

遊水室型海水交換防波堤の効果に及ぼす通水部構造と基礎マウンドの影響について

中村孝幸¹・中山哲蔵²・大村智宏²・楨本一徳³・兼貞 透⁴

本研究は、海水交換防波堤として、本来の防波機能を維持しつつ、波と構造体の干渉により生起される渦流れを利用して海水交換が促進できる防波堤の開発を進めるものである。具体的な防波堤の構造は、垂下版と没水平版で構成される遊水室型防波堤である。ここでは、このような防波堤を現地に適用する際に重要となる、下部通水部の高さや堤体前面より見たときの通水部開口率の波浪制御効果および海水交換量への影響などを実験と理論により明らかにする。このとき、付随的に防波堤下部に設ける捨石マウンドの有無や遊水室背後の重量部長さの影響などについても検討する。

1. はじめに

港湾では、主に港内の静穏度に着目して防波堤などの外郭施設が建設されてきた。しかし、静穏度を求めるあまり港内外の海水交換が抑止され、港内の水質汚濁が問題視されるようになってきた。このため、その対策方法の一つとして透過性防波堤や海水交換防波堤が利用されるようになってきている。

本研究は、海水交換防波堤として、本来の防波機能を維持しつつ、波と構造体の干渉により生起される渦流れを利用して海水交換が促進できる防波堤の開発を目指す。既に著者ら（中村ら、2005a）は、このような海水交換促進型防波堤として、図-1 に示すような垂下版と没水平版で構成される遊水室型防波堤を提案し、その波浪制御効果や海水交換機能などを明らかにしてきた。この研究では、このような防波堤を現地に適用する際に重要となる、下部通水部の高さや堤体前面より見たときの通水部開口率の波浪制御効果および海水交換量への影響などを明らかにする。このとき、付随的に防波堤下部に設ける捨石マウンドの有無や遊水室背後の重量部長さの影響などについても検討する。

2. 実験装置および実験方法

(1) 実験水槽

実験には、長さ 25 m、幅 1 m、高さ 1.25 m の 2 次元造波水槽を用いた。水路内には、1/30 勾配の不透過な斜面を設け、この背後には斜面に接続するように長さ約 13 m の水平床部を設けた。水平床部には水路幅をほぼ二分するように隔壁を設け、一方の水路で入射波が、もう一方の水路に模型堤体を設置して反射・透過波などが測定できるようにした。この隔壁の終端には、ヘチマロ

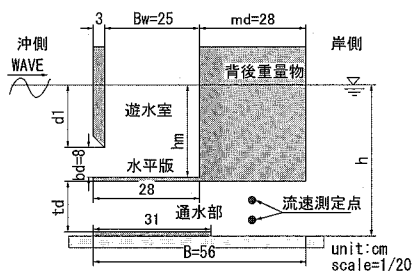


図-1 遊水室型海水交換防波堤

表-1 水深 h を固定したときの各寸法

通水部開口高さ td (cm)	水深 h (cm)	垂下版吃水深 $d1$ (cm)	水平版上水深 hm (cm)	td/h
5	40	25	33	0.13
9	40	21	29	0.23
13.5	40	16.5	24.5	0.34

表-2 水深 h を通水部高さ td に連動させたときの各寸法

通水部開口高さ td (cm)	水深 h (cm)	垂下版吃水深 $d1$ (cm)	水平版上水深 hm (cm)	td/h
5	31.5	16.5	24.5	0.16
9	35.5	16.5	24.5	0.25
13.5	40	16.5	24.5	0.34

ンと捨石斜面で構成される消波工を設け、この終端部と隔壁先端部を介して平均流が回流できる構造としており、なるだけ正確に海水交換量が測定できるようにしてある。

(2) 通水部高さの検討に用いた堤体条件等

図-1 は、堤体下部に設ける通水部高さの影響を検討するために用いた遊水室型防波堤の典型的な断面を示す。想定した模型の縮尺は 1/20 程度である。実験では、通水部高さ td を 5 cm～13.5 cm の範囲で 3 種類に変化させて、各種の周期、波高の条件下で反射率、透過率、平均輸送流量などを測定した。平均輸送流量は、図-1 に示すように、2 台の電磁流速計を堤体重量部の下側の通水部に設置して測定した。

実験では、通水部高さの変化に伴い、①前面垂下版の吃水深 $d1$ および遊水室内の没水平版上の水深 hm が変化する設置水深を固定したケース、② $d1$ と hm 変化し

1 正 会 員 工 博 愛媛大学大学院理工学研究科
2 正 会 員 工 修 (独立) 水産総合研究センター水産工学研究所
3 正 会 員 工 修 復建調査設計株式会社松山支社
4 学生会員 愛媛大学大学院理工学研究科環境建設工学専攻

ないように通水部高さに連動させて設置水深を変化させたケースの2種類を実施した。これら各ケースの堤体条件を表-1, 2に示す。このような2種類のケースを用いた理由は、前面垂下版の吃水深が遊水室内のピストンモード波浪共振の生起に強く関係することが知られていることによる(中村ら, 2002)。なお、このとき、模型堤体に作用させた入射波の条件は、波高 $H=5, 10, 15$ cm, 周期 $T=1.0\sim 2.4$ s の範囲の規則波である。

(3) 通水部の前面開口率の検討に用いた堤体条件等

現地の防波堤では、通水部の構造形式として、パイプ構造やボックスカルバート構造などが利用されると想定される。ここでは、このように通水部を部分的に閉塞するときの通水部開口率の反射率、透過率、平均輸送流量などに及ぼす影響を実験的に検討した。用いた模型堤体の代表例は、図-2に示すもので、通水部の構造を角型パイプとし、その左右開口寸法を変化させることで開口率を46%~82%の範囲内で3種類に変化させた。このとき、通水部高さは、上記(2)の検討結果を考慮して $td=9$ cm と固定した。

この実験では、一部の開口率において堤体の下部に捨石マウンドがない場合についても検討しており、付随的に捨石マウンドの有無の影響などについても明らかにした。検討に用いた堤体諸元などを表-3に一括して示す。なお、入射波の諸元および計測装置の配置は、上記(2)の検討のときとほぼ同様である。

3. 通水部高さの影響

(1) 垂下版吃水深の影響

図-3~5は、水深 h を固定して通水部高さ td を変化させるときの反射率 Cr 、透過率 Ct および輸送流量 Q^* の結果を示す。図中では、周期を表すパラメータとして L/Bw (波長遊水室幅比) による変化で示し、反射・透過率については、中村・井出 (1997) による減衰波理論に基づく算定結果についても併せ示す。理論算定では、等価線形抵抗係数 fc が必要になるが、従来の成果(中村ら, 2005) および実験結果との整合性等を考慮して $fc=0.2$ を用いた。

無次元輸送流量 Q^* は、一波あたりの平均輸送流量に比例する量で次式の定義による。

$$Q^* = qT / (HL/2\pi) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 q : 通水部で測定した水平流速の時間平均値(20波程度)にそれぞれの代表長を乗じて求められる単位幅当りの輸送流量である。この際、冲向きへの流量を負と定義している。

反射率 Cr の結果を示す図-3に着目すると、通水部が狭くなることで Cr が低減する有効周期帯は L/Bw の大きな長周期側に移行することが認められる。これは、通水部高さの減少に伴い、前面垂下版の吃水深が深くなる

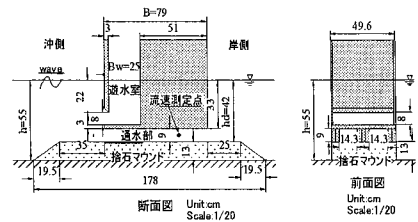


図-2 通水部開口率の検討に用いた遊水室型海水交換促進型防波堤の模型 (通水部開口率: 57%, マウンド高さ: 13cm)

表-3 通水部前面開口率の検討に用いた諸元法

通水部 前面開	水深 h (cm)	マウンド上 水深 hd (cm)	垂下版吃水深 d1 (cm)	マウンド
96	42		22	無
57	42		22	無
82	44	31	11	有
82	55	42	22	有
57	44	31	11	有
57	55	42	22	有
46	44	31	11	有
46	55	42	22	有

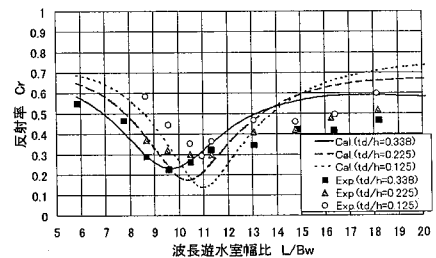


図-3 各通水部高さ (垂下版吃水深) のときの反射率 Cr ($h=40$ cm, $H=10$ cm, $Bw=25$ cm, $fc=0.20$)

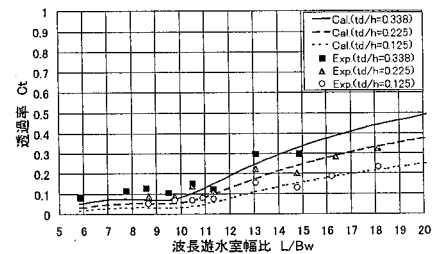


図-4 各通水部高さ (垂下版吃水深) のときの透過率 Ct ($h=40$ cm, $H=10$ cm, $Bw=25$ cm, $fc=0.20$)

ためである。一方、図-4に示す透過率 Ct は、通水部高さが狭くなると、実験結果、算定結果ともに低下する傾向が見られる。これは、通水部が狭くなることで透過する波のエネルギーが減少するためと考えられる。

輸送流量 Q^* は、いずれの通水部高さにおいても冲向きに生じることや、 Cr が低下し始める周期条件より長周期側で有意な大きさとなり、増加する傾向が認められる。これは、既に中村ら (2002) により報告されているように、

遊水室内のピストンモード波浪共振の生起により、前面垂下版の下端より強い渦流れが冲向きに発生し、その影響により沖側への平均流が引き起こされることによる。

そして、 Q^* は通水部高さが低くなると流水面積が狭くなるため減少する傾向にあるが、通水部高さ $td=9$ cm では、 $td=13.5$ cm のときとほぼ同程度の量であり、透過波の低減効果を考え合わせると最適な通水部高さと言える。

図-6は、 Q^* に及ぼす波高の影響を検討した結果を示す。この図より、多少のばらつきは見られるものの、作用波高が小さいほど、 Q^* は増加する傾向が見られる。 Q^* が式(1)の無次元化によることを考慮すると、単位幅当りの輸送量 q は、作用波高の1/2乗程度に比例するものと推測され、前面垂下版を潜堰とみなすような流量になるものと推定される。これについては今後続く検討課題としたい。

図-7は、既に中村ら(2005b)により指摘されている波長と断面特性長との比を用いて、図-4の Cr の結果を再整理したものである。ここで、断面特性長は、前面垂下版の吃水深 $d1$ と遊水室幅 Bw の積の平方根で定義される。図中では、波長として、遊水室の特性に直接的に関係する没水平版上の水深に対応する波長 Lm が用いてある。この図より、通水部高さ(垂下版吃水深)に関係なく、 Cr が極小となる条件は、ピストンモード波浪共振の生起に対応する、 Lm と断面特性長の比がほぼ10程度であることや周期条件による変化特性が類似して、ほぼ一律に表せるようになることなどが分かる。なお、長周期側での実験値と算定値の差が大きくなるのは、実流体場での渦形成による逸散がより強く現れるためと推定される。

(2) 水深の影響

図-8、9は、通水部高さが変化しても前面垂下版の吃水深が一定となるように、水深を通水部高さに連動して変化させた場合の Cr および Q^* の結果を示す。図中では、周期を表すパラメータとして没水平版上の水深に対応する波長 Lm と遊水室幅 Bw の比 Lm/Bw (遊水室波長遊水室幅比)による変化および Lm と断面特性長 $(Bw \cdot d1)^{1/2}$ の比の両者により示す。これらの図より、反射率 Cr は、通水部が狭くなっても、それほど変化はみられない。これは、やはり反射波の低減には、遊水室幅が同じときには前面垂下版の吃水深と水平版上の波長が最も強く影響することによるものと考えられる。一方、輸送流量 Q^* は、やはり最も狭い通水部高さの条件のとき、極小になるものの、中間的な通水部高さのときには、有意な海水交換量が期待できることが分かる。

4. 通水部開口率の影響

(1) 捨石マウンド無しの場合

このときの堤体は、図-2に示す模型堤体で捨石マウンドを取り除いたものに相当する。図-10~12は、この

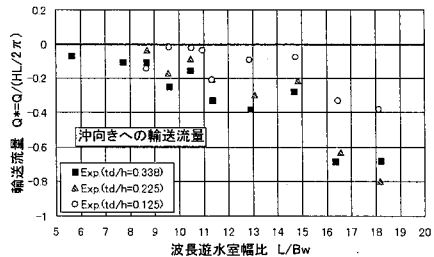


図-5 各通水部高さ(垂下版吃水深)のときの輸送流量 Q^* ($h=40$ cm, $H=10$ cm, $Bw=25$ cm)

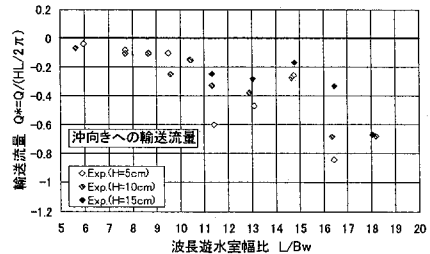


図-6 波高別輸送流量 ($td=13.5$ cm, $d1/hm=0.67$, $h=40$ cm, $H=10$ cm, $Bw=25$ cm, $fc=0.20$)

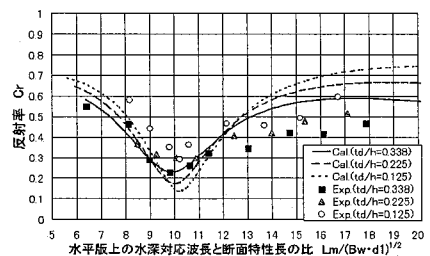


図-7 各通水部高さ(垂下版吃水深)のときの反射率 Cr ($h=40$ cm, $H=10$ cm, $Bw=25$ cm, $fc=0.20$)

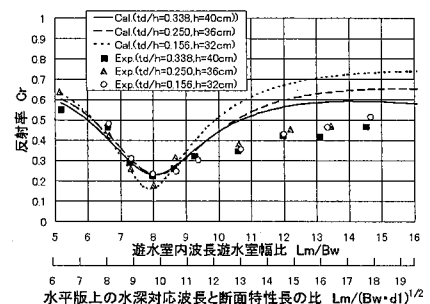


図-8 通水部高さの違いによる反射率 Cr の比較: 設置水深 h は通水部高さに伴わない変化 ($d1/hm=0.67$ cm, $H=10$ cm, $Bw=25$ cm, $fc=0.20$)

条件下で通水部前面の開口を変化させた場合の反射率 Cr 、透過率 Ct および堤体単位幅当りの断面平均輸送流量 Qa^* の結果をそれぞれ示す。図中では、周期を表すパラメータである L/Bw による変化で示す。断面平均

輸送流量 Qa^* は、通水部の前面開口率の影響を採りいれるため新規に定義したもので、式 (1) の Q^* に開口率を乗じて求められ、無次元の断面平均流量に相当する。

Cr の結果を示す図-10 より、通水部開口率が 57 % と

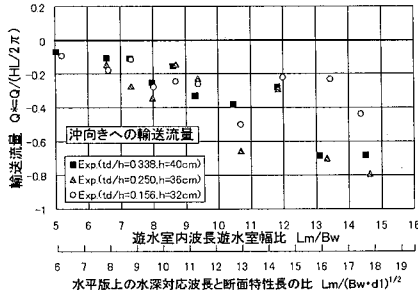


図-9 通水部高さの違いによる輸送流量 Q^* の比較：設置水深 h は通水部高さに伴ない変化 ($d1/hm=0.67cm$, $H=10cm$, $Bw=25cm$)

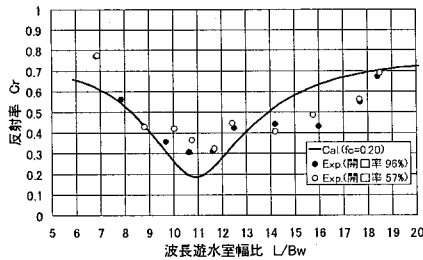


図-10 通水部開口率の変化による反射率 Cr ($H=10cm$, $Bw=25cm$, マウンド無し)

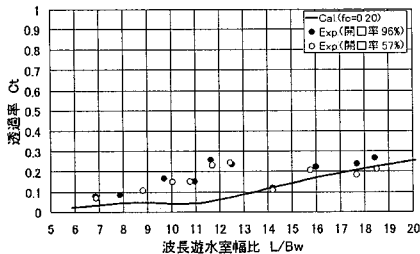


図-11 通水部開口率の変化による透過率 Ct ($H=10cm$, $Bw=25cm$, マウンド無し)

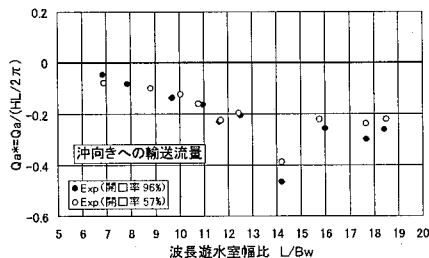


図-12 通水部開口率の変化による単位幅当りの断面平均輸送流量 Qa^* ($H=10cm$, $Bw=25cm$, マウンド無し)

閉塞率が高い場合でも算定結果は実験結果とほぼ一致しており、 Cr は通水部の構造にほとんど影響されないことが分かる。透過率 Ct も Cr と同様に開口率の影響はそれほど大きくないが、やはり開口率が小さくなると若干ながら低下する傾向にある。なお、 Ct の実験結果は、開口率を 100 % とする算定結果よりも大きくなる場合も見られるが、これは用いた分断 2 水路の回流水槽の消波工側において、入射波測定用水路からの回り波と消波工よりの反射波の影響による誤差と考えられる。

平均輸送流量の結果を示す図-12 より、 Qa^* は開口率が小さくなると多少ながら減少する傾向が見られる。しかし、 Qa^* の減少度合いは、開口率の割合に比較すると顕著でなく、通水部開口断面積の縮小の影響はあまり有意でないと判断される。そして、このような結果から、通水部での実質平均流速は、通水部開口率が小さくなると増大することが示唆される。

(2) マウンド有りの条件

a) マウンド上の水深が深い場合 ($h=55cm$, $hd=42cm$)

図-13~15 は、この条件のときの反射率 Cr 、透過率 Ct および断面平均輸送流量 Qa^* の結果を示すもので、図中では通水部開口率が 3 種類に変化させてある。この図より、反射率は、やはり通水部開口率に依存することなく、ほぼ同じ周期特性および絶対値を示す。透過率についても、開口率が小さくなるとその絶対値は多少ながら低下する傾向が認められる。

Qa^* に着目すると、やはり開口率が小さくなると、流水断面積の低下により、その絶対値は減少する傾向が見られ、この傾向は、長周期側で顕著である。ただし、短周期から中周期の条件下では、開口率による差異はそれほど大きくない。

一方、前出のマウンドなしのときの結果と比較すると、この場合にはマウンド下の水深が深いため、同一周期条件でも波長が長くなるため、 L/Bw による各水理量の変化を見ると、長周期側にシフトしたような結果となる。ただし、各水理量の絶対値については、マウンドの有無

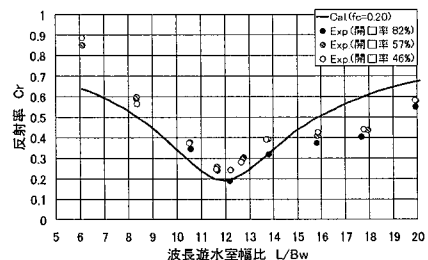


図-13 通水部開口率の変化による反射率 Cr ($H=10cm$, $h=55cm$, $Bw=25cm$, $hd=42cm$, マウンド高さ 13cm)

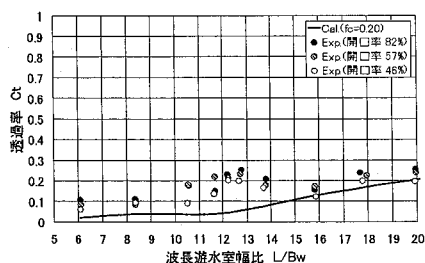


図-14 通水部開口率の変化による透過率 C_t
($H=10\text{cm}$, $h=55\text{cm}$, $B_w=25\text{cm}$, $h_d=42\text{cm}$,
マウンド高さ13cm)

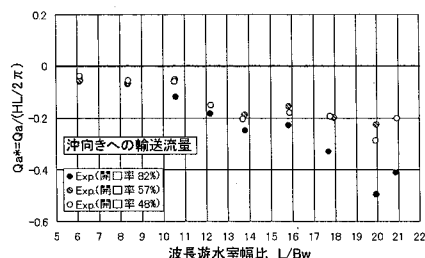


図-15 通水部開口率の変化による単位幅当りの断面平均
輸送流量 Qa^* ($H=10\text{cm}$, $h=55\text{cm}$, $B_w=25\text{cm}$,
 $h_d=42\text{cm}$, マウンド高さ13cm)

の相違はほとんど見られない。

b) マウンド上の水深が浅い場合 ($h=44\text{cm}$,
 $h_d=31\text{cm}$)

図-16, 17 は、この条件のときの反射率 C_r 、および断面平均輸送流量 Qa^* の結果を示す。この場合においても反射率は、やはり通水部開口率に依存しない結果となっている。ただし、理論算定では、減衰波理論で用いる線形抵抗係数 $fc=0.4$ と大きくした結果が実験結果との一致度が良く、絶対値も低下する傾向にある。これは、遊水室内の水深が浅くなることおよび捨石マウンドによる波エネルギーの逸散効果によるものと推定される。断面平均輸送流量に着目すると、上述した水深が深い場合に比較して、各開口率での差異が縮小し、短・中周期帯において絶対値が増大する傾向が認められる。これは、遊水室内の水深が浅くなることで、垂下版下端よりの渦流れの強度が増すことによるものと考えられる。

5. 結 語

(1) 遊水室型海水交換防波堤の下部に設ける通水部高さを高くすると、透過率は多少ながら上昇する傾向にある。一方、反射率はそれほど変化せず、むしろ前面垂下版の吃水深に強く影響される。そして、反射率の周期による変動特性は、没水平板上の水深に対応する波長と垂下版背後の遊水室遮断断面積を用いて定義される断面特性長の比を用いると一律にあらわせる。

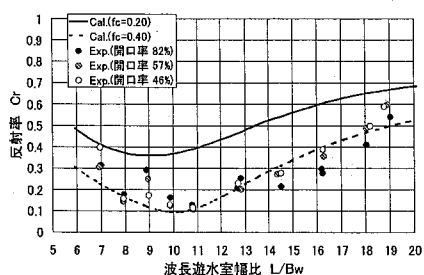


図-16 通水部開口率の変化による反射率 C_r
($H=10\text{cm}$, $h=44\text{cm}$, $B_w=25\text{cm}$, $h_d=31\text{cm}$,
マウンド高さ13cm)

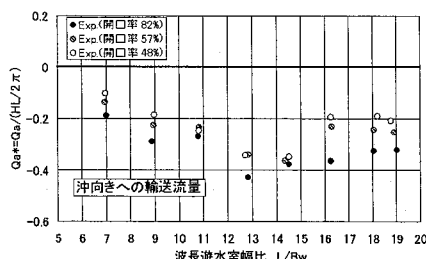


図-17 通水部開口率の変化による単位幅当りの断面平均
輸送流量 Qa^* ($H=10\text{cm}$, $h=44\text{cm}$, $B_w=25\text{cm}$,
 $h_d=31\text{cm}$, マウンド高さ13cm)

(2) 通水部高さや通水部前面開口率を狭めると、通水部平均流速は増大する傾向にあるが、開口面積が減少する影響の方がより強くあらわれ、結果的に平均輸送流量は減少する。ただし、通水部高さを水深の2割程度に設定すると、その低下度合いは小さく、しかも透過波の遮断効果に優れることから、望ましい通水部高さと言える。

(3) マウンド上の堤体断面諸元をマウンドのない場合と同一にすると、マウンドの有無による反射・透過波の低減特性および海水交換量への影響はほとんど見られない。

謝辞：本研究は、(財)災害科学研究所に設けた沿岸新技術研究会と(独立)水産総合研究センター水産工学研究所との共同研究による成果の一部である。ここに記して、ご協力頂いた関係各位に感謝の意を表する次第です。

参 考 文 献

- 中村孝幸・大村智宏・榎本一徳・大井邦昭(2005a)：波による渦流れを利用する遊水室型海水交換防波堤の効果的な断面について、海洋開発論文集，第21巻，pp. 541-546。
- 中村孝幸・小野塚孝・加藤孝輔・神野充輝(2005b)：垂下版式反射工の遊水室内における波浪共振の特性と支配パラメータについて、海洋開発論文集，第21巻，pp. 535-540。
- 中村孝幸・高木伸雄・中山哲蔵・河野徹(2002)：ピストンモード波浪共振を利用する低反射・低透過の海水交換防波堤の開発、海岸工学論文集，第49巻，pp. 661-665。
- 中村孝幸・井出義彦(1997)：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。