

水耕栽培を併用したゼロエミッション型水産養殖モデルに関する 実験的研究

村上定瞭*・深川勝之*・竹内正美*・西村基弘*・森岡 弘**

摘 要

養殖の自家汚染を防止し、生産性の向上と環境破壊の防止を目的として、水耕栽培を併用したゼロエミッション型水産養殖モデルの実験的研究を行った。このモデルは飼料→魚類（収穫）養殖→損失飼料・排泄物→微生物→無機塩類→水耕栽培（収穫）の生態系経路で、実験設備は魚類飼育池、生物酸化槽及び水耕栽培池より構成された。微細藻類による水耕栽培への阻害を防止するため、循環水に紫外線を照射して藻類増殖を阻止した。魚のモデルとしてヒブナを、植物のモデルとしてウォーターレタスを栽培した。投餌負荷は栽培植物の摂取により相殺され、魚飼育池の水質は良好に維持された。このモデル実験系における物質収支を明らかにし、ウォーターレタスの浄化機能を定量的に把握できた。4月におけるウォーターレタスの浄化能力は年換算で147kg-wet biomass/m²/year, 531g-N/m²/year, 111g-P/m²/yearであった。

キーワード：ゼロエミッション、水産養殖、水耕栽培、物質収支、生態系利用技術

1. はじめに

我が国における養殖の自家汚染は深刻で、水質汚濁による被害が年々増加している。海外では水質汚濁のみでなく、疲弊した養殖場の代替地の開発により環境破壊が繰り返されている。本グループでは、生態系の浄化能を強化して養殖の自家汚染を防止する要素技術を開発するとともに、生産性の向上と環境破壊の防止を目的とするゼロエミッション型養殖システムの構築に関する一連の研究を行っている。

本構想における養殖システムは Fig.1 に示すような自然界生態系の物質循環を利用したもので、構成生物は魚類、細菌類、植物、小動物である。自然浄化力を強化する各要素技術は生物法、化学法及び物理法の各技術から構成される。本研究の目的を達成するため、屋内・屋外の実験施設及び海面養殖場において一連の調査及び実験を行っている。既に、養殖等による水域汚濁防止関連技術として、生態系利用法¹⁾、紫外線-リン固定-生物酸化法^{2,3)}、生物脱窒-藻類回収法⁴⁾、底質改善剤⁵⁾等の開発を行った。

今回は、水耕栽培を併用したゼロエミ型養殖モデルの実験を行ったところ、若干の知見が得られたので報告する。本モデルは魚養殖と水耕栽培を組み合わせたもので、飼料を投与して魚を養殖し、損失飼

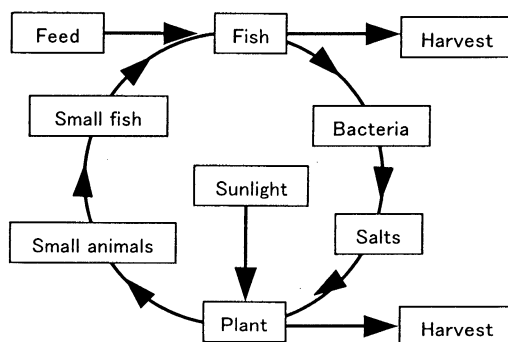


Fig.1 A zero emission model for fish cultivation in combination with material flow for natural ecosystem.

料及び排泄物を生物酸化により無機塩類に変換し、この塩類を水耕栽培で回収して植物を収穫する系であった。

2. 実 験

2.1 実験装置

実験設備 (Fig.2) は、魚飼育池、水耕栽培池及び生物酸化装置から構成された。各池はいずれも水深50cm, 水量3m³で、池底に厚さ10cmの砂を敷いた。雨水を避けるため、実験設備をビニールハウス内へ

2000年8月21日受付、2000年12月13日受理

* 宇部工業高等専門学校物質工学科, 〒755-8555 宇部市常盤台 2-14-1

** 宇部工業高等専門学校機械工学科

設置した。

生物酸化装置^{2,3)}には 0.15m³の接触槽に紐状接触材を充填した。養殖池の水を生物酸化槽へ通水し水耕栽培池へ導入した。生物膜が過大に増殖した接触材は、池水を散布して生物膜を剥離・再生した。剥離した生物膜は魚の餌として養殖池へ投入した。

養殖池の水を生物酸化槽内の接触材に通水して栽培池へ流入させ、水位計に連動したポンプにより栽培池の水を養殖池へ戻し水を循環させた。蒸発分を水道水により補給したのみで、実験期間中、水の排出・交換は全く行わなかった。この実験系では微細藻類が繁殖して、水耕栽培植物の生育阻害が生じたので、生物酸化装置の上部に取り付けた低圧水銀ランプ (15W) により循環水に紫外線を照射して殺藻し、微細藻類の増殖を阻止した³⁾。

2.2 魚飼育及び水耕栽培

試験魚としてヒブナ、*Carassius auratus*、100尾を飼育し、植物のモデルとして熱帯・亜熱帯種のウォーターレタス、*Pistia stratiotes*、を栽培した。実験は1999年8月25日より開始し、現在も継続実験中である。

魚の飼料として日本ペットフード(株)製の錦鯉用フード”スイミー”を一日一回投与した。ヒブナは定期的に全数捕獲し、水を入れたバケツへ移して、全増殖量を測定した。レタスは水耕栽培池の全水面を覆うまで増殖した時点で、全体の1/3を一度に抜き取った。抜き取りは週に2~5回であった。前法⁹⁾と同様な方法により、定期的にヒブナ及びレタスの水分、窒素及びリンの含有量を測定し、その平均値を物質収支の計算に用いた。

3. 結果及び考察

3.1 飼育・栽培条件

ビニールハウス内の室温及び実験池の水温を Figs.3-4 (15:00 前後の温度) に示す。水温に比べて室温のバラツキが大きい原因は、天候によりハウス内の温度が大きく異なったからである。実験を開始した8月下旬から室温は25°C~36°Cに達した後、9月中旬から低下して11月下旬から20°C以下に低下し、2月下旬より20°C以上となった。池の水温は実験開始直後30°C~35°Cであったが、室温と同様に9月中旬から低下して11月中旬には20°Cまで低下し

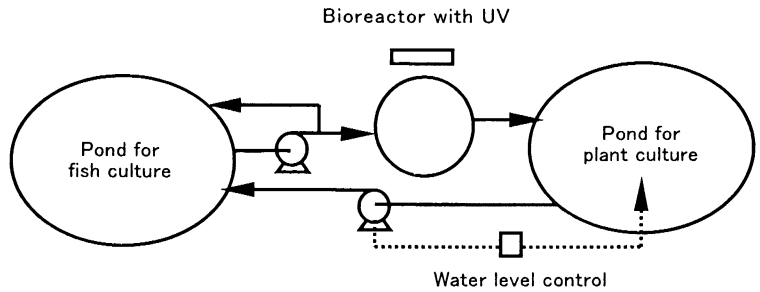


Fig.2 Experimental facility for a zero-emission model of fish cultivation in combination with plant water-cultivation.

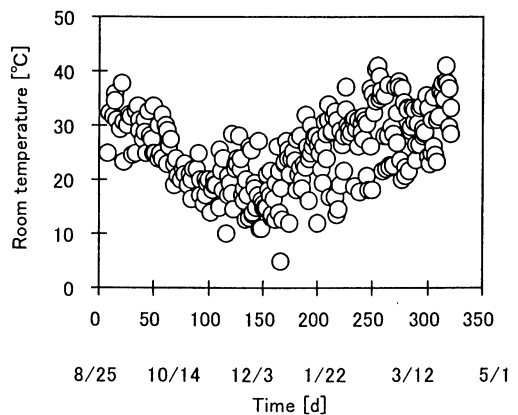


Fig.3 Room temperature in the green house.

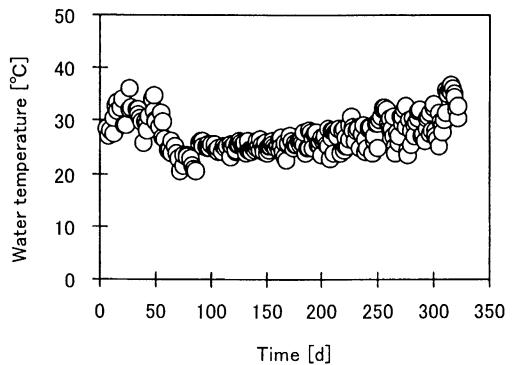


Fig.4 Water temperature in the cultivation pond.

た。ウォーターレタスは水温が15°C以下になると枯れてしまうため、11月19日(86日)よりヒーターにより水温を25°Cに制御した。2月中旬(175日)より温度は25°C以上となり、その後上昇している。

実験池水のpHは、Fig.5に示すように8.0前後でほぼ一定に維持されたが、225日頃から低下して250

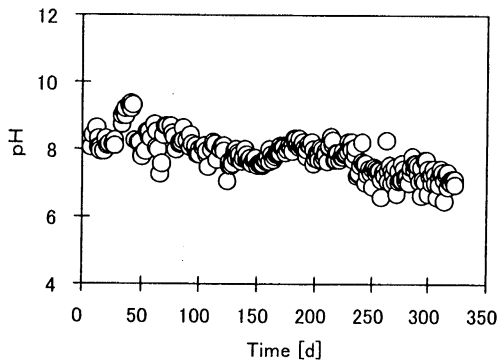


Fig.5 pH of water in the cultivation pond.

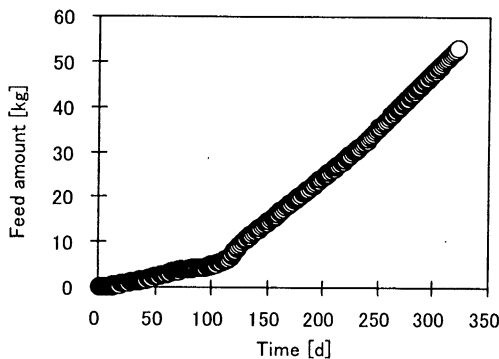


Fig.6 Feed amount throughout the experiment.

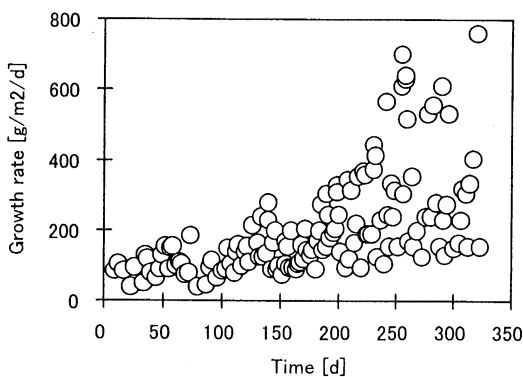


Fig.7 Growth rate of water lettuce.

日以後 7.0 前後で推移している。

積算投餌量を Fig.6 に示す。魚の成長に伴い、110 日あたりから餌摂取量が増えたため投餌量を増やした。

3.2 栽培植物の浄化能

Fig.7 にウォーターレタスの 1 日、 1m^2 当たりの増殖速度を示す。増殖速度に大きなバラツキ

があるのは、天候により日照時間が大きく異なったからである。増殖速度は、80 日 (11 月中旬) ごろ、一時低下しているが、これは水温が低下したためである。水温を 25°C に制御してからは、冬季でも増殖速度は良好であった。185 日 (2 月下旬) から増殖速度が増加しているが、これは気温の上昇と日照時間の増加によるものである。250 日以後、増殖速度に極めて大きなバラツキが認められるが、これは梅雨の季節に入り、晴天・雨天による日照時間の差が激しかったからと思われる。

Table 1 に養殖・水耕栽培系の成分表を示す。この値を用いて、水耕栽培による浄化能力を求めた。Table 2 に 4 月 1~15 日における平均値を示す。浄化能力は年間算で、 1m^2 当たり生重量で 147kg、乾燥重量で 11.7kg、窒素で 531g、リンで 111g の浄化力となっている。

Table 1 Composition of Species for cultivation.

Constituents	Feed	Fish	Lettuce
Moisture	11.0	78.0	92.0
Protein	37.0	18.2	2.52
Nitrogen	5.92	2.91	0.362
Phosphorus	0.44	0.16	0.076

Unit:%

Table 2 Purification rate of water lettuce
(average in April from 1 through 14, 2000).

Material	As daily rate	As annual rate
Biomass (wet)	412 $\text{g/m}^2/\text{d}$	147 $\text{kg/m}^2/\text{y}$
Biomass (dry)	33.0 $\text{g/m}^2/\text{d}$	11.7 $\text{kg/m}^2/\text{y}$
Nitrogen	1.49 $\text{g/m}^2/\text{d}$	531 $\text{g/m}^2/\text{y}$
Phosphorus	313 $\text{mg/m}^2/\text{d}$	111 $\text{g/m}^2/\text{y}$

3.3 池水の水質

魚飼育池の透視度 (Fig.8) は、実験開始後 30-40 日で透視度が一時低下した。これは生物酸化装置の上部に設置した殺菌灯の寿命による劣化により、微細藻類が増殖したからである。新しい殺菌灯に取り替えた後、微細藻類が殺傷されて消失し、透視度は回復した。115-130 日に透視度が急激に減少した。これは池水中の窒素が消失しレタスの生育が不良となったため、投餌量を増加したところ、餌の食べ残しが増えて池水の水質が悪化したからである。投餌量を減らすと透視度も回復した。

池水中の窒素及びリンの濃度を Figs.9-10 に示す。有機態窒素及びアンモニア態窒素は亜硝

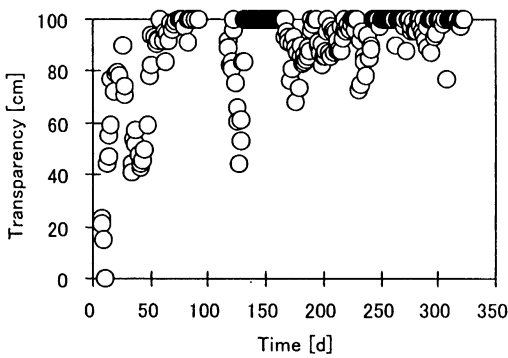


Fig.8 Transparency of water in the cultivation pond.

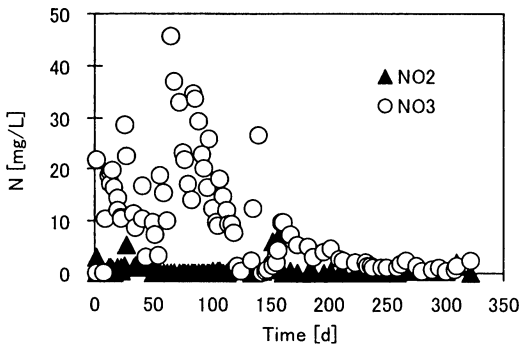


Fig.9 Nitrogen concentration in water of the cultivation pond.

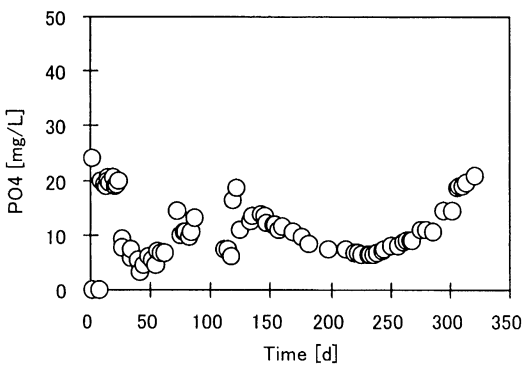


Fig.10 Phosphorus concentration in water of the cultivation pond.

酸・硝酸態窒素に比べて無視できる濃度であった。TP及びリン酸態リンの分析値はほぼ同じ値であった。

一般に、養殖水の生物酸化処理のみによる閉

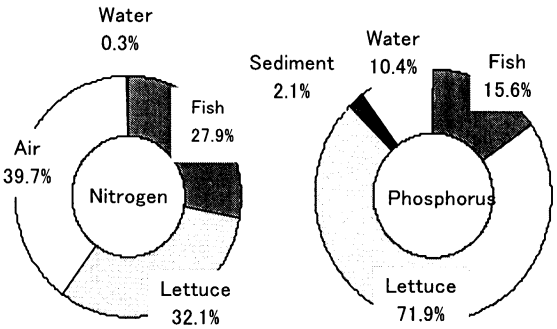


Fig.11 Material distribution from fish feeding in a fish and plant cultivation system. Air: nitrogen was denitrified in sandy pond-bed and emitted into the atmosphere.

鎖性養殖系においては、積算投餌量に比例して窒素・リンが系内に蓄積する⁷⁾。しかし、水耕栽培を導入した本実験系ではレタスによる窒素・リンの摂取及び底砂内脱窒素の速度が、餌投与による窒素・リンの蓄積速度を上回ったので、肥料(1回分: N 30g, P 6g)を計10回投与した(1, 8, 23, 44, 54, 56, 61, 64, 82, 105日の各実験日)。105日以後、ヒブナが成長し投餌量を増加したので、肥料投入を停止した。前述したように、115-130日には餌の投与量を一時増加した。

以上のような経過に追従して、池水中の窒素及びリン濃度が変化している。130日以後においても、窒素・リンいずれの濃度も少しずつ減少しており、レタスによる摂取量が投餌による栄養塩の蓄積量を上回った。しかし、250日あたりからリンは池水中に蓄積しはじめ、325日には20mg/Lに達している。これは、前述したように梅雨の季節に入り、日照時間が短く、リンについては投餌による蓄積量がレタスによる摂取量を上回ったからと思われる。

3.4 養殖・水耕栽培系における物質収支

養殖・水耕栽培系における物質収支を求めた。Fig.11に投与した餌中の窒素及びリンの移行先を示す(肥料による投入分も含む)。餌中窒素の移行先は魚に27.9%、レタスに32.1%、脱窒による大気への気散39.7%、水中への溶存分が0.3%となった。脱窒は、池底に敷いた砂の中の通性嫌気性微生物によるものである。リンの移行先は魚に15.6%、レタスに71.9%、水中溶存分が10.4%、池底に固定されたものが2.1%であった。

窒素・リンの移行先には差異が認められ、ヒブナ・レタスの無機塩類組成比の差異や底砂内

での脱窒素反応による窒素・リンの不均衡を調整する必要がある。

3.5 養殖に必要な栽培面積

本モデルで淡水魚を飼育するために必要な栽培面積を、Table 2 に示すレタスの浄化能力を基に試算した。本実験で用いた飼料を投入し、餌中の窒素及びリンはそれぞれ 27.9%、15.6%が増殖魚へ移行するものとし、残りは飼育池へ排出されることとした。また、池底での脱窒素反応はないものとした。

年間 1t の魚を収穫するための栽培面積は、レタスによる窒素の浄化能を基準にすると 140m²が必要で、このときの餌の投入量は 1.8t となる。また、リンの浄化能を基準にすると、栽培面積は 78m²で餌の投入量は 2.3t となる。なお、実際の魚養殖・水耕栽培系は魚の成長過程による餌効率の変化、温度・日照時間の季節変動によるレタス増殖速度の変化、その他様々な要因があるので、本モデルの実験結果をそのまま適用できるものでないことはいまでもない。

3.6 本モデルの実用化への課題

アメリカのウエストバージニアでの養殖・水耕栽培システム⁸⁾では、温室を用い淡水魚テラピアとハッカ、レタス、ローズマリーなどの野菜を生産し、その生産性はテラピア 120kg/m³/y、ハッカ・ローズマリー 100kg/m²/y 及びレタス 25kg/m²/y の成績を収め、採算も維持しているとのことである。

本モデル実験でも、魚飼育と水耕栽培の組合せにより、蒸発分の水補給のみで飼育水を排出しない閉鎖系において魚飼育と水耕栽培が可能であることが実証された。また、ウォーターレタスの生産性も上記事例とほぼ同等である。

本モデル実験はビニールハウス内で実施したので水温が高く、また、冬季にはヒーターを投入してウォーターレタスの枯化を防止した。本モデルは熱帯・亜熱帯地域の淡水養殖への応用は可能であるが、国内の淡水養殖へ応用するには、国内の気候に適した水耕栽培種の選定が必要である。また、実用化に当たっては経済性が極めて重要であるので、付加価値の高い栽培種の選定が必要である。原子力発電所等の廃熱利用、高付加価値種の栽培等により、温室栽培の採算性も可能となろう。国内に適した魚種・栽培種については、今後、具体的に検討する予定である。

4. まとめ

水耕栽培を併用したゼロエミ型養殖モデルの実験を行った結果、次の知見が得られた。

- 1) 魚飼育と水耕栽培の組合せにより、水の補給のみで飼育水を排出しない閉鎖系において魚飼育と水耕栽培が可能であることが実証できた。
- 2) 残餌および魚の排泄物による汚濁物質は生物酸化により無機化され、栄養塩類は水耕栽培により回収できた。
- 3) 養殖・水耕栽培系における物質収支が把握できた。窒素は底砂内の微生物による脱窒素反応により大気中へ揮散した割合が大きく、リンはレタスへ移行した割合が大きかった。

文 献

- 1) 村上定瞭, 竹内正美(1997)単純なエコシステムを利用した環境水の浄化に関する基礎的研究. 環境技術, 26(11), 698-701.
- 2) 村上定瞭, 竹内正美(1995)憩いの場における池の浄化と維持に関する研究. 環境技術, 24(7), 425-432.
- 3) 竹内正美, 村上定瞭(1996)紫外線, リン固定および接触酸化による憩いの場の池水浄化. 環境技術, 25(8), 453-457.
- 4) 林 知得, 酒井能具, 村上定瞭(1998)閉鎖性水域浄化システムの開発—生物学的処理と物理学的処理との組合せによる栄養塩類除去—. 環境技術, 27(8), 583-588.
- 5) 根本隆司, 西野伸明, 松尾 裕, 村上定瞭(1996)閉鎖性海域の底質改善剤による浄化, 環境技術, 25(8), 458-461.
- 6) 竹内正美, 深川勝之, 村上定瞭, 中西 弘(1990)養殖のクローズド化に関する基礎的研究, 衛生工学研究論文集, 26, 39-48.
- 7) 竹内正美, 村上定瞭, 深川勝之, 石川宗孝(1994)水産業における用排水処理, 環境技術, 23(7), 429-436.
- 8) 守村慎次(1999)水産学シリーズ 123 水産養殖とゼロエミッション研究 (日野明德, 他, 編), 恒星社厚生閣, pp.38-39.

A Study of Zero-Emission Model for Fish Cultivation in Combination with Plant Water- Cultivation

Sadaaki MURAKAMI*, Masayuki Fukagawa*, Masami TAKEUCHI*,
Motohiro NISHIMURA * and Hiroshi MORIOKA**

(*Department of Biological and Chemical Engineering, 2-14-1 Tokiwadai,
Ube 755-8555, Japan,

**Department of System Engineering, Ube National College of Technology)

Abstract

To prevent water pollution by fish cultivation and to achieve the higher fishery production, a zero-emission model for fish cultivation was studied experimentally in combination with plant water- cultivation. This model was an ecological route of material flow from feed to plant (harvest) through fish (harvest), lost feed and excreta, microorganisms and salts. The experimental facility was composed of fish cultivating pond, bio-reactor to purify water and plant water-cultivating pond among which the water was circulated. To prevent propagation of algae which hinder the plant growth, ultraviolet ray was applied to the circulating water. Hibuna, *Carassius auratus*, and water lettuce, *Pistia stratiotes*, were cultivated as models of fish and plant. The load of feed for fish was compensated by intake of materials by the lettuce and the pond water was maintained to be of a good quality. The material balance has been analyzed and the ability of lettuce for water purification has been determined as to be 147kg-wet biomass/m²/year, 531g-N/m²/year an 11g -P/m²/year as in April.

Key Words: Zero-Emission, Fish Cultivation, Plant Water-Cultivation, Material Balance, Ecological Technology