

# 段階的碎波モデルによる人工リーフ波高伝達率の特性解析

合 田 良 実\*

段階的碎波変形モデルは放物型方程式に基づいて多方向不規則波の変形を解析し、底面の摩擦減衰も考慮する。このモデルを人工リーフ周辺の波高分布の解析に適用し、室内実験および現地観測とほぼ一致する結果を得た。このモデルはリーフ側面の急傾斜面からの波の部分反射を考慮できないため、開口部と天端面との水深差による波の屈折を過大に表現する問題を抱えるけれども、人工リーフの波浪減殺効果を簡便に解析することができる。2次元リーフについては波高伝達率の算定図表を作成し、3次元リーフについては開口部を含むリーフ背後の平均波高伝達率の算定式を導いた。また、横に広いリーフよりも縦に長いリーフのほうが波をよく減殺することを示した。

## 1. はじめに

人工リーフは海岸保全の有力な施設として日本沿岸各地で建設されている。しかし、人工リーフによる波浪減殺効果については適切な計算手法が開発されておらず、波高伝達率の概略算定式が用いられているにすぎない。著者は先に、任意地形における多方向不規則波の碎波変形を計算する数値モデルを開発し、種々の地形条件についてその適用性を検証した。そこで、これまでに発表されている人工リーフの室内模型実験および現地観測事例について、この数値モデルで計算した波高分布と比較し、モデルの適用性を確認する。

さらに、この数値モデルを用いて2次元および3次元人工リーフの波高伝達率を計算し、その算定図表をとりまとめるものである。

## 2. 段階的碎波モデルの概要

この数値モデルは平口・丸山 (1986) が開発した放物型方程式を基本とし、方向スペクトルの成分波のエネルギー重ね合わせを行う。波の減衰は速度ポテンシャルの複素振幅に比例するとして扱う。本モデルでは、碎波および底面摩擦による減衰を考慮し、減衰の比例係数  $f_D$  を式 (1) のように両者の和として表す。

$$f_D = f_{D0} + f_{Dr} \dots\dots\dots (1)$$

碎波減衰は波振幅が水深に対するある比率 (碎波指標) を超えたときに生じると考えるが、碎波指標の値は波群中の波高レベルによって段階的に変化させ、波高の小さい波は低い指標値で碎波するとみなす。また、波の進行方向に水深が減少する水域と増加する水域 (バ型地形のトラフ部分など) とでは、段階的碎波指標の関数の形状を若干変更している。

底面摩擦による減衰は、一般に用いられる乱流境界層内のエネルギー逸散率に基づき、次のように導いた。

$$f_{Dr} = \frac{4}{3\pi} f_w \frac{a}{h^2} \frac{k^2 h^2}{\sinh kh (\sinh 2kh + 2kh)} \dots\dots (2)$$

ここに  $f_w$  は摩擦係数、 $a$  は波振幅、 $h$  は水深、 $k$  は波数である。

数値モデルの詳細については合田 (2002, 2003a, 2003b) を参照していただきたい。

## 3. 室内模型実験と数値計算結果との比較

人工リーフの水理模型実験はいろいろ行われており、合田・高木 (1997)、合田 (2000) も縦型・横型人工リーフ周辺の波高分布を測定している。このうち横型リーフ背後の沿岸方向分布の実験値と計算値の比較は、合田 (2003) が提示している。こうした沿岸方向の波高平均値について、縦型リーフも含めた比較を図-1 に示す。

図の横軸は実験値、縦軸は計算値であり、黒三角は横型リーフ、黒丸は縦型リーフである。計算値は実験値の±20%内に入っており、数値モデルの妥当性を例証している。

また、野口ほか (2002) は複数基の人工リーフ群周りの波高分布を測定している。そのうちの1ケース (天端上で激しい碎波が発生) について、数値モデルによる等波高比線図を図-2 に示す。模型リーフは天端幅  $B=1.0$

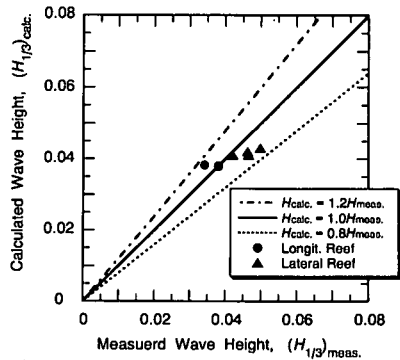


図-1 人工リーフ背後における沿岸方向の平均有義波高の計算値と実験値の比較

\* 名誉会員 工博 横浜国立大学名誉教授 (株)エコー顧問

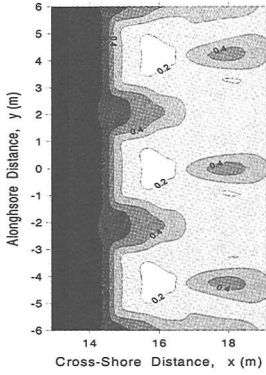


図-2 野口ほか (2002) の実験ケース No. 42 に対して数値モデルで求めた等波高比線分布

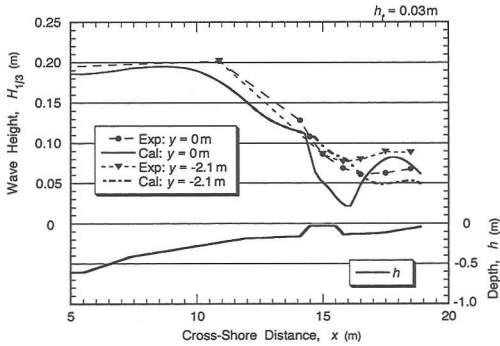


図-3 リーフ中心軸線および開口部中心軸線に沿う波高分布の実験値と計算値の比較 (ケース No. 42)

m, 堤長  $A=3.0$  m, 開口幅  $S=1.20$  m であり, 3 基が造波板から  $x=14.5\sim 15.5$  m の範囲に設置されている。天端水深は  $h_t=0.03$  m である。リーフ天端の直背後で計算による波高比が 0.2 以下となり, さらに岸側で波の集中域がある。

この 3 基のリーフの中央および開口部の中央を通る縦断線に沿う波高分布について, 実験値と計算値を比較したのが図-3 である。計算値は実験値と比べてリーフの直背後で過小, その岸側で過大となっており, 開口部では全般的に過小である。これは, 本モデルの基本である放物型方程式がリーフ側面の急勾配斜面の境界条件 (斜面への法線速度ゼロ) を取り入れていないために, 実現象での波の部分反射を考慮できないことによる。この結果, 開口部と天端上との水深差による屈折効果が過大に表現されたと考えられる。

しかし, 開口部およびリーフ天端背後の波高測定各 3 地点, 合計 6 点で波高を平均し, これをリーフ背後の水域全体の波高の代表値とみなして, 国土技術政策総合研究所海岸研究室からご提供いただいた実験データのうちの 9 ケースについて計算波高と実験波高を比較した。結

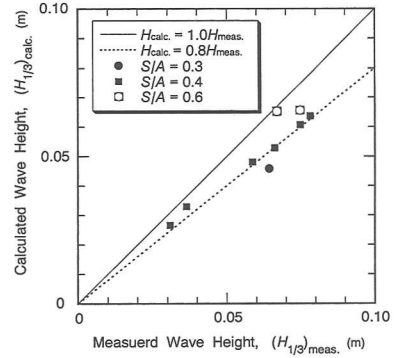


図-4 人工リーフの背後水域における平均波高の比較

果は図-4 のように計算値が実験値の 0.73~0.98 倍の範囲に入っており, 水域全体の平均波高については本数値モデルが適用できることを示している。

#### 4. 現地観測値に対する数値モデルの適合性

人工リーフは全国各地に建設されているものの, 波高制御効果について観測した事例は多くない。宇多ほか (1990) は糸魚川海岸の堤長 930 m, 天端幅 40 m, 天端高 TP-4.04 m の人工リーフの前面と背面で観測した波高の比較を報告している。観測値はある幅で広がっている, 上下限と見られる線を図-5 に破線と点線で記入した。また, LWL=TP±0.0 m と HWL=TP+0.46 m の潮位について各波高レベルで周期を設定して数値モデルで計算した結果も示している。

摩擦係数は 0.1, 0.2, 0.3 の値で試算し, 結果として中間値である  $f_w=0.15$  を使用した。糸魚川海岸については本数値モデルが良く適合している。

他の観測事例として, 大中・吉沢 (1992) は湯河原海岸の堤長 170 m, 天端高 TP-1.84 m の人工リーフに関する観測結果を報告している。このリーフは当初の天端幅が 32 m であり, 後に 70 m に拡幅された。リーフは埋立護岸の前面にあるため, 大中・吉沢は護岸からの反射

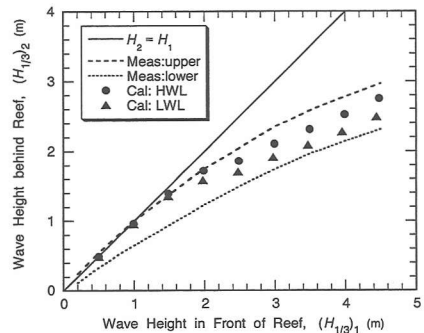


図-5 糸魚川海岸人工リーフの沖側波高と岸側波高の関係

波の影響を除去した伝達波高を推定し、前面波高に対する波高伝達率を相対天端水深に対してプロットしている。それらのデータの上下限を図-6に破線と点線で表示した。図中の記号は摩擦係数を  $f_w=0.15$  とし、潮位を  $LWL=TP-0.84\text{ m}$ ,  $MWL=TP\pm 0.0\text{ m}$ ,  $HWL=TP+0.64\text{ m}$  の3通りに設定し、入射波を  $H_0=0.6\sim 3.0\text{ m}$ ,  $T_p=7\sim 12\text{ s}$  として計算したもので、上が天端幅  $32\text{ m}$ , 下が  $70\text{ m}$  の結果である。

このケースでは、波高が小さくて相対天端水深  $h_t/H_0$  が約  $2.0$  以上の範囲で、計算による波高比が  $1.0$  を超えている。これは過大な屈折効果によるもので、2次元リーフとして計算すれば波高比が  $1.0$  以下になる。また、沖側への波の反射を無視していることも一因である。一方、波高が大きくて相対天端水深が約  $0.5$  以下の範囲では、計算値が観測値の下限よりも低くなる。これは屈折効果によって天端上の波高が増幅され、碎波による減衰効果を実際よりも強く受けたためではないかと思われる。ただし、摩擦係数の値が過大であった可能性も考えられる。なお、合田 (2003) では天端幅  $B=70\text{ m}$  のケースについて摩擦係数を  $1.0$  とし、波高の小さい範囲で観測値と適合する試算を示したけれども、摩擦係数が過大であって相対天端水深の小さい範囲で観測値を大きく下回った。

このように湯河原海岸については観測結果との適合性がよいとはいえない。しかし、相対天端高に応じて波高比が変化する状況は再現しており、糸魚川海岸について

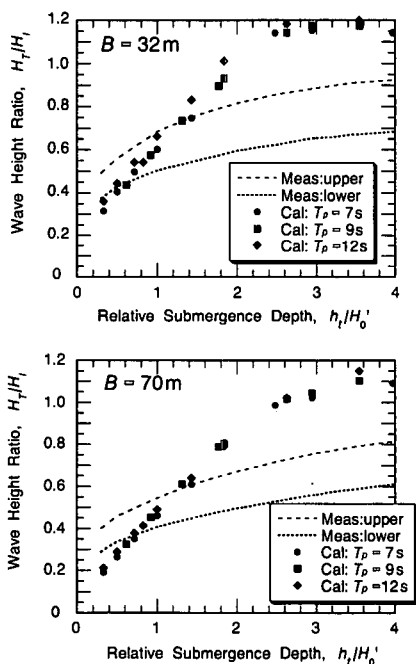


図-6 湯河原海岸人工リーフの波高比と相対天端水深の関係

の良好な適合性と併せて勘案すると、本数値モデルは実際の人工リーフに十分に適用できると判断される。

## 5. 2次元人工リーフの波高伝達率

ここで、2次元断面の人工リーフの波高伝達率の算定図表を作成してみる。既発表の図表としては、田中(1976)が波高伝達率を換算沖波波高  $H_0$  を用いて定義し、相対天端幅  $B/L_0$  をパラメータとして相対天端高さ  $h_c/H_0$  に対して波高伝達率  $K_T$  をプロットした。一方、 $h_c/H_0$  をパラメータとして  $K_T$  を  $B/L_0$  に対してプロットした図表もある。

図-7は後者の方式による波高伝達率の算定結果である。計算は水深  $h=6.0\text{ m}$ , 天端水深  $h_t=1.5\text{ m}$  のリーフ(法面勾配  $1:2$ )を対象とし、単方向不規則波を用いた。この表示法では、相対水深  $h/L_0$ , すなわち波周期の影響を受けるため、一般的な算定図表としては使いにくい。そこで主パラメータを相対天端高さ  $h_c/H_0$ , 副パラメータを水深に対する相対天端幅  $B/h$  に変更して表示

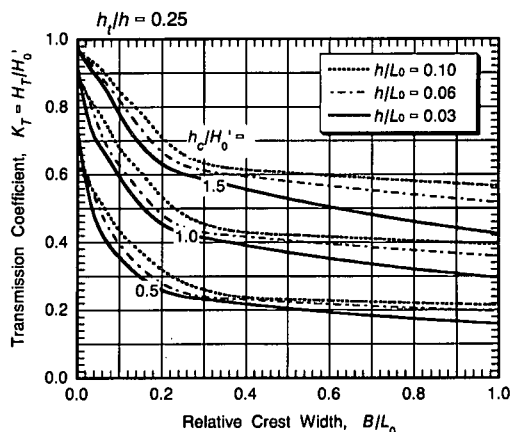


図-7 波高伝達率と相対天端幅  $B/L_0$  の関係

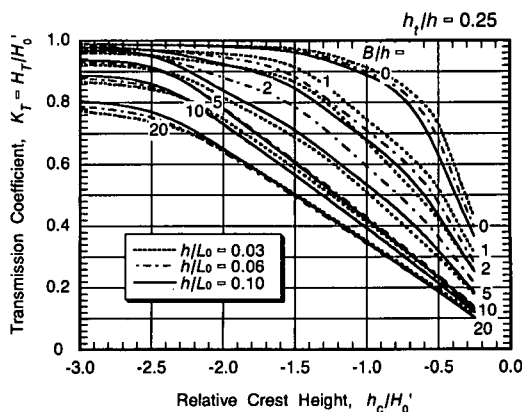


図-8 波高伝達率と相対天端高さ  $h_c/H_0$  の関係

したのが図-8である。この表示法を用いれば波周期の影響が少なく、人工リーフの波高伝達率図表として使いやすくなる。

人工リーフの波浪減殺機能は、天端上の碎波と摩擦抵抗の両者に依存する。後者は式(2)で示されるように、天端上の水深が小さいほど強まる。図-9はその例示であり、設置水深は  $h=6.0$  m のまま、天端水深を  $h_t=0.6$  m, 1.5 m, 2.4 m に変えて波高伝達率を算定した結果である。

このように波高伝達率の値は  $h_t/H'_0$ ,  $B/h$ ,  $h/L_0$ ,  $h_t/h$  のパラメータによって変化し、さらに摩擦係数  $f_w$  の影響も受ける。したがって、人工リーフの計画では潮位の変化範囲に対し、伝達波高の絶対値の算定図表を用意する必要がある。図-10 はそうした一例であり、設置水深 7.5 m, 堤高 6.0 m, 天端水深 1.5 m, 法面勾配 1:3 の人工リーフが対象である。摩擦係数は 0.15 とした。入射波高 1 m 以下ではほとんど減衰しないが、波高の増大とともにリーフによる波浪減殺効果が発揮される。天端を拡幅する効果は波高が大きいくほど効いてくる。ただし、湯河原海岸の観測結果を参照すると、本モデルでは考慮して

いないリーフ内部への浸透流によるエネルギー減衰が働き、波高があまり大きくなくても天端拡幅の効果が発揮される可能性はある。

### 6. 3次元人工リーフの波高伝達率

人工リーフは堤長が有限な3次元形状として設置されるので、開口部からの波の回り込みによってリーフ背後の波高が増大する。こうした波高の増大を評価するため、開口部を含めた背後水域全体へのエネルギー伝播を考えると、平均波高伝達率  $(K_T)_{\text{mean}}$  を次式で推定できる。

$$(K_T)_{\text{mean}} = \sqrt{\frac{S+A(K_T)_{2D}^2}{S+A}} = \sqrt{1 - \frac{1-(K_T)_{2D}^2}{1+S/A}} \quad \dots (3)$$

ここに  $(K_T)_{2D}$  は2次元断面の波高伝達率である。

この推定式の妥当性を検討するため、天端幅  $B=0$  m, 前後の法面勾配 1:3, 堤長  $A=96$  m の人工リーフ3基を開口幅を変えて設置したときの計算を行った。横法面の勾配は、過大な屈折効果をいくらかでも低減させるために鉛直に近い 1:0.1 に設定した。入射波は  $H'_0=2.0$  m,  $T_{1/3}=8.01$  s,  $S_{\text{max}}=25$  の多方向不規則波である。リーフ天端高水深は  $h_t=0.5$  m とし、2次元計算による波高伝達率は 0.303 であった。数値計算の結果(平滑化した破線)を式(3)の推定式と比較したのが図-11 である。なお平均波高伝達率は、中央のリーフの両側の開口部の中心を結ぶ範囲で波高をエネルギー平均した値で定義した。

数値計算結果は推定値よりもやや低めである。これは式の誘導に当たって開口部からの波の屈折・回折の現象を考慮していないためである。天端幅が広くなるにつれて、式(3)との乖離は拡大する。すなわち、この式は3次元リーフの平均波高伝達率の上限値を与える。

次に、リーフの平面形状の影響を調べた一例が図-12 である。天端幅を  $B=32$  m, 開口比を  $S/A=1.0$  に固定し、堤長が  $A=96$  m の横型リーフと、 $A=16$  m の縦型リーフについて、等波高比線の分布を比較した。なお、

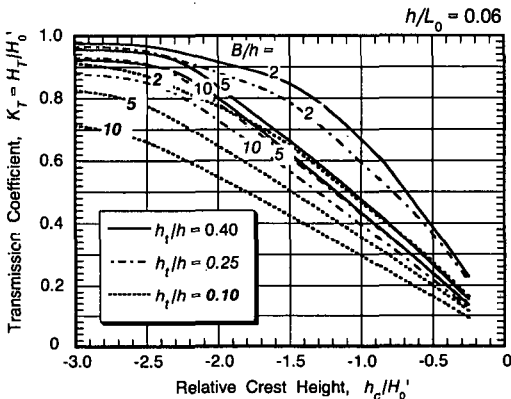


図-9 波高伝達率に及ぼすリーフの相対高さの影響

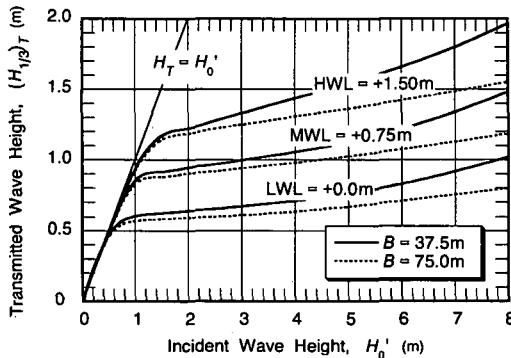


図-10 伝達波高の絶対値の算定図表の一例

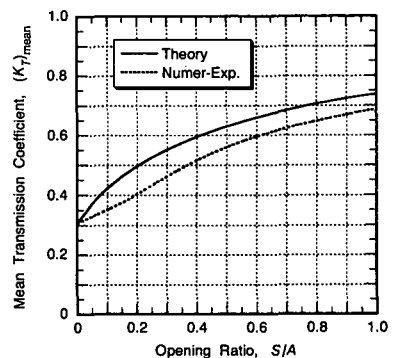


図-11 平均波高伝達率と人工リーフ開口比の関係

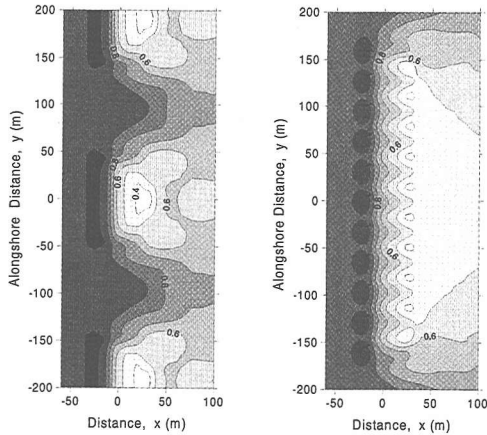


図-12 堤長 96 m と 16 m のリーフの比較 ( $S/A=1.0$ ,  $L_0=100$  m)

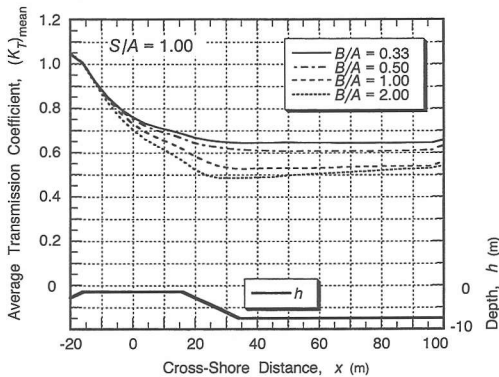


図-13 平均波高伝達率の距離による変化 ( $h_c/H_0=0.75$ )

リーフは天端面を  $x=-16\sim 16$  m の範囲に揃えて設置した。

図-12 では、堤長が 96 m のときはリーフ背後と開口部の岸側とで波高比に大きな差があるのに対し、堤長 16 m のときは 11 基のリーフが一体となって背後水域を遮蔽している。そこで、外側のリーフの外縁を結ぶ範囲で波高のエネルギー平均値を求め、平均波高伝達率の場所的变化を調べた結果が図-13 である。図中の曲線は上から順に堤長 96 m, 64 m, 32 m, 16 m のケースであり、リーフが縦長になるにつれて波高伝達率が低下する。

この平均波高伝達率の最小値に着目し、開口比が  $S/A=0.5$  のケースも併せてリーフの縦横比  $B/A$  に対して表示したのが図-14 である。なお  $B/A=0$  の値は、 $(K_T)_{2D}$  の数値計算値から式 (3) で推定した。図から明

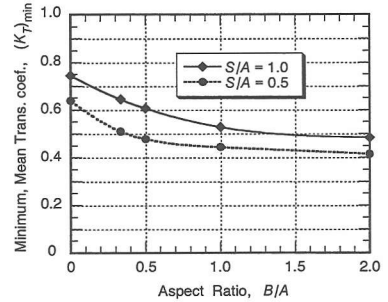


図-14 最小波高伝達率に及ぼすリーフの縦横比の影響

らかなように、リーフを縦長に設計するほうが波高伝達率が低くなる。

## 7. む す び

以上に述べたように、ここに提示した不規則波浪変形計算手法は、人工リーフのような複雑な形状に対しても波高分布をほぼ適切に算定できる。リーフ側面の急傾斜面からの波の部分反射を考慮できない難点があるけれども、利用範囲は広いと考えられる。今後の人工リーフの計画・設計へ活用していただけるならば幸いである。

## 参 考 文 献

- 宇多高明・森下 襄・早津誠一 (1990): 糸魚川海岸における人工リーフ周りの波、流れ、漂砂の現地観測, 海工論文集, 第 37 巻, pp. 489-493.
- 大中 晋・吉沢央明 (1992): 人工リーフの天端幅の違いによる波浪低減効果および反射率に関する現地調査, 海工論文集, 第 39 巻, pp. 641-645.
- 合田良実 (2000): 屈折効果を利用した縦型人工リーフシステムの特性について, 土木学会論文集, No. 663/II-53, pp. 55-67.
- 合田良実 (2002): 段階的砕波係数を導入した 3 次元地形場の不規則波浪変形計算, 海洋開発論文集, 第 18 巻, pp. 197-202.
- 合田良実 (2003a): 段階的砕波係数を用いた不規則波浪変形計算モデルの改良, 海洋開発論文集, 第 19 巻, pp. 141-146.
- 合田良実 (2003b): 不規則波浪変形計算における段階的砕波係数の導入について (Ver. 4), ECOH/YG 技術論文 No. 2, 18 p. (<http://www.ecoh.co.jp/> どんな会社/顧問からダウンロード可能).
- 合田良実・高木泰士 (1997): 人工リーフと縦型傾斜式離岸堤の水利特性の比較について, 海洋開発論文集, 第 13 巻, pp. 31-36.
- 田中則男 (1976): 天端幅の広い潜堤の波浪減殺および砂浜安定効果について, 第 23 回海講論文集, pp. 152-157.
- 野口賢二・鳥居謙一・人見 寿 (2002): 人工リーフの平面性能評価に関する研究, 海工論文集, 第 49 巻, pp. 821-825.
- 平口博丸・丸山康樹 (1986): 斜め入射波に対する放物型方程式の適用性の拡張, 第 33 回海講論文集, pp. 114-118.