

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

公募区分： 環境問題対応型研究（一般課題）

研究予定期間： 令和3（2021）年度 ～ 令和5（2023）年度

課題番号： 【2-2101】

体系的番号： （JPMEEER20212001）

研究課題： 「気候変動による富山県の水・栄養塩循環への影響評価と適応策の検討」

Research Title: Impact assessment of climate change on water and nutrient transport with adaptation options for Toyama

研究代表者： 張 勁

研究代表機関： 富山大学

研究分担機関： 富山大学、富山県環境科学センター、公益財団法人環日本海環境協力センター、愛媛大学、中央大学

研究領域： 気候変動領域

キーワード： 気候変動、少雪多雨化、健全な水循環、栄養塩管理

令和6（2024）年5月

目次

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書	1
Ⅰ. 成果の概要	4
1. はじめに（研究背景等）	6
2. 研究開発目的	6
3. 研究目標	6
4. 研究開発内容	7
5. 研究成果	8
5-1. 成果の概要	8
5-2. 研究目標の達成状況	8
5-3. 研究成果の学術的意義と環境政策等への貢献	10
6. 研究成果の発表状況の概要	12
6-1. 成果の件数	12
6-2. 主な査読付き論文等の主要な成果	12
7. 国際共同研究等の状況	13
8. 研究者略歴	14
Ⅱ. 成果の詳細	16
Ⅱ-1 サブテーマ1「少雪・多雨化に適応する持続的な水循環管理方法の提案」	16
[サブテーマ1要旨]	16
1. サブテーマ1研究開発目的	16
2. サブテーマ1研究目標	16
3. サブテーマ1研究開発内容	17
4. サブテーマ1結果及び考察	17
[1-1. 水・栄養塩循環メカニズムの解明]	17
[1-2. 休耕田地下水涵養実験]	20
[1-3. 長期観測データから見る気候変動の影響]	20
[1-4. 富山県自然環境・社会環境GIS]	23
[1-5. 気候変動適応策：中山間地域の活用法]	25
[1-6. 地下水位変動予測の可能性]	28
5. サブテーマ1研究目標の達成状況	29
Ⅱ-2 サブテーマ2「水循環メカニズム解明のための富山県陸海統合モデルの開発と将来予測及び適応策の検証」	30
[サブテーマ2要旨]	30
1. サブテーマ2研究開発目的	30
2. サブテーマ2研究目標	30
3. サブテーマ2研究開発内容	30
4. サブテーマ2結果及び考察	31
[2-1. 富山県水文モデルの開発(成果番号46, 47, 52)]	31
[2-2. 富山湾低次生態系モデルの開発]	33
5. サブテーマ2研究目標の達成状況	37
Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細	38
(1) 成果の件数	38
(2) 誌上発表	38
(3) 口頭発表	39
(4) 知的財産権	43
(5) 「国民との科学・技術対話」の実施	43

(6)	マスメディア等への公表・報道等	44
(7)	研究成果による受賞	45
(8)	その他の成果発表	45
	【参考資料】 終了研究成果報告書 公募審査・中間評価結果への対応	49

I. 成果の概要

<課題情報>

公募区分：	環境問題対応型研究（一般課題）
研究実施期間：	令和3（2021）年度 ～ 令和5（2023）年度
課題番号：	【2-2101】
研究課題：	「気候変動による富山県の水・栄養塩循環への影響評価と適応策の検討」
研究代表者：	張 勁（富山大学学術研究部理学系，教授）
重点課題（主）：	【重点課題⑧】気候変動への適応に係る研究・技術開発
重点課題（副）：	【重点課題⑩】大気・水・土壌等の環境管理・改善のための対策技術の高度化及び評価・解明に関する研究
行政要請研究テーマ（行政ニーズ）：	（2-2）地域特性に応じた気候変動影響予測及び適応の推進に関する研究
研究領域：	気候変動領域

<キーワード>

気候変動
少雪多雨化
健全な水循環
栄養塩管理

<研究体制>

サブテーマ1「少雪・多雨化に適応する持続的な水循環管理方法の提案」

<サブテーマ1リーダー及び研究分担者>

機関名	部署名	役職名	氏名	参画期間
富山大学	学術研究部理学系	教授	張 勁	
富山県環境科学センター	水質課	主任研究員	中易佑平	
（公財）環日本海環境協力センター	地域活動センター	副主幹研究員	吉田尚郁	

<サブテーマ1研究協力者>

機関名	部署名	役職名	氏名
富山大学 （一財）電力中央研究所	学術研究部理学系 サステナブルシステム研究本部	特命助教 主任研究員	西澤（片境）紗希 （2021年度～2023年度）

(公財) 環日本海環境協力センター	地域活動センター	研究員	Seo Yuhwan (2021年度～2023年度)
富山大学	理工学研究部	リサーチ・アシスタント	勝田裕大 (2023年度)

サブテーマ2「水循環メカニズム解明のための富山県陸海統合モデルの開発と将来予測及び適応策の検証」

<サブテーマ2リーダー及び研究分担者>

機関名	部署名	役職名	氏名	参画期間
愛媛大学	沿岸環境科学研究センター	教授	郭 新宇	
中央大学	理工学部都市環境学科	教授	手計太一	

<サブテーマ2研究協力者>

機関名	部署名	役職名	氏名
愛媛大学	沿岸環境科学研究センター	研究員	Menghong Dong (2021年度～2023年度)
中央大学 山梨大学	理工学部都市環境学科 大学院総合研究部工学域	助教 助教	松浦 拓哉 (2021年度～2023年度)

<研究経費（間接経費を含む）>

年度	直接経費	間接経費	経費合計
2021	27,697千円	8,299千円	35,996千円
2022	29,301千円	8,789千円	38,090千円
2023	27,741千円	8,255千円	35,996千円
合計	84,739千円	25,343千円	110,082千円

1. はじめに（研究背景等）

日本では世界平均の 1.7 倍もの早さで気温が上昇しており、富山県においてもその影響が気象や陸水環境に表れてきている。富山県には標高3,000m級の立山連峰から水深1,000m超の富山湾まで、数十km圏内に陸域から海域にいたる水・物質循環システムがコンパクトに形成されている。山地における冬季の降雪はもとより、広大な森林域や河川流域に広がる扇状地が、豊富な河川水と浅層・深層地下水を産出し、これらの陸水は豊富な栄養塩を富山湾に供給し、富山湾内の高い生物生産に繋がっている。

しかし、気温の上昇に伴い降雪が降雨へと変化し、降雪量は過去40年間で5割も減少している。この積雪量の減少により地下水の貯水力及び涵養機能が低下してきている。気候変動の影響により河川水量と浅層地下水量が増加し、海に達するまでの滞留期間が短縮化することで栄養塩濃度の低下が起きており、その現状把握と今後の予測が重要になってきている。すでに環境研究総合推進費S-13-3では、気候変動による陸域の水循環システムの変化が、山・森・川から海への栄養塩の供給にも変化を及ぼし、沿岸海域の基礎生産に影響を及ぼす可能性が指摘されている。

これまで富山県では、豊かな水資源を保全するために、「とやま21世紀水ビジョン」や「地下水指針」を策定し、「水と緑の森づくり税」の導入等の独自施策を実施して水資源の確保・保全に努めてきている。今後は、さらに進行する気候変動を想定し、水・栄養塩循環システムを持続していくために、適切な適応策を予防的に実施することが行政としても必要である。

2. 研究開発目的

本課題では、富山県の河川水、浅層・深層地下水という異なる時間スケールを持った水循環プロセスを安定・放射性同位体によって定量化し、それを組み込んだ新しい水文モデルを構築した。さらに歴史的環境モニタリングデータに社会的情勢を加え、同位体解析と数値モデルを組み合わせ、陸域から海域にいたる時間的・空間的に複合した水循環メカニズムを明らかにし、気候変動に適応した持続的な水・栄養塩循環システムの保全に向けた管理方策の提案を目的とした。

3. 研究目標

全体目標	富山県の水・栄養塩循環メカニズムを解明し、気候変動に伴う水環境変化の影響要因と変動要素を明らかにする。影響要因と変動要素の将来変化を予測し、気候変動に適応する持続的な水・栄養塩循環システムの検討を行い、富山県行政施策等への貢献のために持続的な水・栄養塩循環の管理方法を提案する。
サブテーマ1	「少雪・多雨化に適応する持続的な水循環管理方法の提案」
サブテーマ1 実施機関	富山大学、富山県環境科学センター、（公財）環日本海環境協力センター

サブテーマ1 目標	<ol style="list-style-type: none"> 1) 富山県全域を網羅する約80地点で調査し、安定・放射性同位体等トレーサーによる分析を行う。山・森・川・海において河川水、浅層・深層地下水の時空間的に複合した水・栄養塩循環のメカニズムを解明する。(富山大学) 2) 休耕田を利用した地下水涵養に着目し、涵養に伴う地下水量・地下水質の改善効果を定量的に把握し、効率的・効果的な休耕田活用方法を提案する。(富山大学) 3) 1981年からの観測データの分析と、気候変動に伴う水循環の将来変動予測結果を解析し、気候変動による影響の要因と影響を受けやすい変動要素を特定する。(環境科学センター) 4) 富山県内の1980年代から2020年までの環境・社会情報のGIS化を進め、必要な情報の2次元的な時間変化データベースを作成する。(環日本海環境協力センター) 5) 気候変動に伴う将来の水・栄養塩循環システムの変化に適応するため、富山県の社会情勢及び既往の行政施策を踏まえ、持続的な水・栄養塩循環のための水源の管理・休耕田活用方法・地下水利用方法などを提案する。(環日本海環境協力センター)
-----------	---

サブテーマ2	「水循環メカニズム解明のための富山県陸海統合モデルの開発と将来予測及び適応策の検証」
サブテーマ2 実施機関	愛媛大学、中央大学
サブテーマ2 目標	<ol style="list-style-type: none"> 1) 富山県内の河川・地下水の水・栄養塩循環を再現する富山県水文モデルを開発する。(中央大学) 2) 富山湾低次生態系モデルと富山県水文モデルを結合した富山県陸海統合モデルを開発し、富山県の水・栄養塩循環システムの再現し、水・栄養塩の輸送経路・輸送量を解明する。(愛媛大学・中央大学) 3) 富山県陸海統合モデルを用い、気候変動シナリオ(RCP8.5および2.6)による2050年及び2100年の気候変動影響下の水・栄養塩の変化を予測する。(愛媛大学・中央大学) 4) 休耕田の活用や地下水利用に関する適応策の持続的な水循環システム構築への効果および有用性を数値モデルで検証する。(愛媛大学・中央大学)

4. 研究開発内容

【サブテーマ1】少雪・多雨化に適応する持続的な水循環管理方法の提案

持続的な水循環管理方法の提案に向け、気候変動の水・栄養塩循環への影響の科学的根拠及び歴史的变化の把握に取り組んだ。具体的には、安定・放射性同位体トレーサーを用いた時空間的な水・栄養塩循環の把握と定量化、長期観測データに基づく変動因子の抽出、水循環に係る自然・社会環境情報の2次元時間変化データベースの整備を進めたほか、適応策として、休耕田による涵養機能や効果的な活用方法を検討した。

【サブテーマ2】水循環メカニズム解明のための富山県陸海統合モデルの開発と将来予測及び適応策の検証

陸域から海域に及ぶ水・栄養塩循環メカニズムへの気候変動の影響やその変化の定量化と、各種適応策の効果を検証するために、陸水の動態を再現する富山県水文モデルと、海洋環境を再現する富山湾低次生態系モデルを結合した富山県陸海統合モデルを開発した。(成果番号46, 47, 52)

5. 研究成果

5-1. 成果の概要

全体として、富山県内の地下水・河川水の化学観測及び数値シミュレーションから、水・栄養塩循環メカニズムを評価し、将来の変化を予測した。本研究で開発した「富山県陸海統合モデル」により、河川水及び地下水が沿岸海域へ輸送する栄養塩供給量と、陸域からの各栄養塩供給源の富山湾沿岸における低次生態系（植物プランクトン、動物プランクトン等）への寄与を評価した。これらの結果に基づき、富山県行政施策等への貢献のために持続的な水・栄養塩循環の管理方法を提案し、成果の一部は、富山県のカーボンニュートラル戦略及び農林水産関連の政策に反映された(p9-10)。

サブテーマ1では、富山県全域を網羅する約80地点で調査し、山・森・川・海における河川水や地下水の水・栄養塩循環メカニズムを、化学トレーサー等を用いて評価した[1-1]。少雪・多雨化に適応する持続的な水循環管理方法として、地下水量保全と地下水への栄養塩付加が期待される休耕田を活用した地下水涵養に焦点を当て、その効果を定量的に評価した[1-2]。化学トレーサーによる地下水分析の結果と当研究で開発した地下水シミュレーションの結果を組み合わせることで、各地域での効果的な休耕地利用方法を提案した(図 1-10)。富山県内の1980年代から2020年までの環境・社会情報のGIS化を進め、必要な情報の2次元的な時間変化データベースを作成して公開した[1-4] (成果番号89, 90)。富山県の社会情勢及び既往の行政施策を踏まえ、持続的な水・栄養塩循環のための水源の管理・休耕地活用方法・地下水利用方法等を提案した[1-5, 1-6] (成果番号25, 33, 41)。

サブテーマ2では、富山県の水・栄養塩循環メカニズムを解明するため、富山湾を対象とした流動・低次生態系モデル(成果番号44)を構築した。富山水文モデルにより得られた、陸域からの淡水・栄養塩供給量を富山湾低次生態系モデルの陸域境界条件として与えることで、富山陸海統合モデルを開発した。表層で一級河川と二級河川の河川流量及び栄養塩負荷量を、海底で地下水からの淡水流量と栄養塩供給(海底湧水)をモデルに与えた(成果番号46, 47, 52) [2-2]。河川水起源の栄養塩と地下水起源の栄養塩の寄与率を評価するため、モデルに起源別の栄養塩フローを追跡するモジュール(成果番号4, 5)を導入し、河川水起源と地下水起源の栄養塩動態を別々に表現し、その役割を比較した(図 2-9~図 2-11; 成果番号50, 53)。本統合モデルを用いて、気候変動シナリオに準じた陸域からの淡水・栄養塩供給量の変化による富山湾沿岸域への影響を検証した(成果番号47)。

5-2. 研究目標の達成状況

<全体の達成状況> 3. 目標どおりの成果をあげた

「気候変動による富山県の水・栄養塩循環への影響評価と適応策の検討」

全体目標	全体の達成状況
富山県の水・栄養塩循環メカニズムを解明し、気候変動に伴う水環境変化の影響要因と変動要素を明らかにする。影響要因と変動要素の将来変化を予測し、気候変動に適応する持続的な水・栄養塩循環システムの検討を行い、富山県行政施策等への貢献のために持続的な水・栄養塩循環の管理方法を提案する。	サブテーマ1で、化学分析の結果に基づいて富山県の水・栄養塩循環メカニズムをパターン化し、各扇状地の栄養塩付加方法を、休耕田を用いた地下水涵養試験で検証し、定量的に評価した。サブテーマ2で開発された「富山県陸海統合モデル」により、陸から富山湾沿岸への栄養塩供給量と将来予測、そして、河川水由来・地下水由来の栄養塩供給が富山湾沿岸における基礎生産にどの程度寄与しているかを評価した。サブテーマ1とサブテーマ2の成果を統合し、地下水量と栄養塩付加に効果的な管理方法を検証・提案した。

<【サブテーマ1】達成状況> 2. 目標を上回る成果をあげた

「少雪・多雨化に適應する持続的な水循環管理方法の提案」

サブテーマ1 目標	サブテーマ1 の達成状況
<p>1) 富山県全域を網羅する約80地点で調査し、安定・放射性同位体トレーサー等による分析を行う。山・森・川・海において河川水、浅層・深層地下水の時空間的に複合した水・栄養塩循環のメカニズムを解明する。(富山大学)</p> <p>2) 休耕田を利用した地下水涵養に着目し、涵養に伴う地下水量・地下水質の改善効果を定量的に把握し、効率的・効果的な休耕田活用方法を提案する。(富山大学)</p> <p>3) 1981年からの観測データの分析と、気候変動に伴う水循環の将来変動予測結果を解析し、気候変動による影響の要因と影響を受けやすい変動要素を特定する。(環境科学センター)</p> <p>4) 富山県内の1980年代から2020年までの環境・社会情報のGIS化を進め、必要な情報の2次元的時間変化データベースを作成する。(環日本海環境協力センター)</p> <p>5) 気候変動に伴う将来の水・栄養塩循環システムの変化に適應するため、富山県の社会情勢及び既往の行政施策を踏まえ、持続的な水・栄養塩循環のための水源の管理・休耕田活用方法・地下水利用方法などを提案する。(環日本海環境協力センター)</p>	<p>1) 富山県内3つの扇状地(84地点調査)について、水素・酸素安定同位体比と溶存成分濃度分析の結果から地下水の形成メカニズムを「旧河道接続型」と「表層地下水接続型」の2つにパターン化できることが判った(図1-1)。それぞれの栄養塩付加及び輸送状況がどのような要因で変化するかを評価した[1-1]。</p> <p>2) 1)でパターン化した各栄養塩付加状況に適應した場所を選定し、休耕田を利用した地下水涵養の効果検証を行った。検証結果にもとづき、それぞれの扇状地でどの場所でどの程度の期間地下水涵養を実施すれば良いか具体的な提案をした[1-2]。</p> <p>3) 公共用水域調査結果を用いて河川ごとに水温の変動傾向及び水温と水質項目の変動要因について解析を行い、水温と連動して変化する項目を特定した(表1-2)。また今後の影響評価や将来予測のために、公共用水域調査に併せた追加調査を提案、実施した。</p> <p>4) 人工衛星画像を用いて1985年から2020年までの土地利用マップを作成し、Google Earth Engineを用いて富山県社会環境GISとして公開した(成果番号89)。同様に気象情報についても、2015年から2100年までの気象データを富山県自然環境GISとして公開した(成果番号89)。</p> <p>5) 土地利用マップから休耕田や耕作放棄地の分布を明らかにし、地下水流動モデルから地下水の流動状況を推定し、保全が求められる水源域や中山間地域の有効活用を提案した[1-5]。2)の休耕田を利用した地下水涵養についても、地下水流動モデルのシミュレーション結果と化学分析から推定された適應地における地下水涵養が気候変動に対して効果的であることを確認した(図1-10)。5)の研究計画を進める中で、地下水保全を考えるうえで機械学習による地下水位変動予測の可能性についても評価することが有用と判断され、地下水流動モデルによる地下水位変動予測モデルを開発し、その有用性を確認した[1-6]。</p>

<【サブテーマ2】達成状況> 3. 目標どおりの成果をあげた

「水循環メカニズム解明のための富山県陸海統合モデルの開発と将来予測及び適應策の検証」

サブテーマ2目標	サブテーマ2の達成状況
<p>1) 富山県内の河川・地下水の水・栄養塩循環を再現する富山県水文モデルを開発する。(中央大学)</p> <p>2) 富山湾低次生態系モデルと富山県水文モデルを結合した富山県陸海統合モデルを開発し、富山県の水・栄養塩循環システムを再現し、水・栄養塩の輸送経路・輸送量を解明する。(愛媛大学・中央大学)</p> <p>3) 富山県陸海統合モデルを用い、気候変動シナリオ(RCP8.5及び2.6)による2050年及び2100年の気候変動影響下の水・栄養塩の変化を予測する。(愛媛大学・中央大学)</p> <p>4) 休耕田の活用や地下水利用に関する適応策の持続的な水循環システム構築への効果及び有用性を数値モデルで検証する。(愛媛大学・中央大学)</p>	<p>1) 富山県内の河川水の水・栄養塩循環を再現する水文モデルを開発した(図2-1)。(成果番号46, 47, 52)</p> <p>2) 富山県水文モデルの結果を富山湾低次生態系モデルに導入し、富山県陸海統合モデルを完成させた。さらに、同モデルに起源別の栄養塩の動態を表現し、河川由来と地下水由来の栄養塩の富山湾における基礎生産への寄与を解明した(図2-6~図2-11)。</p> <p>3) 地球温暖化の6つのシナリオに伴う河川水流量の増加を流動モデルに、栄養塩付加の増加を生態系モデルにそれぞれ導入して、富山湾の低次生態系の将来予測変化を検討した。河口付近では、栄養塩濃度と植物プランクトン現存量の増加が一部のシナリオでみられ、特に8月と9月に目立った。</p> <p>4) 河川水と地下水の流量変動に対する感度解析から陸水流量変動の海洋生態系への影響および適応策の効果を評価した(成果番号44)。</p>

5-3. 研究成果の学術的意義と環境政策等への貢献

<得られた研究成果の学術的意義>

本研究の学術的意義は、① 安定・放射性同位体を用いて河川水、浅層・深層地下水の持つ様々な時間スケールで物質の輸送量を定量化し、それを水文モデルに組み入れることによって、気候変動と社会情勢の変化を考慮した、海域と陸域をつなぐ水・栄養塩循環システムを解明すること；② 富山県の水循環政策の推進に貢献することで、これらの統合に独創性がある。このように多面的な観点から河川・地下水系、更に沿岸海洋までを包含し、水・栄養塩循環メカニズム及び循環量をシステムとして捉えた研究は、富山県内では行われておらず、全国的にも稀である。気候変動が自然環境における循環の時間スケールに影響を及ぼすことを明らかにし、それを踏まえた持続可能な水・栄養塩循環管理を検討することは独創的な新しい試みであり、行政ニーズへの貢献も期待される。循環システムの解明、更には適切な施策の実施に向けた先導性を意識し、水環境・物質循環の専門家に加え、海洋モデル、水文モデルの専門家、更には行政関係者が一体となって、本課題に取り組む。

また、本研究は2014-2018年に実施された環境研究総合推進費戦略プロジェクトS-13-3の成果を活用しつつ、地域特性や地域社会の課題、気候変動の影響を踏まえた新たな水循環管理の提案を目指すものであり、富山県以外の地域にも活用が期待できる点で発展性がある。

<行政等に既に貢献した成果>

【1】水に対する温暖化対策としてカーボンニュートラル適応を盛り込むことに貢献

研究代表者の張はとやま21世紀水ビジョン推進委員、サブテーマ2分担者の手計は富山県環境審議会水環境専門部会委員として、各会議の議論に参画し、本研究成果を基に、富山県カーボンニュートラル戦略の策定、富山県水質環境計画(クリーンウォーター計画)、富山県地下水指針の改定に貢献した。特に、令和5年3月31日に策定された富山県の「富山県カーボンニュートラル戦略」内で、研究課題全体の研究概要が掲載され、富山県の気候変動に対する水環境・水資源への今後の対応(適応策)の計画に

貢献した。（「富山県カーボンニュートラル戦略」全体版のp125に課題番号とともに掲載されている。
富山県カーボンニュートラル戦略：[senryaku.pdf \(pref.toyama.jp\)](https://www.pref.toyama.jp/senryaku.pdf)）

【2】富山湾沿岸における海洋観測項目の拡充

富山湾沿岸における気候変動の影響評価、具体的には主に陸から沿岸海域への水・物質供給の変化を評価し、今後の将来予測の精度向上のために富山県環境科学センターでは、令和4年4月より通常の公共用水域水質調査に合わせて富山湾沿岸海域7地点で富山県独自に追加調査を実施している。新たに実施している調査内容は、① CTD観測（水深0～50m）、②水深別の栄養塩（ $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 $\text{SiO}_2\text{-Si}$ ）濃度測定である。これらの調査により、融雪水の流入による沿岸海域の水質への影響をより正確に評価が可能になる。加えて、富山湾沿岸海域における栄養塩の水平及び鉛直の詳細な3次元分布や、植物プランクトン等の基礎生産への栄養塩の利用状況なども評価することができる。これらのモニタリングを継続して実施することで、将来の地球温暖化等の気候変動による陸から富山湾沿岸海域への水・物質供給の影響評価に役立つことが期待される。

【3】県内農業（稲作）における気候変動適応策への貢献

2023年10月に富山市で開催された日本地下水学会秋季講演会に合わせて開催された公開シンポジウムにおいて、2023年の異常気象による稲作への影響を含め、温暖化が進行した場合のコシヒカリを主要品種とする県内の稲作への影響を紹介した。本シンポジウムには富山県の副知事も参加しており、その後富山県の水稲高温耐性品種として開発育成した「富富富」の栽培面積を6倍にする戦略目標が公表された。本研究で得られた成果が戦略策定の根拠の一つとして利用された。

<行政等に貢献することが見込まれる成果>

【4】休耕田を用いた地下水涵養事業面積の拡大

本研究の実施のために、研究期間中は富山県等の地方自治体関係部局との意見・情報交換を行う場を設置し、本研究課題の成果を報告し、実施面積拡大への共通理解を図った。（成果番号55, 57, 62, 63, 65, 66, 67, 68, 72, 73）これらの自治体との緊密な情報交換と連携強化により、地域の行政ニーズに基づいた研究が進められた。今後も要望に応じた科学的データを様々な機会を提供していきたい。

【5】富山県自然環境・社会環境GISデータの活用

富山県を対象とした詳細かつ歴史的な変遷を示すGISデータはこれまで公開されていなかったため、本プロジェクトで制作した富山県自然・社会環境GISが各種施策の基礎情報として利用されることが期待できる。また、CMIP6に基づく将来気象予測に基づき整備された富山県の降雪変化や平野部の気温の上昇に関する気象メッシュデータは、今後、農業・林業分野の適応策を検討するうえで重要な資料であり、行政での活用が期待されるほか、農林業に従事する生産者にも有益な情報を提供できると考えている。本研究で制作した富山県自然環境・社会環境GISは富山県の気候変動適応センターに指定されている富山県環境科学センターに提供することとなっており、今後環境科学センターにおいて運用が引き継がれ、継続的な情報発信が行われることが期待される。

本プロジェクトの成果として提案する気候変動適応策では、気候変動に対する県内の水循環及び農地・森林域の脆弱性を科学的に示すとともに、現在進められている施策や行政ニーズに基づいて提案する予定であり、富山県等が行う施策の各種計画や適応策に活用されることが期待される。

6. 研究成果の発表状況の概要

6-1. 成果の件数

成果の種別	件数
査読付き論文：	5
査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）：	0
その他誌上発表（査読なし）：	0
口頭発表（国際学会等・査読付き）：	0
口頭発表（学会等・査読なし）：	48
知的財産権：	0
「国民との科学・技術対話」の実施：	20
マスコミ等への公表・報道等：	9
研究成果による受賞：	6
その他の成果発表：	2

6-2. 主な査読付き論文等の主要な成果

成果番号	主要な成果（10件まで）
1	Katazakai, S., & Zhang, J. (2021). A quarter-century of nutrient load reduction leads to halving river nutrient fluxes and increasing nutrient limitation in coastal waters of central Japan. <i>Environmental Monitoring and Assessment</i> , 193(9), 573. https://doi.org/10.1007/s10661-021-09279-5
2	Katazakai, S., & Zhang, J. (2021). A shift from snow to rain in midlatitude Japan increases fresh submarine groundwater discharge and doubled inorganic carbon flux over 20 years. <i>Environmental Science & Technology</i> , 55(21), 14667-14675. https://doi.org/10.1021/acs.est.1c05108
3	Yang, H., Mishima, H., Katazakai, S., & Kanabu, M. (2022) Analytical approach using a chemical equilibrium formula and geochemical modeling for alkalinity measurements of small natural water samples. <i>Applied Geochemistry</i> , 105535. https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2022.105535
4	Leng, Q., Guo, X., Zhu, J., & Morimoto, A. (2023). Contribution of the open ocean to the nutrient and phytoplankton inventory in a semi-enclosed coastal sea. <i>Biogeosciences</i> , 20(20), 4323-4338. https://doi.org/10.5194/bg-20-4323-2023
5	Luo, Y., Shi, J., Guo, X., Mao, X., Yao, P., Zhao, B., Chen, L., & Wang Y. (2023). Yearly variations in nutrient supply in the East China Sea due to the Zhejiang coastal upwelling and Kuroshio intrusion. <i>J. Geophys. Res. Ocean</i> , 128, e2022JC019216. https://doi.org/10.1029/2022JC019216

7. 国際共同研究等の状況

<国際共同研究等の概要>

研究計画名：アジア縁辺海域（東シナ海、南シナ海）沿岸における富栄養化、赤潮、貧酸素化形成機構及びその対応策に関する研究

カウンターパート：インドネシア共和国・ジェンダール・ソディルマン国立大学、タイ王国・ブラパー大学、マレーシア・トレンガヌ大学、中華人民共和国・中国海洋大学、天津師範大学、大韓民国・ソウル大学、台湾・国立中央大学

連携状況：瀬戸内海始めとする日本沿岸海域の“貧栄養化”問題の顕在化に対し、アジア諸国のほとんどがその沿岸海域には依然として富栄養化等に起因する赤潮、貧酸素水が頻発しており、陸から海への栄養塩の排出抑制等は依然として深刻な問題である。その発生源、形成のメカニズム解明と対応策構築は喫緊の課題である。現在、富山大学（沿岸海洋の生物化学調査；張勁）、九州大学（海洋物理観測）、愛媛大学（低次生態系モデル；郭新宇）、長崎大学（水産学）及び海洋研究開発機構（衛星海洋学）を日本メンバーとして、アジア関係諸国との国際的な協力コミュニティによって、学際的共同研究調査を立案して、実施し始めている。

国際的な位置づけ：政府間海洋学委員会西太平洋小委員会（IOC/WESTPAC）傘下「健全で生産的な持続可能なアジア縁辺海域：地球規模の気候変動に対応した海洋環境変化の理解」（2021～2030、張は共同主席）と題した国際的協働プログラムを推進している。現在、日本・各大学、インドネシア共和国・ジェンダール・ソディルマン国立大学、タイ王国・ブラパー大学、マレーシア・トレンガヌ大学、中華人民共和国・中国海洋大学、大韓民国・ソウル大学等が参画している沿岸貧酸素水問題の解決を目的とする研究課題を、国連海洋科学の10年にあわせて提案する準備を開始している。

当該連携が本研究成果にもたらした効果：コア・プロジェクトを開始するにあたり、2022年11月30日、富山大学において「健全で持続可能な陸域・沿岸水に関する国際ブレインストーミング・ワークショップ」が開催された。ワークショップの目的は、西アフリカのカメルーンからの参加者を招き、WESTPAC諸国（タイ、インドネシア、バングラデシュ、中国、韓国、日本）における栄養塩と重金属のフラックスに関する既存の知識、研究ギャップ、課題に関する最新情報を収集することであった。ワークショップでは、陸域と沿岸の水システムの特徴、沿岸の調査方法（フィールドワークと実験室での分析）、既存の沿岸調査シーズ（データ、問題点、ギャップ、課題）、沿岸の総合的な水管理における経験、気候変動と沿岸水資源に対する人為的な影響に関する様々なトピックが、日本、インドネシア、カメルーン、タイ、中国、韓国、バングラデシュのケーススタディとして紹介された。各事例の簡単な内容は以下の通りである。日本の事例 栄養塩規制が必ずしも豊かで健全な海の回復につながらないことが示された。水と栄養塩の循環を再現し、生態系への影響を予測することが必要である。インドネシアの事例：天然資源や環境は、過剰な開発や持続可能性への配慮の欠如により、不足しつつある。公害、生息地の物理的劣化、天然資源の乱開発、海岸の摩滅、保護区の建造物化、自然災害など様々な問題がある。タイの事例：タイ上流湾（UGoT）における水質汚染と富栄養化、有機物と無機物の高負荷。UGoTにおける赤潮や低酸素症、気候変動などの問題が紹介された。カメルーンの事例：陸域と沿岸の水のネクサスに関する包括的なデータはない。都市化は沿岸環境を悪化させ、生態系を変化させている。工業排水やその他の人間活動に関連する問題があり、これらは栄養塩類、水質汚濁物質、水文地化学的動態のフラックスに影響を与えることが危惧された。中国からの発表では、富栄養化、脱酸素化、沿岸酸性化など、世界的な沿岸水問題に言及した。海底地下水湧出量（SGD）も、陸域システムと沿岸水生生態系をつなぐものとして重要である。例えば、渤海におけるSGD由来の栄養塩と炭素のフラックスとその季節変動はどのようなものなのか、あるいは沿岸の酸性化に対するSGDの制御メカニズムと貢献はどのようなものなのか。韓国からの参加者は、AMSにおける栄養塩の長期的な変化と現在の収支を懸念していた。バングラデシュでは、沿岸・海洋汚染に関心があり、沿岸・海洋水中の汚染物質、汚染レベルの判定、主要食品を摂取することによる生態学的・健康的リスクの評価などを行っている。また、いつ、どこで、どのような実地調査が可能か、誰がその調査を担当できるかも提示された。また、財政支援の可能性も示唆された。栄養フットプリントを理解するための混合プロセスに関するもう一つのコ

プロジェクトが計画され、コアプロジェクト会議に関する最初の交渉が行われた。3つ目の活動は、インドネシアで実施されたキャパシティ・ビルディングである。2022年12月に日本から2名の専門家がインドネシアを訪問し、学生や若手研究者を対象に講義や実験室・現場での実習を行った。詳細は以下の通りである。日本の富山大学とインドネシアの Jenderal Soedirman 大学の関係者は、12月に Jenderal Soedirman 大学で、WESTPAC のリソースの一部支援を受けて、協力の可能性を探るための会議を行った。ワークショップでは、特に地下水、水循環、環境分野での研究、海洋・沿岸分野での研究など、環境分野における学生の知識と見識を深めるため、富山大学の張淳氏による講義が行われた。その後、様々な研究分野における両大学間の協力の可能性について話し合われた。また、ラグーンへのフィールドトリップを実施し、沿岸域のフィールド調査に関する実習を行い、学生や若手研究者に対し、その地域でどのような研究が実施できるのか、また、若手研究者に対し、沿岸海域の海洋科学で実施可能なサンプリング技術に関するキャパシティ・ビルディングを行うとともに、周辺環境が損なわれないように保護・保全するためにどのような措置を講じることができるのかについての知識を提供した。両大学間のワークショップを通じて、日本とインドネシア間の沿岸海洋科学分野におけるキャパシティ・ビルディングと研究協力のプロセスが構築された。これは様々な研究分野における国際協力のためのパイロット・プログラムであり、他の国との間にも設置される可能性がある。

<相手機関・国・地域名>

機関名	国・地域名（本部所在地等）
ジェンダール・ソディルマン国立大学	インドネシア共和国・プルウォルケト
ブラパー大学	タイ王国・チョンブリー
トレンガヌ大学	マレーシア・トレンガヌ
中国海洋大学	中華人民共和国・青島
天津師範大学	中華人民共和国・天津
ソウル大学	大韓民国・ソウル
国立中央大学	台湾・桃園

8. 研究者略歴

<研究代表者略歴>

代表者氏名	略歴（学歴、学位、経歴、現職、研究テーマ等）
張 勁	東京大学大学院理学系研究科化学専攻博士課程修了 博士（理学） 科学技術庁放射線医学総合研究所特別研究員、富山大学理学部講師・助教授・准教授を経て、 現在、富山大学学術研究部理学系教授 専門は沿岸化学海洋学・水文学 研究テーマは、陸・海の物質循環

＜研究分担者（サブテーマリーダー）略歴＞

分担者氏名	略歴（学歴、学位、現職、研究テーマ等）	参画期間
1) 郭 新宇	愛媛大学大学院理工学研究科博士後期課程修了 博士（工学） 東京大学海洋研究所COE研究員、地球フロンティア研究システム研究員、愛媛大学沿岸環境科学研究センター助教授・准教授を経て 現在、愛媛大学沿岸環境科学研究センター教授 主に沿岸域の流動構造と栄養塩輸送を研究	2021年度 ～ 2023年度

Ⅱ. 成果の詳細

Ⅱ-1 サブテーマ1「少雪・多雨化に適応する持続的な水循環管理方法の提案」

[サブテーマ1 要旨]

サブテーマ1では、気候変動に対する持続可能な水循環管理方法の提案を目指し、気候変動が水・栄養塩循環に及ぼす影響の科学的根拠及び歴史的变化を把握するための調査と解析を行った。富山県全域を網羅する約80地点で調査し、山・森・川・海における河川水や地下水の水・栄養塩循環メカニズムに関して化学トレーサー等を用いて評価した。少雪・多雨化に適応する持続的な水循環管理方法として、地下水量保全と地下水への栄養塩付加が期待される休耕田を活用した地下水涵養に焦点を当て、その効果を定量的に評価した。化学トレーサーによる地下水分析の結果と当研究で開発した地下水シミュレーションの結果を組み合わせることで、各地域での効果的な休耕地利用方法を提案した。1981年からの観測データの分析と、気候変動に伴う水循環の将来変動予測結果を解析し、気候変動による影響の要因と影響を受けやすい変動要素を検討した。富山県内の1980年代から2020年までの環境・社会情報のGIS化を進め、必要な情報の2次元的な時間変化データベースを作成して公開した。富山県の社会情勢及び既往の行政施策を踏まえ、持続的な水・栄養塩循環のための水源の管理・休耕田活用方法・地下水利用方法等を提案した。また、地下水資源の持続的な利用の観点から、地下水位の変動予測の可能性についても検証した。

1. サブテーマ1 研究開発目的

持続的な水循環管理方法の提案をするために、サブテーマ1では気候変動の水・栄養塩循環への影響の科学的根拠及び歴史的变化の把握に取り組んだ。具体的には、下記に示す「安定・放射性同位体トレーサーを用いた時空間的な水・栄養塩循環の把握・定量化、長期観測データに基づく変動因子の抽出、水循環に係る自然・社会環境情報の2次元時間変化データベースの整備」を進めたほか、適応策として、休耕田による涵養機能や効果的な活用方法について検討した。

2. サブテーマ1 研究目標

サブテーマ1	「少雪・多雨化に適応する持続的な水循環管理方法の提案」
サブテーマ1 実施機関	富山大学、富山県環境科学センター、(公財)環日本海環境協力センター
サブテーマ1 目標	<ol style="list-style-type: none"> 1) 富山県全域を網羅する約80地点で調査し、安定・放射性同位体等トレーサーによる分析を行う。山・森・川・海において河川水、浅層・深層地下水の時空間的に複合した水・栄養塩循環のメカニズムを解明する。(富山大学) 2) 休耕田を利用した地下水涵養に着目し、涵養に伴う地下水量・地下水質の改善効果を定量的に把握し、効率的・効果的な休耕田活用方法を提案する。(富山大学) 3) 1981年からの観測データの分析と、気候変動に伴う水循環の将来変動予測結果を解析し、気候変動による影響の要因と影響を受けやすい変動要素を特定する。(環境科学センター) 4) 富山県内の1980年代から2020年までの環境・社会情報のGIS化を進め、必要な情報の2次元的な時間変化データベースを作成する。(環日本海環境協力センター) 5) 気候変動に伴う将来の水・栄養塩循環システムの変化に適応するため、富山県の社会情勢及び既往の行政施策を踏まえ、持続的な水・栄養塩循環のための水源の管理・休耕田活用方法・地下水利用方法などを提案する。(環日本海環境協力センター)

3. サブテーマ1 研究開発内容

[1-1. 安定・放射性同位体トレーサーを用いた水・栄養塩循環メカニズムの解明及び定量化]

富山県内3つの扇状地（黒部川・片貝川・庄川）の83地点において地下水の採水を行い、水素・酸素安定同位体比による水源の特定と、放射性同位体（トリチウム）による滞留時間の解明を進めた。水を構成する水素・酸素の安定同位体比は、低標高域から高標高域に向かって同位体比が低くなる特徴をもち、これらを利用することで水の起源標高を把握することができる。また、トリチウムの半減期が12.3年であることを利用し、気候変動に伴う地下水の滞留時間の変化を推定した。同位体の測定と合わせて、硝酸やリン酸に代表される栄養塩濃度測定も実施することで、各扇状地の地下水中の栄養塩動態も評価を行った。得られた結果を過去の観測データと比較し、気候変動の影響や社会環境の変化の影響を検証した。

[1-2. 休耕田を利用した地下水涵養効果の検証]

上述の1にて得られた結果を踏まえ、適応策に対応する富山県東部2か所、西部1か所の休耕田を選定し、採水調査と浸透量観測を行い、各地域の地下水涵養効果と地下水への栄養塩付加効果を検証した。

[1-3. 長期観測データに基づく気候変動に伴う変動要因の抽出]

富山県環境科学センターが実施している公共水域水質調査（海域：1977～、河川：1981～）の水質データを解析し、気候変動に伴う影響を特定した。

[1-4. 富山県自然・社会環境情報GISの構築]

社会環境情報として、1980年代からの人工衛星画像を入手し、教師付き分類及び機械学習により、高分解能の土地利用とその変遷を可視化した。分類にあたっては、水循環に係る森林域や農地に関して細分化を試みた。土地利用図と合わせて、農業・食品産業技術総合研究機構及び国立環境研究所が公開する気象メッシュデータを活用し、1980年から2100年までの富山県気象メッシュデータを整備した。

[1-5. 気候変動適応策の検討]

これまで得られた成果及び富山県が実施する様々な施策を踏まえ、将来の気候変動予測に応じて実施すべき適応策について検討を進めた。初年度は地下水保全のための水源確保として、休耕田を活用した地下水涵養と農地の利用状況（特に耕作放棄地）に注目し、情報の収集、適応オプションの検討を進めた。

4. サブテーマ1 結果及び考察

[1-1. 水・栄養塩循環メカニズムの解明]

富山県東部に位置する(a)片貝川扇状地の沿岸海域及び(b)黒部川扇状地の沿岸海域の海底から湧出する浅層地下水（以下、淡水性海底湧水）は、富山大学での先行研究（中口・張ら、2005）から、異なる水質形成プロセスであることが明らかにされている（図1-1）。具体的には、(a)片貝川扇状地沖の淡水性海底湧水は平野部地表面からの浸透の影響をほとんど受けずに旧河道を流れる「旧河道接続型」であるのに対し、(b)黒部川扇状地沖では、平野部地表面からの浸透の影響を受けながら流れる「表層地下水接続型」である。また、本研究で対象とした海底湧水が確認されていない(c)庄川扇状地（富山県西部）の地下水は、「表層地下水接続型」に分類される。本研究では、この性質の異なる2つの水質形成プロセスに着目し、扇状地地下水の広域的な調査を実施した。加えて、淡水性海底湧水とともに富山湾への主要な栄養塩供給源である富山県内5つの1級河川を始めとし、全14河川の富山県水質モニタリングデータの解析を行った。

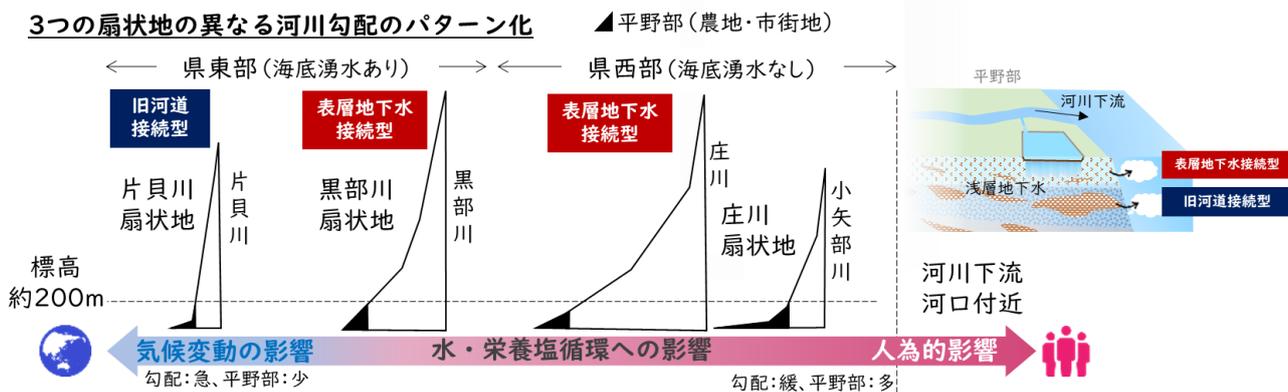


図 1 - 1 本研究対象地域の水・栄養塩循環メカニズム及び影響要素

【旧河道接続型・片貝川扇状地地下水の変化】

旧河道接続型の淡水性海底湧水が存在する(a)片貝川扇状地では、環境研究総合推進費S-13-3でのシミュレーション結果で、少雪・多雨化に伴う淡水性海底湧水の湧出量増加が確認されている(Zhang et al., 2017)。陸水の量的変化は同時に水質の変化をもたらすと推測されることから、本研究では約20年前の本研究室の地下水の化学分析データ(溶存成分濃度、安定・放射性同位体)と現在の観測値を比較した。その結果の概要は、図 1 - 2と下記に示す。

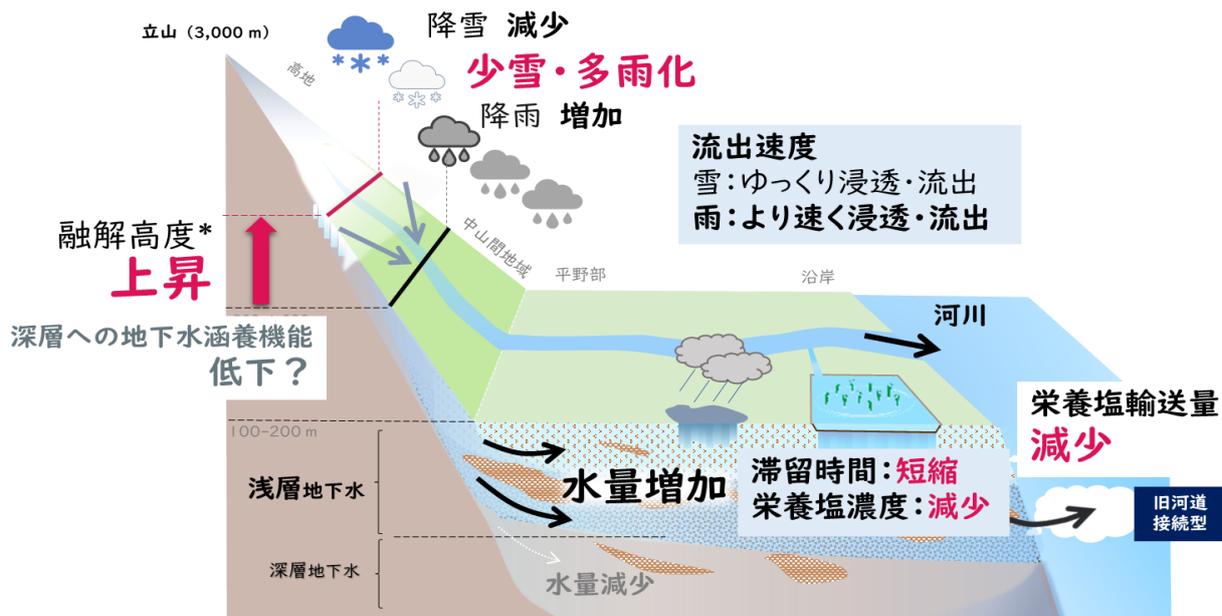


図 1 - 2 片貝川流域における水循環変化のメカニズム

片貝川流域では、気候変動に伴う温暖化により、降雨と降雪の境界標高である融解高度は、約20年前に比べて100~250m程度上昇していることが推定された。加えて、片貝川扇状地の浅層地下水及び沿岸海底湧水の起源標高である涵養標高を、水を構成する水素・酸素の安定同位体比を用いて算出したところ、融解高度と涵養標高はほぼ一致しており、かつ20年前と比較したところ、涵養標高も融解高度と同程度上昇していることが明らかとなった。この変化は、従来「雪のダム」として蓄えられていた雪由来の水が、降雨となったことにより短時間で山間部から平野部の浅層地下水へ流出する水量が増加したことが主要な要因と考えられる(図 1 - 2)。この仮説は、実測の放射性同位体であるトリチウム(半減期:12.3年)の濃度から推定した地下水の滞留時間の変化からも支持され、具体的には20年前に比べて滞留時間が1/3程度短くなっていることが分かった。このような地下水の流動状況の変化、具体的には地下水の山間部から平野部への滞留時間の短縮は、森林地域等の地面から地下水へ溶出する栄養塩量の減少をもたらすと考えられ、実際の分析結果を比較したところ、地下水中の栄養塩(窒素、リン等)等

の溶存成分濃度は約10-30%も減少していることが明らかとなった。これら滞留時間の短縮及び溶存成分濃度の低下の変化率は、環境研究総合推進費S-13-3の研究成果で明らかになった淡水性海底湧水の湧出量の増加率（10-30%）とほぼ一致していた。以上のことから、旧河道接続型の片貝川扇状地浅層地下水は、少雪・多雨化により滞留時間の短縮と栄養塩濃度の低下が起きていることが明らかとなった（成果番号2, 8, 11, 26, 29, 56, 63, 64, 65, 66, 67, 70, 71, 72, 73, 83, 85）。

【表層地下水接続型・黒部川扇状地地下水の変化】

上述の(b) 黒部川扇状地では、平野部の土地利用形態の変化（水田面積の減少）の影響が気候変動の影響に比べて強く表れた（成果番号19）。平野部の水田面積が減少したことで水田からの地下水涵養量が減少し、水田土壌から地下水に溶出する栄養塩量が減少したため、地下水の栄養塩濃度、特に硝酸態窒素濃度の顕著な減少が確認された。硝酸態窒素の沿岸海域への供給減少量は、過去30年間で約1,200トンと見積もられ、黒部川の年間付加量（約1,100トン）に匹敵する供給量が失われたことになる。以上のことから、平野部地表面からの浸透の影響を受けながら旧河道を流れる「表層地下水接続型」の黒部川扇状地浅層地下水では、水田面積の減少によって栄養塩付加量の減少が起きていると考えられた。

【表層地下水接続型・庄川扇状地地下水の変化】

富山県西部の庄川扇状地では、2000～2022年における観測データと1960年代及び1980年代の文献値を比較し、化学分析値に基づく約半世紀における地下水の流動・起源解析を行った（成果番号6, 21）。酸素同位体比と塩化物イオン濃度を組み合わせた起源解析の結果、庄川扇状地地下水は、降水の直接浸透、水田等の灌漑水、庄川河川水の3つの成分が混合した水であることが明らかとなった。これらの涵養源の割合を試算すると、ほとんどの地点の地下水では「降水の直接浸透＋水田等の灌漑水」による地表からの浸透割合が50%を超えていることが推定された。

庄川扇状地では、洪水被害の減災のための河川河床整備により、庄川から平野部地下水への浸透量が減少したと指摘されている（富山県、1985）。本研究の化学分析に基づく地下水の起源解析でも、1960年代～1990年の間に庄川からの浸透水の影響範囲が縮小していることが確認された。しかし、1993年の砂利採取規制後にあたる2000～2022年の観測データでは、庄川扇状地地下水における庄川からの浸透範囲は縮小していないことが分かった。したがって、現在の庄川扇状地における地下水の涵養状況は安定しており、それは庄川の砂利採取規制によって維持されていることが考えられた。また、将来の地下水量確保のためには平野部での地下水涵養が重要であり、特に水田や休耕田を利用した地下水涵養事業が必要であることが示された。

【富山県内河川の栄養塩濃度と陸から富山湾沿岸への供給量の変化】

富山県では、主要5河川（小矢部川、庄川、神通川、常願寺川、黒部川）と呼ばれる1級水系から、沿岸海域へ豊富な栄養塩が供給されている。しかしながら、その栄養塩供給量は20年前と比較して3～5割も減少しており、浅層地下水（海底湧水）の栄養塩の減少率よりも高いことが明らかとなった（成果番号1, 10）。この減少は、気候変動に加えて、土地利用の変化や下水・污水处理施設の普及等、様々な要因が複合的に影響を及ぼしていると考えられる。この結果は、サブテーマ2の[2-1]のシミュレーション結果と調和的であり、本研究では、富山湾沿岸へ流入する河川水中の栄養塩濃度を調整して増加させる必要性を、化学分析（サブテーマ1）と富山県水文モデル（サブテーマ2）の異なるアプローチから示すことができた。

[1-2. 休耕田地下水涵養実験]

上記の[1-1]で示したように、気候変動の影響や水田面積の減少に伴う地下水への栄養塩の涵養量が減少したことを受け、何らかの方法で消失分を補完する適応策が必要である。その一つの適応策として、本研究では利用されていない農地（休耕田）を活用して地下水涵養を行う休耕田地下水涵養に着目した。具体的には、気候変動の影響への適応策①として片貝川上流部中山間地域（魚津市別又）と、土地利用変化等の人為的削減の影響への適応策②として黒部川扇状地平野部（入善町）の2か所を選定し、各地域の地下水涵養効果の定量的評価を行った（図 1 - 3）。

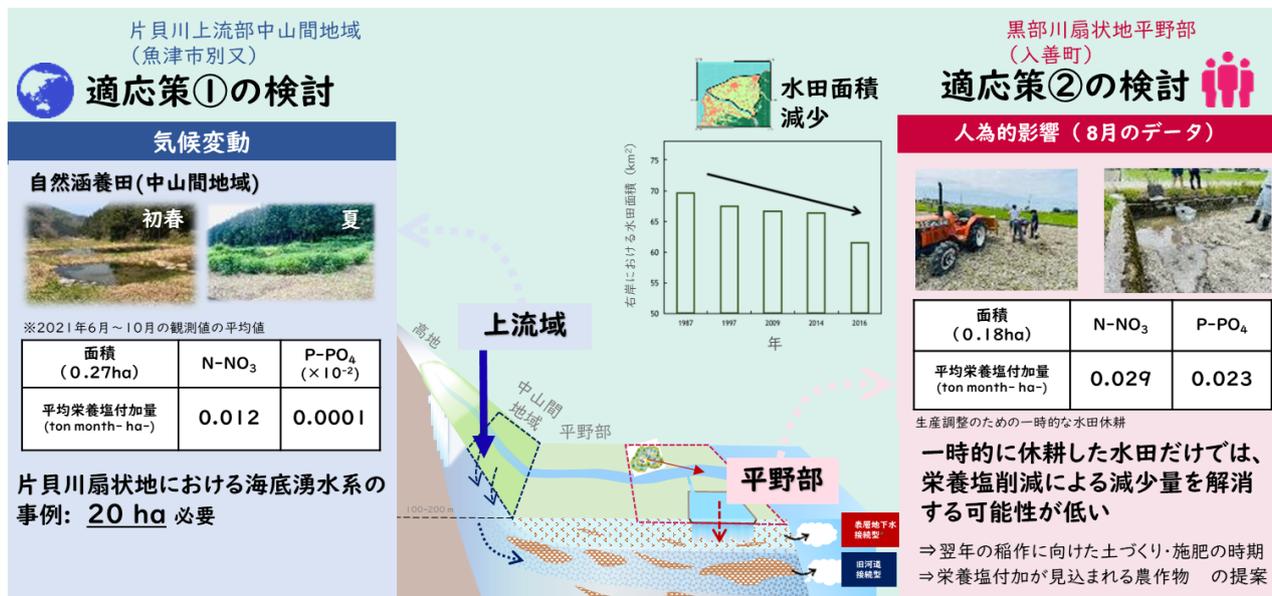


図 1 - 3 休耕田を活用した地下水涵養の効果

適応策① 気候変動の影響：片貝川上流部中山間地域（魚津市）の自然涵養田（0.27ha）から地下水への栄養塩付加量は、硝酸態窒素で0.012 トン/月/ha、リン酸態リンで 0.0001×10^{-2} トン/月/haと見積もられた。この実測値をもとに、旧河道接続型・片貝川扇状地地下水の栄養塩減少分を補うために必要な中山間部の休耕田面積を推定したところ、約20haであることが分かった。現在、魚津市では中山間地域での休耕田涵養面積は約3.8haまで拡大している（魚津市長及び魚津市生活環境課からの情報提供）。[1-4]で示されたGIS結果からも拡大の余地が十分にあることから、今後、魚津市とより緊密に連携しながら地下水涵養効果の定量的評価の実施を継続する予定である（成果番号12, 18, 86, 87）。

適応策② 土地利用変化等の人為的削減の影響：黒部川扇状地において、米の年間生産量調整のための一時的な休耕田（0.18ha）で実施した実験では、各付加量が硝酸態窒素で0.029 トン/月/ha、リン酸態リンで0.023 トン/月/haとの結果が得られた。しかし、黒部川扇状地平野部には継続的な休耕田が少なく、ほとんどが生産量調整のための一時的な休耕田であるが、実際に失われた地下水・栄養塩の供給量を補うためにはある程度の面積で継続的な涵養を行う必要がある。この化学分析の結果を受け、サブテーマ2 [2-2]では、富山湾への栄養塩供給量の将来予測結果も考慮した地下水涵養の実施面積も試算した。これらに加え、次年度の稲作に向けた土づくりの時期及び回数の変更や耕作土壌から地下水への栄養塩付加効果が高い農作物の栽培等の工夫をすることで、効率的に損失分を補うことができると考えている（成果番号15, 20, 37, 73）。

[1-3. 長期観測データから見る気候変動の影響]

公共水域水質調査で年12回の測定を実施している観測点のデータに関し、河川については1981年からの37年間、海域については1977年からの41年間のデータを解析した。Mann-Kendall検定でトレンドを検出し、優位な変動傾向が見られたものについて、Sen's Slopeにより変化率を求めた(成果番号23)。

河川水温は、比較的河川延長が長くて集水域が低地に広がる西部及び中部の河川を中心に優位な上昇傾向が見られた。pHは東部の河川を中心に優位な上昇傾向が見られ、溶存酸素では河川によって上昇と下降、両方の傾向が見られた（表 1 - 1）。また、県東部に位置し、上流にダムのない境川において融雪期（3～5月）の水温の経年変化を確認したところ、4月及び5月には優位な上昇傾向が見られないものの、3月には+0.05℃/年の上昇傾向が見られた。

一方、沿岸海域の海水温は、神通川・小矢部川河口域で優位な水温上昇が確認され、主に春先及び初夏に優位な水温上昇が顕著であった。

表 1 - 1 河川水質の長期変動傾向

区分	水系	河川名	地点	地点名	水温	pH	DO	県土木部河川課資料より			
					傾き(℃/年)	傾き(/年)	傾き(/年)	河川延長(km)	流域面積(km ²)	ダムの有無	
西部	1級	小矢部川	小矢部川	上	太美橋	—	+0.017	—	366.3	667	有
				中	国条橋	+0.029	—	—			
				下	城光寺橋	+0.026	—	+0.027			
	山田川	上	二が淵堰堤	+0.037	+0.019	-0.014					
1級	庄川	庄川	中	雄神橋	+0.039	—	—	167.1	1,180	有	
			下	大門大橋	+0.030	—	—				
中部	1級	神通川	神通川	上	新国境橋	+0.031	+0.019	—	350.7	2,720	有
				下	神通大橋	+0.043	—	—			
				下	荻浦橋	+0.046	—	+0.017			
	1級	常願寺川	常願寺川	中	常願寺橋	—	—	—	145.2	368	有
				下	今川橋	+0.036	—	+0.012			
	2級	白岩川	白岩川	中	泉正橋	—	+0.014	—	87.3	170	有
下	東西橋			+0.029	+0.006	—					
上	寺田橋			—	+0.016	-0.007					
		栃津川	上	寺田橋	—	+0.016	-0.007			なし	
			下	流観橋	—	+0.015	+0.003				
東部	1級	早月川	早月川	下	早月橋	—	+0.017	-0.008	45.2	134	なし
	1級	片貝川	片貝川	下	落合橋	+0.036	+0.022	-0.017	59.5	169	なし
	1級	黒部川	黒部川	下	黒部橋	—	—	+0.011	141.8	682	有
	2級	小川	小川	上	上朝日橋	—	+0.021	—	30.7	90	有
				下	赤川橋	—	+0.020	—			
			舟川	中	舟川橋	—	+0.015	—			有
	2級	笹川	笹川	下	笹川橋	—	+0.022	-0.005	4.9	17	なし
	2級	境川	境川	下	境橋	—	+0.017	-0.007	13.0	58	なし

※ 月1回採水時の水温12か月の年度平均値（1981～2018年度）を使用。ただし、片貝川落合橋のデータは1983～2018年度。

公共用水域調査の観測結果を用いた解析方法において水温の変化要因を解析するため、使用したデータの採水時刻の違いによる気温変化について検証した。最初に、採水時刻のばらつきを評価するため、地点ごとに採水時刻のばらつきを確認した。その結果、河川及び海域のすべての地点で、採水時間の標準偏差の3倍が1時間を上回り、最大で6.5時間のばらつきが生じており、観測時間での気温は、気温の長期トレンドと同程度かそれ以上のとなる。そのため、気温上昇による水温の変化傾向をとらえるためには、公共用水域調査の結果に含まれない調査時間のばらつきを考慮して、調査時間の統一や水質の連続観測が必要である。

気候変動による気温の上昇が水温に与える影響について評価するため、気温と水温、水温と水質汚濁指標の相関を解析した。データに含まれる長期トレンドや季節変化が相関係数に与える影響を除去するため、解析には統計数理研究所で開発されたTIMSACパッケージに含まれるdecomp関数を用いて、各データからトレンド成分及び季節成分を抽出し、それらを各データから減じたものを使用した。河川の全地点で気温と水温は正の相関があり、特に下流部及び人為的影響（工場や家庭からの排水流入による影響）の小さい河川において相関係数が大きく、気温は河川水温に強く影響を与えていると考えられる（表 1 - 2 左）。海域における、水温と水質汚濁指標であるCODの相関を解析した結果、多くの地点で水温とCODに正の相関がみられた（表 1 - 2 右）。この原因を詳細に解析するため過去の6～9月の調査結果を対象に、環境基準値超過の要因を場合分けして解析した結果（表 1 - 3）、原因は日射量であることが分かった。これは、栄養塩を基にした内部生産がCODの上昇に寄与している可能性があるため、海域での栄養塩濃度の調査を詳細に実施することで、将来の水質への影響を評価できる可能性がある。

表 1 - 2 気温及び水温と水質項目の相関（左：河川、右：海域）

地点		気温-水温	水温-pH	水温-DO	水温-BOD	水温-SS
西部	太美	0.49	0.11	-0.43	0.14	-0.08
	国条	0.64	0.09	-0.31	-0.02	-0.04
	城光寺	0.68	0.03	-0.55	-0.01	-0.09
	二ヶ淵	0.50	0.08	-0.55	0.15	-0.05
	雄神	0.49	0.07	-0.32	0.07	-0.11
	大門	0.59	0.12	-0.25	0.03	-0.12
中部	新国境	0.49	-0.01	-0.48	0.07	-0.01
	神通	0.68	0.06	-0.34	0.13	-0.06
	荻浦	0.68	0.03	-0.51	0.06	-0.07
	高田	0.68	-0.03	-0.32	0.15	-0.07
	井田	0.64	0.04	-0.37	0.07	-0.12
	八幡	0.68	0.13	-0.22	0.25	-0.01
	常願寺	0.65	0.08	-0.44	0.21	-0.20
	今川	0.60	-0.04	-0.20	0.07	0.03
	泉正	0.70	0.19	-0.24	0.06	-0.15
	東西	0.74	-0.05	-0.39	-0.03	-0.07
	寺田	0.74	0.40	-0.32	0.13	-0.13
	流観	0.73	0.21	-0.42	0.08	-0.12
	早月	0.65	0.17	-0.58	0.02	-0.07
東部	片貝	0.69	0.34	-0.37	0.07	-0.08
	下黒部	0.65	0.19	-0.49	0.02	-0.18
	上朝日	0.59	0.03	-0.64	0.05	-0.13
	赤川	0.69	0.14	-0.56	0.06	-0.06
	舟川	0.65	0.09	-0.49	0.12	0.02
	笹川	0.79	0.20	-0.62	0.08	-0.11
	境川	0.61	0.18	-0.54	-0.01	-0.11
	地点		気温-水温	水温-pH	水温-DO	水温-COD
	富山新港	新港 1	0.47	-0.07	-0.16	-0.02
小矢部 2		0.51	0.03	-0.23	0.08	
小矢部川 河口海域	小矢部 3	0.48	0.03	-0.40	0.10	
	小矢部 5	0.55	0.00	-0.21	0.13	
	小矢部 6	0.49	0.00	-0.29	0.12	
	神通 1	0.54	0.00	-0.20	0.16	
神通川 河口海域	神通 2	0.52	-0.04	-0.16	0.19	
	神通 3	0.49	-0.06	-0.22	0.08	
	神通 4	0.56	-0.01	-0.15	0.18	
	神通 5	0.57	-0.05	-0.15	0.19	
	神通 6	0.50	-0.04	-0.10	0.14	
	その他 海域	小矢部 7	0.58	0.00	-0.25	0.14
神通 7		0.58	-0.03	-0.15	0.16	
その他 1		0.53	0.07	-0.40	0.03	
その他 2		0.57	0.05	-0.34	0.08	
その他 3		0.56	0.06	-0.32	0.08	
その他 4		0.43	0.02	-0.30	0.06	
その他 5		0.50	0.01	-0.19	0.13	
その他 6		0.54	0.00	-0.14	0.18	
その他 7		0.57	0.08	-0.15	0.21	
その他 8		0.59	0.02	-0.19	0.17	
その他 9	0.57	-0.02	-0.24	0.22		
その他 10	0.57	0.00	-0.19	0.19		

表 1 - 3 COD超過要因の分類

①	日射量 (短期)	直近 2 日の全天日射量が両日 ともに 20MJ/m ² 以上
②	日射量 (長期)	直近 5 日の全天日射量が 15MJ/m ² 以上の日が 3 日以上 かつ①に当てはまらない
③	吹送流	採水時陸方向へ風速 2 m/s 以上 の風が吹いていた (汚濁が 拡散しにくい)
④	河川汚濁	直近 3 日の降水量の合計が 50 mm以上
⑤	高水温	採取時水温が 6 ~ 9 月の平均 水温 (季節成分を除く) より 2℃以上高い
⑥	その他	①~⑤に当てはまらない

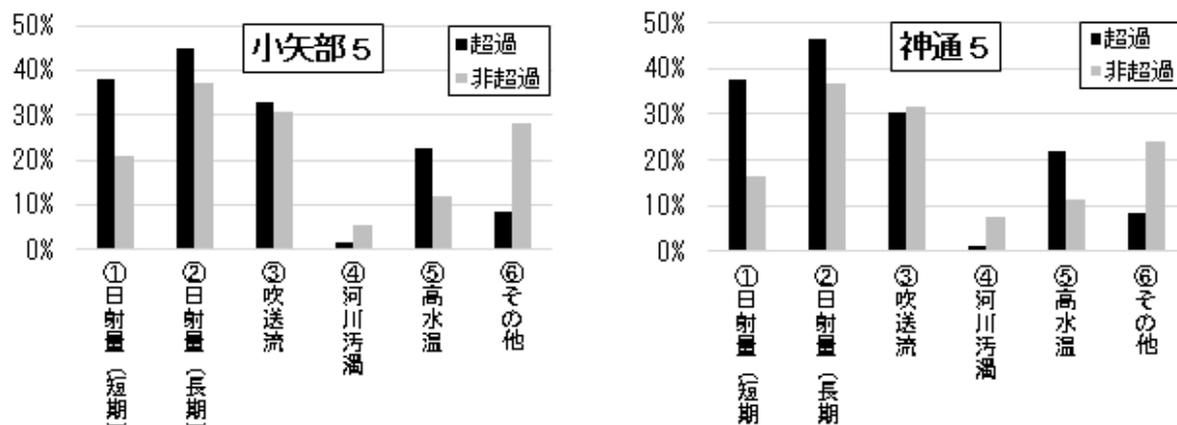


図 1 - 4 COD超過要因の超過時、非超過時の出現割合

[1-4. 富山県自然環境・社会環境GIS]

アメリカ合衆国地質調査所が無償で提供している人工衛星（Landsat、解像度30m）の画像を入手し、雲の影響が少ない画像を選別したのち、教師付き分類による画像解析を行い、土地利用分布マップを開発した。教師付き分類による判定だけでは、撮影時の光環境による誤判定が原因で判定精度が低下する恐れがあるため、複数の画像判定結果を機械学習させ、明らかに他の画像と判定が異なる場合は再判定を行い、判定精度の向上を図った。その結果、高い判定精度の土地利用マップが得られただけではなく、スムーズな土地利用変遷データを得ることができた（図 1 - 5）。

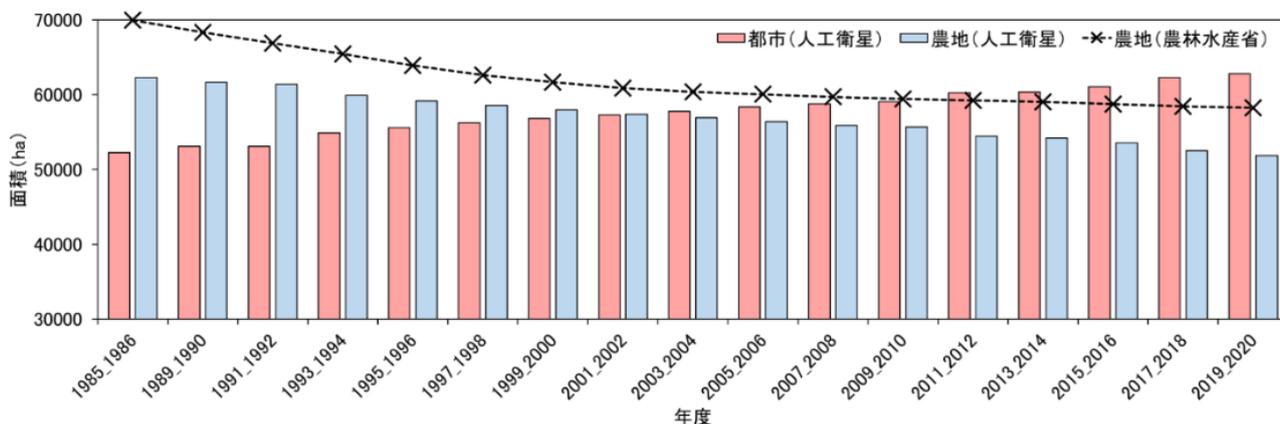


図 1 - 5 人工衛星画像解析によって推定された都市部及び農地面積の推移

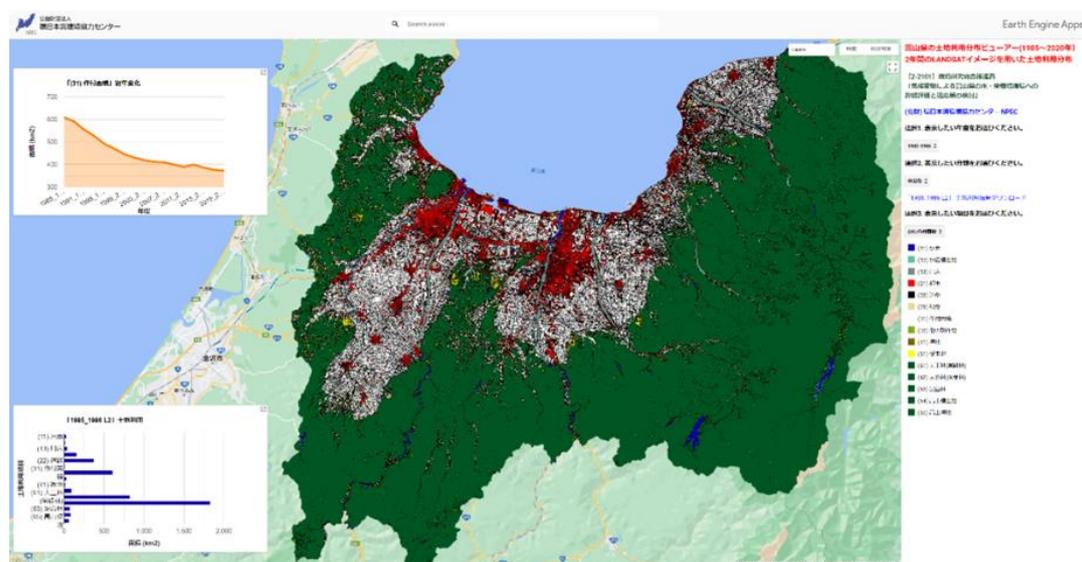


図 1 - 6 富山県土地利用マップ (<https://ertdf2-2101.users.earthengine.app/view/toyamalulc>)

さらに、本研究では水循環に着目していることから、水源として重要な農地と森林域に関して、正規化植生指数及び正規化水指数による利用形態と植生の細分化を試み、水田、果樹園、その他農地（休耕地や耕作放棄地を含む）及び人工林と天然林に分類した。得られた土地利用マップは、年ごとの利用形態別面積やその経年変化が確認できるよう、Google Earth Engineを用いてWEB上に公開した（図 1 - 6；成果番号90）。さらに、社会変動シナリオ（将来推計人口、市町村都市計画など）を用い、2050年までの土地利用変化の予測実験も行った。その結果、2030～2050年の間は10年あたり約500 haの農地が減少し都市化が進むと予測された（図 1 - 7）

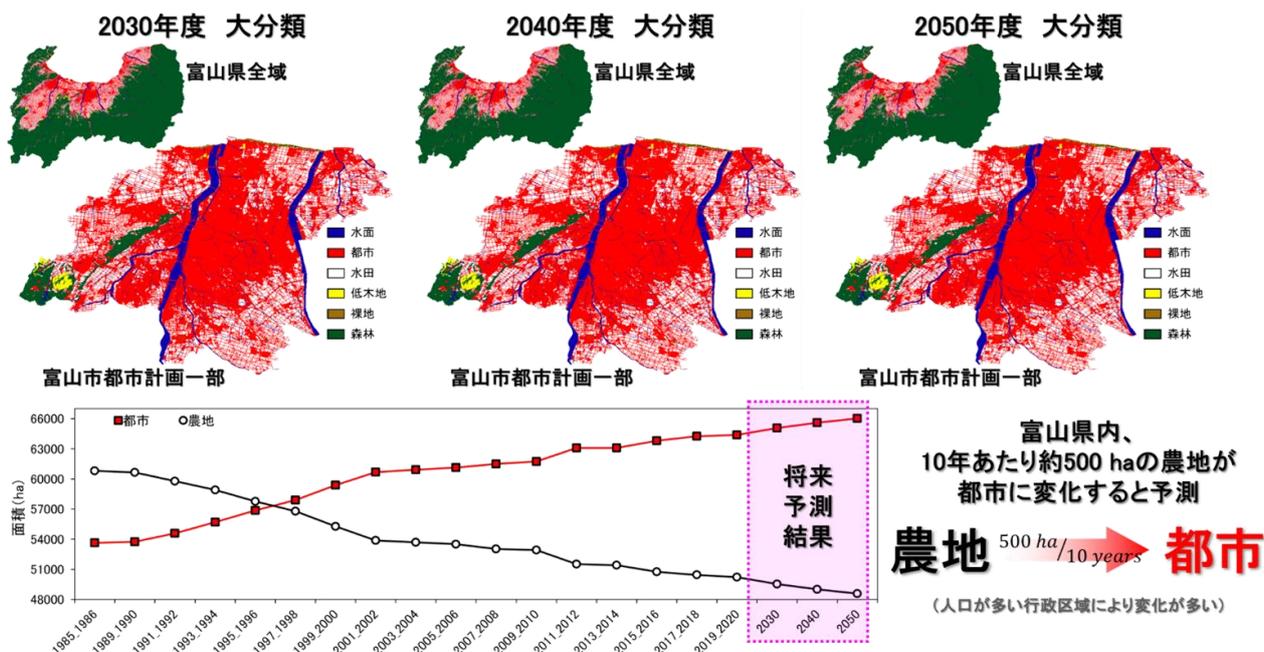


図 1 - 7 富山県土地利用マップの将来予測結果

土地利用マップに加えて、過去から将来に至る気象データを気象メッシュデータとして整備した。農研機構が提供するメッシュ農業気象データ（データ分解能：1km×1km、データ期間：1980～現在）及び国立環境研究所が運用するWebGIS気候変動で公開されている将来予測値（データ分解能：1km×1km、データ期間：現在～2100）を活用し、1980年から2100年までの県内のマンスリー気象メッシュデータを整備し、WEB上に公開した（成果番号89）。本研究で整備・開発した気象データをもとに、気候変動に伴う県内の積雪水量の変化を推定したところ、減少量は高標高帯ほど大きくなることが明らかとなった（図 1 - 8）。

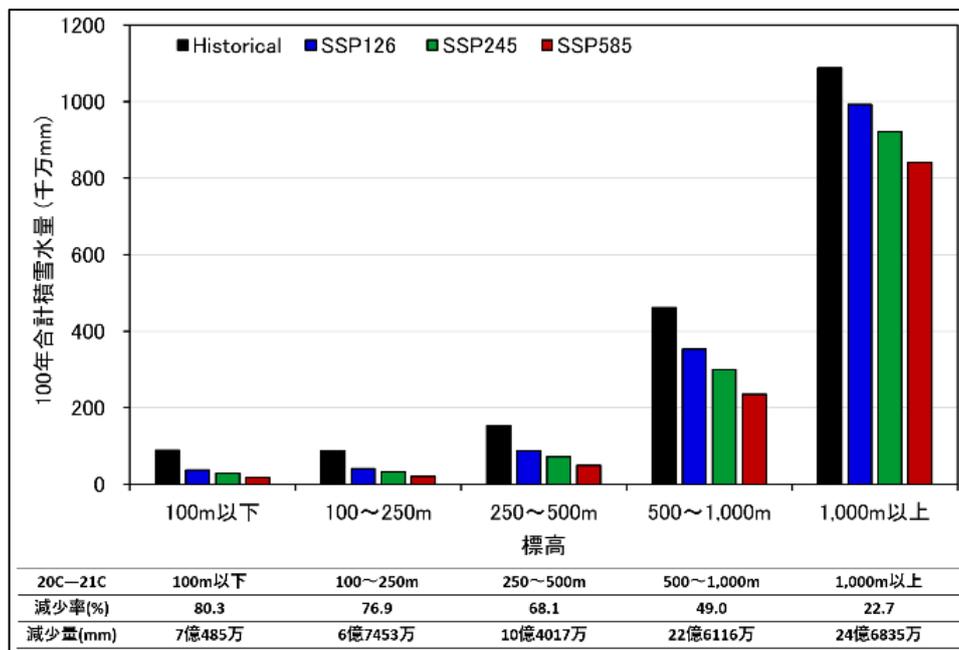


図 1 - 8 標高別100年間の合計積雪水量の変化

黒：過去100年間の合計積雪水量。青、緑、赤：それぞれSSP126、SSP245、SSP585で予測される気象データをもとに推計した100年間の合計積雪水量

[1-5. 気候変動適応策：中山間地域の活用法]

富山県内の降水や土地利用に伴う地下水涵養量及び地下に浸透した水の流れを把握することを目的に、富山県地下水流動モデルを開発した。本モデルはU.S. Geological Surveyが開発した地下水流動モデルMODFLOWを用いた。県全体の地質データが整備されていないことから、鉛直的な地質分布は4層に単純化している。モデルの概要を図1-9に示す。流入条件として、降雨や降雪に伴う土地利用に準じた涵養量を算出し、流出条件として、県内の年間地下水揚水量をもとに、気象条件から推定される消雪用地下水揚水量と、工業用等の常時利用される地下水揚水量をメッシュ単位で日別に与えている。モデルの精度検証として、県内31の観測井での地下水位変動との整合性を比較した。河川からの影響が強いと考えられる一部の地域で地下水位変動の再現が低い、それ以外の地域ではおおむね変動を再現できたことから、本モデルを各種適応策の効果検証に用いた。

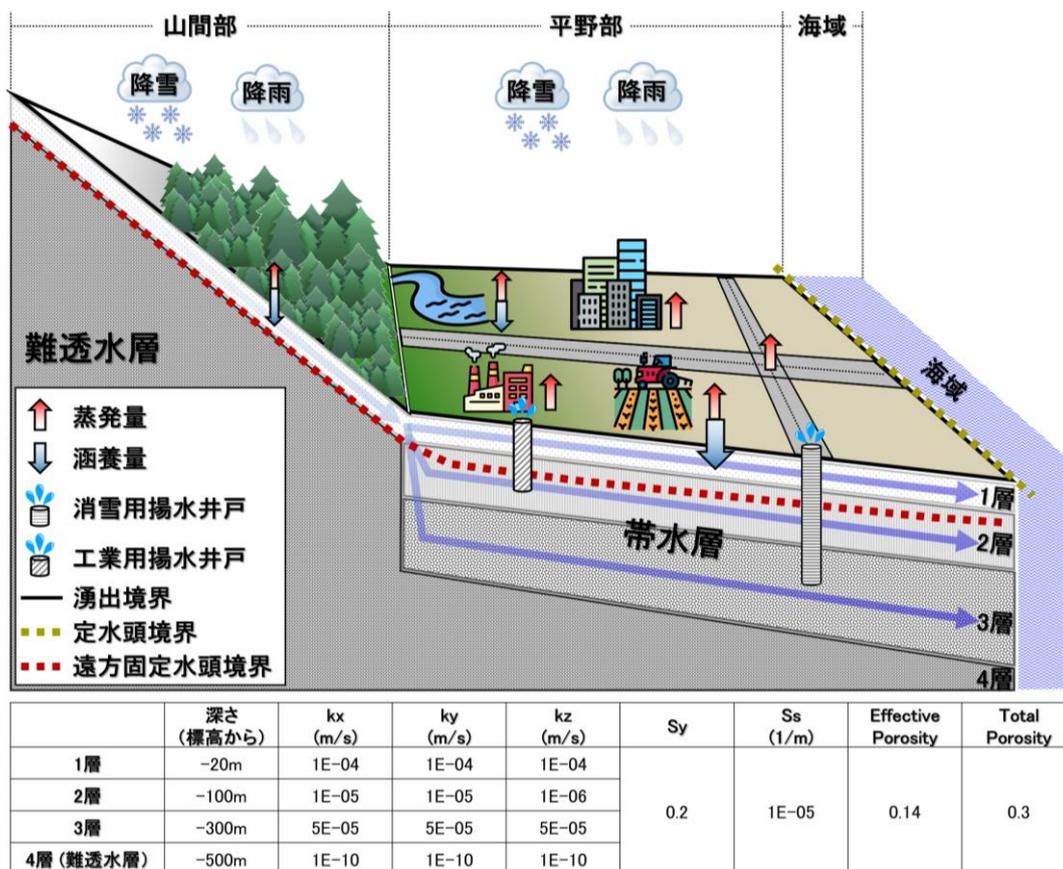


図1-9 富山県地下水流動モデルの概要

本モデルを用い、初めに森林域及び水田で地下に浸透した地下水の流れの再現を試みた。その結果、図1-10に示されるように、県内の一部の地域では水田における地下水涵養が水源となっている地域が確認され、これらの地域では水田面積の維持が地下水の保全上重要であることが明らかとなった。また、本研究で行った水田涵養実験地から地下水への流れも再現でき、本モデルを用いることで、地下水涵養の適地を抽出することが可能である。また、富山市の平野部や砺波・南砺市には、水田からの涵養が地下水の水源となっている地域があることも明らかとなった。

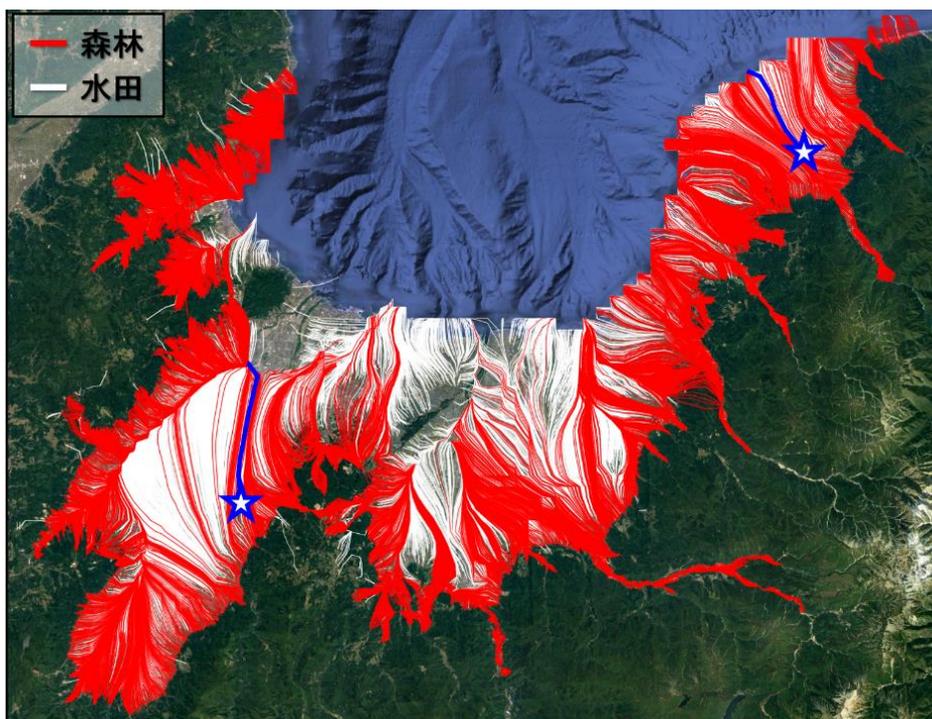


図 1 - 10 森林及び水田で浸透した地下水の流線
星印は[1-2]の地下水涵養実験を行った地点を示す。

2019-2020 富山県土地利用分布(農地)

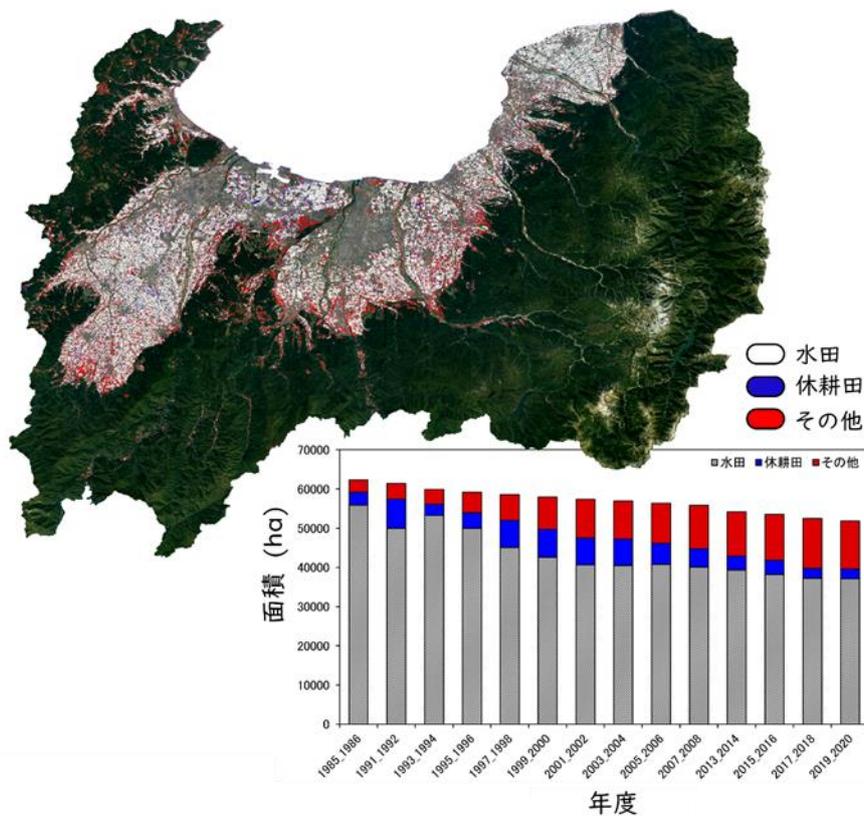


図 1 - 11 富山県内の農地の利用状況

白色部は水田として利用されている農地、青色部は数年おきに水田としての利用がない休耕田、赤色部はその他農地（長期間水田として利用されていない農地及び畑・果樹園等）

中山間地区の耕作放棄地の分布状況を把握するため、本研究で開発した富山県社会環境GISを活用し、農地の水田、休耕田、耕作放棄地の細分類化を試みた。細分類化の方法は、稲作期間中の水田での水の湛水状況について正規化水指数をもとに判別し、毎年水田として利用されているか、一定の間隔で休耕田となっているか、長期間放置されているかを分類している。その結果、図 1 - 11に示されるように平野部と山間部の境界に当たる中山間地域に耕作放棄地が多く分布していることが確認された。中山間地域（標高250～1,000m）は気候変動に伴う降雪量の減少量も大きい地域であり、水田面積の減少と合わせて、地下水涵養量が大きく減少している地域である。そのため、南砺市や富山市の中山間地域で地下水涵養を行うことで、地下水資源の保全に大きな効果が得られると考えられる。

中間評価において審査委員から気候変動の農林水産業への影響についての提案を期待されたことを受け、富山県自然環境GISを用いて、将来の農林業への影響を検証した。先に示したように、富山県では稲作が主要農業となっており、コシヒカリが主要生産品種となっている。2023年は全国的な異常猛暑となり、全国でコメの品質低下（白未熟米）が報告されている。富山県でもコシヒカリの1等米比率が43.6%まで低下しており、気候変動の影響が顕在化してきている。気候変動シナリオに基づく、コシヒカリ生産における品質低下の可能性を検証したところ、図 1 - 12に示されるように、気候変動シナリオSSP585では、21世紀末には県内すべての農地がコシヒカリの生産にとっては不適地化する可能性が高いと示された。気候変動シナリオSSP126でも、現時点で品質低下が起こる可能性が示されており、早急に高温耐性品種への転換が求められる。現実には、一気に品種転換を図ることは難しいことから、気温上昇の影響が平野部に比べて小さい高標高帯、中山間地域でのコシヒカリ栽培を復活させることも一時的な適応策の一つとして考えられる。加えて、水田面積の維持は、県内の持続的な農業（稲作）だけでなく、地下水資源の持続性の観点からも重要である。もしも水田がすべてなくなった場合の仮想実験として、水田が失われることによる地下水涵養量の減少量を推計したところ、富山県の年間揚水量に匹敵する1億 m^3 の涵養量が失われることが明らかとなった。温暖化に伴う品質低下により、年内の稲作がより衰退していくような事態を避けなければ、将来の地下水資源にも大きな影響を及ぼす可能性が高い。

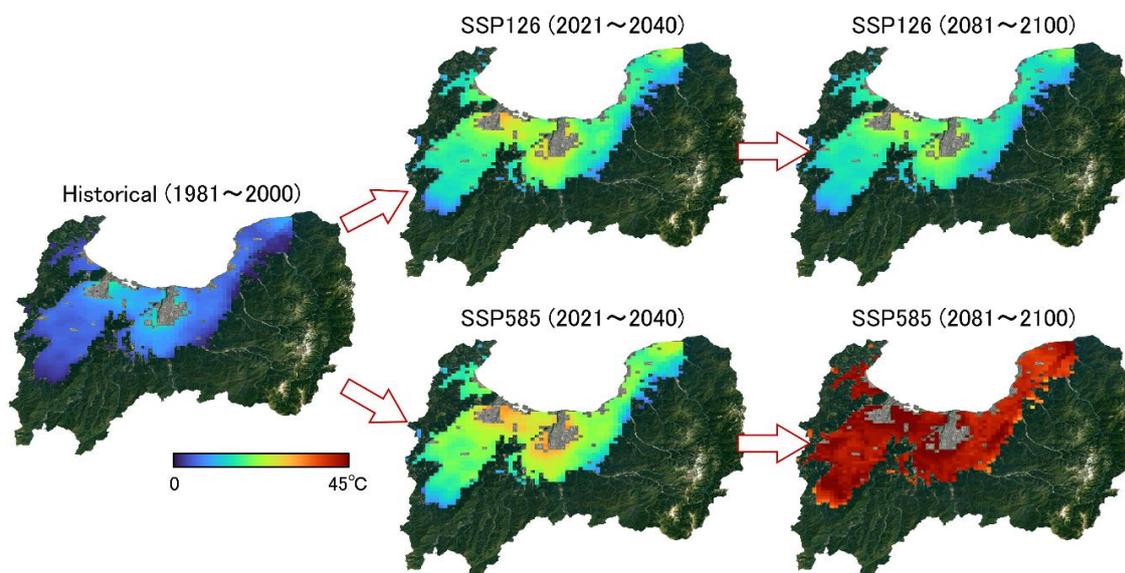


図 1 - 12 県内農地における27℃以上となる積算気温の気候変動シナリオによる変化

森林植生についても温暖化の影響がすでに明らかとなっており、国内の天然林の多くを占めるブナ林は気温の上昇に伴って荒廃が進行することが予測されている。富山県内は約70%を森林域が占めており、その内の約60%がブナを主体とした天然林で、気候変動の影響が懸念される。富山県自然環境GISをもとに、ブナ林への影響を検討したところ、図 1 - 13に示されるように、低標高帯（中山間地域）でのブナ林の荒廃が進行する可能性が示された。コメの生産品種の高温耐性品種への転換と同様に、森林植生に関してもミズナラやコナラなどのより温暖な地域に生息する植生への人為的転換を図っていくことで、気候変動の影響低減を図ることが可能である。

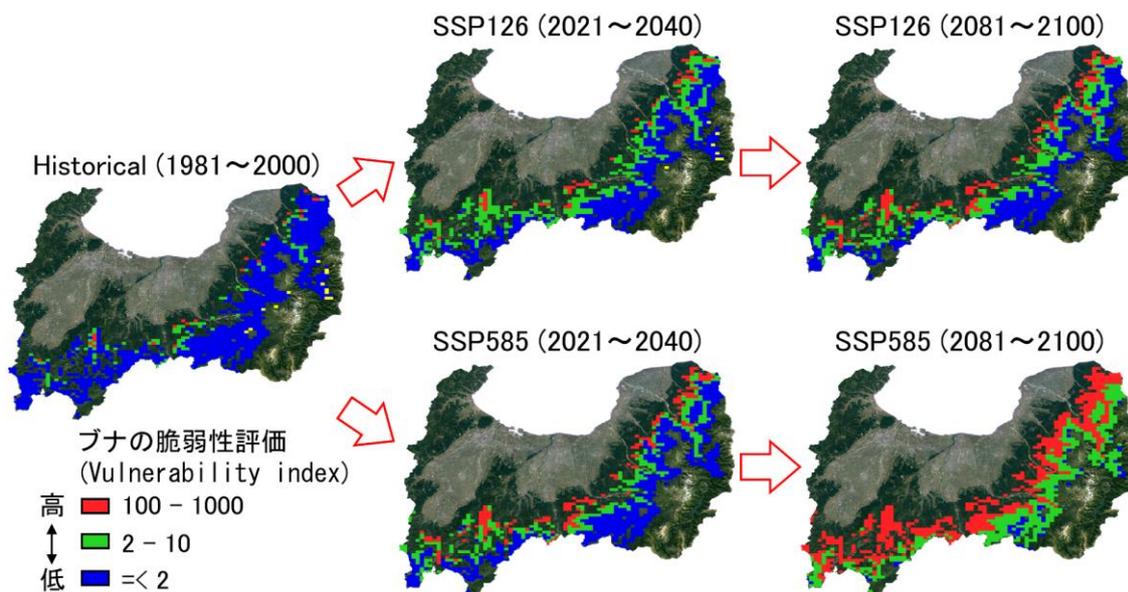


図 1 - 13 県内ブナ林の脆弱性評価

[1-6. 地下水位変動予測の可能性]

富山県では冬季降雪時に消雪のために地下水が利用されており、降雪量が多い場合、急激な地下水位の低下が度々報告され、地下水の利用に支障が生じている。そのため、富山県では注意喚起水位を設定し、観測井において注意喚起水位を下回った場合、利用に関する注意報や警報を発令している。もし、地下水位の低下を事前に把握することができれば、適切な地下水利用を事前に案内することが可能となることから、地下水位変動が予測できれば地下水の保全に大きく貢献することができる。そのため、地下水変動に係るパラメータを用いて、機械学習による変動予測がどこまで可能か検討した。変動パラメータには公開されて誰でも利用可能な気温、降水量、河川水位を用い、これらを変数として地下水位をランダムフォレスト解析による予測を試みた。その結果、高い精度で予測が可能な地域がある一方、限られた変数では予測精度にも限界があることが示された。

そのため、地下水流動モデルを用いた地下水変動予測を提案したい。1-5で紹介した富山県地下水流動モデルでは、モデルの再現の検証に県内観測井における地下水位変動を用いており、全体的に精度よく地下水位の変動が再現できている（図 1 - 14）。本モデルは気象データから涵養量を推計し、気象データから得られる冬季の揚水量を用いており、気象予報値を用いて地下水位の変動を予測することが可能である。本モデルを運用することで、早期に地下水位の急激な低下の有無を予測し、急激な低下が予測される地域に事前に注意喚起を行うことで、効果的な地下水利用につなげられる。

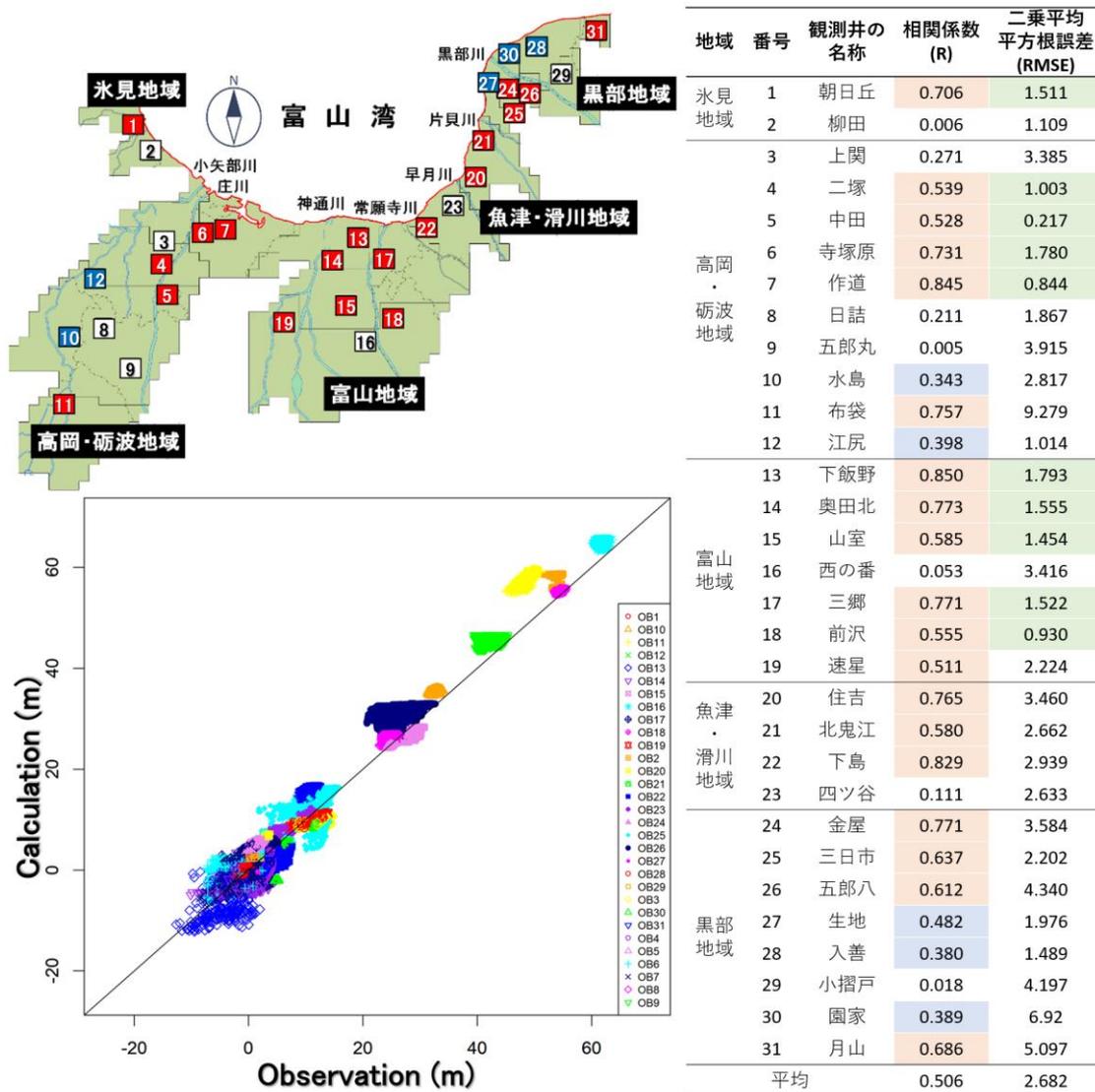


図 1 - 14 地下水流動モデルによる地下水位変動の再現

5. サブテーマ1 研究目標の達成状況

サブテーマ1では、主要5河川を対象とした採水、安定・放射性同位体分析、既存の観測データの分析、得られたデータのサブテーマ2との共有、自然環境・社会環境に関するGIS情報の整備を行った。[1-1]に関しては、県内約80か所で採水を行い、その安定・放射性同位体分析も予定通り完了し、パターン化した各扇状地の水・栄養塩循環メカニズムの評価をした。既存の観測データの分析に関しては、1981年から河川の観測データと、1977年からの海域の観測データの解析を進め、気候変動による影響を観測データからも確認できた。サブテーマ2とのデータ共有に関しては、数値モデルの再現性の検証と、データ同化に必要となるデータの共有は予定通り行われた。自然環境・社会環境に関するGIS情報の整備についても、高分解能・高精度の土地利用マップを作製したほか、農研機構や国立環境研究所が公開する気象データを活用した県内の気象メッシュデータの整備も行った。整備したデータを用いて、米の品質低下危険度分布のほか、当初の予定にない地下水流動モデルの開発とそれによる地下水位変動の将来予測の検討まで実施した。

Ⅱ-2 サブテーマ2 「水循環メカニズム解明のための富山県陸海統合モデルの開発と将来予測及び適応策の検証」

[サブテーマ2要旨]

富山県の水・栄養塩循環メカニズムを解明するため、富山湾を対象とした流動・低次生態系モデルを構築した(成果番号46, 47, 52)。富山水文モデルから得られた、陸域からの淡水・栄養塩供給量を富山湾低次生態系モデルの陸域境界条件として与えることで、陸域から海域をつなげる富山陸海統合モデルとした。表層では一級河川と二級河川の河川流量及び栄養塩負荷量を、海底では地下水からの淡水流量と栄養塩供給をモデルに与えた。河川水起源の栄養塩と地下水起源の栄養塩の寄与率を評価するため、モデルに起源別の栄養塩フローを追跡するモジュールを導入し、河川水起源と地下水起源の栄養塩動態を別々に表現し、その役割を比較した。本統合モデルを用いて、気候変動シナリオに準じた陸域からの淡水・栄養塩供給量の変化が富山湾沿岸域へ与える影響を検証した。

1. サブテーマ2 研究開発目的

陸域から海域に及ぶ水・栄養塩循環メカニズムへの気候変動の影響やその変化の定量化と、各種適応策の効果を検証するために、陸水の動態を再現する「富山県水文モデル」(成果番号46, 47, 52)と、富山湾を対象とした「流動・低次生態系モデル」を構築した。さらに、その陸域・海域の2つのモデルを結合した「富山県陸海統合モデル」を開発した。開発した統合モデルを用いて、富山湾の栄養塩濃度と植物プランクトン成長に対する河川水と地下水のそれぞれの影響及び気候変動シナリオに準じた陸域からの淡水・栄養塩供給量の変化の富山湾沿岸域への影響を評価した(成果番号46, 47, 52)。

2. サブテーマ2 研究目標

サブテーマ2	「水循環メカニズム解明のための富山県陸海統合モデルの開発と将来予測及び適応策の検証」
サブテーマ2 実施機関	愛媛大学、中央大学
サブテーマ2 目標	<ol style="list-style-type: none"> 1) 富山県内の河川・地下水の水・栄養塩循環を再現する富山県水文モデルを開発する。(中央大学) 2) 富山湾低次生態系モデルと富山県水文モデルを結合した富山県陸海統合モデルを開発し、富山県の水・栄養塩循環システムの再現し、水・栄養塩の輸送経路・輸送量を解明する。(愛媛大学・中央大学) 3) 富山県陸海統合モデルを用い、気候変動シナリオ(RCP8.5および2.6)による2050年及び2100年の気候変動影響下の水・栄養塩の変化を予測する。(愛媛大学・中央大学) 4) 休耕田の活用や地下水利用に関する適応策の持続的な水循環システム構築への効果および有用性を数値モデルで検証する。(愛媛大学・中央大学)

3. サブテーマ2 研究開発内容

[2-1. 富山県水文モデルの開発]

富山県内の河川・地下水の水・栄養塩循環を再現するために、既存の水収支モデル及び地下水モデルを改修した水収支-地下水結合モデルを開発した(成果番号46, 47, 52)。

[2-2. 富山湾低次生態系モデルの開発]

陸域における栄養塩循環の変化が富山湾の環境や低次生態系に及ぼす影響を解明するために、富山湾低次生態系モデルを開発した。環境研究総合推進費S-13で開発した富山湾低次生態系モデルをベースとして、境界条件の変更、領域に応じた分解能の変更、動植物プランクトンのパラメータの細分化等の

改修を施し、気候変動に伴う水・栄養循環の変動が海域の生態系に及ぼす影響を再現できる新たな低次生態系モデルを開発した。なお、富山県陸海統合モデルは水文モデルと低次生態系モデルを直接結合してシミュレーションを行うものではなく、シミュレーションは個別に行い、水文モデルから得られる陸域からの供給量を境界条件として海域に与えることで結合する統合モデルとしている。

4. サブテーマ2 結果及び考察

[2-1. 富山県水文モデルの開発(成果番号46, 47, 52)]

図 2 - 1は本研究で作成した富山県域の水循環モデルの概念図である。モデルの分解能は1kmメッシュである。図に示すように土地の利用形態に応じた蒸発散モデルと流出モデルをメッシュごとに計算し、水の流動過程を再現している。水文モデルの妥当性評価を、上流域に水工施設が存在しない黒部川黒部川流域で実施した。その結果、Nash-Sutcliffe係数は0.67、相関係数は0.67であり、本モデルによって流動環境を概ね再現できた(図 2 - 2)。

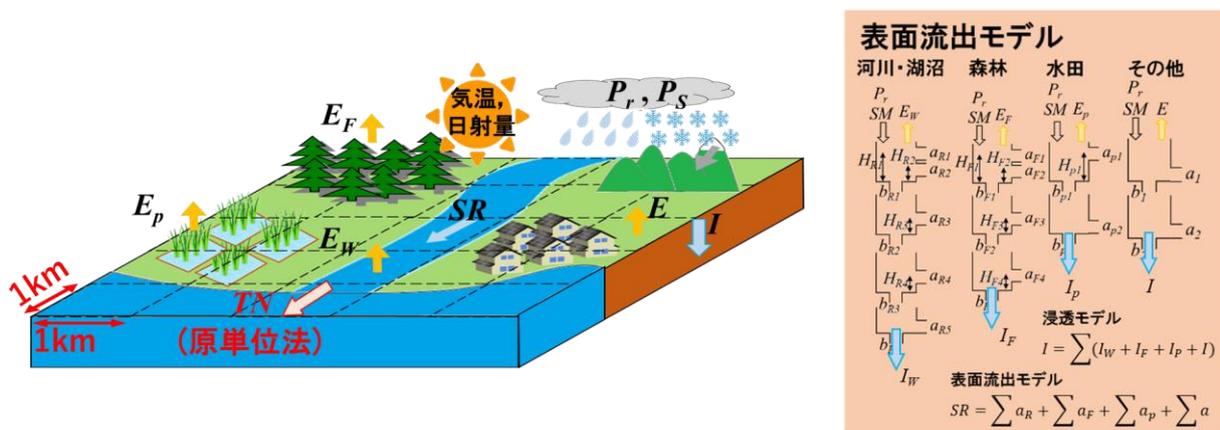


図 2 - 1 富山県水文モデルの概要図

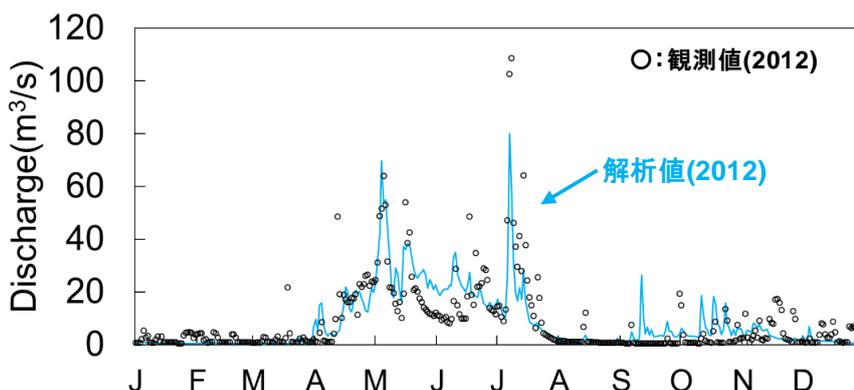


図 2 - 2 黒部川流域における栄養塩付加量の観測値とモデル解析地の比較

上記のモデルに原単位法を結合させることで、陸域から富山湾へ流出する窒素負荷量を算出した。富山県内の土地利用は約77%が国立公園等に指定されている森林であり、解析期間において変化がほとんどない。そのため、面源からの負荷量は2021年の土地利用を用いた。図 2 - 3は窒素負荷量の算出方法のフローチャートである。解析領域内の下水道処理場は49施設が存在し、それぞれの放流先は、小矢部川に2施設、庄川に8施設、神通川に17施設、常願寺川に2施設、黒部川に2施設、2級水系に8施設、単独水系に6施設、富山湾へ直接放流が4施設である。本研究では、1級河川及び2級河川はそれぞれの水系に放流し、単独水系は富山湾へ直接放流するようにモデル化した。本研究で使用した人口データは

1kmメッシュ別将来推計人口、国勢調査のデータ、日本の将来推計人口(平成29年推計)を利用し、下水道処理人口普及率、污水处理人口普及率は、各都道府県が公表している下水道普及率と人口データを用いて推計した。以下に推計方法を記載する。

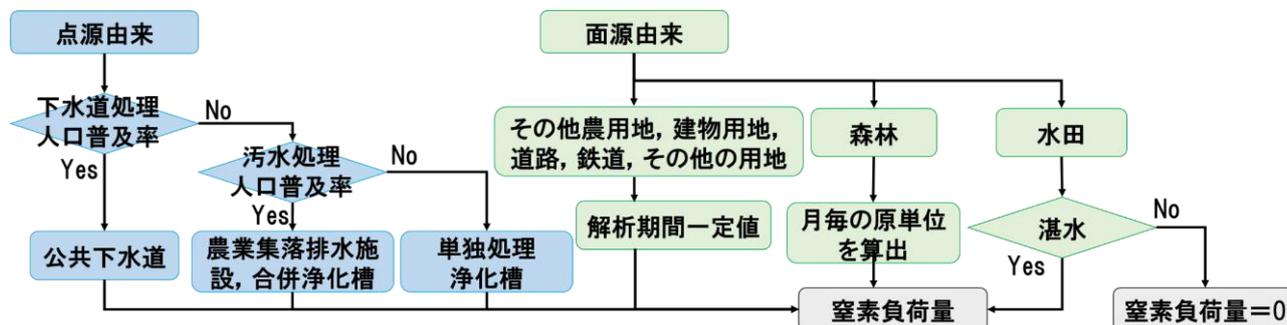


図 2 - 3 窒素負荷量の算出方法のフローチャート

図 2 - 4は対象領域内の市町村における下水道普及率と人口の時系列変化である。国勢調査は5年毎に実施されているため、人口データがない期間は、線形で補間した。対象領域内の人口は2005年まで横ばいであるが、それ以降は減少傾向であり、2050年には約84万人、2100年には約56万人まで減少する。富山県で下水道処理場が広く普及し始めたのは1985年であり、2007年まで急激に増加した。富山県と岐阜県は2026年度までの下水道計画目標として、それぞれ99%、96.1%を設定している。過去を評価した解析期間は、富山県で下水道処理場が広く普及し始めた1985年を始点とし、下水道普及率が公開されている2020年までとした。次に現在から近未来の解析期間として、2021~2025年は2026年までの各県の下水道普及計画を基に、公共下水道、農業集落排水施設・合併浄化槽・単独処理浄化槽、未処理の割合を線形で与え、2026年以降は2100年まで一律で与えた。本研究では、下水道処理区分を公共下水道、単独処理層・農業集落排水施設・合併浄化槽、未処理の3つに分類分けした。それぞれの処理人口は、公開されていないため、下水道処理区域の人口と各普及率を用いて、各処理の普及人口を以下の式で推定した。

$$P_u = aP_o$$

$$P_a = (b - a)P_o$$

$$P_s = P_o - P_u - P_a$$

ここで、 P_u は公共下水道の推定普及人口、 P_a は農業集落排水施設、合併浄化槽、単独処理浄化槽の推定普及人口、 P_s は未処理の推定普及人口、 P_o は人口、 a は下水道処理人口普及率、 b は污水处理人口普及率である。図 2 - 5は処理別の推定普及人口の時系列変化である。本研究対象領域は、公共下水道の普及により、未処理から公共下水道に変化している。

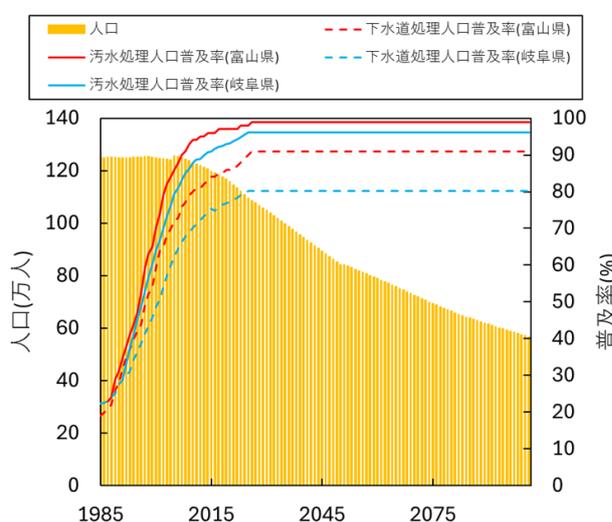


図 2 - 4 1985~2100年の対象領域内における市町村の下水道普及率と人口の時系列変化

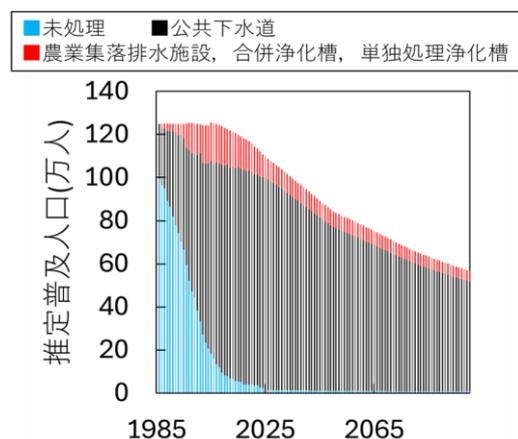


図 2 - 5 1985~2100年の処理別の推定普及人口の時系列変化

表 2 - 1は下水処理別の窒素排出負荷原単位である。窒素排出負荷原単位は解析期間一定で与え、農業集落排水施設、合併浄化槽、単独処理浄化槽及び未処理の窒素排出負荷原単位は、文献値を用いた。公共下水道の窒素排出負荷原単位は富山県が観測している神通川左岸浄化センターの観測値から算出した値を使用した。富山湾低次生態系モデルと結合させるため、陸側の境界条件として県内の1級（5河川）、2級（28河川）の河川流量及び窒素負荷量を算出し、愛媛大学の研究グループと共有した。

表 2 - 1 下水処理別の窒素排出負荷原単位

下水処理方法	TN排出負荷 原単位(g/人/day)
公共下水道	3.25
農業集落排水施設・合併浄化槽・ 単独処理浄化槽	7.5
未処理	13

【将来予測結果をふまえた栄養塩付加の適応策】

適応策(1)：水田への冬期湛水

2026年以降、窒素負荷量は人口減少が要因で、1年間で平均40kg/day減少することが予測された。これと同等の窒素付加を、水田を用いて維持していく場合、冬期の休耕期間に水田湛水を3か月・1300ha実施することで、1年間で人口減少により減少する窒素供給量に相当することが見積もられた。

適応策(2)：下水処理場における放流水の栄養塩増加運転

2025年の陸から富山湾への窒素供給量を保つためには、2025年の放流窒素濃度と比較して、2050年で1.4倍、2100年で2.3倍高い濃度で放流する必要があることが見積もられた。

[2-2. 富山湾低次生態系モデルの開発]

図 2 - 6 (a)に示すように、富山湾を含む150Km×150Kmの海域を対象とした流動・低次生態系モデルを構築した。モデルの水平解像度は富山湾を区域分けし、区域ごとの解像度を設定し、鉛直方向は31層を設けた。流動モデルは水温、塩分、流速、海面高度等を求めるが、低次生態系モデルには、2種類の栄養塩（溶存態無機窒素（DIN）と溶存態無機リン（DIP））、植物プランクトン、動物プランクトン、デトリタスの5つの予報変数で構成されている（図 2 - 6 (b)）。2つのモデルはオンライン計算で結合している。

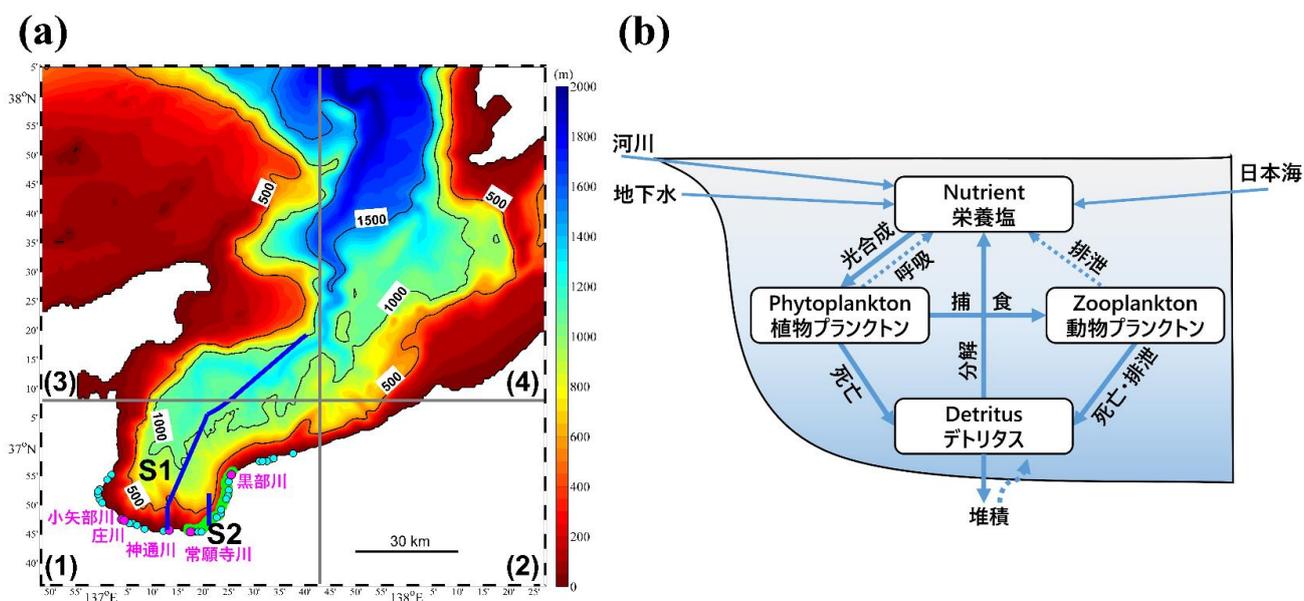


図 2 - 6 (a) 富山湾低次生態系モデルの対象海域及び (b) 低次生態系モデルの構成

(a) 富山湾低次生態系モデルの対象海域

モデル領域を(1)湾奥(2)沿岸(3)中央(4)外海の4つの領域に分けた。それぞれの解像度は(1)300m×300m、(2)900m×300m、(3)300m×900m、(4)900m×900mである。図中の丸は河川供給(河川流量・栄養塩負荷)を与える河口部を示し、ピンクは一級河川、青は二級河川である。海岸沿いの緑丸は地下水由来の淡水・栄養塩負荷を与えるグリッドである。青い線S1とS2は、モデル結果の鉛直分布を示す断面である。

(b) 低次生態系モデルの予報変数と生物地球化学過程

モデル海面において、流動場の境界条件としてメソ数値予報モデルGPV (MSM) の風速、熱フラックス、降水量の毎時データを与える。対象海域外の流動場の境界条件として数値海況予測システムJCOPE-Tの流速・水温・塩分・海面高度の日平均データを、低次生態系の境界条件として数値海況予測システムJCOPE2-ECOの栄養塩濃度(DIN・DIP)・植物プランクトン・動物プランクトン・デトリタスの月平均値を与えている。陸側の境界では、富山湾に流入する5つの一級河川と28の二級河川の河川流量を流動モデルに、河川水中の栄養塩濃度と河川流量から求めた栄養塩負荷を低次生態系モデルに与えた。河川流量と河川水中の栄養塩濃度は中央大学のグループが開発した富山県水文モデルの1日間隔の出力データを使用した。地下水の湾内への流出位置は、常願寺川から黒部川まで、海岸線に沿って水深が70mより浅い海底と仮定している(図 2 - 6 (a))。地下水による淡水流入量は地下水の流出位置付近の河川(一級河川2本と二級河川10本)の淡水流量の15%と、地下水からの栄養塩負荷はそれらの河川の栄養塩負荷量の合計値と同じに仮定している。このような条件で、富山湾の流動・低次生態系モデルを2年間計算させ、1年目はスピンアップ用に、2年目は計算結果として利用する。

【モデル検証・富山湾物理環境の再現】

本モデルによる流動環境の再現性を検証した結果、本モデルから求められた水温・塩分と1964年から1992年までの浅海定線観測データとの平均二乗偏差は、それぞれ1.58 (°C) と0.22 (PSU) となった(図 2 - 7)。富山湾の表層(水深0-200m)は、冬は混合層が発達し、夏は成層化する顕著な季節変化を示すが、本モデルでもこれらの季節変化は再現された。塩分については、表層は低塩分水に覆われ、亜表層から水深200m付近には5~7月に高塩分水が侵入していることや、雪解けに伴う河川流量が増加する4月に低塩分水の面積が最大となり、7月以降徐々に縮小していく様子が再現された。

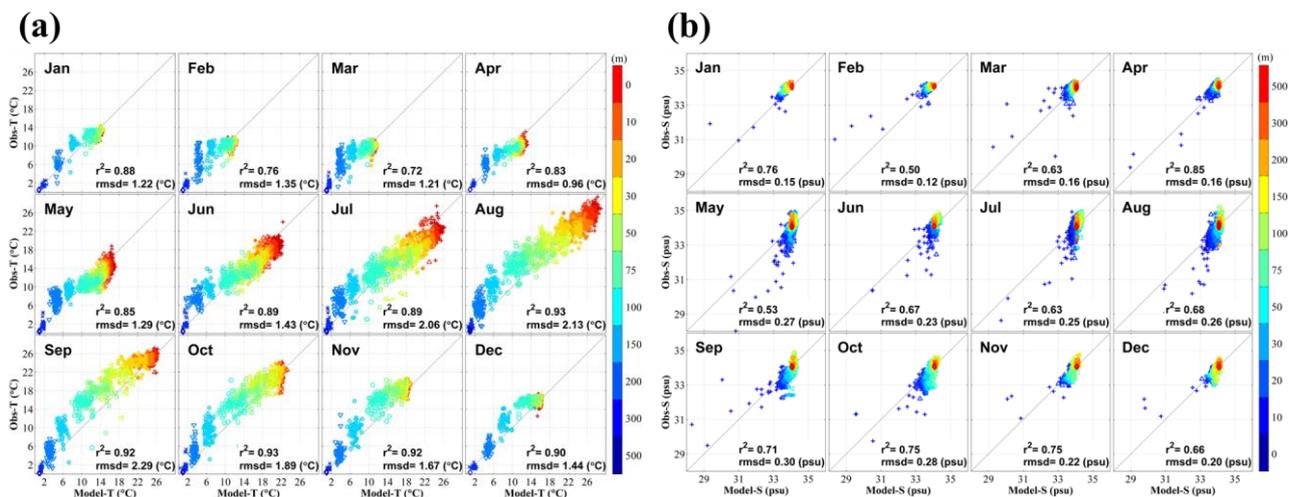


図 2 - 7 モデルの(a)水温、(b)塩分と観測データの比較
 マークの形状の違いは、異なる水深帯を表す。rは相関係数、rmsdは平均二乗偏差である。

【低次生態系モデルの結果】

DINとDIPは湾中央部では外洋型の鉛直分布（表層は低栄養塩、下層に高栄養塩）を示し、湾奥沿岸部は高濃度の栄養塩が年間を通じて分布している。図 2 - 8に生態系モデルで再現された対象海域の表層月平均植物プランクトン濃度(a)と鉛直断面分布(b)を示す。植物プランクトンは主に水深0-100mの層に分布し、顕著な春季ブルームを示す。5月以降は河川から栄養塩が供給されている河口周辺を除き湾全体で低下する。また、5月から垂表層クロロフィル極大が30m付近に現れ、9月まで続くことが見られている。動物プランクトン、デトリタスは植物プランクトンの増減に追従する形で変化する様子が再現された。

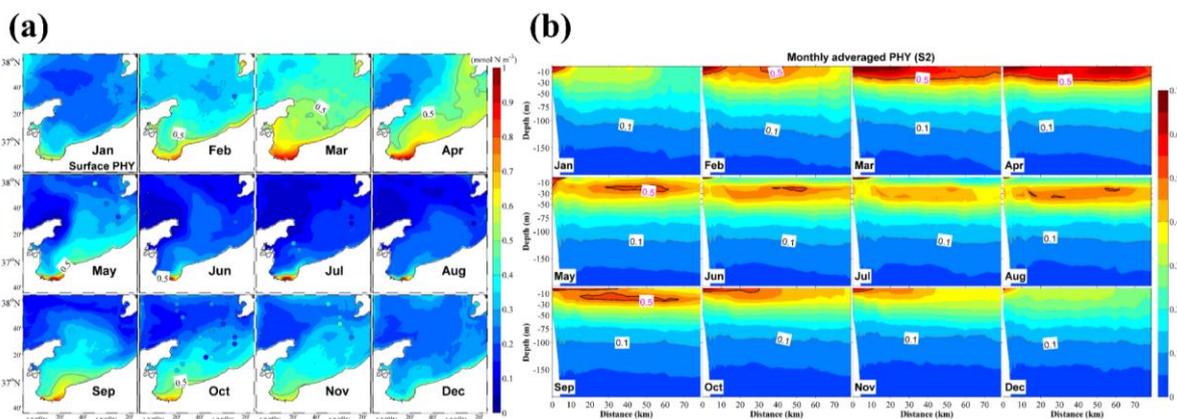


図 2 - 8 (a)表層月平均植物プランクトン濃度及び(b)鉛直分布

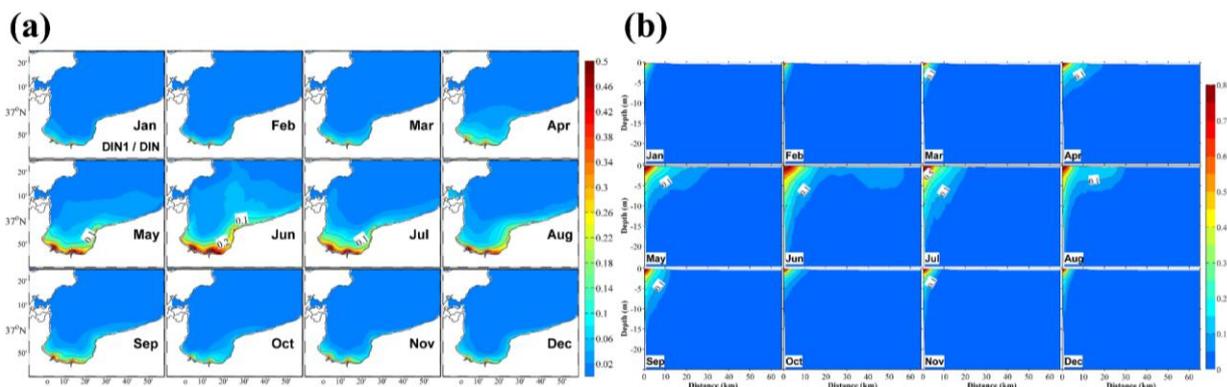


図 2 - 9 (a)表層 (0-20m) すべての栄養塩に対する河川水起源の栄養塩の割合
(b)S1線 (図 2 - 6 (a)) におけるその割合の鉛直分布

【河川水起源栄養塩と地下水起源栄養塩の分離計算】

河川水起源の栄養塩と地下水起源の栄養塩を分離した計算から、河川水起源の栄養塩は主に河口付近の表層 (水深0-20m) に集中し、湾の中央にも広がることが分かった。また、水深0-20mの層における河川水起源の栄養塩は、河口付近で最大の50%を占める。地下水起源の栄養塩は海岸付近に限定され、栄養塩に占める割合は河川水起源のものよりも小さい。断面図から地下水起源の栄養塩は主に海底から垂表層に分布し、表層にはほとんど存在しないことが分かる (図 2 - 10)。ただし、冬の鉛直混合により河口付近の表層では地下水起源の栄養塩の分布が少し見られる (図 2 - 10)。また、河川水起源と地下水起源の栄養塩が支える植物プランクトンの割合は、それぞれの栄養塩濃度に占める割合とほぼ同じである (図 2 - 10)。

図 2 - 10に見られた地下水起源の栄養塩が海底近くに集中する原因は、この計算に地下水からの淡水供給に伴う浮力効果が考慮されていない可能性がある。それを確認するため、流動モデルに地下水からの浮力効果を加えて再計算を行った。地下水から浮力供給をモデルに与えた場合の計算結果は、それを与えない計算結果より、地下水由来の栄養塩の影響範囲が大きくなり、年間を通じて常に表層まで供給されるようになることが分かった (図 2 - 11)。このことから、海洋モデルに地下水を導入する際に、地下水の浮力効果を無視できないことが分かった (成果番号44, 50, 53)。

【温暖化の影響評価】

地球温暖化の6つのシナリオに伴う河川水流量の増加を流動モデルに、栄養塩負荷の増加を生態系モデルにそれぞれ導入し、富山湾の低次生態系の変化を検討した。河口付近を中心とする沿岸域では、栄養塩濃度と植物プランクトン現存量の増加が一部のシナリオで見られ、特に8月と9月に目立つ。一方、地球温暖化に伴う日本海の昇温効果が富山湾の低次生態系に与える影響は限定的であることが追加の計算から分かった。

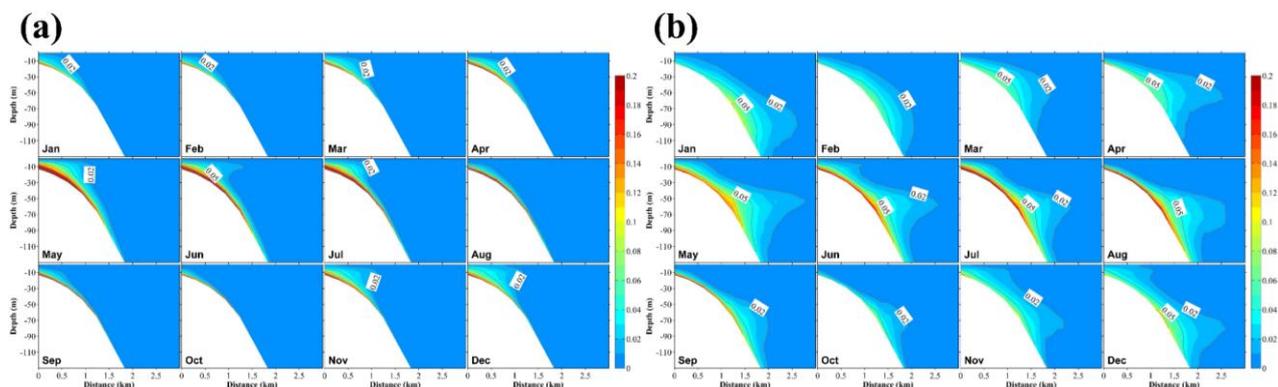


図 2 - 10 (a) S2線 (図 2 - 6 (a)) に沿った地下水起源の栄養塩の割合
(b) 地下水起源の栄養塩が支える植物プランクトンの割合の鉛直分布

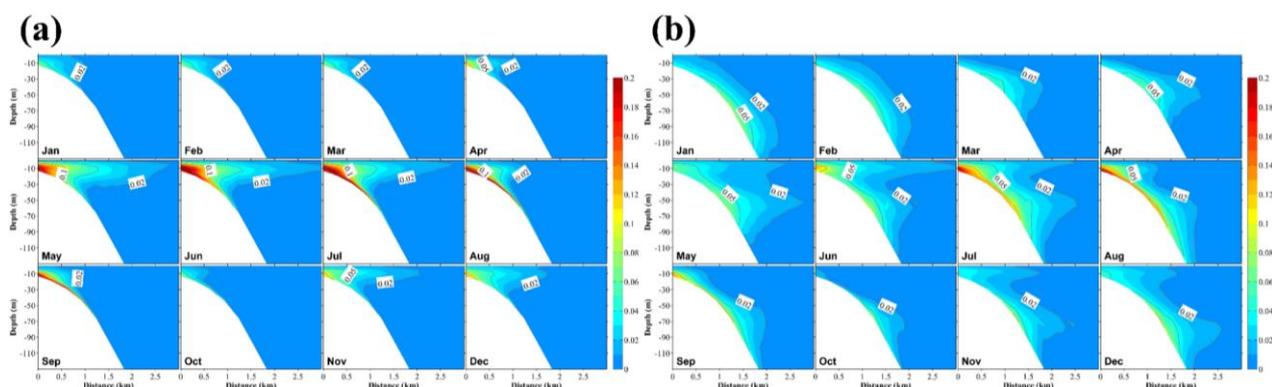


図 2 - 11 地下水からの淡水供給をモデルに与えた計算結果
(a) S2線 (図 2 - 6 (a)) における地下水起源の栄養塩の割合
(b) 地下水起源の栄養塩が支える植物プランクトンの割合

5. サブテーマ2 研究目標の達成状況

本プロジェクトでは、山・森・川・海の水・栄養塩循環メカニズムの解明と、気候変動の影響把握を目指しており、陸域を対象とした水文モデルと海域を対象とした流動・低次生態系モデルを結合した富山県陸海統合モデルの構築を進めた。富山湾低次生態系モデルに関しては、平成 26～30 年に実施された環境研究総合推進費 S-13-3 で開発した富山湾低次生態系モデルをベースに、本プロジェクトの目的に応じた改修が施され、陸域からの影響が強い沿岸海域を中心により詳細に再現できるようになった。また、陸域からの影響も一級河川、二級河川、海底湧水を対象に検証できるよう改良した。そのため、得られる結果を反映し気候変動に伴う陸域での水・栄養塩循環の変化が海洋環境にもたらす影響を、従来よりも高精度に評価できるようになった。

また、富山湾低次生態系モデルを構築し、上述の富山水文モデルと結合し、富山県陸海統合モデルの開発を完成させた。本統合モデルを用いて、河川水・海底湧水の基礎生産への影響・効果を検証したところ、気候変動シナリオに準じた陸域からの淡水・栄養塩供給量の変化の富山湾沿岸域への影響も評価することができた。

Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細

(1) 成果の件数

成果の種別	件数
査読付き論文：	5
査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）：	0
その他誌上発表（査読なし）：	0
口頭発表（国際学会等・査読付き）：	0
口頭発表（学会等・査読なし）：	48
知的財産権：	0
「国民との科学・技術対話」の実施：	20
マスコミ等への公表・報道等：	9
研究成果による受賞：	6
その他の成果発表：	2

(2) 誌上発表

<査読付き論文>

成果番号	【サブテーマ1】の査読付き論文
1	Katazakai, S., & Zhang, J. (2021). A quarter-century of nutrient load reduction leads to halving river nutrient fluxes and increasing nutrient limitation in coastal waters of central Japan. <i>Environmental Monitoring and Assessment</i> , 193(9), 573. https://doi.org/10.1007/s10661-021-09279-5
2	Katazakai, S., & Zhang, J. (2021). A shift from snow to rain in midlatitude Japan increases fresh submarine groundwater discharge and doubled inorganic carbon flux over 20 years. <i>Environmental Science & Technology</i> , 55(21), 14667-14675. https://doi.org/10.1021/acs.est.1c05108
3	Yang, H., Mishma, H., Katazakai, S., & Kanabu, M. (2022) Analytical approach using a chemical equilibrium formula and geochemical modeling for alkalinity measurements of small natural water samples. <i>Applied Geochemistry</i> , 105535. https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2022.105535

成果 番号	【サブテーマ2】の査読付き論文
4	Leng, Q., Guo, X., Zhu, J., & Morimoto, A. (2023). Contribution of the open ocean to the nutrient and phytoplankton inventory in a semi-enclosed coastal sea. <i>Biogeosciences</i> , 20(20), 4323-4338. https://doi.org/10.5194/bg-20-4323-2023
5	Luo, Y., Shi, J., Guo, X., Mao, X., Yao, P., Zhao, B., Chen, L., & Wang Y. (2023). Yearly variations in nutrient supply in the East China Sea due to the Zhejiang coastal upwelling and Kuroshio intrusion. <i>J. Geophys. Res. Ocean</i> , 128, e2022JC019216. https://doi.org/10.1029/2022JC019216

<査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）>

成果 番号	【サブテーマ1】の査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ2】の査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）
	特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表（査読なし）>

成果 番号	【サブテーマ1】のその他誌上発表（査読なし）
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ2】のその他誌上発表（査読なし）
	特に記載すべき事項はない。

(3) 口頭発表

<口頭発表（国際学会等・査読付き）>

成果 番号	【サブテーマ1】の口頭発表（国際学会等・査読付き）
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ2】の口頭発表（国際学会等・査読付き）
	特に記載すべき事項はない。

<口頭発表（学会等・査読なし）>

成果 番号	【サブテーマ1】の口頭発表（学会等・査読なし）
6	Mengqi Son, <u>Saki Katazakai</u> , <u>JING ZHANG</u> , 日本地下水学会2021年春季講演会（English セッション）（2021）Recharge conditions and long-term changes of groundwater in the Sho River Alluvial Fan, Toyama Prefecture, based on stable isotope ratios and chemical composition.
7	<u>JING ZHANG</u> , <u>Yuhei Nakayasu</u> , <u>Takafumi Yoshida</u> , <u>Xinyu Guo</u> , <u>Taichi Tebakari</u> , ECSA 58 - EMECS 13 Estuaries and coastal seas in the Anthropocene (2021) Impact of climate changes on water and nutrient transport in central Japan and leading to climate change adaptation strategies.
8	<u>片境 紗希</u> , 2021年海洋若手研究集会（2021）高低差4,000 mの富山～森-里-富山湾の物質循環像～【成果番号83；優秀講演賞】
9	<u>勝田 裕大</u> , <u>張 勁</u> , <u>稲村 修</u> , 2021年度日本海洋学会秋季大会（2021）富山湾深層動物プランクトンからみる環境の長期変動
10	<u>片境 紗希</u> , <u>野嶋 航太</u> , <u>松本 碧人</u> , <u>張 勁</u> , 2021年度日本海洋学会秋季大会（2021）栄養塩負荷削減による陸からの栄養塩供給量の減少と沿岸域での栄養塩制限状態の強化～富山湾での事例～
11	<u>片境 紗希</u> , <u>張 勁</u> , 日本地下水学会2021年秋季講演会（2021）過去 20 年間の日本中緯度地域の少雪・多雨化による淡水性海底湧水の湧出量増加と溶存無機炭素供給量の倍増【成果番号85；若手優秀講演賞】
12	<u>北澤 唯佳</u> , <u>張 芸馨</u> , <u>花村 虎太郎</u> , <u>山口 圭一</u> , <u>片境 紗希</u> , 令和3年度学生による地域フィールドワーク研究成果報告会（2022）SDGsの視点で富山の地下水を科学する～地下水年齢の把握と持続的地下水利用方法の検討～【成果番号86；優秀賞】
13	<u>花村 虎太郎</u> , <u>張 勁</u> , <u>稲村 修</u> , 第5回富山湾研究会（2022）富山湾産イガイ類の $\delta^{13}\text{C}$ ・ $\delta^{15}\text{N}$ 時空間変動とその影響要因～地域性と季節変化～
14	<u>JING ZHANG (Invited speaker)</u> , Marine Geoscience Forum (Talk 035) China (2022) Tracing Land-Sea Material Transport using Geochemical Multiple Tracers.
15	<u>張 芸馨</u> , <u>中易 佑平</u> , <u>片境 紗希</u> , <u>張 勁</u> , 日本地下水学会2022年春季講演会（2022）黒部扇状地における休耕田地下水涵養実験
16	<u>JING ZHANG (Invited speaker)</u> , 2022 IPACES Annual Meeting, China, Virtual, 2022 The impact of global warming on water and nutrient transport from land to the costal ocean.
17	<u>張 勁</u> , 日本地下水学会2022年秋季講演会（2022）気候変動による富山県の水・栄養塩循環への影響評価と適応策検討 研究概要の紹介
18	<u>北澤 唯佳</u> , <u>張 勁</u> , <u>片境 紗希</u> , <u>谷口 耕一</u> , 日本地下水学会2022年秋季講演会（2022）片貝川扇状地地下水の流動状況解析及び扇頂部休耕田涵養実験の速報～少雪・多雨化に伴う地下水中の栄養塩減少に対する適応策検討に向けて～【成果番号87；優秀賞】
19	<u>Jokam Nenkam Therese Line Laure</u> , <u>張 勁</u> , <u>片境 紗希</u> , <u>中易 佑平</u> , 日本地下水学会2022年秋季講演会（2022）Groundwater recharge in the Kurobe River Alluvial Fan and the nutrient dynamics using chemical compositions, oxygen, and hydrogen isotopes: influence of land-use over the past 30 years
20	<u>張 芸馨</u> , <u>中易 佑平</u> , <u>片境 紗希</u> , <u>張 勁</u> , 日本地下水学会2022年秋季講演会（2022）富山県黒部扇状地における休耕田地下水涵養実験とその涵養効果の検証 続報

2 1	片境 紗希, 張 勁, 孫 夢奇, 北澤 唯佳, 日本地下水学会2022年秋季講演会 (2022) 安定同位体比と化学成分を用いた過去20年間の富山県庄川扇状地地下水の水質及び涵養状況評価
2 2	花村 虎太郎, 張 勁, 稲村 修, 日本地下水学会2022年秋季講演会 (2022) 富山湾産イガイ類の $\delta^{13}C$ ・ $\delta^{15}N$ 時空間変動とその影響要因～陸から沿岸海域への物質供給に着目して～
2 3	中易 佑平, 岩倉 功貴, 張 勁, 日本地下水学会2022年秋季講演会 (2022) 富山県における公共用水域水質調査結果を用いた水質変動の解析
2 4	Seo Yuhwan, 吉田 尚郁, 張 勁, 日本地下水学会2022年秋季講演会 (2022) 富山県の土地利用マップ作製及び将来予測
2 5	吉田 尚郁, Seo Yuhwan, 片境 紗希, 張 勁, 日本地下水学会2022年秋季講演会 (2022) 水・地下水資源の持続的利用のための気候変動適応策
2 6	Saki Katatakai, and JING ZHANG IOC Sub-Commission for Western Pacific (WESTPAC) International Workshop. (2021) Case study in Japan “Impact of climate changes on water and nutrient transport in central Japan and leading to climate change adaptation strategies” .
2 7	JING ZHANG (Invited speaker), 5th International Conference on Multidisciplinary Approaches for Sustainable Rural, November 08-09, Virtual, Indonesia, Virtual, (2022) Impact of Climate Changes on Water and Nutrient Transport into the Coastal Area and Its Leading Adaptation
2 8	JING ZHANG, 日本地球惑星科学連合2023年大会 (English Session) (2023) Healthy, Productive and Sustainable Asian Marginal Seas: Understanding changes in the marine environment in response to global climate change
2 9	Saki Nishizawa Katatakai, JING ZHANG, 日本地球惑星科学連合2023年大会 (English Session) (2023) Impacts of human activities and climate change on water and nutrient transport in central Japan: potential directions for adaptation strategies
3 0	Hirota Katsuda, JING ZHANG, Osamu Inamura, 日本地球惑星科学連合2023年大会 (English Session) (2023) Secular variation of carbon-nitrogen stable isotope ratios of zooplankton in Toyama Bay, central Sea of Japan
3 1	Yuika Kitazawa, JING ZHANG, Roy Andreas, Hendrayana Hendrayana, Mukti Trenggono, Saki Nishizawa Katatakai, 日本地球惑星科学連合2023年大会 (English Session) (2023) Brief report: Nutrient distribution in the estuary of Pekalongan, North Java, Indonesia using chemical tracers
3 2	Therese L L Jokam Nenkam, JING ZHANG, Wilson Yetoh Fantong, 日本地球惑星科学連合2023年大会 (English Session) (2023) Effect of land use and climate change on coastal waters in Cameroon-Central Africa
3 3	吉田 尚郁, Seo Yuhwan, 張 勁, 日本地球惑星科学連合2023年大会 (2023) 富山県における気候変動の農林業への影響とその適応策
3 4	Seo Yuhwan, 吉田 尚郁, 日本地球惑星科学連合2023年大会 (2023) 雲の影響が受けやすい地域での地球観測衛星画像を用いた土地利用マップの作成
3 5	北澤 唯佳, 張 勁, 西澤 (片境) 紗希, 日本地下水学会2023年秋季講演会 (2023) 溶存化学成分と同位体を用いた富山県片貝川扇状地における地下水流動と滞留時間の研究
3 6	Therese L L Jokam Nenkam, JING ZHANG, Hirofumi Tazoe, Ade S Otktaviani, Yuika Kitazawa, Keiji Horikawa, 日本地下水学会2023年秋季講演会 (2023) Rare Earth Element Behavior in Coastal Groundwater of the Kurobe River Alluvial fan, Toyama Bay, Japan

37	中易 佑平, 張 芸馨, 張 勁, 西澤 (片境) 紗希, 日本地下水学会2023年秋季講演会 (2023) 富山県黒部川扇状地における休耕田地下水涵養実験とその涵養効果の検証
38	西澤 (片境) 紗希, 張 勁, 北澤 唯佳, 日本地下水学会2023年秋季講演会 (2023) 片貝川扇状地における陸から沿岸海域への溶存ガス動態把握の速報 ~温室効果ガス (GHG) に着目して~
39	Ade S Oktavian, <u>JING ZHANG</u> , <u>Saki Nishizawa Katazakai</u> , Yuika Kitazawa, Therese L L Jokam Nenkam, 日本地下水学会2023年秋季講演会 (2023) Ion exchange method: A clean chemistry approach for nitrate ammonium isotopes analysis in natural water sources
40	花村 虎太郎, 張 勁, 勝田 裕大, 稲村 修, 日本地下水学会2023年秋季講演会 (2023) (続報) 富山湾産イガイ類の $\delta^{13}\text{C}$ ・ $\delta^{15}\text{N}$ 時空間変動とその影響要因
41	<u>Seo Yuhwan</u> , 吉田 尚郁, 張 勁, 日本地下水学会2023年秋季講演会 (2023) 富山県において水田が地下水賦存量に及ぼす影響分析
42	【予定】勝田 裕大, 張 勁, 稲村 修, 大浦 晃生, 北澤唯佳, 日本地球惑星科学連合2024年大会(2024) 休耕田涵養における栄養塩動態 : 水-水生昆虫の関係に着目して

成果 番号	【サブテーマ2】の口頭発表 (学会等・査読なし)
43	<u>JING ZHANG</u> , <u>Yuhei Nakayasu</u> , <u>Takafumi Yoshida</u> , <u>Xinyu Guo</u> , <u>Taichi Tebakari</u> , ECSA 58 - EMECS 13Estuaries and coastal seas in the Anthropocene (2021) Impact of climate changes on water and nutrient transport in central Japan and leading to climate change adaptation strategies.
44	郭 新宇, <u>Menghong Dong</u> , 張 勁, 日本地下水学会2022年秋季講演会 (2022) 富山湾低次生態系モデルによる河川水・地下水の植物プランクトン成長への影響評価
45	原田 晃湧, 手計 太一, 松浦 拓哉, 第 50 回土木学会関東支部技術研究発表会 (茨木大学日立キャンパス) (2023) 増光期・減光期を考慮した MRI-ESM2-0 の全天日射量の校正法の提案
46	松浦 拓哉, 手計 太一, 第 50 回土木学会関東支部技術研究発表会 (茨木大学日立キャンパス) (2023) 生活排水処理形態の変化が黒部川から富山湾へ流出する窒素負荷量に与える影響評価に関する基礎的検討
47	松浦 拓哉, 手計 太一, 日本地下水学会 2022 年秋季講演 (2022) 気候変動による降水の変化が黒部川の $\text{NO}_3\text{-N}$ に与える影響評価【成果番号88; 若手優秀講演賞】
48	<u>Takuya Matsuura</u> , <u>Taichi Tebakari</u> , Naoki Koyama, 19th Annual Meeting Asia Oceania Geosciences Society (Online), 2022, Long-term Changes of Precipitation Characteristics in the Kurobe River Basin Using NIES Statistical Downscaled Data
49	松浦 拓哉, 手計 太一, 水文・水資源学会/日本水文科学会 2022 年度研究発表会 (京都大学宇治おうばくプラザ), 2022, 降水形態の変化が黒部川の $\text{NO}_3\text{-N}$ に与える影響評価に関する基礎的検討
50	<u>Xinyu Guo</u> , <u>Menghong Dong</u> , <u>Takuya Matsuura</u> , <u>Taichi Tebakari</u> , <u>Jing Zhang</u> : 日本海洋学会秋季大会(2023) Impacts of river and groundwater on nutrients and phytoplankton growth in Toyama Bay
51	原田 晃湧, 手計 太一, 松浦 拓哉, 日本地下水学会2023年秋季講演会 (2023) 富山県片貝川扇状地を対象とした地下水モデルの構築と精度評価
52	松浦 拓哉, 原田 晃湧, 手計 太一, 日本地下水学会2023年秋季講演会 (2023) 富山県内の公共下水道の普及が富山湾の窒素負荷量に与えた影響評価

53	郭 新宇, Menghong Dong, 松浦 拓哉, 張 勁, 手計 太一, 日本地下水学会2023年秋季講演会(2023) 富山湾の栄養塩濃度と植物プランクトン成長に対する 河川水と地下水のそれぞれの影響評価
----	--

(4) 知的財産権

成果番号	発明者	出願者	名称	出願以降の番号	出願年月日
	特に記載すべき事項はない。				

(5) 「国民との科学・技術対話」の実施

成果番号	実施年度	【サブテーマ1】の実施状況
54	2021	【張 勁】一般公開シンポジウム「水」と「水循環」の研究最前線—21世紀の多分野協創研究にむけて」（主催：日本学術会議地球惑星科学委員会地球・人間圏分科会、2021年9月18日、オンライン、観客約300名）にて成果紹介
55	2021	【張 勁】一般公開シンポジウム「第10回安全・安心でおいしい地下水サミット」（主催：安全・安心でおいしい地下水連絡協議会（世話人：富山県朝日町）、2021年11月9日、オンライン、観客約40名）にて基調講演
56	2021	【張 勁】【片境紗希】【中易佑平】【ソ ユファン】【吉田尚郁】一般公開シンポジウム「第5回富山湾研究会」（2022年3月6日、聴講者約50名）にて成果紹介
57	2022	【張 勁】一般公開総会「水資源対策協議会」（主催：水資源対策協議会（世話人：富山県黒部市）、2022年7月6日、黒部市民会館、観客約30名、内、黒部市職員5名）にて基調講演
58	2022	【中易佑平】富山県内大学生への一般公開（主催：富山県、2022年4月28日、富山県薬事総合研究開発センター、富山県環境科学センター、参加学生35名）にて成果紹介
59	2022	【張 勁】【片境紗希】東京都渋谷区上原小学校における特別授業（2022年5月27日、聴講者約60名）にて成果紹介
60	2022	【張 勁】【片境紗希】一般公開シンポジウム「アースデイとやま 2022」（主催：アースデイとやま実行委員会、2022年6月5日、富山市ファミリーパーク、観客約30名）にて成果紹介
61	2022	【片境紗希】一般公開「Smart Café in 理学部」（主催：富山大学 ダイバーシティ推進センター、2022年6月15日、富山大学理学部、観客約20名）にて成果紹介
62	2022	【張 勁】一般公開総会「水資源対策協議会」（主催：水資源対策協議会（世話人：富山県黒部市）、2022年7月6日、黒部市民会館、観客約30名、内、黒部市職員5名）にて基調講演
63	2022	【張 勁】一般公開総会「魚津・滑川地下水協議会総会」（主催：魚津・滑川地下水協議会（世話人：富山県魚津市）、2022年8月17日、魚津市役所、観客約30名）にて基調講演

64	2022	【張 勁】一般公開シンポジウム「沿岸環境の変化と人間活動—10年後を見据えた課題と対応—」（主催：日本学術会議地球惑星科学委員会地球・人間圏分科会、地球惑星科学委員会SCOR分科会、2022年9月23日、オンライン、観客約400名）にて講演
65	2022	【片境紗希】一般公開総会「水曜会 11月定例会」（主催：富山県魚津市、2022年11月9日、ホテルグランミラージュ、観客約50名）にて基調講演
66	2022	【片境紗希】一般公開「令和4年度「地下水の守り人」講習会」（主催：公益財団法人とやま環境財団、2022年11月21日、富山県民会館、観客約30名）にて基調講演
67	2022	【西澤（片境）紗希】一般公開「第26回富山県内地下水利用対策協議会合同研修会」（主催：富山県高岡市、2022年12月22日、ホテルニューオータニ高岡、観客約50名）にて基調講演
68	2022	【張 勁】一般公開「国際ロータリー第2610地区富山第1グループIM」（主催：魚津ロータリークラブ、2023年3月26日、ホテルグランミラージュ、観客約50名）にて基調講演
69	2023	【張 勁】一般公開「富山市民大学」（主催：立山黒部ジオパーク、2023年5月31日、富山市民学習センター、観客約50名）にて基調講演
70	2023	【西澤（片境）紗希】一般公開環境問題とやま懇親会（2023年6月17日、観客約20名）にて基調講演
71	2023	【西澤（片境）紗希】射水市立大門中学校における総合的な学習の時間（中学2年生）SDGs講演会「科学の視点から見たとやまの水・自然環境の魅力～未来のために今、できること～」（2023年6月21日、聴講者約200名）
72	2023	【西澤（片境）紗希】一般公開「黒部川地域地下水利用対策協議会」（主催：富山県入善町、2023年8月2日、入善まちなか交流施設うらおい館、観客約30名）にて基調講演
73	2023	【張 勁】【中易佑平】【吉田尚郁】（本研究課題主催）一般公開シンポジウム「富山・富水・富心2023 水の輪廻—変わりゆく水循環：私たちができること—」（2023年11月17日、観客約200名）にて成果報告および富山県内産官学の代表者によるパネルディスカッションの実施

成果 番号	実施 年度	【サブテーマ2】の実施状況
		特に記載すべき事項はない。

(6) マスメディア等への公表・報道等

成果 番号	【サブテーマ1】のメディア報道等
74	毎日新聞（2021年3月31日、全国版、「温暖化の影響か 日本海の異変」）※一部掲載
75	NHK（2022年5月4日、全国版、潜れ！さかなクン「富山湾 びっくり箱みたいな海」、陸から富山湾への栄養塩供給の成果について5分ほど紹介）
76	富山テレビ（2022年7月26日、地方局、富山の海に何が「海水がきれいになり過ぎている!?!」…忍び寄る『貧栄養化』 海からの警告、陸から富山湾への栄養塩供給と休耕田涵養実験の研究成果を2分ほど紹介）

77	NHK（2022年8月10日、全国版、潜れ！さかなクン「ギョギョギョ 富山湾スペシャル!」、陸から富山湾への栄養塩供給の成果について5分ほど紹介）
78	北日本新聞（2022年9月6日、地方版、「富山の水資源と環境」㊦、「高低差4000メートルの自然ラボ」）
79	北日本新聞（2022年9月13日、地方版、「富山の水資源と環境」㊦、「森の恵み海へ運ぶ」）
80	北日本新聞（2022年9月20日、地方版、「富山の水資源と環境」㊦、「日本海で世界を知る」）
81	富山テレビ（2023年2月25日、地方報道局、BBTドキュメンタリース「痩せる海 助教片境の挑戦」、陸から富山湾への栄養塩供給と休耕田涵養実験の研究成果を紹介）
82	富山テレビ（2024年1月29日、地方報道局、BBT報道シンそう富山「進行する海の『貧栄養価』影響と対策は」陸から富山湾への栄養塩供給と休耕田涵養実験の研究成果を紹介）

成果番号	【サブテーマ2】のメディア報道等
	特に記載すべき事項はない。

(7) 研究成果による受賞

成果番号	【サブテーマ1】の研究成果による受賞
83	優秀講演賞，2021年海洋若手研究集会，2021年9月11日，片境 紗希（富山大学）
84	富山大学学長賞第5回「未知に挑む女性研究者賞」奨励賞【女子学生部門】，富山大学，2021年12月17日，片境 紗希（富山大学）
85	若手優秀講演賞，日本地下水学会，2021年12月3日，片境 紗希（富山大学）
86	令和3年度学生による地域フィールドワーク研究成果報告会優秀賞，コンソーシアム富山，2022年2月28日，北澤 唯佳，張 芸馨，花村 虎太郎，山口 圭一，片境 紗希（富山大学）
87	若手優秀講演賞，日本地下水学会，2022年10月27日，北澤 唯佳（富山大学）

成果番号	【サブテーマ2】の研究成果による受賞
88	若手優秀講演賞，日本地下水学会，2022年10月27日，松浦 拓哉（中央大学）

(8) その他の成果発表

成果番号	【サブテーマ1】のその他の成果発表
89	富山県自然環境GISの公開 https://ertdf2-2101.users.earthengine.app/view/toyamalulc
90	富山県社会環境GISの公開 https://ertdf2-2101.users.earthengine.app/view/toyamaclimate

成果 番号	【サブテーマ2】のその他の成果発表
	特に記載すべき事項はない。

Abstract

[Research Title]

Impact assessment of climate change on water and nutrient transport with adaptation options for Toyama

Project Period (FY) :	2021-2023
Principal Investigator :	Zhang Jing
(PI ORCID) :	0000-0002-2926-0709
Principal Institution :	Faculty of Science, Academic Assembly, University of Toyama, Toyama, Toyama, 930-8555, Japan Tel: +81 76 445 6665 E-mail: jzhang@u-toyama.ac.jp
Cooperated by :	Toyama Prefectural Environmental Science Research Center , Northwest Pacific Region Environmental Cooperation Center, Chuo University, Ehime University
Keywords :	Climate Change, Less snow and increased rainfall, Healthy water cycle, Nutrient management

[Abstract]

The objective of this project is to quantify the water and nutrient cycles in Toyama Prefecture using stable and radioactive isotopes and combine the data with numerical models to elucidate the temporally and spatially complex water cycle mechanisms from terrestrial to marine areas, and to propose management measures to maintain a sustainable water and nutrient cycle system adapted to climate change.

Based on the results of chemical analyses of approximately 80 sites, we generalized the mechanisms of groundwater formation in three areas. We evaluated the factors influencing nutrient supply and transport in each area. We focused on groundwater recharge using fallow rice fields as a sustainable water cycle management method to adapt to climate change. We expected it to conserve groundwater volume and supply nutrients to the groundwater and therefore quantitatively evaluated its effectiveness. In addition, we developed the GIS data system of environmental and social information in Toyama Prefecture from the 1980s to 2020 and used it to elucidate the impact of climate change on agriculture and forestry in Toyama Prefecture and to identify suitable areas for groundwater recharge.

The Toyama Hydrological Model, which reproduces the hydrological cycle on land, and the Toyama Bay Lower Trophic Level Ecosystem Model, which reproduces the nutrient cycle in the sea, were developed individually and combined into an integrated land-sea model for Toyama Prefecture. The integrated model was used to predict future changes in nutrient loads from the land area, and its results showed a large impact of changes in the social environment, in which the proliferation of wastewater treatment plants and declining population will result in a decrease of 12,000 kg/day in 2100 as compared with in 1985. To maintain the same level of nitrogen loading, additional nutrients must be added at wastewater treatment plants by a factor of 2.3 in 2100. Results also showed that global warming will increase river discharge, whose impact will be manifested mainly as an increase in nutrient concentrations and primary production in the surface layer (0-20 m depth) near the estuary. On the other hand, the nutrient supply from groundwater as submarine springs will decrease, whose impact on the primary production in the nearshore area cannot be ignored.

It should be noted that some of these results have been reflected in the carbon-neutral strategy and policies related to agriculture, forestry, and fisheries in Toyama Prefecture.

[References]

- Katazakai, S., & Zhang, J. (2021). A quarter-century of nutrient load reduction leads to halving river nutrient fluxes and increasing nutrient limitation in coastal waters of central Japan. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(9), 573. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09279-5>
- Katazakai, S., & Zhang, J. (2021). A shift from snow to rain in midlatitude Japan increases fresh submarine groundwater discharge and doubled inorganic carbon flux over 20 years. *Environmental Science & Technology*, 55(21), 14667–14675. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c05108>
- Yang, H., Mishima, H., Katazakai, S., & Kanabu, M. (2022) Analytical approach using a chemical equilibrium formula and geochemical modeling for alkalinity measurements of small natural water samples. *Applied Geochemistry*, 105535. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2022.105535>
- Leng, Q., Guo, X., Zhu, J., & Morimoto, A. (2023). Contribution of the open ocean to the nutrient and phytoplankton inventory in a semi-enclosed coastal sea. *Biogeosciences*, 20(20), 4323–4338. <https://doi.org/10.5194/bg-20-4323-2023>
- Luo, Y., Shi, J., Guo, X., Mao, X., Yao, P., Zhao, B., Chen, L., & Wang Y. (2023). Yearly variations in nutrient supply in the East China Sea due to the Zhejiang coastal upwelling and Kuroshio intrusion. *J. Geophys. Res. Ocean*, 128, e2022JC019216. <https://doi.org/10.1029/2022JC019216>

This research was funded by the Environment Research and Technology Development Fund (ERTDF).

別紙

【参考資料】 終了研究成果報告書 公募審査・中間評価結果への対応

指摘等	対応状況・非対応理由等
採択時コメント「やや富山モデルの意義づけに焦点を合わせた提案書、説明となっており、適応策として考えている”施策”とその効果を、観測とモデルの構築によって行いますという研究構成にして欲しかった。」	現場観測から得られた結果、開発した数値モデルによる再現実験や将来予測実験の結果、機械学習などを活用し、優先度、効果なども含めて適応策を検討した。
採択時コメント「適応策の定量的な検討を期待する。」	気候変動や社会環境変化の影響を定量的に示すとともに、これらの影響に対する適応策について、目標年や数値目標など定量的な適応策の提示に努めた。
採択時コメント「「富山モデル」が気候変動モデルの中で何を象徴するか特徴付けられると、さらに迫力ある提案になるように思う。」	(中央大) 今後、気候変動により、気温が上昇することで降雪量が降雨量に変化するという降水形態の変化が考えられる。本研究対象領域である富山県は、降水形態の変化を気温で判別した。 (愛媛大) 富山モデルに日本海沿岸海域を含むため、本研究で開発した富山モデルは日本海沿岸域に拡張されることが可能である。
採択時コメント「富山県からの要望等に応じた水循環管理方法が提案でき、適応策のオプションを提案できれば、富山県だけでなく、日本海側の地域へも貢献できるものと期待する。適応策については、海域以外の陸域の河川流域の生態系の適応策の提案も期待する。」	研究を通じて得られた情報や成果については適宜、富山県とも共有し、行政ニーズを踏まえた適応策を検討した。地下水を含めた水循環への気候変動の影響は富山県だけでなく、日本海側の降雪地域に共通する問題であり、他地域の適応策の検討にも貢献できるものとする。中山間地区の休耕田や耕作放棄地を積極的に活用することで、里山再生など生態系の保全にもつながることが期待される。
採択時コメント「得られたデータ、対応策などは下流の農業水産業を営む事業者にとっては貴重なものと思え、判りやすく公開することが望まれる。また、森林の水源涵養、保水などの機能も大きいのでこの分野まで検討を広げることはできるか。森林関連事業者のとっても重要な情報でありこの分野にも公知されることが望ましい。」	本研究で得られた成果は、県や市町村の関係部署の担当者と共有されたほか、シンポジウム等を通じて多くの関係者への発信に努めた。2023年の地下水学会と合わせて開催したシンポジウムには富山県の農林分野を担当する副知事も参加しており、得られた成果や課題についての共有が図られたと考えている。
採択時コメント「統合モデルの成否が大事。ただ地下水を含めた多圏モデルは第一原理では難しいので、AI・機械学習の取り込みも役立つと思う。」	(中央大・愛媛大) 陸上観測・海洋観測ともにデータ数が乏しかったため、本研究のモデルにおいてAI・機械学習は効果的ではなかったが、＜行政等に既に貢献した成果＞【1】富山湾沿岸における海洋観測項目の拡充などにより、将来的に活用できると期待している。

<p>採択時コメント「富山での研究成果を発表するために数回海外出張することとなっているが、成果発表の場として、地域行政・経済界、国内学会・経済界などを優先すべきではないかと思われる。」</p>	<p>本研究課題は、富山県内を中心に講演会講師、シンポジウム開催等の「国民との科学・技術対話」を27件実施した。また、「マスメディア等への公表・報道等」へも積極的に行い、本研究成果の波及に努めた。</p>
<p>採択時コメント「富山地域(立山、富山湾など)をモデル対象として、気候変動と降水量変化、地下水動態、栄養塩挙動など総合的に解明・モデル化し、具体的な地域適応策に結び付ける研究であり、地域に還元しうる成果を期待したい。」</p>	<p>本研究課題全体の成果は、富山県内を中心に幅広く情報発信を行い、富山県との担当部署との意見交換も積極的に行った。その結果として、＜行政等に既に貢献した成果＞に記載した富山県の【1】カーボンニュートラル戦略、【2】沿岸海域の環境モニタリング項目の拡充、【3】気候変動適応策へ、本研究で得られた成果が戦略策定の根拠の一つとして利用された。</p>
<p>採択時コメント「雨と雪の降り方が異なってくることによって富山湾への栄養塩流出の変化していることと、それに対して休耕田等の活用で適応策を考えていることはよく理解できた。その他にどのような変化が起こる可能性があるかという点も理解できたが、具体的な適応策としてどのような方策が考えられるのかをもう少しはっきりさせていただいた方がよい。」</p>	<p>サブテーマ1[1-1]の解析結果から、雨と雪の降り方が異なってくることで、特に「旧河道接続型」の地下水(片貝川扇状地)で栄養塩流出の変化が引き起こることが確認された。旧河道接続型の地下水の場合、平野部からの浸透の影響を受けにくいことから、栄養塩を付加する際は中山間地域で地下水涵養事業を実施することが効果的であることも明らかとなった。本研究では、上述のように化学データを用いて各扇状地の地下水形成・栄養塩付加の状況をパターン化し、[1-2]ではそれぞれの扇状地に合致した栄養塩付加方法や実施場所の検討を行い、定量的に評価を行った。</p>
<p>中間評価コメント「浅層と深層地下水、河川水の栄養塩フラックスを示し、その割合や適応策として栄養塩の最適化を示して欲しい。富山県に限らず、他府県への手法の波及を図ってはどうか。」</p>	<p>本研究では、浅層地下水、深層地下水、河川水の割合ではなく、トータルの栄養塩フラックスを示した。また、適応策としては、水処理場における放流水の栄養塩増加運転に関して検討した。上記の検討は、瀬戸内海有明海で実施されており、富山県に限らず、本研究のモデルを用いれば他県に適用することができる。</p>
<p>中間評価コメント「現時点の自治体の関心は休耕田を利用した地下水涵養実験にあるようだが、県内で水田が栽培不適地になる問題に関しても自治体も含めた具体的な検討を早期に始めた方がよいのではないかと感じた。」</p>	<p>本県の稲作への気候変動の影響についてはシンポジウム等を通じてその影響や緊急性について共有を進めた。その結果、2024年に高温耐性品種への転換のロードマップが示されるなど、行政施策に適切に反映されている。</p>
<p>中間評価コメント「最終成果としては、モデル結果の不確実性について触れていただきたい。」</p>	<p>(中央大) 観測データが不足しているため水文モデル結果の不確実性は十分な評価はできなかったものの、5つの気候モデル、3つの気候シナリオを利用したことで不確実性の幅は提示できた。 (愛媛大) 今回の富山湾モデルは気候的な状況を想定しており、気候的な観測データとの比較を行った(図2-7)。モデル結果の不確実性を相対誤算と定義するとすれば、水温と塩分に関して1~2割と考えられる。ほかの変数について、観測データが少ないため、評価しにくいですが、水温と塩分</p>

	より増えると思われる。
中間評価コメント「富山湾流域の水・栄養塩類循環プロセスの解明を研究目的としており、地域行政との対話を行いながら適応策の検討や測定項目の拡大等まで踏み込んでおり、統合的な水文モデルの開発につなげるなど今後の研究成果を期待する。」	富山湾沿岸における気候変動の影響評価、具体的には主に陸から沿岸海域への水・物質供給の変化を評価し今後の将来予測の精度向上のために、富山県環境科学センターでは令和4年4月より、通常の公共用水域水質調査に合わせて富山湾沿岸海域7地点で、富山県独自の追加調査を開始している。
中間評価コメント「今後、水文モデルと陸海統合モデルの結合を通じて、適応策について総合的な評価が可能となるモデルとなることが期待される。」	本研究は、サブテーマ間で異なるアプローチから富山県の陸から海への栄養塩動態を評価したところ、両者とも将来的に陸域からの栄養塩付加が必要という結論を得た。これらの結果を考慮して、河川水への栄養塩付加、地下水への栄養塩付加の適応策に加え、中山間地域の活用方法についても提案した。
中間評価コメント「行政との連携については評価できるが、今後は、気候変動担当部局のみならず農林水産部局などの影響を受ける行政担当部局との連携への発展を期待したい。また、今回の知見を他の地域にも展開可能なよう整理いただくことも期待したい。」	気候変動が富山県の農林業に及ぼす影響について、シンポジウムを通じて県の行政関係者との情報共有を行った。その結果、県の戦略目標づくりに活用されるなど具体的な効果がみられた。