

第11節 土壤肥料及び環境保全に関する試験研究

土壤肥料及び環境保全に関する試験研究として、昭和44年の瓦谷町移転以来、土壤肥料研究の柱の一つとして継続されてきた農林水産省指定試験の火山灰水田の効率的な水利用に関する試験が平成3年に終了し、平成6年以降は、1 農耕地の土壤保全対策、2 畑地の環境容量の解明と畑地からの栄養塩類溶脱抑制技術の開発、3 農業用水の水質保全対策に関する研究、4 野菜、果樹、花き類の施肥法と栄養診断、5 全量基肥施肥法（肥効調節型肥料）の開発、6 バイオマスの利活用技術開発に関する研究、7 水稻の有機農業栽培技術確立に関する研究、8 温室効果ガスの発生抑制に関する研究、9 大気汚染に関する研究、重金属の吸収抑制に関する研究、10 環境影響評価および農薬の安全使用に関する研究、11 土壌診断技術の開発が実施された。

農耕地の土壤保全対策として実施されてきた定点調査は、平成10年に4巡目が終了し、調査は規模が大幅に縮小し、調査地点数が概ね1/5となった。その後、農林水産省の補助事業「土壌保全対策事業」が打ち切れ、平成25年から一部が「土壌炭素貯留機能に関する評価」として継続されている。同様に当該事業で実施されていた有機物連用試験は3圃場の内2圃場で中止され、本場内に設置された黒ボク土水田のみが、やはり「土壌炭素貯留機能に関する評価」として継続されている。国民の環境保全への意識が高まるのに相まって、その環境を大きく損なうことなく、受け入れることのできる環境負荷物質の量として許容される投入量または浄化能力の限界量を表す「環境容量」という概念が農業環境にも導入され、本県の農耕地土壌の機能に対しても、かつての生産性に加えて環境保全能力の評価が試みられた。環境基準が設定されている硝酸に対して黒ボク土畑地での下方浸透速度が明らかにされ、また黒ボク土台地上の露地野菜畑地における浸透実態が明らかにされた。さらに環境容量を陰イオンまたは陽イオンの吸着容量として捉え、土壌の分布に対応させて面的な拡がりとして把握しようとする試みがなされ、土壌の荷電特性を電気化学的な理論で説明された。

水田は食糧生産機能の他、水質浄化、土壌浸食防止、洪水防止などの多面的な機能を有し、特に脱窒による窒素除去能力は環境保全能力として高く評価される。本県において水田は農耕地の80%、県土の16%を占め、農地環境保全の上で水田の水質浄化に対する寄与を考慮することは重要である。まず用水水質の実態調査を行い、用水環境との関連を明らか

にし、汚濁用水に対する対応を検討した。さらに用水が水田を通過する際の水質の変化を把握し、各種栄養塩類を中心に水質への水田の寄与を明らかにした。県内各水田土壌の潜在的脱窒能力が測定され、脱窒能力は有機態溶存炭素の供給能力であり、既存の測定値として可給態窒素と相関が高いことに基づき、脱窒容量マップが作成された。

農業生産費に対する圧縮圧力の中で、施肥技術に関しては一層の省力化が求められ、施肥改善として、肥効調節型のコーティング肥料を組み合わせた水稻の全量基肥栽培が各種作型や地域に対応して組み立てられた。また、本県の主要畑作物に対する全量基肥栽培向けの肥料が開発され、施肥法が確立された。さらに、より科学的に省力的かつ効果的な施肥を実施するための技術として、気象の変化に対応した生育および土壌窒素の無機化を予測する技術が開発された。すなわち、県内水田に分布する主要な水田土壌を培養し、反応速度論的手法によって窒素無機化パラメータを算出し、水田圃場での水稻コシヒカリによる窒素吸収量の推定を行った。本手法によって各地点、各年の気温の推移により水稻の窒素吸収量をおおむね予測することができた。また、水稻全量基肥栽培面積が増加する中、本施肥法では従来の慣行分施肥栽培と茎数や葉色の推移が異なることから、コシヒカリの全量基肥栽培の最適な生育パターンを明らかにし、生育量と追肥効果の関係に基づき生育診断指標が作成された。

野菜、果樹、花き類の施肥法と栄養診断として、トマト体内の硝酸濃度による栄養診断が検討された。またトマトやばら栽培施設の一部で導入された灌水同時施肥栽培（養液土耕栽培）における土壌管理や植物体の栄養診断技術が検討された。一部のいちご栽培で導入されたクリプトモス養液栽培における施肥技術が開発された。花きの養液土耕栽培または果樹の根圏制御栽培に対する供給養液組成が検討された。

日本政府は、平成14年に、循環型社会を目指す長期戦略「バイオマス・ニッポン総合戦略」を閣議決定し、農林水産業からの畜産廃棄物、木材やわらなどの有機物からエネルギーや生分解性プラスチックなどを生産し、食品産業から発生する廃棄物、副産物を活用する施策を進めた。本県でも本技術開発を積極的に進めた。本県は年間およそ300万トンの家畜排泄物が発生し、その有効活用のため、豚糞を主原料に化学肥料で成分調整をした成分調整粒状化肥料を開発し、民間企業と共同で製造プラントを構築した。また、農業集落排水汚泥

の生石灰による肥料化装置を開発し、同様にやはり民間企業と共同で全自動肥料化装置として製品化され、県内の農業集落排水処理施設に導入された。さらに、流域下水道で生産する下水汚泥肥料の黒ボク土畑地への連用による有害金属の蓄積や可給化を検討して連用可能年数を明らかにした。畜産部門では家畜糞尿からエネルギーを回収する手段としてメタン発酵が研究され、そこで発生する消化液の活用が求められた。当场では消化液中養分の作物生産への有効性を確認し、水稻に対して化学肥料と同等の効果があることを明らかにして、さらに基肥利用技術を確立した。

かつては有機資材を利用して栽培された農産物も有機農産物と呼ばれることがあったが、平成4年に農林水産省によって「有機農産物及び特別栽培農産物に係る表示ガイドライン」が制定され、「化学的に合成された肥料及び農薬を避けることを基本として、播種または植付け前2年以上（多年生作物にあっては、最初の収穫前3年前）の間、堆肥等による土づくりを行ったほ場において生産された農産物」と定義された。平成12年に日本農林規格（JAS）が改正され、農産物について有機農産物またはそれに類似した表示をするためには、農林水産省の登録を受けた第三者機関（登録認証機関）の認証による有機JASの格付け審査に合格することが必要となった。県内でも、水稻の有機栽培では各地に民間主導で技術体系が成立したものの、その技術を科学的に解析した例は少なく、技術の普及を困難にしていた。そこで、NPO 法人民間稲作研究所（上三川町）の有機栽培水田を調査するとともに、農試ほ場で水稻有機栽培を行い、土壤管理技術を科学的に解明した。その結果、水稻への米ぬか施用の収量への影響が明らかにされ、抑草技術が確立された。また、移植前の長期湛水による窒素無機化量の増加による効果などを明らかにした。

農地土壤は堆肥の施用等適切な土壤管理により炭素を貯留することが可能とされており、気候変動に関する国際連合枠組条約の京都議定書においても温室効果ガスの吸収源の一つとして位置づけられている。炭素貯留効果の高い営農活動に取り組む指標とするため、温室効果ガスの発生および土壤炭素貯留効果が、黒ボク土畑地において調査された。また温室効果ガスの農地からの発生量を最小にするための対策として、水田ではメタン発生の実態と抑制対策が、また畑地では亜酸化窒素の発生実態と抑制対策が明らかにされた。

これまで、我が国では、酸性雨による被害は顕在化していないとされるが、本県の白根山地域における森林の衰退（先枯れ、立枯れ、倒木等が発生している状況）の原因のひとつとして首都圏等から移流した大気汚染物質を含む雨や霧による

影響が指摘されている。そこで、県内の代表的な土壤である黒ボク土と灰色低地土の非耕地土壤について、酸性雨による影響を調査した。さらに、白根山の森林衰退地域において、土壤の理化学性を調べ、土壤の酸性化と森林衰退の関係について検討した。これらデータは環境省によってとりまとめられ、全国規模での影響が検討されている。一方、酸性霧は、付着すると流れ落ちにくいので、植物との接触時間が酸性雨よりも長く酸性雨よりも植物に悪影響を与える可能性が高いとされる。植物を人工酸性霧に曝露してどのような影響を受けるか調査し、酸性霧に感受性の高い指標植物の検索を行った結果、多くの植物に白化現象として可視的障害が発生し、これらの感受性のある植物は酸性霧の指標植物として用いることができることを明らかにした。

現在、本県内に、「農用地土壤汚染法」に基づく指定地域は存在しないものの、CODEX 委員会による農産物中有害物質の国際基準策定を受けて、麦類のカドミウム吸収実態の把握と抑制対策の検討がなされた。大麦のカドミウム含有率の実態を把握するため、県内産大麦の子実中カドミウム含有率を調査した。子実105検体中104検体が大麦のCODEX基準値 0.1 mgkg^{-1} 未満であった。また小麦子実のカドミウム濃度予測手法が検討され、小麦子実のカドミウム濃度がCODEX基準 (0.2 mgkg^{-1}) 未満となる土壤 0.1_M 塩酸抽出カドミウム濃度は、灰色低地土で 0.5 mgkg^{-1} 、黒ボク土で 1.0 mgkg^{-1} であることを明らかにした。さらに、土壤の化学性に基づき土壤溶液中カドミウム濃度を予測する手法を開発し、予測に必要なパラメータはCECなど既存の土壤分析値から得られることを併せて明らかにした。

食の安全性に関する消費者の関心は、この20年間、一層高まり、農薬の安全使用の重要性が増した。農薬の環境中の動態として、水田系における動態が検討され、既存モデルによってよく説明されることが明らかにされた。また、黒ボク土畑地の土層内の浸透について検討され、浸透速度は農薬の水溶解性に大きく関連していることが示された。マイナー作物への登録拡大に向けた残留濃度に関する試験は以前から継続的に実施され、この20年間ではゆうがおようどで実施された。平成15年の「食品衛生法」改正により、現在設定されている農薬、飼料添加物及び動物用医薬品の残留基準が見直され、基準が設定されていない農薬等が一定量以上含まれる食品の流通を原則禁止する制度として残留基準値がポジティブリスト化された。本県では、これに対応するため、多成分同時分析や簡易分析法としてイムノアッセイによる分析法が検討され、一部実用化された。

作物生産に際し、土壤環境を整えることは最も基本的であり、土壤診断は継続的にその柱となっている。土壤診断の高速化と新たな評価のため、新たな土壤診断技術の開発と評価がなされた。まず交換性陽イオンの浸出法として酢酸アンモニウム溶液に塩化ストロンチウムを加えさらに土壤:溶液比を大きくして、それまで問題視されていたカルシウムの回収率を大幅に向上するバッチ法を開発した。またトリエタノールアミンを緩衝溶液として使用する交換酸度と交換性陽イオンの和として算出する新たな CEC 測定法を開発し、団体等による土壤診断現場で使用された。可給態窒素を、オートクレープまたはリン酸緩衝液による抽出で簡易に測定する方法が開発され、水稻の施肥診断に活用された。

施肥基準は、これまでの現地慣行や施肥試験結果としての各種知見に基づき定期的に改訂されている。近年は、環境保全や施肥コストの削減への要求の高まりを受け、これまで主に長期的な地力の維持として捉えられていた、有機質資材の施用に対し、含有成分を施肥量の一部として捉える考え方が拡がり、平成 18 年に改訂された施肥基準では、この考え方に基づく施肥量の算出方法が示された。同時に、各種有機質資材中養分の肥効率を見積もるための試験が実施された。

我が国は、肥料原料のほとんどを海外に依存しており、肥料価格は、世界の需給動向の影響を受けやすい。人口増加による食料用穀物需要の増加、BRICS に代表される経済発展著しい国々での穀物から肉を中心とした食生活への変化に伴う穀物需要の増加等により、肥料需要が世界的に増加し、我が国の肥料原料及び肥料の輸入価格が、平成 20 年以降急激に上昇した。国内では、肥料価格高騰を受け、水稻栽培におけるリン酸やカリウムの適正施用が求められ、本県水田の代表的な土壤である黒ボク土において、減肥基準を見直した。

1 農耕地の土壤保全対策（昭 54-平 19：土壤保全事業）

農耕地土壤は、降雨等自然的要因や土壤管理等人為的要因の影響を受け、急速に変化している。県内農耕地の生産阻害要因を除去し生産性を維持または高めるため、実態調査および対策試験が実施された。

(1) 土壤環境基礎調査・定点調査

ア 農耕地土壤の実態

農耕地土壤のモニタリングのため、昭和 54 年に開始された「土壤環境基礎調査」は平成 6 年から 10 年には第 4 巡、平成 11 年から 15 年には第 5 巡、平成 12 から 16 年には第 6 巡目の調査が実施された。調査地点数は、開始当初 545 地点であったものが、農地転用などによって徐々に減少し、第 4 巡目の



写真 2-11-1 大麦畑における土壤調査 (2002)

調査点数は 457 地点であった。第 5 巡目以後の調査地点は、それまでの重要定点のみとなり、96 から 142 地点となった。

第 4 巡目の 457 地点の調査結果に対し、化学性の変化および化学性を性格付ける因子と土壤管理の影響がとりまとめられた。交換性カリウムは樹園地および施設で上昇程度が特に大きく、交換性カルシウムは、全ての地目で上昇傾向にあった。灌漑水の影響で安定的に維持されるとされる水田でも上昇傾向にあり、カルシウム収支を検討する必要性が認められた。また可給態リン酸の上昇傾向が続き、この傾向は樹園地および施設で顕著であった。可給態リン酸は地点間のばらつきが大きいものの徐々に増加する傾向にあり、施設では中央値で 168 cgkg^{-1} と特に高水準で、過剰害が懸念された。可給態リン酸の上昇速度は施肥量に従い、土壤中リン酸 (P_2O_5) 含量の維持に必要な年間施用量は黒ボク土で 200 から 300 kg ha^{-1} 、非黒ボク土で 100 から 200 kg ha^{-1} と推測された。化学性に対する因子分析の結果、塩基状態、母材および可給態窒素に関わる 3 種の因子に集約された。全地点、水田または畑地を対象に分析を行っても因子内容は同様で、全地点および畑地では塩基状態が 1 番目の因子となったのに対し、水田では母材が 1 番目の因子となり、水田で塩基状態が安定し、畑地では、圃場管理の影響が大きく、塩基状態が化学性を性格付ける重要な因子になっていることが示された。さらに、それら 3 種の因子得点の分布は、土壤タイプと地目の組み合わせにより特徴的に分布し、土壤の化学性の性格付けがそれら要因によって形成され

表 2-11-1 地目別調査有効地点数の推移

巡	調査年	水田	普通畑	樹園地	草地	施設	計
1	1979-1984	289	161	46	23	21	540
2	1984-1989	288	159	44	20	21	532
3	1989-1993	276	156	39	19	19	509
4	1994-1998	252	134	33	19	19	457
5	1999-2003	66	37	16	6	17	142
6	2004-2008	61	25	5	4	1	96
7	2009-2013	61	25	5	4	5	100

ていることが示された。

栃木農試成果集 18 : 75-76 (1999)

栃木農試研報 49: 25-32 (2000)

第5巡目の県北東地域では、普通畑の作土深がやや浅くなり、水田および普通畑の耕盤がやや硬くなるなどの物理性の悪化が明らかとなった。県中南部地域では、普通畑の作土深がやや浅くなり、水田および普通畑の耕盤がやや硬くなる等の物理性の悪化および交換性カルシウムやリン酸など養分の蓄積傾向が明らかになった。

栃木農試成果集 23: 15-16 (2005)

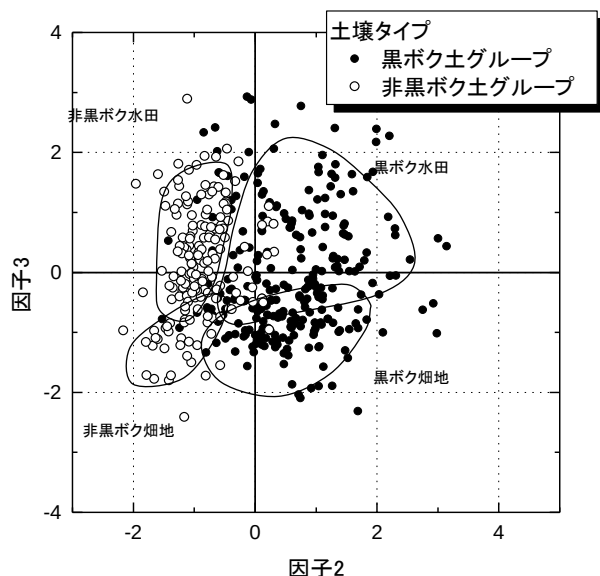


図 2-11-1 定点調査化学性による因子分析結果

因子 2 : T-C, T-N, CEC、 因子 3 : Av-N, Av-N/T-N

イ 微量元素

県内には銅 (Cu) やホウ素 (B) などの微量元素含量の低い地点があり、生育や収量の低下等の潜在的欠乏症が懸念される。そこで、4 巡目調査全地点 460 地点、636 検体の微量元素 B (ホウ素)、Cr (クロム)、Mn (マンガン)、Fe (鉄)、Co (コバルト)、Ni (ニッケル)、Cu (銅)、Zn (亜鉛)、As (ヒ素)、Pb (鉛)、Mo (モリブデン)、および Cd (カドミウム) を測定し、その実態を明らかにした。黒ボク土水田の Cu 含量中央値は 38 mgkg^{-1} 、また熱水可溶性 B の非黒ボク土普通畑の中央値は 0.31 mgkg^{-1} で、これらの地点では欠乏症が発生する可能性が示された。樹園地の Zn 含量は土壌タイプ別に 104 から 118 mgkg^{-1} の範囲にあり管理基準の 120 mgkg^{-1} に近い値であった。

銅含量の少ない土壌をポットに充填し小麦を栽培した結果、銅の添加により、生育量や子実が増加する土壌もあったが、一定の傾向はなかった。

栃木農試成果集 22: 17-18 (2003)

腐植質黒ボク土畑圃場で pH が 6.7 を越え、土壌中 Mn の難溶化により大麦「シュンライ」の稈の伸張が抑制され大幅に減収した。これら圃場に Mn を施用することにより正常な収量が得られ、高 pH 土壌での Mn 施用効果が示された。(平 19)

ウ 陰イオンの分布

本県に広く分布するアロフェン質黒ボク土は HPO_4^{2-} 、 SO_4^{2-} 、F、 $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$ 等の陰イオン種を特異的に吸着し、さらにそれが荷電特性に大きく影響することが知られている。陰イオン存在量の垂直分布を把握することは農耕地の陰イオン負荷に関する環境容量を評価するうえで一つの手がかりともなる。そこで、定点調査 4 巡目の畑地 233 地点から採取された 324 点の土壌試料の吸着態および水抽出性陰イオン含量を分析し、土壌類型別および利用形態別に陰イオンの垂直分布の状況を明らかにし、それらの条件の違いによる分布への影響等について検討した。黒ボク土の吸着態 (0.01 molL^{-1} NaOH 抽出) 陰イオン含量は作土層から耕盤下層まで Cl^- および NO_3^- に比べて SO_4^{2-} が最も高く、また SO_4^{2-} 含量は下層ほど高い傾向であった。この傾向は普通畑、樹園地および草地で共通であった。非黒ボク土の普通畑および樹園地の各層の吸着態陰イオン含量は黒ボク土に比べてかなり低かった。非黒ボク土・施設の土壌溶液中 SO_4^{2-} および Ca^{2+} の活動度積は石膏の溶解度積に達していると推測した。 SO_4^{2-} および Ca^{2+} の濃度の上限値は非黒ボク土では石膏の溶解度に、一方黒ボク土では土壌固相との吸着平衡に支配されていると推察した。さらに吸着態 SO_4^{2-} 含量は、リン酸含量の低い土壌で高い傾向があり、リン酸の蓄積によって SO_4^{2-} 吸着が阻害されているものと推察した。調査対象土層内の吸着態 SO_4^{2-} 存在量は年間施用推定量の、黒ボク土では 10.4 から 16.8 年、非黒ボク土・露地では 1.3 から 3.9 年に相当する量であった。

土肥誌 65: 255-265 (1994)

エ 土壌図の更新およびデジタル化

地力保全基本調査に基づき昭和 55 年に作成された 1/50000 スケールの土壌図 23 図幅は電子データ化され、現在、農業環境技術研究所のウェブサイトで公開されている。平成 6 年から耕作放棄地や市街地化等の土地利用の変更、用排水の分離に伴う土壌統の変更等を修正し、それらデータが更新され、併せて物理化学性および断面写真のデータベース化を行い、各農業振興事務所等へ閲覧用として配置した。(平 6-18)

さらに、これまで異なる体系で分類されてきた農耕地と森林の土壌類型を統一し、統一の土壌図を作成するための作業が資源

対策課の事業「土地分類基本調査」として継続的に実施された。
(昭 56-平 15)

栃木農試成果集 26: 42-43 (2008)

(2) 土壤の炭素貯留調査 (H20-)

温室効果ガス排出削減の一つとして、農耕地土壤の炭素貯留の現状と可能性を評価することが急務となっている。そこで、定点調査の一部 50 地点において炭素含量や圃場管理の調査を実施した。調査ほ場は、牛ふん堆肥施用が 11 件、鶏ふん堆肥施用が 5 件、落ち葉堆肥施用が 1 件、堆肥無施用は 30 件であった。場内の有機物連用圃場 (基準点調査)で実施された土壤炭素の貯留に関するモデル調査で、有機物由来の投入量と二酸化炭素の累積発生量から炭素収支を算出すると、堆肥区では $+30 \text{ g m}^{-2}$ 、有機区では $+176 \text{ g m}^{-2}$ となったが、炭素含量のばらつきと作土深見積もりの不正確性から、短期間の調査結果から作土の炭素含量から炭素収支を見積もることは困難と考えた。

栃木農試成果集 32: 53-54 (2014)

(3) 土壤環境基礎調査・基準点調査

水田および畑地における地力増強対策の指針を得るため、各種有機物の施用や作付け体系の違いが地力の要因に及ぼす影響を明らかにした。

ア 黒ボク土水田

まず、農試本場黒ボク土水田で昭和 58 年から稲わら堆肥および稲わらの長期連用により、土壤の膨軟性を維持する効果が確認され、また腐植の集積、地力窒素の増大や塩基類の集積が認められた。有機物の施用が収量におよぼす影響は、連用 6 年目から明確となり、特に稲わらの秋すき込みは連用期間が長くなるとともに収量指数が増加する傾向を示し、連用 11 年以降、堆肥施用より窒素供給量を高める効果が顕著となった。連用 11 年目の平成 5 年に採取した土壤の窒素無機化速度を反応速度論により解析した結果、水稻作付け期間中の土壤窒素無機化量は稲わら $\geq$ 堆肥 $>$ 無窒素 $\geq$ 三要素の順であり、各有機物施用区の無機化量は無施用区の 2.0 から 2.5 倍であった。これら結果から、稲わらの秋すき込みおよび堆肥施用による水田土壤への還元が、黒ボク土水田の地力維持および収量の安定確保に大きく寄与していることが裏付けられた。

さらに、有機物連用による精玄米重の増加は、堆肥連用では穂数が、また稲わら連用では一穂粒数が増加してもたらされ、この違いは、堆肥連用では主に幼穂形成期までの窒素供給量が増加し、稲わら連用では出穂期前の窒素供給量が増加

したためと考えた。

栃木農試成果集 17: 67-68 (1998)

栃木農試研報 49: 15-23 (2000)

栃木農試研報 66:27-35 (2011)

イ 灰色低地土水田

農試栃木分場の灰色低地土水田において、昭和 52 年から稲わら、麦わら、稲わら堆肥および麦わら堆肥を連用し、水稻および二条大麦の生育収量および土壤の理化学性への影響を調査した。有機物を長期連用して二毛作栽培することにより、土壤の膨軟性を維持する効果が確認され、腐植の集積、可給態窒素の増大や塩基類の集積が認められた。また、有機物の施用が収量に及ぼす影響は施用初期には判然としないものの、連用年数が長くなるに伴い三要素区より増収した。特に堆肥区で作物に対する窒素供給量が高まり、作物の収量指数は増加する傾向を示した。これらの結果から、稲わら+麦わらすき込みおよび堆肥施用は、二毛作水田の地力維持および収量の安定に寄与していることが明らかとなった。

栃木農試成果集 17:69-70 (1998)

栃木農試成果集 23: 17-18 (2005)

土肥学会講要集 53: 264 (2007)

栃木農試研報 59: 11-23 (2007)

ウ 黒ボク土畑

本場の黒ボク土畑地で昭和 54 年から、稲わら堆肥、牛ふん、豚ふん、デントコーン、麦わらの連用試験を継続した。作物生産性は、窒素施用量、土壤中可給態リン酸および可給態窒素含有量に大きく影響され、可給態窒素含有量は有機態窒素施用量と正の相関が認められた。このことから稲わら堆肥、牛ふん、豚ふんおよび麦わらは、同等の効果が期待できると考えられたが、稲わら堆肥は塩基類過剰、牛ふんはリン酸不足等の若干の問題を補う必要があった。またデントコーンは、収量性、肥料の利用率および養分の圃場外への流亡の可能性の点から他の有機物よりやや劣ることが明らかになった。

栃木農試成果集 17: 65-66 (1998)

栃木農試研報 50: 79-91 (2001)

栃木農試研報 63: 35-45 (2008)

さらに、黒ボク土畑地での有機物連用の環境への影響を検討するため深層土壤の化学性を明らかにした。表層から 5 m まで、陰イオンではリン酸および硫酸が優占種であった。同様に陽イオンではカルシウムが優占種であった。リン酸は作土およ

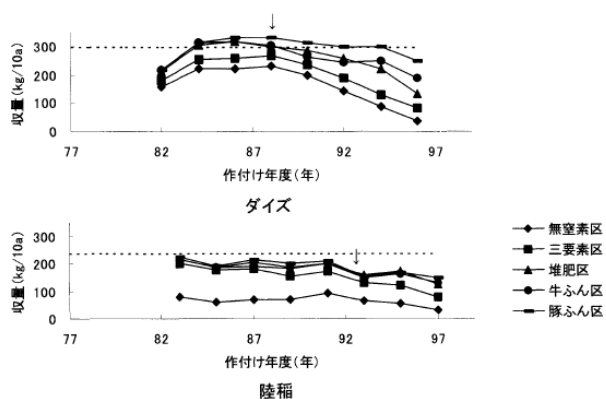


図 2-11-2 畑基準点・穀類系の大豆および陸稲収量の推移

び耕盤層に最も多く下層ほど少なかった。硫酸は深さ 0.5 から 1.0 m の今市軽石層に最も多く、それ以深では下層ほど少なかった。カルシウムは作土および耕盤層で最も高く、次いで 4 m から 5 m の粘土層、次いで 1 m から 3 m のローム層に多かった。今市軽石層は両極性が強く陰イオンを陽イオンと同等に吸着した。一方 5 m 付近に分布する粘土層は陰イオンをほとんど吸着しなかった。リン酸の吸着は土層の電気化学的特徴に変化をもたらした。硫酸は固相および液相の双方に分布し、電気化学的性質の変化と液相無機イオン濃度の決定と移動に寄与した。土層内に存在する各イオン種の量は化学肥料および有機物の施用量に規定され、それらの垂直分布パターンは各土層の電気化学的特徴による影響を強く受けた。20 年間に施用されたリン酸の大部分は 1 m 以内に蓄積した。同様に窒素は NO_3^- として 5 m 以深に浸透しそのときの濃度はデントコーン鋤込みで最も高く 2.1 mmol L^{-1} (29.4 mg kg^{-1}) であった。土壌の化学性および作物収量に併せて硝酸態窒素およびカウンターイオンとしての塩基類の溶脱を考慮すると、本県黒ボク土畑での有機物連用量は、稲わら堆肥で $17 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ 、牛ふんで $35 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ 、豚ふんで $9 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ が適正であることを明らかにした。

栃木農試研報 52: 63-74 (2003)

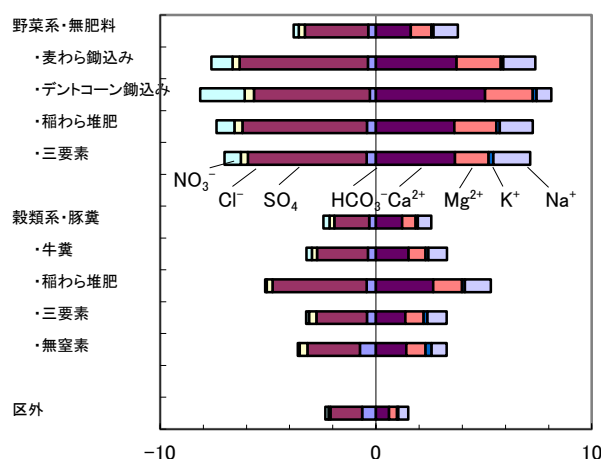


図 2-11-3 鹿沼軽石層の液相中無機イオン推定濃度

栃木農試成果集 22: 19-20 (2003)

さらに、有機質物の施用によって土壌中の水溶性有機態炭素含量が高まることにより脱窒能力が高まるものと推定された。脱窒は、窒素の肥効を低下させる一方、流出量を低減する機能を持ち、その把握は適正な有機物の利用を図る上で知らなければならない。当該基準点畑圃場の脱窒能を測定した結果、有機物施用によって作土の脱窒能は高まり、その値は同一 pH で測定した場合、土壌の有機態炭素含量が高いほど高かった。しかし、作土下層の脱窒能は極めて低水準であり、窒素溶脱量低下への寄与は小さいことが示された。

土肥学会講要集 47: 325a (2001)

土肥学会講要集 47: 325b (2001)

土肥学会講要集 47: 214 (2001)

栃木農試成果集 21: 33-34 (2002)

Soil Science and Plant Nutrition 53: 401-412 (2007)

有機物連用により土壌に蓄積された地力を評価するため、「基準点調査」によって各種有機物を 20 年間連用した腐植質黒ボク土の作土を 1/2000 a ワグネルポットに充填し、土壌ごとに N 欠 (PK) 施肥、P 欠 (NK) 施肥、K 欠 (NP) 施肥を行い、5 年間で二条大麦やデントコーン等を 9 作栽培し、作物による窒素、リンおよびカリウムの吸収量を測定した。稲わら堆肥連用土壌は、窒素、リンおよびカリウムの供給能力が高く、牛糞連用土壌は、窒素、リン、カリウムいずれも供給能力は低かった。豚糞連用土壌はリン、麦わら鋤き込み土壌は窒素とリン、青刈りデントコーン鋤き込み土壌は窒素の供給能力が高かった。

栃木農試成果集 23: 19-20 (2005)

(4) 芳賀台地地区営農推進技術実証調査

芳賀台地に導入された畑地灌漑のモデル実証圃の土壌調査および技術指導を実施した。露地畑での 1300 mm から 2900 mm の畑地灌漑によって硝酸態窒素濃度は表層から 1.0 m に渡り低下したが可給態リン酸および交換性陽イオン類は変化しなかった。施設圃場における 7100 mm 掛け流しによって表層から 0.2 m の硝酸態窒素濃度は低下したが 0.4 m では上昇した。本圃場の湧水面が 0.45 m と浅く、下方への水分移動が妨げられたためと考えた。300 mm 湛水では表層の硝酸態窒素濃度が高まり、湛水後の水分上昇によって下層から移動したものと考えた。300 mm 湛水後代かきすることによって可給態リン酸および交換性陽イオン類濃度はやや上昇した。(平 6-10)

2 畑地の環境容量の解明と畑地からの栄養塩類溶脱抑制技術の開発

畑地における余剰養分は降雨に伴って地下水に到達し、環境に負荷をもたらす。硝酸態窒素は環境基準が設定されており、系外への流出を最小にすることが求められている。系外に流出する栄養塩類を最小にするため、畑地の環境容量を明らかにし、土壤管理技術を明らかにするための試験を実施した。

(1) 黒ボク土荷電特性の解明

本県の主要な畑土壌である黒ボク土のイオン交換反応についてはこれまでに多数研究されているものの、現象に対する理論に基づいた量的な検討は行われていない。そこで、黒ボク土を用いて広い範囲の pH およびイオン濃度で、塩化物イオン (Cl⁻)、硝酸イオン (NO₃⁻)、硫酸イオン (SO₄²⁻) およびカリウムイオン (K⁺) の吸着量を測定し、「表面錯体生成モデル・4 面モデル」の各パラメータを決定した。モデルによる予測値と測定値は、全ての電解質溶液の広範囲な pH および濃度で極めて良く一致した。

それら検討の中で、陰イオン吸着には表面錯体生成が大きな機能を果たし、その生成量の違いが陰イオン種間の吸着量に違いをもたらしていることを明らかにした。陰イオン種 NO₃⁻、Cl⁻ および SO₄²⁻ の比較では、SO₄²⁻ の吸着量が際だって大きいことを明らかにした。陰イオンによる表面錯体生成は負荷電を生じ、陽イオンの吸着量を増加させ、表面錯体生成量は陰イオンの吸着のみならず、陽イオンの吸着に対しても重要であり、リン酸 (HPO₄²⁻) の蓄積も同様の変化をもたらしていることを明らかにした。

県内に分布する主要な土壌の荷電特性を測定した結果、陽イオンおよび陰イオン吸着量はいずれも腐植質黒ボク土>腐植の少ない黒ボク土>灰色低地土の傾向にあり、さらに、腐植質黒ボク土の陰イオン吸着量は未耕地>既耕地の関係にあり、リン酸の集積が陰イオン吸着を阻害していると考えた。一般に、土壌の pH 緩衝能は、重炭酸イオンの解離、陽イオン吸脱着、陰イオン吸脱着ならびにアルミニウムおよび鉄の溶解によってもたらされ、実用 pH 領域ではこれらのうち陽イオンおよび陰イオンの吸脱着が主に機能し、したがって、実用 pH 領域での pH 緩衝能は未耕地の腐植質黒ボク土の硫酸塩平衡下で最も大きく、一方、灰色低地土で最も小さいことが予測された。

さらに、黒ボク土への陰イオン吸着における陰イオン種間の相互作用を明らかにするため、黒ボク土を用いて KNO₃ および K₂SO₄ 混合溶液での NO₃⁻ および SO₄²⁻ 吸着量を測定した結果、NO₃⁻ 吸着量は液相の SO₄²⁻ 濃度の上昇によって低下し、一方、SO₄²⁻ 吸着量は液相の NO₃⁻ 濃度の上昇によって増加した。表面

錯体生成モデルによって複数イオン種の同時吸着を解析するため、単一塩養液の電氣的拡散二重層を示す「Gouy-Chapman 式」に代わる一般式を電氣的拡散二重層理論の中心式から誘導した。

$$\Gamma = -2\beta^{-\frac{1}{2}} \left[\sum Co, k \{ \exp(zk y) - 1 \} \right]^{\frac{1}{2}} \text{ mol m}^{-2}$$

ただし、 y は Boltzman 定数で $y = -F\psi/RT$ 、 zk はイオン K の荷電数、 Co 、 K はイオン K の濃度 (mol m⁻³)、また β は定数。

$$\beta = \frac{8\pi F^2}{\epsilon' RT}$$

ただし F はファラデー定数 (9.648×10⁴ C mol⁻¹)、 R はガス定数 (8.314 J mol⁻¹ K⁻¹)、 T は温度 (K)、 ϵ' は誘電率 ($\epsilon' = 4\pi\epsilon_0\epsilon_r$)、 ϵ_0 は真空中の誘電率 (8.854×10⁻¹² F m⁻¹)、 ϵ_r は水の誘電定数 (298K で 78.3)。

これら検討結果、SO₄²⁻ は液相のイオン濃度、浸透圧および pH に対してレギュレーターとして機能していると評価され、またこの現象により、土層中での陰イオンならびにカウンターイオンとしての陽イオンの移動および垂直分布にも影響することが示された。

Soil Sci. Plant Nutr. 42: 785-799 (1996)

Soil Sci. Plant Nutr. 42: 801-808 (1996)

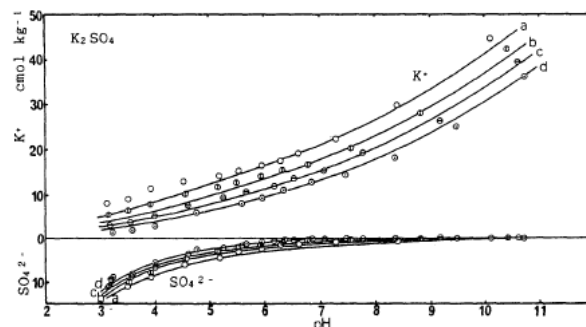


図 2-11-4 腐植質黒ボク土の荷電特性

(2) 畑地からの栄養塩類溶脱抑制技術の開発

ア 黒ボク土畑地における硝酸の垂直移動

昭和 63 年 9 月から平成 3 年 6 月の約 3 年間、黒ボク土露地畑でレタスおよび二条大麦を栽培し、表層から 1.0 m までの水分張力および土壌溶液中イオン濃度を継続的に調査した。土層中のマトリックポテンシャルの変動は表層から 0.5 m まで大きく、それ以深での変動幅は比較的小さかった。蒸発散量推定値から降水量を差し引いた正味蒸発散量の積算値は 3 年間の平均で -629 mm⁻¹ で、この値および未回収施肥窒素量から求めた浸透水中 NO₃⁻ 濃度は標準量施用で 7 から 11 mgL⁻¹ であったのに対し、標準量の 2.5 倍量施肥では 52 から 60 mgL⁻¹

と非常に高かった。これらの値から浸透水中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度を環境基準値 10 mgL^{-1} 未満にするための窒素環境容量は、野菜+麦栽培露地畑の黒ボク土でおよそ 260 から $300 \text{ kg ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ と推定した。硫酸系肥料を使用した場合、 NO_3^- は明瞭なピークを形成しながら下降し、およそ1年後に 1.0 m に達するのに対し、塩素系肥料を使用した場合、 NO_3^- の下降速度が速く、また吸着態として土層内全体に分散する傾向で、このような違いは、 NO_3^- と SO_4^{2-} または NO_3^- と Cl^- の吸着の相互作用の違いによってもたらされたと考えた。

栃木農試研報 43 : 19-43 (1995)

栃木農試成果集 13 : 75-76 (1994)

イ リン酸水準が硝酸流亡に及ぼす影響

本県に分布が多い腐植質の黒ボク土はリン酸吸収能が非常に高く、未だリン酸欠乏により作物の生育が制限される圃場も多い。そこで土壌のリン酸水準の違いが窒素およびカリウムの吸収に及ぼす影響と窒素の流亡に及ぼす影響を明らかにした。昭和 59 年から平成 4 年までの 9 年間に可給態リン酸水準 2 cg kg^{-1} から 1000 cg kg^{-1} の多腐植質黒ボク土畑圃場における大麦および各種野菜類の計 15 作のデータを解析し、標準的な施肥条件下での窒素の見かけの利用率が 100% に達する可給態リン酸水準は 38 cg kg^{-1} で、肥効の確保および環境負荷の低減の両面から、土壌の可給態リン酸を本水準に維持するのが有効と考えた。

栃木農試成果集 13 : 17-18 (1994)

ウ 畑地の環境容量の評価

硝酸態窒素の深層土壌への浸透実態と畑地の窒素浄化能を評価するため、県内の主要な畑地土壌で、硝酸態窒素濃度、陰イオン交換容量 (AEC) 及び脱窒活性等を深さ 5 m まで調査した。作土の陽イオン交換容量 (CEC) は $35 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ であったのに対し、AEC は $0.2 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ と極めて小さかった。下層土の AEC は褐色土壌で 4 から $5 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ 程度の値を示す場合もあったが、総じて小さかった。硝酸態窒素は、表層から下層まで高水準の地点もあった。黒ボク土ほ場における硝酸の浸透速度を年間約 1 m と仮定し、過去 5 年間に投入された化学肥料及び有機物由来の窒素と深さ 5 m までの土層内硝酸態窒素存在量は、堆肥やスラリーを多量に施用した草地 2 地点を除き有意な正の相関が示され、残存窒素の大部分が脱窒等の影響を受けることなく下層に浸透することが示された。

栃木農試成果集 29: 53-54 (2010)



写真 2-11-2 露頭での深層の物理性測定試料の採取 (2008)

エ 畑地帯における硝酸の流亡実態

県南部の畑作地帯の農業用地下水硝酸態窒素濃度は、他地域よりも高い傾向であった。特に壬生台地は、県特産品かんぴょうの原料であるゆうがおの主産地である。ゆうがおは、肥料による濃度障害を起こしにくいいため過剰に施肥される傾向にあり、この地域周辺では化学肥料窒素の過剰施肥が報告されている。本地域の農業用地下水の硝酸態窒素濃度を調査した結果、その平均値は 2.9 から 6.9 mgL^{-1} と、環境基準値 10 mgL^{-1} を越える地点はなかったものの、比較的高い値を示した。地下水中の硝酸は、 $\delta^{15}\text{N}$ 値および過去の土地利用状況から、その 50 から 60% が化学肥料由来と推測した。また、施肥水準を変えてゆうがおを栽培したところ、多肥による果実の収量は標準施肥の 110% で、肥料費の上昇によって経済的メリットはない一方、施用窒素の溶脱率は、標準施肥で 19.6% であったのに対し多肥では 39.6% となり、多肥栽培が地下水の硝酸態窒素濃度の上昇に大きく影響することが示された。(平 7-11)

栃木農試研報 49: 47-54 (2000)

土肥学会講要集 47 : 332 (2001)

栃木農試成果集 19:59-60 (2000)

日作紀 80: 96-102 (2011)

表 2-11-2 $\delta^{15}\text{N}$ 値利用法による地下水中 NO_3^- 起源別構成比の

地点名	$\text{NO}_3\text{-N}$ mgL^{-1}	$\delta^{15}\text{N}$ ‰	NO ₃ -N の構成比											
			Z=2.0の場合			Z=1.5の場合			Z=1.0の場合			Z=0.5の場合		
			肥料	動物	土壌	肥料	動物	土壌	肥料	動物	土壌	肥料	動物	土壌
			‰	‰	‰	‰	‰	‰	‰	‰	‰	‰	‰	‰
A	5.13	5.85	40	21	39	45	26	29	51	30	19	56	34	10
B	2.83	5.19	28	1	71	37	10	53	48	20	32	56	26	18
C	6.82	6.35	42	29	29	46	32	22	51	36	13	54	39	7
D	5.41	4.43	51	12	37	56	16	28	61	22	17	66	25	9
E-高	3.98	5.45	37	13	50	43	19	38	51	26	23	57	30	13
E-低	1.20	4.87	-22	-45	167	1	-24	125	28	-3	75	45	13	42
F	6.29	5.38	47	21	32	51	25	24	57	29	14	60	32	8

オ 硝酸流亡を抑制する有機物管理

地下水の硝酸汚染は有機物の大量施用によっても発生する可能性がある。有機物由来の窒素は土壌中で長期間にわたって無機化が継続し、硝酸等雄の養分流亡の長期的な予測は難しい。そこで、平成 19 年 10 月から平成 22 年 12 月に、キャ

ピラリーライシメーターを埋設した黒ボク土の露地野菜畑で継続的に牛糞堆肥および豚ふん堆肥を施用し、浸透水中の硝酸態窒素を継続的に測定した。夏作物の生育および収量は堆肥に施肥基準量の化学肥料を上乗せすると最も高くなるものの同時に浸透水中硝酸態窒素濃度が環境基準値 10 mgL^{-1} を上回った。一方、冬期に六条大麦を導入することにより、収量は高水準を維持しながら、浸透水の硝酸態窒素濃度は環境基準を上回ることではなく、年間窒素溶脱量は堆肥に化学肥料を上乗せした場合の 17 %と少なくなり、六条大麦導入による窒素溶脱の減効果が非常に大きいことが示された。

また、堆肥連用 4 年間の養分供給特性、作物生育および窒素の溶脱量から、持続的な栽培が可能な適正施用量は、全窒素量で施肥基準量と同等と判断した。(平 19-22)

栃木農試研報 68: 51-63 (2011)

栃木農試成果集 30: 77-78 (2011)

3 農業用水の水質保全対策に関する試験

水田は食糧生産機能の他、水質浄化、土壤浸食防止、洪水防止などの多面的機能を持ち、特に水質浄化による窒素除去能力は高い。水田は本県農耕地の 80 %、県土の 16 %を占め、農地環境保全の上で水田の水質浄化に対する寄与を考慮することは重要である。そこで、水田と周辺環境との相互作用を明らかにするため、用水汚濁への対策と水田の浄化能力の評価が行われた。

(1) 農業用水の水質実態

県内主要農業用水の現状を把握するため、県内の主要農業用水 104 地点水質調査を行った。アンモニウム態窒素濃度は、約 90 %の地点で 1 mgL^{-1} 以下であったが、水稻の生育に影響を及ぼす汚濁濃度の地点があった。硝酸態窒素は水田地帯より畑作地帯の方が高く、土地利用形態による違いが見られた。昭和 61 から 63 年の一次調査、平成 3 から平成 5 年の二次調査と 2 回に分けた調査を実施した。農業用水の汚濁は、窒素成分で顕著に現れた。全窒素で基準値 1 mgL^{-1} を越える地点が、一次調査で 96 %、二次調査で 80 %であった。全窒素濃度の平均値は、基準値の 2 mgL^{-1} 以上であったが、値は、低下する傾向にあった。アンモニウム態窒素濃度は、90 %以上の地点で 1 mgL^{-1} 以下で、低下の傾向にあったものの、水稻の生育に影響を及ぼす汚濁地点が散見された。全リン濃度が特に高い地点があった。調査地域は、都市下流で、汚濁水準は高かったが、二次調査で全窒素濃度の低下の傾向にあり、二次調査において、下水道が整備されていない都市下流では、全濃度の高い地点が残っていることから、汚濁程度の低下は、

下水道の普及によってもたらされたと考えた。(平 6-9)

さらに、5 年後の平成 8 から 10 年に主要農業用水 85 地点および農業用排水 6 地点の調査をした。調査時期による水質の変化は小さかった。調査地が同一である 53 地点について 10 年前と比較したところ、栄養塩類の濃度は低下する傾向にあり、特に全窒素で顕著であった。農業用排水は用水に比較してケイ酸を除き栄養塩類濃度が高かった。(平 8-10)

さらに、土地改良課の事業である農業用水水質汚濁調査として水質が汚濁傾向にある農業用水路 25 地点で年間 4 回の調査を継続して実施した。全窒素で基準値を越える地点が多く、平成 12 年度測定試料の中で基準値をクリアする地点は 16 %にすぎなかった。

栃木農研報 42 : 35-44 (1994)

栃木農試成果集 13 : 115-116 (1994)

栃木農試成果集 15 : 81-82 (1996)

日作紀 78 : 234-241 (2009)

(2) 水田土壌の水質浄化能力

ア 水田の通過による水質の変化

県内主要水田地帯の田川・姿川流域、五行川流域および巴波川流域の 3 流域で、水田を通過することによる流入水の水質変化を、水稻移植後、最高分げつ期、出穂期の 3 回、のべ 395 地点で溶存態栄養塩類など 13 項目について実態調査を行った。硝酸態窒素は流入水の濃度にかかわらず大部分の地点で表面流去および地下浸透により低くなった。アンモニウム濃度は、流入濃度が低い場合、表面流去または地下浸透により濃度が上昇し、 0.12 から 0.15 mmolL^{-1} が平衡濃度であった。リン酸およびカリウムは水稻移植後 20 日の灰色低地土で、表面流去または地下浸透により上昇する地点が多かった。カルシウム、マグネシウムおよびケイ酸濃度は、表面流去により低下し、地下浸透により上昇した。本調査による濃度変化を水収支



写真 2-11-3 現地水田での脱窒速度の測定 (2007)

に基づき予想される濃度変化の値と比較した結果、水田が浄化するのは窒素のみと推測した。

栃木農試研報 55: 45-55 (2005)

栃木農試成果集 23 : 23-24 (2004)

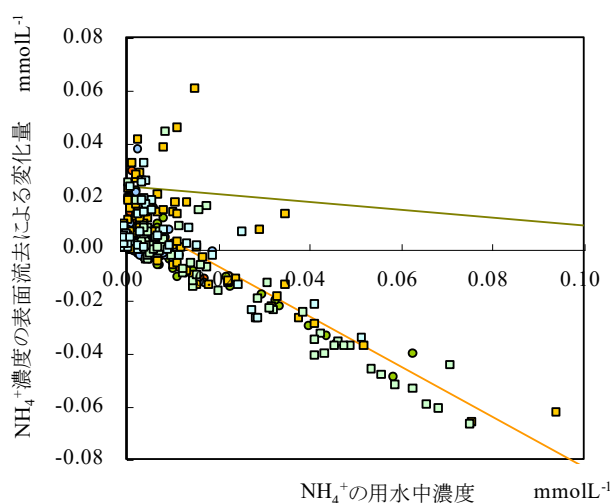


図 2-11-5 実態調査によるアンモニウムの水田の通過による濃度変化

イ 水田の窒素浄化能力の解明

県内主要土壌 9 種類をワグネルポットに充鎮し、硝酸カリウム溶液を給水し、継続的に排出液中硝酸態窒素等の濃度を測定した。2 種類の土壌を除いて、窒素負荷量の増加とともに窒素除去量は直線的に増加した。また、湛水 51 日後のポットの作土のアセチレン阻害法による脱窒酵素活性測定値の傾向と水準はポット試験の収支による推定値と概ね一致したため、窒素除去が主に脱窒によるものと推論した。

栃木農試成果集 23 : 21-22 (2005)

水田の窒素浄化能力について具体的な値や土壌間差および県内における分布を明らかにし、水田の多面的機能としての窒素浄化能力を活用した県内水環境の維持ならびに水利用計画や土地利用計画に資するため、本県に分布する水田の脱窒能力 (脱窒酵素活性) を測定した。

各種土壌を含む 13 地点の水田における脱窒酵素活性測定の結果、脱窒能力は還元能力と同義であり、土壌からの溶存有機態炭素の供給により高まり、遊離酸化鉄の供給によって抑えられることから、既存の分析値を用いた次の予測式を得た。

脱窒酵素活性積算値 (kg/10a/作期間)	=	98.9 可給態窒素	-	113.2 遊離酸化鉄
		(mg/100g)		(%)

本式に定点調査による既存データを適用し、土壌統群毎の脱窒能力を推定し脱窒マップを作成した。潜在的脱窒能力には、相対的に腐植質多湿黒ボク土>灰色低地土、グライ土>褐

色低地土という土壌間差があった。地域的には、那須野が原、五行川流域および今市扇状地で高く、一方、鬼怒川上流域、思川上流域および南西部山間谷津田地域で相対的に低く、また、八溝山系那須北部の谷津田地域、鬼怒川下流域、思川下流域および渡良瀬川流域で中程度であることが示された。

栃木農試成果集 25: 17-18 (2006)

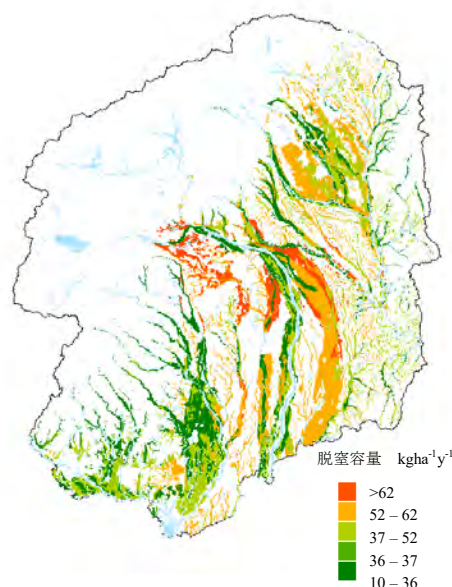


図 2-11-6 脱窒容量マップ (2006 作成)

さらに、脱窒速度に地点間差が生じる要因を明らかにするため、各種土壌を含む県内 8 地点で 3 年間、脱窒を測定した。水稻作付け期間中の水田土壌にシリンダーを打ち込み内部の田面水を硝酸カリウム溶液に替え、その後田面水および作土の土壤溶液中硝酸態窒素 ($\text{NO}_3\text{-N}$) 濃度、溶存有機態炭素濃度 (DOC) および水位を経時的に測定した。脱窒速度係数 k (脱窒速度= $k[\text{NO}_3\text{-N}]$) は、田面水の溶存有機態炭素濃度が高いほど大きいものの、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が高いほど溶存有機態炭素濃度が消耗するため脱窒速度係数 k は小さくなりやすく、さらに、作土の溶存有機態炭素の供給は作土の酸化還元電位の低下と一体的に進行することが示された。

栃木農試成果集 28: 55-56 (2009)

宇都宮市南部の中島堰用水の全窒素濃度は $2\sim9\text{ mgL}^{-1}$ と高く、用水を利用する多腐植質黒ボク土水田地帯では施肥管理に苦慮している。用水の水質と水田土壌の窒素浄化能力を考慮した施肥・水管理に資するため、地域内の物質収支を明らかにした。用水中窒素濃度は水田の通過によって低下し、その程度は濃度が高いほど大きく、したがって水田での窒素浄化は主に水口付近で生じ、その機作は水稻による吸収と脱窒により、その値は水稻一作期間中に 72 kg ha^{-1} と推定した。

栃木農試成果集 25: 19-20 (2007)

ウ 那須北部地域における窒素フローと水田の水質浄化機能の評価

那須扇状地は、栃木県北部に位置する面積およそ 400 km² の広大な扇状地である。北辺を那珂川、南辺を碓氷川に挟まれ、これら両河川ならびに中央部を流れる蛇尾川および熊川などによって形成された複合扇状地で、扇頂を要とし碓氷川が那珂川に合流する扇端で閉じる紡錘形あるいは砲弾型に近い形状をもつ。北西から南東に向けて傾斜し、扇頂部から扇中央部にかけて河川は伏流水無川となり、扇中央付近で河川は再び表流し、また多数の湧水が存在し小河川を形成している。扇頂から扇中央部は乳牛の飼養頭密度が高く、家畜糞尿を汚濁源とする地下水の硝酸態窒素濃度の上昇が懸念されている。一方、扇中央から扇端部は 1885 年に開通した那須疎水や地下水を利用して市街地を除くほとんどの土地が水田として活用されている。本地域内の水分動態に関する水文的特徴や硝酸態窒素濃度に関してこれまでに多数の調査実績があり、その実態の一部が明らかにされているものの、域内での伏流水の移動および表流水との交換に伴うフローや水田の機能を組み込んで統合的に解析した報告は見当たらない。

そこで、那須扇状地および周辺地域で流域を単位として養分流量の実態を調査し、その結果を再現するモデルを作成し、当該地域での水分および養分動態を総合的に把握し水質形成に関する特徴として、伏流水や水田の寄与について推論した。

那須扇状地の窒素収入総量 70.6 kg $\text{ha}^{-1}\text{y}^{-1}$ の内、家畜糞尿+養魚由来が 40.4 kg $\text{ha}^{-1}\text{y}^{-1}$ と最も多かった。周辺流域からの流入も含め、伏流水により 59.5 kg $\text{ha}^{-1}\text{y}^{-1}$ が流域間を移流し、水田かんがいによって 24.1 kg $\text{ha}^{-1}\text{y}^{-1}$ が脱窒した。周辺流域および扇頂付近での家畜飼養により発生した窒素の一部は伏流水

し、上流流域や北部高久丘陵からの伏流水によって希釈され、さらにその一部は扇中央から扇端部の水田で脱窒されると推論した。(平 19-22)

土肥誌 (審査中)

エ 農業集落排水処理施設処理水を用いた水稲栽培

天水を利用して水稲栽培をする足利市彦谷地区は用水量が不足するため、地域内の農業集落排水施設処理水のみで水稲栽培を検討した。その結果、窒素供給量が過剰となり水稲を栽培するのは困難であるものの、水田を用いた窒素除去法の可能性が示された。(平 12)

4 バイオマスの利活用技術開発に関する試験

栃木県内で家畜から排せつされるふん尿は年間約 300 万 t と推定され、それらバイオマスの有効活用が生産コスト低減と環境保全対策の面で重要である。堆肥の積極的活用技術の開発や、より使いやすい新肥料の開発が行われた。また、農業集落排水汚泥の生石灰による肥料化装置を開発した。

(1) 家畜ふん尿の利活用

堆肥や家畜糞尿は、これまでは主に長期的な地力の維持のための資材として捉えられていた。近年はより積極的な活用のため、含有成分を施肥量の一部として捉える考え方が拡がり、肥料成分としての有効性および化学肥料の代替性の評価が行われた。

ア 牛ふん堆肥の水稲栽培への利用

堆肥を有用な資源として、水稲栽培に安定して継続的に利活用するための栽培法を明らかにした。コシヒカリ早植栽培において、オガクズ牛ふん堆肥 20 Mg ha^{-1} を春施用し、出穂期前 15 日に窒素成分 20 kg ha^{-1} を追肥することで、5 年間は慣行栽培並の収量と玄米粗タンパク質含有率が得られた。

牛ふん堆肥の水稲に対する肥料効果を評価した。牛ふん堆肥の肥効は施設間のバラツキが大きかったが、同一施設の肥効は年間変動が少なかった。牛ふん堆肥の肥料効果をねらって水稲に連用施用する場合は、20 Mg ha^{-1} を上限とすれば生育、収量および品質が安定することを明らかにした。

敷料の異なる牛ふん堆肥を施用して、水稲を栽培した結果、0.5 mol L^{-1} 塩酸抽出窒素含有量は堆肥由来窒素吸収量と正の相関が認められ、本分析法は堆肥の窒素肥効の指標として有効であった。追肥前時点で茎数×葉色値が 2300 以下の場合は、追肥の効果が期待できた。茎数が過剰な場合には、中干しは稈数過剰防止の有効な手段であることを示した。



写真 2-11-4 那珂川水系での流量調査 (2008)

牛ふん堆肥の水稲コシヒカリ早植栽培への基肥としての利用は、牛ふん堆肥の 0.5 molL^{-1} 塩酸抽出アンモニウム態窒素量を指標に不足する窒素を化学肥料で補い、代かきの20日以内に施用し、慣行と同様に追肥することにより可能と考えられた。

栃木農試成果集 25:27-28 (2007)

栃木農試成果集 25:29-30 (2007)

栃木農試成果集 28:35-36 (2010)

栃木農試成果集 31:29-30 (2013)

土肥学会講要集 57:132 (2011)



写真 2-11-5 成分調整豚ふん肥料製造プラント (2005)

イ 黒ボク土普通畑における各種有機物の適正管理技術の解明

おがくず牛糞堆肥や発酵豚ふん等の有機質資材を施用し、化学肥料の減肥割合を検討し、施肥基準作成のための基礎資料とした。(平 5-9)

各種有機物の施用後の窒素等の無機化特性を明らかにして施肥の減肥基準作成に資するため、主要な畜種の堆肥の圃場での無機化率を測定した。牛糞オガクズ堆肥、牛糞モミガラ堆肥、発酵鶏ふん堆肥施用後のレタス栽培期間 8/22 から 10/27 の窒素の溶出無機化率はそれぞれ 30%、34%、40%、さといも栽培期間 4/18 から 11/1 の溶出無機化率はそれぞれ 27%、22%、39%、しんつみな栽培期間 11/1 から 4/8 の溶出無機化率はそれぞれ 34%、29%、41%であった。また、キャベツ栽培期間 9/6 から 11/13 の溶出無機化率は 43%、46%、35%、ねぎ栽培期間 5/20 から 12/3 の溶出無機化率は 67%、62%、62%であった。

さらに、牛糞堆肥 35 点、豚ふん堆肥 5 点および鶏ふん堆肥 5 点を 5 月または 9 月に土壤に埋設し、1 年間の窒素無機化率を測定した。5 月埋設では豚ふんおよび鶏ふんは 3 ヶ月間に急速に無機化が進んだが、1 年後には牛糞を含めた全畜種で C/N が小さいほど無機化率が高い傾向にあることを明らかにし

た。(平 10-14)

家畜ふん尿の農業におけるリサイクルの推進を図るためには、生産性の評価に加えて安全性面で金属の吸収に及ぼす影響を明らかにすることが必要である。そこで、県内各地から家畜ふん堆肥 51 点を集め、重金属等 19 項目の含有量を調査した結果、肥料取締法の規制値を超えるものはなかった。さらに、県内で生産された家畜ふん堆肥 10 点施用してこまつなを栽培したところ、亜鉛、マンガン、銅および鉄の吸収量は堆肥施用による土壤への持ち込み量の違いよりも土壌種の違いによる影響が大きかった。さらに、有機物が連用されている施設 6 地点で隣接する非農耕地土壌とともに作土を採取し、ポットに充填してこまつなおよびほうれんそうを栽培し、各種養分の吸収量を比較した。Na、P および Fe は全土壌において連用区の含有率が高く、特に水溶性 Na^+ 濃度の高い土壌で栽培されたほうれんそうの Na 含有率は、対未耕地土壌比で 9 倍であった。(平 14-16)

ウ 硝酸態窒素溶脱軽減技術の開発

堆肥の活用は、安定した収量の確保と同時に土壤や地下水の環境に考慮することが必要である。そこで、にらにおける硝酸態窒素溶脱軽減栽培について検討した。窒素無機化が遅い堆肥は、収量を低下させることなく硝酸態窒素溶脱を軽減させることができ、無機化が速い堆肥は、土壤中の残存窒素量に応じて基肥窒素を減肥すると、目標収量を確保しながら硝酸態窒素の溶脱を低下させることができることを示した。

栃木農試成果集 26:56-57 (2008)

エ 土壤物理性の改善効果

牛ふんオガクズ堆肥と牛ふん戻し堆肥を灰色低地土の水田転換畑に多量施用してほうれんそうを栽培し、土壤物理性の改善効果を検討した。堆肥の多量施用により短期間で土壤の固相が低下し気相が増加して物理性が改善した。また、全炭素、全窒素、陽イオン交換容量が増加した。

栃木農試成果集 29:35-36 (2011)

オ 成分調整肥料の開発

農耕地で家畜ふんを利用を促進するため、各種加工技術を検討した。まず、豚糞の付加価値を高めた迅速肥料化技術を開発した。(平 6-8)

続いて石灰窒素入り豚糞粒状肥料を製造し、その肥効を検討した。豚糞に石灰窒素、尿素および PK 化成を添加し混合すると粒状肥料が製造でき、その成分含有率は $\text{N:P}_2\text{O}_5:\text{K}_2\text{O} =$

8:6:5 程度であった。(平 9-17)

さらに、生ふんを原料に成分を調整し成型した肥料を製造する方法を開発し、肥料の性質および施用効果を明らかにした。豚ふんおよび牛ふんを乾燥し、化学肥料を添加・混合後、湿式押出造粒機でペレット状に成型、乾燥し家畜ふん肥料とした。ポットによるこまつなおよびほうれんそう栽培では、同肥料の施用による発芽および生育障害がなく、有害金属含量、大腸菌群数等についての安全性も確認された。製造安定性、保存安定性も確保された。また、同肥料について、原料豚ふんの窒素肥効率を 50%として施肥量を設定したとき、水稻、なす、ほうれんそう、ねぎに対して化学肥料と同等の収量が得られ、肥料としての有用性が実証された。

なお、開発肥料は、公定規格に規格のない普通肥料と特殊肥料の混合物であったため、農林水産省に働きかけた結果、規格が新設された。(平 16-18)

日作紀 76:555-561 (2007)

日作紀 79:198-204 (2010)

栃木農試研報 63:47-58 (2008)

(2) その他バイオマス

ア 農業集落排水汚泥の石灰処理

汚泥の有効利用を図るため、継続的に各地の集落排水汚泥の含有成分を調査した。さらに、肥料化とその肥効について検討した。汚泥に生石灰を添加する方式により、短時間に汚物感の少ない粒状肥料の製造を可能とした。自動肥料化装置を開発・製品化した。製造した肥料は、保管中の変質がなく、運搬、機械散布に耐えうる硬度を有し、流通性の高い製品であることを確認した。水稻、えだまめ及びキャベツ等への肥効試験によりその有用性を実証した。本研究は (株)トキメック (後に古河機械金属)との共同研究で実施され、全自動肥料製造装置が開発され、県内 5 箇所の農業集落排水処理施設に導入された。(平 5-12)

栃木農試研報 49:33-46 (2000)

イ その他の有機質資材の石灰処理

豚ふん、豆腐粕、醤油粕及び魚粕を堆肥化または生石灰処理による粒状肥料化を行った。製造した肥料を用いてスイートコーン、はくさい及びびつまいもに対する効果を確認した。(平 9-17)

ウ 豆腐かす堆肥の製造

豆腐かすを取扱性の良い堆肥に加工し利用する技術の検討を行った。重量比で豆腐かす 100、裁断紙 6 から 10 を攪拌し



写真 2-11-6 農業集落排水汚泥の石灰処理装置および製造肥料 (1998)

ながら発酵させ粒状の堆肥化物が製造できた。こまつな、だいこんへの堆肥の施用試験を実施した結果、窒素施肥量の 50%を製品堆肥で、50%を化学肥料で施用することで、慣行栽培と同等の収量が得られた。

栃木農試成果集 20:59-60 (2001)

エ 浄水汚泥と豚糞を主原料とした育苗培土の製造

浄水汚泥、豚ふん、紙および籾殻を混合・醗酵して浄水汚泥培土を製造した。その比率は 10 : 10 : 1 : 2.5 (現物重量)が望ましく、培土としての適正な化学性を有した。浄水汚泥培土は、トマトおよびきゅうりの育苗試験では市販培土と同等に生育したが、レタス、キャベツ、パンジーおよびマリーゴールドでは市販培土より劣った。また浄水汚泥培土はトマトおよびきゅうりの鉢上げ用にはそのまま使用できるが、葉菜類や花壇苗のは種用にはパーク堆肥を容積比で培土と等量程度混合して使用するのが望ましいと考えた。浄水汚泥培土は市販培土に比較して細粒の画分が多く、取り扱い性は不良で、乾燥すると撥水性を生じ、灌水後ポット中心部まで水が浸潤するのに長時間を要した。葉菜類および花壇苗で農試培土の生育が不良となった一因として通気性不良が考えられた。

栃木農試成果集 23: 33-34 (2004)

オ 作物残さの炭化による有効利用技術の開発

作物残さの有効利用のため低温炭化物の利用を検討した。炭化物の pH は 200 °C から 300 °C で低下し、それ以上では処理温度が高く処理時間が長いほど高い傾向であった。EC は処理温度が高くまた処理時間が長いほど高く、なし剪定枝は 0.2 から 1.4 dS m⁻¹であったのに対し、トマト茎葉は 6.3 から 13.4 dS m⁻¹と高かった。トマト茎葉炭化物の全窒素含有率は 250 °C の時 2.3 %で最大となり、一方なし剪定枝では 325 °C で 1.3 %で最大であった。土壌中で徐々に窒素無機化が続き、128 日後

の無機化率はトマトで全窒素の 17.2 %、乾物重の 0.4 %であった。全リンおよび全カリウム濃度は温度が高いほど高く、また水溶性カリウムも処理温度が高いほど高まったが水溶性窒素、リン、カルシウムおよびマグネシウムは温度が高いほど低下した。トマト茎葉炭化物の CEC は 300 °C で最大となり 60 cmol_c kg⁻¹ であった。

炭化物を施用してこまつなを栽培した結果、トマト炭化物は全窒素で化学肥料の 4 倍施用しても化学肥料より肥効が劣った。またナシ炭化物は生育阻害効果が認められた。化学肥料区の窒素の 20 %およびカリウムの全量を炭化物で代替し、スイートコーンを栽培した結果、乾物重、雌穂重いずれも、化学肥料区と同等であった。鹿沼土になし剪定枝炭化物を混入した培土でトマト苗を育苗したところ、60 %混入で最も生育が良かったものの市販培土に劣った。(平 14-16)

カ 黒ボク土における下水汚泥肥料の連用可能年数

地力維持を目的とした下水汚泥肥料の連用に伴う黒ボク土畑地土壌の化学性の変化を把握して、当該肥料の年間施用量および連用可能年数を明らかにした。平成 9 年 10 月から農試本場の黒ボク土畑圃場で汚泥肥料または堆肥を現物重で冬作 30 kg a⁻¹、夏作 70 kg a⁻¹ を 5 年間連用し、冬作として毎年小麦を、夏作として各種葉菜類を栽培した。銅および亜鉛の全量測定値は、下水汚泥肥料の連用により徐々に高まる傾向であったが、0.1 mol L⁻¹ 塩酸可溶性測定値および鉛の可溶性 (pH4.5 1 mol L⁻¹ 酢酸アンモニウム) 測定値は連用によって低下する傾向であった。汚泥肥料由来のカルシウムによって土壌の pH が上昇し、土壌中可溶性画分が低下する現象が捉えられた。本汚泥肥料はカルシウム含量が高く、土壌の急激な pH の上昇を避けるためには年間 50 kg a⁻¹ 程度の連用が適当と考えられ、この場合の連用可能年数は、カルシウム含量から 13 年間、亜鉛含量から 109 年、銅含量から 111 年間と推定された。

栃木農試成果集 21: 35-36 (2002)

キ メタン発酵消化液

家畜ふん尿をメタン発酵させることによるエネルギー回収の技術開発の中で、メタン発酵消化液の処理が課題となっている。そこで、牛ふん尿由来の消化液の水稲および畑作物への利用技術について検討した。

固液分離した牛ふん尿の液分を主原料としたメタン発酵消化液を用いて、水稲コシヒカリの基肥施用の肥効を検討した。用いた消化液の全窒素のうちアンモニウム態が 67% を占めた。水稲施肥基準相当量のアンモニウム態窒素を含む消化液を施

用し、速やかに代かきすることにより、化学肥料と同等の生育ならびに収量が得られた。このことから、全窒素の残り大部分を占める消化液の有機態窒素による水稲の生育への影響を考慮する必要がないことが示された。

また、施用直後の代かきは大規模圃場では困難なので、湛水前施用および流入施用による肥効を検討した。湛水前施用では、湛水 2 日前に施用すると、直後に代かきした場合と同等の生育および収量が得られた。しかし、湛水 9 日前施用では、消化液由来の追肥直前の窒素吸収量は直後に代かきした場合の 40% となった。流入施用では、施用 3 日後に代かきを行ったものの、消化液由来の追肥直前の窒素吸収量は、施用直後に代かきした場合の 48% であった。このように、流入から放置することによって生じる著しい肥効の低下は、アンモニウム態窒素の硝化および引き続き脱窒による損失によってもたらされたと考えた。

なお、消化液の pH は 8.4 であり、アンモニアガスとしての揮散の可能性が考えられるが、湛水前に消化液を施用し、翌日にすき混みを行えば、pH 調整の有無に関わらず、生育および収量は同等であり、揮散による損失を考慮する必要がないことが示された。

土肥誌 82 (1):31-40 (2011)

栃木農試成果集 30:75-76 (2012)



写真 2-11-7 メタン発酵消化液の水稲に対する流し込み施肥試験 (2008)

ク 土を用いた農業施設排水の浄化装置の開発

土壌 1500 mL を用いた小規模実験で硝酸カルシウム液による水質浄化能力を調査した結果、有機炭素の適量添加により、容積 1000 mL 当たり 1 日の浄化量は窒素として最大 200 mg であった。畜産施設排水を対象とした中規模浄化装置を作製し、窒素浄化能力の確認および SS 除去資材の検討を行った結果、粉がらが適当であった。しかし、短期間で土壌に目詰まりが生

じ窒素浄化能力の低下が認められたため、家畜ふん尿液状部分の簡易窒素浄化装置の開発は困難と判断した。(平 14-16)

5 野菜・果樹および花き類の施肥法と栄養診断

トマトやバラ栽培施設の一部で導入された灌水同時施肥栽培における土壌管理や植物体の栄養診断技術が検討された。一部のいちご栽培で導入されたクリプトモス養液栽培における施肥技術が開発された。

(1) トマト

トマトの養水分吸収特性を明らかにして施肥効率の向上を図るとともに時期別最適養水分供給量を明らかにした。(平 8-10)

また、高品質トマトの安定生産を実現するため、作型別トマトの時期別栄養診断技術を開発した。養液栽培の葉柄汁液の硝酸濃度は、培養液 EC 0.6 dSm⁻¹ 区では常に低かったが、EC 1.2dSm⁻¹ および 2.4 dSm⁻¹ 区では上段花房ほど低い値となった。栄養診断のための葉柄汁液の硝酸濃度測定部位は、測定値の安定性の面から、果実がピンポン玉サイズに肥大した開花果房周辺の基部近くの小葉柄が適していることを明らかにした。収穫開始時期までの植物体窒素濃度は、10 から 12 節葉柄汁液の硝酸濃度から推定可能であった。(平 10-14)

(2) 有機質培地を用いたいちごの全量基肥施肥技術の開発

クリプトモス+パーライト (7:3) 培地によるとちおとめ栽培において、通常の液肥に代えて肥効調節型肥料「ロングトータル」を窒素成分 2.0g 株⁻¹ 施用することで液肥と遜色ない可販果収量が得られたものの、12 月までは頂果房の乱形果の多発や一次腋果房開花の遅れが見られ窒素過多と判断された。また、4 月以降では草勢の衰えが見られ、肥料の溶出パターンの再検討の余地が示された。(平 11-12)

(3) ネギニラ「なかみどり」の施肥基準設定試験

春どりおよび夏どり作型において目標収量 26 Mgha⁻¹ を得るためには、収穫 1 回目の収量水準を 3 回目まで維持する必要があり、収穫期間中に地上部に移行する窒素は土壌からの吸収が多く、収穫期間中の養分供給が重要であると考えた。

パーライトを支持材とした養液栽培の結果、移植直後には NO₃⁻ 20 mmolL⁻¹ 以上の高濃度を要求するが、移植 30 日以後は 8 mmolL⁻¹ 程度が望ましく、SO₄²⁻ 濃度は常に 0.5 mmolL⁻¹ 以下で十分であり、HPO₄²⁻、K⁺、Ca²⁺ および Mg²⁺ の NO₃⁻ に対する濃度比は 0.49、3.0、0.58、0.4 が適正であることを明らかとし

た。

可給態リン酸 8.1 から 202 cgkg⁻¹ の腐植質黒ボク土でネギニラ「なかみどり」およびにら「スーパーグリーンベルト」を栽培し、両作物ともに可給態リン酸は 50 cgkg⁻¹ 以上が必要であることを明らかにした。

上都賀地域の夏どりにらの葉中硝酸濃度は、516 から 3260 mgkg⁻¹ で、土壌中無機態窒素と可給態窒素合計量が 35cgkg⁻¹ までは高いほど高まるがそれ以上ではやや低下することを明らかにした。(平 9-11)

(4) 花き生産安定技術の確立・土壌管理技術の解明

ばらの養液土耕における適正な施用液肥濃度および土壌溶液養分濃度を検討した。硝酸 (NO₃⁻) の施用濃度は 200 mgL⁻¹ で土壌溶液硝酸濃度は 1370 から 1880 mgL⁻¹ で推移した。窒素施用量は 40 mg から 280 mg 株⁻¹d⁻¹ の範囲で多いほど切り花本数も多かったが、高水準で土壌溶液硝酸濃度が上昇し、これを考慮し、150 mg 株⁻¹d⁻¹ が適正と判断した。

点滴灌水において、最初に確保された浸潤領域に対し土壌表面からの蒸発によって失われる水分量を供給することで浸潤領域の水分状態を安定的に維持できることを明らかにした。(平 5-7)

(5) 果樹の根圏制御栽培技術の開発

毛管給水によるぶどう根圏制御栽培における養水分管理技術を明らかにして低コスト、高品質、多収となる栽培システムを開発した。施肥は加温開始と同時に土壌混和することで摘房時に着粒の良好な房を選ぶことが容易になり、房重および収量が向上した。窒素施用量 40 g 樹⁻¹ 以上で 20 Mgha⁻¹ の目標収量を得ることができたものの、60 g 樹⁻¹ 以上では窒素吸収量や跡地土壌の無機態窒素含有率が高まり、40 g 樹⁻¹ が適当であることを明らかにした。根圏制御栽培なしの側枝のデンプン含有率および C/N が大きいほど果実横径および収量が大きい傾向があった。(平 13-18)

(6) 野菜における硝酸塩蓄積機構の解明と低減化技術の確立

にら葉中硝酸イオン濃度は、夏どりでは土壌中の無機態窒素と可給態窒素の含量に関係が認められたが、冬どりでは収穫時の土壌化学性との関係は認められなかった。品種により可食部の硝酸イオン濃度は差があり、冬どりに比べ夏どりで低下した。基肥は、土壌の残存窒素量に応じて減肥し冬どり前は追肥せず、翌年の夏どり前に肥効調節型肥料 (70 日タイプ) で施肥した結

果、目標収量の3 t/10aを確保でき、これらの葉中硝酸イオン濃度は慣行栽培に比べて半減することを明らかにした。(平 14-16)

6 全量基肥施肥法の開発

施肥技術として、水稻の生育診断技術の開発とともに、各作型に対する全量基肥栽培技術と専用肥料の開発が進められ、現在では水稻作付面積の50%に普及している。畑作物として、ねぎやたまねぎ等主要各作目に対する全量基肥肥料が開発された。

(1) 水稻

ア 早植コシヒカリ

各種の肥効調節型肥料の開発によって全量基肥施肥による水稻の省力および安定生産が期待できるようになった。そこでシグモイドタイプの窒素溶出特性をもつ被覆肥料を用いた全量基肥施肥法に



写真 2-11-8 開発された全量基肥肥料

における水稻の窒素吸収特性を把握するとともに、それに応じた被覆肥料と速効性窒素肥料の適正な配合割合を検討した。

その結果、黒ボク土地帯の早期早植コシヒカリを対象にした全量基肥施肥法には、速効性窒素肥料とシグモイドタイプの窒素溶出特性を示す被覆尿素 (LPS100 タイプ) を2から3:4の成分割合で配合し、20%程度減肥することが適当であった。これにより施肥の省力化を図りつつ追肥体系と同様の施肥効果が得られるため、安定した収量および玄米品質が維持できた。

栃木農試成果集 13 : 29-30 (1994)

栃木農試研報 42 : 9-24 (1994)



写真 2-11-9 水稻全量基肥肥料の開発 (2000)

イ 一発穂肥

水稻栽培では被覆尿素入り穂肥専用肥料 (一発穂肥) の普及により、収量の安定化とともに追肥作業の省力化が図られていた。一方、良質米生産のために栽培法の工夫などによっても食味向上が図られており、一発穂肥においても食味に及ぼす影響を明らかにする必要があった。そこで、食味との関連性に有意な相関を示す玄米中窒素濃度を指標とし、一発穂肥の施用量の多少による変動を検討した。

その結果、追肥窒素を1 kg/10a 減らすことによって、玄米中窒素濃度が0.03 から0.04%低下すると推察された。その割合は基肥窒素の多少に関わらずほぼ一定であった。

栃木農試成果集 14 : 69-70 (1995)

ウ 普通植栽培

施肥作業の省力化を図るため、県南部の普通植栽培地帯を対象として、肥効調節型肥料を利用した全量基肥施肥法を検討した。

その結果、LP50 または70 タイプの被覆尿素を80%程度配合することにより、全量基肥施肥栽培ができた。また、肥料の利用率が高まることから、20%程度の減肥が可能であった。収量は慣行並を確保でき、省力施肥技術として位置付けられた。

栃木農試成果集 15 : 73-74 (1996)

エ 湛水直播

水稻栽培はより一層の低コスト化が求められていた。そこで、省力化技術である湛水直播水稻について、肥効調節型の被覆尿素を用いた全量基肥施肥法を検討した。

その結果、湛水直播 (条播) におけるコシヒカリの全量基肥栽培は、肥効調節型肥料の被覆尿素40日タイプ (LP40) と100日タイプ (LPSS100) の1:2の組合せで栽培が可能であった。また、慣行分施に比べて25%程減肥できた。

栃木農試成果集 17 : 43-44 (1998)

オ 施肥時期と地域適合性の検討

水稻の全量基肥栽培は早植コシヒカリを中心に栽培面積が拡大しつつあったが、専用肥料の施用時期や適用地域によっては、緩効性肥料部分の溶出時期と水稻の生育ステージにずれが生じる等の問題が指摘されていた。特に、地温の高い地域での施用や施用時期が早すぎると溶出の開始時期が早まり、倒伏や生育後半の肥料切れの危険性を生じる懸念があった。そこで、全量基肥栽培におけるこのような問題について検討した。

その結果、全量基肥法の水稲の生育は慣行分施肥法の生育と異なることが明らかとなった。また、肥料の溶出は年次および適地地域により変動するが、水稲の生育ステージとのずれは、年次変動よりもむしろ地域間差のほうが大きかった。さらに、施用時期が早まると肥料の溶出も早まり倒伏等の危険性が増加した。したがって、早植コシヒカリの LPS100 を用いた全量基肥栽培をより安定させるには、施用時期に特に注意する必要がある。また、県南地域への適応性をさらに高める場合や、施肥時期を早め春先の作業効率を高めるためには、LPSS100 の配合が有効であることが示唆された。

栃木農試成果集 17 : 61-64 (1998)

カ 全量箱施肥法

水稲栽培では肥効調節型肥料の利用により全量基肥栽培が普及し、低コストおよび省力化は一層進む方向にあった。さらに、全量育苗箱施肥法の導入によって一層の低コスト化と省力化が図れると考えられた。本県に分布が広い黒ボク土水田は、リン酸肥沃度が低い一方、地力窒素の発現が生育後期まで続くなどの特徴があるため、全量育苗箱施肥法の導入に際し、これら問題を検討した。

その結果、肥効調節型肥料を利用することによって水稲生育に必要な窒素質肥料の全量を育苗箱に施肥する栽培が可能となった。この場合、LPS100 を窒素で 6 kg/10a (箱当たり現物 750 g)、または NK301 を窒素で 6 kg/10a (箱当たり 1000 g) の施肥が適当であった。

なお、本施肥法は、県央および県北部黒ボク土水田で、交換性カリウム 20 mg/100g 以上、可給態リン酸 15 mg/100g 以上の圃場に適応し、またカリウムを補給するため稲わらの秋季鋤込みを励行した。

栃木農試成果集 18 : 49-50 (1999)

キ 配合肥料の検討

水稲栽培の省力化技術として肥効調節型肥料を用いた全量基肥栽培法が開発され、早植コシヒカリを中心に普及しつつあった。しかし、被覆尿素肥料の窒素溶出速度は地温に影響されるため、地域によっては、尿素的溶出時期と水稲の生育ステージとのずれが想定された。このため、倒伏の軽減や登熟向上を図るために、それぞれの地域に適合した肥効調節型肥料を選定した。

その結果、これまで県内の地温の高い地域では、LPS100 の単用では溶出が早過ぎる懸念があったが、LPSS100 を配合することで穂肥としての効果がより安定すると考えられた。

また、早植コシヒカリを対象とした全量基肥栽培法の地域区分を行った。県北では LPS100 単用または LPS100 と LPSS100 とを 1:1 に配合した場合が適合し、県央では LPS100 と LPSS100 とを 1:1 に配合した場合が適合した。

栃木農試成果集 18 : 51-52 (1999)

栃木農試成果集 20 : 33-34 (2001)

ク 側条・全量基肥施肥

水稲栽培のより一層の省力化と低コスト化を図るため、水稲の側条施肥に用いる全量基肥肥料の配合割合、減肥率を検討した。

側条施肥用の全量基肥肥料として適した速緩比率は、適正な茎数や穂数が確保できることから、1:2 であった。また、全層の全量基肥栽培に比べて減肥が可能で、全層施肥で慣行分施肥の 2 割減とすると、側条施肥で 3 割減が可能であった。側条・全量基肥施肥で省力化が可能になるだけでなく、減肥によって、コストの削減や環境負荷を軽減できた。

栃木農試成果集 21 : 19-20 (2002)

(2) 水稲以外

ア ねぎ

6 月定植の秋冬どりねぎにおいて、追肥による従来の施肥法と比較して同等以上の収量と窒素吸収量が得られる緩効性窒素肥料の種類と速効性肥料の配合割合を検討し、さらに施肥位置を考慮し、環境への負荷軽減を目指した新しい施肥法を検討した。

その結果、定植位置の直下 10 cm に条施肥することにより 10 から 20 % の減肥が可能で、収量の安定性、窒素吸収量の面から LP140+硫安 (1.2+0.8 kg/a) と、スーパー IB+硫安 (1.4+0.6 kg/a) が適当と考えられた。また、条施用することにより、施肥基準より 25% 減肥しても従来の慣行栽培並の収量を得られた。

栃木農試成果集 13 : 37-38 (1994)

栃木農試成果集 16 : 47-48 (1997)

イ やまのいも

黒ボク土での窒素施用量は 20kg/10a が適正で、8 月までの追肥により増収し、くびれが少なくなることを明らかとした。

緩効性肥料を用いて、追肥的效果のある全量基肥施肥法を検討した結果、施肥法としては、速効性肥料と緩効性肥料を組み合わせた (速効性 : 緩効性 = 5:10) 全量基肥施肥が省的で、低コスト化が図れ効果的であった。この施肥法で、栃木

県の施肥基準（基肥 15 kg + 追肥 5 kg）よりも 20 %程度の減肥が可能と考えられた。（平 5-6）

栃木農試成果集 14 : 71-72 (1995)

ウ とちおとめ

いちご「とちおとめ」栽培の省力化と高品質生産技術の確立に寄与するため、緩効性窒素肥料を利用した全量基肥施肥法を検討した。

その結果、9 月上旬定植の作型では、定植前一週間以内に施肥する場合、窒素肥料として、100 日タイプと 140 日タイプを 1 : 4 にブレンドしたものを 18 から 20 kg/10a 施用することにより全量基肥施肥が可能であった。

栃木農試成果集 16 : 49-50 (1997)

エ こんにゃく

従来のこんにゃく栽培では、基肥 1 回の施肥が行われていた。しかしこの作業では、降雨などにより作物に吸収される前に肥料成分が流亡し、土壌や地下水などを汚染する危険性が生じる。そこで、肥効調節型窒素肥料の溶出特性を明らかにし、収量および利用率の点からこんにゃく栽培に適した肥料を選定した。

肥効調節型窒素肥料を 3 種類検討した結果、肥効調節型窒素肥料を施肥すると、窒素利用率が高くなり、その中でも、LPS100 は地上部の生育が増加する時期に窒素が溶出し、こんにゃくの生育量を確保することから、収量性が最も安定しており、こんにゃく栽培に適した肥料であった。

栃木農試成果集 18 : 57-58 (1999)

オ たまねぎ

従来、たまねぎの栽培法は基肥と 2 回程度の追肥を行う追肥主体の施肥が行われてきた。しかし、たまねぎは生育期間が約 220 日と長く、追肥作業では、作業上の労力はもちろんのこと、生育旺盛な株間を通して行わなくてはならないため、生育中の葉を痛めてしまう危険性もあった。

そこで、肥効調節型窒素肥料を利用し、収量を低下させず、省力的で肥料の利用率が高い全量基肥栽培法を検討した。

その結果、肥効調節型窒素肥料に 40 日タイプと 70 日タイプを用いることで全量基肥施肥による省力的な栽培法が可能であった。また、収量・貯蔵性・窒素利用率の面から見て、速効性肥料を使用せず、40 日タイプと 70 日タイプを 3 : 7 で配合し、全窒素量を慣行より 20 %減肥した全量基肥減肥処理がたまねぎに最も適した栽培法と結論づけた。

栃木農試成果集 18 : 61-62 (1999)

7 水稻の有機農業栽培技術確立に関する試験

水稻の有機栽培では各地に民間主導で技術体系が成立しているが、その技術を科学的に解析した例は少なく、技術普及を困難にしていた。そこで、NPO 法人民間稲作研究所（栃木県上三川町）の有機栽培水田を調査するとともに、農試ほ場で水稻有機栽培を行い、土壌管理技術を科学的に解明した。

(1) 米ぬか施用の効果

ア 水稻への肥料効果

平成 21 年から 22 年の 3 年間米ぬか施用を主体とした水稻栽培を行い、土壌肥料の観点から収量や土壌への影響等を評価した。

その結果、米ぬかの施用を主体とした水稻有機栽培では、基肥と移植直後の米ぬか表面施用（計 150 から 300kg/10a）により、化学肥料区の 80 から 90 %の収量を確保できた。米ぬかの秋施用は、冬期から春期に 50 %以上が分解するため、肥料効果が低下し、米ぬかの連用効果は小さく、跡地土壌の化学性に影響を及ぼさないと考えた。

栃木農試成果集 31 : 31-32 (2013)

イ 雑草の抑草効果

米ぬかを水稻の移植直後に表面施用することにより、雑草抑制効果が発揮される。しかし、移植時期の違いや、植代から米ぬか施用までの日数と雑草の出芽状況を基にした最も適切な米ぬか施用のタイミングの評価が不十分であった。そこで、これらの時期別の米ぬか表面施用の抑草効果を、主にコナギの多発する圃場で平成 24 年および 25 年の 2 年間評価した。

その結果、米ぬかの表面施用によりコナギを抑草するためには、普通植時期にコナギの出芽が確認される前に表面施用することが重要と考えられた。また、早植で効果が認められない要因の一つとして、米ぬかの分解の遅れによる影響が考えられた。

栃木農試成果集 33 : 29-30 (2015)

(2) 移植前長期湛水の効果

水田の移植前長期湛水の効果および機作について土壌肥料の観点から検討した。

その結果、現地の有機水田では、移植前に 30 日以上長期湛水を行うことにより、湛水土壌中のアンモニウム態窒素が蓄積し、収量増につながるものと考えられた。

栃木農試成果集 31 : 73-74 (2013)

(3) アミミドロ・ウキクサの発生と雑草抑制効果

雑草の抑制は、水稻有機栽培を行う上で大きな課題となる。そこで、雑草管理技術を科学的に解明するため、NPO 法民間稲作研究所（上三川町）の有機栽培水田の雑草抑制効果を評価した。有機栽培水田では、移植後にアミミドロやウキクサが繁茂し田面が覆われ、アミミドロは乾物 10 gm^{-2} の発生量で 60 %、 25 gm^{-2} の発生で 80 % 遮光され、雑草発生量が低下すると考えられた。また、アミミドロの大量発生は、深水管理の維持により継続的に供給される用水中の硝酸態窒素が起因していることが明らかとなった。

栃木農試成果集 31 : 75-76 (2013)

また、これら個々の技術を基に、NPO 法民間稲作研究所の水稻有機栽培体系について総括し、発酵肥料の施用や移植前の長期湛水によって水稻の安定栽培が確保されていることを明らかにした。

栃木農試成果集 32 : 21-22 (2014)



写真 2-11-10 田面水におけるアミミドロ発生条件の検討 (2012)

8 温室効果ガスの発生抑制に関する試験

農業による環境負荷としての温室効果ガスの発生を抑制することが求められている。水田ではメタンの発生が、畑地では亜酸化窒素の発生が懸念されており、その実態の把握と発生量抑制対策を明らかにした。

(1) 水田から発生するメタンの有機物施用を中心とした制御方法

県内の代表的な土壌である黒ボク土（宇都宮市）および灰色低地土（栃木市）において、メタンの発生量、施用有機物の種類による発生量の相違、およびメタン発生に及ぼす温度の影響について比較検討した。メタンの平均年間発生量は、黒ボク土では稲わら施用 > 化学肥料施用 > 堆肥施用の順となり、灰色低

地土では麦・稲わら施用 > 堆肥施用 > 化学肥料施用の順となった。

水稻の収量、メタン発生量の 2 点から、水田には適正量の腐熟の進んだ堆肥施用が望ましく、また、中干しや間断かん水の実施によりメタン発生を少なくすることが可能であった。

灰色低地土では水稻の生育後半にも堆肥中の易分解性有機物の分解が進行することが想定され、土壌別の堆肥施用基準を確立する必要性が認められた。

栃木農試研報 43 : 35-46 (1995)

栃木農試成果集 14 : 97-98 (1995)

(2) 畑地における亜酸化窒素の発生と制御方法

亜酸化窒素の温室効果は二酸化炭素の 150~250 倍に相当し、今後、温暖化への寄与率がより高まることが予想されている。農業分野では施肥によって亜酸化窒素が発生することが指摘されていることから、黒ボク土（宇都宮市）において、窒素施用量、施用有機物および肥料の種類による畑地からの亜酸化窒素の発生量の相違を明らかにした。

はくさい及び二条大麦を栽培しながら発酵豚ふん、硫酸 1.5 倍、稲わら堆肥、稲わら、硫酸の各施用をして 2 年間、亜酸化窒素発生量を継続的に測定したところ、亜硝酸窒素の放出率は 0.03 から 0.5 % で、年次変動が大きく、発生フラックスは、特に基肥施用直後の温度および土壌水分の影響を大きく受けることが示された。作物の生産性と亜酸化窒素の発生制御の両面を実現するためには、易分解性有機物の少ない腐熟の進んだ堆肥施用が望ましいと考えられた。また、窒素の多施用を控えること、緩行性窒素肥料の施用、必要以上の多灌水を控えることや排水不良畑の排水対策が亜酸化窒素の発生制御に有効であることが示された。

栃木農試研報 44 : 35-46 (1996)

栃木農試成果集 15 : 87-88 (1996)

(3) 土壌管理が温室効果ガス発生と土壌炭素の貯留へ及ぼす影響

農耕地土壌は堆肥の施用等適切な土壌管理により炭素を貯留することが可能とされており、京都議定書においても温室効果ガスの吸収源の一つとして位置づけられている。炭素貯留効果の高い営農活動に取り組む指標とするため、温室効果ガスの発生および土壌炭素貯留効果について、黒ボク土畑地（茂木町）において 3 年間調査した。

にんじんを栽培しながら、堆肥施用、堆肥多量施用および化学肥料施用について比較したところ、二酸化炭素や亜酸化

窒素の発生量は堆肥を多量に施用することによる影響が大きく、土壌への炭素貯留効果も高かった。しかし、降雨量が多い年には、炭素貯留効果が最も少なくなる現象も確認された。

栃木農試成果集 31 : 81-82 (2013)

9 大気汚染に関する調査

我が国では、酸性雨による被害は顕在化していないとされてきたが、本県の白根山地域における森林の衰退（先枯れ、立枯れ、倒木等が発生している状況）の原因のひとつとして首都圏等から移流した大気汚染物質を含む雨や霧による影響が指摘された。

そこで、県内の代表的な土壌である黒ボク土と灰色低地土の非耕地土壌について、酸性雨による影響を調査した。さらに、白根山の森林衰退地域において、土壌の理化学性を調べ、土壌の酸性化と森林衰退の関係について検討した。

県内の代表的土壌である黒ボク土と灰色低地土について、人工酸性雨を用いたモデル実験を行った。その結果、処理した希硫酸水の pH が低くなる程、土壌 pH が低下し、また、灰色低地土に比べて、黒ボク土の方が酸性化しやすいと考えられた。

白根山のダケカンバ林衰退地の土壌は、酸性のポドゾル土壌であり、ダケカンバが衰退していた地点の土壌では、土壌溶液中のアルミニウムイオン (Al^{3+}) の活動度が大きかった。

酸性霧は付着すると流れ落ちにくいので、植物との接触時間が酸性雨よりも長い。このため酸性霧は酸性雨よりも植物に悪影響を与える可能性がある。そこで、植物を人工酸性霧に曝露してどのような影響を受けるか調査し、酸性霧に感受性の高い指標植物の検索を行った。酸性霧により陸稲、ほうれんそう、はつかだいこん、大豆、インパチエンス、ルピナス、水稻、あさがお、ベチュニアに可視的障害として白色小斑点があらわれた。これらの感受性のある植物は酸性霧の指標植物として用いることができると考えられた。

栃木農試研報 42:25-34 (1994)

栃木農試成果集 13:119-120 (1994)

栃木農試成果集 17:77-78 (1998)

10 重金属の吸収抑制に関する試験

CODEX 委員会による農産物中有害物質の国際基準策定を受けて、本県でも麦類のカドミウム吸収抑制、水稻のカドミウムおよびヒ素吸収抑制対策が実施された。

(1) 水稻におけるカドミウム吸収抑制手法の検討

アルカリ資材として ALC（軽量気泡コンクリート粉末肥料）を土壌に施用し、カドミウム吸収抑制効果について検討した。ALC の施用により、無施用区に比べて土壌および土壌溶液の pH は高くなり、土壌溶液カドミウム濃度は低くなった。出穂 1 週間後に採取した土壌溶液カドミウム濃度と玄米カドミウム濃度との間に有意な相関関係が認められた。

栃木農試成果集 31:77-78 (2013)

(2) 水田土壌のカドミウム浄化技術

カドミウム高吸収水稻品種「モーれつ」を用い、カドミウム汚染土壌の浄化効果を検討した。モーれつは対照品種のコシヒカリ等に比べ、籾重、わら重、わらおよび籾のカドミウム吸収量が最も高く、栽培後の土壌カドミウム濃度の低減率も最も高かった。

栃木農試成果集 31:79-80 (2013)

(3) 大麦のカドミウム吸収の品種間差

大麦のカドミウム含有率の実態を把握するため、県内産大麦の子実中カドミウム含有率を調査した。子実 105 検体中 104 検体が大麦の CODEX 基準値 0.1 mgkg^{-1} 未満であった。

カドミウム低水準灰色低地土は場ならびにカドミウム添加土壌または現地汚染土壌（腐植質黒ボク土）で大麦を栽培し、カドミウム含有率の品種・系統間の特性を検討した。子実中カドミウム含有率が高い品種として Apam およびカシマムギ、低い品種として RisoM56、大系 HL138-8-7、Spartan および RisoM86、極めて低い品種として 2727 (GRIN)) を分類した。

栃木農試研報 63:17-25 (2008)

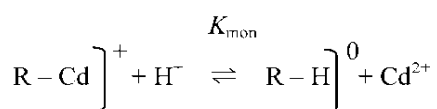
(4) カドミウム吸収予測手法の開発

水田では、土壌の還元に伴う硫化カドミウム生成がカドミウム溶解度の低下をもたらし、湛水の継続が水稻による吸収抑制技術として確立されている。一方畑作物では吸収量の予測手法や吸収抑制手法は確立されておらず、カドミウム吸収に関するリスク予測技術の確立が急務となっている。そこで、まず腐植質黒ボク土と灰色低地土でのしゅんぎく栽培結果に基づきカドミウム吸収量予測手法を開発した。しゅんぎくのカドミウム吸収量と土壌溶液カドミウム濃度の関係を植物根による養分吸収モデルによって解析し、土壌種類の違いにかかわらず、土壌溶液カドミウム濃度 5 mmolL^{-1} 以下で、作物根はカドミウムを能動的に吸収し、それ以上では受動的に吸収すると判断した。さらに、土壌によるカドミウム吸脱着反応は次式によると仮定し、本式に基づきカドミウム活動度 (Cd^{2+}) と $\log Q$ -pH の関係



写真 2-11-11 人工圃場における小麦のカドミウム吸収試験(2007)
土壌類型、カドミウム水準、塩化物水準が設定された

図を作成したところ、両土壌ともに、傾き 1 の直線的な関係にあった。



したがって、 $\log(\text{Cd}^{2+}) = \log K_{\text{mon}} + \log Q_{\text{Cd}} - \text{pH}$ 、

ただし、 K_{mon} は土壌のカドミウム吸脱着係数、 Q_{Cd} は土壌のカドミウム含有量。

$\log(\text{Cd}^{2+})$ と $\log Q_{\text{Cd}} - \text{pH}$ の回帰直線の Y 切片は吸脱着係数 $\log K_{\text{mon}}$ に相当し、土壌類型毎に固有の値であり、土壌類型毎に明らかにすることにより、土壌のカドミウム含有率と pH から土壌溶液中カドミウムイオン濃度（活動度）が推定でき、これら二種の関係に基づき、土壌のカドミウム含有率および pH から作物のカドミウム吸収量予測が可能であることを示した。

さらに、多様な土壌での土壌溶液カドミウム濃度を予測するため、県内に分布する 6 種の土壌に硝酸カドミウムおよび硝酸を多水準で添加した。4 週間後に土壌溶液中カドミウム並びに各種イオン濃度を測定し、解析した結果、土壌溶液カドミウム活動度は、土壌の種類に関わらず前述のしゅんぎくを用いた試験と同様に活動度 $\log(\text{Cd}^{2+})$ と $\log Q - \text{pH}$ の関係図を作成し次式で示されることを確認した上、吸脱着係数 $K_{\text{Cd}}/C_{\text{Cd}}$ を求めた。

$$(\text{Cd}^{2+}) = \frac{Q_{\text{Cd}} K_{\text{Cd}}}{10^{\text{apH}} C_{\text{Cd}}}$$

さらに既知の各種イオンペア生成定数から土壌溶液カドミウム濃度にはイオンペア CdCl^+ の生成が重要であると推定し、土壌中カドミウム含有率 Q_{Cd} 、土壌のカドミウム吸着容量 C_{Cd} 、カドミウム吸着係数 K_{Cd} 、pH、塩化物イオン濃度 $[\text{Cl}^-]$ 、イオンペア CdCl^+ 生成定数 K_{CdCl} およびカドミウムイオン活動度係数 f_{Cd} から土壌溶液カドミウム濃度 $[\text{Cd}_T]$ を予測する次の予測式を得た。

$$[\text{Cd}_T] = \frac{Q_{\text{Cd}} K_{\text{Cd}}}{10^{\text{apH}} C_{\text{Cd}}} \left\{ \frac{1}{f_{\text{Cd}}} + K_{\text{CdCl}} [\text{Cl}^-] \right\}$$

さらに、 f_{Cd} は EC から予測でき、 $K_{\text{Cd}}/C_{\text{Cd}}$ は CEC と極めて関連が深いことを見出し、一般的な土壌分析項目から土壌の種類にかかわらず土壌溶液総カドミウム濃度を予測する次式を誘導した。

$$[\text{Cd}_T] = 0.288 Q_{\text{Cd}} 10^{-0.6\text{pH}} \text{CEC}^{-2.37} \{1 + 2.23 \text{EC}^{0.490} + 95.5 [\text{Cl}^-]\}$$

Soil Sci. Plant Nutr. 55: 441-451 (2009)

Soil Sci. Plant Nutr. 57: 367-376 (2011)

栃木農試成果集 28: 53-54 (2010)

カドミウム低水準灰色低地土ほ場において、土壌 pH、カドミウム濃度および子実カドミウム濃度のは場内変動を検討した。その結果、pH の圃場内変動は比較的小さかったものの、カドミウム濃度および子実カドミウム濃度の変動係数は 12 から 45 % と大きかった。また、場内の腐植質黒ボク土と灰色低地土人工圃場において多水準の土壌カドミウム濃度と pH 条件下で小麦を栽培し、小麦子実カドミウム濃度予測手法を検討した。子実カドミウム濃度は、播種前土壌 0.1 M 塩酸抽出カドミウム濃度が 0.1 から 2.5 mgkg^{-1} の範囲で直線的に増加した。小麦子実カドミウム濃度が CODEX 基準 (0.4 mgkg^{-1}) 未満となる土壌 0.1 M 塩酸抽出カドミウム濃度は、灰色低地土で 0.5 mgkg^{-1} 、黒ボク土で 1.0 mgkg^{-1} だった。土壌、土壌溶液および収穫前作物体カドミウム濃度と子実カドミウム濃度との間には、それぞれ正の相関が認められた。出穂 1 か月後の穂カドミウム濃度が成熟期の子実カドミウム濃度と最も相関が高く収穫前に収穫物のカドミウム濃度が予測可能であることを示した。

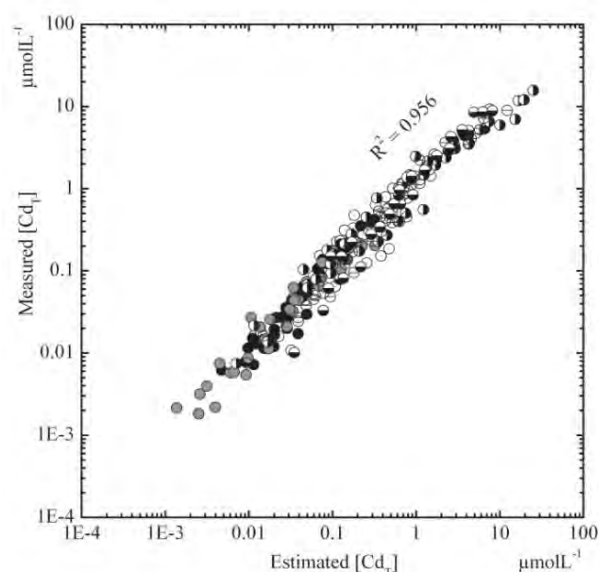


図 2-11-7 土壌養液 Cd の予測値と測定値の関係

栃木農試研報 68 : 65-77 (2012)

11 農薬の安全使用に関する試験

農薬の環境中の動態として、水田系における動態ならびに土層内の浸透について検討された。また残留基準値のネガティブリスト化に対応して、多成分同時分析や簡易分析法としてイムノアッセイによる分析法が検討された。

ア 農作物由来による農薬摂取の実態

残留農薬の消費者への安全性の資料を得るために市販の食品を購入し、水洗、調理後分析を行い、数種類の農薬の一日あたり摂取量を明らかにした。イソキサチオン、DDVP、DEP、ジネブは米、麦・雑穀、豆類、いも類、果実類、野菜類、茶の全ての食品群から検出されなかった。イプロジオンは緑黄色野菜から1人1日当たり0.6 µg、エチルチオメトン は緑黄色野菜から1人1日当たり1.0 µg、その他の野菜から0.4 µgの摂取があり、ADIに対する比率はイプロジオンでは0.004%、エチルチオメトンでは1.4%であった。

栃木農試研報 40 : 39-46 (1993)

イ 栃木県におけるマイナー作物の農薬残留と防除効果

(ア) ゆうがいの病害虫の防除効果と農薬残留

平成2、4年にTPN、エチオフェンカルブの残留および防除効果を試験した。ユウガオ炭そ病防除に対しTPNフロアブル剤が5回散布、収穫前日までの使用、アブラムシ防除に対しエチオフェンカルブ乳剤が2回散布、収穫前日までの使用で登録拡大された。いずれの場合も残留濃度が登録保留基準あるいは残留基準を大きく下回り、農産物としての安全性は高いと考えられた。また、いずれの場合も病気の初発前あるいは害虫の低密度時からの農薬散布が防除効果に優れていると考えられた。

(イ) うどの病害の防除効果と農薬残留

平成3から4年に塩基性塩化銅、TPNの残留および防除効果を試験した。うど黒斑病防除に対し、塩基性塩化銅水和剤が根株養成期における散布(回数の制限なし)およびTPNフロアブル剤が根株養成期における3回散布の使用で、登録拡大された。散布された農薬は収穫までに消失し、あるいは検出されず、農産物としての安全性は高いと考えられた。また、いずれの場合も病気の初発前からの農薬散布が防除効果に優れていると考えられた。

栃木農試研報 44 : 25-32 (1996)

栃木農試成果集 15 : 83-86 (1996)

ウ 黒ボク土畑地における農薬の浸透

畑地における農薬の浸透試験は実施例が少ない。そのため、畑地における農薬散布後の気象条件、土壌水分並びに農薬の特性が浸透に及ぼす影響について検討した。

(ア) イプロジオンおよびジメトエート

農薬散布後の降雨強度および時期、土壌水分および農薬の土壌吸着係数によって浸透に違いが生じた。また、水溶解度が高く、土壌吸着係数が小さいジメトエートは、バイパス流だけでなく、マトリックス流によっても下方まで浸透することが明らかとなった。深度70 cmの検出は不被圧層の存在では微量な濃度ではあるが、下層の微生物活性や温度の低下などにより農薬の消長が長くなることから、浅層地下水への浸透の可能性が考えられた。

(イ) ペンディメタリンおよびアセフェート

ペンディメタリンの浸透水中の濃度はイプロジオンやジメトエートに比べて低かった。また、アセフェートの検出頻度は低かった。しかし、それぞれの $t_{1/2}$ (半減期)が長いことや、土壌吸着係数が小さいという特性により、浅層地下水への浸透の可能性が考えられることから、今後も監視が必要であると考えた。

(ウ) リニュロンおよびプロメトリン

県内での畑地はアロフェン質黒ボク土の占める割合が高いため、これら2農薬の浅層地下水への浸透の可能性は少ないと考えた。

(エ) 有機物施用による浸透制御

腐植化が進んだ高い有機物含量を持つアロフェン質黒ボク土の特性により、有機物施用による農薬の浸透制御効果は遮蔽される場合が多かった。しかし、稲わら堆肥施用により、ペンディメタリンやアセフェートの浸透が制御された。一方、ニトロフミン酸には吸着の促進効果も可溶性の低分子画分による浸透助長の影響も認められなかった。

栃木農試成果集 16 : 61-68 (1997)

エ 流通農産物からの農薬摂取の実態

食品群ごとに調理前と調理後の試料に分割して14種類の農薬について分析を行い、食品中に残留している農薬の摂取の実態を明らかにした。調査した14種類の農薬のうち、9種類が調理前のいずれかの食品群から検出され、このうちの7種類が調理後にいずれかの食品群から検出された。調理後の食品から摂取される農薬の量は、体重50 kgあたりADIの0.017から2.18%であった。

栃木農試研報 48 : 29-37 (1999)

栃木農試成果集 18 : 77-78 (1999)

オ 農薬の鉛直浸透と土壌特性との関係

県内の代表的土壌である黒ボク土、灰色低地土および茨城県牛久市の淡色黒ボク土の3種類の土壌における農薬の鉛直浸透を、モデル的に把握する試験を行った。土壌カラムリーチング法により、各種農薬の土壌中鉛直浸透を調査した。その結果、水溶解度の高い農薬ほど溶出しやすい傾向を示した。また、土壌の特性としては、有機炭素含量が農薬溶出に影響を与えたと考えられた。

栃木農試成果集 18 : 79-80 (1999)

カ 農薬の特性と表面流出との関係

モデル的に作成した傾斜地に農薬を散布し、その農薬の降雨による流出実態を、人口降雨装置を用いて調査することにより、農薬の環境中での挙動を明らかにした。また、傾斜地からの農薬の流出実態を、モデル的に把握した。その結果、流出率は散布した農薬量の2%を超えることはなく、また、散布後の時間の経過に従い、流出率は概ね減少する傾向を示した。しかし、農薬によっては、土中での移動に伴い、逆に若干増加する場合もみられた。また、農薬は、散布後の時間の経過に従い、SS画分に存在する割合が高かった。

栃木農試成果集 18 : 81-82 (1999)

キ 水田から河川への農薬流出の実態

農薬の水田から河川への流出は、環境への影響および人の健康への影響から問題とされることが多い。そこで、農薬の流出実態を調査し、環境への影響を明らかにした。調査した薬剤のうち、ベンチオカーブ以外は、特に濃度が高まることはなく、安全性が確認された。特に、航空散布薬剤については、散布3日後にはほとんど検出されなくなり、環境および人に対する影響は、最小限に抑えられていると考えられた。ベンチオカーブについては、農家の散布時期が集中し、水溶解度も比較的高い薬剤であることから、多量の降雨が予想される場合は散布を延期し、水田の水止めをしっかり行うことによって、環境への負荷が少なくなり、かつ効率的な防除が行われることが示された。

また、調査水田からのベンチオカーブおよびフサライドの流出率は農薬水田ほ場モデル (PADDY)を用いた推定値に極めて近かった。

栃木農試研究報告 51 : 29-36 (2002)

栃木農試成果集 19 : 61-62 (2000)

ク 畑土壌の種類が農薬の鉛直浸透に及ぼす影響

近年、農薬による環境負荷が問題となっている。その中で水質に関しては環境基準が4農薬、要監視項目の指針が27農薬について設定されている。しかし、地下水等の基準は設定されておらず、基準設定に関して多くの土壌によるデータを集積する必要がある。そこで、本県の代表的土壌についてモデル実験を行い、農薬の畑圃場における鉛直浸透試験を実施した。11剤を検討した結果、10剤の農薬が黒ボク土よりも灰色低地土において移動が速いことが認められた。農薬別ではジメトエート、PHCの移動速度が速く、ジメトエート、メトラクロール、シマジンは土壌間の差が大きかった。

栃木農試成果集 21 : 31-32 (2002)

ケ イムノアッセイによる残留農薬測定方法

残留農薬分析は多大な労力を要することから、各産地のモニタリングや出荷前検査への対応は困難であった。そこで、イムノアッセイ (免疫測定法)を本県の重要農産物に適用できるよう技術的な課題を検討した。作物としてねぎ、いちご、なしと農薬としてイプロジオン、アセタミプリドの組み合わせでは、イムノアッセイによる残留測定はほぼ可能であった。アセタミプリドをいちごに供した場合では作物成分の影響が大きく、回収率が劣ったが、希釈により回避できた。ただし、イムノアッセイで基準値の1/5程度以上の分析値が出た場合は機器分析による再分析が必要と考えた。分析の手引きを作成した。

栃木農試成果集 23 : 13-14 (2005)

コ 土壌中の残留農薬が葉菜類の農薬残留濃度に及ぼす影響

前作物に使用し、土壌中に残留した農薬が後作物に基準値



写真 2-11-12 イムノアッセイによる残留農薬の簡易測定法の手引き (2004)

を超えて吸収される事例が報告されている。そこで、物理化学性の異なる農薬を裸地に施用後、葉菜類を栽培し、施用された農薬の土壌および作物体における動態を明らかにした。すなわち、場内表層多腐植質黒ボク土畑において、平成22年にこまつな、ほうれそうとチアクロプリド、プロシモン、平成23年にしゅんぎく、みずなとホスチアゼート、フルトラニルの組合せで実施した。作物の残留農薬基準値を超えた組合せはなかった。農薬の土壌中残留濃度の減少程度は、水溶解性が高いもののほど大きく、最も水溶解性が高いホスチアゼートでは、散布直後から7日の間に急激に減少した。

栃木農試成果集 31 : 33-34 (2013)

12 土壤診断技術の開発

土壤診断は、作物生産の基本である。近年は団体による分析点数が増加し、一層の効率化が求められている。ただし、測定法が簡易であっても、測定値には確実性が求められる。現在使用されている土壌分析法の中で長時間を要する項目は、可給態窒素および CEC である。可給態窒素はインキュベータ装置と4週間の培養期間を要する。また、CEC は浸透管を接続する専用の装置と煩雑な操作を伴う。さらに、交換性陽イオンの測定には日常的に簡易法も用いられるが、簡易法による測定値は、特にカルシウムとマグネシウムの浸出率が低く、問題視されている。

そこで、これら問題に対応する新たな分析法として、浸出液に塩化ストロンチウムを含む酢酸アンモニウム溶液を用いた交換性陽イオン類の測定法、交換酸度を用いた CEC 測定法が開発され、リン酸アンモニウムによる可給態窒素の測定法が検討された。

さらに、近年の化学肥料の高騰を受け、水稻のリン酸およびカリウムの減肥基準が見直された。

(1) 陽イオン交換容量の測定を要さない土壌試料のための簡易な交換性陽イオンの浸出法

交換性陽イオン含量は生産力を評価する重要な化学性として多数の土壌試料の測定が行われている。交換性陽イオン含量はセミマイクロショーレンベルガー法(カラム法)による陽イオン交換容量(CEC)の測定過程で得られる浸透液中の陽イオン濃度を測定することによって行うことが標準法となっているが、浸出作業が煩雑であること、浸出装置の不備などのためカラム法を使用できない場合が多い。また、CEC の値が既知の場合は、従来 pH7.0, 1M 酢酸アンモニウム溶液を浸出液とした酢酸振とう法が広く用いられていた。しかし、酢酸振とう法はカラム法に比べて操作性、効率性で優れている一方で、特に二価の陽イオン類

の測定値が低くなる問題があることから、簡易な浸出測定法について検討した。

その結果、0.0114M 塩化ストロンチウム / 0.05M 酢酸アンモニウム溶液により溶液 / 土壌 = 200 で浸とうすることにより、カラム法と同等の測定値が得られ、特定の器具や煩雑な浸透作業を必要とせず、短時間で多試料の分析が可能であることから CEC の測定を必要としない土壌試料の交換性陽イオン浸出に有効と考えた。

土肥誌 68 : 61-64 (1997)

栃木農試成果集 16 : 35-36 (1997)

(2) 土壤診断における簡易な CEC 測定法

CEC は土壌の保肥力を評価し、陽イオン飽和度を計算する上で土壌診断の際に必要な値である。標準法であるカラム法は、操作が煩雑で長時間を要することから、これに代わる簡易な CEC 測定法を開発した。すなわち pH 7.1, 1M 塩化カリウム + 0.2M トリエタノールアミン溶液の交換・浸出溶液による交換酸度の測定値に交換性陽イオン類総量を加えることにより標準法より短時間、低コストで標準法に近似の CEC 測定値が得られる測定法を開発した。

本法による測定値は、ショーレンベルガー法による測定値に良く一致し、塩基飽和度が 100 % を越える地点、つまり炭酸塩が生成していると推測される地点でも良好な測定値が得られた、前項の簡易な交換性陽イオン類の測定法と組み合わせて、極めて効率的な分析ができると考えられた。

栃木農試成果集 19 : 57-58 (2000)

土肥誌 72 : 550-553 (2001)

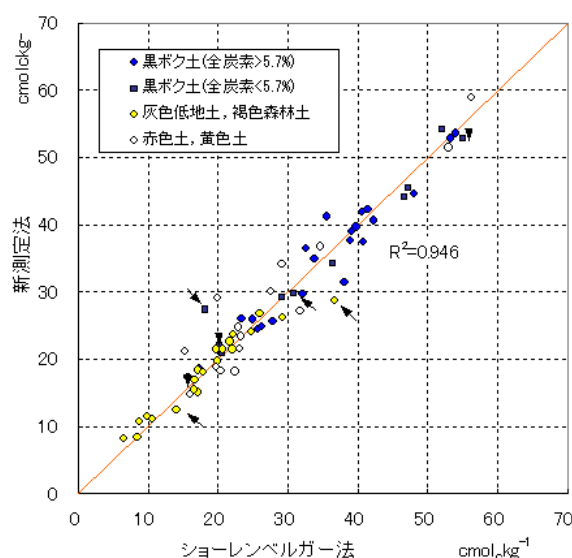


図 2-11-9 ショーレンベルガー法と新測定法測定値の関係

↓ EC > 1.0 dSm⁻¹ の試料で、指し示す先端は水溶性陽イオンを差し引いた値。
↘ 塩基飽和度が 100% を越える試料

(3) 施設土壌の可給態窒素の簡易測定法と土壌からの無機化量の推定

施設土壌は一般に残存無機態窒素や可給態窒素含有率が高く、これらを考慮して基肥量を決定する必要がある。しかし、可給態窒素の測定には4週間の培養が必要であり、黒ボク土ではその簡易測定法が確立されていない。また、栽培期間中に土壌から無機化してくる窒素量の推定方法も確立されていないことから、施設土壌の可給態窒素簡易測定法と土壌からの無機化量の予測について検討した。

黒ボク土および褐色低地土の4種の施設土壌を用いて無機態窒素と可給態窒素の検討を行った結果、土壌残存無機態窒素は窒素質化学肥料と同等の肥効を示すと評価できた。また、可給態窒素の簡易分析法についてこれまでに提案された各種手法を比較した結果、オートクレーブ抽出液を415 nmと210 nmで測定した原スペクトルにおける方法が有効であった。また、栽培期間中の無機化窒素量は、無機化係数(栽培開始から追肥までの累積地温)/(可給態窒素の累積地温840℃)として推測することが可能で、栽培前の可給態窒素測定値に基づき「無機化量=可給態窒素×無機化係数」から基肥の施肥量が計算可能であった。

栃木農試成果集23:69-70(2005)

(4) 水田の可給態窒素の簡易測定法

水稲栽培で地力窒素を考慮して適正な施肥量を決定するため、指標となる可給態窒素の簡易測定法として、多腐植質黒ボク土ならびに灰色低地土で短期間培養法および浸出法を検討した。

短期間培養法は培養期間4日、7日、培養温度30℃、35℃、40℃を組み合わせた6処理、リン酸緩衝浸出の前処理法は風乾土を用いた2M塩化カリウムによる浸出、蒸留水での洗浄、無処理の3処理を比較した。

培養法は35℃7日間培養とし、前処理無しにリン酸緩衝浸出液で浸出した液を295 nm前後の吸光度スペクトルを2次微分する方法が、標準法である30℃で4週間培養による可給態窒素の測定値との相関が最も高く、簡易測定法として適していた。

栃木農試成果集27:36-37(2009)

(5) 地力を考慮した水稲の施肥量診断技術

良質米生産安定技術確立として、県内の黒ボク土と灰色低地土で生産された水稲の玄米を食味計により分析し、土壌の化学性と食味の関連を検討した。(平2-6)

一方、水稲栽培において環境への負荷を抑えて目標収量540 kg/10aを確保するため、地力窒素の指標値である可給態窒素と水稲の土壌由来の窒素吸収量の関係を明らかにし、地力に応じた施肥量診断技術を確立した。場内の腐植質黒ボク土水田において、無窒素区、施肥診断区、施肥基準区でコシヒカリを5年間栽培した。可給態窒素が高いほど、無窒素区の窒素吸収量は高くなる傾向が認められた。追肥直前までの窒素吸収量が多いと収量が増加し、この時期の窒素吸収量が5.0 kg/10aで540 kg/10aの収量が得られた。

栃木農試成果集28:31-32(2010)

(6) 水稲生育診断予測技術の開発

気象の変化に対応した水稲の生育および土壌窒素の無機化を予測する技術を開発した。県内水田に分布する主要な水田土壌を培養し、反応速度論的手法によって窒素無機化パラメータを算出し、水田圃場での水稲コシヒカリによる窒素吸収量の推定を行った。各地点、各年の気温の推移により水稲の窒素吸収量をおおむね予測できた。

また水稲全量基肥栽培では、従来の慣行分施栽培とは茎数や葉色の推移が異なる傾向が見られることから、全量基肥栽培の最適な生育パターンを検討した。特に、初めて全量基肥栽培を導入する農家に対して、数年かけて施肥の適量を決定するまでの経過措置として、生育量と追肥効果の関係から生育診断指標を作成し、追肥時期とその要否判定を検討した。すなわち場内黒ボク土水田において、窒素施肥量を全量基肥として4割増(H13のみ6割増)区、2割増区、標準区、2割減区、4割減区、慣行分施区、無窒素区の計8処理について平成11年から3年間実施した。収量は基肥窒素量が多いほど多く、基肥窒素量が少なく生育の小さい区では収量に対する追肥の効果が大きかった。収量と総粒数には正の相関があり、目標収量540から600 kg/10aを確保するために必要な総粒数は281から315(×100粒/m²)と推定された。出穂前20日の葉色×茎数値で生育診断値を下回る場合、生育診断値が低いほど収量に対する追肥の効果が大きかった。しかし、最高分げつ期に追肥を行うと玄米中の窒素含有率が適正值を大幅に超える傾向にあり、全量基肥栽培の生育診断時期は出穂前20日、指標値は葉色×茎数値は1779から1974と設定した。これによって、全量基肥栽培導入時などで、生育の小さい場合には追肥で対応できる。

また、診断手法の一つとしての水稲生育期間中の土壌溶液アンモニウム態窒素の簡易測定に真空採血管の利用が有効であった。(昭61-平13)

栃木農試成果集 21 : 17-18 (2002)

栃木農試成果集 21 : 23-25 (2002)

栃木農試研報 52 : 19-29 (2003)

(7) 水稻のリン酸およびカリウムの減肥基準の見直し

世界的な肥料価格高騰を受け、水稻栽培におけるリン酸やカリウムの適正施用が求められている。そこで、本県水田の代表的な土壌である黒ボク土において、減肥基準を見直した。

ア リン酸

土壌中の可給態リン酸 (Truog 法) が 5 cgkg^{-1} 程度の場合、リン酸標準施肥でも収量が低下するため、リン酸水準の改良が必要である。 10 cgkg^{-1} 程度の場合、リン酸を減肥しても収量は維持されるが、可給態リン酸および作物体中リン濃度が低下するので標準施肥から 1/2 施肥とする。 30 cgkg^{-1} を越える場合は数年間の減肥は可能であることが示された。

また水田における可給態リン酸の評価にはアスコルビン酸

還元-ブレイ No.2 法がより優れることを明らかにした。

栃木農試成果集 33 : 27-28 (2015)

イ カリウム

土壌中のカリウム蓄積量と施肥によるカリウム量が不足する場合、ナトリウムが代替吸収され、カリウム欠乏の指標となる。土壌中の交換性カリウム水準が 30 cgkg^{-1} 以上で、カリウム資材を 3 年間程度減肥できる可能性が示された。

栃木農試成果集 33 : 41-42 (2015)



写真 2-11-13 蒸留による窒素の分析作業

コラム 8

土壌調査と現地試験の思いで

新採の頃、箒川流域の水田土壌の調査に行った。午前中、中野主任研究員に断面の見方を教えられ、午後に一人で調査を始めたが、土壌断面の「土の基色」を記載すべきところ「部分グライの色」で記載してきた。夜、宿で夕食後に調査票を見せると「あそこ断面の基色に、こんな色はない」と誤りを厳しく指摘された。翌日、中野主研と共に、全ての試坑の断面調査をやり直した。自分の勉強不足が恥ずかしかった。この時から、土壌調査で二度と同じ失敗をすまいと、お陰で「甘さ」が消え、その後、なんとか土壌肥料で飯が食えるようになった。中野先輩には、感謝している。

また、幸運にも当時は、現地試験が、仕事の大部分を占めていた。例えば、足利では「銅の汚染土壌」、栃木では排水対策試験地の「盤層のある土壌」、小山の「カドミウム汚染土壌」「砂質の強グライ土壌」、大田原の「リン酸欠乏の開田土壌」、都賀の「珪酸欠乏土壌」など列挙できないほど、多くの問題のある土壌をこの目で見る機会を得た。

当時、試験地を作るのも大変だった。水田の客土の土を運搬するのに山道がぬかるんで車輪が滑り、小型トラックにチェーンを巻いて何回も往復した事。トンチャーを自分で操作し掘削しコルゲート管を埋設した事。弾丸暗渠を施工した際、土壌の余りの硬さに弾丸を固定している金具が曲がってしまった事など懐かしい。

土壌調査と現地試験で県内各地の土壌を知るという貴重な経験が、後年、土壌肥料の専門技術員になった時に本当に役立った。

岩崎秀穂