J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 99, p. 21～28（2005）

土地利用解析と窒素収支法による河川水質評価

波多野　隆　介*

Evaluating River Water Quality through Land Use Analysis and N Budget Approaches

Ryusuke HATANO*

* Field Science Center for Northern Biosphere, Hokkaido University, Sapporo 060-8589, Japan

Abstract

Increase of reactive nitrogen associated with production of food and feed has increased N load into aquasphere and atmosphere.　This has induced the problems such as eutrophication, acidification and global warming.　What will be going on in future? In order to predict it and to mitigate food production managements, monitoring of N loads in various scales is required.　How shall we conduct them？ This paper will focus its discussion on the monitoring of NO_3^--N load from soils based on the previous studies which were conducted in the different scales, such as soil structure level, field level and basin level.

Key words : soil structure, field, basin, nitrate, surplus nitrogen

1.　は じ め に

1890 年から 1990 年の 100 年間に地球上の植物に吸収可能な窒素量（反応性窒素）は 1.3 億 t から 2.8 億 t へ約 2 倍に増加したと見積もられている（Galloway and Cowling, 2002）。その増加の 60％ は化学肥料，25％ が豆科作物，3％ が土地利用変化に由来し，合計 88％ が食料生産に関わっていることになる（UNEP, 1999）。FAO 統計によれば，1961 年から 2000 年までに農地面積は，13 億 ha から 14 億 ha へほぼ横ばいであるにもかかわらず，穀類生産は 9 億トンから 20 億トンへとほぼ 2 倍に増加した（FAO, 2004）。その間，人口は 30 億から 60 億へ増加している。すなわち，人類は，窒素肥料を農地へ集中的に施与することにより，収量を増加させ，人口を増加させてきたのである。しかし，近年，反応性窒素の環境への負荷が地球温暖化，富栄養化，土壌酸性化に強く影響しているとの報告が増えている（UNEP, 1999）。

反応性窒素は，陸域，水域で，主に植物と微生物により，さまざまな形態変化を起し，その過程でアンモニア揮散，硝酸溶脱，亜酸化窒素ガス放出による，酸性化，富栄養化，地球温暖化など広範囲な環境破壊を助長する窒素化合物の環境への流出が生じる（Galloway and Cowling, 2002）。陸域への窒素のインプットは生物的窒素固定，窒素降下物，化学肥料，家畜糞尿，人間屎尿により生じる。年間の窒素インプットは，産業革命以前には世界のどの地域も 20 kg N ha^{-1} 以下であったが，1990 年代には西ヨーロッパ，東アジア，インドで 50 kg N ha^{-1} 以上となっている。その主要な起源は，産業革命以前過去は，生物的窒素固定と家畜糞尿であったが，1990 年代には，西ヨーロッパは家畜糞尿と化学肥料，東アジアは化学肥料，インドでは家畜糞尿となっている（Green *et al.*, 2004）。表-1 に示すように，それらのインプットのうち，約 19％ が河川を通して沿岸域に流出している。その全流出量は，産業革命以前は 21 Tg（Tg＝100 万 t）だったものが，1990 年代には 40 Tg に約 2 倍に増加した。とくにアジア，ヨーロッパでの流出量が増加している。産業革命以前はアジア，南アメリカでの流出が全流出量のそれぞれ 30％ を占め，ヨーロッパは 6％ に過ぎなかったが，1990 年代には南アメリカの寄与率は 19％ に低下し，アジアで 48％，ヨーロッパで 15％ に増加している。

このように集約的な農業を行っている地域では，反応性窒素の環境への負荷を減らすことが強く要求されてい

* 北海道大学北方生物圏フィールド科学センター，〒060-8589 札幌市北区北 9 条西 9 丁目
キーワード : 土壌構造，圃場，流域，硝酸態窒素，余剰窒素

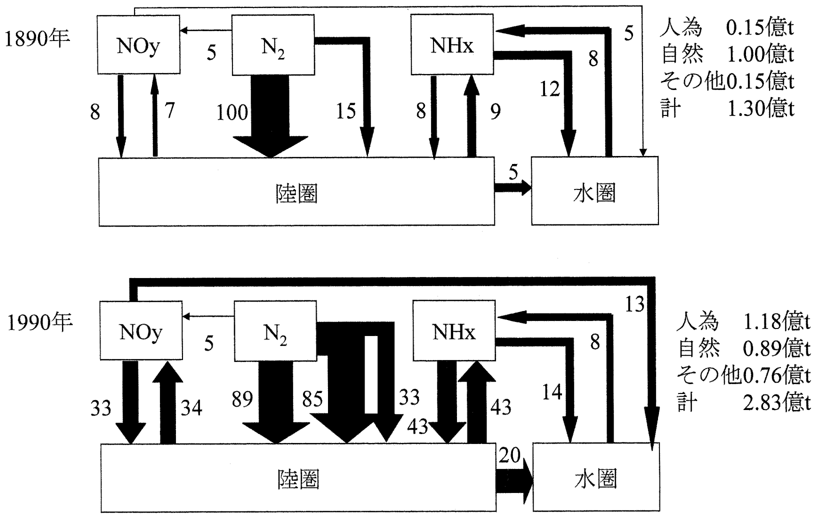


図-1　世界の窒素循環（100万tN）（Galloway, J.N. and Cowling, E.B. 2002を一部改変）

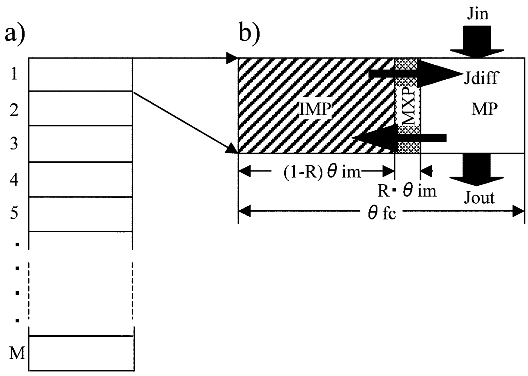
表-1　陸地へのインプットと河川へのアウトプットの見積もり（Green *et al.* から作成）

	1870年以前			1990年代		
	陸地へのインプット	河川へのアウトプット	流出率	陸地へのインプット	河川へのアウトプット	流出率
	Tg		%	Tg		%
世界	110.7	21.0	19	222.6	40.1	18
アフリカ	35.6	3.1	9	41.2	2.4	6
アジア	28.7	7.4	26	89.2	18.7	21
EU・旧ソ連	4.5	1.2	26	26.2	6.2	24
北アメリカ	11.1	2.6	24	28.2	4.5	16
南アメリカ	22.9	6.2	27	29.1	7.5	26
オセアニア	7.8	0.5	6	8.8	0.7	8

る（OECD, 2001）。実効的な対策に結びつけるためには，地域において窒素負荷がどのように進行しているかの情報とその解析が必要である。圃場レベル，流域レベルでのモニタリングによる実態の把握と，そのモデル化を通して，地域レベルにおける窒素管理技術の構築が要求されている。地域レベルでの流出の積算が世界レベルの変動を明瞭にすることになる。

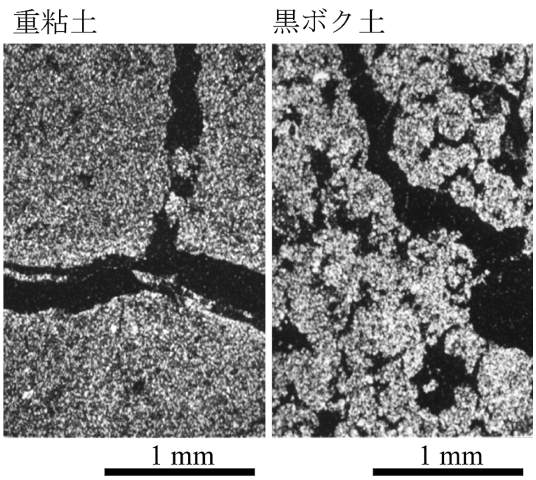
2.　硝酸溶脱への土壌構造の影響

土壌からの硝酸溶脱は，1970年代には細管中の水移動と分子拡散から移流分散理論が提唱され土壌中の物質移動の理解は著しく深まった（例えばRose and Passioura, 1971）。多くの研究は風乾細土や砂を用いて行われ，荷電特性も組み込んだ理論も数多く提唱されてきた（例えばLai and Jurinack, 1971）。しかし，土壌構造を破壊した状態では水の保持も移動状態も実際とは違うものになってしまう。土壌構造が発達した粘土質土壌では，表層から下層に連続した割れ目状の粗孔隙が水みちとなり，土壌粒団をバイパスする粗孔隙流が顕著におこる（波多野ら，1983, 1984 a, 1984 b）。さらに，土壌粒団は，粗孔隙流から水と溶存物質を吸収したり放出したりする，ソースシンク効果を発現する（Hatano *et al.*, 1985）。これらの現象は，土壌中の硝酸の移動は，鉛直一次元の移流分散理論だけでは現せないことを示している。すくなくとも，水みちとなる可動部孔隙と，粒団のソースシンク効果を持たせる不動部孔隙のように，孔隙の機能を2つ以上に分けた図-2のようなモデルが必要である（Hatano and Sakuma, 1991 a）。それは粒団を含む土壌のカラム実験での溶脱過程はよりよく再現した（Hatano and Sakuma, 1991 b）。



図–2　土壌構造の発達した土壌における溶質移動モデル（Hatano *et al.,* 1991）

a, M 層からなる土壌；b, 1 層に含まれる土壌粒と粗孔隙；IMP, 粒団内細孔隙；MP, 粒団間粗孔隙；MXP, 粒団表面の混合相孔隙（塩濾過効果を表すために設定）；Jin, 流入；Jout, 流出；Jdiff, 拡散移流；θfc, 孔隙量；θim, 粒団内孔隙量；R, 混合相孔隙割合



図–3　重粘土と黒ボク土の粗孔隙の状態の違い

ところで，土壌の粗孔隙の形状は，土壌により異なる。図–3 は結晶性粘土鉱物を含む重粘土と，非晶質粘土鉱物を含む黒ボク土の粗孔隙を示しているが，重粘土がストレートな壁面をもつ粗孔隙を含むのに対し，黒ボク土の粗孔隙は曲がりくねっており，さまざまに連結しあっており，水と溶存物質の移動に与える影響は異なるはずだと思われる。そのような形状を定量するために，フラクタル次元を適用した（Hatano *et al.,* 1992）。フラクタルは，Mandelbrot（1982）が提唱した理論で，自然物の複雑な形が自己相似形であることに基づいて提案されたものである。例えば海岸線を考えてみると，我々はその長さを正確に測れない。海岸線に 1 km のスケールをあてれば，1 km 以下の凹凸は無視されてしまい，スケールを 100 m, 10 m と短くしていってもやはりそのスケール以下の凹凸は測れないことに気づく。ところが，このスケール（l）とそのスケールをあてた回数（n）は，log$n$＝Dlog$l$ の関係になっている。正確に測れない対象の中に法則があったということである。上の式の D をフラクタル次元といい，ユークリッド幾何学では整数次元しか扱えないが，フラクタルは小数を持つ次元も取り扱える。地図でみる海岸線は直線ではなくかつ平面ではない，1 次元と 2 次元の間の次元をもつ。

図–4 は水みちの形状のフラクタル次元はボックスカウント法を用いて計測した例である　（Hatano　*et al.,* 1992；波多野，2000）。これは，自然物の場合，必ずしも全体の画像が得られるわけで無いので，デジタル化したピクセル（ボックス）を基本単位として，その倍数の大きさをもつピクセルを用いて順次対象物の面積を計測する方法である。この場合，ピクセルのサイズを r として，測定個数を n とすると

$$\log n = -Dm \log r + c$$

となり，切片 c は r＝1 のときの測定個数となる。図–4 b をみると，基準ピクセルの 13 倍以内（図中 h＞r の範囲）で，Dm が 1.47 の直線が得られている。すなわちこの染色部位はフラクタルである。したがって，厳密にはその周囲の長さは決定できず，そのために染色面積も決定できないことになる。図–4 の場合，1 ピクセルは 0.22 mm であったので，ほぼ重力排水孔隙の形状が測定されていると考えられる。フラクタル次元は，分散係数（Hatano *et al.,* 1992），流出時間遅（Hatano, 1998）を有意に説明した。しかし，圃場の代表的な値を得るためには，少なくとも直径 60 cm 深さ 60 cm のサンプルでの計測が必要であった（Hatano and Booltink, 1998）。その重量は 170kg 以上となり，採取が困難であった。

3.　圃場レベルでの硝酸溶脱の測定

圃場の広い範囲から水を集める暗渠排水の流量と硝酸濃度をモニターすることにより，圃場からの硝酸溶脱を検討した（波多野，2002）。硝酸の溶脱量は，施肥窒素と植物吸収窒素量の差とほぼ等しかった。硝酸溶脱量の 90% は降雨時，融雪時に生じた。図–5 に示すように，暗渠排水の平水時の NO_3^--N 濃度は概ね 10 mg N L^{-1}，で推移し，降雨時 50 mg N L^{-1} 程度まで上昇した。暗渠排水中の NO_3^--N 濃度は排水速度により分数関数（y＝

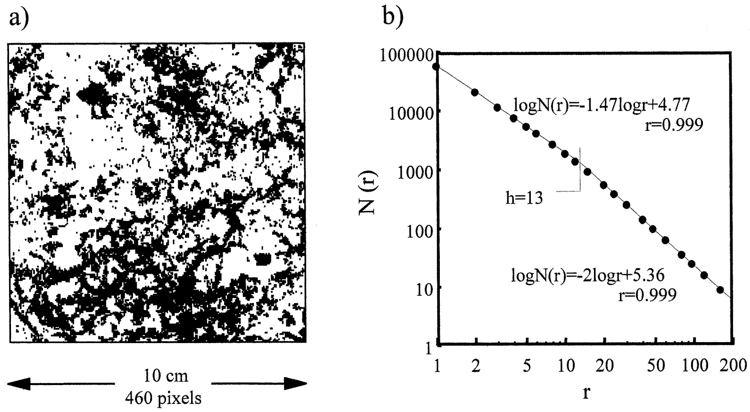


図-4 褐色森林土B層水平断面のメチレンブルーにより染色された土壌粗孔隙分布の画像（ピクセルサイズ0.22 mm）a）と，ピクセルサイズ（r；最少サイズを1）と染色粗孔隙を含むピクセルの数の両対数プロット，hは染色部の構造が見える最低の解像度を示し，h＞rにおける回帰式の傾きの絶対値がフラクタル次元（Dm＝1.47）b）（Hatano *et al.*, 1992）

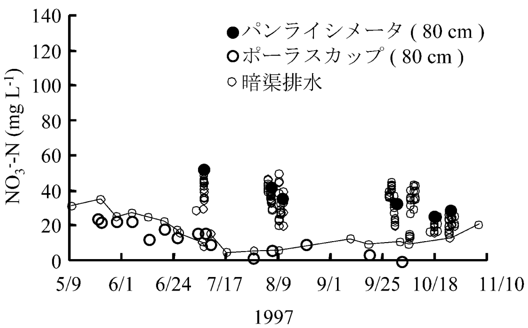


図-5 暗渠排水，土壌溶液の $NO_3{}^-$-N濃度

(B/(x＋A))＋C) で有意に回帰された（Hayashi and Hatano, 1999）。降雨時の暗渠排水 $NO_3{}^-$-N濃度は，80 cmに埋設したパンライシメータ（30 cm×30 cm）で採水した濃度とほぼ等しく，重力排水の $NO_3{}^-$-N濃度が高いことがわかる。一方，平水時の暗渠排水 $NO_3{}^-$-N濃度は深さ80 cmのポーラスカップで吸引採取したものと等しくなり，粒団から溶出する $NO_3{}^-$-N濃度は比較的低濃度である（Pampolino *et al.*, 2000）。降雨時には上層から高濃度の $NO_3{}^-$-Nを含む重力水が暗渠に直接排水されているようにみえる。下層からは，比較的低濃度の基底流が暗渠に常に供給されている。暗渠排水が基底流と重力排水の混合物だと仮定すると，暗渠排水中の $NO_3{}^-$-N濃度（Cdrain）は次のように書ける（Pinder *et al.*, 1969）。

$$\mathrm{Cdrain} = (\mathrm{Qbase} \times \mathrm{Cbase} + \mathrm{Qmacro} \times \mathrm{Cmacro}) / \mathrm{Qdrain}$$

ただし，Qbaseは基底流の流量，Cbaseは基底流の $NO_3{}^-$-N濃度，Qmacroは粗孔隙流の流量，Cmacroは粗孔隙流の $NO_3{}^-$-N濃度，Qdrainは暗渠排水の流量である。これを整理すると，

$$\mathrm{Cdrain} = (\mathrm{Qbase}(\mathrm{Cbase} - \mathrm{Cmacro}) / \mathrm{Qdrain}) + \mathrm{Cmacro}$$

が得られ，ちょうど分数関数の式に等しくなる。

これらのことから，圃場レベルの硝酸溶脱は，室内実験の知見により推察できることがわかる。

4. 流域レベルでの硝酸流出

農地が河川への窒素負荷源になっていることを明確にしたのは，田淵ら（1995）の研究である。同氏らは，流域レベルで河川水 $NO_3{}^-$-N濃度と畑地率を測定し，それらの間に正の相関関係があることを明らかにした。図-6は，田淵らの結果とともに，北海道における代表的河川の支流域の河川水 $NO_3{}^-$-N濃度の調査結果を示している。いずれの流域においても，河川水 $NO_3{}^-$-N濃度と畑草地率には正の相関関係が認められた（Woli *et al.*, 2004）。それらの回帰式の傾きは，土地利用システムが河川水質へ与えるインパクトの指標と考えられ，インパクトファクターと定義した。インパクトファクターは集約的畜産流域で最も高く（0.040），畑作酪農混合流域で中庸であり（0.020–0.030），酪農地域と軽種馬生産地域および水田畑作混合地域では低かった（0.005–0.015）。そして，このインパクトファクターの大きさの違いは，図-7のように，流域の農地の余剰窒素量により有意に回帰された（インパクトファクター＝1.09×10^{-4}×余剰窒素＋

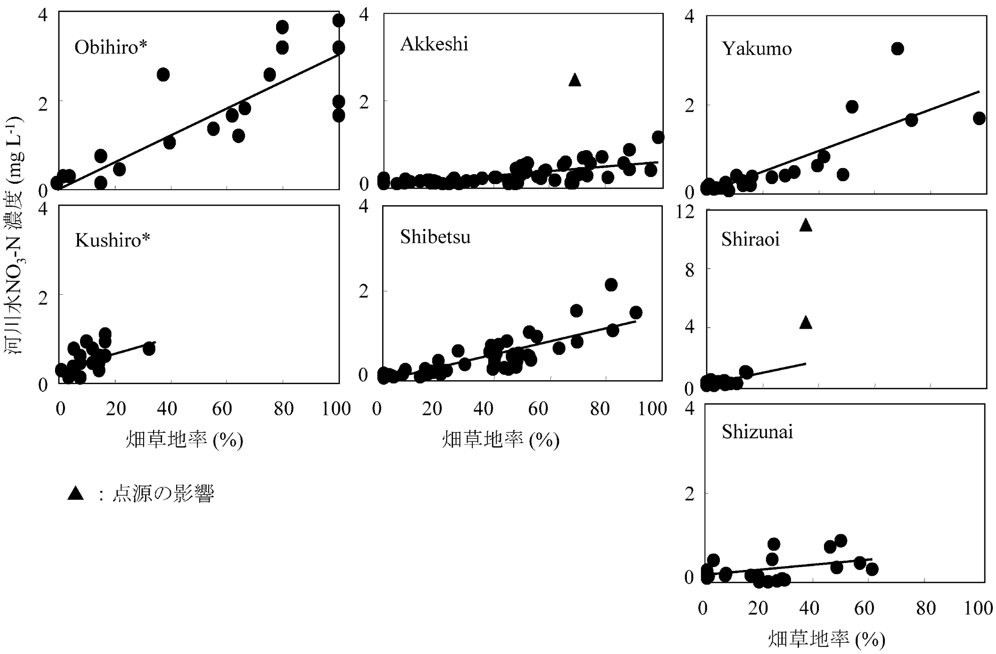


図-6　畑草地率と河川水 NO_3^--N 濃度の関係
* は田淵ら（1995）を引用

0.017 n＝7，r＝0.93，P＜0.01）。なお，余剰窒素は，次式で計算されている（Nagumo and Hatano, 2000）。すなわち，余剰窒素＝堆肥＋化学肥料＋大気降下物＋灌漑＋窒素固定－（作物吸収＋脱窒＋アンモニア揮散）である。堆肥，化学肥料，作物吸収，灌漑は流域の統計資料により計算され，大気降下物，窒素固定，脱窒，アンモニア揮散は文献を参考にしている。統計データと文献による値を用いて求めた余剰窒素が，実測した河川水 NO_3^--N 濃度の間にこのような有意な関係があることはある意味で驚きである。同様にして，北海道の 218 市町村の余剰窒素を求め，インパクトファクターを推定し，各市町村の畑草地率を乗じて河川水 NO_3^--N 濃度を推定し，実測した河川水 NO_3^--N 濃度（南雲・波多野，1999）と比較した。13 箇所が実測値が推定値を大きく上回ったが，それらを除くと，実測値と推定値はほぼ 1：1 となり，0.01% で有意な関係にあった。基本的には流域レベルの河川水 NO_3^--N 濃度は，面源により生じていることを示しているといえる。一方，実測値が推定値を大きく上回った市町村には，点源があることを示している。図-6 においても極端に河川水 NO_3^--N 濃度が高い地点が見られたが，その重点調査の結果，家畜糞尿処理ラグーンから全負荷量の 40% が排出されていた例（Woli *et al.,* 2003），し尿処理場や終末処理場からの高濃度の流出例を認め（Nagumo *et al.,* 2003），点源の評価も重要なことを示した。なお，年間流出量の測定は現在進行中であるが，年間の河川水 NO_3^- N 濃度は，夏季の平水時の河川水 NO_3^--N 濃度と有意な正の相関関係にある。

5.　スケール問題からのアプローチ

土壌からの硝酸流出は，土壌構造レベルでみると，極めて複雑なメカニズムに支配されるが，スケールを拡大すると意外に単純な法則に支配されている。例えば，世界中の河川水の NO_3^--N 濃度は人口密度と高い相関関係にある（Peierls *et al.,* 1991）。逆にいうと，大スケールでとらえられる単純な法則は，土壌内部の複雑なメカニズムに支配されていることになる。あるいは，圃場レベルでの点源にも影響をうけていることになる。土壌構造レベルの複雑な要因をそのまま厳密にパラメータとして用い，流域スケールの予測までに持ち上げていくボトムアップアプローチは，これまで土壌学で何度もとりあげられてきたが，境界条件（土地の区分），パラメータの測定とその代表性の問題のために限界があると思われる。一方，単に流域レベルの硝酸流出の見積もりから推定するトップダウンアプローチだけでは，要因が単純化されすぎることになる。これら両者とともに，中間スケールのアプローチが必要である。本稿で示した流域レベルの

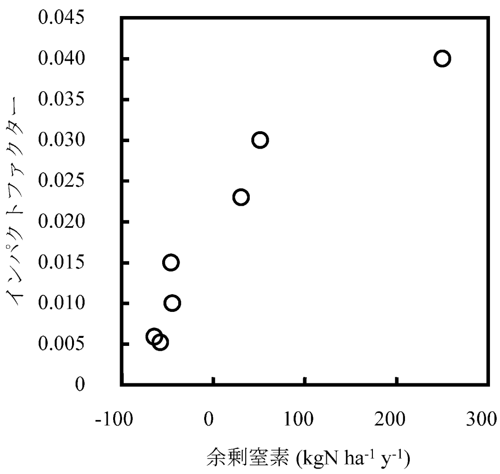


図-7 流域の農地の余剰窒素とインパクトファクターの関係

トップダウンデータの土地利用および窒素収支による解析には，圃場レベルでの知見を取り込むことが可能であり，圃場レベルデータは土壌構造レベルの知見により解釈できることから，今後，トップダウンアプローチとボトムアップアプローチを組み合わせることにより，それぞれのレベルでの硝酸溶脱に関わる要因の階層的パラメタリゼーションが可能になるものと期待される。

6. おわりに

本稿は，土壌物理学とフィールド科学の関係について，硝酸流出を例に書いたものである。フィールド科学は，最近，大学農学部付属施設を統合した組織の組織名として多く用いられている。私も，農学研究科から流動教員（時限で2つの組織を兼務する教員）として，北方生物圏フィールド科学センターに所属している。しかし，フィールド科学は十分に定義されているとは言いがたく，新機軸を打ち出すまでに至っていない。しかし，近年の環境問題を考えれば，野外におけるモニタリングとそのモデル化による予測，および環境変動による生態系変動予測のための野外実験を行い，それらデータを蓄積し，シナリオを描いていく作業は，非常に重要であると認識される。そのためには，目的と研究手法をさらに明確にしておかなければならない。土壌学および土壌物理学は，その重要な一翼を担うはずであることは論を待たない。ここで，取り上げた硝酸流出は富栄養化，飲用水汚染の問題に密接にかかわっている。硝酸流出ばかりでなく，生態系における窒素循環を通して，酸性化に関わるアンモニア揮散，地球温暖化に関わる亜酸化窒素放出などが生じている。また土壌はあらゆる栄養塩の循環の場所であり，炭素固定の場所であり，それらは富栄養化，酸性化，地球温暖化の問題に密接にかかわっている。それらほとんどすべての反応のメカニズムは良くわかっているが，いつ，どこで，どのようにその反応が生じるかは誰もわかっていない。想像しているだけでは，環境の劣化は止められないのである。土壌物理学は測定と解析のノウハウをもち，循環と流出を支配するパラメータに関するデータをすでに多く保有している学問である。世界に貢献する時であることは論をまたない。

引用文献

Food and Agriculture Organization of United Nations (FAO) (2004) : "FAOSTAT", http : //faostat.fao.org/faostat/collections?version＝ext＆hasbulk＝0＆subset＝agriculture

Galloway, J.N. and Cowling, E.B. (2002) : Reactive nitrogen and the world : 200 years of change. Ambio, **31** : 64–71.

Green, P.A., Vorosmarty, C.J., Meybeck, M., Galloway, J.N., Peterson, B.J. and Boyer, E.W. (2004) : Pre-industrial and contemporary fluxes of nitrogen through rivers : a global assessment based on typology. Biogeochemistry, **68** : 71–105.

波多野隆介・佐久間敏雄・岡島秀夫（1983）：メチレンブルートレーサー法による水みちの分布状態，土肥誌，**54** : 490–498.

波多野隆介・佐久間敏雄・岡島秀夫（1984）：シミュレーションモデルによる亀裂内水分流の解析，1. 理論．土肥誌，**55** : 344–350.

波多野隆介・佐久間敏雄・岡島秀夫（1984）：シミュレーションモデルによる亀裂内水分流の解析，2. 数値例．土肥誌，**55** : 351–356.

Hatano, R., Sakuma, T. and Okajima, H. (1985) : The source-sink effect of clayey soil peds on solute transport. Soil Sci. Plant Nutr., **31** : 199–213.

Hatano, R. and Sakuma, T. (1991 a) : A plate model for solute transport through aggregated soil columns. I. Theoretical description. Geoderma, **50** : 13–23.

Hatano, R. and Sakuma, T. (1991 b) : A plate model for solute transport through aggregated soil columns. II. Experimental results and application of the model. Geoderma, **50** : 25–36.

Hatano, R., Kawamura, N., Ikeda, J. and Sakuma, T. (1992) : Evaluation of the effect of morphological features of flow paths on solute transport by using fractal dimensions of methylene blue staining patterns. Geoderma, **53** : 31–44.

Hatano, R. (1998) : Regression model to predict trav : el time for chloride leaching throughout pedons using soil morphological characteristics. Nutr. Cycl. Agroecosyst., **50** : 267–269.

Hatano, R. and Booltink, H.W.G. (1998) : Using fractal dimensions of stained flow patterns in clay soils to predict bypass flow. In : P. Baveye, J.-Y. Parlange, B.A. Stewart (eds) “Fractals in Soil Science”, CRCpress, Boca Raton. 262–288.

波多野隆介（2000）：ペドメトリックス—その理論と応用—2. 土の顔，ミクロで見てもマクロで見ても金太郎飴：フラクタル．土肥誌，**70** : 914–919.

波多野隆介（2002）：暗渠排水を利用した硝酸溶脱のモニタリングとモデリング—灰色低地土タマネギ畑におけるケーススタディー—，長谷川周一ら編，環境負荷を予測する—モニタリングからモデリング—．日本土壌肥料学会監修，pp. 57–71，博友社，東京．

Hayashi, Y. and Hatano, R. (1999) : Annual nitrogen leaching in subsurface-drained water from a clayey aquic soil growing onions in Hokkaido, Japan. Soil Sci. Plant Nutr., **45**, 451–459.

Lai, S.-H. and Jurinack, J.J. (1971) : Numerical approximation of cation exchange in miscible displacement through soil column, Soil Sci. Soc. Amer. Proc., **35** : 894–899.

Mandelbrot, B.B. (1982) : The fractal geometry, of nature. p. 468, W.H. Freeman and Co., San Francisco.

Nagumo, T. and Hatano, R. (2000) : Impact of Nitrogen Cycling Associated with Production and Consumption of Food on Nitrogen Pollution of Stream Water. Soil Sci. Plant Nutr. **46** : 325–342.

南雲俊之・波多野隆介（2001）：北海道における融雪期河川水質の地域特性，土肥誌，**72** : 41–48.

Nagumo, T., Woli, K.P. and Hatano, R. (2004) : Evaluating contributions of point and non-point sources of nitrogen pollution in stream water in a rural area of central Hokkaido, Japan. Soil Sci. Plant Nutr. **50** : 109–117.

Organisation for Economic Co-Operation and Development (OECD) (2001) : Environmental Indicators for Agriculture-Methods and Results, http : //www.oecd.org/dataoecd/0/9/1916629.pdf.

Pampolino, M.F. Urushiyama, T. and Hatano, R. (2000) : Detection of nitrate leaching through bypass flow using Pan Lysimeter, Suction Cup and Resin Capsule. Soil Sci. Plant Nutr. **46** : 703–712.

Peierls, B.L., Caraco, N.F., Pace, M.L. and Cole, J.J. (1991) : Human influence on river nitrogen. Nature, **350** : 386–387.

Pinder, G.F. and Jones, J.F. (1969) : Determination of the ground-water component of peak discharge from the chemistry of total runoff. *Water Resources Research,* **5** : 438–445.

Rose, D.A. and Passioura, J.B. (1971) : The analysis of experiments on hydrodynamic dispersion. Soil Sci., 111 : 345–351.

田淵俊雄・吉野邦彦・志村もと子・黒田清一郎・石川雅也・山路永司（1995）：農林地からの流去水の硝酸態窒素濃度と土地利用との関係．農土論集，**178** : 129–135.

United Nations Environment Program (UNEP) (1999) : ”Global Environment Outlook 2000”, http : //www.unep.org/geo2000/

Woli, K.P., Nagumo, T. and Hatano R. (2002) : Magnitude of Nitrogen pollution in stream water due to intensive livestock farming practices. Soil Sci. Plant Nutr., **48** : 883– 888.

Woli, K.P., Nagumo, T., Kuramochi, K. and Hatano, R. (2004) : Evaluating river water quality through land use analysis and N budget approaches in livestock farming areas. Science of the Total Environment, **329** : 61–74.

受稿年月日：2004 年 11 月 26 日
受理年月日：2005 年 1 月 6 日

波多野隆介氏講演に関する質疑

取出伸夫（三重大学生物資源学部）：

なぜ，降雨量が多いと暗渠からの排水中の窒素濃度は高くなるのか。排水量が増えることはわかるが，バイパス流を含む通常の土中水流れでは，濃度が高くなる現象は説明がつかない。

波多野：

そのメカニズムまでは，まだ解明していない。測定結果はこのようになっているということだ。降雨時には，河川の窒素濃度も上昇する。

取出：

水田内の肥料が降雨時に越流して流れ出すということはないのか。

波多野：

そのような現象は無い。実測により確認している。

取出：

降雨時には，通常は流出しない表層土に含まれる肥料分が，バイパス流で流出するメカニズムがあるという理解でよいか。

波多野：

そうである。バイパス流は，窒素濃度の高い表層土からの水が直接暗渠へ流れ込むものとしてモデル化している。土壌溶液の実測結果も，地表に近い層で窒素濃度が高くなっている。

筑紫二郎（九州大学生物環境調節センター）：

フラクタル次元と浸透速度の関係を示されたが，フラクタル次元は水平断面の値か。

波多野：

そうである。

筑紫：

鉛直断面であれば，異なる結果になるのか。

波多野：

鉛直断面については計算していないが，亀裂に沿って水が流れることを考えれば，鉛直断面について計算する意味はあまり無い。フラクタル次元を計算するのであれば，水平断面で計算するのが適当である。

なお，深さ別の水平断面毎にフラクタル次元の計算を行い，これを積算して三次元のフラクタル次元を求めることが出来る。二次元面で 0.91 次元というのは，水平断面において水みちが 0.91 次元のフラクタル次元で分布しているという意味であり，鉛直方向に全く同じ構造で分布しているのであれば，三次元，すなわちボックス中のフラクタル次元は 1 を加えて 1.91 次元となる。

フラクタル次元について発表した論文は，非常に好意的に引用された場合と非常に批判的に引用された場合の両極に分かれた。粗孔隙の限界値が 0.2 mm だったので，画像解析の解像度も 0.2 mm としたが，批判の多くは画像解析の精度が悪く，解析上の下限値があるということで受けた。現在は良い機械が出ているので，この辺の改善は容易だと思う。

筑紫：

下限値があるならば，三次元のフラクタル次元を求める際に，二次元の値に 1 を加えるだけでは駄目ではないか。

波多野：

ある水平断面の次元が深さ方向に一様分布している場合に，二次元のフラクタル次元に 1 を加えれば三次元のフラクタル次元になるということだ。当然，一様分布でない場合は異なる。