

# 琵琶湖を水源とする浄水場における、かび臭を中心とした近年の生物障害

京都市上下水道局  
水道部新山科浄水場担当係長  
横井貴大



## 琵琶湖について



京都市市街地の浄水場の概要



京都市における生物障害



まとめ



- 面積が669km<sup>2</sup>と、日本最大の湖
- 約400万年前にできた、世界で約20しかない古代湖

- 最小幅を境に、南湖と北湖に分けられる。
- 南湖：小さく浅い（貯水量2億m<sup>3</sup>、水深平均4m）
- 北湖：大きく深い（貯水量273億m<sup>3</sup>、水深平均43m）
- 湖面標高：大阪湾の干潮位から87m
- 流出先：瀬田川と琵琶湖疏水のみ

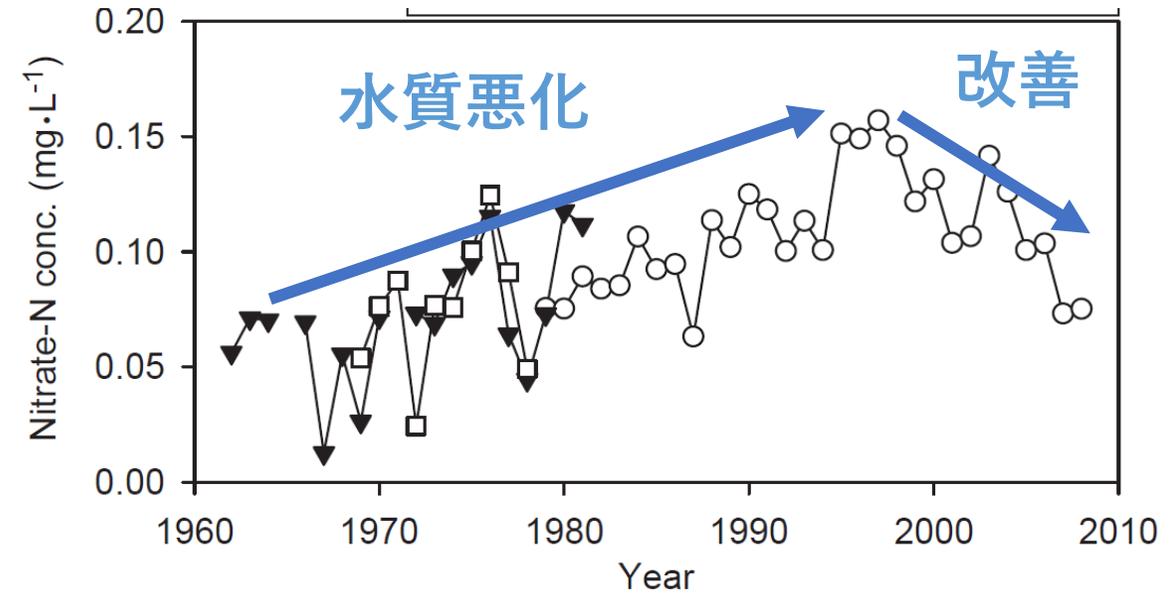
出典：滋賀県HP (<https://www.pref.shiga.lg.jp/ippan/kankyoshizen/biwako/gaiyou.html>)

琵琶湖は、琵琶湖・淀川流域に住む約1,450万人の水道水源である。

## 南湖における水質の変遷

- 1930年代までは清澄（貧栄養）
- 高度経済成長期に水質悪化（富栄養化）
- 1980年代以降、保全再生活動を実施
- 近年水質は改善傾向

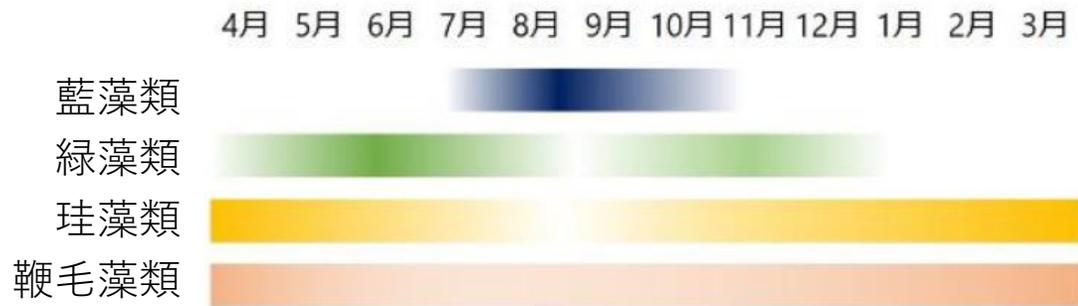
## 南湖における硝酸態窒素



出典：早川ら、2012「複数の定期調査データを用いた統合的な解析による琵琶湖における全リン、硝酸態窒素濃度およびいくつかの水質項目の長期変化」

- 琵琶湖では、多くの種類（数百種程度）の植物プランクトンが確認されている。
- 季節ごとにも変動するとともに、年代ごとにも変遷している。
- 中には、浄水処理障害を引き起こす種もいる。

## 季節ごとの増減の大まかな傾向

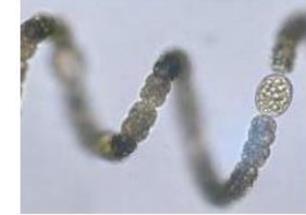


## 南湖でよく観察される種と浄水処理障害の例

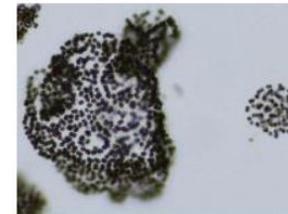
ウログレナ：生ぐさ臭



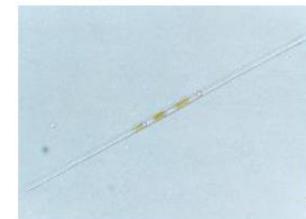
アナベナ：かび臭



ミクロキスティス：  
ろ過漏出



シネドラ：ろ過閉塞



出典：大津市HP

<https://www.city.otsu.lg.jp/soshiki/080/2812/g/suishitsu/1452047722825.html>

## 南湖での植物プランクトンの変遷

- '30年代までは、生物量は少ない
- '60年代、生物量の顕著な増加
- '77年に赤潮、'83年にアオコが発生
- '90年代以降、減少から横ばい傾向

水の華（植物プランクトンが異常発生して、水面に集積する現象）

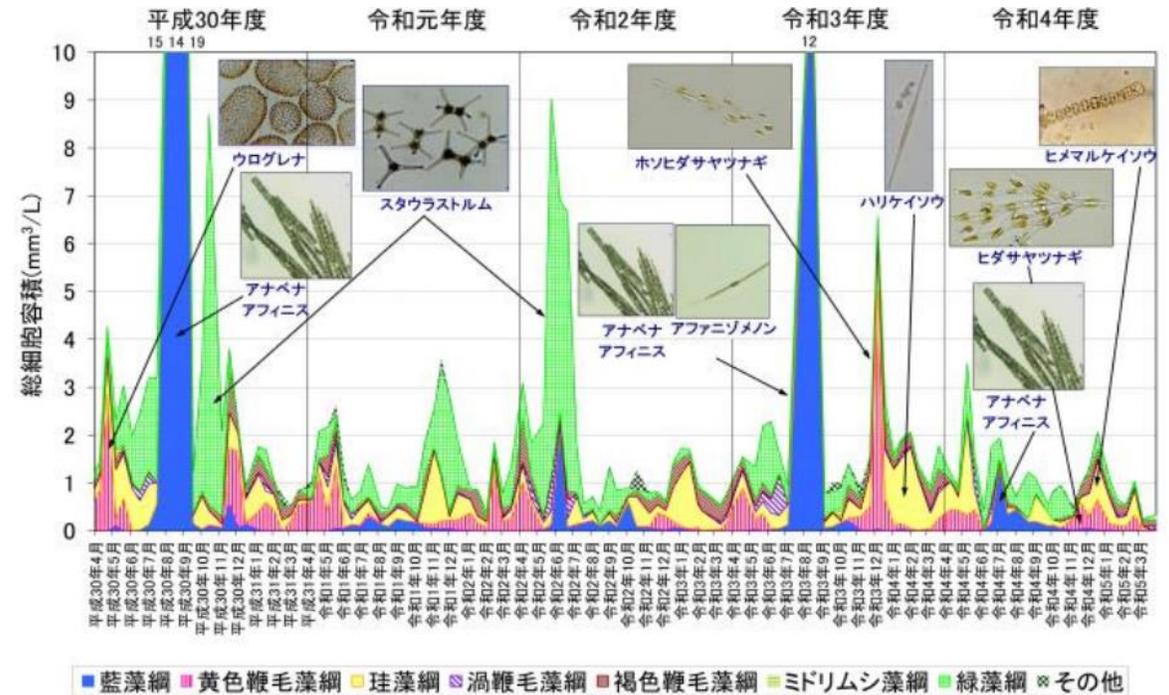
淡水赤潮



アオコ



## 2018年～2022年の南湖での植物プランクトン総細胞容積

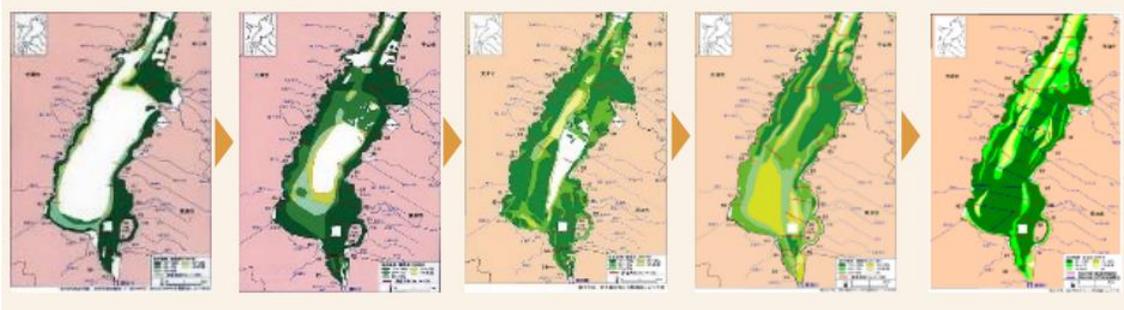


出典：  
滋賀の環境2023  
滋賀県琵琶湖環境科学研究センターHP  
<https://www.lberi.jp/investigate/plankton/planktoninfo>

- 1994年に取水制限を伴う大渇水が発生し、その後、南湖で水草が繁茂
  - 2019年及び2020年は全層循環\*が未完了で、冬季に北湖低層がほぼ無酸素状態
- \*琵琶湖の水が表層から底層まで循環し、低層まで酸素が行き渡る現象

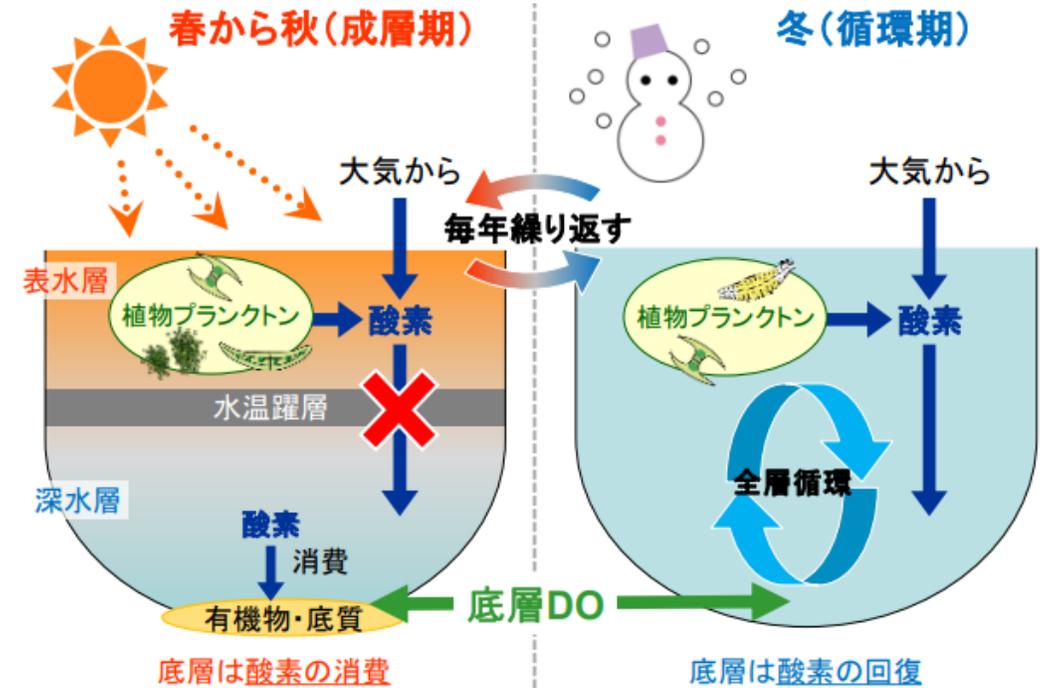
## 南湖の水草群落面積の推移

1997年      2002年      2007年      2013年      2019年



出典：  
滋賀県2023、MLGs評価報告書「シン・びわ湖なう2023」  
滋賀県2022、第2期琵琶湖保全再生計画の推進状況について

## 全層循環のメカニズム

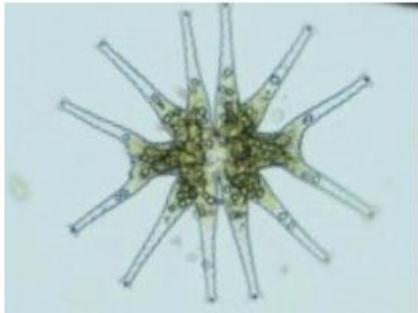


水草の繁茂や、全層循環の未完了など、近年、水環境が変化している。

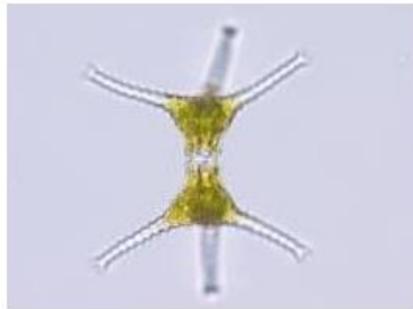
- 2011年：緑藻類ミクラステリアスが初観察（2016年に大量発生）
- 2012年：湖底での付着性藍藻類の繁茂、スタウラストルムの大量発生
- 2018年：アナベナが大量発生し、アオコの発生が過去最大を記録

## 近年大量発生した大型の植物プランクトン

ミクラステリアス

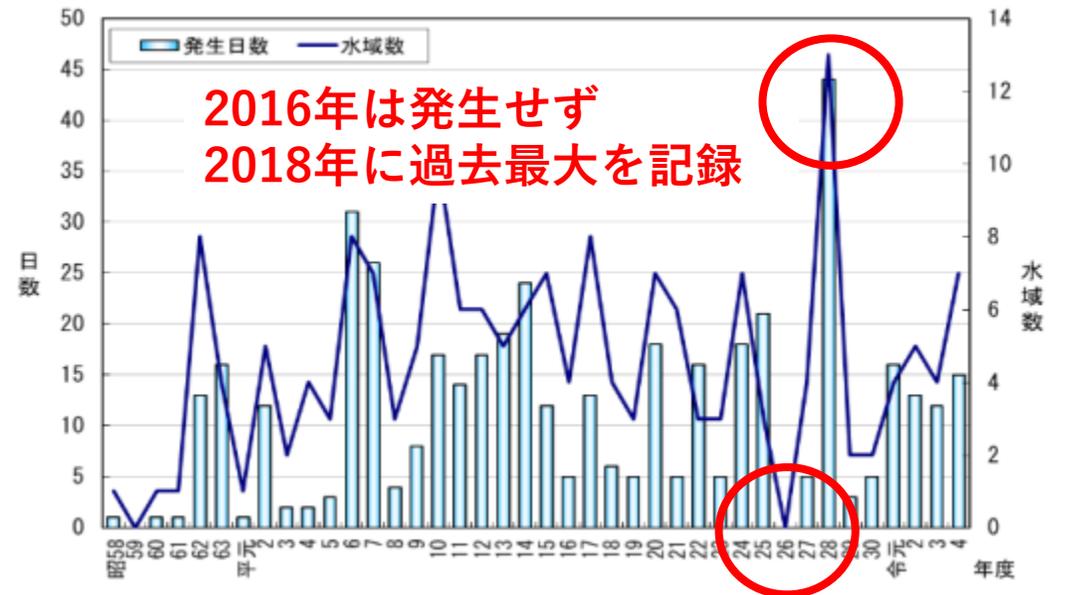


スタウラストルム



出典：滋賀の環境2023、大津市HP  
<https://www.city.otsu.lg.jp/soshiki/080/2812/g/suishitsu/1452047722825.html>

## アオコ発生日数及び水域数の経年変化



近年、琵琶湖の水環境の変化のほか、植物プランクトンの生物相も変化している。そのため、植物プランクトンによる浄水処理障害も、発生状況の変化がみられる。



琵琶湖について



**京都市市街地の浄水場の概要**

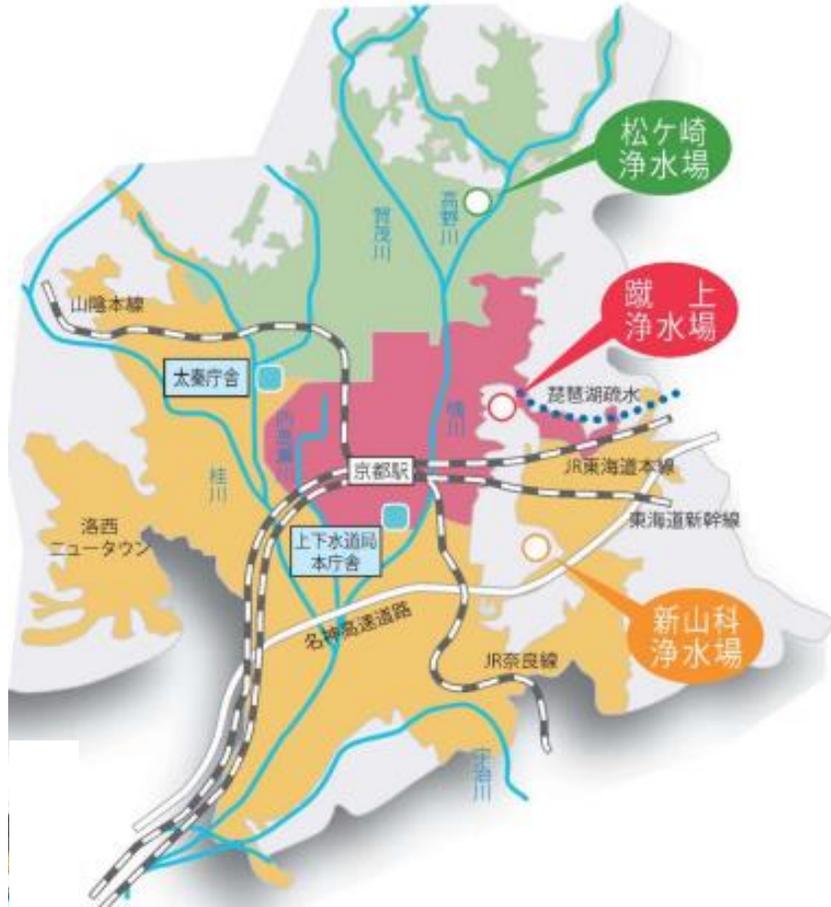


京都市における生物障害



まとめ

京都市には、市街地に3浄水場、山間地域に18浄水場を有している。



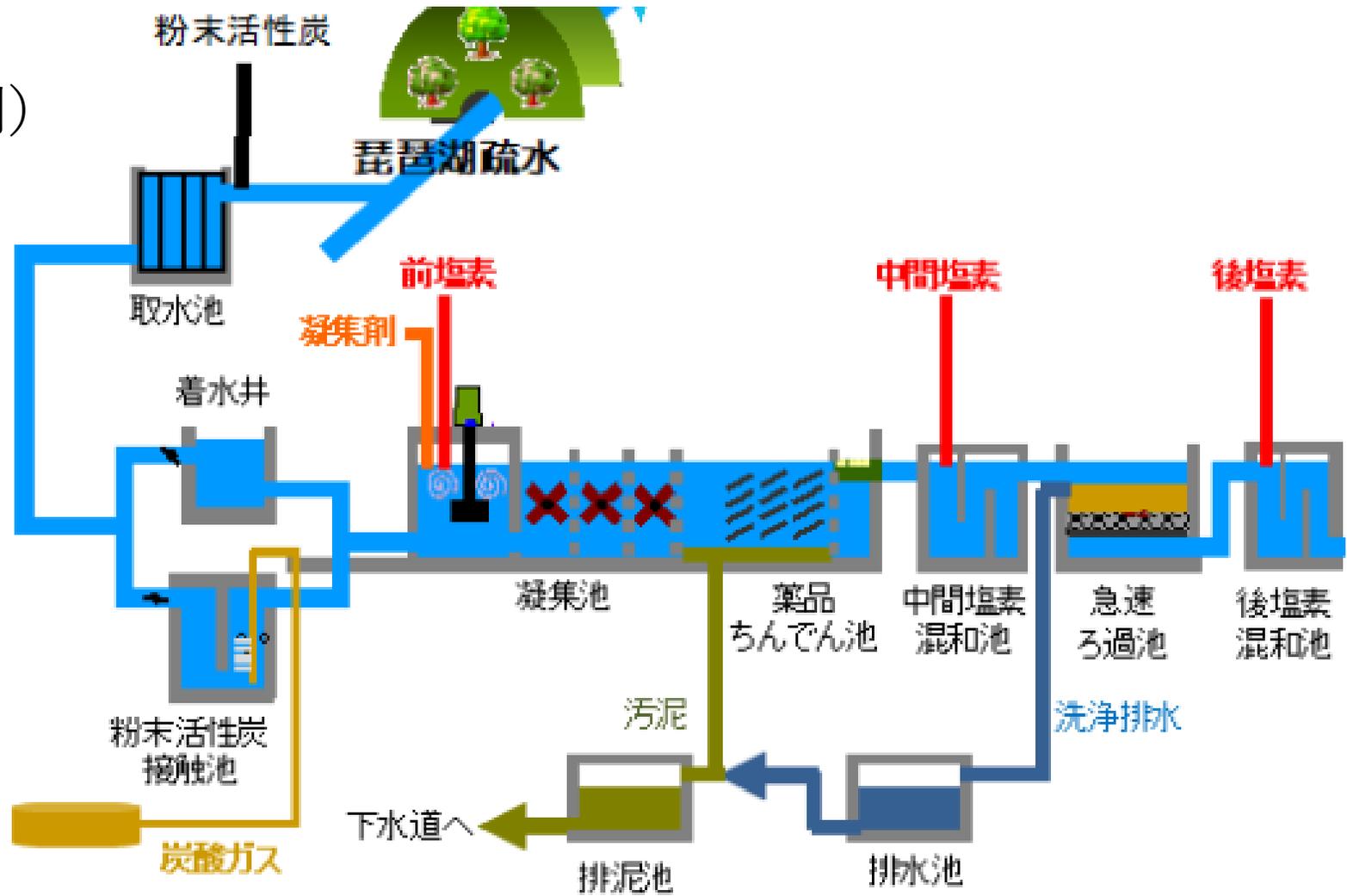
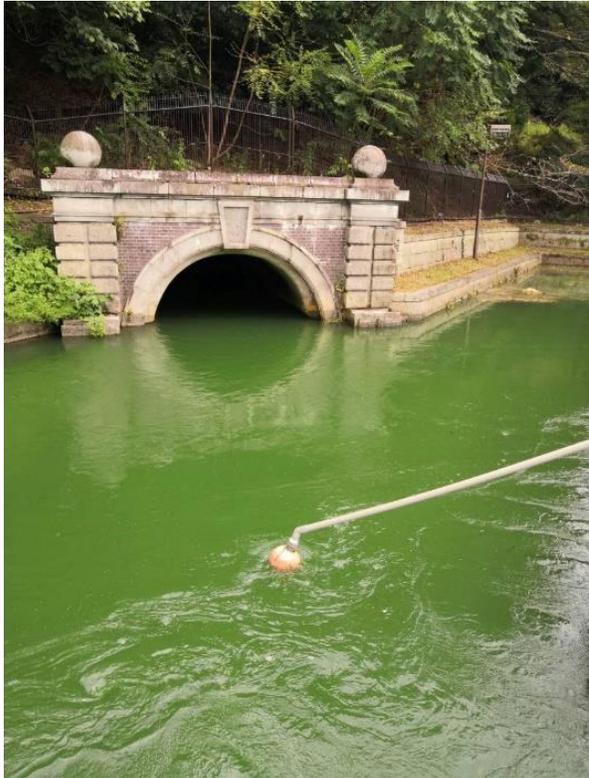
松ヶ崎浄水場（施設能力173,000m<sup>3</sup>/日）

蹴上浄水場（198,000m<sup>3</sup>/日）

新山科浄水場（362,000m<sup>3</sup>/日）

給水人口は約140万人（山間地域含む）で、市街地には3つ浄水場がある。市街地の浄水場はいずれも南湖を水源とし、凝集沈澱急速砂ろ過方式を採用。

# 浄水フロー (蹴上浄水場の例)



原水水質：濁度4度、色度10度、pH7.7、全有機炭素1.8mg/L (R4年度平均)

炭酸ガス：pH調整 (夏季に原水pH9を超える場合もある)

凝集剤：ポリ塩化アルミニウム (蹴上浄水場のみ高塩基度のものを使用)

## 浄水処理におけるかび臭対策

- ・ 溶存態かび臭物質の除去：粉末活性炭の注入\*
  - ・ 粒子態かび臭物質の除去：前塩素の停止、及び凝集処理の強化
- \* 2020年から、2-MIB価の低い、高機能な粉末活性炭を全浄水場で導入

## 原水水質監視体制（自動監視装置は除く）

|        | 採水場所     | 理化学試験 | 生物試験   | かび臭測定  |
|--------|----------|-------|--------|--------|
| 原水毎日試験 | 蹴上浄水場取水口 | 毎日2回  | 平日毎日1回 | 毎日1～2回 |
| 琵琶湖調査  | 南湖9地点    | 月1回   | 月1回    | 月1回    |

⇒ かび臭発生状況に応じて測定体制を強化している。

琵琶湖について

京都市市街地の浄水場の概要

**京都市における生物障害**

さいごに

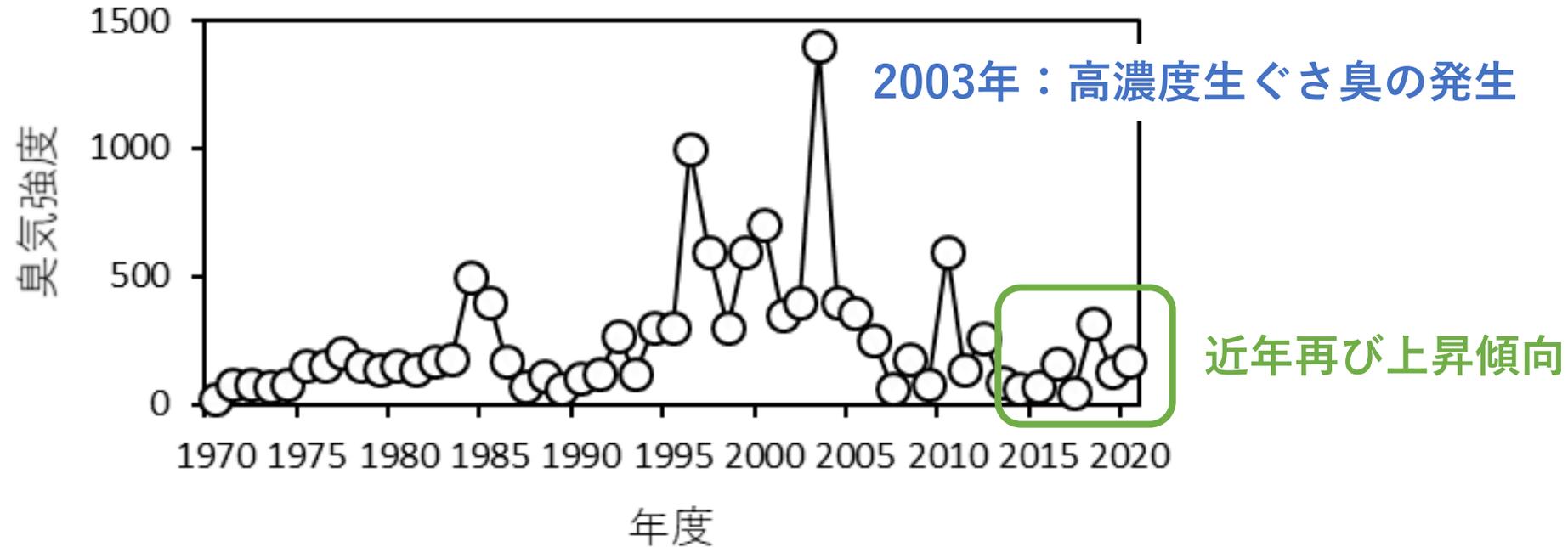
**これまでの生物障害**

近年のかび臭発生状況

近年のその他の生物障害

- 京都市では、1969年のかび臭の初発生以来、異臭味問題に長年苦慮している。
- 複数人の鼻で臭いの強さを測る臭気強度を測定している。

生ぐさ臭やかび臭等の異臭味に係る原水臭気強度の年最大値

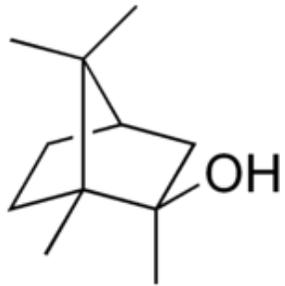


- その臭気強度は、1990年代後半～2000年代前半がピークとなっていた。
- ただし、担当者で感じ方の程度に差がある、かび臭より生ぐさ臭のほうが強度が高くなる、原水では青草臭や藻臭が常時感じられる等、測定上の課題がある。

- かび臭原因物質として主に、2-メチルイソボルネオール（以下「2-MIB」）及びジェオスミンが知られ、植物プランクトンや放線菌によって産生される。
- 両物質とも2003年に水道水質基準項目に設定され、基準値は10 ng/Lである。

## 2-MIB

構造



主な原因生物

オシラトリア

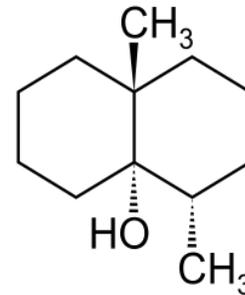


フォルミジウム



## ジェオスミン

構造

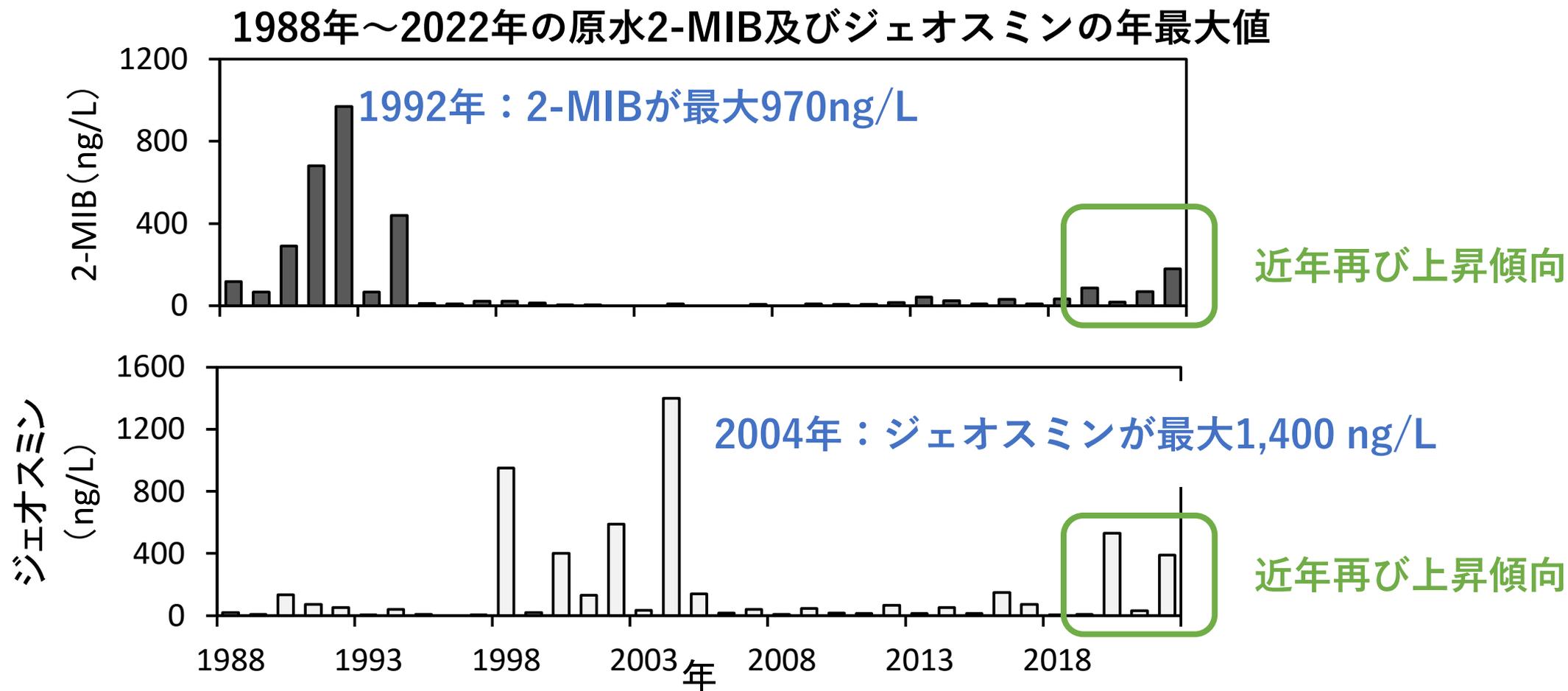


主な原因生物

アナベナ



かび臭物質の測定について京都市では、1988年以降、定期的に実施している。



1990年代後半は2-MIB、2000年前後はジェオスミンが高濃度だった。  
2000年代後半から一時沈静化していたが、近年再び上昇傾向にある。

### 生ぐさ臭

生ぐさ臭は黄金藻類ウログレナ等によって産生されるが、原因物質が未特定で、2,4-ヘプタジエナル等を指標物質としている。

琵琶湖でウログレナによる淡水赤潮が初発生した1977年に、京都市でも生ぐさ臭が初めて確認された。

### ろ過閉塞

1951年に珪藻類アツテアによるろ過閉塞が初発生した。その後も、1960年の緑藻類クロステリウムの大増殖など、生物量の増加に伴ってろ過閉塞が頻発した。

### ろ過漏出

1990年代には北湖で大量発生したピコプランクトンが南湖に流入し、ろ過漏出した結果、ろ過水濁度の上昇を招いた。

琵琶湖について

京都市市街地の浄水場の概要

**京都市における生物障害**

まとめ

これまでの生物障害

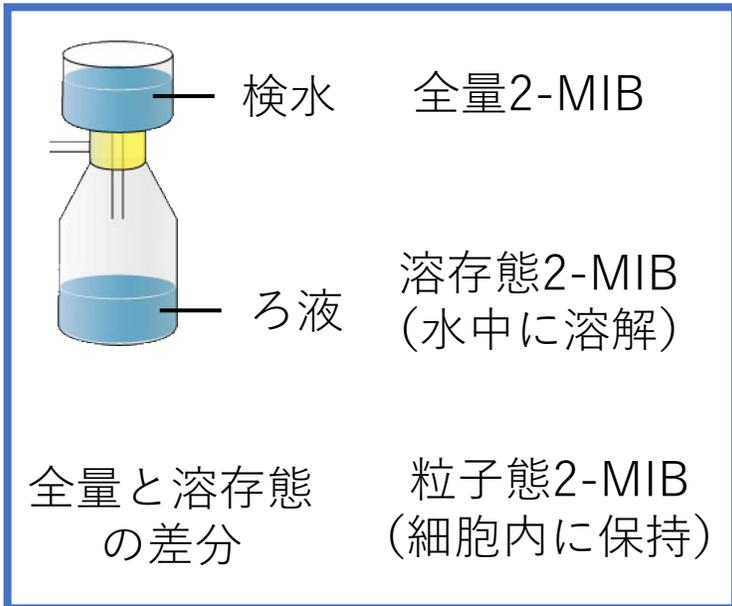
**近年のかび臭発生状況**

近年のその他の生物障害

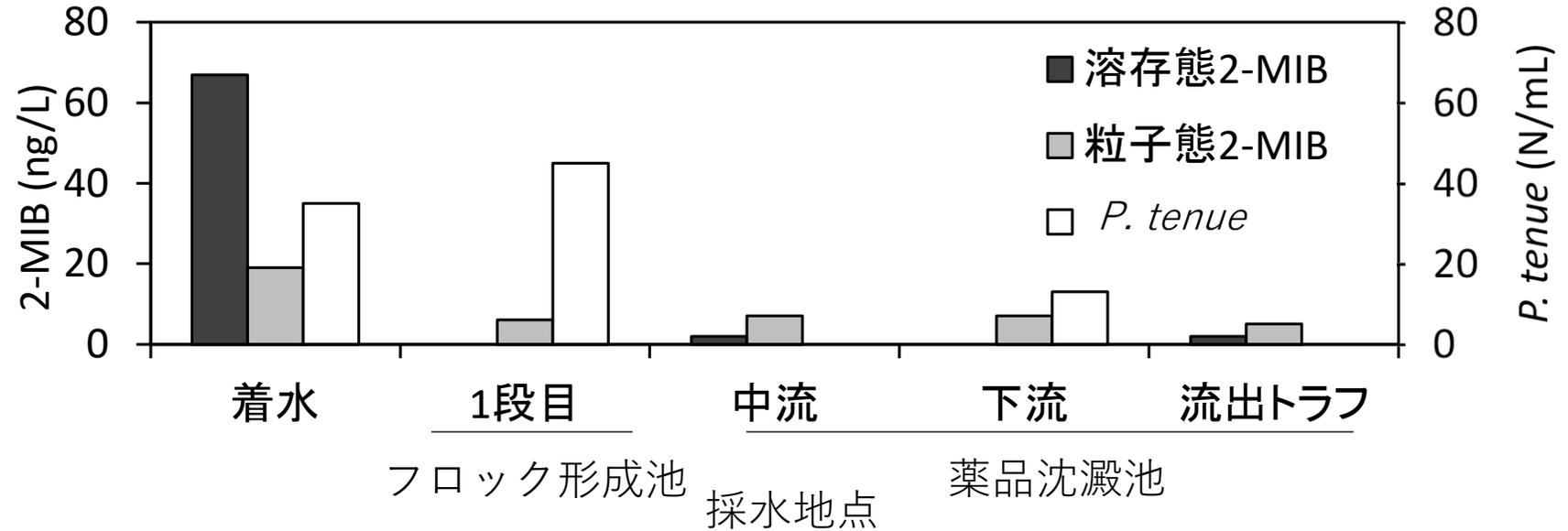
| 年度   | 発生した生物障害   |
|------|--|
| 2013 | ラフィド藻類の塩素処理によって給水TCAA濃度が上昇   |
| 2019 | <i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i> の塩素処理による油様臭が発生 |
| 2019 | 2-MIBが25年ぶりの高濃度で発生   |
| 2020 | 外来種 <i>Anabaena minispora</i> による高濃度ジェオスミンが発生                        |
| 2021 | 冬季に <i>Phormidium tenue</i> 由来の2-MIBが初めて発生                           |
| 2022 | 高濃度かび臭が長期間発生し，粉末活性炭使用量が過去最大を記録                                       |

5月に *P. tenue*由来の2-MIBが最大86 ng/Lと、25年ぶりの高濃度を記録した。その際、沈殿水2-MIBの上昇がみられた。

## 2-MIBの区分



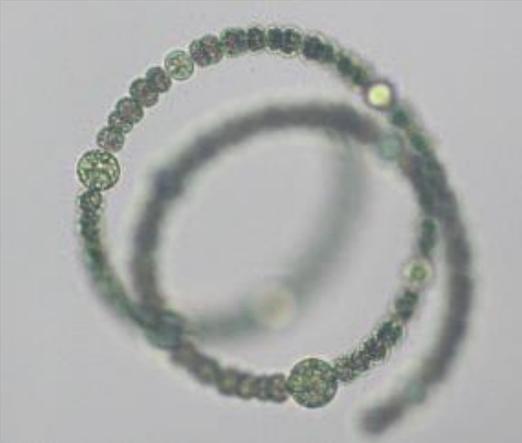
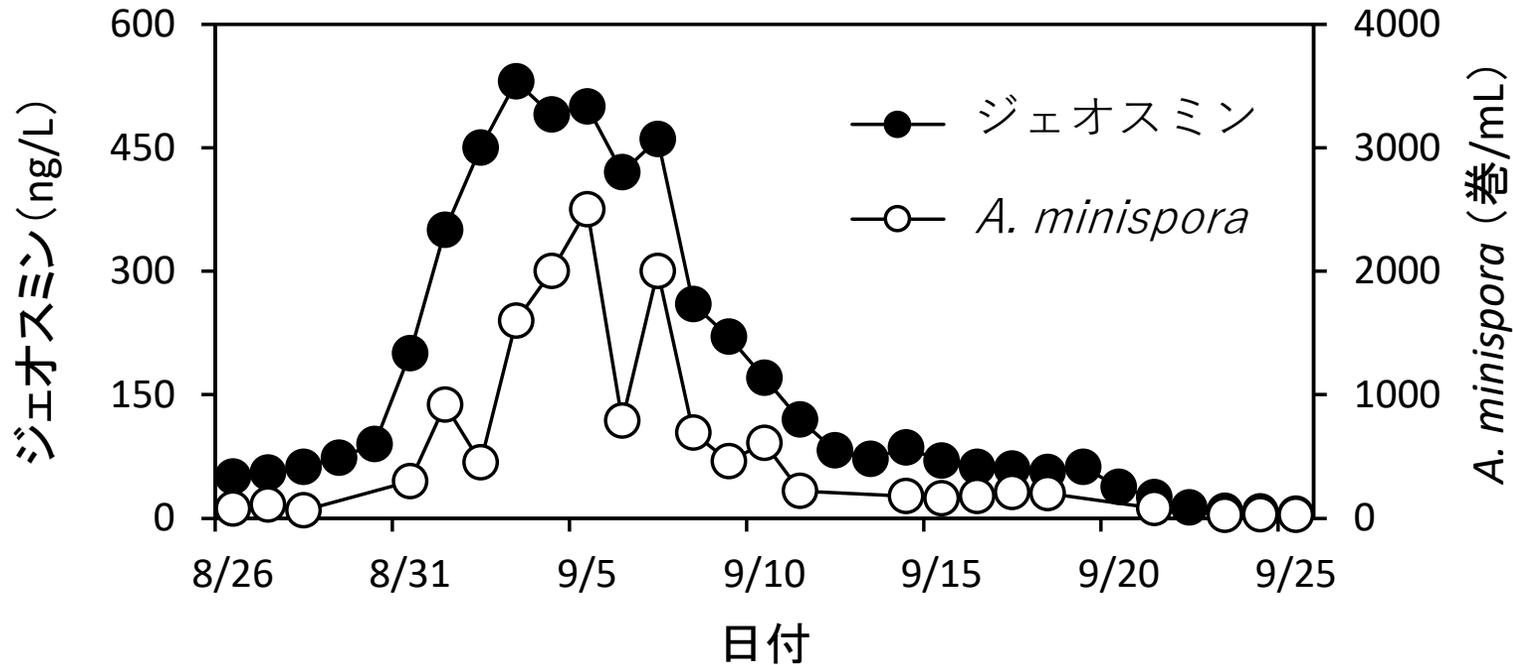
2019年5月23日の各処理工程水での2-MIB及び *P. tenue*



薬品沈澱池末端でも、*P. tenue*が細胞内に保持する粒子態2-MIBが検出された。沈澱池での *P. tenue*除去率は一般的に80%程度で、*P. tenue*の凝集不良が疑われた。

9月に、原水ジェオスミンが最大で530 ng/L発生した。  
同時期に、琵琶湖初観察となる *Anabaena minispora*が増加していた。

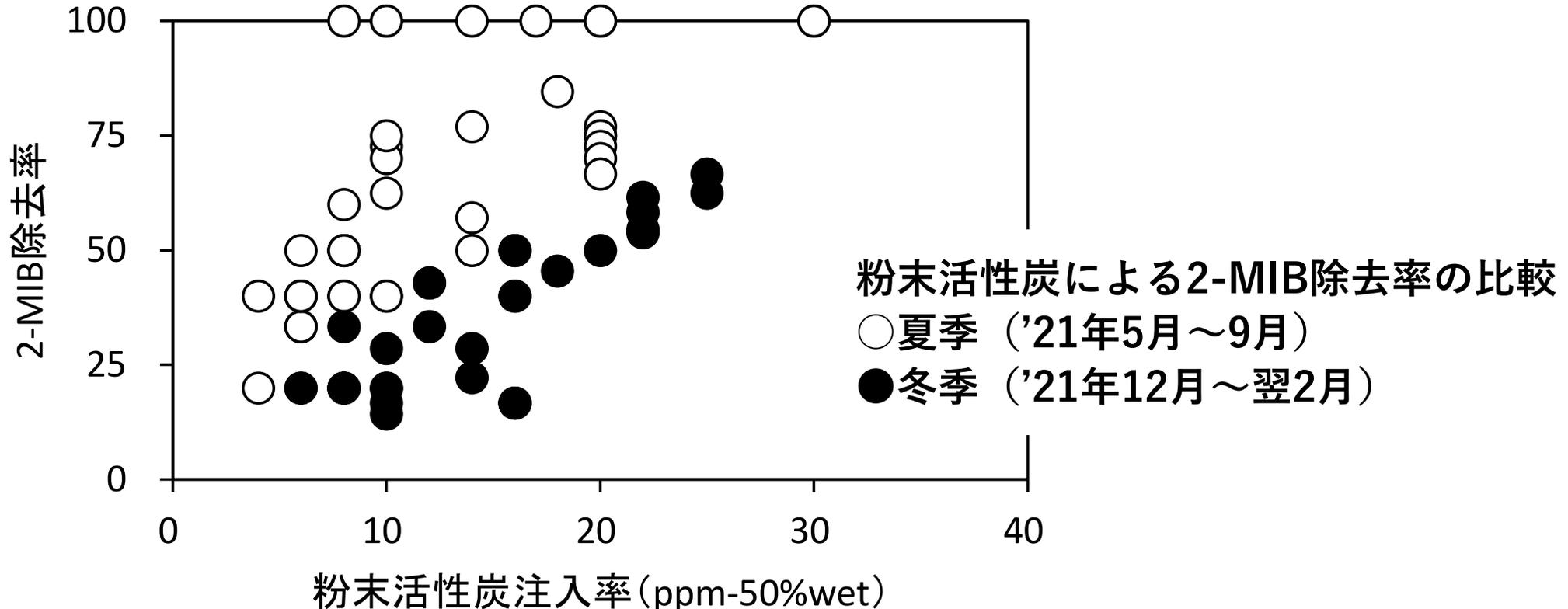
### 2020年9月の原水ジェオスミン及び*A. minispora*の推移



*A. minispora*

*A. minispora*は文献情報に乏しく、ジェオスミンを産生するか分からなかった。  
培養実験を実施したところ、培養株でのジェオスミン産生が確認された。

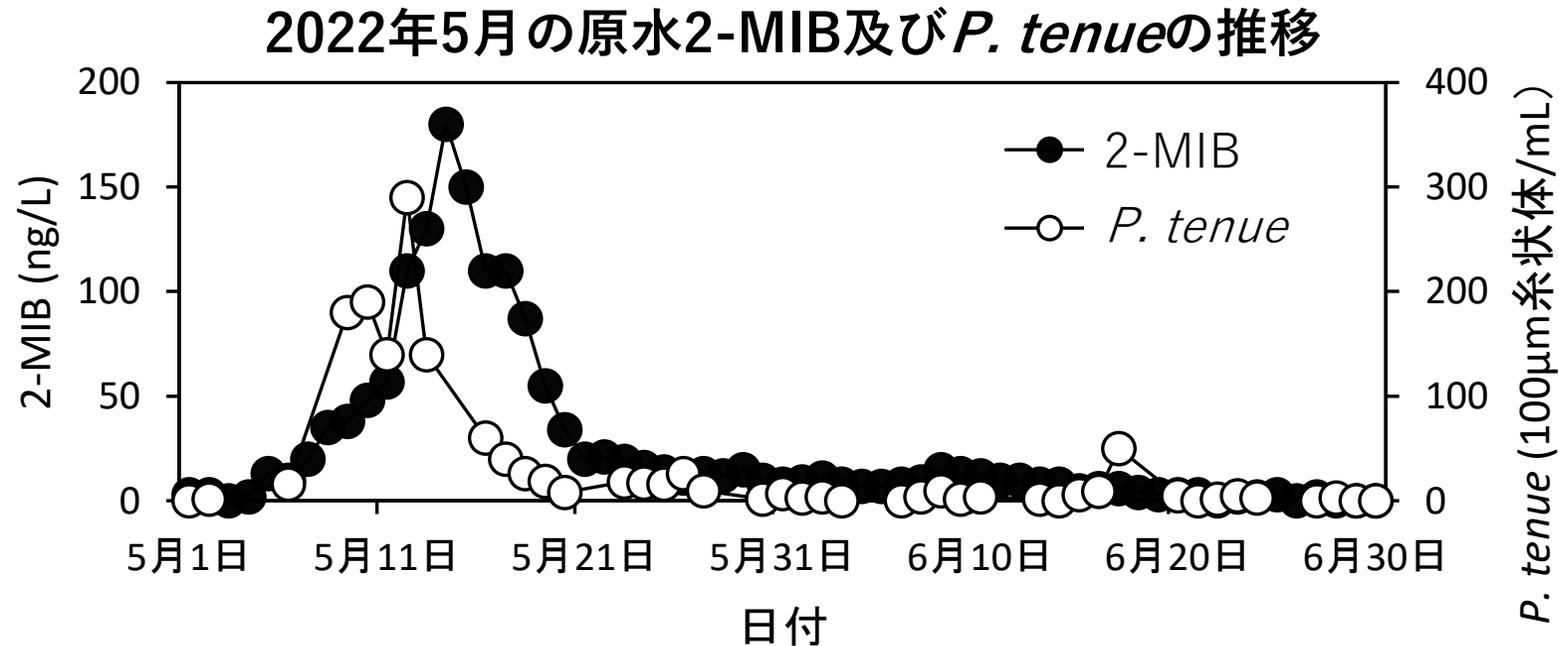
冬季では初めて2-MIBが発生し、最大濃度21 ng/Lを記録した。  
ただ、粉末活性炭の使用量が通常より多くなっていた。



2-MIB除去率は、夏季に比べて冬季は低くなっていた。

その原因として、冬季の低水温が2-MIBの吸着反応に影響したと考えられた。

5月に *P. tenue* 由来の2-MIBが最大180 ng/Lを記録した。  
また9月には、*Anabaena*属由来のジェオスミンも最大390 ng/L記録した。  
(両物質の年最大値が100 ng/L以上となったのは2000年代以降で初めて)



生ぐさ臭対策等と合わせ、粉末活性炭を計219日間、計1,436tと注入した。  
過去最大の使用量となり、金額もさることながら、在庫管理にも苦慮した。

琵琶湖について

京都市市街地の浄水場の概要

**京都市における生物障害**

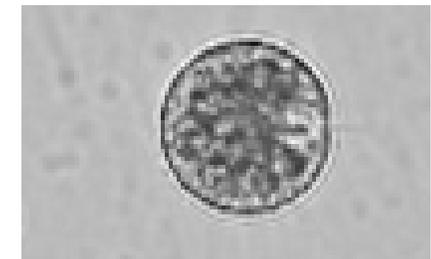
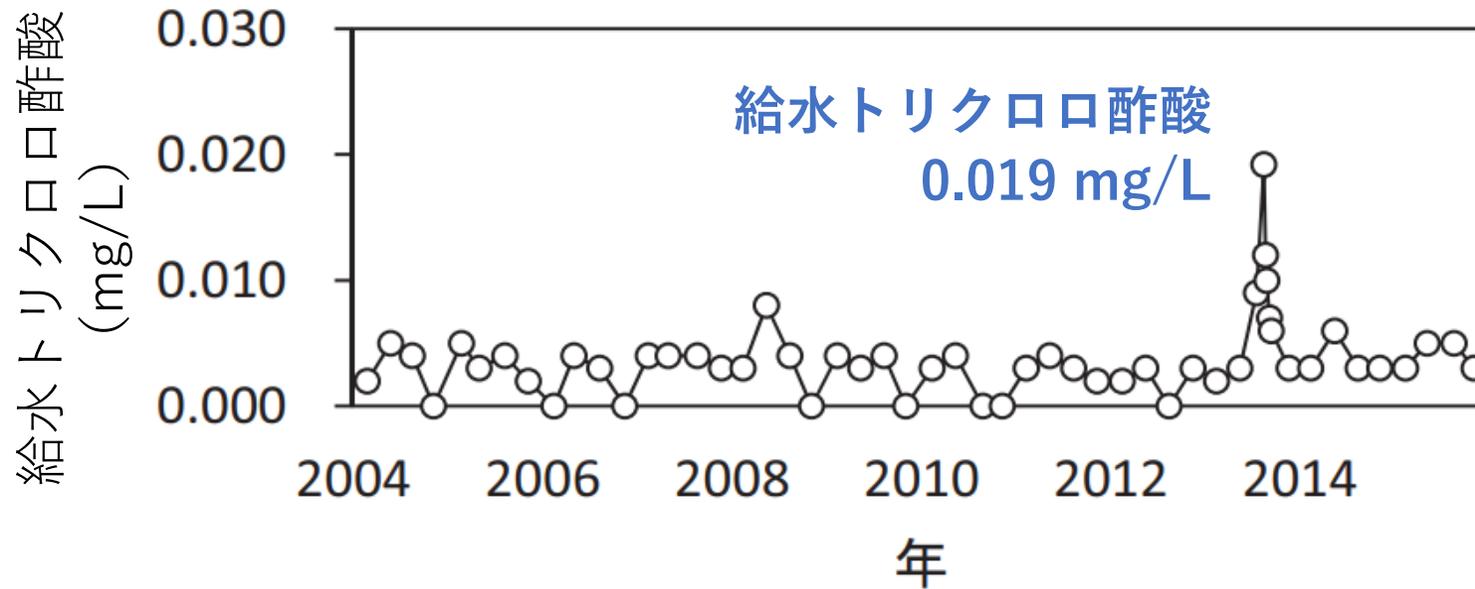
まとめ

これまでの生物障害

近年のかび臭発生状況

**近年のその他の生物障害**

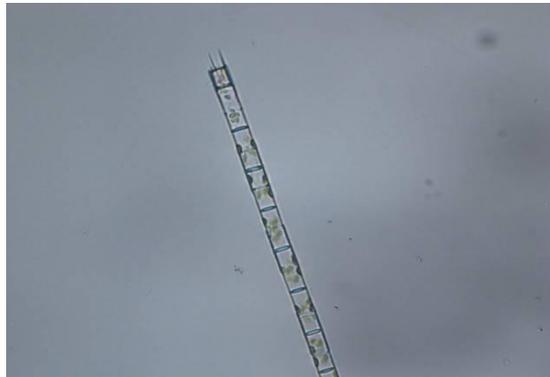
トリクロロ酢酸は消毒副生成物の一種で、2015年に水質基準が0.03 mg/Lに改正。京都市では2013年に、給水で最大0.019 mg/Lを記録した。また同時期に、原水で琵琶湖初観察となるラフィド藻類が確認された。



*Merotrichia capitata*

培養株での調査の結果、ラフィド藻類の塩素処理により、トリクロロ酢酸が生成。以後、ラフィド藻類出現時は、前塩素処理を停止することとした。  
(ただ、出現頻度は減少している)

11月、水道水から油様臭がすると問合せが複数件あった。  
問合せがあった区域に給水する浄水場のみ、前塩素を注入していた。  
また、当時の原水では、珪藻類オーラコセイラ属が優占していた。



*Aulacoseira granulata* var.  
*angustissima*



オーラコセイラ属を数種培養したところ、特定種で、塩素処理で油様臭が発生した。  
以後、該当種の出現時は、前塩素処理を停止することとした。  
また、同様の事例は数は少ないものの、川崎市等\*でも報告されていた。

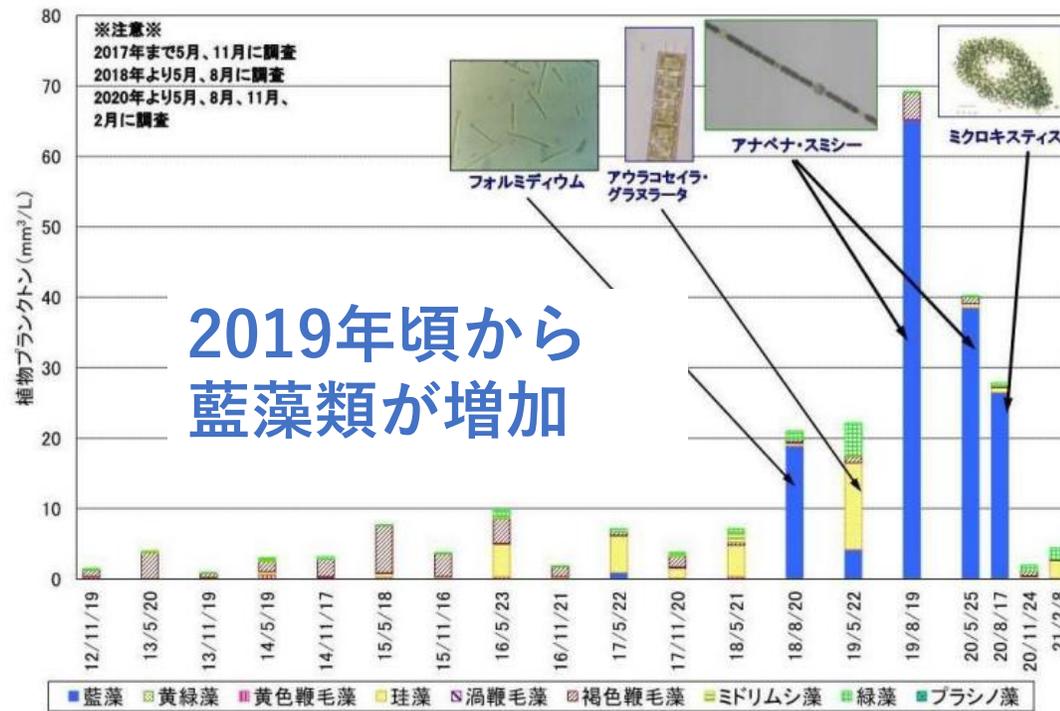
\*仲田ら2024「におい嗅ぎGCを用いた水道水における珪藻由来の樹脂臭に関する調査と浄水処理の改善」

2015年頃から、琵琶湖内湖の西の湖（2.85km<sup>2</sup>）の水質が悪化し、アオコが発生。水質悪化した西の湖の水が、流出経路を通じて、北湖に流れ込む場合がある。



出典：滋賀県2022、西の湖の水環境改善対策

## 西の湖の中央最深部での植物プランクトン体積の推移



北湖は従来、水質が良好だったが、近年、北湖を水源とする滋賀県の浄水場では、西の湖に起因する異臭問題が発生しており、滋賀県が水環境改善対策を講じている。



琵琶湖について



京都市市街地の浄水場の概要



京都市における生物障害



**まとめ**

南湖を水源とする京都市の浄水場では、一時はかび臭発生が鎮静化していたが、近年再び濃度が上昇傾向にあり、問題化している。

また、かび臭発生状況も、外来種や冬季発生等、従来とは異なっていた。そのほかにも、ラフィド藻類によるトリクロロ酢酸，オーラコセイラ属による油様臭等，新たな生物障害も発生している。

そこで京都市では現在、水質監視体制を強化し、水質管理を徹底するとともに、原水水質の変化に応じて、浄水処理機能の充実を図り、処理プロセスの最適化・高度化に向けた検討を行っている。

今後も、琵琶湖の生物発生動向に注視しながら、安全・安心な水道水供給に努めていきたい。

ご清聴ありがとうございました