

人工魚礁の最適規模

小川 嘉彦・竹内 正一・服部 昭
 (山口県外海水産試験場) (東京水産大学) (海上労働科学研究所)

An Estimate for the Optimum Size of Artificial Reef

Yoshihiko OGAWA

(Yamaguchi Prefectural Open-Sea Fisheries Experimental Stations)

Shoichi TAKEUCHI

(Tokyo University of Fisheries)

Akira HATTORI

(Maritime Labour Research Institute)

Abstract: This paper is focused on determining optimum size of artificial reefs. For this purpose, theoretical models were composed on the basis of information concerning the relation between the size of reef and the production from the reefs. The models depend essentially on an authentic relation that yield per reef increases with an enlargement in size of the reef over a wide range of reef size between 400 m³ and 4,000 m³. Major points revealed, through numerical analysis by a procedure of Operations Research and through comparisons of the results with factual information as to real reefs, are as follows.

While the production per reef reaches maximum at 4,000 m³, the production per unit volume of a reef attains a peak at a considerably smaller size. The peak reef size equals the optimum size in a sense that maximum production can be obtained under a limited amount of reef material. Consequently, it is most efficient to construct a reef accumulation with an optimum size, that is the size at which the production per unit volume of the reefs is maximum. Although the optimum size of unit reef may vary among different models, the models analyzed here imply that it seems suitable to employ about 2,000 m³ for volume of unit reef as an optimum size. For practical purposes, however, it is most desirable to realize an actual relation between the production per unit volume of reefs and the size of the reefs for each area where new reefs should be distributed.

1. 緒 言

我が国の人工魚礁造成史上最古のものは、1795年の淡路島の西田新蔵によるものとされているが、魚類を対象とする人工礁による漁場造成事業が国のプロジェクトとして開始された1954年から数えても、すでに20余年を経ている(小川, 1972)。その間、人工魚礁に関する各種の調査研究も実施され、その成果は魚礁総合研究会(1975)によって整理されている。一方、沿岸漁場開発整備法にともない、人工魚礁造成事業も大型化し、一カ所における事業量 50,000 m³ 以上という従来経験しなかった規模での造成が具体化されるに至っている。

ところで、今 50,000 m³ の事業量で人工魚礁を設置しようとした場合、それをどのように構成し、海中に配置

すべきかについて明確に示し得るほどの判断の基準となるべきものは、前述の魚礁総合研究会の報告の中にさえ見出し難い。このことは、従来の魚礁の調査研究の多くは、“行政的計画によって、すでに投入されてしまった魚礁”の投入後の状態に関するものであることと無関係ではないと思われる。とは言え、そうした魚礁研究の現状とは別に、漁場造成が、“事業”として、しかも一層大規模に実施されつつある事実は直視しなければならない。少なくとも、従来通りの方式で造成を続けることは、今後の魚礁研究にとってばかりでなく、事業そのものの真の目的にとっても望ましいとは言えない。最近の事業の大規模化が、単に“大きいことはいいこと”式の思想にのみよっているとしたら、大規模化そのものも検

討する必要がある。もし、大規模化が必要であるなら、それはどのような大規模化であるのか、完全とは言えぬまでも過去の多くの研究成果を足がかりに、可能な限り望ましい造成方法を見出すべきであろう。

著者らはいずれも魚礁研究者ではないが、基本的には前述の考え方に従って、人工魚礁の最適値問題について共同研究を行った。ここでは、その結果を報告すると共に、明らかになった点に関連して若干の問題提起を試みたい。

この問題を考えるに当たり、種々有益な批判と助言をいただいた東海区水産研究所増殖部主任研究官小川良徳博士に深く感謝する。また、作図に御協力いただいた福井清枝嬢に感謝する。

2. モデリング

1) 問題の性質

今、総事業量を $50,000 \text{ m}^3$ と考え、これをどのように配分して魚礁を構成すればよいかを考える。配分方法としては、 1 m^3 の礁を $50,000$ 個投入する場合から、 $50,000 \text{ m}^3$ の礁を 1 個投入する場合まで、現実的感覚からすればほとんど“無数”に存在するが、その広い範囲の中に“最適値”が存在するであろうと考えられる。ここでは最適値として最大生産量をもたらす魚礁の配分について考える。一配分量によって構成される礁を“単位礁”と呼ぶことにすると、問題は“与えられた事業量 $50,000 \text{ m}^3$ の中で、これを何個の単位礁に分け、魚礁群を構成したら最大の生産量を得るか?” という形に要約される。一定の事業量の中では単位礁を大きくすれば、その数は減少する一方、単位礁当りの生産量は増大すると考えられるので、その関係のどこかに生産量が最大になる点が存在するはずである。すなわち問題は OR 理論の中の典型的な決定法の問題に帰着する。

2) 問題定式化のための仮定の設定

この問題に対する解答を得るためには単位礁の大きさと、単位礁当りの生産量との関係がわかればよい。しかし、両者の関係を単純に関数関係で表現できるように研究は現在まで行われていないし、魚礁での生産量が単にその礁の体積(事業量)の関数として一義的に決定されると考えてしまうことの方が、むしろ不自然であるかもしれない。同じ体積の魚礁でもその形状はさまざまであり得るし、設置場所が異なれば効果も変化するであろう。また、対象魚種が異なれば同じ魚礁もまったく別の意味を持つかも知れない。それ故、少なくとも、比較的狭い範囲での一外的諸条件をほぼ一定とみなし得る範囲で

の一礁の体積と生産量の関係を明らかにした上で定式化することが望ましいが、ここではとりあえず魚礁総合研究会(1976)および小川(私信)に従い、単位礁の単位事業量当り生産量(以下‘単位生産量’と呼ぶ)を $10 \text{ kg/m}^3/\text{year}$ から $16 \text{ kg/m}^3/\text{year}$ の範囲で考え、単位礁の規模を 400 m^3 から $4,000 \text{ m}^3$ の間で考える。ここで 400 m^3 という事業量は魚礁が一定の効果範囲を持つための最小事業量と考えられており、 $4,000 \text{ m}^3$ の事業量は従来の大型魚礁として投入されたものの最大規模のものである。魚礁の効果範囲は底魚を対象とした場合で半径 60 m 、浮魚を対象とした場合で半径 300 m の範囲と言われ事業量 400 m^3 ではほぼこの範囲に達し、 400 m^3 以上の事業量に対しては効果範囲は増大せず生産量が増大するとされている。それ故、漁場面積という点から考えると、単位礁はなるべく小さくした方が、一定の事業量の中では多数の漁船を収容できることになる。

以上から、事業量 400 m^3 の単位礁の生産量を、 4 ton/year ($10 \text{ kg/m}^3/\text{year}$)、事業量 $4,000 \text{ m}^3$ のそれを 64 ton/year ($16 \text{ kg/m}^3/\text{year}$) とおき、事業量 400 m^3 から $4,000 \text{ m}^3$ の間では礁の増大とともに生産量も増大すると仮定する。礁の規模を増大させれば生産量も増大するという関係は魚礁について一般的に認知された関係である(魚礁総合研究会, 1976)。

3) 問題の定式化

以上考えてきた各要因について、ここで

N : 単位礁の数

x : 単位礁の大きさ(事業量, m^3)

y : 単位礁当りの生産量

T : 総事業量

z : 総生産量

とおくと、問題は

$$y = f(x) \quad (1)$$

$$N = g(x) \quad (2)$$

の時、目的関数

$$z = f(x) \cdot g(x) \quad (3)$$

を最大にする x を求める問題である。

(2) 式において

$$N = g(x) = \frac{T}{x} \quad (2)'$$

である。一方(1)式については上限と下限での値しか現状ではわかっておらず、妥当なモデルを設定する必要がある。そこでまず、 $y = f(x)$ として

$$\text{モデル I} \quad y = \frac{bx^2}{x^2 + a} \quad (4)$$

$$\text{モデル II} \quad y = \tanh x \quad (5)$$

の型での変化を仮定し、試算する(Fig. 1 参照)。これらモデルの妥当性については後の項で議論する。

3. モデルの数値解析結果と問題点

(4), (5) 式と (2)' 式をもとに最適値を求めるためには, (4) 式では定数 a, b を決定しなければならないし, (5) 式では若干の変数変換が必要である。ここでは前節 (2) の仮定にもとづいて定数決定を行った。

(4), (5) 式はそれぞれ

$$y = \frac{\left(\frac{528}{7} \times 10^3\right) x^2}{x^2 + \left(\frac{20 \times 10^6}{7}\right)} \quad (4)'$$

$$\begin{cases} 400 \leq x \leq 4,000 \\ 4,000 \leq y \leq 64,000 \end{cases}$$

および

$$y' = 3,000 \left[1 + \tanh\left(\frac{x' - 1,800}{600}\right) \right] \quad (5)'$$

$$\begin{cases} 0 \leq x' \leq 3,600 \\ 0 \leq y' \leq 60,000 \end{cases}$$

と表現される。(5)' 式は $-1,800 < x < 1,800, -30,000 < y < 30,000$ の範囲で双曲線関数 (5) 式を考え, x, y 軸に

それぞれ平行移動したものである。(4)', (5)' 式を Fig. 1 として示す。計算に当っては $T=50,000\text{m}^3$ とおいた。

計算結果から, 単位礁の大きさに対する総生産量 (以下 '総生産量曲線' という) の変化を Fig. 2, Fig. 3 に示す。モデルでは原則的に連続量となるが, 現実の数値一例えば, 単位礁の数—は離散量としてとりあつかわれる。このために二つの図では総生産量曲線の現実のプロットに若干の振動が現われる。モデル I では $x^2=1,690\text{m}^3, N=30$ 単位礁の場合に総生産量は最大となり $1,131 \text{ ton/year}$ を得, モデル II では, $x=2,800 \text{ m}^3$ で $N=18$ 単位礁の場合に最大生産量 $1,023 \text{ ton/year}$ を得る。しかし, 最大生産量に対して, 単位生産量はモデル I で $22.6 \text{ kg/m}^3/\text{year}$, モデル II では $20.5 \text{ kg/m}^3/\text{year}$ となり, これは最初の仮定—単位生産量は $10\text{--}16 \text{ kg/m}^3/\text{year}$ で変化するとした—に矛盾する。

このことは, 単位生産量は単位礁の大きさが 400m^3 から $4,000\text{m}^3$ まで増大するにつれて $10 \text{ kg/m}^3/\text{year}$ から $16 \text{ kg/m}^3/\text{year}$ まで増大するとして, 機械的に両端での値で曲線をあてはめたことに起因していると考えられる。モデル I, モデル II ともいくぶん上に凸型になる部

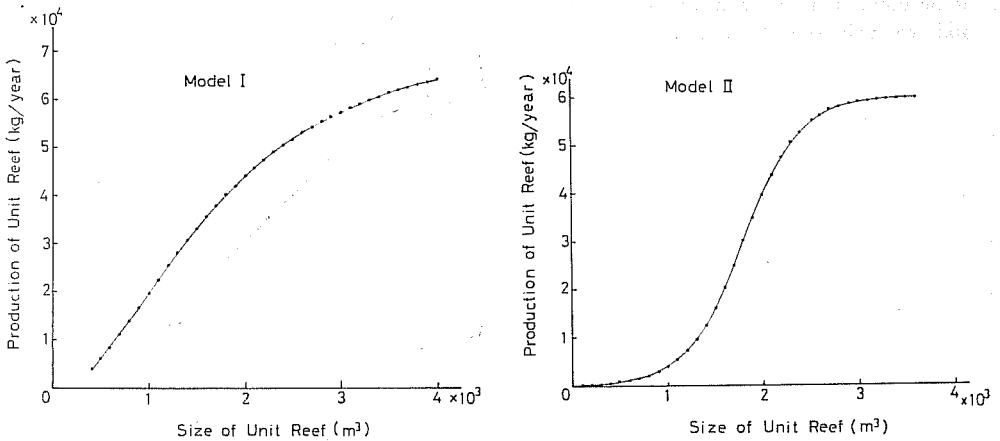


Fig. 1. Production curve of reefs representing relations between yield per unit reef (y) and size of the reef (x), which were employed as models.

As production functions (curves),

$$y = \frac{(528 \times 10^3) x^2}{x^2 + \left(\frac{20 \times 10^6}{7}\right)} \quad \begin{cases} 400 \leq x \leq 4,000 \\ 4,000 \leq y \leq 64,000 \end{cases}$$

for 'Model I' and

$$y' = 3,000 \left[1 + \tanh\left(\frac{x' - 1,800}{600}\right) \right] \quad \begin{cases} 0 \leq x' \leq 3,600 \\ 0 \leq y' \leq 60,000 \end{cases}$$

for 'Model II' were composed. They are based on authentic information as to real reefs in the sea; values of $10 \text{ kg/m}^3/\text{year}$ and $16 \text{ kg/m}^3/\text{year}$ for yield per unit volume of reefs were employed corresponding to values of 400 m^3 and $4,000 \text{ m}^3$ for size unit of reef.

分を含むパターンの曲線で単位礁当りの生産量の変化を考えているので、逆に下に凸型の曲線としてモデル I の曲線と $y=ax+b$ に対称な曲線をあてはめ試算すると、

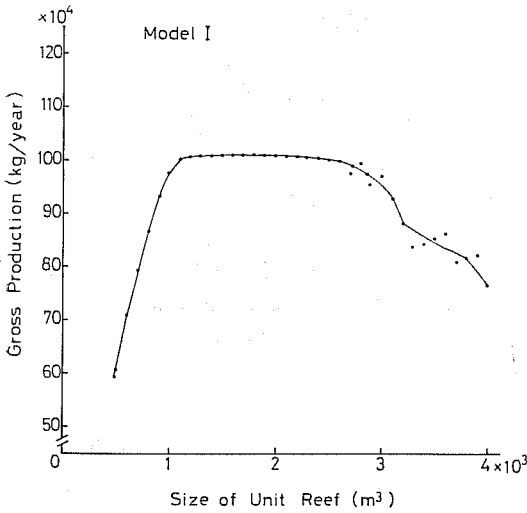


Fig. 2. Gross production curve for 'Model I', which represents a relation between production of a reef accumulation and size of unit reef in the accumulation under a limited amount of total reef volume ($50,000 \text{ m}^3$).

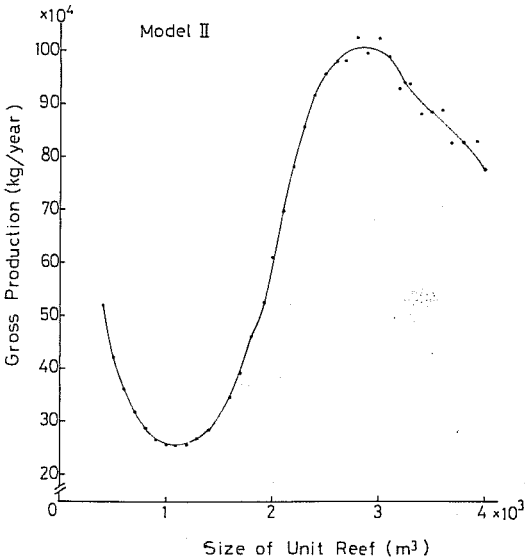


Fig. 3. Gross production curve for 'Model II', which represents a relation between production of a reef accumulation and size of unit reef in the accumulation under a limited amount of total reef volume ($50,000 \text{ m}^3$).

単位生産量は $10\text{-}16 \text{ kg/m}^3/\text{year}$ の両端の間で逆に $7 \text{ kg/m}^3/\text{year}$ にまで低下してしまうということが起る。それ故最大の問題は、単位生産量と、単位礁当りの生産量との関係が、両端以外では明確でないという点にあると考えられる。この点については次の三つの可能な場合が考えられる。

①単位礁当りの生産量は単位礁の大きさに比例して増大するが、単位生産量も $10\text{-}16 \text{ kg/m}^3/\text{year}$ の間で増加するという関係が維持されている場合 (ケース I)。

②単位生産量は $10\text{-}16 \text{ kg/m}^3/\text{year}$ の間で変化するが、単位礁の大きさ 400 m^3 から $4,000 \text{ m}^3$ の間で単調に増大するのではなく、その間で最大値をとる場合 (ケース II)。

③最小と最大の単位礁については、単位生産量はそれぞれ $10 \text{ kg/m}^3/\text{year}$ と $16 \text{ kg/m}^3/\text{year}$ になるが $400 \text{ m}^3 < x < 4,000 \text{ m}^3$ の間では必ずしも $10\text{-}16 \text{ kg/m}^3/\text{year}$ の間の値をとるとは限らない場合 (ケース III)。

試算したモデル I, モデル II はケース III に該当する例である。

4. 問題点の検討

1) ケース I

単位生産量, 単位礁当り生産量ともに増大する場合の礁の大きさと単位礁当り生産量との関係を示す曲線は, Fig. 4 の型で成り立つ。この曲線は一般に想定されているパターンとは異なっているのが特徴的である。この場合総生産量は単位礁の大きさを増すほど大きくなり, 単

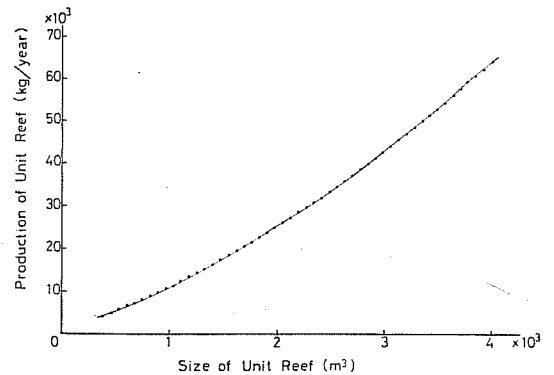


Fig. 4. Production curve of reefs, which is composed numerically to satisfy a conditions that yield per unit volume of reef increase from $10 \text{ kg/m}^3/\text{year}$ to $16 \text{ kg/m}^3/\text{year}$ according to enlargement in the reef size from 400 m^3 to $4,000 \text{ m}^3$. This pattern seems not to be realistic for actual reefs in the sea.

調増大型の生産量曲線として考えられる。すなわち、 $50,000\text{m}^3$ の礁を一個投入した場合に最大生産量 800ton/year を得ることになる。ところで、 $50,000\text{m}^3$ の礁が現実の海洋中で占める面積はさほど大きなものではない。また礁の体積を大きくさせても効果範囲そのものは増大し得ないことを考え併せると、漁場としての面積は小さなものでしかなく、そこで操業し得る漁船数も限られる。限られた漁場で限られた漁船によって年間 800ton の生産を揚げ得ることは、現実にはありそうもない。

2) ケースⅡ

単位生産量のピークが単位礁の大きさでみてどこに存在するかによって単位礁当たり生産量曲線も変化すると考えられるが、モデル的に3例について考える。第一は礁の大きさの増大と共に相対的に早くピークが出現する場

合 (CaseⅡ-1)、第二はピークが 400m^3 と $4,000\text{m}^3$ の間で出現する場合 (CaseⅡ-2)、そして第三はピークが相対的におそく出現する場合 (CaseⅡ-3)である。ここでは単位生産量のピークの値を $16\text{kg/m}^3/\text{year}$ としてそれぞれ3例のパターンを Fig. 5 に示す。

それぞれの単位生産量曲線に対応する単位礁当りの生

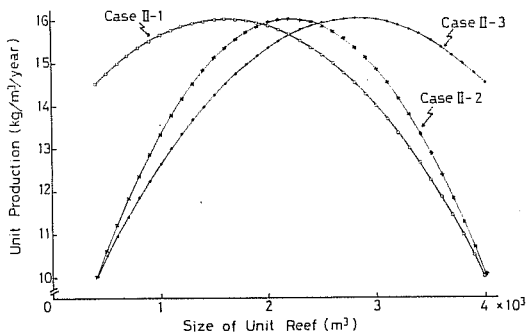


Fig. 5. Unit production curves as models, representing relations between yield per unit volume of reefs and size of the reefs. Three different cases were employed to evaluate 'Model I' and 'Model II' according to variations in point where a peak of unit production occurs.

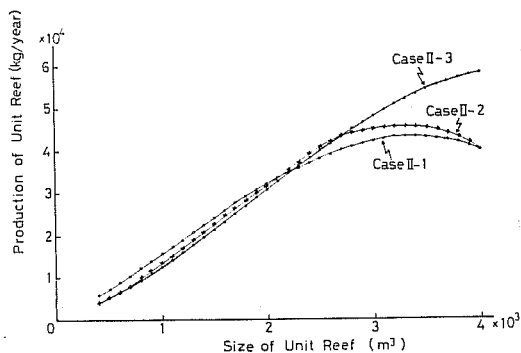


Fig. 6. Production curves of reefs calculated on the basis of the three unit production curves shown in Fig. 5.

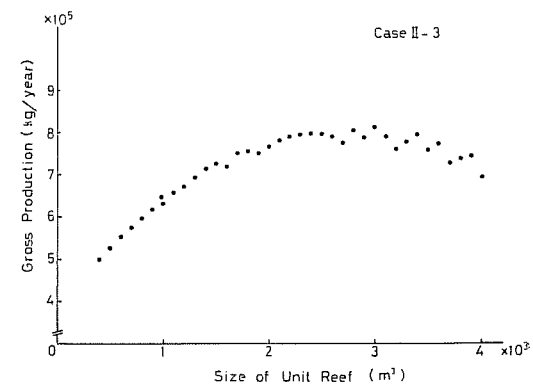
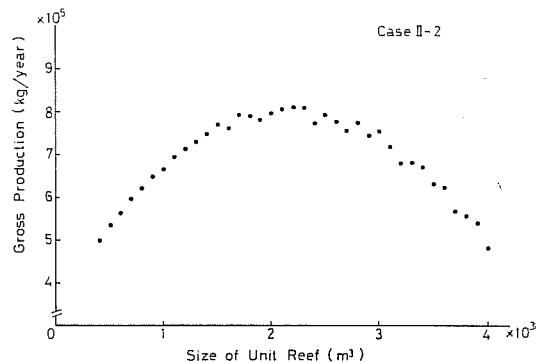
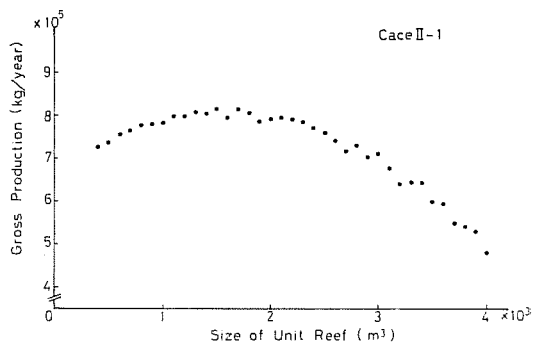


Fig. 7. Gross production curves calculated on the basis of the three production curves shown in Fig. 6. These suggest that yield from a reef accumulation may be expected at its maximum when size of unit reef in the accumulation equals the reef size where unit production curve attains a peak.

産量曲線を Fig. 6 に示す。一方、対応する総生産量は、単位生産量曲線のピークにはほぼ対応して最大値を示す曲線を描く (Fig. 7)。とくに、単位礁当たり生産量曲線についてみると、単位生産量のピークが相対的に早く出現する場合 (Case II-1) のそれが一般に想定されているところに最も適合しているように思われる。少なくとも、ケース I に比較してケース II の方が、より現実合っていると考えられる。

3) ケース III

前述のケース I、ケース II の検討結果から考えると、ケース III は必ずしも現実に矛盾しないと予想される。Fig. 8 は、魚礁総合研究会(1976)の“Fig. 7”に使われた元の資料から、“礁の断面積”を体積におきかえて模式的に図示したものである。ただし、ここでの縦軸は生産量そのものではなく、魚群探知機で計測した魚群量指数 (School Counts, m^2) で、横田 (1953) の方式によって算出されたものである。小川・中原 (1972) によれば、漁場内で測定された魚群量指数は、その漁場からの漁獲量とまったく同一の傾向を示すことが知られているので、Fig. 8 の魚群量の変化は、近似的に生産量の変化と考えてもよいであろう。この図で単位礁当たり“生産量”をみると、たしかに礁の大きさが増大するにつれて増大しているが、対応する“単位生産量”(単位魚群量)を計算

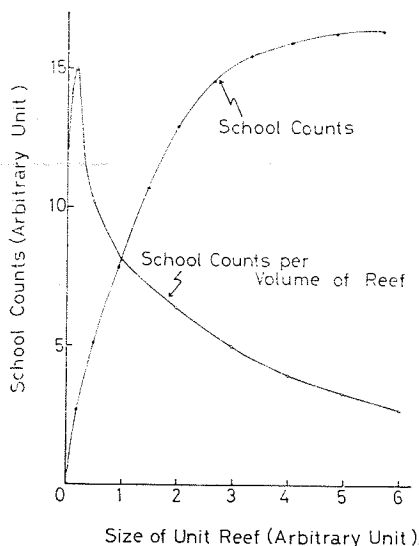


Fig. 8. Schematic representations of production curve and unit production curve based on measurements of school counts with acoustic method in coastal waters in the southwestern Japan Sea. Field observations suggest appropriateness of 'Model I'.

すると、そのピークは著しく早く出現しており、傾向的には前述のケース II の第一のパターンに一致していることがわかる。

ケース II の各モデルでは、単位生産量曲線のピークの値として $16 \text{ kg/m}^3/\text{year}$ をとったが、モデル I、モデル II では、単位礁の大ききの“最小”と“最大”のところで単位生産量の最小と最大を対応させているので、単位生産量の最大値は $16 \text{ kg/m}^3/\text{year}$ を越えることになる。もし、単位生産量の“最大値” $16 \text{ kg/m}^3/\text{year}$ の値が、単位礁当たり生産量が最大となるところから算出されたものであるなら、それは単位生産量の最大値としては過小評価であって、さらに大きい真の最大値は、もっと小さい規模の単位礁のところで出現していると考えなければならぬ。もしそうでなければ、単位礁当たり生産量曲線は、Fig. 4 のようなパターンを示すはずであり、決して Fig. 8 のようなパターンを示し得ない。

Fig. 8 のパターンから考えるとモデル I とモデル II の比較では、モデル I がより現実的であるように思われる。

5. 議 論

以上、人工魚礁の最適規模について検討したが、その結果の重要な点のひとつは、最適規模の決定には、礁の規模ごとの単位生産量を明らかにする必要がある、ということである。近年人工魚礁による漁場造成事業として、礁の大型化傾向が認められるが、例えば、Fig. 8 に示した単位礁当たり生産量曲線のみをもとに礁の大型化を考えるのは誤りで、魚礁は大きいほどよいという一般に信じられている考え方は必ずしも正しくはない。生産量は、たしかに礁の規模の増大とともにある一定限度までは増大するが、最大の生産量をあげるためには、単位生産量が最大となる規模の魚礁をより多数投入する方がはるかに有効である。“魚礁は大きい方がよい”とする思想には、この点についての誤解がまったくないであろうか？ 特に礁の規模を大きくしてもその効果範囲は一定限度以上増大せず、それもたかだか 400 m^3 程度でほぼ決まってしまうという事実を考え併せると、可能な限り多数の漁船を利用の対象にすべきであるという観点からしても、むやみに大きな礁を造ればよいということには決してならない。それ故、一定の事業量の中では単位生産量を最大にする規模での礁を単位礁として、複数個の単位礁を魚礁群として設置すべきであると判断される。“大型化”は個々の礁ではなく、魚礁群が全体として形成すべき漁場面積についてははかられるべきであろう。試

算のひとつの結果としてはひとつの単位礁の大きさは2,000m³前後であればよく、むやみに大きい礁はむしろ非効率的であると言える。

ところで、魚礁総合研究会(1976)に示されている“Fig. 7”の単位礁当り魚群量曲線は、日本海山口県沿岸海域で主として浮魚類について得られたものであって、現実には、魚種により、また海域によって単位生産量曲線一従ってまた単位礁当り生産量曲線も一は異なったパターンを示すであろう。それ故単位礁の最適規模の決定には、個々の海域ごとに具体的な単位生産量曲線を求めることが必要で、それが明らかになれば、単位生産量曲線がピークを示すところの礁の規模を単位礁の最適規模と考えればよい。このことは前述のケースⅡの三つのモデルから明らかである。

しかし、この点に関してまったく問題がないとは言いつても、少なくともそれは、基本的には過去の経験からの未来の値の外挿にすぎず、過去のパターンが未来においても常に成り立つとは限らないかも知れないことも考えておく必要がある。人工魚礁の設置は従来副漁具として漁獲量の増大に大きく寄与してきたことは事実であるとしても、一定の資源量を考えた場合、魚礁の設置がどこまでも生産量の増大につながるであろうとは、むしろ考えにくい。限られた沿岸漁場内で、魚礁の占める割合が大きくなればなるほど、そこでの単位生産量曲線もこれまでとはまったく異なったパターンのものとなるであろう。人工魚礁設置による漁場造成事業は、遠からず資源の問題を考えざるを得なくなるであろうと予想される。資源問題をも含めて、より正確な予測として人工礁の最適規模を決定するためには、過去に投入した魚礁や天然礁を通じて魚礁についてのより総合的な知識が必要であり、とりわけ比較研究が望まれる。魚礁に関する過去の報告についてみると、“効果”を強調する傾向が一般に認められるが、投入して効果のない魚礁も実際には少なからず存在するのではなからうか？効果のない魚礁について何故効果がないのかを明らかにすることも、少なくとも魚礁研究としては、何故効果があるのかを明らか

にするのと同じ重みで重要であると考えられる。

なお、魚礁の構造に関してしばしば言われる“高さ”について、ここでは特に考慮しなかった。従来行われて来たように1m四方ないしは1.5m四方のブロック魚礁を投入する仕方では、ある一定以上の事業量を投入することが“高さ”を確保することにも直接つながってきたと考えられ、そうした意味では“高さ”の要素も不可分にここでのいう規模の中に含まれていると言える。しかし“高さ”は魚礁に関して議論の多い問題であり、今後比較研究を通じて客観的に明らかにすべき問題のひとつであると思われる。

6. 要 約

人工魚礁の設置に際して直接問われる“ある一定の事業量の中で、どのようにそれを配分して魚礁を設置すべきか”の問題を検討した。魚礁の生産量はある一定の規模まで礁の規模の増大と共に増大するが、単位事業量当り生産量は礁当り生産量が最大となるはるか以前に最大値をとる。それ故、一定事業量で最大生産量を得るためには、単位生産量が最大となる規模の礁を単位礁として、複数の単位礁をもって魚礁群として配置すべきで、魚礁は大きければよい、というものではない。単位礁1個の妥当な規模としては2,000m³前後の事業量が試算結果からは考えられるが、魚種ごと、海域ごとに単位生産量曲線を得ることが必要である。

文 献

- 1) 小川良徳(1972) 沿岸増殖と人工魚礁について。第一回太平洋の水産増殖に関する日ソ合同シンポジウム論文集。
- 2) 魚礁総合研究会(1976) 人工魚礁の理論と実際、(1)および(2)。日本水産資源保護協会。
- 3) 横田滝雄(1953) 日向灘、豊後水道のイワシ類の研究。南海区水産研究所研究報告, No. 2。
- 4) 小川嘉彦・中原民男(1972) 沿岸漁場の特性に関する研究, 第5報 動物プランクトン魚類分布の日変動。水産海洋研究会報, No. 21。