のタマネギ栽培における可給態リン酸よりも低水準であった。ただし、冬春どり作型では、収量に対する初期生育の影響が夏秋どりより大きく、土壌の可給態リン酸を高めて初期生育を確保することが増収につながるものと推察した。

6) 土壌可給態リン酸とリン酸施肥量との関係を検討し、可給態リン酸が 200 mg kg^{-1} 未満ではリン酸施肥量は 25 g m^{-2} 、 $200 \sim 500 \text{ mg kg}^{-1}$ では 10 g m^{-2} 、 500 mg kg^{-1} 以上では無施肥とした。年間を通して生産性を安定させることを目指し、作型で区分せずに設定した。

7) 北海道の主要な軟白ネギ生産地における農家ハウス土壌の多くで硝酸態Nが200

mg kg⁻¹を、可給態リン酸が 500 mg kg⁻¹を超えていた。以上の施肥法は、多くの軟白ネギ栽培ハウスの土壌硝酸態Nと可給態リン酸を低減し、長期的に適正な範囲で維持することを可能にする。

5. 牛糞尿由来堆肥の養分評価に基づく施用法

北海道の施設栽培で牛糞尿由来堆肥を連年施用したときの土壌理化学性の変化を明らかにし、トマトを栽培して1年当たりの適切な堆肥施用量、堆肥施用時の養分評価法を策定した。また、堆肥施用と亜酸化窒素発生との関係を検討し、現行の収量レベルを維持しながら亜酸化窒素の発生を抑制できる堆肥施用法の改善方策を明らかにした。

1) 堆肥中の窒素のうち可溶性有機態Nの形で土壌に蓄積する割合は数%程度と考えられた。土壌可溶性有機態Nが 75 mg kg⁻¹程度ある肥沃度の高い土壌では、夏秋期の栽培において窒素施肥の効果は期待できない。

2) 堆肥中のリン酸のうち、土壌に可給態リン酸の形で蓄積した割合は少なくとも 70 %以上あり、北海道の平均的な牛糞尿由来堆肥を現物 1 kg 施用したときにリン酸を 3 g 程度減肥できる可能性のあることを指摘した。

3) トマトの初期生育から見て、堆肥 4 kg m⁻²の施用で 5 g m⁻²の基肥窒素を減肥することが可能であった。また、規格内収量から見て、堆肥を連用したときに減肥できる追肥窒素量は堆肥 4 kg m⁻²につき連用 4 年目までは 5 g m⁻²、連用 5 年目以降は 7.5 g m⁻²、十数年間連用すると 10 g m⁻²であった。

4) 以上の結果から、牛糞尿由来堆肥を連用したときに、堆肥現物 1 kg の施用につき連用 4～5 年目に窒素を 2.5～3.1 g 減肥することが可能と結論した。

5) 堆肥を毎年 4 kg m⁻²連用すると土壌の容積重、ち密度および貫入硬度などの物理性が改善されたが、8 kg m⁻²連用すると堆肥に由来する窒素投入量が作物体による窒素吸収量を大きく上回り、土壌への窒素負荷を引き起こす恐れがあった。北海道の施設栽培における年間堆肥施用量は 4 kg m⁻²程度が適当と結論した。

6) 亜酸化窒素フラックスと堆肥の腐熟期間との関係を見ると、3 カ月間堆積した牛糞稲わら堆肥を施用したときの調査期間中の平均フラックスは、1 年間堆積した堆肥より約 8 倍高い 608 μg m⁻² hr⁻¹であった。

7) 堆肥施用と窒素施肥を同時に行うと、窒素施肥後のフラックスは 216 μg m⁻² hr⁻¹で、施肥のみで堆肥無施用よりも約 7 倍高かった。しかし、窒素施肥の 1 週間以上前に

堆肥を施用すると、フラックスは著しく低下した。

8) 以上の結果から、腐熟の進んだ堆肥を化学肥料窒素施肥よりも1週間以上前に施用すると、亜酸化窒素発生量は堆肥無施用で化学肥料窒素のみ施肥した条件と同程度になることが明らかとなった。これらの方法は栽培管理上の基本技術でもある。

6. まとめ

以上のことから、北海道の施設栽培において土壌の塩類集積を回避して生産性を長期的に持続するための方策を、以下にまとめた。

- ① 根系が深くに到達する作物については下層土に存在する硝酸態窒素を評価して施肥量を決定する。
- ② 各作物について生育特性に基づく施肥法を開発し、かつ土壌養分レベルに対応してその施肥量を増減する。
- ③ 堆肥を施用したときに、寒冷地における堆肥からの養分供給特性に基づき、堆肥から土壌中に供給される窒素、リン酸、カリウムの各相当量を施肥量から減じる。

謝辞

本研究を取りまとめるに当たり、岩手大学農学部 河合成直教授には終始懇切丁寧なご指導と本稿のご校閲，さらに多くのご配慮を賜った。山形大学農学部 俵谷圭太郎教授，帯広畜産大学 筒木 潔教授，並びに同じく谷 昌幸准教授には本稿のご校閲と，多くの示唆に富む有益な助言を賜った。ここに謹んで深甚なる謝意を表する。

本研究は北海道立道南農業試験場元主任研究員 坂本宣崇博士の懇切なご指導の下で開始し，引き続き元土壌肥料科長（現中央農業試験場研究主幹）日笠裕治博士，川原祥司元専門研究員のご指導の下で行ったものである。とりわけ坂本博士には研究の端緒を与えられ，心温まる激励を賜りながら真摯にご指導頂き，日笠博士には本研究の多くの部分において取りまとめのご指導を賜り，川原元専門研究員には日常の論議を通じて多くの示唆に富むご指摘とご助言を頂戴した。

研究の遂行中には道南農業試験場の元木征治元土壌肥料科長，元園芸環境科長（現中央農業試験場研究主幹）中住晴彦博士，元主任研究員 大村邦男博士，同僚である阿部珠代，坂口雅己，細淵幸雄，高品 純，福川英司の各氏とは多くの共同作業あるいは有益な論議をともし，元園芸科長（現研究主幹）川岸康司博士には取りまとめに当たり激励とともに多くの助言を頂いた。試験場内の作業では管理科および総務課の諸兄，並びに多くの臨時職員にご協力頂いた。また，現地調査あるいは試験において檜山南部地区農業改良普及センター，厚沢部町農業活性化センターを始め，檜山北部地区，渡島南部地区，同北部地区，日高西部地区，北後志，上川の各農業改良普及センター，並びに各地の農業生産者の皆様には多大なる協力を頂いた。

本稿の主要な部分は，北海道立（現北海道立総合研究機構）中央農業試験場の能代昌雄元農業環境部長，同今野一男博士，元環境保全部長（現上川農業試験場天北支場長）木曾誠二博士，農業環境部長 志賀弘行博士，並びに道南農業試験場 竹川昌和元場長に激励されながら執筆のご指導を頂いたものであり，中央農業試験場の元生産システム部長 稲津 脩博士，元クリーン農業部副部長 鎌田賢一博士にも有意義なご指導を頂いた。また，本稿の取りまとめは，北海道立中央農業試験場元環境化学部長 沢口正利博士，並びに帯広畜産大学 菊地晃二元教授から契機を与えられ始めたものである。この間，北海道立北見農業試験場 中村隆一元栽培環境科長（現中央農業試験場主査），同元主任研究

員 赤司和隆博士には、有益な論議をともにするとともに、執筆の便宜を図って頂いた。

加えて、本稿の取りまとめ、並びに一部の試験は北海道立総合研究機構 花・野菜技術センターで行われたものであり、中野雅章場長には論文指導を頂き、長尾明宣研究部長には共同作業をともにし論文指導を頂いた。この間、生産環境グループの角野晶大研究主幹を始め、田丸浩幸、野田智昭、大塚省吾の各氏、著者が旧技術普及部に在勤した当時の山口作英部長、高宮泰宏次長、藤田寿雄主任普及指導員、祐川正光主査、佐藤勝宏指導主任の各氏、旧栽培環境科に在勤された山上良明、藤倉潤治、佐藤康司の各氏には取りまとめに当たり特段の便宜を図って頂いた。また、センター内の作業では管理科、総務課、並びに臨時職員の諸氏にご尽力頂いた。

以上の各位に心からの敬意と謝意を表するものである。

また、本研究は、ここには書ききれなかった多くの恩師にご指導頂き、友人と論議をともにしながら行われたものである。ここに衷心から感謝の意を捧げたい。

引用文献

- Abbott, J. L. and Lingle, J. C. 1968. Effect of soil temperature on the availability of phosphorus in animal manures, *Soil Sci.*, **105**, 145 ~ 152.
- Abbott, J. L. and Tucker, T. C. 1973. Persistence of manure phosphorus availability in calcareous soil, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **37**, 60 ~ 63.
- 阿部珠代 1999. 簡易軟白栽培, 農山漁村文化協会編, 農業技術体系 野菜編 8-① ネギ・ニンニク・ラッキョウ・ニラ・ワケギ・他ネギ類, p. 基 278 の 106 ~ 113, 農山漁村文化協会, 東京.
- 阿部珠代・川岸康司・福川英司 2000. 簡易軟白ネギの根系と生育・収量の関係, 北海道園芸研究談話会報, **33**, 16 ~ 17.
- 阿部珠代・中住晴彦 2004. ネギの花芽分化に要する低温遭遇時間と最適温度の品種間差異, 北海道立農試集報, **86**, 11 ~ 17.
- Akashi, K., Maeda, K. and Ogoshi, A. 1987. Soil environment in relation to the incidence of *Aphanomyces* root rot of spinach I Effect of Nitrate Nitrogen on disease Outbreak. *Ann. Phytopath. Soc. Jpn.*, **53**, 323 ~ 328.
- Al-Janabi, K. Z. and Lewis, D. T. 1982. Salt-affected soils in the Platte river valley of central Nebraska: properties and classification, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **46**, 1037 ~ 1042.
- Anderson, I. C. and Levine, J. S. 1986. Relative rate of nitric oxide and nitrous oxide production by nitrifiers, denitrifiers, and nitrate respirers, *Appl. Environ. Microbiol.*, **51**, 938 ~ 945.
- 荒垣憲一・藤井弘志・中西政則 1986. 野菜ハウス畑における土壌化学性の実態と問題点, 山形農試研報, **21**, 45 ~ 62.
- 荒木浩一・伊藤秀文・岩崎清治・金森哲夫・安田 環・野々山芳夫 1985. 施設トマトの連作ほ場に対するおがくず, バークおよびピートモス連用の影響, 野菜試報告, **A13**, 93 ~ 108.
- 荒木陽一 1994. 体内水分状態あるいは土壌水分状態に基づいてかん水された施設栽培トマトの生育, 園学雑, **63**, 91 ~ 97.
- Beauchamp, E. G., Trevors, J. T. and Paul, J. W. 1989. Carbon sources for bacterial denitrification. *Adv. Soil Sci.*, **10**, Springer-Verlag, p. 133 ~ 134.
- Blackmer, A. M. and Bremner, J. M. 1978. Inhibitory effect of nitrate on reduction of N₂O to N₂

- by soil microorganisms. *Soil Bio. Biochem.*, **10**, 187 ~ 191.
- Bremner, J. M and Shaw, K. 1958. Denitrification in soil I. Methods of investigation. *J. Agric. Sci.*, **51**, 22 ~ 39.
- Bremner, J. M. and Blackmer, A. M. 1978. Nitrous oxide emission from soils during nitrification of fertilizer nitrogen, *Science*, **199**, 295 ~ 296.
- Cahn, M. D., Hummel, J. W. and Brouer, B. H., 1994. Spatial analysis of soil fertility for site-specific crop management, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **58**, 1240 ~ 1248.
- Cambardella, C. A., Moorman, T. B., Novak, J. M., Parkin, T. B., Karlen, D. L., Turco, R. F. and Konopka, A. E. 1994. Field scale variability of soil properties in central Iowa soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **58**, 1501 ~ 1511.
- 土岐和夫・下野勝昭・西田忠志・川原祥司 1991. ハウス土壌における塩集積の進行とその回避策. 日本土壌肥料学会編 塩集積土壌と農業, p. 96 ~ 122, 博友社, 東京.
- Doss, B. D., Evans, C. E. and Turner, J. L. 1977. Influence of subsoil acidity on tomato yield and fruit size, *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, **102**, 643 ~ 645.
- Egginton, Gwen M. and Smith, K. A. 1986. Nitrous oxide emission from a grassland soil fertilized with slurry and calcium nitrate. *J. Soil Sci.*, **37**, 59 ~ 67.
- 江口 洋・高倉 求・野口純隆 1983. 施設野菜産地の土壌化学性の実態, 鹿児島農試研報, **11**, 1 ~ 65.
- 江口 洋 1994. ハウス土壌の養分過剰集積とその改善対策, 鹿児島農試研報, **22**, 1 ~ 93.
- Folorunso, O. A. and Rolston, D. E. 1985. Spatial and spectral relationships between field-measured denitrification gas fluxes and soil properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **49**, 1087 ~ 1093.
- 笛木伸彦・今野一男 2002. 泥炭土およびグライ土における下層土の窒素供給力の経年的低下が水稻の窒素吸収量・白米中蛋白含量に与える影響, 土肥誌, **73**, 17 ~ 25.
- Fueki, N. and Takeuchi, H. 2010. Difference in vertical root distribution of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) and its relationship to soil properties in four typical soil profiles in Hokkaido, Japan. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **56**, 745 ~ 749.
- 藤井弘志・荒垣憲一・中西政則 1987. SO_4 の多い土壌におけるECの測定法, 農及園, **62**, 44 ~ 48.
- 藤本堯夫・半田裕一・西尾 隆 1987. 畑土壌における化学性測定値のバラツキとサン

- プリングに伴う誤差, 北農, **54**, 31 ~ 38.
- 藤村耕一・松崎朝浩 2007, 隔離床を用いた高糖度トマト生産における生理障害対策としての一原液タイプの隔離床用肥料, 農及園, **82**, 899 ~ 904.
- 藤原俊六郎 1989. 土壌診断システムの改良と施設野菜への適用, 神奈川園試研報, **38**, 51 ~ 62.
- 藤原隆広・熊倉裕史・大田智美・吉田祐子・亀野 貞 2005. 市販ハウレンソウのL-アスコルビン酸および硝酸塩含量の周年変動. 園学研, **4**, 347 ~ 352.
- 古山芳広・南 松雄 1968. 北海道における玉ネギの施肥技術改善に関する研究 第2報 新畑における生育障害とその改良対策について, 北海道立農試集報, **18**, 33 ~ 47.
- 二見敬三・吉倉惇一郎・桑名健夫・青山喜典 1986. シュンギクの心枯れ症の発生要因と対策, 土肥誌, **57**, 411 ~ 413.
- Goodroad, L. L., Keeney, D. R. and Peterson, L. A. 1984 a. Nitrous oxide emissions from agricultural soils in Wisconsin, *J. Environ. Qual.*, **13**, 557 ~ 561.
- Goodroad, L. L. and Keeney, D. R. 1984 b. Nitrous oxide production in aerobic soils under varying pH, temperature and water content, *Soil Biol. Biochem.*, **16**, 39 ~ 43.
- Greenwood, D. J., Gerwitz, A., Stone, D. A. and Barnes, A. 1982. Root development of vegetable crops, *Plant and Soil*, **68**, 75 ~ 96.
- 郡司掛則昭・久保研一 1996. 有機物の窒素分解特性と果菜類に対する効果的施用法, 熊本農研セ報, **5**, 46 ~ 55.
- 花・野菜技術センター・中央農業試験場 2006. 道産野菜の硝酸塩含量の実態と変動要因, 北海道農政部編 平成 18 年普及奨励ならびに指導参考事項, p.182 ~ 184.
- 花・野菜技術センター 2009. 下層土窒素診断による道産ほうれんそうの硝酸塩低減栽培法, 北海道農政部編 平成 21 年普及奨励ならびに指導参考事項, p.161 ~ 163.
- 原 正之・郡司掛則昭・松元 順・山口武則 2000. 成分分析法. 堆肥等有機物分析法, p.18 ~ 42, 143 ~ 153. 日本土壌協会, 東京.
- 橋田茂和 1965. ビニールハウス栽培の土壌肥料学的問題点. 土肥誌, **36**, 274 ~ 283.
- 橋本鋼二・山本 正 1974. 豆類の冷害に関する研究 第5報 大豆の生育・収量におよぼす生殖生長初中期の低温と磷酸肥料ならびに施肥水準との関係, 日作紀, **43**, 40 ~ 46.
- 早川康夫・奥村純一 1964. 根釧地方の牧野改良 第4報 放牧による土壌成分の偏倚,

- 北海道立農試集報, 14, 47 ~ 55.
- 林 哲央・庄司奈都・日笠裕治・中住晴彦 2001. 道南地域の施設土壌の特性解明 第7報 泥炭地の下層窒素供給を評価したハウレンソウ施肥の検討, 土肥要旨集, 47, 166.
- 林 哲央・日笠裕治・坂本宣崇 2003 a. 施設軟白ネギのリン酸肥沃度に対応したリン酸施肥量, 土肥誌, 74, 9 ~ 14.
- 林 哲央・日笠裕治・坂本宣崇 2003 b. 施設軟白ネギの乾物生産特性に基づく窒素施肥法, 土肥誌, 74, 407 ~ 414.
- 林 哲央・日笠裕治・中住晴彦 2004. ハウス土壌の下層土診断による窒素施肥改善. 土肥誌, 75, 617 ~ 621.
- 林 哲央・日笠裕治・坂本宣崇 2009. 北海道のハウス栽培における層位別の土壌養分, とくに硝酸態窒素の実態と下層土診断法の有効性, 土肥誌, 80, 14 ~ 22.
- Herron, G. M. and Erhart, A. B. 1965. Value of manure on an irrigated calcareous soil, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 29, 278 ~ 281.
- Hills, F. J., Broadbent, F. E. and Lorenz, O. A. 1983. Fertilizer nitrogen utilization by corn, tomato, and sugarbeet, *Agron. J.*, 75, 423 ~ 426.
- 東 隆夫・田中正美・太田譲一・古田勝己・田中輝夫・鎌田光久・清田武夫 1983. 施設野菜の施肥改善—火山灰土壌におけるりん酸の施肥に関する試験, 熊本農試研報, 8, 57 ~ 83.
- 樋口太重 1982. 有機物連用土壌の地力窒素的な評価, 土肥誌, 53, 214 ~ 218.
- 日置雅之・北村秀教・久野智香子・加藤 保 2001. 愛知県で生産される家畜ふん堆肥の化学組成, 愛知農総試研報, 33, 237 ~ 243.
- 平岡潔志・米山忠克 1990. 農業資材多投に伴う作物栄養学的諸問題 3 窒素, リン酸, カリウムの過剰と生理機能, 土肥誌, 61, 315 ~ 322.
- 北海道農業試験会議 1989. 土壌および作物栄養の診断基準 (改訂版), p. 12 ~ 13, 北海道立中央農業試験場・北海道農務部, 札幌.
- 北海道農政部 2002. 北海道施肥ガイド (施肥標準・診断基準・施肥対応). p. 77 ~ 190, 札幌.
- 北海道農政部 2005. 北海道における有機質資材の利用ガイド 第3章 有機質資材の施用基準と減肥対応, p. 56 ~ 66, 北海道農政部道産食品安全室, 札幌.
- 北海道立中央農業試験場 1981. 土壌および作物栄養の診断基準—分析法—, p. 83, 北

- 北海道農務部，札幌．
- 北海道立道南農業試験場 2000．平成 12 年普及奨励ならびに指導参考事項，p. 170 ～ 172，北海道農政部，札幌．
- 北海道立道南農業試験場 2003．平成 15 年普及奨励ならびに指導参考事項，p. 115 ～ 117，北海道農政部，札幌．
- 北海道立農業・畜産試験場 家畜ふん尿プロジェクト研究チーム 2004．家畜ふん尿処理・利用の手引き 第 1 章 ふん尿処理・利用の基本的考え方，p. 9 ～ 16，北海道立畜産試験場，新得町．
- 堀 兼明・福永亜矢子・浦嶋泰文・須賀有子・池田順一 2002．有機栽培農家圃場の土壌の実態－京都府夜久野町の事例，近中四農研報，1，77 ～ 94．
- 堀 兼明・浦嶋泰文・塩見文武・太田雅也 2003．ハウレンソウの減化学肥料ビニルハウス栽培農家土壌の実態，近中四農研報，2，67 ～ 82．
- 細谷 毅・北村一男 1980，越冬キュウリ栽培施設土壌の化学性の変動，農及園，55，447 ～ 448．
- 細谷 毅 1982．野菜畑の基肥施用前土壌における化学性の変動，埼玉園試研報，11，1 ～ 8．
- 細谷 毅・田部井優・松本英夫・加藤英男 1982．キュウリ施設栽培におけるリン酸およびカリ多土壌での減肥事例，農及園，57，683 ～ 687．
- 飯塚文男・佐久間敏雄・岡島秀夫 1982．減率乾燥過程における水の移動と硝酸イオンの移動・集積，土肥誌，54，1 ～ 8．
- 飯塚隆治 1991．野菜の生理障害（1），化学と生物，29，679 ～ 688．
- 池田彰弘・塩田悠賀里・武井昭夫 1990．施設土壌のかん水・太陽熱処理による塩類の挙動と除塩効果．愛知農総試研報，22，295 ～ 302．
- 今泉諒俊 1988．畑土壌におけるりん酸肥沃度の諸問題 1 りん酸肥沃度の実態と変遷（2）施設野菜，農及園，63，811 ～ 813．
- 位田藤久太郎 1958．タマネギの養分特に燐酸の吸収と移行について，農及園，33，69 ～ 70．
- 井上 浩・鹿島美彦 2006．稚苗を用いた初秋どりネギ栽培における施肥法，鳥取園試報，7，1 ～ 7．
- 井上勝広・藤山正史・前田ゆかり 1999．長崎県における農耕地土壌の理化学性の実態

- と経年変化 (1) 畑土壌, 長崎総農林試研報 (農), 25, 59 ~ 68.
- Iqbal, J., Thomasson, J. A., Jenkins, J. N., Owens, P. R and Whisler, F. D. 2005. Spatial variability analysis of soil physical properties of alluvial soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 69, 1338 ~ 1350.
- 石黒嘉門 1967. 越津ネギの生産安定と栽培の省力化に関する研究, 愛知県園試研報, 6, 1 ~ 66.
- 石居企救男・細谷 毅・柴 英雄・斉藤哲夫 1967 a. ネギ栽培における土じょう肥料に関する研究 第1報 生育及び養分吸収経過, 埼玉農試研報, 27, 71 ~ 79.
- 石居企救男・細谷 毅・柴 英雄・秋本俊夫 1967 b. ネギ栽培における土じょう肥料に関する研究 第2報 三要素の影響, 埼玉農試研報, 27, 80 ~ 89.
- 石居企救男・細谷 毅・柴 英雄・秋本俊夫 1967 c. ネギ栽培における土じょう肥料に関する研究 第3報 苗床の磷酸施用量が苗及び定植後の生育におよぼす影響, 埼玉農試研報, 27, 90 ~ 95.
- 石居企救男・細谷 毅・新井真杉 1968. ネギ栽培における土壌肥料に関する研究 第5報 要素欠及び施肥に対するネギと他そ菜との対応性の比較, 埼玉農試研報, 29, 111 ~ 129.
- 石川格司・中村 毅 1985. ハウス土壌における集積塩類除去のための湛水効果, 農及園, 60, 49 ~ 52.
- 石井 貴・河野 隆 2007. ハウスニラ栽培における減肥試験とその養分収支, 茨城農総セ園研報, 15, 37 ~ 44.
- 石塚喜明・尾形昭逸・関矢信一郎 1962 a. 泥炭地における排水水位の問題 (第1報) 排水水位と泥炭地土壌の理化学性及び作物の生育との関連性, 土肥誌, 33, 483 ~ 488.
- 石塚喜明・尾形昭逸 1962 b. 泥炭地における排水水位の問題 (第2報) 排水水位と窒素適量の関連性, 土肥誌, 33, 489 ~ 495.
- 糸川修司 1997. 施設畑における施肥窒素の挙動と地下水の硝酸態窒素濃度, 土肥誌, 68, 327 ~ 330.
- 伊藤秀文・荒木浩一 1984. 施設トマト栽培土壌における施用窒素の収支に関する一考察, 野菜試報告, A12, 131 ~ 139.
- 伊藤純雄 1984. 施設栽培における新実用化技術 (3) 土壌溶液に基づく施設内土壌診断と管理②, 農及園, 59, 1081 ~ 1088.

- 岩崎貢三・竹尾優子・田中壯太・櫻井克年 2001. 環境保全型農業導入前後における施設栽培土壌の養分集積実態の比較, 土肥誌, 72, 265 ~ 267.
- Jackson, L. E. and Bloom, A. J. 1990. Root distribution in relation to soil nitrogen availability in field-grown tomatoes, *Plant and Soil*, 128, 115 ~ 126.
- Jury, W. A., Letey, J. and Collins, T. 1982. Analysis of chamber methods used for measuring nitrous oxide production in the field. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 46, 250 ~ 256 .
- 香川 彰 1989. ホウレンソウ 生育のステージと生理生態. 野菜園芸大百科 9, p. 165 ~ 170. 農文協, 東京.
- 景山美葵陽・石原正道・巽 穰・西村周一 1958. そ菜のりん酸施肥に関する研究 たまねぎの生育に及ぼすりん酸の効果について, 農技研報告, E7, 87 ~ 105.
- 景山美葵陽・正木 敬・片井政一 1968. 被覆下そ菜園土壌の生産力低下防止に関する研究 第4報 土壌中の可溶性塩類の除去に関する試験 1. 園試報告, B8, 43 ~ 77.
- 鎌田 淳 2005. 秋冬ネギ栽培における緩効性肥料を利用した全量基肥法, 埼玉農林総研セ研報, 5, 13 ~ 17.
- 鎌田春海 1986. 土壌診断のすすめ方 6. サンプルングの基本, 農業技術大系土壌施肥編 4 土壌診断・生育診断, p. 基本 61 ~ 64, 農山漁村文化協会, 東京.
- 亀野 貞・木下隆雄・楠原 操・野口正樹 1990. ホウレンソウの栽培条件及び品種と品質関連成分の変動. 中国農試研報, 6, 157 ~ 177.
- 亀和田國彦・岩崎秀穂・粕谷光正・佐藤文政 1987. 黒ボク土における土壌中リン酸と作物の生育に関する研究 第1報 作物生育に対する可給態リン酸濃度こう配の影響, 栃木農試研報, 33, 17 ~ 32.
- 亀和田國彦・日高 伸・南條正巳 1997. 第V章 土壌化学. 土壌環境分析法編集委員会編 土壌環境分析法, p. 195 ~ 269, 博友社, 東京.
- 上山紀代美・藤原俊六郎・舟橋秀登 1995. 牛ふん堆肥連用が作物収量と土壌の化学性に及ぼす影響, 神奈川農総研報, 136, 31 ~ 42.
- 金沢晋二郎・川村征夫・河合武彦・広瀬春郎・森山真明・熊沢喜久雄・高井康雄 1979. 畑地圃場における土壌の多点試料間の微生物性および化学性のバラツキ, 肥料科学, 2, 99 ~ 110.
- 金沢晋二郎・金 澄玉・長谷部亮・高井康雄 1981. 水田土壌の微生物性および化学性に関する分析値のバラツキ, 土肥誌, 52, 187 ~ 192.

- 加藤秀正・岡 紀邦・亀和田国彦 1987a. 土壤溶液論的にみた黒ボク畑土壤のリン酸の上限, 土肥誌, **58**, 27 ~ 34.
- 加藤秀正・岡 紀邦・藤沢 徹 1987b. 各地の試験にみるリン酸の上限—土壤溶液論的考察, 土肥誌, **58**, 549 ~ 555.
- 加藤 淳・奥山昌隆・竹内晴信・中津智史 2009. インゲン豆 (金時類) に対する適正な窒素施肥管理のための土壤および作物栄養診断法, 土肥誌, **80**, 626 ~ 629.
- 加藤哲郎・米田和夫 2001. 堆肥の長期連用が黒ボク土の理化学性ならびにキャベツとダイコンの収量に及ぼす影響, 土壤の物理性, **87**, 3 ~ 17.
- 加藤俊博・武井昭夫 1988. 園芸作物に対する土壤りん酸の適正範囲 (1) 土壤りん酸濃度が温室メロンの生育, 収量, 品質に及ぼす影響, 愛知農総試研報, **20**, 252 ~ 259.
- 川原祥司・目黒孝司・相馬 暁・古山芳広 1985. 施設栽培における窒素施肥法 (第1報) 抑制キュウリに対する施肥法, 北農, **52**, 29 ~ 42.
- Kayama, R. and Ohnishi, Y. 1978. Effect of farmyard manure on crop behavior of Green-house Tomato and Cucumber, *Environ. Control in Biol.*, **16**, 59 ~ 71.
- Keeney, D. R. and Bremner, J. M. 1966. Comparison and evaluation of laboratory methods of obtaining an index of soil nitrogen availability, *Agron. J.*, **58**, 498 ~ 503.
- Khalil, M. A. K. and Rasmussen, R. A. 1992. The global sources of nitrous oxide, *J. Geophys. Res.*, **97**, D13 14651 ~ 14660.
- 北村明久・久保田増栄 1985. 鈣質畑の地力に対する有機物連用の影響 第1報 土壤中における各種有機物の分解と集積ならびに土壤理化学性の変化と作物生育, 高知農林研報, **17**, 63 ~ 77.
- 喜多村俊明・庄子貞雄・尾形佳彦・竹田康夫・秋谷達司 1986. バーレー種タバコに対する黒ボク土下層からの無機態窒素の供給について, 土肥誌, **57**, 414 ~ 417.
- 小林五郎・農耕と園芸編集部共編 1989. ネギ類 生理と栽培技術, p.51, 誠文堂新光社, 東京.
- 小林 渡・酒井雄行・中島一成 1990. 屏風山砂丘地における根深ネギの栽培技術, 青森農試研報, **31**, 59 ~ 72.
- 神山和則・大塚紘雄 1993. 仮比重値を用いた有効水分容量図の作成, 土肥誌, **64**, 440 ~ 443.

- 今野一男 2001. 網走地方の畑作地帯における有機物および土壌の窒素評価と施肥対応, 北海道立農試報告, **98**, 42 ~ 75.
- 今野陽一・熊谷勝巳・富樫政博・黒田 潤・上野正夫 2001. 肥効調節型肥料を利用したネギの全量基肥局所施肥栽培, 山形農試研報, **35**, 37 ~ 43.
- 小柳 渉・和田富広・安藤義昭 2005. 家畜ふん堆肥中リン酸の性質と肥効, 新潟畜研セ研報, **15**, 6 ~ 9.
- 久野智香子 1997. 牛ふん堆肥連用畑における下層土への肥料成分・有機物の移動, 愛知農総試研報, **29**, 135 ~ 140.
- 草野 秀・鬼鞍 豊・新田一彦 1974. 水田・畑地・牧草地におけるサンプリング, p. 21 ~ 25, 83 ~ 123, 講談社, 東京.
- 黒島 学 2004. 北海道のハウレンソウ栽培における溝底播種技術の導入. 北海道園研談話会報, **37**, 12 ~ 13.
- 黒柳直彦・藤田 彰・中島靖之・許斐健治・渡邊敏朗 1989. リン酸蓄積畑における施肥リン酸の肥効 第1報 春夏播きネギに対する肥効, 福岡農総試研報, **B9**, 21 ~ 24.
- 黒柳直彦・藤田 彰・渡邊敏朗 1991. リン酸蓄積畑における施肥リン酸の肥効 (3) 雨よけ栽培トマトに対する肥効, 福岡農総試研報 B (園芸), **11**, 39 ~ 42.
- Linn, D. M. and Doran, J. W. 1984. Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and nontilled soils, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **48**, 1267 ~ 1272.
- Lucas, R. E., Wittwer, S. H. and Teubner, F. G. 1960. Maintaining high soil nutrient levels for greenhouse tomatoes without excess salt accumulation, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **24**, 214 ~ 218.
- Mallarino, A. P. 1996. Spatial variability patterns of phosphorus and potassium in no-tilled Soils for two sampling scales, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **60**, 1473 ~ 1481.
- 丸尾奈都・古川康徳・平浩一郎・浅野 亨 2002. 施設栽培で推肥を大量施用した場合の土壌中窒素の推移, 奈良農技セ研報, **33**, 35 ~ 37.
- 丸本卓哉 1996. 土壌バイオマス形成と窒素フロー, 土肥誌, **67**, 446 ~ 452.
- 枘田正治・荒木良一・五味 清 1984. ハウス栽培のトマトにおける施肥窒素 (^{15}N) の利用率について, 宮崎大農学部研報, **31**, 173 ~ 178.
- 枘田正治 1989. トマト栽培における施肥窒素の利用率と施肥量, 農及園, **64**, 747 ~ 75

- 間藤 徹 1990. 農業資材多投に伴う作物栄養学的諸問題 4 カルシウム, マグネシウム, 微量要素などの過剰と生理 機能, 土肥誌, **61**, 417 ~ 422.
- 松本美枝子 1998. 施設ハウレンソウにおける窒素の合理的施肥方法, 農業技術, **53**, 447 ~ 451.
- 松本 聡 1993. 乾燥地土壌におけるナトリウム, カルシウムの輸送と集積, 土壌の物理性, **67**, 3 ~ 10.
- 松浦勝美・福永明憲・坂上行雄 1977. 水稻の生育と無機養分吸収に及ぼす下層土の役割に関するモデル実験, 土肥誌, **48**, 19 ~ 24.
- Meek, B., Graham, L. and Donovan, T. 1982. Long-term effects of manure on soil nitrogen, phosphorus, potassium, sodium, organic matter, and water infiltration rate, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **46**, 1014 ~ 1019.
- 目黒孝司・吉田企世子・山田次良・下野勝昭 1991. 夏どりハウレンソウの内部品質指標. 土肥誌, **62**, 435 ~ 438.
- Miller, R. J., Rolston, D. E., Rauschkolb, R. S. and Wolfe, D. W. 1981. Labeled nitrogen uptake by drip-irrigated tomatoes, *Agron. J.*, **73**, 265 ~ 270.
- 南 松雄・古山芳広 1968. 北海道における玉ネギの施肥技術改善に関する研究 第1報 養分吸収の特性と施肥法, 北海道立農試集報, **17**, 73 ~ 86.
- Minami, K. and Fukushi, S. 1984. Methods for Measuring N₂O flux from water surface and N₂O dissolved in water from agricultural land. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **30**, 495 ~ 502.
- 峰岸恵夫・只木正之・松本泰彦・栗原久義 1984. 淡色黒ボク畑地における牛糞連用効果, 群馬農業研究, **A1**, 23 ~ 34.
- 峰岸恵夫・須永文雄・猿田正暁・今井善之輔・只木正之 1995. 群馬県農耕地土壌の地力実態の推移, 群馬農試研報, **1**, 17 ~ 50.
- 宮地直道・神山和則・大塚鉦雄・粕渕辰昭 1995. 美唄泥炭地における地盤沈下, 土肥誌, **66**, 465 ~ 473.
- 三好昭宏・桑名健夫・西口真嗣・吉倉惇一郎 2001. 施設軟弱野菜に施用した牛糞堆肥由来窒素の吸収利用, 土肥誌, **72**, 558 ~ 561.
- 三好 洋 1972. 根群発達の良好な土壌条件からみた畑地の有効土層の検討, 土肥誌, **43**, 92 ~ 97.
- 水田昌宏・浅野 亨 1978. 塩類集積防止に関する研究 第2報 灌水除塩の方法と除塩

- 効果. 奈良農試研報, 6, 51 ~ 57.
- 森田明雄・太田 充 1999. 小型反射式光度計を用いた茶園浸透水の硝酸態窒素濃度と
土壌の無機態窒素濃度の簡易測定法, 静岡茶試研報, 22, 9 ~ 16.
- 村上圭一・後藤逸男 2007. 土壌のリン酸過剰が土壌病害の発病を助長する, 農及園, 8
2, 1290 ~ 1294.
- 村山 登・平田 熙・矢崎仁也・但野利秋・堀口 毅・嶋田典司・前田乾一 1984. 作
物栄養・肥料学, p. 27 ~ 28, 文永堂, 東京.
- 長友 誠・上之菌茂 2001. 促成ピーマンのかん水施肥による減肥栽培, 土肥誌, 72, 6
94 ~ 697.
- 中神 敏・水本順敏・金田雄二 1983. 園芸作物土壌の有効りん酸に関する研究 (1)
ハウレンソウのりん酸上限について, 静岡農試研報, 28, 59 ~ 66.
- 中神 敏・水本順敏・中村新市・戸田幹彦 1984. 園芸作物土壌の有効りん酸に関する
研究 (2) 温室メロンのりん酸上限について, 静岡農試研報, 29, 53 ~ 63.
- 中川行夫 1963. 果樹の凍霜害とその対策 [1], 農及園, 38, 441 ~ 444.
- 仲谷紀男・横井肇 1974. 土壌有機物の比重 真比重と仮比重, 土肥誌, 45, 273 ~ 278.
- Nelsen, C. E., Bolgiano, N. C., Furutani, S. C., Safir, G. R. and Zandstra, B. H. 1981. The effect o
f soil phosphorus levels on mycorrhizal infection of field-grown onion plants and on mycorrhizal
reproduction, *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 106, 786 ~ 788.
- 西畑秀次 2006. ネギにおける合理的施肥法に係わる研究, 富山農技セ研報, 23, 73 ~
79.
- 西尾道徳 1983. 連作障害の発生について, 土肥誌, 54, 64 ~ 73.
- 西尾道徳 1985. 最近の連作障害の実態と発生要因, 化学と生物, 23, 582 ~ 589.
- 西尾道徳 2001. 農業生産環境調査にみる我が国の窒素施用実態の解析, 土肥誌, 72, 5
13 ~ 521.
- 西尾道徳 2003. 農業生産環境調査にもとづく我が国のリン酸施用実態の解析, 土肥誌,
74, 435 ~ 443.
- Nishio, T., Kanamori, T. and Fujimoto, T. 1988. Effect of organic matter, moisture content and
other environmental factors on denitrification in topsoils of an Upland Field, *Soil Sci. Plant Nut
r.*, 34, 97 ~ 105.
- 新良力也・西宗 昭 1998. 北海道における秋播コムギ子実への施肥窒素の集積と土壌

- 由来窒素の吸収, 土肥誌, **69**, 604 ~ 611.
- 野口純隆 1977. 南九州の腐植質火山灰畑土壌における施肥養分の動態に関する定量的研究. 鹿児島農試研報, **5**, 122 ~ 132.
- 小原 洋・中井 信 2004. 農耕地土壌の可給態リン酸の全国的変動 農耕地土壌の特性変動 (II), 土肥誌, **75**, 59 ~ 67.
- 小田島ルミ子・高橋正樹・平賀昌晃・小野剛志・阿江教治・松本真悟 2006. オガクズ牛ふんたい肥の長期施用がハウレンソウの生育および窒素吸収に及ぼす影響, 園学研, **5**, 389 ~ 395.
- 小川昭夫 1988. 畑土壌におけるりん酸肥沃度の諸問題 2 可給態りん酸の適正水準と上限値, 農及園, **63**, 1025 ~ 1031.
- 大橋恭一・岡本将宏 1985 a. 野菜の養分吸収と土壌の化学性に及ぼすおがくず入り牛ふん厩肥連用の影響, 土肥誌, **56**, 378 ~ 383.
- 大橋恭一・岡本将宏 1985 b. おがくず入り牛ふん厩肥連用による野菜収量と土壌水分環境の変動, 土肥誌, **56**, 373 ~ 377.
- 大橋恭一 1989. 農耕地におけるリン酸の動態に関する研究, 滋賀農試特別研報, **16**, 29 ~ 73.
- 大橋優二・木曾誠二・林 哲央・後藤英次 1995. 農耕地からの温室効果ガス発生実態と対策技術, 北農, **62**, 319 ~ 322.
- 大橋優二 2000. 化学肥料及び有機物施用が亜酸化窒素発生に及ぼす影響, 北農, **67**, 232 ~ 236.
- 大前加陽子・福留紘二・遠城道雄・林 満 2003. 牛糞堆肥の施用がメロンの生育, 収量, 品質と培養土の理化学的性質に及ぼす影響. 鹿大農学報, **53**, 1 ~ 14.
- 大村邦男・坂本宣崇 2000. 施設花き栽培における硝酸態窒素の流出と環境負荷の軽減対策, 北海道立農試集報, **79**, 59 ~ 66.
- 大西成長・佳山良正 1980 a. 施設栽培における過剰厩肥連続施用による土壌中ミネラルの動向, 生物環境調節, **18**, 103 ~ 109.
- 大西成長・佳山良正 1980 b. トマトの生育とミネラル分布におよぼす過剰厩肥施用の影響, 生物環境調節, **18**, 111 ~ 117.
- 大西成長・吉田光二・佳山良正 1983 a. 過剰塩類の集積土壌環境がトマトの尻ぐされ症発生と土壌微生物数に及ぼす影響, 生物環境調節, **21**, 19 ~ 25.

- 大西成長・吉田光二・佳山良正 1983 b. 施設栽培条件下における過剰厩肥の連用が土壌の物理的環境要因に及ぼす影響, 生物環境調節, **21**, 61 ~ 67.
- 大西成長 1984. 厩肥の多量施用効果に関する土壌肥料学的研究, 名古屋大学学位論文, 乙 02500.
- 大西成長・吉田光二・佳山良正 1984 a. 施設栽培における厩肥連用が土壌の化学性に及ぼす影響, 土肥誌, **55**, 311 ~ 315.
- 大西成長・吉田光二・佳山良正 1984 b. 施設栽培における厩肥連用が土壌溶液および溶脱に及ぼす影響, 土肥誌, **55**, 316 ~ 320 (1984)
- 岡島秀夫・石渡輝夫 1979. 土壌温度と作物生育—とくにリン酸肥効との関連について—その1 大豆幼植物の生育と地温, 土肥誌, **50**, 334 ~ 338.
- 小野寺政行・西川政信・高栗仁子・鎌田賢一 1994. シュンギクの心枯れ症とその軽減対策, 北海道立農試集報, **67**, 43 ~ 54.
- 小野寺政行・美濃健一・三木直倫 1998. 施用有機物および土壌窒素放出量予測に基づく露地野菜畑の窒素施肥管理, 土肥誌, **69**, 79 ~ 84.
- Organisation for economic co-operation and development (OECD) 1997. Environmental indicators for agriculture, OECD Publications, p. 35 ~ 36, Paris.
- 小沢 聖 1998. 下層土に伸長した根の吸水・吸肥の調節, 東北農試研報, **93**, 51 ~ 100.
- Paschold, J. S., Wienhold, B. J., Ferguson, R. B. and McCallister, D. L. 2008. Soil nitrogen and phosphorus availability for field-applied slurry from swine fed traditional and low-phytate corn, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **72**, 1096 ~ 1101.
- Petersen, S. O., Lind, A. M. and Sommer, S. G. 1998. Nitrogen and organic matter losses during storage of cattle and pig manure. *J. Agric. Sci., Cambridge*, **130**, 69 ~ 79.
- Robinson, J. B. D. and Gacoka, P. 1962. Evidence of the upward movement of nitrate during the dry season in the Kikuyu red loam coffee soil. *J. Soil Sci.*, **13**, 133 ~ 139.
- Ruehlmann, J. and Korschens, M. 2009. Calculating the effect of soil organic matter concentration on soil bulk density, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **73**, 876 ~ 885.
- 三枝正彦・庄子貞雄・酒井 博 1983. 黒ボク土下層の酸性がムギ類の施肥窒素吸収と生育収量におよぼす影響, 土肥誌, **54**, 460 ~ 466.
- Sahrawat, K. L. and Keeney, D. R. 1986. Nitrous oxide emission from soils, *Adv. Soil Sci.*, **4**, Springer-Verlag, p. 103 ~ 104.

- 坂口雅己・日笠裕治・中住晴彦 2004. ハウス夏秋どりトマトにおける窒素栄養診断法, 土肥誌, **75**, 29 ~ 35.
- 坂柳迪夫・赤塚 恵 1963. 高位泥炭における窒素の無機化について, 北農試集報, **82**, 28 ~ 35.
- 佐々井兼人 1993. リン酸過剰施与が園芸作物の生育および品質に及ぼす影響, 宮城農短大報, **41**, 1 ~ 11.
- 佐々井兼人 1995. 宮城県における畑土壌およびハウス土壌での蓄積養分の実態 特に蓄積リン酸について, 宮城農短大報, **43**, 31 ~ 40.
- 佐藤康司・中津智史・三木直倫・中村隆一・笛木伸彦・志賀弘行 2008. 秋まきコムギの起生期における土壌硝酸態窒素診断による窒素追肥量の設定, 土肥誌, **79**, 45 ~ 51.
- 佐藤俊夫・藤井弘志・荒垣憲一・渡辺幸一郎 1990. 深耕時における下層土の窒素肥沃性と水稻生育について, 土肥誌, **61**, 198 ~ 201.
- 沢口正利 1986. 北海道における小豆の栄養生理的特性と施肥法に関する研究, 北海道立農試報告, **54**, 41 ~ 53.
- 澤本卓治・波多野隆介 2000. 北海道の土壌構造が発達した灰色低地土タマネギ畑からの N_2O フラックス, 土肥誌, **71**, 659 ~ 665.
- Sawamoto, T., Kusa, K., Hu, R. and Hatano, R. 2003. Dissolved N_2O , CH_4 , and CO_2 emissions from subsurface-drainage in a structured clay soil cultivated with onion in central Hokkaido, Japan. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **49**, 31 ~ 38.
- 澤本卓治・西田拓生・松中照夫 2010. チモシーを栽培したライシメーター地下排水からの溶存 N_2O 排出, 環境科学会誌, **23**, 191 ~ 197.
- 関口定男 1989. 定植期と定植後の生育期, 農山漁村文化協会編, 野菜園芸大百科 10 ネギ・ニンニク・ラッキョウ・ニラ・ワケギ・他ネギ類, p. 87 ~ 88, 農山漁村文化協会, 東京.
- 関谷宏三 1970. 土壌養分測定法委員会編 肥沃度測定のための土壌養分分析法, p. 10 ~ 11. 養賢堂, 東京.
- Shaw, K. 1962. Loss of mineral nitrogen from soil, *J. Agric. Sci.*, **58**, 145 ~ 151.
- 嶋田永生・武井昭夫 1964. 被覆そ菜栽培における施肥と土壌管理. 農及園, **39**, 1549 ~ 1552.

- 嶋田永生 1977. 施設栽培の諸問題. 化学と生物, 15, 368 ~ 374.
- 新村昭憲・坂本宣崇・林 哲央・星 春光・谷井昭夫 1998. 檜山北部地域におけるネギ根腐萎ちょう病の発生実態, 北海道立農試集報, 74, 27 ~ 33.
- 白石 誠・長田 隆・滝本英二・脇本進行・北村直起・奥田宏健 2004. 亜酸化窒素・メタン発生抑制方法の検討—肥育牛ふんの堆肥化過程から発生するアンモニア・亜酸化窒素・メタン濃度—, 岡山県総畜セ研報, 15, 70 ~ 75.
- 白岩裕隆・鹿島美彦・井上 浩・板井章浩・田辺賢二 2005. 初夏どりネギ栽培における花芽分化時期の液肥が植物体の窒素レベル, 抽苔および収量に及ぼす影響, 園学研, 4, 411 ~ 415.
- 宗林 正・瀬崎滋雄・島 康博・田中康隆 1990. 施設栽培における硫酸塩高集積土壌の実態, 奈良農試研報, 21, 34 ~ 37.
- 宗林 正・瀬崎滋雄・田中康隆 1992. 塩類集積土壌における土壌管理技術 (第1報) 各種の有機物の施用により土壌中に集積したリン酸の特性について, 奈良農試研報, 23, 33 ~ 42.
- 相馬 暁・岩淵晴郎 1982. リン酸肥沃度及びりん酸施肥がタマネギの生育・収量に及ぼす影響, 北海道立農試集報, 47, 47 ~ 56.
- 相馬 暁 1986. 北海道における野菜畑土壌の現状と各種野菜の特性に対応した肥培管理法, 北海道立農試報告, 56, 8 ~ 20, 74 ~ 82.
- Stanford, G. 1968. Extractable organic nitrogen and nitrogen mineralization in soils, *Soil Sci.*, 106, 345 ~ 351.
- Stanford, G. and Demar, W. H. 1969. Extraction of soil organic nitrogen by autoclaving in water: 1 The NaOH-distillable fraction as an index of nitrogen availability in soils, *Soil Sci.*, 107, 203 ~ 205.
- Stanford, G. 1969. Extraction of soil organic nitrogen by autoclaving in water: 2 A kinetic approach to estimating the NaOH-distillable fraction, *Soil Sci.*, 107, 323 ~ 328.
- Stanford, G. and Demar, W. H. 1970. Extraction of soil organic nitrogen by autoclaving in water: 3 Diffusible Ammonia, an index of soil nitrogen availability, *Soil Sci.*, 109, 190 ~ 196.
- 杉田麻衣子・国信耕太郎・徳永哲夫 2007. ハウスハウレンソウの硝酸イオン含量を低減させるための肥料・堆肥適正施用技術, 土肥誌, 78, 597 ~ 601.
- 鈴木則夫・山田金一・高橋和彦・戸田幹彦・中村新市・水口長八 1983. 温室メロンの

- 養分吸収特性とりん酸過剰害に関する研究, 静岡農試研報, **28**, 43 ~ 50.
- 鈴木良則・宮下慶一郎・玉田ゆみ子 1991. pHとECによる簡易土壌診断法, 東北農業研究, **44**, 147 ~ 148.
- 高田 亨・小林 茂・盛 時雄 1985. 分析資料集 第2編 肥料・飼料・水質・土壌, 北海道立農試資料, **16**, 14 ~ 16
- 高橋英一 1993. 多量必須元素. 茅野充男著者代表 植物栄養・肥料学, p.76 ~ 84. 朝倉書店, 東京.
- 高辻豊二・石原正義 1980. ウンシュウミカンのカリ栄養に関する研究(第3報) 樹体の耐寒性と二三の樹体内成分含量に及ぼす影響, 果樹試報, **A7**, 45 ~ 62.
- 建部雅子・岡崎圭毅・鍵下恵太・唐澤敏彦 2006. ホウレンソウの硝酸イオン含有率低減に対する養液土耕栽培の効果, 土肥誌, **77**, 9 ~ 16.
- 建部雅子・岡崎圭毅・岡 紀邦・水落勁美 2009. 飽水土壌溶液を用いた土壌硝酸態窒素の簡易分析法, 土肥誌, **80**, 285 ~ 287.
- 瀧 勝俊 1992. 施設土壌における窒素診断の問題点—硫酸根の集積について—, 農業技術, **47**, 207 ~ 212.
- 玉川和長・川村武司・鎌田建造・古川栄一・北山隆三 1992. ニンニク畑における養分蓄積と収量 第1報 リン酸の蓄積と収量, 東北農業研究, **45**, 273 ~ 274.
- 棚橋寿彦・高橋幸蔵・矢野秀治 1999. 鶏糞利用による冬春ほうれんそうの合理的施肥法, 岐阜農総セ研報, **12**, 12 ~ 19.
- 田中有子・小山田勉 2000. セル成型苗を利用した秋冬穫りネギの吸肥特性, 茨城農総セ園研報, **8**, 13 ~ 18.
- 谷本俊明 1991. わが国の野菜畑における塩集積の実態と改良対策. 日本土壌肥料学会編 塩集積土壌と農業, p.79 ~ 95, 博友社, 東京.
- 竹内 誠 1997. 農耕地からの窒素・リンの流出, 土肥誌, **68**, 708 ~ 715.
- 徳永哲夫・木村 靖 2002. 雨よけトマト栽培における施用有機物の肥効を考慮した施肥法, 山口農試研報, **53**, 30 ~ 34.
- 鳥山和伸 2001. フィールドから展開される土壌肥料学—新たな視点でデータを採る・見る— 1. 大区画水田における地力窒素ムラと水稻生育, 土肥誌, **72**, 453 ~ 458.
- 豊田 隆・森尾昭文 1995. 昭和農業技術発達史 第1巻 農業動向編, p.313 ~ 322, 農林水産省農林水産技術会議事務局編, 農山漁村文化協会, 東京.

- Truog, E. 1930. The determination of the readily available phosphorus of soils, *J. Am. Soc. Agric.*, **22**, 874 ~ 882.
- 塚澤和憲 2008. 高リコピン調理用トマト品種及び隔離床栽培による品質変動, 埼玉農総研報, **7**, 66 ~ 69.
- 鶴田治雄 2000. 地球温暖化ガスの土壌生態系との関わり 3. 人間活動による窒素化合物の排出と亜酸化窒素の発生, 土肥誌, **71**, 554 ~ 564.
- 内野浩二・立田芳伸・徳永和代・迫田和好 2001. 鹿児島県内の施設栽培ウンシュウミカン園における土壌化学性及び葉中無機成分の実態, 鹿児島果試研報, **3**, 7 ~ 15.
- 上野末秋・鈴木陽一・関崎義正・三谷宗孝・沢田美智雄・田中善博・高橋朋宣 1986. 斜里町の泥炭土壌における土壌窒素および施肥窒素がテンサイの品質に及ぼす影響, てん菜研究会報, **28**, 133 ~ 140.
- 牛尾進吾・吉村直美・斉藤研二・安西徹郎 2004. 家畜ふん堆肥の成分特性と肥料的効果を考慮した施用量を示す「家畜ふん堆肥利用促進ナビゲーションシステム」, 土肥誌, **75**, 99 ~ 102.
- 宇田川義夫・上村幸廣 1979. 施設栽培における有機物施用の効果について 第Ⅱ報 きゅう肥, 稲わらの施用がハウス土壌の理化学性に及ぼす影響, 鹿児島農試研報, **7**, 59 ~ 69.
- 上沢正志 1991. 化学肥料・有機物の連用が土壌・作物収量に与える影響の全国的解析, 農業技術, **46**, 393 ~ 397.
- 和田信一郎・角藤やす子・小田原孝治・吉村秀麿 1994. 7点の施設土壌における水分含量変化にともなう土壌溶液イオン組成の変化, 土肥誌, **65**, 530 ~ 537.
- 渡辺敏朗・兼子 明・黒柳直彦・古賀正明 1994. 施設ねぎの「葉先枯れ症」の発生と土壌の理化学性との関係, 九州農業研究成果情報, **9**, 467 ~ 468.
- Wetselaar, R. 1961a. Nitrate distribution in tropical soils I Possible causes of nitrate accumulation near the surface after a long dry period. *Plant and Soil*, **15**, 110 ~ 120.
- Wetselaar, R. 1961b. Nitrate distribution in tropical soils II Extent of capillary accumulation of nitrate during a long dry period. *Plant and Soil*, **15**, 121 ~ 133.
- Willers, H. C., Derikx, J. L., Ten Have, P. J. W. and Vijn, T. K. 1996. Emission of ammonia and nitrous oxide from aerobic treatment of Veal Calf Slurry. *J. Agric. Engng. Res.*, **63**, 345 ~ 352.

- 八鍬利郎 1989. 苗の発育と分けつをめぐる諸要因, 農山漁村文化協会編, 野菜園芸大百科 10 ネギ・ニンニク・ラッキョウ・ニラ・ワケギ・他ネギ類, p. 30 ~ 32, 農山漁村文化協会, 東京.
- 山田 裕・鎌田春海 1989. 有機農業の技術的評価 第1報 有機栽培が野菜の収量および土壌に及ぼす影響, 神奈川農総研研報, 131, 1 ~ 13.
- 山田良三・川嶋和子・今川正弘 2005, 即時制御灌水システムを導入した隔離床栽培トマトの養液土耕栽培マニュアル, 愛知農総試研報, 37, 61 ~ 66.
- 山口裕文・堀内昭作・森源治郎 2000. 応用植物科学実験, p. 111 ~ 112, 養賢堂, 東京.
- 八槇 敦・戸辺 学・渡辺春朗・安西徹郎 1997. 砂質土における土壌の可給態リン酸含量と露地野菜の生育・収量の関係ならびに土壌中でのリン酸の移動, 千葉農試研報, 38, 17 ~ 26
- 山本二美・松丸恒夫 2007 a. 夏どりネギにおけるチェーンポット内施肥の施肥窒素量と追肥窒素量の検討, 土肥誌, 78, 179 ~ 186.
- 山本二美・松丸恒夫 2007 b. ネギのチェーンポット内全量窒素施肥が生育および収量に及ぼす影響, 土肥誌, 78, 371 ~ 378.
- 山本公昭・梅原久稔 1970. ハウス野菜連作土壌の化学性について, 高知農林研報, 3, 19 ~ 25.
- Yamasaki, A., Tanaka, K., Yoshida, M. and Miura, H. 2000. Effects of day and night temperatures on flower-bud formation and bolting of Japanese bunching onion (*Allium Fistulosum L.*), *J. Japan. Soc. Hort. Sci.*, 69, 40 ~ 46.
- 山崎 篤・田中和夫 2005. ネギの抽だいに及ぼす窒素の影響, 園学研, 4, 51 ~ 54.
- 山内 章 1998. 根長の測定法. 根の事典編集委員会編 根の事典, p. 380 ~ 382. 朝倉書店, 東京.
- Yanai, J., Lee, C. K., Umeda, M. and Kosaki, T. 2000. Spatial variability of soil chemical properties in a paddy field, *Soil Sci. Plant. Nutr.*, 46, 473 ~ 482.
- 矢内純太・李 忠根・下保敏和・飯田訓久・松井 勤・梅田幹雄・小崎 隆 2002. 水田における土壌特性値と水稻収量の空間変動解析および収量規定要因の解析, 土肥誌, 73, 477 ~ 484.
- 矢内純太・松原倫子・李 忠根・森塚直樹・真常仁志・小崎 隆 2008. 土壌診断のための水田土壌の合理的サンプリング法の検討, 土肥誌, 79, 61 ~ 67.

- 柳井利夫 1978. ハウス土壌の湛水処理が土壌に集積した物質の変化におよぼす影響,
高知農林研報, 10, 29 ~ 36.
- 横田 剛・伊藤豊彰・小野剛志・高橋正樹・三枝正彦 2003. 製造条件の異なる牛ふん
堆肥の無機態リン酸組成, 土肥誌, 74, 133 ~ 140.
- 米田茂男・河内知道 1958. 葡萄硝子室の土壌における肥料塩類の異常集積について,
農及園, 33, 959 ~ 960.
- 米山忠克 1996. 5分できる炭素・窒素の同位体自然存在比の分析, 化学と生物, 34, 26
1 ~ 262.
- Yoshida, T. and Alexander, M. 1970. Nitrous oxide formation by *Nitrosomonas europaea* and He
terotrophic microorganisms, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 34, 880 ~ 882.
- 吉川義一・吉田 薫 1980. 施設畑土壌におけるリン酸の集積 I, 高知大学術研報農学,
29, 19 ~ 26.
- 吉村修一・伊藤 清・赤木禎二・木村 康・左手勝巳 1972. ハウスナス連作土壌の対
策調査 [I]. 大阪農技セ研報, 9, 87 ~ 98.

寒冷地の施設栽培における土壌診断と肥培管理法に関する研究

林 哲央

2011年3月
