

## 第1部門 土 壤 物 理

### 物質循環・動態

谷山一郎<sup>1</sup>・岩田幸良<sup>2</sup>・藤井一至<sup>3</sup>

#### 1. 土壌中の水分・熱移動と溶質移動

##### 1) 野外観測

森林では、木の幹を伝って雨水が選択的に流れる樹幹流が、降雨時の浸透や非降雨時の水の再分配過程に大きな影響を与えることが明らかにされた(嶋田ら, 2008; Liang *et al.*, 2007, 2009). また、撥水性をもつ森林土壌で降水量や降雨履歴により表面流出量が異なること(Miyata *et al.*, 2007; Gomi *et al.*, 2008)や対象とするスケールの違いによる撥水性の効果の違い(宮田ら, 2009; Miyata *et al.*, 2010), 撥水性による土壌への浸透形態の変化(Kobayashi and Shimizu, 2007)が解明された. 透水性基岩が森林水文に与える役割(小杉, 2007), 森林樹幹下における大粒の滴を再現した正確な浸透能の評価(加藤ら, 2008)やテンションフリーライシメータなどによる斜面の水移動の解明(篠宮・吉永, 2008)が行われた. シベリアの永久凍土地帯では、多雨で夏の融解深が増加したこと(Iijima *et al.*, 2010), 凍結・融解プロセスの変化による夏の表層の土壌水分量の増加が蒸発散に影響を与えたこと(Ohta *et al.*, 2008), 木が枯れた原因が多雨による土壌水分量の増加によること(Iwasaki *et al.*, 2010)が解明された.

北海道の農地では、土壌凍結深(季節凍土)の変化が融雪水の浸透に大きく影響すること(Iwata *et al.*, 2008a, 2010a), 地表面の厚い氷板が融雪水の浸透を抑制すること(松田ら, 2009), 融雪期以外の期間にも雪の断熱程度で土壌水分移動が大きく変化すること(Iwata *et al.*, 2010b)が示された. 本州の山岳地帯でも、最大土壌凍結深と最大積雪深の間に高い相関があることが報告された(濱田・田中, 2010). また、凍結層が形成されるとき熱と水の移動の詳細な解析が行われた(Iwata *et al.*, 2008b; Tokumoto *et al.*, 2010).

寒冷地とは対照的な環境の東北タイでは、新しい節水灌漑の有効性のHYDRUS(水・熱・溶質移動の数値シミュレーションソフト)による実証(小田・諸泉, 2007), サトウキビ圃場で毛管上昇が栽培に与える影響の評価(Moroizumi *et al.*, 2009), 土壌水分量や地下水位を考慮した水収支の解明(Hamada and Sukchan, 2008; Hamada *et al.*, 2008)が行われた. タイよりも降水量が少ないモンゴルやエチオピアでも、雨季と乾季の土壌水分移動の特徴が明らかにされた(Yamanaka *et al.*, 2007; Suzuki *et al.*, 2009).

田畑輪換を目的とした汎用水田では、適切な地下水位制御によるダイズの収量の増加(村上ら, 2007), インタープレート試験によるダイズ圃場の物理性の評価(塚本ら, 2008), 弾丸暗渠の有無と浸透能の関係に関する検討(冠ら, 2007), 表土の鎮圧と明渠, 圃場の傾斜化による排水促進効果の検討(松田・向, 2009), 新しい地下灌漑システムの開発(若杉・藤村, 2009)が行われた.

その他、バイパス流の定量的な評価(Eguchi and Hasegawa, 2008; Wang *et al.*, 2009), 浅層地下水の空間分布や流れに関する検討(飯山ら, 2007; Eguchi *et al.*, 2009a), 熱水消毒時の土壌中の熱と水の移動に関する検討(加藤ら, 2009), 斜面におけるキャピラリーバリアーに関する検討(森井ら, 2009)および地下水を熱源と温暖化緩和に利用するための検討(石田ら, 2008)が行われた.

溶質の移動に関して、北海道における地下水のNO<sub>3</sub>汚染の現状把握とその対策の検討(志賀・中津, 2009), 農地からの肥料成分が河川水質に与える影響の評価(岡澤ら, 2008, 2009), 黒ボク土水田の肥料成分の流出機構の解明(松浦ら, 2010), 湖沼における有機性汚染の原因物質の水田での動態調査(人見ら, 2007), 農業や生活排水が地下水の汚染に与える影響の調査(村松ら, 2010), 化学肥料や農薬の地下水への混入に関する調査(吉本ら, 2007; 土原ら, 2009), 塩類の集積・溶脱機構の解明(Akai *et al.*, 2008; 赤江ら, 2010), 塩水を灌水したときの土壌中の塩類の挙動の調査(山崎ら, 2007), 牛糞堆肥を施用した畑における窒素挙動の観測(井原ら, 2009, 2010; 松波・三浦, 2010), 豚糞堆肥の連用によるZnの下層への移動の実態解明(Asada *et al.*, 2010), 永久凍土地帯のアラスカの陰イオンや多雪地帯の畑の融雪期のNO<sub>3</sub>の移動メカニズムの解明(Lopez *et al.*, 2007; 青木・長谷川, 2007), 熱水消毒時の窒素肥料動態の観察(落合ら, 2009)が行われた.

NO<sub>3</sub>の系外への排出を抑制するための研究として、施肥量を減らすことで茶園から流出するNO<sub>3</sub>濃度が大幅に改善されたことや(Hirono *et al.*, 2009), 茶園から排出されたNO<sub>3</sub>の多くがその近くの水田帯水層で脱窒されていたこと(Eguchi *et al.*, 2009b), 減肥と節水管理により蓮田からの窒素の流出が抑えられたこと(折本・武井, 2007), ヒマワリの作付けにより地下水のNO<sub>3</sub>濃度が減少したこと(末久ら, 2007), バガス炭の施用, 消化液の利用, ソルガムの栽培によりNO<sub>3</sub>の地下水汚染が軽減できたこと(陳ら, 2007, 2008)が報告された.

##### 2) 観測手法

新しい観測手法により野外観測の可能性が広がる. 土壌中の水環境を非破壊に測定する方法として、地中レーダや孔井間地中レーダによる浅層の水分量や地下水位, 浸潤前線のモニタリングが検討された(黒田ら, 2007; 竹下,

<sup>1</sup> 農業環境技術研究所

<sup>2</sup> 農研機構・北海道農業研究センター

<sup>3</sup> 森林総合研究所

2008; 竹下ら, 2009; Kuroda *et al.*, 2009; 坂田ら, 2010). また, 電気探査法や地中レーダによる土壌水分量や土質, 土壌の厚さの推定 (Yamakawa *et al.*, 2010), 多周波数電磁探査法 (平井ら, 2008) や高周波 CSTM 法 (半田, 2008), 核磁気共鳴表面スキャナー (中島・宇津, 2008) による土壌の水環境の測定が検討された. 熱画像から圃場の土壌水分量を評価できることが示された (Sugiura *et al.*, 2007; 池端ら, 2007).

土壌水分センサーについては, 3 mm と非常に細かい間隔で水分量の測定が可能な TDR プローブの開発 (伊藤ら, 2009), 時間領域透過法 (TDT) による土壌の水分量や EC の測定の検討 (宮本ら, 2008), 静電容量式土壌水分計 (ECH2O プローブ) の温度・EC 依存性を補正する方法 (齋藤ら, 2008; 齋藤, 2010) や影響範囲の評価 (井本ら, 2010), ECH2O プローブの初期不良や専用ロガーの測定精度に関する検討 (星野ら, 2010) が行われた. また, 土壌水分プロファイルを測定するセンサーの現場でのキャリブレーション方法や測定精度の検討が実施された (諸泉ら, 2008a; 林・田中, 2010).

水や熱の移動の測定に関して, 土壌水分や圧力水頭, 地温や原位置透水試験の測定値を用い, 不飽和透水係数や水フラックスを推定する方法が提案された (竹下, 2008; Izumi *et al.*, 2009; Iwata *et al.*, 2010b). また, 実験室で蒸発法により不飽和透水係数を推定する際の実験条件の検討 (坂井・取出, 2007a), 非常に小さな水フラックスの測定が可能な温度パルスプローブの測定精度向上に関する検討 (Saito *et al.*, 2007), ペルチェ素子を利用した安価な地中熱流板の検討 (百瀬・粕淵, 2008), 地温から水の移流を評価することで池堤防の漏水箇所を特定する手法の開発 (吉迫, 2008), 地表面の熱収支からみた土壌の乾湿の判定方法の検討 (Hirota and Fukumoto, 2009) が行われた.

溶質移動に関する測定法については, 野外での EC や NO<sub>3</sub> 濃度, Na イオンの TDR による連続モニタリングの検討 (廣野・野中, 2008; Kobayashi *et al.*, 2008), 粘土懸濁液の水分量と EC を精度良く測定できる TDR プローブの開発 (Miyamoto *et al.*, 2009), 土壌のバルク EC の測定により緩効性肥料の溶解速度を測定する方法の検討 (藤原ら, 2009) が行われた. また, ガソリンや有機溶媒などの汚染物質の土壌中での濃度を水分センサー (ADR) や双曲熱パルス法により測定する方法の開発 (Moroizumi and Sasaki, 2008; 諸泉ら, 2008b), これらの汚染物質の土壌中の動態を調査するためのトレーサー試験の検討 (西脇ら, 2007) が行われた. 複数層の土壌の EC を TDR で測定する場合, 各層の EC の平均値が全体の EC の平均値とほぼ等しくなることが確認された (落合ら, 2010).

### 3) 室内試験

自然現象を深く理解するためには, 実験室での精密な実験が有効である. 土壌中の水移動に大きな影響を与える撥水性の発生機構の解明が進んだ (Kawamoto *et al.*, 2007; Leelamanie and Karube, 2007, 2009a, 2009b;

Leelamanie *et al.*, 2008a, 2008b, 2010; 小淵ら, 2009b; Karunarathna *et al.*, 2010). フィンガー流について, フィンガー流路が発生する際の水圧の変動の測定やフィンガー流路先端速度, 接触角の測定結果の解析や (Annaka and Hanayama, 2007, 2010; 安中ら, 2008), 浸潤の不安定性の土壌による違いに関する検討 (長・井上, 2009) が行われた. その他, 乾燥した砂層における蒸発と水蒸気の凝集を考慮した水移動機構の解明 (Sakai *et al.*, 2009), 水の損失を削減するための地中灌漑方法の検討 (Nagasawa *et al.*, 2008), 熱帯土壌の浸透特性の解明 (Askari *et al.*, 2008), クラストの形成が透水性に与える影響の解明 (Onishi *et al.*, 2008; 小原ら, 2008), 水の移動に伴う線虫の挙動の解明 (Fujimoto *et al.*, 2009), 土壌水分量の測定に影響を与える黒ボク土固相の誘電率の測定 (Kameyama and Miyamoto, 2008) が行われた. 土壌凍結時の水移動について, 凍結前線付近での微生物と水の顕微鏡観察 (Watanabe and Ito, 2008), 水分と温度プロファイルから不飽和透水係数を決定する方法の提案 (Watanabe and Wake, 2008), 水の誘電率を考慮した TDR による精密な不凍水量の測定 (Watanabe and Wake, 2009), サーモ TDR による凍土の不凍水量, 熱容量, 熱伝導率, 全土壌水分量の測定 (渡辺ら, 2010a) が行われた.

土壌の熱的特性について, 土壌を焼いた時の比熱や熱伝導率の変化 (Guo *et al.*, 2007a, 2007b) や熱や水分の移動の観測 (小淵ら, 2009a), 塩分が土壌の熱伝導率に与える影響の評価 (Sakaguchi *et al.*, 2007; Mochizuki *et al.*, 2008), 減圧条件での土壌中の熱的特性の解明 (Momose *et al.*, 2008; Sakaguchi *et al.*, 2009), 著しい膨張と収縮を示す土壌の熱伝導率の測定 (Ardiansyah *et al.*, 2008), 浸潤前線で発生する浸潤熱の測定 (赤江ら, 2007) が行われた.

溶質の移動に関しては, 北海道の主要な火山灰土壌の NO<sub>3</sub> の遅延特性が報告された (三木ら, 2009). 浅い地下水による塩の集積が小麦の蒸発や根の水分吸収に与える影響 (Nishida *et al.*, 2009) および土壌中の塩濃度と大豆の根の水吸収量の関係 (Fujimaki *et al.*, 2008) が調査された. 土壌中の汚染物質の除去などに使用される界面活性剤や (Ishiguro and Fujii, 2008; 石黒ら, 2008), 微量元素のヨウ素 (Shimamoto *et al.*, 2010), タンパク質とフミン酸 (濱田ら, 2009), 農薬 (土原ら, 2009) の土壌中での挙動が調査された. 粗孔隙が溶質の移動に与える影響が, 人工的に粗孔隙を作成したカラムによる試験 (Sugita and Nakane, 2007) や自然土壌と攪乱した土壌の溶質の移動の違い (Mori and Higashi, 2009), 飽和土と不飽和土の溶質の移動の違い (徳本ら, 2007) を調査することで評価された. 酸性雨が土壌からの栄養塩類の容脱に与える影響 (森澤ら, 2010) や拡散二重層が土壌へのコロイドの吸着に与える影響 (Kobayashi *et al.*, 2009) が調査された.

### 4) 数値シミュレーションモデル

信頼性の高い野外観測データや実験データにより, 数値シミュレーションモデルの開発が可能となる. 土壌中の

水・熱・溶質の移動を解析する上で重要なパラメータである通気係数、熱伝導率や電気伝導度、溶液の拡散係数を推定するモデルの様々な土壌への適用に関する検討がなされた (Hamamoto *et al.*, 2009, 2010)。また、土壌凍結時の透水係数 (Watanabe and Flury, 2008; 渡辺ら, 2010b)、非凍結時の熱伝導率 (Kasubuchi *et al.*, 2007)、水と油が混在する土壌での熱伝導率 (望月ら, 2007) の新しい推定モデルが開発された。

土壌中の水の動きを評価することで、低水分ストレスの影響を考慮した牧草の生産性の予測 (中辻, 2008) や斜面崩壊を予測する (Sharma and Nakagawa, 2010) モデルが開発された。また、森林のバイパス流 (パイプ流) を表現するモデル (An *et al.*, 2008)、森林の樹幹流を表現したモデル (Liang *et al.*, 2009) が開発された。差分法の弱点を適切な座標変換により克服し、有限要素法を用いた HYDRUS と同等以上の性能で3次元の水移動解析が可能なモデルが開発された (An *et al.*, 2010)。

開発されたモデルの検証について、地温を推定する際の地表面の熱収支モデルや入力データの質に関する検討 (斎藤ら, 2007; Saito and Simunek, 2009)、拡張フォースレストモデルで土壌凍結深を推定したときの精度の検証 (Nemoto *et al.*, 2008) が行なわれた。

圃場容水量は圧力水頭などの静的な概念で決定できないことが指摘されてきたが、HYDRUS の数値シミュレーションにより、本来の動的な定義で圃場容水量を決定する方法が提案され、土性などから簡便に圃場容水量を決定する図が作成された (Twarakavi *et al.*, 2009)。気候変動に伴う永久凍土や季節凍土の地温 (土壌凍結深) の変化の予測 (Saito, 2008; 井上ら, 2010)、太陽エネルギーを利用して海水から真水を作るソーラーポンプで使用される砂柱の水・熱移動の解析 (Ichikawa *et al.*, 2008, 2010)、土壌の凍結課程における水・熱・溶質の移動の解析 (渡辺ら, 2007)、不飽和透水係数を水分特性曲線から推定するアルゴリズムの検討 (坂井・取出, 2007b)、HYDRUS を活用して土壌中の水移動の基礎を理解する試み (取出ら, 2009, 2010a, 2010b, 2010c) が行われた。

これらの数値シミュレーションモデルは計算量が膨大になるため、広域な水移動の解析にはタンクモデルが用いられる。水田の浸透水が地下水涵養に与える影響 (Takeuchi *et al.*, 2009) や水田面積の変化に伴う流域の水貯留能力の変遷 (Takeuchi *et al.*, 2010) の評価、タイの水田地帯の土壌水分量の広域評価 (Ishigooka *et al.*, 2010)、風食防止のための灌漑方法の検討 (有森ら, 2009a, 2009b)、温室内のキュウリ栽培のための最適な灌漑方法の検討 (Bai *et al.*, 2008) が、タンクモデルによる水移動の解析により行われた。タンクモデルの流出パラメータは実態に合うように経験的に求められることが多いが、これらを物理パラメータから理論的に導出する試みが行なわれた (呉・山田, 2009)。流出パラメータを物理プロセスに即した形で改良することで、推定精度を向上させる取り組みも行なわれた

(Wang and Takase, 2007)。

土壌中の窒素の移動について、新たに開発された数値シミュレーションモデルのパッケージ (前田, 2008; 唐ら, 2007) が紹介された。タンクモデルに窒素循環を組み込んだモデルにより、農地が地下水の水質に与えた影響の解明 (吉本ら, 2007) や窒素の溶脱を抑制するための施肥管理の提案 (Takeuchi and Kawachi, 2007) がなされた。形態変化を考慮した土壌中の窒素の移動モデルを用いて、水田と畑の窒素循環の違いについての検討が行われた (中村・取出, 2007)。塩濃度が高い条件での作物の根の吸収を考慮した溶質移動モデルや (Nishida and Shiozawa, 2010)、土壌中で水と一緒に移動するコロイドの挙動を記述する確率モデル (Bradford and Toride, 2007) が開発された。

## 文 献

- 赤江剛夫・中尾千晶・史 海濱 2010. 土壌物理性, 115, 43-50.  
 Akae, T., Nakao, C., Shi, H., and Zhang, Y. 2008. 農工論集, 253, 27-33.  
 赤江剛夫・田中亜弥・石黒宗秀 2007. 土壌物理性, 106, 11-19.  
 An, H., Ichikawa, Y., Tachikawa, Y., and Shiiba, M. 2008. *Hydrol. Res. Letters*, 2, 52-55.  
 An, H., Ichikawa, Y., Tachikawa, Y., and Shiiba, M. 2010. *Water Resour. Res.*, 46, W11521.  
 Annaka, T., and Hanayama, S. 2007. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 71, 901-908.  
 Annaka, T., and Hanayama, S. 2010. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56, 366-370.  
 安中武幸・川島麻里枝・花山 奨 2008. 農工論集, 253, 53-59.  
 青木 大・長谷川周一 2007. 農工論集, 252, 33-40.  
 Ardiansyah, Shiozawa, S., and Nishida, K. 2008. 土壌物理性, 110, 67-77.  
 有森正浩・遠藤 泰・小林孝至 2009a. 農工論集, 262, 1-6.  
 有森正浩・遠藤 泰・小林孝至 2009b. 農工論集, 263, 7-13.  
 Asada, K., Toyota, K., Nishimura, T., Ikeda, J.I., and Hori, K. 2010. *J. Environ. Sci. Health B*, 45, 1-8.  
 Askari, M., Tanaka, T., Setiawan, B. I., and Saptomo, S. K. 2008. 水文・水資源学会誌, 21, 215-227.  
 Bai, Y., Inosako, K., Liang, Y., Inoue, M., and Takuma, K. 2008. 農工論集, 257, 57-63.  
 Bradford, S.A., and Toride, N. 2007. *J. Environ. Qual.*, 36, 1346-1356.  
 陳 嫻・平良正彦・川満芳信・凌 祥之 2007. 農工論集, 251, 25-30.  
 陳 嫻・平良正彦・上野正美・凌 祥之 2008. 農工論集, 254, 31-37.  
 長 祐幸・井上光弘 2009. 土壌物理性, 111, 53-60.  
 Eguchi, S., and Hasegawa, S. 2008. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 72, 320-330.  
 Eguchi, S., Nakajima, Y., Yabusaki, S., Kasuya, M., Shibayama, H., Tsunekawa, A., and Imai, K. 2009b. *J. Environ. Qual.*, 38, 2198-2209.  
 Eguchi, S., Sawamoto, M., and Shiba, M. 2009a. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 55, 337-348.  
 Fujimaki, H., Ando, Y., Cui, Y., and Inoue, M. 2008. *Vadose Zone J.*, 7, 31-38.  
 Fujimoto, T., Hasegawa, S., Otobe, K., and Mizukubo, T. 2009. *Appl. Soil Ecol.*, 43, 200-205.

- 藤原菜世・浦田 遙・平井英行・片山勝之・細川 寿・岩本 嗣・高橋能彦 2009. 土肥誌, 80, 387-391.
- Gomi, T., Sidle, R. C., Ueno, M., Miyata, S., and Kosugi, K. 2008. *J. Hydrol.*, 361, 275-290.
- Guo, G., Zhang, H., Araya, K., Jia, H., Ohomiya, K., and Matsuda, J. 2007a. *Biosys. Eng.*, 96, 413-418.
- Guo, G., Zhang, H., Araya, K., Jia, H., Ohomiya, K., and Matsuda, J. 2007b. *Biosys. Eng.*, 96, 593-603.
- Hamada, H. and Sukchan, S. 2008. 土壤物理性, 110, 79-87.
- Hamada, H., Watabe, H., Moroizumi, T., and Sukchan, S. 2008. 土壤物理性, 109, 45-50.
- 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. 農工論集, 260, 121-122.
- 濱田洋平・田中 正 2010. 水文・水資源学会誌, 23, 398-407.
- Hamamoto, S., Moldrup, P., Kawamoto, K., and Komatsu, T. 2010. *Water Resour. Res.*, 46, W06514.
- Hamamoto, S., Perera, M. S. A., Resurreccion, A., Kamamoto, K., Hasegawa, S., Komatsu, T., and Moldrup, P. 2009. *Vadose Zone J.*, 8, 942-952.
- 半田 駿 2008. 土壤物理性, 108, 29-36.
- 林 敦史・田中 正 2010. 水文・水資源学会誌, 23, 470-477.
- 平井優也・森也寸志・宗森広昭・江草直和・森澤太平 2008. 土壤物理性, 109, 3-14.
- 廣野祐平・野中邦彦 2008. 水土の知, 76, 805-808.
- Hirono, Y., Watanabe, I., and Nonaka, K. 2009. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 55, 783-792.
- Hirota, T., and Fukumoto, M. 2009. 農業気象, 65, 375-386.
- 人見忠良・吉永育生・三浦 麻・濱田康治・白谷栄作・高木強治 2007. 農工論集, 250, 73-81.
- 星野亜季・藤巻晴行・大黒俊哉・武内和彦 2010. 土壤物理性, 114, 23-25.
- Ichikawa, H., Seki, H., and Takami, S. 2008. 農業気象, 64, 205-213.
- Ichikawa, H., Seki, H., and Takami, S. 2010. 農業気象, 66, 51-56.
- Iijima, Y., Fedorov, A. N., Park, H., Suzuki, K., Yabuki, H., Maximov, T. C., and Ohata, T. 2010. *Permafrost Periglacial Process.*, 21, 30-41.
- 井原啓貴・前田守弘・駒田充生・太田 健 2010. 土肥誌, 81, 489-498.
- 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.
- 飯山一平・松森堅治・藤原英司・中島泰弘 2007. 土壤物理性, 107, 17-26.
- 池端克則・阿部 浩・南部雄二 2007. 農工誌, 75, 129-130.
- 井本博美・西村 拓・宮崎 毅 2010. 土壤物理性, 114, 27-31.
- 井上 聡・廣田知良・岩田幸良・根本 学 2010. 寒地技術論文・報告集, 26, 96-100.
- 石田 聡・稲本 暁・小林郁雄・今泉眞之 2008. 水土の知, 76, 977-980.
- Ishigooka, Y., Kuwagata, T., Goto, S., Toritani, H., Hasegawa, T., Sawano, S., and Ohno, H. 2010. 農業気象, 66, 91-101.
- Ishiguro, M., and Fujii, T. 2008. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 72, 741-749.
- 石黒宗秀・鳥越崇宏・亀岡喜史・赤江剛夫 2008. 農工論集, 258, 7-13.
- 伊藤祐二・筑紫二郎・宮本英揮 2009. 土壤物理性, 111, 35-41.
- Iwasaki, H., Saito, H., Kuwao, K., Maximov, T. C., and Hasegawa, S. 2010. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 14, 301-307.
- Iwata, Y., Hayashi, M., and Hirota, T. 2008a. *Vadose Zone J.*, 7, 79-86.
- Iwata, Y., Hayashi, M., and Hirota, T. 2008b. 農業気象, 64, 301-309.
- Iwata, Y., Hirota, T., Hayashi, M., Suzuki, S., and Hasegawa, S. 2010b. *Hydrol. Process.*, 24, 1755-1765.
- Iwata, Y., Hayashi, M., Suzuki, S., Hirota, T., and Hasegawa, S. 2010a. *Water Resour. Res.*, 46, W09504.
- Izumi, T., Takeuchi, J., Kawachi, T., and Fuzihara, M. 2009. 農工論集, 264, 35-42.
- Kameyama, K., and Miyamoto, T. 2008. *Eur. J. Soil Sci.*, 59, 1253-1259.
- 冠 秀昭・岩佐郁夫・星 信幸・加藤 誠 2007. 農工論集, 250, 107-115.
- Karunarathna, A.K., Moldrup, P., Kawamoto, K., de Jonge, L. W., and Komatus, T. 2010. *Vadose Zone J.*, 9, 719-730.
- Kasubuchi, T., Momose, T., Tsuchiya, F., and Tarnawski, V. R. 2007. 農工論集, 251, 53-57.
- 加藤弘亮・恩田裕一・伊藤 俊・南光一樹 2008. 水文・水資源学会誌, 21, 439-448.
- 加藤高寛・登尾浩助・北 宜裕 2009. 明治大学農学部研究報告, 58, 75-84.
- Kawamoto, K., Moldrup, P., Komatsu, T., de Jonge, L.W., and Oda, M. 2007. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 71, 1658-1666.
- Kobayashi, M., Nanaumi, H., Muto, Y. 2009. *Colloid Surf. A-Physicochem. Eng. Asp.*, 347, 2-7.
- Kobayashi, M., and Shimizu, T. 2007. *Hydrol. Process.*, 21, 2356-2364.
- Kobayashi, T., Yasutake, D., Wu, Y., Urayama, K., Tagawa, K., Wang, W., and Cho, H. 2008. *J. Fac. Agr. Kyushu Univ.*, 53, 535-541.
- 小杉賢一郎 2007. 水文・水資源学会誌, 20, 201-213.
- 呉 修一・山田正 2009. 水文・水資源学会誌, 22, 386-400.
- 黒田清一郎・浅野将人・二平 聡・奥山武彦・斎藤広隆・金 喜俊・竹内睦雄 2007. 物理探査, 60, 467-476.
- Kuroda, S., Jang, H., and Kim, H.J. 2009. *J. Appl. Geophys.*, 67, 361-366.
- Leelamanie, D.A.L. and Karube, J. 2007. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 53, 711-719.
- Leelamanie, D.A.L. and Karube, J. 2009a. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 55, 457-461.
- Leelamanie, D.A.L. and Karube, J. 2009b. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 55, 462-467.
- Leelamanie, D.A.L., Karube, J., and Yoshida, A. 2008a. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 54, 179-187.
- Leelamanie, D.A.L., Karube, J., and Yoshida, A. 2008b. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 54, 695-700.
- Leelamanie, D.A.L., Karube, J., and Yoshida, A. 2010. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56, 371-375.
- Liang, W.L., Kosugi, K., and Mizuyama, T. 2007. *Vadose Zone J.*, 6, 879-889.
- Liang, W.L., Kosugi, K., and Mizuyama, T. 2009. *J. Hydrol.*, 366, 62-75.
- Lopez, C.M.L., Brouchkov, A., Nakayama, H., Takakai, F., Fedorov, A.N., and Fukuda, M. 2007. *Hydrol. Proess.*, 21, 103-109.
- 前田守弘 2008. 土肥誌, 79, 89-99.
- 松田 周・向 弘之 2009. 農工論集, 262, 83-88.
- 松田 周・向 弘之・佐藤義和 2009. 農工論集, 262, 49-55.
- 松波寿弥・三浦吉則 2010. 土肥誌, 81, 549-556.
- 松浦悠人・嶋 栄吉・眞家永光 2010. 農工論集, 268, 9-16.
- 三木直倫・松本武彦・加藤英孝 2009. 土肥誌, 80, 365-378.
- Miyamoto, H., Chikushi, J., and Kanayama, M. 2009. *Soils Found.*,

- 49, 175–180.  
宮本英揮・伊藤直樹・安永円理子・高市信也・間瀬 淳・筑紫二郎 2008. 土壤物理性, 110, 3–12.  
宮田秀介・小杉賢一朗・五味高志 2009. 土壤物理性, 111, 9–16.  
Miyata, S., Kosugi, K., Gomi, T., Onda, Y., and Mizuyama, T. 2007. *Hydrol. Process.*, 21, 2365–2376.  
Miyata, S., Kosugi, K., Nishi, Y., Gomi, T., Sidle, R.C., and Mizuyama, T. 2010. *Hydrol. Process.*, 24, 535–549.  
望月秀俊・小岩崎真・須甲武志 2007. 土壤物理性, 105, 59–65.  
Mochizuki, H., Mizoguchi, M., and Miyazaki, T. 2008. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 54, 829–838.  
百瀬年彦・粕淵辰昭 2008. 土壤物理性, 108, 91–98.  
Momose, T., Sakaguchi, I., and Kasubuchi, T. 2008. *Eur. J. Soil Sci.*, 59, 982–986.  
Mori, Y. and Higashi, N. 2009. *Colloid Surf. A-Physicochem. Eng. Asp.*, 347, 121–127.  
森井俊広・竹下祐二・井上光弘・松本 智 2009. 農工論集, 263, 91–97.  
森澤太平・森也寸志・井手淳一郎・宗村広昭・武田育郎・井上光弘 2010. 土壤物理性, 114, 3–10.  
Moroizumi, T., Hamada, H., Sukchan, S., and Ikemoto, M. 2009. *Agric. Water Manage.*, 96, 160–166.  
諸泉利嗣・池本賢弘・濱田浩正・Sukchan, S. 2008a. 水文・水資源学会誌, 21, 361–367.  
Moroizumi, T., and Sasaki, Y. 2008. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 72, 1520–1526.  
諸泉利嗣・繁澤和佳子・佐々木長市 2008b. 地下水学会誌, 50, 17–24.  
村上 章・佐々木長市・安中武幸 2007. 土壤物理性, 107, 45–55.  
村松容一・荒木寛末・近藤史也・大城恵理・千葉 仁 2010. 土肥誌, 81, 7–15.  
Nagasawa, K., Zhang, J., Nishimura, T., Saito, H., and Kato, M. 2008. 沙漠研究, 18, 11–20.  
中村公人・取出伸夫 2007. 土壤物理性, 105, 83–97.  
中島善人・宇津澤慎 2008. 水土の知, 76, 795–799.  
中辻敏朗 2008. 北海道立農業試験場報告, 119, 1–53.  
Nemoto, M., Hirota, T., and Iwata, Y. 2008. 農業気象, 64, 177–183.  
Nishida, K., Khan, N.M., and Shiozawa, S. 2009. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 55, 375–384.  
Nishida, K. and Shiozawa, S. 2010. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 74, 774–786.  
西脇淳子・宮崎 毅・溝口 勝・駒井 武 2007. 土壤物理性, 107, 27–36.  
小淵敦子・溝口 勝・西村 拓・井本博美・宮崎 毅 2009b. 農工論集, 263, 73–79.  
小淵敦子・西村 拓・溝口 勝・井本博美・宮崎 毅 2009a. 農工論集, 260, 31–37.  
落合博之・登尾浩助・北 宜裕・加藤高寛 2009. 土壤物理性, 112, 9–12.  
落合博之・登尾浩助・溝口 勝 2010. 土壤物理性, 116, 3–8.  
小田正人・諸泉利嗣 2007. システム農学, 23, 245–250.  
小原 洋・高橋智紀・細川 寿 2008. 土壤物理性, 109, 27–44.  
Ohta, T., Maximov, T.C., Dolman, A.J., Nakai, T., van der Molen, M.K., Kononov, A.V., Maximov, A.P., Hiyama, T., Iijima, Y., Moors, E.J., Tanaka, H., Toba, T., and Yabuki, H. 2008. *Agric. Forest Meteorol.*, 148, 1941–1953.  
岡澤 宏・竹内 康・左村 公 2009. 農工論集, 259, 53–59.  
岡澤 宏・豊田祐道・島田沢彦・鈴木伸治・竹内 康 2008. 農工論集, 258, 45–50.  
Onishi, T., Kato, M., and Nishimura, T. 2008. 土壤物理性, 108, 53–65.  
折本善之・武井昌秀 2007. 土肥誌, 78, 363–369.  
Saito, H., and Simunek, J. 2009. *J. Hydrol.*, 373, 545–561.  
Saito, H., Simunek, J., Hopmans, J.W., and Tuli, A. 2007. *Water Resour. Res.*, 43, W07408.  
齋藤広隆・Simunek, J.・取出伸夫 2007. 土壤物理性, 107, 79–96.  
Saito, K. 2008. *J. Geophys. Res.*, 113, D21106.  
齋藤忠臣 2010. 土壤物理性, 114, 37–40.  
齋藤忠臣・藤巻晴行・安田 祐 2008. 土壤物理性, 109, 15–26.  
Sakaguchi, I., Momose, T., and Kasubuchi, T. 2007. *Eur. J. Soil Sci.*, 58, 92–97.  
Sakaguchi, I., Momose, T., Mochizuki, H., and Kasubuchi, T. 2009. *Eur. J. Soil Sci.*, 60, 110–115.  
坂井 勝・取出伸夫 2007a. 土壤物理性, 106, 33–46.  
坂井 勝・取出伸夫 2007b. 土壤物理性, 107, 63–77.  
Sakai, M., Toride, N. Simunek, J. 2009. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 73, 707–717.  
坂田 賢・野津俊光・徳富啓二・刑部信吾・三野 徹 2010. 水土の知, 78, 311–314.  
Sharma, R. H., and Nakagawa, H. 2010. *Landslides*, 7, 425–432.  
志賀弘行・中津智史 2009. 北海道立農試資料, 38, 1–106.  
嶋田 純・大角京子・大場和彦・丸山篤志 2008. 土壤物理性, 108, 19–28.  
Shimamoto, Y.S., Itai, T., and Takahashi, Y. 2010. *J. Geochem. Explor.*, 107, 117–123.  
篠宮佳樹・吉永秀一郎 2008. 水文・水資源学会誌, 21, 126–139.  
末久美由紀・中津智史・中本 洋 2007. 農土誌, 75, 410–411.  
Sugita, F. and Nakane, K. 2007. *Vadose Zone J.*, 6, 548–553.  
Sugiura, R., Noguchi, N., and Ishii, K. 2007. *Biosyst. Eng.*, 96, 301–313.  
Suzuki, S., Deressa, M., Watanabe, F., Shiratori, K., Matsumoto, I., Jabessa, B.S., and Takahashi, S. 2009. 沙漠研究, 19, 295–298.  
竹下祐二 2008. 土壤物理性, 108, 11–17.  
Takeuchi, J., Imagawa, C., Kawachi, T., Unami, K., Meda, S., and Izami, T. 2010. *Paddywater Environ.*, 8, 175–187.  
Takeuchi, J., and Kawachi, T. 2007. 農土論集, 247, 1–9.  
Takeuchi, J., Kawachi, T., Unami, K., Maeda, S., and Izumi, T. 2009. *Paddywater Environ.*, 7, 33–43.  
竹下祐二・森上慎也・森田周三・黒田清一郎・井上光弘 2009. 土木論集 C, 65, 943–950.  
取出伸夫・渡辺晋生・久行雄大・坂井 勝 2010b. 土壤物理性, 115, 51–60.  
取出伸夫・渡辺晋生・森崎大樹 2010a. 土壤物理性, 114, 71–80.  
取出伸夫・渡辺晋生・中川絢子 2010c. 土壤物理性, 116, 27–35.  
取出伸夫・渡辺晋生・坂井 勝 2009. 土壤物理性, 113, 31–41.  
Tokumoto, I., Noborio, K., and Koga, K. 2010. *Cold Reg. Sci. Tech.*, 62, 98–106.  
徳本家康・取出伸夫・井上光弘 2007. 農工論集, 252, 51–60  
唐 星児・志賀弘行・中本 洋・日笠裕治 2007. 土肥誌, 78, 607–610.  
土原健雄・吉本周平・石田 聡・今泉眞之 2009. 農工論集, 260, 101–111.  
塚本康貴・竹内晴信・北川 巖 2008. 水土の知, 76, 138–139.  
Twarakavi, N.K.C., Sakai, M., and Simunek, J. 2009. *Water Resour. Res.*, 45, W10410.  
若杉晃介・藤村新作 2009. 水土の知, 77, 705–708.  
Wang, Y., and Takase, K. 2007. 水文・水資源学会誌, 20, 116–124.  
Wang, K., Zhang, R., and Yasuda, H. 2009. *J. Hydrol.*, 370, 109–121.

- Watanabe, K., and Flury, M. 2008. *Water Resour. Res.*, **44**, WR007012.
- Watanabe, K., and Ito, M. 2008. *Cold Region Sci. Tech.*, **54**, 1-6.
- 渡辺晋生・紀藤哲矢・坂井 勝・取出伸夫 2010b. 土壤物理性, **116**, 9-8.
- 渡辺晋生・大森陽介・和気朋己・坂井 勝 2010a. 雪氷, **72**, 157-168.
- 渡辺晋生・取出伸夫・坂井 勝・Simunek, J. 2007. 土壤物理性, **106**, 21-32.
- Watanabe, K., and Wake, T. 2008. *Proc. International Conference on Permafrost*, 147-152.
- Watanabe, K., and Wake, T. 2009. *Cold Reg. Sci. Tech.*, **59**, 34-41.
- Yamakawa, Y., Kosugi, K., Masaoka, N., Tada, Y., and Mizuyama, T. 2010. *Vadose Zone J.*, **9**, 768-779.
- Yamanaka, T., Kaihotsu, I., Oyunbaatar, D., and Ganbold, T. 2007. *J. Arid Environ.*, **69**, 65-79.
- 山崎真吾・井上光弘・森也寸志・山本太平 2007. 農工論集, **252**, 25-32.
- 吉本周平・土原健雄・石田 聡・今泉眞之 2007. 農工論集, **251**, 69-82.
- 吉迫 宏 2008. 土壤物理性, **108**, 67-80.

## 2. 土壌中の物質循環

### 1) 炭素循環

土壌は陸域最大の炭素貯留プールであると同時に、温室効果ガスの放出源でもあるため (Lal, 2004), 土壌炭素蓄積量の変動および CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> フラックスの観測が農耕地・森林生態系において進められてきた。北海道十勝地方の耕地土壌では多湿黒ボク土が最も炭素蓄積量の多い土壌型であるが、排水改良事業によって有機物分解が促進されることを報告している (関谷ら, 2010)。カザフスタン北部のチェルノーゼム地帯では、夏季休閑によって土壌有機物の減耗が引き起こされることが示された (Takata *et al.*, 2008a, b)。水田条件では土壌炭素が蓄積する一方、田畑輪換は土壌炭素の減耗に繋がることからフラックス観測に基づく炭素収支から示された (Nishimura *et al.*, 2008; Mu *et al.*, 2008a, b)。異なる肥培管理条件における土壌炭素蓄積量変化のシミュレーションが RothC (Rothamsted-Carbon) モデル (Jenkinson *et al.*, 1990) を用いて行われ、炭素蓄積量を高める農地の肥培管理技術について検討された (Yokozawa *et al.*, 2010)。堆肥施用は土壌炭素の直接的な供給源としてだけでなく作物生産の増加を通じた間接的な土壌炭素蓄積の効果を有することも報告されている (Koga and Tsuji, 2009)。土壌炭素を高める肥培管理技術については CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O フラックスへの影響評価とともに収量・環境負荷 (NO<sub>3</sub> 汚染・NH<sub>4</sub> 揮散・微量無機成分) に及ぼす影響についても今後さらに評価する必要がある。

森林では、タワーによるフラックス観測によって土壌への有機物蓄積が重要な炭素シンクとなることが示唆されている (Ohtsuka *et al.*, 2007)。また、日本では森林土壌への火山灰混入量が多いほど炭素蓄積量が高いことが示された (Imaya *et al.*, 2010)。さらに、Sakai ら (2010) は炭素蓄積量の多い火山灰土壌においても、植林に伴って約

200 kg C ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> の土壌炭素が蓄積したことを観測している。土壌呼吸には植物の根呼吸と微生物呼吸が含まれ、その起源別測定は土壌炭素収支の把握のための重要且つ困難な課題となってきた (Kuzyakov, 2006)。Sakata ら (2007) は、ミズナラ林において <sup>13</sup>C 自然存在比を用いて微生物呼吸が土壌呼吸速度の 70% を占めることを報告している。Takahashi ら (2009, 2011) はトレンチ法を用いて微生物分解の寄与を推定し、タイ国のチーク植林地及び熱帯季節林において微生物呼吸が 63 ~ 85% を占めることを報告している。室内の <sup>14</sup>C トレーサー実験では、土壌微生物呼吸が低分子溶解有機物 (糖や有機酸) を基質として進むことが示され (Van Hees *et al.*, 2005; Fujii *et al.*, 2010)、現場条件でも核実験由来の <sup>14</sup>C をトレーサーとして微生物呼吸の大部分が比較的新鮮な土壌有機物の分解に由来することが示された (Koarashi *et al.*, 2009)。土壌呼吸速度の季節変動について、日本では地温に依存することが報告されているが (Sakata *et al.*, 2007)、タイ国の熱帯季節林では乾季よりも雨季に高くなる季節性があることが報告されている (Adachi *et al.*, 2009; Takahashi *et al.*, 2009)。リターバッグと NMR を組み合わせることによって落葉リターの各成分の分解・腐植化速度を現場で追跡することが可能になり (Ono *et al.*, 2009)、針葉樹のリターでは広葉樹よりも脂肪族炭素の土壌有機物への移行量が高いことが示された (Ono *et al.*, 2010)。シベリアの永久凍土では温度上昇に伴い active layer の厚さが変化し、土壌中の DOC 濃度が変動することが示された (Prokushkin *et al.*, 2009)。

嫌気条件下の分解最終産物である CH<sub>4</sub> の放出フラックス及びメカニズムが水田・湿地において観測されてきた (Inubushi *et al.*, 2002; Tokida *et al.*, 2010)。特に近年では、今後の環境変動に対する CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> の変動予測が大気 CO<sub>2</sub> 濃度上昇 FACE (free-air CO<sub>2</sub> enrichment) 実験を中心に実施されている。多くの品種で大気 CO<sub>2</sub> 濃度上昇に対して CH<sub>4</sub> 放出は根渗出物・微生物バイオマスの増加によって増加するが、コシヒカリは収量の安定性、CH<sub>4</sub> 放出の軽減という点から優れていることが示されている (Luo *et al.*, 2008)。FACE 実験における CO<sub>2</sub> 濃度や温度の上昇は光合成を増加させ、Fe (III) 還元よりも根からの有機物供給の増加によって CH<sub>4</sub> 放出が増加することを解明している (Tokida *et al.*, 2010)。CH<sub>4</sub> の放出量の予測に関して、Cheng ら (2007) は易分解性炭素量と Fe (III) 量によって、水田土壌からの CH<sub>4</sub> 生成量を推定するモデルを提案した。日本の水田での異なる稲わら処理条件での CH<sub>4</sub> 放出量の違いを記述するため、既存の DNDC モデルを基礎にした DNDC Rice モデルが考案され (Fumoto *et al.*, 2008)、同様に稲作の盛んなタイ国の水田土壌においてもモデルの適用が試みられている (Smakgahn *et al.*, 2009)。

CH<sub>4</sub> 放出量の削減に向けた技術も開発・適用されており、新潟の排水不良の強還元水田土壌ではパイプ暗渠排水によって還元状態が改善され、CH<sub>4</sub> 放出量が 71% 減少することが観測されている (Shiratori *et al.*, 2007; )

Furukawa *et al.*, 2008). また、落水期を設ける酸化還元電位の管理と稲わら施用によって  $\text{CH}_4$  放出量を減少させる栽培管理法が確立されている (Khalil and Inubushi, 2007; Minamikawa and Sakai, 2007; Yan *et al.*, 2009). 一方で、乾田化は易分解性有機物の分解・排水の増加による  $\text{NO}_3$  溶脱量の増加など土壌肥沃度の低下が懸念され、土壌の管理のしやすさ、土壌タイプなどを考慮した地域ごとに異なる水管理法の確立が求められている。水田の不耕起についても  $\text{CH}_4$  放出量を 43% 削減することが示されており (Harada *et al.*, 2007)、雑草駆除の課題とあわせて実施可能性について検討する必要がある。

一方、森林・草地では好気的な土壌水分条件での  $\text{CH}_4$  資化菌による分解に伴う  $\text{CH}_4$  吸収が多く報告されている (Morishita *et al.*, 2007; Sawamoto *et al.*, 2010).  $\text{CH}_4$  吸収速度は土壌によって異なり (黒ボク土 > 褐色森林土)、 $\text{N}_2\text{O}$  放出速度は植生によって異なること (スギ > ヒノキ > 広葉樹) が報告されている (Morishita *et al.*, 2007).  $\text{CH}_4$  消費は強酸性条件で抑制され、 $\text{pH}5.5\sim 6.2$  で高いことが報告されている (Xu and Inubushi, 2009). 日本の森林土壌が欧米と比較して高い  $\text{CH}_4$  酸化・吸収能を有する要因として、火山灰土壌の高い孔隙率が指摘されている (Ishizuka *et al.*, 2009). 一方、斜面上部・中部は吸収源となるものの、地下水位が高い斜面下部・溪畔林は  $\text{CH}_4$  の放出源ともなり得る (Itoh *et al.*, 2007, 2008). このため、同一森林内でも地下水位によって年変動が大きく ( $-0.45\sim 1.80\text{ kg CH}_4\text{ ha}^{-1}\text{ yr}^{-1}$ ) 吸収源にも放出源にもなり得ることが報告された (Itoh *et al.*, 2009). シベリア・タイガ林においても Alas と呼ばれる一部の湿地帯が森林全体の主要な  $\text{CH}_4$  放出源となることが観測された (Takakai *et al.*, 2008; Desyatkin *et al.*, 2009).  $\text{CH}_4$  放出は一般に温度に依存することが知られているが、北海道の積雪融解時の泥炭土においては、積雪の融解とともに雪中に蓄積していたガスバブルの放出が起こることが報告されている (Tokida *et al.*, 2007).

## 2) 窒素循環

窒素の工業的固定によって、肥料として大量の窒素が農地へ投入されるようになり、農地への窒素投入量は、1970年代半ばの 4000 万 t から 2006 年には世界で 1 億 t を超えた (FAOSTAT, 2008). すでに 25 億人が合成窒素なしに生存し得ない状況である (Duncan, 2003). 窒素肥料は今日の世界人口を支える一方で、温室効果ガスである  $\text{N}_2\text{O}$  放出・ $\text{NH}_3$  揮散、 $\text{NO}_3$  溶脱といった多くの環境負荷を与えており、この実態解明のために多くのモニタリングが実施されてきた。特に黒ボク土の広域分布、家畜糞尿の多量施用といった日本の地域性を反映したデータが集積しつつある。堆肥が多量施用された農耕地では高い  $\text{NO}_3$  溶脱量が観測されるとともに、溶脱モデルの検討によって土壌の透水性、 $\text{NO}_3$  吸着能、施肥後の降雨イベントのタイミングが黒ボク土の  $\text{NO}_3$  溶脱において重要な因子となることが示唆されている (Endo *et al.*, 2009). 特に黒ボク土では、 $\text{NO}_3$  吸着によって溶脱遅延が起こること、吸着能は pH や  $\text{SO}_4$  イ

オン濃度によって影響を受けることがバッチ・カラム実験において示されている (前田ら, 2008; 三木ら, 2009). 今後、現場条件における吸着された  $\text{NO}_3$  の長期的な挙動 (吸収、脱室、溶脱) の解明は重要な課題となる。窒素溶脱量の削減における植物・微生物の役割について実験室から現場における実証試験が実施され、土壌カラムでの栽培試験では  $\text{NO}_3$  溶脱量をトウモロコシの植栽密度を高めることで削減できること (Hashimoto *et al.*, 2007)、タンザニアの圃場試験では微生物バイオマスの窒素保持によって  $\text{NO}_3$  溶脱を軽減できる可能性が示唆されている (Sugihara *et al.*, 2010).

極めて地球温暖化係数の高い  $\text{N}_2\text{O}$  は硝酸化成・脱室の過程の中間産物であり、放出メカニズムの複雑さ故に依然として不明な点が多い。観測された  $\text{N}_2\text{O}$  フラックスは時空間的な変動が大きい点で森林・農耕地とも共通している (Konda *et al.*, 2008, 2010; Kusa *et al.*, 2010). Nishina ら (2009a, b) はスギ人工林の斜面位置によって  $\text{N}_2\text{O}$  放出量の時空間的な変動が大きく、斜面下部の C/N 比が低く、含水率が高い条件で  $\text{N}_2\text{O}$  フラックスが高くなること、地温とともに上昇することを報告した。また、溶存有機炭素・ $\text{NO}_3$  濃度の上昇によって凍結時にも  $\text{N}_2\text{O}$  放出量が高くなることを報告している。 $^{15}\text{N}$  トレーサー試験によって白菜畑から放出される  $\text{N}_2\text{O}$  や  $\text{NO}$  の大部分が硝化によって生産されること、 $\text{N}_2\text{O}$  放出と  $\text{NO}$  放出にはトレードオフの関係が存在することが確認された (Ding *et al.*, 2007). 一方、 $\text{N}_2\text{O}$  放出量及びメカニズムは土壌型によっても異なり、北海道の灰色低地土においては脱室が主要な  $\text{N}_2\text{O}$  放出源となること (Toma *et al.*, 2010)、下層からの  $\text{N}_2\text{O}$  ピークは粗孔隙を通した  $\text{NO}_3$  の移動・脱室によって起こることが示された (Kusa *et al.*, 2010). 熱帯泥炭の森林伐採地や農地における  $\text{N}_2\text{O}$  生産には酸耐性バクテリアや糸状菌が関与することが解明されている (Yanai *et al.*, 2007a; Hashidoko *et al.*, 2008). 北海道の灰色低地土において添加した残渣窒素量のうち  $\text{N}_2\text{O}$  として放出量される割合は残渣の C/N 比が低いほど高いことが示された (Toma and Hatano, 2007). 草地土壌では、 $\text{N}_2\text{O}$  放出の季節変動は堆肥施用時期、地温、水分条件に依存するが (Mori *et al.*, 2008)、草地更新時に  $\text{N}_2\text{O}$  放出が高くなる実態が明らかとなった (Mori and Hojito, 2007). 草地における  $\text{N}_2\text{O}$  の放出量は余剰無機態窒素の 1.2% に相当し (Shimizu *et al.*, 2010)、硫安または  $\text{CH}_4$  発酵消化液の施用条件では施肥窒素の 0.2% に相当したことが報告されている (Sawamoto *et al.*, 2010). 季節・年変動の大きな  $\text{N}_2\text{O}$  放出量の平均・予測値について気象因子や余剰窒素量から推定する試みも行われている (Katayanagi *et al.*, 2008).

$\text{N}_2\text{O}$  放出の削減に向けた技術開発も進んでおり、炭の添加による吸水効果によって比較的好気的な条件では  $\text{N}_2\text{O}$  の放出量が抑制されることが報告されている (Yanai *et al.*, 2007b). 現場条件では、硝化抑制剤であるジシアンジアミドの添加が  $\text{N}_2\text{O}$  放出の抑制に働くことが南カリマンタンのトウモロコシ畑で実証されている (Hadi *et al.*, 2008).

畑圃場におけるペレット鶏糞施用条件では降水後に $N_2O$ 放出が最大となることから、過湿時の施用を避けることによって $N_2O$ 放出を軽減できることが示唆されている (Hayakawa *et al.*, 2009). 今後、さらなるメカニズムの解明とともに実証データの集積によって放出削減技術を検証・確立する必要がある。

植物の窒素固定量と土壤への移行量は土壤の窒素動態を解明する上で重要なフローである。近年、畑転換後のダイズ圃場における土壤中の可給態窒素の減少が報告されており (稲原, 2006), 田畑輪換に伴う窒素動態・収支が関心を集めている。秋田県のダイズ畑における土壤窒素収支では、窒素固定量に対して穀物持ち去りが大きく高収量でのダイズ作が窒素の収奪に繋がること、完熟堆肥の利用によって緩和しうる事が示されている (Takakai *et al.*, 2010)。ダイズ作を含む作付体系全体での窒素収支を解明するためには、さらなる窒素収支のデータ集積と植物の窒素固定量の推定手法の確立が必要となる。

森林における窒素・リン等の養分収支は土壤の可給態養分量の把握や都市近郊・畜産地帯における窒素飽和の問題と関連して多く調べられてきた (Kaneko *et al.*, 2007)。土壤窒素の無機化速度を台湾の亜熱帯林において調べた研究では、斜面下部において上部よりも窒素無機化・硝化速度が高いことが示された (Tsui and Chen, 2010)。窒素の無機化速度は一般に気温、水分条件、落葉リター・土壤のC/N比に依存するが (平井ら, 2007), 京都・高知のヒノキ林では攪乱要因 (間伐・台風) によっても異なることが示された (Inagaki *et al.*, 2008, 2010)。窒素固定樹種では非固定種よりもリターフォールを通じた窒素の供給量が多く (Inagaki *et al.*, 2010), 窒素固定樹木の影響によって土壤窒素の無機化速度が高くなる事が示されている (Wang *et al.*, 2010)。一方で、高い窒素固定条件では、硝酸化成によって土壤の酸性化が進むことも報告されている (Yamashita *et al.*, 2008)。酸素・窒素の自然同位体比によって無機化と植物吸収の総速度を解明する試みも進められている (Osaka *et al.*, 2010)。

### 3) その他の物質循環

東アジアの産業化に伴う酸性降水物の増加の土壤への影響が懸念されるが、Tanikawaら (2009), Funakawaら (2008) は、日本の森林土壤が非晶質Al・Fe酸化物によって高い $SO_4$ 吸着能・酸緩衝能を有していることを示した。一方、伊自良湖流域では樹木の枯死が報告され、高い窒素降水物と樹木の病害倒木後の硝酸化成によって土壤・河川水の酸性化が進んだことが報告されている (Nakahara *et al.*, 2010)。土壤酸性化の要因としては酸性降水物だけでなく、生態系内部の樹木や微生物活動による酸生産も大きいことがプロトン収支から分かっており (Fujii *et al.*, 2008), 欧米の土壤と火山灰土壤を多く含む日本の酸性化プロセスの違いを認識した上で、要因解析及び予測を実施する必要がある。一方、中国の農耕地においても過剰な窒素肥料による土壤酸性化が報告されており (Guo *et al.*, 2010), 窒

素肥料の施用量削減の指導が必要とされている (Ju *et al.*, 2009)。日本やインドネシアの茶園流域では水系の酸性化が顕在化してきたが (中曾根ら, 2000; Husnain *et al.*, 2008), 一部ではその修復に向けた肥培管理・土地利用も成果を示しつつある (Hirono *et al.*, 2009)。

## 文 献

- Adachi, M., Ishida, A., Bunyavejchewin, S., Okuda, T., and Koizumi, H. 2009. *J. Trop. Ecol.*, 25, 532–539.
- Akiyama, H., Yan, X., and Yagi, K. 2010. *Glob. Chan. Biol.*, 16, 1837–1846.
- Cheng, W., Yagi, K., Akiyama, H., Nishimura, S., Sudo, S., Fumoto, T., Hasegawa, Hartley, A.E., and Megonigal, J.P. 2007. *J. Environ. Qual.*, 36, 1920–1925.
- Desyatkin, A.R., Takakai, F., Lopez, C.M.L., 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.
- Duncan, A.D. 2003. Feed or feedback: agriculture, population dynamics and the state of the planet.
- Endo, A., Mishima, S., and Kohyama, K. 2009. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*, 85, 41–61.
- FAOSTAT 2008. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://faostat.fao.org/> viewed May 2008.
- Fujii, K., Funakawa, S., Hayakawa, C., and Kosaki, T. 2008. *Geoderma*, 144, 478–490.
- Fujii, K., Hayakawa, C., Van Hees, P.A.W., Funakawa, S., and Kosaki, T. 2010. *Plant Soil*, 334, 475–489.
- Fumoto, T., Kobayashi, K., Li, C., Yagi, K., and Hasegawa, T. 2008. *Glob. Chan. Biol.*, 14, 382–402.
- 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.
- Guo, J.H., Liu, X.J., Zhang, Y., Shen, J.L., Han, W.X., Zhang, W.F., Christie, P., Goulding, K.W.T., Vitousek, P.M., and Zhang, F.S. 2010. *Science*, 327, 1008–1010.
- 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.
- Hashidoko, Y., Takakai, F., Toma, Y., Darung, U., Melling, L., Tahara, S., and Hatano, R. 2008. *Soil Biol. Biochem.*, 40, 116–125.
- Hashimoto, M., Herai, Y., Nagaoka, T., and Kouno, K. 2007. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 53, 300–309.
- Hayakawa, A., Akiyama, H., Sudo, S., and Yagi, K. 2009. *Soil Biol. Biochem.*, 41, 521–529.
- 平井敬三・金子真司・高橋正通 2007. 森林立地, 49, 123–131.
- Hirono, Y., Watanabe, I., and Nonaka, K. 2009. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 55, 783–792.
- Husnain, Wakatsuki, T., Setyorini, D., Hermansah, Sato, K., Masunaga, T. 2008. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 54, 916–927.
- Imaya, A., Yoshinaga, S., Inagaki, Y., Tanaka, N., and Ohta, S. 2010. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56, 454–465.
- Inagaki, M., Kamo, K., Titin, J., Jamalung, L., Japongan, J., Miura, S. 2010. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*, 88, 381–395.

- Inagaki, Y., Kuramoto, S., Torii, A., Shinomiya, Y., and Fukata, H. 2008. *For. Ecol. Manag.*, 255, 1859–1867.
- Inagaki, Y., Okuda, S., Sakai, A., Nakanishi, A., Shibata, S., and Fukata, H. 2010. *Ecol. Res.*, 25, 429–438.
- 稲原 誠 2006. 土肥誌, 77, 241–242.
- Inubushi, K., Cheng, W., Mizuno, T., Lou, Y., Hasegawa, T., Sakai, H., and Kobayashi, K. 2011. *Eur. J. Soil Sci.*, 62, 69–73.
- Inubushi, K., Sugii, H., Watanabe, I., and Wassmann, R. 2002. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*, 64, 71–77.
- Ishizuka, S., Sakata, T., Sawata, S., and Ikeda, S. 2009. *Biogeochemistry*, 92, 281–295.
- Itoh, M., Ohte, N., and Koba, K. 2009. *Soil Biol. Biochem.*, 41, 388–395.
- Itoh, M., Ohte, N., Koba, K., Sugimoto, A., and Tani, M. 2008. *J. Geophys. Res.*, 113, G03005.
- Itoh, M., Ohte, N., Koba, K., Katsuyama, M., Hayamizu, K., and Tani, M. 2007. *J. Geophys. Res.*, 112, G01019.
- Jenkinson, D.S. 1990. *Philos. Trans. R. Soc. London Ser. B*, 329, 361–368.
- Ju, X.T., Xing, G.X., Chen, X.P., Zhang, S.L., Liu, X.J., Cui, Z.L., Yin, B., Christie, P., Zhu, Z.L., and Zhang, F.S. 2009. *PNAS*, 106, 3041–3046.
- Kaneko, S., Akieda, N., Naito, F., Tamai, K., and Hirano, Y. 2007. *J. For. Res.*, 12, 38–44.
- Katayanagi, N., Sawamoto, T., Hayakawa, A., and Hatano, R. 2008. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 54, 662–680.
- Khalil, M.L., and Inubushi, K. 2007. *Soil Biol. Biochem.*, 39, 2675–2681.
- Koarashi, J., Ando, M., Ishizuka, S., Miura, S., Saito, T., and Hirai, K. 2009. *Glob. Chan. Biol.*, 15, 631–642.
- Koga, N., and Tsuji, H. 2009. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 55, 546–557.
- Konda, R., Ohta, S., Ishizuka, S., Arai, S., Ansori, S., Tanaka, N., and Hardjono, A. 2008. *Soil Biol. Biochem.*, 40, 3021–3030.
- Konda, R., Ohta, S., Ishizuka, S., Heriyanto, J., and Wicanksono, A. 2010. *Soil Biol. Biochem.*, 42, 1512–1522.
- Kusa, K., Sawamoto, T., Hu, R., and Hatano, R. 2010. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56, 186–199.
- Kuzyakov, Y. 2006. *Soil Biol. Biochem.*, 38, 425–448.
- Lal, R. 2004. *Science*, 304, 1623–1627.
- Luo, Y., Inubushi, K., Mizuno, T., Hasegawa, T., Lin, Y., Sakai, H., Cheng, W., and Kobayashi, K. 2008. *Glob. Chan. Biol.*, 14, 2678–2687.
- 前田守弘・田中正一・太田 健 2008. 土肥誌, 79, 353–357.
- 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.
- Mori, A., and Hojito, M. 2007. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 53, 812–817.
- Mori, A., Hojito, M., Shimizu, M., Matsuura, S., Miyaji, T., and Hatano, R. 2008. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 54, 606–617.
- Morishita, T., Sakata, T., Takahashi, M., Ishizuka, S., Mizoguchi, T., Inagaki, Y., Terazawa, K., Sawata, S., Igarashi, M., Yasuda, H., Koyama, Y., Suzuki, H., Toyota, N., Muro, M., Kinjo, M., Yamamoto, H., Ashiya, D., Kanazawa, Y., Hashimoto, T., and Umata, T. 2007. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 53, 678–691.
- Mu, Z.J., Kimura, S.D., Toma, Y., and Hatano, R. 2008a. *J. Environ. Sci.*, 20, 1312–1322.
- Mu Z.J., Kimura S.D., Toma Y., and Hatano, R. 2008b. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 54, 650–661.
- Nakahara, O., Takahashi, M., Sase, H., Yamada, T., Matsuda, K., Ohizumi, T., Fukuhara, H., Inoue, T., Takahashi, A., Kobayashi, H., Hatano, R., and Hakamada, T. 2010. *Biogeochemistry*, 97, 141–158.
- 中曾根英雄・山下 泉・黒田久雄・加藤 亮 2000. 水環境学会誌, 23, 374–377.
- Nishimura, S., Yonemura, S., Sawamoto, T., Shirato, Y., Akiyama, H., Sudo, S., and Yagi, K. 2008. *Agriculture, Ecosys. Environ.*, 125, 9–20.
- Nishina, K., Takenaka, C., and Ishizuka, S. 2009a. *Biogeochemistry*, 96, 163–175.
- Nishina, K., Takenaka, C., and Ishizuka, S. 2009b. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 55, 179–189.
- Ohtsuka, T., Mo, W., Satomura, T., Inatomi, M., and Koizumi, H. 2007. *Ecosystems*, 10, 324–334.
- Ono, K., Hirai, K., Morita, S., Ohse, K., and Hiradate, S. 2009. *Geoderma*, 151, 351–356.
- Ono, K., Hiradate, S., Morita, S., Ohse, K., and Hirai, K. 2010. *Plant Soil*, 338, 171–181.
- Osaka, K., Ohte, N., Koba, K., Yoshimizu, C., Katsuyama, M., Tani, M., Tayasu, I., and Nagata, T. 2010. *J. Geophys. Res.*, 115, G02021.
- Prokushkin, A.S., Kawahigashi, M., and Tokareva, I.V. 2009. *In R. Margesin (ed.) Permafrost soils*. p237–250. Springer, Berlin.
- 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.
- Sawamoto, T., Yoshida, R., Abe, K., and Matsunaka, T. 2010. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56, 492–502.
- Shimizu, M., Marutani, S., Desyatkin, A.R., Jin, T., Nakano, K., Hata, H., and Hatano, R. 2010. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56, 676–688.
- Shiratori, Y., Watanabe, H., Furukawa, Y., Tsuruta, H., and Inubushi, K. 2007. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 53, 387–400.
- 関谷長昭・高階史章・丹羽勝久・木村園子ドロテア・波多野隆介 2010. 土肥誌, 81, 224–233.
- Smakgahn, K., Fumoto, T., and Yagi, K. 2009. *J. Geophys. Res.*, 114, G02017.
- Sugihara, S., Funakawa, S., Kilasara, M., and Kosaki, T. 2010. *Appl. Soil Ecol.*, 44, 80–88.
- Takahashi, M., Hirai, K., Limtong, P., Leungvutivirog, C., Sukawang, S., Panuthai, S., Anusontpornperm, S., and Marod, D. 2009. *JARQ*, 43, 337–343.
- Takakai, F., Desyatkin, A.R., Lopez, C.M.L., Fedorov, A.N., Desyatkin, R.V., and Hatano, R. 2008. *J. Geophys. Res.*, 113, G02002.
- Takakai, F., Takeda, M., Kon, K., Inoue, K., Nakagawa, S., Sasaki, K., Chida, A., Sekiguchi, K., Takahashi, T., Sato, T., and Kaneta, Y. 2010. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56, 760–772.
- Takata, Y., Funakawa, S., Akshalov, K., Ishida, N., and Kosaki, T. 2008a. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 54, 794–806.
- Takata, Y., Funakawa, S., Yanai, J., Mishima, A., Akshalov, K., Ishida, N., and Kosaki, T. 2008b. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 54, 159–171.
- Tanikawa, T., Takahashi, M., Imaya, A., and Ishizuka, K. 2009. *Geoderma*, 151, 42–49.
- 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. *Biogeosciences*, 7, 2639–2653.
- Tokida, T., Mizoguchi, M., Miyazaki, T., Kagemoto, A., Nagata, O., and Hatano, R. 2007. *Chemosphere*, 70, 165–171.
- Toma, Y., and Hatano, R. 2007. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 53, 198–205.

- Toma, Y., Kimura, D.S., Yamada, H., Hirose, Y., Fujiwara, K., Kusa, K., and Hatano, R. 2010. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56, 663–675.
- Tsui, C.C., and Chen, Z.S. 2010. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56, 319–331.
- Van Hees, P.A.W., Jones, D.L., Finlay, R., Godbold, D.L., Lundström, U.S. 2005. *Soil Biol. Biochem.*, 37, 1–13.
- Wang, F., Li, Z., Zou, B., Li, N., Liu, J., and Zhu, W. 2010. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56, 297–306.
- Xu, X., and Inubushi, K. 2009. *Eur. J. Soil Sci.*, 60, 489–498.
- Yamashita, N., Ohta, S., and Hardjono, A. 2008. *For. Ecol. Manag.*, 254, 362–370.
- Yanai, Y., Toyota, K., Morishita, T., Takakai, F., Hatano, R., Limin, S.H., Darung, U., and Dohong, S. 2007a. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 53, 806–811.
- Yanai, Y., Toyota, K., and Okazaki, M. 2007b. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 53, 181–188.
- Yan, X., Akiyama, H., Yagi, K., and Akimoto, H. 2009. *Glob. Biogeochem. Cycl.*, 23, GB2002.
- Yokozawa, M., Shirato, Y., Sakamoto, T., Yonemura, S., Nakai, M., and Ohkura, T. 2010. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56, 168–176.

### 3. 土壌侵食・土砂流出

#### 1) 農地における実態把握

土壌侵食量や実態を把握する方法の開発が試みられているが、航空写真による1976～2006年の放牧草地の地形変化の解析では、2 m以上の侵食でなければ抽出は困難であることが明らかとなった(鈴木ら, 2010)。また、放射性核種であるCs-137やPb-210の土壌、懸濁粒子および堆積物の濃度から、林地(Mizugaki *et al.*, 2008; Fukuyama *et al.*, 2008; Fukuyama *et al.*, 2010)、農地(内田ら, 2009)および草地(Kato *et al.*, 2010)において侵食量が推定された。

土壌侵食量の広域評価が行われ、石垣島名蔵川流域における土砂輸送の連続観測が実施され、年間の土砂輸送は年1, 2回程度の大規模な降雨イベントに支配され、WEPPモデルとの適合性は高いことが示された(大澤ら, 2008)。同じ名蔵川が流出する名蔵湾と石西礁湖において、河川から湾に流入した土砂および栄養塩は、降水量、風向、風速や潮汐の影響を受け、台風時には底質の巻き上げによる懸濁物質濃度の上昇が観測された(大澤ら, 2009)。一方、国外では、インドネシアの流域面積1,920 km<sup>2</sup>の斜面、河床堆積物および浮遊土砂のPb-210を測定し、林地の土壌侵食量は0～5.6 t ha<sup>-1</sup>の範囲で平均0.38 t ha<sup>-1</sup>、農耕地は0～31.5 t ha<sup>-1</sup>で平均11.1 t ha<sup>-1</sup>と農耕地で林地の30倍近い侵食量であることが明らかにされた(内田ら, 2009)。同じく、中村ら(2009)はインドネシアの面積12,000 haの集水域の1991年から2007年の年間平均侵食量をUSLEで推定した結果、30.3～62.6 t ha<sup>-1</sup>であり、土地開発の経過とほぼ一致することを示した。

中尾(2010)は草地における放牧圧や草種による侵食量の違いなどについて総説をとりまとめた。また、モンゴルの半乾燥地草原の土壌Cs-137濃度から推定した土壌侵食量は通常の放牧圧では年間0.51 t ha<sup>-1</sup>に対し、過放牧の場

所で年間1.68 t ha<sup>-1</sup>であることが明らかとなった(Kato *et al.*, 2010)。

水田の土壌侵食量または土砂貯留機能についての評価が行われ、島根県出雲地方の棚田から4.9 t ha<sup>-1</sup>の土壌流出が発生し、代かき時よりも湛水時の発生量が多かったこと、USLEにおける棚田の作物・保全係数が0.256であることが明らかにされた(吉迫ら, 2009)。樺元(2009)は島根県と岡山県の棚田から流出する懸濁物質濃度から土壌侵食量を推定し、USLEの要因を把握した上で岡山県全域の棚田の平均土壌侵食量は12.7 t ha<sup>-1</sup>、水田耕作放棄地では23.0 t ha<sup>-1</sup>と耕作放棄地で高いと予測した。石垣島における水田の沈砂池機能評価が行われ、粒径0.1 mm前後の土粒子は水田に沈積するが、それよりも細かい0.03 mm前後の粒子は水田から流出し、浮遊土砂については水田は排出源であることが明らかになった(松井ら, 2007)。

侵食に伴う養分や有害化学物質の流出についても評価が行われ、USLEを用いて推定した1 kmメッシュ単位の日本の農耕地における土壌侵食ポテンシャルと河川水の全リン濃度の間には明確な関係が認められなかった。これは河川水の全リン濃度が平水時であることなどが関係していると推定された(神山, 2009)。琵琶湖に流入する野洲川流域のダイオキシン負荷は0.458 mg TEQであり、そのうち水田における排水が1.7%、基底流出が1.7%で、残りの96.4%が降雨流出によるものであり、水田からの代かき濁水などによる排出は僅かであると推定された(Kanematu *et al.*, 2009)。

また、今井・石渡(2007)は、土壌侵食の全国評価のため、USLEの土壌侵食要因を統計資料を用いて都道府県別に算出した。

#### 2) 林地における実態把握

高知県の管理されていないヒノキ植林地の懸濁粒子の給源である林床の表土、河岸および林道のうち、林床が主なものであると推定された(Mizugaki *et al.*, 2008)。また、三重県における傾斜39～43°のリター量の異なるスギ植林地からの侵食量を測定し、林床植生密度やリター量が多いほど雨滴衝撃を減らして侵食量が低下することが観測された(Miyata *et al.*, 2009)。三重県のヒノキ植林地における土壌侵食量と新たに定義した局所的な堆積物移動能との間には相関関係が認められたが、地形的な曲率との間には関係がなかった(Fukuyama *et al.*, 2008)。同じヒノキ植林地の表面流去水中の懸濁物質に対する表面侵食の割合を推定し、林床植生が少ないほど表面侵食率が高いことが明らかにされた(Fukuyama *et al.*, 2010)。高知県のヒノキ植林地において雨滴による飛散侵食を測定し、侵食量は1時間以内の雨滴の速度と直径に依存する運動エネルギーの最大値と関係があることを見出し、それを表すモデルが開発された(Nanko *et al.*, 2008)。同じ高知県の管理されていないヒノキ植林地の雨滴による土壌剥離量と林内雨の雨滴の運動エネルギー、運動量および雨滴径と運動量の積で示される指標の1時間当たりの最大値との間に強い相関があるこ

とが明らかにされた (Nanko *et al.*, 2008).

福岡県のスギ植林地からの懸濁物質の5年間の年間平均流出量は  $723 \text{ kg ha}^{-1}$  で、自然林よりも多く、これは植林地密度が高く、十分な管理が行われていないためと考えられた (Ide *et al.*, 2009). 愛媛県の天然林、スギ、ヒノキ植林地の土壌侵食量は、立木密度、材積、樹高、胸高直径を因子とする相対的収穫指数と相関があることを明らかにされた (Bam *et al.*, 2010). また、桑野ら (2009) は、福岡県における手入れ不足の植林地の土壌侵食程度はスギ林では低く、ヒノキ林で高いのは、スギ林ではリター層の被覆度がヒノキ林よりも高いためと推定した.

人や動物による土壌侵食の加速化の実態について調査され、尾瀬至仏山登山道の侵食断面積と傾斜の間に相関関係があるものの、樹木根や岩石の露出および登山者の回避行動などにより、形態や断面積が異なることを明らかにされた (須永ら, 2009). また、神奈川県丹沢山地のブナ林においてニホンジカの採食によって林床植生が衰退し、林床植生被覆面積率1%の場所では、土壌侵食量は年間数 mm に達していた (若原ら, 2008). さらに、初ら (2010) は、丹沢山地におけるシカによる林床植生衰退地の傾斜  $21 \sim 36^\circ$  の斜面の林床被覆率と雨量  $1 \text{ mm}$  当たりの土壌侵食量との間には負の相関があったことを示した.

### 3) 対策

資材利用では、傾斜ライシメーターに黒ボク土を充填し人工降雨装置を用いて、稲わらと木質混合牛糞コンポストを表面被覆資材として施用したところ、資材に関係なく、表面被覆率に対応して土壌侵食量は低下した (Onishi *et al.*, 2008). 同じく降雨シミュレーターを使用して海外の塩性土壌を想定した人工ソーダ質土壌にポリアクリルアミドを添加してところ、交換性ナトリウム率の高い土壌や石膏を添加した場合に表面流去水量は減少したが、雨滴の衝撃による土壌侵食量は増加した (Yamamoto *et al.*, 2008). 松下ら (2008) は、石垣島における赤色土の土壌侵食発生の要因は大規模な圃場の構造と化学肥料多用による土壌団粒構造の破壊が原因であると、家畜糞尿の循環利用などを提案した.

植生利用では、斜面長  $1.4 \text{ m}$ 、傾斜  $8^\circ$  の侵食箱に黒ボク土を充填し、リュウノヒゲを下端に栽植して、人工降雨装置を用いて侵食量を測定した結果、土壌流出量は  $59\%$ 、窒素流出量は  $42\%$  減少した (Siriwattanaon *et al.*, 2009). 同じように川井ら (2007) は、斜面長  $1.3 \text{ m}$  の傾斜ライシメーターの下端に幅  $10 \sim 50 \text{ cm}$  幅でリュウノヒゲを栽植し人工降雨実験を行った. 植生幅の増加に伴い、土壌、窒素、リンの捕捉量は増加するが、 $30 \text{ cm}$  以上では捕捉増加率は低下することから、面積の小さな畑圃場では  $20 \sim 30 \text{ cm}$  の幅が最適であると提案した.

現場での植生利用については、静岡県の赤色土や黄色土の傾斜カンキツ園からのリン流出量は、清耕区に比べてナギナタガヤを全面栽植した区で  $1.7 \sim 3.1\%$ 、部分的に栽植した区では  $8.1 \sim 9.3\%$  程度と、土壌侵食量が低下すること

によって大幅に減らすことができた (山家ら, 2008). さらに、表面流去水量は清耕栽培の  $6\%$  程度で、懸濁態や水溶性リンの流出量を大幅に低下させることができた (高橋, 2009). 沖縄県のサトウキビ畑の侵食量は、不耕起、間作栽培、植生帯でそれぞれ、対照区の  $89, 45, 17\%$  であったが、新たな侵食防止対策として導入した不耕起株出し栽培および減耕起・間作栽培は対照区の  $85, 45\%$  であった (乃田ら, 2009). 沖縄県の黄色土におけるサトウキビの休閑期間に緑肥作物を栽培することによって、土壌侵食量は裸地区に比べて、クロタラリアで  $38\%$ 、ピジョンピーで  $38\%$ 、フウキマメで  $29\%$  低下し、緑肥鋤き込み後1ヶ月間の土壌侵食量も減らすことができた (宮丸ら, 2008). 石垣島の名蔵湾流域における土壌と栄養分の流出を調査し、WEPPモデルで検証を行い、斜面長の短縮や傾斜の緩和、不耕起栽培などの導入により、土壌流出を  $74\%$  低下させることができると予測した (Ikeda *et al.*, 2009). 大澤・池田 (2007) は、石垣島における土壌侵食量推定に WEPP が有効であることを明らかにし、WEPP を用いてサトウキビ畑の侵食防止対策の効果を予測したところ、植生帯は効果が少なく、残渣マルチや省耕起が効果があった.

海外では、インドネシアのコーヒーが栽培されている  $10.2 \text{ ha}$  の流域からの土壌侵食量は圃場レベルの侵食量の10倍以上の値を示し、耕地における侵食対策だけでなく、耕地以外での保全対策を講じる必要があることが示された (Afandi, *et al.*, 2010).

のり面の侵食防止対策の効果について検証が行われ、被覆植物としての利用が期待される常緑小低木のフッキソウを人工斜面に千鳥状に栽植することによって格子状よりも侵食量を低下させることができた (関根・鍋島, 2010). 植物の栽植密度との関係についても知見が得られ、砂を充填した傾斜ライシメーターにエンパクを栽植して人工降雨実験をおこない、栽植密度が増えると侵食量は低下するが、栽植間隔が  $3 \text{ cm}$  以下では侵食量に変化がないことを明らかにした (関根ら, 2008).

林地では、丹沢山地におけるシカ食害による林床植生の衰退により年間最大  $10 \text{ mm}$  の土壌侵食が起こっており、その防止のため植生保護柵とリター捕捉ネットを施工した (石川・内山, 2009).

### 4) 風食

風食に関する報告は少なく、風食によって地上  $5 \text{ cm}$  以下で飛散する  $0.2 \text{ mm}$  以上の粗粒質有機物と土壌粒子の捕捉装置を開発し、風洞実験で性能を確認したところ、 $100\%$  の捕捉率ではないが、風速のデータと捕捉量から風食量を推定することが可能であることを明らかにした (Ikazaki, *et al.*, 2009). また、この装置の捕捉率は風速や風の入射角などによって  $50 \sim 100\%$  変化するが、予測式と高い相関があり、風速や入射角を測定すれば実際の風食量を推定することが可能であることが示された (Ikazaki *et al.*, 2010).

## 文 献

- Afandi, Wiharso, D., Aji, A., Senge, M., and Ito, K. 2010. 土壤物理性, 115, 15–23.
- Bam, H.N., Razafindrabe, B.H.N., He, B., Inoue, S., Ezaki, T., and Shaw, R. 2010. *Environ. Monit. Assess.*, 160, 337–354.
- Fukuyama, T., Onda, Y., Gomi, T., Yamamoto, K., Kondo, N., Miyata, S., Kosugi, K., Mizugaki, S., and Tsubonuma, N. 2010. *Hydrol. Proc.*, 24, 596–607.
- Fukuyama, T., Onda, Y., Takenaka, C., and Walling, D.E. 2008. *J. Geophys. Res.*, 113: F02007, doi:10.1029/2006JF000657
- Ide, J., Kume, T., Wakiyama, Y., Higashi, N., Chiwa, M., and Otsuki, K. 2009. *For. Ecol. Manag.*, 257, 1955–1965.
- Ikazaki, K., Shinjo, H., Tanaka, U., Tobita, S., Funakawa, S., and Kosaki, T. 2010. *Pedologist*, 53, 126–134.
- Ikazaki, K., Shinjo, H., Tanaka, U., Tobita, S., and Kosaki, T. 2009. *Trans. ASABE*, 52, 487–492.
- Ikedo, S., Osawa, K., and Akamatsu Y. 2009. *Proc. Japan Academy, Series B*, 85, 374–390.
- 今井 啓・石渡輝夫 2007. 寒地土木研究所月報, 645, 49–54.
- 石川芳治・内山佳美 2009. 砂防学会誌, 62, 74–79.
- 樺元淳一 2009. 圃場と土壌, 41, 24–28.
- Kanematu, M., Shimizu, Y., Sato, K., Ki, S., Suzuki, T., Park, B., Saino, R., and Nakamura, M. 2009. *Environ. Sci. Tech.*, 43, 4260–4266.
- Kato, H., Onda, Y., and Tanaka, Y. 2010. *Geomorphology*, 114, 508–519.
- 川井聡之・河村 征・三原真智人 2007. 環境情報科学論文集, 21, 591–594.
- 神山和則 2009. 土・水研究会資料, 26, 41–47.
- 桑野泰光・植崎康二・橋川ひろみ・佐々木重行 2009. 福岡県森林林業技術センター研究報告, 10, 11–16.
- 松井宏之・福永隆二・清水 智 2007. 農工論集, 75, 689–694.
- 松下 潤・安谷屋隆司・入嵩西正治 2008. 自然環境復元研究, 4, 105–112.
- 宮丸直子・儀間 靖・與那嶺介功・亀谷 茂 2008. 土肥誌, 79, 496–499.
- Miyata, S., Kosugi, K., Gomi, T., and Mizuyama, T. 2009. *Water Resources Research*, 45, 1–17.
- Mizugaki, S., Onda, Y., Fukuyama, T., Koga, S., Asai, H., and Hiramatsu, S. 2008. *Hydrological Processes*, 22, 4519–4531.
- 中村義文・小川茂男・石川善成・河田直美 2009. 水土の知, 77, 1003–1008.
- 中尾誠司 2010. 日本草地学会誌, 56, 175–181.
- Nanko, K., Mizugaki, S., and Onda, Y. 2008. *Catena*, 72, 348–361.
- 乃田啓吾・大澤和敏・池田駿介・小沢 聖 2009. 農工論集, 260, 47–56.
- Onishi, T., Kato, M., and Nishimura, T. 2008. 土壤物理性, 108, 53–65.
- 大澤和敏・池田駿介 2007. 水利科学, 51, 1–24.
- 大澤和敏・池田駿介・久保田龍三朗・乃田啓吾・赤松良久 2008. 水工学論文集, 52, 577–582.
- 大澤和敏・久保田龍三朗・池田駿介・赤松良久・乃田啓吾 2009. 地球環境研究論文集, 17, 53–59.
- 関根正人・鍋島康大 2010. 水工学論文集, 54, 655–660.
- 関根正人・大前謙友・松島貴之 2008. 水工学論文集, 52, 559–564.
- Siriwattanaon, L., Kawai, T., and Mihara, M. 2009. 環境情報科学, 37, 61–66.
- 初 磊・石川芳治・白木克繁・若原妙子・内山佳美 2010. 日林誌, 92, 261–268.
- 須永 智・須藤志成幸・北爪智啓 2009. 尾瀬の自然保護, 32, 21–26.
- 鈴木公人・嶋 栄吉・嶋田 浩・田中勝千・真家永光 2010. 写真測量とリモートセンシング, 49, 219–226.
- 高橋和彦 2009. 農耕と園芸, 64, 123–127.
- 内田太郎・高橋 史・恩田裕一・Sisingghi, D.・加藤弘亮・野呂智之・小山内信智 2009. 水文水資源学会誌, 22, 188–197.
- 若原妙子・石川芳治・白木克繁・戸田浩人・宮 貴大・片岡史子・鈴木雅一・内山佳美 2008. 日林誌, 90, 378–385.
- Yamamoto, T., Shimura, Y., Nishimura, T., Andry, H., Moritani, S., and Al-Busaidi, A. 2008. 土壤物理性, 110, 53–66.
- 山家一哲・杉山泰之・高橋和彦 2008. 土肥誌, 79, 303–306.
- 吉迫 宏・小川茂男・塩野隆弘 2009. システム農学, 25, 205–213.

## 4. 物質循環の広域評価と栄養塩の流出

## 1) 物質循環の広域評価

今日の日本の農業は化学肥料とともに輸入飼料に由来する堆肥の多量投入に特徴付けられ、施用量は平均  $1.7 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 、そのうち 23% が堆肥由来と見積もられている (Kimura *et al.*, 2010a)。これらに由来する環境負荷を軽減するため、温室効果ガス・余剰窒素量・収入のエコバランス評価によって土地利用を策定する手法も確立されつつある (Kimura *et al.*, 2007, 2010b; 木村, 2008)。三島ら (2009, 2010) は都道府県別に窒素・リンのフローおよび余剰窒素・リン量を算出し、野菜畑における施肥量の増加を指摘するとともに、地域ごとの堆肥の受入れ可能量を推定している。バイオマスの再利用と環境負荷・生産性との調和に向けて、物質フローの広域評価およびエコバランスは具体的・定量的な指針を示すことのできるツールとして重要性は極めて高い。窒素・リン余剰量の広域評価によって、窒素・リン余剰量と水質の関係について解析が進み、予測に繋がられている (Shindo *et al.*, 2009)。栃木県の畜産地帯では、窒素・リンの余剰量と水質の関係が解析され、肥培管理の水質への影響は即座には対応しないこと (Mishima *et al.*, 2007)、韓国と日本では窒素負荷の水質への影響の受けやすさが異なることも示されており (Itahashi *et al.*, 2007)、広域評価の時空間的な解像度、適応範囲についても検討が進んでいる。

## 2) 農地からのアンモニア揮散

日本の過去 50 年間の農業活動において最も大きく変化したのが畜産と関わる窒素フローであり、飼料を輸入に依存する畜産由来のふん尿からの窒素がアンモニア揮散など環境負荷の要因となっている (Shindo *et al.*, 2009)。家畜排せつ物からの  $\text{NH}_3$  放出は世界の  $\text{NH}_3$  供給源の 40% を占める (Bouwman *et al.*, 1997)。 $\text{NH}_3$  は悪臭の原因となるほか、酸性降下物として土壌酸性化にも働くため (Hojito *et al.*, 2010)、現地観測と削減技術の開発が進められている。ベトナムの水田では栽培期間中尿素の 2~15% が  $\text{NH}_3$  揮散によって失われることを報告している (Watanabe *et al.*, 2009)。集約的な畜産地帯では大気中の  $\text{NH}_3$  濃度の上昇が

確認され、雨水の窒素濃度、窒素降下物の量も比例して高くなることが観測された(寶示戸ら, 2006)。畜産地帯の草地生態系においては乾性降下物によるNH<sub>3</sub>の供給とNH<sub>3</sub>揮散による窒素フラックスが窒素循環において重要なプロセスとなることが定量的に示された(Hojito *et al.*, 2010)。また、黒ボク土ではNH<sub>3</sub>揮散が低くなることが報告されている(Hayashi *et al.*, 2009a, b)。CH<sub>4</sub>発酵消化液の草地への施用では、施肥窒素の32~42%がNH<sub>3</sub>揮散によって失われ、60 Mg ha<sup>-1</sup>施用を境界に割合が増加することが示された(Matsunaka *et al.*, 2008)。一方で、抑制技術に関しては、CH<sub>4</sub>発酵消化液の土壌への添加では57~60%がNH<sub>3</sub>揮散によって失われるものの、CH<sub>4</sub>発酵消化液の土壌への働き込みによって数%に抑制できることが報告された(Tao *et al.*, 2007)。CH<sub>4</sub>発酵消化液を施用した水田からのNH<sub>3</sub>放出量は13%に相当したが、木酢液によるCH<sub>4</sub>発酵消化液の酸性化もしくは田面水位を高くすることで放出量を63~82%削減できることが示された(Win *et al.*, 2009)。豚糞堆肥のコンポスト化はNH<sub>3</sub>揮散後のNH<sub>3</sub>酸化細菌の働きによってN<sub>2</sub>O放出が起こるが、NO<sub>2</sub>酸化細菌を含んだ成熟した豚糞コンポストの添加ではN<sub>2</sub>O放出を削減できることを報告している(Fukumoto and Inubushi, 2009)。

### 3) 農地からの栄養塩類の流出

窒素・リンの施用量は日本だけでなく、アジア地域全体で増加しており、土壌の酸性化・流域の富栄養化が問題となっている。物質フローの広域評価は環境負荷を査定する上で非常に有効であり、多くの成果が報告されている。農地からの窒素流出、人の食生活からの排出、大気沈着を考慮して河川水窒素濃度分布を推定した結果、日本では大都市および集約的な畜産地帯で河川窒素濃度が高くなることが推定された(Shindo *et al.*, 2009)。北海道では流域の余剰窒素量の27%が河川に流出していることが示されている(Hayakawa *et al.*, 2009)。リンの余剰は、水系の富栄養化を引き起こすほか、土壌リンの増加は外来植物の侵入や病害の増加などの問題を引き起こすことも指摘されている(平舘, 2007)。工業生産が可能になった窒素と異なり、有限な資源であるリンの有効活用は今後さらに重要な課題となる。石垣島においては農地へ投入された窒素の19%、リンの4%が海洋に流出していた(坂西・中村, 2007)。北海道では、河川の窒素濃度は農地の割合と比例することが知られてきたが(Woli *et al.*, 2004)、河川のリン濃度は傾斜地においてリンが多施肥された場合に高くなることが報告された(Woli *et al.*, 2008)。水質には元素・土壌による吸着特性の違いなどが影響するため、余剰窒素やリンに対する流域の応答解析・予測には土壌・地形といった因子が組み込まれている(Woli *et al.*, 2008)。

窒素・リンの流出の抑制技術の開発・確立も進んでいる。静岡の集約的な茶栽培地域では、窒素施用量の削減によって水系の窒素濃度が減少したことが報告されている(Hirono *et al.*, 2009)。多量の窒素溶脱が懸念される北海道

の玉ねぎ畑では、全層破碎による耕盤層の破碎によって根張りを促進し窒素吸収量を高めることで地下水のNO<sub>3</sub>汚染を抑制する技術が報告されている(志賀・中津, 2009)。取量を維持し、作付体系全体を配慮した形での技術開発は今後さらに注目を集めるだろう。矢作川河畔域では、水田帯水層のNO<sub>3</sub>・溶存有機炭素濃度の高い条件で脱窒のホットスポットが存在し地下水NO<sub>3</sub>濃度の低下に働くことが示され、低地に水田を配置した地目管理による富栄養化軽減の効果が評価されている(Eguchi *et al.*, 2009)。市街地の影響の強い多摩川流域における土地利用の河川水窒素濃度への影響が解析され、脱窒の盛んな水田、河畔林や湖沼における水質浄化作用が確認された(山本ら, 2006; 木村・岡崎, 2008)。一方で、畑地・水田の農地連鎖系集水域において流出水の61%は水田を経ずに深部浸透によって直接系外へ流出していることが水文解析によって示された例もあることから(飯山ら, 2007)、今後さらに水移動と物質循環の両面から総合的な評価や土地利用戦略の策定が必要となる。

## 文 献

- 坂西研二・中村 乾 2007. 水土の知, 75, 821-824.
- Bouwman, A.F., Lee, D.S., Asman W.A.H., Dentener, F.J., Van der Hoek, K.W., and Olivier, J.G.J. 1997. *Glob. Biogeochem. Cycl.*, 11, 561-587.
- Eguchi, S., Nakajima, S., Yabusaki, S., Kasuya, M., Shibayama, H., Tsunekawa, A., and Imai, K. 2009. *J. Environ. Qual.*, 38, 2198-2209.
- Fukumoto, Y., and Inubushi, K. 2009. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 55, 428-434.
- Hayakawa, A., Shimizu, M., Woli, K. P., Kuramochi, K., and Hatano, R. 2009. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 55, 800-819.
- Hayashi, K., Hayakawa, A., Akiyama, H., and Yagi, K., 2009a. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 55, 571-581.
- Hayashi, K., Koga, N., and Yanai, Y. 2009b. *Atmos. Environ.*, 43, 5702-5707.
- 平舘俊太郎 2007. 圃場と土壌, 39, 30-38.
- Hirono, Y., Watanabe, I., and Nonaka, K. 2009. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 55, 783-792.
- Hojito, M., Hayashi, K., and Matsuura, S. 2010. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 56, 503-511.
- 寶示戸雅之・林健太郎・村野健太郎・森 昭憲 2006. 土肥誌, 77, 53-57.
- 飯山一平・松森堅治・藤原英司・中島泰弘 2007. 土壌物理性, 107, 17-26.
- Itahashi, S., Seo, M.C., and Takeuchi, M. 2007. *Water Sci. Tech.*, 56, 105-113.
- 木村園子ドロテア 2008. 土肥誌, 79, 323-331.
- Kimura, S.D., Mischima, S.I., and Yagi, K. 2010a. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*, 89, 291-302.
- Kimura, S.D., Mu, Z., Toma, Y., and Hatano, R. 2007. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 53, 373-386.
- Kimura, S.D., Mu, Z., Toma, Y., Yamada, H., and Hatano, R. 2010b. *Sustain. Sci.* 5, 19-27.
- 木村園子ドロテア・岡崎正規 2008. 地理学雑誌, 117, 553-560.
- Matsunaka, T., Sentoku, A., Mori, K., and Satou, S. 2008. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 54, 627-637.
- 三島慎一郎・遠藤 明・白戸康人・木村園子ドロテア 2009. 土肥誌,

- 80, 226–232.
- 三島慎一郎・神山和則 2010. 農環研報, 27, 117–139.
- Mishima, S., Taniguchi, S., Kohyama, K., and Kodama, M. 2007. *Soil Sci Plant Nutr.*, 53, 318–327.
- 志賀弘行・中津智史 2009. 道立農試資料, 38, 1–106.
- Shindo, J., Okamoto, K., Kawashima, H., and Konohira, E. 2009. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 55, 532–545.
- Tao, X., Matsunaka, T., and Sawamoto, T. 2007. *Aust. J. Exp. Agric.*, 48, 169–174.
- Watanabe, T., Son, T.T., Hung, N.N., Van Truong, N., Giau, T.Q., Hayashi, K., and Ito, O. 2009. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 55, 793–799.
- Win, K.T., Toyota, K., Motobayashi, T., and Hosomi, M. 2009. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 55, 190–202.
- Woli, K.P., Hayakawa, A., Nagumo, T., Imai, H., Ishikawa, T., and Hatano, R. 2008. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 54, 310–317.
- Woli, K.P., Nagumo, T., Kuramochi, K., and Hatano, R. 2004. *Sci. Total Environ.*, 329, 61–74.
- 山本富久・中曾根英雄・黒田久雄・加藤 亮 2006. 水環境学会誌, 29, 15–20.

## 5. 土壌構造・土層改良

団粒構造, 乾燥亀裂や植物・動物の活動によって形成される管状孔隙網など, 土壌構造は複雑である. 土壌構造の違いは, 水・ガスの透過性や保水性, 熱の伝達に大きな影響を与えるため (Hamamoto *et al.*, 2010), 土壌中の物理現象を理解するための基礎として, 土壌構造の研究は重要である.

水分特性曲線を微分して土壌構造を推定する場合があるように (Hamamoto *et al.*, 2009), 土壌構造と保水性には密接な関係がある. 水分特性曲線から不飽和透水係数を推定する多くのモデルが提案されており, 土壌中の水移動を評価する際に広く使用されている (小杉, 2007; 坂井・取出, 2009). 不飽和透水係数を推定するために必要な水分量と圧力水頭の関係の回帰は, HYDRUS や表計算ソフトより可能であるが, より簡便に回帰式を得ることができるソフトウェアが開発された (関, 2007).

土壌に資材を入れることで中程度の孔隙が増える, すなわち圃場容水量と成長阻害水分点に相当する水分量の差が増加すれば, 保水性が改善される. 実際, 東北タイの土壌にベントナイトを施用すると土壌構造が安定化し, 保水性が改善された (Suzuki *et al.*, 2007). 日本でも, カンキツの周囲にパーライトとピートモスを入れることで, 保水性が改善し, 根の張りが良くなることが報告された (鯨, 2007). コンポスト, 木くず, 稲わらを入れて1年後の物理性を評価した結果, 乾燥密度が減少し, 透水係数が増加したことも報告された (Eusufzai *et al.*, 2007). 近年, 地球温暖化の原因とされる CO<sub>2</sub> を固定する目的でバイオ炭の利用が注目されている. このバイオ炭を土壌に入れることで, 土壌の保水性が向上することが, オーストラリア (篠田ら, 2008) および沖縄 (陳ら, 2008) での圃場試験により明らかになった. 排水不良の圃場では, 資材の投入により粗孔隙が増えることで透水性の改良が期待できる. パーク資材

を用いた透水・排水性の改良法であるカルチタイン式心土改良耕を北海道の排水不良の圃場に適用した結果, 作物の養分吸収量が増加したことが報告された (北川, 2007). このような透・排水性の改善効果以外にも, 北海道の黒ボク土に牛糞パーク堆肥や収穫残渣を連用することで間隙率が増大し, 土壌が膨軟になったこと (中津・田村, 2008), 黒ボク土に木くずや稲わらを混ぜることで気相率が増加し, 通気性が改善されること (佐々木ら, 2008) が報告された. 一方, 国頭マージと島尻マージに鶏糞堆肥, 豚糞堆肥, 牛糞堆肥, バガスなどの資材を入れると一時的には土壌が膨軟になるが, 土壌 pH によっては数ヶ月後には資材を投入しない場合よりも土壌が硬くなってしまうことが報告されている (久保寺, 2007). インドネシアのバイナップル畑でも, 土壌改良材として籾殻とタピオカの残渣を施肥した場合, 短期的には明確な土壌物理性の改善効果は期待できなかったことが報告された (Komariah *et al.*, 2008). これらの報告のように, 土壌・気象条件によっては必ずしも期待通りの成果が得られない場合があることがわかる. これら有機物資材の投入以外にも, セメントを土壌に少量混ぜることで, 透水係数や支持力が增加することが報告された (Zakaria and Sakai, 2008).

資材の投入のほかにも, 圃場の乾燥によって物理性は改善される. 重粘土の水田を畑にしたとき, 作付け履歴により保水性が変化することが明らかにされた (足立ら, 2009). 排水性についても, 水管理や季節による亀裂の消長により暗渠の排水能力が著しく増減することから, 排水性の確保に乾燥亀裂の影響が重要な役割をもつことが実証された (吉田ら, 2008). また, トレーサー試験や透水試験から, 干拓地の畑で暗渠排水が不良な原因が比較的浅い層に形成された硬盤にあり, 無振動サブソイラーを用いた心土破碎が排水性改善に有効であること (磯本・永井, 2010) や, 資材を使わない土層改良としての掘削式穿孔暗渠の耐久性が検討される (北川, 2007) など, 機械的に粗孔隙を増やすことで排水性を改善する研究にも進展がみられた. 排水性が改善されると干ばつ時に水が不足する場合がある. 深耕により物理性が改善されると, 陸稲の根張りは良くなるが, 水持ちが悪くなるため, 蒸発抑制のための稲わらマルチを併用する必要があったことが報告された (Kato *et al.*, 2007). このように, 干ばつが起こるような地域で排水改良を実施するときは, 干ばつ対策を同時に行なう必要がある.

圃場の透排水性に大きな影響を与える亀裂の発生を支配する亀裂先端開口角のサクシヨンの履歴依存性について明らかにされ (Yoshida and Hallet, 2008), 亀裂の発生機構の解明が進んだ. 亀裂と同様に代表的な粗孔隙である根成孔隙について, 軟 X 線により映像化された土壌中の孔隙構造とその土壌が堆積した年代から, 誕生から劣化までのプロセスと耐久年限が調査された (徳永ら, 2009).

この他, 有効間隙を電気伝導度から推定する方法 (Kim *et al.*, 2008) や土壌薄片を作るときの方法を応用して牛ふ

ん堆肥ペレットの微細形態を顕微鏡観察する方法 (久保寺ら, 2009) の検討, カドミウム汚染圃場を客土により改良する方法についてのレビュー (山田, 2007), 礫質水田の作土層を改良するためのブルドーザ鎮圧工法についての検討 (久保, 2009) がなされた。また, 伝統客土「ドロツケ」が土壌物理性に与えた影響が評価された (若林ら, 2010)。

土壌水分や溶質の移動の基礎的なことを調べる場合, 砂をカラムにつめて実験をおこなうことが多い。この際に, 意外と砂を均一に詰めることは難しく, 一見均一に見える砂層でも, 実際には構造をもっていることが示唆された (安中, 2007)。

#### 文 献

- 足立一日出・吉田修一郎・大野智史・小原 洋 2009. 農工論集, 263, 57-64.
- 安中武幸 2007. 土壌物理性, 107, 57-61.
- 陳 媽・平良正彦・上野正美・凌 祥之 2008. 農工論集, 254, 31-37.
- Eusufzai, M.K., Maeda, T., and Fujii, K. 2007. 土壌物理性, 107, 3-16.
- Hamamoto, S., Moldrup, P., Kawamoto, K., and Komatsu, T. 2010. *Water Resour. Res.*, 46, W06514.
- Hamamoto, S., Perera, M.S.A., Resurreccion, A., Kamamoto, K., Hasegawa, S., Komatsu, T., and Moldrup, P. 2009. *Vadose Zone J.*, 8, 942-952.
- 磯本佐知子・永井寿治 2010. 水土の知, 78, 72-73.
- Kato, Y., Kamoshita, A., Abe, J., and Yamagishi, J. 2007. *Soil Tillage Res.*, 92, 30-44.
- Kim, M.I., Chae, B.G., and Nishigaki, M. 2008. *Geosci. J.*, 12, 83-93.
- 北川 巖 2007. 北海道立農業試験場報告, 113, 43-53.
- Komariah, Ito, K., Senge, M., Adomako, J. T., and Afandi 2008. 土壌物理性, 108, 81-90.
- 小杉賢一郎 2007. 土壌物理性, 106, 47-60.
- 久保雅俊 2009. 水土の知, 77, 568-569.
- 久保寺秀夫 2007. 土肥誌, 78, 587-590.
- 久保寺秀夫・山根 剛・脇山恭行・荒川祐介 2009. 土肥誌, 80, 522-525.
- 鯨 幸和 2007. 土肥誌, 78, 515-517.
- 中津智史・田村 元 2008. 土肥誌, 79, 139-145.
- 坂井 勝・取出伸夫 2009. 土壌物理性, 111, 61-73.
- 佐々木徹・赤坂英則・鈴木良子・藤井克己 2008. 農工論集, 255, 77-82.
- 関 勝寿 2007. 土壌物理性, 105, 67-78.
- 篠田 裕・佐々木理・矢沢勇樹・松本 剛・小島紀徳 2008. 沙漠研究, 18, 21-27.
- Suzuki, S., Noble, A.D., Ruaysoongnern, S., and Chinabut, N. 2007. *Arid Land Res. Manag.*, 21, 37-49.
- 徳永光一・佐藤幸一・佐々木長市・佐瀬 隆 2009. 農工論集, 262, 133-140.
- 若林正吉・田村憲司・小野信一・六本木和夫・東照雄 2010. 土肥誌, 81, 573-583.
- 山田信明 2007. 土肥誌, 78, 411-416.
- 吉田修一郎・足立一日出・谷本 岳 2008. 農工論集, 257, 51-56.
- Yoshida, S., and Hallet, P. 2008. *Water Resour. Res.*, 44, W00C01.
- Zakaria, Md.Z., and Sakai, T. 2008. 土壌物理性, 110, 25-35.