中間ヒアリング資料

令和3～5年度環境研究総合推進費

課題番号：2-2101（体系的番号：JPMEERF20212001）

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

主：【重点課題⑧】 気候変動への適応に係る研究・技術開発

副：【重点課題⑯】 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：

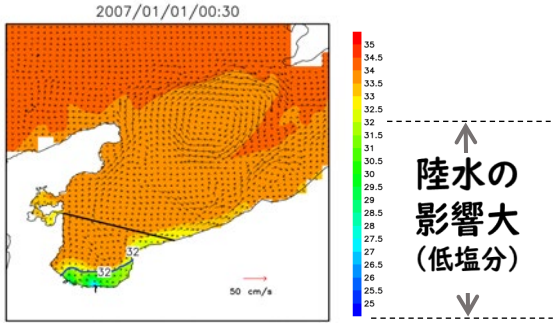
（2-2）地域特性に応じた気候変動影響予測及び適応の推進に関する研究

研究代表者　張　勁（富山大学・学術研究部理学系）

- サブテーマ１：張勁⋆（富山大学），中易佑平（富山県環境科学センター），吉田尚郁（（公財）環日本海環境協力センター（NPEC））
- サブテーマ２：郭新宇⋆ （愛媛大学），手計太一（中央大学）

⋆サブテーマリーダー

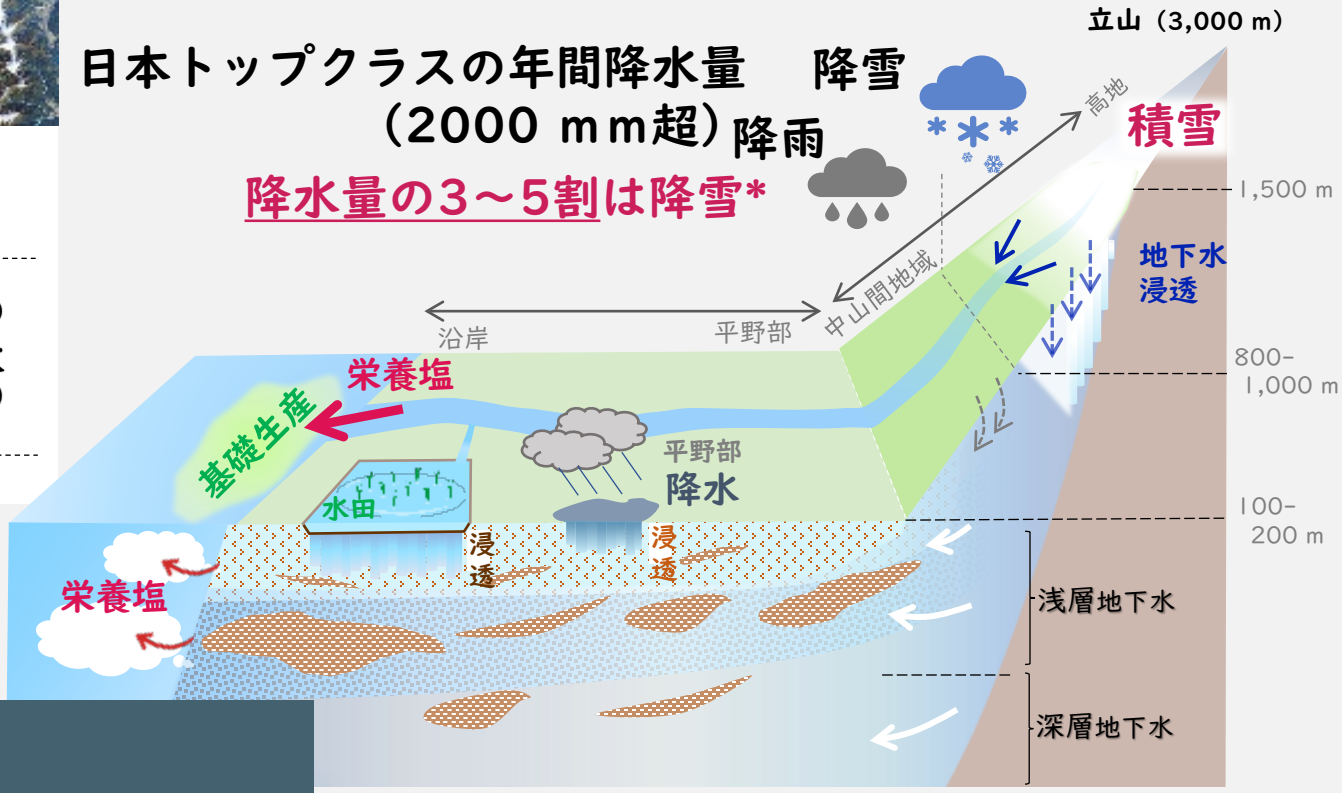
富山県の水循環と栄養塩供給



富山湾の塩分の季節変化 (S-13-3)

日本トップクラスの年間降水量 (2000 mm超)

降水量の3～5割は降雪*



陸水起源の栄養塩

2～4割 沿岸海域の基礎生産に寄与!

*高見 (1983),** とやま21世紀水ビジョン 1. S-13 (JPMEERF14S11300) の一部成果

気候変動に伴い激変する富山県の水循環

豊かな水資源が生み出す水・栄養塩循環

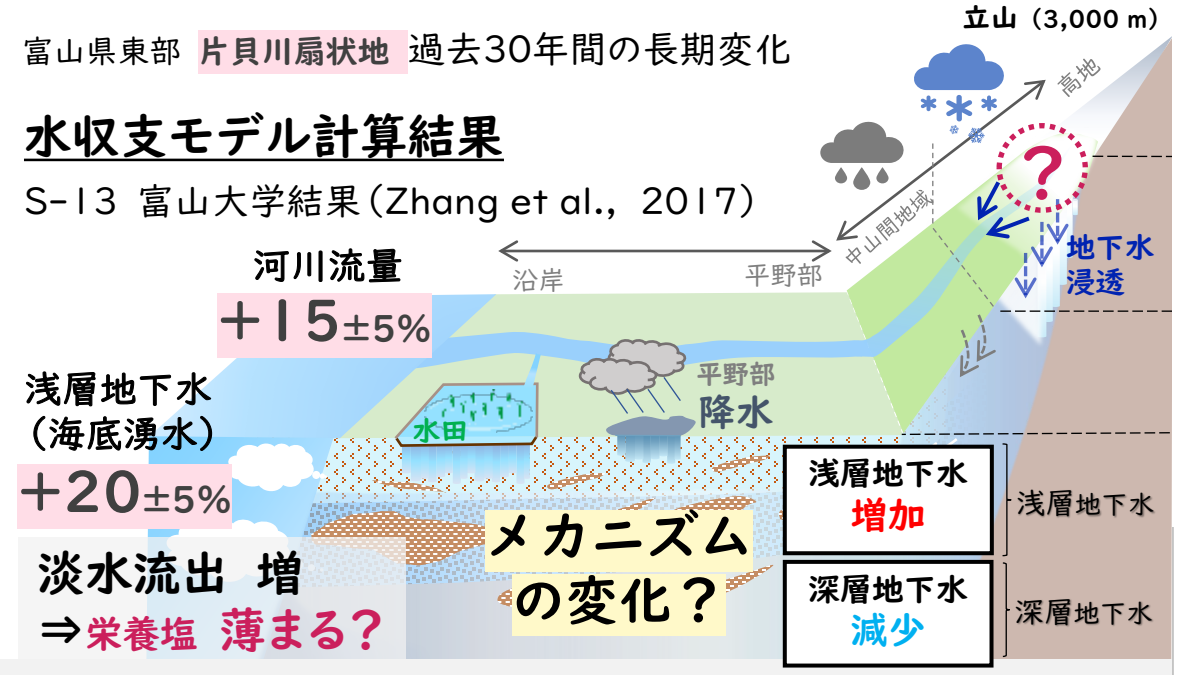
気候変動

- ◆ 少雪・多雨化
- ◆ 顕著な気温上昇

富山県東部 **片貝川扇状地** 過去30年間の長期変化

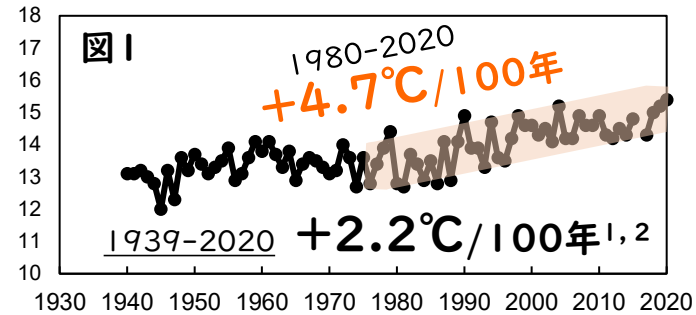
水収支モデル計算結果

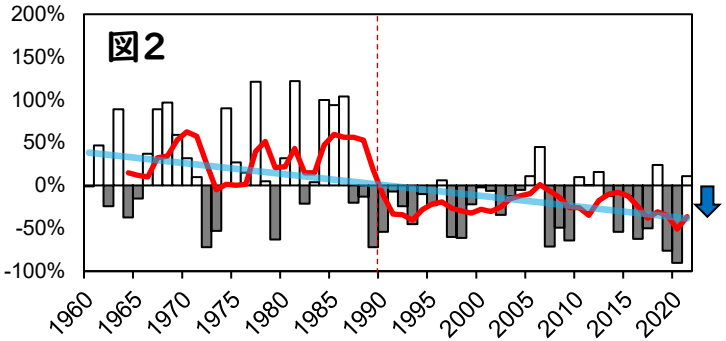
S-13 富山大学結果（Zhang et al., 2017）



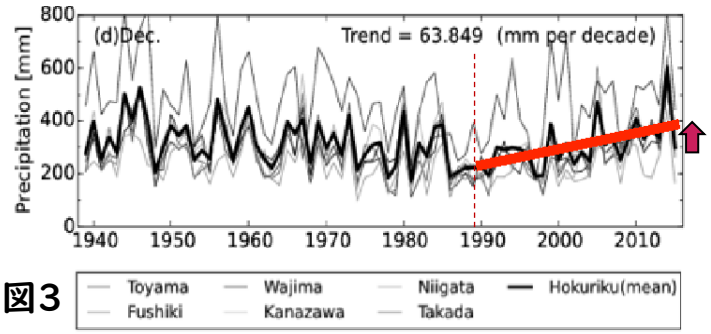
富山全域：**少雪・多雨化**に伴う陸水の
栄養塩動態の把握 喫緊の課題

富山県の気候の長期変化





降雪量 **5割減[1]**



冬季降水量 **2倍増[3]**

1. 気象庁, 2. 富山県気候変動適応センター, 3. Yasunaga and Tomochika (2017)

2. 研究開発目的・研究開発内容

気候変動

栄養塩供給の管理

科学的根拠

研究開発目的:

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

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 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
将来予測及び適応策の検証

全体目標: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提案

研究開発内容:

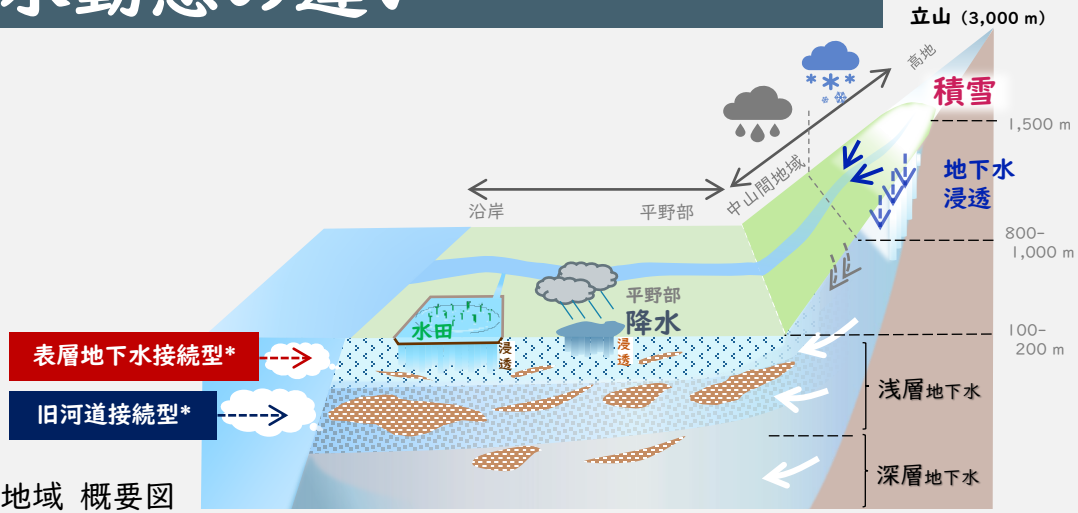
1. 水・栄養塩循環メカニズムの解明

- 現場観測+歴史的環境モニタリングデータ解析
- 富山県自然・社会環境GISの構築
- モデルの検証・再現⇒陸海統合モデルの構築

2. 気候変動の影響解析及び影響要因の抽出と将来予測

3. 持続的な水・栄養塩循環の管理方法・適応策の提案

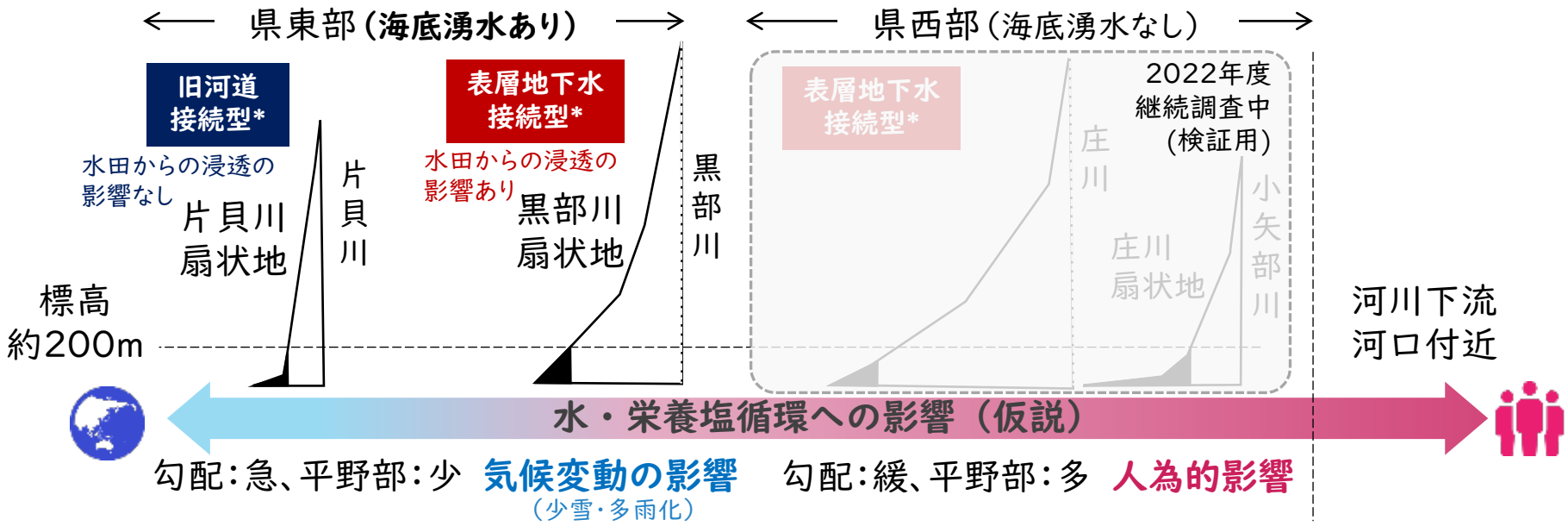
各扇状地の陸から海への水動態の違い



調査実施地域 概要図

3つの扇状地の河川縦断勾配・パターン化

◢平野部（農地・市街地）



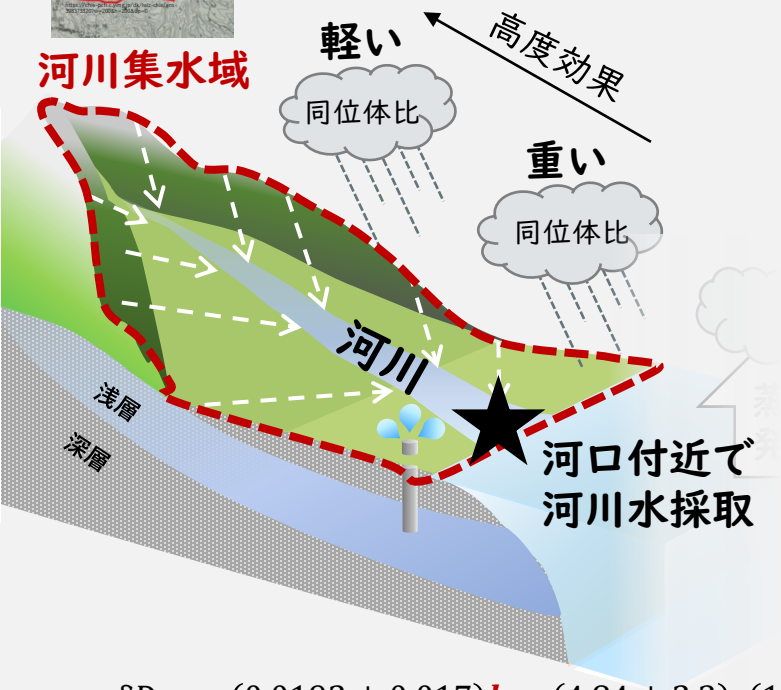
*中口・張ら（2005）の化学データより本研究課題で定義

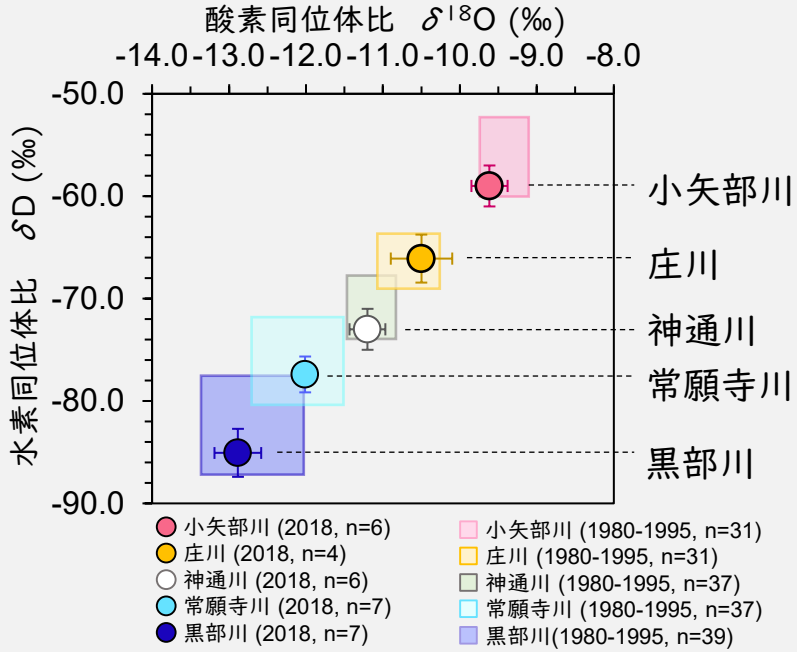
水・栄養塩循環メカニズムの解明 ～起源～

研究成果1

水 H_2Oの「DNA」

水素・酸素安定同位体比





$$\delta D = -(0.0193 \pm 0.017)\boldsymbol{h} - (4.84 \pm 2.3) \quad (1)$$

$$\delta^{18}O = -(0.00236 \pm 0.00016)\boldsymbol{h} - (8.68 \pm 0.22) \quad (2)$$

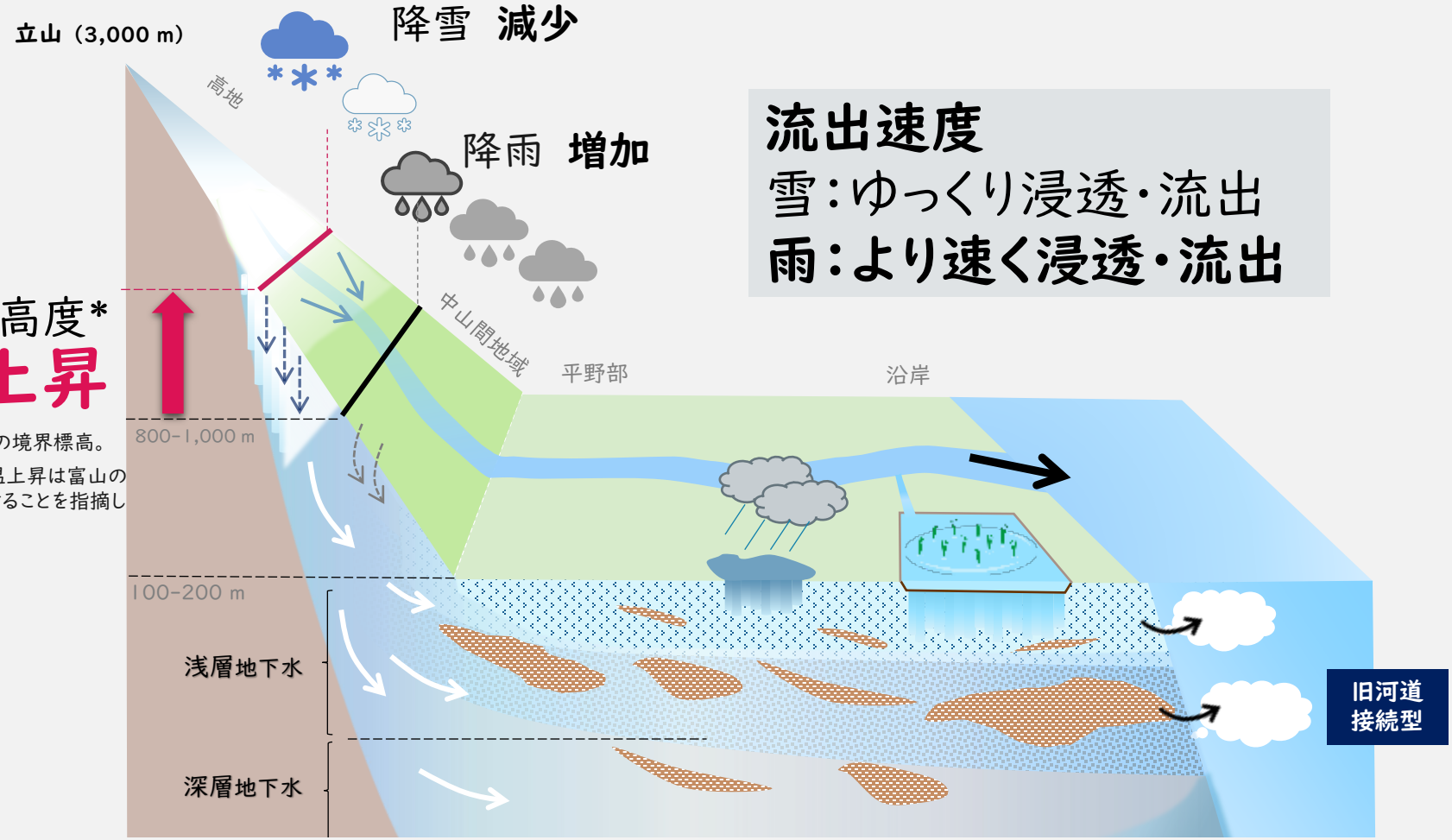
h ： 水の起源標高（涵養標高）

水谷・佐竹（1997）

2021年度 解析結果		同位体比から算出した涵養標高(m)	地図上における河川集水域の平均高度(m) 水谷・佐竹（1997）
県東部（海底湧水あり）	片貝川扇状地	933～1274	990
	黒部川扇状地	1566～2013	1570
県西部（海底湧水なし）	庄川扇状地 ※庄川・小矢部川で形成	183～994	260～1020

流域全体の起源評価が可能 各流域の平均集水高度：過去と同様

少雪・多雨化の影響による水循環の変化 ～考えられるプロセス～



流出速度

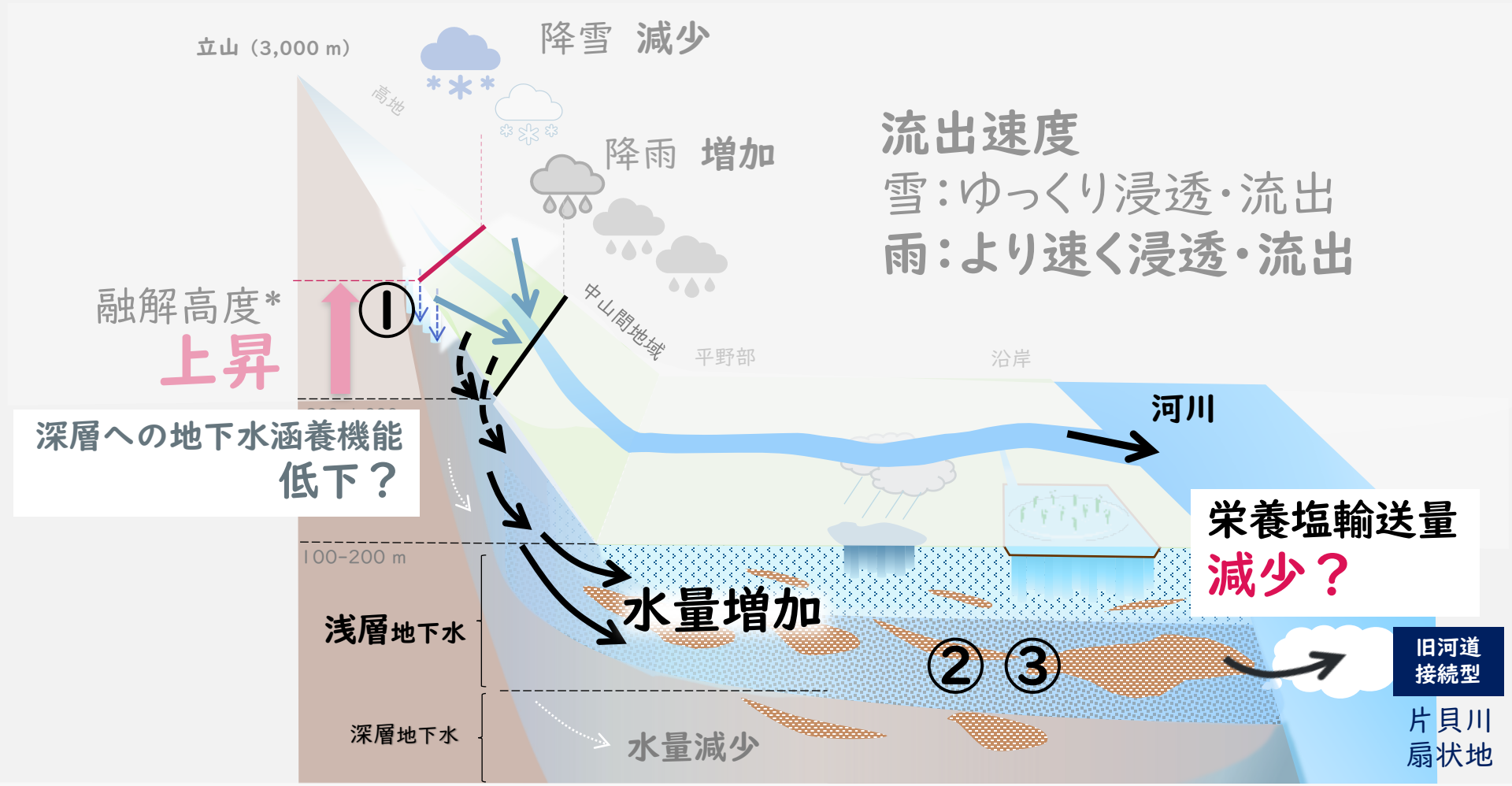
雪：ゆっくり浸透・流出

雨：より速く浸透・流出

*雨雲の降雪と降雨の境界標高。

飯田（2001）は気温上昇は富山の融解高度を上昇させることを指摘している。

少雪・多雨化の影響による水循環の変化 ～考えられるプロセス～



【仮説】想定される地下水の水質的変化

① 地下水の起源標高の上昇

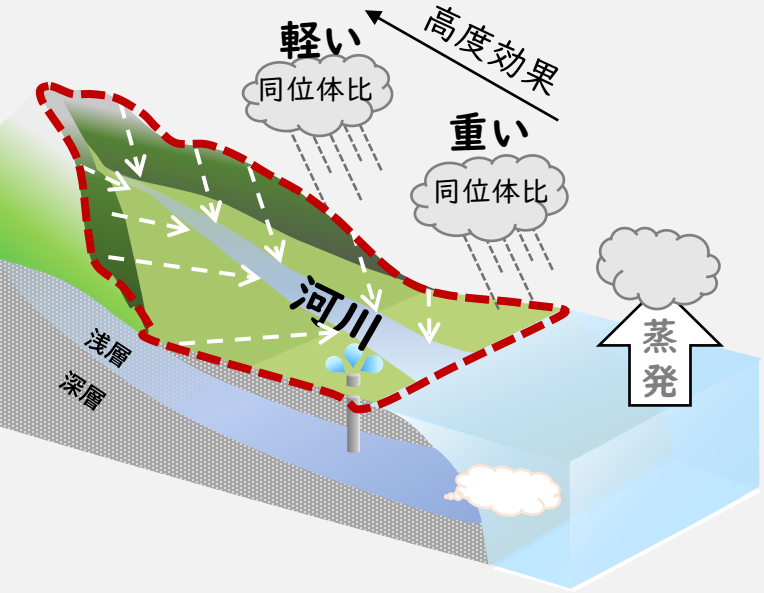
② 陸水の栄養塩濃度の低下

③ 海へ達するまで滞留時間の短縮化

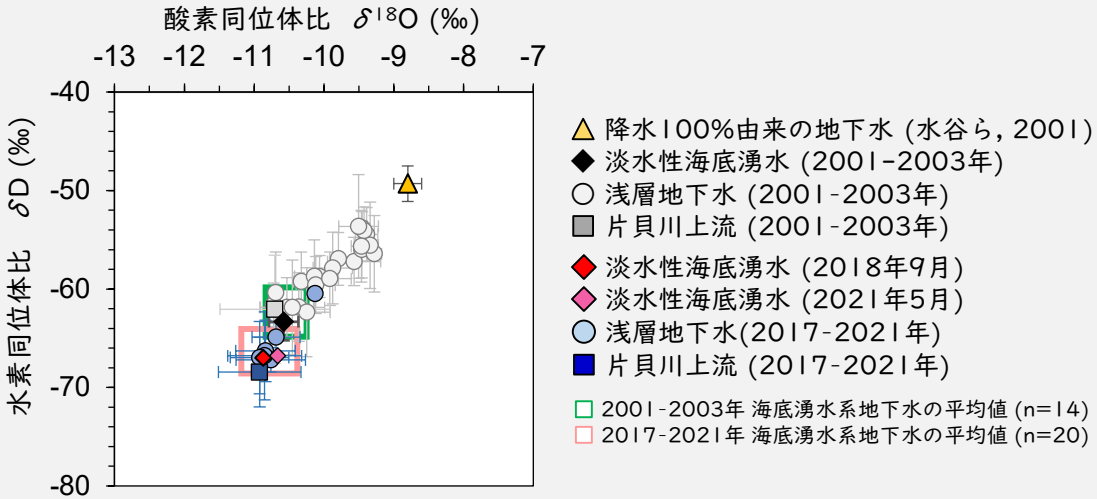
「出口」の同位体比からみえた片貝川上流域における降雪・降雨の境界標高の上昇

旧河道接続型　研究成果2

水 H_2Oの「DNA」**水素・酸素安定同位体比**



片貝川扇状地 地下水・河川水の分析結果 Katazakai and Zhang（2021）



➢ 海底湧水系の平均涵養標高の比較

	平均 涵養標高 (m)
2001-2003	800±80
2017–2021	980±150

涵養標高
100-250 m上昇

➢ 降雨・降雪の境界標高の指標：**冬季(12月～3月)の融解高度***

*飯田（2001） 等

2001-2003: **760±80 m**
2017-2021: **850±80 m**

+90-250 m 上昇

融解高度

同位体比の結果⇒ 気温上昇・降雪の下限の上昇を確認

溶存成分のとの関係性は？

片貝川上流域での涵養状況の変化に伴う溶存成分の希釈と滞留時間の短縮

旧河道接続型　研究成果３

(1)地下水の起源標高

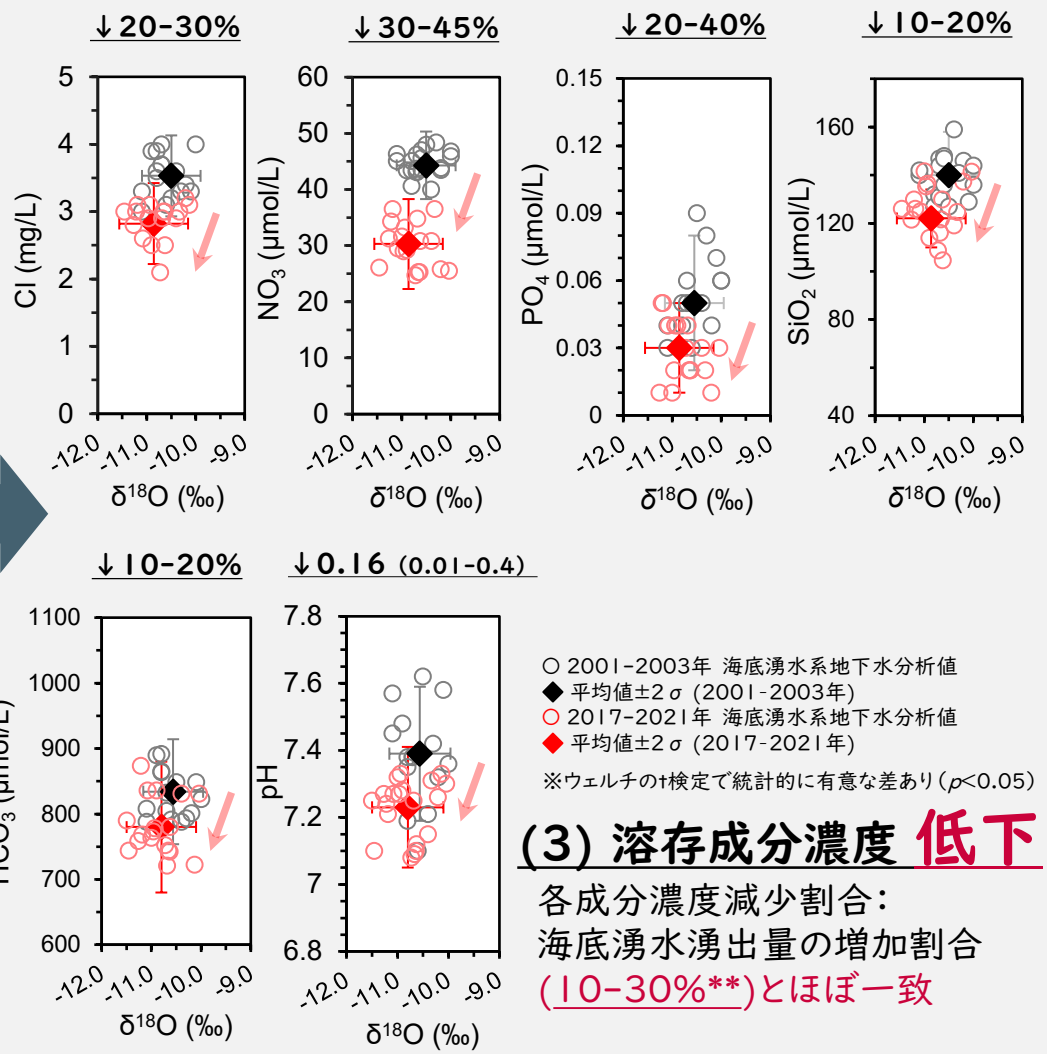
100-250 m上昇

➢ 水源付近の標高帯：雪から雨に

◆ 山間部から平野部浅層地下水へ短期間で流出する水量の増加
◆ 流速増加

(2) 滞留時間 1/3 短縮

	トリチウム年代 (years)
2000–2001	5–20*
2018–2021	3–14



(3) 溶存成分濃度 低下

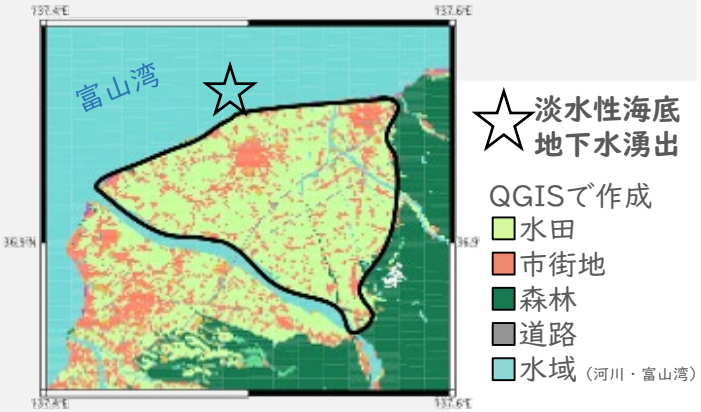
各成分濃度減少割合：
海底湧水湧出量の増加割合
(10-30%**)とほぼ一致

*Zhang and Satake（2003）にて観測されたトリチウム濃度より再解析，** Zhnag et al. 2017

県東部・黒部川扇状地 地下水中の硝酸濃度減少と水田面積 表層地下水接続型 研究成果４

黒部川扇状地の土地利用図

国土数値情報ダウンロードサービス

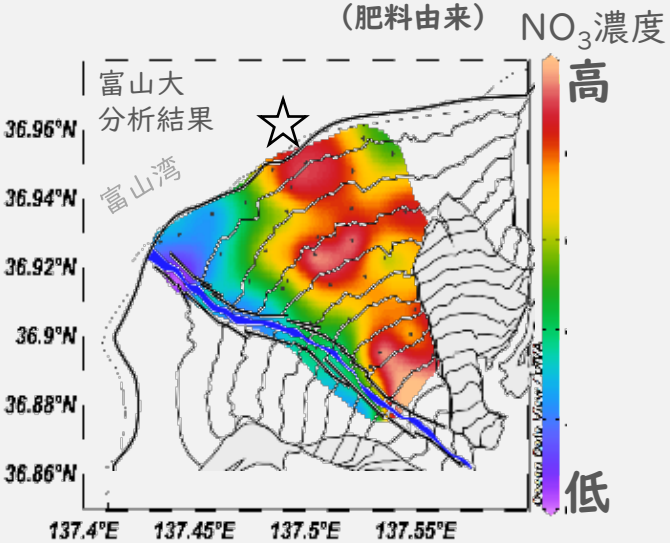


公表前データのため削除

黒部川右岸：水田面積　多

硝酸濃度　高

（肥料由来）



右岸の水田面積　減少

地下水中の平均硝酸濃度 減少

試算

陸上地下水（右岸）から富山湾沿岸への供給量の減少量

公表前データのため削除 **NO_3/30年** **N-NO_3:** 公表前データのため削除 **/日**

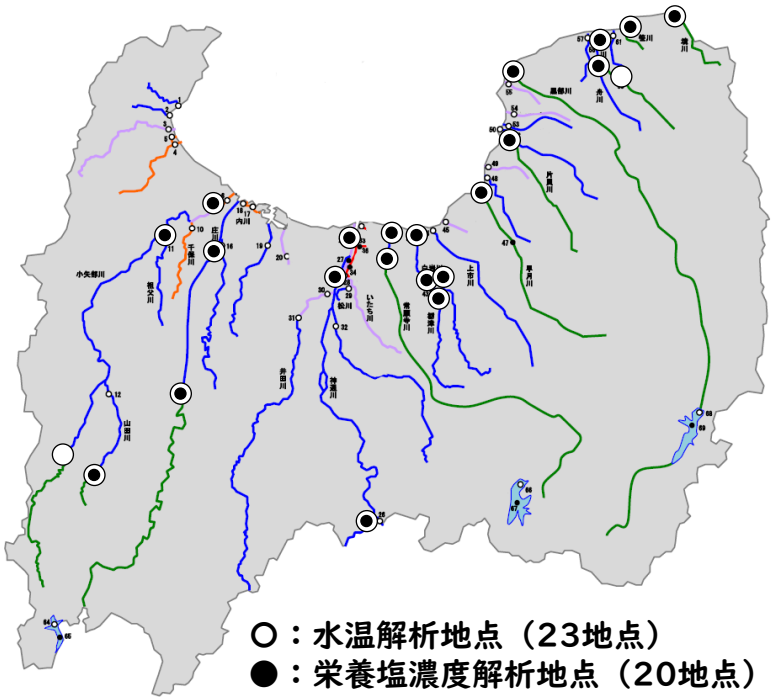
黒部川の年間供給量に相当

公表前データのため削除 **ton/年**

水・栄養塩循環への人為的影響（土地利用変化）も確認

富山県モニタリングデータの解析 ～陸域河川～

調査地点地図



○：水温解析地点（23地点）
●：栄養塩濃度解析地点（20地点）

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。

水温

区分	河川名	地点	水温変化量(℃/年)	流域面積	勾配
西部	小矢部川	上	－	大	小
		中	+0.029		
		下	+0.026		
	山田川	上	+0.037		
	庄川	中	+0.039	大	小
		下	+0.030		
中部	神通川	上	+0.031	大	小
		中	+0.043		
		下	+0.046		
	常願寺川	中	－	大	小
		下	+0.036		
	白岩川	中	－	小	小
		下	+0.029		
	栃津川	上	－		
		下	－		
東部	早月川	下	－	小	大
	片貝川	下	+0.036	小	大
	黒部川	下	－	大	小
	小川	上	－	小	大
		下	－		
	舟川	中	－		
	笹川	下	－	小	大
	境川	下	－	小	大

河川・地点名		全窒素				全りん				硝酸態窒素			
		全窒素(1994-2018)				全りん(1994-2018)				NO3(2000-2018)			
河川	地点(橋)	2月	5月	8月	11月	2月	5月	8月	11月	2月	5月	8月	11月
小矢部川	太美	-			-0.009	-0.0003	-0.0003						
山田川	二ケ渕			-0.006									
小矢部川	城光寺			-0.035	-0.061	-0.003				-0.013	-0.015	-0.013	-0.026
小矢部川	国条	-0.014	-0.02	-0.032	-0.037	-0.001		-0.002	-0.003	-0.01	-0.012		-0.01
庄川	雄神	-0.009		-0.009	-0.009	-0.0003	-0.0001		-0.0003	-0.006		-0.002	-0.008
庄川	大門	-0.008	-0.004	-0.008		-0.0003		-0.0002		-0.007			-0.006
宮川	新国境	-0.016	-0.011		-0.014				-0.0007		-0.01		-0.013
神通川	神通	-0.066	-0.029	-0.076	-0.036	-0.001	-0.0007	-0.001	-0.0004	-0.014	-0.008	-0.022	-0.021
神通川	萩浦		-0.029	-0.04	-0.008	-0.0004		-0.001			-0.01		
常願寺川	常願寺	-0.018	-0.015	-0.018	-0.011	-0.0013	-0.001	-0.0016	-0.0009			-0.003	-0.006
常願寺川	今川	-0.013	-0.009	-0.024	-0.012	-0.0014	-0.0008	-0.0016	-0.0013	-0.007	-0.003	-0.005	-0.012
白岩川	東西	-0.012	-0.017	-0.016	-0.016	-0.001		-0.0012	-0.0011	-0.01	-0.012	-0.013	-0.014
白岩川	泉正	-0.005	-0.011			-0.003	-0.004	-0.0026	-0.0029	-0.014	-0.008	-0.013	-0.010
栃津川	寺田		-0.008			-0.0008					-0.008	-0.015	-0.017
栃津川	流観	-0.013	-0.012	-0.008	-0.014					-0.009		-0.016	-0.02
早月川	早月	-0.015				-0.0011					-0.008		-0.009
片貝川	落合	-0.043			-0.026	-0.0103	-0.0021	-0.0017	-0.0046	-0.039	-0.007	-0.028	-0.02
黒部川	下黒部		-0.005	-0.008	-0.005	-0.0005	-0.0003	-0.0007	-0.0005			-0.005	-0.004
小川	上朝日					-0.0002	-0.0003						
小川	赤川					-0.0009		-0.0005				-0.004	-0.010
舟川	舟川					-0.0004		-0.0005			-0.008	-0.004	-0.013
笹川	笹川					-0.0003			-0.0004	-0.010	-0.007	-0.009	-0.018
境川	境川								-0.0003		-0.01		-0.013

■:上昇傾向　－:有意な傾向なし　■:減少傾向　□:有意な傾向なし　■:データなし

水温上昇（年平均）
11地点（48%）
/23地点

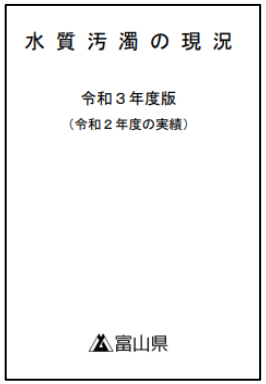
栄養塩濃度減少
全窒素・全リン・硝酸態窒素のいずれか
20地点（100%）
/20地点

富山県内の河川:
- ◆ 温暖化に伴う水温上昇
- ◆ 河川水中の栄養塩濃度減少
  人為的削減？
  汚水・下水道処理人口普及率の向上？

解析データ詳細：
富山県 公共用水域の水質調査モニタリング
・水温解析：1981～2018年度
・全窒素・全りん濃度解析：1994～2018年度
・硝酸態窒素濃度解析：2000～2018年度

H14年度～R2年度までのモニタリングデータは富山県HP内で公表中

https://www.pref.toyama.jp/1706/kurashi/kankyoushizen/kankyou/kj00007252/index.html



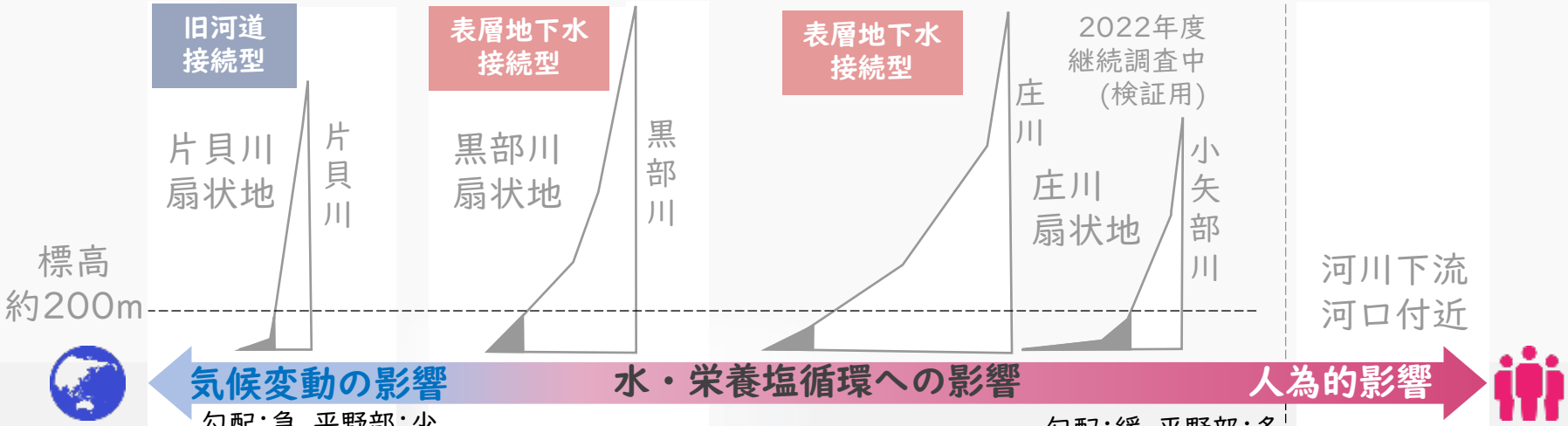
各扇状地地下水・河川河口付近の栄養塩減少の要因

研究成果２～５の小まとめ

3つの扇状地の異なる河川勾配のパターン化

◢平野部（農地・市街地）

← 県東部（海底湧水あり） → ← 県西部（海底湧水なし） →



勾配：急、平野部：少

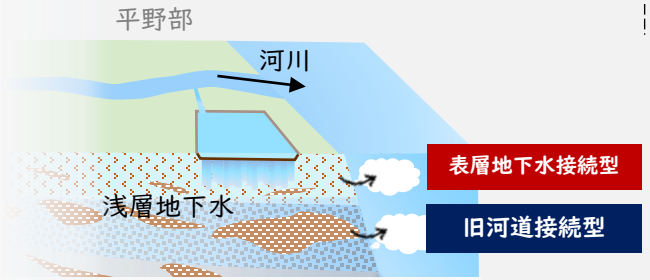
栄養塩減少
↓
少雪・多雨化
（気候変動）

適応策①？

栄養塩減少
↓
水田面積の減少
（土地利用変化）

適応策②？

勾配：緩、平野部：多



栄養塩減少
↓
人為的削減

適応策②？

- **流域内の地形環境・土地利用・人間活動によって栄養塩変化の要因が異なる**
- **「流域単位」での変化・影響要因の特定、それに合った適応策の選定が必要**

⇒サブテーマ2への観測データ共有

適応策①・適応策②：休耕田を利用した地下水涵養・栄養塩付加

研究成果6

休耕田における地下水涵養実験

地下水中への水の浸透量と栄養塩付加量の定量

流入水の**10～100倍**の**栄養塩濃度**

片貝川上流部中山間地域
（魚津市別又）

適応策①の検討

気候変動

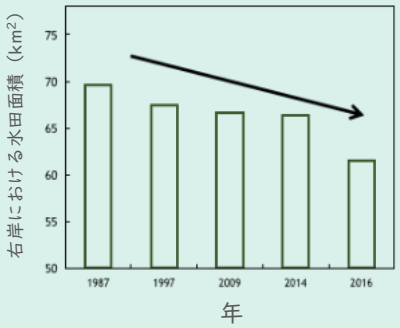
自然涵養田(中山間地域)

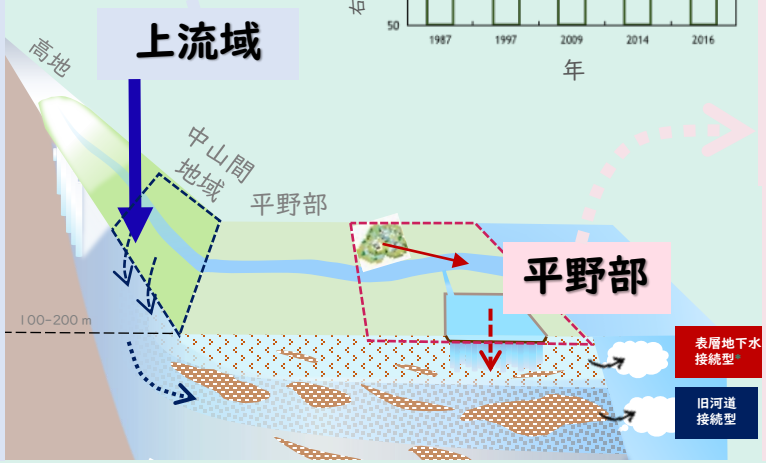
※2021年6月～10月の観測値の平均値

面積（0.27ha）	$N\text{-}NO_3$	$P\text{-}PO_4$ ($\times 10^{-2}$)
平均栄養塩付加量 (ton month- ha-)	公表前データのため削除	

片貝川扇状地における海底湧水系の事例：～数十ヘクタール必要

水田面積減少





黒部川扇状地平野部
（入善町）

適応策②の検討

人為的影響（8月のデータ）

面積（0.18ha）	$N\text{-}NO_3$	$P\text{-}PO_4$
平均栄養塩付加量 (ton month- ha-)	公表前データのため削除	

生産調整のための一時的な水田休耕

一時的に休耕した水田だけでは、栄養塩削減の影響分を解消する可能性が低い

⇒翌年の稲作に向けた土づくり・施肥の時期
⇒栄養塩付加が見込まれる農作物
⇒稲刈直後の休耕田での効果検証

自然環境GISデータベースと連携⇒各流域内の休耕田を抽出、栄養塩付加可能量を推定
サブテーマ2へデータ共有⇒適応策の効果検証の実施

富山県社会環境GISの構築とオープンアクセス化

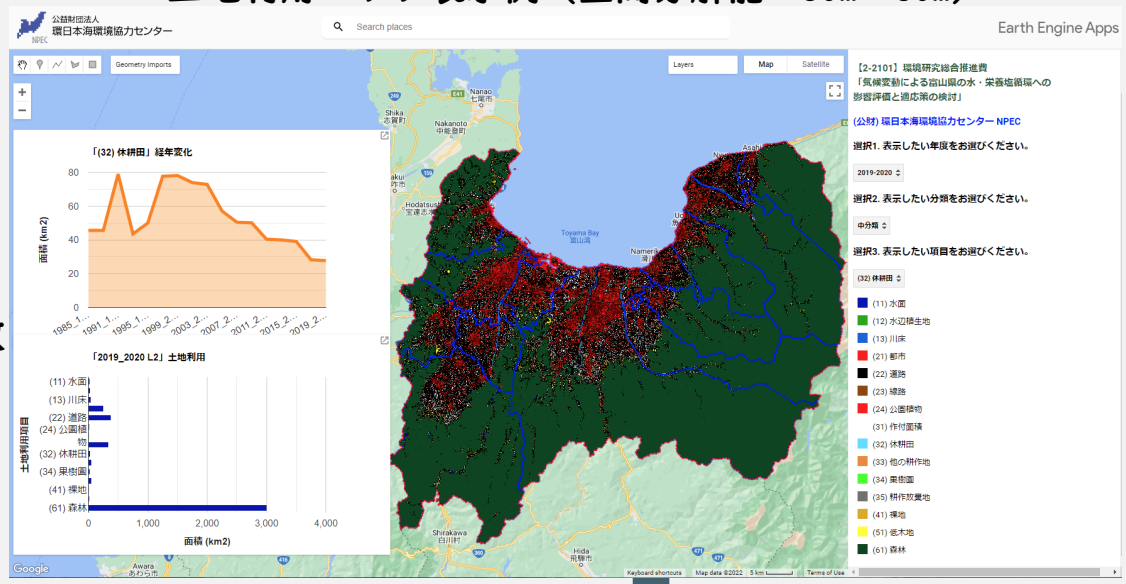
研究成果7

https://ertdf2-2101.users.earthengine.app/view/toyamalulc

Landsat
（1985年～）

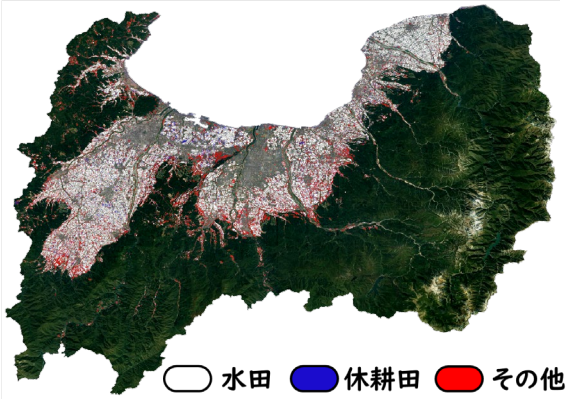
- 教師付き分類
- 機械学習
- 正規化植生指数
- 正規化水指数

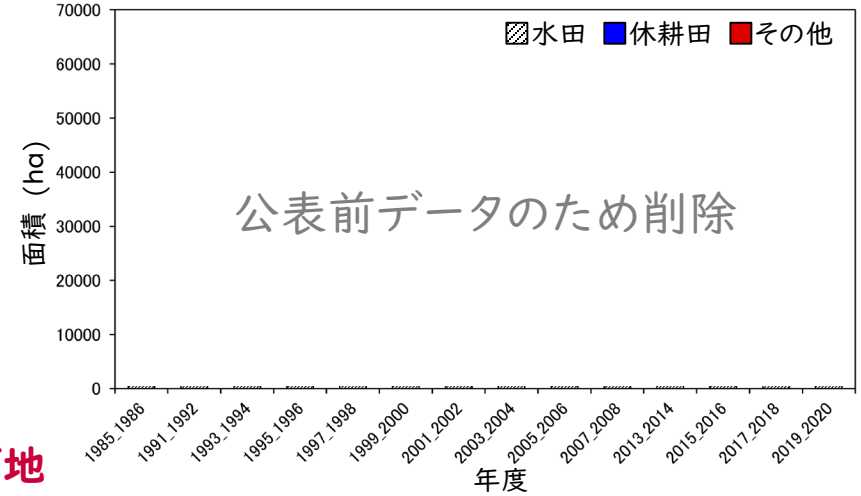
土地利用マップ表示例（空間分解能：30m×30m）



WEBサイト①公開
オープンアクセス化

2019-2020年 富山県土地利用分布（農地）





耕作放棄地の抽出⇒休耕田涵養の候補地

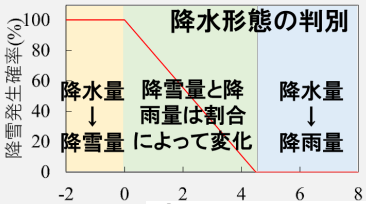
富山県自然環境GISの構築とオープンアクセス化・将来予測

研究成果８

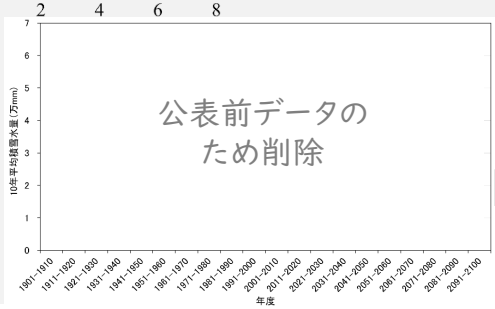
https://ertdf2-2101.users.earthengine.app/view/toyamaclimate

- ◆ 農研機構メッシュ農業気象データ（過去）
- ◆ 国環研（CMIP6をベースにしたCDFDM手法による日本域バイアス補正気候シナリオデータ、2010～）

降水量データ
⇒降雨・降雪を分ける換算式を使用



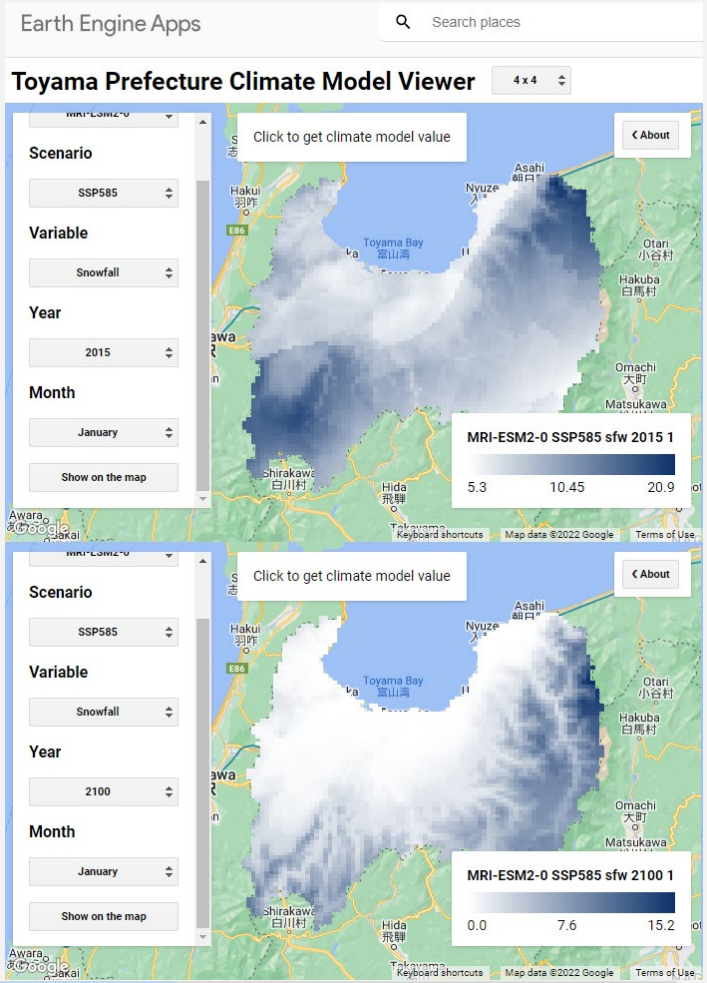
融雪モデル
（気温・降水量・風速）



■Historical ■SSP126 ■SSP245 ■SSP585

WEBサイト②公開、オープンアクセス化

- ◆ 5つの気候モデル、Historical&3つのシナリオに対応
- ◆ 11項目のデータに対応
- ◆ 期間：2015-2100年（月別）



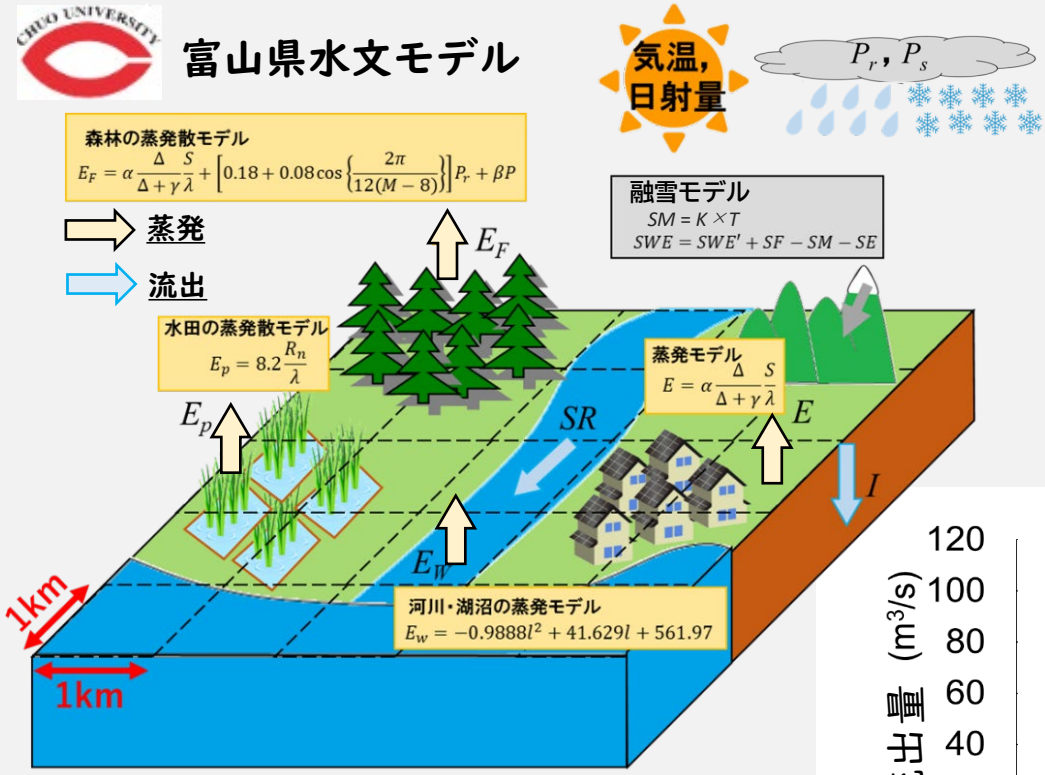
公表前データのため削除

中山間地域
⇒ 旧河道接続型
地下水の涵養標高

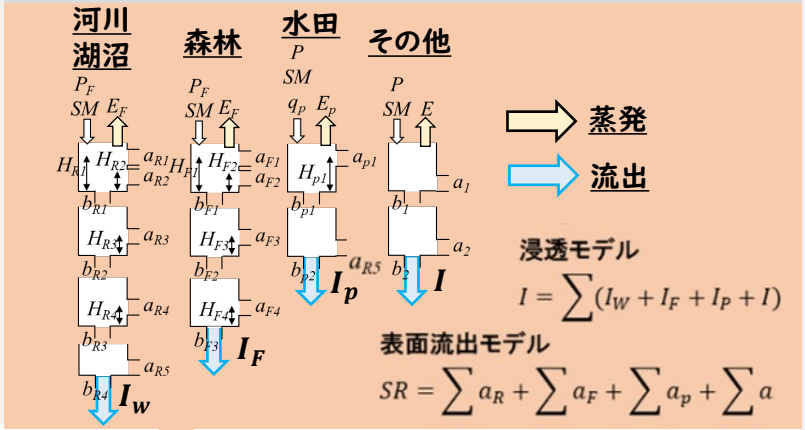
【将来予測結果】
積雪量の減少が
懸念された

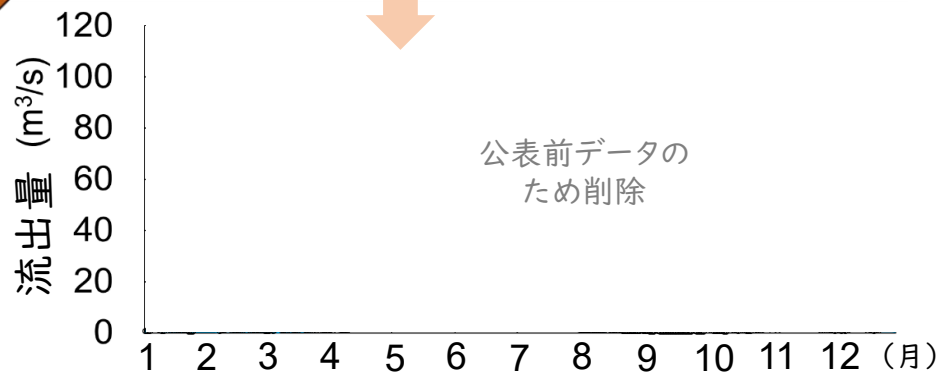
陸海統合モデルの開発のための精査・現状に則したモデルへの改善　研究成果９

富山県水文モデル



改善点：表面流モデル⇒タンクモデルに改良





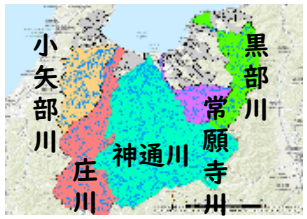
観測値とモデル解析値の一致を確認

河川供給データ提供

出力

富山湾へ流出する
- 1級河川(5河川)
- 2級河川(28河川)

河川流量が推定可能に

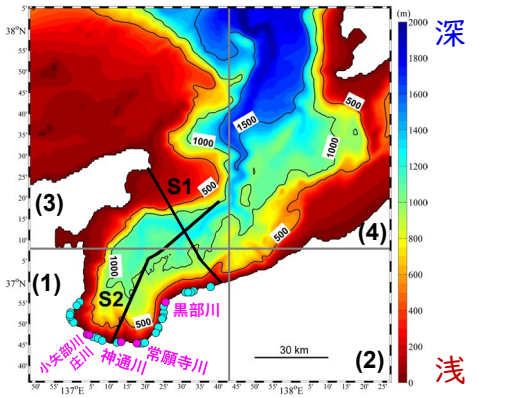


陸海統合モデルの開発のための精査・現状に則したモデルへの改善　研究成果10

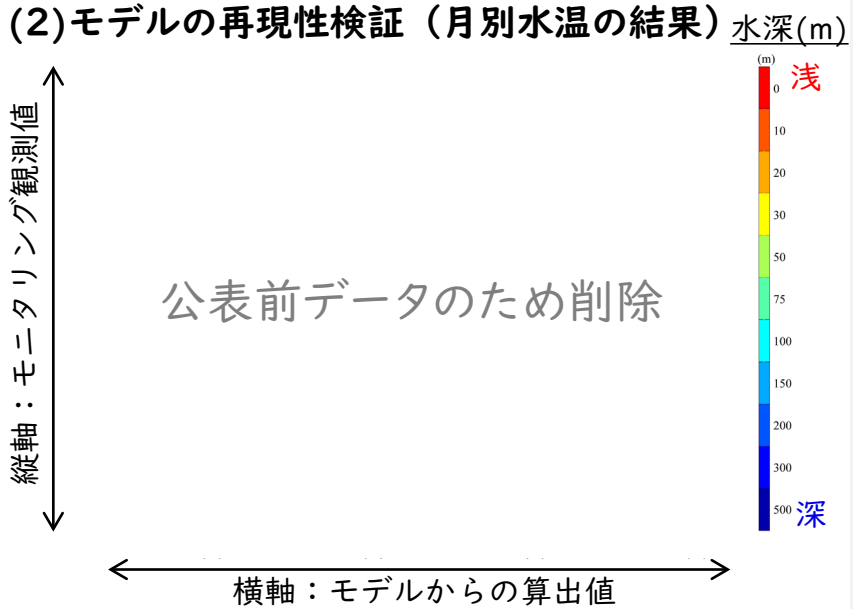
EHIME UNIVERSITY
CMES
CENTER FOR MARINE ENVIRONMENTAL STUDIES

- **現状の水・栄養塩循環の再現**
- **50年後　100年後将来予測**

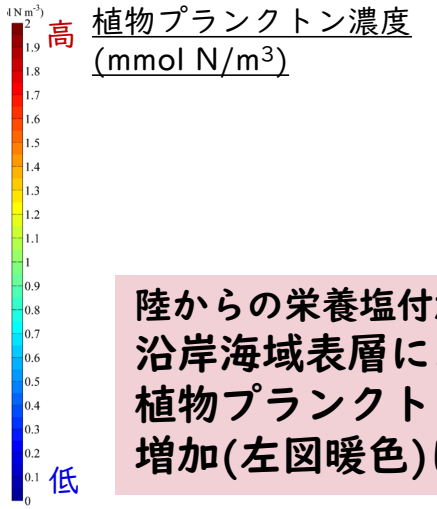
(1)対象地域の設定



(2)モデルの再現性検証（月別水温の結果）



(3)栄養塩供給量を変化させた植物プランクトンの感度実験



公表前データのため削除

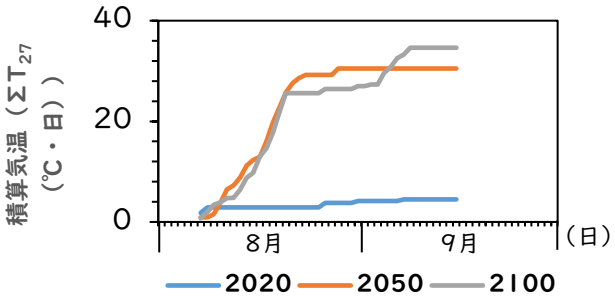
陸からの栄養塩付加：
沿岸海域表層における植物プランクトン濃度の増加(左図暖色)に貢献

適応策：中山間地域の有効活用

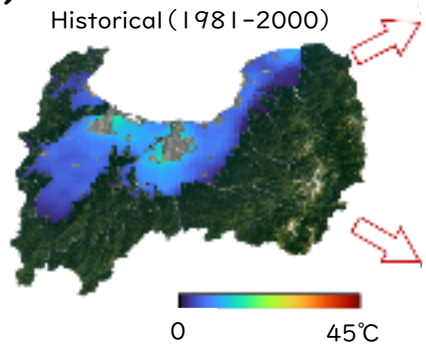
研究成果11

富山県の農地利用の特徴（令和3年度農水省統計）
農地面積：58,000 ha
水田面積：55,300 ha（95%）

温暖化の影響で品質低下（白未熟粒）
気候変動の稲作への将来の影響は？



白未熟粒発生の根拠となる登熟期27℃以上の積算気温の変化（SSP126）



SSP126（2021-2040）

SSP126（2081-210）

公表前データのため削除

SSP585（2021-2040）

SSP585（2081-210）

公表前データのため削除

高温障害にさらされる水田分布の解析結果（出穂後10～15日の積算気温超過頻度分布）

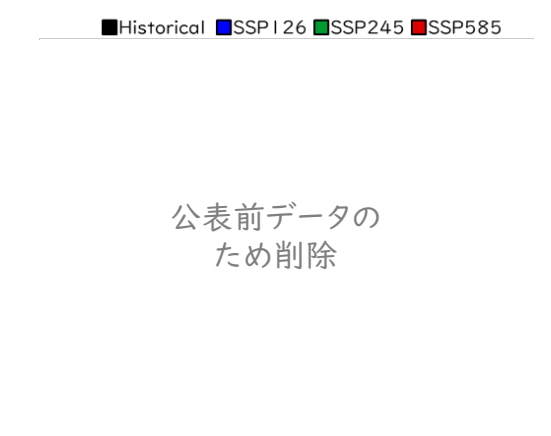
県内ほぼすべての水田が栽培不適地に

考えうる適応策
- 高温耐性品種に転換
- 田植え時期の繰り下げ
- 中山間地域での栽培

富山県の品種別作付け面積（ha）

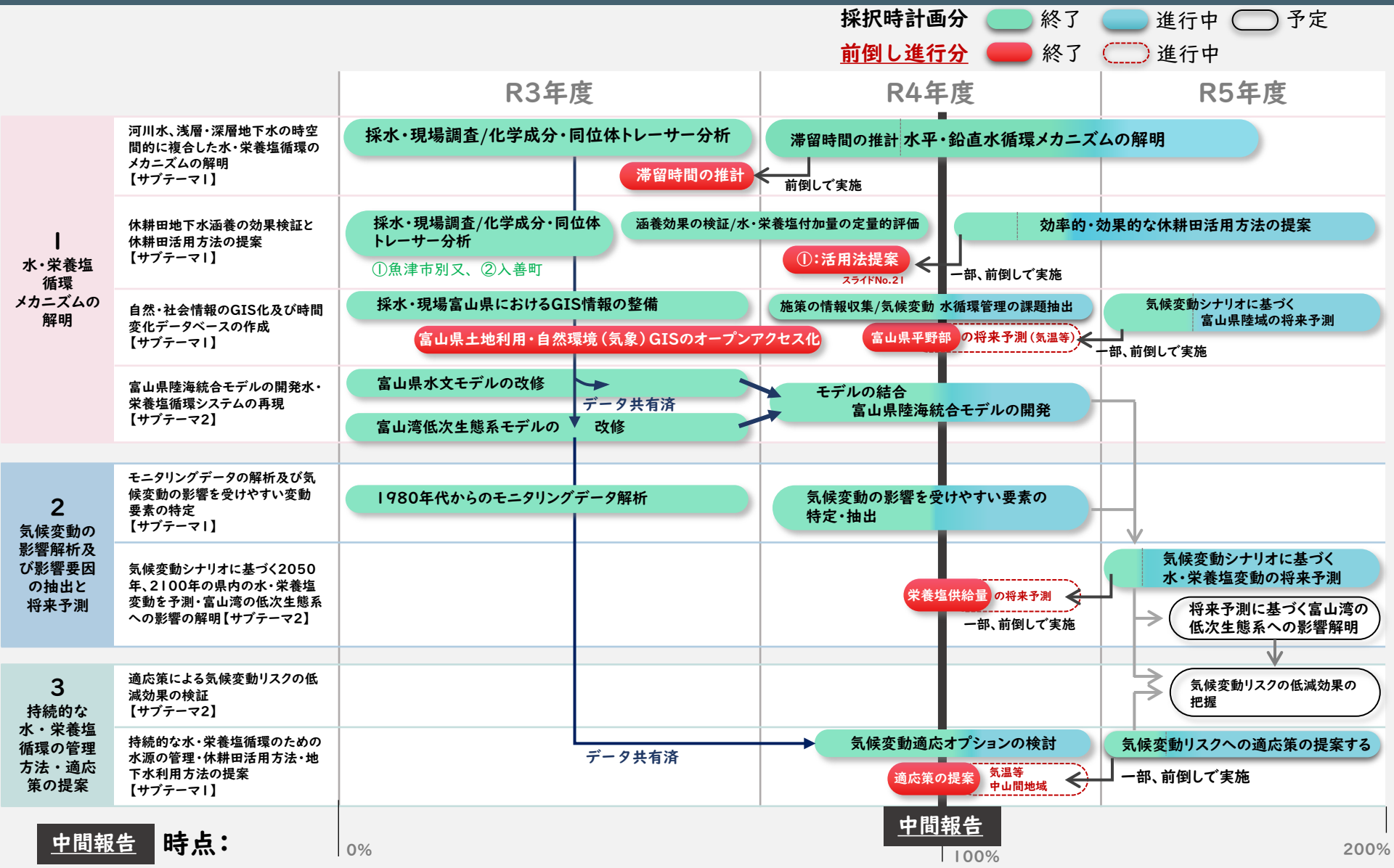
	H29	H30	R01	R02	R03
てんたかく	3,900	4,000	4,000	3,900	3,900
コシヒカリ	27,750	26,700	26,500	26,100	25,300
てんこもり	2,600	2,600	2,600	2,700	2,600
富富富	-	518	1,113	1,282	1,392

赤字：高温耐性品種



中山間地区の降雪量減少も顕著

6-(1) 研究の進捗状況



中間報告 時点：

採択時計画分(100%)＋前倒し進行分（約20%）、計画以上に進捗あり

6-(2)環境政策等への貢献

地域特性に応じた課題解決のための連携強化

1. 富山県（環境政策課、環境保全課）からの意見@2022年2月14日　意見交換会

-
-
-
-

公表前の内容のため削除

2. 富山県魚津市 からの意見@ 2022年７月６日　魚津市長との意見交換会

-
-

公表前の内容のため削除

3. 富山県西部（呉西圏域6市）からの意見@ 2022年７月11日

-

公表前の内容のため削除

地域行政と密に連携・ニーズへ対応しながら、具体的な適応策の提案ができる見込み

6-(2)環境政策等への貢献　～行政等が既に活用した成果～

気候変動による沿岸海域への淡水・栄養塩供給の変化を確認（R3年度研究成果）

富山県　R4.4月より開始（富山県環境科学センター）

地球温暖化の影響・陸水影響の季節変化・将来予測の精度向上のため独自に調査　●追加調査実施地点（7地点）

R3.までの、通常公共用水域水質調査: 表中層(0.5m+2m等量混合)の採水のみ、毎月の栄養塩*測定は実施なし

追加調査内容

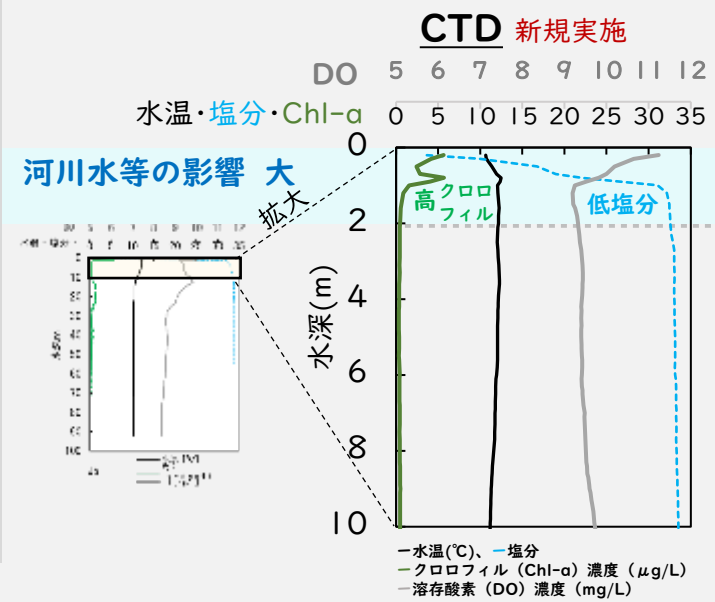
① **CTD観測**（0～50m）　新規実施

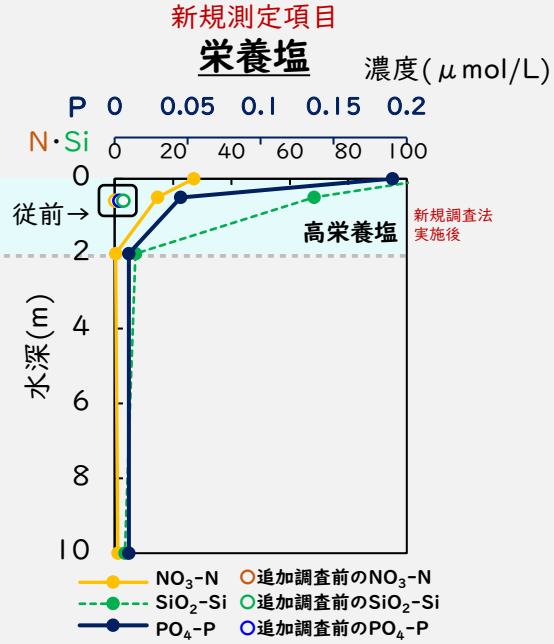
② **水深別の採水**
表層、0.5m、2m、10m
従前の0.5m+2m等量混合より
新規設定

③ **毎月栄養塩*の測定**
(*: NO_3,NO_2,NH_4,SiO_2,PO_4)

※ ②の採水層で、「毎月」の水深別調査と栄養塩濃度測定を実施

観測結果の一例(地点神通5、R4年4月)





【中間報告のまとめ】
地域行政と連携しており、ニーズに対応しながら計画以上に進展している

7. 研究成果の発表状況

〇誌上発表（査読有）（英文２件）

S. KATAZAKAI, and J.ZHANG: Environ. Sci. Technol., 55, 21 (2021) (**IF:9.0**)
S. KATAZAKAI, and J.ZHANG: Environ. Monit. Assess. 193, 9 (2021) (IF: 3.3)

〇口頭発表（学会等）（国内：９件、<u>国外：招待講演２件</u>、国際学会1件）

- 主にオンラインでの学会･シンポジウム等での発表

〇「国民との科学・技術対話」の実施・実施予定：下記５件他，全13件

- 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）
- 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
- 手計太一、一般公開シンポジウム「令和3年度富山県環境科学センター成果発表会」（主催：富山県、2021年 2月9日、オンライン、観客約100名）にて基調講演
- 【予定】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**成果紹介**
- 【予定】課題全体、**2022年10月開催の日本地下水学会秋季大会にて「特別セッション」の設置**

〇新聞・雑誌記事等：3件

〇本研究費の研究成果による受賞：下記１件他、全4件⇒若手育成に貢献

- 若手優秀講演賞, 日本地下水学会秋季大会, 2021年12月3日, 片境 紗希（富山大学）