

第6部門 土 壤 肥 沃 度

水田土壌肥沃度*

鳥山和伸¹・石橋英二²

1. 水田土壌肥沃度の評価と管理

土壌肥沃度の評価と管理に関するシンポジウムが開催され、肥沃度の決定要因、肥沃度ムラの実態と局所管理による対応などが整理された（日本土壌肥料学会編, 2008）。圃場の肥沃度を知り適切に管理するには、適切な土壌サンプリングを行って特性値の評価を行う必要があるが、特性値によって空間的な変動係数は大きく異なり、例えばC/N比で6%, 全窒素13%, 可給態窒素24%のように可給度が高いほど大きな変動係数を有する。許容される誤差範囲に応じて、空間的あるいは時間的なサンプリング頻度を決定する必要がある（矢内ら, 2008）。一枚の圃場単位ではなく、集落営農を対象として、土壌特性値の空間変動解析を行う場合、土壌養分の供給や排水性を考慮した輪換ブロックの設定指標として、地形の影響を強く受ける土壌有機物や粒径組成などの特性値が有効であるが、輪換ブロック内では、可給態窒素等の土壌特性値に基づく可変施肥などの局所管理が有効である（池永ら, 2010）。水田転換畑における窒素肥沃度変化などを検討し、土壌有機物の蓄積と分解等に及ぼす田畑輪換の効果が整理された（日本土壌肥料学会編, 2010）。滋賀県の水田50地点の粘土鉱物、土壌微生物バイオマス等の特性を主成分分析とクラスター分析により類型化し、肥沃度の低い砂質土壌において資材投入で増加したと推定される可給態リン酸量と微生物バイオマス量との間に高い正の相関があり、資材投入が肥沃度に及ぼす影響が認められた。（西堀ら, 2009）。

2. 田畑輪換の肥沃度実態と管理

水田転換畑における窒素およびリン酸肥沃度の変化の法則性とその分子レベルでの変化の推定、肥沃度維持のための家畜ふん堆肥や緑肥の施用について総合的に検討した（日本土壌肥料学会編, 2010; 新良ら, 2010）。重粘土水田転換畑におけるダイズの初期生育の促進には、ヘアリーベッチを前作に導入することが有効であり、その要因としてヘアリーベッチの蒸散作用と根の伸長に伴う土壌の亀裂構造の発達を推定した（佐藤ら, 2007）。田畑輪換の繰り返しにより土壌有機物の化学形態がどのような影響を受けるかを熱分析（DSC分析）により解析し、発熱量は概ね可給態窒素量と相関があること、発熱ピークが二つあり、畑地利用回

数にしたがって単調に減少する低温分解成分と4回程度の畑地化を経て減少に転じる高温分解成分のあることを明らかにした（森泉ら, 2010）。飼料イネを4年栽培したライシメータ圃場で転換初年目ダイズ圃場における窒素収支を推定し、完熟堆肥を適切に施用することにより窒素固定を促進し、かつ圃場からの窒素損失とそれに伴う窒素肥沃度低下を緩和できる可能性を示した。（Takakai *et al.*, 2010）

3. 養分動態と診断、施肥法

1) 窒素

窒素肥沃度は水稲生産に最も強く影響するので、圃場の窒素肥沃度の評価を簡便に実施できる診断法の開発がもてられていた。加熱温度と加熱期間を変えて処理した土壌のアンモニア態窒素量と湛水培養後アンモニア態窒素量との相関を検討し、105℃1日乾燥が簡易な窒素肥沃度診断に有効であるとした（原ら, 2009）。窒素施肥では大区画水田における省力追肥が課題であったが、灌漑水とともに施用する流入窒素施肥では尿素が硫酸よりもやや吸収利用効率の-highいことが示された（土田ら, 2009）。高品質で多収を目指す場合に追肥の量や時期を適切に決める必要から窒素栄養診断が重要であり、群落の窒素吸収量との相関が高い植生指数（NDVI）測定が有効であるとした（鳥山, 2009）。

2) リン酸

2008年から2009年にかけてリン酸肥料の高騰などがあり、リン酸施肥についての見直しの機運が高まったが、取りまとめ時点で論文は少なかった。アロフェン質黒ボク土水田において、灰色低地土水田とは異なり、湛水後の還元が進行しても有効態リン酸含量は増加せずむしろ減少し落水後に約2ヶ月間上昇した。一方、有効態リン酸含量は、有機区が化肥区よりも常に高く、穂のリン酸含量との相関は幼穂形成期頃の還元状態で最も高かった（齊藤ら, 2007）。

3) ケイ酸、鉄

水稲が大量に吸収し、その生育改善に有効とされるケイ酸については、供給と吸収、その生理的作用についての研究が引き続き行われたが、高温登熟や潮害等への抵抗性の観点が新たに盛り込まれた。先ず、土壌のケイ酸供給力の面からは、沖積水田土壌のケイ酸供給力が風化抵抗性、粒径組成、鉱物組成に影響され、しゅう酸可溶性のケイ酸、鉄、粘土画分の $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比×粘土含量によって可給態ケイ酸の変動の50%が説明できた（Makabe *et al.*, 2009）。また、インドネシアの二つの集水域における可給態ケイ酸含量の違いについて、母材の違い等からの説明が可能であった（Husnain *et al.*, 2008）。土壌からのケイ酸供給量が水稲の生育時期別ケイ酸吸収量に及ぼす影響を推定し、幼穂形成期から成熟期にかけての吸収量、茎葉ケイ酸含有率に大

¹ (独) 国際農林水産業研究センター

² 岡山県農林水産総合センター

* 2007年1月から2010年12月の日本土壌肥料学雑誌およびSoil Science and Plant Nutrition誌を中心として、水田土壌肥沃度に関する論文を整理した。

日本土壌肥料学雑誌 第82巻 第6号 p.520~536 (2011)

きな差を生じること(森・藤井, 2009), ケイ酸の低日照時における増収効果には止葉における光合成速度の高さが寄与していることが推定された(藤井ら, 2008). 登熟期の水稻穂部への海水由来塩分付着害はケイ酸施用によって軽減された(森ら, 2008). ケイ酸質肥料が高温処理水稻の生育に及ぼす影響について検討し, ケイ酸質肥料の施用により茎葉ケイ酸濃度および稲体ケイ酸吸収量が上昇し, 気孔コンダクタンスが増加し, 葉温が低下することを見出し, 高温条件下での収量・品質へのケイ酸の寄与が推定された(金田ら, 2010). また, 施用コストの面から, 加工鉍滓リン酸肥料およびシリカゲルの幼形期追肥は, ケイカル全層施用よりも費用対効果が高いことが示された(森ら, 2009). 高pHにおける鉄欠乏に対する接触施肥の効果を調べ, 根と肥料の接触が鉄吸収を促進することを示した(Morikawa *et al.*, 2008).

4. 土壤有機物

1) モデル予測と実態解明

土壤肥沃度の長期的変動を予測する上でモデルを利用した予測が重要であり, C/N比や分解の難易度の異なる有機物を投入した場合の窒素の動態予測に一定の成果を上げているが, 多くのモデルは畑土壌用に開発されており, 水田への適用を考慮したモデルの必要性が指摘された(西尾, 2007). 土壤炭素動態モデル RothC を日本の全農耕地に適用し, 有機物投入のいくつかのシナリオについて炭素蓄積効果が推定された(Yokozawa *et al.*, 2010). 土壤の有機態窒素の化学形態について, 最近の進歩がとりまとめられ, タンパク質の割合が土壤有機態窒素の40%に上り, 多くは土壤有機物の超分子の一部として存在すると推定されている(森泉・松永, 2009). 田畑輪換の繰り返しによる土壤有機物の化学形態の変容を熱分析(DSC分析)により解析し, 畑地利用回数との関係などを推定した(森泉ら, 2010).

2) 有機物施用

水田における各種家畜ふん堆肥の窒素分解パターンをリン酸緩衝液抽出窒素で推定する方法が有効であることを示した(瀧ら, 2009). 堆肥連用9~12年の水稻栽培における化学肥料の削減可能性について, 収量, 窒素吸収量, 玄米たんぱく質から検討し, 牛ふん堆肥と鶏ふん堆肥では基肥と追肥の半量削減が, 豚ふん堆肥では基肥全量と追肥の半量削減が可能であった(住居・徳永, 2009). 飼料イネ栽培では, 一次発酵後の牛ふん堆肥を代掻き間近に施用すると初期生育は遅延するが, 茎葉も含む乾物収量の低下は引き起こさない(原・土屋, 2007). コメヌカとオカラの湛水培養での窒素無機化特性解析と圃場での窒素放出経過の推定が行われ, コメヌカを地温の低い時期に圃場に基肥として施用すると1ヵ月程度は有機化が進むが, それ以降無機化に転じ, 約90日後には80%, 最終的にみかけ上100%が無機化された. オカラの場合には最初から無機化が進行し, やはり90日後には80%が無機化された(新良, 2010). メコンデルタの2期作水田における稲わら堆肥施用効果を検討し, 化学肥料の減肥が有効であることが示さ

れた(Watanabe *et al.*, 2009). 麦わらと稲わらを添加した湛水土壌における有機酸の蓄積と土壤溶液中の NH_4^+ の減少を培養実験で検討し, 麦わら施用では稲わら施用に比べ有機酸生成量が多く土壤溶液中 NH_4^+ 量が低く推移すること, 尿素添加により麦わらではメタン発生量が有意に高まり, 有機酸量が減少した(Shan *et al.*, 2008). 重窒素を用いた直接的な手法によって水田に施用された有機質資材(牛ふん, 豚ふん, 鶏ふん, コメヌカ, 稲ワラ等を使用した堆肥)に由来する窒素の動態を検討し, ガラス繊維ろ紙法の窒素分解率は必ずしも資材由来窒素の分解率を示さないこと等を明らかにし, 無機質窒素肥料, 有機質資材の窒素肥効は牛ふん堆肥との併用により緩効化されることを示した(西田, 2010). 家畜ふん堆肥と稲わら堆肥の長期連用が土壤窒素の ^{15}N 天然存在比($\delta^{15}\text{N}$)に及ぼす影響を調べ, 家畜ふん堆肥連用で増加, 稲わら連用で変化なし, 無施用で低下傾向にあり, 天然供給Nの存在比も影響することを示した(Nishida *et al.*, 2007). 重窒素標識牛ふんオガクズ堆肥の施用後3ヵ年の水稻に対する吸収が累積で7%, 土壤への残存66~69%, 未回収24~27%であり, 毎年の水稻吸収割合は2~3%であり累積吸収量は標準温度変換日数に比例した(Nishida *et al.*, 2008).

5. 土壤管理法(不耕起, 中干し, 好氣的栽培法等)

不耕起継続水田に家畜ふん堆肥を連用するとリン酸の蓄積と系外への溶脱リスクが増大する可能性を指摘し, 耕起を行うことにより溶脱量を減らす作用があることを見だし, 不耕起栽培が継続された場合の土壤孔隙の溶脱への寄与を推定した(大家ら, 2007). 水田転換畑におけるダイズ不耕起無培土栽培の継続が土壤の理化学性に及ぼす影響について検討し, 耕起栽培に比べて最表層は緻密化するが, 土壤炭素および窒素肥沃度の減少は少ないという特徴を見出した(坂東・藤山, 2010). 重粘土水田における中干し時の亀裂生成が水稻生育に及ぼす影響を無代掻き水田を対照にして検討し, 代かき水田での大亀裂の発生は土壤水および灌漑水の吸収を低下させ気孔開度を減少させるなど光合成に不利に作用し, 収量・品質の低下に結びついた(金田ら, 2008). 水稻の好氣的栽培法(アエロビクライス)を継続した場合の収量低下を抑制するため, 窒素源を変えた施肥を行い, アンモニウム態が硝酸態窒素に比べて効果的であることを示した(Nie *et al.*, 2009). アエロビクライスを継続した場合の収量低下の原因がpH上昇にあると想定し, 希硫酸を土壤に処理してpHを下げると窒素等の養分吸収量が増加した(Xiang *et al.*, 2009). また, 収量漸減の要因として生物的要因の関与を調べ, 土壤への熱処理の実施による窒素供給量の増加にもかかわらず, 無処理の1作目よりも11作目の熱処理区で地上部乾物重が有意に低く, 非生物的要因の関与が推定された(Sasaki *et al.*, 2010).

6. 環境

1) カドミウム

農用地における重金属汚染土壌の現状, 客土効果の持続性, ファイトレメディエーション, 化学洗浄や電気泳動に

よる汚染土壌の修復技術ならびに水稲のカドミウム吸収抑制対策について、詳細な解説が行われた(小野・阿部, 2007; 山田, 2007; 村上, 2007; 茨木・谷口, 2007; 牧野ら, 2008; 川池, 2008; 石川, 2008; 荒尾, 2009). 日本全国の土壌中のカドミウム濃度の中央値(1530点)は 0.27 mg kg^{-1} で、他国と比較して高かった。この原因として、日本に多く分布する火山灰土壌との関係が指摘されていたが、今回の調査結果から、火山灰土壌とは関係が無いと考えられた(山崎ら, 2009). カドミウムのイネ体内の輸送について、玄米中のカドミウムの9割以上が篩管から輸送されたものであることが明らかにされた(Tanaka *et al.*, 2007). また、連続湛水条件下の登熟初期の篩管液のカドミウム濃度が低いと、結果的に玄米のカドミウム濃度も低くなることが明らかになった(Yoneyama *et al.*, 2010). 水田におけるファイトレメディエーションについて、低カドミウム汚染土壌におけるカドミウム高吸収水稲品種の栽培は、土壌中カドミウム含量の低下および次作のコシヒカリの玄米中濃度の低下に有効であった(本間ら, 2009). また、カドミウム吸収能の高いイネを2年間早期落水条件下で栽培したところ、カドミウム汚染田の修復に効果的であった(Ibaraki *et al.*, 2009). 水田のファイトレメディエーションに適した植物として、カドミウム収奪量が多いケナフとカドミウム含有率が高いアフリカンマリーゴールドが有望で(大森, 2008a), 雑草ではアメリカセンダングサ、コセンダングサ及びアオコビが適していると考えられた(Abe *et al.*, 2008). 水管理、資材の施用等について、カドミウム吸収抑制対策として、愛媛県の水田で検討したところ、出穂前後3週間を必ずしも常時湛水とする必要はなく、土壌タイプによっては、50%以上の湛水率でも良いことが示された(大森, 2009). カドミウムの低汚染レベル圃場で、収穫期の機械走行性、収量性および玄米カドミウム濃度を総合的に考慮すると、出穂前15日から出穂後25日の40日間の湛水処理が効率的であった(稲原ら, 2007a). 新潟県のグライ土水田において、玄米中カドミウムの低減効果は、幼穂形成期から出穂後3週間の湛水管理単独で約50%、熔リン等の併用で70~75%であった(星野ら, 2008). さらに、土壌の汚染レベルおよびpHが低い水田では、アルカリ資材施用と後期湛水処理を組み合わせることにより、水稲のカドミウム吸収抑制と生育・収量の安定化を図ることが可能であることが示された(稲原ら, 2007). リン酸セロース資材は、カドミウム汚染土壌における浄化用資材として適用可能であった(原田ら, 2007b). 精米のカドミウム濃度を低減するためには、出穂期後3週間の湛水管理に加えてカドミウム含有率が高い青未熟粒の除去、さらに青未熟粒が発生しないような栽培管理が重要であることが明らかにされた(中津ら, 2010). カドミウム汚染土壌に対する塩化カルシウムによる洗浄は、土壌中のカドミウム濃度を低下させたが、米のカドミウム濃度を 0.2 mg kg^{-1} 以下にするためには不十分で、アルカリ性にするか湛水処理を組み合わせる必要があった(Hayashi *et al.*, 2007). 収穫時

の玄米カドミウム濃度の推定において、収穫1~2週間前の茎・葉鞘部のカドミウム濃度は有効な指標である(今井ら, 2009). また、出穂約20日後の茎・葉鞘中のカドミウム濃度によって立毛段階の出荷事前検査において玄米中濃度を推定できることが明らかにされた(中島, 2007). 土壌中カドミウムの1M酢酸アンモニウム抽出法は、早期落水栽培した場合の水稲の玄米中濃度の推定に活用できることが示された(中島ら, 2010). 湛水条件と畑条件で水稲を移植したペットボトルを現地の農家圃場に埋設し、玄米中カドミウムを測定することで、そこで収穫される玄米中のカドミウム濃度の上下限界が予測可能である(中島・市川, 2007). 玄米中のカドミウム濃度が高いと推定された場合は、イネの全量持ち出しによる土壌浄化を進め、 0.4 mg kg^{-1} の境界域の場合は、カドミウム濃度が高い未熟粒等を除くことによって、玄米中のカドミウム濃度を基準値以下に低下できることが示された(中島ら, 2009). 分析法では、ヒートブロック型酸分解システムで分解し、ICP-MSを用いた玄米中カドミウムの迅速分析法が検討された(馬場・後藤, 2009).

2) その他の重金属

宮城県農耕地土壌中の42元素が分析され、全国規模で得られたデータとの比較が行なわれた(木村ら, 2008). 秋田県の農地では、堆肥由来の亜鉛蓄積量と作物による亜鉛持ち出し量が検討された(佐藤ら, 2007c). 水稲品種の亜鉛欠乏や鉄毒性の評価法が検討され、寒天をいれた培養液を使う方法が欠乏や毒性の評価に有効であることが示された(Wang *et al.*, 2008). 水稲にヒ素汚染水を灌漑する際に、非晶質鉄水酸化物を施用すると、土壌溶液中の有効態ヒ素濃度を低下させ、その毒性緩和に有効であることが明らかにされた(Ultra *et al.*, 2009). 水田土壌及び水稲における化学形態別ヒ素の動態に関する最近の研究の動向がまとめられた(荒尾ら, 2009). ベトナムにおけるクロムやニッケル、あるいはヒ素の汚染実態が明らかにされた(Kien *et al.*, 2010; Phuong *et al.*, 2008).

3) 温室効果ガス

不耕起栽培田からの温室効果ガス発生について、稲わらを圃場に戻す不耕起乾田直播栽培を7年以上継続した水田では、稲わら由来有機物が作土表層に集積することにより、11月~2月頃の亜酸化窒素の発生量が増加し、また湛水期間中のメタンの発生も多くなることから、4~5年間不耕起直播栽培を継続した後、耕起栽培に転換し、表層の有機物をすき込むことが温室効果ガスの発生量(二酸化炭素等価発生量)抑制に有効であることが明らかにされた(石橋ら, 2007; 石橋ら, 2009). 水稲不耕起栽培では、水田からの温室効果ガス発生量と燃料消費共に少なくなり温室効果ガス放出量を抑制できる栽培法であると考えられた(Harada *et al.*, 2007). 稲わらの春すき込みに代えてもみ殻入り家畜ふん堆肥をすき込むと、メタン発生量は鶏ふん堆肥や牛ふん堆肥で減少したが、豚ふん堆肥では判然としなかった(熊谷ら, 2010). 積雪寒冷地帯の水田への稲わら施用は、冬

期間の稲わら分解が進まないため、メタンの発生が多くなることが示された (Naser *et al.*, 2007). 中国ではメタン発生と小麦わらの施用法との関係 (Ma *et al.*, 2008), タイでは塩分濃度が高い水田に有機物をすき込んだ時のメタンの発生に及ぼす影響について検討された (Supparattanapan *et al.*, 2009). 水稲単作水田において、稲わらをすき込む一方で、適切な水管理による酸化還元電位のコントロールを行うことは、水田土壌からの二酸化炭素等価発生量の削減と土壌炭素集積量の維持に有効であることが明らかされた (Minamikawa and Sakai, 2007). 冬期間積雪があるグライ水田土壌における暗渠の設置は、非栽培期間中の土壌を酸化するために、有機物の分解が進み、相対的に還元容量を減少させ、メタン生成活性を低下させることが明らかにされた (Shiratori *et al.*, 2007; Furukawa *et al.*, 2008). また、水田への硝酸イオン高濃度灌漑水の導入効果が検討された (糟谷, 2008; 糟谷, 2009). 日本の耕地土壌における有機物投入効果を RothC モデルで推定した結果、水田では堆肥として炭素 $1.0 \text{ t ha}^{-1} \text{年}^{-1}$ の投入が土壌の炭素蓄積に有効で、その際水田裏作に麦を作付けし、麦の残渣をすき込むと良いことを明らかにした (Yokozawa *et al.*, 2010). 土壌から発生する亜酸化窒素及びメタンフラックスの長期モニタリングのための、移動可能で低コストな自動ガスサンプリング装置が開発された (Akiyama *et al.*, 2009). また、水田土壌からのメタンと亜酸化窒素の排出量を推定するためのプロセスモデル (DNDC-Rice) の開発とその評価が行われた (麓ら, 2010).

4) 有機環境影響物質

水稲をダイオキシン汚染土壌で栽培しても、ダイオキシンは玄米中へ移行しにくいことが示された (佐藤ら, 2007a).

5) 水質

印旛沼周辺の水田で、側条施肥、育苗箱全量施肥および紙マルチ移植栽培を組み合わせると、全窒素の流出、COD と濁度の低下に顕著な効果があることが示された (大塚ら, 2008). 滋賀県の“環境こだわり農業” (蓮川ら, 2009) や猪苗代湖湖岸水田地域における水管理の改善 (中山ら, 2008) により、大幅な環境負荷物質の流出抑制が可能であることが示された. 湛水深の抑制や田面水中の電解質濃度の向上による水質汚濁負荷の削減効果が、八郎潟の水田で検証された (原田ら, 2007a; 原田ら, 2008). また、レンコン田からの窒素排出量低減対策として、シグモイド型の被覆肥料の使用と節水管理が有効であると考えられた (折本・武井, 2007).

7. 定点調査

低位生産地調査, 地力保全基本調査, 土壤環境定点調査等が継続的に実施された土壤保全対策事業について、その歴史, 成果, 問題点及び今後の方向性について整理された (日高, 2007; 橋本, 2007; 郡司掛, 2007; 三輪, 2007). 和歌山県, 神奈川県, 愛媛県, 千葉県及び滋賀県で、土壤保全対策事業定点調査の取りまとめが行われた (林ら,

2007; 藤原・岡本, 2008; 大森, 2008b, 金子, 2007; 堀田ら, 2010). 土壤保全対策事業の定点調査で得られた結果をもとに土壌図をデジタル化し, GIS ソフトを用いて、土壌情報を迅速かつ視覚的に表現可能とした (水口・黒田, 2007). また、デジタル土壌図を用いて、全国的な農耕地土壌の分布面積の推移が検討され、水田土壌では都市化や田畑輪換の影響を受けやすい平坦地に分布する灰色低地土やグライ土の減少が大きいことが分かった (高田ら, 2009; 高田ら, 2011). フィリピンの土壌分布状況及び土壌肥沃度的特徴等が紹介され、きめ細かな土壌管理技術の必要性の中で、日本の技術協力の在り方が論じられた (浜崎ら, 2010).

8. 基盤整備

深水栽培は、障害型冷害対策、雑草防除、倒伏防止、貯水機能の増大および水生生物の生息場所としての機能が注目されている. しかし、深水栽培を推進する上での基盤整備上の課題は、畦畔の高さ確保、横浸透による漏水防止、地耐力維持のための排水機能の強化などである. 一方、深水栽培を常時湛水型にすると、必ずしも用水量の増加問題が起きないことが示された (有田・熊谷, 2007). 地力にムラがある基盤整備後の大区画水田圃場において、基肥および追肥を可変施用すると水稲の生育・収量・品質ムラを改善できた (若松ら, 2006). 下層に未分解有機物層が存在する湿田において、基盤整備後不耕起乾田直播栽培を継続すると、下層の有機物層が酸化分解し、田面が部分的に沈下し均平度が徐々に失われることが分かった (赤井ら, 2010).

文 献

- Abe, T., Fukami, M., and Ogasawara, M. 2008. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 54, 566.
- 赤井直彦・石橋英二・河田員宏・村上倫啓・藤原利行 2010. 土肥誌, 81, 378.
- Akiyama, H., Hayakawa, A., Sudo, S., Yonemura, S., Tanonaka, T., and Yagi, K. 2009. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 55, 435.
- 荒尾知人・加藤英孝・牧野知之・赤羽幾子・鈴木克拓・天知誠吾・山口紀子・高橋嘉夫・石川 覚・川崎 晃・松本新悟・前島勇治・村上政治・門倉雅史・堀田 博 2009. 農環研報, 26, 91.
- 荒尾知人 2009. 土肥誌, 80, 58.
- 有田博之・熊谷和美 2007. 農及園, 82, 1253.
- 馬場康尋・後藤逸男 2009. 土肥誌, 80, 271.
- 坂東 悟・藤山英保 2010. 土肥誌, 81, 472.
- 藤原俊六郎・岡本 保 2008. 神奈川農技セ研報, 150, 1.
- 麓 多門・柳原哲司・斎藤 隆・八木一行 2010. 土壌の物理性, 114, 49.
- Furukawa, Y., Shiratori, Y., and Inubushi, K. 2008. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 54, 950.
- 藤井弘志・森 静香・安藤 豊 2008. 土肥誌, 79, 471.
- 郡司掛則昭 2007. ペドロジスト, 51, 127.
- 浜崎忠雄・大倉利明・三浦憲蔵 2010. 土肥誌, 81, 267.
- 原 嘉隆・土屋一成 2007. 土肥誌, 78, 573.
- 原 嘉隆・土屋一成・中野恵子 2009. 土肥誌, 80, 241.
- Harada, H., Kobayashi, H., and Shindo, H. 2007. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 53, 668.

- 原田久富美・太田 健・進藤勇人・小林ひとみ 2007a. 農及園, 82, 375.
- 原田久富美・太田 健・進藤勇人・小林ひとみ・伊藤千春 2008. 土肥誌, 79, 53.
- 原田直樹・須田 誠・斎藤陽子・藪崎克己 2007b. 土肥誌, 78, 89.
- 橋本 均 2007. ペドロジスト, 51, 119.
- 蓮川博之・柴原藤善・駒井佐知子・水谷 智・大林博幸・藤井吉隆・須戸 幹 2009. 滋賀県農技振興セ研報, 48, 1.
- Hayashi, T., Kida, T., Nanzyo, M., Takahashi, T., Honna, M., Aikawa, Y., and Yoshihara, K. 2007. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 53, 720.
- 林 恭弘・森下年起・久田紀夫・藪野佳寿郎・東 卓弥 2007. 和歌山県農総技術セ研報, 8, 41.
- Husnain., Wakatsuki, T., Setyorini, D., Hermansah., Sato, K., and Masunaga, T. 2008. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 54, 916
- 日高 伸 2007. ペドロジスト, 51, 113.
- 本間利光・大峽広智・金子綾子・星野 卓・村上政治・大山卓爾 2009. 土肥誌, 80, 116.
- 堀田 悟・園田敬太郎・武久邦彦・西堀康士・山田善彦 2010. 滋賀県農技振興セ研報, 49, 33.
- 星野 卓・門倉綾子・遠藤由紀夫・白鳥 豊・本間利光 2008. 新潟県農総研報, 9, 99.
- Ibaraki, T., Kuroyanagi, N., and Murakami, M. 2009. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 55, 421.
- 茨木俊行・谷口 彰 2007. 土肥誌, 78, 627.
- 池永幸子・遠藤好恵・稲村達也 2010. 土肥誌, 81, 207.
- 今井清之・柴原藤善・堀田 悟・小野信一 2009. 滋賀県農技振興セ研報, 48, 23.
- 稲原 誠・雄川洋子・東 英男 2007a. 土肥誌, 78, 149.
- 稲原 誠・雄川洋子・東 英男 2007b. 土肥誌, 78, 253.
- 石橋英二・山本章吾・赤井直彦・鶴田治雄 2007. 土肥誌, 78, 453.
- 石橋英二・山本章吾・赤井直彦・岩田 徹・鶴田治雄 2009. 土肥誌, 80, 123.
- 石川 寛 2008. 土肥誌, 79, 408.
- 金子文宜 2007. 土と微生物, 61, 117.
- 金田吉弘・高橋大悟・佐藤 孝 2008. 土肥誌, 79, 454.
- 金田吉弘・高橋大悟・坂口春菜・金 和裕・高階史章・佐藤 孝 2010. 土肥誌, 81, 504.
- 糟谷真宏 2008. 土肥誌, 79, 376.
- 糟谷真宏 2009. 愛知県農総研報, 40, 179.
- 川地 武 2008. 土肥誌, 79, 209-211.
- Kien, C.N., Noi, N.V., Son, L.T., Ngoc, H.M., Tanaka, S., Nishina, T., and Iwasaki, K. 2010. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56, 344.
- 木村和彦・本吉博美・武田 晃・山崎慎一 2008. 土肥誌, 79, 358.
- 熊谷勝巳・塩野宏之・森岡幹夫・長沢和弘・中川文彦 2010. 山形県農研報, 2, 1.
- Ma, J., Yagi, K., Xu, H., Han, Y., and Cai, Z. 2008. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 54, 638.
- 牧野知之・神谷 隆・近藤和子 2008. 土肥誌, 79, 101.
- Minamikawa, K., and Sakai, N. 2007. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 53, 657.
- 水口晶子・黒田康文 2007. 徳島県立農総技術支援セ農研報, 4, 17.
- 三輪睿太郎 2007. ペドロジスト, 51, 133.
- Makabe, S., Kakuda, K-I., Sasaki, Y., Ando, T., Fujii, H., and Ando, H. 2009. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 55, 300.
- 森 静香・藤井弘志・安藤 豊 2008. 土肥誌, 79, 387.
- 森 静香・藤井弘志 2009. 土肥誌, 80, 136.
- 森 静香・柴田康志・松田裕之・藤井弘志 2009. 土肥誌, 80, 347.
- Morikawa, C.K., Saigusa, M., Nishizawa, N.K., and Mori, S. 2008. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 54, 467.
- 森泉美穂子・松永俊朗 2009. 土肥誌, 80, 304.
- 森泉美穂子・金田吉弘・福島裕助 2010. 土肥誌, 81, 372.
- 村上政治 2007. 土肥誌, 78, 525.
- 中島秀治 2007. 農及園, 82, 1068.
- 中島秀治・市川泰之 2007. 土肥誌, 78, 603.
- 中島秀治・福田陽子・市川泰之 2009. 農及園, 84, 72.
- 中島秀治・福田陽子・市川泰之 2010. 農及園, 85, 76.
- 中津智史・中本 洋・松本武彦・五十嵐俊成・菅原 彰 2010. 土肥誌, 81, 514.
- 中山秀貴・野木照修・宮島曹聡・服部 実 2008. 農及園, 83, 15.
- Naser, H. M., Nagata, O., Tamura, S., and Hatano, R. 2007. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 53, 95.
- Nie, L., Peng, S., Bouman, B.A.M., Huang, J., Cui, K., Visperas, R.M., and Xiang, J. 2009. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 55, 150.
- 日本土壤肥科学会編 2008. 土壤肥沃度の評価と管理—食料生産と環境保全の両立に向けて—, 博友社, pp146.
- 日本土壤肥科学会編 2010. 田畑輪換土壌の肥沃と管理—変化の要因と制御の考え方—, 博友社, p196.
- 新良力也 2010. 土肥誌, 81, 511.
- 新良力也・西田瑞彦・森泉美穂子・赤羽幾子・棚橋寿彦・佐藤 孝・鳥山和伸・木村 武・矢内純太 2010. 土肥誌, 81, 73.
- Nishida, M., Iwaya, K., Sumida, H., and Kato, N. 2007. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 53, 310.
- Nishida, M., Sumida, H., and Kato, N. 2008. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 54, 459.
- 西田瑞彦 2010. 東北農研研報, 112, 1.
- 西堀康士・柴原藤善・武久邦彦・北川靖夫・久馬一剛 2009. 滋賀県農技セ研報, 48, 35.
- 西尾 隆 2007. 土肥誌, 78, 619.
- 小野信一・阿部 薫 2007. 土肥誌, 78, 323.
- 大森誉紀 2008a. 愛媛県農試研報, 41, 41.
- 大森誉紀 2008b. 愛媛県農試研報, 41, 51.
- 大森誉紀 2009. 愛媛県農水研企画環境部・農研部研報, 1, 27.
- 大塚英一・山本幸洋・金子文宜・真行寺 孝 2008. 千葉県農総セ研報, 7, 41.
- 大家理哉・山本章吾・久山弘巳 2007. 土肥誌, 78, 237.
- 折本善之・武井昌秀 2007. 土肥誌, 78, 363.
- Phuong, N. M., Kang, Y., Sakurai, K., Iwasaki, K., Kien, C.N., Noi, N.V., and Son, L.T. 2008. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 54, 846.
- 齊藤奏枝・松野更和・平井英明・加藤秀正・前田忠信 2007. 土肥誌, 78, 283.
- Sasaki, Y., Hosen, Y., Peng, S., Nie, L., Rodriguez, R., Agbisit, R., Fernandez, L., and Bouman, B.A.M. 2010. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56, 476.
- 佐藤賢一・佐藤岩夫・成田伊都美・中村幸二 2007a. 埼玉県農総セ研報, 6, 5.
- 佐藤 孝・善本さゆり・渡邊俊一・金田吉弘・佐藤 敦 2007b. 土肥誌, 78, 53.
- 佐藤雄太・谷口吉光・中野芳雄・尾崎保夫 2007c. 農及園, 82, 489.
- Shan, Y., Cai, Z., Han, Y., and Johnson, S.E., Buresh, R.J. 2008. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 54, 46.
- Shiratori, Y., Watanabe, H., Furukawa, Y., Tsuruta, H., and Inubushi, K. 2007. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 53, 387.
- 住居丈嗣・徳永哲夫 2009. 山口農試研, 57, 43.
- Supparattanapan, S., Saenjan, P., Quantin, C., Maeght, J.L., Grunberger, O. 2009. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 55, 142.
- Takakai, F., Takeda, M., Kon, K., Inoue, K., Nakagawa, S., Sasaki, K., Chiba, A., Sekiguchi, K., Takahashi, K, T., Sato, T., and Kaneta, Y. 2010. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56, 760.
- 高田裕介・中井 信・小原 洋 2009. 土肥誌, 80, 502.
- 高田裕介・小原 洋・中井 信・神山和則 2011. 土肥誌, 82, 15.

- 瀧 典明・熊谷千冬・齊藤公夫 2009. 土肥誌, 80, 575.
- Tanaka, K., Fujimaki, S., Fujiwara, T., Yoneyama, T., and Hayashi, H. 2007. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 53, 72.
- 鳥山和伸 2009. 土肥誌, 80, 66.
- 土田 徹・南雲芳文・大竹憲邦・大山卓爾・高橋能彦 2009. 土肥誌, 80, 606.
- Ultra, J.V.U., Nakayama, A., Tanaka, S., Kang, Y., Sakurai, K., and Iwasaki, K. 2009. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 55, 160.
- 若松一幸・石田頼子・小笠原伸也・片平光彦・鎌田易尾 2006. 東北農業研究, 59, 13-14.
- Wang, Y., Frei, M., and Wissuwa, M. 2008. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 54, 744.
- Watanabe, T., Man, L.H., Vien, D.M., Khang, V.T., Ha, N.N., Linh, T.B., and Ito, O. 2009. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 55, 754.
- Xiang, J., Haden, V.R., Peng, S., Bouman, B., Visperas, R.M., Nie, L., Huang, J., and Cui, K. 2009. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 55, 705.
- 山田信明 2007. 土肥誌, 78, 411.
- 山崎慎一・木村和彦・本吉(手嶋)博美・武田 晃・南條正巳 2009. 土肥誌, 80, 30.
- 矢内純太・松原倫子・李 忠根・森塚直樹・真常仁志・小崎 隆 2008. 土肥誌, 79, 61.
- Yokozawa, M., Shirato, Y., Sakamoto, T., Yonemura, S., Nakai, M., and Ohkura, T. 2010. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56, 168.
- Yoneyama, T., Goshō, T., Kato, M., Goto, S., and Hayashi, H. 2010. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56, 445.

畑地土壤肥沃度*

西尾 隆¹・矢内純太²

1. 畑地土壤肥沃度の評価と管理

土壤肥沃度の評価・管理に関する新展開が、土壤窒素を中心にまとめられた(日本土壤肥科学会編, 2008; 小崎ら, 2008). 田畑輪換土壤の肥沃度変化のメカニズムと長期的管理の考え方がまとめられた(日本土壤肥科学会編, 2010; 新良ら, 2010).

2. 窒素, リン酸, カリウム

1) 土壤窒素供給能の評価, 作物の窒素吸収と窒素動態

これまで土壤の可給態窒素を評価するために様々な抽出法が試みられてきたが、リン酸緩衝液抽出法については、黒ボク土畑土壤に適用する際の抽出液のpHについて検討がなされた(阿部, 2008). リン酸緩衝液抽出法は標準的な抽出法として定着しつつあるが、抽出される有機態窒素の化学形態については未解明の部分が多く残されている。土壤から中性リン酸緩衝液で抽出される有機物について SDS-PAGE による電気泳動(Watanabe and Yoshizawa, 2007) やサイズ排除クロマトグラフィー・疎水性クロマトグラフィー(Miyazawa and Murayama, 2007) による解析が行われているが、実態は明らかになっていない。また、

リン酸緩衝液抽出液で抽出される有機態窒素が無機化を経ずに直接植物に吸収されると言う仮説もポジティブな結果は得られていない(Miyazawa *et al.*, 2008). 土壤中の有機態窒素の存在形態別割合については、近年、固体¹⁵N NMRなどの機器分析技術の進歩により、土壤中の有機態窒素の主成分は窒素複素環態ではなくタンパク質態のものが腐植物質など他の土壤有機物とともに超分子或いは高分子複合体の一部として存在するということが分かってきた(森泉・松永, 2009). 各種の抽出法による有機態窒素画分についてもこれらの存在形態を考慮する必要がある。

一般的に、土壤の可給態窒素評価法には、他にも、30℃ 4週間の土壤インキュベーション法、熱水抽出法、希硫酸抽出法などがあるが、土壤インキュベーション法は多大な時間と労力がかかるためにルーチンの業務には使用しにくく、また多くの抽出法はケルダール分解を伴うため排気装置等の設備が必要である。そこで、もっと簡易に行うことができ施肥診断の現場でも実施可能な簡易分析法がいくつか提案されている。八槇(2009)は、有機態窒素の浸出に熱水抽出法を改良した煮沸浸出法を用い、有機態窒素の測定にペルオキシ二硫酸カリウム分解法を取り入れることによって畑土壤の可給態窒素量を推定できることを明らかにした。さらに、硝酸態窒素の測定に小型反射式光度計を用いることによって迅速性、簡易性を向上させている。上菌ら(2010a)は露地畑土壤の可給態窒素を簡易に推定する方法として80℃ 16時間水抽出法を検討した。この抽出法では、黒ボク土で抽出窒素量が培養窒素量よりも過多になる傾向のある熱水抽出法と異なり土壤タイプの違いによる影響が小さく、また堆肥連用土壤や生土の測定にも適用できた。更に、COD簡易測定キットを組み合わせることで迅速な推定を可能にし、家庭でも調達可能な物品で測定可能であることを具体的な操作手順で示した(上菌ら, 2010b). 北海道では熱水抽出性窒素の簡易測定法として280 nm吸光度法を検討し、測定機器の状態により絶対値が変動する問題点をL-トリプトファンを指標物質とすることで解決した(中辻ら, 2008; 坂口ら, 2010). 105℃・1日乾熱処理後のアンモニア態窒素量により土壤の窒素肥沃度を簡便迅速に評価する方法が提案された(原・土屋, 2007). これらの新規に提案された手法は、農業改良普及センターなどの指導現場でも活用されることが期待される。

ハウレンソウとトウモロコシの導管液中の有機成分の分子量分布と栽培後土壤の有機態窒素の形態の比較により、ハウレンソウは土壤中の有機態窒素を吸収する可能性が示唆された(小田島ら, 2007).

北海道では、熱水抽出性窒素が可給態窒素の指標として主に用いられているが、秋まき小麦では作土下に蓄積した硝酸態窒素の直接吸収の寄与が大きいことが指摘されている。そこで、十勝・網走地方の秋まき小麦圃場における起生期の無機態窒素蓄積量を測定するとともに、それが小麦の窒素吸収量、収量、子実タンパク質含有率に及ぼす影響が調べられ、硝酸態窒素診断による窒素追肥量の設定の可

¹ (独) 農業環境技術研究所

² 京都府立大学大学院生命環境科学研究科

* 2007年1月から2010年12月の日本土壤肥科学雑誌および *Soil Science and Plant Nutrition* 誌を中心として、畑地土壤肥沃度に関する論文を整理した。

能なことが示された(佐藤ら, 2008). また, 我が国の典型的な4種の土壌において小麦の枠施肥試験が3年間にわたって行われ, 茎立期から成熟期までの窒素吸収に対する追肥時の土壌無機態窒素の寄与が回帰分析により評価された(高橋・Anwar, 2008). マサ土における硝酸態窒素溶脱量に与えるトウモロコシの窒素吸収量および蒸散量の影響が評価された(Hashimoto *et al.*, 2007). 排水不良転換畑における畝立栽培およびシグモイド型被覆尿素肥料施用により, 大豆の窒素集積量の増加とちりめんじわ粒発生率の軽減の効果が認められた(南雲ら, 2010).

2) 土壌リン酸供給能の評価と作物のリン吸収

リン酸については, わが国の畑土壌のリン酸欠乏が作物生産の制限要因になっているという認識からリン酸多量施用が行われ, 現在ではリン酸レベルの高い土壌が多くなっているにもかかわらずリン酸多投の傾向は相変わらず続いている. 十勝地域の普通畑土壌のリン酸蓄積とその形態を明らかにするために, 畑地と隣接未耕地において土壌断面調査と土壌採取が行われ, リン酸の全量, 形態別含量とそれらの垂直分布が調べられた(谷ら, 2010). その結果, 農耕地における正味リン酸蓄積量は黒ボク土で年平均 130 kg ha^{-1} と著しく多く, 褐色低地土では少なかった. 可給態リン酸については, 北海道多腐植質黒ボク土圃場における有機物施用試験で, トルオーグリン酸よりもバイオマスリンの方がインゲンマメへのリン供給能を評価する指標として優れているという結果が得られた(Sugito *et al.*, 2010). 黒ボク土を用いた作物のリン鉱石からのリン吸収と堆肥添加による微生物性改善との関連を調べたポット試験では, 鶏ふん堆肥や牛ふん堆肥などの添加でリン鉱石由来P吸収量が増加し, それは微生物バイオマスP量やリン溶解菌密度増加などの土壌微生物性改善と密接に関連していることが明らかとなった(Wickramatilake *et al.*, 2010). 南アフリカにおける利用可能なリン資源のひとつであるヤギふん堆肥の土壌微生物バイオマスリンへ及ぼす影響が調べられ, リンの生物学的循環を促進することにより併用される無機リン肥料の利用効率を高めることが示された(Gichangi *et al.*, 2009, 2010). 家畜ふん堆肥の施用によるリン負荷の軽減に, 硫酸アルミニウムや塩化鉄などの無機塩の添加が有効であることが示された(Wilson *et al.*, 2008).

3) 土壌カリウム供給能の評価と作物のカリウム吸収

三大肥料要素の残りの一つのカリウムについては研究例が少ないが, 可給態カリウムの評価をするときに二つの考慮すべき問題があると指摘されている(森塚, 2009). 一つはカリウムの化学的可給度の評価には水溶性や交換性画分だけではなく, 非交換態画分を考慮すること, もう一つは空間スケールの選択を目的に合わせて行うことである.

シロクロバーのリビングマルチはトウモロコシのカリウム栄養および収量を低下させることが示された(Deguchi *et al.*, 2010).

3. 微量元素

宮城県の農耕地土壌中の微量元素(42元素)の濃度が

ICP-質量分析装置を用いて定量され, その特徴が検討された(木村ら, 2008). 農耕地土壌の各種構成元素の形態別定量評価の現状と展開が議論され, 食料生産と環境保全の両面におけるその重要性が解説された(矢内, 2008).

4. 有機物施用の土壌および作物生育に及ぼす影響

1) 土壌理化学性への影響

畑地への有機物施用効果は, 肥よ度向上, 物理性改善, 環境負荷低減等, 様々な面に現れてくるが, 正しく評価するためには長期にわたる継続的な試験が必要なので, 各地の試験場等で有機物連用試験が行われている. 北海道十勝地方の黒ボク土畑においては, 30年間にわたる牛ふんバーク堆肥, 収穫残渣の連用がテンサイ, ダイズ, コムギ, バレイショの輪作体系において土壌にどのような影響を与えるか調査された. 全炭素・窒素含量, 容積重, 固相率等は有機物施用量と高い相関関係があったのに対し有機物の種類とはあまり関係がなかった(中津・田村, 2008). 作物別に収量, 窒素吸収量への反応を見るとテンサイが最も有機物施用の反応が大きくダイズが小さかった. また, 有機物施用でテンサイ糖分, バレイショでん粉価は低下, コムギ蛋白は高まった(中津・田村, 2009). 北海道テンサイ畑においては, 有機物投入履歴やその他の圃場管理が作付け前の土壌無機態窒素蓄積量に影響を及ぼしていることが分かり窒素投入等の圃場管理を“N-score”として定量化する試みがなされた(Fueki *et al.*, 2010). また, テンサイについては, 網走地域の下層土に出現する火砕流堆積物の深度と収量の関係の農家圃場における検証(中丸ら, 2009), 十勝地域の生産力の時系列変化に及ぼす土壌タイプの影響の解析(Niwa *et al.*, 2008), 北海道の典型的な4土壌と根系発達の関係の調査(Fueki and Takeuchi, 2010)などが実施されている. さらに, 北海道における有機農業技術研究の現状と今後の展望が総説された(中辻, 2008). 栃木県の黒ボク土畑では29年間有機物を連用して土壌化学性や作物収量への影響が調査され, その結果を考慮して, 年間 10a あたり稲わら堆肥 1.7 Mg , 牛ふん堆肥 3.5 Mg , 豚ふん堆肥 0.9 Mg の施用が望ましいと判断された(高間・廣澤, 2008). 下水汚泥コンポストの長期連用試験が東京大学付属農場において, 夏作飼料用トウモロコシ, 冬作オオムギで行われ, $\delta^{15}\text{N}$ 値, および $\delta^{13}\text{C}$ 値を基にCN循環が解析された(後藤・米山, 2010). 連用26年目の下水汚泥コンポストの炭素蓄積比率は全土壌炭素の35~44%であった. 亜熱帯地域の暗赤色土畑においては, サトウキビの葉を原料とした堆肥の7年間連用施用がサトウキビ収量と土壌理化学性に及ぼす影響について検討がなされ, 施用量は 50 Mg ha^{-1} 以上が望ましいと結論された(後藤・永田, 2008).

リン酸については, リン酸肥料と堆肥の併用で可給態リン酸の不可給化が抑制されると考えられているが, 褐色低地土と非アロフェン質黒ボク土について重過石と牛ふん堆肥, 鶏ふん堆肥の併用時の可給態リン酸の変動を調査したところ, 黒ボク土のようなリン酸吸収係数が非常に高い土

壤では不可給化抑制の影響は小さいものの、褐色低地土においては抑制効果が認められた(加藤ら, 2010b)。北海道の淡色黒ボク土畑における25年間の牛ふんバーク堆肥連用土壌においてはリン酸吸収係数の低下(低下率3~10%)が認められたが、ラングミュアの吸着理論を適用して算出した堆肥施用区のリン酸最大吸着量はリン酸吸収係数から見込まれるよりも更に単位面積あたりにして16~31%低下した(八木ら, 2010)。

2) ^{15}N を用いた窒素の動態解析

家畜ふん堆肥等の有機質資材の畑土壌への投入は、畑土壌肥沃度の維持、向上とともに、循環型農業や環境負荷低減の観点からも非常に重要である。家畜ふん堆肥中のリン酸やカリウムに関しては、比較的、易溶出性の部分も多く、全量分析値が土壌からの養分供給量の指標になる。一方、堆肥中の窒素の存在形態は有機態の部分が多く、また微生物の無機化・有機化による形態変化の影響が著しいので、家畜ふん堆肥の施用下、或いは家畜ふん堆肥と化学肥料の併用下における窒素動態の解析が ^{15}N 等を利用して盛んに行われている。

有機質資材を施用した畑土壌の ^{15}N -窒素動態解析には、有機質資材を ^{15}N で標識する方法と化学肥料を ^{15}N で標識する方法があり、また、両者の組み合わせにより複数の処理を設けている試験もある。有機質資材を ^{15}N で標識した施用試験としては、鶏ふんとなたね油かすを ^{15}N で標識してニンジン、トウモロコシに対する効果を比較検討した試験が、鹿児島県のシラス畑で実施されている(上之蘭ら, 2007)。更に、同じ研究者により重窒素標識牛ふん堆肥を灰色低地土、淡色黒ボク土、多腐植質黒ボク土に施用して ^{15}N 収支が比較検討された(上之蘭ら, 2008)。

化学肥料と有機質資材の併用試験としては、硫安と各種牛ふん堆肥、或いは硫安と鶏ふん・豚ふん堆肥との併用条件下における無機態窒素動態が ^{15}N 標識硫酸アンモニウムを用いて解析された(加藤ら, 2008; 加藤ら, 2009)。いずれの場合も窒素有機化が顕著に起こり、易分解性炭素量等との相関関係が認められた。また、肥効調節型肥料を用いることにより、家畜ふん堆肥との併用下での有機化が少なくなることが明らかとなった(加藤ら, 2010a)。化学肥料・牛ふん堆肥併用に関する試験は、福島県の黒ボク土、褐色低地土畑のライシメーターでも実施されている。いずれの土壌タイプでも化学肥料(硫安)区に比べ、窒素供給量を同等に設定した牛ふん堆肥併用区で窒素溶脱が少なく、硫安由来窒素が土壌表層に有機態として存在することや溶脱割合と有機化割合の間に高い負の相関関係が存在することが確認された(松波・三浦, 2010)。

牛ふん堆肥と硫酸アンモニウムの併用、あるいは単用における窒素溶脱、作物窒素吸収、土壌中残存については、不攪乱土壌モノリスライシメーターを用いても2年半にわたる野菜作で砂丘未熟土と黒ボク土について調査されている(井原ら, 2009; 井原ら, 2010)。処理の組み合わせは、標識硫安単独、標識硫安と非標識堆肥、標識堆肥単独、標

識堆肥と非標識硫安の4処理である。硫安と牛ふん堆肥併用時における硫安由来窒素の有機化促進や堆肥由来窒素の無機化促進の影響は、その後の微生物有機化窒素の再無機化などによって、長期的に見れば相殺されることが推察された。

以上のように、有機物資材施用下における畑土壌の窒素動態は、 ^{15}N を利用して新たなデータが蓄積されつつあるが、土壌窒素供給力や窒素溶脱量の長期的変動について更に普遍性、信頼性のある予測をするためには、既存の窒素循環モデル(西尾, 2007; 前田, 2008)や新しく作成した包括的なモデルとこれらの試験結果を合わせて検討、解析を行い、新たな展開を試みることも有意義であろう。

5. 土壌物理性

寒冷地の黒ボク土における堆肥の利用は、土壌表面における水分蒸発量を減少させ潜熱移動を抑えることで裸地の地温を上昇させることが明らかとなった(Deguchi *et al.*, 2009)。露地圃場への雑草すき込み・太陽熱処理により雑草発芽抑制と土壌物理性の改善が可能であることが示された(堀, 2010)。

6. 圃場管理と土壌肥沃度

日本の農耕地土壌における有機物投入による炭素蓄積効果が、RothCモデルを用いて4つのシナリオについて推定された(Yokozawa *et al.*, 2010)。北海道中央部における異なる畑地利用条件下での土壌炭素収支の評価が行われ、多くの利用条件で畑地は CO_2 の放出源となっていることが示唆された(Mu *et al.*, 2008)。北海道の輪作畑における省耕起の適用・収穫残渣管理・堆肥施用が畑作物の収量および土壌炭素貯留量へ及ぼす影響が評価された(Koga and Tsuji, 2009)。不耕起栽培による土壌有機物の蓄積と理化学性の変化が耕起栽培との比較で検討された(戸上ら, 2009)。

道北強粘質転換畑における耕起法を組み合わせた合理的な作付体系が検討された(木村ら, 2008)。焼土効果に関する研究の総説がまとめられた(森塚・松岡, 2008)。

7. 海外における研究

アジアにおける多様な土壌と我が国ベドロジストによる研究の最前線が紹介された(神山, 2008)。すなわち、カザフスタンにおける乾燥地・半乾燥地の持続的土地利用法の多面的評価(舟川ら, 2008)、ベトナム・メコンデルタ沖積土壌における有機物連用の土壌肥沃度に及ぼす影響評価と酸性硫酸塩土壌における環境修復法の検討(渡辺・隅田, 2009)とともに、タイにおける熱帯サバナ気候下の土壌環境と農林業の関係(櫻井, 2010)、フィリピンにおける熱帯島嶼の土壌環境と農業の関係(浜崎ら, 2010)、モンゴルにおける草原土壌の生成・劣化・回復(田村ら, 2010)、中国黄土高原周辺の灌漑農地における土壌塩性化とソーダ質化(遠藤ら, 2010)が、それぞれ論じられた。

中国の亜熱帯地帯において、土壌の微生物バイオマスの炭素・窒素・リンの空間変動が赤色土の卓越する山岳地域で調べられた(Liu *et al.*, 2010)。フィリピンにおいて、Ultisolsでのリン酸の抽出性とイネ・トウモロコシに

よるリン酸吸収に及ぼす土壤団粒の粒径の影響が調べられた (Thao *et al.*, 2008). 東北タイにおいて、トウモロコシ畑での牛ふん堆肥施用および不耕起栽培での炭素収支が比較され、不耕起栽培で土壤炭素蓄積量が増加することが示された (Matsumoto *et al.*, 2008). 同地域の砂質土壤について、様々な肥培管理下における土壤養分量と植物の養分吸収量の関係解析に基づいた土壤養分の有効性評価が行われた (Yanai *et al.*, 2007; Yanai *et al.*, 2010). タイのマングローブ植林におけるフタバナヒルギの初期生長を規定する土壤肥沃度因子の検討が行われ、有機物施用などの局所管理の有効性が示唆された (Matsui *et al.*, 2008). 中央アジアにおいて、カザフスタン北部穀作地帯のチェルノーゼム土壤における炭素収支に及ぼす土地利用の影響が評価され、炭素収支を正にするには輪作体系に牧草を導入することが望ましいことが示される (Takata *et al.*, 2007a) とともに、地形と植生の情報を用いて土壤有機物量の広域推定が行われた (Takata *et al.*, 2007b). さらに、同地域の土壤有機炭素収支の時空間変動に及ぼす輪作体系の影響が評価された (Takata *et al.*, 2008). 一方で、中央アジアの灌漑農業に関連して、大規模灌漑地域における可溶性塩類の分布パターンが明らかにされ (Funakawa *et al.*, 2007), 土壤塩類化の潜在的な危険性が地域ごとに評価された (Funakawa and Kosaki, 2007).

アフリカに関しては、タンザニアの半乾燥地域の畑作地における土壤微生物動態と植物の窒素吸収の関係が解析され、土壤微生物が植物の生殖生長期に窒素供給源として寄与していることが推察された (Sugihara *et al.*, 2010). ¹⁵Nトレーサー法で評価した窒素吸収・窒素利用効率および窒素固定に及ぼすアワとササゲの栽培体系の影響がセネガルで調べられ、混作の有利性が示された (Sarr, *et al.*, 2008). 西アフリカニジェールにおけるサヘル地域の砂質土壤の可給態窒素評価法として、可給態窒素指標としてのリン酸緩衝液抽出有機態窒素が有効であることが示された (Suzuki *et al.*, 2008). 西アフリカサヘル地帯における風食抑制と生産性向上を目指して、新規の風成物質捕捉装置が開発され、粗大有機物と土壤粒子の流量の定量に有効であることが示された (Ikazaki *et al.*, 2009; Ikazaki *et al.*, 2010).

文 献

- 阿部盟夫 2008. 土肥誌, 79, 193.
- Deguchi, S., Kawamoto, H., Tanaka, O., Fushimi, A., and Uozumi S. 2009. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 55, 778.
- Deguchi, S., Uozumi S., Touno, E., and Tawarayama, K. 2010. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56, 848.
- 遠藤常嘉・山本定博・本名俊正 2010. 土肥誌, 81, 281.
- Fueki, N., Sato, K., and Nakatsu, S. 2010. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56, 750.
- Fueki, N., and Takeuchi, H. 2010. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56, 745.
- Funakawa, S., and Kosaki, T. 2007. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 53, 634.
- Funakawa, S., Suzuki, R., Kanaya, S., Karbozova-Salnikov E., and Kosaki, T. 2007. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 53, 150.
- 舟川晋也・小崎 隆・矢内純太 2008. 土肥誌, 79, 399.
- Gichangi, E.M., Mkeni, P.N.S., and Brookes, P.C. 2009. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 55, 764.
- Gichangi, E.M., Mkeni, P.N.S., and Brookes, P.C. 2010. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56, 853.
- 後藤茂子・米山忠克 2010. 土肥誌, 81, 16.
- 後藤 忍・永田茂穂 2008. 土肥誌, 79, 9.
- Hashimoto, M., Herai, Y., Nagaoka, T., and Kouno, K. 2007. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 53, 300.
- 浜崎忠雄・大倉利明・三浦憲蔵 2010. 土肥誌, 81, 267.
- 原 嘉隆・土屋一成 2007. 土肥誌, 78, 573.
- 堀 兼明 2010. 農業及び園芸, 85, 60.
- 井原啓貴・前田守弘・高橋 茂・駒田充生・太田 健 2009. 土肥誌, 80, 494.
- 井原啓貴・前田守弘・駒田充生・太田 健 2010. 土肥誌, 81, 489.
- Ikazaki, K., Shinjo, H., Tanaka, U., Tobita, S., and Kosaki, T. 2009. *Am. Soc. Ag. Biol. Eng.*, 52, 487.
- Ikazaki, K., Shinjo, H., Tanaka, U., Tobita, S., Funakawa, S., and Kosaki, T. 2010. *Pedologist*, 53, 126.
- 加藤雅彦・林 康人・田中福代・森國博全 2008. 土肥誌, 79, 163.
- 加藤雅彦・林 康人・森國博全 2009. 土肥誌, 80, 152.
- 加藤雅彦・林 康人・森國博全 2010a. 土肥誌, 81, 31.
- 加藤雅彦・小宮山鉄兵・藤澤英司・森國博全 2010b. 土肥誌, 81, 367.
- 木村文彦・奥村正敏・高松 聡・岡田直樹・島 恵子・石井耕太・神野裕信・渋谷幸平・宮森康雄 2008. 北農, 75, 212.
- 木村和彦・本吉博美・武田 晃・山崎慎一 2008. 土肥誌, 79, 358.
- Koga, N., and Tsuji, H. 2009. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 55, 546.
- 小崎 隆・渡辺和彦・佐野修司・矢内純太・鳥山和伸・松本真悟・阿江教治・三島慎一郎 2008. 土肥誌, 79, 113.
- 神山和則 2008. 土肥誌, 79, 397.
- Liu, S., Li, Y., Wu, J., Huang, D., Su, Y., and Wei, W. 2010. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56, 693.
- 前田守弘 2008. 土肥誌, 79, 69.
- Matsui, N., Suekuni, J., Havanond, S., Nishimiya, A., Yanai, J., and Kosaki, T. 2008. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 54, 301.
- Matsumoto, N., Paisanchoen, K., and Hakamata, T. 2008. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 54, 277.
- 松波寿弥・三浦吉則 2010. 土肥誌, 81, 549.
- Miyazawa, K., and Murayama, T. 2007. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 53, 1.
- Miyazawa, K., Murayama, T., and Takeda, M. 2008. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 54, 247.
- 森泉美穂子・松永俊朗 2009. 土肥誌, 80, 304.
- 森塚直樹 2009. 土肥誌, 80, 80.
- 森塚直樹・松岡かおり 2008. 土肥誌, 79, 505.
- Mu, Z., Kimura, S.D., Toma, Y., and Hatano, R. 2008. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 54, 650.
- 中津智史・田村 元 2008. 土肥誌, 79, 139.
- 中津智史・田村 元 2009. 北海道立農試集報, 94, 81.
- 中辻敏朗 2008. 北海道有機農業技術研究年報, 18, 13.
- 中辻敏朗・坂口雅己・柳原哲司・小野寺政行・櫻井道彦 2008. 土肥誌, 79, 317.
- 中丸康夫・斉藤鷹一・小林宏之・木村あゆみ・小松輝行 2009. 土肥誌, 80, 41.
- 南雲芳文・佐藤 徹・服部 誠・土田 徹・細川 寿・高橋能彦・大山卓爾 2010. 土肥誌, 81, 360.
- 日本土壤肥料学会編 2008. 土壤肥沃度の評価と管理—食料生産と環境保全の両立に向けて—, 博友社, p146.
- 日本土壤肥料学会編 2010. 田畑輪換土壤の肥沃度と管理—変化の要因と制御の考え方—, 博友社, pp196.
- 新良力也・西田瑞彦・森泉美穂子・赤羽幾子・棚橋寿彦・佐藤 孝・

- 鳥山和伸・木村 武・矢内純太 2010. 土肥誌, 81, 73.
 西尾 隆 2007. 土肥誌, 78, 619.
 Niwa, K., Seino, N., Yokobori, J., Kikuchi, K., and Hongo, C. 2008. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 54, 928.
 小田島ルミ子・阿江教治・松本真悟 2007. 土肥誌, 78, 275.
 坂口雅己・櫻井道彦・中辻敏朗 2010. 土肥誌, 81, 130.
 櫻井克年 2010. 土肥誌, 81, 55.
 佐藤康司・中津智史・三木直倫・中村隆一・苗木伸彦・志賀弘行 2008. 土肥誌, 79, 45.
 Sarr, P.S., Khouma, M., Sane, M., Guisse, A., Badiane, A.N., and Yamakawa, T. 2008. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 54, 142.
 Sugihara, S., Funakawa, S., Kilasara, M., and Kosaki, T. 2010. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56, 105.
 Sugito, T., Yoshida, K., Takebe, M., Shinano, T., and Toyota, K. 2010. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56, 390.
 Suzuki, K., Matsunaga, R., Hayashi, K., Matsumoto, N., Tobita, S., and Okada, K. 2008. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 54, 449.
 高橋 茂・Anwar, M.R. 2008. 土肥誌, 79, 365.
 高間由美・廣澤美幸 2008. 栃木県農試研究報, 63, 35.
 Takata, Y., Funakawa, S., Akshalov, K., Ishida, N., and Kosaki, T. 2007a. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 53, 162.
 Takata, Y., Funakawa, S., Akshalov, K., Ishida, N., and Kosaki, T. 2007b. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 53, 289.
 Takata, Y., Funakawa, S., Yanai, J., Mishima, A., Akshalov, K., Ishida, N., and Kosaki, T. 2008. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 54, 159.
 谷 昌幸・溝田千尋・八木哲生・加藤 拓・小池正徳 2010. 土肥誌, 81, 350.
 田村憲司・藤原英司・鳥山和伸 2010. 土肥誌, 81, 273.
 Thao, H.T.B., George, T., Yamakawa, T., and Widowati, L.R. 2008. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 54, 148.
 戸上和樹・中井 信・米村正一郎 2009. 土肥誌, 80, 511.
 上蘭一郎・加藤直人・森泉美穂子 2010a. 土肥誌, 81, 39.
 上蘭一郎・加藤直人・森泉美穂子 2010b. 土肥誌, 81, 252.
 上之園茂・長友 誠・高橋 茂 2007. 土肥誌, 78, 383.
 上之園茂・長友 誠・高橋 茂・西田瑞彦 2008. 土肥誌, 79, 37.
 Watanabe, S., and Yoshizawa, H. 2007. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 53, 650.
 渡辺 武・隅田裕明 2009. 土肥誌, 80, 288.
 Wickramatilake, A.R.P., Kouno, K., and Nagaoka, T. 2010. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56, 607.
 Wilson, J.D., Zheljajzkov, V.D., Rathgeber, B., Caldwell, C.D., and Burton, D.L. 2008. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 54, 600.
 八木哲生・谷 昌幸・苗木伸彦・田村 元・加藤 拓 2010. 土肥誌, 81, 594.
 八槇 敦 2009. 土肥誌, 80, 173.
 矢内純太 2008. 化学と生物, 46, 450.
 Yanai, J., Nakata, S., Funakawa, S., Nawata, E., Katawatin, R., Tulaphitak, T., and Kosaki, T. 2007. *Japanese Journal of Tropical Agriculture.*, 51, 169.
 Yanai, J., Nakata, S., Funakawa, S., Nawata, E., Katawatin, R., and Kosaki, T. 2010. *Tropical Agriculture and Development*, 54, 113.
 Yokozawa, M., Shirato, Y., Sakamoto, T., Yonemura, S., Nakai, M., and Ohkura, T. 2010. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56, 168.

園地・施設土壤肥沃度*

平岡潔志

園地土壤

1. 施肥改善（施肥量の低減）

農林水産省は、2008年に入って肥料価格が高騰したことから「肥料高騰に対応した施肥改善等に関する検討会」を開催し、中間取りまとめ報告書において果樹・茶園に対して1) 施肥・土壌の実態及び土壌診断に基づく施肥改善、2) 地域有機資源等の活用、3) 施肥低減技術の導入の必要性を指摘した（農林水産省, 2009）。

過剰な施肥による肥料成分の蓄積については各地で報告されてきたが、福岡県でも22果樹園を対照に1999～2007年に調査した結果、有機質資材の施用などにより可給態リン酸が過剰になり、一部に交換性カリウムの過剰傾向も見られることが報告された（藤富・黒柳, 2009）。和歌山県では、ウメ園の主要な土壌である褐色森林土、黄色土、灰色低地土および岩屑土のライシメータ試験から、土壌の種類に関係なく浸透水中総陽イオン当量は浸透水中総陰イオン当量と相関関係があり、主要な浸透水中陰イオンである硝酸イオンおよび硫酸イオンの濃度に応じてカルシウムイオンなどの陽イオンが溶脱している可能性が示された（岡室ら, 2010）。湿度が高い日本において殺菌剤として硫酸銅を含むボルドー液を頻繁に散布する園地では、銅の蓄積が懸念されている。深さ0～10 cmのリンゴ園土壌を分析した結果、土壌中の全銅濃度は55～2,662 mg kg⁻¹で、濃度の高い園地の銅はボルドー液の散布によるものと考えられた。同時に散布されるカルシウムにより土壌pHが高く維持されていることなどから、樹体に銅の過剰障害はみられていないが、ボルドー液から有機銅剤への切り替えによりカルシウム施用量が減って土壌pHが低下してくると、土壌中の交換態銅濃度が上昇して障害が発生することが危惧されている（井上ら, 2007a）。台湾のブドウ園土壌の銅濃度は9.1～100 mg kg⁻¹で、ブラジルやヨーロッパの一部より低く、カナダ、オーストラリア、ニュージーランドと同程度であった。銅は、樹体内では葉の濃度が最も高く果実に移行する量は少なかった（Lai *et al.*, 2010）。

このような肥料成分等の土壌への蓄積や土壌からの溶脱に対して、施肥低減に向けた技術開発が進められている。ウンシュウミカン栽培では、¹⁵Nトレーサー法から、3月下旬の葉面散布により旧葉から吸収された尿素は、6月中旬までに57%が新生器官に移行することがわかった。根への移行量は極めて少なかったが、3回まで散布回数に応じて窒素吸収量は増加したことから、3月下旬～4月上旬の尿素葉面散布は、樹の窒素含有率を増加させると考えられた（石川ら, 2008）。地温が低く降水量が少ない春は、施用

農業・食品産業技術総合研究機構果樹研究所

* 2007年1月から2010年12月の日本土壌肥科学雑誌, *Soil Science and Plant Nutrition*, 園芸学研究誌を中心として、園地・施設土壤肥沃度に関する論文を整理した。

した肥料が根群域に行き渡るのに時間がかかるとの考えから3月上旬施肥が行われてきたが、 ^{15}N トレーサー法による3, 4, 5月施肥の圃場試験とポット試験から、春肥の施肥時期は3月上旬より萌芽期直前の4月上旬の方が窒素の利用効率は高いことがわかった(石川, 2009)。また、水溶性粉末複合肥料の300倍液を年間18回均等に分けて樹上散布すると、果実糖度やクエン酸含有率に影響を与えることなく、砂壤土に植栽したウンシュウミカン‘日南1号’への年間窒素施肥量を慣行の 200kg ha^{-1} から30%削減できると考えられた(上松, 2010)。このように吸収利用効率の高い春の尿素葉面散布や肥効調節型肥料の利用、スプリンクラーを利用した液肥の樹上散布は、施肥量・回数削減や作業の省力化に有効であった(石川, 2010)。しかし、中晩生カンキツ‘不知火’は、結実し始めると樹勢が低下して収量が少なくなりやすいため、礫質黄色土に植栽して4年間3月上旬、6月下旬、7月中旬、8月下旬、10月上旬に年間施用量のそれぞれ20%ずつを樹冠下に均一施肥した場合、収量は基準量の2倍量施肥が最も多く、幼木の適正窒素施肥量は基準量から2倍量の7年生樹で $224\sim 448\text{kg ha}^{-1}$ が適当と推定された(杉山ら, 2008)。

多肥傾向にある‘デラウェア’の超早期加温栽培では、窒素栄養診断により適正な施肥管理を行うため、開花期に第4~6葉の葉柄を採取し、2~5mmに裁断した切片を純水中に24時間浸漬した上澄み液中の硝酸態窒素濃度を測定し、 $200\sim 800\text{mg L}^{-1}$ を適正基準として施肥管理することが適当とされた(藤本, 2010)。ブドウ‘巨峰’の加温ハウス内盛土式根域制限栽培では、生育時期と日射量に応じて灌水量を制御し、生育初期 $1\text{L day}^{-1}\text{樹}^{-1}$ 、幼果期 $8\text{L day}^{-1}\text{樹}^{-1}$ 、成熟期は晴天日 $6\text{L day}^{-1}\text{樹}^{-1}$ 、曇雨天日 $1\text{L day}^{-1}\text{樹}^{-1}$ にすると、年間総灌水量が46~47%減少し、排水量が減少して環境負荷低減効果があった(金原ら, 2011)。イチジク栽培では、コンテナ栽培した一文字整枝の‘柗井ドーフィン’3年生樹の発芽から落葉前までの養分吸収特性が明らかにされた。 33t ha^{-1} の収量を得るには、 $\text{N } 108, \text{P}_2\text{O}_5 56, \text{K}_2\text{O } 159, \text{CaO } 198, \text{MgO } 77\text{kg ha}^{-1}$ が必要と試算され、コンテナ栽培の施肥改善と露地栽培への応用が期待されている(鬼頭ら, 2008)。

果樹園では、樹の列間や全面に草を生やして栽培する草生栽培を行っていることが多い。この草を利用して肥料成分の園外への流出量を削減する方法も検討されている。カンキツのナギナタガヤ草生栽培では、無底傾斜ライシメータ試験から、ナギナタガヤの3~4月の急激な生育や5~6月の根の枯死に伴う土壌孔隙の増加、倒伏による地表面の被覆等により、梅雨以降のリンの地表面流出量を裸地の1%程度に抑えられた(山家ら, 2008)。

果樹園より施肥量の多い茶園からの肥料成分の流出は、北台湾においても貯水池へのリンの流入などで問題となっている(Zehetner *et al.*, 2008)。日本では、地下水への硝酸態窒素の溶脱が問題となってきたが、静岡県茶園周辺16地点における1996~2005年の水質調査から、窒素施

肥量削減により地下水等の硝酸態窒素濃度が減少していることが分かった(Hirono *et al.*, 2009)。しかし、高品質玉露を生産するには、2~3月に年間施肥量の半量を施肥する春肥重点施肥にしても、年間 540kg ha^{-1} の窒素施肥量が必要であった(堺田・吉岡, 2008)。また、有機液肥を点適灌水施肥しても、高品質の玉露及び二番茶を生産するには年間 500kg ha^{-1} の窒素施肥量が必要であった(中園ら, 2010)。ただし、土壌に顆粒状脂肪酸を5%添加すると、硝酸カリウム施用の場合約6割、硫酸アンモニウム施用の場合約8割窒素溶脱量が減少し、施肥窒素は有機化されて土壌に蓄積し、茶樹の成育に影響を与えないことがポット試験から明らかにされた(森田ら, 2009)ことから、施肥量を低減できる技術の開発は期待できる。

2. 園内有機資源の活用(剪定枝の堆肥化)

果樹園では、焼却できなくなった剪定枝の処理が問題となっている。 ^{15}N でラベルしたリンゴの葉や剪定枝の粉碎物を土壌に添加したポット試験では、8ヶ月間に無機化される窒素は葉の6%、枝の12%に過ぎなかった(Tonon *et al.*, 2007)。そこで、チップパーで粉碎したリンゴ剪定枝に鶏ふんや石灰窒素を加え、1ヶ月に1回程度3回繰り返すを行うことにより、200日程度でコマツナの成育を阻害しない堆肥を生産する方法が開発された(坂本, 2008)。この方法で生産されたリンゴ剪定枝堆肥は、稲わら堆肥に比べpH, ECが高く、全炭素・全窒素・無機成分も多かった。黒ボク土に1/5の割合で混和したポット施用試験から、リンゴ苗木の成育は稲わら堆肥と同等で、土壌の交換性塩基や可給態窒素含量が高まる理化学性改良効果が認められた(坂本・青山, 2010)。

3. 樹体の土壌環境応答性

中晩生カンキツ‘不知火’の無加温ハウス栽培では、12月15日から27日に $16\sim 18^\circ\text{C}$ の井戸水を4日間隔で灌水すると、 11°C の川水を灌水するより果実の減酸が促進され浮皮の発生が減少した。これは、地温が高まり根の養水分吸収能が向上したためと考えられた(笹山ら, 2007)。赤黄色土ナシ園では、主幹から $1.5\sim 2\text{m}$ の範囲に環状に深さ 1.5m 程の穴を樹冠面積 1m^2 当り1穴、専用のノズルを付けた高圧動力噴霧機を使ってあけてパーライトを充填すると、穴のパーライト部分に根が伸長して新梢成育の増大や花芽着生率の向上効果がみられた(松浦ら, 2008)。

カキ‘西条’早生系統において8月下旬から収穫期にかけて発生する樹上軟果症状は、5~7月に0.5%硫酸マンガンを溶液を葉面散布しても改善しなかったが、硫酸亜を施用して土壌pHを4.5程度に矯正するとともに可溶性マンガンを資材を施用することにより、葉・ヘタ・果肉および1年枝のマンガン含量が著しく増加し、果実のエチレン生成が抑制されて症状が減少した(持田ら, 2008)。地下水位が約90cmの砂壤土水田転換園に植栽されたアウトウでは、樹冠下に不織布シートを敷き、周囲を深さ70cmまで厚さ0.1mmのポリ塩化ビニルフィルムで覆って雨水の根域への侵入を遮断すると、土壌水分は低く推移するものの変動

幅が小さく、果実はやや小さくなるが裂果発生率と裂果程度は大きく低下した(山本ら, 2008)。樹勢制御のため根域を深さ 30 cm にした施設で栽培されているマンゴでは、果実が直径 20 mm 程度の幼果の頃から内部がシミ状に褐変し、肥大とともに果実表面に凹みを生じる果実障害が発生している。開花終期の花穂への 0.2 % ホウ酸溶液散布で軽減されることからホウ素欠乏症と考えられているが、土壌中には十分なホウ素があり土壌 pH も高くない。新葉展開期や硬化期のホウ酸葉面散布は効果がないことから、花芽分化期に分化を促進するため土壌水分を pF 2.7 程度の乾燥状態にしていることが、ホウ素の根からの吸収や幼果への移行を抑制し、果実に欠乏症を発生している可能性が考えられた(上之園ら, 2009)。ウメ‘南高’では、果肉の一部が硬くなる果肉硬化障害が問題になっている。この果肉硬化障害は、生育初期における光合成産物の不足や乾燥ストレスに伴い果肉細胞数が減少した果実において、肥大後期に縦方向に急速に肥大する際、果肉内に亀裂が生じて空洞が発生し、修復のためにカロースが蓄積して発生すると考えられた(城村ら, 2009)。ユズでは、果皮が不規則に凹んで褐変するこはん症と呼ばれる果皮障害が問題となっている。しかし、8月上旬～9月上旬に黒色化織布(サンテ)で被覆すると、日焼け果や風傷果も少なくなって収穫時の秀品率が高まり、貯蔵中のこはん症の発生も抑制された。ただし、逆に水腐れ症が多くなる傾向があった(田中ら, 2008)。このように、果実の養水分状態は土壌の養水分環境と密接にかかわっていることから、日本ナシ‘二十世紀’の果梗および種子中の元素濃度は、栽培土壌表層の元素濃度と相関関係を示し、果梗と種子中の元素濃度から高い精度で産地が判別された(井上ら, 2007b)。また、リンゴ‘ふじ’においても果梗および種子中の元素濃度から産地が判別された(井上ら, 2009)。

しかし、果実の養水分状態は、土壌の養水分状態だけでなく、樹体の生理生態特性によっても影響を受ける。塩化ナトリウムを 0~100 mM 加えた Hoagland 液で 15 週間栽培した 2 年生自根サワーオレンジの葉のナトリウムと塩素の濃度は、培養液に塩化カルシウムを添加することにより減少した(Chatzissavidis *et al.*, 2008)。アルミニウム耐性パイナップルの一種‘Cayenne’の根端からは、アルミニウム耐性に関わる特異なタンパク質が分取されている(Chen and Lin, 2010)。果実への養水分の輸送を担っている結果枝の導管直径は樹種によって異なり、剪定した枝の断面から春に溢泌現象が見られる成育旺盛なツル性のブドウやキウイフルーツでは導管の直径が太く、リンゴやウンシュウミカンでは細かった。常緑樹のウンシュウミカンの枝含水率は落葉樹のリンゴより低く導管液量も少なかったが、常緑樹では 1 年中葉の蒸散により枝の水が奪われるためと考えられた(村松ら, 2010)。樹液流量が多いブドウやキウイフルーツでは、樹皮を剥ぎ取る環状はく皮を行うことがあるが、環状はく皮によって枝の乾燥が過度に進みにくいこと、篩管の切断により光合成産物が根に転流する

ことなく結果枝に蓄積し果実への転流量が増加することなどから、果実の着色や糖度向上効果を期待できるためと考えられた。‘巨峰’の無核栽培では、従来の着色開始前(満開 34~35 日後)より遅い着色開始後(満開 48~55 日後)に環状はく皮を行っても着色向上に効果があった(藤島ら, 2010)。しかし、落葉すると樹液流量・光合成量が著しく低下するため、8月下旬から9月上旬の台風により葉が 80 % 以上落葉したキウイフルーツでは、翌年の着花数が減少して減収した(宮田ら, 2007)。

4. 水管理と管理指標

TDR 法で測定した誘電率から推定した枝体積含水率と土壌水分、葉の水ポテンシャル、果実品質との関係から、枝体積含水率は、夏秋季の葉の水ポテンシャルを -1MPa 程に維持すると蒸発散位に対応する傾向を示したが、より乾燥した状態にすると低い値となり、葉の水ポテンシャルとの関係は明確でないものの、夏秋季の水ストレス程度を判別できる可能性が示唆された(貝原ら, 2008)。同様に、ステンレス製の釘をセンサーロッドとして携帯型 TDR 土壌水分計(TDR-341F)で主枝を測定した値を、ウンシュウミカン樹の水管理指標に活用するため、測定値の気温による温度補正式を作成し、7月上中旬の補正值を基準とした相対値を利用することが検討された。TDR 土壌水分計で測定した値の相対値は 7~9 月に葉の水ポテンシャルとの関係が見られ、樹の水分状態を示す指標になると考えられた(岩崎ら, 2010)。12月上旬収穫の中晩生カンキツ‘はれひめ’では、8月中旬~収穫期、葉の水ポテンシャルが -0.7~-1.2 MPa になるように水管理をすると、果実はやや小さくなるものの湿潤区に比べて全糖量が約 1.6 倍、クエン酸が約 1.3 倍になり、9種類のアミノ酸濃度も高くなって濃厚な味で商品性の高い果実が生産できた(岩崎ら, 2011)。花崗岩質の砂壤土に植栽した極早生ウンシュウミカン‘日南 1 号’では、6月から収穫期まで透湿性シートで地表面をマルチし、主幹から 90 cm の土壌水分を 12 cm のセンサープローブを用いて TDR 土壌水分計(HydroSense)で測定し、6月下旬までやや湿潤、7月上中旬はやや乾燥、7月下旬から収穫期までは乾燥となるように、測定値を目安に必要に応じてシート下に敷設した点滴灌水チューブで灌水すると、着色の良い糖度 11 度前後の極早生品種としては高糖度の果実を生産できた(村本ら, 2011)。中山間地や水田転換園に植栽されているミカン科の‘アサクラサンショウ’は、植栽 2~3 年後あるいは 5 年以上でも突然枯れてしまうことがある。ポット試験では、砂壤土より植壤土の枯死率が高く、地植えでは地下水位が高いと枯死率が高かった。水田転換園や梅雨の後に枯死することが多いことから、排水不良が要因になっていると考えられた(松浦・青山, 2011)。

5. 新しい根圏制御栽培法(高密度栽培法)

果樹栽培では、定植から収穫開始までの未収益期間を短縮する栽培技術の開発が進められている。日本ナシ栽培では、厚さ 1 mm 以上幅 1 m のビニルシートを敷いた上に、

厚さ3 mm幅2 mの遮根シートを敷いて根域を土壌から完全に切り離し、その上に樹間2 m、列間2.5 mになるように盛った約150 Lの培土(赤玉土:パーク堆肥=2:1)に苗を植え付け、点滴かん水とシグモイド型緩効性被覆肥料100日タイプ(12:14:12)などを利用した施肥管理により、植え付け2年目から20 t ha⁻¹の収量が得られる盛土式根圏制御栽培法が開発された(大谷・林, 2008)。ブドウ栽培でも、樹間0.4 m、列間3 mに密植した挿し木苗ブドウ‘ピオーネ’の樹冠下を不透水性シートでマルチし、シート下に配置した点滴灌水チューブから液肥混入器を付けた自動灌水制御装置により灌水同時施肥を行う超密植栽培システムが開発された。定植2年目に成園並の生産量があり、着果基準15房 m⁻²、新梢密度10~20本 m⁻²とすることで、果粒重、糖度および果皮色の優れた果実生産が可能である(倉藤ら, 2008)。

野菜畑・施設土壌

1. 施肥改善

リン酸など施肥成分の土壌への過剰蓄積が、ワケギの葉先枯れ症(伊藤・蔵尾, 2007)、スイカなどウリ科の急性萎凋症(大島・後藤, 2008)、レンコンの葉枯れ症(白鳥ら, 2008)、スイートピーの葉身白化症(岡本・山田, 2009)などの生理障害の発生要因になっていると考えられた。また、リン酸過剰土壌の隔離床で栽培されたトマトでは、マグネシウムの吸収と移行が低下するなどの影響が考えられた(小宮山ら, 2009)。環境負荷低減のためにも施肥を改善する取り組みが行われ、レンコン栽培では、100日タイプのシグモイド型被覆肥料を用いることにより、慣行の29%減肥でも収量は同等で、窒素総排出量を41%削減できた(折本・武井, 2007)。サトイモ栽培でも窒素吸収特性に応じて肥効調節型肥料等を組み合わせた専用肥料が開発された(大森・松本, 2009)。ハクサイ、レタスの連作では、点滴灌水施肥(養液土耕)栽培することにより窒素利用率が向上し、施肥量を削減できた(植田ら, 2009)。Oxisolに5種類の有機質肥料を施用したハウス内において、4年間26種の野菜を栽培し、土壌の化学性や微生物に与える影響が調査された(Chang *et al.*, 2008)。コマツナを連続栽培した際の有機質肥料の窒素肥効特性が明らかにされた(佐藤, 2010)。硫安と牛ふん堆肥を併用したハウレンソウのプランター栽培試験から、適正な窒素量には堆肥の無機化窒素量を考慮する必要があることが明らかにされた(加藤ら, 2008)。露地野菜畑において牛ふん堆肥併用時の硫安由来窒素の動態が解析された(松波・三浦, 2010)。有機物の効率的な利用を推進するため、露地野菜では、各種有機質肥料を成分に応じて組み合わせて利用する無化学肥料栽培技術が開発された(小野寺・中本, 2007)。北海道のハウス栽培トマトでは、無化学肥料栽培に使用する有機質資材の種類、施用量や施用時期が指針にまとめられた(八木ら, 2008)。未利用有機質資材として高塩類堆肥の利用がミニトマト(江波戸・栗原, 2009a)、コマツナ(江波戸・栗原, 2009b)で検討された。メタン発酵消化液由来濃縮液肥は、黒ボク土ハウス

半促成トマト栽培に灌水同時施肥資材として利用できた(岩佐ら, 2010)。有機栽培野菜畑の窒素肥沃度指標として熱水抽出性窒素が利用できた(中辻ら, 2008)。北海道のハウス栽培における層位別の硝酸態窒素の動態と栽培管理方法との関係を検討するとともに、ハウス栽培における下層土診断法の有効性が明らかにされた(林ら, 2009)。深さ0~40 cmの土壌窒素診断に基づく施肥により、ハウレンソウ栽培ハウス土壌の窒素低減が期待された(林・長尾, 2010)。セルリーのチューブかん水栽培における減化学農薬・減化学肥料栽培技術が検討された(富沢ら, 2008)。トマト接ぎ木栽培では、汁液栄養診断に基づく追肥により、自根栽培より21~25%減肥できた(山本・松丸, 2007)。平板型硝酸イオン電極による野菜汁中硝酸イオン濃度の簡易計測法の検討が行われた(伊藤, 2009)。GC/MSによるハウレンソウの窒素代謝産物のプロファイリングが、根圏の養分環境を解析する手法となる可能性が示された(Okazaki *et al.*, 2009)。また、ダイコンの代謝産物組成は土壌中無機態窒素の違いや堆肥施用量により異なることが明らかにされた(Okazaki *et al.*, 2010)。

2. 亜酸化窒素の放出抑制

北海道の灰色低地土、褐色低地土のタマネギ畑におけるクロードチャンパー法から、投入した有機物からの亜酸化窒素の放出は、より湿潤な環境下において増加することが示された(Toma *et al.*, 2007)。コマツナ2連作畑からの硝酸態窒素の溶脱や亜酸化窒素の放出を抑制するため、無機化速度調節型アセトアルデヒド縮合尿素肥料の元肥1回施肥が検討された(Amkha *et al.*, 2009)。黒ボク土ハクサイ畑において、尿素の深層施肥は一酸化窒素の放出を効果的に削減できたが、亜酸化窒素の削減効果は比較的小さかった(Hou *et al.*, 2010)。

文 献

- Amkha, S., Sakamoto, J., Tachibana, M., and Inubushi, K. 2009. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 55, 772.
- Chatzissavvidis, C., Papadakis, I., and Therios, I. 2008. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 54, 910.
- Chang, E.H., Chung, R.S., and Whang, F.N. 2008. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 54, 587.
- Chen, J., and Lin, Y. 2010. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56, 438.
- 江波戸宗大・栗原三枝 2009a. 土肥誌, 80, 143.
- 江波戸宗大・栗原三枝 2009b. 同上, 80, 233.
- 藤本順子 2010. 土肥誌, 81, 125.
- 藤島宏之・松田和也・牛島孝策・矢羽田二郎 2010. 福岡農総試研報, 29, 70.
- 藤富慎一・黒柳直彦 2009. 福岡農総試研報, 28, 23.
- 林 哲央・日笠裕治・坂本宣崇 2009. 土肥誌, 80, 14.
- 林 哲央・長尾明宣 2010. 同上, 81, 263.
- Hirono, Y., Watanabe, I., and Nonaka, K. 2009. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 55, 783.
- Hou, A., Tsuruta, H., McCreary, M.A., and Hosen, Y. 2010. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56, 861.
- 井上博道・増田欣也・坂本 清・額田光彦・梅宮善章・喜多正幸 2007a. 土肥誌, 78, 81.

- 井上博道・梅宮善章・喜多正幸 2007b. 土肥誌, 78, 565.
- 井上博道・梅宮善章・喜多正幸・羽山裕子・中村ゆり 2009. 土肥誌, 80, 583.
- 石川 啓・木村秀也・吉川省子 2008. 園学研, 7, 39.
- 石川 啓 2009. 園学研, 8, 19.
- 石川 啓 2010. 愛媛果研セ研報, 2, 1.
- 伊藤秀和 2009. 土肥誌, 80, 396.
- 伊藤純樹・蔵尾公紀 2007. 土肥誌, 78, 403.
- 岩佐博邦・山本二美・斉藤研二 2010. 土肥誌, 81, 248.
- 岩崎光徳・深町 浩・佐藤景子・今井 篤・野中圭介・平岡潔志・奥田 均 2010. 園学研, 9, 433.
- 岩崎光徳・深町 浩・今井 篤・野中圭介 2011. 園学研, 10, 191.
- 加藤雅彦・林 康人・森國博全 2008. 土肥誌, 79, 283.
- 城村徳明・桜井直樹・土田靖久・三宅英伸・東 卓弥・竹中正好 2009. 園学研, 8, 181.
- 貝原洋平・宮本輝仁・原口暢朗・池田繁成・新堂高広 2008. 園学研, 7, 517.
- 金原啓一・岸 祐子・須藤貴子・八巻良和 2011. 園学研, 10, 21.
- 鬼頭郁代・上林義幸・成田秋義・眞子伸生 2008. 愛知農総試研報, 40, 129.
- 倉藤祐輝・尾頃敦郎・藤井雄一郎・小野俊朗・久保田尚浩・森 茂郎 2008. 園学研, 7, 425.
- 小宮山鉄兵・藤澤英司・新妻成一・加藤雅彦・森國博全 2009. 土肥誌, 80, 516.
- Lai, H., Juang, K., and Chen, B. 2010. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56, 601.
- 松波寿弥・三浦吉則 2010. 土肥誌, 81, 549.
- 松浦克彦・川上信二・岡本哲也・玉木衣央 2008. 兵庫農技総セ研報, 56, 13.
- 松浦克彦・青山喜典 2011. 兵庫農技総セ研報, 59, 13.
- 宮田信輝・矢野隆・松本秀幸 2007. 愛媛果樹試研報, 21, 41.
- 森田明雄・中山彰一郎・中村孔秋・廣野祐平・野中邦彦 2009. 土肥誌, 80, 566.
- 持田圭介・倉橋孝夫・桐野康行・板村裕之 2008. 園学研, 7, 3.
- 村松 昇・平岡潔志・山之内宏昭・武弓利雄 2010. 土肥誌, 81, 508.
- 村本晃司・井樋昭宏・大倉英憲・松本和紀・牛島孝策 2011. 福岡農総試研報, 30, 43.
- 中辻敏朗・坂口雅巳・柳原哲司・小野寺政行・櫻井道彦 2008. 同上, 79, 317.
- 中園健太郎・成山秀樹・堺田輝貴・吉岡哲也・仁田原寿一 2010. 福岡農総試研報, 29, 82.
- 農林水産省生産局農業環境対策課 2009. 肥料高騰に対応した施肥改善等に関する検討会中間取りまとめ報告書. http://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/nenyu_koutou/n_kento/pdf/report.pdf.
- 岡本 保・山田 裕 2009. 同上, 80, 630.
- 岡室美絵子・桑原あき・土田靖久 2010. 園学研, 9, 299.
- Okazaki, K., Oka, N., Shinano, T., Osaki, M., and Takebe, M., 2009. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 55, 496.
- Okazaki, K., Shinano, T., Oka, N., and Takebe, M. 2010. 同上, 56, 591.
- 小野寺政行・中本 洋 2007. 土肥誌, 78, 611.
- 大森誉紀・松本英樹 2009. 同上, 80, 413.
- 大島宏行・後藤逸男 2008. 同上, 79, 307.
- 大谷義夫・林 雅子 2008. 栃木農試新技術, 12, 1.
- 折本善之・武井昌秀 2007. 同上, 78, 363.
- 堺田輝貴・吉岡哲也 2008. 福岡農総試研報, 27, 117.
- 坂本 清 2008. 青森りんご試研報, 35, 53.
- 坂本 清・青山正和 2010. 園学研, 9, 153.
- 笹山新生・野中 稔・高木信雄 2007. 愛媛果樹試研報, 21, 15.
- 佐藤紀男 2010. 土肥誌, 81, 557.
- 白鳥 豊・長井 隆・犬伏和之 2008. 同上, 79, 189.
- 杉山泰之・江本勇治・濱崎 櫻・鈴木晴夫・大城 晃 2008. 園学研, 7, 203.
- 田中満徳・矢野臣祐・谷岡秀明 2008. 高知農技セ研報, 17, 71.
- Toma, K., Kimura, S.D., Hirose, Y., Kusa, K., and Hatano, R. 2007. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 53, 692.
- 富沢ゆり子・中辻敏朗 2008. 北農研セ新しい研究成果 2008 年度, 102.
- Tonon, G., Ciavatta, C., Solimando, D., Gioacchini, P., and Tagliavini, M. 2007. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 53, 78.
- 植田稔宏・池羽智子・安東 赫・加藤一幾・河野隆・松本英一 2009. 土肥誌, 80, 477.
- 上松富夫 2010. 園学研, 9, 305.
- 上之園茂・西田 学・橋本祥一・東 明弘 2009. 土肥誌, 80, 408.
- 八木哲生・坂口雅巳・日笠裕治 2008. 同上, 79, 203.
- 山家一哲・杉山泰之・高橋和彦 2008. 土肥誌, 79, 303.
- 山本二美・松丸恒夫 2007. 同上, 78, 391.
- 山本隆儀・奥谷紘平・田中宏幸・川上 晃・金本明洋 2008. 園学研, 7, 351.
- Zehetner, F., Vemuri N.L., Huh, C., Kao, S., Hsu, S., Huang, J., and Chen, Z. 2008. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 54, 618.

草地土壌肥沃度*

中辻敏朗

1. 草地土壌特性と管理

道央のチモシー・シロクローバ混播草地で2004年に開始されたメタン発酵消化液、堆肥、化学肥料の長期連用試験圃場の土壌化学性について、3年目までの結果がまとめられた。1年目には化学肥料施用区のpHおよび塩基飽和度が他区より低かったが、3年目までの変化を通して解析すると明確な処理間差は認められず、モニタリングの継続が必要と判断された(澤本ら, 2007, 2008)。重粘土地帯のため干ばつ被害を受けやすい道北を対象に、低水分ストレスがオーチャードグラスの乾物生産に与える影響が詳細に検討され、その影響を組み込んだ乾物生産予測モデルが開発された(中辻, 2008)。そのモデルが将来の温暖化気候に適用され、気温上昇に伴う乾物生産量の変化予測にあたっては、降雨量の多少や土壌水分特性の違い等に起因する低水分ストレスの影響を考慮することが重要と指摘された(Nakatsuji and Kiso, 2008)。家畜ふん尿をかんがい水で希釈して散布する肥培かんがい5~12年行われた道北の採草地の土壌理化学性が調査され、肥培かんがいにより表層5cmの腐植含量が高まり、同層の保肥力や保水性が向上していることが明らかにされた(横濱・今井, 2007)。省力・低コストな草地更新を可能とする、鎮圧ローラ付き碎土機および施肥播種機の性能が道北で検討され、従来法による更新と同等以上の発芽個体数や牧草生育状況を確保し

北海道立総合研究機構中央農業試験場

* 2007年1月から2010年12月の日本土壌肥科学雑誌, *Soil Science and Plant Nutrition*, 日本草地学会誌を中心として、草地土壌肥沃度に関する論文を整理した。

ながら、作業時間の短縮化、機械費・種子費の低減が期待できる有効な技術と判断された(古館・丸山, 2009). 北海道における草地土壌および肥培管理に関する直近10余年の研究成果が土壤肥科学会北海道大会記念誌に取りまとめられた(三木ら, 2010). 青森県では原子燃料サイクル施設に係る環境モニタリングとして、草地土壌中のウラン濃度を測定している. 一部のモニタリング地点で1999年頃からウラン濃度の上昇傾向が認められているが、これは主に施肥されたリン酸肥料に含まれるウランに由来することがウラン/トリウム比の測定から明らかとなった(三浦・工藤, 2007). 土壌リンの有効利用を目的に、神奈川県黒ボク土に立地する長期無施肥の日本シバ放牧地でのリン循環が調査され、地上部リターの還元で表層土壌の全リンおよび有効態リン含量が高まり、これがシバの旺盛なリン吸収に寄与していることが示された(Kaneko *et al.*, 2008). モンゴル高原の半乾燥地草原では、1990年代初頭から放牧や耕作などの農業生産活動による草原の衰退と土壌劣化(砂漠化)が問題となっている. これに対し、草地を耕地化した場合の土壌の変化や、砂漠化の予測あるいは砂漠化からの回復程度を判断するための指標、具体的な回復方策などに関する研究成果が総説としてまとめられた(田村ら, 2010). また、中国内モンゴル自治区の砂漠化が進んだ科爾沁砂地では、植生の回復に伴い土壌有機物含量が高まることが認められた(烏云娜ら, 2008). 一方、日本国内では農業生産構造の変化に伴い、耕作放棄地の増加が問題となっている. 耕作放棄地の放牧利用に資するため、耕作放棄を誘引する自然立地条件を解析するとともに、耕作放棄地をすべて牧草地化した場合の潜在乾物生産量を推定したところ、日本全国で最大229万tと見積もられた(佐々木ら, 2007). また、耕作放棄地の草量を、優占種や種構成を問わず群落高から精度良く推定する方法が提案された(堤ら, 2010).

2. 肥培管理(有機物の有効利用を含む)

高栄養で嗜好性の高いペレニアルライグラスの栽培適地である道北において、窒素施肥が採草地または採草・放牧兼用地の収量、草種構成、飼料特性などに及ぼす影響等が詳細に検討され、同草地に対する適正な窒素施肥法が確立された(岡元ら, 2007a, 2007b, 2009; 岡元, 2010). 酪農・畜産地域の貴重な養分資源である、きゅう肥、スラリーおよび尿液肥に含まれる窒素、リン酸、カリウムの肥効評価法が提案されるとともに、本評価法の有効性が圃場栽培試験により実証され、北海道のチモシー基幹採草地に対するふん尿処理物主体施肥法が確立された(松本, 2008). 酪農場におけるふん尿の有効利用計画立案支援ソフトウェア「AMAFE」が開発された. AMAFEでは、圃場面積、土壌診断値、飼養頭数、ふん尿の分析値等を入力すると、圃場(採草地、放牧地、飼料畑)ごとのふん尿利用計画と化学肥料補給量、さらに採草地ではアンモニア揮散量などの環境負荷の推定値が表示される. 利用者はこれらの情報を見ながら、各圃場での具体的なふん尿利用計画を試行錯誤

的に立案できる(松中ら, 2009; 松中, 2010). 道央では省力型放牧草地としてのケンタッキーブルーグラス・シロクローバ混播草地の評価が2006年から継続的に行われている. 北海道施肥標準に準じた施肥量では、土壌と牧草の養分含量が経年的に高まり、飼料品質等への悪影響が懸念された. この傾向は単年度の減肥によりある程度軽減されたが、根本的解決には放牧地の養分循環に基づく施肥量の設定が必要であった(三枝ら, 2010). また、北東北地域の公共牧場の省力・持続的放牧利用に資するため、ケンタッキーブルーグラス優占草地の牧養力が調査された(成田ら, 2007). 放牧地での養分循環に及ぼす糞虫(食糞性コガネムシ)の寄与が圃場試験により調査された. 糞虫の密度が高いほど糞の分解は促進され、糞直下の土壌の無機態窒素量も高まるが、牧草の生育や養分吸収量への効果は限定的であった(Yamada *et al.*, 2007). アルファルファに対する施用窒素形態の違いが根系発達に及ぼす影響について、窒素吸収量や呼吸と正の相関を示す根のペルオキシダーゼ活性に着目して検討された(廣瀬, 2008).

3. 牧草・飼料作物の品質

北関東では、飼料品質からみたスーダングラスの土壌診断に基づく窒素施肥法が提案された. 1番草の硝酸態窒素濃度を飼料基準値(2 g kg^{-1})以下とするには、生土培養窒素(30°C , 4週間)で 40 mg kg^{-1} 以下が目安となる. 同窒素が $30\sim 40 \text{ mg kg}^{-1}$ では窒素施肥は不要であるが、 30 mg kg^{-1} 未満では安定多収のために 10 g m^{-2} の窒素施肥が必要である(Sunaga *et al.*, 2008). また、葉緑素計を用いた非破壊による飼料作物の栄養診断技術(飼料品質、収穫適否の判断)にも進展が見られ、各種研究成果の概要が総説としてまとめられた(須永, 2009). 年3回刈りの暖地型牧草ネピアグラスを対象に、窒素施肥と家畜のカルシウム欠乏症の発症に関連する牧草中のシュウ酸含有率との関係が調査された. 窒素施肥量が 90 g m^{-2} までであれば、施肥量の増加に伴う水溶性および全シュウ酸含有率の上昇は認められず、家畜栄養上の問題が生じる可能性は小さいと推察された(Rahman *et al.*, 2008). 乳牛スラリーを多量施用した牧草(チモシー)の乳牛への給与試験が行われた. 粗タンパク質とカリウム含有率が高い牧草の給与は乳牛のマグネシウム吸収阻害の一因となることが示され、牧草に対する適正な施肥は草地生産性の維持・向上だけでなく家畜栄養面からも重要であることが確認された(松本ら, 2008). 良質サイレージ調製のための基礎データ蓄積を目的に、土壌が異なる道内3地域においてチモシーの可溶性炭水化物含量と土壌化学性の変動実態および両者の相関が検討された(増子ら, 2008). また、一般にペレニアルライグラスは他の寒地型牧草よりも飼料品質が良好(岡元・古館, 2007)であるが、過剰な窒素施肥は可溶性炭水化物(特にフラクタン)濃度を低下させ、サイレージの発酵品質を悪化させることが指摘された(岡元ら, 2007c).

4. 環境影響評価と負荷軽減対策

地球温暖化抑制策の一つとして草地土壌の炭素隔離能を

活用するため、全国14ヶ所の草地土壌24点の炭素貯留量の実態が調査された。草地は林地並みの炭素貯留能を有し、特に黒ボク土で貯留量が多いこと、またその量は草地の経年化に伴い増加すること等が明らかとなった(Nakagami *et al.*, 2009)。17年間の頻繁な刈取りによりススキ型からシバ型へ変化した島根県三瓶山の草地では、ススキ型と比較して、土壌表層5 cmの根量増加とそれに伴う炭素貯留量の増加が認められた(Shimoda and Takahashi, 2009)。福島県の黒ボク土において、林地から放牧草地への転換が土壌の炭素貯留量に与える影響がRoth-Cモデルを用いて解析され、放牧草地の土壌炭素量を転換前の林地並みに維持するには、炭素として年間3~4 t ha⁻¹の投入が必要と見積もられた。この量は年間8~9 t ha⁻¹の牧草生産に伴う枯死葉、根および放牧牛からのふん尿で還元可能であり、草地の高い炭素貯留能が示唆された(Takahashi *et al.*, 2007)。これら3報の概要は、我が国の生態系サービスに関する総説でも紹介されている(中神, 2010)。このように草地は畑地よりも大きな炭素貯留能を持つが、一方で亜酸化窒素の排出源ともなっている。栃木県の黒ボク土草地において、草種構成、草地更新および堆肥施用がメタンと亜酸化窒素の排出量に及ぼす影響が詳細に検討され、亜酸化窒素排出量抑制からみた望ましい更新時期、草種構成や施用堆肥の無機化を考慮した施肥管理の重要性が示された(森, 2010b)。集約的畜産が盛んな栃木県N市の畜産一耕種農業系を対象に、ライフサイクルアセスメント手法により自給飼料生産の環境影響評価が行われた。自給飼料生産の増加と輸入飼料の減少は系内の温暖化負荷の発生量にある程度低減させたが、負荷低減に対する自給飼料生産の優位性をより高めるには、飼料単収や家畜への飼料給与量の適正な目安を明らかにする必要があった(池口, 2008)。草地の持つ降雨流出・土壌流亡防止機能とその変動に影響する各種要因(放牧強度、被覆率、草種)について総説がまとめられた(中尾, 2010)。大規模草地型酪農が展開される道東の風蓮湖流域において、遊水池や土砂緩止林などの水質保全対策施設の整備による草地からの水質負荷物質流出抑制効果を実証された(中村ら, 2010)。

5. 重金属リスク管理

道北の酪農地域でのカドミウム汚染リスク管理に資するため、牛ふん・水産系廃棄物混合堆肥の施用がチモシーのカドミウム含量に及ぼす影響が検討された。堆肥施用下のチモシー地上部のカドミウム含有率は0.02~0.07 mg kg⁻¹と低いものの、堆肥由来の負荷量がチモシーによる収奪量を大きく上回るため、長期的には土壌にカドミウムが蓄積する方向にあることが明らかとなった(古館・乙部, 2009)。一方、ファイトレメディエーションへの利用を目指し、ペレニアルライグラスとトールフェスクのカドミウム吸収能が水耕条件で調査された。両草種とも根部から地上部へのカドミウム移行性は高く、刈取り後の再生も良いことから、低濃度の汚染除去に応用できる可能性が示唆された(浅井ら, 2007)。国内の家畜ふん尿に由来する重金

属(銅、亜鉛、カドミウム、鉛)の草地飼料畑への投入量と飼料作物による収奪量が地域性を考慮しながら解析された。その結果、我が国には家畜ふん尿由来の重金属が作物による収奪量よりも多く存在し、飼養密度が高い都府県では草地飼料畑に局所的に投入されている可能性が示唆された。また、土壌の亜鉛収支を重金属に関する農用地土壌の管理基準(亜鉛: 120 mg kg⁻¹)に照らし合わせると、北海道を除く都府県では特に銅と亜鉛の蓄積に留意が必要と推察された(森ら, 2007)。家畜ふん堆肥への重金属の混入経路、これらの利用に伴う重金属の土壌蓄積、農地土壌の重金属濃度に関する規制値と安全性に関する総説がまとめられた(森, 2010a)。

文 献

- 浅井俊光・佐藤 文・水庭千鶴子・近藤三雄 2007. 芝草研究, 36, 20.
 古館明洋・丸山健次 2009. 北農, 76, 313.
 古館明洋・乙部裕一 2009. 土肥誌, 80, 506.
 廣瀬大介 2008. 日草誌, 54, 123.
 池口厚男 2008. 日草誌, 54, 168.
 Kaneko, M., Kurosawa, Y., Tanaka, H., Suzuki, S., and Itabashi, H. 2008. *Grassl. Sci.*, 54, 17.
 増子孝義・相馬幸作・白井美帆・河合佑典・古川研治・柴田浩之・林川和幸・三枝俊哉 2008. 日草誌, 54, 257.
 松中照夫・三枝俊哉・佐々木寛幸・松本武彦・神山和則・古館明洋・三浦 周 2009. 土肥誌, 80, 177.
 松中照夫 2010. 土肥誌, 81, 523.
 松本武彦 2008. 道立農試報告, 121, 1.
 松本武彦・糟谷広高・扇 勉・寶示戸雅之 2008. 日草誌, 54, 223.
 三木直倫・古館明洋・松中照夫・岡元英樹・大塚省吾・木曾誠二・三枝俊哉 2010. 土肥学会北海道支部編 北海道農業と土壌肥料 2010, p.111. 北農会, 札幌.
 三浦誓也・工藤俊明 2007. 青森原子力センター所報, 2, 27.
 森 昭憲・寶示戸雅之・神山和則 2007. 土肥誌, 78, 23.
 森 昭憲 2010a. 土肥誌, 81, 413.
 森 昭憲 2010b. 畜草研究報告, 10, 85.
 Nakagami, K., Hojito, M., Itano, S., Kohyama, K., Miyaji, T., Nishiwaki, A., Matsuura, S., Tsutsumi, M., and Kano, S. 2009. *Grassl. Sci.*, 55, 96.
 中神弘詞 2010. 日草誌, 56, 166-169.
 中村和正・山下彰司・山本 潤・中山博敬・大久保天・鶴木啓二・多田大嗣・林田寿文・渡辺光弘・加藤道生・西山章彦・斉藤 勉 2010. 寒地土木研月報, 686, 2.
 中尾誠司 2010. 日草誌, 56, 175.
 Nakatsuji, T., and Kiso, S. 2008. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 54, 289.
 中辻敏朗 2008. 道立農試報告, 119, 1.
 成田大展・梨木 守・東山由美 2007. 日草誌, 53, 159.
 岡元英樹・古館明洋 2007. 道立農試集報, 91, 31.
 岡元英樹・奥村正敏・古館明洋 2007a. 日草誌, 52, 243.
 岡元英樹・奥村正敏・古館明洋 2007b. 日草誌, 53, 152.
 岡元英樹・古館明洋・吉田昌幸 2007c. 日草誌, 53, 195.
 岡元英樹・奥村正敏・古館明洋 2009. 日草誌, 55, 40.
 岡元英樹 2010. 道立農試報告, 125, 1.
 Rahman, M.M., Ishii, Y., Niimi, M., and Kawamura, O. 2008. *Grassl. Sci.*, 54, 146.
 三枝俊哉・手島茂樹・小川恭男・高橋俊 2010. 日草誌, 55, 318.
 佐々木寛幸・神山和則・松浦庄司 2007. 日草誌, 53, 189.

- 澤本卓治・井上徳子・松中照夫 2007. *J. Rakuno Gakuen Univ.*, **32**, 43.
- 澤本卓治・水上朋美・松中照夫 2008. *J. Rakuno Gakuen Univ.*, **33**, 75.
- Shimoda, S., and Takahashi, Y. 2009. *Grassl. Sci.*, **55**, 175.
- Sunaga, Y., Harada, H., Kawachi, T., and Hatanaka, T. 2008. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **54**, 543.
- 須永義人 2009. 土肥誌, **80**, 183.
- Takahashi, S., Nakagami, K., Sakanoue, S., Itano, S., and Kirita, H. 2007. *Grassl. Sci.*, **53**, 210.
- 田村憲司・藤原英司・鳥山和伸 2010. 土肥誌, **81**, 273.
- 堤 道生・高橋佳孝・惠本茂樹・伊藤直弥・佐原重行・吉村知子 2010. 日草誌, **56**, 4.
- 烏 云娜・岡本勝男・塩見正衛 2008. 日草誌, **53**, 301-307.
- Yamada, D., Imura, O., Shi, K. and Shibuya, T. 2007. *Grassl. Sci.*, **53**, 121.
- 横濱充宏・今井 啓 2007. 寒地土木研月報, **655**, 21.
-