

機関番号：12701
 研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2008～2010
 課題番号：20570018
 研究課題名（和文） 湖沼生態系の空間情報と多重安定性理論を応用した社会生態モデリング研究
 研究課題名（英文） Modeling of social-ecosystems based on geographic information and multi-stable theory in lake ecosystems
 研究代表者 雨宮 隆（AMEMIYA TAKASHI）
 横浜国立大学・環境情報研究院・准教授
 研究者番号：60344149

研究成果の概要（和文）：本研究では、はじめに生態系の多重安定理論を応用し、生物間相互作用を利用することで富栄養化湖沼生態系を回復できることを数理生態モデルから明らかにした。次に、相模湖および津久井湖を対象とし、1960年代から2007年までの約40年間の水質・土地利用等のデータをGISを用いて総括的に解析することで、両湖におけるアオコの発生の原因や特徴を時空間的な視点から解明した。その結果、両湖における富栄養化の要因である窒素については大気由来の窒素であることが強く示唆された。集水域の社会・経済的な状況、環境要件等で富栄養化が避けられない湖沼においても、生物間相互作用を利用すれば環境修復が可能であることが示された。

研究成果の概要（英文）：Based on the multi-stable theory in ecosystems, this study firstly shows a restoration technique of eutrophicated lakes by using a mathematical model that takes into account biological interactions in lake ecosystems. Secondly, comprehensive-GIS (Geographic Information System) analyses of forty-year social and environmental data in basins of lakes Sagami and Tsukui in Kanagawa prefecture revealed a prime factor for algal blooms in these lakes. Namely, one of the main nutrients, nitrogen, may originate not from sewage in the basins but from atmosphere. Taking into account the above results, a restoration technique by using biological interactions is very effective especially for lakes that are unavoidable for eutrophication due to social and environmental circumstances.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2009年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：生物学

科研費の分科・細目：基礎生物学・生態・環境

キーワード：生態系, 数理生態学

1. 研究開始当初の背景

今から約30年前に発表された生態系の多重安定性理論が近年多くの野外生態系で報告されているレジームシフトの根拠になりつつある。また、多重安定性理論は当初から生態系管理の視点からもその重要性が指摘

されていた。一方、生態系管理にとって自然の景観や土地利用、社会経済活動などの空間情報が重要な役割を演じ、地理情報システム（GIS）を活用した生態系管理が進められている。

2. 研究の目的

生態系の多重安定性理論が実証されつつあり、また、環境管理に GIS が有効に利用されている現在、双方の研究を生態系管理に応用できれば新たな研究課題となる。そこで本研究では、数理生態学と GIS の仲介に生態モデリングの手法を用い、神奈川県内のダム湖（相模湖・津久井湖）を対象として、ダム湖生態系と集水域の時空間情報を視覚化した社会生態モデルを構成し、実用的な湖沼生態系管理手法を提示することを目的とした。

3. 研究の方法

神奈川県内のダム湖（相模湖・津久井湖）集水域を研究対象として、下記の 2 つのサブ課題を並列的に進めた。

(1)数理生態学の理論と生態モデリングを融合した生態系管理に資する新しい方法論の構築：ダム湖の富栄養化対策に生態系の多重安定性理論とレジリエンスの概念を応用する方法論を提示する。

(2)地理情報システム (GIS) を利用した社会生態モデルの時空間的展開：集水域の自然環境や社会経済状況がダム湖の水質・生物相に及ぼす影響を時空間的に視覚化し、富栄養化に対する実践的な管理手法を示す。

4. 研究成果

(1) 数理生態学の理論と生態モデリングを融合した生態系管理に資する新しい方法論：富栄養化湖沼に異常増殖する藍藻類（アオコ）の低減に生物間相互作用を利用することが当該研究室において見出されたので、その効果を湖沼生態系モデルに組み込み、湖沼生態系の多重安定性の変化と管理手法について検討した。当該研究者らがレジリエンスの研究に用いてきた湖沼生態系の 5 変数モデル

$$\begin{aligned} \frac{dN}{dt} &= I_N - r_N N - \frac{r_1 N}{k_1 + N} X + \eta d_4 D \\ \frac{dX}{dt} &= \frac{r_1 N}{k_1 + N} X - f_1 \frac{X^2}{k_2 + X^2} Y - (d_1 + e_1) X \\ &\quad - \frac{f_B X^2}{k_B + X^2} B \\ \frac{dY}{dt} &= \eta f_1 \frac{X^2}{k_2 + X^2} Y - f_2 \frac{Y^2}{k_3 + Y^2} Z - (d_2 + e_2) Y \\ \frac{dZ}{dt} &= \eta f_2 \frac{Y^2}{k_3 + Y^2} Z - (d_3 + e_3) Z \\ \frac{dD}{dt} &= (1 - \eta) f_1 \frac{X^2}{k_2 + X^2} Y + (1 - \eta) f_2 \frac{Y^2}{k_3 + Y^2} Z \\ &\quad + d_1 X + d_2 Y + d_3 Z - (d_4 + e_4) D \end{aligned}$$

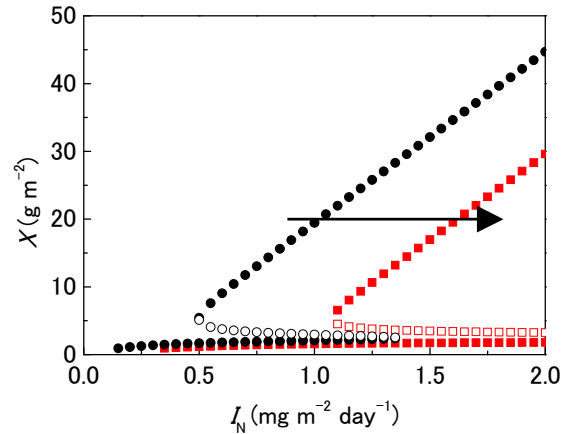


図1 数理モデル(1)式の線形安定性解析
横軸は栄養塩の流入量（富栄養度）、縦軸は藍藻類のバイオマス密度。「ウキクサー根圏細菌」の効果により、安定性曲線が右側にシフト（黒印→赤印）し、富栄養化した状態においても、藍藻類の増殖を抑制できることを示している。

（黒印： $f_B B = k_B = 0$, 赤印： $f_B B = 0.03, k_B = 2$ ）

ル (CASM: Amemiya et al., *Ecology & Society* 2005) に、生物間相互作用として見出した「ウキクサー根圏細菌共生系が藍藻類の増殖を低減する効果」（特願 2099-105196）を組み込んだ下記のモデルを構成した。

モデルの特徴は、第 2 式の最後の項（下線）に、根圏細菌群集が藍藻を殺菌する効果を Holling Type-III の捕食項として導入したことである。ここで、 N は栄養塩濃度、 X は藍藻類バイオマス密度、 Y は動物プランクトンバイオマス密度、 Z は高次捕食者バイオマス密度、 D は死骸のバイオマス密度を表す。他は捕食-被食に関する定数である。

解析結果を図 1 に示す。根圏細菌群集が藍藻類の増殖を抑制する効果として、双安定性曲線が右側にシフトすることが明らかとなった。すなわち、横軸は栄養塩の負荷量（富栄養化度）であるので、相模湖・津久井湖のように富栄養化が進行した条件下においても、「ウキクサー根圏細菌群集」を導入することで、藍藻類の増殖が抑制された単安定状態が実現される可能性が示された。本結果は、集水域の社会・経済的な要因により栄養塩の削減が困難な湖沼においても安価かつ環境負荷の少ない方法で湖沼生態系を管理できる可能性を示唆している。

(2)地理情報システム (GIS) を利用した社会生態モデルの時空間的展開：

①集水域：相模湖および津久井湖の集水域を GIS を用いて作成した。まず初めに、50 m メッシュの DEM (Digital Elevation Model) をもとに、水文解析を行った。さらに、実際

の地形を考慮し、追加すべき部分については、10 m の DEM をもとにサーフェス解析によって等高線を作成し、その等高線からマニュアルで作成した。その結果、相模湖・津久井湖集水域全体の面積は約 1,123 km²であった。尚、集水域の中央を中央自動車道が貫通しており、このことが後で述べるように藍藻類の窒素源となっていることを示す。

②人口：「国勢調査」のデータをもとに、1965 年から 2005 年まで 5 年ごとの集水域の人口の変移を作成した。その結果、集水域の人口密度は高くとも 10 人/km²であり、1965 年から 2005 年の 40 年間に於いて、ほとんど変遷していない。人口総数においても、2005 年の時点で約 25 万人であり、それほど大きな値ではない。

③土地利用：1976 年・1987 年・1991 年・1997 年の 4 年分の土地利用の変化を作成した。また、山梨県側については各市町村の 2000 年時点の土地利用図を GIS データ化した。さらに、この GIS データを「国土数値情報土地利用」と照らし合わせ、土地利用の分類を改編した。その結果、1976 年から 1997 年までの約 20 年間では、ほとんど土地利用状況が変化していなかった。すなわち、森林及び荒地が多く、人工的な土地利用は非常に少ないことが明らかとなった。

④下水道の整備状況：集水域の下水処理の整備状況や普及率を山梨県および神奈川県ホームページから調べた。その結果、集水域内の市町村における下水処理は 1986 年 7 月に初めて山梨県富士吉田市周辺で開始されたことが分かった。その後、1989 年から城山町などの集水域内に位置する神奈川県の市町村でも次々に開始され、2004 年に相模湖の上流に位置する山梨県大月市周辺で下水道が供用された。集水域の主な市町村の下水道普及率は平均すると 40%程度と低い。

⑤相模湖・津久井湖の水質：神奈川県環境科学センターが発行している『神奈川県水質調査年表』のデータをもとに、全窒素・全リン・N(窒素)/P(リン)比・BOD(生物化学的酸素要求量)の年平均値の経年変化を相模湖と津久井湖それぞれにおいて求めた。全窒素は 1973 年から 2007 年まで 35 年間、全リンは 1980 年から 2007 年まで 28 年間、N/P 比と BOD は 1971 年から 2007 年まで 37 年間の期間について行った。

(i)全窒素・全リン：全窒素の値は、1.0 mg/l から 1.5 mg/l 前後と高い値で横ばいに推移しており大きな増加はみられなかった。同様に、全リンにおいても 0.05 mg/l から 0.1 mg/l 前後と高い値で横ばいに推移していた。

(ii)N/P 比：両湖において 1980 年前後のある年を境に急激な増加がみられた。これは、後で述べるように、集水域の交通量の増加と対応している。

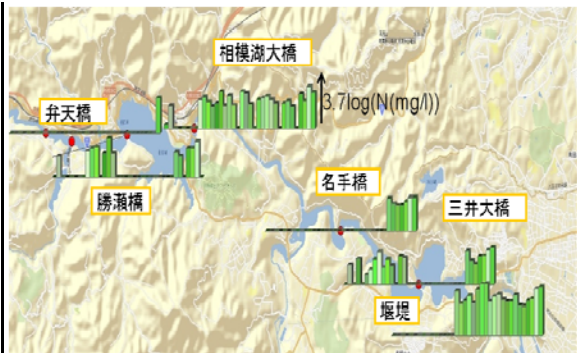


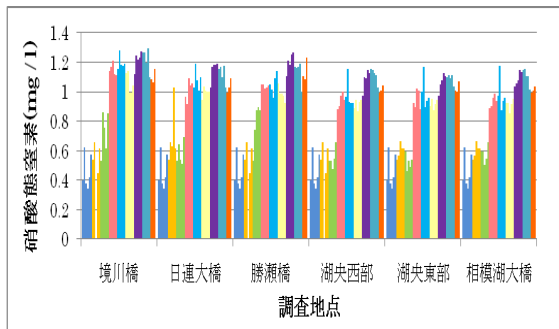
図 2 アオコの発生状況

(iii)BOD:1973 年ごろ値が大きく増加していた。しかし、1973 年以降については、1986 年に集水域内の市町村で下水処理が開始されたにもかかわらず BOD の値は横ばいであり、大きな変化はみられていない。

⑥藍藻類(アオコ)の発生状況：「県営水道の水質」を用い、藍藻類 *Microcystis aeruginosa* の 1 ml 中の細胞数のデータを利用した。その経年変化を GIS を用いて作成した。尚、1972 年から 1986 年までは、勝瀬橋・相模湖大橋(相模湖)および三井大橋(津久井湖)の 3 地点で測定を行っている。また、1987 から 2000 年までは、相模湖の相模湖大橋と堰堤の 2 地点のみで調査が行われており、2001 年以降は、勝瀬橋・相模湖大橋(相模湖)、名手橋・三井大橋・堰堤(津久井湖)の 5 地点に増えている。

アオコの発生の経年変化について図 2 に示す。アオコの発生は 1970 年代前半からみられ、1980 年に相模湖と津久井湖の両方で初めて 10⁴細胞/ml を超えた。これは、1979 年ごろからアオコの発生が顕著になったという報告とも一致する(相模原水系ダム管理事務所、2006)。相模湖では 1985 年に、津久井湖では 1987 年に 10⁵細胞/ml を超え、初めてアオコの異常増殖となった。その後、相模湖においてエアレーションが導入された 1988 年以降から、相模湖と津久井湖のアオコの挙動に違いが表れるようになった。相模湖では、1989 年・1993 年・1999 年・2003 年の 4 年間はアオコが発生はしていない。しかし、2004 年に相模湖でアオコが大発生して以来、再び発生が続き状態は悪化した。特に、2006 年は相模湖で初めて 10⁶細胞/ml 以上を記録し過去最悪の発生状況となった。一方津久井湖では、アオコが発生しなかった年はなく、毎年必ず発生している。また、各年のアオコの発生量を比較しても、津久井湖のほうが多い。特に、相模湖と津久井湖の違いが顕著に表れているのが 1993 年であった。相模湖は 0 細胞/ml であったのに対し、津久井湖では 1972 年から 2007 年までの間で 2 番目に多い 2.5 × 10⁷ 細胞/ml を記録した。

以下では、アオコの発生状況の原因として



■1964~1969 ■1971~1974 ■1975~1979 ■1980~1984 ■1985~1989
■1990~1994 ■1995~1999 ■2000~2004 ■2005~2007

図3 硝酸態窒素の経年変化(相模湖)

湖沼の硝酸態窒素との相関について述べる。

⑦硝酸態窒素の経年変化：硝酸態窒素の経年変化は、すべての調査地点において、1980年前後を境に値が階段状に一気に増加していた(図3)。調査地点ごとにその平均値の差を比較しても、1%または5%で有意な差がみられた。これは、アオコの発生が顕著になった年とも一致する。また、その増加量は相模湖では0.5mg/l程度であり、津久井湖では0.2~0.5 mg/l程度であった。また、1980年以前とそれ以降の年平均値の差を比較したところ、すべての地点において1%または5%水準で有意な差がみられた。

⑧集水域の交通量の変化：集水域周辺の交通量の経年変化を見ると(図4)、硝酸態窒素やアオコの発生量が増加する約10年前である1960年代後半から1970年代前半にかけて、大幅に増加していた。

また、大気中の窒素のシミュレーション結果を交通量の経年変化を図5に重ねて示す。図5の左上には中央自動車道が通っている。交通量と大気中の窒素濃度を比較すると、Aの交通量の多い地点は大気中の全窒素濃度も高く、中央自動車道の近くであるCの地点でも全窒素濃度が高くなっていた。逆に、Bの交通量の少ない地点は全窒素濃度も低くなっている。このように、交通量と大気中の全窒素の濃度の大小が一致していた。

以上より、集水域の土地利用、アオコの発生状況、大気中の窒素負荷の時空間的変化の結果をまとめると以下ようになる。

相模湖と津久井湖は、以下に示すように2つの大きな特徴をもつと言える。第1の特徴は、湖沼中の全窒素と全リンの濃度が極めて高く、水質調査が開始された1970年代から既に富栄養から過栄養の状態にあったことである。特に、リンについては、相模川上流に富士山があるため、リンを豊富に含む富士山の溶岩の中を通過してきた地下水が、桂川を通じて相模湖と津久井湖に流れ込むことが1つの要因と考えられる。尚、津久井湖のリン

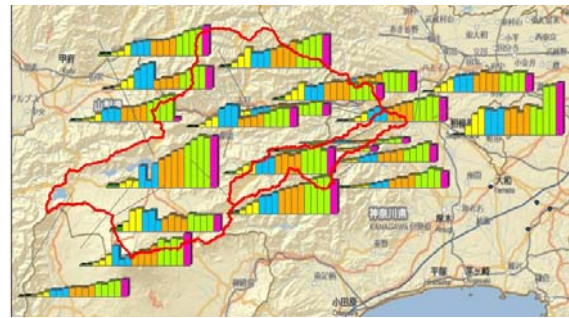


図4 交通量の経年変化
1950年~2005年まで10年間隔で色分けして示してある。

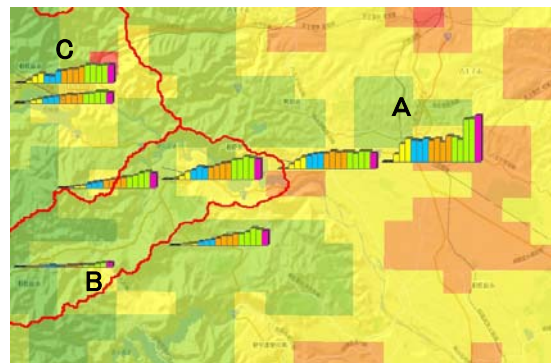


図5 大気中窒素濃度と交通量
緑、黄、橙、赤の順に大気中窒素濃度が高いことを示す。

の濃度が相模湖のリンの濃度に比べて低いのは、津久井湖の方が下流にあること、また、相模湖と津久井湖の途中で道志川が流入しているためと考えられる。

第2の特徴としては、集水域が琵琶湖などと比較してそれほど都市化されていないことである。集水域のほとんどは森林であり、住宅や幹線道路などの人工的なものの割合は5%にも満たない。これは、都市部に位置する琵琶湖の集水域の土地利用と比較しても大きく異なっている。さらに、人口密度を比較すると、琵琶湖の集水域内に位置する滋賀県の人口密度が349人/km²であるのに対し、相模湖と津久井湖の集水域の市町村の人口密度は多くとも10人/km²であり非常に低い値といえる。一般にアオコの発生原因は、人口増加や集水域の都市化による家庭排水からのリンの流入や農地の肥料からの窒素の流入の増加といわれている。確かに、BODの推移から、相模湖と津久井湖で初めてのアオコの発生をもたらした要因が生活排水などの影響である可能性は否定できない。しかし、1980年代からアオコの大発生が頻繁に起こるようになった要因は、もともと自然由来のリンに加え、大気中の窒素であると考えられる。

次に、アオコの発生の特徴についてまとめ

ると以下ようになる。相模湖と津久井湖のアオコの発生における特徴は4つに分けることができる。第1の特徴は、相模湖では1968年に、津久井湖では1972年ごろにアオコが初めて発生したが、これはアオコが発生していない状態からアオコが発生する状態へと湖沼生態系のレジームシフトが起こったと考えられることである。これは、高度経済成長による一般的に日本各地で起こった環境汚染が原因であると考えられる。第2の特徴は、1980年前後から相模湖と津久井湖ではアオコの発生量が急激に増加し、1980年代中ごろから慢性的にアオコの大発生が確認されたことである。また、第3の特徴は、1988年のエアレーション導入以降、津久井湖では毎年必ずアオコが発生しているのに対し相模湖のみ4年間アオコが発生しない年があったことである。すなわち、相模湖と津久井湖は地理的に近いにもかかわらずアオコ発生に関しては異なる特徴を持っている

以上のような1980年代からのアオコの異常増殖の要因は、以下のように大気中の窒素の増加であると考えられる。すなわち、アオコの発生が顕著になった1980年ごろ、同様に湖沼中の硝酸態窒素濃度の急激な増加がみられた。したがって、アオコの発生状態を悪化させた原因は、湖沼中の硝酸態窒素濃度の増加であると考えている。硝酸態窒素濃度の増加の原因として、先ほども述べたように、相模湖と津久井湖の集水域の土地利用はほとんどが森林であるため農地由来の窒素源の流入が少ないことから、大気中の窒素が湖沼の水質に影響を与えたのではないかと考えられる。実際に、大気中の窒素が起源となる湖沼中の硝酸態窒素の増加による富栄養化はElserらの研究(Elser, et al., *Science*, 2009)によって示されている。

また、交通量の経年変化と大気中の全窒素濃度のシミュレーションの結果から、調査地点ごとの交通量の大小とシミュレーションによる大気中の窒素濃度の大小が非常によく一致しているため、大気中の窒素を増加させた原因は、自動車の排気ガスであると考えられる。集水域周辺には工場も少ないことから大気中の窒素源は自動車の排気ガスであるということが伺える。

交通量の急激な増加がみられたのが1960年代後半から1970年代前半にかけてであり、アオコの発生状態が悪化したのが1980年ごろと少しずれが生じている。この時間的なずれは、降雨により集水域に集まった大気由来の硝酸態窒素が土壌の緩衝作用を受けたり、あるいは、森林による吸収を経て土壌に流出した後に、地下水によって湖沼に運ばれるまでに時間を要したためと考えられる。

以上を総合的に考察すると、排気ガス由来の大気中の窒素がアオコの大量発生を引き

起こしたことが強く示唆される。しかし、相模湖と津久井湖の集水域における大気中の窒素の発生源がどの程度の割合で相模湖と津久井湖に沈着しているのかなどについて、今後定量的に根拠づけていく必要がある。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計52件)

① Shrestha, G., Sadohara, S., Maunaga, S., Kondo, H., Yoshida, S., Sato, Y., River Water Quality Analysis of Hadano Basin and its Relationship with Nonpoint Sources of Pollution, *Journal of Water and Environment Technology*, in press, 査読有。

② Kotani K, Kakinaka M, Matsuda H (2010) Adaptive management for eradication of exotic species. *Population Ecology* 52:349-358, 査読有。

③ Akita T, Matsuda H (2010) Why do sex ratio dimorphisms exist in *Quercus* masting? Evolution of imperfect synchronous reproduction in Monoecious trees. *J Theor Biol* 264:223-236, 査読有。

④ Tomoko Yamamoto, Ping Gui, Toshifumi Osaka, Yoshitaka Ebie, KaiQin Xu, Norio Sugiura and Yuhei Inamori (2010) Comparative Evaluation of Wastewater Purification Performance among Ten Different Macrophytes in the Constructed Wetland, *Japanese Journal of Water Treatment Biology*, 46(1), 59-69, 査読有。

⑤ Kai-qin Xu, Lian-hui Qi, Yoshitaka Ebie, Yuhei Inamori, Ryuichi Sudo (2010) Measures and policies for the eutrophication in Japan, *China Environmental Science*, 30(Suppl.), 86-91, 査読有。

⑥ 稲森悠平, 徐開欽, 稲森隆平, 陶村貴, 須藤隆一 (2010) 地球環境問題としての低炭素社会型の排水処理の方向性と国際的展望, *用水と廃水*, 52(10), 30-39, 査読有。

⑦ Serizawa, H., Amemiya, T., Itoh, K., Effects of buoyancy, transparency and zooplankton feeding on surface maxima and deep maxima: Comprehensive mathematical model for vertical distribution in cyanobacteria biomass, *Ecological Modelling*, 221, 2028-2037 (2010), 査読有。

⑧ Serizawa, H., Amemiya, T., Itoh, K., Noise-triggered regime shifts in a simple aquatic model, *Ecological Complexity*, 6, 375-382 (2009), 査読有。

⑨ Serizawa, H., Amemiya, T., Itoh, K., Patchiness and bistability in the comprehensive cyanobacterial model (CCM), *Ecological Modelling*, 220, 764-773 (2009), 査読有。

[学会発表] (計92件)

① 類家翔, 神蔵雄生, 西村浩, 林紀男, 稲森隆平, 稲森悠平, 有毒藍藻類産生 Microcystin の根菜作物に対する蓄積特性解析, 第47回

日本水処理生物学会, 2010年11月17日, つくば.

②Kunihiko Kakazu, Kazuhito Murakami, Katsura Sugiura Ryuhei Inamori, Yuhei
Inamori:Development of Ecocystem Risk Impact Assessment System Methods using Microcosm System, 2010 National Advanced Forum on Chinese Water Environmental Pollution Control and Ecological Restoration Techniques, Nanchang, China, Nov. 12, 2010.

③松田裕之, 趣旨説明: 合意形成ツールとしての個体群管理モデル, 個体群生態学会 COE シンポジウム, 2010年9月22日, 横浜.

④松田裕之, 野生生物資源管理と生物多様性の保全, 日本哺乳類学会・野生動物保護学会合同大会公開講演会, 2010年9月17日, 岐阜.

⑤佐土原聡, 佐藤裕一, 異分野多主体協働のための流域圏時空間情報プラットフォームの構築 その4 気候変動と生物多様性保全の概念整理およびプラットフォームの支援技術の実装, 日本建築学会大会学術講演, 2010年9月11日, 富山.

⑥Shibata, K., Amemiya, T., Itoh, K.,
Degradation of microcystis by typical proteases and proteolytic microbes, The 1st Korean-Japan International Symposium on Microbial Ecology, Jeju, Korea, May 28, 2009.

⑦Amemiya, T., Understanding nonlinearity in ecosystems for benefitting sustainable ecosystem service, International Conference on Sustainability Science, Tokyo, February 5, 2009.

⑧Shibata, K., Amemiya, T., Itoh, K., Activities of algicidal bacteria and their influences on microbial communities, JST Presto Symposium on Mathematical Sciences towards Environmental Problems, Hokkaido, June 11, 2008.

〔図書〕(計20件)

①日本生態学会編, 矢原徹一・竹門康弘・松田裕之・西廣淳監修, 自然再生ハンドブック, 地人書館, 印刷中.

②佐渡原聡編著, 時空間プラットフォーム, 東京大学出版会, 2010.

③松田裕之, 生物資源の持続的管理, 現代生物科学 第6巻「地球環境と保全生物学」, 岩波書店, 2010.

④雨宮隆共著, 「よみがえれ! 科学者魂」, 丸善株式会社, 2009.

⑤ Amemiya, T., Serizawa, H., Itoh, K., Mathematical models for dynamics and management of algal blooms in aquatic ecosystems, "Aquatic Ecosystem Research Trends", Nova Scientific Publishers, Inc., New York, 2009.

⑥稲森悠平共著, リン資源の回収と有効利用,

サイエンス&テクノロジー, 2009.

⑦稲森悠平編集, 環境浄化のための微生物学, 講談社, 2008.

〔産業財産権〕

○出願状況 (計1件)

名称: アオコの除去方法

発明者: 雨宮隆, 比田井淳, 伊藤公紀

権利者: 横浜国立大学

種類: 特願

番号: 2009-105196

出願年月日: 2009年4月23日

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

雨宮 隆 (AMEMIYA TAKASHI)

横浜国立大学・環境情報研究院・准教授

研究者番号: 60344149

(2) 研究分担者

佐土原 聡 (SADOHARA SATORU)

横浜国立大学・環境情報研究院・教授

研究者番号: 90178799

松田 裕之 (MATSUDA HIROYUKI)

横浜国立大学・環境情報研究院・教授

研究者番号: 70190478

稲森 悠平 (INAMORI YUHEI)

福島大学・共生システム理工学類・教授

研究者番号: 10142093

(3) 連携研究者

伊藤 公紀 (ITHO KIMINORI)

横浜国立大学・工学研究科・教授

研究者番号: 40114376

金子 信博 (KANEKO NOBUHIRO)

横浜国立大学・環境情報研究院・教授

研究者番号: 30183271