

メヒルギ (*Kandelia obovata*) を用いたバイオリメディエーション ～地域に根差した価値ある研究のために～

沖縄尚学高等学校 BiO2 佐渡山風羽、新城有希葉、赤嶺太一、我如古梨乃（沖縄県）

1. はじめに

現在でも、世界には排水処理が50%を下回る国々が存在している（図1）。これらの排水には工場排水や生活排水、農業排水、畜産排水が含まれており、窒素化合物やリン酸塩等栄養塩類の過剰供給による河川の富栄養化現象や、重金属汚染などにより水質汚濁の原因となる。

Share of domestic wastewater that is safely treated, 2020

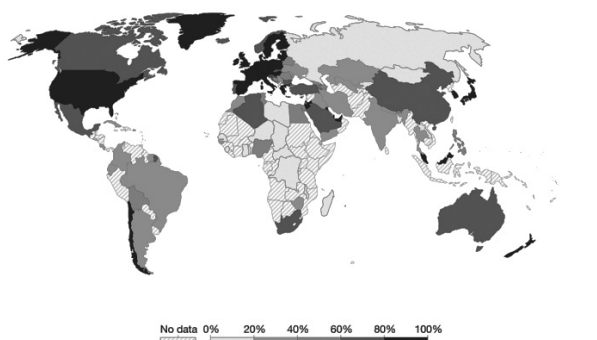


図1 世界の廃水処理率（Our world in Data, 2020）

私たちは、廃水処理率が低い地域とマングロープ生息する地域が大きく合致していることを発見した（図1と図2）。図3には、マングロープが生息している国々の廃水処理率を示した表1から、東南アジア、南アジア、アフリカ、カリブ海周辺の国々は処理率が低い傾向にあることがわかる。マングロープ林は河口付近または沿岸地域に生息しているため、このマングロープを活用した廃水処理技術を提案できれば、これらの国々

において都市からの未処理の廃水が海洋へ流れるのを防ぐことができる。

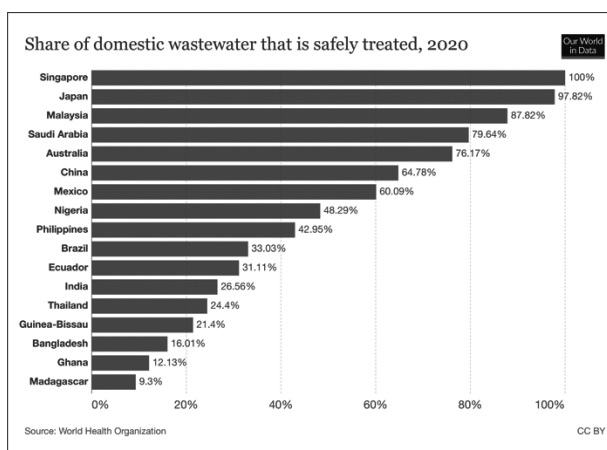


図3 マングロープ生息国における廃水処理率（Our world in Data, 2020）

汽水域を生息地とするマングロープは、地球環境に大きな役割を担っている。マングロープ林は多様性に富んだ生態系を形成し、独自の食物連鎖が存在する。また、マングロープ林は嫌気性の地下土壌に多く炭素を貯留するため、ブルーカーボン問題においても重要な役割を担っている（2）。それだけでなく、津波の際は波高を10%減少させ、水圧を30%減衰させる（2）ことができ、防災面でも重要である。マングロープは主に熱帯、亜熱帯地域に生息しており、日本では沖縄県をはじめとした南西諸島に広く分布している。同県那覇市と豊見城市にまたがる漫湖は、国場川の河口に広がる干

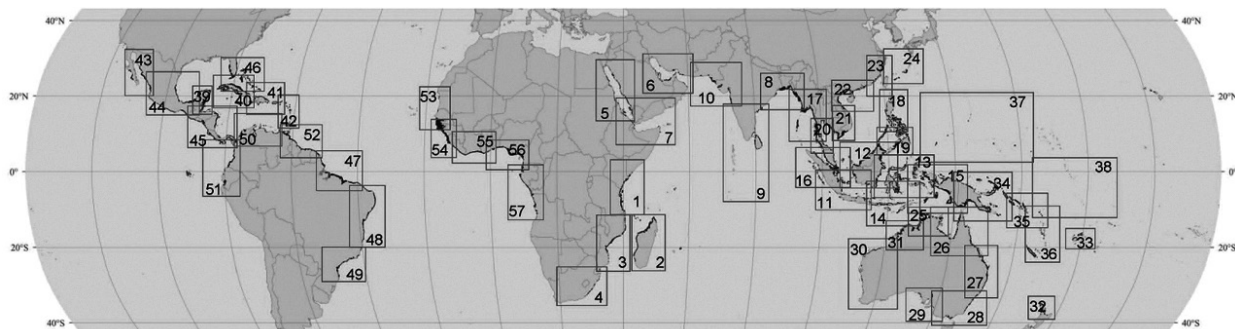


図2 マングロープの分布図（国立環境研究所, 2015）

潟で、塩分濃度およそ1.3%~2.9%の汽水域であり、メヒルギやオヒルギ、ヤエヤマヒルギなどといったマングローブ林が広がっている。これは1990年代に数回にわたって植樹されたことにより分布が拡大したもので、漫湖が生活排水から流れ出る重金属イオンにより水質汚濁が進んでいた環境下でもその分布が拡大されていた(3)。メヒルギ、オヒルギ、ヤエヤマヒルギは塩分を吸収し、過剰供給分は自らの葉に貯蓄して落葉させることで体内から排出する機能を持っている(4)。

そこで、私たちは次のような予想を立てた。

- (1) メヒルギは、塩分だけでなく、銅や亜鉛などの重金属イオンも体外に排出する機構を持っている。
- (2) メヒルギは、体内の重金属イオンを落ち葉に溜め込み、落葉させることで重金属イオンを体外に排出している。
- (3) (2) が正しければ、メヒルギの落ち葉を回収することで重金属に汚染された水を浄化することができる。

2. 基礎

2-1 漫湖湿地について

漫湖(図4)は、沖縄県豊見城市所在の湿地帯である。市街地に囲まれる漫湖はかつて周辺河川の汚水の流入によりひどく汚染されていた。現在、水質汚濁は改善され基準値を下回っているが、未だ改善の余地は残されており、絶滅危惧種であるクロツラヘラサギをはじめとした水鳥101種を含む200種以上の鳥類や、底生生物、魚類も豊富に確認されているため、これらの多種多様な生物を守っていくためにも、さらなる水質改善は必須である。また、ラムサール条約に指定され国際的に重要な湿地として世界的に認められているた



図4 漫湖水鳥湿地センターとマングローブ林

め、漫湖の水質改善は世界的にも意義のあることである。

2-2 メヒルギ (*Kandelia obovata*) について

メヒルギ(図5)は、真正双子葉類キントラノオ目ヒルギ科メヒルギ属に属し、汽水域に生息するマングローブ林を構成する樹木の一つである。塩分濃度約3%程度の汽水域においても成育可能であるという特徴を持ち、塩分を吸収した葉は黄色く変色してから落葉することが知られている。このことから、本実験では落葉する前の黄色く変色した葉(黄朽葉)には重金属イオンが貯蔵されている可能性が高いと予想した。



図5 メヒルギ (*Kandelia obovata*)

2-3 銅イオンと亜鉛イオンについて

銅イオンも亜鉛イオンも、少量であれば生命に必須の金属元素であるが、量が過剰だと有害である。例えば、銅イオンは魚類に対する毒性が高く、濃度が1mg/L以上だとほとんどの魚類が死ぬと言われている。このため、環境省の一般排水基準では、銅は3mg/L以下、亜鉛は2mg/L以下に規制されている。

2-4 金属イオンの濃度を測定する方法について

(1) パックテスト

最初、私たちは共立理化学研究所のパックテストを用いて、試薬を投入した後の色の变化からマングローブの青葉と黄朽葉に銅イオンと亜鉛イオンが含まれていることを確認した。

(2) 吸光光度計

パックテストを用いて定性的に銅イオンと亜鉛イオンが含まれていることを確認した後に、HACHのDR3900吸光光度計を用いて定量分析を行った。具体的には、銅イオンを計測する際にHACHの「銅試薬CuVer1 HACH0584」キットを用いて銅イオンを1価に還元した後、ピシンコニン酸と錯体を形成させ、この錯体がもつ特徴的な波長に対する吸光度から銅イオンの濃度を求めた。また、亜鉛イオンを計測する際には、HACH「亜鉛試薬 HACH1086」を用い、亜鉛イオンとジソコンの錯体を形成させ、この錯体が持つ特徴的な波長に対する吸光度から亜鉛イオンの濃度を求めた。

3. 研究手法

3-1 葉の選定

本研究では、ラムサール条約登録湿地である沖縄県豊見城市所在の漫湖に植生するマングローブの一種であるメヒルギの若葉と黄朽葉を研究対象として用いた。メヒルギを研究対象として選んだ理由としては、漫湖水鳥湿地におけるメヒルギの分布が、オヒルギやヤエマヒルギなどの他のマングローブ種より広いため、漫湖湿地におけるメヒルギの役割の影響範囲が広いということである。

葉の選定方法としては、枝の一節目から生える明るい黄緑色の葉を若葉とし、黄朽葉は落葉前の黄色がかっている葉とし、それぞれ生体から手掴みで採取するという手法を取った。この時、採取する葉は葉身と子葉柄約3cm以内のものと定義した。また、すでに落葉した黄朽葉は、土壌によって何らかの影響を受けている可能性が考えられたため、本研究では使用しなかった。

3-2 採取場所の選定

本研究では、試料であるメヒルギの葉の採取を、漫湖湿地を管理している漫湖水鳥・湿地センターから許可を得た木道付近で行った(図6)。採取は木道上から手の届く範囲で行ったが、試料の個体差の影響を少なくするために、全長約200mある木道の全ての地点でランダムに採取した。

3-3 銅および亜鉛イオンの濃度計測用サンプルの作成

(1) 若葉と黄朽葉に対し、生重量の4倍の重量の水

を加え、ミキサーにかける。

(2) 粥状になった溶液を減圧濾過し、液体のみを取り出す。

(3) 銅イオン計測用サンプルは、(2) で得られた若葉の抽出液は蒸留水でさらに10倍希釈して最終的に50倍希釈にする。黄朽葉の抽出液は蒸留水でさらに20倍希釈して最終的に100倍希釈にする。亜鉛イオン計測用サンプルは、(2) で得られた若葉の抽出液を蒸留水でさらに200倍希釈して最終的に1000倍希釈にする。黄朽葉の抽出液は蒸留水でさらに400倍希釈して最終的に2000倍希釈にする。

3-4 銅イオン・亜鉛イオンの濃度計測

銅 (銅試薬CuVer1 HACH0584を使用)

(1) ゼロの設定

1. 別の角形サンプルセルにサンプルを10ml入れる。
2. 表線が正面を向くようにブランクセルをセルホルダーにセットする。それをゼロとする。

(2) 調整サンプルの作成

1. 角形サンプルセルにサンプル10mlを入れる。

(3) 調整サンプルにCuVer1 銅試薬パウダーピローを1包加える。

(4) 振って混ぜる。

(5) 2分間の反応時間。

(6) 反応終了後、調整サンプルをセルホルダーに取り付け、測定をする。

亜鉛 (亜鉛試薬セット HACH1086を使用)

(1) サンプル20mlを測定。

(2) 25mlメスシリンダーに (1) を入れる。

(3) メスシリンダーにZincoVer5試薬パウダーピロー 1包を添加し、蓋をして完全に溶解させるために混ぜる。

(4) ブランクの調整

1. (3) でできた溶液10mlを角形サンプルセルに入れる。

(5) 調整サンプルの作成

1. 付属のプラスチック製スポイトを使用して、シクロヘキサノン0.5mlを (3) に入れる。
2. 反応のため30秒振る。

(6) メスシリンダーから (5) を二つ目の角形サンプ

ルセルに入れる。

(7) (4) の角形サンプルセル (ブランク) を吸光度計にいれ、ゼロとする。

(8) (5) の角形サンプルセル (調整サンプル) を吸光度計に入れ、測定する。

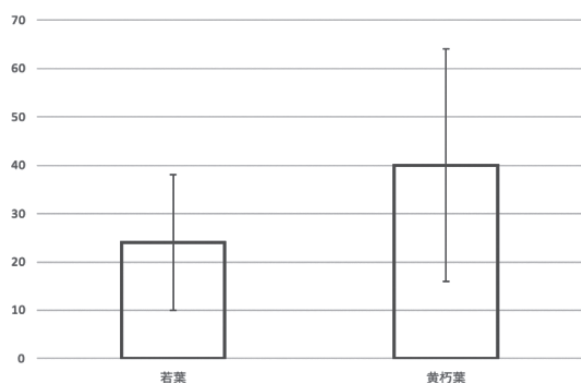
3-5 銅イオン・亜鉛イオンの濃度の計算

3-4の方法で求めた濃度に対し、希釈率を考慮し、元の葉の濃度を計算した。

4. 結果と考察

以上の実験により、表2のような結果が得られた。

- ・銅イオンの濃度は、若葉よりも黄朽葉で2倍以上増加した。
- ・亜鉛イオンの濃度は、若葉よりも黄朽葉で多かったが、データのばらつきが大きかった (図6)。



黄朽葉の方が、若葉よりも銅イオンや亜鉛イオンの濃度が高い理由について、マングローブが黄朽葉に銅イオンを貯める仕組みがあると考えられる。銅イオンや亜鉛イオンは、少量であれば植物の生育に必須な金属だが、いずれも濃度が高すぎると植物の生育に悪影響を及ぼすことが知られている。マングローブの生体内において、銅イオンおよび亜鉛イオンの最適濃度がどの程度であるかはわかっていないが、若葉や黄朽葉でこれらのイオンの濃度が高いことを考えると、いずれも今回調査を行ったマングローブにとっては銅イオンや金属イオンは過剰な状態であり、マングローブはこれらのイオンを黄朽葉に蓄積し、落葉することでこれらの過剰なイオンを排出している可能性がある。

5. 結論と展望

今回の研究により、メヒルギでは若葉よりも黄朽葉の方が銅イオンや亜鉛イオンを多く含むことがわかつ

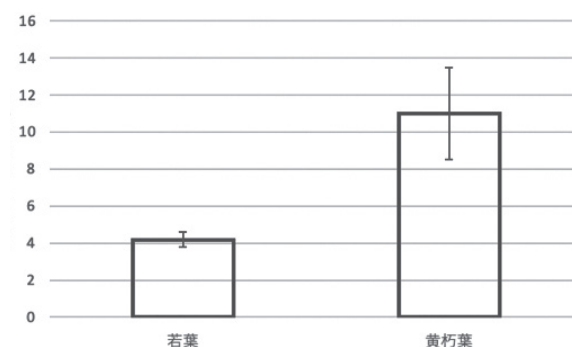


図6 生の若葉と黄朽葉に含まれる亜鉛イオン (左) と銅イオン (右) の濃度 (mg/L)

表1 各サンプルの希釈時の値と換算した値のまとめ

	亜鉛イオン (mg／L)					銅イオン (mg／L)			
	若葉		黄朽葉			若葉		黄朽葉	
サンプル	1000倍 希釈時	原液 換算	2000倍 希釈時	原液 換算	サンプル	50倍 希釈時	原液 換算	100倍 希釈時	原液 換算
1	0.04	40	0.04	80	1	0.09	4.5	0.06	6
2	0.02	20	0.01	20	2	0.09	4.5	0.15	15
3	0.01	10	0.02	40	3	0.08	4	0.09	9
4	0.03	30	0.01	20	4	0.07	3.5	0.09	9
5	0.02	20	—	—	5	0.07	3.5	0.13	13
平均値	0.024	24	0.02	40	6	0.09	4.5	0.13	13
標準偏差	0.01	10	0.01	24	7	0.09	4.5	0.09	9
					8	0.09	4.5	0.11	11
					9	0.09	4.5	0.1	10
					10	0.08	4	0.1	10
					平均	0.08	4.2	0.11	11
					標準偏差	0.008	0.4	0.025	2.5

た。これは、マングローブの黄朽葉を回収することで、水中の銅イオンや亜鉛イオンを回収し、水質を浄化できる可能性があることを示している。

しかし、以下のような課題も残されている。

- (1) 一般的に、植物に含まれるイオンの濃度を計測する際には、植物を乾燥させた上で乾燥重量あたりで計測するのが一般的だが、今回は植物を乾燥させずに計測を行ったので、一般的な文献との比較が難しい。
- (2) 植物から金属イオンを抽出する際に蒸留水を用い、また酸分解等の溶解処理を行わなかったため、葉から十分に金属イオンを抽出できていない可能性がある。また、金属イオンの有効数字が小さかったため、値の精度に問題がある。
- (3) ごく限られた地点から葉のサンプルを採取したため、他の地点では異なる結果が得られる可能性がある。
- (4) メヒルギから落葉する葉の量が不明であるため、落ち葉を回収することで環境中からどの程度の銅イオンを回収できるかが不明である。

これらの課題を解消するため、2023年3月下旬に、沖縄科学技術大学院大学 (OIST) の協力のもと、次の調査を行うことになっている。

- (1) 葉を乾燥させ、乾燥重量中の金属イオンの量を調べる
- (2) 葉を酸分解で溶解し、ICP-MSなどの高精度な機器で計測する。
- (3) 複数地点から葉のサンプルを採取する。
- (4) 落ち葉の調査を行い、落葉量を推定する。

6. 謝辞

本研究に当たり、漫湖水鳥湿地センター様にはメヒルギの葉などの試料の提供や、調査に関するご助言、発表に際してレクチャールームの貸出など、度重なるご協力を賜り誠に感謝申し上げます。研究の監督に随時後協力下さった宜保皓大先生、研究に際して手法論の提供など全てにおいてご指導して下さい、化学教科担当松尾英樹先生および、生物教科担当の大城与志仁先生に心から感謝申し上げます。

7. 参考文献

1. 沖縄県『沖縄の自然環境』2022年9月16日
<https://www.pref.okinawa.jp/site/kankyo/saisei/taisaku/kankyokyouiku/documents/04.sizen.pdf>
2. 特定非営利活動法人 国際マングローブ生態系協会『マングローブとは?』、2023年3月13日
http://mangrove.or.jp/subpage/about_mangroves.html
3. 棚原朗・仲栄真史哉・鈴木秀隆・金城嘉哉『漫湖干潟堆積物に含まれる重金属元素濃度の経年変化』、2023年3月13日
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jcrs/15/1/15_79/_pdf/-char/ja
4. 北宅 善昭『海水で生育するマングローブ植物の生態と現状』、2023年3月13日
<https://www.saltscience.or.jp/symposium/3-kitaya.pdf>
5. 沖縄県『さあ、世界へ目指せ世界遺産』2022年9月16日
<https://www.pref.okinawa.jp/site/kankyo/shizen/sekaishizenisan/index.html>
6. 環境省『遺産地域の特徴』2022年9月16日
<https://kyushu.env.go.jp/okinawa/amami-okinawa/description/index.html>
7. 沖縄県『2018年 沖縄の位置』2022年9月16日
<https://www.pref.okinawa.jp/site/kikaku/tochitai/keikaku/okinawanoichi.html>
8. 沖縄県『平成20年 国場川水系河川整備計画』2022年9月16日
https://www.pref.okinawa.jp/site/doboku/kasen/kikaku/documents/10kokuba_3.pdf
9. 田村正行『2016年マングローブの面積変化を衛星画像で見る, Journal of The Remote Sensing Society of Japan Vol.36 No.4 (2016) pp.407-409』2022年9月16日
https://www.jstage.jst.go.jp/article/rssj/36/4/36_407/_pdf
10. 国際熱帯木材機関『マングローブ林』2022年9月16日

- https://www.itto.int/ja/sustainable_forest_management/mangroves/
11. 国立環境研究所『2007 マングローブと環境問題』2022年9月16日
<https://www.nies.go.jp/kanko/news/26/26-4/26-4-04.html>
 12. 岡崎健治, 山崎秀策, 倉橋稔幸, 榊原正幸『2016 重金属を吸収する植物による排水の浄化実験 土木学会論文集G(環境), Vol.72, No.7, III_179III_185』2022年9月30日
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscej/72/7/72_III_179/_pdf/-char/ja
 13. WHO『2022 World Health Statistics』2022年9月27日
<https://apps.who.int/iris/rest/bitstreams/1435584/retrieve>
 - 14.『Our World in Data 2022 Share of domestic wastewater that is safely treated』2022年9月27日
<https://ourworldindata.org/grapher/wastewater-safely-treated>
 15. 農林水産省『第一章富栄養化現象』2022年9月27日
https://www.maff.go.jp/j/nousin/noukan/eikyoku_hyouka/attach/pdf/damu_suisitu-4.pdf
 16. United Nations Department of Economic and Social Affairs Sustainable Development,『Goal6 Ensure availability and sustainable management of water and sanitation for all』2022年9月27日
<https://sdgs.un.org/goals/goal6>
 17. 日本光合成学会『2020 塩ストレス』2022年9月27日
<https://photosyn.jp/pwiki/index.php?塩ストレス>
 18. 環境省『水質汚濁防止法改正関係Q&A』2022年9月27日
https://www.env.go.jp/water/law/qa_hs.html
 19. 漫湖水鳥・湿地センター『漫湖のマングローブの歴史』2022年9月30日
<https://www.manko-mizudori.net/welcome/ecology/mangroves/history-mangroves/>
 20. 漫湖水鳥・湿地センター『ラムサール条約』2022年9月30日
<https://www.manko-mizudori.net/ramsar/>
 21. 加藤茂, 矢口行雄, 杉二郎『1986 各種マングローブ葉のイオン組成 日本海水学会誌 第40巻 第1号』2022年7月15日
https://www.jstage.jst.go.jp/article/swsj/1965/40/1/40_9/_pdf/-char/ja
 22. 岡山大学『2013年 亜鉛の行き先を決める遺伝子を発見』2022年9月30日
https://www.okayama-u.ac.jp/tp/release/release_id21.html
 23. 公益社団法人日本薬学会『エンドサイトーシスについて』2022年9月30日
<https://www.pharm.or.jp/>
 24. 漫湖水鳥・湿地センター『漫湖のマングローブ植物』2022年9月30日
<https://www.manko-mizudori.net/welcome/ecology/mangroves/mangroves-in-manko/>
 25. 東京海上日動火災保険『マングローブの生育環境』2023年3月12日
<https://www.tokiomarine-nichido.co.jp/world/mangrove/aboutmangrove/environment.html>

沖縄尚学高等学校 BiO₂ 佐渡山風羽、
新城有希葉、赤嶺太一、我如古梨乃（沖縄県）