

豊かで美しい三重の海づくり調査特別委員会

令和8年1月19日

豊かな海づくりに資する 海底湧水の保全の取り組みについて

福井県立大学 海洋生物資源学部

杉本 亮

海底湧水は、目に見えないが、河川に匹敵する規模で栄養物質を沿岸海域へ供給する重要な経路であり、三重県沿岸の「豊かな海づくり」を支える基盤である。その保全には、地下水涵養域から沿岸浅海域までを一体として捉える陸海統合的な管理が不可欠である。

地下水が影響すると指摘される水産資源の一例

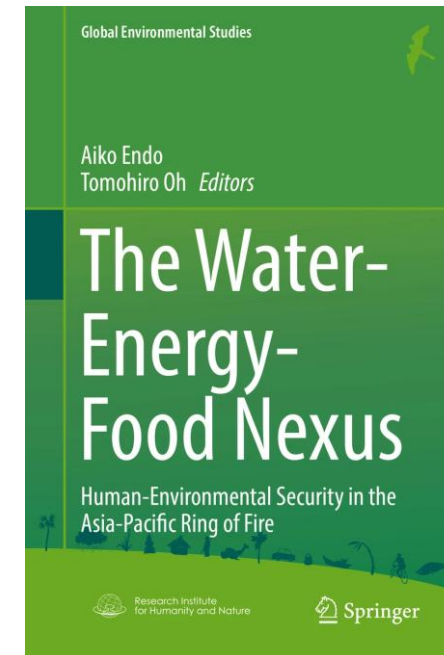
多くが経験知に基づく情報であり、科学的な理解・
検証は十分には進んでいない状況

(谷口、2012)



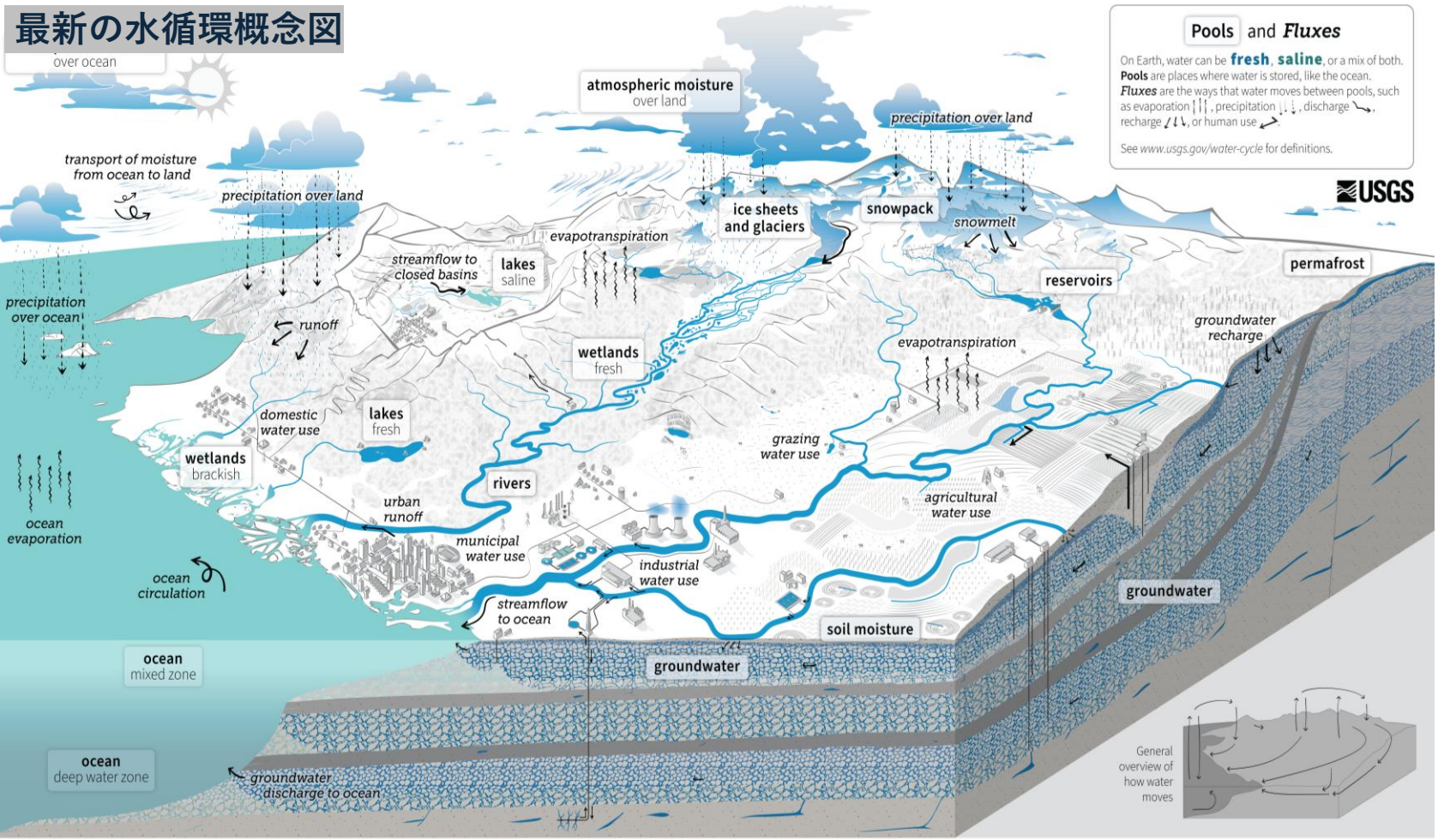
1. 海底湧水の概論（メカニズム、生物生産への影響等の現状の理解）
2. 海底湧水を観測する技術・方法
3. 三重県沿岸域における海底湧水
4. 海底湧水を保全するために

参考書

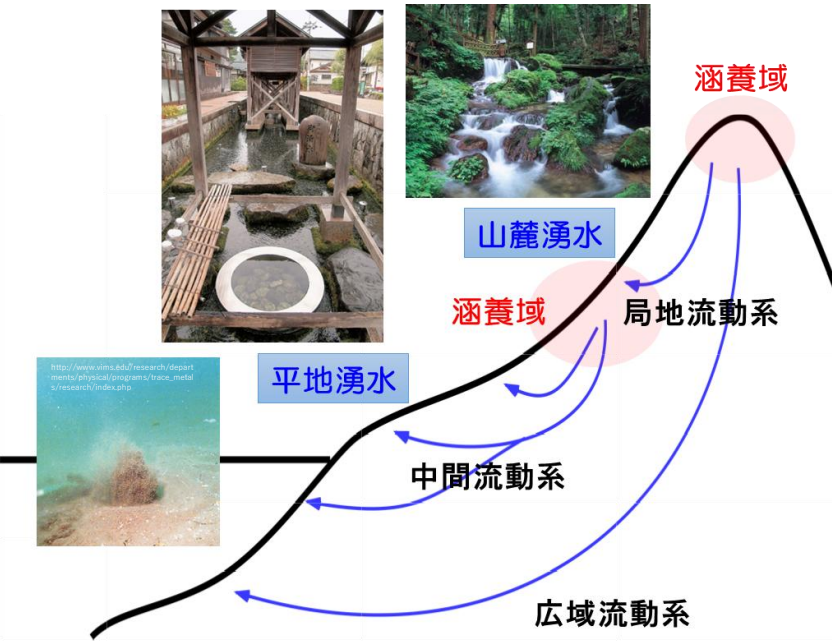


①概論：水循環システムからみる陸域地下水の海洋流出

- 陸域から海洋へ流出する淡水の経路
- 河川水(表流水)：主要な流出経路
 - 地下水：地球規模の評価では寄与は小さい(<~1%)。地域スケールでは10%を上回る事例（※地域差が大きい）もある。

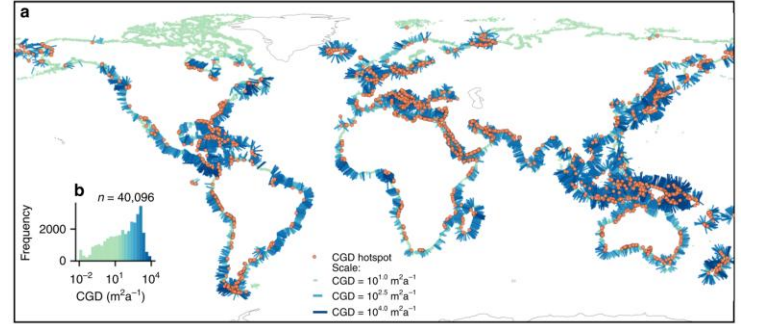


地下水流動：涵養・流動・流出
からなる一連のシステム



淡水地下水のグローバルフラックス評価

地下水/(河川+地下水) = ~0.6%
(Luijendijk et al., 2020, Nature Communications)



①概論：水循環システムからみる陸域地下水の海洋流出

陸域地下水の海洋への流出を制御する要因

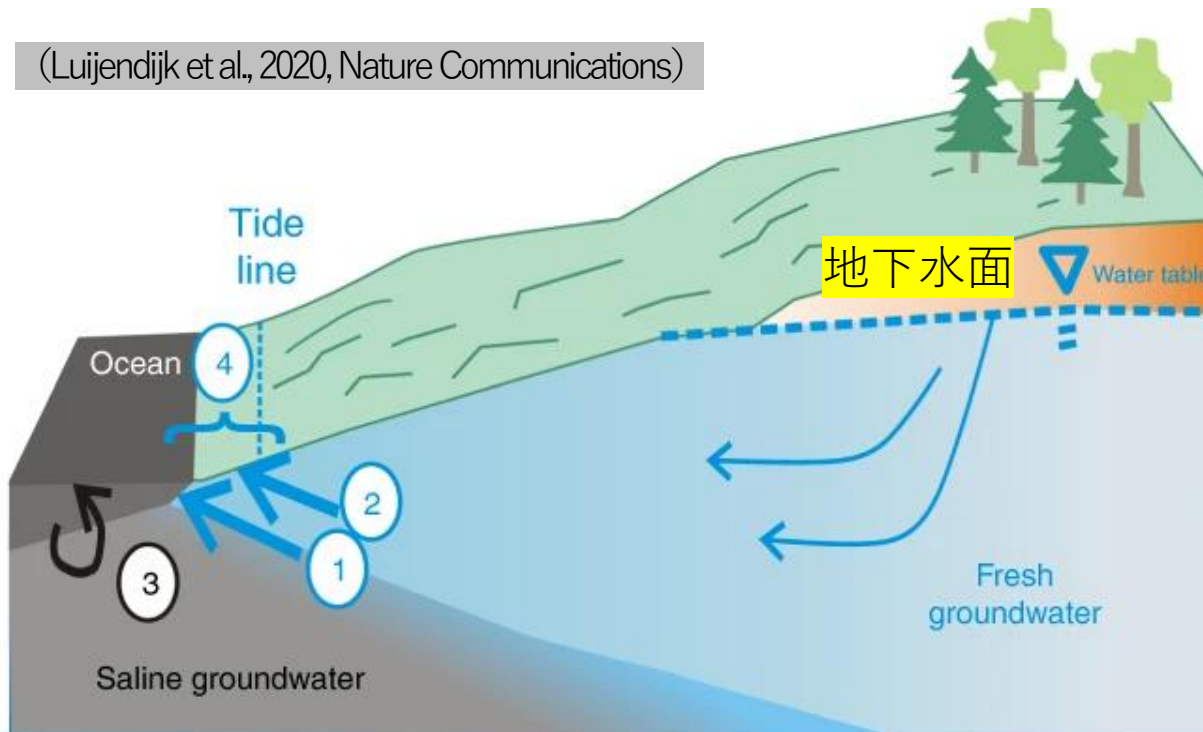
➤ 陸から海へ地下水を動かす力（動水勾配）

- ・ 降水量と蒸発散量で決まる**地下水涵養量**
- ・ 動水勾配を支配する**地形勾配**（起伏）

➤ 地下水が流れる帯水層の水の通りやすさ

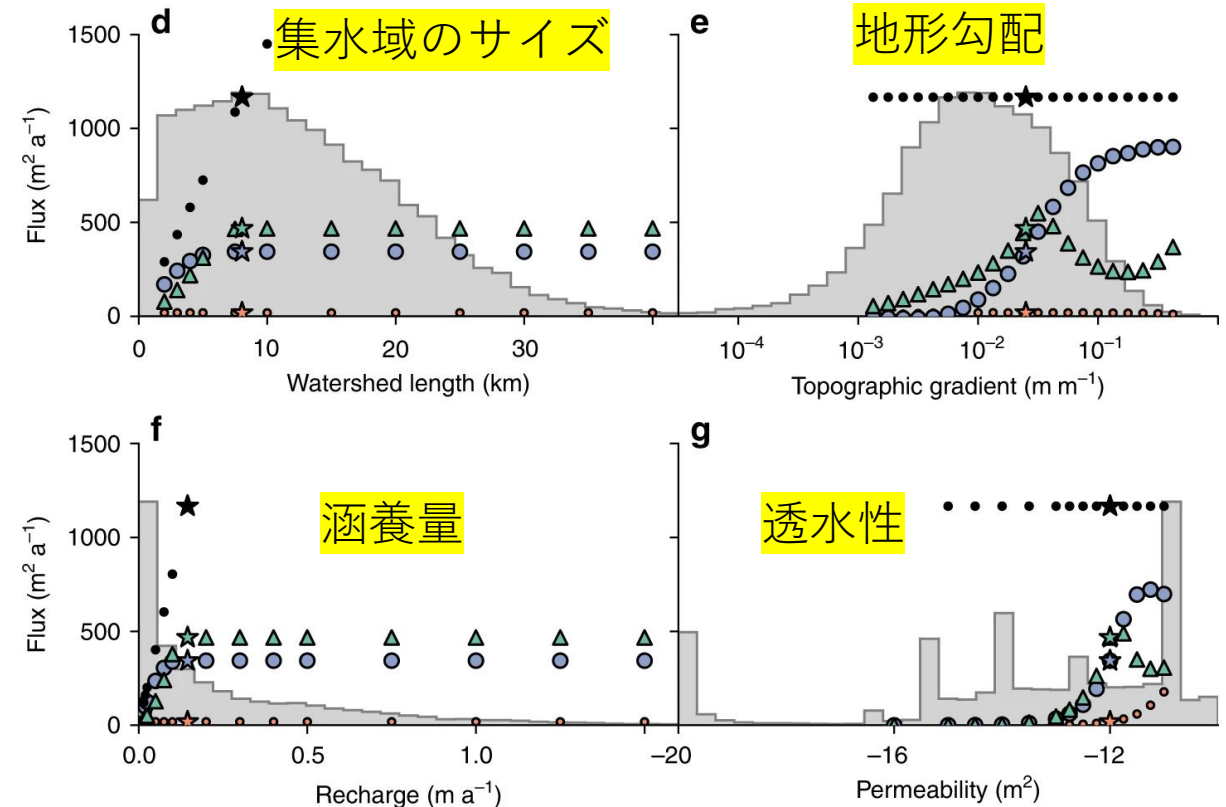
- ・ 帯水層の**透水性**（透水係数：礫＞砂＞シルト＞粘土）

(Luijendijk et al., 2020, Nature Communications)



陸域地下水の湧出量の大きな地域の特徴

- ✓ 降水量の多い湿潤地域
 - ✓ 地形起伏の大きな地域
 - ✓ 亀裂を含めた透水係数の大きな石灰岩地域
 - ✓ 大きな河川の発達がない島など
- ⇒ 日本列島は世界的にも地下水が海洋流出しやすい

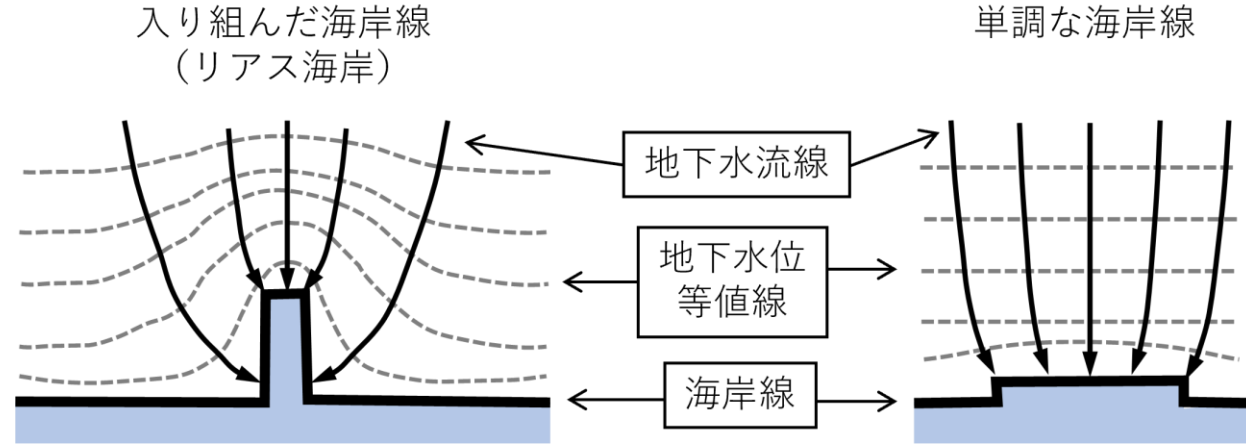


①概論：水循環システムからみる陸域地下水の海洋流出

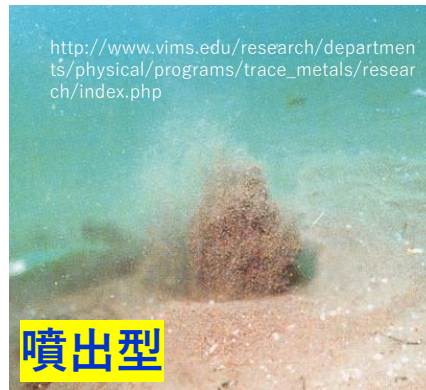
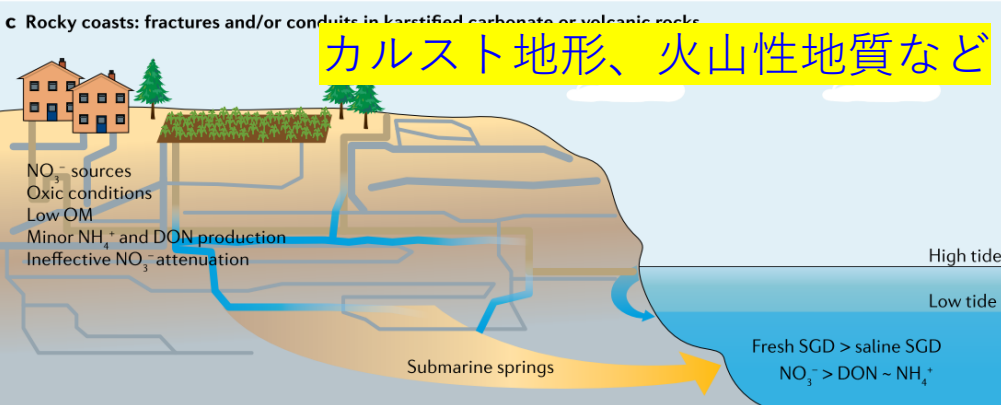
多様な流出形態を持つ地下水

- 目視できない場合がほとんど
- 火山性地質、石灰岩、リアス海岸などは局所的に地下水が流出しやすい

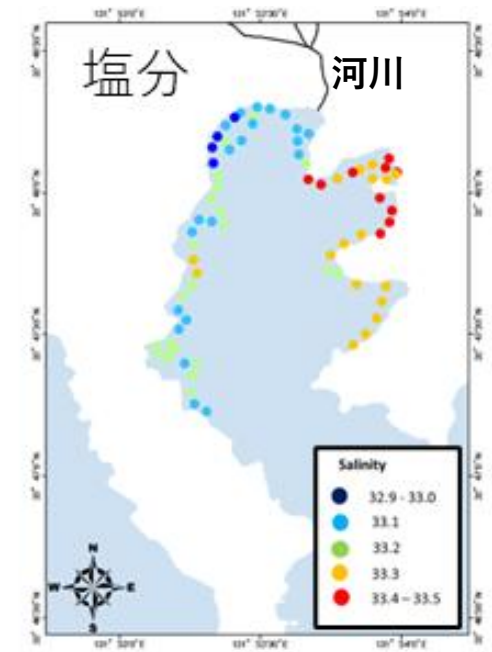
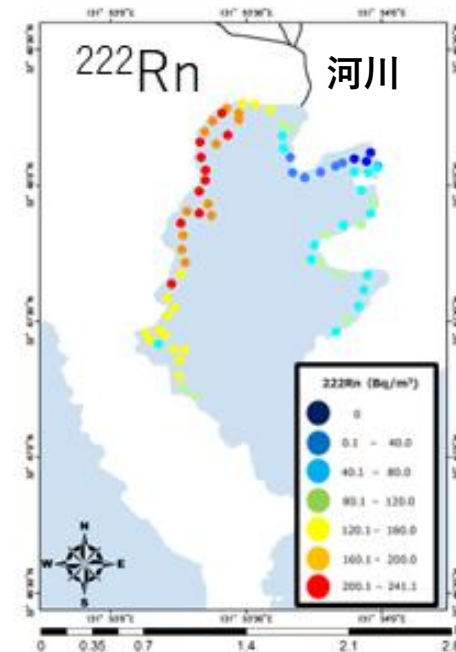
(Santos et al., 2021, Nature Reviews Earth & Environment)



カルスト地形、火山性地質など

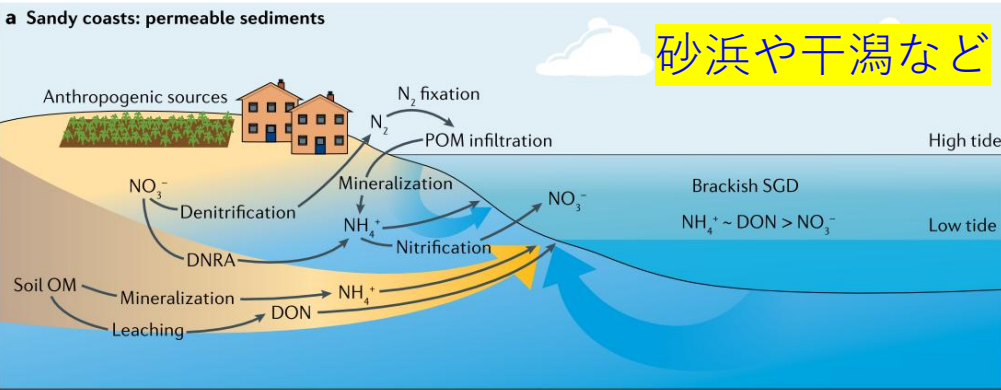


九州東部リアス海岸地域の例（大分県猪串湾）
(杉本ほか, 2024, 月刊海洋)



a Sandy coasts: permeable sediments

砂浜や干潟など



①概論：陸海境界領域での地下水の流出（海底湧水）

陸海境界領域における地下水は2種類に大別される

- **淡水地下水**：陸域で涵養した降水に起源をもつ地下水の流出
- **海水地下水**：帯水層内に浸入した海水の流出(再循環過程)

※湧出域は帯水層構造が形成される浅海域から陸棚域まで

※駆動力は陸域と海洋の両方に存在

海底湧水（海底地下水湧出）

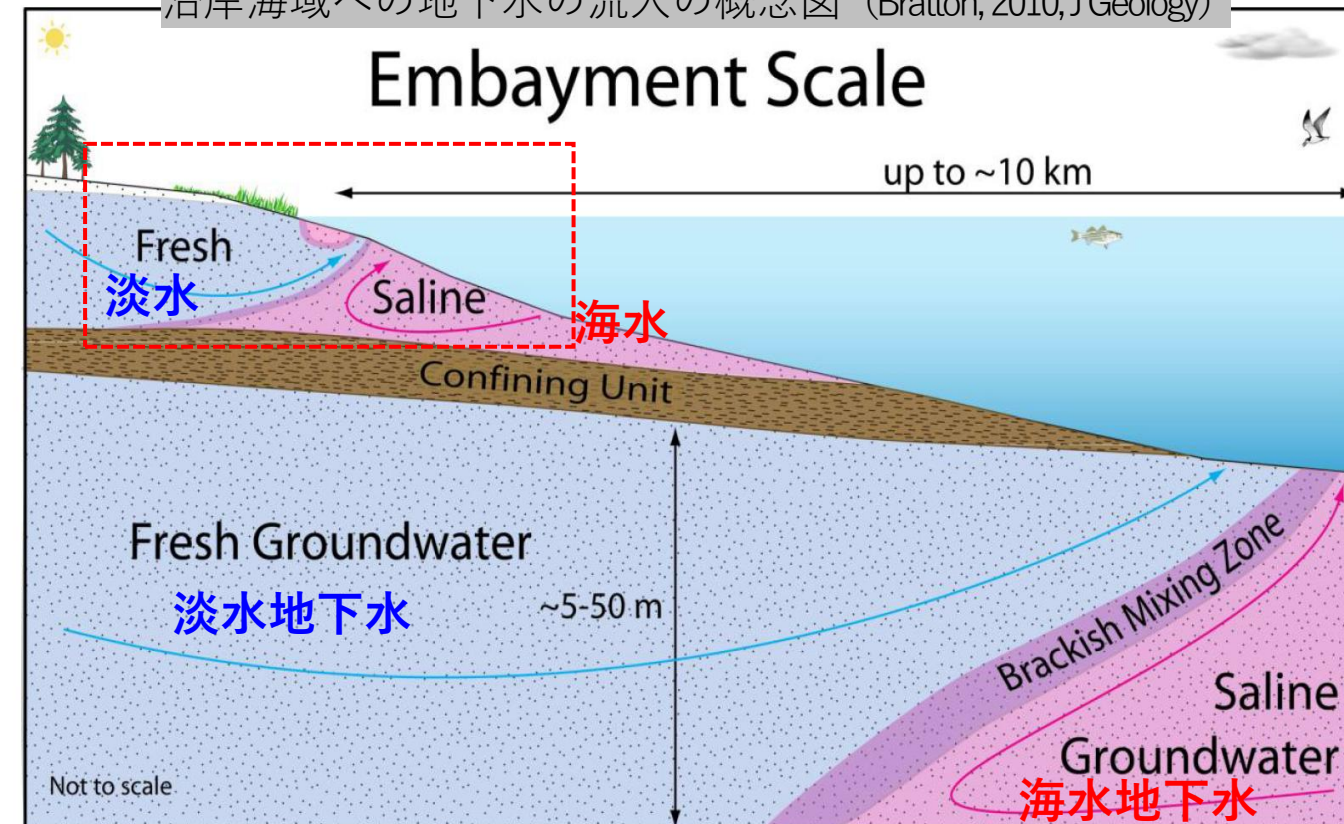
定義：海底面を通過するあらゆる水の流出現象(Burnett et al., 2003, Biogeochemistry)

Submarine Groundwater Discharge (SGD)

= fresh SGD (FSGD)

+ recirculated SGD (RSGD)

沿岸海域への地下水の流入の概念図 (Bratton, 2010, J Geology)



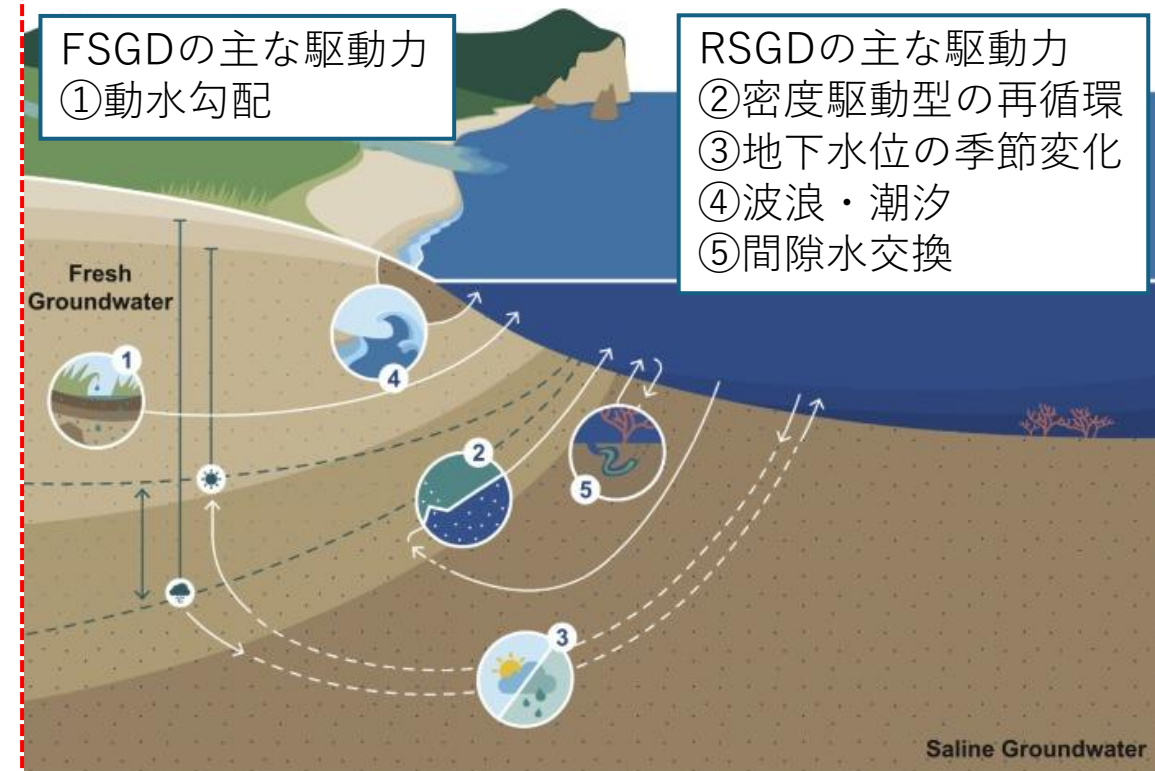
海底湧水の駆動力 (Garcia-Orellana et al., 2021, Earth-Science Reviews)

FSGDの主な駆動力

①動水勾配

RSGDの主な駆動力

- ②密度駆動型の再循環
- ③地下水位の季節変化
- ④波浪・潮汐
- ⑤間隙水交換

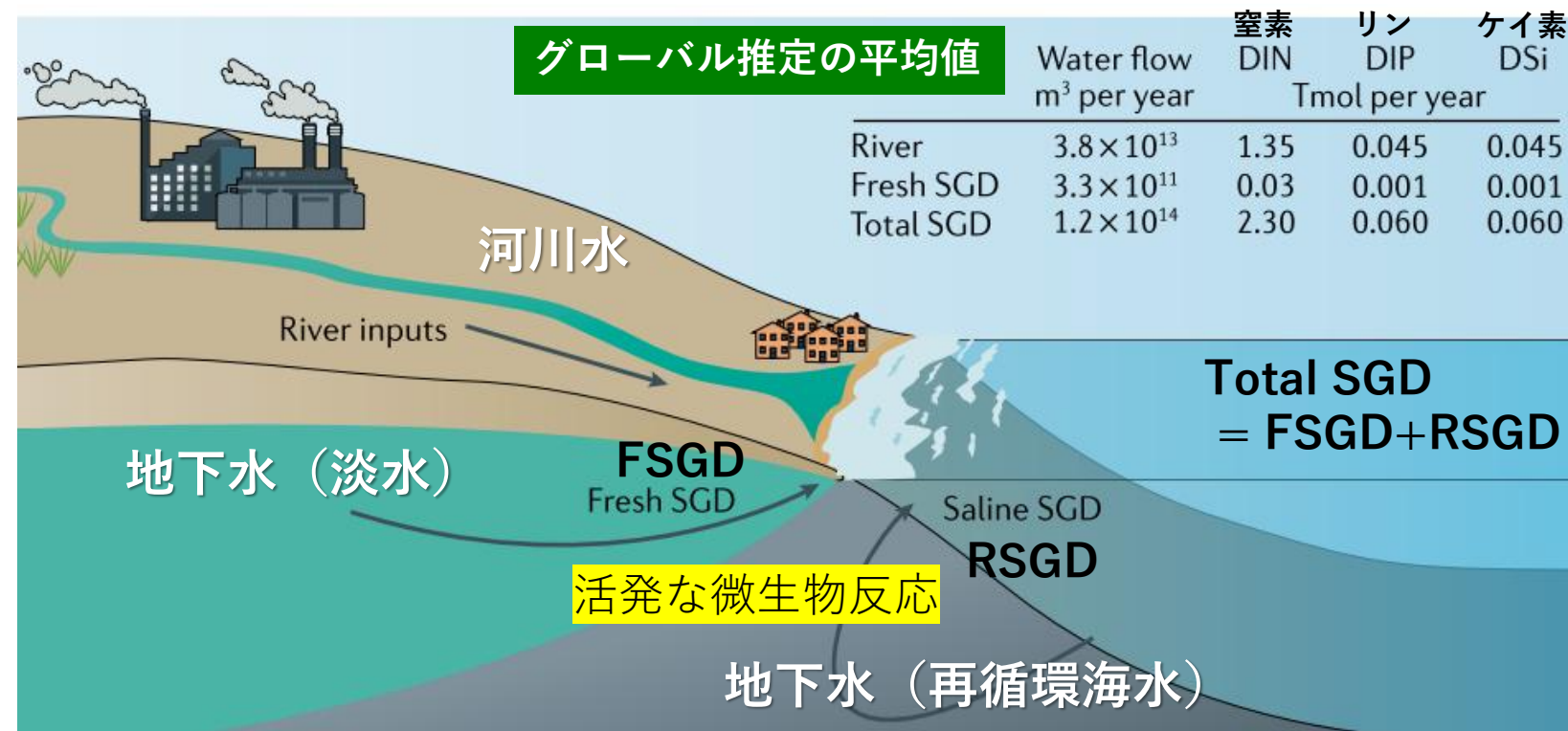


①概論：海底湧水による水と物質フラックス

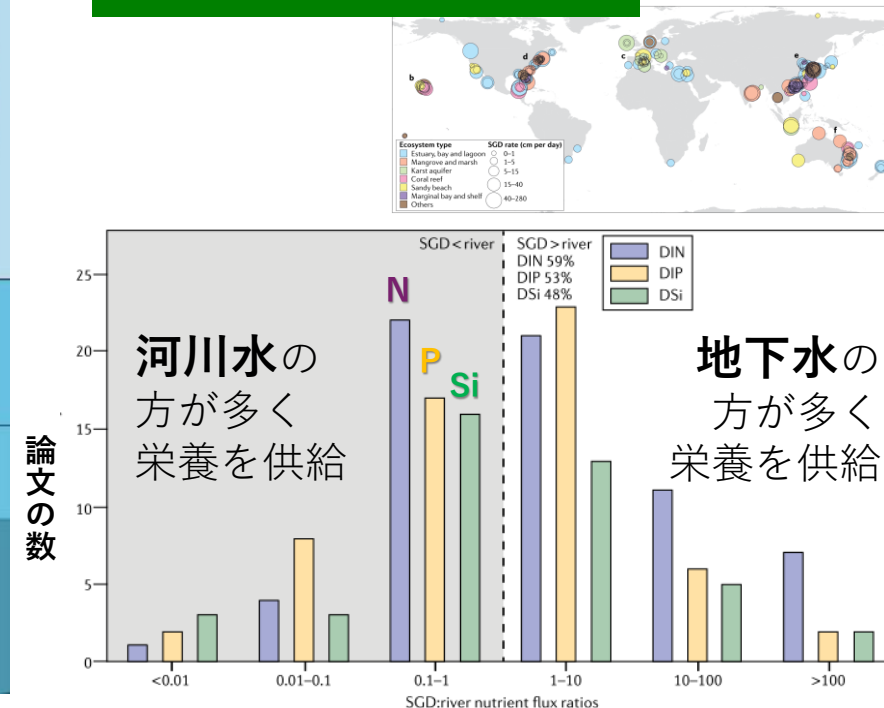
海底湧水による水・物質の供給量

- **水**：FSGD/River = ~ 0.01 , Total SGD/River = ~ 3 (※RSGDは水収支的には正味ゼロなので注意)
 - **栄養物質**：FSGD/River = ~ 0.02 , Total SGD/River = $1.3 \sim 1.7$
- ⇒ グローバル評価・地域評価に関わらず、SGDの寄与は大きい (**RSGD >>> FSGD**)
- ※ RSGDが輸送する栄養物質の大部分が再生生産。炭素・重金属・汚染物質などの輸送も重要

海底湧水による水と栄養物質フラックス：グローバルスケール vs 地域スケール (Santos et al., 2021, Nature Reviews Earth & Environment)



地域ごとの推定(メタ解析)



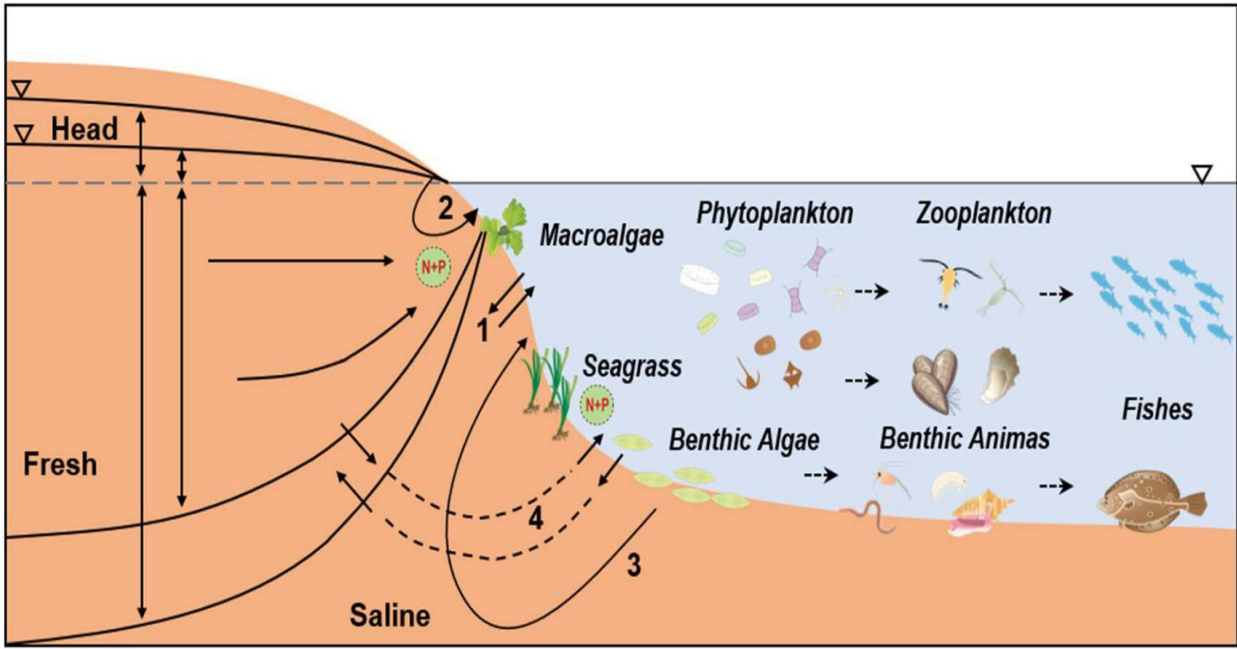
①概論：海底湧水の生物・生態系への影響

地下水が輸送する様々な物質（主に栄養塩類）に生物が応答する

- 地域ごとに違いが大きい
- 底生だけでなく、表層でも影響は大きい
- ポジティブな影響が大きいが、ネガティブな影響も一部で報告されている

⇒ 海底湧水のタイプ（噴出vs浸出、淡水vs塩水、栄養物質の含有濃度）や評価する空間スケールによっても異なる

海底湧水と生物生産の概念図 (Taniguchi et al., 2019, Front Environ Sci)



海底湧水に対する生物応答の比較 (Santos et al., 2021, Nature Reviews Earth & Environment)

Biological response		Response to SGD nutrients		
		Increase	Decrease	Unclear/mixed
Species scale 種	Organism abundance 生物量（個体数）	17	2	9
	Growth and biomass 成長速度	9	1	2
	Tissue N:P ratio 組織N:P比	5	1	2
	Disease 疾病	1	—	—
Community scale 群集	Richness 種数	1	1	1
	Chlorophyll a 植物プランクトン	20	—	6
	Diversity 多様性	3	5	2
	N sourcing 窒素ソース	21	—	1
	Benthic density 底生生物	—	1	3
Ecosystem scale 生態系	Productivity/photosynthesis 生産性	11	—	2
	Respiration 呼吸	2	1	1
	Anoxia/deoxygenation 貧酸素化	1	—	—
	Calcification 石灰化	3	1	—

※FSGDとRSGDは明確に区分されていない

海底湧水（SGD）とは何か

海底湧水（Submarine Groundwater Discharge, SGD）とは海底面を通過するあらゆる地下水の流出現象を指す。SGDは以下の2成分に大別される。

- ・ 淡水性地下水のSGD（FSGD）：陸域で涵養された降水起源の地下水
- ・ 再循環性地下水のSGD（RSGD）：海水が帯水層に浸入・循環して再び海へ戻る水

※水量としてはRSGDが卓越する。物質（栄養塩・金属・炭素）の輸送において極めて重要である。

なぜ日本で重要なのか

地下水が海へ流出しやすい条件

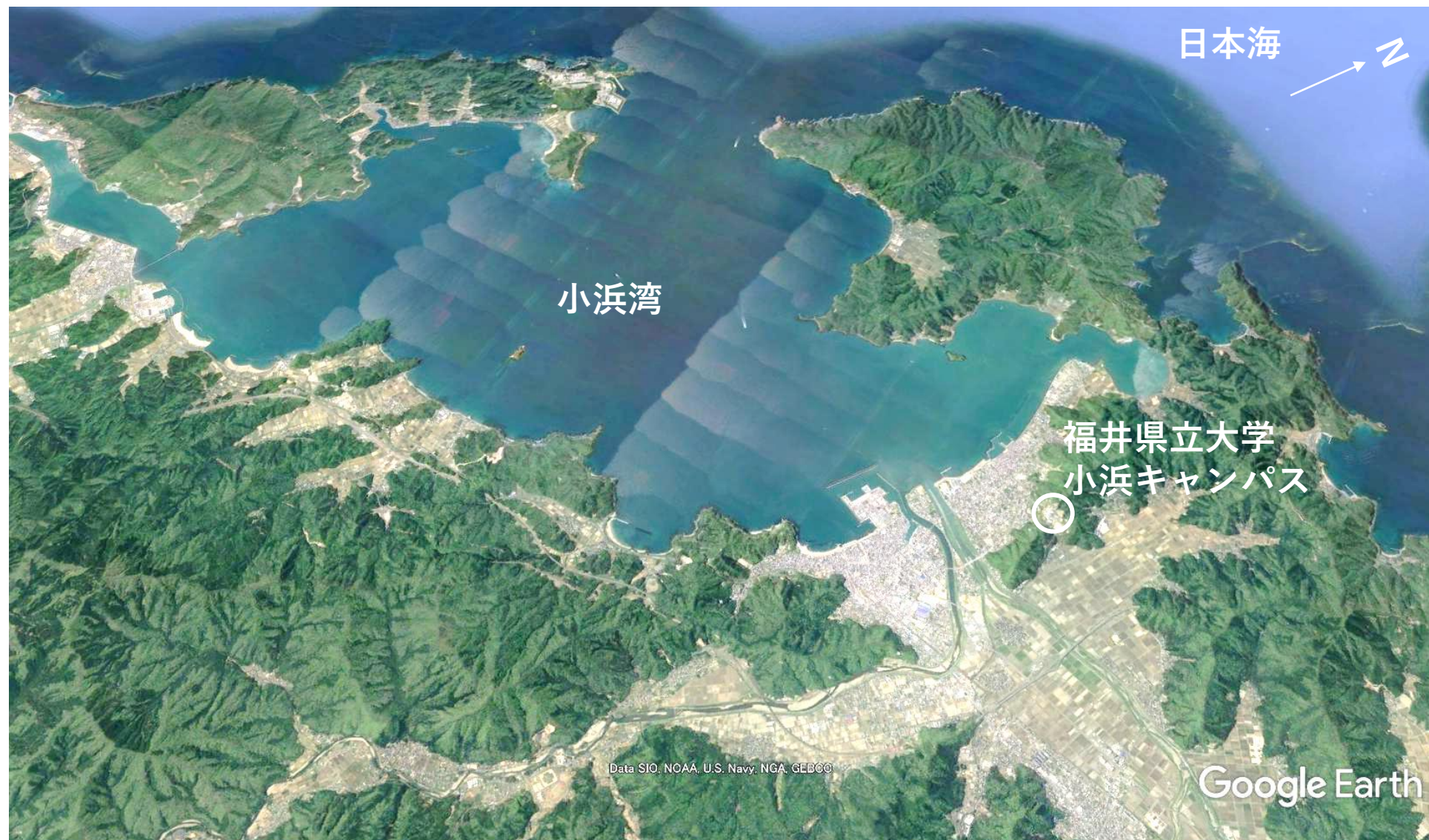
- ・ 降水量が多い湿潤気候
- ・ 地形起伏が大きい
- ・ 透水性の高い地質（砂礫層・断層・亀裂）

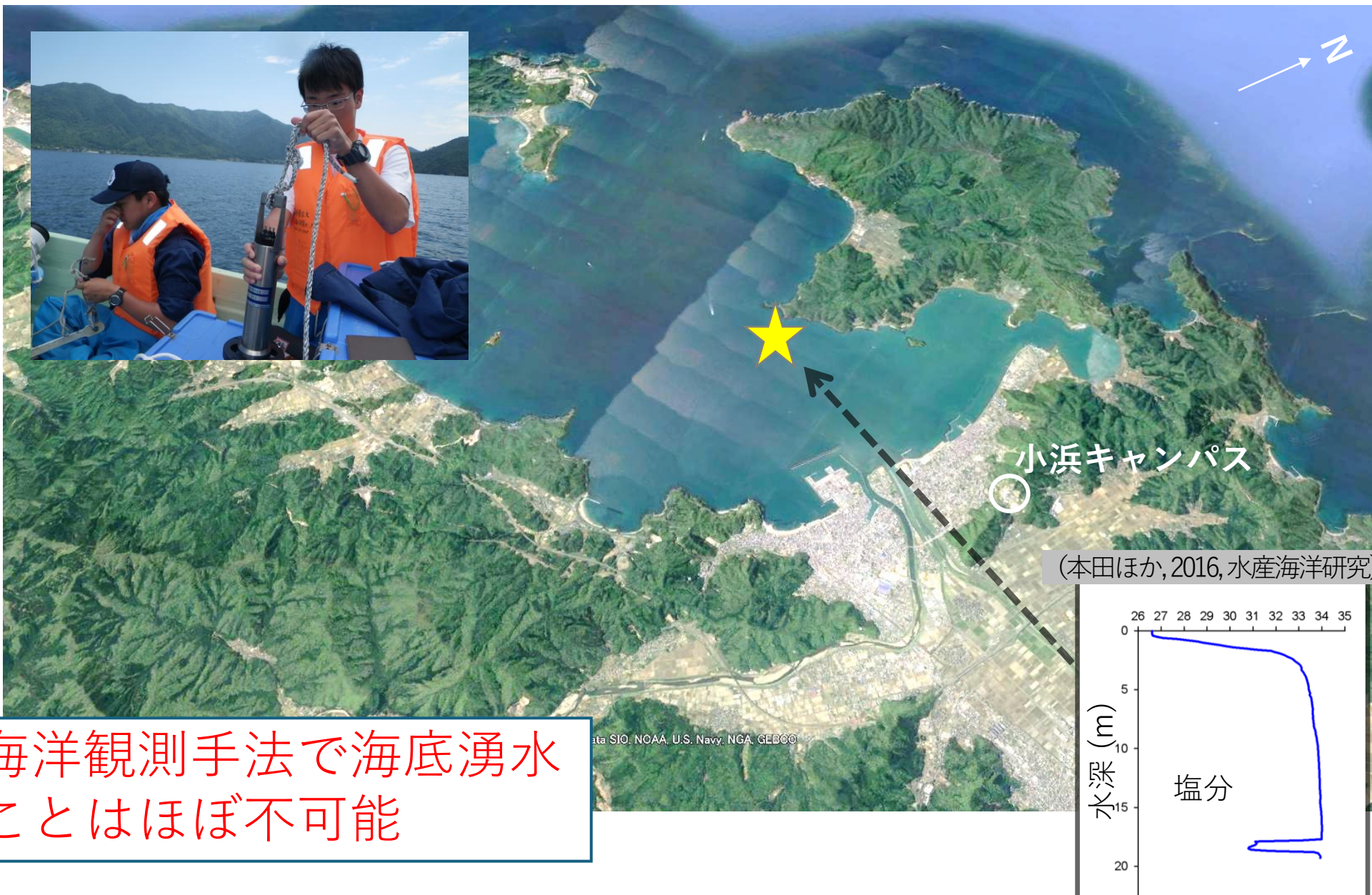
※日本列島はこれらをすべてを満たし、世界的にも地下水流出のホットスポット。

海底湧水がもたらす生態系・水産への影響

- ・ 海底湧水は窒素（N）、リン（P）、ケイ素（Si）などの栄養塩の重要な供給経路である。
- ・ グローバル評価でも栄養塩供給量は河川と同等、あるいはそれ以上
- ・ 生物応答は一様ではないが、植物プランクトンメイオベントス底生生物などに正の効果が多く報告されている。

※ただし、富栄養化・貧酸素化など負の影響が生じる場合もあり、タイプ別評価が不可欠である。





②海底湧水の調査方法

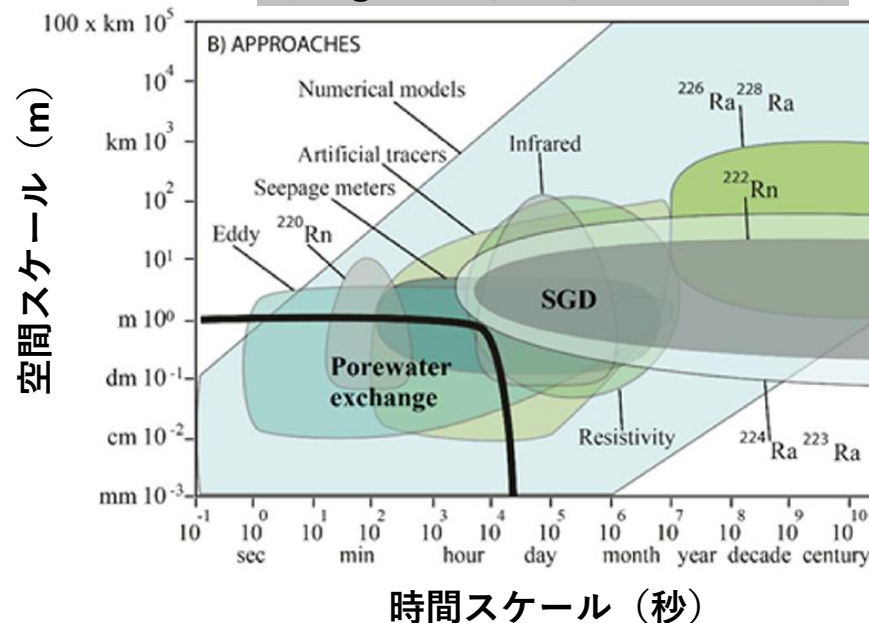
海底湧水（SGD）は空間的にも学問的にも境界領域/学際領域性が強いいため、様々な手法を組み合わせる必要がある

- 水文学的手法（地下水位・水収支）
- 物理探査（湧水量・温度・比抵抗）
- 数値モデル（地下水流動・物質輸送）
- 地球化学的手法（ラドン・ラジウム）

対象とする空間や時間のスケールに応じて適切な組み合わせ・使い分けを考える

「調査手法の空間・時間スケール（参考）」

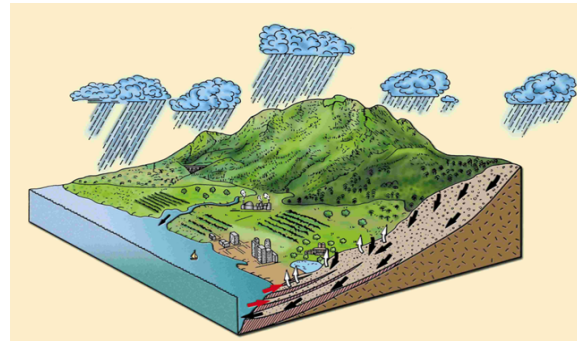
(Taniguchi et al., 2019, Front Environ Sci)



SGDは、陸と海をつなぐ研究の接点

陸からの視点

SGDは「研究の出口」

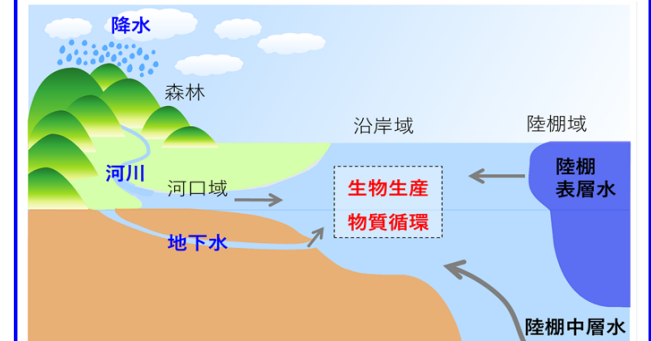


水文学/陸水学研究

SGDの「重要性を指摘」

海からの視点

SGDは「研究の入り口」



海洋学/地球化学研究

SGDの「重要性を評価」

基本的な考え方

海底湧水は目視が困難なため、単一の方法では把握できない。
そこで、異なる原理の手法を組み合わせることで実態を評価する。

【Step 1】地下水の湧出と影響範囲を把握する

- ⇒ どこで起きている現象かを把握（可視化）
- ✓ 地形・地質条件や流動モデルからの評価
 - ✓ 地下構造の把握（比抵抗分布）
 - ✓ ラドン等の天然トレーサーによる分布把握

【Step 2】地下水の湧出量を定量する

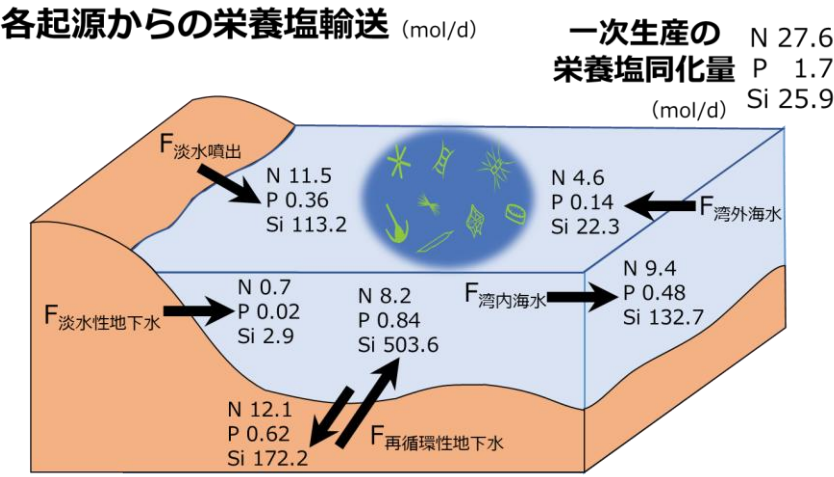
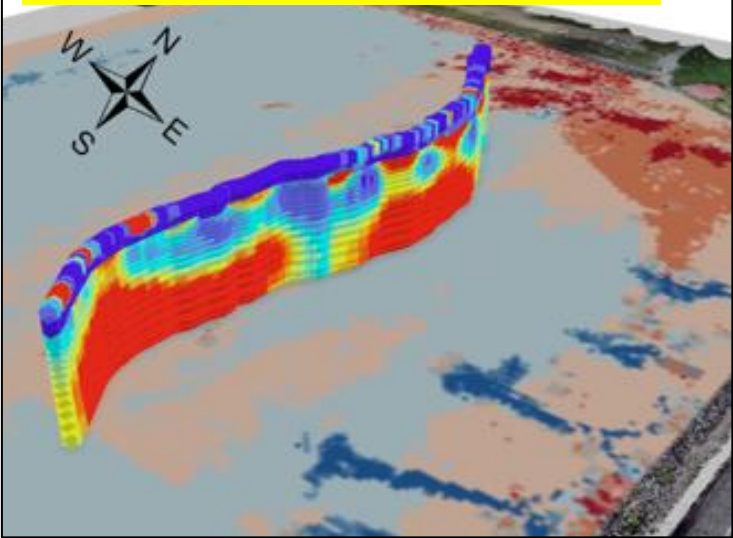
- ⇒ どの程度の規模かを把握
- ✓ 水収支や地下水モデリング
 - ✓ トレーサー物質の収支解析

【Step 3】地下水の生物・生態系影響を評価する

- ⇒ なぜ重要かを評価
- ✓ 栄養塩供給量の推定
 - ✓ 生物生産・生態系応答との関係整理

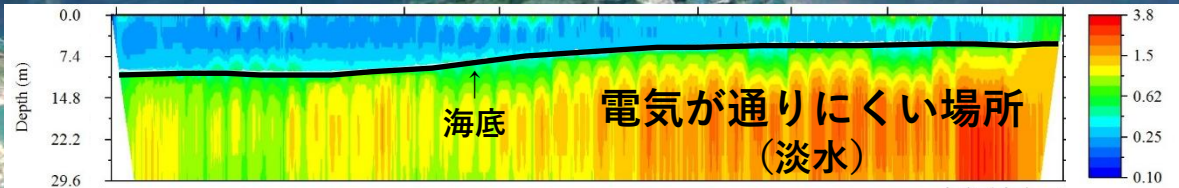
比較対象が重要
(例. 河川)

熱探査と比抵抗探査の組み合わせ

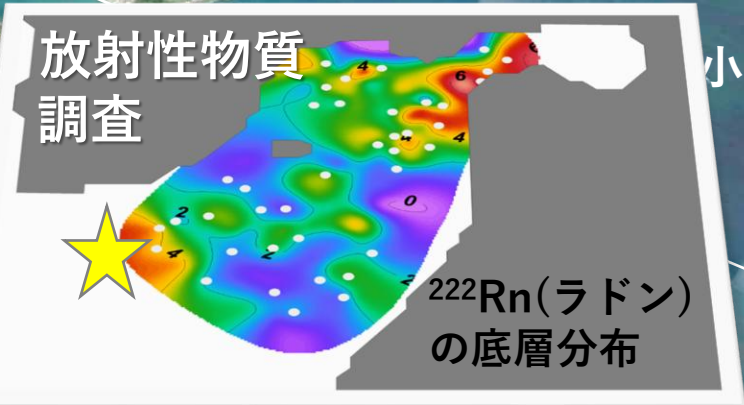


【結論】 陸海をつなぐ地下水が、沿岸生態系と水産資源の生産を支えていることを、科学的に定量評価する手法体系を構築する。

電気探査調査

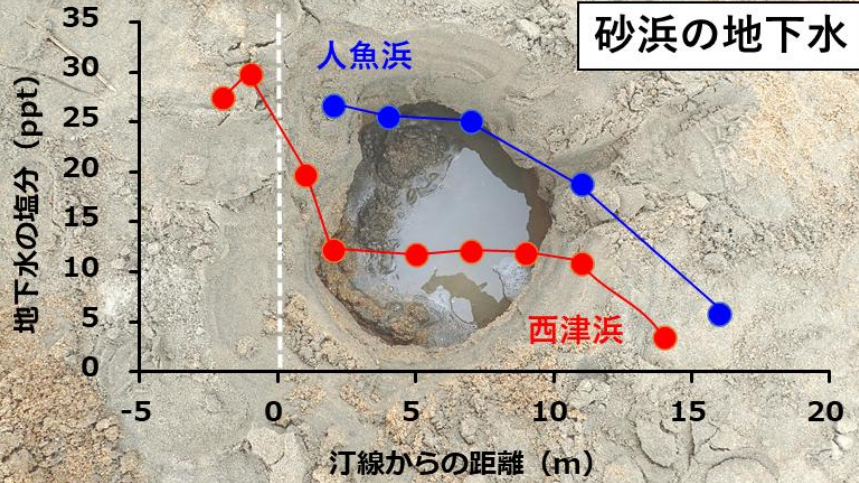


放射性物質調査



小浜湾

222Rn(ラドン)の底層分布

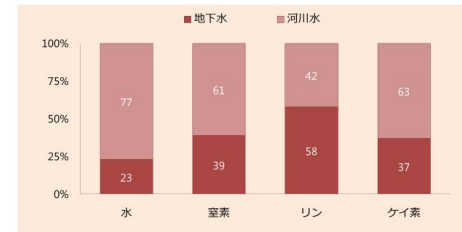
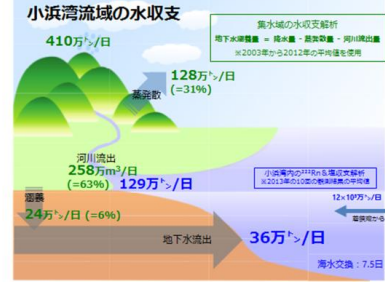
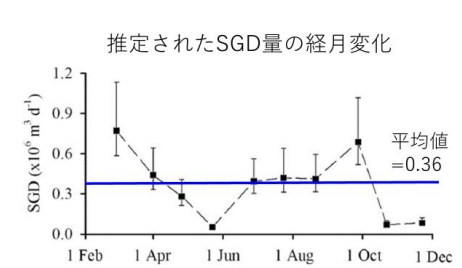


砂浜の地下水

222Rn & 塩分の収支モデルによる地下水の流入量評価

222Rnモデルと陸域の水収支との比較

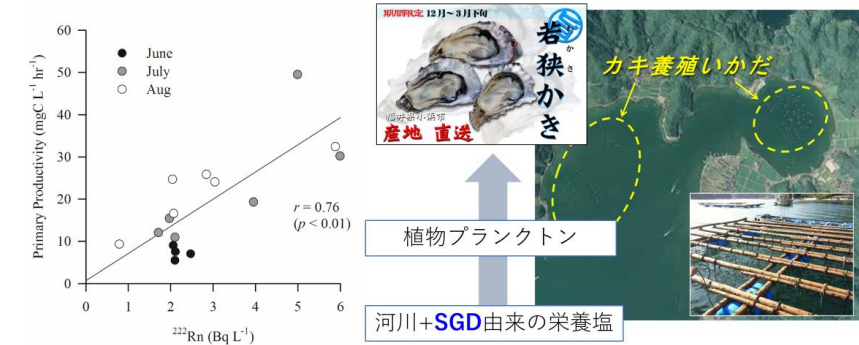
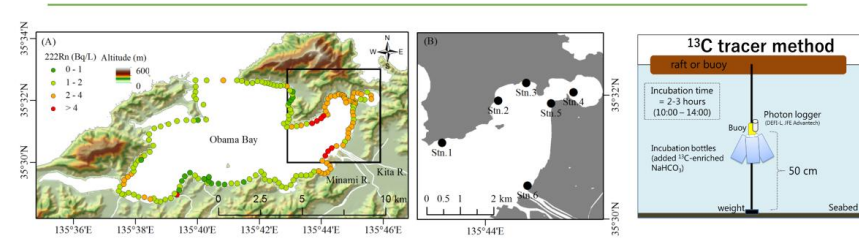
水- 222Rn-塩分の収支モデル (Sugimoto et al. 2016)



湾全体での栄養塩評価

- 小浜湾に流入する水の約99%は湾外水 (若狭湾の水)
- 小浜湾に流入する栄養塩の約22~40%は陸水 (河川水+地下水)
- 陸からのDIP供給量の6割が地下水

海底湧水と一次生産速度の関係



③三重県沿岸域における海底湧水



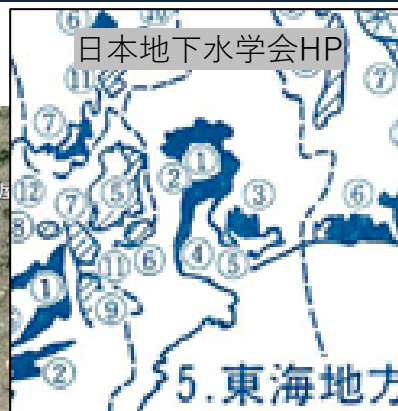
地下水盆

自噴帯

砂浜・干潟

断層

リアス海岸



木曽川河口↓

海底面

沖積層



S-8. 海陸シームレス地質情報集「伊勢湾・三河湾沿岸域」

A-5 I-伊良湖水道断面

5-eg17

406a-eg17

白子沖海脚↓

白子・野間断層

伊良子水道↓

20m
40m
60m
80m

0 5 10 km

三重県沿岸（伊勢湾を含む）は

- ・ 巨大な地下水盆（濃尾平野）
- ・ 高い地下水圧（自噴井戸）の存在
- ・ 断層構造（白子沖海脚、鈴鹿沖海脚）
- ・ 浅海域（干潟・砂浜）
- ・ リアス海岸

が重なり、様々なタイプの海底湧水の存在が想定される地域だが、学術的な研究例はほとんどない。

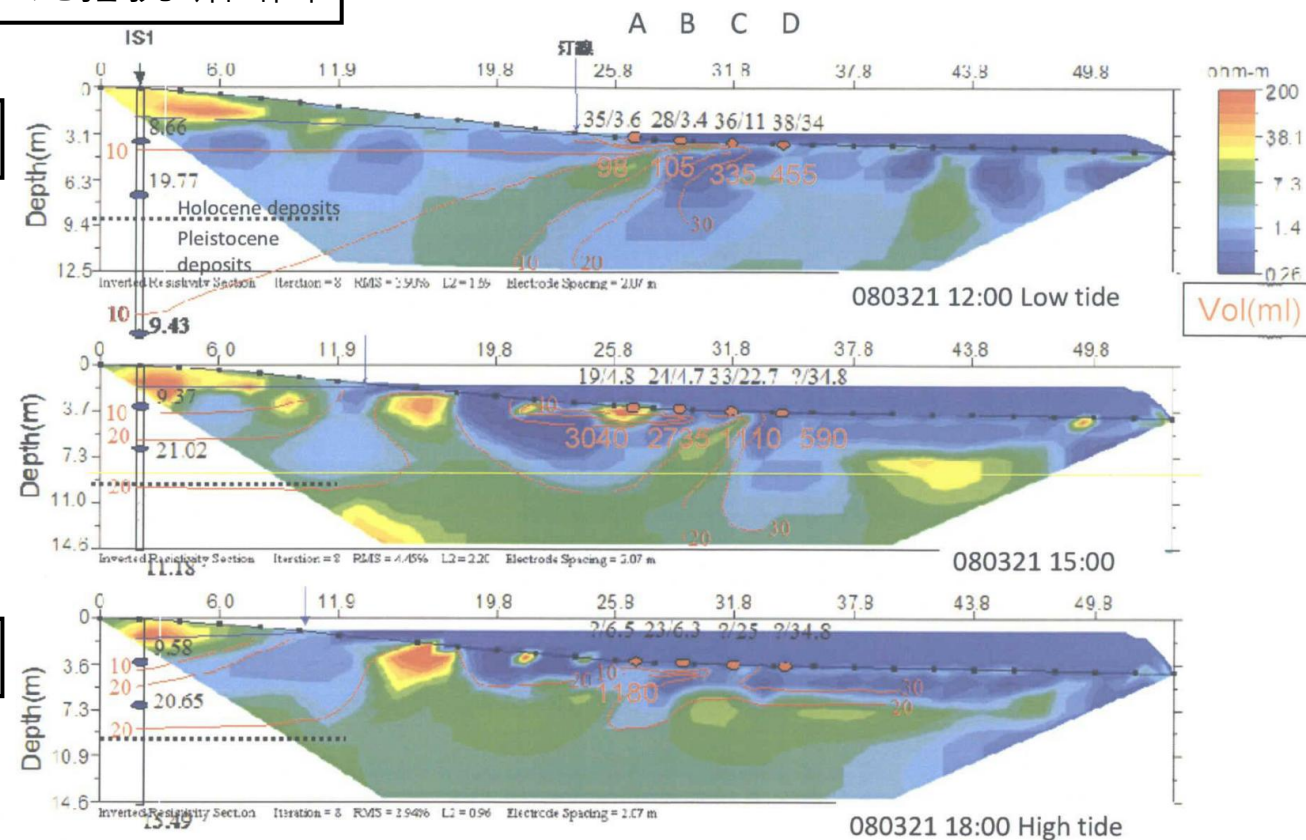
③三重県沿岸域における海底湧水

伊勢湾沿岸域における海底地下水湧出特性 (田畑育海 2008年度 三重大学大学院修士論文)

冬季の比抵抗断面図

干潮

満潮



シーページメータで見積もられた海底湧水量
24.8~56.9 cm/day (248~569L/m²/d)

スケールアップ ↓

夏季

SGD Volume(ton/day)	5785
FW Volume(ton/day)	3817
Shitomo River(ton/day) (2007年 8月30日)	44928

志登茂川の流量の約
8.5%

冬季

FW Volume(ton/day)	8779
Shitomo River(ton/day) (2007年 2月12日)	34560

志登茂川の流量の約
25.4%

③三重県沿岸域における海底湧水

文部科学省科学研究費助成事業「学術実証領域研究 (A)」陸域から外洋におよぶ物質動態の統合的シミュレーション



Members only

ホーム

領域概要・計画班

メンバー

公募研究

研究成果

陸域から外洋におよぶ
物質動態の統合的シミュレーション

MACRO COASTAL OCEANOGRAPHY

© JAXA

伊勢湾が研究ターゲットの海域の一つ

国立研究開発法人水産研究・教育機構水産資源研究所、三重県水産研究所、福井県立大学の3機関で共同契約「地下水湧出が沿岸海洋環境に与える影響評価および海域間比較」を結び、2022年度から研究を開始している。

三重水研「あさま」



三重大「勢水丸」



A班

A01

沿岸－外洋間海水交換プロセス

代表者：東京大学・伊藤 幸彦

日本沿岸の河口から大陸棚における海水と溶存物質の拡散過程を解明し、そのフラックスを定量化する。

A02

沿岸栄養物質の陸域からの流入と外洋への移出

代表者：福井県立大学・杉本 亮

陸域から沿岸海洋への栄養物質の流入量および縁辺海への移出量を定量化するとともに、その支配プロセスを明らかにする。

A03

沿岸生態系による陸域起源栄養物質利用

代表者：水産資源研究所・黒田 寛

陸域と外洋を接続する包括的沿岸モデリングシステムを構築し。陸域から供給される淡水・土砂・栄養物質の輸送および変質・除去過程を解明する。

A04

シミュレーションシステム構築

代表者：東京大学・松村 義正

陸域と外洋を接続する包括的沿岸モデリングシステムを構築し。陸域から供給される淡水・土砂・栄養物質の輸送および変質・除去過程を解明する。

日本地球惑星科学連合2025年大会

Japan Geoscience Union Meeting 2025

[A-CG53] 沿岸海洋生態系－1. 水循環と陸海相互作用

[A-CG53] Coastal Ecosystems - 1. Water Cycle and Land-Ocean Interactions

ラジウム同位体を用いた伊勢湾における地下水流出量の評価

Significance of Submarine Groundwater Discharge in Ise Bay using Radium Isotopes

杉本 亮¹、板尾 唯一¹、中島 壽視²、岡田 誠³、小林 智彦³、万田 敦昌⁴

(¹福井県大・海洋生物資源、²東京大・大気海洋研、³三重県水産研究所、⁴三重大・生物資源学部)

Ryo Sugimoto¹, Yuitsu Tochio¹, Toshimi Nakajima², Makoto Okada³, Tomohiko Kobayashi³, Atsuyoshi Manda⁴

(¹ Fukui Prefectural University, ² University of Tokyo, ³ Mie Prefecture Fisheries Research Institute, ⁴ Mie University)



マクロ沿岸海洋学



Macro Coastal Oceanography

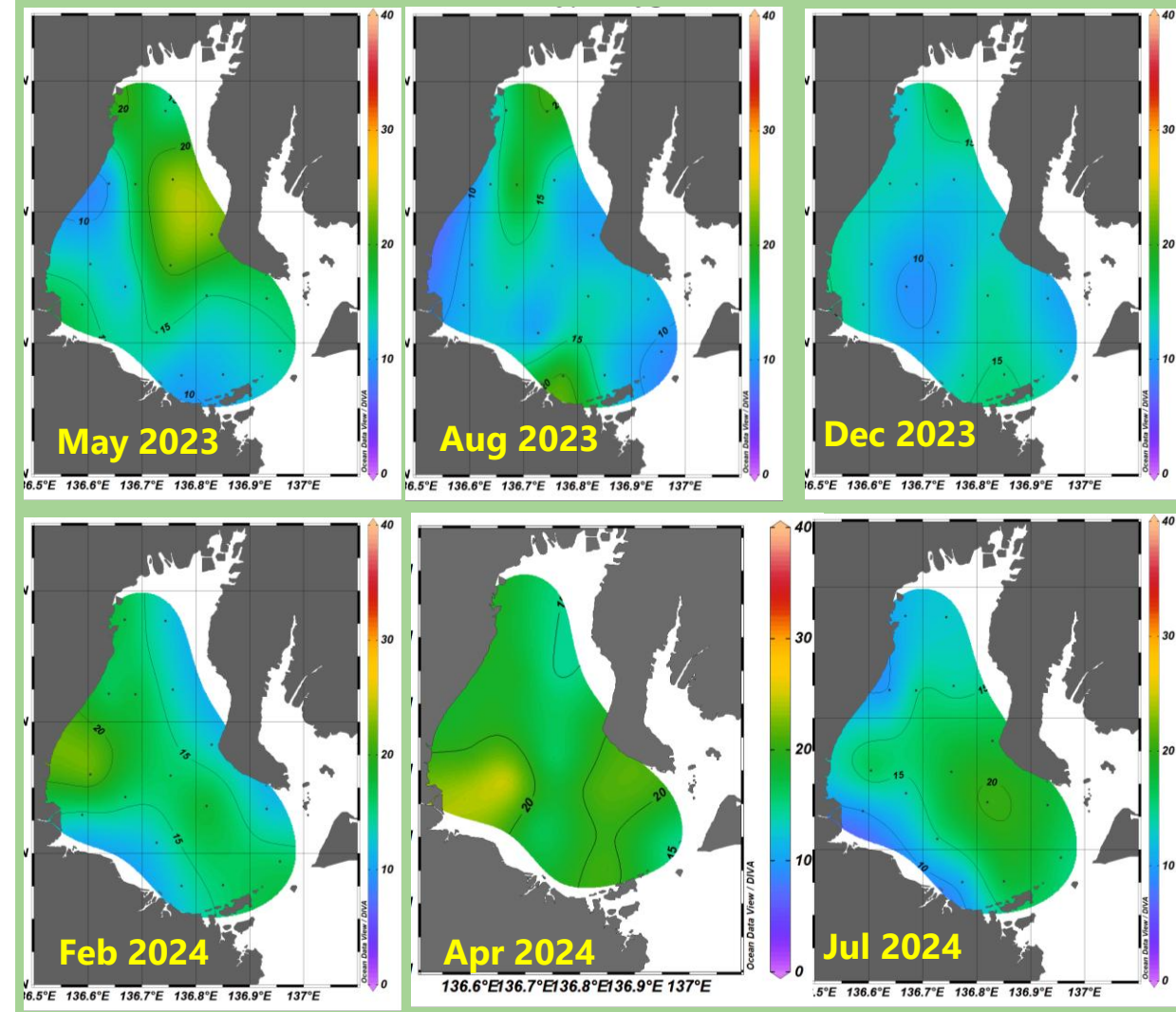
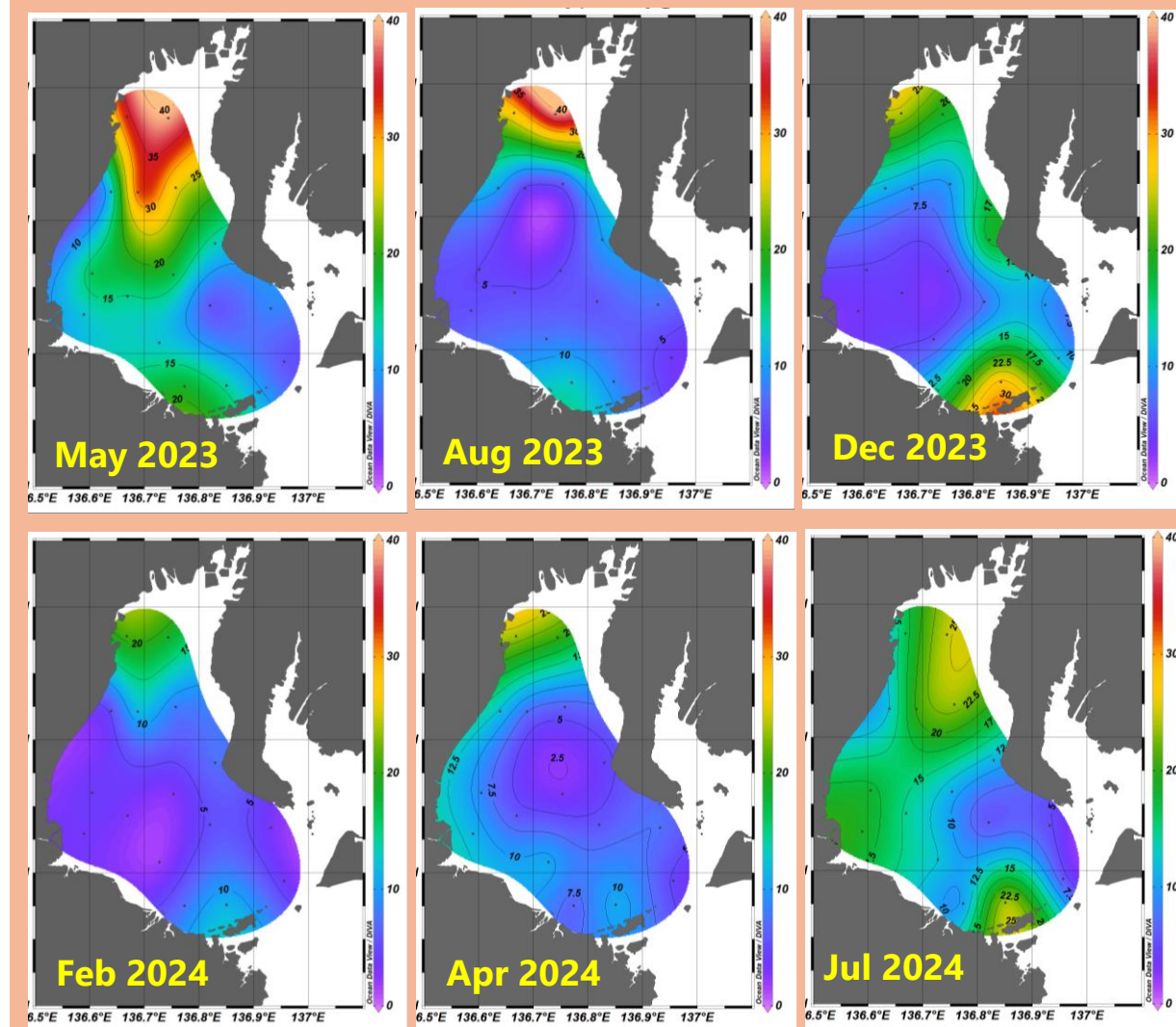
③三重県沿岸域における海底湧水：ラジウムを使った調査例

伊勢湾における地下水トレーサーの分布（表層水）

湾内のラジウム値は、河川水や外海水よりも有意に高い

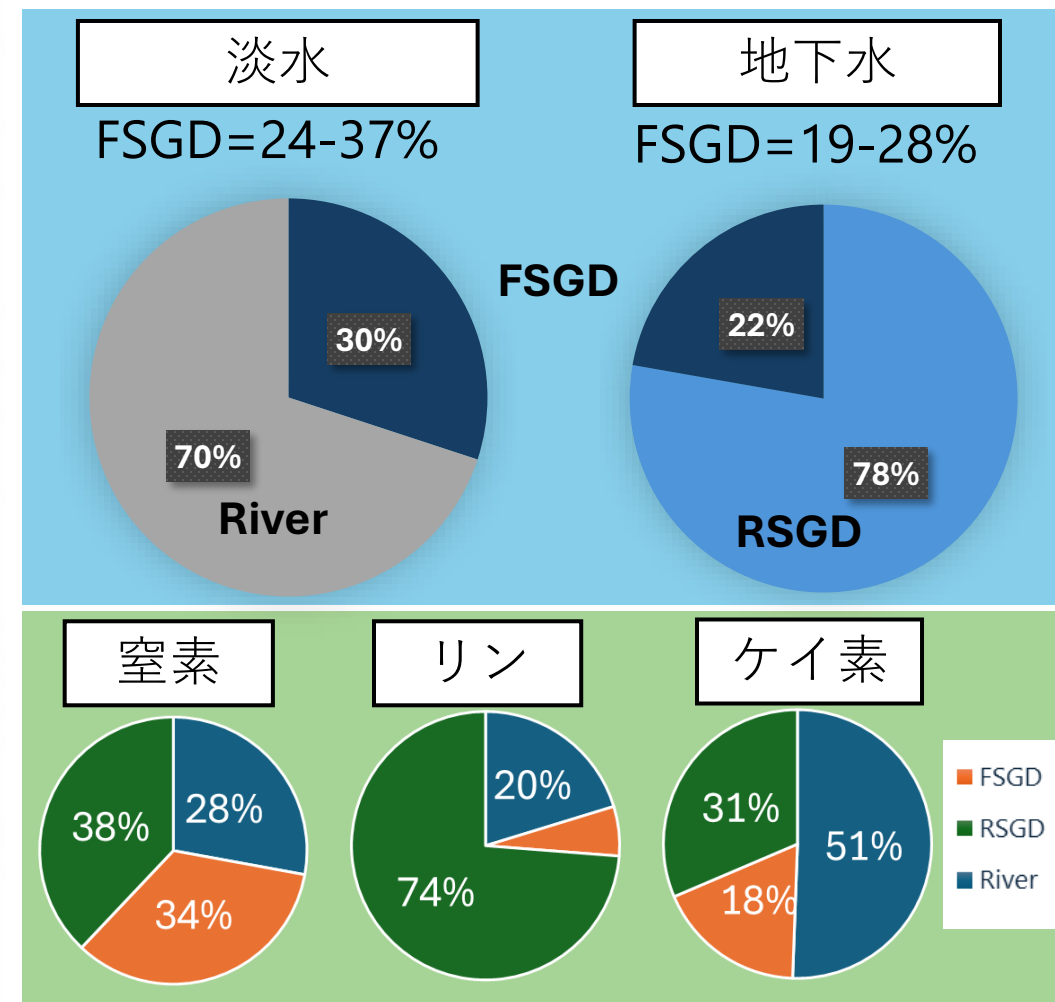
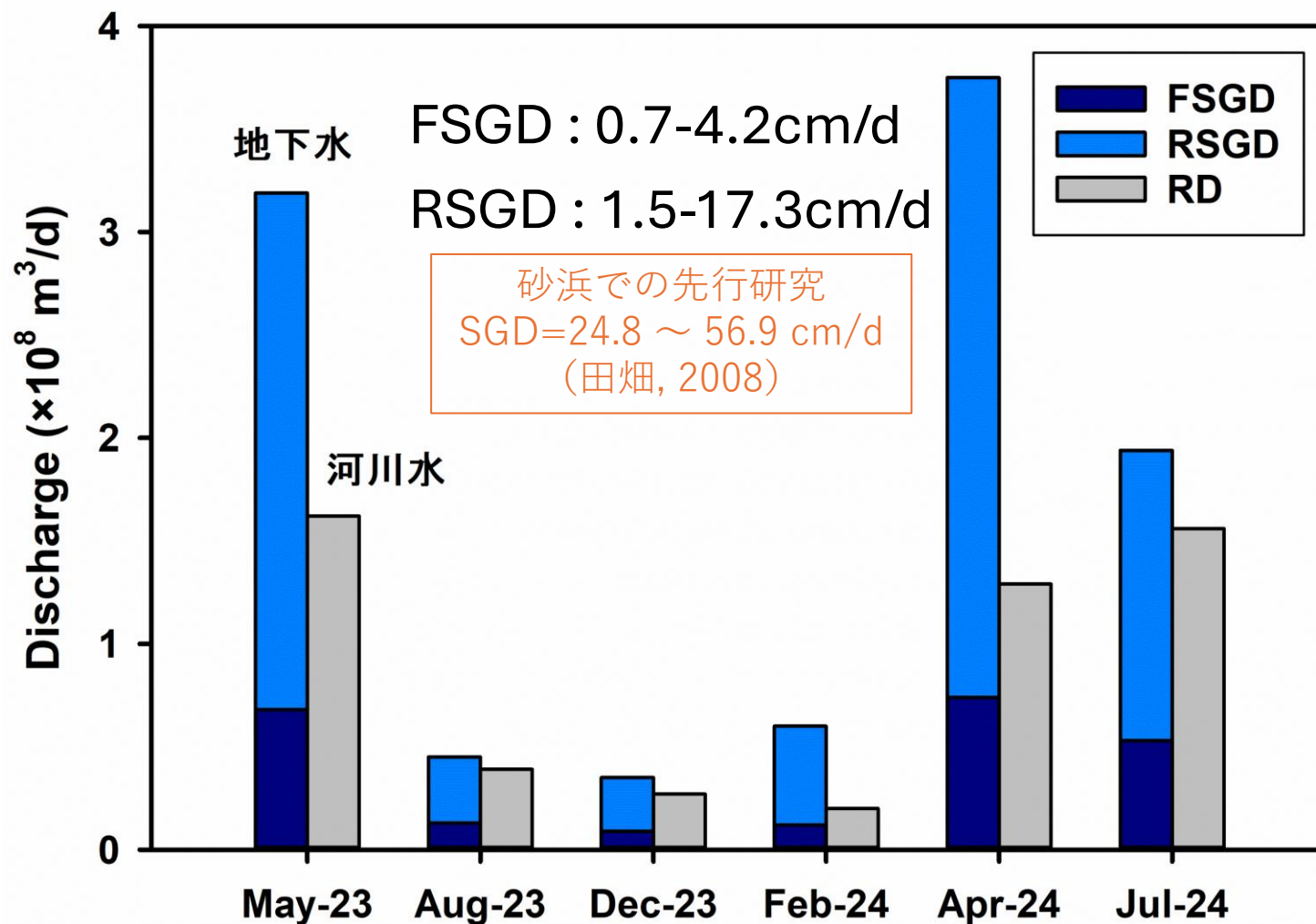
^{224}Ra activity (dpm/100L)

^{226}Ra activity (dpm/100L)



③三重県沿岸域における海底湧水：ラジウムを使った調査例

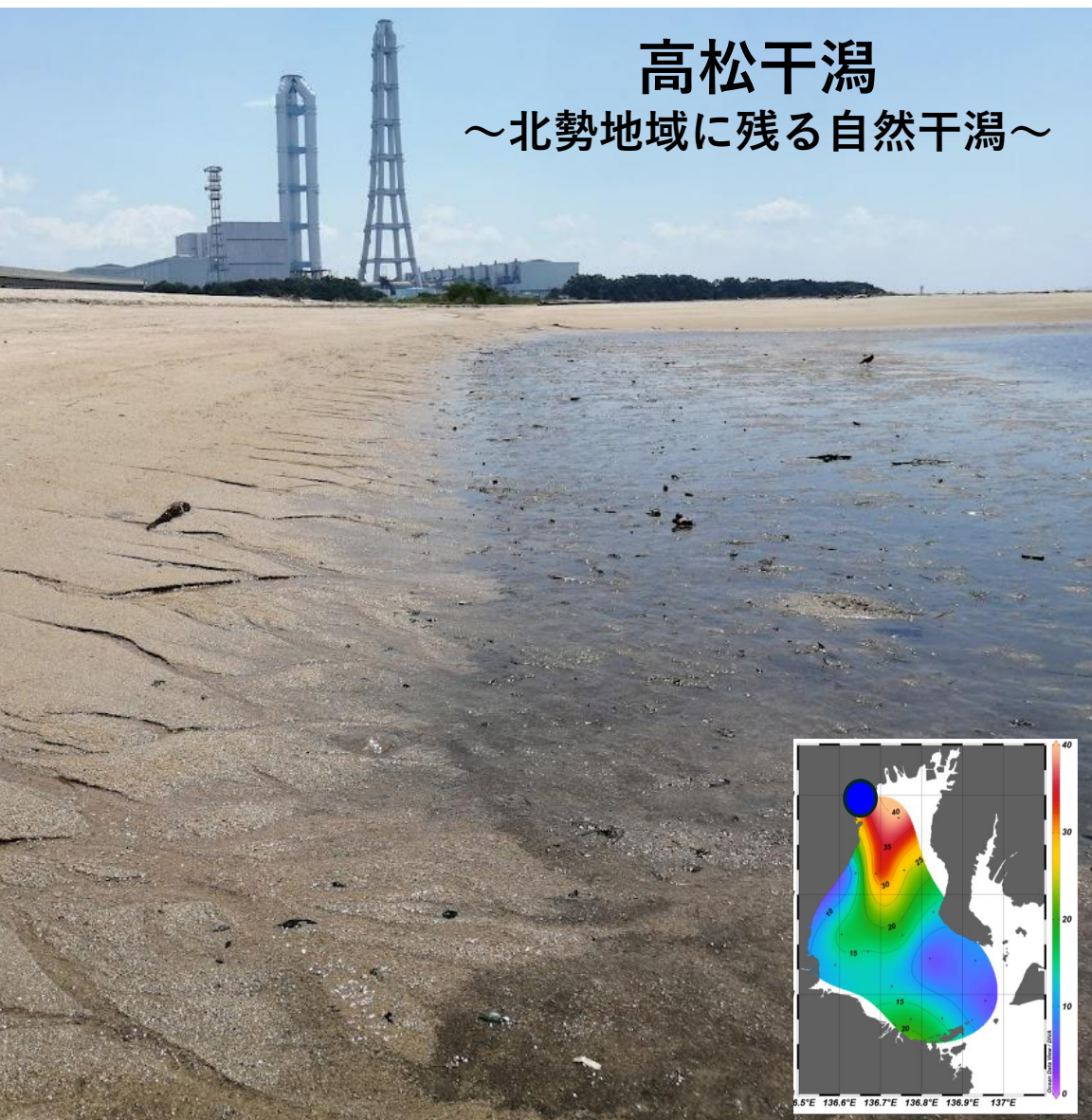
伊勢湾における海底湧水（SGD）は $2.0\text{--}21.6\text{ cm d}^{-1}$ ($20\text{--}216\text{ L/m}^2/\text{d}$) の範囲で変動し、河川流量が多い時期に増大する傾向が認められた。再循環型海底湧水（RSGD）の寄与が主成分であるものの、淡水SGD（FSGD）は全淡水流入量の約3割を占め、その影響は大きい可能性が示唆された。



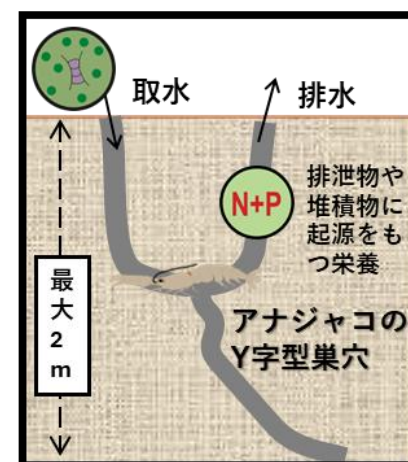
注意：データは解析途中のため速報的な値である。今後の解析によっては数値は変わる可能性を含んでいる。

③三重県沿岸域における海底湧水

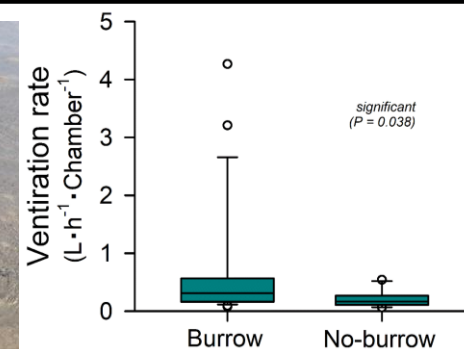
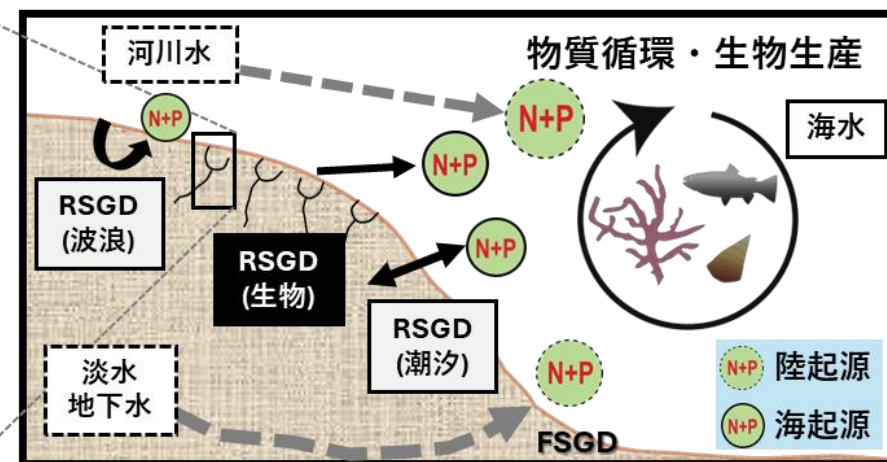
浅海域：水の循環を介した物質の再生産の場



①生物現象スケール(数 cm^2)



②生態系現象スケール(数 $100\text{m}^2 \sim 1\text{km}^2$)



③三重県沿岸域における海底湧水

三重県沿岸部における海底湧水の実態

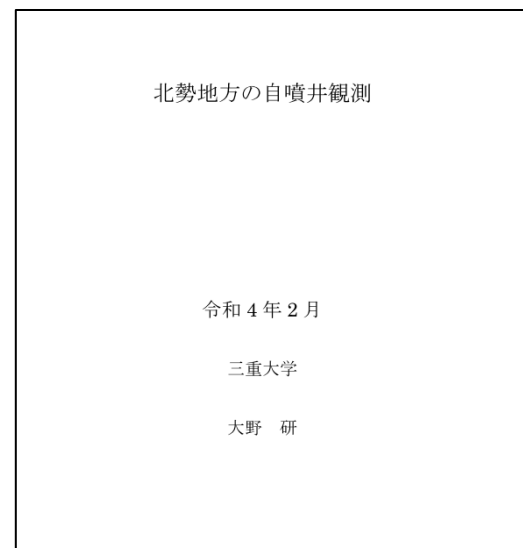
◎学術的に体系立てた調査例はほとんどない

伊勢湾エリア（一部、現在進行中）

- ・地球化学トレーサーによる定量法では湧出ポテンシャルが高い
- ・海底湧水としては再循環成分が主体的であるが、淡水の割合は決して低くない
- ・全淡水流出に占める淡水性地下水の割合は高い傾向にある

南部のリアス海岸エリア

- ・研究例は見当たらない



2006年頃まで続いていた自噴量の減少が、増加傾向に変化⇒海底湧水量も増加している可能性大

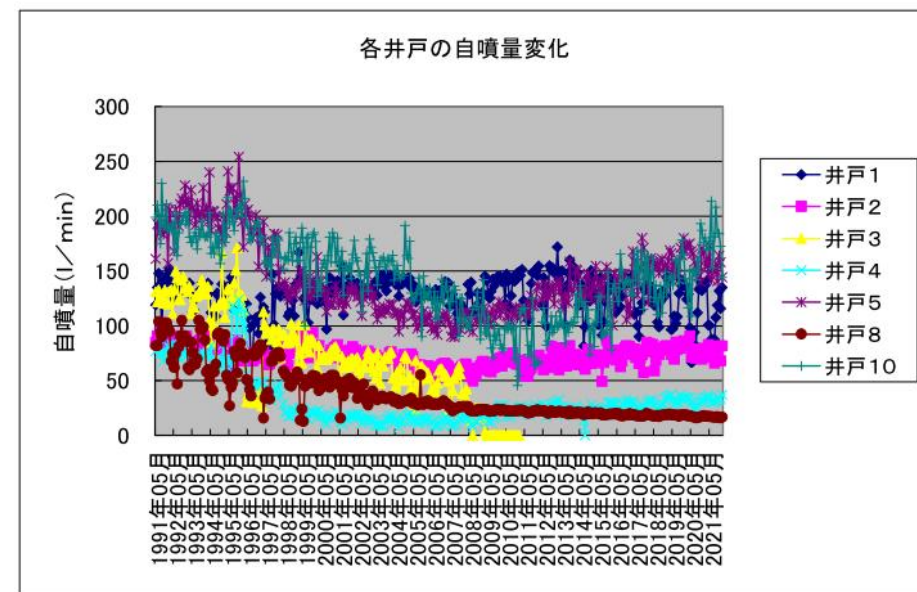


図 2-8 各井戸の自噴量変化

④海底湧水を保全するために

水・エネルギー・食料は、人間の生存にとって最も基本的かつ重要な資源で、しかも互いに複雑な依存関係にある。これら資源間には、一方を追求すれば他方を犠牲にせざるを得ないというトレードオフ関係があり、資源を効率的に利用・保全することが求められている。

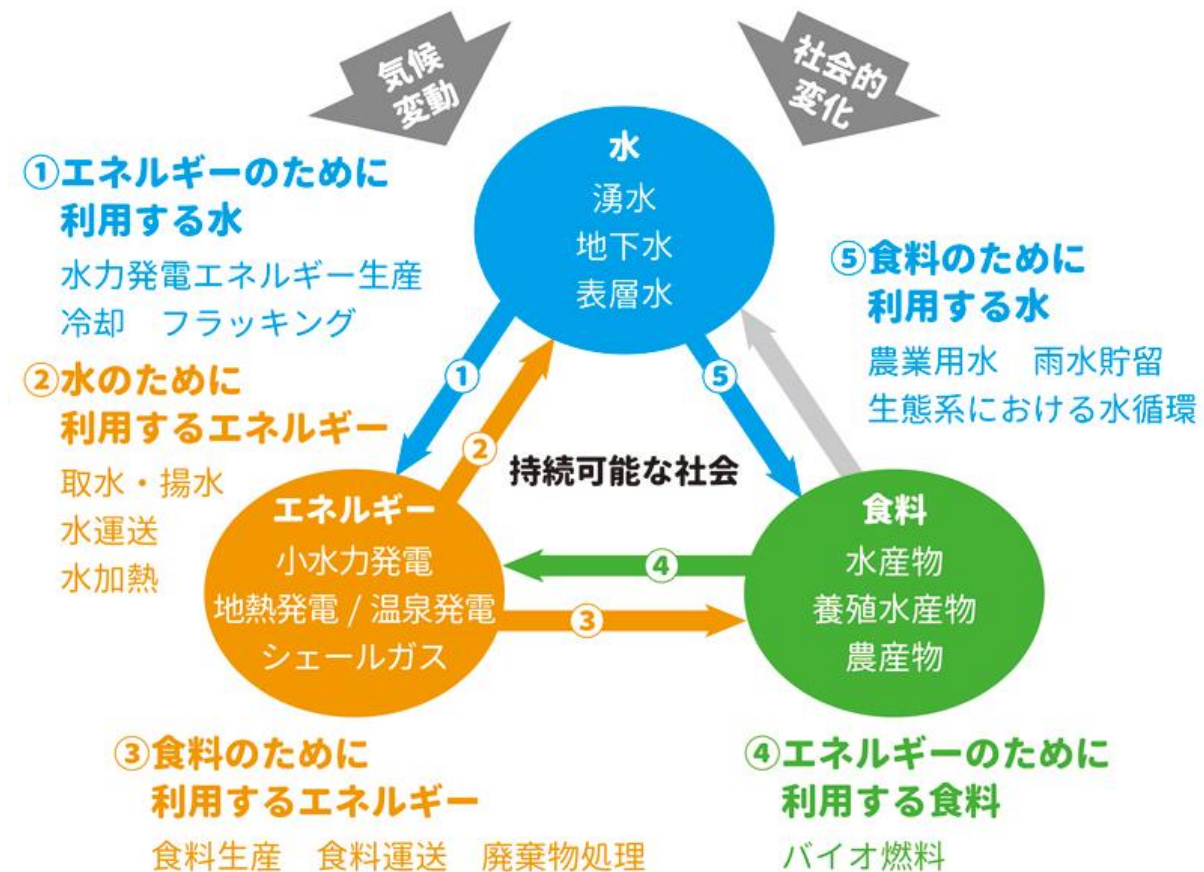
三重県は豊富な地下水資源によって支えられている

県名	使用量 (千m ³ /年)	地下水依存率 (%)	県名	地下水の占める 比率 (%)
静岡	347,524	62.3	鳥取	99.3
埼玉	197,413	22.0	熊本	86.9
兵庫	191,384	26.5	福井	74.1
岐阜	175,693	72.0	三重	69.6
東京	173,231	10.7	岐阜	67.2
三重	163,208	59.5	徳島	66.5
栃木	152,157	58.9	群馬	63.2
愛知	151,390	16.1	島根	61.4
熊本	148,478	88.3	静岡	58.6
長野	146,426	49.0	愛媛	57.3
			山梨	57.2
			栃木	52.5

表 1-11 年間の水使用量に地下水が占める割合 (2005年)
(表 1-10、1-11とも鎌形香子らによる)

表 1-10 水道水に地下水が占める割合 (2005年)

(日本地下水学会, 2009)

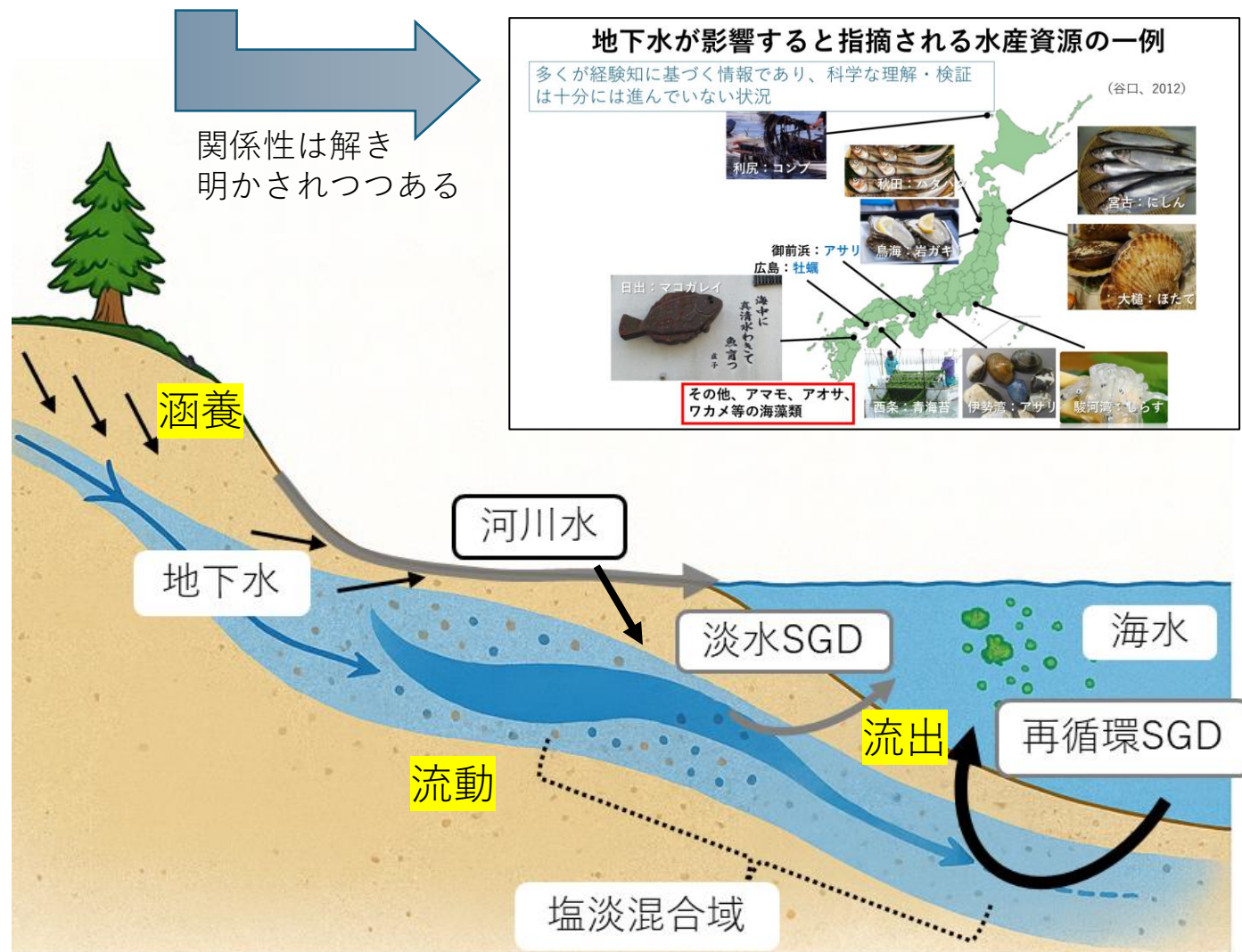


水・エネルギー・食料ネクサスの関係図

④海底湧水を保全するために

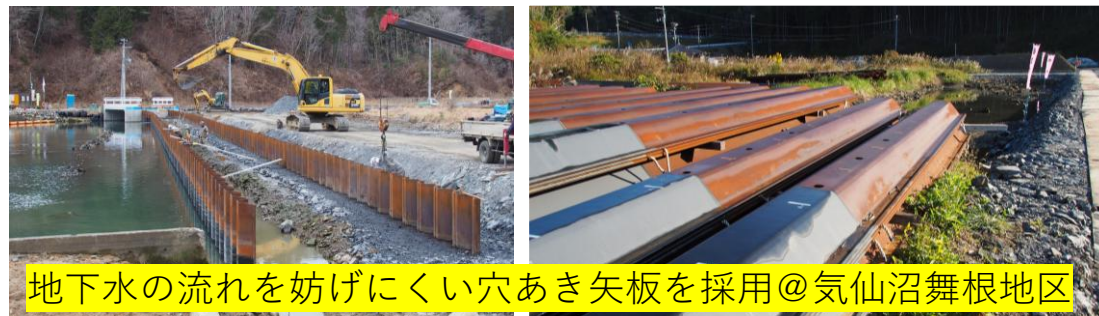
観測事実

海底湧水は沿岸海域では普遍的な現象であり、河川に匹敵する物質供給源である



陸海統合管理の必要性

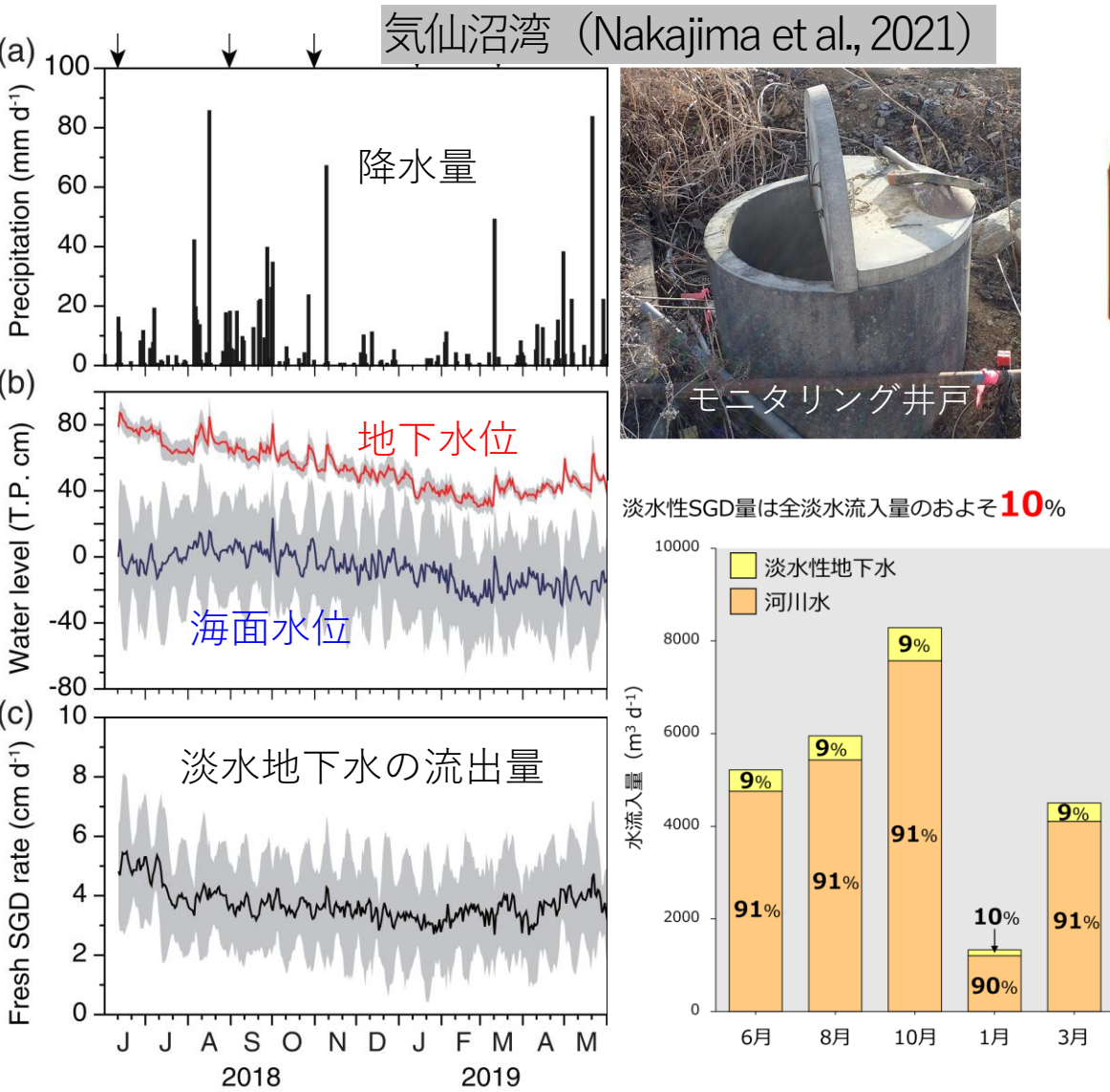
- ① 陸域地下水の量と水質を保全する
 - ✓ 森林（水源）の保全
 - ✓ 涵養域の保全
 - ✓ 過剰揚水の防止
 - ✓ 地下水汚染の防止
- ② 地下水の流動経路（陸と海のつながり）を確保する
 - ✓ 流出域の保全
 - ✓ 地下構造物（建物、護岸、防潮堤）の影響を考慮
- ③ 沿岸浅海域の機能を見直す（浅海域はSGDの要）
 - ✓ 砂浜や干潟の保全



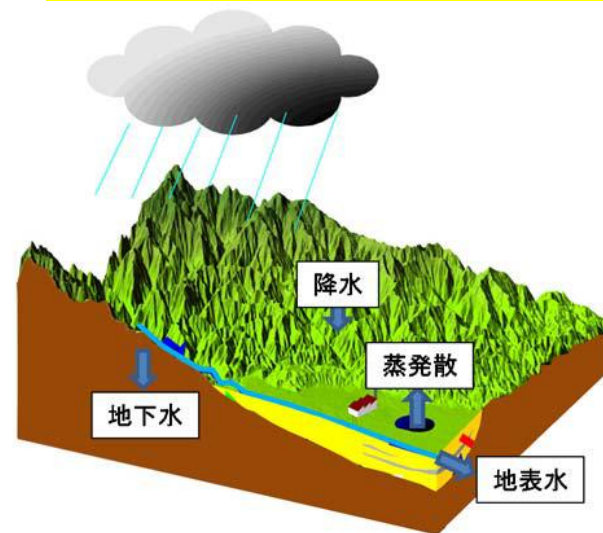
補足資料

②海底湧水の調査方法：水文学的手法

陸域の地下水位や水収支解析から海底湧水を評価する



$$\text{降水量} = \text{蒸発散量} + \text{地表水流出量} + \text{地下水涵養量} (\pm \text{貯留量})$$

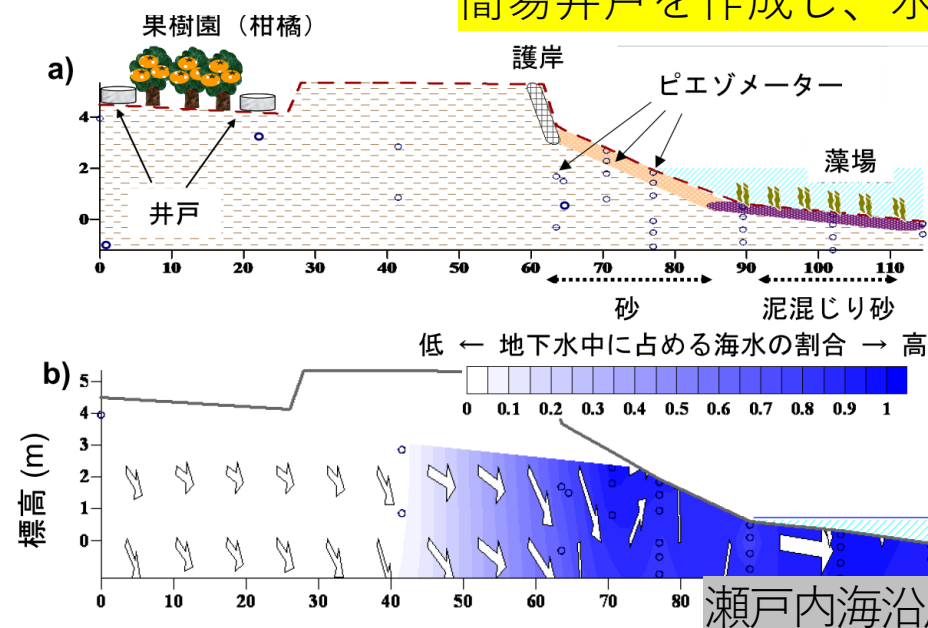


(清水ほか2009)

表1 海底地下水流出量の推定結果

Stream	Estimation of SGD by water balance (mm)
Okayama Pref.	78.4
Kagawa Pref.	90.8

簡易井戸を作成し、水位や水質を評価



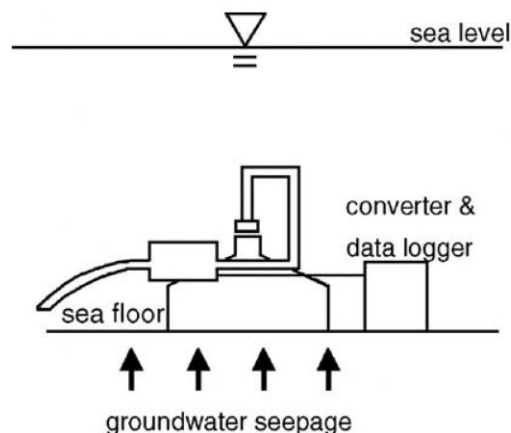
②海底湧水の調査方法：物理的手法～海底湧水量計～

海底にお椀上のチャンバーを設置し、海底から湧出する地下水を直接計測する方法

流速は数cm/day～数10cm/day



海底に設置した湧水量計



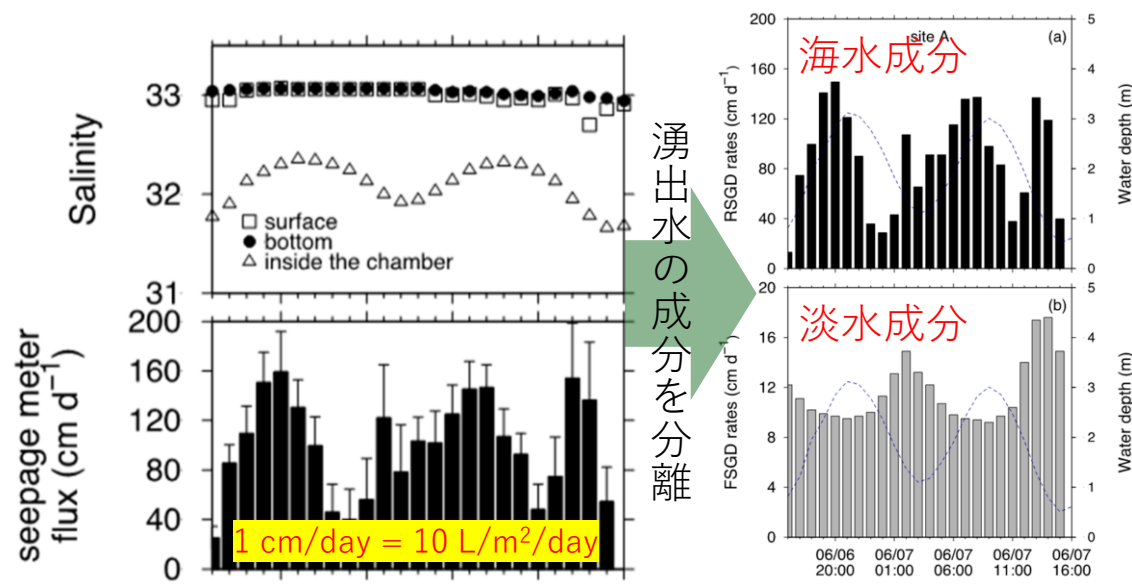
メリット

- 設置した場所の湧水量を正確に計測することが可能
- 淡水と海水の流出量を識別した上で、それらの時間変化も連続的に計測できる

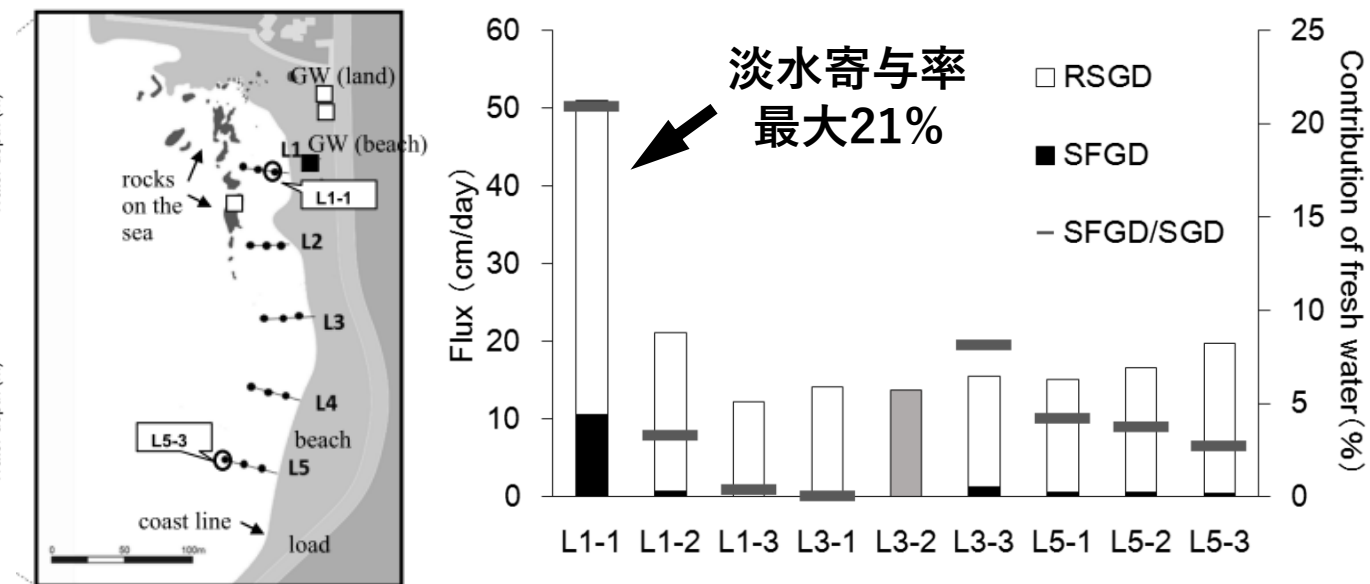
デメリット

- 製品化されたものがない（自作する）
- 設置場所が限られる（データに偏りが生じる）

瀬戸内海での計測例（Nakajima et al., 2018 Hydrology）



山形県釜磯海岸での測定例（小林ほか, 2018, 日本水産学会誌）

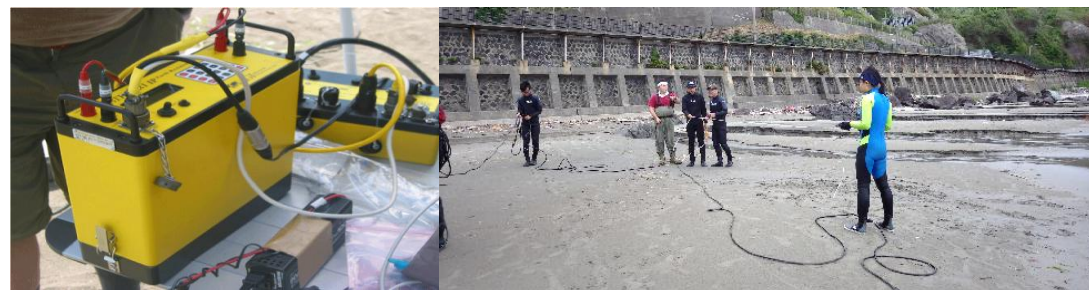
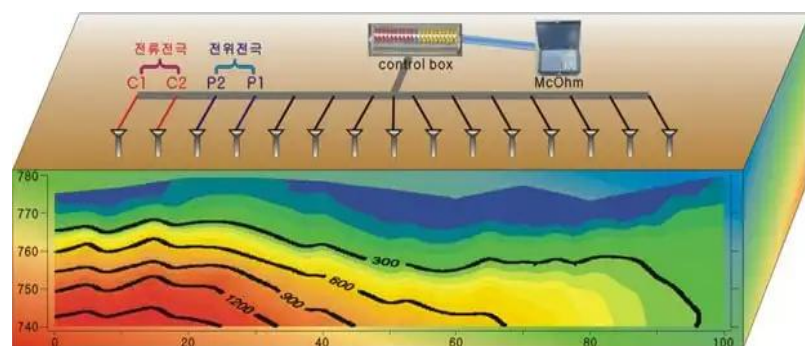


②海底湧水の調査方法：物理的手法～比抵抗探査～

地中に電流を流し、地下の比抵抗値の分布を測定することで、地層構成（≒水の組成）を把握する調査法

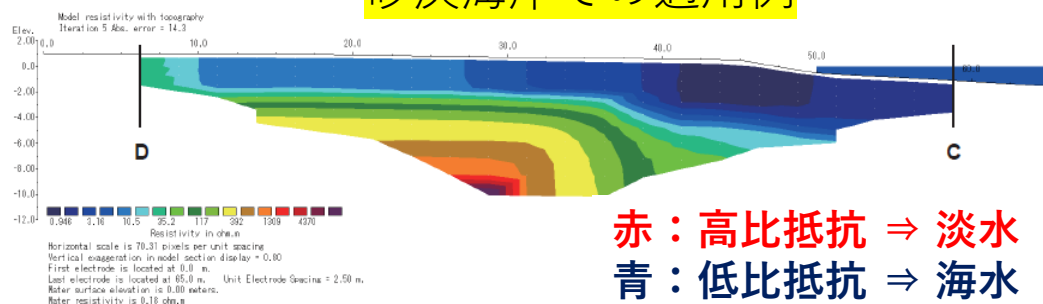
メリット

- 陸域から浅海域にかけての地下水の空間分布（流動経路）やその時間変化、淡水と海水の混合状況がわかる

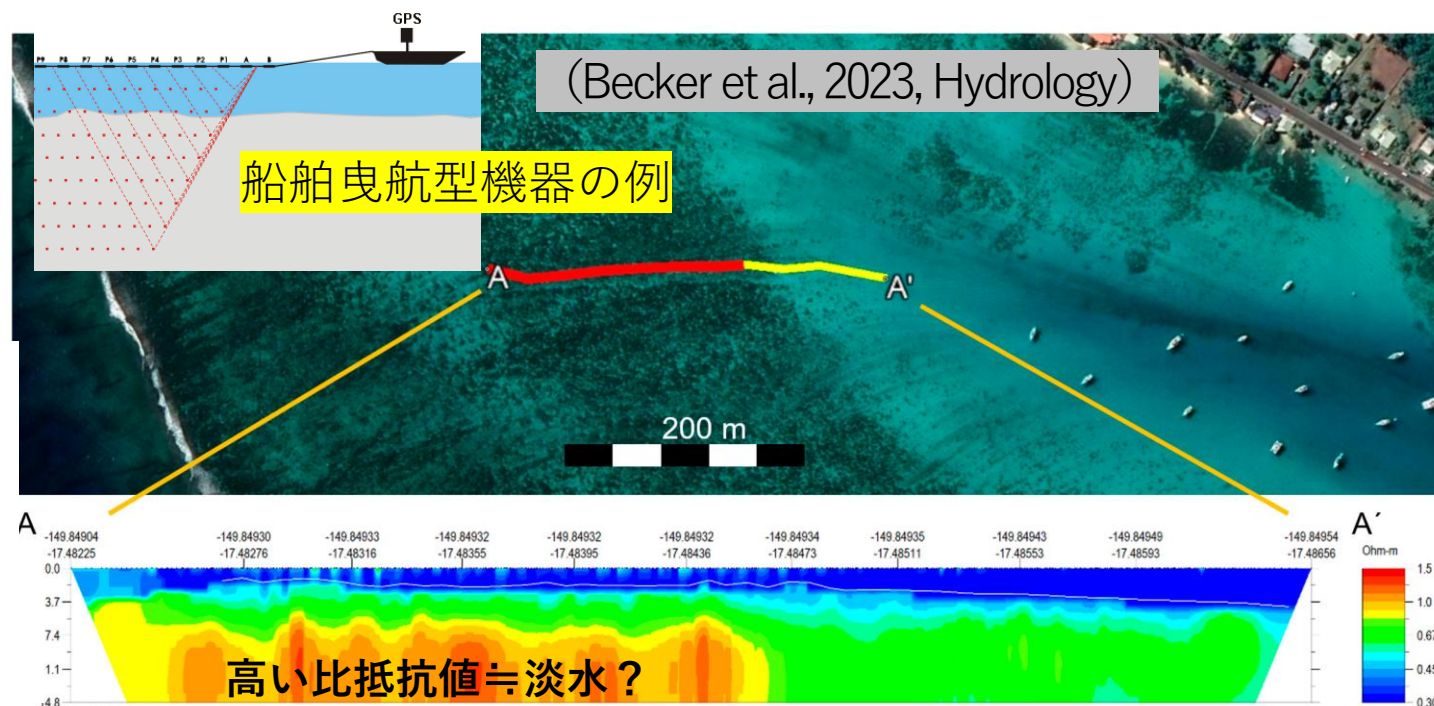


Line 3

砂浜海岸での適用例



赤：高比抵抗 ⇒ 淡水
青：低比抵抗 ⇒ 海水



②海底湧水の調査方法：物理的手法～熱探査～

地下水と海水の温度の違いから海底湧水の湧出域（※温度異常域）を探查する方法



淡水地下水の水温
は年間一定

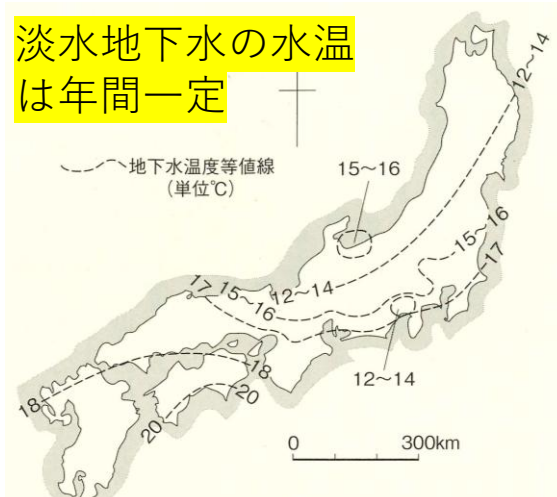


図4-10 地下水温度の等値線（「地質調査所報告」より）

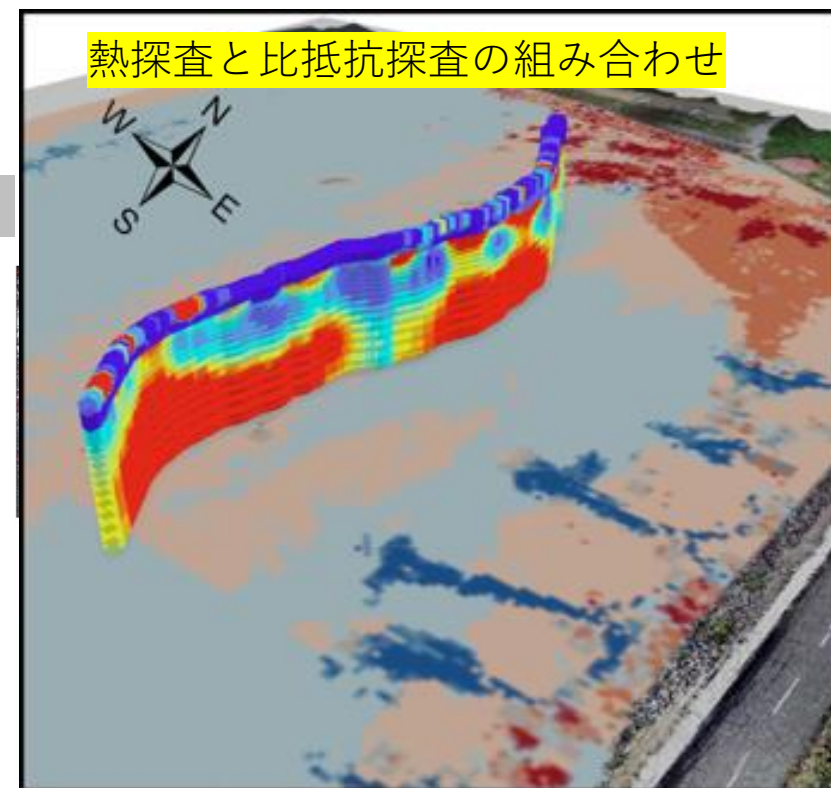
メリット

- 海底湧水の分布を高い解像度で広域把握ができる

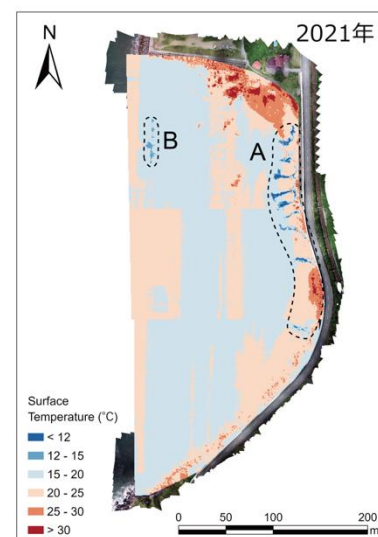
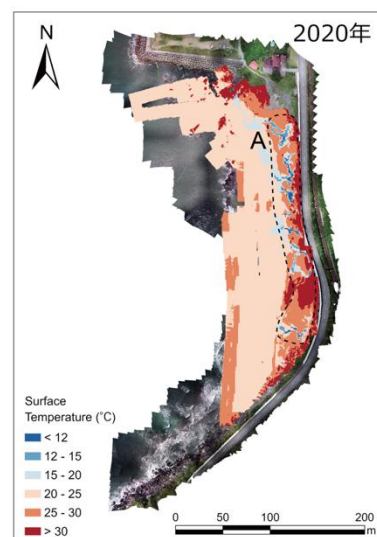
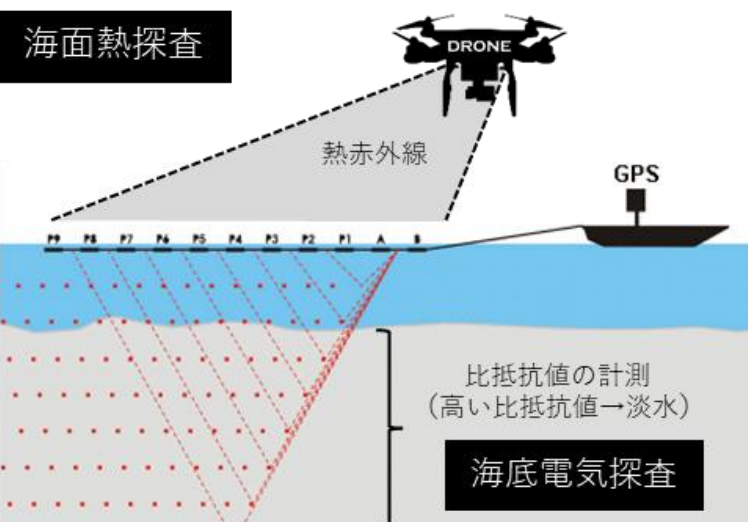
デメリット

- 探查できる季節が限られる
- 海面まで熱が伝わらないと検知できない
- 海水性地下水の湧出は探查できない

熱探査と比抵抗探査の組み合わせ



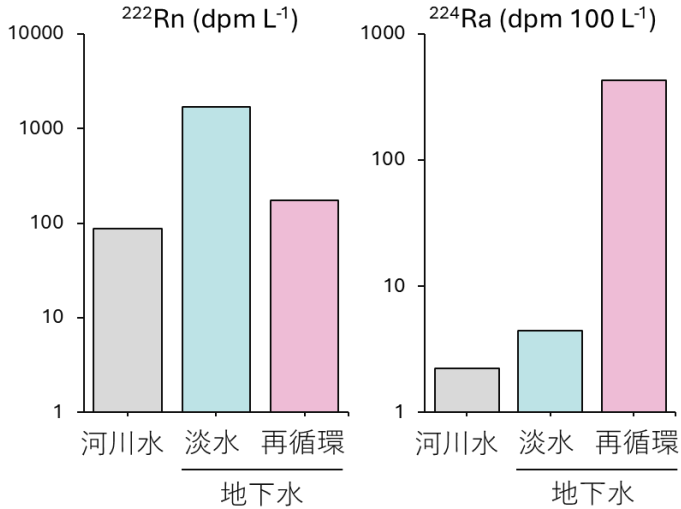
海面熱探査



(山田ほか, 2024, 月刊海洋)

②海底湧水の調査方法：地球化学トレーサー（ラジウム・ラドン）

地下水中に特に多い物質（放射性元素など）を天然のトレーサーとして利用する方法



核種	半減期
^{220}Rn	55.6秒
^{222}Rn	3.82日
^{224}Ra	3.66日
^{223}Ra	11.4日
^{228}Ra	5.75年
^{226}Ra	1600年

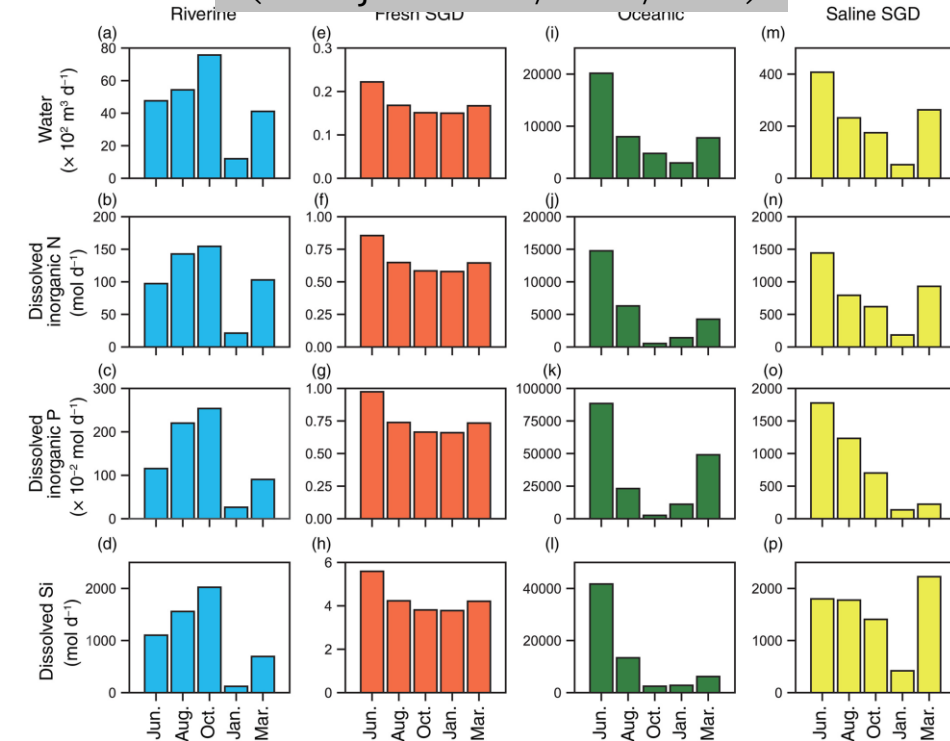
メリット

- 海底湧水の湧出域や湧出量の評価が可能
- 海洋観測との相性がよい

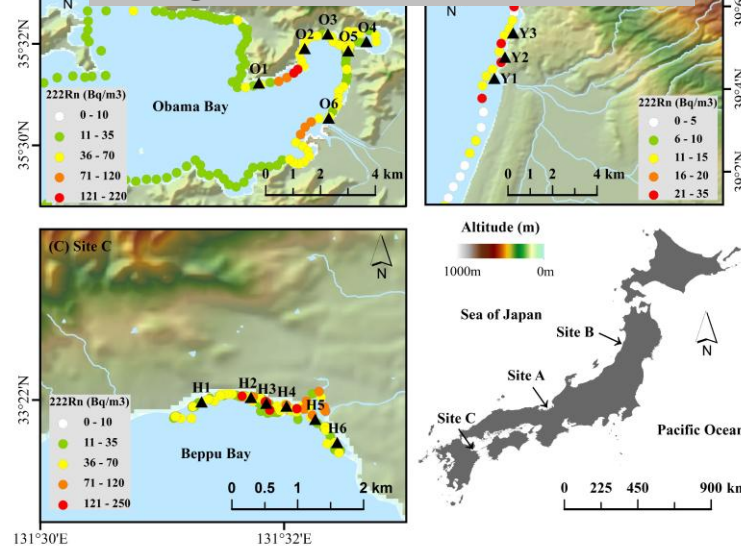
デメリット

- 分析機器の導入

気仙沼舞根湾における海底湧水量の定量評価
(Nakajima et al., 2021, L&O)

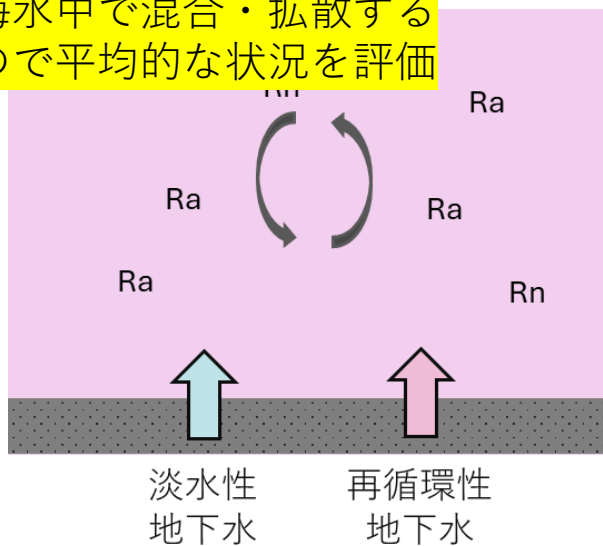


^{222}Rn 曳航観測手法を用いた湧出域探査
(Sugimoto et al., 2017, MEPS)



海水中で混合・拡散するので平均的な状況进行评估

(※小浜湾の例)



②海底湧水の調査方法：数値モデル

32

地下水モデリングとは、地下の地層構造や透水性、涵養・流出条件等を考慮し、地下水の流れや水量、物質輸送を数値計算で再現・予測する手法である。

水循環シミュレーションデータ
@地圏環境テクノロジー

メリット

- 流域全体を対象とした数値シミュレーションが可能
- シナリオ解析等が可能

デメリット

- 不確実性が大きい（陸と海の連結や物質の動態など）

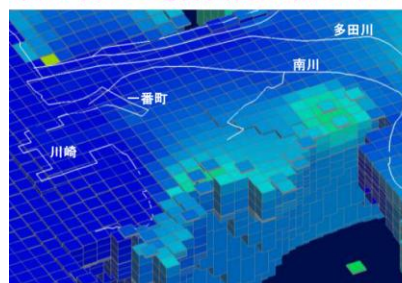
福井県小浜平野の地下水調査@小浜市HP

地下水の状態を予測するシミュレーション
(雨量や揚水量が変化した時の地下水位・水質を予測計算)

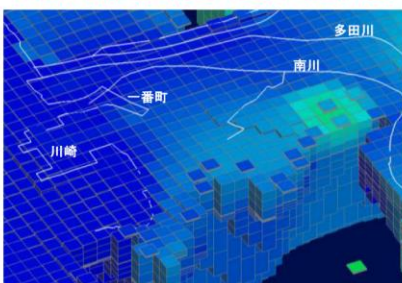
小浜平野を対象とした
地下水流動モデル(鳥瞰図)



雨が多い時期の地下水位分布
水位が高いことを表す緑色の範囲が広い



雨が少ない時期の地下水位分布
水位が低いことを表す青色の範囲が広い



地下河口域のモデル解析例 (Nakada et al., 2011)

