

着底式魚礁の作用流体力に関する研究

松 見 吉 晴*

1. ま え が き

魚礁設置後の作用流体力による転倒・滑動に関する魚礁の安定性は、現行の設計指針（日本水産資源保護協会，1984）では魚礁の自重と水平方向の最大流体力、並びに魚礁と海底との摩擦力による平衡関係式より検討されている。その際、作用流体力は設計計算上の簡便性からモリソン式により評価され、抗力係数および慣性力係数には魚礁を構成する部材の形状特性に対応した従来明らかにされている単一柱状物体の値がそのまま準用されている。しかし、魚礁の作用流体力には、魚礁部材間の干渉効果並びに群体魚礁の場合の魚礁相互の干渉効果の影響、さらには海底に設置されることから底面境界の影響も混在することが考えられる。従って、モリソン式を魚礁に適用するには、これら種々の影響が考慮された抗力係数および慣性力係数を明らかにしておく必要がある。

一方、鉛直方向の作用流体力は、現行の設計指針では全く考慮されていないが、魚礁上面近傍に形成される渦流に伴う圧力の低下部、さらには波浪場での鉛直方向の水粒子速度および加速度成分による流体力は、魚礁の自重を軽減させる鉛直上向きの流体力の発生原因ともなる。この鉛直方向の作用流体力が魚礁の自重に比べて無視できない大きさであるならば、魚礁の安定計算上考慮しなければならない外力となる。

本研究は、立方体型魚礁の2次元魚礁モデルを対象とした流体力測定実験より、まず水平方向の作用流体力の算定に対するモリソン式の適用性について再検討し、ついで魚礁の抗力係数および慣性力係数に及ぼす魚礁部材間の干渉効果および魚礁相互の干渉効果、さらには底面効果の影響について検討を加えるとともに、魚礁の安定計算に対して鉛直方向の作用流体力の導入の必要性を明らかにするものである。

2. 流体力測定の実験概要および解析方法

実験に使用した水槽は、長さ 27 m、幅 50 cm、高さ 70 cm の2次元造波水槽である。魚礁モデルは、立方体型魚礁を2次元化した1辺 $a=5\text{ cm}$ の角柱モデルで、

魚礁モデルを構成する4本の角柱部材の径を変化させることにより空隙率 $\gamma=0, 64, 84\%$ の3種類変化させた。

流体力測定は、波の進行方向に3個の単体魚礁を縦列に等間隔に配置した群体魚礁モデルの中央魚礁を対象に行った。流体力の測定には、水平および鉛直方向の流体力が同時に測定できる図-1に示す装置を用いた。なお、この装置の水中固有振動数は魚礁モデルを設置したときに $9.5\sim 12\text{ Hz}$ 程度で、異方向の力に対する測定誤差は測定方向の歪量の約 2% 以下であった。本実験は2次元流体力を対象としているため、流体力測定用の魚礁モデル（長さ 10 cm）の両端に同一形状の魚礁モデルを設置し流体場の2次元化を行った。実験条件は、周期 T が $1.2\sim 3.0$ 秒の範囲の9種類、波高 H が $3\sim 10\text{ cm}$ の範囲の7種類、水深は 40 cm と一定にした。群体魚礁の設置間隔 l_f は $l_f/a=1\sim 4$ の範囲で1刻みに変化させた。

抗力係数 C_D および慣性力係数 C_M の算定は、測定結果を 0.01 秒のサンプリング間隔で AD 変換し、中央魚礁の真上に設置した波高計の記録よりゼロアップクロス法で定義した1波分に対応する水平方向の流体力を取り出し、次式に示す最小自乗法を用いて求めた。

$$C_D = \frac{\sum (F_H F_I) \sum (F_I^2) - \sum (F_H F_I) \sum (F_D F_I)}{\sum (F_I^2) \sum (F_D^2) - \sum (F_D F_I)^2} \dots\dots\dots (1)$$

$$C_M = \frac{\sum (F_H F_I) \sum (F_D^2) - \sum (F_H F_I) \sum (F_D F_I)}{\sum (F_I^2) \sum (F_D^2) - \sum (F_D F_I)^2} \dots\dots\dots (2)$$

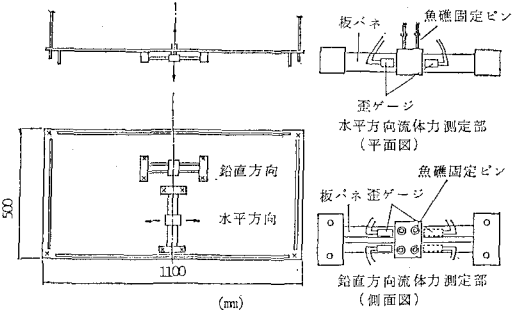


図-1 流体力測定装置

* 正会員 工博 鳥取大学助教授 工学部社会開発システム工学科

ここに, F_H は測定された水平方向の流体力, F_D , F_I はそれぞれモリソン式の抗力項および慣性力項の C_D , C_M を除いたもので次式のように表せる.

$$F_D = (1/2)\rho A u |u|$$

$$F_I = \rho V du/dt$$

ここに, ρ は流体の密度, A , V は流れに直角面の遮蔽面積および体積, u , du/dt は水粒子速度および加速度の水平方向成分であり, 本研究ではストークス波の3次近似式を適用した.

3. 水平方向の流体力特性

(1) 魚礁に対するモリソン式の適用性について

図-2 は, 空隙率 $\gamma=0, 64\%$ の単体魚礁モデルの場合の入射波形記録 η と水平方向の流体力 F_H の時間変化の1例を示したもので, 流体力に関する図の縦軸には魚礁モデルの実体積を水に置き換えた重量で無次元化した値をとっている. また, 図中実線は実験結果を, 破線はモリソン式より現行の設計指針に記載されている $C_D=2$, $C_M=2$ としたときの計算結果を表し, 黒丸は流況解析(松見ら, 1985)に基づく水平方向の流体力である. この図より, モリソン式による計算結果と実験結果の時間変化を比較すると, 両者の間には大きな時間位相のずれがあり, 現行の設計指針で採用されている C_D および C_M の値により魚礁に作用する水平方向の流体力の時間変化まで予測することは不可能であることがわかる. しかし, 魚礁の安定性を魚礁の自重と水平方向の最大流体力との静的な平衡関係に基づいて論じる限り, 流体力の1周期内に発生する最大値が重要となる. このこ

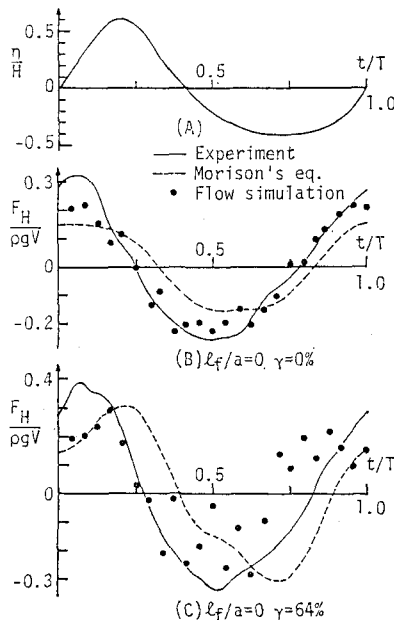


図-2 入射波形, 水平方向の流体力の時間変化

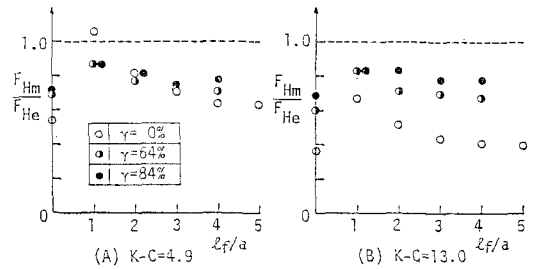


図-3 F_{Hm}/F_{He} の比較

とから, 以下に水平方向の最大流体力に関して実験結果とモリソン式による計算結果を比較し, 魚礁に対するモリソン式の適用性についてさらに検討を加える.

図-3 は, $C_D=2$, $C_M=2$ として計算した水平方向の作用流体力の最大値 F_{Hm} と, 実験結果の最大流体力 F_{He} との比 F_{Hm}/F_{He} を ℓ_f/a について示したもので, $K-C$ 数 $=UD/T$ の U は魚礁上面位置での最大流速, D は魚礁モデルの代表長 a をとっている. なお, F_{Hm} は ℓ_f/a の値に関係なく C_D , C_M を一定として算定した. この図より, 大部分の F_{Hm}/F_{He} は1より小さい値を示し, 現行の設計指針で採用されている $C_D=2$, $C_M=2$ では水平方向の最大流体力を過小に見積る恐れがあることがわかる. 群体魚礁の場合 ($\ell_f/a \geq 1$), F_{Hm}/F_{He} が ℓ_f/a の増加に伴って減少し単体魚礁 ($\ell_f/a=0$) の値に漸近する変化特性は, F_{Hm} が ℓ_f/a の変化に対して一定値であることから, F_{He} の ℓ_f/a による変化, すなわち作用流体力に及ぼす魚礁相互の干渉効果の影響を表している. また, γ によって F_{Hm}/F_{He} の値が異なるが, この差は魚礁部材間の干渉効果によるものである.

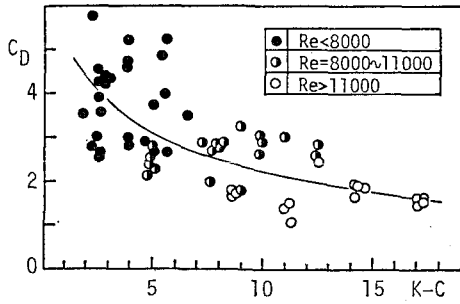
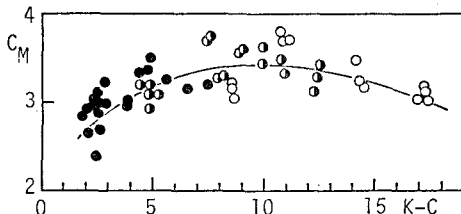
以上のことより, 魚礁に対するモリソン式の適用性については, 最大流体力の評価のみに着目するならば, 現行の設計指針のように C_D , C_M を一定値とすることには明らかに問題があるが, 流体力係数に対する魚礁相互の干渉効果, 部材間の干渉効果等の影響が的確に評価できれば適用できるものと推察できる.

(2) 魚礁の抗力係数および慣性力係数について

ここでは, 現在数多く用いられている魚礁が 60% 前後であることを考慮して $\gamma=64\%$ の結果を基に, 角型魚礁の流体力係数について述べる.

a) 単体魚礁の C_D および C_M について

図-4 および 5 は, 実験結果より式 (1), (2) を適用して得られた単体魚礁の抗力係数 C_D および慣性力係数 C_M を $K-C$ 数について示したものである. 図-4 中の Re は UD/ν (ν は動粘性係数) で定義されるレイノルズ数である. これらの図より, 図中実線で示す平均的な値は, 現行の設計指針で採用されている値 ($C_D=2$, $C_M=2$) より大きい値を示す. 図-5 の C_M の値は, 有


 図-4 角型単体魚礁の抗力係数 ($\gamma=64\%$)

 図-5 角型単体魚礁の慣性力係数 ($\gamma=64\%$)

孔と無孔の違いはあるが、従来明らかにされている無限流体場の角柱の慣性力係数 2.19 (土木学会編, 1985) と比較しても明らかに大きいことがわかる。本研究では、この原因が底面効果によるものと考え、慣性力係数に及ぼす底面効果の影響を検討するため、ポテンシャル論を適用して魚礁の慣性力係数の算定を行った。

すなわち、流れ場に魚礁が置かれた場合と、静水中で魚礁が底面に沿って流れ場の流速と同じ速度でもって移動する場合の魚礁周辺の流況は、ポテンシャル論に基づく限り等価であることから、まず魚礁の付加質量係数について魚礁を静水中で底面に沿って正弦運動させたときの流体場が受ける運動エネルギーの増分量と、魚礁の運動エネルギーが等しいことを利用して求める (松見,

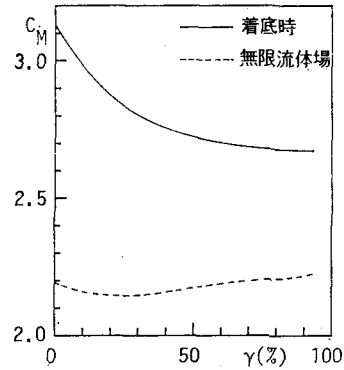
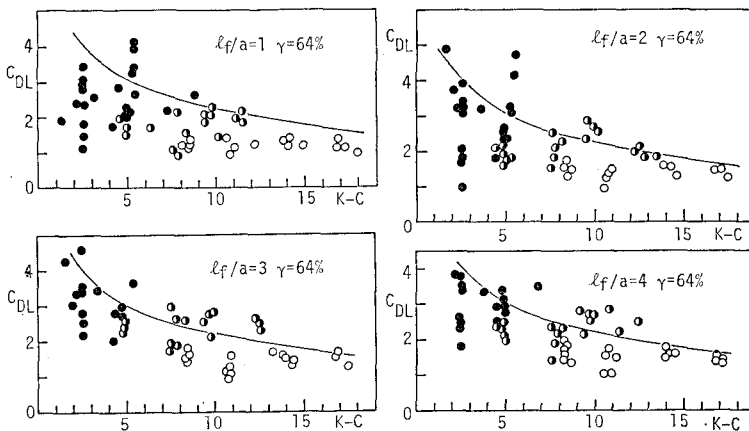


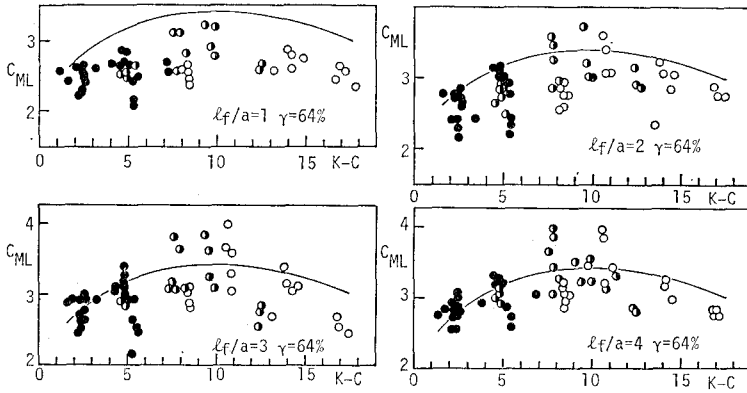
図-6 角型単体魚礁の慣性力係数に及ぼす底面効果

1990)。この付加質量係数に流体場の非定常運動に伴って生じる圧力勾配による流体力係数 1 を加え、単体魚礁の C_M を求めたのが 図-6 である。この図より明らかに、着底している魚礁の C_M は、同図に示す無限流体場の同一形状の魚礁の C_M より大きい値を示す。この両者の差が底面効果によるものである。また、 C_M の γ による変化をみると、 $\gamma=50\%$ 付近まで C_M は γ の増大に伴って急激に減少し、それ以降では一定値 2.67 に漸近することから、空隙率が約 50% 以上になると慣性力係数に及ぼす部材間の干渉効果はほぼ同程度であることがわかる。

b) 群体魚礁の C_{DL} および C_{ML} について

図-7 および 8 は、それぞれ群体魚礁の各 l_f/a における抗力係数 C_{DL} および慣性力係数 C_{ML} を $K-C$ 数について示したもので、図中実線は単体魚礁の C_D 、 C_M の平均値曲線を表し、シンボルは 図-4 と同じ内容である。図-7 より、 C_{DL} は単体魚礁の C_D より小さい値を示し、しかも l_f/a が小さいほど C_{DL} が C_D に比べて減少していることがわかる。この原因は、先の (1)


 図-7 角型群体魚礁の抗力係数 ($\gamma=64\%$)

図-8 角型群魚礁の慣性力係数 ($\gamma=64\%$)

で上述した魚礁相互の干渉効果によるものである。

一方、図-8 の C_{ML} は、 $l_f/a=1, 2$ において単体魚礁の C_M より小さい値を示し、 $l_f/a=3, 4$ では C_M とほぼ同程度の値をとる。この l_f/a による C_{ML} の変化は、中央魚礁および左右の隣接魚礁に挟まれた領域の流体と、それ以外の領域における流体との間の加速度運動の差によって生じる付加外力によるものと考えられる。すなわち、設置間隔の狭い群魚礁の場合、この加速度運動の差が大きいことから、中央魚礁両側に作用する付加外力が相互に影響し合って慣性力を低減させ、 C_{ML} が C_M に比べて減少したものと推測される。

図-9 は、先に述べた慣性力係数の算定法を用いて得られた C_{ML} の l_f/a による変化を示したものである。この図によると、各 γ の C_{ML} は魚礁相互の干渉効果により、図中点線で示している単体魚礁の C_M より小さい値を示す。また、 γ が小さいほど l_f/a による C_{ML} の変化が大きい。そして、図-8 に示した実験結果と同じ $\gamma=64\%$ の C_{ML} の l_f/a による変化特性をみると、 C_{ML} は l_f/a の減少とともに 2.67 から 2.25 まで減少し、 $l_f/a=3, 4$ では C_{ML} は単体魚礁の C_M の約 95% 程度の値をとる。このことは、図-8 の実験結果において $l_f/a=3, 4$ の C_{ML} が C_M と同程度の値を示したこと

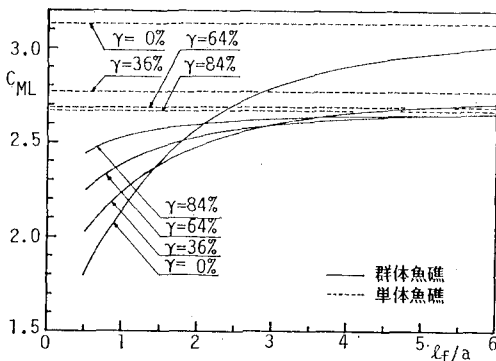


図-9 慣性力係数に及ぼす魚礁相互の干渉効果

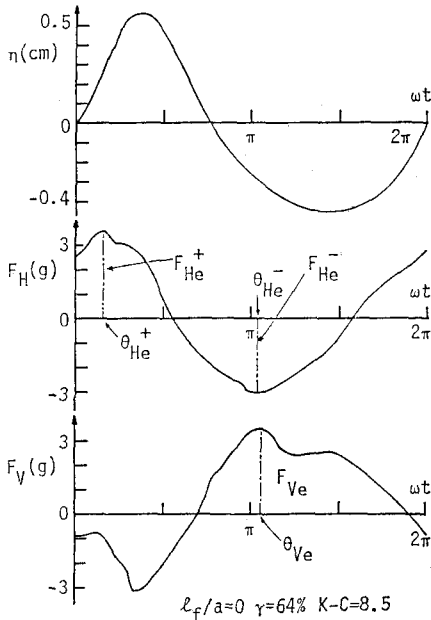
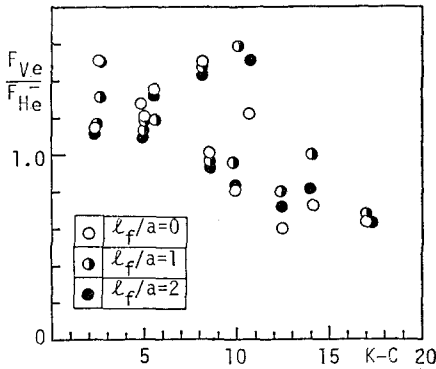
ほぼ一致し、計算結果の妥当性が確認できる。

以上検討してきた群魚礁の C_{ML} および C_M の l_f/a による変化特性より、魚礁の流体力係数について述べておく。魚礁の配置計画として設置間隔を狭くした場合、例えば、 $l_f/a=1$ 程度の流体力係数は $C_{DL}=2$ 、 $C_{ML}=2$ 程度まで減少し、また現行の設計計算において安全率を 1.2 以上の値にとっていることから、現行の設計指針の通りの流体力係数を用いても魚礁の安定維持は確保されるであろうが、設置間隔を広げた場合には、現行の流体力係数では危険側になる恐れが十分にある。従って、流体力に対する魚礁の安定性をモリソン式より判定する際には、魚礁の設置間隔に対応した流体力係数を用いる必要があると結論できる。そのための流体力係数の算定方法としては、慣性力係数は上述したポテンシャル論に基づいて決定できるが、抗力係数は流況解析に基づく方法の十分な適合性を得るまでに至っていないことから、現在の所、模型実験に頼らざるを得ない。

4. 安定設計における鉛直方向の流体力の必要性

鉛直上向きの最大流体力が魚礁の重量に比較して無視できる程度の大きさであれば、安定計算上この流体力を考慮する必要はないであろう。また、鉛直上向きの最大流体力と水平方向の最大流体力が同程度の大きさであったとしても、両者の最大値が発生する時間位相に大きなラグがあるならば、静的な力の平衡関係より安定性を検討する限り鉛直方向の流体力を敢えて取り挙げる必要もないであろう。ここでは、このような鉛直方向の流体力に関する本研究の基本的な考え方に基づき、流体力測定結果より鉛直上向きの最大流体力の大きさ、並びに鉛直および水平方向の流体力が最大となるときの時間位相の対応関係について調べ、魚礁の安定計算に鉛直方向の流体力を導入する必要性があるかを明らかにする。

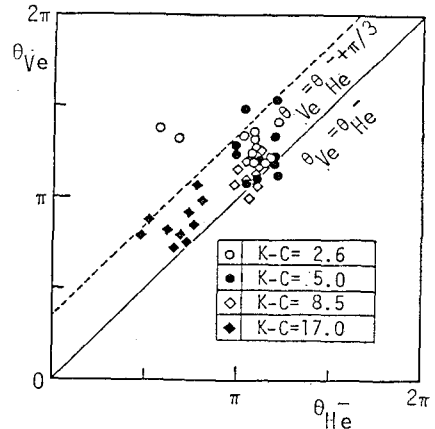
図-10 は、流体力測定実験より得られた水面変動 η 、水平方向の流体力 F_H 、鉛直方向の流体力 F_V の時間変

図-10 水面変動, 測定流体力 (F_H , F_V) の時間変化図-11 F_{Ve} と F_{He^-} の比較

化の1例を示したものである。なお、 F_V は鉛直上向きを正としている。この図より、 F_V の最大値 F_{Ve} と、 F_{He} の正負2箇所に見られる最大値 F_{He^+} 、 F_{He^-} はそれぞれ同程度の大きさを示し、しかも F_{Ve} と F_{He^-} の発生する時間位相がほぼ一致している。このケースは、魚礁の安定上最も危険性のある1例と言える。

図-11 は、 $\gamma=64\%$ の単体、群体魚礁の F_{Ve} と F_{He^-} を比較して示したものである。なお、鉛直上向きの流体力の大きさを調べるに当たっては、本来ならば魚礁の自重と比較すべきであるが、対象とする魚礁の材質密度によって自重が異なることから、ここでは便宜上 F_{He^-} と比較している。この図によると、 F_{Ve} は F_{He^-} の6割以上の値を示し、鉛直方向の流体力が水平方向の流体力に対して無視できない大きさであることがわかる。なお、 $l_f/a=3, 4$ の場合も同様の結果を得ている。

図-12 は、 F_{Ve} および F_{He^-} が発生する時間位相

図-12 θ_{Ve} と θ_{He^-} の対応関係

θ_{Ve} と θ_{He^-} の対応関係を示したものである。この図より θ_{Ve} と θ_{He^-} の間の時間位相差は、図中破線で示している $\pi/3$ ずらした直線より小さいことから、 F_{Ve} および F_{He^-} はそれぞれ接近した時間位相で発生する可能性が高いことがわかる。

以上述べた事柄より、魚礁に作用する鉛直方向の流体力は魚礁の安定計算上無視することのできない外力であると結論できる。しかしながら、本研究では鉛直方向の流体力の算定式に関する検討を行うまでに至っておらず、水平と鉛直方向の流体力の合成流体力に関する算定式の開発も含め、今後さらに検討して行く予定である。

5. あとがき

本研究では、魚礁設置後の作用流体力に関する安定設計に必要な魚礁の流体力係数、並びに鉛直方向の作用流体力の安定設計における必要性について検討してきた。本研究で得られた結果を以下に要約する。

(1) 角型魚礁に作用する水平方向の最大流体力の算定に対してモリソン式を適用するためには、流体力係数に魚礁相互の干渉効果、部材間の干渉効果、底面効果等が考慮された値を用いる必要がある。

(2) 角型魚礁の慣性力係数に及ぼす底面効果、部材間の干渉効果並びに群体魚礁の場合の魚礁相互の干渉効果の影響がポテンシャル論より明らかになった。

(3) 角型魚礁に作用する鉛直方向の流体力は、水平方向の流体力とほぼ同時位相で発生し、同程度の大きさであることが判明した。

参考文献

- 日本水産資源保護協会 (1984): 沿岸漁場整備開発事業構造物設計指針 (昭和59年度版), pp. 129-131.
- 土木学会編 (1985): 水理公式集, pp. 523.
- 松見吉晴・瀬山 明 (1985): 群体魚礁周辺の流況特性について, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 652-656.
- 松見吉晴 (1990): 海上投入法による魚礁沈設時の着底衝撃力について, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 719-723.