

気候変動と水質の関係の検討

はじめに

- ・本資料では、現在気候と将来気候における気温と降水量の解析を実施
- ・気候変動と水質変化の関係については今後解析予定

1 過去データ（観測値）を用いた解析

- ・気温（年平均と月平均）と降水量（年降水量と年間最大日雨量）の解析を実施
- ・対象期間は 1977年1月1日から2022年12月31日
- ・アメダス地点は 川崎・蔵王、新川 を選択
 ⇒川崎地点は2005年10月26日に観測を終了、2005年10月27日に蔵王地点に移転
 ⇒新川地点は釜房ダム近隣で長期間の連続データを有する地点として選択
- ・各解析にて線形回帰を実施し、傾きに対してt検定を実施（有意水準0.05）



※本資料で解析を行った地点を で示す

マーク	地点の種類	観測要素
●	気象台等	気圧、降水量、気温、湿度、風、日照、積雪、天気など
● (■)	アメダス	降水量、気温、湿度、風、日照、(積雪)
● (■)	アメダス	降水量、気温、湿度、風、(積雪)
● (■)	アメダス	降水量、(積雪)
□	アメダス	積雪

(参考 : <https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/mdrr/man/sousa.html>)

図 1-1 宮城県内の地上気象観測所及びアメダス（地域気象観測システム）

1.1 気温

① 年平均気温

川崎、蔵王及び新川地点の月平均気温の推移を図 1-2 から図 1-3 に示す。川崎と蔵王は一つのグラフにまとめて描画している。全ての地点で右肩上がりの傾向を示しており、近年の気温が上昇傾向であることが見て取れる。t 検定の結果、蔵王地点で $p < 0.01$ 、新川地点で $p < 0.001$ で有意となった。

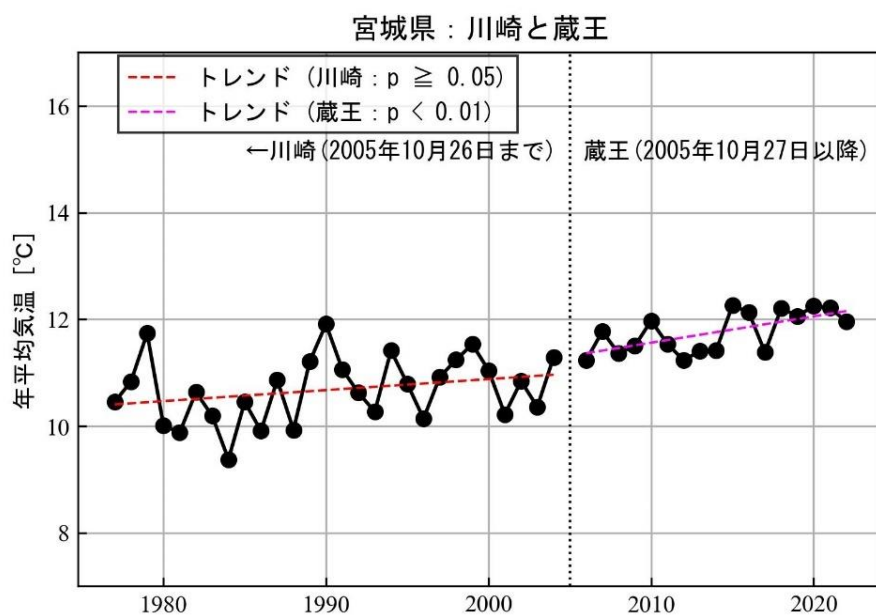


図 1-2 川崎地点と蔵王地点の年平均気温の変化傾向

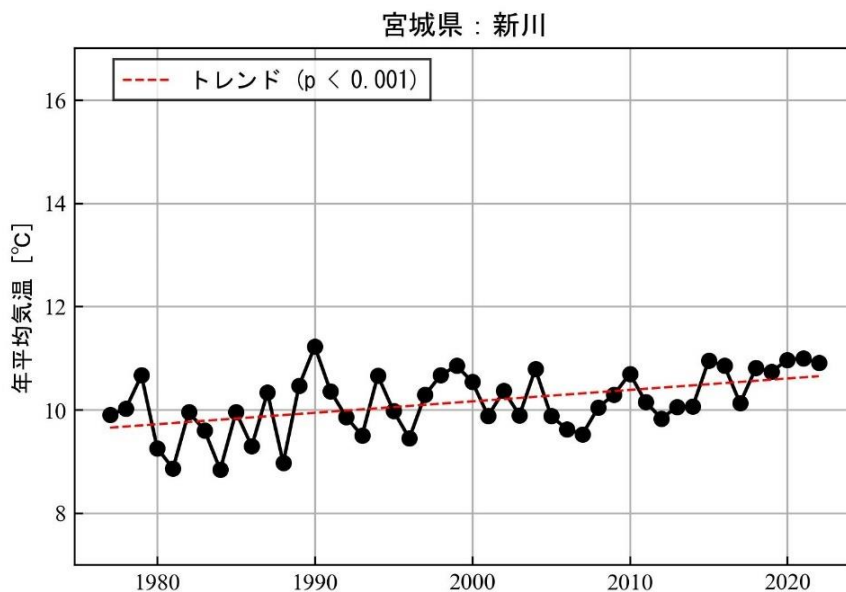


図 1-3 新川地点の年平均気温の変化傾向

② 月平均気温

川崎、蔵王及び新川地点の月平均気温の推移を図 1-4 から図 1-5 に示す。川崎と蔵王は一つのグラフにまとめて描画している。

凡例の右側の「+」は t 検定の結果を表している。p 値が 0.001 未満のとき「+++」を、p 値が 0.001 以上 0.01 未満のとき「++」を、p 値が 0.01 以上 0.05 未満の時「+」を表示した。また、図 1-4 の凡例は「/」の左側が期間前半（川崎地点）、右側が期間後半（蔵王地点）の t 検定の結果を表している。例えば図 1-4 の 3 月の「(/++)」は、前半（川崎地点）の t 検定が有意でなく、後半（蔵王地点）の t 検定が $p < 0.01$ で有意であることを示しており、4 月の「(+/+）」は、前半（川崎地点）、後半（蔵王地点）ともに t 検定が $p < 0.05$ で有意であることを示している。

蔵王と新川で 3 月の平均気温が大きく上昇している様子が見られる。

一方で 12 月の平均気温は横ばいであり、月によって傾向が異なることが分かる。

3 月の平均気温の上昇は釜房ダム流域における春季の流出ピークの早期化、それに伴う栄養塩の動態に影響を及ぼしている可能性がある。

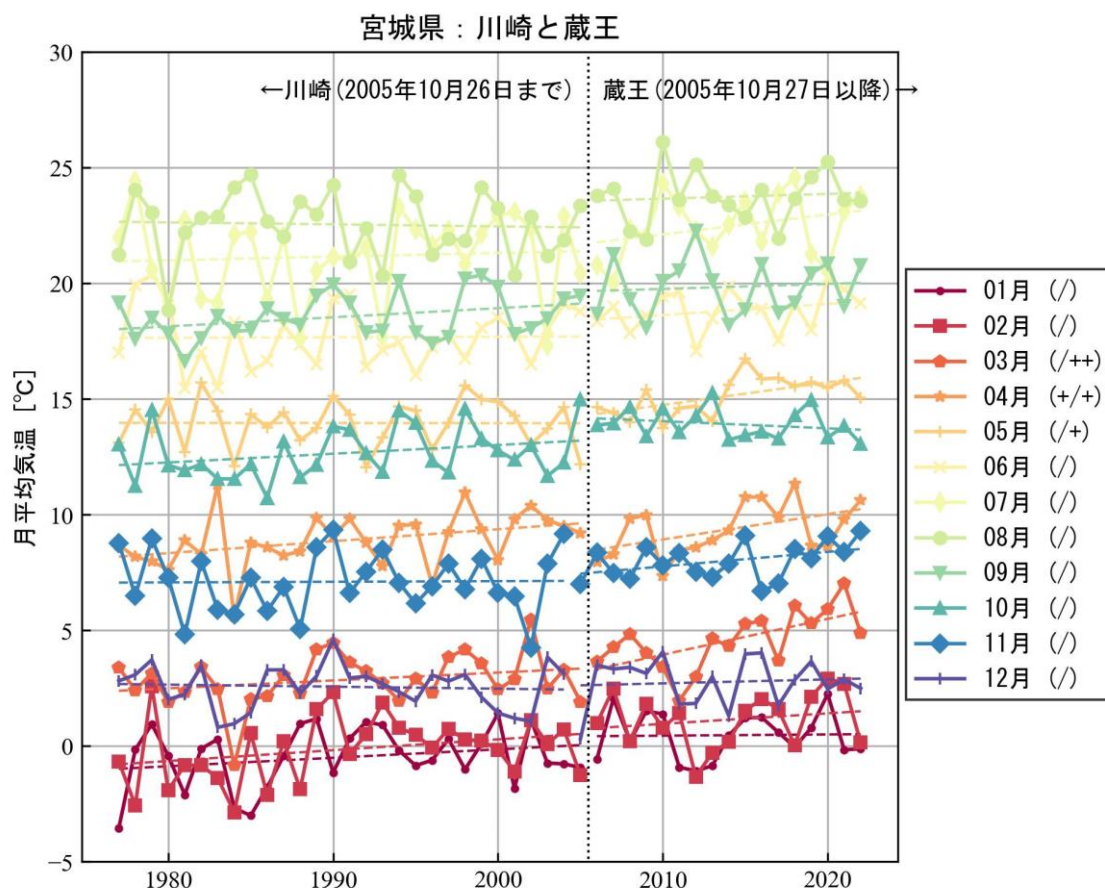


図 1-4 川崎地点と蔵王地点の月平均気温の変化傾向
($p < 0.001$: +++, $p < 0.01$: ++, $p < 0.05$: +)

宮城県：新川

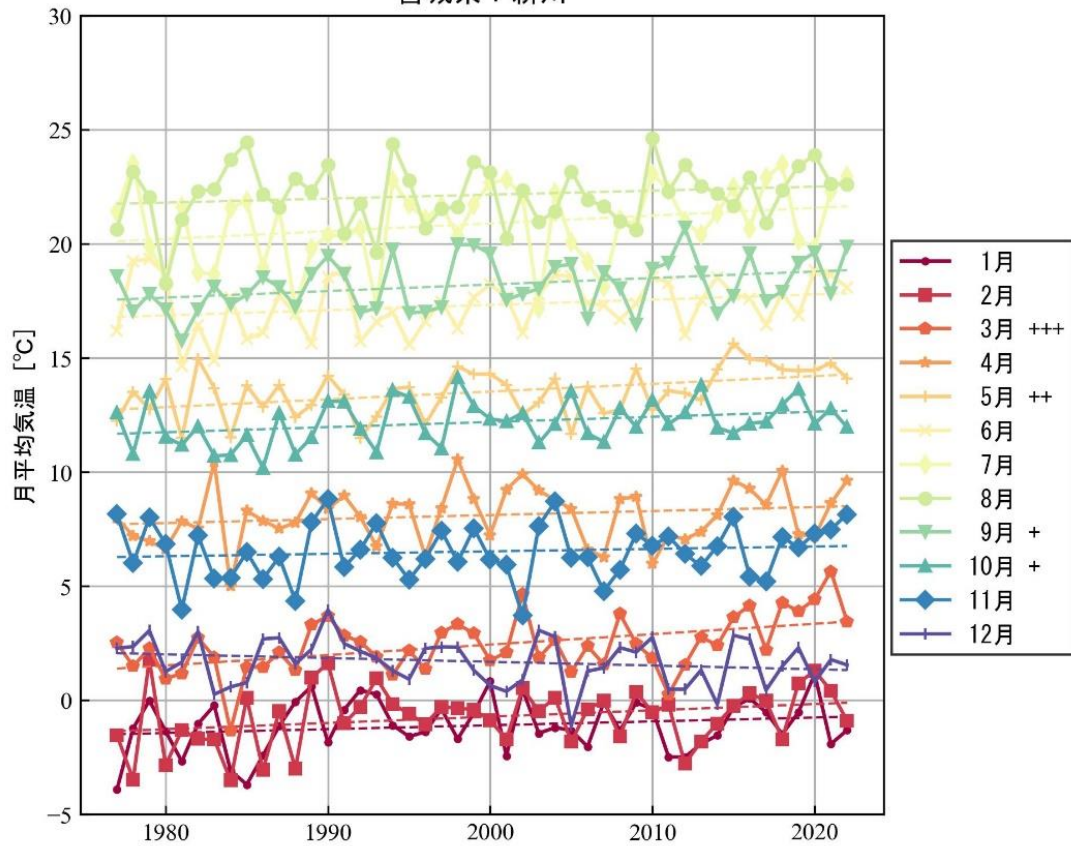


図 1-5 新川地点の月平均気温の変化傾向
($p < 0.001$: +++, $p < 0.01$: ++, $p < 0.05$: +)

1.2 降水量

① 年降水量

川崎、蔵王及び新川地点の年降水量の推移を図 1-6 から図 1-7 に示す。川崎と蔵王は一つのグラフにまとめて描画している。いずれの地点でも統計的に有意な傾向は見られなかった(有意水準 0.05)。

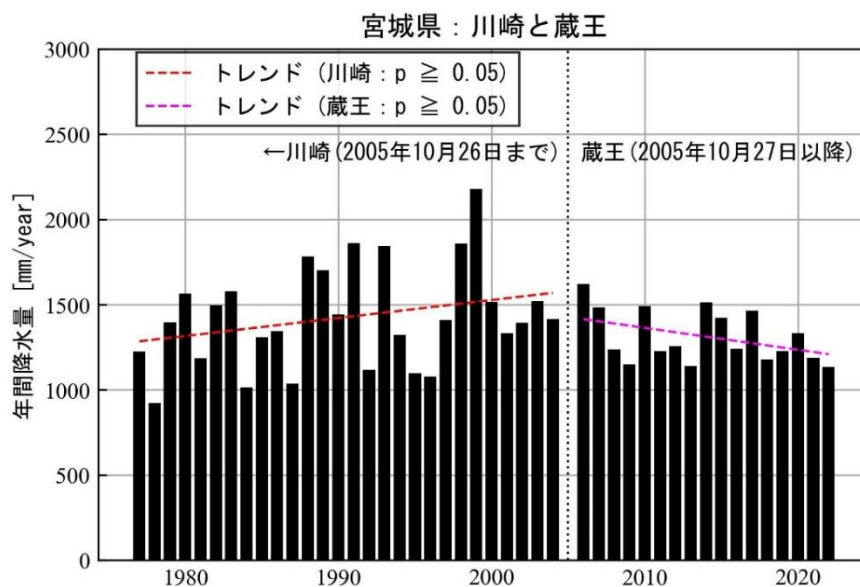


図 1-6 川崎地点と蔵王地点における年降水量の変化傾向

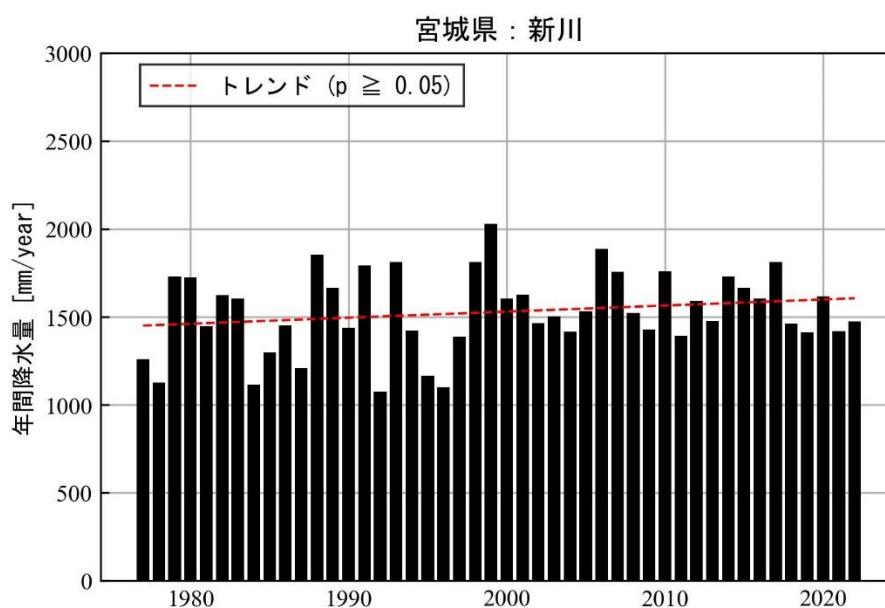


図 1-7 新川地点における年降水量の変化傾向

② 年間最大日雨量

各地点における年間最大雨量の推移を図 1-8 から図 1-9 に示す。いずれの地点においても右肩上がりの傾向が得られたが、年によるばらつきが大きく、統計的に有意な傾向は見られなかった (有意水準 0.05)。

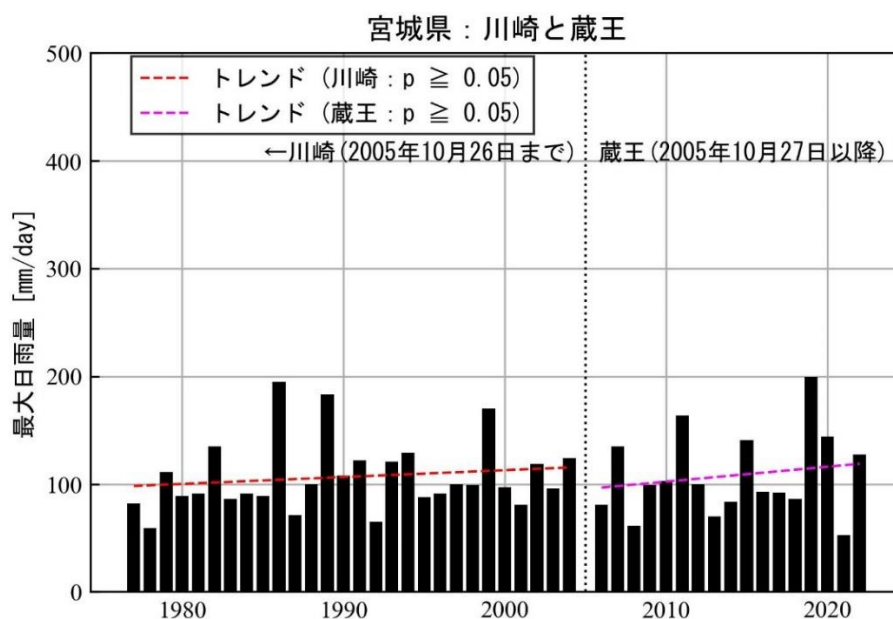


図 1-8 川崎地点と蔵王地点における年間最大雨量

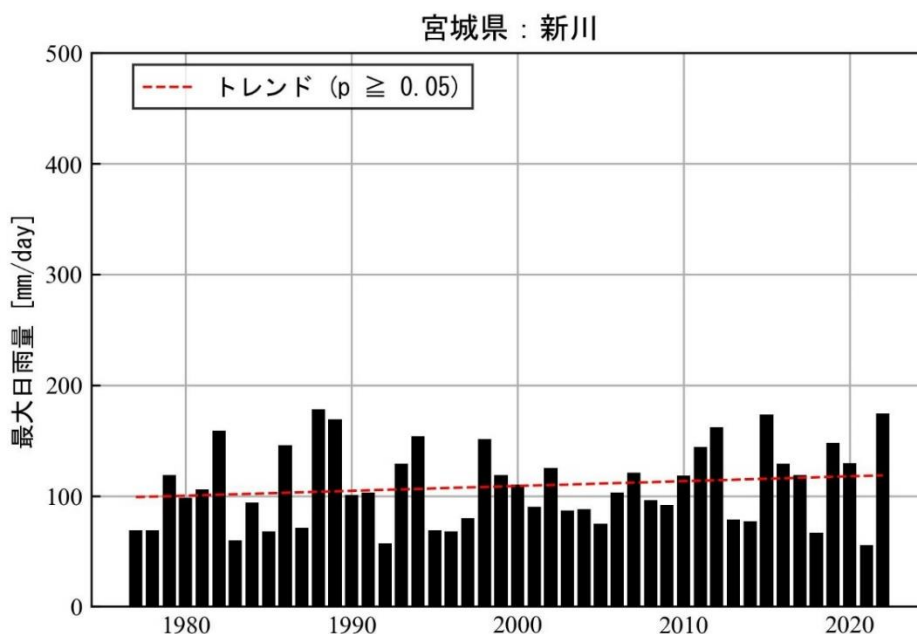


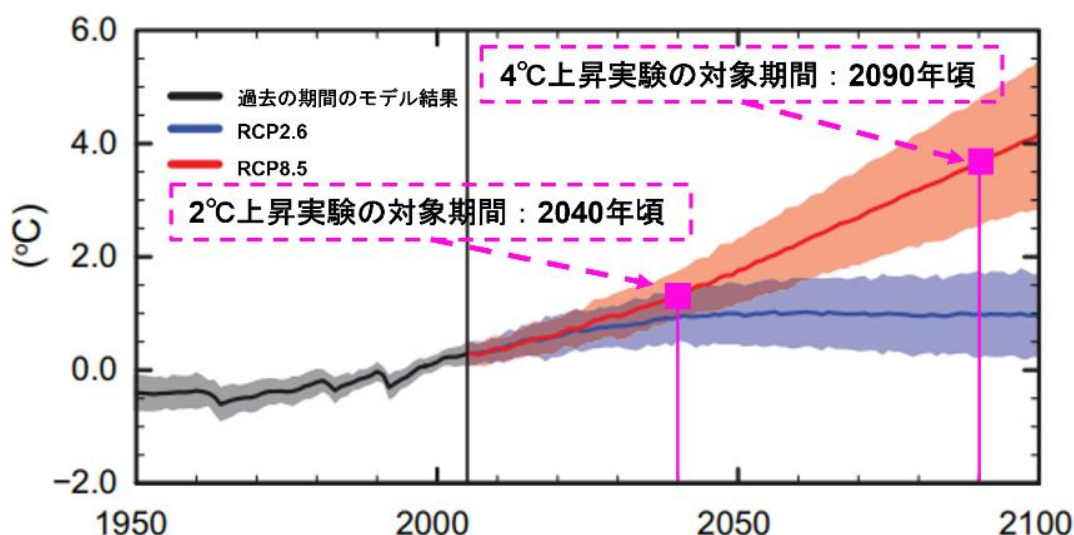
図 1-9 新川地点における年間最大雨量

2 将来データ（計算値）を用いた解析

2.1 将来データ d4PDF について

将来気候における気温、降水量のデータに d4PDF の出力結果を利用した。d4PDF とは「地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース：database for Policy Decision making for Future climate change」の頭文字をとったもので、温暖化対策策定等への活用を目的として、文科省・気候変動リスク情報創生プログラムおよび海洋研究開発機構・地球シミュレータ特別推進課題において作成されたものである。d4PDF には水平解像度が 60km のものと 20km のもの、そして 5km のものが存在し、本業務では水平解像度 5km のデータセットを使用する。

d4PDF の計算結果には過去実験、2℃上昇実験、4℃上昇実験の 3 種類がある。2℃上昇実験、4℃上昇実験は RCP（Representative Concentration Pathways：代表濃度経路）シナリオに基づいており、2℃上昇実験は RCP8.5 シナリオで近未来 2040 年頃の条件を与えて計算したもの、4℃上昇実験は RCP8.5 シナリオで 21 世紀末 2090 年頃の条件を与えて計算したものである。RCP シナリオと d4PDF シナリオの対応を図 2-1 に示した。



(出典： https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_SPM_FINAL.pdf)

図 2-1 RCP シナリオと d4PDF の 2℃上昇実験、4℃上昇実験の対応関係

過去実験の計算期間は 1980 年から 2010 年の 31 年間で、各年の計算条件（海面水温、温室効果ガスなど）に 12 パターンの摂動を加えることで、延べ 31 年×12 パターンの計算結果を有する。気候モデルの計算結果は不確実性を有するため、多数の予測を行い、気象現象の発生を確率的に捉える狙いがある。2℃上昇実験、4℃上昇実験の計算期間は 31 年間で、2℃上昇実験は 2040 年頃の、4℃上昇実験は 2090 年頃の計算条件に 12 パターンの摂動を加えることで、それぞれ 31 年×12 パターンの計算結果を有する。釜房ダム周辺の計算地点を図 2-2 に示す。

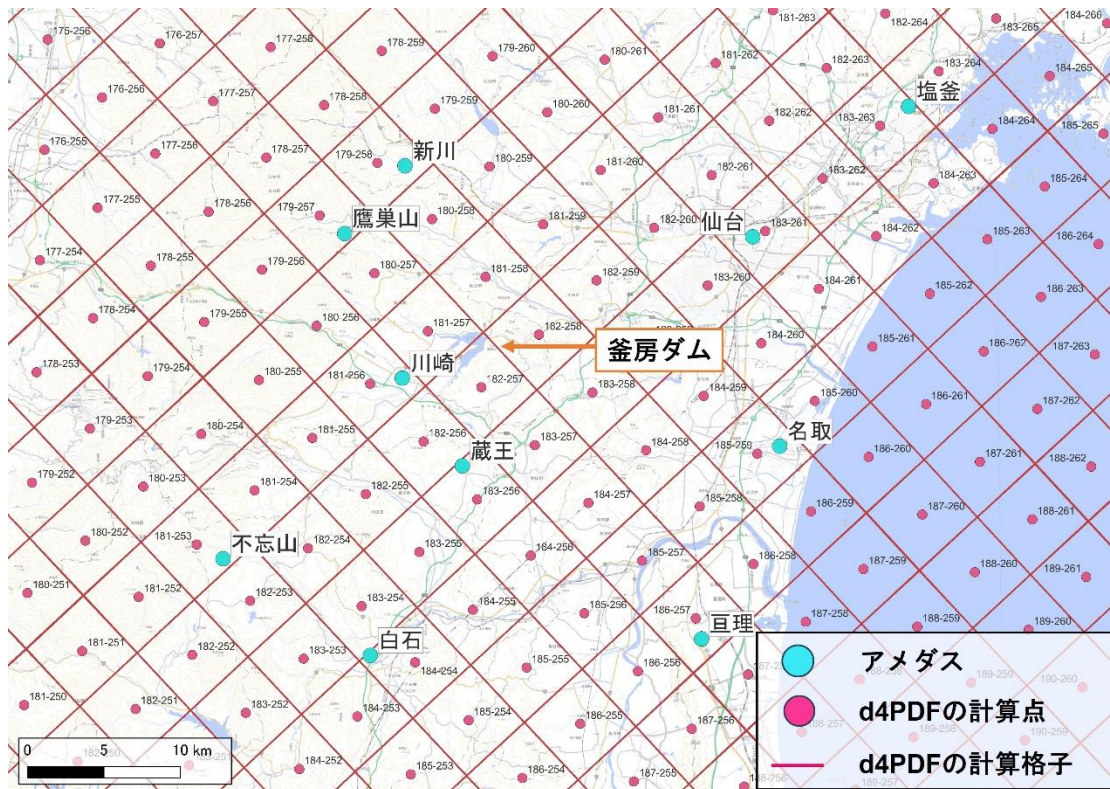


図 2-2 釜房ダム周辺の計算地点とアメダス観測所

d4PDF の計算結果と観測値の両者に系統的な誤差が見られるか確認し、誤差が大きい場合は観測結果を用いてバイアス補正を行うこととなる。バイアス補正については資料編を参照。

2.2 解析手法

気温と降水量の観測値と将来実験の計算結果の比較を行った。 将来実験との比較にあたり、観測値で見られるトレンドと比較する目的で、1977 年から連続したデータを有する新川地点での解析を行った。

本業務では 2℃上昇実験の結果を用いることを基本とする。 湖沼計画の間隔（約 10 年）を考慮すると、約 20 年先までの予測を行うのが妥当であると考えた。従って、2040 年頃の気象場を予測した 2℃上昇実験を用いることとした。

2.3 気温

観測値の年（月）平均気温時系列グラフと、2℃上昇実験で得られた年（月）平均気温の比較を行った。なお、2℃上昇実験はバイアス補正済みのデータを用いている。観測値は1977年01月01日から2022年12月31日までのデータを用いた。2℃上昇実験は30年×12パターンのデータを用いた。従って、年平均気温と各月の平均気温は30年×12パターンの360通り存在する。これら360通りの計算結果から平均値と標準偏差を求め、観測値と比較を行った。

① 年平均気温

新川地点における年平均気温の観測値と、2℃上昇実験における年平均気温を図2-3に示す。2℃上昇実験は360通りある計算結果の平均値と標準偏差の幅を示した。2℃上昇実験における平均値は観測値における最大値を1℃弱上回った値であり、気候変動の影響が明確に表れている。

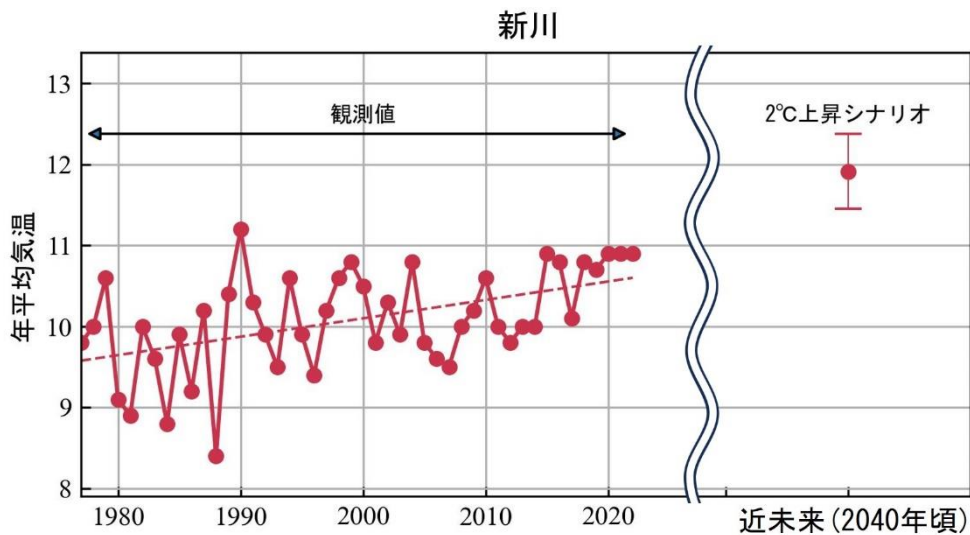


図 2-3 新川地点における年平均気温の観測値の時系列データと、2℃上昇実験における年平均気温。エラーバーは標準偏差を示す。

② 月平均気温

新川地点における月平均気温の観測値と、2℃上昇実験における月平均気温を図 2-4 と図 2-5 に示す。代表として有意な上昇傾向が見られた 3 月と 9 月を選択した。2℃上昇実験の気温は観測値における回帰直線の延長線上に存在することが分かる。年平均気温の解析では 2℃上昇実験における平均値は観測値の最大値を上回っていたが、3 月と 9 月の平均気温では 2℃上昇実験における平均値は観測値の変動幅の中に納まっている。3 月、9 月平均気温は観測値でも変動が大きく、2℃上昇実験に近い気温の年が存在したことが分かる。

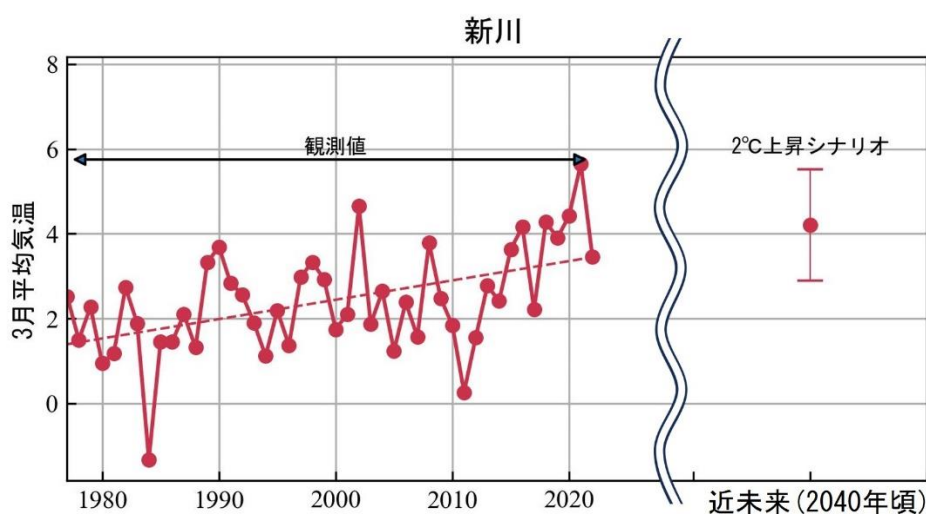


図 2-4 新川地点における 3 月平均気温の観測値の時系列データと、2℃上昇実験における年平均気温。エラーバーは標準偏差を示す。

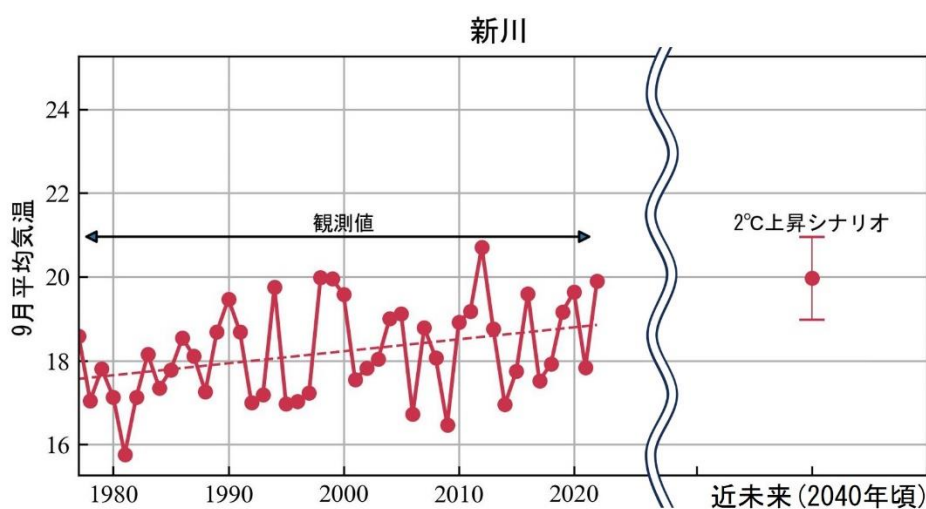


図 2-5 新川地点における 9 月平均気温の観測値の時系列データと、2℃上昇実験における年平均気温。エラーバーは標準偏差を示す。

2.4 降水量

観測値と 2℃上昇実験の年降水量、年最大日降水量の比較を行った。 使用したデータの期間は気温と同様である。これらデータから平均値と標準偏差を求め、観測値と比較を行った。なお、2℃上昇実験はバイアス補正済みのデータを用いている。

新川地点における年降水量と 2℃上昇実験の平均値と標準偏差を図 2-6 の左側に、年間最大日雨量の平均値と標準偏差を図 2-6 の右側に示した。年降水量に着目すると、平均値に大きな差は見られない一方、標準偏差が少し大きくなっている事が分かる。 このことから、1年間の降水量は将来的に大きく変化しないが年によるバラつきが多少大きくなると考えられる。 一方、年間最大日雨量に着目すると、平均値・標準偏差ともに観測値よりも 2℃上昇実験の方が大きくなっていることが分かる。このことから、年間最大日雨量のような極端な降雨は将来的により強い降水が発生するようになるが、その強度は年によってかなりバラつきがあると考えられる。

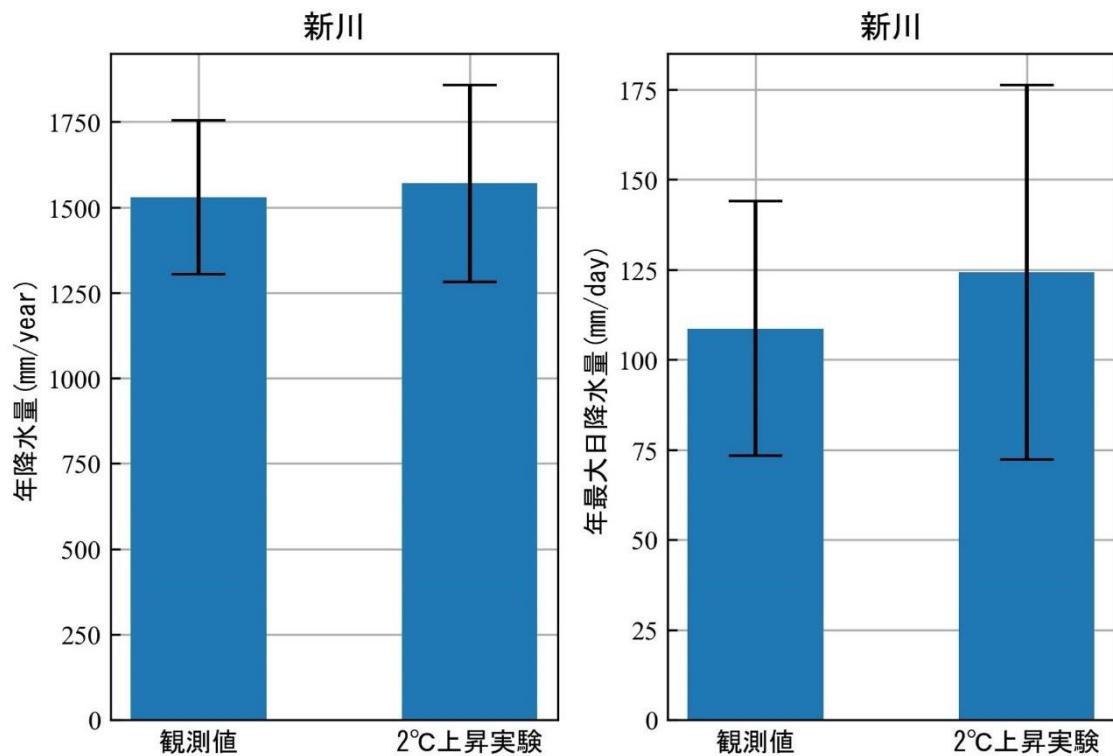


図 2-6 新川地点における年降水量と年間最大日雨量の観測値と 2℃上昇実験の比較。エラーバーは標準偏差を表す。

3 まとめ

川崎、蔵王及び新川地点における 1977 年から 2022 年の観測値を用いて、現時点における気温と降水量の解析を行った。また、新川地点における気候予測データ d4PDF の 2℃上昇実験の計算結果を用いて、将来実験における気温と降水量と観測値の比較を行った。2℃上昇実験の計算結果を用いた理由は、湖沼計画の間隔（約 10 年）を考慮すると、約 20 年先までの予測を行うのが妥当であると考えたからである。従って、2040 年頃の気象場を予測した 2℃上昇実験を用いることとした。

結果を以下に記す。

3.1 気温

① 年平均気温

- ✓ 観測値の解析では、蔵王と新川地点で年平均気温に有意な上昇傾向が見られた。
- ✓ 2℃上昇実験の年平均気温は観測値の年平均気温を上回っている。

② 月平均気温

- ✓ 観測値の解析では、特に 3 月の平均気温が大きく上昇していることが判明した。
- ✓ 2℃上昇実験において、3 月と 9 月の月平均気温は観測値における平均値よりも上昇する。

3.2 降水量

- ✓ 観測値の解析では、年降水量・年最大日降水量ともに有意な上昇傾向は見られなかった。
- ✓ 年降水量は観測値と 2℃上昇実験に大きな差異は見られなかった。
- ✓ 年最大日降水量は 2℃上昇実験の方が平均値・標準偏差ともに観測値を上回っていた。このことから、年間最大日降水量などの極端現象は将来にかけてより強い強度で現れると考えられる。

4 今後の予定

4.1 将来シナリオの計算結果の整理

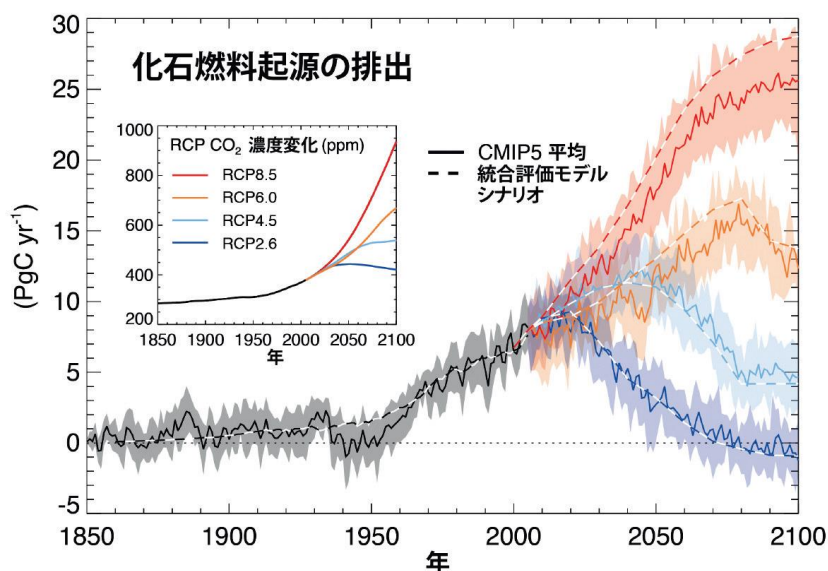
現時点で整理している 2℃上昇実験のデータは新川地点のみであるため、他地点においても 2℃上昇実験のデータの整理を行い、観測値との比較を行う。ここで整備した 2℃上昇実験のデータが今後の流域解析モデル、水質モデルの入力値となる。

4.2 今後の計算で使用するシナリオの作成

2℃上昇実験のデータのうち、特徴的なデータを何パターンか抽出し、今後の計算で用いるための気候変動シナリオを作成する。シナリオ作成の例として、2℃上昇実験の降水量のうち、年降水量の多寡から将来シナリオにおける豊水年、平水年、渇水年にあたる計算結果を抽出し、これを釜房ダムの将来シナリオとする案が考えられる。

5 気候予測シナリオ（RCPシナリオ）について

気候予測シナリオについて、IPCC（Intergovernmental Panel on Climate Change：気候変動に関する政府間パネル）が報告したAR5（Fifth Assessment Report: Climate Change 2013：第5次評価報告書）にて用いられたものを基本とする。RCPシナリオ（Representative Concentration Pathways）とは、AR5の気候予測モデルで用いられる温室効果ガスの代表的な濃度の仮定（シナリオ）のことである。気候変動の予測を行うためには、放射強制力（単位： W/m^2 ）をもたらす温室効果ガスや大気汚染物質の排出量などが将来どのように変化するか仮定する必要がある。AR5ではRCP2.6、RCP4.5、RCP6.0、RCP8.5と4つのシナリオが用意されている。なお、放射強制力は何らかの要因（例えば二酸化炭素濃度の変化、エアロゾル濃度の変化、雲分布の変化等）により地球気候系に変化が起こったときに、その要因が引き起こす放射エネルギーの収支（放射収支）の変化量（ W/m^2 ）として定義される。RCPに続く数値は2100年頃のおおよその放射強制力である（RCP2.6シナリオでは約 $2.6 \text{ W}/\text{m}^2$ 、RCP4.5シナリオでは約 $4.5 \text{ W}/\text{m}^2$ 、RCP6.0シナリオでは約 $6.0 \text{ W}/\text{m}^2$ 、RCP8.5シナリオでは約 $8.5 \text{ W}/\text{m}^2$ ）。各シナリオにおける化石燃料由来のCO₂排出量を図5-1に示した。なお、RCP2.6はCO₂等の排出を抑えるため気温上昇が少ないシナリオで、RCP8.5がCO₂等の排出を抑えないため気温上昇が大きいシナリオである。



出典：「気候変動による湖沼の水環境への影響評価・適応策検討に係る手引き」（令和3年3月，環境省水・大気環境局水環境課）

図 5-1 RCPシナリオに基づくCO₂濃度変化（図内側）とRCPシナリオに対応する化石燃料起源のCO₂排出量

なお、最新版として第 6 次評価報告書（AR6）が既出であり、RCP シナリオの代わりに SSP シナリオ（共有社会経済経路）が使用されている。これらは SSPx-y と表記され、x は 5 種の SSP（1：持続可能、2：中道、3：地域対立、4：格差、5：化石燃料依存）、y は RCP シナリオと同様に 2100 年頃のおおよその放射強制力（単位は W/m²）を表す。RCP シナリオと SSP シナリオの対応は表 5-1 の通りである。

表 5-1 AR6 で使われている主なシナリオ

シナリオ	概要	近い RCP シナリオ
SSP1-1.9	持続可能な発展の下で、工業化前を基準とする 21 世紀末までの昇温（中央値）を概ね（わずかに超えることはあるものの）約 1.5℃以下に抑える気候政策を導入。21 世紀半ばに CO ₂ 排出正味ゼロの見込み。	該当なし
SSP1-2.6	持続可能な発展の下で、工業化前を基準とする昇温（中央値）を 2℃未満に抑える気候政策を導入。21 世紀後半に CO ₂ 排出正味ゼロの見込み。	RCP2.6
SSP2-4.5	中道的な発展の下で気候政策を導入。2030 年までの各国の「自国決定貢献（NDC）」を集計した排出量の上限にほぼ位置する。工業化前を基準とする 21 世紀末までの昇温は約 2.7℃（最良推定値）。	RCP4.5（2050 年までは RCP6.0 にも近い）
SSP3-7.0	地域対立的な発展の下で気候政策を導入しない中～高位参照シナリオ。エアロゾルなど CO ₂ 以外の排出が多い。	RCP6.0 と RCP8.5 の間
SSP5-8.5	化石燃料依存型の発展の下で気候政策を導入しない高位参照シナリオ。	RCP8.5

6 バイアス補正について

6.1 バイアス補正とは

気候予測データは気候モデルによって計算される。気候モデルは自然界で起こっている現象全てを計算している訳ではなく、代表的と思われる現象のみを取り扱い計算を行う。従って、気候モデルで自然現象を完全に再現することは難しく、気候モデルの計算結果の精度や誤差を評価しておく必要がある。過去の気候であれば観測値と気候モデルの計算結果の比較が可能である。計算結果と観測値の間に見られる誤差が系統的なものである場合、これをバイアスと呼び、気候モデルが系統的に持っている誤差であると考え。例えば気候モデルが常に現実より3°C高い気温を計算する場合、この3°Cをバイアスと呼ぶ。

観測値との比較で得たバイアスを参考に、気候モデルの計算結果に補正をかけることをバイアス補正と呼ぶ。バイアス補正は、都合のいいようにモデルの出力を加工する「データの捏造」とは異なり、「気候モデルにはバイアスがあるが、気候変動に対する気候システムの変化は信頼する」という前提の下に行われる。

6.2 バイアス補正を行った例

新川地点における年平均気温について、観測値と過去実験値の比較を図 6-1 に示す。上図がバイアス補正前、下図がバイアス補正後である。図 6-1 上図を見ると、過去実験値は観測値より常に 1~2°C 近く低い値であり、負のバイアスがあることが分かる。このように一定の誤差（バイアス）は見られるが、気温の変化傾向は過去実験値と観測値で概ね一致していることが分かる。続いて、バイアス補正を行った図 6-1 下図を確認すると、過去実験値の範囲と観測値の範囲が概ね一致しており、負のバイアスが除去されたことが分かる。

図 6-2 に観測値と過去実験値、2°C 上昇実験値の年平均気温について、バイアス補正前とバイアス補正後のものを比較したものを示す。観測値と過去実験値から得たバイアス補正值を使用し、2°C 上昇実験のバイアス補正を実施している。バイアス補正をすることで、観測値と過去実験値の平均値が一致していることが分かる。また 2°C 上昇実験値に着目すると、バイアス補正前では観測値から約 1°C の上昇であるのに対し、バイアス補正後では 2°C 上昇実験値は観測値から約 2°C の上昇であることが分かる。

なお、バイアス補正にはクオンタイルマッピング型補正手法を用いた。詳細は「アメダス観測点を対象とした d4PDF バイアス補正降水量データセットの開発、土木学会論文集 B1(水工学)、Vol.73、No.4、I_121-I_126、2017」を参照。

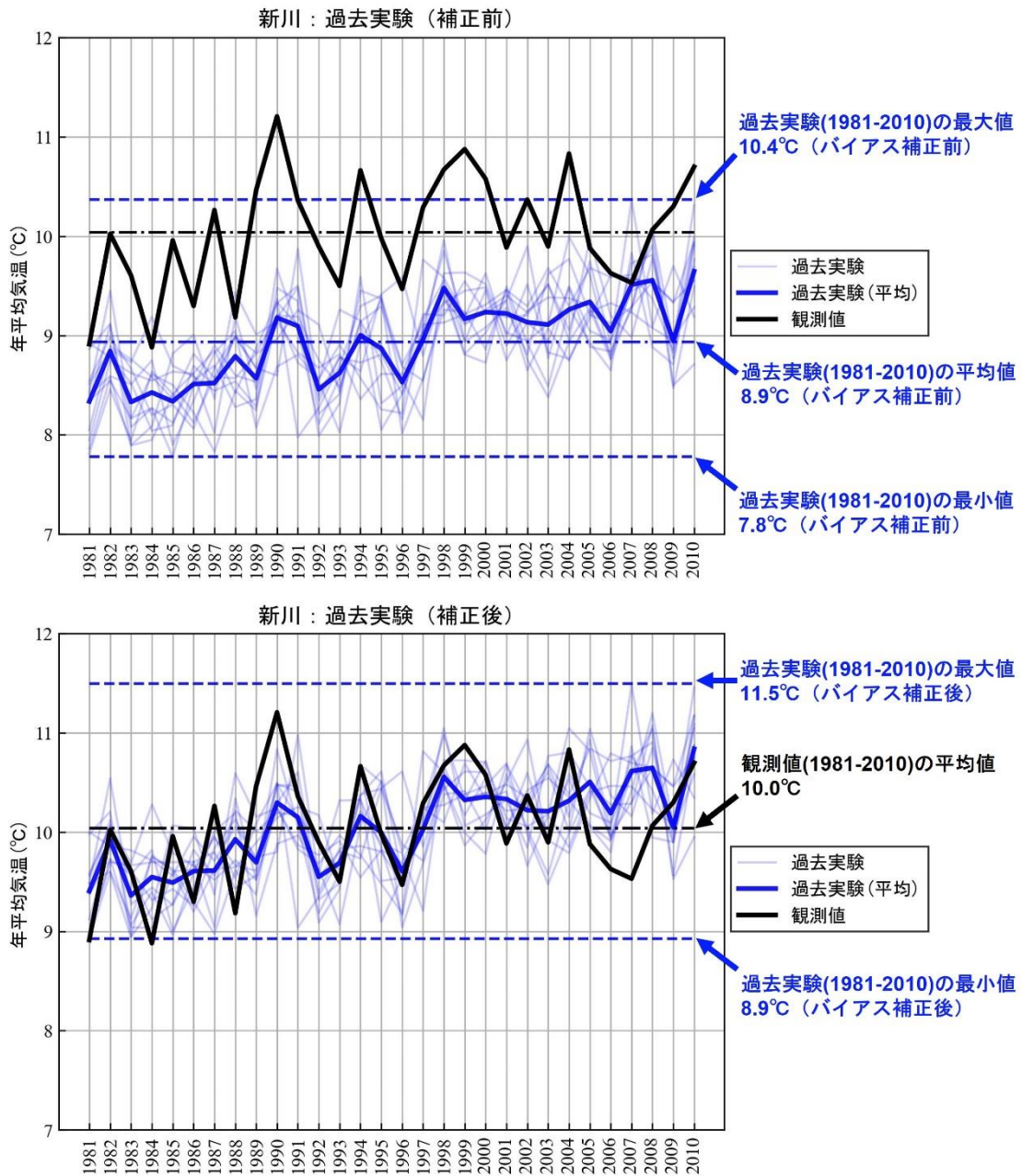


図 6-1 観測値と過去実験値の比較（上図：バイアス補正前、下図：バイアス補正後）

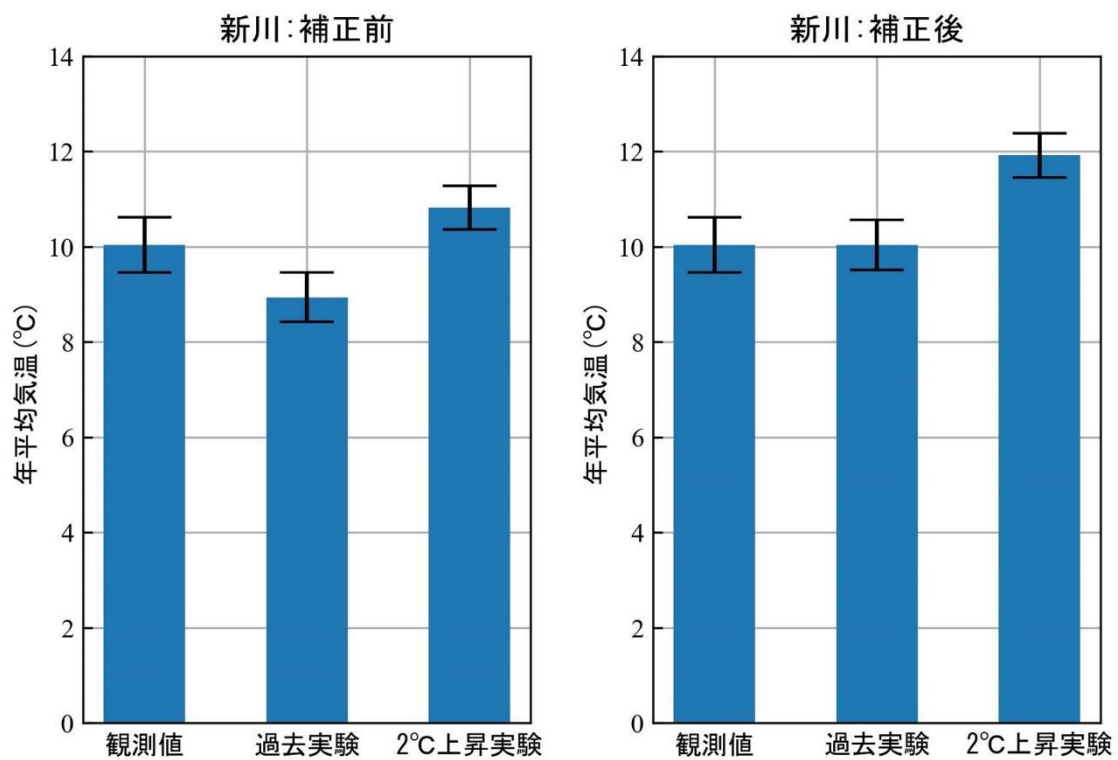


図 6-2 新川地点における年平均気温。左図がバイアス補正前、右図がバイアス補正後。
エラーバーは標準偏差を表す。