気候に対してレジリエントな水安全計画：

気候の変動と変化にともなう健康リスクの管理

国立保健医療科学院
National Institute of Public Health

英語の原本「Climate-resilient Water Safety Plans: Managing Health Risks Associated with Climate Variability and Change」は、2017年に世界保健機関（World Health Organization、WHO）により発行された。

© World Health Organization 2017

クリエイティブ・コモンズ 表示－非営利－継承 3.0 IGO ライセンス（CC BY-NC-SA 3.0 IGO；https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/igo）

本翻訳書は、WHOによって作成されたものではない。WHOは、翻訳の内容や正確さについて責任を負わない。英語の原本「Climate-resilient Water Safety Plans: Managing Health Risks Associated with Climate Variability and Change. Geneva: WHO; 2017. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO」が拘束力があり、真正である。

本翻訳書は、CC BY-NC-SA 4.0（https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/）のもとに、利用可能である。

気候に対してレジリエントな水安全計画：気候の変動と変化にともなう健康リスクの管理
発行所　国立保健医療科学院
発行日　2023年3月1日
ISBN　978-4-903997-12-4
©国立保健医療科学院 2023

気候に対してレジリエントな水安全計画：

気候の変動と変化にともなう健康リスクの管理

訳者一覧

小坂　浩司	国立保健医療科学院生活環境研究部 水管理研究領域	第1、6章　付録2、3　その他
越後　信哉	京都大学大学院地球環境学堂	第2章　付録1
島﨑　大	国立保健医療科学院生活環境研究部 水管理研究領域	第3、4章　付録4～6
下ヶ橋　雅樹	叡啓大学 ソーシャルシステムデザイン学部	第5章

謝辞

本ガイダンスは、世界保健機関（WHO）の公衆衛生、環境、健康の社会的決定要因部（PHE）の気候変動および保健チームと水、衛生、保健ユニットの共同成果である。

WHOは、英国国際気候基金、英国国際開発省、豪州外務貿易省、シンガポール環境水資源省、日本の厚生労働省による財政的、技術的支援に感謝の意を表する。

編集者は、Elena Villalobos Prats、Angella Rinehold、Jennifer De France、Diarmid Campbell-Lendrumである。

最終著者は、Dan Deereである。

著者および査読者の一覧を示す。20名以上の専門家や実務家が、ワークショップへの参加、ピアレビュー、識見や文書の提供を通じて、本書に貢献した。これらの方々には、Jamie Bartram（元WHO、現ノースカロライナ大学）、Karla Billington（Natural Logic）、Robert Bos（元WHO）、Katrina Charles（オックスフォード大学）、Chee Keong Chew（元WHO、現PUB、シンガポール）、Vanya Delgermaa（WHO）、John Dennis（環境保健コンサルティング、ニュージーランド）、Kristie Ebi（ワシントン大学）、Bruce Gordon（WHO）、Michael Hammond（独立コンサルタント）、Guy Howard（DFID）、Alex von Hildebrand（WHO）、Asoka Jayaratne（ヤラ・バレー・ウォーター）、Ahammadul Kabir（WHO）、Nam Raj Khatri（Thecho-9、ラリトプル、ネパール）、Waltaji Kutane（WHO）、Kah Cheong Lai（元WHO、現PUB、シンガポール）、Bonifacio Magtibay（WHO）、Shamsul Gafur Mahmud（WHO）、Rory Moses McKeown（WHO）、Rachael Miller（Water Corporation）、Maria Neira（WHO）、Tuan Nghia Ton（WHO）、Payden（WHO）、Sophary Phan（WHO）、Raja Ram Pote Shrestha（WHO）、Masaki Sagehashi（国立保健医療科学院、日本）、Paul Samuels（HR Wallingford）、David Sutherland（WHO）、Nigel Walmsley（HR Wallingford）、George Woolhouse（HR Wallingford）、Osman Yiha（WHO）、Gertjan Zwolsman（KWR Watercycle Research Institute）が含まれている。

目次

略語 vii

要約 1

1. はじめに 3
   1.1 文書の根拠 3
   1.2 文書の範囲 3
2. 気候変動が水供給に与える影響の概要 5
   2.1 IPCC第5次評価報告書の主要メッセージ 5
   2.2 気候変動が水循環に与える影響の予測 5
   2.3 気候が水資源に与える影響 8
   2.4 健康への潜在的な影響 11
3. 水安全計画のための地域的な気候脆弱性評価 13
   3.1 評価の範囲と目的 14
   3.2 評価のインプットと構成要素 14
   3.3 関連アウトプット 15
   3.4 地域的な気候脆弱性評価の情報源 16
   3.5 事例研究 16
4. レジリエンスと適応 18
   4.1 水安全計画の文脈における災害リスク軽減 19
   4.2 水安全計画の文脈における統合水資源管理 20
5. 気候変動の水安全計画プロセスへの統合 23
   5.1 モジュール1－水安全計画チームの編成 24
   5.2 モジュール2－水供給システムの記述 25
   5.3 モジュール3および4－危害の特定とリスク評価 26
   5.4 モジュール5－改善計画 30
   5.5 危害因子および危害原因事象に影響をおよぼす可能性のある気候変動の影響の例と関連する管理措置 32
   5.6 モジュール8および9－管理手順と支援プログラム 41
6. 補助情報と手引き 44
   6.1 はじめに 44
   6.2 気候変動と水供給に関するさらなる資料 44

参考文献 49

付録

付録1　オランダの事例研究：ライン川とマース川の飲料水供給機能に対する気候変動の潜在的影響 51
付録2　オーストラリアの事例研究：西オーストラリア州の補助水源からのリスクを管理するための水安全計画 61
付録3　ネパールの事例研究：ネパールにおけるリスク管理のための水安全計画 68
付録4　タンザニア連合共和国の事例研究：水安全計画は不確実な気候への適応をどのように支援できるか？ 71
付録5　エチオピアの事例研究：エチオピアの水供給における気候変動への対応 73
付録6　バングラデシュの事例研究：塩分濃度が飲料水源に与える影響 77

略語

CMIP	結合モデル相互比較計画
CO_2	二酸化炭素
CORDEX	統合地域ダウンスケーリング実験
DFID	英国国際開発省
DRR	災害リスク軽減
EPA	米国環境保護庁
HACCP	危害要因分析重要管理点
IPCC	気候変動に関する政府間パネル
IWA	国際水協会
IWRM	統合水資源管理
KNMI	オランダ王立気象研究所
NGO	非政府組織
NTU	比濁法濁度単位
SWAT	土壌・水評価ツール
UF	限外ろ過
UNEP	国連環境計画
UNISDR	国連国際防災戦略事務局
UV	紫外線
WASH	水と衛生
WCI	水循環統融合
WEAP	水の評価と計画
WEDC	水工学開発センター
WHO	世界保健機関
WISE	欧州水情報システム
WQP	WHO健康のための水質パートナーシップ
WSP	水安全計画

要約

適切かつ安全な飲料水供給のための長期的な計画は、気候や環境の変化に起因する外部の不確実性の増大を考慮して策定されなければならない。水安全計画（WSP）プロセスは、気候の変動性と変化の影響を考慮して、これらのリスクを管理するための体系的な枠組みを提供する。

本文書は、既にWSPアプローチの利用に携わっており、WSPを策定、実施している水供給事業者やWSPチームが、気候変動と、WSPプロセスにおいて気候変動をどのように考慮し、対処できるかについて、より深い理解を得るための一助となることを目的としている。この文書は、他の利害関係者、特にWSPの実施を支援している保健・環境機関にとっても有用である。本文書は、気候変動、地域の気候脆弱性評価、災害リスクの軽減、統合的な水資源管理といったより広範な問題を、WSPプロセスの中でどのように考慮するかを論じている。これをどのように特定のWSPで行うかの詳細は、各地域の状況に依存する。

この文書では、気候の変化にともない、将来の変化した条件や、より頻繁に、より深刻になる可能性のある異常気象を考慮して、十分な量の安全な水を提供することを考慮して、WSP のプロセスと成果を強化する機会を特定している。

本ガイダンスは、世界保健機関／国際水協会による*水安全計画マニュアル*に記載されているWSPモジュールに沿ったものである。したがって、本書は、気候変動がWSPの包括的リスク評価、管理、継続的改善プロセスの一部として考慮されていることを確認するために、水安全計画マニュアルと併せて使用することを意図している。

この文書は、科学的文献、特に気候変動に関する政府間パネルの第5次評価報告書の情報に基づいて、気候変動が水循環に与える影響に関する現在の知見を提示している。

本文書では、WSPプロセスを通じてこれらのリスクを効果的に管理するために、気候の変動や変化を明示的に考慮する必要がある*水安全計画マニュアル*のこれらのモジュールについて説明している。これらのモジュールは、1（「WSPチームの編成」）、2（「水供給システムの記述」）、3〜5（「危害および危害原因事象の特定とリスク評価」、「管理措置の設定と妥当性の確認、リスクの再評価と優先順位付け」、「改善計画あるいは更新計画の作成、実施および維持」）、8（「管理手順の作成」）、9（「支援プログラムの作成」）である。気候変動リスクの取り込みを支援するために実施される主な活動は以下の通りである。

WSPチームは、水道システムに悪影響を与えた過去の気候関連事象を検討し、将来の水道システムの危害やリスクに影響を与える可能性のある気候予測について学ぶべきである。モジュール1と2（本文書の5.1節と5.2節）で説明されているように、WSPチームは、他の機関の専門知識や情報を活用する必要があるかもしれない。

水文学や気候学の専門家などの関係者は、その水供給の文脈で気候変動の潜在的な影響を理解するために、そのような関係者を支援している。

モジュール3〜5（本文書の5.3節と5.4節）で説明したように、危害を特定し、リスクを評価し、改善を計画する際には、WSPチームは潜在的なリスクを大局的にとらえる必要がある。気候の変化は、環境および社会システムの変化につながり、通常考慮されている危害や曝露の性質に影響を与え、新たな危害を生じる可能性がある。危害や危害原因事象から生じる結果の可能性と重大性は、気候

の変動と変化によって変わる可能性が高い。

*水安全計画マニュアル*のモジュール8と9（本書の5.6節）では、管理手順とそれを支援するプログラムの策定を対象としている。大まかなレベルでは、これらのモジュールには、水質リスクに加えて水不足と信頼性に関連するリスクを管理するための水道事業者の制度的・個人的能力を構築するためのプログラムの策定が含まれている。これらのプログラムには、緊急時対応計画（洪水や渇水管理計画など）などの管理手順が含まれる。これらのプログラムは、異なる分野の利害関係者を集めて、水資源を管理するためのより流域に根ざした総合的なアプローチを支援し、よりレジリエントな水供給を実現するために利用することができる。

気候変動を考慮し、変化に適応し、気候変動の増加に対するレジリエンスを向上させようとするとき、WSPチームは、他の人と協力して活動する機会と実践を特定し、WSPの範囲と実施に関連する計画やプログラムに影響を与えることができる。

追加の情報源、詳細なケーススタディおよび事例は、文書全体および最後に付録として提供されている。

はじめに 1

1.1 文書の根拠

水道システムが、現在のレベルの気候の変動と将来の変化の両方に対してレジリエンスを持たない限り、安全な飲料水の持続的な利用可能性は危険にさらされることになる。気候変動は、気象関連事象の空間的分布、時期、強度を変化させることが予想される。より頻繁で深刻な異常気象が予想されることから、気候変動は淡水資源と水質にストレスを与え、その結果、飲料水の安全性と安全性が損なわれることになる。洪水や干ばつの発生率の増加を含むこれらの事象は、水道サービスに悪影響を与え、開発と人間の健康に危険をもたらすことになる。人口増加、都市化、産業活動の拡大もまた、水需要の増加をもたらし、気候変動の影響を悪化させる。

このような気候変動の影響が予想される中、極端な気象条件や資源ストレスの増大、それにともなう水質・水量の問題に対応するために、水道サービスの気候への耐性を向上させることが求められている。水安全計画（WSP）は、飲料水供給の安全と安心を確保するためのリスク評価とリスク管理のアプローチを積極的かつ包括的に構成し、これらの問題に対処するための貴重な枠組みを提供する。世界保健機関（WHO）の*飲料水水質ガイドライン（1）*では、WSPの立案を推奨しており、WHO／国際水協会（IWA）の*水安全計画マニュアル（2）*では、注意事項が記載されている。

> *危害の特定は、水質基準の遵守という点で重要であるため、微生物や化学的パラメータに影響を与える水道システムへの直接的なインプットについて考えることに限定される傾向があるかもしれない。しかし、安全な水を確保するためのアプローチは、洪水被害の可能性、原水や代替供給の充足度、電源の利用可用性と信頼性、浄水薬品や材料の品質、訓練プログラム、訓練を受けた職員の利用可用性、貯水槽の清掃、配水システムに関する知識、安全性、緊急時の手順、通信システムの信頼性、実験施設の利用可用性などリスク評価を必要とするすべての側面を考慮して、より広範なものにしなければならない。*

WSPの立案の原則と実践、および飲料水の安全性と安全性に対するリスクを特定し、優先順位をつけ、問題が発生する前に管理することを暗黙の要件としていることから、気候変動の影響に対処するための貴重な入口となっている。

1.2 文書の範囲

本文書は、気候変動が水の安全（質と量）におよぼすリスクを特定し、管理するために、WHO／IWAによる*水安全計画マニュアル（2）*に記載されているWSPのアプローチを適用することに焦点を当てている。この文書は、さまざまな水と衛生（WASH）の気候に対するレジリエンスに関する*ビジョン2030報告書（3）*を含む、これまでの取り組みを基にしている。ここでは、気候変動リスクに対処するための非常に関連性の高い管理アプローチとしてのWSPの強化と適応に焦点を当てている。WSPアプローチの利用を約束した水供給事業者、または既にWSPを策定、実施している水供

給事業者が、気候変動問題をより深く理解し、WSPプロセス内での統合を支援することを目的としている。

この文書は、部門の専門家、特に水道事業者やWSPチームが、気候変動、災害リスク軽減（DRR）、統合水資源管理（IWRM）のより広範な問題を特定し、WSPプロセスへの重要な貢献的アプローチとして取り入れることを支援するものである。どのようなWSPにおいても、これをどのように行うかは、地域の状況に依存する。本文書は、また、水道事業者とWSPチームが、気候や生態系ゾーンレベルでの気候脆弱性評価など、他の当事者から提供された情報を、各水道に関する取り組みのインプットとして、どのように活用するのが最善であるかについても記述している。

この文書は、WSPの包括的リスク管理と継続的改善プロセスの一環として気候変動が考慮されていることを確認するために、WHO／IWAによる*水安全計画マニュアル（2）*と併せて使用することを意図している。

気候変動が水供給に与える影響の概要 2

2.1 IPCC第5次評価報告書の主要メッセージ

気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の第5次評価報告書（*4*）は、気候変動の影響のうち水に関連したものについて世界的な視点を提供している。IPCC文書における水に関する議論のほとんどは、飲料水の安全性よりも、水供給の安全保障に関するものである。本文書では飲料水の安全性に焦点を当てているが、水安全保障と水質との関係から、水安全保障に関するある程度の理解は重要である。例えば、安定で安全な水源が失われると、安全性の低い代替水源から飲料水を調達する必要性が生じる。さらに、水量の減少は、希釈率の低下による汚染物質濃度の上昇につながる可能性がある。

IPCC文書で強調されている重要な第一のポイントは、淡水資源が限られているということである。世界人口の約80%が、水の利用可能性、水需要、汚染などの指標で評価されているように、水供給の安全保障に対する脅威に苦しんでいる。気候変動は水の利用可能性を変化させ、その結果、水供給の安定性、ひいては水質、つまり安全性を脅かすことになる。

気候変動は大気温度を上昇させており、水循環に影響を与えている。ほとんどの気象変数の平均値と極値が変化しており、健康に影響を与えている。これは、気温と降水量が、水の質と量に関係する多くの感染症や非感染性疾患に影響を与えるからである。水を介して気候変動の影響を受ける疾患には、食中毒、水系感染症、媒介性感染症、作物が失敗した場合の栄養不良による健康被害などがある（健康への影響の詳細については、2.4節を参照）。

飲料水の安全性に責任を持つ者は、気候変動が水資源にどのような影響を与えているか、また、気候変動が水供給システムにどのような影響を与える可能性があるかを理解し、淡水の量と質の変化に備え、対処するための政策、プログラム、インフラに反映させる必要がある。

2.2 気候変動が水循環に与える影響の予測

IPCC第5次評価報告書（*4*）のプロジェクトでは、以下のように述べられている。

- 地表面温度の上昇は、大気の蒸気保持能力に影響を与える。全球平均地表面温度の上昇の大きさとパターンは、温室効果ガスの排出量に関する仮定によって異なる。
- 雪として降る降水量が減少し、その結果、積雪の範囲と期間が減少する。しかし、最も寒い地域では、冬の降雪量の増加が夏の融雪量の増加を上回ると予想される。
- 気温の上昇にともなう雪や氷の量の減少や湖沼、貯水池、帯水層からの蒸発速度の増大。これらの変化は、降水量が増加しない限り、自然の貯水量と水の利用可能性を減少させる。
- 流水のある時期が変化し、干ばつの頻度が高くなったり、激しい干ばつが発生したりする可能性があり、人工的な貯水の必要性が高まっている。
- 世界の平均降水量は、温暖化により増加するが、地域間で大きな差がある（一部の地域での減少

を含む)。降水量は、特に地中海、メキシコ、中央アメリカ、オーストラリアの一部など、亜熱帯の緯度域で減少し、その他の地域、特に北緯の高い地域、インド、中央アジアの一部で増加すると予測される。

・湿潤地域や季節は一般的により湿潤な状態になり、乾燥した地域や季節は乾燥した状態になる。
・蒸発パターンの変化は、降水量の変化に似ており、ほぼ全域で中程度の増加が見られ、特に北緯の高い地域で顕著である。シナリオに依存した土壌水分の減少は、特に中・南ヨーロッパ、北アメリカ南西部、アマゾン、アフリカ南部で広範囲におよぶと予測される。

気候変動はすでに水循環に影響を与えている。これらの影響の例とその原因を表1にまとめる。

気候変動の影響に加え、淡水システムの将来は、ライフスタイルの変化を含む人口統計学的、社会経済的、技術的な変化によって決まる。これらの変化は、気象に関連した危険への曝露や水資源としての要件に影響をおよぼす。

土地利用の変化は、例えば、都市化の進展により洪水の危険性が高まるなど、淡水システムに大きな影響を与えると予想される。淡水システムにとって重要なのは、将来の農業用地利用、特に灌漑であり、これは世界の水消費量の大部分を占めており、淡水の利用可能性に大きな影響を与えている。

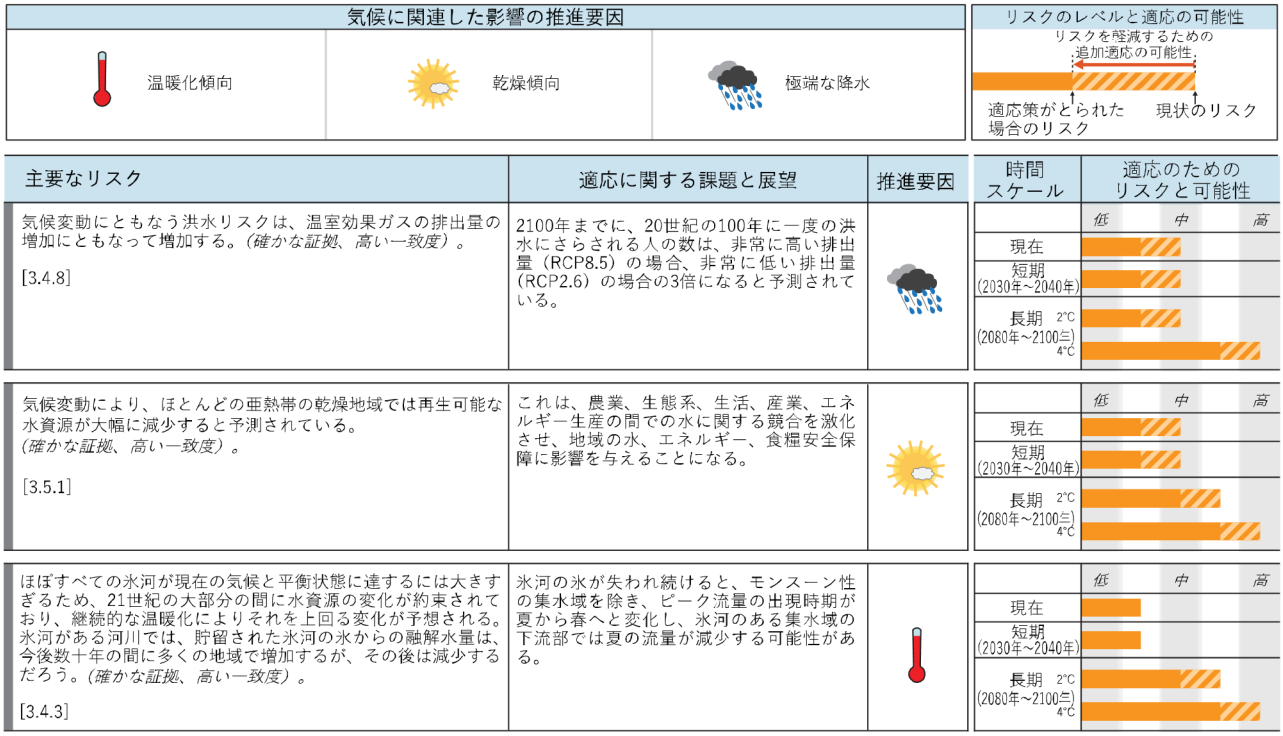
科学的知見は常に更新されているため、水管理者は最新の情報を探し出して活用することが重要である。

図1は、気候変動による淡水資源の主要なリスクと、緩和と適応によるリスク低減の可能性をまとめたものである。リスクは、現在、短期（2030～2040年)、長期（2080～2100年）の3つの時間枠で示されている。

表1　気候変動が水循環におよぼす観測された影響

観測された変化	原因
河川流量の変化（地球規模、1960～1994年）	主に気候変動と、それよりも少ない程度の二酸化炭素（CO_2）の増加、および土地利用の変化などの非気候要因
河川流量の減少（中国、黄河）	気温の上昇；人為的撤退に起因する減少は35%に過ぎない
年間ピーク流量出現時期の早期化（ロシア北極海、1960～2001年）	気温の上昇と春の雪解けの早さ
年間ピーク流量出現時期の早期化（コロンビア川、アメリカ西部、1950～1999年）	人為由来の温暖化
1910～1940年の氷河雪解け水量は1980～2000年よりも多い（ヨーロッパアルプス）	2つの時期の同程度の温暖化率がもたらす氷河の縮小
乾季の流量の減少（ペルー、1950年代～1990年代）	降水量の明確な傾向がない状態での氷河面積の減少
ボリビア・チャカルタヤ氷河の消失（2009年）	50 m地点での凍結等温線の上昇、1980年代～2000年代
降水量の極端な増加（北半球・中緯度帯、1951～1999年）	人為由来の気候変動
洪水（イングランドとウェールズ、2000年秋）	人為由来の気候変動に起因する異常な降水量
カルスト帯水層の涵養量の減少（スペイン、20世紀）	降水量の減少、可能性として気温上昇，さらには複数の交絡因子
地下水涵養量の減少（カシミール地方、1985～2005年）	冬季降水量の減少
高地湖の溶存有機炭素の増加（イギリス、1988～2003年）	気温と降水量の増加、さらには複数の交絡因子
貯水池の貧酸素化（これはエルニーニョ南方振動期間中に緩和される）（スペイン、1964～1991年および1994～2007年）	降水量の減少と蒸発要求量の増加による流出量の減少
塩水湿地における変動する糞尿汚染（カリフォルニア州、1969～2000年）	雨水流出の変動；大腸菌の変動の70%は降水の変動に起因
沼地や貯水池からの栄養塩の流出（ノースカロライナ州、1978～2003年）	ハリケーン
湖の栄養塩量の増加（オーストラリア・ビクトリア州、1984～2000年）	気温と水温の上昇

出典：IPCC *(4)*



出典：IPCC *(4)*

図1　気候変動による淡水資源の主要なリスクと適応によるリスク低減の可能性

2.3　気候が水資源に与える影響

水文循環の変化の範囲と性質、およびそれにともなう水資源への影響を、細かい空間スケールで正確に予測することは困難である。空間的・時間的なスケールでの影響には大きなばらつきがある。全体的に、気候モデルは、再生可能な水資源がある地域では減少し、他の地域では増加すると予測しているが、多くの場所では大きな不確実性がある *(4)*。大まかには、多くの中緯度地域や亜熱帯の乾燥地域では水資源が減少し、高緯度地域や多くの中緯度湿潤地域では増加すると予測されている。増加が予測されている場合でも、(降水量の変動性が大きいために）河川流量の変動が大きいために短期的な水不足が生じたり、雪や氷の貯蔵量が減少するために季節的に水供給量が減少したりする可能性がある。

気候変動は、自然現象と人為由来のメカニズムが複雑に同時に直列的・並列的に組み合わさって、水質に影響を与える *(4)*。気候変動シナリオの下での予測は、水、土壌、大気中の汚染物質の移動や変質を分析するために使用されるモデルと気候モデルを統合するだけでなく、適切なベースラインを確立する必要があるため、実行したり解釈したりすることが困難である。そのため、気候変動が水質に与える影響を予測したものはほとんどなく、利用可能なものでもその不確実性は高い。しかし、水質予測は、(a)地域の状況、(b)気候や環境の前提条件、(c)現在の汚染状態や基準となる汚染状態に大きく依存していることは明らかである。

IPCC第5次評価報告書では、気候変動は、以下に示すようなさまざまな課題に水道事業者が直面していると結論付けている *(4)*。以下に示す課題は、水質への直接的な影響に焦点を当てているが、集水域が森林の場合に森林火災の頻発や深刻化によりそこに依存している都市の水質が悪化するな

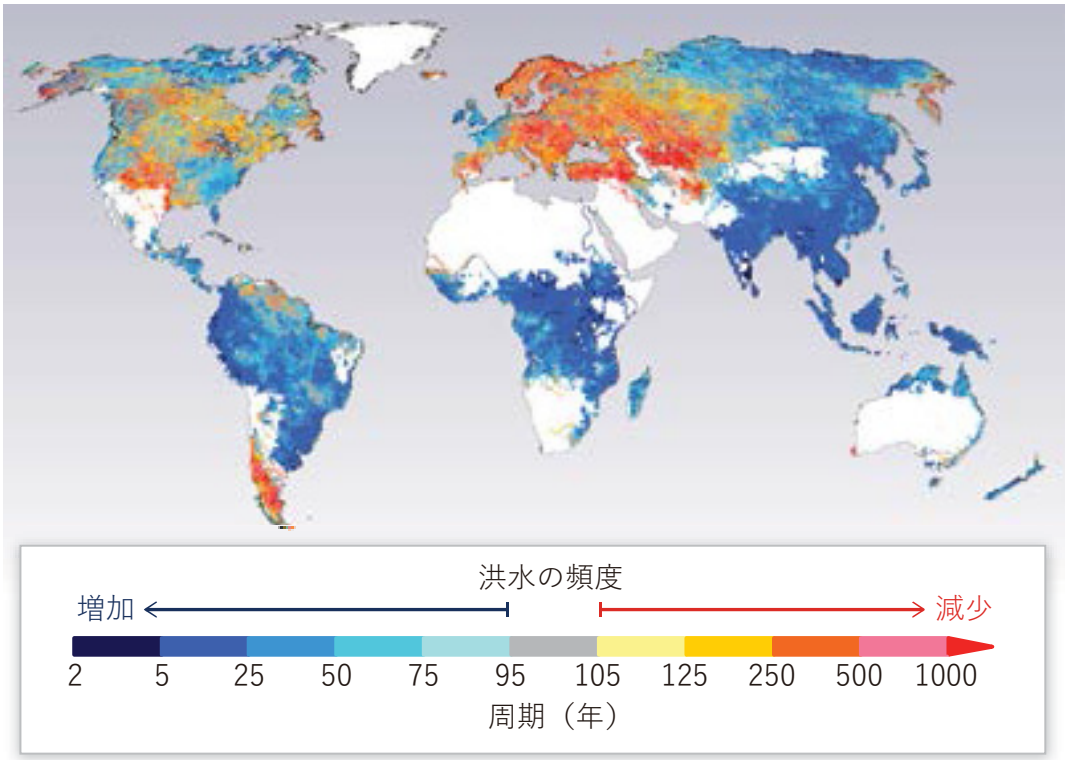
ど、水質への間接的な影響にも留意することが重要である。多くの浄水場、特に小規模な浄水場は、気候変動にともなって予想される、より極端な原水の変動に対応するように設計されていない。これらの浄水場は、追加または別のインフラを必要とするため、特に農村部では、浄水処理に非常にコストがかかる。

2.3.1　より激しい降水と洪水

IPCCは、今後数十年の水循環の変化は、最近観測されたものと同様の大規模なパターン、すなわち、降水量が減少する地域よりも多くの地域で降水量が大幅に増加すると予測しているが、その傾向には地域的・局所的な強いばらつきがある。また、洪水の大きさや頻度については、地球規模での傾向の向きについて証拠が不足している *(5)*。近い将来の変化や地域規模での変化は、自然の内部変動の影響を強く受け、人為的なエアロゾル排出の影響を受ける可能性がある。

中緯度の陸域の大部分と熱帯の湿潤地域では、今世紀末までに極端な降水イベントが増加し、頻度も高くなると予想される。飲料水の安全性の観点からは、より極端な降水イベントは、しばしば短期的な水質の低下と関連している。上流の土壌浸食により、濁った汚染水が発生する可能性がある。洪水はまた、雨水や排水の貯留システムを破綻させ、浄水処理および配水システムが対応できなくなる可能性がある。原理的には、病原体、栄養塩、および有害化学物質は、高流量によって希釈される可能性がある。しかし、実際には、貯留システム（人工のものと自然による緩和機構の両方）が破綻するということは、通常、高流量時、特に最初の流出時には、より高濃度の病原体や有害化学物質が水中に存在することを意味する。広域的な洪水は、降雨イベントの極端化により、より激しく、より一般的になる可能性がある。

図2は、洪水の予測周期の変化の例を示している。周期の変化の大きさに影響を与える排出シナリオには大きなばらつきがある。とはいえ、特に排出量の多いシナリオでは、潜在的に多くの人々が被害を受ける可能性がある。



出典：IPCC *(4)*

図2　20世紀に平均100年に1度発生したであろう洪水の、2080年代における周期の変化の予測（複数モデルによる予測の中央値）

2.3.2　干ばつの増加

21世紀には、降水量の減少や蒸発散量の増加により、一部の季節や地域で干ばつが激化すると予測されている *(6)*。これは、南ヨーロッパや地中海地域、中央ヨーロッパ、北アメリカ中部、中央アメリカ・メキシコ、ブラジル北東部、アフリカ南部などの地域に当てはまる。

飲料水の安全性の観点からは、干ばつの増加は長期的な水質の悪化と関連していることが多い。降水量が多くなると汚染物質が水中に移動する傾向があるが、一旦水中に存在すると、流量が少なく水位が低下する場合、汚染物質や栄養塩の濃度が高くなる傾向がある。汚染物質の濃度は、乾燥条件下で増加する。これは、ヒ素、鉄、マンガン、フッ化物イオンの濃度が問題となることが多いインドやバングラデシュ、北米および中南米、アフリカの特定の地域など、すでに水質が低い地下水源に対して懸念される *(4)*。大規模な貯水池では、高温と流量の減少により溶存酸素が低下する可能性がある。この溶存酸素の低い水は、底生生物の栄養分（例えば、リン）をより放出し、その結果、植物プランクトンの活性が高まり、湖の堆積物から水域への金属（例えば、鉄やマンガン）の放出が促進される可能性がある。淡水が少ない地域では、これらの資源をめぐって競争が激化し、水道事業体は他の利用者と水の割り当てをめぐって競合する必要性が高まる。さらに、干ばつはしばしば、そうでなければ回避できる可能性がある安全性の低い代替水源への依存度を高めることになる。

2.3.3　温度の上昇

飲料水の安全性の観点からは、気温が高いとシアノバクテリアの繁殖が増加し、それにともなって水源のシアノトキシンや天然有機物からのリスクが高まる可能性がある。また、気温が高く、溶存酸素の低い水は、特定の金属、リン、植物プランクトンの濃度を高めてしまう可能性がある（2.3.2項を参照）。これらの影響は、浄水処理において追加の処理を必要とする可能性がある。

給配水システム内では、温度の上昇が、おそらく水の使用を制限することによる流量の減少と相まって、中温性日和見病原体、例えば、*フォーラーネグレリア*にとってより好ましい条件を提供する。温度の上昇は残留塩素の安定性を低下させ、日和見病原体の制御の問題をさらに悪化させる。同時に、消毒副生成物も増加する。

2.3.4　海面上昇

沿岸域の地下水は、地下水涵養量の変化だけでなく、海面上昇によっても影響を受ける。海面上昇と地下水の汲み上げ速度は、塩水－淡水界面の位置を決定する。ほとんどの被圧帯水層は海面上昇の影響を受けないと予想されるが、不圧帯水層は塩水の浸入に悩まされる可能性がある *(4)*。海面上昇にともなって水位の自由な上昇がさまたげられると、淡水を貯留できる量が減少する。これは、多くのサンゴ礁の島々や三角州など、地表面が低い場所で起こるが、地下水が河川に流出している場所でも起こる。

飲料水の安全性の観点からは、飲料水に塩水が侵入すると、塩分除去のための水処理費用が増加する可能性がある *(7)*。

2.4　健康への潜在的な影響

2.1節で概説したように、水を介して気候変動の影響を受ける病気は、主に食物由来、水系由来、媒介性のものである。健康への影響は、飲料水に含まれる病原体や化学物質への曝露の増加や、農作物の不作による栄養不足によっても発生する可能性がある。表2は、気候の変動と変化に関連した曝露が、主に飲料水の質と量を介して健康影響を決定する主な因果経路をまとめたものであり、気候に対してレジリエントなWSPが疾病率の低下に貢献する可能性があるものを示している。[1]

[1] 気候変動が水の利用可能性、ひいては健康に影響を与える経路は他にもある。例えば、干ばつによる空気中の粉塵レベルの上昇や、アフリカにおける髄膜炎菌性髄膜炎のリスクの増加などである。これらは、水供給システムに明確に関連するわけではなく、WSPによって明確に管理できるものではないため、表からは除外されている。

表2　気候の変動と変化にさらされたことによる健康影響：因果経路

気候変動の影響を受ける現象	水資源への潜在的な影響	潜在的な健康およびその他の影響
平均気温の上昇	水系病原体の増殖、生存、残留、伝染、強毒化が、残留塩素の安定性の低下により促進。 消毒副生成物の増加。	病原体による食中毒や水系感染症のリスクの増加。 消毒副生成物への長期曝暴露による発がんリスクの増加の可能性。
干ばつの増加	洗濯、調理、衛生のための水の利用可能性が低下し、水系汚染にさらされる可能性が高くなる。 乾燥条件の場合、汚染物質の濃度が上昇する。これは、ヒ素、鉄、マンガン、フッ化物イオンの濃度が問題となることが多いインドやバングラデシュ、北中南米、アフリカの特定の地域など、すでに水質に問題がある地下水源にとって懸念されている。 地下水位低下と地表水流量の減少により、井戸が枯渇し、（安全でない可能性のある）水を入手するために移動する距離が長くなり、水源汚染が増加する可能性がある。 降雨量が少ないと河川の流れが悪くなり、媒介生物の繁殖地が増える可能性がある。 食糧安全保障上の問題。 熱帯地域の食糧生産量が減少し, 供給量の減少と価格の上昇による食糧へのアクセスが低下する。	食中毒や水系感染症の疾病負担増。 フッ化物イオン：歯・骨格のフッ素症。 ヒ素：皮膚の変化（色素の変化、（角質肥大）、がん（皮膚、膀胱、肺）など。 鉄・マンガン：水の変色、不快な味。 貧しい地域での食糧生産と摂取量の減少と感染症の発生率の高さとの相互作用から生じる栄養不良に関連した健康影響のリスクの増大。 栄養不足と感染症の複合的な影響、小児の発育阻害と衰弱の慢性的な影響。
より極端な降水イベント	衛生のための水の不足、水と衛生インフラの洪水被害、越流水による水源の汚染。 降雨量の増加と強雨による雨水流出により、水中の病原体、化学物質、懸濁物質の負荷量が増加する。 下水道システムからの越流水や汚染を引き起こす洪水、特にインフラが整備されていない場所での洪水。 長期に亘る降雨量の増加により地下水位が上昇し、自然浄化の効率が低下する可能性がある。 地表水の増加は、媒介生物の繁殖地を拡大し、降雨の増加は植生の成長を促進し、脊椎動物の宿主の個体数の拡大を可能にする可能性がある。また、洪水は脊椎動物の宿主を人間に接近させる可能性がある。 非常に高い降雨量は、溜まった水の中で幼虫を生息地から洗い流すことで、感染症（例えば、住血吸虫症）の媒介昆虫や中間宿主の個体数を減少させうる。	食中毒や水系感染症、潜在的に有毒な化学物質への曝露によるリスクの増加。 地域の生態系に応じて、媒介性感染症のリスクが増減する。
淡水温度の上昇（リンなどの栄養塩の上昇などで）	コレラ菌や住血吸虫属などの地理的・季節的な分布の変化。 淡水での藍藻類の異常増殖の増加。 温暖で低溶存酸素の水は、底生生物の栄養分（リンなど）をさらに放出し、植物プランクトンの活動を促進し、湖の堆積物から金属（鉄やマンガンなど）を水域に放出しうる。	コレラや住血吸虫症などの食中毒や水系感染症のリスクの増加。 肝障害、腫瘍促進、神経毒性（曝露された毒素による長期的な影響）。
海面上昇	海面上昇により沿岸地域は居住不能となり、人口移動に影響を与えたり、塩分の浸入により現在確保されている水源を使用できなくなったりする可能性がある。 海面上昇により沿岸帯水層の塩分濃度が上昇し、地下水の涵養量も減少すると予想される。	水系感染症のリスクの増加、高塩分消費が非伝染性疾患におよぼす健康への影響。

注：気候変動の影響を受ける現象はIPCC *(4)*、潜在的な健康リスクと影響はWHO *(2)*、Hunter *(8)*、Bouzid、Hooper and Hunter *(9)* に基づいている。

水安全計画のための地域的な気候脆弱性評価 3

なぜこれが重要なのか

WSPプロセスを通じて気候に対するレジリエンスを強化するためには、気候の変動と変化がもたらす現在および将来のリスクを理解することが重要であり、それは気候や生態系のゾーンをまたいで類似していることが多い。したがって、局地規模のWSPは、地域規模での水資源の脆弱性評価から恩恵を受けることができる。この地域的な気候脆弱性評価は、WSPプロセスに重要なインプットを提供する。

第2章では、気候が安全で適切な水供給にもたらす潜在的なリスクをいくつか説明した。WSPプロセスを通じて気候リスクに効果的に対処するためには、WSPチームは、記述されている潜在的なリスクのうち、どれが自分たちの水供給システムに関連しているのかを理解しなければならない。例えば、WSPチームは、シアノバクテリア繁殖のリスク上昇を評価し、管理するために、その地域の気温が上昇する可能性を理解する必要がある。この種の情報は、過去のデータの評価を含む気候脆弱性評価から得ることができ、理想的には将来シナリオの分析に基づいている。気候の変化は、特定の特徴を有する地域（つまり、気候や生態系のゾーン）全体で同様の傾向を示す可能性が高いため、地域的な気候脆弱性評価は、流域レベルから大陸レベルまでの規模で実施することが推奨される。

例えば、ヒマラヤの氷河からの雪解け水は、南アジアの多くの地域の河川システムや水資源に大きく貢献している。WSPを準備している水道事業者にとって、この水源が地域規模での気候変動の影響をどのように受けるかを理解することは重要である。地域的な気候脆弱性評価では、以下のような質問に対処できるかもしれない。河川流量の季節的なパターンは影響を受けるのか？氷河の融解が増加した場合、短期的に水の利用可能性は増加するのか？氷河が融解して後退し続ける場合、長期的には水資源が減少するのか？

気候の変動と変化が水資源と水供給にどのように影響を与えているのか、また、今後どのように影響を与えると予想されるかを理解することは、気候学、水文学、水文地質学、統計学、環境衛生学の専門知識を必要とする可能性がある困難な作業である。地域的な気候脆弱性評価は、地域または国の政府、国際機関、非政府組織（NGO）、学術機関によって作成されるかもしれない。これらの評価は、非常に洗練された包括的な評価から、より粗く単純化されたアプローチまで、多岐にわたるかもしれない。

本章では、以下について説明する。

- 地域的な気候脆弱性評価の範囲と目的
- 地域的な気候脆弱性評価のインプットと構成要素
- 地域的な気候脆弱性評価の関連アウトプット
- 地域的な気候脆弱性評価が得られるかもしれない場合
- 地域的な気候脆弱性評価に利用可能なツール

3.1　評価の範囲と目的

気候変動に対する脆弱性に関する文献は豊富であり、脆弱性を評価するための多くの枠組みが提案されている。IPCCは、気候変動に対する脆弱性を「あるシステムが、気候の変動や変化による悪影響に対して、どの程度影響を受けやすいか、あるいは対処できないかの程度」と定義するアプローチを採用している *(10)*。脆弱性は、特定の気候リスクへの曝露、システムの感度、ならびにシステムの適応能力の関数として記述されている。

本章では、脆弱性のうち曝露の要素に焦点を当てる。WSPの文脈における地域的な気候脆弱性評価の目的は、WSPチームや地理的地域内の他の利害関係者に、WSPプロセスに周知すべき主要な気候影響に関する情報を提供することである。これは通常、降雨、気温、蒸発散などの気候要因の現在および将来の変動性と、それらが水供給にどのように影響するか評価することを意味する。簡単な例としては、極端な洪水の規模と可能性、および将来の気候シナリオの下でこれがどのように変化するかが挙げられる。社会がどのように対応できるか、あるいは適応できるかを盛り込んだ、より広範な脆弱性および適応性評価に関するガイダンスが、国連気候変動枠組条約によって策定されている *(11)*。WHOは、保健分野に特化した脆弱性および適応性評価を実施するための同様のガイダンスを作成している *(12)*。

気候脆弱性の評価は、様々な規模を取り扱うことができる。地球規模では、気候変動が水不足 *(13)* や洪水リスク *(14)* に与える影響の評価が行われてきた。気候変動の影響に関するIPCC第5次評価報告書では、各大陸だけでなく、極地や小島嶼を含む9つの地域について報告されている *(15)*。大陸規模では、Eisenreichら *(16)* が欧州環境局のために欧州全体の気候変動の影響に関する知見を報告した。米国政府が実施した2014年の全米気候アセスメントでは、米国を10の地域に分けている。一般的に、水資源の評価は、ライン川 *(17)* のような規模の河川流域から、はるかに小さな規模の流域や小流域に至るまで行われている。最後に、気候や生物物理学的特性が類似している地域をまたいで気候変動の脆弱性を評価することも可能である（例えば、Padghamら *(18)* は西アフリカの半乾燥地域を研究している）。

気候脆弱性評価の結果をWSPに組み込む方法のガイダンスは、第5章に記載されている。

3.2　評価のインプットと構成要素

地域的な気候脆弱性評価の複雑さは、大きく異なる可能性がある。最も単純なものでは、地域の気候脆弱性評価は、洪水や干ばつなどの事象に関する過去の情報を収集し、検討することに基づくことで可能である。記録は、新聞や公式発表などの情報源で見つけることができる。降水量、気温、海水位、河川流量などの気候および水文関連のパラメータに関する過去のデータは、極端な変動の可能性や大きさなどの変動性を評価し、傾向を特定するために利用することができる。

過去のデータの見直しは有用であるが、限界があり、変化する気候の中で将来のリスクを評価するためには、気候や他のプロセスのモデル化が必要になるかもしれない。その結果、モデルの連鎖が生じることがある。最上位レベルでは、大循環モデルは、地球上の大気、海洋、氷冠（氷圏）、陸地間の相互作用を表現し、気温や降水量などの気候変数や、温室効果ガスの大気中濃度の違いによってどのように影響を受けるかを推定する。これらの地球規模のモデルは、100～500 kmの範囲の解像度で動作する。このモデルでは、人口や経済成長、炭素集約度の低い技術の採用、世界経済の構造などの要因についての仮定に基づいて通常IPCCから導き出される、温室効果ガスの排出シナリ

オを必要とする。

世界中の様々な科学グループによって多くの大循環モデルが開発されており、そのアウトプットは世界気候計画の結合モデル相互比較計画（CMIP）から得ることができる。これらのモデルの出力を地域的な解析に役立てるためには、地域気候モデルなどの様々な手法を用いて、より細かな規模に改良（ダウンスケール）する必要がある。

これらのモデルのアウトプットは、地域規模の水文モデルや水資源モデルで使用することができる。これらのモデルの複雑さや規模は様々であり、集水域の特性を一つの構成単位に「一括」または集約するものから、集水域を流域ごとに分割するもの、あるいは、土地被覆や土壌種別などの変数の変化を集水域全体で表現する、さらに細かい分解能のグリッドまである。これらのモデルは、生物物理学（土壌、地形、植生）、水文気象学（降水量、気温）、社会経済学（人口、土地被覆）、水利用（一人当たりの水需要）に分類できるインプットデータを使用する。貯水池などの基幹施設とその運用規則に関するデータが必要となる場合がある。土地被覆が主要な水文プロセスに大きく影響することを考えると、都市化などの傾向に基づく土地利用の変化のシナリオも必要となるかもしれない。多くのモデル化ツールが存在するが、6.1.1項では2つのツールを簡単に説明する。

水文系モデルや水資源系モデルと同様に、以下のような他のモデルを使用してもよい。

・河川からの浸水範囲の推定に使用できる水理モデル
・海岸浸水や塩水侵入のリスクに影響を与える海面上昇を推定するための海洋学モデル
・帯水層の挙動とその涵養のモデル化に使用できる地下水モデル

モデリングの複雑な連鎖や過去のデータの評価を考えると、地域的な気候脆弱性評価には、経済学者や社会科学者だけでなく、気候モデル学者、データ分析学者、水文学者、工学者の専門知識が必要となる可能性がある。

3.3　関連アウトプット

地域的な気候脆弱性評価は、WSPに有用な以下の情報を生み出す可能性がある。

・洪水、海面上昇、塩水の侵入など、水の供給や安全に影響を与える気候リスクの詳細な理解。
・気候変動シナリオの下での降水量、気温、河川流量などの主要パラメータの変化の予測。平均値は、極端な値に関する情報と同様に有用。これには、暑い日の数や豪雨の回数などが含まれる。
・暴風雨、洪水、干ばつなどの異常気象の可能性と規模に関する情報を、現在と将来のシナリオの両方で提供。
・既存の水源への脅威や新たな水源を見いだす必要性など、地域の水資源への影響。

地域的な気候脆弱性評価のアウトプットには、インプットデータやモデル構造に関連した不確実性があるため、大きな不確実性が存在するかもしれない。比較的よく用いられる手法は、モデルのアウトプットに安全係数を適用することである。例えば、ピーク河川流量の推定では、その値を一定量（例えば、20%）増加させる。一例として、英国環境庁は、11の地域にまたがるピーク河川流量の増加に対して、中・高・上限値を使用することを推奨している *(19)*。上限値は、浄水場などの重要なインフラの場合に適用されるかもしれない。

3.4　地域的な気候脆弱性評価の情報源

地域的な気候脆弱性評価にはさまざまな情報源がある。

・国際機関：IPCCは、第5次評価報告書において、気候変動が9地域（大陸別、極地、小島嶼を含む）で主要なパラメータに与える潜在的な影響について報告した。地域的な気候脆弱性に関する情報を保有している他の機関として、国連環境計画（UNEP）や世界気象機関がある（6.2節CMIPおよび統合地域ダウンスケーリング実験（CORDEX）参照）。欧州では、水と気候に関する多くのデータや情報に、欧州水情報システム（Water Information System for Europe）を通じてアクセスできる。
・国や地域の政府：例としては、米国の全米気候アセスメント *(20)* がある。各国の気象庁や水関連省庁が、気候の変動と変化や気候変動に対する脆弱性に関する情報を保有していることが多い。
・学術機関：気候変動に対する脆弱性に関する科学文献には、研究プロジェクトを通じて多くの情報がある。しかし、これらの情報は高度に技術的であるかもしれず、また、雑誌の購読料がかかるため、文献へのアクセスが制限されるかもしれない。
・国内または国際的に活動しているNGOは、研究やデータにアクセスできるかもしれない。3.5.2項にてメコン川下流域の事例研究が引用されている。

気候リスクに関する情報やデータを提供するオンラインツールがいくつか存在する（簡単な例については6.2.1項を参照）。また、さらなるツール開発プロジェクトが進行中である。

地域的な気候脆弱性評価を利用する際の重要な課題は、降水量、洪水、地下水の変化など、水供給システムに影響をおよぼす可能性のある各側面に焦点を当てているが、包括的な視点を持っていないことである。そのため、WSPチームは、複数の情報源を利用し、検討する必要があるかもしれない。

3.5　事例研究

当文書の付録では、気候リスクをWSPに組み込むことの重要性に関する5つの事例研究を示している。地域的な気候脆弱性評価とそれがWSPにどのように情報を提供できるかについての2つの事例研究の概要を以下に示す。

3.5.1　イーストベイ、カリフォルニア州、アメリカ合衆国

米国環境保護庁（EPA）は、イーストベイ公営事業団が行った気候変動に対する脆弱性の評価について報告した *(21)*。当事業団は、2つの独立した州規模の気候変動脆弱性評価を参照した。1つはカリフォルニア州エネルギー委員会の公益エネルギー研究およびカリフォルニア気候変動センターによるもの、もう1つはカリフォルニア州水資源局によるものである。これら2つの評価では、いくつかの関連する結論が得られた。例えば、雪はより早い時期に溶ける。年間総降水量の変化と干ばつへの影響についての結論は出なかったが、いくつかのシナリオでは干ばつの頻度と期間の増加を予測していた。気候変動は一般的に増加すると報告された。これらの情報はすべて、イーストベイ公営事業団が直接利用して、水の供給、需要、水質に与える洪水、海面上昇、気温上昇、降水量の低減により生じる干ばつといった影響に対処するための計画を水供給管理プログラムの一部として策定することができる。

3.5.2　メコン下流域、タイ、ラオス人民民主共和国

NGOのSTART Internationalは、タイとラオス人民民主共和国の支流に焦点を当て、メコン川下流域における気候変動の影響を評価するための研究を実施した *(22)*。この研究では、オーストラリア連邦科学産業研究機構（Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation）が開発した気候シナリオと気候モデルに、各支流域の複数の水文モデルを加えたものを使用した。この研究では、暑い日（33℃以上と定義される）の日数が年間2〜3週間まで増加する可能性があることが示された。また、特にラオス人民民主共和国の東部とメコン下流域では、降水量が10〜30%増加する可能性があると予測している。当研究はまた、乾燥した年には河川への排出量が減少する可能性があるが、ほとんどの小流域では河川への排出量が多くなることを示している。この情報は、水資源の利用性、洪水の可能性、水需要への示唆を与える。

4 レジリエンスと適応

レジリエンスと適応は、この文書全体を通して共通のテーマである。ボックス1は、これら2つの概念のIPCCの定義を示している。

ボックス1　IPCCによるレジリエンスと適応の定義

レジリエンス：「社会的、経済的、環境的なシステムが、危害原因事象や傾向、または撹乱に対処し、その本質的な機能、固有性、および構造を維持しつつ、適応、学習、および変容の能力を維持する方法で応答または再編成する能力。」

適応：「実際のまたは予想される気候とその影響に対する調整のプロセス。人間のシステムでは、適応は害を緩和したり、回避したり、有益な機会を利用しようとする。いくつかの自然システムでは、人間の介入によって、予想される気候とその影響への適応が促進されることがある。」

出典：IPCC用語集 *(23)*

この2つの用語は、時として置き換え可能な意味で使われることもあるが、異なるものである。健康システムに関連して、WHOは「レジリエンスは、健康システムの本質的な機能、固有性、構造が維持されるような方法で、健康リスクに対処し、管理するシステム自体の能力に関連している。一方、健康適応は害を和らげたり、有益な機会を利用しようとするが、システム自体の一定レベルの質の維持と持続可能な性能は保証されない」と考えている *(24)*。健康と水システムに気候に対してレジリエントな取組みを取り入れることは、システムの性能を確保することに貢献し、その結果、健康と水関連分野への投資の持続可能性と費用対効果の最大化に貢献する。しかし、気候に起因する変化や衝撃の程度が著しい場合には、システムのレジリエンスを維持することが常に可能とは限らず、システムが崩壊したり、破綻したりするかもしれない。本ガイダンスでは、水システム自体のレジリエンスを強化するための適応策（または管理措置）を推進している。

気候変動リスクに対する水供給システムの適応力とレジリエンスを高めるためには、淡水水源の継続的な利用のための長期的な計画、競合するニーズの中での水需要の管理、水供給システム自体のレジリエンスの見直し、貯水や洪水制御などの政策的ニーズへの対応、水質（と水量）を確保するための管理措置の実施、管理措置の継続的な有効性を確保するための運用・維持管理の改善が必要である。WSPプロセスは、適応力とレジリエンスを向上させるために必要となる、これらの要件の多くに体系的に対処するための効果的な枠組みを提供する。

水供給システムに対する気候リスクは、異常事象の頻度の増加と、水資源の利用可能性および水質に対する長期的な圧迫の両方を通じて現れているため、2つの補完的なアプローチが関連しており、WSPプロセスを通じて考慮されるべきである。DRRは、主にレジリエンスの向上を通じた例外的な事象の緩和に焦点を当てており、IWRMは、気候変動にともなう長期的な変化に適応するための枠組みを提供している。

4.1　水安全計画の文脈における災害リスク軽減

国連国際防災戦略事務局（UNISDR)[2] は、災害を「人的、物質的、経済的、環境的な損失や影響をともなうコミュニティや社会の機能の深刻な混乱で、被災したコミュニティや社会が自らの資源を使って対処する能力を超えたもの」と定義している。

災害リスクとは、「将来の、ある特定の期間に特定の地域社会や社会にて発生する可能性のある人命、健康状態、生計、資産、サービスの損失」を通じて、災害が発生する可能性とその結果を集約したものである。災害はシステムの正常な機能を混乱させ、通常は何らかの外部の影響によって引き起こされる。水供給システムの場合、災害は、インフラ自体（例えば、配水管網の完全性)、システムの運用、または水源の安全性を混乱させる可能性がある。洪水や干ばつは、水供給システムに影響をおよぼす可能性のある、気候変動と最も密接に関連する自然の危害原因事象である。

これに関連するDRRの概念として、「災害の原因となった要因を分析し管理するための体系的な取り組みを行い、危害因子への曝露を減らし、人や財産の脆弱性を減らし、土地や環境を賢く管理し、有害事象への備えを改善することを通じて、災害リスクを軽減する実践」というものがある。ボックス2には、DRRの枠組みが記載されている。

DRRのための国家戦略は、ある地域を脅かす潜在的な異常気象とそれに関連した危害因子を網羅するものであり、安全な水供給の継続性を考慮しなければならない。というのも、公的な水供給システムは、その本質および機能の面から、重要な国家インフラと位置付けられるかもしれないからである。異常気象は、水供給システムの構成要素に直接影響を与えるかもしれない（例えば、パイプラインの破壊、汚染物質や病原体の異常な負荷、貯水池の機能停止の可能性)。また、異常気象は、電力の損失や輸送の途絶など、間接的に水供給の安全性に影響を与える外部インフラの故障につながる可能性もある。WSPプロセスを通じて、関連する災害の種別とその潜在的な影響を考慮することで、WSPは、緊急時の水の安全性を促進するより良い準備と緊急時対応計画とともに、災害後の通常機能の迅速な回復を可能にすることを通じて、DRRに貢献することができる。

5.6.1項では、DRRと、あらゆるWSPの一部を形成する事故、災害、異常事態への備えとの関連を説明している。

2　http://www.unisdr.org/we/inform/terminology

ボックス2　DRRの枠組み

2005年には世界各国の政府がDRRに関する行動をとることを約束し、2015年までの10年間を対象とした「兵庫行動枠組」を採択した。

兵庫行動枠組の5つの原則とは、以下のとおりである。

・DRRを優先事項とする：DRRが国と地域の優先事項であり、実施のための強力な制度的基盤があることを確認する。
・リスクを知り、行動を起こす：災害リスクを特定、評価、監視し、早期警報を強化する。
・理解と意識の構築：知識、イノベーション、教育を活用して、あらゆるレベルで安全とレジリエンスの文化を構築する。
・リスクを減らす：根本的なリスク要因を減らす。
・準備ができ、行動する準備ができていること：あらゆるレベルで効果的な対応ができるよう、災害への備えを強化する。

2015年3月、日本の仙台で、2015年以降のDRRの枠組が合意された。仙台防災枠組2015〜2030 *(25)* は、「人命・暮らし・健康と、個人・企業・コミュニティ・国の経済的・物理的・社会的・文化的・環境的資産に対する災害リスクおよび損失を大幅に削減する」の達成を目的としており、以下の優先分野が含まれている。

・災害リスクの理解
・災害リスクを管理する災害リスク・ガバナンスの強化
・レジリエンスのための災害リスク軽減への投資
・効果的な災害対応へ備えの向上と、復旧・復興過程における「より良い復興（ビルド・バック・ベター）」

4.2　水安全計画の文脈における統合水資源管理

IWRMとは、「重要な環境システムの持続可能性を損なうことなく、経済的・社会的福祉を最大化するために、水、土地、関連資源の協調的な開発と管理を促進するプロセス」と定義されている[3]。IWRMの基本は、水資源は有限であり、多くの異なる利用が相互に依存しているということである。水資源の政策と管理は、水文学的資源が基本的に相互接続しているとの本質を反映する必要があり、IWRMは、過去に主流であった部門ごとのトップダウン型の水管理に代わるものとして受け入れられている。IWRMは、地球環境の保護に役立ち、経済成長と持続可能な農業開発を育み、ガバナンスへの民主的な参加を促進し、人間の健康の向上に貢献する。

飲料水に使用される水資源は、水質リスク、信頼性リスク、水不足リスクなど、水部門の管理のおよばない広範囲のリスクにさらされている。気候変動は水供給へのリスクを悪化させる可能性があるため、変化する気候の中で水供給の継続的なレジリエンスを支えるツールとしてのIWRMの必要性を強めている。優れた水資源管理は、レジリエンスを構築し、避けられない変化への適応を支援する上で重要である *(26)*。ボックス3では、WHOの *ビジョン2030 (3)* に明記されているように、レジリエントな水供給を支援するためにIWRMアプローチを利用する事例を紹介している。

3　http://www.gwp.org/The-Challenge/What-is-IWRM/.

ボックス3　IWRMと気候に対してレジリエントな水供給

世界規模でみると飲料水はすべての水利用の15%に過ぎず、低所得国ではそれ以下であることが多い*(27)*。少なくとも70%（一部の国ではそれよりもかなり多い）が農業に利用されている。気候変動の原因となる気温の上昇は、蒸発散量を増大し、その結果、多くの地域で農業用水の需要が増加するであろう。飲料水やその他の家庭用の水もまた、産業、電力、レクリエーション、環境における水利用と競合せざるを得ず、それぞれがより多くの水を消費したり、年間の特定の時期に水利用が制限されたりする。

多くの部門にまたがる水の複数の需要を考えると、水は、その割当てのための透明性の高いアプローチと、異なる利用者間での必要なトレードオフをともなう、統合的な方法で管理される必要がある。水から得られる利益を共有するシステム－食料、エネルギー、生態系サービスなど－が水の全体的な貢献を最大化するために重要である。これは、水が複数の国で共有されている場合には、さらに重要である。また、優先的な需要を満たすべく十分な水を確保するため、水を効率的に利用する必要がある。IWRMのパラダイムの中では、水質と十分な水量を確保するために、飲料水の供給が保護されていることが重要である。

気候変動は、水利用の効率を向上させ、レジリエンスを高め、適応を支援するために、IWRMをより良く取り入れ、実施することの緊急性を高めるだろう *(26)*。飲料水と衛生は、生活用水の需要を満たすべく、各コミュニティすべてに十分に割当てられる必要がある。このように、水と衛生分野は、農業やエネルギーなどの他の水を利用する部門とは異なっている。後者では、ある場所での食糧生産や発電に必要な水の流れは、ある程度、他の地域や国からの物品やサービスの輸入で代替できる。

IWRMツールは、水供給システムのリスクレベルを直接的または間接的に低減するために役立つさまざまな適応策を提供している。多くのIWRMツールは、直接的な管理措置ではなく、水管理のための制度やガバナンスの取り決めに関連している。例えば、環境水の水質および汚濁に関する規制を策定し、施行することは、水源汚濁リスクの低減に役立つ。WSPプロセスでは、流域の利害関係者や環境規制当局を含めた利害関係者の関与が奨励されている。すべての集水域管理の問題をWSPの範囲内で検討できるわけではないが、飲料水資源の保護には、水供給事業者とWSPチームを含むさまざまな利害関係者の間での協力的かつ戦略的な努力が必要である。

水供給事業者は、事業を実施するところの水資源システムをより広範に意識し、水源を超えた集水域の各プロセスに目を向けるべきである。そのことで、水供給が継続してリスクを評価し、機会を探ることができる。例えば、農業灌漑に排水を安全に利用することで、不足している水源への圧力を減らすことができる。適切に管理されたシステムでは、排水の利用は、水供給事業者だけでなく、信頼性が高く、手頃な価格で栄養源に富んだ灌漑用水を提供することで、農家にもメリットをもたらす（ボックス4）。水供給事業者自身の直接的な影響範囲外のリスクと機会を特定するためには、集水域のさまざまな利害関係者との関わりが重要である。

5.6.2項は、WSPが水供給システムのレジリエンスを高めるためにIWRMをどのように組み入れることができるかについてのガイダンスを提供している。

ボックス4　農業における排水の安全な利用

農業灌漑用の水は淡水資源の最大70%を消費しており、特に水不足の地域では飲料水供給のための水の利用可能性を圧迫している。水不足の深刻化に直面している水供給事業者の気候変動リスクを緩和するために、排水を灌漑目的の代替として利用することができる。

排水は、一年を通じた灌漑用水の供給源であり、貴重な栄養源を含んでいる。水と栄養源を手頃な価格で安定的に供給でき、化学肥料を購入する必要性を減らすことができるため、農家にとっては魅力的な代替水源となっている。

しかし、排水の使用は健康リスクをもたらすため、農業従事者と農産物の消費者を保護し、排水処理に対する一般の人々の否定的な認識に対処するために管理する必要がある。さらに、排水処理の処理と使用に関する国の基準や規制は、各省庁間で分断されていることが多く、改正には担当機関間の調整が必要である。

WHO*汚水・排泄物の安全な処理と再利用のガイドライン（28）*は、WSPと同じく危害要因分析重要管理点（HACCP）の原則を用いた政策と規制上のガイダンス、リスク評価と管理の枠組みを提供している。WHO*衛生安全計画（29）*は、WSPプロセスを補完するために使用できる排水使用のリスク評価、監視、管理措置に関する実践的なガイダンスを提供している。

気候変動の水安全計画プロセスへの統合

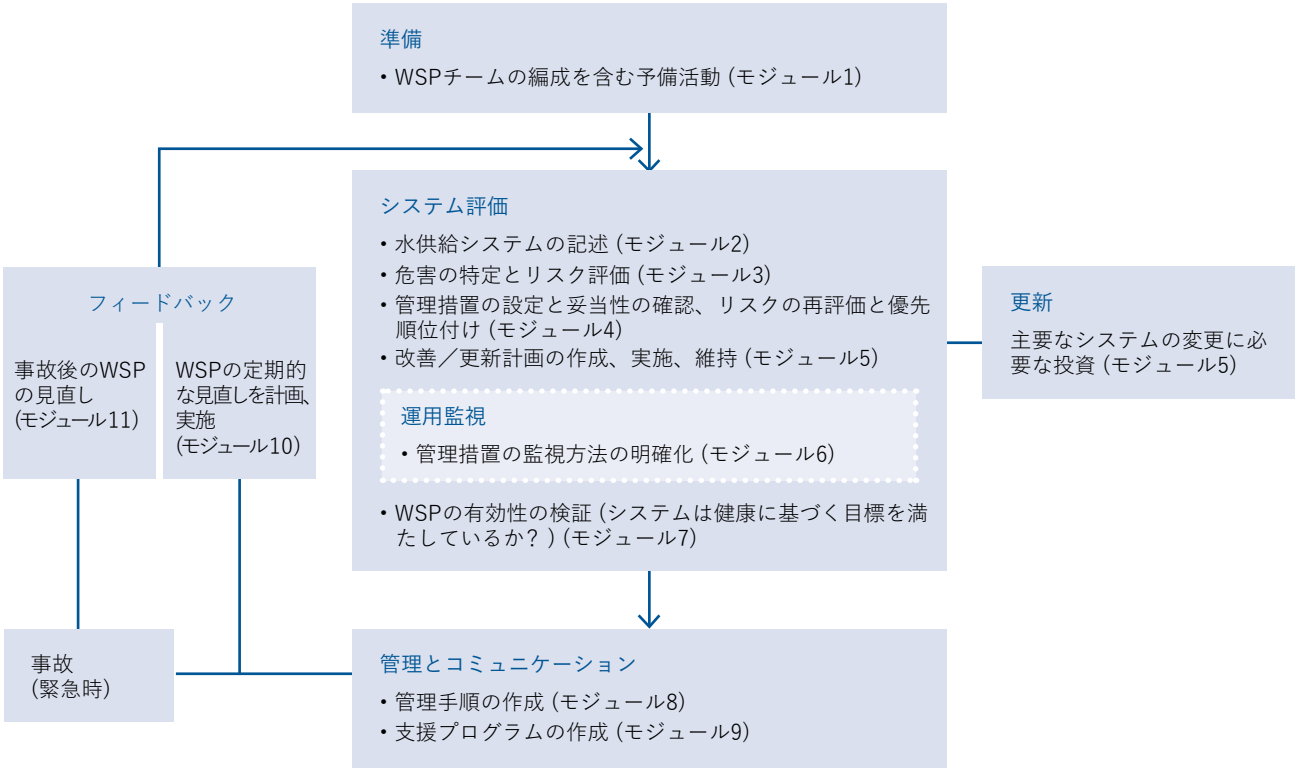
5

なぜこれが重要なのか

長期に亘って十分な量の安全な飲料水を供給するための計画は、気候と環境の変化に起因する外的要因の不確実性の増大という状況に照らしたうえで設定される。WSPは、そのプロセスのさまざまなポイントで気候の変動や変化の影響を考慮することで、これらのリスクを管理するための枠組みを提供している。本節では、WSPアプローチに沿った主な気候変動に関する検討事項を説明する。

WHO／IWAによる*水安全計画マニュアル (2)* は、水供給事業者またはそれに類する事業者が管理する水供給のためのWSPの策定と実施を支援する実践的なガイダンスを提供している。同マニュアルは、図3に示すように、11のモジュールに分かれている。本章では、いくつかのモジュールの中で、水供給システムの気候に対するレジリエンスを強化するために*水安全計画マニュアル*の補足として使用すべき、気候変動リスクを特定、管理する具体的な事項を示す。

本書で扱う*水安全計画マニュアル*のモジュール（モジュール1～5、8、9）は、WSPプロセスを通じて気候に関連したリスクを十分に管理するため、気候変動を明確に考慮する必要がある。これにより、本書で採り上げていないモジュールについても追加的な指針なしで気候関連の問題を適切に考慮できると予想される。例えば、気候関連リスクを管理するために必要な追加的な管理措置は、本書（モジュール5の一部）で明確に採り上げられている。WSPチームがモジュール6で管理措置の監視計画を決める際には、追加的な指針を必要とせずに、気候に関連した管理を他のすべての管理と一緒に検討できると予想される。



出典：WHO *(2)*

図3　WSPの概要

5.1　モジュール1－水安全計画チームの編成

5.1.1　付加的専門知識の追求

なぜこれが重要なのか

WSPチームは通常、水供給システムの運転者、管理者、技術専門家で構成され、しばしば保健・環境部門の代表者も加わる。しかし、気候変動影響を考慮し対処するために、WSPチームには気候に関連した情報の入手や解釈のための追加の支援が必要となる場合がある。

WSPチームは、気候に関連したシステムの説明、危害の抽出、リスク評価、改善計画に必要な証拠や情報を提供するために、必要に応じて専門家の助言を得るべきである。WSPチームが、実施された地域別の気候脆弱性評価の結果（第3章を参照）など、気候変動の考慮事項のWSPプロセスへの統合を支援するための情報を収集・解釈することを、これらの専門家は支援できる。

その専門的知識が、気候変動にともなうリスクを考慮してWSPを策定、改訂する際に、有用な知見を与えうる人は以下が含まれる。

・気候変動の影響と適応計画を専門とする気候学者
・対象地域の気候が水資源に与えうる影響について助言する水文学者または水文気象学者
・予測される気候に関連した水質変化が健康に与える影響について助言できる公衆衛生または水質の専門家

・DRRについて助言する災害対策または市民保護の専門家
・現在の気候が、WSPの地域で将来直面するであろう気候と類似している地域での運用経験を有する水計画者
・分野を超えた水資源開発と戦略的な水供給計画の経験を持つ水資源の専門家
・必要に応じて、検討中の新規水源または水管理配置のリスク評価を支援するための、その他の専門家

5.2　モジュール2－水供給システムの記述

5.2.1　気候に関連した危害原因事象に影響を与える現在および将来の状況の記述

なぜこれが重要なのか

WSPの中心となる危害の特定とリスク評価を支援するために、水供給システムの詳細な記述が不可欠である（モジュール3と4を参照）。WSPプロセスを通じて気候に対するレジリエンスを構築するために、WSPチームは気候に関連したリスクに対する脆弱性を理解し、それに対処するために十分な情報を収集しなければならない。

水供給システムを記述する際、WSPチームは、気候に関連して水資源または水供給システムのインフラに影響を与える可能性のある現在および将来の（予測される）状況を検討すべきである。必要な情報を収集するために、WSPチームは、WSPチームの中心メンバーの経験と知識、そして可能であれば、5.1.1項に記載しているような追加の助言者の専門知識と助言を利用すべきである。

気候に関連した危害の特定とリスク評価を支援するシステム情報の例は、以下のようなものがある。

・（例えば、渇水に起因する季節変動や年ごとの変動を考慮した）水源収量の信頼性
・過去の水質データと水源収量との関係
・異常気象の歴史と傾向（例えば、洪水や渇水）
・水供給に影響を与える可能性のある将来の気候予測
・現在および予測されている気候条件の水量と水質への影響
・利用可能な新規水源または代替水源
・水資源の需給に影響を与える土地利用や人口増加の傾向
・集水域内の他の水利用者と、その平常時および渇水時の取水パターン

既存の調査結果を検討することで、WSPチームと専門委員はこのような情報の一部を得ることができる。例えば、既存の水資源評価や流域管理計画は、水需要を増加させる可能性のある人口増加や都市開発に関する貴重な情報を提供できる。地域の気候脆弱性評価結果は、現状および計画されている気候シナリオとそれに関連する水資源への影響に注目したものであるため、WSPチームにとって特に有用であり、入手可能な場合には必ず参考にすべきである。ボックス5は、WSPプロセスのシステムの記述の段階で、地域の気候脆弱性評価をレビューすることの価値について、より多くの情報を提供している。

ボックス5　システムの記述に情報を提供するための地域の気候脆弱性評価

地域の気候脆弱性評価は、WSPチームがどのような気候に関連した潜在的なリスクが自らの水供給システムに関連するかを理解するうえで役に立つ。気候の変化は地域全体－すなわち気候帯や生態系のゾーン－で同様である可能性が高く、その評価を水供給システムレベルで実施する必要はない。むしろ、評価は、地域や国の政府、国際機関、NGO、学術機関の専門家によって、流域レベルや大陸レベル等のより広いレベルで実施することができる。WSPチームは、自分たちの地域で予測される気候変動、および気候変動によって自分たちの水供給システムとWSPにどのような影響を受けるかを理解するために、その評価結果をレビューすべきである。

WSPチームと専門委員は、範囲と目的、インプットとアウトプット、評価結果や支援ツールの入手先などを含む地域の気候脆弱性評価に関する詳細情報について、第3章を参照すべきである。

5.3　モジュール3および4－危害の特定とリスク評価

なぜこれが重要なのか

モジュール3と4はWSPの主要な要素であり、潜在的な危害因子や危害原因事象とそれにともなうリスクについて検討している。気候の変動と変化は、環境や社会システムの（気候変動とは無関係に、あるいは気候変動の結果としての）変化と同様に、結果として(a)新たな危害が発生する可能性、ならびに(b)危害因子や危害原因事象にともなうリスクの変化、をもたらす。

危害因子あるいは危害原因事象にともなうリスクとは、危害因子または危害原因事象の（一定期間の）発生頻度と、その危害因子あるいは危害原因事象が生じた場合の影響程度の組み合わせである。危害因子あるいは危害原因事象の発生頻度とその結果としての影響程度は、既存の管理措置の有効性と同様に、気候の変動と変化によって変化する可能性が高い。

5.3.1　気候に関連する危害と危害原因事象の評価

気候変動を念頭に置いて、WSPチームは、危害因子、危害原因事象、管理措置の一般的なチェックリストを参考にして、地域の状況の中でより問題となる可能性のある危害の種類を検討すべきである。表3は、気候に関連した水質・水量の危害因子、危害原因事象、および連動するリスク管理のための関連管理措置の例を示している。WSPチームはその専門知識を活用しつつ必要に応じてより広範な専門知識を導入して、WSPの作成または更新においてリスクシナリオを通じた作業支援を行うべきである。

水供給システムに影響をおよぼす気候に関連した主要な危害原因事象は、4つの大まかなシナリオの下にグループ化することができる。

- 一部の地域では、洪水の発生頻度が高まったり表面流出量が増加したりすることで、現在の衛生面での保護手段を打ち負かしてしまう可能性があり、インフラの損傷や破壊、二次汚染を引き起こす可能性がある。洪水の増加は、より強い降雨イベント、平均降雨量の増加、またはその両方の組み合わせに起因する可能性が高い。
- 一部の地域では、降雨量が増加し、地下水位の長期的な上昇につながる可能性があり、病原体や化学物質の減弱化や除去能力が低下し、地下インフラの浸水や急速な浅い地下水の流れを引き起こす可能性がある。

・一部の地域では、降水量の減少または低降水量期間が長くなり、地表水や再生可能な地下水の利用可能性の低下や、干ばつの長期化を招く可能性がある。これにより、生活用水需要を賄うための課題が増加し、消費者が代替の（安全でない可能性のある）水源を探すようになる可能性がある。一部の地域では、総降雨量が減少すると、汚染を希釈、減弱、除去するための地表水の能力が低下し、気温の上昇と相まって水源水と処理水の両方で微生物の増殖パターンが変化することになる。気温の上昇と蒸発は、生物学的・化学的汚染の濃度を高める可能性がある。

水の利用可能性と信頼性（量）に影響する気候に関連した危害因子と危害原因事象

*水安全計画マニュアル*には、危害因子と危害原因事象を特定し、各危害原因事象にともなうリスクのレベルを評価するためのプロセスが記載されている。WSPは水質に影響を与える危害原因事象に焦点を当てる傾向がある。より広範な水資源の状況では、将来の気候変動によって悪化する干ばつにともなう危害原因事象は、水不足と信頼性のリスクにつながる可能性がある。WSPは水源での水不足と集水域内の水を競合する利用者がもたらす戦略的リスクを考慮すべきである。

水供給インフラに影響をおよぼす気候に関連した危害因子と危害原因事象

水供給システムは、気候に関連した水供給システム資産の効果的な運用や全体的な構造健全性に影響を与える可能性がある、さまざまな危害原因事象にさらされている。これは浄水場や電源などの補助システムの浸水、浸水による配管の損傷、河川や沿岸域での洗掘や浸食による損傷、土砂やシルトの堆積による汚水、貯水池、取水口、その他の構造物の容量を低下など多岐に亘る可能性がある。

気候変動が水供給システムのインフラにおよぼす影響は、将来の水資源への影響や異常気象に対処できる貯留、浄水処理、配水システムなどの技術のレジリエンスの検討を含めて考慮されるべきである。*ビジョン2030報告書 (3)* には、さまざまなWASHに関する技術の気候リスクに対する脆弱性について高いレベルのレビューが含まれており、これを出発点として、地域の状況に応じたより詳細な検討を行うことができる。

インフラの被害は、多くの場合より広範な災害の一部として発生し、水供給事業者の制御のおよばない電力や輸送ネットワークに広範囲の混乱も引き起こしている可能性がある。このような場合には、水供給がさらされるリスクの全体像を把握するために、水供給システムそのものを超えた関連する危害原因事象の評価が必要となる。

DRRの観点からは、その地域が被る可能性のある潜在的な危害原因事象の範囲を考慮することが不可欠である。危害原因事象とその潜在的な水の安全性への影響を調査するためには、民間の緊急時対応計画担当者が、特定の場所での信頼できる危害原因事象シナリオの開発を支援できるかもしれない。

水質に影響をおよぼす気候に関連した危害因子と危害原因事象

一般的に、気候変動の結果として既存の水供給源内で深刻度を増して発生しがちな水質危害因子のタイプは、より温暖で乾燥した条件や、より激しい降水によって悪化する。歴史的に、これらの種類の危害因子や危害原因事象には、以下のような要因が含まれている。

・病原体、例えば、*クリプトスポリジウム*のオーシストは、粒子（表面流出水中の表土を含む）にともなって降水量の増加により高濃度で水源域に流入し、その後、長期間の乾季や火災の被害によって、貯水池の水位が下がり希釈率が低下した森林の場合にはその状況がさらに悪化する可能

性がある。
・植物プランクトン、例えば、毒素を持つシアノバクテリアは、覆いのない貯水池における、流れが遅く、回転率が低く、より温かな水の中で、より高レベルで増殖する。
・例えば、*フォーラーネグレリア*のような日和見病原体は、流れが遅く、より温かな水の中で、より高レベルで増殖し、その結果、閉鎖性貯水池と配水システム内で、消毒剤の残留がより不安定となる。
・多くの地下水系に含まれる化学物質（ヒ素やフッ化物イオンなど）や排水中の化学物質は、希釈度低下のために濃度が上昇し、懸念すべきレベルに達している。

気候変動の予測される結果の一つは世界の多くの地域で水不足の期間が長くなることであり、多くの地域で新たな水供給が開始されている。(他の状況では、水流が増加し、より変動しやすく、あるいはより激しい降水イベントの対象となるかもしれない。)長年に亘って使用されてきた伝統的な水源は十分に理解されており、主要な危害因子、危害原因事象、および管理措置が認識・管理されている可能性が高い。しかし、多くの場合、新しい水供給に関する現地での経験がない場合があり、新しい水供給に関連する問題はその状況特有のものとなる。水管理機関は新しい水源に関わる非常に異なる水質や課題に不慣れな場合がある。例えば、以下のようなものが挙げられる。

・地表水に精通している水供給事業者が、地下水供給を余儀なくされる可能性もあれば、その逆もある。地表水には問題のある濃度の金属が含まれていることはほとんどないが、地下水には含まれていることが多い。さらに地下水は通常、水質がかなり安定しているのに対し、地表水の水質は非常に変動しやすい。
・大規模な貯水池からの水の調達に精通している水供給事業者が河川水源を余儀なくされる可能性もあれば、その逆もある。河川が水源の場合には問題のある濃度のシアノトキシンが含まれていることはほとんどないが、貯水池の水には含まれていることが多い。さらに貯水池の水は通常、水質がかなり安定しているのに対し、河川の水質は非常に変動しやすい。
・比較的清澄な水に精通している水供給事業者が、より汚染された水源の使用を余儀なくされる可能性がある。未開発の集水域からの水には問題のある濃度の有害物質が含まれることはほとんどないが､開発の進んだ集水域から供給された水には高濃度の有害物質が含まれていることが多い。
・革新的な水管理の取り決めが実施され、新しい種類の危害因子や危害原因事象が生じる可能性がある。例えば、農業および都市環境において再生水への依存度が高まる可能性があり、飲料水供給に相互接続された場合には、水関連疾患のリスクが高まる可能性がある。

5.3.2　リスク評価において気候関連の影響を考慮する

リスクとは単なる過去事象の評価ではない。WSPにおけるリスク評価は実際には第一に将来起こりうることを想定するものである。過去は将来を考えるうえでの良い指針となり得るが、新たなトレンドが出現する可能性がある場合（定常性の喪失として知られている）には完全とはいえない。

気候変動自身は水道サービスに対する脅威の基本的性質を変えるものではないが、いくつかの脅威の可能性と深刻度、およびそれらの地理的範囲を変える可能性がある *(3)*。

リスク評価に気候変動を組み込む単純なアプローチは、気候変動シナリオに基づいてリスクの経年変化の可能性を評価することである。これは単にリスクが時間の経過とともに増加するか減少するかといった方向性を示すものであってもよい。場合によっては気候変動の根拠が不確実すぎて、変化の方向性すら示せないこともある。このような場合には許容可能と考えられるリスクレベルを検討し、将来起こりうるすべての気候変動シナリオの下でリスクを低減するための管理措置を特定

することに価値がある。このようなリスク評価は通常、気候変動やその他の要因が水資源や関連リスクにおよぼす影響の概要を示す、大地域レベルでの気候に対する脆弱性評価（第3章で説明）によって周知されるべきである。WSPチームはリスク管理戦略を強化・適応させる基礎として、これらのより大規模なパターンが、直接管理している特定の水供給システムに与えうる影響を検討するためにこれを利用することができる。

可能性の推定に与える気候変動の影響

将来の状況の可能性、すなわち発生頻度は、通常、過去の発生頻度に関する現地の経験に基づいて、WSPチームによって提示される。地域において過去に稀にしか発生しなかった事象は将来も稀であると仮定できるかもしれないが、そのためには危害原因事象の引き金要因の性質が根本的に不変である必要がある。

しかしWSPチームがリスク評価を行う際には、将来の事象の可能性を考慮する必要があり、過去の発生可能性予測を基にすることには限られない。危害原因事象の中には、過去よりも将来の方が発生の可能性が高いものもあれば、低いものもある。例えば、気候変動により、より暖かく湿った状態になる可能性が高い地域では、以下の可能性がある。

・高強度降雨による水源汚染は、過去には珍しく、特定の状況では考えられなかったが、将来的にはより頻繁になるかもしれない。
・今後、気温の上昇により凍結による導水管の故障が少なくなるかもしれない。

シナリオによっては発生確率に確固たる値を置くことが難しい場合もあるが、危害原因事象は、その確率は低いが影響が大きいかどうか（低確率／高影響事象）で単純に分類することができる。

WSPチームがリスク評価で将来の可能性を考慮しない場合、そのWSPは、発生確率、すなわち特定の危害原因事象のリスクを過小評価したり、過大評価したりする可能性があり、その結果、不適切な資源配分につながってしまう。

気候変動が結果の予測に与える影響

リスク評価を行う際には、WSPチームは将来の事象の結果も考慮すべきであり、過去の観測のみに基づいて推定を行うべきではない。結果の中には、将来的にはより重要になる可能性が高いものもあれば、そうでないものもある。例えば、気候変動により乾燥する可能性が高い地域では、以下の可能性がある。

・水源域におけるシアノトキシンの影響は、過去には水源の規則正しい入れ替わりにより、特定の状況下でのシアノバクテリアに対する環境収容力を低く抑えているためほとんど生じなかったかもしれない。将来的には低い流量条件の下で、より高く、より影響の大きい濃度が発生するかもしれない。
・地下水が過去に供給された水の総量に占める割合が少なかった場合には、地下水源からのヒ素の影響はほとんど見られなかったかもしれない。今後、地下水が水源に占める割合が大きくなれば、その影響が大きくなるかもしれない。

WSPチームが発生確率と同様にリスク評価で将来の結果を考慮しなければ、WSPは特定のリスクを過小評価したり、他のリスクを過大評価したりする可能性がある。

気候変動が管理措置の有効性に与える影響

WSPプロセスにおいて、モジュール4で概説されているリスク評価では、各危害原因事象の管理として既に実施されている既存の管理措置を検討し、それらの有効性を検証することが含まれる。WSPチームは既存の管理措置の有効性が気候条件の変化にともなって変化し、リスク評価に影響をおよぼす可能性があることを念頭に置く必要がある。既存の管理が、現在または将来のリスクを適切に管理するには不十分であると判断された場合には、追加の管理措置が必要となる（追加の情報については、モジュール5および本文書の5.4節を参照）。

5.4　モジュール5－改善計画

5.4.1　気候に関連したリスクの管理のための追加的な管理措置の特定

なぜこれが重要なのか

モジュール3と4で特定、評価された重大な気候に関連したリスクを許容可能なレベルまで低減するためには、追加の管理措置が必要である。現在の気候リスクの管理を改善する管理措置を特定するとともに、将来の長期的なリスクを管理するための戦略的なアプローチをとる管理措置が必要となる。水源を保護するのに役立つ管理措置は、水供給システムに特異的であってもよいし、自然災害に関連したより広範のリスクの軽減を目的とした水資源管理のより広い範囲の改善に基づいたものであってもよい。これらのより広範な潜在的管理措置のいくつかは、水供給事業者とは別の利害関係者が主たる責任を負っているため、それらの者と連携して開発する必要がある。

将来における気候と開発のすべてのシナリオの下でリスクを低減する管理措置は、「後悔しない」または「後悔が少ない」対策と考えることができる。これは将来起こりうるさまざまなシナリオの下で利益をもたらすことを意味する。例えば、動物による汚染から水源を保護することは、気候変動によってより湿潤な状態、あるいはより乾燥した状態になっても、リスクを低減する上で有益である。

水質を支える管理措置

水質管理のための管理措置の特定、実施、監視は、WSPの立案の重要な要素である。以下の表3は、気候変動によって悪化する可能性のある危害因子や危害原因事象と、それに対する管理措置の例を示す。*ビジョン2030報告書（3）*には、異なる技術に対する適応策の選択肢についての詳細情報が記載されたファクトシートも含まれている。

水の利用可能性と信頼性を支える管理措置と改善点

水の利用可能性と信頼性が重要なリスクとして認識されている場合、リスクのレベルを低減するための管理措置が必要である。不足と信頼性のリスクを管理するという観点からは、選択肢は需要側と供給側に分類される。需要側の選択肢は、消費量管理と効率向上により水資源需要を減少させることを目的としている。

これとは対照的に供給側の選択肢は水源収量増加、および新規水源開発により供給可能水量を増加させることを目的とする。新しい飲料水源を検討する際には量と質の両面から評価を行う必要がある。水源の水の状態と水質を確立するために、取水活動評価とともにベースライン監視を実施す

べきである。

水が不足し、水資源をめぐる競争が激しい地域では、特に渇水時には集水域の水資源への全体的な負荷を増やさないため、需要側オプションが望ましい。水供給システムの効率向上は、エネルギー消費量の削減、水の処理・汲み上げコストの削減、温室効果ガスの排出量の削減という相乗便益ももたらす。

さらには、需要側の管理措置は将来のすべての気候シナリオの下でこれらの便益を提供することに対し、新規水源の開発は、水源収量を予測レベルより減少させうる将来の気候変動によって損なわれる可能性がある。将来の広範な潜在的シナリオに対して頑強な需要側と供給側の選択肢のポートフォリオを選択することは、将来の不確実性を管理するために有用な戦略である。

5.4.2　気候変動が長期計画に与える影響の検討

なぜこれが重要なのか

改善計画における管理措置のいくつかは既存のリスク管理を短い時間スケールで行い、WSPの見直しの際に定期的に更新して調整されうるものである。他の資本インフラの更新や新たな水源などの対策は、はるかに長期間存続する可能性がある。改善計画や更新計画におけるこれら長期的な側面の中で、気候変動や、需要や汚染負荷の増加に関連するその他のリスクを考慮することが重要となる。

老朽化したインフラ資産は、維持管理や更新のために多額の資本投資を必要とする可能性があり、おそらくは何十年にも亘って運用されるであろう。一般的なアプローチとして、水インフラに対する適応戦略には、以下のような行動が必要となる可能性がある。

- **適応性のあるインフラを設計する**。水インフラは長寿命であり、現在とは大きく異なる可能性のある気候や社会状況で使用されることが多い。最小限のコストや中断をともないつつサイズアップや調整が可能なインフラは、将来の不確実性に対処するためにより適切に配置されている。これには、将来、需要が予想以上に増加した場合に大型化できる浄水場の設計も含まれるかもしれない。
- **将来の気候の不確実性に対応するために、インフラに安全性の要素を組み込む**。例えば、提案された貯水池の容量増加は、将来の降雨パターンの不確実性相殺のために使用されるかもしれない。建設段階でこれを行うコストは、後日容量を追加したり、追加の供給源を建設したりするよりもはるかに低いかもしれない。しかしこれは、追加の先行投資コストが、リスクの相殺に比べて低い場合にのみ適用される。
- **成果を達成するために、さまざまな選択肢を利用する**。水の場合、地下水、地表水、海水淡水化、雨水回収、水の再利用、水効率向上等の、多角的、あるいは連結的な利用が含まれる。これにより、単一の解決策に依存した場合に比べて、広範な措置にわたって気候変動影響のリスクを分散させることができる。気候変動は、このような選択肢を開発する際に考慮すべき多くの事項のうちの一つに過ぎないことに留意すべきである。例えば、海水淡水化は干ばつには強いが、エネルギー大量消費型であるためコスト増加をともなうことや、気候変動の緩和策に反する可能性がある。
- **非構造物対策でインフラを支える**。非構造物対策は、固定インフラ資産よりも本質的に適応性が高い。例えば、水道料金を定期的に改革することで、消費者の需要行動に影響を与えることができる。情報、計画、政策への投資は、インフラ資産の計画と設計に大きな信頼を与えうる。

適応的意思決定で利用可能な背景情報の広い範囲がある。簡潔な説明はRanger *(30)* によって提供されている。

5.5 危害因子および危害原因事象に影響をおよぼす可能性のある気候変動の影響の例と関連する管理措置

表3はWSPプロセスのモジュール3、4、5への気候の影響を適切に考慮するためのものである。この表は気候変動の影響によって被害を受ける可能性のある危害因子や危害原因事象の例を、可能な管理措置とともに示している。

この表は実例のみを示していることに注意されたい。この表は、多くの重要な影響、危害因子、危害原因事象、および管理措置が欠落している可能性があるため、網羅的なものを意図したものではない。同様にこの表は、その内容がすべての状況に関連するわけではなく、普遍的なものではない。

影響、危害因子、危害原因事象、管理措置のほとんどは、気候変動に対するWSPの立案に特有のものではないことに注意されたい。ほとんどは気候変動にかかわらずWSPに関連するものである。気候変動の影響は単にリスクレベルを変化させるだけであり、したがって、特定の管理措置の必要性を高めるか低めるかにすぎない。

表3　気候変動によって悪化する可能性のある危害因子および危害原因事象の例と、それにともなうリスクレベルを低減させうる管理措置の例

気候変動の影響の例	危害因子の例	気候の変動と変化によって悪化する可能性のある危害原因事象の例	気候の変動と変化によってもたらされるリスクを管理するために、より重要になる可能性のある管理措置の例
腸内病原体			
温度の上昇 表面流出量の減少 降水強度の増加 貯水池の回転率および水深の減少	病原ウイルス、原虫、細菌（例えば、ノロウイルス、*クリプトスポリジウム・パルバム*、*カンピロバクター・ジェジュニ*）	以下の理由により、浄水中の濃度が上昇： ・降水強度の増加で、排水の封じ込め環境が破損したことにより、病原体の流出量が増加し、浄水処理や管理システムの効果が低下 ・降水強度の増加で、家畜の糞尿の移動量が増加したことにより、病原体の流出量が増加 ・降水強度の増加と貯水池の成層化の増加により、水源の希釈、沈降、減衰率が減少 ・降水強度の増加と貯水量の減少で、浄水処理システムを通じた病原体の移動量が増加したことにより、浄水処理システムの有効性が低下 ・より安全な通常利用している水源の利用可能性が制限されることにより、安全性の低い代替水源の選択 ・代替水源の利用可能性の低下により、汚染活動での水源の水使用量が増加 ・下水システムの損傷や下水ポンプ場の浸水によるクロスコンタミネーション ・洪水後、浄化槽への地表水の侵入にともなう排水オーバーフローの河川への流出 ・大規模な流出事象の後に、汚染された地表水が井戸坑口に流入 ・大きな降雨事象後に土壌中の側方流が増加することにより、特に浅い帯水層で、汚染物質の移動量が増加	水源での管理： ・集水域からの下水や糞尿、特にヒトや集中的な幼年家畜源からの流出を最小化 ・水辺の健全性と植生被覆の向上 ・雨天事象に対する貯蔵や排水管理システムの管理能力を導入、強化 ・後退距離を長くし、水路から糞便堆積あるいは排水貯留の地点までの緩衝を強化 ・長期的な干ばつ管理計画を作成（例えば、消費または使用の増加、代替水源の探索） ・滞留時間を最大にするため、貯水池を可能な限り満杯にする ・病原体が流入する可能性がある活動（例えば、レクリエーション、水源の直近での放牧）から貯水池と集水域を保護 ・集水域における不浸透面積の減少による極端な流出または流入の低減 ・未使用の掘削井戸を被覆し、現在使用中の井戸の表面流出から適切な密閉を確保 ・深井戸について、ケーシングの浅部帯水層より十分低いレベルまでの到達を確保 浄水処理による管理： ・ピーク時の病原体負荷の増加に対応するための追加処理の強化または導入 ・処理中、特にピーク時の濁度レベルの維持または改善

続く

気候変動の影響の例	危害因子の例	気候の変動と変化によって悪化する可能性のある危害原因事象の例	気候の変動と変化によってもたらされるリスクを管理するために、より重要になる可能性のある管理措置の例
貯水池内および配水システム内で増殖する微生物			
温度の上昇 水の利用可能性の低下	日和見病原体(例えば、*レジオネラ*属菌) 大腸菌群と関連する法令遵守上の問題 生物膜、従属栄養細菌数、および関連する管理上の問題点 アンモニア酸化細菌と関連する残留クロラミンの維持の困難性 放線菌と関連する異臭味原因物質(例えば、ジェオスミン)	以下の理由により、より頻繁に配水システム内での濃度が上昇： ・環境の温暖化により水温が上昇 ・水温の上昇により、残留消毒剤の維持が困難化 ・水の利用可能性の低下に対応するために水利用の制限を行った場合、水の回転率の低下にともなう残留消毒剤の維持が困難化 ・水源の減少により残留消毒剤の維持が困難となり、それにより浄水水質が低下	水源での管理： ・水源選択の最適化を通じた水中の有機物の最小化により、消毒剤の要求量の低減 ・低水温の水深から取水 ・貯水池周辺の水辺での遮光植栽の増加 浄水処理による管理： ・凝集強化による消毒剤要求量の低減 ・一次消毒剤の注入地点での残留消毒剤濃度の増加 ・二次追加消毒の導入あるいは増加 ・残留減衰率の低い消毒剤への変更（例えば、塩素からクロラミンへの変更、しかし多くの場合に残留クロラミンの管理がより困難であることに留意） 配水システムでの管理： ・水理学的滞留時間を短縮するために配水池の運転水位を低下 ・配管内の滞留時間を短縮するためにシステムを設計あるいは変更 ・(実用的な場合) 浅部または表層の管路の長さを最小化するためにシステムを設計あるいは、変更 ・露出した管路やタンクの屋根に白色塗料の塗布、あるいは反射材を使用し暗色を回避 使用場所での管理： ・直射日光の当たる容器での水の貯蔵を避ける ・露出した管路やタンクの屋根に白色塗料の塗布、あるいは反射材を使用し暗色を回避 ・保存水の冷蔵

気候変動の影響の例	危害因子の例	気候の変動と変化によって悪化する可能性のある危害原因事象の例	気候の変動と変化によってもたらされるリスクを管理するために、より重要になる可能性のある管理措置の例
問題となる原水中の藻類と細菌			
温度の上昇 流出量の減少 降水強度の増加 貯水池の回転率および水深の減少	シアノバクテリアと関連するシアノトキシン(例えば、ミクロキスチン)、および異臭味原因物質(例えば、ジェオスミン) 珪藻類と関連する異臭味原因物質(例えば、*アステリオネラ*属の化合物)、ろ過閉塞珪藻類(例えば、*シネドラ*属) 底生シアノバクテリアと関連するシアノトキシン(例えば、サキシトキシン)、および異臭味原因物質(例えば、ジェオスミン) 底生放線菌と関連する異臭味原因物質(例えば、ジェオスミン)	以下の理由により、より頻繁に水源貯水池内での濃度が上昇： ・水温の上昇 ・干ばつ期の長期化により、水理学的滞留時間が増加 ・降水強度の増加により、栄養塩負荷量が増加 ・希釈率の減少により、特に点汚染源からの栄養塩濃度が上昇 ・流量の減少により、より強い成層化 ・生物学的地位の変化により、優占種が以前は考慮していなかったあるいは経験していなかった型に変化	水源での管理： ・貯水池への栄養塩負荷の低減 ・湿地帯と水辺の緩衝帯を設け、流出から栄養塩を保持し、土壌浸食を最小化 ・可能であれば、危害因子の濃度が最小となる深さからの選択取水 ・貯水池周辺の水辺での遮光植栽の増加 ・低回転率が根本的な問題である場合、回転率を最大にするための貯留と流動での運転 ・下層部で問題が発生している場合、上層部が底生の影響を大きくうける水深より上に貯水池を保つ ・人工的な混合を導入して、成層を減らし、栄養塩を酸化 ・問題となるレベル以下に濃度を維持するために、殺藻剤を予防的に散布 ・レクリエーションなど大型水生植物に損傷を与える可能性がある活動から貯水池を保護し、大型水生植物からプランクトンに優占が移行するのを防止 ・集水域における不浸透面積の減少による流入量の低減 ・リスクが大きい場合、小規模な貯水池を被覆 浄水処理による管理： ・細胞を殺すことによる毒素や異臭味原因物質の放出を避けるため、ろ過前の酸化の停止 ・毒素を不活化するために、ろ過後の一次消毒の強化 ・藻類細胞を除去するために、凝集とろ過の最適化 ・毒素や異臭味原因物質の除去能力を有する消毒剤への変更(例えば、オゾン処理) ・毒素や異臭味原因物質を除去するための技術の導入(例えば、粉末活性炭、粒状活性炭) 使用場所での管理： ・暗所での水の貯蔵

続く

気候変動の影響の例	危害因子の例	気候の変動と変化によって悪化する可能性のある危害原因事象の例	気候の変動と変化によってもたらされるリスクを管理するために、より重要になる可能性のある管理措置の例
問題となる植物			
温度の上昇 表面流量の減少 降水強度の増加 貯水池の回転率および水深の減少	水草と関連する貯水池の利用の消失（例えば、*カボンバ*）	以下の理由により、より頻繁に水源貯水池内での濃度が上昇： ・流出量の減少で濁度が減少し、光透過が増加 ・水温の上昇 ・干ばつ期の長期化により、水理学的滞留時間が増加 ・降水強度の増加により、栄養塩負荷量が増加 ・希釈率の減少により、特に点汚染源からの栄養塩濃度が上昇 ・流量の減少により、より強い成層化 ・生物学的地位の変化により、優占種が以前は考慮していなかったあるいは経験していなかった型に変化	水源での管理： ・集水域からの栄養塩、特にリンの流出を最小化 ・集水域の要所に湿地を設け、栄養塩を保持 ・水中の水草を機械的に刈り入れ ・飲用水利用に安全な除草剤を用いて水草を枯死 ・貯水池周辺の水辺での遮光植栽の増加 ・問題となるレベル以下に維持するために除草剤を散布 ・問題となる水草を持ち込む可能性のある活動から貯水池を保護（例えば、水を利用するレクレーション）
有毒物質			
温度の上昇 表面流出量の減少 降水強度の増加 貯水池の回転率および水深の減少	農業用化学物質（例えば、硝酸イオン）	以下の理由により、浄水中の濃度が上昇： ・流出量の減少により、原水の希釈率が減少 ・干ばつにより農業に利用可能な土地面積が減少し、存続可能な地域での農業活動が活発化 ・取水量の増加や流入量の減少により、より汚染された水になる可能性があるため、水源の割合を変更 ・より安全な通常利用している水源の利用可能性が制限されることにより、安全性の低い代替水源の選択 ・大規模な流出事象後に原水への栄養塩負荷量が増加 ・大きな降雨事象で汚染物質が浸透し、地下水が汚染 ・大きな降雨事象後に土壌中の側方流が増加することにより、特に浅い帯水層で、汚染物質の移動量が増加	水源での管理： ・集水域あるいは涵養地帯からの農業用化学物質の流出の最小化 ・涵養地帯での高リスク農業用化学物質の使用の最小化 ・重要な集水域および涵養地帯での活発的な農業活動の制限 ・より深い、あるいはより良い帯水層からの取水 ・未使用の掘削井戸を被覆し、現在使用中の井戸の表面流出に対する適切な密閉を確保 ・深井戸について、ケーシングの浅部帯水層より十分低いレベルまでの到達を確保 浄水処理による管理： ・逆浸透膜処理の導入

気候変動の影響の例	危害因子の例	気候の変動と変化によって悪化する可能性のある危害原因事象の例	気候の変動と変化によってもたらされるリスクを管理するために、より重要になる可能性のある管理措置の例
	地下水に含まれる地質由来の化学物質（例えば、ヒ素、フッ化物イオン）	以下の理由により、浄水中の濃度が上昇： ・干ばつ期の長期化で流量や涵養量が減少し、原水の希釈率が減少 ・取水量の増加や過剰、および流入量の減少により、より汚染された水になる可能性があるため、水源の割合を変更 ・より安全な通常利用している水源の利用可能性が制限されることにより、安全性の低い代替水源の選択	水源での管理： ・汚染の低い水源から取水 ・より汚染された水源への変更に寄与する可能性のある過剰な取水を回避 ・特定の汚染物質を希釈するため、複数の水源を利用 浄水処理による管理： ・化学物質を除去するために既存の浄水処理を最適化（例えば、凝集の最適化） ・高度処理の導入（例えば、前酸化、イオン交換、化学吸着、あるいは逆浸透膜）
	消毒副生成物（例えば、ハロ酢酸類）	以下の理由により、浄水中の濃度が上昇： ・干ばつ期の長期化で流量や涵養量が減少し、原水中の有機前駆物質の希釈率が減少 ・降水強度の増加にともなう流出量の増加により、原水中の有機前駆物質濃度が上昇 ・河川流量の減少や栄養塩濃度の増加により、植物プランクトン由来の有機物が増加 ・水温が高く、流量が減少した条件で消毒剤を維持するために、消毒剤濃度を増加 ・水利用の可能性の低下への対応に水使用を制限する場合、配水管網での滞留時間が増加	水源での管理： ・集水域からの栄養塩、特にリンの流出を最小化 ・集水域の要所に湿地を設け、栄養塩を保持 ・高濃度での有機物の流出に寄与する植生を、より問題の少ない植生に植え替え ・人工的な混合を導入して、成層を減らし、栄養塩を酸化 ・有機物を持ち込む可能性のある活動（例えば、水を利用するレクリエーション）から貯水池を保護 浄水処理による管理： ・前駆物質を除去するために既存の浄水処理を最適化（例えば、凝集の最適化） ・塩素消毒副生成物の生成を抑制するため、前塩素処理を避ける ・高度処理の導入（例えば、前酸化、イオン交換、化学吸着、あるいは逆浸透膜） ・過剰な一次消毒ではなく、追加消毒の適用など、より最適化された消毒方法の導入 ・消毒副生成物の生成能が低い一次消毒剤の使用への変更（例えば、紫外線（UV）あるいは、オゾン）

続く

気候変動の影響の例	危害因子の例	気候の変動と変化によって悪化する可能性のある危害原因事象の例	気候の変動と変化によってもたらされるリスクを管理するために、より重要になる可能性のある管理措置の例
			配水システムでの管理： ・水理学的滞留時間を短縮するために配水池の運転水位を低下 ・残留性を維持するために遊離塩素ではなくクロラミンを使用するなど、消毒副生成物生成能がより低い残留消毒剤の使用への移行 ・配管内の滞留時間を短縮するためにシステムを設計あるいは変更
	底泥から溶出される金属（例えば、マンガン）	以下の理由により、より頻繁に水源貯水池内で濃度が上昇： ・全体的な降雨量の減少により、希釈率が減少 ・温度の上昇により、より強い成層化と溶存酸素の浸透の低下 ・底泥の露出と再湿潤により、酸性硫酸塩土壌が形成	水源での管理： ・酸性硫酸塩土壌の形成を最小限に抑えるために、河川や湿地の流動様式を管理 ・危害因子の濃度が最小となる深さからの取水 ・回転率を最大にするための貯留と流動での運転 ・上層部が底生の影響を大きく受ける水深より上に貯水池を保つ ・人工的な混合を導入して、成層を減らし、金属を酸化 浄水処理による管理： ・金属を除去するために既存の浄水処理を最適化（例えば、凝集の最適化） ・高度処理の導入（例えば、曝気、前酸化、イオン交換、化学吸着、あるいは逆浸透膜）
物理的な危害			
温度の上昇による海水面の上昇 流出量の減少 降水強度の増加	塩分濃度	海面上昇や、塩分を含む地下水の影響を受ける淡水の過剰取水により、沿岸河口部や地下水への塩分の流入 涵養量の減少により、一部の地下水資源の塩分濃度が上昇する可能性 集水域の源流での流出量の減少により、下流での希釈率が減少し、塩分の流入がより顕著化	・河川や小川の限界希釈流量を維持 ・河川や小川に流入する特定の発生源からの高い塩分負荷を最小化（例えば、灌漑排水や湿地帯からの排水） ・管理された河川システムでは、塩分の高い水の濃度を最小限に抑えるために、流量を管理 ・浅部地下水の塩水化を軽減するために、景観植生を維持または改善 ・塩分の浸入を防ぐために、取水率を管理 ・塩分の浸入を防ぐために、排水による帯水層への涵養

気候変動の影響の例	危害因子の例	気候の変動と変化によって悪化する可能性のある危害原因事象の例	気候の変動と変化によってもたらされるリスクを管理するために、より重要になる可能性のある管理措置の例
	濁度	以下の理由により、浄水中の濃度が上昇： ・干ばつにより農業に利用可能な土地面積が減少し、存続可能な地域での農業活動が活発化 ・降水強度の増加により農地や河川堤防が侵食し、都市雨水の負荷量が増大し、濁度が上昇	・農業および都市雨水からの土砂の負荷を最小化 ・河床と河岸を安定させ、浸食を最小化 ・集水域の要所に湿地を設け、栄養塩を保持 ・水辺の健全性と植生被覆の向上
全般的な危害			
温度の上昇 流出量の減少 降水強度の増加 貯水池の回転率および水深の低下 風速の増加	新規水源に存在する水質上の危害因子	新規水源を飲料水の供給力の増強に使用する、あるいは新規水源を既存の水源の場所で使用する場合、危害が問題化（これが潜在的な危害原因事象である場合には、上記を危害の例として参照）	・新規水源に関連すると考えられるすべての危害因子を慎重に検討 ・新規水源で基本的な水質検査を実施 ・既存の浄水処理システムの能力を新規水源に対する処理要件に照らしてレビューし、必要であれば処理システムの能力を増強 ・水質に関する情報がない場合、新たな情報が蓄積されるまでは、水質が最悪のケースであると仮定して水源を運用
	予期せぬ事象を引き起こす水質上の危害因子	予期されずに、有害な結果が発生または発生しそうになって初めて明らかになった場合、危害が問題化	・緊急時や将来のリスクの評価を重視 ・水質事故および緊急時管理計画の維持 ・予測可能な危害シナリオに対する具体的な緊急時対応計画の作成 ・利用可能な代替水源の特定 ・問題発生期間を回避できるよう、浄水の貯水容量を増加 ・地域社会への迅速な警報を可能にするシステムの構築（例えば、煮沸勧告、水消費の回避勧告や命令）

続く

気候変動の影響の例	危害因子の例	気候の変動と変化によって悪化する可能性のある危害原因事象の例	気候の変動と変化によってもたらされるリスクを管理するために、より重要になる可能性のある管理措置の例
	新たな水管理体制により生じる水質上の危害因子	新たな水管理体制により、これまでにない水に関連する曝露やクロスコネクションにつながり、危害が問題化（例えば、特定の用途（屋外使用、トイレ洗浄）に非飲用水を供給することで飲用水の需要を管理）	・代替水管理の枠組みに関連する可能性のあるすべての危害を注意深く検討 ・代替水中の危害因子の濃度を適切に低減する浄水処理システムを確保し、代替水の意図的な利用、不用意であるが必然的な利用、または曝露を可能にする ・代替の非飲料水供給において、意図された以上の過剰な曝露を防止するための厳格なシステムを実施 ・代替の非飲料水供給によって、飲料水供給が汚染される原因となるクロスコネクションや不用意なタップインを防止するための厳格なシステムを実施 ・水質に関する情報がない場合、新たな情報が蓄積されるまでは、水質が最悪の状態であると仮定して代替水源を運用
	インフラへの影響により生じる水質上の危害因子	例えば、以下の原因により、水供給システムが障害を受けて、危害が問題化することがある： ・暑さに関連した電力不足、揚水や浄水処理システムの障害 ・風に関連した電力不足、揚水や浄水処理システムの障害 ・強風によるインフラ（例えば、貯蔵タンク）への直接的な被害 ・洪水による浄水処理システムと資産全般の浸水 ・暑さや干ばつに関連した地盤の移動による管路の破損率の増加など、暑さに関連した資産の損失 ・次亜塩素酸ナトリウム溶液の効力損失など、暑さに関連した浄水薬品への影響 ・土地の乾燥による河岸のひび割れや掘削井戸の劣化	・重要インフラのバックアップシステムを導入し、可能であればシステム障害時に役立つバックアップ水供給オプションを構築 ・システム障害時に安全な水を提供するシステムを構築 ・重要な化学物質や資材を過度の暑さから隔離して保管 ・温度上昇に耐えうる資材と化学物質を選択 ・堅牢な資産を設置し、暑さに関連したストレス、地盤の動き、洪水事象から資産を保護する設置手順を使用

5.6　モジュール8および9－管理手順と支援プログラム

なぜこれが重要なのか

IWRMやDRRとともに、気候変動の関連する側面を考慮し、統合することは、WSPの策定者と重複する責務を有する利害関係者を広げてゆくことになる。WSPチームは、関係する他の専門家の用語や概念にある程度の理解を深める必要がある。WSPチームは、他の人々と協力して活動する契機と実務、および他者の計画がWSPの対象範囲とその展開に影響を与える場合にはその影響を見極める必要がある。多くの国では、IWRMとDRRの発出を対象とする国や地域の行動およびプロセスが既に確立されており、気候変動がWSPに与えるより広範な影響に対応する手段が提供されている。

5.6.1　管理手順を策定する際には、気候や天候に関連した緊急事態を考慮する

WSPは、モジュール8の一部として事故、災害、異常事態への備えを含めるべきである。例えば、洪水や干ばつへの対応計画はWSPチームが一般的に取り組んでいるものであり、気候の変動や変化がWSPプロセスで考慮される場合に優先的に注意が払われることがある。異常気象は、外部インフラの故障を通じて水の安全性と水供給の安全性に影響を与える（例えば、電力の損失や輸送の途絶を通じて）か、水供給システム自体の構成要素に直接影響を与える（例えば、供給力の制限、管路の破壊、汚染物質の増加を通じて）。関連するタイプの災害とその影響可能性をWSPに統合することで、WSPは緊急時の水の安全性を促進するとともに、災害後の通常機能の迅速な回復を可能にするためのより良い準備と緊急時対応計画を通じ、DRRに貢献することができる。

徹底した緊急時対応計画には、多くの場合、緊急時に使用する代替水源の見極めが含まれている。災害時には、通常の水供給が途絶した状態で安全な水を供給するため、市民保護事業が水供給の機関に助言を求める可能性が高い。緊急時には、多くの場合、発生する可能性のあるリスクを適切に理解し管理するための十分な時間が確保されないまま、新たな水供給や新規の水管理の取り決めが実施される。例えば、特定の特性を有する水のために設計された既存の浄水場では、極めて異なる種類の水を処理することになり、適切に処理できない可能性がある。緊急時管理手順の策定を通じた早期の準備は、気候変動により発生する可能性のある飲料水の水質リスクの管理に大いに役立つであろう。代替水源の水質を調査し、新たな水源のための水源管理と処理要件を確立して実施するためには、何年もの準備が必要になるかもしれない。気候変動の影響を受ける可能性のある地域のすべての水供給について、優れた将来計画が不可欠である。将来計画には、量と質の観点から水供給の選択肢を評価することが含まれるべきである。

これには、ベースラインの監視の実施や、水源の水の状態と水質を確定するために流域で行われている活動の評価が含まれる場合がある。

ロールプレイや「晴れの日」訓練のように、緊急時対応計画のストレステストを行うことは良い練習である。WSPチームはさらに、他者が主催する緊急時演習（例えば、大洪水事故の演習）において、水の安全に関するインプットに貢献するための機会を確認することができる。

WHOと水工学開発センター（WEDC）は、緊急時対応計画を伝える可能性がある緊急時の安全な水と衛生の供給に関する一連の技術ノート *(31)* を作成している。これらのノートは、緊急事態の影響を受けた人々の緊急時および中期的な水と衛生に関する需要に対応するための実践的で科学的根拠に基づいた提案を与えている。このノートは、自然災害や紛争によって引き起こされた災害を含む、広範囲の緊急事態に関連している。現場の専門家、技術者、衛生推進者、および機関本部

の職員に適している。ノートには以下の内容が含まれている。

1. 井戸の清掃と消毒
2. 掘削井戸の清掃と消毒
3. 貯水槽や水タンカーの清掃と消毒
4. 小規模な管路配水システムの復旧
5. 使用地点での飲料水の緊急処理
6. 緊急時後における浄水場の復旧
7. 緊急時における固形廃棄物管理
8. 緊急事態での死体処理
9. 緊急時における必要水量
10. 緊急時における衛生促進
11. 水供給における塩素濃度の測定
12. タンカーによる安全な水の運搬
13. 緊急時における排泄物処理の計画
14. 緊急時における排泄物処理の技術的な選択肢
15. 海水氾濫後の井戸の清掃

5.6.2 支援プログラムに気候に対するリスク管理を含める

WSPプロセスのモジュール9で採り上げられている支援プログラムは、水質上のリスクに加えて、水不足と信頼性に関連するリスク管理のために、水供給事業者の機関および個人の能力を構築する貴重な機会を提供するものである。これらのプログラムは、異なる分野の利害関係者を結集し、よりレジリエントな水供給に向けて水資源を管理するための、より集水域に根ざした総合的なアプローチを支援することができる。研究プログラムは、既存の知識のギャップを埋め、改善された意思決定や将来のWSPの反復を支援するための証拠を提供するために利用できる。広範囲の、潜在的な支援プログラムが特定されており、能力開発、利害関係者の関与、研究に照らして以下のようにグループ分けされている。

能力開発には、以下のようなさまざまな課題を対象としている。

- IWRMの原則および水資源の管理と利用のための制度的な協定の理解
- 将来の不確実性を調査するための需給予測や気候変動シナリオの利用を含む、戦略的な水資源と水供給の計画
- 水源収量を支配するプロセスと、気候変動の水文におよぼす影響に関する理解を支援するための気候の変動と変化、および水文学
- 漏水管理を含む需要管理、消費者行動の変化、操作効率を高めるための技術
- 水供給に対するリスク管理のための管理規則の作成、トリガーおよび管理手順を含む、洪水または干ばつ事象の管理および計画

利害関係者の関与とアウトリーチプログラムは以下を対象としている。

- 他の取水者（農業、産業、エネルギーなど）、水資源管理や環境を担当する省庁など他の利害関係者とのパートナーシップを構築し、水管理の連携改善および水質と水量の保全を促進する。

研究プログラムは、以下のような分野の科学的証拠を組み立てている。

- 運用効率の向上と的を絞った資本投資を支援するための水供給システムモデリング

・収量の推定値を向上させ、気候変動の影響評価調査を実施できるようにするための流域水文学と水源モデリング
・水源水量、システムの漏水量、およびシステムからの他の損失などの水の質と量の問題に関するデータ収集と監視
・計画や事業活動の効率化と有効性を向上させる新技術の実現可能性を調査するためのパイロットプロジェクト

気候変動に関しては、気候変動とその影響に関する科学的、局地および地域の理解が発展中である。したがってWSPの気候変動の側面は定期的に見直されるべきである。このことは、*水安全計画マニュアル*のツール5.1に「研究開発」が含まれていることから、既に示唆されている。WSPを担当する組織は、自らのリソースの計画と管理のために、既に気候変動に関する研究開発に資金を提供したり、貢献したりしているかもしれない。加えて、他の組織から資金提供を受けて、さらなる研究開発が行われているかもしれない。WSPチームは、WSPチームに関連する気候科学、影響評価および適応策の進展について検討し、助言するための代表者を任命することを検討してもよい。気候変動に対する適応策は、IWRMの重要な部分であり、気候変動に関するWSPチームの代表者は、WSPの地域におけるIWRMを担当する組織と連絡を取るべきである。

緊急時対応計画とDRR（モジュール8）を支援するために、WSPチームは、国内の他の地域や遠方での事象の事後の振り返りから、水供給事業者自身が経験したものと同様に、WSPに統合可能な教訓と会得を振り返るべきである。

6 補助情報と手引き

6.1 はじめに

突発的事故時の計画や気候変動影響の予測に役立つツール、モデル、データリソースが開発されている。本章では、WSPプロセスの一環として気候変動問題を検討しているWSPチームのために、さらなる参考文献を提供する。これらの参考文献は、WSPチームに気候変動リスク管理の主要概念を紹介し、気候変動問題と、WSPプロセスにおいて気候変動への適応性を支援するために水資源管理とDRRが提供する可能性のある機会について、チームの理解を深めることを目的としている。これらの資料は、網羅的なものではないが、背景となる資料を横断的に提供することを目的としている。以下のウェブポータルは、豊富な追加リソースへのアクセスを提供している。

・気候変動に関する政府間パネル：http://www.ipcc.ch/
・防災Web災害リスクポータル：http://www.preventionweb.net/
・グローバル・ウォーター・パートナーシップ：http://www.gwp.org/

6.2 気候変動と水供給に関するさらなる資料

6.2.1 ツールとデータソース

タイトル	結合モデル相互比較計画（CMIP）
説明	CMIPは、世界気候研究計画（World Climate Research Programme）による進行中のプログラムで、さまざまなモデルやチームからの情報を利用して、一般的な循環モデルの共通基準を開発している。このプロジェクトでは、さまざまなシナリオの気候予測に関するデータセットへのアクセスを提供している。
文献	World Climate Research Programme's Working Group on Coupled Modelling
リンク	http://cmip-pcmdi.llnl.gov/index.html?submenuheader=0

タイトル	CORDEXプロジェクト
説明	CORDEXはスウェーデンが主催する国際プロジェクトで、地域の気候モデルの評価と改善、ダウンスケールされた予測の協調データセットの作成、地域の気候データの利用改善を目的としている。
文献	World Climate Research Programme's CORDEX project
リンク	http://cordex.org

タイトル	欧州水情報システム（WISE）
説明	WISEは、欧州連合の水に関する情報への入り口である。WISEは、欧州環境庁、EUROSTAT、共同研究センターを通じて、洪水リスクから水質に至るまでのデータへのアクセスを提供している。
文献	Water Information System for Europe, European Commission/European Environment Agency
リンク	http://water.europa.eu/

タイトル	土壌・水評価ツール（SWAT）
説明	SWATは、気候変動が水質や水量に与える影響を評価するために使用できるパブリックドメインの水文モデリングツールである。また、SWATは、気候や気象データを分析するためのツールも提供している。SWATは、気候変動が水文学的プロセスに与える影響を評価するために使用できる多くのモデルの一つに過ぎず、これらのモデルはライセンス要件が異なる。
文献	Soil and Water Assessment Tool, Agricultural Research Service of United States Department of Agriculture/Texas A&M AgriLife Research
リンク	http://swat.tamu.edu/

タイトル	Aqueduct Global Flood Analyser
説明	世界資源研究所によって開発されたAqueduct Global Flood Analyserは、世界規模の洪水リスクに関する情報を提供するウェブベースのプラットフォームである。利用者は、河川や沿岸地域における年間の洪水リスクを評価し、潜在的な経済的被害を推定することができる。
文献	Aqueduct Global Flood Analyser, World Resources Institute
リンク	http://www.wri.org/resources/maps/aqueduct-global-flood-analyzer

タイトル	水の評価と計画（WEAP）
説明	WEAPは統合的水資源計画のためのモデリングツールである。このモデルでは、自然環境と人工環境が組み合わされており、利用者は異なる政策オプションや水配分の影響を評価することができる。
文献	Water Evaluation and Planning tool, Stockholm Environment Institute
リンク	http://weap21.org/index.asp?NewLang=EN

タイトル	eartH2Observe 水循環統融合（WCI）
説明	水資源管理に関する世界的なデータ資源を収集するために、欧州連合（EU）が資金提供するプロジェクトの一環として開発されたツールである。利用者は、降水量、気温、流量、地下水や地表水の指標などのレイヤーを持つ利用者が定義した地図を作成することができる。
文献	eartH2Observe Water Cycle Integrator (WCI), eartH2Observe project
リンク	https://wci.earth2observe.eu/

6.2.2　手引きと文書

タイトル	ビジョン2030：気候変動に直面した水供給と衛生のレジリエンス
説明	英国国際開発省（DFID）とWHOによるビジョン2030の研究は、予測される気候変動が飲料水や衛生サービスにどのような影響を与えうるか、また、技術、インフラ、サービスのレジリエンスを最適化するために何ができるかについての理解を深めることを目的としている。政策立案者向けの概要は、WSPチームに有用な背景資料を提供するいくつかの技術出版物によって支えられている。
文献	World Health Organization and Department for International Development. Vision 2030: the resilience of water supply and sanitation in the face of climate change. Technical report. Geneva: World Health Organization; 2010.
リンク	http://www.who.int/water_sanitation_health/publications/9789241598422/en/

タイトル	異常気象時の水供給と衛生に関する手引き
説明	本書は、欧州の状況における上下水道部門で、基本的な災害への備えと早期警報手順をどのように実施することができるかを取りまとめ、脆弱な地域における異常気象の具体的な課題を明らかにしている。また、小規模な水供給や衛生システムに特に注意を払ったWSPの実施や、コミュニケーションを含む多部門間の協力に関する助言も提供している。欧州地域における経験と優れた事例のレビューも含まれており、異常気象時の水道事業体、排水、下水、排水処理システムでの適応策をまとめている。
文献	World Health Organization and United Nations Economic Commission For Europe. Guidance on water supply and sanitation in extreme weather events. Geneva: World Health Organization; 2011.
リンク	http://www.euro.who.int/en/health-topics/environment- and-health/water-and-sanitation/publications/2011/guidance-on-water-supply-and-sanitation-in-extreme-weather-events

タイトル	レジリエントな水道事業体の創出（CRWU）
説明	EPAのレジリエントな水道事業体の創出（CRWU）イニシアチブは、飲料水、排水、雨水の事業者を含む水部門が気候変動の影響に対応するための支援を行っている。EPAは、実用的で使いやすいツールの開発を通じて、複雑な気候予測を利用しやすい形式に変換することで、気候科学と適応策の選択肢に対する明確な理解を促進している。この情報は、公益事業の所有者や運転者が、気候変動の影響に対するシステムの準備をより適切に行うのに役立つものである。
文献	United States Environmental Protection Agency (US EPA): Creating Resilient Water Utilities (CRWU).
リンク	http://water.epa.gov/infrastructure/watersecurity/climate/

タイトル	水分野における極端現象と災害の管理：IPCC SREX報告書の教訓
説明	気候変動適応を促進するための極端事象や災害のリスク管理に関する特別報告書（SREX）は、IPCCが、気候変動、異常気象および気候事象（“極端現象”）に対して具体的な助言を提供する必要性が認識されたことを受けて、委託されたものである。本報告書は、SREXから得られた主要なテーマ別の知見と学習を強調することを目的としている。また、気候変動によるさらなる被害を回避し、水管理に留まらないメリットを持つ、よりレジリエントな未来を構築するための早急な行動の提案を行っている。水分野の政策立案者やプランナー、あるいは水管理に関わる仕事をしている人にとって、本報告書は、いくつかの疑問点についての議論と理解を促すものである。 なぜ極端な事象が水管理にとって重要な問題なのか？ 水分野は、極端な事象のリスクと影響をどのように受けているのか？ これらのリスクを管理するために、どのような行動をとることができるか？
文献	Managing climate extremes and disasters in the water sector: lessons from the IPCC SREX report. Climate and Development Knowledge Network; 2012.
リンク	www.cdkn.org/srex

タイトル	水資源管理における水文気候災害：訓練マニュアル
説明	この訓練資料の主な目的は、水資源管理の文脈の中で洪水や渇水などの水文気候災害に対処するための戦略の策定において、水管理者などの能力を構築することである。 さらに期待されるのは、脆弱なコミュニティのレジリエンスを向上させ、極端事象の影響を軽減することである。この文書は、現在および将来の気候変動に関連した危害の管理を目指すWSPチームに貴重な背景資料を提供する。
文献	Hydro-climatic disasters in water resources management: training manual. United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs – Headquarters (OCHA), United Nations Office for Disaster Risk Reduction – Regional Office for Africa (UNISDR AF), International Network for Capacity Building in Integrated Water Resources Management (Cap-Net), Nile IWRM Capacity Building Network (Nile IWRM Net); 2009.
リンク	http://www.unisdr.org/we/inform/publications/10358

タイトル	気候変動への都市水システムの適応
説明	本ハンドブックは、地方自治体と水道事業体に最新の情報を提供するとともに、資料や優れた実践例へのアクセスを提供するものである。これにより、地方自治体は、気候変動の潜在的な影響によって都市の水システムがどのような影響をおよぼされるかについての認識を高め、水分野における適応のための長期戦略を策定する能力を構築することができるようになる。 このハンドブックは、適応に関連するすべての側面を網羅したり、気候変動の起源と結果の全体像を示すことを目的としたものではなく、むしろ都市の水管理に最も関連する側面を抽出することを目的としている。
文献	Adapting urban water systems to climate change. ICLEI European Secretariat; 2011. Prepared within the framework of the European research project SWITCH (2006 to 2011).
リンク	http://www.switchtraining.eu/home/ http://www.switchtraining.eu/fileadmin/template/projects/switch_training/files/Modules/SWITCH_Adaption-Handbook_final_small.pdf

タイトル	緊急時のWASHに関するWHO／WEDC技術文書の更新版
説明	2011年に作成され、2013年に更新された4ページの図解付き文書は、緊急事態の影響を受けた人々の緊急および中期的な水と衛生の需要に対応するための実践的で科学的根拠に基づいた提言を提供している。 この文書は、自然災害や紛争による災害を含む幅広い緊急事態に関連している。現場の専門家、技術者、衛生管理者、および機関本部職員に適している。この文書は、気候に関連した自然災害時における水道システムのレジリエンスを支援するための緊急対応管理措置を特定するのに役立つ可能性がある。
文献	Updated WHO/WEDC technical notes on WASH in emergencies. World Health Organization and Water Engineering Development Centre; 2013.
リンク	http://www.who.int/water_sanitation_health/publications/technotes/en/

タイトル	世界水パートナーシップ（GWP）統合水資源管理ツールボックス
説明	IWRMツールボックスは、背景資料、政策概要、技術概要、パースペクティブペーパーのライブラリだけでなく、多くの分野での事例研究や参考文献のライブラリを備えた無料のオープンデータベースである。IWRMツールボックスには、気候変動への適応を支援する水管理のための豊富なツールも含まれており、水資源管理と気候変動適応をより広く理解しようとする際に、WSPプロセスに携わる人々に有用な資料となっている。
文献	Global Water Partnership (GWP) Integrated Water Resources Management ToolBox
リンク	http://www.gwp.org/en/learn/iwrm-toolbox/About_IWRM_ToolBox/

タイトル	気候変動に関する政府パネル、第5次評価報告書．第2作業部会-第8章、都市地域
説明	本章では、気候変動が都市の中心部やその人々、企業に与える潜在的な影響について私たちが知っていること、これらの変化に適応するために（そして脆弱なグループを保護するために）どのような対策がとられているか、そして適応を支えるためにどのような制度や管理の変化が可能かに焦点を当てている。水供給は本評価に含まれており、都市における気候変動の影響よりもより広範な問題との関連において、有用と位置付けられている。
文献	Revi A, Satterthwaite DE, Aragón-Durand F, Corfee-Morlot J, Kiunsi RBR, Pelling M et al. Urban areas. In: Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: Global and sectoral aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Field CB, Barros VR, Dokken DJ, Mach KJ, Mastrandrea MD, Bilir TE et al., editors). Cambridge, United Kingdom, and New York, United States of America: Cambridge University Press; 2014:535–612.
リンク	http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/

タイトル	気候変動に関する政府間パネル、第5次評価報告書．第2作業部会-第10章、主要経済部門とサービス
説明	本章では、気候変動が主要な経済部門やサービス、経済的福祉、経済発展における経済活動に与える影響を評価している。これには、水供給システムだけでなく、水に関連した幅広い経済活動や水に依存した経済活動への連鎖も含まれている。
文献	Arent DJ, Tol RSJ, Faust E, Hella JP, Kumar S, Strzepek KM et al. Key economic sectors and services. In: Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: Global and sectoral aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Field CB, Barros VR, Dokken DJ, Mach KJ, Mastrandrea MD, Bilir TE et al., editors). Cambridge, United Kingdom, and New York, United States of America: Cambridge University Press; 2014:659–708.
リンク	http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/

参考文献

1. Guidelines for drinking-water quality. Geneva: World Health Organization; 2011.
2. World Health Organization and International Water Association. Water safety plan manual. Geneva: World Health Organization; 2009.
3. World Health Organization and Department for International Development. Vision 2030: the resilience of water supply and sanitation in the face of climate change. Technical report. Geneva: World Health Organization; 2010.
4. Jiménez Cisneros BE, Oki T, Arnell NW, Benito G, Cogley JG, Döll P et al. Freshwater resources. In: Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: Global and sectoral aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Field CB, Barros VR, Dokken DJ, Mach KJ, Mastrandrea MD, Bilir TE et al., editors). Cambridge, United Kingdom, and New York, United States of America: Cambridge University Press; 2014:229-69.
5. Summary for policymakers. In: Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Stocker TF, Qin D, Plattner G-K, Tignor M, Allen SK, Boschung J et al., editors). Cambridge, United Kingdom, and New York, United States of America: Cambridge University Press; 2013.
6. Summary for policymakers. In: Intergovernmental Panel on Climate Change special report on managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation (Field CB, Barros V, Stocker TF, Qin D, Dokken D, Ebi KL et al., editors). Cambridge, United Kingdom, and New York, United States of America: Cambridge University Press; 2011.
7. Mahmuduzzaman M, Ahmed ZU, Nuruzzaman AKM, Ahmed FRS. Causes of salinity intrusion in coastal belt of Bangladesh. International Journal of Plant Research. 2014;4(4A):8-13.
8. Hunter PH. Climate change and waterborne and vector-borne disease. Journal of Applied Microbiology. 2003;94:37S-46S.
9. Bouzid M, Hooper L, Hunter PR. The effectiveness of public health interventions to reduce the health impact of climate change: a systematic review of systematic reviews. PLoS ONE. 2013;8(4):e62041. doi:10.1371/journal. pone.0062041.
10. Third Assessment Report, Annex B: Glossary of terms. Intergovernmental Panel on Climate Change, Working Group 2; 2001.
11. Handbook on vulnerability and adaptation assessment. United Nations Framework Convention on Climate Change; 2010.
12. Protecting health from climate change: vulnerability and adaptation assessment. Geneva: World Health Organization; 2013 (http://www.who.int/globalchange/publications/vulnerability-adaptation/en/, accessed 20 March 2017).
13. Schewe J et al. Multimodel assessment of water scarcity under climate change. Proceedings of the National Academy of Sciences. 2014;111(9):3245-50.
14. Hirabayashi Y et al. Global flood risk under climate change. Nature Climate Change. 2013;3(9):816-21.
15. Barros VR et al. Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Part B: Regional aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom, and New York, United States of America: Cambridge University Press; 2014.
16. Eisenreich SJ et al., editors. Climate change and the European water dimension. EUR 21553 EN. EC Joint Research Centre; 2005.
17. Middelkoop H et al. Impact of climate change on hydrological regimes and water resources management in the Rhine basin. Climatic Change. 2001;49(1-2):105-28.
18. Padgham J et al. Vulnerability and adaptation to climate change in the semi-arid regions of West Africa. ASSAR Working Paper. Collaborative Adaptation Research Initiative in Africa and Asia (CARIAA); 2014.
19. Flood risk assessments: climate change allowances. Environment Agency; 2016 (https://www.gov.uk/guidance/flood-risk-assessments-climate-change-allowances, accessed 20 March 2017).
20. Melillo JM, Richmond TC, Yohe GW. Climate change impacts in the United States. Third National Climate Assessment, 2014 (http://nca2014.globalchange.gov, accessed 20 March 2017).
21. Climate change vulnerability assessments: four case studies of water utility practices. EPA/600/R-10/07. United States Environmental Protection Agency; 2011 (https://cfpub.epa.gov/ncea/global/recordisplay. cfm?deid=233808, accessed

20 March 2017).

22. Vulnerability to climate change related water resource changes and extreme hydrological events in Southeast Asia. Bangkok, Thailand: START; 2006 (http://www.start.org/Projects/AIACC_Project/Final%20Reports/Final %20Reports/FinalRept_AIACC_AS07.pdf, accessed 20 March 2017).
23. Glossary. In: Field CB, Barros VR, Dokken DJ et al., editors. Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: Global and sectoral aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom, and New York, United States of America: Cambridge University Press; 2014.
24. WHO operational framework to build climate-resilient health systems. Geneva: World Health Organization; 2015.
25. Sendai Framework for Disaster Risk Reduction. Third United Nations World Conference on Disaster Risk Reduction, Sendai, Japan, 18 March 2015 (http://www.preventionweb.net/files/43291_sendaiframeworkfordrren. pdf, accessed 20 March 2017).
26. Sadoff C, Muller M. Water management, water security and climate change adaptation: early impacts and essential responses. TEC Background Paper No. 14. 2009 (http://www.evidenceondemand.info/water-management-water-security-and-climate-change-adaptation-early-impacts-and-essential-responses, accessed 7 April 2017).
27. Gleick PH. Not a drop to drink: National Geographic investigates. Washington (DC): National Geographic Society; 2008.
28. Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater. Geneva: World Health Organization; 2006 (http://www.who.int/water_sanitation_health/sanitation-waste/wastewater/wastewater-guidelines/en/, accessed 7 April 2017).
29. Sanitation safety planning: manual for safe use and disposal of wastewater, greywater and excreta. Geneva: World Health Organization; 2015 (http://www.who.int/water_sanitation_health/publications/ssp-manual/ en/, accessed 7 April 2017).
30. Ranger N. Adaptation: decision making under uncertainty. Evidence on Demand Topic Guide. 2013. doi:10.12774/eod_tg02.june2013.ranger.
31. Updated WHO/WEDC technical notes on WASH in emergencies. World Health Organization and Water Engineering Development Centre; 2013 (http://www.who.int/water_sanitation_health/publications/technotes/en/, accessed 21 March 2017).

付録1　オランダの事例研究：ライン川とマース川の飲料水供給機能に対する気候変動の潜在的影響

背景

ライン川とマース川はオランダの重要な飲料水源であり、供給量の約40%を占め、残りの60%は地下水によるものである *(1)*。ライン川とマース川に沿った取水施設の多くは、オランダの中央部に位置している（図A1.1）。取水後、前処理を経て、砂丘に送られ、人工的に水を浸透させて浄化する（滞留時間：2ヶ月間）。その後、再び汲み上げて最終処理を行い、飲料水とする。河川水の飲料水への直接浄化は、マース川の取水口（大規模な貯水池を有する）とイッセル湖沿いの取水口（図A1.1）で行われている。

2014年、オランダ王立気象研究所（KNMI）はオランダの4つの気候変動シナリオを発表した *(2)*。一般的には、より気温の高い夏が予測されているが、シナリオによっては夏の降水量が増減する可能性がある。水の利用可能性に関して最も危機的なシナリオは高速気候変動シナリオ（W_H）で、夏の平均気温（JJA）が2.3°C上昇し、夏の降水量が平均13%減少し、2050年の夏の潜在的な蒸発散量が11%増加すると予測されている（すべて現在、つまり1981～2010年の期間の気候との相対的な変化として表記）。このシナリオでは、オランダで深刻な干ばつや熱波がより頻繁に発生し、水量と水質に重要な影響をおよぼすことになる。

Zwolsman and Van Bokhoven *(3)* とVan Vliet and Zwolsman *(4)* は、オランダのライン川とマース川の水質への低河川流量と熱波の影響、および飲料水製造への影響を調査した。熱波と低河川流量の影響は、熱波と水文学的干ばつがあった年（1976年と

注：オランダの飲料水供給のための河川の取水口を緑丸で示し、青丸は河川水が浸透し、汲み上げられ、後処理される海岸砂丘を示している。

図A1.1　オランダの飲料水：水源と給水区域

2003年）の水質を、平均河川流量と温度分布が大きい基準年の水質と系統的に比較することで調査した（表A1.1）。水質データは、オランダの地表水水質に関する大規模なデータベース（http://live.waterbase.nl）から入手した。

表A1.1　ドイツ、ベルギーとの国境で記録された2002～2004年のライン川とマース川の平均流量（2003年7～12月は干ばつ期間）

	ライン川（国境：ロビト）：Q（m^3/s）			マース川（ボルフハーレン、国境まで15 km）：Q（m^3/s）		
	2002	2003	2004	2002	2003	2004
4月	2152	1540	1774	198	93	132
5月	2712	1764	2064	172	133	136
6月	2195	1658	2052	70	62	39
7月	1963	1251	1696	51	27	38
8月	2113	1013	1536	69	17	86
9月	1787	936	1495	36	13	62
10月	2415	1266	1537	97	17	53
11月	4845	1160	1978	560	26	125
12月	3301	1425	1685	389	110	191

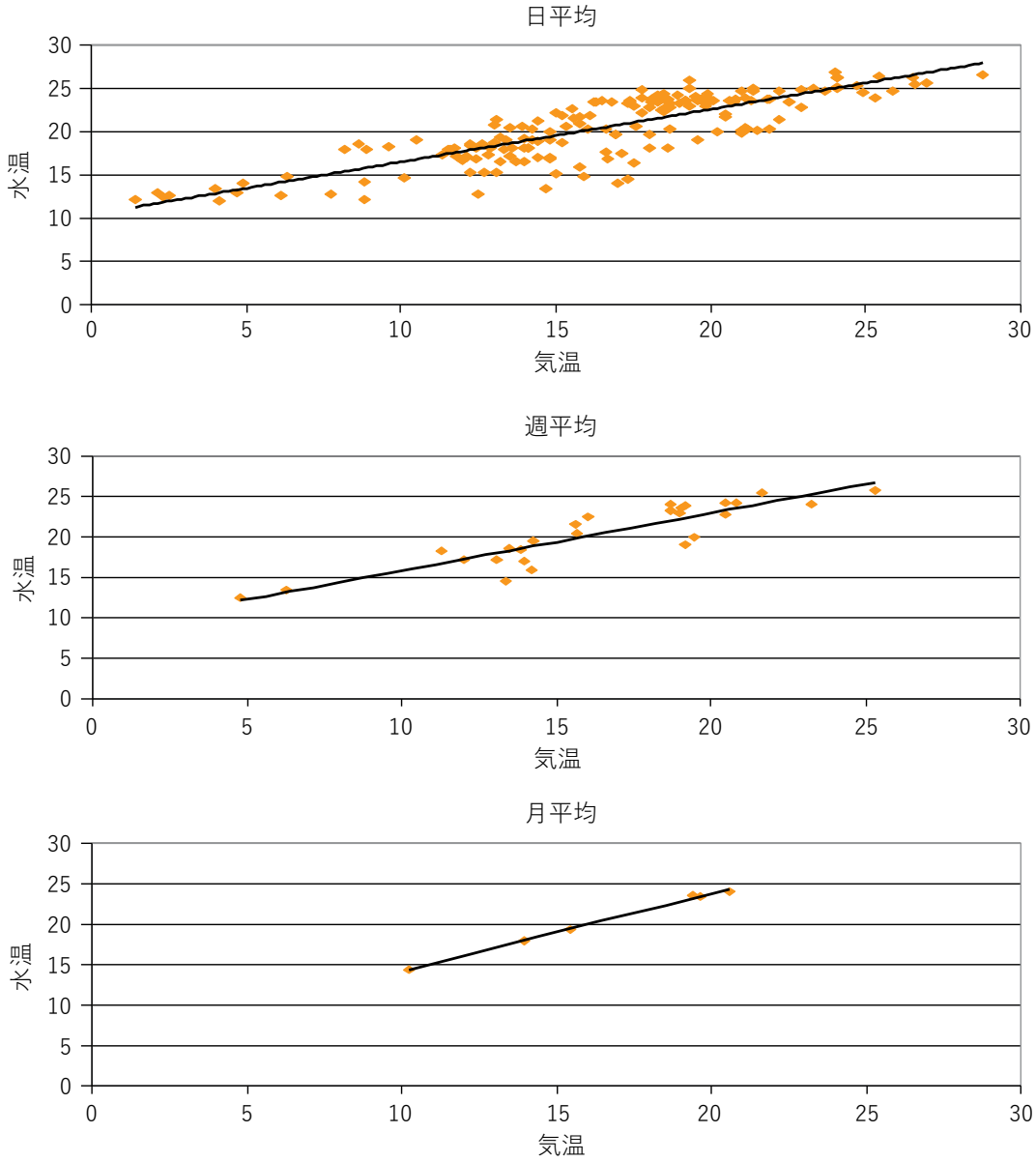
さらに、Sjerps、Zwolsman and ter Laak *(5)* は、2010年と2011年の監視データと放流量、およびKNMIの気候シナリオに基づいて、気候変動がライン川とマース川の医薬品濃度におよぼす影響を研究した。乾季の水質を平均的な年の水質と比較することで、干ばつや熱波が河川の水質におよぼす影響をいくつか特定することができた。

・水温上昇
・富栄養化の可能性の増加
・点汚染源からの排出の希釈が少ない
・河川域の塩類集積（塩水化）

これらの影響については、以下に詳述する。

気候変動が河川水温に与える影響

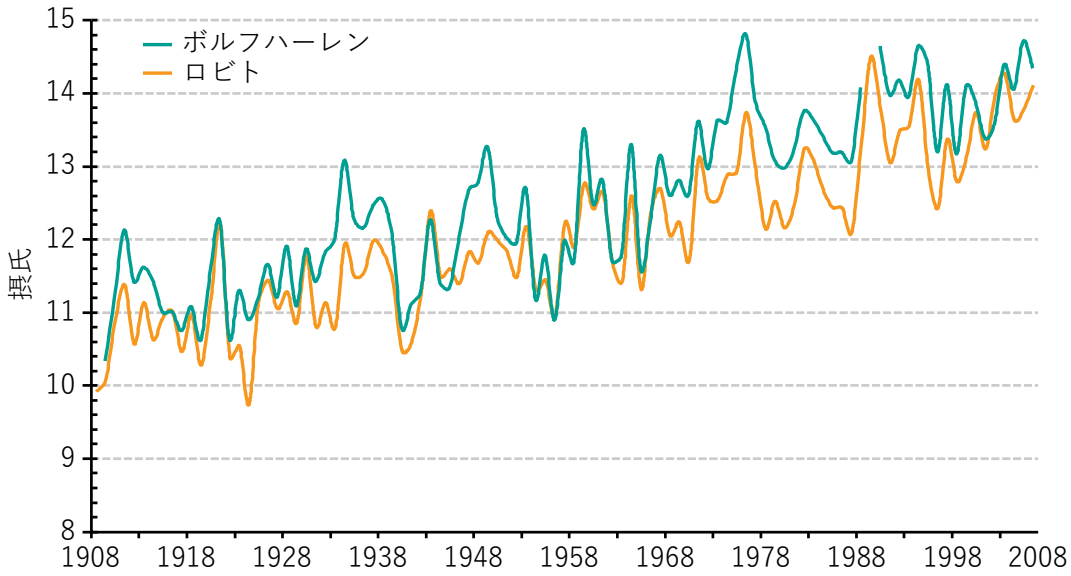
表層水の温度は、短期（日）、長期（月）ともに気温に追従している。例えば、図A1.2は、マース川の水温と気温の関係を示したもので、ライン川（図示せず）でも同様の結果が得られている。このことは、オランダの将来の水温が気候変動の影響を深刻かつ予測可能に受けることを意味する。



図A1.2　オランダ・ベルギー国境のマース川の水温と気温の相関（2003年4～9月のデータ）

1976年と2003年の夏（乾燥かつ高温）のライン川の水温は、それぞれ1975／1977年と2002／2004年の基準夏よりも明らかに高い。基準夏との比較では、1976年夏（JJA）は1.4～1.8℃、2003年夏は1.4～1.6℃の上昇となっている *(3)*。マース川では、Van Vliet and Zwolsman *(4)* が、乾燥かつ高温であった2003年の夏の水温は、2002年と2004年の基準夏の水温と比較して平均2℃高いことを発見した。

このような年ごとの変動性に加えて、過去100年の間に河川の水温が長期的に上昇していることが明らかになっている。過去100年の間に、ライン川とマース川では、年間平均水温が4℃（!）上昇している（図A1.3）。この傾向のおよそ3分の2は冷却水の排出量の増加（発電所や大型化学プラント）によるものであり、3分の1は過去100年間の平均気温の上昇（つまり気候変動によるもの）によるものと考えられる。



注: ロビト地点＝オランダ・ドイツ国境のライン川、ボルフハーレン地点＝オランダ・ベルギー国境から15 km下流のムース川

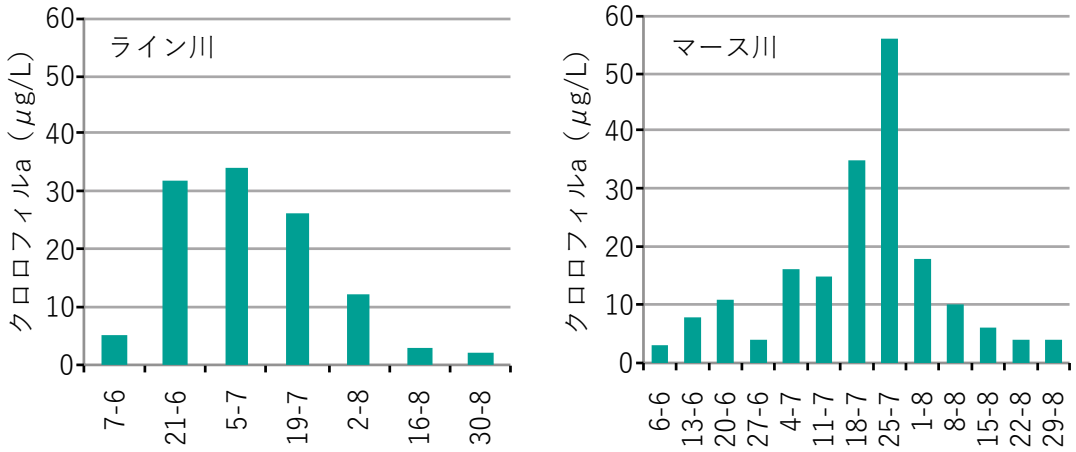
図A1.3　20世紀におけるライン川の年間平均水温の上昇

水温の長期的な上昇は、気候変動の影響に対応するための河川の能力に影響を与えるため、非常に重要である。例えば、2003年8月の熱波の際には、水温が生態系や浄水処理の閾値である25℃を超えることがしばしばあったが、1976年の（より強い）熱波の際には、このようなことはほとんどなかった *(3)*。2006年7月の熱波では、マース川とライン川の両方で過去最高の28.0℃の水温が記録された。このような高温の水温は、河川の水圏生態系に直接的な脅威を与え、浄水処理に関連した問題を引き起こしている（次項参照）。両河川の冷却目的での利用の増加は、気候変動の影響の増大に対応する能力に深刻な影響を与えていると結論付けることができる。

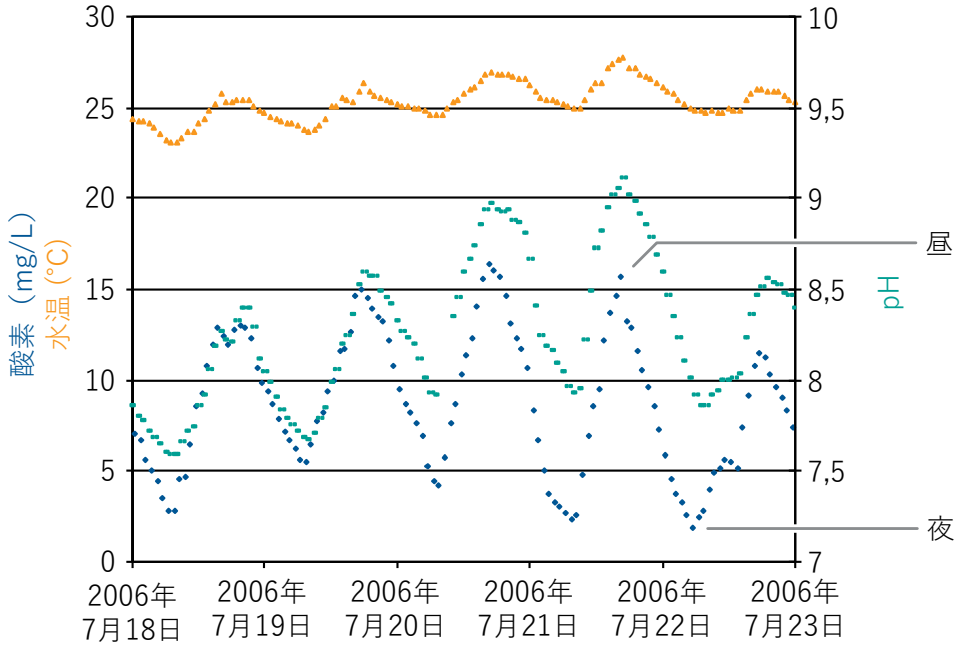
熱波が富栄養化に与える影響

低河川流量と高水温は、富栄養化の理想的な条件となる。藻類の異常増殖とその一般的な水質への影響の典型的な例を図A1.4とA1.5に示す。この2006年7月の熱波は過去300年間の記録で最悪のものである。クロロフィルa濃度は熱波の間にピークを迎える。より重要なことは、藻類の異常増殖が溶存酸素とpHの面で水質に強い影響を与え、結果として河川の生態系にも影響を与えていることである。溶存酸素とpHは、日中の一次生産（二酸化炭素（CO_2）の消費、酸素の生産）と夜間の逆のプロセス（呼吸）のダイナミクスにより、昼夜で振動する。このため、溶存酸素は夜間には2 mg/Lまで低下し、日中には16 mg/Lまで上昇するという劇的な変動を示す。このような溶存酸素の激しい変動は、水圏生態系、特に無脊椎動物（底生生物）に大きなストレスを与える。これらの生物はこのストレスから逃れることができない。

水圏生態系への影響に加えて、藻類の増殖は浄水処理にも影響を与える。藻類は凝集と砂ろ過で除去しなければならないが、水から味や臭い（例えば、ジェオスミン、2-メチルイソボルネオール）を除去するために活性炭による付加的な処理が必要となる場合もある。熱波や河川流量の低下が河川システムの富栄養化の可能性に与える影響を軽減するために、集水域での栄養塩削減プログラムが必要となる場合がある。



図A1.4　2006年6月～8月のライン川（国境：ロビト）とマース川（国境：アイスデン）のクロロフィルa濃度（μg/L）

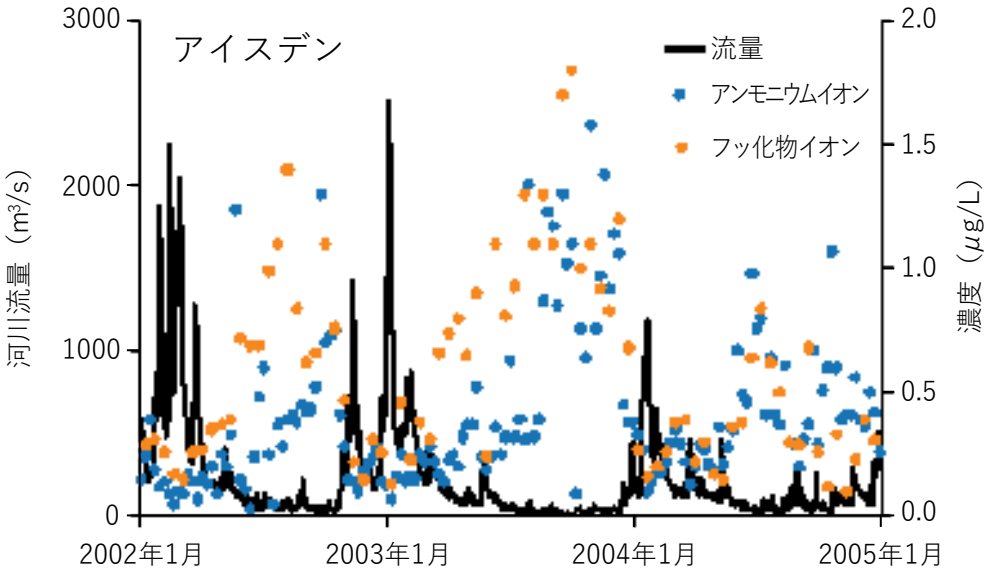


図A1.5　2006年7月の熱波時におけるマース川（国境：アイスデン）の水温（オレンジ）、溶存酸素（青）、pH（緑）の昼夜サイクル

干ばつが河川水質に与える影響

水文的干ばつがライン川とマース川の希釈能力と水質に与える影響は、KWRによって広く研究されている *(1、3～5)*。基本的にこれらの研究は、モデルによる予測ではなく、実際の水質データに基づいて行われていて、干ばつ時の水質を、平均的な水文学的条件の基準となる夏の水質と比較し

ている。一般的に、主要なイオン（例えば、塩化物イオン、ナトリウムイオン、カルシウムイオン）、栄養塩、微量金属、有機微量汚染物質などのパラメータについては、干ばつの影響を受けて水質が悪化することがわかっている。例として、ムース川のアンモニウムイオンとフッ化物イオンの例を示す（図A1.6）。



図A1.6　2002～2004年のマース川（アイスデン＝オランダとベルギーの国境）における河川流量、アンモニウムイオン濃度、フッ化物イオン濃度（河川流量の少なさが河川水質に与える影響に注意）

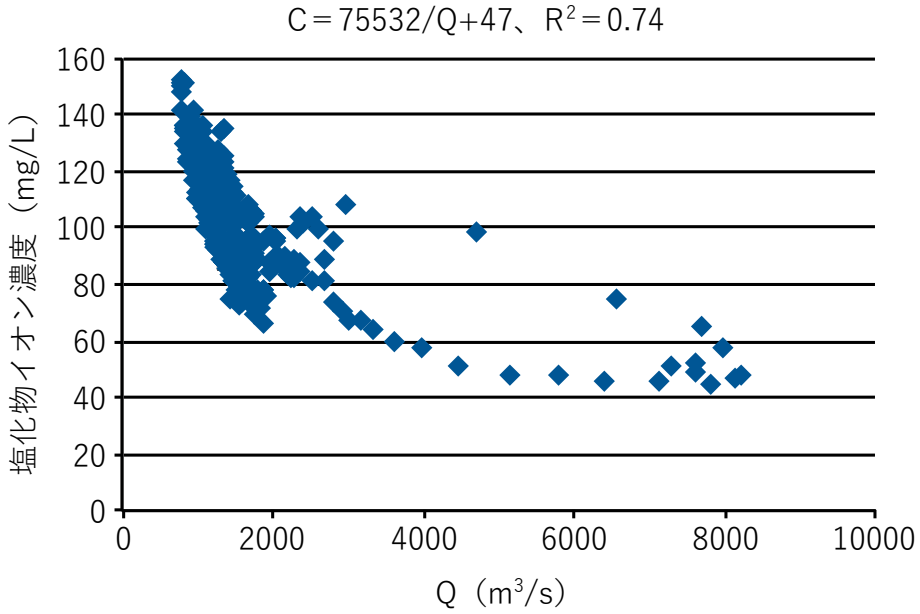
干ばつ時の水質の低下は、下水処理場や工業排水処理施設などの点汚染源からの排出物の希釈が限定されることに関係している。汚染源が主に面汚染源である場合、化学的負荷は集水域の降雨量や降水強度に依存することは注目すべきことである。つまり、Zwolsman and Van Bokhoven *(3)* が論じたように、面汚染源からの化学的負荷は干ばつ時に減少しうる。これは、汚染は点源よりも面源（土壌浸出）に支配されているライン川の硝酸イオンの場合に当てはまる。その結果、河川水中の硝酸イオン濃度は、河川流量に対して化学的負荷と希釈能力が逆に作用し、その影響のバランスが取れているため、河川流量の広い範囲で不変である。

飲料水の観点からは、ライン川の塩化物イオンと臭化物イオンの濃度は、特に河川流量が少ないときに重要である。ライン川の流量がライン川の塩化物イオン濃度に与える影響を図A1.7に示す。2011年の毎日の測定値に基づくデータセットは、単純な希釈式で記述することができる。

$$C = a/Q + b$$

ここで、C＝塩化物イオン濃度（mg/L）、a＝塩化物イオン負荷量（g/s）、Q＝河川流量（m^3/s）、b＝塩化物イオンのバックグラウンド濃度（mg/L）である。

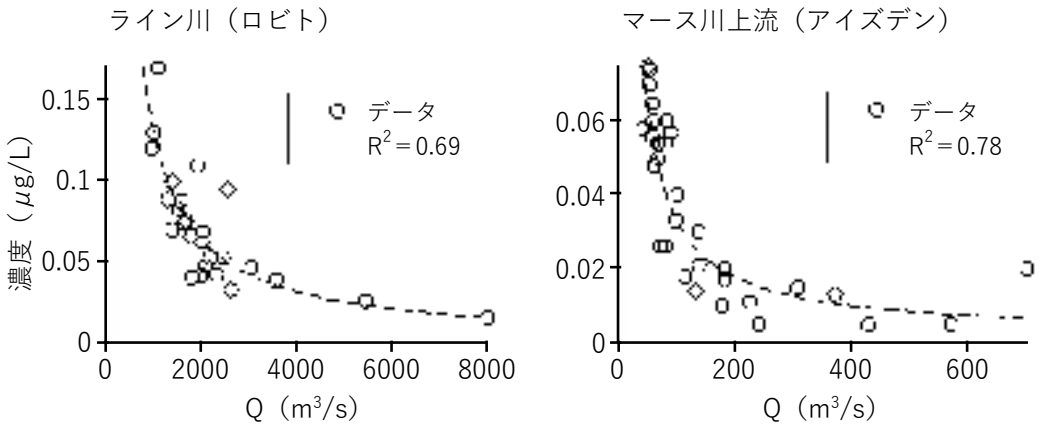
現在の塩化物イオン負荷量（図A1.7から推定）は75 kg/sであり、バックグラウンド濃度は47 mg/Lである。このC-Q間の関係から、河川流量が730 m^3/s以下に低下すると、塩化物イオンはオランダの飲料水基準である150 mg/Lを超えると計算できる（水系への塩化物イオン負荷量が一定であると仮定している）。このような低河川流量は、W_H *(6)* の下では、将来的にも実際に予測されている。



図A1.7　ロビトにおけるライン川の塩化物イオン濃度に対する河川流量の影響（オランダの飲料水基準（150 mg/L）に河川流量が少ない時に到達することに注意）（2011年のデータセットによる）

一般的に、ライン川の臭化物イオン濃度は、平均的な河川流量では100 µg/Lであったものが、低河川流量では300 µg/Lに増加する *(3)*。低河川流量時の臭化物イオン濃度の増加は、オゾンを浄水処理プロセスで使用する場合に関係している。オゾン処理中に臭化物イオンの極一部が臭素酸イオンに変換される場合でも、臭素酸イオンについてのオランダの飲料水基準（5 µg/L）を容易に超えてしまう。

医薬品は、下水処理施設から多かれ少なかれ一定の負荷で地表水に排出される。したがって、多くの医薬品の濃度と河川流量との間には逆の関係があることが予想される。Sjerps、Zwolsman and ter Laak *(5)* は、最近の監視データを用いて、異なる気候シナリオの下でのライン川とマース川の将来の医薬品濃度を予測した。データは、2010年を基準期間として、長引く低流量期を特徴とする2011年のものを選択した。様々な物質について、濃度は塩化物イオンと同様に希釈式c＝a/Q＋bで表される。典型的な例は、ライン川とマース川のカルバマゼピンである（図A1.8）。



出典：Sjerps、Zwolsman and ter Laak *(5)*

図A1.8　2010／2011年のライン川（ロビト）とマース川（アイスデン）における河川流量とカルバマゼピン濃度の関係

Sjerps、Zwolsman and ter Laak *(5)* は、これらのQ-C間の関係を用いて、2050年のライン川とマース川の水質に対する水文学的変動（渇水年と豊水年）と気候変動の影響を評価した。どちらの要因も水質に大きな影響を与えているように見える。水文学的渇水年（1976年）の化学物質濃度は、1967年のような水文学的に平均的な年と比較してライン川では1.5倍、マース川では2倍にもなる。気候変動の水質への影響も同じ程度である。これら2つの影響を合わせると、W_Hの下では、現在の気候条件下の水文学的に通常の年と比較して、渇水年には、マース川における医薬品の濃度は3〜4倍に、ライン川では、濃度は2〜3倍に増加する可能性がある。

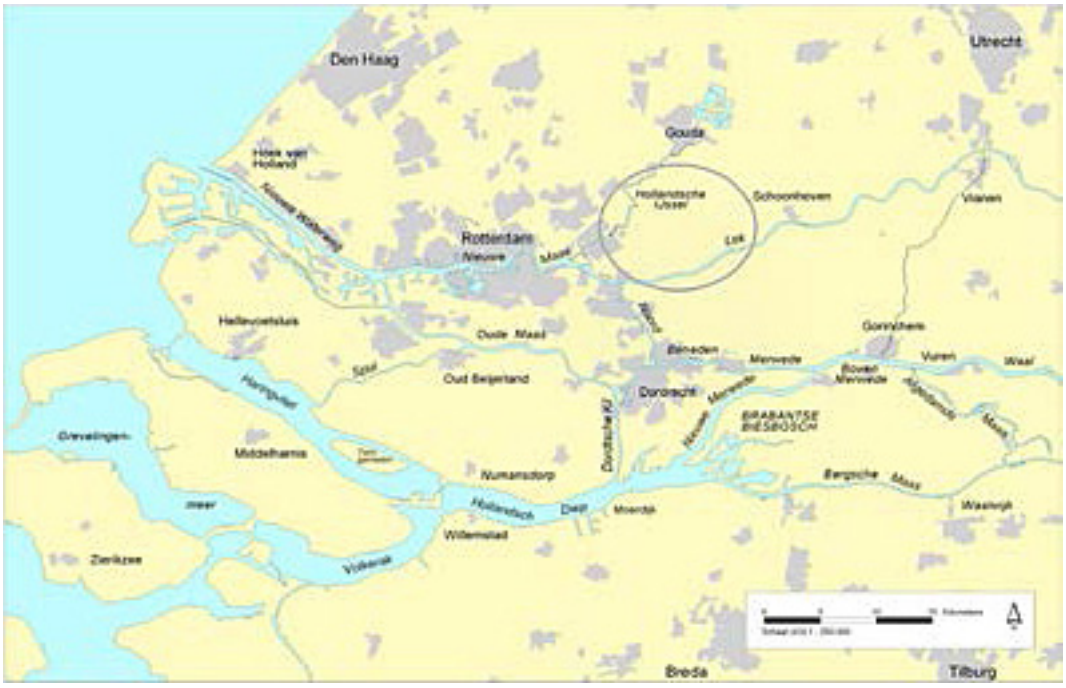
マース川は典型的な降水の影響を直接うける河川であり、流域面積が比較的小さい（ライン川の1/10）ため、渇水年と気候変動の水質への複合的影響が、ライン川に比べて大きくなりやすい。例えば、マース川におけるAMPA（除草剤グリホサートの代謝物）の濃度は、W_Hでは最大10 µg/Lまで上昇すると予測されるが、ライン川のAMPA濃度は飲料水水質基準である1 µg/Lを下回ったままである。ライン川にアルプスからの雪解け水が乾季に供給される限り *(7)*、雨水のみを供給源とするマース川と比較して、流量はそれほど急激には低下しない。

気候変動による将来の河川水質の低下は、オランダの浄水処理にリスクをもたらす可能性がある。しかし、医薬品に関しては、排水処理の効率を向上させるための対策が進んでいる。ドイツやスイスの大規模な下水処理場では、すでに効率的な高度処理（オゾン処理や活性炭処理）が導入されている。今後、オランダもこの例に倣うことになるだろう。

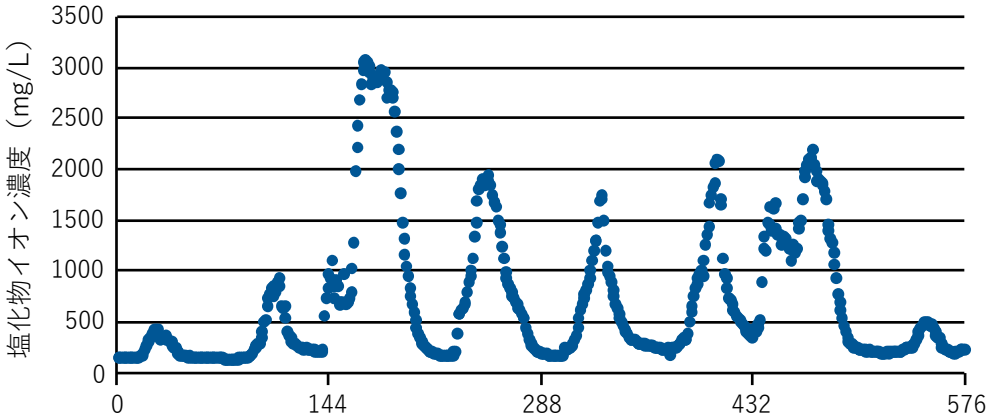
塩水化

Zwolsman *(1)* は、オランダ国内では、2つの理由から塩水化が増加すると予想されると指摘している。第一に、海面の上昇は沿岸の帯水層への海水の浸入を招き、帯水層の飲料水源としての利用を脅かす可能性がある。第二に、ライン川の流量が少ないため、特に北西風や春の潮汐の時期に海水が内陸部に浸入し、海岸付近の海水位が高くなる。通常の水文条件では、海水はライン河口（いわゆるニューウェ水道）を経由してロッテルダム市まで到達している（図A1.9）。しかし、河川流量が少なく、海水の水位が高いという悪条件の下では、海水がさらに上流の灌漑用水源（ホランセ・アイセル川）や水道水源（レック川）である支流にまで浸透する可能性がある。

ライン川の淡水の感潮河川支流の塩水化は、通常、河口部の海水位の上昇と河川流量の低下が重なった場合に発生する。北西風と低い河川流量が一致する可能性を考えると、塩水化のリスクが最も高いのは第4四半期となる。2003年7〜11月の干ばつの間のレック川河口の塩水化の例を図A1.10に示す。



図A1.9　ライン川河口（ニーウェ・ワーテルウフ川+ニーウェ・マース川）、感潮淡水河川支流ホランセ・アイセル川とレック川を含む（青丸）



図A1.10　2003年の干ばつによるライン川河口（支流であるニーウェ・マース川とレック川）の塩分濃度の変化

レック川の水供給機能に影響を与える塩水化が増加している。レック川の河口付近では、河川水は河岸ろ過により取水されている。レック川沿いで揚水された地下水の塩分濃度は、過去の海水浸入により徐々に上昇していることが明らかになっている。気候変動の影響で今後もこのような事象が増えることが予想されるため、地元の水道事業体は、最下流の3つの浄水施設で現在の水処理を拡張し、淡水化処理を導入することを決定した。その結果、将来的には処理コストが増加することになる。

変化に対するシステムのレジリエンス

オランダで実施された研究から、気候変動の影響下にある河川については、一般的な軌跡が確立されているように推測される。マース川 *(4)* のように、夏季の流量が一般的に少なく、点汚染源からの汚染物質の流入が多い河川の水質は、河川水による希釈が限定的で水温が高くなるため、干ばつの影響を最も受けやすいと考えられる。対照的に、夏季の流量が比較的多い河川（例えば、雪解け水を供給源とする河川）では、同程度の影響を受ける可能性は低い。例えば、ライン川の干ばつによる水質への影響は、マース川で観察された影響に比べてはるかに小さかった *(3、5)*。実際、面汚染源の相対的寄与度が高い河川では、土壌からの浸出や表面流出による汚染物質の供給が少なくなるため、干ばつ時の水質は安定しているか、あるいは改善されている可能性がある。

河川システムが気候変動にともなう変化に対処する能力は、生態系のレジリエンスの関数となる。ライン川とマース川の研究では、干ばつが水質に与える影響は、水質がすでに悪い場合に大きくなることが示されている。したがって、ライン川とマース川に排出される汚染物質の削減は、将来の気候変動に対するこれらの河川のレジリエンスを高めることになる。気候変動に対処しなければ、過去に問題となった水質問題が将来的に再び重要になる可能性がある。

付録1　参考文献

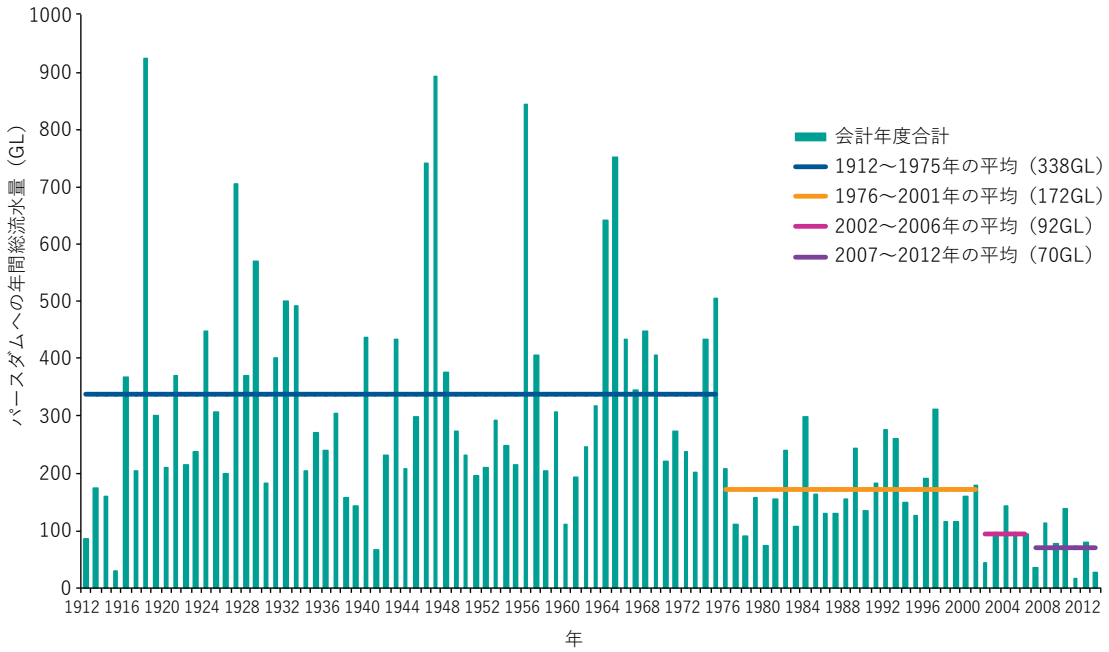
1. Zwolsman JJG. Climate robustness of drinking water supply in the Netherlands based on surface water. Report KWR 08.070. The Netherlands: KWR; 2008.
2. Van den Hurk B, Siegmund P, Klein Tank A., editors. 2014. Climate change scenarios for the 21st century: a Netherlands perspective. KNMI Scientific Report WR 2014–01. KNMI; 2014 [in Dutch; English summary at www.knmi.nl].
3. Zwolsman JJG, Van Bokhoven AJ. Impact of summer droughts on water quality of the Rhine River. Water Science and Technology. 2007;56(4):45–55.
4. Van Vliet MTH, and Zwolsman JJG. Impact of summer droughts on the water quality of the Meuse River. Journal of Hydrology. 2008;353:1–17.
5. Sjerps et al. 2017. Projected impact of climate change and chemical emissions on the water quality of the European rivers Rhine and Meuse: A drinking water perspective Article reference: STOTEN22972 Journal title: Science of the Total Environment Corresponding author: Ms. Rosa M.A. Sjerps First author: Dr. Rosa M.A. Sjerps Final version published online: 10-Jun-2017 DOI information: 10.1016/j.scitotenv.2017.05.250 https://authors.elsevier.com/a/1VBdC_17GgGh6U
6. Klijn F, Hegnauer M, Beersma J, Sperna Weiland F. What do the new climate scenarios imply for the river discharges of the Rhine and the Meuse? Report 1220042–004. Deltares/KNMI; 2015 [in Dutch].
7. Swaiger K. Alps: the water towers of Europe. Innsbruck University Press; 2007.

付録2　オーストラリアの事例研究：西オーストラリア州の補助水源からのリスクを管理するための水安全計画

背景

ウォーター・コーポレーションは、西オーストラリア州の主要な水供給事業者である。長年に亘り気候変動が水質におよぼす影響が研究され、優れた水計画と気候変動への対応で知られている。この事例研究では、ウォーター・コーポレーションの飲料水の水質と安全性に関する経験を説明し、今後、同様の問題に直面する可能性のある他の水供給事業者にとって有益な教訓を明らかにしている。

西オーストラリア州では、降雨量の減少が、州内の多くの地表水および地下水源に大きな悪影響を与えている。このことは図A2.1を見れば一目瞭然であり、降雨量が12%減少すると、ウォーター・コーポレーションの地表水源への流入量が50%減少していることがわかる。西オーストラリア州南西部は、気候変動と降雨量の減少の影響を大きく受けている地域の一つであり、過去10年間でその影響が顕著になっている。



注：期間は7～6月の会計年度であり、決算期として表示している。一部のダムは、建設前の期間の流入量をモデル化している。

出典：Water Corporation, 2013.

図A2.1　西オーストラリア州パースの貯水ダムへの流入量の減少

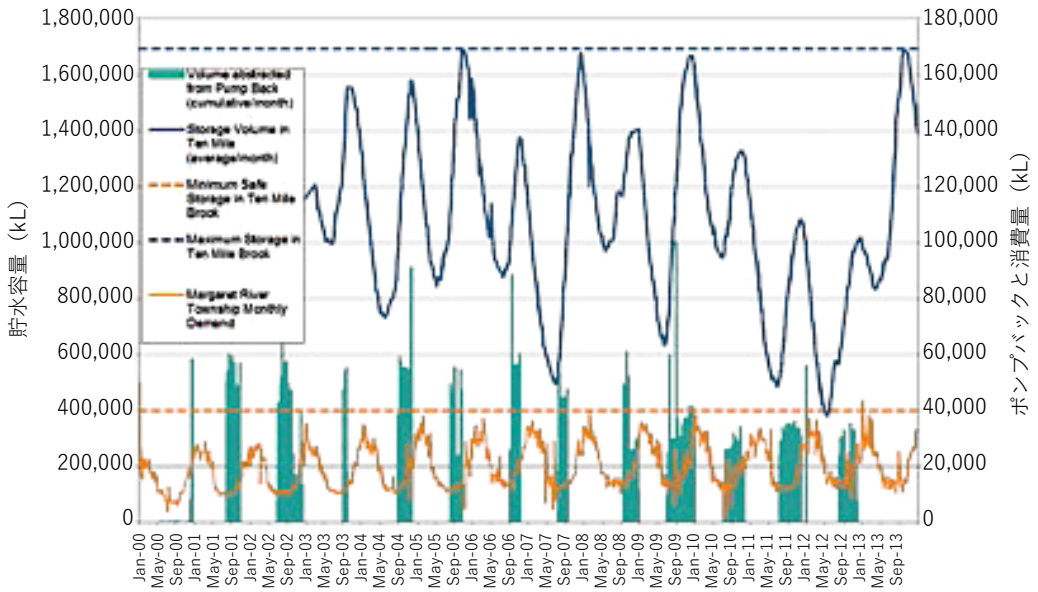
水質への危害と集水域に関する知識、理解、意識が高まったため、さまざまな時点でリスク評価が完了している。WHOのWSPの概念 *(1)* の構築とオーストラリアの飲料水水質管理の枠組みの構築に続いて、ウォーター・コーポレーションのWSPプロセスは2004年に開始され、マーガレット川は最初に評価された事業計画の1つであった。

マーガレット川の事業計画

パースの南約280 kmに位置するマーガレット川には、1万人以上の地元住民が住んでおり、年間約50万人の観光客が訪れている。この地域は地中海性気候に属し、夏は暖かく乾いた気候で、冬は涼しく湿った気候である。年間降水量は集水域で900～1100 mmである。この温暖な気候により、マーガレット川はオーストラリアの主要なワイン生産地域の一つになった。居住人口の増加と観光業の拡大にともない、ウォーター・コーポレーションはこの町に安全で信頼性の高い飲料水を供給するために多大な資源を投入してきた。

マーガレット川の主な水源は、マーガレット川本川の支川に建設されたテン・マイル・ブルック・ダムである。1994年にテン・マイル・ブルック・ダムが建設されたとき、この17億リットルの地表水源が20年以上に亘ってマーガレット川に供給できると期待されていた。雨量にもよるが、流出量が少ないため、テン・マイル・ブルック・ダムの集水域の収量は年間約6億5,000万リットルと推定されている。このように、テン・マイル・ブルック・ダムは水源の水質は良好であると考えられているが、流入量の変化により、この水源は非常に脆弱であると考えられている。

マーガレット川町への水供給は、2000年代初頭に連続した降雨量の少ない冬の後、問題となった。そのため、発生源となる病原体のリスク分類が高いマーガレット川ダムからのポンプバックを利用して、テン・マイル・ブルック・ダムを補完することが決定された。図A2.2は、2000年以降のマーガレット川の需要、貯水レベル、ポンプバック操作を示している。



図A2.2　2000～2013年のマーガレット川のポンプバック、水需要と貯水レベル

水安全計画の策定

2004年、水道公社は245の給水地域を対象としたWSPの策定を開始した。この膨大な数の給水地域では、水質に「リスクが高い」と考えられる計画が優先された。マーガレット川の事業計画では、マーガレット川ダムからのポンプバック率が高く、水源リスクが高いため、最初に見直しが行われた地域の一つであった。

WSP立案プロセスの一環として、水源は検討され、5つの地表水リスクカテゴリーの1つに分類された。レベル1の水源は最小限の処理（消毒のみ）を必要とし、レベル4の水源は大規模な処理を必要とし、レベル4以上のものは使用に「不適」とみなされる。このリスク分類の基礎となるのは、過去の大腸菌の結果、細菌性およびウイルス性のリスク、および観察された土地利用活動に基づく*クリプトスポリジウム*および*ジアルジア*属のリスクを用いた病原体の観点からのものである。

テン・マイル・ブルック・ダムの集水域には私有地があり、牛が放牧されていたことから、この水源は中程度のリスク（レベル3－ろ過や紫外線（UV）消毒などの追加処理が必要）と考えられていた。しかし、マーガレット川のポンプバックによる水源は、以前に大腸菌数が多かったこと、ポンプバックにつながる支川で直接放牧されている牛の数が多かったことから不適当と考えられた。また、リスクを軽減するために取られた可能性のある水源保全策はほとんどなかった。さらに、ポンプバックが運転されていたとき、テン・マイル・ブルック・ダムの出口で濁度と大腸菌の急上昇が観察された。

WSP立案プロセスの結果、行動計画が策定された。中期的には、マーガレット川のポンプバックを水源として利用することに関連した病原体リスクを軽減するために、多くの措置がとられている。

これらの手順は以下にまとめられており、以下のセクションで詳しく説明されている（図A2.3）。

・濁度が5比濁法濁度単位(NTU)を超えて測定された場合、ポンプステーションの自動停止機能を備えたマーガレット川のポンプバックとテン・マイル・ブルックの出口に濁度計を設置すること。5 NTUを超える濁度は、降雨量の多さ、病原体負荷の増加、消毒効果の低下と関連している。
・テン・マイル・ブルック・ダムの出口のUV消毒の更新
・マーガレット川のポンプバックをテン・マイル・ブルック・ダムのポンプバックに移設
・マーガレット川のポンプバックの出口での膜ろ過
・水源としてのマーガレット川のポンプバックを放棄し、被圧帯水層からの新たな水源を開発

長期的な戦略として、テン・マイル・ブルック・ダムに浄水場を設置した。

水安全計画の運用戦略と行動計画

追加処理には数ヶ月を要するため、WSPはポンプバックとテン・マイル・ブルック・ダムからの水質に基づいた水源の適切な運転戦略を速やかに策定し、合意するための効果的なツールとなった。大腸菌の測定値が高いと濁度が高くなるため、ポンプバックの使用に濁度制限を設け、濁度が5 NTU以下の期間に使用を制限することが決定された。この運転基準値（プロセス管理点）は、ポンプバックからの病原体負荷の代替指標として使用され、病原体リスクの低い時間帯に運転を制限するために使用された。その他の早急な対策としては、短絡を制限し、消毒前にテン・マイル・ブルック・ダムでの自然死と希釈を最大化するために、ポンプバックの入口をテン・マイル・ブルックの奥に移設し、UV消毒装置の試運転を行った。

2004年8月、テン・マイル・ブルック・ダムの出口にUV消毒装置が設置された。この追加措置だけでは、ウォーター・コーポレーションが設定した要件を満たすには十分ではなかったが、それでも効果的な暫定的なリスク低減対策と考えられていた。UV消毒装置は40 mJ/cm^{2}以上を目標とする重要な管理点となった。その後、ウォーター・コーポレーションはUV消毒の限界をよりよく理解するようになったため、2006年にWSPが改訂され、UVバリアの効果的な運用を保証するため、テン・マイル・ブルック・ダム出口の水質に色度（10ハーゼン単位）と濁度（＜2 NTU）のプロセス管理点の基準値が適用された。

2007年冬の水質事故

2007年の冬、テン・マイル・ブルック・ダムは集水域からの流出量が非常に少なかった。このため、地元への水供給にはマーガレット川からのポンプバックへの依存度がさらに高まった。2007年の冬の終わりまでに、テン・マイル・ブルック・ダムに貯留されている水の50%以上がポンプバックからの水であると推定された。テン・マイル・ブルック・ダムのポンプバック水の割合が高いため、主要ダムの出口で色度と濁度の管理基準を超過した。このため、テン・マイル・ブルック・ダム出口の原虫バリア（UV消毒）に障害が発生する可能性があるため、WSPに記載されている対応措置が取られた。

即時の対応として、テンマイル・ブルック・ダムの水が色度と濁度の管理基準を満たすまでポンプバック運転を停止した。

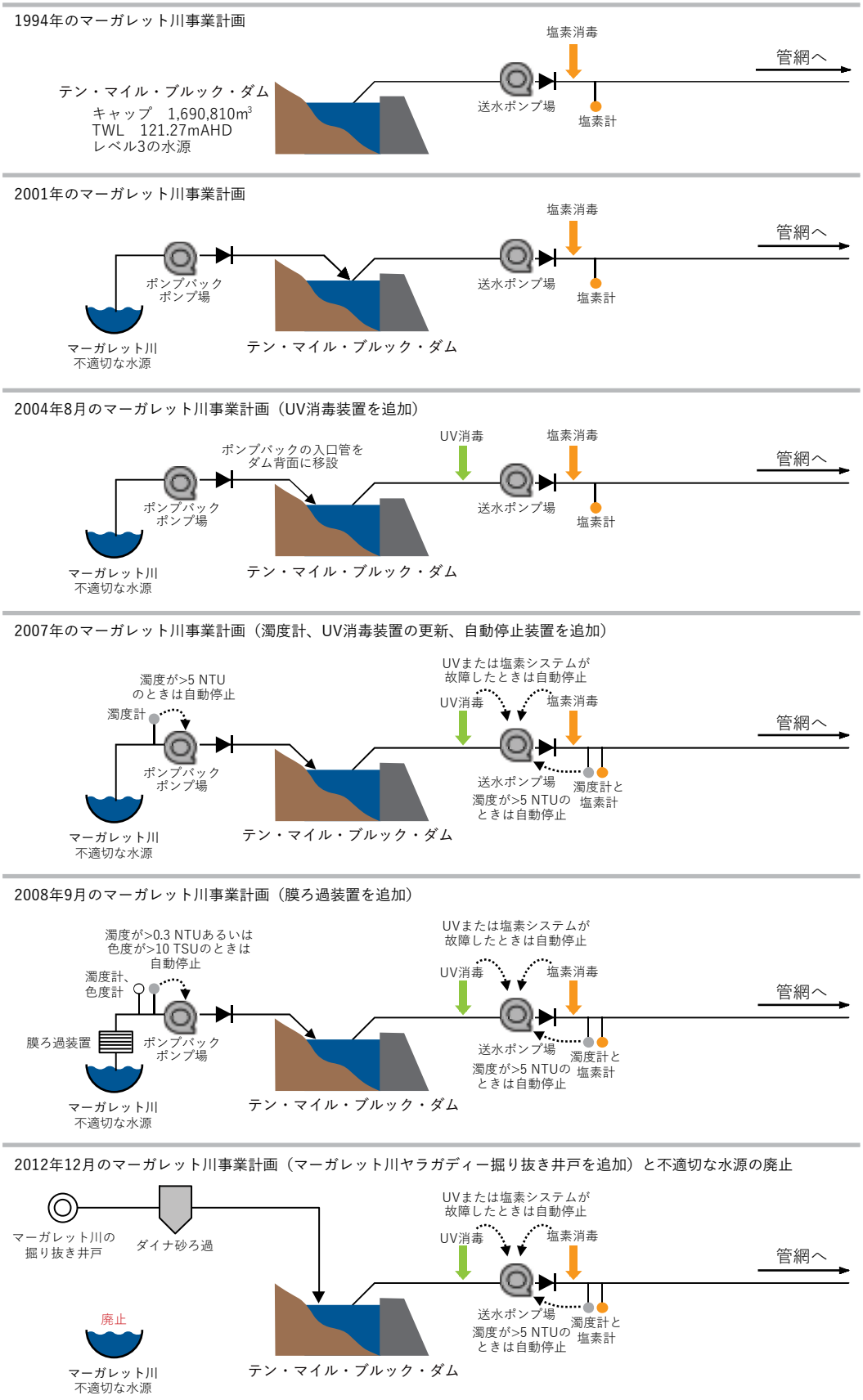
2008年の冬に向けて考えてみると、2007年のシナリオが繰り返されるが、水質や水供給の継続性にはより厳しい結果となるであろう。

地下水による増強計画の早期化が検討されたが、現実的ではないと判断された。

唯一残っている選択肢は、マーガレット川からのポンプバック水をさらに多く使用することであったので、マーガレット川からのポンプバックに原虫病原体に対する第二のバリアを設置することが必要であると考えられた。行動計画には以下が含まれている。

・マーガレット川からのポンプバックに精密ろ過膜の浄水場
・テン・マイル・ブルック・ダムの出口にあるUV消毒装置の容量と冗長性の向上
・*クリプトスポリジウム*と*ジアルジア*の潜在的発生源と考えられる集水域の私有地の買い取り

現在、テン・マイル・ブルック・ダムに流入するすべての水は、*クリプトスポリジウム*と*ジアルジア*に関して「低リスク」とみなされた。そのため、テン・マイル・ブルック・ダムのリスクレベルはレベル2に変更された。テン・マイル・ブルック・ダムの出口に設置されたUVは、処理水供給のための強固な第二の防御ラインである。精密ろ過とUV消毒装置はいずれも「フェイルセーフ」に設計されており、関連する管理基準を達成できなかった場合、供給が自動的に停止することを意味する。



図A2.3　マーガレット川の事業計画で、気候の変化に対応した水供給計画の経年変化

2012年、代替水源の開発

2007年冬の事故後の対応により、マーガレット川の水質リスクは大幅に減少したが、代替水源の解決策を開発する必要があった。

リスクの高いマーガレット川のポンプバックに限外ろ過（UF）を使用し、テン・マイル・ブルック・ダムの出口に単一のUVバリアを設置したことは、マーガレット川への水供給を安定化させる計画を開始するきっかけとなり、新たな水源の選択基準を確立することになった。

その結果、水道公社は、病原体リスクに基づく新たな水源の優先順位を以下のように設定した。

1. 被圧地下水
2. 不圧地下水
3. 地表水（大規模ダム）
4. 地表水（小規模ダム）
5. ポンプバックが停止した後、最低30日間ダムが運転されていない場合にのみ、ポンプバックが許容される

マーガレット川の計画では、その後、被圧帯水層の水源利用が推奨された。この水源は2012年に、鉄除去のための浄水場とともに開発された。これにより、マーガレット川のポンプバック源を廃止することができ、マーガレット川の水質リスクをさらに低減することができた。

長期計画

2014年に行われたマーガレット川計画のさらなる計画見直しにより、テン・マイル・ブルック・ダムの出口に浄水場を建設することが支持された。これにより、病原体除去のための処理の乖離に対処することになった。発生源のリスクは比較的低いが、このレベルのリスクに見合った適切な処理が行われるべきである（つまり、レベル2の発生源に対するレベル2の処理）。現在のUV消毒および塩素消毒は、許容可能な病原体リスクの低減を提供するが、これは一時的な配置であると考えられている。典型的には、レベル2の水源は、粒状媒体によるろ過などの物理的な除去バリアを必要とする。

長期計画の勧告は、テンマイル・ブルック・ダムにレベル2の浄水場を設置することである。

結論

気候変動は、西オーストラリア州全域でウォーター・コーポレーションが運営する多くの計画の水量を著しく低下させている。新たな水源開発には費用がかかり、ほとんどの場合、試運転までに何年もかかる可能性がある。その間、リスクの高い水源を利用して水供給量を増やす圧力が高まっている。WSPの策定と実施は、これらの水源を運用する際に需要者のリスクを特定し、それを最小化するための効果的な仕組みである。リスク評価、緩和策、管理点、および対応計画に注意を払うことで、水供給事業者は、気候や水質の変動に対応しながら、デューデリジェンスを実証することができる。

付録2　参考文献

1. Deere D, Stevens M, Davison A, Helm G, Dufour A. Management strategies. In: Fewtrell L, Bartram J, editors. Water quality: guidelines, standards and health – assessment of risk and risk management for water-related infectious disease. London: World Health Organization and IWA Publishing; 2001:257–88.

付録3　ネパールの事例研究：ネパールにおけるリスク管理のための水安全計画

はじめに

WSPが気候変動に関連した潜在的な水質および水量への影響を体系的に考慮し、対処することを確実にすることは、より効果的なWSPとよりレジリエンストな供給システムを構築するのに役立つ。そのため、英国国際開発省（DFID）とWHO健康のための水質パートナーシップ（WQP）は、ガイダンス文書の草案「*気候に対してレジリエントな水安全計画：気候の変動と変化にともなう健康リスクの管理*」を共同で策定した。

WQPの技術支援とDFIDの財政支援を受けて、ネパールでガイダンス文書の試験運用が行われている。DFIDは、レジリエントな水と衛生を通じて、バングラデシュ、エチオピア、ネパール、タンザニア連合共和国の保健分野で気候変動への適応策を構築しようとする1,000万ドルのプロジェクトの一環として、気候に対してレジリエントなWSPの策定を支援している。ネパールでは、DFIDが資金を提供する気候に対してレジリエントなWSPの策定は、WQPを通じて設立されたWSPプログラムに直接基づいており、既存のWSPの意識と支援、能力、ツール、規制の推進力を活用している。また、DFIDプロジェクトは、WSPの継続的な強化、実施、監視において国のパートナーを支援するための追加的な資源を提供することで、WQPの目標に貢献している。

気候に対してレジリエントなWSPは、ネパールの5つの水供給システムで試験的に実施されている。主な知見は以下にまとめられており、WSPプロセスを通じて気候の影響を考慮することの価値を実証している。

気候に対してレジリエントな水安全計画のパイロット試験の結果と対応：気候変動による危害、リスク、対策

ネパールにおける気候変動に関連した危害原因事象は、一般的に降水量の増加と変動性、流量の減少、気温の変動性の増加に起因するものと述べられており、これらはすべて水供給の利用可能性と質に影響を与え、水の安全性の問題につながる可能性がある。

地球温暖化は、地表水と地下水の両方の水源に影響を与えている。降水量の増加により、集水域からの病原体の流出、濁度、化学物質、栄養塩の負荷量が増加しており、洪水により地表水の水源が短期間で汚染され、多くの場合、浄水場の処理能力を超えている。降雨強度の増加や干ばつ期間の長期化も、地下水位の増減や汚染物質の浸透による地下水の汚染を引き起こしている。流出水の増加は、特にテライのような低地では、地表水が地下水源に流入し、ピット式トイレを浸水させる原因となっている。

また、激しい降雨は、損傷した下水道システム、表面排水溝、洪水による二次汚染や表面汚染を

引き起こす。他の危害原因事象としては、地滑り、洪水による取水口、配管、その他の構造物の損傷、および干ばつ期の山火事による、ジャングル地域での表面に横たわっているプラスチック製のパイプの損傷がある。

気候に対してレジリエントな水供給システムの設計で考慮される主要な管理措置は、これらの危害原因事象について説明する必要がある。これらには、土壌侵食や地すべりを抑制し、降雨時に洪水を迂回させるための対策を備えた集水域の保護、改善された水源保護、深く設置された管井の設置、極端な状況下で予想されるさまざまな汚染事象に対応するための浄水場の設計（または、処理時間、質、量の中断を考慮した追加の処理・貯留能力の導入）、適切な管材の使用、水と衛生分野における3R原則（リデュース、リユース、リサイクル）の認識を含めた、水の保全と地元または代替水源の保全が含まれる。

堆積物の増加は、パイプ交差の相対的な高さが低くなることを意味する

土砂災害や洪水の被害を受けやすい河川の取水口

急斜面でのパイプ損傷

地下水の枯渇により、湧水とそれにともなう取水口の構造が低くなっている

図A3.1　パイロット地点（ムスタング、ジョムソム）の気候関連の課題例

気候問題に対処するための水安全計画プロセスの修正

WSPの気候に対するレジリエンスを高めるために、気候変動の専門家（または、気候変動に関する知識を持つ人）をWSPチームに加え、WSPプロセスにいくつかの変更が加えられた。危害の特定とリスク評価には、大雨、洪水、渇水などの異常気象を含む気候上の危害の考慮が含まれ、気候変動や異常気象に敏感な管理策がWSPに含まれるようになった。WSPチームは、水供給システムに影響を与えた過去の気候関連事象から教訓を得て、気候関連の変化が将来の水供給システムにどのように影響を与えうるかを学ぶことが奨励されている。WSPチームは、保健担当官や地元の専門家を含む他の利害関係者との関わりのために、地元で利用可能な機会を活用するよう奨励されている。

気候によって誘発される危害を考慮し、よりレジリエントな管理措置が、多くの既存のWSPに導入されており、WQPの支援を受けている。例えば、Barchour Ranipani（タナフ）のWSPでは、当初、雨季に上流の灌漑用水路を通じた原水の汚染を防ぐために、取水口の上に迂回路を設けるという通常の管理措置が取られていた。しかし、異常気象による地すべりや洪水のリスクを考慮し、現在では開水路の重要な部分をパイプラインに置き換え、気候に対するレジリエンスを高めている。

結論と成果

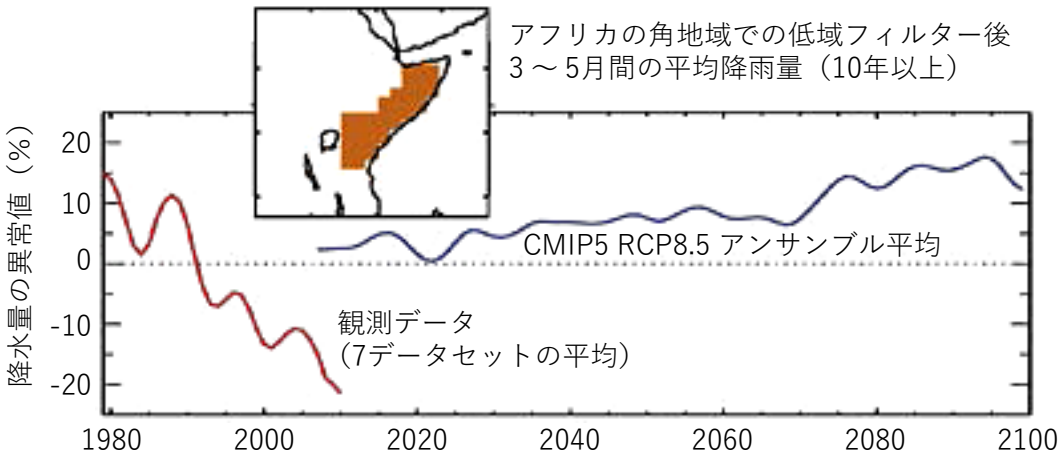
ネパールにおける気候に対してレジリエントなWSPのパイロット試験は、WSPプロセスが、気候変動がもたらす水供給システムへのリスクを考慮し、対処するための効果的な枠組みを提供していることを実証している。WQPの下で策定された既存の国家的なWSP実施ガイドラインと、都市部と農村部の両方のシステムのための関連する訓練マニュアルは、気候変動の問題に対応するために改訂された。したがって、従来のWSPアプローチは、気候変動影響を考慮することを促進する改訂されたWSPアプローチに置き換えられており、「気候に対してレジリエントなWSP」という語句が将来的に冗長となる可能性があるため、気候に対するレジリエンスがあるという概念が暗黙的かつ完全に統合されたものとなっている。

この事例研究は、他の資金供与者からの支援が、WQPが行ってきた活動をほぼ途切れなく構築するためにどのように利用されているかを示している。ここで示された気候変動の影響はネパールだけのものではなく、他の国（ラオス人民民主共和国やベトナムなど）からも、このアプローチとそこから得られる教訓への関心が高まっている。

付録4　タンザニア連合共和国の事例研究：水安全計画は不確実な気候への適応をどのように支援できるか？

WSPは、水供給のリスク管理に予防的に取り組むことを目的としている。しかし、リスクが不確実な場合はどうなるか？東アフリカでは、21世紀末までに気候はより湿潤になり、10～12月および3～5月の雨季はより激しくなり、干ばつはより少なくなると予測されている *(1)*。しかし、現在観測されている傾向では、過去30年間で3～5月の季節降水量は減少している *(1)*。図A4.1に示されているように、降水量の減少と増加というこれらの相反する報告は、「東アフリカのパラドックス」を生み出している。このパラドックスにはいくつかの説があり、現在調査が進められている *(2)* が、まだ解決には至っていない。水管理者にとって、このパラドックスは、将来の水の利用可能性や気候変動にどのように適応すべきかについての大きな不確実性を生み出している。

しかし、予測にはより高い信頼性があり、水管理者が気候適応計画に影響を与えるために利用できる側面もある。このことから、ここでは二つの分野、すなわち水量および水質への示唆について着目する。



©英国気象庁　国家著作権

注：画像は、アフリカの角（図中の地域）で平均化された3～5月降水量の異常値を、ローパスフィルタリングした時系列（10年後に50%の振幅カットオフ）で示したものである。観測データは7つのグリッド化されたデータセットの平均値であり、予測データは最大の温室効果ガス排出量とそれにともなう気候変動を予測したシナリオによって強制された39の連成モデル相互比較プロジェクトフェーズ5（CMIP5）モデルの平均値である。単位は1901～2000年の気候のパーセント値であり、各年に利用可能なグリッド化された観測データまたは対応するCMIP5の過去の実行結果 *(3)* を用いて計算されている。

図A4.1　「東アフリカのパラドックス」：アフリカの角地域における現在の乾燥傾向と3～5月の「長雨」の降水量増加予測

総降水量の予測は全体的に不確実であり、ゆえに降雨から得られる水量も不確実であるが、降雨がより激しくなることは十分な証拠がある。タンザニア連合共和国では、これは「長雨」(3〜5月)の期間がより短く、乾燥期間がより長く、極端な雨の日がより多くなることに関連している。このことは、年間を通じて水の利用可能性の変動が大きくなり、貯水と水需要の管理がますます重要になることを示唆している。タンザニア連合共和国の過去のデータを調査した結果、ドドマ州の飲料水供給源であるマクタポーラ井戸区域の地下水涵養の大部分が異常な降雨と関連しており、55年間の涵養量の75%がわずか11季節に関連していることが明らかになった *(4)*。著者らが推奨しているように、予想される激しい降雨の増加にともない、地下水の涵養量が増加するため、地下水は重要な貯水手段ならびに適応策の選択肢の一つとなる。地下水は、飲料水供給だけでなく、農業にとっても重要な資源となるため、WSPは他の地下水汲み上げ者や、飲料水用の地下水汲み上げを保護するために規制が十分かどうか考慮すべきである。

降雨が激しくなり、極端な雨の日が多くなると、水質に影響が出る。降雨が激しくなると、流出量が増加し、堆積物の負荷量が増加し、洪水が増加する。降雨イベントは、動物の排泄物や下水が地表水に流れ込むため、水質の低下と関連している。洪水や極端な降雨イベントは、施設に障害を与え、堆積物や汚濁物質の負荷が大きいと、浄水処理が効かなくなる可能性がある *(5)*。タンザニア連合共和国のように、地下水の涵養がこれらの異常気象に関連している場合、WSPにとって、急速な涵養期間中の地下水の水質変化を理解し、適切な管理策を講じることが重要である。

現在のところ、タンザニア連合共和国でのWSPの導入実績の記録は限られている。水源の信頼性を向上させるなど、他の形態の管理システムが実施されているが、これは代替水源が無い状況下での乾燥期間の長期化によって水源での加圧の可能性があるため、適応を支援し、レジリエンスを構築するためのものである。しかし、WSPは、気候変動にともなう潜在的な水供給と水サービスへの影響を分析するための、より全体的なアプローチを支援する。

要約すると、タンザニア連合共和国のように、気候変動予測の一部に不確実性が高い地域では、WSPは、より確信が持てる部分に適応することに焦点を当て、チームが地域の最新の予測を常に把握していることを確認すべきである。タンザニア連合共和国では、降水量の変動性が大きくなり、降水が激しくなることへの適応に重点を置くことが、雨量が多くなっても、乾燥していても、レジリエンスを構築するのに役立つだろう。

付録4　参考文献

1. Niang I, Ruppel OC, Abdrabo MA, Essel A, Lennard C, Padgham J et al. Africa. In: Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Part B: Regional aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Barros VR, Field CB, Dokken DJ, Mastrandrea MD, Mach KJ, Bilir TE et al., editors). Cambridge, United Kingdom, and New York, United States of America: Cambridge University Press; 2014:1199–265.
2. Booth B, Rowell D, Nicholson SE, Good P. Reconciling past and future rainfall trends over East Africa. Abstract GC53B-0521. Fall Meeting Abstracts, American Geophysical Union; 2014.
3. Graham R, Rowell D, Vellinga M. Drivers of multi-decadal variability and change in West and East Africa. Presentation at Climate Change and Development in Africa 4, Marrakech, 8–10 October 2014 (http://www.climdev-africa.org/sites/default/files/ccda4documents/1.1.2.%20Richard%20Graham.pdf, accessed 20 March 2017).
4. Taylor RG, Todd MC, Kongola L, Maurice L, Nahozya E, Sanga H et al. Evidence of the dependence of groundwater resources on extreme rainfall in East Africa. Nature Climate Change. 2013;3(4):374–8.
5. Charles K. Climate change. In: Bartram J, with Baum R, Coclanis PA, Gute DM, Kay D, McFayden S et al., editors. Routledge handbook of water and health. London and New York: Routledge; in press.

付録5　エチオピアの事例研究：エチオピアの水供給における気候変動への対応

エチオピア国南部緒民族州（Southern Nations, Nationalities, and Peoples' Region: SNNPR)、メスカン地区、小規模コミュニティ管理の水道事業

エチオピア国南部緒民族州メスカン地区のエリー村は、気候にレジリエントなWSPを実施するコミュニティ管理型水供給施設の試行箇所の一つであった。

試行区域のほとんどの水源では、開発や建設の際に洪水の影響を考慮していない。このため、雨季の洪水時には機能しない水源や公共の噴水がある。しかし、気候にレジリエントなWSPの開始後、WSPチームはそれぞれのコミュニティと資源を動員して分水溝を掘ることで、雨季ごとに発生しエリー村コミュニティの住民への安全かつ十分な水供給の妨げとなっていた、集中的な洪水の危害から水源を保護している。

雨季の期間中、洪水は重大な問題であり、水源の汚染や氾濫により、清浄な水の供給を妨げる。そのため、コミュニティの住民は代替の水源を探さざるを得なくなり、そのほとんどが池や河川水などの改善されていない水源であった。さらに、気候にレジリエントなWSPチームは、水源がフェンスで囲まれておらず、農業活動が水源の近くで行われていることを確認した。

気候変動にレジリエントなWSPの訓練を受けた後、WSPチームは、農業活動が水供給に重大な危害であることをエリー村の行政組織と合意した。

現在、水源に近い農業活動の移転に向けた取り組みが進められている。農業活動の移転後は、水位を保全し維持するために在来樹木を植樹する計画が立てられている。

エチオピアにおける気候に対してレジリエントな水安全計画のための政策形成

気候の変動と変化は、水分野を含むほぼすべての社会・経済分野に影響を与え、重大な結果をもたらしている。エチオピアの気候は、多様な地理的条件のため、複雑で変化に富んでいる。気候変動は、エチオピアの水資源の利用可能性と安全性に大きな影響を与える可能性がある。気候の変動と変化の影響のいくつかは、洪水や干ばつなどの異常気象イベントの増加として、また、水系感染症の発症数の増加、水質の悪化、エネルギー需要の増加として表れている。

図A5.1　エリー村のコミュニティは、6,000人以上の人々が恩恵を受ける唯一の水源を守るため、自らの資源を動員して250 mの分水溝を掘った.

図A5.2　エリー村の水源付近での農業活動を見せる地区の水事務所の職員、シャフィ氏.

エチオピアでは、体系的かつ包括的な水質監視と評価が行われておらず、WASHプログラムに関連した疾病の集団発生や健康問題が報告された場合に、臨時の水質検査を行うのみである。そのため、ほとんどの機関や組織では、継続的かつ包括的な水質監視とサーベイランス活動が行われていない。エチオピア政府は、「レジリエントなWASHプログラムを通じて後発開発途上国の保健分野における気候変動への適応策を構築する」プロジェクトの結果として、気候に関連するリスクを考慮、評価、管理し、水源から使用箇所までの水の安全性を確保するため、気候にレジリエントなWSPに関する政策およびガイドライン文書を策定し、承認した。関連する対策は、エチオピアの国家WASHプログラムの一環として実施されている。政策およびガイドラインの文書は、国内のさまざまな部門やWASHプログラム開発パートナーがより広く利用できるように配布された。

図A5.3　エチオピア国における気候に対してレジリエントなWSPに関する国家政策とガイドライン文書.

エチオピア国アムハラ州南アシェファー地区

ラリベラ村は、アムハラ州の南アシェファー地区に位置している。ラリベラ村のコミュニティ管理水供給施設は、エチオピアにおける気候に対してレジリエントなWSPのパイロット実施箇所であった。この村の水源は、特に雨季には洪水による被害や汚染のリスクにさらされていた。訓練の後、気候に対してレジリエントなWSPチームは洪水によるリスクを同定し、コミュニティを動員して分水溝を掘り、水供給施設を被害や汚染リスクの可能性から保全する対策を講じた。現在、長期的には（ザブジ川からの）洪水リスクから水源を守るために、標準的な分水溝の建設が計画されている。また、水源を豪雨から保護し、水の涵養を改善するために、水源の周囲に在来樹木が植えられた。井戸水源を保護するため、適切なフェンスが建設された。気候に対してレジリエントなWSPチームは、また、老朽化し錆びて損傷した貯水槽は、著しい水の浪費を招くだけでなく、公衆衛生上の危害をもたらすかもしれないと認識した。そのため、WASHプログラム委員会は、気候に対してレジリエントなWSPチームと協力して、地域の水道局の支援を得て、交換のための資金を調達するように地域住民に働きかけた。

図A5.4　コミュニティは、潜在的な洪水による被害や汚染から水供給施設を保護するために、分水溝を掘り、土着の樹木を植えた．適切なフェンスも建設された．

図A5.5　アムハラ州ラリベラ村にて長年に亘り漏水して錆びていた貯水槽．地上にあるものは、古いものに交換予定の新しい貯水槽である．

付録6　バングラデシュの事例研究：塩分濃度が飲料水源に与える影響

塩分濃度がバングラデシュの飲料水源に与える影響

バングラデシュは、世界気候リスク指数によると、異常気象に対して最も脆弱な国である。バングラデシュの脆弱性は、広大な沿岸地域、人口密度の高さ、天然資源への依存度に起因している。IPCCの2007年の報告書では、地球温暖化による海面上昇により、2050年までにバングラデシュの17%が浸水し、2000万人の難民が発生すると予測している。

沿岸地域の脆弱性は、ここ数十年の間にサイクロン、高潮位、暴風雨、洪水、塩水の浸入などの異常事象の影響が増大しているために増大している。これらの異常事象は、地下水と地表水の両資源の水質と水量に影響を与えている。過去30年間で、塩水の影響を受ける地域は26%増加した *(1)*。

2011年の国の統計によると、約88%の人々が、飲用や家庭用に管井戸を通じて安全な地下水を利用しているが、気候の脆弱性と適応に関する最近の現地調査では、この地域における安全な飲料水の利用可能性が減少しており、沿岸部の人々の50%は、飲料水や家庭用水を池や水路、河川などの安全でない水源から直接採取せざるを得ないことが明らかになった。これらの水源は、地表面流出や塩分濃度の高い水の侵入によって汚染されつつある。多くの浅井戸の塩分濃度は、使用できなくなって放棄されるレベルまで上昇している。また、水位が低下しているため、より深く、より高価な井戸を掘り下げる必要がある。いくつかの地域では、利用可能な帯水層が無いため、このような深い管井戸を選択することさえ成功していない。通常の潮位は干潮時と満潮時の両方で上昇しており、一部の地域では不規則な浸水の問題を引き起こしている。管井戸の金属部分が腐食による影響を受けている。沿岸のコミュニティでは、子供の間で肺炎、下痢、赤痢、発熱などの健康問題が増加しており、成人の間では下痢、チフス、胃痛などが発生している。

沿岸地域は平均海抜3 mの低地で平坦である。2007年のサイクロン「Sidr」と2008年の「Aila」では、海水が堤防を破り、塩水が内陸部に侵入して、池や運河、河川などの地表の真水の資源が長期にわたって破壊された。

バングラデシュにはインドとの国境を越える54の河川がある。過去数十年の間、これらの河川は主要河川を通ってベンガル湾に急流となる水を運び、海の塩水が内陸に移動するのを抑制していた。しかし近年では、インドによるこれらの河川の管理により貫流が減少し、真水と塩水の自然バランスに影響を与え、塩水が徐々に内陸に移動していく。地表水域が塩水化すると、帯水層の涵養という自然現象により、上層の浅い帯水層が地表水からの塩分汚染を受けやすくなる。また、河川流量の減少は、堆積による河床水位の上昇をもたらす。

気候の変動と変化がもたらすリスクに取り組むことを目的に、バングラデシュは、英国のDFIDの支援を受けて「レジリエントなWASHを通じた後発開発途上国の保健医療における気候変動への適応の構築」に関するプロジェクトを実施している4つのパイロット国の一つである。このプロジェク

トは気候の変動と変化がもたらすリスクに取り組むことを目的としており、気候変動にレジリエントなWSPの実施が含まれている。沿岸地域のコミュニティは、雨水を塩分の多い井戸水に混ぜて希釈して味を良くしたり、硫酸アルミニウム（ミョウバン）や塩素タブレットを使って汚れた地表水を浄化したり、緊急時に備えて家庭に飲料用の安全な貯水槽を作ったり、布を重ねて作った自家製フィルターを使って池の水をきれいにしたりと、さまざまな方法で困難な状況に適応するための努力を行っている。沿岸部の人々は、飲料水以外の生活用水に池や川の水などの地表水を利用することで、飲料水の制限に対応している。

付録6　参考文献

1. Mahmuduzzaman M, Ahmed ZU, Nuruzzaman AKM, Ahmed FRS. Causes of salinity intrusion in coastal belt of Bangladesh. International Journal of Plant Research. 2014;4(4A):8-13.

公衆衛生と環境

本ガイダンスは、気候変動が水循環におよぼす影響とそれにともなう健康への影響に関する現在の知見を示しており、水安全計画（WSP）アプローチに取り組んでいる、あるいは既に利用している水供給事業者を助けること、気候変動の問題をより深く理解すること、WSP プロセスの中で気候変動リスクの特定や管理を支援することを目的としている。

本文書は、部門の専門家、特に水供給事業者や WSP チームが、WSP プロセスへの重要な貢献アプローチとして、気候変動、災害リスク低減（DRR）、統合水資源管理（IWRM）の広範な問題を特定し、取り入れることを支援する。

国立保健医療科学院
National Institute of Public Health