

特集：集水域の生物地球化学シミュレーションモデルの有用性と課題

巻頭言 [Preface]

集水域研究におけるシミュレーションモデルへの期待

吉岡崇仁<sup>1)</sup>・館野隆之輔<sup>1,2)</sup>・楊宗興<sup>3)</sup>

Prospects for simulation models in watershed studies

Takahito YOSHIOKA<sup>1)</sup>, Ryunosuke TATENO<sup>1,2)</sup> and Muneoki YOH<sup>3)</sup>

Abstract

Any one who studies the watershed environments cannot ignore the strong link between terrestrial and freshwater ecosystems through material cycling. Simulation models of material and water cycling are useful tools not only for planning and practicing sustainable uses of forest and water resources and the adaptive management of forested watershed environments, but also for scientific researches. At the 70th annual meeting of the Japanese Society of Limnology (Kashihara, Osaka, September 2005), we discussed the validity and limitations of watershed simulation models in the section “Watershed biogeochemistry: Simulation models for the watershed environment based on material cycling and hydrologic processes”. Biogeochemical and hydrologic models for forest, river and lake environments were introduced in the section. During the discussion, it was recognized that simulation models were valid and powerful for understanding and predicting environmental changes in the watershed. However, their applicability should be carefully checked when they are used for regions under different climatic and environmental conditions. We also recognized that the introduction of the general characteristics of each model would be helpful understand the significance of the simulation model in the limnological sciences. Titles of presentations were as follows: 1. Biogeochemical model in forest ecosystem; Application and problem of PnET model, 2. The influence of forest disturbance and examination of applying the PnET model for the long term influences, 3. Necessity for consideration on hydrological controls of biogeochemical cycling to develop a catchment scale ecosystem model, 4. Quantitative approach and problems of river hydrological simulation models, and 5. Biogeochemical model coupled with hydrodynamic model in lake environment. In this special issue, these five reviews are featured. Although each review is based on the presentation at the annual meeting, the content has been expanded and detailed.

**Keywords** : Simulation model, watershed, biogeochemistry, material cycling

<sup>1)</sup> 総合地球環境学研究所、〒603-8047 京都市北区上賀茂本山457-4 Research Institute for Humanity and Nature, 457-4 Kamigamo Motoyama, Kita-ku, Kyoto 603-8047, Japan. (E-mail: yos@chikyu.ac.jp)

<sup>2)</sup> 鹿児島大学農学部、〒890-0065 鹿児島県鹿児島市郡元1丁目21-24 Faculty of Agriculture, Kagoshima University, 1-21-24 Korimoto, Kagoshima 890-0065, Japan

<sup>3)</sup> 東京農工大学大学院共生科学技術研究院、〒183-8509 府中市幸町3-5-8 Institute for Symbiotic Science and Technology, Tokyo University of Agriculture and Technology, 3-5-8 Saiwai-cho, Fuchu 183-8509, Japan

## 摘 要

集水域環境を研究する上で、陸上生態系と陸水生態系の間での物質循環を通じた密接なつながりを無視することはできない。物質循環・水循環のシミュレーションモデルは、森林・水資源の持続的利用や森林集水域系の適応的管理をはかるためだけでなく、森林集水域における物質循環・水循環の科学研究にとっても有効な手段である。われわれは、2005年9月に開催された日本陸水学会第70回大会（大阪教育大学，柏原市）の課題講演「集水域の生物地球化学：物質循環・水文過程に基づく集水域環境のシミュレーションモデル」において、シミュレーションモデルの有効性と限界について議論した。ここでは、森林、河川、湖沼生態系の生物地球化学的、水文学的モデルが紹介された。異なる気候・環境条件の場所に適用するには注意が必要であるが、シミュレーションモデルが集水域における環境変化を理解し、また予測するための有効で強力な手段であるという認識を得ることができた。各講演のタイトルは、1.「森林生態系の生物地球化学モデル：PnETモデルの適用と課題」、2.「シミュレーションモデルを用いた森林攪乱の長期影響評価」、3.「森林生態系からの溶存物質の流出をモデル化するために考慮しなければならない事柄」、4.「河川シミュレーションモデルの現状と課題」、5.「湖水の流動モデルと生物地球化学的物質循環モデル」であった。ここでは、これら5講演を総説としてまとめた。総説の内容は、講演発表に基づいているが、内容としてより詳しく、充実したものになっている。

キーワード：シミュレーションモデル，集水域，生物地球化学，物質循環

（2005年7月30日受付；2006年4月3日受理）

集水域を考えると、森林をはじめとする陸上と陸水との間での物質循環の密接なつながりが強く認識される。集水域は、河川・湖沼・沿岸へと小滝の連なり（カスケード）を形成しており、その中で様々な物質が移入・移出し、また転換過程を経て流れ下っていく。集水域の生物地球化学は、この物質循環のカスケードを理解し、陸上と陸水という二つのサブシステムからなる陸域生態系をよりよく理解することにつながる（吉岡2003）。

近年、大気窒素沈着の負荷により、森林が窒素飽和状態となり、流域の酸性化、渓流水の高い硝酸態窒素濃度となって現れており（Driscoll et al. 2003）、土壌および水系の酸性化に加えて、栄養塩や有害なアルミニウムの流出が問題となっている。日本でも、大気沈着の大きい地域の渓流水で高い硝酸態窒素濃度が検出されている（Shibata et al. 2001; Yoh et al. 2001）。また、森林伐採や土地利用の改変といった人間活動も、森林と水系の環境に大きな影響を及ぼす。したがって、森林・水資源の持続的利用や森林集水域系の適応的管理をはかるために、森林集水域単位での自然的・人為的インパクトに対する影響の評価や変化を予測することは重要な課題である。この課題に取り組み、また、集水域における物質循環カスケードを統合的に理解するために、物質循環・水循環のシミュレーションモデルは有効な手段であると考えられる。

森林・土壌管理や窒素負荷軽減対策等の効果を評価するために、いくつかの生物地球化学的物質循環モデルの開発がなされている（たとえば、PnETモデルやCENTURYモデルなど）。しかしながら、渓流水中の硝酸態窒素濃度の季節変動をアメリカと日本で比較した研究からは、降水の季節変動など地域による水文過程の違いを考慮しなければならないことなども指摘されており（Ohte et al. 2001）、既存のモデルをそのまま使えるかどうかについては、これからの十分な検討が必要である。

一方、湖沼環境でも、富栄養化や酸性化などの環境変化に対する湖沼生態系の応答を予測する目的で、PAMOLARE（Planning And Management Of Lakes And Reservoirs focusing on Eutrophication, UNEP-IETC, ILEC and Kyoto Univ.）やWASP（Water Quality Analysis Simulation Program, EPA, US）などが開発されている。日本では、水系の富栄養化が問題となった1970年代以降、富栄養化のメカニズムや防止対策の有効性を見積りなどを目的として物質循環のシミュレーションモデルが検討されている（沖野ほか1981）が、湖水の流動に関して十分な考慮はされていなかった。最近、湖水流動モデルの開発が進められており、物質循環過程のモデルとの統合の方向性（Eco-hydro-dynamicモデル）が示されている（植田ほか2004）。

以上のようなシミュレーションモデルの有効性と限

界を検討するために、2005年9月に開催された日本陸水学会第70回大会（大阪教育大学、柏原市）において、課題講演「集水域の生物地球化学：物質循環・水文過程に基づく集水域環境のシミュレーションモデル」を開催した。講演の骨格として、総合地球環境学研究所の研究プロジェクトの一つ、「流域環境の質と環境意識の関係解明：土地・水資源利用に伴う環境変化を契機として」（<http://www.chikyu.ac.jp/idea>）での取り組みを取り上げた。このプロジェクトでは、北海道にある朱鞠内（シュマリナイ）湖集水域を対象として、森林伐採や土地利用改変に対する流域環境の応答を予測するためのモデル構築を目標に掲げており、森林から河川、湖沼までの物質循環・水循環のシミュレーションモデル群が検討されている。そこで、課題講演では、このプロジェクトに参画している5名の研究者にそれぞれのモデルについて紹介していただいた。各講演のタイトルと概要は、以下の通りである。

1. 「森林生態系の生物地球化学モデル：PnETモデルの適用と課題」（柴田英昭，北海道大学）

北米の森林を対象として開発されたPnET-CNモデルを北海道の森林（朱鞠内湖集水域）に適用した例が紹介された。気象・生物地球化学のデータをインプットし、大気窒素沈着量の変化や大気二酸化炭素濃度の増大が森林渓流水質にどのように反映されるかが検討された。

2. 「シミュレーションモデルを用いた森林攪乱の長期影響評価」（徳地直子，京都大学）

林齢の異なる杉人工林（和歌山-奈良県境）を対象としてPnET-CNモデルを適用し、林齢と渓流水質の関係のシミュレーションがなされた。伐採後の渓流水中硝酸濃度の上昇を再現することができた。しかし、濃度レベルにはギャップがあり、パラメータの調整が必要であることなどが紹介された。

3. 「森林生態系からの溶存物質の流出をモデル化するために考慮しなければならない事柄」（大手信人，京都大学）

気候の異なる森林集水域に生物地球化学シミュレーションモデルを応用するには、水文過程を適切に組み込む必要のあることを、日米の森林水文・水質研究の比較を通して強調された。水文モデルとして有効な地下水と表層水の混合を扱える多段タンクモデル等について紹介された。

4. 「河川シミュレーションモデルの現状と課題」（山下三男，福岡大学）

小流域からの流出と河道における流下の二つの過程を統合した分布型モデルについて紹介された。河道流下に関しては、商用の河川モデルが利用できるが、小流域からの流出量のモデル化には、個別の開発が必要であり、とくに短時間間隔の降雨と流出量の観測データが不可欠であることが示された。

5. 「湖水の流動モデルと生物地球化学的物質循環モデル」（中田喜三郎，東海大学）

湖水の流動モデルに生物地球化学プロセスを組み合わせた湖沼モデルが紹介された。朱鞠内湖について予備的に作成された流動モデルが提示され、これに湖沼観測データを入力することで、生物地球化学シミュレーションモデルが構成されることが説明された。

課題講演には、会場をほぼ埋める60名以上の参加者があり、活発な議論が繰り広げられた。参加者の多くは、モデルの専門家ではなく、現場での観測調査を専門とする研究者であったと思われる。その中で、コメント者としてお願いした京都大学流域圏総合環境質研究センターの田中宏明氏から、環境工学的流域管理の観点からコメントをいただいた。

1. 流域内の土地被覆・土地利用状況の不均一性を克服するために、従来から原単位法がモデル化に使用されてきた。
2. 面源（ノンポイントソース）や流出・流達等に不確実性があり、現象の時空間スケールをどのように設定するかが問題となってきた。
3. これを工学的に克服するものとして、流量・負荷量モデルが開発されてきた。
4. しかしながら、検証データが未だに不足している状況。

このコメントは、モデルの専門家と観測調査の専門家との協働が重要であることを認識させることになった。一方で、参加者からは、既存の観測データをモデルの検証に使うことへの疑問や、集水域といった異なる環境を含んだ複雑な系を対象としたモデル構築は現実的ではなく、むしろ単純なモデル水系を設定して取り組むべきではないかといった意見も出された。

様々な観点からの、また、参加者自らの経験をふまえての議論が活発にされたことは、陸水学における生物地球化学的物質循環のシミュレーションモデルについての関心の高さを示すものであった。しかしながら、講演発表では時間も限られており、モデルの有効性や問題点について十分に議論できたとはいえなかった。そこで、森林、河川、湖沼の物質循環モデルや水文モデル全般について広く紹介することを目的とした総説を陸水学雑誌の特集として発表することにした。総説のタイトルは、講演時と異なるものがある。また、広くシミュレーションモデルを紹介するものから個別事例報告の色彩の強いものまでバラエティに富むもので構成されているが、内容としてより充実したものになった。この特集が、陸水学におけるシミュレーションモデルの意義を理解する上で役立つとともに、今後の研究で活用されることを期待する。

なお、各総説は、陸水学雑誌の通常の査読過程を経て受理されたものである。

## 謝 辞

講演発表に続き、総説執筆にも同意いただいた課題講演者各位に感謝する。また、特集として取り上げていただいた日本陸水学会和文誌編集委員会(村上哲生委員長)にお礼申し上げる。なお、課題講演および各総説に含まれている研究内容の一部は、総合地球環境学研究所研究プロジェクト経費(5-2IDEA プロジェクト、プロジェクトリーダー：吉岡崇仁)によって実施されたものである。

## 文 献

- Driscoll, C., D. Whitall, J. Aber, E. Boyer, M. Castro, C. Cronan, C. Goodale, P. Groffman, C. Hopkinson, K. Lambert, G. Lawrence and S. Ollinger (2003): Nitrogen pollution in the Northeastern United States: sources, effects and management options. *BioScience*, 53: 357-374.
- Ohte, N., M. J. Mitchell, H. Shibata, N. Tokuchi, H. Toda and G. Iwatsubo (2001): Comparative evaluation on nitrogen saturation of forest catchments in Japan and Northeastern United States. *Water, Air and Soil Pollution*, 130: 649-654.
- 沖野外輝夫・平塚茂雄・田中哲治郎(1981): 諏訪湖における物質循環のモデル化 II. 「環境科学」研究報告集 B83-R12, 諏訪湖集水域生態系研究経過報告第 7 号, pp. 63-85.
- Shibata, H., K. Kuraji, H., Toda and K. Sasa (2001): Regional comparison of nitrogen export to Japanese forest streams.

*TheScientificWorld*, 1 (S2): 572-580.

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.

植田真司・近藤邦男・稲葉次郎・細田昌広・横山瑞江・中田喜三郎(2004): 核燃料サイクル施設に隣接する汽水湖尾鮫沼における流動モデルの開発. *海洋理工学会誌*, 9: 81-97.

吉岡崇仁(2003): 集水域の生物地球化学：陸域生態系物質循環カスケードへの位置づけ—「陸域生態系の地球環境変化に対する応答の研究」から—。 *陸水学雑誌*, 64: 75-77.