

## 5.4-3 海面上昇等による塩水遡上の河川への影響調査

### 5.1 概要

#### 5.1.1 背景・目的

京都府舞鶴市では、日本海に注ぐ一級河川である由良川から上水の取水を行っている。取水場は河口から約 17 km 上流にあるが、この取水場およびさらに約 2.5 km 上流の補助取水場(図 5.1-1)まで塩水が遡上する現象が発生しており、対策として取水量の調整や防潮幕の設置が必要となっている。また、将来の気候変動による海面の上昇や降水量の変化によって、塩水の遡上距離がさらに延びる可能性がある。特に渇水期においては、通常より上流まで塩水が遡上し、一時的に取水を停止せざるを得ない状況が発生しているが、国内で気候変動と塩水遡上の関係性について明らかにした研究は少ない。

本調査では、由良川をモデル河川として、気候変動による海面上昇等が塩水遡上に与える影響の評価を実施することを目的として調査を行った。

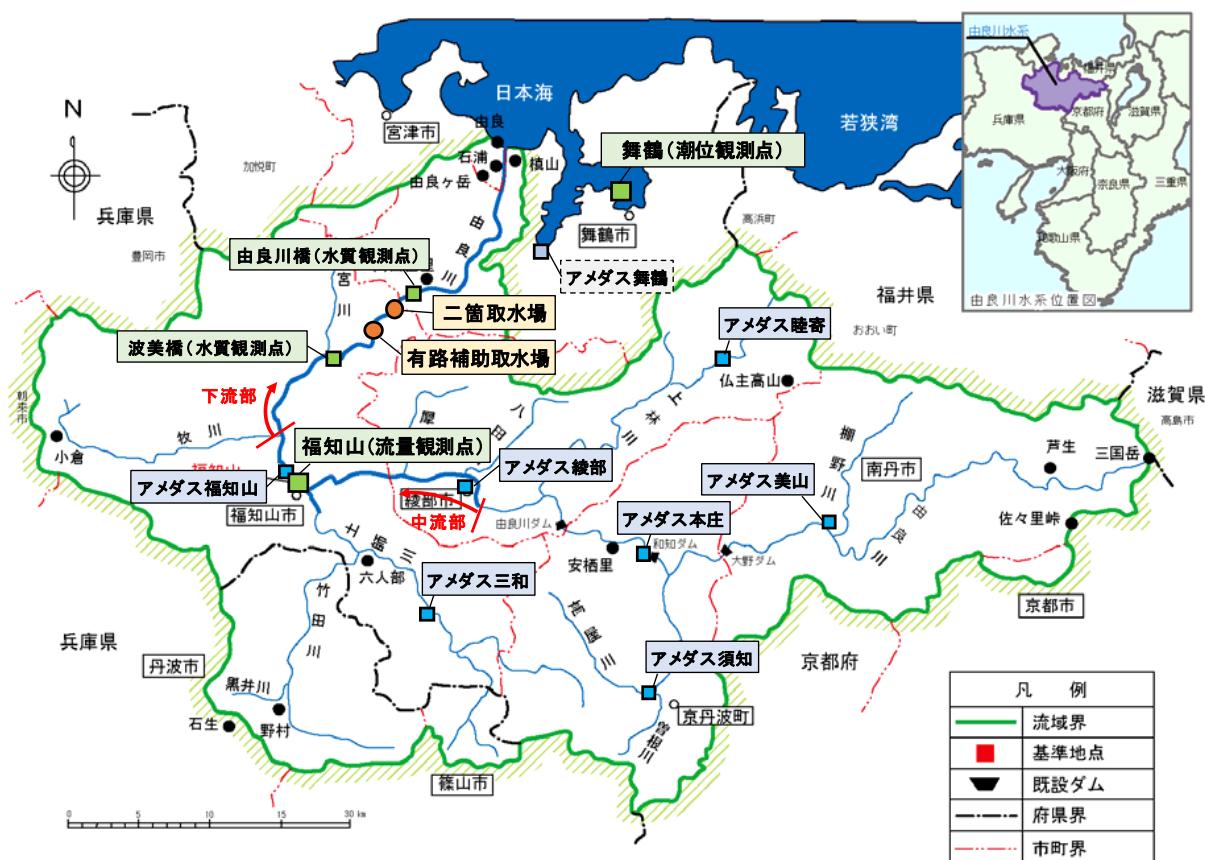


図 5.1-1 由良川流域及び取水場・各観測地点等の位置図

出典:「由良川水系河川整備計画【国管理区間】」(平成 25 年 6 月) (近畿地方整備局)  
(<http://www.kkr.mlit.go.jp/fukuchiyama/river/honbun.pdf>) 図 1.3.1 をもとに作成

## 5.1.2 実施体制

本調査の実施者：一般財団法人日本気象協会、神戸大学

(河川の流量推定、塩水遡上のシミュレーションは神戸大学が実施)

アドバイザー：神戸大学大学院工学研究科 教授 中山 恵介

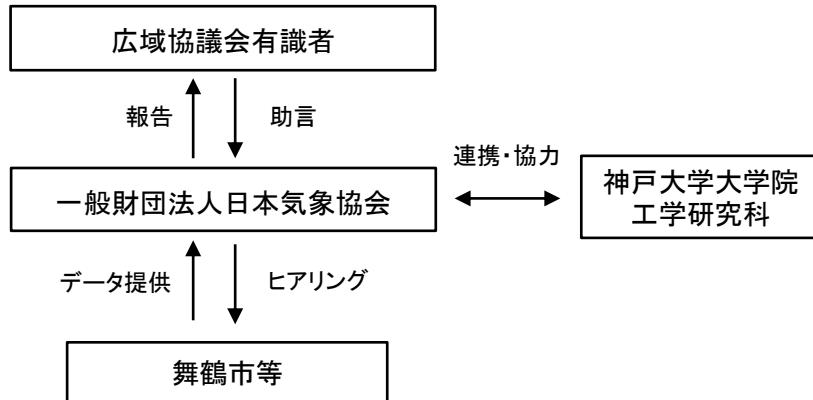


図 5.1-2 実施体制図(調査項目 4-3)

## 5.1.3 実施スケジュール(実績)

本調査では、平成 29 年度から平成 31 年度の 3 年間で、由良川における気候変動による海面上昇等が塩水遡上に与える影響を調査し、将来の影響評価及び適応策の検討を行った(図 5.1-3)。

平成 29 年度は、既存知見の収集整理を行うとともに、由良川を対象に過去の河川流量、潮位、塩分に関する資料や観測データを収集し、それらの関係性解析を行った。

平成 30 年度は、気候シナリオの降水量から推定した河川流量を用いて、環境流体モデル(Fantom)による塩水遡上のシミュレーションを行い、取水場付近の塩分や塩水遡上距離の変化等について影響評価を実施するとともに、適応策の検討を行った。

平成 31 年度は、河川流量の推定方法について改良を行うとともに、気候シナリオの海面水位上昇も考慮したシミュレーションを実施し、影響評価の精緻化を行った。その結果をもとに適応策を再検討し、他地域への拡張性についても検討した。

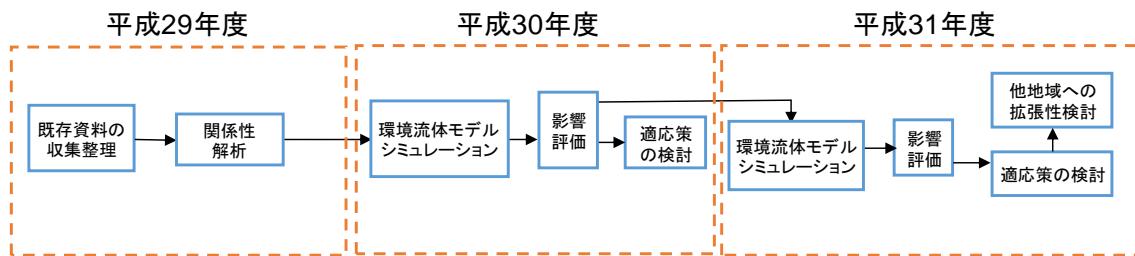


図 5.1-3 本調査の実施フロー(調査項目 4-3)

#### 5.1.4 気候シナリオ基本情報

本調査で利用した気候シナリオの基本情報を表 5.1-1 に示す。

表 5.1-1 気候シナリオ基本情報(調査項目 4-3)

項目	由良川の流量及び塩水遡上	
気候シナリオ名	NIES 統計 DS データ	海洋近未来予測力学的 ダウンスケーリングデータ by SI-CAT ver.1
気候モデル	MRI-CGCM3、MIROC5	MRI-CGCM3
気候パラメータ	降水量	海面水位
排出シナリオ	RCP2.6 及び 8.5	RCP2.6 及び 8.5*
予測期間	21世紀中頃、21世紀末 / 月別・日別	
バイアス補正の有無	あり(全国)	なし

\*21世紀中頃は RCP8.5 のみ、21世紀末は RCP2.6 と RCP8.5 のデータがある。

#### 5.1.5 気候変動影響予測結果の概要

由良川における将来の河川流量及び海面高度の変化傾向から、取水場付近における塩水遡上の影響予測を実施した。その結果、下記のような可能性が示唆された。

- 無降水(少雨)日は現在よりも増えるが、総降水量も増えるため、塩水遡上が生じやすい時期(5月～11月)における河川流量は、現在よりも若干増加する可能性がある(表 5.1-2)。一方で海面水位は、RCP8.5 シナリオでは 21世紀中頃で 22cm 程度、21世紀末には 79cm 程度上昇する(表 5.1-3)。

表 5.1-2 5～11月における流量の出現頻度(MRI-CGCM3)

	流量 $24m^3/s$ 以下	流量 $20m^3/s$ 以下	流量 $16m^3/s$ 以下
	現在	21世紀中頃・RCP2.6	21世紀中頃・RCP8.5
現在	16%(年 34 日)程度	6%(年 13 日)程度	2%(年 5 日)程度
21世紀中頃・RCP2.6	15%(年 33 日)程度	6%(年 14 日)程度	2%(年 4 日)程度
21世紀中頃・RCP8.5	14%(年 30 日)程度	5%(年 11 日)程度	2%(年 4 日)程度
21世紀末・RCP2.6	12%(年 26 日)程度	5%(年 10 日)程度	1%(年 2 日)程度
21世紀末・RCP8.5	13%(年 27 日)程度	4%(年 9 日)程度	1%(年 2 日)程度

表 5.1-3 若狭湾の海面水位上昇(年平均)

	シナリオ	21世紀中頃		21世紀末	
		平均	予測幅	平均	予測幅
若狭湾の海面水位 上昇(cm)	RCP2.6	-	-	42	38～47
	RCP8.5	22	16～29	79	66～92

(注) 海洋近未来予測力学的ダウンスケーリングデータ by SI-CAT ver.1 (MRI-CGCM3) の値に、IPCC 海洋・雪氷圈特別報告書による全球平均海面水位上昇を足し合わせた値。

- 海面水位上昇を踏まえた河川内の塩水遡上のシミュレーションを行ったところ、将来は塩水遡上距離がさらに延びるとともに、取水場付近の高塩分が長時間継続する恐れがある。特に21世紀末においては、流量が比較的多いケースにおいても、各取水場付近の塩分は現在よりも高くなり、遡上距離も延びることが予測される(図5.1-4)。

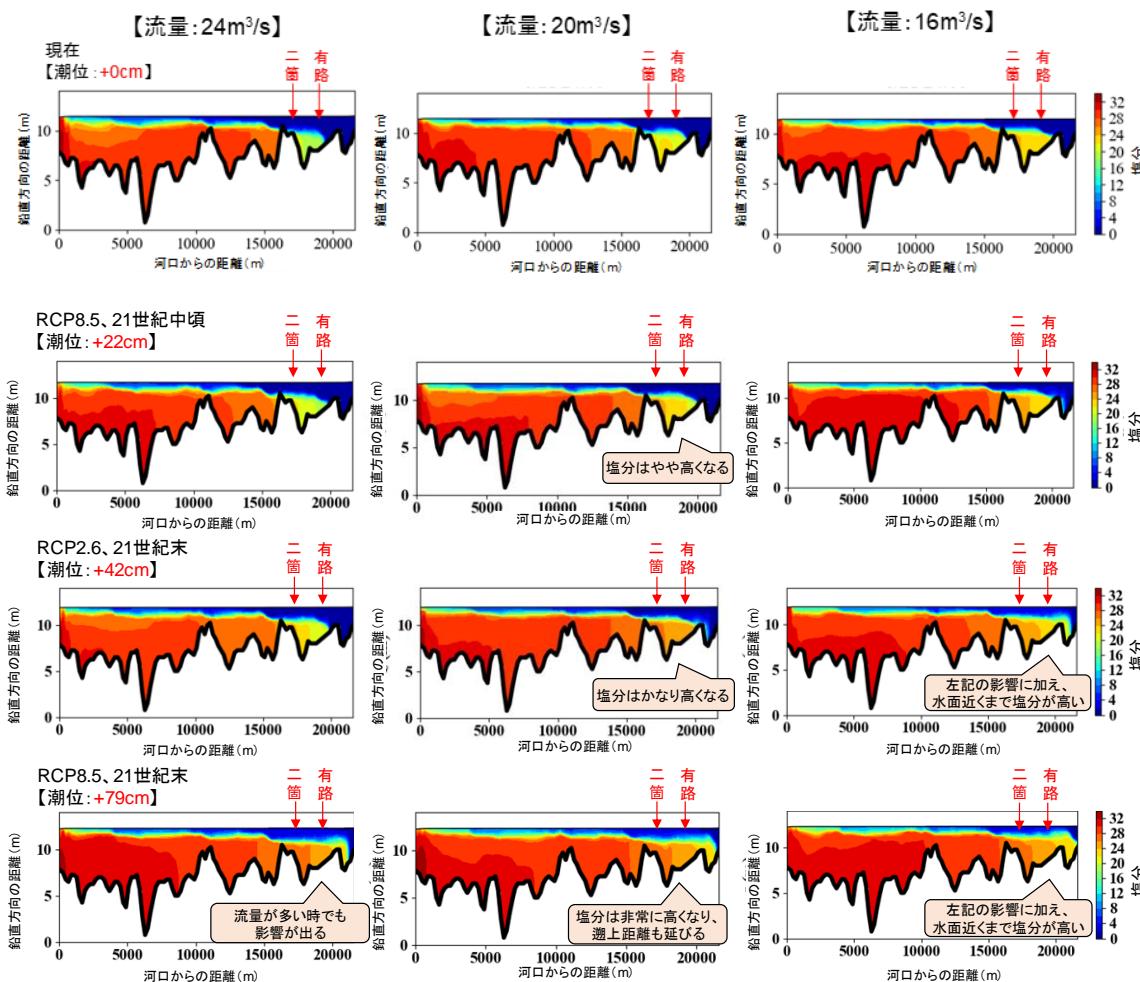


図5.1-4 潮位が上昇したケースにおける塩水遡上のシミュレーション結果  
(塩水が最も遡上したタイミングの塩分分布)

潮位は海洋近未来予測力学的ダウンスケーリングデータ by SI-CAT ver.1 (MRI-CGCM3) の値に、IPCC 海洋・雪氷圈特別報告書による全球平均海面水位上昇を足し合わせた値。

## 5.1.6 活用上の留意点

### 5.1.6.1 本調査の将来予測対象とした事項

本調査では、由良川流域における降水量の変化による由良川の流量変化と、若狭湾における海面水位の変化が、取水場付近の塩分の状況や塩水の遡上距離に与える影響を予測対象とした。

### 5.1.6.2 本調査の将来予測の対象外とした事項

塩水遡上には河床状況の変化も影響すると考えられるが、本調査において気候変動影響予測を実施するに当たり、降水及び海面水位の変化以外の影響は考慮していないことに留意が必要である。

### 5.1.6.3 その他、成果を活用する上での制限事項

塩水遡上の状況は河川の地形によって異なっており、また日本海側と太平洋側、瀬戸内海沿岸等では、日々の干満差の違いにより塩水の混合状況が異なる可能性がある。そのため、本成果の他地域への展開にあたっては、河川の地形や塩水の混合状況を踏まえて予測を行う必要がある。

### 5.1.7 適応オプション

適応オプションを表 5.1-4 に整理する。なお適応オプションの検討にあたっては、防災や農業、自然生態系等、他分野とのトレードオフには十分に注意する必要がある。

表 5.1-4 適応オプション(調査項目 4-3)

適応オプション	想定される実施主体			評価結果							
	行政	事業者	個人	現状			実現可能性			効果	
				普及状況	課題	人的側面	物的側面	コスト面	情報面	効果発現までの時間	期待される効果の程度
①適切なタイミングでの防潮幕の設置	●	●		普及が進んでいる	・幕には隙間があるため、塩水遡上を完全に防ぐことはできない。 ・事前(1週間程度前)に塩水遡上の可能性を予測する必要がある。 ・大雨の際に取り外しが必要。	◎	○	◎	◎	短期	中
②流量の調整	●			普及が進んでいない	・河川管理者及びダム管理者、他の水利用者(農業利用等)との調整が必要となる。 ・渇水が続いた場合、十分な流量を継続させることが難しいと想定される。	△	○	△	△	短期	中
③取水高さの変更／取水口の移設／貯水池の設置	●			普及が進んでいる	・コストがかかる他、将来の遡上の状況を踏まえ適切な位置・規模を設定する必要がある。 ・貯水池の設置には十分な広さの土地が必要であるが、由良川沿いで確保するのは難しい。	△	○	△	◎	短期	中
④河川内構造物(堰等)の設置／河床形状の変更等	●			普及が進んでいる	・河川整備計画等との整合をとる必要があるほか、河川生態系への影響や治水面への配慮など、クリアすべき課題が非常に多い。	△	○	△	◎	短期	高

表 5.1-5 適応オプションの根拠(調査項目 4-3)

適応オプション	適応オプションの考え方と出典
①適切なタイミングでの防潮幕の設置	防潮幕の設置は舞鶴市すでに実施中(設置時期は例年、梅雨明け～秋頃)。塩水遡上の可能性やタイミングを事前に予測し、設置時期を判断する
②流量の調整	塩水遡上が見込まれるタイミングで、上流側の放流量を増やす(もしくは取水量を減らす)ことにより、取水場付近の流量を一定以上確保する。塩水遡上防止のための流量調整は、他河川を含め実施事例が確認できていない。
③取水高さの変更／取水口の移設／貯水池の設置	取水口の移設については、取水場をより上流へ移設する、取水管を上流へ延長する、または上流側に簡易水路を設置するといったいくつかのパターンが想定される。貯水池については、北海道で実施実績がある。
④河川内構造物(堰等)の設置／河床形状の変更等	取水場より下流側に、河川内構造物(堰等)を設置する。もしくは、塩水が遡上しにくくするに河床形状を変更する。堰については、長良川、淀川等で設置されている。

## 5.2 気候シナリオに関する情報

### 5.2.1 気候シナリオ基本情報

本調査で利用した気候シナリオの基本情報を表 5.2-1 に示す。

表 5.2-1 気候シナリオ基本情報(調査項目 4-3):再掲

項目	由良川の流量及び塩水遡上	
気候シナリオ名	NIES 統計 DS データ	海洋近未来予測力学的 ダウンスケーリングデータ by SI-CAT ver.1
気候モデル	MRI-CGCM3、MIROC5	MRI-CGCM3
気候パラメータ	降水量	海面水位
排出シナリオ	RCP2.6 及び 8.5	RCP2.6 及び 8.5*
予測期間	21世紀中頃、21世紀末 / 月別・日別	
バイアス補正の有無	あり(全国)	なし

\*21世紀中頃は RCP8.5 のみ、21世紀末は RCP2.6 と RCP8.5 のデータがある。

### 5.2.2 使用した気候パラメータに関する情報

#### 5.2.2.1 降水量

現在と将来の月降水量の比較は表 5.2-2 及び図 5.2-1、図 5.2-2 の通りであり、21世紀末、特に RCP8.5 では降水量が若干増える傾向にある。一方で、日降水量の頻度分布のうち雨量が少ないケースに着目すると、将来のほうが無降水及び 1mm 未満の少雨の日数が増えることが推定された(詳細は気候シナリオの再現性および妥当性の検証資料を参照)。

表 5.2-2 観測値とシナリオの月合計降水量の平均値比較  
(由良川流域(福知山より上流)のアメダス 7 地点平均)

モデル	シナリオ	現在	21世紀中頃	21世紀末
MRI-CGCM3	RCP2.6	132.1 mm	137.8 mm	143.0 mm
	RCP8.5		137.7 mm	148.0 mm
MIROC5	RCP2.6	143.4 mm	145.6 mm	147.4 mm
	RCP8.5		136.7 mm	154.3 mm

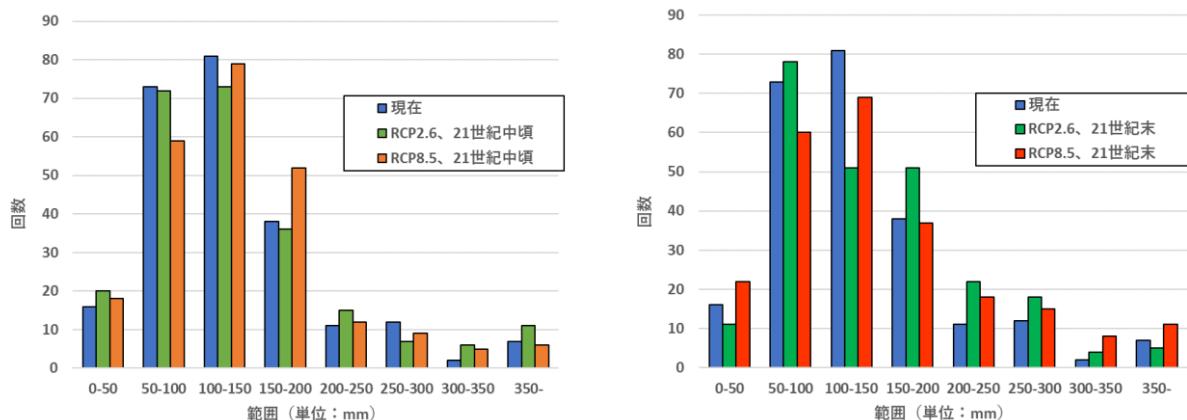


図 5.2-1 月別降水量の現在と将来の頻度分布比較(MRI-CGCM3)

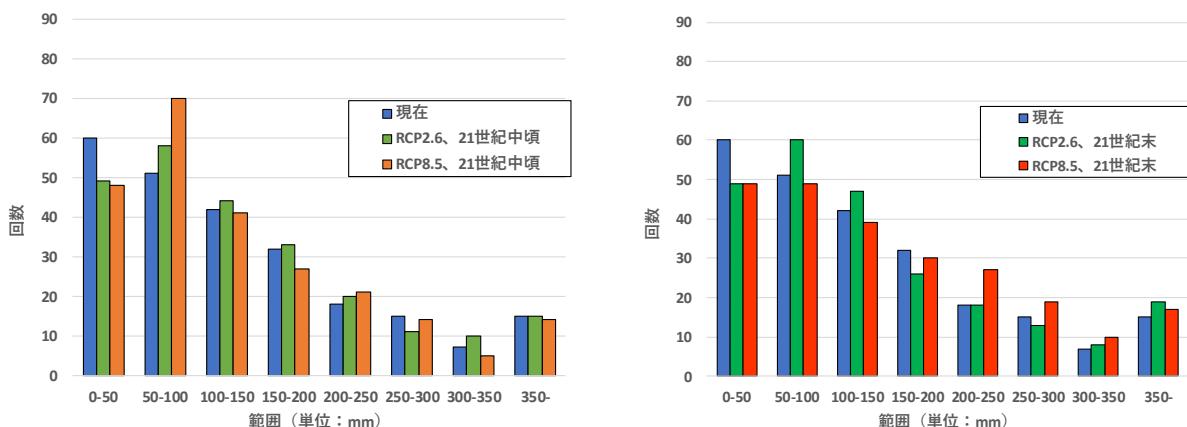


図 5.2-2 月別降水量の現在と将来の頻度分布比較(MIROC5)

### 5.2.2.2 海面水位

海面水位の上昇量は、全球における海水の熱膨張や氷床等の流入についても考慮するため、海洋近未来予測力学的ダウンスケーリングデータ by SI-CAT ver.1 の現在と将来の差分(図 5.2-3)に、全球平均海面水位上昇分(表 5.2-3)を足し合わせて求めた。

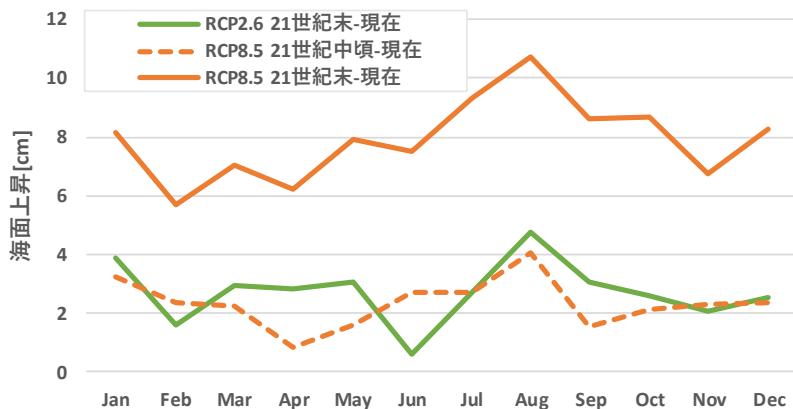


図 5.2-3 海洋近未来予測力学的ダウンスケーリングデータ  
by SI-CAT ver.1 による海面水位上昇 (MRI-CGCM3)

表 5.2-3 IPCC 海洋・雪氷圏特別報告書による全球平均海面上昇

	シナリオ	2031－2050		2081－2100	
		平均	年平均の範囲	平均	年平均の範囲
世界平均	RCP2.6	17	13～22	39	35～44
海面水位上昇(cm)	RCP8.5	20	14～27	71	58～84

### 5.2.3 気候シナリオに関する留意事項

今回の検証対象となった気象要素のうち降水量に関しては、MRI-CGCM3 については追加的な補正の必要はなく調査への利用が妥当と考えられる。一方で、日降水量での無降水もしくは少雨の頻度に着目すると、実測値と気候シナリオの現在との差が、現在と将来との差よりも大きかったが、追加的なバイアス補正による精度向上は困難であることから、将来の値については、降水の絶対量ではなく、シナリオの現在との間の相対的な比較により影響評価を行った。

### 5.2.4 バイアス補正に関する情報

地域事業における本調査のバイアス補正是行っていない。

### 5.2.5 気候シナリオ選択の理由

陸域のシナリオについては、バイアス補正済みである統計的ダウンスケーリングによるシナリオとして、NIES 統計 DS データを用いた。海洋シナリオは本事業で提供された唯一のシナリオである海洋近未来予測力学的ダウンスケーリングデータ by SI-CAT ver.1 を用いた。

## 5.3 気候変動影響に関する調査手法

### 5.3.1 手順

図 5.3-1 に示すフローに基づいて影響評価を行った。

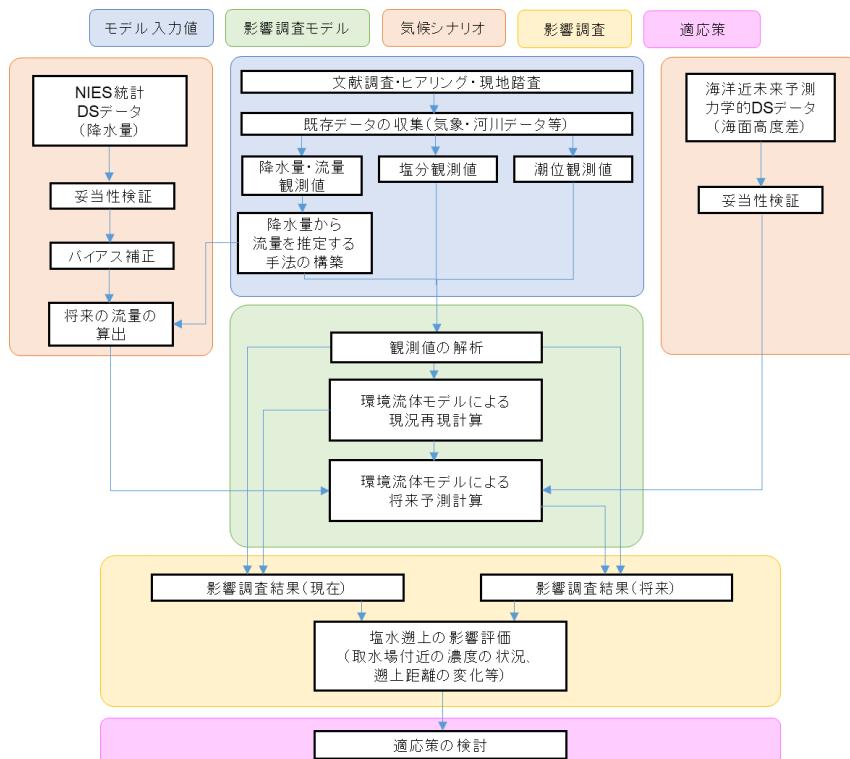


図 5.3-1 本調査の実施フロー(調査項目 4-3)

### 5.3.2 使用したデータ・文献

本調査では、主に舞鶴市が測定した塩化物イオン濃度を収集するとともに、国土交通省水文水質データベースや気象庁ホームページ等から河川流量や降水量、潮位等のデータを収集した(表 5.3-1)。観測地点等の位置は図 5.1-1 のとおりである。

また、収集した文献のうち主なものを表 5.3-2 に示す。なお、文献調査結果の概要については 3.3.4 (1)文献調査結果で後述する。

その他、収集したデータ及び文献の一覧については収集データリスト及び参考文献リストを参照のこと。

表 5.3-1 収集データ概要(調査項目 4-3)

収集データ		出典・提供元	備考
塩化物イオン濃度	取水場ゲート前及びゲート内(時別値)、由良川内地点別・水深別(塩水遡上時)[2001~2017年]	舞鶴市上下水道部	—
	由良川橋・波美橋地点(月別値)[2003~2017年]	国土交通省 水文水質データベース	—
河川流量	福知山地点(日別値、一部時別値)[1988~2018年]	国土交通省 水文水質データベース	公開データで確定値が得られるのは2018年まで
	福知山地点(日別値、一部時別値)[2017~2019年]	京都府河川防災情報	閲覧時より400日以内の流量が速報値として確認できる。
河川水位	取水場ゲート前(時別値)[2001~2017年]	舞鶴市上下水道部	—
	福知山地点(時別値)[2001~2017年]	国土交通省 水文水質データベース	—
降水量	アメダス(美山・睦寄・須知・本庄・綾部・三和・福知山)(時別値、日別値、月別値)[1988~2019年]	気象庁ホームページ	由良川流域のアメダス7地点
潮位	潮汐観測資料(舞鶴)(時別値)[2001~2019年]	気象庁ホームページ	—
由良川河川図	縦横断測量図[2012年、2017年]	国土交通省 近畿地方整備局	モデル計算に利用
その他	調査幕(防潮幕)架設期間一覧	舞鶴市上下水道部	—
	由良川水利権調書 河川台帳附図	国土交通省 近畿地方整備局	参考資料として確認
	河口部(砂州)の航空写真	国土地理院地図・空中写真閲覧サービス	参考資料として確認

表 5.3-2 (1) 主な収集文献

文献	概要
中本篤嗣, 新谷哲也, 中山恵介, 丸谷靖幸, 石田哲也, 法村賢一, 2011: 海面上昇を考慮した釧路湿原への塩水遡上の影響評価, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.67, No.4, L1351-L1356.	地球温暖化に伴う海面上昇による新釧路川の塩水遡上形態の変化に着目し、地球温暖化が釧路湿原に及ぼす影響について考察したもの。
新谷哲也, 中山恵介, 2013: 網走川河口域で発生する塩水遡上に関する数値的検討, 水工学論文集, 第57巻.	オブジェクト指向環境流体モデル(Fantom3D)を用いて網走川河口域で発生する塩水遡上現象の3次元解析を行ったもの。

表 5.3-2(2) 主な収集文献

文献	概要
Nguyen, D. K., A. Kotera, T. Sakamoto and M. Yokozawa, 2008: Sensitivity of Salinity Intrusion to Sea Level Rise and River Flow Change in Vietnamese Mekong Delta—Impacts on Availability of Irrigation Water for Rice Cropping, J. Agric. Meteorol. 64 (3): 167-176.	ベトナムのメコンデルタにおいて、乾季のメコン川の流量減少と海面上昇が塩水遡上と稲作に及ぼす影響を総合的に評価したもの。
Kasai, A., Y. Kurikawa, M. Ueno, D. Robert and Y. Yamashita, 2010: Salt-wedge intrusion of seawater and its implication for phytoplankton dynamics in the Yura Estuary, Japan, Estuarine, Coastal and Shelf Science 86, 408–414.	由良川における塩水遡上の程度と植物プランクトンの動態を把握するため、水文・生物学的条件をモニタリングしたもの。
Funahashi, T., A. Kasai, M. Ueno and Y. Yamashita, 2013: Effects of Short Time Variation in the River Discharge on the Salt Wedge Intrusion in the Yura Estuary, a Micro Tidal Estuary, Japan, Journal of Water Resource and Protection, 2013, 5, 343–348.	由良川河口における塩分分布を数値モデルで調べたもの。
Nakayama, K., D. H. Nguyen, T. Shintani and K. Komai, 2016: Reversal of secondary circulations in a sharp channel bend, Coastal Engineering Journal, Vol.58, 1650002	網走川の曲流部分の二次流を定量化するために、3次元数値モデル(Fantom3D)を使用した解析を行ったもの。
Nakayama, K., T. Shintani, K. Shimizu, T. Okada, H. Hinata and Katsuaki Komai, 2014: Horizontal and residual circulations driven by wind stress curl in Tokyo Bay, Journal of Geophysical Research, Vol.119, pp.1977–1992	野外観測や数値シミュレーション等を用いて、東京湾の水平循環と残差循環について調べたもの。

### 5.3.3 有識者ヒアリング

主な有識者ヒアリングの結果は表 5.3-3 のとおりである。

表 5.3-3(1) ヒアリング結果の概要

NO.	1
ヒアリング対象者	神戸大学 教授 中山恵介氏
日付	2017年10月16日 14:00～15:20
場所	神戸大学 工学研究科
概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 塩水遡上の既存研究としては、釧路川、網走川の例のほか、国交省が島根・鳥取で実施したもの、筑後川、小川原湖、印旛沼などがある。</li> <li>・ 再現計算をする場合、最も塩水が遡上しているときの潮位、流量、水位の時系列データがあると良い。</li> <li>・ 海面上昇については、湾内でも基本的には一律で上がると考えてよい。外海の上昇値をそのまま用いればよいだろう。潮汐については、気圧の変化も数十 cm 単位で効いてくるので注意が必要である。</li> <li>・ 網走川では、「塩水遡上堰」（河床に設置する可動式のもの）が効果を発揮している。ただし、強混合の場合はあまり効果がない。ほかに、底水路の設置や、河川断面を広く浅くするといった方法もある。それなりに費用がかかるが、防潮幕にも毎年の設置・維持費がかかるということであれば、コスト的には検討の余地はあるだろう。</li> <li>・ 農業用水を河川に戻す場所を工夫するといった方法も有用ではないか。ソフト面では、広域での利水計画の策定も重要であろう。</li> </ul>

表 5.3-3 (2) ヒアリング結果の概要

NO.	2
ヒアリング対象者	近畿地方整備局 河川部河川計画課 課長補佐 吉田公則氏
日付	2017年12月4日 13:00～13:50
場所	国土交通省近畿地方整備局
概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>・由良川の河川横断図は、200m ピッチで作成されている。</li> <li>・由良川の河床は、出水のたびにある程度変化しているかとは思うが、そこまで顕著ではないだろう。また、河川整備については人口の多い中流部（綾部・福知山周辺）の築堤等が中心で、下流部での工事（掘削等）はさほど実施していない。</li> </ul>

NO.	3
ヒアリング対象者	瀬戸内海区水産研究所 資源生産部長 小畠泰弘氏、 京都大学 教授 白岩立彦氏、 京都大学 教授 中北英一氏、 大阪府立大学 教授 吉田篤正氏
日付	2018年1月17日 15:00～17:00
場所	一般財団法人日本気象協会 関西支社
概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>・一定以上の潮位かつ一定以下の流量でも、塩分が高くない点も存在する。どういった理由でその差が生じたのか確認しておくと良い。</li> <li>・降水量と流量の関係を議論するのであれば、流量の多いところを省くなど、低水側に注目すべき。</li> <li>・日降水量を用いて流量を推定する場合には、簡単なタンクモデルの利用などを想定したほうが良い。</li> </ul>

NO.	4
ヒアリング対象者	神戸大学 教授 中山恵介氏、 舞鶴市上福井浄水場 場長 戸田篤志氏
日付	2018年5月14日 13:30～15:00
場所	舞鶴市 上福井浄水場
概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>・塩水遡上の原因の一つである潮位は、低気圧と干満の関係により数日のオーダーで変化するため、防潮幕を張るのに要する期間である一週間前に判断を行うのは難しいと思われる。一方で、流量の減少は一週間前からある程度予測できる可能性がある。</li> <li>・適応策として、北海道では土地が広いので貯水池を新たに作るような対策ができたが、舞鶴では難しいかもしれない。</li> <li>・河口砂州や中洲は残しておいたほうがよい。塩水遡上が軽減される。</li> <li>・特に弱混合の時は、風による影響を受けやすくなる。下流向きに風が吹いているほうが塩水は遡上しやすくなる。</li> </ul>

表 5.3-3 (3) ヒアリング結果の概要

NO.	5
ヒアリング対象者	京都大学 教授 白岩立彦氏、京都大学 教授 竹門康広氏 京都大学 教授 中北英一氏、神戸大学 教授 中山恵介氏 広島大学 元教授 橋本博明氏、大阪府立大学 教授 吉田篤正氏
日付	2018年12月18日 12:00～13:00、13:00～17:30
場所	一般財団法人日本気象協会 関西支社
概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>・塩水遡上に影響する要因としては、流量と潮位の時間変化のバランス、風、そして潮位(海面水位)が考えられる。</li> <li>・水温による影響は塩分濃度に比べると非常に小さいため、パラメータとして用いなくても問題ないだろう。</li> <li>・上流と、水深の浅いところの地形の変化は、塩水遡上に大きく影響する可能性がある。</li> <li>・海水と淡水の入り混じるところは生態学的に非常に重要であるため、適応策を検討する際には、エコトーンを損なわない観点も入れると良いだろう。</li> </ul>

NO.	6
ヒアリング対象者	神戸大学 教授 中山恵介氏
日付	2019年7月25日 15:00～16:30
場所	神戸大学 工学研究科
概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>・現在の流量について、速報値と確定値、福知山地点と波美地点で差異が見られるため、補正して計算する必要がある。</li> <li>・流量の設定にあたりタンクモデルを使用する場合、日降水量・日流量を用いて解析ができる。降水量は流域平均を用いる。</li> </ul>

NO.	7
ヒアリング対象者	神戸大学 教授 中山恵介氏
日付	2019年9月10日 13:30～14:45
場所	神戸大学 工学研究科
概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>・シミュレーションの結果、北風(下流から上流に向かう風)があると遡上が小さくなる。また、二箇取水場と有路補助取水場の間にある中州(またはその周辺の河床)を削った場合、二箇取水場の遡上のピーク値は下がる一方、有路補助取水場まで遡上する頻度が高くなる。天文潮位と観測潮位とで比較した場合、さほど大きな変化は見られなかった。</li> </ul>

NO.	8
ヒアリング対象者	京都大学 教授 白岩立彦氏、京都大学 教授 竹門康広氏、 京都大学 教授 中北英一氏、神戸大学 教授 中山恵介氏、 大阪府立大学 教授 吉田篤正氏
日付	2019年9月18日 13:00～17:30
場所	一般財団法人日本気象協会 関西支社

概要	<ul style="list-style-type: none"> <li>・5～11月頃において塩水遡上がりがみられやすい(冬季は顕著でない)理由としては、冬季は潮位が低いこと、北風が卓越すること、また農業取水がなくなること等が挙げられる。</li> <li>・影響評価結果と適応策については、ある程度定量的に示せると良い。</li> </ul>
----	---

### 5.3.4 観測および実証実験

本調査では観測及び実証実験は実施していない。

### 5.3.5 気候変動影響予測手法の検討

本調査での由良川の塩分への影響予測にあたり、有識者ヒアリングの結果及び本事業で提供される気候シナリオから、由良川の流量及び若狭湾の海面水位を評価した。

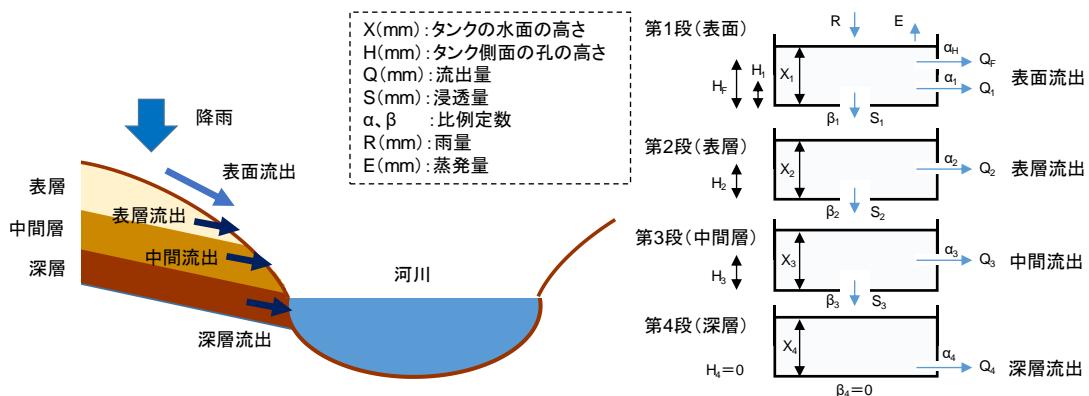
由良川の流量については、当初月降水量と月平均流量の相関から予測していたが、流域に貯留される水量も考慮することで精度が向上することが考えられたため、タンクモデルを利用することとした。また、海面水位は、海洋近未来予測力学的ダウンスケーリングデータ by SI-CAT ver.1 の現在と将来の差分に、全球平均海面水位上昇分を加えた。

河川内の塩分シミュレーションについては、おおまかな地形を考慮しつつ、流量および潮位の変化を詳細に考慮でき、また釧路川等の塩水遡上研究等で実績のある環境流体モデル(Fantom)を利用して行うこととした。

### 5.3.6 影響予測モデルに関する情報

#### 5.3.6.1 タンクモデル

タンクモデル法は、観測された降雨と河川流量の関係を流域単位でモデル化し、降水量から河川流量を推定する一般的な手法であり、流域をいくつかの流出孔を持つ容器の組み合わせに置き換えて計算する。今回の計算では、長期流出型4段タンクを用いた。本調査で用いたタンクモデルの概要と計算式は図5.3-2のとおりである。



各タンクの流出量Q、浸透量Sは、下記の式によって計算される。  

$$Q_F = \alpha_F(X_1 - H_F), Q_1 = \alpha_1(X_1 - H_1), Q_2 = \alpha_2(X_2 - H_2), Q_3 = \alpha_3(X_3 - H_3), Q_4 = \alpha_4(X_4 - H_4)$$
  

$$S_1 = \beta_1 X_1, S_2 = \beta_2 X_2, S_3 = \beta_3 X_3$$

貯留高X'は、下記の式のようになる。  

$$X'_1 = X_1 - Q_F - Q_1 - S_1 + R - E, X'_2 = X_2 - Q_2 - S_2 + S_1, X'_3 = X_3 - Q_3 - S_3 + S_2, X'_4 = X_4 - Q_4 + S_3$$

河川流量は、各タンクの流出量(mm)の総和として、 $Q(\text{m}^3/\text{s}) = qA/K$ となる。  
 $(q = Q_F + Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4, A: \text{流域面積} (\text{m}^2), K: \text{流量に換算する係数})$

図5.3-2 本調査で用いたタンクモデルの概要

係数は次のとおり；  $H_F = 50.0, H_1 = 20.0, H_2 = 15.0, H_3 = 15.0, \alpha_F = 0.25, \alpha_1 = 0.15, \beta_1 = 0.07$   
 $\alpha_2 = 0.10, \beta_2 = 0.09, \alpha_3 = 0.02, \beta_3 = 0.02, \alpha_4 = 0.001, \text{流出量・貯留高の初期条件: } 0.0 \text{ (mm)}$   
E:蒸発量:0 (mm/day, 降雨量>0), 4 (mm/day, 降雨量=0)、由良川の流域面積:1,882 km<sup>2</sup>

### 5.3.6.2 環境流体モデル(Fantom)

環境流体モデル(Fantom)は、河川内の地形等の複雑な研究領域の再現や気象や海洋等の様々なデータの導入が比較的容易な、環境流体のシミュレーションモデルである。本調査では、一般的な四角形セルを利用して由良川の河川内を再現し、塩分の遡上の状況を推定した。

本調査における塩水遡上の計算領域は、二箇取水場、有路補助取水場を含む河口から約22kmまでの範囲とした(図5.3-3)。由良川の地形は、実際には図5.1-1のように蛇行をしているが、精度を維持しつつ計算時間を短縮するため、本調査では川幅と水深は実際の地形と同じとしたまま、右岸と左岸の中心を軸に左右対称の地形として計算を行った。縦断方向のメッシュ間隔は200m、横断方向のメッシュ間隔は10mとし、鉛直メッシュ間隔は基準面から水面にかけて $0.25\text{m} \times 60$ 層とした。日本海からの流入海水については、水温は22.5(℃)、塩分は32.5(‰)を与えた。なお、二箇取水場、有路補助取水場いずれも由良川の右岸に取水口が設置されているため、本報告書における塩水遡上のシミュレーション結果(縦断面図)は、いずれも右岸側のものを示している。

環境流体モデル(Fantom)による塩水遡上の現況再現結果と、風の有無、潮位の上昇具合、地形改変による塩水遡上への影響のケーススタディの結果は、資料編に掲載する。

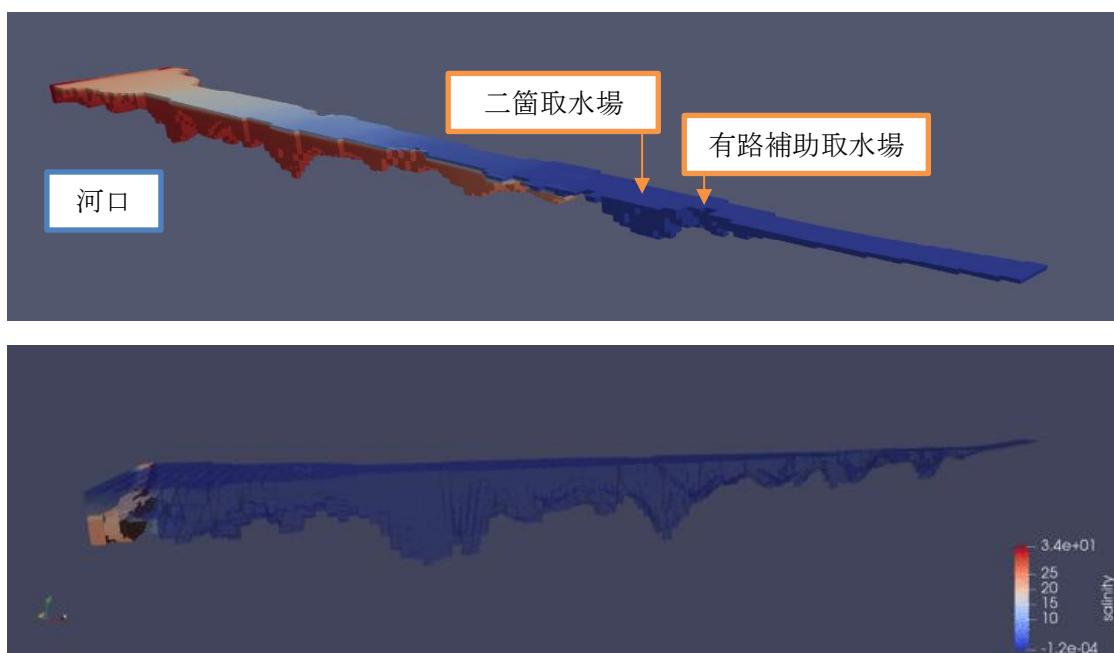


図5.3-3 本調査における塩水遡上の計算領域

### 5.3.6.3 観測値の解析

舞鶴市からの提供データ等の収集データをもとに解析した結果を以下に示す。

二箇取水場(由良川河口より約17km上流)においては、例年5月～9月頃にかけて塩水遡上の影響がみられ、12月頃まで影響が継続する年もある。由良川における塩水遡上

距離は、河川流量及び海面水位の影響を受けることが既往研究で指摘されており(Kasai et al. 2010)、本調査で収集したデータからも、潮位が一定以上かつ河川流量が一定以下の条件において、取水場付近への塩水遡上が集中することが確認された(図 5.3-4)。

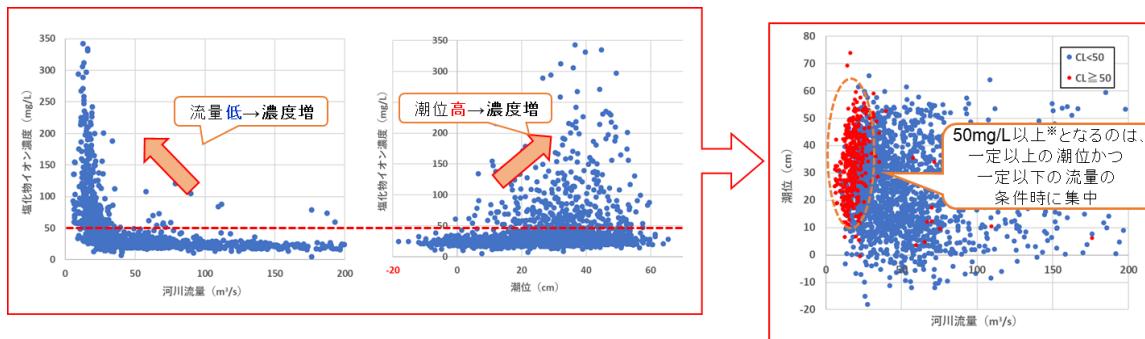


図 5.3-4 塩化物イオン濃度(日平均)と河川流量・潮位(前日)との関係

塩化物イオン濃度:二箇取水場前、河川流量:福知山、潮位:舞鶴の値を使用。

いずれも 2008 年 3 月～2017 年 10 月の日別値(防潮幕の設置日を除く)

国土交通省水文水質データベース、気象庁ホームページ及び舞鶴市提供データをもとに作成

また、流量が小さいほど二箇取水場付近で高い塩化物イオン濃度(以下、Cl 濃度)が観測される割合が高まることが確認された。Cl 濃度が 50mg/L 以上となるケースは、流量 15m<sup>3</sup>/s 未満で 90%弱、流量 15～20m<sup>3</sup>/s で 65%程度であった。流量ほどの顕著な関係は見られないものの、高潮位において、Cl 濃度が高まる傾向も見られている。(図 5.3-5)

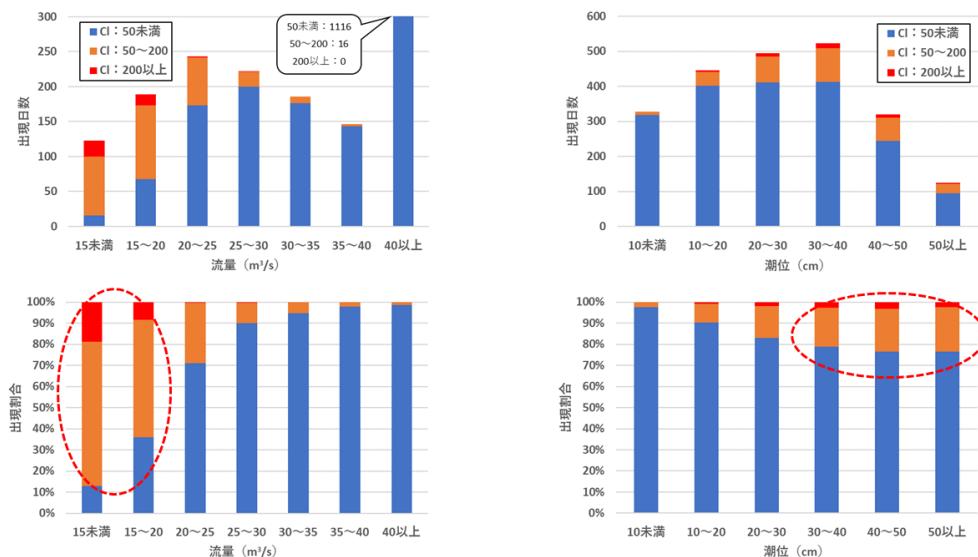


図 5.3-5 塩化物イオン濃度(日平均)と河川流量・潮位(前日)との関係

塩化物イオン濃度:二箇取水場前、河川流量:福知山、潮位:舞鶴の値を使用。

いずれも 2008 年 3 月～2017 年 10 月の日別値(防潮幕の設置日を除く)

国土交通省水文水質データベース、気象庁ホームページ及び舞鶴市提供データをもとに作成

有路補助取水場まで塩水が遡上したケース(表 5.3-4)では、潮位が一定程度(25 cm以上)あり、流量が特に小さい(15m<sup>3</sup>/s 以下)場合に起きやすいことが分かる。さらに潮位の上昇や南寄りの風が吹くなどの条件が重なると、顕著な塩水遡上が生じやすいと考えられる。

表 5.3-4 塩水遡上が顕著であったケースの気象条件等

国土交通省水文水質データベース、気象庁ホームページ及び舞鶴市提供データをもとに作成

日付	塩化物イオン (mg/L) (水深0.5mの換算結果)		降水10mm 以下連続 日数(日)	前10日 降水量 (mm)	前30日 降水量 (mm)	前日の流量 (m <sup>3</sup> /s)	前日の水位 (m)	前日の潮位 (m)	前日からの 気圧変化 (hPa)	前日最多風向 /平均風速 (m/s)	
	二箇 取水場前	有路 取水場前	福知山	福知山	福知山	福知山	福知山	舞鶴	舞鶴	舞鶴	
2009年6月21日	148	37	20	4.5	57.0	8.1	-2.01	28.1(中潮)	-4.5	西南西/2.6	
2009年9月28日	240	33	15	2.0	44.5	11.5	-1.94	37.3(小潮)	-2.2	北北東/2.1	
2010年8月10日	520	(*1)	32	25	15.0	138.0	12.8	-1.91	44.2(大潮)	+1.1	西南西/1.8
2013年6月14日	107	80	18	0.0	35.0	8.1	-2.04	27.8(中潮)	+1.6	北北東/2.5	
◆2014年6月4日	820	33	13	4.0	63.5	(*2) 12.4	-1.92	30.1(中潮)	-2.4	西南西/2.6	
2014年7月29日	114	36	9	25.5	88.5	(*2) 10.1	-1.92	40.4(大潮)	+1.7	北北東/2.6	
2017年5月24日	240	37	27	0.0	95.5	14.8	-1.70	18.5(中潮)	-2.8	西南西/2.1	
◆2017年6月21日	1201	46	13	1.0	80.0	9.0	-1.80	31.1(中潮)	-7.1	西南西/2.1	
◆2018年8月23日	高濃度の為 計測なし	44	9	15.5	45.5	8.8	-1.70	43.7(中潮)	-5.9	東/2.2	
◆2018年10月3日	—	—	9	8.0	83.0	確定値未定	-1.79	40.1(中潮)	-8.7	南西/1.6	
◆2019年11月25日	—	—	30	5.5	21.5	確定値未定	-1.84	24.4(中潮)	+2.7 (前日に-5.6)	西南西/2.1	

◆: 有字補助取水場内で基準を超える濃度を観測し、一時取水停止が発生

(\*1)島右側の観測値 (\*2) 当日朝 6 時の値(前日の値が得られなかつたため)

### 5.3.7 影響予測に必要な入力パラメータ

本調査での塩水遡上の影響予測には、表 5.3-5 に示すパラメータが必要である。

表 5.3-5 塩水遡上の影響予測に必要なパラメータ

流量の推定に必要な パラメータ (タンクモデル)	・流域の降水量及び河川流量の日別データ
塩水遡上の再現計算 に必要なパラメータ (環境流体モデル)	・潮位、流量、水位および塩分(または塩化物イオン濃度)の時系列データ ・河川内の地形データ(縦横断測量図)
将来予測に必要な パラメータ	・将来の降水量データ(日別値) ・将来の海面水位上昇量データ(月別値または年平均値)

### 5.3.8 影響予測における留意事項(制限事項)

本調査における将来予測においては、河川の地形変化は考慮していない。

## 5.4 調査結果

### 5.4.1 文献調査結果

#### 5.4.1.1 気候変動が塩水遡上に与える影響に関する知見

気候変動に伴う塩水遡上の影響評価を行った国内の事例は少ないが、海面上昇による釧路湿原への影響を評価し、最大遡上距離が大きくなること等を予測した研究(中本ら, 2011)等がある。海外では気候変動の影響としては海面上昇を扱った(特に地下水に対する)ものが多いが、ベトナムのメコンデルタの研究事例(Nguyen et al. 2008)では降水量の変化を含めて評価し、流量の減少により遡上距離が延びると予測している。

#### 5.4.1.2 国内河川の塩水遡上に関する知見(由良川含む)

由良川を含むいくつかの国内河川においては、塩水遡上の実態やそのメカニズムに関する研究・調査事例がある。由良川においては夏季に塩水遡上が顕著になり、その遡上距離は河川流量及び海面水位(特に河川流量)の影響を受けることが指摘されている(Kasai et al. 2010)ほか、河口から 250 m<sup>3</sup>/s 以上の出水があった場合には塩水くさびが回復するまでに約 11 日かかることを示した研究(Funahashi et al. 2013)もある。また、由良川以外の塩水遡上の研究・調査事例としては、網走川(北海道)、高瀬川・小川原湖(青森県)、筑後川(福岡県・佐賀県)等におけるもののほか、河口地形や風・波が及ぼす影響に着目したものもある。日本海側の河川は日々の潮汐変化が小さく、塩水の混合形態は弱混合である場合が多い。

#### 5.4.1.3 塩水遡上対策に関する知見

河川における塩水遡上対策として、河口堰の設置のほか、河床ゲートの設置、エアレーション(気泡噴流)、透過性構造物などの効果を検証またはシミュレーションした調査・研究がある。

### 5.4.2 有識者ヒアリングの結果

有識者ヒアリングの結果概要は下記のとおりである。(いずれも神戸大学中山教授より)

- ・ 塩水遡上に影響する主な要因としては、流量と潮位の時間変化のバランス、風、及び潮位(海面水位)が考えられる。特に弱混合の時は、風による影響を受けやすくなる。下流向きに風が吹いているほうが塩水は遡上しやすくなる。
- ・ 水温による影響は塩分に比べると非常に小さいため、パラメータとして用いなくとも問題ないだろう。上流もしくは、水深の浅い箇所での地形の変化は、塩水遡上に大きく影響する可能性がある。

### 5.4.3 観測や実証実験の結果

本調査では、観測や実証実験は実施していない。

## 5.4.4 気候変動影響予測結果

### 5.4.4.1 由良川の流量

日降水量から、タンクモデルを用いて河川流量を予測した結果は図 5.4-1 及び図 5.4-2 のとおりである。前述のとおり、無降水及び 1mm 未満の少雨日が増える一方で、月単位の降水量は増加の傾向であり、流量自体は将来にかけてやや増加する可能性がある。

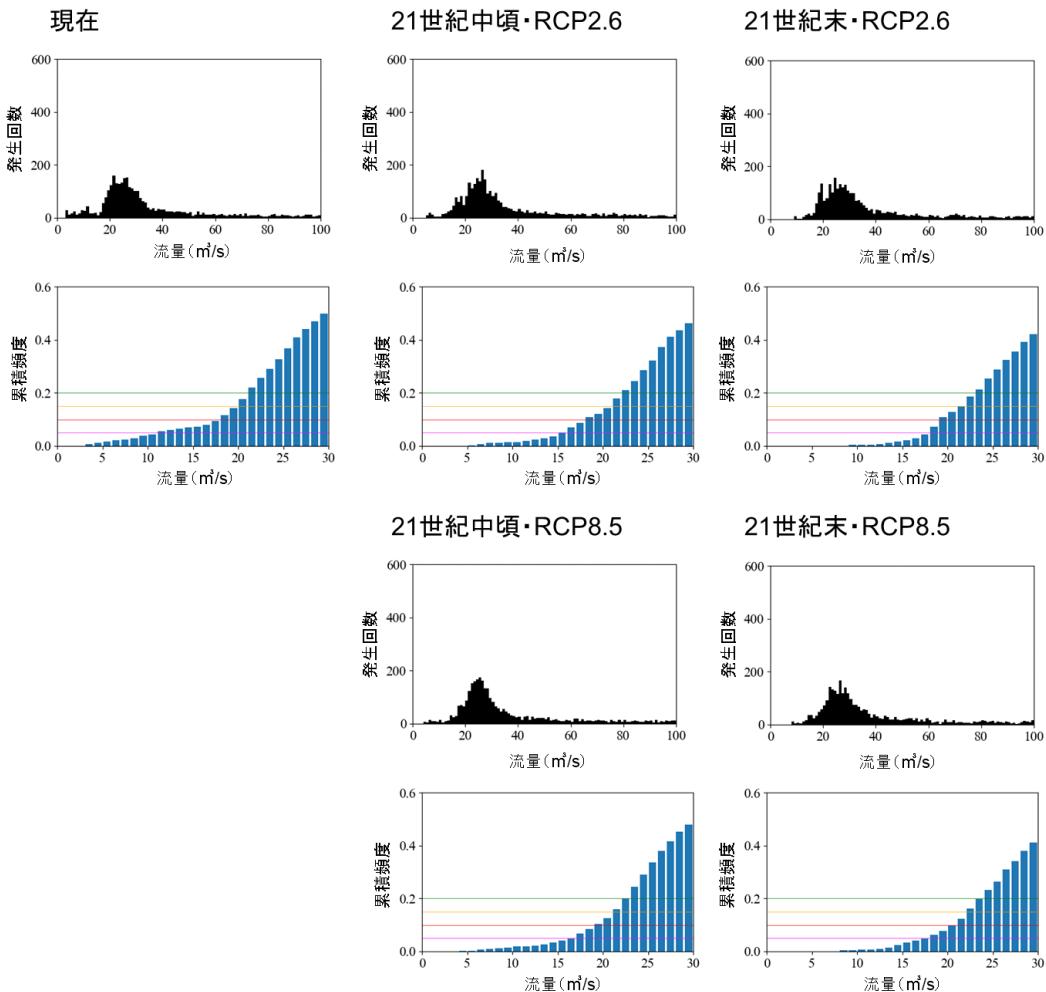


図 5.4-1 タンクモデルを用いて予測した流量の頻度分布 (MRI-CGCM3)

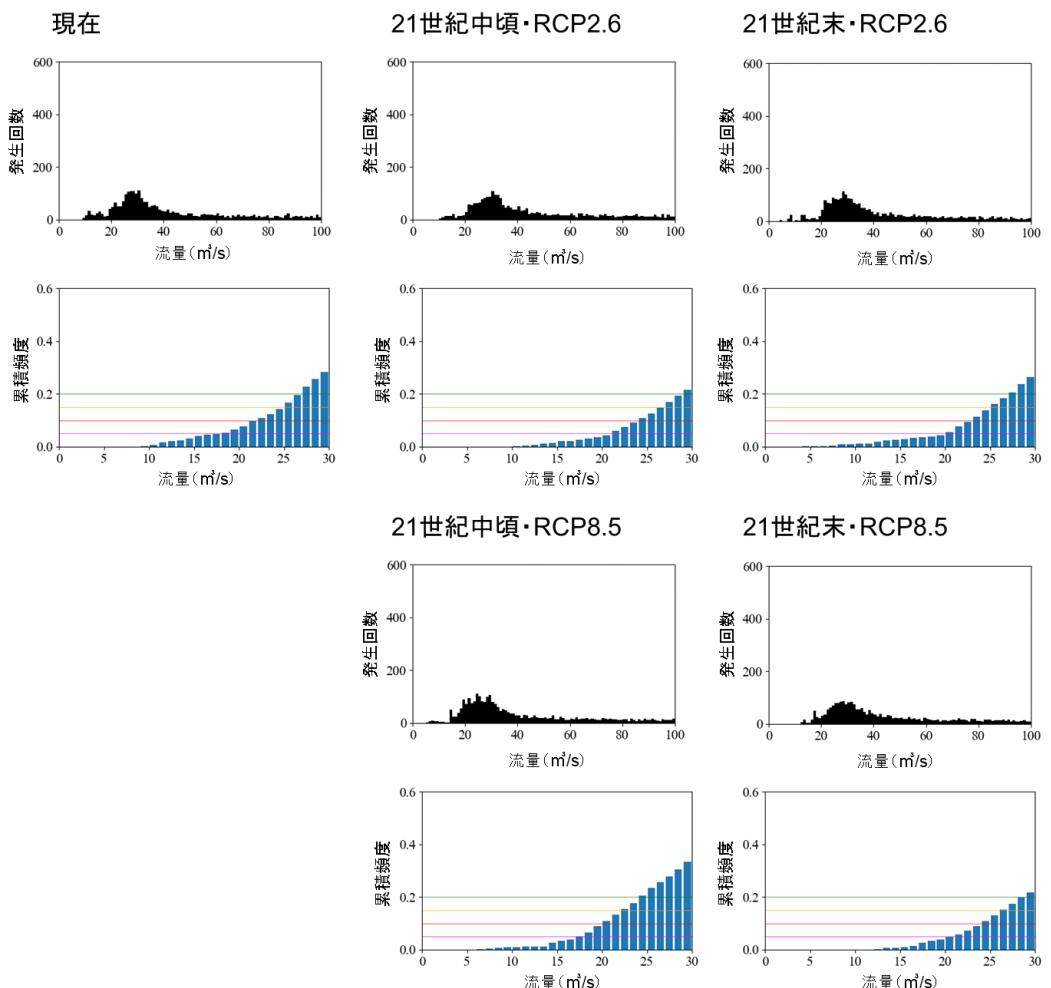


図 5.4-2 タンクモデルを用いて予測した流量の頻度分布(MIROC5)

また、5～11月における流量の出現頻度の予測を表 5.4-1 に示す。現在において有路補助取水場まで顕著な塩水遡上が生じやすい流量(波美橋地点で  $20\text{m}^3/\text{s}$  以下)の出現頻度は、将来においてはやや少なくなる可能性がある。ただし、後述の海面水位上昇に伴い、将来においては現在より大きな流量でも塩水遡上が生じやすくなる点には留意が必要である。

表 5.4-1 5～11月における流量の出現頻度(MRI-CGCM3)

	流量 $24\text{m}^3/\text{s}$ 以下	流量 $20\text{m}^3/\text{s}$ 以下	流量 $16\text{m}^3/\text{s}$ 以下
現在	16%(年 34 日)程度	6%(年 13 日)程度	2%(年 5 日)程度
21世紀中頃・RCP2.6	15%(年 33 日)程度	6%(年 14 日)程度	2%(年 4 日)程度
21世紀中頃・RCP8.5	14%(年 30 日)程度	5%(年 11 日)程度	2%(年 4 日)程度
21世紀末・RCP2.6	12%(年 26 日)程度	5%(年 10 日)程度	1%(年 2 日)程度
21世紀末・RCP8.5	13%(年 27 日)程度	4%(年 9 日)程度	1%(年 2 日)程度

表 5.4-2 5~11月における流量の出現頻度(MIROC5)

	流量 $24\text{m}^3/\text{s}$ 以下	流量 $20\text{m}^3/\text{s}$ 以下	流量 $16\text{m}^3/\text{s}$ 以下
現在	16%(年 34 日)程度	6%(年 13 日)程度	2%(年 5 日)程度
21世紀中頃・RCP2.6	9%(年 20 日)程度	2%(年 5 日)程度	1%(年 2 日)程度
21世紀中頃・RCP8.5	17%(年 37 日)程度	6%(年 14 日)程度	2%(年 4 日)程度
21世紀末・RCP2.6	14%(年 29 日)程度	4%(年 8 日)程度	1%(年 3 日)程度
21世紀末・RCP8.5	8%(年 17 日)程度	3%(年 5 日)程度	0.5%(年 1 日)程度

#### 5.4.4.2 若狭湾の海面水位

海面水位の予測結果は表 5.4-3 及び図 5.4-3 のとおりである。RCP8.5 の 21世紀末では、日平均海面水位の年較差とほぼ同程度の海面上昇が予測されており、塩水遡上に影響を及ぼす潮位の頻発が想定される。

表 5.4-3 若狭湾の海面水位上昇(年平均)

	シナリオ	21世紀中頃		21世紀末	
		平均	予測幅	平均	予測幅
若狭湾の海面水位上昇(cm)	RCP2.6	-	-	42	38~47
	RCP8.5	22	16~29	79	66~92

注) 海洋近未来予測力学的ダウンスケーリングデータ by SI-CAT ver.1 (MRI-CGCM3) の値に、IPCC 海洋・雪氷圈特別報告書による全球平均海面水位上昇を足し合わせた値。

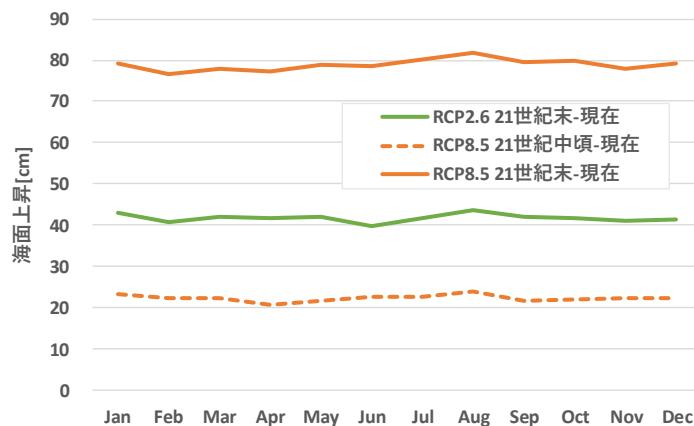


図 5.4-3 若狭湾の海面水位上昇

注) 海洋近未来予測力学的ダウンスケーリングデータ by SI-CAT ver.1 (MRI-CGCM3) の値に、IPCC 海洋・雪氷圈特別報告書による全球平均海面水位上昇を足し合わせた値。

#### 5.4.4.3 由良川の塩水遡上

波美橋地点の流量が  $24\text{m}^3/\text{s}$ 、 $20\text{m}^3/\text{s}$ 、 $16\text{m}^3/\text{s}$  である場合に、潮位の変化による塩水遡上の状況の変化について、環境流体モデル(Fantom)でシミュレーションを行った。結果を

図 5.4-4～図 5.4-5 に示す。なお、図中の塩分は  $1.80655 \times \text{塩化物イオン } \text{Cl}(\text{mg/L}) \times 10^{-3}$  で換算しており、水道水基準( $\text{Cl}=200\text{mg/L}$ )に相当する塩分は約 0.36 となる。

塩水が最も遡上したタイミングの塩分分布をみると、将来は取水場付近の高塩分が長時間継続する可能性が示唆される。特に RCP8.5 の 21 世紀末(潮位が現在より +79cm)においては、上流からの流量が比較的多いケースでも、各取水場付近の塩分は現在よりも高くなることが予測された。

遡上距離については、21 世紀中頃(潮位が現在より +22cm)であれば、遡上距離はまだ大きくは変化しないが、現在より +79cm になると流量が多くても遡上距離が大きくなり、取水場までの到達時間も短くなることが予測された。ただし、いずれのケースでも河口から 22 km 以上には達しないとみられる。

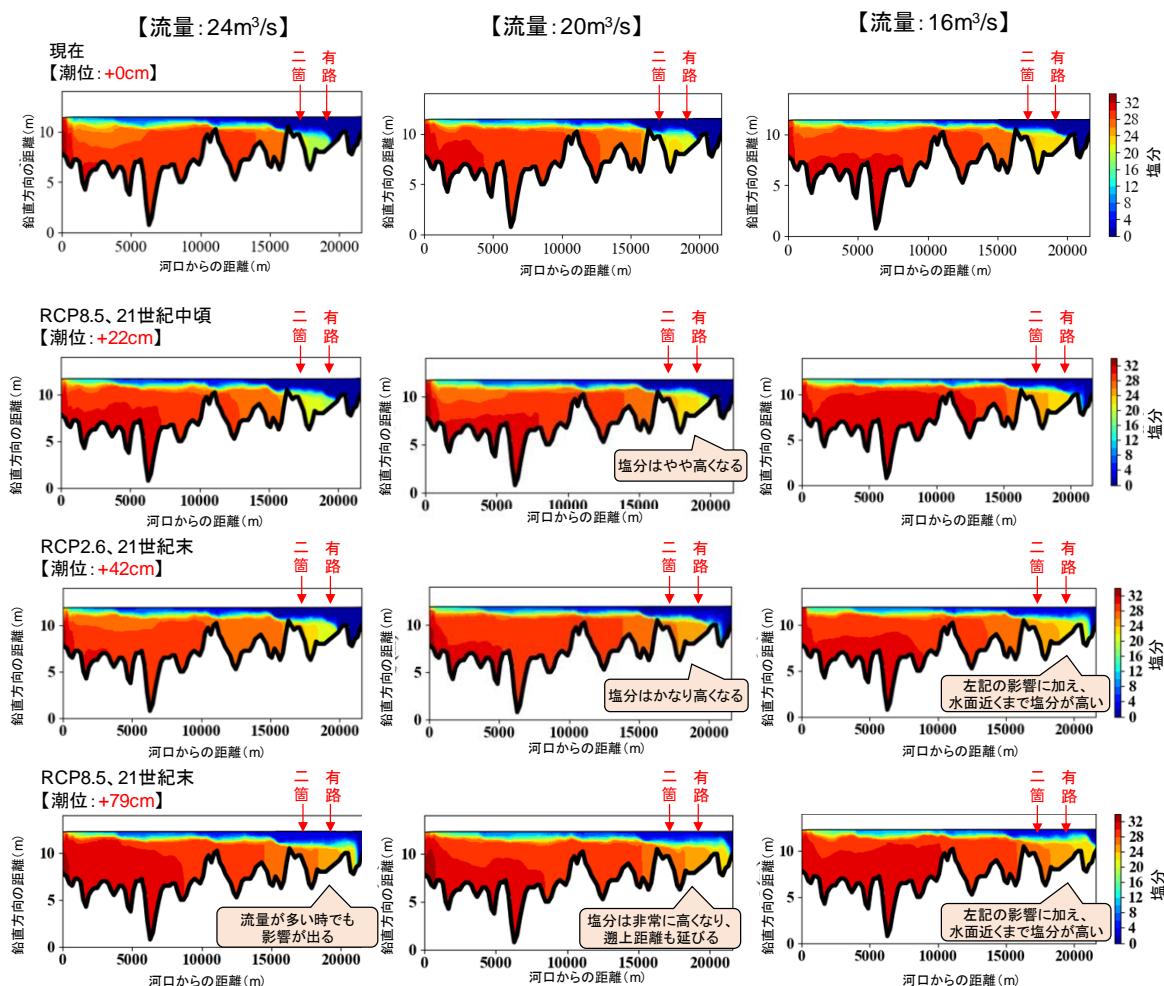


図 5.4-4 潮位が上昇したケースにおける塩水遡上のシミュレーション結果  
(塩水が最も遡上したタイミングの塩分分布)

潮位は海洋近未来予測力学的ダウンスケーリングデータ by SI-CAT ver.1 (MRI-CGCM3) の値に、IPCC 海洋・雪氷圈特別報告書による全球平均海面水位上昇を足し合わせた値。

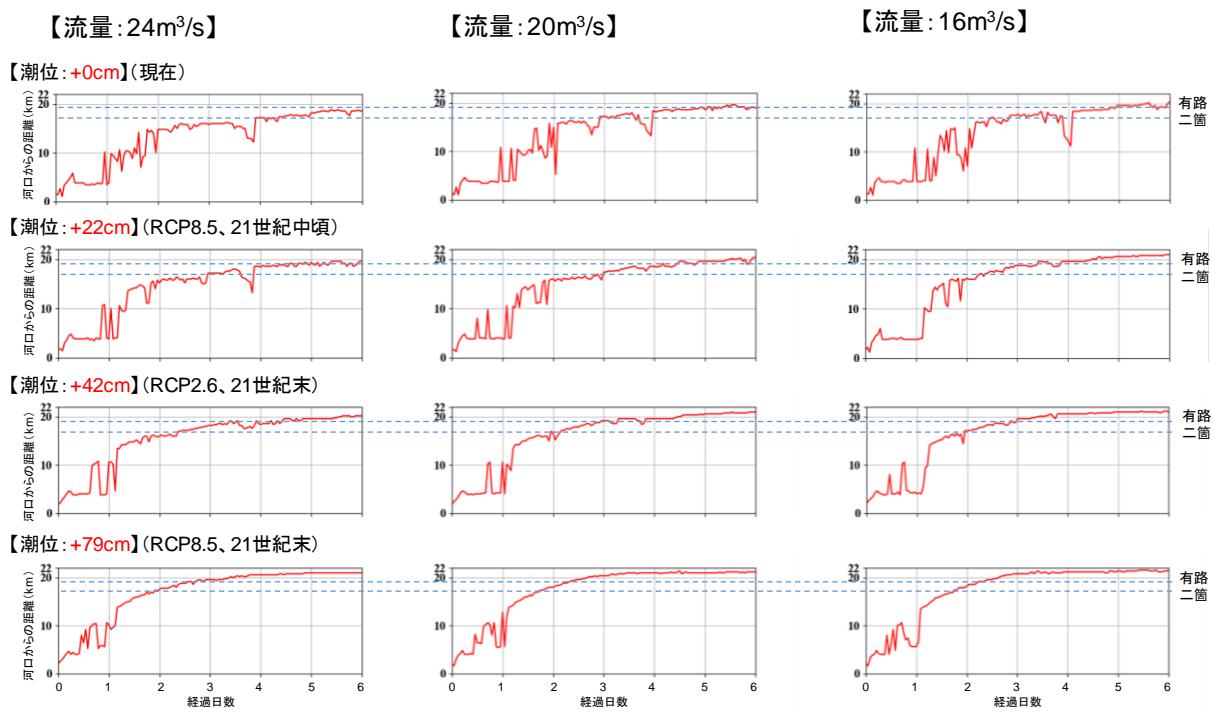


図 5.4-5 潮位が上昇したケースにおける塩水遡上のシミュレーション結果

(水道水基準( $\text{Cl}=200\text{mg/L}$ )を上回る塩水の遡上距離の時系列変化)

潮位は海洋近未来予測力学的ダウンスケーリングデータ by SI-CAT ver.1 (MRI-CGCM3) の値に、IPCC 海洋・雪氷圈特別報告書による全球平均海面水位上昇を足し合わせた値。

また、RCP8.5 の 21 世紀末(潮位が現在より +79cm)を対象に、流量がさらに多いケースの予測も行った(図 5.4-6)。この結果、流量が  $36\text{m}^3/\text{s}$ (現在の平水流量程度)であっても補助取水場付近まで塩水遡上が発生することが推定され、年間の半分近く塩水遡上のリスクにさらされる可能性があることが示された。この場合、現在の取水場位置では対応が困難になる恐れがあるが、取水口高さを 79cm 上げた場合には塩分の低い水を取水できる可能性も考えられる。取水口高さの変更は、適応策としての効果も一定程度期待できる。

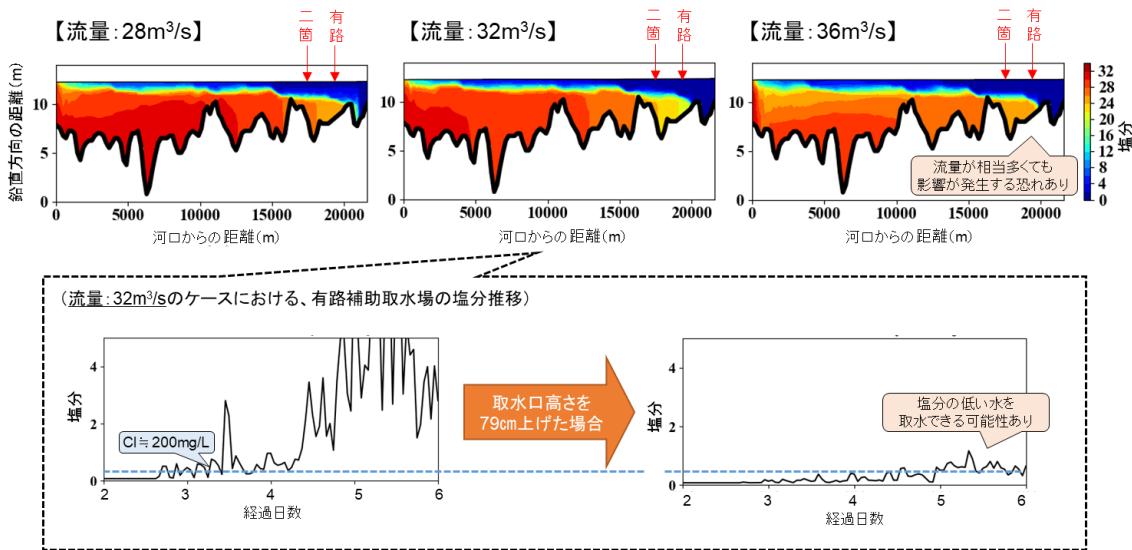


図 5.4-6 潮位が 79cm 上昇したケース(RCP8.5、21世紀末)における  
塩水遡上のシミュレーション結果

#### 5.4.5 結果を活用する上で留意点・制限事項

塩水遡上の状況は河川の地形によって異なっており、また日本海側と太平洋側、瀬戸内海沿岸等では、日々の干満差の違いにより塩水の混合状況が異なる可能性がある。そのため、本成果の他地域への展開にあたっては、対象河川の地形や塩水の混合状況を踏まえて予測を行う必要がある。

### 5.5 適応オプション

#### 5.5.1 手順

適応オプション検討フローを図 5.5-1 に示す。

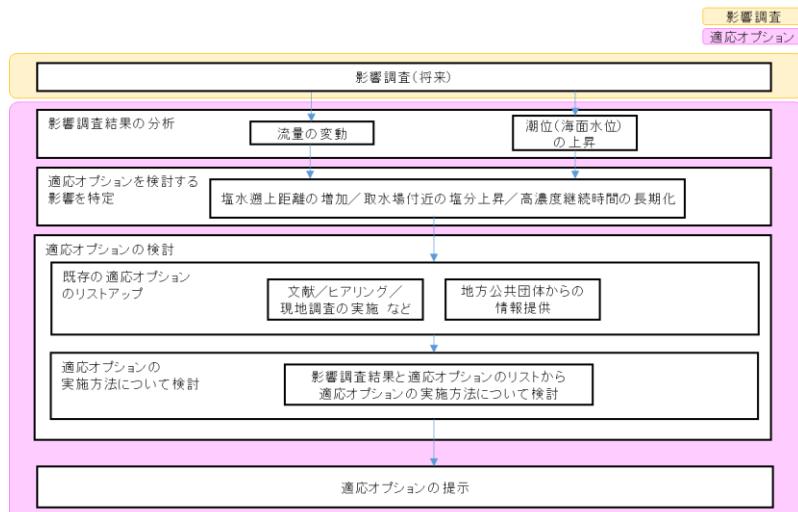


図 5.5-1 適応オプション検討フロー(調査項目 4-3)

## 5.5.2 概要

適応オプションの概要は表 5.5-1 のとおりである。なお適応オプションの検討にあたっては、防災や農業、自然生態系等、他分野とのトレードオフには十分に注意する必要がある。

表 5.5-1 適応オプション(調査項目 4-3):再掲

適応 オプション	想定される 実施主体			評価結果							
	行政	事業者	個人	現状		実現可能性			効果		
				普及 状況	課題	人的 側面	物的 側面	コスト 面	情報 面	効果 発現 までの 時間	期待 される 効果の 程度
①適切なタイミングでの防潮幕の設置	●	●		普及が進んでいる	・幕には隙間があるため、塩水遡上を完全に防ぐことはできない。 ・事前(1週間程度前)に塩水遡上の可能性を予測する必要がある。 ・大雨の際に取り外しが必要。	◎	○	◎	◎	短期	中
②流量の調整	●			普及が進んでいない	・河川管理者及びダム管理者、他の水利利用者(農業利用等)との調整が必要となる。 ・渇水が続いた場合、十分な流量を継続させることが難しいと想定される。	△	○	△	△	短期	中
③取水高さの変更／取水口の移設／貯水池の設置	●			普及が進んでいる	・コストがかかる他、将来の遡上の状況を踏まえ適切な位置・規模を設定する必要がある。 ・貯水池の設置には十分な広さの土地が必要であるが、由良川沿いで確保するのは難しい。	△	○	△	◎	短期	中
④河川内構造物(堰等)の設置／河床形状の変更等	●			普及が進んでいる	・河川整備計画等との整合をとる必要があるほか、河川生態系への影響や治水面への配慮など、クリアすべき課題が非常に多い。	△	○	△	◎	短期	高

表 5.5-2 適応オプションの根拠(調査項目 4-3):再掲

適応オプション	適応オプションの考え方と出典
①適切なタイミングでの防潮幕の設置	防潮幕の設置は舞鶴市すでに実施中(設置時期は例年、梅雨明け～秋頃)。塩水遡上の可能性やタイミングを事前に予測し、設置時期を判断する
②流量の調整	塩水遡上が見込まれるタイミングで、上流側の放流量を増やす(もしくは取水量を減らす)ことにより、取水場付近の流量を一定以上確保する。塩水遡上防止のための流量調整は、他河川を含め実施事例が確認できていない。
③取水高さの変更／取水口の移設／貯水池の設置	取水口の移設については、取水場をより上流へ移設する、取水管を上流へ延長する、または上流側に簡易水路を設置するといったいくつかのパターンが想定される。貯水池については、北海道で実施実績がある。
④河川内構造物(堰等)の設置／河床形状の変更等	取水場より下流側に、河川内構造物(堰等)を設置する。もしくは、塩水が遡上しにくいうように河床形状を変更する。堰については、長良川、淀川等で設置されている。

### 5.5.3 適応オプションの内容

#### 5.5.3.1 適切なタイミングでの防潮幕の設置

由良川の二箇取水場の約370m下流に、塩化物イオン濃度の高い水の遡上を物理的に防ぐ防潮幕を設置する。防潮幕の設置は舞鶴市すでに実施中(設置時期は例年、梅雨明け～秋頃まで)であるが、塩水遡上の可能性や時期を事前に予測することで、現状より効果を高めることが期待される。

課題としては、防潮幕を張る判断から設置までは1週間程度を要すること、幕の設置および撤去の際にかなりの費用がかかること、大雨の際は安全のため取り外しが必要となること、早い時期に設置する場合は漁業権との調整も必要であることが挙げられる。

#### 5.5.3.2 流量の調整

由良川の有路補助取水場より上流(既存のダム・堰等)において、塩化物イオンの上昇が見込まれる時期に上流側の放流量を増やす(もしくは取水量を減らす)ことにより、取水場付近の流量を一定以上確保し、塩水の遡上を抑制する。河床付近では塩水が遡上している場合でも、表層では一定程度濃度の低い部分が存在することで、水面付近から取水できれば取水量を確保できる可能性がある。

課題としては、河川管理者及びダム管理者、他の水利用者(農業利用等)との調整が必要となること、渇水が続いた場合、十分な流量を継続させることが難しい可能性があることが挙げられる。

#### 5.5.3.3 取水高さの変更／取水口の移設／貯水池の設置

由良川の有路補助取水場及びそれより上流において、取水高さを変更する、取水場をより上流へ移設する、取水管を上流へ延長する、または上流側に簡易水路を設置することで、より塩化物イオン濃度の低い水を取水することができる。もしくは、取水場付近またはその上流に貯水池を設置することで、塩水が遡上する前に、一定量の水を確保しておくことができると考えられる。

課題としては、コストがかかる他、将来の遡上の状況を踏まえ適切な位置・規模を設定する必要があること、貯水池の設置には十分な広さの土地が必要であるが、由良川沿いで確保するのは難しいことが挙げられる。

#### 5.5.3.4 河川内構造物(堰等)の設置／河床形状の変更等

由良川の二箇取水場より下流において、河川内構造物(堰等)の設置、河床形状の変更等により、下流からの塩化物イオン濃度の高い水の遡上を恒常に抑えることが期待される。

課題としては河川整備計画等との整合をとる必要があるほか、河川生態系への影響や治水面への配慮など、検討すべき課題が多いと考えられる。

#### 5.5.4 引用文献一覧

- Funahashi, T., A. Kasai, M. Ueno and Y. Yamashita, 2013: Effects of Short Time Variation in the River Discharge on the Salt Wedge Intrusion in the Yura Estuary, a Micro Tidal Estuary, Japan, Journal of Water Resource and Protection, 2013, 5, 343–348.
- Kasai, A., Y. Kurikawa, M. Ueno, D. Robert and Y. Yamashita, 2010: Salt-wedge intrusion of seawater and its implication for phytoplankton dynamics in the Yura Estuary, Japan, Estuarine, Coastal and Shelf Science 86, 408–414.
- Nakayama, K., D. H. Nguyen, T. Shintani and K. Komai, 2016: Reversal of secondary circulations in a sharp channel bend, Coastal Engineering Journal, Vol.58, 1650002
- Nakayama, K., T. Sato, K. Shimizu and Leon Boegman, 2019: Classification of internal solitary wave breaking over a slope, Physical Review Fluids, Vol.4, 014801.
- Nakayama, K., T. Shintani, K. Kokubo, T. Kakinuma, Y. Maruya, K. Komai and T. Okada, 2012: Residual current over a uniform slope due to breaking of internal waves in a two-layer system, Journal of Geophysical Research, Vol.117, C10002, 11pp.
- Nakayama, K., T. Shintani, K. Shimizu, T. Okada, H. Hinata and Katsuaki Komai, 2014: Horizontal and residual circulations driven by wind stress curl in Tokyo Bay, Journal of Geophysical Research, Vol.119, pp.1977–1992
- Nguyen, D. K., A. Kotera, T. Sakamoto and M. Yokozawa, 2008: Sensitivity of Salinity Intrusion to Sea Level Rise and River Flow Change in Vietnamese Mekong Delta—Impacts on Availability of Irrigation Water for Rice Cropping, J. Agric. Meteorol. 64 (3): 167–176.
- 新谷哲也, 中山恵介, 2013: 網走川河口域で発生する塩水遡上に関する数値的検討, 水工学論文集, 第 57 卷.
- 中本篤嗣, 新谷哲也, 中山恵介, 丸谷靖幸, 石田哲也, 法村賢一, 2011: 海面上昇を考慮した釧路湿原への塩水遡上の影響評価, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.67, No.4, L1351-L1356.