

薬剤を投入した環境下での
タイワンシジミの生残率

令和 5 年度
修士論文

三重大学大学院生物資源学研究科
共生環境学専攻 農業土木学講座
環境施設工学研究室

学籍番号 522M221

氏名 藤島 眞樹

指導教員 岡島 賢治

目次

目次.....	i
第1章 序論.....	1
1.1 はじめに	1
1.2 宮川用水について.....	3
1.3 タイワンシジミについて	6
1.4 タイワンシジミによる被害について	9
1.5 土地改良区での被害軽減の取り組み	12
1.6 シジミ被害の軽減対策について	14
1.7 研究目的	14
第2章 研究手法.....	15
2.1 実験で扱うタイワンシジミと使用する水.....	15
2.1.1 実験で扱うタイワンシジミ	15
2.1.2 実験で使用する水	15
2.2 実験方法	15
2.2.1 密閉条件での実験	15
2.2.2 開放条件での実験	20
2.3 水質の測定方法	23
2.3.1 溶存酸素濃度(DO)	23
2.3.2 全窒素(T-N)	24
2.3.3 硝酸態窒素(NO ₃ -N).....	27
2.3.4 亜硝酸態窒素(NO ₂ -N)	28
2.3.5 アンモニア態窒素(NH ₃ -N)	30
2.3.6 全リン(T-P).....	31
2.3.7 pH.....	33
2.3.8 カルシウムイオン濃度(Ca ²⁺)	34
2.3.9 電気伝導度(EC)	35
第3章 結果と考察	37
3.1 密閉条件の結果	37
3.1.1 対照区の結果	37

3.1.2	薬剤未投入区の結果.....	40
3.1.3	DO 調整区の結果	45
3.1.4	水酸化カルシウム投入区の結果.....	48
3.2	開放条件の結果	57
3.2.1	対照区	57
3.2.2	薬剤未投入区	61
3.2.3	DO 調整区	66
3.2.4	水酸化カルシウム投入区.....	70
3.3	考察	82
3.3.1	タイワンシジミの個体数変位と生残率	82
3.3.2	タイワンシジミの個体数変位と生残率(補正後)	88
3.3.3	各水質項目について.....	95
第4章	まとめ	134
4.1	タイワンシジミの生残率について.....	134
4.2	各水質の変化について.....	135
4.3	タイワンシジミの個体数変位と水質の関係について.....	140
参考文献	145
謝辞	148

第 1 章 序論

1.1 はじめに

日本では現在、外来生物が多く存在している。外来生物とは、もともとその地域に存在せず、人間の活動によって意図的、非意図的に持ち込まれた生きもののことである。外来生物は、在来種を捕食して在来種の数減らしたり、近縁の在来種と交雑して雑種を作り、在来生物の遺伝的な独自性を損なわせるなど生態系に悪影響を及ぼす。また、その地域や国に存在しなかった病気の発症や感染の危険を増やすなど人の生命・身体にも被害を及ぼす。さらに、農作物を食べたり、畑を踏み荒らしたり、農業用水利施設に侵入・繁茂し、通水障害を引き起こすなど農林水産業にも被害を及ぼす。中でも農業用水利施設における外来生物による被害には、抽水植物であるオオフサモ、ブラジルチドメグサ、ナガエツルノゲイトウが大雨で流されて用排兼用水路内の水門に詰まり、排水できない被害や水門を覆いつくし、ゲートが開かなくなる被害がある。また、沈水植物であるオオカナダモ、コカナダモが吐出槽に繁茂し、調整機能が低下、流出口のスクリーンが目詰まりする被害や排水機場稼働に伴う水流で流れ、除塵機に絡まりポンプが停止する被害がある。他にも、浮遊植物であるホテイアオイ、ボタンウキクサの繁茂により放水路下流の防潮樋門が通水できない被害や水田が水没する被害がある(農林水産省)。

日本では近年、開水路の改修工事において、農業用水のパイプライン化による更新が進められている。パイプラインは水源から管路で送水を行うことから、ポンプや水源と利用地点の高低差で水圧がかかっているため、任意に用水を利用することができること、開水路に比べ複雑な地形での路線設定が可能になること、適切な水利用方式を組み合わせることにより無効放流を少なくできることが特徴である。また、地下埋設区間が多くなることから、水路用地の節約、農作業機械の運行が容易、汚濁水の流入防止などの利点がある。このようにパイプライン化した農業水利施設における外来生物による被害には、貝類であるカワヒバリガイ、タイワンシジミが用水施設に付着することにより通水を阻害する被害や死貝が流下しパイプを閉塞させ通水を阻害する被害がある(農林水産省)。

三重県南勢部に位置する宮川用水においても、農業用水路の老朽化に伴い、施設の適正な機能を発揮させるため、幹線水路施設のパイプライン化が進められた。また、宮川用水では水路施設のパイプライン化とともに、全国に先駆け自動給水栓が配備された。このような状況下で、パイプライン化した受益地全体で末端の給水栓にタイワンシジミが詰まることによる通水障害が起きている。しかし、パイプライン内でのタイワンシジミの生息可能な環境など詳細は分かっておらず、効果的な駆除方法の確立には至っていない。

1.2 宮川用水について

宮川用水(図 1)は、三重県の南西部に位置し、受益値は主に宮川を中心とした伊勢平野に位置している。上流に位置する三重県大台町の粟生頭首工で宮川より導水し、斎宮調整池を経由する国営 1 号幹線と押野池を経由する国営 2 号幹線を主とし、各受益地へと配水している(図 2)。伊勢市、玉城町、明和町、多気町、大台町の 1 市 4 町 4,554ha の受益面積を持つ(東海農政局)。およそ水田が 86.9%、普通畑が 11.3%、果樹地が 1.8%の水稻が主体の優良農業地帯である。しかし、宮川より高い位置に農地が存在していたことから、宮川の水を農業用水として利用することは困難だった。そのため、昭和 32 年～昭和 41 年に行われた国営宮川用水農業水利事業によって農業用水の確保、用水施設の整備がなされ、農業用水の農地への配水が実現された。しかし、昭和 30 年代後半に施工された農業用水路は老朽化が進み、漏水事故が起き全面的な改修が必要となった。また、水利権は昭和 40 年に河川管理者の同意を得た内容で運用されており、その後の農業経営の変化や農地の乾田化、汎用化に伴う単位用水量の増加等により用水量不足が生じている。このため、平成 7 年～平成 24 年に行われた国営宮川用水第二期事業および国営関連事業では、用水計画の見直しが行われ、水利権の変更、用水の確保、また、水管理システムの導入により節水、水管理の省力化が図られた。そして、安定した農業経営の実現のため、既設導水路および幹線水路の改修、地区内に新たに斎宮調整池が造成された。さらに、施設の適正な機能を発揮させるため、老朽化した施設を更新、開水路のパイプライン化が行われた(宮川用水土地改良区)。

国営宮川用水第二期事業で造成された基幹水利施設は県営、団体営で建設される支線水路に接続され、農業用水は各ほ場に配水される。これらの支線水路を整備する関連事業は 5 つの工区に分かれて実施されており、令和 3 年度までの進捗率は事業費ベースで 87.1%である(図 3)。関連事業の実施により、今後さらなる水利施設の維持管理労力の軽減、営農時間の短縮、営農規模の拡大が見込まれる(宮川用水土地改良区)。県営支線水路の管径は 200~500mm、末端部に関しては 75~100mm である。

また、宮川用水の用水計画は以下の通りである。

計画基準年：昭和 52 年(水源依存量 1/10)

水田(湛水灌漑)：

早期(早植) 代かき期 4/11~4/20 普通期 4/21~8/11

早期(普通) 代かき期 4/21~4/30 普通期 5/1~8/21

早植 代かき期 5/1~5/10 普通期 5/11~8/31

畑地灌漑：散水灌漑 通年、うね間灌漑 通年

計画単位用水量：

水田減水深 代かき期 130mm/日 普通期 17mm/日

畑消費水量 1.5~5.0mm/日

計画最大取水量：10,438m³/s

(宮川用水概要、宮川用水土地改良区)

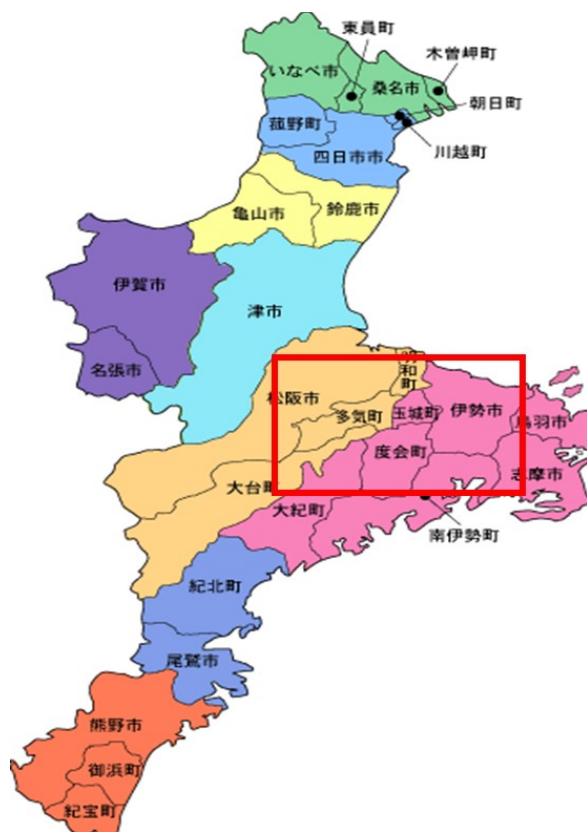


図 1 宮川用水の位置図

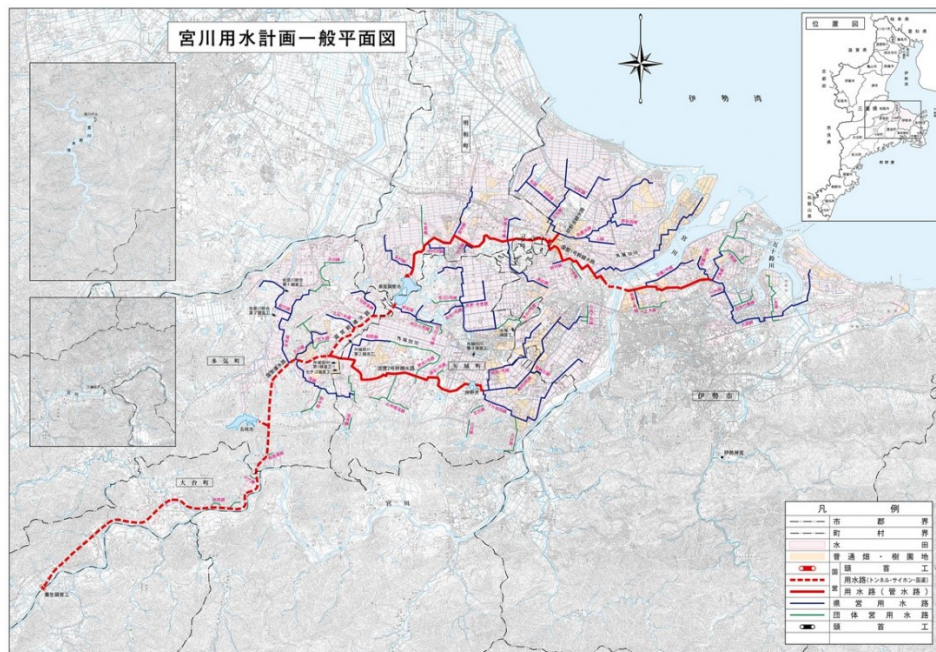


図 2 宮川用水計画一般平面図

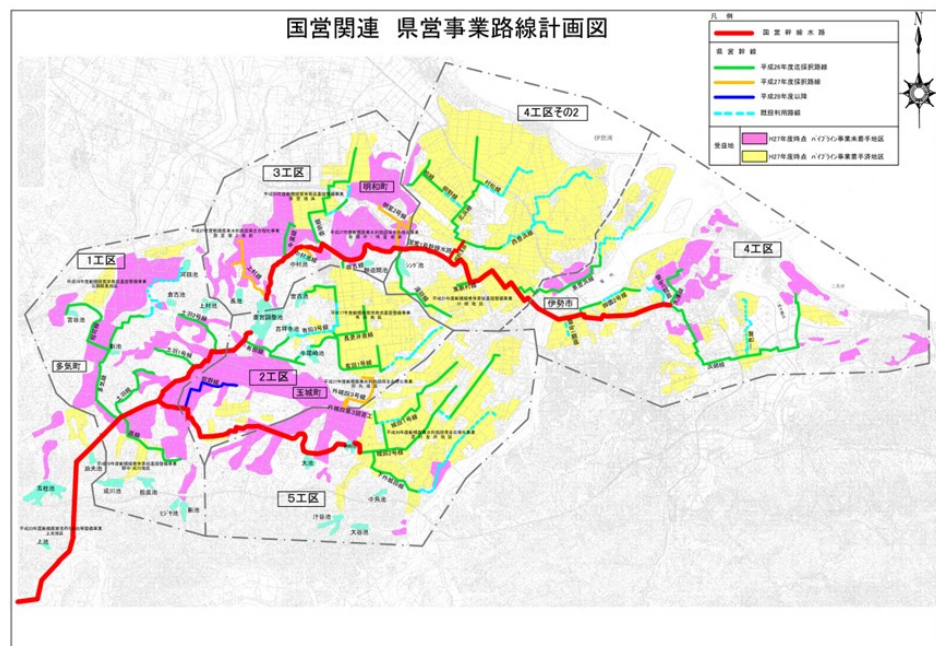


図 3 県営事業路線計画図

1.3 タイワンシジミについて

タイワンシジミは、中国・台湾などを原産とする淡水二枚貝であり、日本国内での最も古い記録は、魚屋で購入したシジミの中にタイワンシジミの混入が確認されたものである(西村・波部, 1985)。1987 年頃には岡山県の水路で繁殖が確認されている(中川ら, 2014)。1996 年には兵庫県加古川水系などで確認され、1999 年には神奈川県農業用排水路でも生息が確認され、相模川水系、金目川水系では広範囲にタイワンシジミが生息していることが報告されている(園原, 2005)。また、従来マシジミのみが生息していた琵琶湖の水が下流する淀川水系では、マシジミが姿を消し、タイワンシジミのみが多数確認された(石橋・古丸, 2003)。その後、2008 年には熊本県の緑川水系でも生息が確認されている(池上, 2009)など、現在は北海道を除く全都道府県に分布を広げている(木村, 1994)。

タイワンシジミの侵入の経緯には放流、生貝の混在する選別屑の河川への放棄、出荷場や家庭での洗浄時などに鰓の中の稚貝が溝や川へ流れすみ着くことなどが指摘されている(増田, 2004)。その他にも、アユやコイ等の魚類放流時における混入、サギ類等の水鳥を媒体とした拡散、ホタル幼虫の餌としてのカワニナ放流時における混入等が指摘されている(山田ら, 2010)。

タイワンシジミは初めの 1 年で殻長が 15~20mm となり(平野, 1987)、成長速度が速い。日本には在来の淡水二枚貝のマシジミが生息するが、タイワンシジミはマシジミ同様雌雄同体で自家受精による雄性発生を行い(Counts, 1986. Morton, 1986. Hedtke et al, 2008)、在来のマシジミに比べ生殖器官が大きく繁殖力が強いため(石橋・古丸, 2003)、在来のシジミに対し浸透交雑による遺伝的固有性の破壊や、一部の地域においては農業水利施設において通水阻害を起こすなどの被害が生じている。このため、環境省はタイワンシジミを「総合的に対策が必要な外来種(総合対策外来種)」のうち、「その他の総合対策外来種」に指定している。

タイワンシジミは主に藻類などの植物プランクトンを餌としている。鰓で酸素を取り入れるとともに餌のろ過を行う。通常、摂食のために酸素の取り込みに必要な量よりもはるかに多い量の水を取り入れ、ろ過を行う。水管を形成し、そこから取り入れた水を外套腔内でろ過を行い、懸濁している粒子を吸着させ、それらを口から取り入れる。また、餌となる物質以外のものや、必要以

上の食物を体内に取り込んでしまったときには、それを粘液で固めて出水管から殻外に出す。これを偽糞という(PeterG et al,1999)。

タイワンシジミの生息環境はマシジミと同様、砂礫～砂泥質のやや流れが緩やかで、しかも流況の安定した場所に多いと考えられる。3～4月から10～11月までが繁殖可能な時期と考えられ、卵胎生による繁殖のほかに卵生による繁殖する可能性も考えられる。

また、タイワンシジミは外部形態的には黄色型と緑色型の2つの系統が知られている。黄色型のタイワンシジミは殻表面が黄色で、殻の内側は白色にも関わらず、側歯だけが明瞭に紫色になることから同定が容易である。しかし、緑色型のタイワンシジミは、形態や殻色においてマシジミとの識別が専門家でも困難といわれている(山田ら,2010)。宮川用水にも両方の系統のタイワンシジミが排出されている。斎宮調整池と押野池を経由して配水される受益地および排泥工では、黄色型のタイワンシジミ(図4)が存在しており、牛尾崎池を経由して配水される受益地および排泥工では、緑色型のタイワンシジミ(図5)が主に分布している。



図4 黄色型のタイワンシジミ(明星1号排泥工で採取)



図 5 緑色型の台湾シジミ(長更井倉線 1 号排泥工で採取)

1.4 タイワンシジミによる被害について

日本国内のシジミ類による被害としては、以下の事例が報告されている。佐賀県東部の工業用水で 1990 年ごろから配水管やストレーナー等にマシジミが詰まり、流量の低下や製品の品質の低下が発生したことが報告されている(生島,1995)。2006 年岡山県では、既設の灌漑施設の末端スプリンクラーがシジミや藻類により目詰まりを起こすため配水に支障をきたしていると受益者から報告されている(川上・瀬川,2006)。また、鳥取県の水土理ネット北条砂丘の 2010 年 6 月の広報誌でも、シジミやシジミの卵による末端スプリンクラーのノズルが詰まる対策として、シジミフィルターが紹介されている(北条砂丘土地改良区,2010)。2015 年には愛知県の明治用水で転作などにより給水を行わない圃場において、管内部に沈殿土砂やシジミなどの貝殻が詰まり、水が出なくなる被害が報告されている(明治用水だより,2015)。

タイワンシジミによる被害については日本国内での報告事例は少ない。しかし、2013 年頃から三重県の宮川用水でタイワンシジミによる被害が報告されている。宮川用水でのタイワンシジミによる被害として、幹線水路では支線水路とのつなぎ目にある分土工減圧施設にあるごみの除去装置であるストレーナーでの目詰まり(図 6)がある。また、支線水路では自動給水栓にタイワンシジミが詰まった際に田畑へ給水できないという問題がある(図 7)。自動給水栓は内水圧により弁体を押上げて給水する仕組みとなっており、シジミが弁体付近に蓄積すると、弁体が開かずシジミ詰まりの原因となる。さらに水路の高さの確保や減圧のために幹線水路に設置される配水槽の中にタイワンシジミが大量に堆積することもある(図 8)。



図 6 ストレーナーでのシジミ詰まり



図 7 自動給水栓でのシジミ詰まり



図 8 配水槽でのタイワンシジミの堆積

1.5 土地改良区での被害軽減の取り組み

宮川用水土地改良区では被害軽減の取り組みとして、定期的な管路排出作業(図 9)の実施が行われている。管路排出作業とは、排泥工での排泥操作によってタイワンシジミを排出することである。この管路排出作業は、週 1 回 15 カ所、月 1 回 20 カ所で行われている。また、水管理方法の周知として、年に数回は給水栓を開けること、少量での給水の禁止、給水の分散利用の啓発資料を作成している。他にも、水路構造等の改良及び継続調査として、学官民連携により被害軽減を念頭においた施設設計を検討するとともに、排出作業時において生息調査を実施し、今後の対策検討の根拠資料としている。

パイプライン末端を管理している各土地改良区においても、排出量の軽減のための対策として、パイプラインの主にサイフォン構造になっている箇所に設置されている泥を排出するための排泥工より、年に 1~2 度、主に代かき期前の 3 月または 4 月に県営支線の末端からの排泥操作を実施し、タイワンシジミの排出作業を行っている。

また、タイワンシジミが大量に溜まる配水槽(図 10)の清掃を年に 1 回、1 日間水を止め、行っている。



図 9 排泥操作の様子



図 10 配水槽での清掃作業の様子

1.6 シジミ被害の軽減対策について

一時的に水の供給を止めることができる末端水路管内に薬剤を投入し、密閉状態にすることで、管内に生息するタイワンシジミを完全に死滅させ繁殖を防ぐという対策を想定した。また、配水槽での被害対策として、3日程度断水を行い、薬剤を投入することで配水槽内の水質が悪化し、タイワンシジミを完全に死滅させ繁殖を防ぐという対策を想定した。

1.7 研究目的

宮川用水ではタイワンシジミによる給水栓詰まりやストレーナーでの目詰まりなどの被害が多く報告されている。現状、宮川用水土地改良区では被害軽減の取り組みとして、定期的な管路排出作業の実施や配水槽内の清掃を行っている。しかし、週1回15カ所、月1回20カ所で行う管路排出作業や年1回行う配水槽内の清掃には多大な労力が必要である。そこで今回想定した水路管内や配水槽内への薬剤投入でタイワンシジミを完全に死滅させ繁殖を防ぐことが可能になれば、管理者の労力を削減することができる。

本研究では、一時的に水の供給を止め管内を閉塞することができる水田の末端水路や一時的に水の供給を止めることのできる開放した配水槽でタイワンシジミを薬剤投与により完全に死滅させ除去する方法の有効性を確かめることを目的とした。

第1章では、本研究の背景について記述した。

第2章では、研究手法について記述した。

第3章では、実験結果と得られた結果について検討した。

第4章では、第3章で得られた結果をもとに、生残率と水質の関係をまとめた。

第 2 章 研究手法

2.1 実験で扱うタイワンシジミと使用する水

2.1.1 実験で扱うタイワンシジミ

宮川用水土地改良区で 2023 年 4 月から 12 月まで毎週 1 回行われている排泥操作に毎月 1 回同行させていただき、排泥工から排出されるタイワンシジミを採取した。採取したタイワンシジミを一定期間飼育し、刺激を与えると足を水管から殻の中にしまう生きている個体を実験で使用した。また、殻長は 10~20mm の個体を使用した。

2.1.2 実験で使用する水

実験で使用する水は蒸留水とした。蒸留水は暗室の高低温室に入れ、十分曝気させ、溶存酸素飽和状態のものを使用した。

2.2 実験方法

本研究では、閉塞した末端水路をモデル化した実験(以下密閉条件での実験とする)と配水槽をモデル化した実験(以下開放条件での実験とする)を行った。

2.2.1 密閉条件での実験

管径 100mm の末端水路を想定し、ボトル(図 11)の中に溶存酸素飽和状態の蒸留水とタイワンシジミを入れ、空気が入らないように密閉状態にすることでモデル化した。対照区・薬剤未投入区・DO 調整区・水酸化 Ca 投入区(3 種類)の計 6 区を用意した。



図 11 ボトル(直径約 100mm)

① 対照区

ボトルの中に溶存酸素飽和状態の蒸留水を入れ、空気が入らないように密閉状態にしたものを 18 本用意した。これらを暗室の高低温室に入れた。期間を 25 日に設定し、0 日目から 25 日目まで 5 日毎にボトルを 3 本ずつ開封し、水質を測定した。一度開封したボトルは溶存酸素濃度の変動に影響するため廃棄した。測定項目は溶存酸素濃度(DO)、全窒素、硝酸態窒素、亜硝酸態窒素、アンモニア態窒素、全リン、pH、カルシウムイオン濃度(Ca^{2+})、電気伝導度(EC)とした。

② 薬剤未投入区

ボトルの中に溶存酸素飽和状態の蒸留水とタイワンシジミを 10 体入れ、空気が入らないように密閉状態にしたものを 27 本用意した。これらを暗室の高低温室に入れた。期間を 40 日に設定し、0 日目から 40 日目まで 5 日毎にボトルを 3 本ずつ開封し、水質を測定した。一度開封したボトルは溶存酸素濃度の変動に影響するため廃棄した。測定項目は溶存酸素濃度(DO)、全窒素、硝酸態窒素、亜硝酸態窒素、アンモニア態窒素、全リン、pH、カルシウムイオン濃度(Ca^{2+})、電気伝導度(EC)とした。また、タイワンシジミの個体数も記録し、生残率を計算した。計算式は以下の式(1)を基本として求めた。タイワンシジミの生死の判定は、水管から足を出している個体でボトルを揺らして刺激を与えても反応のないもの、殻を完全に開けているもの、ボトルを揺らすと水面に浮くものを死貝とした。

$$\text{生残率} = \frac{\text{生貝の個体数}}{\text{開封したボトルの全シジミ個体数}} \times 100(\%) \quad \text{式(1)}$$

③ DO 調整区

溶存酸素濃度の調整には、脱酸素剤ダイクリーン F(図 12)を使用した。ダイクリーン F は、食品および食品添加物許可品として認められた物質を原料とした脱酸素剤である。主成分である糖類の持つ強力な還元力で、溶存酸素を除去する。また、亜硫酸ナトリウム系の脱酸素剤のように、腐食性因子を発生させないため投入後の管理が容易、液体品で使いやすいなど、優れた特徴を持つ(カタログ引用)。

ダイクリーン F の水質にもたらす影響を調べるため、濃度別に溶存酸素濃度の低下を示す実験を 3 日間行った。結果を以下の表 1 に示す。

表 1 ダイクリーン F の濃度別溶存酸素濃度低下推移

濃度別DO濃度(mg/L)	0%	0.01%	0.1%	1%	5%	10%
1日目	9.8	9.6	5.5	1.2	1.1	0.9
2日目	9.7	9.4	5.4	1.1	1.0	0.9
3日目	9.9	9.3	5.2	0.9	0.9	0.9

以上の結果から本研究では、溶存酸素濃度が大幅に低下したダイクリーン F の濃度 1% の DO 調整区を用意した。

DO 調整区では、ダイクリーン F 濃度 1% の蒸留水を作成した。ボトルの中にダイクリーン F 濃度 1% の蒸留水とタイワンシジミを 10 体入れ、空気が入らないように密閉状態にしたものを 18 本用意した。これらを暗室の高低温室に入れた。期間を 25 日に設定し、0 日目から 25 日目まで 5 日毎にボトルを 3 本ずつ開封し、水質を測定した。一度開封したボトルは溶存酸素濃度の変動に影響するため廃棄した。測定項目は溶存酸素濃度(DO)、全窒素、硝酸態窒素、亜硝酸態窒素、アンモニア態窒素、全リン、pH、カルシウムイオン濃度(Ca^{2+})、電気伝導度(EC)とした。また、タイワンシジミの個体数も記録し、生残率を計算した。計算式は式(1)とした。タイワンシジミの生死の判定は、水管から足を出している個体でボトルを揺らして刺

激を与えても反応のないもの、殻を完全に開けているもの、ボトルを揺らすと水面に浮くものを死貝とした。

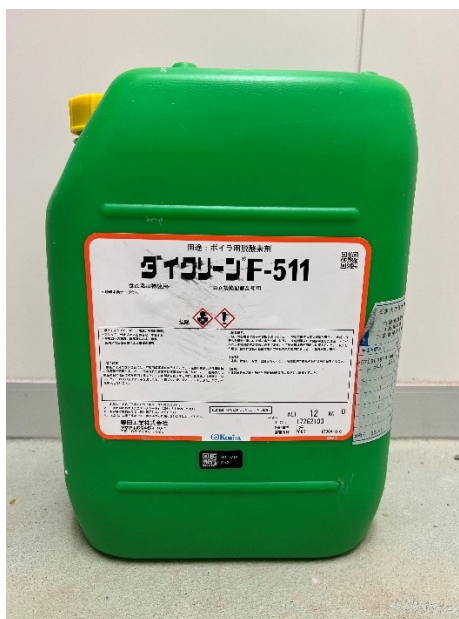


図 12 ダイクリーン F-511(栗田工業株式会社)

④ 水酸化 Ca 投入区

既往の研究で小林らはカワヒバリガイの死滅手法として効果の高い薬剤を抽出した。様々な薬剤をそれぞれ 3 日間暴露した後に換水し、清水環境下において 1 週間程度飼育する短期試験を行った結果、次亜塩素酸ナトリウム、水酸化カルシウム、過酸化水素、カルシウムシアナミドの 4 つの薬剤を使用したときにカワヒバリガイは斃死した(表 2)。その中でも水酸化カルシウムを使用した実験では、薬剤除去後も徐々に死亡率が上昇し、ほぼ全数が死亡することを確認できた。また、水酸化カルシウムを使用した実験はタイワンシジミでも行われており、短期試験における半数致死濃度は 800mg/L であると報告されている。以上の結果から本研究では、水酸化カルシウム(図 13)の濃度によって、半数致死濃度の半分である 400mg/L の水酸化 Ca0.04%区、半数致死濃度である 800mg/L の水酸化 Ca0.08%区、半数致死濃度の倍である 1600mg/L の水酸化 Ca0.16%区を用意した。

水酸化 Ca0.04%区では、水酸化カルシウム濃度 0.04%の蒸留水を作成した。ボトルの中に水酸化カルシウム濃度 0.04%の蒸留水とタイワンシジミを 10 体入れ、空気が入らないように密閉状態にしたものを 18 本用意した。これらを暗室の高低温室に入れた。期間を 25 日に設定し、0 日目から

25日目まで5日毎にボトルを3本ずつ開封し、水質を測定した。一度開封したボトルは溶存酸素濃度の変動に影響するため廃棄した。測定項目は溶存酸素濃度(DO)、全窒素、硝酸態窒素、亜硝酸態窒素、アンモニア態窒素、全リン、pH、カルシウムイオン濃度(Ca^{2+})、電気伝導度(EC)とした。また、タイワンシジミの個体数も記録し、生残率を計算した。計算式は式(1)とした。タイワンシジミの生死の判定は、水管から足を出している個体でボトルを揺らして刺激を与えても反応のないもの、殻を完全に開けているもの、ボトルを揺らすと水面に浮くものを死貝とした。

水酸化 Ca0.08%区では、水酸化カルシウム濃度 0.08%の蒸留水を作成した。その後は、水酸化 Ca0.04%区と同様にして実験を行った。

水酸化 Ca0.16%区では、水酸化カルシウム濃度 0.16%の蒸留水を作成した。その後は、水酸化 Ca0.04%区と同様にして実験を行った。

表 2 カワヒバリガイ対策に適用可能な薬剤

薬剤名	結果
次亜塩素酸ナトリウム	260mg/Lで半数が斃死
炭酸カルシウム	斃死なし
水酸化カルシウム	2,500mg/Lで半数が斃死
過酸化水素	100mg/Lで半数が斃死
カルシウムシアナミド	500mg/Lで半数が斃死
亜硫酸ナトリウム	斃死なし
硫酸マグネシウム	斃死なし
ニリン酸鉄	斃死なし
イソアスコルビン酸	斃死なし
陽イオン界面活性剤	斃死なし
メタアルデヒド	斃死なし
ヒドロキノン	斃死なし

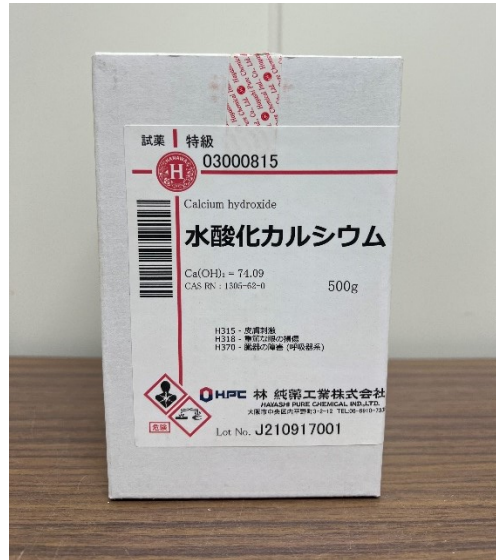


図 13 水酸化カルシウム(林純薬工業株式会社)

2.2.2 開放条件での実験

高さ約 5m の配水槽を想定し、50 分の 1 スケールの水槽(図 14)の中に蒸留水とタイワンシジミを入れることでモデル化した。密閉条件と同様に対照区・薬剤未調整区・DO 調整区・水酸化 Ca 投入区(3 種類)の計 6 区を用意した。



図 14 水槽(高さ約 10cm)

① 対照区

水槽の中に溶存酸素飽和状態の蒸留水を入れ、蓋を閉めずに開放状態にしたものを 3 つ用意した。これらを暗室の高低温室に入れた。実際に水を止めることができる期間を想定して、3 日間暴露した後に換水した。また、

配水槽への水の流入を想定して、水質測定後に水槽に蒸留水を入れた。暴露初日と 0 日目から 25 日目まで 5 日毎に水質を測定した。測定項目は溶存酸素濃度(DO)、全窒素、硝酸態窒素、亜硝酸態窒素、アンモニア態窒素、全リン、pH、カルシウムイオン濃度(Ca^{2+})、電気伝導度(EC)とした。

② 薬剤未投入区

水槽の中に溶存酸素飽和状態の蒸留水とタイワンシジミを 10 体入れ、蓋を閉めずに開放状態にしたものを 3 つ用意した。これらを暗室の高低温室に入れた。実際に水を止めることができる期間を想定して 3 日間暴露した後に換水し、清水環境下において 40 日間飼育した。また、配水槽への水の流入を想定して、水質測定後に水槽に蒸留水を入れた。暴露初日と 0 日目から 40 日目まで 5 日毎に水質を測定した。測定項目は溶存酸素濃度(DO)、全窒素、硝酸態窒素、亜硝酸態窒素、アンモニア態窒素、全リン、pH、カルシウムイオン濃度(Ca^{2+})、電気伝導度(EC)とした。また、タイワンシジミの個体数も記録し、生残率を計算した。計算式は以下の式(2)を基本として求めた。タイワンシジミの生死の判定は、水管から足を出している個体で水槽を揺らして刺激を与えても反応のないもの、殻を完全に開けているもの、水槽を揺らすと水面に浮くものを死貝とした。

$$\text{生残率} = \frac{\text{生貝の個体数}}{\text{水槽の中の全シジミ個体数}} \times 100(\%) \quad \text{式(2)}$$

③ DO 調整区

密閉条件と同様に、ダイクリン F の濃度 1% の DO 調整区を用意した。

DO 調整区では、ダイクリン F 濃度 1% の蒸留水を作成した。水槽の中にダイクリン F 濃度 1% の蒸留水とタイワンシジミを 10 体入れ、蓋を閉めずに開放状態にしたものを 3 つ用意した。これらを暗室の高低温室に入れた。実際に水を止めることができる期間を想定して 3 日間暴露した後に換水し、清水環境下において 25 日間飼育した。また、配水槽への水の流入を想定して、水質測定後に水槽に蒸留水を入れた。暴露初日と 0 日目から 25 日目まで 5 日毎に水質を測定した。測定項目は溶存酸素濃度(DO)、全窒素、硝酸態窒素、亜硝酸態窒素、アンモニア態窒素、全リン、pH、カルシ

ウムイオン濃度(Ca^{2+})、電気伝導度(EC)とした。また、タイワンシジミの個体数も記録し、生残率を計算した。計算式は式(2)とした。タイワンシジミの生死の判定は、水管から足を出している個体で水槽を揺らして刺激を与えても反応のないもの、殻を完全に開けているもの、水槽を揺らすと水面に浮くものを死貝とした。

④ 水酸化 Ca 投入区

密閉条件と同様に、水酸化カルシウム(図 13)の濃度によって、半数致死濃度の半分である 400mg/L の水酸化 Ca0.04%区、半数致死濃度である 800mg/L の水酸化 Ca0.08%区、半数致死濃度の倍である 1600mg/L の水酸化 Ca0.16%区を用意した。

水酸化 Ca0.04%区では、水酸化カルシウム濃度 0.04%の蒸留水を作成した。水槽の中に水酸化カルシウム濃度 0.04%の蒸留水とタイワンシジミを 10 体入れ、蓋を閉めずに開放状態にしたものを 3 つ用意した。これらを暗室の高低温室に入れた。実際に水を止めることができる期間を想定して 3 日間暴露した後に換水し、清水環境下において 25 日間飼育した。また、配水槽への水の流入を想定して、水質測定後に水槽に蒸留水を入れた。暴露初日と 0 日目から 25 日目まで 5 日毎に水質を測定した。測定項目は溶存酸素濃度(DO)、全窒素、硝酸態窒素、亜硝酸態窒素、アンモニア態窒素、全リン、pH、カルシウムイオン濃度(Ca^{2+})、電気伝導度(EC)とした。また、タイワンシジミの個体数も記録し、生残率を計算した。計算式は式(2)とした。タイワンシジミの生死の判定は、水管から足を出している個体で水槽を揺らして刺激を与えても反応のないもの、殻を完全に開けているもの、水槽を揺らすと水面に浮くものを死貝とした。

水酸化 Ca0.08%区では、水酸化カルシウム濃度 0.08%の蒸留水を作成した。その後は、水酸化 Ca0.04%区と同様にして実験を行った。

水酸化 Ca0.16%区では、水酸化カルシウム濃度 0.16%の蒸留水を作成した。その後は、水酸化 Ca0.04%区と同様にして実験を行った。

2.3 水質の測定方法

本研究では溶存酸素濃度(DO)、全窒素、硝酸態窒素、亜硝酸態窒素、アンモニア態窒素、全リン、pH、カルシウムイオン濃度(Ca^{2+})、電気伝導度(EC)を測定した。

2.3.1 溶存酸素濃度(DO)

溶存酸素濃度は、DO-5509(図 15)を用いて測定した。

① 使用器具

- ・ DO-5509

② 使用試薬

- ・ 電解液(DO-5509 用溶存液)

③ 手順

1. 溶存酸素プローブの先端の電解液コンテナを外し、電解液を注いだ。
2. 電源を ON にして校正スイッチを「DO」から「CAL」の位置にスライドさせ、ディスプレイの値が 0 になるまで「ゼロ調節ボリューム(ZEROADJ)」を調節した。
3. 電源を OFF にして溶存酸素プローブを接続し、再び電源を ON にするとディスプレイの数値が徐々に下がっていき、安定するまで約 5 分程度待った。
4. 数値が安定したら、読み取り値が 20.9 になるように「校正用調節ボリューム(O_2CAL)」を調整した。
5. 校正後、校正スイッチを「DO」の位置にスライドさせ、密閉条件では空気中の酸素がなるべく入らないように、ボトルの蓋を開けたらすぐに溶存酸素プローブを入れ一定の速度でかき回した。
6. 数秒の間は数値が変動するので変動しなくなるまでかき回し、一定になったところで数値を記録した。



図 15 DO-5509(溶存酸素計)

2.3.2 全窒素(T-N)

全窒素は、TNT826(図 16)と DRB200(図 17)と DR2800(図 18)を用いて測定した。

① 使用器具

- ・ DRB200(リアクター)
- ・ DR2800(吸光光度計)
- ・ マイクロピペット(1000 μ l~5000 μ l)
- ・ マイクロピペット(200,500,1000 μ l)
- ・ チップ(1000 μ l~5000 μ l)
- ・ チップ(200,500,1000 μ l)
- ・ 試験管

② 使用試薬

TNT826(全窒素試薬 LR TNT plus)

- ・ 試薬 A：水酸化ナトリウム、硝酸カリウム
- ・ 試薬 B：ペルオキシニ硫酸カリウム、メタホウ酸ナトリウム四水和物、ホウ砂

- ・ 試薬 D：イソプロパノール、2,6-ジメチルフェノール、酢酸イソペンチル
- ・ 試薬バイアル：硫酸、リン酸

③ 手順

1. 試験管にサンプルをマイクロピペット(1000 μ l~5000 μ l)で 1.3mL 入れ、試薬 A を 1.3mL、試薬 B を 1 錠入れた。
2. DRB200 に試験管を差し込み、120°C で 30 分間加熱した。
3. 加熱終了後、DRB200 から試験管を取り出し、18~20°C になるまで 15 分程度、室温で冷ました。
4. 試薬バイアルに加熱したサンプルをマイクロピペット(200,500,1000 μ l)で 0.5mL 入れた。
5. その後すぐに試薬 D をマイクロピペット(200,500,1000 μ l)で 0.2mL 入れた。
6. 試薬バイアルを振り混ぜ、15 分間反応を待った。
7. 時間経過後、DR2800 に差し込み、値を記録した。



図 16 TNT826(全窒素試薬 LR TNT plus)



図 17 DRB200(リアクター)



図 18 DR2800(吸光光度計)

2.3.3 硝酸態窒素($\text{NO}_3\text{-N}$)

硝酸態窒素は、硝酸試薬(図 19)と DR2800(図 18)を用いて測定した。

① 使用器具

- ・ DR2800(吸光光度計)
- ・ 角型セル(10mL)
- ・ ビーカー
- ・ ゴム栓
- ・ シリンジ
- ・ シリンジフィルター(孔径 $0.45\mu\text{m}$ 、直径 25mm)

② 使用試薬

硝酸試薬(NitraVer5)

- ・ NitraVer5 硝酸塩試薬パウダーピロー：リン酸二水素カリウム、スルファニル酸、ジヒドロキシ安息香酸、硫酸マグネシウム、カドミウム、マロン酸銅(II)、アクリル酸アミド重合物

③ 手順

1. 有機態窒素を取り除くために、シリンジとシリンジフィルターを用いてサンプルをろ過したものをビーカーに入れた。
2. 角型セルを2つ用意し、両方にろ過したサンプルを10mLずつ入れた。
3. 一方に NitraVer5 硝酸塩試薬パウダーピローを1包入れ(調整サンプル)、もう一方はブランクサンプルとした。
4. NitraVer5 硝酸塩試薬パウダーピローを入れた角型セルにゴム栓をして、1分間振り混ぜ、5分間反応を待った。
5. 時間経過後、DR2800の保存プログラム「353 N, Nitrate MR PP」を選択した。
6. 先にブランクサンプルセルを差し込み、「ゼロ」を押した。
7. その後、調製サンプルセルを差し込み、「測定」を押し、値を記録した。



図 19 硝酸試薬(NitraVer5)

2.3.4 亜硝酸態窒素($\text{NO}_2\text{-N}$)

亜硝酸態窒素は、亜硝酸試薬セット NitriVer3 LR TNT (図 20)と DR2800(図 18)を用いて測定した。

① 使用器具

- ・ DR2800(吸光光度計)
- ・ マイクロピペット(1000 μl ~5000 μl)
- ・ チップ(1000 μl ~5000 μl)
- ・ ビーカー
- ・ 試験管
- ・ シリンジ
- ・ シリンジフィルター(孔径 0.45 μm 、直径 25mm)

② 使用試薬

亜硝酸試薬セット NitriVer3 LR TNT

- ・ Test 'N Tube NitriVer3 亜硝酸塩バイアル：ピロ硫酸カリウム、スルファニル酸ナトリウム

③ 手順

1. 有機態窒素を取り除くために、シリソジとシリソジフィルターを用いてサンプルをろ過したものをビーカーに入れた。
2. 試験管にサンプルをマイクロピペット(1000μl~5000μl)で5.0mL 入れた。これをブラソクサンプルとした。
3. Test 'N Tube NitriVer3 亜硝酸塩バイアルにサンプルをマイクロピペット(1000μl~5000μl)で5.0mL 入れ(調製サンプル)、蓋を閉め振り混ぜ、20 分間反応を待った。
4. 時間経過後、DR2800 の保存プログラム「345 N, Nitrite LR TNT」を選択した。
5. 先にブラソクサンプルセルを差し込み、「ゼロ」を押した。
6. その後、調製サンプルセルを差し込み、「測定」を押し、値を記録した。

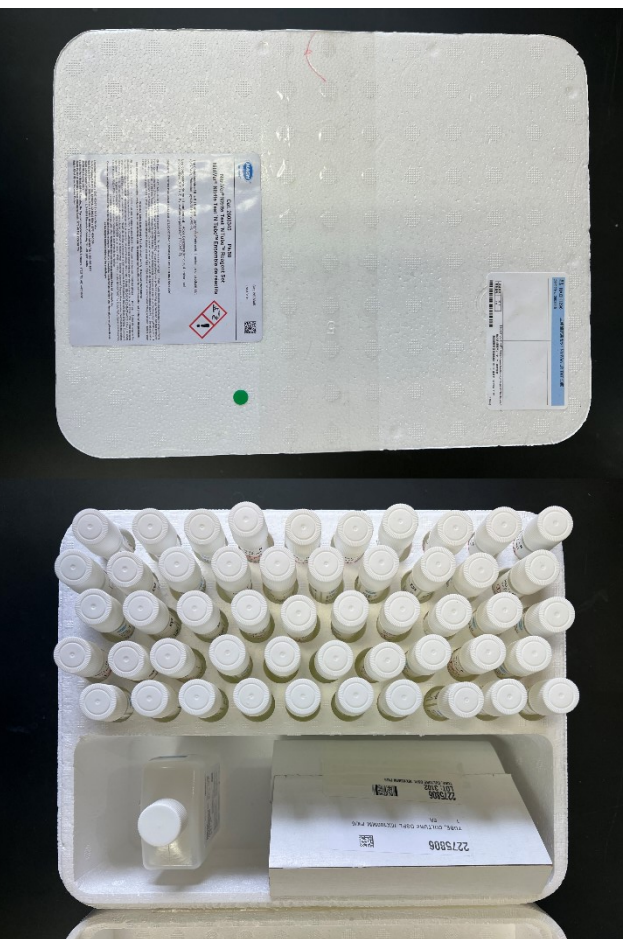


図 20 亜硝酸試薬セット NitriVer3 LR TNT

2.3.5 アンモニア態窒素(NH₃-N)

アンモニア態窒素は、アンモニア試薬 AmVer LR TNT(図 21)と DR2800(図 18)を用いて測定した。

① 使用器具

- ・ DR2800(吸光光度計)
- ・ マイクロピペット(1000μl~5000μl)
- ・ チップ(1000μl~5000μl)
- ・ ビーカー
- ・ シリンジ
- ・ シリンジフィルター(孔径 0.45μm、直径 25mm)

② 使用試薬

アンモニア試薬 AmVer LR TNT

- ・ AmVer アンモニア Test 'N Tube 試薬 LR：サリチル酸ナトリウム、水酸化ナトリウム
- ・ アンモニア-サリチル酸試薬：サリチル酸ナトリウム、酒石酸ナトリウム二水和物、ニトロプルシドナトリウム二水和物、m-ニトロフェノール
- ・ アンモニア-シアヌール酸試薬：水酸化リチウム一水和物、ジクロロイソシアヌール酸ナトリウム
- ・ 精製水：水

③ 手順

1. 有機態窒素を取り除くために、シリンジとシリンジフィルターを用いてサンプルをろ過したものをビーカーに入れた。
2. AmVer アンモニア Test 'N Tube 試薬 LR にサンプルをマイクロピペット(1000μl~5000μl)で 2.0mL 入れた(調製サンプル)。
3. AmVer アンモニア Test 'N Tube 試薬 LR にアンモニアを含まない水として精製水をマイクロピペット(1000μl~5000μl)で 2.0mL 入れた(ブランクサンプル)。
4. 各サンプルにアンモニア-サリチル酸試薬とアンモニア-シアヌール酸試薬を 1 包ずつ入れた。
5. 蓋を閉め、十分に振り混ぜ、20 分間反応を待った。

7. 時間経過後、DR2800 の保存プログラム「342 N, Ammonia LR TNT」を選択した。
8. 先にブランクサンプルセルを差し込み、「ゼロ」を押した。
9. その後、調製サンプルセルを差し込み、「測定」を押し、値を記録した。

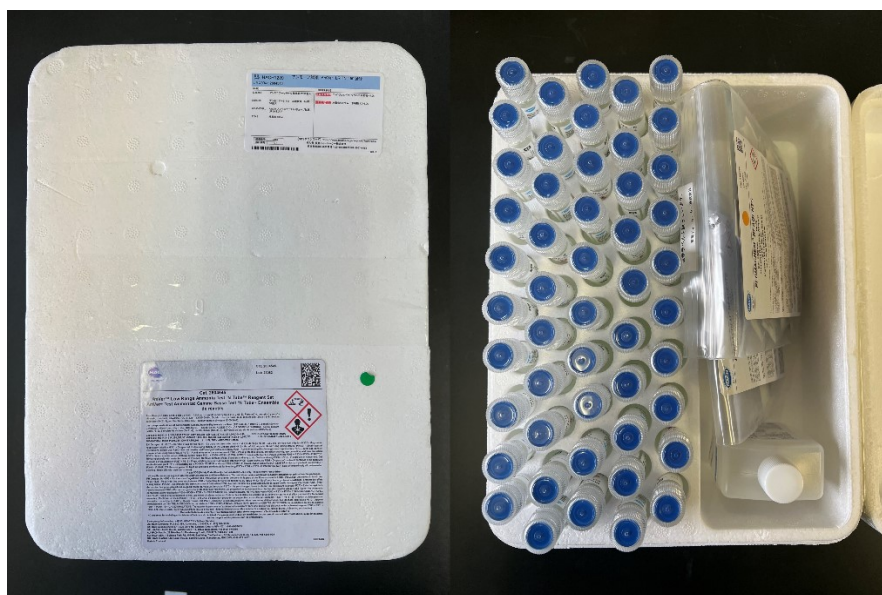


図 21 アンモニア試薬 AmVer LR TNT

2.3.6 全リン(T-P)

全リンは、TNT843(図 22)と DRB200(図 17)と DR2800(図 18)を用いて測定した。

① 使用器具

- ・ DRB200(リアクター)
- ・ DR2800(吸光光度計)
- ・ マイクロピペット(1000 μ l~5000 μ l)
- ・ マイクロピペット(200,500,1000 μ l)
- ・ チップ(1000 μ l~5000 μ l)
- ・ チップ(200,500,1000 μ l)

② 使用試薬

TNT843(全りん/りん酸試薬 LR TNT Plus)

- ・ 試薬 A：ペルオキシニ硫酸ナトリウム、メタホウ酸ナトリウム四水和物、硫酸リチウム一水和物
- ・ 試薬 B：硫酸、モリブデン酸アンモニウム四水和物、スルファミン酸、L-酒石酸、酒石酸アンチモンカリウム三水和物
- ・ 試薬 C：L-アスコルビン酸、メタホウ酸ナトリウム四水和物
- ・ 試薬バイアル：硫酸

③ 手順

1. 試薬バイアルにサンプルをマイクロピペット(1000 μ l~5000 μ l)で 2.0mL 入れた。
2. 試薬バイアルの蓋に付いている銀紙を剥がし、銀紙が付いていた方を下に向け蓋を閉めた。
3. 蓋の中に試薬 A が入っており、それをバイアル内に振り落とし、振り混ぜた。
4. DRB200 に試験管を差し込み、120°Cで 30 分間加熱した。
5. 加熱終了後、DRB200 から試験管を取り出し、18~20°Cになるまで 15 分程度、室温で冷ました。
6. 試薬バイアルに試薬 B をマイクロピペット(200,500,1000 μ l)で 0.2mL 入れた。
7. その後、蓋を試薬 C が入っているものに付け替え、それをバイアル内に振り落とし振り混ぜ、10 分間反応を待った。
8. 時間経過後、DR2800 に差し込み、値を記録した。

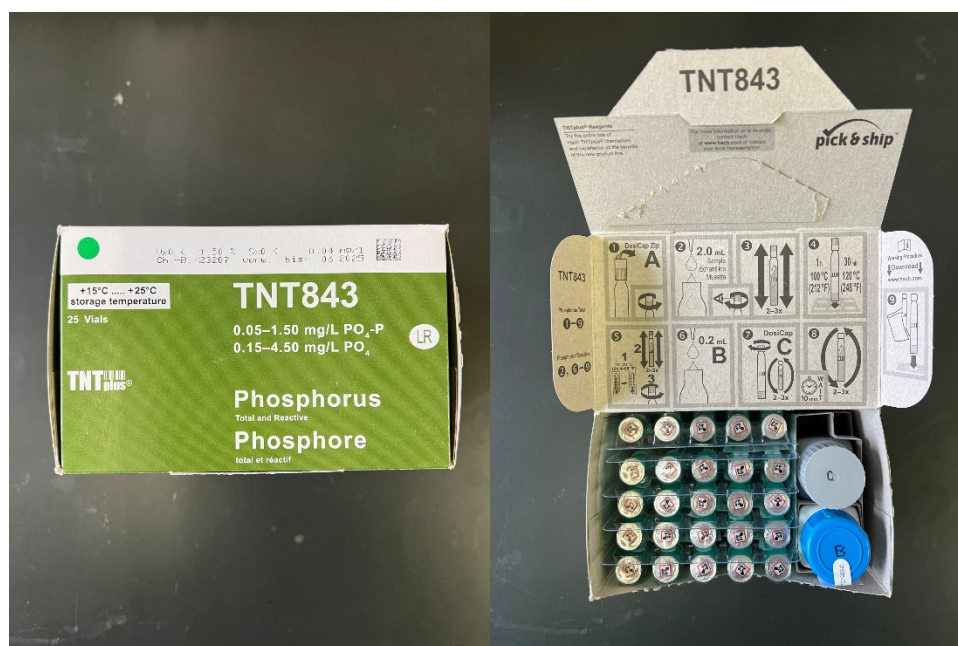


図 22 TNT843(全りん/りん酸 LR TNT Plus)

2.3.7 pH

pH は、HORIBA COMPACT pH METER LAQUAtwin-pH-33B(図 23)を用いて測定した。

① 使用器具

- ・ HORIBA COMPACT pH METER LAQUAtwin-pH-33B

② 使用試薬

- ・ pH 標準液(pH 6.86)

③ 手順

1. HORIBA COMPACT pH METER LAQUAtwin-pH-33B の平面センサ全体を覆うように pH 標準液を滴下した。
2. 蓋を閉じ、「CAL」スイッチを押した。(校正が完了すると画面上の CAL の点滅が止まり、自動的に測定画面に切り替わる。)
3. 蓋を開き、蒸留水でセンサを洗浄し、優しく水滴を取り除いた。
4. 平面センサ全体を覆うようにサンプルを滴下した。
5. 蓋を閉じ、「MEAS」スイッチを押した。(測定値が安定すると値が固定され、画面上の MEAS が点灯する。)
6. その後、測定値を記録した。

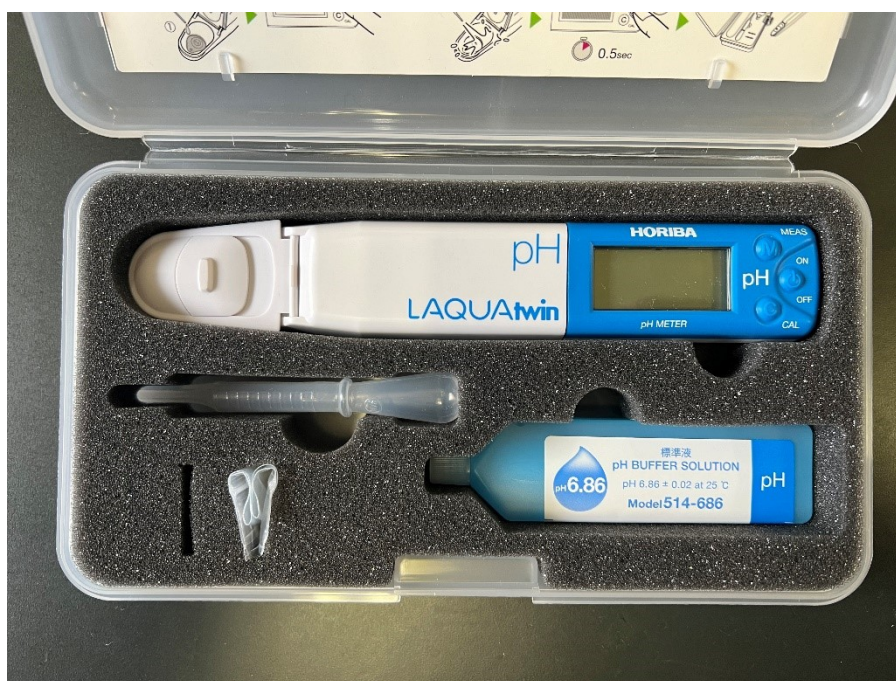


図 23 HORIBA COMPACT pH METER LAQUAtwin-pH-33B

2.3.8 カルシウムイオン濃度(Ca^{2+})

カルシウムイオン濃度は、HORIBA COMPACT Ca^{2+} METER LAQUAtwin-Ca-11(図 24)を用いて測定した。

① 使用器具

- ・ HORIBA COMPACT Ca^{2+} METER LAQUAtwin-Ca-11

② 使用試薬

- ・ カルシウムイオン用標準液 150ppm
- ・ カルシウムイオン用標準液 2000ppm

③ 手順

1. HORIBA COMPACT Ca^{2+} METER LAQUAtwin-Ca-11 の平面センサ全体を覆うようにカルシウムイオン用標準液 150ppm を滴下した。
2. 蓋を閉じ、「CAL」スイッチを2回押した。(校正が完了すると画面上のCALの点滅が止まる。)
3. 蓋を開き、蒸留水でセンサを洗浄し、優しく水滴を取り除いた。
4. 平面センサ全体を覆うようにカルシウムイオン用標準液 2000ppm を滴下した。

5. 蓋を閉じ、「CAL」スイッチを2回押した。(校正が完了すると画面上のCALの点滅が止まり、自動的に測定画面に切り替わる。)
6. 蓋を開き、蒸留水でセンサを洗浄し、優しく水滴を取り除いた。
7. 平面センサ全体を覆うようにサンプルを滴下した。
8. 蓋を閉じ、「MEAS」スイッチを押した。(測定値が安定すると値が固定され、画面上のMEASが点灯する。)
9. その後、測定値を記録した。

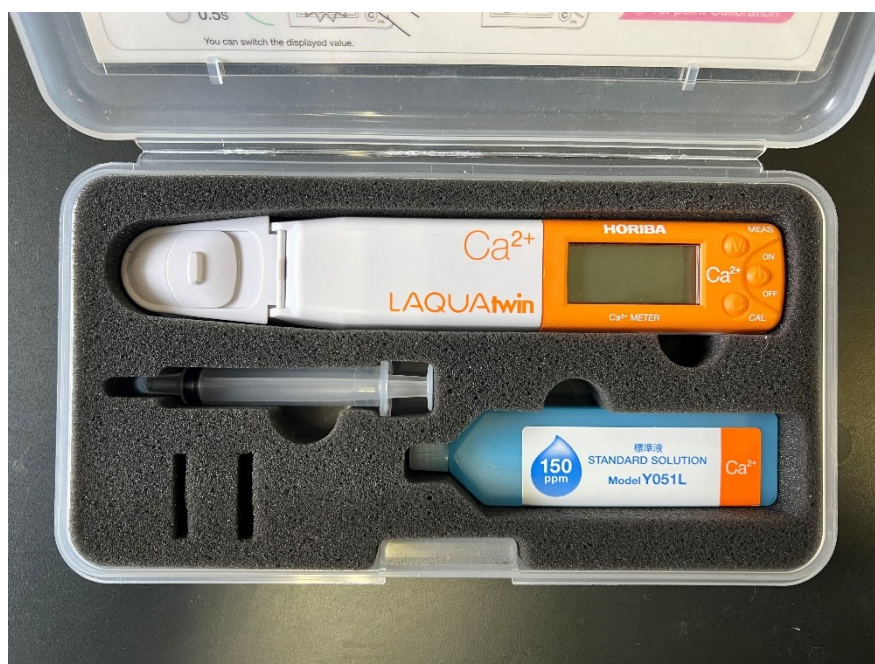


図 24 HORIBA COMPACT Ca²⁺ METER LAQUAtwin-Ca-11

2.3.9 電気伝導度(EC)

EC は、HORIBA COMPACT CONDUCTIVITY METER LAQUAtwin-EC-33B(図 25)を用いて測定した。

- ① 使用器具
 - ・ HORIBA COMPACT CONDUCTIVITY METER LAQUAtwin-EC-33B
- ② 使用試薬
 - ・ 電気伝導率標準液(1.41mS/cm)
- ③ 手順

1. HORIBA COMPACT CONDUCTIVITY METER LAQUAtwin-EC-33B
の平面センサ全体を覆うように電気伝導率標準液を滴下した。
2. 蓋を閉じ、「CAL」スイッチを押した。(校正が完了すると画面上の
CAL の点滅が止まり、自動的に測定画面に切り替わる。)
3. 蓋を開き、蒸留水でセンサを洗浄し、優しく水滴を取り除いた。
4. 平面センサ全体を覆うようにサンプルを滴下した。
5. 蓋を閉じ、「MEAS」スイッチを押した。(測定値が安定すると値が固定
され、画面上の MEAS が点灯する。)
6. その後、測定値を記録した。

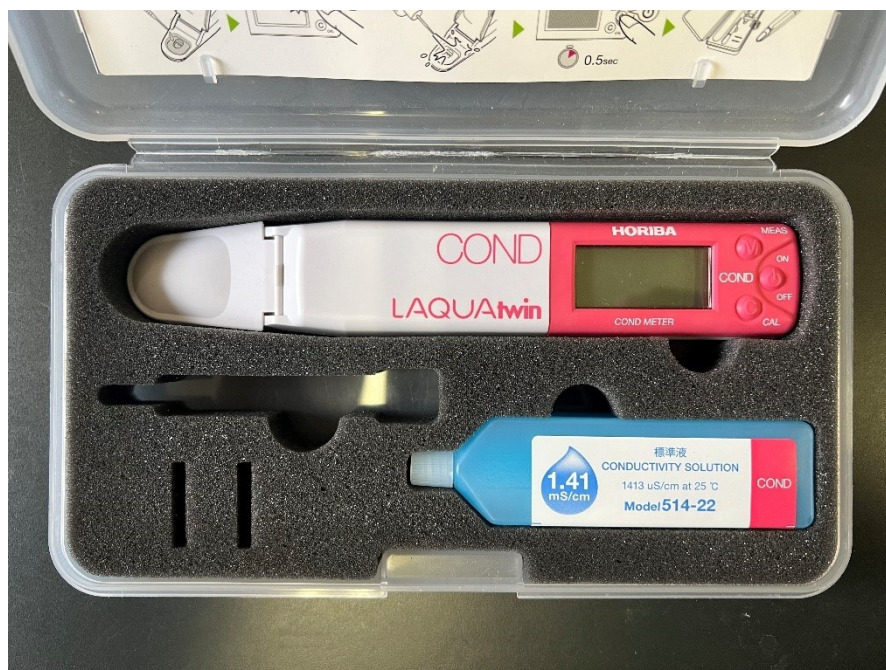


図 25 HORIBA COMPACT CONDUCTIVITY METER LAQUAtwin-EC-33B

第 3 章 結果と考察

3.1 密閉条件の結果

3.1.1 対照区の結果

対照区での実験で計測した水質の結果を表 4～表 12 に示す。

表 3 溶存酸素濃度と溶存酸素飽和度の変動(対照区、密閉条件)

日数	①DO(mg/L)	②DO(mg/L)	③DO(mg/L)	平均(mg/L)	DO飽和度(%)	室温(°C)
0	9.3	9.4	9.3	9.33	98.56	18.3
5	10.3	10.0	9.9	10.07	100.00	15.8
10	9.8	9.7	9.8	9.77	98.95	15.9
15	9.8	10	9.9	9.90	100.00	15.9
20	10.0	9.6	9.8	9.80	97.22	15.0
25	9.7	9.8	9.8	9.77	98.95	15.8

表 4 全窒素の変動(対照区、密閉条件)

日数	①T-N(mg/L)	②T-N(mg/L)	③T-N(mg/L)	平均(mg/L)
0	0	0	0	0
5	0	0	0	0
10	0	0	0	0
15	0	0	0	0
20	0	0	0	0
25	0	0	0	0

表 5 硝酸態窒素の変動(対照区、密閉条件)

日数	①NO3-N(mg/L)	②NO3-N(mg/L)	③NO3-N(mg/L)	平均(mg/L)
0	0.2	0.5	0.3	0.333
5	0.4	0.4	0.3	0.367
10	0.5	0.3	0.4	0.400
15	0.4	0.3	0.3	0.333
20	0.4	0.3	0.4	0.367
25	0.3	0.3	0.4	0.333

表 6 亜硝酸態窒素の変動(対照区、密閉条件)

日数	①NO ₂ -N(mg/L)	②NO ₂ -N(mg/L)	③NO ₂ -N(mg/L)	平均(mg/L)
0	0.002	0	0.003	0.00167
5	0.002	0.001	0.002	0.00167
10	0.003	0.002	0.003	0.00267
15	0.004	0.002	0.003	0.00300
20	0.004	0.003	0.003	0.00333
25	0.003	0.004	0.003	0.00333

表 7 アンモニア態窒素の変動(対照区、密閉条件)

日数	①NH ₃ -N(mg/L)	②NH ₃ -N(mg/L)	③NH ₃ -N(mg/L)	平均(mg/L)
0	0	0.02	0.01	0.01
5	0	0	0	0
10	0	0	0	0
15	0	0	0	0
20	0	0	0	0
25	0	0	0	0

表 8 全リンの変動(対照区、密閉条件)

日数	①T-P(mg/L)	②T-P(mg/L)	③T-P(mg/L)	平均(mg/L)
0	0	0	0	0
5	0	0	0	0
10	0	0	0	0
15	0	0	0	0
20	0	0	0	0
25	0	0	0	0

表 9 pH の変動(対照区、密閉条件)

日数	①pH	②pH	③pH	平均
0	7.47	6.67	7.06	7.067
5	6.70	6.40	7.01	6.703
10	6.84	6.53	6.79	6.720
15	6.77	6.50	6.62	6.630
20	6.66	6.72	6.68	6.687
25	6.68	6.71	6.59	6.660

表 10 カルシウムイオン濃度の変動(対照区、密閉条件)

日数	①Ca ²⁺ (ppm)	②Ca ²⁺ (ppm)	③Ca ²⁺ (ppm)	平均(ppm)
0	0	0	0	0
5	0	0	0	0
10	0	0	0	0
15	0	0	0	0
20	0	0	0	0
25	0	0	0	0

表 11 電気伝導度の変動(対照区、密閉条件)

日数	①EC(μS/cm)	②EC(μS/cm)	③EC(μS/cm)	平均(μS/cm)
0	12	5	8	8.33
5	1	13	7	7.00
10	1	2	8	3.67
15	1	9	5	5.00
20	6	3	5	4.67
25	2	9	7	6.00

表 12 個体数と生残率の変動(対照区、密閉条件)

日数	①個体数	②個体数	③個体数	平均	生残率(%)
0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0

3.1.2 薬剤未投入区の結果

薬剤未投入区での実験で計測した水質の結果を表 13～表 22 に示す。

表 13 溶存酸素濃度と溶存酸素飽和度の変動(薬剤未投入区、密閉条件)

日数	①DO(mg/L)	②DO(mg/L)	③DO(mg/L)	平均(mg/L)	DO飽和度(%)	室温(°C)
0	7.7	7.4	7.6	7.57	89.87	23.5
5	3.5	2.8	4.3	3.53	41.96	23.9
10	3.6	4.7	3.6	3.97	47.11	24.4
15	2.9	3.3	3.1	3.10	37.53	25.4
20	1.9	3.5	2.5	2.63	32.47	26.0
25	3.3	2.8	4.7	3.60	44.39	25.8
30	2.7	2.5	3.0	2.73	34.30	27.4
35	1.3	1.3	3.0	1.87	23.84	28.3
40	0.9	0.9	1.3	1.03	13.67	29.7

表 14 全窒素の変動(薬剤未投入区、密閉条件)

日数	①T-N(mg/L)	②T-N(mg/L)	③T-N(mg/L)	平均(mg/L)
0	0.795	0.835	0.773	0.801
5	1.06	1.07	1.09	1.073
10	16.3	1.15	14.5	10.650
15	3.06	3.85	3.24	3.383
20	15.7	8.01	3.13	8.947
25	16.1	34.2	2.57	17.623
30	24.6	24.9	15.7	21.733
35	26.3	25.7	27.4	26.467
40	22.8	33.2	26.5	27.500

表 15 硝酸態窒素の変動(薬剤未投入区、密閉条件)

日数	①NO ₃ -N(mg/L)	②NO ₃ -N(mg/L)	③NO ₃ -N(mg/L)	平均(mg/L)
0	0.3	0.3	0.3	0.300
5	0.4	0.3	0.3	0.333
10	0.3	0.2	0.5	0.333
15	1.1	0.5	0.8	0.800
20	0.4	1.0	0.5	0.633
25	0.4	0.9	1.0	0.767
30	0.5	1.0	0.5	0.667
35	0.3	0.4	0.7	0.467
40	0.4	0.3	0.7	0.467

表 16 亜硝酸態窒素の変動(薬剤未投入区、密閉条件)

日数	①NO ₂ -N(mg/L)	②NO ₂ -N(mg/L)	③NO ₂ -N(mg/L)	平均(mg/L)
0	0.006	0.008	0.009	0.00767
5	0.011	0.013	0.006	0.01000
10	0.008	0.005	0.01	0.00767
15	0.013	0.007	0.01	0.01000
20	0.009	0.008	0.013	0.01000
25	0.012	0.01	0.021	0.01433
30	0.015	0.013	0.012	0.01333
35	0.002	0	0.036	0.01267
40	0.025	0.003	0.003	0.01033

表 17 アンモニア態窒素の変動(薬剤未投入区、密閉条件)

日数	①NH ₃ -N(mg/L)	②NH ₃ -N(mg/L)	③NH ₃ -N(mg/L)	平均(mg/L)
0	0.17	0.22	0.18	0.190
5	0.21	0.18	0.17	0.187
10	0	0	0.32	0.107
15	1.2	0.24	0.19	0.543
20	0	2.4	1.77	1.390
25	3.5!	3.5!	0.11	0.110
30	3.5!	3.5!	3.5!	#DIV/0!
35	3.5!	3.5!	3.5!	#DIV/0!
40	3.5!	3.5!	3.5!	#DIV/0!

* 測定範囲を超えたデータは「3.5!」と測定されエラーになった。

表 18 全リンの変動(薬剤未投入区、密閉条件)

日数	①T-P(mg/L)	②T-P(mg/L)	③T-P(mg/L)	平均(mg/L)
0	0	0	0	0.000
5	0.553	0.416	0.388	0.452
10	5.84	0.612	4.71	3.721
15	0.915	1.23	1.12	1.088
20	6.24	3.48	1.34	3.687
25	6.04	7.54	1.57	5.050
30	6.86	7.98	7.28	7.373
35	8.22	7.74	7.3	7.753
40	8.23	8.69	7.15	7.690

表 19 pH の変動(薬剤未投入区、密閉条件)

日数	①pH	②pH	③pH	平均
0	6.71	6.58	6.67	6.653
5	6.80	6.71	6.77	6.760
10	6.69	6.85	6.69	6.743
15	6.94	6.98	6.96	6.960
20	6.67	6.95	7.01	6.877
25	6.89	6.71	7.12	6.907
30	6.75	6.73	6.74	6.740
35	6.92	6.92	6.84	6.893
40	6.99	6.95	6.94	6.960

表 20 カルシウムイオン濃度の変動(薬剤未投入区、密閉条件)

日数	①Ca ²⁺ (ppm)	②Ca ²⁺ (ppm)	③Ca ²⁺ (ppm)	平均(ppm)
0	0	0	0	0.00
5	28	25	30	27.67
10	110	54	100	88.00
15	120	100	120	113.33
20	130	140	120	130.00
25	140	160	120	140.00
30	140	150	150	146.67
35	150	150	140	146.67
40	150	170	160	160.00

表 21 電気伝導度の変動(薬剤未投入区、密閉条件)

日数	①EC(μS/cm)	②EC(μS/cm)	③EC(μS/cm)	平均(μS/cm)
0	29	34	26	29.67
5	91	73	77	80.33
10	385	142	318	281.67
15	156	182	171	169.67
20	367	331	213	303.67
25	425	649	309	461.00
30	612	696	572	626.67
35	661	608	576	615.00
40	710	837	712	753.00

表 22 個体数と生残率の変動(薬剤未投入区、密閉条件)

日数	①個体数	②個体数	③個体数	平均	生残率(%)
0	10	10	10	10.00	100.00
5	10	10	10	10.00	100.00
10	6	10	5	7.00	70.00
15	10	9	10	9.67	96.67
20	2	5	10	5.67	56.67
25	0	0	8	2.67	26.67
30	0	0	0	0.00	0.00
35	0	0	0	0.00	0.00
40	0	0	0	0.00	0.00

3.1.3 DO 調整区の結果

DO 調整 1%区での実験で計測した水質の結果を表 23～表 32 に示す。

表 23 溶存酸素濃度と溶存酸素飽和度の変動(DO 調整区、密閉条件)

日数	①DO(mg/L)	②DO(mg/L)	③DO(mg/L)	平均(mg/L)	DO飽和度(%)	室温(°C)
0	7.5	7.7	7.6	7.60	90.26	23.5
5	0.9	0.9	0.8	0.87	10.29	23.9
10	0.8	0.8	0.8	0.80	9.50	24.4
15	1.3	1.5	2.0	1.60	19.37	25.4
20	2.7	3.0	2.7	2.80	34.53	26.0
25	3.0	3.0	3.1	3.03	37.40	25.8

表 24 全窒素の変動(DO 調整区、密閉条件)

日数	①T-N(mg/L)	②T-N(mg/L)	③T-N(mg/L)	平均(mg/L)
0	0.454	0.557	0.701	0.571
5	10.8	12.5	11.6	11.633
10	16.6	23.7	27.7	22.667
15	25.1	19.2	15.3	19.867
20	24.3	30.1	25.2	26.533
25	15.1	28.2	16.6	19.967

表 25 硝酸態窒素の変動(DO 調整区、密閉条件)

日数	①NO3-N(mg/L)	②NO3-N(mg/L)	③NO3-N(mg/L)	平均(mg/L)
0	0.4	0.3	0.4	0.367
5	0.9	0.8	1.1	0.933
10	1.2	1.9	2.2	1.767
15	1.6	1.8	2.3	1.900
20	1.3	1.8	1.7	1.600
25	2.4	1.8	1.8	2.000

表 26 亜硝酸態窒素の変動(DO 調整区、密閉条件)

日数	①NO ₂ -N(mg/L)	②NO ₂ -N(mg/L)	③NO ₂ -N(mg/L)	平均(mg/L)
0	0.006	0.007	0.006	0.00633
5	0.009	0.01	0.011	0.01000
10	0.012	0.021	0.023	0.01867
15	0.019	0.023	0.021	0.02100
20	0.021	0.018	0.022	0.02033
25	0.02	0.019	0.021	0.02000

表 27 アンモニア態窒素の変動(DO 調整区、密閉条件)

日数	①NH ₃ -N(mg/L)	②NH ₃ -N(mg/L)	③NH ₃ -N(mg/L)	平均(mg/L)
0	0	0	0	0
5	0	0	0	0
10	3.5!	3.5!	3.5!	#DIV/0!
15	3.5!	3.5!	3.5!	#DIV/0!
20	3.5!	3.5!	3.5!	#DIV/0!
25	3.5!	3.5!	3.5!	#DIV/0!

* 測定範囲を超えたデータは「3.5!」と測定されエラーになった。

表 28 全リンの変動(DO 調整区、密閉条件)

日数	①T-P(mg/L)	②T-P(mg/L)	③T-P(mg/L)	平均(mg/L)
0	0	0	0	0.000
5	2.98	3.29	4.09	3.453
10	4.10	5.58	6.45	5.377
15	5.00	5.82	6.76	5.860
20	4.73	5.11	4.27	4.703
25	6.04	7.67	1.50	5.070

表 29 pH の変動(DO 調整区、密閉条件)

日数	①pH	②pH	③pH	平均
0	6.27	6.31	6.36	6.313
5	6.05	6.16	6.05	6.087
10	6.06	6.05	5.98	6.030
15	6.04	6.05	6.07	6.053
20	6.10	6.01	6.05	6.053
25	6.08	6.09	6.09	6.087

表 30 カルシウムイオン濃度の変動(DO 調整区、密閉条件)

日数	①Ca ²⁺ (ppm)	②Ca ²⁺ (ppm)	③Ca ²⁺ (ppm)	平均(ppm)
0	0	0	0	0.00
5	21	22	30	24.33
10	40	59	63	54.00
15	58	62	65	61.67
20	66	74	70	70.00
25	93	81	75	83.00

表 31 電気伝導度の変動(DO 調整区、密閉条件)

日数	①EC(μS/cm)	②EC(μS/cm)	③EC(μS/cm)	平均(μS/cm)
0	1450	1480	1540	1490.00
5	2930	3000	3120	3016.67
10	3030	3230	3210	3156.67
15	3090	3160	3250	3166.67
20	3110	3150	3040	3100.00
25	3240	3290	3230	3253.33

表 32 個体数と生残率の変動(DO 調整区、密閉条件)

日数	①個体数	②個体数	③個体数	平均	生残率(%)
0	10	10	10	10.00	100.00
5	5	5	3	4.33	43.33
10	1	0	0	0.33	3.33
15	0	0	0	0.00	0.00
20	0	0	0	0.00	0.00
25	0	0	0	0.00	0.00

3.1.4 水酸化カルシウム投入区の結果

水酸化 Ca0.04%区での実験で計測した水質の結果を表 33～表 42、水酸化 Ca0.08%区での実験で計測した水質の結果を表 43～表 52、水酸化 Ca0.16%区での実験で計測した水質の結果を表 53～表 62 に示す。

表 33 溶存酸素濃度と溶存酸素飽和度の変動(水酸化 Ca0.04%区、密閉条件)

日数	①DO(mg/L)	②DO(mg/L)	③DO(mg/L)	平均(mg/L)	DO飽和度(%)	室温(°C)
0	8.4	8.2	8.1	8.23	100.00	25.5
5	8.0	7.8	7.8	7.87	97.00	26.2
10	7.2	7.8	7.4	7.47	95.36	27.9
15	7.3	7.3	7.5	7.37	95.80	29.4
20	7.6	7.5	7.5	7.53	99.65	29.9
25	7.5	7.9	7.7	7.70	100.00	30.6

表 34 全窒素の変動(水酸化 Ca0.04%区、密閉条件)

日数	①T-N(mg/L)	②T-N(mg/L)	③T-N(mg/L)	平均(mg/L)
0	0.456	0.545	0.461	0.487
5	1.84	4.7	3.56	3.367
10	2.94	3.87	4.33	3.713
15	16.4	20.7	11.7	16.267
20	12.6	24.1	13.6	16.767
25	28.2	19.5	20.2	22.633

表 35 硝酸態窒素の変動(水酸化 Ca0.04%区、密閉条件)

日数	①NO3-N(mg/L)	②NO3-N(mg/L)	③NO3-N(mg/L)	平均(mg/L)
0	0.9	0.6	0.7	0.733
5	0.5	0.7	0.6	0.600
10	0.9	0.7	0.8	0.800
15	0.6	0.6	0.6	0.600
20	0.6	0.7	0.7	0.667
25	0.5	0.6	0.5	0.533

表 36 亜硝酸態窒素の変動(水酸化 Ca0.04%区、密閉条件)

日数	①NO ₂ -N(mg/L)	②NO ₂ -N(mg/L)	③NO ₂ -N(mg/L)	平均(mg/L)
0	0.005	0.005	0.004	0.00467
5	0.003	0.007	0.004	0.00467
10	0.005	0.006	0.002	0.00433
15	0.003	0.005	0.006	0.00467
20	0.006	0.002	0.005	0.00433
25	0.005	0.006	0.004	0.00500

表 37 アンモニア態窒素の変動(水酸化 Ca0.04%区、密閉条件)

日数	①NH ₃ -N(mg/L)	②NH ₃ -N(mg/L)	③NH ₃ -N(mg/L)	平均(mg/L)
0	0.02	0.03	0.03	0.027
5	0.54	2.01	2.28	1.610
10	3.5!	3.5!	3.01	3.010
15	3.5!	3.5!	3.5!	#DIV/0!
20	3.5!	3.5!	3.5!	#DIV/0!
25	3.5!	3.5!	3.5!	#DIV/0!

* 測定範囲を超えたデータは「3.5!」と測定されエラーになった。

表 38 全リンの変動(水酸化 Ca0.04%区、密閉条件)

日数	①T-P(mg/L)	②T-P(mg/L)	③T-P(mg/L)	平均(mg/L)
0	0.683	0.713	0.669	0.688
5	0.51	1.58	0.588	0.893
10	1.50	1.61	0.825	1.312
15	1.60	1.30	0.971	1.290
20	1.27	0.962	1.15	1.127
25	1.21	1.34	1.55	1.367

表 39 pH の変動(水酸化 Ca0.04%区、密閉条件)

日数	①pH	②pH	③pH	平均
0	11.62	11.58	11.61	11.603
5	11.63	11.40	11.32	11.450
10	11.55	11.22	11.32	11.363
15	11.48	11.32	11.18	11.327
20	11.30	11.43	11.28	11.337
25	11.31	11.21	11.05	11.190

表 40 カルシウムイオン濃度の変動(水酸化 Ca0.04%区、密閉条件)

日数	①Ca ²⁺ (ppm)	②Ca ²⁺ (ppm)	③Ca ²⁺ (ppm)	平均(ppm)
0	290	260	260	270.00
5	270	270	310	283.33
10	220	220	280	240.00
15	220	240	240	233.33
20	190	230	240	220.00
25	200	210	190	200.00

表 41 電気伝導度の変動(水酸化 Ca0.04%区、密閉条件)

日数	①EC(μS/cm)	②EC(μS/cm)	③EC(μS/cm)	平均(μS/cm)
0	2340	2270	2310	2306.67
5	2060	1959	1866	1961.67
10	1614	1383	1842	1613.00
15	1516	1458	1480	1484.67
20	1166	1382	1326	1291.33
25	1219	1214	1024	1152.33

表 42 個体数と生残率の変動(水酸化 Ca0.04%区、密閉条件)

日数	①個体数	②個体数	③個体数	平均	生残率(%)
0	10	10	10	10.00	100.00
5	9	7	6	7.33	73.33
10	6	6	7	6.33	63.33
15	9	8	7	8.00	80.00
20	8	7	8	7.67	76.67
25	9	9	7	8.33	83.33

表 43 溶存酸素濃度と溶存酸素飽和度の変動(水酸化 Ca0.08%区、密閉条件)

日数	①DO(mg/L)	②DO(mg/L)	③DO(mg/L)	平均(mg/L)	DO飽和度(%)	室温(°C)
0	8.4	8.3	8.4	8.37	100.00	25.5
5	8.0	8.1	7.9	8.00	98.64	26.2
10	7.1	7.4	7.5	7.33	93.66	27.9
15	7.2	7.6	7.7	7.50	97.53	29.4
20	7.8	7.9	7.7	7.80	100.00	29.9
25	7.7	7.9	7.9	7.83	100.00	30.6

表 44 全窒素の変動(水酸化 Ca0.08%区、密閉条件)

日数	①T-N(mg/L)	②T-N(mg/L)	③T-N(mg/L)	平均(mg/L)
0	1.77	1.65	1.72	1.713
5	3.09	3.04	4.20	3.443
10	12.5	11.3	10.9	11.567
15	26.4	22.9	24.3	24.533
20	18.5	30.2	26.7	25.133
25	20.6	22.8	33.2	25.533

表 45 硝酸態窒素の変動(水酸化 Ca0.08%区、密閉条件)

日数	①NO3-N(mg/L)	②NO3-N(mg/L)	③NO3-N(mg/L)	平均(mg/L)
0	1.2	1.3	1.2	1.233
5	1.3	1.2	1.5	1.333
10	1.8	1.5	1.8	1.700
15	1.6	1.5	1.3	1.467
20	1.5	1.4	1.6	1.500
25	1.2	1.9	1.5	1.533

表 46 亜硝酸態窒素の変動(水酸化 Ca0.08%区、密閉条件)

日数	①NO2-N(mg/L)	②NO2-N(mg/L)	③NO2-N(mg/L)	平均(mg/L)
0	0.005	0.004	0.004	0.00433
5	0.009	0.008	0.010	0.00900
10	0.009	0.007	0.011	0.00900
15	0.008	0.010	0.008	0.00867
20	0.008	0.006	0.013	0.00900
25	0.009	0.007	0.007	0.00767

表 47 アンモニア態窒素の変動(水酸化 Ca0.08%区、密閉条件)

日数	①NH ₃ -N(mg/L)	②NH ₃ -N(mg/L)	③NH ₃ -N(mg/L)	平均(mg/L)
0	0.2	0.3	0.4	0.300
5	1.34	1.03	1.63	1.333
10	4.62	4.28	3.5!	4.450
15	3.5!	3.5!	3.5!	#DIV/0!
20	3.5!	3.5!	3.5!	#DIV/0!
25	3.5!	3.5!	3.5!	#DIV/0!

* 測定範囲を超えたデータは「3.5!」と測定されエラーになった。

表 48 全リンの変動(水酸化 Ca0.08%区、密閉条件)

日数	①T-P(mg/L)	②T-P(mg/L)	③T-P(mg/L)	平均(mg/L)
0	1.32	1.29	0.982	1.197
5	0.549	0.622	0.941	0.704
10	1.10	1.14	1.18	1.140
15	1.34	1.62	1.86	1.607
20	0.728	0.764	1.72	1.071
25	0.98	1.28	0.962	1.074

表 49 pH の変動(水酸化 Ca0.08%区、密閉条件)

日数	①pH	②pH	③pH	平均
0	11.71	11.7	11.64	11.683
5	11.87	11.61	11.63	11.703
10	11.74	11.78	11.63	11.717
15	11.84	11.53	11.42	11.597
20	11.75	11.98	11.53	11.753
25	11.81	12.05	11.58	11.813

表 50 カルシウムイオン濃度の変動(水酸化 Ca0.08%区、密閉条件)

日数	①Ca ²⁺ (ppm)	②Ca ²⁺ (ppm)	③Ca ²⁺ (ppm)	平均(ppm)
0	550	540	530	540.00
5	520	520	550	530.00
10	500	520	550	523.33
15	500	530	510	513.33
20	450	500	540	496.67
25	490	460	420	456.67

表 51 電気伝導度の変動(水酸化 Ca0.08%区、密閉条件)

日数	①EC(μS/cm)	②EC(μS/cm)	③EC(μS/cm)	平均(μS/cm)
0	3880	3890	3920	3896.67
5	3930	3840	3880	3883.33
10	3650	3590	3540	3593.33
15	3390	3390	3240	3340.00
20	3350	3370	3220	3313.33
25	3160	3180	3230	3190.00

表 52 個体数と生残率の変動(水酸化 Ca0.08%区、密閉条件)

日数	①個体数	②個体数	③個体数	平均	生残率(%)
0	10	10	10	10.00	100.00
5	7	7	5	6.33	63.33
10	3	4	3	3.33	33.33
15	6	7	6	6.33	63.33
20	8	8	5	7.00	70.00
25	5	8	8	7.00	70.00

表 53 溶存酸素濃度と溶存酸素飽和度の変動(水酸化 Ca0.16%区、密閉条件)

日数	①DO(mg/L)	②DO(mg/L)	③DO(mg/L)	平均(mg/L)	DO飽和度(%)	室温(°C)
0	6.9	7.1	7.3	7.10	93.92	29.5
5	6.8	6.6	5.5	6.30	84.79	30.5
10	6.8	6.4	6.3	6.50	85.98	30.3
15	6.5	6.7	6.5	6.57	85.39	28.5
20	7.2	6.9	7.0	7.03	89.83	27.9
25	8.5	8.5	8.4	8.47	100.00	25.3

表 54 全窒素の変動(水酸化 Ca0.16%区、密閉条件)

日数	①T-N(mg/L)	②T-N(mg/L)	③T-N(mg/L)	平均(mg/L)
0	0.29	0.37	0.27	0.310
5	16.0	22.3	20.4	19.567
10	30.1	38.9	33.7	34.233
15	32.4	32.5	33.4	32.767
20	34.1	32.3	33.9	33.433
25	36.0	32.2	35.8	34.667

表 55 硝酸態窒素の変動(水酸化 Ca0.16%区、密閉条件)

日数	①NO3-N(mg/L)	②NO3-N(mg/L)	③NO3-N(mg/L)	平均(mg/L)
0	11.7光源不安定	9.2光源不安定	8.4光源不安定	#DIV/0!
5	7.6光源不安定	3.5!	7.3	7.300
10	9	8.5	3.5!	8.750
15	3.5!	3.5!	3.5!	#DIV/0!
20	3.5!	3.5!	3.5!	#DIV/0!
25	3.5!	3.5!	3.5!	#DIV/0!

* 測定範囲を超えたデータは「3.5!」と測定されエラーになった。

* 「光源不安定」と測定された値もエラーとした。

表 56 亜硝酸態窒素の変動(水酸化 Ca0.16%区、密閉条件)

日数	①NO2-N(mg/L)	②NO2-N(mg/L)	③NO2-N(mg/L)	平均(mg/L)
0	0.059	0.046	0.054	0.05300
5	0.048	0.079	0.079	0.06867
10	0.094	0.098	0.072	0.08800
15	0.078	0.075	0.073	0.07533
20	0.092	0.084	0.100	0.09200
25	0.100	0.105	0.092	0.09900

表 57 アンモニア態窒素の変動(水酸化 Ca0.16%区、密閉条件)

日数	①NH ₃ -N(mg/L)	②NH ₃ -N(mg/L)	③NH ₃ -N(mg/L)	平均(mg/L)
0	0.01	0.02	0.01	0.013
5	3.5!	0.3	4.39	2.345
10	3.5!	3.5!	3.5!	#DIV/0!
15	3.5!	3.5!	3.5!	#DIV/0!
20	3.5!	3.5!	3.5!	#DIV/0!
25	3.5!	3.5!	3.5!	#DIV/0!

* 測定範囲を超えたデータは「3.5!」と測定されエラーになった。

表 58 全リンの変動(水酸化 Ca0.16%区、密閉条件)

日数	①T-P(mg/L)	②T-P(mg/L)	③T-P(mg/L)	平均(mg/L)
0	1.51	2.21	1.64	1.787
5	3.42	2.88	3.13	3.143
10	1.82	2.32	2.26	2.133
15	2.88	2.89	2.90	2.890
20	2.84	2.96	3.51	3.103
25	2.77	2.98	3.87	3.207

表 59 pH の変動(水酸化 Ca0.16%区、密閉条件)

日数	①pH	②pH	③pH	平均
0	12.48	12.21	12.32	12.337
5	12.24	12.16	12.20	12.200
10	12.23	12.31	12.03	12.190
15	12.28	12.14	12.05	12.157
20	12.24	12.13	12.18	12.183
25	12.07	12.12	12.20	12.130

表 60 カルシウムイオン濃度の変動(水酸化 Ca0.16%区、密閉条件)

日数	①Ca ²⁺ (ppm)	②Ca ²⁺ (ppm)	③Ca ²⁺ (ppm)	平均(ppm)
0	730	740	690	720.00
5	600	640	730	656.67
10	570	530	750	616.67
15	530	650	700	626.67
20	540	620	730	630.00
25	570	670	880	706.67

表 61 電気伝導度の変動(水酸化 Ca0.16%区、密閉条件)

日数	①EC(μS/cm)	②EC(μS/cm)	③EC(μS/cm)	平均(μS/cm)
0	7080	6990	7020	7030.00
5	6700	6550	6980	6743.33
10	6520	6270	6400	6396.67
15	6390	6310	6320	6340.00
20	6290	6350	6320	6320.00
25	6310	6200	6440	6316.67

表 62 個体数と生残率の変動(水酸化 Ca0.16%区、密閉条件)

日数	①個体数	②個体数	③個体数	平均	生残率(%)
0	10	10	10	10.00	100.00
5	5	6	5	5.33	53.33
10	3	3	5	3.67	36.67
15	7	4	2	4.33	43.33
20	4	8	7	6.33	63.33
25	8	7	3	6.00	60.00

3.2 開放条件の結果

3.2.1 対照区

対照区での実験で計測した水質の結果を表 63～表 72 に示す。

表 63 溶存酸素濃度と溶存酸素飽和度の変動(対照区、開放条件)

日数	①DO(mg/L)	②DO(mg/L)	③DO(mg/L)	平均(mg/L)	DO飽和度(%)	室温(°C)
-3	7.7	7.5	7.6	7.60	98.83	29.1
0(換水前)	7.6	7.9	7.7	7.73	100.00	29.5
0(換水後)	7.8	8.2	7.9	7.97	100.00	29.5
5	8.3	7.6	8.3	8.07	100.00	30.5
10	7.4	7.9	7.7	7.67	100.00	30.3
15	7.3	7.8	8.1	7.73	100.00	28.5
20	7.9	8.3	7.6	7.93	100.00	27.9
25	8.6	8.4	7.9	8.30	100.00	25.3

表 64 全窒素の変動(対照区、開放条件)

日数	①T-N(mg/L)	②T-N(mg/L)	③T-N(mg/L)	平均(mg/L)
-3	0.224	0.233	0.321	0.259
0	0.218	0.242	0.441	0.300
5	0.559	0.642	0.546	0.582
10	0.647	0.598	0.71	0.652
15	0.568	0.454	0.663	0.562
20	0.814	0.657	0.398	0.623
25	1.21	0.881	0.925	1.005

表 65 硝酸態窒素の変動(対照区、開放条件)

日数	①NO3-N(mg/L)	②NO3-N(mg/L)	③NO3-N(mg/L)	平均(mg/L)
-3	0.3	0.3	0.4	0.333
0	0.4	0.3	0.4	0.367
5	0.4	0.3	0.2	0.300
10	0.3	0.2	0.3	0.267
15	0.4	0.4	0.3	0.367
20	0.3	0.2	0.3	0.267
25	0.3	0.3	0.4	0.333

表 66 亜硝酸態窒素の変動(対照区、開放条件)

日数	①NO ₂ -N(mg/L)	②NO ₂ -N(mg/L)	③NO ₂ -N(mg/L)	平均(mg/L)
-3	0	0.004	0.003	0.00233
0	0.002	0.003	0.002	0.00233
5	0	0.002	0.004	0.00200
10	0.002	0.005	0.004	0.00367
15	0.005	0.004	0.005	0.00467
20	0.004	0.004	0.003	0.00367
25	0.003	0.004	0.003	0.00333

表 67 アンモニア態窒素の変動(対照区、開放条件)

日数	①NH ₃ -N(mg/L)	②NH ₃ -N(mg/L)	③NH ₃ -N(mg/L)	平均(mg/L)
-3	0	0	0	0.000
0	0.04	0.03	0.03	0.033
5	0	0	0.05	0.017
10	0	0.11	0.07	0.060
15	0.17	0.10	0.13	0.133
20	0.23	0.21	0.22	0.220
25	0.62	0.21	0.35	0.393

表 68 全リンの変動(対照区、開放条件)

日数	①T-P(mg/L)	②T-P(mg/L)	③T-P(mg/L)	平均(mg/L)
-3	0	0	0	0
0	0	0	0	0
5	0	0	0	0
10	0	0	0	0
15	0	0	0	0
20	0	0	0	0
25	0	0	0	0

表 69 pH の変動(対照区、開放条件)

日数	①pH	②pH	③pH	平均
-3	7.35	7.24	7.32	7.303
0	7.42	6.91	7.04	7.123
5	7.56	7.51	7.43	7.500
10	7.31	7.12	6.89	7.107
15	7.36	7.22	7.41	7.330
20	7.25	6.93	7.08	7.087
25	7.03	7.31	7.24	7.193

表 70 カルシウムイオン濃度の変動(対照区、開放条件)

日数	①Ca ²⁺ (ppm)	②Ca ²⁺ (ppm)	③Ca ²⁺ (ppm)	平均(ppm)
-3	0	0	0	0
0	0	0	0	0
5	0	0	0	0
10	0	0	0	0
15	0	0	0	0
20	0	0	0	0
25	0	0	0	0

表 71 電気伝導度の変動(対照区、開放条件)

日数	①EC(μS/cm)	②EC(μS/cm)	③EC(μS/cm)	平均(μS/cm)
-3	3	2	3	2.67
0	2	3	4	3.00
5	25	12	16	17.67
10	5	8	11	8.00
15	11	10	4	8.33
20	9	12	5	8.67
25	13	7	3	7.67

表 72 個体数と生残率の変動(対照区、開放条件)

日数	①個体数	②個体数	③個体数	平均	生残率(%)
-3	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0

3.2.2 薬剤未投入区

薬剤未投入区での実験で計測した水質の結果を表 73～表 82 に示す。

表 73 溶存酸素濃度と溶存酸素飽和度の変動(薬剤未投入区、開放条件)

日数	①DO(mg/L)	②DO(mg/L)	③DO(mg/L)	平均(mg/L)	DO飽和度(%)	室温(°C)
-3	7.9	7.8	8.0	7.90	100.00	29.5
0(換水前)	6.9	5.8	6.6	6.43	83.66	29.1
0(換水後)	7.8	8.2	8.1	8.03	100.00	29.1
5	4.9	4.8	5.5	5.07	67.02	30.3
10	4.2	4.4	4.7	4.43	57.65	28.9
15	5.3	6.6	5.4	5.77	74.99	29.1
20	4.2	7.3	6.9	6.13	76.96	26.7
25	4.3	8.0	8.0	6.77	80.36	23.9
30	4.4	7.4	7.4	6.40	76.01	23.6
35	4.8	7.7	7.7	6.73	79.97	23.7
40	5.1	6.5	6.7	6.10	69.79	22.3

表 74 全窒素の変動(薬剤未投入区、開放条件)

日数	①T-N(mg/L)	②T-N(mg/L)	③T-N(mg/L)	平均(mg/L)
-3	0.453	0.363	0.445	0.420
0	0.341	0.427	0.488	0.419
5	2.14	2.01	2.19	2.113
10	2.35	2.21	2.36	2.307
15	3.42	3.87	2.95	3.413
20	10.9	5.39	6.42	7.570
25	9.76	6.01	7.06	7.610
30	10.7	6.57	6.89	8.053
35	8.95	7.84	8.01	8.267
40	7.85	7.13	7.55	7.510

表 75 硝酸態窒素の変動(薬剤未投入区、開放条件)

日数	①NO ₃ -N(mg/L)	②NO ₃ -N(mg/L)	③NO ₃ -N(mg/L)	平均(mg/L)
-3	0.2	0.4	0.3	0.300
0	0.3	0.4	0.3	0.333
5	0.8	0.8	0.8	0.800
10	1.8	1.7	1.6	1.700
15	2.0	1.9	2.2	2.033
20	4.2	2.3	2.9	3.133
25	6.0	2.8	3.1	3.967
30	7.5	2.3	2.9	4.233
35	8.4	2.8	3.3	4.833
40	8.2	2.2	3.9	4.767

表 76 亜硝酸態窒素の変動(薬剤未投入区、開放条件)

日数	①NO ₂ -N(mg/L)	②NO ₂ -N(mg/L)	③NO ₂ -N(mg/L)	平均(mg/L)
-3	0.002	0.003	0.002	0.00233
0	0	0	0	0.00000
5	0.099	0.072	0.08	0.08367
10	0.358	0.314	0.292	0.32133
15	0.258	0.198	0.295	0.25033
20	0.967	0.141	0.283	0.46367
25	0.995	0.024	0.032	0.35033
30	1.000	0.014	0.023	0.34567
35	1.003	0.012	0.056	0.35700
40	1.001	0.125	0.059	0.39500

表 77 アンモニア態窒素の変動(薬剤未投入区、開放条件)

日数	①NH ₃ -N(mg/L)	②NH ₃ -N(mg/L)	③NH ₃ -N(mg/L)	平均(mg/L)
-3	0	0	0	0.000
0	0	0	0	0.000
5	0.75	0.39	0.35	0.497
10	0.60	0.37	0.21	0.393
15	0.71	0.43	0.37	0.503
20	5.08	0.10	0.60	1.927
25	0.56	0.06	0.04	0.220
30	0.72	0.09	0.08	0.297
35	1.68	0.07	0.06	0.603
40	0.49	0.29	0.09	0.290

表 78 全リンの変動(薬剤未投入区、開放条件)

日数	①T-P(mg/L)	②T-P(mg/L)	③T-P(mg/L)	平均(mg/L)
-3	0	0	0	0.000
0	0	0	0	0.000
5	0.458	0.356	0.446	0.420
10	0.56	0.508	0.597	0.555
15	0.878	0.882	0.935	0.898
20	3.25	1.22	1.40	1.957
25	3.84	1.61	1.38	2.277
30	5.46	1.28	1.35	2.697
35	5.22	1.37	1.43	2.673
40	5.33	1.47	1.44	2.747

表 79 pH の変動(薬剤未投入区、開放条件)

日数	①pH	②pH	③pH	平均
-3	7.02	7.14	6.98	7.047
0	6.85	7.35	7.05	7.083
5	7.08	6.82	7.07	6.990
10	7.06	7.19	7.16	7.137
15	7.15	7.43	7.25	7.277
20	7.26	7.02	7.02	7.100
25	6.85	6.82	6.78	6.817
30	7.62	7.24	7.16	7.340
35	7.60	7.22	6.97	7.263
40	7.02	7.12	7.09	7.077

表 80 カルシウムイオン濃度の変動(薬剤未投入区、開放条件)

日数	①Ca ²⁺ (ppm)	②Ca ²⁺ (ppm)	③Ca ²⁺ (ppm)	平均(ppm)
-3	0	0	0	0.00
0	0	0	0	0.00
5	18	19	22	19.67
10	22	25	30	25.67
15	41	38	51	43.33
20	65	49	73	62.33
25	77	68	64	69.67
30	93	55	62	70.00
35	85	58	77	73.33
40	82	54	77	71.00

表 81 電気伝導度の変動(薬剤未投入区、開放条件)

日数	①EC(μ S/cm)	②EC(μ S/cm)	③EC(μ S/cm)	平均(μ S/cm)
-3	5	5	10	6.67
0	8	1	8	5.67
5	62	59	67	62.67
10	71	73	84	76.00
15	128	116	133	125.67
20	247	152	180	193.00
25	255	176	183	204.67
30	301	162	172	211.67
35	271	163	195	209.67
40	261	176	211	216.00

表 82 個体数と生残率の変動(薬剤未投入区、開放条件)

日数	①個体数	②個体数	③個体数	平均	生残率(%)
-3	10	10	10	10.00	100.00
0	10	10	10	10.00	100.00
5	10	10	10	10.00	100.00
10	10	10	10	10.00	100.00
15	10	10	10	10.00	100.00
20	9	10	10	9.67	96.67
25	8	10	10	9.33	93.33
30	6	10	10	8.67	86.67
35	5	10	10	8.33	83.33
40	5	9	10	8.00	80.00

3.2.3 DO 調整区

DO 調整 1%区での実験で計測した水質の結果を表 83～表 92 に示す。

表 83 溶存酸素濃度と溶存酸素飽和度の変動(DO 調整区、開放条件)

日数	①DO(mg/L)	②DO(mg/L)	③DO(mg/L)	平均(mg/L)	DO飽和度(%)	室温(°C)
-3	7.4	7.5	7.3	7.40	87.89	23.9
0(換水前)	5.3	5.2	5.5	5.33	63.34	24
0(換水後)	7.1	7.1	7.4	7.20	85.51	24
5	2.4	2.0	2.8	2.40	28.50	23.7
10	1.8	1.6	1.6	1.67	19.43	22.6
15	2.6	2.2	3.9	2.90	33.18	22.3
20	4.5	4.7	5.5	4.90	56.06	21.7
25	5.2	5.4	5.5	5.37	62.55	22.6

表 84 全窒素の変動(DO 調整区、開放条件)

日数	①T-N(mg/L)	②T-N(mg/L)	③T-N(mg/L)	平均(mg/L)
-3	0.793	0.772	0.714	0.760
0	0.837	0.705	0.794	0.779
5	10.7	16.4	10.3	12.467
10	31.7	34.5	29.4	31.867
15	31.5	34.1	29.6	31.733
20	27.8	24.9	20.4	24.367
25	23.9	21.2	18.5	21.200

表 85 硝酸態窒素の変動(DO 調整区、開放条件)

日数	①NO3-N(mg/L)	②NO3-N(mg/L)	③NO3-N(mg/L)	平均(mg/L)
-3	0.4	0.3	0.3	0.333
0	0.3	0.4	0.3	0.333
5	0.4	0.4	0.4	0.400
10	1.1	1.2	0.5	0.933
15	0.5	0.6	0.6	0.567
20	0.5	0.5	0.5	0.500
25	0.4	0.5	0.4	0.433

表 86 亜硝酸態窒素の変動(DO 調整区、開放条件)

日数	①NO ₂ -N(mg/L)	②NO ₂ -N(mg/L)	③NO ₂ -N(mg/L)	平均(mg/L)
-3	0.005	0.004	0.004	0.00433
0	0.003	0.003	0.003	0.00300
5	0.004	0.002	0.004	0.00333
10	0.005	0.004	0.003	0.00400
15	0.002	0.003	0.004	0.00300
20	0.005	0.003	0.004	0.00400
25	0.005	0.003	0.003	0.00367

表 87 アンモニア態窒素の変動(DO 調整区、開放条件)

日数	①NH ₃ -N(mg/L)	②NH ₃ -N(mg/L)	③NH ₃ -N(mg/L)	平均(mg/L)
-3	0	0	0	0.000
0	0	0	0.01	0.003
5	4.85	3.5!	4.94	4.895
10	3.5!	3.5!	3.5!	#DIV/0!
15	3.5!	3.5!	3.5!	#DIV/0!
20	3.5!	3.5!	3.5!	#DIV/0!
25	3.5!	3.5!	3.5!	#DIV/0!

* 測定範囲を超えたデータは「3.5!」と測定されエラーになった。

表 88 全リンの変動(DO 調整区、開放条件)

日数	①T-P(mg/L)	②T-P(mg/L)	③T-P(mg/L)	平均(mg/L)
-3	0	0	0	0.000
0	0.081	0.057	0.167	0.102
5	2.65	5.25	3.26	3.720
10	7.66	7.80	7.14	7.533
15	7.44	7.46	6.65	7.183
20	6.78	6.85	5.86	6.497
25	6.73	6.16	5.76	6.217

表 89 pHの変動(DO調整区、開放条件)

日数	①pH	②pH	③pH	平均
-3	7.22	7.01	7.11	7.113
0	7.50	7.95	7.19	7.547
5	7.30	7.41	7.31	7.340
10	7.22	7.26	6.87	7.117
15	7.43	7.66	7.65	7.580
20	7.62	7.74	7.75	7.703
25	7.61	8.00	7.90	7.837

表 90 カルシウムイオン濃度の変動(DO調整区、開放条件)

日数	①Ca ²⁺ (ppm)	②Ca ²⁺ (ppm)	③Ca ²⁺ (ppm)	平均(ppm)
-3	0	0	0	0.00
0	0	0	0	0.00
5	32	35	39	35.33
10	86	93	83	87.33
15	82	96	84	87.33
20	86	97	88	90.33
25	90	94	92	92.00

表 91 電気伝導度の変動(DO調整区、開放条件)

日数	①EC(μS/cm)	②EC(μS/cm)	③EC(μS/cm)	平均(μS/cm)
-3	1380	1410	1320	1370.00
0	12	12	17	13.67
5	133	165	147	148.33
10	387	412	383	394.00
15	409	463	384	418.67
20	410	441	373	408.00
25	401	413	358	390.67

表 92 個体数と生残率の変動(DO 調整区、開放条件)

日数	①個体数	②個体数	③個体数	平均	生残率(%)
-3	10	10	10	10.00	100.00
0	7	5	7	6.33	63.33
5	6	5	6	5.67	56.67
10	0	0	0	0.00	0.00
15	0	0	0	0.00	0.00
20	0	0	0	0.00	0.00
25	0	0	0	0.00	0.00

3.2.4 水酸化カルシウム投入区

水酸化 Ca0.04%区での実験で計測した水質の結果を表 93～表 102、水酸化 Ca0.08%区での実験で計測した水質の結果を表 103～表 112、水酸化 Ca0.16%区での実験で計測した水質の結果を表 113～表 122 に示す。

表 93 溶存酸素濃度と溶存酸素飽和度の変動(水酸化 Ca0.04%区、開放条件)

日数	①DO(mg/L)	②DO(mg/L)	③DO(mg/L)	平均(mg/L)	DO飽和度(%)	室温(°C)
-3	10.0	9.8	10.1	9.97	100.00	15.8
0(換水前)	9.6	9.6	9.3	9.50	96.25	15.9
0(換水後)	9.9	9.5	9.9	9.77	98.95	15.9
5	6.5	7.3	7.9	7.23	73.29	16.3
10	5.7	7.9	7.3	6.97	70.58	15.9
15	5.3	9.9	7.4	7.53	74.74	15
20	6.1	5.9	7.3	6.43	65.18	15.8
25	5.9	6.7	7.7	6.77	67.13	15.1

表 94 全窒素の変動(水酸化 Ca0.04%区、開放条件)

日数	①T-N(mg/L)	②T-N(mg/L)	③T-N(mg/L)	平均(mg/L)
-3	0	0	0	0.000
0	0	0.307	0	0.102
5	2.47	2.36	2.47	2.433
10	5.85	3.74	5.05	4.880
15	7.68	3.63	8.23	6.513
20	13.8	6.78	9.42	10.000
25	20.1	7.80	20.4	16.100

表 95 硝酸態窒素の変動(水酸化 Ca0.04%区、開放条件)

日数	①NO3-N(mg/L)	②NO3-N(mg/L)	③NO3-N(mg/L)	平均(mg/L)
-3	0.5	0.3	0.3	0.367
0	0.4	0.5	0.4	0.433
5	0.5	0.5	0.4	0.467
10	0.5	0.7	0.6	0.600
15	0.7	0.5	0.8	0.667
20	1.0	1.3	0.6	0.967
25	0.5	0.8	0.5	0.600

表 96 亜硝酸態窒素の変動(水酸化 Ca0.04%区、開放条件)

日数	①NO ₂ -N(mg/L)	②NO ₂ -N(mg/L)	③NO ₂ -N(mg/L)	平均(mg/L)
-3	0.002	0.003	0.003	0.00267
0	0.002	0.004	0.003	0.00300
5	0.006	0.006	0.001	0.00433
10	0.003	0.003	0.003	0.00300
15	0.004	0.002	0.006	0.00400
20	0.003	0.003	0.003	0.00300
25	0.022	0.004	0.003	0.00967

表 97 アンモニア態窒素の変動(水酸化 Ca0.04%区、開放条件)

日数	①NH ₃ -N(mg/L)	②NH ₃ -N(mg/L)	③NH ₃ -N(mg/L)	平均(mg/L)
-3	0	0	0	0.000
0	0.01	0.14	0.01	0.053
5	0.78	2.22	1.83	1.610
10	3.5!	4.34	3.5!	4.340
15	3.5!	3.5!	3.5!	#DIV/0!
20	3.5!	3.5!	3.5!	#DIV/0!
25	3.5!	3.5!	3.5!	#DIV/0!

* 測定範囲を超えたデータは「3.5!」と測定されエラーになった。

表 98 全リンの変動(水酸化 Ca0.04%区、開放条件)

日数	①T-P(mg/L)	②T-P(mg/L)	③T-P(mg/L)	平均(mg/L)
-3	0.378	0.379	0.277	0.345
0	0	0.279	0	0.093
5	1.41	1.30	1.29	1.333
10	2.55	1.98	2.62	2.383
15	4.38	2.38	3.93	3.563
20	6.16	3.91	3.95	4.673
25	5.94	3.96	4.49	4.797

表 99 pH の変動(水酸化 Ca0.04%区、開放条件)

日数	①pH	②pH	③pH	平均
-3	11.88	11.86	11.86	11.867
0	7.60	6.98	7.04	7.207
5	7.26	7.27	7.36	7.297
10	7.36	7.56	7.49	7.470
15	7.45	7.75	7.47	7.557
20	7.47	7.50	7.69	7.553
25	7.56	7.57	7.60	7.577

表 100 カルシウムイオン濃度の変動(水酸化 Ca0.04%区、開放条件)

日数	①Ca ²⁺ (ppm)	②Ca ²⁺ (ppm)	③Ca ²⁺ (ppm)	平均(ppm)
-3	310	330	310	316.67
0	5	4	4	4.33
5	24	23	19	22.00
10	68	35	38	47.00
15	96	41	47	61.33
20	67	49	51	55.67
25	61	54	48	54.33

表 101 電気伝導度の変動(水酸化 Ca0.04%区、開放条件)

日数	①EC(μS/cm)	②EC(μS/cm)	③EC(μS/cm)	平均(μS/cm)
-3	2280	2350	1991	2207.00
0	21	19	21	20.33
5	118	107	92	105.67
10	235	164	175	191.33
15	314	213	256	261.00
20	383	260	297	313.33
25	443	322	332	365.67

表 102 個体数と生残率の変動(水酸化 Ca0.04%区、開放条件)

日数	①個体数	②個体数	③個体数	平均	生残率(%)
-3	10	10	10	10.00	100.00
0	10	10	10	10.00	100.00
5	9	9	9	9.00	90.00
10	7	9	7	7.67	76.67
15	5	8	2	5.00	50.00
20	3	5	2	3.33	33.33
25	1	3	1	1.67	16.67

表 103 溶存酸素濃度と溶存酸素飽和度の変動(水酸化 Ca0.08%区、開放条件)

日数	①DO(mg/L)	②DO(mg/L)	③DO(mg/L)	平均(mg/L)	DO飽和度(%)	室温(°C)
-3	10.1	10.0	10.0	10.03	100.00	15.8
0(換水前)	9.7	9.4	9.5	9.53	96.59	15.9
0(換水後)	10.0	9.9	9.9	9.93	100.00	15.9
5	7.2	7.9	6.6	7.23	73.29	16.3
10	7.9	6.2	7.8	7.30	73.96	15.9
15	7.3	5.6	5.5	6.13	60.85	15
20	6.5	5.9	5.4	5.93	60.11	15.8
25	6.7	7.1	6.1	6.63	65.81	15.1

表 104 全窒素の変動(水酸化 Ca0.08%区、開放条件)

日数	①T-N(mg/L)	②T-N(mg/L)	③T-N(mg/L)	平均(mg/L)
-3	0	0.123	0.037	0.053
0	0.462	0.039	0.231	0.244
5	2.84	1.71	1.68	2.077
10	5.31	4.90	8.64	6.283
15	16.0	7.37	10.6	11.323
20	10.8	10.8	15.0	12.200
25	12.3	12.8	15.1	13.400

表 105 硝酸態窒素の変動(水酸化 Ca0.08%区、開放条件)

日数	①NO3-N(mg/L)	②NO3-N(mg/L)	③NO3-N(mg/L)	平均(mg/L)
-3	0.8	0.9	0.8	0.833
0	0.4	0.3	0.4	0.367
5	0.5	0.5	0.4	0.467
10	0.5	0.5	0.6	0.533
15	0.7	0.4	0.5	0.533
20	0.5	1.1	0.6	0.733
25	0.7	0.5	0.5	0.567

表 106 亜硝酸態窒素の変動(水酸化 Ca0.08%区、開放条件)

日数	①NO ₂ -N(mg/L)	②NO ₂ -N(mg/L)	③NO ₂ -N(mg/L)	平均(mg/L)
-3	0.002	0.005	0.003	0.00333
0	0.004	0.002	0.004	0.00333
5	0.001	0.003	0.003	0.00233
10	0.004	0.003	0.004	0.00367
15	0.004	0.003	0.004	0.00367
20	0.004	0.003	0.004	0.00367
25	0.005	0.003	0.002	0.00333

表 107 アンモニア態窒素の変動(水酸化 Ca0.08%区、開放条件)

日数	①NH ₃ -N(mg/L)	②NH ₃ -N(mg/L)	③NH ₃ -N(mg/L)	平均(mg/L)
-3	0	0	0	0.000
0	0.08	0	0.02	0.033
5	1.99	1.03	1.08	1.367
10	3.5!	3.5!	3.5!	#DIV/0!
15	3.5!	3.5!	3.5!	#DIV/0!
20	3.5!	3.5!	3.5!	#DIV/0!
25	3.5!	3.5!	3.5!	#DIV/0!

* 測定範囲を超えたデータは「3.5!」と測定されエラーになった。

表 108 全リンの変動(水酸化 Ca0.08%区、開放条件)

日数	①T-P(mg/L)	②T-P(mg/L)	③T-P(mg/L)	平均(mg/L)
-3	0.657	0.442	0.461	0.520
0	0.398	0.025	0.168	0.197
5	2.44	1.04	2.11	1.863
10	3.39	2.15	4.74	3.427
15	6.25	4.10	4.57	4.973
20	4.58	4.62	6.07	5.090
25	5.49	4.98	5.39	5.287

表 109 pH の変動(水酸化 Ca0.08%区、開放条件)

日数	①pH	②pH	③pH	平均
-3	12.27	12.01	12.06	12.113
0	8.01	7.79	7.32	7.707
5	7.28	7.33	7.28	7.297
10	7.48	7.35	7.22	7.350
15	7.32	7.36	7.29	7.323
20	7.68	7.52	7.67	7.623
25	7.39	7.69	7.63	7.570

表 110 カルシウムイオン濃度の変動(水酸化 Ca0.08%区、開放条件)

日数	①Ca ²⁺ (ppm)	②Ca ²⁺ (ppm)	③Ca ²⁺ (ppm)	平均(ppm)
-3	560	580	620	586.67
0	8	8	12	9.33
5	48	28	33	36.33
10	37	53	61	50.33
15	98	59	49	68.67
20	55	58	58	57.00
25	73	59	61	64.33

表 111 電気伝導度の変動(水酸化 Ca0.08%区、開放条件)

日数	①EC(μS/cm)	②EC(μS/cm)	③EC(μS/cm)	平均(μS/cm)
-3	3630	3570	3640	3613.33
0	30	29	41	33.33
5	113	116	131	120.00
10	191	217	258	222.00
15	357	285	267	303.00
20	297	327	385	336.33
25	340	372	395	369.00

表 112 個体数と生残率の変動(水酸化 Ca0.08%区、開放条件)

日数	①個体数	②個体数	③個体数	平均	生残率(%)
-3	10	10	10	10.00	100.00
0	10	9	10	9.67	96.67
5	9	9	10	9.33	93.33
10	8	8	6	7.33	73.33
15	6	7	1	4.67	46.67
20	5	6	1	4.00	40.00
25	4	4	1	3.00	30.00

表 113 溶存酸素濃度と溶存酸素飽和度の変動(水酸化 Ca0.16%区、開放条件)

日数	①DO(mg/L)	②DO(mg/L)	③DO(mg/L)	平均(mg/L)	DO飽和度(%)	室温(°C)
-3	7.2	7.0	7.3	7.17	94.80	29.5
0(換水前)	7.6	7.3	7.3	7.40	96.23	29.1
0(換水後)	7.5	7.4	7.3	7.40	96.23	29.1
5	0.8	0.8	0.7	0.77	10.14	30.3
10	0.8	0.8	0.7	0.77	9.97	28.9
15	3.6	4.7	3.7	4.00	52.02	29.1
20	5.3	5.1	5.1	5.17	64.83	26.7
25	6.1	6.4	6.4	6.30	74.82	23.9

表 114 全窒素の変動(水酸化 Ca0.16%区、開放条件)

日数	①T-N(mg/L)	②T-N(mg/L)	③T-N(mg/L)	平均(mg/L)
-3	0.324	0.29	0.282	0.299
0	0.275	0.404	0.27	0.316
5	34.7	22.8	29.1	28.867
10	26.3	25.8	27.4	26.500
15	25.9	26.5	19.8	24.067
20	22.5	21.3	19.2	21.000
25	16.9	22.7	15.1	18.233

表 115 硝酸態窒素の変動(水酸化 Ca0.16%区、開放条件)

日数	①NO3-N(mg/L)	②NO3-N(mg/L)	③NO3-N(mg/L)	平均(mg/L)
-3	0.9	1.1	1.0	1.000
0	0.3	0.3	0.3	0.300
5	0.6	0.3	0.6	0.500
10	0.5	0.4	0.4	0.433
15	0.4	0.4	0.3	0.367
20	0.4	0.5	0.4	0.433
25	0.3	0.3	0.4	0.333

表 116 亜硝酸態窒素の変動(水酸化 Ca0.16%区、開放条件)

日数	①NO ₂ -N(mg/L)	②NO ₂ -N(mg/L)	③NO ₂ -N(mg/L)	平均(mg/L)
-3	0.049	0.054	0.054	0.05233
0	0.002	0.021	0.001	0.00800
5	0	0	0	0.00000
10	0.006	0.005	0	0.00367
15	0.005	0.004	0.006	0.00500
20	0.004	0.006	0.005	0.00500
25	0.004	0.007	0.007	0.00600

表 117 アンモニア態窒素の変動(水酸化 Ca0.16%区、開放条件)

日数	①NH ₃ -N(mg/L)	②NH ₃ -N(mg/L)	③NH ₃ -N(mg/L)	平均(mg/L)
-3	0.16	0.20	0.11	0.157
0	0.09	0.10	0.09	0.093
5	3.5!	3.5!	3.5!	#DIV/0!
10	3.5!	3.5!	3.5!	#DIV/0!
15	3.5!	3.5!	3.5!	#DIV/0!
20	3.5!	3.5!	3.5!	#DIV/0!
25	3.5!	3.5!	3.5!	#DIV/0!

* 測定範囲を超えたデータは「3.5!」と測定されエラーになった。

表 118 全リンの変動(水酸化 Ca0.16%区、開放条件)

日数	①T-P(mg/L)	②T-P(mg/L)	③T-P(mg/L)	平均(mg/L)
-3	1.55	1.72	1.64	1.637
0	0	0	0	0.000
5	5.34	2.86	5.64	4.613
10	6.13	3.85	5.37	5.117
15	5.98	3.91	6.82	5.570
20	9.11	3.99	7.06	6.720
25	5.55	4.76	6.86	5.723

表 119 pH の変動(水酸化 Ca0.16%区、開放条件)

日数	①pH	②pH	③pH	平均
-3	12.13	12.22	12.09	12.147
0	9.59	8.59	9.15	9.110
5	7.69	7.48	7.64	7.603
10	7.62	7.56	7.74	7.640
15	7.85	7.90	7.93	7.893
20	6.96	6.91	6.86	6.910
25	7.03	7.02	6.96	7.003

表 120 カルシウムイオン濃度の変動(水酸化 Ca0.16%区、開放条件)

日数	①Ca ²⁺ (ppm)	②Ca ²⁺ (ppm)	③Ca ²⁺ (ppm)	平均(ppm)
-3	690	710	700	700.00
0	4	0	4	2.67
5	71	67	94	77.33
10	81	68	89	79.33
15	78	82	77	79.00
20	85	79	110	91.33
25	93	91	93	92.33

表 121 電気伝導度の変動(水酸化 Ca0.16%区、開放条件)

日数	①EC(μS/cm)	②EC(μS/cm)	③EC(μS/cm)	平均(μS/cm)
-3	6990	6820	6780	6863.33
0	22	17	19	19.33
5	339	292	345	325.33
10	331	325	373	343.00
15	357	354	380	363.67
20	370	357	395	374.00
25	327	345	333	335.00

表 122 個体数と生残率の変動(水酸化 Ca0.16%区、開放条件)

日数	①個体数	②個体数	③個体数	平均	生残率(%)
-3	10	10	10	10.00	100.00
0	9	10	10	9.67	96.67
5	8	9	9	8.67	86.67
10	7	8	8	7.67	76.67
15	7	8	8	7.67	76.67
20	7	8	8	7.67	76.67
25	7	7	7	7.00	70.00

3.3 考察

3.3.1 タイワンシジミの個体数変位と生残率

密閉条件での実験のタイワンシジミの個体数変位と生残率のグラフを図 26～図 29、開放条件での実験のタイワンシジミの個体数変位と生残率のグラフを図 30～図 33 に示す。

① 密閉条件

図 26、図 27 を見ると、薬剤未投入区では、10 日目に死貝が発生し、30 日目でタイワンシジミは完全に死滅したことがわかる。DO 調整区では、5 日目に死貝が発生し、15 日目でタイワンシジミは完全に死滅したことがわかる。また、個体数が減少し始めるとタイワンシジミの死滅速度が上がることがわかった。以上のことから、脱酸素剤を投入したことで死貝の発生を速くし、全滅までの期間を短縮できたと考えられる。

図 28、図 29 を見ると、水酸化 Ca0.04%区、水酸化 Ca0.08%区、水酸化 Ca0.16%区では、5 日目に死貝が発生したが、25 日間では完全に死滅しなかったことがわかる。

そこで、水酸化 Ca 投入区ではタイワンシジミの生死の判断が難しく、生残率が正確な値ではないと考え、生残率の補正を行った。その結果を「3.3.2 タイワンシジミの個体数変位と生残率(補正後)」に示す。

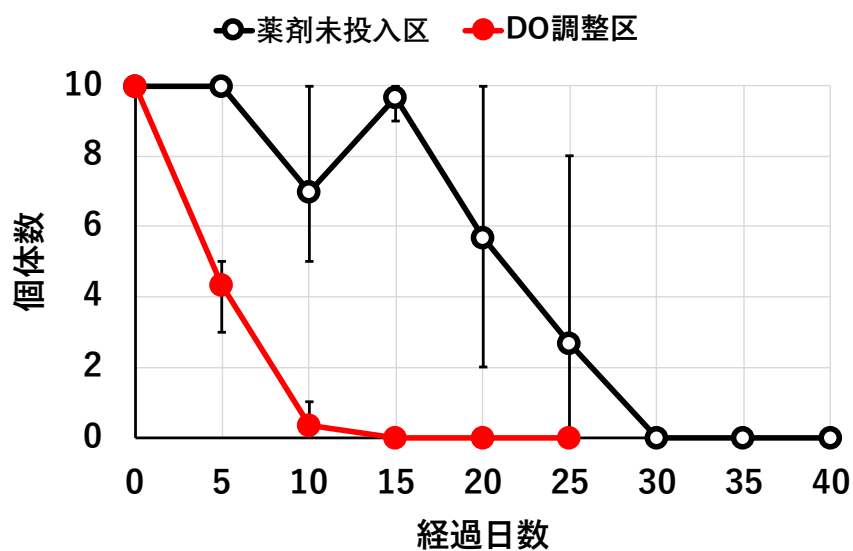


図 26 薬剤未投入区、DO 調整区のタイワンシジミの個体数変位(密閉条件)
* エラーバーは最大、最小を示す。

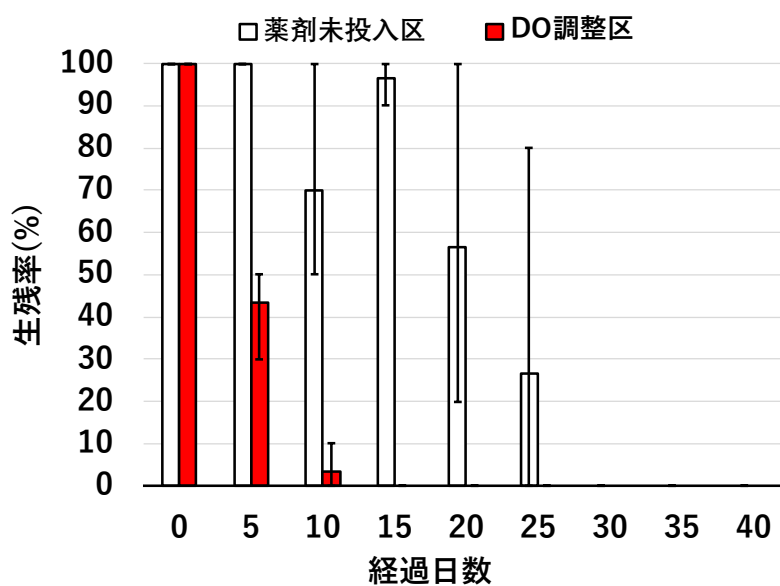


図 27 薬剤未投入区、DO 調整区のタイワンシジミの生存率(密閉条件)
* エラーバーは最大、最小を示す。

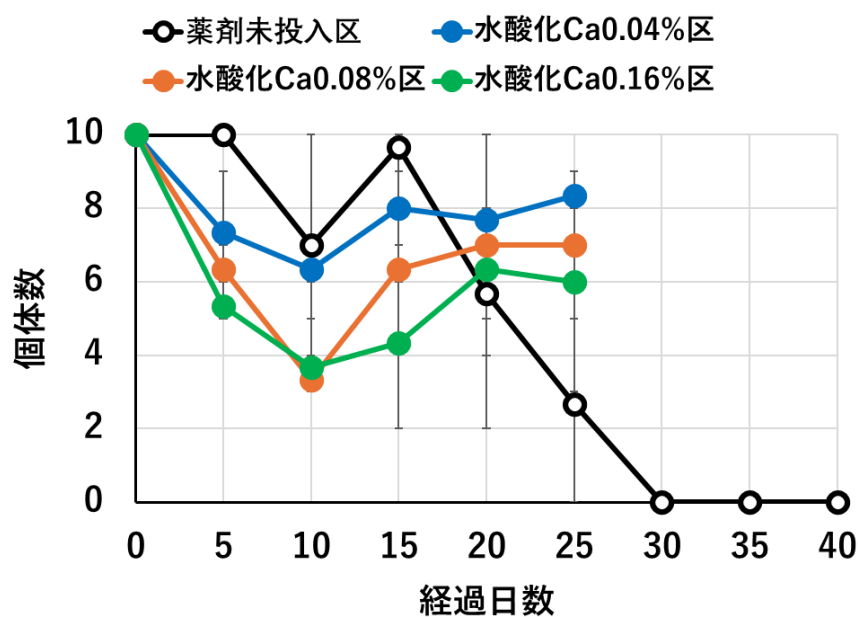


図 28 薬剤未投入区、水酸化 Ca0.04%区、水酸化 Ca0.08%区、水酸化 Ca0.16%区のタイワンシジミの個体数変位(密閉条件)

* エラーバーは最大、最小を示す。

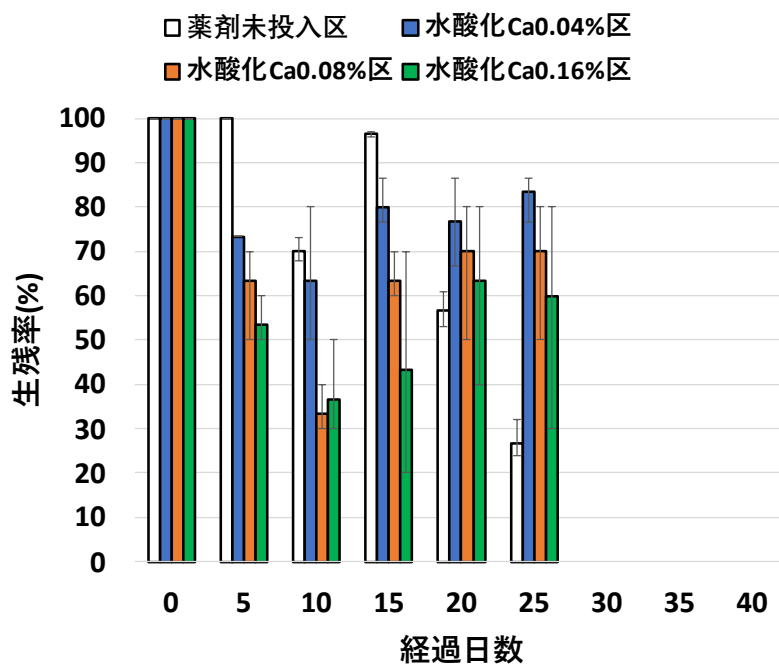


図 29 薬剤未投入区、水酸化 Ca0.04%区、水酸化 Ca0.08%区、水酸化 Ca0.16%区のタイワンシジミの生存率(密閉条件)

* エラーバーは最大、最小を示す。

② 開放条件

図 30、図 31 を見ると、薬剤未投入区では、暴露期間中に死貝は発生せず、換水後 20 日目に死貝が発生したが、40 日間では完全に死滅しなかったことがわかる。DO 調整区では、暴露期間中に死貝が発生し、換水後 10 日目でタイワンシジミは完全に死滅したことがわかる。また、個体数が減少し始めるとタイワンシジミの死滅速度が上がることもわかった。以上のことから、開放条件では脱酸素剤を投入し、3 日間暴露したことで死貝の発生を速くし、全滅までの期間を短縮できたと考えられる。

図 32、図 33 を見ると、水酸化 0.04%区では、暴露期間中に死貝は発生せず、換水後 5 日目に死貝が発生したが、25 日間では完全に死滅しなかったことがわかる。水酸化 0.08%区、水酸化 0.16%区では、暴露期間中に死貝が発生したが、25 日間では完全に死滅しなかったことがわかる。

そこで、水酸化 Ca 投入区ではタイワンシジミの生死の判断が難しく、生残率が正確な値ではないと考え、生残率の補正を行った。その結果を「3.3.2 タイワンシジミの個体数変位と生残率(補正後)」に示す。

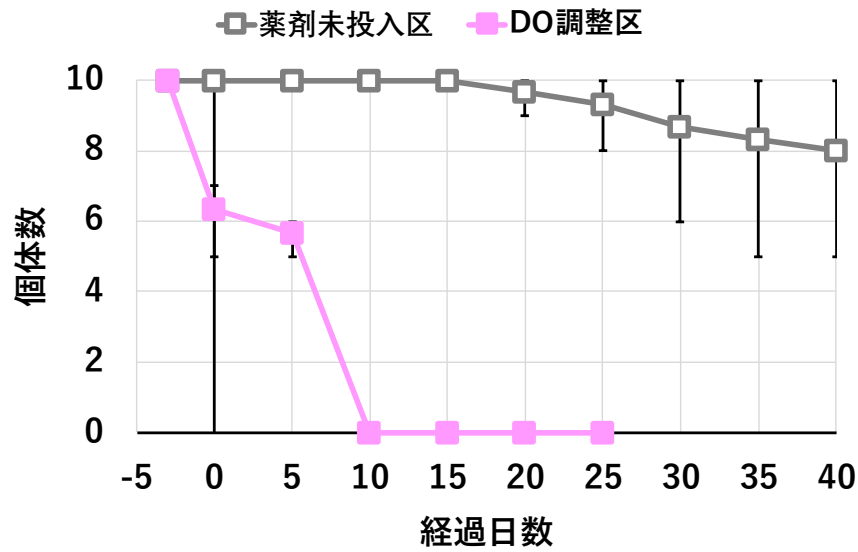


図 30 薬剤未投入区、DO 調整区のタイワンシジミの個体数変位(開放条件)
* エラーバーは最大、最小を示す。

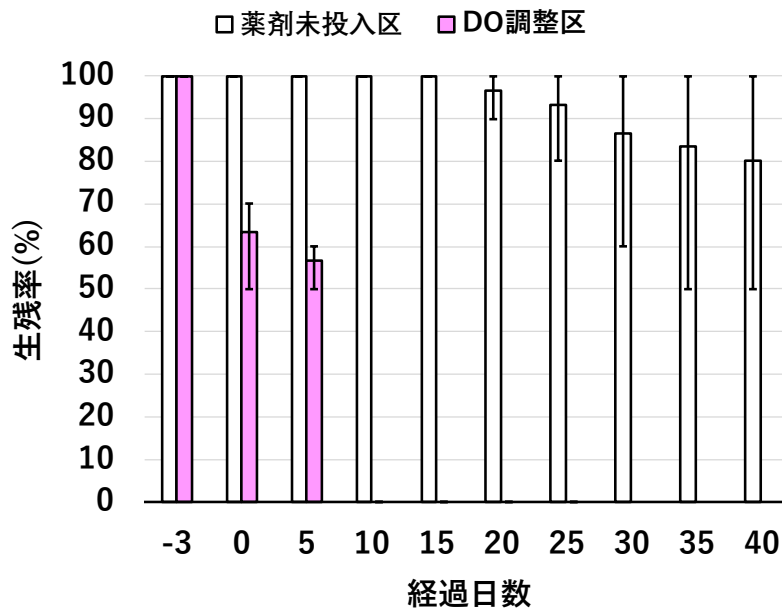


図 31 薬剤未投入区、DO 調整区のタイワンシジミの生存率(開放条件)
* エラーバーは最大、最小を示す。

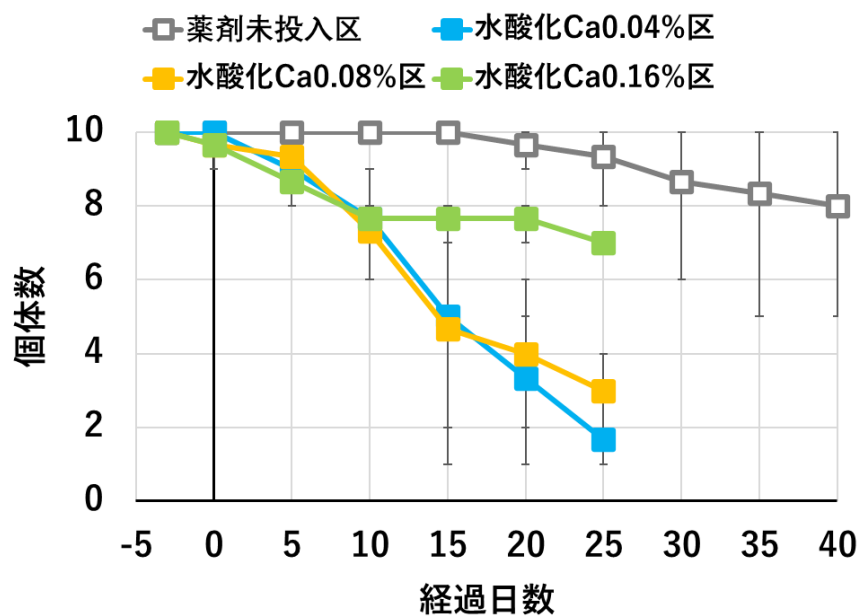


図 32 薬剤未投入区、水酸化 Ca0.04%区、水酸化 Ca0.08%区、水酸化 Ca0.16%区のタイワンシジミの個体数変位(開放条件)

* エラーバーは最大、最小を示す。

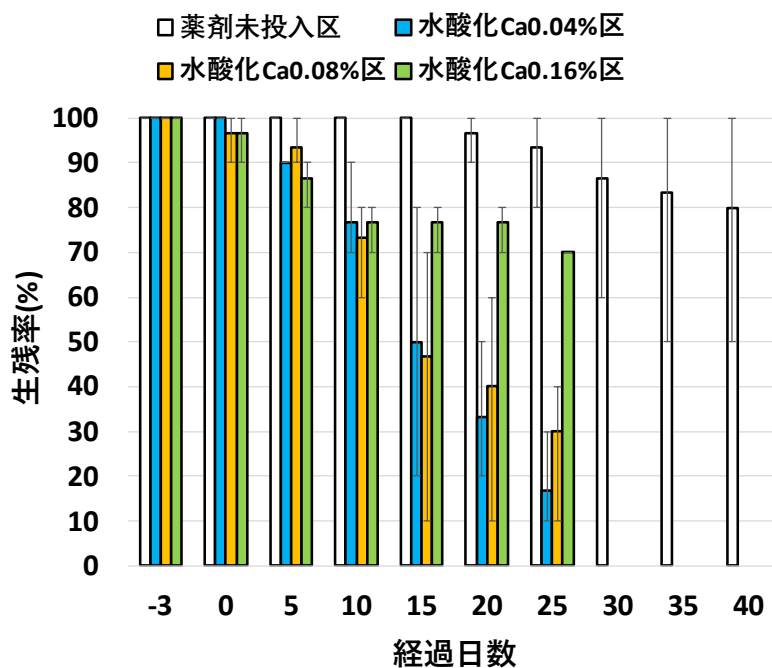


図 33 薬剤未投入区、水酸化 Ca0.04%区、水酸化 Ca0.08%区、水酸化 Ca0.16%区のタイワンシジミの生存率(開放条件)

* エラーバーは最大、最小を示す。

3.3.2 タイワンシジミの個体数変位と生残率(補正後)

タイワンシジミの生残率の補正方法

① 密閉条件

表 14、表 22、表 24、表 32 を見ると、薬剤未投入区、DO 調整区では、タイワンシジミの個体数が 0 のとき、全窒素の値が 15mg/L 以上になっていることがわかる。よって、水酸化 Ca 投入区でも全窒素の値が 15mg/L 以上のとき、タイワンシジミの個体数を 0 にすることで生残率の補正を行った。

② 開放条件

表 74、表 82、表 84、表 92 を見ると、薬剤未投入区、DO 調整区では、タイワンシジミの個体数が 0 のとき、全窒素の値が 15mg/L 以上になっていることがわかる。よって、水酸化 Ca 投入区でも全窒素の値が 15mg/L 以上のとき、タイワンシジミの個体数を 0 にすることで生残率の補正を行った。

補正後のタイワンシジミの個体数変位と生残率の結果

密閉条件での水酸化 Ca 投入区の実験の補正後のタイワンシジミの個体数を表 123～表 125、タイワンシジミの個体数変位と生残率のグラフを図 34～図 35 に示す。開放条件での水酸化 Ca 投入区の実験の補正後のタイワンシジミの個体数を表 126～表 128、タイワンシジミの個体数変位と生残率のグラフを図 36～図 37 に示す。

① 密閉条件

図 34、図 35 を見ると、水酸化 Ca0.04%区では、5 日目に死貝が発生し、25 日目でタイワンシジミは完全に死滅したことがわかる。水酸化 Ca0.08%区では、5 日目に死貝が発生し、15 日目でタイワンシジミは完全に死滅したことがわかる。水酸化 Ca0.16%区では、5 日目にタイワンシジミは完全に死滅したことがわかる。また、個体数が減少し始めるとタイワンシジミの死滅速度が上がることもわかった。以上のことから、水酸化カルシウムを投入したことで死貝の発生を速くし、全滅までの期間を短縮できたと考えられる。

表 123 個体数と生残率の変動(水酸化 Ca0.04%区、密閉条件、補正後)

日数	①個体数	②個体数	③個体数	平均	生残率(%)
0	10	10	10	10.00	100.00
5	9	7	6	7.33	73.33
10	6	6	7	6.33	63.33
15	0	0	7	2.33	23.33
20	8	0	8	5.33	53.33
25	0	0	0	0.00	0.00

表 124 個体数と生残率の変動(水酸化 Ca0.08%区、密閉条件、補正後)

日数	①個体数	②個体数	③個体数	平均	生残率(%)
0	10	10	10	10.00	100.00
5	7	7	5	6.33	63.33
10	3	4	3	3.33	33.33
15	0	0	0	0.00	0.00
20	0	0	0	0.00	0.00
25	0	0	0	0.00	0.00

表 125 個体数と生残率の変動(水酸化 Ca0.16%区、密閉条件、補正後)

日数	①個体数	②個体数	③個体数	平均	生残率(%)
0	10	10	10	10.00	100.00
5	0	0	0	0.00	0.00
10	0	0	0	0.00	0.00
15	0	0	0	0.00	0.00
20	0	0	0	0.00	0.00
25	0	0	0	0.00	0.00

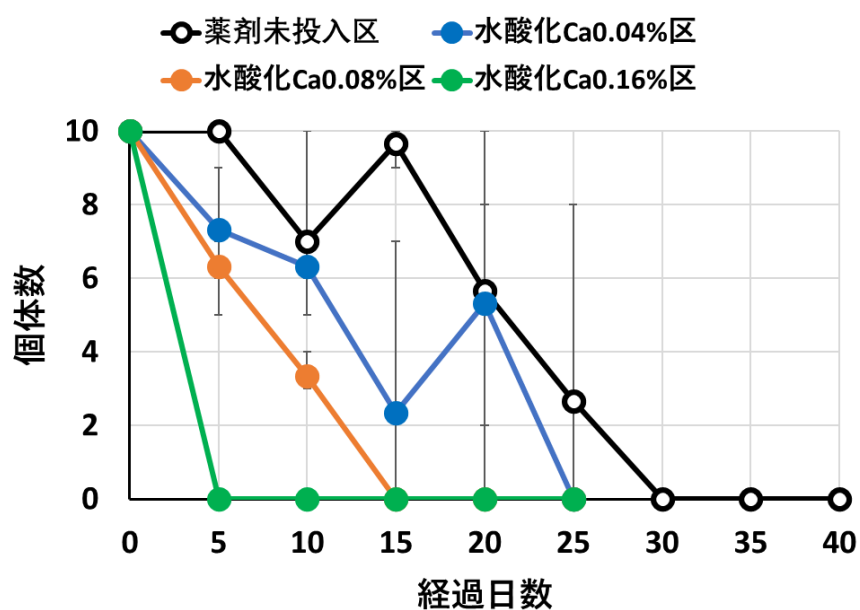


図 34 薬剤未投入区、水酸化 Ca0.04%区、水酸化 Ca0.08%区、水酸化 Ca0.16%区のタイワンシジミの個体数変位(密閉条件、補正後)

* エラーバーは最大、最小を示す。

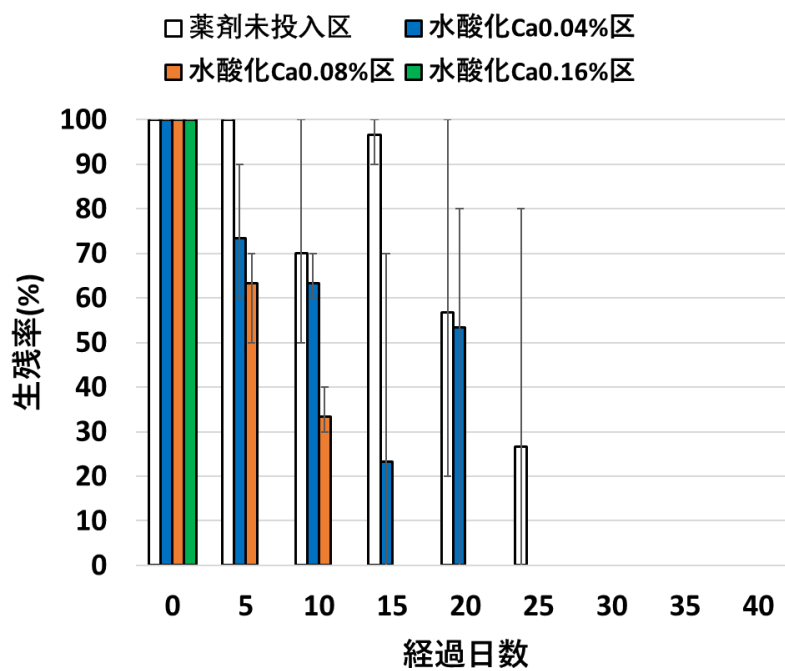


図 35 薬剤未投入区、水酸化 Ca0.04%区、水酸化 Ca0.08%区、水酸化 Ca0.16%区のタイワンシジミの生残率(密閉条件、補正後)

* エラーバーは最大、最小を示す。

② 開放条件

図 36、図 37 を見ると、水酸化 Ca0.04%区では、暴露期間中に死貝は発生せず、換水後 25 日間では完全に死滅しなかったが、個体数は 1 体程度まで減少し生残率が低下したことがわかる。水酸化 Ca0.08%区では、暴露期間中に死貝が発生し、換水後 25 日間でタイワンシジミは完全に死滅しなかったが、個体数は 1 体程度まで減少し生残率が低下したことがわかる。水酸化 Ca0.16%区では、暴露期間中に死貝が発生し、換水後 5 日間でタイワンシジミは完全に死滅したことがわかる。また、個体数が減少し始めるとタイワンシジミの死滅速度が上がることがわかった。以上のことから、開放条件では水酸化カルシウムを投入し、3 日間暴露したことで死貝の発生を速くし、全滅までの期間を短縮できたと考えられる。

表 126 個体数と生残率の変動(水酸化 Ca0.04%区、開放条件、補正後)

日数	①個体数	②個体数	③個体数	平均	生残率(%)
-3	10	10	10	10.00	100.00
0	10	10	10	10.00	100.00
5	9	9	9	9.00	90.00
10	7	9	7	7.67	76.67
15	5	8	2	5.00	50.00
20	3	5	2	3.33	33.33
25	0	3	0	1.00	10.00

表 127 個体数と生残率の変動(水酸化 Ca0.08%区、開放条件、補正後)

日数	①個体数	②個体数	③個体数	平均	生残率(%)
-3	10	10	10	10.00	100.00
0	10	9	10	9.67	96.67
5	9	9	10	9.33	93.33
10	8	8	6	7.33	73.33
15	6	7	1	4.67	46.67
20	5	6	0	3.67	36.67
25	0	4	0	1.33	13.33

表 128 個体数と生残率の変動(水酸化 Ca0.16%区、開放条件、補正後)

日数	①個体数	②個体数	③個体数	平均	生残率(%)
-3	10	10	10	10.00	100.00
0	9	10	10	9.67	96.67
5	0	0	0	0.00	0.00
10	0	0	0	0.00	0.00
15	0	0	0	0.00	0.00
20	0	0	0	0.00	0.00
25	0	0	0	0.00	0.00

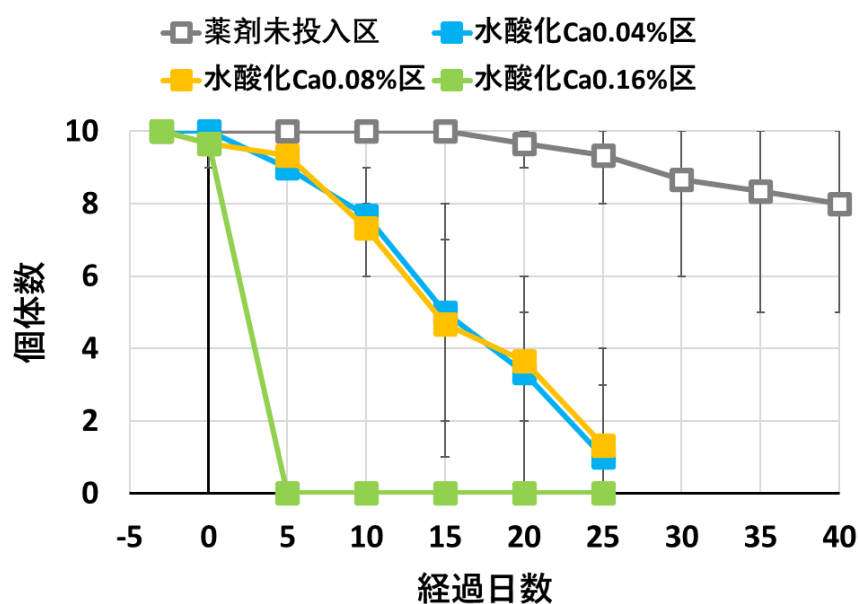


図 36 薬剤未投入区、水酸化 Ca0.04%区、水酸化 Ca0.08%区、水酸化 Ca0.16%区のタイワンシジミの個体数変位(開放条件、補正後)

* エラーバーは最大、最小を示す。

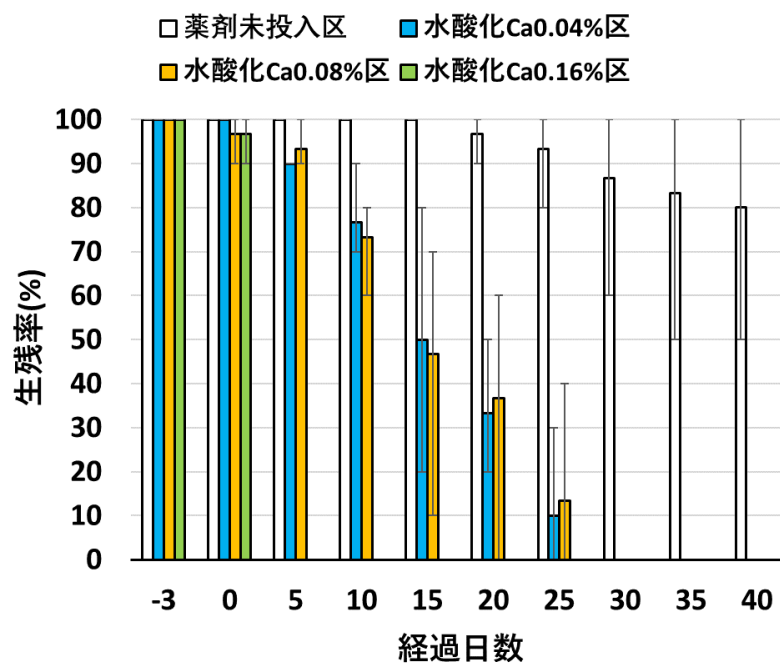


図 37 薬剤未投入区、水酸化 Ca0.04%区、水酸化 Ca0.08%区、水酸化 Ca0.16%区のタイワンシジミの生残率(開放条件、補正後)

* エラーバーは最大、最小を示す。

3.3.3 各水質項目について

密閉条件での実験の 6 区(対照区、薬剤未投入区、DO 調整区、水酸化カルシウム投入区 3 種類)の各水質の日変化のグラフを図 38～図 58、開放条件での実験の 6 区(対照区、薬剤未投入区、DO 調整区、水酸化カルシウム投入区 3 種類)の各水質の日変化のグラフを図 59～図 78 に示し、考察をした。

① 密閉条件

1. 溶存酸素濃度(DO)と溶存酸素飽和度(DO 飽和度)

図 38、図 39 を見ると、対照区では、0 日目から 25 日目まで DO は 9.0～10.0mg/L(DO 飽和度 100%)程度で一定になった。これは、蒸留水を高低温室に入れ、十分曝気させ、溶存酸素飽和状態のものを使用したためと考えられる。薬剤未投入区では、5 日目まで DO は急激に減少し、25 日目までは 3.0mg/L(DO 飽和度 40%)程度で一定になった。そこから 40 日目にかけて低い値まで減少した。これについて既往の研究でも、タイワンシジミは 1 日に 10～12 時間殻を閉じ、代謝を標準代謝速度の 10%まで減少させ、餌の欠乏に耐えることができること(Ortman and Grieshaber,2003)や他の淡水二枚貝に比べ、エネルギーを呼吸にあてる割合が低く、成長と生殖にあてる割合が高いこと(McMahon,2002)が報告されている。よって、タイワンシジミは密閉状態において DO が 3.0mg/L(DO 飽和度 40%)程度で呼吸を抑制する生存戦略をとると考えられる。DO 調整区では、5 日目まで DO は薬剤未投入区に比べ急激に減少し、10 日目には 1.0mg/L(DO 飽和度 10%)まで減少した。よって、脱酸素剤の効果が大きいことがわかった。

図 40、図 41 を見ると、水酸化 Ca0.04%区、水酸化 Ca0.08%区、水酸化 Ca0.16%区では、0 日目から 25 日目まで DO は 6.0～8.0mg/L(DO 飽和度 90%)程度で一定になった。よって、水酸化カルシウムを投入したかによる DO の低下はないことがわかった。また、対照区に比べ DO が低いのは塩濃度が高いほど DO が低くなるからであると考えられる。

図 26 と図 38 を見ると、薬剤未投入区でも DO 調整区でも個体数が減少すると DO も減少する傾向にあることがわかる。また、個体数が 0 のとき、DO は 0.8mg/L になっていることがわかる。既往の研究でも、タイワ

ンシジミの致死濃度は 25℃において DO1.1mg/L で 9 日 (Johnson and McMahon,1998) と報告されており、同程度の結果が得られた。

しかし、図 34 と図 40 を見ると、水酸化 Ca 投入区では個体数が減少しても DO は減少しないことがわかる。このことから、タイワンシジミは水質に異常があると殻を閉じ、呼吸を抑制すると考えられる。よって、水酸化 Ca 投入区では DO 以外の要因でタイワンシジミは死滅したと考えられる。

以上のことから、溶存酸素濃度の低下は個体数の減少に寄与すると言える。

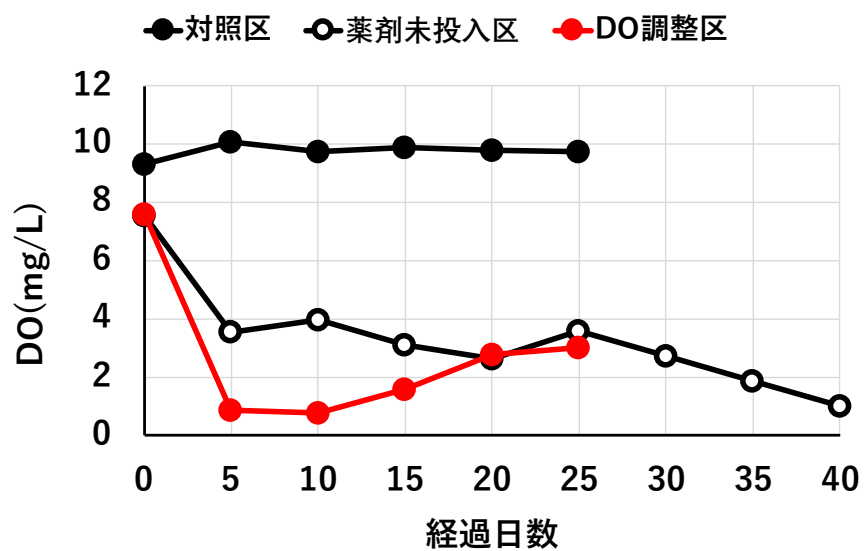


図 38 対照区、薬剤未投入区、DO 調整区の溶存酸素濃度(密閉条件)

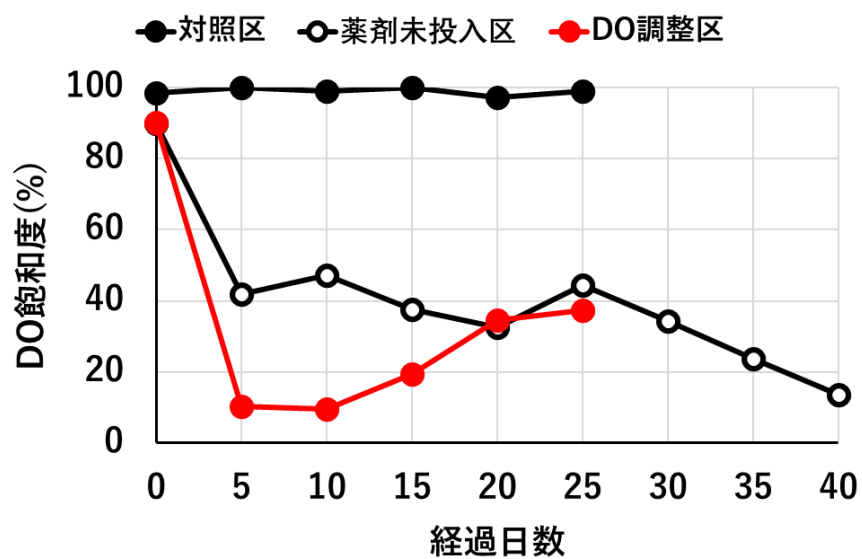


図 39 対照区、薬剤未投入区、DO 調整区の溶存酸素飽和度(密閉条件)

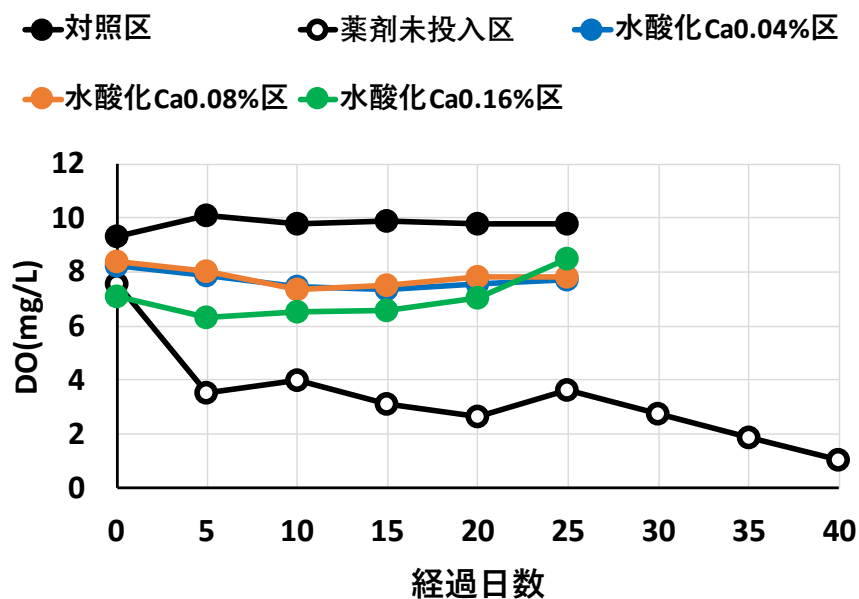


図 40 対照区、薬剤未投入区、水酸化 Ca0.04%区、水酸化 Ca0.08%区、水酸化 Ca0.16% 区の溶存酸素濃度(密閉条件)

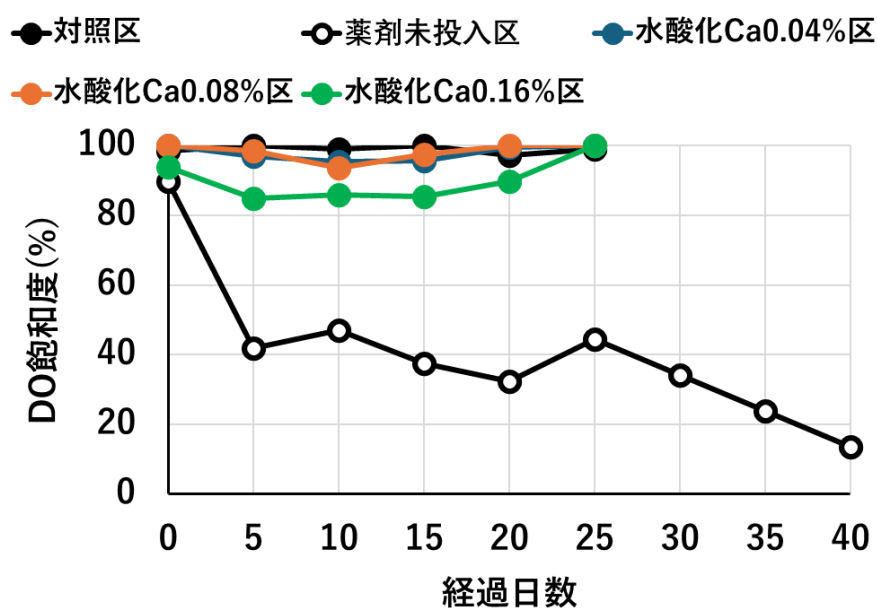


図 41 対照区、薬剤未投入区、水酸化 Ca0.04%区、水酸化 Ca0.08%区、水酸化 Ca0.16% 区の溶存酸素飽和度(密閉条件)

2. 全窒素(T-N)

図 42 を見ると、対照区では、0 日目から 25 日目まで全窒素は 0mg/L で一定になった。薬剤未投入区では、0 日目から 40 日目まで日数が経過するにつれて全窒素は高い値になった。DO 調整区では、0 日目から 25 日目まで日数が経過するにつれて全窒素は高い値になった。これは、タイワンシジミの偽糞やタイワンシジミの死貝が分解されたことが要因であると考えられる。

図 43 を見ると、水酸化 Ca0.04%区、水酸化 Ca0.08%区では、15 日目まで全窒素は増加し、25 日目まで緩やかに増加した。水酸化 Ca0.16%区では、10 日目まで全窒素は急激に増加し、25 日目まで緩やかに増加した。これは、タイワンシジミの偽糞やタイワンシジミの死貝が分解されたことが要因であると考えられる。

図 26 と図 42 を見ると、薬剤未投入区でも DO 調整区でも個体数が減少すると全窒素は増加する傾向にあることがわかる。また、個体数が 0 のとき、全窒素の値は 15mg/L 以上になっていることがわかる。既往の研究でも、水質の悪化が在来のイシガイ類を死滅させることがある(Cherry et al,2005)と報告されており、同程度の結果が得られた。

図 34 と図 43 を見ると、水酸化 Ca 投入区でも個体数が減少すると全窒素は増加する傾向にあることがわかる。また、個体数が 0 のとき、全窒素の値は 15mg/L 以上になっていることがわかる。既往の研究でも、水質の悪化が在来のイシガイ類を死滅させることがありと報告されており、同程度の結果が得られた。

以上のことから、全窒素の増加は個体数の減少に寄与すると言える。

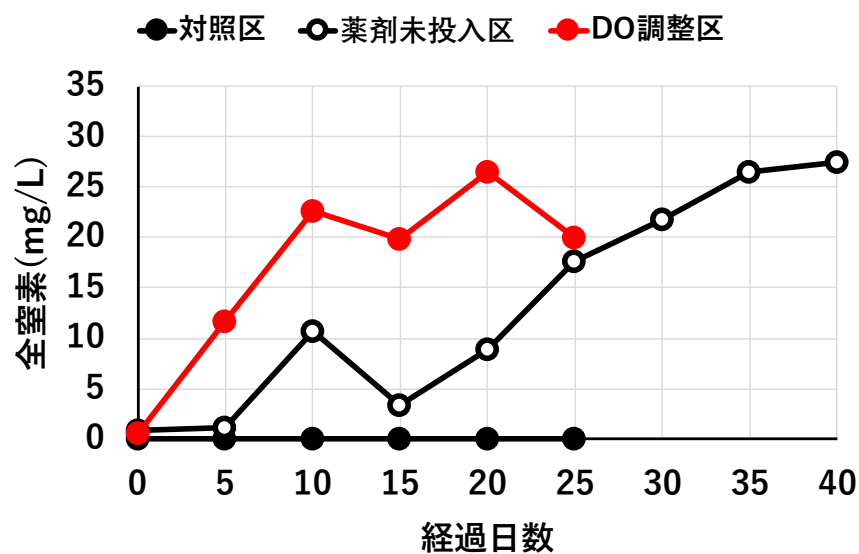


図 42 対照区、薬剤未投入区、DO 調整区の全窒素(密閉条件)

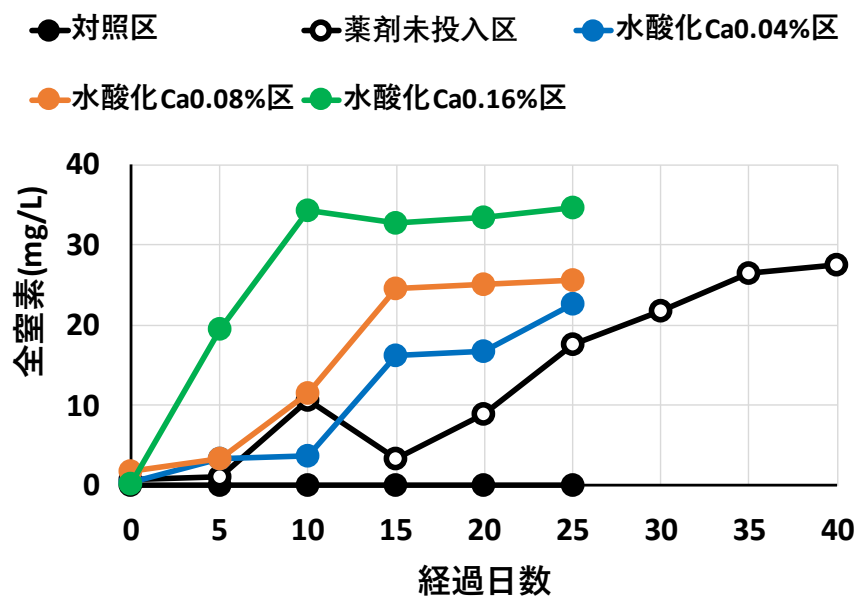


図 43 対照区、薬剤未投入区、水酸化 Ca0.04%区、水酸化 Ca0.08%区、水酸化 Ca0.16% 区の全窒素(密閉条件)

3. 硝酸態窒素($\text{NO}_3\text{-N}$)

図 44 を見ると、対照区では、0 日目から 25 日目まで硝酸態窒素は 0.3～0.4mg/L 程度の低い値で一定になった。薬剤未投入区では、0 日目から 40 日目まで硝酸態窒素は 0.3～0.8mg/L 程度の低い値で一定になった。DO 調整区では、0 日目から 25 日目まで硝酸態窒素は 2.0mg/L 程度の低い値で一定になった。

図 45 を見ると、水酸化 Ca0.04%区では、0 日目から 25 日目まで硝酸態窒素は 0.5～0.8mg/L 程度の低い値で一定になった。水酸化 Ca0.08%区では、0 日目から 25 日目まで硝酸態窒素は 1.2～1.7mg/L 程度の低い値で一定になった。水酸化 Ca0.16%区では、10 日目まで硝酸態窒素は 8.0mg/L 付近と高い値を示した。15 日目以降は測定範囲である 10.0mg/L を超える値であったため測定できずグラフ上では 0mg/L になっているが、高い値を示した。これは、亜硝酸態窒素が酸化して硝酸態窒素に変化したためであると考えられる。

図 26 と図 44 を見ると、薬剤未投入区と DO 調整区では個体数が減少しても硝酸態窒素は一定であることがわかる。

図 34 と図 45 を見ると、水酸化 Ca0.04%区と水酸化 Ca0.08%区では個体数が減少しても硝酸態窒素は一定であることがわかる。水酸化 Ca0.16%区では個体数が減少すると硝酸態窒素は増加する傾向にあることがわかる。しかし、硝酸態窒素の増加原因は前述のとおり、亜硝酸態窒素が酸化して硝酸態窒素に変化したためであると考えられる。

以上のことから、硝酸態窒素は個体数の減少に寄与しないと言える。

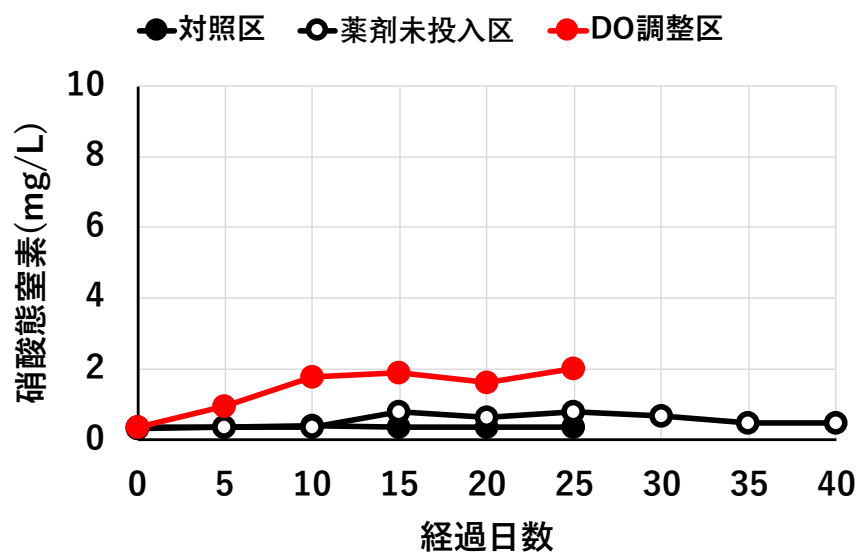


図 44 対照区、薬剤未投入区、DO 調整区の硝酸態窒素(密閉条件)

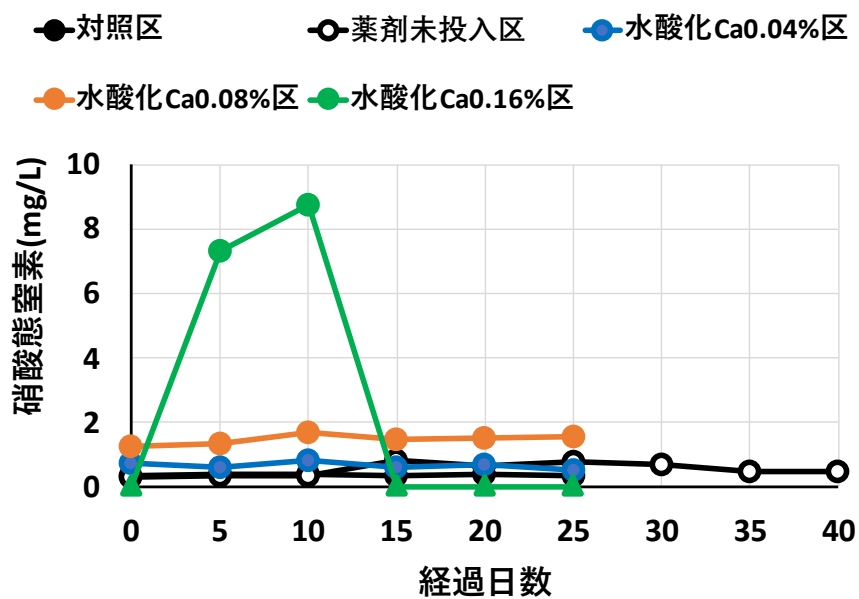


図 45 対照区、薬剤未投入区、水酸化 Ca0.04%区、水酸化 Ca0.08%区、水酸化 Ca0.16% 区の硝酸態窒素(密閉条件)

* 測定範囲を超えたデータは三角のマークで表した。

4. 亜硝酸態窒素($\text{NO}_2\text{-N}$)

図 46 を見ると、対照区では、0 日目から 25 日目まで亜硝酸態窒素は 0.001~0.003mg/L 程度の低い値で一定になった。薬剤未投入区では、0 日目から 40 日目まで亜硝酸態窒素は 0.007~0.01mg/L 程度の低い値で一定になった。DO 調整区では、0 日目から 25 日目まで亜硝酸態窒素は 0.02 mg/L 程度の低い値で一定になった。

図 47 を見ると、水酸化 Ca0.04%区では、0 日目から 25 日目まで亜硝酸態窒素は 0.004mg/L 程度の低い値で一定になった。水酸化 Ca0.08%区では、0 日目から 25 日目まで亜硝酸態窒素は 0.004~0.009mg/L 程度の匹値で一定になった。水酸化 Ca0.16%区では、0 日目から 25 日目まで日数が経過するにつれて亜硝酸態窒素は増加し、25 日目には 0.09mg/L 程度になった。これは、アンモニア態窒素が酸化して亜硝酸態窒素に変化したためであると考えられる。

図 26 と図 46 を見ると、薬剤未投入区と DO 調整区では個体数が減少しても亜硝酸態窒素は一定であることがわかる。

図 34 と図 47 を見ると、水酸化 Ca0.04%区と水酸化 Ca0.08%区では個体数が減少しても亜硝酸態窒素は一定であることがわかる。水酸化 Ca 0.16%区では個体数が減少すると亜硝酸態窒素は増加する傾向にあることがわかる。しかし、亜硝酸態窒素の増加原因は前述のとおり、アンモニア態窒素が酸化して亜硝酸態窒素に変化したためであると考えられる。

以上のことから、亜硝酸態窒素は個体数の減少に寄与しないと言える。

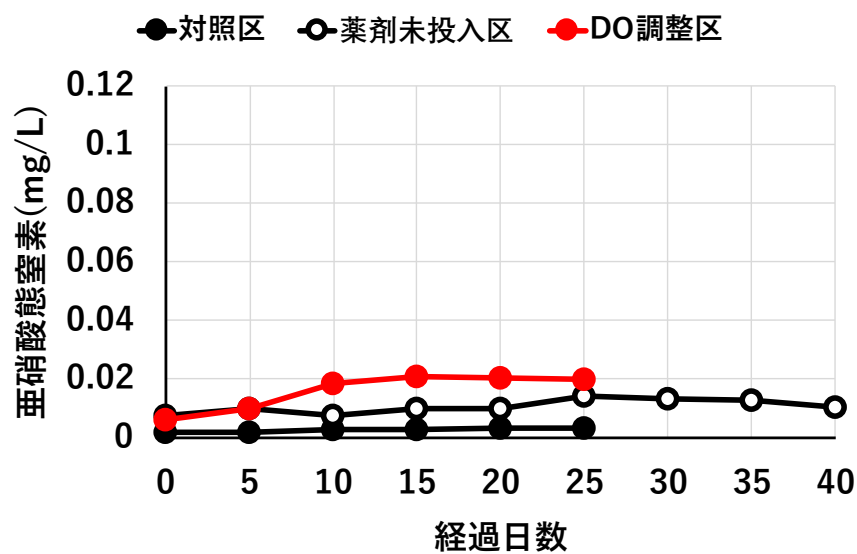


図 46 対照区、薬剤未投入区、DO 調整区の亜硝酸態窒素(密閉条件)

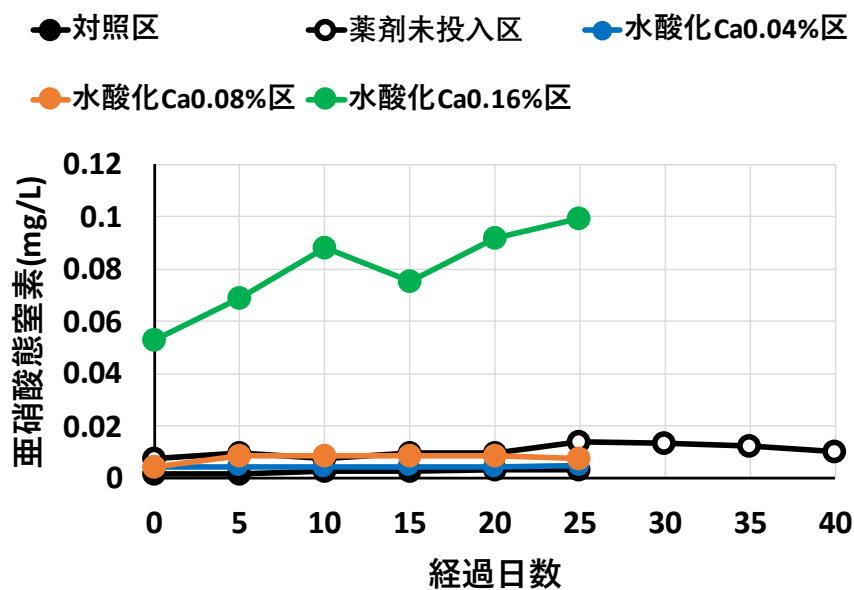


図 47 対照区、薬剤未投入区、水酸化 Ca0.04%区、水酸化 Ca0.08%区、水酸化 Ca0.16% 区の亜硝酸態窒素(密閉条件)

5. アンモニア態窒素(NH₃-N)

図 48 を見ると、対照区では、0 日目から 25 日目までアンモニア態窒素は 0mg/L で一定になった。薬剤未投入区では、20 日目までアンモニア態窒素は緩やかに増加した。25 日目以降は測定範囲である 2.5mg/L を超える値であったため測定できずグラフ上では 0mg/L になっているが、高い値を示した。DO 調整区では、5 日目までアンモニア態窒素は 0mg/L で一定になった。10 日目以降は測定範囲である 2.5mg/L を超える値であったため測定できずグラフでは 0mg/L になっているが、高い値を示した。これは、タイワンシジミの偽糞やタイワンシジミの死貝が分解されたことが要因であると考えられる。

図 49 を見ると、水酸化 Ca0.04 区、水酸化 Ca0.08%区では、10 日目までアンモニア態窒素は急激に増加し、15 日目以降は測定範囲である 2.5mg/L を超える値であったため測定できずグラフでは 0mg/L になっているが、高い値を示した。水酸化 Ca0.16%区では、5 日目までアンモニア態窒素は急激に増加し、10 日目以降は測定範囲である 2.5mg/L を超える値であったため測定できずグラフでは 0mg/L になっているが、高い値を示した。これは、タイワンシジミの偽糞やタイワンシジミの死貝が分解されたことが要因であると考えられる。

図 26 と図 48 を見ると、薬剤未投入区でも DO 調整区でも個体数が減少するとアンモニア態窒素は増加する傾向にあることがわかる。また、個体数が 0 のとき、アンモニア態窒素は測定範囲を超える値になっていることがわかる。既往の研究でも、アンモニアの濃度が高い環境下でシジミはストレスに抵抗できない(Tianxu Zhang et al,2021)と報告されており、同程度の結果が得られた。

図 34 と図 49 を見ると、水酸化 Ca 投入区では個体数が減少するとアンモニア態窒素は増加する傾向にあることがわかる。また、個体数が 0 のとき、アンモニア態窒素は測定範囲を超える値になっていることがわかる。既往の研究でも、アンモニアの濃度が高い環境下でシジミはストレスに抵抗できないと報告されており、同程度の結果が得られた。

以上のことから、アンモニア態窒素の増加は個体数の減少に寄与すると言える。

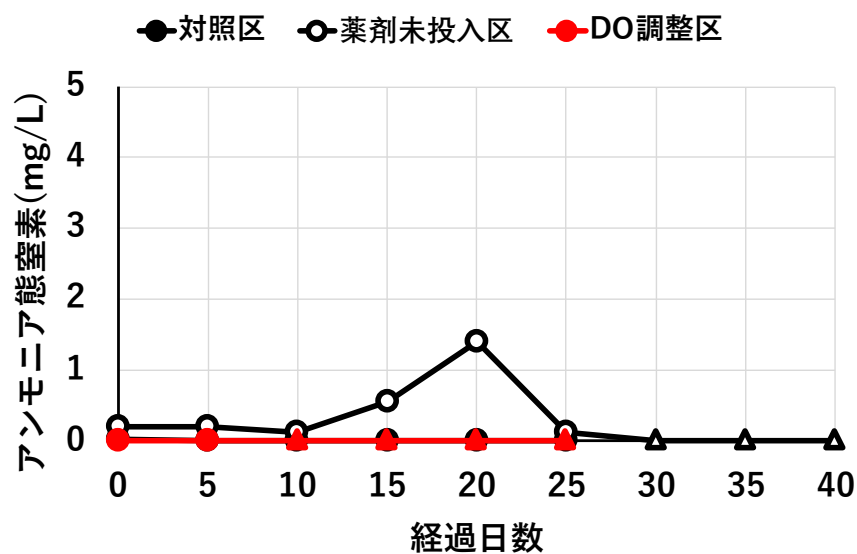


図 48 対照区、薬剤未投入区、DO 調整区のアモンニア態窒素(密閉条件)
 * 測定範囲を超えたデータは三角のマーカで表した。

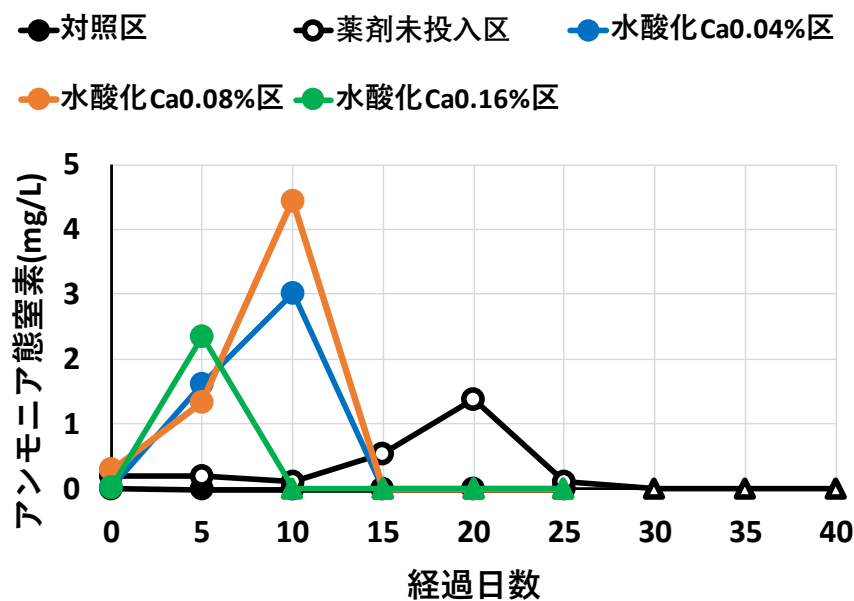


図 49 対照区、薬剤未投入区、水酸化 Ca0.04%区、水酸化 Ca0.08%区、水酸化 Ca0.16%
 区のアモンニア態窒素(密閉条件)
 * 測定範囲を超えたデータは三角のマーカで表した。

6. 全リン(T-P)

図 51 を見ると、対照区では、0 日目から 25 日目まで全リンは 0mg/L で一定になった。薬剤未投入区では、0 日目から 40 日目まで日数が経過するにつれて全リンは高い値になった。DO 調整区では、0 日目から 25 日目まで日数が経過するにつれて全リンは高い値になった。これは、タイワンシジミの偽糞やタイワンシジミの死貝が分解されたことが要因であると考えられる。

図 52 を見ると、水酸化 Ca0.04%区、水酸化 Ca0.08%区では、0 日目から 25 日目まで全リンは 0.7~1.6mg/L 程度で一定になった。水酸化 Ca0.16%区では、0 日目から 25 日目まで全リンは 1.7~3.2mg/L 程度で一定になった。

図 26 と図 51 を見ると、薬剤未投入区でも DO 調整区でも個体数が減少すると全リンは増加する傾向にあることがわかる。また、個体数が 0 のとき、全リンの値は 4mg/L 以上になっていることがわかる。既往の研究でも、水質の悪化が在来のイシガイ類を死滅させることがあると報告されており、同程度の結果が得られた。

図 34 と図 52 を見ると、水酸化 Ca 投入区では個体数が減少しても全リンは増加しないことがわかる。これは、水酸化カルシウムとリンが中和反応し、懸濁態のリンが発生したためであると考えられる。この中和反応により発生したリン酸カルシウムは懸濁態で水に溶けにくいため沈殿した(図 50)。よって、水酸化 Ca 投入区では、全リン以外の要因でタイワンシジミは死滅したと考えられる。

以上のことから、全リンの増加は個体数の減少に寄与すると言える。

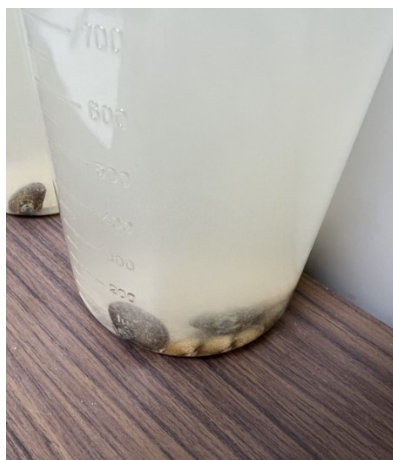


図 50 リン酸カルシウムの沈殿

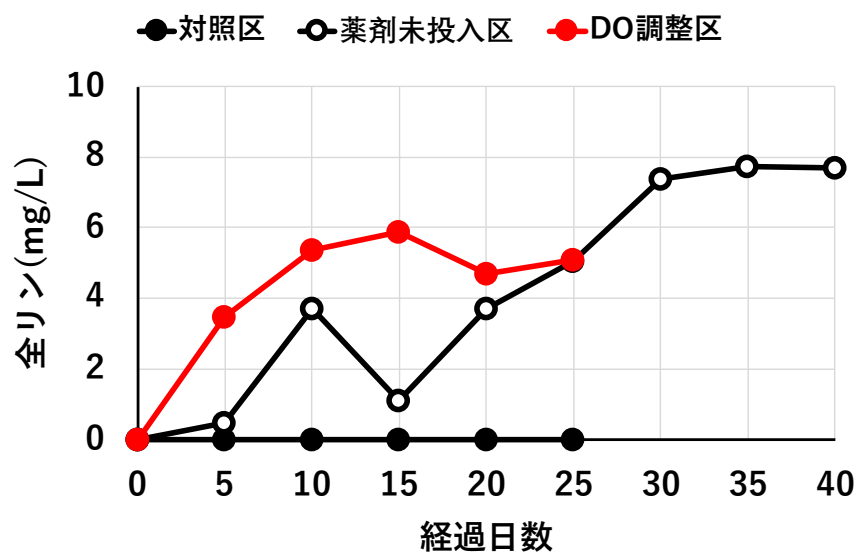


図 51 対照区、薬剤未投入区、DO 調整区の全リン(密閉条件)

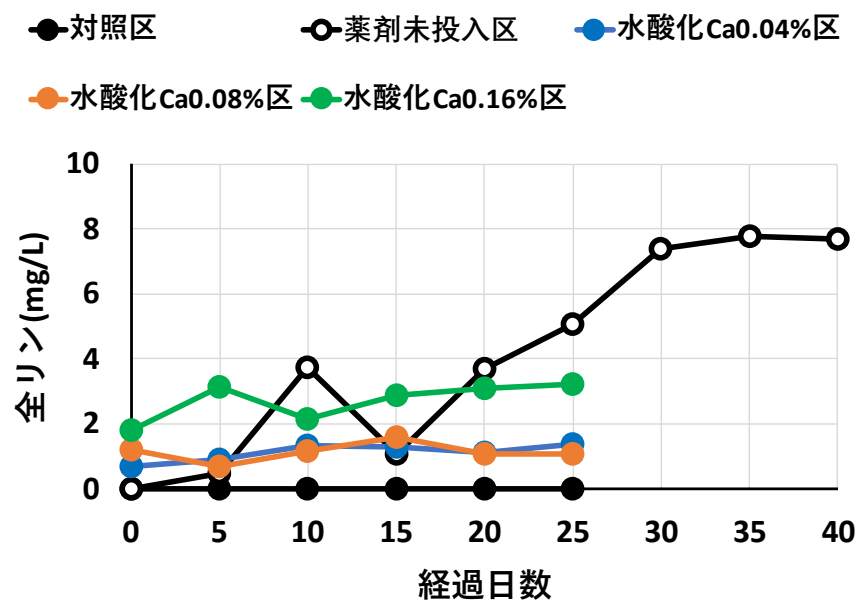


図 52 対照区、薬剤未投入区、水酸化 Ca0.04%区、水酸化 Ca0.08%区、水酸化 Ca0.16% 区の全リン(密閉条件)

7. pH

図 53 を見ると、対照区では、0 日目から 25 日目まで pH は 6.6～7.0 で一定になった。薬剤未投入区では、0 日目から 40 日目まで pH は対照区と同様に 6.6～7.0 で一定になった。DO 調整区では、0 日目から 25 日目まで pH は 6.0 付近で一定になり、薬剤未投入区に比べ少し低い値を示した。これは、投入した脱酸素剤がアルカリ性を示すからであると考えられる。

図 54 を見ると、水酸化 Ca0.04%区では、0 日目から 25 日目まで pH は 11.2～11.6 で一定になった。水酸化 Ca0.08%区では、0 日目から 25 日目まで pH は 11.6～11.8 で一定になった。水酸化 Ca0.16%区では、0 日目から 25 日目まで pH は 12.2 付近で一定になった。

図 26 と図 53 を見ると、薬剤未投入区でも DO 調整区でも個体数が減少しても pH は中性で一定であることがわかる。これについて、水生生物の生息に適した pH は 6.8～8.5と言われており、pH の結果だけを見ると薬剤未投入区でも DO 調整区でもタイワンシジミは生存可能であると考えられる。よって、薬剤未投入区と DO 調整区では、pH 以外の要因でタイワンシジミは死滅したと考えられる。

図 34 と図 54 を見ると、水酸化 Ca 投入区では個体数が減少しても pH は強アルカリ性で一定であることがわかる。これについて既往の pH 異常によるフナの斃死実験でも、pH12 の水の中で飼育したフナは 2 時間後に死亡が確認されており、同程度の結果が得られた。

以上のことから、強アルカリ性の pH は個体数の減少に寄与すると言える。

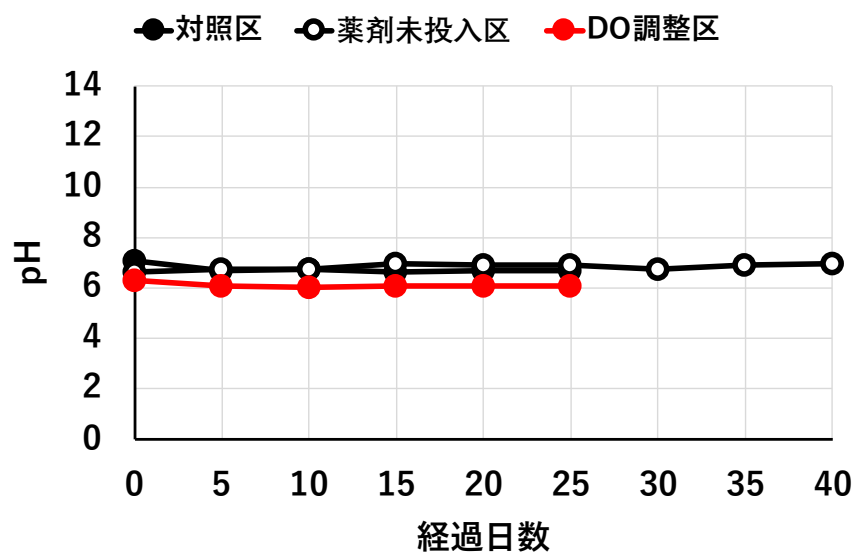


図 53 対照区、薬剤未投入区、DO 調整区の pH(密閉条件)

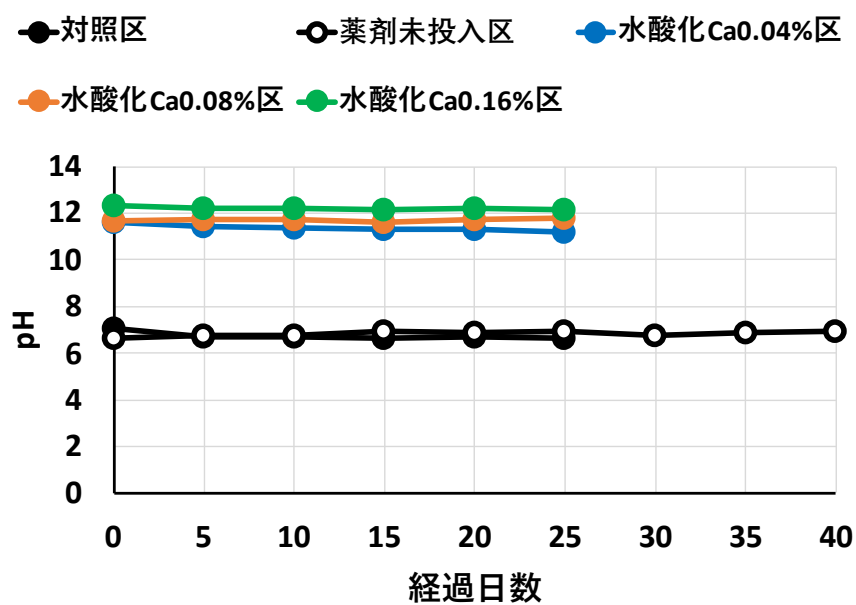


図 54 対照区、薬剤未投入区、水酸化 Ca0.04%区、水酸化 Ca0.08%区、水酸化 Ca0.16% 区の pH(密閉条件)

8. カルシウムイオン濃度(Ca^{2+})

図 55 を見ると、対照区では、0 日目から 25 日目まで Ca イオン濃度は 0ppm で一定になった。薬剤未投入区では、0 日目から 40 日目まで日数が経過するにつれて Ca イオン濃度は緩やかに増加した。DO 調整区では、0 日目から 25 日目まで日数が経過するにつれて Ca イオン濃度は緩やかに増加した。これは、Ca イオン濃度の低い環境下でシジミは繁殖のため殻から Ca イオンを放出する(Noe Ferreira-Rodriguez et al,2017)ためであると考えられる。

図 56 を見ると、水酸化 Ca0.04%区、水酸化 Ca0.08%区、水酸化 Ca0.16%区では、0 日目から 25 日目まで日数が経過するにつれて Ca イオン濃度は減少する傾向にあった。これは、Ca イオン濃度の高い環境下でシジミは呼吸により Ca イオンを体内に吸収しているのではないかと考えられる。

図 26 と図 55 を見ると、薬剤未投入区でも DO 調整区でも個体数が減少すると Ca イオン濃度は少し増加する傾向にあることがわかる。しかし、Ca イオン濃度の増加原因は前述のとおり、Ca イオン濃度の低い環境下でシジミは繁殖のため殻から Ca イオンを放出するためであると考えられる。

図 34 と図 56 を見ると、水酸化 Ca 投入区では個体数が減少すると Ca イオン濃度も少し減少する傾向にあることがわかる。しかし、Ca イオン濃度の減少原因は前述のとおり、Ca イオン濃度の高い環境下でシジミは呼吸により Ca イオンを体内に吸収しているのではないかと考えられる。

以上のことから、Ca イオン濃度は個体数の減少に寄与しないと言える。

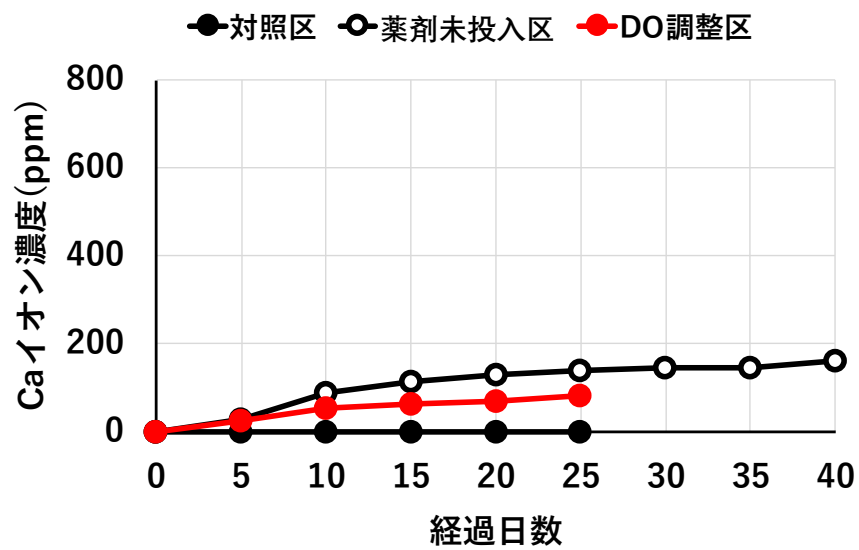


図 55 対照区、薬剤未投入区、DO 調整区の Ca イオン濃度(密閉条件)

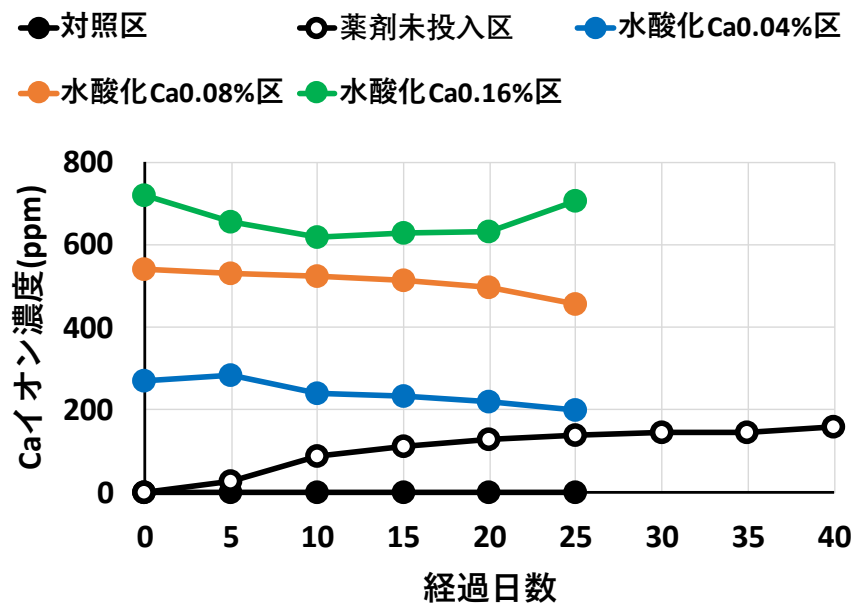


図 56 対照区、薬剤未投入区、水酸化 Ca0.04%区、水酸化 Ca0.08%区、水酸化 Ca0.16% 区の Ca イオン濃度(密閉条件)

9. 電気伝導度(EC)

タイワンシジミは淡水域から汽水域まで幅広く分布しており、自然界における一般的な電気伝導度は雨水で 5~50 μ S/cm、河川水で 30~40 μ S/cm、地下水で 30~500 μ S/cm、汽水湖で 2000~20000 μ S/cm、海水で 20000~50000 μ S/cm の値を示す。以上のことからタイワンシジミは電気伝導度が 0~20000 μ S/cm まで生存可能であると言える。

図 57 を見ると、対照区では、0 日目から 25 日目まで電気伝導度は 4~8 μ S/cm で低い値で一定になった。薬剤未投入区では、0 日目から 40 日目にかけて電気伝導度は 30~750 μ S/cm まで増加した。DO 調整区では、0 日目から 25 日目にかけて電気伝導度は 1500~3300 μ S/cm まで増加した。

図 58 を見ると、水酸化 Ca0.04%区では、0 日目から 25 日目にかけて電気伝導度は 2300~1200 μ S/cm まで減少した。水酸化 Ca0.08%区では、0 日目から 25 日目にかけて電気伝導度は 3900~3200 μ S/cm まで減少した。水酸化 Ca0.16%区では、0 日目から 25 日目にかけて電気伝導度は 7000~6300 μ S/cm まで減少した。

図 26 と図 57 を見ると、薬剤未投入区と DO 調整区では個体数が減少すると電気伝導度は 750 μ S/cm と 3300 μ S/cm まで増加することがわかる。前述のとおり、電気伝導度の結果だけ見ると薬剤未投入区でも DO 調整 1%区でもタイワンシジミは生存可能であると考えられる。よって、薬剤未投入区と DO 調整区では、電気伝導度以外の要因でタイワンシジミは死滅したと考えられる。

図 34 と図 58 を見ると、水酸化 Ca 投入区では個体数が減少すると電気伝導度は 1200 μ S/cm、3200 μ S/cm、6300 μ S/cm まで減少することがわかる。前述のとおり、電気伝導度の結果だけ見ると水酸化 Ca 投入区でもタイワンシジミは生存可能であると考えられる。よって、水酸化 Ca 投入区では、電気伝導度以外の要因でタイワンシジミは死滅したと考えられる。

以上のことから、電気伝導度は個体数の減少に寄与しないと言える。

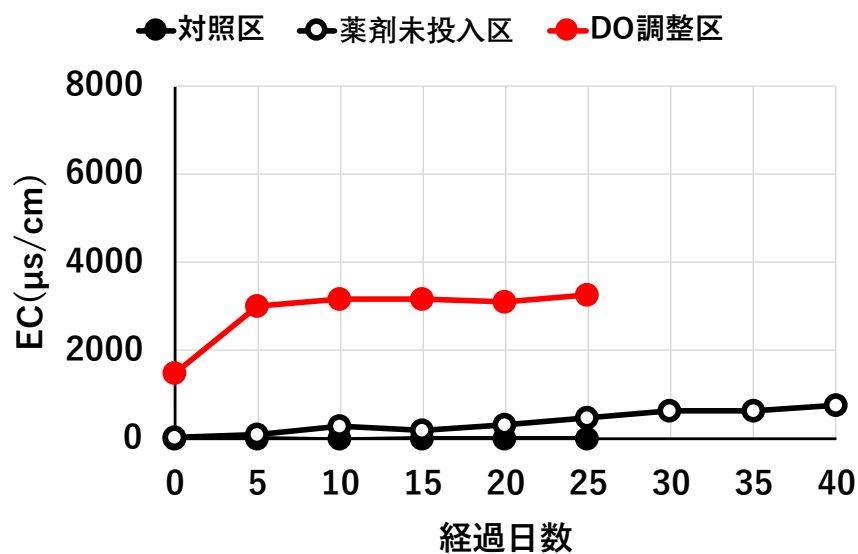


図 57 対照区、薬剤未投入区、DO 調整区の電気伝導度(密閉条件)

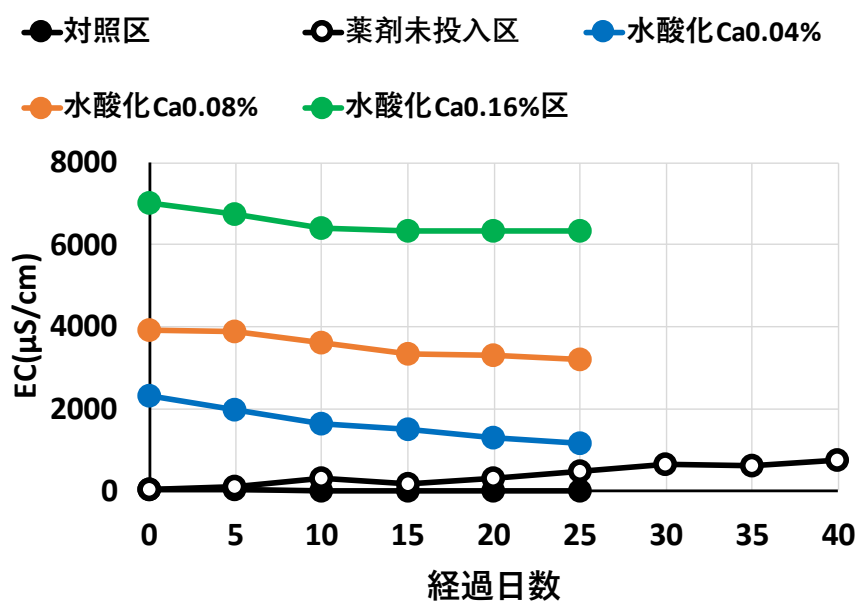


図 58 対照区、薬剤未投入区、水酸化 Ca0.04%区、水酸化 Ca0.08%区、水酸化 Ca0.16% 区の電気伝導度(密閉条件)

② 開放条件

1. 溶存酸素濃度(DO)と溶存酸素飽和度(DO 飽和度)

図 59、図 60 を見ると、対照区では、暴露期間中に DO の変化はなく、換水後 0 日目から 25 日目まで DO は 8.0mg/L(DO 飽和度 100%)程度で一定になった。これは、蒸留水を高低温室に入れ、十分曝気させ、溶存酸素飽和状態のものを使用したためと考えられる。薬剤未投入区では、暴露期間中に DO 6.0mg/L(DO 飽和度 80%)程度まで減少した。換水後 5 日目まで DO は急激に減少し、10 日目には 4.5mg/L(DO 飽和度 60%)程度まで減少になった。そこから 40 日目にかけて空気中の酸素により DO は緩やかに増加した。DO 調整区では、暴露期間中に DO 4.5mg/L(DO 飽和度 60%)程度まで減少した。換水後 5 日目まで DO は薬剤未投入区に比べ急激に減少し、10 日目には 2.0mg/L(DO 飽和度 20%)付近まで減少した。そこから 25 日目にかけて空気中の酸素により DO は増加した。よって、開放条件でも脱酸素剤の効果が大きいことがわかった。

図 61、図 62 を見ると、水酸化 Ca0.04%区、水酸化 Ca0.08%区では、暴露期間中に DO の変化はなく、換水後 10 日目まで DO は緩やかに減少し、そこから 25 日目まで 6.0~7.5mg/L(DO 飽和度 60~80%)程度で一定になった。これは、タイワンシジミの死貝が分解されたことによる減少と空気中の酸素による増加が同程度であったと考えられる。水酸化 Ca0.16%区では、暴露期間中に DO の変化はなく、換水後 5 日目まで DO は急激に減少し、10 日目には 1.0mg/L(DO 飽和度 10%)付近まで減少した。そこから 25 日目にかけて空気中の酸素により DO は増加した。これは、タイワンシジミの死貝が分解されたことが要因であると考えられる。

図 30 と図 59 を見ると、薬剤未投入区でも DO 調整区でも個体数が減少すると DO も減少する傾向にあることがわかる。また、個体数が 0 のとき、DO は 1.6mg/L まで減少している。これは密閉条件での実験と同程度の結果が得られた。

図 36 と図 61 を見ると、水酸化 Ca 投入区でも個体数が減少すると DO も減少する傾向にあることがわかる。また、個体数が 0 のとき、DO は 0.7mg/L まで減少している。既往の研究でもタイワンシジミの致死濃度は 25°Cにおいて DO 1.1mg/L で 9 日と報告されており、同程度の結果が得られた。

以上のことから、溶存酸素濃度の低下は個体数の減少に寄与すると言える。

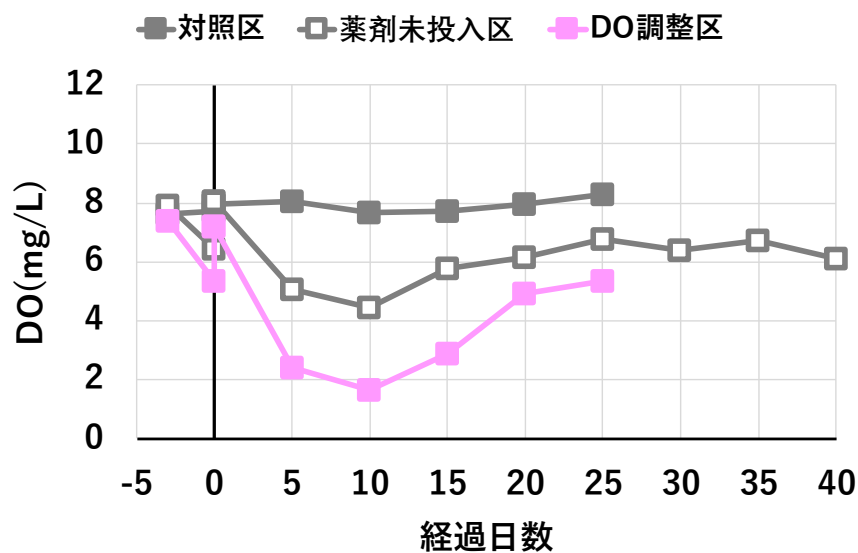


図 59 対照区、薬剤未投入区、DO 調整区の溶存酸素濃度(開放条件)

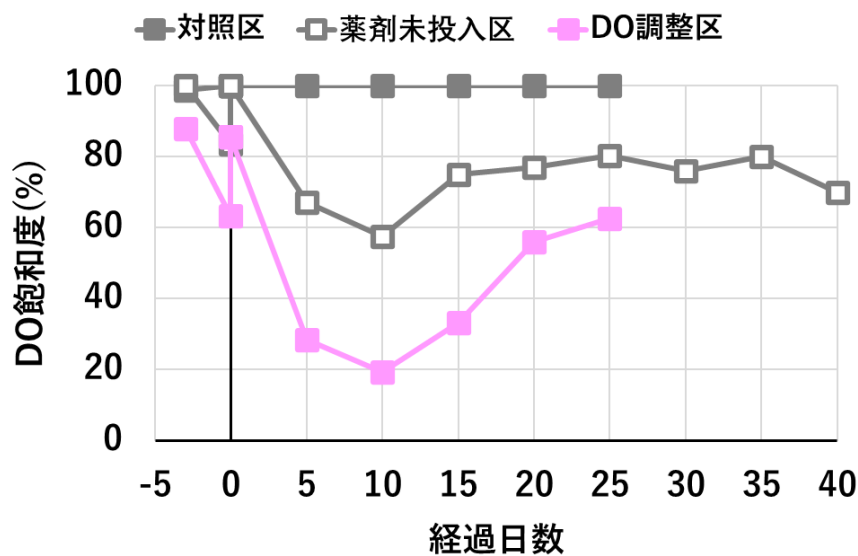


図 60 対照区、薬剤未投入区、DO 調整区の溶存酸素飽和度(開放条件)

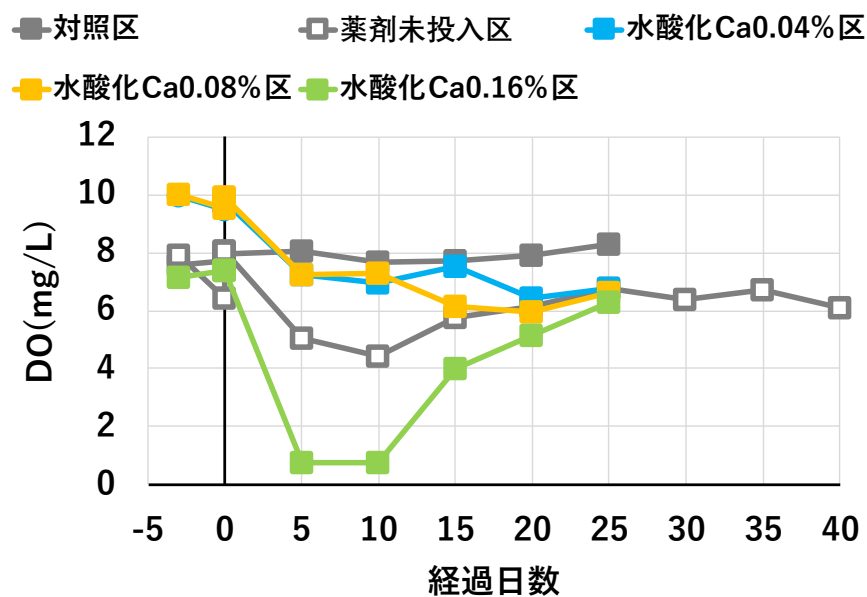


図 61 対照区、薬剤未投入区、水酸化 Ca0.04%区、水酸化 Ca0.08%区、水酸化 Ca0.16% 区の溶存酸素濃度(開放条件)

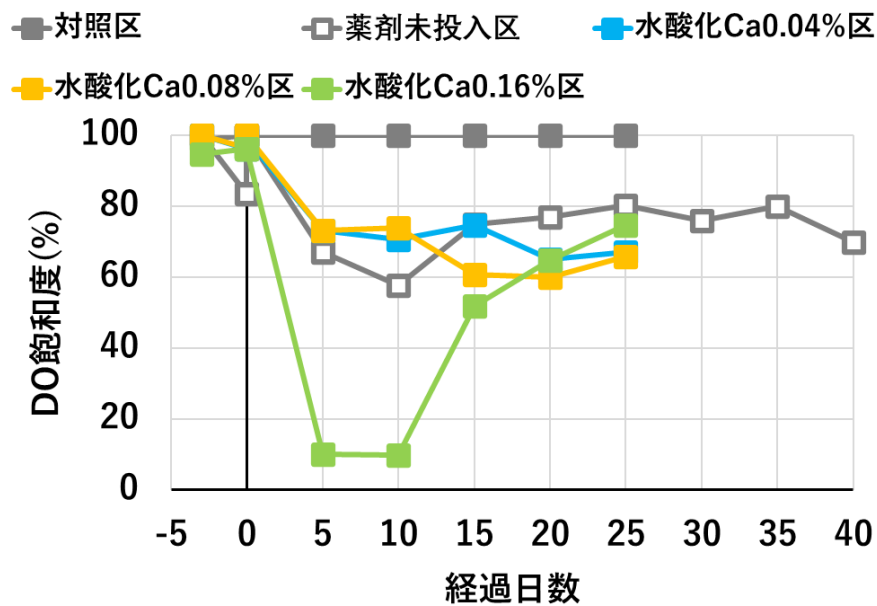


図 62 対照区、薬剤未投入区、水酸化 Ca0.04%区、水酸化 Ca0.08%区、水酸化 Ca0.16% 区の溶存酸素飽和度(開放条件)

2. 全窒素(T-N)

図 63 を見ると、対照区では、暴露期間中に全窒素の変化はなく、換水後 0 日目から 25 日目まで全窒素は 0.3~1.0mg/L と低い値になった。薬剤未投入区では、暴露期間中に全窒素の変化はなく、換水後 0 日目から 40 日目まで日数が経過するにつれて全窒素は高い値になった。DO 調整区では、暴露期間中に全窒素の変化はなく、換水後 0 日目から 10 日目まで日数が経過するにつれて全窒素は高い値になった。これは、タイワンシジミの偽糞やタイワンシジミの死貝が分解されたことが要因であると考えられる。その後 25 日目にかけて全窒素は減少した。これは、配水槽への水の流入を想定して、水質測定後に水槽に蒸留水を入れていたことが要因であると考えられる。

図 64 を見ると、水酸化 Ca0.04%区、水酸化 Ca0.08%区では、暴露期間中に全窒素の変化はなく、換水後 0 日目から 25 日目まで日数が経過するにつれて全窒素は高い値になった。水酸化 Ca0.16%区では、暴露期間中に全窒素の変化はなく、換水後 5 日目まで全窒素は急激に増加した。これは、タイワンシジミの偽糞やタイワンシジミの死貝が分解されたことが要因であると考えられる。その後 25 日目にかけて全窒素は減少した。これは、配水槽への水の流入を想定して、水質測定後に水槽に蒸留水を入れていたことが要因であると考えられる。

図 30 と図 63 を見ると、薬剤未投入区でも DO 調整区でも個体数が減少すると全窒素は増加する傾向にあることがわかる。また、個体数が 0 のとき、全窒素の値は 15mg/L 以上になっていることがわかる。これは密閉条件での実験と同様の結果が得られた。

図 36 と図 64 を見ると、水酸化 Ca 投入区でも個体数が減少すると全窒素は増加する傾向にあることがわかる。また、個体数が 0 のとき、全窒素の値は 15mg/L 以上になっていることがわかる。これは密閉条件での実験と同様の結果が得られた。

以上のことから、全窒素の増加は個体数の減少に寄与すると言える。

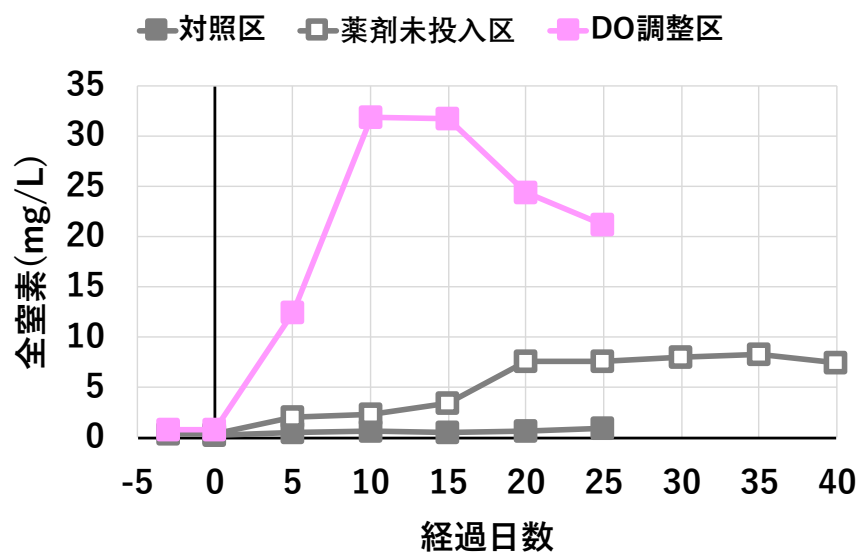


図 63 対照区、薬剤未投入区、DO 調整区の全窒素(開放条件)

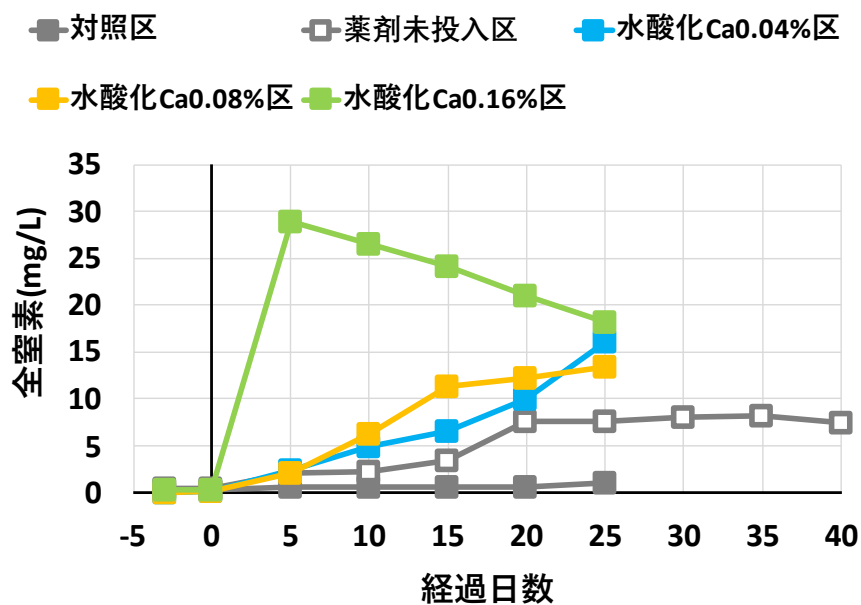


図 64 対照区、薬剤未投入区、水酸化 Ca0.04%区、水酸化 Ca0.08%区、水酸化 Ca0.16% 区の全窒素(開放条件)

3. 硝酸態窒素($\text{NO}_3\text{-N}$)

図 65 を見ると、対照区では、暴露期間中に硝酸態窒素の変化はなく、換水後 0 日目から 25 日目まで硝酸態窒素は 0.3mg/L 程度の低い値で一定になった。薬剤未投入区では、暴露期間中に硝酸態窒素の変化はなく、換水後 0 日目から 40 日目まで日数が経過するにつれて硝酸態窒素は高い値になった。これは、亜硝酸態窒素が酸化して硝酸態窒素に変化したためであると考えられる。DO 調整区では、暴露期間中に硝酸態窒素の変化はなく、換水後 0 日目から 25 日目まで硝酸態窒素は 0.5mg/L 程度の低い値で一定になった。

図 66 を見ると、水酸化 $\text{Ca}0.04\%$ 区、水酸化 $\text{Ca}0.08\%$ 区では、暴露期間中に硝酸態窒素の変化はなく、換水後 0 日目から 25 日目まで硝酸態窒素は $0.4\sim 0.8\text{mg/L}$ 程度の低い値で一定になった。水酸化 $\text{Ca}0.16\%$ 区では、暴露期間中に硝酸態窒素は少し減少した。これは、実際に水を止めることができる期間を想定して、3 日間暴露した後に換水したことが要因であると考えられる。換水後 0 日目から 25 日目まで硝酸態窒素は $0.3\sim 0.5\text{mg/L}$ 程度の低い値で一定になった。

図 30 と図 65 を見ると、薬剤未投入区では個体数が減少すると硝酸態窒素は増加する傾向にあることがわかる。しかし、硝酸態窒素の増加原因は前述のとおり、亜硝酸態窒素が酸化して硝酸態窒素に変化したためであると考えられる。DO 調整区では個体数が減少しても硝酸態窒素は一定になることがわかる。

図 36 と図 66 を見ると、水酸化 Ca 投入区では個体数が減少しても硝酸態窒素は一定であることがわかる。

以上のことから、硝酸態窒素は個体数の減少に寄与しないと言える。

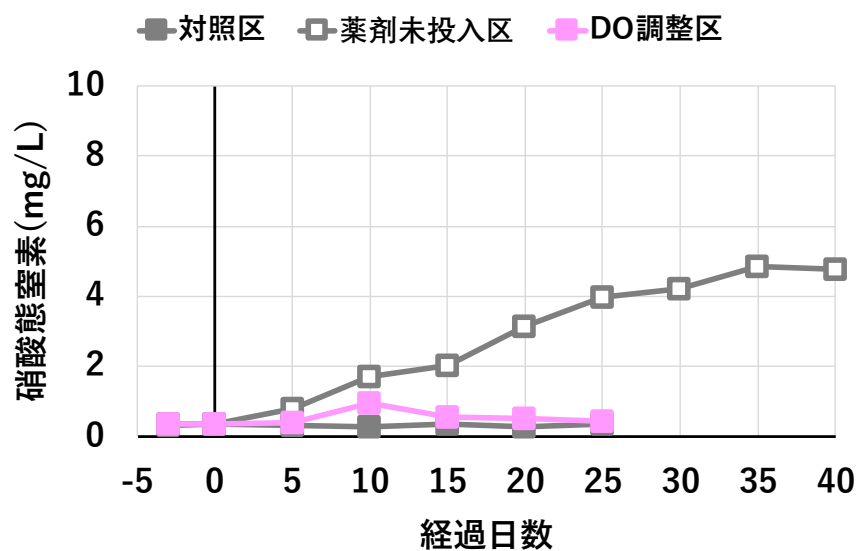


図 65 対照区、薬剤未投入区、DO 調整区の硝酸態窒素(開放条件)

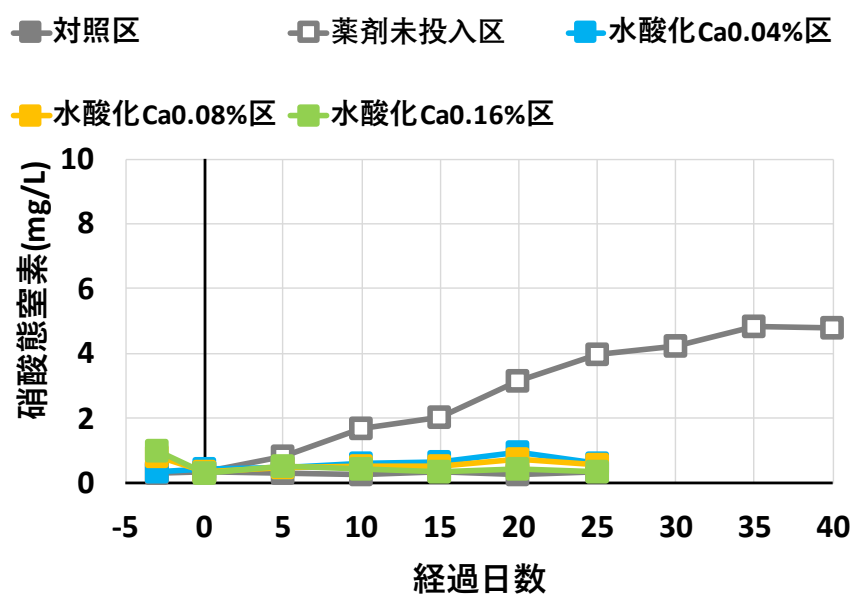


図 66 対照区、薬剤未投入区、水酸化 Ca0.04%区、水酸化 Ca0.08%区、水酸化 Ca0.16% 区の硝酸態窒素(開放条件)

4. 亜硝酸態窒素($\text{NO}_2\text{-N}$)

図 67 を見ると、対照区では、暴露期間中に亜硝酸態窒素の変化はなく、換水後 0 日目から 25 日目まで亜硝酸態窒素は $0.002\sim 0.004\text{mg/L}$ 程度の低い値で一定になった。薬剤未投入区では、暴露期間中に亜硝酸態窒素の変化はなく、換水後 0 日目から 40 日目まで日数が経過するにつれて亜硝酸態窒素は高い値になった。これは、アンモニア態窒素が酸化して亜硝酸態窒素に変化したためであると考えられる。DO 調整区では、暴露期間中に亜硝酸態窒素の変化はなく、換水後 0 日目から 25 日目まで亜硝酸態窒素は 0.004mg/L 程度の低い値で一定になった。

図 68 を見ると、水酸化 $\text{Ca}0.04\%$ 区、水酸化 $\text{Ca}0.08\%$ 区では、暴露期間中に亜硝酸態窒素の変化はなく、換水後 0 日目から 25 日目まで亜硝酸態窒素は $0.003\sim 0.009\text{mg/L}$ 程度の低い値で一定になった。水酸化 $\text{Ca}0.16\%$ 区では、暴露期間中に亜硝酸態窒素は少し減少した。これは、実際に水を止めることができる期間を想定して、3 日間暴露した後に換水したことが要因であると考えられる。換水後 0 日目から 25 日目まで亜硝酸態窒素は $0.003\sim 0.008\text{mg/L}$ 程度の低い値で一定になった。

図 30 と図 67 を見ると、薬剤未投入区では個体数が減少すると亜硝酸態窒素は増加する傾向にあることがわかる。しかし、亜硝酸態窒素の増加原因は前述のとおり、アンモニア態窒素が酸化して亜硝酸態窒素に変化したためであると考えられる。DO 調整区では個体数が減少しても亜硝酸態窒素は一定であることがわかる。

図 36 と図 68 を見ると、水酸化 Ca 投入区では個体数が減少しても硝酸態窒素は一定であることがわかる。

以上のことから、亜硝酸態窒素は個体数の減少に寄与しないと言える。

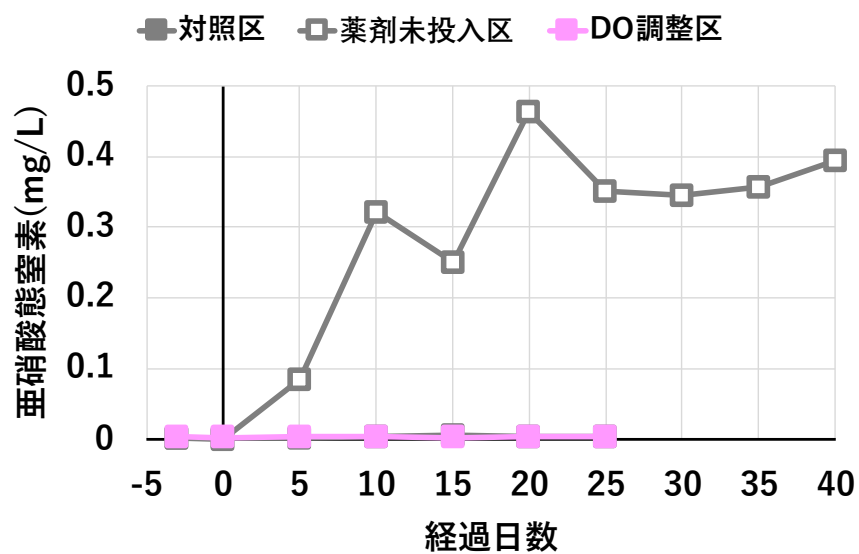


図 67 対照区、薬剤未投入区、DO 調整区の亜硝酸態窒素(開放条件)

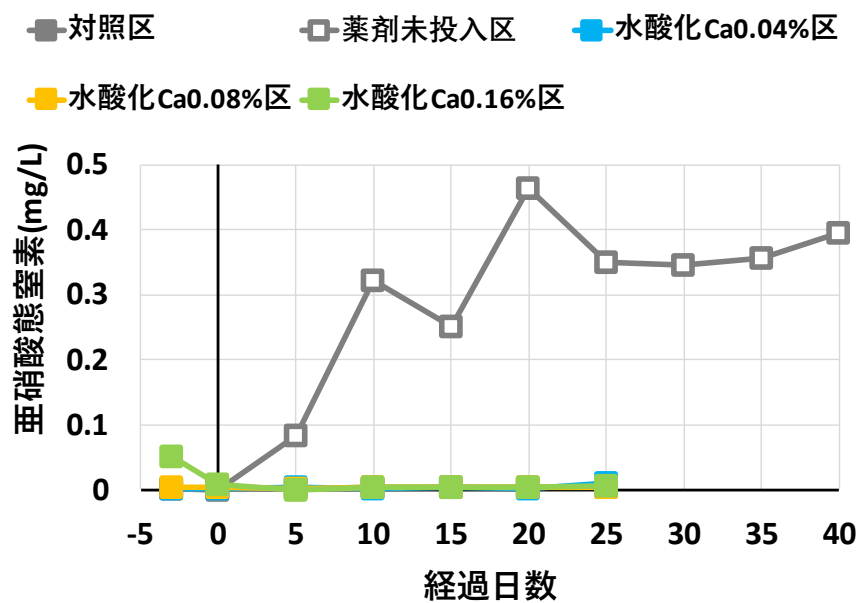


図 68 対照区、薬剤未投入区、水酸化 Ca0.04%区、水酸化 Ca0.08%区、水酸化 Ca0.16% 区の亜硝酸態窒素(開放条件)

5. アンモニア態窒素(NH₃-N)

図 69 を見ると、対照区では、暴露期間中にアンモニア態窒素の変化はなく、換水後 0 日目から 25 日目までアンモニア態窒素は 0~0.03mg/L で一定になった。薬剤未投入区では、暴露期間中にアンモニア態窒素の変化はなく、換水後 0 日目から 40 日目まで 20 日目以外は 0.3~0.6mg/L 程度で一定になった。これは、20 日目に死貝が 1 体発生しているが、測定値が高すぎるため測定ミスであると考えられる。DO 調整区では、暴露期間中にアンモニア態窒素の変化はなく、換水後 5 日目までアンモニア態窒素は急激に増加し、10 日目以降は測定範囲である 2.5mg/L を超える値であったため測定できずグラフでは 0mg/L になっているが、高い値を示した。これは、タイワンシジミの偽糞やタイワンシジミの死貝が分解されたことが要因であると考えられる。

図 70 を見ると、水酸化 Ca0.04 区では、暴露期間中にアンモニア態窒素の変化はなく、換水後 10 日目までアンモニア態窒素は急激に増加し、15 日目以降は測定範囲である 2.5mg/L を超える値であったため測定できずグラフでは 0mg/L になっているが、高い値を示した。水酸化 Ca0.08%区では、暴露期間中にアンモニア態窒素の変化はなく、換水後 5 日目までアンモニア態窒素は増加し、10 日目以降は測定範囲である 2.5mg/L を超える値であったため測定できずグラフでは 0mg/L になっているが、高い値を示した。水酸化 Ca0.16%区では、暴露期間中にアンモニア態窒素の変化はなく、換水後 0 日目以降は測定範囲である 2.5mg/L を超える値であったため測定できずグラフでは 0mg/L になっているが、高い値を示した。これは、タイワンシジミの偽糞やタイワンシジミの死貝が分解されたことが要因であると考えられる。

図 30 と図 69 を見ると、薬剤未投入区では個体数が減少してもアンモニア態窒素は一定であることがわかる。DO 調整区では個体数が減少するとアンモニア態窒素は増加する傾向にあることがわかる。また、個体数が 0 のとき、アンモニア態窒素は測定範囲を超える値になっていることがわかる。これは、密閉条件での実験と同様の結果が得られた。

図 36 と図 70 を見ると、水酸化 Ca 投入区では個体数が減少するとアンモニア態窒素は増加する傾向にあることがわかる。また、個体数が 0 のとき、アンモニア態窒素は測定範囲を超える値になっていることがわかる。

これは、密閉条件での実験と同様の結果が得られた。

以上のことから、アンモニア態窒素の増加は個体数の減少に寄与すると言える。

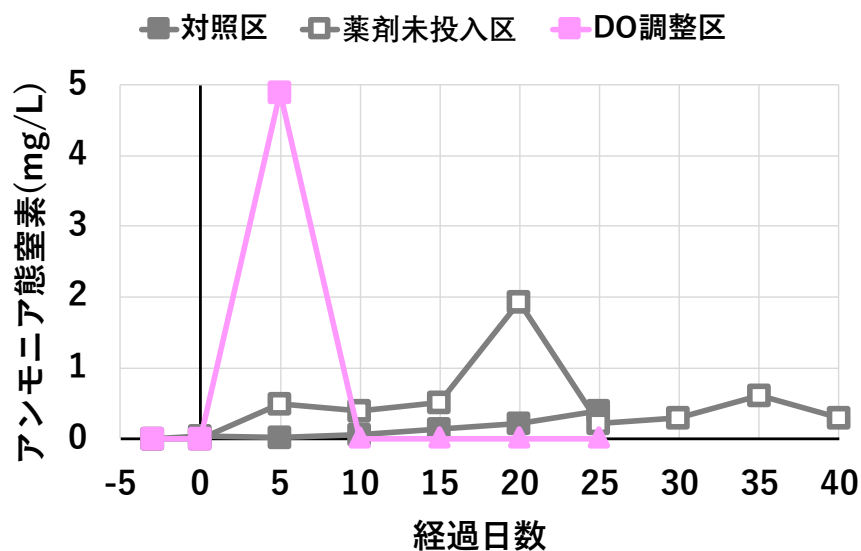


図 69 対照区、薬剤未投入区、DO 調整区のアンモニア態窒素(開放条件)
* 測定範囲を超えたデータは三角のマーカで表した。

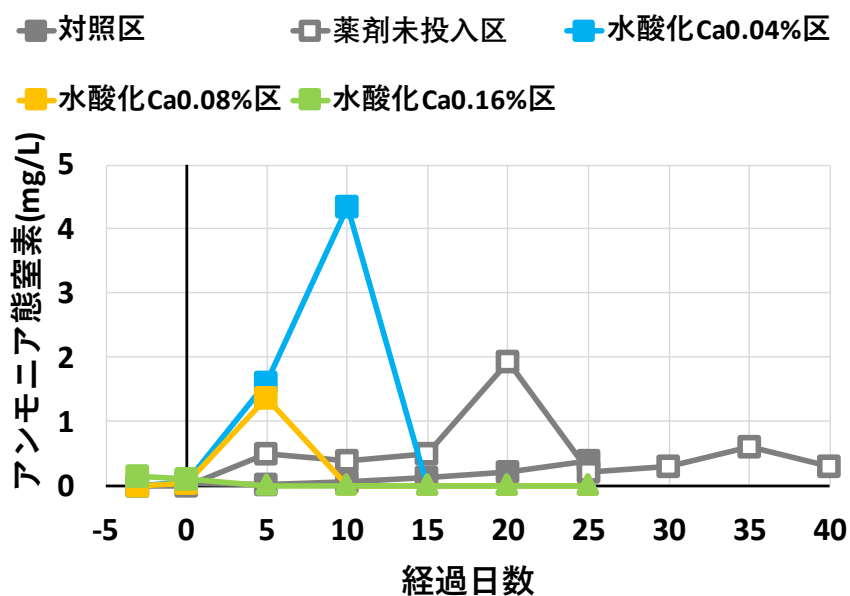


図 70 対照区、薬剤未投入区、水酸化 Ca0.04%区、水酸化 Ca0.08%区、水酸化 Ca0.16%
区のアンモニア態窒素(開放条件)
* 測定範囲を超えたデータは三角のマーカで表した。

6. 全リン(T-P)

図 71 を見ると、対照区では、暴露期間中に全リンの変化はなく、換水後 0 日目から 25 日目まで全リンは 0mg/L で一定になった。薬剤未投入区では、暴露期間中に全リンの変化はなく、換水後 0 日目から 40 日目まで日数が経過するにつれて全リンは高い値になった。DO 調整区では、暴露期間中に全リンの変化はなく、換水後 10 日目まで日数が経過するにつれて全リンは高い値になった。これは、タイワンシジミの偽糞やタイワンシジミの死貝が分解されたことが要因であると考えられる。その後 25 日目にかけて全リンは減少した。これは、配水槽への水の流入を想定して、水質測定後に水槽に蒸留水を入れていたことが要因であると考えられる。

図 72 を見ると、水酸化 Ca0.04%区、水酸化 Ca0.08%区では、暴露期間中に全リンの変化はなく、換水後 0 日目から 25 日目まで日数が経過するにつれて全リンは高い値になった。水酸化 Ca0.16%区では、暴露期間中に全リンは減少した。これは、実際に水を止めることができる期間を想定して、3 日間暴露した後に換水したことが要因であると考えられる。換水後 0 日目から 25 日目まで日数が経過するにつれて全リンは高い値になった。これは、タイワンシジミの偽糞やタイワンシジミの死貝が分解されたことが要因であると考えられる。

図 30 と図 71 を見ると、薬剤未投入区でも DO 調整区でも個体数が減少すると全リンは増加する傾向にあることがわかる。また、個体数が 0 のとき、全リンの値は 4mg/L 以上になっていることがわかる。これは、密閉条件での実験と同様の結果が得られた。

図 36 と図 72 を見ると、水酸化 Ca 投入区でも個体数が減少すると全リンは増加する傾向にあることがわかる。また、個体数が 0 のとき、全リンの値は 4mg/L 以上になっていることがわかる。

以上のことから、全リンの増加は個体数の減少に寄与すると言える。

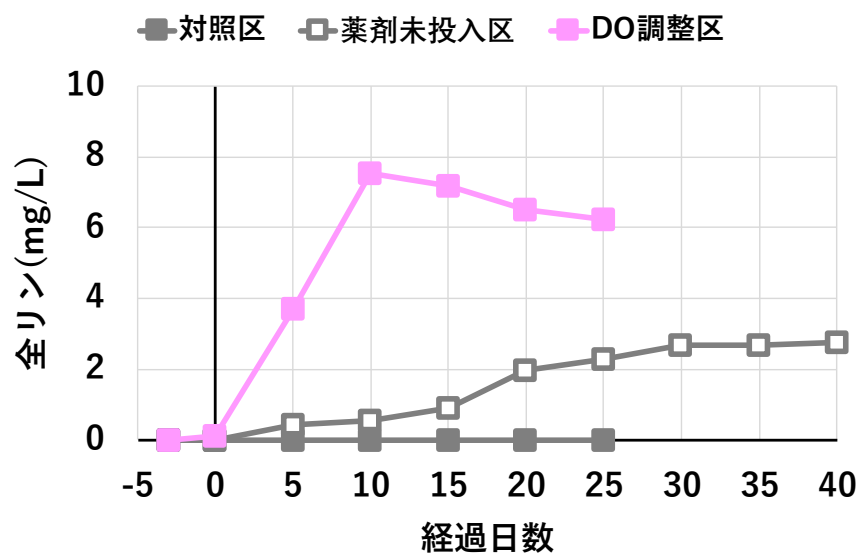


図 71 対照区、薬剤未投入区、DO 調整区の全リン(開放条件)

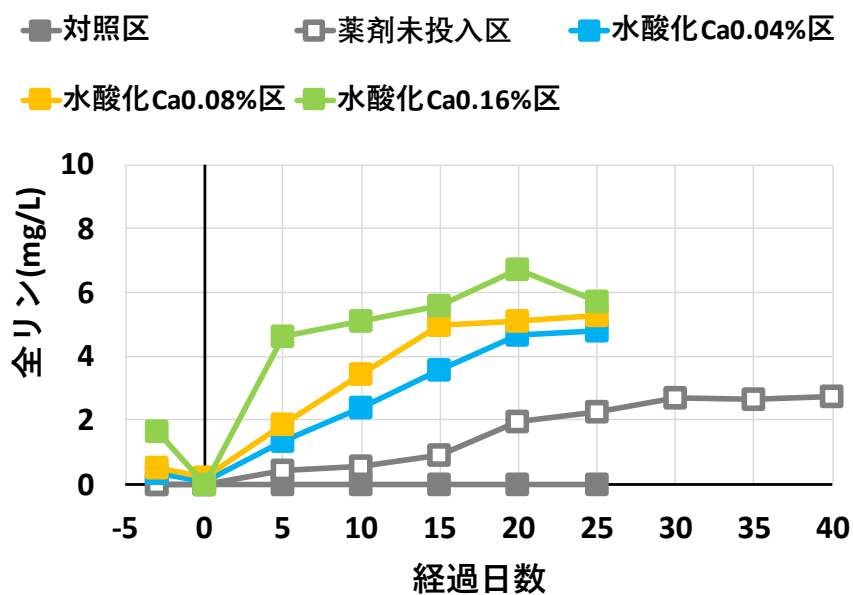


図 72 対照区、薬剤未投入区、水酸化 Ca0.04%区、水酸化 Ca0.08%区、水酸化 Ca0.16% 区の全リン(開放条件)

7. pH

図 73 を見ると、対照区、薬剤未投入区、DO 調整区では、暴露期間中に pH の変化はなく、換水後 0 日目から 25 日目まで pH は 6.9~7.8 程度で一定になった。

図 74 を見ると、水酸化 Ca 投入区では、暴露期間中に pH が減少した。これは、実際に水を止めることができる期間を想定して、3 日間暴露した後に換水したことが要因であると考えられる。換水後 0 日目から 25 日目まで pH は 7.0~7.7 で一定になった。

図 30 と図 73 を見ると、薬剤未投入区でも DO 調整区でも個体数が減少しても pH は中性で一定であることがわかる。これについて、水生生物の生息に適した pH は 6.8~8.5 と言われており、pH の結果だけを見ると薬剤未投入区でも DO 調整 1%区でもタイワンシジミは生存可能であると考えられる。よって、薬剤未投入区と DO 調整 1%区では、pH 以外の要因でタイワンシジミは死滅したと考えられる。

図 36 と図 74 を見ると、水酸化 Ca 投入区では暴露初日に pH は強アルカリ性を示しており、暴露期間中に死亡個体が発生していることがわかる。また、換水後は水酸化 Ca 投入区でも個体数が減少しても pH は一定であることがわかる。これについて既往の pH 異常によるフナの斃死実験でも、pH12 の水の中で飼育したフナは 2 時間後に死亡が確認されており、同程度の結果が得られた。

以上のことから、強アルカリ性の pH は個体数の減少に寄与すると言える。

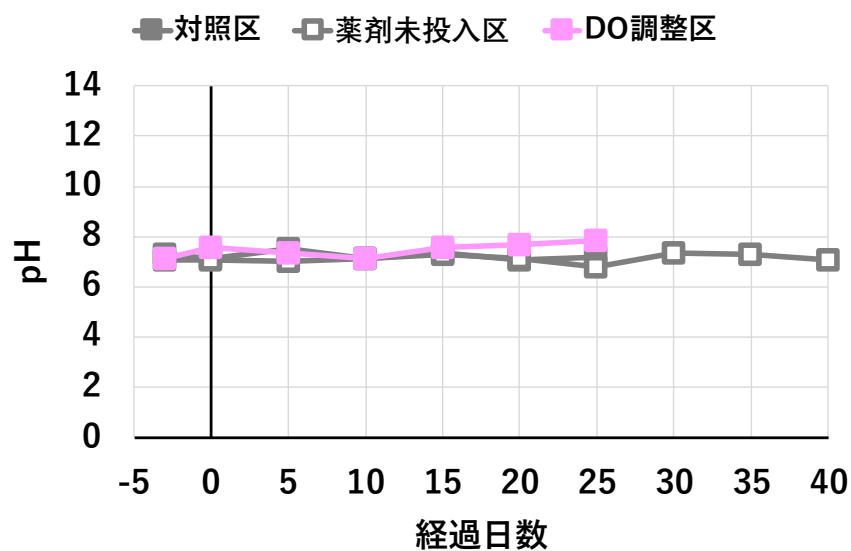


図 73 対照区、薬剤未投入区、DO 調整区の pH(開放条件)

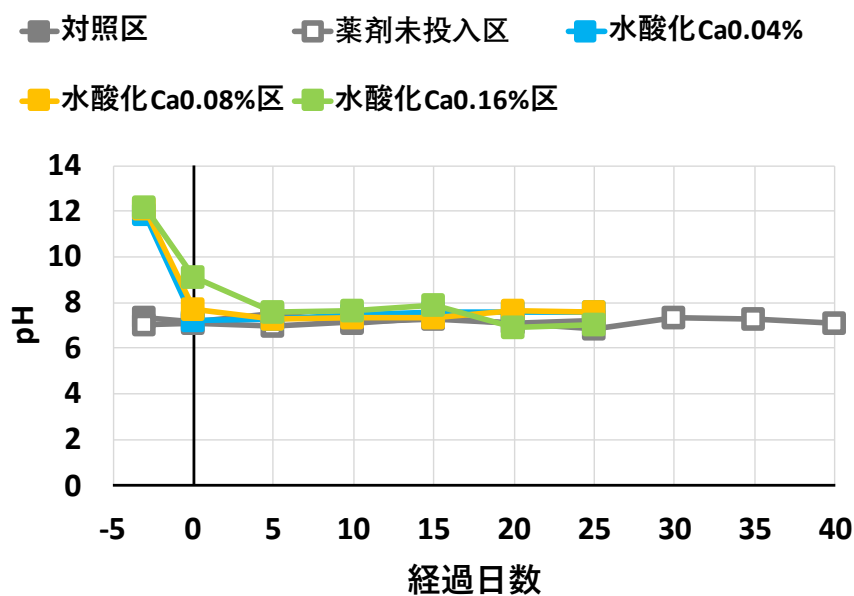


図 74 対照区、薬剤未投入区、水酸化 Ca0.04%区、水酸化 Ca0.08%区、水酸化 Ca0.16% 区の pH(開放条件)

8. カルシウムイオン濃度(Ca^{2+})

図 75 を見ると、対照区では、暴露期間中に Ca イオン濃度の変化はなく、換水後 0 日目から 25 日目まで Ca イオン濃度は 0ppm で一定になった。薬剤未投入区では、暴露期間中に Ca イオン濃度の変化はなく、換水後 0 日目から 40 日目まで日数が経過するにつれて Ca イオン濃度は緩やかに増加した。DO 調整区では、暴露期間中に Ca イオン濃度の変化はなく、換水後 0 日目から 25 日目まで日数が経過するにつれて Ca イオン濃度は緩やかに増加した。これは、 Ca イオン濃度の低い環境下でシジミは繁殖のため殻から Ca イオンを放出するためであると考えられる。

図 76 を見ると、水酸化 Ca 投入区では、暴露初日の Ca イオン濃度は高い値を示した。これは、水酸化カルシウムを投入したことが要因であると考えられる。その後、暴露期間中に Ca イオン濃度は減少した。これは、実際に水を止めることができる期間を想定して、3 日間暴露した後に換水したことが要因であると考えられる。換水後 0 日目から 25 日目まで日数が経過するにつれて Ca イオン濃度は増加する傾向にあった。これは、 Ca イオン濃度の低い環境下でシジミは繁殖のため殻から Ca イオンを放出するためであると考えられる。

図 30 と図 75 を見ると、薬剤未投入区でも DO 調整区でも個体数が減少すると Ca イオン濃度は少し増加する傾向にあることがわかる。しかし、 Ca イオン濃度の増加原因は前述のとおり、 Ca イオン濃度の低い環境下でシジミは繁殖のため殻から Ca イオンを放出するためであると考えられる。

図 36 と図 76 を見ると、水酸化 Ca 投入区では個体数が減少すると Ca イオン濃度は少し増加する傾向にあることがわかる。しかし、 Ca イオン濃度の増加原因は前述のとおり、 Ca イオン濃度の低い環境下でシジミは繁殖のため殻から Ca イオンを放出するためであると考えられる。

以上のことから、 Ca イオン濃度は個体数の減少に寄与しないと言える。

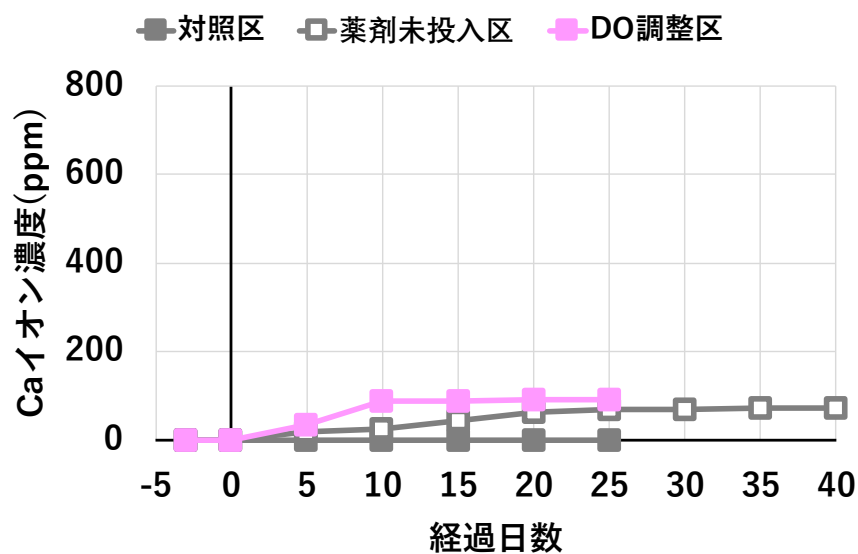


図 75 対照区、薬剤未投入区、DO 調整区の Ca イオン濃度(開放条件)

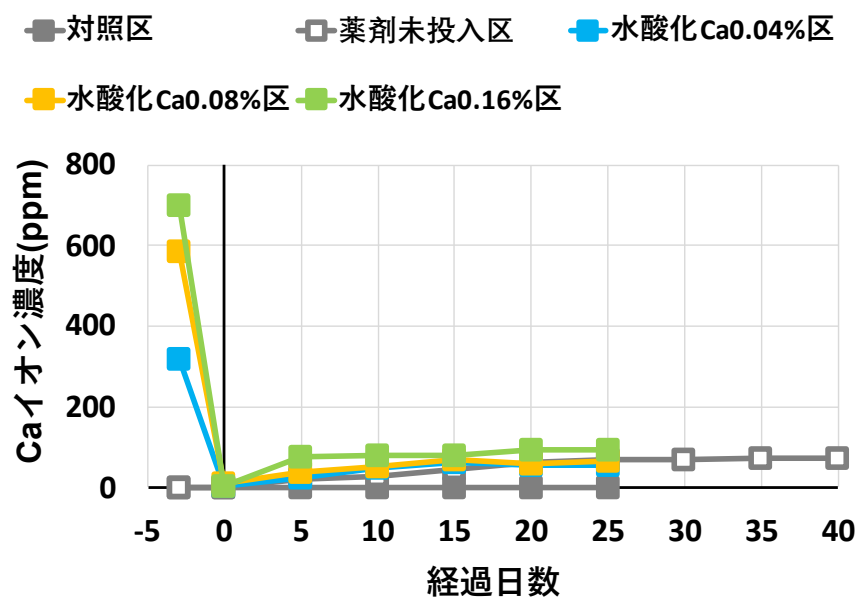


図 76 対照区、薬剤未投入区、水酸化 Ca0.04%区、水酸化 Ca0.08%区、水酸化 Ca0.16% 区の Ca イオン濃度(開放条件)

9. 電気伝導度(EC)

タイワンシジミは淡水域から汽水域まで幅広く分布しており、自然界における一般的な電気伝導度は雨水で 5~50 μ S/cm、河川水で 30~40 μ S/cm、地下水で 30~500 μ S/cm、汽水湖で 2000~20000 μ S/cm、海水で 20000~50000 μ S/cm の値を示す。以上のことからタイワンシジミは電気伝導度が 0~20000 μ S/cm まで生存可能であると言える。

図 77 を見ると、対照区では、暴露期間中に電気伝導度の変化はなく、換水後 0 日目から 25 日目まで電気伝導度は 3~17 μ S/cm で低い値で一定になった。薬剤未投入区では、暴露期間中に電気伝導度の変化はなく、換水後 0 日目から 40 日目にかけて電気伝導度は 6~220 μ S/cm まで増加した。DO 調整区では、暴露初日の電気伝導度は 1370 μ S/cm と高い値を示した。これは、脱酸素剤を投入したことが要因であると考えられる。その後、暴露期間中に電気伝導度は減少した。これは、実際に水を止めることができる期間を想定して、3 日間暴露した後に換水したことが要因であると考えられる。換水後 0 日目から 25 日目にかけて電気伝導度は 13~400 μ S/cm まで増加した。

図 78 を見ると、水酸化 Ca 投入区では、暴露初日の電気伝導度は高い値を示した。これは、水酸化カルシウムを投入したことが要因であると考えられる。その後、暴露期間中に電気伝導度は減少した。これは、実際に水を止めることができる期間を想定して、3 日間暴露した後に換水したことが要因であると考えられる。換水後 0 日目から 25 日目にかけて電気伝導度は 300 μ S/cm 程度まで増加した。

図 30 と図 77 を見ると、薬剤未投入区と DO 調整区では個体数が減少すると電気伝導度は 220 μ S/cm と 400 μ S/cm まで増加することがわかる。前述のとおり、電気伝導度の結果だけ見ると薬剤未投入区でも DO 調整 1%区でもタイワンシジミは生存可能であると考えられる。よって、薬剤未投入区と DO 調整区では、電気伝導度以外の要因でタイワンシジミは死滅したと考えられる。

図 36 と図 78 を見ると、水酸化 Ca 投入区では個体数が減少すると電気伝導度は 300 μ S/cm 程度まで増加することがわかる。前述のとおり、電気伝導度の結果だけ見ると水酸化 Ca 投入区でもタイワンシジミは生存可能

であると考えられる。よって、水酸化 Ca 投入区では、電気伝導度以外の要因でタイワンシジミは死滅したと考えられる。

以上のことから、電気伝導度は個体数の減少に寄与しないと言える。

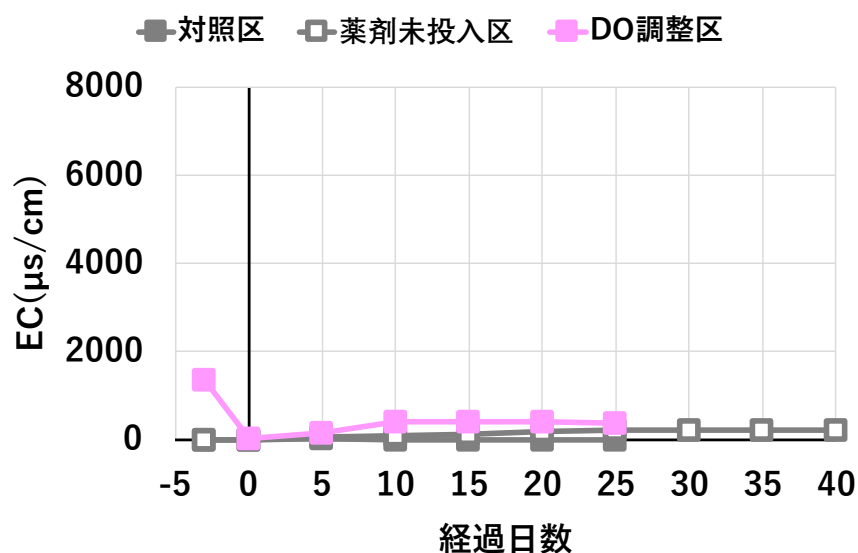


図 77 対照区、薬剤未投入区、DO 調整区の電気伝導度(開放条件)

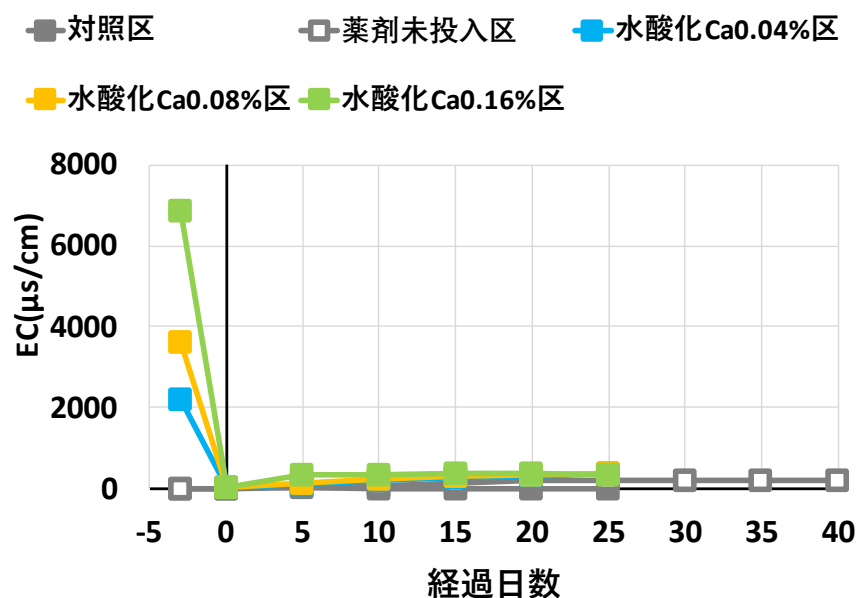


図 78 対照区、薬剤未投入区、水酸化 Ca0.04%区、水酸化 Ca0.08%区、水酸化 Ca0.16% 区の電気伝導度(開放条件)

第4章 まとめ

本研究では、一時的に水の供給を止め管内を閉塞することができる水田の末端水路や一時的に水の供給を止めることのできる開放した配水槽でタイワンシジミを薬剤投与により完全に死滅させ除去する方法の有効性を確かめることを目的とした。そのために、閉塞した末端水路をモデル化した実験と配水槽をモデル化した実験を行い、タイワンシジミの生残率と水質の関係を調べた。その結果、以下のことが分かった。

4.1 タイワンシジミの生残率について

4.1.1 密閉条件での実験

密閉条件での実験から、薬剤未投入の水においてタイワンシジミが低密度環境で生息するとき 30 日で完全に死滅することがわかった。また、脱酸素剤を濃度 1% になるように投入した DO 調整区ではタイワンシジミが 15 日で完全に死滅することがわかった。よって、脱酸素剤を投入することにより生残率を低下させることが可能であるとわかった。さらに、水酸化カルシウムを濃度 0.04% になるように投入した水酸化 Ca0.04% 区ではタイワンシジミが 25 日で完全に死滅し、水酸化カルシウムを濃度 0.08% になるように投入した水酸化 Ca0.08% 区ではタイワンシジミが 15 日で完全に死滅し、水酸化カルシウムを濃度 0.16% になるように投入した水酸化 Ca0.16% 区ではタイワンシジミが 5 日で完全に死滅することがわかった。よって、水酸化カルシウムを投入することにより生残率を低下させることが可能であるとわかった。以上のことから、密閉条件下では非かんがい期でなくても 5 日間だけ水の供給を止めることでタイワンシジミを完全に死滅することができる水酸化カルシウムを濃度 0.16% になるように投入する手段の方が有効であると言える。

4.1.2 開放条件での実験

開放条件での実験から、薬剤未投入の水においてタイワンシジミが低密度環境で生息するとき 40 日では完全に死滅しないことがわかった。また、脱酸素剤を濃度 1% になるように投入し、3 日間暴露した後に換水した DO 調整区で

はタイワンシジミが換水後 10 日で完全に死滅することがわかった。よって、開放条件でも脱酸素剤を投入することにより生残率を低下させることが可能であるとわかった。さらに、水酸化カルシウムを濃度 0.16%になるように投入し、3 日間暴露した後に換水した水酸化 Ca0.16%区ではタイワンシジミが換水後 5 日で完全に死滅することがわかった。よって、開放条件でも水酸化カルシウムを投入することにより生残率を低下させることが可能であるとわかった。以上のことから、開放条件下では非かんがい期でなくても暴露期間の 3 日間だけ水の供給を止めることでタイワンシジミを完全に死滅することができる水酸化カルシウムを濃度 0.16%になるように投入する手段の方が有効であると言える。

4.2 各水質の変化について

4.2.1 溶存酸素濃度

溶存酸素濃度について、密閉条件での実験から、薬剤未投入区では、5 日目まで対照区に比べ溶存酸素濃度は急激に減少し、25 日目までは 3.0mg/L 程度で一定になった。既往の研究でも、タイワンシジミは 1 日に 10~12 時間殻を閉じ、代謝を 10%まで減少させることや他の淡水二枚貝に比べ、エネルギーを呼吸にあてる割合が低いことが報告されている。よって、タイワンシジミは密閉条件下において DO が 3.0mg/L(DO 飽和度 40%)程度で呼吸を抑制する生存戦略をとると言える。また、DO 調整区では、5 日目まで溶存酸素濃度は薬剤未投入区に比べ急激に減少し、10 日目には 1.0mg/L(DO 飽和度 10%)付近まで減少した。よって、脱酸素剤の効果が大きいことがわかった。水酸化 Ca 投入区では、DO は 6.0~8.0mg/L(DO 飽和度 90%)程度で一定になった。よって、水酸化カルシウムを投入したかによる DO の低下はないことがわかった。

開放条件での実験から、薬剤未投入区では、暴露期間中に DO6.0mg/L (DO 飽和度 80%)程度まで減少した。換水後 5 日目まで対照区に比べ溶存酸素濃度は急激に減少し、10 日目までは 4.5mg/L(DO 飽和度 60%)程度で一定になった。そこから 40 日目にかけて空気中の酸素により DO は緩やかに増加した。

また、DO 調整区では、暴露期間中に DO4.5mg/L(DO 飽和度 60%)程度まで減少した。換水後 5 日目まで DO は薬剤未投入区に比べ急激に減少し、10 日目にはそれぞれ 2.0mg/L(DO 飽和度 20%)付近まで減少した。そこから 25 日にかけて空気中の酸素により DO は緩やかに増加した。また、水酸化 Ca0.16%区では、暴露期間中に DO の変化はなく、換水後 5 日目まで DO は急激に減少し、10 日目には 1.0mg/L(DO 飽和度 10%)付近まで減少した。そこから 25 日にかけて空気中の酸素により DO は緩やかに増加した。よって、開放条件でも脱酸素剤の効果は大きいことがわかった。また、開放条件では水酸化カルシウムを 3 日間暴露することで DO が低下したことがわかった。

4.2.2 全窒素

全窒素について、密閉条件での実験から、対照区では日数が経過しても全窒素は 0mg/L で一定になった。薬剤未投入区と DO 調整区と水酸化 Ca 投入区では日数が経過するにつれて全窒素は増加し、それぞれ最大値は 27.5mg/L、26.5mg/L、34.6mg/L と高い値になった。

開放条件での実験から、対照区では暴露期間中に全窒素の変化はなく、換水後日数が経過しても全窒素は低い値で一定になった。薬剤未投入区では暴露期間中に全窒素の変化はなく、換水後日数が経過するにつれて全窒素は緩やかに増加した。DO 調整区と水酸化 Ca 投入区では暴露期間中に全窒素の変化はなく、換水後日数が経過するにつれて全窒素は増加し、それぞれ最大値 31.8 mg/L、28.8mg/L と高い値になった。

4.2.3 硝酸態窒素

硝酸態窒素について、密閉条件での実験から、対照区と薬剤未投入区と DO 調整区と水酸化 Ca0.04%区と水酸化 Ca0.08%区では日数が経過しても硝酸態窒素は低い値で一定になった。水酸化 Ca0.16%区では、10 日目まで硝酸態窒素は 8.0mg/L 付近と高い値になった。15 日目以降は測定範囲である 10.0mg/L を超える値であったため測定できずグラフ上では 0mg/L になっているが、高い値になった。

開放条件での実験から、対照区と DO 調整区と水酸化 Ca0.04%区と水酸化 Ca0.08%区では暴露期間中に硝酸態窒素の変化はなく、換水後日数が経過しても硝酸態窒素は低い値で一定になった。水酸化 Ca0.16%区では暴露期間中に硝酸態窒素は少し減少し、換水後日数が経過しても硝酸態窒素は低い値で一定になった。薬剤未投入区では暴露期間中に硝酸態窒素の変化はなく、換水後日数が経過するにつれて硝酸態窒素は増加し、換水後 40 日目には 4.8mg/L と高い値になった。

4.2.4 亜硝酸態窒素

亜硝酸態窒素について、密閉条件での実験から、対照区と薬剤未投入区と DO 調整区と水酸化 Ca0.04%区と水酸化 Ca0.08%区では日数が経過しても亜硝酸態窒素は低い値で一定になった。水酸化 Ca0.16%区では、日数が経過するにつれて亜硝酸態窒素は増加し、25 日目には 0.09mg/L と高い値になった。

開放条件での実験から、対照区と DO 調整区と水酸化 Ca0.04%区と水酸化 Ca0.08%区では暴露期間中に亜硝酸態窒素の変化はなく、換水後日数が経過しても亜硝酸態窒素は低い値で一定になった。水酸化 Ca0.16%区では暴露期間中に亜硝酸態窒素は少し減少し、換水後日数が経過しても亜硝酸態窒素は低い値で一定になった。薬剤未投入区では暴露期間中に亜硝酸態窒素の変化はなく、換水後日数が経過するにつれて亜硝酸態窒素は増加し、40 日目には 0.39mg/L と高い値になった。

4.2.5 アンモニア態窒素

アンモニア態窒素について、密閉条件での実験から、対照区では日数が経過してもアンモニア態窒素は低い値で一定になった。薬剤未投入区では日数が経過するにつれてアンモニア態窒素は増加し、30 日目以降は測定範囲である 2.5mg/L を超える値であったため測定できずグラフ上では 0mg/L になっているが、高い値になった。DO 調整区と水酸化 Ca0.16%区では日数が経過するにつれてアンモニア態窒素は増加し、10 日目以降は測定範囲である 2.5mg/L を超える値であったため測定できずグラフ上では 0mg/L になっているが、高い値になった。水酸化 Ca0.04%区と水酸化 Ca0.08%区では日数が経過するにつ

れてアンモニア態窒素は増加し、15 日目以降は測定範囲である 2.5mg/L を超える値であったため測定できずグラフ上では 0mg/L になっているが、高い値になった。

開放条件での実験から、対照区と薬剤未投入区では暴露期間中にアンモニア態窒素の変化はなく、換水後日数が経過してもアンモニア態窒素は低い値で一定になった。DO 調整区と水酸化 Ca0.08%区では暴露期間中にアンモニア態窒素の変化はなく、換水後日数が経過するにつれてアンモニア態窒素は増加し、10 日目以降は測定範囲である 2.5mg/L を超える値であったため測定できずグラフ上では 0mg/L になっているが、高い値になった。水酸化 Ca0.04%区では暴露期間中にアンモニア態窒素の変化はなく、換水後日数が経過するにつれてアンモニア態窒素は増加し、15 日目以降は測定範囲である 2.5mg/L を超える値であったため測定できずグラフ上では 0mg/L になっているが、高い値になった。水酸化 Ca0.16%区では暴露期間中にアンモニア態窒素の変化はなく、換水後日数が経過するにつれてアンモニア態窒素は増加し、5 日目以降は測定範囲である 2.5mg/L を超える値であったため測定できずグラフ上では 0mg/L になっているが、高い値になった。

4.2.6 全リン

全リンについて、密閉条件での実験から、対照区では日数が経過しても全リンは 0mg/L で一定になった。薬剤未投入区と DO 調整区では日数が経過するにつれて全リンは増加し、それぞれ最大値は 7.7mg/L、5.8mg/L と高い値になった。水酸化 Ca0.04%区と水酸化 Ca0.08%区では日数が経過しても全リン 0.7～1.6mg/L 程度で一定になり、水酸化 Ca0.16%区では日数が経過しても全リンは 1.7～3.2mg/L 程度で一定になった。

開放条件での実験から、対照区では暴露期間中に全リンの変化はなく、換水後日数が経過しても全リンは低い値で一定になった。薬剤未投入区では暴露期間中に全リンの変化はなく、換水後日数が経過するにつれて全リンは緩やかに増加した。DO 調整区と水酸化 Ca0.04%区と水酸化 Ca0.08%区では暴露期間中に全リンの変化はなく、換水後日数が経過するにつれて全リンは増加し、それぞれ最大値 7.1mg/L、5.2mg/L と高い値になった。水酸化 Ca0.16%区では

暴露期間中に全リンは減少し、換水後日数が経過するにつれて全リンは増加し、最大値 6.7mg/L と高い値になった。

4.2.7 pH

pH について、密閉条件での実験から、対照区と薬剤未投入区と DO 調整区では日数が経過しても pH は 6.0~7.0 の中性で一定になった。水酸化 Ca 投入区では日数が経過しても pH は 11.2~12.2 の強アルカリ性で一定になった。

開放条件での実験から、対照区と薬剤未投入区と DO 調整区では暴露期間中に pH の変化はなく、換水後も 6.9~7.8 の中性で一定になった。水酸化 Ca 投入区では暴露期間中に pH は強アルカリ性から中性になり、換水後は 7.0~7.7 の中性で一定になった。

4.2.8 カルシウムイオン濃度

Ca イオン濃度について、密閉条件での実験から、対照区では日数が経過しても Ca イオン濃度は 0ppm で一定になった。薬剤未投入区と DO 調整区では日数が経過するにつれて Ca イオン濃度は緩やかに増加した。水酸化 Ca 投入区では日数が経過するにつれて Ca イオン濃度は緩やかに減少した。

開放条件での実験から、対照区では暴露期間中に Ca イオン濃度の変化はなく、換水後 Ca イオン濃度は 0ppm で一定になった。薬剤未投入区と DO 調整区では暴露期間中に Ca イオン濃度の変化はなく、換水後 Ca イオン濃度は緩やかに増加した。水酸化 Ca 投入区では暴露期間中に Ca イオン濃度は低い値まで減少し、換水後 Ca イオン濃度は緩やかに増加した。

4.2.9 電気伝導度

電気伝導度について、密閉条件での実験から、対照区では日数が経過しても電気伝導度は低い値で一定になった。薬剤未投入区と DO 調整区では日数が経過するにつれて電気伝導度は緩やかに増加した。水酸化 Ca 投入区では日数が経過するにつれて電気伝導度は緩やかに減少した。

開放条件での実験から、対照区では暴露期間中に電気伝導度の変化はなく、換水後電気伝導度は低い値で一定になった。薬剤未投入区では暴露期間中に電気伝導度の変化はなく、換水後電気伝導度は緩やかに増加した。DO 調整区と

水酸化 Ca 投入区では暴露期間中に電気伝導度は低い値まで減少し、換水後電気伝導度は緩やかに増加した。

4.3 タイワンシジミの個体数変位と水質の関係について

4.3.1 溶存酸素濃度

溶存酸素濃度について、密閉条件での実験から、薬剤未投入区と DO 調整区では個体数が減少すると、溶存酸素濃度も減少することがわかった。また、個体数が 0 のとき、溶存酸素濃度は 0.8mg/L になっていることがわかった。水酸化 Ca 投入区では個体数が減少しても、DO は 6.0～8.0mg/L 程度で一定になることがわかった。これは、タイワンシジミは水質に異常があると殻を閉じ、呼吸を抑制するからであると考えられる。

開放条件での実験から、薬剤未投入区と DO 調整区と水酸化 Ca 投入区では個体数が減少すると、溶存酸素濃度も減少することがわかった。また、個体数が 0 のとき、溶存酸素濃度は DO 調整区で 1.6mg/L、水酸化 Ca0.16%区で 0.7mg/L になっていることがわかった。これらについて既往の研究でも、タイワンシジミの致死濃度は 25℃において DO1.1mg/L で 9 日と報告されている。

以上のことから、溶存酸素濃度の低下は個体数の減少に寄与すると言える。

4.3.2 全窒素

全窒素について、密閉条件と開放条件での実験から、薬剤未投入区と DO 調整区と水酸化 Ca 投入区では個体数が減少すると、全窒素は増加することがわかった。また、個体数が 0 のとき、全窒素の値は 15mg/L 以上になることがわかった。これらについて既往の研究でも、水質の悪化が在来のイシガイ類を死滅させることがあると報告されている。

以上のことから、全窒素の増加は個体数の減少に寄与すると言える。

4.3.3 硝酸態窒素

硝酸態窒素について、密閉条件での実験から、薬剤未投入区と DO 調整区と水酸化 Ca0.04%区と水酸化 Ca0.08%区では個体数が減少しても、硝酸態窒素は一定であることがわかった。また、水酸化 Ca0.16%区では個体数が減少すると、硝酸態窒素は増加することがわかった。これは、亜硝酸態窒素が酸化して硝酸態窒素に変化したためであると考えられる。

開放条件での実験から、薬剤未投入区では個体数が減少すると、硝酸態窒素は増加することがわかった。これは、亜硝酸態窒素が酸化して硝酸態窒素に変化したためであると考えられる。また、DO 調整区と水酸化 Ca 投入区では個体数が減少しても、硝酸態窒素は一定であることがわかった。

以上のことから、硝酸態窒素は個体数の減少に寄与しないと言える。

4.3.4 亜硝酸態窒素

亜硝酸態窒素について、密閉条件での実験から、薬剤未投入区と DO 調整区と水酸化 Ca0.04%区と水酸化 Ca0.08%区では個体数が減少しても、亜硝酸態窒素は一定であることがわかった。また、水酸化 Ca0.16%区では個体数が減少すると、亜硝酸態窒素は増加することがわかった。これは、アンモニア態窒素が酸化して亜硝酸態窒素に変化したためであると考えられる。

開放条件での実験から、薬剤未投入区では個体数が減少すると、亜硝酸態窒素は増加することがわかった。これは、アンモニア態窒素が酸化して亜硝酸態窒素に変化したためであると考えられる。また、DO 調整区と水酸化 Ca 投入区では個体数が減少しても、亜硝酸態窒素は一定であることがわかった。

以上のことから、亜硝酸態窒素は個体数の減少に寄与しないと言える。

4.3.5 アンモニア態窒素

アンモニア態窒素について、密閉条件と開放条件での実験から、薬剤未投入区と DO 調整区と水酸化 Ca 投入区では個体数が減少すると、アンモニア態窒素は増加することがわかった。また、個体数が 0 のとき、アンモニア態窒素は測定範囲である 2.5mg/L を超える値になることがわかった。これらについて既

往の研究でも、アンモニアの濃度が高い環境下でシジミはストレスに抵抗できないと報告されている。

以上のことから、アンモニア態窒素の増加は個体数の減少に寄与すると言える。

4.3.6 全リン

全リンについて、密閉条件での実験から、薬剤未投入区と DO 調整区では個体数が減少すると、全リンは増加することがわかった。また、個体数が 0 のとき、全リンの値は 4mg/L 以上になることがわかった。水酸化 Ca 投入区では個体数が減少しても、全リンは一定になることがわかった。これは、水酸化カルシウムとリンが中和反応し、懸濁態のリンが発生したためであると考えられる。

開放条件での実験から、薬剤未投入区と DO 調整区と水酸化 Ca 投入区では個体数が減少すると、全リンは増加することがわかった。また、個体数が 0 のとき、全リンの値は 4mg/L 以上になることがわかった。これらについて既往の研究でも、水質の悪化が在来のイシガイ類を死滅させることがあると報告されている。

以上のことから、全リンの増加は個体数の減少に寄与すると言える。

4.3.7 pH

pH について、密閉条件での実験から、薬剤未投入区と DO 調整区では個体数が減少しても、pH は中性で一定になることがわかった。これについて、水生生物の生息に適した pH は 6.8~8.5 と言われており、pH の結果だけを見ると薬剤未投入区でも DO 調整区でもタイワンシジミは生存可能であると考えられる。よって、薬剤未投入区と DO 調整区では、pH 以外の要因でタイワンシジミは死滅したと考えられる。水酸化 Ca 投入区では、個体数が減少しても、pH は強アルカリ性で一定になることがわかった。これについて既往の pH 異常によるフナの斃死実験でも、pH12 の水の中で飼育したフナは 2 時間後に死亡が確認されている。

開放条件での実験から、薬剤未投入区と DO 調整区では個体数が減少しても、pH は中性で一定になることがわかった。これについて、水生生物の生息

に適した pH は 6.8~8.5 と言われており、pH の結果だけを見ると薬剤未投入区でも DO 調整区でもタイワンシジミは生存可能であると考えられる。よって、薬剤未投入区と DO 調整区では、pH 以外の要因でタイワンシジミは死滅したと考えられる。水酸化 Ca 投入区では暴露期間中に pH は強アルカリ性を示しており、暴露期間中に死亡個体が発生していることがわかる。また、換水後は水酸化 Ca 投入区でも個体数が減少しても pH は一定であることがわかる。これについて既往の pH 異常によるフナの斃死実験でも、pH12 の水の中で飼育したフナは 2 時間後に死亡が確認されている。

以上のことから、強アルカリ性の pH は個体数の減少に寄与すると言える。

4.3.8 カルシウムイオン濃度

Ca イオン濃度について、密閉条件での実験から、薬剤未投入区と DO 調整区では個体数が減少すると、Ca イオン濃度は緩やかに増加することがわかった。これについて既往の研究でも、Ca イオン濃度の低い環境下でシジミは繁殖のため殻から Ca イオンを放出すると報告されている。よって、Ca イオン濃度の増加原因はタイワンシジミからの放出によるものであると考えられる。また、水酸化 Ca 投入区では個体数が減少すると、Ca イオン濃度は緩やかに減少することがわかった。これは、Ca イオン濃度の高い環境下でシジミは呼吸により Ca イオンを体内に吸収しているのではないかと考えられる。よって、Ca イオン濃度の減少原因はタイワンシジミの呼吸による吸収だと考えられる。

開放条件での実験から、薬剤未投入区と DO 調整区と水酸化 Ca 投入区では個体数が減少すると、Ca イオン濃度は緩やかに増加することがわかった。これについて既往の研究でも、Ca イオン濃度の低い環境下でシジミは繁殖のため殻から Ca イオンを放出すると報告されている。よって、Ca イオン濃度の増加原因はタイワンシジミからの放出によるものであると考えられる。

以上のことから、Ca イオン濃度は個体数の減少に寄与しないと言える。

4.3.9 電気伝導度

タイワンシジミは淡水域から汽水域まで幅広く分布しており、自然界における一般的な電気伝導度は雨水で 5~50 μ S/cm、河川水で 30~40 μ S/cm、地下水

で 30～500 μ S/cm、汽水湖で 2000～20000 μ S/cm、海水で 20000～50000 μ S/cm の値を示す。以上のことからタイワンシジミは電気伝導度が 0～20000 μ S/cm まで生存可能であると言える。

電気伝導度について、密閉条件での実験から、薬剤未投入区と DO 調整区では個体数が減少すると、電気伝導度はそれぞれ 750 μ S/cm と 3300 μ S/cm まで増加することがわかった。水酸化 Ca0.04%区、水酸化 Ca0.08%区、水酸化 Ca0.16%区では個体数が減少すると、電気伝導度はそれぞれ 1200 μ S/cm、3200 μ S/cm、6300 μ S/cm まで減少することがわかった。前述のとおり、電気伝導度の結果だけ見ると薬剤未投入区でも DO 調整区でも水酸化 Ca 投入区でもタイワンシジミは生存可能であると考えられる。よって、タイワンシジミは電気伝導度以外の要因で死滅したと考えられる。

開放条件での実験から、薬剤未投入区と DO 調整区では個体数が減少すると、電気伝導度はそれぞれ 220 μ S/cm と 400 μ S/cm まで増加することがわかった。水酸化 Ca 投入区では個体数が減少すると、電気伝導度は 300 μ S/cm 程度まで増加することがわかった。前述のとおり、電気伝導度の結果だけ見ると薬剤未投入区でも DO 調整区でも水酸化 Ca 投入区でもタイワンシジミは生存可能であると考えられる。よって、タイワンシジミは電気伝導度以外の要因で死滅したと考えられる。

以上のことから、電気伝導度は個体数の減少に寄与しないと言える。

引用参考文献

- ・ 外来種が農業水利施設に及ぼす影響と対策, [外来種が農業水利施設に及ぼす影響と対策：農林水産省 \(maff.go.jp\)](#)
- ・ 農業生産基盤分野における気候変動適応にも活用可能な技術の仕組みと活用 [index-46.pdf \(maff.go.jp\)](#)
- ・ 「宮川用水地区」の概要, [「宮川用水地区」の概要：東海農政局 \(maff.go.jp\)](#)
- ・ 宮川用水事業, [宮川用水土地改良区 \(miyagawa.cc\)](#)
- ・ 西村正, 波部忠重(1985), 秋田県男鹿市で中国産淡水貝カワムラガイとタイワンシジミを買う. ちりぼたん, 16, 62-63
- ・ 中川雅博, 鈴木誉士, 浅香智也(2014), 滋賀県湖北平野の農業用水路におけるタイワンシジミ種群とみられる二枚貝の生息状況, 1
- ・ 園原哲司(2005), 相模川水系におけるタイワンシジミの侵入状況とシジミ亜科分類の変遷, Actinia 16, 11-19
- ・ 石橋亮, 古丸明(2003), 琵琶湖淀川水系, 大和川水系におけるタイワンシジミの出現状況, Venus, 62, 65-70
- ・ 池上直樹(2009), 熊本県緑川水系で採取された淡水産シジミータイワンシジミとマシジミの貝殻形態, 熊本地学会誌, 151, 2-8
- ・ 山田充哉, 石橋亮, 河村功一, 古丸明(2010), ミトコンドリア DNA のチトクローム b 塩基配列および形態から見た日本に分布するマシジミ, タイワンシジミの類縁関係, 76(5), 926-932
- ・ 平野克己(1987), マシジミの成長と寿命, 水産増殖, 35 巻 3 号, 183-189
- ・ 生島文昭(1995), マシジミ被害についての調査, 工学用水, 436 号, 78-80
- ・ 川上英樹, 瀬川邦男(2006), 積層円盤フィルター式除塵機の設置について, 農土誌, 74(3), 239-241
- ・ 水土里ネット北条砂丘(北条砂丘土地改良区)(2010), 広報北条砂丘, 15, 4
- ・ 明治用水土地改良区(2015), 明治用水だより, 49, 15
- ・ 小林卓也, 古田岳志, 阿部悟(2022), 「野生鳥獣及び病害虫等被害対応技術の開発(農業被害をもたらす侵略的外来種の管理技術の開発)」 (4)閉鎖系水域における薬剤等による死滅手法の開発, 1-17

- 小林卓也,阿部悟(2023),「野生鳥獣及び病害虫等被害対応技術の開発(農業被害をもたらす侵略的外来種の管理技術の開発)」 (4)閉鎖系水域における薬剤等による死滅手法の開発,1-16
- 合山幹二(1979),水環境指標 水素イオン濃度(pH)
- Christian Ortmann and Manfred K. Grieshaber(2003),Energy metabolism and valve closure behaviour in the Asian clam *Corbicula fluminea*, The Journal of Experimental Biology 206,4167-4178
- Robert F. McMahon(2002),Evolutionary and physiological adaptations of aquatic invasive animals: r selection versus resistance, Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences.59,1235-1244
- Noe Ferreira-Rodriguez, Ignacio Fernandez, Simone Varandas, Rui Cortes, M. Leonor Cancela, Isabel Pardo(2017),The role of calcium concentration in the invasive capacity of *Corbicula fluminea* in crystalline basins, Science of the Total Environment 580,1363-1370
- Donald S. Cherry, Jennifer L. Scheller, Naomi Cooper, Joseph Bidwell(2005),Potential effects of Asian clam(*Corbicula fluminea*) die-offs on native freshwater mussels(Unionidae) I: Water-column ammonia levels and ammonia toxicity,Journal of the North American Benthological Society 24(2),369-380
- Tianxu Zhang, Yan Zhang, Jiayun Xu, Zhenguang Yan, Qianhang Sun, Yi Huang, Shuping Wang, Shuo Li, Binbin Sun(2021),Toxic effects of ammonia on the intestine of the Asian clam(*Corbicula fluminea*),Environmental Pollution 287,117617
- Paul D. Johnson and Robert F. McMahon(1998),Effects of temperature and chronic hypoxia on survivorship of the zebra mussel(*Dreissena polymorpha*) and Asian clam(*Corbicula fluminea*),Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences.55,1564-1572
- Peter G. Beninger, A Veniot, Yves Poussart(1999),Principles of pseudofeces rejection on the bivalve mantle : integration in particle processing,Marine Ecology Progress Series Vol.178,159-169

- Counts C.L.I(1986),The zoogeography and history of invasion of the United States by Corbicula(Bivalvia : Corbiculadae),American Malacological Bulletin,Special Edition(2),7-39
- Morton B.(1986),Corbicula in Asia-an updated Synthesis,American Malacological Bulletin,Special Edition(2),113-124
- Hedtke S. M, Stanger-Hall K, Baker R.J. and Hillis D.M.(2008),All male asexuality : origin and maintenance of androgenesis in the Asian clam Corbicula,Evolution,62,1119-1136

謝辞

本研究を進めるにあたり、ご指導を頂いた三重大学大学院生物資源学研究科の岡島賢治教授、近藤雅秋准教授に感謝致します。

宮川用水土地改良区の皆様には、毎月の排泥操作への同行やタイワンシジミの採取など、ご協力頂き感謝致します。

東海農政局、三重県庁、宮川用水土地改良区の皆様にはシジミ対策調整会議の際に、貴重な意見、質問を頂き感謝致します。

最後に、環境施設工学研究室の皆様には日頃から、貴重な意見、質問を頂き感謝致します。