

気候変動による水資源への影響評価 ガイドライン(案)

令和 年 月

国土交通省 水管理・国土保全局
水資源部 水資源計画課

は じ め に

目 次

1. ガイドラインの位置づけ	1
2. 本ガイドラインの構成と活用にあたっての基本的事項	3
3. 気候変動による水資源への全国的な影響	7
4. 気候変動による水資源への影響評価手法	14
4.1 影響評価の手順	14
4.2 現状把握	16
4.3 気象要素への影響の把握	21
4.3.1 気象要素への影響把握の基本的な考え方	21
4.3.2 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（d4PDF）の利用	22
4.3.3 バイアス補正	25
4.4 河川流量への影響把握	28
4.4.1 流出計算	28
4.4.2 河川流量への影響	34
4.5 水資源への影響把握	36
4.5.1 水運用計算	36
4.5.2 水資源への影響	39
5. 評価結果の活用イメージ	42
5.1 近年深刻な渇水が発生している流域	45
5.2 水需要が大きい流域	46
5.3 将来降雪や融雪の影響が大きく現れる可能性がある流域	47
5.4 将来水資源が増加する可能性がある流域	48

1. ガイドラインの位置づけ

- 本ガイドラインは、気候変動による水資源への影響について評価手法等に関する現時点の知見をとりまとめたものである。
- 本ガイドラインを参考に、気候変動による水資源への影響に関する評価結果が流域の関係者間で共有され、流域総合水管理における水資源の有効な利用に資する取組が推進されることを想定している。

【解説】

<背景・目的>

気候変動は、将来、無降雨日数の増加、積雪量の減少・融雪の早期化などの降水パターンの変化や蒸発散量の増加による河川流量の減少等の流量パターンの変化を引き起こすと言われており、従来どおりの水資源の利用が困難になるおそれがある。

このため、各流域において気候変動がもたらす影響について関係者間で問題意識を共有した上で、限りある水資源の有効活用に向けた議論を進めていく必要がある。

そこで本ガイドラインでは、最新の技術的知見に基づき、気候変動による水資源への全国的な影響を整理するとともに、各流域でその影響を算出・評価する手法を体系的に整理し、とりまとめるものである。

本ガイドラインでは、降水・河川流量・ダム貯留水といった供給側（以下、供給側）の将来変化を対象としてとりまとめている。

本ガイドラインを活用した影響評価を行うことで、将来の水資源量の変化傾向等が明らかとなることから、流域総合水管理における水資源の有効利用に資する取組として、各流域の関係者間で評価結果や問題意識が共有され、当面のソフト対策や制度的な課題も含めた議論が行われることを想定している。

なお、本ガイドラインに基づき影響評価を行う主体としては、流域総合水管理に係る取組の担い手の一員であり、観測データや施設情報等を保有する河川管理者が適任であると考えられるが、地域の実情に応じた丁寧な議論が必要になると考えられることから、当面の間は、全国 109 の一級水系のうち一部の水系を対象として、国の河川管理者が評価を行うことを想定している。

<需要側の扱い>

本ガイドラインでは、供給側の変化を対象としており、需要側については扱わないが、ガイドラインをもとに試算された河川流況を用い、各流域の状況に応じて、需要側の変化を考慮し総合的に検討することを否定するものではない。

◆留意事項◆

- ✓本ガイドラインに基づく評価結果は、流域の関係者が連携した既存施設の有効活用等による総合的な水のマネジメントの推進において活用されることを想定しているものであり、評価結果をもって直ちに施設計画に用いることは想定していない。

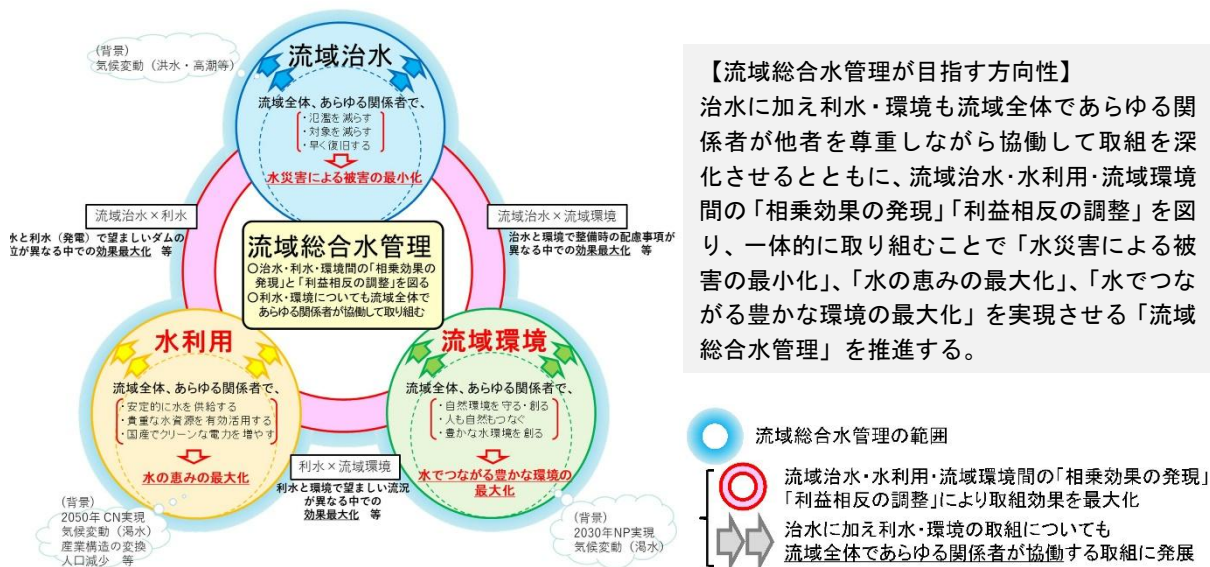


図 1.1 流域総合水管理のイメージ

出典：「流域総合水管理のあり方について」答申参考資料、R7.6

2. 本ガイドラインの構成と活用にあたっての基本的事項

- 本ガイドラインでは、読者の理解を助けるため、まず、気候変動による水資源への全国的な影響について記載した後、各流域で実施する影響評価手法について記載した。
- さらに、各流域の状況に応じて様々な議論が円滑に進むよう、参考として評価結果の活用イメージも併せて記載した。

【解説】

<本ガイドラインの構成>

各流域で気候変動による水資源への影響について関係者間で様々な議論を進めていくため、本ガイドラインは、以下の流れで構成されている。

まず Step1 では、気候変動による水資源の全国的な影響を概観し、その傾向を把握することが重要である。このため、各種報告書や既往研究で示されている気候変動による水資源への全国的な影響を整理した（第3章）。

Step2 では、各流域の課題等を明らかにするため、気候変動による水資源への影響評価を実施することが重要である。このため、各流域で気候変動による水資源への影響を定量的に評価する手法とその評価結果の例について解説した（第4章）。

Step3 では、各流域において評価結果を関係者間で共有した上で、地域の実情に応じた課題や適応策の検討などの幅広い議論が行われることを想定している。本ガイドラインの対象は Step2 の影響評価の実施までであり、その先の議論については各流域の判断に委ねられるものであるが、議論の参考となるよう、本ガイドラインの5章では、評価結果の活用イメージも併せて示した（第5章）。

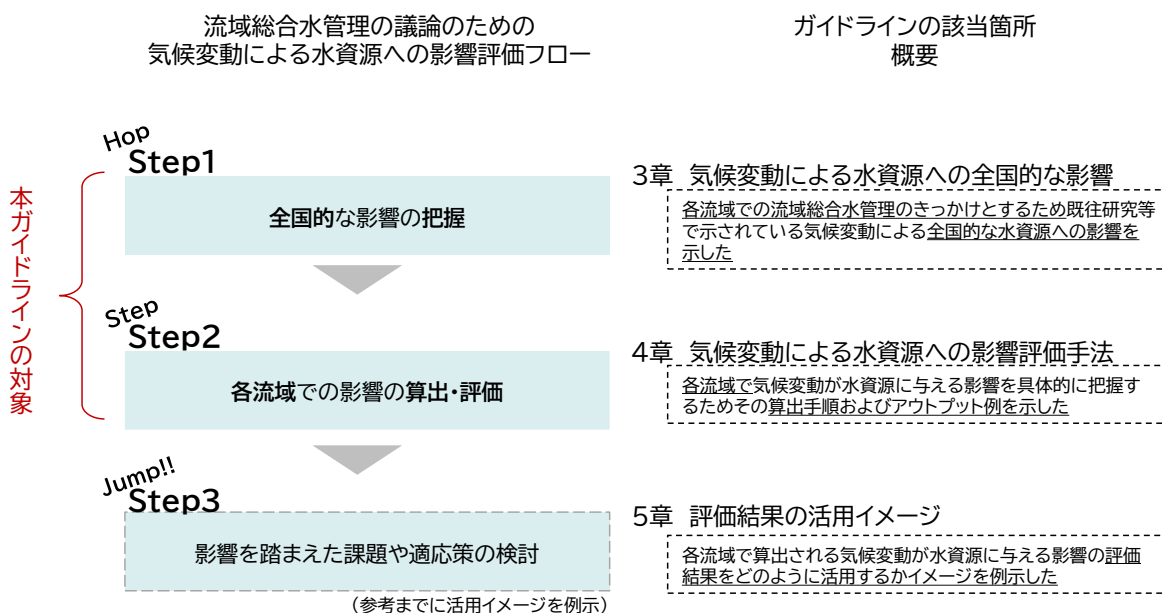


図 2.1 本ガイドラインの構成

＜基本的事項＞将来予測に用いるデータの特徴

本ガイドラインでは、主に d4PDF（気候変動対策に資するアンサンブル気象予測データベース）を用いた将来予測結果を掲載している。（d4PDF の詳細は 4 章 3 節 2 項参照）

d4PDF には過去実験と将来実験（2℃上昇実験、4℃上昇実験）のデータが含まれており、本ガイドラインでは将来実験のデータとしては主に 2℃上昇実験のデータを用いている。2℃上昇実験では 4℃上昇シナリオ(RCP8.5)における 2040 年、4℃上昇実験では 4℃上昇シナリオ(RCP8.5)における 2090 年の温室効果ガス等の予測値を境界条件として計算された気温や降水量等の気象データが用いられているが、将来実験の結果は特定の年次を指すものではない。

このため、d4PDF を用いた分析では、将来実験の結果が顕在化する時期やそこに至るまでの途中経過については把握することができない。

経年的な変化傾向を把握する必要がある場合には、d4PDF に加え、「全球及び日本域における 150 年連続実験データ」を用いることも有効である。

また、d4PDF は多数のアンサンブル（複数回の実験例）を用いることにより、単一の結果ではなく、不確実性の幅を考慮した情報を提供するものである。各流域においてこれらの結果を活用するにあたっては、このような不確実性を踏まえて議論を進める必要がある。

なお、本ガイドラインは、現時点における最新の技術的知見の一部をとりまとめたものであり、今後の技術的知見の進展や地域の実情に応じてガイドラインに記載のない手法を用いて評価を行うことを妨げるものではない。

＜基本的事項＞人為的要素の影響

評価結果には、ダム操作や取水等の人為的要素が含まれている河川流量と含まれていない河川流量（自然流量）があり、水資源への影響を適切に解釈するためには人為的要素が含まれているかどうかを把握することが重要である。そのため、本ガイドラインで示す評価結果のうち、人為的要素が含まれるものについては、その旨を明記することとした。

【コラム1】 気候モデル/温室効果ガス排出シナリオ/将来予測データセットについて

■ 気候モデル

気候モデルとは、大気や海洋の物理法則を方程式で表し、気候の変化を数値計算するモデルの総称であり、日本の気候予測では気象研究所が開発したMRI-AGCM3.2（水平解像度 60km / 高解像度版 20km）が中核的に用いられている。ただし、河川流域スケールでは、その出力を境界条件として日本域を高解像度で詳細化

（力学的ダウンスケーリング）したNHRCM

（気象研究所非静力学地域気候モデル、水平解像度 20km/5km/2km）が用いられることも多い。

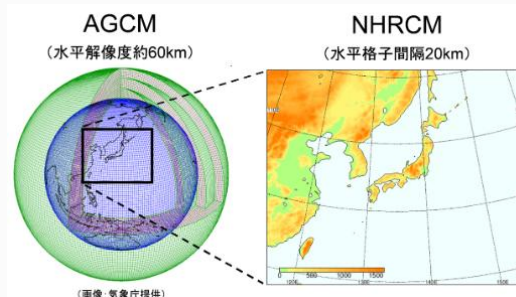


図 2.2 MRI-AGCM3.2 と NHRCM

■ 温室効果ガス排出シナリオ

気候モデルを用いた将来予測では、2100年頃の温室効果ガスの大気中濃度と、現在からその濃度に至るまでの温室効果ガス排出の経年変化を仮定した代表的濃度経路（RCP）シナリオが用いられている。RCP2.6は低位安定化シナリオとも呼ばれ、工業化以前と比べて世界の平均表面気温の上昇を2℃未満に抑えることを目指す想定であり、2℃上昇シナリオ（以下、

「2℃上昇シナリオ（RCP2.6）」と表記）といわれ、温室効果ガスの排出抑制対策を定めたパリ協定における2℃目標に対応する。また、RCP8.5は高位参照シナリオとも呼ばれ、追加的な緩和策を取らない場合を想定しており、4℃上昇シナリオ（以下、「4℃上昇シナリオ（RCP8.5）」と表記）といわれる。

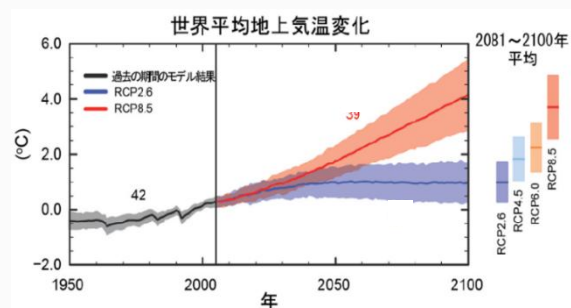


図 2.3 シナリオ毎の世界平均地上気温の変化

■ 将来予測データセット（d4PDF等）

気候モデルに温室効果ガス排出シナリオを条件として与えた予測計算が行われており、下表に示す気温や降水量などの気象要素の将来予測データセットが公表されている。

表 2.1 MRI-AGCM3.2 及び NHRCM に関連する将来予測データセットの概要

データセット	排出シナリオ	解像度
全球及び日本域気候予測データ （高解像度実験）	RCP2.6・RCP8.5	全球:20km 日本域:5km/2km
マルチシナリオ・マルチ物理予測データ	RCP2.6・RCP4.5・RCP6.0・RCP8.5	全球:60km 日本域:20km
全球及び日本域150年連続実験データ	RCP2.6・RCP4.5・RCP6.0・RCP8.5	全球・日本域:60km/20km
全球及び日本域確率的気候予測データ （d4PDFシリーズ）	RCP8.5の2090年(+4℃)/2040年(+2℃)/2030年 (+1.5℃)の温室効果ガス濃度	全球:60km 日本域:20km

（引用文献）

「気候予測データセット 2022 解説書」、「日本の気候変動 2025」の記述を要約・再構成

【コラム2】気候モデルの予測データが持つ不確実性

■不確実性の定義^[1]

「確実性」とは、どのような事象(事態)が起こるかどうかが確定的に分かっている場合、一方で「不確実性」とは、起こりうる幾つかの事象(事態)は分かっているが、どの事象(事態)がどのような確率＝可能性で発現するかが定量的に分かっていない場合をいう。

■不確実性の3要因^[2]

気候モデルによる温暖化予測では「不確実性」は避けられず、予測結果と合わせて考慮すべき要素となり、以下に示す3要因に整理される。

①「排出シナリオ」に起因する不確実性

今後の社会・経済の動きによって、温室効果ガスの排出量は大きく変わり、将来の気候は「どのような社会を選ぶか」によって左右される。

▶ 例として、d4PDF の場合は、4℃上昇シナリオ (RCP8.5) における 2040 年時点の温室効果ガス等の予測値を境界条件とした予測結果(2℃上昇実験)と、2090 年時点の温室効果ガス等の予測値を境界条件とした予測結果(4℃上昇実験)となる

②「モデルの応答」に起因する不確実性

気候モデルは物理法則に基づいて作られており、雲や降水、海洋との相互作用などを完全に表現することは難しく、モデルの構造そのものに起因して将来変化の出方が異なる。

▶ 例として、d4PDF の場合は、気象研究所全球大気モデル MRI-AGCM3.2 による全球実験と日本域を対象とする NHRCM 領域実験を組合せたモデル構造に伴う予測結果となる

③「気候の内部変動」に起因する不確実性

同じ温暖化条件でも、年ごとの気温や降水の現れ方には自然なばらつきが生じる。

▶ 例として、d4PDF の場合は、2 つの摂動(予測計算の初期値等に与える微小差)と 6 種類の海面水温(SST)を組み合わせた計 12 メンバについて、各メンバ 61 年分、合計 732 年分の年毎に異なる予測結果となる

■不確実性を踏まえることの意義

d4PDF は単一モデルによる予測となるため、「モデルの応答」に起因する不確実性を複数モデルで表現するものではない。一方、「気候の内部変動」に起因する不確実性については、6 種類の海面水温と 2 つの摂動を組み合わせた計 12 メンバのアンサンブルデータにより表現しており、さらに、「排出シナリオ」において、1.5℃上昇、2℃上昇、4℃上昇の複数シナリオを用いることで幅を持って把握できる。

ただし、d4PDF を用いる場合でも、使用するメンバ数や採用するシナリオによって、結果に反映される不確実性の範囲は異なる。そのため、使用するデータの特性と、そこに含まれる不確実性を理解した上で評価結果を解釈することが重要である。

(引用文献)

[1] 「ケインズの蓋然性論とナイトの不確実性論:奇跡の1921年を考える」を要約・再構成

[2] 文部科学省・気象庁『日本の気候変動2025 (詳細版)』コラム1「将来予測の不確実性」(pp.27-29)を要約・再構成

3. 気候変動による水資源への全国的な影響

- これまでの観測結果によると、無降水日数の増加や積雪量の減少といった変化傾向が確認されている。
- 将来、気候変動の影響により、積算降水量の変化は小さいが、50mm/日未満の降水量が減少し、50mm/日以上降水量が増加するなど降水パターンの極端化が進む。
- また、本州以南の地域では年最深積雪深及び降雪量が減少し、全国的に蒸発散量は増加する。
- 渇水流量（1/10 渇水流量）は 109 水系のうち 6 水系で増加、71 水系で減少し※、平均では 0.79 倍になるとの予測があり、また渇水の長期化や同時生起も予測されている。

※1%以内の増減を変化なしとした場合

【解説】

<全国的な影響の概要>

一般的に、気候変動による気温の上昇は、大気中の飽和水蒸気量を増加させ、蒸発散量を増大させると言われている。このことは雨の降り方の変化などにも影響しており、極端な大雨の発生頻度の増加や雨の降らない日数の増加、日降雪量 20cm 以上の日数の減少といった変化傾向が、これまでの観測結果から明らかとなっている。^[1]

そこで本章では、気温、降水量、降雪・積雪量、蒸発散量、河川流量について、これまでの観測結果から明らかになっている内容に加え、将来予測として示されている内容を、各種報告書や既往研究等から引用する形で整理し、気候変動による水資源への影響を概観することとした。

<気温>

- ✓日本国内の都市化の影響が比較的小さい 15 地点で観測された年平均気温については、1898～2024 年の間に 100 年当たり 1.40℃の割合で上昇している。^[1]
- ✓20 世紀末（1980～1999 年の平均）と比べた 21 世紀末（2076～2095 年の平均）の気温は、2℃上昇シナリオ（RCP2.6）では約 1.4℃上昇すると予測されている。^[1]
- ✓河川流域を対象にした既往研究によると、4℃上昇シナリオ（RCP8.5）における 2℃上昇時の将来実験※の年平均気温の 109 水系平均値が、過去実験に対して約 2.0℃上昇すると予測されている。^[4]

※以下、「将来実験」のみの場合は「4℃上昇シナリオ（RCP8.5）における 2℃上昇時の将来実験」を示す。

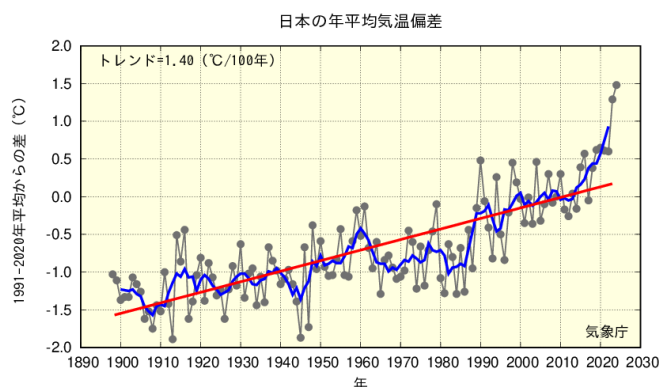


図 3.1 日本の年平均気温偏差の経年変化 (1898～2024)^[1]

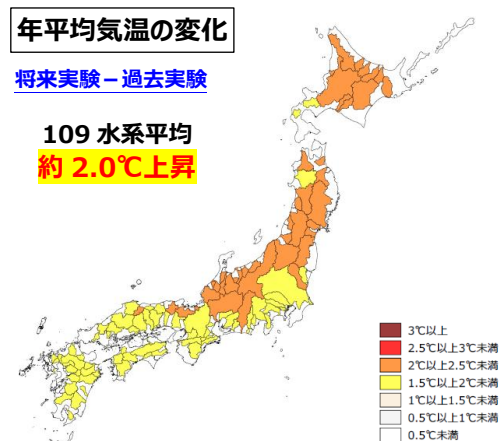


図 3.2 年平均気温の変化 (将来実験－過去実験)^[4]

<降水量>

- ✓気象庁の全国 51 観測所における観測によると、1901 年から 2024 年の期間、日降水量 1.0mm 未満の無降水日は増加しており、増加率は 100 年あたり 9.2 日となっている。[1]
- ✓将来的には、無降水日は 2℃上昇シナリオ(RCP2.6)では有意な変化傾向が確認されていないものの、4℃上昇シナリオ(RCP8.5)では、20 世紀初めから約 9.1 日増加すると予測されている。[1]
- ✓河川流域を対象にした既往研究によると、将来実験による 10 年に 1 回の確率で発生する少雨年の発生頻度は、過去実験に対して約 1.3 倍になると予測されている。[2]
- ✓さらに年積算降水量の 109 水系平均値は、過去実験に対して 3.14mm 減少すると予測されている。特に、日降水量が 1~50mm の年積算降水量が 52.85mm 減少するのに対し、日降水量 50mm 以上の年積算降水量が 49.18mm 増加すると予測されており、降水パターンの極端化が予測されている。[2]

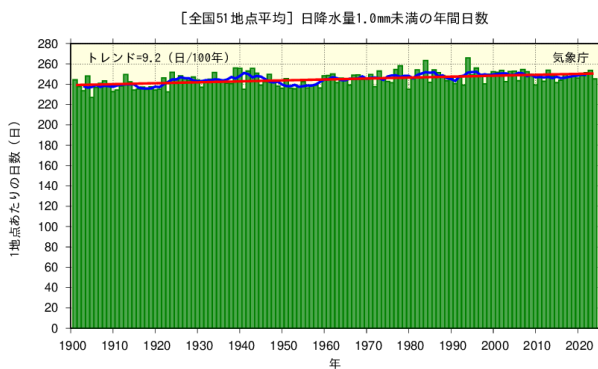


図 3.3 無降水日（日降水量 1.0mm 未満）の年間日数の経年変化(1901~2024)[1]

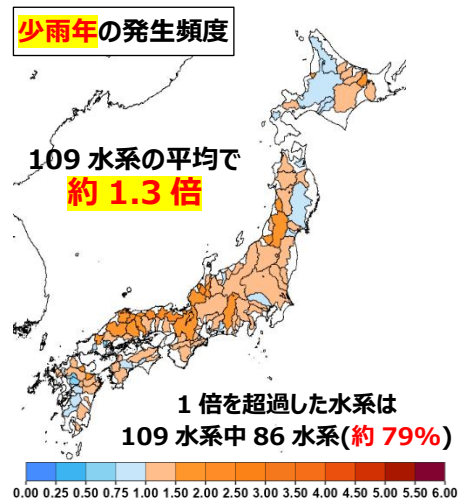
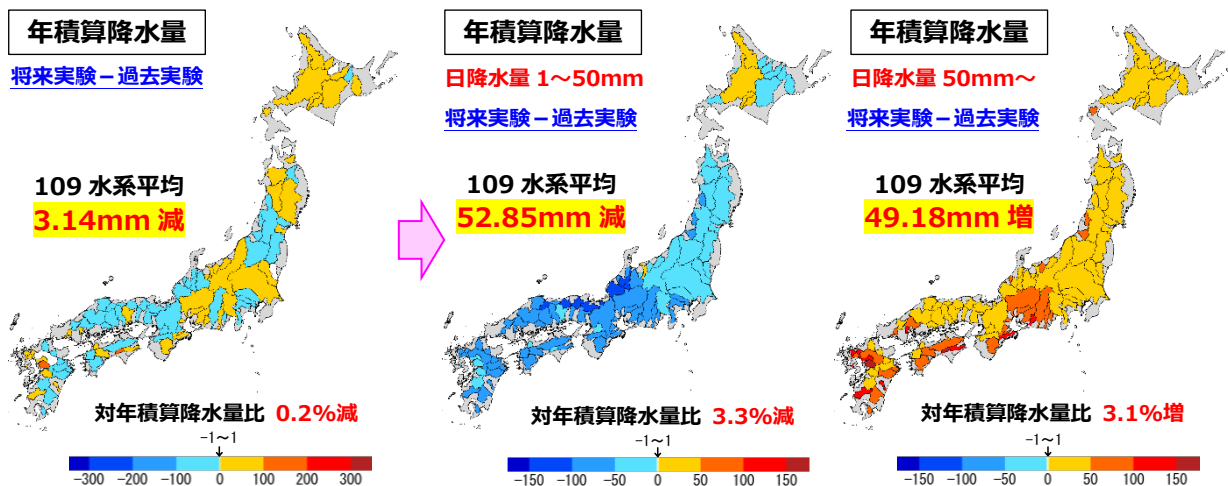


図 3.4 少雨年の発生頻度（将来実験－過去実験）[2]



年積算降水量の変化は小さいが、50mm/日未満の降水量が減少し、50mm/日以上降水量が増加する。
⇒降水パターンの極端化が予測されている。

年積算降水量：2023 年の我が国の年降水量 約 1,585mm（出典：令和 6 年版日本の水資源の現況）

※本研究は気候変動による全国的な影響を検証したものであり、各流域での評価を対象としたものではない。

図 3.5 年積算降水量の変化（将来実験－過去実験）[2]

<降雪・積雪量>

- ✓最深積雪は、1962年以降、日本海側の各地域で減少傾向が確認されている。[1]
- ✓将来的には、2℃上昇シナリオ(RCP2.6)において、本州以南の地域で年最深積雪深及び降雪量が減少すると予測されている。[1]
- ✓一方で、本州の山間部や北海道の内陸部等の一部地域では、極端な大雪時の降雪量が増加する可能性も示されている。[1]
- ✓河川流域を対象にした既往研究によると、将来の降雪・積雪量の減少は、春先の融雪流出の減少・前倒しにつながり、特に中部・北陸から東北の多雪地帯において基底流量(夏~秋季の自然流量)の低下を引き起こす可能性も示されている。[3]

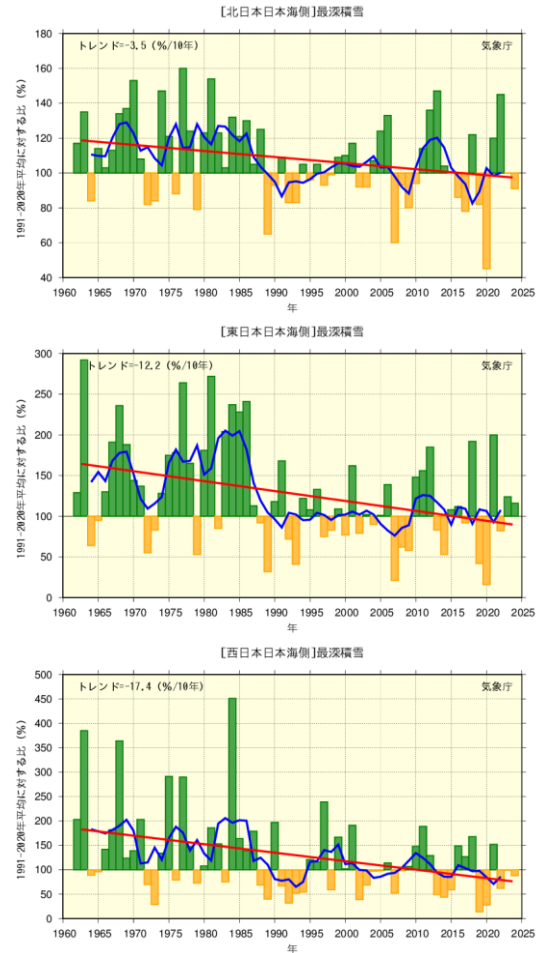
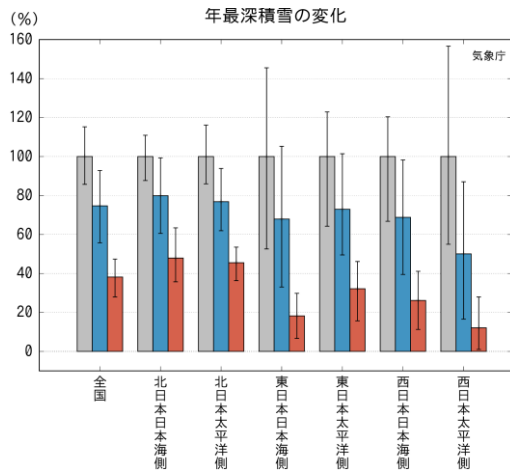


図 3.6 日本の年最深積雪の基準値に対する比率の経年変化(1962~2024年)及び全国及び地域別の年最深積雪の将来変化[1]

<蒸発散量>

- ✓蒸発散量については、全国的な変化傾向を示すデータは揃っていない状況である。
- ✓河川流域を対象にした既往研究によると、将来実験では、年蒸発散量の109水系平均値は、過去実験に対して44.51mm増加すると予測されている。[2]

※本研究は気候変動による全国的な影響を検証したものであり、各流域での評価を対象としたものではない。

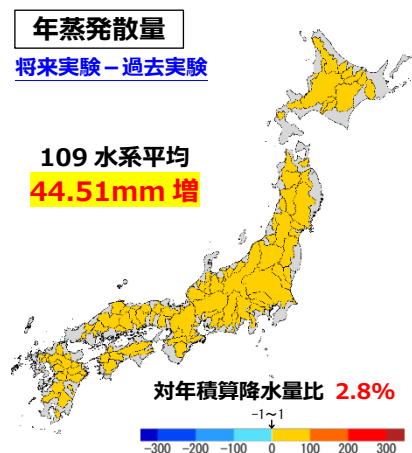
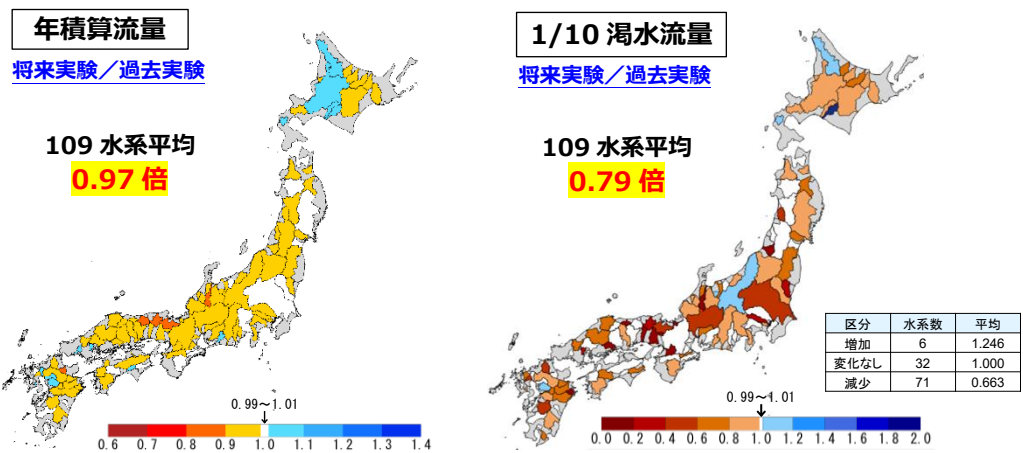


図 3.7 年蒸発散量の変化(将来実験-過去実験) [2]

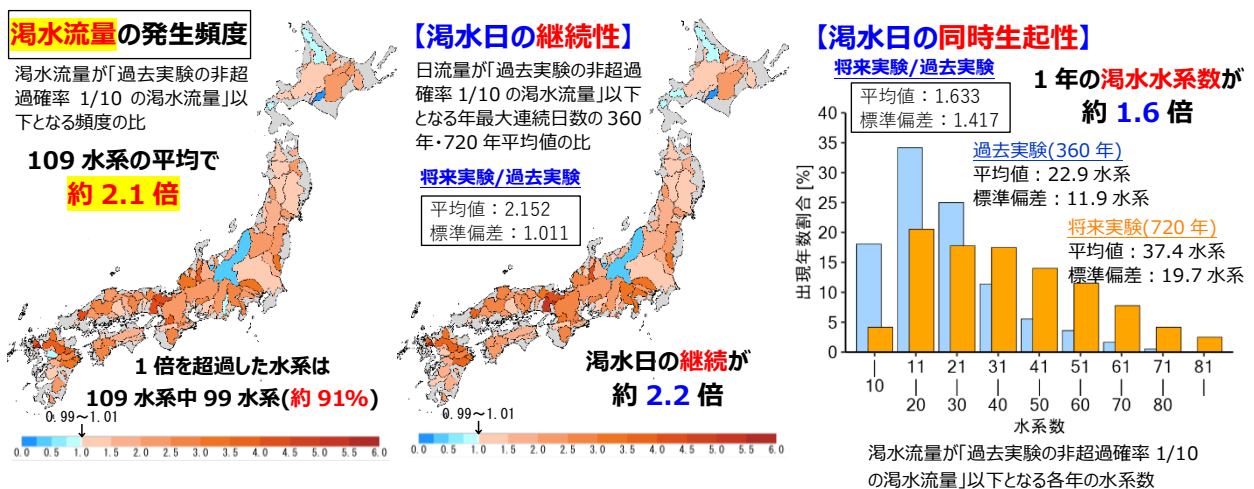
<河川流量>

- ✓観測流量は、ダム操作など地域固有の人為的要素を含むため、全国的な変化傾向を把握することは困難な状況である。
- ✓河川流域を対象にした既往研究によると、将来実験では、年積算流量の109水系平均値は、過去実験に対して0.97倍になると予測され、10年に1回の頻度で発生する渇水流量(1/10渇水流量)は過去実験に対して将来実験が0.79倍になると予測されている。さらに1/10渇水流量を下回る渇水流量の発生頻度は、109水系平均で約2.1倍である。^[2]
- ✓特に、1/10渇水流量については、1%以内の増減を変化なしとした場合、6水系で増加、71水系で減少することが予測されている。^[2]
- ✓さらに、日流量が1/10渇水流量を連続して下回る日数は過去実験に対して約2.2倍(渇水の長期化)に増加し、その水系数も約1.6倍に増加(渇水の同時生起性)すると予測されている。^[2]



※本研究は気候変動による全国的な影響を検証したものであり、各流域での評価を対象としたものではない。

図 3.8 河川流量の変化(将来実験/過去実験)^[2]



※本研究は気候変動による全国的な影響を検証したものであり、各流域での評価を対象としたものではない。

図 3.9 渇水の発生頻度と継続性、同時生起性(将来実験と過去実験の比較)^[2]

(引用文献)

- [1] 「日本の気候変動 2025 –大気と陸・海洋に関する観測・予測評価報告書–」(令和 7 年 3 月 26 日)
<https://www.jma.go.jp/jma/press/2503/26a/ccj2025.html>
- [2] 西村宗倫, 高田望, 坂本光司, 嶋谷祐馬, 柴川大雅, 因幡直希, 仲江川敏之, 池淵周一, 竹下哲也
「WBC-d4PDF5km(2022)を用いた気候変動による渇水への影響のマクロ的評価」
土木学会論文集(地球環境)Vol.81, No.27(2025)、引用した図は本ガイドライン作成時に一部改変している。
- [3] 田中賢治 「超高解像度気候モデルと将来土地利用変化を用いた日本の水資源量の長期変化予測」
土木学会論文集 B1(水工学)Vol.77, No.2(2021)
- [4] 国土技術政策総合研究所によりバイアス補正された過去実験及び将来実験のデータセットに基づき作成

◆留意事項◆

- ✓気象要素（降水量、蒸発散量等）は、将来の不確実性を考慮するため、複数の予測結果を組み合わせた予測（アンサンブル予測）に基づき評価したものである。蒸発散量は土地利用の影響を受けるなど、社会・経済条件等の人為的要素により変化する側面もあるが、当該予測は人為的要素の変化は考慮していない。
- ✓河川流量には、降水や蒸発散、地形・地質等の自然的要素と、土地利用、ダムの補給・貯留、取水・還元等の人為的要素が複合的に影響している。一方、上述の予測では、ダム操作や取水を一定のルールに基づき考慮しているものもあるが、実態に即したダム操作や取水は考慮されていない。また、渇水時には、被害軽減のため、節水協力や他水系からの水融通などの対策が講じられるため、そのような突発的な対応による人為的要素も含まれていない。
- ✓様々な人為的要素の変化により予測結果に変化が生じる可能性があるため、このようなデータの特性を理解した上で、全国的な傾向を示した予測結果として解釈する必要がある。

【コラム3】日本周辺の海面水位の上昇

海面水位の変化は、直接的には水資源に影響を及ぼさないが、海面水位の上昇は海水の遡上範囲を拡大し、河川下流域での水利用（取水）に対して影響を及ぼす可能性がある。

(引用文献)「気候変動影響評価報告書 詳細(2025年度版)」R8.2, 環境省

■既往の観測結果

日本沿岸の海面水位は、1980年代以降、地球温暖化の影響による上昇傾向が現れている。気象庁と国土地理院が連携し、全国13地点の検潮所にGPS観測装置を設置して地盤上下変動の影響を除外した精密な観測を実施しており、その結果、2004～2024年の期間で地盤変動補正後の年平均上昇率は年3.4mm/年と算出している。

日本沿岸の平均海面水位には、人間活動ではなく自然変動によると考えられる十年規模の長周期変動が見られており、1930年頃・1950年頃・1970年頃に水位が高くなる現象が観測されているが、1980年代後半以降は、この自然変動よりも地球温暖化による上昇の影響が顕著になってきている。

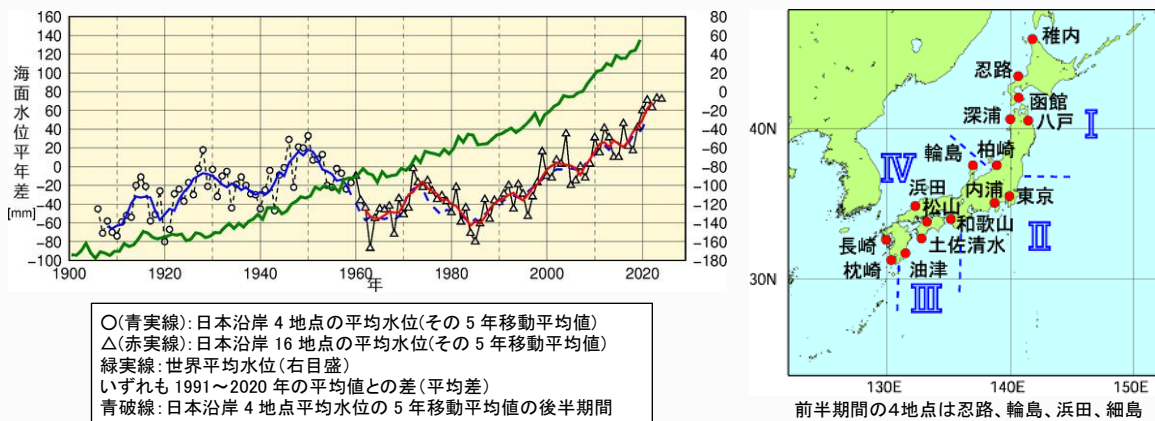


図 3.10 日本沿岸の海面水位の経年変動（1906～2024年）

■将来予測結果

近未来（2031～2050年）の日本沿岸の平均海水面は、20世紀末（1986～2005年）と比較して、RCP8.5（4℃上昇シナリオ）では0.19m、RCP2.6（2℃上昇シナリオ）では0.17mの上昇が予測されており、近未来においては両シナリオ間の差は小さく、将来において一定程度の上昇は避けられないとしている。

表 3.1 20世紀末(1986～2005年)を基準にした海面水位上昇量の将来予測(m)

	シナリオ	海域 I	海域 II	海域 III	海域 IV	4 海域平均	(世界平均)
2031～2050年 平均	2℃ 上昇	0.16 (0.14-0.21)	0.17 (0.14-0.22)	0.16 (0.12-0.22)	0.16 (0.13-0.21)	0.17 (0.14-0.21)	0.16 (0.14-0.21)
	4℃ 上昇	0.19 (0.16-0.24)	0.19 (0.16-0.24)	0.18 (0.14-0.23)	0.19 (0.16-0.24)	0.19 (0.16-0.24)	0.19 (0.16-0.23)
2081～2100年 平均	2℃ 上昇	0.40 (0.30-0.55)	0.40 (0.30-0.56)	0.39 (0.29-0.55)	0.40 (0.31-0.56)	0.40 (0.30-0.55)	0.41 (0.32-0.57)
	4℃ 上昇	0.67 (0.55-0.87)	0.68 (0.56-0.88)	0.67 (0.55-0.87)	0.69 (0.57-0.89)	0.68 (0.56-0.88)	0.67 (0.55-0.87)

(引用文献)

「日本の気候変動 2025」(第9章 海面水位)の記述を要約、図表はいずれも同資料からの抜粋

【コラム4】 季節別の気温・降水量の全国的な傾向

全国 109 水系を対象に、過去実験と将来実験それぞれの平均気温と流域平均降水量の差分を 3 か月ごとに整理した結果（過去実験・将来実験のいずれも 12 メンバの全予測結果を対象に平均化して差分したもの）を図 3.11 及び図 3.12 に示す。

■ 気温

将来の気温は全ての季節で上昇すると予測される。中でも秋季と冬季の上昇幅が大きく、全国的に概ね 2℃以上となる。一方、夏季は全国的に概ね 1.5℃以上 2℃未満、春季は北海道・東北・北陸で 2℃以上、その他の地域で 1.5℃以上 2℃未満の上昇となる。

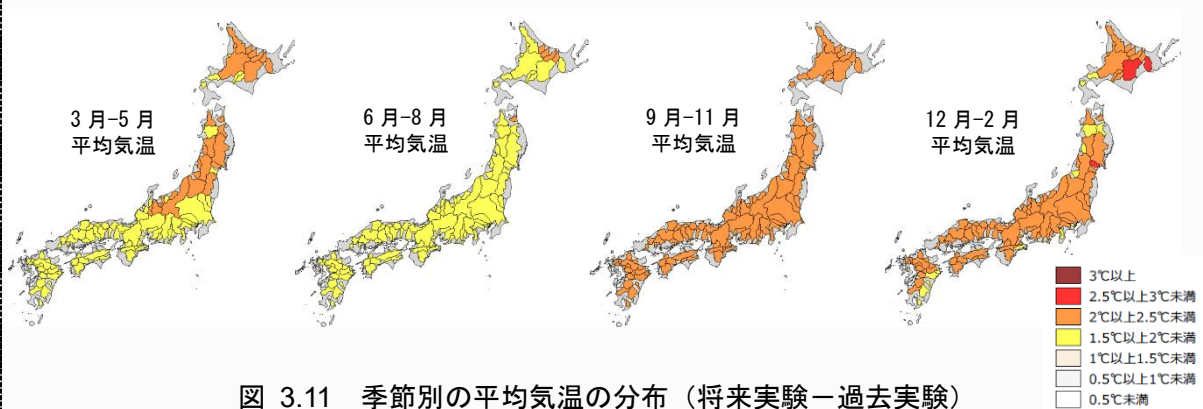


図 3.11 季節別の平均気温の分布（将来実験－過去実験）

■ 降水量

将来の流域平均降水量は、春季と冬季に全国的に増加傾向を示す水系が多い一方、秋季は概ね全国的に減少傾向となる。秋季は、降水量の減少に加え、気温上昇に伴う蒸発散量の増加も見込まれるため、水資源量の減少がより大きくなると予測される。

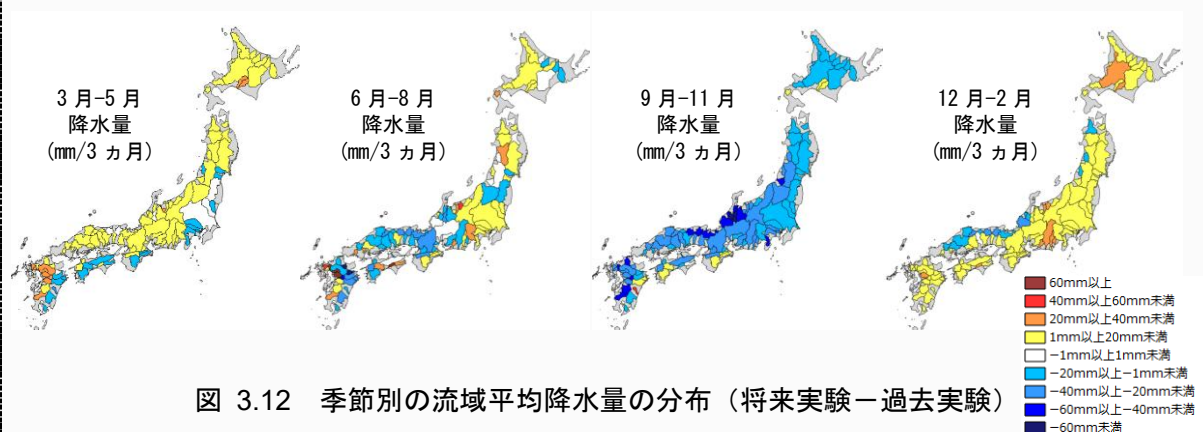


図 3.12 季節別の流域平均降水量の分布（将来実験－過去実験）

（引用文献）

国土技術政策総合研究所によりバイアス補正された過去実験及び将来実験のデータセットに基づき作成

4. 気候変動による水資源への影響評価手法

4.1 影響評価の手順

○各流域では、実績データに基づく現状把握を行った上で、d4PDFを用いた気象要素への影響評価、流出計算による河川流量への影響評価、水運用計算による水資源への影響評価を行うことを基本とする。

【解説】

＜影響評価の手順の概要＞

まず4章2節では、実績資料に基づき、降雨・流量等の季節変化及び経年変化傾向、ダム の運用実績並びに水資源利用の実態等の現状把握を行う必要があることを記載した。その上で4章3節では、外力条件となる気象要素について、将来の不確実性を踏まえ、アンサンブル予測値にバイアス補正を施した値を用いて影響を把握することを記載した。4章4節では、河川流量について、流域特性や水利用形態等に応じて、集中型または分布型の流出計算モデルを構築し、ダム地点や利水基準地点における影響を把握することを記載した。4章5節では、水資源量について、ダムの補給・貯留ルールや取水・還元等の諸条件を加味した水運用計算を実施することにより、自然的要素に人為的要素を加味した影響を把握することを記載した。

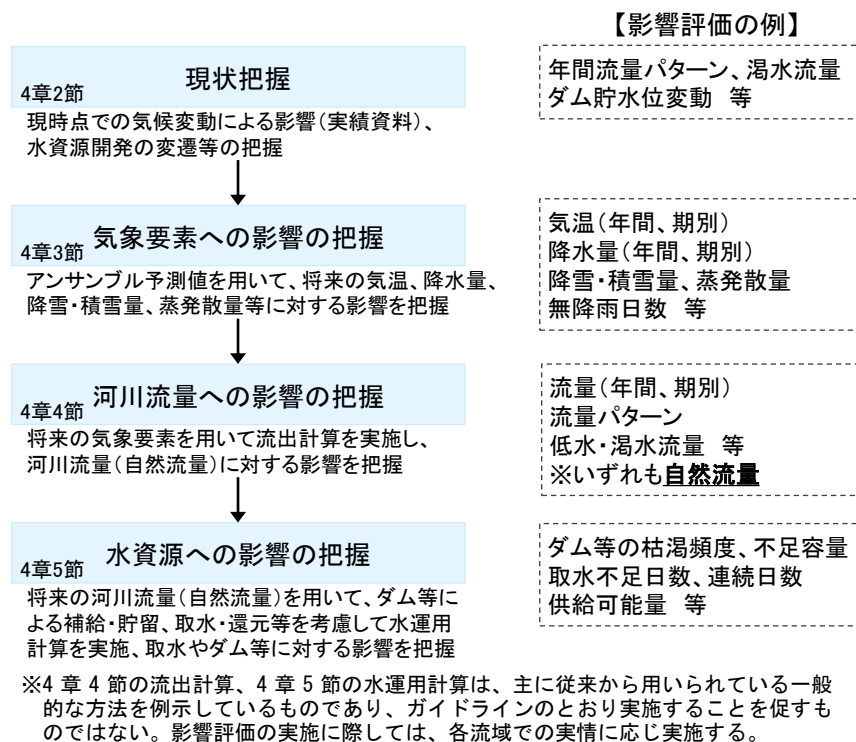


図 4.1 各流域での影響評価の手順と評価結果の例

これらの手順を踏むことによって、各段階において、降水量や無降雨日数の変化、低水・渇水流量や流量波形の変化、ダム等の枯渇頻度や供給可能量等を定量的に評価でき、より具体的な議論や適応策の検討を行うことが可能となる。なお、影響評価に当たっては、必ずしも定量的な評価に限らず、変化傾向の把握にとどまる場合であっても有効な手段となりうる。

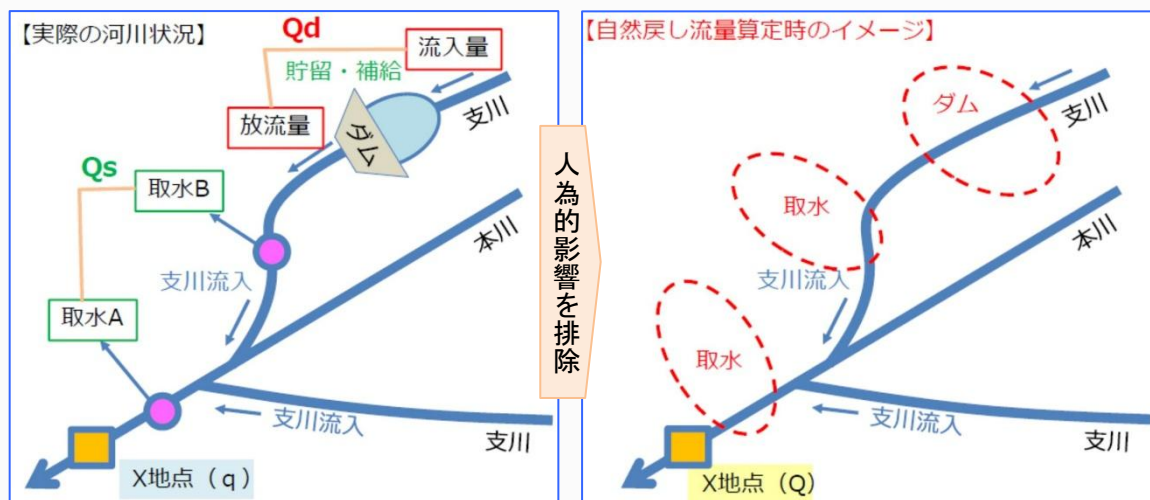
ここで整理した手順のうち4章4節「河川流量への影響把握」と4章5節「水資源への影響把握」については、従来から用いられている一般的な手法を主に整理したものであり、地域の実情に応じて各流域で評価手法を取捨選択することが重要である。

【コラム5】自然流量の算定（流量戻し）

自然流量は、実際の取水やダム操作等の人為的影響を排除した流量であり、図4.2に自然流量の算定イメージを記載する。なお、流下距離の長い河川では、自然流量の算出において、流下時間等に配慮が必要である。

表 4.1 自然流量算出に必要な主なデータ

項目	内容
地点流量	<u>流量観測地点の日流量データ</u> <ul style="list-style-type: none"> 原則として実測値とし、欠測がある場合は欠測補填を行う。 欠測補填は流域特性が類似する近傍観測所の比流量、もしくは相関式等により行う。
取水量	<u>水道、工業用水、農業用水等の日取水量データ</u> <ul style="list-style-type: none"> 原則として実績取水量を利用する。 実績取水量がない場合は、水利権量等を用いる。
ダム流入・放流量	<u>ダム流入量・放流量の日データ</u> <ul style="list-style-type: none"> ダム管理年報等により流入量・放流量を把握する。



【X地点の観測流量】 q

【ダムの影響量】 = 放流量 - 流入量 = Q_d (「-」貯留、「+」補給)

【取水量】 ダム地点～X地点 = 取水量A + 取水量B = Q_s

【X地点自然流量】 $Q = q + Q_s - Q_d$

図 4.2 自然流量の算定イメージ

4.2 現状把握

○将来予測を実施する前に、まずは観測結果に基づき、これまでの降水量や流量等の経年変化及び季節変化を定量的に整理するとともに、ダム運用実績、取水量・取水期間等の水源状況を踏まえ、流域における水資源の利用実態を把握する。

【解説】

<現状把握の概要>

将来予測を行う前に、まずはこれまでに生じている降雨・河川流況などの変化やダムの開発など水資源の変遷を整理し、過去から現在までの変化傾向を把握することが重要である。それによって、次節以降で行う現在から将来の変化傾向を把握する際にも、過去からの変化傾向との違いを意識でき、評価結果をより深く理解することが期待できる。

観測データについては、箇所毎に観測開始時期が異なる場合もあるが、可能な限り長い期間のデータを取得することが望ましい。その際、時系列のデータを前期と後期に分けて、それぞれの期間の平均値やデータの変動性（変動幅、標準偏差）等を把握することが有効である。

また、気候変動に伴う気温の上昇や降水量・蒸発散量の変化は、年間を通じて一様に現れるものではなく季節変動も大きいことから、過去から現在までの水文・気象状況の変化傾向を把握する際には、年平均値や年間の合計値のみを確認するのではなく、融雪期やかんがい期などの特定の時期にも着目し、季節ごとの変化を踏まえた資料整理を行うことが重要である。その際、有意差検定を行い、各期間の結果に統計的に有意な違いがあるのかどうかを確認することも有効である。ここでは、気象要素、各種水文量毎に、整理項目と着眼点などを記載する。

<気象要素の整理>

✓整理項目

- ・年別・月別の平均気温、最大積雪深、降水量等を整理する。

✓着眼点

- ・気象要素については、年別・月別で整理することで、年別では経年変化を、月別では季節的な変化傾向を把握することができる。
- ・なお、年最大積雪深は一度に極端な降雪があった場合に大きな値を示すため、1シーズンの降雪量を確認したい場合は累計降雪量を確認するとよい。

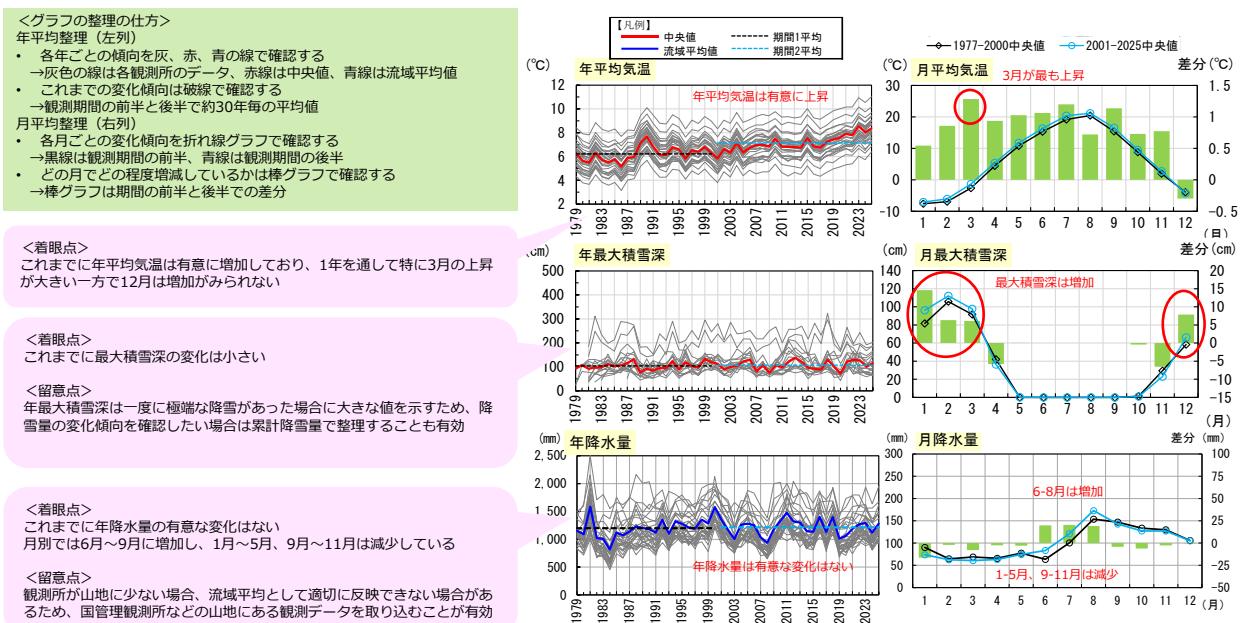


図 4.3 気象の整理イメージ

<河川水流量の整理>

✓整理項目

- ・渇水流量 (年間・夏季・冬季)、渇水流量の生起時期、ダム開発水量、利水容量、データの変動性 (変動幅、標準偏差)、日・年平均流量 (流出高) 等を整理する。

✓着眼点

- ・渇水流量は夏季と冬季を分けて整理することで、融雪による影響が平均化されることなく鮮明に把握できる場合がある。渇水流量の生起回数からは、渇水の発生時期や頻度の変化傾向を読み取ることができる。また、渇水流量のデータの変動性 (変動幅、標準偏差) を数値化しておくことも有効である。
- ・なお、実績流量の整理を行う場合には、取水やダム操作等の人為的要素が含まれるデータであることが多いため結果の解釈が難しくなるが、ダムの開発状況 (利水容量) の変遷などと併せて確認を行うことで、人為的要素の影響をより鮮明に把握できる場合がある。

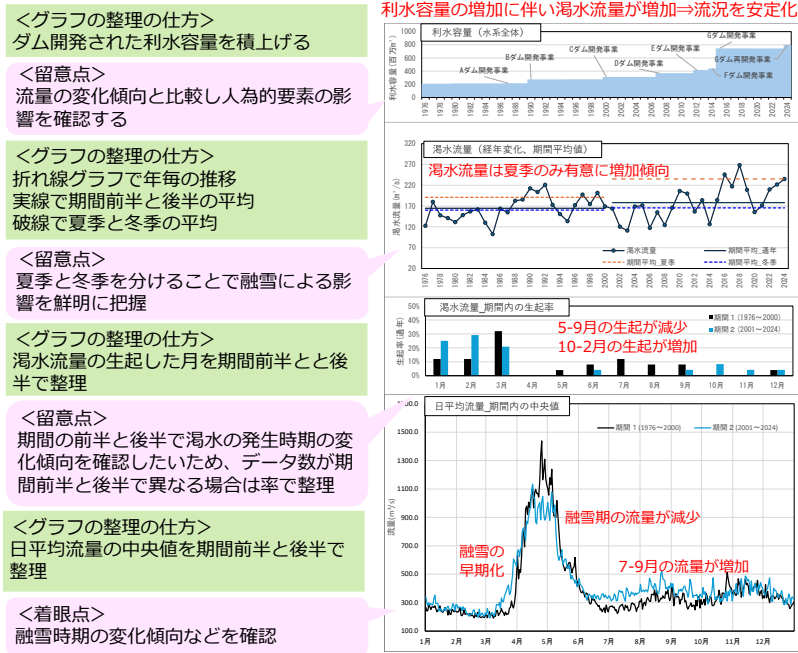


図 4.4 流量の整理イメージ

<ダム水流量の整理>

✓整理項目

- ・貯水位 (貯水池運用)、ダム流入量等を整理する。

✓着眼点

- ・最上流部にあるダムの流入量に着目することで、人為的要素による影響を抑えた自然的要素に近い水流量を把握することができる。夏季の無降雨日の長期化による貯水位の低下や、冬季の融雪の早期化・減少に伴う貯水位変化や貯水位低下などが確認できる。
- ・また、時系列データを用いて、流入量から算定する流出高と流域平均降水量をプロットした散布図を作成することで流出率の変化等を把握することができる。

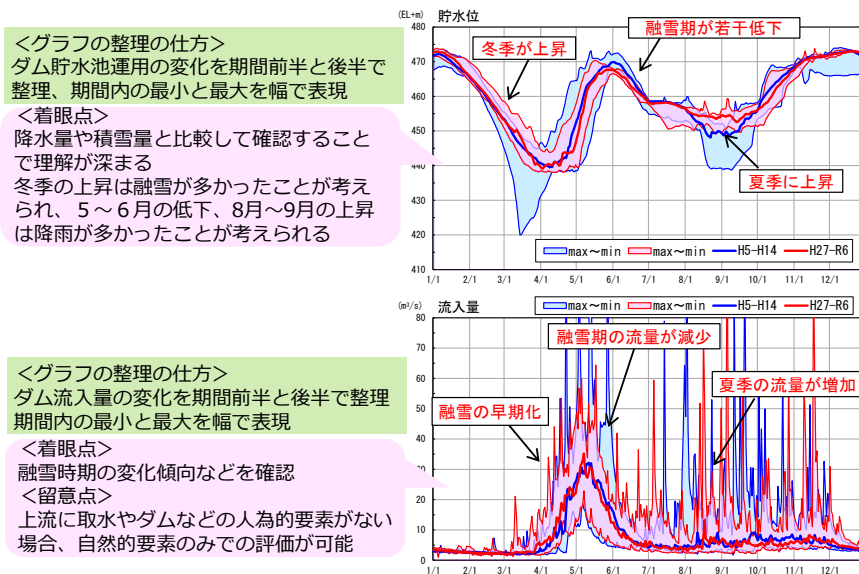


図 4.5 ダム貯水位と流入量の整理イメージ

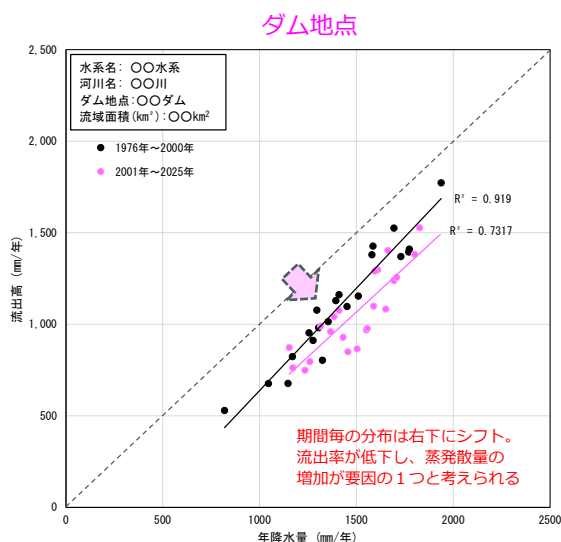


図 4.6 ダム地点における年降水量～流出高（流出率）の整理イメージ

◆留意事項◆

- ✓実績流量は、ダムによる補給と貯留、水利用のための取水と還元等の人為的要素を含んでいる。そのため、実績流量により気候変動影響の概略を推定することは可能であるが厳密ではない。特に水利用が多い流域は、人為的要素の影響が大きくなる。
- ✓代表地点の選定においては、正常流量基準地点など各流域において低水管理上代表となる地点を基本とする（長期間のデータ取得が可能な地点を選定）。人為的要素を排除した結果を見るためには、ダム操作や取水の影響のない、上流のダム地点流入量を見ることも有効である。
- ✓変化傾向の有意性を確認するため、有意差検定を行う。ただし、「有意でない＝変化なし」ではない。
- ✓山間部の降水量を適切に評価するためには、アメダスのみではなく国土交通省等の雨量計を併用することが望ましい。積雪地域では河川流量に融雪が影響するため、降水量の観測時期と融雪により河川流量が増加する時期が異なる。

【コラム6】気候変動影響評価における「再解析データ」の活用

気候変動の影響評価においては、将来の評価だけでなく、観測データによる過去の傾向の把握も重要となる。

しかし、観測手法の進歩により、時期によって観測方法や観測密度が異なる問題がある。そのため、観測データに物理モデルを組み合わせて再解析し、データの長期均一性・高品質性を考慮された「再解析データ」が近年、公開されている。

西村ら¹⁾は、「再解析データ」の DSJRA-55²⁾の 55 年間の年降水量に対し、増減傾向を把握するため、日本陸域の格子毎（格子数：14082）及び 109 の 1 級水系毎に一次相関分析を行い、一定の回帰係数（増減傾向）を持つ格子・流域の存在を定量的・視覚的に示している。

その結果、例えば、一次相関式の回帰係数が-2.0mm/年とは 50 年間で年降水量 100mm の減少を意味するが、このトレンドを下回る格子が 29.93%、流域は 26.61%を占めることが確認された。

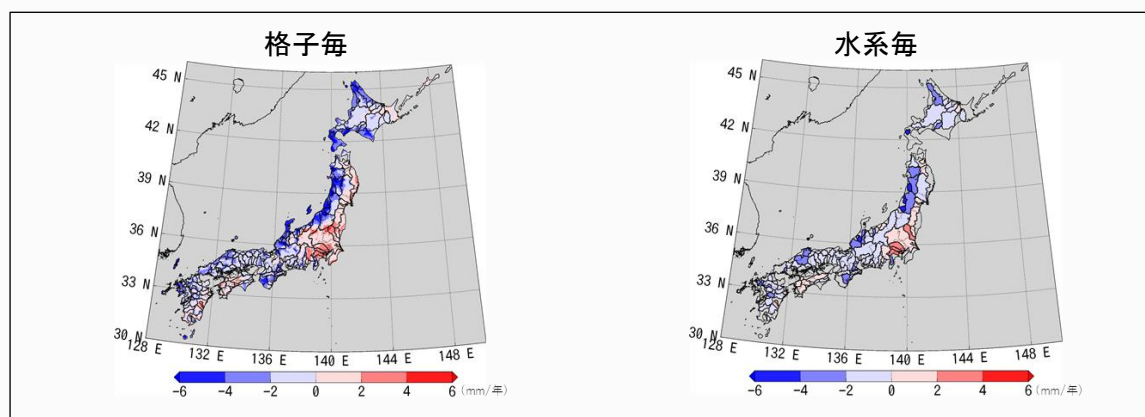


図 4.7 DSJRA-55 の年降水量に対する一次相関分析の回帰係数の分布図¹⁾

表 4.2 DSJRA-55 の年降水量に対する一次相関分析の回帰係数の割合¹⁾

一次相関式の 回帰係数 (mm/年)	格子毎 (全格子数：14082)		流域毎 (全流域数：109)	
	格子数	割合	流域数	割合
-4.0 未満	1262 格子	8.96%	5 流域	4.59%
-4.0 以上 -2.0 未満	2953 格子	20.97%	24 流域	22.02%
-2.0 以上 0.0 未満	5310 格子	37.71%	56 流域	51.38%
0.0 以上 2.0 未満	3519 格子	24.99%	18 流域	16.51%
2.0 以上 4.0 未満	960 格子	6.82%	6 流域	5.50%
4.0 以上	78 格子	0.55%	0 流域	0.00%

(引用文献)

1)西村宗倫, 因幡直希, 西原大貴, 高田望, 柴川大雅, 仲江川敏之, 山本陽子: DSJRA-55 を用いた年降水量のトレンドの全国的把握と Mann-Kendall 検定および地域 Kendall 検定, 河川技術論文集, 第 32 巻, pp.631-636,2026.

2)JRA-55 領域ダウンスケーリング(DSJRA-55),

https://www.data.jma.go.jp/jra/html/DSJRA-55/index_ja.html

(執筆)国土技術政策総合研究所河川研究部

4.3 気象要素への影響の把握

4.3.1 気象要素への影響把握の基本的な考え方

- 気候変動による気象要素への影響を把握する際には、多数のアンサンブル実験によって将来の不確実性を考慮できる d4PDF を用いることを基本とする。
- 蒸発散量については、経験則に基づく推定手法のほか、d4PDF に含まれる上向き潜熱フラックス値を用いることも有効である。

【解説】

＜気象要素への影響把握の概要＞

気候変動による水資源への影響を評価する際には、まず、流出計算の外力条件となる気象要素の将来変化を把握する必要がある。一般的に、将来の不確実性を考慮した手法として複数の予測結果を組み合わせたアンサンブル計算が用いられていることから、本ガイドラインでは、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として開発された d4PDF を用いることを基本とする。

流出計算を行う際に必要となる気象要素としては、降水量、蒸発散量等が挙げられる。特に、蒸発散量については、気温、日射量、雲量、風速等を用いて経験則に基づき推定する手法のほか、d4PDF に含まれる上向き潜熱フラックス値を用いて算出することも有効である。ただし、現行の d4PDF では水田など土地利用の実態が十分に反映されていないことから、そのような土地利用が大半を占めている場合には注意が必要である。

なお、d4PDF から得られる予測値には、地形表現の限界や物理過程の近似等に起因する系統的な誤差（バイアス）が含まれるため、観測値を用いたバイアス補正を実施したうえで、流出計算に用いることが望ましい。

これらの流出計算の外力条件としての整理に加え、気候変動による気象要素への影響を可視化することで、評価結果に対する理解が進むことが期待されるため、その概要を把握しておくことが重要である。

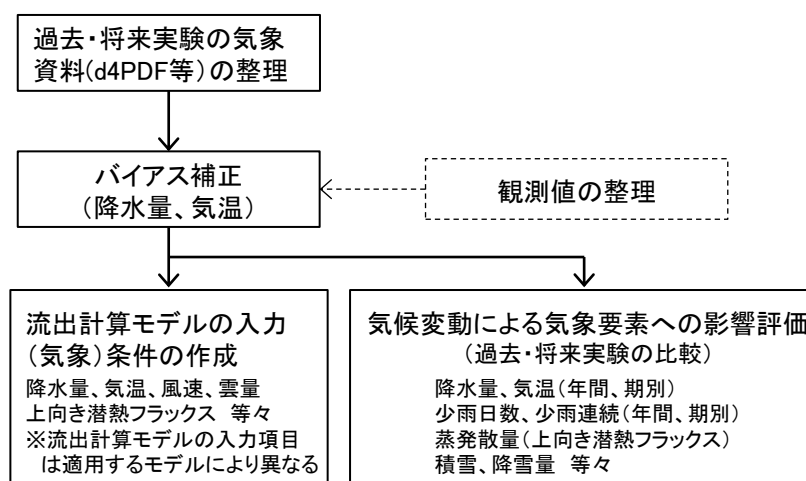


図 4.8 気象条件作成、気象要素への影響把握の手順

4.3.2 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（d4PDF）の利用

○d4PDF を用いることにより、4℃上昇シナリオ（RCP8.5）において全球平均地上気温が2℃上昇あるいは4℃上昇した時の影響を定量的に評価することが可能となる。

○なお、d4PDF の活用にあたっては、12メンバ（アンサンブルの個数）全てのデータを用いることを基本とする。

【解説】

<d4PDF の概要>

d4PDF（database for Policy Decision making for Future climate change）は、気候変動対策に資するアンサンブル気候予測データベースとして開発されたものであり、文部科学省によって開発された DIAS（データ統合・解析システム）の中でデータセットが公開されている。

d4PDF は、水平解像度 60km の全球モデル MRI-AGCM3.2 を用いた全球実験から、日本域をカバーする 20km 解像度まで力学的ダウンスケーリングが行われた領域実験のデータであり、実験は、地球温暖化が進行し世界平均地表気温が産業革命前より 1.5℃・2℃・4℃上昇した場合の将来実験データが格納されている。

- ・ **過去実験**：1951-2010 年の各年の温室効果ガス等の観測値を境界条件として計算された気温や降水量等の気象データ
- ・ **将来実験**：1.5℃、2℃、4℃上昇実験があり、それぞれ 4℃上昇シナリオ（RCP8.5）における 2030 年、2040 年、2090 年時点の温室効果ガス等の予測値を境界条件として計算された気温や降水量等の気象データ

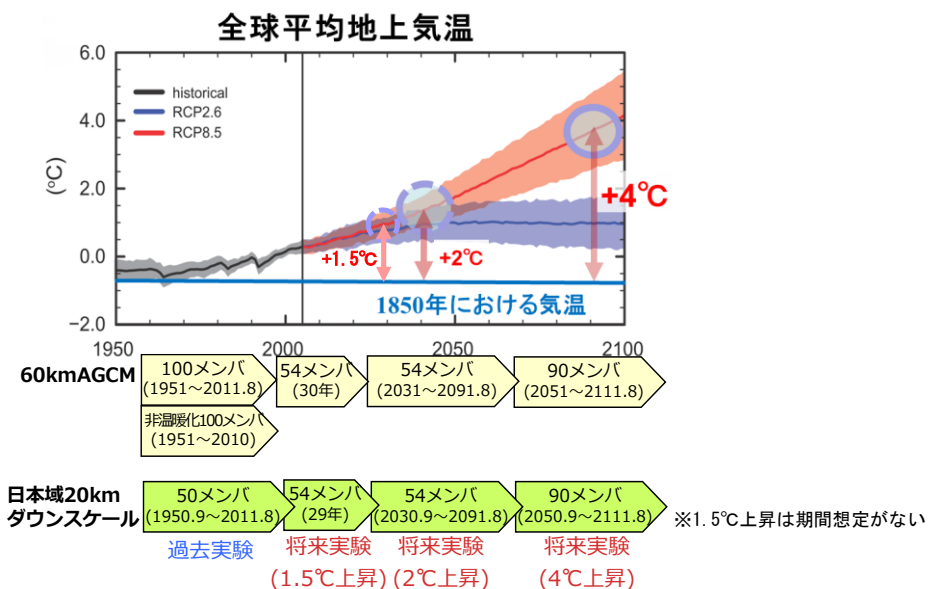


図 4.9 d4PDF の実験デザイン

出典：気候予測データセット 2022 解説書,気象庁,令和 4 年 12 月に加筆

<全国 5km メッシュアンサンブルデータ (d4PDF_5kmDDS_JP)>

前述の日本域 20km の d4PDF のデータを用いて、過去実験と 2℃上昇実験、4℃上昇実験それぞれの海面水温(SST)と摂動の組合せから 12 メンバを選び、5km メッシュでダウンスケーリ

ングを行った全国 5km メッシュアンサンブルデータ「d4PDF_5kmDDS_JP」が公開されており、過去実験、将来実験ともに、12 メンバ×61 年の 732 年分のデータセットが含まれている。

各メンバにおける 61 年間の計算では、温室効果ガス濃度の経年変化は一定値（例えば 2℃上昇実験であれば 2040 年時点）に固定しつつ、SST については 1951～2010 年の観測値に基づく年々変動のパターンを反映している。これにより数年規模の海面水温の高低変動等の自然変動を考慮し、温暖化影響と自然変動を組合せた気候変動の表現としている。

当該モデルにより提供される気象データは、気温、降水量を中心に多岐にわたるため、気候変動による気象要素への影響の把握や流出計算モデルに与える気象条件を設定する際には、気温や降水量、蒸発散量（上向き潜熱フラックス）に関する項目等を抽出して整理する必要がある。

d4PDF の活用にあたっては、12 メンバ（アンサンブルの個数）全てのデータを用いることを基本とする。

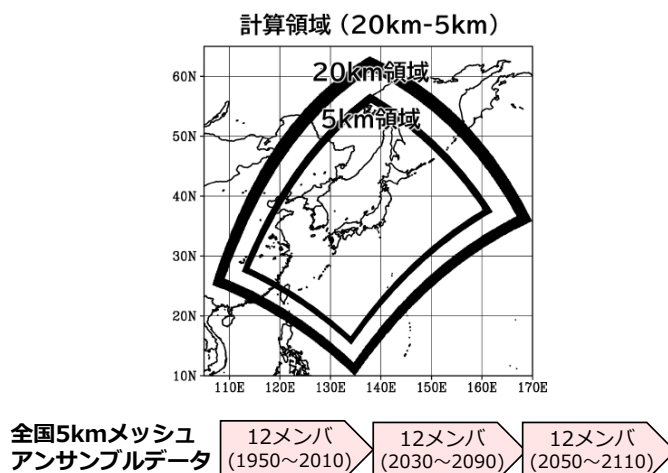


図 4.10 全国 5km メッシュアンサンブルデータ(d4PDF_5kmDDS_JP)

出典：「全国 5km メッシュアンサンブル気候予測データ」利用手引き,第 4 版, 2025.10.20 に加筆

表 4.3 d4PDF_5kmDDS_JP による提供データ（1 時間間隔、1 日間隔）

項目	単位	備考	項目	単位	備考
降水量（雨+雪+霰(ひょう)）	mm	30分間間隔もあり	上向き潜熱フラックス	W/m ²	
降雨量	mm		上向き顕熱フラックス	W/m ²	
降雪量	mm		全雲量	0-1	
降霰量	mm		上層雲量	0-1	
地上気温	K	地上 1.5m	中層雲量	0-1	
風速（モデル x 方法）	m/s	地上 10m	下層雲量	0-1	
風速（モデル y 方法）	m/s	地上 10m	雲水量	kg/m ²	1 日間隔のみ
海面校正気圧	hPa		可降水量	mm	
地上気圧	hPa		地表面温度	K	
地上 (1.5m) 湿数	K	気圧-露点温度	土壌第 1 層の温度	K	
地上面上向き長波放射フラックス	W/m ²		土壌第 2 層の温度	K	
地上面上向き短波放射フラックス	W/m ²		積雪被覆率	%	
地上面下向き長波放射フラックス	W/m ²		積雪水当量	kg/m ²	
地上面下向き短波放射フラックス	W/m ²		積雪深	m	
地表面直達日射フラックス	W/m ²		暑さ指数	—	WBGT（湿球黒球温度）
地表面散乱日射フラックス	W/m ²				

赤字：流出計算に設定することが多い項目

◆留意事項◆

- ✓d4PDFには過去実験と将来実験（2℃上昇実験、4℃上昇実験）のデータが含まれており、本ガイドラインでは将来実験のデータとしては主に2℃上昇実験のデータを用いている。2℃上昇実験では4℃上昇シナリオ(RCP8.5)における2040年、4℃上昇実験では4℃上昇シナリオ(RCP8.5)における2090年の温室効果ガス等の予測値を境界条件として計算された気温や降水量等の気象データが用いられているが、将来実験の結果は特定の年次を指すものではない。
- ✓このため、d4PDFを用いた分析では、将来実験の結果が顕在化する時期やそこに至るまでの途中経過については把握することができない。
- ✓経年的な変化傾向を把握する必要がある場合には、d4PDFに加え、「全球及び日本域における150年連続実験データ」を用いることも有効である。

未定稿

【コラム7】上向き潜熱フラックス値の蒸発散量への換算

蒸発散は水が蒸発するときに奪う熱（潜熱）によって生じるため、潜熱フラックス（単位面積・単位時間当たりの熱輸送量）を水の気化熱で除することで、蒸発散量に変換できる。

$$E = \lambda E \div \lambda$$

E：蒸発散量 [kg/m²/s =水の密度 1000kg/m³を踏まえると mm/s に相当],

λ E：潜熱フラックス [W/m² = J/m²/s], λ：気化熱* [J/kg]

*気化熱λについて

気化熱の実務上の値：2.45MJ/kg (=2.45×10⁶ J/kg、気温 20℃の場合)

λの温度依存式(Harrison 1963 / FAO-56)：λ = 2.501 - 2.361×10⁻³ T[MJ/kg] (T：気温℃)

<参考> 高山ダム流域における蒸発散量算定手法の比較

木津川水系高山ダムを対象に、以下の3手法で算定した年蒸発散量を比較した結果を図 4.11 に示す。3手法でデータのばらつきに多少の違いは見られるものの、年蒸発散量は600～800mm程度で推移しており、年単位で見れば大きな違いはないことが確認される。

- ①水収支法：流域平均雨量－ダム地点流量（※土壌水分量の変化は考慮していない）
- ②気温等（SI-CAT データ（気候モデル出力値））を用いて、Penman 法に古藤田の補正を適用して推定した値
- ③上向き潜熱フラックス（SI-CAT データ）を気化熱で除して推定した値

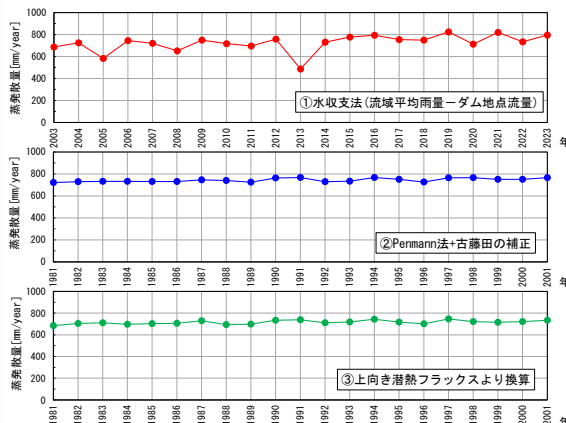
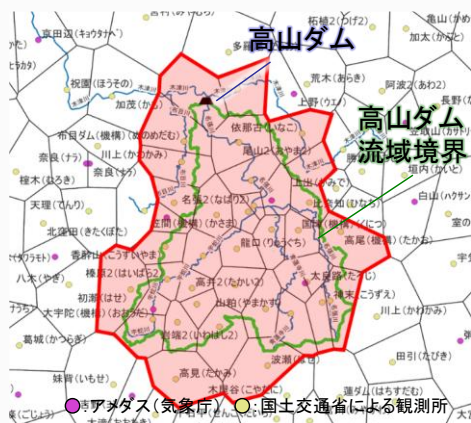


図 4.11 高山ダム流域における算定手法の違いによる年蒸発散量の比較結果

4.3.3 バイアス補正

Od4PDF 等の気候モデルの予測値には、観測値に対する系統的な誤差が存在するため、気候モデルの予測値を使用する際には、観測値を用いた補正(バイアス補正)を行うことが望ましい。

○なお、日降水量と日平均気温については、バイアス補正されたデータが DIAS 上で公開されているので、それらの利用も有効である。

*系統的な誤差：偶発ではなく繰り返した場合に同じ方向にずれる誤差（一方向の連続した偏り）

【解説】

<バイアス補正>

d4PDF_5kmDDS_JP 等のデータには、系統的な誤差(バイアス)が含まれている。この気象データを用いて流出計算を行う際には、観測値を用いてモデル値のバイアスを取り除くための補正(バイアス補正)を行うことが望ましい。ただし、過去実験と将来実験の結果を比較して変化傾向を把握するだけであれば、両者の比較によりバイアスが相殺されるとみなして、バイアス補正を回避する考え方もある。

バイアス補正に用いる気温や降水量の観測値については、全国の地上観測網により稠密な観測資料が長期間蓄積されており、観測値との比較によりバイアス補正が可能となる。一方、蒸発散量は直接観測された資料が十分に整備されていない。蒸発散量については、ダム上流部に雨量計が十分に設置されている場合には、水収支(降水量-ダム流入量)から算出した年単位程度の蒸発散量を用いて妥当性を確認する手法もあるが、流域平均降水量を適切に把握するために必要な山間部における雨量観測資料が十分に整備されている流域は限定的である。

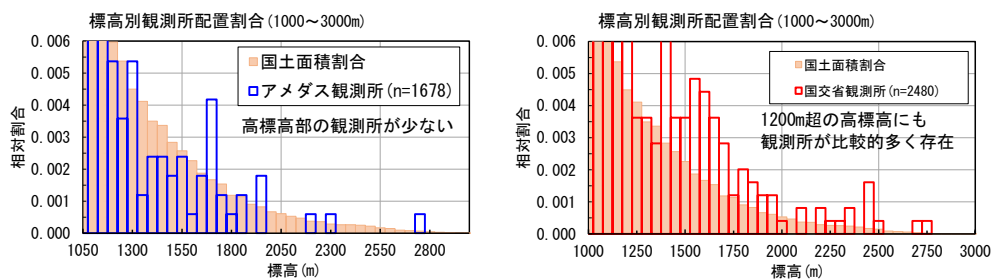
そのため、流出計算モデルに与える気象データについては、降水量及び気温をバイアス補正した値を設定し、蒸発散量(上向き潜熱フラックス)等については、気候モデルの予測値を補正せずに用いることが一般的である。

なお、日降水量及び日平均気温については、国土技術政策総合研究所によりバイアス補正された過去実験及び将来実験のデータセットが DIAS で公開されている(コラム 8 参照)。本ガイドラインではバイアス補正ツールの提供は想定していないが、このデータセットを活用することで日降水量及び日平均気温についてはバイアス補正值を利用することができる。

また、その他の項目のバイアス補正については、観測値の有無など地域の実情に応じて利用者側で適宜バイアス補正を行うことが望ましい。

<雨量観測資料>

気象庁が観測・データ公開しているアメダスは、山間部の観測所が十分でないという課題がある(図 4.12 参照)。バイアス補正や流出計算モデルに与える流域平均降水量を算定する際には、このような観測値の課題を踏まえて、アメダスだけでなく国土交通省の観測資料など、山間部の観測値を収集することや、降雪のための補正を行うことが重要である。



出典：アメダス観測所：気象庁ホームページ、国交省観測所：国土交通省水文・水質データベース
 国土面積割合：国土数値情報「標高・傾斜度3次メッシュデータ(G04-a, 2011年度版)」国土交通省

図 4.12 アメダス及び国交省観測所の標高の相対割合

◆留意事項◆

✓ アンサンブル予測値は、複数の初期条件、将来シナリオ、モデルによる幅を持つ予測値であり、そのばらつきから将来変化の幅や不確実性を評価するものである。d4PDF_5kmDDS_JP は日本周辺を対象にした気候モデルであり、海面水温や将来シナリオの組合せは考慮しているが単一モデルに依存しているため、モデル固有のバイアスが残る。

【コラム8】WBC-d4PDF5km(2022) (バイアス補正後データセット)

気候モデルには、バイアス（観測値と再現計算の誤差）があるため、そのバイアスを統計的に補正するバイアス補正が広く行われている。

国土技術政策総合研究所では、「全国版 d4PDF ダウンスケーリングデータ」をバイアス補正したデータセット「WBC-d4PDF5km(2022)」を開発し、2025年2月にDIASで公開（URL：https://search.diasjp.net/ja/dataset/d4PDF_BiasCorrection_202502）した。更には、手法やバイアス量の特徴を記したディスクリプション論文を2025年6月に公開している。

■WBC-d4PDF5km(2022)の概要

対象データ 日降水量、日平均気温
 計算地点 降水量：756地点、気温：576地点
 計算年数 過去実験：360年、将来実験（2度上昇実験、4度上昇実験）：720年

■バイアス補正手法の概要

バイアス補正には、九州大学渡部哲史准教授開発のDual-Window法を適用した。Dual-Window法は、期間移動窓と順位移動窓の2つの窓で、解析値と観測値の累積相対度数の整合を図る手法であり、若干のバイアスを許容する代わりに、気候モデルの期間連続性と将来トレンドの双方の保存を特徴とする。

■バイアスの解消率の概要

図4.13に示すように、年降水量の絶対平均値は228.93mmから19.69mmに、年平均気温の絶対平均値は0.51°Cから0.01°Cとなり、バイアスの解消率はそれぞれ91%、98%であった。

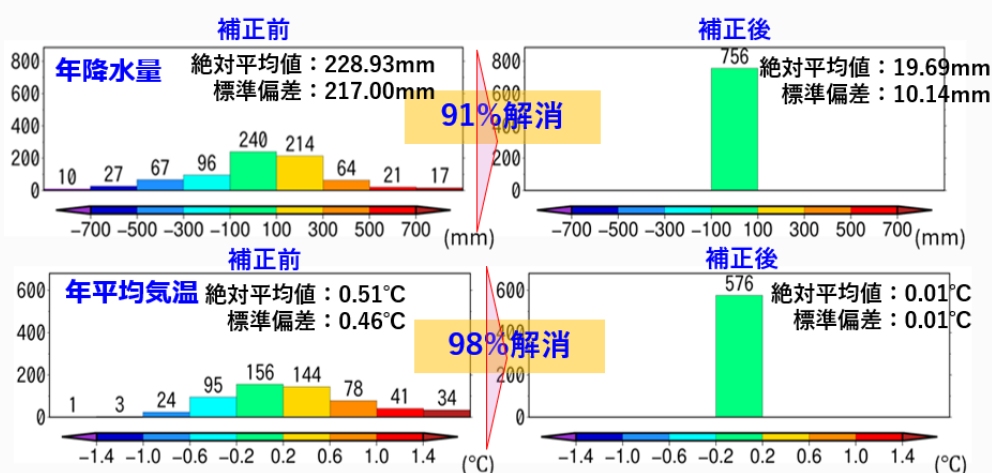


図 4.13 バイアス補正前後の(解析値－観測値)の頻度分布 (上段:年降水量、下段:平均気温)

(引用文献)

西村宗倫, 高田望, 因幡直希, 坂本光司, 柴川大雅, 吉田翔, 三浦悠, 渡部哲史, 仲江川敏之, 竹下哲也「全国版 d4PDF ダウンスケーリングデータのバイアス補正データの開発と公開」河川技術論文集, 第 31 巻, pp.421-426, 2025.

(執筆)国土技術政策総合研究所河川研究部

4.4 河川流量への影響把握

Od4PDF の過去実験と将来実験における気象条件を用いて流出計算を行い、気候変動による河川流量（自然流量）の変化を把握する。

○本ガイドラインでは、一般的に用いられている流出計算方法を主に記載したが、気候変動による水資源への影響を考える上で特に押さえておくべきポイントも併せて整理した。

4.4.1 流出計算

Od4PDF の過去実験と将来実験における降水量、蒸発散量等を入力条件として、流域特性等を踏まえて流出計算モデルを選択し、現在と将来の河川流量（自然流量）を算定する。

○流出計算モデルの再現性は、実績の気象条件を入力した検証計算結果に対して、Nash-Sutcliffe 効率係数（NSE）、平均相対誤差(MRE)、Kling-Gupta 効率係数（KGE）などの指標を用いて評価し、特に低水部の再現性に留意してモデルを構築することが望ましい。

【解説】

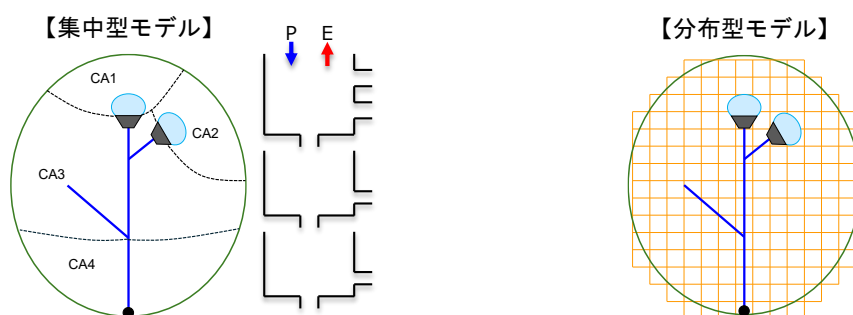
<流出計算モデル>

河川流量の算定に一般的に用いられている流出計算モデルとしては、ダム地点や利水基準地点等において、数 10km²～数 100km²程度のまとまった流域に分割する集中型モデルと、数 100m～1km 程度のメッシュに細分する分布型モデルが存在する。

集中型モデルは、取り扱いが容易で、地形や土地利用が単調な流域では良好な再現性が得られる。低水流出計算では 3 段もしくは 4 段タンクモデルの適用事例が多い。

分布型モデルは取り扱いが煩雑になるが、細分化したメッシュ毎に地形や地質、土地利用等の条件を与えるため、精緻な解析が可能であり、流域面積が大きく、地形や地質、土地利用等が多様な流域においては適用性が高い。分布型モデルは、さらに概念モデル、物理的モデル（陸面過程モデルを含む）に分類される(表 4.4 参照)。

流出計算の実施に際しては、個別流域の流域特性、水利用形態、渇水実績や渇水時の影響等を踏まえてモデルを選択する必要がある。



・降雨・流出特性、ダム地点、基準地点等を踏まえて、流域全体を複数流域に分割してタンクモデルを構築
 ・実績値によりモデルパラメータ（タンク定数）を同定
 ※流域特性が単調な流域では良好な再現が得られる（適用性が高い）

・流域全体を 1km 程度でメッシュ状に分割
 ・各メッシュで地形（標高・勾配）、地質、土地利用等を設定
 ・上記のメッシュ特性に応じたモデルパラメータを設定
 ※高低差が大きい流域や地質・土地利用が複雑な流域において適用性が高い
 ※物理的モデルを適用した場合、地下水位等もアウトプットできるため地下水利用が多い流域などの適用性が高い

図 4.14 流出計算モデル（集中型モデルと分布型モデル）のイメージ

＜流出計算モデルの再現性の評価＞

一般的に、流出計算モデルを構築する際には、モデル内のパラメータを適宜調整した上で、モデルの検証計算を行い、個別流域におけるモデルの再現性を確認することになる。特に、低水流出は、中間流出や基底流出といった長期的かつ緩慢な水文過程に支配され、さらには、ダム等の水運用や取水・還元に伴う人為的影響を受けやすいことから、降雨応答が明瞭な高水部と比べて再現精度の確保が難しい。

このため、再現計算では、原則として人為的影響を除いた自然流量と比較する。その上で、Nash-Sutcliffe 効率係数 (NSE)、平均相対誤差(MRE)、Kling-Gupta 効率係数 (KGE) 等の指標によりモデルの再現性を評価し、その結果を踏まえてパラメータを最適化し、モデルを構築することが望ましい。

◇Nash-Sutcliffe Efficiency(NSE)

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N \{q_o(i) - q_c(i)\}^2}{\sum_{i=1}^N \{q_o(i) - q_{av}\}^2}$$

$$q_{av} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N q_o(i)$$

N : 計算時間数

$q_o(i)$: i 時の実測流量

$q_c(i)$: i 時の計算流量

q_{av} : 実測流量の平均値

◇平均相対誤差 (MRE)

$$MRE = \frac{1}{N} \sum \frac{|Q_{w,obs} - Q_{w,sim}|}{Q_{w,obs}}$$

$Q_{w,sim}$: 解析平均流量

$Q_{w,obs}$: 実測平均流量

N : MRE の計算に用いるデータ数

◇Kling-Gupta Efficiency (KGE) (クリング・ガプタ効率係数)

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2}$$

r : 観測値と計算値のピアソン相関係数

$\alpha = \sigma_{sim} / \sigma_{obs}$: ばらつき比(計算値の標準偏差/観測値の標準偏差)

$\beta = \mu_{sim} / \mu_{obs}$: バイアス比(計算値の平均/観測値の平均)

3つの成分がすべて1のとき、KGE=1 (完全一致) となる。

(引用文献)

- Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V. : River flow forecasting through conceptual models part I —A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10, 282–290, 1970
- 小槻峻司, 田中賢治, 小尻利治 「気候変動が日本の水資源に与える影響水系 (I)」 *水文・水資源学会誌*, vol.26, No3, 2013
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., Martinez, G. F. : Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling, *Journal of Hydrology*, 377(1-2), 80-91, 2009

<分布型モデルの分類>

一般的な分布型モデルの分類と各モデルの特徴を表 4.4 に示す。

分布型モデルは、モデルの構造により、概念モデル、物理的モデル、陸面過程モデル※に分類される。分布型モデルを適用する際には、流域特性に加え、地下水への影響、森林整備効果の評価等、必要とする結果を踏まえてモデルを選択する必要がある。

例えば、地下水利用が多い流域や、代替水源として地下水の利用を検討する流域においては、地下水位の予測が可能な物理的モデルの適用性が高いと考えられる。また、森林整備による水源涵養の向上等を検討する場合は、陸面過程モデルの適用性が高いと考えられる。なお、SiBUCなどの陸面過程モデルでは入力値として時間単位のデータが必要となる。

※陸面過程モデルは物理的モデルの一種だが、大気と陸面の放射収支の扱いなどで精緻化されており、取り扱いがより複雑となるため区分している。

表 4.4 分布型流出計算モデルの分類と各モデルの特徴

区分		概念モデル	物理的モデル		陸面過程モデル
モデル構造		水循環を簡略化した関係式で表現（経験的）	物理法則（保存則）に基づき表現（物理的・理論的）		地表面や地中の放射収支・水収支・熱収支に特化した解析（物理的・理論的）
モデル例		土研タンク ^[1]	WEP ^[2]	H08 ^[3]	SiBUC ^[4]
入力	気象	降水、気温、湿度、風速、日照時間	降水、気温、湿度、風速、日照時間	降水、気温、湿度、風速、気圧、短波・長波放射 等	
	流域	貯留高、透水係数 等	土地利用、葉面積指数、植生高、被覆率、土壌層厚、間隙率、土壌水分ポテンシャル、透水係数、含水率 等		
	河道	河道諸元	河道諸元（幅、延長等）、取水量		—
出力	熱収支	—	短波放射、長波放射、顕熱・潜熱フラックス	顕熱・潜熱フラックス、地中熱フラックス	顕熱・潜熱フラックス、地中熱フラックス、水体水温
	陸面水文	蒸発散量、流出量（表面・中間・基底）、積雪・融雪量	蒸発散量、土壌水分量、流出量（表面・中間・基底）	蒸発散量、土壌水分量、流出量（表面・中間・基底）、積雪・融雪量	
	河道追跡	河川流量	河川流量		—
	需要量	—	—	灌漑要求水量	
メリット		・必要データが少なく、モデル構築が比較的容易 ・計算負荷が比較的小さい	・物理法則に基づくため、降雨→浸透→地下水→河川流出の因果関係が説明可能	・大気と陸面の水収支・熱収支の再現性が高く、水体の熱的な状態量を評価可能	
デメリット			・気象条件に加えて、土地利用等、流域条件の変化に対応でき、それによる蒸発散量、地表面・基底流出量の変化が評価可能		
		・モデル定数を観測値に基づき設定し、物理的根拠がない	・土壌特性、地質、植生等の必要データが多い	・短・長波放射や大気圧等の必要データ多い	
			・モデル構造が複雑 ・計算負荷が大きい	・メッシュ間の移動を考慮していないため河道モデルとの組み合わせが必要	

（引用文献）

[1] 独立行政法人土木研究所「土研分布型モデル解説書（内部資料）」、平成 19 年 3 月

[2] 独立行政法人土木研究所水工研究グループ水理水文チーム「WEP モデル解説書（試用版）」、2002.10 月

[3] 花崎直太「H08 マニュアル利用編 第 2 版」、2018 年

[4] 田中賢治「陸面過程モデル SiBUC を用いた気候変動影響評価例」水資源分野における気候変動への適応策のあり方検討会資料 3

【コラム9】 SiBUC モデル

SiBUC (Simple Biosphere including Urban Canopy) は、京都大学防災研究所の田中賢治氏らが開発した陸面過程モデルである。Sellers らが提案した生物圏モデル SiB を基礎とし、従来の陸面過程モデルでは省略されてきた都市および水体の効果を組み込むことで、陸面の多様性をより精緻に表現することを目的としている。SiBUC は、一つの格子内を「植生地」「都市」「水体」の3区分に分類し、それぞれの領域で独立に水・熱フラックスを計算したうえで、面積割合で加重平均した値を大気側へ受け渡す「モザイクモデル」構造を有する。これにより、農地・市街地・湖沼が混在する日本の流域の地表面特性を表現している。

■モデルの特徴と基本諸元

植生地モデルは SiB2 をベースとし、葉面・地面における放射収支 (2 流近似)、顕熱・潜熱フラックス、乱流輸送過程、および土壌水分の鉛直移動を物理的に扱う。葉面積指数 (LAI) やグリーンネスなど衛星リモートセンシングデータを取り込むことで、現実の植生状態に応じたパラメータ推定が可能である。

かんがい地については、水田では維持すべき湛水深、畑地では目標土壌水分量を設定し、これらを下回る場合にはかんがい取水によって水供給がなされるようモデル化されている。さらに、水稻成長モデルと結合することで、作付期間や生育段階に応じたかんがい需要量を計算することができる。都市キャノピーモデルは舗装面による蒸発抑制と顕熱の増大、人工排熱を表現し、水体モデルは湖面や貯水池の水温・蒸発を扱う。

出力は顕熱・潜熱に加え、表面流出量と基底流出量を含むため、分布型流出モデル (1K-FRM 等) や数値予報モデル (JSM、ARPS) と容易に結合でき、流域水循環から大気陸面相互作用まで幅広い解析に利用されている。

表 4.5 SiBUC モデルの基本諸元

項目	内容
ベースモデル	SiB (Simple Biosphere) / SiB2
構造	モザイクモデル (植生・都市・水域の3分類を面積荷重平均)
主要物理過程	放射収支 (2 流近似)、顕熱・潜熱、乱流輸送、土壌水分鉛直移動
人為的水操作	灌漑取水 (水田の湛水深/畑地の土壌水分を目標値に制御)
流出出力	表面流出量、基底流出量 (河川流モデルへ受渡し可能)

■適用上の留意点

低水流出計算に SiBUC を適用する場合、流域内の灌漑取水・ダム操作・導水といった人為的水操作を河川流モデル側で適切に取り扱うことが鍵となる。土地利用や土壌のパラメータは Ecoclimap 等の全球データセットでも一定の精度が得られるが、現地のボーリングデータや農業統計に基づく設定により再現性は向上する。SiBUC は、モザイク構造とかんがいモデルを併せ持つことから、農地と都市が混在する日本の中小流域における湧水管理や気候変動下の水資源評価に有効な陸面過程モデルといえる。

(引用文献)

- ・田中賢治「SiBUC 公式ページ (京都大学防災研究所)」
- ・Tinumbang and Tachikawa, HRL, 20(2), 2026
- ・萬・松原・立川：分布型水循環モデル, 水文・水資源学会, 2014

【コラム10】 全球水資源モデル H08

H08 は、国立環境研究所(NIES)が中心となり開発した全球水資源モデルであり、世界の自然の水循環と人間の水利利用・水管理を全球 0.5 度（赤道付近で約 50km 四方）の空間解像度、日単位の時間解像度で計算するモデルである。ソースコードはオープンソースとして公開されており、Linux 環境で利用可能となっている。また、日本域に対しては、空間解像度 1 分(2km)のモデルでの適用実績を有している。

■モデルの特徴と基本構造

H08 は 6 つのサブモデルで構成されている。

- ・陸面過程サブモデル：気象条件から地表面の水熱収支を計算し、蒸発散量・土壌水分量・流出量などを算出する。
- ・河川サブモデル：一定流速を仮定して流出量を河道網に沿って流下させ、流量を計算する。
- ・作物成長サブモデル：H08 はかんがい農地の土壌水分量の不足分から農業用水需要量を求める。この際に必要な世界の農事歴は、作物収量を最大にする期間から求めている。
- ・貯水池操作サブモデル：一般化された操作規則を用いて、世界主要ダムでの貯水・放流を行う。
- ・環境流量サブモデル：河川生態系の維持に必要な河川流量を推定する。
- ・取水サブモデル：農業・工業・生活用水の需要を満たすため、利用可能な水源から取水する。なお、工業・生活用水は、AQUASTAT*の国別取水量を人口分布に基づいて各格子に配分する。 *国連食糧農業機関のデータベース

■入力条件

- ・気象：降水量、気温、相対湿度、風速、気圧、下向き短波放射(日射量)、下向き長波放射
- ・地理：アルベド、傾斜、土壌、地質、河道網、導水路網、貯水池、かんがい農地、栽培種作付け強度(二期作)、かんがい効率、生活用水、工業用水、取水の地下水依存度、GDP

■水リスクへの適用

H08 はダムや運河などのインフラの効果も考慮しながら、水資源量と水利用量を時空間詳細に計算できる。このため、様々な水資源リスク指標を算出できる。H08 は東京大学等が開発したグローバル水リスク評価のオンラインプラットフォーム「Water Security Compass」のベースモデルとなっている。

(引用文献)

- ・全球水資源モデル H08 のホームページ <https://h08.nies.go.jp>
- ・グローバル水リスク評価のオンラインプラットフォーム Water Security Compass <https://water-sc.org>



図 4.15 全球水資源モデル H08 における水循環・水利用のイメージ

【コラム11】気候変動影響評価のための雪水文モデル(WEB-DHM-S)

気候変動による降雪・積雪・融雪量の変動特性を評価するには、過去から現在、観測データがない将来も含めて積雪賦存量を流域単位で推定可能な雪水文モデルが必要である。積雪山岳地域では、積雪から融雪までのプロセスは気象再解析データ、積雪分布は人工衛星で比較的精度よく推定できるが、降雪量は地上・衛星観測とも不確実性が大きく、過小評価により年降水量より年流出高が大きくなることが多い。

そこで、観測降雪量をシグナルと捉えて、モデルの積雪域が衛星観測と一致するよう補正し、観測流量と整合するよう校正することで上流域の降雪量分布を定量的に推定可能となる。

国立研究開発法人 土木研究所 水災害・リスクマネジメント国際センター (ICHARM) では地上観測、衛星観測、モデル出力を統合的に解析し、流域内の積雪賦存量を定量的に把握可能な「降雪・積雪・融雪を含む地表面での水エネルギー収支を考慮した分布型水循環モデル (WEB-DHM-S)」を開発した。

本モデルは、大気強制力データ (降水量・風向・風速・気温・日射・長波放射) を入力して地表面の状態量を逐次更新するため、一度過去データで校正・検証すれば、再校正なしに長期間安定して走り続ける特徴を有する。これにより、写真のような山岳地域での積雪賦存量を図 4.16 に示すフローで WEB-DHM-S を構築し推定可能となる。

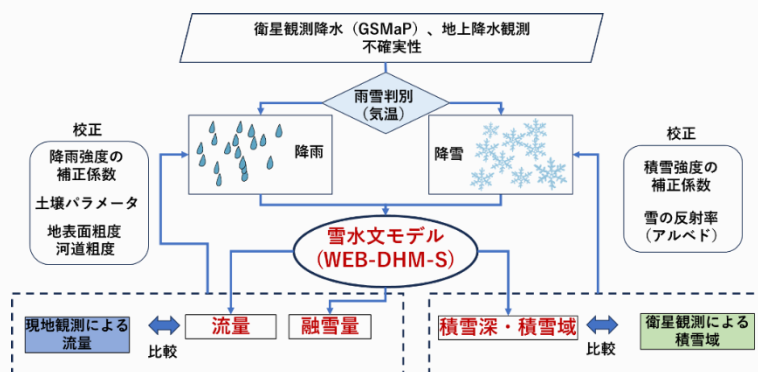
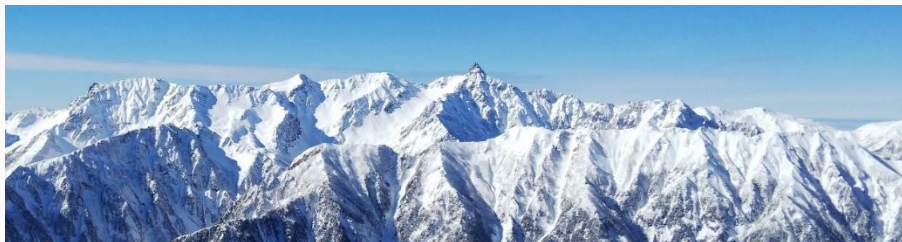


図 4.16 WEB-DHM-S の構築フロー

過去から現在は気象庁の長期再解析データ(JRA3Q)と観測雨量を入力することで高精度に、将来は CMIP6 や d4PDF のアンサンブル予測を入力することで降雪・積雪・融雪量の分布や河川流量を不確実性の幅を持って定量的に高時間、高空間分解能で推定できる。これにより水資源管理、融雪水の発電利用、観光産業に与える影響等を総合的に評価できるようになる。

(引用文献)

Katsunori Tamakawa, Shigeru Nakamura, Cho Thanda Nyunt, Tomoki Ushiyama, Mohamed Rasmy, Keijiro Kubota, Asif Naseer, Eiji Ikoma, Toshihiro Nemoto, Masaru Kitsuregawa, and Toshio Koike (2024): Investigation of an Ensemble Inflow-Prediction System for Upstream Reservoirs in Sai River, Japan, Water 2024, 16(18), 2577; <https://doi.org/10.3390/w16182577>.

(執筆)土木研究所 ICHARM

4.4.2 河川流量への影響

○流出計算で得られる河川流量（自然流量）を視覚的に整理することで、人為的な要素を除いた流量波形の季節変化や豊水・平水・低水・渇水流量といった流況の変化など、気候変動による河川流量（自然流量）への影響をより詳細に把握することができる。

【解説】

＜河川流量（自然流量）の整理方法＞

表 4.7、図 4.17 は、d4PDF（アンサンブル予測値）を用いた河川流量の予測結果の整理方法の一例を示したものである。表上段の黄色部は、12 メンバについて 61 年×365 日（暦により最大+15 日）の日単位流量を出力したものである。これに対し、表右側にはメンバごとに日集計・月集計・年集計を行った結果を、表下段には全 12 メンバを統合した各年・各日の平均・最大・最小を整理している。これにより、年・季節単位での流量変動と、アンサンブルとしてのばらつきの双方を把握できる。下段のグラフは、過去実験と将来実験の流量波形の変化を比較したものである。なお、過去実験については図を煩雑にしないため、平均のみを示しているが、将来実験と同様に最大・最小の幅を有している。

このように、アンサンブル予測値を用いて流出計算を行うことで、12 メンバ×61 年=732 年分の流量波形の予測結果が得られ、幅を持った評価が可能となる。予測結果のデータのばらつきについては、①全メンバの日データから最大・最小を抽出し、極大・極小の幅を把握する場合、②各メンバの最大値・最小値をそれぞれ平均し、平均的な最大・最小の幅を把握する場合、③各メンバの平均値の最大・最小の幅を把握する場合など複数の整理が考えられるため、地域の実情に応じて適切な方法を選択する必要がある。

表 4.7 河川流量（予測結果）の整理イメージ

メンバ	流出計算アウトプット(日単位)			日集計			月集計			年集計						
	1年目	2年目	61年目	平均	最大	最小	平均	最大	最小	平均	最大	最小	豊水	平水	低水	渇水
	1/1~12/31	1/1~12/31	1/1~12/31	1/1~12/31	1/1~12/31	1/1~12/31	1月~12月	1月~12月	1月~12月	平均	最大	最小	平均/大/小	平均/大/小	平均/大/小	平均/大/小
CC_m101																
CC_m105																
MR_m105	12メンバ×61年×365日 12メンバ×61年× 月平均・最大・最小 豊平低渇等			メンバ毎の各日の61ヶ年 の平均・最大・最小			メンバ毎の各月平均の 61ヶ年の平均・最大・最小			メンバ毎の各年 平均の61ヶ年の 平均・最大・最小			メンバ毎の各年の豊平低渇 61ヶ年の平均・最大・最小			
	1/1~12/31	1/1~12/31	1/1~12/31	1/1~12/31	1/1~12/31	1/1~12/31	1月~12月	1月~12月	1月~12月	平均	最大	最小	豊水	平水	低水	渇水
平均	全メンバをまとめた各年の 各日の平均・最大・最小			③	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②
最大				③	①	①	③	①	①	③	①	①	①	①	①	①
最小				③	①	①	③	①	①	③	①	①	①	①	①	①

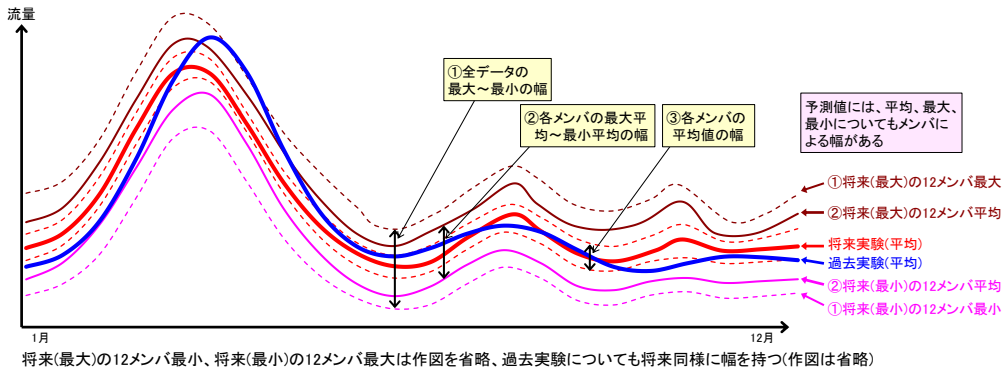
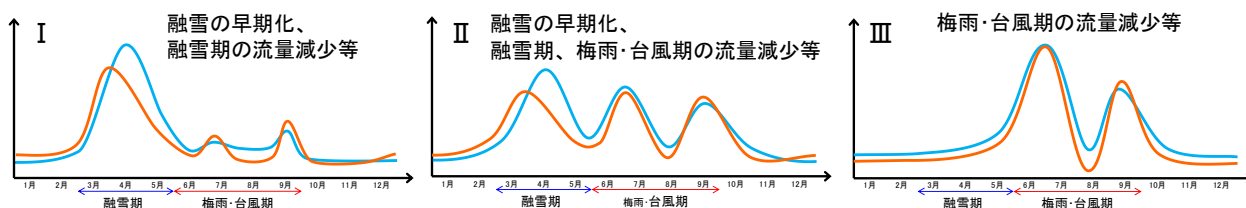


図 4.17 流量波形の変化（過去実験・将来実験）

＜評価結果の解釈＞

河川流量の流量波形については、北海道から東日本の日本海側で主にみられる融雪期の流量が多い流域（図 4.18 I）、西日本の日本海側で主にみられる融雪期と梅雨・台風期の流量増がそれぞれある流域（図 4.18 II）、九州や四国、西日本の太平洋側で主にみられる梅雨・台風期の流量が多い流域（図 4.18 III）などが挙げられる。流量波形については、各流域の流量特性を踏まえ、融雪の早期化や梅雨期の流量の極端化等に注目して整理を行い、平均的な流量波形の変化や異常渇水年における変化等を把握する。

また、日単位の流量の変化だけでなく、月平均値(中央値)、月最大・最小流量など、月単位で集計した変化を比較することも有効である。



※水色：過去実験、オレンジ：将来実験をイメージ

図 4.18 年間の流量波形のイメージと着眼点の例

図 4.19 左図は流況（豊平低渇）の比較図である。水利用への影響の観点からは、低渇水時の流量減少の程度を定量的に示すことが重要となる。また、流量波形と同様、流況の変化についても幅を持った評価が可能であり、幅の取り方についても複数あるため、地域の実情に応じて適切な方法を選択する必要がある。

図 4.19 右図は 12 メンバ毎の年平均流量の 61 ヶ年平均を示しており、エラーバーは各メンバの 61 ヶ年最大・最小を示した評価結果のイメージである。この結果から例えば、将来実験で河川流況が最も厳しくなる年の状況を把握することもできる。

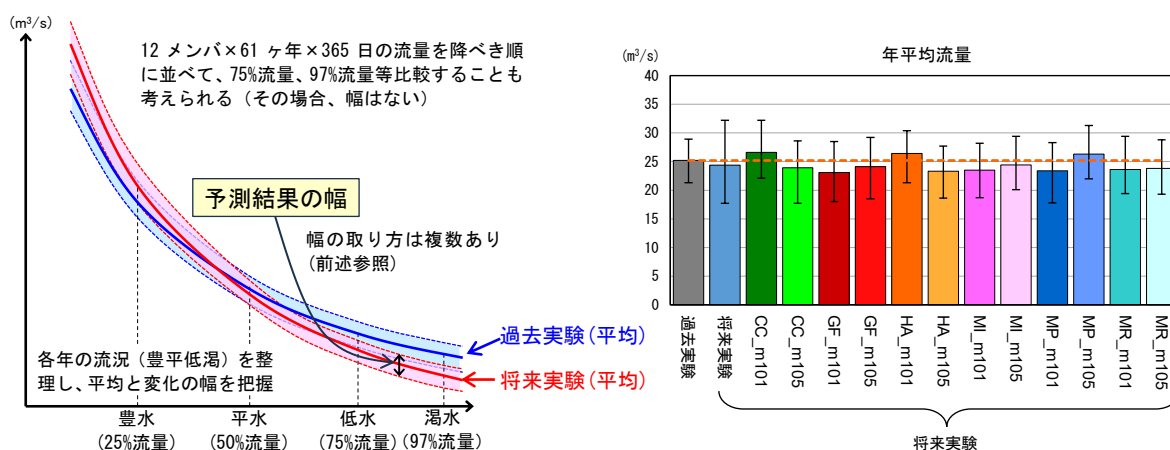


図 4.19 流況（低水・渇水流量等）の変化（過去実験・将来実験）

◆留意事項◆

✓ 流出計算結果には、降水量等の気象条件の不確実性に加えて、流域特性の設定や流出過程のモデル化、初期条件等に起因する不確実性が含まれる。

4.5 水資源への影響把握

○ダム操作や取水・還元量等の人為的要素を考慮した水運用計算を行うことにより、供給側の影響（供給可能量の変化、ダム等の枯渇の期間・頻度等）を把握することができる。

○本ガイドラインでは、一般的に用いられている水運用計算方法を記載しているものであり、地域の実情に応じて本ガイドラインに記載のない手法で計算を行っても構わない。

4.5.1 水運用計算

○ダム操作や取水・還元量等の人為的要素を考慮した水運用計算を行うことにより、供給側の影響（供給可能量の変化、ダム等の枯渇の期間・頻度等）を把握することができる。

【解説】

<水運用計算の手順>

各基準地点の自然流量（流出計算結果）および確保流量（維持流量・取水量等）を確認する。水運用計算では、自然流量が確保流量を下回る場合にダムから補給を行い、年間を通じたダムの貯水位や基準地点での河川流量を求める。これにより、供給可能量、ダム等の水資源開発施設の容量割れ（枯渇）の期間・頻度等の供給側の影響を把握することができる。

なお、本ガイドラインでは、一般的に用いられている水運用計算方法を記載しているものであり、地域の実情に応じて本ガイドラインに記載のない手法で計算を行っても構わない。

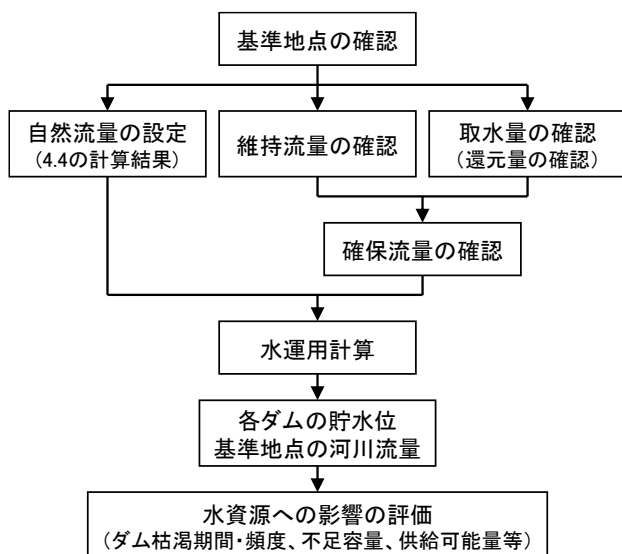


図 4.20 水運用計算の手順

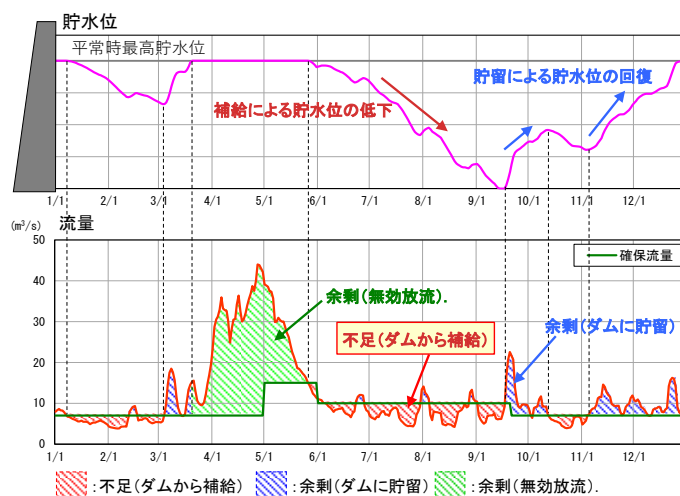


図 4.21 補給・貯留の計算イメージ

<取水地点・取水量の設定>

取水地点は利水計画等で設定されている取水地点、もしくは実取水地点とするのが一般的である。また、各種用水の取水量は、水利権に基づく設定を基本としつつも、流域において実態に即した取水量を設定することが望ましい。

農業用水は消費量を除き河川に還元されるが、流域内で反復利用されることが多いため、還元量や還元地点の設定は容易ではないことが多い。しかし、農業用水は季節変動が大きいいため、実態把握に努め、水運用計算に反映することが望ましい。

<シリーズ運用とプール運用>

ダム等の水資源開発施設が複数ある流域では、複数施設を同時に運用計算するプール運用方式と、施設を順番に運用するシリーズ運用方式がある。両運用方式による水運用計算の概念図を図4.23に示す。

プール運用方式は、施設能力に応じた補給・貯留の分担により、複数施設を効率的に運用できる一方、シリーズ運用方式では、後発施設の安全度が低下し、水資源開発能力に差が生じやすい特徴がある。水運用計算では、運用実績や両計算方法の特徴に留意しつつ、地域の実情に応じて運用方法を選択することが望ましい。

<複数施設による補給・貯留分担>

ダム等の水資源開発施設が複数あり、プール運用方式により水運用計算を実施する場合は、残容量・空容量比率等、地域の実情に応じて設定することが望ましい。

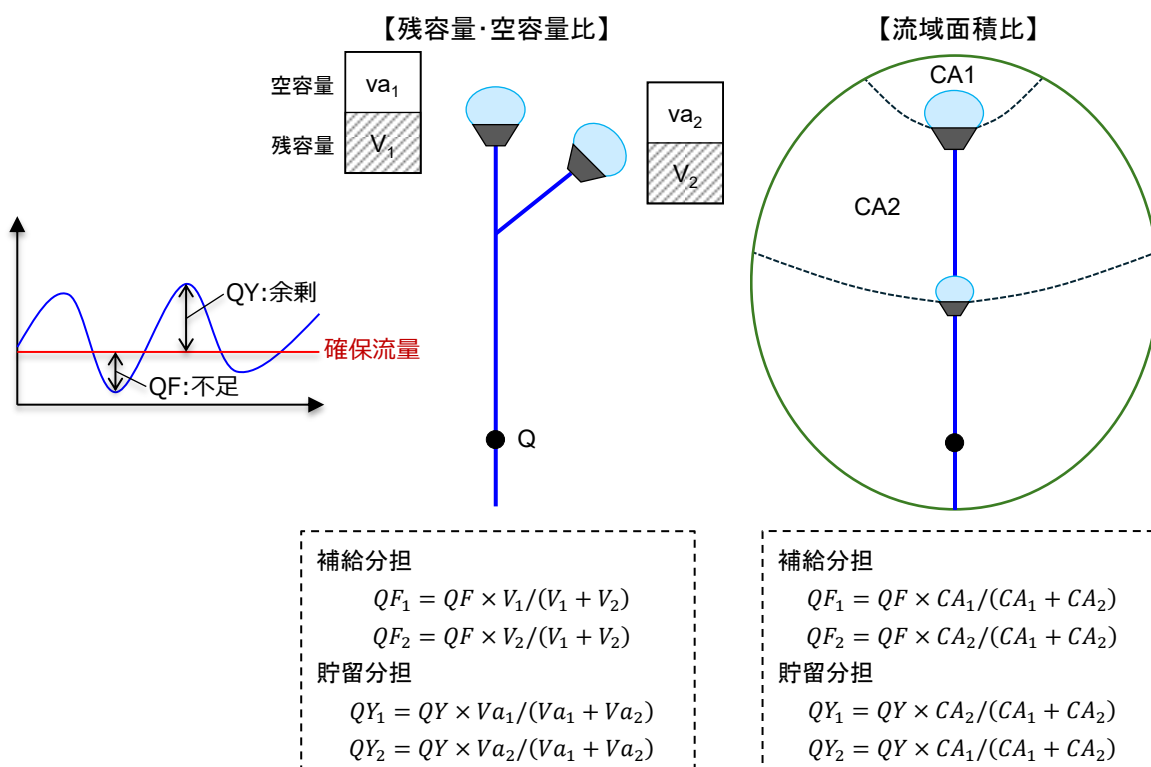


図 4.22 複数施設による補給・貯留分担の例

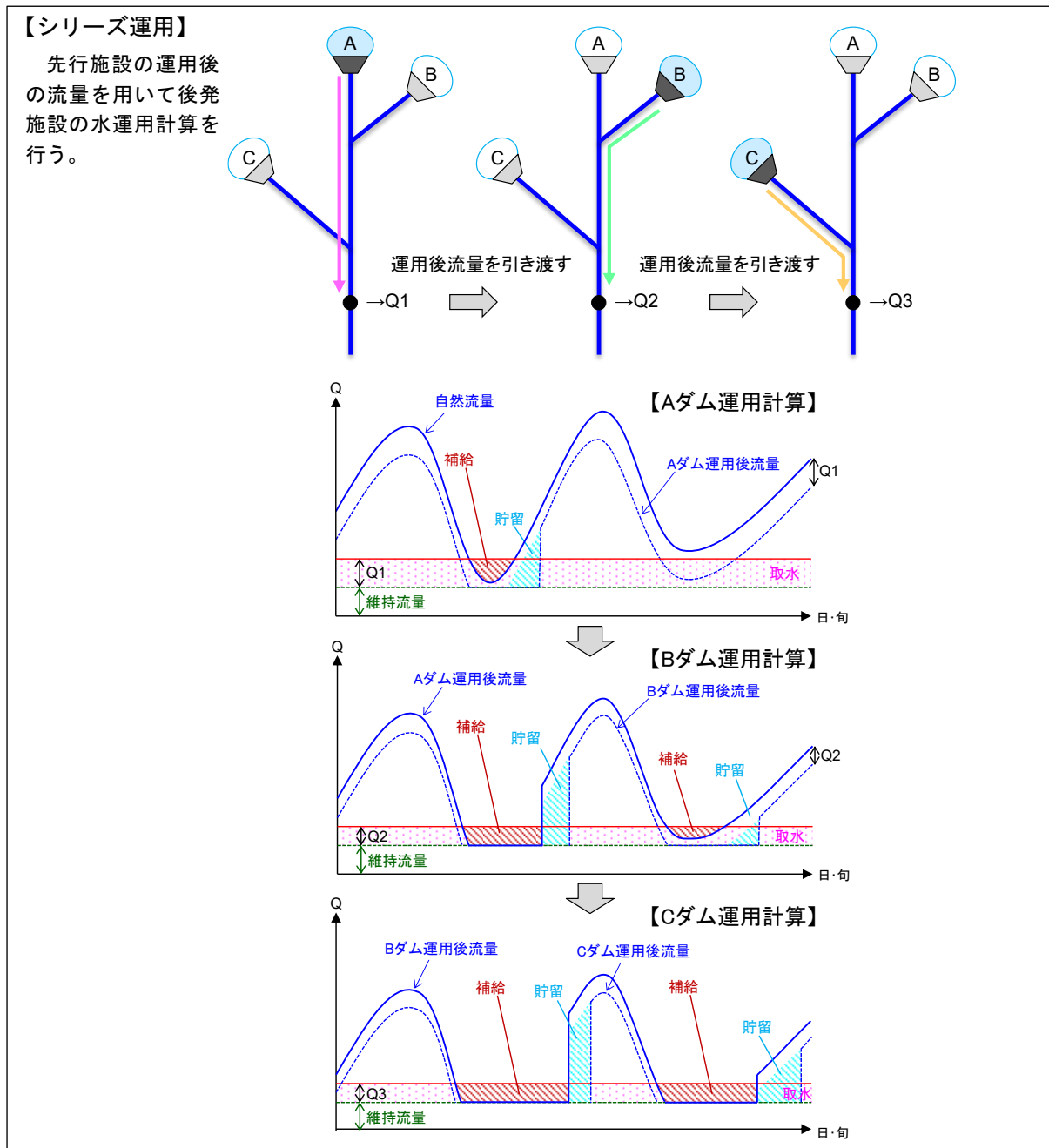
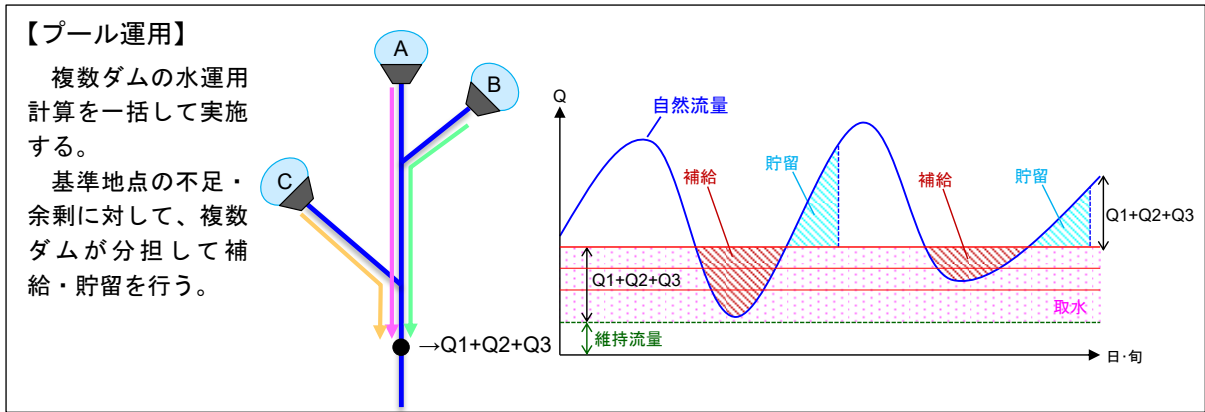


図 4.23 シリーズ運用・プール運用の水運用計算概念図

4.5.2 水資源への影響

○水運用計算を行い、現在と将来の河川流量やダム等の貯水池運用（貯水位変動パターンの変化）等を整理することで、ダム枯渇期間・頻度、不足容量や供給可能量など、気候変動による水資源への影響をより詳細に把握することができる。

【解説】

＜水資源への影響把握（河川流量と貯水池運用の整理）＞

過去実験と将来実験から算定した河川流量（自然流量）を用いて水運用計算を行うことで、河川流量（自然流量）への影響評価と同様に、12 ヶ月×61 ヶ年×365 日の人為的要素を考慮した河川流量やダム等の貯水量を算定することができる。これにより、貯水位変動パターンや基準地点流量の変動パターン、ダム等の枯渇期間・頻度（利水安全度）、不足容量、1/10 渇水年等における供給可能量等を把握することができる。

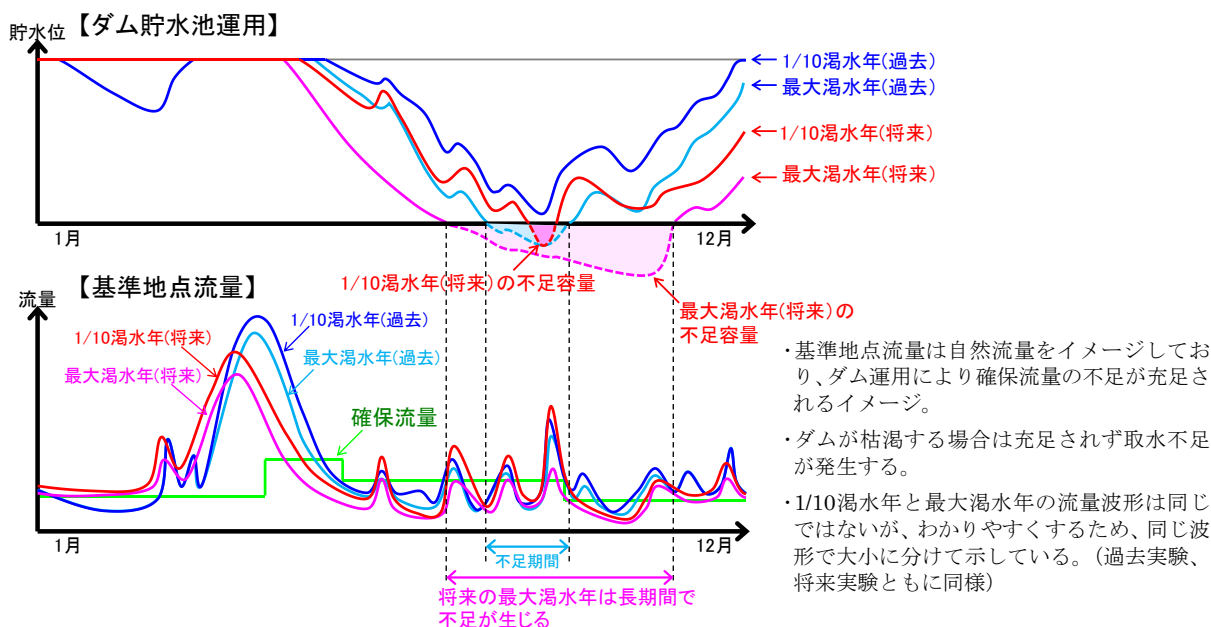


図 4.24 貯水池運用及び基準地点流量の評価結果のイメージ

図 4.25 は過去実験と将来実験の結果について、月平均流量と月最小流量の整理イメージを示している。月平均や月最小で整理することで、流量変化を定量的に把握しやすくなる。

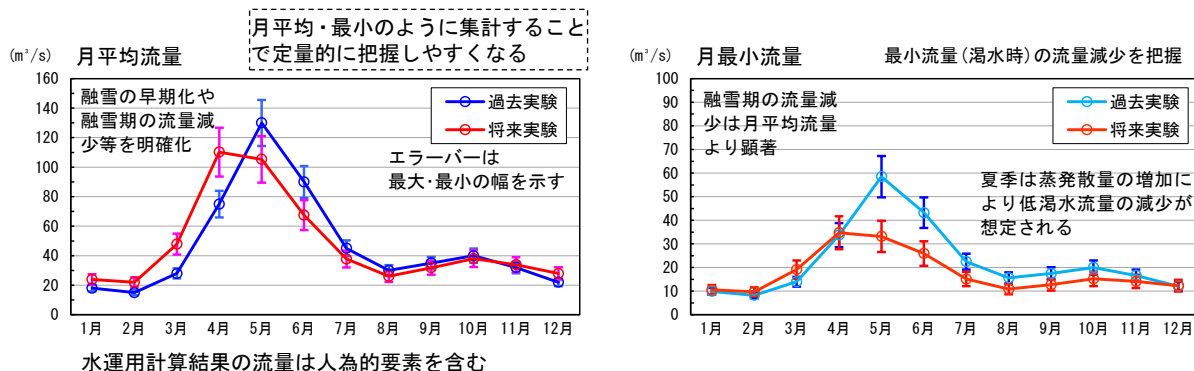
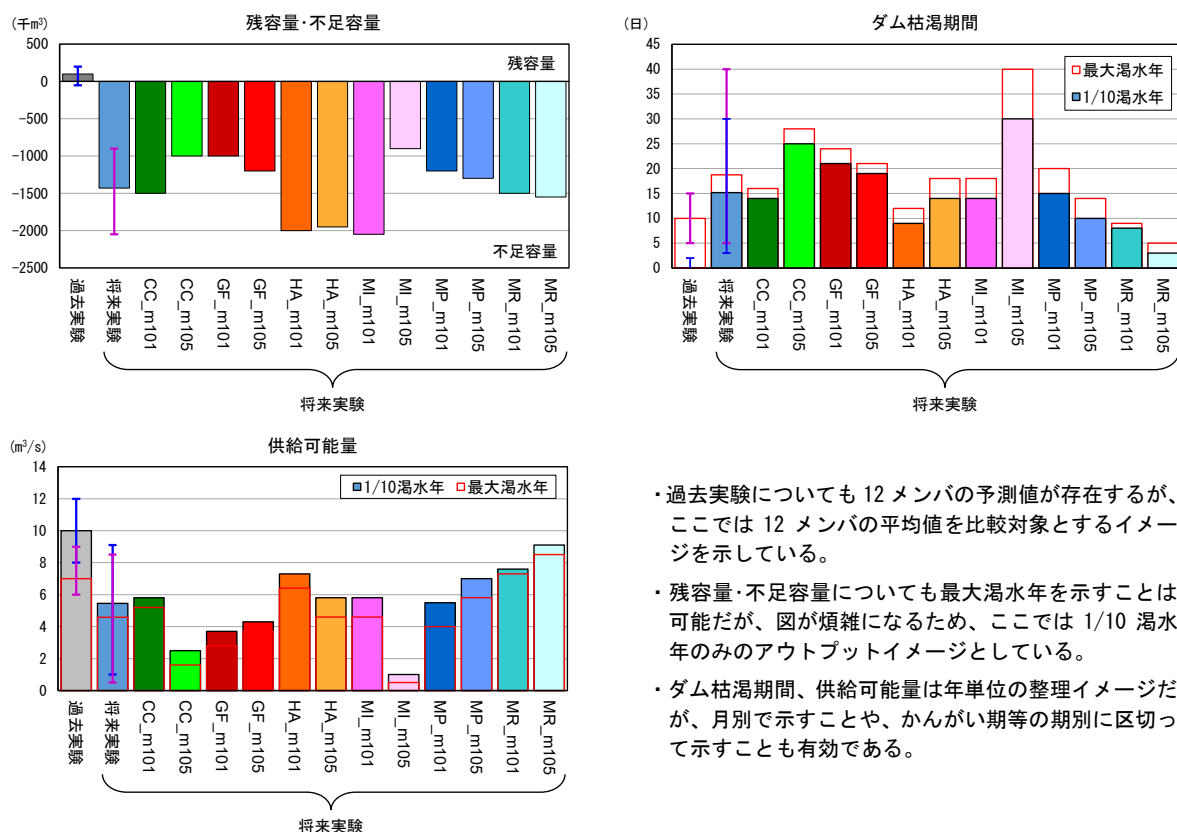


図 4.25 月平均流量・月最小流量の整理イメージ

図 4.26 は、1/10 渇水年のダム貯水池の残容量・不足容量、1/10 渇水年及び最大渇水年の枯渇期間、供給可能量の評価結果のイメージを示している。利水計画の基準となる 1/10 渇水年におけるダムの不足容量や枯渇期間、供給可能量等についても複数メンバによる予測値（アンサンブル予測値）を用いた水運用計算により幅を持った形で出力されるため、地域の実情に応じて平均値や最大値の結果を活用する。



- ・過去実験についても 12 メンバの予測値が存在するが、ここでは 12 メンバの平均値を比較対象とするイメージを示している。
- ・残容量・不足容量についても最大渇水年を示すことは可能だが、図が煩雑になるため、ここでは 1/10 渇水年のみアウトプットイメージとしている。
- ・ダム枯渇期間、供給可能量は年単位の整理イメージだが、月別で示すことや、かんがい期等の期別に区切って示すことも有効である。

図 4.26 不足・残容量、ダム枯渇期間、供給可能量の評価結果イメージ

◆留意事項◆

- ✓水運用計算は、水資源開発施設の運用及び取水量を一定のルールに基づき設定するとともに、残流域流量については流出計算結果を用いて実施するものである。一方、実際の運用においては、その時々気象予報等を踏まえてダム運用や取水が行われ、また残流域流量も推定値であることから、水運用計算の結果と実運用との間には一定の乖離が生じ得る。
- ✓2℃上昇実験は 4℃上昇シナリオ(RCP8.5)における 2040 年、4℃上昇実験は 4℃上昇シナリオ(RCP8.5)における 2090 年の温室効果ガス等の予測値を境界条件とした計算結果であるため、本ガイドラインに基づく影響評価結果は特定の年次を指すものではない。このため、水資源開発基本計画（通称：フルプラン）で示されている供給可能量及び需要量とは将来の捉え方（フルプランでは現状や将来人口等を踏まえて将来予測を行うのに対して、本ガイドラインの評価結果では、今後の世界が 4℃上昇シナリオ(RCP8.5)どおりに推移すると仮定した場合の気温や降水量等を用いた計算を行う）が異なることから、両者を直接的に比較できるものではない。本評価結果は、将来における供給可能量の増減傾向を把握するための参考情報として活用されるべきものである。

【コラム12】供給可能量の算出方法

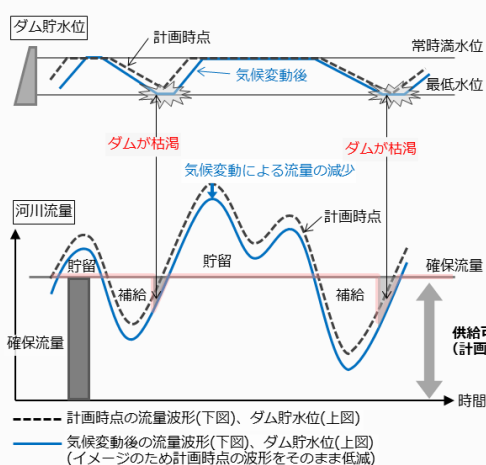
供給可能量の算出方法は「水需給バランス評価の手引き(R6.3)」に準じるが、ここではd4PDFのアンサンブルデータを用いた供給可能量の算出手順を整理した。

なお、d4PDFでは12メンバ×61年の予測結果を出力するため、STEP1では各年(1年)の供給可能量の算出方法を整理し、STEP2では算出した複数年の供給可能量から1/10安全度等の供給可能量を算出する方法を整理した。

STEP1：供給可能量の算出

計画規模を上回る渇水に対し、利水計算のトライアルにより計画補給量や利水基準点の確保流量を低減し、ダム等が枯渇しない補給量を供給可能量として算出する。これにより、d4PDFのアンサンブルデータ各年における気候変動後の供給可能量を算定する。

手順①：過不足の評価



手順②：供給可能量の算出

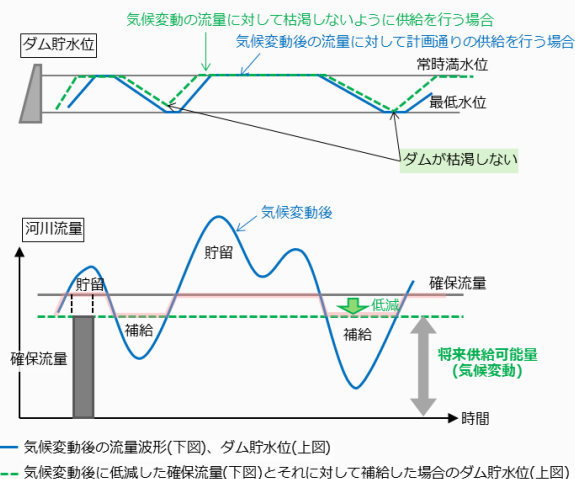


図 4.27 気候変動後の供給可能量の算定イメージ

STEP2：アンサンブルデータから算出される将来供給可能量の処理

STEP1で算出した供給可能量に対して、以下の処理を施し、気候変動前後の変化量を最終的に評価する。

【順位評価】：過去実験と将来実験の評価期間における各年の供給可能量を昇順に並べ、評価対象の安全度に対応する順位の値を比較する（例：評価期間60年で1/10安全度をみる場合は、各期間の下位6番目の供給可能量を比較する）。この方法によると、特定年の流量波形を確認することが可能である。

【確率評価】：各年の供給可能量を確率紙にプロットし、Weibull分布等による統計処理で求めた曲線を用いて、任意の確率に対応する値を比較する。なお、確率評価では外挿により、1/1000確率等のプロット範囲外の確率規模に対する供給可能量の変化を評価できる。

5. 評価結果の活用イメージ

- 気候変動による水資源への影響評価結果については、流域総合水管理の水利用の取組として、流域の関係者間で共有されることがまずは重要であり、必要に応じて関係者間で課題や適応策について議論を深めていくことが想定される。
- 本ガイドラインでは、対象流域毎に供給者側と需要者側の活用例を記載したが、これらは一例であり、地域の実情に応じて幅広い議論が進められることが望ましい。

【解説】

<水資源への影響評価結果と適応策の関係>

本ガイドラインに基づく影響評価を実施することで、将来の降水量、河川流量（自然流量）、ダム貯水量など様々な評価結果を得ることができる。それらの評価結果については、各流域における流域総合水管理の取組として、流域の関係者間でわかりやすい形で共有されることがまずは重要であり、その上で、必要に応じて水資源の供給者側及び需要者側のそれぞれの立場から、地域の実情に応じて課題や適応策について議論を深めていくことが想定される。例えば、渇水対応タイムラインが作成されている水系では、タイムラインで整理されている対応策を参考に議論が進められることも想定される。

特に、「近年深刻な渇水が発生した流域」、「水需要の大きい流域」、「将来降雪や融雪の影響が大きく現れる可能性がある流域」、「将来水資源が増加する可能性がある流域」では、現に水資源に対して課題がある、あるいは将来、水資源に変化が生じる可能性があると考えられることから、水資源の有効活用に向けた幅広い議論が行われることを期待している。

本ガイドラインでは、各流域での議論の参考となるよう、近年深刻な渇水が発生している流域などガイドラインの活用が期待される流域を対象として、活用イメージを5章1節～4節で例示することとした。ただし、ここで例示した適応策を検討しなければならないということではなく、各流域の課題解決に向けて必要となる議論が進められることを期待している。

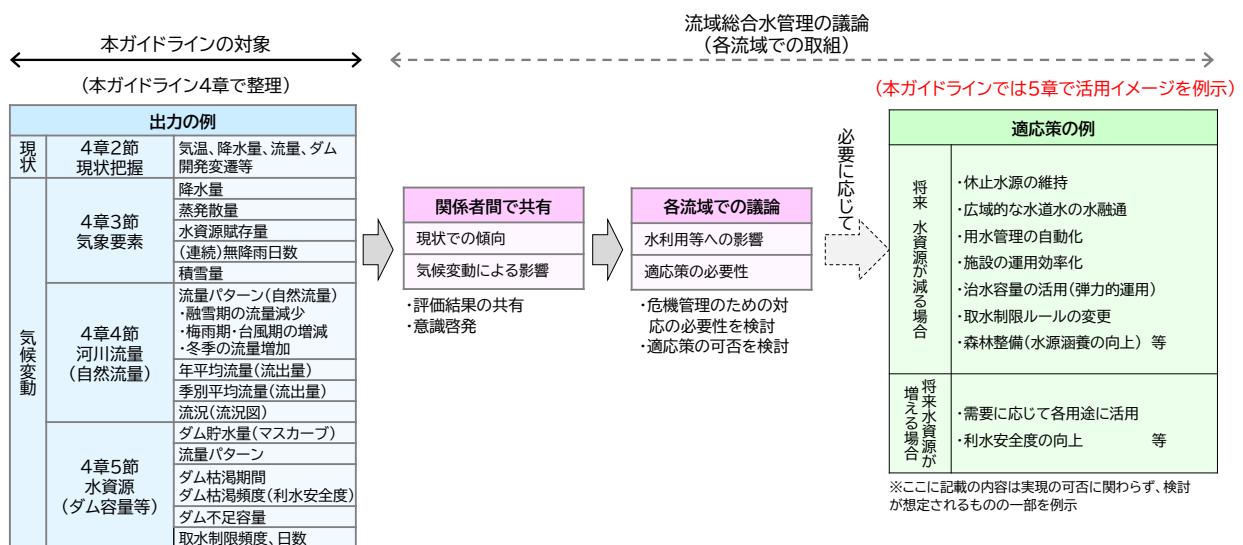


図 5.1 気候変動による水資源への影響に関する取組（議論）の進め方イメージ

表 5.1 本ガイドラインの活用が期待される流域と議論のポイント（イメージ）

ガイドラインの活用が期待される流域	想定される議論のポイント(イメージ)
5章1節 深刻な渇水が発生している流域	・近年発生した渇水が将来どのように変化するのか ・将来の傾向を踏まえ、現在の渇水対応の改善点があるか
5章2節 水需要が大きい流域	・将来の供給可能性がどのように変化するのか (各流域で水利用のあり方を検討する際の参考として活用)
5章3節 融雪の影響が大きくなる可能性がある流域	・季節毎の流量波形が将来どのように変化するのか ・季節毎の流量変化を考慮した適応策の検討が必要か
5章4節 水資源が増加する可能性がある流域	・年間を通じた流量波形がどのように変化するのか ・更なる水資源の有効活用が可能か

<参考>

本ガイドラインでは、主に水資源の量に着目して全国的な影響や影響評価手法の整理を行ったところであるが、既往研究によると、気候変動の影響により、水質、水温、さらには生物への影響も報告されているところである。地域の課題は様々であると考えられるが、このような観点も場合によっては参考になると考えられる。

◆留意事項◆

- ✓議論の内容によっては、ダム開発時における計算結果と気候変動による水資源への影響評価結果とを併せて参照することが、検討の参考として有効となる場合がある。
- ✓流域総合水管理（水利用）等において、気候変動による影響や適応策の議論を具体的に進めるにあたっては、モデルを用いた定量的な予測・評価が有効である。一方、モデルによる予測は、気象要素の設定、流出計算、水運用計算の各検討過程において、実態との間に誤差を生じることから、予測結果は不確実性を有する。この点に留意し、適応策等の検討においては、複数のシナリオを想定するなど、状況の変化に柔軟に対応できる対策を検討することが望ましい。
- ✓本ガイドラインは、水資源の供給側の変化を対象とするものであり、需要側の変化は対象としていない。ただし、地域の実情に応じて需要側の変化を考慮し総合的に検討することを否定するものではない。

【コラム13】気候変動の適応**■気候変動の緩和と適応**

地球温暖化の対策には、その原因物質である温室効果ガス排出量を削減する（または植林などによって吸収量を増加させる）「緩和」と、気候変化に対して自然生態系や社会・経済システムを調整することにより気候変動の悪影響を軽減する（または気候変動の好影響を増長させる）「適応」がある。

■適応がなぜ必要か

IPCC WGI 第六次評価報告書によると、世界平均気温は、少なくとも今世紀半ばまでは上昇を続け、向こう数十年の間に二酸化炭素及びその他の温室効果ガスの排出が大幅に減少しない限り、21世紀中に、産業革命以前と比べ1.5℃および2℃を超えると報告されている。

緩和の効果が現れるには長い時間がかかるため、早急に大幅削減に向けた取組みを開始し、それを長期にわたり強化・継続していかなければならないが、最大限の排出削減努力を行っても、過去に排出された温室効果ガスの大気中への蓄積があり、ある程度の気候変動は避けられない。気候変動によって、異常気象が将来は頻繁に発生したり深刻化したりすることが懸念されており、変化する気候のもとで悪影響を最小限に抑える「適応」が不可欠である。

(引用文献)

・「気候変動適応情報プラットフォーム」の記述を要約

5.1 近年深刻な渇水が発生している流域

- 近年深刻な渇水が発生している流域では、再度災害防止の観点から、渇水対応の振り返りや改善策を検討するだけではなく、本ガイドラインに基づく評価を行うことで、将来起こりうる深刻な渇水の影響をあらかじめ把握することができる。
- 例えば、現行の取水制限ルールを維持した場合の将来の取水制限日数やダム枯渇期間等を把握し、取水制限の開始のタイミングや基準、取水制限率の見直しなど課題と適応策の方向性について議論することが想定される。

【解説】

将来、河川流量が減少した場合、確保流量に対する不足が生じやすくなることから、ダム等による補給の開始時期が早まるとともに、総補給量が増大する可能性がある。さらに渇水が発生した場合には、取水制限の開始時期が早まり、取水制限期間が長期化することに加え、ダム等の貯水量が枯渇し、取水不足が生じることも想定される。

そこで、再度災害防止の観点から、過去の渇水対応の振り返りや改善策の検討にとどまらず、本ガイドラインに基づく評価を行い、例えば、取水制限の開始時期、取水制限期間、取水制限日数やダム枯渇発生頻度等を整理することで、将来起こりうる深刻な渇水の影響をあらかじめ把握することができる。

これらの結果を流域の関係者間で共有し、将来起こりうる渇水の影響について理解を深めるとともに、例えば、現行の取水制限ルールを前提とした課題を整理し、取水制限の開始時期や基準の見直し、取水制限率の設定のあり方等の適応策について議論することが想定される。

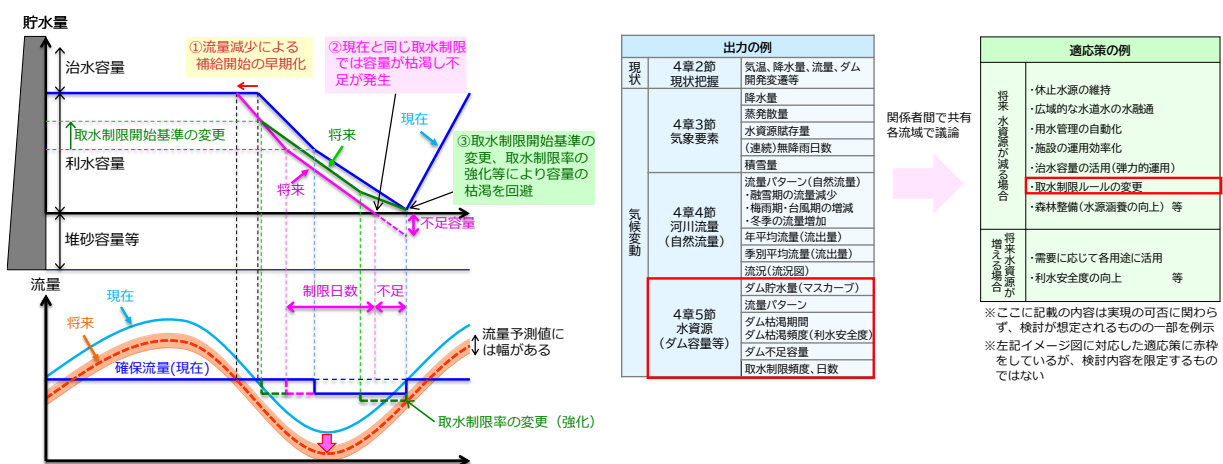


図 5.2 深刻な渇水が発生している流域における運用見直しの検討イメージ

5.2 水需要が大きい流域

○水需要が大きい流域では、供給可能性が減少した場合に国民の暮らしや社会経済に影響を与える可能性があるため、本ガイドラインに基づく評価を行うことで、気候変動の影響に備え供給可能性の変化等について把握することができる。

○例えば、供給可能性が減少する場合には、ダム枯渇期間等の影響の程度を把握するとともに、現状の水利用を前提とした場合の課題を整理し、休止水源の維持や広域的な水道水の水融通や施設の運用効率化等の適応策について議論することが想定される。

【解説】

大都市圏を含む流域等、人口及び産業の集積により水需要が大きい流域においては、将来、河川流量の減少に伴い供給可能性が減少した場合、国民の暮らしや社会経済活動に影響を及ぼすことが想定される。

そこで、気候変動による影響に備えるため本ガイドラインに基づく評価を行うことで、例えば、供給可能性や河川流量の変化やダム枯渇発生頻度など、将来生じる供給側への影響を把握することができる。

これらの結果を流域の関係者間で共有し、将来の供給可能性の変化による影響について理解を深めるとともに、例えば、現状の水利用を前提とした課題を整理し、休止水源の維持や広域的な水道水の水融通、施設の運用効率化を通じた無効放流の最小化等の適応策について議論することが想定される。

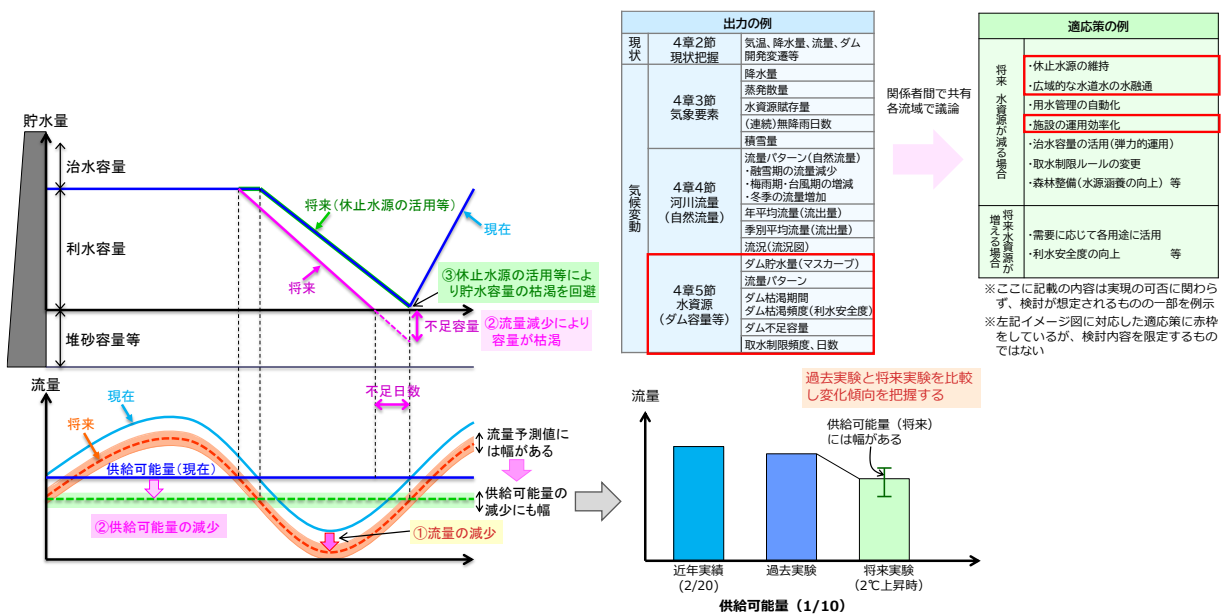


図 5.3 水需要が大きい流域における供給可能性の検討イメージ

5.3 将来降雪や融雪の影響が大きく現れる可能性がある流域

- 降雪が多い地域では、気候変動の影響により降雪や融雪に変化が生じ、河川流量等にも大きな影響が生じる可能性があるため、本ガイドラインに基づく評価を行うことで、降雪や融雪の変化による河川流量等への影響をあらかじめ把握することができる。
- 例えば、河川流量の増減の時期及び増減量（流量波形の変化）等を把握し、農業用水管理の自動化による節水、治水容量の活用（弾力的運用）等の適応策について議論することが想定される。

【解説】

降雪が多い地域においては、降雪量の減少や気温上昇に伴う融雪時期の変化により、河川流量が変化することが想定される。具体的には、降雪量の減少及び融雪時期の早期化により冬季の流量が増加する一方、農業用水の取水量が増加する春先に河川流量が減少することで、ダム等による補給量が増大することが想定される。

そこで、本ガイドラインに基づく評価を行うことで、例えば、河川流量の増減の時期及び増減量（流量波形の変化）、ダム等における無効放流の発生時期等、気候変動による降雪や融雪の影響をあらかじめ把握することができる。

これらの結果を流域の関係者間で共有し、降雪や融雪の変化による影響について理解を深めるとともに、例えば、現状の水利用を前提とした課題を抽出し、農業用水管理の自動化による節水、治水容量の活用（弾力的運用）等の適応策の必要性等について議論することが想定される。

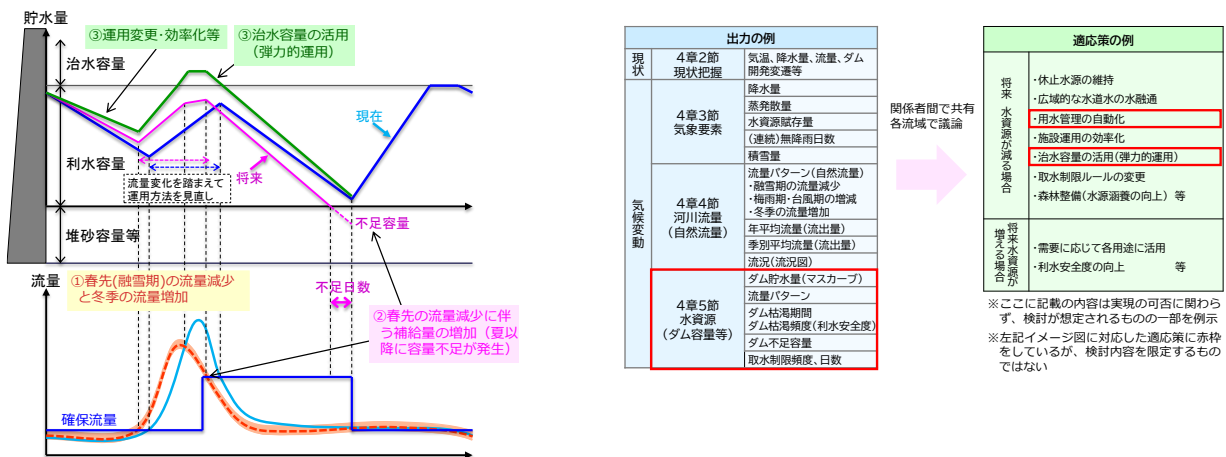


図 5.4 将来降雪や融雪の影響が大きく現れる可能性がある流域における運用見直しの検討イメージ

5.4 将来水資源が増加する可能性がある流域

- 気候変動の影響により水資源が増加する可能性もあり得ることから、そのような流域では流量の季節変化などをあらかじめ把握しておくことができる。
- 例えば、流量波形の季節変化を把握し、新たに生まれる可能性がある水資源について、需要に応じた各用途への活用や、既往の水利用に対する利水安全度の向上など水資源の有効活用について議論することが想定される。

【解説】

気候変動の影響により、梅雨期及び台風期の降水量が増加することなどで河川流量(自然流量)が増加し利用可能な水資源量が増加することも想定される。

このように、気候変動の影響により水資源が増加する可能性もあり得るため、本ガイドラインに基づく評価を行うことで、例えば、流量波形の季節変化から新たに生まれる水資源を把握することができる。

これらの結果を流域の関係者間で共有し、流量パターンの変化による影響について理解を深めるとともに、例えば、新たに生まれる可能性がある水資源について、需要に応じた各用途への活用や、既往の水利用に対する利水安全度の向上など水資源の有効活用について議論することが想定される。

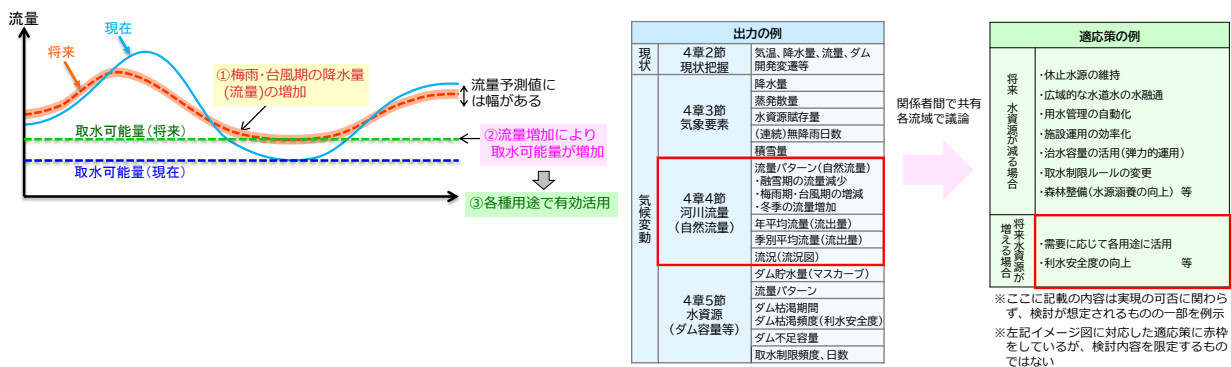


図 5.5 将来水資源が増加する可能性がある流域における有効活用の検討イメージ

【コラム14】気候変動による河川水質への影響

河川において気候変動の影響を考える際、豪雨や洪水の増加が注目されることが多い。一方で、降雨量の減少や渇水発生頻度の変化が河川水質に及ぼす影響についても把握していく必要がある。河川水質は、流域からの汚濁負荷量だけではなく、河川流量によっても変化する。一般に、河川流量が増加すると汚濁物質は希釈され、河川流量が減少すると濃度が高くなる傾向がある。しかし、その関係は流域の土地利用状況によって異なることが知られている。

北村ら¹⁾は、ある河川をケーススタディーとして、流量と水質の関係を解析し、森林流域と市街地流域で異なる特徴がみられることを報告している。解析の結果、森林流域では、河川流量が減少しても水質は大きく変化しない。一方、市街地流域では、流量が減少すると COD や全窒素 (T-N) 濃度が上昇する。河川流量が減少すると、河川水に占める下水処理水の割合が相対的に高くなることから、濃度上昇の一因と考えられている。

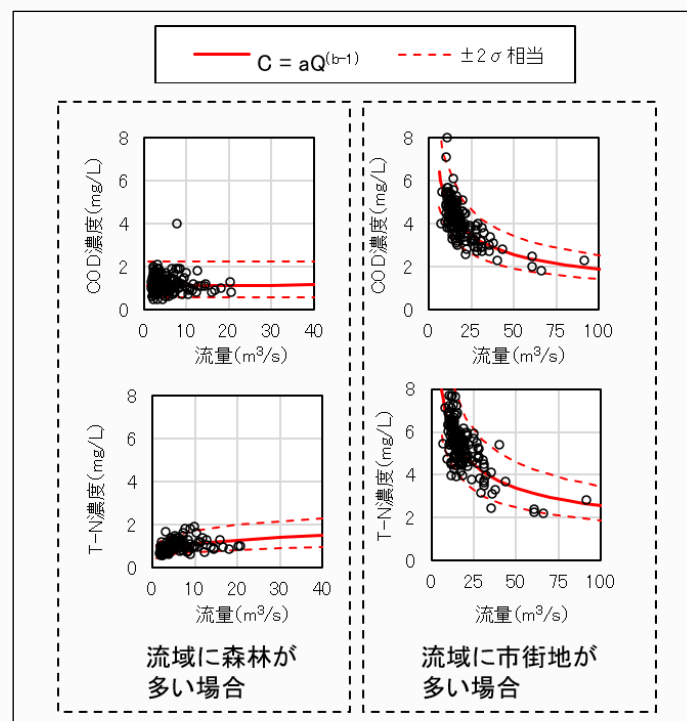


図 5.6 河川流量と COD、T-N 濃度の散布図¹⁾

(引用文献)

北村友一, 阿部翔太, 岡安祐司 土木学会論文集特集号 (環境工学), Vol.81, No.25, 25-25033, 2025 2025.12

(執筆) 土木研究所水質チーム

【コラム15】気候変動に伴う気温上昇と流量変化が河川水温に与える影響

河川水温は生物、水質、農業等に影響する重要な環境指標であり、気温や日射等の気象条件と、河川流量や河川水の起源（降雨、融雪、地下水）等の水文条件により決まる。気候変動による気温上昇により全国的な水温上昇が予想されるが、流量パターンの変化や減少等の水文的影響も受けることから、その上昇量は地域や河川の特徴によって異なると予想される。

星野・西村¹⁾は d4PDF²⁾に基づいた過去・将来実験の気温と河川流量³⁾から水温の将来変化を予測した。その結果、積雪地域の河川では融雪の早期化に伴う融雪末期（5月）の流量減少が水温の顕著な上昇をもたらし、小規模河川では渇水時の流量低下が月最高水温を大きく上昇させるなど、水文的特徴や河川規模の違いにより将来の水温上昇の特徴が異なることを示した。

- ✓ 水温は気温と強い相関を有する
- ✓ 同一気温では低流量時に水温が高い

○：日平均
□：月平均

・各プロットの色分けは流量規模の違い
・数字は月を意味する

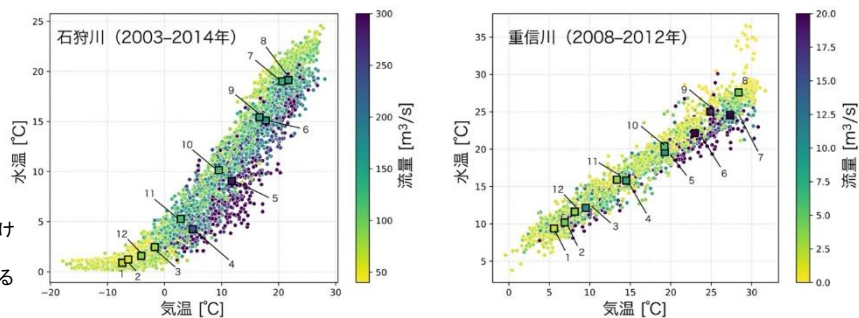


図 5.7 観測データに基づく気温と水温と流量の関係（参考文献 1）の図を一部改変

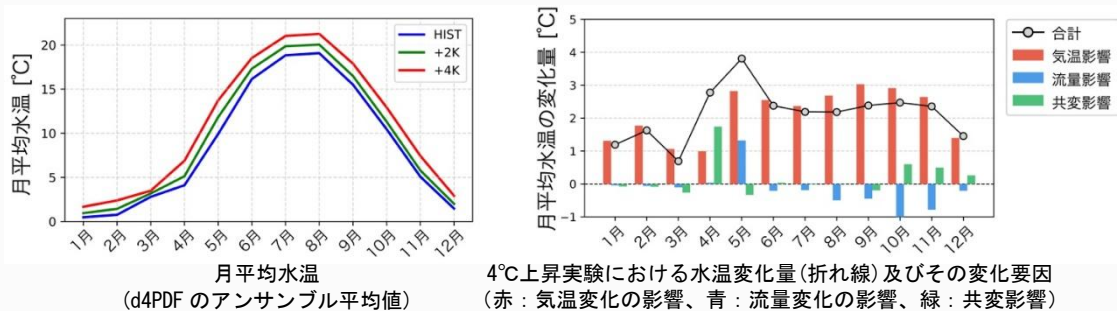


図 5.8 石狩川における過去・将来実験の月平均水温(左)とその変化量および変化要因(右)¹⁾

将来気候では融雪の早期化に伴い融雪末期（5月）に流量が減少することで、顕著な水温上昇を引き起こし、冬季は気温の影響を受けづらいため昇温量が小さいことがわかる。

（引用文献）

- 1) 星野剛, 西村宗倫: 日本における河川水温の将来変化予測とその要因分析, 土木学会論文集, 投稿中.
- 2) Kawase, H., Nosaka, M., Watanabe, S. I., Yamamoto, K., Shimura, T., Naka, Y., Wu, Y. H., Okachi, H., Hoshino, T., Ito, R., Sugimoto, S., Suzuki, C., Fukui, S., Takemi, T., Ishikawa, Y., Mori, N., Nakakita, E., Yamada, T.J., Murata, A., Nakaegawa, T., Takayabu, I.: Identifying robust changes of extreme precipitation in Japan from large ensemble 5-km-grid regional experiments for 4K warming scenario, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. 128, 2023.
- 3) 西村宗倫, 高田望, 因幡直希, 坂本光司, 柴川大雅, 吉田翔, 三浦悠, 渡部哲史, 仲江川敏之, 竹下哲也: 全国版 d4PDF ダウンスケーリングデータのバイアス補正データの開発と公開, 河川技術論文集, Vol.31, pp. 421-426, 2025.

（執筆）寒地土木研究所水環境保全チーム

【コラム16】中小河川の渇水が河川生物に及ぼす影響とその回復

1. はじめに

近年、気候変動による無降雨日の増加等により、河川での渇水がひどくなり、一時的に流れを失う「瀬切れ（断流）」の発生が世界的に報告されている。日本の河川では明確な流況の季節変化があり、その変化に適応した水生昆虫が数多く生息しているが、これらの水生昆虫が瀬切れに対してどのような応答を示し、その後どのように回復するかの知見は乏しいのが現状である。

2. 瀬切れにより生じる 40℃を超過する水温と低酸素

岐阜県各務原市の自然共生研究センターを流れる実験河川（川幅 3～5m）において、夏季に1週間の低水とその後の渇水（ゼロ流量）を人為的に発生させ、瀬切れが生じることを確認した。これにより、淵などに残る水塊（孤立水塊）では生物の生存にとって厳しい条件となることが示された。

✓水温の上昇：流れが失われたことで孤立水塊では、日射の影響を強く受け水温が 40℃を超過する地点が確認された。

✓溶存酸素の枯渇：水の停滞と高温、微生物などの呼吸に伴い、夜間の溶存酸素濃度（DO）は測定限界に近い 0.1 mg/L 未満まで低下し、ほぼ無酸素状態となった。

このような中小河川における渇水は、「高温」と「低酸素」という複合的な環境要因を通じて、流水環境に適応した水生昆虫の個体数および種数を一時的にほぼゼロ（死滅に近い状態）まで減少させた。

3. 生活史により異なる個体群の回復

瀬切れ（断流）後に再び通水されることで、水生昆虫の個体数や種数は約4週間で対照区と同水準まで回復したが、回復の度合いは種ごとの生活史特性に応じて異なることが示された。

例えば、年に複数回、卵から成虫になる種では迅速に回復したが、成長や羽化の時期が揃う種では、瀬切れが成長期と重なることで、次の世代が育つまでの数ヶ月以上の長期にわたり個体数が回復しなかった。

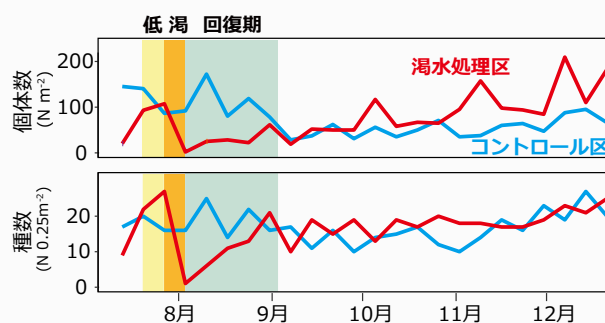


図 5.9 瀬切れ後の水生昆虫の個体群の回復

4. 結び

本研究の結果は、中小河川では短期間の瀬切れであっても高温・低酸素という劇的な変化が水生生物に対して大きな影響を与えることを示している。流れが戻ることで、個体数や種数が約4週間で回復したが、長期的な影響を受ける種も存在した。

（引用文献）

Nakagawa and Mori T (2026) Effects of phenological and drying-resistance traits on insect population trajectories after short experimental flow cessation. *Freshwater Science* 45(2).

（執筆）土木研究所自然共生研究センター