

第 I 章 緒論

I-1 本研究の背景

1960 年代以降、北海道酪農は安価な輸入濃厚飼料に依存し、乳牛頭数と個体乳量の増加により乳生産量を高めてきた（荒木，2000；松中，2006）。同時に、このような酪農のあり方は地球温暖化負荷の増大（築城ら，2009）、不適切な養分循環（松中，2006）、不安定な酪農経営を引き起こすことなどの問題点が指摘されてきた（小林，2016）。わが国では、国産飼料基盤に立脚した酪農への転換が推進され（農林水産省，2020）、北海道でも、2025 年度における乳用牛の飼料自給率を 75 %（2013 年度は 64 %）まで上昇させることを目標としている（北海道農政部，2016a）。

北海道酪農において、ホールクロップ用途としての飼料用トウモロコシ（*Zea mays* L.；以下、トウモロコシと略）は単位土地面積あたりの乳生産量を向上させるうえで重要な飼料作物である（中辻ら，2009）。その栽培面積は 1970 年代に急拡大した後、1983 年の大冷害で減少に転じたが、2006 年以降再び増加を続け、2019 年現在 56,300 ha まで拡大した（図 I-1）。この間、後述するように、道東および道北地域など特に冷涼な地域向けの優良品種が多く開発されたことに加え、栽培技術の改善も生産拡大に貢献した。

このように収量水準が向上する中でより安定的に飼料生産を行うためには、作物生育量に見合う必要養分量を適切に施肥することが重要である。しかしながら、北海道におけるトウモロコシの施肥基準は、主に 1980 年代の研究成果（北海道農政部，1980；北海道農政部，1984；戸澤，1985）に基づき作成されていたため、現在の品種や栽培法を対象とした施肥法を検討

する必要がある。

I-2 既往の研究

I-2-1 北海道における飼料用トウモロコシ栽培

寒冷地におけるトウモロコシの栽培法については、従来、品種選定、早期播種および適切な栽植密度の重要性が指摘されてきた（吉良，1981；窪田・植田，1981；吉良，1985；戸澤，1985）。近年、道東および道北など特に冷涼な地域を普及対象として開発された極早生品種は（林ら，2007；林ら，2013；濃沼，2013；戸荻ら，2013）、従来品種よりも個体生育量が増加したことに加え、耐倒伏性が改善したため密植栽培による収量向上も可能となった（Tokatlidis and Koutroubas, 2004）。さらに、畝間を狭くして栽植密度を高める狭畦栽培（林ら，2006）、短時間で省力的な播種床造成を可能とする不耕起栽培も（林ら，2011）、寒冷地の大規模畑におけるトウモロコシ栽培の拡大に貢献している。また、気象条件とトウモロコシの用途から適切な品種を選択するための「トウモロコシ安定栽培マップ」を活用することで（北海道農政部，2017b）、北海道におけるトウモロコシ生産のさらなる拡大が期待されている。

I-2-2 飼料用トウモロコシ栽培における施肥管理

トウモロコシは他の畑作物と同様に、局所施肥による初期生育および収量の向上が期待できるため（Prummel, 1957; 石塚ら，1967；戸澤，2005）、基肥は作条施肥を基本とする。ただし、必要な窒素成分量の

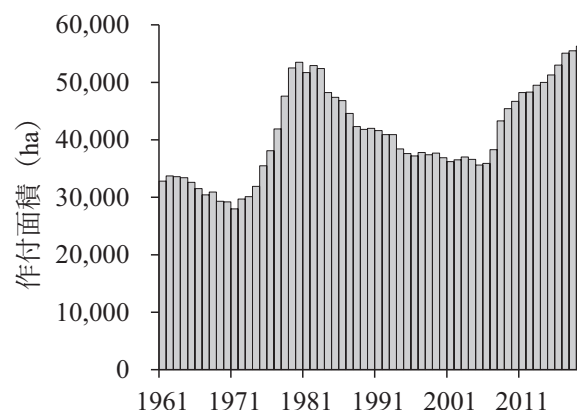


図 I-1 北海道における飼料用トウモロコシの作付面積
作物統計より（農林水産省，2020）。

全量を作条施肥すると濃度障害による減収リスクが高まるため、基肥窒素の適正な水準を $70 \sim 80 \text{ kg ha}^{-1}$ とし、残りを7葉期までの分施により施肥することが適当とされた（戸澤，1985；北海道農政部，2010）。このような施肥体系は、登熟期を迎える絹糸抽出期までに窒素吸収量を高め、高収量を得ることをねらったものである（岩田，1973；Subedi and Ma, 2005）。北海道外では、肥効調節型肥料を用いた省力的な全量基肥栽培により、従来栽培法と同等かそれ以上の収量を得られることが報告されている（三枝ら，1993；井上ら，2000）。一方、上述のようにトウモロコシの生産性は品種の変遷にともなって大きく向上しており、窒素施肥反応も過去の品種とは異なる可能性があるため（Coque and Gallais, 2007; Haegele et al., 2013）、現在の栽培品種を対象に最適な窒素施肥配分を確認する必要がある。また、土壌養分に応じて施肥量を増減する土壌診断については、特に窒素で作物や作型などを考慮した技術が整備されているが（佐藤ら，2008；林ら，2009；櫻井ら，2013）、北海道のトウモロコシでは比較的温暖な地域で子実用として栽培する場合の対応に限られる（富沢ら，2017）。トウモロコシの窒素吸収量は収量水準と密接な関係があることが認められているので（原田ら，2001）、各地の気象条件に対応し早晩性および収量の異なる多様な品種が栽培される北海道では（濃沼，2004）、ホールクロップ用途についても施肥対応の策定が望まれていた。トウモロコシのカリ施肥については、品種間で吸収特性が異なることが知られているが（原田ら，2001）、多様な品種を想定したカリの土壌診断指針が提案されている（Sunaga et al., 2015）。

I-2-3 飼料用トウモロコシ栽培とアーバスキュラー菌根菌

トウモロコシ栽培におけるリン酸肥料の効果は広く認められ（石塚ら，1967；岩田，1973；戸澤，1985）、また肥料三要素の中でリン酸の施肥量はもっとも多い（北海道農政部，2010）。一方、肥料として施用されたリン酸は土壌成分と反応し難溶化するため、作物が吸収利用するリン酸の割合（利用率）は、窒素の $40 \sim 60\%$ 、カリの $40 \sim 70\%$ と比較して $10 \sim 20\%$ と低く（高井ら，1976）、効率的な施肥法の開発が求められている。作物に効率的にリンを吸収させる手段の一つとして、リン吸収を促進するアーバスキュラー菌根菌（arbuscular mycorrhizal fungi; 以下、AM菌と略）の活用が考えられてきた（Miller, 2000; 松崎，2009）。

AM菌によるリン獲得能の向上は、外生菌糸の広がりによる吸収域拡大のほか（Jakobsen et al., 1992; Sawers et al., 2017）、外生菌糸が放出するホスファターゼによる有機態リンの吸収（Sato et al., 2015）、有機酸による無機態難溶性リンの吸収（Yao et al., 2001; Tawaraya et al., 2006）などの作用に起因する。このようなAM菌によるリン吸収促進効果は古くから知られていたもので、AM菌の胞子などを含む資材は、地力増進法において土壌のリン酸供給能を改善する「VA菌根菌資材」として政令指定されている。農業生産現場では、花きや野菜などでの利用が多いほか（鈴木・松崎，1994）、長ネギ（*Allium fistulosum* L.）については品種、リン酸肥沃度などAM菌効果の発現条件が詳細に明らかにされている（Tawaraya et al., 2001; Tawaraya et al., 2012; Sato et al., 2018）。一方、土地利用型の畑地作物では、前作物にAM菌の宿主作物を栽培した圃場において、後作物としてトウモロコシやダイズ（*Glycine max* (L.) Merr.）などの宿主作物を栽培すると、後作物のAM菌感染率が高まり、リン吸収が促進され、生育が向上することが明らかにされている（Arihara and Karasawa, 2000; 白木・山本，2003；唐澤，2004；Oka et al., 2010）。また、宿主作物であるシロクロバ（*Trifolium repens* L.）をリビングマルチとして混植したトウモロコシはAM菌感染率が高まり、リン吸収量や生育量が向上することが確認されている（Deguchi et al., 2007; Deguchi et al., 2017）。トウモロコシのリン吸収は、根に共生するAM菌への依存度が高いとされるので（Plenchette et al., 1983; Arihara and Karasawa, 2000）、本菌の機能を上手に活用できれば生産性を損なうことなく減肥できる可能性がある。しかしながら、AM菌が宿主作物に与える影響は、土壌水分（Karasawa et al., 2000）、土壌温度（唐澤，2004）、土壌化学性（Isobe et al., 2008）、土壌型（Karasawa et al., 2001）などにより変化し、さらにAM菌叢は土壌型や土地利用形態の違いにより異なるとの指摘もあるため（Oehl et al., 2010）、生産現場でAM菌によるリン酸減肥技術を普及させるためには、減肥を可能とする条件と減肥可能量を明らかにする必要がある。

I-2-4 飼料用トウモロコシ栽培における家畜ふん尿の活用

トウモロコシ栽培における肥培管理の特徴として、家畜ふん尿に由来する有機物が多く投入されることが挙げられる（青木，2008；濱戸ら，2009；大津ら，2010）。その理由として、近年の酪農経営では、1戸

当たりの乳牛飼養頭数およびふん尿発生量が増加傾向にあるため、ふん尿処理物を経営内の飼料作物畑へ適正に還元することが困難な背景がある（北海道農政部，2016 b）。さらに、草地へのふん尿処理物の施用は、牧草サイレージへの混入による品質低下が懸念されるため（田村ら，2001），結果としてトウモロコシ畑への過剰施用の割合が高まる。一方で、飼料作物畑へのふん尿処理物の過剰施用は、サイレージ原料としての品質悪化（原田ら，1996；Harada et al., 2000），窒素溶脱による環境負荷増大（北條ら，2005；大津ら，2010）が懸念されているため、各地域の作付体系を対象に家畜ふん尿処理物の施用を前提とした適切な肥培管理法が検討されている（北條ら，2005；青木ら，2008；濱戸ら，2009；大津ら，2010）。家畜ふん尿処理物を主体とした施肥管理を行う場合、これに含まれる養分量を適切に評価し施肥設計に反映させることが重要であるが、これまでトウモロコシに対するふん尿処理物の肥効評価は単年施用を前提とした窒素とカリに留まっていた（渡部ら，2006）。北海道では、ふん尿処理物の施用翌年以降に発現する窒素の連用効果について、テンサイ（*Beta vulgaris* L.），アズキ（*Vigna angularis* (Willd.) Ohwi&Ohashi），バレイショ（*Solanum tuberosum* L.）および秋まきコムギ（*Triticum aestivum* L.）の4年輪作を対象に牛ふん堆肥の窒素肥効が報告されているが（中津ら，2000），トウモロコシを対象とした検討は行われていない。また、家畜ふん尿は易溶性画分のリン酸を多く含むため（Komiyama et al., 2014），リン酸肥効率を60～100％と見込む事例が多いが（西尾，2006），北海道では詳細に検討が

なされていなかった。一般に、植物に対するリン酸の影響は低温時に大きいといわれるので（岡島・石渡，1979），府県より寒冷な北海道での肥効を確認する必要がある。

I－3 本研究の目的

トウモロコシの生産拡大を進めていくためには、現在の栽培法で達成可能な収量水準に適した施肥管理法を提示する必要があるが、近年のトウモロコシ栽培を対象とした施肥管理に関する体系的な研究は行われていない。上述のように、肥料三要素のうちカリについては、府県での知見ではあるものの多様な品種を想定した土壌診断指針が提案されているので（Sunaga et al., 2015），北海道におけるトウモロコシ生産性向上のためには、窒素とリン酸の施肥法を優先的に検討することが重要と考えられる。

そこで、本研究では、北海道におけるトウモロコシ栽培について土壌診断や家畜ふん尿処理物を活用した合理的な施肥法の開発を目的とした。第Ⅱ章では、分施体系を前提とした窒素施肥について、基肥と分施の最適な窒素施肥配分を検討するとともに、収量水準と窒素肥沃度に基づく窒素施肥法を提案した。第Ⅲ章では、トウモロコシへのリン吸収促進効果が期待されるAM菌の効果を検討し、これを考慮したときの減肥可能量を明らかにした。第Ⅳ章では、家畜ふん尿処理物の連用条件における窒素肥効を埋設試験と栽培試験から明らかにするとともに、リン酸肥効を栽培試験から明らかにした。

第Ⅱ章 土壌診断に基づく窒素施肥

Ⅱ－１ はじめに

トウモロコシの窒素吸収量は収量水準と密接な関係があるので（原田ら，2001），各地域で達成される収量水準に応じた窒素施肥量の設定が必要である（Stanford, 1973; Sela et al., 2017）。また，道内の多様な地域および土壌を対象に，土壌からの窒素供給量に基づき窒素施肥量を増減する窒素施肥対応を整備する必要がある。

1980年代に策定された従来の窒素施肥指針は，総窒素施肥量 $120 \sim 170 \text{ kg ha}^{-1}$ のうち $80 \sim 100 \text{ kg ha}^{-1}$ を播種時の基肥（作条施肥）で，残りを4～7葉期までの分施（表面全面施肥）で施用する基肥重点型の施肥体系を推奨してきた（戸澤，1985；北海道農政部，2010）。しかし，トウモロコシの窒素施肥反応は品種の変遷による収量性向上とともに変化している可能性がある（Coque and Gallais, 2007; Haeghele et al., 2013），現在の品種に対する最適な窒素施肥配分は当時と異なる可能性がある。

そこで，第Ⅱ章では，北海道におけるトウモロコシ栽培について，土壌診断に基づく窒素施肥法の開発を目的とした。Ⅱ－2節では，詳細な窒素施肥法の検討に先立ち，作条基肥窒素量の適正な水準が従来と異なるかどうかを明らかにした。Ⅱ－3節では，気象，土壌型および有機物管理が異なるトウモロコシ畑を対象に施肥試験を行い，収量水準と窒素肥沃度から判断される適正な窒素施肥量を明らかにした。

Ⅱ－2 適正な作条基肥窒素量

Ⅱ－2－1 試験方法

1) 供試圃場

北海道内において気象条件が異なる根釧およびオホーツク地域で供試圃場を選定した。根釧地域では標津郡中標津町の北海道立総合研究機構根釧農業試験場（現酪農試験場；以下，酪農試），野付郡別海町（根釧現地 A, C）および厚岸郡厚岸町（根釧現地 B, D）の生産者圃場，オホーツク地域では常呂郡訓子府町の同北見農業試験場（以下，北見農試）に試験圃場を設置した（表Ⅱ -1）。試験年は，根釧農試および北見農試では2013～2016年，根釧現地 A および B では2014年，根釧現地 C および D では2015年である。

根釧地域は北海道内でも低温寡照な地域であるため，トウモロコシ栽培の限界地帯として位置づけられるのに対し（濃沼，2013），オホーツク地域はこれよりも高温多照かつ少雨である。各地域のトウモロコシ栽培期間（6月から9月）における積算日平均気温，日照時間および降水量（いずれも平年値）は，根釧地域（中標津アメダス）で $1,873^{\circ}\text{C}$ ，480時間および561mm，オホーツク地域（境野アメダス）で $2,035^{\circ}\text{C}$ ，623時間および381mmである。供試圃場の土壌型は，根釧農試は普通黒ボク土，根釧現地 A および C は腐植質火山放出物未熟土，根釧現地 B および D は厚層黒ボク土，北見農試は普通多湿黒ボク土であり（農耕地土壌分類委員会，1995），供試圃場の土壌化学性は

表Ⅱ -1 供試圃場の土壌化学性（施肥前，0～20 cm）

試験場所	試験年	pH (H ₂ O)	有効態 リン酸	交換性 カリ	可給態 窒素	無機態 窒素	腐植
			(mg kg ⁻¹)				(g kg ⁻¹)
酪農試	2013	6.0	53	131	95	16	115
	2014	5.8	23	81	73	14	101
	2015	6.1	36	66	80	14	109
	2016	6.0	48	85	63	9	114
北見農試	2013	6.4	731	566	27	—	66
	2014	6.1	207	339	53	10	117
	2015	5.9	109	480	43	7	78
	2016	6.0	118	383	35	5	66
根釧現地 A	2014	5.9	123	194	86	19	83
根釧現地 B	2014	5.8	96	341	103	24	126
根釧現地 C	2015	6.2	205	186	101	17	94
根釧現地 D	2015	6.2	54	202	89	32	128

酪農試は黒ボク土，北見農試は多湿黒ボク土，根釧現地 A および C は火山放出物未熟土，根釧現地 B および D は黒ボク土。

リン酸およびカリは，各々 P_2O_5 および K_2O あたりの値。無機態窒素の「—」は，未測定。

表Ⅱ-1のとおりである。

2) 栽培概要

試験で供したトウモロコシ品種は各地域で奨励されているもので（北海道農政部，2018），根釧農試および根釧現地では「ソリード」（北海道における早晩性区分は「早生の早」），北見農試では「KD418」（同「早生の晩」）とした。なお，「ソリード」および「KD418」の相対熟度（RM；戸澤，2005）は，各々 78 および 90 である。栽植密度は，根釧地域で 75,000 ～ 86,000 本 ha^{-1} （畦間 72 cm），北見農試で 88,000 ～ 95,000 本 ha^{-1} （畦間 75 cm）とした。栽培期間は試験年や供試圃場により異なるが，いずれの試験地についても 5 月下旬から 6 月上旬に播種し，9 月下旬から 10 月上旬に収穫した。

3) 施肥処理

試験は，基肥窒素のみ施用する基肥試験（試験 1）と，分施体系を想定し，基肥窒素と分施窒素の配分を異にする配分試験（試験 2）の 2 つから成る。試験 1 における窒素施肥処理は，基肥窒素（硫酸アンモニウムを用いて作条施用）を，根釧地域では N として 0，40，80，100 kg ha^{-1} ，オホーツク地域では同 0，60，80，100 kg ha^{-1} （2013 年のみ根釧と同様）とした。また，試験 2 における窒素施肥処理は，基肥と分施を合わせた総窒素施肥量を北海道施肥標準（北海道農政部，2010）に近い 130 ～ 170 kg ha^{-1} の範囲で試験年や圃場ごとに一定としたうえで，基肥窒素量を試験 1 と同量（ただし，0 kg ha^{-1} を除く）に設定し，残りを 4 葉期に尿素を用いて表面全面施用により分施した。窒素以外の肥料成分は，北海道施肥標準（北海道農政部，2010）に準じ，重過リン酸石灰または過リン酸石灰，硫酸カリウム，硫酸マグネシウムを用いて，リン酸（ P_2O_5 ），カリ（ K_2O ），苦土（ MgO ）として，各々 200，200，40 kg ha^{-1} を作条で基肥施用した。

試験区の 1 区面積は 12 ～ 35 m^2 とし，各処理区 3 ～ 5 反復を設けた。

4) 土壌および作物体の調査・分析方法

土壌は，毎年春の施肥前に，各試験区より 3 ～ 5 地点ずつ（深さ 0 ～ 20 cm）採取・混合し，2 mm 篩を通した風乾細土または 4 mm 篩を通した未風乾土（分析まで 4℃で保管）を化学性の分析に供した。土壌の「pH（ H_2O ）」の場合はガラス電極法（土壌：水＝1：2.5），有効態リン酸含量はトルオーグ法，交換性カリ含量は

1 mol L^{-1} 酢酸アンモニウム液による抽出法で測定した（土壌環境分析法編集委員会，1997）。腐植含量は，乾式燃焼法（住化分析センター，SUMIGRAPH，NC-220F）により測定した全炭素含量に 1.724 を乗じて求めた（土壌環境分析法編集委員会，1997）。土壌の無機態窒素含量は，現地での状態を把握するために乾燥による窒素形態変化の影響を小さくするよう未風乾土について，10 倍量（v/w）の 10 % 塩化カリウム溶液（w/v）を加え，振とう抽出したる液中の硝酸態およびアンモニウム態窒素の各濃度をフローインジェクション法（FOSS，FIA star 5000 Analyzer）により測定し，得られた両窒素を合計して求めた。また，土壌の可給態窒素含量は，風乾細土に蒸留水を加え，培養後（30℃，4 週間）の無機態窒素量から，培養前の無機態窒素量を差し引いて求めた（北海道立総合研究機構農業研究本部，2012）。なお，可給態窒素含量の測定では，風乾細土を供試したことにより乾土効果に起因する窒素無機化が生じると考えられるが，これを含め可給態窒素と評価した。

トウモロコシの収穫刈り取り時期は，地上部全体を飼料として利用するホールクロップサイレージでは総体乾物率を 30 % 程度（黄熟期）とすることが望ましい（名久井ら，1981）。しかし，トウモロコシの栽培限界地帯の供試圃場を含む本研究では，総体乾物率 20 ～ 35 %（糊熟期から黄熟期）の登熟程度を目安とした。各試験区の 3 または 4 畦から生育中庸な 12 ～ 16 個体の地上部を地際より高さ約 15 cm で刈取り，茎葉部と雌穂部の生重量を部位別に測定した。その後，茎葉部（農用細断機（IHI スター，SCH2110）で細断した一部）は 3 日間，雌穂部（各試験区で代表的な 4 ～ 5 本の雌穂部）は 7 日間，70℃で通風乾燥して求めた部位別の乾物率を，前述の生重量に乗じて乾物収量（ Mg ha^{-1} ）を算出した。上記の部位別の乾燥粉碎試料について，水野・南（1980）の方法に基づき硫酸と過酸化水素で湿式分解した後，分解液中の窒素濃度を前述のフローインジェクション法により測定し，乾物試料あたりの窒素含有率を得た。茎葉部と雌穂部の各々について，地上部乾物重に窒素含有率を乗じることにより地上部窒素吸収量（ kg-N ha^{-1} ）を求めた。また，各窒素施肥区と窒素無施肥区の窒素吸収量の差を，基肥窒素量または総窒素施肥量で除して，100 を乗じた値を各々，みかけの基肥窒素利用率またはみかけの総施肥窒素利用率（%，以下，基肥窒素利用率または総施肥窒素利用率と表記）とした。

5) 統計処理

全ての供試圃場において、各調査項目に対する窒素施肥処理の効果は Tukey-Kramer 法による多重比較検定を行った。根釧農試および北見農試の試験については、土壌型や窒素肥沃度が近い条件で年次反復をとることができたため、農試ごとに基肥窒素量または総窒素施肥量の水準が同じ圃場を対象として、試験年を反復とした窒素施肥処理の多重比較を行った。その際、年次間の気象の影響を標準化するため、圃場ごとに全処理区の平均値を 100 とし、各区のデータを相対値(相対乾物収量および相対窒素含有量)で比較した。これらの統計処理には統計ソフト「JMP12」(SAS Institute Japan)を用い、危険率 5 % 未満のときに統計的な有意差が認められるとした。

II-2-2 結果

試験 1 において、乾物収量の水準は北見農試で酪農試および根釧現地より高かった(表 II -2)。乾物収量に対する基肥窒素量の増肥効果は、根釧現地 D を除くすべての圃場で有意に認められたが、根釧現地での増肥効果は酪農試および北見農試と比較して小さかった(表 II -2)。酪農試および北見農試において、乾物収量(実数)の平均値に対して基肥窒素量の処理間差は認められなかったが、相対乾物収量の平均値に対しては処理間差が認められた(表 II -2)。すなわち、酪

農試では基肥窒素量 80 kg ha^{-1} までの増肥により有意に増大し、北見農試では統計的な有意差はないものの、基肥窒素量 80 および 100 kg ha^{-1} 区は同 60 kg ha^{-1} 区より 10 % 以上高かった。いずれの圃場でも、基肥窒素量 80 および 100 kg ha^{-1} 区の間で、乾物収量に有意な差は認められなかった(表 II -2)。酪農試および北見農試における窒素吸収量の平均値は、基肥窒素量の増加とともに高まる傾向にあったが、相対窒素吸収量の平均値は、基肥窒素量 80 および 100 kg ha^{-1} 区の間で有意な差は認められなかった(図 II -1)。基肥窒素利用率の平均値は、酪農試で 59 ~ 65 %, 北見農試で 112 ~ 134 % の範囲にあり、基肥窒素量の処理間で有意な差は認められなかった(図 II -1)。根釧現地では、各処理区の窒素含有量は 111 ~ 209 kg ha^{-1} の範囲にあり(表 II -3)、基肥窒素量の処理間で比較すると乾物収量と同様の傾向であった。また、根釧現地における各処理区の基肥窒素利用率は 0 ~ 46 % の範囲にあり(表 II -3)、基肥窒素量の処理間で一定の傾向が見られず、いずれの圃場でも有意な差は認められなかった。

試験 2 において、各処理区の乾物収量を圃場ごとにとみると、処理間で有意な差が認められない場合もあったが、基肥窒素量 40 または 60 kg ha^{-1} 区で最も少ない圃場が多かった(表 II -4)。ただし、根釧現地 A の乾物収量は、基肥窒素量 100 kg ha^{-1} 区で他 2 区より有意に少なかった。一方、酪農試および北見農試における

表 II -2 基肥窒素量と乾物収量の関係(試験 1)

試験場所	基肥窒素量 (kg ha^{-1})	乾物収量 (Mg ha^{-1})					
		2013	2014	2015	2016	平均値	
酪農試	0	8.8 (71) b	8.3 (66) c	11.0 (80) c	3.7 (56) c	7.9 (68) c	
	40	11.4 (93) b	10.6 (85) bc	13.1 (95) b	6.4 (97) b	10.4 (92) b	
	80	14.4 (117) a	15.2 (122) ab	15.5 (113) a	7.9 (120) a	13.3 (118) a	
	100	14.5 (118) a	15.8 (127) a	15.5 (112) a	8.4 (127) a	13.5 (121) a	
	平均	12.3 (100)	12.5 (100)	13.8 (100)	6.6 (100)	11.3 (100)	
北見農試	0	11.7 (62) b	15.1 (70) b	15.0 (78) b	12.7 (62) b	14.2 (70) b	
	60 ¹⁾	19.7 (104) a	20.7 (97) a	19.5 (101) a	21.7 (106) a	20.6 (101) a	
	80	22.2 (117) a	25.4 (118) a	21.2 (110) a	23.3 (113) a	23.3 (114) a	
	100	22.1 (117) a	24.6 (115) a	21.4 (111) a	24.6 (120) a	23.5 (115) a	
	平均	19.0 (100)	21.4 (100)	19.3 (100)	20.6 (100)	20.4 (100)	
根釧現地		2014 現地 A	2014 現地 B	2015 現地 C	2015 現地		
	0	14.3 (92) b	13.2 (89) b	15.4 (90) c	14.9 (96) a		
	40	15.9 (102) ab	12.9 (87) b	16.5 (96) bc	15.4 (99) a		
	80	16.2 (105) a	16.5 (111) a	17.5 (102) ab	16.6 (107) a		
	100	15.6 (101) ab	16.7 (113) a	19.4 (113) a	15.3 (98) a		

1) 2013 年のみ 40 kg ha^{-1} 。平均値の多重比較では除外した。

() は、各試験年・試験場所における 4 処理区の平均値を 100 としたときの相対乾物収量。

平均値は、基肥窒素量の水準が同じ試験(酪農試, 2013 ~ 2016 年; 北見農試, 2014 ~ 2016 年)データを対象に、各試験年における相対乾物収量について多重比較を行った。

異なるアルファベットは、各試験年の基肥窒素処理間で有意差があることを示す (Tukey-Kramer, $p < 0.05$)。

表 II -3 根釧地域の生産者圃場における基肥窒素量と窒素吸収量および基肥窒素利用率の関係（試験 1）

基肥窒素量 (kg ha ⁻¹)	2014 現地 A	2014 現地 B	2015 現地 C	2015 現地 D
【窒素吸収量 (kg ha ⁻¹)】				
0	140 (93) a	119 (87) b	173 (92) b	164 (93) a
40	153 (102) a	111 (81) b	180 (96) b	176 (100) a
80	151 (101) a	151 (111) ab	189 (101) ab	189 (107) a
100	156 (104) a	165 (121) a	209 (112) a	177 (100) a
【基肥窒素利用率 (%)】				
40	31	0	17	30
80	14	40	20	31
100	16	46	37	13

() は、各試験年・試験場所における 4 処理区の平均値を 100 としたときの相対窒素量。

現地 B の基肥窒素量 40 kg ha⁻¹ 区について、窒素吸収量が 0 kg ha⁻¹ 区を下回ったため、計算上の基肥窒素利用率はマイナスとなるが、便宜上 0 % と表記した。

異なるアルファベットは、各試験年の基肥窒素処理間で有意差があることを示す (Tukey-Kramer, p<0.05)。

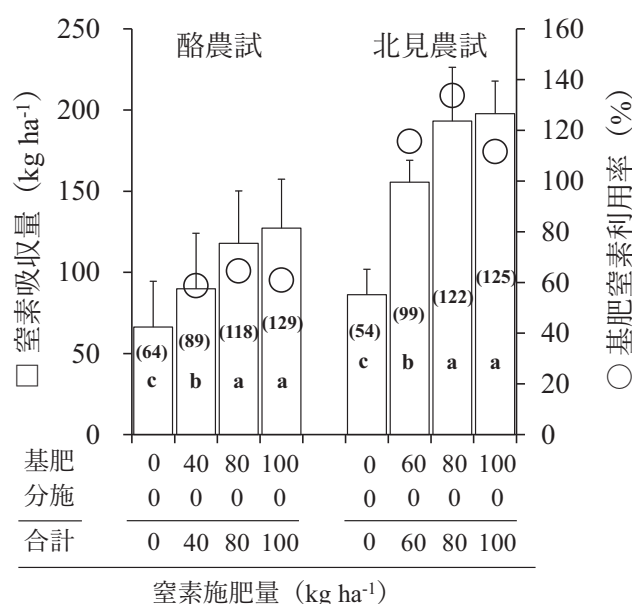


図 II -1 基肥窒素量と窒素吸収量および基肥窒素利用率の関係（試験 1）

酪農試は 2013 ～ 2016 年、北見農試は 2014 ～ 2016 年の平均値。

グラフ中の () の数値は相対窒素吸収量を、異なるアルファベットは各地域内で相対窒素吸収量に有意差があることを示す (Tukey-Kramer, p<0.05)。エラーバーは、窒素吸収量の標準偏差。

窒素吸収量および総施肥窒素利用率の平均値は、基肥窒素量の増加にともなわずに高まる傾向にあったが、有意な処理間差は認められなかった (図 II -2)。根釧現地では、各処理区の窒素吸収量は 145 ～ 207 kg ha⁻¹ の範囲にあり、基肥窒素量の処理間で相対的な関係を比較すると乾物収量と同様の傾向であった (表 II

-5)。また、根釧現地における各処理区の総施肥窒素利用率は 4 ～ 29 % の範囲にあり、基肥窒素量の処理間で一定の傾向が見られず、いずれの圃場でも有意な差は認められなかった (表 II -5)。

表Ⅱ-4 総窒素施肥量を一定とした条件における基肥窒素量と乾物収量の関係 (試験2)

試験場所	基肥窒素量 (kg ha ⁻¹)	乾物収量 (Mg ha ⁻¹)					
酪農試		2013 <130>	2014 <130>	2015 <150>	2016 <130>	平均値	
	40	12.9 (89) b	16.0 (94) a	13.7 (92) b	8.6 (98) a	12.5 (93) b	
	80	15.1 (104) a	17.3 (102) a	15.2 (102) ab	8.7 (99) a	13.7 (102) a	
	100	15.6 (107) a	17.4 (103) a	15.9 (106) a	9.1 (103) a	14.0 (105) a	
	平均	14.5 (100)	16.9 (100)	14.9 (100)	8.8 (100)	13.4 (100)	
北見農試		2013 <170>	2014 <150>	2015 <150>	2016 <150>	平均値	
	60 ¹⁾	23.9 (97) a	24.8 (99) a	21.2 (97) a	24.1 (96) a	23.4 (97) b	
	80	25.2 (102) a	25.7 (102) a	21.6 (98) a	25.0 (100) a	24.1 (100) ab	
	100	24.7 (101) a	24.9 (99) a	23.0 (105) a	26.3 (105) a	24.7 (103) a	
	平均	24.6 (100)	25.1 (100)	21.9 (100)	25.2 (100)	24.1 (100)	
根釧現地		2014 現地 A <130>	2014 現地 B <130>	2015 現地 C <150>	2015 現地 D <150>		
	40	17.2 (102) a	14.9 (93) a	17.1 (95) a	14.8 (91) b		
	80	17.4 (104) a	16.8 (105) a	18.7 (104) a	18.0 (111) a		
	100	15.7 (94) b	16.2 (101) a	18.2 (101) a	15.9 (98) ab		

1) 2013 年のみ 40 kg ha⁻¹. 平均値の多重比較では除外した.

< > は, 基肥と分施の合計の総窒素施肥量 (kg ha⁻¹).

() は, 各試験年・試験場所における 3 処理区の平均値を 100 としたときの相対乾物収量.

平均値は, 総窒素施肥量が同じ試験 (酪農試, 2015 年を除く 3 ヶ年; 北見農試, 2014 ~ 2016 年の 3 ヶ年) データを対象に, 各試験年における相対乾物収量について多重比較を行った.

異なるアルファベットは, 各試験年の基肥窒素処理間で有意差があることを示す (Tukey-Kramer, p<0.05).

表Ⅱ-5 根釧地域の生産者圃場における基肥窒素量と窒素吸収量および総施肥窒素利用率の関係 (試験2)

基肥窒素量 (kg ha ⁻¹)	2014 現地 A <130>	2014 現地 B <130>	2015 現地 C <150>	2015 現地 D <150>
【窒素吸収量 (kg ha ⁻¹)】				
40	166 (105) a	147 (97) a	182 (93) a	174 (91) b
80	164 (104) a	155 (102) a	202 (103) a	207 (109) a
100	145 (92) a	155 (102) a	204 (104) a	189 (100) ab
【基肥窒素利用率 (%)】				
40	20	22	6	6
80	18	28	20	29
100	4	28	21	17

() は, 各試験年・試験場所における 4 処理区の平均値を 100 としたときの相対相対窒素量.

< > は, 基肥と分施の合計の総窒素施肥量 (kg ha⁻¹).

異なるアルファベットは, 各試験年の基肥窒素処理間で有意差があることを示す (Tukey-Kramer, p<0.05).

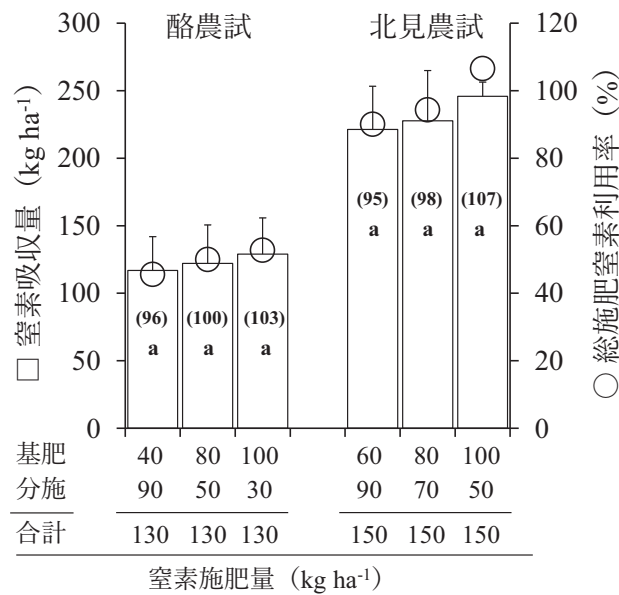


図 II - 2 総窒素施肥量を一定とした条件における基肥窒素量と窒素吸収量および総施肥窒素利用率の関係 (試験 2)

酪農試は 2015 年を除く 3 カ年、北見農試は 2014 ～ 2016 年の 3 カ年の平均値。

グラフ中の () の数値は相対窒素吸収量を、異なるアルファベットは各地域内で相対窒素吸収量に有意差があることを示す (Tukey-Kramer, $p < 0.05$)。エラーバーは、窒素吸収量の標準偏差。

II - 2 - 3 考察

本研究において、乾物収量の水準が北見農試で酪農試および根釧現地より高かった理由は、積算気温が根釧農試および根釧現地よりも高い北見農試では、登熟期間が長く収量水準の高い品種を供試したためである (櫛引, 1980)。本研究で得られた収量水準は、2016 年の酪農試では栽培期間を通した多雨 (6 ～ 9 月の積算降水量および日照時間は、平年比で 238 および 80) のため著しく低収であったが、その他圃場では窒素施肥量を 0 kg ha^{-1} とした処理区を除くと、各地域の基準収量 (総体乾物率を 30 % と想定した場合の乾物収量として、根釧地域は 15 Mg ha^{-1} 、オホーツク地域は 18 Mg ha^{-1} ; 北海道農政部, 2010) と同等かやや高かった。また、北見農試における基肥窒素利用率が 100 % を超えた理由は、土壌の無機態窒素量および可給態窒素量が少ないことに加え、生育量の増大による根域の拡大や窒素要求量の増加が窒素吸収量に大きく影響し (Peng et al., 2010)、基肥窒素量を超える吸収が生じたことが一因と推察された。

基肥窒素量のみ水準を変えた試験 1 において、酪農試および北見農試では、乾物収量に対する統計的な有意差や増収率から基肥窒素量を 80 kg ha^{-1} まで増肥することが有効と考えられた。また、根釧現地では、基肥窒素の増肥により増収効果が認められるものの、その効果は酪農試および北見農試と比較すると小さかつ

た。これは、根釧現地の窒素肥沃度が高く基肥窒素利用率が低いことが理由と考えられた。一方、試験 1 で基肥窒素量 80 および 100 kg ha^{-1} 区の乾物収量を比較した場合、すべての圃場で有意な差が認められず、また両区の間には一定の傾向はみられなかった。トウモロコシに対する基肥窒素による濃度障害は、 100 kg ha^{-1} を超える水準で高まると報告され (戸澤, 1985; 三枝ら, 1993)、従来の施肥基準 (北海道農政部, 2010) でも基肥窒素量の上限は根釧・十勝地域で 80 kg ha^{-1} 、それ以外の地域で 100 kg ha^{-1} と設定されてきた。しかし、近年の栽培条件で検討した本研究では、窒素肥沃度が高いため基肥窒素の増肥効果が相対的に現れにくく、増肥によるデメリットが大きいと考えられる根釧現地でさえ、少なくとも基肥窒素量 100 kg ha^{-1} までは、濃度障害による減収のリスクは低いと判断できた。以上より、基肥窒素量を 80 kg ha^{-1} まで増肥することにより増収効果を期待でき、同 100 kg ha^{-1} までは北海道内の地域によらず、濃度障害のリスクを考慮する必要はないと考えられた。

基肥と分施の配分を変えた試験 2 では、基肥窒素量の多寡が乾物収量に及ぼす影響は、総窒素施肥量を増やしたうえで分施したことで試験 1 より縮小した。しかし、基肥窒素量が少ない処理区で乾物収量が少ない傾向があるので、窒素施肥による増収効果は分施窒素よりも基肥窒素で高いと考えられた。その要因とし

て、総体乾物生産量に大きな影響を与える絹糸抽末期までの窒素吸収を効率的に行ううえで(岩田, 1973; Subedi and Ma, 2005), 分施窒素よりも作条基肥窒素の方が効果的であることが考えられた。そのためには、分施窒素の肥効や農作業機械の作業性を踏まえると、7葉期までに実施することが適当であろう(北海道農政部, 2017a)。

一方、基肥窒素量 80 および 100 kg ha⁻¹ 区の乾物収量および施肥窒素利用率を比較すると、酪農試および北見農試では、概ね同等か 100 kg ha⁻¹ 区でやや高まったのに対し、根釧現地では基肥窒素量 80 kg ha⁻¹ 区で同 100 kg ha⁻¹ 区より高かった。このことは、根釧現地のように土壌の無機態窒素量および可給態窒素量が多い条件では、80 kg ha⁻¹ を超えて基肥窒素量を増肥するよりも、分施する方が増収に寄与しやすいことを示唆している。

Haeghele et al. (2013) は、新しい年代のトウモロコシ品種は古い年代の品種よりも収量水準や施肥窒素利用率が向上し、前者では絹糸抽末期以降の窒素吸収量が多いと報告している。また、Coque and Gallais (2007) も、絹糸抽末期以降の窒素吸収量が多い品種は子実収量も多いことを指摘している。これらの見解を踏まえると、近年開発されたトウモロコシ品種に対しては、従来の基肥重点型の施肥から分施重点型の施肥に変更することにより、効率的な施肥ができる可能性が考えられた。しかし、本研究では、乾物収量に対する窒素施肥の優位性は分施窒素よりも基肥窒素で大きいという点で、従来の施肥基準(北海道農政部, 2010)の考え方が支持された。

以上より、トウモロコシの分施体系を前提とする場合、近年の栽培条件でも従来の考え方と同様に基肥重点型の施肥を推奨すること、その際の作条基肥窒素量の適正な水準は地域によらず 80 ~ 100 kg ha⁻¹ とすることが妥当と結論する。

II-3 収量水準と窒素肥沃度に基づく窒素施肥対応

II-3-1 試験方法

1) 供試圃場

根釧地域およびオホーツク地域に試験圃場(各々 K1 ~ 18 および O1 ~ 13)を設置した(表 II -6)。これらの圃場のうち、K2, 6, 9, 12 は酪農試, O1, 5, 8, 13 は北見農試、他は生産者圃場である。各圃場の試験年、土壌型(農耕地土壌分類委員会, 1995)、後述の方法

で分析した可給態窒素(熱水抽出性窒素)含量、無機態窒素含量および腐植含量は表 II -6 の通りである。

2) 栽培概要

試験で供したトウモロコシ品種は各地域で奨励される北海道優良品種を基本とし(北海道農政部, 2018)、酪農試と根釧地域の生産者圃場では「ソリード」、北見農試では「KD418」、オホーツク地域の生産者圃場では各生産者慣行の「ビビッド」、「39H32」、「KD380」、「アシル 90」、「シンシア 90」および「FD30-66」である。なお、これら供試品種の相対熟度(RM; 戸澤, 2005)は、根釧地域では 78、オホーツク地域では O2 圃場の「ビビッド」(RM80)を除き 85 ~ 90 の範囲である。栽植密度は、根釧地域で 74,000 ~ 86,000 本 ha⁻¹(畦間 72 cm)、オホーツク地域で 68,000 ~ 95,000 本 ha⁻¹(畦間 75 cm)であった。作付期間は試験年や供試圃場により異なるが、いずれの圃場についても 5 月下旬から 6 月上旬に播種し、9 月下旬から 10 月上旬に収穫した。

3) 施肥処理

各圃場における窒素施肥処理は、基肥と分施を合わせた総窒素施肥量について、根釧地域では概ね 80 ~ 170 kg ha⁻¹、オホーツク地域では概ね 100 ~ 190 kg ha⁻¹ の範囲で 3 ~ 6 水準を設けた(表 II -6)。このうち、80 ~ 100 kg ha⁻¹ は硫酸アンモニウムを用いて基肥として作条で施肥し、残りは 4 ~ 5 葉期に尿素を用いて表面全面施用により分施した。また、土壌由来の窒素供給量を把握するため、上記の窒素施肥処理の他に窒素無施肥区を適宜設けた(表 II -6)。K14 ~ 18 については、窒素無施肥区のみ設けた。窒素以外の肥料成分はすべての圃場で共通とし、北海道施肥標準(北海道農政部, 2010)に準じ、重過リン酸石灰または過リン酸石灰、硫酸カリウム、硫酸マグネシウムを用いて、リン酸(P₂O₅)、カリ(K₂O)、苦土(MgO)として、各々 200, 200, 40 kg ha⁻¹ を作条で基肥施用した。なお、各供試圃場のふん尿施用履歴は、試験前年春までは生産者、根釧農試および北見農試の慣行管理、試験前年秋から栽培当年までは無施用である。

試験区は 1 区面積を 12 ~ 35 m² とし、各処理区 3 ~ 5 反復を設けた。

4) 土壌および作物体の調査・分析方法

各試験年の早春(施肥前)に採取した土壌(深さ 0 ~ 20 cm)について、前節と同様に前処理を行い化学性の分析に供した。土壌の可給態窒素として、北海道

表Ⅱ-6 各供試圃場の土壌型と土壌化学性、窒素施肥処理および窒素施肥区における試験データ
(根釧およびオホーツク地域)

試験 年	圃場 記号	土壌型	熱水抽出	無機態	腐植	窒素施肥量 ¹⁾	窒素施肥区データ ²⁾		
			性窒素	窒素			乾物収量	窒素吸収量	窒素含有率
						(kg ha ⁻¹)	(Mg ha ⁻¹)	(kg ha ⁻¹)	(g kg ⁻¹)
【根釧地域】									
2013	K1	火山放出物未熟土	86	23	81	0, 80, 110, 130, 150, 170	11.6～12.8	114～128	9.7～10.5
	K2	黒ボク土	98	16	115	0, 80, 110, 130, 150, 170	12.6～15.1	117～134	8.5～9.3
	K3	黒ボク土	127	32	121	0, 80, 110, 130, 150, 170	13.2～14.1	132～143	9.7～10.5
	K4	黒ボク土	211	45	123	0, 80, 110, 130, 150, 170	11.6～12.8	124～138	10.3～11.1
2014	K5	火山放出物未熟土	125	19	83	0, 80, 110, 130, 150, 170	16.2～18.2	151～181	9.3～10.0
	K6	黒ボク土	80	14	101	0, 80, 110, 130, 150, 170	15.2～17.6	109～152	7.2～8.7
	K7	黒ボク土	151	24	126	0, 80, 110, 130, 150, 170	16.5～17.3	151～164	9.2～9.5
2015	K8	火山放出物未熟土	137	17	94	0, 80, 110, 130, 150, 170	17.5～18.7	189～209	10.8～11.4
	K9	黒ボク土	93	14	109	0, 80, 110, 130, 150, 170	15.2～16.0	159～187	10.2～11.7
	K10	黒ボク土	127	32	128	0, 80, 110, 130, 150, 170	16.6～18.3	187～224	10.9～12.2
2016	K11	火山放出物未熟土	76	7	60	0, 130, 160, 190	4.7～5.0	66～69	13.6～14.2
	K12	黒ボク土	91	9	114	0, 80, 130, 160	7.9～9.0	82～108	10.3～12.0
	K13	黒ボク土	159	21	158	0, 100, 130, 160	4.5～5.6	63～77	13.4～14.0
2015	K14	火山放出物未熟土	93	22	75	0	—	—	—
	K15	黒ボク土	101	14	115	0	—	—	—
	K16	褐色低地土	86	21	36	0	—	—	—
2016	K17	火山放出物未熟土	71	10	58	0	—	—	—
	K18	褐色低地土	80	19	32	0	—	—	—
【オホーツク地域】									
2013	O1	黒ボク土	66	—	66	0, 100, 130, 150, 170, 190	22.1～25.5	232～265	10.1～10.5
	O2	褐色低地土	88	—	42	100, 130, 150, 170, 190	18.0～19.2	188～206	10.3～10.8
	O3	灰色低地土	66	—	42	100, 130, 150, 170, 190	15.6～18.1	153～179	9.0～9.9
	O4	褐色低地土	76	—	45	100, 130, 150, 170, 190	13.1～14.8	130～155	9.4～10.9
2014	O5	黒ボク土	89	10	117	0, 100, 150, 170, 190	23.9～25.6	220～256	8.9～10.3
	O6	灰色低地土	64	7	32	100, 130, 150, 170, 190	14.6～15.7	166～192	11.3～12.3
	O7	褐色低地土	111	14	68	100, 130, 150, 170, 190	18.5～20.0	188～211	9.6～12.0
2015	O8	褐色森林土	67	7	78	0, 100, 150, 170, 190	21.5～23.3	180～236	8.4～10.2
	O9	褐色低地土	72	11	58	100, 130, 150, 170, 190	16.0～16.7	146～182	9.0～11.3
	O10	褐色低地土	34	9	46	100, 150, 190	16.0～17.6	169～188	10.3～10.7
	O11	灰色低地土	54	6	31	100, 130, 150, 170, 190	16.0～18.0	162～196	10.1～11.0
	O12	灰色低地土	75	39	34	100, 150, 190	18.1～18.6	210～214	11.3～11.7
2016	O13	黒ボク土	66	5	66	0, 100, 150, 190, 210, 250, 280	24.6～27.2	193～258	7.9～10.4

1) 基肥と分施を合わせた総窒素施肥量。窒素施肥区は 80 または 100 kg ha⁻¹ を基肥，残りを 4～5 葉期に分施した。

2) 窒素施肥区（窒素無施肥区は除く）における各項目の最大値～最小値を示した。乾物収量の最大値は，本文中で「圃場最大収量」と表記。

— は，分析値がない，または処理を設けていないことを示す。

における畑作物の土壌診断で窒素肥沃度指標として用いられている熱水抽出性窒素を以下の方法により測定した（北海道農政部，2010）。すなわち，土壌に 10 倍量（v/w）の水を加えてオートクレーブにて加熱処理（105℃，60 分）した後，ろ液を硫酸と過酸化水素で分解し，分解液中のアンモニウム態窒素濃度をフローインジェクション法により測定し，熱水抽出性窒素含量を求めた（北海道立総合研究機構農業研究本部，2012）。土壌の無機態窒素含量および腐植含量は前節と同様の方法により求めた。

収穫期におけるトウモロコシ作物体の調査および分析は前節と同様に実施し，地上部の乾物収量（Mg

ha⁻¹）および窒素吸収量（kg-N ha⁻¹）を算出するとともに，窒素吸収量を乾物収量で除すことにより地上部総体の窒素含有率（g kg⁻¹，以下，窒素含有率）を求めた。また，窒素施肥区と窒素無施肥区の窒素吸収量の差を，総窒素施肥量で除して 100 を乗じることにより，みかけの総施肥窒素利用率（％，以下，総施肥窒素利用率）を求めた。

5) 統計解析

根釧およびオホーツク地域で得た上記のデータに，後述する富沢ら（2017）のデータも加えて解析した。乾物収量，窒素吸収量，窒素含有率および総施肥窒素

利用率における多重比較には、得られたデータの分散に地域間差が認められたので Games-Howell 法を用いた。また、トウモロコシの窒素吸収量と各要因の関係を定量的に表すため、窒素吸収量を目的変数、熱水抽出性窒素含量、総窒素施肥量、各圃場の窒素用量試験で得られた最大乾物収量（3～5 反復の処理区平均、以下、圃場最大収量）を説明変数として重回帰分析を行った。窒素無施肥区を対象として土壌からの窒素供給能を検討する際は、各圃場の収量水準の影響（窒素以外の要因の影響）を緩和するため、窒素無施肥区の窒素吸収量を、圃場最大収量を得たときの窒素吸収量で除して 100 を乗じた値を「窒素吸収量指数」と定義し、これと熱水抽出性窒素含量の関係を解析した。また、両者の関係について、折れ線回帰モデルを適用した（大塚・吉原，1975）。さらに、これら関係について土壌型の影響を検討するため、熱水抽出性窒素含量と土壌型を要因とする共分散分析を行った（光永，2010）。

これらの解析では、ソフトウェアに Microsoft Excel 2007（Microsoft）と JMP12（SAS Institute Japan）を用い、危険率 5 % 未満のときに統計的な有意差が認められるとした。

6) 解析で追加したデータ

本研究では、ホールクロップサイレーズ用トウモロコシに対する必要窒素施肥量の設定を目的としたが、北海道内でより広範な地域での適用性を高めるため、道央および十勝地域における栽培試験のデータ（富沢ら，2017）も解析に加えた（表Ⅱ-7）。富沢ら（2017）の報告は子実用トウモロコシを対象とした研究であるが、肥料要素の本質的な吸収特性は変わらないと考えられる（戸澤，2005）。ただし、これらのデータについては、窒素施肥量が 3 水準以上設置された圃場を対象とし、さらに試験前年秋から試験当年春までに堆肥が施用された圃場は、堆肥由来の肥料成分の肥効を正確に評価することが難しいため解析から除外した。また、基肥窒素量が 80 kg ha^{-1} 未満の圃場についても、基肥窒素量の適正水準（ $80 \sim 100 \text{ kg ha}^{-1}$ ；前節の結果より）から外れるため、窒素無施肥区以外の処理区は解析から除外した。富沢ら（2017）の栽培概要は表Ⅱ-7 の通りである。すなわち、1 区面積は $23 \sim 36 \text{ m}^2$ 、各処理区 3～4 反復、栽植密度は大部分の圃場で約 $95,000 \text{ 本 ha}^{-1}$ （道央地域）または約 $90,000 \text{ 本 ha}^{-1}$ （十勝地域）、供試品種は「チペリウス」（RM は 85）である（富沢ら，2017）。また、収穫時の登熟度合は過

熟期であった。

各地域の代表アメダス地点（根釧地域，中標津；オホーツク地域，境野；道央地域，長沼；十勝地域，芽室）における試験年の栽培期間（6 月から 9 月）の積算日平均気温および降水量は、根釧地域で $1,933 \sim 1,995^\circ\text{C}$ （平年値 $1,873^\circ\text{C}$ ）および $518 \sim 1,334 \text{ mm}$ （同 561 mm ），オホーツク地域で $2,051 \sim 2,186^\circ\text{C}$ （同 $2,035^\circ\text{C}$ ）および $325 \sim 763 \text{ mm}$ （同 381 mm ），道央で $2,296 \sim 2,419^\circ\text{C}$ （同 $2,209^\circ\text{C}$ ）および $452 \sim 634 \text{ mm}$ （同 440 mm ），十勝地域で $2,022 \sim 2,380^\circ\text{C}$ （同 $2,083^\circ\text{C}$ ）および $315 \sim 597 \text{ mm}$ （同 493 mm ）であり、気象条件は地域により大きく異なる。

Ⅱ-3-2 結果

各圃場の熱水抽出性窒素含量、無機態窒素含量、腐植含量、窒素施肥区における乾物収量、窒素吸収量および窒素含有率の水準は、表Ⅱ-6（根釧およびオホーツク地域）および表Ⅱ-7（道央および十勝地域）の通りであった。

供試圃場の熱水抽出性窒素含量および無機態窒素含量は、各々 $25 \sim 211 \text{ mg kg}^{-1}$ および $4 \sim 45 \text{ mg kg}^{-1}$ の範囲にあり、圃場により大きく異なった（表Ⅱ-6，表Ⅱ-7）。これらを地域間で比較すると、熱水抽出性窒素含量は根釧地域で他 3 地域より有意に高く、無機態窒素含量は根釧および十勝地域で道央地域より有意に高く、オホーツク地域はこれらの中間の水準であった（表Ⅱ-8）。

本研究における収量水準は、北海道施肥標準（北海道農政部，2010）で示されている各地域の基準収量（総体乾物率を 30 % と想定した場合、根釧，オホーツク，道央，十勝地域の乾物収量は、各々 $13.5 \sim 16.5$ ， $16.5 \sim 19.5$ ， $18.0 \sim 21.0$ ， $15.0 \sim 19.5 \text{ Mg ha}^{-1}$ ）を大きく下回る圃場（K11，12，13），同収量を大きく上回る圃場（O1，5，8，13，T2，5，10）が散見されたが、圃場最大収量は大部分の圃場で基準収量に近かった（表Ⅱ-6，表Ⅱ-7）。なお、圃場最大収量が基準収量を下回ったのは、2016 年に根釧地域に設置された圃場であり、栽培期間を通じた多雨の影響による。窒素施肥区の窒素含有率は $6.2 \sim 14.2 \text{ g kg}^{-1}$ の範囲にあり（表Ⅱ-6，表Ⅱ-7），各圃場の最大値は既往文献（青木ら，2008；濱戸ら，2009；井上ら，2000；大津ら，2010；三枝ら，1993）での慣行栽培から得られる水準（ $9.1 \sim 13.4 \text{ g kg}^{-1}$ ）に近かった。

各地域の圃場最大収量とそのときの窒素吸収量を地域間で比較すると、根釧地域は他 3 地域より有意に低

表Ⅱ-7 各供試圃場の土壌型と土壌化学性、窒素施肥処理および窒素施肥区における試験データ
(道央および十勝地域)¹⁾

試験 年	圃場 記号	土壌型	熱水抽出	無機態	腐植	窒素施肥量 ²⁾	窒素施肥区データ ³⁾		
			性窒素	窒素			乾物収量	窒素吸収量	窒素含有率
			(mg kg ⁻¹)	(g kg ⁻¹)		(kg ha ⁻¹)	(Mg ha ⁻¹)	(kg ha ⁻¹)	(g kg ⁻¹)
【道央地域】									
2010	D1	灰色低地土	25	7	20	0, 80, 120, 160, 200	14.3~19.1	123~216	8.9~11.6
	D2	灰色台地土	55	8	73	0, 80, 120, 160, 200	14.9~19.9	114~196	7.8~10.1
	D3	灰色台地土	88	6	116	0, 80, 120, 160, 200	16.9~21.9	149~242	9.0~11.5
2011	D4	褐色低地土	28	4	18	0, 80, 120, 160, 200	13.2~19.0	93~178	7.3~9.6
	D5	灰色台地土	39	6	26	0, 80, 120, 160, 200	14.9~17.7	104~185	7.2~10.8
	D6	灰色台地土	53	7	68	0, 80, 120, 160, 200	18.2~20.6	147~223	8.2~11.4
	D7	灰色台地土	87	8	111	0, 80, 120, 160, 200	18.7~21.6	142~216	7.9~10.7
2012	D8	褐色低地土	36	5	19	0, 120, 160, 200, 240	14.6~19.1	121~201	8.3~11.0
	D9	灰色低地土	46	7	55	0, 120, 160, 200, 240	17.8~21.1	150~208	8.4~10.7
	D10	灰色台地土	52	14	26	0, 120, 160, 200, 240	18.9~21.8	228~255	11.6~12.4
	D11	灰色台地土	86	10	101	0, 120, 160, 200, 240	18.7~22.2	189~274	10.1~12.3
2013	D12	灰色低地土	30	6	24	0, 120, 160, 200, 240	18.0~20.1	154~199	8.6~10.2
	D13	褐色低地土	50	4	21	0, 120, 160, 200, 240	16.8~18.9	141~183	8.4~9.7
	D14	グライ低地土	51	5	50	0, 120, 160, 200, 240	16.9 ~ 21.0	112 ~ 184	6.6 ~ 8.8
	D15	灰色台地土	66	6	56	0, 120, 160, 200, 240	17.9 ~ 21.0	139 ~ 193	7.7 ~ 9.3
【十勝地域】									
2009	T1	黒ボク土	45	—	37	0, 80, 120, 160, 200	14.8 ~ 16.9	117 ~ 184	7.9 ~ 10.9
2010	T2	黒ボク土	34	—	40	0, 80, 120, 160, 200, 250, 300	15.9 ~ 24.8	109 ~ 238	6.7 ~ 9.6
2011	T3	黒ボク土	40	9	47	0, 80, 120, 160, 200, 250, 300	15.9~18.7	142~208	8.9~11.2
2012	T4	黒ボク土	39	16	36	0, 80, 120, 160, 200, 240	15.5~19.9	96~176	6.2~8.9
	T5	黒ボク土	46	17	59	0, 160, 200, 240	21.4~23.2	194~221	8.9~9.5
2013	T6	黒ボク土	35	20	39	0, 120, 160, 200	14.6~17.7	124~170	8.5~9.6
	T7	黒ボク土	68	18	51	0, 120, 160, 200	19.6~20.1	182~212	9.3~10.6
	T8	黒ボク土	53	15	162	0, 80, 120, 160, 200	13.1~13.8	128~162	9.8~11.8
	T9	黒ボク土	25	30	32	0, 120, 160, 200	13.8~14.9	117~150	8.5~10.3
2010	T10	黒ボク土	53	—	—	140, 180, 220	20.2~22.8	210~260	10.4~11.4
2011	T11	黒ボク土	53	—	44	140, 180, 220	17.6~20.2	156~204	8.9~10.1
	O10	褐色低地土	34	9	46	100, 150, 190	16.0~17.6	169~188	10.3~10.7
	O11	灰色低地土	54	6	31	100, 130, 150, 170, 190	16.0~18.0	162~196	10.1~11.0
	O12	灰色低地土	75	39	34	100, 150, 190	18.1~18.6	210~214	11.3~11.7

1) 富沢ら (2017) の元データを引用した。

2) 基肥と分施を合わせた総窒素施肥量。窒素施肥区は 80 または 100 kg ha⁻¹ を基肥、残りを 4 ~ 5 葉期に分施した。ただし、D5, 9, 14 の基肥は 60 または 70 kg ha⁻¹。

3) 窒素施肥区（窒素無施肥区は除く）における各項目の最大値～最小値を示した。乾物収量の最大値は、本文中で「圃場最大収量」と表記。

— は、分析値がない、または処理を設けていないことを示す。

表Ⅱ-8 各地域における土壌の窒素分析値、圃場最大収量を得たときの乾物収量と窒素吸収特性

地域	土壌の窒素分析値 ¹⁾				収量と窒素吸収特性 ²⁾					
	熱水抽出性窒素	無機態窒素			乾物収量	窒素吸収量	窒素含有率	施肥窒素利用率 ³⁾		
	(mg kg ⁻¹)	(mg kg ⁻¹)			(Mg ha ⁻¹)	(kg ha ⁻¹)	(g kg ⁻¹)	(%)		
根釧	111±36	a	20±9	a	13.9±4.7	b	145±46	b	10.8±1.7	a
オホーツク	71±18	b	12±10	ab	20.0±4.1	a	210±33	a	10.6±0.8	a
道央	53±21	bc	7±3	b	20.2±1.3	a	211±31	a	10.4±1.1	a
十勝	45±12	c	18±6	a	19.4±3.4	a	194±34	a	10.1±1.1	a

1) 欠測値を除いて計算した各地域の平均値 ± 標準偏差。

2) 基肥窒素量を 80 ~ 100 kg ha⁻¹ とした圃場において、圃場最大収量を得た処理区の平均値 ± 標準偏差。

3) 窒素無施肥区を設置した圃場のデータ (n 数は、根釧 13, オホーツク 4, 道央 12, 十勝 9)。

各項目に付したアルファベットは、異種文字間に地域間で有意差があることを示す (Games-Howell, p<0.05)。

かった（表Ⅱ-8）。また、圃場最大収量を得たときの施肥窒素利用率は、根釧地域で他3地域より有意に低く、また十勝地域でオホーツクおよび道央地域より有意に低かった（表Ⅱ-6）。一方、各地域における窒素含有率は10.1～10.8 g kg⁻¹の範囲にあり、地域間で統計的な有意差は認められなかった（表Ⅱ-8）。

Ⅱ-3-3 考察

気象条件や土壌型が異なる道内4地域で実施された栽培試験の結果に基づき、乾物収量とそれに対応する目標窒素吸収量の関係を検討するとともに、目標窒素吸収量を得るために必要な窒素施肥量を熱水抽出性窒素含量ごとに設定することとした。

1) 乾物収量と窒素吸収量の関係

はじめに、気象条件、収量水準および土壌型が異なる栽培試験の結果をまとめて解析できるかどうか確認した。圃場最大収量およびそれに対応する窒素吸収量が根釧地域で他3地域より有意に少なかった理由は、6～8月の月平均気温が他3地域より有意に低い根釧地域では（井上ら，2017）、登熟期間が短く収量水準の低い品種を栽培せざるを得ないためである（櫛引，1980）。施肥窒素利用率に地域間差が生じたのは、根釧および十勝地域では熱水抽出性窒素含量または無機態窒素含量が高いため、土壌からの窒素供給量が多いこと（櫻井ら，2013）、さらに根釧地域では収量水準が低いため、土壌中に吸収可能な窒素が存在する条件でも窒素吸収量が頭打ちになることが理由と考えられた。このように、施肥窒素利用率は収量水準と窒素肥沃度の影響を受ける一方で、窒素含有率は地域間で有意な差が認められなかった（表Ⅱ-8）。このことは、目標の窒素吸収量を得るために必要な窒素施肥量は、収量水準と窒素肥沃度によって異なると考えられるが、窒素吸収量が決まれば乾物収量はほぼ一律に決まることを示唆する。したがって、地域を通して収量水準に対応する目標窒素吸収量を設定できると判断した。

2) 窒素肥沃度評価の指標

次に、窒素肥沃度に応じた総窒素施肥量を設定するため、窒素肥沃度評価の指標について検討した。北海道の畑作物では窒素肥沃度評価の指標として熱水抽出性窒素が適用されているが、この指標は土壌型の影響を受けることが指摘されており（松永・森泉，2012）、実際に道内で同手法を適用する作物においても、泥炭

土や腐植含量が多い一部の黒ボク土で適用を除外する場合がある（北海道農政部，2010）。そこで、トウモロコシを対象としたとき、土壌からの窒素供給量の指標として熱水抽出性窒素の適用が可能かどうかを検討した（図Ⅱ-3）。なお、本研究では、熱水抽出性窒素含量が高く収量水準が低い圃場において、土壌の窒素供給量に対して窒素吸収量が頭打ちになる傾向が見られたので、熱水抽出性窒素含量と窒素吸収量指数の関係を検討した。両者の関係について土壌型ごとに折れ線回帰モデルを適用した結果、黒ボク土および非黒ボク土の各々について、折曲点を（129.27, 72.87）および（131.40, 82.50）とする折れ線回帰式が得られた。これより、熱水抽出性窒素含量130 mg kg⁻¹未満の範囲では、いずれの土壌型についても両者に正の相関関係が認められたので（黒ボク土では相関係数（ r ）は0.80, $p < 0.001$ ；非黒ボク土では $r = 0.70$, $p = 0.003$ ）、この範囲内のデータで共分散分析を行った。その結果、窒素吸収量指数に対する土壌型と熱水抽出性窒素含量の交互作用は認められず（ $p = 0.49$ ）、交互作用項を除いたときの土壌型の効果も認められなかった（ $p = 0.87$ ）。つまり、熱水抽出性窒素含量と窒素吸収量指数の関係に対して、土壌型の影響は認められなかった。なお、上記条件で、窒素吸収量（実数）に対する土壌型と熱水抽出性窒素含量の交互作用も認められなかった（ $p = 0.70$ ）。これらの理由は、トウモロコシ畑では家畜ふん尿の還元量が多いため（青木，2008；濱戸ら，2009；大津ら，2010）、熱水抽出性窒素に占める家畜ふん尿由来の有機態窒素の寄与が土壌型の影響を大きく上回っていたことが推察される。これらのことを踏まえると、少なくとも熱水抽出性窒素含量が約130 mg kg⁻¹未満のトウモロコシ圃場では、窒素肥沃度評価指標として黒ボク土と非黒ボク土の区別なく、熱水抽出性窒素を適用しても現実的な問題は少ないと考えられた。ただし、熱水抽出性窒素含量が130 mg kg⁻¹以上の圃場でも、収量水準が高い条件であれば窒素吸収量が頭打ちにならない可能性があるため、このような条件での本手法の妥当性について更なる検討を要する。また、泥炭土については、本研究でも未検討のため、他作物と同様に熱水抽出性窒素含量による窒素肥沃度評価を行わないのが適当であろう。

以上より、本研究では熱水抽出性窒素含量130 mg kg⁻¹を超える4圃場（K4, 7, 8, 13）を除外し、地域や土壌型で区別することなくトウモロコシの窒素吸収量に影響を及ぼす要因を解析できると判断した。

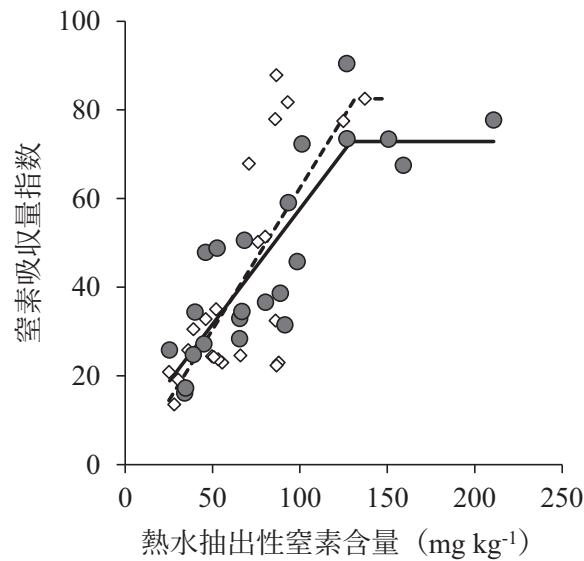


図 II -3 窒素無施肥区における熱水抽出性窒素含量とトウモロコシの窒素吸収量指数の関係

●, 黒ボク土 (n=23); ◇, 非黒ボク土 (n=23).

窒素吸収量指数は次の通り求めた. 窒素無施肥区の窒素吸収量を, 圃場最大収量を得たときの窒素吸収量で除して 100 を乗じた. 折れ線回帰式は次の通り. 黒ボク土 (実線) は, $Y = \text{Min} (0.52X + 5.72, 72.87)$, 折曲点 (129.27, 72.87), RMSE = 11.41, $R^2 = 0.74$. 非黒ボク土 (破線) は, $\text{Min} (Y = 0.64X - 1.51, 82.50)$, 折曲点 (131.40, 82.50), RMSE = 17.41, $R^2 = 0.56$.

3) 窒素肥沃度に対応した窒素施肥量

(1) 窒素吸収量の予測

トウモロコシの窒素吸収量と各要因の関係を定量的に表すため, 窒素吸収量 (Y_a) を目的変数, 総窒素施肥量 (X_{a1}) および熱水抽出性窒素含量 (X_{a2}) を説明変数として重回帰分析を行い, 次式を得た (式 A, 表 II -9).

$$Y_a = 0.51 X_{a1} + 0.26 X_{a2} + 79.51 \quad (\text{式 A})$$

得られた重回帰式 A は統計的に有意であったが ($p < 0.001$), 自由度修正済み決定係数 (修正 R^2) は 0.28 であり予測精度は低かった (図 II -4). 式 A から求めた予測値 Y_a と実測値の残差 (実測値 - 予測値 Y_a) は, 各圃場の圃場最大収量と正の相関関係が認められ ($r = 0.74$, $p < 0.001$), 窒素吸収量の予測値 Y_a は圃場最大収量の影響を受けることが明らかであった. そこで, 窒素吸収量 (Y_b) を目的変数, 総窒素施肥量 (X_{b1}), 熱水抽出性窒素含量 (X_{b2}) および圃場最大収量 (X_{b3}) を説明変数として重回帰分析を行い, 次式を得た (式 B, 表 II -9).

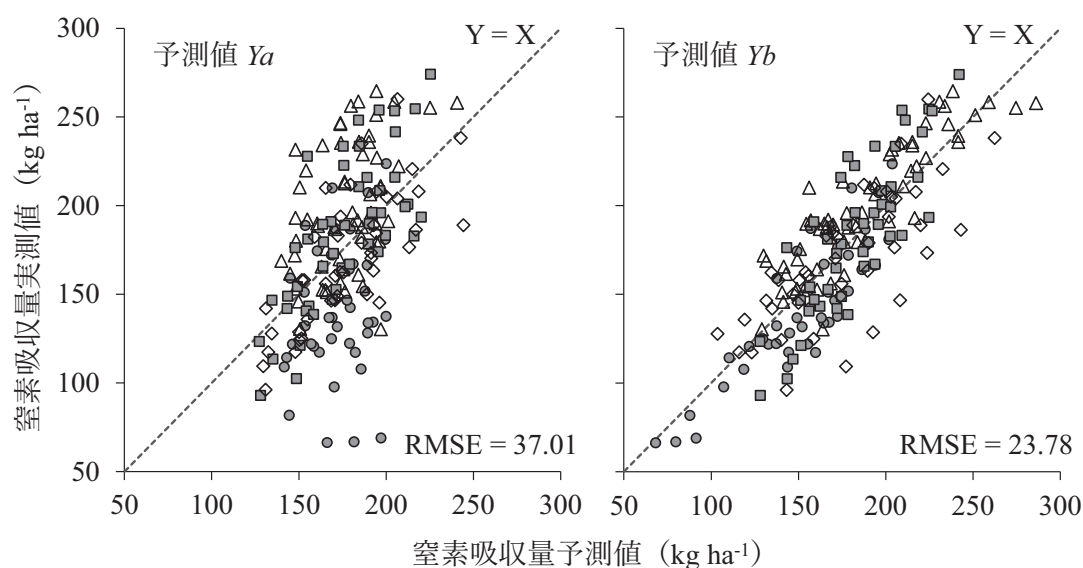
$$Y_b = 0.39 X_{b1} + 0.43 X_{b2} + 7.41 X_{b3} - 51.79 \quad (\text{式 B})$$

得られた重回帰式 B の修正 R^2 は 0.70 であり, 式 B による予測精度は式 A より高かった (図 II -4). トウモロコシの窒素吸収量や施肥窒素利用率は, 地上部生

育量の影響を強く受けることが知られており (Liang and MacKenzie, 1994; Peng et al., 2010), 本研究の結果でも収量水準を考慮する必要があることを示唆している. 従来の施肥基準では地域ごとに基準収量が定められているが, 本研究では同一地域内でも試験年や供試圃場により収量水準が大きく異なった. この理由として各試験年の気象条件の他, 土壌理化学性や栽培方法などの影響が推定されるが, 本研究では収量水準を制限する多様な要因を個別に考慮することはできなかったため, 重回帰分析での説明変数として各圃場の圃場最大収量を加えた. なお, 実際の適用場面における収量水準設定の考え方については後述する. 以上より, 各圃場の熱水抽出性窒素含量と圃場最大収量を設定することにより, 総窒素施肥量に対応した窒素吸収量の予測が可能となる.

(2) 収量水準と窒素肥沃度に対応した窒素施肥量

各圃場の熱水抽出性窒素含量と圃場最大収量から総窒素施肥量を算出するため, 式 B に各処理区の総窒素施肥量, 圃場ごとの熱水抽出性窒素含量および圃場最大収量を代入して得られた窒素吸収量の予測値 Y_b と, 実際の乾物収量 (Y_c) の関係から, 以下の一次回帰式 (式 C) を得た ($R^2 = 0.83$, $p < 0.001$, 図 II -5).



図Ⅱ-4 窒素吸収量の予測値と実測値の関係

●, 根釧 (n=41); △, オホーツク (n=60); ■, 道央 (n=48); ◇, 十勝 (n=43).

表Ⅱ-4 および表Ⅱ-5 のうち、熱水抽出性窒素含量が 130 mg kg^{-1} 以上の圃場 (K4, 7, 8, 13) および基肥窒素量が 80 kg ha^{-1} 未満の圃場 (D5, 9, 14) を除外した (図Ⅱ-5 も同様)。

表Ⅱ-9 窒素吸収量を目的変数とした重回帰分析の結果

式	説明変数	偏回帰係数	標準偏回帰係数	t 値	p 値	修正 R^2	RMSE
A	総窒素施肥量 Xa_1	0.51	0.55	8.67	<.0001	0.28	37.01
	熱水抽出性窒素量 Xa_2	0.26	0.16	2.57	0.01		
	切片	79.51		6.15	<.0001		
B	総窒素施肥量 Xb_1	0.39	0.41	9.94	<.0001	0.70	23.78
	熱水抽出性窒素量 Xb_2	0.43	0.27	6.50	<.0001		
	圃場最大収量 Xb_3	7.41	0.68	16.43	<.0001		
	切片	-51.79		-4.49	<.0001		

修正 R^2 は自由度修正済み決定係数, RMSE は二乗平均平方根誤差。

$$Yc = 0.095Yb + 1.070 \text{ (式 C)}$$

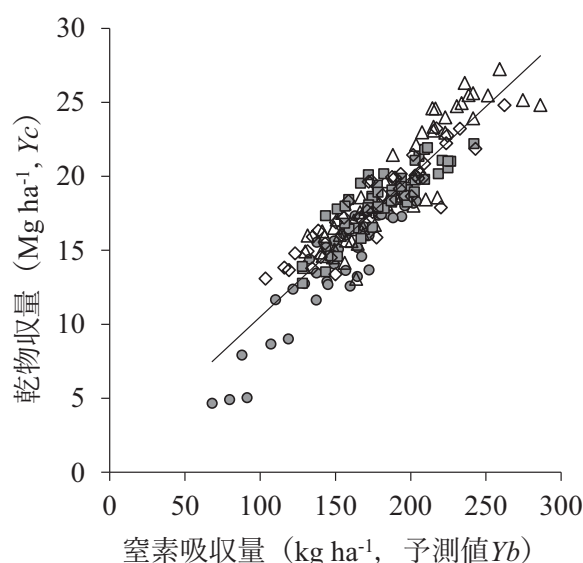
ここで、圃場最大収量を各圃場の栽培条件で適正な窒素施肥を行った場合に達成可能な目標収量と捉え、式 C の乾物収量 Yc に圃場最大収量 Xb_3 を代入すると ($Yc = Xb_3$)、式 C は次式 C' として表すことができる。

$$Xb_3 = 0.095Yb + 1.070 \text{ (式 C')}$$

式 B と式 C' において、任意の熱水抽出性窒素含量 (Xb_2) および目標収量 (Xb_3) を設定することにより、総窒素施肥量 (Xb_1) を計算することが可能となる。つまり、各圃場で窒素以外の制限要因を反映した目標収量を設定し、土壌分析により熱水抽出性窒素含量を評価すれば、必要な施肥窒素量を求めることが可能となる。仮に、熱水抽出性窒素含量を $10 \sim 130 \text{ mg kg}^{-1}$ 、目標収量を北海道施肥標準 (北海道農政部, 2010) で示されている基準収量の水準 ($13 \sim 22 \text{ Mg ha}^{-1}$ 、総体乾物率を 30 % と想定した乾物収量) の条件で、上記 2 式に基づき計算すると総窒素施肥量は $68 \sim 274 \text{ kg}$

ha^{-1} となる。

熱水抽出性窒素含量が低い圃場において、上記方法で求めた窒素施肥量は窒素吸収量を大きく超過することになるが、このような圃場での多肥栽培は持続的生産の観点から推奨しがたい。そこで、上記基準収量の上限 (乾物収量 22 Mg ha^{-1}) を得るとき、式 C' より想定される窒素吸収量 (216 kg ha^{-1}) を総窒素施肥量の上限とした。一方、トウモロコシに対する適正な作条基肥窒素量を検討した結果では (本章第 2 節)、土壌の窒素肥沃度が高い圃場 (供試圃場は本節の K5, 7, 8, 10; 熱水抽出性窒素含量 $127 \sim 151 \text{ mg kg}^{-1}$) でも基肥窒素量 80 kg ha^{-1} の有効性が確認されている。前述のように、熱水抽出性窒素含量が 130 mg kg^{-1} を超える圃場では、熱水抽出性窒素による窒素肥沃度評価の妥当性を確認するとともに、更なる減肥の余地を検討する必要があるが、現時点では過度な減肥による減収リスクを高めないため、熱水抽出性窒素含量に関わら

図Ⅱ -5 窒素吸収量予測値 Yb と乾物収量の関係

●, 根釧 (n=41); △, オホーツク (n=60); ■, 道央 (n=48); ◇, 十勝 (n=43).
 回帰直線 ($Yc = 0.095 Yb + 1.070$, $R^2 = 0.83$, $p < 0.001$) は、全地域のデータから作成した。

表Ⅱ -10 北海道の飼料用トウモロコシに対する収量水準と熱水抽出性窒素含量に対応した総窒素施肥量 (一部抜粋)

乾物収量 (Mg ha ⁻¹)	想定窒素吸収量 (kg ha ⁻¹)	熱水抽出性窒素含量 (mg kg ⁻¹)						
		40	50	60	70	80	90	100
13	130	170	160	150	130	120	110	100
14	140	180	160	150	140	130	120	110
15	150	180	170	160	150	140	130	120
16	160	190	180	170	160	150	140	130
17	170	200	190	180	170	160	140	130
18	180	210	200	190	180	160	150	140
19	190	220	210	190	180	170	160	150
20	200	220	210	200	190	180	170	160
21	210	*	220	210	200	190	180	170
22	220	*	*	220	210	200	190	170

乾物収量は、生産履歴や各地域の基準収量から想定される圃場ごとの目標収量。

* 計算上 220 kg⁻¹ を超えるが、上限値 (220 kg ha⁻¹) を適用する。

ず窒素施肥量の下限を 80 kg ha⁻¹ とするのが妥当と考えられる。以上を踏まえ、総窒素施肥量、乾物収量および熱水抽出性窒素含量の関係を整理し、一部を抜粋すると表Ⅱ -10 の通りとなる。

表Ⅱ -10 の適用場面では、当該圃場における過去の平均的な収量水準 (実績収量) に対応した窒素施肥量推奨値 (推奨施肥量) を、過去の窒素施肥量 (実績施肥量) と比較することが重要である。すなわち、実績施肥量が推奨施肥量より多い場合、収量水準に対して窒素過剰と考えられるので窒素を減肥するのが妥当である。一方、実績施肥量が推奨施肥量より少ない場合、窒素の増肥による増収を期待できる。すなわち、表Ⅱ -6 および表Ⅱ -7 に示した窒素用量試験の結果から推

察されるように、窒素不足条件で栽培したときの窒素含有率は適正な窒素施肥条件よりも低いと考えられるため、窒素増肥により窒素栄養状態が改善し増収すると考えられる。なお、生産履歴を把握できない場合には、まずは地域の基準収量 (北海道農政部, 2010) をあてはめるのが適当である。

子実用トウモロコシを対象とした富沢ら (2017) の報告では、目標収量、想定窒素吸収量、地域および土壌型の適用範囲を詳細に設定し窒素施肥基準を提案したのに対し、本研究ではこれらを設定せず北海道内の多様な条件で適用可能な基準の策定を目指した。富沢ら (2017) における低地土および台地土の基準と本基準の総窒素施肥量を比較すると (想定窒素吸収量 200

kg ha⁻¹の条件)、本基準は富沢ら(2017)の基準より10～20 kg ha⁻¹多いものの両者の水準は近かった。一方、富沢ら(2017)における火山性土の基準と本基準の総窒素施肥量を比較すると(想定窒素吸収量180 kg ha⁻¹の条件)、両者の間には最大で50 kg ha⁻¹の差があり、その多寡も熱水抽出性窒素含量の水準により異なった。富沢ら(2017)の報告では、窒素吸収量の推定方法が土壌型により異なることや、火山性土で施肥対応可能な条件が熱水抽出性窒素含量70 mg kg⁻¹未満の圃場に限定されていることが原因と考えられる。

以上より、北海道でのトウモロコシ栽培において、収量水準と熱水抽出性窒素含量から判断される窒素施肥量の推奨値を提案した。ただし、上記の工程で求める窒素施肥量は、限られた圃場試験の供試データに依存すること、また重回帰分析での目的変数(窒素吸収量)と説明変数(総窒素施肥量、熱水抽出性窒素含量および圃場最大収量)の関係は、各々線形であることを前提としているので(奥野ら, 1971)、今後は多様な条件で本基準の適用性を検証が必要である。

II-4 まとめ

分施肥系を前提としたトウモロコシの適正な窒素施肥配分および収量水準から判断される必要な窒素施肥

量を検討した。

施肥配分は、従来の考え方と同様に基肥重点型の窒素施肥を推奨し、その際の作条基肥窒素量の適正な水準は地域によらず80～100 kg ha⁻¹とすることが妥当であった。窒素肥沃度が高い条件における窒素施肥については、作条基肥窒素量を80 kg ha⁻¹以上とするよりも分施する方が増収に寄与しやすいと考えられた。

気象および土壌型が異なる地域を対象に窒素用量試験を実施した結果、乾物収量あたりの窒素吸収量に地域間差は認められなかったことから、地域によらず収量水準に対応した目標窒素吸収量を設定することが可能と判断した。また、土壌の窒素肥沃度評価指標として熱水抽出性窒素の適用が可能と考えられた。各処理区の窒素吸収量は、総窒素施肥量、熱水抽出性窒素含量および各圃場の圃場最大収量(窒素用量試験での最大乾物収量)を説明変数とした重回帰式により説明できた。ここで、圃場最大収量を考慮する理由は、施肥窒素利用率が窒素以外の要因で制限される収量水準の影響を受けるためである。また、各処理区の乾物収量は、上記の重回帰式から求めた窒素吸収量を説明変数とする一次回帰式で表すことができた。これら2式に、任意の乾物収量(目標収量)および熱水抽出性窒素含量を代入することにより、収量水準と窒素肥沃度に対応して必要な総窒素施肥量を算出することができる。

第三章 アーバスキュラー菌根菌（AM 菌）の機能を活用したリン酸施肥

Ⅲ－１ はじめに

北海道でのトウモロコシ栽培における標準的な施肥量は、窒素（N）、リン酸（ P_2O_5 ）、カリ（ K_2O ）の順にそれぞれ 130 ～ 190, 160 ～ 200, 80 ～ 140 kg ha⁻¹ である（北海道農政部, 2010）。リン酸施肥量はこの肥料三要素の中で最も多く、土壌診断に基づき施肥を行った場合には、最大で 300 kg- P_2O_5 ha⁻¹ になることもある。一般に、畑作物に対する施肥リン酸の利用率は 10 ～ 30 % であり（高井ら, 1976）、北海道におけるトウモロコシの地上部リン吸収量が 69 kg- P_2O_5 ha⁻¹ 程度であることを考えると（櫛引, 1979）、効率的なリン酸施肥技術の開発が必要である。一方、トウモロコシを栽培する前年に AM 菌の宿主作物を栽培し、その後作トウモロコシに土着 AM 菌が感染しやすい条件ではリン酸肥料を削減できる可能性がある（唐澤, 2004）。

そこで、第三章では、土着 AM 菌の機能を活用したリン酸減肥栽培技術を検討した。Ⅲ－２節では、夏季は冷涼湿潤、冬季は寒冷少雪で土壌凍結が発達し、北海道の中でも特異な気象条件に立地する根釧地域において、AM 菌感染によるトウモロコシの生育促進効果を確認した。Ⅲ－３節では、前節の結果を受け、AM 菌の効果を期待できるトウモロコシ連作畑を対象に、土壌型、播種床造成法、リン酸肥沃度などが多様な条件で施肥試験を行い、AM 菌の機能によるリン酸減肥可能性を明らかにした。

Ⅲ－２ AM 菌宿主作物の栽培が後作トウモロコシに及ぼす影響

Ⅲ－２－１ 試験方法

１）供試圃場

供試圃場は、北海道標津郡中標津町の生産者圃場（現地 A, B）と北海道立総合研究機構根釧農業試験場（現酪農試験場；以下、酪農試；農試 A, B, C, D）の計 6 圃場とした。土壌は、いずれも普通黒ボク土（農耕地土壌分類委員会, 1995）である。試験年は、現地 A では 2009 年、現地 B と農試 A では 2010 年、農試 B, C, D では 2011 年とし、その前年に各圃場を分割して、AM 菌の宿主作物と非宿主作物を栽培する前作物の処理を設けた。試験前年に供試した前作物は、宿主作物としてトウモロコシ、非宿主作物としてテンサイ

（*Beta vulgaris* L.; 現地 A, B）およびシロガラシ（*Sinapis alba* L.; 農試 A, B, C, D）である（表Ⅲ -1）。

前作物に対する年間施肥量は、前作物の種類や土壌肥沃度に関わらず、概ねトウモロコシの標準的な施肥量とした。すなわち、現地 A および B ではトウモロコシおよびテンサイともに生産者の慣行施肥量、農試 A, B, C, D では、トウモロコシは「北海道施肥ガイド 2010」（北海道農政部, 2010）、シロガラシは「北海道緑肥作物等栽培利用指針（改訂版）」（北海道農政部, 2004）に準じて、両作物ともに窒素（N）、リン酸（ P_2O_5 ）、カリ（ K_2O ）、苦土（MgO）の順にそれぞれ 120, 216, 132, 60 kg ha⁻¹ とした。なお、シロガラシの年間施肥量は、年 2 作の合計量である。前作物の収穫部位は、テンサイでは根部、シロガラシでは全地上部、トウモロコシでは刈高約 15 cm 以上の部位とし、これらを圃場外に持ち出した後、他の部位は圃場にすき込んだ。これら供試圃場における試験年早春（施肥前）の土壌化学性は表Ⅲ -1 の通りである。

２）栽培概要

試験年のトウモロコシには、試験当時に当地域において奨励されていた早生品種（北海道農政部, 2018）を供し、現地 A では 1 畦ごとに交互に品種を変える交互条播（林ら, 2008）で「クウィス」および「ぱびりか」、現地 B では「クウィス」、試 A では「ぱびりか」、農試 B, C, D では「たちびりか」とした。トウモロコシの播種床は、いずれの圃場についても、プラウ耕を省略し、ディスクハロ（現地 A, B）またはロータリハロ（農試 A, B, C, D）による簡易耕（林ら, 2011）で造成した。設定播種密度は 99,200 本 ha⁻¹（畦間 56 cm）、作付期間は試験年や供試圃場により異なるが、5 月下旬から 6 月上旬に播種し、9 月下旬から 10 月上旬に収穫した。

３）施肥処理

リン酸施肥は、重過リン酸石灰を用いて 0 ～ 300 kg- P_2O_5 ha⁻¹ の範囲で 4 ～ 6 水準で施用した。リン酸以外の肥料成分は、北海道施肥標準（北海道農政部, 2010）に準じ、硫酸アンモニウム、硫酸カリウム、硫酸マグネシウムを用いて、窒素（N）、カリ（ K_2O ）、苦土（MgO）として各々 130, 140, 40 kg ha⁻¹ を施用した。施肥位置は農試 D では作条（窒素のみ作条の基肥 80 kg ha⁻¹ と、表面全面全層の分施 50 kg ha⁻¹ に分

表Ⅲ-1 供試圃場の土壌化学性とAM菌胞子密度(施肥前, 0~20 cm)

試験年	圃場	前作物	pH (H ₂ O)	有効態 リン酸 ¹⁾	交換性塩基 ¹⁾			リン酸 吸収係数 ¹⁾ (mg 100g ⁻¹)	AM 菌 胞子密度 (個 10g ⁻¹)
					カリ	苦土	石灰		
					(mg kg ⁻¹)				
2009	現地 A	トウモロコシ	5.9	63	312	259	1,770	1,650	100
		テンサイ	6.4	118	300	331	3,425	1,560	93
		t 検定 ²⁾	**	**	ns	ns	**	ns	ns
2010	現地 B	トウモロコシ	5.8	96	199	360	1,782	1,630	85
		テンサイ	6.2	93	182	272	2,621	1,570	75
		t 検定	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns
	農試 A	トウモロコシ	5.8	45	92	113	1,305	1,590	194
		シロガラシ	5.7	50	114	91	1,188	1,610	80
		t 検定	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*
2011	農試 B	トウモロコシ	6.5	86	184	345	3,068	1,590	85
		シロガラシ	6.6	94	241	375	3,344	1,630	75
		t 検定	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	農試 C	トウモロコシ	6.2	249	160	283	2,180	1,550	97
		シロガラシ	6.2	193		172	285	2,250	
		t 検定	ns	ns		ns	ns	ns	
	農試 D	トウモロコシ	6.5	107		185	344	3,145	
		シロガラシ	6.5	88		199	311	2,967	
		t 検定	ns	ns		ns	ns	ns	

1) リン酸, カリ, 苦土および石灰は, 各々 P₂O₅, K₂O, MgO および CaO あたりの値.

2) **, * は, 各々危険率 1%, 5% 水準で前作物の処理間に有意差があることを, ns は危険率 5% 水準で有意差がないことを示す. 各前作跡地における n 数は, 現地 A および農試 A は 4 点, 他は 3 点.

けて施用), 他 5 圃場では全面全層(全成分について全量基肥)とした.

試験区の 1 区面積は, 現地 A および B で 30 m², 農試 A, B, C および D で 25 m² であり, 各処理区 3~4 反復とした.

4) 土壌および作物体の調査・分析方法

各試験年の早春(施肥前)に, 各前作物跡地より 3~4 地点の土壌(深さ 0~20 cm)を採取し, 前章と同様に前処理を行い pH(H₂O), 有効態リン酸含量, 交換性カリ・苦土・石灰含量およびリン酸吸収係数を測定した(土壌環境分析法編集委員会, 1997). また, 未風乾の生土試料(2 mm 篩を通過した土壌)については, 湿式篩別法(小島・大場, 2006)により AM 菌の胞子を回収し, 胞子密度を測定した. ただし, ショ糖による胞子画分の濃縮では, 一般的な密度勾配遠心に替えて, 水で沈殿し 50% ショ糖水溶液で浮遊する画分を胞子画分とした.

トウモロコシ作物体は, 生育初期(7月中旬; 播種後 41~55 日目, 7~9 葉期)と収穫期(糊熟期から黄熟期; 総体乾物率 23~36%)に採取した. すなわち, 生育初期は, 各試験区から中庸な 8 個体のトウモロコシについて地上部全体と根部に分けて採取し, 収穫期は, 各試験区から中庸なトウモロコシ(15~20 個体)を地表から約 15 cm の高さで刈取り, 茎葉部と雌穂部

に分けて採取した. 採取した地上部の作物体は生重量を測定した後, 70℃で 3 日間(生育初期の全地上部, 収穫期の茎葉部)または 5 日間(収穫期の雌穂部)乾燥後に重量を測定し乾物率を求め, 地上部乾物重(生育初期; g 個体⁻¹)および乾物収量(収穫期; Mg ha⁻¹)を算出した. 生育初期に採取した根部は水洗後, AM 菌感染率を測定するための試料とした. 生育初期に採取した地上部の粉碎試料は, 水野・南(1980)の方法に基づき硫酸と過酸化水素で湿式分解した後, 分解液中のリン含有率をバナドモリブデン酸による比色法(日本土壌協会, 2010)にて測定した. リン吸収量(mg-P 個体⁻¹)はリン含有率と地上部乾物重を乗じて求めた. また, 生育初期におけるトウモロコシ根部について, 大場ら(2006)の方法に準じて AM 菌感染率を測定した. すなわち, 採取した根部を水洗し 5 mm 程度に刻んだ後, その一部を 10% 水酸化カリウム溶液(w/v)中で加熱することにより脱色し, 2% 塩酸(v/v)で中和, 0.05% トリパンプブルー溶液(w/v)で染色後, ラクトグリセロール溶液に保存した. このように染色したサンプルをスライドガラスに並べ, AM 菌の各構造物(内生菌糸, 樹枝状体, 嚢状体)を顕微鏡で観察した. なお, AM 菌感染率は, 観察した視野の中心と根の総交点数(100~150)に対して, 内生菌糸, 樹枝状体, 嚢状体のいずれかの構造物と視野中心との交点数の割合を計算することにより評価した.

5) 統計解析

土壌化学性と AM 菌胞子密度は、前作物処理間で t 検定を行った。トウモロコシの生育初期における AM 菌感染率、地上部乾物重およびリン含有率、収穫期における乾物収量は、前作物とリン酸施肥を要因とする二元配置分散分析を行った。また、各前作物の処理内において、上記の調査項目を対象として、リン酸施肥の処理間で Tukey-Kramer 法による多重比較検定を行った。

これらの統計処理には、統計ソフト「JMP5.1」(SAS Institute Japan) を用い、危険率 5 % 未満のときに統計的に有意差が認められるとした。

Ⅲ-2-2 結果

前作物の処理後（試験年春）の各圃場における有効態リン酸含量は、農試 C で北海道の土壌診断基準である $100 \sim 300 \text{ mg-P}_2\text{O}_5 \text{ kg}^{-1}$ (北海道農政部, 2010) の中央から上限値付近、他 5 圃場は同基準の下限値付近またはそれ未満の水準であった (表Ⅲ-1)。現地 A において、トウモロコシ跡地における有効態リン酸含量は、非宿主作物跡地より有意に低かったが ($p<0.01$)、他 5 圃場では前作物の処理による有効態リン酸含量の違いは認められなかった。現地 A における $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ および交換性 CaO 含量は、トウモロコシ跡地でテンサイ跡地より有意に低かったが ($p<0.01$)、いずれの作物跡地でも土壌診断基準の範囲内であった。また、現地 B におけるリン酸吸収係数は、トウモロコシ跡地でテンサイ跡地より有意に高かったが ($p<0.05$)、その差はわずかであった。試験年春の各圃場における土壌の AM 菌胞子密度は、農試 A においてトウモロコシ跡地でシロガラシ跡地より有意に高かった ($p<0.05$)。一方、他 5 圃場については、前作物の処理による差異は明瞭ではなかった (表Ⅲ-1)。

土壌の有効態リン酸含量が高まると、AM 菌感染率は低下することが知られているが (野中・吉田, 1987)、トウモロコシの AM 菌感染率は、有効態リン酸含量の水準が異なるすべての圃場において、トウモロコシ跡地 (42 ~ 95 %) で非宿主作物跡地 (15 ~ 70 %) より有意に高かった ($p<0.01$, 表Ⅲ-2)。特に、農試 D では、他の圃場と異なり作条施肥としたため、トウモロコシの根周辺におけるリン酸濃度は高いと考えられたが、トウモロコシ跡地における AM 菌感染率 (42 ~ 72 %) は非宿主作物跡地 (15 ~ 29 %) よりも高かった。一方、リン酸施肥の処理がトウモロコシの AM 菌感染率に及ぼす影響は、いずれの作物跡地において

も認められず、またリン酸施肥量の多寡と AM 菌感染率の高低との間には一定の傾向は認められなかった (表Ⅲ-2)。

生育初期におけるトウモロコシの地上部乾物重は、播種後日数および各年の気象条件により、試験年次間で大きな差があった (表Ⅲ-2)。すなわち、6 ~ 7 月の積算降水量および積算日照時間の平年比が、それぞれ 214 および 74 であり、播種後に多雨・日照不足で推移した 2009 年の現地 A における地上部乾物重 (1 個体当たり $0.9 \sim 1.8 \text{ g}$) は、同期間の積算気温が平年より高かった 2010 年 (平年比 120) の現地 B および農試 A における地上部乾物重 (同 $6.2 \sim 17.7 \text{ g}$) と比較して著しく低かった。しかし、生育初期における地上部乾物重は、いずれの圃場でもトウモロコシ跡地で非宿主作物跡地より有意に高かった ($p<0.01$, 表Ⅲ-2)。また、トウモロコシの生育量は、現地 B, 農試 A, B, D において、リン酸施肥による有意な増加効果が認められた ($p<0.01$)。このとき、リン酸施肥水準が最も高い処理区に対するリン酸無施肥区の地上部乾物重の比率は、トウモロコシ跡地 (71 ~ 85 %) で非宿主作物跡地 (43 ~ 60 %) より大きな傾向が認められた。しかし、前作物とリン酸施肥の処理には、危険率 5 % 水準で有意な交互作用は認められず、リン酸施肥反応が前作物の処理によって異なるか否かについては、この時点では不明確であった。

トウモロコシの地上部リン含有率は、農試 A を除いてトウモロコシ跡地で非宿主作物跡地より有意に高かった ($p<0.01$, 表Ⅲ-2)。また、地上部リン吸収量は、すべての圃場においてトウモロコシ跡地で非宿主作物跡地より高かった ($p<0.01$, データ省略)。一方、リン酸施肥の処理は、リン含有率に影響を与える場合 (農試 D, $p<0.01$) もあったが、危険率 5 % 水準で有意差の認められない圃場が多く、前作物の処理と比較してリン含有率に及ぼす影響は小さかった。

トウモロコシ跡地における収穫期の乾物収量は、現地 A および B, 農試 A において、非宿主作物跡地より有意に高かった ($p<0.01$, 表Ⅲ-2)。リン酸施肥の処理は、農試 C ($p<0.01$)、現地 B, 農試 A, 農試 D (以上, $p<0.05$) で有意差が認められたが、前作物とリン酸施肥の処理には、危険率 5 % 水準で有意な交互作用は認められなかった (表Ⅲ-2)。前作物およびリン酸施肥の処理の影響は、生育初期には明瞭に認められたが、収穫期には処理間差が縮小する傾向にあった。

表Ⅲ-2 前作試験における生育初期のAM菌感染率、地上部乾物重、リン含有率および乾物収量

試験年	圃場	リン酸施肥 (kg-P ₂ O ₅ ha ⁻¹)	生育初期							収穫期		
			AM菌感染率 (%)		地上部乾物重 (g 個体 ⁻¹)			リン含有率 (%, P)		乾物収量 (kg ha ⁻¹)		
			NH ¹⁾	H ¹⁾	NH ¹⁾	H ¹⁾	同左比 ²⁾	NH ¹⁾	H ¹⁾	NH ¹⁾	H ¹⁾	同左比 ²⁾
2009	現地 A	0	68	83	1.0	1.7	59	0.31	0.40	8.0	12.4	64
		100	66	87	0.9	1.7	55	0.29	0.39	9.1	11.4	80
		150	65	87	1.1	1.6	71	0.28	0.39	8.7	11.8	74
		200	62	86	1.4	1.8	76	0.33	0.41	9.4	11.6	82
	分散分析 ³⁾	前作物	**		**			**		**		
		リン酸施肥	ns		ns			ns		ns		
		交互作用	ns		ns			ns		ns		
2010	現地 B	0	67	95	6.2 b	15.0 b	41	0.28 ab	0.31	9.2 b	13.3	69
		160	70	87	9.6 ab	17.5 ab	55	0.26 b	0.33	10.7 ab	14.0	76
		200	65	92	10.3 ab	16.9 ab	61	0.29 a	0.31	11.7 ab	14.1	83
		240	63	84	9.9 ab	16.8 a	59	0.27 ab	0.31	11.8 ab	14.1	84
		30	64	87	12.1 a	17.7 a	68	0.29 a	0.32	13.1 a	14.6	90
	分散分析 ³⁾	前作物	**		**			**		**		
		リン酸施肥	ns		**			ns		*		
		交互作用	ns		ns			ns		ns		
	農試 A	0	43	58	6.2 c	11.5	54	0.31	0.30	12.7 b	14.4	88
		160	38	58	8.1 bc	14.1	58	0.31	0.30	13.3 ab	15.6	86
		200	47	64	9.8 ab	15.0	65	0.31	0.30	14.4 ab	15.6	93
		240	49	58	9.5 ab	15.7	60	0.29	0.31	14.1 ab	16.1	87
		300	41	64	10.4 a	15.5	67	0.28	0.30	14.8 a	16.0	92
	分散分析 ³⁾	前作物	**		**			ns		**		
		リン酸施肥	ns		**			ns		*		
		交互作用	ns		ns			ns		ns		
2011	農試 B	0	54	72	2.3	4.2	54	0.39	0.51	13.0	13.9	93
		120	47	68	3.2	5.3	59	0.40	0.52	12.9	14.4	90
		160	42	77	2.5	4.9	51	0.38	0.52	14.0	14.1	99
		200	50	68	4.2	5.1	82	0.48	0.53	14.4	14.2	101
		240	64	71	4.1	5.3	76	0.49	0.51	13.9	14.4	97
		300	57	72	4.3	5.3	81	0.43	0.50	13.8	14.4	95
	分散分析 ³⁾	前作物	**		**			**		ns		
		リン酸施肥	ns		**			ns		ns		
		交互作用	ns		ns			ns		ns		
	農試 C	0	45	68	5.0	7.1	71	0.42	0.57	13.8 b	15.0	92
		80	44	75	5.0	7.2	69	0.42	0.55	14.5 ab	14.5	100
		120	46	64	6.6	8.2	81	0.51	0.55	14.4 ab	15.1	96
		160	36	72	7.4	8.1	92	0.44	0.51	15.7 ab	15.2	103
		200	43	64	6.9	7.3	94	0.43	0.50	14.7 ab	14.9	99
		240	35	64	7.6	7.9	96	0.47	0.57	16.0 a	15.7	102
	分散分析 ³⁾	前作物	**		**			**		ns		
		リン酸施肥	ns		ns			ns		**		
		交互作用	ns		ns			ns		ns		
	農試 D	0	18	62	2.4 c	4.1 b	59	0.33 c	0.45 c	14.6	15.3	95
		120	15	72	3.9 bc	5.4 ab	72	0.43 bc	0.50 bc	17.1	16.5	103
		160	21	42	4.8 ab	5.5 ab	88	0.47 ab	0.54 abc	16.6	16.2	103
		200	28	50	5.5 ab	6.3 a	88	0.54 a	0.59 ab	16.8	16.8	100
		240	29	59	5.9 a	5.9 ab	100	0.54 a	0.55 ab	17.0	16.6	102
		300	19	51	5.6 ab	5.8 ab	96	0.53 a	0.60 a	16.9	17.3	98
	分散分析 ³⁾	前作物	**		**			**		ns		
		リン酸施肥	ns		**			**		*		
		交互作用	ns		ns			ns		ns		

1) NH：非宿主作物（テンサイまたはシロガラシ）跡地，H：トウモロコシ跡地。

2) 同左比は，H に対する NH の比率（%）。

3) **，* は，各々危険率 1%，5% 水準で有意差があることを，ns は危険率 5% 水準で有意差がないことを示す。
異なるアルファベットは，各前作処理内でリン酸施肥の処理間で有意差があることを示す（Tukey-Kramer, p<0.05）。

Ⅲ-2-3 考察

北海道の主な農耕期間（5～10月）における気象条件について、当地域の中標津町と北海道内で既にAM菌の効果が確認されている札幌市とを比較すると（Arihara and Karasawa, 2000；唐澤, 2004；Oka et al., 2010）、中標津町および札幌市でそれぞれ、積算気温は2,424および3,117℃、積算降水量は792および550 mm、積算日照時間は798および1,034時間であり、両地域の気象条件は大きく異なる。

AM菌胞子の発芽は15℃以下では抑制され（小林, 1988）、AM菌の効果は土壌水分が低い状態でより大きいこと（Karasawa et al., 2000）から判断すると、気温が低く降水量が多い当地域では、AM菌の効果は発現しにくい可能性がある。一方で、AM菌は低温条件においても宿主作物のリン吸収を促進すること（Karasawa et al., 2012）、AM菌叢は土壌型により異なること（Oehl et al., 2010）、宿主作物へのAM菌の感染力の温度依存性はAM菌の種類により異なること（Grey, 1991）が報告されている。また、臼木・山本（2003）は、播種直後が梅雨時期に相当し降水量の多いつくば市において、AM菌の効果によりトウモロコシおよびダイズの生育が促進されることを認めた。このように、作物生育に対するAM菌の効果については、気象および土壌などの環境条件により様々な見解があるので、生産現場でAM菌の機能を活用した肥培管理を行うためには、各地域でAM菌の効果を検討することが重要である。

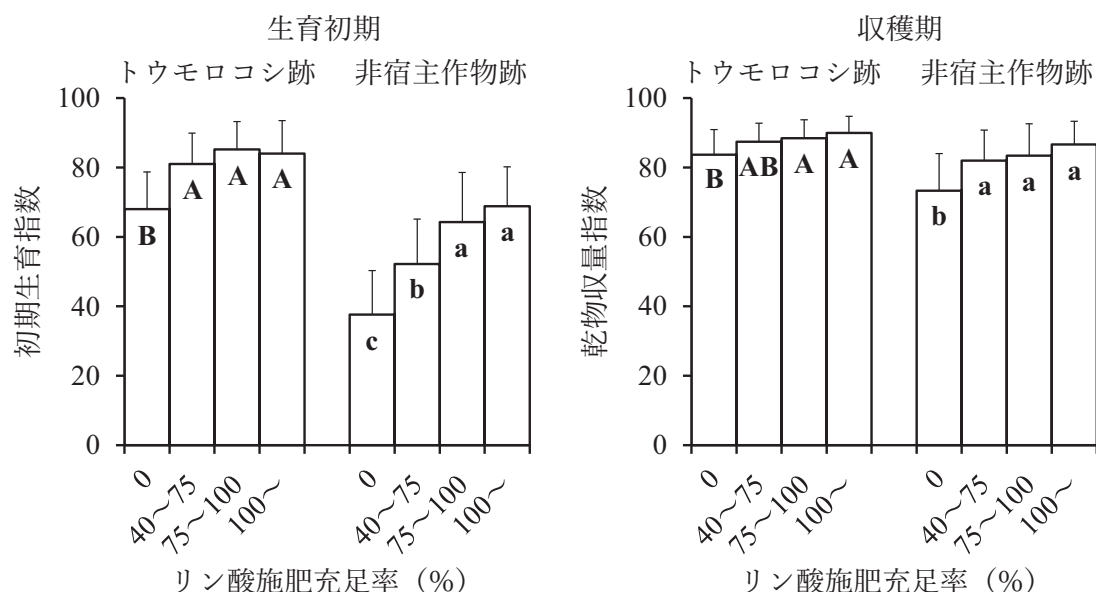
本研究では、根釧地域の気象、有効態リン酸含量、施肥位置が異なる圃場試験の結果を整理したが、トウモロコシのAM菌感染率および生育量は、いずれの圃場でもトウモロコシ跡地で非宿主作物跡地より高かった。この結果から、既報（Arihara and Karasawa, 2000；臼木・山本, 2003；唐澤, 2004；Oka et al., 2010）と同様に、AM菌の宿主作物であるトウモロコシを栽培することにより、土着のAM菌が感染しやすくなり、AM菌を介したリン吸収の促進がもたらされたと考えられた。また、本研究には、有効態リン酸含量がトウモロコシ跡地（63 mg-P₂O₅ kg⁻¹）で非宿主作物跡地（118 mg-P₂O₅ kg⁻¹）より低く、また播種後の降水量が顕著に多かったため生育不良年であった現地Aも含まれる。以上のことから、当地域においても、トウモロコシと共生関係を成立させやすい土着のAM菌が存在し、トウモロコシを前作物とすることにより、後作トウモロコシに対してAM菌の効果が期待できると考えられた。一方で、各圃場のAM菌胞子密度

は、農試A圃場を除く他5圃場において、前作物の処理間で有意差（ $p<0.05$ ）は認められず、既報（臼木・山本, 2003；唐澤, 2004）とは異なる傾向を示した。AM菌の主要な感染源は、AM菌の種類によって異なり（Klironomos and Hart, 2002）、AM菌胞子の他、前作物の栽培時に形成されたAM菌の菌糸（Evans and Miller, 1990）やAM菌が感染した根の断片（Tommerup and Abbott, 1981）によっても生じる。本研究において、AM菌胞子密度が前作物の処理間で有意差が無いにも関わらず、後作トウモロコシのAM菌感染率および生育量が前作物の処理間で有意に異なった理由は、AM菌の菌糸や前作物の根等、AM菌胞子以外の要因が影響した可能性が考えられる。しかし、これらの原因を明らかにするためには、AM菌の菌糸量の測定やAM菌の菌相の解析が必要である。

本研究で確認されたAM菌の生育促進効果は、リン吸収の促進によるものと考えられるので、トウモロコシに対するリン酸施肥効果の影響度合は、前作物の種類により異なるという仮説が成り立つ。しかし、試験の結果、表Ⅲ-2のように、前作物の効果とリン酸施肥反応には有意な交互作用が認められず、上記の仮説を証明できなかった。リン酸施肥反応は、土壌中の有効態リン酸含量の水準に依存する。そこで、新たに各供試圃場における土壌の有効態リン酸含量を考慮し、従来のリン酸施肥基準との関係から次のような検討を試みた。

従来の施肥基準（北海道農政部, 2010）では、圃場の有効態リン酸含量の多寡に応じてリン酸施肥量を決定することを奨励している。すなわち、有効態リン酸含量（mg-P₂O₅ kg⁻¹）を50未満、50～100、100～300、300～600、600以上の5つに区分し、各々に対して施肥標準量（根釧地域の黒ボク土では200 kg-P₂O₅ ha⁻¹）に、150、130、100、80、60%を乗じることによりリン酸施肥量を決定する。そこで、本研究では、「北海道施肥ガイド2010」（北海道農政部, 2010）に従い、各圃場における有効態リン酸含量に基づいて求めたリン酸施肥量に対する、各試験区のリン酸施肥量の割合を「リン酸施肥充足率」と定義した。なお、生育量は圃場によりバラツキがあったので、各圃場で調査時に最大となった試験区の地上部乾物重（生育初期）または乾物収量（収穫期）を100とした相対値で検討した。

図Ⅲ-1に、リン酸施肥充足率が0、40～75、75～100、100以上の範囲内に含まれる現地B、農試A、B、CおよびDの各試験データについて、リン酸施肥充



図Ⅲ-1 各リン酸施肥充足率区分におけるトウモロコシの初期生育指数と乾物収量指数

現地 B, 農試 A, B, C および D のデータを平均して示した。

各指数は、調査時に各圃場で最大となった試験区を 100 とした相対値。異なるアルファベット (大文字, トウモロコシ跡; 小文字, 非宿主作物跡) は、同一前作物の処理内において有意差のあることを示す (Tukey-Kramer, $p < 0.05$)。エラーバーは、窒素吸収量の標準偏差。

足率とトウモロコシの初期生育量および収穫期乾物収量の関係を示した。なお、ここでは、年次や圃場が異なる上記 5 圃場のデータを平均して解析に用いた。非宿主作物跡地におけるトウモロコシの初期生育量は、リン酸施肥充足率の低下にともなって有意に減少した ($p < 0.05$)。これは、非宿主作物跡地におけるトウモロコシ栽培では、従来のリン酸施肥基準が概ね妥当であることを示唆している。一方、トウモロコシ跡地においては、リン酸施肥充足率が低下しても、初期生育量の減少割合は小さく、リン酸施肥充足率 40 % 以上の区分では、初期生育量に有意差は認められなかった ($p < 0.05$)。前述のように、トウモロコシの AM 菌感染率は、トウモロコシ跡地で非宿主作物跡地より高いことから、トウモロコシ跡地では AM 菌によるリン吸収促進効果のため、リン酸減肥の影響を受けづらいと考えられた。

収穫期における乾物収量は、初期生育量と同様の傾向が見られたが、前作物およびリン酸施肥の影響は小さかった。この傾向は唐澤ら (2001) の報告と一致し、その理由は次のように考えられる。すなわち、トウモロコシの生育とともに土壤中の体積当たりの根量が増加すること (米山ら, 1990)、地温が上昇すること (岡島・石渡, 1979) により、作物根自身がリンを吸収しやすくなり、リン酸施肥や AM 菌を介したリン吸収

の効果は、みかけ上小さくなったと考えられた。また、一般に、リン酸欠乏が収穫期の生育量に与える影響は、生育初期の生育抑制程度と生育期間によって決定されるため (但野, 1993)、生育期間が約 4 ヶ月間と長いトウモロコシでは、収穫期の乾物収量に及ぼす AM 菌の効果が小さくなる場合があると考えられた。

以上のように、トウモロコシ跡地における後作トウモロコシの生育は、AM 菌の感染率が高まることにより、特に生育初期で非宿主作物跡地より優った。また、従来のリン酸施肥基準から減肥した場合にも、AM 菌の効果により生育量の低下は小さいことから、AM 菌を活用した効率的なリン酸施肥技術確立の可能性が高いと考えられる。本節では、いずれの圃場でも AM 菌の効果が現れやすいとされる簡易耕 (Miller, 2000; 臼木ら, 2007) により播種床を造成したことや、リン酸吸収係数が高く有効態リン酸含量が高まりにくい黒ボク土 (小原・中井, 2004) を供試したことが、AM 菌の効果を発現させやすくした可能性も考えられる。リン酸施肥技術を確立するためには、トウモロコシなど AM 菌の宿主作物跡地において、耕起法および土壌型などの要因が、リン酸施肥とトウモロコシ生育との関係に及ぼす影響を検討するとともに、収量を低下させないためのリン酸施肥量を明らかにする必要がある。

Ⅲ－３ AM 菌の効果を考慮したリン酸施肥 対応

Ⅲ－３－１ 試験方法

１）供試圃場

試験は2012年（圃場A, BおよびC）および2013年（圃場D, E, F, G, H, IおよびJ）に行い、試験年におけるトウモロコシ連作年数は2～9年目であった（表Ⅲ-3）。

試験場所は、北海道標津郡中標津町（圃場AおよびF）、厚岸郡厚岸町（圃場B, C, G, H, IおよびJ）、野付郡別海町（圃場DおよびE）の生産者圃場である（表Ⅲ-3）。供試圃場の土壌型は、圃場A, D, EおよびFは腐植質火山放出物未熟土、他6圃場は厚層黒ボク土である（農耕地土壌分類委員会, 1995）。供試圃場の播種床は、プラウ耕または表層攪拌により耕起した後、碎土および整地を行って造成した。したがって、耕起深は圃場によって異なる。

供試圃場の有効態リン酸含量（ $\text{mg-P}_2\text{O}_5 \text{ kg}^{-1}$ ）は、圃場J（426）では「北海道施肥ガイド2010」（北海道農政部, 2010）における土壌診断基準値（100～300）より高かったが、他9圃場（101～168）では同基準値の範囲内であった（表Ⅲ-3）。土壌のリン酸吸収係数（ $\text{mg-P}_2\text{O}_5 \text{ 100 g}^{-1}$ ）は、腐植質火山放出物未熟土で910～1,190、厚層黒ボク土で1,710～2,010であった。また、土壌のpHおよび交換性塩基含量については、同基準値（pH, 5.5～6.5；交換性カリ, 150～300 $\text{mg-K}_2\text{O kg}^{-1}$ ；交換性苦土, 250～450 mg-MgO kg^{-1} ；交換性石灰, 粒径により異なるが1,000～3,500

mg-CaO kg^{-1} ）の範囲をわずかに外れる圃場もあったが、これらの土壌化学性が生育の制限因子になる可能性は低いと考えられた。

２）栽培概要

試験に供したトウモロコシ品種は、試験当時に当地域で奨励されていた早生品種である「たちぴりか」（2012年）および「ソリード」（2013年）とした（北海道農政部, 2018）。設定播種密度は約82,000～83,000本 ha^{-1} （畦間は75cm（2012年）、72cm（2013年））とした。作付期間は試験年や供試圃場により異なるが、5月下旬から6月上旬に播種し、9月下旬から10月上旬に収穫した。

試験年の栽培期間（6月から9月）における中標津の積算日平均気温および降水量は、2012年は2,026℃および363mm、2013年は1,973℃および518mmであり、平年値（1873℃および561mm）よりも、日平均気温は高く、降水量は少なかった。この傾向は、他の試験地においても同様であった。

３）施肥処理

リン酸施肥量は、作条および全面全層施肥の合計量として過リン酸石灰を用いて0～300 $\text{kg-P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ の範囲で4～6水準を設けた。各々の施肥配分は表Ⅲ-4に示した。リン酸以外の肥料成分は北海道施肥標準（北海道農政部, 2010）に準じ、基肥は硫酸アンモニウム、硫酸カリウム、硫酸マグネシウムを用いて、作条で窒素（N）、カリ（ K_2O ）、苦土（ MgO ）として、各々80, 140, 40 kg ha^{-1} を施用した。さらに、分施を基

表Ⅲ-3 供試圃場のトウモロコシ連作年数、土壌型、播種床造成法および土壌化学性

試験年	圃場	トウモロコシ 連作年数 (年)	土壌型	播種床造成法 ¹⁾		pH (H ₂ O)	有効態 リン酸 ²⁾	交換性塩基 ²⁾			リン酸 吸収係数 ²⁾ (mg 100g ⁻¹)
				プラウ耕 (P)	表層攪拌			カリ	苦土	石灰	
2012	A	3	腐植質火山放出物未熟土	+	PH,RH	6.2	131	139	125	1,036	910
	B	6	厚層黒ボク土	+	PH,RH	6.4	168	560	536	3,399	2,010
	C	9	厚層黒ボク土	+	PH,RH	6.2	151	348	329	2,458	1,950
2013	D	5	腐植質火山放出物未熟土	+	DH,RH	5.7	153	197	97	895	1,160
	E	5	腐植質火山放出物未熟土	—	DH,RH	5.7	149	194	99	939	1,190
	F	4	腐植質火山放出物未熟土	+	PH,RH	5.7	139	234	187	1,165	1,050
	G	2	厚層黒ボク土	+	RH	5.8	102	256	247	1,525	1,830
	H	2	厚層黒ボク土	—	RH	5.9	101	279	235	1,506	1,820
	I	9	厚層黒ボク土	+	RH	6.1	142	334	337	2,315	1,920
	J	4	厚層黒ボク土	+	RH	6.8	426	667	866	4,767	1,710

1) 播種床造成法は、試験前年の収穫後から試験当年播種までの播種床造成工程。P, プラウ; PH, パワーハロ; RH, ロータリハロ; DH, ディスクハロ。

2) リン酸, カリ, 苦土および石灰は、各々 P_2O_5 , K_2O , MgO および CaO あたりの値。土壌化学性の分析値は、各試験区の平均値。対照区のリン酸施肥量 ($\text{kg-P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$) は土壌診断に基づく施肥対応を行い、圃場Jは160、その他9圃場は200（北海道農政部, 2010）。

本とする窒素は、4 葉期に尿素を用いて 50 kg-N ha^{-1} を全面に表面施用した。なお、各圃場において、土壌診断に基づく施肥対応（北海道農政部，2010）を行った場合のリン酸施肥量（ $\text{kg-P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ ）は、有効態リン酸含量が土壌診断基準値より高い圃場 J では 160、有効態リン酸含量が同基準値の範囲内である他 9 圃場では 200 であり（表Ⅲ -3）、これらのリン酸施肥区を各圃場の対照区とした。

試験区の 1 区面積は、 75 m^2 （2012 年）または 46 m^2 （2013 年）とし、各処理区 3 反復を設けた。

4）土壌および作物体の採取・分析方法

土壌は、試験年の早春（施肥前）に、各試験区より 3 地点ずつ（深さ 0 ～ 20 cm）採取し、前節と同様の方法で前処理および分析を行った。

トウモロコシ作物体は、生育初期（7 月中旬、播種後 38 ～ 48 日目、6 ～ 9 葉期）および収穫期（糊熟期から黄熟期；総体乾物率 20 ～ 30 %）に調査した。生育初期は各試験区から生育中庸な 8 個体（2 個体×4 畦）について、地上部と根部を分けて採取し、前節と同様に前処理を行い、AM 菌感染率、地上部の生重量、乾物重量およびリン吸収量を算出した。収穫期は、各試験区から生育中庸なトウモロコシ地上部（6 個体×4 畦の 24 個体（2012 年）、4 個体×3 畦の 12 個体（2013 年））について、地表から約 15 cm の高さで刈取り、前節と同様の方法で重量を測定し、乾物率および乾物収量（ Mg ha^{-1} ）を求めた。

5）統計処理

各調査項目に対するリン酸施肥処理間の比較は、Tukey-Kramer 法による多重比較検定を行った。地上部乾物重、リン吸収量および収穫期乾物収量については、各圃場における調査時の生育ステージや品種の影響を標準化するため、各圃場の対照区における値（3 反復の平均値）を 100 とした相対値を算出し（各々、初期生育指数、リン吸収指数および乾物収量指数と表記）、解析を行った。初期生育指数と収穫期乾物収量指数の関係については、初期生育指数「100～」の階級を対照群とする Dunnett 法による多重比較検定を行った。これらは、危険率 5 % 未満のときに統計的な有意差が認められるとした。また、リン酸施肥と生育の関係について、非線形最小二乗法による平方根モデル（Nelson et al., 1985；荒川，2012）を適用し解析を行った。

これらの統計処理には、統計ソフト JMP12（SAS

Institute Japan）を用いた。

Ⅲ－3－2 結果

生育初期の AM 菌感染率は、2012 年は 9 ～ 32 %，2013 年は 21 ～ 60 % であり、いずれの圃場においてもリン酸施肥処理による有意な差は認められなかった（表Ⅲ -4）。生育初期の地上部乾物重は、播種後日数が少ない 2012 年（播種後 38 ～ 39 日、 $0.5 \sim 1.7 \text{ g 個体}^{-1}$ ）で 2013 年（同 46 ～ 48 日、 $3.5 \sim 32.2 \text{ g 個体}^{-1}$ ）より少なかった（表Ⅲ -4）。リン酸施肥区の地上部乾物重は、圃場 C および I を除く 8 圃場においてリン酸無施肥区よりも有意に高まった。しかし、リン酸施肥区の中では、地上部乾物重に有意な差が認められない圃場が大部分であった。リン酸無施肥区の初期生育指数は 24 ～ 86 を示し、圃場間差が大きかった（表Ⅲ -4）。また、普通黒ボク土の初期生育指数（38 ～ 86，平均は 67）は、腐植質火山放出物未熟土（24 ～ 55，同 39）より大きい傾向を示した。

生育初期の地上部リン含有率は概ね 0.2 ～ 0.5 % であり、試験年および圃場による差は小さかった（表Ⅲ -4）。リン酸施肥区のリン含有率は、腐植質火山放出物未熟土の圃場 A、E および F、普通黒ボク土の圃場 C および G において、リン酸無施肥区よりも有意に高まった。しかし、リン酸施肥区の中では、リン含有率に有意な差が認められなかった。リン酸施肥区の地上部リン吸収量は、黒ボク土の圃場 C、I および J を除く 7 圃場において、リン酸無施肥区よりも有意に高まった。しかし、リン酸施肥区の中では、リン吸収量に有意な差が認められない場合が多かった。また、リン酸無施肥区のリン吸収指数は、前述の初期生育指数と同様に、普通黒ボク土（33 ～ 79，平均 57）で腐植質火山放出物未熟土（21 ～ 50，同 38）より大きかった。

各圃場の対照区における収穫期乾物収量は、 $10.1 \sim 16.2 \text{ Mg ha}^{-1}$ の範囲（10 圃場の平均は 12.7 Mg ha^{-1} ）にあり、当地域の基準収量（総体乾物率 30 % を前提とした生収量で $45 \sim 50 \text{ Mg ha}^{-1}$ ，乾物収量で $13.5 \sim 15.0 \text{ Mg ha}^{-1}$ ；北海道農政部，2010）よりやや低かった。リン酸施肥区の収穫期乾物収量は、普通黒ボク土の圃場 B、C および I を除く 7 圃場において、リン酸無施肥区よりも有意に高まった。しかし、リン酸施肥区の中では、乾物収量に有意な処理間差が認められなかった。また、乾物収量指数は、リン酸無施肥区で 62 ～ 95，リン酸施肥区では 91 ～ 104 であり、生育初期に見られたリン酸施肥の処理間差（初期生育指数は、リン酸無施肥区で 24 ～ 86，リン酸施肥区で 71 ～ 119）

表Ⅲ-4 リン酸用量試験における生育初期の AM 菌感染率，地上部乾物重およびリン含有率，収穫期のリン吸収量および乾物収量

試験年	圃場	土壌型	リン酸施肥量			AM 菌感染率	生育初期				収穫期		
			作条	全面	全層 合計		乾物重 ¹⁾		リン含有率	リン吸収量 ¹⁾	乾物収量 ¹⁾		
			(kg-P ₂ O ₅ ha ⁻¹)				(%)	(g 個体 ⁻¹)		(%, P)	(mg-P 個体 ⁻¹)	(Mg ha ⁻¹)	
2012	A	腐植質 火山放出物 未熟土	0	0	0	15	0.5 c	(46)	0.19 b	1.0 b	(26)	6.7 b	(62)
			80	0	80	12	0.8 bc	(71)	0.33 a	2.7 a	(70)	10.3 a	(96)
			80	80	160	20	0.9 ab	(80)	0.34 a	3.2 a	(80)	10.4 a	(97)
			80	120	200	14	1.2 a	(100)	0.34 a	3.9 a	(100)	10.7 a	(100)
			80	160	240	12	0.9 ab	(78)	0.32 a	2.9 a	(74)	10.2 a	(95)
			80	220	300	9	1.1 ab	(95)	0.37 a	4.1 a	(103)	10.9 a	(102)
	B	厚層 黒ボク土	0	0	0	26	1.2 b	(80)	0.35	4.2 b	(62)	14.8	(91)
			80	0	80	26	1.4 ab	(98)	0.43	6.3 ab	(94)	16.1	(99)
			80	80	160	25	1.4 ab	(97)	0.43	6.3 ab	(93)	16.2	(100)
			80	120	200	32	1.5 ab	(100)	0.46	6.7 ab	(100)	16.2	(100)
			80	160	240	24	1.6 ab	(106)	0.45	7.1 ab	(105)	16.3	(100)
			80	220	300	25	1.7 a	(114)	0.45	7.6 a	(113)	16.1	(99)
	C	厚層 黒ボク土	0	0	0	19	0.7	(73)	0.29 b	1.9	(60)	14.1	(95)
			80	0	80	20	1.0	(110)	0.35 ab	3.4	(109)	15.4	(104)
			80	40	120	19	0.9	(105)	0.36 ab	3.4	(109)	14.7	(99)
			80	80	160	15	1.1	(119)	0.38 a	4.0	(128)	14.1	(95)
			80	120	200	18	0.9	(100)	0.35 ab	3.1	(100)	14.8	(100)
2013	D	腐植質 火山放出物 未熟土	0	0	0	36	4.0 b	(29)	0.24	9.7 b	(26)	8.6 b	(75)
			50	0	50	34	9.6 ab	(71)	0.28	26.9 ab	(72)	11.0 a	(95)
			50	50	100	34	12.1 a	(89)	0.28	34.4 a	(92)	10.6 ab	(91)
			50	100	150	32	12.2 a	(90)	0.27	32.7 a	(87)	10.9 a	(94)
			50	150	200	38	13.6 a	(100)	0.27	37.5 a	(100)	11.6 a	(100)
	E	腐植質 火山放出物 未熟土	0	0	0	43	9.3 b	(55)	0.27 b	25.3 b	(50)	9.5 b	(79)
			50	0	50	46	13.4 ab	(80)	0.29 ab	39.5 ab	(79)	11.9 a	(99)
			50	50	100	49	16.3 a	(97)	0.31 a	49.8 a	(99)	11.9 a	(100)
			50	100	150	47	14.6 ab	(87)	0.29 ab	41.8 ab	(83)	11.6 a	(96)
			50	150	200	33	16.8 a	(100)	0.30 ab	50.1 a	(100)	12.0 a	(100)
	F	腐植質 火山放出物 未熟土	0	0	0	34	3.5 c	(24)	0.24 b	8.3 c	(21)	7.1 b	(70)
			80	20	100	45	10.4 b	(71)	0.29 a	30.2 b	(75)	9.6 a	(95)
			80	80	160	31	13.1 a	(89)	0.28 a	36.9 ab	(91)	9.0 a	(90)
			80	120	200	37	14.7 a	(100)	0.28 ab	40.5 a	(100)	10.1 a	(100)
	G	厚層 黒ボク土	0	0	0	38	3.8 b	(38)	0.25 b	9.4 b	(33)	10.3 b	(77)
			50	0	50	33	8.4 a	(86)	0.30 a	24.9 a	(88)	12.5 a	(93)
			50	50	100	35	9.8 a	(100)	0.30 a	28.9 a	(103)	12.6 a	(95)
			50	100	150	34	9.1 a	(93)	0.29 a	26.7 a	(95)	12.3 a	(92)
			50	150	200	38	9.8 a	(100)	0.29 a	28.2 a	(100)	13.4 a	(100)
	H	厚層 黒ボク土	0	0	0	60	4.5 b	(48)	0.29	13.3 b	(49)	10.2 b	(82)
			50	0	50	45	7.5 ab	(81)	0.30	22.4 a	(83)	11.4 ab	(92)
			50	50	100	43	9.2 a	(99)	0.30	27.3 a	(100)	12.5 a	(100)
			50	100	150	35	9.4 a	(100)	0.30	28.1 a	(103)	12.3 ab	(99)
			50	150	200	40	9.3 a	(100)	0.29	27.1 a	(100)	12.4 a	(100)
	I	厚層 黒ボク土	0	0	0	57	7.8	(74)	0.31	24.3	(79)	10.6	(79)
			80	20	100	42	10.8	(101)	0.30	32.6	(106)	12.3	(93)
			80	80	160	37	11.8	(111)	0.31	36.5	(118)	12.4	(93)
			80	120	200	35	10.6	(100)	0.29	30.9	(100)	13.3	(100)
	J	厚層 黒ボク土	0	0	0	31	25.5 b	(86)	0.34	86.9	(89)	11.3 b	(90)
			80	0	80	27	30.1 ab	(102)	0.35	105.2	(107)	12.8 a	(102)
			80	40	120	21	32.2 a	(109)	0.33	107.8	(110)	11.9 ab	(95)
			80	80	160	26	29.5 ab	(100)	0.33	97.9	(100)	12.5 ab	(100)

1) () は、各圃場における対照区(圃場 J, 160 kg-P₂O₅ ha⁻¹; その他 9 圃場, 200 kg-P₂O₅ ha⁻¹) の平均値を 100 とした初期生育指数, リン吸収指数および乾物収量指数。対照区は太字で示した。

各調査項目の数値に付した異なるアルファベットは、各圃場内でリン酸施肥の処理間で有意差があることを示す (Tukey-Kramer, p<0.05)。

より縮小する傾向にあった（表Ⅲ-4）。

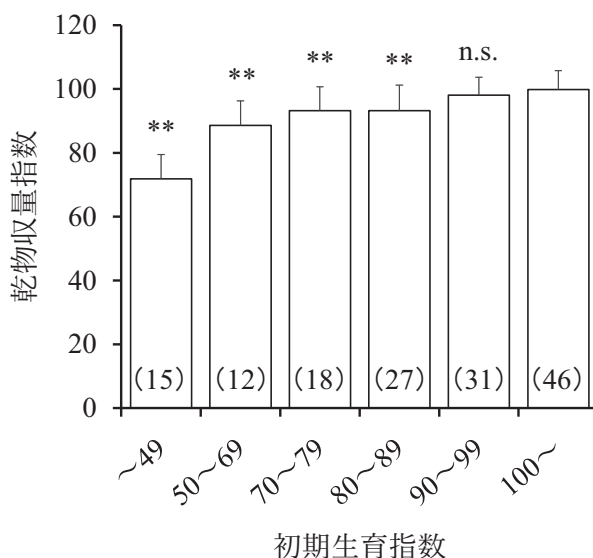
Ⅲ-3-3 考察

AM菌の宿主作物跡地では、後作トウモロコシのAM菌感染率が高まりリン吸収が促進され、トウモロコシの生育が向上することが知られている（Arihara and Karasawa, 2000；唐澤, 2004；臼木ら, 2007）。本研究の供試圃場は土壌型、播種床造成法（ブラウ耕、表層攪拌）、リン酸肥沃度（有効態リン酸含量 $102 \sim 426 \text{ mg-P}_2\text{O}_5 \text{ kg}^{-1}$ ）が様々なトウモロコシ連作畑であったが、すべての圃場において、リン酸施肥区（従来基準のリン酸施肥量の $25 \sim 150\%$ ）の乾物収量指数は90以上であり、リン酸施肥がトウモロコシの収穫期乾物収量に及ぼす影響は小さかった。本研究で得られた乾物収量は基準収量に満たない圃場が多かったが、リン酸施肥の処理効果を相対的に比較することは可能と考え、本研究のデータを用いて、トウモロコシ連作畑におけるリン酸減肥可能性を考察することとした。

1) リン酸減肥の判断指標

はじめに、収量水準を低下させない範囲でのリン酸施肥量を求めるための判断指標について検討した。本研究において、各圃場のリン酸施肥区の収穫期乾物収量は概ね同等（乾物収量指数は $92 \sim 104$ ）であり、リン酸施肥の処理間に有意な差が認められなかった。したがって、収穫期乾物収量や乾物収量指数に基づい

て判断する場合には、大幅なリン酸減肥が可能と考えられる。これに対し、生育初期の地上部乾物量は、収穫期乾物収量よりリン酸施肥の処理間差が大きかった（リン酸施肥区の初期生育指数は $71 \sim 119$ ）。吉良（1985）は、生育可能期間が短い寒冷地におけるトウモロコシの生産性について、その収量や品質は、生育期間の積算気温と密接な関係が認められることから、登熟期間を十分確保するため初期生育を向上させることが重要であると述べている。また、播種から6葉期までの生育初期におけるリン供給が収穫期収量に影響を及ぼすことが認められている（Barry and Miller, 1989）。これらのことから、寒冷地でのトウモロコシ栽培において、収穫期の収量水準を可能な限り低下させないためには、リン酸肥沃度に応じて適切にリン酸施肥を行うことにより、生育初期に一定水準以上の生育量を確保することが重要と考えられた。トウモロコシに対するリン酸肥効は低温年でより大きいことから（田中ら, 1971）、本研究において収穫期乾物収量の処理間差が小さかった理由は、2012年および2013年における6月から9月の積算日平均気温が平年値よりも高かったことが一因と考えられた。したがって、本研究の限られたデータに基づき収穫期乾物収量の統計的な有意差のみを根拠として、大幅な減肥を可能と結論した場合、寒冷年における収量低下リスクが高まることが懸念される。一方、リン酸施肥量に水準を設けた



図Ⅲ-2 トウモロコシの初期生育指数と乾物収量指数の関係

各指数は、各圃場の対照区（従来基準のリン酸施肥量を施用した処理区）における生育量の平均値を100とした相対値。

() の数値は、初期生育指数の各階級におけるサンプル数。** は、初期生育指数の各階級における乾物収量指数が、「100～」と比較して有意差があることを示す（Dunnett, $p < 0.01$, n.s. は $p > 0.05$ ）。エラーバーは標準偏差。

本研究の結果において、初期生育指数と乾物収量指数の関係をみると（図Ⅲ-2）、乾物収量指数は初期生育指数の減少とともに低下し、初期生育指数 90 未満のときに、同指数 100 以上の階級と比較して有意な低下が認められた。このことは、リン栄養状態により初期生育が影響を受ける条件では、一定水準以上の初期生育を確保できなければ、生育が回復しづらいことを示唆している。以上のことから、本研究では、リン酸減肥の可否を判断する指標として、収穫期乾物収量指数よりもリン酸施肥の処理間差が明瞭な初期生育指数を用い、この値が 90 以上のとき収穫期収量の低下リスクが小さいと判断した。

2) リン酸減肥可能量の推定

次に、各処理区のリン酸施肥量と初期生育指数との関係について、従来基準のリン酸施肥量との関連から解析するため、本章前節と同様に「リン酸施肥充足率」の概念を取り入れた。すなわち、圃場の有効態リン酸含量の多寡に応じて設定されている従来のリン酸施肥量（北海道農政部，2010）に対する、各試験区のリン酸施肥量の割合を「リン酸施肥充足率」と定義し、これと初期生育指数の関係を解析した。

図Ⅲ-3 に、火山放出物未熟土 4 圃場と黒ボク土 6 圃場のデータについて、リン酸施肥充足率と初期生育

指数（3 反復の平均値）の関係を示した。黒ボク土および火山放出物未熟土のいずれについても、初期生育指数はリン酸施肥充足率の増大とともに増加するが、その増加度合は次第に小さくなる傾向にあった。また、土壌型別にみると、黒ボク土のプロットは火山放出物未熟土のそれよりも初期生育指数が高い位置に存在する傾向にあった。そこで、施肥と作物生育の関係について、非線形最小二乗法による平方根モデルを土壌型別に当てはめ、以下の回帰式（①火山放出物未熟土、②黒ボク土）を得た。

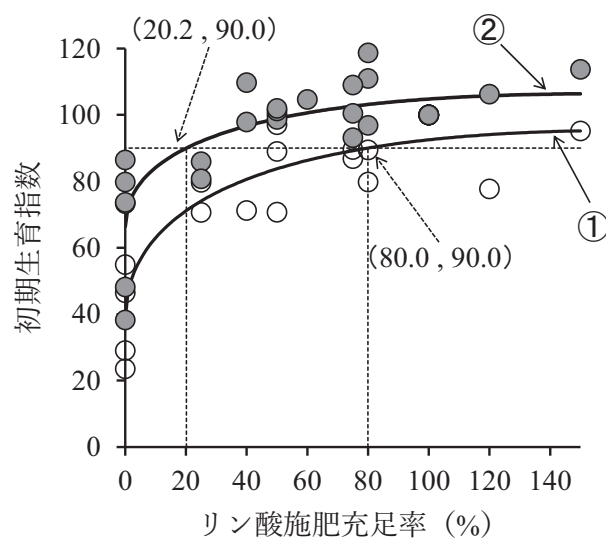
$$Y = 38.38 + 8.89 X^{1/2} - 0.35 X \quad (R^2 = 0.82, \text{式①})$$

$$Y = 66.32 + 6.45 X^{1/2} - 0.26 X \quad (R^2 = 0.68, \text{式②})$$

ここで、 Y はトウモロコシの初期生育指数、 X はリン酸施肥充足率である。

これらの回帰式から、リン酸減肥を可能とする基準値（初期生育指数 90）を満たすリン酸施肥充足率は、火山放出物未熟土で 80.0、黒ボク土で 20.2 と見込まれた。すなわち、収穫期乾物収量を低下させない範囲でのリン酸減肥可能割合は、火山放出物未熟土では従来基準の 20 %、黒ボク土では同約 80 % と考えられた。

Treseder (2013) は、AM 菌効果に関する多くの研究についてメタ解析を行い、AM 菌感染率が高いほど作物生育に対する AM 菌効果が高いことを報告している。本研究の 2 カ年の結果については、各土壌型



図Ⅲ-3 リン酸施肥充足率と初期生育指数の関係

初期生育指数は、各圃場の対照区（従来基準のリン酸施肥量を施用した処理区）における地上部乾物重の平均値を 100 とした相対値。リン酸施肥充足率は、圃場の有効態リン酸含量の多寡に応じて設定されている従来のリン酸施肥量（北海道農政部，2010）に対する、各試験区のリン酸施肥量の割合。

プロット（○，火山放出物未熟土；●，黒ボク土）は、各圃場における処理区ごとの平均値（ $n = 3$ ）。回帰曲線は、① $Y = 38.38 + 8.89 X^{1/2} - 0.35 X$ ($R^2 = 0.82$ ，火山放出物未熟土 4 圃場， $n = 20$)，② $Y = 66.32 + 6.45 X^{1/2} - 0.26 X$ ($R^2 = 0.68$ ，黒ボク土 6 圃場， $n = 29$)。

における AM 菌感染率の平均値は、火山放出物未熟土（4 圃場）で 32 %，黒ボク土（6 圃場）で 33 % とほぼ等しかったことから，AM 菌感染率の差異そのものがリン酸施肥反応に影響している可能性は小さいと考えられた。AM 菌は菌糸を伸長させることにより，土壤中のリンとの接触機会を増やし，植物も吸収可能な形態のリンを吸収すると考えられている（Yao et al., 2001）。また，AM 菌のリン吸収能力は，土壤における菌糸の広がり方の影響を受けることが知られている（Jakobsen et al., 1992; Sawers et al., 2017）。今後，土壤型によるリン酸施肥反応の違いを検討するためには，AM 菌菌糸の長さや広がりにも着目する必要がある。

3) リン酸減肥可能量を左右する要因

本章前節において，非宿主作物跡地で栽培されたトウモロコシの生育初期における AM 菌感染率（15 ～ 70 %）は，本節の値と同等か高いにも関わらず，リン酸施肥充足率の減少にともなう初期生育指数の低下が認められた。すなわち，感染率のみでは AM 菌による生育促進効果を判断することは困難と考えられた。そこで，本節および前節の 2010 年および 2011 年におけるトウモロコシ連作畑のデータのみを用いて，次の方法により初期生育に寄与する要因について解析を試みた。すなわち，リン吸収量がトウモロコシの生育制限因子となりやすいリン酸無施肥条件において，初期生育指数を目的変数，土壤の有効態リン酸含量および AM 菌感染率を説明変数として重回帰分析を行

い，以下の重回帰式③を得た（図Ⅲ-4）。

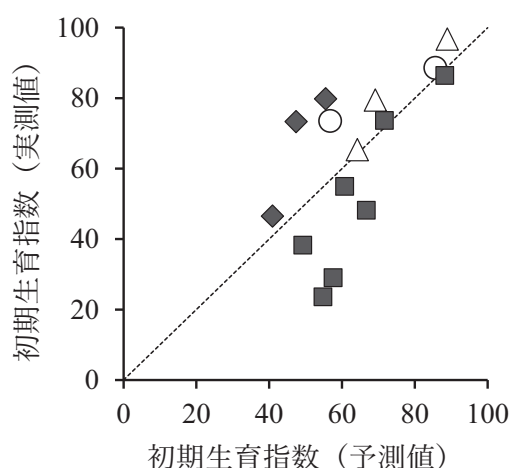
$$Y = 15.19 + 0.14 X_1 + 0.59 X_2 \text{ (式③)}$$

ここで， Y はトウモロコシの初期生育指数， X_1 は有効態リン酸含量， X_2 は AM 菌感染率である。

式③の自由度修正済み R^2 は 0.35（平均二乗誤差（RMSE）は 18.22）であり，さらに他の要因の寄与が示唆されるものの，有効態リン酸含量および AM 菌感染率はいずれも有意な説明変数（ $p < 0.05$ ）として選択されたことから，初期生育の良否には有効態リン酸含量と AM 菌感染率の影響を無視できない（標準偏回帰係数は各々 0.51 および 0.58）。言い換えると，有効態リン酸含量や AM 菌感染率が高い条件は，大幅なリン酸減肥を可能とする必要条件である。もちろん，これらの要因の寄与率は高くないため，初期生育に影響を与える他の要因についても今後，整理する必要がある。

以上より，トウモロコシ連作畑において，収穫期の収量水準を低下させないリン酸施肥量は，土壤型，有効態リン酸含量および AM 菌感染率などにより異なるが，トウモロコシ連作畑では，火山放出物未熟土で従来比 20 %，黒ボク土で同 80 % 削減可能と推定できた。

これまで，AM 菌によるリン吸収促進効果により宿主作物の生育向上やリン酸減肥の可能性が指摘されてきたが（Arihara and Karasawa, 2000; 白木・山本, 2003; 唐澤, 2004; Oka et al., 2010），従来施肥基準に対する減肥可能量を具体的に示す研究は限られてい



図Ⅲ-4 リン酸無施肥区における初期生育指数の予測値と実測値の関係

初期生育指数は，各圃場の対照区（従来基準のリン酸施肥量を施用した処理区）における地上部乾物重の平均値を 100 とした相対値。図中の点線は，1 : 1 の関係を示す。

予測値は以下の式により算出した。 $Y = 15.19 + 0.14 X_1 + 0.59 X_2$ （修正済み $R^2 = 0.35$, $p < 0.05$, RMSE = 18.22）。ここで， X_1 は有効態リン酸含量， X_2 は AM 菌感染率を表す。

○，2010 年；△，2011 年（以上，前節より）；◆，2012 年；■，2013 年。

た（大友ら，2015）．本研究において，AM 菌の効果を考慮する場合のリン酸施肥量は，従来比で最低でも 20 %，最大で 80 % の減肥が可能と明示されたことは，リン酸減肥栽培を推進していくうえで大きな前進である．今後，リン酸減肥可能量に対する環境要因を明らかにすることにより，土壌診断の高度化を図ることが必要である．

Ⅲ－４ まとめ

根釧地域の普通黒ボク土において，前作物が後作トウモロコシの AM 菌感染と，AM 菌の効果によるリン酸減肥可能量について検討した．

AM 菌の宿主作物であるトウモロコシ跡地における後作トウモロコシは，非宿主作物跡地における後作トウモロコシよりも，AM 菌感染率および初期生育量が

顕著に高かった．また，トウモロコシに対するリン酸施肥の効果を前作物ごとにみると，非宿主作物跡地での初期生育量はリン酸施肥充足率の低下とともに顕著に減少したのに対し，トウモロコシ跡地ではリン酸施肥充足率が低下しても初期生育量の減少割合は小さかった．これより，AM 菌の宿主作物であるトウモロコシの連作条件では AM 菌を活用したリン酸減肥栽培が可能と考えられた．

多様な条件で実施したリン酸用量試験において，リン酸減肥の可否を判断する指標として，リン栄養状態を反映しやすい初期生育指数を用いることが適当と考えられた．収穫期収量を低下させないリン酸施肥量は，土壌型，有効態リン酸含量および AM 菌感染率などにより異なると考えられた．トウモロコシ連作畑では，AM 菌のリン吸収促進効果により従来比で最低でも 20 % 減肥することが可能と考えられた．

第Ⅳ章 乳牛ふん尿処理物の肥効評価

Ⅳ－１ はじめに

第Ⅱ章および第Ⅲ章では、トウモロコシの安定生産を可能とする必要養分量を土壌診断に基づき設定する方法を明らかにした。トウモロコシ畑では家畜ふん尿処理物が多量に還元されるので（青木，2008；濱戸ら，2009；大津ら，2010），ここから供給される養分を適切に評価し施肥設計に反映することが重要である。「北海道施肥ガイド」では、各種有機物の養分含量を化学肥料に換算するための肥料換算係数（ふん尿処理物等有機物の全養分含量に乗じる係数）を設定している（北海道農政部，2010）。トウモロコシ畑については、単年施用条件における肥料換算係数として、窒素は堆肥0.2、スラリー0.4、カリは堆肥とスラリーいずれも1.0と整理されているのみである。

そこで、第Ⅳ章では、トウモロコシ畑において家畜ふん尿処理物を主体とした施肥設計を簡易に行うため、乳牛ふん尿を主体とした堆肥およびスラリーの肥効について検討を加えた。Ⅱ－２節では、家畜ふん尿処理物の連用条件における窒素の肥料換算係数を栽培試験と埋設試験から検討した。Ⅱ－３節では、北海道内のトウモロコシ栽培で未検討であったリン酸の肥料換算係数を検討した。

Ⅳ－２ 窒素の肥効評価

Ⅳ－２－１ 試験方法

１）供試資材

試験で供したふん尿処理物は、北海道標津郡中標津町の北海道立総合研究機構根釧農業試験場（現酪農試験場；以下、酪農試）の牛舎で産出された堆肥およびスラリーである（表Ⅳ-1）。堆肥は、育成牛舎から産出された乳牛のふん、尿および敷料（麦稈、牧草）の混合物を主体とし、固液分離したスラリーの固形分等を一部加えて屋根付き堆肥舎で切り返しを行い、約半

年間腐熟させたものである。スラリーは、フリーストール牛舎とスタンション牛舎から産出された搾乳牛のふん、尿およびパーラー洗浄水等の混合物を、地下ピットに貯留したものである。堆肥およびスラリーの全炭素含量、全窒素含量（いずれも現物あたり、 g kg^{-1} ）およびC/N比は、堆肥で各々89.5、5.5および16.3、スラリーで各々29.7、2.7および10.9であった。また、全窒素含量に占める有機態窒素含量（全窒素含量から、アンモニウム態窒素および硝酸態窒素の合計含量を差し引いた値）の割合は、堆肥で97%，スラリーで52%であった。これらの資材を以下の２試験（埋設試験および圃場試験）で共通に供した。

ふん尿処理物の肥料成分は、現物試料について前述の水野・南（1980）の方法で湿式分解した後、前章までの作物体分析と同様の方法により、分解液中の窒素（フローインジェクション法）、リン酸（バナドモリブデンによる比色法）およびカリ、石灰、苦土（原子吸光法）の各含有率を測定し、各成分の全含量を求めた。アンモニウム態窒素および硝酸態窒素の各含量は、現物試料の10%塩化カリウム（w/v）による抽出液を前述のフローインジェクション法により測定して求めた。全炭素含量は105℃で24時間以上乾燥したふん尿処理物を粉碎後、乾式燃焼法（住化分析センター、SUMIGRAPH, NC-220F）により測定して求めた。

２）埋設試験

ふん尿処理物を施用したときの経年的な窒素分解特性を把握するため、2011～2015年および2013～2018年に埋設試験を行った。

前述の堆肥およびスラリー（表Ⅳ-1）を自然乾燥後に粉碎し、目開き45 μm のナイロンメッシュ袋に5gずつ秤取した。これを酪農試の普通黒ボク土圃場（農耕地土壌分類委員会，1995）に深さ10 cmで埋設した。埋設後は圃場を無作付け（裸地状態）とし、1年間に1～5回、ナイロンメッシュ袋を回収（堆肥お

表Ⅳ-1 供試したふん尿処理物の成分分析値

試験	ふん尿 処理物	水分	全炭素 C	全窒素 N	全リン酸 P_2O_5	全カリ K_2O	全石灰 CaO	全苦土 MgO	無機態窒素	
									$\text{NH}_4\text{-N}$	$\text{NO}_3\text{-N}$
埋設	堆肥	790	89.5	5.5	3.9	5.7	6.3	1.4	0.0	0.2
	スラリー	933	29.7	2.7	1.1	2.9	1.9	0.5	1.3	n.d.
栽培	堆肥	770±34	未測定	5.5±0.5	3.5±0.6	8.5±2.2	4.5±1.8	1.5±0.2	0.1±0.2	0.3±0.2
	スラリー	936±8	未測定	2.3±0.3	0.8±0.1	3.0±0.6	1.4±0.6	0.4±0.0	1.1±0.4	n.d.

成分分析値は現物あたり濃度（ g kg^{-1} ）。無機態窒素の $\text{NH}_4\text{-N}$ および $\text{NO}_3\text{-N}$ は各々アンモニウム態および硝酸態窒素。栽培試験の値は、2007～2012年の6年間の平均値±標準偏差。

よびスラリーの各々について、1回あたり4袋)し、試料の乾燥重量を測定した。埋設中の試料から生じる無機態窒素は速やかに消失すると考え、乾燥重量に乾式燃焼法で測定した全窒素含有率を乗じて、各回収時の残存窒素量を求め、これと埋設時の有機態窒素量との差を有機態窒素分解量とした。さらに、各回収時における有機態窒素分解量を埋設時の有機態窒素量で除して有機態窒素分解率を求め、これを以下の式に当てはめることにより経年的な有機態窒素分解率を推定した(小野寺ら, 1998)。

$$D_N = e \times T^r$$

ここで、 D_N は有機態窒素分解率(%), e は分解加速度係数, T は日平均気温 0°C 以上の積算気温($^\circ\text{C}$), r は分解難易度係数である。

3) 栽培試験

(1) 供試圃場

栽培試験は前述のふん尿処理物(表IV-1)による用量試験で、2007～2012年の6年間、酪農試の普通黒ボク土圃場(農耕地土壌分類委員会, 1995)において行った。試験開始時において、供試圃場の土壌化学性(0～20 cm)は、 $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ が6.1、有効態リン酸(P_2O_5)含量が 30 mg kg^{-1} 、交換性カリ(K_2O)、苦土(MgO)および石灰(CaO)の各含量が 93 mg kg^{-1} 、 220 mg kg^{-1} および 2174 mg kg^{-1} 、リン酸吸収係数が $1680 \text{ mg-P}_2\text{O}_5 100 \text{ g}^{-1}$ 、熱水抽出性窒素(N)含量が 133 mg kg^{-1} であった。

(2) 栽培概要

試験に供したトウモロコシ品種は、試験当時に当地域で奨励されていた早生品種である「ぱぴりか」(2007～2009年)および「たちぴりか」(2010～2012年)とした(北海道農政部, 2018)。これら品種の相対熟度(RM; 戸澤, 2005)はいずれも75である。なお、本研究では栽培年により供試品種が異なるが、栽培年ごとにふん尿処理物の窒素肥効を相対評価したため、この影響を考慮しなかった。設定播種密度は $99,200 \text{ 粒 ha}^{-1}$ (畦間56 cm)とした。後述する化学肥料、堆肥およびスラリーを5月中旬に施用し、概ね1週間以内にロータリーハロにて約15 cmの深さで攪拌、その後、ケンブリッジローラーによる鎮圧、コーンプランターによる播種を行った。収穫は9月下旬から10月上旬とした。

(3) 施肥処理

各ふん尿処理物の施用量(現物, Mg ha^{-1})は、堆肥施用系列では0, 25, 50, 100, スラリー施用系列では0, 40, 80, 120とした。ただし、スラリーの 120 Mg ha^{-1} 施用区は、2007年に 160 Mg ha^{-1} を施用したところ、トウモロコシの出芽率が低く(他区の約80%)、スラリーの過剰施用が主要因と推察されたため、2008年からは施用量を 120 Mg ha^{-1} に変更した。

化学肥料の施肥量は、ふん尿処理物を施用せず、標準的な施肥量で栽培した対照区(堆肥施用系列およびスラリー施用系列の各々に設置)では、北海道施肥標準(北海道農政部, 2010)に準じ、硫酸アンモニウム、重過リン酸石灰または過リン酸石灰、硫酸カリウム、硫酸マグネシウムを用いて、窒素(N)、リン酸(P_2O_5)、カリ(K_2O)、苦土(MgO)として、各々130, 200, 140, 40 kg ha^{-1} を全面全層に施肥した。対照区を除く処理区では、上記の各肥料成分について施肥標準の50%を全面全層に共通施肥した(化学肥料窒素併用系列)。ただし、上記の化学肥料窒素併用系列では、ふん尿処理物施用による増収効果が小さかったため窒素肥効の評価が難しいと判断し、2011および2012年には各試験区(ただし、対照区を除く)を分割し、化学肥料窒素を施用しない処理区(化学肥料窒素無施用系列)を併設した。

試験区の1区面積は、2007～2010年までは全区 25 m^2 ($5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$)、2011および2012年は対照区で 25 m^2 ($5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$)、化学肥料窒素併用系列で 15 m^2 ($3 \text{ m} \times 5 \text{ m}$)、化学肥料窒素無施用系列で 10 m^2 ($2 \text{ m} \times 5 \text{ m}$)とし、各処理区3反復を設けた。なお、各試験区あたりの畦数は、2010年までは8～9畦、2011および2012年は8～9畦(対照区)、5～6畦(化学肥料窒素併用系列)、3～4畦(化学肥料窒素無施用系列)である。

(4) 土壌および作物体の採取・分析方法

土壌は、試験開始前は圃場全体から、各試験年の栽培前または収穫後は各試験区(2011および2012年は化学肥料窒素併用系列の各試験区)から、3～5地点ずつ(20 cmごとに深さ0～60 cm)採取・混合し、前章までと同様の方法で前処理を行い、 $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ 、有効態リン酸含量、交換性カリ・苦土・石灰、リン酸吸収係数および熱水抽出性窒素含量を測定した。

トウモロコシ作物体の収穫時期は、概ね黄熟期(総体乾物率30～40%)としたが、多雨・日照不足であった2009年は糊熟期(同25%)とし、次の方法により調査した。2010年までは各試験区の3または4畦か

ら生育中庸な15～20個体、2011および2012年は各試験区中央の3畦から15個体（化学肥料窒素併用系列）または1畦から5個体（化学肥料窒素無施用系列）の地上部を、地際より高さ約15cmで刈取り、前章までと同様の方法で各部位の生重量および乾物率を求め乾物収量（ Mg ha^{-1} ）を算出した。また、乾燥後の部位別粉碎試料について第II章と同様の方法で窒素含有率を測定し、地上部窒素吸収量（ kg-N ha^{-1} ）を求めた。ふん尿処理物のみかけの窒素利用率（%、以下、窒素利用率）は、ふん尿処理物施用区と同無施用区（0 Mg ha^{-1} 施用区）の窒素吸収量の差を、施用当年におけるふん尿処理物由来の全窒素施用量で除して100を乗じて求めた。また、化学肥料の窒素利用率は、対照区とふん尿処理物無施用区（0 Mg ha^{-1} 施用区）の窒素吸収量の差を、両区の化学肥料窒素施用量の差（ kg ha^{-1} ）である65（化学肥料窒素併用系列）または130（2011および2012年の化学肥料窒素無施用系列）で除して100を乗じて求めた。さらに、ふん尿処理物の窒素利用率を同系列の化学肥料の窒素利用率で除して求めた値を「窒素の肥料換算係数」（以下、窒素肥料換算係数）と定義した。この窒素肥料換算係数は、化学肥料窒素の利用率を100としたとき、ふん尿処理物由来窒素の利用率を相対的に表す係数である。

（5）統計処理

各栽培年の乾物収量および窒素吸収量は、各ふん尿処理物施用系列の全処理区を対象に、Tukey-Kramer法による多重比較検定を行った。ふん尿処理物の窒素利用率、土壌の硝酸態窒素含量および熱水抽出性窒素含量については、ふん尿処理物の連用年数と施用量の影響を検討するため、各ふん尿処理物の系列ごとに（対照区を除く各系列の4処理区を対象）、これらを要因とした二元配置分散分析を行った。さらに本研究では、ふん尿処理物の連用効果を評価するにあたり、施用量の影響を同一栽培年で確認することは有効と考え、各栽培年において上記4処理区を対象にTukey-Kramer法による多重比較検定を行った。

ふん尿処理物の連用年数と肥料換算係数の関係は、各処理区の化学肥料窒素量とふん尿処理物の肥料換算窒素量（単年施用時の基準で計算）の合計量が施肥標準を大きく超過しない処理区として、堆肥施用系列では25および50 Mg ha^{-1} 施用区、スラリー施用系列では40および80 Mg ha^{-1} 施用区の平均値（各栽培年で $n=2$ ）を用いて検討した。肥料換算係数は、後述する埋設試験の結果から、スラリーおよび堆肥ともに連用

開始後、数年間は増大することが期待できたので、連用年数を要因とした多重比較では連用初年目を対照群とするWilliams法により検定した。なお、得られたデータの平均値が連用年数に対して単調増加していない場合、これを誤差と捉え連用年数の組み合わせをプールして検定した。また、連用数年を経た後は一定値に収束すると予測されたので、単調増加後、一定値で推移することを仮定した折れ線回帰モデル（大塚、1975）を適用した。

これらの解析では、ソフトウェアに「エクセル統計」（社会情報サービス）と「JMP12.1」（SAS Institute Japan）を用い、危険率5%未満のときに統計的な有意差が認められるとした。

IV-2-2 結果

1）埋設試験

堆肥およびスラリー中の有機態窒素分解率（積算値、 D_N , %）について、日平均気温 0°C 以上の積算値（ T , $^\circ\text{C}$ ）を変数とする以下のモデル式で表した（図IV-1）。

堆肥, $D_N = 3.59 \times 10^{-2} \times T^{0.77}$, (RMSE = 3.52)

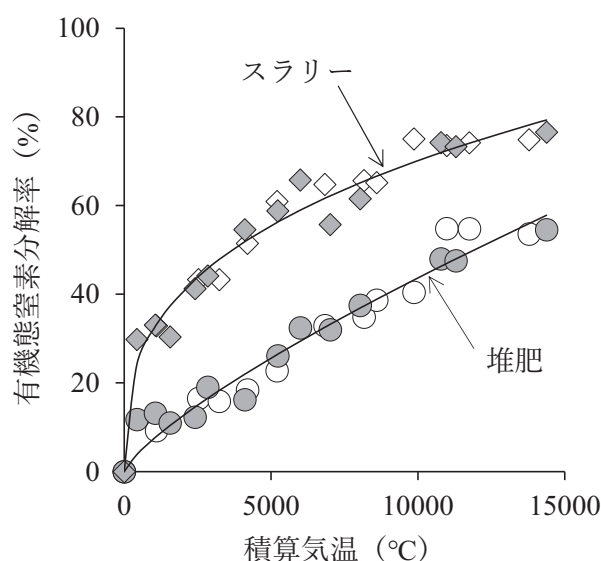
スラリー, $D_N = 3.10 \times T^{0.34}$, (RMSE = 3.53)

中標津における 0°C 以上の日平均気温の年間積算値（平年値）である 2608°C を基準とすると、上記モデル式から計算される有機態窒素分解率の積算値は、施用1, 2, 3, 4, 5年後の順に、堆肥で15, 26, 36, 45, 54%, スラリーで44, 56, 65, 71, 77%と推定された。このように年次別分解率は、いずれのふん尿処理物についても埋設後の年数経過とともに漸減した。

2）栽培試験

（1）堆肥施用系列

対照区の乾物収量は、多雨・日照不足の影響で収量が著しく低かった2009年（9.2 Mg ha^{-1} ）を除いて14.1～15.0 Mg ha^{-1} の範囲にあった（表IV-2）。堆肥の化学肥料窒素併用系列（2007～2012年）において、乾物収量は堆肥施用量の増加にともない増収する傾向にあった。堆肥50および100 Mg ha^{-1} 施用区の処理間では、いずれの栽培年でも有意な差は認められず、その差も小さい栽培年が多かった（表IV-2）。堆肥の化学肥料窒素無施用系列（2011および2012年）における乾物収量は、堆肥施用量の増加にともない増収し、いずれの栽培年でも堆肥施用量の処理間差が認められた（表IV-2）。また、窒素吸収量は、化学肥料窒素併用および同無施用のいずれの系列においても、乾物収量と同様の傾向を示し、堆肥施用量の増加にともな



図IV -1 積算温度とふん尿処理物の有機態窒素分解率の関係（埋設試験）

積算気温は日平均気温 0℃以上の積算値。

堆肥； $D_N = 3.59 \times 10^{-2} \times T^{0.77}$ （○，2011 年埋設；●，2013 年埋設）。

スラリー； $D_N = 3.10 \times T^{0.34}$ （◇，2011 年埋設；◆，2013 年埋設）。

回帰式は，埋設年が異なる 2 回の試験データを合わせて作成した。

て増大した（表IV -2）。

堆肥の窒素利用率は 1.8 ～ 17.4 % の範囲にあり（表IV -3），各栽培年および施用量の処理の間でバラツキが大きく，統計的な有意差は認められなかった。堆肥 25 および 50 Mg ha⁻¹ 施用区における肥料換算係数の平均値と連用年数との関係を見ると，化学肥料窒素併用系列では，連用 4 年目以降（0.22 ～ 0.41）で初年目（0.11）より有意に高くなった。折れ線モデルをあてはめると，肥料換算係数は 4 年目まで増加し，それ以降は 0.31 で一定値を得た（図IV -2）。

各栽培年栽培前の硝酸態窒素含量（0-60 cm）について，連用年数および堆肥施用量の各影響は有意に認

められたが，これら要因の交互作用は認められなかった。各試験年の硝酸態窒素含量は，2010 年以降，堆肥 100 Mg ha⁻¹ 施用区で他区より多い場合があったが，0 ～ 50 Mg ha⁻¹ 施用区で処理間差は認められなかった（表IV -4）。各栽培年収穫後の熱水抽出性窒素含量に対しては，連用年数，堆肥施用量およびこれらの交互作用の影響が認められた。対照区，堆肥 0 および 25 Mg ha⁻¹ 施用区における熱水抽出性窒素含量は経年的な減少傾向にあったが，堆肥 50 および 100 Mg ha⁻¹ 施用区では試験開始時と同程度か，やや高く推移し，他区より有意に高い場合があった（表IV -5）。

表IV -2 堆肥施用系列におけるトウモロコシの乾物収量と窒素吸収量

栽培年	乾物収量 (Mg ha ⁻¹)					窒素吸収量 (kg ha ⁻¹)				
	対照	堆肥施用量 (Mg ha ⁻¹)				対照	堆肥施用量 (Mg ha ⁻¹)			
		0	25	50	100		0	25	50	100
(化学肥料窒素併用系列)										
2007	14.1	10.9	11.7	14.0	14.7	123	98	100	117	131
2008	14.3	13.0	14.1	15.5	15.7	139	119	131	143	153
2009	9.2 a	6.1 c	6.9 bc	7.8 abc	8.6 ab	100 ab	67 c	80 bc	89 abc	105 a
2010	15.0 ab	13.3 b	15.3 ab	15.8 ab	16.5 a	128 ab	103 b	125 ab	143 ab	169 a
2011	14.7	13.4	13.3	15.4	14.8	128 ab	104 b	114 ab	137 a	140 a
2012	15.0 ab	14.3 ab	13.8 b	16.5 a	16.8 a	145 abc	121 c	126 bc	156 ab	160 a
(化学肥料窒素無施用系列)										
2011	14.7 a	10.8 b	11.8 ab	13.3 ab	14.7 a	128 a	78 b	89 b	108 ab	136 a
2012	15.0 a	9.7 b	12.3 ab	14.2 a	15.0 a	145 a	82 b	106 ab	125 a	134 a

2011 年および 2012 年の対照区は，化学肥料窒素併用および無施用の両系列で共通。

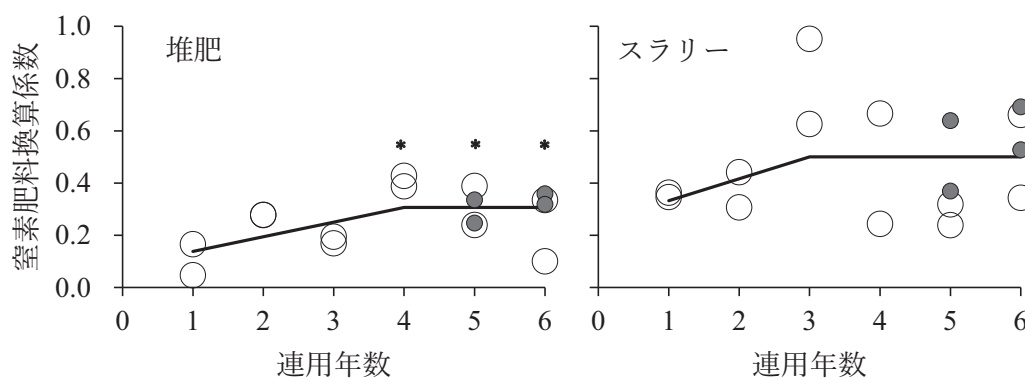
異なるアルファベットは，各栽培年において処理間で有意差があることを示す（n = 3; Tukey-Kramer, p < 0.05）。

表IV-3 堆肥およびスラリーの窒素利用率

栽培年	堆肥施用系列				スラリー施用系列			
	対照	堆肥施用量 (Mg ha ⁻¹)			対照	スラリー施用量 (Mg ha ⁻¹)		
		25	50	100		40	80	120 ¹⁾
(化学肥料窒素併用系列)								
2007	38.4	1.8	6.3	5.3	59.2	21.4	20.5	4.7
2008	30.3	8.4	8.4	6.0	45.2	19.9	13.8	8.4
2009	50.1	9.7	8.4	7.2	39.8	37.9	24.9	17.2
2010	38.1	16.3	14.8	12.1	14.9	9.9	3.6	9.0
2011	37.1	8.9	14.4	7.9	38.7	9.2	12.3	11.4
2012	37.0	3.7	12.4	6.9	49.4	32.6	16.9	11.5
(化学肥料窒素無施用系列)								
2011	38.1	9.4	12.7	12.6	36.9	13.6	23.6	19.3
2012	48.5	17.4	15.4	9.3	49.2	34.0	25.9	21.1

1) 2007年のみ160 Mg ha⁻¹.

ふん尿処理物施用区と無施用区における窒素吸収量の差し引き値から求めたみかけの窒素利用率。対照区の値は、ふん尿処理物無施用区における窒素吸収量との差し引きから求めた化学肥料の窒素利用率。



図IV-2 ふん尿処理物の連用年数と窒素肥料換算係数の関係

窒素肥料換算係数は、最大施用量の処理区を除く2処理区のプロット(3反復の平均値:○, 化学肥料窒素併用系列;●, 化学肥料窒素無施用系列)。各ふん尿処理物の化学肥料窒素併用系列における回帰線は次式の通り。

堆肥: $Y = \text{Min}(0.056X + 0.082, 0.306)$, 折曲点 (4.00, 0.306), $\text{RMSE} = 0.10$, $R^2 = 0.45$ 。スラリー: $Y = \text{Min}(0.084X + 0.249, 0.500)$, 折曲点 (3.00, 0.500), $\text{RMSE} = 0.21$, $R^2 = 0.15$ 。

図中の*は、化学肥料窒素併用系列について、2007年と比較して有意差があることを示す(Williams, $p < 0.05$)。

表IV-4 各栽培年の栽培前における土壌の硝酸態窒素含量

栽培年	堆肥施用系列					スラリー施用系列				
	対照	堆肥施用量 (kg ha ⁻¹)				対照	スラリー施用量 (kg ha ⁻¹)			
		0	25	50	100		0	40	80	120 ¹⁾
2007	28	28	28	28	28	27	27	27	27	27
2008	45	14	10	8	35	51	16	14	17	55
2009	47	44	42	48	57	82	50	55	56	75
2010	24	30 b	30 b	28 b	52 a	24	34 b	38 ab	35 b	53 a
2011	28	26 b	42 ab	46 ab	76 a	31	32	37	37	50
2012	32	24	32	43	48	43	28	31	40	53

1) 2007年のみ160 Mg ha⁻¹.

表中の数値は、0-60 cmの土壌を対象に、20 cmごとに測定した硝酸態窒素含量と風乾土仮比重から計算した合計量(kg ha⁻¹)。2007年は各系列内で全処理共通の初期値。2011年および2012年は、化学肥料窒素無施用系列の値。異なるアルファベットは、各系列の同一栽培年(対照区を除く)において処理間で有意差があることを示す(Tukey-Kramer, $p < 0.05$)。

表Ⅳ-5 各栽培年の収穫跡地における土壌の熱水抽出性窒素含量

栽培年	堆肥施用系列					スラリー施用系列				
	対照	堆肥施用量 (Mg ha ⁻¹)				対照	スラリー施用量 (Mg ha ⁻¹)			
		0	25	50	100		0	40	80	120 ¹⁾
2007	135	158	140	149	163	138	148	145	155	154
2008	108	132 b	146 b	151 ab	188 a	112	143	134	140	160
2009	112	137 b	141 b	167 ab	220 a	125	130	134	133	162
2010	98	115 b	120 b	147 b	197 a	98	104	105	117	112
2011	87	96 b	117 ab	149 a	150 a	85	92 b	84 b	92 b	113 a
2012	82	96 b	118 b	126 ab	180 a	96	100	111	113	111

1) 2007 年のみ 160 Mg ha⁻¹.

単位は mg kg⁻¹. 2011 年および 2012 年は、化学肥料窒素無施用系列の値.

異なるアルファベットは、各系列の同一栽培年（対照区を除く）において処理間で有意差があることを示す (Tukey-Kramer, p<0.05).

(2) スラリー施用系列

対照区の乾物収量は、堆肥施用系列と同様に 2009 年 (8.1 Mg ha⁻¹) で他の栽培年 (13.8 ~ 17.0 Mg ha⁻¹) より顕著に少なかった (表Ⅳ-6). スラリーの化学肥料窒素併用系列 (2007 ~ 2012 年) における乾物収量は、スラリー施用区 (40, 80, 120 Mg ha⁻¹ 区) で同無施用区 (0 Mg ha⁻¹ 区) より増収する場合が多かったが、最大施用量が他年より多い 2007 年 (160 Mg ha⁻¹) を除いても、スラリー施用量との対応関係は判然としなかった (表Ⅳ-6). スラリーの化学肥料窒素無施用系列 (2011 および 2012 年) における乾物収量は、スラリー施用量の増加とともに増収した (表Ⅳ-6). 各処理区の窒素吸収量は、化学肥料窒素併用系列ではスラリー施用量との対応関係は判然としないのに対し、化学肥料窒素無施用系列ではスラリー施用量の増加にともなって増大した (表Ⅳ-6).

スラリーの窒素利用率 (2007 年のスラリー施用量 160 Mg ha⁻¹ 区を除く) は 3.6 ~ 37.9 % の範囲にあり (表Ⅳ-3), 堆肥施用系列と同様に栽培年および施用量の

処理の間でバラツキが大きく、統計的な有意差は認められなかった. スラリー 40 および 80 Mg ha⁻¹ 施用区における肥料換算係数の平均値と連用年数との関係を見ると、化学肥料窒素併用系列では、連用 3 年目以降 (0.28 ~ 0.79) は初年目 (0.35) よりも高い場合が多かったが、初年目と比較した統計的な有意差は認められなかった. しかし、折れ線モデルをあてはめると、連用 3 年目まで増大し、以降 0.5 前後の水準で一定となる結果を得た (図Ⅳ-2).

各栽培年栽培前の硝酸態窒素含量および各栽培年収穫後の熱水抽出性窒素含量について、連用年数およびスラリー施用量の各影響が認められたが、これら要因の交互作用は認められなかった. 各栽培年における硝酸態窒素含量は、2010 年でのみ、スラリー 120 Mg ha⁻¹ 施用区で他区より多かったが、その他の栽培年および施用量の処理間では概ね同等であった. (表Ⅳ-4). また、熱水抽出性窒素含量は、いずれの処理区についても経年的な減少傾向にあった (表Ⅳ-5). 栽培年ごとに処理間で熱水抽出性窒素含量を比較する

表Ⅳ-6 スラリー施用系列におけるトウモロコシの乾物収量と窒素吸収量

栽培年	乾物収量 (Mg ha ⁻¹)					窒素吸収量 (kg ha ⁻¹)				
	対照	スラリー施用量 (Mg ha ⁻¹)				対照	スラリー施用量 (Mg ha ⁻¹)			
		0	40	80	120 ¹⁾		0	40	80	120 ¹⁾
(化学肥料窒素併用系列)										
2007	14.2 a	10.4 b	12.9 ab	14.6 a	11.5 ab	130 a	92 b	113 ab	133 a	111 ab
2008	17.0	14.4	15.8	16.2	14.8	167	138	154	160	158
2009	8.1 ab	5.6 b	8.4 ab	8.8 a	8.5 ab	85 ab	59 b	90 ab	100 a	102 a
2010	15.4	14.4	15.4	14.9	15.8	127 ab	118 b	127 ab	125 ab	144 a
2011	13.8 ab	12.2 c	13.0 bc	14.1 ab	14.3 a	121 ab	96 c	105 bc	120 ab	129 a
2012	13.8	12.3	14.4	15.1	14.7	134 a	102 b	136 a	138 a	138 a
(化学肥料窒素無施用系列)										
2011	13.8 ab	11.2 b	12.4 ab	14.6 a	14.5 a	121 a	73 b	86 ab	119 a	130 a
2012	13.8 a	10.0 b	13.1 a	14.3 a	14.9 a	134 a	71 b	106 a	124 a	137 a

1) 2007 年のみ 160 Mg ha⁻¹.

2011 年および 2012 年の対照区は、化学肥料窒素併用および無施用の両系列で共通.

異なるアルファベットは、各栽培年において処理間で有意差があることを示す (n = 3; Tukey-Kramer, p<0.05).

と、2011年のスラリー 120 Mg ha⁻¹ 区は他区より有意に高かった。

IV-2-3 考察

埋設試験において、5年目（日平均気温 0℃以上の積算気温の平年値は約 13,000℃）における堆肥の有機態窒素分解率（54 %）は、過去に道内で同様の埋設試験方法で検討された牛ふん麦稈堆肥の値（49～53 %）とほぼ同じ水準にあった（小野寺ら、1998；鈴木・志賀、2004）。一方、スラリーについては、有機態窒素の分解率を経年的に調査した例はみられないが、埋設2年目以降も経年的に分解が進行し5年目には77 %に達した。これらのことから、堆肥およびスラリーのいずれについても、施用翌年以降も窒素肥効が発現する可能性が高いと考えられた。なお、本研究の各栽培年における5～9月の積算気温（2,148～2,422℃）が施用1年目の有機態窒素分解率に及ぼす影響（最大年と最小年の差）は、堆肥で1.3 %およびスラリーで1.7 %程度であり、各栽培年の気温が連用効果に及ぼす影響は小さいと推測された。

栽培試験における対照区の乾物収量水準は、2009年（8.1および9.2 Mg ha⁻¹）を除いて13.8～17.0 Mg ha⁻¹（平均14.7 Mg ha⁻¹）の範囲にあり、当地域の基準収量（総体乾物率を30 %と仮定した場合で約13.5 Mg ha⁻¹；北海道農政部、2010）よりやや高かった。

対照区の熱水抽出性窒素含量は経年的な低下傾向にあった。本供試圃場における試験開始前数年間の管理履歴について、ふん尿処理物の施用がなかったこと、数年前まで牧草が栽培されていたことを踏まえると、熱水抽出性窒素含量が低下した理由として、土壌に元々含まれる腐植および牧草残渣が試験期間中に分解され、可給態窒素が減少したことが考えられる。堆肥施用区では、熱水抽出性窒素含量に対して連用年数と堆肥施用量の要因間に交互作用が認められ、経年的な低下度合いが軽減されたことから、既報（糟谷ら、2011；脇門ら、2000）と同様に有機物の施用量に応じて窒素肥沃度の維持や残効による化学肥料の減肥を期待できると考えられた。一方、スラリー施用区における熱水抽出性窒素含量は、連用年数とスラリー施用量の要因間に交互作用が認められず、経年的な低下傾向にあった。このように、施用するふん尿処理物の種類によって熱水抽出性窒素含量の推移が異なる理由は、後述のふん尿処理物由来の有機態窒素投入量の多寡によると考えられた。以上のように、本研究は熱水抽出性窒素含量が比較的高い条件で開始されたが、ふん尿

処理物の種類および施用量が窒素肥沃度の推移に影響を及ぼすと考えられたので、処理間を相対比較することにより連用効果を評価できると判断した。

本研究の連用初年目における肥料換算係数は、単年施用を想定した現行基準（堆肥 0.20、スラリー 0.40）と比較すると、スラリー（0.35）ではほぼ同等であったのに対し、堆肥（0.11）ではやや低かった。この理由は、供試したふん尿処理物の成分から次のように推察される。供試スラリーの無機態窒素割合（全窒素に対して48 %）は、当地域で一般的なスラリー（46 %）とほぼ同等であった（松本・實示戸、2005）。これに対し、供試堆肥のC/N比（埋設試験の値で16.3）は、一般的な堆肥（13.8）よりもやや高く、このことが本研究における堆肥の窒素肥効を低下させたと考えられた（松本・實示戸、2006）。

化学肥料窒素併用系列で求めた肥料換算係数の平均値は、堆肥施用系列では連用4年目以降に初年目より有意に高まったのに対し、スラリー施用系列では統計的な有意差は認められなかった。この理由は、年間の有機態窒素投入量が堆肥 25 および 50 Mg ha⁻¹ 施用区では各々 127 および 254 kg ha⁻¹ であったのに対し、スラリー 40 および 80 Mg ha⁻¹ 施用区では 49 および 99 kg ha⁻¹ と少なく、両者の差が大きかったためと考えられる。加えて、スラリーの施用当年の窒素肥効（現行の肥料換算係数は0.40）は、堆肥（同0.20）より高いため、施用2年目以降の残効は見かけ上検出しづらくことも一因と考えられた。しかしながら、当地域の酪農場で産出されるスラリー（現物あたり有機態窒素含有率 2.42 g kg⁻¹；松本・實示戸 2005）を現実的な施用量（50 Mg ha⁻¹；北海道農政部、2013）で連用することを想定した場合、有機態窒素の年間投入量は約 120 kg ha⁻¹ と見込まれ、これは上記の堆肥施用時の水準に近い。これらのことから、当地域の生産現場では、スラリーの連用条件でも施用量に応じた連用効果を見込むことが可能と考えられる。なお、本研究において、肥料換算係数を求めたふん尿処理物施用量の水準では、いずれのふん尿処理物施用系列においても同係数に対する硝酸態窒素蓄積の影響は小さいと考えられた。

連用効果を考慮した肥料換算係数を設定するためには、連用年数と肥料換算係数の間に一定の傾向を認める必要がある。埋設試験より、ふん尿処理物中の有機態窒素の年次別分解率は漸減していた。本研究のように差し引き法で求める肥料換算係数は、連用年数の経過とともに減少する無機態窒素放出量を反映しづらく

なると考えると、肥料換算係数は連用年数の経過とともに増加から一定に転じると仮定できる。そこで、肥料換算係数の増大が継続する年限と、頭打ちとなる水準を折れ線モデルで予測した結果、化学肥料窒素併用系列における肥料換算係数は、堆肥で連用4年目以降に0.31、スラリーで3年目以降に0.50になると見込まれた。上記系列では、ふん尿施用による増収効果が小さかったため、試験年次間および処理間でバラツキが大きく、回帰式の平方根平均二乗誤差（RMSE）は堆肥で0.10、スラリーで0.21と大きかった。しかし、上記の肥料換算係数は、化学肥料窒素無施用系列における連用5および6年目の肥料換算係数（平均値は堆肥で0.32、スラリーで0.56）に近いことから、連用年数経過後の肥料換算係数の値として概ね妥当と考えられる。また、連用年数経過後に一定となる肥料換算係数は、堆肥およびスラリーのいずれについても単年施用を想定した現行基準（堆肥で0.20、スラリーで0.40）よりも約0.1（全窒素含量の10%に相当）大きかった。

このような連用時における窒素減肥可能量の妥当性は、熱水抽出性窒素含量の変化からも次のように考えることができる。第Ⅱ章（表Ⅱ-10）によると、熱水抽出性窒素含量が 10 mg kg^{-1} 高まった場合の窒素減肥可能量は約 10 kg ha^{-1} である。本研究の連用5および6年目において、ふん尿処理物施用区における熱水抽出性窒素含量は、堆肥施用系列で $20 \sim 80 \text{ mg kg}^{-1}$ 、スラリー施用系列で $0 \sim 20 \text{ mg kg}^{-1}$ 、ふん尿無施用区より高いので、窒素減肥可能量は各系列で各々 $20 \sim 80$ および $0 \sim 20 \text{ kg ha}^{-1}$ と評価される。一方、前述より、堆肥およびスラリー由来の全窒素施用量から見込まれる連用効果（年間全窒素施用量の10%）は、各々 $14 \sim 55$ および $9 \sim 28 \text{ kg ha}^{-1}$ と評価される。このように、熱水抽出性窒素含量の変化、またはふん尿処理物由来の全窒素施用量から想定される減肥可能量は概ね一致することから、連用効果による上乗せ分を全窒素施用量の10%と評価し、連用時の肥料換算係数を堆肥で0.30、スラリーで0.50と見込むことは概ね妥当と考えられる。なお、本研究の化学肥料窒素併用系列でふん尿施用による増収効果が小さい理由としては、本研究のふん尿処理物無施用区における窒素施肥量（ 65 kg ha^{-1} ）が³、収量水準（2009年を除く5年間平均で 15 Mg ha^{-1} ）と熱水抽出性窒素含量（試験開始時で 133 mg kg^{-1} ）から必要と判断される窒素施肥量（ 80 kg ha^{-1} ）に近かったことが一因と考えられる（第Ⅱ章）。

堆肥の連用効果を考慮する時期については、北海道の畑作物に対して、連用5年目からこれを考慮した窒

素減肥可能量が定められている（中津ら、2000）。これに対し、本研究では、堆肥で連用4年目、スラリーで同3年目まで肥料換算係数が漸増し、以降一定値となると推定された（図Ⅳ-2）。しかし、前述のように回帰式のRMSE（堆肥で0.10、スラリーで0.21）は、連用効果として評価される肥料換算係数の上積み分（各ふん尿処理物で0.1）と同等またはこれより高く、推定精度が十分とはいえない。そこで、トウモロコシに対しても既往の畑作の基準に倣い、肥料換算係数が漸増する4年目までは、単年施用を想定した現行の肥料換算係数（堆肥0.20、スラリー0.40）を適用し、十分な肥効の蓄積が期待される連用5年目から、各ふん尿処理物について0.1を上積みする肥料換算係数を適用するのが適当と判断した。実際の適用場面では、当該圃場に施用されたふん尿処理物由来の全窒素施用量の5年間平均値に、肥料換算係数を乗じることにより減肥可能量を求めるのが現実的である。例えば、当地域で一般的な全窒素含有率の堆肥（現物あたり 4.27 g kg^{-1} ；松本・實示戸、2006）またはスラリー（現物あたり 4.48 g kg^{-1} ；松本・實示戸、2005）を現実的な施用量（堆肥、スラリーいずれも 50 Mg ha^{-1} ；北海道農政部、2013）で連用した場合、連用効果による減肥可能量（連用効果による上乗せ分のみ）は堆肥およびスラリーのいずれも約 20 kg ha^{-1} と見込むことができる。

以上、トウモロコシ畑に対して堆肥またはスラリーを5年以上連用する場合の肥料換算係数を、各々0.30または0.50と見込むことが可能であった。

Ⅳ-3 リン酸の肥効評価

Ⅳ-3-1 試験方法

1) 供試圃場

2011および2012年の2年間、酪農試の普通黒ボク土圃場（農耕地土壌分類委員会、1995）において行った。供試したふん尿処理物は前節と同様で、酪農試の牛舎で産出された乳牛ふん尿を主体とする堆肥およびスラリーである（表Ⅳ-7）。試験開始時において、供試圃場の土壌化学性（0～20 cm）は、 $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ が6.2、有効態リン酸含量が $53 \text{ mg-P}_2\text{O}_5 \text{ kg}^{-1}$ 、交換性カリ、苦土および石灰の各含量が $147 \text{ mg-K}_2\text{O kg}^{-1}$ 、 $150 \text{ mg-MgO kg}^{-1}$ および $2264 \text{ mg-CaO kg}^{-1}$ 、リン酸吸収係数が $1770 \text{ mg-P}_2\text{O}_5 \text{ kg}^{-1}$ であった。

表IV-7 供試したふん尿処理物の成分分析値

ふん尿 処理物	栽培年	水分	全窒素	全リン酸	全カリ	全石灰	全苦土	無機態窒素	
			N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	NH ₄ -N	NO ₃ -N
堆肥	2011	807	4.6	3.5	6.4	4.5	1.3	0.0	0.2
	2012	793	5.6	4.0	6.9	5.8	1.7	0.0	0.5
スラリー	2011	933	2.5	1.0	2.8	1.8	0.5	1.2	n.d.
	2012	939	2.6	0.9	2.5	1.9	0.4	1.6	n.d.

成分分析値は現物あたり濃度 (g kg⁻¹)。無機態窒素の NH₄-N および NO₃-N は各々アンモニウム態および硝酸態窒素。

2) 栽培概要

試験に供したトウモロコシ品種、設定播種密度、施肥時期および栽培期間は、前節と同様である。圃場試験を行った2011および2012年の積算日平均気温は次の通りであった。すなわち、2011年および2012年の順に、5～9月は2282および2298℃（平年値2135℃）、播種から生育中期に相当する5月20日から7月20日は840および769℃（平年値778℃）であり、試験年の気温を平年と比較すると栽培期間全体としてはやや高め、播種から生育中期までは平年並みかやや高い条件であった。

3) 施肥処理

各試験処理は2カ年とも同一区画に配置（連用）し、化学肥料（過リン酸石灰）、堆肥およびスラリーを各々単独で施用して全リン酸（P₂O₅）量を100 kg ha⁻¹としたリン酸100 kg ha⁻¹系列（P100系列；処理名を各々、C100、M100およびS100と略）、上記の各区に化学肥料のリン酸100 kg ha⁻¹を上乗せし、化学肥料と各ふん尿処理物を併用（総リン酸施肥量は施肥標準量）した200 kg ha⁻¹系列（P200系列；処理名を各々、C200、M200およびS200と略）を設けた（表IV-8）。各系列内においてふん尿処理物施用区と化学肥料施用区と比較し（各系列での対照区は、C100またはC200）、ふん尿処理物のリン酸肥効を評価した。さらに、各資材中のみかけのリン酸利用率（以下、リン酸利用率）を

求めるため、リン酸無施用区（P0）も設置した。本設計では、各系列のふん尿処理物施用区におけるリン酸利用率が化学肥料単独施用区と同等であれば、ふん尿処理物のリン酸肥効が化学肥料と概ね同等と判断できる。なお、ふん尿処理物の施用量は、各栽培年早春に採取したふん尿処理物のリン酸含有率に基づき、全リン酸量が100 kg ha⁻¹となるように決定したが、実際に施用したふん尿処理物の成分含有率とは若干異なったため、化学肥料とふん尿処理物由来のリン酸施用量はわずかに異なる（表IV-8）。

C100およびC200における化学肥料の施肥量は、リン酸を除いて北海道施肥標準（北海道農政部，2010）に準じ、硫酸アンモニウム、硫酸カリウム、硫酸マグネシウムを用いて、窒素（N）、カリ（K₂O）、苦土（MgO）として、各々130、140、40 kg ha⁻¹を全面全層に施肥した（表IV-8）。ただし、ふん尿処理物施用区における化学肥料の施用量は、すでに肥料換算係数が設定されている窒素およびカリについては、ふん尿処理物ごとにその値を考慮し化学肥料区の施肥量から減じた（北海道農政部，2010）。

試験区の1区面積は25 m²（5 m×5 m）とし、リン酸無施用区は2反復、その他処理区は3反復を設けた。

4) 土壌および作物体の調査・分析方法

土壌は、2011年の早春に各試験区から3地点ずつ（0～20 cm）採取・混合し、前章までと同様の方法によ

表IV-8 ふん尿処理物および化学肥料の施用量

系列	処理	ふん尿 施用量 (Mg ha ⁻¹)	ふん尿中全肥料成分 (kg ha ⁻¹)			肥料換算施用量 (kg ha ⁻¹)								
			N	P ₂ O ₅	K ₂ O	ふん尿由 ¹⁾			化学肥料			合計		
						N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
P100	C100	-	-	-	-	-	-	-	130	100	140	130	100	140
	M100	24	122	91	159	24	91	159	103	0	0	128	91	159
	S100	93	237	90	248	95	90	248	32	0	0	126	90	248
P200	C200	-	-	-	-	-	-	-	130	200	140	130	200	140
	M200	24	122	91	159	24	91	159	103	100	0	128	191	159
	S200	93	237	90	248	95	90	248	32	100	0	126	190	248
	P0	-	-	-	-	-	-	-	130	0	140	130	0	140

2011年と2012年の平均値。

1) ふん尿由来成分の肥料換算施用量は、ふん尿中肥料全成分量に肥料換算係数（堆肥はN0.2、K₂O1.0、スラリーはN0.4、K₂O1.0）を乗じて求めた。ただし、本試験で検討するリン酸の肥料換算係数については、1.0と仮定して処理区を設置した。

り前処理を行い分析に供した。

トウモロコシ作物体は前節と同様の方法で調査し乾物収量 (Mg ha^{-1}) を算出するとともに、第Ⅲ章と同様の方法でリン含有率を測定し、地上部リン酸吸収量 ($\text{kg-P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$) を求めた。本節では、生育中期 (2011 年, 7 月 18 日; 2012 年, 7 月 30 日) にも、各処理区で中庸な個体を地際より採取し、地上部全体の乾物重およびリン吸収量を算出した。

ふん尿処理物および化学肥料のリン酸利用率 (%) は、リン酸施用区と同無施用区 (P0 区) のリン酸吸収量の差 (各処理区における試験年ごとの平均値) を、総リン酸施用量 (ふん尿処理物と化学肥料の合計値) で除して 100 を乗じて求めた。さらに、ふん尿処理物施用区のリン酸利用率を同系列の対照区におけるリン酸利用率で除して求めた値を「リン酸の肥料換算係数」 (以下、リン酸肥料換算係数) とした。なお、P200 系列では、ふん尿処理物のみのリン酸利用率を求めることが困難であったため、ふん尿処理物の肥料換算係数を求めず、化学肥料とふん尿処理物を併用した条件に

おけるリン酸利用率のみ求めた。

5) 統計解析

乾物重、乾物収量、リン酸含有率およびリン酸吸収量は、試験年ごとにリン酸資材および施用量を要因とした二元配置分散分析 (P0 区を除く処理区)、Tukey-Kramer 法による多重比較検定 (P0 区を含む全処理区) を行った。

これらの解析では、「JMP12.1」 (SAS Institute Japan) を用い、危険率 5 % 未満のときに統計的な有意差が認められるとした。

Ⅳ-3-2 結果

収穫期における乾物収量水準は、2011 年で $13.1 \sim 14.3 \text{ Mg ha}^{-1}$ 、2012 年で $13.5 \sim 16.9 \text{ Mg ha}^{-1}$ であり、当地域の基準収量 ($13.5 \sim 15.0 \text{ Mg ha}^{-1}$ 、総体乾物率 30 % と想定; 北海道農政部, 2010) と概ね同じ水準であった (表Ⅳ-9)。

はじめに P0 区を除く処理区について二元配置分散

表Ⅳ-9 トウモロコシの地上部乾物重、リン酸含有率、リン酸吸収量、乾物収量、リン酸利用率およびリン酸肥料換算係数

処理	生育中期				収穫期				
	乾物重 (Mg ha ⁻¹)	リン酸含有率 (P ₂ O ₅ %)	リン酸吸収量 (kg-P ₂ O ₅ ha ⁻¹)	利用率 ¹⁾ (%)	乾物収量 (Mg ha ⁻¹)	リン酸吸収量 (kg-P ₂ O ₅ ha ⁻¹)	利用率 ¹⁾ (%)	リン酸肥料 換算係数	
2011 年									
C100	0.81 ± 0.08 ab	1.00 ± 0.04 a	8.2 ± 0.7 ab	1.7	13.8 ± 0.9 a	73 ± 3 a	11.4		
M100	0.90 ± 0.06 ab	1.05 ± 0.11 a	9.4 ± 1.2 ab	3.2	13.1 ± 0.8 a	69 ± 8 a	7.9	0.70	
S100	0.93 ± 0.09 a	1.04 ± 0.06 a	9.7 ± 0.4 ab	3.5	13.2 ± 0.1 a	72 ± 4 a	11.1	0.97	
C200	0.85 ± 0.12 ab	1.03 ± 0.06 a	8.8 ± 1.3 ab	1.2	13.6 ± 0.7 a	70 ± 7 a	4.0		
CM200	0.88 ± 0.14 ab	1.12 ± 0.06 a	9.9 ± 1.9 ab	1.8	14.3 ± 0.6 a	75 ± 5 a	6.9		
CS200	0.88 ± 0.06 ab	1.16 ± 0.08 a	10.3 ± 1.1 a	2.0	13.3 ± 0.5 a	73 ± 3 a	5.7		
P0	0.63 ± 0.01 b	1.02 ± 0.10 a	6.4 ± 0.8 b	—	13.1 ± 1.0 a	62 ± 9 a	—		
資材 ²⁾	n.s.	n.s.	n.s.		n.s.	n.s.			
施肥量 ²⁾	n.s.	*	n.s.		n.s.	n.s.			
交互作用 ²⁾	n.s.	n.s.	n.s.		n.s.	n.s.			
2012 年									
C100	1.45 ± 0.25 bc	0.77 ± 0.05 ab	11.2 ± 1.5 bc	2.0	14.6 ± 0.1 ab	59 ± 2 a	4.6		
M100	1.81 ± 0.03 ab	0.70 ± 0.03 b	12.7 ± 0.7 ab	4.0	15.5 ± 0.8 ab	59 ± 8 a	4.9	1.08	
S100	1.79 ± 0.12 ab	0.74 ± 0.03 ab	13.2 ± 0.8 ab	4.5	16.4 ± 0.7 a	61 ± 6 a	7.3	1.61	
C200	1.83 ± 0.09 ab	0.76 ± 0.02 ab	13.9 ± 0.7 a	2.4	14.9 ± 0.5 ab	62 ± 11 a	3.7		
CM200	1.84 ± 0.03 a	0.81 ± 0.01 a	14.8 ± 0.3 a	3.0	16.9 ± 1.3 a	68 ± 3 a	7.3		
CS200	2.04 ± 0.14 a	0.73 ± 0.01 ab	15.0 ± 1.3 a	3.1	16.2 ± 0.7 ab	76 ± 18 a	11.1		
P0	1.24 ± 0.18 c	0.74 ± 0.04 ab	9.2 ± 0.8 c	—	13.5 ± 1.8 b	55 ± 11 a	—		
資材 ²⁾	*	n.s.	*		**	n.s.			
施肥量 ²⁾	**	*	**		n.s.	+			
交互作用 ²⁾	n.s.	**	n.s.		n.s.	n.s.			

1) 利用率は、各処理区のリン酸吸収量から P0 区のリン酸吸収量の差し引き値を総リン酸施用量で除して求めた (各処理区の平均値より算出)。なお、P200 系列における利用率は、ふん尿処理物と化学肥料の合計のリン酸施用量から求めた。本利用率から系列ごとに肥料換算係数を算出した。

2) **, *, + は $p < 0.01, 0.05, 0.10$, n.s. は $p < 0.10$ であることを示す (二元配置分散分析)。

乾物重、リン酸含有率、リン酸吸収量および乾物収量は平均値 ± 標準偏差。異なるアルファベットは処理間で有意差があることを示す (Tukey-Kramer, $p < 0.05$)。

分析を行い、試験年ごとに各調査項目に対するリン酸の資材および施肥量の効果を検討した（表Ⅳ-9）。2011年では生育中期におけるリン酸含有率についてのみ、施肥量の効果が認められた。一方、2012年では、施肥量の効果は生育中期における乾物重、リン酸含有率およびリン酸吸収量について認められ、資材の効果は生育中期における乾物重およびリン酸吸収量、収穫期における乾物収量について認められた。また、資材および施肥量の交互作用は、2012年の生育中期におけるリン酸含有率についてのみ認められた。

生育中期における各項目を処理間で比較すると、いずれの試験年でもP0区では一部処理区より低い場合が多かった。P100およびP200の各系列内では、各処理区の乾物重およびリン酸吸収量について処理間差は認められないもの、いずれの項目でも堆肥またはスラリー施用区は対照区と同等か、それよりわずかに高かった。同時期におけるリン酸利用率についても、堆肥またはスラリーを施用した区は、対照区と同等かわずかに高い場合が多かった。収穫期における各項目を処理間で比較すると、2012年の乾物収量についてP0区と一部処理の間で差が認められるものの（ $p<0.05$ ）、リン酸吸収量については処理間差が認められなかった。また、リン酸利用率についても処理間で一定の傾向はみられず、P100系列で4.9～11.1、P200系列で5.7～11.1の範囲にあった。P100系列における2カ年のリン酸肥料換算係数は0.70～1.61の範囲にあった。

Ⅳ-3-3 考察

試験を実施した2011および2012年の積算日平均気温は、5月から9月の積算では両年ともに平年より約150℃高かったものの、リン酸肥効の影響がより大きいと考えられる播種後約2ヶ月間では平年並み（2012年）か、やや高い程度（2011年）であり、両年の乾物収量は当地域の基準収量に近かった。リン酸施肥量の効果は、両年ともに生育中期におけるリン酸含有率について認められ、2012年では乾物重およびリン酸吸収量についても認められた。2012年では播種から生育中期までの積算気温が2011年よりも低かったため、リン酸施肥量の影響は2012年で2011年より大きかったと考えられた。なお、本研究は各処理区の配置を固定し連用条件で行ったが、2012年早春における各処理区の有効態リン酸含量は64～72 mg-P₂O₅ kg⁻¹の範囲にあり、処理間で大差がないことから有機物連用の影響は小さいと考えられた。また、上記の有効態リン酸含量は土壌診断基準値を下回り、ふん尿処理物

のリン酸肥効を評価しやすいと考えられる。以上より、本研究は、当地域でリン酸肥効を検討する条件として妥当と考えられた。

生育や収量に対するリン酸資材の影響は2012年でのみ認められ、ふん尿処理物施用区で化学肥料単用区よりわずかに優る傾向にあった。このような傾向が、播種から生育中期における気温がより低く、リン酸施肥量の効果が現れやすかった2012年で確認できたことにより、ふん尿処理物のリン酸肥効は栽培年の気象条件に関わらず期待してよいと考えられた。本研究では、堆肥およびスラリー由来の全リン酸を単独で化学肥料の代替（リン酸肥料換算係数を1.0と仮定）として施用したP100系列において、化学肥料と同等以上の生育および収量が得られ、これらのリン酸利用率（収穫期で4.9～11.1%）は化学肥料（同4.6、11.4%）と概ね同等であった。複数の既報においても、牛ふん堆肥のリン酸肥効は化学肥料と同等以上と報告されており（河野ら、1992；瀧、2003；小柳ら、2005）、この理由として、牛ふん堆肥はク溶性リン酸や水溶性リン酸を多く含むことが考えられる（小柳ら、2005；Komiyama et al., 2014；小田部ら、2014）。また、本研究では、ふん尿処理物を化学肥料と併用したP200系列において、化学肥料とふん尿処理物を合わせたリン酸利用率（収穫期で5.7～11.1）は、化学肥料を単独施用した場合（同3.7、4.0）よりも高かった。この理由は、両者を併用することにより、土壌における化学肥料由来リン酸の不可給化が抑制された可能性が考えられる（加藤ら、2010）。なお、2012年の生育中期におけるリン酸含有率について、資材と施肥量の処理の交互作用が認められたのは、CM200区のリン酸含有率がM100区より有意に高いことによるものであるが、その理由は明らかではない。

これらのことから、北海道の中で特に寒冷な当地域でも、ふん尿処理物のリン酸肥効を考慮し化学肥料を減肥することが可能と考えられた。一方で、ふん尿処理物の単独施用条件において、供試したふん尿処理物の製造工程が同一であるにも関わらず、肥料換算係数には幅（0.70～1.61）があり、1.0を超える場合もみられたが、土壌型、施肥位置など、肥効が高まる施用条件については解明すべき点が残された。

ふん尿処理物の施用にともなうリン酸減肥可能性を最大限見積もるためには、肥効を左右するリン酸の溶解性を考慮することが望ましい（Komiyama et al., 2014；小田部ら、2014）。横田ら（2003）は、牛ふん堆肥のリン酸の溶解性に対する主原料、副資材の種類

と量、腐熟期間の影響を検討し、可給性の高い易溶性リン酸割合は腐熟期間が短いほど（6 ヶ月未満で 80 %）、副資材の混入量が少ないほど（混入量 30 % 未満で 75 %）高く、副資材としてパーク・おがくずを含む乳牛ふん堆肥で低い（混入量 30 % 以上で 60 %）と報告している。これによると、堆肥中のリン酸のうち、易溶性画分を化学肥料と同等に利用できるとすれば（Komiyama et al., 2014）、化学肥料の減肥可能量は全リン酸量の 6 ～ 8 割程度と考えられる。このことは、牛ふん堆肥のリン酸肥効率を 60 ～ 100 %（リン酸肥料換算係数として 0.6 ～ 1.0）とする府県の見解（西尾，2006）、また肥料換算係数が 0.7 以上（肥効率として 70 % 以上）と見込まれた本研究の結果と概ね矛盾しない。また、酪農地帯では、酪農場の規模拡大にともなってフリーストール牛舎が増加したこともあり、敷料の混合割合が低く高水分の堆肥、液状のふん尿処理物であるスラリーなど、腐熟度の高くないふん尿処理物の産出量が増加していることも踏まえると（山田，2010；北海道農政部，2014）、乳牛ふん尿処理物の易溶性リン酸割合は比較的高いと考えられる（横田ら，2003）。以上のことから、乳牛ふん尿処理物のリン酸肥効は、府県で提案されている肥効率 60 ～ 100% の下限値、すなわち肥料換算係数として少なくとも 0.6 と見込むことが可能である。なお、当地域で一般的なリン酸含有率の堆肥（現物あたり 2.84 g-P₂O₅ kg⁻¹；松本・寶示戸，2006）またはスラリー（同 2.11 g-P₂O₅ kg⁻¹；松本・寶示戸，2005）を現実的な施用量（堆肥，スラリーいずれも 50 Mg ha⁻¹；北海道農政部，2013）で施用すると、肥料換算量として各々 85.2 kg-P₂O₅ ha⁻¹，63.3 kg-P₂O₅ ha⁻¹ と計算され、施肥標準量（200 kg-P₂O₅ ha⁻¹）の 32 ～ 43 % を減肥可能と見込むことが

できる。

以上より、ふん尿処理物のリン酸肥効が未検討であったトウモロコシに対し、乳牛ふん尿由来の堆肥およびスラリーのリン酸の肥料換算係数は少なくとも 0.6 と見込むことができる。

IV-4 まとめ

乳牛ふん尿を主原料とした堆肥およびスラリーについて、連用条件における窒素肥効と、これまで整理されていなかったリン酸肥効を検討した。

窒素肥効を明らかにするため埋設試験および栽培試験を行った。埋設試験では、堆肥およびスラリーのいずれについても、埋設 2 年目以降も経年的に有機態窒素の分解が認められた。栽培試験では、連用年数がある程度経過した条件における肥料換算係数は堆肥で約 0.3、スラリーで約 0.5 と見込まれた。本研究での堆肥およびスラリー由来の有機態窒素施用量を踏まえると、いずれについても連用開始 5 年目には連用効果を見込んだ窒素減肥が可能と考えられた。以上より、堆肥またはスラリーを 5 年以上連用する場合、窒素の肥料換算係数を堆肥で 0.30、スラリーで 0.50 と見込むことができる。

リン酸肥効は圃場試験および既往の知見から検討した。圃場試験では、堆肥およびスラリー中のリン酸の有効性は、化学肥料のリン酸と概ね同等かそれ以上と見込まれた。本研究の圃場試験と、ふん尿処理物中のリン酸の溶解性、成分量の変動などに関する既往の文献に基づき、堆肥とスラリーのいずれについても、リン酸の肥料換算係数は少なくとも 0.6 と見込むことができる。

第V章 総合考察

2007年の飼料価格高騰を契機に、輸入濃厚飼料に依存した不安定な酪農経営から脱却するため自給飼料増産の機運が高まる中、トウモロコシは重要な自給飼料作物として位置づけられるようになった。近年、優良品種の多様化や栽培技術の改善によりトウモロコシの生産性は向上したが、北海道におけるトウモロコシの施肥基準は1980年代初頭から大きな改訂がなされていなかった。今後もトウモロコシ栽培の拡大が見込まれる状況において、生産性の向上と同時に、環境保全、肥料節減の視点に立った施肥管理を推進する必要がある。本研究では、現在栽培されるトウモロコシを対象に、土壌中や施用するふん尿処理物中の養分含量に基づき、必要養分を過不足なく供給するための合理的な施肥法を確立することを目的とした。

V-1 トウモロコシに対する必要養分量の設定

第II章では、一般に施肥効率が高い局所施肥と分施を組み合わせた施肥体系を前提とし（Prummel, 1957; 石塚ら, 1967; 戸澤, 2005）、適正な窒素施肥配分と、トウモロコシの収量水準や窒素肥沃度から判断される必要窒素施肥量を明らかにした。窒素施肥配分は、戸澤（1985）の報告と同様に濃度障害のリスクが生じない範囲で基肥に重点を置いた施肥が望ましく、その適正な基肥窒素量は地域によらず $80 \sim 100 \text{ kg ha}^{-1}$ と考えられた。従来基準は、濃度障害のリスクが特に低温で助長されることを踏まえ（北海道農政部, 1984）、早春に比較的低温となりやすい十勝および根釧地域におけるリスク回避を重視したと理解される。一方で、根釧およびオホーツク地域を対象とした本研究の栽培試験では、総窒素施肥量を同量とした場合、地域による違いよりも窒素肥沃度の違いを考慮して基肥窒素量を設定することが適当と考えられた。すなわち、作条基肥窒素量と収量の関係は、比較的窒素肥沃度が低い酪農試と北見農試において同様の傾向にあったが、窒素肥沃度が高い生産者圃場における収量はこれらと異なり、作条基肥窒素量を 100 kg ha^{-1} とするよりも 80 kg ha^{-1} とする場合に高い傾向にあった。従来知見との差異については、近年の温暖化傾向が影響した可能性がある。2010年代の中標津における5月の日平均気温および最低気温は、1980年代よりも各々 1.4°C および 1.6°C 高いことから、濃度障害のリスクは従来基準

策定時よりも低下していると考えられる。一方、ふん尿処理物を多量に連用するなど養分含量が高い圃場では、作条基肥窒素量を多くすると土壌の電気伝導度（EC）は濃度障害のリスクが高まる水準に達しやすい（北海道農政部, 1984）、上記の範囲で作条基肥窒素量を少なくすることが適当と考えられる。これらのことから、現在のトウモロコシ栽培について一般的な畦間（72～75 cm）の条件では、作条基肥窒素量の水準を $80 \sim 100 \text{ kg ha}^{-1}$ とするのが妥当である。ただし、本研究で対象とした栽植様式とは異なる狭畦栽培（林ら, 2006）や千鳥栽培（義平ら, 2013）では別途検討を要する。次いで、作条基肥窒素量を適正範囲とした条件において、収量水準に見合う必要窒素施肥量（基肥と分施の合計量）を明らかにしようとした。北海道では各地域における様々な気象条件に対応し、トウモロコシの品種および用途が選択されるが、多様な条件で得られたデータを統一的に解析して施肥指針がつくられることはなかった。そこで、各栽培条件で達成可能な収量水準を目安とした必要窒素施肥量の指針が必要と考えた。本研究では、気象、品種、圃場など多様な条件を対象とする場合でも、各圃場で得られる実際の収量水準を考慮することで、総窒素施肥量および熱水抽出性窒素含量からトウモロコシの窒素吸収量を説明できた。この関係に基づき算出される必要窒素施肥量は、地域、土壌型および目標収量を詳細に設定して策定された基準（富沢ら, 2017）より精緻さに欠けるかも知れないが、栽培条件について汎用性が高い点で優位性がある。ただし、ここで留意すべきことは、設定する収量水準は目標値ではなく実績値という点である。トウモロコシの生産量は気象要因に大きく左右されるのはもちろん（戸澤, 1985）、土壌物理性など窒素以外の要因が生産性を妨げている可能性がある（小野寺ら, 2015）、各地域の基準収量、各圃場の肥培管理、土壌理化学性などを確認しておくことも必要である。本研究で新設した窒素施肥対応は、北海道全域を対象に統一的な考え方に基づき設定したものである。これを基盤として更なる発展が期待できる。例えば、栽培当年の気象で変動する生育経過、収量水準および窒素溶脱の影響も考慮して分施窒素量を調整することなどの技術の高度化が挙げられる。海外では、窒素溶脱モデルと気象情報などを組み合わせた窒素施肥ツールの活用により収益性が向上することが確認されており（Sela et al., 2017）、北海道でも本研究の知見

に基づく施肥支援ツールの開発が望まれる。

第Ⅲ章で検討したトウモロコシ栽培におけるリン酸施肥の効果については、1970年代に行われた試験でも初期生育の向上が認められ、特に低温年に大きいことが確認されている（北海道農政部，1980）。本研究では、すでに提示されていた土壌の有効態リン酸含量に基づく施肥対応に加え、いっそうのリン酸減肥を推進するため、植物のリン吸収を促進するAM菌の機能を考慮する場合の減肥可能量を検討した。畑に元々棲息する土着AM菌のリン吸収促進効果については、北海道内で比較的温暖な札幌市で栽培したトウモロコシに対して認められていたが（唐澤，2004），本研究により栽培期間の気象条件が冷涼，寡照，湿潤な根釧地域でも確認できた。本研究では、根釧地域以外の畑，トウモロコシ以外のAM菌の宿主作物を対象に検討していないが，札幌市やオホーツク地域でも，AM菌宿主作物（ダイズ（*Glycine max* (L.) Merr.），ヒマワリ（*Helianthus annuus* L.），ベッチ（*Vicia villosa* Roth）など）を栽培した圃場において，後作トウモロコシのAM菌感染率の向上や生育促進効果が確認されている（Arihara and Karasawa, 2000；唐澤ら，2001；北海道農政部，2003）。したがって，AM菌宿主作物を前作物として栽培したときのリン吸収促進効果は，地域やAM菌宿主作物の種類によらず認められると考えられる。本研究では，収穫期における減収を招かない範囲で初期生育を確保するという視点でAM菌の機能によるリン酸減肥可能量を検討した結果，従来比で最低でも20%，最大80%のリン酸施肥量を削減できると考えられた。一方で，トウモロコシの初期生育は有効態リン酸含量やAM菌感染率の影響を受けるものの，その他の要因の寄与も大きいことが示唆された。したがって，現時点での現実的な施肥設計の対応を考えるならば，まずはトウモロコシ連作畑においてリン酸施肥量を従来比で20%削減することが妥当であろう。このように，本研究は，対象作物や作付け履歴を限定した条件ではあるが，古くから認められていたAM菌の機能を土地利用型作物であるトウモロコシの施肥指針まで導いたことに意義が大きい。今後は栽培条件ごとに，トウモロコシ生育に対するAM菌感染率，リン酸施肥量，その他の要因の影響度合をさらに解析し，これらを定量化することで更なる減肥が可能となる。また，AM菌の効果などを考慮した効率的なリン酸施肥技術を広く普及するためには，土着AM菌が作付予定の作物に感染する能力やリン吸収促進効果について，施肥設計前に診断できる技術の開発が望まれ

る（Deguchi et al., 2021）。

肥料三要素の一つであるカリについては，今後，検討することが望ましい。Sunaga et al. (2015) は，カリ吸収特性の異なる品種を対象に土壌診断に基づくカリの施肥指針を策定した。ここでは，土壌の交換性カリ含量が $360 \text{ mg-K}_2\text{O kg}^{-1}$ 未満のとき， $0 \sim 100 \text{ kg-K}_2\text{O ha}^{-1}$ のカリ肥料を施用することで，目標乾物収量 18 Mg ha^{-1} （目標カリ吸収量 $200 \text{ kg-K}_2\text{O ha}^{-1}$ ）を達成できるとした。ただし，交換性カリ含量が $180 \text{ mg-K}_2\text{O kg}^{-1}$ 未満の条件では土壌中のカリが収奪されるので，堆肥施用によるカリ投入（ $220 \sim 330 \text{ kg-K}_2\text{O ha}^{-1}$ ）を推奨している。北海道では，基準収量 $13.5 \sim 21.0 \text{ Mg ha}^{-1}$ に対し，土壌診断を行う場合のカリ施肥量（堆肥等有機物由来も含む）は $0 \sim 210 \text{ kg-K}_2\text{O ha}^{-1}$ と設定されており，上記報告と比較すると若干少ないと考えられる（北海道農政部，2010）。北海道内における既往の知見をみると，トウモロコシのカリ吸収量は $140 \sim 400 \text{ kg-K}_2\text{O ha}^{-1}$ の範囲にあるため（北海道農政部，2019；中津ら，2015），土壌の交換性カリ含量が少ない場合には吸収量相当のカリを施用することが適当と考えられる。カリはぜいたく吸収される場合もあるので（Sunaga et al., 2015），まずは土壌養分，施肥量，乾物収量および吸収量の関係を整理する必要がある。

V-2 ふん尿処理物を活用したトウモロコシ栽培

第Ⅳ章では，ふん尿処理物を主体とした施肥設計を簡易に行うため，乳牛ふん尿を主原料とする堆肥およびスラリーの肥料換算係数について，これまで未検討であった項目について検討を加えた。窒素については，いずれのふん尿処理物でも経年的な有機態窒素の分解率は漸減するものの，連用にとまなう蓄積を考慮すると減肥可能量は増加すると考えられた。栽培試験の結果も踏まえると連用効果として上乗せできる窒素肥効は，堆肥およびスラリーのいずれも全窒素含量の10%相当（肥料換算係数として0.1上乗せ）と見込まれた。これはテンサイなど生育期間の長い畑作物を対象とした基準とほぼ同等であった（中津ら，2000）。分施体系を基本とするトウモロコシ栽培において，連用効果は地温が高まった生育中期以降に発現すると考えられるので，分施窒素から減肥することが妥当と考えられる。一方，連用で増大する窒素肥効については，原料や処理方法が大きく異なるふん尿処理物を連用する場合や，連用年数が長期にわたる場合は，土壌に残存し

たふん尿処理物由来窒素の肥効発現が、本研究の結果と異なることが考えられるので第Ⅱ章で導いた土壌診断を併用することが肝要である。なお、第Ⅱ章において基肥窒素の重要性が確認されていることを踏まえると、一般的に無機態窒素含量が少ない堆肥を主体とした施肥を行う際は、初期生育を確保するためスタータ窒素として化学肥料 40 kg ha^{-1} を基肥として施用することが妥当であろう。トウモロコシに対するふん尿処理物のリン酸肥効については、生育時期や栽培年によっては化学肥料と概ね同等、またはそれ以上と判断できる場合もあり、北海道外で広く用いられる肥効率 (60 ~ 100 % ; 西尾, 2006 ; 肥料換算係数として 0.6 ~ 1.0) と同様に、ふん尿処理物中の全リン酸含量の 60 % 以上を減肥対象と見込むことが可能と考えられた。一方で、同一製造場所でもふん尿処理段階における成分変動が一定程度あること (大家ら, 2018)、播種床造成工程、施肥位置および気象などの要因により、化学肥料よりも低く見積もることが合理的な場面があることを踏まえると (東田・中瀬, 2013)、生産現場で活用することを想定した肥料換算係数は 0.6 と見込んでおくことが適当と考えられる。前述のように (第Ⅳ章)、現実的なふん尿処理物の施用量を想定すると、施肥標準量の 3 ~ 4 割程度の減肥が可能と見込まれるため、圃場におけるリン酸収支の改善に貢献できる。今後、ふん尿処理物の易溶性画分を簡易に評価できるようになれば、更なるリン酸減肥を期待できる。ただし、このような減肥を行ったとしても、作物に吸収されなかったリン酸の一部は作土に可給態画分として残存するため (谷ら, 2011)、定期的な土壌診断が不可欠である。

近年の酪農場では多頭化にともないふん尿処理物の発生量が増加しているため、本研究で示した施肥指針を遵守したうえで、ふん尿処理物を最大限活用するこ

とが望ましい。その際、環境負荷を増大させず、土壌の養分状態を適正に維持するためには、ふん尿処理物に由来するいずれの肥料成分も過剰にならないことが前提となる。そこで、北海道で酪農を基幹産業とする根釧地域を対象に、以下の条件において肥料三要素からみたふん尿処理物の施用上限量を概算した (表 V -1)。ここで、窒素は第Ⅳ章で得られた堆肥およびスラリーの有機態窒素分解率に基づき、窒素環境容量を超えないこととした (松本・唐, 2006 ; 中辻ら, 2016)。また、リン酸はトウモロコシ連作畑における AM 菌の効果を見込み施肥標準量から 20 % 減じた施肥量とし (第Ⅲ章)、カリは土壌への過剰な蓄積を進行させないため吸収量を超えないこととした。表 V -1 より、三要素がいずれも過剰とならないふん尿処理物の施用量は、窒素またはカリが制限要因になる場面が多いと考えられ、堆肥で 72 Mg ha^{-1} (ただし、連用年数が長くなると最小で 49 Mg ha^{-1})、スラリーで 52 Mg ha^{-1} と見込まれる。このようなふん尿処理物の施用上限量は、現在の酪農経営における乳牛飼養頭数と耕地面積、とりわけトウモロコシ作付面積を考えると厳しい側面があることは否定できない。しかし、牧草地を含めた酪農経営全体でふん尿処理物を計画的に利用し (三枝, 2018)、トウモロコシ畑における養分収支を改善する取り組みが必要である。

V-3 今後の展望

本研究の成果は、各要素技術について更なる高度化の余地が残されているものの、環境保全に配慮したトウモロコシの安定栽培に貢献できる。今後は、生産現場における取り組みを推進するため、これらの要素技術を体系化したツールの開発など簡易に施肥設計するための環境づくりが必要と考える。

表 V -1 トウモロコシ畑におけるふん尿処理物の施用上限量の試算

要素	各要素上限量 考え方	要素量 kg ha^{-1}	ふん尿処理物由来の 要素上限量 kg ha^{-1}		ふん尿処理物の 現物上限量 Mg ha^{-1}	
			堆肥	スラリー	堆肥	スラリー
N ¹⁾	窒素環境容量を超えない	231	210 ~ 352	232 ~ 261	49 ~ 82	52 ~ 58
P ₂ O ₅ ²⁾	施肥標準量を超えない	160	267	267	94	126
K ₂ O ³⁾	カリ吸収量を超えない	200	200	200	72	52

根釧地域の火山灰土壌における基準収量 (乾物収量 15 Mg ha^{-1} ; 北海道農政部, 2010)、当該地域の平均的なふん尿処理物の成分含有量 (松本・實示戸, 2005 ; 松本・實示戸, 2006) を想定した。

1) 連用 5 ~ 10 年目におけるふん尿処理物の有機態窒素分解率に基いて試算した (第Ⅳ章)。窒素環境容量は、余剰水量 (810 mm ; 中標津の 1991 ~ 2020 年の平均値) と窒素吸収量 (150 kg ha^{-1} ; 表 II -8) から求めた。

2) トウモロコシ連作畑を想定し、施肥標準 (200 kg ha^{-1} ; 北海道農政部, 2010) から 20 % 減じた (第Ⅲ章)。

3) 既往知見の総体カリ含有率 ($13.3 \sim 14.8 \text{ g-K}_2\text{O kg}^{-1}$; 北海道農政部, 2019) から設定した。

一方で、農業生産現場における施肥管理では、適正施肥および環境保全を意識した取り組みの優先度が高いとは言えない場合がある。様々な技術の導入が進まない理由の一つとして、これらを実践しても生産者がメリットを認識しづらいことが考えられる。短期的には生産物や環境への影響が見えづらいためである。トウモロコシのホールクロープサイレージとしての飼料価値は、雌穂がどの程度含まれているかによって決まるため（戸澤，2005），想定される気象条件において適切な品種選定，適期作業および施肥管理を行えば，期待される生産物を得ることができると考えられる。しかしながら，逆説的にいうと各地域で適切な肥培管理を行わない場合，良質な生産物を得られない。実際に，栽植密度や施肥などの肥培管理がトウモロコシの栄養成分や発酵品質に影響を及ぼすことが指摘されている（名久井ら，1984；原田ら，1996；古賀ら，1996；原田ら，2001）。本研究では検討できなかったが，施肥管理が飼料品質に与える影響についても確認が必要である。

酪農経営とは直結しない環境保全について，関心を高めることはいっそう難しい。窒素については，過剰投入が地下水汚染を引き起こすことは明らかであるが，汚染経路を容易に特定できないこと，自然環境の影響を受けることなどの理由により制御が難しい（前田，2007）。「窒素環境容量」は農耕地の窒素収支と水収支から計算できる簡便な硝酸汚染リスク評価指標であり（松本ら，2006；中辻ら，2016），これに基づく窒素投入量の制限が有効と思われる。また，様々な施肥条件における窒素溶脱量をモデル解析により予測することも有効である（Asada et al., 2013；前田，2007）。当地域でふん尿処理物を連用したトウモロコシ畑についても，モデル活用の有効性が示唆されており今後の発展が望まれる（八木ら，2012）。リン酸については，本研究において AM 菌やふん尿処理物の活用により大幅な減肥の可能性が示唆されたものの，生産性低下のリスク回避に大きく配慮した指針を結論としたため，肥料コストの削減効果も見えづらくなっ

た。一方で，リン酸肥料は，近い将来，原料であるリン鉱石の品質低下や枯渇が懸念される資材であることに加え（安藤 1981；黒田ら，2005），資材にはカドミウムやヒ素など有害な不純物が含有されることから（菅原，2014），可能な限り化学肥料に依存しない施肥体系を構築することが急務である。リン酸肥料を多用するわが国では，化学肥料が農耕地におけるカドミウム負荷の主要因であることが指摘され（Mishima et al., 2004），北海道でも全リン酸含量が高いほど可給態カドミウム含量も高まることが指摘されている（谷・木下，2020）。施肥が農地および生産物に与える影響について多面的に検討を継続する必要があるものの，条件に応じて必要最小限の施肥を安心して実行するための技術開発と，それを当たり前とする共通認識が必要と思われる。

今後は，サイレージ原料としての品質，トウモロコシ栽培導入による酪農経営全体への影響，さらに農業生産環境への長期的な影響も評価したうえで，各地域における最適な栽培体系を構築する取り組みが望まれる。

V-4 結論

本研究を結論すると次のとおりである。作条基肥窒素は濃度障害のリスクが高まらない範囲で基肥重点の施肥を行い，総窒素施肥量は窒素肥沃度と収量水準に対応して設定する。トウモロコシを連作する場合，AM 菌のリン吸収促進効果を期待できるので，リン酸は通常の土壌診断に基づく施肥対応から少なくとも 20 % 減肥することが可能である。ふん尿処理物を活用する際，窒素は 5 年以上の連用条件において全窒素含量の 10 % 相当を連用効果として見込むことができる。また，全リン酸含量の少なくとも 60 % を減肥対象と見込むことができる。以上の知見に基づく施肥管理を実践すれば，環境保全に配慮したトウモロコシの安定栽培が可能である。

第Ⅵ章 要約

国産飼料基盤に立脚した酪農生産を実現するため、北海道では単位土地面積当たりのエネルギー生産量が高いトウモロコシは重要な自給飼料作物と位置づけられ、近年、その栽培面積は増加を続けている。ホールクロップ用途としてのトウモロコシの生産性は、1980年代以降、品種改良や栽培技術の改善により向上したが、北海道におけるトウモロコシの施肥基準は大きな改訂がなされていなかった。近年の農業生産は生産性の向上と同時に、環境保全、肥料節減の視点に立った施肥管理を推進する必要がある。本研究では、現在栽培されているトウモロコシを対象に、土壌中や施用するふん尿処理物中の養分含量に基づき、必要養分を過不足なく供給するための合理的なトウモロコシの施肥法を確立しようとした。

1. 土壌診断に基づく窒素施肥

分施肥を前提とした場合の窒素施肥について、基肥と分肥の適正な施肥配分、トウモロコシの収量水準と窒素肥沃度に対応した必要窒素施肥量を明らかにした。適正な窒素施肥配分は、近年の栽培条件でも従来の考え方と同様に基肥重点型の施肥を推奨すること、その際の作条基肥窒素量の適正な水準は地域によらず $80 \sim 100 \text{ kg ha}^{-1}$ とすることが妥当と結論された。次いで、適正な基肥窒素の施肥条件において、気象、収量水準および土壌型が異なる地域を対象に分施肥の用量試験を実施した。多様な条件で得られた結果を統一的に解析した結果、乾物収量や窒素吸収量に地域間差が認められたが、乾物収量あたりの窒素吸収量に地域間差は認められなかったことから、地域によらず収量水準に対応した目標窒素吸収量を設定できると判断した。また、土壌の窒素肥沃度評価指標として熱水抽出性窒素の適用が可能と考えられた。各処理区の窒素吸収量は、総窒素施肥量および熱水抽出性窒素含量と、窒素以外の要因で制限される収量水準の影響を反映するため、各圃場の圃場最大収量（窒素用量試験での最大乾物収量）を加えた3つの要因を説明変数とした重回帰式により推定できた。また、各処理区の乾物収量は、上記の重回帰式から求めた推定窒素吸収量を説明変数とする一次回帰式で表すことができた。これら2つの関係式より、各圃場で達成可能な収量水準と土壌の熱水抽出性窒素含量に基づき、必要窒素施肥量を算出することができる。

2. アーバスキュラー菌根菌（AM菌）の機能を活用したリン酸施肥

肥料三要素の中で施肥量が最も多いリン酸肥料を節減するため、北海道の中でも特に栽培期間が冷涼湿润な根釧地域の普通黒ボク土において、土着AM菌のリン吸収促進効果と、それによるリン酸減肥可能量を検討した。AM菌の宿主作物であるトウモロコシ跡地における後作トウモロコシは、非宿主作物跡地よりAM菌感染率および初期生育量が高かった。また、トウモロコシに対するリン酸施肥の効果を前作物ごとに見ると、非宿主作物跡地の初期生育量はリン酸施肥充足率の低下とともに減少したのに対し、トウモロコシ跡地ではリン酸施肥充足率が低下しても初期生育量の減少度合は小さかった。このことから、トウモロコシ連作畑では、AM菌を活用した効率的なリン酸施肥技術を確立できると考えられた。次いで、根釧地域において、土壌型、リン酸肥沃度、播種床造成法などが異なるトウモロコシの連作畑を対象に、リン酸の用量試験を実施した。リン酸減肥の可否を判断する指標として、リン栄養状態を反映しやすい初期生育指数を用いることが妥当と考えられた。収穫期収量を低下させないリン酸施肥量は、土壌型、有効態リン酸含量およびAM菌感染率などにより異なると考えられた。トウモロコシ連作畑において、AM菌の効果を考慮したリン酸減肥可能量は、従来比で20%以上と見込まれ、条件によっては80%の減肥の可能性が示唆された。

3. 飼料用トウモロコシに対するふん尿処理物の肥効評価

トウモロコシ畑においてふん尿処理物を主体とした施肥管理を簡易に行うため、これまで整理されていなかった肥料換算係数（減肥可能量を計算するため、ふん尿処理物の各成分の全含量に乗じる係数）について検討を加えた。窒素肥効については、埋設試験において堆肥およびスラリーのいずれについても、埋設2年目以降も経年的に有機態窒素の分解が認められた。栽培試験では、連用2年目以降の堆肥およびスラリーの肥料換算係数は、単年施用を想定した現行基準（堆肥で0.20、スラリーで0.40）を上回る場合が多く、連用年数がある程度経過した条件での窒素肥料換算係数は堆肥で約0.3、スラリーで約0.5と見込まれた。リン酸肥効については、圃場試験において堆肥およびスラリーは化学肥料と同等かそれ以上と考えられたが、得

られた肥料換算係数に幅があった。本研究の結果に加え、乳牛ふん尿堆肥のリン酸溶解性に関する既往の知見や生産現場でのふん尿成分量の変動も考慮しても、堆肥およびスラリーのリン酸肥料換算係数は0.6以上

と見込むことができると考えられた。

以上の知見に基づく施肥管理を実践すれば、環境保全に配慮したトウモロコシの安定栽培が可能である。

謝 辞

本研究をまとめるにあたり、帯広畜産大学 谷 昌幸教授には終始懇切なるご指導を頂き、さらに本稿のご校閲を賜った。帯広畜産大学 大西一光 准教授、橋本靖 准教授、木下林太郎 助教には本稿のご校閲と適切なご教示を頂いた。

本研究の一部は、北海道立総合研究機構 酪農試験場（旧北海道立根釧農業試験場）で実施された環境省委託プロジェクト研究「湿原流域の変容の監視手法の確立と生態系修復のための調査的管理手法の開発」、農林水産省委託プロジェクト研究「気候変動に対応した循環型食料生産等の確立のための技術開発」の研究成果を取り纏めたものである。プロジェクトの運営にあたり、環境省総合環境政策局および農林水産省農林水産技術会議事務局の関係各位には、多大なるご支援を頂いた。この間、根釧農業試験場長または酪農試験場長として在任された扇 勉 博士、宮崎 元氏、草刈直仁氏、原 仁氏、さらに同試験場 研究部長または草地研究部長として在任された三木直倫 博士、石田 亨氏、大坂郁夫 博士、宝寄山裕直氏、杉本昌仁 博士には、研究途上で御指導と激励を賜った。

酪農試験場 草地研究部 飼料環境グループ（当時）の松本武彦 博士（現秋田県立大学教授）には、本研究の端緒を与えて頂いた。また、本研究が行われた大半の期間を通じて研究遂行上の便宜を図って頂くとともに暖かいご指導と激励を賜った。同グループ（当時）の三枝俊哉 博士（現酪農学園大学教授）、酒井 治氏（現北見農業試験場）には、本研究の初期から取り纏めに至るまでの期間、詳細な論議をして頂くとともに暖かいご指導と激励を賜った。同グループ（当時）の佐藤尚親氏（現雪印種苗株式会社）には、研究遂行のための様々なご支援を頂いた。また、本研究をともに進めて頂いた国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構 北海道農業研究センター（当時）の岡 紀邦 博士（現中日本農業研究センター）、大友 量 博士（現農業環境研究部門）、小林創平 博士（現九州沖縄農業研究センター）、北海道立総合研究機構 北見農業試験場（当時）の中辻敏朗 博士（現研究本部）、小野寺政行氏（現道南農業試験場）、唐 星児氏、大塚省吾氏（現上川農業試験場）には、本研究に係る計画、解析、考

察および論文執筆について多くのご助言を頂いた。北海道立総合研究機構 中央農業試験場（当時）の富沢ゆい子氏（現企画調整部 原子力環境センター駐在）、十勝農業試験場（当時）の須田達也氏（現中央農業試験場）には貴重なデータを提供頂いた。

本研究の実施・取り纏めを行った期間に北海道立総合研究機構 中央農業試験場 農業環境部長に在任された志賀弘行 博士（現ホクレン農業協同組合連合会）、加藤 淳 博士（現名寄市立大学教授）、長尾明宜氏（現TOMATEC 株式会社）、安積大治氏（現上川農業試験場）、中本 洋氏（現十勝農業試験場）、渡邊 祐志氏には、本研究に関する論文のご校閲を賜るとともに、取り纏めにあたり暖かいご指導と激励を賜った。酪農試験場 草地研究部 飼料環境グループ（当時）の出口健三郎氏（現酪農試験場天北支場）、木場稔信氏（現北見農業試験場）、林 拓博士（現畜産試験場）、有田敬俊氏、牧野 司氏（現中央農業試験場）、國本亜矢氏、板垣英祐氏には、本研究を行うにあたり示唆に富む有益な論議と共同作業をともにして頂いた。また、本研究は、研究活動のきっかけをつくってくださった方、研究の過程や節目で熱いご指導と激励をくださった方など、ここに書ききれなかった多くの方々のご協力を頂きながら進めることができた。

実際の研究作業の遂行に際しては酪農試験場 飼料環境グループおよび乳牛グループの農業技能員諸氏、本研究の実施中に在任された非常勤農業技能員諸氏のご協力に負うところが大きい。また、現地試験や調査の実施に際しては、根室農業改良普及センター、釧路農業改良普及センター、網走農業改良普及センター、ホクレン農業協同組合連合会の関係各位、試験圃場を提供してくださった生産者各位に多くのご協力を頂いた。

本研究の取り纏めにあたっては、中央農業試験場 環境保全グループの関係各位にご配慮頂いた。

以上の諸氏に心から感謝の意を表する。

最後に、私の生活を見守ってくれた両親、私の仕事を理解し様々な場面でサポートしてくれた妻、いつも応援してくれた長女および長男に、心から感謝の気持ちを捧げる。

引用文献

- 安藤淳平 1981. リン鉱石の低品位化と対策. 農林水産技術研究ジャーナル, 4, 4, 27-30.
- 青木ひかる 2008. 飼料作物生産における家畜ふん堆肥を中心とした施肥での適正施用成分量の推定. 千葉県畜産総合研究センター研究報告, 8, 67-70.
- 荒川祐介 2012. 堆肥のペレット成型がそのリン酸肥効に及ぼす影響. 土肥誌, 83, 249-255.
- 荒木和秋 2000. 北海道酪農における自給飼料生産の現状と課題. 農林水産技術研究ジャーナル, 232, 11-16.
- Arihara, J., and Karasawa, T. 2000. Effect of previous crops on arbuscular mycorrhizal formation and growth of succeeding maize. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 46, 43-51.
- Asada, K., Eguchi, S., Urakawa, R., Itahashi, S., Matsumaru, T., Nagasawa, T., Aoki, K., Nakamura, K. and Katou, H. Modifying the LEACHM model for process-based prediction of nitrate leaching from cropped Andosols. *Plant Soil*, 373, 609-625.
- Barry, D. A. J. and Miller, M. H. 1989. Phosphorus nutritional requirement of maize seedlings for maximum yield. *Agron. J.*, 81, 95-99.
- Coque, M., and Gallais, A. 2007. Genetic variation for nitrogen remobilization and postsilking nitrogen uptake in maize recombinant inbred lines: Heritabilities and correlations among traits. *Crop Sci.*, 47, 1787-1796.
- Deguchi, S., Shimazaki, Y., Uozumi, S., Tawaraya, K., Kawamoto, H., and Tanaka, O. 2007. White clover living mulch increases the yield of silage corn via arbuscular mycorrhizal fungus colonization. *Plant Soil*, 291, 291-299.
- Deguchi, S., Uozumi, S., Touno, E., Uchino, H., Kaneko, M., and Tawaraya K. 2017. White clover living mulch reduces the need for phosphorus fertilizer application to corn. *Eur J Agron.*, 86, 87-92.
- Deguchi, S., Yagi, T., and Ohtomo, R. 2021. Low indigenous AM fungal activity would be a necessary but not sufficient condition for effective utilization of exogenous AM fungal inoculum to forage corn. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 67, 50-56.
- 土壌環境分析法編集委員会 1997. 土壌環境分析法, p.195-385. 博友社, 東京.
- Evans, D. G., and Miller, M.H. 1990. The role of the external mycelial network in the effect of soil disturbance upon vesicular-arbuscular mycorrhizal colonization of maize. *New Phytol.*, 114, 65-71.
- Grey, W. E. 1991. Influence of temperature on colonization of spring varleys by vesicular arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant Soil*, 137, 181-190.
- Haeghele, J. W., Cook, K. A., Nichol, D. M., and Below, F. E. 2013. Changes in nitrogen use traits associated with genetic improvement for grain yield of maize hybrids released in different decades. *Crop Sci.*, 53, 1256-1268.
- 濱戸もえぎ・前田武己・小野剛志・雑賀 優 2009. 堆肥化過程を異にする家畜排せつ物堆肥の飼料用トウモロコシ (*Zea mays* L.) に対する窒素肥料効果の差異. 日草誌, 55, 117-127.
- 原田久富美・畠中哲哉・杉原 進 1996. 窒素多量施用条件下のトウモロコシ (*Zea mays* L.) の硝酸態窒素含量. 日草誌, 41, 352-356.
- Harada, H., Yoshimura, Y., Sunaga, Y., and Hatanaka, T. 2000. Variations in nitrogen uptake and nitrate-nitrogen concentration among sorghum groups. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 46, 97-104.
- 原田久富美・須永義人・畠中哲哉 2001. トウモロコシ (*Zea mays* L.) の養分濃度の品種間差異. 日草誌, 47, 289-295.
- 橋本知義・神山和則・久保田哲史 2004. 農林業センサスを利用した家畜ふん尿由来有機物の窒素換算流通量及び圃場投入量の推定. 土肥誌, 75, 593-600.
- 畠中哲哉・倉島健次・木村 武 1983. 家畜ふん尿施用土壌の土壌管理に関する研究. I 化学性からみた草地・飼料畑土壌の実態と問題点. 草地試験場研究報告, 25, 48-59.
- 林 拓・佐藤尚親・牧野 司 2006. サイレージ用トウモロコシ早生品種の狭畦露地栽培における生育の特徴. 日草誌, 52 (別 1), 56-57.
- 林 拓・佐藤尚親・牧野 司 2007. とうもろこし (サイレージ用) 新品種「クウィス」. 北農, 74, 144.
- 林 拓・牧野 司・佐藤尚親 2008. 根釰地域におけるサイレージ用とうもろこしの狭畦・2 品種交互条播栽培の特徴. 日草誌, 54 (別), 42-43.
- 林 拓 2011. 北海道における不耕起栽培. 日草誌, 57, 162-166.
- 林 拓・牧野 司・酒井 治・三枝俊哉 2013. とうもろこし (サイレージ用) 新品種「KD254 (KE8301)」. 北農, 80, 170.

- 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別別の土壌養分, 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.
- 東田修司・中瀬祐介 2013. 堆肥に含まれるリン酸の肥効. 北農, 80, 398-406.
- 北條 亨・阿部正夫・杉本俊昭・斎藤忠史・神辺佳弘・脇坂 浩 2005. 家畜ふん尿施用による飼料畑下層への窒素動態調査. 栃木県畜産試験場研究報告, 21, 1-4.
- 北海道農政部 1980. 昭和 55 年普及奨励ならびに指導参考事項, p. 429-447. 北海道農政部, 札幌.
- 北海道農政部 1984. 昭和 59 年普及奨励ならびに指導参考事項, p. 372-377. 北海道農政部, 札幌.
- 北海道農政部 2003. 平成 14 年普及奨励ならびに指導参考事項, p. 105-107. 北海道農政部, 札幌.
- 北海道農政部 2004. 北海道緑肥作物等栽培利用指針(改訂版), p. 1-101. 札幌.
- 北海道農政部 2010. 北海道施肥ガイド 2010, p. 1-235. 北海道農政部, 札幌.
- 北海道農政部 2013. 北海道農業生産技術体系第 4 版, p. 305-350. 北海道農政部, 札幌.
- 北海道農政部 2014. 平成 26 年普及奨励ならびに指導参考事項, p. 152-153. 北海道農政部, 札幌.
- 北海道農政部 2016 a. 第 7 次北海道酪農・肉用牛生産近代化計画, p. 22. 北海道農政部, 札幌.
- 北海道農政部 2016 b. 北海道家畜排せつ物利用促進計画, p. 1-7. 北海道農政部, 札幌.
- 北海道農政部 2017 a. 平成 29 年普及奨励ならびに指導参考事項, p. 45-47. 北海道農政部, 札幌.
- 北海道農政部 2017 b. 平成 29 年普及奨励ならびに指導参考事項, p. 86-88. 北海道農政部, 札幌.
- 北海道農政部 2018. 北海道牧草・飼料作物優良品種一覧, p. 1-37. 北海道農政部, 札幌.
- 北海道農政部 2019. 平成 31 年普及奨励ならびに指導参考事項, p. 84-86. 北海道農政部, 札幌.
- 北海道立総合研究機構農業研究本部 2012. 土壌・作物栄養診断のための分析法 2012, p. 1-193. 北海道立総合研究機構, 長沼.
- 井上博道・伊藤豊彰・三枝正彦 2000. 全量基肥・接触施肥・不耕起栽培におけるデントコーンの養分吸収と収量性. 土肥誌, 71, 674-681.
- 井上 聡・奥村健治・牧野 司・広田知良 2017. クラスター分析とハイサーグラフによる北海道の気候区分. 生物と気象, 17, 1-5.
- 石塚喜明・林 満・西野紀子 1967. 畑作物に対する施肥位置に関する研究(第 5 報) 肥料の種類, 量, 施肥位置と作物根系発達の相互関係の総括. 土肥誌, 38, 373-378.
- Isobe, K., Sugimura, H., Maeshima, T., and Ishii, R. 2008. Distribution of arbuscular mycorrhizal fungi in upland field soil of Japan. 2 Spore density of arbuscular mycorrhizal fungi and infection ratio in soybean and maize fields. *Plant Prod. Sci.*, 11, 171-177.
- 岩田文男 1973. トウモロコシの栽培理論とその実証に関する作物学的研究. 東北農業試験場研究報告, 46, 63-129.
- Jakobsen, I., Abbott, L. K. and Robson, A. D. 1992. External hyphae of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi associated with *Trifolium subterraneum* L. 1. Spread of hyphae and phosphorus inflow into roots. *New Phytol.*, 120, 371-380.
- Karasawa, T., Arihara, J., and Kasahara, Y. 2000. Effects of previous crops on arbuscular mycorrhizal formation and growth of maize under various soil moisture conditions. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 46, 53-60.
- Karasawa, T., Kasahara, Y., and Takebe, M. 2001. Variable response of growth and arbuscular mycorrhizal colonization of maize plants to preceding crops in various types of soils. *Biol. Fertil. Soils*, 33, 286-293.
- 唐澤敏彦・笠原賢明・建部雅子 2001. 緑肥作物の導入によるアーバスキュラー菌根菌の増殖とトウモロコシ栽培への利用. 土肥誌, 72, 357-364.
- 唐澤敏彦 2004. 輪作におけるアーバスキュラー菌根菌の動態と作物の生育に関する研究. 北海道農業研究センター研究報告, 179, 1-71.
- Karasawa, T., Hodge, A., and Fitter, A. H. 2012. Growth, respiration and nutrient acquisition by the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus mosseae* and its host plant *Plantago lanceolata* in cooled soil. *Plant Cell. Environ.*, 35, 819-828.
- 糟谷真宏・荻野和明・廣戸誠一郎・石川博司・鈴木良地 2011. 牛ふん堆肥または豚ふん堆肥を連用する黄色土野菜畑における 5 年間の養分動態. 愛知県農業総合試験場研究報告, 43, 137-149.
- 片峯美幸・亀和田國彦・鈴木康夫・伊藤良治・中山喜一・内田文雄 2000. 黒ボク土畑における各種有機物の 20 年間連用が作物生育ならびに土壌理化学性に及ぼす影響. 栃木県農業試験場研究報告, 50, 25-32.
- 加藤雅彦・小宮山鉄兵・藤澤英司・森國博全 2010. 畑

- 条件下での牛糞・鶏糞堆肥と重過リン酸石灰の併用による肥料由来の可給態リン酸の不可給化の抑制。土肥誌, 81, 367-371.
- 吉良賢二 1981. 北限地帯におけるサイレージ用トウモロコシの生育および生産性に関する研究 第1報 生育および収量に及ぼす播種期の影響。日作記, 50, 481-488.
- 吉良賢二 1985. 北限地帯におけるサイレージ用トウモロコシの生育および生産性に関する研究 第3報 初期生育が収量に及ぼす影響。日作記, 54, 47-53.
- Klironomos, J. N., and Hart, M. M. 2002. Colonization of roots by arbuscular mycorrhizal fungi using different sources of inoculum. *Mycorrhiza*, 12, 181-184.
- 小林国之 2016. 面積あたり自給飼料由来乳量の規定要因と意義—北海道酪農を対象に—. フロンティア農業経済研究, 19, 1-16.
- 小林紀彦 1988. *Gigaspora margarita* 胞子の発芽に影響をおよぼす要因について。土と微生物, 31, 13-23.
- 古賀照章・太田堯道・春日重光 1996. トウモロコシの栽植密度がその生育, 発酵, 成分および栄養価に及ぼす影響。長野県畜試研報, 24, 1-9.
- 濃沼圭一 2004. トウモロコシの栄養収量—北海道の例。松中照夫編牧草・トウモロコシの生産量から乳生産を考える, p. 83-94. 酪農総合研究所, 札幌.
- 濃沼圭一 2013. 北海道における飼料用トウモロコシの栽培技術および育種の動向。北畜草会報, 1, 23-27.
- 小島知子・大場広輔 2006. アーバスキュラー菌根菌実験法 (3) 胞子の分離・観察。土と微生物, 60, 63-69.
- Komiyama T, Ito T, Saigusa M. 2014. Measurement of the maximum amount of water-extractable phosphorus in animal manure compost by continuous and sequential water extraction. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 60, 196-207.
- 河野憲治・尾形昭逸・丸本一城 1992. 鉍質土と黒ボク土における添加有機物と化学肥料の窒素, イオウおよびリンの利用率の比較。土肥誌, 63, 146-153.
- 窪田文武・植田精一 1981. 飼料用トウモロコシの栽培環境と生産性 I トウモロコシの気象生産力の地域間差。日草誌, 27, 167-173.
- 黒田章夫・滝口昇・加藤純一・大竹久夫 2005. リン資源枯渇の危機予測とそれに対応したリン有効利用技術開発。環境バイオテクノロジー誌, 4, 87-94.
- 櫛引英男 1979. 北海道におけるサイレージ用トウモロコシ栽培。農業技術, 34, 300-302.
- 櫛引英男 1980. 寒冷地におけるサイレージ用トウモロコシの原料生産特性と早晩性品種群の配合に関する研究 IV 地帯区分と品種配合。日草誌, 26, 7-13.
- Liang, B. C., and MacKenzie, A. F. 1994. Corn yield, nitrogen uptake and nitrogen use efficiency as influenced by nitrogen fertilization. *Can. J. Soil Sci.*, 74, 235-240.
- 前田守弘 2007. 硝酸性窒素による地下水汚染にどう対処するか。化学と生物, 45, 219-222.
- 松本武彦・寶示戸雅之 2005. チモシー単播草地に施用した乳牛スラリーの化学成分変動に対応した窒素肥効の評価。土肥誌, 76, 253-259.
- 松本武彦・寶示戸雅之 2006. チモシー単播草地に表面施用した乳牛堆肥の窒素無機化率を考慮した肥効評価。土肥誌, 77, 407-412.
- 松本武彦・糟谷広高・扇勉・寶示戸雅之 2008. チモシー (*Phleum pratense* L.) 草地に対するスラリーの多量施用が牧草生産性, 乳牛の泌乳量および血液成分に与える影響。日草誌, 54, 223-229.
- 松本武彦・唐星児 2006. 北海道の市町村を単位とした窒素環境容量に基づく地下水の硝酸汚染リスクの評価。土肥誌, 77, 17-24.
- 松永俊朗・森泉美穂子 2012. 土壌の可給態窒素分析法と課題。土肥誌, 83, 625-629.
- 松中照夫・近藤誠司 2006. 北海道の採草地 1 ha から期待できる乳生産量—土地面積当たりで乳生産を考える—。畜産の研究, 60, 641-648.
- 松崎克彦 2009. アーバスキュラー菌根菌とその利用。農業および園芸, 84, 170-175.
- Miller, M. H. 2000. Arbuscular mycorrhizae and the phosphorus nutrition of maize: A review of Guelph studies. *Can. J. Plant Sci.*, 80, 47-52.
- Mishima, S., Kimura, R., and Inoue, T. 2004. Estimation of cadmium load on Japanese farmland associated with the application of chemical fertilizers and livestock excreta. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 50, 263-267.
- 光永貴之 2010. 使える統計学基礎講座 (第4回) 一分散分析と共分散分析—。農作業研究, 45, 183-189.
- 水野直治・南松雄 1980. 硫酸—過酸化水素による農作物中 N, K, Mg, Ca, Fe, Mn 定量のための迅速処理法。土肥誌, 51, 418-420.
- 中津智史・濱村美由紀・中本洋・甲田裕幸 2015. 道央地域における子実用とうもろこしの栽培法 (2)。北農, 82, 267-273.
- 中津智史・東田修司・山神正弘 2000. 淡色黒ボク土壌

- における堆きゅう肥の連用が収量・品質および土壌環境に及ぼす影響. 土肥誌, 71, 97-100.
- 中辻浩善 2009. 土地利用方式からみた乳牛生産の評価. 日草誌, 55, 79-85.
- 中辻敏朗・笛木伸彦・中津智史・鈴木慶次郎・志賀弘行 2016. 地下水の硝酸汚染リスク評価指標としての窒素環境容量の有効性. 土肥誌, 87, 360-364.
- 名久井 忠・岩崎 薫・早川政市 1981. ホールクロップサイレージ用トウモロコシの収穫適期の検討. 日草誌, 26, 412-417.
- 名久井 忠・箭原信男・高井慎二 1984. 東北地域におけるトウモロコシの収穫時期, 栽植密度がサイレージの飼料価値と収量におよぼす影響. 東北農試研報, 70, 85-103.
- Nelson, L. A., Voss, R. D., and Pesek, J. T. 1985. Agronomic and statistical evaluation of fertilizer response. In O.P. Engelstad (ed.) Fertilizer Technology and Use (third ed.), p.53-90, ASA, Madison, WI.
- 日本土壤協会 2010. 堆肥等有機物分析法 2010 年版, p. 53-55. 日本土壤協会, 東京.
- 西尾道徳 2006. 農業技術大系, p. 162.8-162.15. 農文協, 東京.
- 野中昌法・吉田富男 1987. VA 菌根菌の増殖に及ぼす各種リン酸塩の影響. 土肥誌, 58, 561-565.
- 農耕地土壌分類委員会 1995. 農耕地土壌分類第3次改訂版. 農業環境技術研究所資料, 17, 1-79.
- 農林水産省. 農業・農村・基本計画 2020. https://www.maff.go.jp/j/keikaku/k_aratana/attach/pdf/index-13.pdf.
- 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.
- Oehl, F., Laczo, E., Bogenrieder, A., Stahr, K., Bösch, R., Van der Heijden, M., and Sieverding, E. 2010. Soil type and land use intensity determine the composition of arbuscular mycorrhizal fungal communities. *Soil Biol. Biochem.*, 42, 724-738.
- Oka, N., Karasawa, T., Okazaki, K., and Takebe, M. 2010. Maintenance of soybean yield with reduced phosphorus application by previous cropping with mycorrhizal plants. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56, 824-830.
- 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. 土肥誌, 50, 334-338.
- 奥野忠一・久米 均・芳賀敏郎・吉澤 正 1971. 多変量解析法, p. 1-157. 日科技連出版社, 東京.
- 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.
- 小野寺政行・新谷竜太郎・田隈篤夫・中辻敏朗 2015. 遠紋地域における飼料用とうもろこし畑の生産性阻害要因と土壌・肥培管理法. 北農, 82, 375-384.
- 大場広輔・斎藤勝晴・藤吉正明 2006. アーバスキュラー菌根菌実験法(2) アーバスキュラー菌根の観察. 土と微生物, 60, 57-61.
- 大友 量・酒井 治・塚本康貴・杉戸智子・谷藤 健・岡紀邦 2015. 北海道のダイズ作における輪作順序を考慮したリン酸減肥法. 土肥誌, 86, 549-552.
- 大津善雄・藤山正史・永田浩久・川口貴之・廣川順太 2010. 家畜ふん堆肥を連続施用した飼料畑における土壌溶液中の硝酸態窒素の推移. 長崎農林技セ研報, 1, 55-66.
- 大塚雍雄・吉原雅彦 1975. 1 ないし 2 の折曲点をもつ折れ線モデルのあてはめ. 応用統計学, 5, 29-39.
- 大家理哉・鷲尾建紀・石橋英二 2019. 牛ふんを主原料とする堆肥中リン酸並びにカリウム含量の変動特性. 岡山県農業研報, 9, 33-39.
- 小田部裕・藤田 裕・植田稔宏・折本善之 2014. クエン酸可溶性含量を指標とした家畜ふん堆肥中リン酸およびカリウムの肥効評価. 土肥誌, 85, 461-465.
- 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. 新潟県農業総合研究所畜産研究センター研究報告, 15, 6-9.
- Peng, Y., Niu, J., Peng, Z., Zhang, F., and Li, C. 2010. Shoot growth potential drives N uptake in maize plants and correlates with root growth in the soil. *Field Crops Res.*, 115, 85-93.
- Plenchette, C., Fortin, J. A., and Furlan, V. 1983. Growth responses of several plant species to mycorrhizae in a soil of moderate P fertility. *Plant Soil*, 70, 199-209.
- Prummel, J. 1957. Fertilizer placement experiments. *Plant Soil*, 8, 231-253.
- 三枝正彦・児玉広志・渋谷暁一・阿部篤郎 1993. 肥効調節型被覆尿素を用いたデントコーンの全量基肥栽培. 日草誌, 39, 44-50.
- 三枝俊哉 2018. 酪農生産現場における農業情報の利用環境に配慮した酪農のためのふん尿利用計画支援ソフト AMAFE. JATAFF ジャーナル, 6, 11, 28-33.
- 櫻井道彦・中辻敏朗・日笠裕治 2013. 有機栽培露地野菜畑の土壌診断に基づく窒素施肥対応の構築. 土肥誌, 84, 285-292.

- 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.
- Sato, T., Ezawa, T., Cheng, W., and Tawaraya, K. 2015. Release of acid phosphatase from extraradical hyphae of arbuscular mycorrhizal fungus *Rhizophagus clarus*. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 61, 269-274.
- Sato, T., Cheng, W., and Tawaraya, K. 2018. Effects of indigenous and introduced arbuscular mycorrhizal fungi on the growth of *Allium fistulosum* under field conditions. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 64, 705-709.
- Sawers, R. J. H., Svane, S. F., Quan, C., Grønlund, M., Wozniak, B., Gebreselassie, M. -N., González-Muñoz, E., Montes, R. A. C., Baxter, I., Goudet, J., Jakobsen, I., and Paszkowski, U. 2017. Phosphorus acquisition efficiency in arbuscular mycorrhizal maize is correlated with the abundance of root-external hyphae and the accumulation of transcripts encoding PHT1 phosphate transporters. *New Phytol.*, 214, 632-643.
- Sela, S., van Es, H.M., Moebius-Clune, B.N., Marjerson, R., Moebius-Clune, D., Schindelbeck, R., Severson, K., and Young, E. 2017. Dynamic model improves agronomic and environmental outcomes for maize nitrogen management over static approach. *J. Environ. Qual.*, 46, 311-319.
- Stanford, G. 1973. Rationale for optimum nitrogen fertilization in corn production. *J. Environ. Qual.*, 2, 159-166.
- Subedi, K. D. and Ma, B. L. 2005. Nitrogen uptake and partitioning in stay-green and leafy maize hybrids. *Crop Sci.*, 45, 740-747.
- 菅原和夫 2014. 日本農業における持続的リン利用の可能性. 農業および園芸, 89, 506-516.
- Sunaga, Y., Harada, H., and Kawachi, T. 2015. Potassium fertilization and soil diagnostic criteria for forage corn (*Zea mays* L.) production contributing to lower potassium input in regional fertilizer recommendation. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 61, 957-971.
- 鈴木源士・松崎克彦 1994. VA 菌根菌の農業への利用. 化学と生物, 32, 238-246.
- 鈴木慶次郎・志賀弘行 2004. 浸透水の硝酸性窒素濃度から見た網走地域の黒ボク土畑における投入窒素限界量. 土肥誌, 75, 45-52.
- 但野利秋 1993. 栄養特性. 山崎耕宇・杉山達夫・高橋英一・茅野充男・但野利秋・麻生昇平編 植物栄養・肥料学, p.130-161. 朝倉書店, 東京.
- 高井康雄・早瀬達郎・熊沢喜久雄 1976. 植物栄養土壌肥料大事典. p. 535-539. 養賢堂, 東京.
- 瀧 典明 2003. 畑地における家畜ふん堆肥中のリン酸の肥効. 東北農業研究, 56, 99-100.
- 田村 忠 1999. 糞尿施用量と牧草の品質・乳量への影響. 農家の友, 51, 5, 26-28.
- 田村 忠・小倉紀美・前田善夫 2001. 牧草サイレージ発酵品質に対する堆肥混入の影響および牧草収穫時の堆肥混入量の推定. 日草誌, 47, 68-71.
- 田中 明・山口淳一・原 徹夫 1971. トウモロコシの栄養生理学的研究 (第 11 報) 異なった栽植密度下における窒素およびリンの肥効の年次変異. 土肥誌, 12, 465-470.
- 谷 昌幸・木下林太郎 2020. リン酸肥料を多施用してきた普通畑土壌におけるカドミウムの可給性と作物への移行. 土肥要旨集, 66, 91.
- 谷 昌幸・溝田千尋・八木哲生・笛木伸彦・田村 元・加藤 拓・小池正徳 2011. 化学肥料と牛ふん堆肥を 25 年間連用した淡色黒ボク土畑土壌におけるリン酸の蓄積量と形態. 土肥誌, 82, 224-227.
- Tawaraya, K., Tokairin, K., and Wagatsuma, T. 2001. Dependence of *Allium fistulosum* cultivars on the arbuscular mycorrhizal fungus, *Glomus fasciculatum*. *Agric., Ecosyst. Environ., Appl. Soil Ecol.*, 17, 119-124.
- Tawaraya, K., Naito, M., and Wagatsuma, T. 2006. Solubilization of insoluble inorganic phosphate by hyphal exudates of arbuscular mycorrhizal fungi. *J Plant Nutr.*, 29, 657-665.
- Tawaraya, K., Hirose, R., and Wagatsuma, T. 2012. Inoculation of arbuscular mycorrhizal fungi can substantially reduce phosphate fertilizer application to *Allium fistulosum* L. and achieve marketable yield under field condition. *Biol. Fertil. Soils*, 48, 839-843.
- 戸荻哲郎・山川政明・出口健三郎・寺見 裕 2013. とうもろこし (サイレージ用) 新品種「ソリード Anjou227 (HE91003)」。北農, 80, 169.
- Tokatlidis, I. S. and Koutroubas, S. D. 2004. A review of maize hybrids' dependence on high plant populations and its implications for crop yield stability. *Field Crops Res.*, 88, 103-114.
- 富沢ゆい子・濱村美由紀・須田達也・渡部 敢・笛木伸彦・吉田昌幸 2017. 北海道における子実用トウモロコシの窒素利用特性と土壌診断に基づく窒素

- 施肥対応 第2報土壌診断に基づく窒素施肥対応の構築. 土肥誌, 88, 100-108.
- Tommerup, I. C., and Abbott, L.K. 1981. Prolonged survival and viability of VA mycorrhizal hyphae after root death. *Soil Biol. Biochem.*, 13, 431-433.
- 戸澤英男 1985. 寒冷地におけるホールクロップサイレージ用トウモロコシの安定多収への栽培改善と品種改良に関する研究. 道立農試報告, 53, 39-53.
- 戸澤英男 2005. トウモロコシ—歴史・文化, 特性・栽培, 加工・利用. p.1-382. 農文協, 東京.
- Treseder, K. K. 2013. The extent of mycorrhizal colonization of roots and its influence on plant growth and phosphorus content. *Plant Soil*, 371, 1-13.
- 築城幹典・齋藤弘太郎・前田武己 2009. 酪農における環境影響の経年的変化のライフサイクルアセスメント. システム農学, 25, 185-194.
- 臼木一英・山本泰由 2003. 温暖地における畑作付体系の違いがアーバスキュラー菌根菌の密度と後作物の生育・収量に及ぼす影響. 日作記, 72, 158-162.
- 臼木一英・山本泰由・田澤淳子 2007. 温暖地における前作と耕起法の組み合わせがトウモロコシの生育とアーバスキュラー菌根菌との共生関係に及ぼす影響. 日作記, 76, 394-400.
- 八木哲生・江口定夫・朝田 景・酒井 治・松本武彦・三枝俊哉 2012. 根鋤地域の肥培管理が異なる飼料用トウモロコシ畑における窒素溶脱のモデル解析. 土肥要旨集, 58, 8.
- 山田洋文 2010. 家畜ふん尿処理における新技術導入の経営的評価:「セミソリッドふん尿用固液分離装置」を事例として. フロンティア農業経済研究, 15, 63-73.
- Yao, Q., Li, X., Feng, G. and Christie, P. 2001. Mobilization of sparingly soluble inorganic phosphates by the external mycelium of an arbuscular mycorrhizal fungus. *Plant Soil*, 230, 279-285.
- 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.
- 米山忠克・堀江秀樹・建部雅子・丹野文雄 1990. 植物の根量とリン吸収の関係. 土肥誌, 61, 382-385.
- 義平大樹・安田貴大・小阪進一・大塚博志・高陽憲基 2013. サイレージ用トウモロコシに対する千鳥播栽培が収量におよぼす影響—千歳市における実規模試験—. 育種・作物学会北海道談話会会報, 54, 47-48.
- 脇門英美・松元 順・和合由員・小玉泰生・永田茂穂・森 清文・鳩野哲也・山下純一・森田重則・市来征勝 2000. 家畜ふん堆肥の連用が普通作物の収量に及ぼす効果. 鹿児島県農業試験場研究報告, 28, 1-12.
- 渡部 敢・湊 啓子・田村 忠・阿部英則 2006. 飼料用トウモロコシにおけるふん尿主体施肥設計法. 日草誌, 52 (別1), 256-257.

Studies on the rational fertilizer application method based on soil and dairy cattle manures for maize

Tetsuo Yagi

Abstract

For the establishment of dairy production based on domestic feed, it is important to promote the cultivation of maize (*Zea mays* L.), which has more calories per unit area than forage grass, as a self-sufficient feed crop. Recently, the cultivated area of maize for whole-crop silage has been expanding in Hokkaido. After the 1980s, the productivity of whole crop maize increased due to its breeding and the improvement of cultivation methods; nevertheless, the fertilizing guidelines were not revised during this period. Recent agricultural production must satisfy not only high productivity, but also establish efforts for environmental protection and fertilizer reduction. Therefore, the objective of this study is to establish a rational fertilizer application method based on the nutrients in soil, and in the applied manure and slurry of dairy cattle for fields on which current whole-crop silage maize is cultivated. The results obtained in this study are as follows:

1. Nitrogen fertilizer application based on soil diagnosis

The amount of nitrogen uptake by maize is related to the yield level; therefore, the nitrogen fertilizer amount should be determined by referring to the yield level in each maize field. In addition, to reduce environmental pollution caused by nitrogen leaching in agricultural fields, it is effective to practice nitrogen application based on the soil diagnosis. The rational fertilizer amounts of nitrogen, according to yield levels and soil nitrogen fertility, were determined. Prior to the detailed nitrogen fertilizer examination, the appropriate amounts of basal and split nitrogen fertilizer that should be distributed were revealed. When applying the fertilizer application method consisting of basal and split nitrogen application it was concluded that the application method that focused on basal nitrogen fertilizer should be recommended. This recommendation is similar to that concluded in a previous study. Additionally, ideal the amount of basal banded nitrogen was determined to be 80-100 kg ha⁻¹. Thereafter, the examination with different amounts of nitrogen fertilizer was carried out in districts with various climatic conditions and soil types. Nitrogen concentrations in the plants were not significantly different, although dry matter yields and nitrogen uptake of maize varied significantly among districts. Thus, it was suggested that the target nitrogen uptake levels corresponding to specific yields could be determined regardless of the district. In addition, it was possible to evaluate soil nitrogen fertility using hot-water extractable nitrogen (HEN) in maize fields. The multiple regression equation based on total nitrogen application amounts and HEN could not accurately estimate the nitrogen uptake in each plot. However, by using an improved multiple regression equation by adding the maximum yield, which was obtained for each field in the examination as explanatory variables to the above multiple regression equation, nitrogen uptake in each plot could be presumed accurately. The reason for this result may be that the yield level of each field, which was limited by factors other than nitrogen (climatic conditions, cultivation conditions, soil physicochemical properties) affected the efficiency of nitrogen availability in each field. The dry matter yield in each plot could be estimated by the primary regression equation based on nitrogen uptake that was calculated using the improved multiple regression equation. Using the two above-mentioned equations, it was able to calculate suitable nitrogen fertilizer amounts based on the achievable yield and HEN of each field.

2. Phosphorus fertilizer application considering the effect of arbuscular mycorrhizal fungi in maize fields

According to fertilizer guidelines for maize in Hokkaido, the amount of phosphorus fertilizer is the highest among the three main nutrients; nitrogen, potassium, and phosphorus. To reduce the amount of phosphorus fertilizer required for cultivating maize, it was investigated that the amount of phosphorus fertilizer that can be reduced when considering the function of indigenous arbuscular mycorrhizal fungi (AMF), which promote phosphorus absorption by the host plant. Prior to the

phosphorus examination in the maize fields under various conditions, it was confirmed whether AMF had an effect on maize cultivated in Kosen District, which has unique weather conditions, such as cool and wet conditions, during the cultivation period. The degree of AMF colonization and early growth level of maize were significantly higher in the plots in which maize was previously grown than in the plots in which non-AMF host plants, such as sugar beet (*Beta vulgaris* L.) or white mustard (*Sinapis alba* L.), were previously grown. In addition, the early growth of maize in the plot where maize was previously grown was less affected by a reduction in the phosphorus application rate than the growth of maize in the plots where non-AMF host plants were previously grown. These results suggest that there is a fair chance of establishing an efficient phosphorus application method using AM fungi in fields where maize is cultivated continuously. Subsequently, the examination with different amounts of phosphorus fertilizer was carried out in various fields that were previously cultivated with maize and had different soil types, phosphorus fertility levels, and seed bed preparation methods. The relative early growth rate was a useful measure for evaluating the effect of reduced amounts of phosphorus fertilizer application on maize yield. Phosphorus fertilizer application rates that did not reduce the yield were dependent on factors such as soil type, available phosphorus content, and AMF colonization. Based on the relative early growth rate, phosphorus fertilizer application rates could be reduced by at least 20 %, sometimes 80 %, of the present standard in fields where maize is continuously cultivated.

3. The nitrogen and phosphorus efficiency of cattle manure and slurry applied to maize fields

The fertilizer conversion factor is used to calculate the amount of available nutrients in organic matter and is indispensable for estimating the total amount of chemical fertilizer to be applied to crop fields. However, supposing that the fertilization method included mainly manure and slurry every year, it is necessary to set additional conversion factors for detailed conditions. The present study was carried out to estimate the conversion factors of nitrogen when applying manure and slurry over consecutive years, and that of phosphorus, which has not yet been estimated. In the burying field test, the organic nitrogen in both manure and slurry were continuously decomposing even after the second year of application. In a six-year cultivation test, after the second year, the fertilizer conversion factors of manure and slurry were often higher than the current standard values (0.20 for manure and 0.40 for slurry), which were assumed in the first year of application. The increase in fertilizer conversion factors for both manure and slurry may be related to the cumulative amount of organic nitrogen that was used. It was expected that the nitrogen fertilizer conversion factors in maize fields were 0.30 and 0.50 for manure and slurry, respectively, after more than five consecutive years of application. The availability of phosphorus in both cattle manure and slurry was expected to be approximately the same as, or higher than, that of commercial phosphorus fertilizer. Based on our field experiments and previously reported literature, even if fluctuations in dairy cattle feces and urine are taken into consideration, it was suggested that the phosphorus fertilizer conversion factors for both cattle manure and slurry are at least 0.60 in maize fields.

It is possible to achieve stable production, environmental conservation, and fertilizer reduction in the cultivation of maize when using fertilizer application methods based on the above-mentioned information.