



地球温暖化に伴う気候変動が積雪寒冷地の水環境に及ぼす影響の定量評価手法の研究

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2019-12-24 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 工藤, 啓介 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.15118/00010096

博士學位論文

題目 地球温暖化に伴う気候変動が積雪寒冷地の
水環境に及ぼす影響の定量評価手法の研究

氏名 工藤 啓介

提出年月日 令和元年 9月 25日

博士論文題目

地球温暖化に伴う気候変動が積雪寒冷地の水環境に及ぼす影響の定量評価手法の研究

氏 名 工藤 啓介

論文内容の要旨

地球温暖化に伴う気候変動の影響は既に顕在化しており、降雪・積雪・融雪に大きく依存する積雪寒冷地の水環境や生態系ではより強い影響を受ける。気温上昇に伴う水温上昇、植物プランクトン異常増殖頻度の増加等が顕著となり、内水面漁業等の地域経済に影響が及ぶことが懸念される。気候変動が及ぼす影響は、温室効果ガスの排出削減等の「緩和策」を最大限実施しても完全に避けられず、影響に備えるための「適応策」の実施が重要となっている。しかしながら、気候変動による影響は地域の特性によって大きく異なるため、市町村等の地域レベルで気候変動の影響リスクを評価することが課題である。

そこで本研究は、気候変動に対する地域レベルでの「適応策」立案に資することを目的として、既に脆弱性を有する積雪寒冷地の汽水湖及び河川環境を対象に、まず1つ目として、地域レベルの変動特性を把握可能な気候変動予測データの高解像度化手法を構築し、次に2つ目として、湖沼環境における水質解析モデルを構築し、水質変化の観点から気候変動の影響を定量的に評価し、最後に3つ目として、河川水温を推定可能な解析モデルを構築し、水温変化と冷水性魚類の生息環境の観点から気候変動の影響を定量的に評価した。

具体的な研究内容として、統計的ダウンスケーリングによる高解像度気候変動予測データの推定では、バイアス補正を適用した統計的ダウンスケーリング手法を構築し、地域気候モデルMRI-NHRCM20の気候変動予測データを解像度1kmへ細分化した。観測値との比較によりバイアス補正の妥当性を検証するとともに、気候変動に伴う水文特性を分析した。

次に、積雪寒冷地汽水湖の水環境変化の分析では、水質解析モデルを構築してシミュレーションを行い、気候変動に対する水質特性及び既に顕在化しているアオコの発生頻度増加のリスクについて検証した。

最後に、積雪寒冷地河川の水温変化と冷水性魚類の生息環境に対する影響の分析では、河川流量と水温の積による熱フラックスの河道追跡モデルを構築し、気候変動に対する水温特性及び水温が上昇した場合のイトウ *Hucho perryi*、サクラマス(ヤマメ) *Oncorhynchus masou* の生息に最適な水温域の変化について検証した。

以上より、本論文は、積雪寒冷地の地域レベルにおける気候変動の影響を水環境の観点から定量的に評価する上で有効な手法を提示するものである。気候変動に対する地域レベルでの水環境管理や生態系保全のあり方を検討し、地域に根差した効果的・効率的な「適応策」を立案する上で非常に有益であり、本論文の社会的意義は極めて高いと考える。

地球温暖化に伴う気候変動が積雪寒冷地の水環境に 及ぼす影響の定量評価手法の研究

目 次

第1章 序論	1
1.1 はじめに	1
1.2 気候変動が水環境に与える影響	3
1.2.1 影響要因の相互関係	4
1.2.2 湖沼における水温変化	5
1.2.3 河川における水温変化	6
1.2.4 冷水性魚類の生息適地の変化	9
1.3 最近の研究動向	10
1.3.1 気候変動予測データの高解像度化に関する研究	10
1.3.2 湖沼環境の影響評価に関する研究	11
1.3.3 河川環境の影響評価に関する研究	12
1.4 研究方針	13
1.5 論文の構成	15
1.6 参考文献	16

第2章 統計的ダウンスケーリングによる

高解像度気候変動予測データの推定 17

2.1	解析方法	17
2.1.1	気候変動の将来予測における温室効果ガス排出シナリオ	17
2.1.2	気候変動予測データの概要	22
2.1.3	対象流域	26
2.1.4	解析条件	29
2.2	解析結果	36
2.2.1	現在気候と将来気候の比較検証	36
2.3	解析方法に対する評価	40
2.4	本章のまとめ	41
2.5	参考文献	42

第3章 気候変動による積雪寒冷地汽水湖の水環境変化の分析 44

3.1	解析方法	44
3.1.1	対象流域	44
3.1.2	解析条件	49
3.2	解析結果	65
3.2.1	熱・水収支解析モデルによる水文諸量の推定	65
3.2.2	流出モデルによる流入量の推定	67
3.2.3	水質解析モデルによる水質シミュレーション	71
3.3	定量評価手法に対する評価	78
3.4	気候変動への適応策に関する考察	79
3.5	本章のまとめ	80
3.6	参考文献	81

第4章 気候変動による積雪寒冷地河川の水温変化と	
冷水性魚類の生息環境に対する影響の分析	82
4.1 解析方法	82
4.1.1 対象流域	82
4.1.2 解析条件	84
4.2 解析結果	99
4.2.1 熱・水収支解析モデルによる水文諸量の推定	99
4.2.2 流出モデルによる流入量の推定	101
4.2.3 フラックスの河道追跡による河川水温の推定	104
4.2.4 冷水性魚類の生息環境に対する水温変化の影響評価	107
4.3 定量評価手法に対する評価	114
4.4 気候変動への適応策に関する考察	115
4.5 本章のまとめ	116
4.6 参考文献	117
第5章 結論	119
謝辞	121

第 1 章 序論

1.1 はじめに

平成 25 年から平成 26 年にかけて公表された気候変動に関する政府間パネル IPCC 第 5 次評価報告書では、「気候システムの温暖化には疑う余地はない」と結論づけられており¹⁾、気候変動の影響は既に顕在化しつつある。

既往報告²⁾において、既に気温上昇や都市化等の影響により、都市及びその周辺を中心とした流域で水質や水生生態系に様々な影響が生じているとの報告がなされており、降雪・積雪・融雪に大きく依存する積雪寒冷地の水環境や生態系ではより強い影響を受けるものと考えられる。

気候変動による影響は、二酸化炭素等の温室効果ガスの排出削減と吸収対策を最大限実施したとしても完全には避けられず、影響に備えるための「適応策」が重要となっている³⁾。

しかしながら、気候変動による地域生活への影響は地域の特性によって大きく異なることから、気候変動の不可逆性・不確実性・長期継続性・地域性・多様性を踏まえ、市町村等の地域レベルで気候変動の影響リスクを評価し、地域に根ざした「適応策」を立案することが地域社会に求められている⁴⁾。

そのため本研究では、積雪寒冷地における気候変動の影響に着目し、地域レベルでの気候変動予測、気候変動に伴う湖沼環境・河川環境への影響を定量的に評価可能な手法を構築することにより、気候変動に対する地域レベルでの「適応策」立案に資することを目的としている。

研究の流れは、まず 1 つ目として、地域レベルの変動特性を把握可能な気候変動予測データの高解像度化手法を構築し、次に 2 つ目として、湖沼環境における解析モデルを構築し、水質変化の観点から気候変動の影響を定量的に評価し、最後に 3 つ目として、河川水温を推定可能な解析モデルを構築し、水温変化と冷水性魚類の生息環境の観点から気候変動の影響を定量的に評価した。

気候変動予測データに関しては、近年の IT 技術の飛躍的向上とシミュレーション技術の発達に伴って、空間的かつ時間的な高解像度化が進んでおり、日本周辺の領域では解像度 5~20km の日単位の予測が行われているとともに、バイアス補正を適用した統計的ダウンスケーリングの技術開発も進められている。

しかしながら、「適応策」の立案を行う上で必要となる 1km 程度の解像度へのダウンスケーリングについては、地域レベルの現況気候に対し気候変動予測データが誤差を有しており、バイアス補正時に適用する現況気候値や補正方法によって推定精度が大きく変わるという課題がある。

次に、気候変動に伴う湖沼環境への影響に関しては、汽水域が気候変動の影

響を最も受けると考えられており⁵⁾、海面上昇に伴う塩分濃度の上昇、水温上昇に伴う植物プランクトン異常増殖頻度の増加やDO濃度の低下等が懸念されるものの、気候変動に伴う汽水湖の水質変化に関する具体的な予測研究が十分行われていない課題がある。

最後に、気候変動に伴う河川環境への影響に関しては、気温上昇により生じうる水温上昇やこれに伴う水中の有機物分解に係る酸素消費速度の増加等により、内水面漁業や生態系等に影響を及ぼすことが懸念される²⁾。積雪寒冷地では、冷水性のサケ科魚類 *Salmonidae* は積雪寒冷地を代表する魚種であり、かつ地域経済を支える貴重な水産資源となっていることから、気候変動に伴い生息環境が損なわれた場合に地域経済にも影響が及ぶ可能性があることから、極めて重要な課題である。

本研究では、積雪寒冷地の湖沼環境として、網走川下流に位置する汽水湖の網走湖を対象に、流体の運動及び水温・水質の移流拡散に基づく解析モデルを構築してシミュレーションを行い、気候変動に対する水質特性を分析するとともに、既に顕在化しているアオコの発生頻度増加のリスクについて検証した。

また、積雪寒冷地の河川環境として、石狩川の支川である空知川を対象に、河川流量と水温の積による熱フラックスの河道追跡モデルを構築し、気候変動に対する水温特性を分析するとともに、水温が上昇した場合のイトウ *Hucho perryi*、サクラマス（ヤマメ） *Oncorhynchus masou* の生息に最適な水温域の変化について検証した。

1.2 気候変動が水環境に与える影響

1.2.1 影響要因の相互関係

気候変動の影響は、気温上昇・降雨変化から、水質・水生生態系、水文、水資源・利水、農業、土砂災害等、多岐にわたると考えられている²⁾。

図 1.1, 図 1.2(1), (2)に示すように、気候変動が湖沼・河川の水環境に及ぼす影響要因と相互関係は極めて複雑であり、かつ気候変動には不確実性を伴うことから、それぞれの影響要因について発生の有無・頻度・程度を正確に予測することは困難である。

しかしながら、気候変動による気温上昇に伴う水温上昇は、少なからず水質や水生生態系への影響を引き起こす要因の一つになると考えられる。

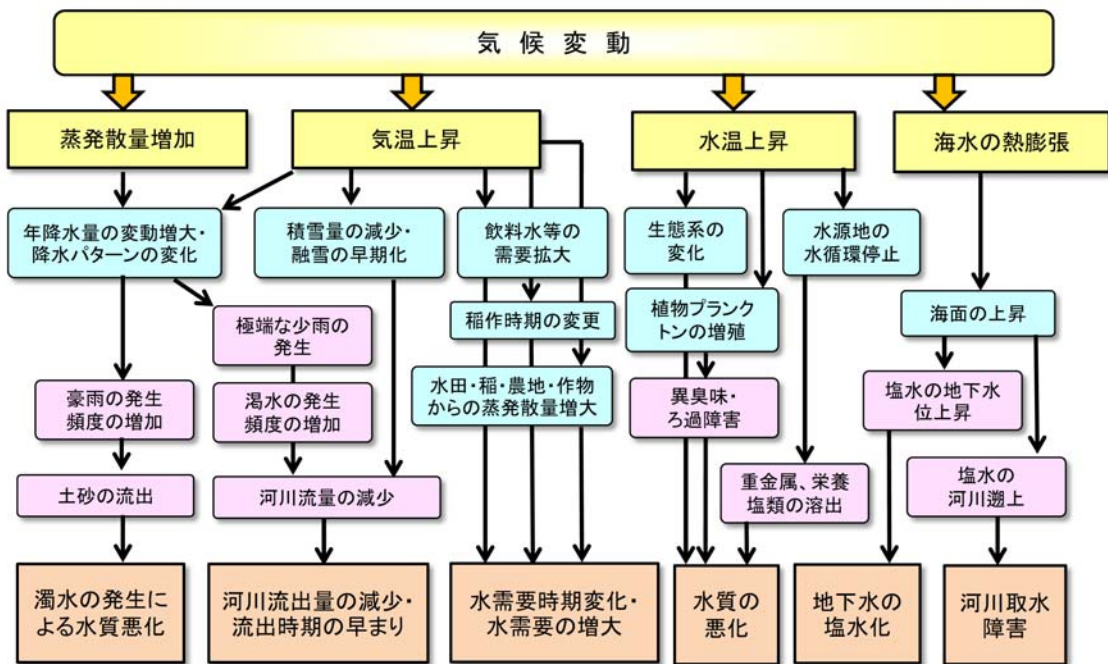


図 1.1 水環境分野における気候変動の影響⁶⁾

1.2.2 湖沼における水温変化

環境省が整理した、全国の湖沼の代表点（湖心またはそれに準じる地点）における過去30年間（1981～2007年度）の水温変化と各湖沼の近傍気温観測地点の気温変化について、図1.3に示す²⁾。

水温上昇がみられる湖沼に関して、夏季は半数以上の湖沼で気温上昇を超えて水温が上昇しており、冬季はほぼすべての湖沼において、水温上昇は概ね気温上昇の範囲内に収まることが報告されている。

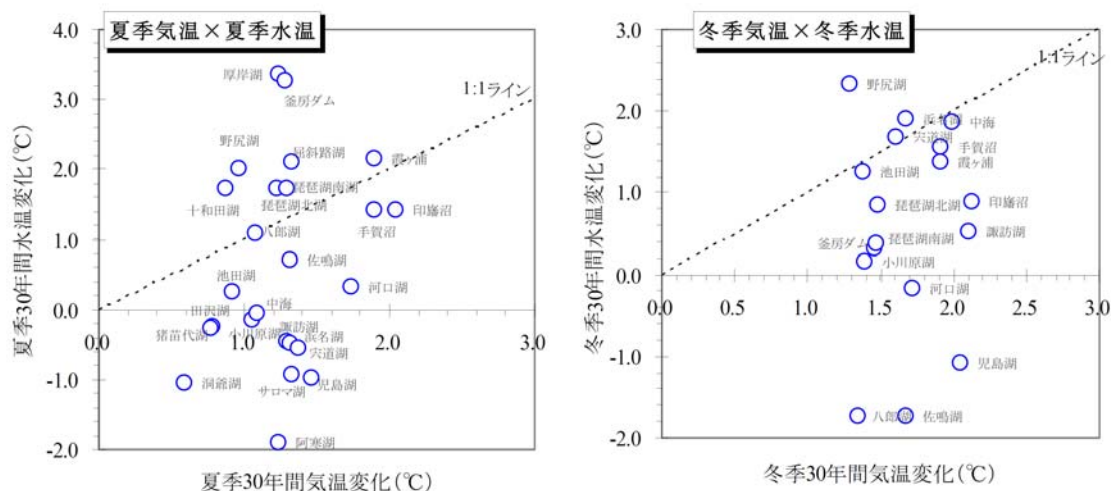


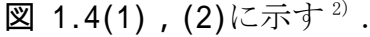
図 1.3 湖沼における過去30年間の気温変化と水温変化との関係²⁾

湖沼においては、既に水温上昇が顕著となっており、積雪寒冷地の汽水湖ではアオコの異常発生や底層の溶存酸素濃度の低下がみられる。

湖沼周辺の自治体における人口増加や下水道の普及といった、流域個別の人為的影響も少なくないものと考えられるが、気温上昇に伴う水温上昇が湖内流動に影響を与え、この変化が水質や水生生態系にも影響が及ぶものと想定される。

今後、気候変動が進行することにより、貧酸素水塊の割合増大、水温躍層の形成、海面上昇に伴う汽水湖の塩水化、植物プランクトン群集の変化が懸念される。

1.2.3 河川における水温変化

環境省が整理した、全国の公共用水域の内、河川の過去30年間（1981～2007年度）の夏季（6～8月）、冬季（12～2月）における水温変化傾向について、 図 1.4(1), (2)に示す²⁾。

夏季については、水温上昇地点の割合が全地点の73%となっており、大都市圏をはじめとした人口密集地や積雪寒冷地である北陸・山陰地方の日本海側で顕著な水温上昇が見られる一方、北海道・東北地方では水温が低下した地点の割合が多いことが示されている。

冬季においては、北海道・東北地方を含む全国で水温上昇傾向にあり、水温上昇地点の割合は全地点の77%となることが示されている。

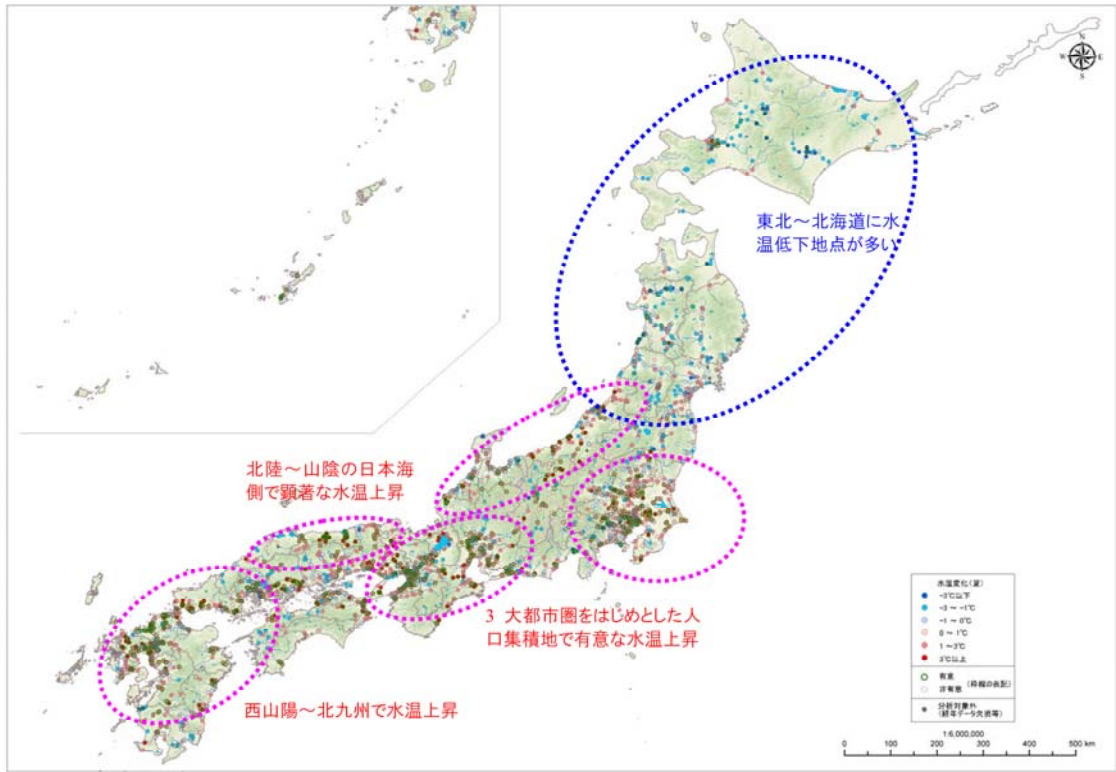


図 1.4(1) 全国河川の過去 30 年間の夏季における水温変化状況²⁾

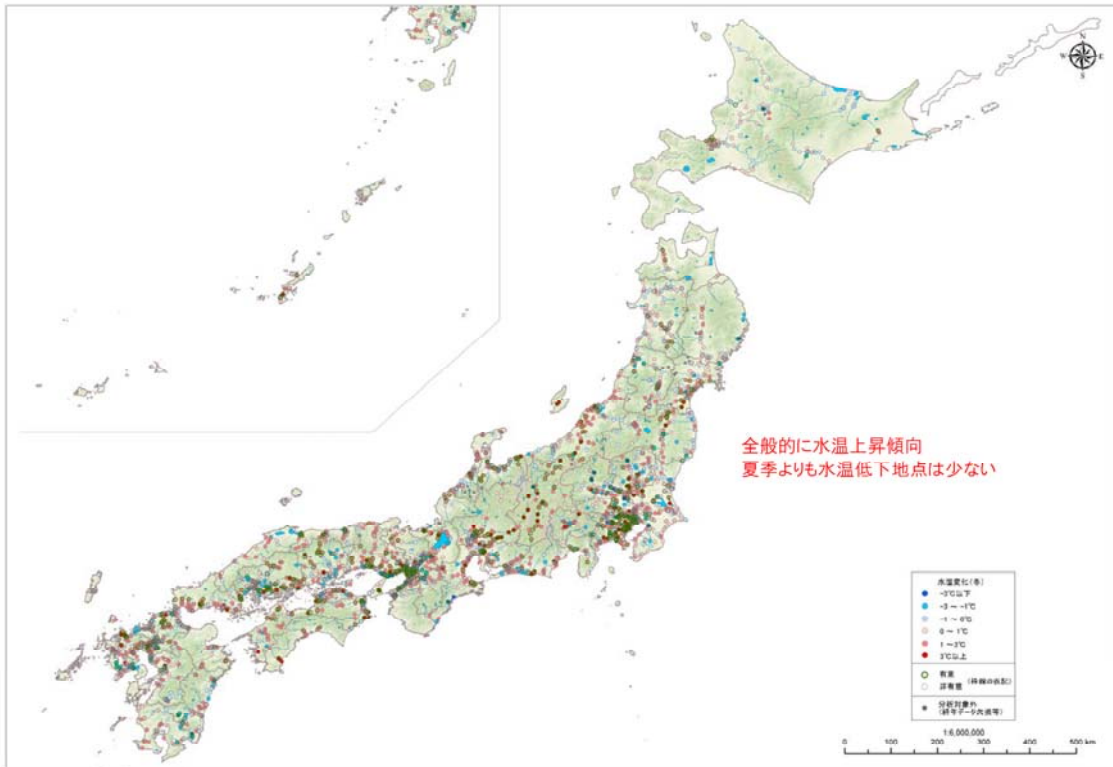


図 1.4(2) 全国河川の過去 30 年間の冬季における水温変化状況²⁾

また、環境省が整理した、全国の主要一級水系 86 水系における過去 30 年間（1981～2007 年度）の水温上昇・低下地点の割合について、図 1.5 に示す²⁾。地域的な傾向も一部見られるものの、水温上昇・低下地点の割合は同一地方でも水系によって異なることから、水系個別の条件に起因するところが大きいものと考えられる。

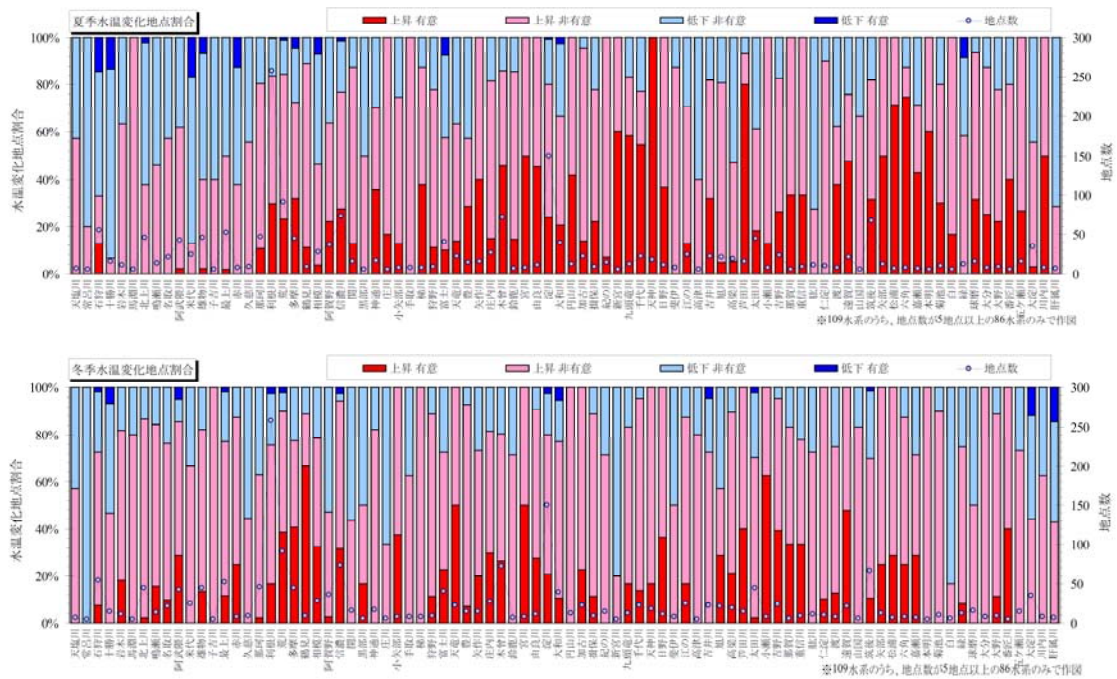


図 1.5 一級水系毎の過去 30 年間の水温変化状況²⁾

河川においては、既に水温上昇が顕著となっており、気温上昇に伴う水温上昇が河川水質や水生生態系にも影響が及ぶものと想定される。

今後、気候変動が進行することにより、短期集中型の豪雨の発生頻度の増加と強度の増大による水質悪化、水利用への影響が懸念される。

1.2.4 冷水性魚類の生息適地の変化

冷水性のサケ科魚類 *Salmonidae* は、気候変動の影響を顕著に受けているとの報告がなされている。

環境省が整理した、気候変動に伴うイワナ類 *Salvelinus* の生息適地の変化について、図 1.6 に示す⁶⁾。

東北地方から中部地方にかけての山間部に広く分布し、中国地方や紀伊半島の高標高域にも生息適地が存在するイワナ類 *Salvelinus* については、河川水温が 3℃上昇した場合、中部山岳以西の西日本において生息適地はほぼ消失し、東日本の生息適地は高標高地のみに限られることが示されている。

また、北海道におけるイワナ類 *Salvelinus* の生息適地は、石狩平野以東や十勝平野等の低標高平野部を除く北海道全域に広く分布しているが、上記と同様、同様に河川水温が 3℃上昇した場合、石狩平野以西の生息適地はほぼ消失し、石狩平野以東も石狩山地、日高山地、知床半島等の高標高地に分断されることが示されている。

生息する魚種によって気候変動に対する適応能力に差があることから、気候変動が進行することにより、積雪寒冷地ではこれまでの水生生態系における共生関係が崩れ分布域が変化するとともに、従来生息していなかった新たな外来種の侵入が懸念される。

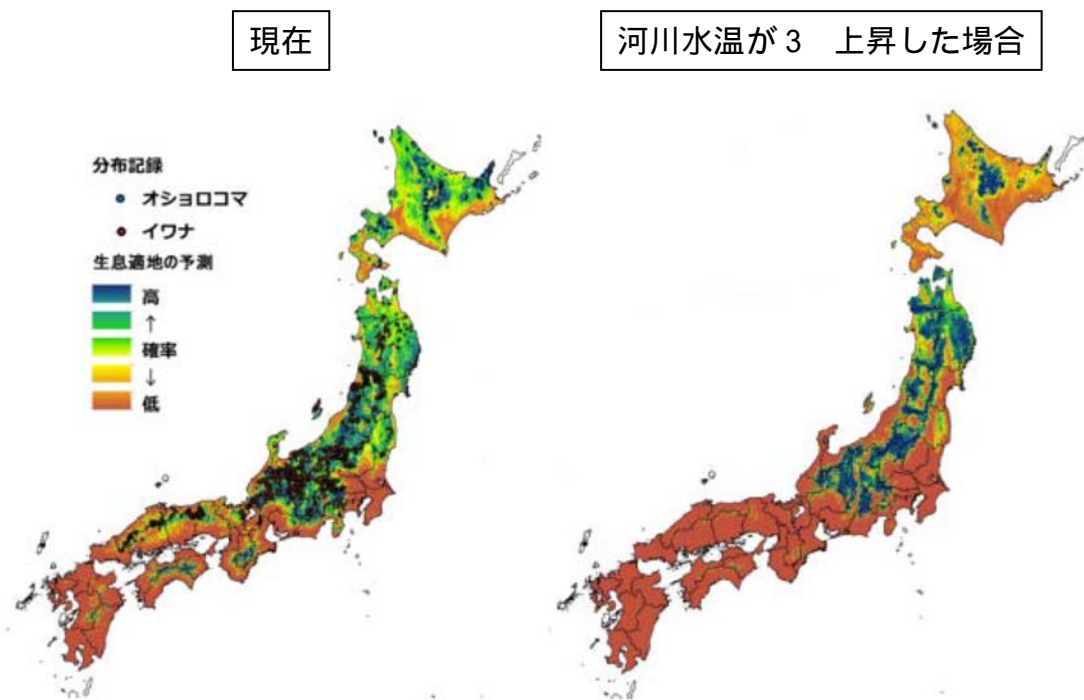


図 1.6 イワナ類 *Salvelinus* の生息適地の変化⁶⁾

1.3 最近の研究動向

1.3.1 気候変動予測データの高解像度化に関する研究

地球温暖化に伴う気候変動による影響が深刻化する中で、自然環境の中長期的な状態を精度良く予測する必要性が高まっており、今後の気候変動状況を予測することは、地域の特性を踏まえた地域レベルでの「適応策」を考える上で、極めて重要である⁷⁾。

気候変動予測については、高度な並列計算が可能である「地球シミュレータ」を用いて、温室効果ガスの排出シナリオに基づき、日本周辺の気候変動に関する様々なシミュレーションを実施されているほか、気候変動予測データを高解像度化するダウンスケーリング手法が開発されている。

気候変動予測データを地域レベルに適用した研究として、藤原ら⁸⁾は、IPCCのSRES A2 シナリオに基づいた RCM20 を用いて確率分布を適用したバイアス補正による統計的ダウンスケーリング方法を提案している。

また、若月ら⁹⁾は、全球モデル GCM を用いて、新たに構築した気候差分ダウンスケーリング法により、関東及び中部山岳域の大気環境の気候変化を予測する領域気候数値実験を行っている。

上記のように、気候変動予測の高解像度化については、本州の地域レベルで研究事例が多くあるものの、気候変動の影響をより強く受けると考えられる北海道や東北地方等の積雪寒冷地に関する研究事例は多くない。

また、気候変動予測データを地域レベルに適切にダウンスケーリングするためには、バイアス補正の精度向上やダウンスケーリング手法について十分な検討が必要であると考えられる。

1.3.2 湖沼環境の影響評価に関する研究

湖沼は、かんがい・水道・工業用水等の水源，地域経済に寄与する内水面漁業の場，自然景観・親水性を有する水辺空間として利用されているが，近年，富栄養化等に起因する水質障害の発生により，水環境や水生生態系へ深刻な影響が及んでいる湖沼が多く見られる。

地球温暖化に伴う気候変動による影響が懸念される中，このような脆弱性を有する湖沼では，地域の自然的・社会的特性を踏まえた新たな水質保全・改善施策の展開が求められており，気候変動予測に基づく水環境保全・改善目標や水質悪化のリスク管理等を検討する必要がある。

以上より，気候変動による湖沼環境への影響評価に関する研究は，最近の主要なテーマであると考えられる。

佐藤ら¹⁰⁾は，生態系モデルを中心とした湖沼モデルによる数値シミュレーションを行い，気温上昇により日本国内の湖沼において，底泥の酸素消費速度と分解速度の増大により DO 濃度が低下し，植物プランクトン増殖速度の増大により COD 濃度が上昇する可能性を示している。

福島ら¹¹⁾は，水質モニタリングデータと気温・降水量データを用いた統計解析を行い，降水量の増減に伴う霞ヶ浦の T-N 濃度変化の可能性を示すとともに，気温上昇に伴う水温上昇，有機汚濁の増加，DO 濃度の減少により，水質が悪化し生態系が劣化するとしている。

熊谷¹²⁾は，琵琶湖の鉛直循環の弱体化に伴う貧酸素水塊の形成と底生生物の斃死を報告している。

上記のように，気候変動による湖沼環境への影響評価については，様々な地域レベルで研究事例が多くあるものの，気候変動に対して脆弱性を有すると考えられる積雪寒冷地の汽水湖に関する研究事例は多くない。

1.3.3 河川環境の影響評価に関する研究

河川は、湖沼と同様、利水、内水面漁業、親水空間として利用されており、流況や水温は河川の水環境や水生生態系を形成する上で重要な要因となっているが、降雪・積雪・融雪に大きく依存する積雪寒冷地では、近年、融雪出水の早期化や渇水に伴い、河川水温の変化が顕著となっている河川が見られる。

積雪寒冷地の河川は、気候変動に伴う流況変化や水温上昇による影響を強く受けるものと考えられ、今後、気候変動予測に基づく水環境・水生生態系の保全・改善目標や水質悪化等のリスク管理等を検討していく必要がある。

以上より、気候変動による河川環境への影響評価に関する研究については、今後の主要なテーマになると考える。

浦部ら¹³⁾は、流出解析モデルに水温モデルを組み込んだ数値解析を行い、淀川におけるアユ *Plecoglossus altivelis* の遡上数が河口水温の上昇を受け大幅に減少し、漁獲量に影響を及ぼす可能性を示している。

新井ら¹⁴⁾は、分布型流出・水温モデルによる河川水温シミュレーションを行い、名取川源流域の水温上昇に伴う底生動物個体数密度の大幅な減少の可能性を示している。

天野ら¹⁵⁾は、魚類の水温依存性評価を行い、気候変動に伴う水温上昇による冷水性魚類の生息領域喪失の可能性を示している。

上記に示したように、気候変動による河川環境への影響評価については、水温変化に伴う水生生物の生息環境変化の観点から研究がされ始めたものの、最新の IPCC の温室効果ガス排出シナリオ RCP に基づく積雪寒冷地の河川に関する研究事例は多くない。

1.4 研究方針

気候変動予測については、気候変動予測データを地域レベルにダウンスケーリングするための手法について十分な検討が必要であることが課題となっている。

また、気候変動予測による湖沼・河川環境への影響については、気候変動に対して脆弱性を有すると考えられる積雪寒冷地において、最新の IPCC の温室効果ガス排出シナリオ RCP に基づく評価手法が十分確立されていないことが課題である。

このような課題を解決するため、気候変動に対する地域レベルでの「適応策」の立案を目指して、気候変動予測データを高解像度化し、気候変動が積雪寒冷地の湖沼・河川環境に及ぼす影響を定量的に評価する。

はじめに、気候変動予測の高解像度化については、降雨予測情報の活用を考えた。具体的には、バイアス補正を適用した統計的ダウンスケーリングにより、地域気候モデル MRI-NHRCM20 の気候変動予測データを解像度 1km へ細分化する。将来気候における水文諸量を推定し、観測値との比較によりバイアス補正の妥当性を検証するとともに、気候変動に伴う水文特性を分析する。

次に、気候変動による湖沼環境の影響評価については、脆弱性を有する積雪寒冷地の汽水湖を対象に、流体の運動及び水温・水質の移流拡散を考慮した解析モデルによるシミュレーションを行い、気候変動に対する水質特性を分析するとともに、既に顕在化しているアオコの発生頻度増加のリスクについて検証する。これにより、気候変動による汽水湖水質への影響を把握し、今後重要になる検討や対策を明らかにする。

最後に、気候変動による河川環境の影響評価については、脆弱性を有する積雪寒冷地のダム上流域を対象に、河川流量と河川水温から求められる熱フラックスの河道追跡に基づく解析モデルを構築し、気候変動に対する水温特性を分析するとともに、河川水温が上昇した場合のイトウ、サクラマスの子息に最適な水温域の変化について検証する。これにより、気候変動による河川水温・魚類生息環境への影響を把握し、今後重要になる検討や対策を明らかにする。

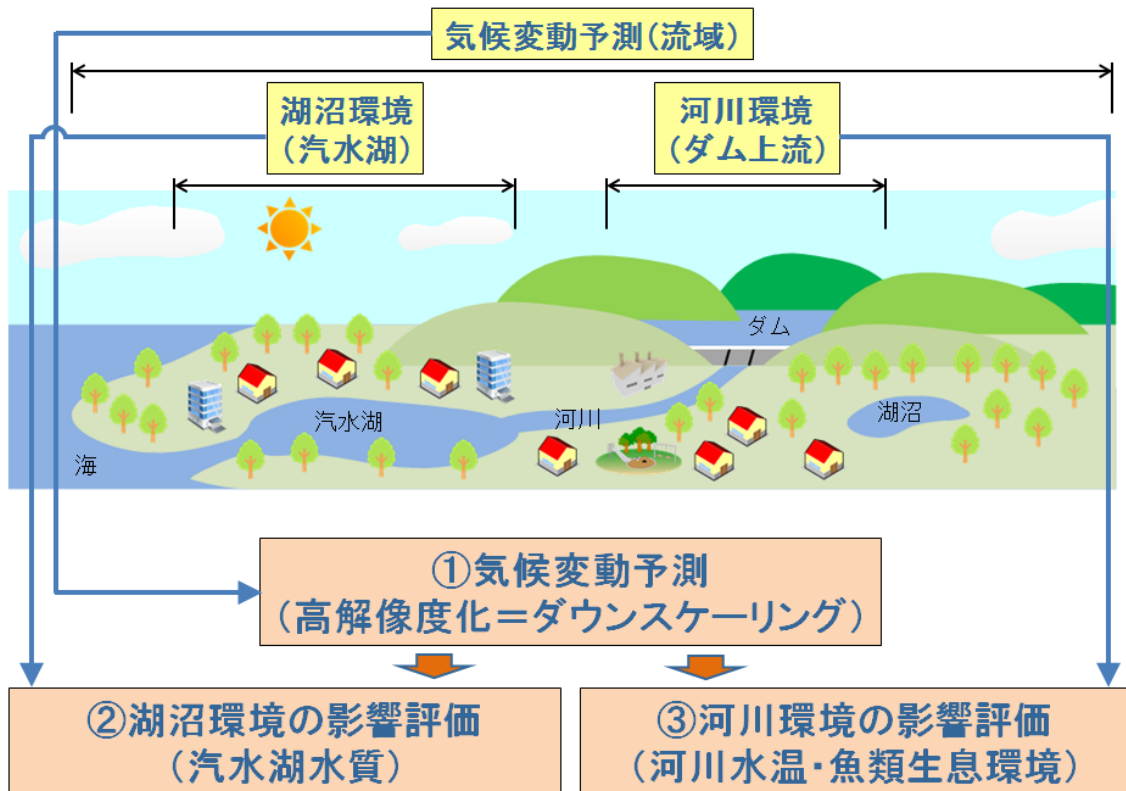


図 1.7 研究方針

1.5 論文の構成

論文構成は、全5章で構成する。全体の流れについて、図 1.8 に示す。

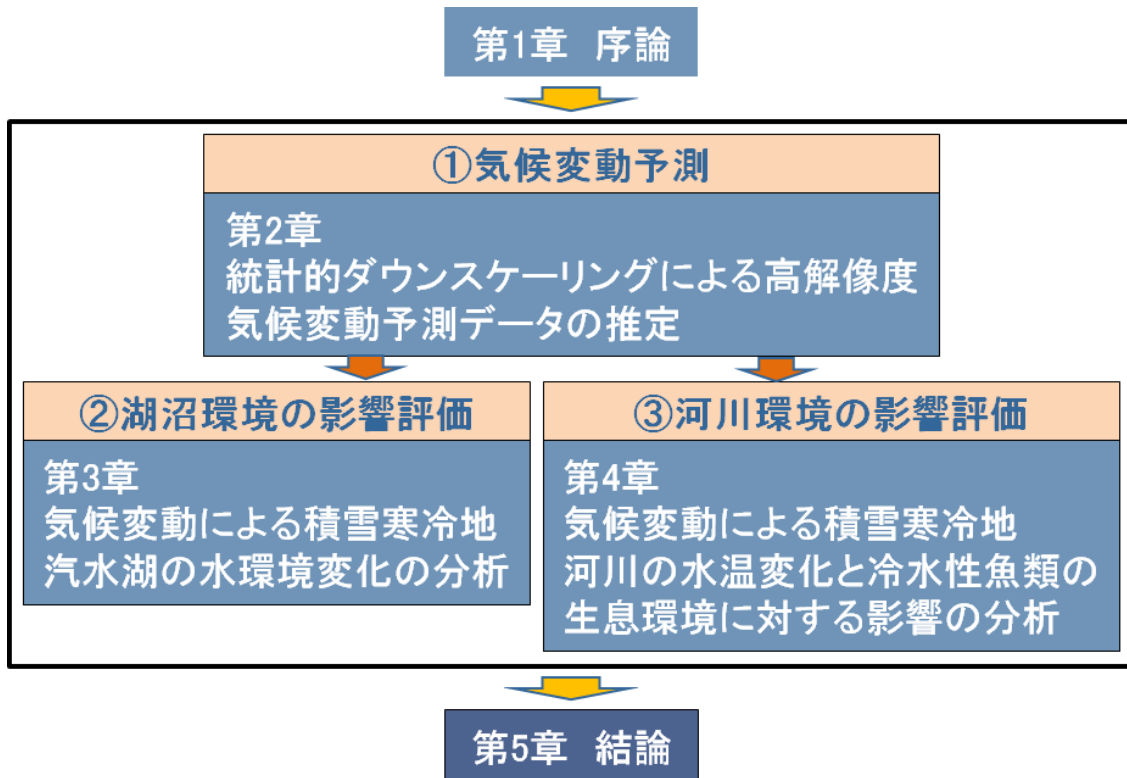


図 1.8 論文の構成

1.6 参考文献

- 1) 環境省：IPCC 第 5 次評価報告書の概要－第 1 作業部会（自然科学的根拠）－，2014 年 12 月版，2014.
- 2) 環境省：気候変動による水質等への影響解明調査報告，2013.
- 3) 国土交通省 HP：<http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_mn_000013.html>（アクセス日：2019/4/30）
- 4) 事業構想大学院大学：自治体レベルでの適応策－「気候変動適応社会に向けて」－，月刊「事業構想」2015 年 10 月号，2015.
- 5) 平井幸弘：汽水湖における地球温暖化・海面上昇の影響とその対応，汽水域研究会設立記念シンポジウム「地球温暖化と汽水域」，2009.
- 6) 環境省 HP:<http://www.env.go.jp/earth/ondanka/rep130412/report_2.pdf>（アクセス日：2019/4/30）
- 7) 国立環境研究所 HP：<<http://tenbou.nies.go.jp/science/description/detail.php?id=29>>（アクセス日：2019/4/30）
- 8) 藤原洋一，大出真理子，小尻利治，友杉邦雄，入江洋樹：地球温暖化が利根川上流域の水資源に及ぼす影響評価，水工学論文集，第 50 巻，pp. 367-372，2006.
- 9) 若月泰孝，原政之，藤田実季子，馬燮銚，井上忠雄，木村富士男，小池俊雄：気候差分ダウンスケーリング法による関東・中部山岳域の確率論的気候変化予測，土木学会論文集 B1（水工学）Vol. 72，No. 4，I_55-I_60，2016.
- 10) 佐藤研三，花木啓祐，松尾友矩：地球温暖化による湖沼水質の変化のモデルによる評価，地球環境シンポジウム講演集，Vol. 3，pp. 299-306，1995.
- 11) 福島武彦，尾崎則篤，河嶋克典，原沢英夫，小尻利治：地球温暖化等の気象変動が河川・湖沼水質に及ぼす影響の統計的解析，京都大学防災研究所年報第 43 号，pp. 97-107，2000.
- 12) 熊谷道夫：地球温暖化が琵琶湖に与える影響，環境技術，第 37 巻，pp. 31-37，2008.
- 13) 浦部真治，竹門康弘，角哲也：淀川におけるアユ遡上数の変動要因解析に基づいた将来予測モデルの検討，京都大学防災研究所年報第 59 号 B，pp. 557-569，2016.
- 14) 新井涼允，糠澤桂，風間聡，竹門康弘：水温環境の変化に伴う源流域における底生動物群集の将来変化，土木学会論文集 B1（水工学）Vol. 70，No. 4，I_1303-I_1308，2014.
- 15) 天野邦彦，望月貴文：気候変動による水温上昇を想定した場合の冷水魚への影響予測，国総研レポート 2012，pp. 96，2012.

第2章 統計的ダウンスケーリングによる

高解像度気候変動予測データの推定

2.1 解析方法

2.1.1 気候変動の将来予測における温室効果ガス排出シナリオ

気候変動の予測を行うためには、放射強制力（地球温暖化を引き起こす効果）をもたらす大気中の温室効果ガス濃度やエアロゾルの量がどのように変化するか仮定（シナリオ）を用意する必要がある¹⁾。

SRES シナリオ²⁾を用いた IPCC 第4次評価報告書では、複数用意した社会的・経済的な将来像による排出シナリオに基づき将来気候を予測していたが、政策主導的な排出削減対策が考慮されていないなどの課題があった（図 2.1，図 2.2）。

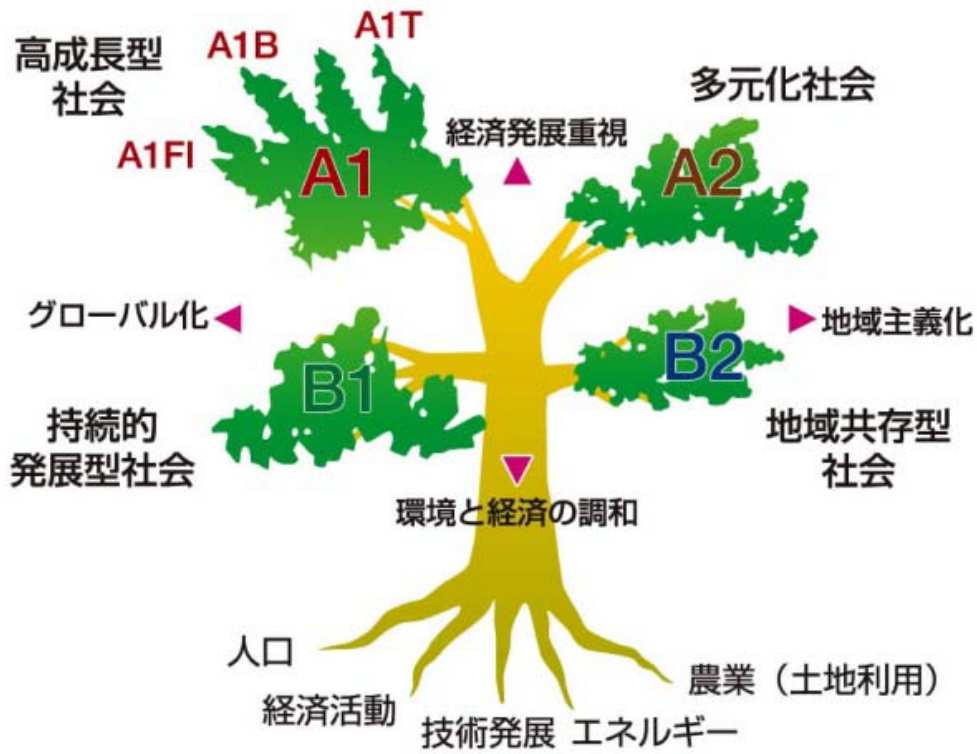


図 2.1 SRES シナリオの概念図²⁾

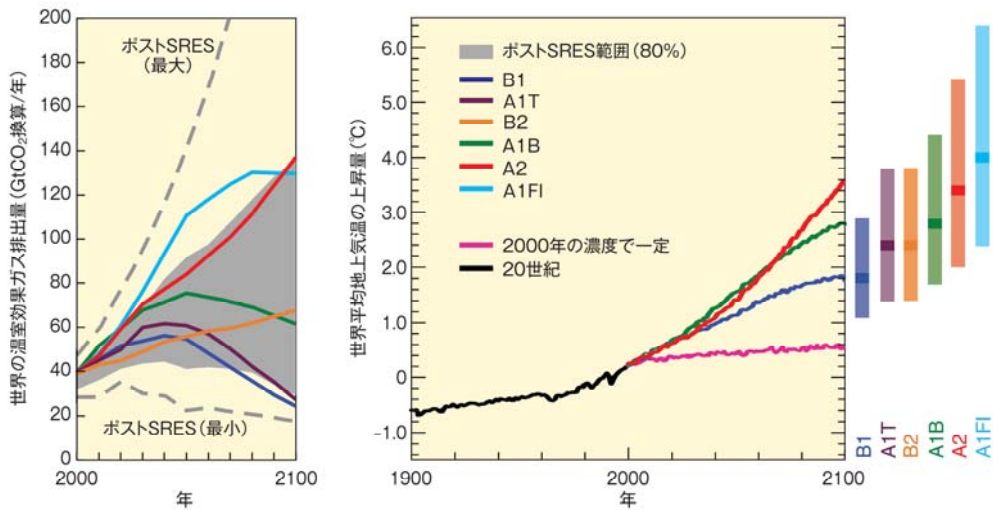


図 2.2 2000～2100年の温室効果ガス排出シナリオ及び地上気温の予測結果³⁾

こうした背景から、政策的な温室効果ガスの緩和策を前提として、将来の温室効果ガス安定化レベルとそこに至るまでの経路のうち代表的なものを選んだ RCP (Representative Concentration Pathways) シナリオが作成され、IPCC 第 5 次評価報告書から RCP シナリオに基づく気候変動予測や影響評価等が行われている。

放射強制力の経路を複数用意し、それぞれの将来気候を予測するとともに、その放射強制力経路を実現する多様な社会経済シナリオを複数作成し、緩和策の効果や気候変動による影響等の評価を行うことが可能となる。

RCP シナリオは、シナリオ相互の放射強制力が明確に離れていることなどを考慮し、2100 年以降も放射強制力の上昇が続く「高位参照シナリオ (RCP8.5)」、2100 年までにピークを迎えその後減少する「低位安定化シナリオ (RCP2.6)」、これらの間に位置して 2100 年以降に安定化する「高位安定化シナリオ (RCP6.0)」と「中位安定化シナリオ (RCP4.5)」の 4 シナリオが選択されており、RCP の数値が大きいほど 2100 年における放射強制力が大きくなっている (図 2.3, 図 2.4)。

RCP シナリオに対する放射強制力のピークについては、RCP2.6 シナリオでは概ね 2020 年、RCP4.5 シナリオでは概ね 2040 年、RCP6.0 シナリオでは概ね 2080 年に迎え、RCP8.5 シナリオでは 2100 年に放射強制力 $8.5\text{W}/\text{m}^2$ を超えるものと予測されている。

また、RCP シナリオに対する気温上昇については、2081~2100 年の世界平均地上気温の 1986~2005 年平均に対する上昇量が試算されており⁵⁾、CMIP5 モデルシミュレーションから得られる幅によれば RCP2.6 シナリオでは $0.3\sim 1.7$ 、RCP4.5 シナリオでは $1.1\sim 2.6$ 、RCP6.0 シナリオでは $1.4\sim 3.1$ 、RCP8.5 シナリオでは $2.6\sim 4.8$ の範囲に入る可能性が高いと予測されている (図 2.5, 図 2.6)。

IPCC 第5次評価報告書における
RCPシナリオとは

RCP...Representative Concentration Pathways (代表濃度経路シナリオ)

略称	シナリオ (予測) のタイプ
 RCP 2.6	低位安定化シナリオ (世紀末の放射強制力 2.6W/m ²) 将来の気温上昇を 2℃以下に抑えるという目標のもとに 開発された排出量の最も低いシナリオ
 RCP 4.5	中位安定化シナリオ (世紀末の放射強制力 4.5W/m ²)
 RCP 6.0	高位安定化シナリオ (世紀末の放射強制力 6.0W/m ²)
 RCP 8.5	高位参照シナリオ (世紀末の放射強制力 8.5W/m ²) 2100年における温室効果ガス排出量の 最大排出量に相当するシナリオ

出典：IPCC第5次評価報告書および(独)国立環境研究所 地球環境研究センターニュースVol.18をもとにJCCCA作成

2100年以前に約 3W/m²でピーク

2100年以降、約 4.5W/m²で安定化

2100年以降、約 6.0W/m²で安定化

2100年において 8.5W/m²を超える

図 2.3 RCPシナリオの概要⁴⁾

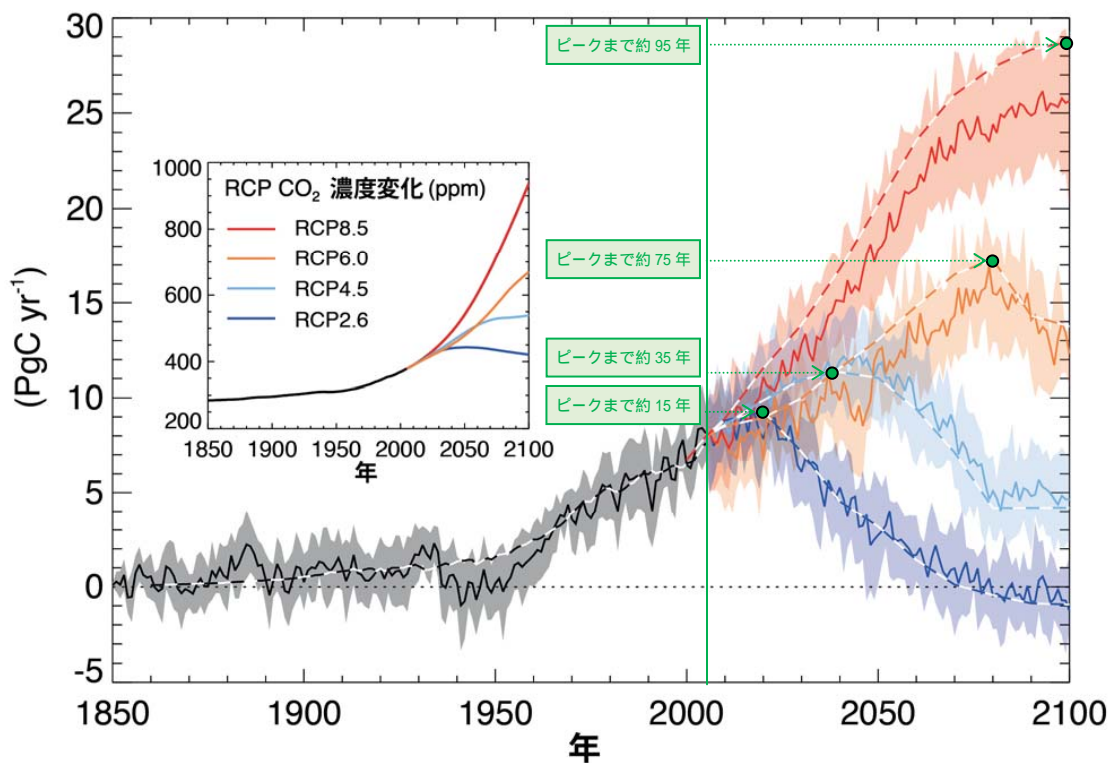


図 2.4 RCPシナリオに基づく放射強制力とRCPシナリオに対応する化石燃料起源の二酸化炭素排出量¹⁾

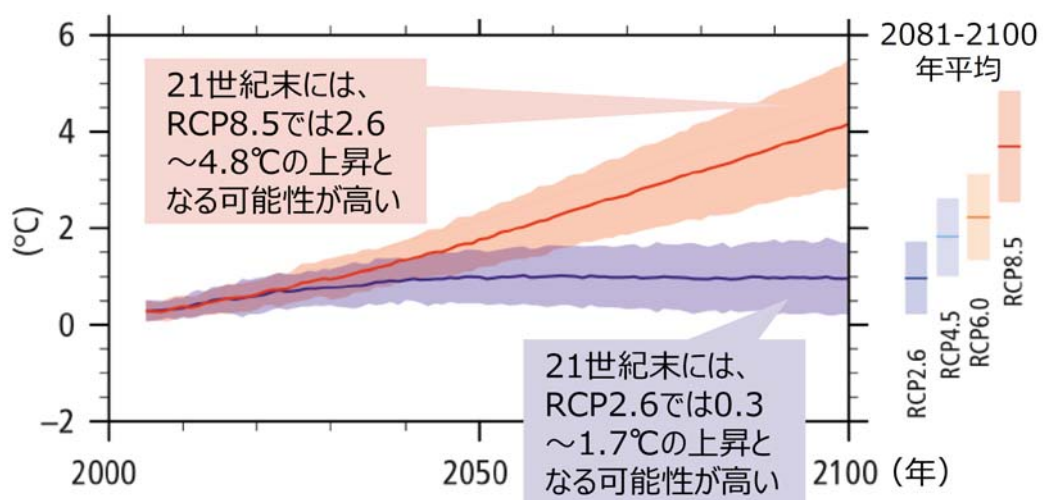
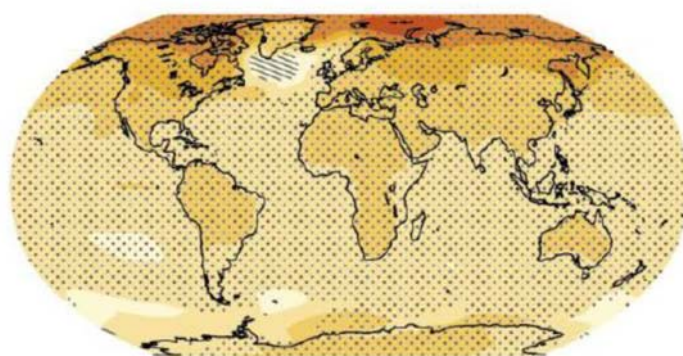


図 2.5 1986-2005 年平均に対する世界平均地上気温の変化⁵⁾

RCP2.6



RCP8.5

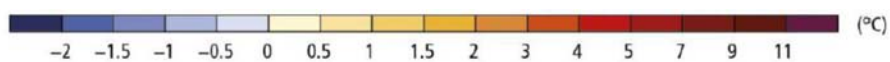
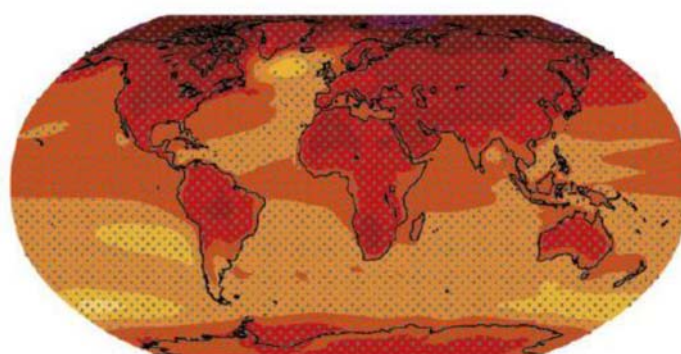


図 2.6 1986-2005 年平均に対する世界平均地上気温の変化予測分布⁵⁾

2.1.2 気候変動予測データの概要

本研究では、IPCC 第5次報告書での評価に用いられた前記の RCP シナリオに基づく気候変動予測データの中から、DIAS（データ統合・解析システム）で一般に公開されており、平成27年に閣議決定された気候変動の影響への適応計画⁶⁾において影響評価結果が整理され汎用性の高い、水平解像度20kmの地域気候モデルMRI-NHRCM20による気候変動予測結果を採用した。

MRI-NHRCM20は、水平解像度60kmの全球気候モデルMRI-AGCM60による気候変動予測結果から日本周辺の気象条件を抽出し、水平解像度20kmにダウンスケーリングされたものであり、大きな出水をもたらす台風や集中豪雨等の数十kmスケールの気象現象を対象としている（図2.7）。

MRI-NHRCM20の予測計算期間、将来予測シナリオ等の諸条件について、表2.1に示す。

表 2.1 予測計算の諸条件⁸⁾

条件	概要
予測計算期間	現在気候：1984/9/1～2004/8/31 将来気候：2080/9/1～2100/8/31
将来予測シナリオ	RCPシナリオ4ケース (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5)
海面水温の状況	現在気候については、観測データ(HadISST)を適用。 将来気候については、IPCC第5次評価報告書で用いられた第5期結合モデル相互比較計画(CMIP5)データより作成された、3種の異なる特徴を有する海面水温の将来変化の空間パターン(SST1, SST2, SST3)を適用。
積雲対流スキーム	MRI-AGCM60において採用された、Yoshimura Scheme(YS)、Kain-Fritsch Scheme(KF)、Arakawa-Schubert Scheme(AS)の3種の積雲対流スキームを適用

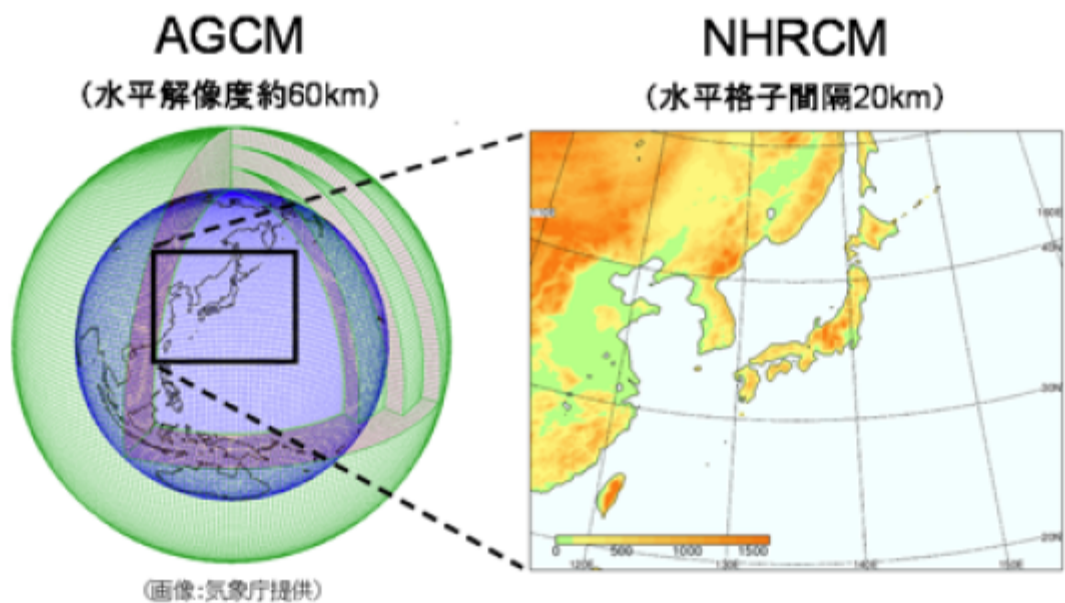


図 2.7 MRI-AGCM60 及び MRI-NHRCM20⁹⁾

表 2.2 MRI-NHRCM20 予測計算ケース^{7),8)}

番号	計算期間	シナリオ	海面水温	積雲対流スキーム	ケース名
1	現在気候 3ケース	-	HadISST	YS	HPA_m02
2			HadISST	KF	HPA_kf_m02
3			HadISST	AS	HPA_as_m02
4	将来気候 16ケース	RCP8.5 9ケース	SST1	YS	HFA_rcp85_c1
5			SST1	KF	HFA_kf_rcp85_c1
6			SST1	AS	HFA_as_rcp85_c1
7			SST2	YS	HFA_rcp85_c2
8			SST2	KF	HFA_kf_rcp85_c2
9			SST2	AS	HFA_as_rcp85_c2
10			SST3	YS	HFA_rcp85_c3
11			SST3	KF	HFA_kf_rcp85_c3
12			SST3	AS	HFA_as_rcp85_c3
13		RCP6.0 3ケース	SST1	YS	HFA_rcp60_c1
14			SST2	YS	HFA_rcp60_c2
15			SST3	YS	HFA_rcp60_c3
16		RCP4.5 1ケース	SST1	YS	HFA_rcp45_c1
-			SST2	YS	HFA_rcp45_c2
-			SST3	YS	HFA_rcp45_c3
17		RCP2.6 3ケース	SST1	YS	HFA_rcp26_c1
18	SST2		YS	HFA_rcp26_c2	
19	SST3		YS	HFA_rcp26_c3	

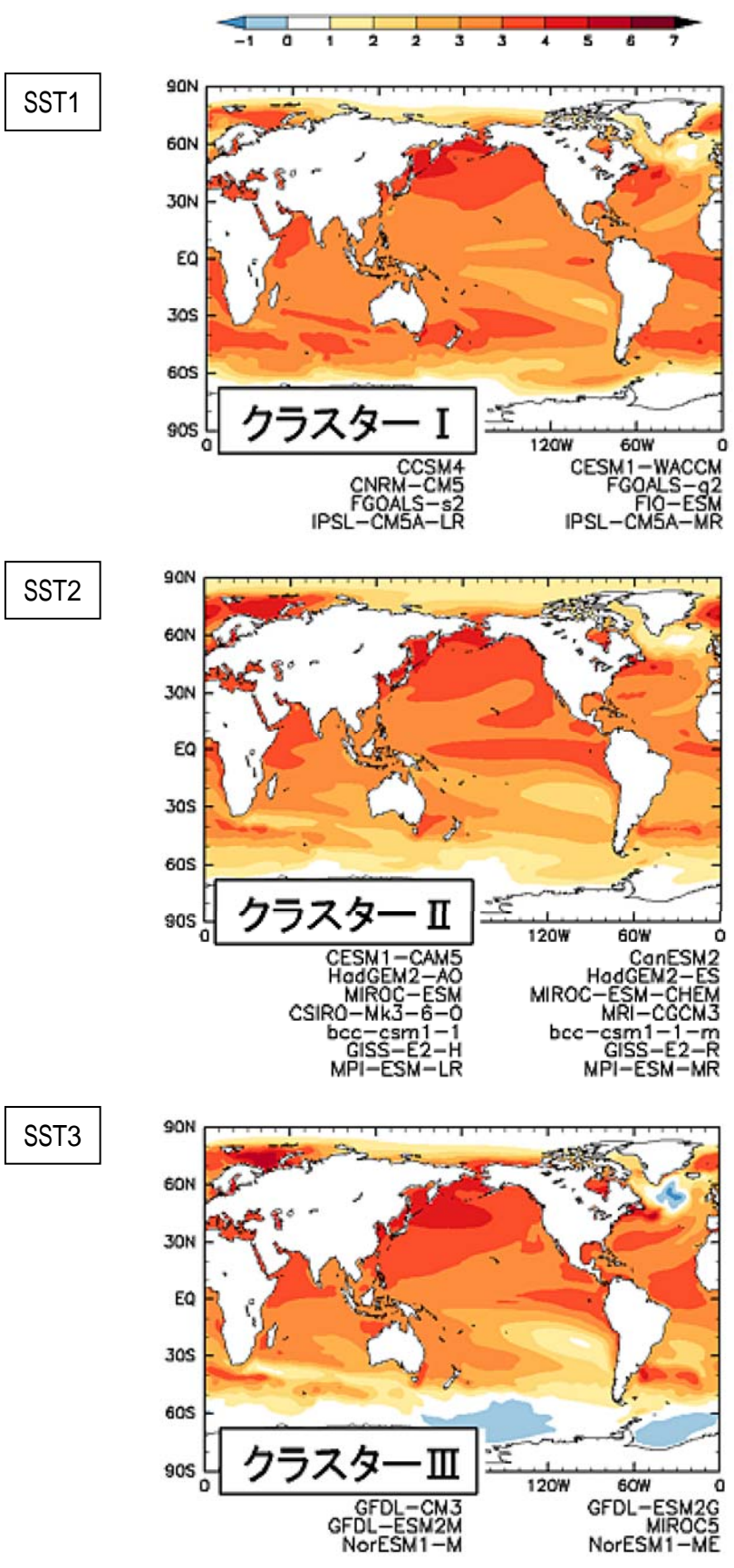


図 2.8 主成分分析によって得られた 21 世紀末の海面水温パターン¹⁰⁾

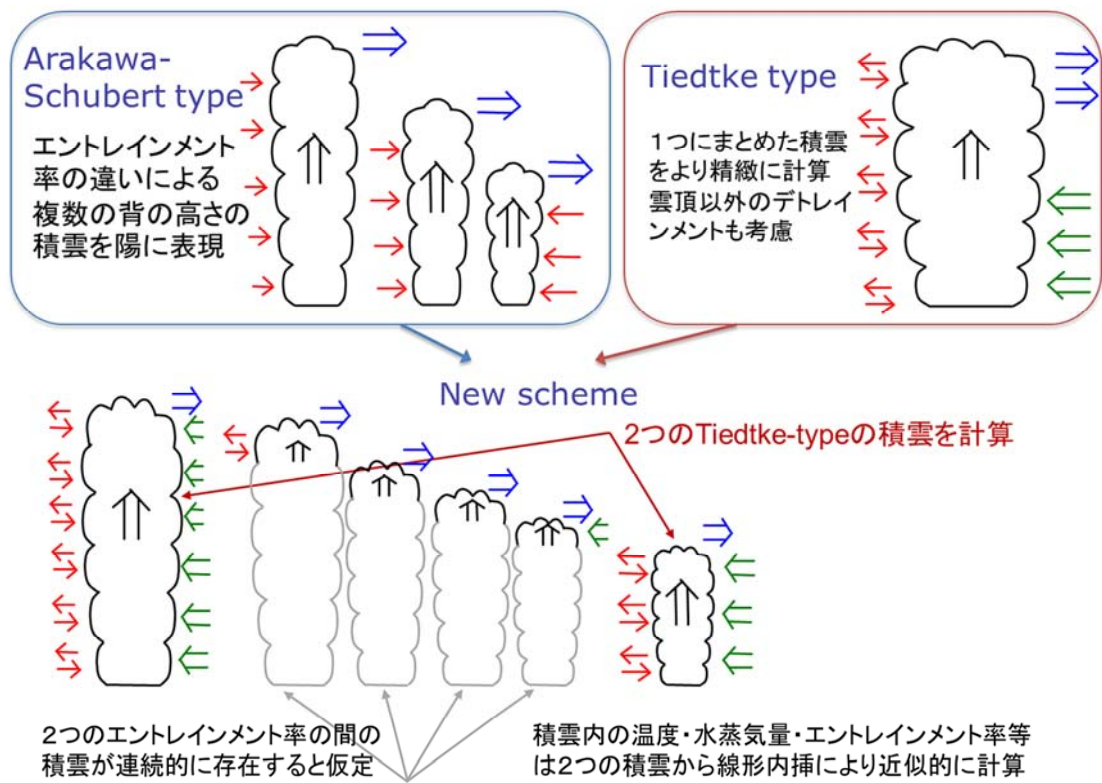


図 2.9 積雲対流スキーム YS と積雲対流スキーム AS の比較¹⁰⁾

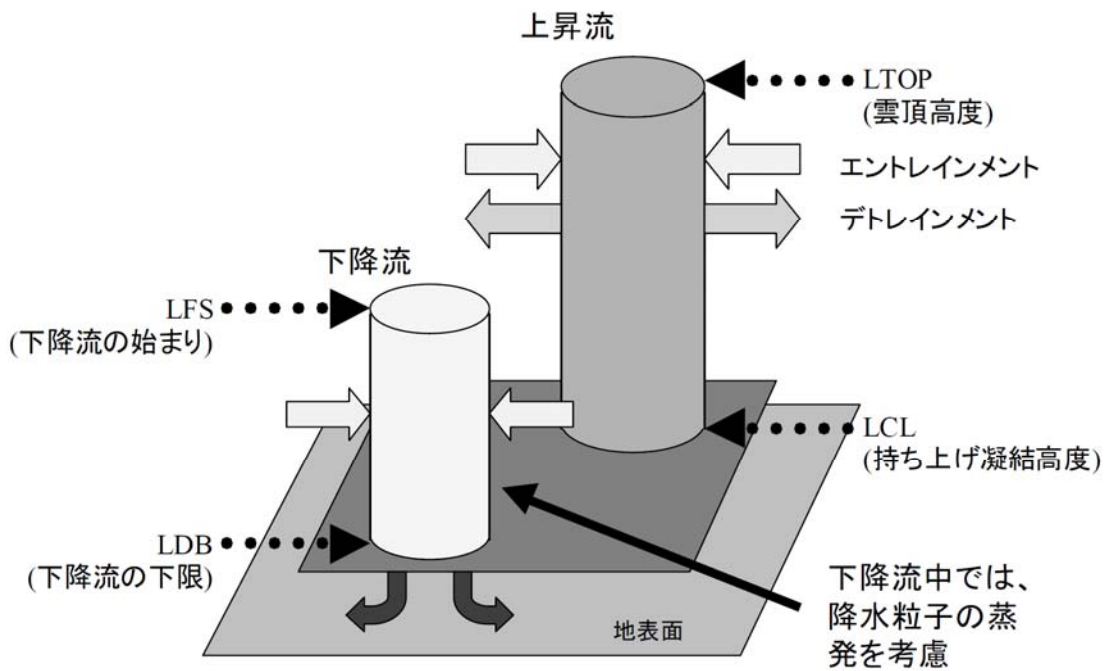


図 2.10 積雲対流スキーム KF の概念図¹¹⁾

2.1.3 対象流域

本研究では、北海道内で既に水環境に対する脆弱性を有する汽水湖及び河川環境の流域として、網走川水系網走川流域及び石狩川水系空知川流域を対象に、前記のMRI-NHRCM20による気候変動予測データの高解像度化を行った(図 2.11, 図 2.12)。

なお、各流域の概要については、第3章及び第4章に後述する。

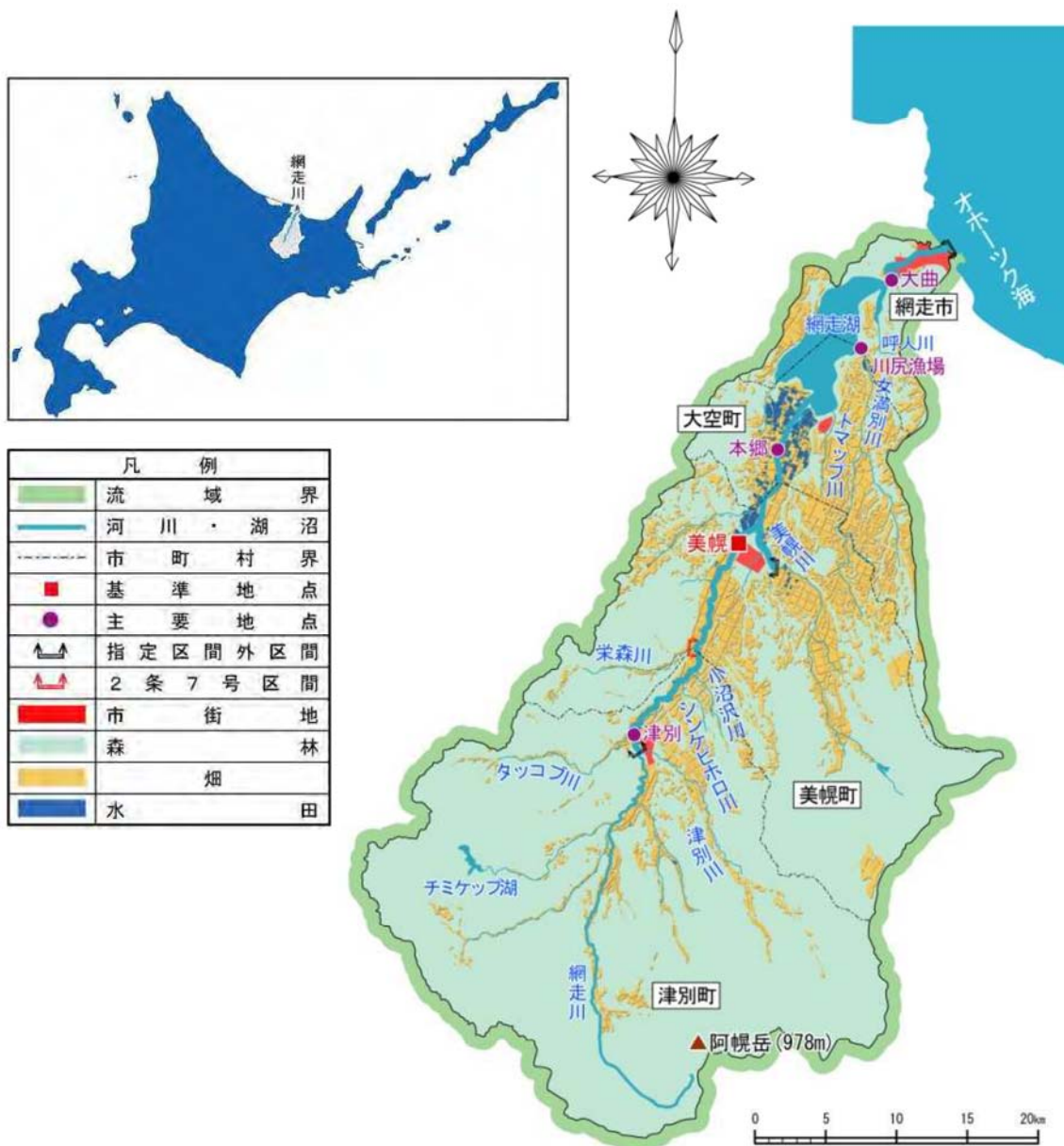


図 2.11 網走川流域図¹²⁾

2.1.4 解析条件

(1) 解析フロー

本章で実施する解析の全体の流れについて、図 2.13 に示す。

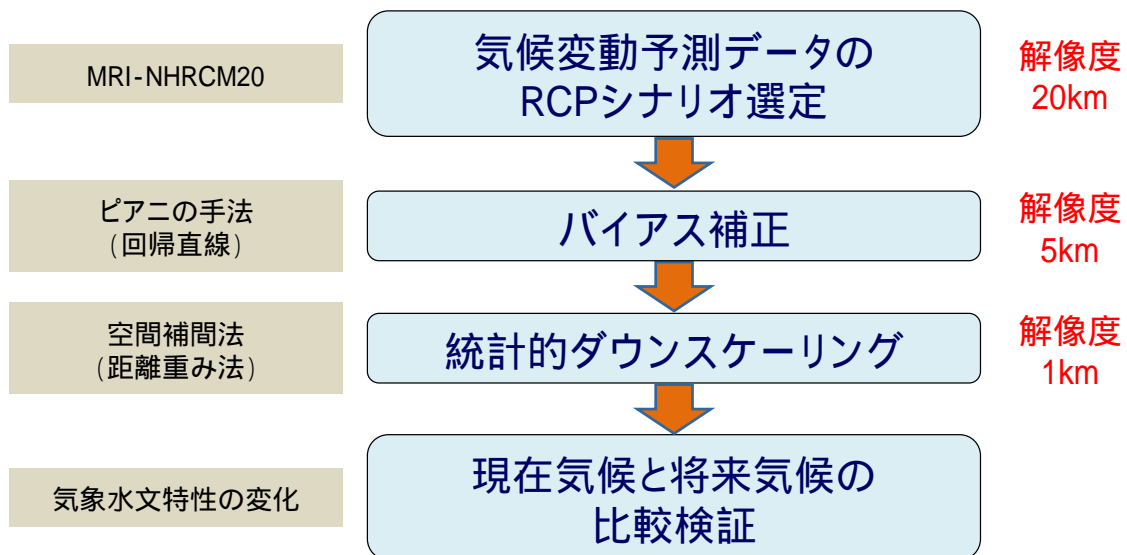


図 2.13 解析フロー

(2) 気候変動予測データのシナリオ選定

本研究では，MRI-NHRCM20 による気候変動予測結果について，RCP シナリオの差異による影響がどの程度生じるのか検証するため，公開されているデータの中から，積雲対流スキームを同一条件として，以下に示す計 7 ケースを選定した（表 2.3）。

表 2.3 RCP シナリオ選定

番号	計算期間	シナリオ	海面水温	積雲対流スキーム	ケース名
1	現在気候 3ケース	-	HadISST	YS	HPA_m02
2			HadISST	KF	HPA_kf_m02
3			HadISST	AS	HPA_as_m02
4	将来気候 16ケース	RCP8.5 9ケース	SST1	YS	HFA_rcp85_c1
5			SST1	KF	HFA_kf_rcp85_c1
6			SST1	AS	HFA_as_rcp85_c1
7			SST2	YS	HFA_rcp85_c2
8			SST2	KF	HFA_kf_rcp85_c2
9			SST2	AS	HFA_as_rcp85_c2
10			SST3	YS	HFA_rcp85_c3
11			SST3	KF	HFA_kf_rcp85_c3
12			SST3	AS	HFA_as_rcp85_c3
13		RCP6.0 3ケース	SST1	YS	HFA_rcp60_c1
14			SST2	YS	HFA_rcp60_c2
15			SST3	YS	HFA_rcp60_c3
16		RCP4.5 1ケース	SST1	YS	HFA_rcp45_c1
-			SST2	YS	HFA_rcp45_c2
-			SST3	YS	HFA_rcp45_c3
17		RCP2.6 3ケース	SST1	YS	HFA_rcp26_c1
18	SST2		YS	HFA_rcp26_c2	
19	SST3		YS	HFA_rcp26_c3	

赤色は選定した RCP シナリオを表す。

(3)統計的ダウンスケーリング

気候変動予測データには、気候モデルが持つ特徴的なバイアスが含まれており、気候変動予測データの高解像度化にあたりバイアス補正が重要となる。

本研究では、気候変動予測データのバイアス補正値を算出する際に、DSJRA-55（領域ダウンスケーリングモデル）を現況の観測値として適用した。

DSJRA-55 は日本の細かい地形を反映した物理モデルであり、北海道全域を覆う解像度 5km の気象データを持つため、観測値よりも精度の高い補正が可能である。

また、MRI-NHRCM20 の内、気温については、DSJRA-55 との誤差を考慮し、気象庁平年値（水平解像度 1km）を適用することとした。

バイアス補正は、気温、降水量、降雪水量、風速、相対湿度、全層雲量、下層雲量、海面気圧の 8 気象要素を対象とし、DSJRA-55 の解析期間である 1984 年 9 月～2004 年 8 月の 20 ヶ年を補正対象期間とした（表 2.4）。

表 2.4 適用データの概要

	MRI-NHRCM20		DSJRA-55	気象庁平年値
	現在気候	将来気候	現況気候	
水平解像度	20km		5km	1km
対象期間	1984/9/1～ 2004/8/31	2080/9/1～ 2100/8/31	1984/9/1～ 2004/8/31	1981年～2010年 (各月平年値)
気象要素	気温、降水量、降雪水量、風速、相対湿度、全層・下層雲量、気圧			
将来予測シナリオ		RCP2.6 RCP4.0 RCP6.5 RCP8.5		
海面水温パターン	HadISST	SST1 SST2 SST3		
積雲対流スキーム		Yoshimura Scheme (YS)		

統計的ダウンスケーリングの解析手順は、次頁以降の通りである。

手順 : 気温・風速の海面高補正

MRI-NHRCM20 の気象要素の内 , 気温については気温減率 (=0.65 /100m) を使用して海面高気温に変換し , 風速についても同様に , 標高を用いて海面高風速に変換した (図 2.14) .

その他の気象要素については , 予測データをそのまま適用した .

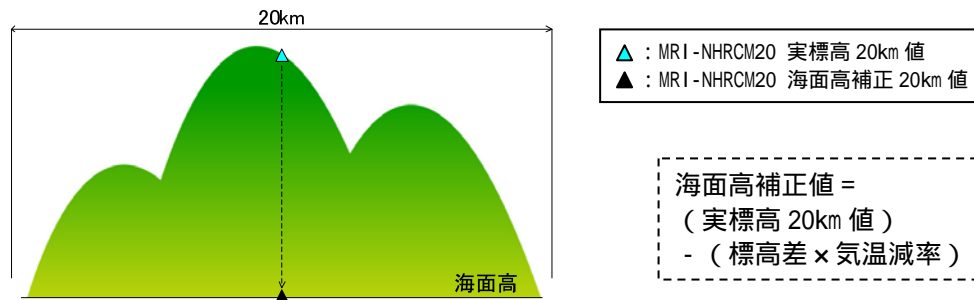


図 2.14 海面高補正のイメージ (気温)

手順 : 水平解像度 5km 値へのダウンスケーリング

バイアス補正にあたり , MRI-NHRCM20 を以下に示す距離重み法により , DSJRA-55 と同じ解像度 5km へ細分化した (図 2.15 , 図 2.16) .

$$z(X_0) = \frac{\sum_{i=1}^N [z(X_i)/d_i]}{\sum_{i=1}^N [1/d_i]} \quad (1)$$

ここで , $\gamma(d)$ は Variogram , $z(X_i)$ は観測所 X_i における観測データ , d は観測所間の距離 , $N(d)$ は d 離れた観測所と対をなす観測データ数である . $z(X_0)$ は任意メッシュ X_0 でのメッシュ気象値 , $z(X_i)$ 及び $z(X_j)$ は観測所 X_i 及び X_j における観測データ , λ_i は $z(X_i)$ の重み係数である .

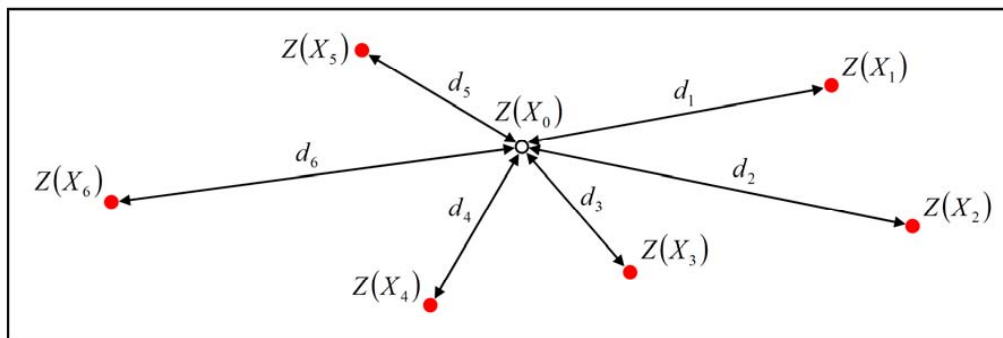


図 2.15 距離重み法のイメージ

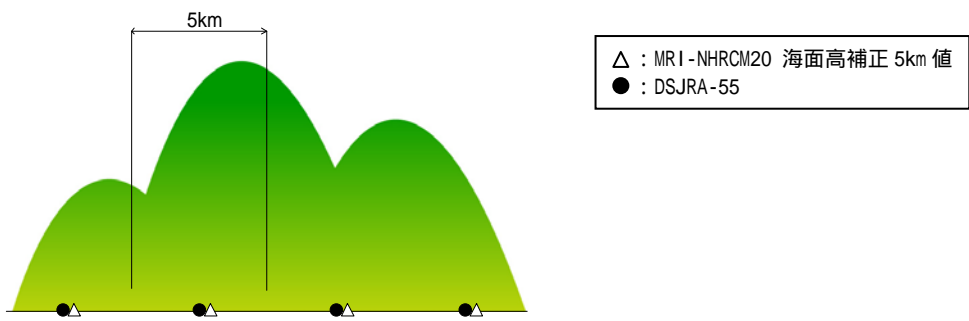


図 2.16 水平解像度 5km 値へのダウンスケーリングのイメージ (気温)

手順 : 相関法によるバイアス補正

バイアス補正手法に関しては様々な手法があるが、今回は既往文献¹⁴⁾を参考に、モデル値の現在気候と実測値の順序統計量の相関から補正率を求める方法(相関法)を用いた(図 2.17)。

気温を除く気象要素の現在気候データについて DSJRA-55 と MRI-NHRCM20 の月単位の気象データの線形関係で近似的に補正を行った。

気温については、バイアス補正を行わずそのまま適用した。

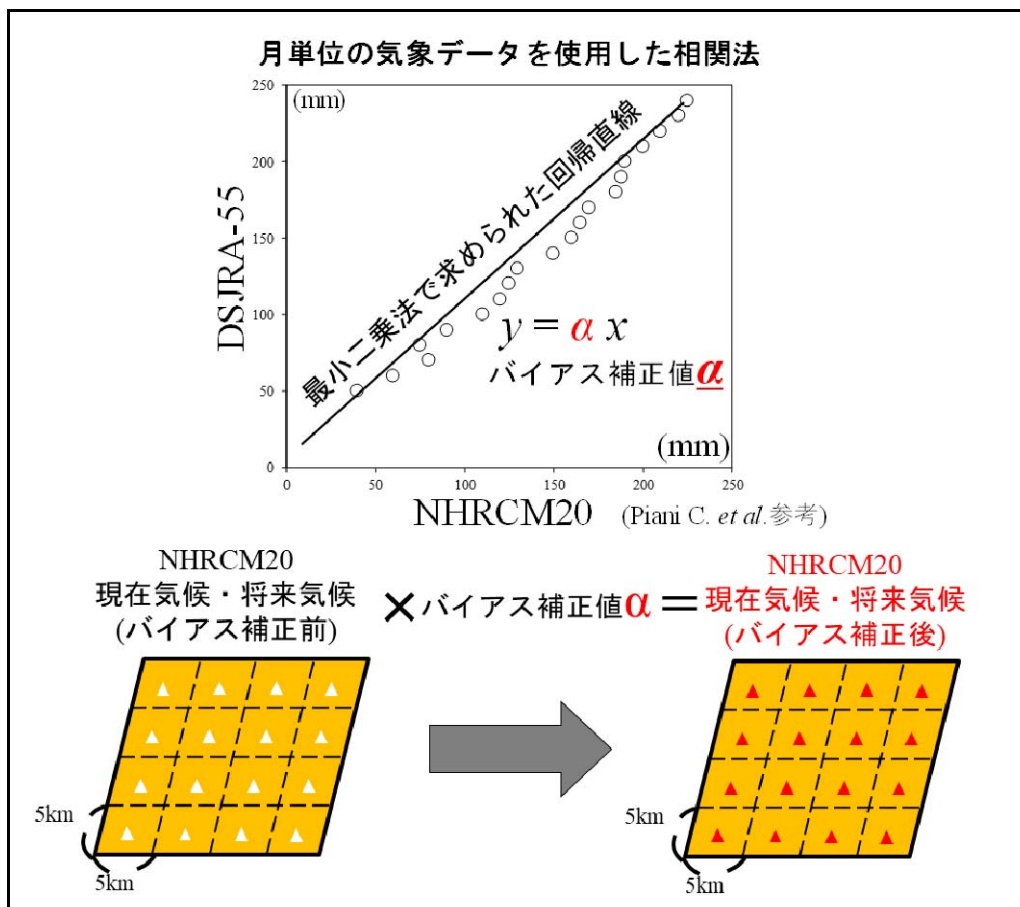


図 2.17 相関法によるバイアス補正

手順 : 水平解像度 1km 値へのダウンスケーリング

バイアス補正後の MRI-NHRCM20 の現在気候と将来気候に距離重み法を用い、解像度 1km の気象データを作成した (図 2.18 , 図 2.19) .

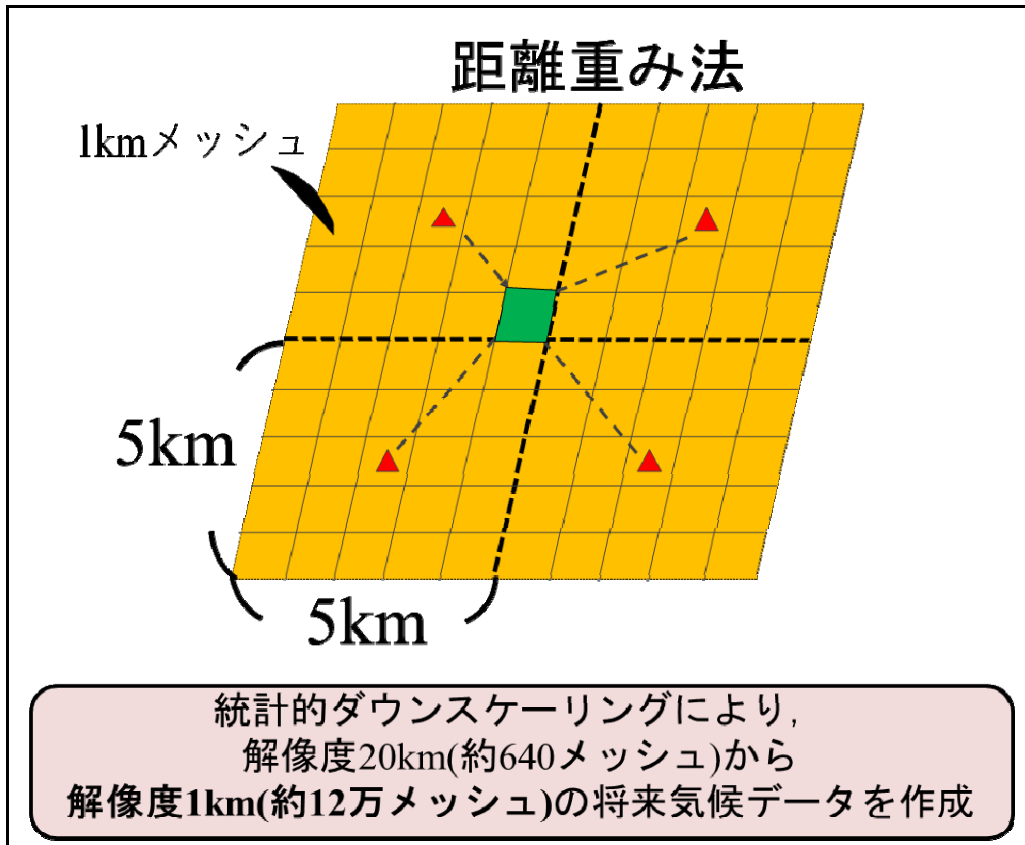


図 2.18 水平解像度 5km から 1km へのダウンスケーリング

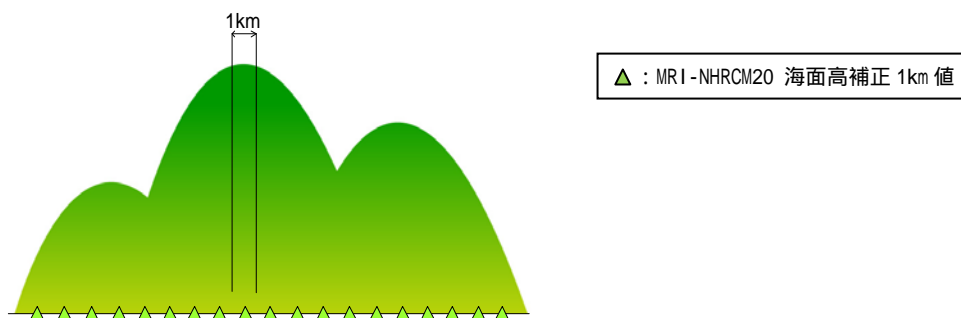


図 2.19 水平解像度 1km 値へのダウンスケーリングのイメージ (気温)

手順 : 水平解像度 1km 値の実標高補正

作成した解像度 1km の気象データの内、海面高気温については気象庁平年値で月毎、地点毎に補正を行った。

また、海面高温度及び海面気圧については、気温減率 (=0.65 /100m) と気圧減率 (=0.114hPa/100m) を用いて実標高の値に変換し、風速についても同様に、標高を用いて同様に変換した(図 2.20)。

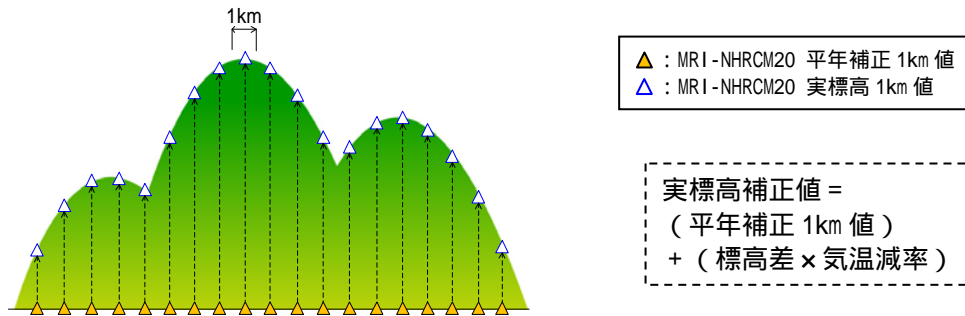


図 2.20 実標高補正のイメージ (気温)

2.2 解析結果

2.2.1 現在気候と将来気候の比較検証

統計的ダウンスケーリングにより推定した解像度 1km の気候変動予測データの内，気温，降水量，降雪水量について，RCP8.5 シナリオを対象に，網走川・空知川流域の 20 ヶ年平均値を算出し，現在気候から将来気候への変化量（流域平均値）と空間分布の変化を整理した（表 2.4，表 2.5，図 2.21，図 2.22）。

将来気候への変化量に着目すると，網走川・空知川流域のいずれも流域全体で年間平均気温は約 5℃ 上昇し，年間降水量は約 140～200mm 増加することが明らかとなった。

逆に年間降雪水量は約 100mm 程度減少しており，比較的標高の高い地域で現象が顕著となっている。

地球温暖化に伴う気候変動により，流域に供給される水資源が雪から雨に変化することが顕著に現れており，網走川・空知川流域では降雪期に天然のダムとして水資源を貯留する効果は低下していくことが考えられる。

表 2.4 網走川流域における水文諸量の変化

気象要素	現在気候	現在気候から将来気候への変化量			
		SST1	SST2	SST3	平均
年間平均気温 ()	4.9	9.6	10.1	10.4	10.0
		4.7	5.2	5.5	5.1
年間降水量 (mm)	927	1058	1001	1151	1070
		131	74	224	143
年間降雪水量 (mm)	244	152	118	127	132
		-92	-126	-117	-112

表の下段の値は、現在気候と将来気候の差分（変化量）を表す。

表 2.5 空知川流域における水文諸量の変化

気象要素	現在気候	現在気候から将来気候への変化量			
		SST1	SST2	SST3	平均
年間平均気温 ()	4.7	9.2	9.6	10.1	9.6
		4.5	4.9	5.4	4.9
年間降水量 (mm)	1537	1734	1689	1786	1736
		197	152	249	199
年間降雪水量 (mm)	620	584	529	511	541
		-36	-91	-109	-79

表の下段の値は、現在気候と将来気候の差分（変化量）を表す。

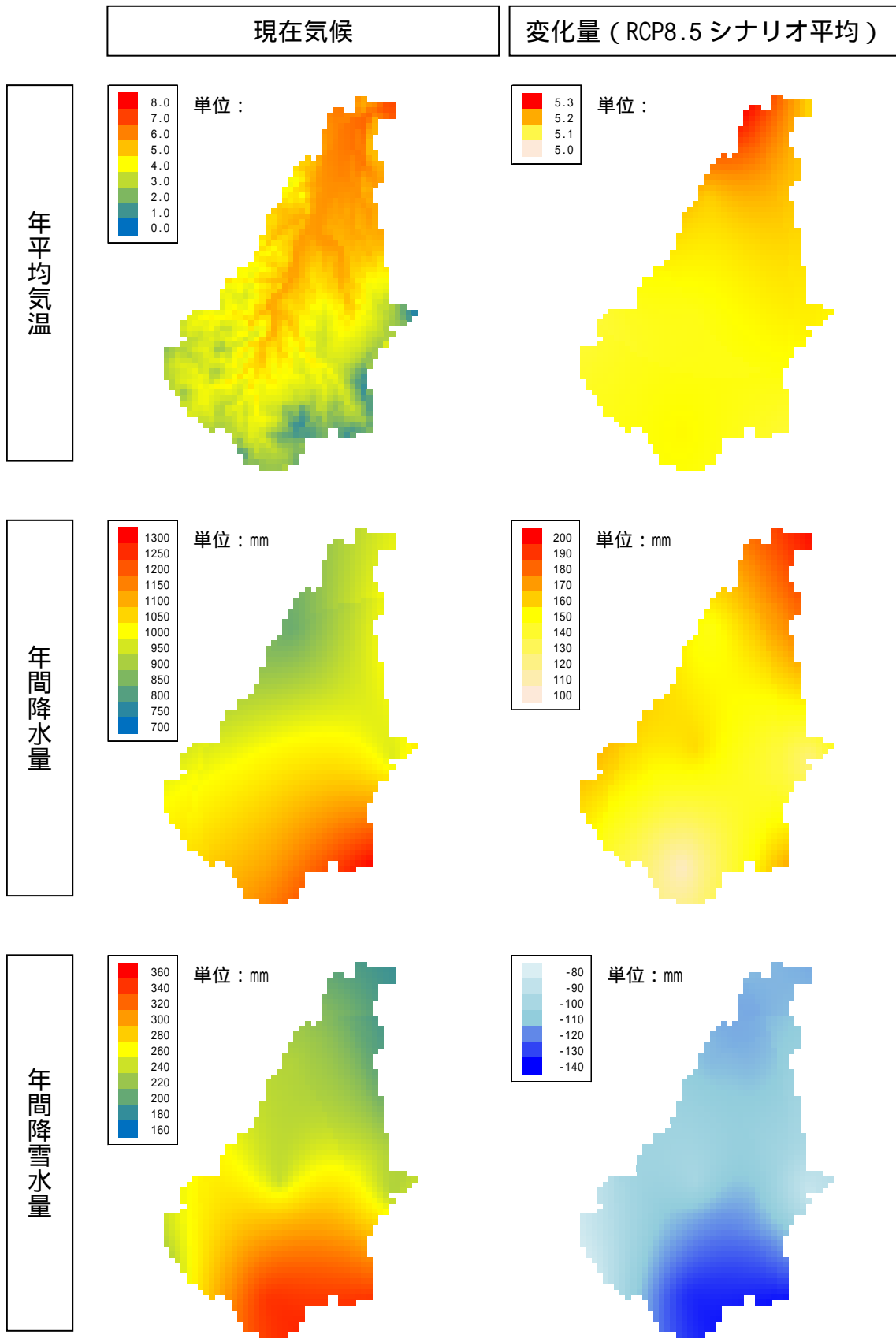


図 2.21 網走川流域における水文諸量の空間分布の変化

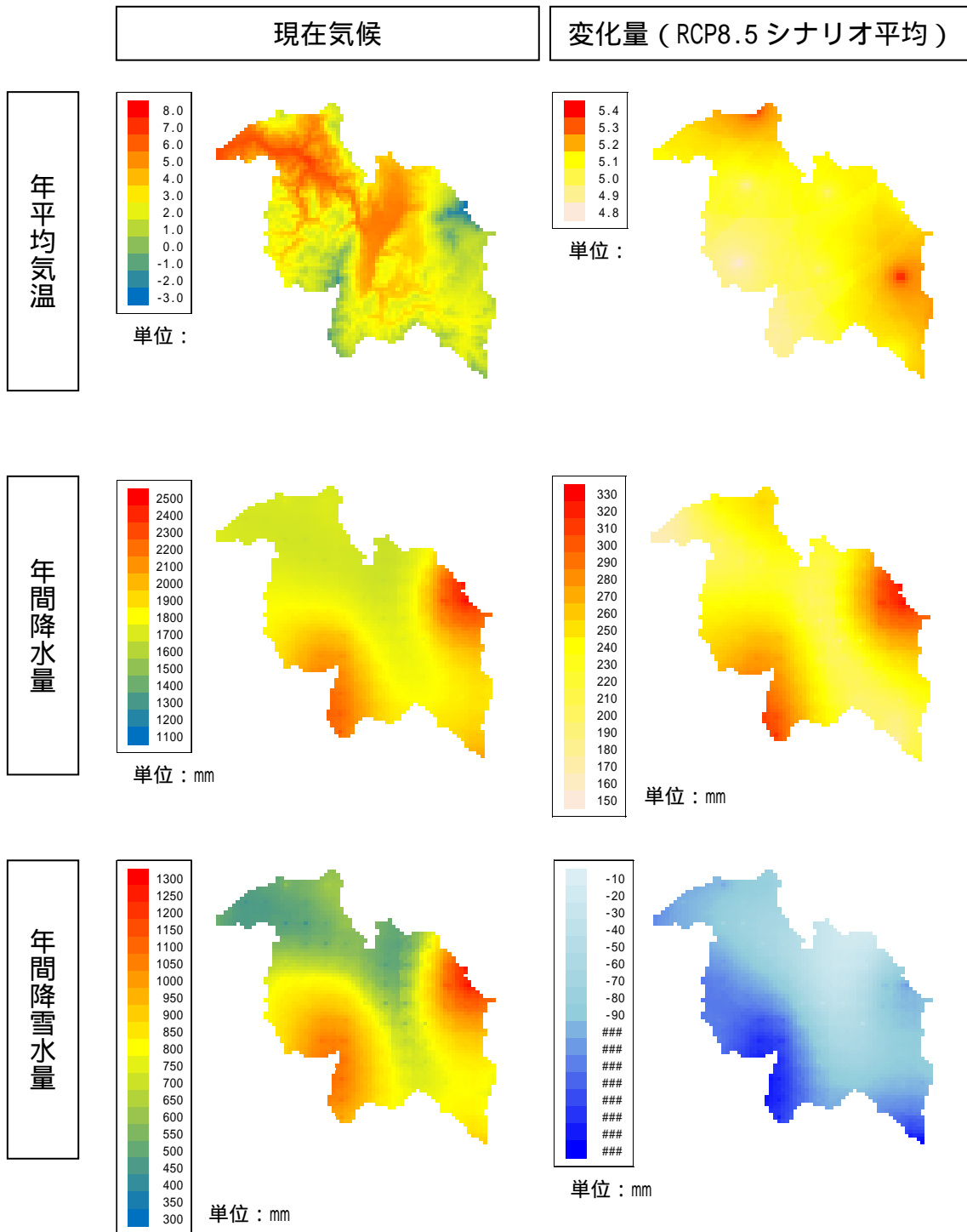


図 2.22 空知川流域における水文諸量の空間分布の変化

2.3 解析方法に対する評価

本研究で採用した、バイアス補正を適用した統計的ダウンスケーリングに関する先行研究として、浜口・佐藤ら¹⁵⁾は、淀川流域の河川流量変動予測において、IPCC 第4次評価報告書のSRESシナリオに基づくGCMデータとAMeDASによる実測データの空間分布の差異に基づく確率密度関数及び分布関数を作成し、バイアス補正を行っている。

渡部ら^{16), 17)}は、地球全体を対象として、IPCC 第5次評価報告書のRCPシナリオに基づく複数のGCMデータを用いて、誤差一定手法、変化量手法、CDF手法、クオンタイルマッピング手法等によるダウンスケーリングの妥当性に関する比較検証を行っている。

こうした先行研究は、主に地球レベルの気候変動を対象としており、本研究のように、積雪寒冷地における自治体等の地域レベルを対象とした研究事例は極めて少なく、気候変動の影響評価のケーススタディとして新規性があると考えられる。

また、先行研究では、主にAMeDAS等の実測データに基づく確率密度関数・分布関数を適用したバイアス補正が行われているが、実測データの取得が煩雑になるとともに解析作業が高難度である。

本研究で採用した解析手法は、高精度で現況気候が再現されているDSJRA-55とMRI-NHRCM20の現在気候の順序統計量の相関から、比較的容易にバイアス補正を行い妥当な結果を得ることが可能であり、DSJRA-55の適用においてオリジナリティを有し、地域レベルの気候変動予測に対する汎用性は高いと考える。

2.4 本章のまとめ

本研究で得られた結果を以下にまとめる．

- (1) 解像度 5km の DSJRA-55 を現況の観測値として使用することで，適切なバイアス補正と統計的ダウンスケーリングが可能となった．
- (2) これまで十分検討されてこなかった地域レベルの気候変動を適切に予測する上で有用な手法を提案することができた．
- (3) 現在気候と将来気候を比較し，網走川・空知川流域では気温・降水量が大幅に上昇・増加し，降雪水量が大幅に減少することから，流域毎の水循環の変化を踏まえた適切な水環境管理が重要であると考えた．

2.5 参考文献

- 1) 文部科学省 HP : <
http://www.mext.go.jp/b_menu/houdou/26/03/attach/1346369.htm> (ア
クセス日 : 2019/5/8)
- 2) 北海道立総合研究機構 HP : <
https://www.hro.or.jp/list/environmental/research/ies/katsudo/kikou/kikou_01.html> (アクセス日 : 2019/5/8)
- 3) 文部科学省, 気象庁, 環境省, 経済産業省 : 気候変動 2007 統合報告書 政策
決定者向け要約, 2007.
- 4) 全国地球温暖化防止活動センターHP : <
<https://www.jccca.org/ipcc/ar5/rcp.html>> (アクセス日 : 2019/5/8)
- 5) 環境省 : IPCC 第 5 次評価報告書の概要-第 1 作業部会 (自然科学的根拠) -,
2014.
- 6) 環境省 : 気候変動の影響への適応計画について, 報道発表資料, 2015.
- 7) データ統合・解析システム HP : <<https://diasjp.net/>> (アクセス日 :
2019/5/8)
- 8) 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.
- 9) 高薮出, 木本昌秀, 中北英一 : 地球温暖化施策決定に資する気候再現・予測
実験データベース (d4PDF), 平成 27 年度地球シミュレータ利用報告会,
2015.
- 10) 佐々木秀孝, 村田昭彦, 川瀬宏明, 花房瑞樹, 野坂真也, 大泉三津夫, 水
田亮, 青柳暁典, 志藤文武, 石原幸司 : 気象研究所非静力学地域気候モデ
ルによる日本付近の将来気候変化予測について, 気象研究所技術報告第 73
号, 2015.
- 11) 気象庁 HP : <
<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/nwptext/37/chapter1.pdf>>
(アクセス日 : 2019/5/9)
- 12) 北海道開発局 : 網走川水系河川整備計画 (国管理区間), 2015.
- 13) 北海道開発局 : 石狩川水系空知川河川整備計画【大臣管理区間】 [変更],
2018.
- 14) Piani C. *et al.* : Statistical bias correction of global simulated daily
precipitation and temperature for the application of hydrological
models. *Journal of Hydrology*, 395, 199-215. 2010.

- 15) 浜口俊雄，佐藤嘉展，森英祐，田中賢治，小尻利治：バイアス補正をした超高解像度 GCM による淀川流域の将来流量予測，第 21 回(2008 年度)水文・水資源学会総会・研究発表会，2008.
- 16) 渡部哲史，沖大幹，鼎信次郎，渡部雅浩，木本昌秀：GCM 月降水量補正手法および MIROC5 出力補正值の考察，土木学会論文集 B1(水工学)Vol.67, No.4, I_469-I_474, 2011.
- 17) 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)Vol.69, No.4, I_385-I_390, 2013.

第3章 気候変動による積雪寒冷地汽水湖の

水環境変化の分析

3.1 解析方法

3.1.1 対象流域

本章では、一級河川網走川水系網走川及びその下流に位置する汽水湖である網走湖を対象とした¹⁾。

網走川は、その源を阿寒山系の阿幌岳に発し、山間部を流下し、津別町市街地で津別川を合わせ、平野部を流れながら美幌町市街地において美幌川と合流後、美幌町を貫流し大空町において網走湖に至り、トマップ川、呼人川及び女満別川を網走湖内に集め、網走湖から網走市街地を経てオホーツク海に注ぐ、幹川流路延長 115km、流域面積 1,380km²の一級河川である¹⁾。

網走湖は、網走川下流に位置する湖沼面積 32.3km²、最大水深 16.1m の汽水湖であり、日本で 16 番目、北海道で 7 番目に大きい湖で、約 2 億 3 千万 m³ の水量を有する。南北に長い湖であり、長軸方向は約 11km、短軸方向は湖の中心部で約 4km である。

女満別湾は、湾口部に網走川が流入しているため、土砂堆積により湾全体が浅くなっている一方、嘉多山湾は比較的深く、湾中央部で 5m 以上の水深である。また、湖口付近に閉鎖性水域の呼人浦がある。

網走湖及びその周辺は国定公園に指定されており、網走湖の南東岸には、国の天然記念物にも指定されている女満別湿性植物群落があり、網走の自然景観を代表するミズバショウ群生地となっている。

網走湖は、魚類等の重要な生息地で豊かな自然環境に恵まれており、水深 1 ~ 4m の比較的水深の浅い箇所、周辺地域における貴重な水産資源であるヤマトシジミ等を対象とした内水面漁業が行われている。

網走湖岸は公園、キャンプ場、散策等に利用され、水面は春季から秋季にかけてレガッタ、ボート競技に利用されているほか、湖面が結氷する冬季はワカサギ釣り等により四季を通じて広く利用されている。

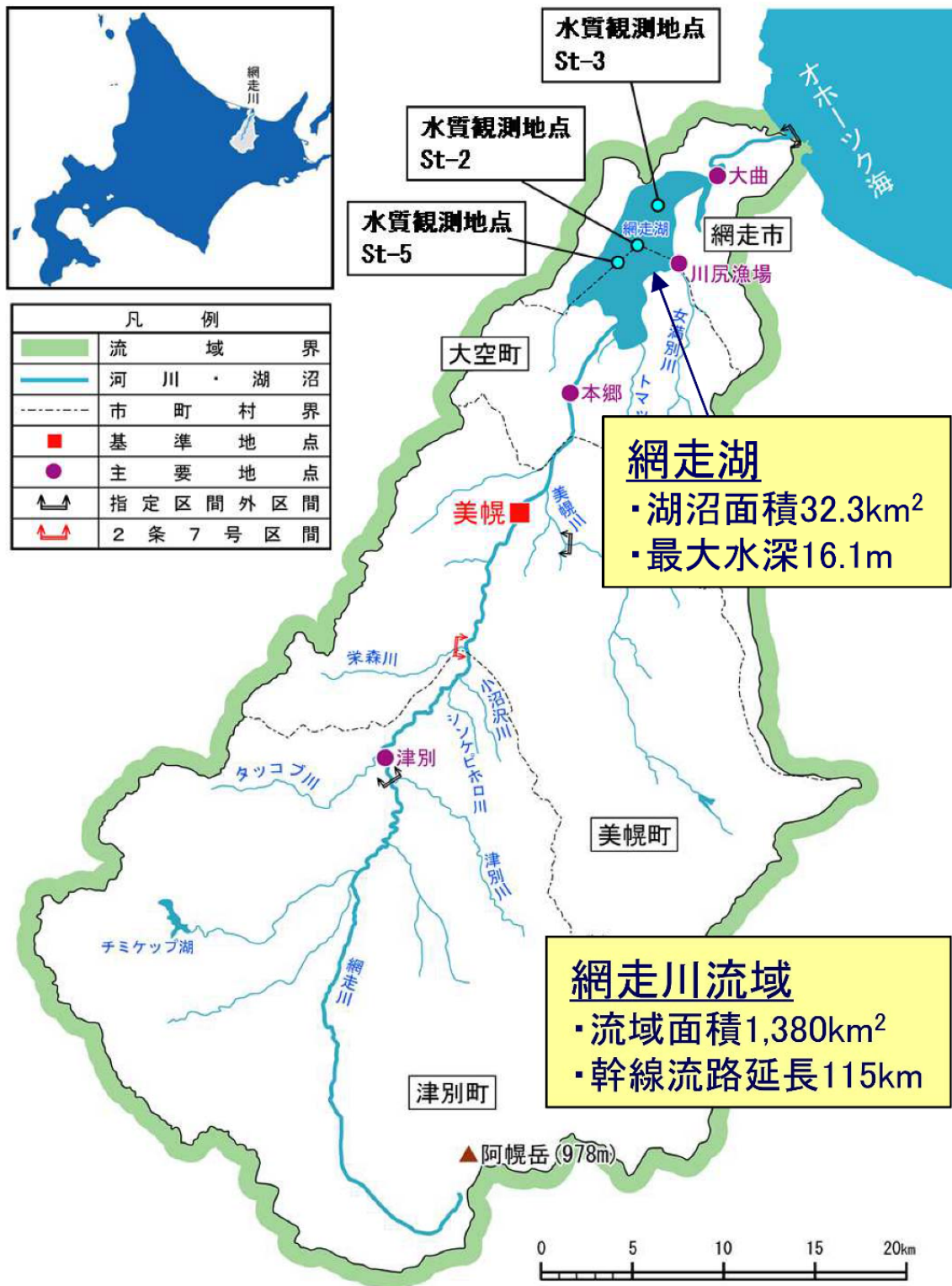


図 3.1 網走川流域図¹⁾

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おり、下部に蓄積された塩水は、拡散や連行により淡水層へ供給され、少量が海へ戻る。

網走湖内へ流入する流域からの汚濁負荷は、底泥として主に湖心付近に長期にわたって蓄積され、塩水層の無酸素化や溶出負荷の要因となっている。

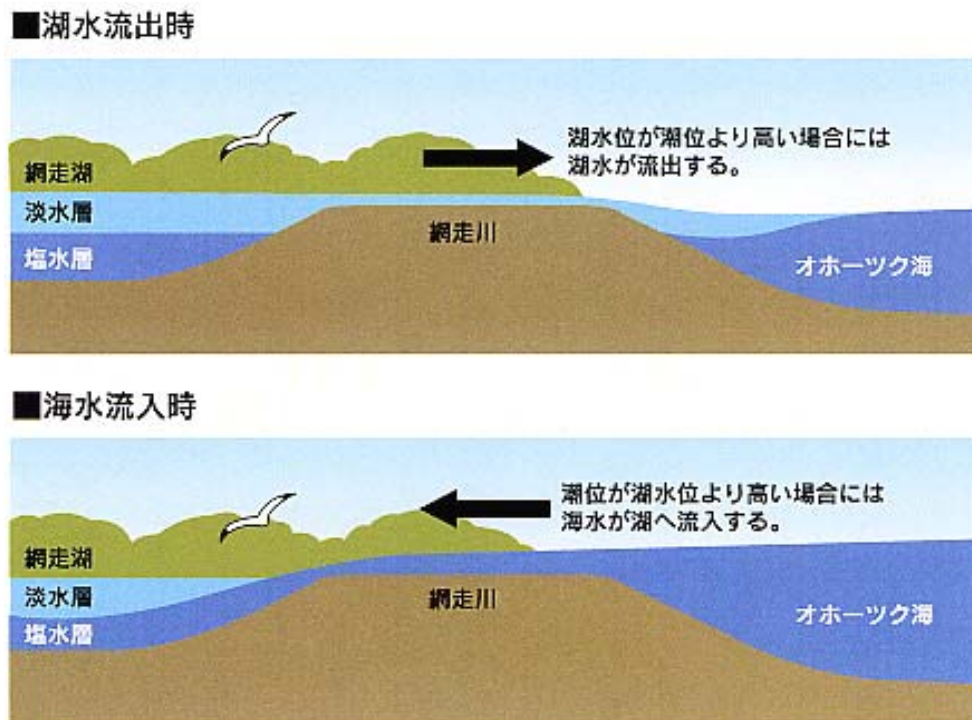


図 3.2 網走湖の二層構造²⁾

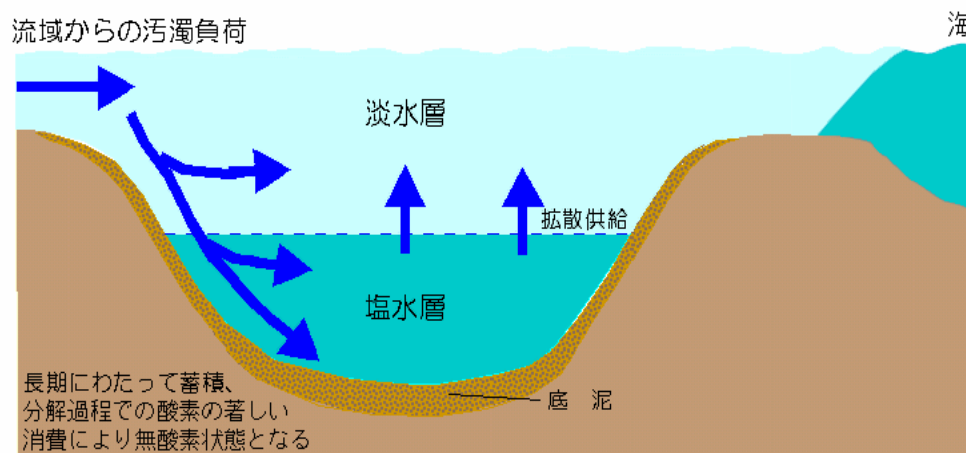


図 3.3 流域からの汚濁負荷の堆積イメージ

網走湖では、流域からの生活排水、工場排水、農畜産排水の流入等による富栄養化の進行に伴い、青潮やアオコが頻発するようになっている²⁾。

青潮は、強風が一定時間連続して吹いた場合に風下に湖水が吹き寄せられ、風上側に下層の無酸素水が上昇して魚類の斃死等の被害が発生する現象であり、塩淡水境界層の上昇に伴い青潮の発生頻度が高くなる傾向にある。

塩淡水境界層が最も上昇した平成 15 年、平成 16 年には塩淡水境界層標高が 3m 以上となり、水深 4m 以浅に生息しているヤマトシジミが大量に斃死する被害を受けている。

アオコは、高温・好天時に植物性プランクトンが窒素やリン等を栄養に異常増殖を起こし、湖面や湖岸に絵の具を流したような状態となる現象である。

淡水層の富栄養化は、流域からの窒素やリンの汚濁負荷に加え、塩水層からの栄養塩供給によるものと考えられる。

昭和 57 年以降毎年のようにアオコが発生しており、塩淡水境界層が上昇したことにより塩水層からの栄養塩供給量が増加したことも原因の一つと考えられる。

塩淡水境界層の上昇は、青潮やアオコが発生しやすい環境を形成し、自然環境だけでなく水産資源にも大きな影響を与えている。

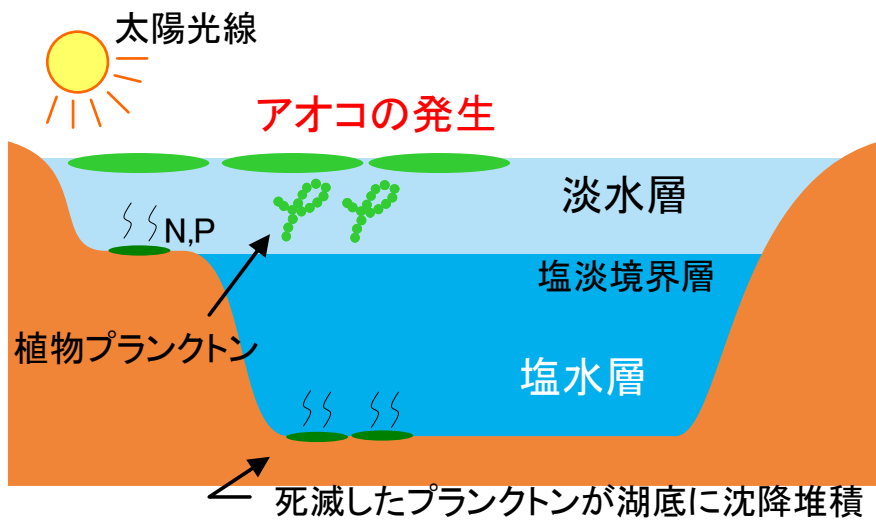
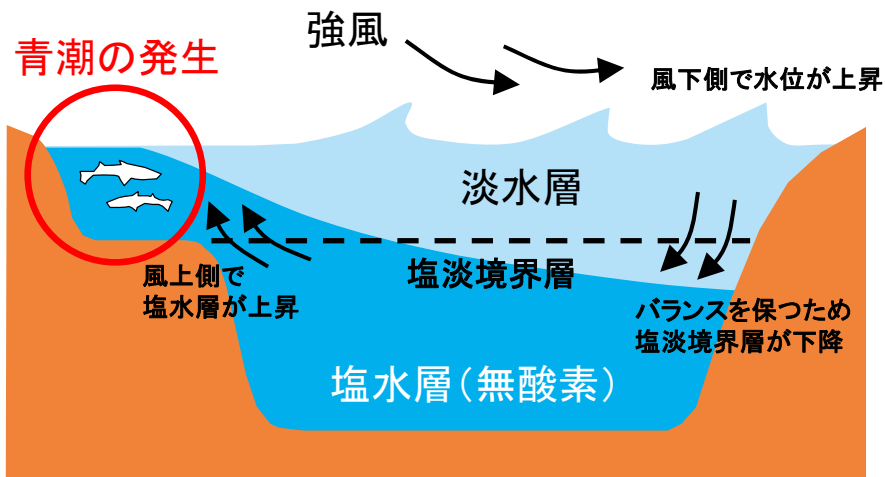


図 3.4 青潮・アオコの発生メカニズム



写真 3.1 青潮による魚類の斃死



写真 3.2 アオコの発生状況

3.1.2 解析条件

(1) 解析フロー

本章で実施する解析の全体の流れについて、図 3.5 に示す。

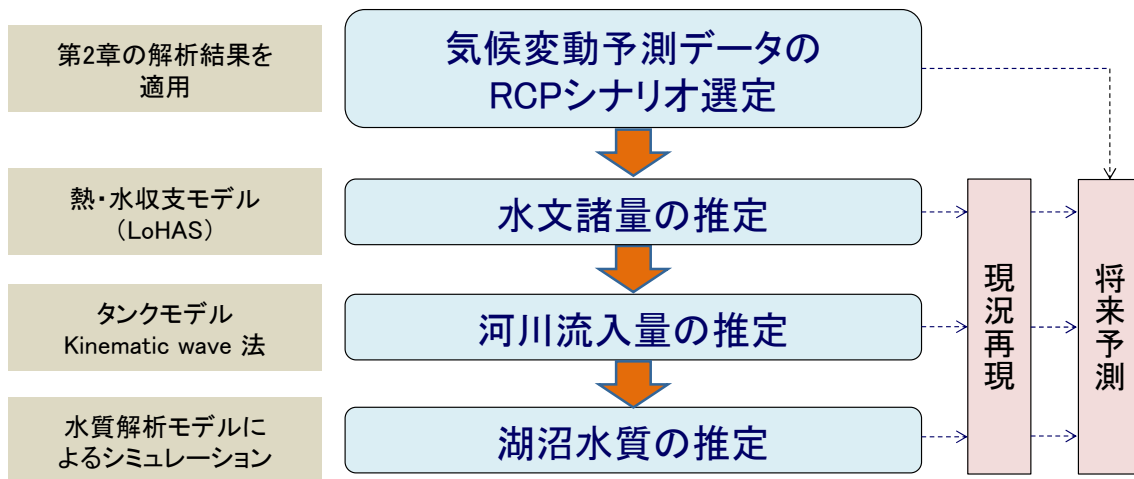


図 3.5 解析フロー

(2) 気候変動予測データの RCP シナリオ選定

本章では，地球温暖化に伴う気候変動の度合いによって湖沼環境に対する影響がどの程度異なるのか検証するため，第 2 章で推定した MRI-NHRCM20 の内，共通の積雲対流スキームで比較が可能となる，以下に示す計 7 ケースを選定した（表 3.1）。

表 3.1 RCP シナリオ選定

番号	計算期間	シナリオ	海面水温	積雲対流スキーム	ケース名
1	現在気候 3ケース	-	HadISST	YS	HPA_m02
2			HadISST	KF	HPA_kf_m02
3			HadISST	AS	HPA_as_m02
4	将来気候 16ケース	RCP8.5 9ケース	SST1	YS	HFA_rcp85_c1
5			SST1	KF	HFA_kf_rcp85_c1
6			SST1	AS	HFA_as_rcp85_c1
7			SST2	YS	HFA_rcp85_c2
8			SST2	KF	HFA_kf_rcp85_c2
9			SST2	AS	HFA_as_rcp85_c2
10			SST3	YS	HFA_rcp85_c3
11			SST3	KF	HFA_kf_rcp85_c3
12			SST3	AS	HFA_as_rcp85_c3
13		RCP6.0 3ケース	SST1	YS	HFA_rcp60_c1
14			SST2	YS	HFA_rcp60_c2
15			SST3	YS	HFA_rcp60_c3
16		RCP4.5 1ケース	SST1	YS	HFA_rcp45_c1
-			SST2	YS	HFA_rcp45_c2
-			SST3	YS	HFA_rcp45_c3
17		RCP2.6 3ケース	SST1	YS	HFA_rcp26_c1
18	SST2		YS	HFA_rcp26_c2	
19	SST3		YS	HFA_rcp26_c3	

赤色は選定した RCP シナリオを表す。

(3) 熱・水収支解析モデルによる水文諸量の推定

本章では、流域水循環の既往研究・検討事例等で採用実績があり、地表面・植被層の熱収支及び積雪の圧密過程を考慮し、気温等の気象条件や地形勾配、土地利用等をもとに、積雪深、積雪密度、融雪量、蒸発散量等の水文諸量を推定する解析モデル LoHAS (Long term Hydrologic Assessment model considering Snow process) を採用した³⁾。

LoHAS の基礎式は、以下の通りである。

(地表面の熱収支式)

$$f_v R + (1 - f_v) \sigma T_v^4 - Q_G + Q_R = \varepsilon \sigma T_g^4 + H_g + \ell E_g \quad (1)$$

(植被層の熱収支式)

$$(1 - f_v) (R \downarrow + \varepsilon \sigma T_g^4) = 2(1 - f_v) \sigma T_v^4 + H_v + \ell (E_v + I) \quad (2)$$

(蒸発散量の算出式)

$$H_g = C_p \rho C_{H_g} U (T_g - T) \quad (3)$$

$$H_v = C_p \rho C_{H_v} U (T_v - T) \quad (4)$$

$$\ell E_g = l \rho \beta_g C_{H_g} U \left\{ e_{SAT}(T_g) - e \right\} \frac{0.622}{p} \quad (5)$$

$$\ell E_v = l \rho \beta_v C_{H_v} U \left\{ e_{SAT}(T_v) - e \right\} \frac{0.622}{p} \quad (6)$$

なお、 f_v は放射に対する植被層の透過率 (=0.5)、 R は下向き posit 放射量 (W/m^2)、 Q_G は土壌または積雪に供給される熱フラックス (W/m^2)、 Q_R は降雨によって供給される熱フラックス (W/m^2)、 H_g 及び H_v は各々地表面 (土壌または積雪面) 及び植被層からの顕熱フラックス (W/m^2)、 ℓE_g 及び ℓE_v は各々地表面 (土壌または積雪面) 及び植被層からの潜熱フラックス (W/m^2)、 ℓI は植被層からの遮断蒸発に伴う潜熱フラックス (W/m^2)、 T_g 及び T_v は各々地表面 (土壌または積雪面) 及び植被層の代表温度 (K)、 ε は射出率 (土壌面=1.00、積雪面=0.97)、 σ は Stefan-Boltzmann 定数 ($=5.67 \times 10^{-8} W/m^2/K^4$)、 U は代表高度での風速 (m/s)、 T は代表高度での気温 ()、 C_p は空気の定圧比熱 ($=1,004 J/kg/K$)、 ρ は空気密度 (kg/m^3)、 C_{H_g} 及び C_{H_v} は地表面 (土壌または積雪面) ~ 大気間及び植被層 ~ 大気間のバルク輸送係数、 l は蒸発潜熱 ($=2.50 \times 10^6 J/Kg$)、 β_g 及び β_v は地表面 (土壌または積雪面) 及び植被層の蒸発効率、 e 及び e_{SAT} は代表温度での水蒸気圧 (hPa) 及び飽和水蒸気圧 (hPa)、 p は大気圧 (hPa) である。

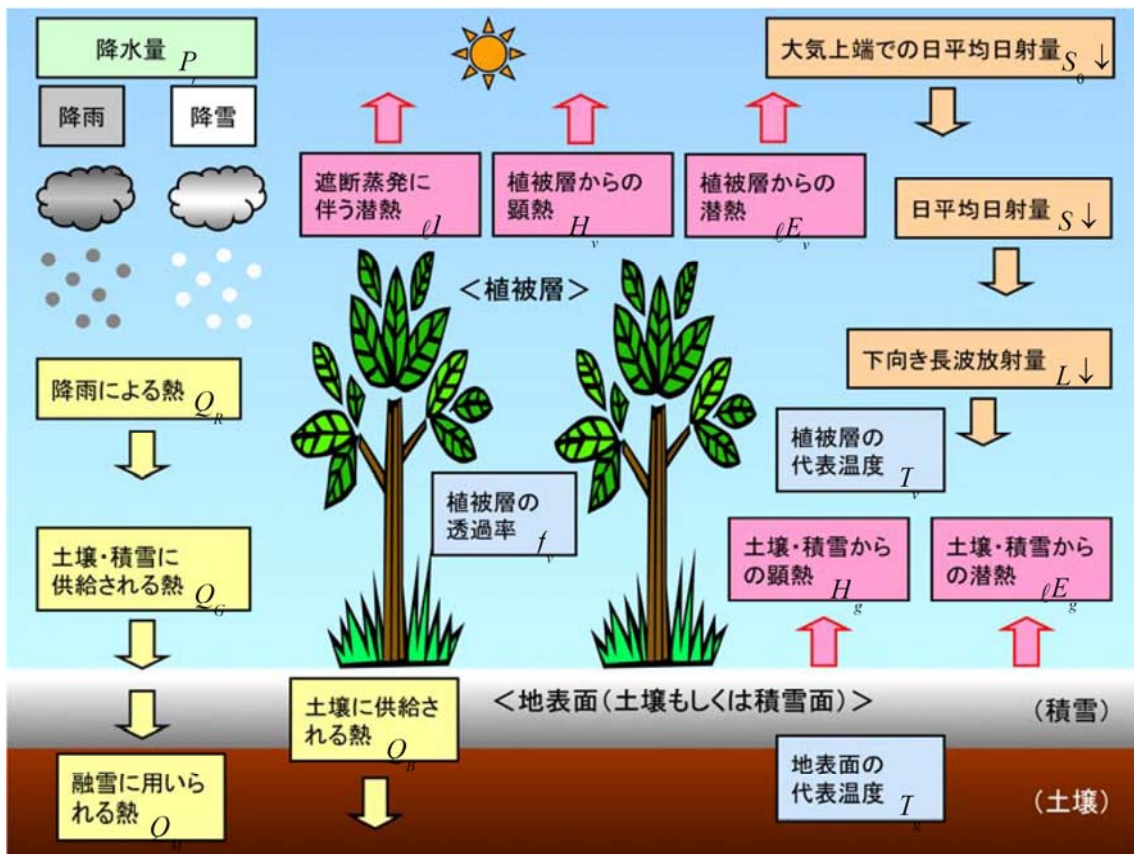


図 3.6 LoHAS の概念図

本研究では,LoHAS の入力データとして,気象データの他に,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,降雪密度を適用した。

LoHAS に適用した網走川流域の標高,土地利用,LAI(葉面積指数),受光係数比等の解析パラメータを整理し,表 3.2,図 3.7 に示す。

表 3.2 解析パラメータ設定値⁴⁾

パラメータ	概要
標高・勾配	国土数値情報3次メッシュ平均標高を採用するとともに,国土数値情報250mメッシュ標高をもとに1kmメッシュ内の東西・南北方向の平均傾斜を算出.
緯度・経度	国土数値情報3次メッシュ中心座標を適用.
LAI(葉面積指数)	既往研究で作成されたLAI月別値(1~12月)を採用.
バルク輸送係数	植被層:0.005, 地表面:0.003, 積雪面:0.002
蒸発効率	植被層:0.10, 地表面:0.50, 積雪面:1.05
アルベド	地表面:0.35
降雪密度	86kg/m ³

LAI(葉面積指数)

熱フラックスの推定で必要となる LAI は森林の状態を表すパラメータであり,植物の葉の多少の度合い(地表の単位面積に対し,その上方に存在するすべての葉の片側の総面積の比率)を示す指標である。

バルク輸送係数・蒸発効率・アルベド

バルク輸送係数は,大気鉛直方向に運ばれる水蒸気の流れを定量化する係数であり,蒸発効率は,物体表面の蒸発特性を示す指標である。アルベドは,物体に対し入射する放射エネルギーのうち,表面で反射するエネルギー量の割合を示す指標である。

受光係数比

地表面が傾いている場合には,日射量と地表面が受けるエネルギーは一致しないことから,地形勾配を考慮した日射量を推定する際に適用する斜面補正係数である。

降雪密度

流域周辺の観測地点における冬期間の降水量及び降雪日に観測された降雪深データを用いて逆算した密度である。

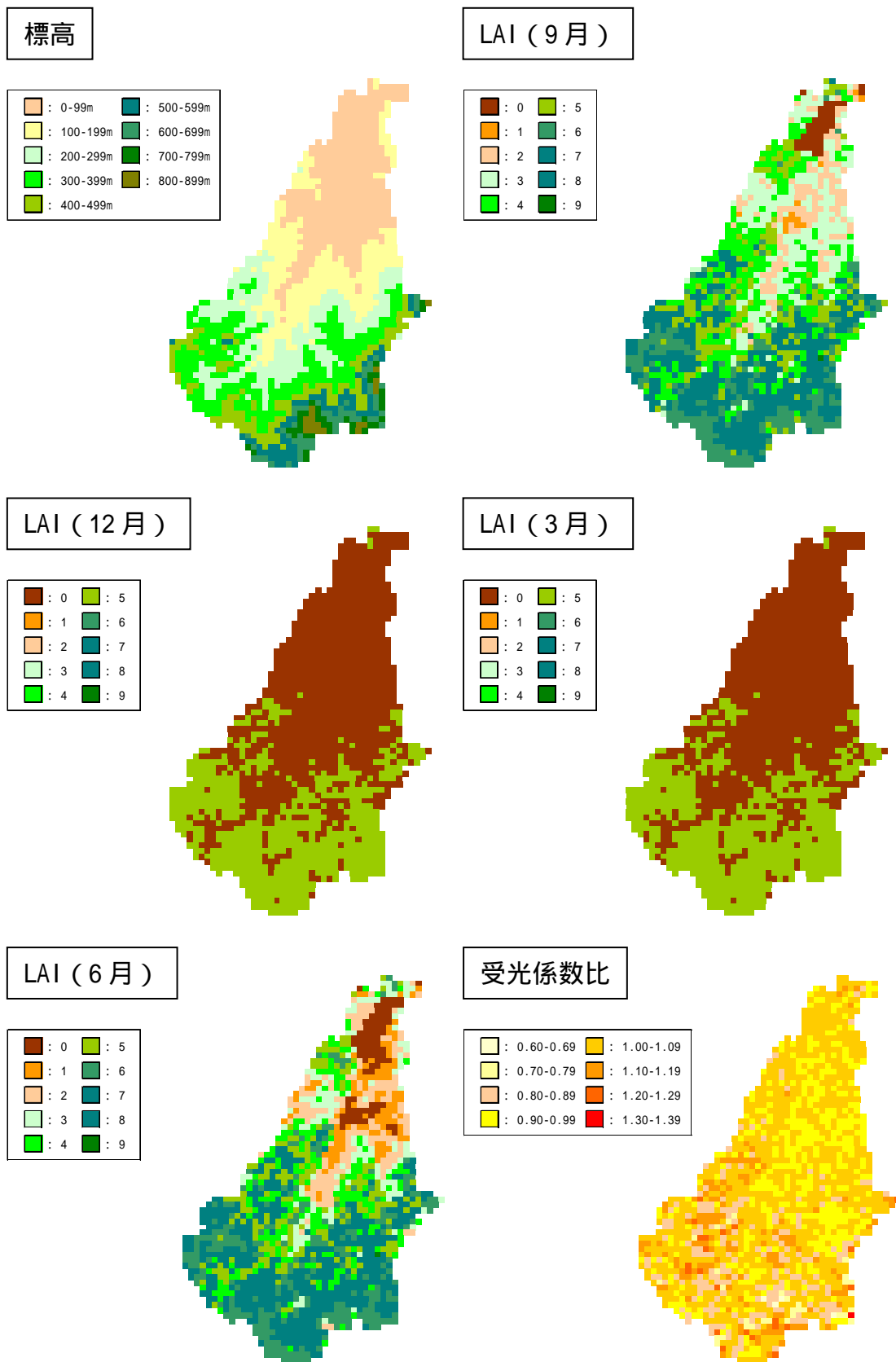


図 3.7 LoHAS で適用する解析パラメータの空間分布

1) 現況再現

網走川流域における融雪量，蒸発散量等の水文諸量の現況再現については，網走湖の直上流に位置する本郷水位流量観測所（以降，本郷地点）を検証地点として，対象期間を 1984 年 9 月～2003 年 8 月の 19 ヶ年とし，第 2 章で推定した MRI-NHRCM20 の現在気候 1km メッシュダウンスケーリング値を LoHAS に適用して推定し，水収支的に流出高を算出し，本郷地点自然流量（流出高換算）との比較により，推定した水文諸量の妥当性を検証した．

2) 将来予測

網走川流域における融雪量，蒸発散量等の水文諸量の将来予測については，第 2 章で推定した MRI-NHRCM20 の 1km メッシュダウンスケーリング値を LoHAS に適用した．

なお，LoHAS に適用した解析パラメータは現況再現時の値をそのまま適用した．

(4) 流出モデルによる河川流入量の推定

本章では、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、前記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た⁵⁾。

メッシュ上端の流出量を下流端まで河道追跡し、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 法を変形した以下の式を用い、差分化して計算を行った⁶⁾。

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{5}{3} \frac{i^{0.3} Q^{0.4}}{n^{0.6} B^{0.4}} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

$$B = 3.476A^{0.435} \quad (8)$$

ここで、 Q は流量 (m^3/s)、 i は勾配、 n は粗度係数 ($= 0.050$)、 B は川幅 (m)、 A は各メッシュの流域面積 ($= 0.9362\text{km}^2$) である。

勾配 i 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。

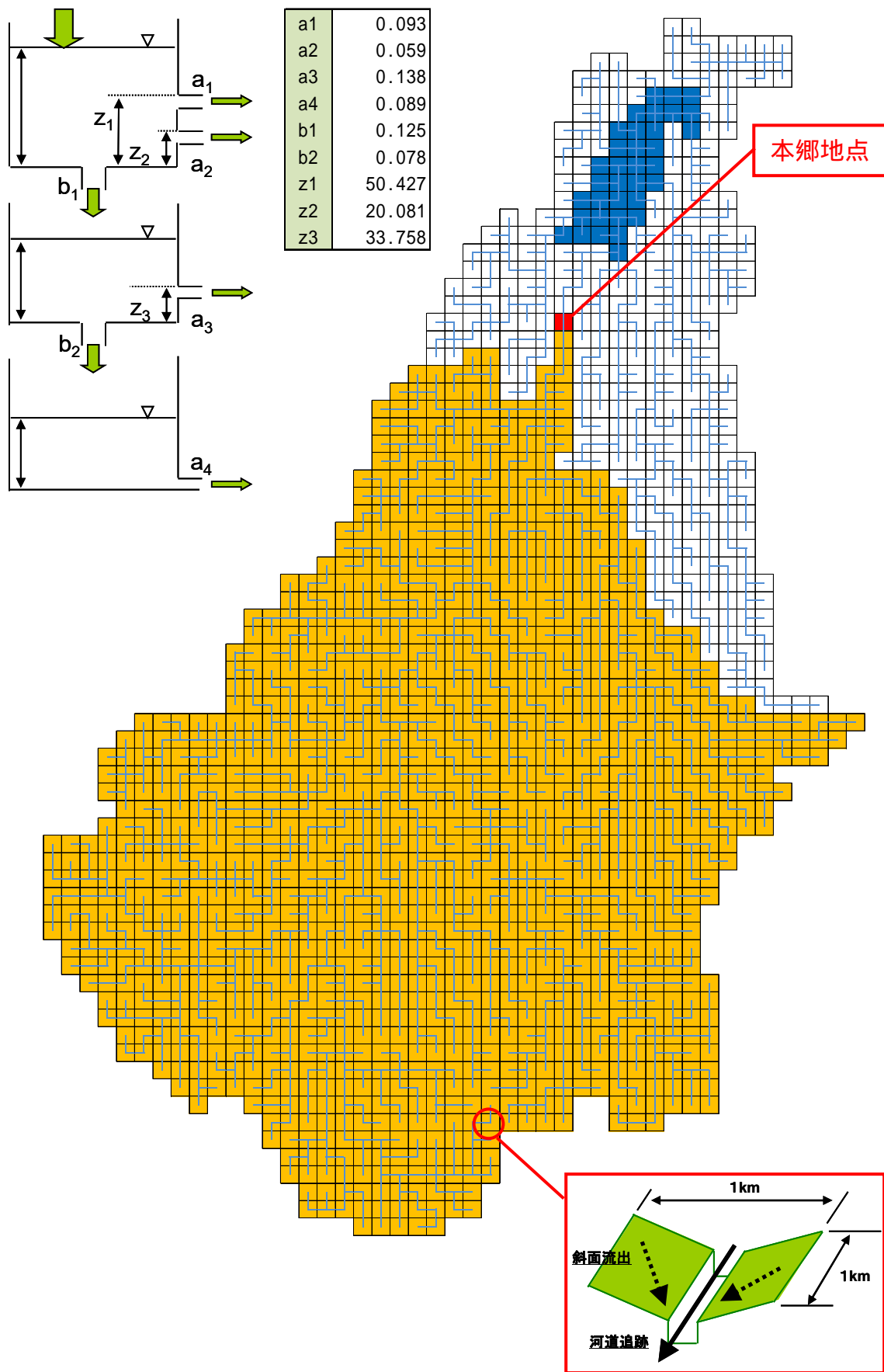


図 3.8 網走川流域流線網図及びタンクモデル定数

1) 現況再現

本郷地点河川流量の現況再現については、前項と同様、対象期間を 1984 年 9 月～2003 年 8 月の 19 ヶ年とし、前項で推定した水文諸量を入力条件としてタンクモデル及び kinematic wave 法に適用して推定し、本郷地点自然流量を比較し、河川流量推定結果の妥当性を検証した。

2) 将来予測

網走川流域における河川流量の将来予測については、第 2 章で推定した MRI-NHRCM20 の 1km メッシュダウンスケーリング値に対応する水文諸量の推定結果をタンクモデル及び kinematic wave 法に適用した。

なお、タンクモデル及び kinematic wave 法に適用した解析パラメータは現況再現時の値をそのまま適用した。

(5)水質解析モデルによる湖沼水質シミュレーション

本研究では，式(9)～(13)に示す流体の連続式・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式(14)に示す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採用した⁷⁾。

前者は流体の運動及び水温の移流拡散，後者は水質項目の移流拡散を再現・予測するためのモデルである。

(流体の連続式)

$$D \equiv H + \eta \quad (9)$$

$$\frac{\partial DU}{\partial x} + \frac{\partial DV}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0 \quad (10)$$

(流体の運動方程式)

$$\begin{aligned} \frac{\partial UD}{\partial t} + \frac{\partial U^2 D}{\partial x} + \frac{\partial UV D}{\partial y} - fVD + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(2A_M \frac{\partial UD}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ A_M \left(\frac{\partial VD}{\partial x} + \frac{\partial UD}{\partial y} \right) \right\} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial VD}{\partial t} + \frac{\partial UV D}{\partial x} + \frac{\partial V^2 D}{\partial y} - fUD + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ A_M \left(\frac{\partial VD}{\partial x} + \frac{\partial UD}{\partial y} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left(2A_M \frac{\partial VD}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

(水温の移流拡散方程式)

$$\frac{\partial TD}{\partial t} + \frac{\partial TUD}{\partial x} + \frac{\partial TVD}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{K_H}{D} \frac{\partial TD}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{K_H}{D} \frac{\partial TD}{\partial y} \right) \quad (13)$$

(水質項目の移流拡散方程式)

$$\frac{\partial C_i D}{\partial t} + \frac{\partial C_i UD}{\partial x} + \frac{\partial C_i VD}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{K_H}{D} \frac{\partial C_i D}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{K_H}{D} \frac{\partial C_i D}{\partial y} \right) + S_i \quad (14)$$

ここで， H は底面の xy 座標， η は xy 方向の水面変動， U 及び V は xy 方向の平均流速成分， g は流速加速度， A_M は Smagorinsky 拡散係数， T は水温， K_H は鉛直渦動粘性係数， C_i は水質項目 i の濃度， S_i は水質項目 i の生物化学反応項である。

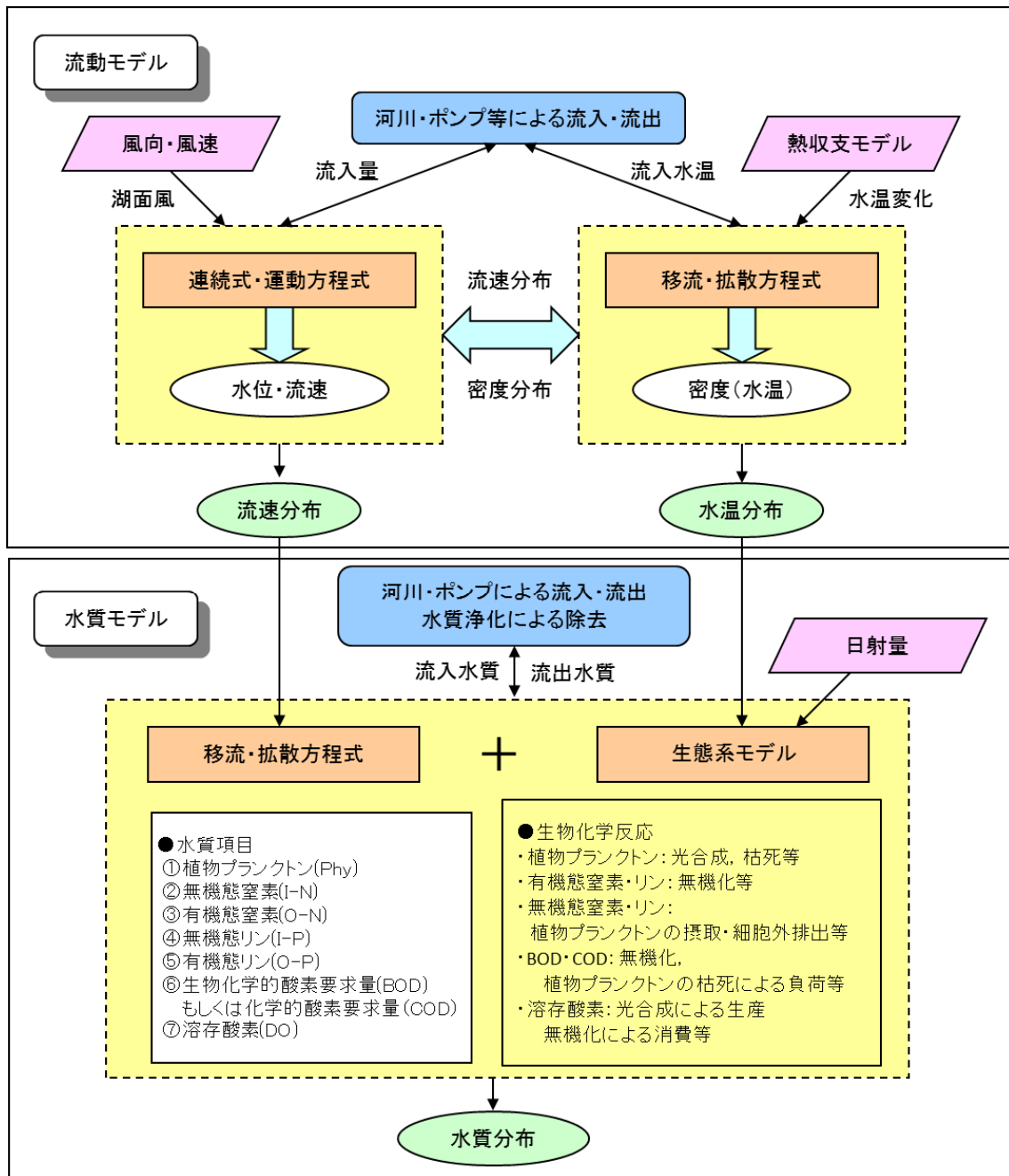


図 3.9 水質解析モデルの概念図

水質項目の移流拡散方程式から算出される水質項目 C_i は、塩分、クロロフィル a、T-N、T-P、COD、DO の 6 項目である。

なお、水質項目の内、クロロフィル a については「藍藻・珪藻・緑藻」、T-N については「デトリタス態・溶存性有機態・アンモニア態・硝酸・亜硝酸態窒素」、T-P については「デトリタス態・溶存性有機態・リン酸態リン」、COD については「デトリタス態・溶存性有機態炭素」を移流拡散方程式の生物化学反応項 S_i として与え、塩分については生物化学反応項を無視し、DO については硝化による酸化消費率等を考慮した。

1) 現況再現

網走湖内の水質観測地点 St-5 (湖心) における水質の現況再現については、対象期間を 2005 年～2009 年の 5 ヶ年とし、前記の水質解析モデルを用いて、下記の条件に基づき、水温、塩分濃度、クロロフィル a、T-N、T-P、COD、DO の再現計算を行い、モデルの妥当性を検証した。

表 3.3 現況再現計算における解析条件

条件	概要
計算メッシュ	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。
流入汚濁負荷量	網走湖の流入河川の水質・河川流量データを基に相関式(L-Q式)を作成し、適用。
網走湖下流端水位	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条件を適用。
結氷期間	12月から翌年2月までとし、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。
塩淡境界層	結氷期間中に2005年～2009年の平均的な塩淡境界層位置である水深6.0mまで戻ると仮定し、塩淡境界層を水深6.0mの位置で固定。

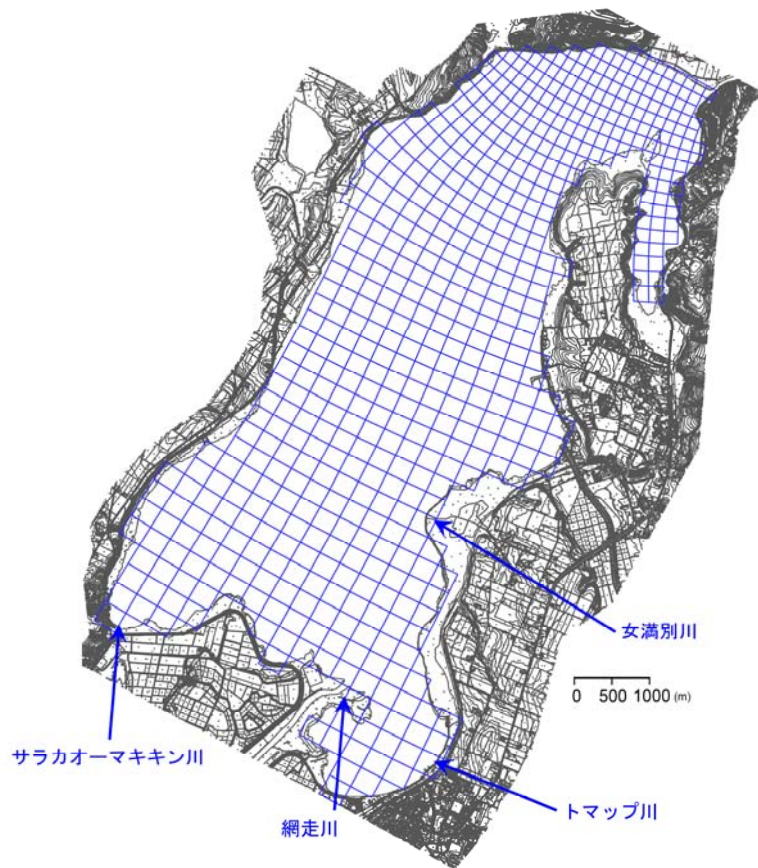


図 3.10 計算メッシュ（水平方向）

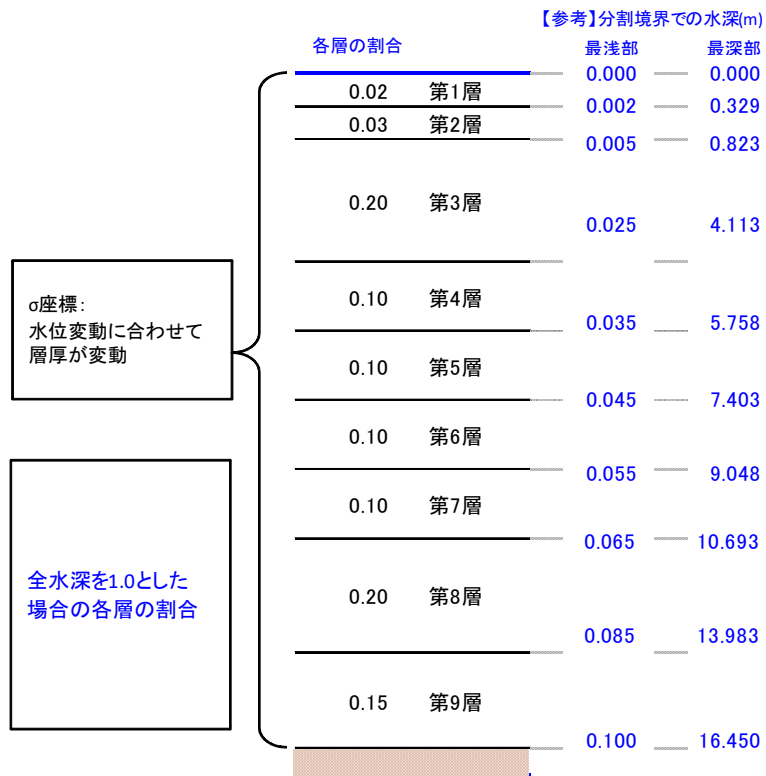


図 3.11 計算メッシュ（鉛直方向）

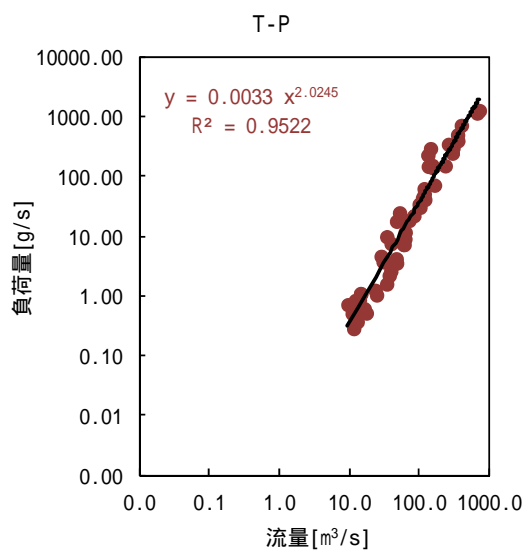
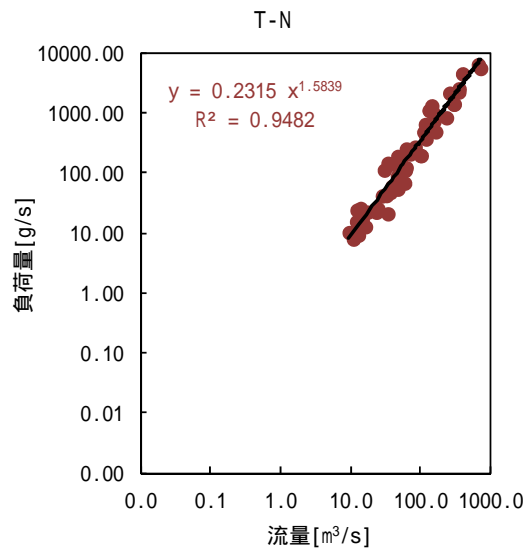
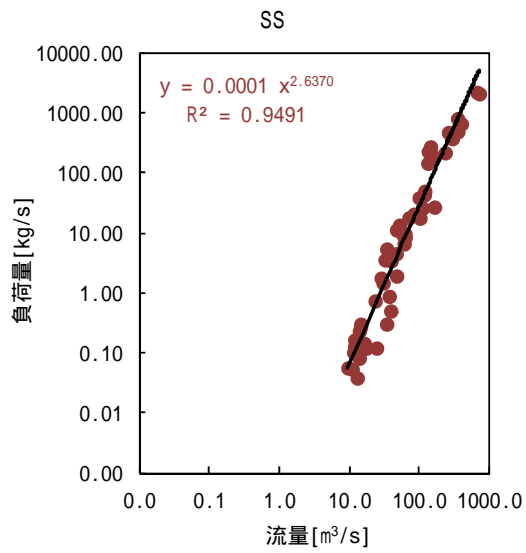
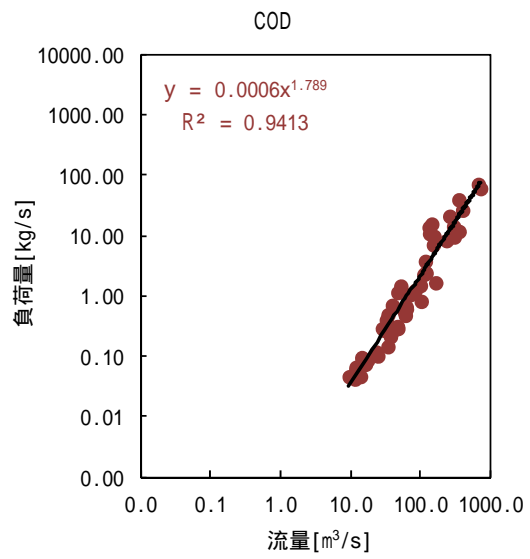
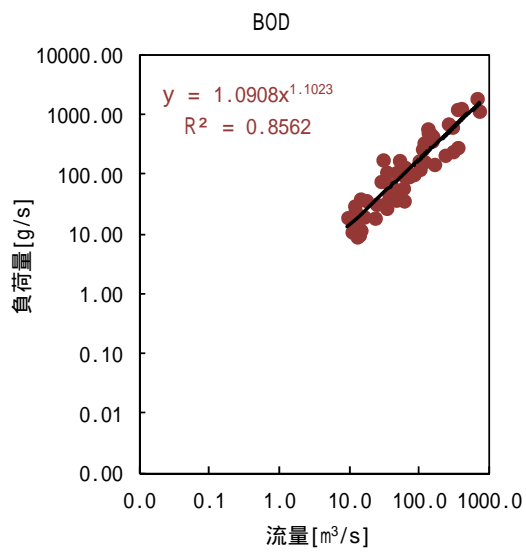


図 3.12 網走川 L-Q 式

2) 将来予測

網走湖内の水質観測地点 St-5 における湖沼水質の将来予測については、対象期間を 2080 年 9 月～2100 年 8 月の 20 ヶ年とし、前項と同様、第 2 章で推定した MRI-NHRCM20 の 1km メッシュダウンスケーリング値に該当する水文諸量及びメッシュ流出量の推定結果を水質解析モデルに適用し、下記の条件に基づき、水質シミュレーションを行った。

なお、水質解析モデルに適用した解析パラメータは現況再現時の値をそのまま適用した。

表 3.4 将来予測計算における解析条件

条件	概要
計算メッシュ	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。 ⇒現況再現と同様
流入汚濁負荷量	網走湖の流入河川の水質・河川流量データを基に相関式(L-Q式)を作成し、適用。 ⇒現況再現と同様
網走湖下流端水位	川尻漁場における水位観測値を基に四半期平均値を算出し、予測期間で繰り返し適用。
水質初期条件	観測結果を基に空間分布を推定し、適用。 ⇒現況再現と同様
流入水温・塩分濃度	水質観測地点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、予測期間で繰り返し適用。 網走湖下流端水位に四半期平均値を用いるため、水位上昇の継続による塩水遡上は発生しない条件を設定。
結氷期間	12月から翌年2月までとし、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。 ⇒現況再現と同様
塩淡境界層	結氷期間中に2005年～2009年の平均的な塩淡境界層位置である水深6.0mまで戻ると仮定し、塩淡境界層を水深6.0mの位置で固定。 ⇒現況再現と同様

3.2 解析結果

3.2.1 熱・水収支解析モデルによる水文諸量の推定

(1) 現況再現結果

本郷地点上流における 1984 年 9 月～2003 年 8 月の 19 ヶ年平均の流域水収支を整理し、表 3.5 に示す。

現在気候下での網走川流域の水文諸量は、解析対象期間の平均で、降雨量 696mm、降雪水量 260mm、総蒸発散量 421mm となり、網走川流域の水循環に関する既往研究⁸⁾における推定値と同程度であり、LoHAS により推定した水文諸量は妥当であるといえる。

また、流域水収支を試算した結果、年間流出高は解析対象期間の平均で 535mm となり、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。

表 3.5 本郷地点上流の流域水収支

降雨量 (mm/年)	降雪水量 (mm/年)	総蒸発散量 (mm/年)	水収支 (mm/年) = + -	流出高 (mm/年)	誤差 (mm/年) = -	誤差率 = /
696	260	421	535	538	-3	-0.6%

(2) 将来予測結果

網走川流域における気候変動に伴う現在気候に対する水文諸量の増加率について、2080年9月～2100年8月の20ヶ年平均値を整理し、図3.13に示す。

RCPシナリオ計7ケースに対する水文諸量の推定結果から、気候変動に伴い降雨量が最大1.50倍、降雪水量が最小で0.49倍、総蒸発散量が最大1.19倍、流出高が最大1.28倍となり、水環境に大きな影響を及ぼす流域の水収支が大きく変化することが把握された。

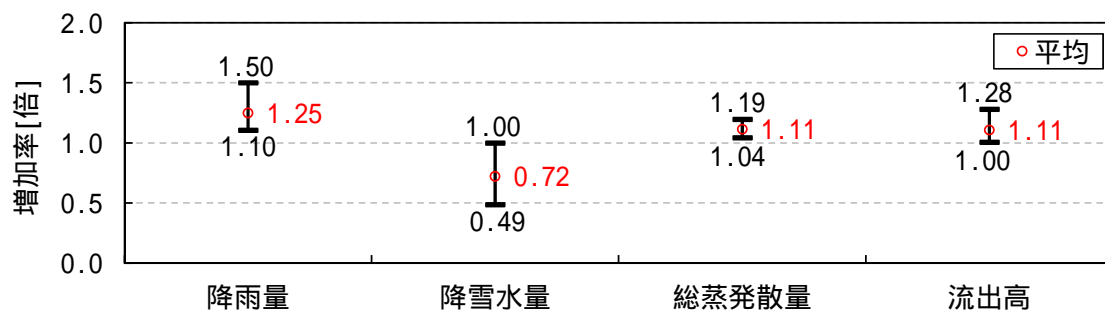


図 3.13 現在気候に対する将来気候の水文諸量の増加率

3.2.2 流出モデルによる流入量の推定

(1) 現況再現結果

1984年9月～2003年9月の19ヶ年における本郷地点自然流量の再現計算結果を整理し、図 3.14、図 3.15 に示す。

再現計算結果から、概ね本郷地点自然流量の季節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。

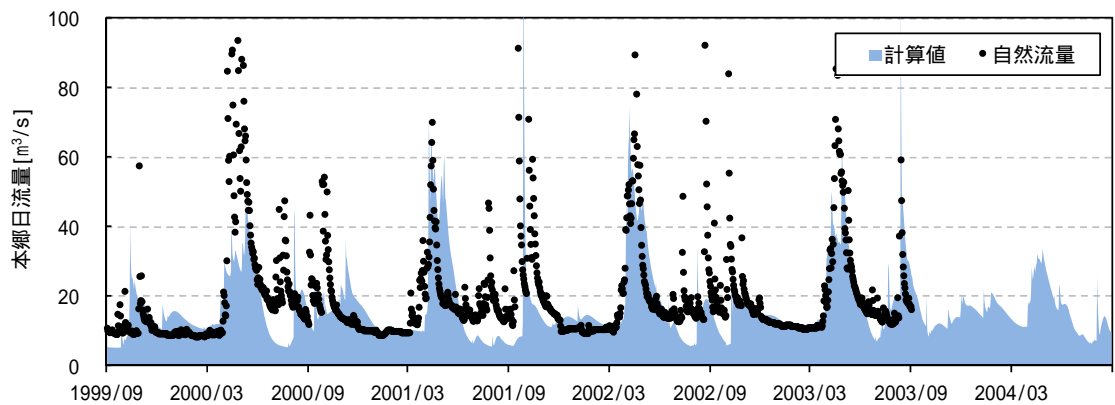
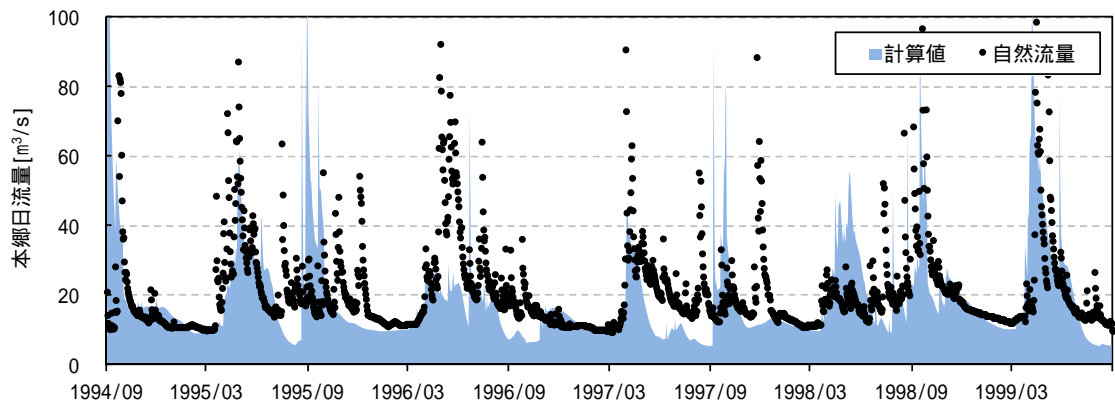
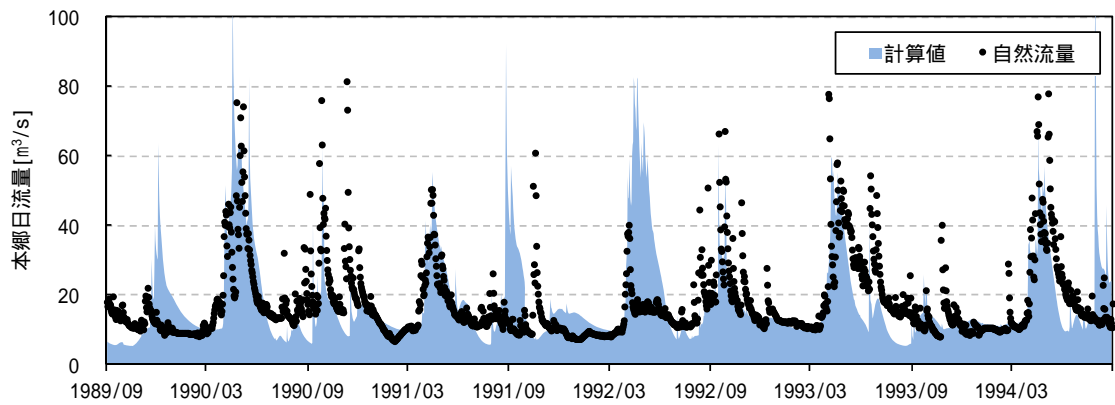
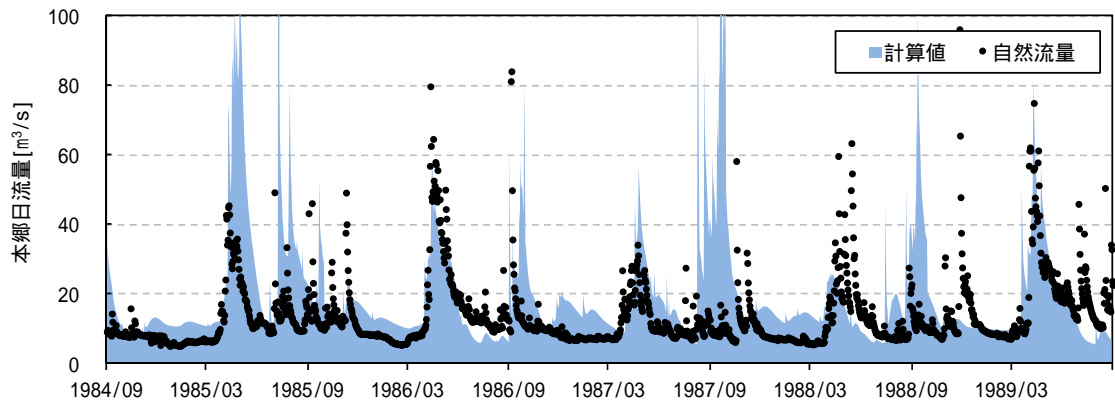


図 3.14 本郷地点自然流量再現計算結果

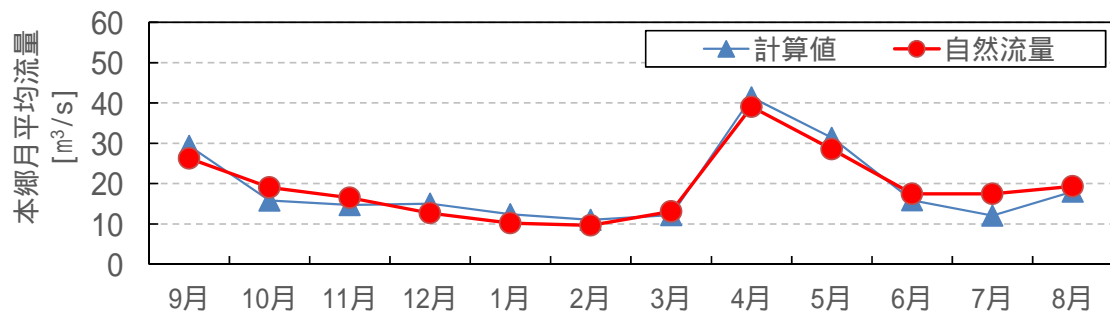


図 3.15 本郷地点自然流量月平均値の変化

(2) 将来予測結果

気候変動に伴う本郷地点自然流量の変化について、2080年9月～2100年8月の20ヶ年における各年流況の平均値を対象に、現在気候に対する増加率を整理し、図 3.16 に示す。

RCP シナリオ計 7 ケースに対する本郷地点自然流量の推定結果から、気候変動に伴い年最大流量が最大約 2.0 倍となり、他の流況においても約 1.2 倍程度増加することが把握された。

年最大流量の増加は、出水時の網走湖への SS 成分や汚濁負荷の流入増加につながるものと考えられる。

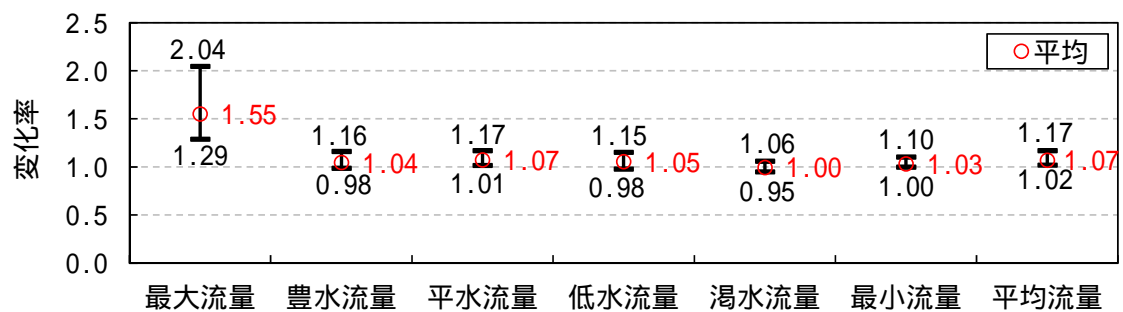


図 3.16 現在気候に対する将来気候の本郷地点自然流量の変化率

3.2.3 水質解析モデルによる水質シミュレーション

(1) 現況再現結果

2005年～2009年の5ヶ年を対象に、網走湖内の水質観測地点 St-5(湖心)における水温、塩分濃度、クロロフィル a、D0 の再現計算結果について、全層で塩分濃度及びクロロフィル 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、再現期間平均の 2 ケース整理し、図 3.17、図 3.18 に示す。

水温及び塩分については、表層・底層における変化傾向を概ね再現しており、クロロフィル a については、表層における増殖時期の傾向とオーダーが概ね再現されている。

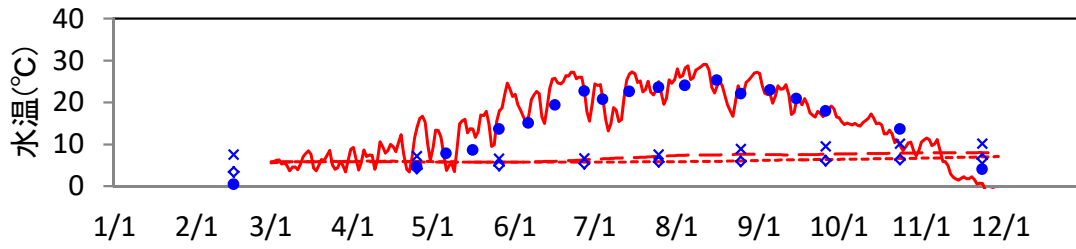
底層におけるクロロフィル a は $0\mu\text{g/L}$ となっており、増殖が表層の淡水層に限定される傾向が見られる。

D0 については、表層の飽和及び底層の無酸素状態の傾向が再現されている。

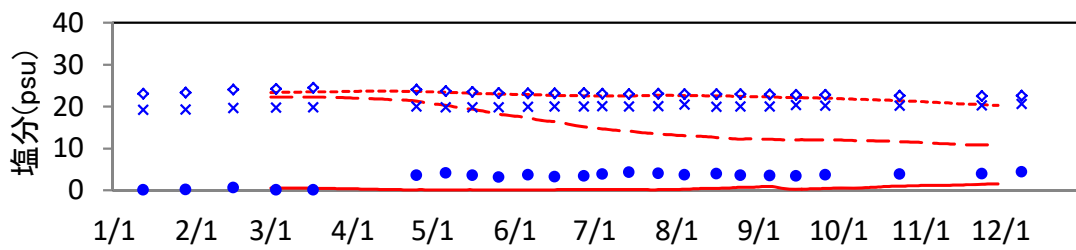
網走湖の特徴的な塩淡境界層の上層、底層における流動・水質の変化を再現できており、予測計算により気候変動に関連する有用な知見を得ることが可能であると考えられる。

なお、表層における水温が過大評価、表層における D0 が過小評価となっているが、水質解析モデルの鉛直方向の解像度が粗いことや湖面での熱吸収が過剰となっていることが要因として考えられる。

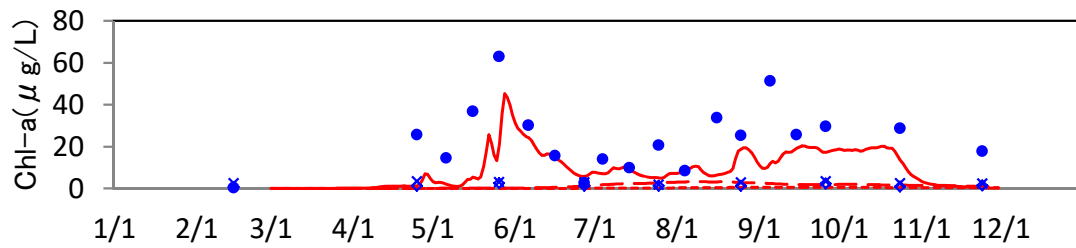
● 観測値(表層) × 観測値(中層) ○ 観測値(底層) — 計算値(表層) - - 計算値(中層) ··· 計算値(底層)



● 観測値(表層) × 観測値(中層) ○ 観測値(底層) — 計算値(表層) - - 計算値(中層) ··· 計算値(底層)



● 観測値(表層) × 観測値(中層) ○ 観測値(底層) — 計算値(表層) - - 計算値(中層) ··· 計算値(底層)



● 観測値(表層) × 観測値(中層) ○ 観測値(底層) — 計算値(表層) - - 計算値(中層) ··· 計算値(底層)

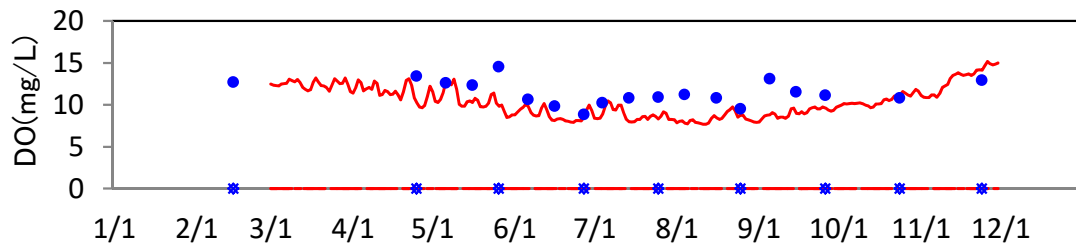
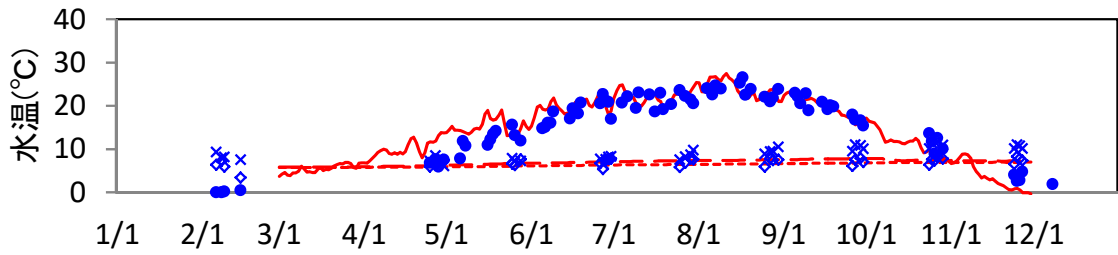
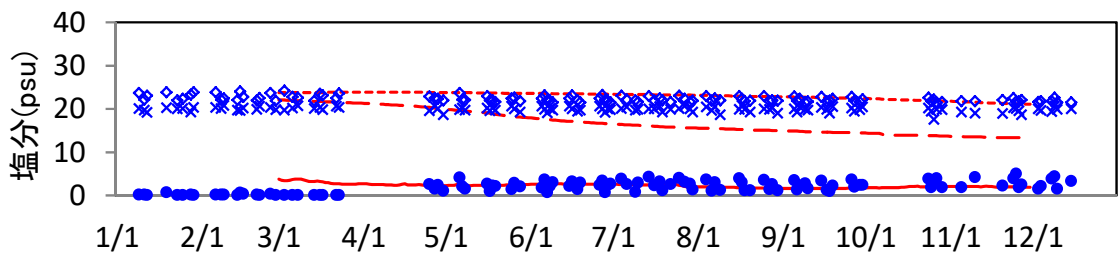


図 3.17 網走湖 St-5 水質再現計算結果
(2005 年)

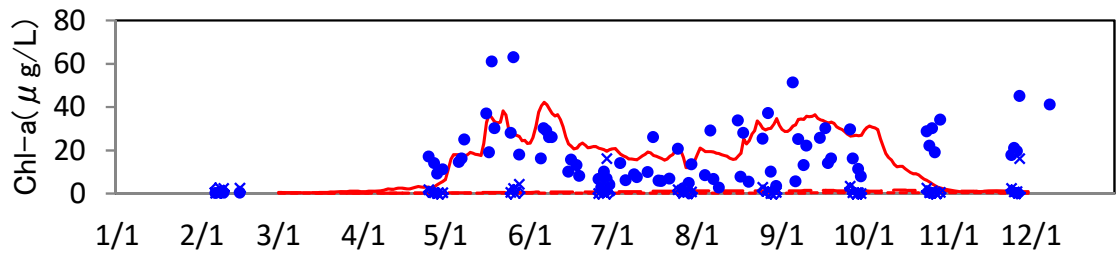
● 観測値(表層) × 観測値(中層) ○ 観測値(底層) — 計算値(表層) - - 計算値(中層) ··· 計算値(底層)



● 観測値(表層) × 観測値(中層) ○ 観測値(底層) — 計算値(表層) - - 計算値(中層) ··· 計算値(底層)



● 観測値(表層) × 観測値(中層) ○ 観測値(底層) — 計算値(表層) - - 計算値(中層) ··· 計算値(底層)



● 観測値(表層) × 観測値(中層) ○ 観測値(底層) — 計算値(表層) - - 計算値(中層) ··· 計算値(底層)

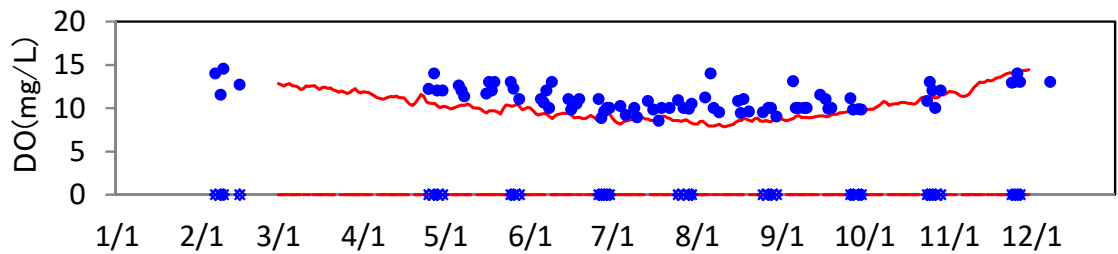


図 3.18 網走湖 St-5 水質再現計算結果
(2005年～2009年の平均値)

(2) 将来予測結果

気候変動に伴う網走湖内の水質観測地点 St-5 (湖心) における水質の変化について、2080年9月～2100年8月の20ヶ年平均値、現在気候に対する水質の変化率と標準偏差を整理し、図 3.19、図 3.20、図 3.21 に示す。

水温、塩分濃度、クロロフィル a については、将来気候下において現在気候に比べて値が上昇し、解析対象期間中の日別値のばらつきが大きくなり、逆に、COD、T-N、T-P、D0 については、現在気候に比べて値が低下し解析対象期間中の日別値のばらつきが小さくなることが明らかとなった。

塩分濃度が上昇する要因として、表層の水温上昇に伴い、表層での流動と底層からの塩分の連行が促進されていることが考えられる。

また、気候変動に伴う河川流量の増大により湖内の流動が多くなるため、T-N、T-P が低下するものと考えられる。

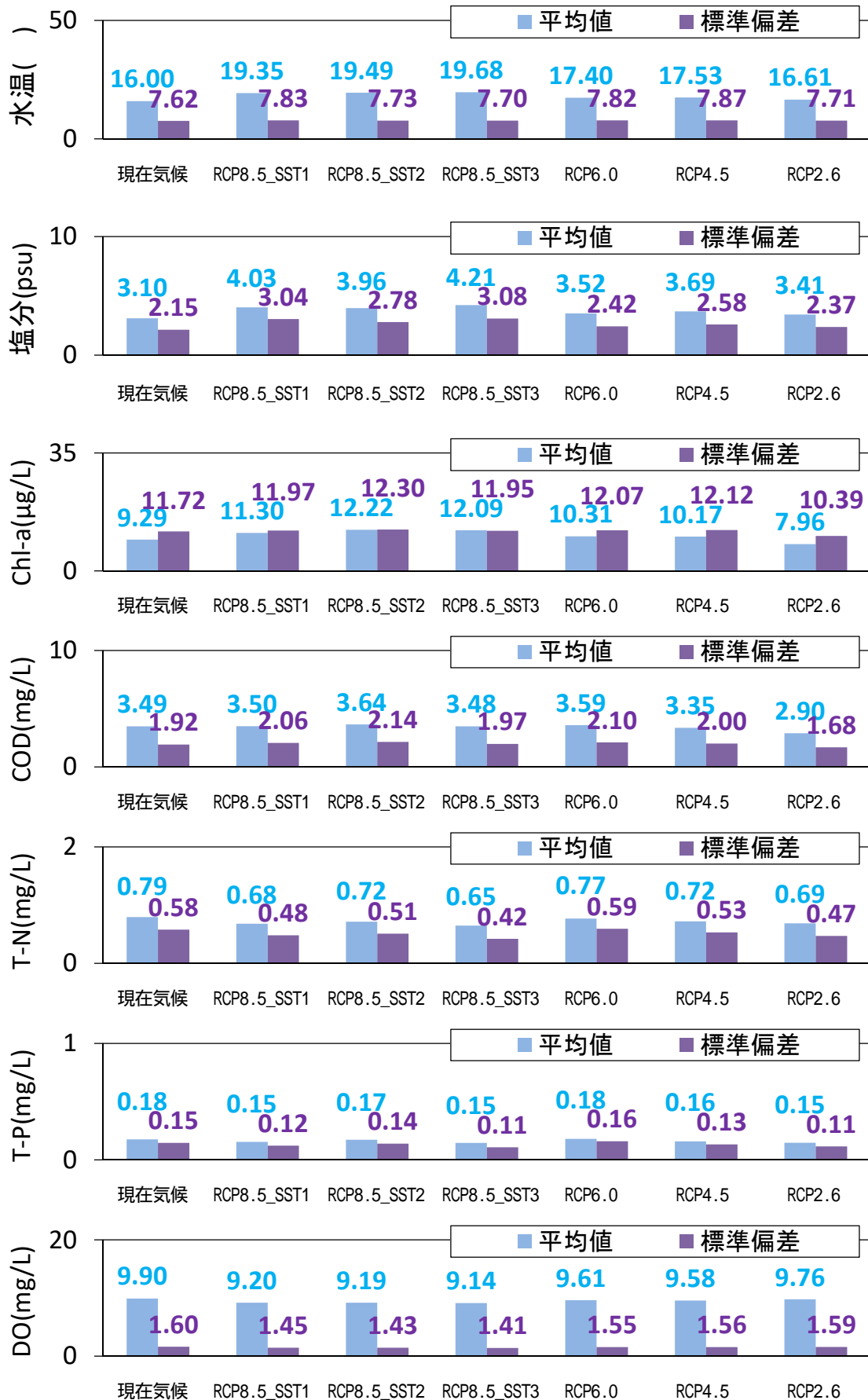


図 3.19 網走湖 St-5 水質シミュレーション結果

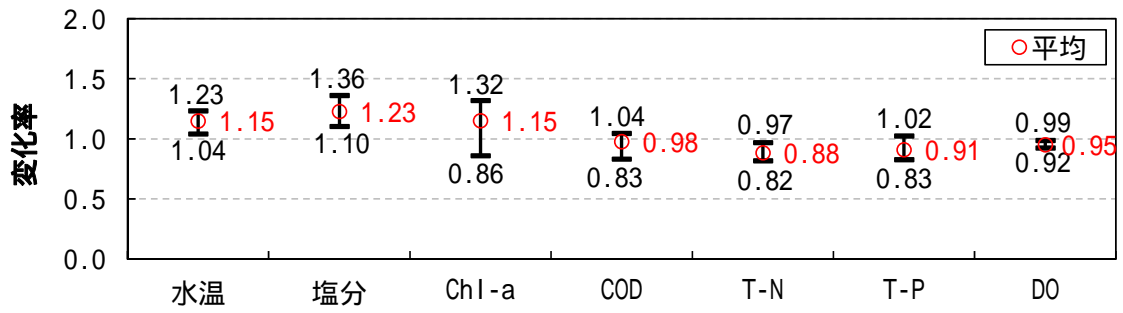


図 3.20 現在気候に対する将来気候の網走湖 St-5 表層水質の変化率

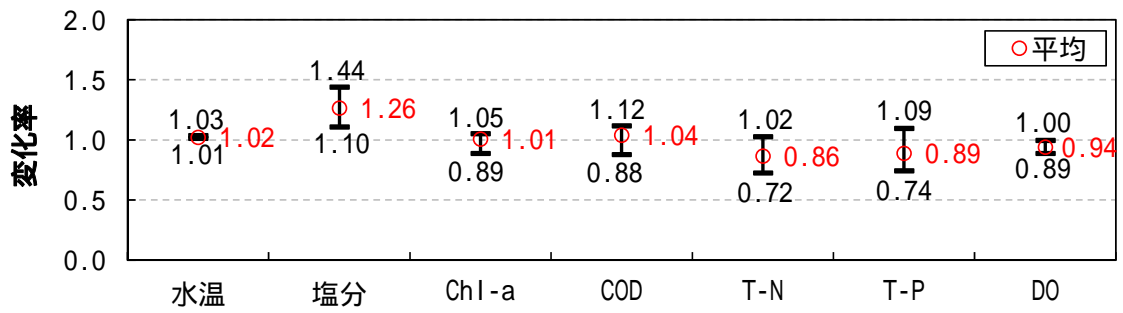


図 3.21 現在気候に対する将来気候の網走湖 St-5 表層水質標準偏差の変化率

(3) 塩分濃度上昇による水質悪化への影響

網走湖で顕在化している水質障害に対する影響を評価するため、網走湖内の水質観測地点 St-5 (湖心) における表層塩分濃度の上昇が最も顕著となる RCP8.5 シナリオを対象に、現在気候に対する塩分濃度上昇量の季節変化を整理し、図 3.22 に示す。

気候変動に伴い、水質観測地点 St-5 の表層塩分濃度の上昇量は夏期以降に増加し、3～6月の平均で最大 0.99psu、網走湖でアオコが発生する 7～11月の平均で最大 1.21psu となり、9月に最大 1.48psu 上昇することが明らかとなった。

気候変動により、流出量が増加する夏期以降、流域からの流入汚濁負荷の増加に伴う塩水層の無酸素化、水温上昇に伴う表層での流動と底層からの連行が促進されることにより、塩水層から栄養塩が供給されやすい環境が形成されるものと考えられる。

これにより、将来気候では現在気候に比べて、強風が発生した場合の青潮発生リスク、表層の塩分濃度上昇によるアオコ発生リスクが増大するものと考えられる。

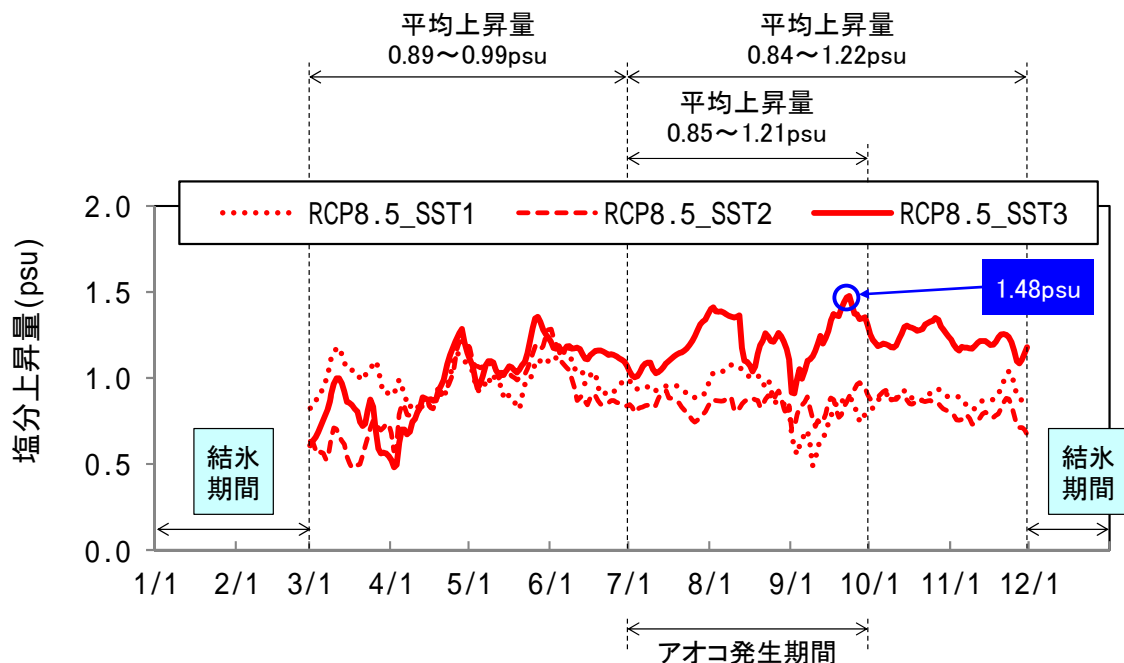


図 3.22 現在気候に対する塩分濃度上昇量の季節変化

3.3 定量評価手法に対する評価

本研究で対象とした，汽水湖における気候変動に対する影響に関する日本国内の先行研究として，早川ら⁹⁾は，網走湖と同様，オホーツク海沿岸の汽水湖であり塩水化が進行しつつある藻琴湖を対象に，河道流解析ソフト HEC-RAS を用いた一次元不定流解析を行い，気候変動に伴う海面上昇による湖出口部における流入出流量の変動を解析している。

松根ら¹⁰⁾は，青森県の日本海側に位置し国内でも有数のヤマトシジミの漁場である十三湖を対象として，準 3 次元の流動解析モデルを用いて湖内の塩水流動を解析している。

また，海外の先行研究として，Jeppesen et al.¹¹⁾は，オランダ等の汽水湖において，気温データと魚類相・植物プランクトン等の相関関係を分析し，気候変動に伴う富栄養化により魚類の生息環境が変化し，生活史に影響が及ぶ可能性のあることを示しているが，過年度までの観測データに基づいた評価にとどまっている。

上記の日本国内の先行研究では，IPCC 第 4 次評価報告書の SRES シナリオに基づく気候変動予測データを適用しており，温室効果ガス排出シナリオが古く，政策主導的な排出削減対策が考慮されていないことから，本研究は気候変動の影響評価のケーススタディとして新規性があると考えられる。

加えて，塩分濃度や T-P 濃度といった特定の水質項目しか評価を行っていないため汎用性が低く，環境省が定める水質汚濁に係る環境基準（生活環境の保全）¹²⁾で定義されている水質項目に対する影響を評価することができる本研究の評価手法は，気候変動に伴う湖沼環境への影響を踏まえた「適応策」の立案に対して極めて有用であると考えられる。

3.4 気候変動への適応策に関する考察

本研究の解析結果より，気候変動に伴い網走湖表層の水温，塩分濃度，クロロフィル a が上昇し，アオコが主に発生する時期に顕著となることが明らかとなった．

表層塩分濃度の上昇は，網走湖での青潮やアオコの発生頻度の増加だけでなく，淡水層の減少による水生生物生息域の縮小にもつながることから，気候変動に伴う水質や水生生物の生息環境の悪化に対応した水質改善施策の実施が今後重要となる．

水質変化は，塩淡水境界層の変化や流域からの汚濁負荷流入特性も密接に関わっているものと考えられることから，今後気候変動への適応策を検討するにあたり，網走湖内の水質変化をよりの確に把握するため，網走湖の二層構造や青潮・アオコ発生メカニズムを踏まえ，塩淡水境界層や流域からの汚濁負荷流入等のモニタリングを適切に実施する必要があると考える．

また，網走湖内の水質変化を抑制しつつ，ヤマトシジミ資源量を安定的に確保するためには，網走湖内の塩分量を適切にコントロールすることが重要であり，網走湖下流端に位置する網走川大曲堰において塩淡水境界層を制御する必要があると考える．



写真 3.3 網走川大曲堰¹³⁾

3.5 本章のまとめ

本研究で得られた結果を以下にまとめる．

- (1) 表層の水温・塩分濃度・クロロフィル a の上昇及び DO の低下が，青潮やアオコの発生頻度の増加に繋がるリスクを把握することができた．
- (2) 地域レベルで気候変動による湖沼環境への影響を適切に評価する上で有用な手法を提案することができた．
- (3) 気候変動に伴う表層塩分濃度の上昇により，淡水層の減少による水生生物生息域の縮小も懸念されることから，水質悪化のリスクを踏まえた湖沼を含む水系全体での水質保全・改善施策の実施が重要であると考えた．

3.6 参考文献

- 1) 北海道開発局：網走川水系河川整備計画（国管理区間），2015.
- 2) 国土交通省北海道開発局網走開発建設部：網走川水系網走川水環境改善緊急行動計画（清流ルネッサンス），2005.
- 3) 口澤寿，中津川誠：熱・水収支を考慮した流域スケールの積雪と蒸発散の推定，北海道開発土木研究所月報第 588 号，pp.19-38，2002.
- 4) 近藤純正：水環境の気象学，pp.10-137，山海堂，1990.
- 5) 中津川誠，濱原能成，星清：積雪変化を考慮した長期流出計算，水工学論文集第 47 巻，pp.157-162，2003.
- 6) 臼谷友秀，中津川誠，工藤啓介：石狩川流域における水循環の定量化について，水工学論文集第 49 巻，pp.229-234，2005.
- 7) 岩佐義朗：湖沼工学，pp.215-356，朝倉書店，1994.
- 8) 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.
- 9) 早川博，本島翼，内島邦秀：オホーツク海沿岸に点在する海跡湖の湖沼環境 - 藻琴湖の場合 - ，水工学論文集第 51 巻，pp.1315-1320，2007.
- 10) 松根駿太郎，梅田信，田中仁，佐々木幹夫：十三湖における汽水環境の長期的な変化要因の検討，土木学会論文集 B1（水工学）Vol.69，No.4，I_1507-I_1512，2013.
- 11) Erik Jeppesen, Mariana Meerhoff, Kerstin Holmgren, IvanGonzález-Bergonzoni, Franco Teixeira-de Mello, Steven A.J. Declerck, Luc De Meester, Martin Søndergaard, TorbenL. Lauridsen, Rikke Bjerring, José Maria Conde-Porcuna,Néstor Mazzeo, Carlos Iglesias, Maja Reizenstein, HilmarJ. Malmquist : Impacts of climate warming on lake fishcommunity structure and potential effects on ecosystemfunction, Hydrobiologia, Volume 646, Issue 1, Pages 73-90, 2010.
- 12) 環境省 HP：<<https://www.env.go.jp/kijun/pdf/wt2-1-2.pdf>>（アクセス日：2019/6/17）
- 13) 北海道開発局 HP：<<https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/ki/kouhou/ud49g7000000jpgq.html>>（アクセス日：2019/6/11）

第4章 気候変動による積雪寒冷地河川の水温変化と

冷水性魚類の生息環境に対する影響の分析

4.1 解析方法

4.1.1 対象流域

本章では、一級河川石狩川水系空知川の上流に位置する金山ダム流域を対象とした¹⁾ (図 4.1)。

空知川は、その源を上ホロカメットク山の南斜面に発し、峻険な山間を経てルーオマンソラプチ川を合流し、その後、金山ダムを経て北海道の中心部に位置する富良野盆地に入り、布部川、富良野川等を合流した後、山間部に入り滝里ダムや野花南ダム、芦別ダムを経て、滝川市街で石狩川に合流する幹川流路延長 194.5km、流域面積 2,618km²を有する石狩川最大の1次支川である¹⁾。

金山ダムは、昭和42年に竣工された直轄多目的ダムであり、空知川下流部に位置する北海頭首工等の取水施設に対して利水補給を行っているほか、洪水調節、発電による周辺地域への電力供給を行っている²⁾。

金山ダム付近では、北海道レッドリスト³⁾の絶滅危惧IB類(近い将来における野生での絶滅の危険性が高い種)であるイトウ *Hucho perryi*、サクラマス(ヤマメ) *Oncorhynchus masou* 等の冷水性魚類が確認されており、金山ダム貯水池(かなやま湖)から空知川源流部を回遊移動し、成魚の遡上・産卵、稚仔魚の降河が行われている¹⁾。

太平橋は、金山ダム貯水池(かなやま湖)上流に位置する、北海道開発局札幌開発建設部が管理する水質・底質定期調査地点であり、5~11月の年7回、生活環境項目、富栄養化関連項目等の調査が行われている。

4.1.2 解析条件

(1) 解析フロー

本章で実施する解析の全体の流れについて、図 4.2 に示す。

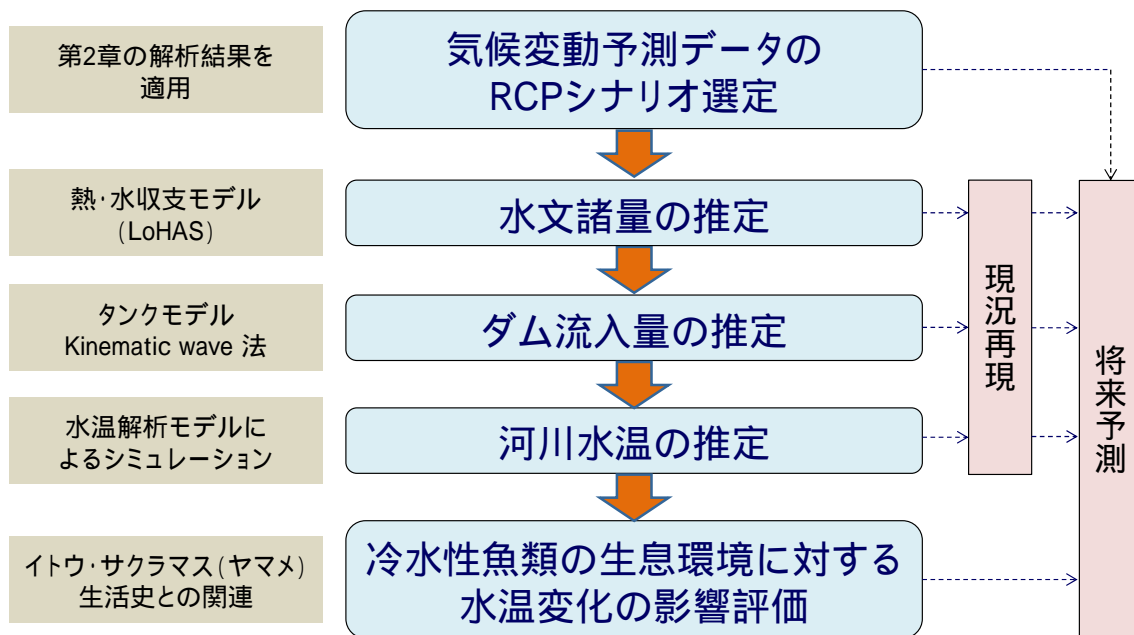


図 4.2 解析フロー

(2) 気候変動予測データのシナリオ選定

本章では、地球温暖化に伴う気候変動が極端化した場合に河川環境に対して影響がどの程度生じるのか検証するため、第2章で推定したMRI-NHRCM20の内、放射強制力が最も高いRCP8.5シナリオを対象として、以下に示す計4ケースを選定した(表4.1)。

表 4.1 RCP シナリオ選定

番号	計算期間	シナリオ	海面水温	積雲対流スキーム	ケース名
1	現在気候 3ケース	-	HadISST	YS	HPA_m02
2			HadISST	KF	HPA_kf_m02
3			HadISST	AS	HPA_as_m02
4	将来気候 16ケース	RCP8.5 9ケース	SST1	YS	HFA_rcp85_c1
5			SST1	KF	HFA_kf_rcp85_c1
6			SST1	AS	HFA_as_rcp85_c1
7			SST2	YS	HFA_rcp85_c2
8			SST2	KF	HFA_kf_rcp85_c2
9			SST2	AS	HFA_as_rcp85_c2
10			SST3	YS	HFA_rcp85_c3
11			SST3	KF	HFA_kf_rcp85_c3
12			SST3	AS	HFA_as_rcp85_c3
13		RCP6.0 3ケース	SST1	YS	HFA_rcp60_c1
14			SST2	YS	HFA_rcp60_c2
15			SST3	YS	HFA_rcp60_c3
16		RCP4.5 1ケース	SST1	YS	HFA_rcp45_c1
-			SST2	YS	HFA_rcp45_c2
-			SST3	YS	HFA_rcp45_c3
17		RCP2.6 3ケース	SST1	YS	HFA_rcp26_c1
18	SST2		YS	HFA_rcp26_c2	
19	SST3		YS	HFA_rcp26_c3	

※赤色は選定したRCPシナリオを表す。

(3) 熱・水収支解析モデルによる水文諸量の推定

本章では、第3章と同様、降雪—積雪—融雪の水文過程を再現できる解析モデル LoHAS (Long term Hydrologic Assessment model considering Snow process) を採用した。

LoHAS に適用した空知川流域の標高、土地利用、LAI (葉面積指数)、受光係数比等の解析パラメータを整理し、表 4.2、図 4.3 に示す。

表 4.2 解析パラメータ設定値

パラメータ	概要
標高・勾配	国土数値情報3次メッシュ平均標高を採用するとともに、国土数値情報250mメッシュ標高をもとに1kmメッシュ内の東西・南北方向の平均傾斜を算出。
緯度・経度	国土数値情報3次メッシュ中心座標を適用。
LAI(葉面積指数)	既往研究で作成されたLAI月別値(1~12月)を採用。
バルク輸送係数	植被層:0.005, 地表面:0.0015, 積雪面:0.002
蒸発効率	植被層:0.10, 地表面:0.50, 積雪面:1.05
アルベド	地表面:0.20
降雪密度	74kg/m ³

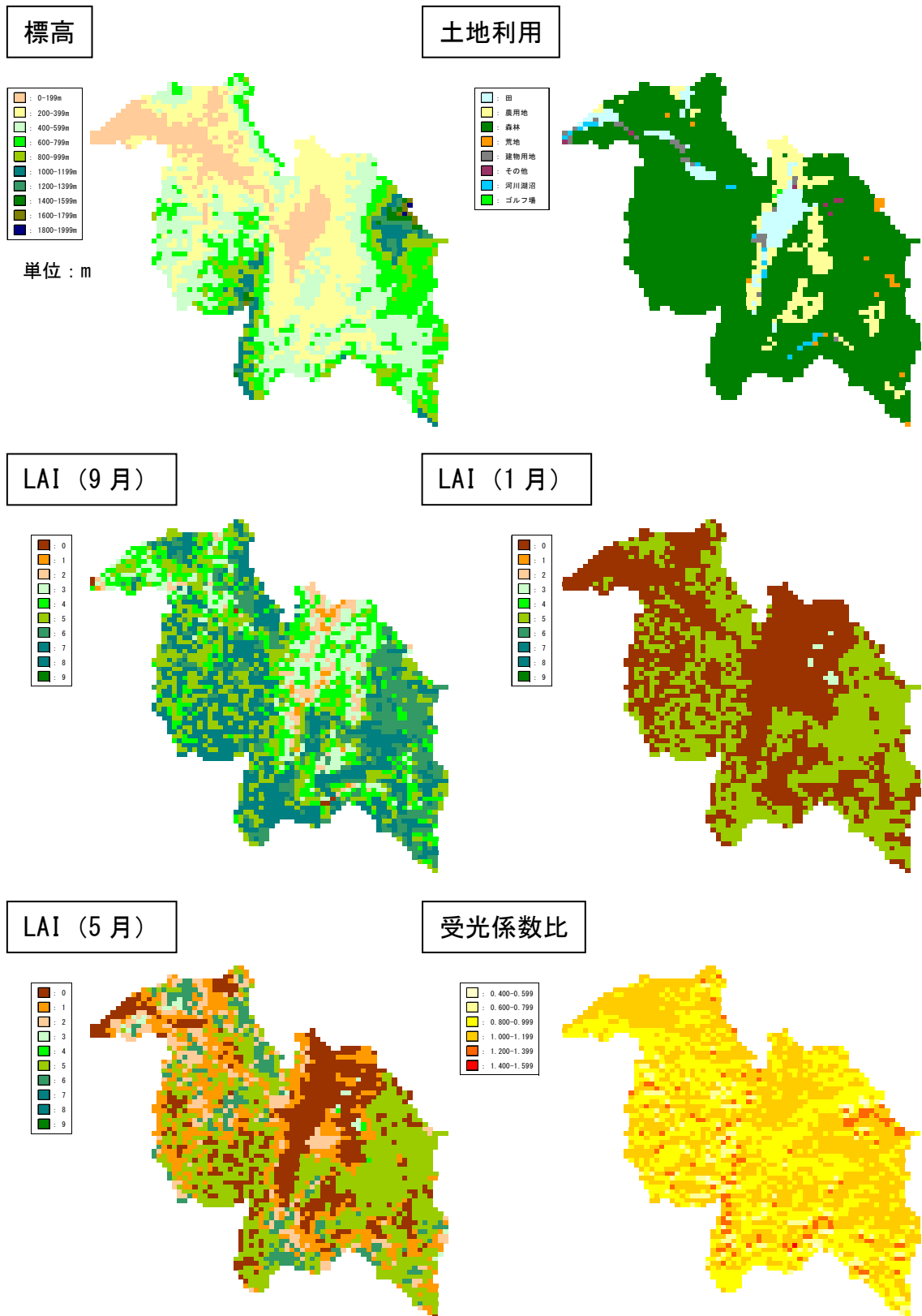


図 4.3 LoHAS で適用する解析パラメータの空間分布

1) 現況再現

金山ダム流域における融雪量，蒸発散量等の水文諸量の現況再現については，対象期間を2010年9月～2015年8月の5ヶ年とし，金山ダム流域周辺の気象観測データ及び解析雨量をLoHASに適用して推定し，水収支的に流出高を算出し，金山ダム流入量（流出高換算）との比較により，推定した水文諸量の妥当性を検証した。

なお，現況再現で採用する風速，気温，相対湿度，日照時間，全天日射量，降雪量，気圧の内，風速については対数則，気温及び気圧については標高に対する変化率を考慮し，補正を行った。

また，解析雨量については，冬期で過小評価されていることから，11月～翌年4月を対象に，金山ダム流域内の降水量観測地点での観測値と解析雨量の差分をもとに補正を行った。

気象観測地点の値から1kmメッシュ値へのダウンスケーリングについては，金山ダム流域を約1km×1km格子にメッシュ分割し，補正処理を行った気象要素を基にVariogramを推定し，Variogramの相関関係の有無に応じて，Kriging法，距離重み法のいずれかの空間補間法を使い分けた。

Variogramは，データが距離と方向にどのような関係を持つかを示す指標であり，測定一定距離離れた2点において剰余の差の分散を一般化するものである。

Variogram, Kriging法, 距離重み法は，次頁の式で表される。

(Variogram)

$$\gamma(d) = \frac{1}{2N(d)} \sum_{i=1}^{N(d)} [z(X_i + d) - z(X_i)]^2 \quad (1)$$

(Kriging 法 : Variogram による格子点間の相関関係が見られる場合)

$$z(X_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i z(X_i) \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i \gamma(X_i - X_j) = \gamma(X_i - X_0) \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^N \lambda_i = 1 \quad (i = 1, \dots, N) \quad (4)$$

(距離重み法 : Variogram による格子点間の相関関係が見られない場合)

$$z(X_0) = \frac{\sum_{i=1}^N [z(X_i)/d_i]}{\sum_{i=1}^N [1/d_i]} \quad (5)$$

ここで、 $\gamma(d)$ は Variogram、 $z(X_i)$ は観測所 X_i における観測データ、 d は観測所間の距離、 $N(d)$ は d 離れた観測所と対をなす観測データ数である。 $z(X_0)$ は任意メッシュ X_0 でのメッシュ気象値、 $z(X_i)$ 及び $z(X_j)$ は観測所 X_i 及び X_j における観測データ、 λ_i は $z(X_i)$ の重み係数である。

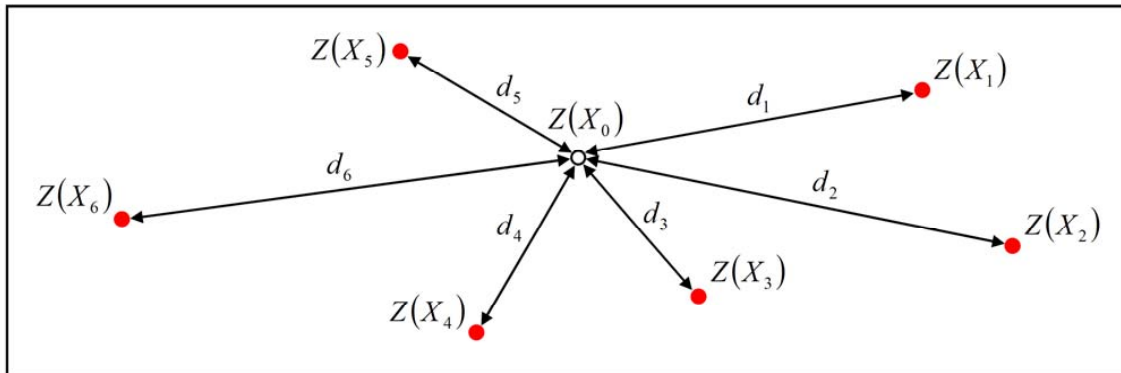


図 4.4 空間補間のイメージ

2) 将来予測

金山ダム流域における融雪量、蒸発散量等の水文諸量の将来予測については、第 2 章で推定した MRI-NHRCM20 の 1km メッシュダウンスケーリング値の内、RCP8.5 計 4 ケースに該当する値を LoHAS に適用した。

なお、LoHAS に適用した解析パラメータは現況再現時の値をそのまま適用した。

(4) 流出モデルによるダム流入量の推定

本章では、第3章と同様、タンクモデル及びkinematic wave法を採用した。

金山ダム流域の地形から水の流れを模式化した空間解像度1kmメッシュの流線網図を作成し、金山ダム流域の水文諸量を入力条件として、タンクモデルを用いてメッシュ流出量を推定し、kinematic wave式を変形した式を用いてメッシュ上端の流出量を下流端まで河道追跡し、金山ダム流入量を算出した。

なお、タンクモデルのパラメータの内、地質との関連性がある中間流出孔 a_3 及び地下水流出孔 a_4 については、既往研究⁴⁾を参考に、国土数値情報から金山ダム流域の表層地質データを抽出し、第三紀火山岩、第四紀火山岩、花崗岩、第三紀層、中生層、その他の6区分に分類し、金山ダム流域の表層地質面積率に基づく式(6)及び式(7)の回帰式を用いて、メッシュ毎に設定した。

(中間流出孔 a_3)

$$a_3 = 0.312 - 0.185g_1 - 0.261g_2 - 2.769g_3 - 0.334g_4 - 0.240g_5 \quad (6)$$

(地下水流出孔 a_4)

$$a_4 = -0.053 + 0.130g_1 + 0.075g_2 + 1.970g_3 + 0.106g_4 + 0.076g_5 \quad (7)$$

ここで、 g_1, g_2, g_3, g_4, g_5 は第三紀火山岩、第四紀火山岩、花崗岩、第三紀層、中生層の面積率であり、メッシュに該当するいずれかの表層地質の面積率を100% (他の表層地質は0%) として与えた。

なお、式(6)及び式(7)により算出した値がマイナスとなる場合は、金山ダム流入量をトライアル計算し、再現性が最も良好となる値として $a_3=0.095$, $a_4=0.059$ とした。

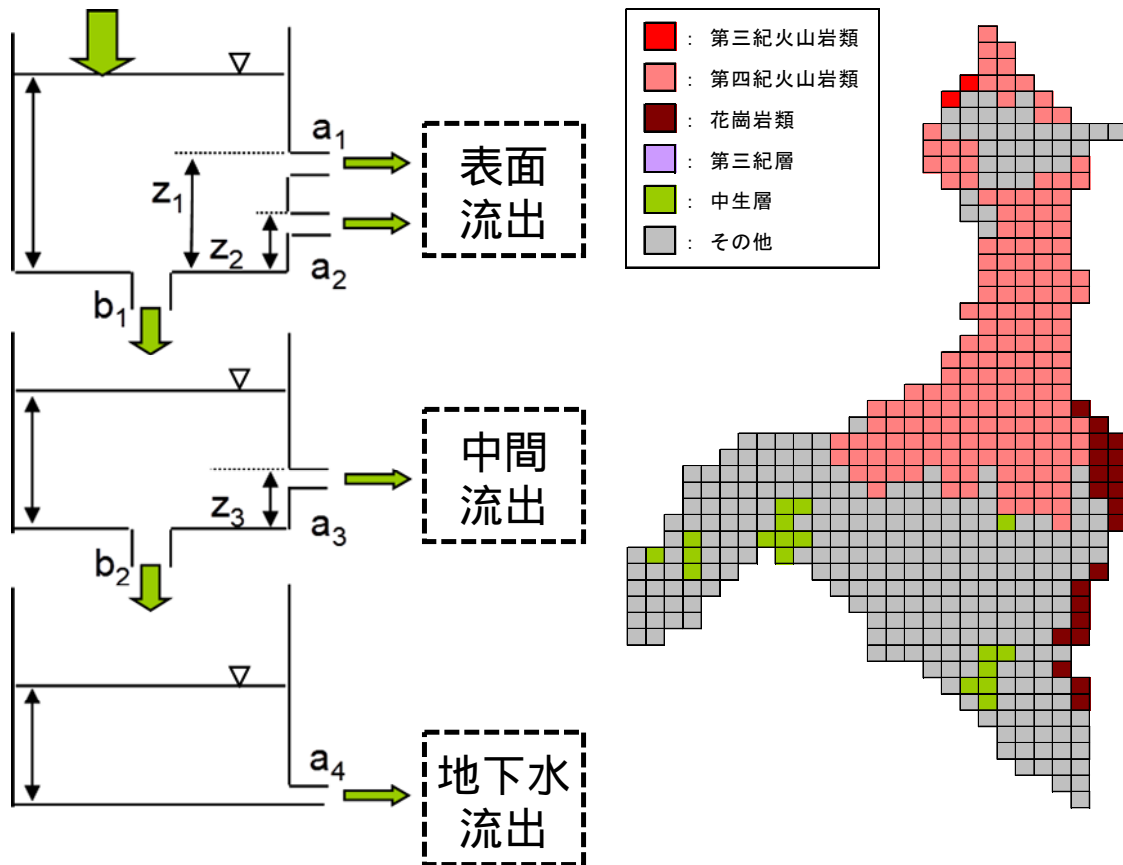


図 4.5 タンクモデル及び金山ダム表層地質分布図

表 4.3 タンクモデル定数
(中間流出孔 a_3 及び地下水流出孔 a_4 を除く)

a1	a2	b1	b2	z1	z2	z3
0.115	0.086	0.155	0.096	84.830	11.530	42.530

1) 現況再現

金山ダム流入量の現況再現については、前項と同様、対象期間を2010年9月～2015年8月の5ヶ年とし、前項で推定した水文諸量を入力条件としてタンクモデル及びkinematic wave法に適用して推定し、金山ダム流入量観測値を比較し、ダム流入量推定結果の妥当性を検証した。

2) 将来予測

金山ダム流入量の将来予測については、第2章で推定したMRI-NHRCM20の1kmメッシュダウンスケーリング値の内、RCP8.5計4ケースに該当する水文諸量の推定結果をタンクモデル及びkinematic wave法に適用した。

なお、タンクモデル及びkinematic wave法に適用した解析パラメータは現況再現時の値をそのまま適用した。

(5) フラックスの河道追跡による河川水温の推定

生田ら⁵⁾によれば、気温と水温の相関性は高く、1年周期の気温・水温の位相差や降雪量等の水文諸量が把握できれば、気温からの水温予測が可能であるとされている。

本章では、LoHAS から得られる水文諸量を適用した簡易的な水温予測の可能性を把握するため、既往文献⁶⁾を参考に、河川流量と水温の積を熱量のフラックスとして考え、式(8)、式(9)、式(10)、式(11)のフラックス推定式を構築し、タンクモデルによる流出量と同時並行でフラックスの河道追跡計算を行い、太平橋地点上流の任意メッシュにおけるフラックスを流出量で除し、河川水温を逆算する解析手法を試みた。

(表面・中間流出フラックス φ_{1i})

$$\varphi_{1i} = \alpha_T \times T_{gsi} \times q_{1i} \quad (8)$$

(地下水流出フラックス φ_{2i})

$$\varphi_{2i} = T_{gwi} \times q_{2i} \quad (9)$$

(水面フラックス φ_{3i})

$$\varphi_{3i} = \frac{A}{\rho C_w} \{ \mu \times (1 - \alpha) S \downarrow + L \downarrow - \varepsilon \sigma T^4 - H - lE \} \quad (10)$$

(河畔の樹木による日射量の遮蔽率 μ)⁷⁾

$$\mu = \exp(-0.5 \times LAI) \quad (11)$$

ここで、 T_{gsi} は任意メッシュの表面・中間流出の水温 (K) , T_{gwi} は任意メッシュの地下水流出の水温 (K) , q_{1i} は任意メッシュの表面・中間流出 (m^3/s) , q_{2i} は任意メッシュの地下水流出 (m^3/s) , α_T は補正係数, A は水面積 (m^2) , C_w は水の比熱 ($=4180\text{J}/\text{deg}/\text{kg}$) , 任意メッシュの上流端における河川水温 (K) , α は水面のアルベド ($=0.10$) である。

表面・中間流出の水温については、任意メッシュの気温を与えることとし、補正係数 α_T については、太平橋地点河川水温をトライアル計算し再現性が最も良好となる値 $\alpha_T = 0.983$ を用いて補正を行い、下限値を 273.15K ($=0^\circ\text{C}$) とした。

また、地下水流出の水温については、全国地下水資料台帳データ⁸⁾で公開されている空知川流域内の富良野市、上富良野町、南富良野町の地下水温観測データの変動特性を踏まえ、平均値 10.5°C ($=283.6\text{K}$) を与えることとした(表 4.4, 図 4.7)。

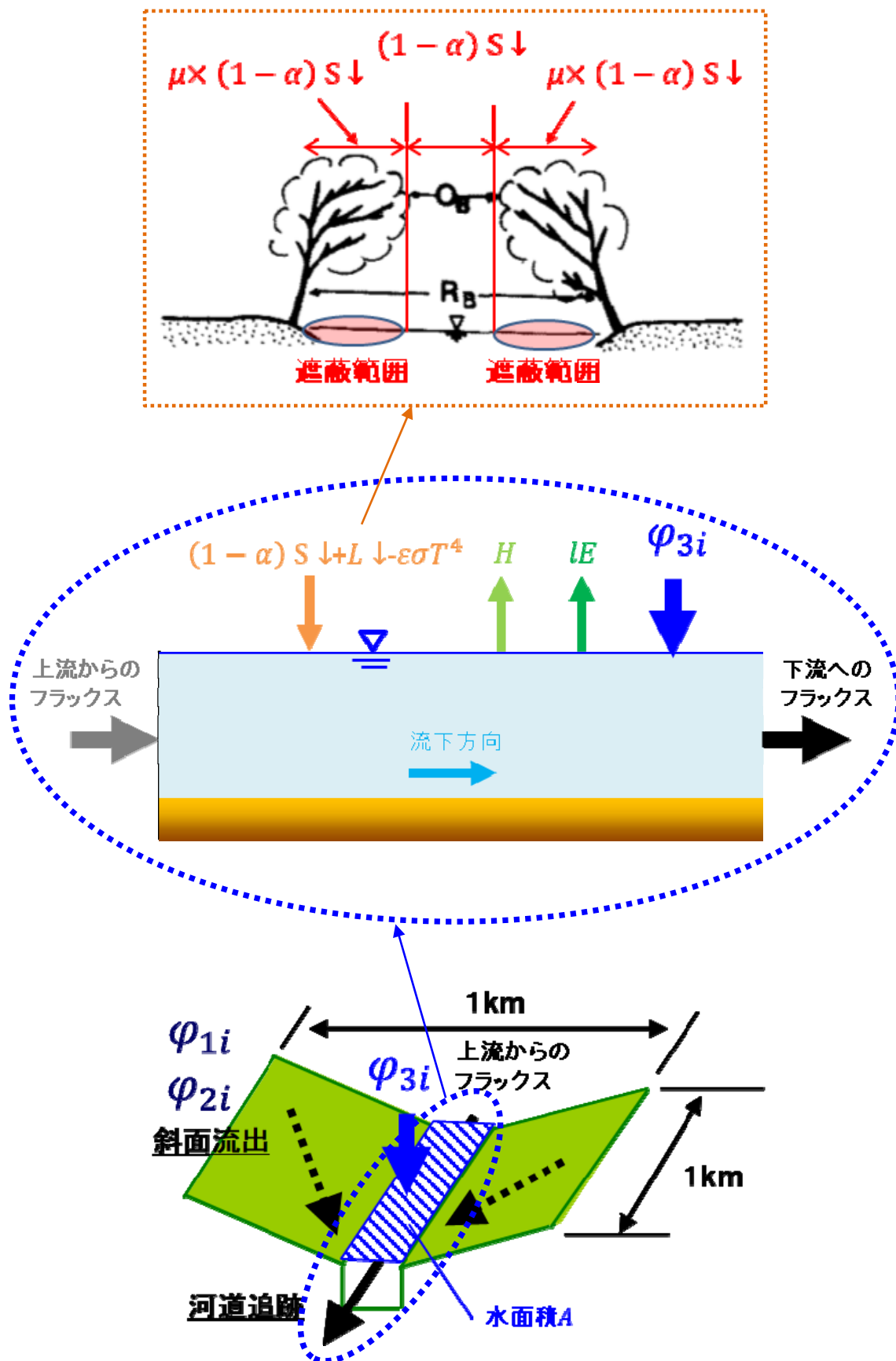


図 4.6 フラックスの河道追跡及び水面における熱収支のイメージ

表 4.4 空知川流域地下水温観測結果⁸⁾
(富良野市・上富良野町・南富良野町)

自治体名	井戸名	観測年日	地盤標高	掘削深度	水温		アメダス気温		地点
			m	m		K		K	
富良野市	東学田	1995/01/07	170.0	40.0	10.7	283.9	-4.9	268.3	富良野
富良野市	中5区02	2013/01/18	175.0	20.0	9.0	282.2	-17.1	256.1	富良野
富良野市	東鳥沼	2013/03/31	199.0	100.0	11.0	284.2	-3.2	270.0	富良野
南富良野町	落合02	2008/05/12	400.0	46.5	9.0	282.2	5.5	278.7	幾寅
南富良野町	落合01	2008/05/20	400.0	30.0	7.2	280.4	10.6	283.8	幾寅
富良野市	西布礼別	2016/05/21	333.0	22.0	13.0	286.2	19.5	292.7	富良野
富良野市	住吉町	2016/05/27	169.6	16.0	11.0	284.2	16.0	289.2	富良野
富良野市	西扇山	2001/07/28	178.0	25.0	12.0	285.2	19.1	292.3	富良野
富良野市	下5区	2012/07/04	175.0	42.0	10.0	283.2	21.5	294.7	富良野
富良野市	東町	2016/07/11	172.1	12.0	11.0	284.2	18.3	291.5	富良野
上富良野町	基線北	2012/08/21	200.0	50.0	11.0	284.2	26.9	300.1	上富良野
富良野市	清水山	1988/08/04	173.0	70.0	10.6	283.8	25.4	298.6	富良野
富良野市	西学田2区	1990/08/07	167.0	55.0	19.0	292.2	24.6	297.8	富良野
富良野市	鳥沼	2011/08/24	185.0	51.0	9.5	282.7	19.8	293.0	富良野
富良野市	中5区01	1993/09/02	176.0	50.0	8.5	281.7	16.1	289.3	富良野
上富良野町	中ノ沢日ノ出	2012/10/01	350.0	280.0	13.0	286.2	15.4	288.6	上富良野
上富良野町	倍本農場	2014/10/30	295.0	66.0	8.0	281.2	4.4	277.6	上富良野
富良野市	北扇山	2011/10/16	180.0	130.0	11.0	284.2	14.9	288.1	富良野
上富良野町	東12線北	2011/11/11	300.0	65.0	8.0	281.2	4.4	277.6	上富良野
上富良野町	旭町	2012/12/11	460.0	50.0	7.0	280.2	-7.0	266.2	上富良野
平均					10.5	283.6	11.5	284.7	

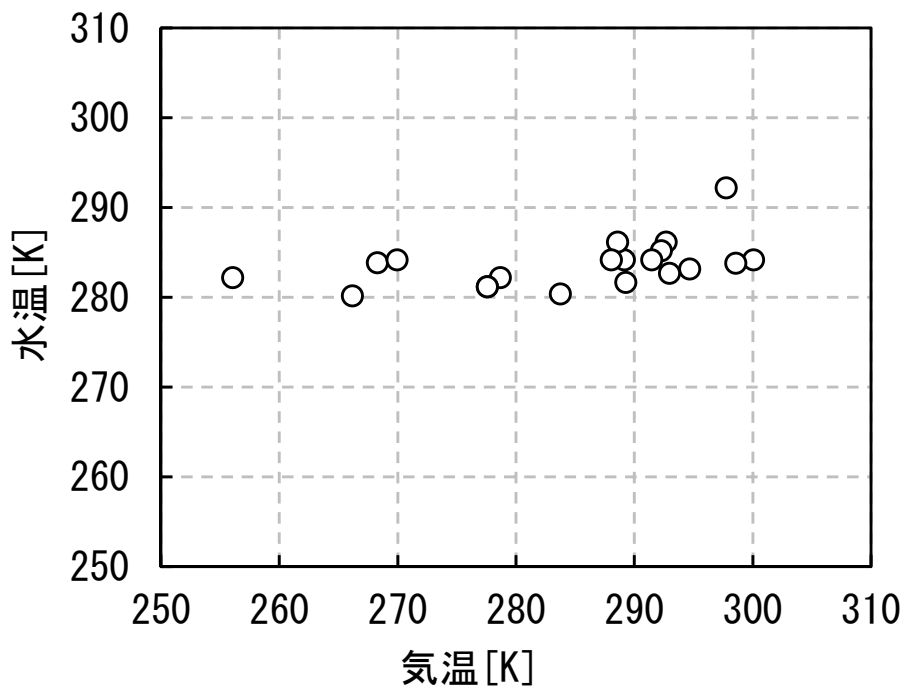


図 4.7 アメダス気温と空知川地下水温の相関関係

1) 現況再現

太平橋地点の河川水温の現況再現については、前項と同様、対象期間を 2010 年 9 月～2015 年 8 月の 5 ヶ年とし、前記で推定した水文諸量及びメッシュ流出量を入力条件として河川水温を推定し、太平橋地点の水温観測値と比較し、水質解析モデルの妥当性を検証した。

2) 将来予測

太平橋地点上流の河川水温の将来予測については、前項と同様、第 2 章で推定した MRI-NHRCM20 の 1km メッシュダウンスケーリング値の内、RCP8.5 計 4 ケースに該当する水文諸量及びメッシュ流出量の推定結果を水質解析モデルに適用した。

なお、水質解析モデルに適用した解析パラメータは現況再現時の値をそのまま適用した。

(6) 冷水性魚類の生息環境に対する水温変化の影響評価

本章では、気候変動による河川水温の変化が生態系に及ぼす影響度合いを評価するため、金山ダム付近に生息する魚類の中から、冷水性魚類で空知川流域において生息・生育が特徴的であるイトウ *Hucho perryi*、サクラマス（ヤマメ）*Oncorhynchus masou* を対象に、産卵、ふ化、稚仔魚の成長、成魚の遡上に適した水温範囲に該当する日数・分布域の変化の観点から検証を行った。

水温範囲については、既往文献^{9),10),11)}をもとに産卵・ふ化・遡上等の期間区分を設定し、既往資料^{12),13),14),15)}で定義されている各時期の生息水温を参考に、設定した（表 4.5, 表 4.6）。

<評価対象魚種の特徴^{9),11)}>

イトウ *Hucho perryi*

北海道のみに分布し、道北、道東の湿原や周辺の湖沼等に生息する。稚魚は水生昆虫を食べるが、体長 20cm を超えると魚食性を示すようになり、やがて完全な魚食性となる。稚魚の時はパーマークが認められるが、体長 15cm ほどになると消失する。背部に独特の黒斑が見られる。産卵期はサケ科の中では珍しく春の 4~5 月である。成熟するまでに雄で 4~6 年、雌で 6~8 年を要し、乱獲、河川改修により激減している。最大級で体長 1.3m くらいだが、1m に達するものは稀である。

サクラマス（ヤマメ） *Oncorhynchus masou*

北海道のサクラマスには、河川と海洋とを回遊する遡河回遊型と河川内で一生を過ごす河川残留型の 2 つの生活史がみられる。8 月下旬から 10 月上旬にかけて河川の主に上流域で産卵する。翌年春に産卵床から浮上した稚魚は 1~3 年間の河川生活の後、銀毛変態（スモルト化）して降海する。約 1 年間の海洋生活を経たサクラマスの河川遡上は春季からみられ、北海道での河川遡上のピークは 5~7 月にみられる。河川に遡上したサクラマスは淵などで越冬し、降雨時の増水を利用して上流へ移動しながら、秋の産卵期を待つ。

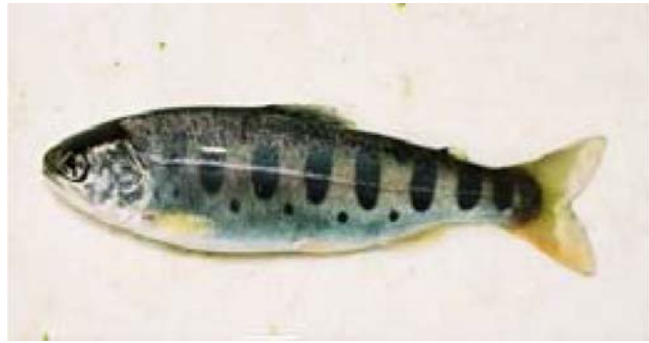


写真 4.3 イトウ
*Hucho perryi*¹⁾

写真 4.4 サクラマス (ヤマメ)
*Oncorhynchus masou*¹⁶⁾

表 4.5 イトウ *Hucho perryi* の生活史を踏まえた期間区分と水温範囲

区分	産卵期	ふ化・稚仔魚期	成魚・遡上期
期間	4～5月	6～8月	9～3月
最適水温	—	—	—
適水温	6～7℃	—	20℃未満
水温範囲	6～7℃	—	20℃未満

表 4.6 サクラマス (ヤマメ) *Oncorhynchus masou* の生活史を踏まえた
期間区分と水温範囲

区分	産卵期	ふ化・稚仔魚期	成魚・遡上期
期間	9～10月	11～4月	5～8月
最適水温	—	—	(成魚期) 8～11℃ (遡上期) 9.5～15.4℃
適水温	8～18℃	—	(成魚期) 6～13℃ (遡上期) 5.5～20℃
水温範囲	8～18℃	—	8～15.4℃

4.2 解析結果

4.2.1 熱・水収支解析モデルによる水文諸量の推定

(1) 現況再現結果

金山ダム流域における2010年9月～2015年8月の5ヶ年平均の流域水収支を整理し、表4.7に示す。

水文諸量は、降雨量1,054mm/年、降雪水量681mm/年、総蒸発散量484mm/年となり、臼谷ら¹⁷⁾による推定値と同程度であり、LoHASにより推定した水文諸量は妥当であるといえる。

また、流域水収支による年間流出高は1,251mm/年となり、金山ダム流入量流出高の5ヶ年平均値1,258mm/年に対する誤差は極めて小さく、流域水収支は妥当であるといえる。

表 4.7 金山ダム流域水収支

降雨量 (mm/年) ①	降雪水量 (mm/年) ②	総蒸発散量 (mm/年) ③	水収支 (mm/年) ④=①+②-③	流出高 (mm/年) ⑤	誤差 (mm/年) ⑥=④-⑤	誤差率 ⑦=⑥/⑤
1054	681	484	1251	1258	-7	-0.6%

(2) 将来予測結果

金山ダム流域における気候変動に伴う現在気候に対する水文諸量の増加率について、2080年9月～2100年8月の20ヶ年平均値を整理し、**図 4.8**に示す。

RCP8.5シナリオ計3ケースに対する水文諸量の推定結果から、気候変動に伴い降雨量が最大1.37倍、降雪水量が最小で0.83倍、総蒸発散量が最大1.17倍、流出高が最大1.15倍となり、水環境に大きな影響を及ぼす流域の水収支が大きく変化することが把握された。

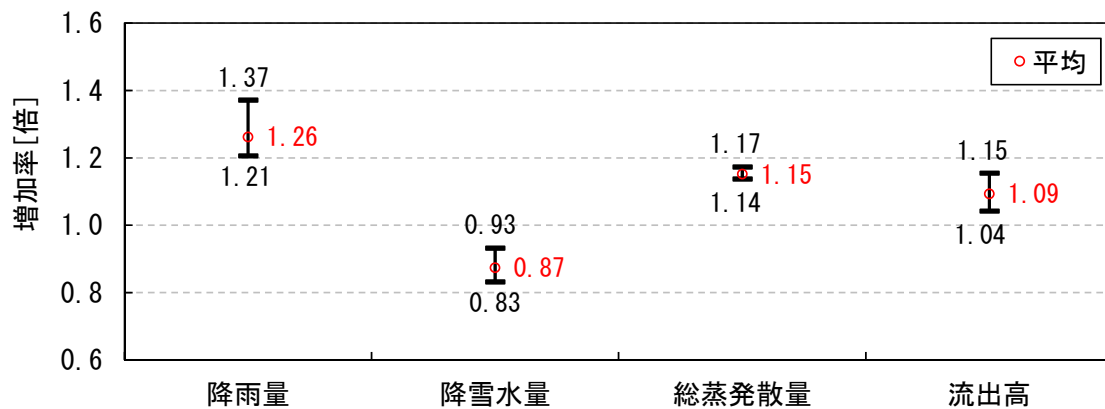
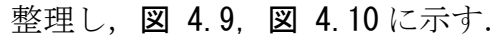
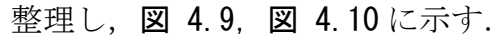
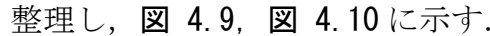


図 4.8 現在気候に対する将来気候（RCP8.5シナリオ）の水文諸量の増加率

4.2.2 流出モデルによる流入量の推定

(1) 現況再現結果

2010年9月～2015年8月の5ヶ年における金山ダム流入量の再現計算結果を整理し、  4.9,  4.10 に示す。

再現計算結果から、概ね金山ダム流入量の季節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。

なお、4月で誤差が大きいが、この要因として、冬期間の解析雨量の精度が良好ではなく、降雪水量が過少評価されたため融雪出水が少なくなっていることが考えられる。

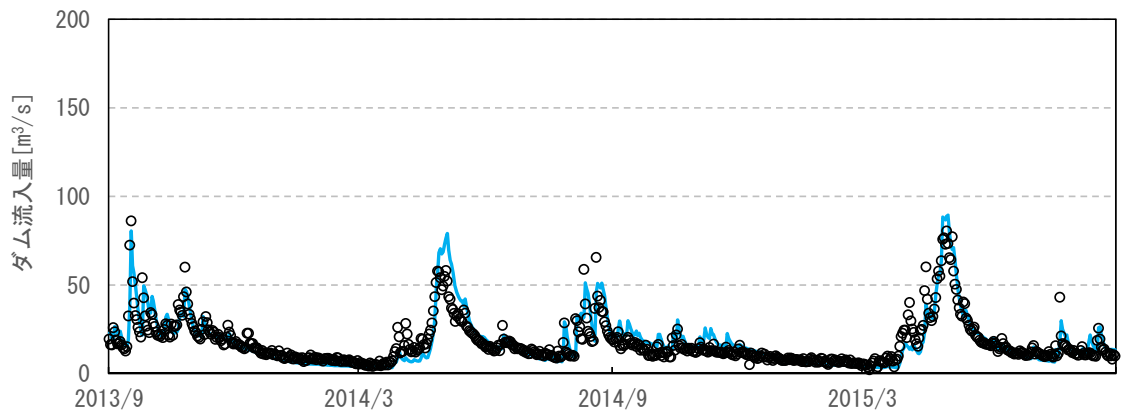
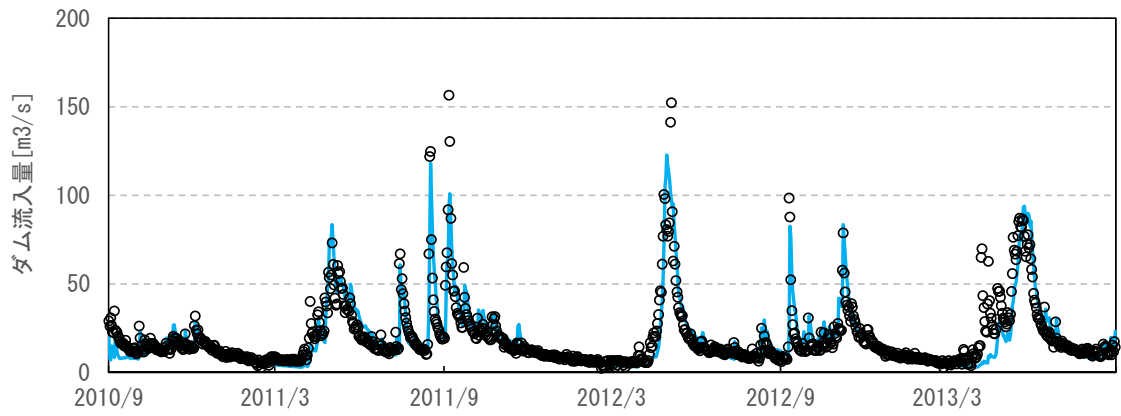


図 4.9 金山ダム流入量の再現計算結果

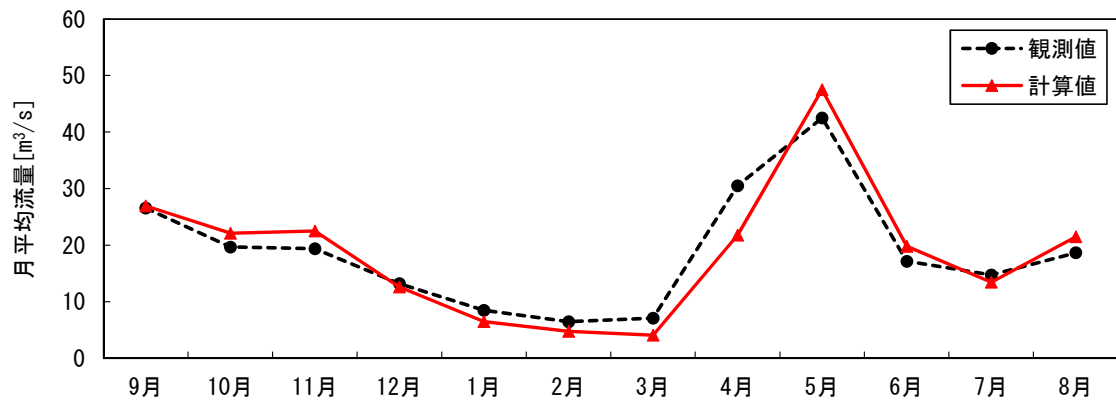


図 4.10 金山ダム流入量月平均値の比較

(2) 将来予測結果

気候変動に伴う金山ダム流入量の変化について、2080年9月～2100年8月の20年における月平均値、現在気候に対するダム流入量の増加率を整理し、**図 4.11**、**図 4.12**に示す。

RCP8.5シナリオ計3ケースに対する金山ダム流入量の推定結果から、気候変動に伴う融雪流出時期の早期化により、3月の月平均流量が最大約3.7倍となり、融雪後期の5～7月及び積雪初期の11月では現在気候よりもダム流入量が減少することが把握された。

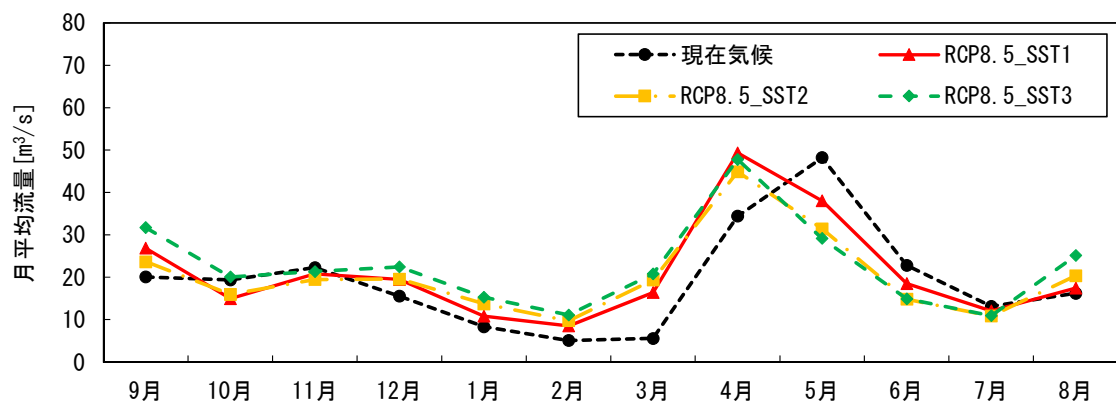


図 4.11 金山ダム月平均流入量の変化

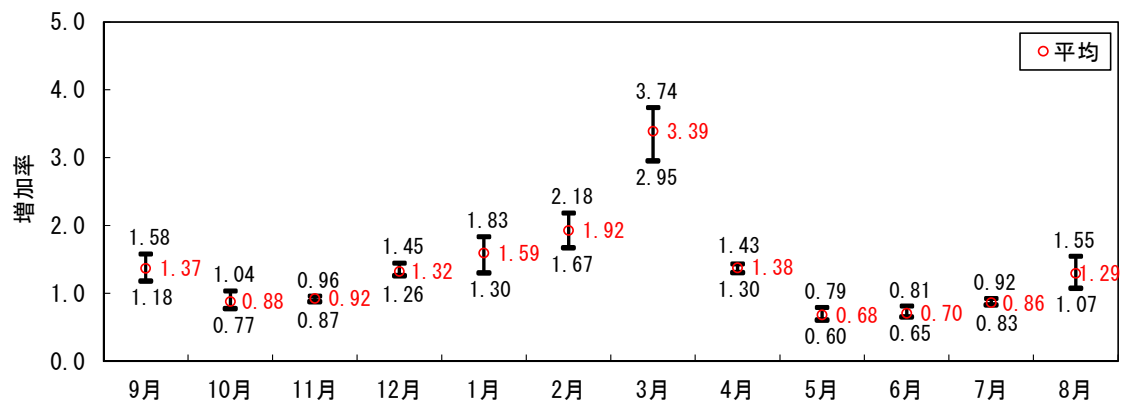


図 4.12 現在気候に対する将来気候 (RCP8.5 シナリオ) の金山ダム流入量の増加率

4.2.3 フラックスの河道追跡による河川水温の推定

(1) 現況再現結果

2010年9月～2015年8月の5ヶ年における太平橋地点における河川水温の再現計算結果を整理し、**図 4.13**に示す。

太平橋地点の河川水温データは、5～11月の各月1回の定期水質調査のみであるため連続期間での比較は困難であるが、河川水温の季節変動を概ね再現できしており、予測計算により気候変動に伴う河川水温の変化に関する有用な知見を得ることが可能であると考えられる。

なお、河川水温の計算結果については、観測値に対して概ね過小評価となっており、冬期間は0℃となるが、本研究において、河川水温の変化に影響を及ぼすと考えられる河床伝導熱、伏流水や水面降雨等による移流熱を考慮していないことが要因として考えられる。

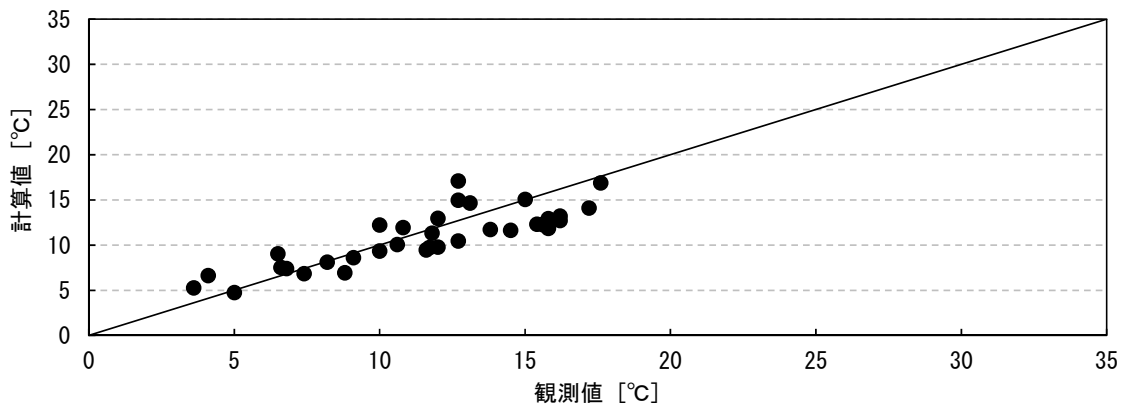
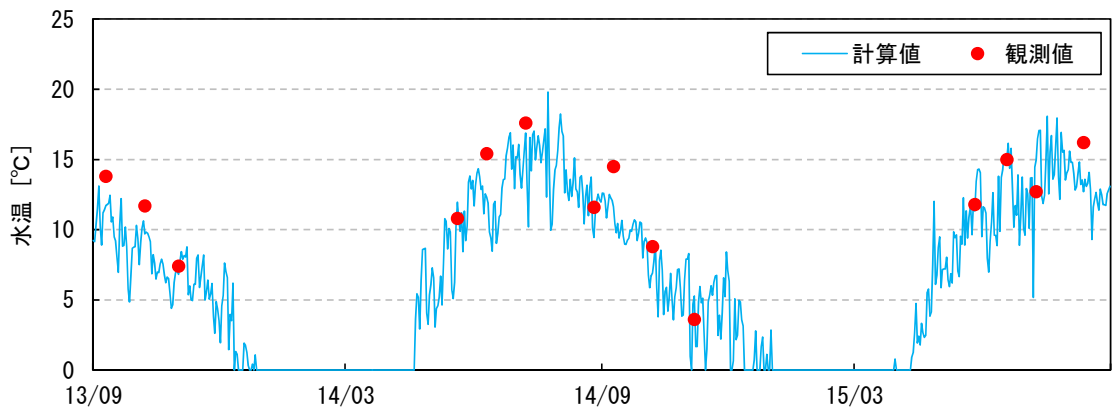
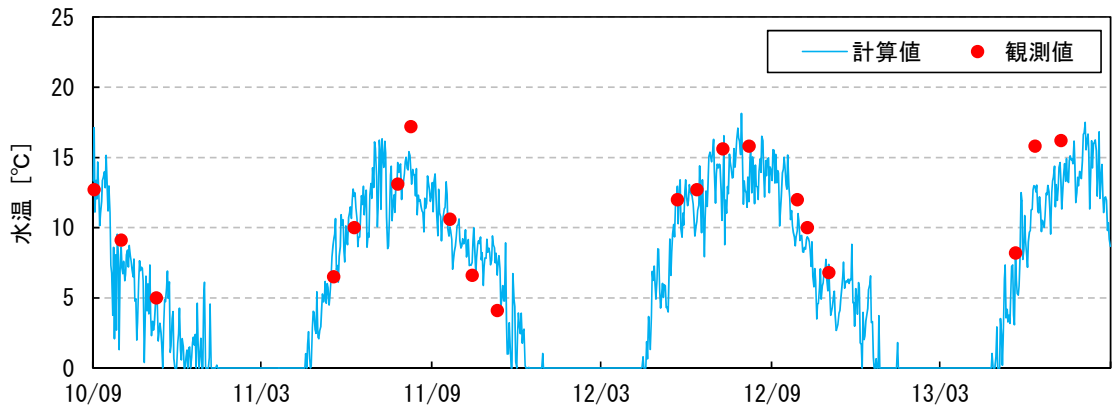


図 4.13 太平橋地点河川水温の再現計算結果

(2) 将来予測結果

気候変動に伴う太平橋地点河川水温の変化について、2080年9月～2100年8月の20ヶ年における月平均値、現在気候に対する河川水温の上昇量を整理し、**図 4.14**、**図 4.15**に示す。

RCP8.5シナリオ計3ケースに対する太平橋地点河川水温の推定結果から、気候変動に伴う気温上昇により、月平均水温が3月で最大約4.7℃、7月で最大約3.6℃上昇することが明らかとなった。

図 4.11、**図 4.12**に示した金山ダム流入量と比較すると、3月は金山ダム流入量、太平橋地点河川水温のいずれも現在気候に対して大きく変化しており、気候変動に伴い融雪期における河川水温の変化が顕著となり、降雪・積雪・融雪に大きく依存する水生生態系に強い影響が及ぶものと考えられる。

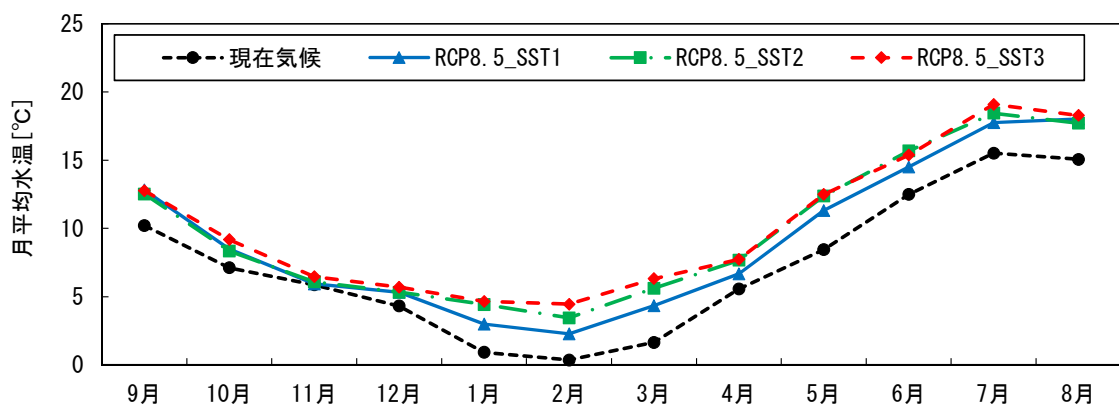


図 4.14 太平橋地点河川水温の季節変動

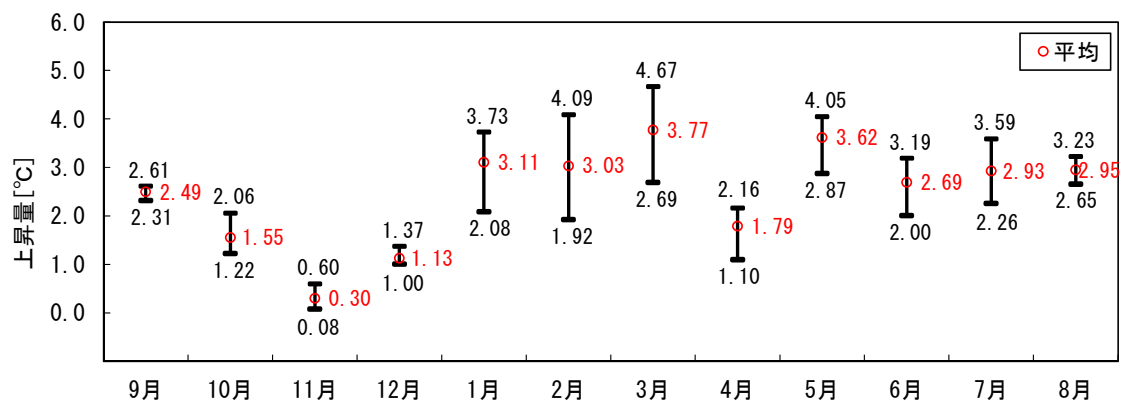


図 4.15 現在気候に対する将来気候（RCP8.5シナリオ）の太平橋地点河川水温の上昇量

4.2.4 冷水性魚類の生息環境に対する水温変化の影響評価

(1) 平均水温と最適水温範囲の関係

太平橋地点上流のイトウ *Hucho perryi*, サクラマス (ヤマメ) *Oncorhynchus masou* の産卵期, 成魚・遡上期における 20 ヶ年平均水温と最適水温範囲の関係を整理し, 図 4.16, 図 4.17 に示す.

イトウ *Hucho perryi* については, 気候変動に伴い将来的に, 産卵期, 成魚・遡上期のいずれも最大約 8.1°C まで河川水温が上昇し, 産卵に適した水温範囲を超過することが明らかとなった (図 4.16) .

また, サクラマス (ヤマメ) *Oncorhynchus masou* については, 産卵期で最大約 10.1°C, 成魚・遡上期で最大約 10.6°C まで河川水温が上昇するものの, 将来気候下においても生息に適した水温範囲内となることが明らかとなった (図 4.17) .

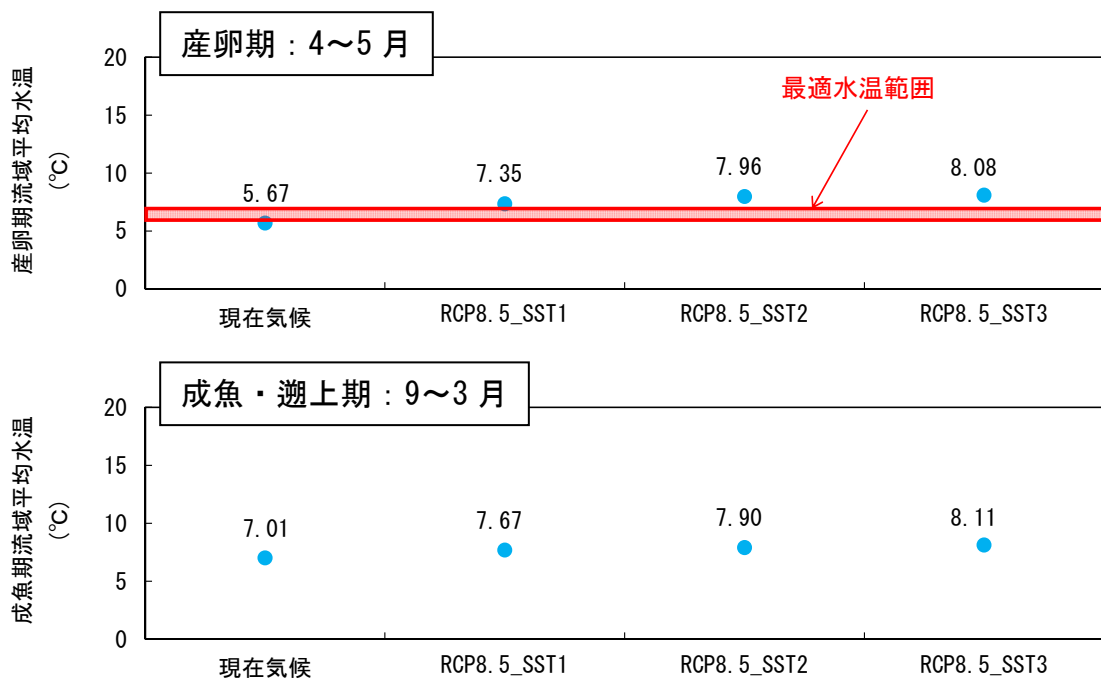


図 4.16 イトウ *Hucho perryi* の産卵期，成魚・遡上期における平均水温と最適水温範囲の関係

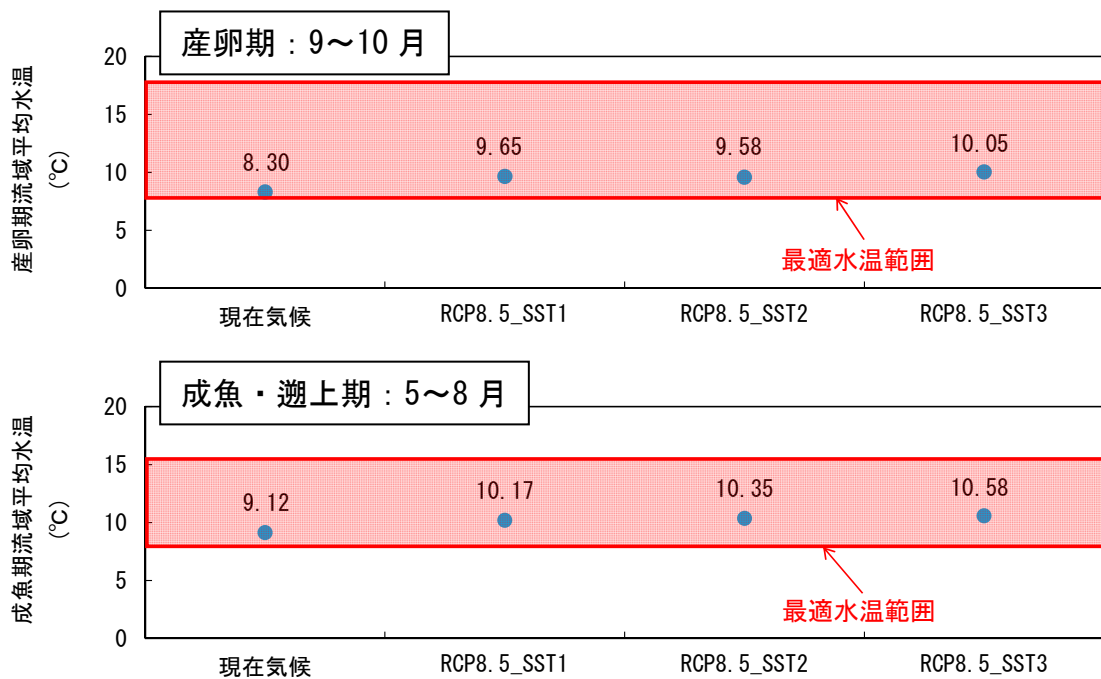


図 4.17 サクラマス（ヤマメ） *Oncorhynchus masou* の産卵期，成魚・遡上期における平均水温と最適水温範囲の関係

(2) 最適水温範囲の日数の変化

太平橋地点上流のイトウ *Hucho perryi*, サクラマス (ヤマメ) *Oncorhynchus masou* の産卵期, 成魚・遡上期の最適水温範囲内となる日数 (20 ヶ年平均値) の変化を整理し, 図 4.18, 図 4.19 に示す.

イトウ *Hucho perryi* については, 産卵に適した水温範囲に該当する日数が将来気候下においてわずかに減少し, 成魚・遡上に適した水温範囲に該当する日数は横ばいとなることが明らかとなった (図 4.18) .

また, サクラマス (ヤマメ) *Oncorhynchus masou* については, 産卵及び成魚・遡上に適した水温範囲に該当する日数が増加することが明らかとなった (図 4.19) .

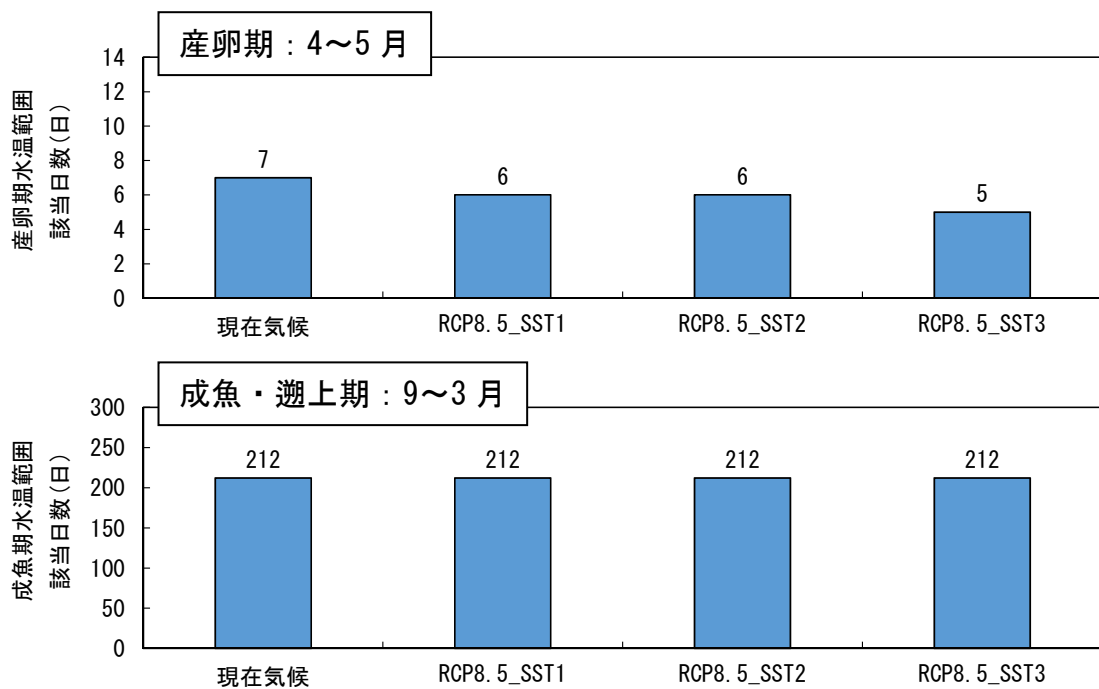


図 4.18 イトウ *Hucho perryi* の産卵期, 成魚・遡上期における最適水温範囲の日数の変化

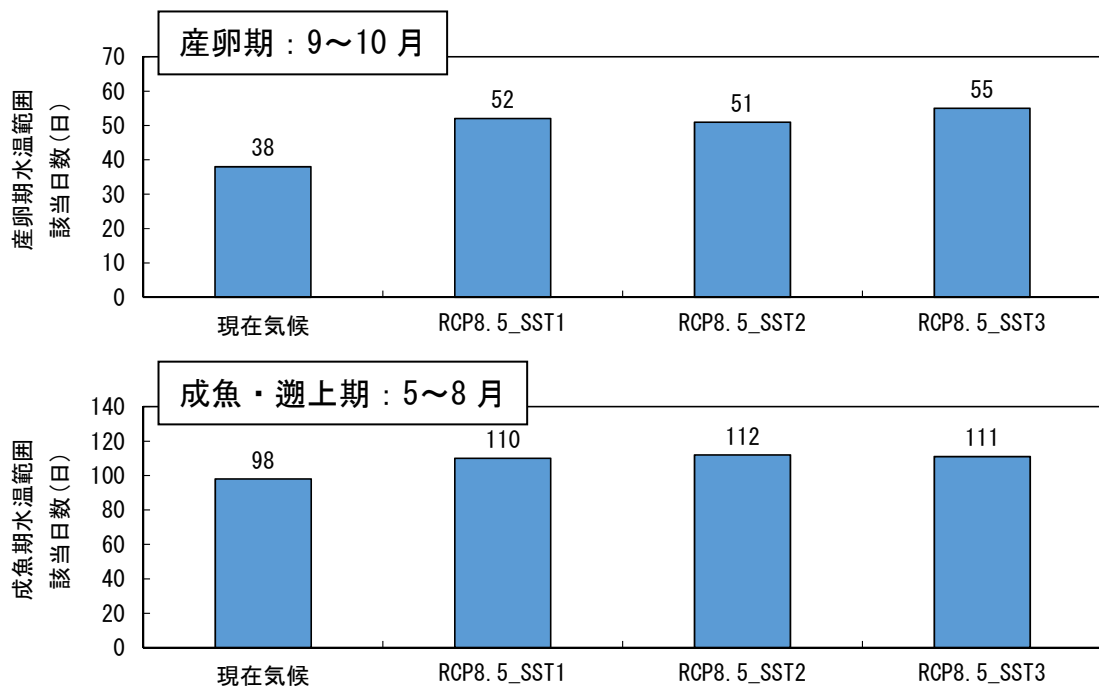


図 4.19 サクラマス (ヤマメ) *Oncorhynchus masou* の産卵期, 成魚・遡上期における最適水温範囲の日数の変化

(3) 産卵，ふ化に適した水温域の変化

前記の20ヶ年平均水温と最適水温範囲の関係，最適水温範囲内となる日数の変化に関する整理結果を踏まえ，イトウ *Hucho perryi*，サクラマス（ヤマメ）*Oncorhynchus masou* の産卵期に着目し，水温分布と産卵に適した水温域の変化を整理し，図 4.20，図 4.21，図 4.22，図 4.23 に示す。

気候変動に伴い，イトウ *Hucho perryi* の産卵期では太平橋上流の上中流域で水温上昇が特に顕著となり，中流域に点在していた産卵に適した水温域が金山ダム上流の空知川源流部付近に移動することが明らかとなった（図 4.20，図 4.22）。

また，サクラマス（ヤマメ）*Oncorhynchus masou* の産卵期では太平橋上流の本支川部で水温上昇が顕著となり，金山ダム上流の空知川源流部付近で産卵に適した水温域が拡大することが明らかとなった（図 4.21，図 4.23）。

前記も含めた整理結果から，気候変動に伴いイトウ *Hucho perryi* の産卵に適した水環境が著しく損なわれ，産卵機会が消失し自然再生産が困難となることが考えられる。

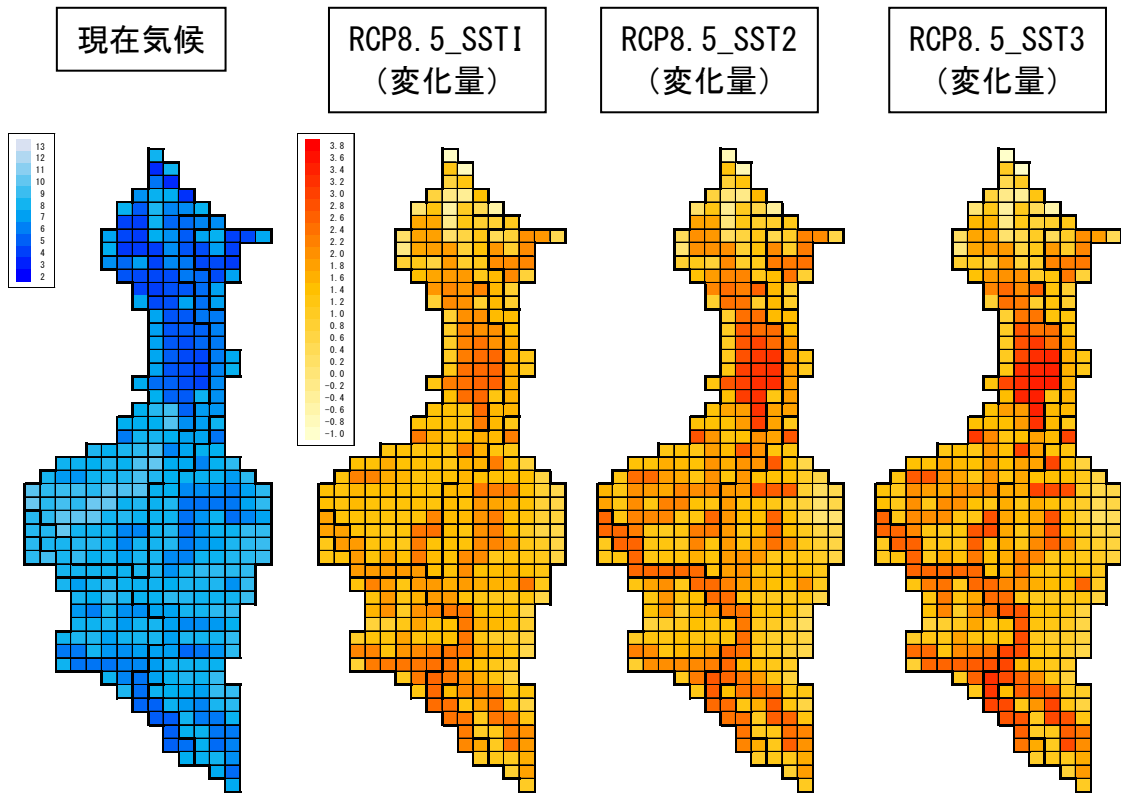


図 4.20 イトウ *Hucho perryi* の産卵期における水温分布の変化

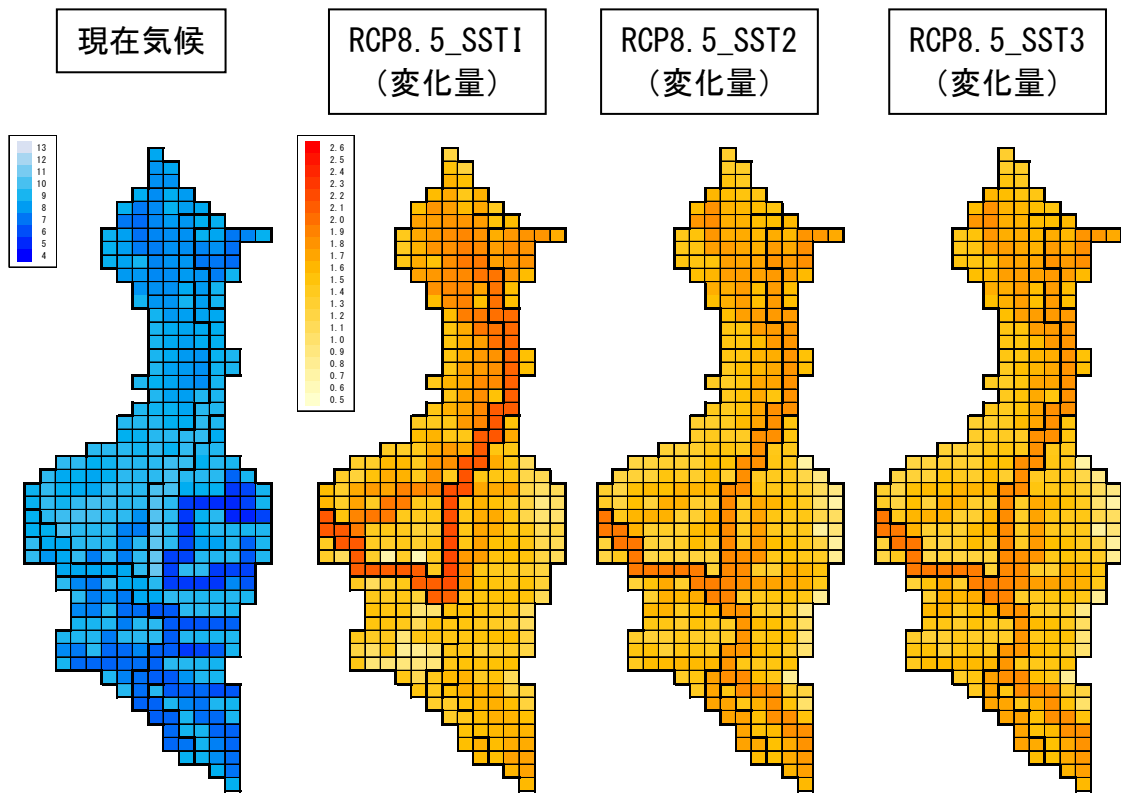


図 4.21 サクラマス (ヤマメ) *Oncorhynchus masou* の産卵期における水温分布の変化

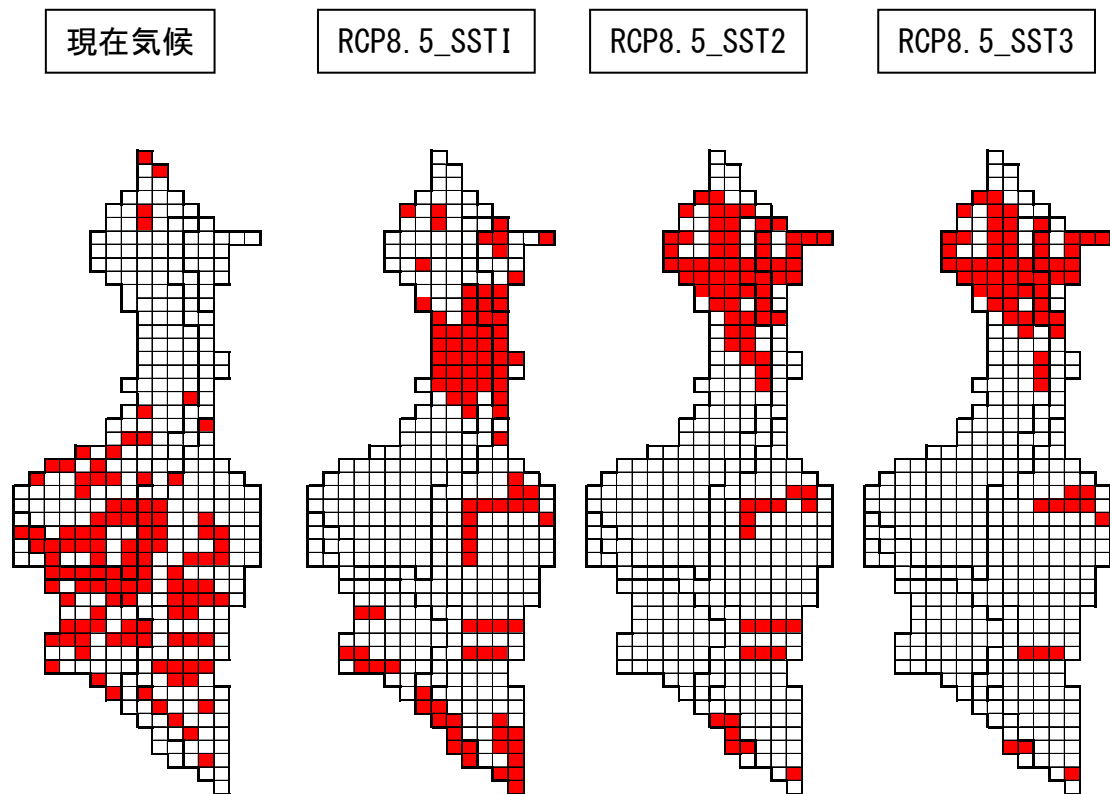


図 4.22 イトウ *Hucho perryi* の産卵に適した水温域の変化

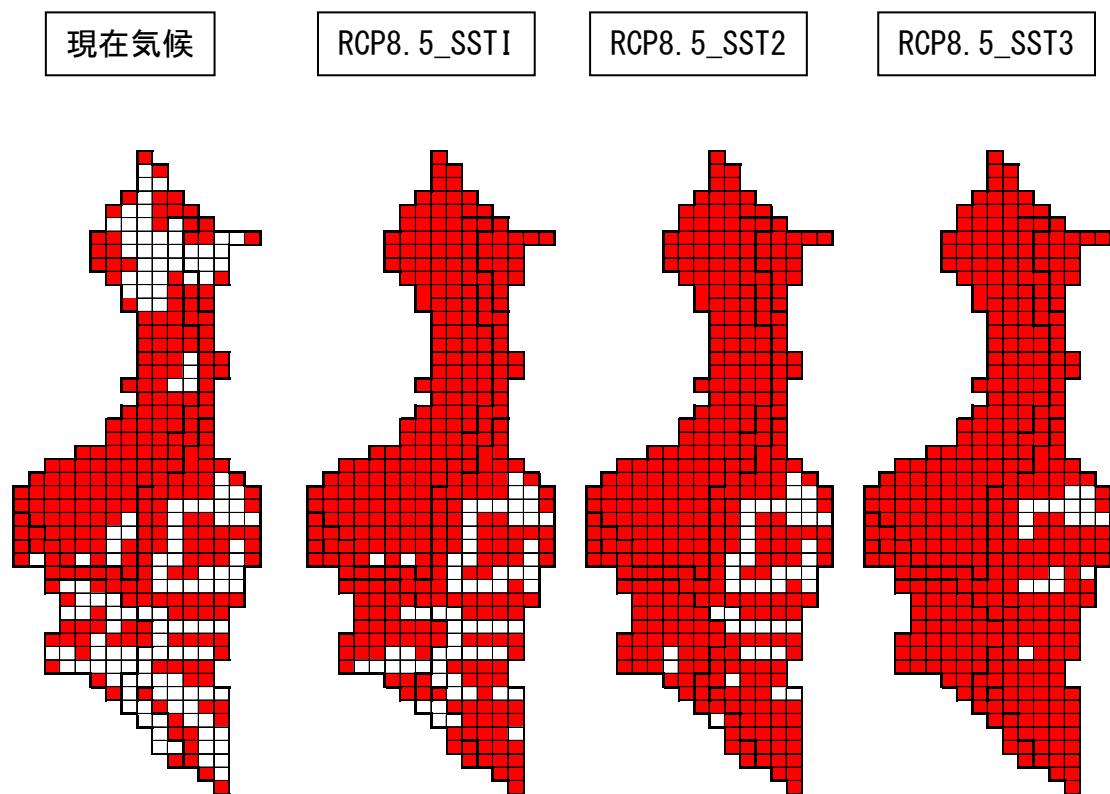


図 4.23 サクラマス (ヤマメ) *Oncorhynchus masou* の産卵期に適した水温域の変化

4.3 定量評価手法に対する評価

本研究で対象とした、気候変動による河川水温・冷水性魚類の生息環境への影響に関する日本国内の先行研究として、白岩ら¹⁸⁾は、宮城県の名取川水系を対象に、分布型流出モデルを基盤とする水温解析モデルを構築し、IPCC第3次評価報告書で示されている地球全体の平均気温上昇量を解析条件として、流域全体の河川水温を解析している。

鈴木ら¹⁹⁾は、木曾三川及び伊勢湾を対象として、分布型流出モデル、不定流モデル、海洋循環モデル、海洋拡散モデルで構成される河川海洋結合モデルを構築し、IPCC第4次評価報告書のSRESシナリオに基づく気候変動予測データを用いて水温の将来予測を行い、アユの遡上時期に与える影響を評価している。

北野ら²⁰⁾は、北海道南西部を流れる尻別川水系の真狩川を対象として、年平均気温を説明変数、地下水温を目的変数とする河川水温の推定式(回帰式)を構築し、気候変動に伴い気温が段階的に上昇した場合のオショロコマの分布・生息密度・体長分布・成長率・流程分布の変化予測を感度分析的に実施している。

上記の日本国内の先行研究では、SRESシナリオに基づく気候変動予測データを適用しており、温室効果ガス排出シナリオが古く、政策主導的な排出削減対策が考慮されていないことから、本研究は気候変動の影響評価のケーススタディとして新規性があると考ええる。

加えて、解析条件となる流域の融雪量や蒸発散量等の水文諸量を簡易的な手法により推定しており、本研究の評価手法は、流域の詳細な気象水文特性・積雪特性を反映した河川水温の推定が可能である面でオリジナリティを有するとともに、気候変動に伴う河川環境への影響を踏まえた「適応策」の立案に対して極めて有用であると考ええる。

また、海外の先行研究として、Kaushal et al.²¹⁾は、アメリカの主要20河川40地点の統計データから河川水温が長期的に温暖化しており、気温と河川水温に相関性が見られ、このまま温暖化が進行した場合生物生産性や水生生物の多様性が損なわれることを提言している。

Morrison et al.²²⁾は、カナダのブリティッシュコロンビア州を流れるフレーザー川において、気候変動に伴い夏期の平均水温が1.9°C上昇し、水温20°C以上でサケ科魚類Salmonidaeの産卵機会が減少する潜在的なリスクがあることを提言している。

上記の海外の先行事例については、気候変動予測データを適用した定量評価が行われていないことから、本研究の評価手法は汎用性が高いものと考ええる。

4.4 気候変動への適応策に関する考察

本研究の解析結果より，気候変動に伴いイトウ *Hucho perryi* の産卵に適した水温域が金山ダム上流の空知川源流部付近に移動することが明らかとなったが，産卵には水温だけでなく流量，流速等の水理特性も密接に関わっているものと考えられる．

今後気候変動への適応策を検討するにあたり，冷水性魚類の生息分布の変化をより的確に把握するため，生態や生活史を踏まえ，産卵に関する水理特性等の各種情報を収集するとともに，産卵床等のモニタリングを適切に実施する必要があると考える．

また，太平橋上流の最上流域には，冷水性魚類の移動を妨げる砂防えん堤等の横断工作物が見られることから，施設管理者と連携し，移動の連続性に配慮した魚道の設置を行う必要があると考える．



写真 4.5 砂防えん堤への魚道の設置事例²³⁾

4.5 本章のまとめ

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- (1) イトウ *Hucho perryi* 及びサクラマス（ヤマメ） *Oncorhynchus masou* に対する水温変化の影響評価を行い，将来的にイトウ *Hucho perryi* の産卵に適した水温域が金山ダム上流の空知川源流部付近に移動する可能性があることを明らかにした。
- (2) 地域レベルで気候変動による魚類生息環境への影響を適切に評価する上で有用な手法を提案することができた。
- (3) 気候変動に伴い，イトウ *Hucho perryi* の自然再生産が困難になることから，産卵環境の保全施策が重要であると考えた。

4.6 参考文献

- 1) 北海道開発局：石狩川水系空知川河川整備計画【大臣管理区間】〔変更〕，2018.
- 2) 北海道開発局：金山ダム定期報告書（案），2015.
- 3) 北海道環境生活部環境局生物多様性保全課：北海道レッドリスト【魚類編（淡水・汽水）】改訂版，2018.
- 4) 臼谷友秀，中津川誠，松岡直基：流域貯留量推定のためのモデルパラメータの一般化に関する研究，土木学会論文集 B1（水工学） Vol. 70, No. 4, I_355-I_360, 2014.
- 5) 生田理弘，大熊孝，大川秀雄，神立秀明，中村一郎：河川水温と気温等の相関に関する研究，水文・水資源学会誌 Vol. 4, No. 1, pp. 39-45, 1991.
- 6) 新井正：地域分析のための熱・水収支水文学，pp. 112-161, 古今書院，2004.
- 7) 中村太士，百海琢司：河畔林の河川水温への影響に関する熱収支的考察，日林誌 71(10)' 89, pp. 387-394, 1989.
- 8) 国土交通省 HP：<
<http://nrb-www.mlit.go.jp/kokjo/inspect/landclassification/water/basis/underground/F9/exp.html>>（アクセス日：2019/6/17）
- 9) アクアライフ編：川魚入門-採集と飼育 淡水魚と水辺の生きものを楽しむ，pp. 12, マリン企画，2001.
- 10) さけます・内水面水産試験場：サケ科概説，2018.
- 11) 宮越靖之：北海道におけるサクラマスの放流効果および資源評価に関する研究，北海道水産孵化場研報 60, 1-64, 2006.
- 12) 笠井文考，田中俊次，小宮山英重，夏原憲子，水口拓真：釧路川水系一支流におけるイトウ（*Hucho perryi*）の産卵生態-2006年の調査における産卵期間，産卵床数およびその分布の特徴-，東京農大農学集報，54（1），pp. 45-50, 2009.
- 13) 本多健太郎，鍵和田玄，高橋伸幸，宮下和士：別寒辺牛川水系及び厚岸湖・厚岸湾に生息するイトウ（*Hucho perryi*）成魚の行動生態の解明，北海道大学 2008年調査報告，pp. 1-19, 2008.
- 14) 日本水産資源保護協会：環境条件が魚介類に与える影響に関する主要要因の整理，1983.
- 15) 環境省 HP：<
<https://www.env.go.jp/council/09water/y0910-10/mat05-2.pdf>>（アクセス日：2019/6/25）
- 16) 北海道開発局：石狩川水系豊平川河川整備計画，2006.

- 17) 臼谷友秀, 中津川誠, 工藤啓介: 石狩川流域における水循環の定量化について, 水工学論文集第 49 巻, pp. 229-234, 2005.
- 18) 白岩淳一, 風間聡, 沢本正樹: 気候変動による河川水温の影響, 水工学論文集第 50 巻, pp. 1063-1068, 2005.
- 19) 鈴木靖, 本間基寛, 佐藤嘉展, 道広有理, 竹門康弘: 水温の将来変化がアユの遡上時期に及ぼす影響について, 土木学会論文集 B1 (水工学) Vol. 70, No. 4, I_1213-I_1218, 2014.
- 20) 北野文明, 中野繁, 前川光司, 小野有五: 河川型オショロコマの流程分布に対する水温の影響および地球温暖化による生息空間の縮小予測, 野生生物保護 1 巻 1 号, pp. 1-11, 1995.
- 21) Sujay S Kaushal, Gene E Likens, Norbert A Jaworski, Michael L Pace, Ashley M Sides, David Seekell, Kenneth T Belt, David H Secor and Rebecca L Wingate: Rising stream and river temperatures in the United States, The Ecological Society of America, Volume 8(9), Pages 461-466, 2010.
- 22) John Morrison, Michael C. Quick and Michael G.G. Foreman: Climate change in the Fraser River watershed: flow and temperature projections, Journal of Hydrology, Volume 263, Pages 230-244, 2002.
- 23) 北海道開発局 HP : <
<https://www.hkd.mlit.go.jp/ob/tisui/kds/sabou/ct111r0000004mkc.htm>
> (アクセス日 : 2019/6/9)

第5章 結論

本論文は、気候変動に対する地域レベルでの「適応策」立案に資することを目的とした研究である。得られた成果を以下に整理する。

第1章では、地球温暖化に伴う気候変動の影響が既に顕在化している現状のもと、気候変動による影響に備えるための「適応策」の立案が重要であることを述べた。

地域の特性を踏まえた地域に根差した「適応策」を立案するためには、市町村等の地域レベルでの気候変動の影響リスク評価が必要であることを整理した。

第2章では、脆弱な水環境を有する網走川水系網走川流域、石狩川水系空知川を対象に、バイアス補正を適用した統計的ダウンスケーリングによる地域気候モデルMRI-NHRCM20の気候変動予測データの高分解像度化について検証した。

解像度5kmのDSJRA-55を現況の観測値として適用しバイアス補正を行うことで水文分布特性の推定精度が向上し、適切な統計的ダウンスケーリングが可能となることを確認した。

本成果により、これまで十分検討されてこなかった地域レベルの気候変動を適切に予測する上で有用な手法を提案することができた。

現在気候と将来気候を比較し、気温・降水量が大幅に上昇・増加し、降雪水量が大幅に減少することから、流域毎の水循環の変化を踏まえた適切な水環境管理が重要であると考えられる。

第3章では、網走川下流に位置する汽水湖の網走湖を対象に、流体の運動及び水温・水質の移流拡散を考慮した解析モデルを用いて気候変動に対する水質シミュレーションを行い、湖沼環境への影響を水質変化の観点から定量的に評価した。

具体的には、気候変動に伴い網走湖表層の水温・塩分・クロロフィルaが上昇するとともにDOが低下することを把握することができた。

本成果により、これまで十分検討されてこなかった地域レベルの気候変動による積雪寒冷地の湖沼環境への影響を適切に評価できる有用な手法を提案することができた。

将来の気候変動下において、強風が発生した場合の青潮発生リスク、表層の塩分濃度上昇によるアオコ発生リスクの増大が想定されることから、網走湖の水環境保全を図るためには水質改善施策の実施が必要であると考えられる。

第4章では、空知川上流の金山ダム流域を対象に、河川流量と河川水温から求められる熱フラックスの河道追跡に基づく解析モデルを構築し、気候変動に対する河川水温シミュレーションを行い、河川環境への影響を河川水温及び冷水性魚類の生息環境変化の観点から定量的に評価した。

具体的には、融雪初期の3月に最大約4.7℃河川水温が上昇し、イトウ *Hucho perryi* の産卵に適した水温域が金山ダム上流の空知川源流部付近に移動する可能性があることを把握することができた。

これまで、河川の縦断的な気象条件・樹木遮蔽・河川流量・水面上の熱収支の変化を考慮した水温解析モデルは構築されておらず、本成果により、これまで十分検討されてこなかった地域レベルの気候変動による積雪寒冷地の魚類生息環境への影響を適切に評価できる有用な手法を提案することができた。

将来の気候変動下において冷水性魚類の生息環境を保全するためには産卵床の保全・代替といった「適応策」の実施が必要であると考えられる。

以上より、本論文は、積雪寒冷地の地域レベルにおいて、地球温暖化に伴う気候変動の影響を水環境の観点から定量的に評価する上で、有効な手法を提示するものである。

地域レベルでの気候変動に対する水環境管理や生態系保全のあり方を検討し、地域に根差した効果的・効率的な「適応策」を立案する上で非常に有益であり、本論文の社会的意義は極めて高いと考える。

謝辞

博士後期課程の在学中，研究テーマの設定や研究への取り組み方，プレゼンテーション方法まで温かく，時には厳しくご指導いただきました，室蘭工業大学大学院教授 中津川 誠先生に深く感謝いたします．

室蘭工業大学大学院教授 木村克俊先生ならびに准教授 有村幹治先生には，お忙しい中，本論文の副査として細部にまで貴重なご助言をいただきました．ここに謝意を表します．

室蘭工業大学 水環境システム研究室の学生ならびに OB・OG の皆様には，本研究に係る各種データの処理作業等でサポートをいただきました．ここに深く感謝いたします．

本論文を執筆するにあたり，貴重なデータを快く提供していただきました，北海道開発局 札幌開発建設部様，網走開発建設部様，日本気象協会 北海道支社様に，この場を借りて御礼を申し上げます．

株式会社ドーコンにおいては，本研究の機会を与えてくださるとともに，研究活動に係る費用面等で多大なるご配慮をいただきました，佐藤 謙二代表取締役社長，氏江 一彦相談役，星野 利幸水工事業本部長，渋谷 義仁前執行役員に謹んで感謝の意を表します．

業務と研究活動の両立は私が想像していた以上に厳しく，己の力不足を痛感する日々でしたが，そのような中，業務と研究活動の両面で協力やサポートをいただきました河川部 部長 菊地 博文様，河川環境部 部長 吉田 透様，河川部 技師長 長谷川 裕史様，技術情報部 主幹 小池 明夫様，河川部 主任 石井 光太郎様，株式会社ドーコン水工事業本部の社員一同に感謝いたします．

最後に，博士後期課程で研究に携わった日々の出来事が走馬燈のように思い出されますが，常に励まし続けてくれた妻と息子達には，言葉にできないくらい感謝の気持ちでいっぱいです．両親，家族，友人に改めて謝意を表し，本論文の謝辞といたします．