

森里海連環学

一人と自然のつながりの視座

吉岡 崇仁*

1. はじめに

「もりさとうみれんかんがく森里海連環学」とは、京都大学フィールド科学教育研究センター（フィールド研）が2003年4月に設置されたのに伴い、森と海の教育研究施設が連携して、川を介した森と海の生態系のつながりを研究し、流域に関する環境問題の解決に資する教育・研究を構築しようとして打ち立てられた学問分野の名称です。現在の環境問題の多くが人間活動による環境への攪乱に起因することから、この学問分野は、自然科学だけではなく、人文社会学からの取り組みも必要となります。そこで、森と海の連環だけではなく、これらの生態系に加えて、人間圏（里）との間での連環も明らかにすることを目指しています。

ここでは、筆者が取り組んだ研究をもとに、森里海連環学の一部をご紹介します。

2. 森林の窒素飽和現象

森の物質循環の特徴の一つとして、生物に必要な窒素やリンなどの栄養塩類のほとんどが森林の生物と土壌の中でその循環が閉じている、閉鎖系の物質循環で構成されているという事実があります。つまり、森林生態系は、基本的に栄養塩が律速した状態にあります。生態遷移（ecological succession）の初期にマメ科植物が出現しますが、根粒に共生している窒素固定細菌の働きで、窒素ガスをアンモニウム塩に還元して有機物に取り込むことができるからであると説明されているのは、窒素栄養塩が律速していることを意味しています。遷移の後期、極相林になっても、樹木や土壌中に

は多量の有機物が蓄積されていますが、その炭素・窒素・リンの元素組成比は、炭素に偏っており、栄養塩律速であることに変わりはありません。

溪流には、陸域の生態系で余った物質が排出されてくると考えられますが、栄養塩律速にある森林から流れ出てくる溪流水中には、窒素栄養塩（アンモニウム塩 NH_4^+ 、硝酸塩 NO_3^- など）やリン酸塩 PO_4^{3-} はほとんど含まれていません。 NH_4^+ と PO_4^{3-} は、土壌粒子に吸着される傾向があるので、たとえ森林土壌で余っていたとしてもほとんど出て来ないのですが、水に良く溶ける NO_3^- も出てくることは通常少ないです。ところが、近年の人間活動の増大により、森林生態系に多量の窒素栄養塩が供給されるようになりました。人工林への施肥もその一つですが、大気を経由した窒素の負荷はより大規模です。農地への窒素肥料施肥と畜産に由来して揮発したアンモニア NH_3 や、化石燃料を使う内燃機関からの排気ガスに含まれる窒素酸化物が、湿性・乾性沈着として大気から森林に負荷されています（新藤ほか2005）。この結果、森林が窒素栄養塩に関して律速状態ではなくなり、やがて窒素が森林生態系の中で余ってることになります。これを「窒素飽和」（Aber et al. 1989）と呼んでいます。この状態になった森林からは、余った窒素が NO_3^- の形で溪流に排出されてくるようになります。また、土壌の酸性化により森林植生の衰退も観られるようになります。溪流水の NO_3^- 濃度を測定すれば、集水域にある森林が窒素飽和になっているどうかを推定することが可能です。ヨーロッパや北アメリカでこ

*京都大学フィールド科学教育研究センター

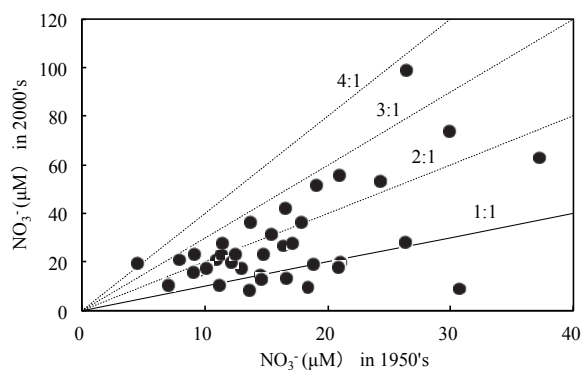


図1. 全国都道府県別平均 NO_3^- 濃度の1950年代と2000年代の比較 (京都大学フィールド科学教育研究センター2012)

の現象が観測されていますが、日本でも関東平野など人間活動の盛んな地域に近い森林渓流水で高い NO_3^- 濃度が検出されています (Yoh et al. 2001). 日本各地の渓流における NO_3^- 濃度を測定したところ、関東圏、愛知、近畿、北九州の各都道府県の渓流水で NO_3^- 濃度が高いことが分かりました (木平ら 2006). 1950年代 (小林 1961) と2000年代 (木平ら 2006) のデータで都道府県ごとの NO_3^- 濃度の平均値を比較すると、多くの都道府県でこの50年間で濃度が2~4倍に増加していました (図1). 日本の各地で窒素飽和が進行しているのかもしれませんが.

窒素飽和以外に渓流水中の NO_3^- 濃度が上昇する原因として、森林伐採があります. スギ人工林などで、皆伐施業が行われると、栄養塩を吸収していた植生がなくなってしまうため、土壌有機物が分解して回帰してきた窒素が NO_3^- となって渓流に流出してきます (福島・徳地 2008).

3. DOC と NO_3^- の関係

森林からは様々な物質が溪流・河川を通して排出されますが、窒素の代表が NO_3^- とすると、炭素の代表は溶存有機態炭素 (DOC) です. 台風や洪水時には、粒子状の有機態炭素 (POC) が大量に流れ出て、年間の DOC 排出量をはるかに超える場合もありますが、平常年の場合は、DOC が主要な形態とされています (Ludwig et al. 1996). 炭素と窒素は、森林に限らず生態系に

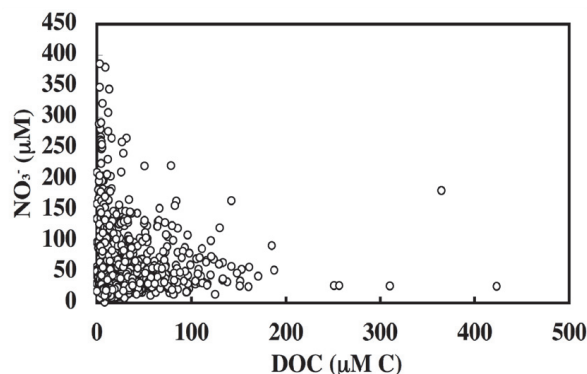


図2. 全国溪流調査における DOC 濃度と NO_3^- 濃度の関係 (木平ら 2006 より作成)

における物質循環系の上で密接な関係がありますが、先に取り上げた日本各地での渓流水質の測定結果によれば、DOC 濃度が高い溪流では NO_3^- 濃度が低く、逆に NO_3^- 濃度が高い溪流では DOC 濃度が低いという非線形で負の相関が見られます (図2). さらに、土壌、河川水から海洋に至るまで、様々な生態系において、DOC と NO_3^- の間に相関関係が見出されています (Taylor and Townsend 2010).

森林生態系で考えると、植物が繁茂し、落葉や落枝が地面に多量に供給されると有機物に富んだ土壌となり、窒素栄養塩は系内に保持されるようになります. そのような森林から流出する渓流水には、DOC 濃度が高く、 NO_3^- 濃度は低くなると考えられます. 一方、森林伐採や酸性雨などで森林植生が減少すると、栄養塩の吸収が低下し、窒素栄養塩が余る状況となります. そのような森林からは、DOC の流出は減少し、余った窒素が NO_3^- の形で流出してきます. また、2で述べたように大気経由で多量の窒素栄養塩が供給され続けた場合も、森林生態系が窒素過多の状態となり余った窒素が NO_3^- の形で河川に流出してきます.

図3は、ここに述べてきた渓流水質と森林の状態を模式的に示しています. 渓流水質は、森林環境の指標になると考えることができます.

森林が河川に供給する物質は、森林生態系における物質循環の結果として、その量や濃度が定まります. しかし、森から海に至る流域全体を見れば、森だけが川や海といった水域に物質を供給し

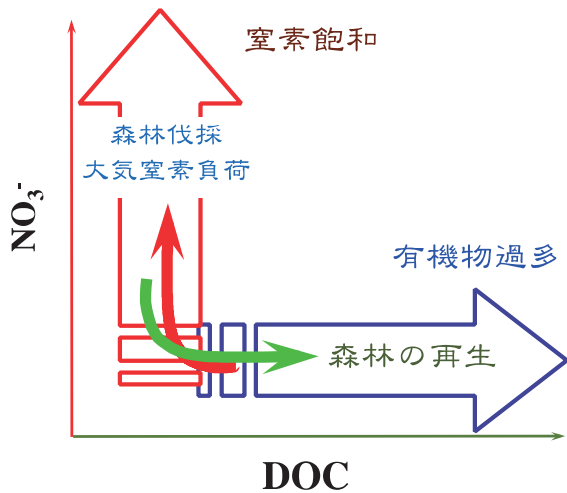


図3. 渓流水中のDOC濃度とNO₃⁻濃度と森林の状態を示す模式図

ているわけではなく、流域内における人間活動も大きく影響しています。

琵琶湖に流入する主要な河川である野洲川でのDOC濃度分布を図4に示しました。野洲川本流では、最上流で濃度が低く、下流に向かって濃度が上昇していますが、支流の柚川では、中流域で濃度が最も高くなっていました。

調査地点の集水域について、土地利用や気象条件、人口密度などを説明変数とすると、DOC濃度 (mg/l) は以下の式で表わすことができました。

$$DOC = 0.29 + 0.001 \cdot x_1 + 0.07 \cdot x_2 - 0.001 \cdot x_3 + 0.03 \cdot x_4$$

ここで、 x_1 は人口密度 (人/km²)、 x_2 は水田面積率 (%), x_3 は前7日間降水量 (mm), x_4 は日平均気温 (°C) を示します。DOC濃度に対して、水田面積率の効果が大きいことなどが分かります。同様に、NO₃⁻濃度について解析すると、茶畑面積率の効果が大きい結果となりました。茶畑への



図4. 野洲川流域におけるDOCの濃度分布 (大手ほか 2006)

窒素肥料の施肥が影響しているものと考えられます。

このように、河川水質は、集水域の土地利用によって変動することが分かります。

4. 鉄の供給源について

フィールド研の森里海連環学は、気仙沼の牡蠣漁師である畠山重篤さんが取り組まれている「森は海の恋人」活動との連携で始まったことができます。この活動は、海に生きる人びとが中心となって、上流にある森林の整備のために手間暇をかけるというものであり、その原点は、森林が健全でなければ、海の一次生産にとって非常に重要な溶存鉄が供給されないという作業仮説にあります。この溶存鉄の動態について、フィールド研が取り組んだ由良川流域での調査事例から紹介したいと思います。

由良川河川水中の溶存鉄濃度は、一般的傾向として、下流に向かって上昇しており、集水域の土地利用との関係を見ると、森林は溶存鉄の主な供給源ではないと推定されました。また、河川水が海水と混合する由良川の河口や沿岸域では、塩分が上昇すると急速に濃度が低下することが分かりました (図5)。河口・沿岸域での急速な濃度低下は、海水と混合する河口域においてコロイド状の鉄が、凝集・沈殿することによって水中から除去されたであると推定することができました。

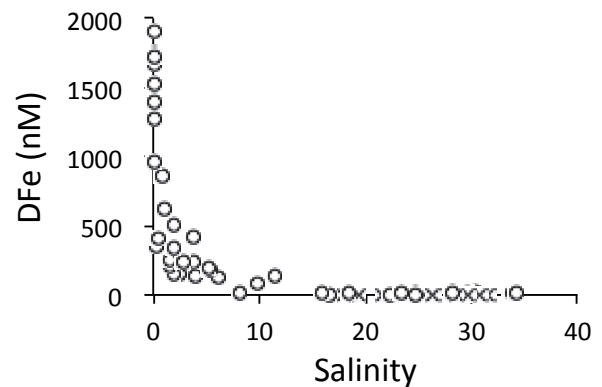


図5. 由良川流域における溶存鉄濃度 (DFe) と塩分 (Salinity) の関係 (Watanabe et al. 2018) ×は、誘導結合プラズマ発光分析で検出限界以下の試料を示す。

(Watanabe et al. 2018).

一方、DOC 濃度や腐植物質の相対的な量を指標する蛍光強度の特性を見ると、河口から沿岸に向かう塩分の上昇とは関係がなく、値の変動は大きくありませんでした。これらの調査結果を総合すると、沿岸域の海水中において、nM レベルで存在する鉄が、森林などを起源とする腐植物質と錯体を形成している可能性が示唆されました (Watanabe et al. 2018)。一方、室内培養実験による間接的な証拠ですが、腐植物質が存在することで、海洋植物プランクトンの生育が促進されることが示されています (例えば、Fukuzaki et al. 2016)。

更なる研究が必要ですが、陸域が供給する腐植物質と溶存鉄が、海の一次生産に有効であるとい連環のスキームを描くことができると思います。

5. で紹介する応答予測モデルなどの結果を見ても分かるように、森林伐採は NO_3^- 濃度を上昇させるので、海の植物プランクトンによる一次生産を高める効果があります。しかし、過剰になると富栄養化を引き起こしかねません。栄養塩類の濃度だけではなく、栄養塩類間のバランスも重要と考えられています。また、濁りの原因となる土砂粒子の排出も、海の生産に影響を及ぼします。人間活動は、これらの物質の循環や環境に影響を及ぼしますが、人間はそれらを制御することができるのではないのでしょうか。森里海連環学では、このような人間活動も扱う必要があります。

5. 人と自然のつながり

森里海連環学では、森・川・里・海の間での、水、物質、生物のつながりを自然科学と人文社会学の協働で解明しようとしています。

図 6 は、Collins ら (2007) が作成した図をもとにして、人間と自然の相互作用を模式的に示したものです。図中の丸囲み数字の順番にこの相互作用の連環をたどると以下の通りとなります。

①人間は、価値判断のもとに自然環境への態

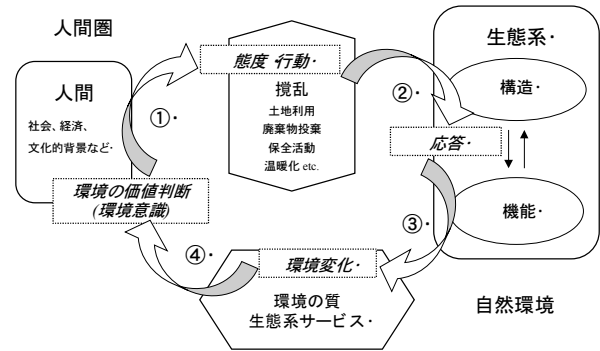


図 6. 人間と自然の相互作用の模式図 (Collins et al. 2007 をもとに改変) 丸囲み数字の説明は本文参照のこと。

度・行動を決定する。

②人間の態度・行動に対し、自然環境は応答する。

③応答によって環境変化が生じる。

④環境変化を認識した人間は、その認識を元に新たな環境の価値判断を形成する。

このスキームの中に、理と文の融合の可能性や自然と人間の相互作用を解明する方法論があり、森里海連環学の基礎があると思います。

人間と自然の相互作用の解明を主題に設立された「総合地球環境学研究所」で、「流域環境の質と環境意識の関係解明」という研究プロジェクトを実施しました。このプロジェクトでは、自然科学の手法により、森林・河川・湖沼で構成される流域 (北海道の朱鞠内湖集水域) の環境変化予測モデルを構築し、予測された環境変化を人びとがどのように評価するかを社会調査の手法である「シナリオアンケート」で解析しました (図 7)。

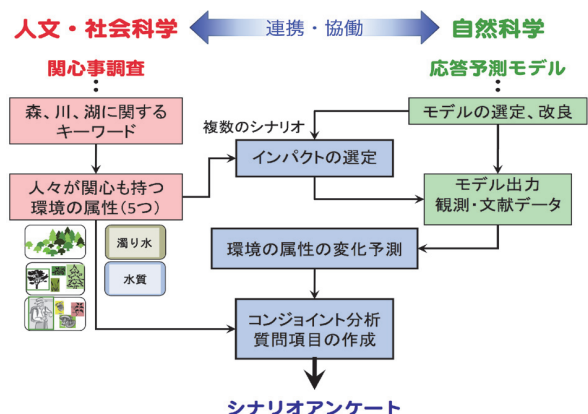


図 7. シナリオアンケートの概略図 (吉岡 2009)

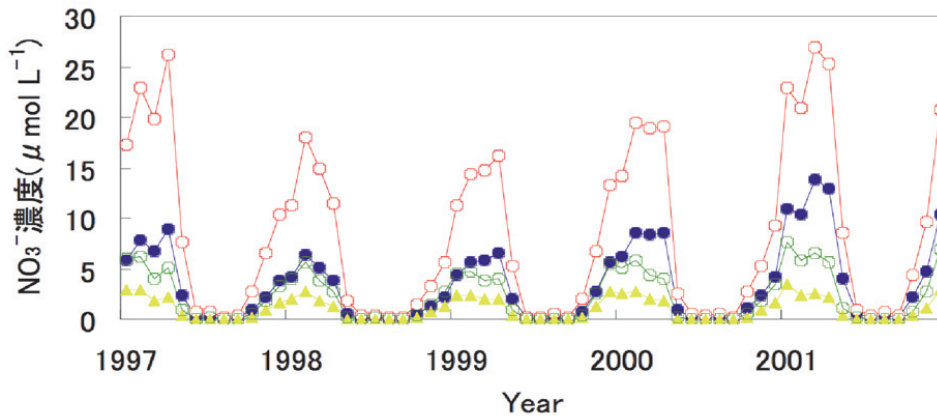


図8. 物質循環モデル (PnET-CN モデル) でシミュレートした渓流水中の NO_3^- 濃度 (原図)
 ●: 現状シミュレーション結果, ○: 大気経路窒素負荷量2倍, ⊖: 大気 CO_2 濃度 500 ppm

まず、環境変化に対する生態系の応答予測モデルを構築しました。森林-溪流の物質循環のモデルには、ソースコードが公開されている PnET-CN モデル (<http://www.pnet.sr.unh.edu/index.html>) を適用し、また、森林土壌から河川への流出量のシミュレーションには、水文モデル (HYCYMODEL, 福島・鈴木 1986) を適用しました。図8は、大気から森林への窒素負荷が2倍になったときと二酸化炭素濃度が 500 ppm に増大したときの渓流水中の NO_3^- 濃度をモデルにより算出したものです。

実際の溪流では、夏場に濃度上昇が見られており、この図では再現がされていません。そこで、降雨量のパラメータなどを調整することで再現性を高めました。湖沼生態系モデルは、すでに開発されていたものを土台として、朱鞠内湖用に適応させました (中田ほか 2006)。図9は、集水域内

の森林を伐採したときの湖沼表層の NO_3^- 濃度のシミュレーション結果を示しています。

図9の右図に示すとおり、森林伐採により、湖沼の NO_3^- 濃度が上昇することが予測されました。

一方、人びとへのアンケート調査により、森林-河川-湖沼生態系において関心のある項目を抽出したところ、図10に上げた5つの項目が重視されていることが分かりました。

そこで、応答予測モデルによって朱鞠内湖集水域内で森林伐採を行ったときに起る環境変化を予測し、その変化を5つの属性の変化として表現し、シナリオアンケートを行いました。

図11は、コンジョイント分析 (選択型実験) で求められた5つの属性に対する部分効用値を示しています。正の値は、その属性が大きく変化することを好み、負の値は、その属性の変化を嫌うということを表わします。

解析の結果、森林伐採を行ったときに人びとが

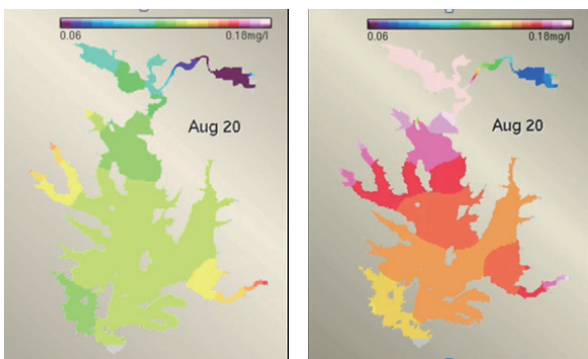


図9. 朱鞠内湖 NO_3^- 濃度のシミュレーション結果
 左: 現状, 右: 森林伐採による影響 (原図)




-  【森林の面積の減少】
-  【植物の種類と量の減少】
-  【森林浴などで利用できる面積の減少】
- 濁水** 【濁り水の発生頻度】
- 水質** 【川や湖の植物プランクトンの増加】

図10. シナリオアンケートで用いた属性と変化






環境変化	部分効用値
 Forest landscape	0.77**
 Plant amount and diversity	-0.70**
 Recreational uses	-0.29**
 濁水 Turbid water	0.26**
 水質 Water quality	-1.00**

図 11. 5つの属性の部分効用値 (吉岡 2009 より)
** : $p < 0.01$

最も嫌だと思える環境変化は、水質の変化 (植物プランクトンの増加) という結果が得られました (吉岡編 2009)。森林を伐採したときに、人びとは森の植物やレクリエーションよりも、川や湖の水質の悪化を一番に気にするという意外な結果でした。人びとの意識の中で、森と川と湖とがつながっていることを示唆しているものと考えられます。

6. おわりに

森、川、海の物質や生物のつながりを生物地球化学の手法で明らかにすることは、フィールド科学の大きな研究課題の一つです。ここで紹介した DOC と NO_3^- の連環に限っても、まだ分かっていないことが数多く残されています。溶存鉄と腐植物質の関係などもまだほとんどよく分かっていない状態です。物質循環に関わる生物学的プロセスの時空間分布を理解するために、これからも研究し続けることが必要だと思います。

また、人と自然とのつながりについて、人文社会学と自然科学の連携の必要性は以前から強く認識されているものの、依然として道半ばだと思います。京都大学フィールド科学教育研究センターが提唱している「森里海連環学」にも、新たな、そして飛躍的な方法論や発想の展開が必要とされています。自然科学者にも人文社会学者にも魅力ある研究分野になっていけばと思います。

7. 文献

Aber, J. D., K. J. Nadelhoffer, P. Steudler and J.

M. Melillo (1989) Nitrogen saturation in northern forest ecosystems. *BioScience*, 39:378-386.

Collins, S. L. and others (2007). Integrated Science for Society and the Environment: A strategic research initiative. Miscellaneous Publication of the LTER Network, https://lter.kbs.msu.edu/docs/robertson/Collins_et_al_2007_Report.pdf

福島慶太郎・徳地直子 (2008) 皆伐・再造林施業が渓流水質に与える影響 - 集水域単位で林齢の異なるスギ人工林を用いて -, *日本森林学会誌*, 90: 6-16.

福嶋義宏・鈴木雅一 (1986) 山地小溪流を対象とした水循環モデルの提示と桐生流域への10年連続日・時間記録への適用. *京都大学演習林報告*, 57: 162-185.

Fukuzaki, K., T. Yoshioka, S. Sawayama, and I. Imai (2016) Iron requirements of *Heterosigma akashiwo* (Raphidophyceae), *Heterocapsa circularisquama* (Dinophyceae) and two common centric diatoms. *北海道大学水産科学研究彙報*, 66: 121-128.

小林純 (1961) 日本の河川の平均水質とその特徴に関する研究. *農学研究*, 48: 63-106.

木平英一・新藤純子・吉岡崇仁・戸田任重 (2006) わが国の渓流水質の広域調査. *日本水文科学会誌*, 36: 145-149.

京都大学フィールド科学教育研究センター編 (2012) 『森と海をむすぶ川』, 向井宏監修, 京都大学学術出版会, pp. 335.

Ludwig, W., J.-L. Probst and S. Kempe (1996) Predicting the oceanic input of organic carbon by continental erosion. *Global Biogeochemical Cycles*, 10: 23-41.

中田喜三郎・日野修次・植田真司 (2006) 湖水の流動モデルと生物地球化学的物質循環モデル. *陸水学雑誌*, 67: 281-291.

大手信人・川崎雅俊・木平英一・吉岡崇仁 (2006)

- 林から河川への炭素と窒素の流出. 『地球環境と生態系－陸域生態系の科学』, 武田博清・占部城太郎編著, 共立出版, p. 138-155.
- 新藤純子・木平英一・吉岡崇仁・岡本勝男・川島博之. (2005) 我が国の窒素負荷量分布と全国溪流水質の推定. 環境科学会誌, 18: 455-463.
- Taylor, P. G. and A. R. Townsend (2010) Stoichiometric control of organic carbon-nitrate relationships from soils to the sea. *Nature*, 464: 1178-1181.
- Watanabe K., K. Fukuzaki, K. Fukushima, M. Aimoto, T. Yoshioka and Y. Yamashita (2018) Iron and fluorescent dissolved organic matter in an estuarine and coastal system in Japan. *Limonology*, 19: 229-240 (doi.org/10.1007/s10201-017-0536-9)
- Yoh, M., E. Konohira and K. Yagi. (2001) Regional distribution of natural stream nitrate in central Japan. *Water, Air, and Soil Pollution*, 130: 655-660.
- 吉岡崇仁編 (2009) 『環境意識調査法－環境シナリオと人々の選好－』. 総合地球環境学研究所環境意識プロジェクト監修, 勁草書房, pp. 196.