

溶存酸素収支に基づく蓄養施設一体型構造物の蓄養可能量

CULTIVATION CAPACITY OF A CULTIVATION FACILITY-INTEGRATED STRUCTURE BASED ON DISSOLVED OXYGEN BALANCE

丸山修治¹・福田光男²・森信幸³・坪田幸雄⁴

Shuji MARUYAMA, Mitsuo FUKUDA, Yukio TSUBOTA, and Nobuyuki MORI

¹北海道開発局 根室港湾建設事業所 (〒087-0024 北海道根室市宝林町3丁目9)
(前 北海道開発土木研究所 水産土木研究室)

^{2,3}北海道開発土木研究所 水産土木研究室 (〒062-0931 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目)

⁴正会員 工修 水産工学研究所 漁港施設研究室 (〒314-0421 茨城県鹿島郡波崎町海老台)
(前 北海道開発土木研究所 水産土木研究室)

In Hokkaido, cultivation (underwater farming) for shipment control of seafood or intermediate breeding of fries is conducted in some waters behind breakwaters with the seawater exchange function.

This study discusses the cultivation capacity of a cultivation facility-integrated structure with the seawater exchange function, using the optimum dissolved oxygen content for the sea urchin, which is the species being cultivated, as the basis. As a result, the following matters were clarified

(1) Temporal changes in the dissolved oxygen content in the preserve, in which 4,000 sea urchins were continuously cultivated for a month, were observed using the wave data of January 1991. Changes in wave height and dissolved oxygen corresponded mostly with each other, and the dissolved oxygen content in the preserve, which was 5.4 mg/l 120 hours later, recovered to 8.0 mg/l, the same level as the open sea water, by the effect of waves approximately 40 cm in wave height. The lowest value of dissolved oxygen in one month was 5.4 mg/l, and the lower limit of optimum dissolved oxygen (2.7 mg/l) was satisfied.

(2) The dissolved oxygen content in the preserve decreased almost linearly in relation to the number of sea urchins cultured.

(3) When sea urchins were cultivated for one month in a preserve using the wave data of 36 months from 1989 to 1991, the cultivation capacity in winter (February and March) was 5,000 sea urchins, greater than the capacity of 4,000 in summer

Key Words : *Cultivation facility-integrated structure, dissolved oxygen, lower limit of the optimum dissolved oxygen content,*

1. はじめに

北海道では、海水交換機能を付加した防波堤の背後水域において、魚介類の出荷調整や稚仔の中間育成を目的とした蓄養（海中飼育）が行われている例がある。蓄養に際しては、対象種に対応した好適な水質を生簀内において確保することが重要である。生簀内の溶存酸素量は、蓄養施設の規模、海水交換量、蓄養対象種及び蓄養量などに影響される。

一方、北原ら¹⁾は、防波堤のケーソンに生簀を併設し、波浪エネルギーを利用して生簀内部の海水交換を計り、水産生物を飼育する海水交換機能を付加

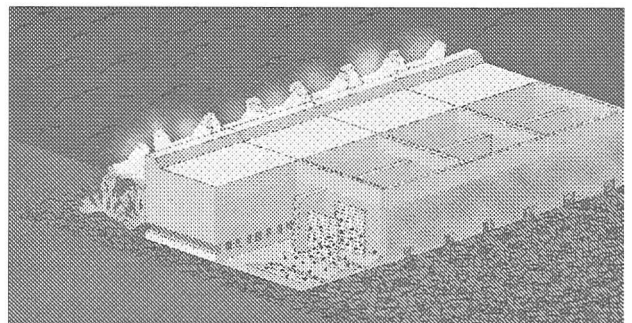


図-1 蓄養施設一体型構造物

した蓄養施設一体型構造物（図-1）を提案している。

本研究の目的は、海水交換機能を付加した蓄養施設一体型構造物の整備に際し、蓄養対象種の好適溶存酸素量を基準として、蓄養可能量を検討することである。

蓄養可能量の検討は、北海道の広い範囲に分布し重要な有用水産生物であるエゾバフンウニを対象とし、北海道根室管内の温根元漁港を事例として行った。海水交換機能を付加した蓄養施設一体型構造物の断面は、設置箇所及び波浪条件などを考慮して決定した。最初に水理模型実験を行い、波浪と生簀内への海水流入量との関係を把握した。次に過去3年間の波浪データを用いて、ウニを蓄養した場合における2時間毎の生簀内の溶存酸素収支について検討し、ウニの好適溶存酸素量の下限值により評価した。

2. 水理模型実験

(1) 実験模型

実験模型の断面を図-2に示す。構造形式は、事例とした温根元漁港は低波浪であり、設計波が小さく本体部の幅が小さくても滑動及び転倒に対処できると予想されることから、沖側から海水交換を促進する遊水部とウニを蓄養する生簀部からなる前面遊水部付有孔堤とした。また、遊水部の前壁は、遊水部への漁船の乗り入れ防止と反射率低減を考慮したスリット構造とした。さらに、生簀部の底部にはウニの排泄物等の排出を促進させるため傾斜を設けた。模型の各諸元は、設置箇所と後述する予備実験から、低波浪時の海水交換に有利な値とした。

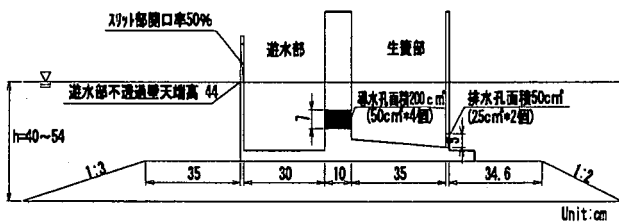


図-2 蓄養施設一体型構造物断面図

(2) 実験条件

実験施設は、不規則波発生装置を備えた長さ28m、高さ1m、幅0.8mの2次元ガラス造波水路を用いた。

実験縮尺は、構造物と実験水槽の関係と、一般的に実験波高が小さいと導水孔内平均流速が小さい値となり、生簀内への海水流入量が少ない値となり、溶存酸素収支の計算を行い水産生物の蓄養可能量を検討するに際して、蓄養可能量を厳しく検討できることから1/10とした。

実験波は、Bretschneider・光易型の不規則波を用い、波高と周期は温根元漁港の過去の波浪推算値

により、波高は $H_{1/3}=2.0\text{cm}, 3.5\text{cm}, 5.0\text{cm}, 10.0\text{cm}$ 、周期は1.58sとした。

(3) 実験方法

測定機器は波高計と流速計で、波高計は造波装置付近、模型の前面、遊水部、生簀部、模型の背後に設置し、それぞれの部位の波高を測定した。また、流速計は導水孔、生簀部、排水孔直背後に設置し、それぞれの部位の流速を測定した。

はじめに予備実験として、低波浪時の海水交換に有利な模型の諸元を決定するための実験を行った。次に、この諸元を採用した模型を用いて実験を行い、波浪と生簀内への海水流入量との関係を把握した。

(4) 実験結果の生簀内容存酸素収支計算への利用

実験結果を図-3に示す。波高=2~5cmにおいて導水孔内平均流速波高比と相対水深（水位-遊水壁高）波高比の関係を現地換算値で近似した式を次式(1)に示す。

$hc/H_{1/3} < 0$ の時

$$V/(H_{1/3})^2 = 0.0071(hc/H_{1/3})^2 + 0.0144(hc/H_{1/3}) + 0.0069$$

$0 \leq hc/H_{1/3}$ の時

$$V/(H_{1/3})^2 = 0.0004(hc/H_{1/3})^2 - 0.0025(hc/H_{1/3}) + 0.007$$

.....(1)

この近似式に波高と潮位のデータを代入することにより、導水孔内平均流速を算出できるので、生簀内への海水流入量が算出できる。この波浪データと生簀内への海水流入量との関係を用いて、生簀内容存酸素収支計算を行った。

なお、後述する生簀内容存酸素収支計算結果から、生簀内容存酸素を港外の溶存酸素(8.0mg/l)に還元させる波高は $H_{1/3} = 40\text{cm}$ 程度である。これらのことから、波高 $H_{1/3} = 50\text{cm}$ を超える波において式(1)から流速を推定しても生簀内容存酸素収支には殆ど影響しないものと考えられる。

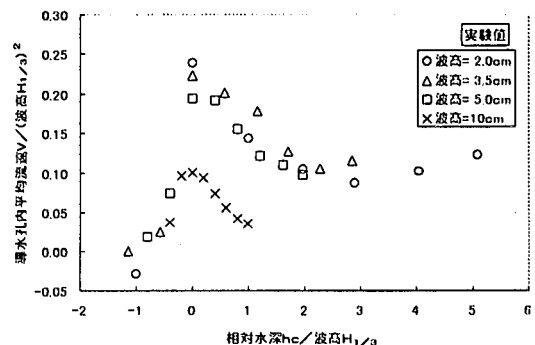


図-3 導水孔内平均流速波高比と相対水深（水位-遊水部不透過壁天端高）波高比との関係

3. 溶存酸素収支計算

(1) 溶存酸素収支の計算式

蓄養施設における生簀内の溶存酸素は、表-1に示す項目²⁾によって増減するが、本検討においては、給餌を対象としていないことから、餌や排泄物等の有機物の分解時の項目を除き、他の項目のうち3項目についても簡略化のため除き、☆を記した項目を対象とした。

表-1 溶存酸素の増減の項目

増加の項目	減少の項目
植物プランクトン・海藻類の光合成	☆動植物プランクトンや付着生物等の呼吸
表層での大気からの混入	水中・底質中の有機物の分解時
☆海水交流	☆蓄養魚介類の呼吸
-	餌や排泄物等の有機物の分解時

生簀内溶存酸素収支計算の基本式は、養殖場における溶存酸素収支方程式³⁾を、上記の理由により簡略化し次式(2)に示す。

$$C_t = (C_0 - I/L)e^{-Lt} + I/L \quad (2)$$

ただし、

$$L = q/V + K_1/V$$

$$I = (q/V) \times C_0 - K \times W_b \times N/V$$

ここに、

- C_t : t時間経過後の溶存酸素(mg/ℓ)
- C_0 : 時間 t_0 の蓄養水域の溶存酸素(mg/ℓ)
- C_0 : 港外の溶存酸素(mg/ℓ)
- V : 蓄養水域体積(ℓ)
- q : 海水交換量(ℓ/hr)
- K : 蓄養種の酸素消費(mg/kg/hr)
- W_b : 蓄養種の重量(kg/尾または個)
- N : 蓄養種の個体数
- K_1 : 海水の酸素消費(mg/ℓ/hr)

今回事例とした温根元漁港の干満差は+1.4m(L.W.L. ±0.0m, H.W.L. +1.4m)もあり、蓄養施設一体型構造物の施工箇所付近は、上げ潮時に周囲の外海水が直接生簀内に流入することから、潮位による海水交換が十分期待できる。潮位による海水交換は、外海水が生簀内に流入する上げ潮時を対象に、生簀面積に水位上昇量に乗じた体積の外海水が流入し、混合が行われるものとして上式(2)を次式(3)のように改良し生簀内溶存酸素収支計算に用いた。

$$C_t = [\{ (C_0 - I/L)e^{-Lt} + I/L \} \times V + C_0 \times V_1] / (V + V_1) \quad (3)$$

ただし、

$$V = A \times (h_0 + \eta_1)$$

$$V_1 = A \times (\eta_1 - \eta_0) \dots \eta_1 - \eta_0 > 0 \text{ の場合}$$

$$V_1 = 0 \dots \eta_1 - \eta_0 \leq 0 \text{ の場合}$$

ここに、

- V_1 : t時間経過後の潮位による海水流入量(ℓ)
- A : 蓄養水域面積(m²)
- h_0 : 蓄養水域の水深(L.W.L.)
- η_1 : 時間 t_1 の潮位(m)
- η_0 : t時間経過後の潮位(m)

(2) 生簀内溶存酸素収支計算式の諸数値及び条件
(2-1)生簀内溶存酸素収支計算式の諸数値は以下の

温根元漁港 平成13年10月1~31日

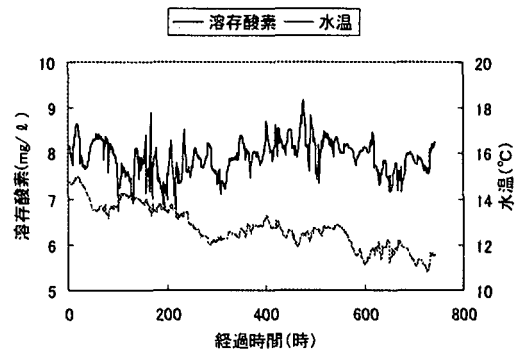


図-4 溶存酸素の経時変化(1ヶ月間)

温根元漁港 平成13年10月1~31日

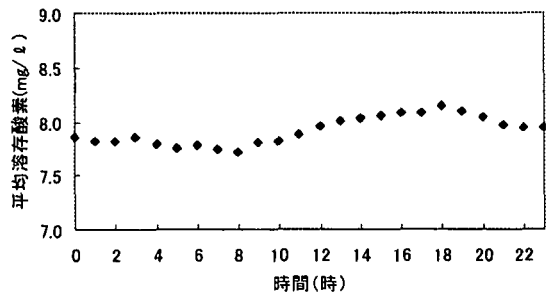


図-5 溶存酸素の経時変化(1日間)

ように仮定した。

- ①港外の溶存酸素 $C_0=8.0(\text{mg}/\ell)$
温根元漁港の溶存酸素を平成13年10月1日から10月31日までの1ヶ月間に毎正時の定点観測を行った結果、1ヶ月間(図-4)及び1日間(図-5)の観測値の幅が小さいことから、平均値を用いた。
- ②蓄養水域面積 $A=14.7(\text{m}^2)$ 、体積 $V=29.4(\text{m}^3)$
生簀の形状(幅4.2m、奥行3.5m、L.W.L.からの深さ2.0m)による。
- ③ウニの酸素消費 $K=8.0(\text{m}\ell/\text{kg}/\text{hr})$
バフンウニの酸素消費量を準用し、その値は $5.0 \sim 8.0(\text{m}\ell/\text{hr}/\text{kg})$ ⁴⁾であることから、蓄養可能量を厳しい条件下で検討するため最大値とした。なお、後述する生簀内溶存酸素収支計算において、単位を mg/ℓ に統一する必要があることから、 $\text{m}\ell/\ell$ から mg/ℓ への換算を次式(4)によって行った。
 $DO(\text{mg}/\ell) = (32 \times DO(\text{m}\ell/\ell)) / (22.4 + (1+T/273)) \quad (4)$
ここに、海水温度は蓄養期間を冬季と想定し $T=0^\circ\text{C}$ とした。なお、この式は海水温度が低い方が mg/ℓ 換算値が大きく、生簀内溶存酸素現存量に厳しい条件となる。
- ④ウニの重量 $W_b=0.07(\text{kg}/\text{個})$
温根元漁港の現地資料による。
- ⑤海水の酸素消費 $K_1=0.00042\text{mg}/\ell/\text{hr}$
湖における数値 $1 \times 10^{-2}(\text{mg}/\ell/\text{day})$ ⁵⁾を準用した。
- ⑥蓄養水域の水深(L.W.L.) $h_0=4.0\text{m}$
温根元漁港の海象条件による。

(2-2)生簀内溶存酸素収支計算の条件を下記に示す。

①波高

温根元漁港の1989～1991年（3ケ年）の波浪推算値を用いた（2時間毎）。

②潮位

温根元漁港の1989～1991年（3ケ年）の4分潮からの計算結果を用いた（2時間毎）。

③蓄養種に対する好適溶存酸素量の下限值=2.0(mg/l) ⁶⁾ =2.7(mg/l)(上式(4)の換算による)

バフンウニの好適溶存酸素量の下限値を準用した。

4. 溶存酸素収支計算結果及び蓄養可能量の検討

(1) 季節及び蓄養個数による比較

図-6は、冬季の例として1991年1月の波浪データを用いて、生簀内でウニ4,000個を1ケ月間連続して蓄養した場合の、生簀内の溶存酸素の経時変化である。波高の増減と溶存酸素の増減が概ね一致している。これは波高の増減による生簀内への海水流入量の増減が反映されたものと考えられる。なお、1月6日0時(120時間後)に5.4mg/lであった生簀内溶存酸素が、波高40cm程度の波浪の作用により港外の溶存酸素(8.0mg/l)に復元されていることがわかる。また、1ケ月間の溶存酸素の最低値は5.4mg/l(1月6日0時(120時間後))であり、好適溶存酸素量の下限值(2.7mg/l)は確保されている。

図-7は、夏季の例として1991年8月の波浪データを用いて、生簀内でウニ4,000個を1ケ月間連続して蓄養した場合の、生簀内の溶存酸素の経時変化である。冬季の例(図-6)と比較して、溶存酸素量は概ね低い値で推移している。これは、冬季と比較して夏季の方が静穏であることが、生簀内への海水流入量に影響を与え、そのことが反映されたものと考えられる(表-2)。また、1ケ月間の溶存酸素の最低値は2.8mg/l(8月21日6時(486時間後))であり、好適溶存酸素量の下限值(2.7mg/l)と概ね同じ値であることから、この期間の波浪データを用いて1ケ月間連続して蓄養する場合の個数は、概ね4,000個が限界と考えられる。

表-2 冬季(1月(1989～1991年))と夏季(8月(1989～1991年))の波高出現率(%)

	0～30(cm)	30～50(cm)	50(cm)～
冬季(1月)	71	15	14
夏季(8月)	91	7	2

図-8は、1991年1月の波浪データを用いて、生簀内でウニ8,000個を1ケ月間連続して蓄養した場合の、生簀内の溶存酸素の経時変化である。同じ波浪データを用いてウニ4,000個蓄養の場合(図-6)と比較して、溶存酸素量の8.0mg/lからの減少量は概ね2倍である。これはウニ蓄養個数を2倍に増加させたことが、生簀内溶存酸素現存量に反映された

1991年 1月 ウニ蓄養数4,000個

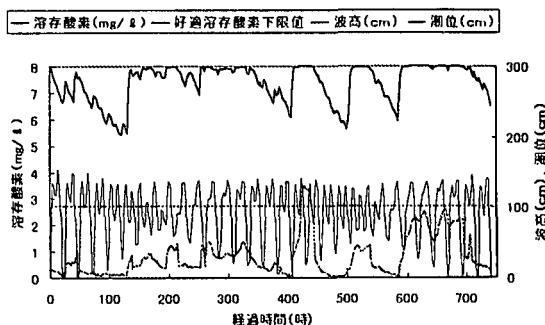


図-6 溶存酸素の経時変化(波浪データ1991年1月,ウニ蓄養個数4,000個)

1991年 8月 ウニ蓄養数4,000個

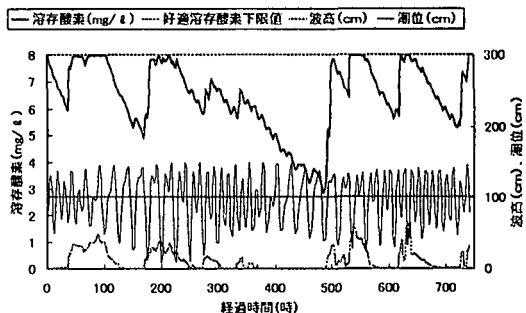


図-7 溶存酸素の経時変化(波浪データ1991年8月,ウニ蓄養個数4,000個)

1991年 1月 ウニ蓄養数8,000個

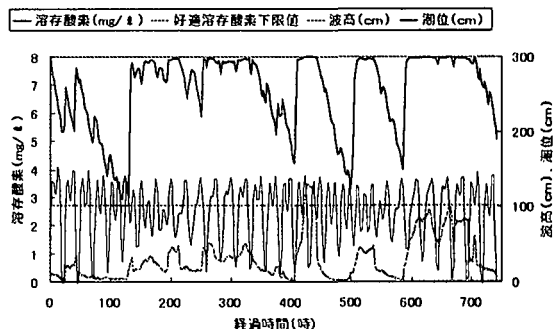


図-8 溶存酸素の経時変化(波浪データ1991年1月,ウニ蓄養個数8,000個)

1991年 8月 ウニ蓄養数8,000個

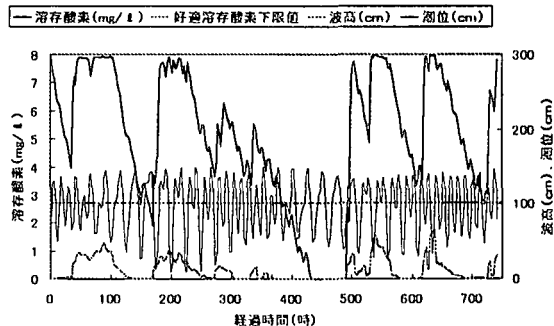


図-9 溶存酸素の経時変化(波浪データ1991年8月,ウニ蓄養個数8,000個)

ものと考えられる。また、1ヶ月間の溶存酸素の最低値は2.9mg/ℓ(1月6日0時(120時間後))であり、好適溶存酸素量の下限值(2.7mg/ℓ)と概ね同じ値であることから、この期間の波浪データを用いて1ヶ月間連続して蓄養する場合の個数は、概ね8,000個が限界と考えられる。

図-9は、1991年8月の波浪データを用いて、生簀内でウニ8,000個を1ヶ月間連続して蓄養した場合の、生簀内の溶存酸素の経時変化である。同じ波浪データを用いてウニ4,000個蓄養の場合(図-7)と比較して、溶存酸素量の8.0mg/ℓからの減少量は概ね2倍であり、同じ蓄養個数で1月の波浪データを用いた場合(図-8)と比較して、溶存酸素量は概ね低い値で推移している。また、蓄養開始後150時間後である8月7日6時には溶存酸素が2.6mg/ℓと好適溶存酸素量の下限值(2.7mg/ℓ)より小さい値となることから、この期間の波浪データを用いて1ヶ月間連続した蓄養は不可能と考えられる。なお、1ヶ月間の溶存酸素の最低値は計算上では-2.1mg/ℓ(8月21日6時(486時間後))であり、この期間はウニが生息するには全く適さない環境である。

図-10は、冬季の例として3ケ年(1989~1991年)における1月の波浪データを用いて、生簀内でウニを1ヶ月間連続して蓄養した場合の、生簀内の最小溶存酸素をウニの個数別に表したものである。生簀内の最小溶存酸素は、ウニの個数に対して概ね直線的に小さくなる傾向を示した。また、好適溶存酸素量の下限值(2.7mg/ℓ)を用いて蓄養可能個数を検討すると、1990,1991年の波浪データでは6,000個以上蓄養できると考えられるが、1989年の波浪データでは約4,800個までしか蓄養できないと考えられる。これは、波浪データに年変動があったことに起因すると考えられるが、3ケ年の波浪データを用いた場合の蓄養可能量の考え方としては、安全側である4,800個以下とすることが望ましいと考えられる。

図-11は、夏季の例として3ケ年(1989~1991年)における8月の波浪データを用いて、生簀内でウニを1ヶ月間連続して蓄養した場合の、生簀内の最小溶存酸素をウニの個数別に表したものである。生簀内の最小溶存酸素は、1月の波浪データを用いた場合と比較して、ウニの個数に対して直線的に小さくなる割合が大きい傾向を示した。これは、冬季と比較して夏季の方が静穏であることが、ウニを蓄養した場合における生簀内の最小溶存酸素に影響を与え、そのことがウニの個数に対して大きく反映されたものと考えられる。また、好適溶存酸素量の下限值(2.7mg/ℓ)を用いて蓄養可能個数を検討すると、1989年の波浪データでは約3,700個、1990年の波浪データでは約4,100個、1991年の波浪データでは約5,600個と年変動があるが、3ケ年の波浪データを用いた場合の蓄養可能量の考え方としては、安全側である3,700個以下とすることが望ましいと考えられ、1月の波浪データを用いた場合と比較して、概ね2割少ない蓄養可能個数となった。

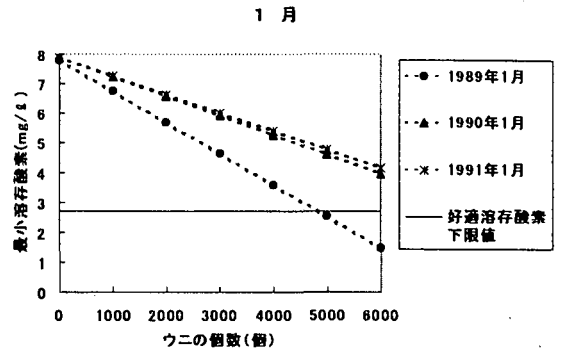


図-10 最小溶存酸素とウニの個数との関係(波浪データ1月(1989~1991年))

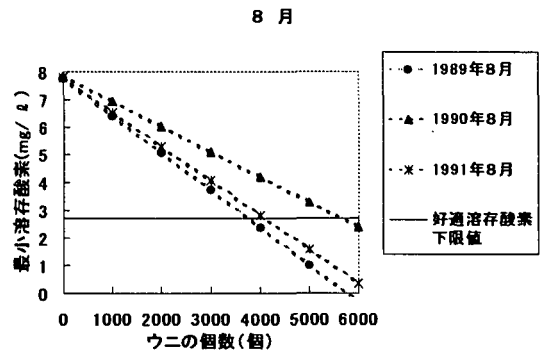


図-11 最小溶存酸素とウニの個数との関係(波浪データ8月(1989~1991年))

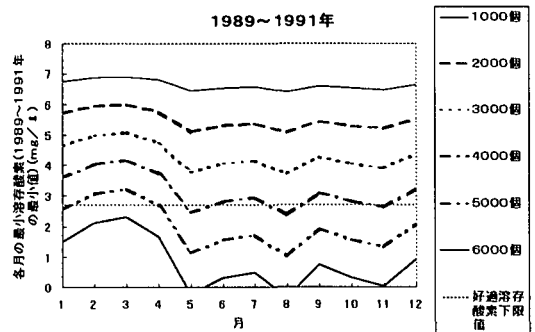


図-12 個数別による各月の溶存酸素の最小値(波浪データ各月(1989~1991年))

(2) 月別による蓄養可能量の検討

図-12は、1989~1991年の36ヶ月の波浪データを用いて、生簀内でウニを1ヶ月間連続して蓄養した場合の、各月における生簀内の溶存酸素の最小値を蓄養個数別に表したものである。個数別による各月の溶存酸素の最小値は、概ね個数に比例して、冬季が大きく夏季に小さい傾向が見られた。3,000個以下では年間を通じて、4,000個で5,8,11月以外の各月で好適溶存酸素量の下限值(2.7mg/ℓ)は確保される。5,000個になると冬季間(2~3月)しか確保されない。これは、一般的に夏季が静穏であることから、生簀内への海水流入量が冬季に比べ少ないことによ

るものと考えられる。また、6,000個以上になると年間を通して確保されない。

5. おわりに

北海道根室管内の温根元漁港の蓄養施設一体型構造物を事例とした水理模型実験を行い、その結果である生簀内への海水交換特性と現地の波浪データを用いて、北海道の広い範囲に分布し重要な有用水産生物であるエゾバフンウニを対象とした生簀内溶存酸素収支の計算結果を、好適溶存酸素量の下限值(2.7mg/ℓ)を基準として、蓄養可能量を検討したことをまとめると以下ようになる。

①1991年の1月の波浪データを用いて、生簀内でウニ4,000個を1ヶ月間連続して蓄養した場合の生簀内溶存酸素の経時変化をみると、波高の増減と溶存酸素の増減が概ね一致し、120時間後に5.4mg/ℓであった生簀内溶存酸素が、波高40cm程度の波浪作用により港外の溶存酸素(8.0mg/ℓ)に復元されている。また、1ヶ月間の溶存酸素の最低値は5.4mg/ℓであり、好適溶存酸素量の下限值(2.7mg/ℓ)は確保されている。

②生簀内の溶存酸素量は、ウニの蓄養個数に対して概ね直線的に減少する。

③1989～1991年の36ヶ月の波浪データを用いて、生簀内でウニを1ヶ月間連続して蓄養した場合の蓄養

可能量は、冬季間(2～3月)が概ね5,000個に対し、夏季は概ね4,000個であり、冬季の方が夏季よりも多い。

今後は、温根元漁港において蓄養施設一体型構造物の完成後に、生簀内でウニを蓄養した場合における溶存酸素量の変化について現地観測を行い、本溶存酸素収支計算結果と比較し検証を行う予定である。

参考文献

- 1)北原繁志：蓄養施設一体型ケーソンの開発～ウニの高密度飼育を事例として～、海洋開発論文集、第13巻、pp.297-302, 1997.
- 2)水産庁漁港部建設課：第39回全国漁港建設技術研究発表会講演集(平成6年8月)、社団法人全国漁港協会、pp.118, 1994.
- 3)沿岸漁場整備開発事業施設設計指針編集委員会：沿岸漁場整備開発事業施設設計指針(平成4年度版)、社団法人全国沿岸漁業振興開発協会、pp.248, 1994.
- 4)沿岸漁場整備開発事業施設設計指針編集委員会：沿岸漁場整備開発事業施設設計指針(平成4年度版)、社団法人全国沿岸漁業振興開発協会、pp.378, 1994.
- 5)沿岸漁場整備開発事業構造物設計計算例集編集委員会：沿岸漁場整備開発事業構造物設計計算例集(平成4年度版)、社団法人全国沿岸漁業振興開発協会、pp.241, 1989.
- 6)沿岸漁場整備開発事業施設設計指針編集委員会：沿岸漁場整備開発事業施設設計指針(昭和53年度版)、社団法人全国沿岸漁業振興開発協会、pp.193, 1978.