

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に向けて

PROJECTION OF NUTRIENT DISCHARGE BY USING MRI-AGCM3.1S IN SHIRETOKO

丸谷靖幸¹・中山恵介²・仲江川敏之³・井上徹教⁴・小俣雅嗣⁵・石田哲也⁶
・駒井克昭²

Yasuyuki MARUYA, Keisuke NAKAYAMA, Toshiyuki NAKAEGAWA,
Tetsunori INOUE, Masashi KOMATA, Tetsuya ISHIDA and Katsuaki KOMAI

¹学生会員 北見工業大学大学院工学研究科 寒冷地・環境・エネルギー工学専攻
(〒090-8507 北見市公園町165番地)

²正会員 博(工) 北見工業大学工学部 社会環境工学科 (〒090-8507 北見市公園町165番地)

³正会員 博(工) 気象研究所 気候研究部 (〒305-0052 茨城県つくば市長峰1-1)

⁴正会員 博(工) 港湾空港技術研究所 沿岸環境研究チーム (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

⁵非会員 博(工) 北見工業大学工学部 バイオ環境化学科 (〒090-8507 北見市公園町165番地)

⁶正会員 博(工) 国土交通省 北陸地方整備局 (〒950-8801 新潟県新潟市中央区美咲町1-1-1)

The Shiretoko Peninsula which is located in the eastern part of Hokkaido, where nutrient circulation between inland and the ocean is revealed to play a great role in ecological system. Because of the unique system, "Shiretoko" was registered as the World Natural Heritage. However, previous studies demonstrated that precipitation pattern has been affected by climate change, which may cause the change in the ecological system. Therefore, this study aims to evaluate nutrient flux from the inland to the ocean in the future. According to the previous studies, precipitation is considered one of the most significant components controlling nutrient supply. Two bias correction techniques were applied by using the MRI-AGCM3.1S. As a result, it is revealed that the cdf correction technique shows better reproduction regarding the nutrient flux compared to the normal distribution correction technique.

Key Words: Shiretoko Peninsula, World Natural Heritage, Nutrient, MRI-AGCM3.1S, Projection

1. はじめに

知床半島およびその沿岸海域は、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という生物多様性に加え、海洋生態系と陸上生態系の栄養循環が生態系を保持しているという特殊性が認められ、2005年7月17日に世界自然遺産に登録された。知床の世界自然遺産登録は日本では3件目の登録であり、海岸線から約3 km 沖まで登録地域となったことで、日本で初めての海洋を含む世界自然遺産となった。知床は流水が漂着する海岸として北半球で最南端に位置しており、この流水が輸送する栄養が生態系に大きな影響を与えているということも、世界自然遺産登録の大きな要因でもある。

しかし近年、地球規模での環境変化が問題となっている。気候変動における政府間パネル (IPCC) 第5次報告書では、今世紀末までに気温が0.3~4.8 °C上昇する可能性を指摘している¹⁾。また、平成23年7月の新潟・福島豪

雨や平成24年7月の九州北部豪雨などのような局所豪雨が頻繁に確認されるなど降水パターンの変化も指摘されている。さらに、知床の面するオホーツク海では、流氷の輸送量の減少や接岸期間の短縮が指摘されており^{2,3)}、海域から陸域への栄養の還元量の低下が懸念されている。つまり、最悪のシナリオとして世界自然遺産から除外されてしまう可能性が考えられる。そのため、現在の栄養循環機構を理解し、将来の栄養循環機構を予測可能な手法を確立することが重要であると考えられる。

既往の研究において、現在の栄養循環機構を解明するため、Maruya et al.⁴⁾やAynurら^{5,6)}は知床ラウス川を対象とし、陸域から海域への栄養流出量を推定し、安定同位体比を用いて海域の栄養の陸域への還元割合を導き出した。将来予測に関して、既往の研究では全球気候モデル (Global Climate Model : 以下GCM) が利用されている。例えば立川ら⁷⁾やKim et al.⁸⁾ではGCM出力値を用いて流出

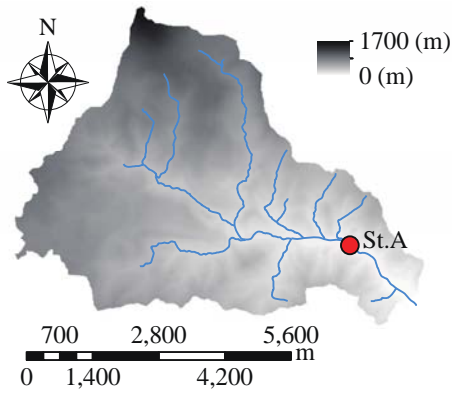


図-1 ラウス川流域.

解析を行い、将来の洪水、水資源量を検討している。Nakayama et al.⁹⁾は知床ラウス川を対象に気象庁気象研究所で作成されたMRI-GCM20の現在気候の6時間降水量にSynthetic Generationを適用することで1時間降水量を推定し、流域からの栄養流出量の将来予測に向けた基礎的検討を行っている。しかし、この研究はGCMを用いた栄養流出量の将来予測の可能性を示したのみであり、例えばバイアス補正手法の違いによる予測値のばらつきや適切なバイアス補正手法の検討など、GCMの利用に伴う不確実性の検討などが不十分である。

そこで将来の知床における海域と陸域の栄養循環機構を予測し、自然環境、生態系の保全、再生に向けた方策を提案することを最終目標とし、MRI-AGCM3.1Sを用いることで、流域からの栄養流出量の推定に向けた降水量の適切なバイアス補正手法の検討を行うことを目的とする。また、その結果を踏まえた栄養流出量の将来予測も実施した。

2. ラウス川における流出機構と栄養流出量

(1) ラウス川流域

本研究では既往の研究^{4),5),6)}と同様に、知床半島で最大の流域面積であるラウス川流域を研究対象領域とした(図-1)。ラウス川はオホーツク海に注ぐ二級河川であり、流域面積は31.8 km²、流路長は約7 km、平均河道勾配は約1/7と、標高約1700 mの羅臼岳が水源であるため非常に急峻な流域である。

(2) 流量の再現計算

栄養流出量の推定は、Aynurら^{5),6)}に従い流量と栄養濃度の関係を利用することとした。ラウス川流域の平均河道勾配が約1/7であり、過去の研究⁹⁾で再現性が高いことが示されている貯留関数法を用いることとした(式(1), (2))。パラメーターの検討には現地観測を行った2009年を対象とし、総流量が卓越することから、融雪の影響を考慮する必要がない6月から10月を対象とした。また降水

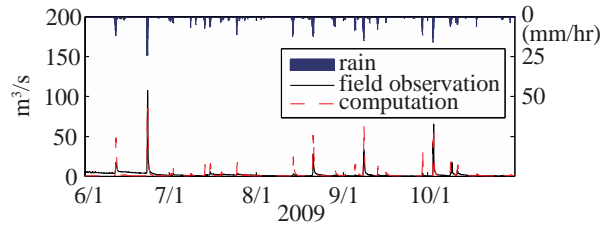


図-2 2009年6月から10月までの流出解析結果.

量はAMeDAS羅臼観測所の値を利用した。

$$\frac{ds}{dt} = fr - q \quad (1)$$

$$S = Kq^p \quad (2)$$

ここで、 S : 貯留高、 r : 降水量、 q : 流出高、 f : 流出率(本研究では、 $f=0.7558$ とした)、 K 、 p : モデルパラメーター(本研究では、 $K=12$ 、 $p=0.6$ とした)である。

本研究では計算精度の検証にCoDを用いた。その結果CoDは0.6156となり、一般的に知られている高再現性を示す0.6以上であった(図-2)。

(3) 栄養流出量

Aynurら⁶⁾により、溶存態の栄養は流量の関数ではなく、粒状態が流量の関数であることが示されている。そこで本研究でも図-1のSt.Aにおいて実施された流量および栄養濃度の計測結果を利用し、流量とSS、粒状態窒素(以下PTN)、粒状態リン(以下PTP)の関係式を作成した(式(3), (4), (5), 図-3)。

$$SS = 1.3015 \cdot Q^{1.9484} \quad (3)$$

$$PTN = 0.0030 \cdot Q^{1.9051} \quad (4)$$

$$PTP = 0.0017 \cdot Q^{1.9518} \quad (5)$$

ここで、 Q : 流量、 PTN : 粒状態窒素、 PTP : 粒状態リンである。

3. MRI-AGCM3.1Sを用いた最適なバイアス補正手法の検討

(1) 使用データ

時間降雨強度を対象とし、AMeDAS羅臼観測所(北緯44度1.4分、東経145度11.2分)の観測データを利用し、予測値は気象庁気象研究所で作成されたMRI-AGCM3.1S(以下AGCM3.1S)の出力結果を使用した。対象期間はバイアス補正には多くのデータが必要であることから、降雪の影響が少ない5月から10月における現在気候(1979年から2003年)と将来気候(2075年から2099年)のそれぞれ25年間とした。

解析を進める上で最適なノードデータを選出するために、AMeDAS観測所にもっとも近いノードを中心とし、1ノード、5ノード、9ノードにおける降水量のデータを抽出し、AMeDAS観測結果との比較を行った(式(6), 図-4, 図-5)。

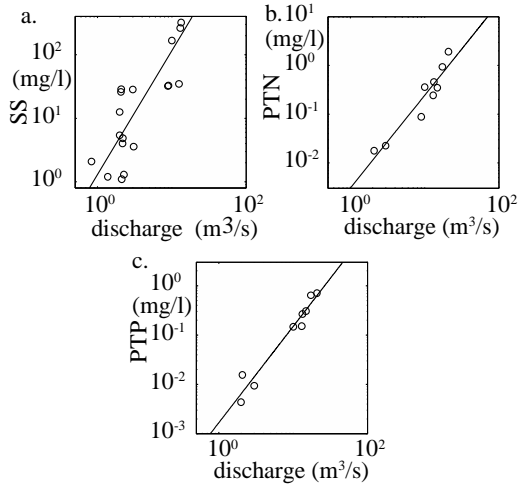


図-3 流量とSSおよび栄養濃度の関係. a : SS, b : PTN, c : PTP.

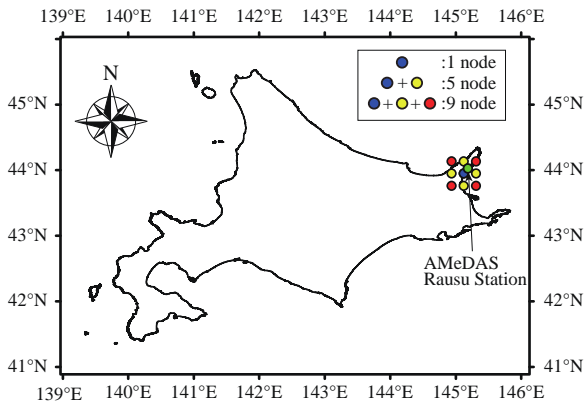


図-4 AMeDAS羅臼観測所と計算グリッド.

$$error = \sqrt{\sum_{i=1}^N (rain_{GCM,i} - rain_{Obs,i})^2} \quad (6)$$

ここで、 $error$: 誤差, $rain_{GCM,i}$: AGCM3.1Sの25年間の各月における総降水量, $rain_{Obs,i}$: AMeDASの25年間の各月における総降水量である。

それぞれのエラーは、1ノードで125.2 mm/hr, 5ノードで147.9 mm/hr, 9ノードで153.9 mm/hrと得られたことから、これ以降の解析には観測地点に直接対応する1ノードデータを用いることとした。

(2) バイアス補正手法

GCM出力値は全球を数10 kmから数100 kmメッシュで区切ることによって計算された予測値であるため、少なからずGCM出力値と観測値にはバイアスが存在する (AGCM3.1Sのメッシュサイズは20 km)。バイアスを補正する手法 (統計的ダウンスケーリング) については、降水量や気温、風などを対象に多くの研究が行われている^{10),11),12)}。渡部らは将来予測値の平均値では補正手法間の結果に差は少ないが、分散に関しては補正手法間により差が生じると報告している。つまり、複数の補正手法

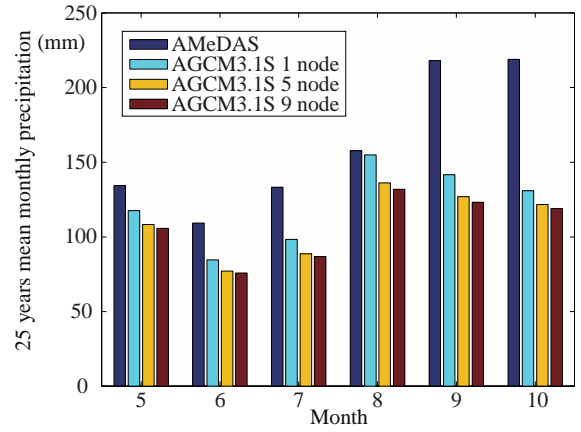


図-5 各グリッド数による現在気候の5月から10月における月降水量の25年平均値.

を利用することで適切な補正手法の検討を行う必要があると考えられる。そこで本研究では、補正手法の中で簡便な手法である正規分布型手法と、累積分布関数 (以下 cdf) 手法の2種類によりバイアス補正を行った。

a) 正規分布型手法

正規分布型手法では式(7), (8)により補正係数を算出し、式(9)によってAGCM3.1Sのバイアス補正を行った。

$$amp1 = \frac{\mu_{Obs}}{\mu_{GCM}} \quad (7)$$

$$amp2 = \frac{\sigma_{Obs}}{\sigma_{GCM}} \quad (8)$$

$$rain_{modified} = \frac{amp2}{amp1} \cdot (amp1 \cdot rain_{GCM} - \mu_{Obs}) + \mu_{Obs} \quad (9)$$

ここで、 $amp1$, $amp2$: 平均値の補正係数と標準偏差の補正係数, μ_{Obs} , μ_{GCM} : AMeDASとAGCM3.1Sの平均, σ_{Obs} , σ_{GCM} : AMeDASとAGCM3.1Sの標準偏差, $rain_{modified}$: バイアス補正後のAGCM3.1S, $rain_{GCM}$: バイアス補正前のAGCM3.1Sである。

b) cdf手法

cdf手法は近年バイアス補正を行う手法として頻繁に利用されている。本研究ではAGCM3.1SとAMeDASのそれぞれでcdfを作成し、AMeDASとAGCM3.1Sの各非超過確率について比率 (補正係数) を算出しバイアス補正を行った (式(10), 式(11))。

$$amp_{PNE} = rain_{PNE_{Obs}} / rain_{PNE_{GCM}} \quad (10)$$

$$rain_{modified} = amp_{PNE} \cdot rain_{PNE_{GCM}} \quad (11)$$

ここで、 amp_{PNE} : 非超過確率PNEにおける補正係数, $rain_{PNE_{Obs}}$: 非超過確率PNEのAMeDAS, $rain_{PNE_{GCM}}$: 非超過確率PNEのAGCM3.1S, $rain_{modified}$: バイアス補正後のAGCM3.1Sである。

(3) バイアス補正結果

現在気候におけるAGCM3.1SとAMeDASとのバイアス

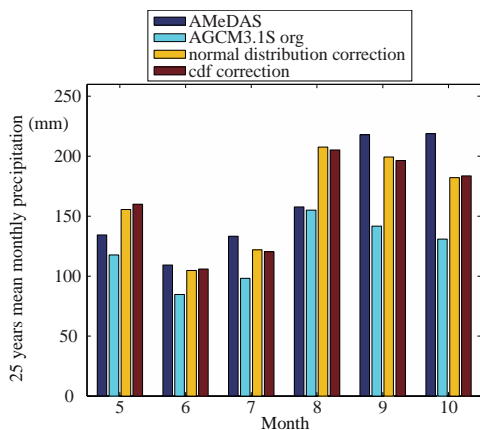


図-6 現在気候の5月から10月におけるバイアス補正後の月降水量の25年平均値

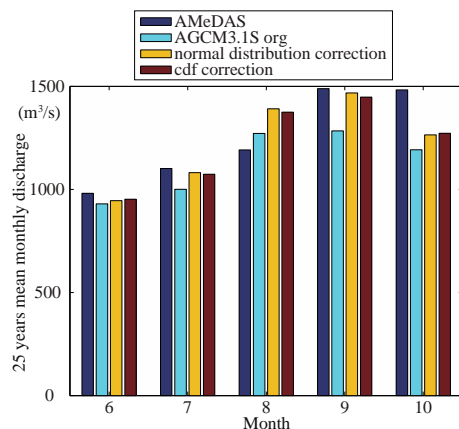


図-8 現在気候の6月から10月における25年間の月平均総流量

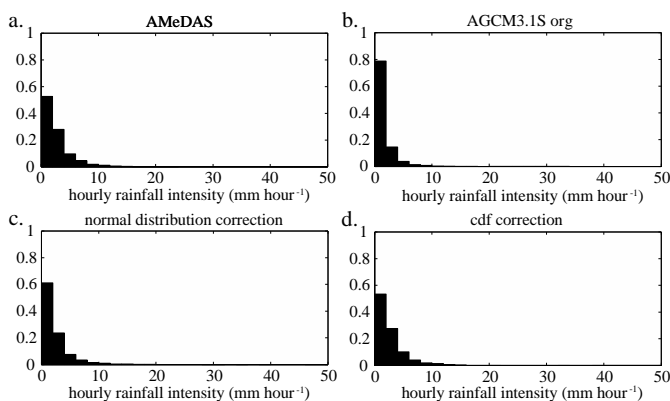


図-7 現在気候における降水量のヒストグラム。 a: AMeDAS, b: バイアス補正なし, c: 正規分布型手法, d: cdf手法

補正を行い、5月から10月における25年（1979年から2003年）平均の月降水量およびヒストグラムの比較を行った（図-6、図-7）。25年平均の月降水量では、正規分布型手法とcdf手法に大きな差が存在していない（図-6）。しかし、ヒストグラムにおいて、正規分布型手法によるバイアス補正では小さな降雨強度である数mm/hrの発生頻度が過大になっている（図-7）。ページの都合上割愛するが、降雨強度の発生頻度が正規分布で高精度に再現されないことにより発生した差であると考えられる。このことから、降雨強度を対象としたバイアス補正にはcdf手法が適していると考えられる。

(4) AGCM3.1Sの流出モデルへの適用結果

流量の再現性を検討するために、前節と同様に、6月から10月の25年間（1979年から2003年）におけるAMeDAS、AGCM3.1Sおよびその正規分布型手法、cdf手法の4種類を利用した流量の再現計算を行った。25年間の月平均総流量を比較すると、全ての結果において、大きな差が存在していないことが確認された（図-8）。そのため、AGCM3.1Sのオリジナルの降雨強度を利用したとしても、流量の季節変化は再現出来ることが示された。

次に、流量の関数であるSS、PTN、PTPの流域からの

流出量の再現性について検討を行った（式(3)、(4)、(5)）。ここで、SS、PTN、PTPの関係式においてべき乗の係数がほぼ同等であることから、例としてSSの25年間の月平均総流出量のみを示す。その結果、正規分布型手法を利用すると、AMeDAS観測結果を利用したものと比較して、最大で数10倍の流出量を示していることが分かった（図-9）。逆に、AGCM3.1Sのオリジナルデータを利用した場合には、過小評価となる傾向が示された。SSの流出量は流量の関数であり、大流量の発生回数がSSの総流出量を決定していると考えられる。そこで、対象流域において洪水流量に対応する50 m³/s以上の洪水の発生回数を解析した。その結果、AMeDASは88回、AGCM3.1S orgは32回、正規分布型手法は114回、cdf手法は70回となり、オリジナルでは過小評価、正規分布型手法では過大評価となっていた。cdf手法を用いても、他に比較して高精度での再現が可能となっているが、8月や10月では過大および過小評価となっている点に注意が必要である。

4. SSおよび栄養流出量の将来予測

(1) バイアス補正手法による栄養流出量の再現性の検討

本研究で利用されているように、流量とSSや栄養濃度にはある関係性があることが多い。貯留関数法と併用する場合、未知のパラメーターは、式(2)のK、pおよび流量のべき乗の係数の3つとなる。本研究の目的であるSSや栄養流出量の推定は、降雨強度を入力値として算出されるものであり、入力値がどの程度信頼性を持って与えられるかが重要となる。つまり、AMeDAS観測データを入力値として利用する場合と、AGCM3.1Sデータを利用する場合では、未知のパラメーターの与え方によって再現精度が大きく異なる可能性がある。そこで本節では、入力値の違いによるSSや栄養流出量の推定結果の変化を検討するために、貯留関数法の未知パラメーターであるKを1から100、pを0.6、0.8、1.0、1.2と変化させ、式(12)で示される未知パラメーターβも変化させることで、SS

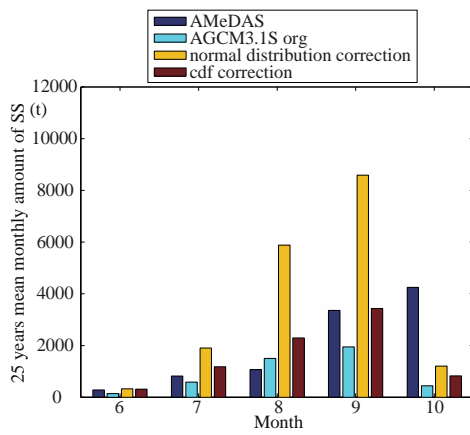


図-9 現在気候の6月から10月における25年間のSSの月平均総流出量。

流出量の再現性の検討を行うこととした。

$$Nutrient = \alpha \cdot Q^\beta \cdot Q \quad (12)$$

ここで *Nutrient* : 栄養流出量, α , β : 栄養係数, *Q* : 流量である。

検討には現在気候の6月から10月の25年間 (1979年から2003年) におけるAMeDAS降水量データから得られるSS流出量を正值とし, AGCM3.1S org, 正規分布型手法, cdf手法から得られるSS流出量と正值との比を計算した。なお, β は一般的に0から2の値を取ることから, 本研究では0, 1, 2と変化させた。

その結果, 正規分布型手法, cdf手法の両者とも β が0, 1の場合には正值との比が1に近くなっており, 良好にバイアスが補正され, 実際の栄養流出量とほぼ同様な値を再現出来ていることが分かる (図-10)。しかし, 正規分布型手法では β が2の場合, 過大評価しており最大でAMeDASの約2倍の栄養流出量を示している。これは前章で示されるように洪水流量 (50 m³/s以上) の発生回数が過大となっていることが要因であると考えられる。一方, cdf手法ではKが小さい値ではAMeDASと誤差が存在するが, 全体的にAMeDASとの比が1に近い値を示している。そのためcdf手法を利用することで降水量のみではなく, 流量および栄養流出量も高精度に実現象を再現出来ることが確認された。

(2) 流量とSSおよび栄養流出量の将来予測

本節ではSS流出量に着目し, 6月から10月の将来気候 (2075年から2099年: 25年間) における予測計算を実施した。なお, 貯留関数法で用いたパラメーターは, 2009年の再現計算で得られたK=12, $p=0.6$ を使用した。まず, 現在気候と将来気候の25年平均の6月から10月の月流量を図-11に示す。これを見ると, 将来気候の6月, 7月は増加, 10月は減少していることが分かる。それらの変化はわずかであり, 図-8に示されているように現在気候の再現において発生する誤差より小さな値である。そのため,

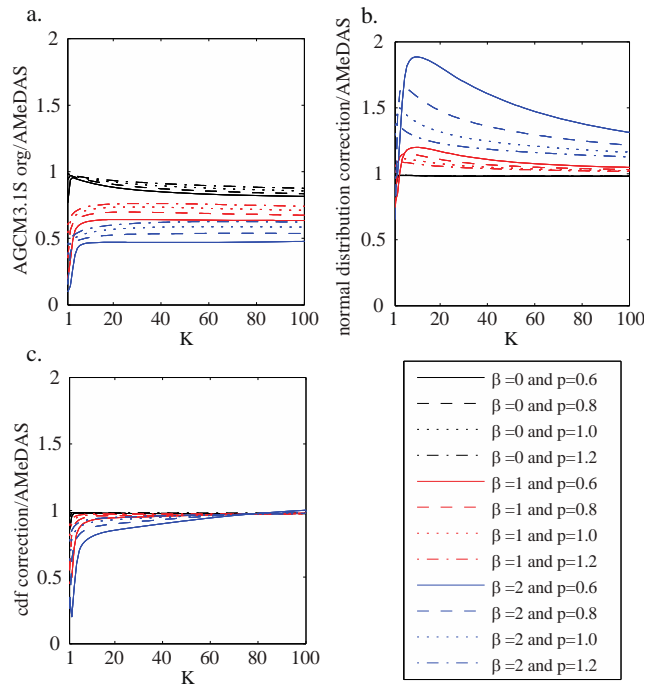


図-10 異なるバイアス補正手法とAMeDASによる現在気候の6月から10月における25年間のSSの総流出量の比較。
a : AGCM3.1S org/AMeDAS, b : 正規分布型手法/AMeDAS, c : cdf手法/AMeDAS。

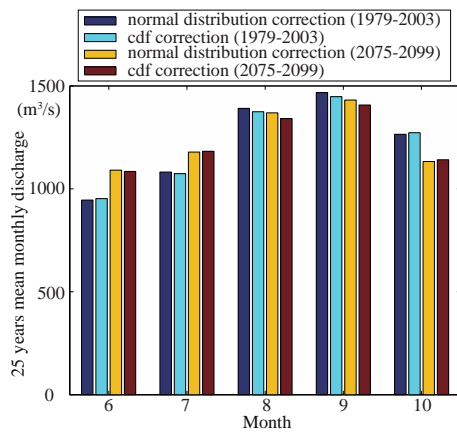


図-11 現在気候と将来気候の6月から10月における25年間の月平均総流量。

これらの変化については, その信頼性のより詳細な検討が必要であると考えられる。

次に, 月平均SS流出量の将来予測結果を図-12に示す。SS流出量は6月と8月に将来において増加する傾向が示された (図-12)。現在気候におけるSS流出量の再現計算結果の検討でも示された通り, 50 m³/sを超えるような洪水の発生回数の変化に注目すると, 6月, 8月の両者とも25年間で約10回増加することが確認され, 洪水の発生回数の増大がSS流出量を増加させていることが分かった。

最後に, 長期的な栄養を検討するために, 現在気候と将来気候におけるSS, PTN, PTPの25年間の総流出量の比較を行った。その結果, 将来気候では現在気候の約1.2倍となり, 地球規模での環境変動の影響によってSSおよ

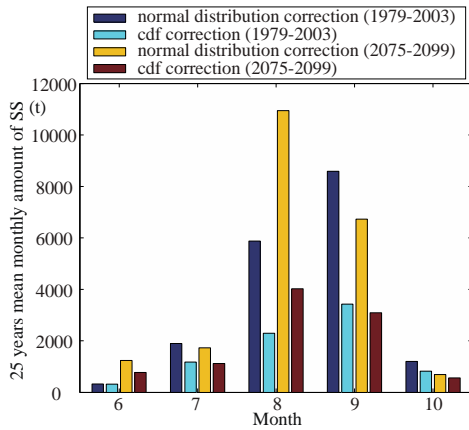


図-12 現在気候と将来気候の6月から10月における25年間のSSの月平均総流出量。

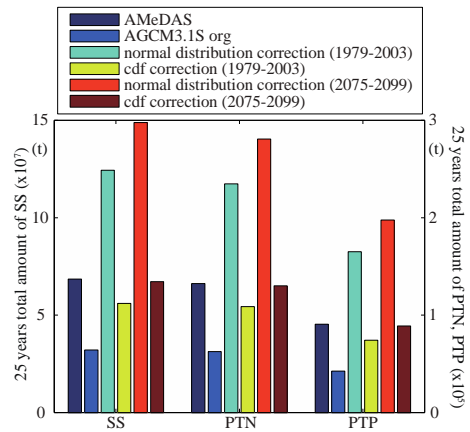


図-13 現在気候と将来気候の6月から10月における25年間の流域からの総栄養流出量の推定値。

び栄養流出量が増加する可能性が示された (図-13)。しかし、本研究の結果は1つのモデルのみで行った検討であるため、今後は複数のモデルを用いることで不確実性の検討をさらに進めていく予定である。

5. おわりに

本研究では、知床ラウス川流域を対象にAGCM3.1Sを用いた栄養塩流出量の将来予測へ向けた解析を行い、以下の様な結論を得た。

- (1) ラウス川流域において貯留関数法を利用することで、実測流量を良好に再現することが出来た。
- (2) GCMにおける降水量のバイアス補正には、流量の再現性も考慮した結果、cdf手法が適していることが示唆された。
- (3) 異なるバイアス補正手法による栄養流出量の不確実性をGCMとAMeDASによる総SSおよび栄養流出量の比を用いて検討した結果、正規分布型手法はAMeDASよりも過大な値を示すことが確認された。一方、cdf手法では全体的にAMeDASとの比が1に近い値を示した。よって、栄養流出量もcdf手法により高精度に再現出来ることが確認された。
- (4) 栄養流出量の将来予測を行った結果、将来、SSおよび栄養流出量が増加する可能性が示唆された。

参考文献

- 1) Twelfth Session of Working Group I: Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report Climate Change 2013: The Physical Science Basis Summary for Policymakers, 2013, http://www.climatechange2013.org/images/uploads/WGIAR5-SPM_Aproved27Sep2013.pdf.
- 2) 小杉知史, 高橋修平, 堀彰, 知床半島ウトロを中心としたオホーツク海南西部の海氷勢力と沿岸気象条件, 北海道の雪氷, 第28号, pp.77-80, 2009.
- 3) 青田 昌秋, オホーツク海・北海道沿岸域における流水勢力

- の減少傾向(1892年-2000年), 号外海洋, 第30巻, pp.18-24, 2002.
- 4) Maruya Y., A. Abuliz, K. Nakayama, T. Kuwae, T. Okada, T. Ishida, Mass transport and nutrient circulation evaluated by stable isotope analysis and chemical decomposition, APHW, pp.428-435, 2010.
 - 5) Aynur Abliz, 中山恵介, 丸谷靖幸, 桑江朝比呂, 岡田知也, 石田哲也, 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, 水工学論文集, 第55巻, pp.1303-1308, 2011.
 - 6) Aynur Abliz, 中山恵介, 丸谷靖幸, 井上徹教, 桑江朝比呂, 館山一孝, 岡田知也, 加藤淳子, 石田哲也, 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.721-726, 2012.
 - 7) 立川康人, 滝野晶平, 市川温, 椎葉充晴, 地球温暖化が最上川・吉野川流域の河川流況に及ぼす影響について, 水工学論文集, 第53巻, pp.475-480, 2009.
 - 8) Kim S., Y. Tachikawa, E. Nakakita and K. Takara, Hydrologic Evaluation on the AGCM20 Output Using Observed River Discharge Data, Hydrological Research Letters, Vol.4, pp.35-39, 2010, DOI: 10.3178/hrl.4.35.
 - 9) Nakayama K., A. Abuliz, T. Nakaegawa and Y. Maruya, Evaluation of nutrient flux from Shiretoko into the ocean using MRI-GCM, Hydrological Research Letters, Vol.5, pp.47-51, 2011, DOI: 10.3178/HRL.5.47.
 - 10) 飯泉仁之直, 西森基貴, 石郷岡康史, 横沢正幸, 統計的ダウンスケーリングによる気候変化シナリオ作成入門, 農業気象, 第66(2)巻, pp.131-143, 2010.
 - 11) 渡部哲史, 沖大幹, 鼎信次郎, 気候変動下での全球水資源量評価に向けた気候モデル出力値補正手法の開発と検証, 水工学論文集, 第54巻, pp.259-264, 2010.
 - 12) Nakayama K., Y. Maruya, T. Nakaegawa, K. Komai, K. Kokubo, T. Ishida and T. Okada, Projection of "strong wind" events related to recovery from hypoxia in Tokyo Bay, Japan, Hydrological Processes, 2013, DOI: 10.1002/hyp.9829.

(2013. 9. 30受付)