

(幹線流路延長115km, 流域面積1,380km²) 及び網走川下流に位置する汽水湖である網走湖(湖沼面積32.3km², 最大水深16.1m)を対象とした。網走湖は、オホーツク海より流れ込んだ塩水が蓄積することにより上部が淡水層, 下部が高濃度の栄養塩を含む無酸素塩水層の二層構造となっている。

(2) 解析に用いる気候変動予測データ

本研究では、IPCC第5次評価報告書のRCPシナリオを適用した地域気候モデルMRI-NHRCM20¹⁾を採用した。網走川流域を網羅する計算格子点を選定し、降水量、降雪水量、海面気圧、地上風速、地上気温、相対湿度、雲量予測データを抽出し、現在気候(1984年9月～2004年8月)及び将来気候(2080年9月～2100年8月)の計40ヶ年の計算を行うこととした。RCPシナリオについては、表-1に示す計7ケースとした。

表-1 解析ケース

解析ケース	計算期間	RCPシナリオ	海面水温
Case-1	現在気候	—	Had1SST
Case-2	将来気候	RCP8.5	SST1
Case-3			SST2
Case-4			SST3
Case-5		RCP6.0	SST1
Case-6		RCP4.5	SST1
Case-7		RCP2.6	SST1

(3) 気候変動予測データのバイアス補正

MRI-NHRCM20の現在気候予測データは、現況の気候状況を厳密に再現しておらずバイアスを含んでいるため、降水量、降雪水量、地上風速、海面高気温(地上気温より推定)を対象として、確率分布関数²⁾を用いて標準最小二乗基準(SLSC)により適合度評価を行い、現在気候を概ね再現するよう補正を行った。

確率分布関数については、月単位の現在気候を対象に、観測データと気候変動予測モデルによる再現データで気象状況の起こりやすさ(確率分布)が同じになるよう、複数の確率分布関数の中からデータに最も適合する関数として「一般化極値分布」を選定した。

解析対象期間中の発生確率(20年に1度)に対する観測データ、気候変動予測モデルによる再現データの月平均値を算出し、観測データに対する再現データの月平均値の比率(海面高気温については月平均値の差分)を補正係数とし、気候変動予測データに乗じて補正を行った。

(4) 気候変動予測データのダウンスケーリング

網走川流域を約1km×1km格子にメッシュ分割してダ

ウンスケーリングを行い、気象要素・年代毎に気象要素の1kmメッシュ値を推定した(図-2)。

解析対象となる主な気象要素の内、降水量、地上風速については、バイアス補正後の20km格子点の気候変動予測データを空間補間法に適用した。海面高気温及び海面気圧については、バイアス補正後の20km格子点の気候変動予測データを空間補間法に適用して1kmメッシュ値を算出した後、気温減率 $\gamma=0.65^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 及び気圧減率 $\gamma=0.114\text{hPa}/\text{m}$ を用いてメッシュの実標高値に補正した。相対湿度、雲量については、20km格子点の気候変動予測データを空間補間法にそのまま適用した。空間補間法については、補正処理を行った気象要素を基にVariogramを推定し、観測地点間の相関関係を把握した上で、「Kriging法」を採用することとした。

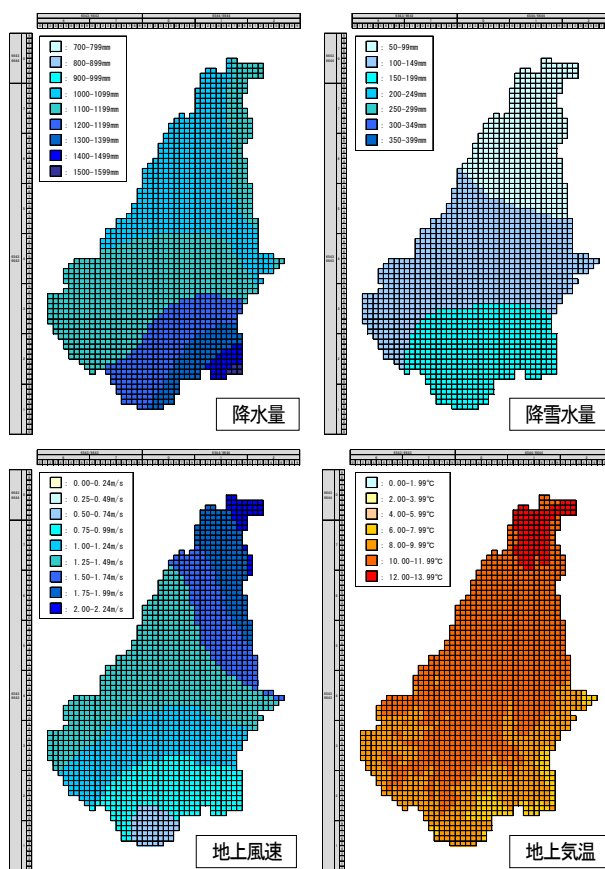


図-2 気象メッシュ値の推定結果
(Case-4: 降水量, 降雪水量, 地上風速, 地上気温)

(5) 熱・水収支解析モデルによる水文諸量の推定

本研究では、網走川流域内の気象水文分布特性、標高・地形特性、植生を反映した水文諸量の推定が可能である長期水循環モデルLoHAS(Long tem Hydrologic Assessment model considering Snow process)³⁾を採用した。LoHASの入力データとして、気候変動予測データの他に、標高、緯度経度、LAI(葉面積指数)、バルク輸送係数、蒸発効率、アルベド、受光係数比(日射量の斜面補正係数)、降雪密度、積雪密度を適用した。

(6) 流出モデルによる流入量の推定

網走川流域の地形から水の流れを模式化した流線網図を作成し、(5)で推定した網走川流域の降水量、融雪量、蒸発散量を入力条件として、地下流出等を考慮したタンクモデルを用いてメッシュからの流出量を算出し、河道追跡計算により網走湖への流入量（自然流量）を算出した。河道追跡計算については、kinematic wave 式を変形した式を用い、差分化して計算を行った。勾配は、ランドスケープ情報から計算対象メッシュとその流下側メッシュの最低標高を抽出し、標高差から決定した。

(7) 水質解析モデルの構築

本研究では、水質シミュレーションの実施にあたり、流体の連続式・運動方程式と水温の移流拡散方程式からなる流動モデル及び水質項目の移流拡散方程式・生態系モデルからなる水質解析モデルを構築し、以下の条件に基づいて網走湖内の水温、DO、SS、COD、T-N、T-Pの再現計算を行い、モデルの妥当性を検証した。

- ①再現期間は2005年～2009年の5ヶ年とした。
- ②計算メッシュは、網走湖の地形を表現できるよう水平方向に150m～300mに分割し、網走湖内の塩分躍層の形成状況を踏まえ、鉛直方向に9層に分割した。
- ③気象条件は、気象庁で公開されている網走地方気象台の気温、気圧、全天日射量、湿度、雲量、風速、風向データを与えた。
- ④流入水温は、網走地方気象台の3日移動平均気温を算出し、流入水温との相関式を作成し、気温の変化に対応した流入水温を与えた。
- ⑤流入汚濁負荷量は、網走湖の流入河川における水質観測データと河川流量データを基に相関式（L-Q式）を作成し、与えた。
- ⑥網走湖下流端の水位は、水位観測地点である川尻漁場の観測水位を与え、水位低下時には網走湖から網走川下流へ流出し、水位上昇時には、網走湖下流端から網走湖へ塩水が遡上することとした。
- ⑦流入水温及び塩分は、水質観測地点St-3での鉛直観測結果を用い、網走湖への逆流時に水位上昇が5時間以上継続している場合に塩水遡上が発生するものとして底層の観測結果を与え、水位上昇が5時間未満の場合にはまだ塩水が到達していないものとし、表層の観測結果を与えた⁹⁾。
- ⑧12月から翌年2月までを結氷期間とし、生物活動が抑制されているものとして、最終計算値をそのまま春季まで継続する取り扱いとした。
- ⑨非結氷期間中に塩分が流出し塩淡水境界層の位置が低下するものの、結氷期間中に水深6.0mまで戻るものと仮定し、塩淡水境界層を水深6.0mの位置で一定とした。

(8) 水質解析モデルによる水質シミュレーション

(7)で構築した水質解析モデルを用いて、以下の条件に基づいてRCPシナリオ計7ケースの水質シミュレーションを行った。

- ①予測期間は気候変動予測モデルのデータ期間と同様、2080年9月～2100年8月の20ヶ年とした。
- ②気象条件は、(4)で推定した気候変動予測データの気象要素の1kmメッシュ値をそのまま適用した。
- ③網走湖内の水温、塩分濃度、水質項目の初期条件は、観測結果を基に空間分布を推定し、与えた。
- ④網走湖下流端の水位は、本研究において将来気候下の変動予測を行っておらず、予測期間における条件設定が困難であることから、川尻漁場における水位の観測値を基に四半期平均値を算出し、予測期間について繰り返し与えた。
- ⑤流入水温及び塩分は、St-3での鉛直観測結果を観測期間同一日で平均した年間変動を想定し、予測期間について繰り返し与えた。なお、予測計算では、網走湖下流端の水位に四半期平均値を用いるため、網走湖内の水位上昇が継続することによる塩水遡上は発生しないこととした。
- ⑥地形条件、流入汚濁負荷量、結氷期間、塩淡水境界層の位置は、(7)と同様の条件とした。

(9) 塩淡水境界層の違いによる影響の分析

塩淡水境界層の上下変動による水質変化への影響を評価するため、近年の観測値を踏まえて塩淡水境界層水深が上下した場合を想定し、水質シミュレーションによる感度分析を実施した。なお、解析条件はCase-1（現在気候）とし、計算期間を6年間、塩淡水境界層の位置を±2.0mで変化させ、解析を実施した。

3. 結果と考察

(1) 熱・水収支解析モデルによる水文諸量の推定

RCPシナリオ計7ケースについて、網走川流域の降雨量、降雪水量、蒸発散量から水収支的に流出高を算出した結果、気候変動に伴い網走川流域の水文諸量は、降雨量が1.10～1.50倍、降雪水量が0.49～1.00倍、総蒸発散量が1.04～1.19倍、流出高が1.00～1.28倍となり、降雨量及び総蒸発散量の増加、降雪水量の減少が顕著となることが明らかとなった（図-3）。

また、本郷地点上流における水文諸量は、現在気候の19ヶ年平均値で、降雨量696mm、降雪水量260mm、総蒸発散量421mmとなった（表-2）。本研究で推定した降水量（＝降雨量＋降雪水量）及び蒸発散量は、既往資料⁹⁾

による網走川流域の推定結果と概ね同程度となっていることから、LoHASにより推定した水文諸量は妥当であるといえる。年間流出高は19ヶ年平均値で535mm、既往検討で算出されている自然流量の同期間平均値538mmに対する相対誤差は約1%となり、流域水収支は妥当であるといえる。なお、年間流出高の各年の推定誤差は約-300～400mmとなり、流出高の推定精度に大きなバラツキが見られたが、気象分布特性、土壌湿潤状況、流域内の貯留状況の違いによるものと考えられる。

(2) 流出モデルによる流入量の推定

図-4に、本郷地点における自然流量の経月変化及び年間変動を示す。推定結果より、既往検討で推定されている自然流量に対する各月の誤差にバラツキが見られ、出水のタイミングが十分再現されていないものの、水質変化が特に顕著となる小規模流量を概ね再現している。

また、解析期間の各月平均値で見ると、現況の自然流量の年間変動を再現できており、本研究で採用した流出解析手法は妥当であるといえる。

(3) 水質解析モデルの構築

網走湖の湖心に位置する水質観測地点St-5において、再現期間の各年中、全層での塩分及びクロロフィルaの年平均値が最も高く、クロロフィルaの異常増殖が見られた2005年を対象として、表層・底層での水質項目観測結果と水質解析モデルによる計算結果を整理し、図-5に示す。

水温については、観測値は、表層水温は季節変化に対応し、夏場の水温上昇及び冬場の水温低下が確認できる。下層水温は逆に変化が少なく、1年を通してほぼ8℃前後の値となっている。計算値は、表層及び底層の水温変化

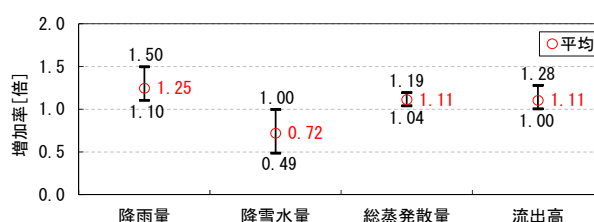


図-3 気候変動に伴う水文諸量の増加率

表-2 流域水収支（本郷地点上流）

	降雨量 mm	降雪量 mm	総蒸発量 mm	水収支 mm	流出高 mm	誤差 mm	誤差率
1984年	809.39	342.86	450.18	702.06	335.44	366.63	109.3%
1985年	581.90	226.46	396.45	411.92	444.94	-33.02	-7.4%
1986年	903.40	223.72	439.40	687.72	333.80	353.92	106.0%
1987年	850.06	216.72	448.50	618.29	344.02	274.27	79.7%
1988年	608.57	208.28	396.23	420.62	506.89	-86.27	-17.0%
1989年	632.62	308.71	428.40	512.92	494.95	17.98	3.6%
1990年	755.81	222.87	402.98	575.69	531.80	43.89	8.3%
1991年	579.43	363.08	399.31	543.20	397.03	146.17	36.8%
1992年	600.91	276.93	457.13	420.70	705.74	-285.04	-40.4%
1993年	708.48	265.81	430.79	543.51	521.35	22.16	4.3%
1994年	1004.47	201.85	428.37	777.96	620.19	157.76	25.4%
1995年	586.01	232.39	390.25	428.14	694.14	-265.99	-38.3%
1996年	470.19	223.42	436.22	257.39	525.65	-268.26	-51.0%
1997年	907.07	204.75	468.36	643.46	584.78	58.68	10.0%
1998年	690.84	332.41	380.37	642.87	714.41	-71.54	-10.0%
1999年	552.27	266.50	399.32	419.44	609.82	-190.38	-31.2%
2000年	589.51	253.75	397.72	445.53	510.45	-64.92	-12.7%
2001年	694.58	278.72	417.88	555.42	736.75	-181.34	-24.6%
2002年	695.54	282.68	422.07	556.15	610.62	-54.47	-8.9%
平均	695.84	259.57	420.52	534.89	538.04	-3.15	-0.6%

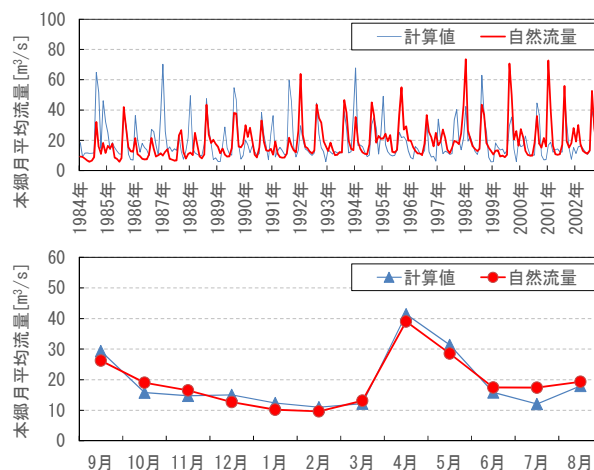


図-4 自然流量の経月変化及び年間変動（本郷地点）

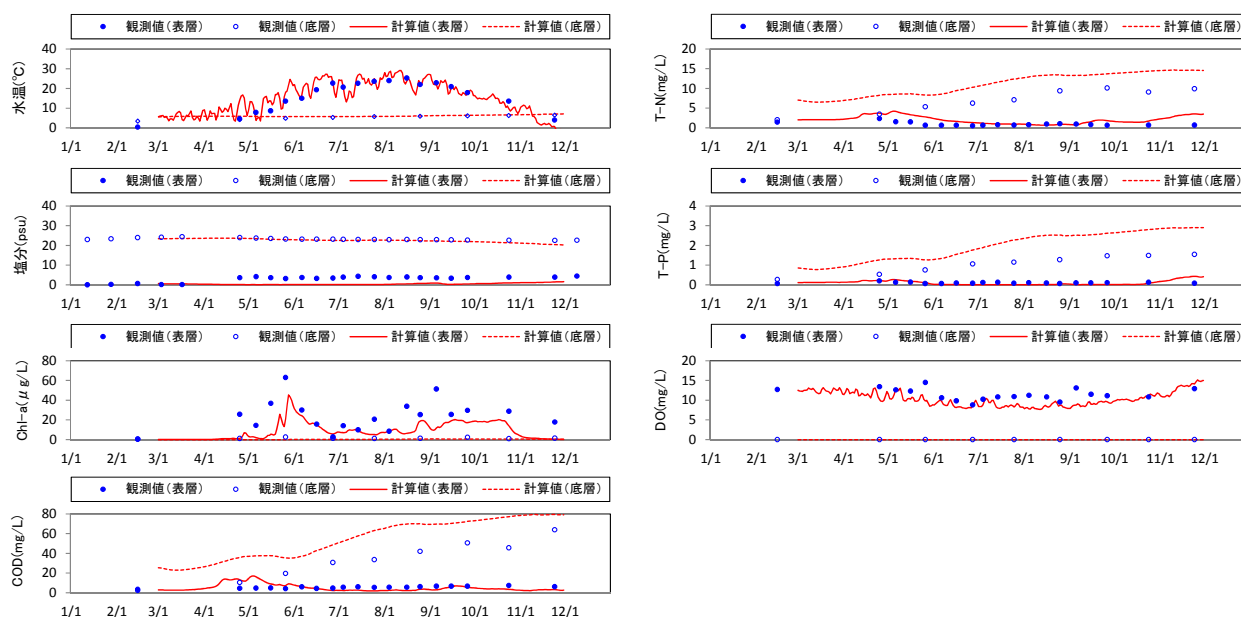


図-5 水質解析モデルによる各水質項目の再現計算結果（2005年、St-5：表層及び底層）

が非常によく再現されている。

塩分については、観測値は、表層塩分は0～3psu程度の値で推移しており、ほぼ淡水である。逆に底層塩分は22psuで推移している。計算値は、表層・下層ともに塩分の値がよく再現されている。上述の表層、底層における水温の傾向と塩分の分布を勘案すると、湖内で塩淡水境界層が形成された結果、表層と底層の流動場が分離され、下層の塩水が滞留していると考えられる。

クロロフィルaについては、観測値は、表層では6月と9月の増殖傾向が確認できる。増殖のオーダーは概ね0～60 $\mu\text{g/L}$ である。また、底層では0 $\mu\text{g/L}$ となっており、クロロフィルaの増殖は表層の淡水層に限定されていることがわかる。計算値でも表層におけるクロロフィルaの増殖時期の傾向とオーダーが概ね再現されている。

DOについては、観測値は、表層で5月及び9月に一時的に高い値を示しているが、他の月では概ね安定しており、冬場に14mg/L程度、夏場に8mg/L程度となっている。また、底層は0mg/Lとなっており、無酸素状態となっている。計算値については、底層の年間を通した無酸素状態がほぼ再現されているものの、表層の5月及び9月における観測値の再現性が良好となっていない。

再現期間において、クロロフィルaの異常増殖が見られた2005年以外の年については観測値に対する再現性が概ね良好であるが、2005年については一時的な値の変化を精度よく再現することができなかった。L-Q式から与えている流入汚濁負荷が実現象よりも過少となっていることが再現精度の要因として考えられる。

(4) 解析モデルによる水質シミュレーション

水質解析モデルによるRCPシナリオ計7ケースの水質シミュレーション結果について、現況気候（Case-1）に対するRCPシナリオ（将来気候：Case-2～Case-7）の影響度合いを評価するため、絶対値の最大・最小・平均値を指標とした。水質観測地点St-5の表層における水質項目の最大・最小・平均値を整理し、図-6に示す。

水温については、Case-2～Case-7のすべての将来予測ケースでCase-1に比べて水温が上昇しており、Case-2～Case-4については、最大値・平均値ともにCase-1に比べて3～4℃上昇し、最低水温が1～2℃となっている。これは気温及び日射量の変化に対応している。

塩分については、Case-2～Case-7のすべての将来予測ケースでCase-1に比べて表層の塩分濃度が上昇している。増加した河川水が塩淡水境界層に沿って流入することにより表層の流動が大きくなり、底層の塩水の連行・表層水との混合が活発になるものと考えられる。

クロロフィルaについては、最大値でCase-6がCase-1に比べて上昇し、それ以外の将来予測ケースでCase-1に比べて低下している。平均値では、Case-2～Case-7のすべ

ての将来予測ケースでCase-1に比べてクロロフィルa濃度が上昇している。

DOについては、最大値では、Case-1と表層水温の高いCase-2～Case-4で1.5mg/L程度DO濃度が低下している。平均値では、Case-1とCase-2～Case-7の将来予測ケースでそれほど大きな差は見られない。最小値では、表層水温の高いCase-2～Case-4で0.4～0.6程度DO濃度が低下している。

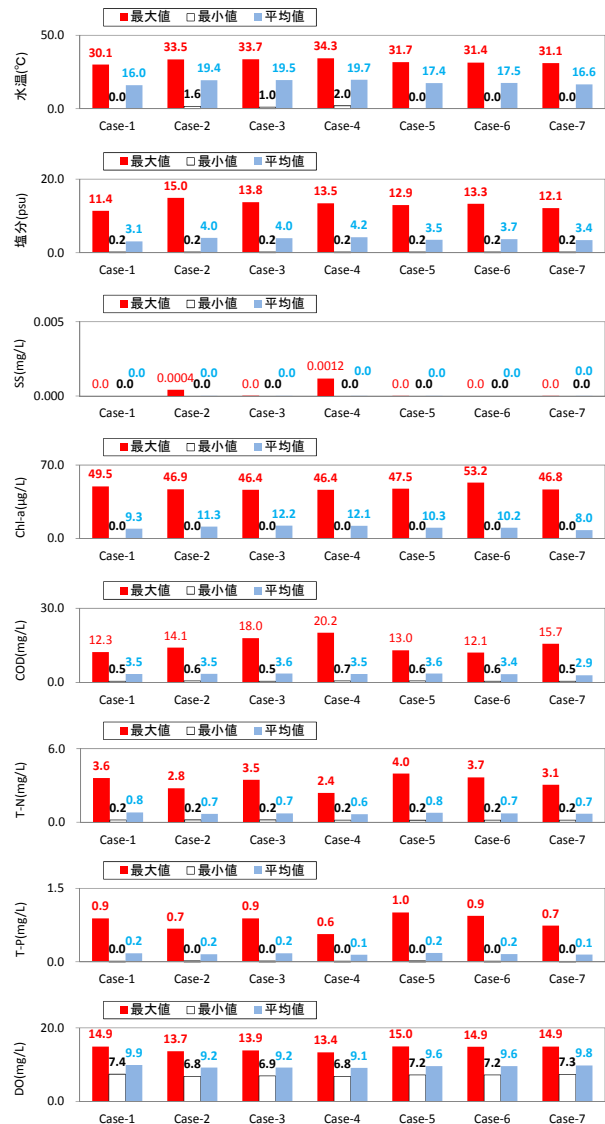


図-6 水質シミュレーション結果
(最大・最小・平均値, St-5: 表層)

(5) 塩淡水境界層の違いによる影響の分析

St-5における底層での塩淡水境界層の感度分析結果を図-7に示す。表層では水質項目の変化が小さく、底層では塩淡水境界層が2.0m上昇した場合にCOD, T-N, T-Pが増加する結果となったが、塩淡水境界層の上昇により底層のCOD, T-N, T-Pが上層に溶出しやすい環境が形成されるためであると考えられる。

また、塩淡水境界層が2.0m上昇した場合に底層の塩分が減少する結果となったが、淡水層の移動に伴い生じる塩淡水境界層でのせん断力の影響を受け、塩水層からの塩分

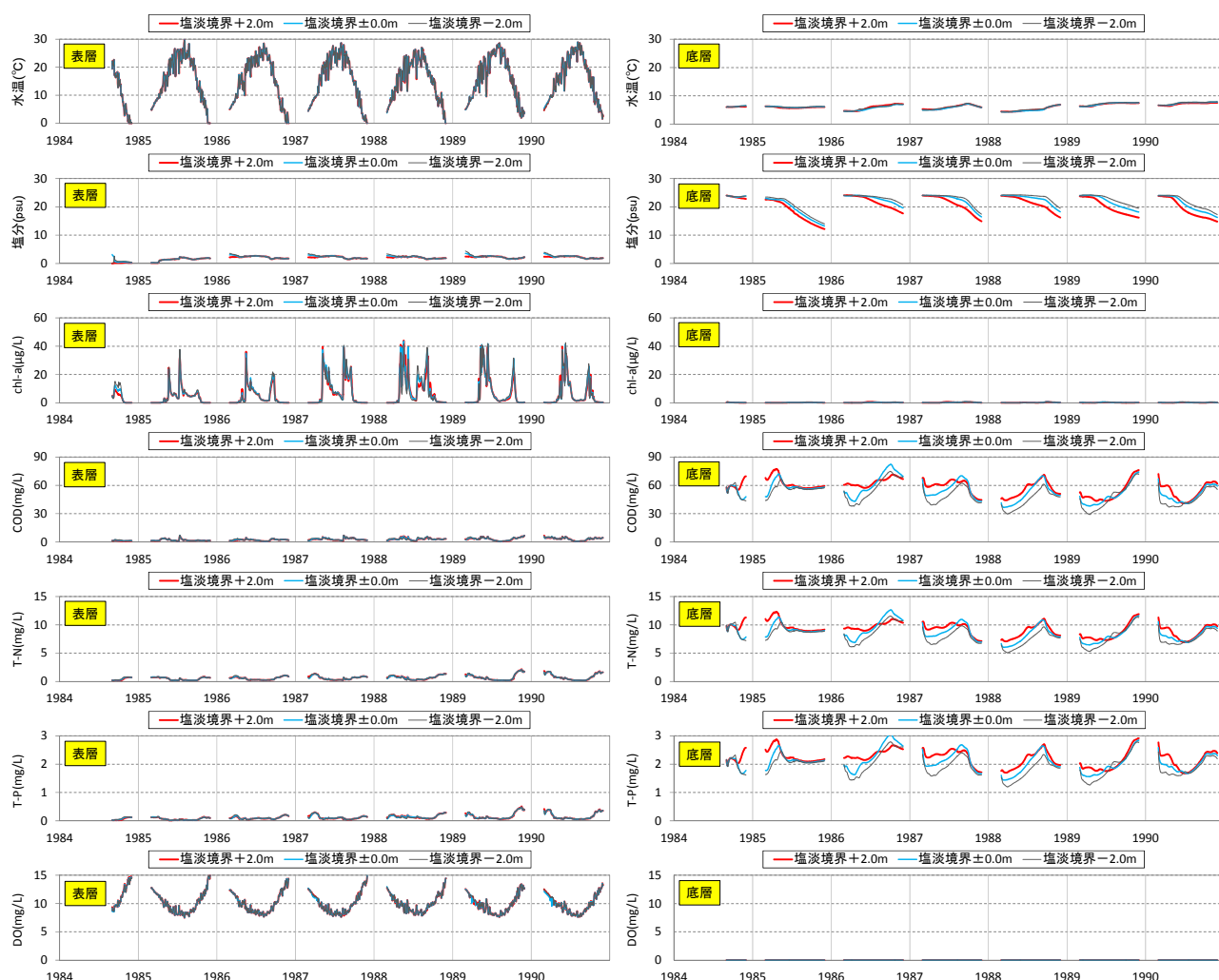


図-7 塩淡水境界層の感度分析による水温、塩分、クロロフィル a、COD、T-N、T-P、DO の計算結果 (St5)

供給量が増加したことによるものと考えられる。

上記の結果から、塩淡水境界層が2.0m上昇した場合、底層でのCOD、T-N、T-Pが上層に溶出しやすくなるとともに底層からの塩分供給量が増加することにより、アオコの発生回数増加及び水質悪化のリスクが高まることが懸念される。

4. おわりに

本研究により、将来的な気候変動に対する汽水湖の水質変化を定量的に評価することができた。しかしながら、流域水収支における各年流出高の推定精度や水質解析モデルによる水質項目の再現性において課題が残る結果となった。水質シミュレーションについては、水質解析モデルを適用する際の前提条件を十分考慮し、網走川河口まで計算メッシュを延伸し、海側の境界より気候変動に伴う潮位変動や水温・塩分条件を与えて遡上計算を行うことで、網走湖内の流動場の再現性向上が期待できる。

今後は、水質シミュレーション前提条件の精査を行い、

解析精度向上を図るとともに、湖内に生息する貝類等への影響の観点からの定量評価も行っていきたい。

謝辞：本報告は、室蘭工業大学大学院博士課程在学中の研究成果である。本研究の実施にあたり、北海道開発局網走開発建設部より網走川流域に関する各種データ・資料をご提供いただいた。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 環境省：日本国内における気候変動による影響の評価のための気候変動予測について（お知らせ）別添資料, 2014.
- 2) 水文統計ユーティリティVer1.5 操作マニュアル：（財）国土技術研究センター, 2003.
- 3) 谷口陽子, 中津川誠, 臼谷友秀：長期水循環に基づく流域の湿潤状態を考慮した洪水流出解析の研究, 水工学論文集第60巻, pp. 163-168, 2016.
- 4) 国土交通省：湖沼における水理・水質管理の技術, 2007.
- 5) 疋田貞良：藻琴山北麓地域の水収支, 昭和61年度技術研究発表会, pp. 45-50, 1987.