

# 湖底の硝化細菌の作用

浜松市立高等学校 自然科学部  
2年 石川綾音

## 1 動機

私は浜名湖の湖畔に住んでいて小さい頃から浜名湖に触れながら育ってきた。小学校の頃に和船、カヌーの総合学習を通して浜名湖には漂流物やヘドロがたくさんあって色も茶色で汚いと思っていた。そのためなぜ汚くなってるのか、本当に見た目だけを見て汚いと定義してもいいのか調べたいと思い、パックテストによる水質調査を行った。水質調査を進めていくと、硝化細菌の作用によって水質が変化していることが分かり、硝化細菌の働きとその周辺の様子を知りたいと思った。

## 2 目的

硝化細菌は土壌や河川、湖沼などの水界に広く存在している。硝化細菌は、アンモニウムイオンや亜硝酸イオンを酸化して硝酸イオンにすることにより生命の維持や増殖に必要なエネルギーを得ており、下水処理場で環境汚染の原因となる窒素化合物を生物学的に除去する際に重要な役割を果たしている。私は、浜名湖の汚さを知るために水質を数値化するパックテストを行った。調べていくうちに季節によってさまざまな変化が見られたため、変化がなぜ起こるのか、どういう原因で変化しているのかを調べようと思った。さらに、硝化細菌の作用との関係を考察した。

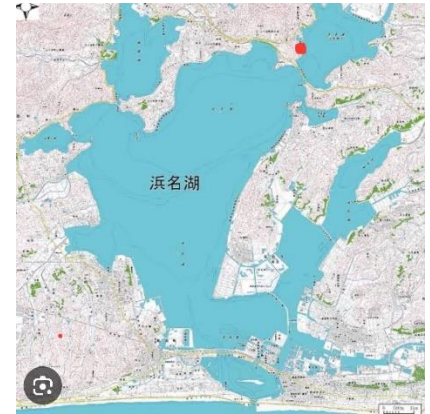


図1 採集場所

## 3 方法

### (1) 採水

2023年の9月から2024年の11月までの期間で月ごとに分けて季節によっていつが一番汚くなっているのかを、細江町にある細江湖の出入り口付近の海岸(図1の赤丸)で採水した。COD、(COD低濃度)、NO<sub>2</sub>、NO<sub>3</sub>、アンモニウム、pH、リン酸に焦点を当ててパックテスト(株式会社共立理化学研究所の地図簡易水質検査器)、塩分濃度の測定(ソアー社製 柏木デジタル塩分計)を行ってきた。最低でも月に一回浜名湖の水を収集した。朝7時、登校する途中の1分程度で家の近くの道路から海岸に通じる坂道を降りて水のうわべをすくう。

50mL ビーカーに浜名湖から採取してきた水を入れ、順番にパックテストを使って水を吸い取り、適当な時間おいておく。時間が経ったら色見本と比較する。

水を取っている様子を写真1に示す。

### (2) パックテストのやり方

#### 【測定項目】

- ・種類(範囲)単位
- ・COD(0～100)mg/L
- ・COD(低濃度)(0～8)mg/L
- ・NO<sub>3</sub>(0～45)mg/L
- ・NO<sub>2</sub>(0～1)mg/L
- ・アンモニウム(0～10)mg/L



写真1 採集の様子

- ・リン酸 ( 0 ~ 2 ) mg/L
- ・pH ( 5.0 ~ 9.5 )

### (3) 検証実験

(2) の結果を踏まえて以下の検証実験を行った。

#### 検証実験1 落ち葉の働き

秋に硝化細菌が増えるのは落ち葉の有機物を使って硝化細菌が増えることを検証する。

#### 検証実験2 湖底の土の働き

湖底の泥に硝化細菌が多いことを検証する。

### (4) 検証実験の方法

#### ア 検証実験1

学校の落ち葉や枯れた草など (写真2) 例えばイチョウの葉、銀杏、芝生、松の葉などを5.00グラム量り取る (写真3)。11月1日の浜名湖の水をビーカーで100mL量り取り、11月1日から5日までの4日間密閉された容器の中で浸したものを用意し、塩分濃度、COD、NO<sub>2</sub>、NO<sub>3</sub>、アンモニウム、pH、リン酸の値を測る (写真4 中央)。

#### イ 検証実験2

浜名湖の水の上層だけを取ったもの (写真4 右) と、湖底の泥を含めてすくったもの (写真4 左) の2種類を比較して、塩分濃度、COD、NO<sub>2</sub>、NO<sub>3</sub>、アンモニウム、pH、リン酸の値を測る。



写真2 採集した落ち葉



写真3 量った落ち葉

## 4 結果

(1) パックテストでの測定の様子を示す。



写真4-1 COD

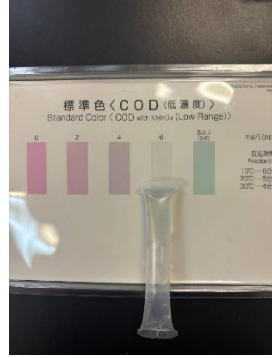


写真4-2 COD (低濃度)

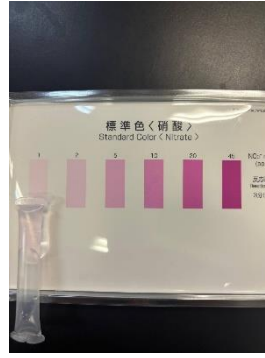


写真4-3 硝酸 NO<sub>3</sub>

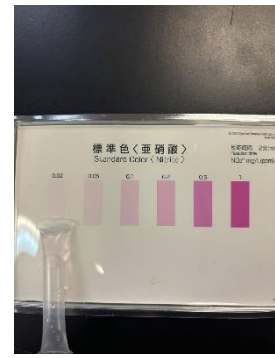


写真4-4 亜硝酸 NO<sub>2</sub>

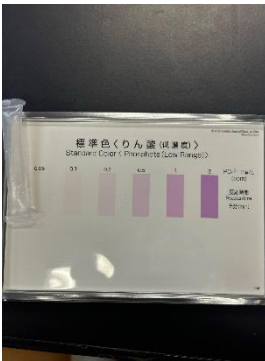


写真4-5 リン酸



写真4-6 アンモニウム



写真4-7 pH

2023年の9月から2024年の11月の測定結果は資料として添付した。測定結果をグラフに示した(図5-1～図5-8)。

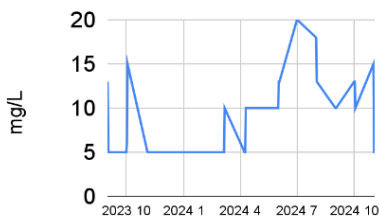


図5-1 COD

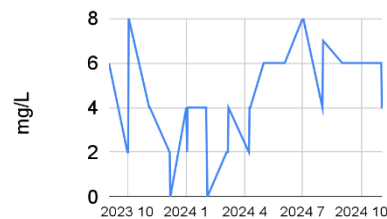


図5-2 COD (低濃度)

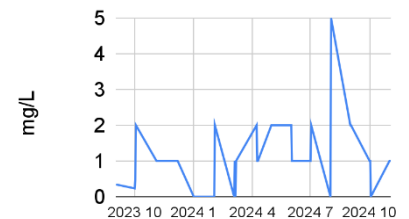


図5-3 NO<sub>3</sub>

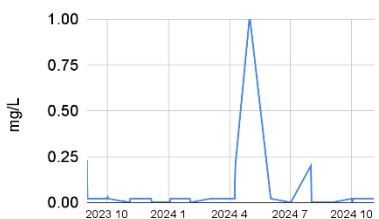


図5-4 NO<sub>2</sub>

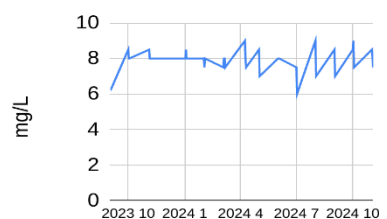


図5-5 pH

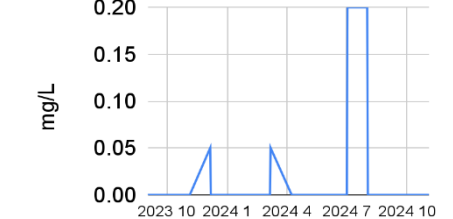
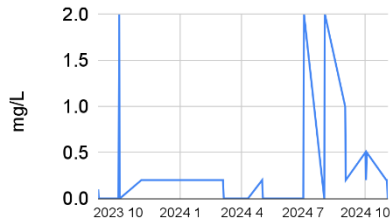
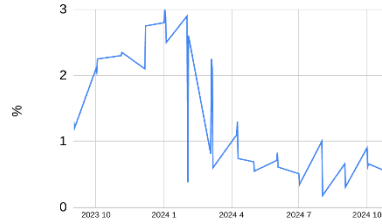


図5-6 リン酸



5-7 アンモニウム



5-8 塩分濃度

図5-1、5-2より、CODの濃度は6月、7月、8月、9月、10月、特に7月に高くなっている。

図5-3より、NO3の濃度は8月に高くなっている。

図5-4より、NO2の濃度は5月、6月に高くなっている。

図5-6より、リン酸の濃度は7月、8月、12月、特に7月、8月に高くなっている。

図5-7より、アンモニウムイオン濃度は7月、8月、10月に高くなっている。

(2) COD、NO3、NO2、アンモニウムの比較

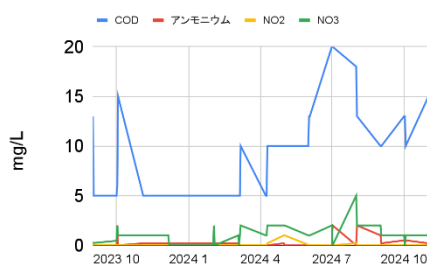


図6よりほとんど同時に起こっているが、7月にCODが高くなっていたら、8月にアンモニウムが高くなり、亜硝酸が高くなり、硝酸が高くなっているという流れになっている。  
冬はすべての濃度が低くなっている。

図6 COD、NO3、NO2、アンモニウムの比較

(3) 検証実験1 ～落ち葉～

11月1日の浜名湖の水

塩分濃度	0.52
COD	15
COD (低)	6
NO2	0.02
NO3	1
アンモニウム	0.2
pH	8.5
リン酸	0

葉を浸して4日間経過した浜名湖の水

塩分濃度	0.3
COD	100～
COD 塩分濃度	6
NO2	0.05
NO3	1
アンモニウム	0.5
pH	～5.0
リン酸	0

落ち葉などを入れたらCODが85mg/L以上上昇した。分解される前、落ちていた葉や草には有機物が大量に含まれていることがわかった。さらにNO2は0.03mg/L増えているため、豊富な有機物がアンモニウムイオンに変換され、亜硝酸に変換されることでエネルギーに変換して亜硝酸菌がNO2を生成している。

このことから、落葉は有機物をたくさん生み出しているため、落ち葉が多い秋は硝化細菌にとってエネルギー源が豊富で活発に活動している事がわかった。

pHは3.5以上下がった。

#### (4) 検証実験2 ～湖底の泥～

##### 上層

塩分濃度	0.49
COD	5
COD (低)	4
NO2	0.02
NO3	1
アンモニウム	0.2
pH	8.0
リン酸	0

##### 下層の泥

塩分濃度	0.49
COD	10
COD 塩分濃度	4
NO2	0.05
NO3	1
アンモニウム	0.5
pH	～5.0
リン酸	0

下層の泥は、上層より COD が 5mg/L 高く、NO<sub>2</sub> が 0.03mg/L 高く、アンモニウムが 0.3mg/L 高く、pH が 3 以上低い。

このことから、湖水の上層より下層の泥のほうが硝化細菌にとっての養分が多くなっていて、活発に分解が進められている事がわかる。

## 5 考察

### (1) 季節による変動の考察

春から秋の間にかけて COD、アンモニウムイオン、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>、リン酸の数値が高くなっているのは暖かくなるにつれて生物の動きが活発になり、有機物がたくさん生産されたり、対流が停滞していた湖の水が循環したりするからだと考え。

秋にリン酸とアンモニウムイオン、COD、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>の数値が最も高くなっているのは、湖に落ちた葉を分解するために硝化細菌の数が増えたため、数値が高くなっていると考え。

測定値を変化させる理由として以下の理由がある。水温や光の強さによって植物性プランクトンの数や種類、生息域が変化してそれに伴って捕食者の生息環境も変化するので、生き物から排出される有機物の量が季節によって大きく変化する。

春から夏にかけては、夏には暴風や台風が多く発生し、水が混ざり、湖底にある有機物が攪乱されたり、上層の酸素が下層に届いたりする。それによって硝化細菌の働きが活発になると考える。

秋について秋に変化が起きたのは、秋は気温が水温より低い日々が続くようになり、湖は冷やされていく。この頃の湖の水は、空気に接している表面が最も冷やされ、影響を受けにくい水中はまだ暖かい状態になっている。水は温度が下がると比重が高くなるので、上層の水が下層の暖かい水の比重より重くなると、下層の水と入れ替わるように湖の中へ落ちはじめる。冷えた水は、表層と中層間で対流を起こし、続いて中層と下層での対流を起こしながら、徐々に湖水の温度は水の最大比重である約 4℃になるまで続く。この循環は、湖底では酸素の多い水の沈降によって酸欠から解消され、反対に表・中層では湖底に溜まっていた有機物や栄養塩類が巻き上げられて、湖全体に栄養が供給される湧昇が起こる。

さらに浜名湖の周辺では農業が盛んで稲作やみかんの栽培が特に有名である。稲やみかんは秋に収穫のため川から浜名湖に収穫残渣が流れ出た結果、有機物としての流入となり、COD が高くなっている原因の一つだと考えられる。

秋から冬にかけて、数日だけ COD、NO<sub>2</sub>、NO<sub>3</sub>、アンモニウムが高くなっていた理由として考えられることは、遠州地方の特徴である強風である。冬には「遠州の空っ風」と呼ばれるほど強い強風、いわゆる「赤石おろし」が吹く。そのため、冷やされた湖面が強風によって湖底に沈んでいた有機物などがかき混ぜられ、値が上昇し

ていると考える。さらに、湖面が冷やされて湖底の温かい湖水が上層部へ向かおうとするため、循環が起きるため、多少の値の変化があった。

冬から春について、この頃の表層～中層の付近の水は、冬の間によく冷やされていて氷の温度に近いが、太陽に温められる。水は約4℃が1番重いから、浜名湖の水温が浜は湖底よりも湖の表面の方が温度が低くなるのでわずかに湖底と表層との温度差が生じ、循環が起こり、表層と湖底がほぼ同じ温度になる。表層の酸素も一様に広がっていき湖底の栄養分を含んだ水中で植物性プランクトンをはじめ多くの微生物が増え始める準備ができあがる。

## (2) 湖水中の硝酸イオンや亜硝酸イオンの減少の考察

### ア 藻類や海藻の吸収

硝酸塩と亜硝酸塩は、海洋植物や藻類にとって重要な窒素源である。これらの植物や藻類は、窒素同化を行うために窒素を必要としており、硝酸イオンやアンモニウムイオンはその窒素供給源となる。これにより、湖中の一次生産が支えられている。

### イ 窒素循環

湖中での窒素は、有機物(CODで測定されている)→アンモニウムイオン→ $\text{NO}_2^-$ → $\text{NO}_3^-$ に変換される。有機物は、動植物の残骸や排泄物などから成り立っている。これらの有機物は、まず分解者(バクテリアや真菌など)によって分解され、アンモニウムイオンなどの無機窒素化合物が生成される。アンモニウムイオンや亜硝酸イオンは硝化細菌が利用している。硝化細菌は、土壌や水中に存在するアンモニウムイオンや硝酸イオンをエネルギー源として利用し硝酸イオンにする。硝酸イオンは、脱窒細菌によって窒素ガス( $\text{N}_2$ )に変換される。また、今回は考察しないが、窒素ガス( $\text{N}_2$ )は窒素固定細菌によりアンモニウムイオンに変換されている。このように湖中でも窒素循環が確認できる。

## (3) アンモニウムイオン、亜硝酸イオン、硝酸イオンと硝化細菌

硝化細菌はアンモニウムイオンや亜硝酸イオンを栄養源として利用しているため水中のアンモニウムイオンが増えたあとに亜硝酸イオンが増え、亜硝酸イオンが増えたあとに硝酸イオンが増えていることがわかる。これらの化合物が豊富に存在する環境では、硝化細菌が活発に活動している。硝化細菌はアンモニウムイオンや亜硝酸イオンを酸化する細菌であるため適切な条件は酸素が豊富な環境が必要である。

また、水温やpHも重要で、一般的には中性から弱アルカリ性の条件が好ましい。そのためPHが7.5~8.5の日が多い浜名湖は硝化細菌が生息しやすい環境である。水温については5.3で述べる。

硝化細菌が生息しにくい環境として酸素不足が挙げられる。検証実験1よりCODが高い場所では有機物を分解するのにバクテリア等が酸素を消費し、いずれ酸素不足になることが予想できる。

また、酸性の環境では生存が難しいと思われる。検証実験1、2より硝化作用が進むとpHが8から6になり環境が酸性になっている。硝化細菌自身の環境形成作用により自ら生きづらい環境を作ってしまう。

このほか金属や毒素などの有害物質の存在によっても硝化細菌が生きられなくなる。

## (4) 水質浄化のための硝化細菌の必要性

有機物→アンモニウムイオン→亜硝酸イオン→硝酸イオンというふうに分解されている。アンモニウムイオンは魚や他の水生生物にとって非常に毒性が高い物質である。これらが水中に蓄積すると、魚の健康を害し、最終的には死に至ることもある。アンモニアは水中での酸素の供給を妨げるため、魚や他の水生生物にストレスを与え、呼吸困難を引き起こすことがある。また、高濃度のアンモニアは神経系に影響を与え、最終的には死亡することもある。さらに、アンモニアは水質を悪化させ、エコシステム全体に悪影響を及ぼす可能性がある。そのため、アンモニウムイオンを硝酸にする硝化細菌が必要である。

### (5) 地球温暖化と硝化細菌の生育

日本近海における、2023 年までのおよそ 100 年間にわたる海域平均海面水温の上昇率は、 $+1.28^{\circ}\text{C}/100$  年といわれている (図 7)。硝化細菌の生育の適正温度は  $20\sim 30^{\circ}\text{C}$  である。硝化菌は高温による悪影響も受けやすい。

水温  $30^{\circ}\text{C}$  を上回ると、硝化活性が低下する場合が多い。浜名湖の最低水温は 1 月の  $4.6^{\circ}\text{C}$ 、最高水温は、本校の夏の調査では 9 月で  $33.4^{\circ}\text{C}$  であった。最高気温が硝化細菌が生育しにくい温度になっている。

また、浜名湖の最低水温は 1 月の  $4.6^{\circ}\text{C}$  である。これを踏まえると、浜名湖の最低水温が硝化細菌の最適温度から外れる温度である  $30^{\circ}\text{C}$  になるのは約 200 年後であることがわかる。だから完全に硝化細菌が死滅するのはまだまだ先であることがわかった。

しかし、現在でも一年の中で硝化細菌の最適温度から外れる期間が長くなっており、アンモニウムイオンが分解されない期間が長くなっていると考えられる。そのため、アンモニウムイオンの毒性により生物の生息に影響が及ぶ可能性がある。

### (6) 水質浄化における考察

検証実験 2 で硝化細菌は湖底に生息することがわかった。そのため、現在の川底や湖底をコンクリートで覆うような開発が進んでいる世の中では、硝化細菌が生きることができなくなってしまうのではないかと考えた。浜名湖でよく見かけるヘドロは有機物が溜まった栄養価の高い泥で、硝化細菌にとっては好都合な生息場所であることがわかった。テレビ番組などでも水の底に溜まった泥を全部抜いてきれいにするというものがある。ヘドロは、生き物の死骸や草木が積み重なったもので、人間にとっては汚いかもしれない。ヘドロが多すぎると富栄養化になってしまうが、水の中の生き物にとっては重要な役割を果たしている。埋め立てが進んでコンクリートで固められると、硝化細菌が生きることができる適切な量の栄養分を含む泥が少なくなってしまうと思う。そのため、有機物が堆積し、バクテリアや硝化細菌が生息し、それらを栄養源として藻類や植物が育ち、そして消費者が集まってくるという循環が生まれる環境を考えたいと思った。

### (7) 今後の計画

雨の水を測定したところ pH が 6.0 ほどの弱酸性であった。雨の水がそのまま浜名湖に流れ込んでいるのになぜ浜名湖の pH が雨水に比べて 2 ぐらい高いのか、どの過程で pH に変化が起こるのかを調べたいと思った。

リン酸の 7 月、8 月、12 月特に 7 月、8 月に多くなっていた。このデータにどんな規則性があるのか調べたいと思った。-

### 参考

第一学習社 高等学校生物基礎

第一学習社 スクエア最新図説

tenki.jp <https://tenki.jp/past/2023/09/weather/5/25/47654/> (2024/12/20 閲覧)

わかさぎ雑学 富栄養湖の湖水循環 <https://clubcrest.net/wakasagi/ikimonokankyou.html>  
(2024/12/20 閲覧)

気象庁 [https://www.data.jma.go.jp/kaiyou/data/shindan/a\\_1/japan\\_warm/japan\\_warm](https://www.data.jma.go.jp/kaiyou/data/shindan/a_1/japan_warm/japan_warm)  
(2024/12/20 閲覧)

藤谷拓嗣 未培養硝化菌の分離戦略と特徴づけ 環境バイオテクノロジー学会誌 Vol. 21, No. 1, 53-58, 2021

[https://www.jstage.jst.go.jp/article/jenvbio/21/1/21\\_53/\\_pdf/-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jenvbio/21/1/21_53/_pdf/-char/ja) (2024/12/20 閲覧)

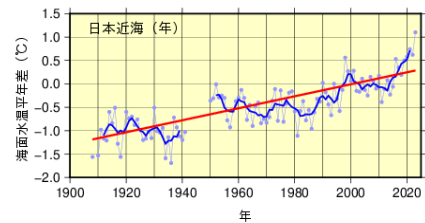


図 7 日本近海の海水の上昇温度