

不規則波に対する垂下板式反射波低減工の 波浪制御効果について

PERFORMANCE OF A VERTICAL-BARRIER TYPE DISSIPATER OF REFLECTED WAVES FROM VERTICAL BREAKWATERS

中村孝幸¹・神野充輝²・西川嘉明³・小野塚 孝³

Takayuki NAKAMURA, Mitsuteru JINNO, Yoshiaki NISHIKAWA and Takashi ONODUKA

¹正会員 工博 愛媛大学助教授 工学部環境建設工学科 (〒790-8577 松山市文京町3)

²学生会員 愛媛大学大学院 土木海洋工学科 (〒790-8577 松山市文京町3)

³正会員 (株) 三柱 (〒135-0034 東京都江東区永代1丁目3番4号(門前仲町MFビル2・3階))

A new type of dissipater of reflected waves from vertical walls was proposed. The section of this dissipater is very simple, which comprises a vertical barrier on the front and a vertical wall on the back. Performance of this dissipater was examined experimentally and theoretically for both regular and irregular waves. The dissipation mechanism of reflected waves is to enhance the vortex flow under the front curtain wall by the piston-mode wave resonance in the water chamber. Major advantage of this new dissipater is to be able to decrease the breadth of the water chamber, say 1/10 of a wave length. Therefore, it is possible to dissipate much longer waves by the new dissipater having the same size as the conventional perforated type. Another advantage may be easy berthing of ships to the dissipater because of a flat front wall without any holes and slits.

Key Words: Low reflection wave, vertical-barrier type dissipater, piston-mode resonance, enhancement of vortex flow

1. 序論

既に著者ら¹⁾は、図-1, 2に示すような垂下板で水面近傍のみを遮断した遊水室をもつ非常に簡単な工夫により、反射波を低減する工法を提案した。そして、その効果を規則波に対して検討すると共に、反射波の低減機構についても明らかにしてきた。この反射波低減工は、従来のスリット式ケーソンや直立式ブロック消波護岸など²⁾に代わるもので、構造形式が単純であり、しかも反射波の低減に最も有効な遊水室幅は波長の約1/10程度に小さくできることから建設コストの削減が可能である。また、前面壁にスリット孔や円孔および突起がないため、港湾域に設けるには船の接岸に適している構造形式と考えられる。

本研究では、図-3に示すように、垂下板で直立堤前面水域の水面近傍のみを遮蔽することによって、①遊水室内でピストンモードの波浪共振の発生、②垂下板前後の水位変動の位相差の発生、③垂下板下端部よりの大規模渦の形成、その結果として反射波エネルギーの逸散という機構を利用している。

しかしながら、このような低減工では、非線形性の強

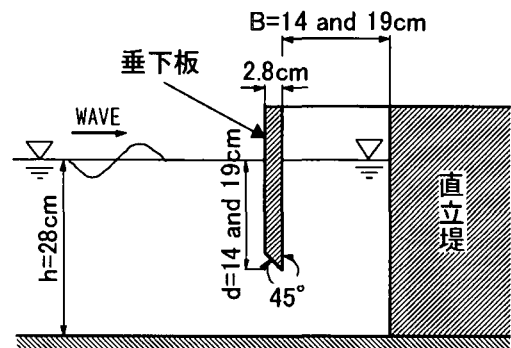


図-1 垂下板式の反射波低減工の模型

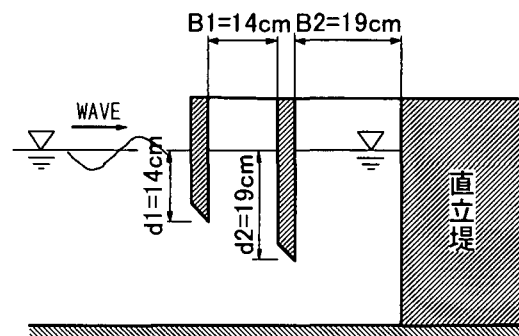


図-2 二重式構造の模型

い渦流れの発生現象を伴うことから、現地で見られるような不規則波に対する波浪制御効果について確認する必要がある。

ここでは、主に不規則波に対する垂下板式低減工の波浪制御効果を規則波に対する結果と比較しながら明らかにする。

2. 実験装置および実験方法

(1) 実験水槽

実験は、愛媛大学工学部環境建設工学科の長さ25m、幅1m、高さ1.25mの2次元水槽を用いて行った。この水槽の一端には、反射波吸収方式のピストン型造波装置が設置されている。そして、後述する模型堤体は、この水槽内の他端部より約5mの位置に設けた。

(2) 実験模型

遊水室幅Bおよび垂下板の吃水深dは各種の組み合わせが可能となる。ここでは、この組み合わせとして、ケース1の両者が小さな場合（B=d=14cm）と、ケース2の両者が比較的大きな場合（B=d=19cm）の二種類の模型を用いた。次に、反射波の低減に有効な周期帯を拡大する目的から、図-2に示すような垂下板を二枚にした二重の遊水室をもつ低減工も用いた。このとき、前後の遊水室幅および垂下板の吃水深の組み合わせは、図中に見られるように相違なるものに設定しており、前後の遊水室幅と吃水深をそれぞれ単独に有する単一垂下板の場合との比較が行えるようにした。なお、ここで想定した模型の縮尺は、現地の約1/18程度である。

(3) 実験条件

実験に用いた水深hは28cmと一定にし、不規則波に対する効果について検討した。各模型実験に用いた不規則波の条件として有義波高および有義波周期を、一括して表-1に示す。また、表中には比較のために行った規則波実験で用いた波条件も併せて示してある。

3. 反射波の低減機構

ここでは、不規則波に対する垂下板式反射波低減工の波浪制御効果を検討する前に、規則波に対するケース2（B=d=19cm）の模型堤体を用いたときの実験結果および算定結果から、反射波の低減機構について紹介する。

本研究で採用した垂下板式の反射波低減工では、垂下板下端部で形成される渦流れの影響が重要であると考えられる。写真-1は、反射率が極小となる条件下での逆流時における渦最大発達時の流況を示す。写真に見られるように、垂下板の反射側および遊水室側とも

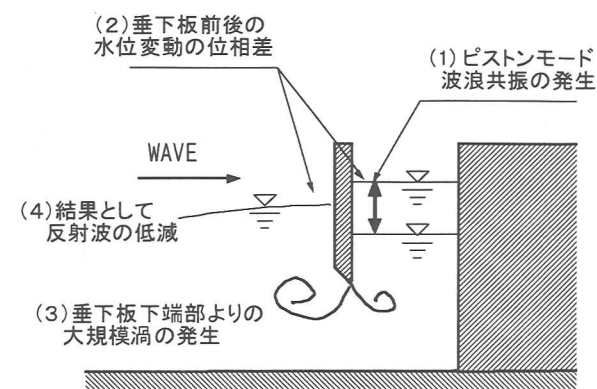


図-3 反射波の低減機構

表-1 実験波の条件

堤体模型	不規則波		規則波	
	$T_{1/3}$ (s)	$H_{1/3}$ (cm)	T (s)	H (cm)
ケース1 (B=d=14cm)	1.11	4.5		
	1.17	7.8		
ケース2 (B=d=19cm)	1.29	5.0	0.9~1.9 から選定	4
	1.40	8.2		8
二重式構造 (B1=d1=14cm, B2=d2=19cm)	1.63	5.4	0.9~2.2 から選定	4 8
	1.76	9.0		
	0.98	4.8		
	1.00	7.5		

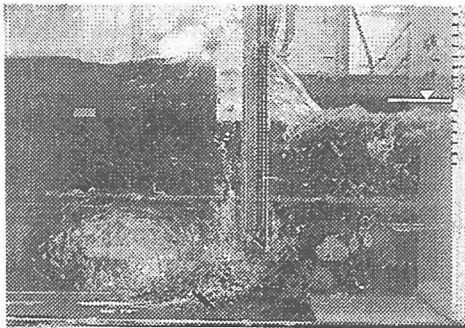


写真-1 垂下板の下端部での渦流れ

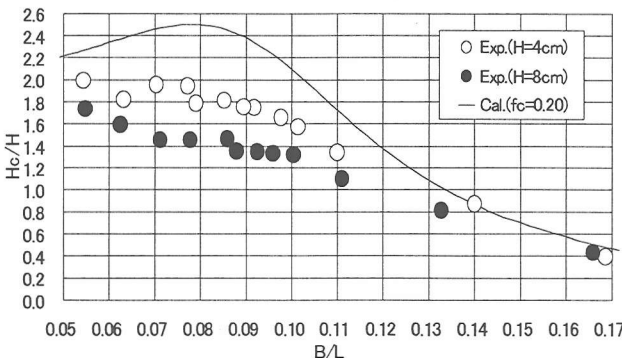


図-4 遊水室内平均波高の周期による変化

に明確な渦が形成されており、反射波の低減がこのような大規模な渦流れの発生によることが分かる。そして、写真-1の条件よりも短周期側では、垂下板の反射側のみに明確な渦が形成されるようになることなどを確認している。

次に、このような渦流れが形成される理由について考

察してみる。図-4は、遊水室内の空間的な平均波高 H_c の B/L による変化を示す。図中では、入射波高との比について、実験結果および減衰波理論³⁾による算定結果の両者についてプロットしてある。なお、遊水室内の波面モードは、本実験における周期条件の範囲内では、遊水室幅 B が波長 L より比較的短い条件であり、ほぼ平坦なピストンモードになっていたことを確認している。

この図より、 B/L が小さな長周期の条件になるほど、遊水室内の無次元波高は増大することや、反射率が極小となる付近では極大ではないものの比較的大きな値になることが分かる。

図-5は、垂下板前後面での水面変動の位相差（前面水位を基準）の B/L による変化を示す。この図より、長周期の条件になるにつれ、位相差は減少することが確認できる。これは直接的には、位相差が生じると板下端部を通過する流速が増大することによると考えられる。

このような検討より、垂下板式低減工の反射波低減機構を総括すると、図-3に示す過程を経て反射波エネルギーが逸散されると推定される。

4. 不規則波に対する波浪制御効果

(1) 反射波の特性

図-6, 7は、ケース1 ($B=d=14\text{cm}$) のときの反射波スペクトル $S_r(f)$ を入射波スペクトル $S_i(f)$ と併せて示す。これらの図中には、システム関数的に求めた周波数 f の関数として求められる反射率 Cr および規則波を想定した減衰波理論による算定結果も併せて示してある。このような反射率 Cr は次式の定義による。

$$Cr(f) = \sqrt{S_r^2(f)/S_i^2(f)} \quad (1)$$

これらの図の比較から、入射波スペクトル $S_i(f)$ の大小に関係なく、特定の周波数帯で効果的に低減する傾向が認められる。このように、反射波が特定の周波数帯で低減する傾向は、図中に示す減衰波理論による Cr の算定結果とほぼ一致しており、不規則波に対しても規則波と同様に反射波の低減が可能であると判定される。

次に、図-7, 8は、ケース1 ($B=d=14\text{cm}$) とケース2 ($B=d=19\text{cm}$) のときの反射波スペクトル $S_r(f)$ 、入射波スペクトル $S_i(f)$ およびシステム関数的に求めた反射率 Cr を示す。これらの図の比較から、遊水室幅 B や吃水深 d を変化させると、異なる周波数帯で反射率が極小になることがわかる。このことから、不規則波においても、遊水室幅および垂下板の吃水深の組み合わせ効果が認められる。そして、その周波数特性は、

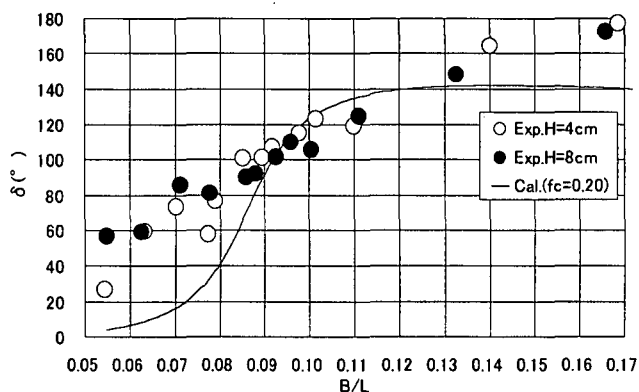


図-5 垂下板前後面での水位変動の位相差 δ

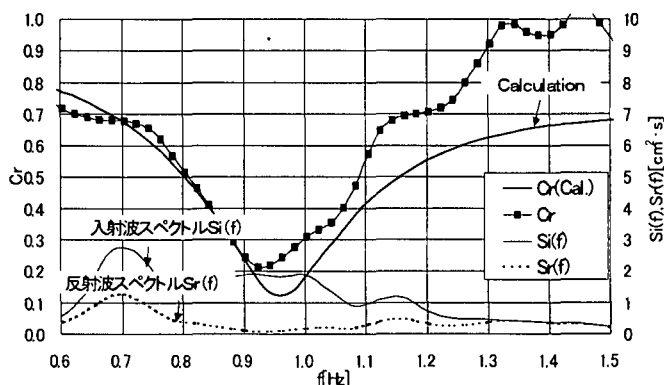


図-6 垂下板一枚のときの入・反射波のスペクトルおよび反射率
($B=d=14\text{cm}$, $T_{1/3}=1.11\text{s}$, $H_{1/3}=4.5\text{cm}$)

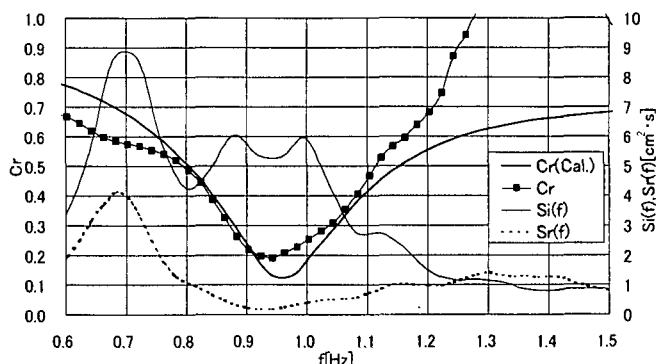


図-7 垂下板一枚のときの入・反射波のスペクトルおよび反射率
($B=d=14\text{cm}$, $T_{1/3}=1.17\text{s}$, $H_{1/3}=7.8\text{cm}$)

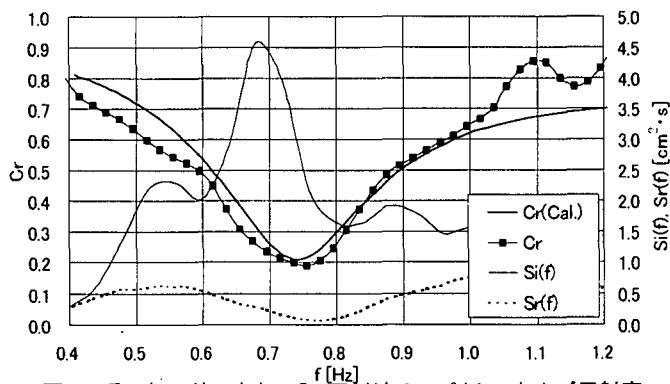


図-8 垂下板一枚のときの入・反射波のスペクトルおよび反射率
($B=d=19\text{cm}$, $T_{1/3}=1.40\text{s}$, $H_{1/3}=8.2\text{cm}$)

規則波の場合と同様に不規則波に対しても減衰波理論によりほぼ推定することが可能である。

(2) 規則波実験との比較

図-9は、ケース2 ($B=d=19\text{cm}$) のときの規則波と不規則波に対する反射率の比較を示す。不規則波に対する反射率には、上記のシステム関数的に求められる値を用いた。これらの図より、反射率 Cr は、規則波と不規則波でそれほど有意な差は見られない。

このように、規則波と不規則波の結果に差異が見られない理由としては、規則波実験で明らかになった逸散現象の原動力である遊水室でのピストンモードの波浪共振現象の出現が線形性の強い現象であることによると考えられる。

以上の検討より、垂下板式の反射波低減工では、規則波のみならず不規則波に対しても、効果的に反射波の低減が期待できるといえよう。

(3) 有義波に対する波浪制御効果

反射波低減工の実際場への適用となると、現地の有義波条件に対する波浪制御効果について検討する必要がある。表-2は、ケース1, 2においての、各有義波高 $H_{1/3}$ 、有義波周期 $T_{1/3}$ の不規則波群に対する反射率 Cr を示す。この表より、ケース1, 2の両者において、 Cr は4割程度となっており、有義波に対しても十分な消波効果が認められる。

5. 有効周期帯を拡大する二重式構造について

上記までの検討で、垂下板一枚のみの反射波低減工では、不規則波に対しても、反射率が遊水室幅と垂下板の吃水深に關係する固有な周期帯で極小となることがわかった。そこで、反射波低減の有効な周期帯を拡大する目的から、図-2に示すような直立堤前面に2枚の異なる吃水深の垂下板を異なる遊水室幅で設置する二重式構造の低減工を採用した。以下では二重式構造の不規則波に対する効果について紹介する。

図-10～図-13は、このときの反射波スペクトル $Sr(f)$ を入射波のスペクトル $Si(f)$ と併せて示す。これらの図中には、システム関数的に反射率 Cr および規則波を想定した実験結果、減衰波理論による算定結果も示している。これらの図から、規則波実験と同様に、 $f=0.6, 1.0\text{Hz}$ 付近で反射率が極小となり、不規則波においても規則波の場合と同様に反射波の低減に有効な周期帯を有意に拡大できる。

図-10と図-11より、有義波周期 $T_{1/3}=1.7\text{s}$ 付近の条件では、 $f=1.0\text{Hz}$ 付近の極小値が規則波の結果に比べて大きくなる傾向が見られる。

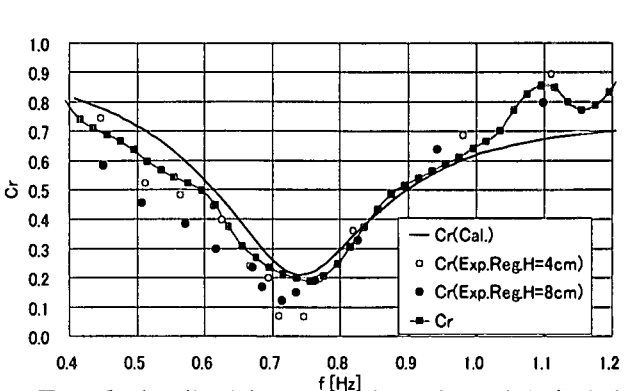


図-9 垂下板一枚のときの入・反射波のスペクトルおよび反射率 ($B=d=19\text{cm}$, $T_{1/3}=1.40\text{s}$, $H_{1/3}=8.2\text{cm}$)

表-2 有義波に対する反射率 Cr			
	$T_{1/3}(\text{s})$	$H_{1/3}(\text{cm})$	Cr
ケース1 ($B=d=14\text{cm}$)	1.11	4.5	0.40
	1.17	7.8	0.37
ケース2 ($B=d=19\text{cm}$)	1.29	5.0	0.49
	1.40	8.2	0.36

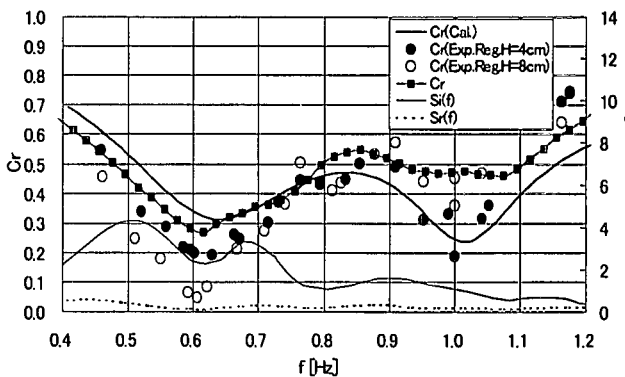


図-10 二重式構造のときの入・反射波のスペクトルおよび反射率 ($T_{1/3}=1.63\text{s}$, $H_{1/3}=5.4\text{cm}$)

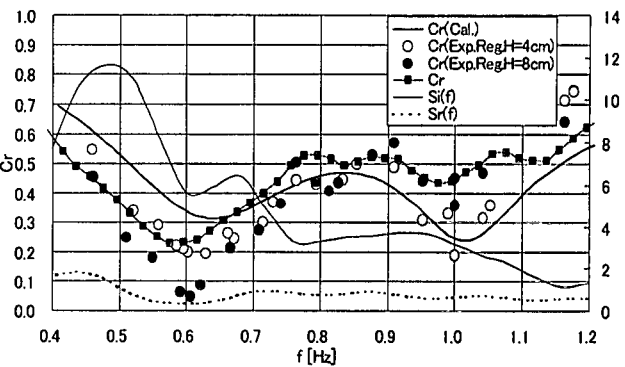


図-11 二重式構造のときの入・反射波のスペクトルおよび反射率 ($T_{1/3}=1.76\text{s}$, $H_{1/3}=9.0\text{cm}$)

また、表-3は、各有義波高、有義波周期の不規則波群に対する反射率を示す。この表より、いずれの有義波においても二重式構造による波浪制御効果は、 $Cr=0.3$ 程度となる。このことから、二重式構造にすることによる

有用性が再確認できた。

以上の検討より、不規則波に対する二重式構造の波浪制御効果についても、規則波の場合と同様に減衰波理論によりほぼ推定することが可能であると判断できる。

結語

(1) 反射波スペクトル $S_r(f)$ やシステム関数的な反射率 Cr は、入射波スペクトル $Si(f)$ の大小に関係なく、特定の周波数帯で効果的に提言する傾向が認められた。そして、その周波数特性は、規則波の場合と同様に不規則波に対しても減衰波理論によりほぼ推定するところが可能である。

(2) 遊水室幅や吃水深を変化させると、異なる周波数帯で反射率が極小となることがわかる。このことから、不規則波においても遊水室幅および垂下板の吃水の組み合わせの効果が認められる。

(3) 直立堤の前面に異なる遊水室幅、吃水深で垂下板を2枚設置する二重式構造の場合、不規則波においても規則波の場合と同様に反射波の低減に有効な周期帯を拡大できる。

(4) 不規則波実験と規則波実験の結果の比較から、渦流れの発生現象に伴うエネルギー逸散現象は、比較的線形性の強い現象であることが指摘された。

(5) 有義波群に対する単一垂下板式および二重式の低減工による波浪制御効果は、反射率を3～4割程度まで減少できる。

参考文献

1) 中村孝幸・神野充輝・西川嘉明・小野塚孝：渦流れの増大現象を利用した垂下板式の反射波低減工について，海岸工学論文集，第46巻，pp.797～800，1999。
2) 岩田好一郎：消波構造物による波の反射と透過，水工学に関する夏季研修会講義集，pp.B6-1～B6-18，1980。

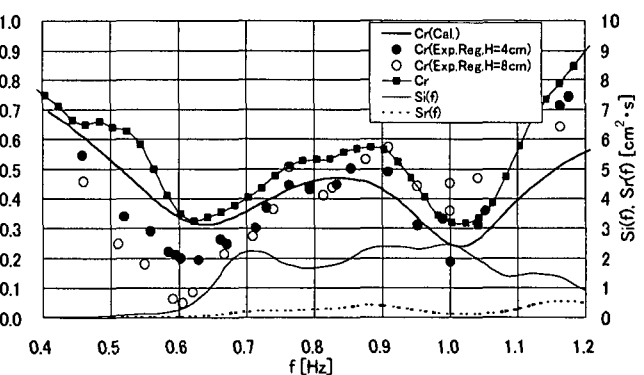


図-12 二重式構造のときの入・反射波のスペクトルおよび反射率
($T_{1/3}=0.98s$, $H_{1/3}=4.8cm$)

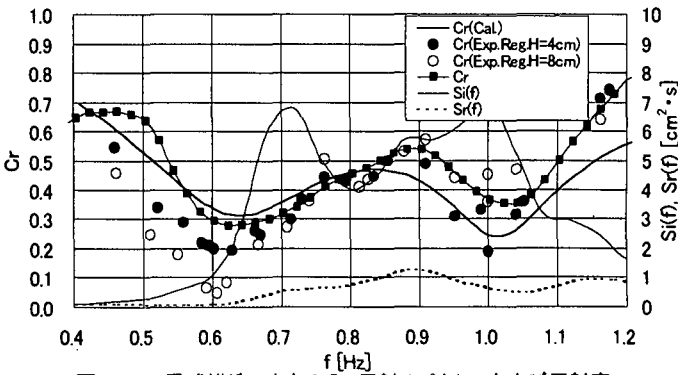


図-13 二重式構造のときの入・反射波のスペクトルおよび反射率
($T_{1/3}=1.00s$, $H_{1/3}=7.5cm$)

表-3 有義波に対する反射率 Cr

$T_{1/3}(s)$	$H_{1/3}(cm)$	Cr
1.63	5.4	0.28
1.76	9.0	0.27
0.98	4.8	0.40
1.00	7.5	0.31

3) 中村孝幸・井手義彦：波の逸散現象を利用した隅角物体まわりの波変形と作用波力の算定法，海洋開発論文集，第13巻，pp.177～182，1997。