

〈総説〉

## 陸域と海域の物質循環を通じた健全な流域圏環境の評価 —知床半島を例にして—

丸谷靖幸\*, 永井 信\*\*, 渡部哲史\*\*\*, 藤岡悠一郎\*\*\*

**Integrity of river basin environment based on the biogeochemical cycle between the terrestrial and coastal area**

**Yasuyuki MARUYA\*, NAGAI Shin\*\*, Satoshi WATANABE \*\*\*, Yuichiro FUJIOKA\*\*\***

\*Graduate School of Engineering, Kyushu University, 744 Motoooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395, Japan

\*\*Earth Surface System Research Center, Research Institute for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), 3173-25 Showa-machi, Kanazawa-ku, Yokohama 236-0001, Japan

\*\*\*Faculty of Social and Cultural Studies, Kyushu University, 744 Motoooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395, Japan

### Abstract

Recently, climate and social change have impacted on the river basin environment, it is important to conserve a sustainable river basin environment. However, in previous studies, the evaluation of the integrity of river basin has not been examined adequately. Therefore, we made an attempt to propose the method which is necessary to estimate the biogeochemical cycle between the terrestrial and coastal area in long-term for the Shiretoko Peninsula has a unique biogeochemical cycle system as a target field. We compiled the challenges and the perspective based on “climate and social change from previous to the current” and “the estimation method of the biogeochemical cycle between the terrestrial and coastal area” in this paper.

**Keywords:** climate change; social change; river basin, biogeochemical cycle between terrestrial and coastal area; Shiretoko peninsula

---

\*九州大学 大学院工学研究院環境社会部門 〒819-0395 福岡市西区元岡 744

\*\*国立研究開発法人海洋研究開発機構 地球環境部門 地球表層システム研究センター 〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町 3173-25

\*\*\*九州大学 大学院比較社会文化研究院 〒819-0395 福岡市西区元岡 744

## 1. はじめに

近年、気候システムの変化（極端気象や異常気象の頻発や地球温暖化など）だけではなく、社会システムの変化（経済活動や人口動態にともなう土地利用土地被覆変化など）が、人類が生活する流域圏に対して大きな影響を及ぼしている<sup>1)</sup>。これらのメカニズムの解明と、その知見に基づいた各問題に対する緩和策と適応策の構築は社会的にみて重要な課題となる。気候変動に着目すると、日本国内では2018年12月1日に気候変動適応法<sup>2)</sup>が施行され、自治体や流域圏スケールでの気候変動を踏まえた環境保全の検討が急務となっている。既往の多くの研究では、特に近年の気候変動や人間活動に伴う影響は将来に向けて長期的に生じる可能性が指摘されている一方、現在（数年から数10年前の過去を含む）の現象を踏まえた環境保全に関する議論に留まる<sup>3),4)</sup>。人間活動が将来へ与える影響を評価した研究も限定的に存在するが、その多くは水循環や全球スケールを対象とした検討である<sup>5),6)</sup>。しかし、例えば流域圏（一辺数kmから100 kmスケール）における自然環境（以下、流域圏環境）は、数10、数100年といった長期的な諸要因（気候や人間活動の変化など）の影響の蓄積により形成されるため、現在の流域圏環境が必ずしも健全（最適）であるとは限らない。つまり、対象流域にとって健全な環境の理解・予測を達成するためには、過去-現在-将来に亘る検討が必要不可欠となる。そのため、観測データが乏しい過去も含め、将来に亘る流域圏環境の変化を評価・予測することが、重要な課題となる。しかし、既往の多くの研究では、現地観測が実施された現在における流域圏からの流出のみに着目した研究であり<sup>7),8)</sup>、とりわけ陸域と海域間における循環、さらにはその変遷や各時代における健全性の評価などの検討は行われていないという問題点がある。

流域圏の健全性評価において重要な点として、物質循環があげられる。物質循環は気候システムの変化や社会システムの変化の影響を受け、長時間かけて変化する<sup>9)</sup>。その変化は、河川水質も含む流域環境、生態系システムにも影響を与え、気候システム、社会システムへさらに影響を与える、といった負の循環（場合によっては正の循環の場合もある）が存在する。そのため、流域圏における物質循環を考えることは、健全な流域圏環境の評価を行う上で、非常に重要となる。例えば窒素に着目すると、窒素は生態系の必須栄養素の一つである一方、水質汚濁の原因物質、かつ温室効果ガスの一つである一酸化二窒素の源でもある。このため、窒素循環機構の長期的な変化傾向の理解・予測の深化は、流域圏の健全性評価だけではなく、気候変動影響評価ならびに緩和策研究の発展に貢献すると考えられる。そのため、持続可能な流域圏環境（特に水環境）の実現には、自然生態系・人類にとって重要な水・物質（例えば窒素など）動態を考慮し、陸域（山地森林）-河川といった流域圏（一辺数 kmから数10 km スケールでの流域）の諸現象の解明が必須である<sup>9),10)</sup>。ただし流域圏の土地利用土地被覆は長期的に変化し、その結果、流域から沿岸域へ流出する水・物質動態に影響を与えるため、今後の流域圏環境保全を行うには、気候システムだけではなく社会システムの変化も把握することが非常に重要となる。しかし、流域圏における循環機構の長期的変化について解明・予測に取り組んだ研究は著者らが知る範囲では、ほとんど存在しない。

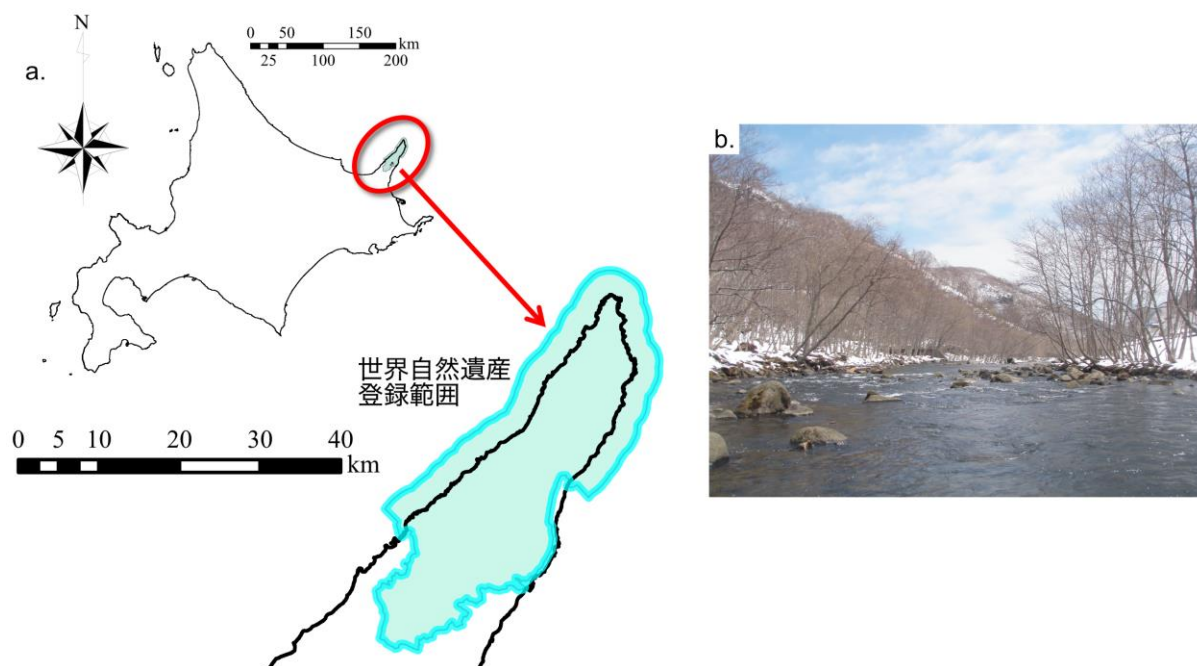
そこで本稿では、我が国において豊かな自然環境、また特徴的な陸域-海域の物質循環を有する北海道知床を中心として、健全な流域圏環境の保全に向けて、長期的な陸域と海域の物質循環を推定するために必要な手法論の提案を試みる。具体的には、第2章で北海道知床の概要、第3章で過去から現在に亘り生じている気候および社会システムの変化について、第4章で陸域-海域の物質循環の推定手法について、第5章で今後の課題や将来展望をまとめる。なお、本稿で対象とする流域スケールは一辺数 km から数10 km 程度である。

## 2. 北海道知床に関する概要

シマフクロウやシレットコスミレといった多くの希少種が存在するなど生物多様性が高く、多種多様な陸上生態系と沿岸海域における海洋生態系との間の栄養塩循環が生態系を保持しているという特異性を持つ知床半島は、2005年7月17日に日本では3件目となる世界自然遺産に登録された（<https://www.env.go.jp/nature/isan/worldheritage/index.html>）。同半島の海岸線から約3 km 沖までの範囲が登録地域となっている（Fig. 1）。知床は流水が漂着する海岸として北半球では最南端に位置しており、この流水とともに輸送される豊富な栄養塩が知床半島における生態系に大きく寄与しているという点も、世界自然

遺産登録の大きな要因となっている<sup>11)</sup>。

しかし、近年では IPCC AR6<sup>12)</sup>で指摘されているように、気候変動の影響に伴い気温上昇や降水パターンの変化が顕在化しており、その影響は知床半島でも生じている。知床半島が面するオホーツク海では、流水輸送量の減少や接岸期間の短縮が指摘されており<sup>13),14)</sup>、それに伴い海域から陸域への栄養塩還元量の低下が懸念されている<sup>15),16)</sup>。現在では上述のように陸域生態系と海域生態系の相互関係に基づく特徴的な物質循環が保持されているが、このような影響は短期的ではなく長期的に生じる。将来における知床半島における栄養塩循環の変化は、特異的な生態系システムの崩壊を促進させ、その結果最悪なケースとして世界自然遺産登録から抹消される可能性も懸念される。そのため、過去から現在に亘って保全されている知床半島における陸域と海域間における物質（栄養塩）循環を理解することは、将来に向けてこの環境を保全していく上で、非常に重要な課題となる。



**Fig. 1** a) Shiretoko peninsula and world natural heritage area, b) The photo of Rausu river on April 28, 2009, was taken by Y. Maruya who is the corresponding author in this paper.

### 3. 気候および社会システムの変化について

#### 3.1 気候変化について

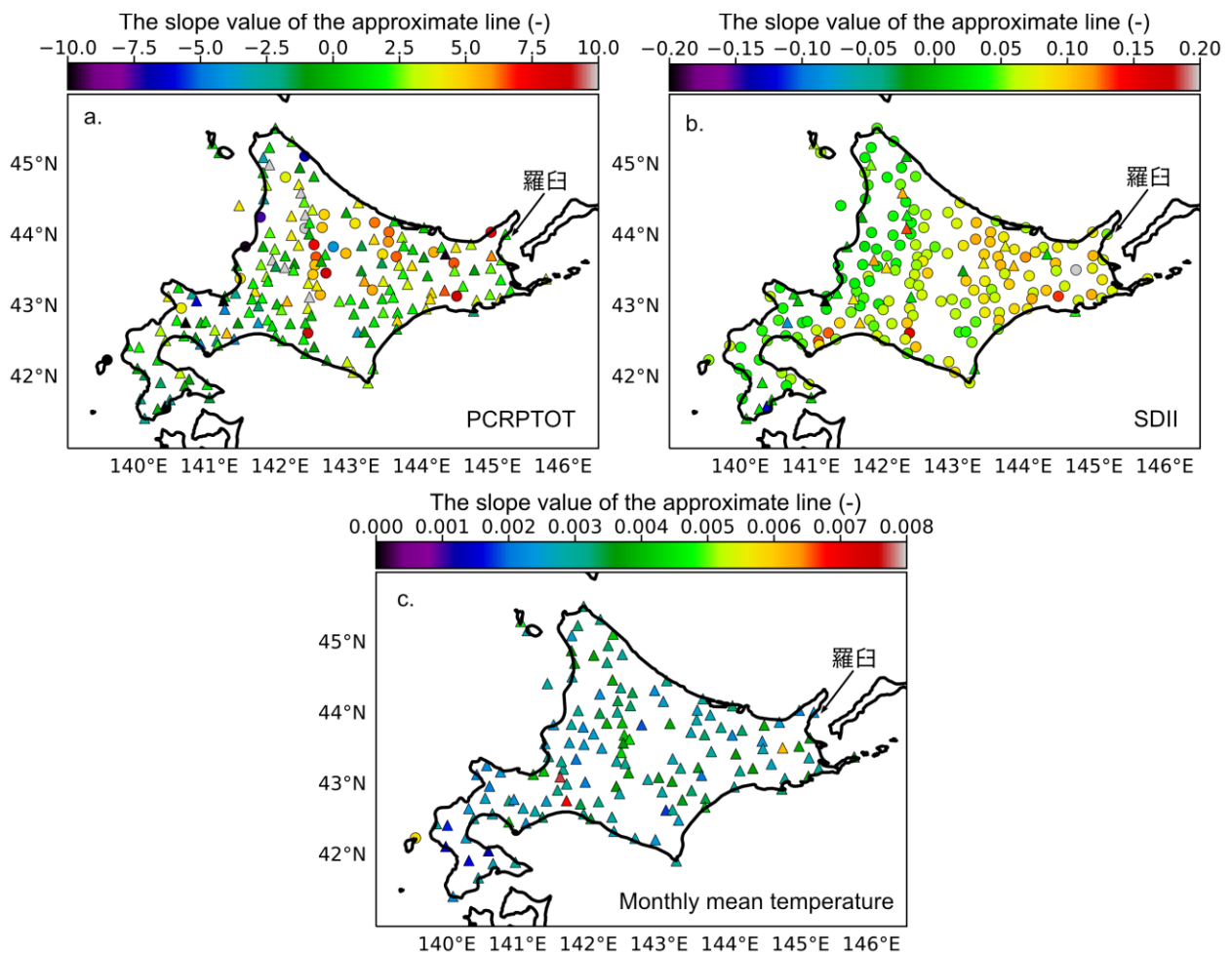
流域圏における物質輸送は主に降雨に伴う流出によって生じる。つまり、長期的な降水活動の変化を理解することは、陸域と海域間の物質循環を評価する上でも非常に重要となる。一例として、北海道全域を対象に、気象庁の web<sup>17)</sup>から取得可能な降水量および気温の観測開始年から 2020 年までの観測値を用い、北海道全域を対象とした平均的な変化と知床半島に位置する羅臼観測所（以下、羅臼とする）を対象とした局地的な変化との対応関係を調査した。丸谷ら<sup>18)</sup>と同様に降水量に関しては気候変動の傾向を表す指標 Climate Change Indices<sup>19),20)</sup>の内、年総降水量（Total Precipitation: PRCPTOT）および単純日降水量強度指標（SDII: Simple Daily precipitation Intensity Index）、気温に関しては月平均気温に関する解析を実施し、長期的な変化を分析した。計算式は参考文献を参照いただきたい<sup>19),20)</sup>。

北海道全域における解析結果を **Fig. 2** に示す。カラーバーは各指標の計算結果から推定された傾き（年増加比）の値を示している。長期的な変化トレンドの評価は、丸谷ら<sup>17)</sup>と同様に Mann-Kendall 検定（有意水準（P 値）5 %）を適用した。また丸谷ら<sup>18)</sup>でも注意点として述べられているが、Amrhein et al.<sup>21)</sup>は、ある P 値以上の場合に「有意な差がないため、結果が偽である（本研究の場合、気候変化が生じていない）」と、統計的評価のみで解析結果を断定するべきではないと指摘している。そこで本研究では、丸谷ら<sup>18)</sup>と同様

に有意水準 5 %で棄却された、つまり気候変化が顕著であると考えられる点 (○) とそうではない点 (△) の区別に Mann-Kendall 検定を用いた。

まず北海道全域における降水量に着目すると、一部の地域では降水量が減少傾向を示す地域も存在するが、多くの地点で降水量が増加する可能性を示している (Fig. 2a, b). また特徴的な点として、PRCPTOT では大多数の地点で気候変化が顕著ではない (Fig. 2a) 一方、降水発生日当たりの日平均降水量を示す SDII では大多数の地点で気候変化が顕著に生じている結果を示している (Fig. 2b). また羅臼では、北海道全域と比較すると PRCPTOT では年増加比は小さいものの、SDII は平均的な年増加比と同程度であることが分かる。以上の結果より、降水量の変化は年降水量ではなく、一回当たりの降水量に起因していることが確認された。陸域から流出する物質質量 (L) は流量 (Q) の関数であり、一般的に指数関数 ( $L=\alpha Q^\beta$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  は係数である) で表現される。つまり、SDII の増加は、出水時の流量の増加にも繋がるため、近年懸念されている気候変動に伴い、陸域からの物質流出量が増加する可能性が考えられる。

一方、気温に着目すると、北海道全域で月平均気温は顕著に変化していると示した地点は 1 地点のみであり、その他の地点では気温は上昇しているものの顕著な変化は現れていないことが確認された (Fig. 2c). また、羅臼も含み北海道全域でほとんどの地点で気温上昇率は同様であり、約  $0.048^\circ\text{C}/\text{年}$  の速度で上昇していることが分かる。評価期間の違いに注意は必要であるが、気象庁<sup>22)</sup>によると日本の平均気温は  $0.013^\circ\text{C}/\text{年}$  の速度で上昇していると言われており、北海道の気温上昇速度は非常に高いことが分かる。この気温上昇は流域圏における生態系に大きな影響を与えるため、流域圏環境保全を行うにはこれらの気温変化も踏まえた検討が重要となることが示唆される。



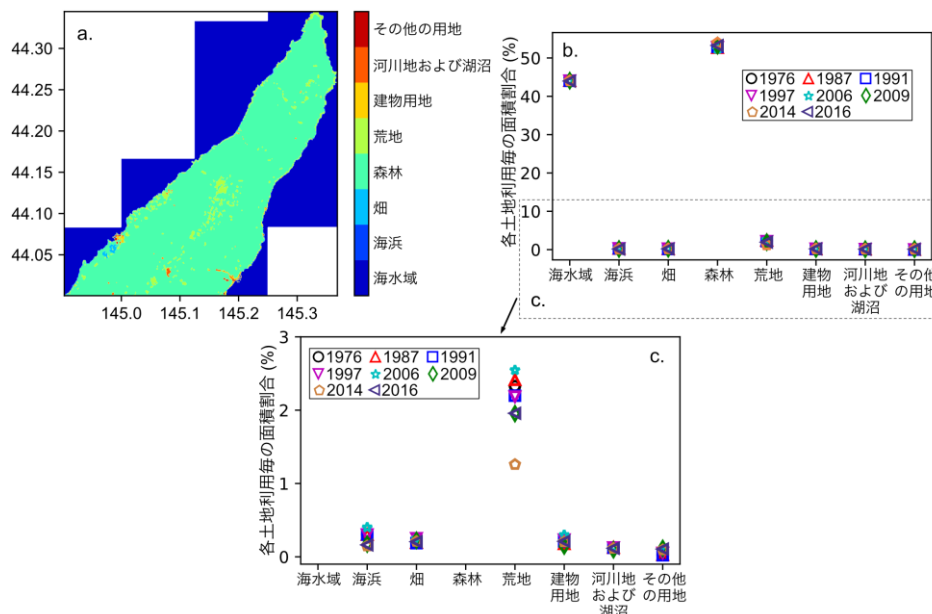
**Fig. 2** The result of a) PRCPTOT, b) SDII, and c) monthly mean temperature in the meteorological stations in Hokkaido from observation starting year to 2020. The circles, triangles, and color bar indicate the stations where were found a significant trend and not a significant trend and the slope values of the approximate line,

respectively. In the slope value, the negative and positive indicate a decreasing and an increasing trend, respectively.

### 3.2 社会変化について

#### (1) 土地利用変化について

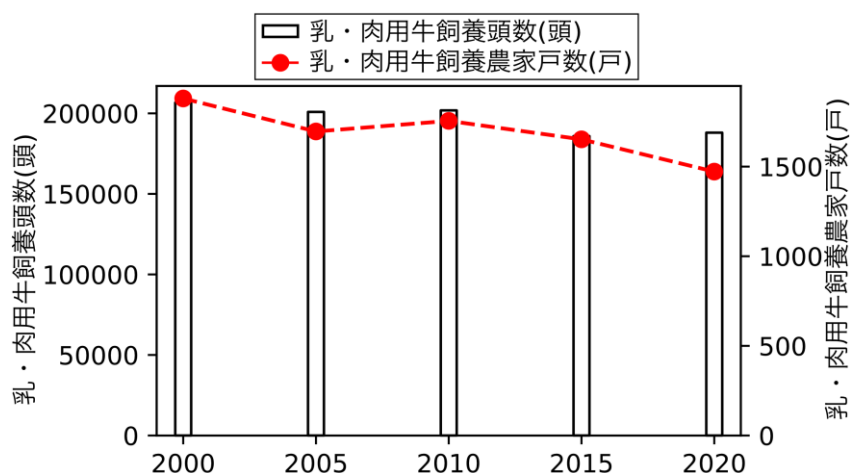
流域圏における土地利用の改変に伴い、元々存在していた水文学的性質や栄養塩類量を変化させたという研究も存在する<sup>23),24)</sup>。さらに、水文学的性質の変化に伴い陸域から海域への物質流出量も変化し、例えば物質流出量が増加し、沿岸域において赤潮が引き起こされる場合も存在する<sup>25)</sup>。さらに、陸域の土地利用の変化が海域生態系へ与える影響は、流域面積が大きくなるほど大きくなるという報告も存在する<sup>26)</sup>。そのため、海域の生態系に正あるいは負の影響を与え、陸域-海域の物質循環を変化させる可能性が考えられる。一例として、国土交通省国土数値情報で最も古く入手可能な1976年から近年に近い2016年の土地利用細分メッシュデータ（空間解像度：100 m）を用いて知床半島周辺の土地利用変化を調査した。なお、本稿では簡便に解析を行うため、国土交通省国土数値情報から入手したデータをそのまま利用しており、知床半島の陸域のみを抽出するといったデータ処理を行っていない。そのため、本解析結果の海水域の面積割合が大きく得られていることに注意されたい。2016年の土地利用分布を確認すると、知床半島周辺における土地利用の大部分は森林（約5割）であり、海水域と合わせると全体の9割程度を占めていることが分かる（Fig. 3a）。上述の通り知床半島は世界自然遺産に登録されているため、登録範囲は人間活動による影響がないため、全体として森林が多くの面積割合を占める。世界自然遺産登録されている範囲が多く存在するため、知床半島では土地利用分布の変化が小さい可能性があるものの、1976年から2016年の土地利用の変遷を確認した。知床半島の大部分は世界自然遺産登録されていることから、本研究で解析した範囲内において、長期的な土地利用変化は小さく、昔からの流域環境が保全されている地域が多く存在することが確認された。ただし全体の内、数%程度の占有面積割合ではあるものの、荒地の面積割合が変動していることが確認された。この変化は微小ではあるものの、知床半島に存在するいくつかの市町村において、酪農・農業などを営む人々の変化に伴い、耕作放棄などに伴って生じた変化である可能性が存在する。ただし、この微小な変化の傾向は一定ではなく、2014年が最も低く、その次の2016年では回復傾向を示しており、この変化が耕作放棄などによるもの以外の影響である可能性がある。例えば、土地利用細分メッシュデータの作成には、年により異なる衛星データが用いられているため、その違いによって判読結果が異なっている可能性も考えられる。そのため、この土地利用分布の微小な変化については、詳細な検討を今後行っていく必要があることを記しておく。なお、この土地利用細分メッシュデータの作成には、1976年、1987年は国土地理院発行の2万5千分の1地形図を基盤、1991年は衛星データ（Landsat）と2万5千分の1地形図、1997年は衛星データ（Landsat, SPOT）と2万5千分の1地形図、2006年は衛星データ（TERRA（Aster）, ALOS）、数値地図25000（地図画像）、2009年は衛星データ（ALOS など）と2万5千分の1地形図、2014年は衛星データ（SPOT, RapidEye）と数値地図電子国土基本図及び電子地形図25000（地図画像）、2016年は衛星データ（SPOT, RapidEye）と数値地図電子国土基本図及び電子地形図（タイル）といったように、異なる年で異なるデータを基に作成されている。ただし、全体の中で小さな土地利用の変化であったとしても負荷量（物質流出量）は、例えば1 km<sup>2</sup>が酪農地から荒地に変化した場合、数10分の1へ変化する可能性が存在する<sup>27)</sup>。そのため、流域圏環境の保全を行うには微小な変化であったとしても把握しておく必要性が示唆された。



**Fig. 3** a) The distribution of land use around Shiretoko peninsula in 2016, b) area ratio of each land use around Shiretoko peninsula, c) the enlarged view in Fig. 3b. The area of seawater body is shown too large in these figures since we used the original data directly from National Land Information Division, National Spatial Planning and Regional Policy Bureau, MLIT of Japan.

## (2) 酪農業および水産業の変化について

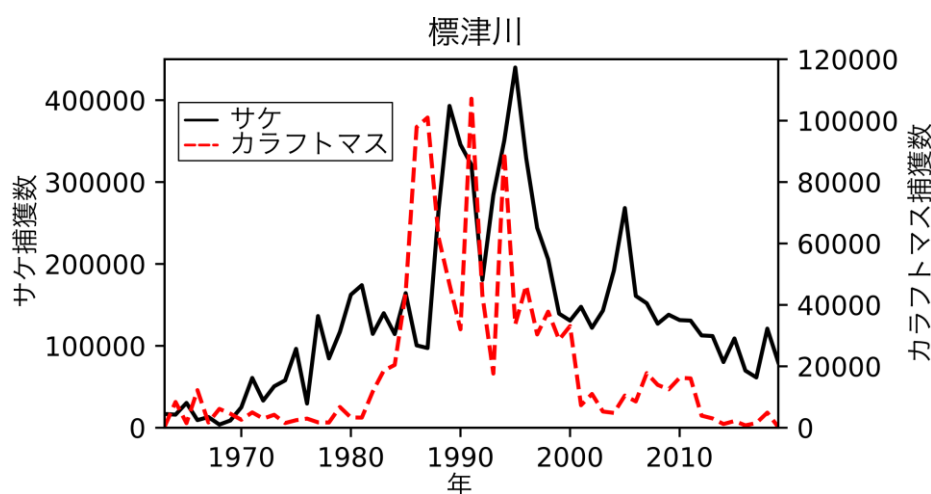
知床半島周辺における産業として酪農業と水産業の占める割合が高い。一例として、知床半島が含まれる振興局である根室振興局による乳・肉用牛飼養頭数、乳・肉用牛飼養農家戸数<sup>28)</sup>、および知床半島周辺で水産業が盛んである標津川におけるサケ・マスの捕獲数<sup>29),30)</sup>の長期変化を調査した。まず酪農業では2000年から飼養頭数が減少傾向にあったものの、近年は乳用牛飼養頭数の増加に起因して、飼養頭数が増加傾向にある<sup>28)</sup> (**Fig. 4**)。ただし、飼養戸数は近年の人口減少、少子高齢化等の影響もあり酪農業の担い手が年々減少し、1戸当たりの飼養頭数が増加傾向にあり令和2年では155.6頭となっている<sup>28)</sup> (**Fig. 4**)。飼養頭数の変化は、酪農地からの負荷量(物質流出量)の変化にも直結するため、このような社会変化の1つとして酪農業を含めた産業の変化も踏まえた、流域圏環境に与える物質循環の評価の重要性が示唆された。



**Fig. 4** The number of dairy and beef cattle and the farm households. The bars and red circles indicate the number of dairy and beef cattle farm households and the number of dairy and beef cattle, respectively.

続いて、長期継続的なデータが公開されている<sup>29),30)</sup>標津川におけるサケ・マスの捕獲数の長期変化を **Fig.**

5に示す。サケは1970年代、カラフトマスは1980年代からそれぞれ捕獲数は徐々に増加し、1990年代に最大となっている。これは人工孵化放流事業による効果や1975/76年のレジームシフトによる影響であると推測される<sup>9),31),32)</sup>。一方、最大値を取った以降はサケ・マスの捕獲数は減少傾向を示しており、2010年代は最大値の約4~5分の1程度の数となっている。上昇トレンドから減少トレンドに転じた要因としては、1998年以降に生じたレジームシフトによる影響である可能性が指摘されている<sup>9),31)</sup>。また、近年の急激な捕獲数の減少は、地球温暖化に伴う水温上昇や海洋環境の変化によるサケ・マスの生存率の低下、海域の上流に位置する流域における社会変化（土地利用土地被覆変化、一時的な水産資源の乱獲など）が要因として指摘されている<sup>9)</sup>。詳細は後述するが、永井らで示されているように、サケ・マスなどの遡河魚は陸域-海域間における物質循環を形成する上で、非常に重要な要素となる<sup>9)</sup>。陸域-海域間における物質循環は、河川・沿岸域の水環境の形成に影響を与えるだけでなく、陸域・海域生態系の形成にも非常に重要であり、またそれらの変化は全体に影響を及ぼすこととなる。そのため、河川・沿岸域の水環境ならびに陸域生態系を保全する上でも、サケ・マスなどの遡河魚の長期的な変化とその要因の理解が重要となる。



**Fig. 5** Historical record of catches of the chum and pink salmon in the Shibetsu river, Hokkaido, which is located around Shiretoko peninsula. The black and red broken lines indicate the number of chum and pink salmon caught, respectively.

#### 4. 陸域-海域の物質循環の推定手法

陸域（流域）では気象などの自然要因や土地利用などの社会的要因に伴い、森林や河川生態系と相互に複雑な関係を持つことで物質循環が形成されている<sup>33),34),35),36)</sup>。さらに、海域におけるサケ・マスなどの遡河魚の栄養が陸域に還元されることで、陸域と海域を繋いだ流域圏として物質循環が形成されていることが知られている<sup>7),10)</sup>。このため、陸域からの物質流出量ならびに陸域-海域間の物質循環を解明する手法を理解することは重要である。そこで本章では、陸域において気象などの自然要因に伴い生じる物質流出量の推定手法と陸域-海域間の物質循環推定手法をまとめる。

##### 4.1 陸域から海域への物質流出量の推定手法

陸域では、森林や植物などの陸域生態系の成長に伴い、大気との間で鉛直方向の物質循環が生じている<sup>37),38)</sup>。陸域では特定の範囲内において生成された物質が水文過程に則り下流へと流出する<sup>39),40)</sup>。ここで生じる物質流出は河川や海域生態系の栄養素にもなるため重要な役割を担っている<sup>41)</sup>。そのため、この物質流出量を推定することは流域圏環境保全を行う上で重要となる。そこで本節では、既往の研究で用いられている陸域から海域への物質流出量の推定手法をまとめることとする。

1つ目は、河川流量（Q）と物質流出量（物質質量：L）の関係式を用いるL-Q式があげられる。陸域からの物質流出量に影響を与える要因として、3.1節で示したように自然要因である降水量に基づく出水に伴う

流出が考えられる。降水に伴って生じる出水（河川流量： $Q$ ）と物質量（ $L$ ）は 3.1 節でも述べたように一般的に指数関数（ $L=\alpha Q^\beta$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ は係数である）で表される。この係数の内、 $\beta$ は一般的に0から2の値を取るとされ、知床半島のような山地流域では $\beta$ は2に近い値を示すことが多い<sup>7,10</sup>。気候変動により洪水規模が増加した場合、流量の増加の二乗で物質流出量も増加することとなるため、陸域から流出する物質流出量が極端に増加し、河川・海域生態系に大きな影響が生じる可能性が示唆される。L-Q 式はこのような物質流出量の変化を河川流量を測定・推定することにより簡便に把握することが出来る。ただし、L-Q 式は様々な出水規模における河川流量と物質流出量の観測値に基づき作成する必要があるため、長期的な観測データが必要となる。さらに、観測で経験した規模以上の出水が生じた場合は外挿となってしまうため、推定精度に誤差が生じるという課題も存在する。このため、本手法を利用する際、洪水時における観測が実施されていない場合は、外挿された推定結果となるため、過大あるいは過小に推定された値であることを理解しておく必要がある。

2 つ目は、発生源とされる各土地利用分類において単位面積当たりの物質発生量（単位：kg/day/km<sup>2</sup>、kg/year/km<sup>2</sup>）に発生源面積を乗じることで物質流出量を推定する手法である原単位法があげられる。丸谷ら<sup>27</sup>は北海道東部に位置する釧路湿原を対象に、流域環境が健全であったとされる 1970 年代と土地開発（森林から農用地・畑地・酪農地への改変）後である 2006 年を比較し、窒素やリンなどの物質流出量の変化を原単位法により推定し、開発後の物質流出量は開発前と比較して約 2～3 倍となっていることを推算した。このように原単位法を用いることで、社会変化（土地利用土地被覆変化）によって長期的にどの程度、物質流出量が増加するかを見積もることが可能となる。ただし、原単位法では降水に伴う出水の影響などを含む水文過程の影響を考慮することが出来ず、あくまでも長期的かつ平均的な影響の議論のみにとどまってしまう。そのため、特定の出水イベント時の変化の評価への利用には適していない手法となる。

3 つ目としては、土地利用分布などを考慮し、降水に伴う出水の影響といった水文過程を考慮し物質流出を推定することが出来る手法として、水・物質流出モデルの利用があげられる<sup>42),43)</sup>。水・物質流出モデルの例として SWAT モデル<sup>1),42)</sup>が存在する。SWAT モデルは農業地域における水質変化を評価することを目的に開発されており、窒素や炭素に関する生物地球化学的過程および水文過程も考慮された数値モデルとなっている。また、近年では改良が加えられ農業地域のみではなく、世界中で多く用いられている<sup>44),45),46)</sup>。ただし、SWAT モデルのような数値モデルでは、多くのモデルパラメータが必要となるため、水文過程だけではなく生物地球化学的過程についても観測データに基づきそれらを同定することでモデル開発を進める必要がある。

4 つ目として、生物地球化学的過程を簡略化し、流域をサブ流域に分割し、各サブ流域で観測された安定同位体比と水文過程を考慮可能な分布型水文流出モデルを組み合わせ、土地利用別の物質流出量を推定する手法があげられる<sup>47)</sup>。この手法は、1 つ目の L-Q 式と 2 つ目の原単位法を組み合わせたような手法、かつ 3 つ目の水・物質流出モデルを簡略化した手法となっている。土地利用別の物質発生量を流量との関係式で推定しており、この関係式の係数を分布型水文流出モデルから推定された流域内の各メッシュの流量と各サブ流域で観測された安定同位体比を用いたベイズ推定により逆推定しており、物質流出率が最も高くなる雨期において、既往の研究の推定手法よりも精度良く推定できることを示している。ただし、本手法は土地利用別の物質流出量を流量との関係式により推定するため、その係数を推定するには流域を多数のサブ流域に分割する必要がある、サブ流域において多数の物質流出量の観測データが必要となるという課題も存在する。

以上のように、本稿では 4 つの手法を示したが、それぞれ長所、短所が存在するため、目的に応じて選択することで、陸域からの物質流出量の推定を行う必要がある。

## 4.2 海域から陸域の物質循環の推定手法

降水といった気候の影響を受け、陸域から海域へ物質が流出し、その一部は海域生態系の栄養となる。物質の移動は陸域から海域という一方向ではなく、例えば沿岸域に生息するクマや海鳥類（オオワシやオジロワシなど）がサケやマスといった遡河魚を捕獲し、陸域へ運搬するという現象もみられる。その結果、海域生態系に取り込まれた物質（有機物や栄養塩）は、クマや海鳥類といった運搬者によって海域から陸域へ還元される。しかし、クマや海鳥類が海域から陸域へ運ぶ遡河魚の数を定量的かつ空間的に把握することは困

難である。ただし、例えば知床半島ではこのような陸域-海域間の複雑な物質循環を理解し、健全な流域圏環境を保全していくことが重要である。そこで、既往の研究では、炭素・窒素安定同位体を用い、海起源物質 (Marine-derived nutrients : MDN) の循環について検討が行われている<sup>48),49),50)</sup>。

既往研究では、知床半島最大の流域面積を有する羅臼川流域 (流域面積 31.8 km<sup>2</sup>) を対象に、炭素・窒素安定同位体を用い、海域からの物質循環割合を推定している<sup>10),15),16)</sup>。炭素・窒素安定同位体を用いた陸域-海域間の物質循環割合の推定手法の詳細については、参考文献を参照いただきたい<sup>9),10),15),16)</sup>。既往の研究において、陸域-海域間の物質循環の推定に安定同位体比を用いた際の特徴的な点は次の通りである。本来、安定同位体比を用いる際、動物の採餌に伴う濃縮効果を考慮する必要がある。ただし、糞等として排出される場合は濃縮の効果はなく、摂取した餌の安定同位体比がそのまま排出されることとなる。Nakayama et al.<sup>10)</sup>や Abliz ら<sup>15),16)</sup>ではこのような特徴を利用し、濃縮効果は考慮せず、陸域生態系および海域生態系による寄与率を推定している点は特徴的である。

ただし、安定同位体比のみでは定性的な陸域-海域間の物質循環の推定のみとなってしまう、定量的な議論が困難となる。そこで、Nakayama et al.<sup>10)</sup>では降雨から河川流量を推定可能な簡易な流出解析モデル (貯留関数法) と前節で述べた L-Q 式を組み合わせることで、陸域から海域への物質流出量を推定している。また、海域から陸域への物質還元量を推定するため、海域生態系の代表としてサケ・マスの遡上数を羅臼川で実施されているウライによる捕獲尾数に対して捕捉率を考慮した年平均遡上数を推定することで定量化を試みている。なお、サケの捕捉率は、ウライ設置期間と撤去後において赤外線カメラを設置し、回収後に撮影された映像を目視により平均通過尾数を測定・比較することで計算されている<sup>10)</sup>。

永井ら<sup>9)</sup>においても示唆されているが、既往の多くの研究では前節で示したような陸域から海域への一方での物質流出量の推定・予測に関する研究が主流であった<sup>51)</sup>。しかし、上述しているように、近年では気候や社会システムの変化を起因とした水・物質流出量の変化に顕著に表れてきており、その変化が流域圏の水質や生物の生息場環境、生物多様性、生態系システムなどに対して数年、数 10 年スケールで長期的に影響を与え、流域圏環境を大きく変化させることが推察される。今後それらに対する策を講じなかった場合、陸域-海域間の物質循環は大きく変化し、過去あるいは現在における健全な流域圏環境が崩壊する可能性が懸念される。そのため、例えば前節で述べた原単位法のような平均的な議論を基に健全であると考えられる時代の流域圏環境を把握し、その環境の再生または保全を行う上で必要となる対策を、陸域-海域間の物質循環を気候変化や社会変化の影響も考慮した上で、利用可能な様々な情報を統合することで進めていくことが益々重要となってくる。

## 5. 今後の課題や将来展望

本稿では北海道東部、特に知床半島周辺の地域を例に健全な流域圏環境の保全に向けた検討として、陸域-海域間の物質循環に着目し、既往研究をまとめてきた。気候変化や社会変化は既にどの地域でも生じており、それによって現在変化していない場合においても、今後、数年、数 10 年といった長期的な時間スケールで流域圏環境が変化していく可能性があり、現在当たり前に存在する環境、特に生態系が崩壊する可能性が考えられる。そこで、本稿では今後の新たな方向性として、(1)過去の統計データのマイニング、(2)過去の陸域-海域間の物質循環の復元手法の検討、(3)健全な流域圏環境の評価手法の構築、という 3 点を提案する。

### (1) 過去の統計データのマイニング

過去の流域圏環境を把握する上で、例えば 3 章で述べたような気候情報、産業活動に関する情報や長期的な土地利用土地被覆の変化といった情報が重要となる。ただし、一般的に入手可能なデータは例えば 1960 年、1970 年代以降の近年に関する電子データである。それ以前のデータを入手するには、例えば国や都道府県、市町村といった官公庁などが有する紙媒体のデータ、または例えば市町村史といった電子データになっていない書籍類等からのデータのマイニングが重要となる。例えば、永井らは明治から大正期を対象に跡見花蹊の日記から桜の開花季節をマイニングし、現在の開花季節と比較し、植物季節に対する気候変動の影響を評価している<sup>52)</sup>。このように、デジタル数値データには変換されていないものの、過去の流域圏環境

を把握する上で重要となる情報が書籍類等に存在する可能性がある。そのため、今後は眠っている貴重な統計データをマイニングしていくことが、健全な流域圏環境の保全、復元に繋がっていくと考えられる。

## (2) 過去の陸域-海域間の物質循環の復元手法の検討

「(1)過去の統計データのマイニング」で述べたように、過去の流域圏環境を評価する上では、眠っている情報をマイニングし、限られた情報から復元する必要がある。ただし、例えば河川流量や降水に伴う物質流出量といった情報は過去には測定されていない可能性が高く、復元は困難である可能性が高い。その場合、既往の研究のように、例えば全球を対象に過去の気候を再現する再解析データと現在の観測データから統計的な関係性を求め、擬似的な過去の観測データを作成し<sup>53),54),55),56),57)</sup>、前章で述べたような水・物質流出モデルのような数値モデルに入力することで、過去の陸域から海域への物質流出量を復元することが可能となると考えられる。

一方、海域から陸域への物質循環の推定を行う上で、過去における安定同位体比に基づく定性的な陸域-海域間の物質循環割合を把握することは困難である。そのため、「(1)過去の統計データのマイニング」で提案したようなデジタル数値に変換されていない統計データをマイニングすることにより、例えば漁獲数といった定量的な情報を取得し、海域生態系の陸域への還元率を想定されるいくつかのパターンで推定し、上述した数値モデルから得られる陸域からの物質流出量と組み合わせることで、海域-陸域間の物質循環を復元する。それにより、現在の条件下での流域圏環境との比較を行うことで、想定される流域圏環境を評価可能となる。

## (3) 健全な流域圏環境の評価手法の構築

流域圏環境を考えるに当たり、人視点であるか生態系視点であるか、といったようにどの視点で捉えるかによって健全と考えられる環境は異なると考えられる。そのため、現在は人の生活を中心に流域圏環境を保全していることから、人視点での健全な流域圏環境は現在であると考えられる。一方、人の手が入っていない、過去の流域圏環境は生態系にとって健全であった可能性が考えられる。既往の研究では、例えば様々な生態系サービスを評価軸として GIS ベースで評価可能な数値モデル InVEST が開発されている<sup>58)</sup>。ただし、InVEST は陸域に着目したモデルであり、大きな目的が生態系サービスを経済的に評価することを目的としたモデルであることから、陸域-海域間の繋がりを考慮した流域圏環境の評価には不十分である。ただし、InVEST の思想は参考となるため、InVEST を参考にするとともに、流域圏における例えば河川水質、洪水規模、漁獲高、土地利用土地被覆分布、生物多様性などを評価軸に追加することで、人視点ならびに生態系視点の両者にとって健全であると考えられる流域圏を解明し、それらを保全、復元する手法を提案していくことが重要であると考えられる。

今後は、上述の3つの新たな方向性の研究を陸域-海域の物質循環を中心に展開していくことで、健全な流域圏環境を保全、復元することが望まれる。なお、本稿では上述しているように、北海道知床を中心に研究展望をまとめているため、対象は一辺数 km から数 10 km 程度の流域スケールを対象としている。ただし、流域スケールによって対象事象の評価精度や現象そのものが変化すると考えられるため、そのような点についても合わせて議論していくことも重要となることを合わせて記しておく。

## 謝辞

本研究は、JSPS 科研費 (JP21H05178, JP22K04337) およびベルモント・フォーラム CRA「ランドスケープ・土地利用変化、放棄と回復をもたらす社会的要因の国際比較」(JPMJBF2102)の支援を受けた。記して感謝の意を表する。

## 参考・引用文献

- 1) Muto, Y., Noda, K., Maruya, Y., Chibana, T., Watanabe, S. (2022): Impact of climate and land-use changes on the water and sediment dynamics of the Tokoro River Basin, Japan., Environmental Advances, Vol.7, 100153,

<https://doi.org/10.1016/j.envadv.2021.100153>.

- 2) 環境省 (2018) : 気候変動適応法, [https://elaws.e-gov.go.jp/document?law\\_unique\\_id=430AC00000000050\\_20181201\\_0000000000000000](https://elaws.e-gov.go.jp/document?law_unique_id=430AC00000000050_20181201_0000000000000000) (2022/12/26 確認)
- 3) 笠間 基, 駒井克昭, 丸谷靖幸, 佐藤辰哉 (2018) : 釧路川流域が親潮沿岸域に供給する溶存炭素量の将来予測に向けて, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.74, No.4, pp.I\_133-I\_138.
- 4) 入江政安, 山中敦史, 田淵貴久, 多部田茂 (2015) : 陸域の人間活動の定量化および漁業の域内物質循環への影響評価に関する三大湾比較, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.71, No.2, pp.I\_832-I\_837.
- 5) Hanasaki, N., Kanae, S., Oki, T., Masuda, K., Motoya, K., Shirakawa, N., Shen, Y., Tanaka, K. (2008): An integrated model for the assessment of global water resources – Part 1: Model description and input meteorological forcing, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, Vol.12, pp.1007–1025, <https://doi.org/10.5194/hess-12-1007-2008>.
- 6) 河野剛典, 山田朋人, Yadu Nath Pokhrel (2013) : 人間活動を考慮した陸面過程モデルの北海道への適用, 土木学会論文集 G (環境), Vol.69, No.5, pp.I\_177-I\_182.
- 7) 丸谷靖幸, 中山恵介, 仲江川敏之, 井上徹教, 小俣雅嗣, 石田哲也, 駒井克昭, 知床を対象とした MRI-AGCM3.1S を用いた栄養流出量の将来予測 (2014) : 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.70, No.4, pp.1219-1224.
- 8) Katsuyama, M., Shibata, H., Yoshioka, T., Yoshida, T., Ogawa, A., Ohte, N. (2009): Applications of a hydro-biogeochemical model and long-term simulations of the effects of logging in forested watersheds, *Sustainability Science*, Vol.4, pp.179-188.
- 9) 永井信, 丸谷靖幸, 小谷亜由美, 鄭竣介, 大石侑香 (2022) : 遡河魚:サケ *Oncorhynchus keta* が繋ぐ海域と陸域の生態系の物質循環, 流域圏学会誌, Vol.9, pp.1-17.
- 10) Nakayama, K., Maruya, Y., Matsumoto, Kei., Komai, K., Kuwae, T. (2018): Nitrogen fluxes between the ocean and a river basin using stable isotope analysis, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol.212, pp.286-293.
- 11) 知床世界遺産センター (2022) : 世界自然遺産とは, <http://shiretoko-whcc.env.go.jp/> (2022/12/26確認)
- 12) Intergovernmental Panel on Climate Change (2021): Summary for Policymakers. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*.
- 13) 小杉知史, 高橋修平, 堀彰 (2009) : 知床半島ウトロを中心としたオホーツク海南西部の海水勢力と沿岸気象条件, 北海道の雪氷, 第 28 号, pp.77-80.
- 14) 青田昌秋 (2002) : オホーツク海・北海道沿岸域における流氷勢力の減少傾向(1892 年-2000 年), 号外海洋, Vol.30, pp.18-24.
- 15) Aynur Abliz, 中山恵介, 丸谷靖幸, 桑江朝比呂, 岡田知也, 石田哲也 (2011) : 安定同位体比による知床ラウス川を通じた海起源栄養塩の流域内分布, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.67, No.4, pp.I\_1303-I\_1308.
- 16) Aynur Abliz, 中山恵介, 丸谷靖幸, 井上徹教, 桑江朝比呂, 舘山一孝, 岡田知也, 加藤淳子, 石田哲也 (2012) : 知床を対象とした海陸の栄養塩循環機構の解明, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.68, No.4, pp.I\_721-I\_726.
- 17) 気象庁ホームページ (2022) : 過去の気象データ検索, <http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php> (2022/12/26 確認).
- 18) 丸谷靖幸, 小林知朋, 永井信, 宮本昇平, 矢野真一郎 (2021) : 気象官署の降水量を用いた気候変動に伴う日本全国の長期的気候変化傾向の解明, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.77, No.2, pp.I\_1261-I\_1266.
- 19) Karl, T. R., Nicholls, N., Ghazl, A. (1999): CLIVAR/GCOS/WMO workshop on indices and indicators for climate extremes: Workshop summary, *Climatic Change*, Vol.42, pp.3-7.
- 20) Peterson, T. C. (2005): Climate change indices, *WMO Bulletin*, Vol.54, pp.83-86.
- 21) Amrhein, V., Greenland, S., McShane, B. (2019): Scientists rise up against statistical significance, *Nature*, Vol.567, pp.305-307, <https://doi.org/10.1038/d41586-019-00857-9>.

- 22) 気象庁ホームページ: 日本の年平均気温, [https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/temp/an\\_jpn.html](https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/temp/an_jpn.html) (2022/12/26 確認)
- 23) Liu, Y.B., Gebremeskel, S., De Smedt, F., Hoffmann, L., Pfister, L. (2006): Predicting storm runoff from different land-use classes using a geographical information system-based distributed model, *Hydrological Processes*, Vol.20, pp.533-548.
- 24) Wang, J. Fu, B., Qiu, Y., Chen, L. (2001): Soil nutrients in relation to land use and landscape position in the semo-arid small catchment on the loess plateau in China, *Journal of Arid Environments*, Vol.48, pp.537-550.
- 25) National Science and Technology Council (2000): Integrated Assessment of Hypoxia in the Northern Gulf of Mexico, Committee on Environment and Natural Resources, Washington, DC.
- 26) 岩波秀晃, 和田知之, 坂本和佳, 工藤勲, 知北和久 (2013) : 流出特性と土地利用形態に基づく十勝川水系の栄養塩供給機構, *日本水文科学会誌*, Vol.43, No.1, pp.3-24.
- 27) 丸谷靖幸, 菅原庸平, Aynur Abliz, 石田哲也, 中山恵介 (2011) : 1970 年代と比較した釧路湿原における水循環機構解析, *水工学論文集*, Vol.55, pp.I\_547-I\_552.
- 28) 北海道庁根室振興局 (2021) : 根室の農業 - 概要編 -, [https://www.nemuro.pref.hokkaido.lg.jp/fs/5/6/1/3/0/1/1/\\_/R3\\_概要編.pdf](https://www.nemuro.pref.hokkaido.lg.jp/fs/5/6/1/3/0/1/1/_/R3_概要編.pdf) (2022/12/26 確認).
- 29) 北海道さけ・ますふ化放流百年記念事業協賛会 (1988) : 北海道鮭鱒ふ化放流事業百年史 統計編, pp.432, [http://salmon.fra.affrc.go.jp/kankobutu/hsh100thyear\\_stat.pdf](http://salmon.fra.affrc.go.jp/kankobutu/hsh100thyear_stat.pdf) (2022/12/26 確認).
- 30) 水産研究・教育機構 水産資源研究所さけます部門 (2022) : 河川別の捕獲数, 採卵数及び放流数, [http://salmon.fra.affrc.go.jp/zousyoku/fri\\_salmon\\_dept/river.html](http://salmon.fra.affrc.go.jp/zousyoku/fri_salmon_dept/river.html) (2022/12/26 確認).
- 31) 帰山雅秀 (2018) : サケ学への誘い, 北海道大学出版会, pp.194.
- 32) 帰山雅秀, 秦玉雪 (2014) : 気候変動とサケ資源, *北日本漁業*, Vol.42, pp.1-12.
- 33) Gundersen, P., Schmidt, I.K., Raulund-Rasmussen, K. (2006): Leaching of nitrate from temperate forests -effects of air pollution and forest management, *Environmental Reviews*, Vol.14, pp.1-57.
- 34) Likens, G. E., Bormann, F.H., Johnson, N.M., Fisher, D.W. and Pierce, R.S. (1970): Effects of forest cutting and herbicide treatment on nutrient budgets in the Hubbard Brook watershed-ecosystem, *Ecological Monographs*, Vol.40, pp.23-47.
- 35) Swank, W. T., Vose, J. M., Elliott, K. J. (2001): Long-term hydrologic and water quality responses following commercial clearcutting of mixed hardwoods on a southern Appalachian catchment. *Forest Ecology and Management*, Vol.143, pp.163-178.
- 36) 柴田英昭, 戸田浩人, 福島慶太郎, 谷尾陽一, 高橋輝昌, 吉田俊也 (2009) : 日本における森林生態系の物質循環と森林施業との関わり, *日林誌*, Vol.91, pp.408-420.
- 37) 久米篤 (2002) : 物質循環における地下過程の重要性—物理学的過程と生物学的過程の地上との比較—, *日本生態学会誌*, Vol.52, pp.101-106.
- 38) 大手信人, 久米篤 (2002) : 森林生態系における物質循環研究の新しい展開. *日本生態学会誌*, Vol.52, No.1, pp.99-100.
- 39) Cosby, B. J., Hornberger, G. M., Galloway, J. N., Wright R. F. (1985): Modelling the effects of acid deposition assessment of a lumped parameter model of soil and streamwater chemistry, *Water Resources Research*, Vol.21, pp.51-63.
- 40) McDowell, W. H., Likens, G. E. (1988): Origin, composition, and flux of dissolved organic carbon in the Hubbard Brook Valley, *Ecological Monographs*, Vol.58, pp.177-195.
- 41) Naiman, R. J., Sibert, J. R. (1978): Transport of nutrients and carbon from the Nanaimo River to its estuary, *Limnology and Oceanography*, Vol.23, pp.60-73.
- 42) Arnold, J., Srinivasan, R., Muttiah, R., Williams, J. (1998): Large area hydrologic modeling and assessment. Part 1. Model development, *Journal of the American Water Resources Association*, Vol.34, No.1, pp.73-89.
- 43) 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*, Vol.41, No.3, pp.295-319.

- 44) Wang, Y.; Jiang, R.; Xie, J.; Zhao, Y.; Yan, D., Yang, S. (2019): Soil and water assessment tool (SWAT) model: A systemic review. In: Guido-Aldana, P.A. and Mulahasan, S. (eds.), *Advances in Water Resources and Exploration. Journal of Coastal Research, Special Issue No.93*, pp. 22–30. Coconut Creek (Florida).
- 45) Bhatta, B., Shrestha, S., Shrestha, P. K., Talchabhadel, R. (2019): Evaluation and application of a SWAT model to assess the climate change impact on the hydrology of the Himalayan River Basin, *Catena*, Vol.181, 104082, <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104082>.
- 46) Pang, S., Wang, X., Melching, C. S., Feger, K. H. (2020): Development and testing of a modified SWAT model based on slope condition and precipitation intensity, *Journal of Hydrology*, Vol.588, 125098, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125098>.
- 47) Adiyanti, S., Maruya, Y., Eyre, B. D., Mangion, P., Turner, J. V., Hipsey, M. R. (2022): Using Inverse Modelling and Dual Isotopes ( $\delta^{15}\text{N}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  of  $\text{NO}_3$ ) to Determine Sources of Nitrogen Export from a Complex Land Use Catchment, *Water Resources Research*, Vol. 58, e2022WR031944, <https://doi.org/10.1029/2022WR031944>.
- 48) Kaeriyama, M. (2004): Evaluation of carrying capacity of Pacific salmon in the North pacific Ocean for ecosystem-based sustainable conservation management, *NPAFC Tech. Rep.*, Vol.5, pp.1-4.
- 49) Kaeriyama, M., Nakamura, M., Edpalina, R., Bower, J. R., Yamaguchi, H., Walker, R. V., Myers, K. W. (2004): Change in feeding ecology and trophic dynamics of Pacific salmon (*Oncorhynchus* spp.) in the central Gulf of Alaska in relation to climate events, *Fish. Oceanogr.*, Vol.13, pp.197-207.
- 50) Hocking, M. D., Reimchen, T. E. (2002): Salmon-derived nitrogen in terrestrial invertebrates from coniferous forests of the Pacific Northwest, *BMC Ecology*, Vol.2, pp.14.
- 51) Ohnishi, T., Yoshino, J., Hiramatsu, K., Somura, H. (2020): Developing a hydro-chemical model of Ise Baywatersheds and the evaluation of climate change impacts on discharge and nitrate-nitrogen loads, *Limnology*, Vol. 21, pp.465-486.
- 52) 永井信, 小谷亜由美, 丸谷靖幸 (2022) : 跡見花蹊日記を用いた明治・大正期における 東京のサクラの開花季節記録のマイニング, *日生氣誌*, Vol.59(3・4), pp.89-99, <https://doi.org/10.11227/seikisho.59.89>.
- 53) 丸谷靖幸, Matthew R. Hipsey, 渡部哲史, Sri Adiyanti, 立川康人 (2016) : 水文気象データが乏しい流域を対象とした気候変動影響評価手法の検討, *土木学会論文集 B1 (水工学)*, Vol.72, No.4, pp.I\_37-I\_42.
- 54) 丸谷靖幸, 渡部哲史, 田中智大, 立川康人 (2017) : ローカルスケールの気候変動影響評価に向けた JRA-55 降水量に対する統計的補正手法の検討, *土木学会論文集 B1 (水工学)*, Vol.73, No.4, pp.I\_115-I\_120.
- 55) 丸谷靖幸, 渡部哲史, 玉川一郎 (2019) : 流域スケールの気候変動影響評価に向けた JRA-55 の統計的補正手法と力学 DS の比較, *土木学会論文集 B1 (水工学)*, Vol.75, No.2, pp.I\_1123-I\_1128.
- 56) 丸谷靖幸, 渡部哲史, 玉川一郎 (2020) : JRA-55 降水量の統計的補正手法の開発に必要な観測年数に関する検討, *土木学会論文集 B1 (水工学)*, Vol.76, No.2, pp.I\_43-I\_48.
- 57) 和田光将, 丸谷靖幸, 渡部哲史, 矢野真一郎 (2022) : 観測データの乏しい流域での利用に向けた再解析データを用いた水文気象準観測データ作成手法の開発, *土木学会論文集 B1 (水工学)*, Vol.78, No.2, pp.I\_115-I\_120.
- 58) Natural Capital Project (2022): InVEST 3.12.0.post26+ug.g230fb3d User's Guide. Stanford University, University of Minnesota, Chinese Academy of Sciences, The Nature Conservancy, World Wildlife Fund, and Stockholm Resilience Centre.

(原稿受付 2022 年 12 月 26 日 原稿受理 2023 年 7 月 9 日)