

学 位 論 文 題 名

閉鎖循環式養殖システムに関する研究

学位論文内容の要旨

【研究の目的】

閉鎖循環式養殖は、飼育期間中の飼育水の入れ換えや定常的な給排水を伴わず飼育水を循環再利用するものである。一定割合の水を定常的に海や川から給水しながら飼育水を濾過し循環再利用する半閉鎖循環式養殖では、水温を制御して飼育に適した環境を整えることは可能だが、立地条件の制約や高濃度窒素排出の問題が生じる。閉鎖式にすることによって定常的な取水が必要なくなり、川や海の近くという養殖施設の立地条件が大きく緩和される。また、高濃度窒素排出の問題は、今後ますます厳しくなると予想される環境規制に対して、解決しなければならない重要な課題である。

これまで環境汚染の軽減を目的として、いくつかの閉鎖循環式養殖システムが開発されてきた。しかしながら、報告されているシステムのほとんどは、数%/dayの換水を行うか飼育期間中に部分換水を行うことで水質を維持しており、長期間に渡り少量の補水程度で良好な水質を維持することはこれまでなされていなかった。本研究では、継続的な換水や定期的な部分換水を必要とせず、補水程度で長期間運転可能な閉鎖循環式養殖システムを開発するとともにその経済性についても検討を行った。

【生物濾過装置】

魚類の循環式養殖では、飼育水を浄化するために生物濾過を行うのが一般的であり、その中でもアンモニアの除去は重要な管理項目の一つとなっている。本研究では先ずじめに閉鎖循環式養殖システムでの使用を主目的に、インターロック繊維濾材を使用した浸漬濾床と回転円板装置を試作し、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 1 mg-N/L 以下のアンモニア態窒素濃度での種々の運転条件とアンモニア浄化能の関係を調べ、それぞれの最適な運転条件を明らかにした。その結果、浸漬濾床では、 $\text{NH}_4\text{-N}$ が 1 mg-N/L において見掛けの流速 0.74 cm/s までは流量に比例してアンモニア浄化能は増加し、0.74 cm/s の時 0.25 g-N/m²/day で最も高く、それ以上ではアンモニア浄化能は変化しなかった。回転円板装置では、回転数 12~18 rpm（周速度 0.094~0.14 m/s）、浸漬率 40%以上、流量は多い方がアンモニア浄化能は高い値を示し、最大約 0.17 g-N/m²/day（回転数 12 rpm、浸漬率 50%、流量 240 L/h（見掛けの流速 0.45 cm/s））となった。また、インターロック繊維状濾材を使用した場

合、浸漬濾床の方が回転円盤装置より高いアンモニア浄化能が得られることが明らかとなった。

閉鎖循環式養殖を長期間行う場合、飼育水中の硝酸を低減することは不可欠であり脱窒技術を確立する必要がある。このため、脱窒装置を試作し脱窒の効果確認を行うとともに、脱窒能力と諸特性および問題点について明らかにした。その結果、本装置の脱窒能力は、投入したメタノール量に対して $0.47 \text{ mg-N/mg-CH}_3\text{OH}$ の脱窒量が得られ、この量は脱窒装置の硝酸濃度 $400 \sim 900 \text{ mg-N/L}$ の範囲で一定であり、脱窒槽濾材当り最大 $400 \text{ g-N/m}^3/\text{day}$ となった。また、脱窒量とアルカリ度増加量との関係は $2.23 \text{ mg-CaCO}_3/\text{mg-NO}_3\text{-N}$ となり、硝化によるアルカリ度の低下を 40%回復させることが判った。さらに、脱窒装置の処理水には亜硝酸および溶存二酸化炭素の低減対策が必要であり、処理水を硝化および曝気後に水槽へ戻すように設計する必要があることが示された。

【実証試験】

実用性を検討することを目的として、これまでの実験結果や既存の知見をもとに流速を変えられる水槽 2 基を備えた閉鎖循環式養殖システムを試作し、ペヘレイを 1 年間飼育する実証試験を行った。試験では、本システムの実用性を確認するとともに、飼育水と各装置前後の水質測定から閉鎖循環式養殖システムの浄化機構を明らかにした。また、飼育に関しては、2 つの水槽の流速を変え、魚の成長や肉質に与える影響も検証した。

実証試験の結果、本試験システムにおける飼育水の水質は良好に維持でき、魚病等も観察されなかった。また、物理濾過によってシステム内が好氣的に保たれ、自然発生的な脱窒は見られず、脱窒装置の組込みによって硝酸は低減されその有効性が示された。補水量は総水量の $0.5 \text{ \%/day}$ 程度でこれまでの報告の中で最も少ない量となった。本システムにおける各装置の窒素処理割合は、溶存態として回転円板装置 38%、流動床 22%、その他 14%、糞などの固形物として、残餌糞回収装置 19%、ドラムフィルター 7%であった。硝化装置は、回転円板装置と流動床の実用性を確認したが長期安定性という観点からは問題があった。飼育に関しては、高流速区（最大流速 16 cm/s , 0.8 BL/s ）と低流速区（流速 8 cm/s , 0.4 BL/s ）の間に生残率、体長、体重の平均値に差は見られなかったものの、低流速群の方が体長体重のばらつきが有意に大きかった。また、高流速区の筋肉の方が圧縮強度で 7.2%高くなり、 1 BL/s 以下の比較的低い流速の回転流環境下での飼育においても養殖魚の品質向上を計れることが示唆された。

【経済性】

本研究で開発した閉鎖循環式養殖システムの経済性を明らかにするために、養殖魚の生産原価を、魚種（ブリ、ヒラメ、ペヘレイ）、水槽容量（50, 100, 150, 200 m^3 ）、飼

育密度（3，5，7，10％）等を変えて1年間飼育した場合について試算し，それぞれの生産原価に対する影響とコストダウンの方法について検討した。その結果，閉鎖循環式養殖システムに必要な設備費は，建物を含めた場合は約440千円/m³，設備だけでは240千円/m³，また，必要な面積は2.2 m²/m³（水槽容量125 m³，飼育密度6.3％），設備費以外の生産経費（初期費用＋運転経費）として1,300～2,600円／生産量kg／年かかり飼育密度によって大きく異なることが示された。生産原価の内訳は，おおよそ設備償却費が21%，初期費が16%，運転経費が63％となるが，設備償却費は窒素負荷量の大きい魚種ほど高く，初期費は成長の遅い魚種ほど高くなり，運転経費は酸素消費量の多い魚種ほど高くなった。設備償却費は飼育密度の増加に伴って下がり生産原価も下がった。コストダウンに対して影響が大きいものは，生物的には飼育密度と生残率と成長で，設備面では電力利用設備容量であった。また，複数の水槽容量のシステムを組み合わせ，種苗を年4回入れ，最終飼育密度を7％とした場合のヒラメの生産原価は1,214円/kg（設備償却費含む）と試算され，単一の水槽で周年飼育した場合に比較して35％程度コストダウンできることが示された。

【社会的意義】

本システムで魚を養殖すれば，海面養殖のような環境問題は発生しない。飼育環境のコントロールを前提にし，施設開発と育種研究が協調した形で進められれば生産原価はさらに低減でき海面養殖からの移行も可能になる。また，それぞれの地域の特色を生かしたシステムの使い方が進めば，養殖魚の生産が現在の西日本中心から全国に分散され環境問題の改善も実現でき社会に大きく貢献できる。さらに，閉鎖循環式養殖は，魚に与えるもの全てについて管理ができ，また魚を完全に人工管理下で飼育するためにトレーサビリティが容易であることから，食品として安全な魚を生産でき食生活の安全に対しても大きく貢献できるものと考ええる。

学位論文審査の要旨

主査	教授	山本	勝太郎
副査	教授	吉水	守
副査	教授	廣吉	勝治
副査	助教授	平石	智徳
副査	助教授	山下	成治

学位論文題名

閉鎖循環式養殖システムに関する研究

閉鎖循環式養殖は、飼育期間中の飼育水の入れ換えや定常的な給排水を伴わず飼育水を循環再利用するものである。これまで環境汚染の軽減を目的として、いくつかの閉鎖循環式養殖システムが開発されてきた。しかしながら、報告されているシステムのほとんどは毎日数パーセントの換水を行うか飼育期間中に部分換水を行うことで水質を維持しており、長期間に渡り少量の補水程度で良好な水質を維持することはこれまでなされていなかった。

本論文は、継続的な換水や定期的な部分換水を必要とせず補水程度で長期間運転可能な閉鎖循環式養殖システムを開発するとともに、その経済性についても検討を行ったものである。

特に審査員一同が高く評価した点は以下の通りである。

1) 魚類の循環式養殖では、飼育水を浄化するために生物濾過によって魚から排出されるアンモニアの除去を行うのが一般的である。本研究では、繊維濾材を使用した浸漬濾床と回転円板装置を試作し、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 1 mg-N/L 以下のアンモニア態窒素濃度での種々の運転条件とアンモニア浄化能の関係を調べ、それぞれの最適な運転条件を明らかにした。その結果、浸漬濾床では、流速 0.74 cm/s までは流量に比例してアンモニア浄化能は増加し、 0.74 cm/s の時 $0.25\text{ g-N/m}^2\text{/day}$ で最も高く、それ以上の流速ではアンモニア浄化能は変化しないこと、回転円板装置では、回転数 12 rpm 、浸漬率 50% 、流量 240 L/h (見掛けの流速 0.45 cm/s) の運転条件でアンモニア浄化能は最大約 $0.17\text{ g-N/m}^2\text{/day}$ となることを見出した点。

2) 閉鎖循環式養殖を長期間行う場合、飼育水中の硝酸を低減することは不可欠である。このため、脱窒装置を試作し脱窒の効果確認を行うとともに、脱窒能力と諸特性および問題点について明らかにした。その結果、本装置の脱窒能力は、投入したメタノール量に対して $0.47\text{ mg-N/mg-CH}_3\text{OH}$ の脱窒量が得られ、この量は脱窒装置の硝酸濃度 $400\sim 900\text{ mg-N/L}$ の範囲で一定であり、また、脱窒量とアルカリ度増加量との関係は $2.23\text{ mg-CaCO}_3\text{/mg-NO}_3\text{-N}$ となり、硝化によるアルカリ度の低下を 40% 回復させることを見出した点。

3) また、実用性を検討することを目的として、流速を変えられる水槽 2 基を備えた閉鎖循環式養殖システムを試作し、ペヘレイを 1 年間飼育する実証試験を行った。その結果、本試験システムにおける飼育水の水質は良好に維持でき、魚病等も観察されず、また物理濾過によってシステム内は好氣的に保たれ脱窒装置の組み込みによって硝酸は低減されること、さらに補水量は総水量の 0.5 %/day 程度でこれまでの報告の中で最も少ない量となることを実証した点。

4) さらに、本研究で開発した閉鎖循環式養殖システムの経済性を明らかにするために、養殖魚の生産原価を、魚種（ブリ、ヒラメ、ペヘレイ）、水槽容量（50, 100, 150, 200 m³）、飼育密度（3, 5, 7, 10 %）等を変えて 1 年間飼育した場合について試算し、それぞれの生産原価に対する影響とコストダウンの方法について検討した。その結果、生産原価の内訳は、おおよそ設備償却費が 21%、初期費が 16%、運転経費が 63%となるが、設備償却費は窒素負荷量の大きい魚種ほど高く、初期費は成長の遅い魚種ほど高くなり、運転経費は酸素消費量の多い魚種ほど高くなることを示した点。また、飼育魚の飼育密度と電力利用設備容量が生産経費の増減に大きな影響を与えることから、複数の水槽容量のシステムを組み合わせることで種苗を年 4 回入れ最終飼育密度を 7%とすると、ヒラメの生産原価は 1,214 円/kg（設備償却費含む）となることを試算し、単一的水槽で周年飼育した場合に比較して 35%程度コストダウンできることを示した点。

以上の成果は、閉鎖循環式養殖システムを構築する上で重要な知見を得たものと高く評価できる。また、この閉鎖循環式養殖システムは魚を完全に人工管理下で飼育するためにトレーサビリティが容易で食品として安全な魚を生産できることから、食生活の安全に対しても大きく貢献できるものと考えられる。よって、審査員一同は本論文が博士（水産科学）の学位を授与される資格のあるものと判定した。