

## 鋼製設置魚礁に関する安定及び流況測定模型実験

## Model tests on stability and ambient current of steel artificial reefs

関田 欣治\* 牧 純也\*\* 谷山 正樹\*\*\* 田附 正文\*\*\*

Kinji Sekita, Junya Maki, Masaki Taniyama, Masafumi Taduke

## Abstract

Since recently artificial reef have been installed offshore on the seabed having rough wave, the stability of them becomes of crucial importance. However they consists of not only tubular members but also plates and box shape members, the drag and inertia wave force coefficients for stability evaluation are uncertain so that we determined through model testing. Furthermore, this kind of the artificial reefs are required the function of fish-gathering and propagation by attaching the plates causing upwelling current and pilling up stones on their top. The paper also presets that observations and measurements of the current adjacent to the reef and possible wash out of the stones secured by fence in order to confirm the validity of such devices.

Keywords: artificial reef, wave force coefficients, upwelling current

## 1. はじめに

最近、海象の厳しい外洋に設置型魚礁が据え付けられる機会が多くなり、滑動、転倒等に対処するため、波力に対する安定性評価が重要となっている。しかしながら魚礁は円柱部材だけでなく板材や角柱からも構成され、質量力、抗力係数等の波力係数が不明確なので模型実験で調べることにした。さらに、魚礁には湧昇流発生板の取付け、頂部石積み等を施し、増殖・餌集効果向上など付加機能が求められている（高橋、1997）。その有効性の確認のため、流れによる流況の観察と流速測定および石積みの安定性の調査を実施した。

## 2. 実験概要

本実験は、東海大学海洋学部臨海実験場の2次元造波装置（長さ38m、幅1.0m、高さ0.6m）で行い、縮尺はフルード則を用い決めた。また本実験に用いた2種類の模型の構造図を、図-1、図-2に示す。

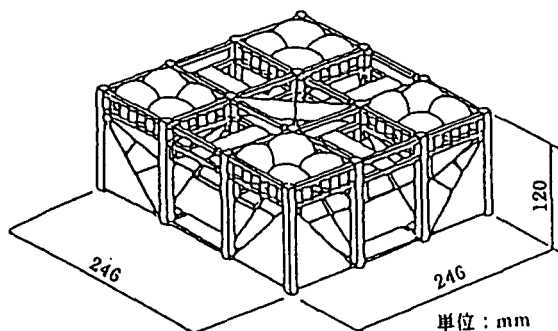


図-1 鋼製培養礁構造図  
(縮尺: 1/25)

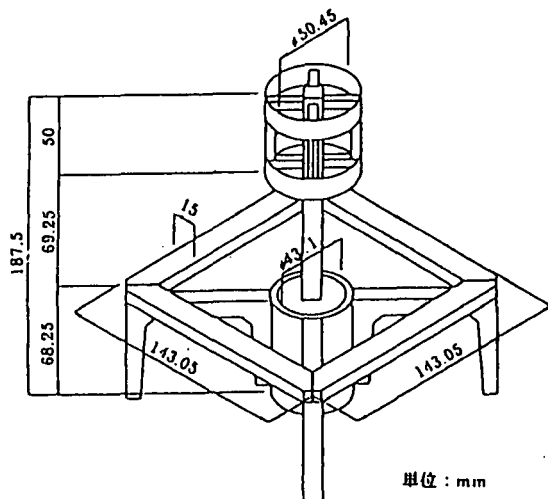


図-2 タワー式魚礁構造図  
(上部鋼製下部コンクリートの複合構造 縮尺: 1/40)

\* 正会員 東海大学海洋学部海洋土木工学科 (〒424-0902 清水市折戸 3-20-1)

\*\* 学生会員 東海大学大学院

\*\*\* (株) 日鉄建材工業 鉄構・海洋商品部

\*\*\* (株) 日鉄建材工業 鉄構・海洋商品部

### 3. 波力測定実験

#### 3. 1 実験方法

海底床内に2軸ロードセルを置きその上に模型を取り付け、規則波を起こし波力を測定した。(ただし、鉛直波力は水平波力の5%程度であったので測定は行わなかった。) 実験ケースについては、表-1に示す。比較のため、鋼製培養礁の板無し(湧昇板や整流板等のすべての板を取り外した骨組み)構造についても実験した。

また実験に先立ち、水深 20、34 cmにおいて模型のない水底だけの状態で波浪についての確性実験を行い、出力電圧と波高の関係を得た。ついで、実験全ケースに対し底板とロードセルに作用する波力を測定した。これは実験結果からロードセル上に設けた 40 cm×40 cmの底板に作用する波力の摩擦力成分を取り除き、模型のみに作用するネットの波力を得るためである。

表-1 波力測定実験の実験ケース

| 模型        | 波向    | 波高(cm) | 周期(s)       | 設置水深(cm) | 合計     |
|-----------|-------|--------|-------------|----------|--------|
| 鋼製培養礁 板無し | 0,45° | 6,8,10 | 1,1.6,2.4   | 20       | 18 ケース |
| 鋼製培養礁 板有り | 0,45° | 6,8,10 | 1,1.6,2.4   | 20,34    | 36 ケース |
| タワー式魚礁    | 0°    | 8,10   | 0.8,1.3,1.9 | 34       | 6 ケース  |

#### 3. 2 波力データの処理

波力計算は微小振幅波理論に基づき(1)式のモリソン式を用いて行い。波力係数は、下の2つの方法によって求めた。

$$F_x = \frac{1}{2} \frac{W_0}{g} C_d A |U| U + \frac{W_0}{g} C_m V \dot{U} \dots\dots (1)$$

ただし、 $W_0$  : 水の単位体積重量  $V$  : 物体の体積  $A$  : 流れの方向への投影面積

$C_d$  : 抗力係数  $C_m$  : 質量力係数  $U$  : 水粒子の速度  $\dot{U}$  : 水粒子の加速度  $g$  : 重力加速度である。

板材については板の体積をもとに  $C_m$  を算定すると、N.D.P.Banltrop (1991) によると 12 から 25 位になる。しかしながら沿岸漁場整備開発事業施設設計指針 (1992、以下設計指針と記す) では板材の幅を直径とする等価な円柱に置き換えて、体積を定義しており、以下設計指針通りの体積を用いることとした。

##### (1) 特定位相法 (従来法)

本法は、従来から一般的に行われてきた方法であり、特定の位相点でモリソン式により表される波力は、抗力だけとか質量力だけとかになるのでその位相点で  $C_d$ 、 $C_m$  求める方法である。なお、一波についてそれぞれ2つの係数が得られる。

##### (2) 統計的手法 (T.Sarpkaya 1968)

本法は、最小2乗法を利用したものであり、以下にその方法を示す。

図-3で示すように1周期  $T$  を  $N$  分割した時間における波力実験値と理論値の差を(2)式で表す。(  $N$  分割については、今回 40 又は 80 分割とした。)

$$\Delta F_{xi} = F_{xi} - C_d x \bar{F}_{dx} \left| \cos \left( \frac{2\pi i}{T} \right) \right| \cos \left( \frac{2\pi i}{T} \right) + C_m x \bar{F}_{mx} \sin \left( \frac{2\pi i}{T} \right) \dots\dots (2)$$

ただし、 $\Delta F_{xi}$  : 理論値と実験値の差、 $F_{xi}$  : 実験値である。

$\Delta F_{xi}$  の2乗の  $N$  個総和を最小とするような波力係数  $C_d x$ 、 $C_m x$  を(3)式の条件で求める。

$$\frac{\partial \sum (\Delta F_{xi})^2}{\partial C_d x} = 0, \frac{\partial \sum (\Delta F_{xi})^2}{\partial C_m x} = 0 \dots\dots (3)$$

以上のような方法で波力係数を算定し、それぞれ模型の幅を基準としたレイノルズ数で整理した。

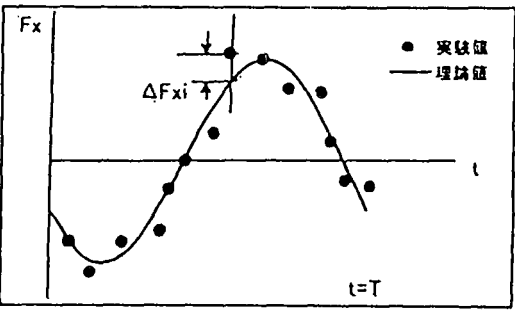


図-3 実験値と理論値との比較

### 3. 3 実験結果

#### (1) 統計的手法と特定位相法の比較

図-4のように特定位相法による場合では山側の波力係数 ( $\triangle$ 印) は大きく、谷側の波力係数 ( $\blacktriangle$ 印) は小さいものになっている。これは、微小振幅波が適用できないような、波の有限振幅性が現れているためである。すなわち、実験では山側の波力が大きく谷側が小さいためである。また統計的手法 ( $\circ$ 印) は、特定位相法の平均付近に分布することが分かる。なお図-4は、骨組み構造である板なし鋼製培養礁に関する  $C_m$  であるが、上記のことは  $C_d$  についても同様の傾向を示していた。以下、統計的手法の結果を述べる。

#### (2) 鋼製培養礁の $C_d$ 、 $C_m$

図-5と図-6は、鋼製培養礁の湧昇板等の板材がつけている状態で実験した結果である。図-5、図-6に代表的な  $45^\circ$  の場合を示し、以下に今回の実験の結果をまとめる。

- ①  $C_m$  は板のない状態に比べて小さく 1.0 以下であり、一方  $C_d$  は若干大きい。
- ②  $C_m$  はレイノルズ数に無関係に一様に分布しており、一方  $C_d$  はレイノルズ数が増えると急激に減少する。
- ③  $C_m$ 、 $C_d$  ともにばらつきが大きく変動係数でそれぞれ 0.28, 0.44 である。
- ④  $C_m$ 、 $C_d$  は水深の深い 34 cm のほうが 20 cm の場合より概ね大きい値をとっている。

#### (3) タワー式魚礁の $C_d$ 、 $C_m$

図-7は、水深 34 cm 時のタワー式魚礁の  $C_d$ 、 $C_m$  とレイノルズ数との関係の図である。以下にタワー式魚礁の実験結果を示す。

- ①  $C_m$  については鋼製培養礁に比べて小さめであった。
- ②  $C_m$ 、 $C_d$  ともにばらつきがあり、変動係数ではそれぞれ 0.22, 0.14 であった。これは鋼製培養礁より若干小さい。
- ③ レイノルズ数に対する関係として、 $C_d$  はレイノルズ数が増加すると減少する傾向がある。

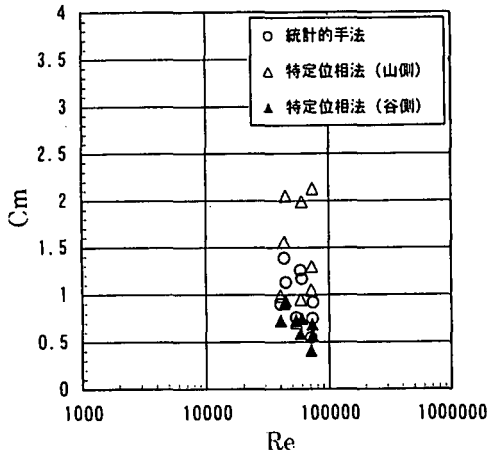


図-4 統計的手法と特定位相法の比較  
(板なし魚礁、水深 20cm、波向き  $0^\circ$ )

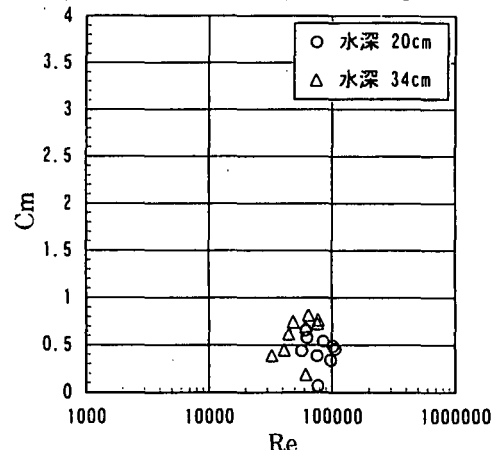


図-5 鋼製培養礁の  $C_m$  とレイノルズ数の関係  
(統計的手法による、波向き  $45^\circ$ )

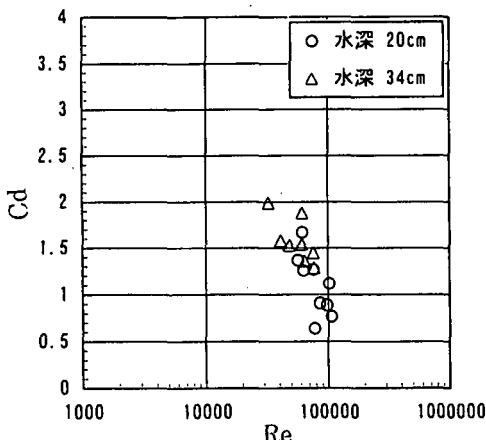


図-6 鋼製培養礁の  $C_d$  とレイノルズ数の関係  
(統計的手法、波向き  $45^\circ$ )

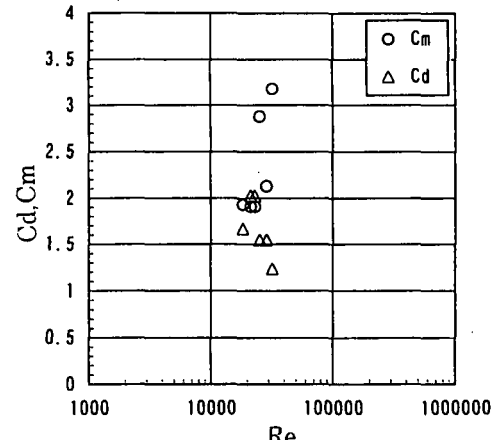


図-7 タワー式魚礁の  $C_d$ 、 $C_m$  とレイノルズ数との関係  
(統計的手法、波向き  $0^\circ$ )

### 3. 4 高レイノルズ数範囲へのCdの外挿

以上の結果を踏まえて、実験から得られた抗力係数 (Cd) を Schlichting (1968) が与えたレイノルズ数との関係線上にプロットしてみる。図-8に鋼製培養礁 (波向き 45°) のプロットした結果を示す。

図-8示されるように、Schlichting の円柱に関する Cd-Re 数の関係に示される点線を中心に実験結果は分布する。

したがって、次のような仮定のもとに魚礁に作用する波力係数を実物でのレイノルズ数  $3 \times 10^6 \sim 10^7$  台に外挿する。

- ① Cd のばらつきは実験のレイノルズ数範囲でも、 $3 \times 10^6 \sim 10^7$  台の範囲でも同じとする。
- ② Schlichting の滑らかな円柱に関する関係が、板および角柱等で構成される魚礁の場合でも成立する。

こうして  $3 \times 10^6 \sim 10^7$  台なるレイノルズ数を中心に Schlichting の関係点線の上に実験結果の分布を斜線で示す領域としてプロットした。

安全側になるように、その斜線の範囲の上限値を設計提案値として、抗力係数 (Cd) を表-2に示す。

あわせて Cm についても推奨値を示しているが、板材と角柱で構成されている鋼製培養礁については、沿岸漁場整備開発事業施設設計指針によれば、板材の Cm は 1.0~0.6、角柱の Cm は 2.19、

円柱は 2.0 を理論値として推奨しており、部材間の遮蔽効果等によりこれらより若干小さい実験値が得られている。全般に抗力が卓越し、水深 34cm の場合は質量力成分が小さいためばらつきも大きくなったので、水深 20cm における平均に標準偏差を加えたものを提案値とした。これは結果的に平均値となる。

表-2 波力設計の推奨値

| 魚礁             | 実験値      |           | 設計提案値 |     |
|----------------|----------|-----------|-------|-----|
|                | Cd*      | Cm        | Cd    | Cm  |
| 鋼製培養礁 (0°)     | 1.35~0.5 | 0.82~0.07 | 1.35  | 0.5 |
| 鋼製培養礁 (45°)    | 1.05~0.4 | 0.70~0.30 | 1.05  | 0.5 |
| 骨組み (板無し鋼製培養礁) | 0.95~0.2 | 1.71~0.55 | 0.95  | 1.1 |
| タワー式魚礁         | 1.0~0.7  | 3.18~1.91 | 1.0   | 2.3 |

(Cd\* : レイノルズ数による外挿値)

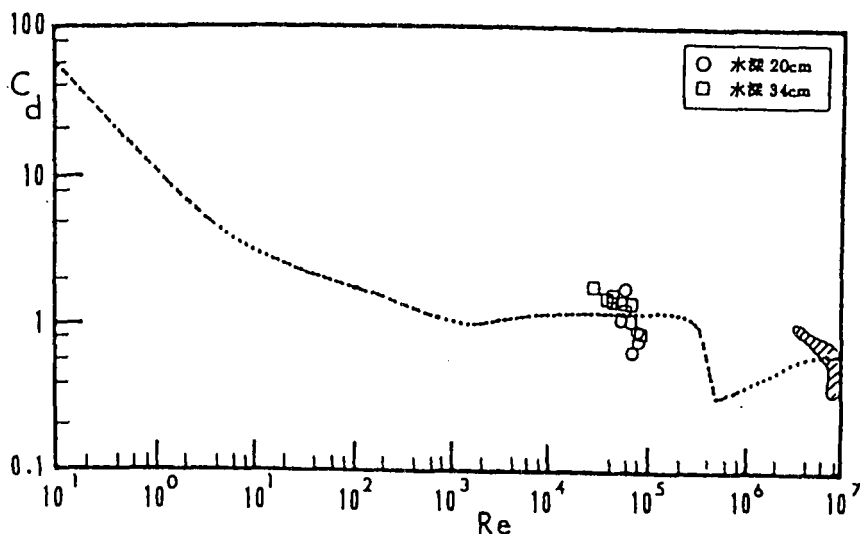


図-8 既往の Cd-Re 線上への鋼製培養礁 (波向き 45°) 実験値のプロット

## 4. 石積みの安定性実験

### 4. 1 実験方法

本実験では、鋼製培養礁の頂部に設けられた枠内に石材を図-1のように敷き、測定は波力が一番大きくなる波浪条件のもとで石の動きを目視観察 (VIDEO 撮影) によって行った。実験ケースは、水深 20, 30 cm、周期 1.0, 1.6, 2.4 s、波高 10 cm とした。

石の重量算定は「沿岸漁場整備開発事業施設設計指針」3.3 着定基質の所要重量算定式に基づいて (4) 式で行うことができる。

$$W = Cu^6 \dots\dots (4)$$

ここで、W：石の重量、u：水粒子の速度、係数Cは碎波帯近傍では囲いが有れば1.0、非碎波帯の場合0.04である。

安定性の程度を以下のような定義として評価するものとした。

- 0段階：全く動かない
- 1段階：振動する、石同士または部材に小刻みにぶつかる
- 2段階：石が浮き上がり始める
- 3段階：激しく浮き上がりながら振動するが枠からは流失しない

#### 4. 2 実験結果

鋼製培養礁頂部の枠内に締め固め等特別に行わず単純に石材を投入し、その後波浪を数波作用させた程度であったものの、すべての条件で判定0段階、すなわち全く動かなかった。次に、本実験で一番厳しい水粒子速度は、周期1秒で水深20cmの場合40cm/sである。これより厳しい条件での実験ができなかったため、これを限界と考え重量算定式を用いて、平均重量2.85gの石に対しCを求めてみると0.7であった。碎波限界には完全に達しない波高条件であったが、現規則の碎波帯における囲い有りの場合の上限値が確認できたと言える。

#### 5. 流況測定実験

##### 5. 1 実験方法

本実験は、鋼製培養礁に取り付けた湧昇板等の作用により湧昇流が発生するのか確認を行うものである。まず、2次元水槽において流れを起こし、設置した鋼製培養礁周辺の流況を染料（過マンガン酸カリ）を流すことにより目視観測、特に鉛直方向については写真とVIDEO撮影により、空間的広がり（広がり、高さ）を調べた。なお染料については、溶解し水とほぼ同じ比重になっている事を確認し、実験を進めた。実験ケースは、5cm/sと10cm/sの2水準とし、水深を20cm、34cmに設定した。模型は鋼製培養礁の湧昇板や整流板等をすべて取り除いた骨組みだけの実験も参考程度に行った。波向については、湧昇板に流れが直角に当たる0°方向の他、全体を45°ねじった向きについても調べた。

##### 5. 2 実験結果

図-9に鋼製培養礁の流況及び流速ベクトルを示す。これは水深20cm、流速10cm/sの条件で、図中の矢印は流速ベクトルである。流線は写真が見にくいのでトレースしたものである。

本図にもあるように湧昇板等がある場合は、明らかに過マンガン酸カリ溶液が拡散し、鉛直方向に渦列が生じていることから、湧昇流が発生していることが分かる。また上からみた水平面内の模型後流域には模型の幅でカルマン渦列が流れ直角方向に非対象に生じていることから、魚礁が流れを乱し、流況を変化させる効果があることも分かった。なお湧昇板がないと顕著な上昇流がみられなかった。波向については、45°向きの場合には湧昇板に直角に流れが当たらないので、0°の場合ほどの効果が認められない、よって方向性が現れないように湧昇板を配置すると効果的であると思われる。

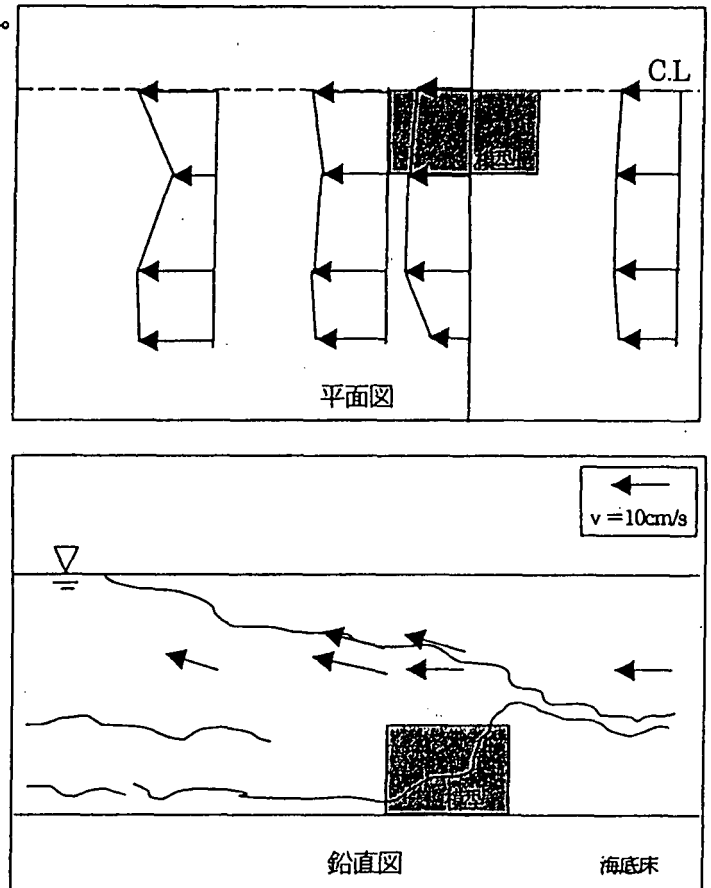


図-9 流況及び流速ベクトル

## 6. おわりに

本実験によって得られた主な結果を以下に示す。

- (1) 波力係数のうち質量力係数( $C_m$ )算出のための体積には板と角柱で構成される模型なので、現行設計法に則り板材を等価な円柱に置き換える等価体積により整理した。 $C_m$ 、抗力係数( $C_d$ )ともばらつきがあるがレイノルズ数との関係等従来のデータと同様であった。 $C_d$ についてはレイノルズ数に依存するので、設計範囲の高レイノルズ数への外挿を行い、 $C_m$ とともに設計推奨値を提案した。
- (2) 石積みの安定性については、実験範囲では板材に囲われているため、全く動かなかった。安定性基準値のパラメータ  $C$  の値が 0.7 より小さいことが確認できた。
- (3) 湧昇板の効果は流向によって異なるが、かなりの上昇流が発生することがわかった。したがって、湧昇板を全方向に配置すれば各方向に對しそれなりの効果が得られると予想される。

また本研究を進めるにあたり、愛知県知多事務所水産課長松井義征氏および農業水産部水産振興室主査石井克也氏には、魚礁全般に関する種々の技術上の貴重な示唆や懇切丁寧なご指導を賜りました。心より感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) American Petroleum Institute: Recommended Practice for planning, Designing and Constructing Fixed Offshore platforms, API RP2A-LRFD, Working Stress Design 12<sup>th</sup> ed., pp19, 1993
- 2) H. Schlichting: Boundary-layer Theory, McGraw-Hill Book Co., 6th., 1968
- 3) N.D.P. Banltop et al: Dynamic of fixed Marine Structures, Batterworth Heinemann, 3<sup>rd</sup> ed. pp311, 1991
- 4) 高橋伸明他: ヒラメ魚礁の開発、pp37-38、日本水産工学会 学術講演会論文集、1997
- 5) T. Sapkaya and M. Isaacson: Mechanics of Wave Forces on Offshore Structures, Van Nostrand Reinhold Company, pp56, pp98-pp99, 1968
- 6) 社団法人 全国沿岸漁業振興開発協会: 沿岸漁場整備開発事業施設設計指針 pp134-135, 1992