

気候変動による水質等への 影響解明調査

報告

2013年3月

環境省 水・大気環境局 水環境課

目次

1. 調査の目的と実施手順	1
2. これまでに得られた知見、影響要因と相互の関連	3
2.1 気候変動が公共用水域の水質・水生生態系に及ぼす影響	3
2.2 気候変動が水質等に及ぼす影響要因と相互の関連	5
3. 公共用水域の過去の水温変化と気温上昇との関連性	9
3.1 公共用水域の過去の水温変化	9
3.2 水域別・地域別の過去の水温変化	11
3.3 水温変化と気温変化やその他要因との関連性	12
4. 湖沼に関する検討	14
4.1 全国の湖沼における水温変化要因の分析	14
4.1.1 過去30年間の水温変化状況	14
4.1.2 水温変化要因の分析	15
4.2 モデル湖沼における水温変化要因の分析	16
4.2.1 モデル湖沼の選定	16
4.2.2 琵琶湖流域でこれまで観測された気候変動	18
4.2.3 気候変動による琵琶湖水温・水質等への影響	19
4.2.4 琵琶湖における過去30年間の水温変化の状況	21
4.2.5 琵琶湖における水温上昇の要因分析	23
4.3 モデル湖沼における将来の水質予測	26
4.3.1 使用したモデル、計算条件および予測評価項目	26
4.3.2 将来予測結果	31
5. 河川に関する検討	32
5.1 全国の河川における水温変化要因の分析	32
5.1.1 全国の河川における水温変化状況	32
5.1.2 河川において考えられる水温変化の要因と分析	36
5.2 モデル河川における水温変化要因の分析	39
5.2.1 モデル河川の選定	39
5.2.2 雄物川における水温変化の状況	39
5.3 モデル河川における将来水温等の予測	42
5.3.1 使用したモデル、計算条件および予測評価項目	42
5.3.2 将来予測結果	44
6. 適応策の検討に向けて	46
7. あとがき	47
(参考)気候変動による水質等への影響解明調査検討会 委員名簿	48
(参考)気候変動による水質等への影響解明調査検討会 検討経緯	49
参考資料編	51

1. 調査の目的と実施手順

2007年に公表された「気候変動に関する政府間パネル」(IPCC)第4次評価報告書(AR4)では、「気候システムの温暖化には疑う余地がない」ことが示された。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に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いる。今後、気温上昇により生じうる河川、湖沼及び海域の水温上昇、これらに伴う水中有機物分解に係る酸素消費速度の増加などにより、日本固有の在来生態系が消失し、内水面漁業等に甚大な影響を生じることが懸念される。また水温上昇以外にも、降水頻度・降雨強度の変化に伴う河川の水量減少による排水希釈効果の減少や瀬切れの発生、濁水発生増加や河床材料の変化など様々な形で、我が国の水環境に影響を与える可能性が懸念されている。

上記を踏まえ、本調査は、気候変動が公共用水域の水質等に与える影響を適切に把握するとともに、将来の気候変動に伴う水質等への影響を予測することにより、想定される影響に対する適応策の検討に向けた参考とすることを目的として実施するものである。本調査は、平成21年度より「気候変動による水質等への影響解明調査検討会(座長：岡田光正放送大学教授)」の助言を得て実施してきたところであり、本報告は、これまでの検討内容を取りまとめ、広く周知することを目的に公表するものである。なお、本調査における「水質等」とは、水温を含む水質全般を指すが、本調査では、特に水生生態系への影響に関連の深い水質項目を中心に検討を行うこととする。

図1-1に本調査の実施手順を示す。第2章では、これまでに得られた知見や本検討の一環として実施したアンケート調査等に基づき、気候変動が水質等に及ぼす影響要因と相互関係について整理し、第3章では全国の公共用水域の過去の水温変化について分析した結果をとりまとめた。続いて第4章では湖沼を、第5章では河川を対象として、それぞれ水温変化の要因を分析するとともに、モデル湖沼(琵琶湖)、モデル河川(雄物川)における水温・水質の予測モデルを構築し、将来の水温・水質等の変化を予測した。なお海域についても本調査の対象範囲ではあるが、本調査では海域の水質や生態系への影響に関する既往の検討事例の収集を行うにとどめた。最後に第6章として、本調査の結果を踏まえ、将来生じうる水質等への影響を抑制するとともに、生じた影響に対応するための適応策の検討に向けた考え方について整理した。

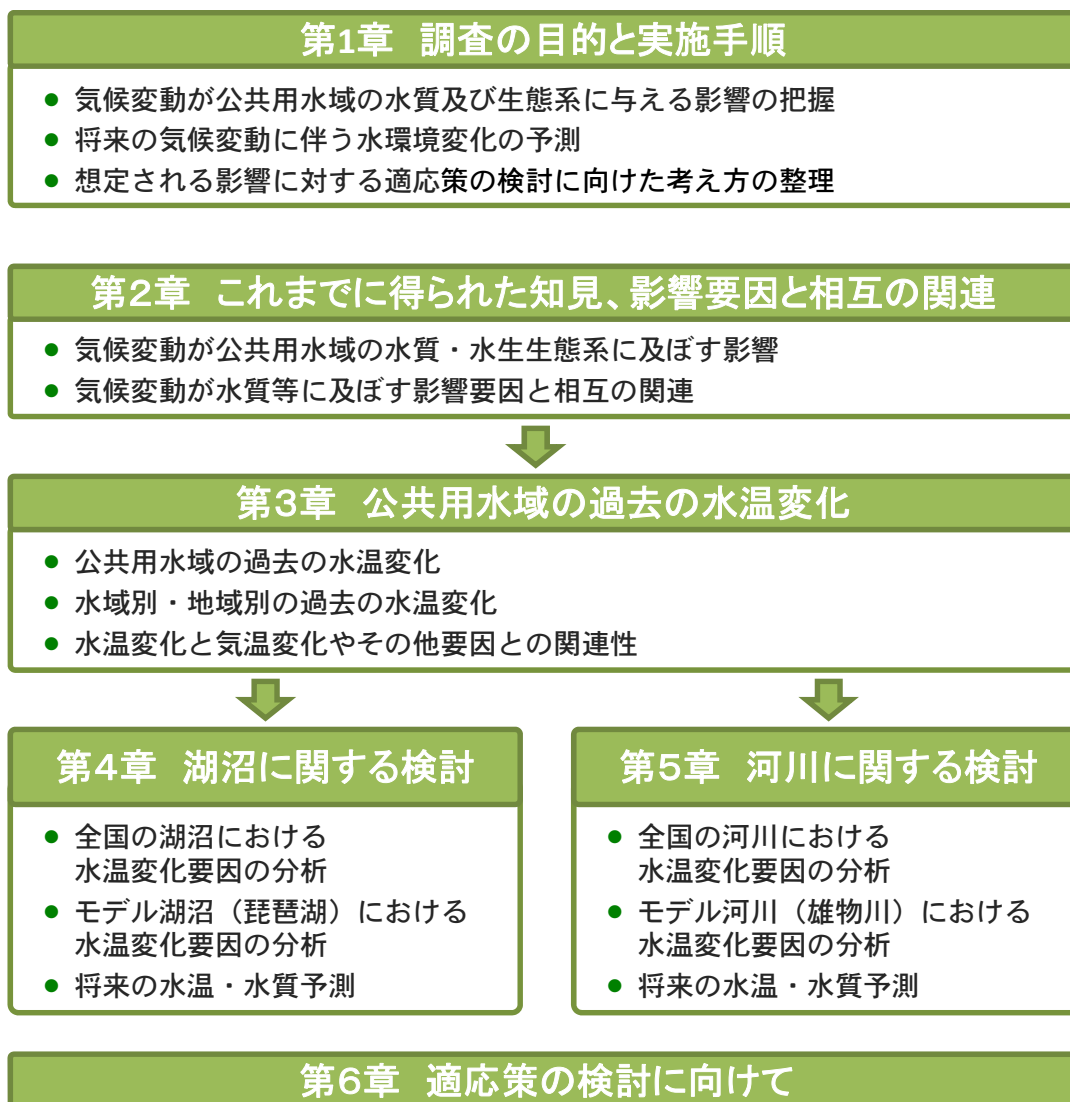


図 1.1 本調査の実施手順

なお、本検討では、特に断りのない限り、以下のデータを検討に用いた。

- (a) 水温および水質データ：
 - 公共用水域水質測定結果（検体値データ）
http://www.nies.go.jp/igreen/mk_down.html
- (b) 気温データ：
 - 気象庁観測値（気象台・測候所およびアメダス観測値）
<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>

2. これまでに得られた知見、影響要因と相互の関連

気候変動が公共用水域の水質や水生生態系に与える影響については、既に「気候変動への賢い適応¹」や「日本の気候変動とその影響²」などの既往文献などが整理されている他、様々な学術研究によりその影響が指摘されている。本章では、はじめにこれら既往の知見を概観した上で、気候変動が水質等に及ぼす様々な影響の要因とそれらの相互関連を整理した。

2.1 気候変動が公共用水域の水質・水生生態系に及ぼす影響

これまでの知見^{1,2}や研究成果によると、気候変動に伴う気温上昇や渇水、豪雨の増加等により、河川水および湖沼、海域の水温・水質に変化が生じ、水質や水域の生態系等に下記のような影響を及ぼすことが想定される。

気候変動が公共用水域の水質に及ぼす影響

既に生じている影響

- ・ 河川・湖沼・海域の水温上昇^{3,4,5,6}
- ・ 湖沼でのアオコの異常発生（水利用や水域の生態系への影響）^{7,8,9,10}
- ・ 渇水による赤潮被害の拡大¹¹
- ・ 湖の鉛直循環の減少による水質の変化¹²
- ・ 鉛直混合の弱体化による底層の溶存酸素濃度の低下¹²

将来予測される影響

- ・ 大雨や渇水による河川水質の悪化¹³
- ・ 河川水や湖沼・ダム湖、地下水の水温上昇・蒸発散量の増大^{14,15,16}
- ・ 融雪期の河川流量の減少¹⁷
- ・ 湖沼・貯水池の全循環の停止^{18,19}
- ・ 貧酸素水塊の割合増大²⁰
- ・ 水温躍層の形成^{15,21}
- ・ アオコ発生確率の上昇⁷
- ・ 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²²
- ・ 海面上昇に伴う地下水塩水化²³
- ・ 水利用への影響^{24,25}

気候変動が水生生態系に及ぼす影響

既に生じている影響

- ・ 水温上昇に伴う植物プランクトン群集の変化²⁶
- ・ 湖の鉛直循環が停滞し、底層の溶存酸素が減少するなどの原因による生態系の変化²⁷
- ・ 淡水域における冷水魚の分布域縮小^{28,29}
- ・ 沿岸における南方種の増加・北方種の減少^{4,6}
- ・ サンゴ礁の白化・死滅^{30,31}
- ・ 水温上昇による養殖カキへの影響⁶
- ・ オホーツク海等の水温上昇・溶存酸素濃度低下による生物生産性への影響³²
- ・ 結氷日数の減少および結氷面積の低下による生態系への影響³³

将来予測される影響

- ・ 淡水域における種の分布域変化、新たな外来種の侵入^{28,29,34}
- ・ オホーツク海の海氷減少に伴う食物連鎖の変化、回遊性生物の回遊ルートの変化³⁵
- ・ 海洋の酸性化によるプランクトン、石灰化生物への影響拡大^{36,37}
- ・ サンゴの白化や病気の拡大^{30,31,38}
- ・ 砂浜環境の減少^{39,40}

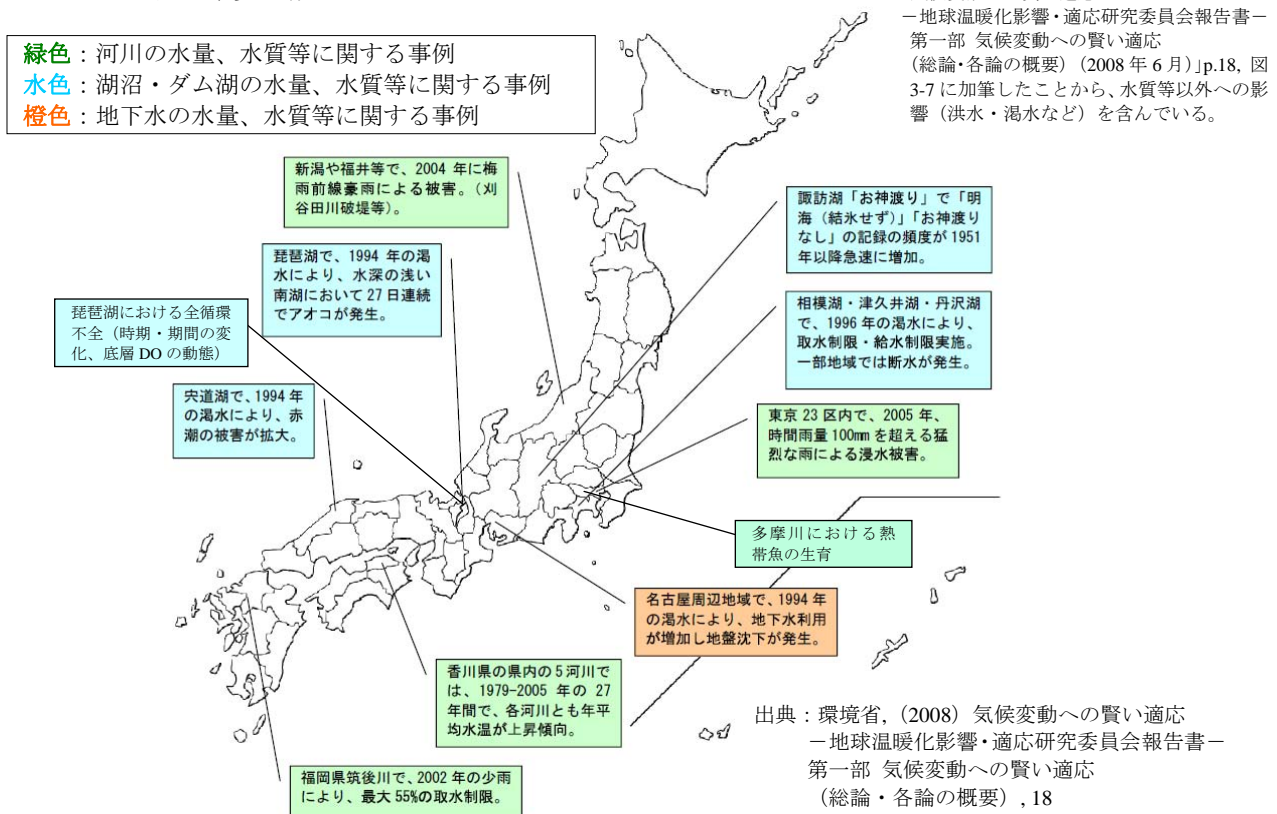


図 2.1 日本国内で既に生じている水質等への影響

2.2 気候変動が水質等に及ぼす影響要因と相互の関連

気候変動による水関連問題への影響は、気温上昇・降雨変化から、水質・水生生態系、水文、水資源・利水、治水、沿岸海洋、農業、土砂災害など多岐にわたることから、生じうる影響の要因関連を幅広く捉えるため、水質・水生生態系に関して想定される影響要因と相互の関連性を図 2.2～図 2.4に整理した。

図に示すように、気候変動が水質等に及ぼす影響要因と相互の関連は非常に複雑である。また、気候変動には不確実性を伴うことから、それぞれの要因について、影響発生の有無、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こと、また、将来気候データ（気温、日射量、降雨量等）を入力条件として、将来の水温・水質の変化を定量的に予測することが可能であることから、以降の検討では、気候変動が引き起こす水温変化やそれに伴う水質の変化に特に着目して検討を進める。第3章では、公共用水域（河川、湖沼、海域）における過去の水温変化状況を整理・分析する。その結果を踏まえて4章以降では、湖沼や河川における水温・水質等の将来予測を行う。

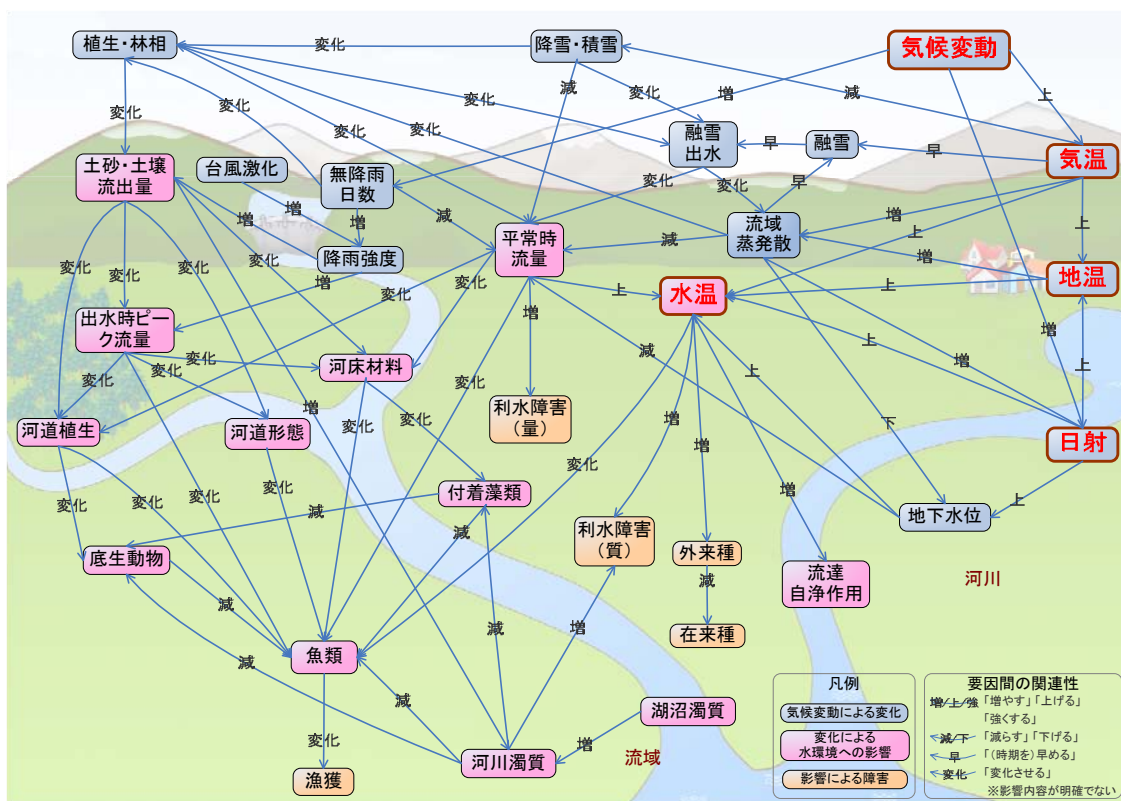


図 2.2 影響要因と相互の関連性（河川および流域）

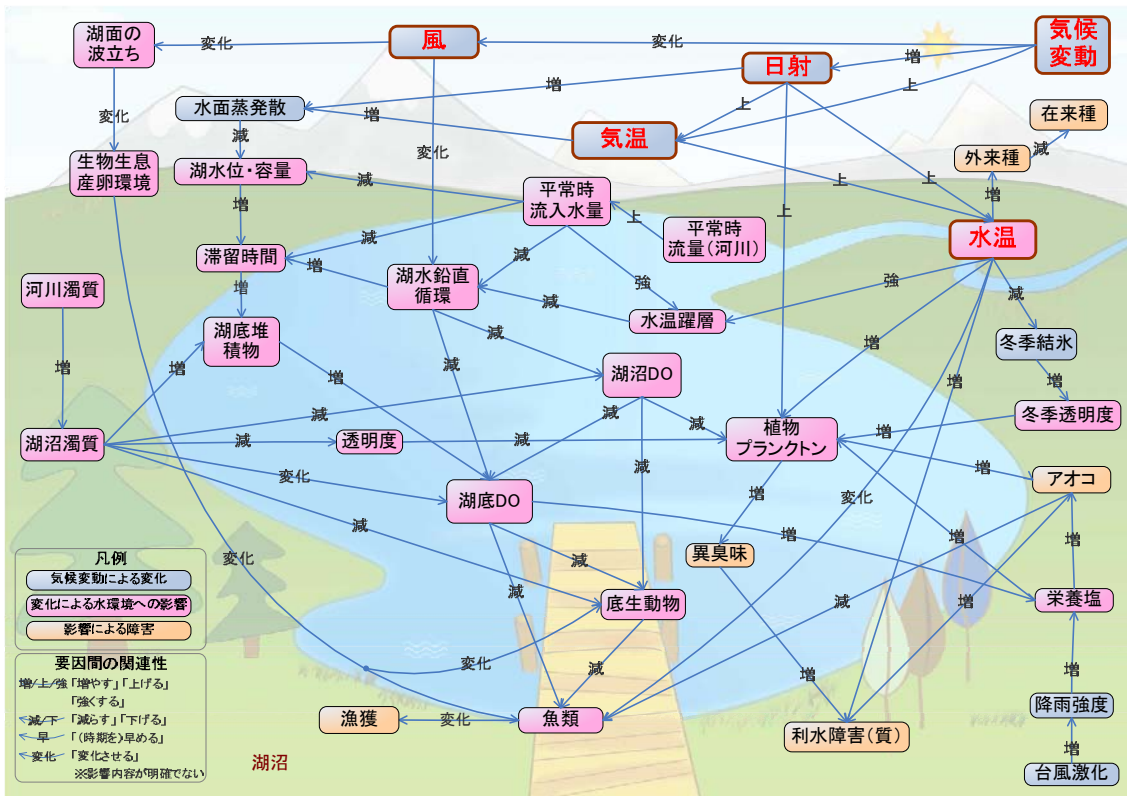


図 2.3 影響要因と相互の関連性 (湖沼)

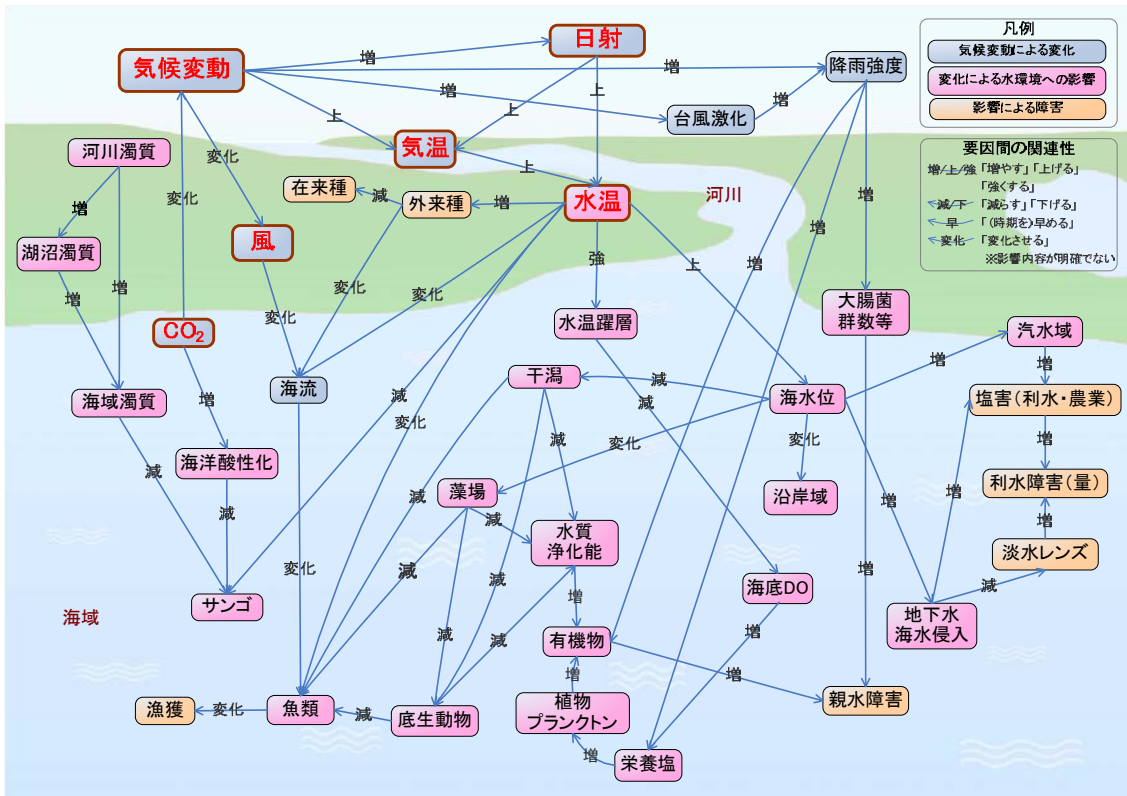


図 2.4 影響要因と相互の関連性 (海域)

- 1 環境省地球温暖化影響・適応研究委員会（2008）気候変動への賢い適応，地球温暖化影響・適応研究委員会報告書。
- 2 文部科学省，気象庁，環境省（2009）温暖化の観測・予測及び影響評価統合レポート「日本の気候変動とその影響」。
- 3 香川県 香川の環境ホームページ（地球温暖化について香川県の状況を調査しました！）
<http://www.pref.kagawa.jp/kankyo/data/0712/071225.htm>
- 4 熊谷道夫（2008）地球温暖化が琵琶湖に与える影響，環境技術，**37(6)**，pp.31-37.
- 5 福井県衛生環境研究センター（2012）「福井県から見る地球温暖化」調査研究報告書
- 6 広島県環境県民局環境部環境政策課（2009.2）平成20年度広島県内における温暖化影響調査報告書
- 7 草場智哉，盛谷明弘（2007）ダム貯水池の富栄養化（アオコ発生）の簡易的な手法の研究，H18 年度ダム資源池環境技術研究所所報，3-9.
- 8 北澤弘美，富永和樹，北田真吾，斉藤滋，佐藤親房，小泉明（2007）貯水池からの表層放流がアオコ発生に及ぼす影響，環境工学研究論文集，**44**，513-524.
- 9 北澤弘美，北田真吾，湯浅岳史，佐藤親房，小泉明（2007）小内貯水池における湖水流動・水質モデルの構築，水道協会雑誌，**76(7)**，pp.16-30.
- 10 松居弘吉（1997）平成6年度異常渇水に伴う琵琶湖の水環境（特集 琵琶湖およびその集水域における水問題），環境技術，**26(8)**，495～501.
- 11 橋谷博 他（1995）1994年の渇水と宍道湖の水質，第60回日本陸水学会講演要旨集，188.
- 12 永田俊，熊谷道夫，吉山浩平（2012）温暖化の湖沼学，195pp，京都大学学術出版会
- 13 尾崎ら（1999）気候変動が河川水質に及ぼす影響に関する統計的研究，土木学会論文集，**629**，97-109.
- 14 香川県 香川の環境ホームページ（「香川の温暖化」（河川への影響）について），
<http://www.pref.kagawa.jp/kankyo/data/0712/071225/2.pdf>
- 15 速水祐一，藤原建紀（1999）琵琶湖深層水の温暖化，海の研究，**8**，197-202.
- 16 池田光良，三浦均也，操上広志（1999）地下水温による北海道美々川周辺の地下水流動解析，応用地質，**40(2)**，70-85.
- 17 川崎将生（2005）気候変動が利根川流域の水資源に与える影響検討，気候変動が水資源に与える影響評価研究調査（国土交通省委託業務成果報告書），水文・水資源学会，pp.64-140.
- 18 福島ら（1998）浅い富栄養湖の水質に及ぼす気象の影響，水環境学会誌，**21(3)**，180-187.
- 19 草場ら（2007）ダム貯水池の富栄養化（アオコ発生）の簡易的な手法の研究，平成18年度ダム水源池環境技術研究所所報，3-9.
- 20 永田俊・宮島利宏・吉山浩平（2008-2010），東京大学大気海洋研究所海洋化学部門 生元素動態分野 D-0804 温暖化が大型淡水湖の循環と生態系に及ぼす影響評価に関する研究，（3）温暖化が物質循環と水質に及ぼす影響評価に関する研究
- 21 Komatsu E. et al.(2007) A modeling approach to forecast the effect of long-term climate change on lake water quality, *Ecological Modelling*, **209(2-4)**, 351-366.
- 22 国土交通省（2007）「気候変動等によるリスクを踏まえた総合的な水資源管理のあり方について」研究会資料.
- 23 神野健二，広城吉成（2006）地球温暖化と地下水塩水化，水環境学会誌，**29(2)**，72-76.
- 24 滋賀県琵琶湖研究所（1996）平成6年度琵琶湖の異常渇水の影響に関する調査研究報告書.
- 25 神奈川県ホームページ（水資源の開発：平成8年の渇水），
<http://www.pref.kanagawa.jp/osirase/01/0104/suigenkaihatu/page20.html>
神奈川県政策部土地水資源対策課ホームページ，<http://www.pref.kanagawa.jp/sosiki/01/0104/index.html>
- 26 Winder, M., Reuter, J.E. and Schladow, S.G.(2009) Lake warming favours small-sized planktonic diatom species. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, **276**, 427-435.
- 27 Ohtaka A., M. Nishino, T. Kobayashi (2006) Disappearance of deep profundal zoobenthos in Lake Ikeda, southern Kyushu, Japan, with relation to recent environmental changes in the lake, *Limnology*, **7**, 237-242
- 28 Fang X., H. G. Stefan, J. G. Eaton, J. H. McCormic and S. R. Alam, (2004a) Simulation of thermal/dissolved oxygen habitat for fishes in lakes under different climate scenarios Part2. Cold-water fish in the contiguous US., *Ecol Model*, **172**, 39-54.
- 29 Nakano S., F. Kitano and K. Maekawa (1996) Potential fragmentation and loss of thermal habitats for charrs in the Japanese archipelago due to climatic warming, *Freshwater Biology*, **36**, 711-722.
- 30 原沢英夫，西岡秀三（2003）地球温暖化と日本 第3次報告—自然・人への影響予測—，411pp.，古今書院.

-
- 31 環境省, 日本サンゴ礁学会 (2004) 日本のサンゴ礁, 375pp., 自然環境研究センター.
 - 32 Nakanowatari T., Ohshima K. I., Wakatsuchi M. (2007) Warming and oxygen decrease of intermediate water in the northwestern North Pacific, originating from the Sea of Okhotsk, 1955-2004., *Geophysical Research Letters*, **34**, L04602, doi: 10.1029/2006GL028243.
 - 33 Arai, T. and Pu, P. (1986) A preliminary study on the water temperature and freezing of Lake Suwa in Japan and shallow lakes in eastern China. *Japanese Journal of Limnology*, **48**, 225-230.
 - 34 IPCC (2007) Climate change 2007: Impact, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 976pp., Cambridge Univ. Press,
 - 35 環境省地球温暖化影響・適応研究委員会 (2008) 気候変動への賢い適応, 地球温暖化影響・適応研究委員会報告書, 第4章, p.22.
 - 36 環境省地球温暖化影響・適応研究委員会 (2008) 気候変動への賢い適応, 地球温暖化影響・適応研究委員会報告書, 第4章, p.13.
 - 37 Reynaud S., Leclercq N., Romaine-Lioud S., Ferrier-Pagès C., Jaubert J. and Gattuso J.-P. (2003) Interacting effects of CO₂ partial pressure and temperature on photosynthesis and calcification in a scleractinian coral, *Global Change Biology*, **9**, 1660-1668.
 - 38 気象庁 (2012) 海洋酸性化に関する情報の提供開始について～北西太平洋で海洋酸性化が進行～、気象庁報道発表資料
 - 39 Weil E, Smith G, Gil-Agudelo DL. (2006) Status and progress in coral reef disease research, *Diseases of Aquatic Organisms*, **69**, 1-7
 - Wilhelm S. and R. Adrian (2007) Long-term response of *Dreissena polymorpha* larvae to physical and biological forcing in a shallow 51 lake, *Oecologia*, **151**, 104-114
 - 40 日本ウミガメ協議会 (2002) 日本のアカウミガメの産卵と砂浜環境の現状, p.162, 日本ウミガメ協議会.

3. 公共用水域の過去の水温変化と気温上昇との関連性

3.1 公共用水域の過去の水温変化

全国の公共用水域における水温の変化傾向を捉えることを目的として、過去約 30 年間（1981～2007 年度）における水温の上昇または低下地点の分析および抽出を行った。抽出の流れおよび結果を図 3.1に示す。

全国の分析対象地点 4,477 地点（うち河川 3,121 地点、湖沼 265 地点、海域 1,091 地点）のうち、夏季では 3,244 地点（分析対象地点の 72%）、冬季では 3,654 地点（82%）で水温上昇傾向が認められた。このうち、全国の 1,405 地点（分析対象地点の 31.4%）、うち河川の 997 地点（31.9%）、湖沼の 68 地点（25.7%）、海域の 340 地点（31.2%）で、冬季または夏季に有意な水温の上昇が認められることがわかった。

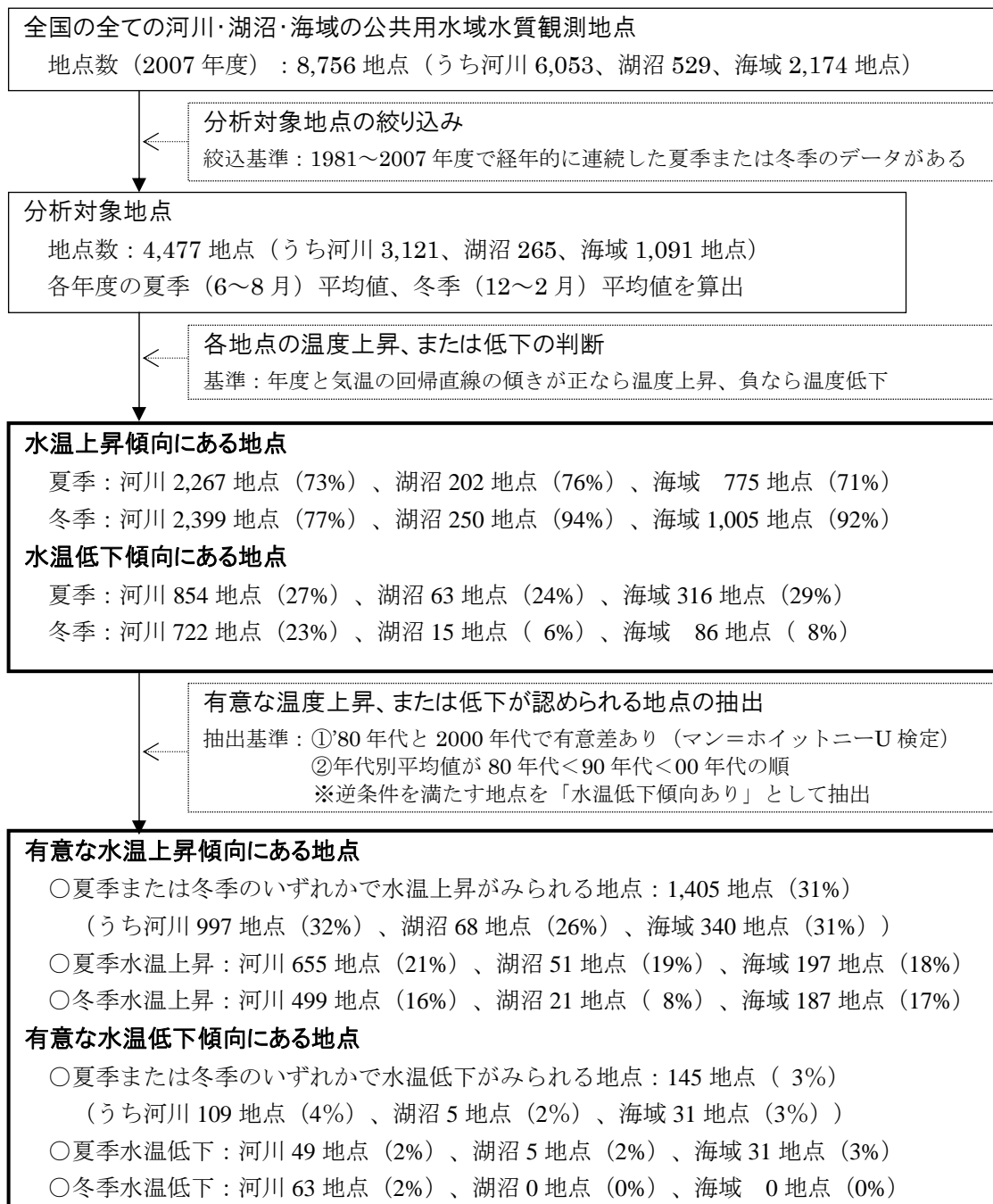


図 3.1 水温上昇、または低下地点の分析・抽出方法

3.2 水域別・地域別の過去の水温変化

水域別、地方別に水温上昇地点の割合をみると、下記の傾向が確認された。

河川：北海道、東北を除き 8 割程度の地点で水温上昇が確認された。さらに、北海道・東北を除き 3～4 割程度の地点で夏季・冬季いずれかの水温が有意に上昇することが確認された。

湖沼：冬季は 8 割以上、夏季は北海道、中国、四国を除き 7 割以上の地点で水温上昇が確認された。有意に水温が上昇した地点について、北海道では有意に水温上昇した地点はなく、東北では 1 割以下であるが、関東・中部・近畿は夏季水温有意上昇地点の割合が 2～4 割、四国・九州は冬季水温有意上昇地点の割合が 5～6 割と相対的に高かった。

海域：冬季は 8 割以上、夏季は北海道、東北、関東、四国で 8 割以上、その他の地方で 5 割以上の地点で水温上昇が確認された。さらに、関東・中国・四国で夏季・冬季いずれも水温有意上昇地点の割合が相対的に高かった。北海道・近畿は夏季・冬季とも水温有意上昇地点の割合が 1 割以下と低かった。

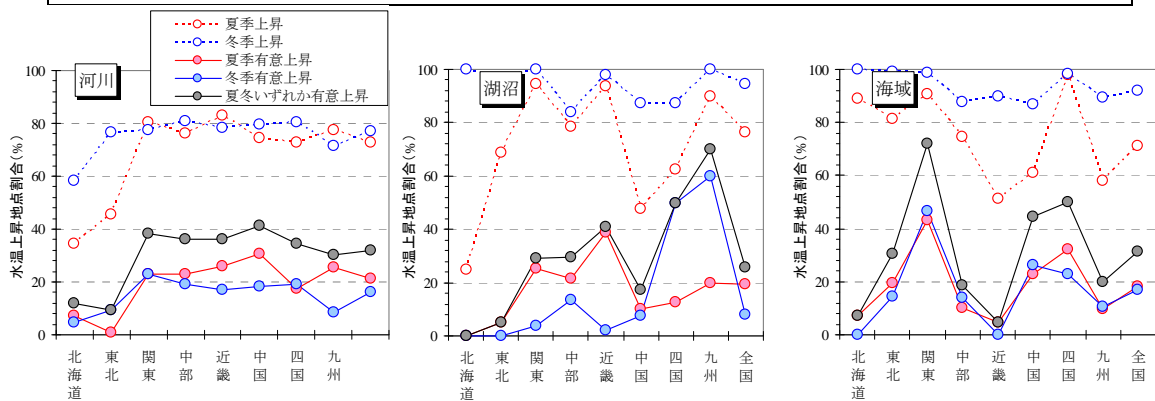


図 3.2 地方別の水温上昇地点の割合

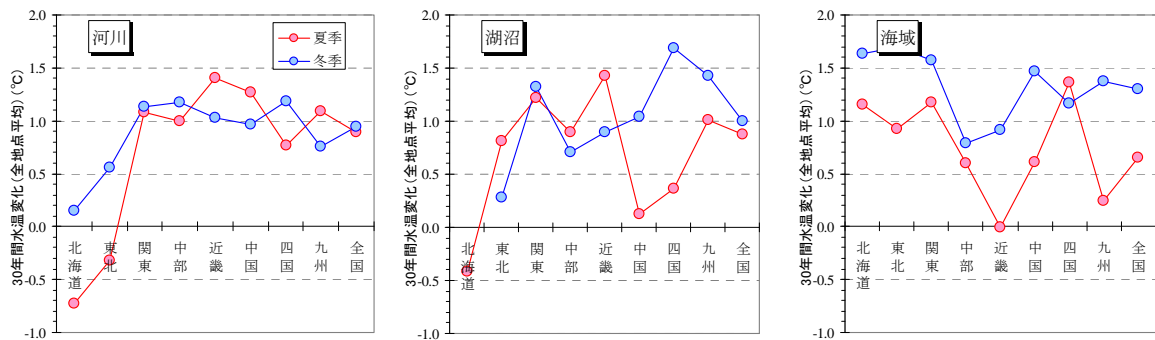


図 3.3 地方別の過去 30 年間の水温変化（全地点の水温変化の平均値）

3.3 水温変化と気温変化やその他要因との関連性

全ての分析対象地点（4,477 地点）について、最近隣のアメダス気象観測地点（全国 157 地点）の夏季・冬季の 30 年間の気温変化を分析し、気温変化と水温変化の関係について整理した（図 3.4）。また、図 3.5には、河川における水温変化と人口密度、市街化率の関係を整理した。水温と気温、水温と人口密度、市街化率とも、明確な相関関係は見られなかった。水温変化は、気温影響のみならず、流量の増減や温排水の流入、都市排熱等の他の要因の影響を受けるため、その影響度合いは地点により異なることから、特定の要因との相関関係が見られなかったと考えられる。

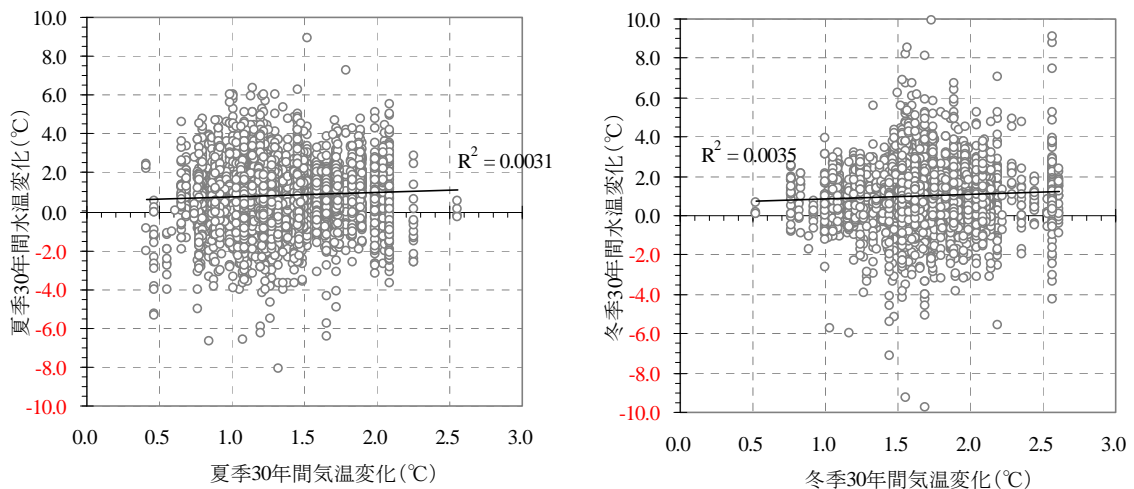


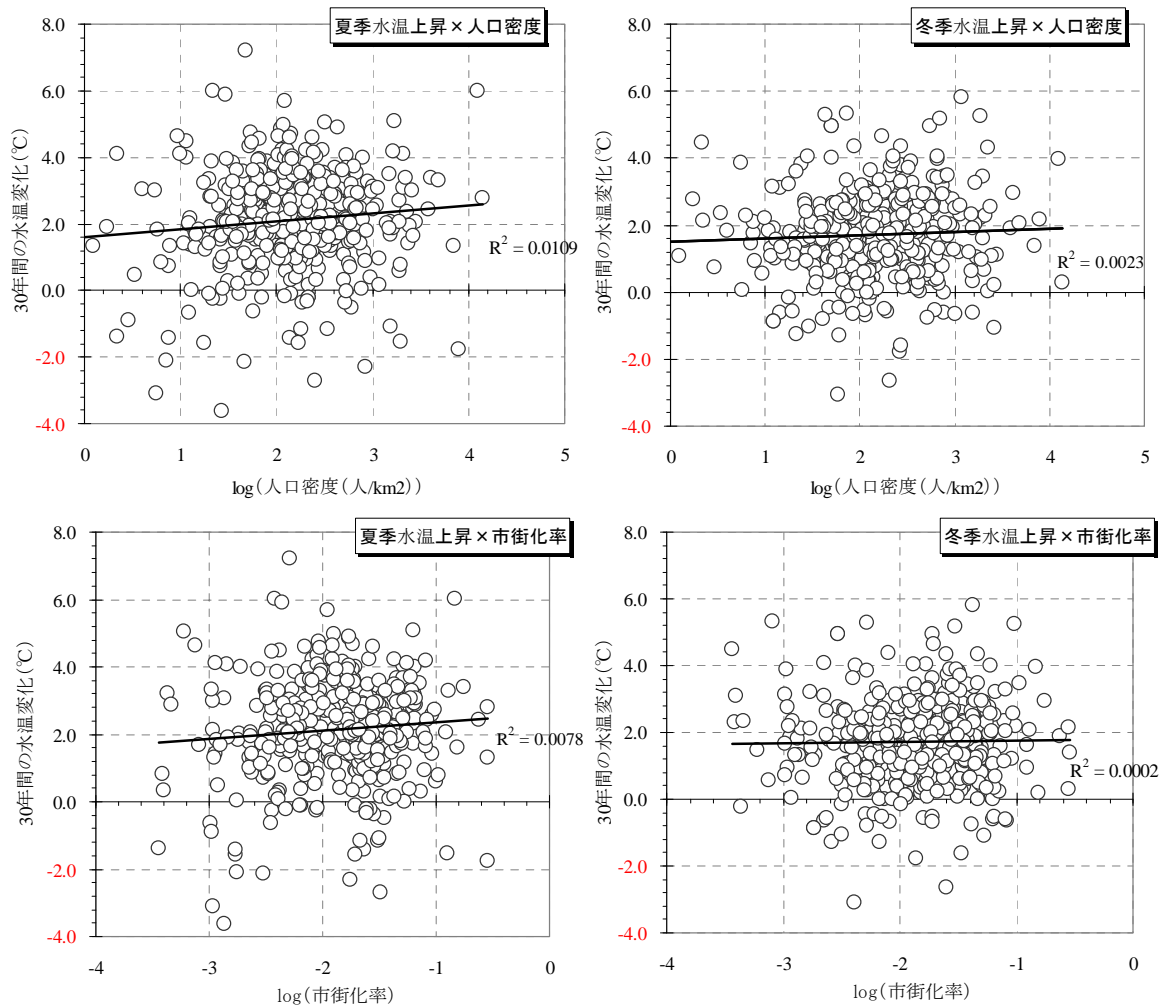
図 3.4 過去 30 年間の気温変化と水温変化との関連性
(左：夏季、右：冬季)

【参考：過去 30 年間の水温・気温変化の分析方法】

過去約 30 年間（1981～2007 年度）のデータに基づき、年と気温で直線相関式を作成し、傾き（即ち、1 年あたり温度変化）に 30 年を乗じて 30 年間の気温変化を算出した。

【参考：過去 30 年間の気温変化の特徴】

- ・アメダス 157 地点について、過去 30 年間（水温分析期間と同期間）の変化傾向を調べた。
- ・全ての地点で年平均気温、夏季（6～8 月）平均気温、冬季（12～2 月）平均気温とも上昇傾向が確認された。
- ・過去 30 年間の気温上昇程度は、年平均気温で 0.5～2.5℃程度である。



データ出典：

<人口>平成 17 年国勢調査 男女別人口総数及び世帯総数（1km メッシュ、(独) 統計センター）

<市街化率>国土数値情報 KS-202-1 1/10 細分区画土地利用（平成 9 年度、100m メッシュ、国土交通省

※市街化率は、建物用途（A）、建物用途（B）が集水域面積に占める割合を算出した。

注）河川的环境基準 AA 類型、A 類型の地点を対象に、標高データに基づき集水域を確定し、集水域内の人口密度及び市街化率を集計した。

図 3.5 過去 30 年間の水温変化と集水域指標（人口密度・市街化率）との関係

公共用水域の水温変化に関しては、前節で見られたような水域別・地域別の傾向に加えて、地域毎の人為的な影響を強く受けることから、将来の水質等を予測するにあたっては、水域毎に各地域の特性を踏まえて検討を進める必要がある。そこで次章以降では、湖沼・河川の水域別に、それぞれモデル水域を選定し、地域の諸条件を踏まえた検討を進めることとする。

4. 湖沼に関する検討

4.1 全国の湖沼における水温変化要因の分析

4.1.1 過去 30 年間の水温変化状況

全国の湖沼を対象に、水温変化要因の分析を行った。対象とした湖沼は、全国の主要な湖沼のうち、過去 30 年間の水温変化を検討可能な図 4.1 の 26 湖沼である（琵琶湖北湖・南湖、中海・宍道湖はそれぞれ別湖沼として扱った）。

各湖沼の代表点（湖心またはそれに準じる地点）の夏季（6～8 月）・冬季（12～2 月）それぞれの過去 30 年間の水温変化を図 4.2 に示す。冬期結氷湖沼を除く 17 湖沼のうち、夏季・冬季とも水温が上昇した湖沼が 8 湖沼、夏季上昇・冬季低下した湖沼が 3 湖沼、夏季低下・冬季上昇した湖沼が 5 湖沼、夏季・冬季とも低下した湖沼が 1 湖沼であった。なお、東北・北海道の大部分の湖沼は、冬季に結氷等による欠測が多いため、冬季は分析対象外とした。



図 4.1 対象湖沼

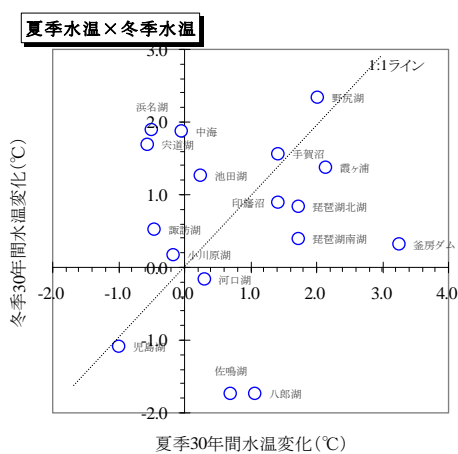


図 4.2 過去 30 年間の水温変化（夏季・冬季）

4.1.2 水温変化要因の分析

(1) 水温変化と気温変化との関係

各湖沼の近傍気温観測地点の気温変化と、湖沼水温変化との関係を図 4.3に示す。水温上昇湖沼に関して、夏季は半数以上の湖沼で気温の上昇を超えて水温が上昇しているのに対し、冬季は野尻湖を除き、水温上昇は概ね気温上昇の範囲内に留まっていた。夏季・冬季とも、気温変化と水温変化に明確な相関は確認できなかった。

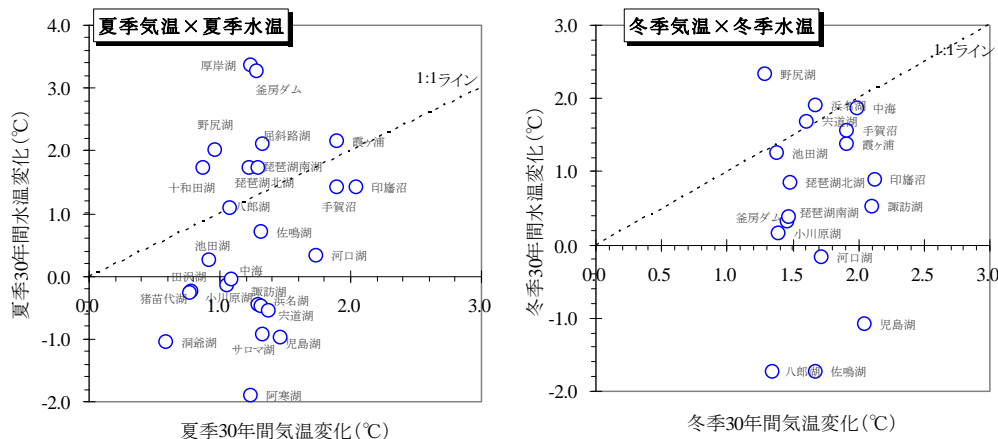


図 4.3 対象湖沼における過去 30 年間の気温変化と水温変化との関係

(2) 水温変化と気温変化以外の水温変化要因との関係

各湖沼における気温変化以外の水温変化要因（地形要因：湖容積、湖面積、平均水深、混合度、滞留時間、流域要因：流域面積、人口密度、下水道普及率）と、湖沼水温変化との関係を確認したところ、いずれの要因との間にも明確な相関性を認めることはできなかった（図 4.4に人口密度と水温変化の関係を例として示す）。

※混合度：「成層の有無」を判断するために EPA が定義した指標であり、混合度が 1 よりも小さければ平均深度が温度躍層深さを上回り、夏季に成層すること、一方 1 を超える場合は温度躍層深さが平均深度を上回り、風により鉛直混合が行われ、夏季に成層しないことを示す。

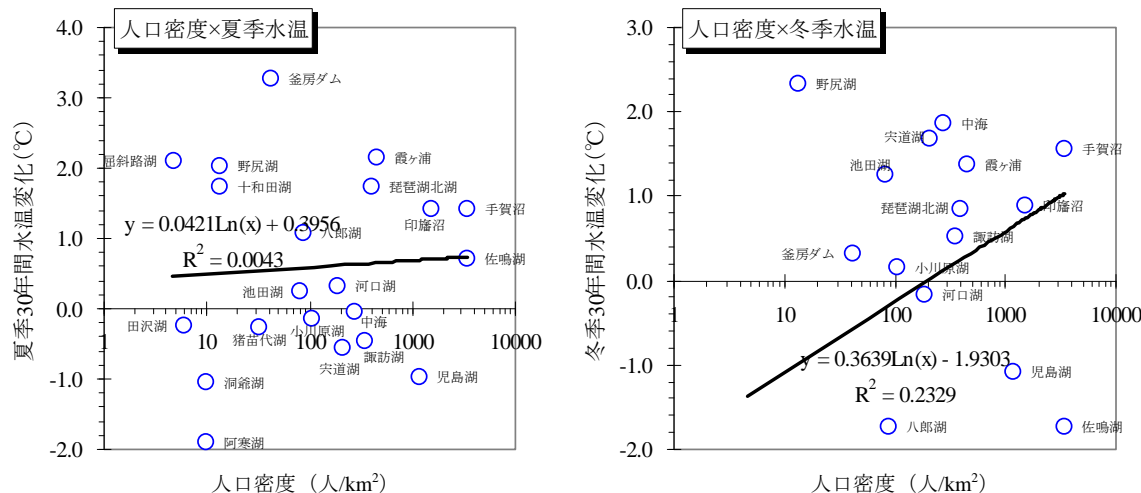


図 4.4 過去 30 年間の水温変化と人口密度との関係

4.2 モデル湖沼における水温変化要因の分析

4.2.1 モデル湖沼の選定

第3章及び前節の分析から、湖沼の水温上昇に関しては人為的影響をはじめとする水域毎の要因による影響が少なくないことが明らかとなった。また一定以上の水深があり成層期と循環期に区分される湖沼については、気温上昇に伴う水温上昇が循環様式に影響を与え、この循環の変化が水質・生態系等にも影響を与えることが懸念される。

例えば、鹿児島県の池田湖はかつて冬季に全循環[※]する湖沼であったが、冬季の平均気温上昇等により、1980年代後半に湖水の全循環が停止し、下層DOが減少するなどの影響が生じている(図4.5参照)。また琵琶湖では、暖冬であった2006-2007年の冬に全循環の開始が遅れ、全循環期間が非常に短くなった(図4.7参照)。琵琶湖よりも北に位置する湖沼は、現在は年2回循環湖であるが、気温の上昇が続くと年1回循環湖になり水質・生態系への影響が生じることが懸念される。

本節では気候変動による湖沼への影響として循環様式の変化に着目し、全循環の時期や期間の変化、下層DOの動態変化等、気候変動影響の可能性が懸念される事象が報告され、過去に多くの機関・研究者等が研究対象としていることからデータ・知見が集積している琵琶湖をモデル湖沼として選定し、地域の諸条件を踏まえた水温変化及びその要因を分析した上で、将来の水質等への影響を予測する。

※全循環：湖水温が表層水から深層水まで一様になり、湖水が鉛直方向に湖底まで混合する現象。

【参考：鹿児島県池田湖における全循環の停止とその影響】

鹿児島県の池田湖は、かつて冬季に全循環する湖沼であったが、冬季の平均気温の上昇により、1980年代後半、湖水の全循環が停止した。この年以降、下層 DO の低下が進行し、1990年代以降は 0mg/L の状態が続いていたが、2010～2011年冬に約20年ぶりに全循環の再開が観測され¹、DOにも回復の兆しがみられた。

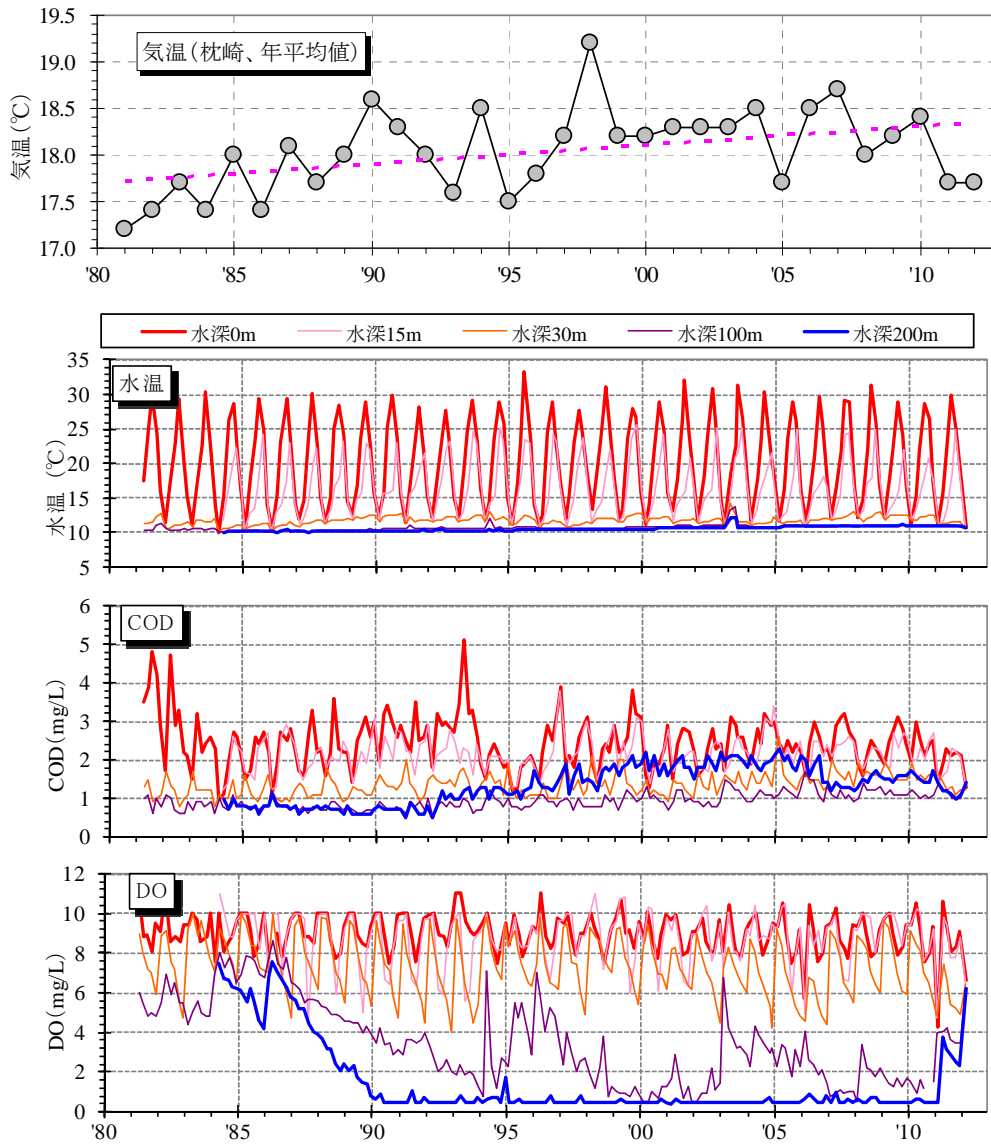


図 4.5 枕崎気温および池田湖水温・水質（基準点 2 地点）の経年変化

¹ 尾辻ら（2012）池田湖における溶存酸素と栄養塩類の挙動について，日本水環境学会年会講演集，p.330.

4.2.2 琵琶湖流域でこれまで観測された気候変動

近年 100 年間のデータを見ると、日本平均で 1.1℃の気温上昇（世界平均は 0.7℃上昇）に対し、滋賀県（彦根）では 1.3℃程度上昇と気温上昇幅が大きい。特に、図 4.6 に見られるように、1990 年代以降、高温となる年が増えている。

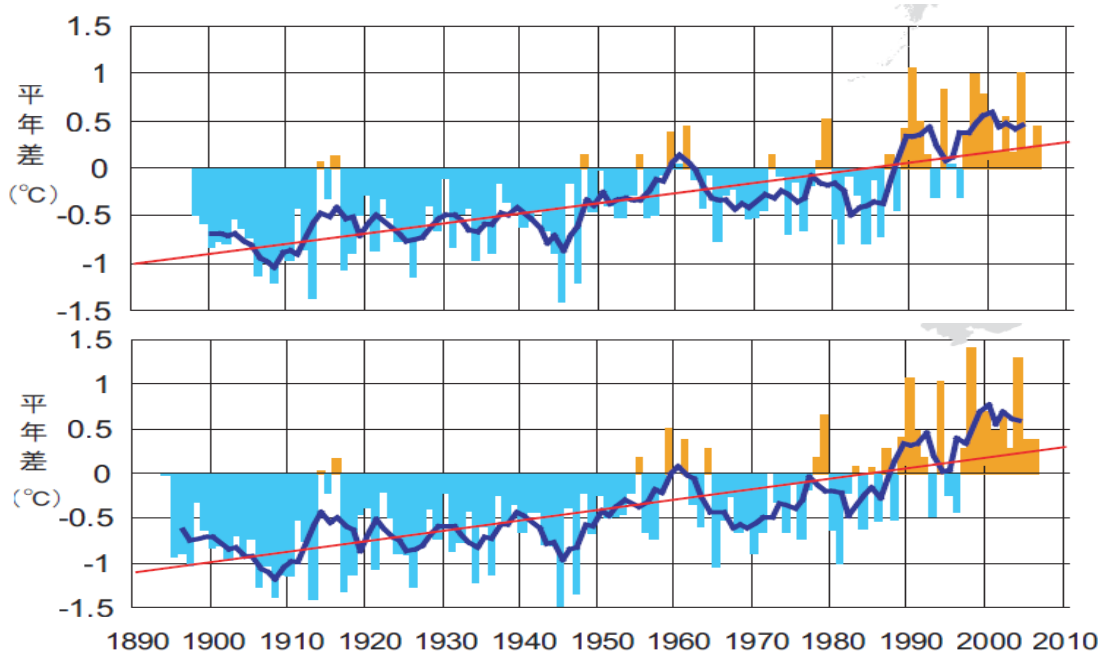


図 4.6 日本・滋賀県（彦根）での気温の上昇傾向

棒グラフ：各年の平均気温と平年値との差（平年値は 1971～2000 年の平均値）

太線（青）：平年差の 5 年移動平均

直線（赤）：長期的な変化傾向

出典：滋賀県琵琶湖環境科学研究センター（2007）センターニュース びわ湖みらい，No.8，01.

4.2.3 気候変動による琵琶湖水温・水質等への影響

今後、地球温暖化に伴い、琵琶湖の成層強度の増加や成層時期の延長により、低酸素化が進行することが危惧される²⁾。図 4.7に、1994～2010年における、気温（彦根地点）と底層水温（今津沖中央地点、観測値）、冬季全循環発生との関係を整理した。近年で冬季の全循環の開始時期が遅れが生じた'06～'07年冬および'01～'02年冬は、いずれも暖冬であった。逆に、冬季の全循環の開始時期が早かった'05～'06年、'00～'01年はいずれも厳冬であった。また、同期間において冬季の全循環観測回数（月2回の水温観測時に全循環が生じていると判断された回数）と1月の平均気温との相関は高いことから（図 4.8）、冬季気温の上昇が全循環の開始時期の遅れに影響を及ぼしていると考えられる。

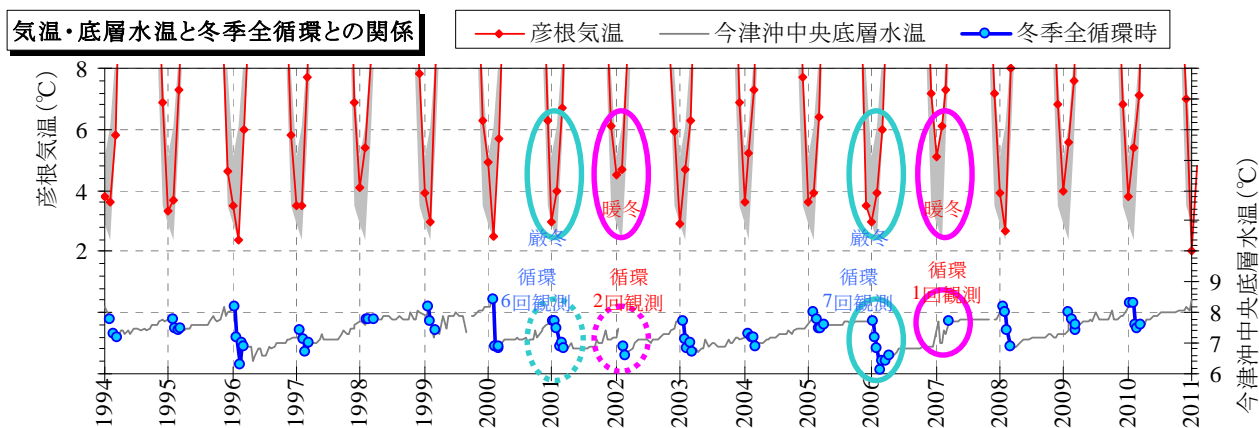


図 4.7 彦根気温、今津沖中央底層水温と冬季全循環との関係

- 注1) 彦根気温は月平均気温。
 グレーで示した範囲は1994～2010年の各月最大～最小値範囲を示す。
- 注2) 今津沖中央底層水温は底-1mの月2回の水温観測値。
 水深5mと底から1m地点の水温から計算される密度差が0.03g/Lより小さい場合に、冬季全循環が生じたと判断し、各年の回数をカウントした。'06～'07年冬に全循環が1回だけ観測されたことに基づき、密度差の閾値0.03g/Lを設定した。

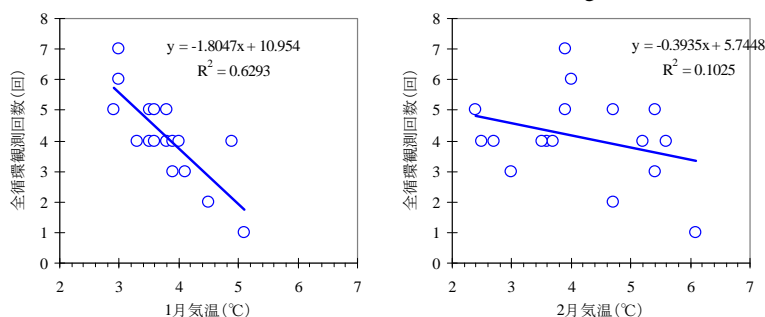


図 4.8 1月・2月気温と全循環観測回数との関係（1994～2010年）

- 注) 1月・2月気温は彦根の月平均気温。
 全循環観測回数は、今津沖中央地点の毎回の水温観測時（月2回）に全循環が生じていると判断される場合（密度差0.03g/L未満）を1回として、各年の回数をカウントした。

²⁾ 琵琶湖ハンドブック, <http://www.pref.shiga.lg.jp/biwako/koai/handbook/files/p136-137.pdf>

次に、冬季全循環の開始時期の遅れが、琵琶湖の水質に及ぼす影響について整理する。図 4.9に今津沖中央地点の鉛直方向の水温、水質（DO、NO₃-N）の5年間の経時変化を示す。4～12月は表層水温が下層水温より高いことから水温躍層が形成され、水の鉛直混合が阻害されることにより、下層の DO 濃度低下および NO₃-N 濃度の上昇、表層の栄養塩濃度低下が生じる。1～3月にかけて、表層の水温が低下して鉛直方向の水温が一樣になり、下層への DO 供給、表層への栄養塩供給が行われる。暖冬のため全循環の開始時期の遅れが生じた 2006～2007 年の冬は、下層の DO 回復が遅れ、3月下旬になって短期間鉛直方向の水温が一樣となった際によく DO が回復した。仮に冬季の気温が更に上昇した場合、冬季に鉛直方向の水温が一樣にならず、下層の DO 濃度が回復しないことが懸念される。

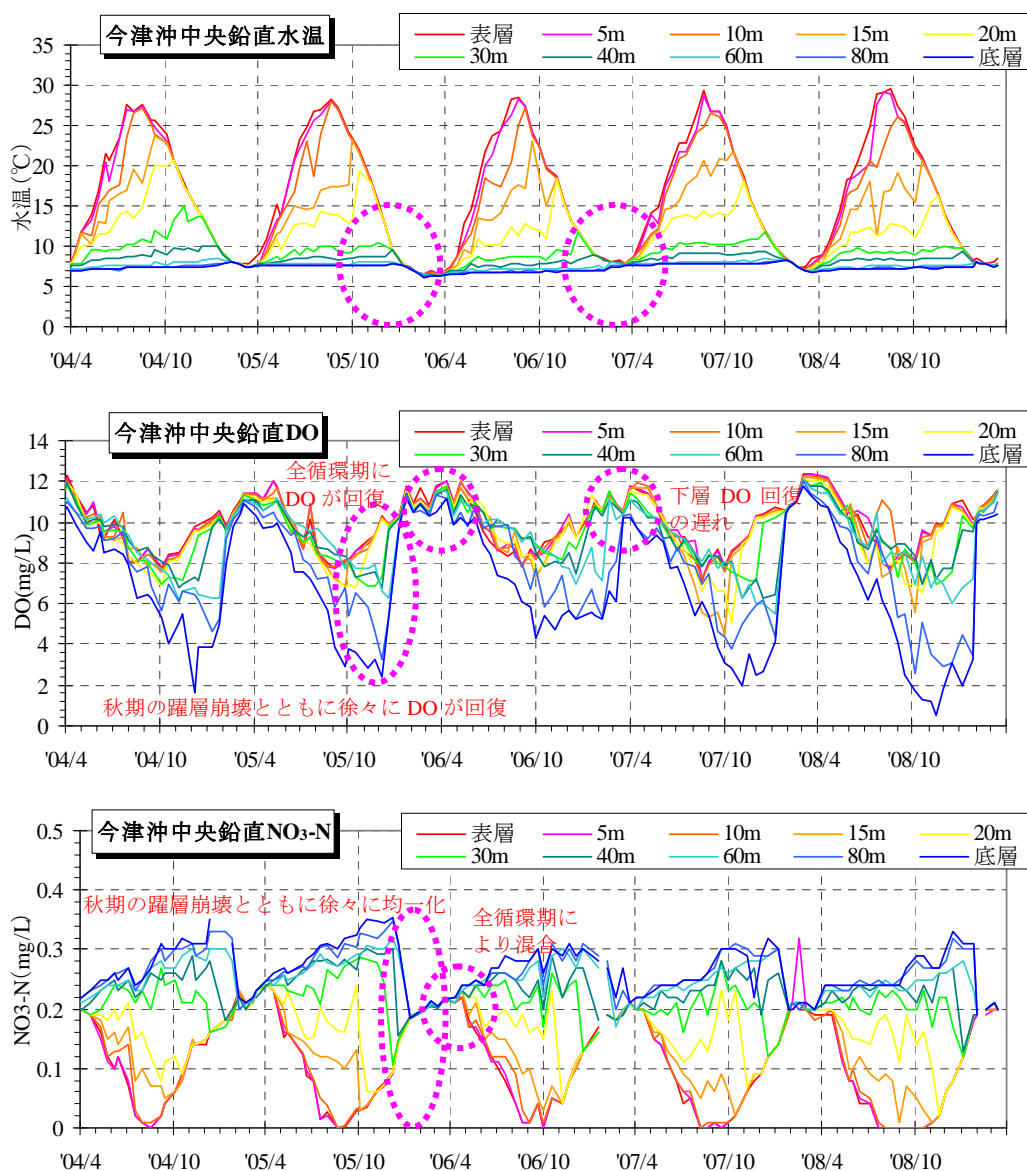


図 4.9 琵琶湖水質の鉛直分布（2004～2008 年度、北湖今津沖中央）

4.2.4 琵琶湖における過去 30 年間の水温変化の状況

図 4.10に、琵琶湖の水温観測地点（46 箇所）における、過去 30 年間の水温変化の状況を整理した。水温上昇の時期については、夏季に有意な水温上昇を示す地点が多い（46 箇所中の 19 箇所）一方で、冬季は大宮川沖（南湖）を除き全地点で有意な水温上昇は見られない。なお、夏季の水温上昇が有意な地点の過去 30 年間の水温変化は 1.2～3.3℃（平均 2.0℃）となっている。

水温上昇に関する湖内の水域分布については、北湖南部（安曇川沖～彦根港沖ライン以南）では全湖的に水温上昇が顕著なのに対し、それ以外の水域では雄琴沖中央を除き沿岸部（北湖北部：長浜沖、知内川沖、早崎港沖、南湖：雄琴沖、唐崎沖、伊佐々川沖、大宮川沖（冬季））でのみ有意な水温上昇が見られた。

また、図 4.11では琵琶湖内の北湖北部、北湖南部、南湖の代表的な地点における夏季・冬季の水温変化の推移を示した。夏季・冬季とも水温が上昇傾向にあり（回帰直線の傾きが正である）、また暑夏・冷夏 / 暖冬・厳冬などの変動傾向も類似していることから、本章の以降の分析については、南比良沖中央地点を代表点として水温変化要因を分析する。なお、南比良沖中央の冬季の水温上昇は有意条件を満たしていない（1980 年代と 2000 年代の水温の有意差を検定するマン=ホイットニーの U 検定で p 値が 0.124（ $p < 0.03$ で有意））が、回帰直線の傾きからは、30 年間で 0.8℃の水温上昇が見られた。

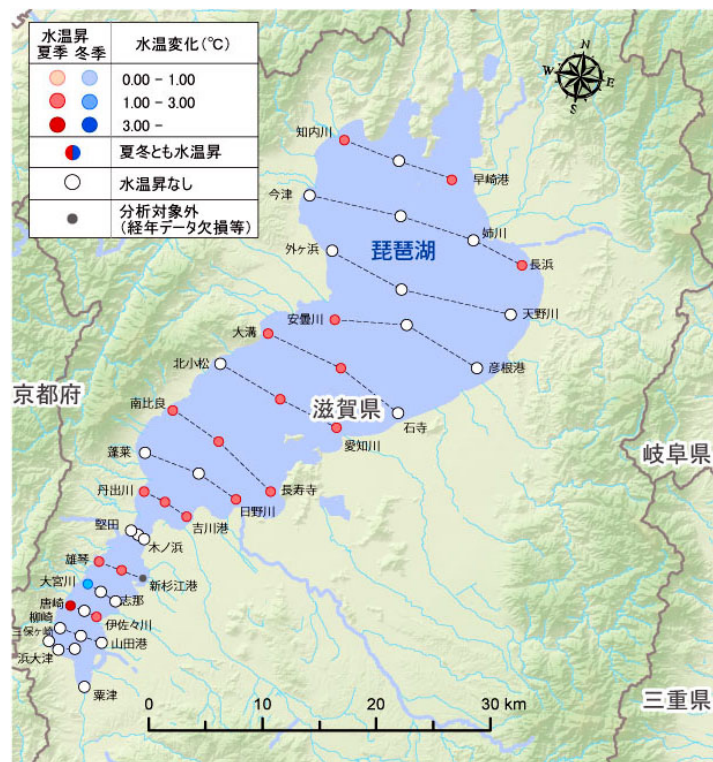


図 4.10 琵琶湖の水温変化の状況

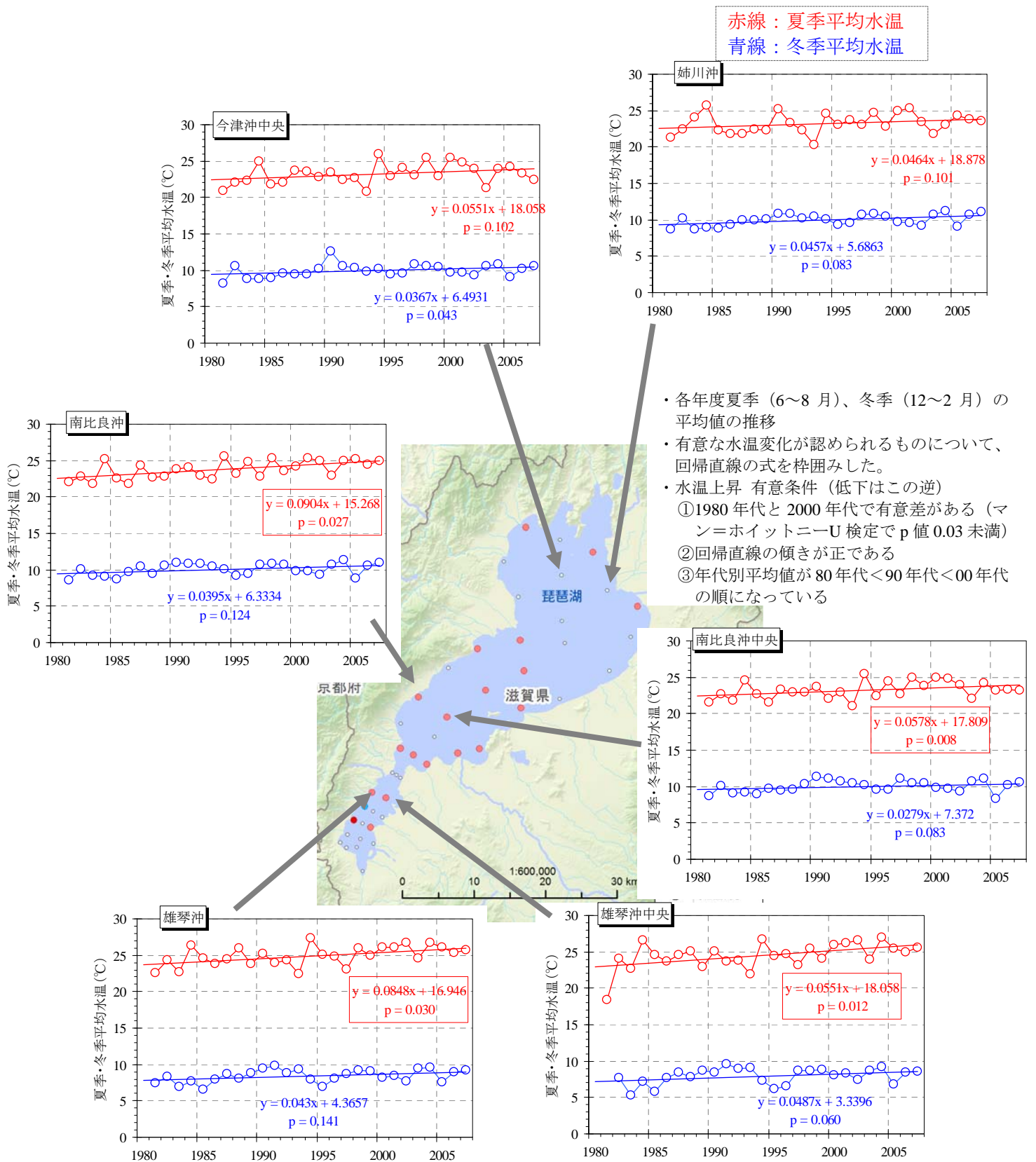


図 4.11 琵琶湖代表地点の過去30年間の夏季・冬季水温変化

4.2.5 琵琶湖における水温上昇の要因分析

(1) 水温変化と気温変化との関連性

図 4.12では、南比良沖中央（北湖南側、1981 年以降）の平均水温と近傍の彦根観測所の平均気温（1940 年以降）とを比較したところ、夏季においては、気温上昇（1.2°C/30 年間）よりも水温上昇（1.7°C/30 年間）のほうが大きいのに対し、冬季では、水温上昇（0.8°C/30 年間）が気温上昇（1.5°C/30 年間）よりも小さいことが明らかになった。

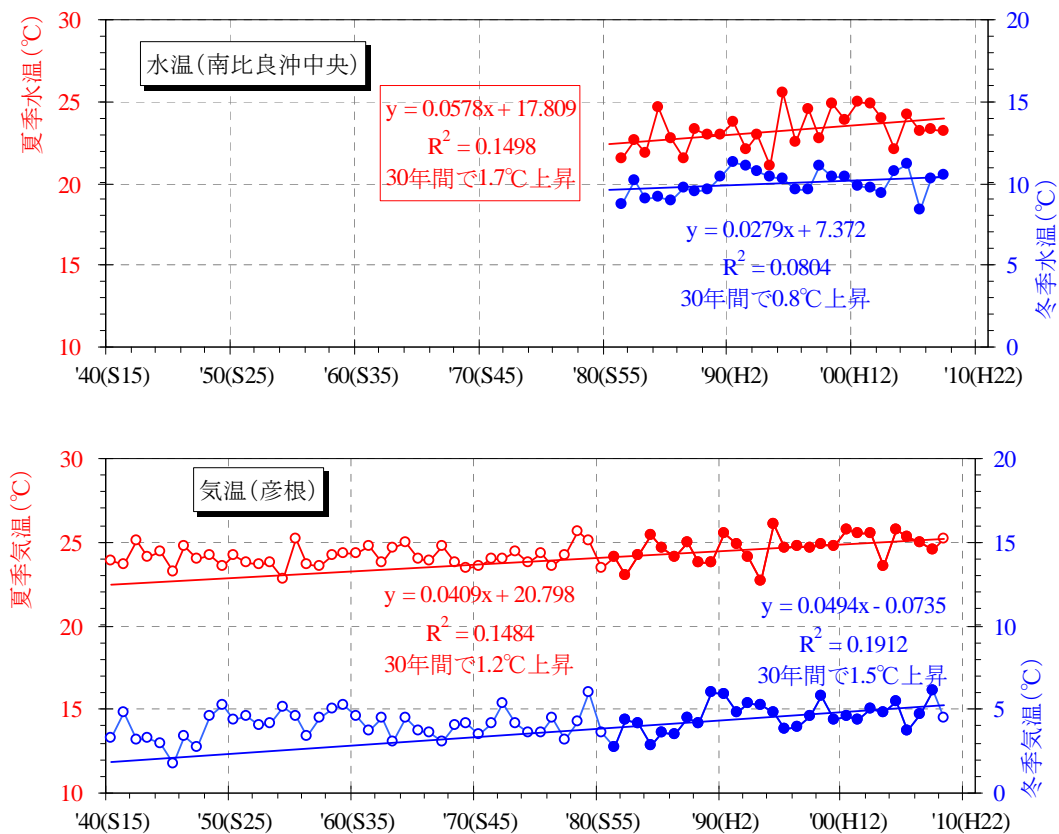


図 4.12 過去の気温変化（彦根）と水温変化（南比良沖中央）との関連性

※有意な水温変化が認められるものについて、回帰直線の式を枠囲みした。

この要因としては、夏季は成層化により湖水の上層部*のみで気温上昇の影響を受けるため、湖水が温まりやすい一方で、冬季は湖水の全循環によって下層の冷水が上層に供給され、水温が一律となった琵琶湖全体として気温上昇の影響を受けるため、水温上昇が緩和される傾向にあることが考えられる。

*最も成層強度が強まる 6～8 月では水温躍層位置が水深 10～20m 程度となる。水深 0～10m の範囲を躍層上層とすると、その容量は約 57 億 m³で琵琶湖容積（275 億 m³）の約 21%となる。

また、図 4.13に夏季・冬季それぞれの平均気温・水温の関係を比較したところ、両者に一定の相関関係が確認された。

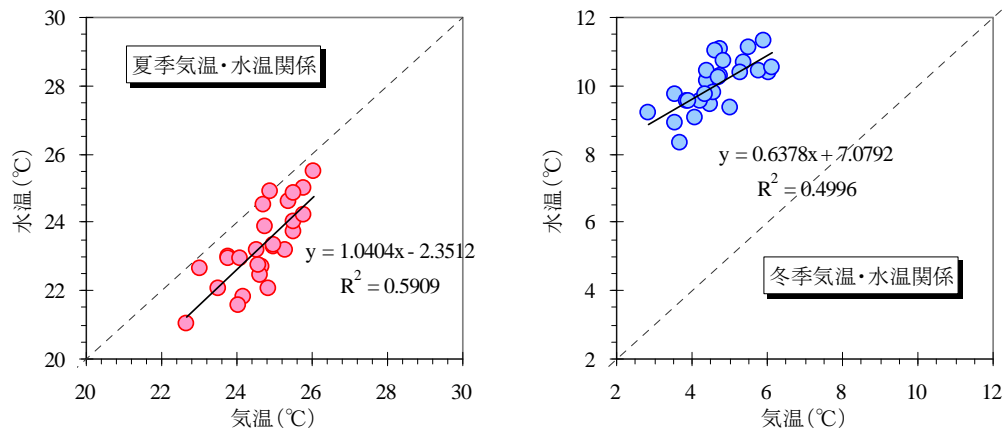


図 4.13 夏季・冬季の平均気温（彦根）と平均水温（南比良沖中央）との関連性（1981～2007 年度）

次に、基準年（1985 年）の気温・水温それぞれに対する各年の気温・水温変化の割合を比較したところ、水温変化と気温変化の高い相関関係を確認することができた（図 4.14）。

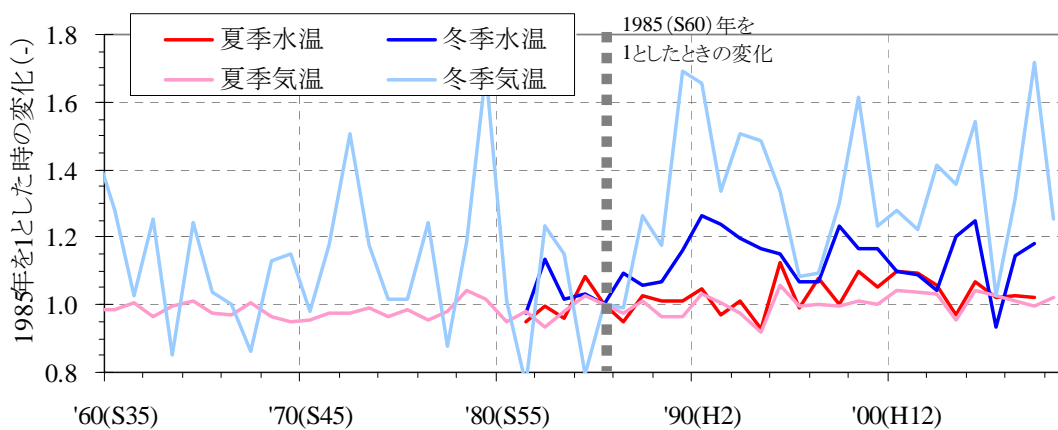


図 4.14 基準年に対する気温（彦根）と水温（南比良沖中央）の変化率の比較

(2) 水温変化とその他の要因との関連性

次に、気温以外の水温上昇の背景要因として的人為的要因との関係を考察するため、琵琶湖の水温変化と流域条件（人口分布、土地利用）との関連性を図 4.15に整理した。琵琶湖周辺では、南湖周辺（大津市・草津市等）および北湖東岸（長浜市・彦根市等）に人口が集中している一方で、水温上昇が人口・市街地密集地（北湖東岸・南湖）のみで卓越しているとは言えないことから、人口分布や土地利用等の人為的要因のみが水温変化に対して支配的な要因であると考えにくい。しかしながら、これまでのような分析では、河川流入や下水処理水放流などの局所的な影響を勘案できないことから、次節以降では、モデル解析により将来の気候変動による水質等への影響の定量的な把握を試みる。

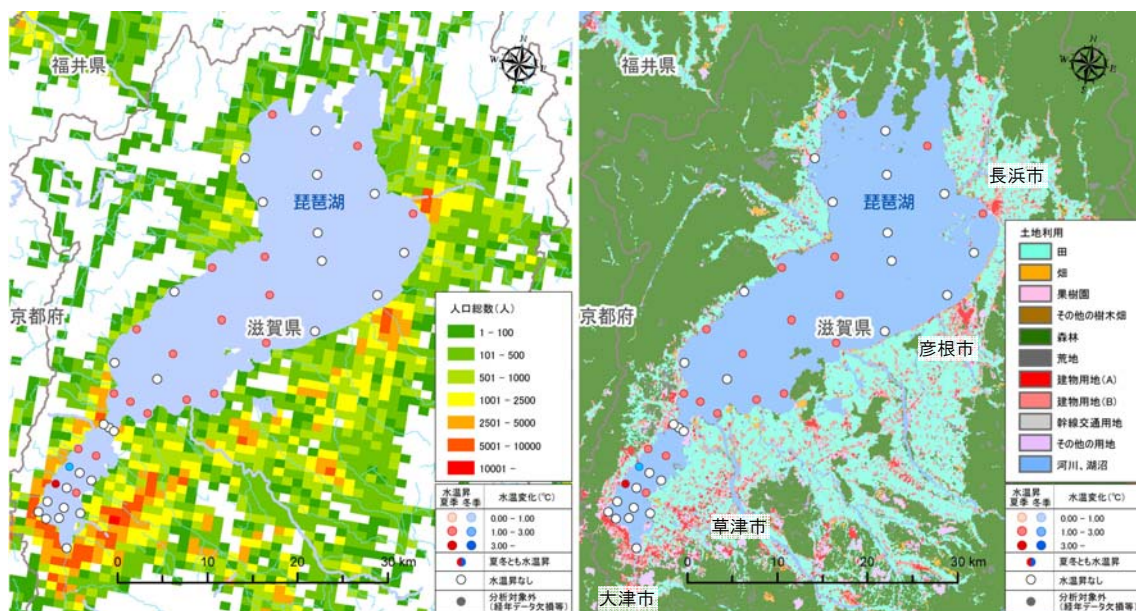


図 4.15 琵琶湖の過去 30 年間の水温変化と流域条件との関連性
(左：人口分布³、右：土地利用⁴)

³ 総務省統計局：平成 17 年国勢調査（世界測地系 1km メッシュ）男女別人口総数及び世帯総数

⁴ 国土交通省：国土数値情報 KS-202-1 1/10 細分区画土地利用（平成 9 年度、100m メッシュ）

4.3 モデル湖沼における将来の水質予測

4.3.1 使用したモデル、計算条件および予測評価項目

シミュレーションには、「第6期琵琶湖に係る湖沼水質保全計画」の将来水質予測に用いられた琵琶湖流域水物質循環モデル⁵（図 4.16および図 4.17）を基礎として、水温等の再現性を高めるため必要な所定の改良を行ったモデルを用いた。

(1) 計算条件

気候モデルとしては、現在使用可能なモデルのうち最新のモデルであるMRI-AGCM3.2S[※]を使用、予測期間は、現在気候10ヵ年（1994～2003年）、近未来気候10ヵ年（2030～2039年）とし、近未来気候条件において現在気候から変化する気象要素としては、気温、日射量、降水量を考慮した。現在気候・近未来気候とも、現在気候の計算開始時の琵琶湖および流入河川の実測値に基づき、計算の初期値を設定しており、一定の助走計算期間を行った上で解析を開始した。なお、陸域モデルでは、気候変動に伴う地表水温および河川水温への影響を解析しており、気候変動に伴う地温・地下水温の変化は今後の課題である。また、湖沼における熱収支・吹送流・湧昇流等を考える上で風の影響は考慮すべき要因の一つであり、近未来気候条件下では台風などの強い風波の襲来等などにより風向風速の条件が変化する可能性があるが、モデルの制約上、本調査では風向風速は現在気候と近未来気候で同等として取り扱う。

※ 気象庁気象研究所（MRI）が開発した全球大気モデル。温室効果ガス排出シナリオは、排出量が中間的な水準に相当するA1Bシナリオに基づいている。本気候モデルの詳細は参考資料編1.気候モデルの概要に示す。なお、本モデルのデータは、文部科学省「21世紀気候変動予測革新プログラム」の「超高解像度大気モデルによる将来の極端現象の変化予測に関する研究」による成果を、気象庁気象研究所から提供を受けて使用した。

(2) モデルの構成と予測評価項目

琵琶湖流域水物質循環モデルは、陸域モデル、湖内流動モデル、湖内水質モデルの3つのモデルから構成される（図 4.17）。本モデルでは、気温、日射量、降水量等を入力条件として、陸域モデルでは流域（河川）の水温・流量・水質を、湖内流動モデルでは湖内の水温・流動を、また湖内水質モデルでは湖内の有機物（溶存態・懸濁態別）、窒素・リン（無機態・有機態別）、溶存酸素、クロロフィルaをそれぞれ解析して時間単位で出力する。解析結果については10か年の経時変化に加えて、統計値（平均およびパーセンタイル値）で評価するものとする。

⁵ 佐藤祐一, 小松英司, 永禮英明, 上原浩, 湯浅岳史, 大久保卓也, 岡本高弘, 金再奎 (2011) 陸域-湖内流動-湖内生態系を結合した琵琶湖流域水物質循環モデルの構築とその検証, 水環境学会誌, 34(9), pp.125-141

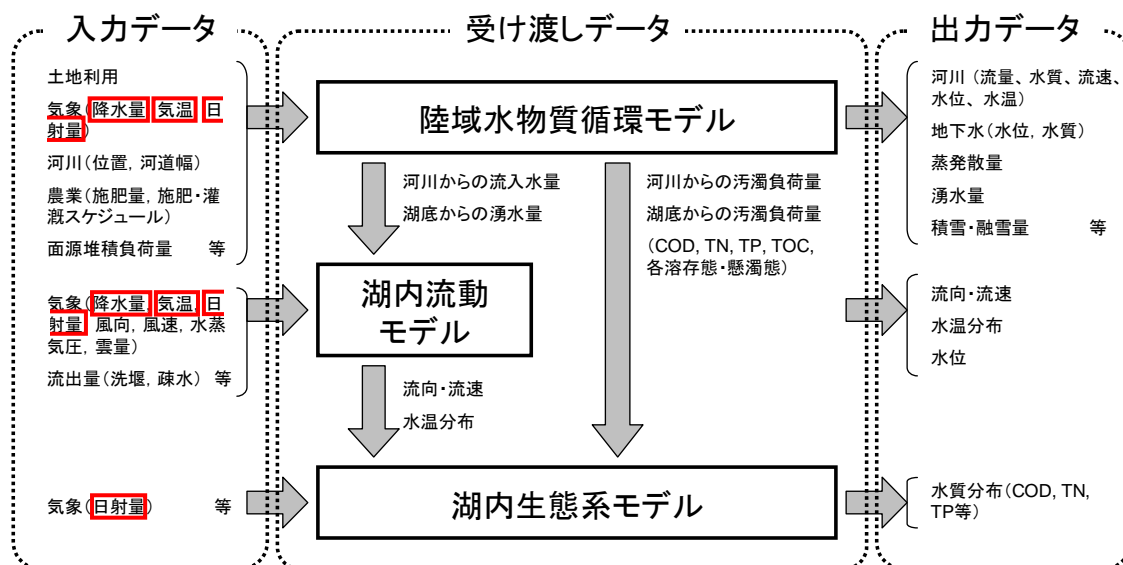


図 4.17 琵琶湖流域水物質循環モデルの計算フロー

※ 赤枠囲みは現在気候と近未来気候で条件を変えている項目。
土地利用や負荷量等の条件は近未来気候条件下でも現在と同一と仮定して解析を実施した。

(3) 入力する気候モデルのデータ

MRI-AGCM3.2S のデータのうちの、現在気候（1979～2003 年）のモデル値と観測値（アメダス）との比較により、気候モデルの近未来気候および将来気候データにバイアス補正を適用した。この結果、観測値とバイアス補正結果後の近未来気候との差/比を表 4.1に示す。補正の結果、予測の入力条件となる近未来の気候データは、平均気温で約 1℃、降水量で約 4%増、日射量が約 1%増という結果となった。

また季節毎の差/比を見ると、気温は 6～7 月と冬季（12 月～2 月）には 1℃以上上昇し、年間の昇温平均値を上回る変化となっている。降水量は、近未来気候で 5 月の降水量が減少するのに対し、6～9 月が増加する傾向が、また日射量については、近未来気候で 5～6 月は増加し、7～9 月は減少する傾向がみられた（図 4.18）。

以降の検討において、これらの近未来の気候データを入力条件として、気候変動が水質等に及ぼす影響のモデル解析を行った。

表 4.1 気候モデル MRI-AGCM3.2S による近未来気候・将来気候のバイアス補正結果

気象要素	アメダス 観測値 1979～2003 年	MRI-AGCM3.2S 近未来気候（補正） 2015～2039 年	
			差/比
気温 [°C] 年平均気温の 25 年平均	14.3	15.4	+1.1
降水量 [mm] 年降水量の 25 年平均	1,780	1,857	×1.04
日射量 [MJ/m ²] 年積算日射量の 25 年平均	4,563	4,623	×1.01

※差/比は観測値と補正後の値を比較した結果を示す

(4) 不確実性の評価のための感度解析

気候モデルや温室効果ガス排出シナリオは不確実性を持つため、気候変動影響評価研究では、複数のシナリオや気候モデルを入力条件とした解析を行い、解析結果の幅を評価することが多いが、本調査では気候モデルデータの入手可能性等を鑑み、A1B シナリオに基づく気候モデル MRI-AGCM3.2S のみを入力条件とした解析を行った。

この複数のシナリオや気候モデルでの解析の代わりに、気候モデルが持つ不確実性の評価のため、気候モデルの誤差を入力条件とした感度解析を行った。具体的には、気候モデル MRI-AGCM3.2S の気温の誤差（95%信頼区間）を算出し、この気温誤差をモデルの入力条件とした解析を行い、水温、水質の予測誤差を評価した。

琵琶湖流域（全メッシュ、1994～2003 年の 10 年間）では、気候モデルの誤差 α は 0.467°C、となったため、近未来気温データにこの誤差を加算および減算した気温データセットを作成し、この誤差を考慮した気温データを用いて水温等解析を実施し、解析結果を一定の幅を持った形で評価することとした。

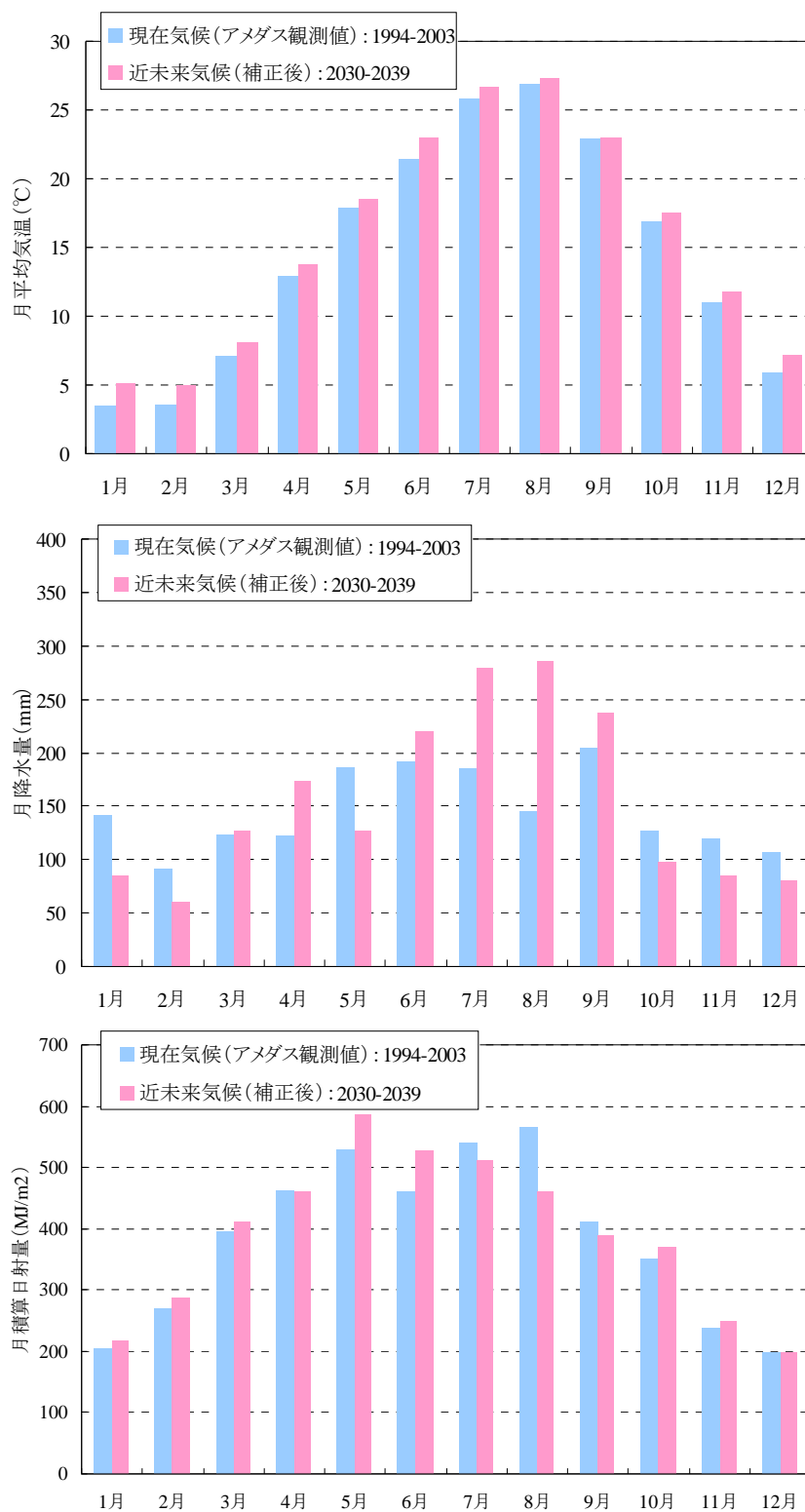


図 4.18 アメダス観測値、近未来気候の月平均値の比較
(上から順に気温、降水量、日射量)

※近未来気候は、気候モデルMRI-AGCM3.2Sのバイアス補正後の値を用いている。

4.3.2 将来予測結果

解析の結果、河川流量・水温・水質等、湖内水温・水質、冬季全循環への気候変動影響として、以下に示す事象が生じる可能性があるという結果が得られた。なお、解析結果の詳細については参考資料編 2.琵琶湖の将来影響解析結果 に詳述するが、本将来影響解析結果は、参考資料編 1. 気候モデルの概要 で詳述する気候モデルの2030～2039年の近未来データを入力条件とし、一定の計算条件下のもと将来影響を解析した予測の一例にすぎないため、将来必ずこのような状況が起こるというものではない点に留意する必要がある。

(1) 湖内水温の変化

10 か年平均表層水温を現在気候と近未来気候で比較すると、今津沖中央地点では15.3℃から16.6℃ [16.3 – 17.0℃] *まで1.3℃ [1.0 – 1.7℃] 上昇し、南比良沖中央地点では15.2℃から16.4℃ [16.1 – 16.8℃] まで1.2℃ [0.9 – 1.6℃] 上昇すると予測された。

※ 気候モデルの誤差を入力条件とした感度解析により、気温が16.3 – 17.0℃の幅を持つ結果となった。この感度解析の結果を本報告では [] と示す。

(2) 全循環の変化

今津沖中央地点では、現在気候の10年間はいずれの年も冬季全循環が生じるが、近未来気候条件下では、2034年～2036年の3年間において、冬季に表層～中層の水温が十分に低下しないことにより、鉛直方向の水温が一様にならない状態が継続するという結果が得られた。

また、表層から各水深まで循環する日数（解析した10年間の平均）を現在気候と近未来気候で比較すると、水深30m以浅では循環日数にほとんど変化が見られない一方で、水深40m以深では循環日数が2～3割程度減少するという結果が得られた。

(3) 湖内水質の変化

今津沖中央地点の湖内水質の解析結果から、近未来気候で鉛直方向の水温が一様にならない期間では、下層DOが徐々に減少し、約1年後には低い水準まで低下した。また下層の無酸素層（嫌気層）の発達に伴い、全リン、特にリン酸態リンの底層濃度が増加する傾向が見られた。

5. 河川に関する検討

5.1 全国の河川における水温変化要因の分析

5.1.1 全国の河川における水温変化状況

第2章 図2-2 に整理したとおり、河川における気候変動影響としては、気温・日射等の変化に基づく水温変化、降雨や蒸発散、積雪・融雪等の変化に伴う流況変化、水温・流況変化や濁質流出に伴う水質変化等が考えられるが、本章では、このうち水温変化に着目して検討を行った。

全国の公共用水域のうち河川の過去約30年間（1981～2007年度）の水温変化傾向を、夏季（6～8月）、冬季（12～2月）それぞれについて整理した結果を図5.1および図5.2に示す。夏季については、水温上昇地点の割合が73%（全3,121地点中2,267地点、うち有意に上昇している地点は655地点、21%）であり、特に大都市圏をはじめとした人口密集地や北陸～山陰の日本海側で顕著な水温上昇が見られた。一方で、北日本（東北～北海道）では水温が低下した地点の割合が多いことが伺える。冬季については北日本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夏季よりも高く77%（全3,121地点中2,399地点、うち有意に上昇している地点は499地点、16%）であった。

また図5.3では、全国の一級水系（109水系）のうちの主要水系（水系内に水温観測地点が5箇所以上ある水系：86水系）について、各水系内における水温上昇・低下地点の割合を示したものである。先ほど考察した地域的な傾向も一部見られるものの、それらは必ずしも支配的ではなく、水温上昇・低下地点の割合は、同一地域でも水系によって異なることから、各水系個別の条件に起因するところが大きいと考えられる。そこで、次節では河川において考えられる水温変化の要因を整理する。

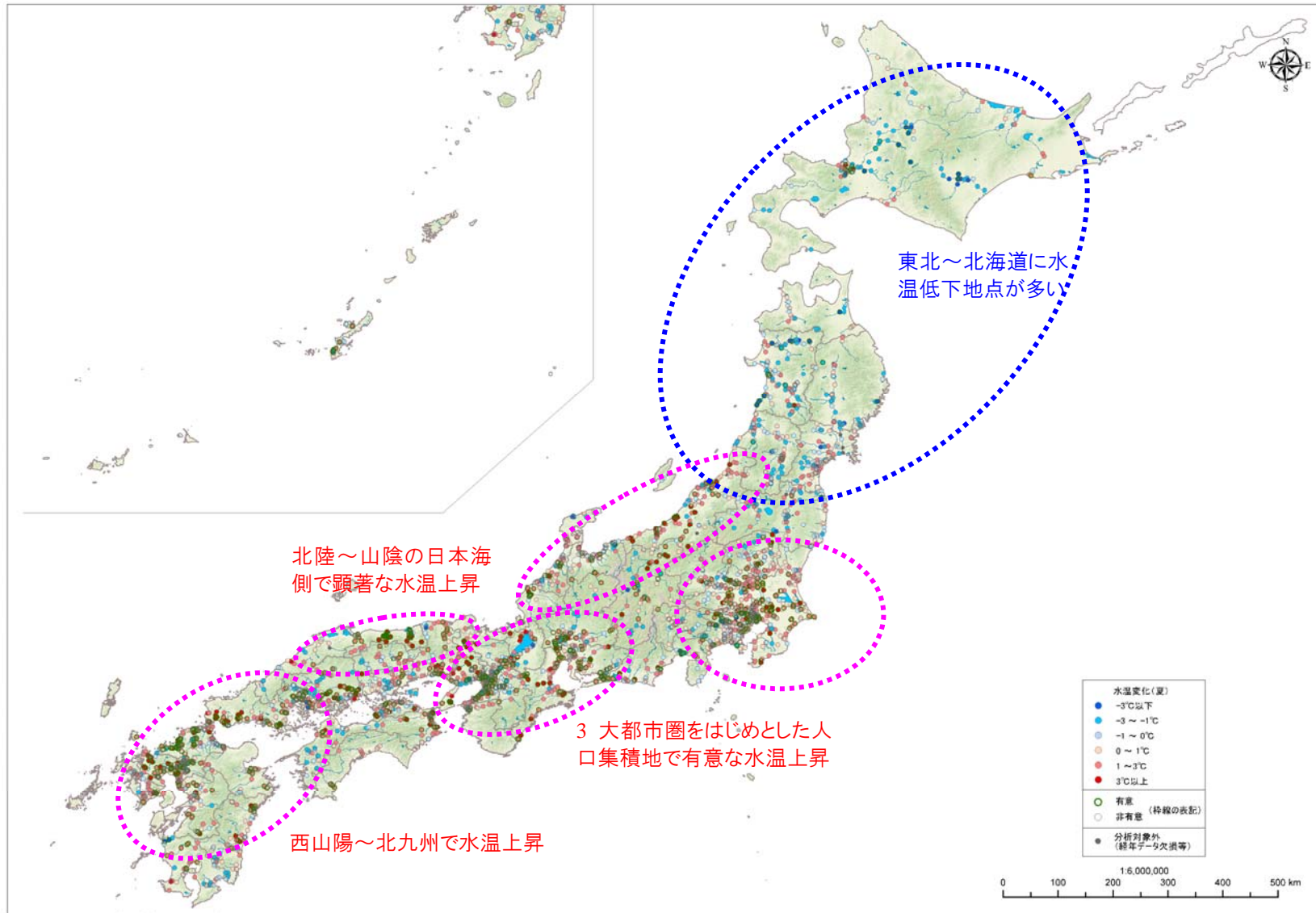


図 5.1 全国河川の過去 30 年間の水温変化状況 (夏季)

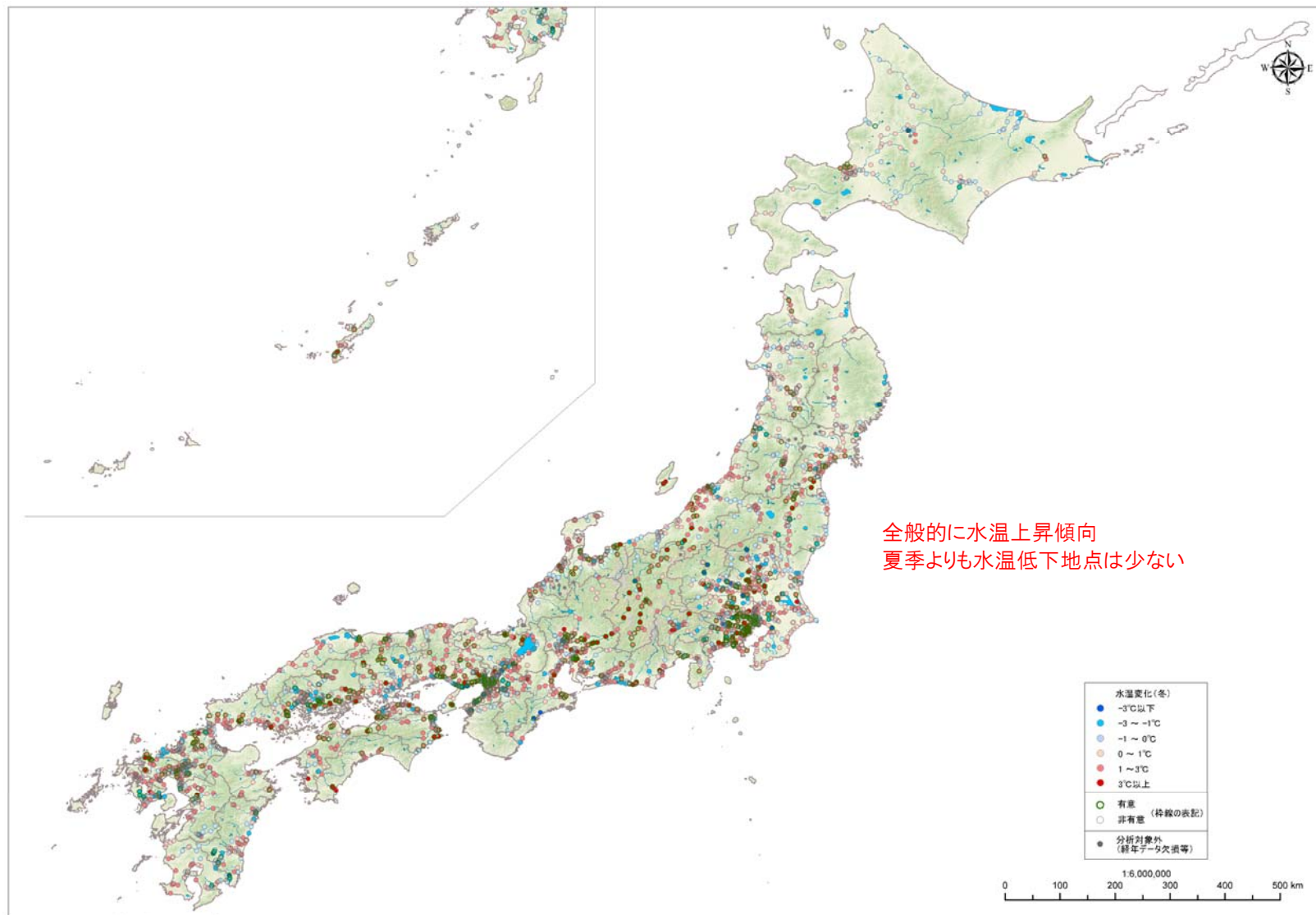


図 5.2 全国河川の過去 30 年間の水温変化状況 (冬季)

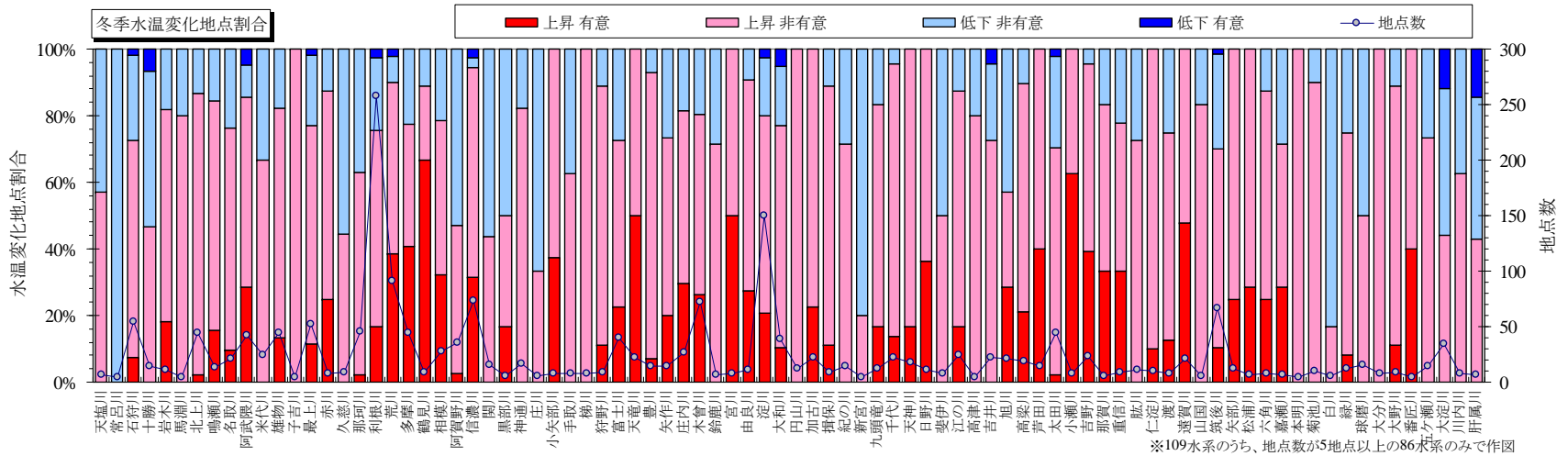
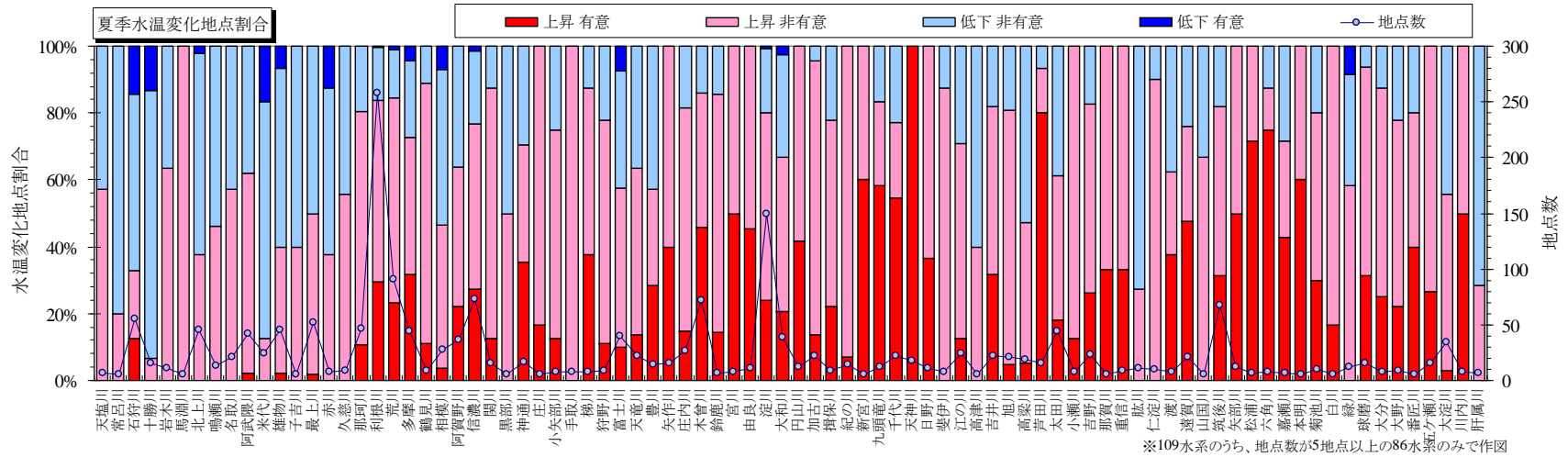


図 5.3 水系毎の過去 30 年間の水温変化状況

5.1.2 河川において考えられる水温変化の要因と分析

一般的な河川では、表 5.1、図 5.4に整理されるように、気温上昇以外にも様々な自然的・人為的要因が水温の変化に関係していると考えられる。

表 5.1 河川における水温変化要因

分類	要因	▲水温上昇	▼水温低下
自然的要因	気温	上昇	低下
	日射量	増加	減少
	日照時間	増加	減少
	河川流量 (※1)	減少	増加
	積雪量・融雪量	減少	増加
	無降雨・小雨期間	増加	減少
	水生植物活性	低い	高い
	河畔林 (※2)	少ない	多い
	水深	浅い	深い
	潤辺からの熱収支量 (※3)	多い	少ない
	流下時間 (※4)	長い	短い
温泉湧出量	増加	減少	
人為的要因	用水取水量	増加	減少
	ダム放流	温水放流	冷水放流
	下水処理水放流量	多い	少ない
	工場排水	多い	少ない
	水力発電用水	温水放流	冷水放流
	水田排水	多い	少ない
	生活排水 (※5)	増加	減少

※1：降雨量の増減等によって変化する。

※2：上流域では河畔林による日射遮蔽効果が大きく影響する。下流域では水面に対する河畔林影響面積が小さいため、影響は相対的に小さくなる。

※3：地温や湧水量等によって変化する。

※4：例えば捷水路（ショートカット）の整備により流下時間は短くなる。

※5：人口増加により下水道未処理人口が増加すると生活排水量が増加する。

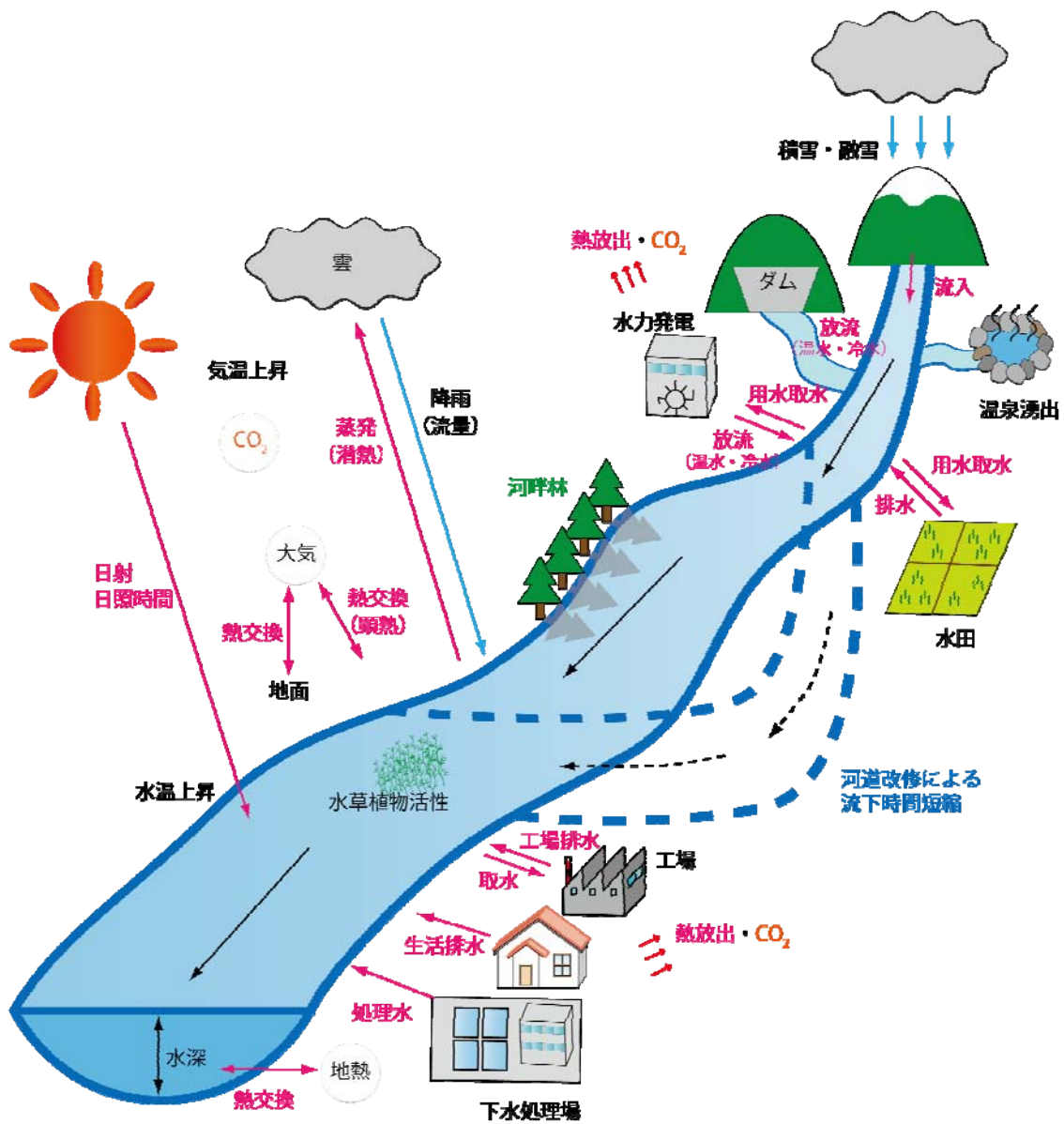


図 5.4 河川・流域における熱交換メカニズム

気温上昇について、過去 30 年間の夏季及び冬季の地域毎の気温変化傾向を図 5.5 に整理した。全国の気温は 30 年間で概ね 1~2℃程度上昇しており、これが少なからず水温上昇の一因となっていることが考えられる。一方で、気温上昇には地域的なばらつきがあり、例えば北海道・東北は他の地方と比較すると気温上昇程度が小さいことから、気温上昇以外の要因が大きく作用した結果として、水温低下地点が多く観測されたと考えられる。

次に人口密度と過去 30 年間の水温変化との関係を見ると、水温観測地点近傍の人口密度が概ね 70 人/ha を超えると水温が上昇する傾向がみられた (図 5.6、夏季は概ね 70 人/ha 未満の平均水温上昇が 0.8℃であるのに対して概ね 70 人/ha 以上の平均水温上昇が 1.3℃、冬季は概ね 70 人/ha 未満の平均水温上昇が 0.9℃であるのに対して概ね 70 人/ha 以上の平均水温上昇が 1.6℃)。このことから、人口集積地ではヒートアイランド効果、人工排熱影響等により、水温が上昇していると考えられる。

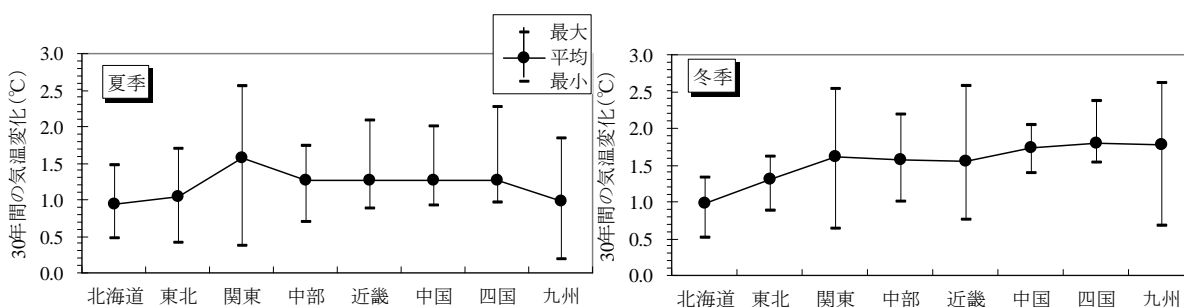


図 5.5 過去 30 年間の気温変化傾向 (地方別)

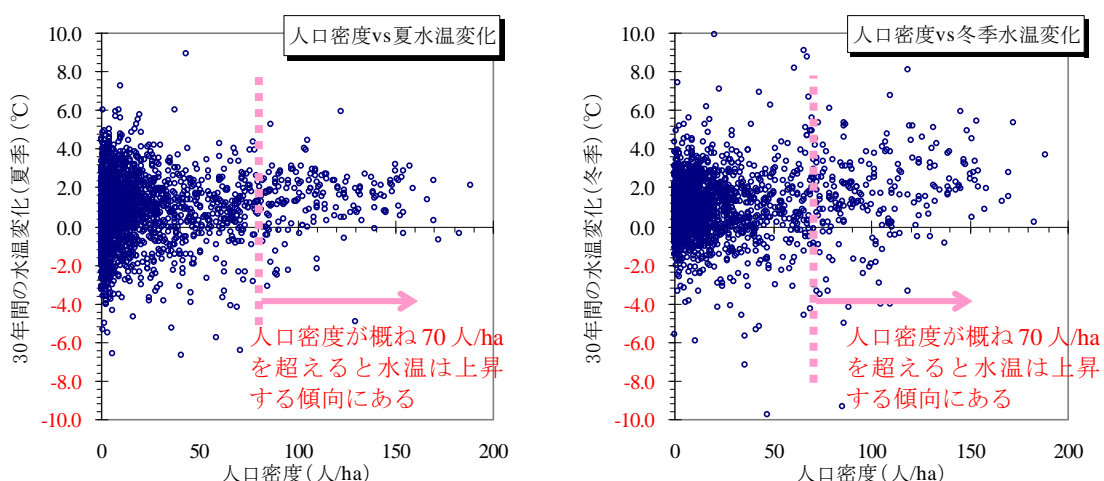


図 5.6 過去 30 年間の水温変化と人口密度との関係

5.2 モデル河川における水温変化要因の分析

5.2.1 モデル河川の選定

河川における水温変化状況および水温変化要因をより詳細に分析し、さらに、モデルを用いて気候変動による将来影響を検討するため、モデル河川として雄物川を選定し、以降の検討を行うこととした。

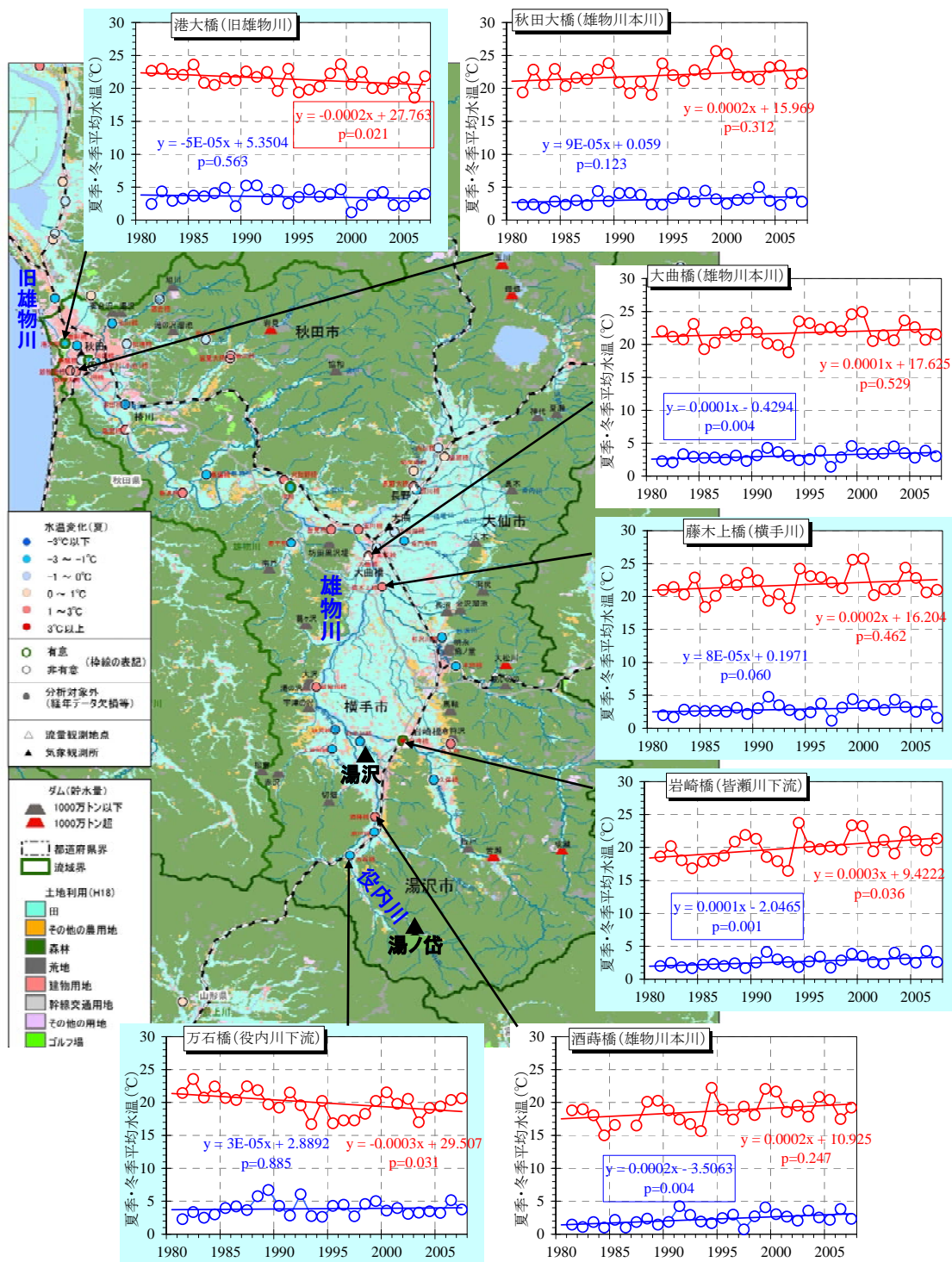
雄物川の選定理由として、過去に有意な水温上昇傾向が確認されていること、人為影響が比較的少ないこと、分析・評価のためのデータ（水量・水温・水質・生物・人為影響等）が存在すること、水温上昇に敏感に反応し、気候変動影響を受け易い冷水性魚類^{*}の生息が確認されていることなどが挙げられる。

※「冷水性魚類」は、「河川水辺の国勢調査結果を利用した魚類および底生動物の水温・水質への依存性評価」(天野他)の中で、平均年最高水温が 26℃以上になる地点で確認されず、平均水温 15℃以下の地点で確認された以下の種とした。これらの種は、水温が低い地点に限定的に生息していることから、こうした条件を満たす国土面積は水温が上昇すると減少することになるため、気候変動の影響を受けやすいといえる。

冷水性魚類：アカザ、アマゴ、カジカ、ニッコウイワナ、サクラマス、ヤマメ、ニジマス

5.2.2 雄物川における水温変化の状況

雄物川において、過去 30 年間の水温変化傾向を分析したところ（図 5.7）、冬季の水温はほぼ一様に漸増していることがわかった。夏季については、本川の各地点ではほぼ一様に水温が上昇している一方で、支川では観測点により傾向が異なり、支川の役内川や旧雄物川では水温低下傾向が見られることがわかった。



○: 夏季平均水温(℃)
○: 冬季平均水温(℃)

- ・各年度夏季(6~8月)、冬季(12~2月)の平均値の推移
- ・有意な水温変化が認められるものについて、回帰直線の式をハコ囲みした。
- ・水温上昇 有意条件(低下はこの逆)
- ① 1980年代と2000年代で有意差がある(マン=ホイットニー-U検定でp値0.03未満)
- ② 回帰直線の傾きが正である
- ③ 年代別平均値が80年代<90年代<00年代の順になっている

図 5.7 雄物川水温経年変化(代表地点の水温経年変化(1981~2007年度))

図 5.8で、本川の代表的な観測点である大曲橋地点及び支川役内川の水温と、近傍の気象観測所における気温の関係を、過去 30 年間（1981～2007 年度）にわたって整理したところ、気温・水温の変化傾向は類似していることがわかる。最上流部の支川である役内川では夏季の水温が低下傾向にあるが、これは、近隣の湯ノ岱地点の気温が横ばいであることがその一因として考えられる。

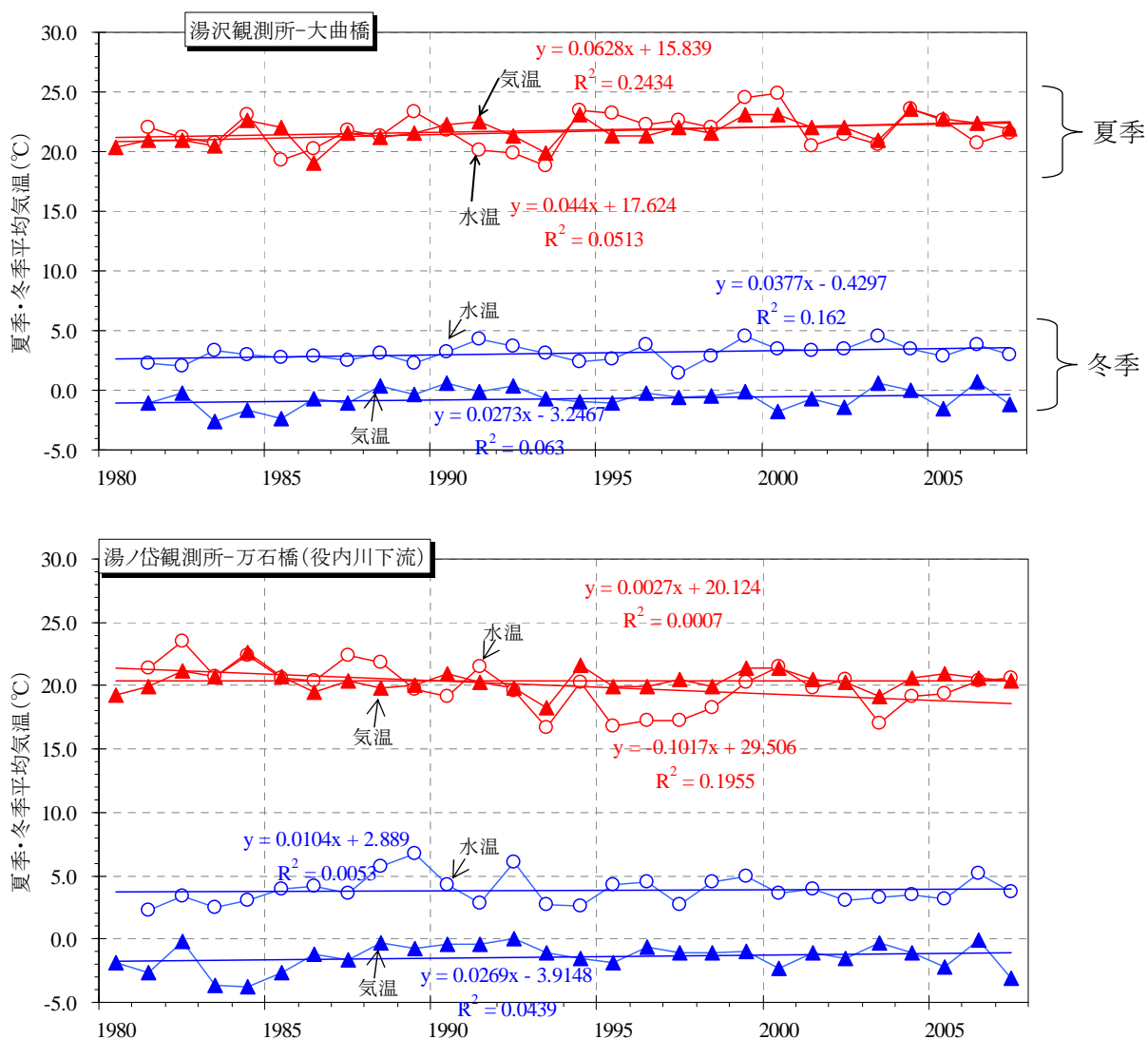


図 5.8 雄物川における過去 30 年間の気温と水温の変化状況

5.3 モデル河川における将来水温等の予測

5.3.1 使用したモデル、計算条件および予測評価項目

(1) 雄物川における将来水温等の予測

モデル河川雄物川において、琵琶湖流域の将来予測に用いた分布型流出・水温解析モデルを適用し、将来の水温変化を予測した。予測期間は現在気候が 1994～2003 年の 10 か年、近未来気候が 2030～2039 年の 10 か年とした。現在気候・近未来気候とも、現在気候の計算開始時の実測値に基づき計算の初期値を設定しており、一定の助走計算を行った上で解析を開始した。解析・評価項目は河川における水温、流量の変化とし、現在気候、近未来気候それぞれ 10 か年の経時変化、および統計値（平均値、パーセンタイル値等）で評価した。

(2) 入力する気候モデルのデータ

気候モデルは琵琶湖と同様に MRI-AGCM3.2S にバイアス補正を行ったデータを使用し、近未来気候において現在気候から変化する気象要素は気温、日射量、降水量とした。バイアス補正の結果、予測の入力条件となる近未来気候の気候データは、平均気温で約 1.1℃増加、降水量で約 10%減少、日射量で約 6%減少という結果となった（表 5.2）。

また、アメダス観測値とバイアス補正後の近未来気候値を月別に比較すると、気温は 1～2 月は 1℃以上上昇しており、年間の昇温平均値を上回る変化となった。降水量は 7 月の降水量が近未来気候で減少するのに対し、春季や 8 月は増加する傾向が、日射量は 8 月や 10 月で減少する傾向がみられた（図 5.9）。

以降の検討において、これらの近未来の気候データを入力条件として、気候変動が水温等に及ぼす影響のモデル解析を行った。

表 5.2 気候モデル MRI-AGCM3.2S による近未来気候・将来気候のバイアス補正結果

気象要素	アメダス 観測値 1979～2003 年	MRI-AGCM3.2S 近未来気候（補正） 2015～2039 年	
			差/比
気温 [℃] 年平均気温の 25 年平均	9.7	10.8	差 +1.1
降水量 [mm] 年降水量の 25 年平均	1,957	1,771	比 ×0.90
日射量 [MJ/m ²] 年積算日射量の 25 年平均	4,345	4,068	比 ×0.94

※差/比は観測値と補正後の値を比較した結果を示す

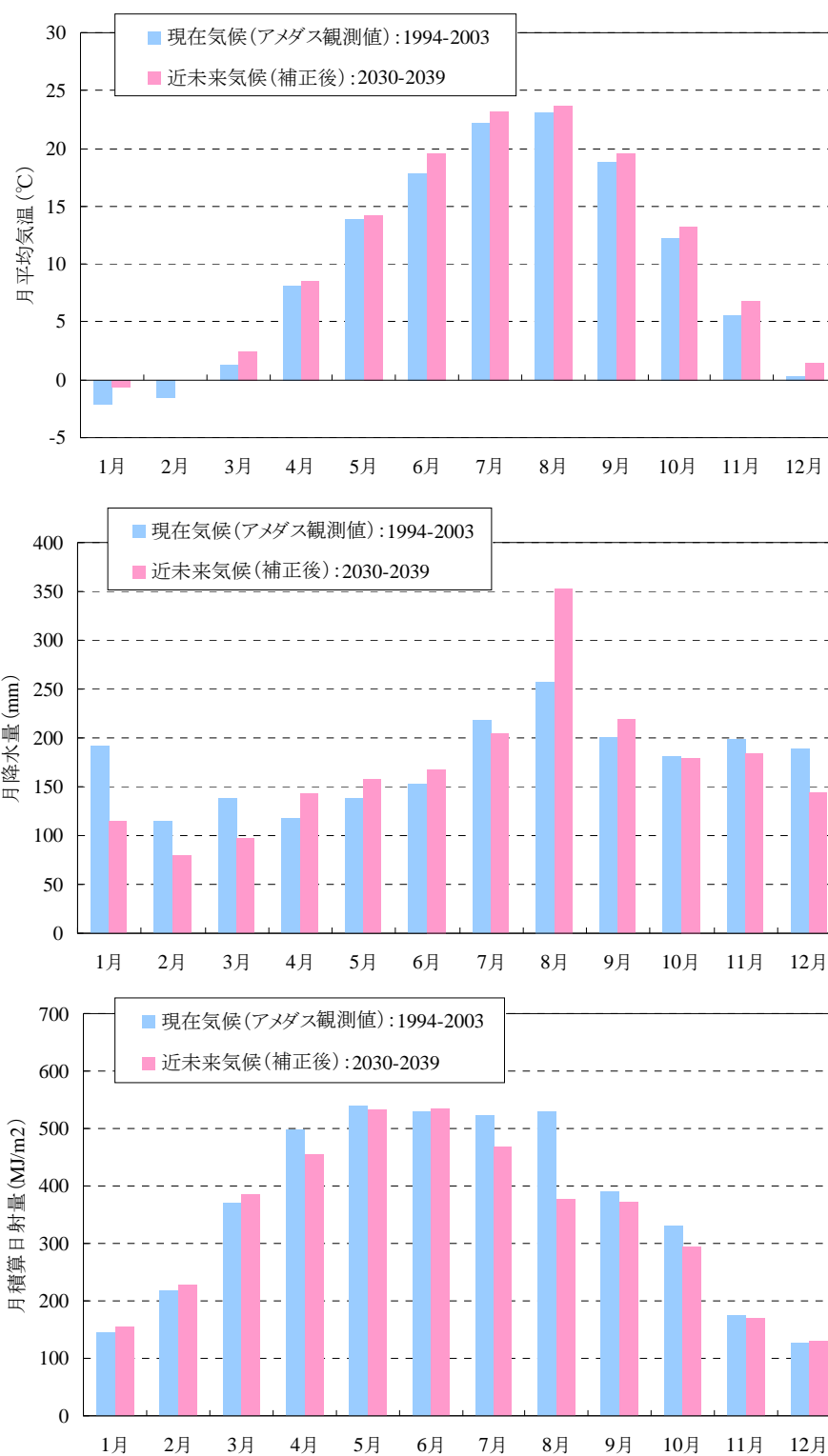


図 5.9 アメダス観測値、近未来気候の月平均値の比較
(上から順に気温、降水量、日射量)

※近未来気候は、気候モデルMRI-AGCM3.2Sのバイアス補正後の値を用いている。

(3) 不確実性の評価のための感度解析

琵琶湖における検討（第4章参照）と同様、気候モデルが持つ不確実性の評価のため、気候モデルの誤差を入力条件とした感度解析を行った。雄物川（全メッシュ、1994～2003年の10年間）では、気候モデルの誤差 α は 0.513°C となったため、近未来気温データにこの誤差を加算および減算した気温データセットを作成し、この誤差を考慮した気温データを用いて水温等の解析を実施し、解析結果を一定の幅を持った形で評価した。

5.3.2 将来予測結果

図5.10は、大曲地点における河川水温の解析結果（現在気候（1994-2003年の10か年平均）と近未来気候（2030-2039年の10か年平均））を比較したものである。1～3月、5～7月は近未来気候の水温が高くなる傾向が見られた。近未来気候における8月の水温が現在気候と比較して低いのは、この時期に近未来の降水量が大きく、日射量が小さいことによると考えられる。

10か年の解析の結果、通年の年平均値で見ると、現在気候の 11.9°C に対して近未来気候 12.4°C [$12.1 - 12.7^{\circ}\text{C}$] であり、 0.5°C [$0.2 - 0.8^{\circ}\text{C}$] 上昇するとの予測結果が得られた（図5.11）。また季節毎の変化については、冬季（12～2月）の水温上昇は 0.8°C [$0.6 - 1.1^{\circ}\text{C}$]、夏季（6～8月）の水温上昇は 0.4°C [$0.0 - 0.7^{\circ}\text{C}$] と、冬季に影響が大きくなるという予測結果となった。

なお、雄物川においては、将来の水質変化は予測していないが、水温変化が 1°C 未満と小さいため、水温変化に由来する内部生産の増加、水質変化は小さいと考えられる。

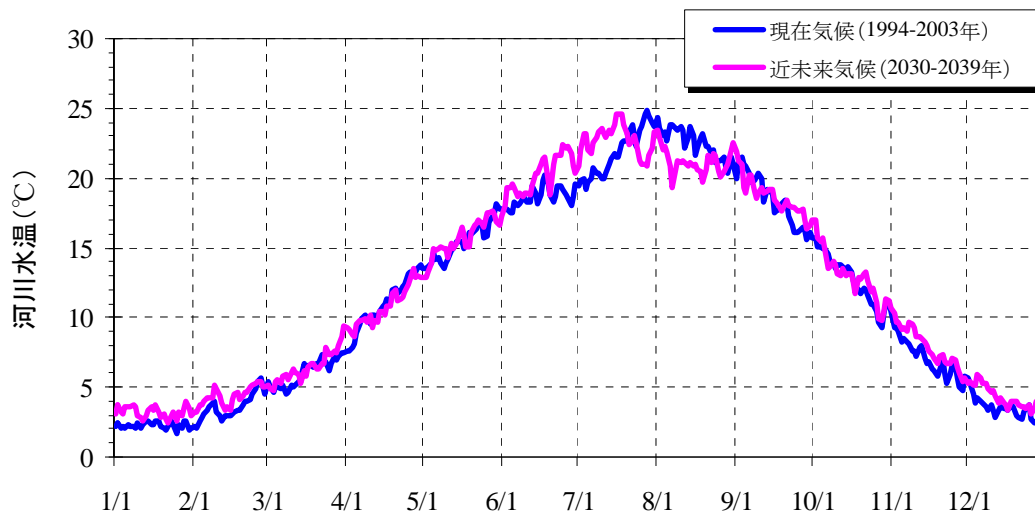


図 5.10 現在気候（1994-2003年）と近未来気候（2030-2039年）における河川水温（10年間平均値）の変化

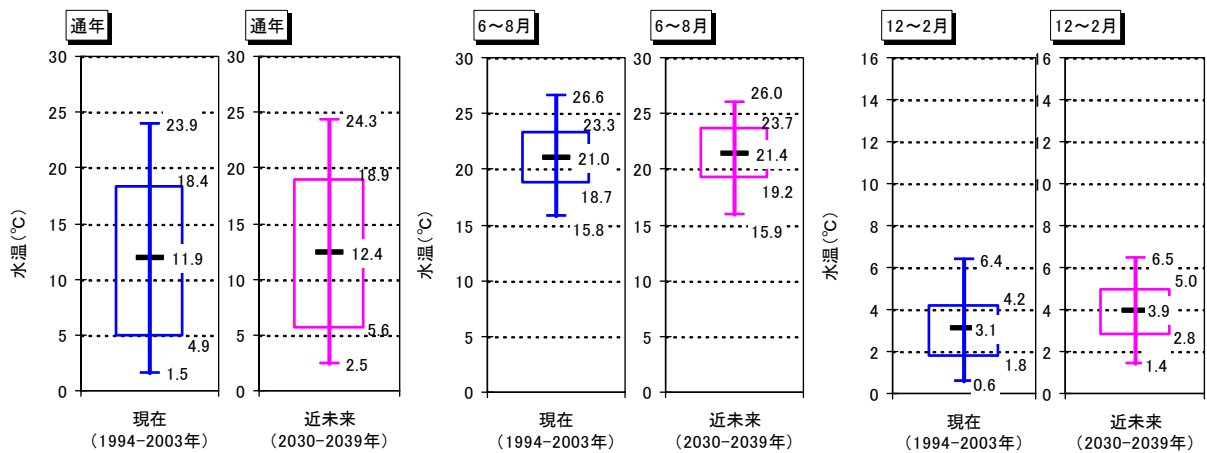


図 5.11 現在気候と近未来気候における河川水温平均値等の変化

6. 適応策の検討に向けて

前章までの検討では、現在までに顕在化した、もしくは将来懸念される気候変動による水質等への影響を整理しつつ、一部のモデル水域において将来の水質等の予測を行った。全国の各水域にて将来生じうる影響については、各水域の特性を踏まえた個別の検討が必要となることから、今後も公共用水域の常時監視や水生生態系のモニタリングを通じ、将来生じうる影響の兆候を的確に把握することがまずは重要である。本調査では全国の公共用水域の将来影響の予測には至っていないが、程度の大小こそあれ、将来の気候変動の影響により水温や水質等に一定の影響が生じることが懸念されることから、本章では、既存の知見や検討会での議論を踏まえ、今後、個別の水域において気候変動による水質等への影響に対する適応策の検討を行う際に勘案すべき事項を記載した。

適応策は大きく2種類に分けて考えられる。一つ目は気候変動による水温上昇や水質汚濁の進行そのものを抑制するための適応策であり、例えば、水温上昇抑制のため的人為的活動からの排熱制御などが考えられる。

他方、生じてしまった水温上昇や水質汚濁による影響を軽減するという視点からも、様々な適応策が考えられる。例えば湖沼下層の貧酸素化に対して、下層 DO の環境基準を導入するとともに循環・流動化対策を実施することや、富栄養化に対する負荷量削減対策の強化、熱帯性侵略的外来種の侵入に対するモニタリング強化による早期発見と侵入初期の駆除実施等が挙げられる。

上記のような適応策を具体的に検討するにあたっては、個々の水域への将来影響をより詳細に予測した上で、対策費用等の実現可能性を勘案し、更に多様な価値観や人間生活との関わりなどを踏まえた総合的な合意形成を経て、効果的・効率的な適応策を選択する必要がある。

また今後は、水域の水温・水質・水生生態系のモニタリングを継続・強化し、生じうる影響に関する兆候を的確に把握するとともに、将来影響予測に関する調査研究を推進し、予測結果を適応策に関する技術開発や国民に対する意識啓発に活用することも極めて重要である。

7. あとがき

本調査は、気候変動が公共用水域の水質等に与える影響を適切に把握するとともに、将来の気候変動に伴う変化を予測し、想定される影響に対する適応策の検討に向けた参考とすることを目的として、「気候変動による水質等への影響解明調査検討会（座長：岡田光正放送大学教授）」の助言を得て、平成21年度より実施してきたものである。本報告でも述べたように、将来の水質等の変化については、気温上昇に伴う水温上昇に起因する水質悪化等の影響のみならず、降水頻度・降雨強度の変化に伴う河川の水量減少、水生生態系の変化、更には人為的なインパクト等様々な要因が複合的に関連することから、これら全てを網羅的かつ定量的に予測することは困難である。そこで本調査では、主に気候変動による水温上昇や水質の悪化に焦点を当てて検討を進めたところである。

しかしながら、各水域の水質や水生生態系は、気候変動のような地球規模の要因もさることながら、各水域の個別の条件に強く依存することから、我が国の水環境全体に生じうる将来影響を全国一律に予測することは困難である。そこで本調査では、過去の公共用水域の水温上昇傾向等を整理するとともに、モデルとして抽出した代表水域における将来影響予測を行い、これらの結果を報告書としてとりまとめた。なお、水生生態系への将来影響予測については、影響メカニズムの複雑さや予測の不確実性等を勘案した結果、本報告では既存の知見の整理にとどめている。

今後、政府全体として、適応策を重点的に講ずべき分野・課題を抽出し、最新の知見に基づく予測・評価により関係府省において適応策を立案し、政府全体の適応計画を作成するという取組が進められる予定である。水環境分野について、環境省では本調査の結果将来の気候変動影響に対して脆弱性が高いと考えられる湖沼環境に特化した調査検討を、次年度以降実施する予定である。また、引き続き全国の水質の常時監視等により水環境の変化を注視しつつ、将来影響予測に関する調査研究を継続し、関係省庁や自治体とも連携の上、環境省としても、適応策としての様々な施策に関する検討を進める必要があると考えている。

本報告を、各自治体の担当者や各研究機関における将来の気候変動による水環境への影響の検討等の一助としていただくとともに、本検討の内容を一般国民の皆様にご承知いただくことにより、将来の気候変動条件下においても、現在我々が享受している良好な水環境を維持することの重要性、またそのために現在の我々の身近な水環境の保全に対する関心が高まることを期待する。

委員名簿

天野 邦彦	前 国土技術政策総合研究所 環境研究部 河川環境研究室長 (平成21年度～平成23年度)
岩見 洋一	国土技術政策総合研究所 環境研究部 河川環境研究室長 (平成24年度)
岡田 光正	放送大学 教授
風間 聡	東北大学大学院工学研究科 土木工学専攻教授
木幡 邦男	埼玉県環境科学国際センター 研究所長兼研究推進室長
高橋 基之	埼玉県環境科学国際センター 水環境担当 担当部長
西野 麻知子	びわこ成蹊スポーツ大学 教授
福士 謙介	東京大学 サステイナビリティ学連携研究機構 准教授
古米 弘明	東京大学大学院工学系研究科附属水環境制御研究センター教授

(敬称略 50音順、所属肩書等は平成25年3月現在)

検討経緯

<平成 21 年度>

第 1 回検討会 平成 22 年 2 月 3 日 (水)

- (1) 本検討会の目的とスケジュール
- (2) 気候変動が水質等に及ぼす影響についての既往知見の整理
- (3) 検討の視点
- (4) 気候変動が水質等に及ぼす影響についての既存情報分析
- (5) 気候変動の水質・生態系影響の予測手法

第 2 回検討会 平成 22 年 3 月 19 日 (金)

- (1) 第 1 回検討会の主な指摘事項と対応案
- (2) 気候変動が水質等に及ぼす影響の基本的考え方
- (3) 気候変動の水質等への影響の予測手法と今後の検討の進め方
- (4) 気候変動が水質等に及ぼす影響についての既存情報分析

<平成 22 年度>

第 3 回検討会 平成 23 年 2 月 21 日 (月)

- (1) 本検討会の目的とスケジュール
- (2) 第 2 回検討会の主な指摘事項と対応案
- (3) 既存情報分析 (マクロスケール分析) の深度化
- (4) 水質等への定量的影響予測
- (5) 生物等への定性的影響検討
- (6) 適応策の評価

第 4 回検討会 平成 23 年 3 月 22 日 (火)

- (1) 第 3 回検討会の主な指摘事項と対応案
- (2) 既存情報分析 (マクロスケール分析) の深度化
- (3) 琵琶湖における水温・水質等の定量的影響予測
- (4) 生物等への定性的影響検討
- (5) 適応策の考え方
- (6) 今後のスケジュール

<平成 23 年度>

第 5 回検討会 平成 23 年 9 月 28 日 (水)

- (1) 検討会の目的と概要
- (2) 第 4 回検討会の主な指摘事項と対応案
- (3) 気候モデルの選定とバイアス補正
- (4) 湖沼における気候変動影響検討
- (5) 河川における気候変動影響検討
- (6) 海域における気候変動影響検討
- (7) 一般的な生物影響評価
- (8) 適応策の抽出

第6回検討会 平成23年12月28日(水)

- (1) 検討会の目的と概要
- (2) 第5回検討会の主な指摘事項と対応案
- (3) 気候モデルの選定とバイアス補正
- (4) 湖沼における気候変動影響検討
- (5) 河川における気候変動影響検討
- (6) 海域における気候変動影響検討
- (7) 適応策の抽出

第7回検討会 平成23年3月26日(月)

- (1) 第6回検討会の主な指摘事項と対応案
- (2) 気候モデルの選定とバイアス補正
- (3) 湖沼における気候変動影響検討
- (4) 河川における気候変動影響検討
- (5) 海域における気候変動影響検討
- (6) 適応策の抽出

<平成24年度>

第8回検討会 平成24年10月31日(水)

- (1) 検討会の目的と概要
- (2) 気候モデルの選定とバイアス補正
- (3) 湖沼における気候変動影響検討
- (4) 河川における気候変動影響検討
- (5) 海域における気候変動影響検討
- (6) 適応策オプションの整理
- (7) 公表資料とりまとめ

第9回検討会 平成24年12月27日(木)

- (1) 今後の進め方
- (2) 気候モデルの選定とバイアス補正
- (3) 湖沼における気候変動影響検討
- (4) 河川における気候変動影響検討
- (5) 海域における気候変動影響検討
- (6) 適応策オプションの整理
- (7) 公表資料とりまとめ

第10回検討会 平成25年3月15日(金)

- (1) 検討会の目的と概要
- (2) 湖沼における気候変動影響検討
- (3) 河川における気候変動影響検討
- (4) 海域における気候変動影響検討
- (5) 適応策オプションの整理
- (6) 公表資料とりまとめ

参 考 資 料 編

1. 気候モデルの概要
2. 琵琶湖の将来影響解析結果

1. 気候モデルの概要

(1) MRI-AGCM3.2S の概要

気候モデルとして、MRI-AGCM3.2S を選定し、気象庁気象研究所よりデータを入力して検討に用いた。MRI-AGCM3.2S の概要を以下に示す。

表 1 気候モデル AGCM3.2S の概要

項目	内容
気候モデル	NRI-AGCM3.2S 全球大気大循環モデル (Global Atmospheric-General Circulation Model)
データ期間	<ul style="list-style-type: none"> ■ 現在気候：1979－2003年 ■ 近未来気候：2015－2039年 ■ 将来気候：2075－2099年
気象要素	気温、降水量、地上下向き日射量（以上、1時間値） 海面水温（月平均値）
空間解像度	約 20km メッシュ
領域	日本周辺 経度：約 120° E～約 150° E 緯度：約 20° N～約 50° N
排出シナリオ	SRES-A1B

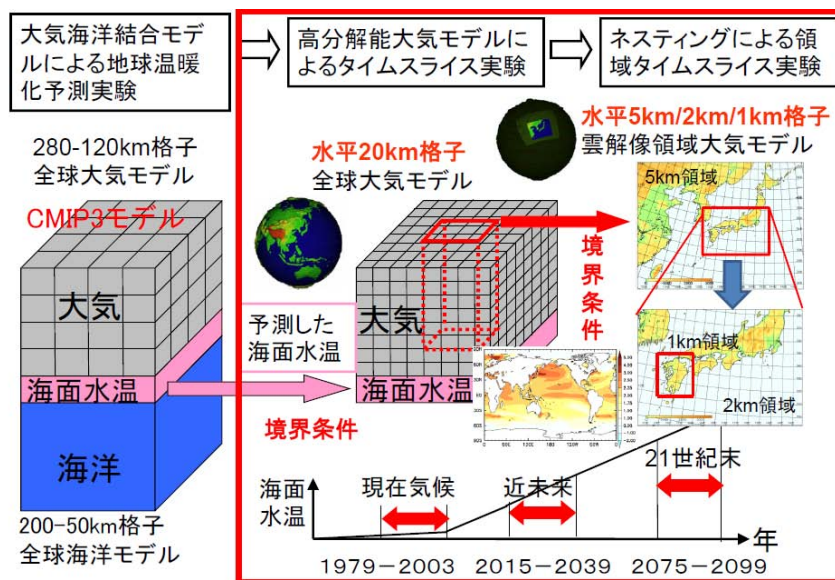


図 1 MRI-AGCM3.2S 実験概要

出典：21世紀気候変動予測革新プログラム，平成22年度研究成果報告会，37.

【参考：SRES A1B シナリオについて】

SRES シナリオ では、排出シナリオを大きく 2 種（経済成長速度の大小）×2 項（グローバル化の進展度合い）の計 4 個に分類している（図 2 左）。A2、A1B、B1 シナリオでの日本の平均気温の予測結果は、20 世紀末（1980～1999 年）から 21 世紀末（2090～2099 年）までにそれぞれ 4.0℃、3.2℃、2.1℃上昇し、いずれのシナリオでも世界平均を上回ることを示している（図 2 右）。

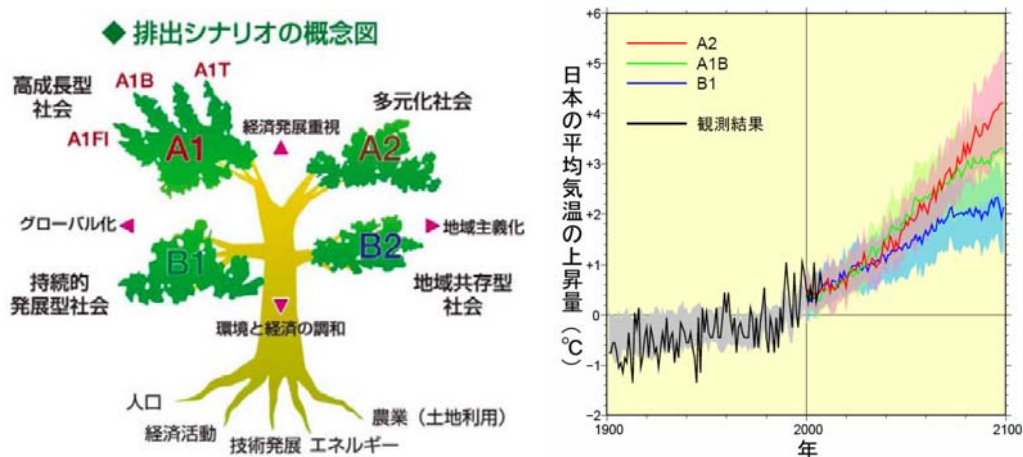


図 2 左：排出シナリオの概念図、右：日本の平均気温の予測

※実線は、A2、A1B、B1 シナリオにおける複数のモデルによる日本の平均地上気温の上昇量を 20 世紀の状態に引き続いて示す。陰影は個々のモデルの年平均値の標準偏差の範囲を示す。

出典：文部科学省・気象庁・環境省（2009）：日本の気候変動とその影響，69

表 2 MRI-AGCM3.2S による現在気候と将来気候の比較

気象要素	流域	MRI-AGCM3.2S 現在気候 1979～2003 年	MRI-AGCM3.2S 近未来気候 2015～2039 年		MRI-AGCM3.2S 将来気候 2075～2099 年	
				差/比		差/比
気温 [℃] 年平均気温の 25 年平均	琵琶湖	12.7	13.6	+0.9	15.4	+2.7
	雄物川	8.3	9.3	+1.0	11.2	+2.9
降水量 [mm] 年降水量の 25 年平均	琵琶湖	1,478	1,533	×1.04	1,614	×1.09
	雄物川	1,210	1,281	×1.06	1,414	×1.17
日射量 [MJ/m ²] 年積算日射量の 25 年平均	琵琶湖	5,406	5,427	×1.00	5,588	×1.03
	雄物川	4,920	4,897	×1.00	5,018	×1.02

※差/比は、それぞれ現在気候との差/比を示す。

(2) CDFDM 法によるバイアス補正

バイアス補正の手法は多く提案されているが、本検討に適した方法として CDFDM 法（累積分布関数によるダウンスケーリング法）を採用した。本法によるバイアス補正の流れを図 3 に示す。また、アメダス観測値と気候モデル（MRI-AGCM3.2S）現在気候値のそれぞれの平均値を比較し、表 3 に示す。

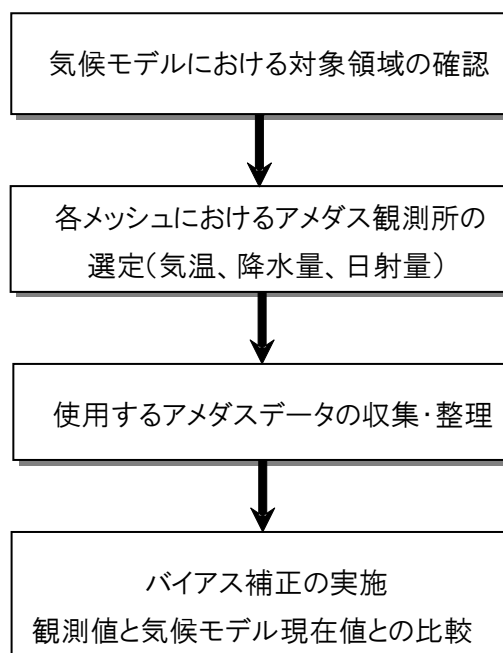


図 3 バイアス補正実施フロー

表 3 観測値と MRI-AGCM3.2S による現在気候の再現性

気象要素	流域	アメダス 観測値	MRI-AGCM3.2S 現在気候
気温 [°C] 年平均気温の 25 年平均	琵琶湖	14.3	12.7
	雄物川	9.7	8.3
降水量 [mm] 年降水量の 25 年平均	琵琶湖	1,780	1,478
	雄物川	1,957	1,210
日射量 [MJ/m ²] 年積算日射量の 25 年平均	琵琶湖	4,562※	5,406/5,393※
	雄物川	4,343※	4,920/4,913※

※日射量の観測値（アメダス）は、1989～2003 年の平均値を示す。

この現在気候における観測値と気候モデル値とのバイアスを補正するため、気候モデルの近未来気候および将来気候データにバイアス補正を適用した。観測値とバイアス補正結果後の近未来気候および将来気候との差/比を以下に示す。以降の検討において、この値を入力条件として、気候変動が水質等に及ぼす影響のモデル解析を行った。

表 4 MRI-AGCM3.2S による近未来気候・将来気候のバイアス補正結果

気象要素	流域	アメダス 観測値 1979～2003 年	MRI-AGCM3.2S 近未来気候(補正) 2015～2039年		MRI-AGCM3.2S 将来気候(補正) 2075～2099年	
				差/比		差/比
気温 [°C] 年平均気温の 25 年平均	琵琶湖	14.3	15.4	+1.1	17.2	+2.9
	雄物川	9.7	10.8	+1.1	12.7	+3.0
降水量 [mm] 年降水量の 25 年平均	琵琶湖	1,780	1,857	×1.04	1,937	×1.09
	雄物川	1,957	1,771	×0.90	1,927	×0.98
日射量 [MJ/m ²] 年積算日射量の 25 年平均	琵琶湖	4,563	4,623	×1.01	4,784	×1.05
	雄物川	4,345	4,068	×0.94	4,189	×0.96

※差/比は観測値と補正後の値を比較した結果を示す。

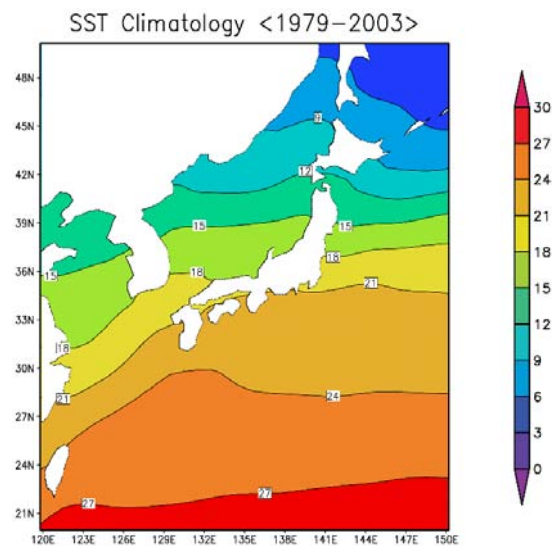
(3) 将来の海水温上昇

本検討で採用している MRI-AGCM3.2S は全球気候モデルであり海洋モデルは含まれていないが、入力値として海洋モデル (MRI-COM3) が使用されており、この MRI-COM3 の海面水温データ (表 5) を用いて、気候変動の影響を評価した。なお、この海洋モデルでは、海流についても再現、予測を行っている。

表 5 海面水温データの概要

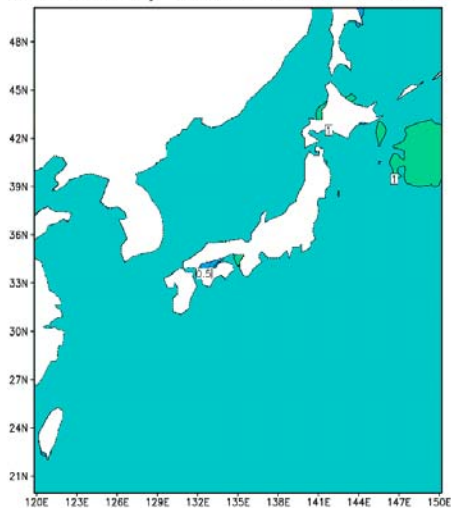
項目	内容
気候モデル	MRI-AGCM3.2S (大気モデル) MRI-COM3 (海洋モデル)
データ期間	■ 現在気候：1979～2003年 ■ 近未来気候：2015～2039年 ■ 将来気候：2075～2099年
空間解像度	約 20km メッシュ
時間解像度	月平均
領域	日本周辺 経度：約 126° E～約 150° E 緯度：約 26° N～約 46° N

MRI-AGCM3.2Sにおける海面水温の将来変化を図4に示す。近未来(2015-2039年平均)の変動幅は、0~2.2°Cに対し、将来気候(2075-2099年平均)は2.0~4.0°Cであり、将来のほうが海面水温の昇温が大きいことがわかる。また、夏季は昇温している地域が一様な分布をしているが、冬季は地域ごとに変動差があることがわかる。



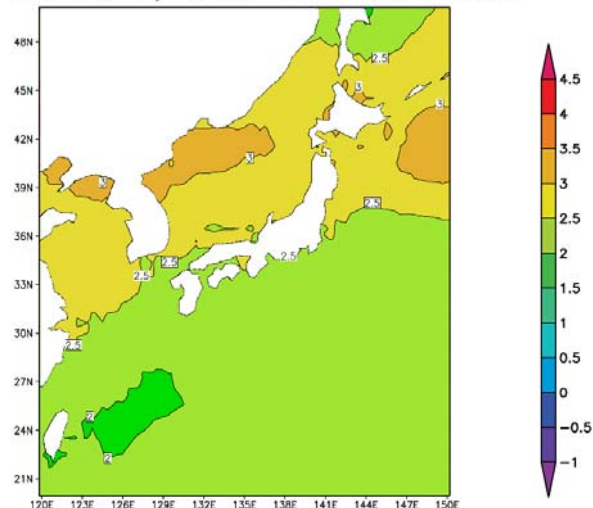
a) 現在気候(1979-2003)での海水温

SST Clim anomaly <2015-2039>-<1979-2003>



b) 現在気候(1979-2003)と近未来(2015-2039)との海水温の差

SST Clim anomaly <2075-2099>-<1979-2003>



c) 現在気候(1979-2003)と将来気候(2075-2099)との海水温の差

図4 海面水温の年変化[°C]

2. 琵琶湖の将来影響解析結果

本編 4.3 で概要を説明した琵琶湖の将来影響解析結果の詳細を以下の通り示す。なお本将来影響解析結果は、前節で詳述した気候モデルの 2030～2039 年の近未来データを入力条件とし、一定の計算条件下のもと将来影響を解析した予測の一例にすぎないため、将来必ずこのような状況が起こるというものではない点について留意する必要がある。

(1) 河川流量の変化

琵琶湖の主要流入 10 河川について、近未来気候 (2030～2039 年) と、現在気候 (1994～2003 年) の流況の比較を図 5 に示す。年平均流量 (通年) について、 $70.8\text{m}^3/\text{s}$ と比較して近未来では $64.3\text{m}^3/\text{s}$ [$63.5 - 65.2\text{m}^3/\text{s}$] ※であり、約 1 割の減少となった。また、琵琶湖流入河川で融雪出水の影響の大きい姉川について、現在気候と近未来気候での解析結果を図 6 に示す。現在の姉川流域では、例年 12 月～2 月頃に積雪・融雪期を迎えるが、近未来気候では融雪出水の影響が小さくなっていった。また、その程度は年によって異なり、97 年 12 月～98 年 3 月では、その違いが特に顕著に表れていた。

※ 気候モデルの誤差を入力条件とした感度解析により、流量が $63.5 - 65.2\text{m}^3/\text{s}$ の幅を持つ結果となった。この感度解析の結果を本報告では [] と示す。

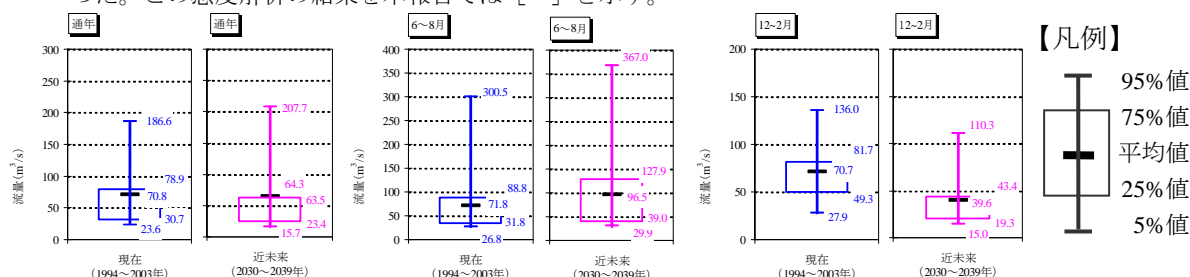


図 5 琵琶湖主要流入 10 河川での現在気候と近未来気候の河川流量計算結果の比較

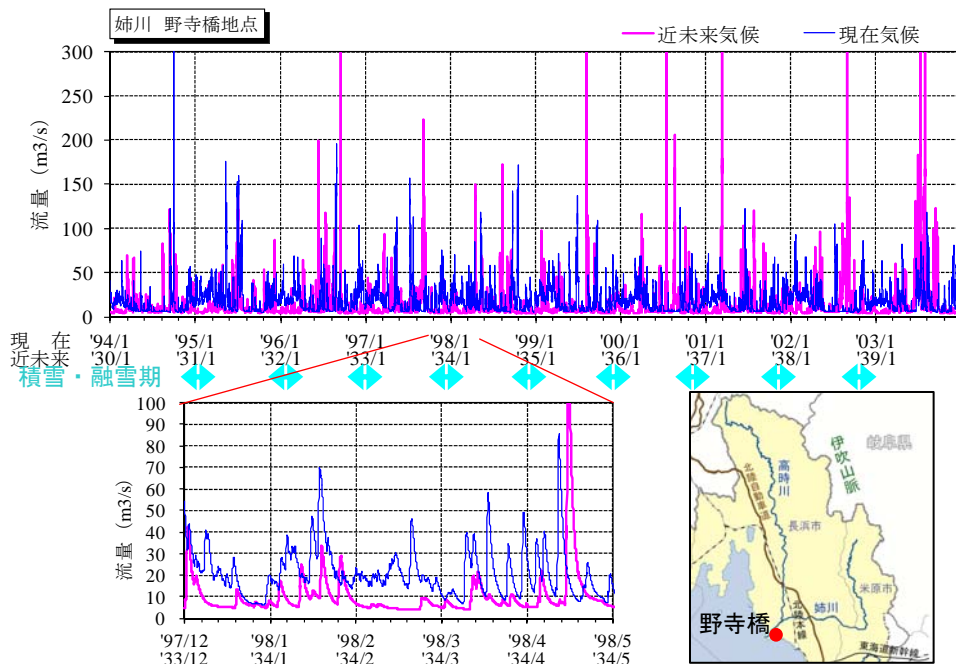


図 6 姉川における現在気候と近未来気候の河川流量計算結果の比較

(2) 河川水温の変化

琵琶湖の主要流入 10 河川について、近未来気候 (2030～2039 年) と、現在気候 (1994～2003 年) の水温の比較を図 7 および図 8 に示す。河川水温の流域平均値は、現在気候の 16.2℃ に対して近未来気候は 16.8℃ [16.8 - 16.9℃] であり、0.6℃ [0.6 - 0.7℃] 上昇するという結果が得られた。季節別でみると、冬季では近未来気候の方が現在気候よりも 1.7℃ [1.6 - 1.7℃] 上昇している一方、夏季は 0.9℃ [0.9 - 1.0℃] 低下するという結果になった。夏季の水温低下原因として、夏季の出水頻度の増加、降水量の増加が考えられる。

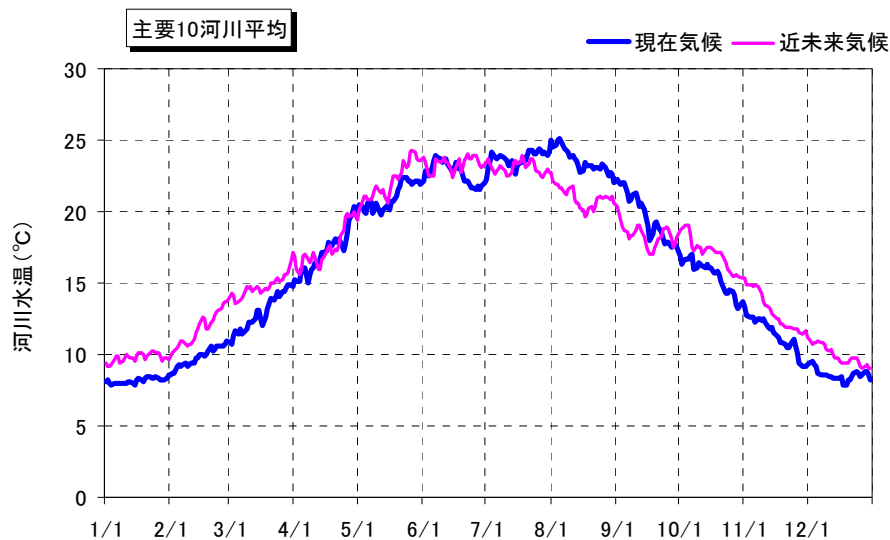


図 7 河川水温の経時変化 (主要 10 河川平均)

【凡例】

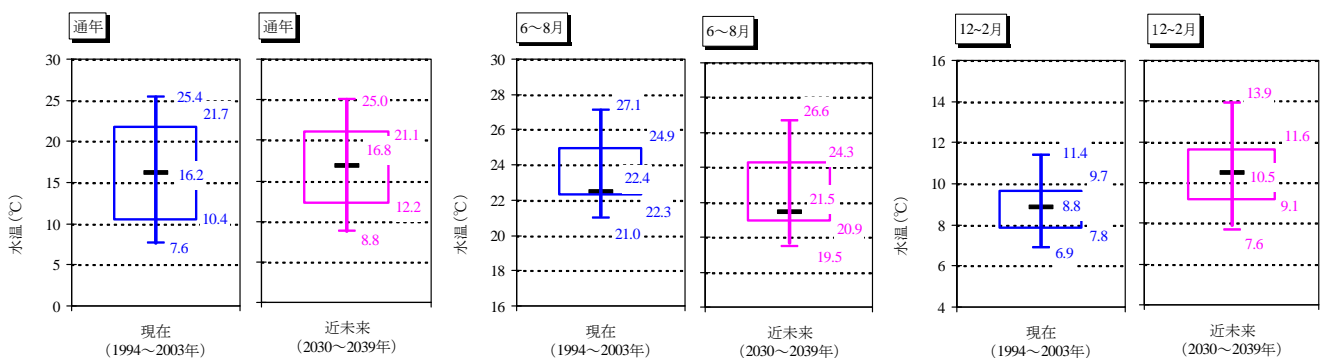
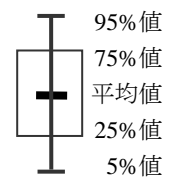


図 8 河川水温の変化 (10 年間の主要流入 10 河川平均値、左から順に年間・夏季・冬季)

(3) 湖内水温の変化

近未来気候における今津沖中央、南比良沖中央地点の湖内各層の水温を図 9 および図 11 に示す。また、これら 2 地点について、表層・底層の水温を現在気候と近未来気候とで比較した結果を図 10 および図 12 に示す。10 か年平均表層水温を現在気候と近未来気候で比較すると、今津沖中央地点では 15.3℃ から 16.6℃ [16.3 – 17.0℃] まで 1.3℃ [1.0 – 1.7℃] 上昇し、南比良沖中央地点では 15.2℃ から 16.4℃ [16.1 – 16.8℃] まで 1.2℃ [0.8 – 1.6℃] 上昇すると予測された。

今津沖中央 近未来 水温

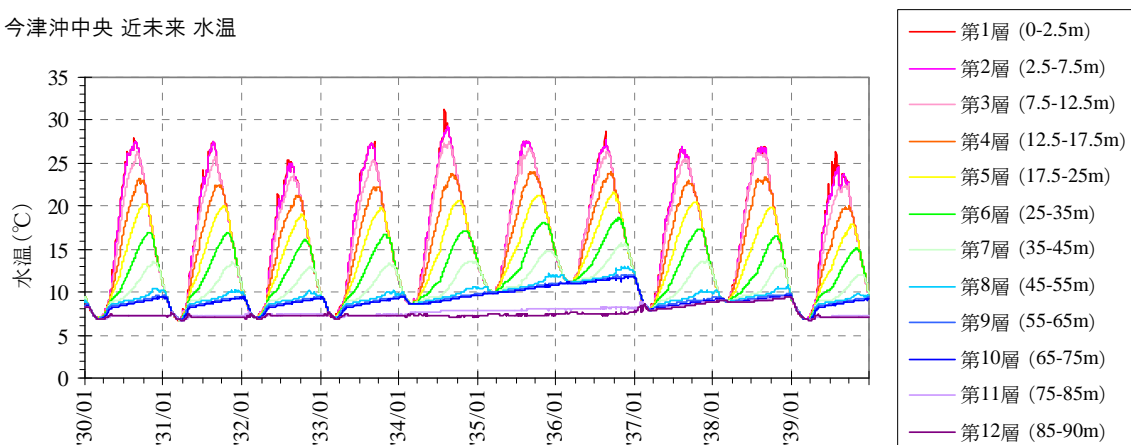


図 9 近未来気候の水温 (今津沖中央地点)

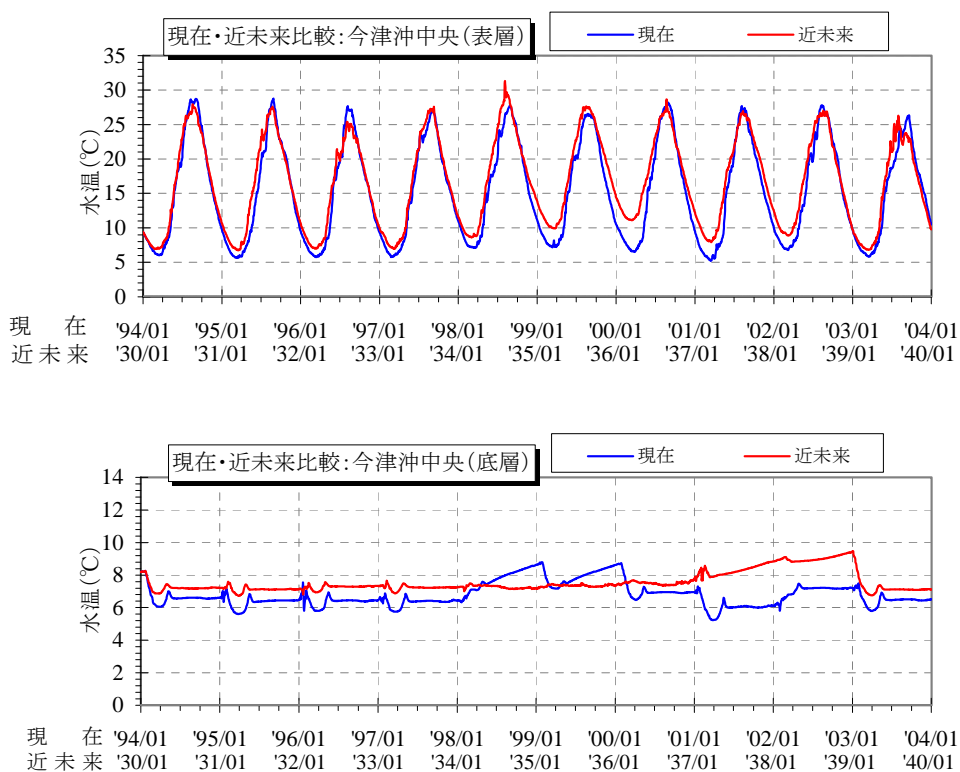


図 10 現在気候と近未来気候の水温比較 (今津沖中央、上：表層、下：底層)

南比良沖中央 近未来水温

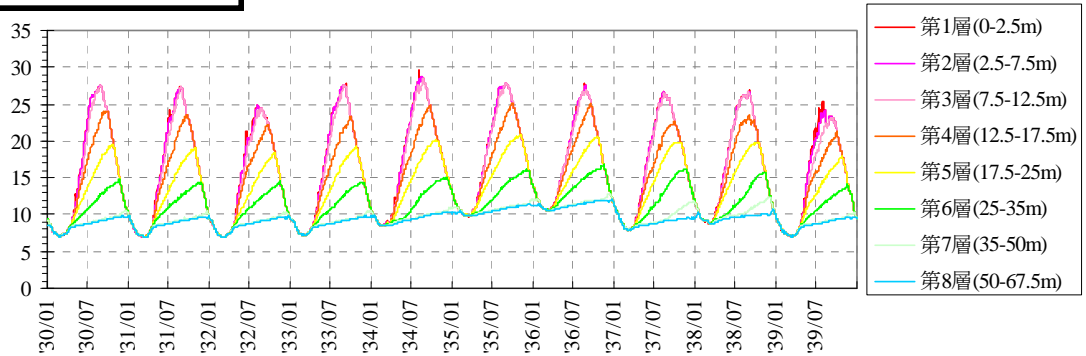


図 11 近未来気候の水温（南比良沖中央地点）

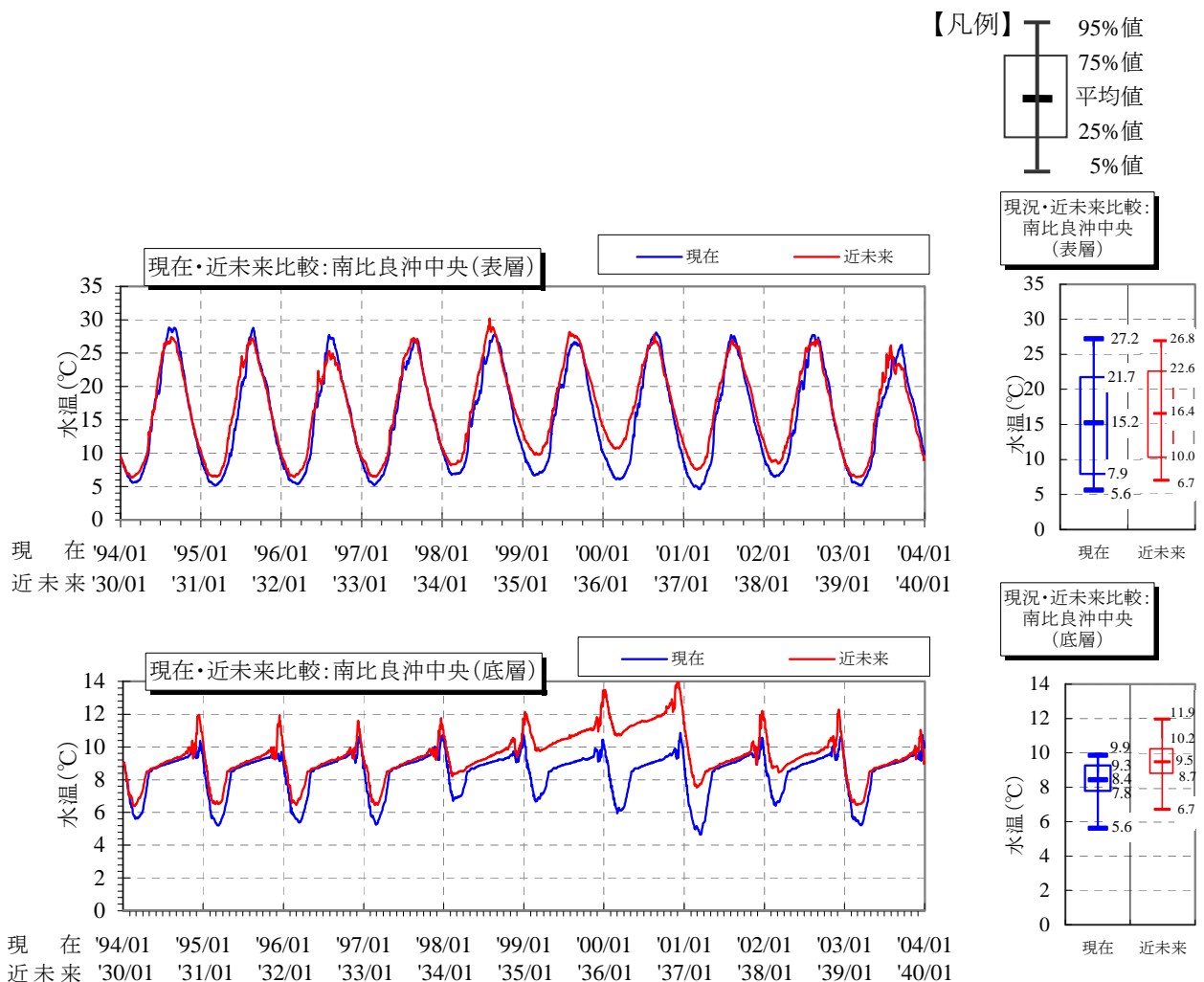


図 12 現在気候と近未来気候の水温比較（南比良沖中央、上：表層、下：底層）

(4) 全循環の変化

図 13に今津沖中央地点における水温の鉛直方向の経時変化を示す。解析結果では、近未来気候条件下において、2034年～2036年の3カ年に渡って、冬季に表層～中層の水温が十分に低下しないことにより、鉛直方向の水温が一様とならない状態が継続するという結果が得られた。

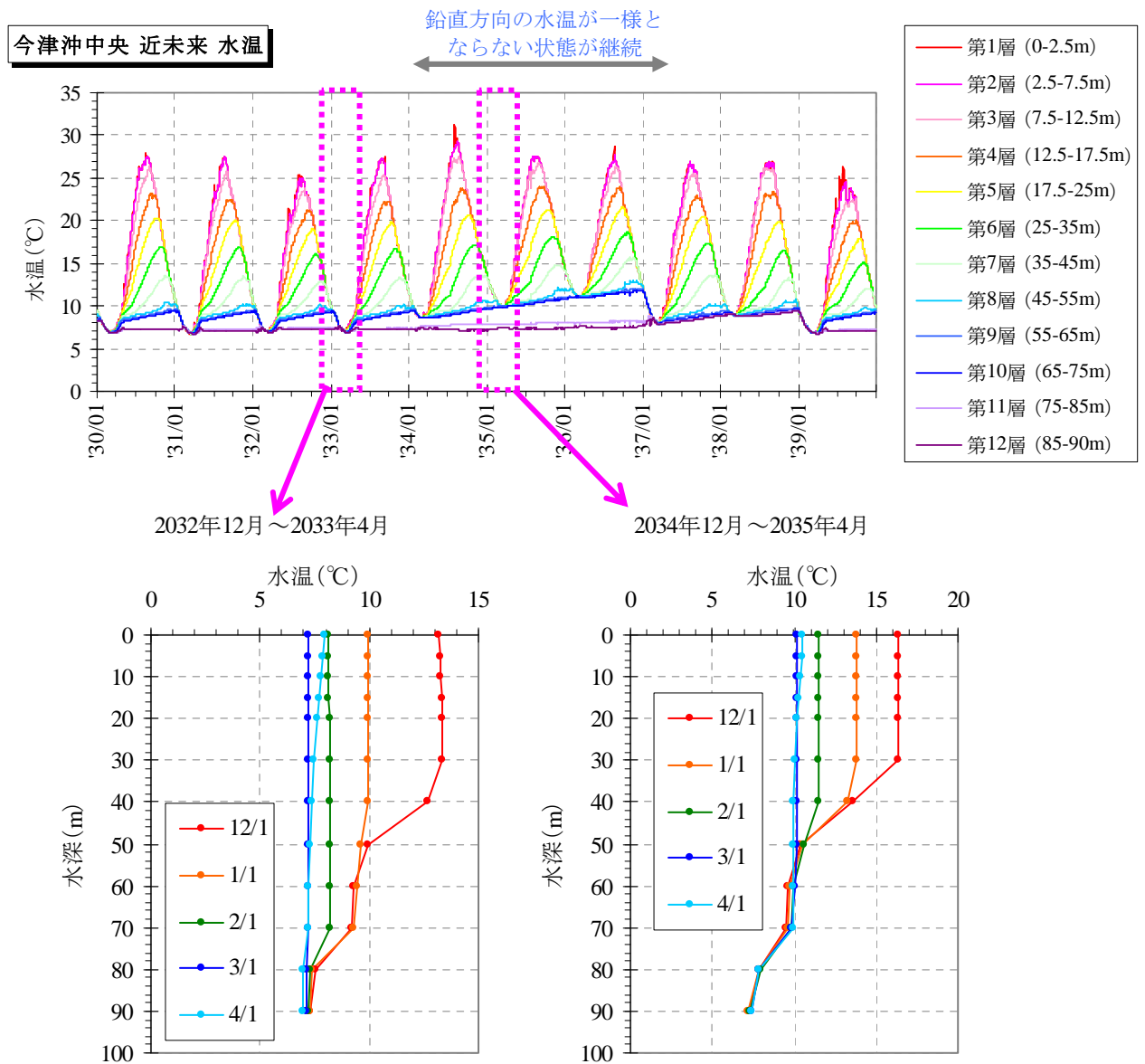


図 13 水温の鉛直方向の経時変化 (近未来気候、今津沖中央地点)

表層からどの程度の深さまで循環したかを表す循環層水深^{*}の経時変化を、図 14 に示す。現在気候の 10 年間はいずれの年も冬季全循環が生じるが、近未来気候では 10 か年中 3 年間で最深層まで循環しないという結果が得られた。

※第 2 層（水深 2.5-7.5m）と各層の密度差が 0.03g/L より小さくなる場合、当該層の水深まで全循環するとして、循環層水深を求めた。'06~'07 年冬に全循環が約半月だけ観測されたことに基づき、密度差の閾値 0.03g/L を設定した。

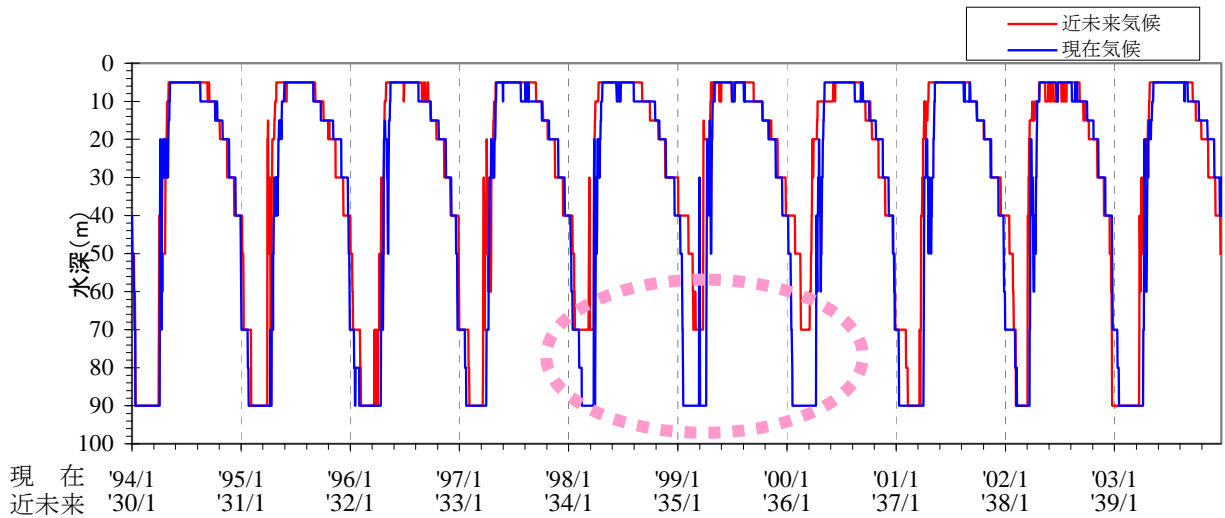


図 14 循環層水深の比較

また、表層から各水深まで循環する日数（解析した 10 年間の平均）を現在気候と近未来気候で比較した結果を図 15 に示す。これによれば、水深 30m 以浅では循環日数にほとんど変化が見られない一方で、水深 40m 以深では循環日数が 2~3 割程度減少するという結果が得られた。

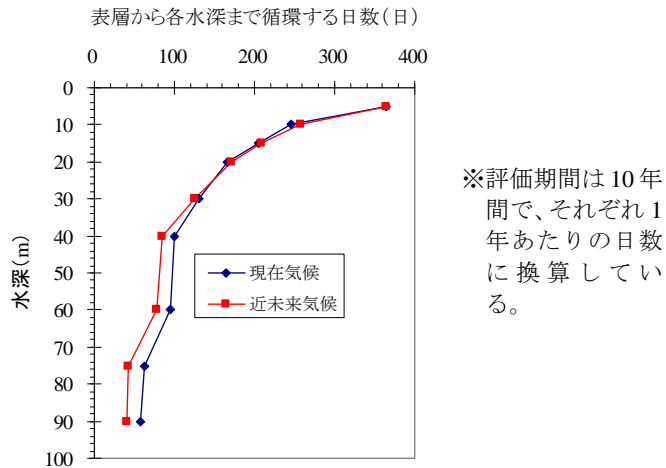


図 15 表層から各水深まで循環する日数の比較

※今回は現在気候条件下における現況再現性を鑑み鉛直拡散係数等の定数を決定したが、現在気候と気象条件等が異なる近未来気候条件下における適切な定数等の設定は、今後の課題である。今後のデータ・知見等の蓄積を待って適切な定数を改めて検討する必要があり、その場合今回と異なった解析結果が得られる可能性がある点に留意する必要がある。

近未来気候（2030～2039年）における気温（MRI-AGCM3.2S、バイアス補正後の値）と鉛直方向各層の水温（今津沖中央地点、モデル解析結果）との関係を図16に整理した。近未来気候で鉛直方向の水温が一様にならなかった原因として、3か年のうち2034年および2035年については冬季の気温が高かったためであると考えられる。一方2036年については冬季の気温は低い、2034～2035年が冬季のみならず夏季も気温が高かったことから、底層を除く全層の水温が平年よりも上昇し、2036年冬季の気温が低下しても湖内蓄積熱の影響により湖内の鉛直方向の水温が一様にならず、最深層まで湖水が循環しない状況が継続したと考えられる。

一方、他の暖冬年、例えば2031年、2033年で、暖冬にも関わらず鉛直方向の水温差が一様となる理由としては、これらの年の夏季水温の上昇が2035年ほどではないため、中層水温が夏～秋に上昇しなかったことが理由と考えられる。

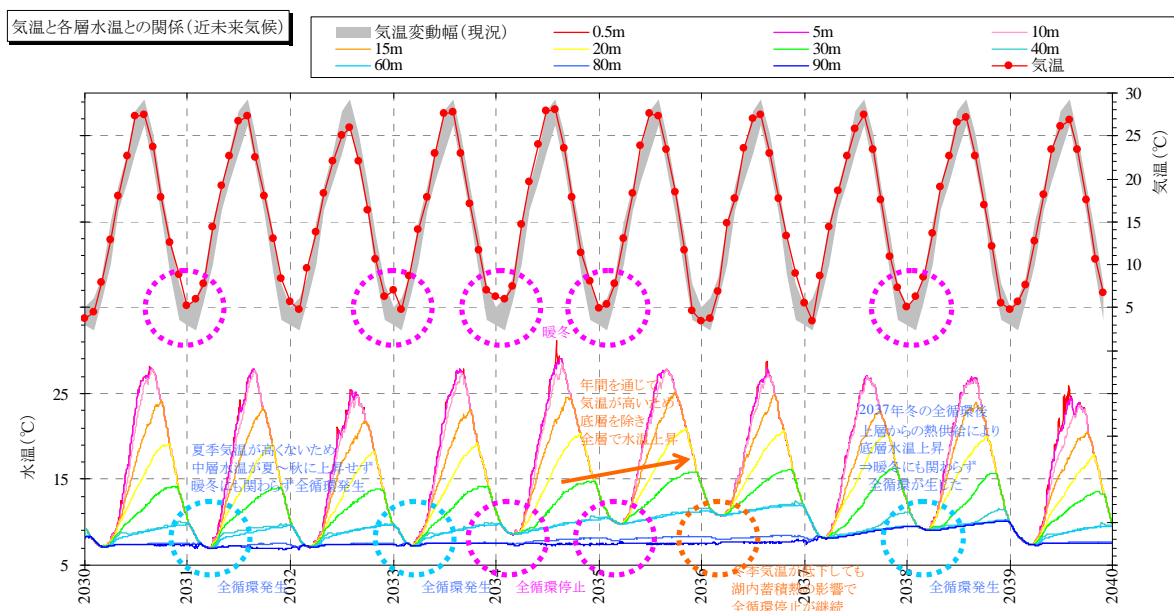


図16 水温と気温との関係（近未来気候、2030～2039年）

注) 気温はMRI-AGCM3.2S（バイアス補正後）の湖上メッシュ値、月平均
 気温変動幅は彦根地点の現況各月気温の最低～最高値幅（1994～2010年）
 各層水温は近未来気候における水温計算結果

(5) 湖内水質の変化

近未来気候における今津沖中央地点の湖内水質（TOC、全窒素、無機態窒素、DO、全リン、無機態リン）の変化を図 17及び図 18に示す。また、表層と底層について、現在気候と近未来気候の水質を比較し、図 19及び図 20に示す。近未来気候にて 2034～2036 年に 3 か年連続で鉛直方向の水温が一樣にならなかった期間では、下層 DO が徐々に減少し、約 1 年後には低い水準まで低下するとともに、下層の無酸素層の発達、鉛直混合不全により、無機態窒素、無機態リンの底層濃度が増加する傾向が見られた。

その後 2037 年に鉛直方向の水温差が一樣となり、下層に蓄積した栄養塩類が上層に供給される。この影響で鉛直混合が生じた後しばらくは表層の無機態窒素濃度が上昇している。無機態リンについては、鉛直混合が生じた 2037 年に濃度上昇が現れており、それが生態系に取り込まれてその翌年（2038 年）には全循環再開前のレベルに戻っている。これは、循環停止後に表層中の無機態リン濃度が低下しリン制限（リンが不足することにより植物プランクトンの増殖が抑制される状態）が強まった結果、鉛直混合再開後の一時的なリン高濃度化の時期に、プランクトンによるリンの取り込み速度が増加し、表層の高濃度化が早期に解消されたものと考えられる。植物プランクトンに取り込まれたリンは、枯死または捕食された後、沈降などにより表層から除去されると推察される。

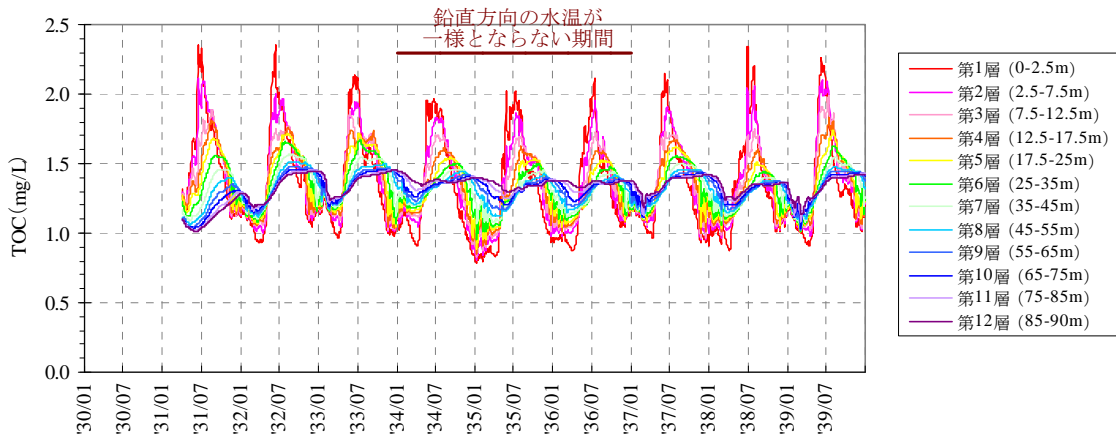
鉛直混合が生じた後の 2037 年に、無機態リン・窒素とも下層から表層への供給が生じたにも関わらず、TOC がそれほど増加していない理由としては、2037 年のプランクトン増殖期（春～夏）の水温が近未来気候の平均と比べて低く、現在気候とそれほど変わらなかったことなどが考えられる。

※本調査で使用した湖内生態系モデルでは、栄養塩の湖内循環を再現するため、難分解性・易分解性有機物の分解、リンと窒素の溶出過程を記述する水-底質相互作用、鉄等の鉱物や懸濁態と無機態リンの吸着・沈降、脱着・溶出等の過程をモデル化している。水中の鉄濃度は実測値を与えており、沈降フラックスは水中濃度と存在形態から推定している。しかしながら、これらの過程は、実測データが少ないため、不確実性が存在することに留意する必要がある。

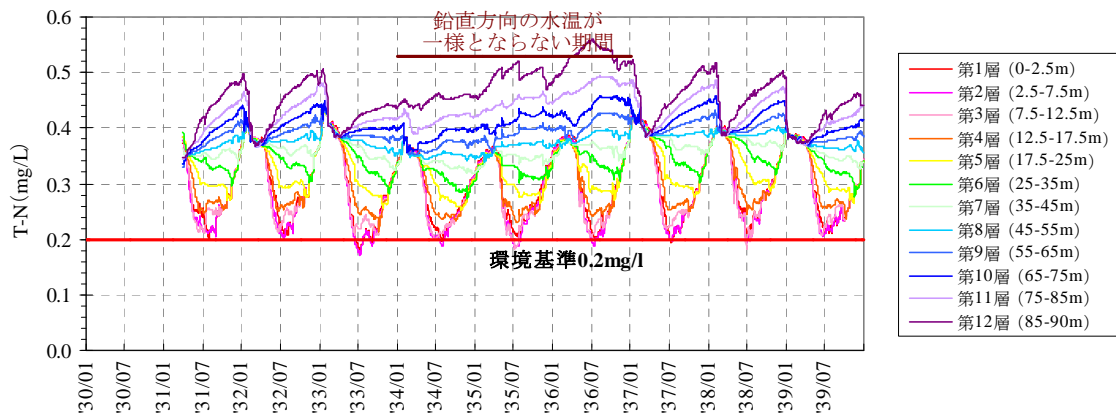
※今回は現在気候条件下における現況再現性を鑑み底泥酸素消費速度等の定数を決定したが、現在気候と気象条件等が異なる近未来気候条件下における適切な定数等の設定は、今後の課題である。今後のデータ・知見等の蓄積を待って適切な定数を改めて検討する必要がある、その場合本解析結果と異なった解析結果が得られる可能性がある点に留意する必要がある。

※また、本解析結果は、解析期間 10 年間のうち、鉛直方向の水温が 3 か年連続して一樣にならないという流動モデルの予測結果に対する水質変化予測であり、今後、知見・データ等の蓄積などによる流動モデルの精度向上等により、鉛直方向の水温が一樣にならない期間が変わると、本解析結果とは異なった解析結果が得られる可能性がある点に留意する必要がある。

今津沖中央 近未来 TOC



今津沖中央 近未来 全窒素



今津沖中央 近未来 無機態窒素

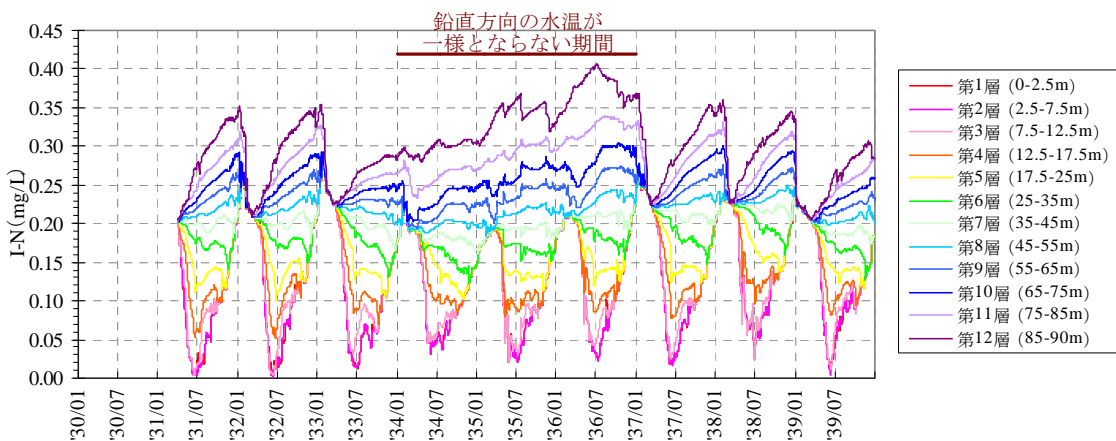
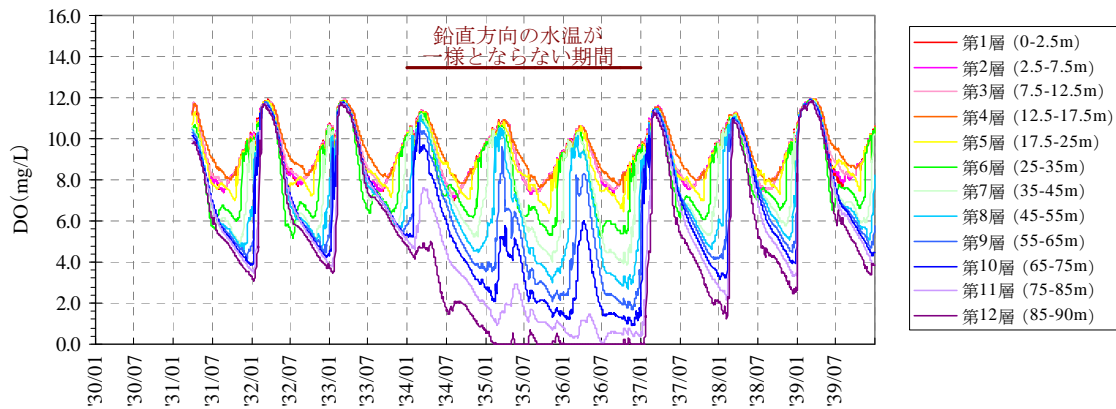
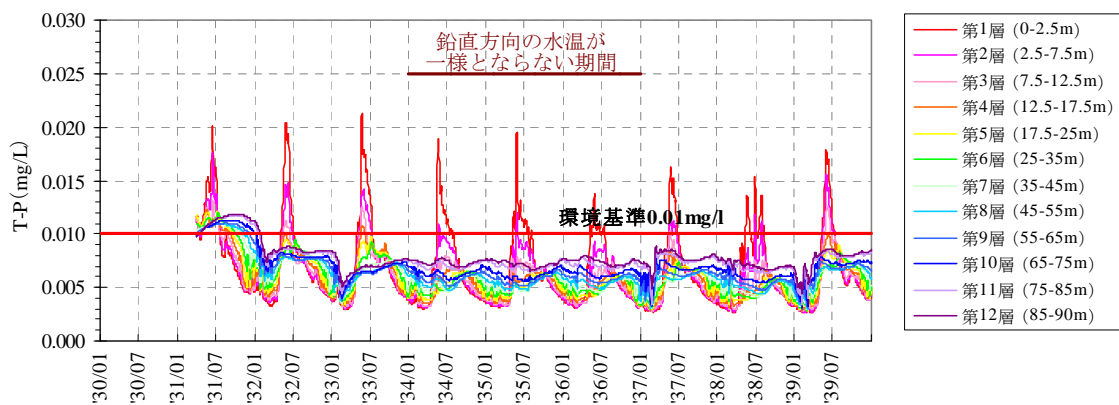


図 17 湖内水質変化 (近未来気候、今津沖中央地点) (1/2)

今津沖中央 近未来 DO



今津沖中央 近未来 全リン



今津沖中央 近未来 無機態リン

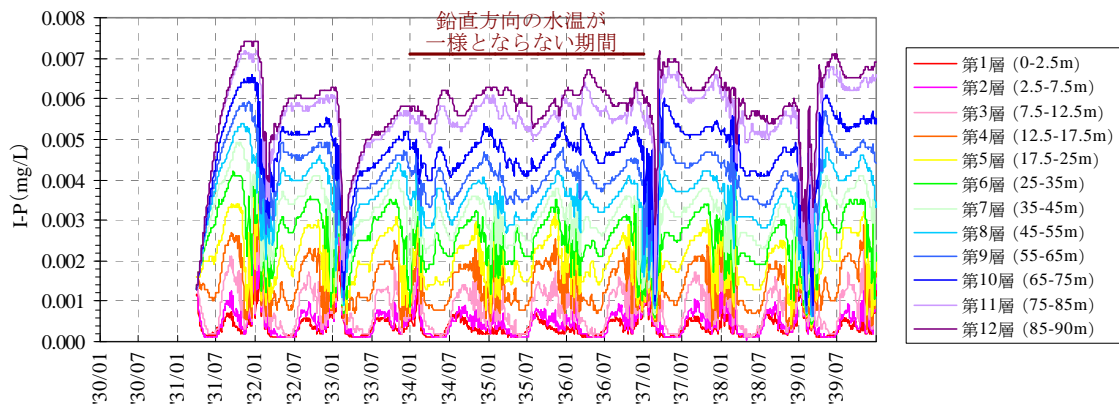


図 18 湖内水質変化 (近未来気候、今津沖中央地点) (2/2)

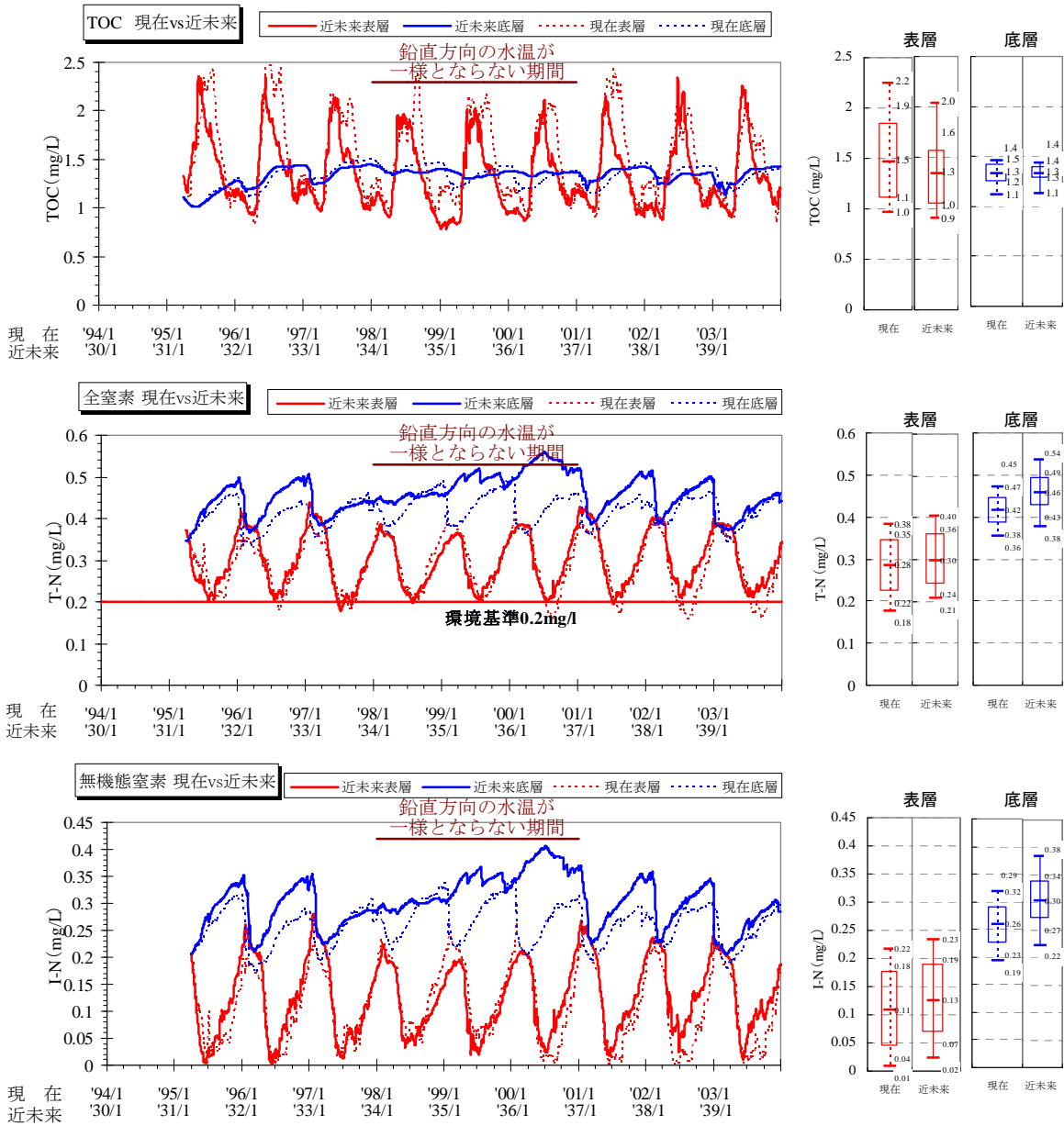
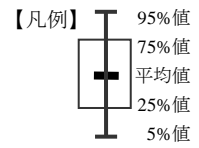


図 19 湖内水質の現在・近未来比較（今津沖中央地点 表層および底層）（1/2）

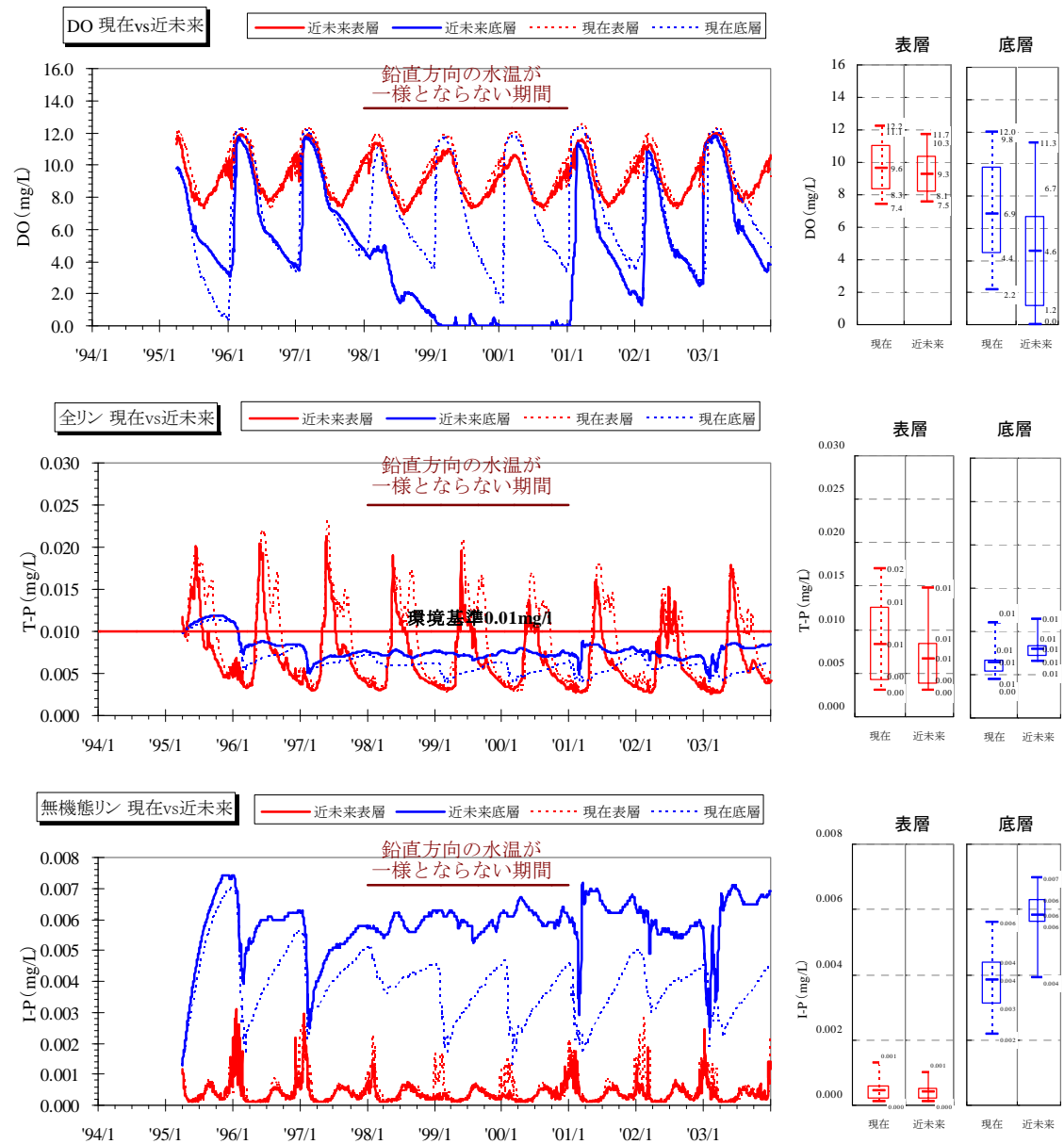
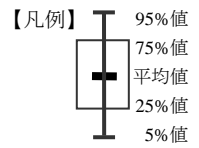


図 20 湖内水質の現在・近未来比較（今津沖中央地点 表層および底層）（2/2）