

平成 30 年度 厚岸湖・別寒辺牛湿原学術研究
奨励補助金報告書

岐阜大学流域圏科学研究センター
特任助教 丸谷靖幸

生物地球化学的過程を考慮した数値モデルによる水・物質流出機構の解明

丸谷靖幸^{1)*}, 柴田英昭²⁾, 仲岡雅裕²⁾, 井上貴央²⁾, 松井孝典³⁾, 芳賀智広³⁾, 前田真理美⁴⁾, 白岩孝行⁵⁾

1) 岐阜大学流域圈科学研究中心

2) 北海道大学北方生物圈フィールド科学センター

3) 大阪大学大学院環境・エネルギー工学専攻

4) 大阪大学工学部

5) 北海道大学低温科学研究所

* 研究代表者 : maruya@green.gifu-u.ac.jp

1. はじめに

近年, 局所豪雨の増加や北海道では台風の上陸数が急激に増加するなど, 気候変動に伴う様々な変化が顕著に現れてきており, 最近では“既往最大”や“想定外”という言葉を頻繁に報道される機会が増加してきた。このような気候変動の影響は, 我々が生活する流域圏において非常に大きな被害をもたらしており, “既往最大”クラスの台風の上陸による, “想定外”の洪水発生による住環境や産業への被害が生じている。このような気候変動の影響は厚岸湖・厚岸湾や別寒辺牛川流域においても生じる可能性があり, 流域水循環システムだけではなく, 厚岸湖で生産されるカキなどの水産資源の栄養源となる陸域からの窒素やリン供給量も変化する可能性が懸念される。そのため, 気候変動などによる流域の水・物質循環機構が受ける影響を定量的に推定・評価可能な手法の確立が望まれる。しかし, 流域圏の水循環機構と物質循環機構はそれぞれ密接に関連しているものの, 既往の研究の多くでは水循環と物質循環に関する研究が個別に進められてきているのが現状である。

これまで多くの研究者により, 様々な水循環モデルが開発されてきた(例えば, Hydro-BEAM¹⁾やWEB-DHM^{2),3)}, MATSIRO⁴⁾)。Hydro-BEAM や WEB-DHM は, 分布型流出モデルであり, 流域圏における河川流況の再現・予測を目的として開発してきた。一方, MATSIRO は陸面過程モデルであり, MATSIRO に人間活動モジュールを組み込まれた水循環モデル HiGW-MAT⁵⁾も開発され, 多くの研究で用いられている。しかし, MATSIRO のような陸面過程モデルは, 水・熱収支の解析には有用であるが, 標高に伴う斜面流出といった流出過程の再現精度に課題を有する。また, 陸域物質循環モデルでは, 例えば Sim-CYCLE⁶⁾や VISIT⁷⁾では生物地球科学的過程を踏まえ, 森林生態系における物質循環機構を数値的に推定可能なモデルが存在する。しかし, これらのモデルでは, 大気-土壤間における水・物質動態は非常に良く再現できるものの, 流出部分に課題を有している。上述のことからも流域圏における物質循環機構は, 水文過程だけではなく生物地球化学的過程も含めて捉える必要がある。そこで, 水文過程や生物地球化学的過程を統合的に理解するためのツールとして, システムのモデル化が挙げられる。例えば, これまで HYPE モデル⁸⁾や SWAT モデル⁹⁾といった流出モデルを用いた研究が多く実施してきた。例えば SWAT モデルでは, 流域の物質循環機構について窒素の硝化や脱窒などの生物地球化学的過程が考慮されている。しかし, 水文過程については流域内の小流域を土地利用・土壤・地形の 3 つの地理的な要素毎の流出量を合計することで小流域の流量を推定するなど水文過程が簡略化されているという課題がある。そのため, 村岡ら¹⁰⁾や田中ら¹¹⁾では, 流域圏を対象とした物質循環機構を理解するには, 流域圏スケールでの水文過程を解くことが可能な水文流出モデルと陸域の物質循環過程を解くことが可能な陸域物質循環モデルを組み合わせる必要があると述べている。

そこで本研究では, 様々な研究分野の共同研究者の持つ知見, 技術を融合させ, 別寒辺牛川流域を対象に水文過程と生態学的過程を物理的に解くことが可能な数値モデルを統合化し, 陸域から流出する物質および水(流量)を定量的に推定可能な手法を確立することで, 別寒辺牛川流域から厚岸湖へ流入する水・物質量を評価することを目的とする。さらに気候変動がこれらに与える影響についても評価する。

2. 研究対象地域

本研究では, 別寒辺牛川流域を研究対象流域とした(図-1)。まず本年度は, 流域の基礎情報を取得するため, 潮汐に伴い厚岸湖からの流入の影響を受けない下流部において, 水位および流量に関する観測

が白岩らによって実施された（図-1, St.A を除く青丸）。また本研究では、別寒辺牛川流域を対象に森林生態系による物質循環を解明するため、陸域物質循環モデルとして森林景観モデル LANDIS-II¹²⁾を適用した。

流域における水循環に関しては、丸谷ら¹³⁾でも利用されている分布型流出モデルを改良し、別寒辺牛川流域へ適用する準備を進めた。なお、別寒辺牛川流域における水位および流量の観測が本年度から実施されたため、水位・流量の関係性についての検証が不十分である。そのため、本年度は別寒辺牛川流域の隣に位置する尾幌川流域（図-1）において、モデルの精度検証を実施した。ここで構築された数値モデルを結合することで、陸域から沿岸域に流出する水・物質流出量を推定し、それらの出力値を沿岸域生態系モデルに入力することで、気候変動がもたらす集中豪雨等の極端気象現象が別寒辺牛川流域および厚岸湖、厚岸湾の生態系に与える影響の統合的評価を本研究の最終目的とする。

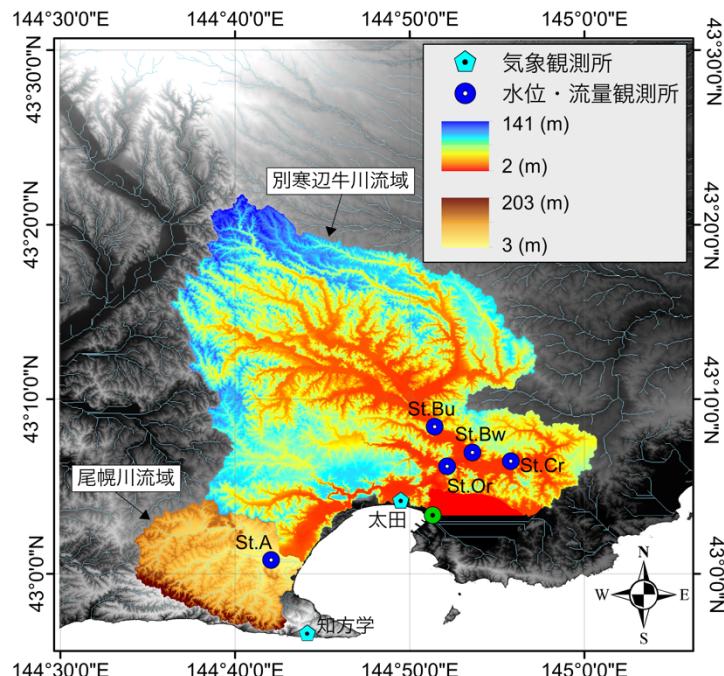


図-1 別寒辺牛川流域および尾幌川流域（水色五角形：気象観測所、青丸：水位・流量観測所）

3. 別寒辺牛川流域における気候変動影響評価

(1) 気象要素の長期トレンド

既に前述している通り、近年気候変動による影響が世界中で生じている。特に気候変動による影響は温暖化や降水パターンの変化などに顕著に現れる。そのため、気候変動の影響が今後どの程度影響を及ぼすか理解する上で、現段階で気候変動の影響が別寒辺牛川流域の気候に生じているのか把握することは、基礎的な情報として重要である。そこで本研究では、降水量および気温の長期トレンドについて、気候変動の傾向を表す指標 Climate Change Indices (CCI)^{14),15)}の一部を利用することとした。降水量については PRCPTOT および SDII (式(1), (2)), 気温に関しては DTR により検証した (式(3))。

$$PRCPTOT_j = \sum_{i=1}^I RR_{ij} \quad (1)$$

$$SDII_j = \frac{\sum_{w=1}^W RR_{wj}}{W} \quad (2)$$

$$DTR_j = \frac{\sum_{i=1}^I (Tx_{ij} - Tn_{ij})}{I} \quad (3)$$

ここで、 $PRCPTOT$ は年総降水量、 I は各年の日数、 i , w は雨天日、 RR_{ij} , RR_{wj} は 1.0 mm day^{-1} 以上の日降水量、 $SDII$ は Simple Daily precipitation Intensity Index、 W は日降水量が 1.0 mm day^{-1} 以上の回数、 DTR は気温日較差、 Tx_{ij} は日最高気温、 Tn_{ij} は日最低気温である。

PRCPTOT, *SDII* および *DTR* のトレンドの検定には有意水準を 5 %とした, Mann-Kendall 検定を適用した. 檢定期間は, 観測データが存在する 1978 年から 2017 年を対象とした.

図-2 に *PRCPTOT*, *SDII* および *DTR* の結果を示す. 気温日較差 (*DTR*) は観測開始から現在にかけて若干の減少を示しており, 日最高気温と日最低気温の差が小さくなっている傾向を示しているものの, Mann-Kendall 検定の結果から, 優位に変化が現れているわけではないことが確認された (図-2c). 一方, 降水量における CCI である *PRCPTOT* および *SDII* は共に Mann-Kendall 検定により, 優位に変化が現れていることが示された (図-2a, b). そのため, 別寒辺牛川流域では, 短時間降水量および総降水量の両者で気候変動の影響が既に現れていることが分かった.

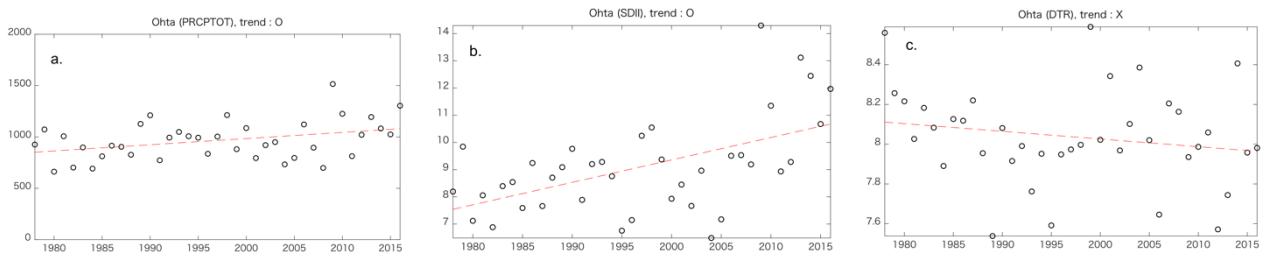


図-2 AMeDAS 観測所 (太田) における *PRCPTOT*, *SDII* および *DTR*. a : *PRCPTOT*, b : *SDII*, c : *DTR*.

(2) 気候変動による降水量および気温の将来予測

本研究では, 別寒辺牛川流域における降水量および気温が将来気候において現在気候と比較して変化するかについて基礎的な検証を行うため, 地球温暖化に資するアンサンブル気候予測データベース (d4PDF, database for Policy Decision making for Future climate change)^{16,17)}を利用した. d4PDF は気象研究所全球大気モデル MRI-AGCM3.2¹⁸⁾を用いた全球実験により水平解像度 60 km (以下, AGCM60) で計算されている. 日本周辺域では AGCM60 の結果を気象庁気象研究所で開発された非静力学地域気候モデル NHRCM^{19,20)}によりダウンスケーリングすることで, 水平解像度 20 km で計算されている (以下, NHRCM20). 計算期間は, 現在気候 (過去実験) で 1951 年 9 月から 2011 年 8 月の 60 年 x 50 メンバー (初期値アンサンブル) の 3000 年分, 将来気候 (4 °C 上昇実験) は 2051 年 9 月から 2111 年 8 月の 60 年 x 15 メンバー (初期値アンサンブル) x 6 メンバー (海面水温 (SST) アンサンブル) の 5400 年分の計算結果が存在する. 本研究では, NHRCM20 の出力値を利用し, 降水量および気温について検討することとした. なお, d4PDF のより詳細な情報は参考文献¹⁶⁾を参照いただきたい.

d4PDF のような気候変動研究で利用される全球気候モデル (GCM) や領域気候モデル (RCM) による計算値は, 再解析データのように観測値を基にデータ同化をされているわけではないため, 現実の気象場を再現していない. また, 気候変動研究で利用される気候モデルによる出力値は計算値であるため, 少なからず観測値との間にバイアスを有している. そのため, 適切な手法により, このバイアスを補正した上で気候変動影響評価を行うことが望ましいと報告されている²¹⁾. しかし本研究では基礎的な検討を行うことを目的としているため, NHRCM20 の値をバイアス補正せずに利用することとした.

現在気候と将来気候の変化に関する結果を図-3 に示す. d4PDF の現在気候に着目すると, 月降水量 (図-3a) では 1 月から 3 月, 6 月から 7 月頃, 月平均気温 (図-3b) では 5 月から 8 月頃の期間で観測値と若干の差が存在しているものの, 概ね観測値と類似の月変動を示しており, d4PDF の予測幅の間に観測値が存在していることが分かる. より高精度な気候変動影響評価を行う場合は, 上述している通りバイアス補正を適用する必要があるが, 基礎的な検討に利用する本研究のようなケースでは十分な予測精度であると考えられる. 続いて, 現在気候と将来気候を比較すると, 降水量では夏季である 8 月, 9 月

に将来気候で大きく増加する可能性が示唆された(図-3a). 冬季である12月から3月では現在気候では予測幅が小さいが、将来気候では予測幅が大きくなっている、予測幅の下限値は現在気候と差がないため、将来における冬季の降水量も大きくなる可能性が高いと推察される(図-3a). また、月平均気温に着目すると冬季の気温が氷点下から約0°C付近まで上昇している(図-3b). これらの結果を踏まえると、別寒辺牛川流域における冬季の降水は、降雪よりも降雨が卓越して発生する可能性が存在する. これらのことからも、将来気候では現在と比較して、流域における水・物質流出機構が変化すると示唆される. そのため、現在における別寒辺牛川流域の水・物質動態を正確に把握し、モデル化しておくことは将来の流域圏の環境を保全する上で非常に重要であると考えられる.

次に、洪水や物質流出に大きく寄与すると考えられる年最大日降水量に着目し、累積密度関数(cdf)を現在気候と将来気候で比較した(図-3c). 既往の多くの研究で言わわれているように、観測値における年最大日降水量のcdfはGumbel分布により表現できていることが分かる(図-3cの黒丸と黒実線). また、多くの線が重なり分かれ難いが、d4PDFの現在気候の各アンサンブルにおけるcdfの結果の範囲内に観測値がおさまっている. そのため、基礎検討としてはd4PDFを用いることで、概ね別寒辺牛川流域における極端現象の予測が可能であろうということが改めて示された. 現在気候と将来気候を比較すると、将来気候の最小クラスの降水量が現在気候の最大クラスに匹敵する減少となり得る可能性が示唆されている. また、最悪クラス同士で比較すると、将来気候では降水量が現在気候の約2倍近くまで上昇する可能性が示されている. ただし、これは重ねて説明するが最悪同士のケースを比較した数値であるため、注意が必要であることを記しておく. しかし、全体的な評価をすると、将来気候では現在気候の数10%程度降水量が増加する可能性があるため、流域内の水・物質動態が変化する可能性は高く、その結果として沿岸域(厚岸湖・厚岸湾)の生態系に影響を及ぼす確率が高いと考えられる. そのため、本研究の最終目的である、陸域物質循環モデルと流出モデルを結合することで、陸域からの水・物質流出量の変化が、厚岸湖・厚岸湾の生態系にどのような変化を与えるかについて評価し、流域環境の保全について検討することは非常に重要であると考えられる.

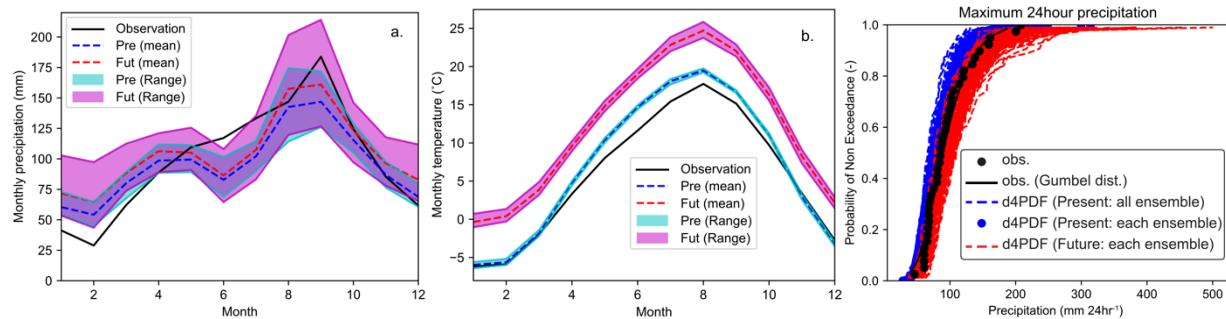


図-3 d4PDFを用いたAMeDAS観測所(太田)における現在気候と将来気候の比較.

a: 月降水量, b: 月平均気温(黒実線: 観測, 青破線: 現在気候(平均),

水色範囲: 現在気候の予測幅, 赤破線: 将来気候(平均), 紫範囲: 将来気候の予測幅),

c: 年最大日降水量の累積密度関数(黒実線: 観測値に対するGumbel分布によるcdf,

黒丸: 観測値によるcdf, 青丸: 現在気候の全アンサンブルによるcdf,

青破線: 現在気候の各アンサンブルによるcdf, 赤破線: 将来気候の各アンサンブルによるcdf)

3. 数値モデルの概要

(1) 陸域物質循環モデルの概要

別寒辺牛川流域では、流域面積の内、森林の面積割合が大きい. そのため、流域からの物質流出量を理解するには、植生動態を踏まえた検討が重要となる. そこで本研究では、気候変動・社会変化にともなう植生動態の変化を評価することとした. 特に、耕作放棄地などは周辺の景観の配置によって植生

が変化するため、種子拡散や動的な植生変化をモデル化できる必要がある。このような景観変化による植生の変化を評価するには、森林景観モデル (Forest Landscape Model, FLM) が有用である。

Shifley et al.²²⁾ では、FLM は 1) 空間明示的なフレームワークを持つ、2) 相互作用を持つ森林景観プロセスを表現可能である、3) 森林林分動態をシミュレーションする、の 3 つの要素が特徴的であると述べられている。さらに、他の空間明示型の森林動態モデルと比較すると、種子散布、火災の拡散や風倒、病虫害などの自然搅乱、さらに森林管理や火災抑制、気候変動といった人為的な影響を表現することができる点に優位性を持っている。

FLM の中でも LANDIS-II¹²⁾は、バイオマスや炭素循環を表現することが可能である²³⁾。LANDIS-II では樹種・樹齢別のコホート毎のバイオマスを計算することができ、種々の搅乱イベントを同時に、異なる時間間隔で計算できるほか、ユーザーが任意の拡張 extension を選択することで表現できる搅乱イベントの組み合わせも自在に拡張できるといった特徴を持っている。また LANDIS-II では、植物の成長や種間・種内競争プロセスや搅乱イベントを追加モジュールで実装、制御することが可能である。さらに近年では、地上部バイオマスの計算を林分レベルの生態系モデルの PnET-II をオンラインカップリングすることで精緻化した PnET モジュール、枯死有機物や土壤炭素動態も計算可能な Forest Carbon モジュール、土壤有機物モデルである CENTURY Soil Organic Matter model v4.0 を組み込み、炭素動態のみではなく窒素動態も考慮した NECN モジュールなど、林分スケールの生物地球学的プロセスの精緻化が進められている。本研究では、気候変動と生態系管理の変化による陸域生態系の物質循環のモデル化や今後流域スケールの物質循環評価に拡張することも加味し、炭素・窒素動態をシミュレーションが可能で、生態系全体の炭素動態を計算可能な NECN モジュール²⁴⁾を適用した。

(2) 流出モデルの概要

前章でも述べた通り、森林生態系による物質循環の評価に用いられる陸域物質循環モデルでは、鉛直 1 次元を対象として計算が行われるため、標高に伴う斜面流出といった流出過程の再現精度に課題を有している。そのため、流域圏における水・物質流出機構を再現、予測するには、洪水のようなピーク流量を適切に評価可能な水循環モデルが必要となる。そこで本研究では、既往の論文で洪水流出の再現性が示されている 1K-DHM^{25),26)}をベースとした分布型流出モデルを構築することとした。1K-DHM は分布型流出モデル (Distributed Hydrological Model) であり、流域を任意のサイズのグリッドで分割することで、任意の地点における水・物質流出量を評価可能な流出モデルである。また 1K-DHM では、標高 (Digital Elevation Model : DEM) および流下方向データ (Flow Direction : FD) を用いることで流域を斜面グリッドおよび河道グリッドに分け、斜面グリッドでは不飽和・飽和中間流・地表面流を考慮した Kinematic-wave モデル (式(4)–(5))、河道グリッドでは地表面型の Kinematic-wave モデルにより流出計算が行われる²⁷⁾ (式(6)–(7))。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r - E_p \quad (4)$$

$$q = \begin{cases} v_m d_m \left(\frac{h}{d_m}\right)^\beta, & (0 \leq h \leq d_m) \\ v_m d_m + v_a (h - d_m), & (d_m \leq h \leq d_a) \\ v_m d_m + v_a (h - d_m) + \alpha (h - d_a)^m, & (d_a \leq h) \end{cases} \quad (5)$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (6)$$

$$Q = \alpha A^m \quad (7)$$

ここで、 h は水深、 q は単位幅流量、 r は降水量、 E_p は蒸発散、 v_m はマトリックス部の平均流速、 d_m はマトリックス部の土層厚、 v_a は土層内の平均流速、 α は \sqrt{i}/n 、 i は斜面勾配、 n は粗度係数、 d_a は土層

厚, m は kinematic パラメータ, A は通水断面積, Q は流量である.

別寒辺牛川流域のような湿原域を含む流域では, 湿原域における水の貯留効果や地下水流动などが流域内の流出機構に大きく影響すると考えられる. 本研究でベースとして用いる 1K-DHM は上述通り, 洪水のようなピーク流量の再現に着目して作成されている流出モデルであるため, 基底流出や地下水流出といった部分の再現に課題を有している. そのため本研究で対象とするような長期計算を行う際には, 低水部分の計算結果が実際の流出量よりも過小評価される可能性がある. そこで本研究では, 別寒辺牛川流域における水・物質流出機構をより精度良く再現できるように, Hydro-BEAM¹⁾などで適用されるような線形貯留モデルを 1K-DHM へ追加することで, 流出モデルを改良した (以下 DHM, 図-4). 改良に伴い, 斜面グリッドにおける地表面および第 1 層は不飽和・飽和中間流・地表面流を考慮した Kinematic-wave モデル (式(4)-(5)), 第 2 層～第 4 層は線形貯留モデルを適用した (式(8)-(14)). なお, 第 1 層～第 3 層における水平流出量は河川に流入し, 第 4 層は河川流量には直接影響を及ぼさない地下水層とした.

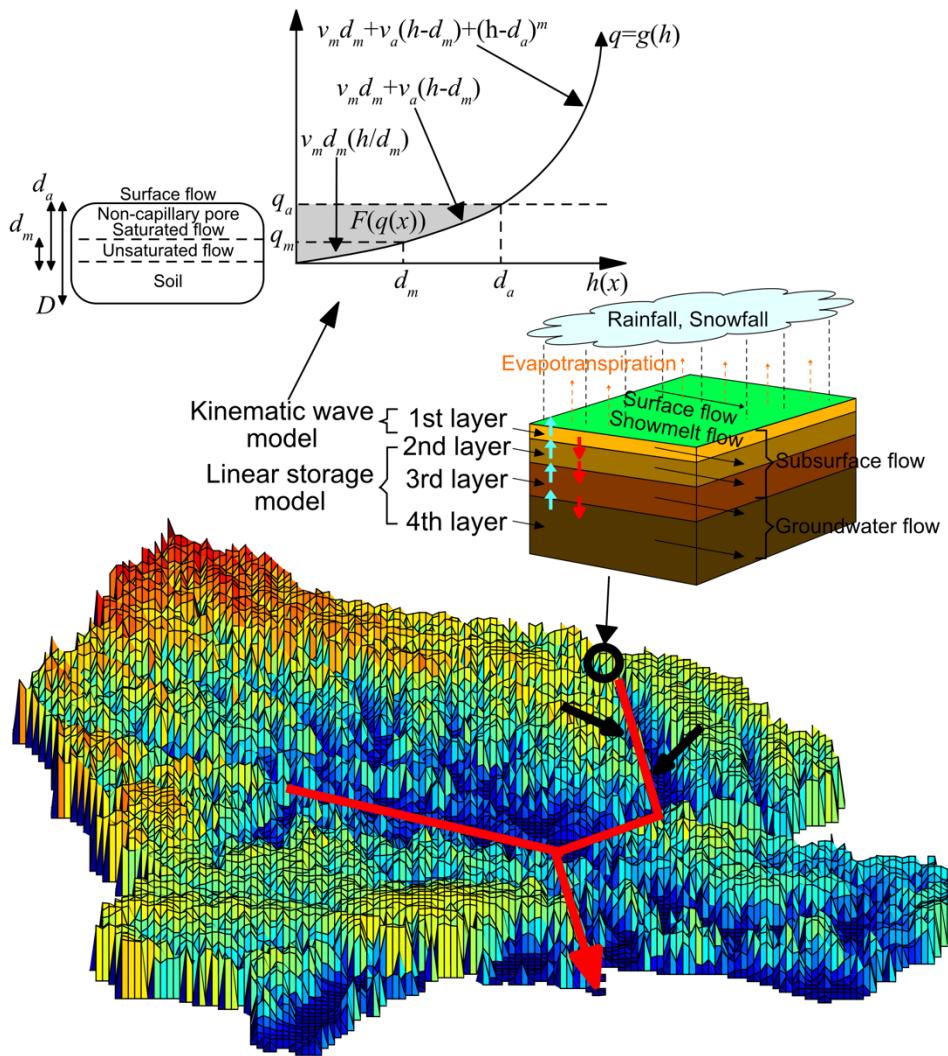


図-4 本研究で利用した流出モデルの概略図

$$\frac{ds}{dt} = I - O - E_p \quad (8)$$

$$O = k \cdot S \quad (9)$$

$$I = P_{in} + Q_{in} \quad (10)$$

$$O = P_{out} + Q_{out} \quad (11)$$

$$k = k_1 + k_2 \quad (12)$$

$$k_1 = \frac{k_H \cdot \cos\theta}{B \cdot \varepsilon} \quad (13)$$

$$k_2 = \frac{k_V}{\varepsilon} \quad (14)$$

ここで、 S は貯留量、 I は側方流入量、 O は流出量、 k は透水係数、 P_{in} は上層からの流入量、 Q_{in} は上流メッシュからの流入量、 P_{out} は下層への流出量、 Q_{out} は下流メッシュへの流出量、 k_H は水平透水係数、 k_V は鉛直透水係数、 B はメッシュ幅、 ε は有効間隙率である。

また、各層（第1層～第4層）では、貯留水量が層厚に達し飽和状態になると、溢水量は上層に復帰流として流入し、蒸発散量は、第1層から差し引き、第1層の水量がゼロのときは第2層から、さらに第2層の水量がゼロのときは第3層から差し引くこととして、モデル化を行った。

なお本研究では、蒸発散の推定には月降水量のみで推定可能な Thornthwaite 法²⁸⁾を採用することとした（式(15)-(17)）。

$$E_p = 16 \cdot \left(\frac{10 \cdot T_{m_j}}{J} \right)^{a_E} \cdot \left(\frac{D_0}{12} \right) \cdot \left(\frac{1}{30} \right) \quad (15)$$

$$a_E = 6.750 \cdot 10^{-7} \cdot J^3 - 7.710 \cdot 10^{-3} \cdot J^2 + 1.792 \cdot 10^{-2} \cdot J + 0.4929 \quad (16)$$

$$J = \sum_{j=1}^{12} \left(\frac{T_{m_j}}{5} \right)^{1.514} \quad (17)$$

ここで、 T_{m_j} は月平均気温、 D_0 は月平均日照時間である。なお、 $T_{m_j} < 0.0$ の場合、 E_p は0.0である。

4. 結果

(1) 陸域物質循環モデル

本研究では、気候変動・社会変化にともなう植生動態の変化に関する検討を実施した。気候変動に関する検討に関しては、CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) で提供される全球気候モデル GCM (General Circulation Model) の内、MRI-CGCM3 の降水量と気温を利用した。また、社会シナリオには、現在（2016年）とPANCES (Predicting and Assessing Natural Capital and Ecosystem Services) プロジェクトで開発されている2050年における全国スケールの探索型社会シナリオを用いた²⁹⁾。具体的には、将来の社会シナリオとして、1)現在の森林管理や農地放棄の進展のトレンドが継続するBaU(Business as Usual) (BaU), BaUをベースに、2)自然資本・コンパクト型社会(NtrCmp), 3)自然資本・分散型社会(NtrDsp), 4)人工資本・コンパクト型社会(PrdCmp), 5)人工資本・分散型社会(PrdDsp), として森林管理や農地放棄のパターンを変化させた、計5つのシナリオを対象に計算を実行した³⁰⁾。なお、本計算では、空間解像度を100 m x 100 mで計算を実施した。

図-5に現在（2016年）と上述した5つの社会シナリオ下における将来（2050年）の植生分布を示す。詳細な考察はHaga et al.³⁰⁾に譲るが、現在（図-5a）と比較して、将来（図-5bからf）の全ての社会シナリオ下において、別寒辺牛川上流域の植生がシラカバからミズナラやハルニレに置き換わる可能性が示されている。また、人工資本・コンパクト型社会（図-5e）、f:人工資本・分散型社会（図-5f）では、現在（図-5a）と比較して、流域北西部の植生が牧草からハンノキに置き換わる可能性を示唆している。これは、釧路湿原で生じている現象と類似している。釧路湿原では、河道の直線化に伴う土砂や栄養塩の流入量の増加、河床高の変化など複数の要因が示唆されているが、別寒辺牛川流域における本現象は気候変動に伴い気温が上昇することにより、土壤の乾燥化が進んだことで、植生がハンノキに置き換わる可能性を示していると推測される。

このように、気候変動や社会シナリオの変化に伴い流域内の植生動態が変化し、陸域における物質循環も変化することで、流域から沿岸域への水・物質流出量へ影響を及ぼす可能性がある。その結果として、特に厚岸ではカキなどの養殖に影響を及ぼしてしまうことが懸念される。本年度は気候変動や社会シナリオの変化に伴う域内の植生動態に関する検討まで進めたため、今後は観測によって得られている流域内の窒素濃度と比較検証を行うことで、LANDIS-IIによって計算される土壤内での物質循環（窒素など）の精度を向上させていく、流出モデルと組み合わせることで、沿岸域生態系に与える水・物質流出量の影響評価を行っていく予定である。

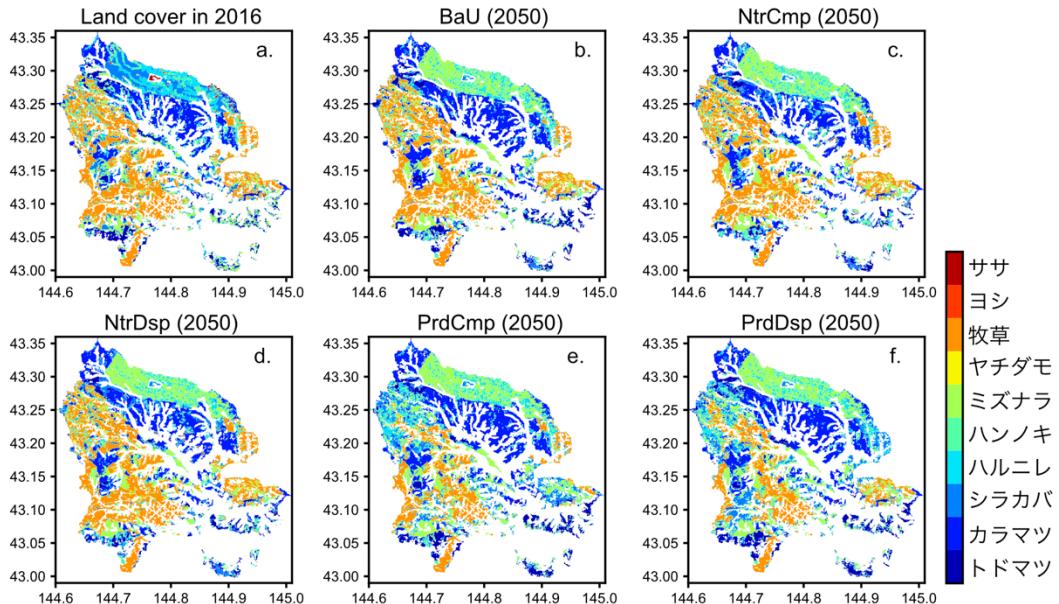


図-5 LANDIS-II で計算された現在（2016年）と5つの社会シナリオ下における将来（2050年）の植生分布（a：現在、b：現在のトレンドが継続するシナリオ（BaU）、c：自然資本・コンパクト型社会（NtrCmp）、d：自然資本・分散型社会（NtrDsp）、e：人工資本・コンパクト型社会（PrdCmp）、f：人工資本・分散型社会（PrdDsp））

(2) 流出モデル

本研究では、本年度、別寒辺牛川流域において水位および流量の観測を実施した（図-1）。しかし、水位・流量の関係性を説明するには検証データが不十分であった。そこで本研究では、別寒辺牛川流域の隣に位置する尾幌川流域を対象に、本研究で構築した流出モデルの精度検証を行った。本研究の検証データとしては、北海道釧路総合振興局釧路建設管理部（以下、釧路建設管理部）によって観測されたデータを利用した（図-1、St.A）。流出モデルによる計算を行うに当たり、AMeDAS 観測所（知方学）の1時間降水量を利用した。また釧路建設管理部によって観測された水位から流量への変換は、釧路建設管理部で作成された水位-流量曲線を利用した³¹⁾（表-1）。また本研究では、観測された実績水位の内、氾濫注意水位である 5.48 m を超えたイベント（全 10 イベント）を抽出し、その中で最大であった 2013 年 9 月の洪水イベントを対象とした。なお本洪水イベントでは、9 月 16 日 24 時に 8.24 m の水位が観測されていた。

表-1 尾幌川における水位-流量の関係

H-Q 式	流量適用範囲	成果年度
$Q=5.114(H-0.599)^2$	$Q < 114.1$	平成16年度
$Q=3.279(H+0.576)^2$	$114.1 \leq Q \leq 164.4$	
$Q=7.383(H-1.786)^2$	$164.4 < Q$	

本流出モデルでは、地形データは国土数値情報によって提供されている 10 m メッシュの DEM および DEM から計算された FD を利用した。空間解像度は約 100 m メッシュとし、計算時間間隔は 300 s とした。また流出モデルのパラメータは、python において開発されたパラメータ同定ライブラリである spotpy³²⁾を利用し、アルゴリズムは複数ある内、水文学分野で広く利用されている SCE-UA 法³³⁾により

同定した。

表-1 における水位-流量の関係により推定された流量を利用し、流出モデルのパラメータを同定した結果を図-6に示す。計算流量（赤破線）は観測流量（黒実線）と同様な変動を再現することが出来ていることが分かる。しかし、流量の絶対量が大きく異なっていることが分かる。これは、釧路建設管理部によって平成16年度に作成されたH-Q式の時点の河床高が、平成16年度以降に発生した洪水や河道整備などによって変化し、H-Q式が変化した可能性が考えられる。そこで、本研究では流量での検証ではなく、水深での検証を実施することとした（図-6）。なお、尾幌川水位観測所における水位標のゼロ点高は0.0mであるため、観測水位をそのまま水深とみなすことが可能である。図-7に水深を用いて流出モデルのパラメータを同定した結果を示す。本計算では助走計算を行わずに計算を実行しているため初期水深では若干の誤差があるものの、その他の例えは洪水ピーク時点での水深やその後の小さな水位上昇など、非常に良く計算値が観測値を再現していることが分かる。

以上の結果より、検証済みの観測流量を利用して、本研究で構築した流出モデルにより流域の水・物質流出機構を再現可能であると考えられる。そのため、今後は本年度実施された水位および流量観測を来年度以降も実施し、流量データの整備を進めることで、本流出モデルを別寒辺牛川流域に適用することで、本研究の最終目標とする、陸域物質循環モデルと流出モデルを結合することで、陸域から沿岸域に流出する水・物質流出量を推定し、それらの出力値を沿岸域生態系モデルに入力することにより、別寒辺牛川流域および厚岸湖、厚岸湾の生態系に与える影響の統合的評価を実施していく予定である。

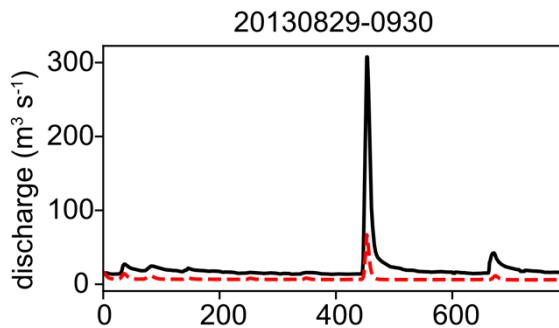


図-6 2013年8月29日から9月30日における流出計算結果（黒実線：観測流量、赤破線：計算流量。横軸は計算開始時間からの時間を示す）

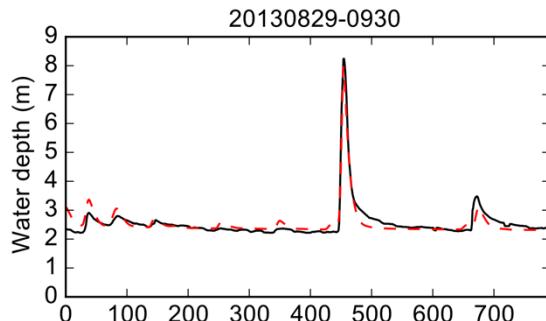


図-7 2013年8月29日から9月30日における流出計算結果（黒実線：観測水深、赤破線：計算水深。横軸は計算開始時間からの時間を示す）

これにより、流出モデルを構築することが出来た。本研究における目的は流域からの水・物質流出機構を評価することであるため、水と同時に物質が移動する効果を考慮する必要がある。そこで本研究では本流出モデルへ移流効果を導入するため、1次元移流拡散方程式を適用することとした（式(18)）。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} - D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} = 0 \quad (18)$$

ここで、 c は物質濃度、 u は流速、 D は拡散係数である。

ただし、上述している通り、別寒辺牛川流域内における水・物質流出量に関する検証データ等が不十分であるため、引き続き観測も含めて検討を行っていく必要があることを述べておく。

5. 陸域物質循環モデルと流出モデルの結合

陸域物質循環モデルと流出モデルの結合を行う上で、オンライン結合（逐次、計算結果を両モデルで共有する方法）とオフライン結合（先に片方のモデル（今回の場合は陸域物質循環モデル）で計算を実行し、全計算が終了した段階で出力結果をもう一方のモデルに共有する方法）が考えられる。前者のオンライン結合の場合は、お互いの計算結果を逐次、反映することが出来るため、例えば、陸域物質循環モデルの課題とされる水収支の部分を流出モデル側の結果を与えることで、陸域物質循環の計算精度が向上する可能性がある、といったメリットが存在する。しかし、多くの場合、両モデルは個別に異なる研究者により開発されるため、例えば開発環境が異なる（C言語やFortran、WindowsやLinuxなど）、などといった課題が生じるため、簡単には両者を結合することは困難である。一方、後者のオフライン結合では、オンライン結合のメリットを反映するには、「流出モデル（水収支の計算を実施、共有）=>陸域物質循環モデル（物質循環の計算を実施、共有）=>流出モデル（水・物質流出量の計算を実施）」といったような複数回のやり取りが必要となるといったデメリットが存在する。しかし、それぞれ個別に計算を実行するため、オンライン結合のデメリットである開発環境の違いなどといった点は、モデル開発者が互いの結果を反映できるように個々にモデル構造を改良するのみで済むため、大きなデメリットとはならない。そこで本研究では、陸域物質循環モデルと流出モデルを結合する初期段階として、まずはオフライン結合により両モデルを結合させることとした。

本研究では、本年度は陸域物質循環モデルによって計算される土壤内における物質（本研究では、窒素濃度を対象）を流出モデルにおいて入力値と出来るよう、まずはデータ整備の手法を構築した。本研究で用いた LANDIS-II における空間情報は投影座標系（m 単位、本研究では 100 m x 100 m で計算）であり、一方の流出モデル（DHM）は地理座標系（緯度・経度、本研究では約 100 m x 100 m となる秒数で計算）で計算されるため、図-8 のように空間座標系と地理座標系で出力される座標値が異なる。

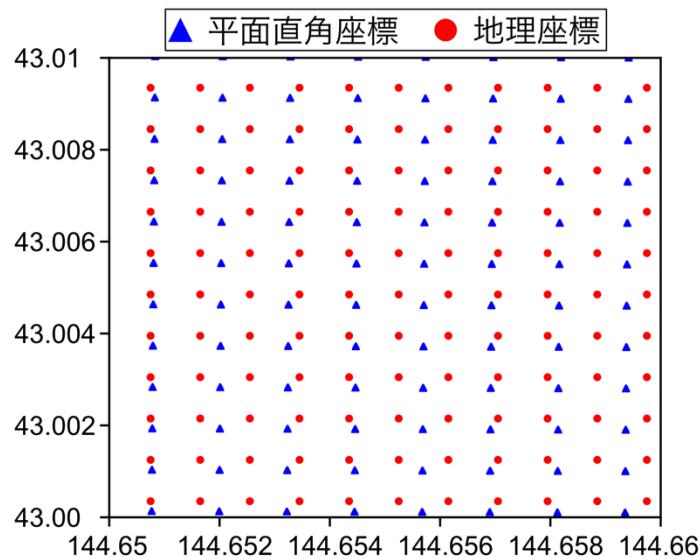


図-8 座標系の違いによる出力座標値。（青三角：平面直角座標系、赤丸：地理座標系）

そのため、LANDIS-II で計算される出力値をそのまま DHM に入力することが出来ず、空間情報の変換を行う必要がある。空間情報の変換や異なる空間スケールに対するデータ作成などは、例えば ArcGIS のような GIS ソフトウェアを利用することで簡単に解決することができる。しかし、本研究のように時系列データを扱う場合は、GIS ソフトウェアなどで作業することは非常に労力のいる作業となり効率が悪くなってしまう。そのため、時系列データを扱う際には、自動化出来るシステムを構築する

ことが重要となる。そこで本研究では、プログラミング言語である python を利用することで、空間情報の変換および LANDIS-II の計算値から DHM の入力値を作成する手法を構築した。

本システムを構築するに当たり、python の複数のライブラリを利用した。まず空間情報の変換には、pyproj というライブラリを用いることで投影座標系から地理座標系へ変換した。具体的な例としては、下記のようなスクリプトを利用した（式(19)–(21)）。

$$\text{jgd2000} = \text{pyproj.Proj(init='EPSG:4612')}$$
 (19)

$$\text{rect13} = \text{pyproj.Proj(init='EPSG:2455')}$$
 (20)

$$\text{lon, lat} = \text{pyproj.transform(rect13, jgd2000, xx, yy)}$$
 (21)

ここで、jgd2000, rect13 は座標系（rect13 は平面直角座標系 13 系）、EPSG は各座標系のコード、lon は経度、lat は緯度、xx は x 軸の距離、yy は y 軸の距離である。

次に、LANDIS-II からの出力値は数値データではなく、GIS 等で用いられるようなラスターデータ（tif ファイル）として出力されるため、DHM への入力データとして読み込むには数値へと変換する必要がある。そこで tifffile というライブラリを用いることでラスターデータを数値データに変換した。具体的な例としては、下記のようなスクリプトを利用した（式(22)）。

$$\text{image} = \text{tifffile.imread('filename')}$$
 (22)

ここで、filename は読み込むファイル名（ディレクトリも含めた相対参照あるいは絶対参照が必要）である。

ここまででの作業により、LANDIS-II の出力値の空間情報の変換ならびに数値データへの変換が可能となる（以下、変換済みの LANDIS-II のデータを LANDIS-II geo とする）。ただし、空間情報の変換に伴い、LANDIS-II geo の座標値（ここでは緯度・経度）が DHM の座標値と異なる。そのため、本研究では KD-Tree 法により DHM の座標値に対してある距離範囲内にある LANDIS-II geo のデータを利用し、IDW 法（Inverse Distance Weighting、逆距離荷重法）により、LANDIS-II の出力値を DHM へ入力可能なデータを自動的に作成するシステムを構築した。具体的には、KD-Tree 法は scipy ライブラリの中の spatial というツール、IDW 法に用いる距離の計算は pyproj というライブラリを利用した。具体的な例は下記のようなスクリプトを利用した（図-9）。

```
grs80 = pyproj.Geod(ellps='GRS80')

tree = ss.KDTree(grid)
a = tree.query_ball_point([xxx, yyy, zzz], search_area)

for ii in range(0, len(a)):
    azimuth, bkw_azimuth, distance = grs80.inv(lon[a[ii]], lat[a[ii]], xxx, yyy)
    dis = 1.0 / distance
    up += dis * LANDISgeo[a[ii]]
    down += dis

output = up / down
```

図-9 KD-Tree 法および IDW 法を用いた DHM 入力用データ作成方法の例

ここで、grs80 は GRS80 横円体、ss.KDTree は KD-Tree 法、grid は探索元（ここでは LANDIS-II geo）の座標情報、tree.query_ball_point はある座標値に対して任意の範囲に存在するデータの探索（1 次元で用意されたデータの中で探索された番号が “a” に出力される）、xxx は探索先（ここでは DHM）における x 軸の座標値（経度）、yyy は探索先（ここでは DHM）における y 軸の座標値（緯度）、zzz は探索先（ここでは DHM）における z 軸の座標値（高さ、ここでは高さ情報はないので 0 となる）、search_area は[xxx, yyy, zzz]の点からの探索する距離範囲（ここでは地理座標で指定）、azimuth は方位

角, `bwx_azimuth` は逆方向の方位角, `distance` は 2 点間の距離, `lon` は探索元（ここでは LANDIS-II geo）の経度, `lat` は探索元（ここでは LANDIS-II geo）の緯度である。

本手法の変換精度を検証するため、変換前のデータと変換後のデータを比較した結果を図-10 に示す。ここでは図-5 と同様に別寒辺牛川流域の現在（2016 年）における植生分布を示している。変換前と本手法による変換後の両者を比較しても、問題なく同様な結果を示していることが分かる。そのため、ここまで示したスクリプト例等を利用することで、時系列データとして出力される複数の LANDIS-II の出力値を自動的に DHM の入力データへ変換することが可能となった。これにより、陸域物質循環モデル（LANDIS-II）と流出モデル（DHM）のオフライン結合に向けたシステムを構築することが出来た。

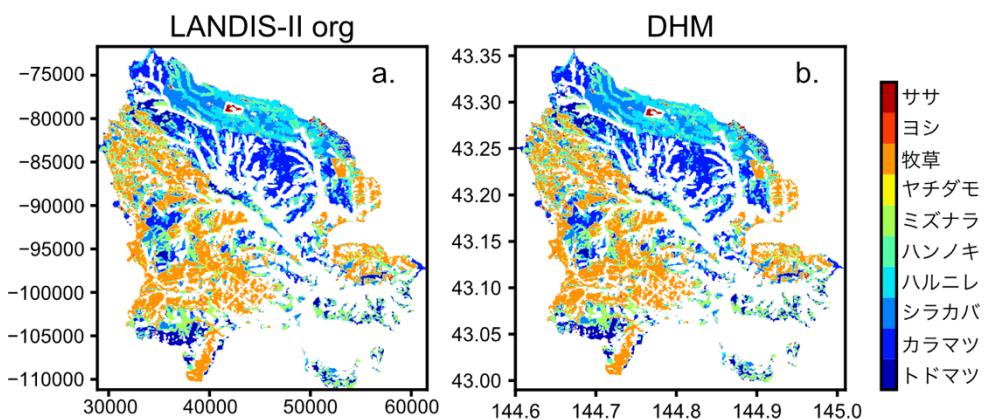


図-10 現在（2016 年）における LANDIS-II による出力値（変換前）と本研究で構築した変換手法による空間情報の変換結果（変換後）の植生分布（a：変換前, b：変換後）

6. まとめ

本研究において実施および得られた結果を以下にまとめる。

- 1) CCI (Climate Change Indices) を用いることで、別寒辺牛川流域における気候が既に気候変動の影響を受けているのか、基礎的な評価を行った。その結果、気温においては顕著な変化が見られないものの、短時間降水量および総降水量では優位に増加している傾向が確認された。そのため、降水量、降水パターンにおいては、気象観測が開始されてから現在にかけて、既に気候変動の影響が現れていることが確認された。
- 2) d4PDF（地球温暖化に資するアンサンブル気候予測データベース）を利用することで、将来気候における降水量と気温が現在気候と比較し、どのように変化する可能性があるかについて、基礎的な検討を行った。その結果、降水量では夏季（8 月、9 月）に現在気候と比較して大きく増加する可能性が示唆された。さらに、冬季（12 月から 3 月）の月平均気温が氷点下から約 0 °C 付近まで上昇しており、冬季の降水は、降雪よりも降雨が卓越して発生する可能性が示唆された。また予測幅の下限値は差がないものの、将来気候における予測幅の上限値が現在気候よりも大きくなっているため、冬季の降水量も大きくなる可能性が高いと推察された。
- 3) 陸域物質循環モデルとして森林景観モデル LANDIS-II を利用することにより、陸域における物質循環の検討を行う検討として植生動態に関する検討を実施した。それにより、気候・社会シナリオの変化によって流域内の植生動態がどのように推移する可能性があるかについて検討した。これにより、植生動態の変化に伴う陸域における物質循環を推定可能となった。
- 4) 本研究において改良した分布型流出モデルを用いることで、流域における水・物質流出機構推定に向けた検討を実施した。なお本研究では、別寒辺牛川流域における水位および流量の観測が本年度から実施されたため、水位・流量の関係性についての検証が不十分であったため、本年度は別寒辺牛川流域の隣に位置する尾幌川流域を対象に、モデルの精度検証を実施した。その結果、観測流量

として利用するデータを事前に精度検証も含めて確認する必要があることが、改めて確認された。また、釧路建設管理部による水位（水深）を用いて流出モデルのパラメータ同定を行った結果、構築した流出モデルを用いることで観測値の洪水ピークや水深の挙動を計算値が再現できることが確認された。

- 5) スクリプト言語である `python` および複数のライブラリを用いることで、陸域物質循環モデル（LANDIS-II）と流出モデル（DHM）をオフライン結合するためのデータ整備を自動的に行うことが出来るシステムを構築した。

また、本研究で得られた結果を踏まえて、今後は以下のような方針で検討を進めていく予定である。

- i. 陸域物質循環モデルとして用いる LANDIS-II による陸域における物質循環（本研究では主に窒素）について、観測値と比較することによりの精度検証を行い、本モデルの高精度化を進める。
- ii. 別寒辺牛川流域において観測される水位および流量の検証を十分に行った後、観測流量を基に本研究で構築した分布型流出モデルの精度検証を改めて実施する。
- iii. 構築した陸域物質循環モデルと分布型流出モデルを結合することにより、過去に発生した極端イベントを対象に、陸域からの水・物質流出量を推定し、厚岸湖・厚岸湾の生態系に与える影響を評価する。
- iv. 本年度実施した LANDIS-II において気候・社会シナリオの変化を踏まえた将来予測と同様なシナリオを分布型流出モデルにも考慮することで、陸域からの水・物質流出量の変化が、厚岸湖・厚岸湾の生態系にどのような変化を与えるかについて評価する。

上記を実施することで、別寒辺牛川流域および厚岸湖・厚岸湾の生態系を踏まえた、持続的な流域環境の保全に資する検討が可能となる。これらの検討で得られる結果については隨時、地域住民も含め、社会へアウトリーチしていくことで、より良い社会となるよう貢献していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 小尻利治・東海明宏・木内陽一：シミュレーションモデルでの流域環境評価手順の開発，京都大学防災研究所年報，第 41 号 B-2, pp.119-134, 1998.
- 2) Wang, L., Koike, T., Yang, K., Jackson, T. J., Bindlish, R. and Yang, D. : Development of a distributed biosphere hydrological model and its evaluation with the Southern Great Plains Experiments (SGP97 and SGP99), *J. Geophys. Res.-Atmos.*, Vol.114, D08107, 2009, DOI:10.1029/2008JD010800.
- 3) Wang, L., Koike, T., Yang, K. and Yeh, P. : A ssessment of a distributed biosphere hydrological model against streamflows and MODIS land surface temperature in the upper Tone River Basin, *Journal of Hydrology*, Vol.377, pp.21-34, 2009.
- 4) Takata, K., Emori, S. and Watanabe, T. : Development of the minimal advanced of the surface interaction and runoff, *Global Planet Change*, Vol.38, pp.209–222, 2003.
- 5) Pokhrel, Y., Hanasaki, N., Koirala, S., Cho, J., Yeh, P. J. F., Kim, H., Kanae, S. and Oki, T. : Incorporating anthropogenic water regulation modules into a land surface model, *J. Hydrometeor.*, pp.255-269, 2012.
- 6) Ito A, Oikawa T, 2002. A simulation model of the carbon cycle in land ecosystems (Sim-CYCLE): a description based on dry-matter production theory and plot-scale validation. *Ecological Modelling* 151: 143-176.
- 7) Ito A, Inatomi M. 2012. Use of a process-based model for assessing the methane budgets of global terrestrial ecosystems and evaluation of uncertainty. *Biogeosciences* 9: 759-773, doi:10.5194/bg-9-759-2012.
- 8) Lindström G, Pers C P, Rosberg R, Strömqvist J, Arheimer B. 2010. Development and test of the HYPE (Hydrological Predictions for the Environment) model – A water quality model for different spatial scales, *Hydrology Research* 41(3): 295-319.
- 9) Arnold J G, Kiniry J R, Srinivasan R, Williams J R, Haney E B, Neitsch S L. 2012. Soil & Water Assessment Tool Input/Output Documentation Version 2012.
- 10) 村岡裕由, 丸谷靖幸, 永井信, 山地森林の炭素循環と生態系機能の環境応答に関する長期・複合的研究の展望, 地学雑誌, 2018. (印刷中)
- 11) 田中智大, 渡部哲史, 小瀬峻司, 林善晃, 丸谷靖幸, 岩嘉哉, 山崎大, 木村匡臣, 田上雅浩, 江草智

- 弘, 橋本雅和, 仲吉信人, 最前線の水文・水資源学～WACCA 世代の挑戦～, 水文・水資源学会誌, Vol.31, No.6, pp.509-540, 2018.
- 12) Scheller RM, Domingo JB, Sturtevant BR, Williams JS, Rudy A, Gustafson EJ, Mladenoff DJ (2007) Design, development, and application of LANDIS-II, a spatial landscape simulation model with flexible temporal and spatial resolution. *Ecol Model* 201(3–4):409–419. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2006.10.009>.
 - 13) 丸谷靖幸, 原田守啓, 伊東瑠衣, 川瀬宏明, 大樂浩司, 佐々木秀孝, 気候変動影響評価に向けた降雨分布の空間解像度が流出解析に与える影響に関する検討, 土木学会論文集 G (環境), Vol.74, No.5, pp.147-156, 2018.
 - 14) Karl, T. R., Nicholls, N. and Ghazl, A. : CLIVAR/GCOS/WMO workshop on indices and indicators for climate extremes: Workshop summary, *Climate Change*, Vol.42, pp.3-7, 1999.
 - 15) Peterson, T. C. : Climate change indices, WMO Bulletin, Vol.54, pp.83-86, 2005.
 - 16) Mizuta, R., A. Murata, M. Ishii, H. Shiogawa, K. Hibino, N. Mori, O. Arakawa, Y. Imada, K. Yoshida, T. Aoyagi, H. Kawase, M. Mori, Y. Okada, T. Shimura, T. Nagatomo, M. Ikeda, H. Endo, M. Nosaka, M. Arai, C. Takahashi, K. Tanaka, T. Takemi, Y. Tachikawa, K. Temur, Y. Kamae, M. Watanabe, H. Sakaki, A. Kitoh, I. Takayabu, E. Nakakita, and M. Kimoto: Over 5,000 years of ensemble future climate simulations by 60-km global and 20-km regional atmospheric models, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 98(7), 1383-1398, 2017.
 - 17) 文部科学省他 : 地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース「利用手引き（抜粋）」, http://www.miroc-gcm.jp/~pub/d4PDF/img/d4PDF_Chap1_20151214.pdf.
 - 18) Mizuta R, Yoshimura H, Murakami H, Matsueda M, Hirokazu E, Ose O, Kamiguchi K, Hosaka M, Sugi M, Yukimoto S, Kusunoki S, Kitoh A: Climate simulations using MRI-AGCM3.2 with 20-km grid. *J. Meteor. Soc. Japan.* 90A, 233-258, 2012.
 - 19) Sasaki H, Murata A, Hanafusa M, Oh'izumi M, Kurihara K: Reproducibility of present climate in a non-hydrostatic regional climate model nested within an atmosphere general circulation model. *SOLA*, 7, 173–176, 2011, doi:10.2151/sola.2011-044.
 - 20) Murata A, Sasaki H, Hanafusa M, Kurihara K: Estimation of urban heat island intensity using biases in surface air temperature simulated by a nonhydrostatic regional climate model. *Theor. Appl. Climatol.* 112, 351–361, 2013, doi: 10.1007/s00704-012-0739-2.
 - 21) 渡部哲史, 内海信幸, 鼎信次郎, 瀬戸心太, 沖大幹, 平林由希子: GCM, RCPシナリオ, バイアス補正手法の選択が日降水量極値の将来予測に与える影響の考察, 土木学会論文集B1(水工学) , 69, I_385-I_390, 2013.
 - 22) Shifley SR, He HS, Lischke H, Wang WJ, Jin W, Gustafson EJ, Thompson JR, Thompson FR III, Dijak WD, Yang J (2017) The past and future of modeling forest dynamics: from growth and yield curves to forest landscape models. *Landsc Ecol* 32(7):1307–1325. <https://doi.org/10.1007/s10980-017-0540-9>.
 - 23) Dai E, Wu Z, Wang X, Fu H, Xi W, Pan T (2015) Progress and prospect of research on forest landscape model. *J Geogr Sci* 25:113–128. <https://doi.org/10.1007/s11442-015-1157-z>.
 - 24) Scheller RM, Hua D, Bolstad PV, Birdsey RA, Mladenoff DJ (2011) The effects of forest harvest intensity in combination with wind disturbance on carbon dynamics in a Lake States mesic landscape. *Ecol Model* 222:144–153. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2010.09.009>.
 - 25) Tanaka, T. and Tachikawa, Y. : Testing the applicability of a kinematic wave-based distributed hydrologic model in two climatically contrasting catchments, *Hydrological Science Journal*, Vol.60, pp.1361-1373, 2014, DOI:10.1080/02626667.2014.967693.
 - 26) 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻水文・水資源学分野 : 1K-FRM/DHM ,

<http://hywr.kuciv.kyoto-u.ac.jp/products/1K-DHM/1K-DHM.html>

- 27) 立川康人・永谷言・寶馨：飽和，不飽和流れの機構を導入した流量流積関係式の開発，水工学論文集，第48卷，pp.7-12, 2004.
- 28) Thornthwaite, C. W. : An approach toward a rational classification of climate, *Geograph. Rev.*, Vol.38, pp.55-94, 1948, DOI:10.2307/210739.
- 29) 自然資本・生態系サービスの将来シナリオ予測のための社会・生態システムの統合シミュレーションモデルの開発，松井孝典，橋本禪，齊藤修，生産技術，Vol. 70, No. 2, 2018.
- 30) Haga C, Inoue T, Hotta W, Shibata R, Hashimoto S, Kurokawa H, Machimura T, Matsui T, Morimoto J, Shibata H (2018) Simulation of Natural Capital and Ecosystem Services in a Watershed in Northern Japan Focusing on the Future Underuse of Nature -By Linking Forest Landscape Model and Social Scenarios-, *Sustainability Science*, <https://doi.org/10.1007/s11625-018-0623-9>.
- 31) 北海道釧路総合振興局釧路建設管理部, 平成16年度 河川情報システム外 観測局観測設備点検委託の内 尾幌川水位雨量観測局移設に伴うH-Q式作成と管理水位設定 報告書, 2004.
- 32) Houska, T., Kraft, P., Chamorro-Chavez, A. and Breuer, L.: SPOTting Model Parameters Using a Ready-Made Python Package, *PLoS ONE*, 10(12), e0145180, doi:10.1371/journal.pone.0145180, 2015.
- 33) Duan, Q., Sorooshian, S. and Gupta, V. K. : Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models, *Journal of Hydrology*, Vol.158, pp.265-284, 1994, DOI:10.1016/0022-1694(94)90057-4.

参考文献

本研究は、厚岸湖・別寒辺牛湿原学術研究奨励補助金による助成を受けて実施された。ここに記して感謝の意を表する。