地表水－地下水相互作用及びその生態系や 生物地球化学へ及ぼす影響 ～プロセス型モデルを用いたアプローチ～

中山忠暢*

Interaction between surface water and groundwater and its effect on ecosystem and biogeochemical cycle

Tadanobu NAKAYAMA*

Abstract

The author has so far developed the National Integrated Catchment-based Eco-hydrology (NICE) model, which takes into account a complex interaction between surface water and groundwater. He has evaluated this interaction and its effect on ecosystem and biogeochemical cycle by using this advanced model. In this paper, case studies of model application to Kushiro Wetland, Lake Kasumigaura, Tokyo Metropolitan Area, and China are overviewed from the view point of this interaction. Further improvement of this evaluation by using an integrated assessment system of multiple methods would be powerful for solving intertwined environmental pollution.

Key words: process-based model, eco-hydrology, biogeochemical cycle, scale

要 旨

著者は地表水－地下水間での相互作用を考慮した統合型水文生態系モデル NICE (National Integrated Catchment-based Eco-hydrology) というプロセス型モデルを開発し、この相互作用が周辺域の水・熱・物質循環、生態系、及び生物地球化学へ非線形的に及ぼす影響を評価してきた。本稿では、釧路湿原、霞ヶ浦、首都圏、中国での NICE の具体的な適用事例を通して、地表水－地下水相互作用が様々な側面から果たす役割を論説した。モデルを含む複数の手法の統合的利用を通じたこの相互作用の時空間的な評価精度の更なる高度化によって、個別対応策では解決が困難であった複合的な環境汚染（水循環及び熱環境に及ぼす影響、物質循環及び植生変化に及ぼす影響、生物地球化学的循環に及ぼす影響）への対策に大きく寄与することが可能であると考えられる。

キーワード：プロセス型モデル、水文生態系、生物地球化学、スケール

* 国立研究開発法人国立環境研究所 地球環境研究センター

Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies

1. はじめに

地球規模での人為活動に伴う環境資源の劣化に対して、生態系機能を定量的に評価・予測し、持続的発展のための科学的根拠に基づいた政策提言を行うことは非常に重要である。特に、東アジア地域は急激な経済成長の一方で環境劣化も著しく、多様かつ複雑な水問題を内包しているという特徴を有する。このような水循環・水資源及びそれに付随する生態系機能の評価及び適切な管理を行うためには、地表水や地下水流、農業利用や工業利用、更には水量・水質・熱、適切な環境管理技術、などの様々な要素・側面・特性について総合的に取り扱うことが重要である。特に、地表水－地下水間での相互作用の定量的な把握は水循環のみならず物質循環や生態系評価の観点からも重要であるが、浸出計 (seepage meter)、水温・塩分・染料などのトレーサー、及び同位体による評価 (Krabbenhoft et al., 1990; Sholkovitz et al., 2003) では流域スケールや地域スケールでの時空間的な動態把握には限界がある。

本稿では、地表水－地下水間での相互作用を考慮したプロセス型モデルを有効活用することによって、この相互作用が周辺域の水・熱・物質循環、生態系、及び生物地球化学へ及ぼす影響を評価した幾つかの具体的事例をレビューし、地表水－地下水間の相互作用の役割について論説する。

2. 統合型水文生態系モデル (NICE) 及び生物地球化学結合モデル (NICE-BGC)

水循環及び生態系機能に関するモデルとしては、概念型や物理型、集中型や分布型モデルなど様々なモデル展開が考えられるが、それらの細分化以前に不可欠なのはモデル要素間及び全体として収支が取れている (保存則が成立する) ということである (Eagleson, 2002)。この保存則の成立が、地表水－地下水間での浸出量及びそれに伴う物質移動についてモデルを用いてシミュレーションし、観測値と比較・検証する上での前提条件となる。本稿で用いる統合型水文生態系モデル NICE (National Integrated Catchment-based Eco-hydrology) はプロセス型の3次元モデルで

あり (図1参照)、様々な生態系 (大気、森林、農地、湿地、都市、河川、湖沼、地下水等) から構成され、地上観測・GISデータ・衛星データなどに基づく環境資源データベースとのインターフェイスを有している (例えば、Nakayama and Watanabe, 2004)。著者はこれまでに同モデルの開発及び適用を通して日本や東アジア地域のみならず、近年は全球を対象として水・熱・物質循環の変化に伴う生態系機能の変化を評価・予測してきている。オリジナル NICE を開発した当初は、地表水－地下水間での相互作用を考慮したモデルは SHE (Système Hydrologique Européen) (Abbott et al., 1986), MIKE-SHE (Refsgaard and Storm, 1995), SWATMOD (Soil and Water Assessment Tool + MODFLOW) (Sophocleous et al., 1999), WEC-C (Water and Environmental Consultants Catchment model) (Croton and Barry, 2001) などに限られ、植生フェノロジーを含む陸面過程が一定という仮定の前提もしくは半概念的モデルであったのに対して、NICE は地表水－地下水間での相互作用に加えて陸面過程の季節変化をも含む分布型プロセスモデルとしての特長を有していた (Nakayama and Watanabe, 2004)。なお、現在は上記のモデルに加えて世界中で様々なプロセス型モデルが出てきている。

NICE は、SiB2 (Simple Biosphere Model, Ver.2) (Sellers et al., 1996), MODFLOW (McDonald and Harbaugh, 1988), GeoHyMoS (Geomorphologically-based Hydrological Modeling System) (Takasao and Shiiba, 1988) のベースとなるサブモデル間でのフラックス収支を毎ステップごとに考慮することによってモデル内部で結合している。特に、同モデルにおいて地表水－地下水間での浸出量はダルシーの法則によって表現され、このフラックスは地表水の水位 (厳密には水理ポテンシャル) と地下水位の差に比例する。両者の水位はモデル内部で毎ステップごとに計算され、ダルシーの法則で計算された浸出量の分だけ地表水及び地下水のサブモデルに加算 (減算) して更新し、両者のサブモデルで次の時間ステップの計算が行われる (モデル詳細は、例えば、著者らの文献 Nakayama and Watanabe (2004) を参照)。特に、著者が主に研究対象とし

図1 統合型水文生態系モデル NICE (National Integrated Catchment-based Eco-hydrology)。
NICE には地表水－地下水間での相互作用も内包されている。

Fig. 1 National Integrated Catchment-based Eco-hydrology (NICE) model.
NICE includes surface water – groundwater interaction.

てきた東アジア地域では農業生産や都市活動などの人為活動に伴って地表水及び地下水利用が流域の水・熱・物質循環に及ぼす影響が年々大きくなっており、このような背景のもと、NICEは自然現象の解明のみならず人為活動に伴う影響を評価することを目的とし、環境と共存・調和した経済発展を目指すためのツールとして技術・政策インベントリ及びシナリオと結合したシミュレーションシステムとして構成されている (Nakayama, 2012a)。

近年、著者はNICEを更に拡張し、斜面－河道の結合を含む統合型水文生態系－生物地球化学結合モデル NICE-BGC (BioGeochemical Cycle) を開発し (図2参照)、全球及び大陸スケールに適用している (Nakayama, 2016; Nakayama, 2017a)。NICE-BGCは、LPJWHyMe (Lund-Potsdam-Jena Wetland Hydrology and Methane) (Wania et al., 2010)、SWAT (Soil and Water Assessment Tool)

(Neitsch et al., 2011)、CO₂SYS (CO₂ System Calculations) (Lewis and Wallance, 1998)、QUAL2Kw (Pelletier et al., 2006)、GENIE (the Grid Enabled Integrated Earth system model) の一部である RokGeM (Rock Geochemistry Modules) (Colbourn et al., 2013) など、多方面で適用事例がある既存の複数の物質循環モデルの中の必要なサブモデルとNICEとを最大限効率的にオンライン/オフラインを組み合わせることで統合している (Nakayama, 2017a)。この統合によって、NICE-BGCは陸域－水域間での水・物質循環相互作用 (地表水や地下水など)、複雑な炭素の反応動態 (二酸化炭素分圧: $p\text{CO}_2$, 溶存態有機炭素: DOC, 溶存態無機炭素: DIC, 懸濁態有機炭素: POC 間での化学反応), 炭素と栄養塩 (窒素・リンなど) との相互作用, 化学的風化, 水域内での食物連鎖の一部 (植物プランクトンや底生植物の光合成や呼吸, 及びデトリタスを

図2 新たな統合型水文生態系-生物地球化学結合モデル NICE-BGC (BioGeochemical Cycle) の開発。NICE-BGC では地表水-地下水間での熱や物質の移動 (炭素・窒素・リンなどの化学反応も含む) も計算される。

Fig. 2 New development of eco-hydrologic and biogeochemical coupling model along terrestrial-aquatic continuum (NICE-BGC). NICE-BGC incorporates surface water - groundwater interaction, and heat and mass transport processes.

含む), 湿原や水田などで地下水位に大きく依存する CH_4 放出, 農地 (約20種類の作物) への施肥及び都市からの汚濁負荷, ダムや底泥からの温室効果ガス放出などの自然及び人為活動に伴う様々な炭素循環を考慮したプロセスモデルであることが大きな特徴である。つまり, 既存の炭素循環研究では大気-陸域間, もしくは大気-海域間での鉛直方向へのフラックスを考慮している場合が主であり, 陸域内における河川・湖沼・地下水などの水域での3次元的な輸送, 陸域-水域間での相互作用, 及びそれらに伴う降雨・洪水イベント, 季節変化, 経年変化スケールまでを含む横断方向への輸送はほとんど考慮されていなかったのに対して, NICE-BGCではこれらのメカニズムをモデ

ル内で考慮していることに新規性がある。

地表水-地下水間での相互作用に着目した NICE 及び NICE-BGC の適用事例について, 表1のように対象エリアのスケール (横軸) 及び対象項目や物質 (縦軸) ごとに区分される。以下に, これらの項目について著者のこれまでの研究成果をもとに, 地表水-地下水間での相互作用との関連を中心にして具体的な研究事例を紹介する。

3. 地表水-地下水相互作用が水循環及び熱環境に及ぼす影響評価の事例

3.1 関東首都圏の事例

日本の経済・産業・政治等の中心である関東首

表1 対象エリアのスケール（横軸）及び対象項目や物質（縦軸）で区分した NICE 及び NICE-BGC の適用事例（地表水－地下水間での相互作用に着目）

Table 1 Examples of application of NICE and NICE-BGC

	流域スケール (釧路湿原・霞ヶ浦など)	都市スケール (関東首都圏・中国の都市など)	広域スケール (華北平原・黄河・長江・シベリア湿原など)	大陸スケール (大陸・全球)
水循環	Nakayama, 2008a-b, 2010, 2012b, 2013; Nakayama & Watanabe, 2004, 2006, 2008a	Nakayama, 2012a; Nakayama & Fujita, 2010; Nakayama & Hashimoto, 2011; Nakayama et al., 2007, 2010, 2012	Nakayama, 2011a-b, 2012c; Nakayama & Maksyutov, 2018; Nakayama & Shankman, 2013a-b; Nakayama & Watanabe, 2008b; Nakayama et al., 2006	Nakayama, 2016, 2017a-b
灌漑・舗装・ダムとの関連	Nakayama & Watanabe, 2008a	Nakayama, 2011b, 2012a; Nakayama & Fujita, 2010; Nakayama & Hashimoto, 2011; Nakayama et al., 2007, 2010, 2012	Nakayama, 2011a-b, 2012c; Nakayama & Shankman, 2013a-b; Nakayama & Watanabe, 2008b; Nakayama et al., 2006	
都市熱循環との関連	Nakayama & Watanabe, 2008a	Nakayama, 2012a; Nakayama & Fujita, 2010; Nakayama & Hashimoto, 2011; Nakayama et al., 2007, 2012		
土砂・栄養塩(窒素・リン)との関連	Nakayama, 2010, 2012b, 2013; Nakayama & Watanabe, 2008a	Nakayama, 2011b; Nakayama et al., 2007	Nakayama, 2011b; Nakayama & Maksyutov, 2018	Nakayama, 2016, 2017a-b
植生変化との関連	Nakayama, 2008a-b, 2012b; Nakayama & Watanabe, 2004	Nakayama, 2011b; Nakayama et al., 2010	Nakayama, 2011a-b, 2012c; Nakayama & Shankman, 2013a-b	
炭素循環との関連				Nakayama, 2016, 2017a-b

都圏ではヒートアイランドに代表される熱環境問題が深刻であり、緩和策として排熱抑制・緑化の推進・風の道の形成などの局地レベルから都市計画レベルまでの対応策が一定レベルで重要な貢献を果たしてきたのは事実であるが（環境省, 2004）、過度に人口・産業が集中する首都圏で熱環境問題を大きく改善するためには様々な対応策のベストミックスが必要不可欠である。一方で、高度成長期の水需要を満たすための過剰な地下水汲み上げの結果として地下水位低下・地盤沈下・塩水侵入などの様々な都市環境問題が露呈し、一部の地域を除いて地下水利用は行政上規制されてきた。その結果として地下水位は年々上昇し、水循環のアンバランスに伴って近年地下鉄・ビル・道路等の様々な地下構造物の浮上・漏水等が深刻な問題になっている（Nakayama et al., 2007）。更に、河川・湖沼・地下水では施肥に伴う高濃度窒素等の水質汚染やヒートアイランドに伴う熱汚染も深刻な問題になってきている（Nakayama and Watanabe, 2008a）。

このような水・熱汚染の現象解明及び適切な管理手法を目的として、地域－都市－地点間での水平スケール、及び、大気－地表面－不飽和層－地下水層での鉛直スケールを統合した新たな NICE

モデル開発を行い（NICE-URBAN）（Nakayama and Fujita, 2010）、都市構造物及び人工排熱が大気－陸域界面での水・熱循環に及ぼす影響評価を行った（図3参照）（Nakayama and Hashimoto, 2011）。モデル計算の結果、都市部では地表面の都市構造物のみならず地下構造物もまた水循環（特に地下水）や熱循環の改変に影響を及ぼすことが明らかになった（Nakayama et al., 2007）。このことは地表水及び地下水の改変を通して両者の相互作用にも間接的に影響を及ぼしている可能性の大きいことを示唆しており、今後都市部での包括的な観測を行うことより複雑な現象解明が期待される。また、人為活動による水資源の過剰利用、規制、治水、利水のための様々なインフラ構築によってアンバランスになった水循環（地下水位の異常低下に伴う地盤沈下エリアと頻繁に冠水するエリアの混在、など）及びヒートアイランドに伴う熱汚染に対して、両者の関係の見える化を進めることの必要性（Nakayama, 2012a）、及び地下水を含む水資源を有効活用することは健全な水循環再生及びヒートアイランド低減のために効果的（両者の相乗効果によってそれぞれの個別対応策以上の効果が期待できる）であることを示した（Nakayama et al., 2012）。このように都市域

図3 水平及び鉛直方向へのマルチスケールモデル (NICE-URBAN) の首都圏への適用 (reprint from Nakayama and Hashimoto, 2011)。

(a) 局所大気モデル, 都市キャノピーモデル, 地下水モデルなどの結合による鉛直方向へのマルチスケールモデル

(b) 計算結果の例

(c) GIS データベースによって推定された熱排出量の日変化 (モデルへの入力データ)

地表から地下までの複雑な都市構造物をモデルに考慮することによって, 水・熱循環の再現を行った。計算の結果, 都市部では地表面の都市構造物のみならず地下構造物もまた水循環 (特に地下水) や熱循環の改変に影響を及ぼすことが明らかになった。

Fig. 3 Schematic representation of multi-scaled model (NICE-URBAN) (reprint from Nakayama and Hashimoto, 2011).

(a) multi-layer in vertical direction.

(b) example of simulated values.

(c) diurnal cycle of anthropogenic heat emission estimated by GIS database.

での複合的な環境汚染に対して, 水・熱環境劣化の両方を地表水-地下水間での相互作用の観点から Win-Win 的に解決する方法は, これまで重要視されてきた個別対応策からの新たな展開, 様々なシナリオに基づくベストミックスの提言のみならず, 気候変動への適応策としても有効である。

3.2 中国華北平原及び大連市の事例

中国における水資源は地域的な偏在が著しく,

北部は半乾燥気候によって水資源が比較的不足しているのに対して (Brown and Halweil, 1998; Solomon, 2010), 南部はモンスーンの影響によって頻発する洪水に悩まされてきた (Nakayama and Watanabe, 2008b; Nakayama and Shankman, 2013a)。

北部の黄河下流域を含む華北平原は北京・天津などの巨大都市を有するとともに, 小麦やとうもろこしなどの一大生産地でもある。ダムや運河を

用いた灌漑や地下水揚水などによる農地及び都市での過剰な水利用は、水資源の枯渇（地下水位低下、河川断流、地下水揚水など）、農業生産量の低下、生態系の劣化などの深刻な問題を引き起こしている。著者は農業生産・灌漑・都市活動などに伴う複雑な水循環を考慮した NICE モデルを適用し（NICE-AGR）（Nakayama et al., 2006）、過去半世紀における地下水位の急激な低下及び地表水との関連性を空間的に明らかにするとともに、作物生産量・水循環・水資源の利用可能性間の定量的な評価が可能になった（図4参照）（Nakayama, 2011b）。特に、同地域では地下水位の過剰な低下に伴って河川の低水時における基底流量としての環境水の維持が困難であり、過去の地表水－地下水間での相互作用は破綻し、地表水から地下水への一方的な浸出が常に生じていることがモデルによって推測された（Nakayama, 2011a）。また、長江中流域に建設された三峡ダムや南水北調プロジェクトなどの人為活動（Nakayama, 2012c）は地表水－地下水間での相互作用を通して流域内の水循環及び生態系変化（Nakayama and Shankman, 2013a）、更に流域外へも影響を及ぼす可能性のある（Nakayama and Shankman, 2013b）ことが NICE を用いたシミュレーションによって明らかになっている。

一方、中国北部の大連市は半島の先端に位置し（表流水や地下水の水資源をほとんど期待できない）、経済活動に必要な水資源の大半を遠方に建設されたダムからのパイプラインでの輸送に依存している。モデル結果は、ダム建設に伴う水資源の流域外（ここでは大連市）への輸送の結果、流域下流部での水資源（河川水のみならず地下水も）の低下を再現するとともに、衛星データから得られる無次元植生指標 NDVI（Normalized Difference Vegetation Index）はダム下流域における植生劣化を示した。環境容量（Carrying Capacity）の計算値及び NDVI 間での統計学的方法に基づくデカップリング指標（Decoupling Indicator）は大連市における深刻な水ストレスを示すとともに、ダム建設に伴う環境劣化とともにそのストレスは増加していくことが明らかになった（Nakayama et al., 2010）。また、これらの結果は水資源と経済成長における密接な関連性、及び

周辺の生態系劣化に及ぼす影響も無視できないことを示しており（Nakayama et al., 2010）、既存研究の妥当性を定量的に裏付けている（Meadows et al., 1972）。

4. 地表水－地下水相互作用が物質循環及び植生変化に及ぼす影響評価の事例

4.1 釧路湿原の事例

釧路湿原は、ラムサール条約、国立公園や天然記念物への指定にもかかわらず周辺域での森林伐採及びそれに伴う農地・宅地開発、排水能力の向上のための河道の直線化等によって土砂・栄養分が大量に流入してきた。その結果として湿原植生はヨシ・スゲ群落からハンノキ林へと急激に変化するとともに乾燥化が急速に進行し、湿原面積はこの50年間で2割以上も減少した。湿原環境のみならず、主に農地・畜産由来により地中へ浸透した周辺域の地下水環境汚染についても危機的状況にある（国土交通省, 2006）。このような状況に対して、2002年度より国土交通省・農林水産省・環境省が主体となって土砂流入の河畔林等での抑制及び直線化した河道の旧流路への再蛇行化等による地下水涵養量及び湿原植生の回復を目的とした「釧路湿原における自然再生事業」が開始された（国土交通省, 2006）。

このような背景のもと、著者らは地上観測・衛星データ・数値モデルの統合による水・熱・物質循環の変化に伴う生態系機能の変化を評価・予測するための手法開発を行い（Nakayama and Watanabe, 2004）、再生事業の有効性の評価を行った。特に、水循環・土砂堆積に伴う地形変化・植生遷移をインタラクティブにシミュレーションするために NICE モデルを更に改良して（NICE-VEG）過去30年間での湿原へのハンノキ林の侵入の再現（Nakayama, 2008a）、自然再生事業による湿原生態系の将来予測（Nakayama, 2008b）、乾燥化とハンノキ侵入の非線形性および湿原の回復可能性の評価を行った（図5参照）（Nakayama, 2012b）。計算結果により、湿原内の水・熱・土砂・栄養塩分布構造の変化を解明し、過去から現在にかけてのハンノキ林の侵入に伴う土壌水分量の減少及び地下水位の低下、観測値のハンノキ侵入の

図4 中国華北平原における地下水位低下 (reprint from Nakayama, 2011b)。

(a) 観測値 (嶋田, 2000)。

(b) NICE に農地での灌漑モデルのみを結合した計算結果。

(c) NICE に灌漑モデルと都市水需要を考慮した計算結果 (NICE-AGR)。

農地灌漑及び都市水需要を考慮したモデルを用いることによって、過去半世紀の空間的な偏在性を持った地下水位の急激な低下が良好に再現された。また、対象地域が、半乾燥域で、地表水が極端に少なく、かつ地下水位が深いために地下水から地表水への浸出はかなり小さくなるがモデルによって推測された。

Fig. 4 Simulated result of groundwater degradation in the North China Plain (reprint from Nakayama, 2011b).

(a) observed value (Shimada, 2000).

(b) simulated result only with irrigation water use.

(c) simulated result with irrigation and urban water uses.

図5 釧路湿原における乾燥化とハンノキ侵入の非線形性の計算結果 (NICE-VEG) (reprint from Nakayama, 2012b)。

(a)-(b) 1985年及び1995年における標高変化 (土砂移動・堆積・洗掘に伴う標高変化の計算結果)。

(c)-(d) 1985年及び1995年における植生変化 (湿原内へのハンノキの侵入の計算結果)。

土壌水分量が飽和に近い状態のため河川・湖沼・地下水間での水頭差に応じて地表水-地下水間で複雑な相互作用が発生する。この相互作用は土砂堆積や植生変化によって更に複雑になることがモデルで計算された。

Fig. 5 Simulated result of feedback process between geomorphology and eco-hydrology in the Kushiro Wetland (reprint from Nakayama, 2012b).

(a)-(b) elevation change rate (m/year) in 1985 and 1995.

(c)-(d) Spatial distribution of alder and reed in 1985 and 1995.

再現性が大きく向上した。特に、湿原内部では土壌水分量が飽和に近く、河川・湖沼・地下水間での僅かな水頭差に応じて地表水-地下水間で時空間的に複雑な相互作用が発生することがモデルによって推測され、今後高精度な観測によって更なる現象解明が期待される。また、過去30年間の長期シミュレーションによって、地表水-地下水間での相互作用は土砂堆積・洗掘や植生変化 (標高・蒸発散・粗度・浸透率などの変化) によって更に複雑になることがモデルで計算された。更に、植生遷移の空間異方性とレジームシフトの関係について検討を行い (Nakayama, 2012b)、湿原生態

系の形成・保全・回復に必要な環境条件 (水・熱・土砂・栄養塩循環とその対象場に繁茂する湿原植生との関係) の提示に基づいて自然再生事業の有効性 (河道再蛇行化や土砂流入量の抑制) 及びプロセスモデルの重要性 (地表水-地下水相互作用及び水・熱・土砂・栄養塩の相互作用の内包) を示した (Nakayama, 2013)。

4.2 霞ヶ浦の事例

霞ヶ浦 (西浦・北浦・外浪逆浦から構成される) は、関東平野の東部に位置し日本で2番目に大きな湖 (湖面積: 220km²) であるが平均水深は4m

程度と非常に浅く、流域における農業・畜産業・工業及び下水道排水による流入汚濁負荷に起因する水質汚濁に長年悩まされ続けてきた (National Institute for Environmental Studies, 2001)。湖の水質は1980年代前半を境に改善の傾向が見られるものの依然として悪く、日本を代表する富栄養湖である。社会的及び行政的な要請から様々な対策が講じられてきたにも関わらず依然として水質汚濁に悩まされており、2000年代前半までは（少なくとも著者が研究を行う以前までは）流域を対象とした水・物質循環の研究及び政策では地表水（点源負荷や面源負荷、及び河川流）が湖に及ぼす影響（一部、湖の底泥が湖の水質に及ぼす影響等の研究あり）に主眼がおかれ、湖周辺の地下水の影響はそのフラックスの小ささゆえにほとんど無視されてきたことが原因として推測された (Nakayama and Watanabe, 2008a)。

このような背景のもと、著者らは NICE を更に改良し (NICE-LAKE)、霞ヶ浦を含む流域全域のシミュレーションを行った。NICE-LAKE では、地表水-地下水間での相互作用としてダルシーの法則で表現される浸出量をモデル内部で考慮するとともに、湖にはボックス型の水収支式を用いて各時間ステップごとに湖の水位を計算し更新した。ダルシーの法則の係数には地下水層と湖底堆積土砂層の等価コンダクタンスを用い、湖底土砂粒径や堆積土砂層厚には既存の文献データを GIS 化することで空間的な分布データをモデルに入力した。モデル計算により、湖への地下水流入量は河川流入量の10%程度であるのに対して、地下水流入窒素負荷量は河川流入負荷量の30%程度と比較的大きく空間的異方性を有しており、処理場から排出される最大負荷量の約4倍も大きいという結果が得られた。つまり、これまで霞ヶ浦流域の水・物質収支において無視されてきた地下水から湖への浸出（季節によって反対の流れも発生する。詳細は著者らの文献 Nakayama and Watanabe (2008a) を参照）を考慮することは、流域での面源負荷の正確な評価とともに霞ヶ浦の水質を改善する上でも今後の水環境政策に不可欠であることが明らかになった (図6参照)。ただし、NICE-LAKE には湖沼内流動、植生の窒素やリン吸収、地下水での脱窒などは加味されておら

ず、今後詳細な観測や分析と併せて近年開発した NICE-BGC との結合による計算結果の高度化が期待される。

5. 地表水-地下水相互作用が全球スケールの炭素循環に及ぼす影響評価の事例

既存の炭素循環研究では、河川・湖沼・地下水などから構成される「陸水」を物質が陸域から海域へ輸送される際の単なる水路「passive pipe」とみなし、全球炭素収支の残差もしくは誤差の範囲内、更には陸域に比べて局所性が強くほとんど無視できるという仮定のもとで積極的には取り扱われてこなかった。近年、陸水の役割に関する新たな研究が世界的に注目されつつある (Cole et al., 2007; Battin et al., 2009)。このような背景のもと、陸水を通した炭素循環の解明に向けて、著者は NICE を既存の複数の物質循環モデルと有機的に結合することにより世界に先駆けて（半経験的もしくは regression ではない）プロセス型モデル NICE-BGC を新たに開発し (図2参照)、水循環と炭素循環の関連性についての研究を行っている (Nakayama, 2016)。NICE-BGC は陸域-水域間での炭素動態及び窒素やリンなどの栄養塩との相互作用を内包するモデルである。既存の観測データや衛星画像データを最大限活用し、同モデルを用いて全球を対象に大規模シミュレーションを行うことによって、陸水を通した炭素循環の評価を行った。計算の結果、一部の炭素は大気へ放出し ($0.79 \pm 0.38 \text{ PgC/yr}$)、一部は河川や湖沼の底泥に堆積し ($0.20 \pm 0.09 \text{ PgC/yr}$)、残りの複数の反応形態から構成される炭素が最終的に海域へ流出する ($1.13 \pm 0.50 \text{ PgC/yr}$)、という一連のプロセスが定量的に再現された (Nakayama, 2017a)。更に、この「active」な陸水 (Cole et al., 2007) には地表水-地下水間での相互作用が密接に関わっており、かつ、そのフラックス量は大陸スケール及び全球炭素収支において複雑な季節変化を伴い無視できない量であることが明らかになった (Nakayama, 2017b)。同モデルでは、既存研究をもとに DOC や POC は表面流で支配的かつ DIC 濃度は表面流よりも地下水中で高濃度である (Hope et al., 1994) という仮定を置いて

図6 霞ヶ浦における周辺地下水が湖沼環境に及ぼす影響の計算結果 (NICE-LAKE) (reprint from Nakayama and Watanabe, 2008a)。

(a) 観測データをクリギング補間した地下水中の観測窒素濃度の分布 (茨城県, 2000-2002)。

(b) モデルで計算された地下水浸出量 (500m メッシュ)。

(c) モデルで計算された地下水からの窒素負荷量 (500m メッシュ)。

(c) の図中の数値は湖沼内の観測窒素濃度 (茨城県, 2000-2002)。地下水流出との関連が推測され、湖沼水質の改善のためには農地・畜産・下水由来の点源・面源負荷対策のみではなく、これまで無視されてきた地下水の影響も考慮する必要性のあることが明らかになった。

Fig. 6 Simulated result of impact of groundwater on Lake Kasumigaura (reprint from Nakayama and Watanabe, 2008a).

(a) interpolated groundwater nitrogen concentration (mg/L) (Ibaraki Prefecture, 2000-2002).

(b) simulated groundwater seepage at the lakes per unit area of each 500 x 500 m cell.

(c) simulated total inflowing nitrogen loading of each 500 x 500 m cell.

In (c), numerical values show the observed nitrogen concentration of the lake (mg/L) (Ibaraki Prefecture, 2000-2002).

いるが、各流域ごとの流下過程での時空間スケールに応じた連続的な観測を行うことによって詳細な地表水-地下水間での相互作用を明らかにする必要がある。これらのシミュレーション結果

は、既存研究で陸域が炭素循環におけるシンクとしてみなされていたフラックス量 (-2.8 から -1.4PgC/yr 程度) が、本研究で明らかになった陸水からのソース分を考慮すると更に小さくな

る可能性 ($-1.05 \pm 0.62 \text{ PgC/yr}$) を示唆しており (Nakayama, 2017a), 今後の炭素循環の精緻化のためにも重要である。

6. おわりに

地表水－地下水間での相互作用は、水循環のみならず物質循環や生態系へも大きな影響を及ぼす。本稿では、釧路湿原、霞ヶ浦、首都圏、中国での具体的事例を通して、この相互作用が時空間的に非線形に影響を及ぼす可能性をプロセス型モデルを用いることによって概観した。従来別々に評価されることの多かった水・熱・物質汚染への対応策を多次元での生態系サービス評価を通して統合的に取り扱うことにより、複合的な環境改善を目的として個別対応策では解決が困難であった領域横断的な研究展開を行うことが可能になる。その際に、モデル・浸出計・トレーサー・同位体等の複数の手法を統合的に用いて地表水－地下水間での相互作用の時空間的な評価精度の更なる高度化を行うことは大きな意義を持つと思われる。

参考文献

- 茨城県 (2000): 公共用水域及び地下水の水質測定結果。
茨城県 (2001): 公共用水域及び地下水の水質測定結果。
茨城県 (2002): 公共用水域及び地下水の水質測定結果。
環境省 (2004): 都市における人工排熱抑制によるヒートアイランド対策調査報告書。
国土交通省 (2006): 釧路湿原自然再生事業 土砂流入対策実施計画 [久著呂川]。
嶋田 純 (2000): 水循環から見た地下水保全と21世紀への提言。日本水文科学会誌, 30, 63-72。
Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E. and Rasmussen, J. (1986): An introduction to the European Hydrological System-Systeme Hydrologique European, SHE, 2: Structure of a physically-based, distributed modeling system. J. Hydrol., 87, 61-77。
Battin, T.J., Luyssaert, S., Kaplan, L.A., Aufdenkampe, A.K., Richter, A. and Tranvik, L.J. (2009): The boundless carbon cycle. Nat. Geosci., 2, 598-600。
Brown, L.R. and Halweil, B. (1998): China's water shortage could shake world food security. World Watch, 11(4), 10-18。
Colbourn, G., Ridgwell, A. and Lenton, T.M. (2013): The Rock Geochemical Model (RokGeM)v0.9. Geosci. Model Dev., 6, 1543-1573。
Cole, J.J., Prairie, Y.T., Caraco, N.F., McDowell, W.H., Tranvik, L.J., Striegl, R.G., Duarte, C.M., Kortelainen, P., Downing, J.A., Middelburg, J.J. and Melack, J. (2007): Plumbing the global carbon cycle: integrating inland waters into the terrestrial carbon budget. Ecosystems, 10, 171-184。
Croton, J.T. and Barry, D.A. (2001): WEC-C: A distributed, deterministic catchment model—Theory, formulation and testing. Environ. Modell. Softw., 16, 583-599。
Eagleson, P.S. (2002): Ecohydrology. Cambridge University Press, Cambridge, UK。
Hope, D., Billett, M.F. and Cresser, M.S. (1994): A review of the export of carbon in river water: Fluxes and processes. Environ. Pollut., 84, 301-324。
Krabbenhoft, D.P., Bowser, C.J., Anderson, M.P. and Valley, J.W. (1990): Estimating groundwater exchange with lakes 1. the stable isotope mass balance method. Water Resour. Res., 26, 2445-2453。
Lewis, E. and Wallance, D. (1998): Program developed for CO₂ system calculations. Oak Ridge National Laboratory。
McDonald, M.G. and Harbaugh, A.W. (1988): A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. U.S. Geol. Surv. Tech. Water Resour. Book 6, 586 pp。
Meadows, D.H., Randers, J. and Meadows, D. (1972): Limits to Growth. Universe Books, New York, USA。
Nakayama, T. and Watanabe, M. (2004): Simulation of drying phenomena associated with vegetation change caused by invasion of alder (*Alnus japonica*) in Kushiro Mire. Water Resour. Res., 40(8), W08402。
Nakayama, T. and Watanabe, M. (2006): Simulation of spring snowmelt runoff by considering microtopography and phase changes in soil layer. Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss., 3, 2101-2144。
Nakayama, T., Yang, Y., Watanabe, M. and Zhang, X. (2006): Simulation of groundwater dynamics in North China Plain by coupled hydrology and agricultural

- models. *Hydrological Processes*, 20(16), 3441–3466.
- Nakayama, T., Watanabe, M., Tanji, K. and Morioka, T. (2007): Effect of underground urban structures on eutrophic coastal environment. *Sci. Total Environ.*, 373(1), 270–288.
- Nakayama, T. (2008a): Factors controlling vegetation succession in Kushiro Mire. *Ecol. Model.*, 215, 225–236.
- Nakayama, T. (2008b): Shrinkage of shrub forest and recovery of mire ecosystem by river restoration in northern Japan. *Forest Ecol. Manag.*, 256, 1927–1938.
- Nakayama, T. and Watanabe, M. (2008a): Missing role of groundwater in water and nutrient cycles in the shallow eutrophic Lake Kasumigaura, Japan. *Hydrological Processes*, 22, 1150–1172.
- Nakayama, T. and Watanabe, M. (2008b): Role of flood storage ability of lakes in the Changjiang River catchment. *Global Planet. Change*, 63, 9–22.
- Nakayama, T. (2010): Simulation of hydrologic and geomorphic changes affecting a shrinking mire. *River Res. Applic.*, 26(3), 305–321.
- Nakayama, T. and Fujita, T. (2010): Cooling effect of water-holding pavements made of new materials on water and heat budgets in urban areas. *Landscape Urban Plan.*, 96, 57–67.
- Nakayama, T., Sun, Y. and Geng, Y. (2010): Simulation of water resource and its relation to urban activity in Dalian City, Northern China. *Global Planet. Change*, 73, 172–185.
- Nakayama, T. (2011a): Simulation of the effect of irrigation on the hydrologic cycle in the highly cultivated Yellow River Basin. *Agr. Forest Meteorol.*, 151, 314–327.
- Nakayama, T. (2011b): Simulation of complicated and diverse water system accompanied by human intervention in the North China Plain. *Hydrological Processes*, 25, 2679–2693.
- Nakayama, T. and Hashimoto, S. (2011): Analysis of the ability of water resources to reduce the urban heat island in the Tokyo megalopolis. *Environ. Pollut.*, 159, 2164–2173.
- Nakayama, T. (2012a): Visualization of missing role of hydrothermal interactions in Japanese megalopolis for win-win solution. *Water Sci. Technol.*, 66(2), 409–414.
- Nakayama, T. (2012b): Feedback and regime shift of mire ecosystem in northern Japan. *Hydrological Processes*, 26(16), 2455–2469.
- Nakayama, T. (2012c): Impact of anthropogenic activity on eco-hydrological process in continental scales. *Proc. Environ. Sci.*, 13, 87–94.
- Nakayama, T., Hashimoto, S. and Hamano, H. (2012): Multi-scaled analysis of hydrothermal dynamics in Japanese megalopolis by using integrated approach. *Hydrological Processes*, 26(16), 2431–2444.
- Nakayama, T. (2013): For improvement in understanding eco-hydrological processes in mire. *Ecohydrological Hydrobiol.*, 13, 62–72.
- Nakayama, T. and Shankman, D. (2013a): Impact of the Three-Gorges Dam and water transfer project on Changjiang floods. *Global Planet. Change*, 100, 38–50.
- Nakayama, T. and Shankman, D. (2013b): Evaluation of uneven water resource and relation between anthropogenic water withdrawal and ecosystem degradation in Changjiang and Yellow River basins. *Hydrological Processes*, 27(23), 3350–3362.
- Nakayama, T. (2016): New perspective for eco-hydrology model to constrain missing role of inland waters on boundless biogeochemical cycle in terrestrial-aquatic continuum. *Ecohydrological Hydrobiol.*, 16, 138–148.
- Nakayama, T. (2017a): Development of an advanced eco-hydrologic and biogeochemical coupling model aimed at clarifying the missing role of inland water in the global biogeochemical cycle. *J. Geophys. Res. Biogeosci.*, 122, 966–988.
- Nakayama, T. (2017b): Scaled-dependence and seasonal variations of carbon cycle through development of an advanced eco-hydrologic and biogeochemical coupling model. *Ecol. Model.*, 356, 151–161.
- Nakayama, T. and Maksyutov, S. (2018): Application of process-based eco-hydrological model to broader northern Eurasia wetlands through coordinate transformation. *Ecohydrological Hydrobiol.*, in press.
- National Institute for Environmental Studies (NIES) (2001): Lake Kasumigaura Database. Center for Global Environmental Research, CGER-M012 (CD-ROM).
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R. and Williams, J.R.

- (2011): Soil and water assessment tool: Theoretical documentation version 2009. Texas Water Resources Institute Technical Report No. 406, Texas A&M University.
- Pelletier, G.J., Chapra, S.C. and Tao, H. (2006): QUAL2Kw – A framework for modeling water quality in streams and rivers using a genetic algorithm for calibration Environ. Modell. Softw., 21, 419–425.
- Refsgaard, J.C. and Storm, B. (1995): MIKE SHE. In Computer Models of Watershed Hydrology, Singh, V.P. (ed), Water Resour. Publ., Highlands Ranch, Colo., 809–846.
- Sellers, P.J., Randall, D.A., Collatz, G.J., Berry, J.A., Field, C.B., Dazlich, D.A., Zhang, C., Collelo, G.D. and Bounoua, L. (1996): A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. part I: Model formulation. J. Clim., 9, 676–705.
- Sholkovitz, E., Herbold, C. and Charette, M. (2003): An automated dye-dilution based seepage meter for the time-series measurement of submarine groundwater discharge. Limnol. Oceanogr.-Meth., 1, 16–28.
- Solomon, S. (2010): Water. HarperCollins Publishers, New York, USA.
- Sophocleous, M.A., Koelliker, J.K., Govindaraju, R.S., Birdie, T., Ramireddygar, S.R. and Perkins, S.P. (1999): Integrated numerical modeling for basin-wide water management: The case of the Rattlesnake Creek basin in south-central Kansas. J. Hydrol., 214, 179–196.
- Takasao, T. and Shiiba, M. (1988): Incorporation of the effect of concentration of flow into the kinematic wave equations and its applications to runoff system lumping. J. Hydrol., 102, 301–322.
- Wania, R., Ross, I. and Prentice, I.C. (2010): Implementation and evaluation of a new methane model within a dynamic global vegetation model: LPJ-WHyMe v1.3.1. Geosci. Model Dev., 3, 565–584.
- (受付：2017年5月31日，受理：2018年3月22日)