

## 第8部門 環境

### 環境保全

川崎 晃<sup>1</sup>・前田守弘<sup>2</sup>・原田久富美<sup>3</sup>・河野憲治<sup>4</sup>

#### 1. 重金属および微量元素等

##### 1) 土壌

わが国の土壌1530点の分析結果から、Cd濃度の中央値は $0.27 \text{ mg kg}^{-1}$ 、95%信頼区間は $0.06 \sim 1.09 \text{ mg kg}^{-1}$ であることが示された(山崎ら, 2009)。農地表層土のCu, Zn, Cd, Pb, U等の濃度は下層土より有意に高く、農業活動による影響が示唆された(木村ら, 2008a)。非汚染水田において、年間約 $3 \text{ g ha}^{-1}$ のCdが持ち込まれていると見積もられた(Yada *et al.*, 2008)。わが国の農地土壌のSe濃度は幾何平均で $0.43 \text{ mg kg}^{-1}$ であり、土壌の有機炭素含量と相関があった(Yamada *et al.*, 2009)。土壌中のBrをアルカリ抽出し、3-ペンタノン誘導体にしてHPLCで定量する手法が開発された(山田ら, 2010)。

SeおよびSbの土壌の固相-液相間での分配係数はリン酸の影響を受け、可給態リン酸が多く、リン酸吸収係数の小さい土壌において、Seの可給性が高まった(Nakamaru and Sekine, 2008)。アロフェン質黒ボク土へのAsの吸着は、ヒ酸(V)が配位子交換反応を伴う内圏錯体の形であるのに対し、亜ヒ酸(III)は別の機構であると考えられた(Saeki, 2008b)。吸着等温式から推定される各種イオンの吸着親和性は、 $F(-I) \gg P(V) > Se(IV) > Mo(VI) \cong As(V) \gg Se(VI) \cong Cr(VI) \cong \text{硝酸イオン}$ の順であった(Saeki, 2008a)。土壌溶液中のフッ化物イオンは、低pH領域においてAlと可溶性の錯体を形成していると考えられた(Oh and Saeki, 2009)。腐植酸に対する重金属の吸着親和性は、 $Zn^{2+} > Cd^{2+} > Co^{2+} > Ni^{2+} \gg Ca^{2+}$ の順であった(Saeki and Kunito, 2009)。

火山碎屑物中のFeやMgは重鉱物に多く含まれていた(Mizuno *et al.*, 2008)。噴出年代の異なる火山灰が堆積している地層のHg濃度プロファイルから、大気降下物由来のHg量の履歴を探る試みがなされた(Hobara *et al.*, 2009)。根圏の土壌溶液には高分子量の溶存有機物が多く、溶存有機物と結合していた金属の溶出が促進されていると考えられた(Takeda *et al.*, 2009)。Cdにより土壌中のプロテアーゼ活性は阻害されるが、アロフェン質粘土の添加によりプロテアーゼが安定化した(Shahriari *et al.*, 2010)。

鶏ふん灰の施用により、射撃場土壌中のPbが不溶性の形態に変化することがEXAFS(広域X線吸収微細構造)

分析から明らかになった(Hashimoto *et al.*, 2009b)。鶏ふん灰の施用と牧草栽培により、不溶性のPbの割合が増加し、土壌の酵素活性が高まった(Hashimoto *et al.*, 2009a)。

ベトナム北部の紅河デルタのAs汚染は、工業由来とAs汚染地下水由来であり(Phuong *et al.*, 2008)、他の重金属についても工業由来の局所汚染が認められた(Phuong *et al.*, 2010)。ベトナム北部のSn, W鉱山周辺では、AsとCuの汚染が認められた(Kien *et al.*, 2009)。ベトナムのCr鉱山周辺の重金属汚染は、底質が流入した周辺2 km圏内で認められた(Kien *et al.*, 2010)。

無機態のヨウ素( $I, IO_3^-$ )は、有機物の多い土壌において、微生物活性の有無にかかわらず有機態に変化した(Yamaguchi *et al.*, 2010)。安定同位体希釈法で求めた黒ボク土の可給態Srは全Srの15%程度であり、1 M酢安抽出による交換態濃度より高かった(Takeda *et al.*, 2010)。Srの土壌-土壌溶液分配係数は、CEC/EC比と強熱減量に依存し、土壌に固定されるCsの割合は、土壌の粘土含量、全炭素、pHに依存した(Ishikawa *et al.*, 2008b)。土壌中の $^{137}Cs$ と安定Csの比は、交換態>有機結合態>残渣であり、同位体平衡に達していないことが示唆された(Tsukada *et al.*, 2008a)。大気降下物中の $^{137}Cs$ の観測結果がまとめられ、大陸の半乾燥地の表土が $^{137}Cs$ の供給源の一つであることが明らかになった(Fujiwara, 2010)。

##### 2) 植物

タマネギのCd濃度は鱗茎の肥大率が大きいほど低下した(内山・佐野, 2010)。オオムギ各品種のうち、Apam, カシマムギは地上部Cd濃度が高く、Spartan, 2727 (GRAIN)は低い傾向にあった(中山ら, 2008)。ハウレンソウのCd濃度の品種間差が、「Cd指数」と「ゆらぎ」の概念を導入してとりまとめられた(伊藤ら, 2010b)。

水稻体内におけるCdの挙動がとりまとめられた(石川, 2008)。玄米へのCdの移行は、葉身から篩管經由と、茎あるいは小穂での導管から篩管への転送が主要な経路であった(Yoneyama *et al.*, 2010)。篩管液中のCdは約13 kDaのタンパク質または低分子のSH化合物と結合していた(Kato *et al.*, 2010a)。

ソルガムで観察されるAs誘導クロロシスはFe欠乏と考えられた(Shaibur *et al.*, 2008)。Fe欠乏水耕液で栽培したオオムギ幼植物では、Asの添加によりFeの地上部への移行量が増加した(Shaibur *et al.*, 2009b)が、As処理によるムギネ酸合成阻害が認められた(Shaibur *et al.*, 2009a)。芳香族ヒ素化合物のうち、メチルフェニルアルシン酸は玄米まで移行した(Arao *et al.*, 2009b)。バングラデシュなど10か国の精米中の全ヒ素濃度分布、全ヒ素に対する無機ヒ素の割合が調査された(Meharg *et al.*, 2009)。

<sup>1</sup> 農業環境技術研究所

<sup>2</sup> 岡山大学

<sup>3</sup> 畜産草地研究所

<sup>4</sup> 広島大学

As 集積植物のモエジマシダの As 耐性に低分子チオールの寄与が示唆された (Sakai *et al.*, 2010).

アーバスキュラー菌根菌の接種は、トウモロコシ地上部の Zn 濃度を高めたが、Cu 濃度には影響しなかった (荻山ら, 2008b). ベニテングダケの 25 元素の濃度 (Falandysz *et al.*, 2007), カラカサダケの 19 元素の濃度 (Falandysz *et al.*, 2008) が調査された. 台湾のブドウ畑において、土壌とブドウの Cu 濃度が調査された (Lai *et al.*, 2010).

放射性廃棄物から放出される  $^{14}\text{C}$  の作物影響評価の目的でマリーゴールド、トールフェスク、水稲による  $^{14}\text{C}$ -酢酸の吸収が調査された (荻山ら, 2008a). ニンジンでは  $^{14}\text{C}$  を経根吸収した (鈴木ら, 2008a). ハツカダイコン可食部の  $^{14}\text{C}$  は、添加した  $^{14}\text{C}$  の 0.51 % であった (Ogiyama *et al.*, 2009). 水稲による  $^{14}\text{C}$  の吸収は、根圏で生成した  $^{14}\text{CO}_2$  が通気組織を経由して大気中に放出された後、同化されたことが示唆された (Ogiyama *et al.*, 2010a).

稲穂中のヨウ素のほとんどは経根吸収であり、根の濃度が最も高く、白米が最も低かった (Tsukada *et al.*, 2008b). Sr の土壌から作物への移行係数は、土壌中 Sr 濃度と作物中 Ca 濃度から推算できた (石川ら, 2009). コマツナ根圏において、土壌溶液中の Cs と Sr 濃度は時間とともに増加し、Cs には K と  $\text{NH}_4^+$ , Sr には Ca イオンが影響した (Takeda *et al.*, 2008). Cs の葉面吸収は陰イオンの影響を受け、吸収量は  $\text{CsCl} > \text{CsNO}_3$  であった (Hasegawa *et al.*, 2009). 放射性 Cs ( $^{137}\text{Cs}$ ) の移行係数は、土壌中の K 濃度、交換性 K 濃度、安定 Cs ( $^{133}\text{Cs}$ ) の移行係数から推算できた (Ishikawa *et al.*, 2008a).  $^{137}\text{Cs}$  等の放射性核種の玄米あるいは精米への移行係数がとりまとめられた (Uchida *et al.*, 2009).

### 3) 重金属汚染土壌の対策技術

わが国における農地土壌の重金属汚染の歴史と重金属対策技術がレビューされた (Arao *et al.*, 2010). 洗浄法による水田土壌の Cd の除去には塩化第二鉄が有効であり (Makino *et al.*, 2008), 実際の適用事例が紹介された (牧野ら, 2008). Cd 汚染土壌から動電学的に Cd を除去する技術の原理、農地への適用性と課題が紹介された (川地, 2008). 動電学的手法は Cd の浄化に有効であるが、交換性塩基の損失などの欠点も明らかになった (久保田ら, 2009).

Cd 高吸収稲の栽培跡地でダイズを栽培すると、子実中の Cd 濃度の有意な低減が認められ (Murakami *et al.*, 2008), 長香穀 2 作後の水稲作においても Cd 濃度の有意な低減が認められた (Murakami *et al.*, 2009). 新潟の気象条件下では、Cd 吸収作物として IR-8 が有望であった (本間ら, 2009). 西南日本においては、モーレッツと IR-8 の早期落水栽培により、Cd を効果的に吸収できた (Ibaraki *et al.*, 2009). 愛媛では、ケナフとマリーゴールドが Cd 浄化植物として有望と考えられた (大森, 2008). Cd 集積植物のハクサンハタザオは 2 か月で深さ 35 cm まで根が伸長し、地上部に効率的に Cd を集積した (久保田ら, 2010).

ベニバナボロギクは地上部に Cd を集積し (Yamato *et al.*, 2008), Cd 汚染圃場において 2 作の合計量で  $320 \text{ g ha}^{-1}$  の Cd を吸収した (大和ら, 2010). 約 100 種類の植物の中から、Cd 浄化植物としてアメリカセンダングサ、コセンダングサ、アオビユが選抜された (Abe *et al.*, 2008b). ナデシコ目では、アマランサス (ハゲイトウ) が Cd 浄化植物として有望であった (Watanabe *et al.*, 2009b). ヘビノネゴザとスズシロソウの混植は、それぞれの重金属吸収に影響しなかった (Chen *et al.*, 2009). グンバイナズナの生育における Cd の役割について評価された (Liu *et al.*, 2008). 重金属耐性微生物の土壌中での生態と重金属汚染土壌の浄化への応用がとりまとめられた (國頭・松本, 2010).

北海道では、低吸収品種の選択、青未熟粒の発生抑制、出穂期後 3 週間の湛水 (中津ら, 2010), 愛媛では、土壌 pH の調整、出穂前後 3 週間の湛水 (大森, 2009), 新潟では、熔リンや多孔質ケイカルなどの資材と水管理の併用 (星野ら, 2008) が水稲の Cd 濃度低減対策として有効であった. 水稲の Cd と As を同時にある程度抑制する水管理が検討された (Arao *et al.*, 2009a). 0 価鉄添加による水稲の Cd 吸収抑制は、土壌中の交換態 Cd の減少と、可給性の低い酸化物吸蔵態の増加によると考えられた (Watanabe *et al.*, 2009a). 非晶質鉄資材による水稲の As 害軽減は、As が根の斑鉄と結合し、土壌溶液中の As 濃度が低下するためと考えられた (Ultra Jr *et al.*, 2009). 台湾における水田土壌の重金属汚染の原因、水稲による重金属吸収の品種間差異、汚染修復法などがレビューされた (Hseu *et al.*, 2010).

野菜の Cd 吸収抑制技術が紹介された (荒尾, 2009). ナスの Cd 吸収を抑えるにはスズメノナズビを台木とするのが有効であった (Arao *et al.*, 2008). Cd 同位体を利用した根の Cd 吸収の評価法 (Mori *et al.*, 2009a) により、導管中の Cd 濃度を低く抑える要因は導管への積み込みの差異にあることがわかった (Mori *et al.*, 2009b).

遮根シートと客土の組み合わせにより、コマツナとハウレンソウの Cd 吸収を抑制できた (武田ら, 2010). 土壌の Cd 汚染が軽微であれば、アルカリ資材による土壌 pH の矯正がダイズの Cd 吸収抑制に有効であった (雄川・稲原, 2009). 酸化マグネシウム資材には Cd との親和性の高いものがあり (Okazaki *et al.*, 2008), Cd 汚染圃場栽培米の Cd 濃度を有意に低減し (Kikuchi *et al.*, 2008b), 後作のコムギ子実 Cd の低減にも寄与した (Kikuchi *et al.*, 2009). アルカリ資材を添加して土壌 pH を高めても土壌の可給性 Cd のプール (E 値) は変化しないが、土壌の固相と液相間で迅速に交換する Cd 量が減少した (Yada and Kawasaki, 2008). Cd の E 値測定に干渉する Mo は、アルカリ共沈法で除去できた (Kawasaki and Yada, 2008).

土壌溶液中の Cd 濃度からシュンギクの Cd 濃度が推定できた (Kamewada and Nakayama, 2009). 土壌の Cd 濃度と N 濃度等からハウレンソウの大まかな Cd 濃度が予測できた (砂川ら, 2008). 水稲収穫 1~2 週間前の茎、葉鞘部の Cd 濃度から、収穫時の玄米 Cd 濃度を予測できるこ

とが示唆された(今井ら, 2009).

玄米中 Cd の分析前処理にヒートブロックが活用できた(馬場・後藤, 2009). イムノクロマト法による Cd の簡易分析法は, 水稻茎葉(Abe *et al.*, 2008a), トマト, レタス, ダイズなど(Sasaki *et al.*, 2009)にも適用できた. 玄米および土壌中の有機 As 化合物の定量法(Baba *et al.*, 2008), 米の形態別 As 定量法(Narukawa and Chiba, 2010)が開発された. ヒ素化合物の形態別分析に関する知見がとりまとめられた(馬場, 2009).

#### 4) 肥料, 水質

家畜ふん堆肥中の肥料成分と微量元素を波長分散型蛍光 X 線分析装置で測定する手法が検討された(小宮山ら, 2009). エネルギー分散型蛍光 X 線分析装置による堆肥分析(松波ら, 2009a)が検討され, 土壌分析にも適用された(Matsunami *et al.*, 2010).

平成 20 年度に「汚泥肥料の規制のあり方に関する懇談会」が開催され, 生産業者による品質管理の方向性などが提言された(大森・朝倉, 2010). 汚泥肥料生産者向けに重金属管理手引書が作成された(農林水産省, 2010). 汚泥肥料の長期連用に由来する Zn と Cu のほとんどは耕うんの範囲内に留まった(後藤ら, 2008). 家畜ふん堆肥の連用は土壌の K, Mn, Fe, Cu, Zn の形態に影響し, Cu は有機態, Zn は無機態の割合が高まった(伊藤ら, 2010a).

牛ふん堆肥や汚泥肥料の草地への施用は, 牧草の Cd 濃度に影響しなかった(古館・乙部, 2009). 豚ふん堆肥を 5 年間連用した圃場で栽培したコマツナは, Zn 濃度が高まったが, Cr と Mn 濃度は一定の傾向がなかった(鈴木ら, 2008b). 豚ふん堆肥施用土壌で栽培したトウモロコシとサツマイモは, 非可食部の Zn と Cu 濃度が高まったが, 可食部には影響しなかった(Ogiyama *et al.*, 2010b). 家畜ふん堆肥施用区のハウレンソウは, 化学肥料区より Cd 濃度が低かった(Sato *et al.*, 2010). 家畜ふん堆肥の 3 作連用により, ハウレンソウとカブの Cd 濃度は低下した(内藤・佐藤, 2007). 牛ふん堆肥の施用により土壌中の交換態 Cd が減少し, ダイズ, ハウレンソウの Cd 濃度は低下した(吉川・瀧, 2009). オガクズ牛ふん堆肥の連用は, 交換態 Cd 濃度を低く抑えた(柿内, 2009). 家畜ふん堆肥のリン酸, カリを基準に施用量を決めれば, 随伴する重金属も抑えられると考えられた(松波ら, 2009b).

リン酸質肥料の連用により土壌中の U 濃度は上昇するが, その多くは土壌有機物あるいは非晶質の Fe/Al 鉱物と結合する形態であった(Yamaguchi *et al.*, 2009).

粒状シリカに二酸化チタンをコーティングした触媒を用いることにより, 塩酸酸性廃液の六価クロムを効率的に光触媒反応で処理できた(Saeki *et al.*, 2010).

愛媛県の工業都市において雨水の元素濃度が調査され, 近隣起源と大気輸送起源の推定がなされた(越智ら, 2007).

ベトナムの紅河デルタとメコンデルタにおいて, 地下水中の As 濃度と住民の頭髮中 As 濃度には正の相関が認めら

れた(Agusa *et al.*, 2009). ベトナムとカンボジアの地下水 As 汚染の実態, 簡易対策, 住民の健康影響等に関する調査がとりまとめられた(Agusa *et al.*, 2010).

#### 5) 農薬, 微量有機化合物

建築廃材には防腐防蟻剤の CCA (主成分は Cr・Cu・As 化合物)を含むものがあり, 不適切な処理による環境汚染が懸念された(康ら, 2009). クロロホルム燻蒸による土壌殺菌は, Mn, Co, Cd の存在形態を変化させ, 溶解しやすい形態の割合を増加させた(Suda *et al.*, 2009).

土壌消毒が N の形態と微生物群集構造に及ぼす影響の大きさは, 蒸気消毒 > クロロピクリン > 臭化メチルの順であった(Yamamoto *et al.*, 2008). 堆肥に残留している除草剤成分クロピラリドに起因するミニトマト, ダイズ, サヤエンドウの生育障害が認められた(佐藤ら, 2010). ヘプタクロルエポキシドの吸収を抑制するには, 活性炭が有効であった(Murano *et al.*, 2009). ウリ科植物の導管液中デイルドリン濃度は, 他の植物より顕著に高かった(Murano *et al.*, 2010). キュウリ地上部のデイルドリン濃度と 50 %メタノール・水 (v/v) 抽出した土壌中濃度との間には相関があり, 栽培前予測に有効と考えられた(Sakai *et al.*, 2009).

#### 2. 水質および地域環境関係

##### 1) 水質一般

北海道では硝酸態窒素等による地下水汚染の防止・改善事例集が発行された(志賀・中津, 2009). そのなかで, 硝酸態窒素が基準値を越えた井戸の約 8 割が年平均降水量 800 mm 以下の地域にあること, 潜在的汚染リスクの高い流域では融雪水の浸透時に硝酸態窒素濃度が上昇することが報告され, 緑肥やデントコーン植生帯等の効果も調べられた. 滋賀県では, 水稻栽培における化学肥料や農薬の削減による環境保全効果が調査され, 栄養塩類・農薬の流出予測モデルが開発された(柴原, 2008).

湖沼については, 霞ヶ浦, 琵琶湖, 印旛沼, 手賀沼, 児島湖, 諏訪湖の水質および保全対策が比較された(田淵, 2008a). 湖沼水質保全計画では発生源毎の排出負荷量の見積もりが重要であるが, 自然界に存在するバックグラウンド負荷を考慮する必要性が強調された(田淵, 2008b).

窒素汚染と有機性資源に関連した窒素負荷の関係(前田, 2007a)および問題解決のためのモデル活用の重要性等が記された(前田, 2007b).

##### 2) 栄養塩等の流出負荷

###### (1) 集水域からの流出

北海道網走川水系の 18 河川において, 土地利用が水質に及ぼす影響が検討された(岡澤ら, 2008) また, 網走地域の河川では, 畑草地面積率と硝酸態窒素濃度に高い相関がみられた(岡澤ら, 2009). 標津川流域において降雨イベントに伴う窒素流出を調査したところ, 粒子状窒素と懸濁物質濃度は地表面流出に関連しており, 硝酸態窒素は早い中間流出によって運搬されると考えられた(Jiang *et al.*, 2010). 北海道 212 市町村における農地余剰リンを計算したところ, 2/3 以上で負の値から 30 kg ha<sup>-1</sup>であったが,

畑地と畜産の混合地域では31~72 kg ha<sup>-1</sup>であった。一方、河川水全リン濃度は多くの地点で1 mg L<sup>-1</sup>以下であった (Woli *et al.*, 2008)。牧之原台地では、茶園への施肥削減にともなって、周辺の茶園排水路、湧水、地下水、小河川等に水質改善がみられた (Hirono *et al.*, 2009)。愛知では、畜産業と露地野菜栽培の盛んな赤黄色地帯の河川水をモニタリングした結果、流出窒素の由来は野菜畑の浸透水と家畜浄化槽排水であり、リンについては家畜浄化槽排水と土壌侵食を伴う表面流出であると推定された (槽谷ら, 2010)。熊野古道では、世界遺産登録前のバックグラウンドデータをとる目的で水環境が調査され、概ね良好な水質であった (浅岡ら, 2008)。土器川扇状地では、湧水の状態や農業用水の利用実態が調査された (山本ら, 2008)。

谷津農業集水域における降雨時の硝酸態窒素流出特性が、灌漑期、直接流出、先行降水量の観点から考察された (加藤ら, 2009)。水田および集約的畜産地帯において、地域の窒素・リン酸過剰条件の違いが河川水水質に及ぼす影響が比較された (Mishima *et al.*, 2007)。千葉県野田市において、地下水、肥料、合成洗剤の窒素・硫黄安定同位体比から、各地区での硝酸態窒素汚染の原因が推定された (村松ら, 2010)。

ジャワ島では、土壌、植物、河川水中のケイ素含有量と土壌母材、土地利用との関係が調べられた (Husnain *et al.*, 2008)。ラオス・ビエンチャンの農業用水路を対象に、水田、宅地、その他の土地利用面積を説明変数とする、全窒素、全リン、COD濃度を推定する重回帰モデルが開発された (加藤ら, 2008)。

#### (2) 水田からの流出

丸亀平野二毛作水田域における湧水の硝酸態窒素濃度が調査され、冬作の施肥由来窒素が稲作灌漑期に排出されると推定された (吉川ら, 2008)。八郎潟干拓地大区画水田における移植前落水に伴う水質汚濁負荷は、前歴が畑の場合、水田の場合よりも2~3倍高くなった (原田ら, 2008)。冷温帯地域黒ボク土水田における窒素、リンの流出特性を調査したところ、差し引き排出負荷量はそれぞれ36, 0.5 kg ha<sup>-1</sup>であった (松浦ら, 2010)。琵琶湖岸の水田群では、循環取水率の増加による差し引き負荷削減効果はリンで現れやすいことがわかった (濱ら, 2008)。

水稲に対する追肥の窒素形態や施肥量が窒素利用率と田面水の養分動態に与える影響が<sup>15</sup>Nを用いて調べられた (土田ら, 2009)。児島湖周辺の水田では、リン、カリウムの減肥実証試験が行われた (赤井, 2010)。水田排水中のCOD/TOC濃度の平均値は田面水で1.5~1.7であった (人見ら, 2009)。フィリピンでは、遺伝子型の異なるイネを栽培し、節水灌漑の効果が調べられた (Bueno *et al.*, 2010)。

牛ふん尿を原料としたメタン発酵消化液を飼料イネに施用したところ、浸透水として排出される窒素は施用量の4%以下であった (須永ら, 2009)。有機栽培において、水稲移植時に有機質肥料 (魚粉, むか) を適切に施用すれば、収量増加と雑草制御が期待できることが示された (Kato *et*

*al.*, 2010b)。

ハス田群からの差し引き流出負荷量は、窒素で-3.2 kg km<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, リンで1.9 kg km<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, CODで75.4 kg km<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, SSで1906 kg ha<sup>-1</sup> y<sup>-1</sup>であった (黒田ら, 2010)。

#### (3) 水田の水質浄化機能による負荷低減

滋賀県の「環境こだわり農業」を実践する地域において、水稲作付期の栄養塩類、濁水、農薬の流出負荷低減効果が実証された (蓮川ら, 2009)。静岡では茶園から流出する硝酸態窒素濃度の高い河川水を休耕田に通年湛水する現地試験が実施され、12月~2月の除去窒素量は0.12~0.17 g m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>であった (新良・渥美, 2007)。水田土壌カラムに42 mg L<sup>-1</sup>の硝酸態窒素を15 mm d<sup>-1</sup>で通水すると、硝酸態窒素は脱窒によってほぼ完全に除去された。しかし、浸透速度がそれよりも大きいと、硝酸態窒素の除去が不十分となり、浸透水中の亜酸化窒素濃度が上昇した (槽谷, 2008)。イネを栽培した土壌に硝酸態窒素濃度の高い灌漑水を供給し、脱窒量の土壌間差が調べられた (亀和田, 2008)。また、無栽培の水田にプラスチックトンネルを設置することにより、脱窒による窒素浄化機能が向上した (Kuroda *et al.*, 2010)。

灌漑期における霞ヶ浦湖岸水田の用排水機場を利用する地域を対象に調査したところ、窒素、リン、CODについては灌漑システムにおける循環利水による負荷削減効果が大きく寄与していた (北村ら, 2010)。また、河川から常時流入のないオフストリーム型ため池による栄養塩負荷の流出抑制効果が調べられた (中桐ら, 2009)。

#### (4) 畑地等からの流出

硝酸溶脱が起こりやすい砂丘未熟土に、重窒素標識した牛ふん堆肥と硫酸を併用あるいは単用し、窒素溶脱、作物吸収、土壌残存等を調査したところ、冬作に施用した堆肥由来窒素の溶脱は翌春から始まり、2年半後まで継続すること、硫酸の併用は堆肥分解を初年度のみ促進すること等が示された (井原ら, 2009)。また、黒ボク土による同様の試験では、標識硫酸由来窒素は主に施用2年目に溶脱すること、標識堆肥由来窒素は多くが土壌残存し、2年半の試験期間中は継続して作物に吸収されること等がわかった (井原ら, 2010)。黒ボク土と褐色低地土において牛ふん堆肥併用時の硫酸由来窒素を1年半にわたって調査したところ、いずれの土壌でも牛ふん堆肥の併用によって、硫酸由来窒素の溶脱量は低減した (松波・三浦, 2010)。また、メタン発酵消化液の黒ボク土畑施用が窒素溶脱および温室効果ガス発生に与える影響を調べた調査では、消化液は硫酸と同等の肥料効果および溶脱特性であった (中村ら, 2009)。

さまざまな緩効性窒素肥料を用いてコマツナを栽培し、窒素吸収量、窒素溶脱量、亜酸化窒素発生量の違いが調査された (Amkha *et al.*, 2007)。褐色森林土、岩屑土、黄色土、灰色低地土を充填したライシメータにウメ樹を植栽し、浸透水を調査したところ、硝酸態窒素溶脱量は灰色低地土で最大であった (岡室ら, 2010)。

水蒸気処理した刈芝および処理過程で排出された処理液

が芝の生長、透水路の水質等に及ぼす影響を調べたところ、水蒸気処理刈草は微生物活性を促進し、化学肥料の一部を代替できることが示唆された (Ushiwata *et al.*, 2007).

硝酸態窒素の溶脱機構を解明するには、土壌への吸着能を理解する必要がある。土壌 pH と共存陰イオンが異なる条件で黒ボク土の硝酸態窒素吸着と移動遅延の関係が解析された (前田ら, 2008)。茨城県の黒ボク土畑に各種資材を10年連用すると、化学肥料区では施用窒素の約5割、豚ふん堆肥区では約1/4に相当する1800~2300 kg ha<sup>-1</sup>の硝酸態窒素が深さ4.5 mまでに蓄積しており、2.5 m付近では硫酸イオン含有量と土壌 pH が低いため、硝酸態窒素吸着量が多いことが報告された (Maeda *et al.*, 2008)。北海道では、黒ボク土の各層位を対象にカラム浸潤実験が行われ、硝酸態窒素の水に対する相対移動速度は0.5~1であり、B, C層≦埋没A層< Ap層の順であった (三木ら, 2009)。

#### (5) 畑地からの溶脱低減技術

トウモロコシを栽培したマサ土からの硝酸態窒素溶脱を梅雨時期に抑制するには、栽植密度を高くして窒素吸収と蒸発散を増加させることが有効であった (Hashimoto *et al.*, 2007)。高級脂肪酸を添加した茶園土壌を用いたポット試験を行ったところ、施用窒素の有機化によって、窒素溶脱量が低減することがわかった (森田ら, 2009)。黒ボク土では、コマツナ栽培にアセトアルデヒド濃縮尿素肥料を用いると、窒素溶脱と亜酸化窒素放出を低減できた (Amkha *et al.*, 2009)。茨城県のレンコン栽培では、被覆肥料による窒素減肥と節水管理を導入することで、窒素排出量が慣行より41%低減できた (折本・武井, 2007)。

#### (6) 溶存炭素の流出

土壌-河川-海を結ぶ溶存有機炭素 (DOC) の動態と機能に関する本が刊行され、土壌からの DOC 供給プロセス、河川および海洋中での DOC の挙動と生元素の移動・循環についてまとめられた (日本土壌肥科学会, 2011)。水田土壌の作土層を用いたカラム実験により、作土層は流出有機物の供給源となる可能性が示唆された (濱田ら, 2009)。

#### 3) 水処理技術

傾斜土槽法をため池の水質改善に用いたところ、全リン、CODの除去に効果的であった (角道ら, 2008)。バラロックウール栽培廃液に含まれる硝酸態窒素を低コストで除去する技術として、水田土壌とメタノールを利用する方法が開発された (横田・大森, 2008)。高濃度にマンガン (Mn) を含む地下水を浄化するため、次亜塩素酸を用いた連続接触ろ過除 Mn 法および Mn 酸化菌による方法が検討された (久田ら, 2008)。メタン発酵消化液の脱水ろ液を蒸留して得られたアンモニア水溶液からリン酸マグネシウムアンモニア (MAP) としてアンモニアを回収する方法が検討された (山岡ら, 2008)。

#### 4) 窒素動態モデルによる解析

本学会誌においては、講座「モデルによる土壌、農耕地、流域における窒素動態の理解」が連載され、異なるスケー

ルでの窒素動態モデルの概要と有効性が整理された (犬伏ら, 2007)。まず、西尾 (2007) が土壌中における窒素動態モデルを CN マルチコンパートメントモデルと <sup>15</sup>N 追跡モデルに分けて整理し、有効性と問題点を指摘した。次いで、前田 (2008) は、畑地における窒素溶脱を予測するために開発された既存の包括的窒素動態モデルや窒素動態モデルの基本事項を整理するとともに、近年わが国で開発された SOILN-jpn を紹介した。続いて、江口 (2008) は、水畔域を含む地形連鎖系での窒素動態を調査する手法を解説し、水畔域における脱窒能を規定する要因を整理した。木村 (木村, 2008, Kimura *et al.*, 2009) は、モデルで考慮するスケールの考え方を整理し、さまざまな広域モデル (全球モデル、行政単位モデル、地域/流域モデル) を紹介した。また、広域モデルの推定結果が持つ不確実性や検証の難しさに言及した。

唐ら (2007) は、畑地における窒素収支および余剰水から地下水の硝酸態窒素汚染リスクを算出するソフト NiPRAS を開発し、その利用方法を紹介した。河北潟地域を対象に複合型タンクモデルによって全窒素、全リンの流出負荷を推定したところ、土地利用が水質負荷に大きく関与していることがわかった (瀧本ら, 2010)。

#### 5) 窒素収支・フロー解析

1961年~2005年の統計データに基づいた窒素フローの見積りによると、食料と飼料の消費増大にともなう環境への窒素負荷は1980年代まで徐々に増加し、その後減少傾向にあった。また、モデルで推定した河川水窒素濃度の変化は測定値とほぼ対応し、食料の供給と消費が水質に大きな影響を与えていることが示唆された (Shindo *et al.*, 2009)。

手取川扇状地における生活排水処理水による窒素負荷は年間186 tになり、この内58%は公共下水道に未接続によるものと想定された (丸山ら, 2010)。土地利用型畜産の飼料調達実態と窒素フローを調査したところ、「放牧タイプ」の方が「複合タイプ」よりも窒素流出リスクが小さかった (白波・小林, 2009)。大規模牧場の窒素収支の特徴と環境負荷低減のあり方が検討された (服部・高松, 2009)。

#### 6) 土壌侵食

沖縄では、サトウキビ休閑期に緑肥作物を栽培することによって、赤土流出量を1/2~1/3に低減できることが示された (宮丸ら, 2008)。

#### 3. 畜産関係

##### 1) 水稲、野菜、果樹栽培への家畜ふん堆肥等の利用、有機資源の循環利用

都道府県の施肥基準値と堆肥の使用基準値データベースおよび作物の収穫物養分含有率のデータベースが構築され、わが国の肥料成分の需要量が概算された (金澤, 2009)。水稲では、不耕起栽培継続田からの無機態リン酸溶脱量について、肥料成分の降下浸透が土壌孔げきの発達と水移動の影響を受けやすく、また耕起により抑制されること、家畜ふん堆肥の利用を前提とした場合、リン酸投入量が増える

傾向があることが明らかとなった (大家ら, 2007). また, 行政的な支援をうけて急激に普及が進む飼料用イネの栽培について, 家畜ふん堆肥を有効利用した栽培方法が解説された (原田, 2010).

野菜では, 有機質資材を用いたハウス夏秋どりトマトについて, 現行の北海道施肥ガイド等の基準に従って魚かすなどの有機質資材を適正に施用することで可能であり, 無化学肥料栽培指針が策定された (八木ら, 2008). また, 近畿地域における冬野菜栽培について未熟な樹木チップを用いたマルチ処理により, 低温期に緑色を保ち, キャベツでは生育・収量がよくなり, 雑草を抑制する効果があることも明らかとなった (内山・佐野, 2007). 堆肥施用量と窒素施用量を変えて栽培したダイコンの124種の代謝成分を網羅的に分析した結果, 根部よりも葉部で施肥による変動が顕著に認められ, アミノ酸含量は無機態窒素施用量と関係し, 葉部の有機酸は無機態窒素および堆肥施用量との関係が認められた. 堆肥施用量が増えるにつれて, リンゴ酸, ミオイノシトールリン酸, ショ糖が減少し, シキミ酸, アラビノース, メチオニンが増加することが明らかとなった (Okazaki *et al.*, 2010).

ウメ栽培における肥料高騰対策として, 果樹における三要素の養分吸収量, 家畜ふん堆肥の肥料的利用など「家畜ふん堆肥を利用した施肥指針」がとりまとめ, 土壤診断による果樹園の実態と改善方向が示された (横谷, 2010a). 和歌山県におけるウメ栽培は, 養水分の保持能力が低い地域に展開されているが, 椰子殻堆肥の表面施用により, 収量, 樹体養分など牛ふんオガクズ堆肥と同等の効果が得られ, 3年経過後も分解せずに残存することから, 施用回数の削減による省力化が期待された (大江ら, 2007). ウメ園土壌の夏期の地温上昇特性および高地温がウメ樹体に及ぼす影響について検討したところ, 日中8時間40℃以上の地温に遭遇すると, 光合成速度, 水ポテンシャルが低下することが明らかとなり, ソルゴー敷草やヘアリーベッチ草生は夏期の地温上昇を抑制する効果が認められた (岡室ら, 2010). ポット試験により根域肥料濃度の違いが「南高」の成長に及ぼす影響が検討され, 肥料濃度が高いと地下部の生育や幹肥大が劣り, 窒素の過剰な吸収による葉縁部の枯死などが認められ, 生育におけるECの適正域は0.5~1.0 ds m<sup>-1</sup>と考えられた (大江・岩尾, 2009). 和歌山県の樹園地における土壤診断基準や樹園地土壌の実態として可給態リン酸が蓄積傾向にあること, 和歌山県で開発された施肥設計支援システムが解説された (横谷, 2010b).

食品系廃棄物の循環利用について, 現在のリサイクル率は18%程度であるが, 今後, リサイクル率を高めることに貢献できる技術として, 大阪府で開発された食品廃棄物の蒸洗クッカーによる油分の除去技術, 豆腐かすサイレージなどの飼料化技術, メタン発酵消化液によるユーグレナ培養などのエネルギー化技術が紹介された (西村, 2009). 北海道の試験成績, 施肥ガイドをもとに有機物施肥の土づくり効果や施肥対応などが解説された (東田, 2009). 都市

公園で年間約17万トン発生する整枝剪定屑について, 枝と葉を分離, 回収することが検討され, 葉と枝の特性を生かした資材の調整による利用促進が期待される (邑瀬ら, 2007). 「土壤管理のあり方に関する意見交換会」報告書が取りまとめられ, 有機質資材の施用上限や土壤炭素蓄積に配慮した有機物施用量が提示された (木村ら, 2008b).

## 2) 堆肥品質の安定化と環境負荷低減, 堆肥の肥効評価

2004年に家畜排せつ物法が完全施行され2008年度には99.9%の高い達成率が実現されたが, 経営の大規模化, 家畜ふん尿の偏在化が一層進み, 流通利用の必要性が増している. その後, 家畜排せつ物法が改定され, 耕畜連携の強化, ニーズに即した堆肥づくり, エネルギーとしての利用がポイントとされ, 低コストで実用的な技術開発への期待が高まっている背景と現在の堆肥化技術, エネルギー利用促進, 窒素・リンの排水規制, 悪臭防止技術, エネルギー利用促進技術が解説された (羽賀, 2010). 付加価値の高い有機質肥料として販売することにより広域流通を実現する堆肥のペレット化技術が解説された (村上・原, 2010). 堆肥品質の安定化に向けて, 堆肥化促進微生物資材の特許登録状況, 日本土壤肥料学会による「微生物資材評価に関する提言」, さらには1981~1994年に55点の資材が圃場試験で評価されたが明らかに効果がある資材が見いだされないことが問題であること, などが紹介された (染谷, 2007). また, 土壤有機物含量と関係することが知られているCIELAB色変数について, 堆肥については, 堆肥を入れたペトリ皿の底からミノルタのカラーリーダーにより読み取ることが可能であり, 堆肥の安定性評価に用いることが可能であった (Khan *et al.*, 2009).

簡易に鶏ふん中の可給態窒素量を評価するため近赤外分光分析の適用が試みられた. 鶏糞中の可給態窒素と尿素態窒素には高い相関が認められることから, 近赤外分析により尿素態窒素を推定することにより, 可給態窒素の評価が可能と考えられた (Fujiwara and Murakami, 2007). 牛ふんパーク堆肥を25年間連用した単色黒ボク土畑土壌を用いて, ラングミュア吸着理論を用いてリン酸最大吸着量を算出した結果, 土壌のリン酸吸着能は堆肥連用に伴って著しく低下していた (八木ら, 2010).

豚ふん堆肥化過程における亜硝酸の蓄積は窒素損失に大きく影響することが明らかとなり, 完熟豚ふん堆肥の添加処理により, 亜硝酸蓄積を防止でき, N<sub>2</sub>Oの排出量を70%低減できることが解明された (Fukumoto and Inubushi, 2009).

## 3) 堆肥利用における安全性の確保

マイクロコロニー自動計数装置を用い, サイバークリーン色素やエチジウムブロマイドを用いた染色により, 堆肥中生菌数を迅速に計数する手法が開発され, 大腸菌とサルモネラ菌に適用することが可能となっている (Wang *et al.*, 2007). 堆肥の安全性について, 米国の生鮮野菜を通じた食中毒事例やわが国の野菜, 食肉の大腸菌汚染状況, 適切な堆肥化処理により大腸菌を殺菌できること, 太陽熱消毒

により大腸菌が土壌に入っても安全化できることが紹介された。(染谷, 2008a) 太陽熱消毒とは、土壌表面に散水し高水分にした状態でビニールマルチをかけ土壌温度を上げる方法であり、これにより土壌温度を通常よりも4~10℃高い31~38℃で推移させた場合、土壌中大腸菌を不検出とすることができ病原微生物の制御に有用と考えられた(染谷, 2008b; Wu *et al.*, 2009). 海外渡航経験のない日本人がヒストプラズマ症を発症することから、ヒストプラズマが日本在来種である可能性を確認するため、コウモリふんを67洞窟から採取、調査したが病原体である *Histoplasma capsulatum* は見つからなかった(Kikuchi *et al.*, 2008a).

#### 4) 草地における施肥, 水質保全

チモシー草地にスラリーを窒素として300 kg ha<sup>-1</sup>の多量施用を行った場合、牧草収量は増加せず、土壌の硝酸態窒素の残存量が増加し、タンパク質及びKの高い収穫物を乳牛に給与するとMgの吸収が阻害されることが確認された(松本ら, 2008). チモシー草地における施肥法として、ふん尿処理物中における肥料成分含有率の簡易推定法、草地に施用したふん尿処理物の肥効評価、採草におけるふん尿主体施肥の実証が取りまとめられた(松本, 2008). 草地・飼料作分野における肥料価格高騰への対策技術が解説され(原田, 2009), 家畜ふん尿の肥料効果を最大限に利用しながら牧草、飼料用トウモロコシ栽培するための方法が解説された(松本ら, 2010).

わが国最大の酪農地帯である北海道東部根釧地域の標津川集水域において、窒素収支を解析した結果、5流域の正味の窒素投入量と川を通じて排出される窒素量には相関が認められたが、排出される窒素は窒素投入量の27%と試算され、残りは脱窒や流域内に保持されていると考えられた。また、揮散したアンモニアの集水域への再沈着割合を100%から0%として試算した場合、正味の窒素投入量は37%減少すると試算された(Hayakawa *et al.*, 2009). 経済的な汚水処理法として世界的に普及しつつある、ヨシ濾床人口湿地による搾乳牛舎排水(パーラー排水)の浄化処理が北海道の酪農家に設置され、その効果や課題が把握された(加藤, 2007; 加藤, 2008; 加藤・井上, 2008a; 加藤・井上, 2008b; 加藤ら, 2009a; 加藤ら, 2009b; 加藤ら, 2010a; 加藤ら, 2010b).

#### 5) 水田, 草地における温室効果ガス発生

稲わら春すき込みに代えて家畜ふん堆肥を水田に施用した場合のメタン発生量は、稲わら区に比較して、牛たい肥では37~51%, 豚たい肥では72~121%, 鶏たい肥では14%と減少したが、稲わら回収コストはメタン低減効果による炭素価格を上回ると試算された(熊谷ら, 2010). 北海道東部の採草地における温室効果ガスの発生量評価とその低減方策が検討された(有田・甲田, 2008). 北海道東部の粗飼料生産過程における温暖化負荷が評価された(有田・三宅, 2010). モンゴル国のイネ科を主体とする草原における生態系呼吸速度は、植物バイオマスと正の相関があり、1次関数で近似され、推定残渣は土壌水分と2次関数で良

くあらわされた。また、温度感度(Q<sub>10</sub>)は土壌水分に対して弱い正の相関が認められたことから、地温、地上部バイオマス、土壌水分により生態系呼吸速度が近似できると考えられた(Nakano and Shinoda, 2010).

北海道南部のリードカナリーグラス草地において、化学肥料、窒素降下物、堆肥由来窒素、土壌・根由来の総無機態窒素量の58%が植物に利用されており、土壌、根リターも重要な無機態窒素供給源となっていた。また、総無機態窒素から植物吸収量の差が、N<sub>2</sub>O放出量と強い正の相関があり、放出係数は1.2%であった。また、降水量の増加によりN<sub>2</sub>O放出係数が増加した(Shimizu *et al.*, 2010). 北海道のチモシー草地を対象にN<sub>2</sub>O、CH<sub>4</sub>フラックスを2年間にわたり測定した結果、施用窒素あたりのN<sub>2</sub>Oの排出係数は0.0024であり、日本の排水良好な畑地の値0.0032に近く、施用資材(消化液、化学肥料)、施用時期(春施用、秋施用)の違いによる影響は小さかった。また、年間CH<sub>4</sub>吸収量に年次間差が認められ、降水量の少ない年で高い値であった(Sawamoto *et al.*, 2010). 乳牛スラリーを草地に表面施用した場合、スラリーの施用量、アンモニア濃度、pHや土壌水分、気温がアンモニア揮散に関する要因であり、スラリー中のアンモニアが施用直後から揮散しなくなるまでの揮散割合は、スラリーの施用量が60 Mg ha<sup>-1</sup>以下では0.32、60 Mg ha<sup>-1</sup>以上では0.42が平均値であった(Matsunaka *et al.*, 2008).

那須地域における火山灰土壌に立地する草地において、堆肥施用直後に見られるN<sub>2</sub>Oの放出は、草地からの年あたりのN<sub>2</sub>O放出量を増加させたが、CH<sub>4</sub>放出量には堆肥施用の影響は認められなかった。土壌のアンモニア態窒素、温度、水分はN<sub>2</sub>O放出に関する要因であり、降水量は年間のN<sub>2</sub>OおよびCH<sub>4</sub>発生量に影響していた(Mori *et al.*, 2008).

集約酪農地帯のオーチャードグラス、イタリアンライグラス採草地において、濃度勾配法によりアンモニアフラックスが調べた結果、草地には16.5 kg-N ha<sup>-1</sup>のアンモニアが乾性沈着していた。家畜ふん尿窒素の大気へのアンモニア発生係数を25%とすると、湿性沈着とあわせた窒素沈着量は地域内でふん尿から発生するアンモニアの7割に相当し、大部分が地域内での循環していると考えられた(Hojito *et al.*, 2010).

#### 6) 土壌を利用した水質浄化技術

通水層の間に混合土壌ブロックをレンガ積層状に配置した多段土壌層装置が家庭排水や汚濁河川水処理にむけて考案された。混合土壌ブロックは砂質土を主成分として、木炭、おがくず、鉄粒からなり、水負荷速度が2000 L m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>以下では、ブロックの表面積が大きいほどSS、COD、TPなどの除去率が高くなった(Chen *et al.*, 2007b). また、マサ土、赤土には下水処理水の脱色能を有しないが、一方、黒ボク土は脱色能を示した。カラム実験により黒ボク土と活性炭を充填した脱色装置では、20倍希釈の畜産排水50 mLについて20日間脱色能を示した(Chen *et al.*, 2007a).

多段土壌層の室内実験装置では、畜産排水の着色物質を60~67%、CODの48~58%の除去が6週間維持された。送気量を増やすことは脱色能、COD除去能を高めた。おがくず、鉄粒の添加は実験5~6ヶ月目の脱色率、COD除去率を高めた(Chen *et al.*, 2007c)。また、多段土壌層により、BODが30および70 mg L<sup>-1</sup>の汚水を浄化したところ、SS, BOD, T-N, T-Pはそれぞれ90, 88, 83, 44, 63%以上が浄化されたが、高濃度処理により目詰まりが生じたため、周期的な休止期間を入れた運転サイクルが必要であった(Masunaga *et al.*, 2007a)。この多段土壌層の室内実験装置を用いた汚水処理時に発生する温室効果ガスの放出特性として、正味のCO<sub>2</sub>フラックスは水負荷速度の影響が小さく、CH<sub>4</sub>は装置内で消費され、N<sub>2</sub>O放出は汚濁物質含量の高い汚水処理で抑制出来ることを明らかにした(Masunaga *et al.*, 2007b)。

## 文 献

- Abe, K., Sakurai, Y., Okuyama, A., Sasaki, K., and Tawarada, K. 2008a. *J. Sci. Food. Agric.*, **89**, 1097-1100.
- Abe, T., Fukami, M., and Ogasawara, M. 2008b. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **54**, 566-573.
- Agusa, T., Inoue, S., Kunito, T., Minh, T.B., Ha, N.N., Tu, N.P.C., Trang, P.T.K., Iwata, H., Viet, P.H., Tuyen, B.C., and Tanabe, S. 2009. *Int. J. Environ. Stud.*, **66**, 49-57.
- Agusa, T., Kunito, T., Kubota, R., Inoue, S., Fujihara, J., Minh, T.B., Ha, N.N., Tu, N.P.C., Trang, P.T.K., Chamnan, C., Takeshita, H., Iwata, H., Tuyen, B.C., Viet, P.H., Tana, T.S., and Tanabe, S. 2010. *Rev. Environ. Health*, **25**, 193-220.
- 赤井直彦 2010. 圃場と土壌, **42**, 38-42.
- Amkha, S., Inubushi K., and Takagaki M. 2007. *Jpn. J. Tropical Agriculture*, **51**, 152-159.
- Amkha, S., Sakamoto A., Tachibana M., and Inubushi K. 2009. *Soil Sci. Plant Nutr.* **55**, 772-777.
- Arao, T., Takeda, H., and Nishihara, E. 2008. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **54**, 555-559.
- 荒尾知人 2009. 土肥誌, **80**, 58-62.
- Arao, T., Kawasaki, A., Baba, K., Mori, S., and Matsumoto, S. 2009a. *Environ. Sci. Technol.*, **43**, 9361-9367.
- Arao, T., Maejima, Y., and Baba, K. 2009b. *Environ. Sci. Technol.*, **43**, 1097-1101.
- Arao, T., Ishikawa, S., Murakami, M., Abe, K., Maejima, Y., and Makino, T. 2010. *Paddy Water Environ.*, **8**, 247-257.
- 有田敬俊・甲田裕幸 2008. 北海道東部の採草地における温室効果ガスの発生量評価と低減の可能性, 北海道農業試験会議資料, 1-28.
- 有田敬俊・三宅俊介 2010. 北海道東部の粗飼料生産過程における温暖化負荷の評価, 北海道農業試験会議資料, 1-47.
- 浅岡 聡・畑野祥久・青野 求 2008. 土肥誌, **79**, 27-36.
- Baba, K., Arao, T., Maejima, Y., Watanabe, E., Eun, H., and Ishizaka, M. 2008. *Anal. Chem.*, **80**, 5768-5775.
- 馬場浩司 2009. 土肥誌, **80**, 297-303.
- 馬場康尋・後藤逸男 2009. 土肥誌, **80**, 271-274.
- Bueno, C.S., Bucourt, M., Kobayashi, N., Inubushi, K., and Lafarge, T. 2010. *Agricultural Water Management*, **98**, 241-250.
- Chen, X., Sato, K., Wakatsuki, T., and Masunaga, T. 2007a. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **53**, 189-197.
- Chen, X., Sato, K., Wakatsuki, T., and Masunaga, T. 2007b. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **53**, 206-215.
- Chen, X., Sato, K., Wakatsuki, T., and Masunaga, T. 2007c. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **53**, 509-516.
- Chen, Z., Setagawa, M., Kang, Y., Sakurai, K., Aikawa, Y., and Iwasaki, K. 2009. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **55**, 315-324.
- 江口定夫 2008. 土肥誌, **79**, 213-227.
- Falandysz, J., Kunito, T., Kubota, R., Lipka, K., Mazur, A., Falandysz, J.J., and Tanabe, S. 2007. *J. Environ. Sci. Health Part A*, **42**, 1615-1623.
- Falandysz, J., Kunito, T., Kubota, R., Gućia, M., Mazur, A., Falandysz, J.J., and Tanabe, S. 2008. *J. Environ. Sci. Health Part B*, **43**, 187-192.
- Fujiwara, H. 2010. *Bull. Natl. Inst. Agro-Environ. Sci.*, **27**, 85-115.
- Fujiwara, T. and Murakami, K. 2007. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **53**, 102-107.
- Fukumoto, Y. and Inubushi, K. 2009. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **55**, 428-434.
- 古館明洋・乙部裕一 2009. 土肥誌, **80**, 506-510.
- 後藤茂子・山岸順子・米山忠克・茅野充男 2008. 土肥誌, **79**, 17-26.
- Jiang, R., Woli K.P., Kuramochi K., Hayakawa A., Shimizu M., and Hatano R. 2010. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **56**, 72-85.
- 羽賀清典 2010. 畜産学会報, **81**, 207-211.
- 濱田康治・小松一弘・久保田富次郎・人見忠良・白谷栄作・高木強治 2009. 農業農村工学会論文集, **260**, 121-122.
- 濱 武英・中村公人・川島茂人・三野 徹 2008. 農業農村工学会論文集, **257**, 11-17.
- 原田久富美 2010. 圃場と土壌, **42**, 62-67.
- 原田久富美 2009. [http://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/nenyu\\_koutou/n\\_kento/pdf/3siry011.pdf](http://www.maff.go.jp/j/seisan/kankyo/nenyu_koutou/n_kento/pdf/3siry011.pdf)
- 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**, 53-60.
- Hasegawa, H., Tsukada, H., Kawabata, H., Chikuchi, Y., Takaku, Y., and Hisamatsu, S., 2009. *J. Environ. Radioact.*, **100**, 54-57.
- Hashimoto, M., Herai Y., Nagaoka T., and Kouno K. 2007. *Soil Sci. Plant Nutr.* **53**, 300-309.
- Hashimoto, Y., Matsufuru, H., Takaoka, M., Tanida, H., and Sato, T. 2009a. *J. Environ. Qual.*, **38**, 1420-1428.
- Hashimoto, Y., Takaoka, M., Oshita, K., and Tanida, H. 2009b. *Chemosphere*, **76**, 616-622.
- 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. 滋賀農技セ研報, **48**, 1-21.
- 服部俊宏・高松利恵子 2009. 農業農村工学会論文集, **260**, 77-84.
- Hayakawa, A., Woli, K. P., Shimizu, M., Nomaru, K., Kuramochi, K., and Hatano, R. 2009. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **55**, 800-819.
- 東田修司 2009. 圃場と土壌, **41**, 40-45.
- Hirono, Y., Watanabe, I., and Nonaka, K. 2009. *Soil Sci. Plant Nutr.* **55**, 783-792.
- 久田紀夫・岡室美絵子・森下年起・宇田 毅 2008. 和歌山県農林水技セ研報, **9**, 21-28.
- 人見忠良・三浦 麻・濱田康治・吉永育生・久保田富次郎・白谷栄作 2009. 農業農村工学会論文集, **261**, 95-96.
- Hobara, S., Mizuno, N., Amano, Y., Yokota, H., and Taniyama, H. 2009. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **55**, 582-589.
- Hojito, M., Hayashi, K. and Matsuura, S. 2010. *Soil Sci. Plant Nutr.*, **56**, 503-511.
- 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**, 116-122.
- 星野 卓・門倉綾子・遠藤由紀夫・白鳥 豊・本間利光 2008. 新潟

- 農総研報, 9, 99-102.
- Hseu, Z.Y., Su, S.W., Lai, H.Y., Guo, H.Y., Chen, T.C., and Chen, Z.S. 2010. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56, 31-52.
- Husnain, Wakatsuki T., Setyorini D., Sato K., and Masunaga T. 2008. *Soil Sci. Plant Nutr.* 54, 916-927.
- Ibaraki, T., Kuroyanagi, N., and Murakami, M. 2009. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 55, 421-427.
- 井原啓貴・前田守弘・高橋 茂・駒田充生・太田 健 2009. 土肥誌, 80, 494-501.
- 井原啓貴・前田守弘・駒田充生・太田 健 2010. 土肥誌, 81, 489-798.
- 今井清之・柴原藤善・堀田 悟・小野信一 2009. 滋賀農技セ研報, 48, 23-34.
- Inoue, K., Tanaka, K., and Ono, Y. 2009. *Waste Management*, 29, 2969-2975.
- 大伏和之・糟谷真宏・渡辺 武 2007. 土肥誌, 78, 617-618
- Ishikawa, N.K., Tagami, K., and Uchida, S. 2008a. *J. Nucl. Sci. Technol., Sup.* 6, 146-151.
- Ishikawa, N.K., Uchida, S., and Tagami, K. 2008b. *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 277, 433-439.
- 石川奈緒・田上恵子・内田滋夫 2009. 日本原子力学会和文論文誌, 8, 313-319.
- 石川 覚 2008. 土肥誌, 79, 408-416.
- 伊藤篤史・村山重俊・池田順一・福永亜矢子・堀 兼明 2010a. 土肥誌, 81, 563-572.
- 伊藤純雄・菊地 直・加藤直人 2010b. 中央農研研究報告, 14, 1-15.
- 柿内俊輔 2009. 土肥誌, 80, 54-57.
- 亀和田國彦 2008. 栃木県農業試験場研究報告, 63, 27-34.
- Kamewada, K., and Nakayama, M. 2009. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 55, 441-451.
- 金澤健二 2009. 中央農研研究報告, 12, 27-50.
- 糟谷真宏 2008. 土肥誌, 79, 376-379.
- 糟谷真宏・坂西研二・板橋直・荻野和明・廣戸誠一郎 2010. 土肥誌, 81, 481-488.
- 角道弘文・生地正人・末次 綾・日下部貴規 2008. 農業農村工学会論文集, 255, 95-102.
- 加藤邦彦・家次秀浩・木場稔信・富田邦彦 2009a. 農業農村工学会誌, 77, 50-51.
- 加藤邦彦 2007. *DairyJapan*, 52, 22-27.
- 加藤邦彦 2008. *DAIRYMAN*, 58, 44-45.
- 加藤邦彦・井上 京 2008a. *DairyJapan*, 53, 57-61.
- 加藤邦彦・井上 京 2008b. *DairyJapan*, 53, 64-67.
- 加藤邦彦・井上 京・木場稔信・家次秀浩 2009b. 畜産技術, 649, 32-37.
- 加藤邦彦・井上 京・家次秀浩・木場稔信・富田邦彦 2010a. 農家の友, 62, 104-106.
- 加藤邦彦・井上 京・家次秀浩 2010b. *DairyJapan* 2010年10月増刊号, 105-110.
- Kato, M., Ishikawa, S., Inagaki, K., Chiba, K., Hayashi, H., Yanagisawa, S., and Yoneyama, T. 2010a. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56, 839-847.
- Kato, S., Abe D., Miki T., Iwaishi S., Harakawa T., and Inubushi, K. 2010b. *Hort Research*, 64, 25-34.
- 加藤 亮・兒玉健和・小林晋太郎・丹治 肇 2008. 農業農村工学会論文集, 254, 113-120.
- 加藤 亮・宗村広昭・大澤和敏・黒田久雄 2009. 農業農村工学会論文集, 260, 49-55.
- 川地 武 2008. 土肥誌, 79, 209-211.
- Kawasaki, A., and Yada, S. 2008. *J. Nucl. Sci. Technol., Sup.* 6, 138-142.
- Khan, M.A.I. Ueno, K., Hiromoto, S., Komai, F., Someya, T., Inoue, K., Tanaka, K., and Ono, Y. 2009. *Waste Management*, 29, 2969-2975.
- 康 峪梅・大谷真菜美・櫻井克年 2009. 環境科学会誌, 22, 329-335.
- Kien, C.N., Noi, N.V., Bang, N.D., Son, L.T., Tanaka, S., Kang, Y., Sakurai, K., and Iwasaki, K. 2009. *Water Air Soil Pollut.*, 197, 75-89.
- Kien, C.N., Noi, N.V., Son, L.T., Ngoc, H.M., Tanaka, S., Nishida, T., and Iwasaki, K. 2010. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56, 344-356.
- Kikuchi, K., Sugita, T., Makimura, K., Urata, K., Someya, T., Sasaki, T., Kamei, K., Niimi, M., Hiramatsu, K., and Uehara, T. 2008a. *Microbiol. Immunol.*, 52, 455-459.
- Kikuchi, T., Okazaki, M., Kimura, S.D., Motobayashi, T., Baasansuren, J., Hattori, T., and Abe, T. 2008b. *J. Hazard. Mater.*, 154, 294-299.
- Kikuchi, T., Okazaki, M., and Motobayashi, T. 2009. *J. Hazard. Mater.*, 168, 89-93.
- 木村和彦・本吉博美・武田 晃・山崎慎一 2008a. 土肥誌, 79, 358-364.
- Kimura, S.D., Hatano R., and Okazaki M. 2009. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 55, 1-12.
- 木村園子ドロテア 2008. 土肥誌, 79, 323-331.
- 木村 武・板橋 直・加藤直人・金子文宜・草場 敬・郡司掛則昭・瀧 勝俊・中辻敏朗 2008b. [http://www.maff.go.jp/j/study/dozyo\\_kanri/pdf/report.pdf](http://www.maff.go.jp/j/study/dozyo_kanri/pdf/report.pdf)
- 北村立実・黒田久雄・山本麻美子・根岸正美・田淵俊雄 2010. 農業農村工学会論文集, 267, 35-41.
- 小宮山鉄兵・藤澤英司・加藤雅彦・森国博全 2009. 土肥誌, 80, 275-279.
- 久保田 洋・菅原玲子・北島信行・矢島 聡・谷 茂 2010. 土肥誌, 81, 118-124.
- 久保田富次郎・人見忠良・濱田康治・白谷栄作・三重野俊彦・塩濱圭治 2009. 農工研技報, 210, 83-99.
- 熊谷勝巳・塩野宏之・森岡幹夫・長沢和弘・中川文彦 2010. 山形県農業研究報告, 2, 1-18.
- 國頭 恭・松本 聰 2010. 地球環境, 15, 37-44.
- Kuroda H. Kato T., Koshigoe Y., Yaegashi D., Horaguti S., Inubushi K., Yamagishi T., and Suwa Y. 2010. *Desalination and Water Treatment*, 19, 146-148.
- 黒田久雄・加藤 亮・中曾根英雄 2010. 農業農村工学会論文集, 265, 47-53.
- Lai, H.Y., Juang, K.W., and Chen, B.C. 2010. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56, 601-606.
- Liu, M.Q., Yanai, J., Jiang, R.F., Zhang, F., McGrath, S.P., and Zhao, F.J. 2008. *Chemosphere*, 71, 1276-1283.
- 前田守弘 2008. 土肥誌, 79, 89-99.
- 前田守弘・田中正一・太田 健 2008. 土肥誌, 79, 353-357.
- 前田守弘 2007. 水環境学会誌, 30, 337-342.
- 前田守弘 2007. 化学と生物, 45, 219-222.
- Maeda, M., Ihara, H., and Ota, T. 2008. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 72, 702-710.
- 牧野知之・神谷 隆・近藤和子 2008. 土肥誌, 79, 101-107.
- Makino, T., Takano, H., Kamiya, T., Itou, T., Sekiya, N., Inahara, M., and Sakurai, Y. 2008. *Chemosphere*, 70, 1035-1043.
- 松本武彦・糟谷広高・扇 勉・寶示戸雅之 2008. 日草誌, 54, 223-229.
- 松本武彦・松中照夫・寶示戸雅之 2010. 循環型酪農へのアプローチ, 酪農ジャーナル臨時創刊号, 134-137.

- 松本武彦 2008. 北海道立農業試験場報告, 121, 1-61.
- Masunaga, T., Sato, K., Mori, J., Shirahama, M., Kudo, H., and Wakatsuki, T. 2007a. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 53, 215-223.
- Masunaga, T., Sato, K., Senga, Y., Seike, Y., Inaishi, T., Kudo, H., and Wakatsuki, T. 2007b. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 53, 173-180.
- Matsunaka, T., Sentoku, A., Mori, K., and Satoh, S. 2008. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 54, 627-637.
- 松波寿弥・三浦吉則 2010. 土肥誌, 81, 549-556.
- 松波寿弥・松田賢士・三浦吉則 2009a. 土肥誌, 80, 219-225.
- 松波寿弥・小川泰正・山崎慎一・三浦吉則 2009b. 土肥誌, 80, 250-256.
- Matsunami, H., Matsuda, K., Yamasaki, S., Kimura, K., Ogawa, Y., Miura, Y., Yamaji, I., and Tsuchiya, N. 2010. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56, 530-540.
- 松浦悠人・嶋 栄吉・眞家永光 2010. 農業農村工学会論文集, 268, 9-16.
- 丸山利輔・能登史和・高橋 強・土原健雄・田中正 2010. 農業農村工学会論文集, 269, 113-119.
- Meharg, A.A., Williams, P.N., Adomako, E., Lawgali, Y.Y., Deacon, C., Villada, A., Cambell, R.C.J., Sun, G., Zhu, Y.G., Feldmann, J., Raab, A., Zhao, F.J., Islam, R., Hossain, S., and Yanai, J. 2009. *Environ. Sci. Technol.*, 43, 1612-1617.
- 三木直倫・松本武彦・加藤英孝 2009. 土肥誌, 80, 365-378.
- Mishima, S.-I., Taniguchi S., Kohyama K., and Komada M. 2007. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 53, 318-327.
- 宮丸直子・儀間 靖・與那嶺介功・亀谷 茂 2008. 土肥誌, 79, 496-499.
- Mizuno, N., Amano, Y., Mizuno, T., and Nanzyo, M. 2008. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 54, 839-845.
- Mori, A., Hojito, M., Shimizu, M., Matsuura, S., Miyaji, T., and Hatano, R. 2008. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 54, 606-617.
- Mori, S., Kawasaki, A., Ishikawa, S., and Arao, T. 2009a. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 55, 294-299.
- Mori, S., Uruguchi, S., Ishikawa, S., and Arao, T. 2009b. *Environ. Exp. Bot.*, 67, 127-132.
- 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, 566-574.
- 村上圭一・原 正之 2010. 畜産コンサルタント, 46, 32-35.
- Murakami, M., Ae, N., Ishikawa, S., Ibaraki, T., and Ito, M. 2008. *Environ. Sci. Technol.*, 42, 6167-6172.
- Murakami, M., Nakagawa, F., Ae, N., Ito, M., Arao, T. 2009. *Environ. Sci. Technol.*, 43, 5878-5883.
- 村松容一・荒井寛末・近藤史也・大城恵理・千葉 仁 2010. 土肥誌, 81, 7-15.
- Murano, H., Otani, T., Makino, T., Seike, N., and Sakai, M. 2009. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 55, 325-332.
- Murano, H., Otani, T., Seike, N., and Sakai, M. 2010. *Environ. Toxicol. Chem.*, 29, 142-148.
- 邑瀬章文・米林甲陽・内山知二・橋本晋・安井宏昭 2007. 日緑工誌, 33, 281-283.
- 内藤健二・佐藤賢一 2007. 埼玉農総研研報, No.7, 6-13.
- Nakamaru, Y., and Sekine, K. 2008. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 54, 332-341.
- 中桐貴生・堀野治彦・松島隆治 2009. 農業農村工学会論文集, 262, 35-40.
- 中村真人・藤川智紀・柚山義人・前田守弘・山岡 賢 2009. 農業農村工学会論文集, 264, 17-26.
- Nakano, T., and Shinoda, M. 2010. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56, 773-781.
- 中津智史・中本 洋・松本武彦・五十嵐俊成・菅原 彰 2010. 土肥誌, 81, 514-517.
- 中山 恵・亀和田國彦・京島理恵 2008. 栃木農試研報, 63, 17-25.
- Narukawa, T., and Chiba, K. 2010. *J. Agric Food Chem.*, 58, 8183-8188.
- 新良力也・渥美和彦 2007. 土肥誌, 78, 299-302.
- 日本土壤肥科学会編 2011. 溶存有機物の動態と機能—土壌—河川—海を結んで—, p.168. 博友社, 東京.
- 西堀康士・柴原藤善・武久邦彦・北川靖夫・久馬一剛 2009. 滋賀農技セ研報, 48, 35-52.
- 西村和彦 2009. 食品・臨床栄養, 5, 19-32.
- 西尾 隆 2007. 土肥誌, 78, 619-626.
- 農林水産省 2010. 汚泥肥料中の重金属管理手引書 [http://www.maff.go.jp/j/syouan/nouan/kome/k\\_hiryo/pdf/tebikisyo.pdf](http://www.maff.go.jp/j/syouan/nouan/kome/k_hiryo/pdf/tebikisyo.pdf).
- 越智久尚・藤田慎二郎・國頭 恭 2007. 人間と環境, 33, 13-20.
- 雄川洋子・稲原 誠 2009. 土肥誌, 80, 589-595.
- 荻山慎一・鈴木弘行・犬伏和之・武田 洋・内田滋夫 2008a. 保健物理, 43, 268-277.
- 荻山慎一・鈴木弘行・坂本一憲・犬伏和之 2008b. 土肥誌, 79, 255-262.
- Ogiyama, S., Suzuki, H., Inubushi, K., Takeda, H., and Uchida, S. 2009. *Radioprotection*, 44, 365-369.
- Ogiyama, S., Suzuki, H., Inubushi, K., Takeda, H., and Uchida, S. 2010a. *Appl. Radiation Isotopes*, 68, 256-264.
- Ogiyama, S., Suzuki, H., Sakamoto, K., and Inubushi, K. 2010b. 食と緑の科学, 64, 9-18.
- Oh, T.K., and Saeki, K. 2009. *Clay Sci.*, 14, 111-116.
- 岡室美絵子・根来圭一・大江孝明 2010. 和歌山県農林水技セ研報, 11, 59-66.
- 岡室美絵子・桑原あき・土田靖久 2010. 園学研, 9, 299-304.
- Okazaki, K., Shinano, T., Oka, N., and Takebe, M. 2010. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56, 591-600.
- Okazaki, M., Kimura, S.D., Kikuchi, T., Igura, M., Hattori, T., and Abe, T. 2008. *J. Hazard. Mater.*, 154, 287-293.
- 岡澤 宏・豊田裕道・島田沢彦・鈴木伸治・竹内 康 2008. 農業農村工学会論文集, 258, 45-50.
- 岡澤 宏・竹内 康・左村 公 2009. 農業農村工学会論文集, 259, 53-59.
- 大江孝明・岩尾和哉 2009. 和歌山県農林水技セ研報, 10, 13-18.
- 大江孝明・林 恭平・北原伸浩・桑原あき 2007. 和歌山県農林水技セ研報, 8, 77-83.
- 大森健司・朝倉健司 2010. 土肥誌, 81, 289-294.
- 大森誉紀 2008. 愛媛農試研報, 41, 41-50.
- 大森誉紀 2009. 愛媛農林水産研報, 1, 27-34.
- 大家理哉・山本章吾・久山弘巳 2007. 土肥誌, 78, 237-243.
- 折本善之・武井昌 2007. 土肥誌, 78, 363-369.
- 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, 846-855.
- Phuong, N.M., Kang, Y., Sakurai, K., Iwasaki, K., Kien, C.N., Noi, N.V., and Son, L.T. 2010. *Water Air Soil Pollut.*, 207, 319-332.
- Saeki, K. 2008a. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 81, 508-512.
- Saeki, K. 2008b. *Soil Sci.*, 173, 248-256.
- Saeki, K., and Kunito, T. 2009. *Communi. Soil Sci. Plant Anal.*, 40, 3252-3262.
- Saeki, K., Kadono, M., and Nabeshima, A. 2010. *J. Environ. Sci. Health Part A*, 45, 275-281.
- Sasaki, K., Yongvongsoontorn, N., Tawarada, K., Ohnishi, Y., Arakane, T., Kayama, F., Abe, K., Oguma, S., and Ohmura, N. 2009. *J. Agric. Food Chem.*, 57, 4514-4519.
- Sakai, M., Seike, N., Murano, H., and Otani, T. 2009. *J. Agric. Food*

- Chem.*, 57, 11261–11266.
- Sakai, Y., Watanabe, T., Wasaki, J., Senoura, T., Shinano, T., and Osaki, M. 2010. *Environ. Pollut.*, 158, 3663–3669.
- Sato, A., Takeda, H., Oyanagi, W., Nishihara, E., and Murakami, M. 2010. *J. Hazard. Mater.*, 181, 298–304.
- 佐藤 強・吉田清志・重盛 勲 2010. 土肥誌, 81, 158–161.
- Sawamoto, T., Yoshida, R., Abe, K., and Matsunaka, T. 2010. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56, 492–502.
- Shahriari, F., Higashi, T., and Tamura, K. 2010. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56, 560–569.
- Shaibur, M.R., Kitajima, N., Sugawara, R., Kondo, T., Alam, S., Imamuru Huq, S.M., and Kawai, S. 2008. *Water Air Soil Pollut.*, 191, 279–292.
- Shaibur, M.R., Kitajima, N., Imamuru Huq, S.M., and Kawai, S. 2009a. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 55, 739–746.
- Shaibur, M.R., Kitajima, N., Sugawara, R., Kondo, T., Imamuru Huq, S.M., and Kawai, S. 2009b. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 55, 283–293.
- 柴原藤善 2008. 先端技術を活用した農林水産研究高度化事業平成17年～19年度研究成果報告書, 1727, 1–49.
- 志賀弘行・中津智史 2009. 道立農試資料, 38, 1–106.
- Shimizu, M., Marutani, S., Desyatkin, A. R., Jin, T., Nakano, K., Hata, H., and Hatano, R. 2010. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56, 676–688.
- Shindo, J., Okamoto, K., Kawashima, H., and Konohira, E. 2009. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 55, 532–545.
- 白波瀬京子・小林 久 2009. 農業農村工学会論文集, 259, 27–34.
- 染谷 孝 2007. 堆肥化促進微生物資材の動向と評価—蛍光染色法などによる評価肥料土づくり資材大辞典, 1031–1042.
- 染谷 孝 2008a. 圃場と土壌, 40, 19–24.
- 染谷 孝 2008b. 季刊肥料時報, 2, 57–70.
- Suda, A., Makino, T., Maejima, Y., Akahane, I., and Higashi, T. 2009. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 55, 623–626.
- 須永薫子・吉村季織・侯 紅・Khin Thawda WIN・田中治夫・吉川美穂・渡邊裕純・本林 隆・加藤 誠・西村 拓・豊田剛己・細見正明 2009. 土肥誌, 80, 596–605.
- 砂川 匡・袖垣一也・安田雅晴・沢野定憲 2008. 岐阜県農技センター報告, 8, 26–33.
- 鈴木弘行・熊谷 弘・内田滋夫 2008a. 土肥誌, 79, 487–490.
- 鈴木弘行・荻山慎一・熊谷 宏・野川憲夫・牛尾進吾・安西徹郎・坂本一憲・犬伏和之 2008b. 食と緑の科学, 62, 31–37.
- 田淵俊雄 2008a. 用水と廃水, 50, 9–17.
- 田淵俊雄 2008b. 農業農村工学会論文集, 257, 65–70.
- Takeda, A., Tsukada, H., Takaku, Y., Akata, N., and Hisamatsu, S., 2008. *J. Environ. Radioact.*, 99, 900–911.
- Takeda, A., Tsukada, H., and Takaku, Y. 2009. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 55, 349–357.
- Takeda, A., Tsukada, H., Takaku, Y., and Hisamatsu, S., 2010. *Plant Soil*, 330, 383–392.
- 武田 悟・伊藤正志・中川進平・金 和裕 2010. 土肥誌, 81, 391–393.
- 瀧本裕士・村島和男・橋本岩夫・丸山利輔 2010. 農業農村工学会論文集, 267, 49–58.
- 唐 星児・志賀弘行・中本 洋・日笠裕治 2007. 土肥誌, 78, 607–610.
- 土田 徹・南雲芳文・大竹憲邦・大山卓爾・高橋能彦 2009. 土肥誌, 80, 606–610.
- Tsukada, H., Takeda, A., Hisamatsu, S., and Inaba, J. 2008a. *J. Environ. Radioact.*, 99, 875–881.
- Tsukada, H., Takeda, A., Tagami, K., and Uchida, S. 2008b. *J. Environ. Qual.*, 37, 2243–2247.
- Uchida, S., Tagami, K., Shang, Z.R., and Choi, Y.H. 2009. *J. Environ. Radioact.*, 100, 739–745.
- 内山知二・佐野修司 2007. 近畿中国四国農研, 10, 20–24.
- 内山知二・佐野修司 2010. 近畿中国四国農研, 16, 57–60.
- Ultra Jr, V.U., Nakayama, A., Tanaka, S., Kang, Y., Sakurai, K., and Iwasaki, K. 2009. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 55, 160–169.
- Ushiwata, S.Y., Sara, H., and Inubushi, K. 2007. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 53, 489–498.
- Wang, X., Tamaguchi, N., Someya, T., and Nasu, M. 2007. *J. Microbiol. Meth.*, 71, 1–6.
- Watanabe, T., Murata, Y., Nakamura, T., Sakai, Y., and Osaki, M. 2009a. *J. Plant Nutr.*, 32, 1164–1172.
- Watanabe, T., Murata, Y., and Osaki, M. 2009b. *Communi. Soil Sci. Plant Anal.*, 40, 3158–3169.
- Woli, K.P., Hayakawa, A., Nagumo, T., Imai, H., Ishiwata, T., and Hatano, R. 2008. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 54, 310–317.
- Wu, S., Nishihara, M., Kawasaki, Y., Yokoyama, A., Matsuura, K., Koga, T., Ueno, D., Inoue, K., and Someya, T. 2009. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 55, 258–263.
- Yada, S., Arao, T., Kawasaki, A., Saito, T., Nagai, H., Mano, M., and Hamada, Y. 2008. *Water Sci. Technol.*, 58, 2243–2249.
- Yada, S., and Kawasaki, A. 2008. *J. Nucl. Sci. Technol., Sup.*, 6, 143–145.
- 八木哲生・坂口雅巳・日笠裕治 2008. 土肥誌, 79, 203–208.
- 八木哲生・谷 昌幸・笛木伸彦・田村 元・加藤 拓・小池正徳 2010. 土肥誌, 81, 594–597.
- Yamada, H., Kamada, A., Usuki, M., and Yanai, J. 2009. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 55, 616–622.
- 山田秀和・尾崎麻衣・川村悠子・下斗米亜美・矢内純太・山崎慎一 2010. 土肥誌, 81, 499–503.
- Yamaguchi, N., Kawasaki, A., and Iiyama, I. 2009. *Sci. Total Environ.*, 407, 1383–1390.
- Yamaguchi, N., Nakano, M., Takamatsu, R., and Tanida, H. 2010. *J. Environ. Radioact.*, 101, 451–457.
- 山本 博・吉川省子・吉田正則・石原 暁 2008. 土肥誌, 79, 478–486.
- 山崎慎一・木村和彦・本吉博美・武田 晃・南條正巳 2009. 土肥誌, 80, 30–36.
- 山岡 賢・柚山義人・中村真人・人見忠良 2008. 農業農村工学会論文集, 256, 63–64.
- 大和政秀・牧 浩之・吉田 聡・桑名健夫 2010. 土肥誌, 81, 140–143.
- Yamato, M., Yoshida, S., and Iwase, K. 2008. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 54, 738–743.
- Yamamoto, T., Ultra Jr, V.U., Tanaka, S., Sakurai, K., and Iwasaki, K. 2008. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 54, 886–894.
- 横田仁子・大森誉紀 2008. 愛媛県農業試験場, 41, 21–28.
- 横谷道雄 2010a. 果実日本, 7–11.
- 横谷道雄 2010b. 果実日本, 28–33.
- Yoneyama, T., Goshō, T., Kato, M., Goto, S., and Hayashi, H. 2010. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56, 445–453.
- 吉川那々子・瀧 勝俊 2009. 愛知県農試研報, 41, 29–34.
- 吉川省子・山本 博・吉田正則・石原 暁 2008. 土肥誌, 79, 461–470.

## 地球環境

秋山博子<sup>1</sup>・馬場光久<sup>2</sup>・河野憲治<sup>3</sup>

## 1. 土壤生態系からの温室効果ガス発生・吸収

近年、地球温暖化抑制技術のひとつとして、土壤が大きな炭素蓄積ポテンシャルを持つことが注目されており、土壤炭素量のモニタリングや広域推定法が重要な課題となっている。また、メタン (CH<sub>4</sub>) や亜酸化窒素 (一酸化二窒素: N<sub>2</sub>O) の発生量評価や発生削減技術の開発に加えて、地球温暖化ポテンシャル (GWP) を用いた温室効果ガス発生量評価の報告例が増えている。さらに投入エネルギー等も考慮した総合的な評価も行われている。

## 1) 土壤ガスおよびガスフラックスのモニタリング手法

ガス透過性膜を用いた土壤ガス採取法 (柳井・常田, 2009) や、土壤から発生する温室効果ガスの可搬型サンプリング装置が開発された (Akiyama *et al.*, 2009)。一方、クローズドチャンバー法と濃度勾配法を比較すると、二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) および N<sub>2</sub>O フラックスの高い時期では、勾配法は正確でないことが明らかになった (Kusa *et al.*, 2008)。

## 2) 二酸化炭素と土壤炭素収支

有機物の投入により、圃場レベルの土壤炭素蓄積量を増加させることができる可能性がある。例えば、様々な農地を比較した結果、堆肥投入の多い畑のみで土壤炭素量が増加していた (Mu *et al.*, 2008)。4年間の輪作栽培体系においても、残さと堆肥の投入により土壤炭素量が増加した (Koga and Tsuji, 2009)。一方、土地利用で比較すると、水田では土壤炭素が増加していたが、水田転換畑では減少していた (Nishimura *et al.*, 2008)。また、水田の適切な水管理と残さ投入により、CH<sub>4</sub> 発生削減と同時に土壤炭素の減少を低減できた (Minamikawa and Sakai, 2007)。一方、水田の不耕起栽培により土壤炭素が増加したが、CH<sub>4</sub> と N<sub>2</sub>O の発生を考慮すると4~5年の不耕起栽培後の耕起栽培への転換が有効と考えられた (石橋ら, 2009)。

土壤の炭素蓄積ポテンシャルを把握するためには、土壤炭素蓄積量の広域推定が必要となる。例えば中国全体の土壤炭素量の正確な推定には、4,000サンプル以上の土壤調査が必要であり、中国第二次土壤調査のサンプル数 (2,364) では不十分なことが示された (Yan and Cai, 2008)。また、地域レベルでは、クリギング法に土地利用と土壤タイプを組み合わせることで、より正確な土壤炭素量推定が可能であった (Zhang *et al.*, 2010)。一方、カザフスタンにおいて、地形と植生データを用いた土壤炭素量推定法 (Takata *et al.*, 2007) により、5年間で2年間の休閑を行うと土壤炭素量が減少するが、休閑を行わなければ増加すると推定された (Takata *et al.*, 2008)。また、RothC モデルと土壤

データを用いて日本の農耕地の土壤炭素蓄積可能性を推定した結果、堆肥投入および水田二毛作を行った場合には土壤炭素の減少が低減されると推定された (Yokozawa *et al.*, 2010)。

## 3) 水田および湿地からのメタン発生および GWP 評価

わら等の有機物管理は、水田からの CH<sub>4</sub> 発生の重要な制御要因である。北海道の水田では稲わら投入量に対する CH<sub>4</sub> 発生量が比較的多く、冬季のわら分解が遅いためと考えられた (Naser *et al.*, 2007)。一方、尿素添加による稲わらの好氣的分解により、GWP を低減できる可能性が示された (Khalil and Inubushi, 2007)。また、冬作の小麦わらの溝施用による CH<sub>4</sub> 削減効果はみられなかった (Ma *et al.*, 2008)。一方で、塩類集積土壤では有機物を施用しても CH<sub>4</sub> 発生量は増加しなかった (Supparattanapan *et al.*, 2009)。

また、水管理も水田における CH<sub>4</sub> 発生の重要な制御要因である。暗渠排水の導入により、CH<sub>4</sub> 発生が大幅に削減された (Shiratori *et al.*, 2007; Furukawa *et al.*, 2008)。また、日本およびインドネシアの水田において、間断灌漑により CH<sub>4</sub> 発生が大幅に削減された (Hadi *et al.*, 2010)。

一方、紅色非イオウ細菌を含む微生物資材の施用により、CH<sub>4</sub> 発生量を削減できる可能性が示された (Kato *et al.*, 2008)。これに対し、ポリシリカ鉄凝集剤を使用した浄水ケーキには、CH<sub>4</sub> 発生抑制効果はみられなかった (堀川ら, 2007)。一方、転換畑から水田に復田した場合には水稲連作田よりも CH<sub>4</sub> 発生量が少なかった (Eusufzai *et al.*, 2010)。

また、DNDC モデルが水田用に改良され (Fumoto *et al.*, 2008)、タイの水田における CH<sub>4</sub> 発生量推定 (Smakgahn *et al.*, 2009) および、水管理による削減ポテンシャルの推定に用いられた (Fumoto *et al.*, 2010)。一方、世界の水田から発生する CH<sub>4</sub> 発生量は 25.6 Tg yr<sup>-1</sup> と推定され、中干しおよび稲わらのすき混み時期の改善により、7.6 Tg yr<sup>-1</sup> の削減可能性があることが推定された (Yan *et al.*, 2009)。

また、シベリア永久凍土地帯において、地球温暖化により CH<sub>4</sub> 発生が増加する可能性が示唆された (Desyatkin *et al.*, 2009)。

## 4) 亜酸化窒素と他の反応性窒素ガス

N<sub>2</sub>O の発生量は土地利用、肥料の種類および施肥量、土壤水分等により大きく異なることが知られている。集水域の N<sub>2</sub>O 発生量データ (Katayanagi *et al.*, 2008) をもとに、N<sub>2</sub>O の広域発生量推定法が提案された (Katayanagi *et al.*, 2009)。また、灰色低地土と褐色低地土の畑において、化学肥料の N<sub>2</sub>O 発生係数は同程度であったが、有機物施用による N<sub>2</sub>O 発生係数は大きく異なり (Toma *et al.*, 2007)、この畑から発生する N<sub>2</sub>O は主に脱窒に由来すると推定された (Toma *et al.*, 2010)。一方、マレーシア泥炭地では森林から農地への土地利用変化により N<sub>2</sub>O 発生は増加した (Melling *et al.*, 2007)。また、中国の集水域においては、

<sup>1</sup> 農業環境技術研究所<sup>2</sup> 北里大学<sup>3</sup> 広島大学

N<sub>2</sub>O および NH<sub>3</sub> の主な発生源は化学肥料であり、NO<sub>x</sub> の主な発生源はわらの燃焼であった (Yang *et al.*, 2010). 一方、様々な作物残さからの N<sub>2</sub>O 発生係数を比較した結果、C/N 比と負の相関がみられた (Toma and Hatano, 2007). 一方、草地更新による N<sub>2</sub>O 発生の増加がみられた (Mori *et al.*, 2007). また、草地において化学肥料のほうが堆肥よりも N<sub>2</sub>O 排出係数が高かった (Jin *et al.*, 2010).

一方、灰色低地土と黒ボク土において、大部分の N<sub>2</sub>O は表層 (0~30 cm) において生成されているが、灰色低地土では一部がより深い土壌において生成されていた (Kusa *et al.*, 2010). また、灰色低地土では地下水を経由した N<sub>2</sub>O の間接発生が地表面から発生する N<sub>2</sub>O の 5~7 割に相当していた (Minamikawa *et al.*, 2010).

農耕地における N<sub>2</sub>O の発生抑制は重要な課題である。インドネシアの圃場において、硝化抑制剤 (DCD) 入り肥料により、N<sub>2</sub>O 発生量が削減されたが、緩効性肥料では削減効果はみられなかった (Jumadi *et al.*, 2008a). これに対し、DCD 入り肥料により N<sub>2</sub>O 発生量は大幅に削減されたが有意差はみられなかった (Hadi *et al.*, 2008). また、無機化調節アセトアルデヒド縮合尿素肥料により、硝酸塩溶脱および N<sub>2</sub>O 発生量を削減できる可能性が示された (Amkha *et al.*, 2009). このように圃場試験によるこれらの資材の N<sub>2</sub>O 削減効果は大きくばらついているが、世界の圃場実験データの解析により、硝化抑制剤入り肥料の N<sub>2</sub>O 削減効果は平均で 38 % であり比較的安定した削減効果がみられる一方で、被覆肥料の N<sub>2</sub>O 削減効果は平均で 35 % であるが、土壌や土地利用により効果が大きく異なり、黒ボク土では効果がみられないことが明らかになった (Akiyama *et al.*, 2010). 一方、炭の添加により N<sub>2</sub>O 発生が抑制される可能性が示された (Yanai *et al.*, 2007a). しかし、深層施肥 (Chu *et al.*, 2007; Hou *et al.*, 2010) や、不耕起・省耕起栽培体系の N<sub>2</sub>O 削減効果はみられなかった (Nagata *et al.*, 2009). また、ペレット堆肥の施用による N<sub>2</sub>O 発生量は化学肥料よりも高かった (井上ら, 2008; 山根ら, 2009; Hayakawa *et al.*, 2009). 一方、豚糞堆肥の製造過程において、亜硝酸酸化細菌を含む完熟堆肥の添加により N<sub>2</sub>O の発生量を削減できる可能性が示された (Fukumoto and Inubushi, 2009).

一方森林においては、N<sub>2</sub>O および一酸化窒素 (NO) フラックスは、地形により大きく異なっていた (Nishina *et al.*, 2009a). 日本の森林土壌からの N<sub>2</sub>O 放出速度は他の温帯林に比べて低かった (Morishita *et al.*, 2007). 25 箇所の森林土壌の培養実験の結果、窒素の無機化量が N<sub>2</sub>O および NO フラックスの制御要因と考えられた (Nishina *et al.*, 2009b). N 沈着量の多い中国亜熱帯馬尾松林土壌からの N<sub>2</sub>O 放出は O/A 層の NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 量、および表層における正味の硝化と有意な相関関係がみられた (Chen and Mulder, 2007).

ボルネオ島北部の *Acacia mangium* 林においては、蒸発散が土壌水分状況に最も影響し (Inagaki *et al.*, 2008a),

N 施肥が細根生産により効果的と判断された (Inagaki *et al.*, 2009). インドネシアの *Acacia mangium* 林における P の施肥は N<sub>2</sub>O 発生量、CO<sub>2</sub> 発生量を増大させた (Mori *et al.*, 2010). また、乾燥したシベリアタイガ林の人工降雨実験の結果、降雨により土壌呼吸、CH<sub>4</sub> および N<sub>2</sub>O 発生量の増加がみられ、将来当該地域の降雨が増加した場合に土壌有機物の分解が促進されると推定された (Koide *et al.*, 2010).

乾燥土壌は脱窒活性が低く、<sup>15</sup>NO<sub>3</sub> は N<sub>2</sub>O に還元された (Katsuyama, *et al.*, 2008). また、相当量の N<sub>2</sub>O が次表層において生成されており、DCD により N<sub>2</sub>O 生成量が減少した (Matsushima *et al.*, 2009). 一方、下層植生の刈取り、窒素固定する *Cassia alata* 苗の植栽により N<sub>2</sub>O フラックスが増大した (Li *et al.*, 2010). 東シベリアタイガ林において、火災跡地、伐採跡地で CO<sub>2</sub> 放出の Q<sub>10</sub> 値が低下し、土壌水分量が高い時にカラマツ林、伐採跡地において N<sub>2</sub>O 放出量が多く、火災跡地において積算 CH<sub>4</sub> 吸収量が有意に多かった (Takakai, *et al.*, 2008).

N<sub>2</sub>O には多くの生成経路が知られており、土壌や環境により生成経路も異なると考えられる。黒ボク土畑において N<sub>2</sub>O の 97 % とほぼすべての NO が硝化由来と推定された (Ding *et al.*, 2007). 茶園の酸性土壌の培養実験において、静岡のほうがインドネシアの約 5 倍の N<sub>2</sub>O および CO<sub>2</sub> 生成がみられ、すべての硝化細菌が *Nitrosospira* sp. に属していた (Jumadi *et al.*, 2008b). 一方、インドネシアの泥炭土では N<sub>2</sub>O の生成においてカビが重要であることが示された (Yanai *et al.*, 2007c). また、従属栄養性細菌による硝化に由来する N<sub>2</sub>O の発生が報告された (Wang and Cai, 2008). また稲わらを施用したポット試験により、施用後 25 日間の N<sub>2</sub>O は硝化由来が主であり、その後は脱窒由来が主と推定された (Lou *et al.*, 2007). 一方、凍結融解による N<sub>2</sub>O 発生の増加は、主に脱窒に由来すると推定された (Yanai *et al.*, 2007b; 柳井ら, 2007). さらに、最大凍結深度と N<sub>2</sub>O 発生量に相関がみられ、凍結融解に伴う N<sub>2</sub>O 発生量は最大で年間発生量の 58~85 % にも相当していた (Yanai *et al.*, 2010).

##### 5) 二酸化炭素濃度増加が水田からのメタン発生に与える影響

将来、大気 CO<sub>2</sub> 濃度が上昇した場合には、水田における CH<sub>4</sub> 発生量にも影響を与える可能性がある。クライマロンを用いた CO<sub>2</sub> 濃度増加実験において、高 CO<sub>2</sub> 区のほうが対照区よりも CH<sub>4</sub> フラックスが増加した (Lou *et al.*, 2008). 同様に高 CO<sub>2</sub> および高夜温により CH<sub>4</sub> 発生が増加した (Cheng *et al.*, 2008a). 一方、3つの品種において高 CO<sub>2</sub> 区と対象区とに CH<sub>4</sub> 酸化に差がみられず、IR72 のみで高 CO<sub>2</sub> 区のほうが対照区よりも CH<sub>4</sub> 酸化量が大きかった (Inubushi *et al.*, 2010). これに対し、開放系大気 CO<sub>2</sub> 増加 (FACE) 実験では、FACE 区と対照区による CH<sub>4</sub> 発生に差がみられなかった (Cheng *et al.*, 2008b, Tokida *et al.*, 2010) が、CO<sub>2</sub> と同時に土壌温度を増加させ

た場合には  $\text{CH}_4$  発生量が増加した (Tokida *et al.*, 2010).

#### 6) LCA, エコバランスモデルおよび経済評価

温室効果ガス発生量だけでなく、投入エネルギーや経済性等を含めた総合的な評価が必要とされている。水稻の LCA 解析において、不耕起移植栽培体系のほうが耕起移植栽培よりも GWP が小さかった (Harada *et al.*, 2007)。また、ビート栽培において、直播および抗菌剤無散布によりエネルギー効率が低下したが、省耕起、高収量品種および植物体全体の収穫によりエネルギー効率が上昇した (Koga *et al.*, 2009)。また、流域レベルのエコバランスモデル解析において、米とダイズでは温室効果ガス発生量が多いが余剰窒素は少なく高収入が得られ、タマネギと野菜では温室効果ガスは削減できるが余剰窒素は多く収入は中程度であった (Kimura *et al.*, 2007, 2010)。一方、インドネシアの水田の  $\text{CH}_4$  放出抑制のための CDM 事業では、水管理者に年間 50USD、一般農家に年間 10USD を配当すると、十分な動機付けになると推定された (Muramatsu and Inubushi, 2009)。

### 2. 炭素循環, 酸性雨, 森林土壌

炭素蓄積の働きが期待される中、森林生態系における物質循環は、長伐期化などの森林施業の変化や大気由来の窒素沈着の影響を受けるため、長期的な視点での研究が進められるとともにこれまでの長期モニタリング研究の成果について解析が進められている。

#### 1) 炭素の蓄積と循環

Takahashi *et al.* (2010) は京都議定書で定められた森林生態系の 5 つの炭素プールの内、日本のリターや枯死木の炭素量は分解速度が高いために少なく、同じ土壌群と比較すると森林の炭素蓄積量は農耕地よりも多く、草地よりも少ないことを示した。土壌の炭素蓄積量は変化しやすい表層ほど層厚を薄く採取して評価しており (高橋・森貞, 2008)、土壌有機物の分解が遅いほど多く (酒井ら, 2010)、地域的には東北、九州で多かった (高橋, 2008)。また、堆積有機物および鉱質土壌中の炭素、窒素含有量の測定精度基準として変動係数の閾値が示された (Ugawa *et al.*, 2010a)。黒ボク土の炭素含有量は  $80 \text{ g kg}^{-1}$  を超えても “C saturation (Gulde *et al.*, 2008)” に達しておらず、今後も炭素蓄積量が増加すると予測された (Sakai *et al.*, 2010)。一方、褐色森林土の炭素蓄積量は Al 腐植複合体量に影響されていた (Imaya *et al.*, 2010b)。土壌の炭素含有量は火災被害地で高くなったり (廣部ら, 2010)、草地の退化により 50% 未満まで減少したり (李ら, 2008) することが報告された。

枯死木の分解はスギとヒノキに種間差が無く、アカエゾマツなどで遅かった (酒井ら, 2008)。枯死木、堆積有機物および土壌の炭素蓄積量は 40 年生のスギ・ヒノキ林の地上部炭素蓄積量とほぼ同じで、90% 近くが土壌に蓄積していた (鳥居ら, 2009)。ヤマトシロアリが主要な分解者であったスギ・ヒノキ林における倒木の重量減少は直径による有意差がみられなかった (稲垣ら, 2009)。

針広混交林を皆伐した結果、炭素排出源となったが、ササのバイオマスと光合成活性の増大により、排出量は急激に減少した (Takagi *et al.*, 2009)。間伐は地上部炭素蓄積量、およびリターフォールによる炭素還元速度を減少させたが、蓄積増加速度には影響しなかった (野口ら, 2009)。乾燥して炭素循環の遅いアリゾナ州北部のマツ林では、間伐は炭素蓄積量を減少させ (Finkral and Evans, 2008)、 $\text{CO}_2$  フラックスを減少させたが、 $\text{CH}_4$  酸化に影響しなかった (Sullivan *et al.*, 2008)。

日本の温帯林における土壌呼吸は土壌水分量よりも温度の影響を受け、最表層における  $\text{CO}_2$  生成量は土壌呼吸の 50% 以上を占めていた (Hashimoto *et al.*, 2007)。土壌呼吸と地温との指数関数式の係数は時間によって変化した (橋本ら, 2009)。スギ人工林における  $\text{CO}_2$  発生量は乾燥湿潤サイクルにも影響され、積雪により減少した (Lee *et al.*, 2008)。林分構造が土壌体積含水率を通じて  $\text{CO}_2$  フラックスの空間変動に間接的に影響している可能性が示唆され (橋本ら, 2008)、ブナ林区の土壌  $\text{CO}_2$  フラックスは草地区に比べて低かった (橋本・三浦, 2008)。また、年間土壌呼吸量は斜面下部で斜面の他のプロットの 6 割程度であった (玉井ら, 2010)。

土壌呼吸に占める割合は根呼吸と土壌有機物の分解呼吸が夏に、リターの分解呼吸が冬に高かった (Sakata *et al.*, 2007)。5 つのモデルにより評価された土壌呼吸量に対する根呼吸の寄与は 3.9~48.4% と大きく異なった (Ito *et al.*, 2010) が、根呼吸は根の直径および根の N 含有量に依存していた (Chen *et al.*, 2010)。枯死根の分解による  $\text{CO}_2$  放出量は枯死根の直径が小さいほど、気温が高いほど増大した (橋本ら, 2010)。森林土壌の微生物バイオマス炭素量に対して呼吸で放出される  $\text{CO}_2$  の 85% は C/N 比、可溶性有機炭素、交換性 Al 含有量で説明された (Xu *et al.*, 2007)。

無酸素状態で  $\text{CH}_4$  の分解を阻害するエチレン ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ) の生成は  $\text{CH}_4$  生成が急激に高くなる時点で最大となる (Xu and Inubushi, 2007b)。一方、グルコースの添加は  $\text{CH}_4$  と  $\text{C}_2\text{H}_4$  の吸収を促進し (Xu and Inubushi, 2007a)、窒素源の添加は  $\text{CH}_4$  生成速度を 5 倍に増加させた (Xu and Inubushi, 2008)。有酸素条件で特に低温において  $\text{CH}_4$  生成量は  $\text{C}_2\text{H}_4$  生成量より多かった (Xu and Inubushi, 2009b)。 $\text{CH}_4$  消費は  $\text{C}_2\text{H}_4$  添加に対して敏感に反応した (Xu and Inubushi, 2009a)。実験的に酸性化させた土壌からの  $\text{C}_2\text{H}_4$  放出速度は高く、 $\text{C}_2\text{H}_4$  放出により  $\text{CH}_4$  消費が抑制されるうことが示された (Xu and Inubushi, 2009c)。特に無酸素条件よりも有酸素条件下で酸性化による  $\text{C}_2\text{H}_4$  放出速度の上昇が顕著であった (Xu and Inubushi, 2009d)。0.1 mM の Al 添加でも  $\text{CH}_4$  酸化は阻害された (Tamai *et al.*, 2007)。氾濫源に生育するヤチダモの樹幹表面から  $\text{CH}_4$  が放出され (Terazawa *et al.*, 2007)、乾燥重量当りの葉面からの  $\text{CH}_4$  放出速度は、カラマツで最も高かった (Kitaoka *et al.*, 2007)。

## 2) 土壌酸性化と養分利用

日本の森林植生下の土壌では植物による陰イオンを上回る陽イオンの吸収が最大の酸生成の要因であった (Fujii *et al.*, 2008). これはインドネシア、タイにおいても同様であったが、耕作地では窒素の形態変化に伴う酸の生成量が最大の要因であり、酸は有機陰イオンの分解によって消費された (Fujii *et al.*, 2009). 酸に対する反応は、熱帯土壌では塩基との交換反応が、日本では二次鉱物の溶解が主体であり、酸中和容量が小さな土壌では陰イオン吸着が重要であった (Watanabe *et al.*, 2008). 黒ボク土は硫酸の保持により酸を消費する能力が高く、Sは有機態として安定化した (Tanikawa *et al.*, 2009). 堆積岩を母材とする森林土壌では、pH5.5~8.3は腐植物質によってpH3.0までは非晶質Al水和酸化による緩衝作用が見られた (Funakawa *et al.*, 2008). 黒ボク土のA層におけるAl<sup>3+</sup>の活動度は土壌有機物との錯体形成により (Yagasaki *et al.*, 2006a), Bw層においては非晶質アルミノケイ酸塩あるいはハロイサイトによって制御されていた (Yagasaki *et al.*, 2006b). 強酸性化したアロフェン質黒ボク土では、Alの溶解度がAl腐植複合体によって制御された (Takahashi *et al.*, 2008). Al腐植複合体に由来する単量体Alは根の伸長を抑制したが、アロフェン物質の添加はAl毒性を緩和した (Ito *et al.*, 2009). 根の養分状態、生理的变化は土壌酸性化やAlストレスに対する良い指標であり (Vanguelova *et al.*, 2007), スギの場合、Ca/Al比が0.5より低くなると細根量などが悪影響を受ける (Hirano *et al.*, 2007).

日本の森林土壌では資源供給力が低い斜面上部で細根量が増大する (Noguchi *et al.*, 2007) が、直径1 mm未満の細根量は早魃により17%まで減少した (Konôpka *et al.*, 2007). 養分の獲得戦略の相違を反映して、樹木と灌木とでは根端の直径に有意な違いが見られ (Ugawa *et al.*, 2010b), オオシラビソ、シラビソの細根は養分量の多い表層に多かった (Ugawa *et al.*, 2010c). ミズナラ林下に密生するクマイザサの細根は深さ60 cmまでの細根量の71%を占めていた (Fukuzawa *et al.*, 2007).

カリマンタン島南部の酸性硫酸塩土壌の水田においてイネの根圏および根面から単離された窒素固定菌を接種するとAlストレスが軽減された (Su *et al.*, 2007). タイ南部の酸性硫酸塩土壌では、リン溶解菌が植物の生育を支えていると考えられた (Pengnoo *et al.*, 2007).

## 3) 大気沈着と窒素循環

日本では集約的な畜産が、中国では窒素肥料の過剰利用がアンモニア発生源であり、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>沈着量は日本ではNO<sub>3</sub><sup>-</sup>沈着量と同等であったが、中国ではNO<sub>3</sub><sup>-</sup>沈着量の2倍以上の地点が多かった (Hayashi and Yan, 2010). 集約的酪農地帯の採草地には、地域内で発生したアンモニアの7割が沈着していることが示された (Hojito *et al.*, 2010). 原生林を皆伐してカラマツを植栽した林分では、アンモニアガスの放出が窒素沈着量を上回った (Hayashi *et al.*, 2009). NO<sub>3</sub><sup>-</sup>の乾性沈着速度は針葉樹林で広葉樹林の2倍以上高

かった (Watanabe *et al.*, 2008). 一方、葉の濡れやすさが増大すると、葉面吸収などでNH<sub>4</sub><sup>+</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>が林冠を通過する際に減少した (Sase *et al.*, 2008).

ヒノキ新鮮葉中のN含有量は土壌のC/N比が低いほど高かった (Inagaki *et al.*, 2010). スギ針葉については、潤沢な栄養によりN含有量が高い場合には、N負荷に対して脆弱な可能性が指摘された (重永ら, 2008). 広葉樹によるNO<sub>3</sub><sup>-</sup>同化は展葉期に最も盛んであった (Koyama *et al.*, 2008). 一方落葉前に、N, P, Kは樹体に回収されるが、Caは回収されないと考えられた (長倉ら, 2009). スギリター中に多く含まれるCaは分解に伴って交換態の割合が高くなった (笠井ら, 2008). 落葉時期が遅くなればN再吸収率が高くなり、落葉中のN含有量は低下したが、台風によってN含有量が高い時期に落葉した (Inagaki *et al.*, 2010). また、日射量が多ほどヒノキリター中のN含有量が低くなった (Inagaki *et al.*, 2008b) が、部分伐採は落葉中のN含有量に影響しなかった (Nakanishi *et al.*, 2009). タイ乾燥常緑林におけるNO<sub>3</sub><sup>-</sup>溶脱量は落葉によるN供給量と有意な相関関係が見られ、その74~82%が雨季の初期に見られた (Yamashita *et al.*, 2010). 窒素沈着は生長が旺盛な林齢であるヒノキ人工林における一次生産と落葉生産を促進した可能性が示唆されたが、土壌中のNが全て吸収されておらず、今後適切な間伐により下層植生の導入を図る必要性が指摘された (稲垣ら, 2010b). この際、N無機化、硝化生成能の制御を考慮した施業方針 (伊藤, 2008) や間伐による生長促進効果と台風などの気象害に対するリスクを評価した間伐施業方針の必要性が指摘されている (稲垣ら, 2008a; Inagaki *et al.*, 2008c). ヒノキの雄花生産の豊作年には土壌C/N比が低いほど雄花生産量が増大したが、強度間伐の雄花生産量に対する影響は無かった (中西ら, 2008). 間伐や枝打ちの遅れから下層植生がまばらなヒノキ林においては林内雨の雨滴の衝撃が飛散剥離の原因となり (Nanko *et al.*, 2008), 豪雨時に粒子に吸着されてNおよびPの流出が起こっていると判断された (Ide *et al.*, 2007).

著しく酸性化している恐山土壌では、硝化の阻害がN溶脱を抑制していた (Watanabe *et al.*, 2010). 北関東地方の森林土壌における窒素無機化速度は、積算地温と正の相関が見られた (平井ら, 2007a) が、正味の無機化量は8月上旬から10月末に最も多かった (稲垣ら, 2010a). 深さ50 cmまでの窒素無機化量に対する20 cm以深の下層土における無機化量の割合は30~43%であった (平井ら, 2007a). 正味の窒素無機化速度は関東北部や四国北部に比べて北海道北部で低く、正味の硝化速度も低かった (柴田ら, 2010). 積雪量の減少に伴う頻繁な凍結・融解による土壌微生物の反応の変化は渓流水への養分溶脱を増大させるうるが (Park *et al.*, 2010), 土壌凍結は正味のN無機化量を増大させたが、硝化に大きく影響しなかった (Christopher *et al.*, 2008).

現地窒素無機化速度や無機化量は温帯土壌で大きく、亜

寒帯や亜熱帯土壌で小さかった(平井ら, 2007b). 台湾南部の亜熱帯雨林においては基質が正味の無機化速度, 硝化速度に影響し, 植生タイプにも影響した(Tsui *et al.*, 2010)が, 台湾北部の森林土壌における正味のN無機化量, 硝化量は土壌水分量や無機態Nの初期含有量と有意な相関を示した(Owen *et al.*, 2010).

下層植生を除去すると正味の無機化と硝化を増大させた(Matsushima and Chang, 2007). 密生するササを根系や土壌と共に除去する掻き起こし処理をすると, 植生による吸収量の減少だけでなく, 硝化活性が高まり, 土壌中のNO<sub>3</sub><sup>-</sup>現存量が増加した(柴田ら, 2007).

長期的なモニタリング研究の成果を解析した結果, 渓流水の酸性化が確認され, 大気汚染物質の森林生態系に対する影響がうかがえる事例が報告された(Yamada *et al.*, 2007; Matsubara *et al.*, 2009). 伊自良湖流域では1994年の早魃による生育の低下によりN吸収量が低下したこと, Ca吸収量の低下などによる土壌pHの上昇によってN無機化, 硝化の促進が起こったことにより渓流水中のNO<sub>3</sub><sup>-</sup>濃度が上昇し, 窒素飽和の段階が1から2へと変化した(Nakahara *et al.*, 2010). また, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>濃度の上昇に伴う一時的な酸性化が観測され, 窒素飽和の可能性が示された(Kamisako *et al.*, 2008). 多量のN沈着はスギの水分ストレスによる衰退を深刻化させていることが示唆された(Nagakura *et al.*, 2008).

奥日光のコメツガ生葉中のMg含有量は地質的な要因により低く, 環境ストレスに対する耐性の低下につながる可能性が指摘された(谷川ら, 2009). 道路沿いのブナの衰退は大気汚染物質ではなく, O<sub>3</sub>濃度の影響を受けている可能性が示唆された(Kume *et al.*, 2009).

大気汚染の影響が比較的小さい北海道北部では, 土壌微生物による窒素有機化が窒素保持メカニズムとして重要であった(柴田・福澤, 2009). 林齢の異なるスギを中心とした人工林の集水域では渓流水中のNO<sub>3</sub><sup>-</sup>濃度が集水域特性よりも林齢に影響されており(福島・徳地, 2008a; Tokuchi and Fukushima, 2009), 除伐や間伐による影響は見られなかった. 急斜面にある若い林分は大気由来のNO<sub>3</sub>だけでなく, 土壌のNO<sub>3</sub>も効率良く保持できていないために, 渓流水中のNO<sub>3</sub>濃度が高いと判断された(Tobari *et al.*, 2010). 高いANCによって皆伐とそれに続く植生の回復過程におけるNO<sub>3</sub><sup>-</sup>流出が渓流水の酸性度に影響することはなかった(福島・徳地, 2008a; Fukushima and Tokuchi, 2009).

火山灰を母材とした褐色森林土(Imaya *et al.*, 2007, 2010a)のB層に保持されるNO<sub>3</sub><sup>-</sup>の量は土壌炭素含有量と負の相関があり(浦川ら, 2007), 100 g-C kg<sup>-1</sup>以下でNO<sub>3</sub><sup>-</sup>の相対移動速度が抑制される(三木ら, 2009). AECの大きな土壌では, 正荷電の一部しか硝酸保持に働かず(Kubotera and Wada, 2008), 黒ボク土におけるNO<sub>3</sub><sup>-</sup>の吸着および移動遅延はSO<sub>4</sub><sup>2-</sup>共存下で小さかった(前田ら, 2008). 土壌中の水・溶質移動モデルを用いる際にNO<sub>3</sub><sup>-</sup>

の吸着保持を考慮する必要性が示された(浦川ら, 2009). 定山溪における渓流水中のNO<sub>3</sub><sup>-</sup>濃度は流量ピーク時に上昇しなかった(相澤ら, 2008)が, 大規模降雨イベント時に迅速な排水が起こる四万十川源流部の森林生態系(篠宮・吉永, 2007)ではNO<sub>3</sub><sup>-</sup>濃度は流量との間に正の相関が見られ, 降雨規模が大きくなると負の相関関係が見られた(篠宮ら, 2007). このように日本では, 渓流水中のNO<sub>3</sub><sup>-</sup>濃度の変動は, 植物によるN吸収や土壌有機物の分解の季節変動ではなく, 水文条件により強く制御されており(大手・徳地, 2010), 複数のスケールでのモニタリングがより本質的な情報をもたらすことが指摘されている(大手ら, 2010). 流域スケールの硝化活性の変動は, 地理情報から予測することが可能であり(Ito *et al.*, 2008), 硝酸態窒素生成量は流出窒素ポテンシャルに影響した(伊藤ら, 2008).

人為起源の過剰な反応性窒素の供給が増大するアジア(Hayashi and Yan, 2010)で, 気候-水文条件の相違が物質循環上の差異に現れるのか, その影響の評価が不可欠である(大手・徳地, 2010). 森林生態系における物質循環とそれに対する森林施業などの影響について明らかにするためには, 地域特性を考慮する一方で, 施業影響下での物質循環モデルのパラメータ化が重要である(柴田ら, 2009).

## 文 献

- 相澤州平・酒井寿夫・阪田匡司・北村兼三・山野井克己・田中永晴 2008. 日本森林学会北海道支部論文集, 56, 177-179.
- Akiyama, H., Hayakawa, A., Sudo, S., Yonemura, S., Tanonaka, T., and Yagi, K. 2009. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 55, 435-440.
- Akiyama, H., Yan, X., and Yagi, K. 2010. *Glob. Change Biol.*, 16, 1837-1846.
- Amkha, S., Sakamoto, A., Tachibana, M., and Inubushi, K. 2009. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 55, 772-777.
- Chen, D., Zhou, L., Rao, X., Lin, Y., and Fu, S. 2010. *Ecol. Res.*, 25, 983-993.
- Chen, X. Y., and Mulder, J. 2007. *Biogeochemistry*, 82, 165-180.
- Cheng, W., Sakai, H., Hartley, A., Yagi, K., and Hasegawa, T. 2008a. *Glob. Change Biol.*, 14, 644-656.
- Cheng, W., Inubushi, K., Hoque, M. M., Sasaki, H., Kobayashi, K., Yagi, K., Okada, M. and Hasegawa, T. 2008b. *Geomicrobiol. J.*, 25, 396-403.
- Chu, H., Hosen, Y., and Yagi, K. 2007. *Soil Biol. Biochem.*, 39, 330-339.
- Desyatkin, A. R., Takakai, F., Fedorov, P. P., Nikolaeva, M. C., Desyatkin, R. V., and Hatano, R. 2009. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 55, 558-570.
- Ding, W., Yagi, K., Akiyama, H., Sudo, S., and Nishimura, S. 2007. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 53, 362-372.
- Eusufzai, M. K., Tokida, T., Okada, M., Sugiyama, S., Liu, G. C., Nakajima, M., and Sameshima, R. 2010. *Agri. Ecosys. Environ.*, 139, 742-748.
- Finkral, A. J. and Evans, A. M. 2008. *Forest Ecol. Manage.*, 255, 2743-2750.
- Fujii, K., Funakawa, S., Hayakawa, C., and Kosaki, T. 2008. *Geoderma*, 144, 478-490.
- Fujii, K., Funakawa, S., Hayakawa, C., and Kosaki, T. 2009. *Plant*

- and Soil, 316, 241–255
- Fukumoto, Y., and Inubushi, K. 2009. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 55, 428–434.
- 福島慶太郎・徳地直子 2008a 日林誌, 90, 6–16.
- Fukushima, K., and Tokuchi, N. 2009. *Hydrological process*, 23, 259–271.
- Fukuzawa, K., Shibata, H., Takagi, K., Satoh, F., Koike, T., and Sasa, K. 2007. *Ecol. Res.*, 22, 485–495.
- Fumoto, T., Kobayashi, K., Li, C., Yagi, K., and Hasegawa, T. 2008. *Glob. Change Biol.*, 14, 382–402.
- Fumoto, T., Fumoto, T., Yanagihara, T., Saito, T., and Yagi, K. 2010. *Glob. Change Biol.*, 16, 1847–1859.
- Funakawa, S., Hirooka, K., and Yonebayashi, K. 2008. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 54, 434–448.
- Furukawa, Y., Shiratori, Y., and Inubushi, K. 2008. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 54, 950–959.
- Gulde, S., Chung, H., Amelung, W., Chang, C., and Six, J. 2008. *Soil Sci Soc Am J*, 72, 605–612.
- Hadi, A., Inubushi, K., and Yagi, K. 2010. *Paddy Water Environ.*, 8, doi: 10.1007/s10333-010-0210-x.
- Hadi, A., Jumadi, O., Inubushi, K., and Yagi, K. 2008. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 54, 644–649.
- Harada, H., Kobayashi, H., and Shindo, H. 2007. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 53, 668–677.
- Hashimoto, S., Tanaka, N., Kume, T., Yoshifuji, N., Hotta, N., Tanaka, T., and Suzuki, M. 2007. *J. For. Res.*, 12, 209–221.
- 橋本 徹・三浦 覚 2008. 関東森林研究, 59, 195–198.
- 橋本 徹・三浦 覚・池田重人・志知幸治 2008. 日林誌, 90, 386–390.
- 橋本 徹・阪田匡司・三浦 覚・金子真司 2009. 関東森林研究, 60, 199–202.
- Hayakawa, A., Akiyama, H., Sudo, S., and Yagi, K. 2009. *Soil Biol. Biochem.*, 41, 521–529.
- Hayashi, K., Takagi, K., Noguchi, I., Fukuzawa, K., Takahashi, H., Fukazawa, T., Shibata, H., and Fujinuma, Y. 2009. *Water, Air, and Soil Pollut.*, 200, 33–46.
- Hayashi, K., and Yan, X. 2010. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56, 2–18.
- 平井敬三・野口享太郎・溝口岳男・金子真司・高橋正通 2007a. 森林立地, 49, 51–59.
- 平井敬三・金子真司・高橋正通 2007b. 森林立地, 49, 123–131.
- Hirano, Y., Mizoguchi, T., and Brunner, I. 2007. *J. For. Res.*, 12, 134–142.
- 廣部 宗・保原 達・徳地直子・松浦陽次郎 2008. 海外の森林と林業, 71, 14–18.
- Hojito, M., Hayashi, K., and Matsuura, S. 2010. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56, 503–511.
- 堀川拓末・増田 靖・新井忠男・三枝正彦 2007. 土肥誌, 78, 261–267.
- Hou, A., Tsuruta, H., McCreary, M. A., and Hosen, Y. 2010. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56, 861–869.
- Ide, J., Nagafuchi, O., Chiwa, M., Kume, A., Otsuki, K., and Ogawa, S. 2007. *J. For. Res.*, 12, 45–56.
- Imaya, A., Inagaki, Y., Tanaka, N., and Ohta, S. 2007. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 53, 621–633.
- Imaya, A., Yoshinaga, S., Inagaki, Y., Tanaka, N., and Ohta, S. 2010a. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56, 454–465.
- Imaya, A., Yoshinaga, S., Inagaki, Y., Tanaka, N., and Ohta, S. 2010b. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56, 734–744.
- Inagaki, M., Kamo, K., Yamada, T., and Titin, J. 2008c. *Japan Agricultural Research Quarterly*, 42, 69–76.
- Inagaki, Y., Sakai, A., Kuramoto, S., Kodani, E., Yamada, T., and Kawasaki, T. 2008a. *Ecol. Res.*, 23, 965–972.
- Inagaki, Y., Kuramoto, S., Torii, A., Shinomiya, Y., and Fukuta, H. 2008b. *For. Ecol. Manage.*, 255, 1859–1867.
- 稲垣善之・篠宮佳樹・鳥居厚志 2008. 森林応用研究, 17, 37–40.
- Inagaki, M., Inagaki, Y., Kamo, K., and Titin, J. 2009. *J. For. Res.*, 14, 178–182.
- 稲垣善之・吉永秀一郎・山田 毅・篠宮佳樹・鳥居厚志 2009. 森林立地, 51, 63–67.
- 稲垣昌宏・橋本 徹・吉澤仁美・稲垣善之・鶴川 信・長倉淳子・金子真司・三浦 覚 2010a. 関東森林研究, 61, 179–182.
- 稲垣善之・橋本 徹・金子真司・三浦 覚・稲垣昌宏・中西麻美 2010b. 関東森林研究, 61, 175–178.
- Inagaki, Y., Okuda, S., Sakai, A., Nakanishi, A., Shibata, S., and Fukuta, H. 2010. *Ecol. Res.*, 25, 429–438.
- 井上健一・渋谷 洋 2008. 土肥誌, 79, 181–182.
- Inubushi, K., Cheng, W., Mizuno, T., Lou, Y., Hasegawa, T., Sakai, H., and Kobayashi, K. 2010. *Euro. J. Soil Sci.*, 62, doi: 10.1111/j.1365-2389.2010.01323.x.
- 石橋英二・山本章吾・赤井直彦・岩田 徹・鶴田治雄 2009. 土肥誌, 80, 123–135.
- Ito, A., Ichii, K., and Kato, T. 2010. *Ecol. Res.*, 25, 1033–1044.
- 伊藤江利子 2008. 水利科学, 304, 116–131.
- Ito, E., Ono, K., and Araki, M. 2008. *Jpn. J. For. Environ.*, 50, 1–6.
- 伊藤江利子・小野賢二・清水貴範・竹中千里・服部重昭・荒木 誠 2008. 水文・水資源学会誌, 21, 100–113.
- Ito, K., Takahashi, T., and Nanzyo, M. 2009. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 55, 35–41.
- Jin, T., Shimizu, M., Marutani, S., Desyatkin, A.R., Iizuka, N., Hata, H., and Hatano, R. 2010. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56, 53–65.
- Jumadi, O., Hala, Y., Muis, A., Ali, A., Palennari, M., Yagi, K., and Inubushi, K. 2008a. *Microbes Environ.*, 23, 29–34.
- Jumadi, O., Hala, Y., Anas, I., Ali, A., Sakamoto, K., Saigusa, M., Yagi, K., and Inubushi, K. 2008b. *Geomicrobiol. J.*, 25, 381–389.
- Kamisako, M., Sase, H., Matsui, T., Suzuki, H., Takahashi, A., Oida, T., Nakata, M., Totsuka, T., and Ueda, H. 2008. *Water Air Soil Pollut.*, 195, 51–61.
- 笠井慎子・馬場光久・佐藤亮太・杉浦俊弘・小林裕志 2008. 土肥誌, 79, 173–179.
- Katayanagi, N., Sawamoto, T., Hayakawa, A., and Hatano, R. 2008. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 54, 662–680.
- Katayanagi, N., Sawamoto, T., Hayakawa, A., and Hatano, R. 2009. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 55, 590–598.
- Kato, S., Iwaishi, S. and Inubushi, K. 2008. *HortResearch*, 62, 39–44.
- Katsuyama, C., Kondo, N., Suwa, Y., Yamagishi, T., Itoh, M., Ohte, N., Kimura, H., Nagaosa, K., and Kato, K. 2008. *Microbes Environ.*, 23, 337–345.
- Khalil, M., and Inubushi, K. 2007. *Soil Biol. Biochem.*, 39, 2675–2681.
- Kimura, S.D., Mu, Z.J., Toma, Y., and Hatano, R. 2007. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 53, 373–386.
- Kimura, S.D., Toma, Y., Mu, Z.J., Yamada, H., and Hatano, R. 2010. *Sustainability Sci.*, 5, 19–27.
- Kitaoka, S., Sakai, T., Koike, T., Tobita, H., Uemura, A., Kitao, M., Maruyama, Y., Sasa, K., and Utsugi, H. 2007. *J. Agric. Meteorol.*, 63, 201–206.
- Kobayashi, S. 2009. *Glob. Change Biol. Bioenergy*, 1, 220–229.
- Koga, N., and Tsuji, H. 2009. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 55, 546–557.
- Koga, N., Takahashi, H., Okazaki, K., Kajiyama, T., and Koide,

- T, Saito, H., Shirota, T., Iwahana, G., Lopez C.M.L., Maximov, T.C., Hasegawa, S., and Hatano, R. 2010. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56, 645–662.
- Konôpka, B., Noguchi, K., Sakata, T., Takahashi, M., and Konôpková, Z. 2007. *J. For. Res.*, 12, 143–151.
- Koyama, L., Tokuchi, N., Fukushima, K., Terai, M., and Yamamoto, Y. 2008. *Trees*, 22, 851–859.
- Kubotera, H., and Wada, S. 2008. ペドロジスト, 52, 118–125.
- Kume, A., Numata, S., Watanabe, K., Honoki, H., Nakajima, H., and Ishida, M. 2009. *Ecol. Res.*, 24, 821–830.
- Kusa, K., Sawamoto, T., Hu, R., and Hatano, R. 2008. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 54, 777–785.
- Kusa, K., Sawamoto, T., Hu, R., and Hatano, R. 2010. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56, 186–199.
- Lee, M.S., Lee, J.S., and Koizumi, H. 2008. *Ecol. Res.*, 23, 777–785.
- Li, H., Fu, S., Zhao, H., and Xia, H. 2010. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56, 541–551.
- 李 海珠・浜崎忠雄・長友由隆・境 雅夫 2008. ペドロジスト, 52, 96–106.
- Lou, Y., Ren, L., Li, Z., Zhang, T., and Inubushi, K. 2007. *Water Air Soil Pollution*, 178, 157–167.
- Lou, Y., Inubushi, K., Mizuno, T., Hasegawa, T., Lin, Y., Sakai, H., Cheng, W., and Kobayashi, K. 2008. *Glob. Change Biol.*, 14, 2678–2687.
- Ma, J., Yagi, K., Xu, H., Han, Y., and Cai, Z. 2008. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 54, 638–643.
- 前田守弘・田中正一・太田 健 2008. 土肥誌, 79, 353–357.
- Matsubara, M., Morimoto, S., Sase, H., Ohizumi, T., Sumida, H., Nakata, M., and Ueda, H. 2009. *Water Air Soil Pollut.*, 200, 253–265.
- 松本 晃・小南裕志・石井弘明 2010. 日林誌, 92, 269–272.
- Matsushima, M., and Chang, S.X. 2007. *Plant and Soil*, 292, 243–258.
- Matsushima, M., Woo-Jung Choi, and Inubushi K. 2009. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 40, 3194–3206.
- Melling, L., Hatano, R., and Goh, K. J. 2007. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 53, 792–805.
- 三木直倫・松本武彦・加藤英孝 2009. 土肥誌, 80, 365–378
- Minamikawa, K., and Sakai, N. 2007. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 53, 657–667.
- Minamikawa, K., Nishimura, S., Sawamoto, T., Nakajima, Y., and Yagi, K. 2010. *Glob. Change Biol.*, 16, 796–809.
- Mori, A., and Hojito, M. 2007. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 53, 812–818.
- Mori, T., Ohta, S., Ishizuka, S., Konda, R., Wicaksono, A., Heriyanto, J., and Hardjono, A. 2010. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56, 782–788.
- Morishita, T., Sakata, T., Takahashi, M., Ishizuka, S., Mizoguchi, T., Inagaki, Y., Terazawa, K., Sawata, S., Igarashi, M., Yasuda, H., Koyama, Y., Suzuki, Y., Toyota, N., Muro, M., Kinjo, M., Yamamoto, H., Ashiya, D., Kanazawa, Y., Hashimoto, T., and Umata, H. 2007. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 53, 678–691.
- Mu, Z., Kimura, S. D., Toma, Y., and Hatano, R. 2008. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 54, 650–661.
- Muramatsu, Y., and Inubushi, K. 2009. *HortResearch*, 63, 35–43.
- Nagakura, J., Kaneko, S., Takahashi, M., and Tange, T. 2008. *Forest Ecol. Manage.*, 255, 2533–2541.
- 長倉淳子・金子真司・赤間亮夫・重永英年 2009. 関東森林研究, 60, 195–198.
- Nagata, O., Sugito, T., Kobayashi, S., and Sanemura, R. 2009. *J. Agri. Meteorol.*, 65, 151–159.
- Nakahara, O., Takahashi, M., Sase, H., Yamada, T., Matsuda, K., Ohizumi, T., Fukuhara, H., Inoue, T., Takahashi, A., Kobayashi, H., Hatano, R., and Hakamata, T. 2010. *Biogeochemistry*, 97, 141–158.
- 中西麻美・稲垣善之・深田英久・柴田昌三・大澤直哉 2008. 森林立地, 50, 167–173.
- Nakanishi, A., Inagaki, Y., Osawa, N., Shibata, S., and Hirata, K. 2009. *J. For. Res.*, 14, 388–393.
- Nanko, K., Mizugaki, S., and Onda, Y. 2008. *Catena*, 72, 348–361.
- Naser, H.M., Nagata, O., Tamura, S., and Hatano, R. 2007. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 53, 95–101.
- Nishimura, S., Yonemura, S., Sawamoto, T., Shirato, Y., Akiyama, H., Sudo, S., and Yagi, K. 2008. *Agri. Ecosys. Environ.*, 125, 9–20.
- Nishina, K., Takenaka, C., and Ishizuka, S. 2009a. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 55, 179–189.
- Nishina, K., Takenaka, C., and Ishizuka, S. 2009b. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 55, 203–214.
- Noguchi, K., Konôpka, B., Satomura, T., Kaneko, S., and Takahashi, M. 2007. *J. For. Res.*, 12, 83–95.
- 野口享太郎・平井敬三・高橋正通・相澤州平・伊藤優子・重永英年・長倉淳子・稲垣善之・金子真司・釣田竜也・吉永秀一郎 2009. 森林総合研究所報告, 8, 205–214.
- 大手信人・徳地直子 2010. 土壌の物理性, 114, 43–47.
- 大手信人・徳地直子・藤本将光 2010. 水利科学, 312, 1–16.
- Owen, J.S., King, H.B., Wang, M.K., and Sun, H. L. 2010. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56, 177–185.
- Park, J.H., Duan, L., Kim, B., Mitchell, M.J., and Shibata, H. 2010. *Environment International*, 36, 212–225.
- Pengnoo, A., Hashidoko, Y., Onthong, J., Gimsanguan, S., Sae-Ong, M., Shinano, T., Watanabe, T., and Osaki, M. 2007. *TROPICS*, 16, 1–7.
- Sakai, H., Inagaki, M., Noguchi, K., Sakata, T., Yatskov, M. A., Tanouchi, H., and Takahashi, M. 2010. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56, 332–343.
- Sakata, T., Ishizuka, S., and Takahashi, M. 2007. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 53, 328–336.
- 酒井寿夫・相澤州平・阪田匡司・森貞和仁 2008. 日本森林学会北海道支部論文集, 56, 103–105.
- 酒井佳美・高橋正通・石塚成宏・稲垣善之・松浦陽次郎・雲野 明・中田圭亮・長坂晶子・丹羽花恵・澤田智志・北条良敬・玉木泰彦・総谷珠美・武田 宏・相浦英春・山内仁人・島田博匡・岩月鉄平・山場淳史・山田隆信・前田 一・室 雅道 2008. 森林立地, 50, 153–165.
- Sase, H., Takahashi, A., Sato, M., Kobayashi, H., Nakata, M., and Totsuka, T. *Environ. Pollut.*, 152, 1–10.
- 柴田英昭・小澤 恵・佐藤冬樹・笹賀一郎 2007. 日林誌, 89, 314–320.
- 柴田英昭・戸田浩人・福島慶太郎・谷尾陽一・高橋輝昌・吉田俊也 2009. 日林誌, 91, 408–420.
- 柴田英昭・福澤加里部 2010. 環境科学会誌, 23, 277–283.
- 柴田英昭・戸田浩人・稲垣善之・館野隆之輔・木庭啓介・福澤加里部 2010. 地球環境, 15, 133–143.
- 重永英年・高橋正通・長倉淳子・赤間亮夫 2008. 日林誌, 90, 182–189.
- 篠宮佳樹・山田 毅・鳥居厚志 2007. 森林立地, 49, 133–144.
- 篠宮佳樹・吉永秀一郎 2007. 水文・水資源学会誌, 21, 126–139.
- Shiratori, Y., Watanabe, H., Furukawa, Y., Tsuruta, H., and Inubushi, K. 2007. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 53, 387–400.
- Smakgahn, K., Fumoto, T., and Yagi, K. 2009. *J. Geophys. Res.*

- Biogeosci.*, 114, G02017, doi:10.1029/2008JG000775.
- Su, Y., Shinano, T., Purnomo, E., and Osaki, M. 2007. *TROPICS*, 16, 261–274.
- Sullivan, B.W., Kolb, T.E., Hart, S.C., Kaye, J.P., Dore, S., and Montes-Helu, M. 2008. *Forest Ecol. Manage.*, 255, 4047–4055.
- Supparttanapan, S., Saenjan, P., Quantin, C., Maeght, J.L., and Grunberger, O. 2009. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 55, 142–149.
- Takagi, K., Fukuzawa, K., Liang, N., Kayama, M., Nomura, M., Hojyo, H., Sugata, S., Shibata, H., Fukazawa, T., Takahashi, Y., Nakaji, T., Oguma, H., Mano, M., Akibayashi, Y., Murayama, T., Koike, T., Sasa, K., and Fujinuma, Y. 2009. *Global Change Biology*, 15, 1275–1288.
- 高橋正通 2008. ベドロジスト, 52, 73–76.
- 高橋正通・森貞和仁 2008. 土肥誌, 79, 109–111.
- Takahashi, M., Ishizuka, S., Ugawa, S., Sakai, Y., Sakai, H., Ono, K., Hashimoto, S., Matsuura, Y., and Morisada, K. 2010. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56, 19–30.
- Takahashi, T., Mitamura, A., Ito, T., Ito, K., Nanzyo, M., and Saigusa, M. 2008. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 54, 362–368.
- Takakai, F., Desyatkin, A.R., Lopez, C.M.L., Fedorov, A.N., Desyatkin, R.V., and Hatano, R. 2008. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 54, 938–949.
- Takata, Y., Funakawa, S., Akshalov, K., Ishida, N., and Kosaki, T. 2007. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 53, 289–299.
- Takata, Y., Funakawa, S., Yanai, J., Mishima, A., Akshalov, K., Ishida, N., and Kosaki, T. 2008. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 54, 159–171.
- 玉井幸治・清水貴範・大貫靖浩・石塚成宏 2010. 森林立地, 52, 1–10.
- Tamai, N., Takenaka, C., and Ishizuka, S. 2007. *Soil Biol. Biochem.*, 39, 1730–1736.
- Tanikawa, T., Takahashi, M., Imaya, A., and Ishizuka, K. 2009. *Geoderma*, 151, 42–49.
- 谷川東子・高橋正通・野口享太郎・重永英年・長倉淳子・酒井寿夫・石塚和裕・赤間亮夫 2009. 環境科学会誌, 22, 401–414.
- Terazawa, K., Ishizuka, S., Sakata, T., Yamada, K., and Takahashi, M. 2007. *Soil Biol. Biochem.*, 39, 2689–2692.
- Tobari, Y., Koba, K., Fukushima, K., Tokuchi, N., Ohte, N., Tateno, R., Toyoda, S., Yoshioka, T., and Yoshida, N. 2010. *Rapid Commun. Mass Spectrom.*, 24, 1281–1286.
- Tokida, T., Fumoto, T., Cheng, W., Matsunami, T., Adachi, M., Katayanagi, N., Matsushima, M., Okawara, Y., Nakamura, H., Okada, M., Sameshima, R., and Hasegawa, T. 2010. *Biogeosci.*, 7, 2639–2653.
- Tokuchi, N., and Fukushima, K. 2009. *For. Ecol. Manag.*, 257, 1768–1775.
- Toma, Y., Kimura, S. D., Hirose, Y., Kusa, K., and Hatano, R. 2007. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 53, 692–703.
- Toma, Y., Kimura, S. D., Yamada, H., Hirose, Y., Fujiwara, K., Kusa, K. and Hatano, R. 2010. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56, 663–675.
- Toma, Y., and Hatano, R. 2007. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 53, 198–205.
- 鳥居厚志・森 一生・中川弘久・藤本浩平 2009. 環境情報科学論文集, 23, 493–498.
- Tsui, C.C., and Chen, Z.S. 2010. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56, 319–331.
- Ugawa, S., Hashimoto, T., Aizawa, S., Kaneko, S., and Takahashi, M. 2010a. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56, 466–475.
- Ugawa, S., Iwamoto, K., Matsuura, Y., Takahashi, M., and Fukuda, K. 2010b. *Plant and Soil*, 326, 303–310.
- Ugawa, S., Miura, S., Iwamoto, K., Kaneko, S., Fukuda, K. 2010c. *Plant and Soil*, 335, 469–478.
- 浦川梨恵子・戸田浩人・生原喜久雄 2007. 日林誌, 89, 190–199.
- 浦川梨恵子・戸田浩人・生原喜久雄・崔 東寿 2009. 日林誌, 91, 184–191.
- Vanguelova, E.I., Hirano, Y., Eldhudet, T.D., Sas-Paszt, L., Bakker, M.R., Püttsepp, Ü., Brunner, I., Löhmus, K., and Godbold, D. 2007. *Plant Biosystems*, 141, 460–480.
- Wang, L., and Cai, Z. 2008. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 54, 786–793.
- Watanabe, M., Takamatsu, T., Koshikawa, M.K., Yamamura, S., and Inubushi, K. 2008. *Atmospheric Environment*, 42, 7339–7347.
- Watanabe, M., Yamamura, S., Takamatsu, T., Koshikawa, M.K., Hayashi, S., Murata, T., Saito, S.S., Inubushi, K., and Sakamoto, K. 2010. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56, 123–132.
- Watanabe, T., Ogawa, N., Funakawa, S., and Kosaki, T. 2008. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 54, 856–869.
- Xu, X., and Inubushi, K. 2007a. *Chinese Science Bulletin*, 52, 3281–3291.
- Xu, X., and Inubushi, K. 2007b. *Euro. J. Soil Sci.*, 58, 668–679.
- Xu, X., Han, L., Wang, Y., and Inubushi, K. 2007. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 53, 430–440.
- Xu, X., and Inubushi, K. 2008. *Chinese Science Bulletin*, 53, 1087–1093.
- Xu, X., and Inubushi, K. 2009a. *Biology and Fertility of Soils*, 45, 265–271.
- Xu, X., and Inubushi, K. 2009b. *Chinese Science Bulletin*, 54, 1426–1433.
- Xu, X., and Inubushi, K. 2009c. *Euro. J. Soil Sci.*, 60, 489–498.
- Xu, X., and Inubushi, K. 2009d. *Advances in Atmospheric Sciences*, 26, 1253–1261.
- Yagasaki, Y., Mulder, J., and Okazaki, M. 2006a. *Geoderma*, 137, 40–57.
- Yagasaki, Y., Mulder, J., and Okazaki, M. 2006b. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70, 147–163.
- Yamada, T., Inoue, T., Fukuhara, H., Nakahara, O., Izuta, T., Suda, R., Takahashi, M., Sase, H., Takahashi, A., Kobayashi, H., Ohizumi, T., and Hakamata, T. 2007. *Water Air and Soil Pollut. Focus*, 7, 259–266.
- 山根 剛・山田一郎 2009. 土肥誌, 80, 403–407.
- Yamashita, N., Ohta, S., Sase, H., Luangjame, J., Visaratana, T., Kietvuttinon, B., Garivait, H., and Kanzaki, M. 2010. *For. Ecol. Manag.*, 259, 1502–1512.
- Yan, X., and Cai, Z. 2008. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 54, 819–825.
- Yan, X., Akiyama, H., Yagi, K., and Akimoto, H. 2009. *Global Biogeochem. Cycles.*, 23, DOI:10.1029/2008GB003299.
- 柳井洋介・常田岳志 2009. 土と微生物, 63, 26–31.
- Yanai, Y., Toyota, K., and Okazaki, M. 2007a. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 53, 181–188.
- Yanai, Y., Toyota, K., and Okazaki, M. 2007b. *Biol. Fertil. Soil*, 44, 113–119.
- 柳井洋介・豊田剛己・岡崎正規 2007. 土と微生物, 61, 135–146.
- Yanai, Y., Hirota, T., Iwata, Y., Nemoto, M., Nagata, O., and Koga, N. 2010. *Soil Biol. Biochem.*, ??, doi:10.1016/j.soilbio.2010.06.009.
- Yanai, Y., Morishita, T., Takakai, F., Hatano, R., Limin, S.H., Darung, U., and Dohong, S. 2007c. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 53, 806–811.
- Yang, R., Ti, C., Li, F., Deng, M., and Yan, X. 2010. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56, 86–94.
- Yokozawa, M., Shirato, Y., Sakamoto, T., Yonemura, S., Nakai, M., and Ohkura, T. 2010. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56, 168–176.
- Zhang, Z., Yu, D., Shi, X., Warner, E., Ren H., Sun, W., Tan, M., and Wang, H. 2010. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56, 307–318.