

第7回水道の諸課題に係る有識者検討会
令和5年10月11日（水）13時～15時

水道事業における 気候変動への適応に向けた取り組み

京都大学大学院 工学研究科 准教授
(元国立保健医療科学院 生活環境研究部 主任研究官)
浅田安廣

科学院での気候変動に関する取り組み (厚生労働科学研究費補助金)

- ・気候変動に対応した飲料水管理手法の開発に関する研究
(平成21年度～23年度)
- ・水道システムにおける生物障害の実態把握とその低減対策に関する研究(平成24年度～26年度)
- ・大規模災害および気候変動に伴う利水障害に対応した環境調和型水道システムの構築に関する研究(平成27年度～29年度)
- ・水道事業の流域連携の推進に伴う水供給システムにおける生物障害対策の強化に関する研究(平成30年度～令和2年度)
- ・気候変動に伴う水道システムの生物障害等リスク評価とその適応性の強化に向けた研究(令和3年度～令和5年度)

気候変動による水道システムへの影響評価と適応策

水質悪化

【影響評価】

- 豪雨による濁度、病原生物、化学物質濃度の上昇
- 気温上昇によるダム貯水池での藻類濃度上昇にともなう水質悪化、浄水障害
- 渇水、海面上昇による塩水遡上

【適応策】

- 水安全計画の策定による危害のリスク評価と対応方法の整備
- 水源管理
- 監視強化、浄水プロセスの強化

豪雨

【影響評価】

- 水道施設への被害（冠水、配水管の破損、停電）
- 断水被害の調査、影響評価

【適応策】

- 風水害対策マニュアルの策定
- 水害マップの作成
- 応急給水体制の整備
- 水道施設の更新、耐震化、浸水対策
- 送水管ネットワークの構築
- 断水に備えた備蓄水

渇水

【影響評価】

- 渇水による減断水
- モデル流域による将来の水量予測

【適応策】

- 渇水対策マニュアルの作成
- 渇水リスクマップの作成
- 代替水源の確保
- 水の有効利用（雨水・再生水の利用含む）
- 水道水源林の保全
- 給水制限、応急給水
- 節水機器の導入、節水意識の向上

平成25年梅雨期の豪雨による断水被害の調査（山形県村山地方）

原水濁度上昇のため取水停止による断水

【概要】

- ダム流入河川で多数の土砂崩落が発生し、大量の土砂がダム貯水池に流入
- 原水の最高濁度は、約3,000度を記録し、100度以上の状態が26日間継続
- 山形県村山広域水道の西川浄水場において、薬品注入量の上限を超える濁度
- 受水団体11（6市6町）のうち6市町で、9日間に渡って断水被害が発生。ピーク時で約5万4千世帯が断水。

【対応（適応策）】

- 山形市では、連絡管を通じて他の水源からの取水を増量し、断水を回避
- 凝集剤貯蔵槽の増設
- 凝集剤の注入機能の増強
- 浄水池の貯水量の拡大
- 河川から取水した原水を確保する設備の新設

平成28年台風第10号による断水被害の調査（岩手県岩泉町）

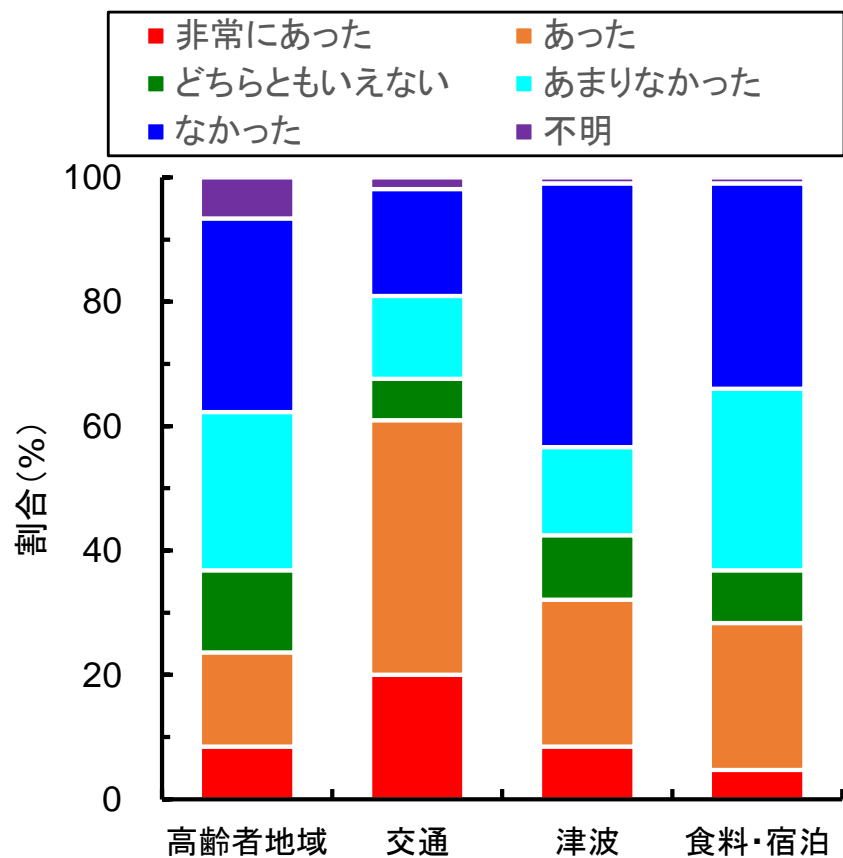
取水施設の損壊による断水



応急給水体制の整備：

アンケート調査による災害時の応急給水体制の把握

- 災害発生時に、応急給水活動に協力した水道事業体職員を対象にアンケート調査
- 応急給水体制の実態把握と、改善点の整理



東日本大震災での応急給水活動への影響

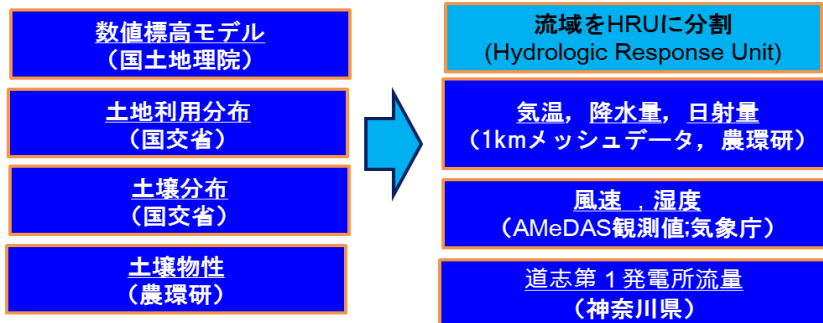


モデル流域による将来の水量予測： 水文モデルを用いた相模ダム流域の気候変動影響評価

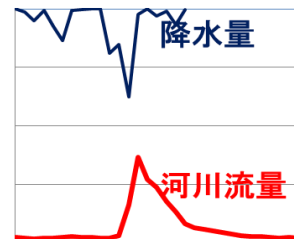
解析対象流域



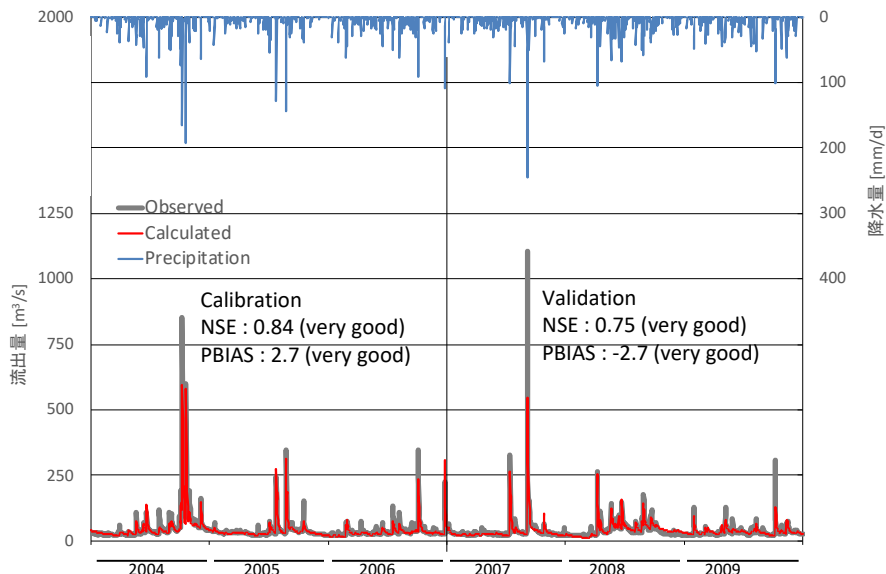
水文モデルの構築



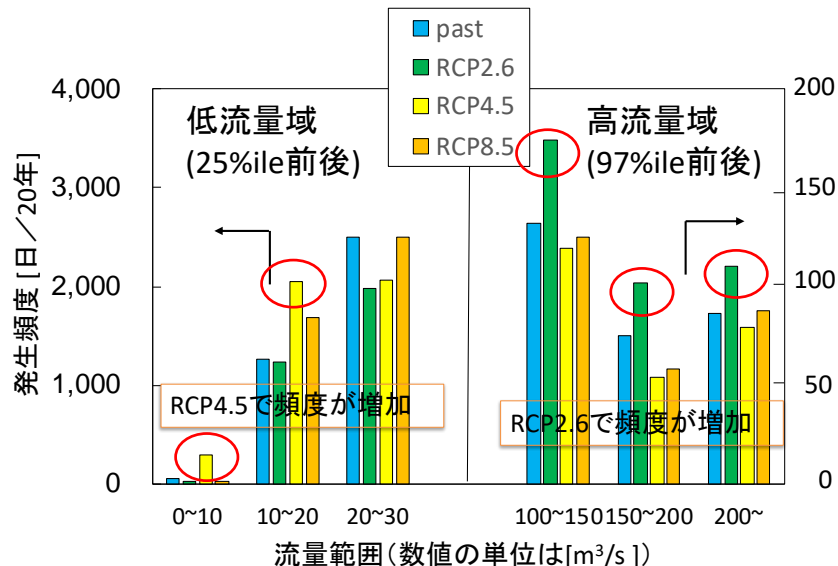
SWAT Soil & Water Assessment Tool
準分布型の水文水質モデル



モデル検証：降水量とハイドログラフ



気候変動影響評価(シナリオ解析) : MIROC5を使用



監視強化、浄水プロセスの強化： 高濁度原水への浄水処理による対応

① 砂ろ過への影響

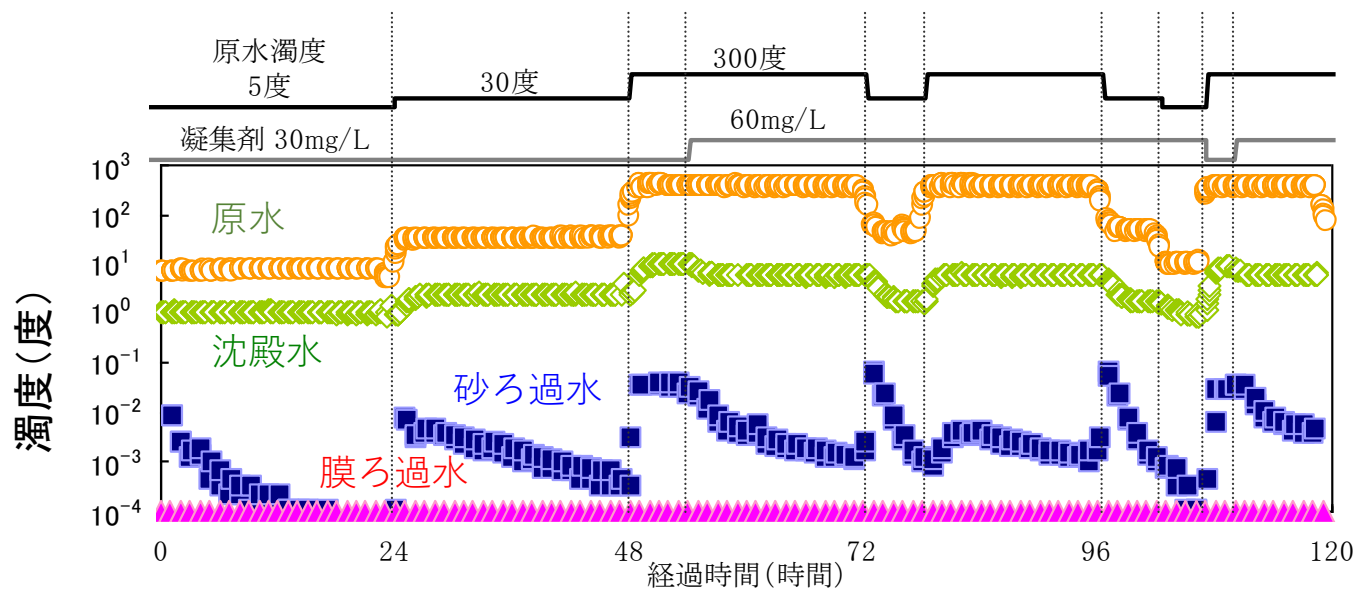
- ・逆洗直後の初期濁度が上昇
- ・初期濁度低下速度が低下
- ・損失水頭上昇速度が低下

② 膜ろ過への影響

- ・膜ろ過水濁度、膜差圧に明確な影響なし。



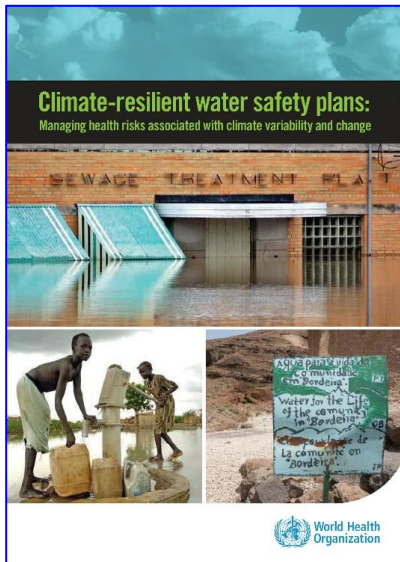
- 濁度急変に強いシステム：凝集沈澱-膜ろ過システム
- 砂ろ過での影響緩和には、凝集沈澱池の運転管理が重要
 - 凝集剤の適切な注入、pH制御、砂ろ過損失水頭の監視等



浄水処理プラント
(国立保健医療科学院)

水安全計画の策定による危害のリスク評価と対応方法の整備

- 水安全計画の策定に際し、将来に亘る適切で安全な飲料水供給に対し、気候変動による影響の考慮の必要性
- 気候変動によって悪化する可能性のある危害原因事象や危害因子を抽出
- これら危害原因事象、危害因子への対応策のうち、気候変動の影響に対して重要となる対応策を構築、整理し、水安全計画を策定・改善



水源での降雨による濁度への対応・監視方法

WHO. 気候変動への適応力のある水安全計画. 2017.

監視方法		監視地点 (管理措置)						
		水源	取水	原水	沈殿水 凝集沈殿	ろ過水	浄水	給配
計器	濁度計		○	◎	◎	○		
	pH計			○				
調査		○						
手分析		○						
管理基準	管理点		35~500			0.05~0.1		
	重要管理点			25~500	0.8~3			

科学院での気候変動に関する取り組み

(厚生労働科学研究費補助金)

- ・気候変動に対応した飲料水管理手法の開発に関する研究
(平成21年度～23年度)
- ・水道システムにおける生物障害の実態把握とその低減対策に関する研究(平成24年度～26年度)
- ・大規模災害および気候変動に伴う利水障害に対応した環境調和型水道システムの構築に関する研究(平成27年度～29年度)
- ・水道事業の流域連携の推進に伴う水供給システムにおける生物障害対策の強化に関する研究(平成30年度～令和2年度)
- ・気候変動に伴う水道システムの生物障害等リスク評価とその適応性の強化に向けた研究(令和3年度～令和5年度)

気候変動に伴う水道システムの生物障害等リスク評価とその適応性の強化に向けた研究

課題(気候変動):生物障害発生、水害被害増加等の様々なリスクの発生が懸念
 課題(水道事業):水道施設の老朽化や職員の減少等の中での、水道の公共サービスとしての持続性確保

目的:気候変動に伴う生物障害等リスクに適応した新たな水道システムの提案



検討項目①(水源管理)

- | | |
|---|---|
| <p><u>障害生物発生ポテンシャル評価</u></p> <ul style="list-style-type: none"> カビ臭原因物質、シアノキシン産生藍藻類 (R3-5) 水源での障害生物の存在実態調査(R3-5) 生物障害予測手法(実験)の構築(R4-5) | <p><u>発生予測モデル構築</u></p> <ul style="list-style-type: none"> 統計モデル構築・精度評価 (R3-4) 対象障害生物発生予測モデル構築(R4-5) 気候変動に伴う障害生物発生予測(R4-5) |
|---|---|

検討項目②(浄水場対応)

- | | |
|---|---|
| <p><u>障害生物発生時における分析方法の開発</u></p> <p><u>生ぐさ臭</u></p> <ul style="list-style-type: none"> 分析方法の開発(R3-4) 問題抽出・基準等の検討 (R4-5) <p><u>溶存有機物(障害生物発生)</u></p> <ul style="list-style-type: none"> 分析方法の開発 (R3-4) 有機物量の簡易測定法等の提案 (R4-5) | <p><u>効率的な浄水処理システムの提案</u></p> <p><u>カビ臭</u></p> <ul style="list-style-type: none"> 粉末活性炭の性能評価(R3-4) 効率的な処理方法の検討(R4-5) |
|---|---|

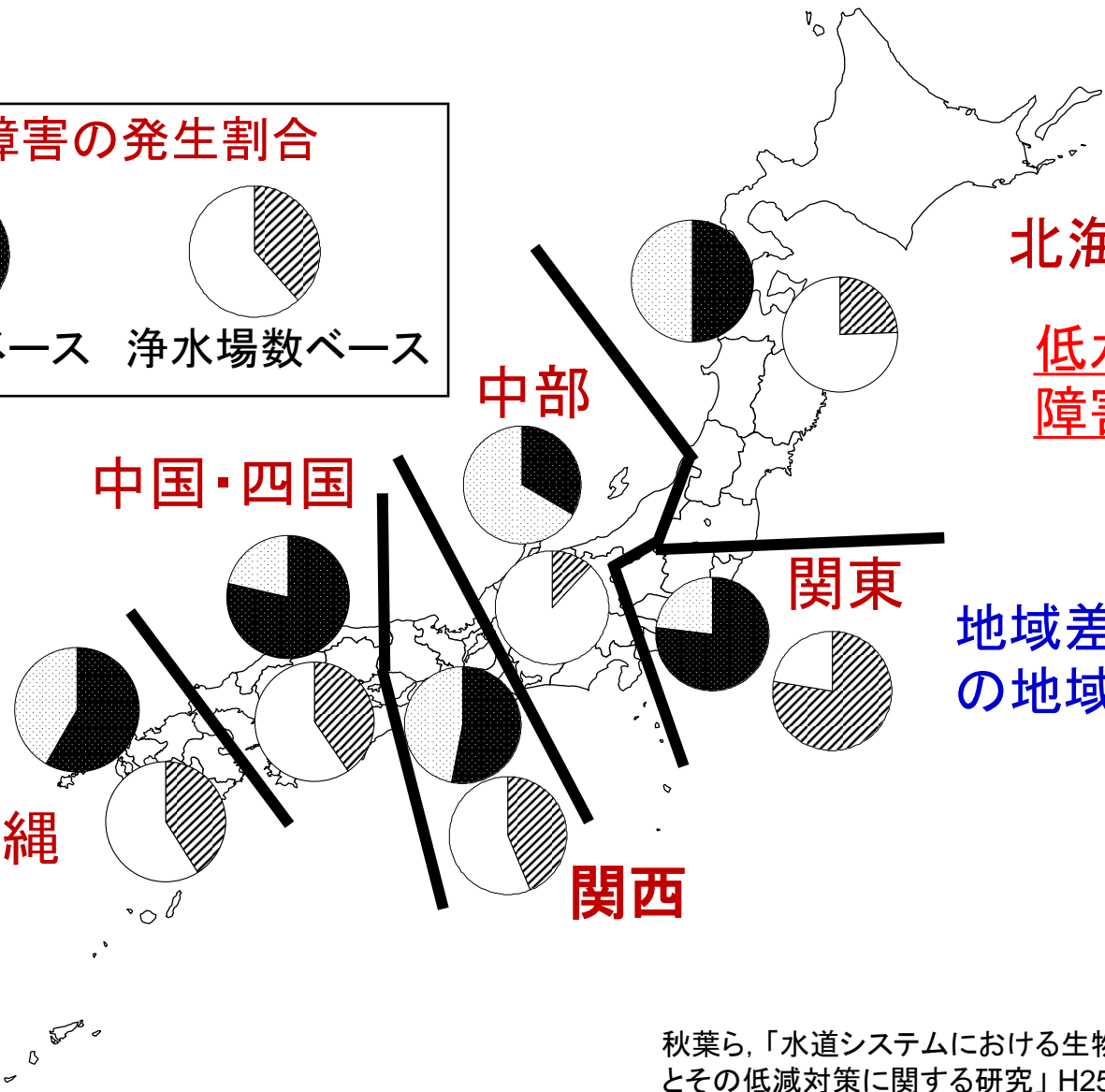
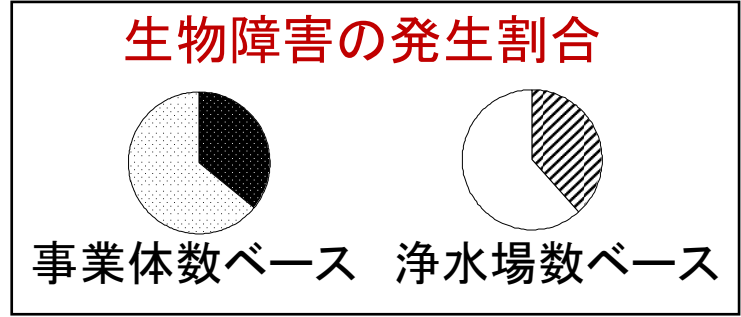
検討項目③(事業者対応)

- 気候変動により生じる生物障害等リスクに対する対応策の検討
- 国内
- 生物障害、水害に対する水道事業者の対策に関する調査(R3-5)
- 国際
- 水安全計画(WHO)の翻訳・公開 (R3-4)
 - 気候変動影響を考慮した水安全計画の運用方法の提案(R4-5)

検討項目④:気候変動に伴う生物障害等リスクに適応した新たな水道システムの提案

- 10年間での生物障害等の発生状況の変化に関する調査+海外における気候変動に適応した水道システムに関する調査(R3-4)
- 気候変動により生じる生物障害等リスクに対する適応可能な水道システムの提案、気候変動適応策ガイドラインの策定(R5)

生物障害発生実態に関するアンケート調査 (H25年度実施)



北海道・東北

低水温地域でも
障害が発生

中部

中国・四国

関東

地域差はあるが、全ての地域で障害が報告

九州・沖縄

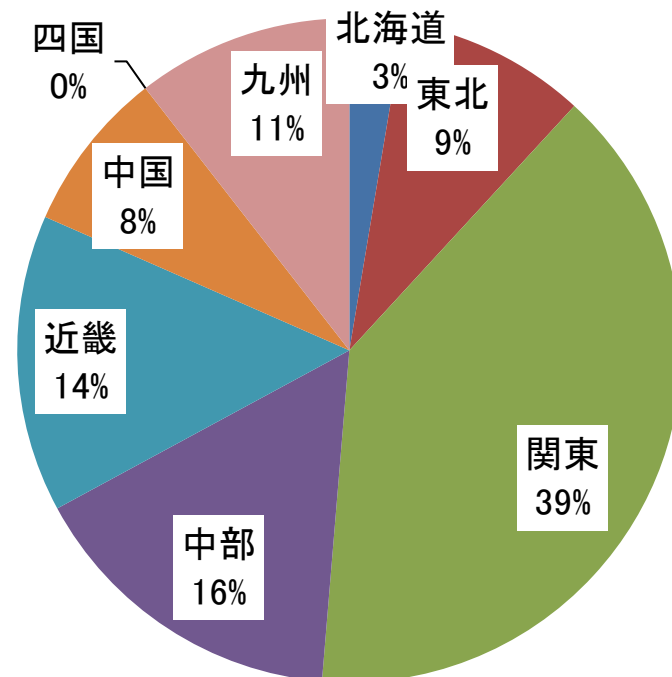
関西

水道におけるカビ臭問題(文献調査)

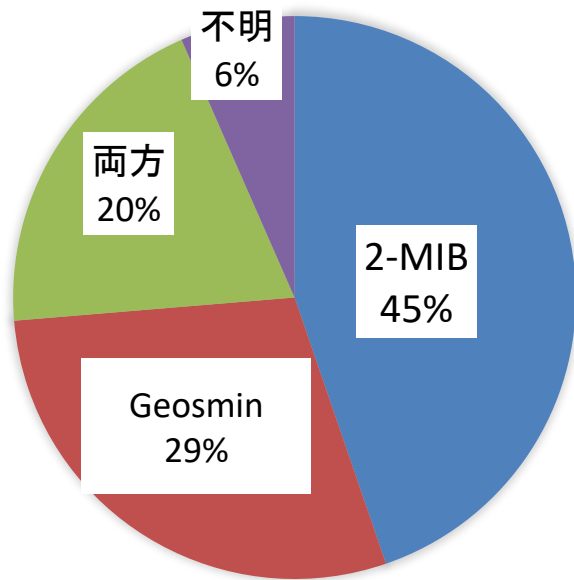
- ・調査期間 平成5年～平成30年(26年間)
- ・調査方法
 - 文献調査
 - ・水道研究発表会講演集
 - ・水道協会雑誌
 - ・日本水環境学会講演集
 - ・「用水と廃水」
 - インターネット
 - ・CiNii Articles
 - ・J-STAGE
 - ・AgriKnowledge
 - ・国会図書館デジタルコレクション
 - ・インターネット検索サイト(Yahoo、Google)

結果(計76事例):カビ臭発生地域

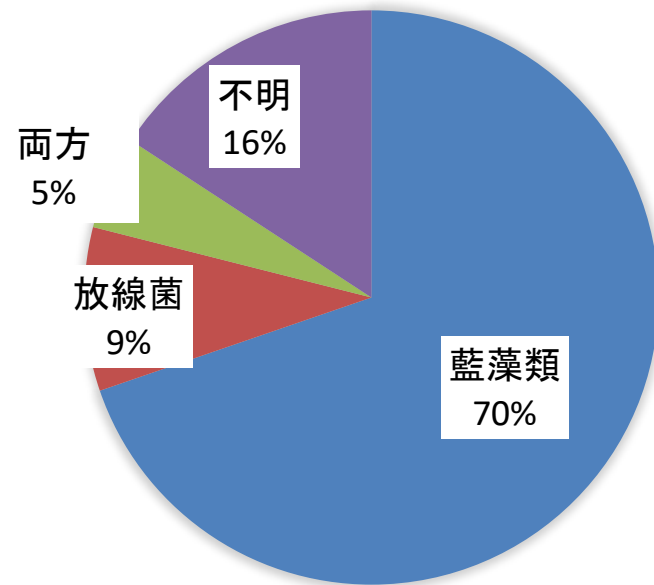
- ・関東が最も多く約40%
ついで中部、近畿が多い。
- ・東北、北海道でも一部発生



水道におけるカビ臭問題(文献調査)



カビ臭原因物質



カビ臭産生生物

カビ臭原因物質

- ・2-MIBの発生が最も多く(45%)、ジェオスミンは29%

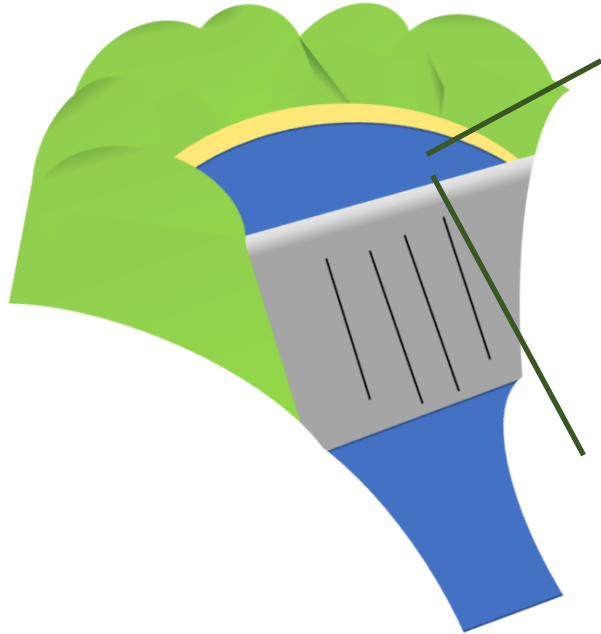
カビ臭原因生物

- ・大部分が**藍藻類**(70%)となっており、放線菌は9%程度、両方が5%

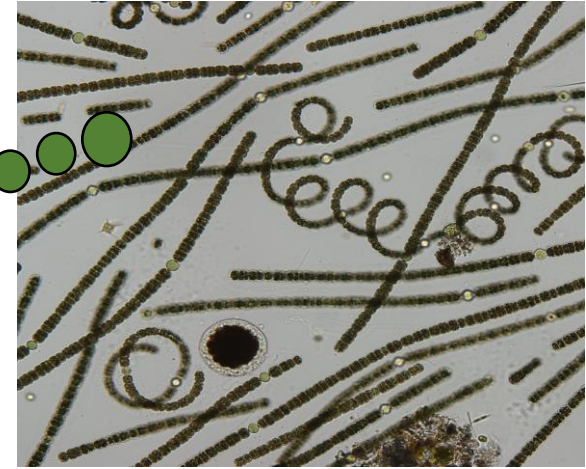
カビ臭原因物質産生藍藻類の 監視強化に向けた取り組み

カビ臭原因物質産生藍藻類の生息状況

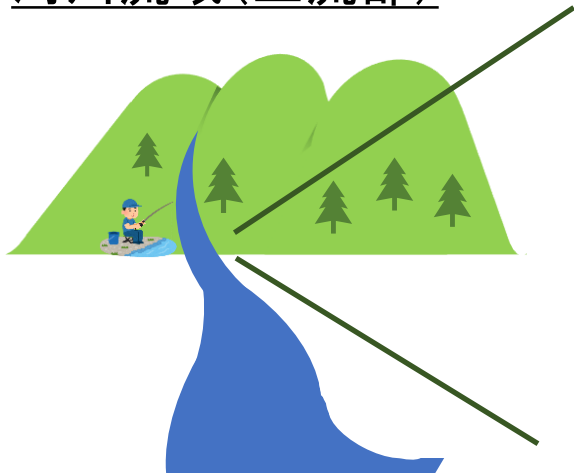
閉鎖性水域(ダム湖など)



浮遊性・底生性
がメイン



河川流域(上流部)



付着性がメイン



浮遊性藻類が問題となる時期

計23件

原因藻類	季節	平均気温(°C)	平均降水量(mm/日)	平均日照時間(時間/日)
<i>Anabaena</i> 属	春~秋	17.3~29.2 (25.6)	0.0~6.1 (3.2)	3.1~9.2 (6.6)
<i>Anabaena</i> 属	冬	2.1	4.6	6.5
<i>Oscillatoria</i> 属	春~秋	10.8~28.3 (22.4)	0.0~7.4 (3.1)	4.1~8.3 (6.1)
<i>Phormidium</i> 属	春~秋	10.8~26.2 (18.0)	0.4~3.6 (2.2)	1.7~8.7 (5.7)

前1週間の平均気温、平均降水量及び平均日照時間を示す、()は平均値

*Anabaena*属: 15°Cから増殖可能、20°C以上が増殖至適温度

*Oscillatoria*属: 増殖温度が10~20°Cと20~30°Cの2つのグループ

*Phormidium*属: 20~25°Cが増殖に適している、10°C以下でも増殖可

付着性藻類が問題となる時期

重要藻類: *Phormidium autumnale*
(*Microcoleus autumnalis*)



多摩川:平成20年10月から確認、平成23年7月に87 ng/Lまで上昇¹⁾

道志川:平成28年度より確認、平成30年7月に54 ng/Lまで上昇²⁾

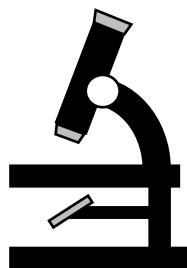
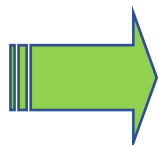
荒川:平成26年7月以降2-MIB濃度上昇、平成27年の**冬季に濃度上昇確認**³⁾

吉野川:平成17年12月頃から確認、夏季に濃度が高くなるが、**冬季にも確認**⁴⁾

夏季に高濃度で確認されるケースが多いが、
冬季でも2-MIB濃度の上昇は確認されている

顕微鏡による藻類監視

定期観察

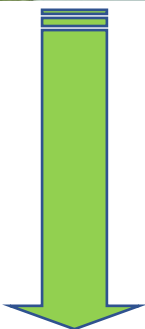


日常監視による水源の状況把握

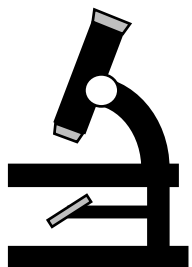


カビ臭原因物質
産生藻類のライブ
ラリーが必要

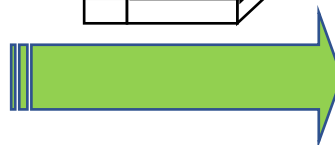
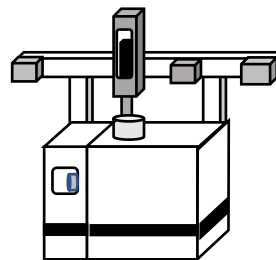
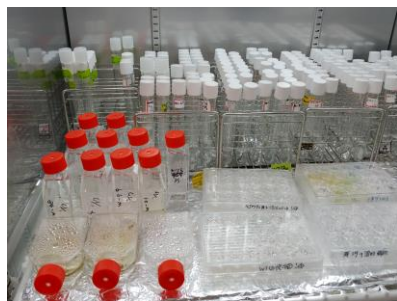
問題発生時(原因究明)
あるいは
特定種の観察



観察・同定



単離培養



観察・原因藻類同定



期間:1ヶ月以上

カビ臭原因物質産生藍藻類のデータベース構築に向けて 全国調査の実施

全国調査 (カビ臭発生水域)

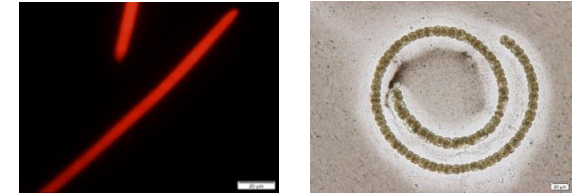


期間: H30年度～R3年度
調査水源: 30水源
(ダム湖、河川、貯水池etc.)

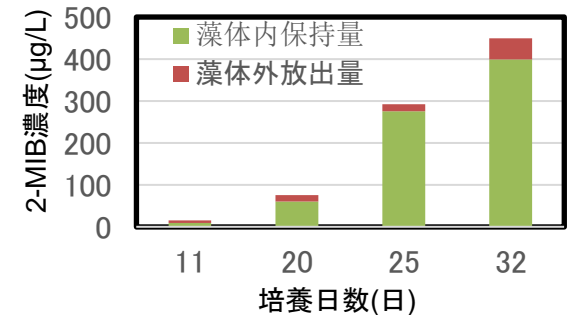
現地調査の様子



形態情報取得



カビ臭原因物質産生能評価



遺伝子検出・配列解析



18種68株のカビ臭原因物質産生株の情報取得に成功!!



カビ臭原因物質産生藻類ライブラリー (写真)



株番号	WILD-2	
属/種	<i>Pseudanabaena limnetica</i>	
旧名	<i>Oscillatoria limnetica</i>	
採取地点		
株種類	単離株	
培養期間 (受入日～撮影日)	2019.4.22 ~ 2019.10.18	
トリコーム	直線状	
栄養細胞	形状	円筒形
	幅 / 節間隔 μm	1.3 ~ 2.3 / 3.5 ~ 8.1
	幅 : 節間隔	1 : 2.21 ~ 5.43
鞘の有無	無	
色	緑色	
蛍光強度 (G励起光)	青 : 緑 : 赤 = 0 : 17 : 144	
遺伝子検出 (PCR) / 臭気検出 (GC-MS)	2-MIB / 2-MIB	
遺伝子情報 (DDBJ登録情報)		
浮遊性 / 付着性	付着性	
その他特徴	トリコームにくびれがあり、先端が角張っている。	



100倍



100倍



200倍



200倍



400倍



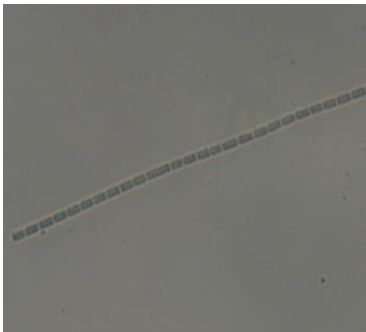
400倍

形態情報, カビ臭発生状況,
 遺伝子情報などを記載
 →研究班で冊子を作成

問題点:カビ臭產生株と非產生株の形態比較

Pseudanabaena cinerera

非產生株
(NIES-4065)

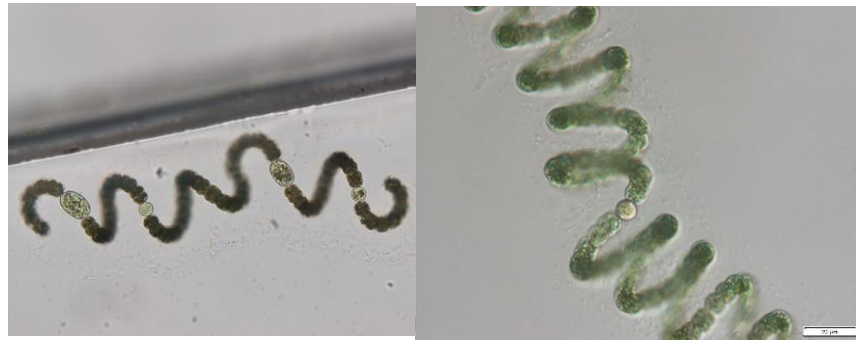


產生株
(NIES-4063)



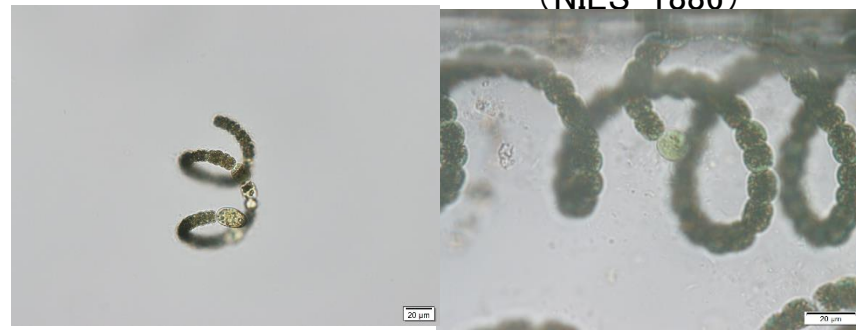
Dolichospermum crassum
(Anabaena crassa)

非產生株
(WILD-49) (NIES-1653)



產生株

(WILD-48) (NIES-1886)



D.planctonicum
(A. planctnica)

非產生株
(分譲-20)



產生株

(分譲-18)



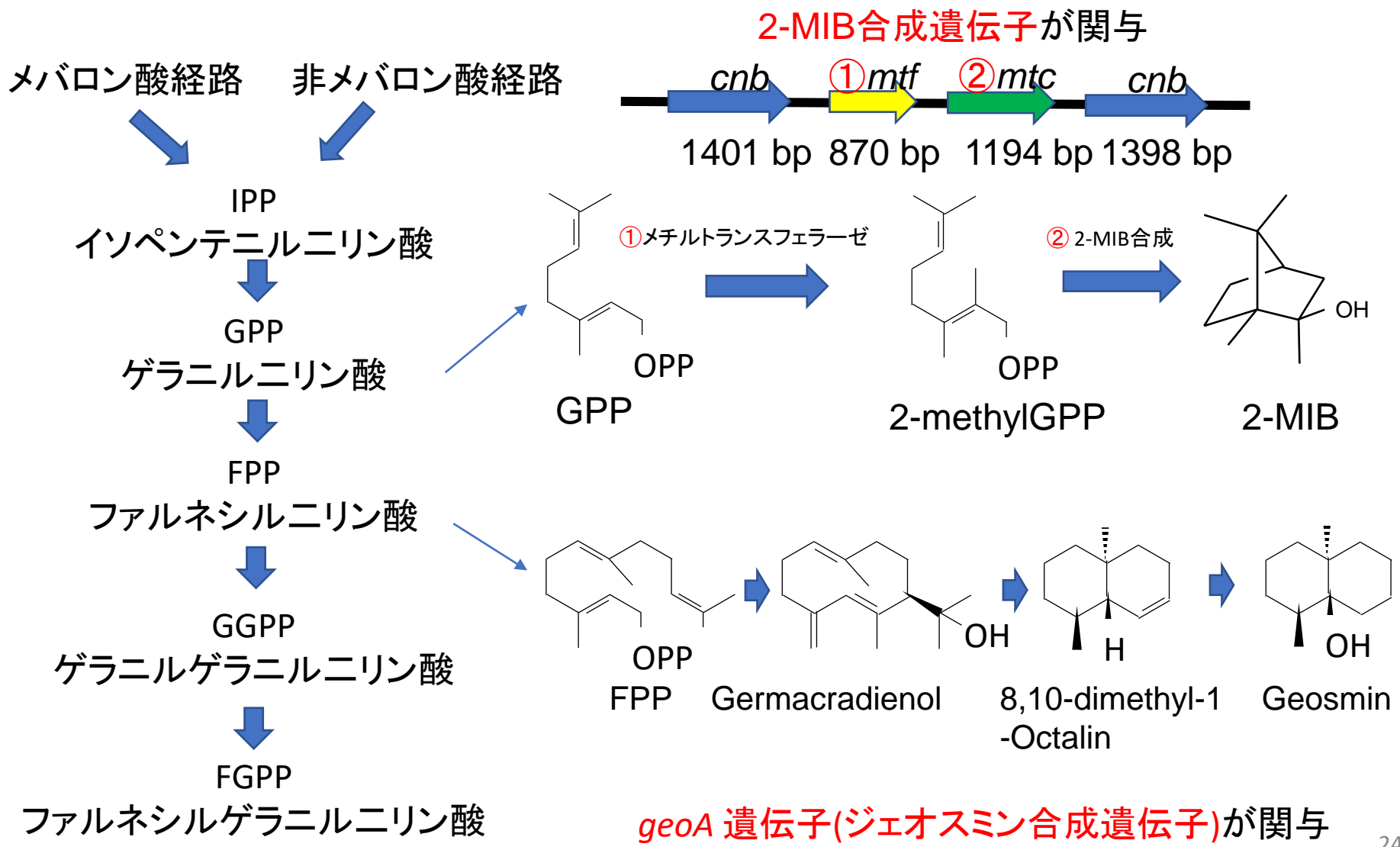
形態的特徴に差異ほとんどなし

→形態情報による現在の判別法でカビ臭產生株の判定は困難
產生株の判断はGC/MCの臭気検出または**遺伝子解析**が必要

参照:江崎ら, 水道協会雑誌, 90(5), 2-12, 2021

カビ臭原因物質の合成経路

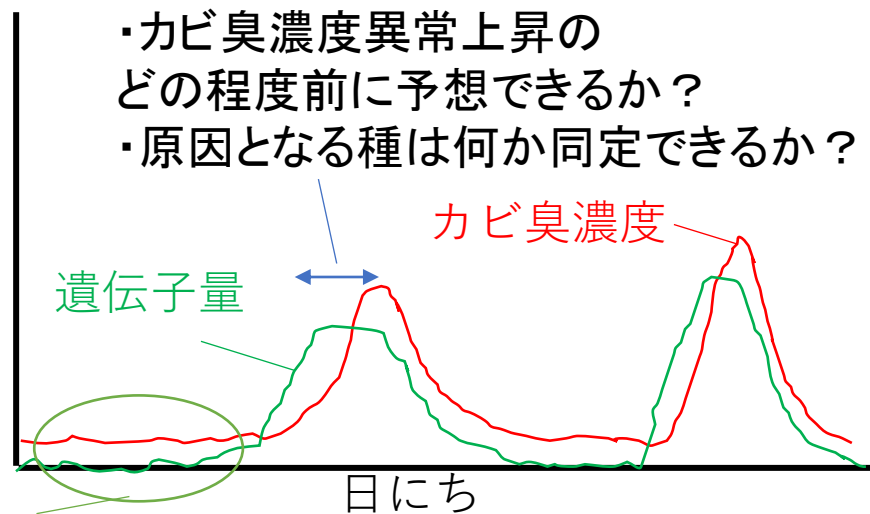
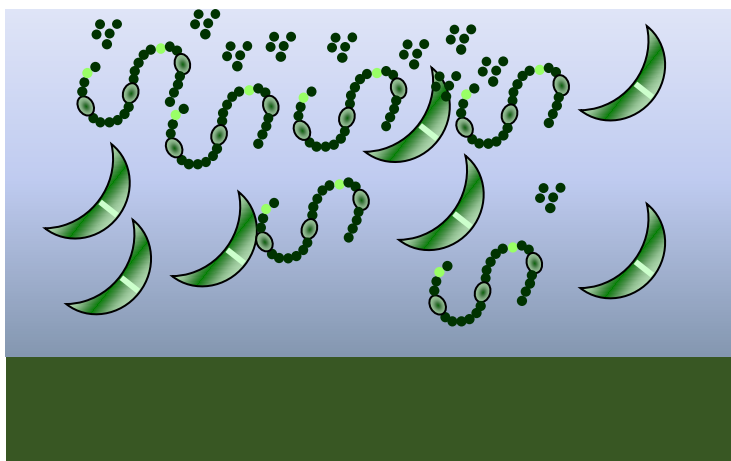
テルペノイドの生合成経路での中間体から合成(藻類の体内で生じている代謝経路)



geoA 遺伝子(ジェオスミン合成遺伝子)が関与

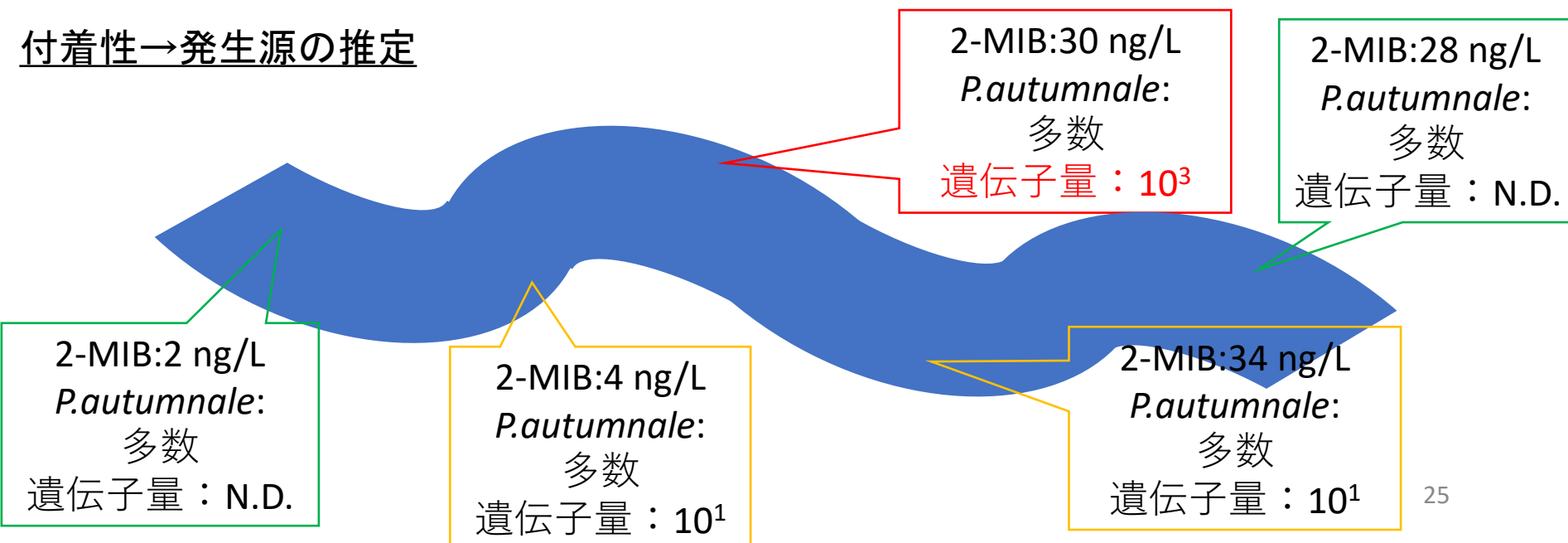
遺伝子検査の将来の展開

浮遊性→発生予測・原因種の同定



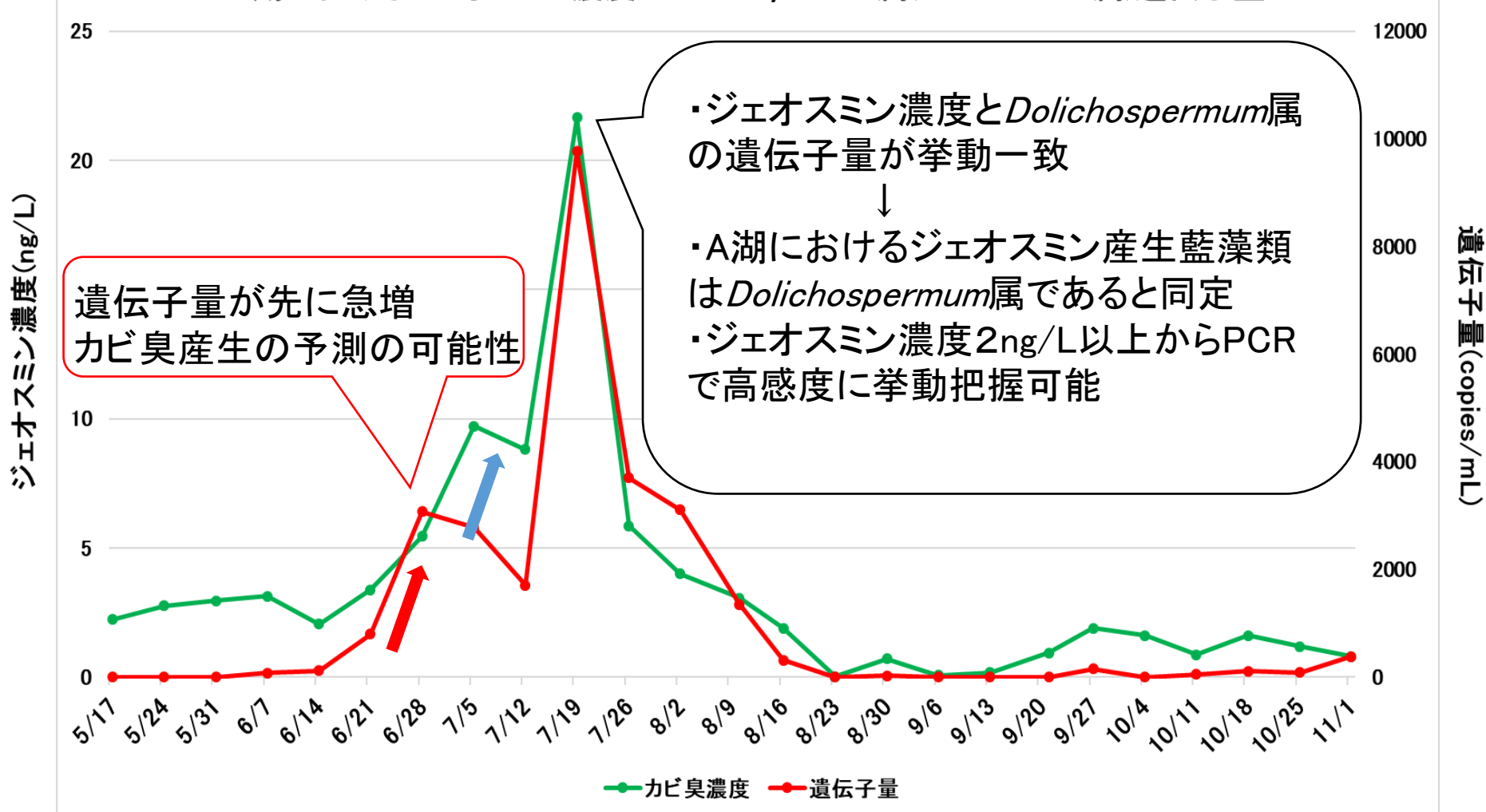
カビ臭を産生しそうな種を把握できるか？

付着性→発生源の推定



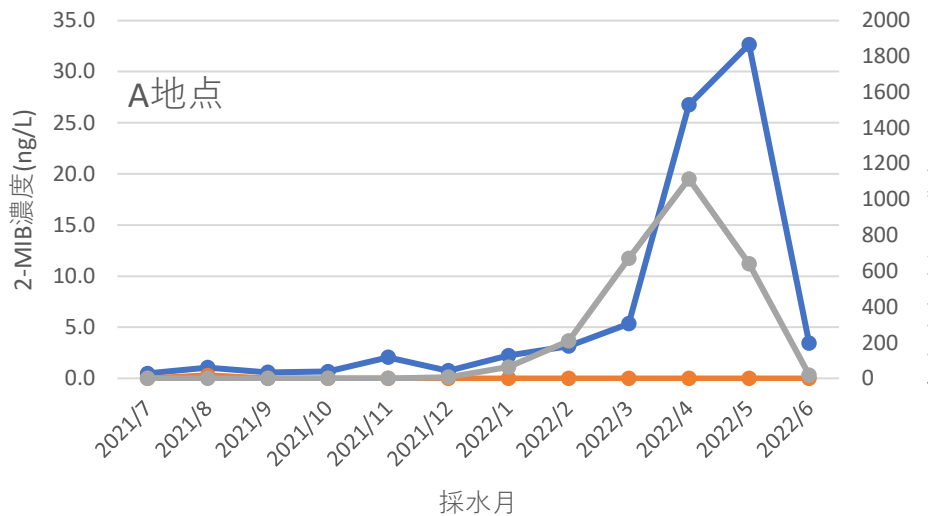
カビ臭原因物質産生藻類の挙動：週ベース

A湖におけるジェオスミン濃度と*Dolichospermum*属(旧:*Anabaena*属)遺伝子量



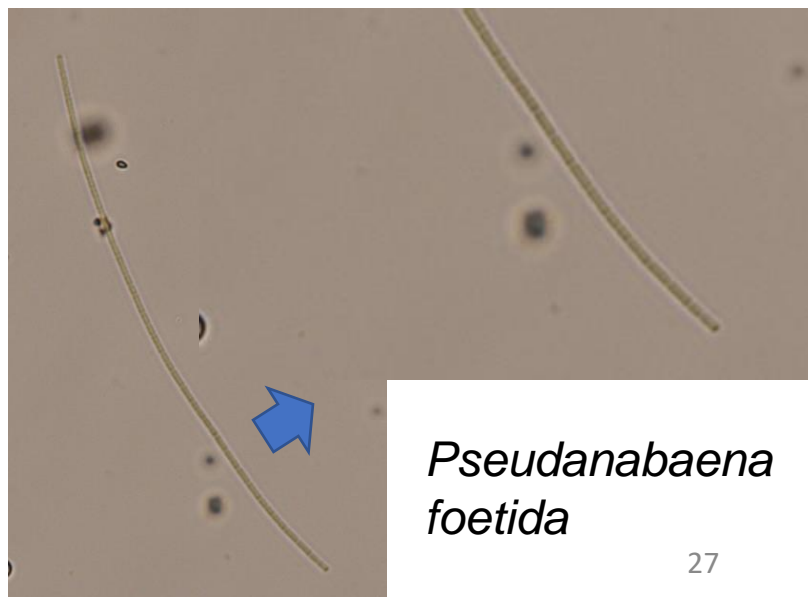
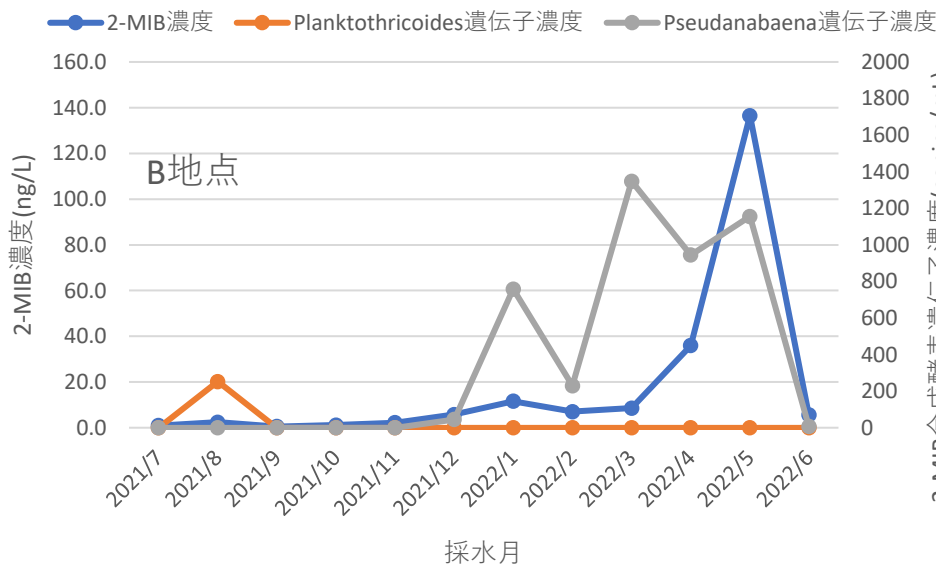
カビ臭原因物質産生藻類の挙動：2-MIB原因藻類

B湖



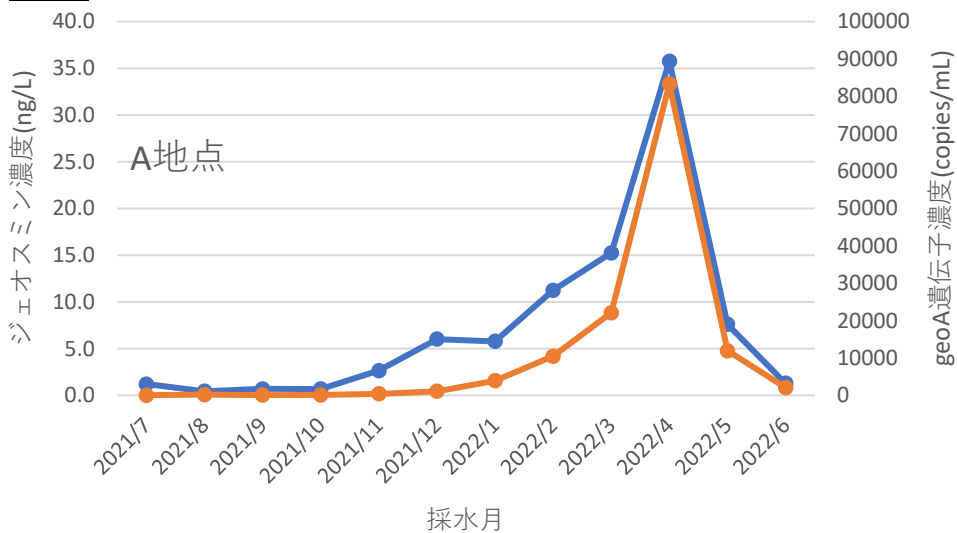
夏季に *Planktothricoides* 属 (*Oscillatoria* 属) の遺伝子が検出
→大きく影響することなかった

12月から5月にかけて *Pseudanabaena* 属 (*Phormidium* 属) の遺伝子が検出
→2-MIB濃度に影響



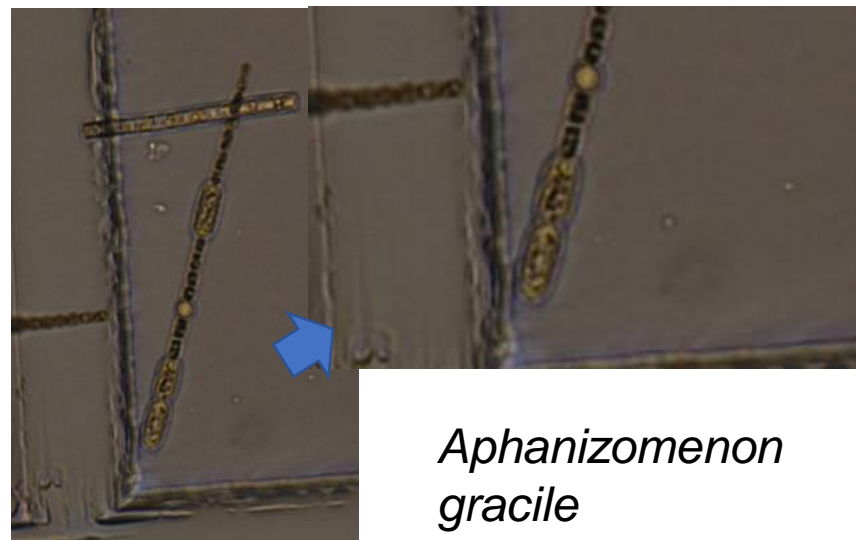
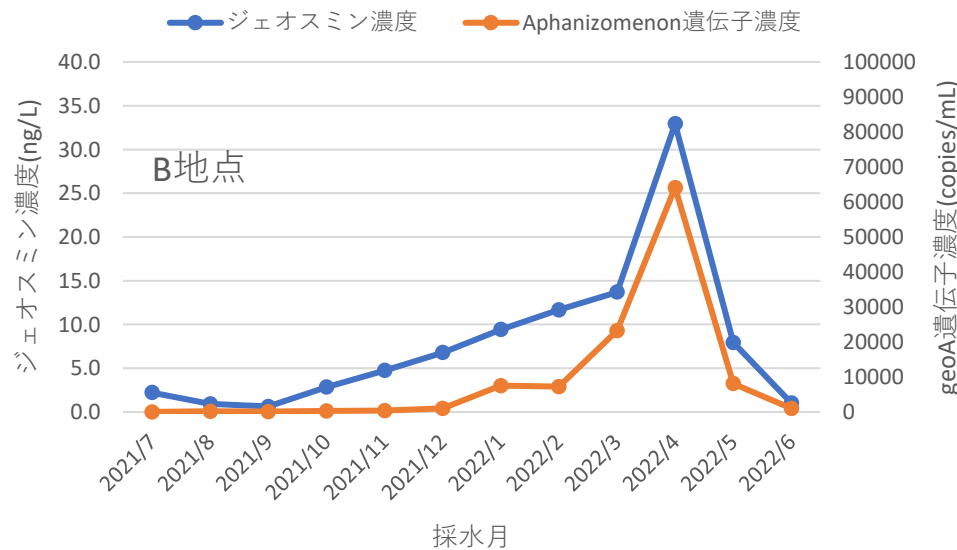
カビ臭原因物質産生藻類の挙動：ジェオスミン原因藻類

B湖



*Dolichospermum*属(*Anabaena*属)の遺伝子は検出されず

毎月 *Aphanizomenon*属の遺伝子が検出
→メインは12月から5月でジェオスミン濃度に影響



Aphanizomenon gracile

まとめ

カビ臭原因物質産生藍藻類が問題となる時期

- ・産生種ごとに生育可能な温度特性が異なっており、冬季でも生育、カビ臭を産生可能な種が存在する

カビ臭原因物質産生藍藻類のデータベース構築

- ・日本全国でのおおよそ問題となる藻類のライブラリーの作成に成功した

カビ臭原因物質産生藍藻類の監視強化

- ・同一の種であってもカビ臭原因物質の産生株、非産生株が存在し、形態のみでの判断が困難
- ・PCRをベースとした監視手法がカビ臭原因物質産生藍藻類の簡易同定・挙動把握に有用であることを示した

粉末活性炭処理によるカビ臭 原因物質除去に関する検証

粉末活性炭処理の現状と課題

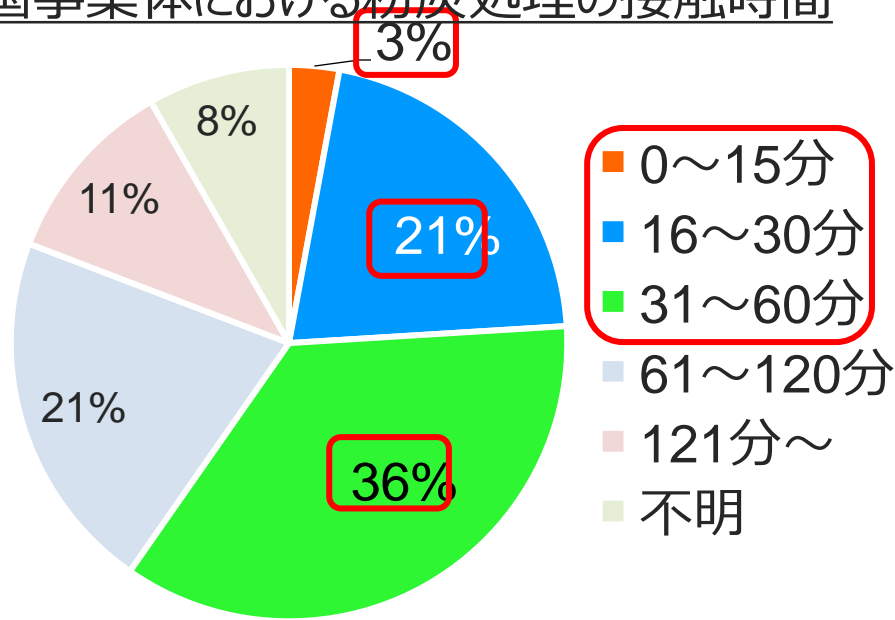
粉末活性炭処理の現状

水道施設設計指針
「十分な処理効果を得るには、1時間
程度の接触時間を確保」



6割の事業体で接触時間が1時間以内

全国事業体における粉炭処理の接触時間



図「水道事業における高度浄水処理の導入実態及び導入検討等に関する技術資料」より

粉末活性炭処理の課題

既往研究：原水中の溶存有機物(DOM)によりカビ臭原因物質の除去率低下(平衡吸着)を確認※松井 et al, 2018

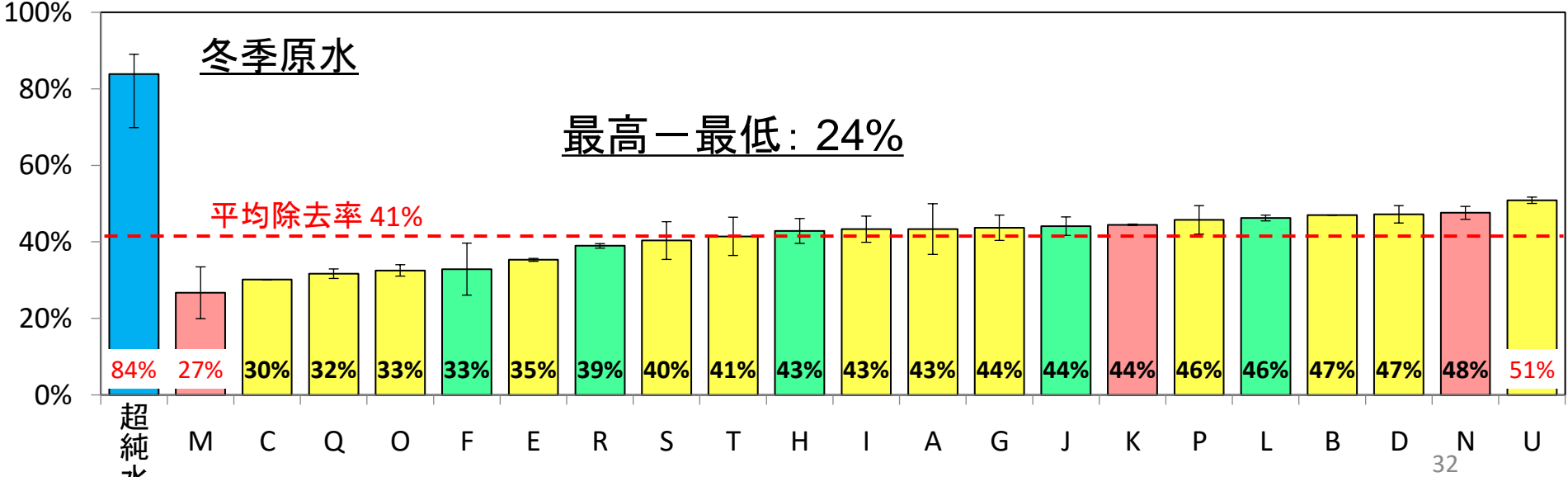
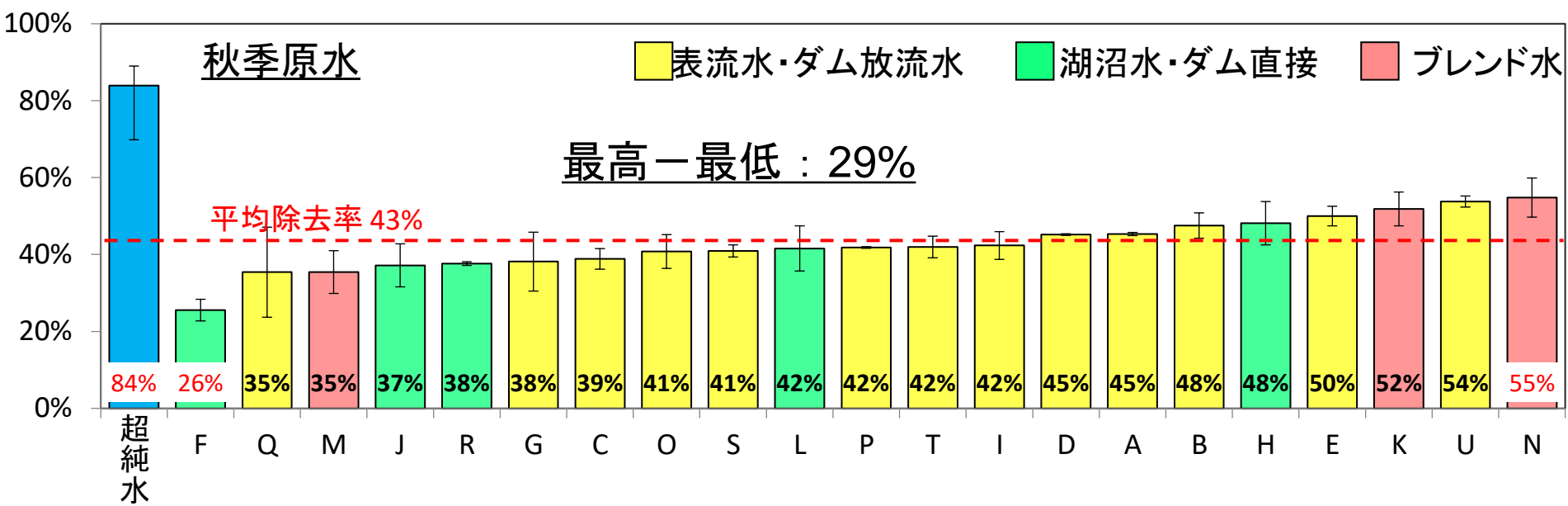
吸着競合物質は分子量230Da以下でUV260の吸光特性を有すると推定※Matsui et al, 2013



短時間接触で除去率はどの程度？原水水質の影響は？

浄水場原水を用いた2-MIB吸着試験を実施

吸着競合成分による2-MIB除去率の低下



参照：井上ら，水道協会雑誌，89(6)，2-11，2020

溶存有機物指標との関係性評価

測定項目

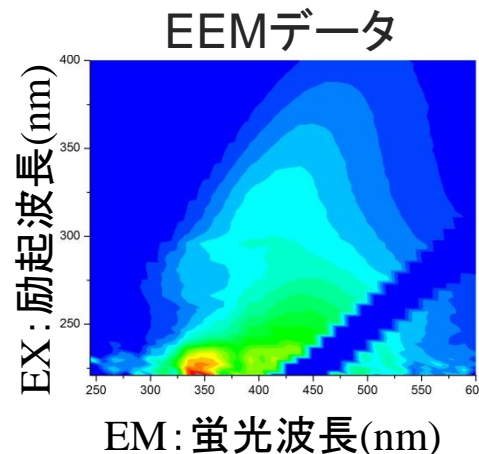
- 全有機炭素(TOC)：有機物の総量
- 紫外線吸光度(UV254)：不飽和結合を有する有機物
- 3次元蛍光分析(EEM)：物質の蛍光特性を利用して、蛍光性溶存有機物を検出

EEM-PARAFAC解析

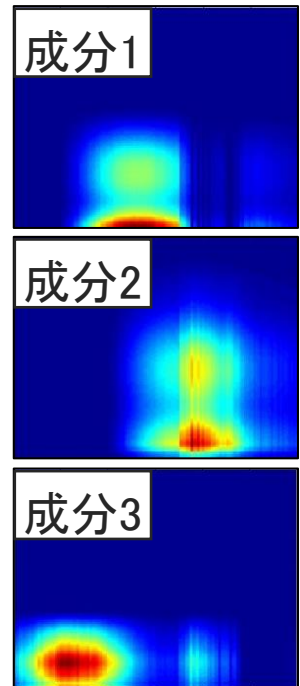
EEMデータから得られた多成分の重なり合ったピークを主要成分に分離



ピーク位置から成分同定

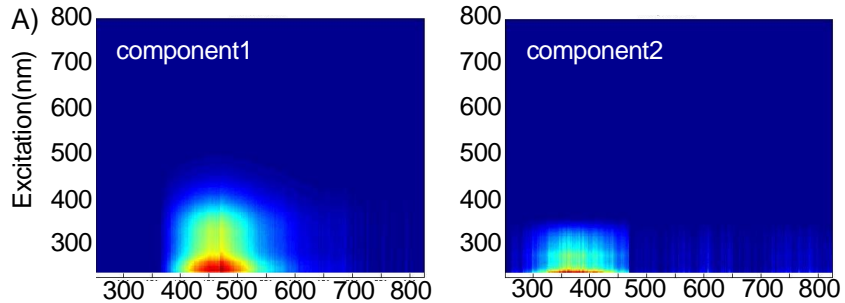


主要成分に分離

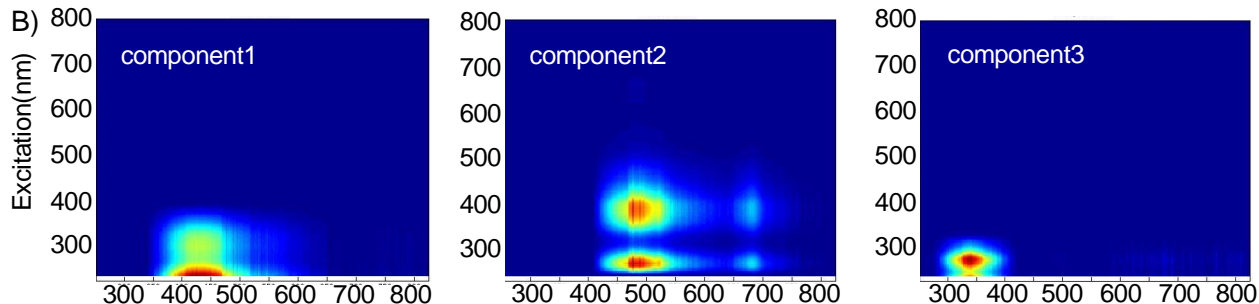


溶存有機物指標との関係性評価

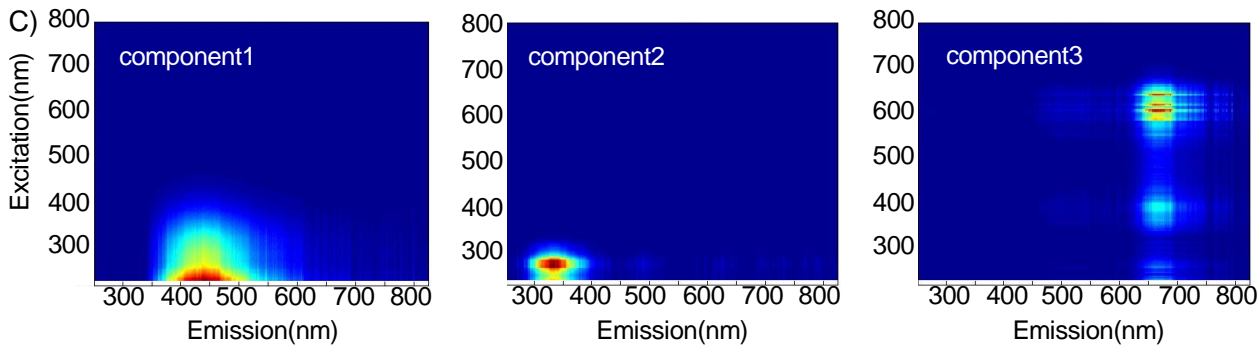
A浄水場



B浄水場



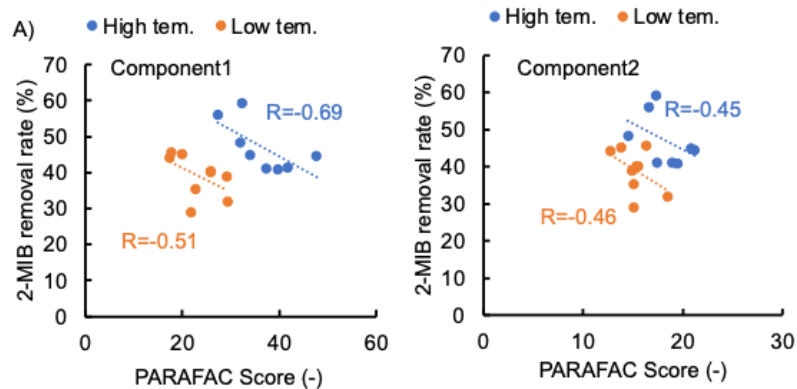
C浄水場



水源ごとに有機物の特性が異なる

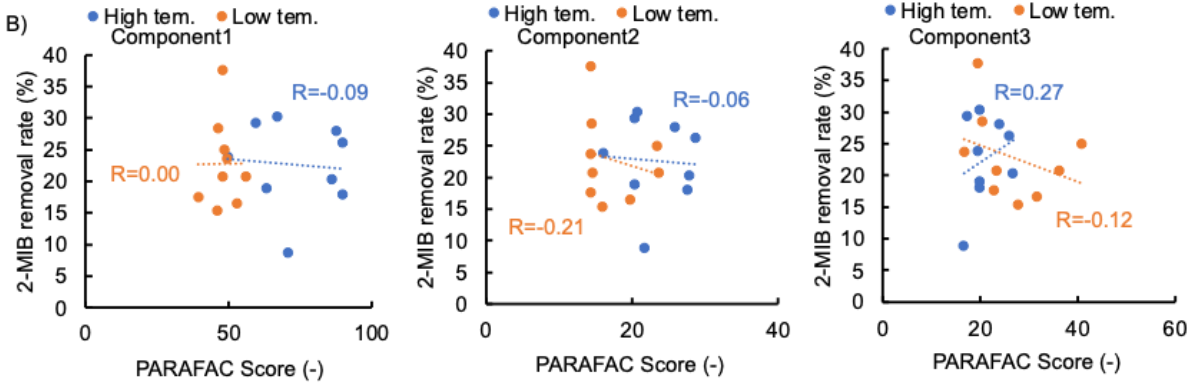
溶存有機物指標との関係性評価

A浄水場



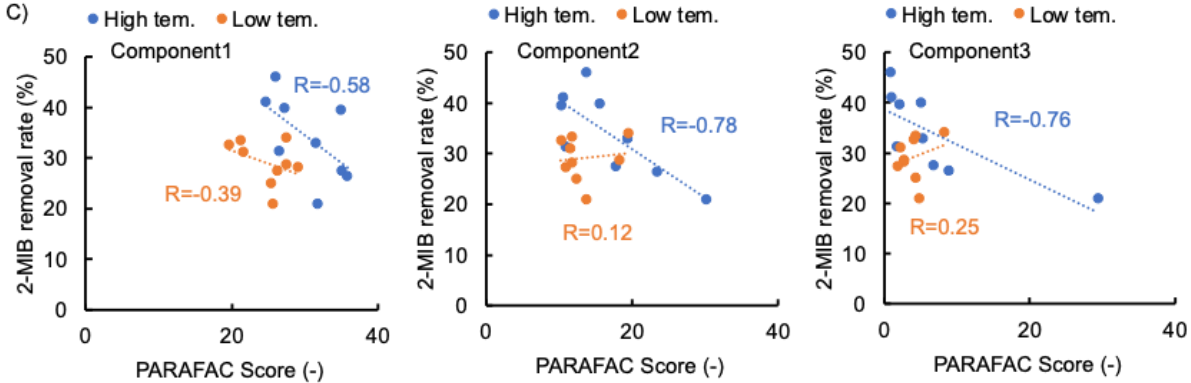
水源ごと、季節ごとに
吸着競合影響の度合い、
関連する有機物が異なる

B浄水場



青 : 高水温期
オレンジ : 低水温期

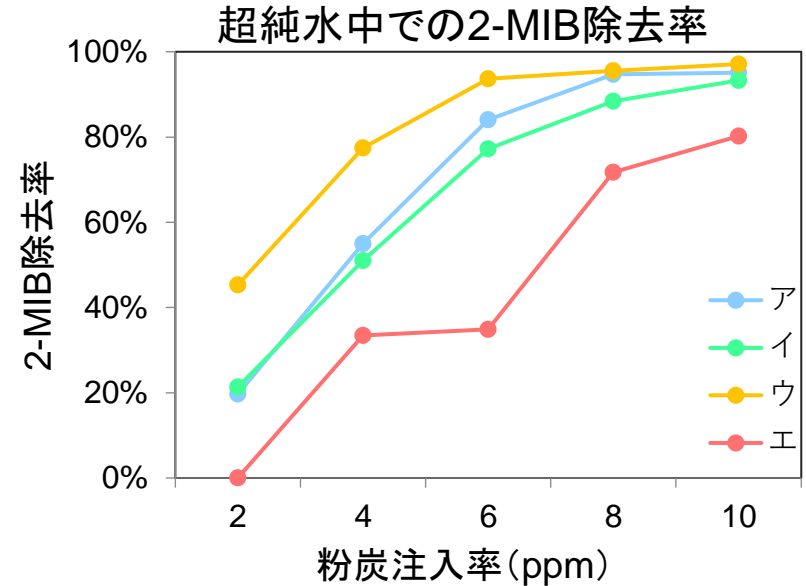
C浄水場



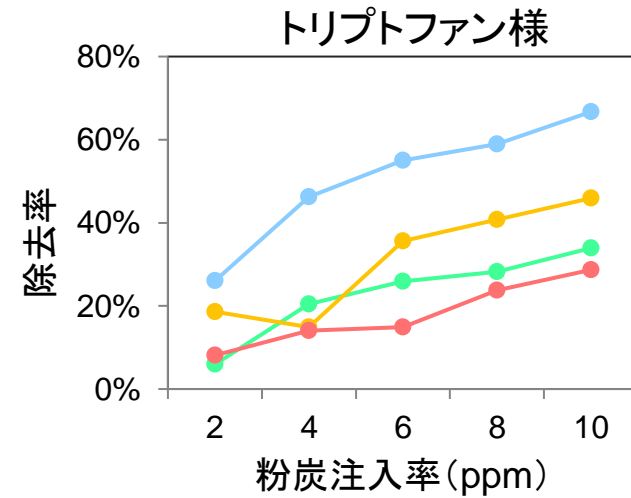
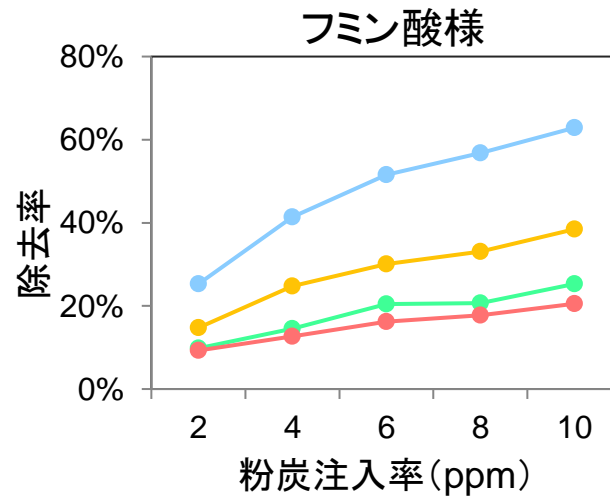
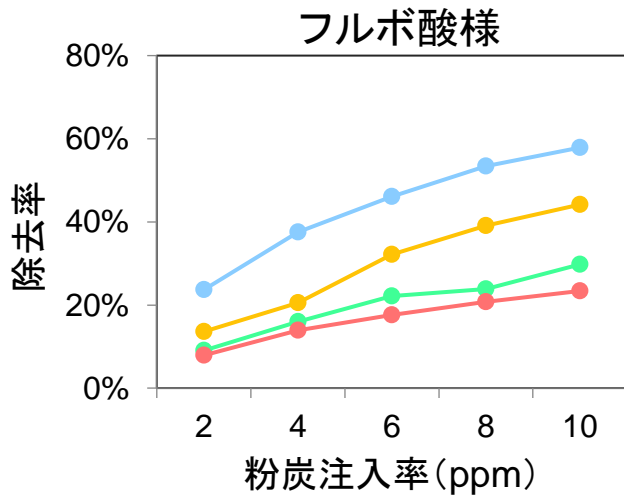
粉炭種を変えた吸着実験の実施

粉炭パラメータ

記号	材質	粒径 [μm]	Micropore (0.3~2nm) [cm ³ g ⁻¹]	Mesopore (2~50 nm) [cm ³ g ⁻¹]	Macropore (50nm~) [cm ³ g ⁻¹]	BET 表面積 [m ² g ⁻¹]
ア	木質	9	0.40 (35%)	0.60 (53%)	0.14 (12%)	955
イ	木質	15	0.47 (83%)	0.08 (14%)	0.02 (3%)	1,163
ウ	植物	12	0.46 (88%)	0.05 (10%)	0.01 (2%)	1,136
エ	石炭	23	0.39 (78%)	0.10 (20%)	0.01 (3%)	913

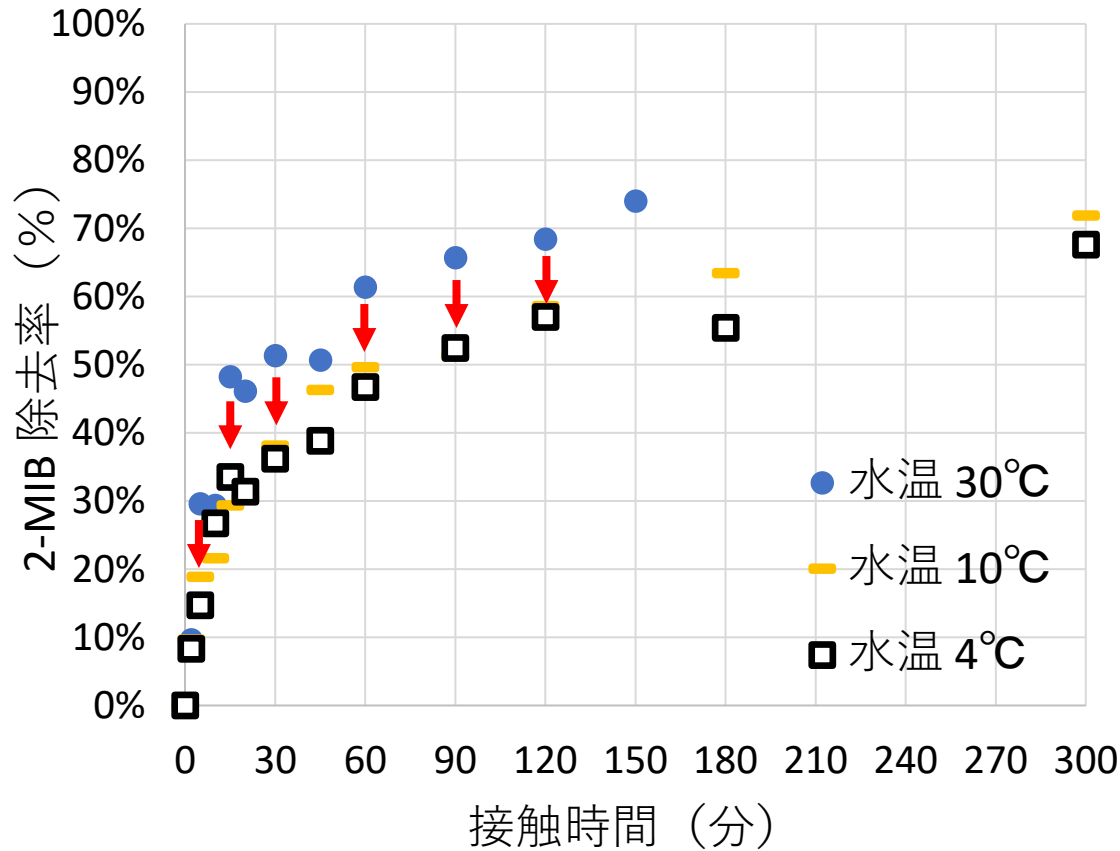


原水(C)の有機物成分除去率

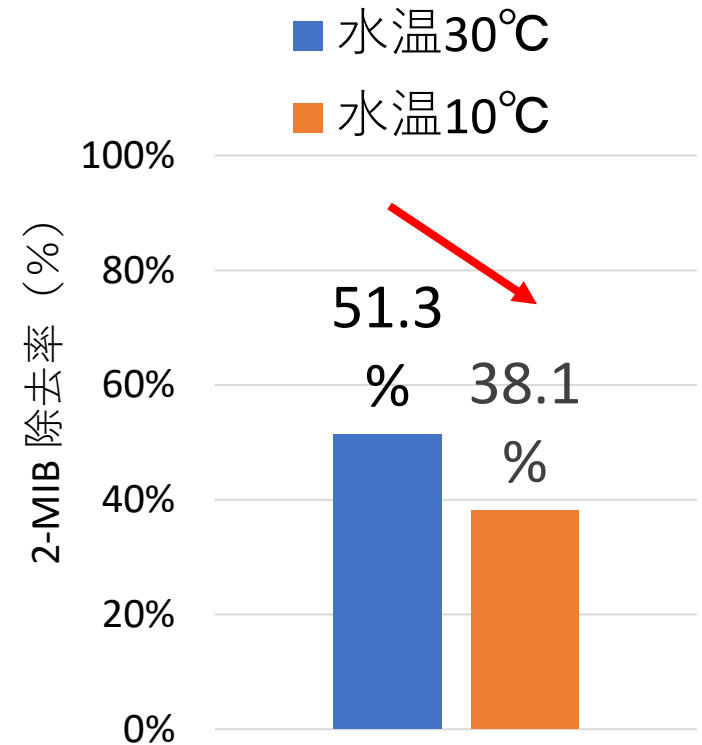


2-MIB除去 ⇒ 粉炭(ウ) 有機物成分除去 ⇒ 粉炭(ア)

水温変化が粉炭処理に与える影響



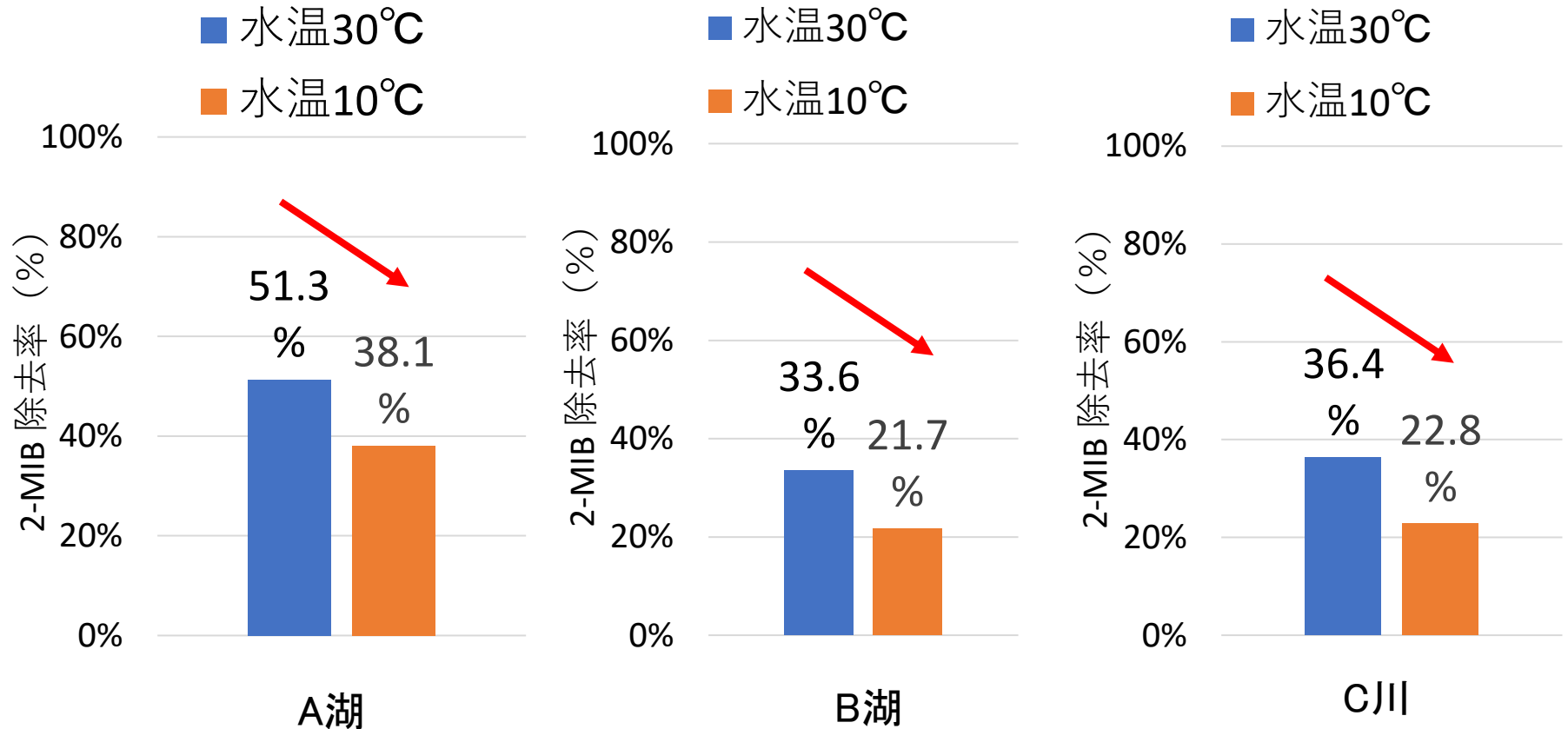
抜粋: 粉炭処理30分



粉炭処理 (2-MIB濃度:100 ng/L, 注入率:10 ppm, 木質系粉炭)

水温低下により、除去率が低下

水温変化が粉炭処理に与える影響：水源の違い



粉炭処理 (2-MIB濃度:100 ng/L, 注入率:10 ppm, 木質系粉炭, 30分接触時間)

水温低下による除去率低下が3つの水源で確認

まとめ

粉末活性炭処理に対する水源水質の影響

- ・21浄水場での調査の結果、水源ごとに共存有機物による影響度合いが異なることが明らかとなった
 - ・3次元蛍光分析を用いたモニタリングの結果、水源ごと、季節ごとに共存有機物による影響度合い、関連する有機物が異なることが明らかとなった
 - ・粉炭種ごとに除去効果がある有機物の特性が異なることを示した
 - ・水温低下に伴い、除去率が低下することを示した
- 各水源試料を用いて、使用する粉末活性炭の除去特性を理解する必要がある

ご清聴ありがとうございました

〈謝辞〉紹介した研究の一部は、厚生労働科学研究費(健康安全・危機管理対策総合研究事業, H30-健危-一般-004, 21LA1004)で行われた