

II-4

波によるカーテンウォール直下の砂地盤洗掘

室蘭工業大学 ○学生員 沖 岳大  
 室蘭工業大学 フェロー 近藤 俊郎  
 室蘭工業大学 学生員 孟 昭武

はじめに

現在の環境破壊防止と自然保護の重要性が考えられている中で、近い将来エネルギーをどう供給するか深刻に考える時が来ていると思われる。二酸化炭素などの排出がなく、人々に安心した電力を供給することの重要性はいまでもないであろう。一方、海岸への土砂供給の減少傾向から、海岸侵食が進行している。そこで室蘭工業大学では発電と海岸保全の両方の効果を考慮したハイブリッド型である振り子式波浪発電システムの研究を進めている<sup>1)</sup>。

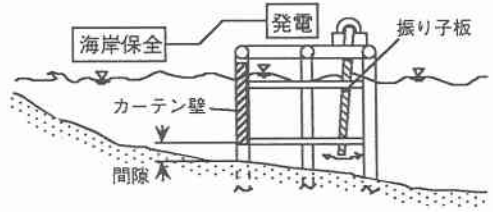


図-1 波浪発電システム概略図

このハイブリッドシステムは、効率を高めるため振り子の背後（岸側）に、壁を設けることにより定常波をつくり、壁の前面（沖側）の1/4波長のところに振り子を設置することにより、共振現象を誘発し高い効率が得られると考えられている。また壁の下端部は、海水の交流や漂砂の移動を阻害しないよう間隙を設ける仕組みとなっている。

そこで本研究では、この波浪発電システムを砂浜海岸に設置した時に、どのような海底地形変化をするかを把握するための基礎的実験として、単一カーテンウォール構造物下部における地形変化と波浪条件の関係を検討することを目的とした。

1. 実験方法および実験装置

実験は、始めに移動限界の入射波条件の設定実験を行い、設定された入射波を用いカーテンウォール下部洗掘実験を行った。設定実験は、砂の移動条件を確認する予備実験である。そのため予備実験は、カーテン壁を設置せず構造物のない条件での、波浪条件と砂粒子の移動についての関係を移動限界水深の理論

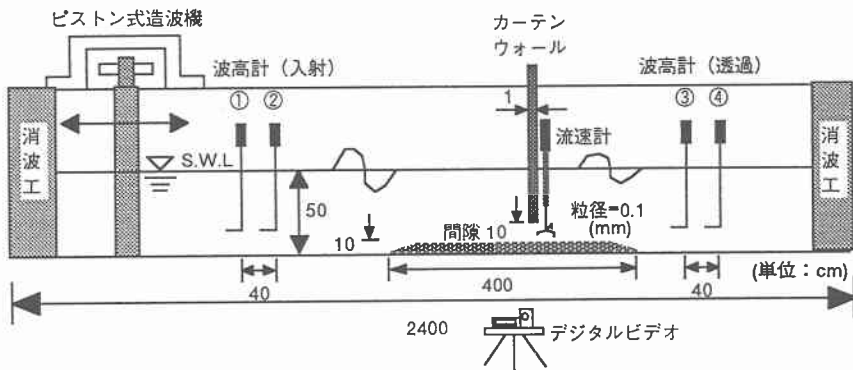


図-2 実験装置

Sand Bed Scour under a Curtain-Wall by Wave Action  
 by Takehiro OKI, Hideo KONDO, MENG Zhaowu

により推定することを目的とした。

予備実験は、図-2に示すように長さ24.0(m)、幅0.6(m)、高さ1.0(m)の2次元水槽を用いた。実験縮尺はおよそ1/20としている。ま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。移動床材料には、中央粒径0.1(mm)、比重2.67の珪砂を造波機より14(m)離れた地点から厚さ10(cm)、長さ4(m)の範囲に敷き詰めている。波高の測定は、カーテン壁前方(入射波高)と後方(透過波高)の位置に波高計を設置した。その際、合田<sup>2)</sup>の入射分離法により入射、反射、透過波高を算出している。なおカーテン壁設置時には、カーテン壁近傍に定常波が生じるため、その影響を避けるためカーテン壁から1波長程度離れた地点に波高計を設置した。流速の測定は水平方向、鉛直方向成分の測定が可能な超音波式ドップラー流速計をカーテン壁設置地点に設置した。ここで流速計は、カーテン壁を設置しない予備実験では、水深40、35、30、25、20(cm)の水粒子速度の測定に用いた。カーテン壁設置時には、カーテン壁下端の間隙部分における流速の測定に用いた。カーテン壁設置実験については、後節3.カーテンウォール下部洗掘実験で後記する。

## 2. 入射波条件の設定実験

本研究では、カーテンウォールの設置位置を、図-3に示すような対称砂漣が形成される領域とした。ここで実験では、このような領域を大域的に満足させるため、カーテン壁を設置する前に2つの検討を行った。第1に移動限界水深の検討、第2に砂漣形状についての検討である。

移動限界水深の計算値には、佐藤・田中<sup>4)</sup>により提案された表層移動限界水深、完全移動限界水深の実験式(1)を用いた。

$$\frac{H_o}{L_o} = \alpha \left( \frac{d}{L_o} \right)^n \left( \sin \left( \frac{2\pi h_i}{L} \right) \right) \left( \frac{H_o}{H} \right) \quad (1)$$

ここで  $H_o$  : 沖波波高、 $L_o$  : 沖波波長、 $d$  : 粒径、 $h_i$  : 水深、 $H$  : 水深  $h_i$  での波高、 $L$  : 水深  $h_i$  での波長である。また式中の係数  $\alpha$  は、表層移動限界では  $\alpha = 0.565$ 、完全移動限界では  $\alpha = 1.35$  であり、指数  $n$  は、両方の限界式ともに  $n = 1/3$  と定義されている。

ここで本実験では、カーテン壁の設置された地点での水深は、40(cm)と定められていることから、その水深における周期ごとの表層移動限界波高、完全移動限界波高を逆算している。佐藤・田中の実験式により逆算した周期ごとの移動限界波高を表-1に示す。表-1の計算により定められた表層、完全移動限界波高の確認実験は、表層移動の確認の場合、周期  $T=1.0 \sim 2.0$ (s)まで0.1秒間隔、入射波高  $H_i$  は、計算値による表層移動限界波高を用い実験し、移動現象が目視により見られない場合、実験の入射波高を大きくしていき行った。

完全移動限界の検討は、周期  $T=1.0 \sim 1.4$ (s)の範囲での計算値による完全移動波高が大きいため実験の制限上、周期  $T=1.5 \sim 2.0$ (s)の範囲で検討した。

その結果、表層移動限界では計算値

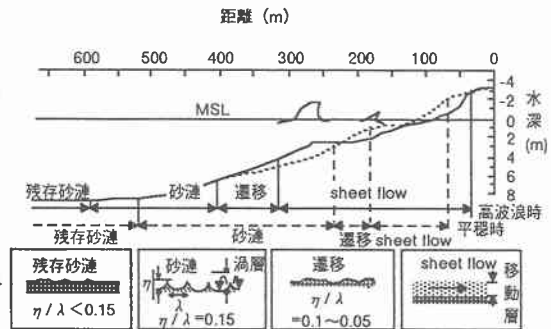


図-3 海浜断面形状 (Dingler, Inman,1976)<sup>3)</sup>

表-1 表層、完全移動限界波高の計算値と実験値

周期 $T$ (s)	表層移動限界波高(cm)		移動判定	完全移動限界波高(cm)		移動判定
	$H_{es}$ :計算値	$H_i$ :実験値		$H_{ep}$ :計算値	$H_i$ :実験値	
1.0	9.7	11.0	○	23.3	/	/
		10.2	×			
1.1	8.5	10.7	○	20.3	/	/
		8.9	×			
1.2	7.7	9.0	○	18.5	/	/
		8.1	×			
1.3	7.2	8.2	○	17.3	/	/
		7.5	×			
1.4	6.9	8.1	○	16.5	/	/
		7.4	×			
1.5	6.7	7.8	○	16.0	17.2	●
		7.1	×		14.6	●
1.6	6.5	7.5	○	15.6	16.1	●
		7.0	×		14.2	●

○ : 表層移動をする    × : 移動しない  
● : 完全移動をする    / : 未確認

より5(mm)程度大きくても移動しないことが確認できた。また移動するには、計算値より1.0(cm)程度以上大きければ、集団的に砂粒子が移動することが確認できた。その際、1時間程度波を当てたところ、8分から14分の間で移動床全体に砂漣が形成された。また時間の経過に対しても砂漣に大きな乱れは生じなかった。その時の様子をデジタルビデオカメラにより撮影した画像を図-4に示す。図-4は、周期 $T=1.3(s)$ 、入射波高 $H_i=8.2(cm)$ で造波から20分後の画像である。画像より左右対称な砂漣が形成されていることが確認できる。砂漣の波長 $\lambda$ と波高 $\eta$ の関係は $\eta/\lambda=0.16$ となり、砂漣形成領域であることが確認でき、狭幅カーテンウォール設置の対象と仮定している領域を大局的に満足するものと考えられる。

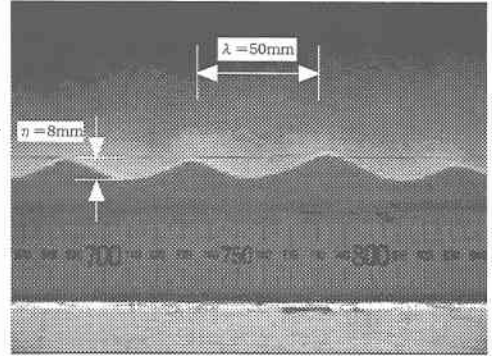


図-4 造波から20分後の砂漣模様  
(周期 $T=1.3(s)$  波高 $H=8.2(cm)$ )

完全移動限界に関しては、水深の変化が明らかに表れる顕著な底質砂の移動が確認できた。またこのとき遷移領域、シートフロー領域と考えられる現象も確認できた。そのため本研究の実験対象領域外と判断し、実験に用いる入射波高は、表層移動限界波高より1.0(cm)程度大きな波高が妥当であると考え波高条件を決定した。周期は、1.11(s)、1.34(s)、1.56(s)の3パターンで行うものとした。

移動限界水深実験の際、水平方向、鉛直方向成分の水粒子速度の測定を行ったことからその結果を図-5、図-6に示す。図に示す実験値の水粒子流速は、岸向き、沖向きに分けそれぞれの方向成分の速度を平均して算出している。また計算値は、微小振幅波理論による浅海波の水粒子速度式(2)、(3)式を用い平均し算出している。式中の記号は、 $u$ :水平方向水粒子速度、 $w$ :鉛直方向水粒子速度、 $H_i$ :入射波高、 $T$ :周期、 $h$ :水深、 $L$ :浅海波波長、 $z$ :静水面からの距離を示している。

$$u = \frac{\pi H_i}{T} \frac{\cosh 2\pi(h+z)/L}{\sinh 2\pi h/L} \sin\left(\frac{2\pi}{L}x - \frac{2\pi}{T}t\right) \quad (2)$$

$$w = -\frac{\pi H_i}{T} \frac{\sinh 2\pi(h+z)/L}{\sinh 2\pi h/L} \cos\left(\frac{2\pi}{L}x - \frac{2\pi}{T}t\right) \quad (3)$$

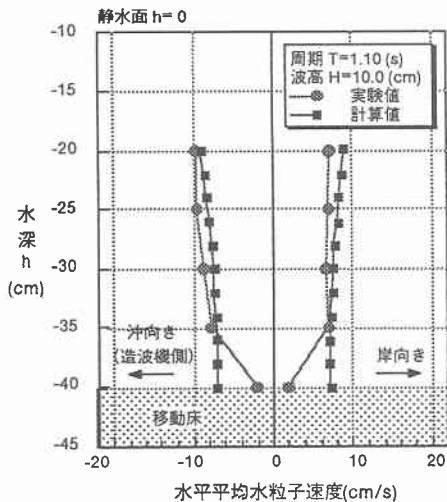


図-5 水平水粒子速度の比較  
(周期 $T=1.11(s)$  波高 $H=10.0(cm)$ )

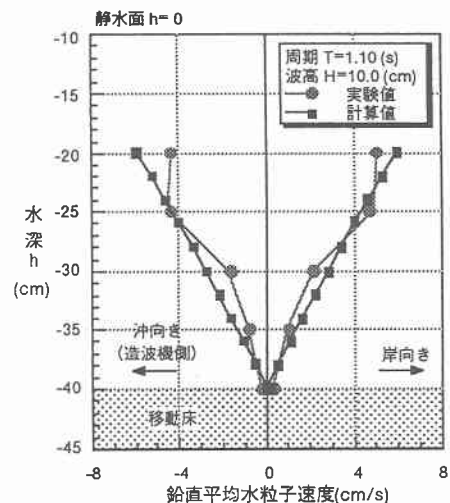


図-6 鉛直水粒子速度の比較  
(周期 $T=1.11(s)$  波高 $H=10.0(cm)$ )

図一五より水平水粒子速度は、水深 40(cm)から 35(cm)の範囲においては、理論値と実験値に差が見られた。これは底質付近では、複雑な境界層が存在しているためと考えられる。しかし水深 35(cm)より浅い範囲において計算値と実験値が非常に近い値であることが確認できる。また図一六より鉛直水粒子速度に関しても、計算値と実験値に相関があることが確認できる。よって本実験における水粒子速度は、微小振幅波理論を概ね満足できるものと推定できる。

### 3. カーテンウォール下部洗掘実験

カーテン壁模型には、幅 60.0(cm)、高さ 80.0(cm)、厚さ 1.0(cm)の亚克力板を用い、底質砂とカーテン壁下端に 10(cm)の間隙ができるように設置した。その際、越波はさせないものとしている。さらに、カーテン壁直下の地形変化の観測にデジタルビデオカメラを用いた。間隙部分の流速の測定は、流速計を間隙 10 (cm)の中央の高さである底質砂から 5(cm)の地点に、またカーテン壁後方へ 5(cm)の地点に設置した。

カーテンウォール型構造物を砂浜海岸の浅海域に設置する際の問題点に、カーテンウォール直下における局所洗掘が考えられる。本実験ではこの局所洗掘の様子を把握するため、時間経過に伴う洗掘状況、最大洗掘深、またカーテン壁下部の流速について検討を行った。

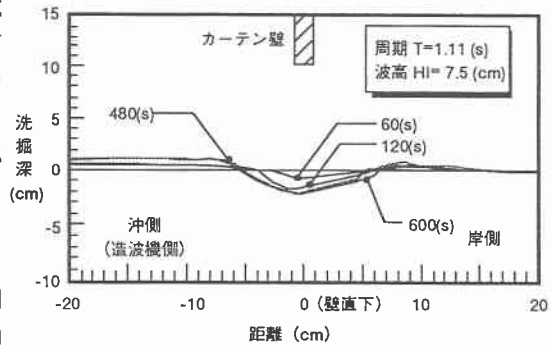
#### 3.1 洗掘状況

時間経過に伴う洗掘状況については図一七、図一八、図一九に示す。図中の縦軸は洗掘深、横軸は、カーテン壁の厚さ中央を 0 とし、岸沖方向の距離を示す。

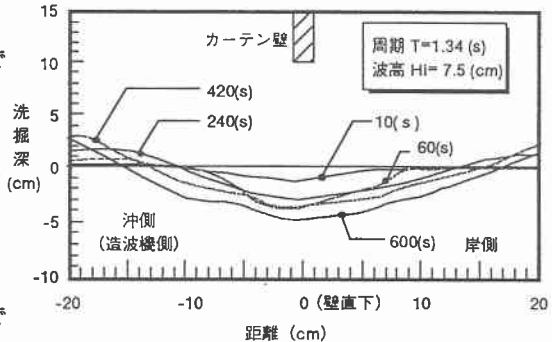
図一七は周期  $T=1.11(s)$ 、入射波高  $H_i=7.5(cm)$  である。時間経過の初期段階である 60(s) 経過時から 120(s) 経過までの間、カーテン壁前方 (沖側) の洗掘が大きいことが確認できる。時間の経過につれ、洗掘の深さ方向、岸沖方向の洗掘距離ともに変化は小さくなる。洗掘地形状況は、カーテン壁の直下のみ窪むような様子になる。

図一八は周期  $T=1.34(s)$ 、入射波高  $H_i=7.5(cm)$  である。図一八では、60(s) 経過時に急激な洗掘があるが、それから 240(s) 経過まで洗掘深を小さくする現象が確認できた。240(s) 経過後は、洗掘は下に凸の滑らかな放物線状の地形を形成しながら洗掘が進行した。

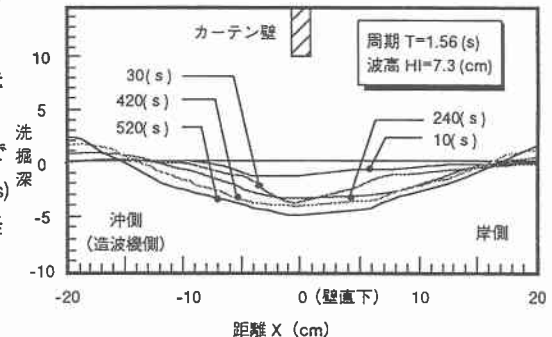
図一九は周期  $T=1.56(s)$ 、入射波高  $H_i=7.3(cm)$  である。図一九では、図一八同様、初期段階の 30(s) 経過時に急激な洗掘が確認でき、その後 240(s) 経過時まで洗掘深を小さくする現象が確認できた。240(s) 経過後は、図一八同様洗掘は滑らかに進行した。



図一七 時間経過による洗掘状況



図一八 時間経過による洗掘状況



図一九 時間経過による洗掘状況

図-7、図-8は同一の入射波高であるにもかかわらず、周期の違いにより洗掘の状況は異なる。特に、岸沖方向洗掘距離の違いが顕著である。また図-8、図-9に関しても、洗掘深5(cm)に達するまでの時間に差がある。このように周期の違いによる洗掘状況に変化があるのは、周期が大きくなると、波長が長くなり水平水粒子速度が大きくなるため、洗掘領域での局所流に影響を与えるものと考えられる。全てのパターンでの共通点は、初期段階での洗掘が卓越すること、また時間経過により左右対称的な地形に変化していくことである。

### 3.2 最大洗掘深

最大洗掘深は、時間経過での最も洗掘の大きくなっている地点の深さである。最大洗掘深についての実験結果を図-10、図-11に示す。ここで実験では、造波開始後水槽全体に波が行きわたってから10分間で、洗掘の進行、平衡状態を評価することとしている。また洗掘が5(cm)に達してしまったものは、移動床の厚さを10(cm)としていることを考慮し、その時点で造波を終了させた。

図-10は、予備実験により定めた移動限界入射波高に近い条件で実験を行ったものである。グラフより洗掘は、時間の経過につれ進み、周期 $T=1.11, 1.34, 1.56$ (s)のいずれの周期に関しても洗掘は進行し続けた。そのため入射波高を1.0~2.5(cm)程度小さくし実験を行った。その場合の最大洗掘深を図-11に示す。グラフから10分以内で平衡と思われる安定した状態を確認できる。平衡状態に至ったのは、入射波高を1.0~2.5(cm)程度小さくすることによりカーテン壁前方で打ち上げ高が抑えられたこと、さらにカーテン壁直下の洗掘により水深が大きくなり移動限界水深に達したためではないかと推測する。

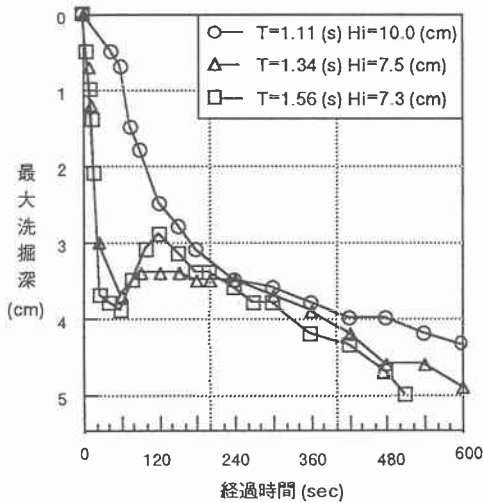


図-10 最大洗掘の時間変化

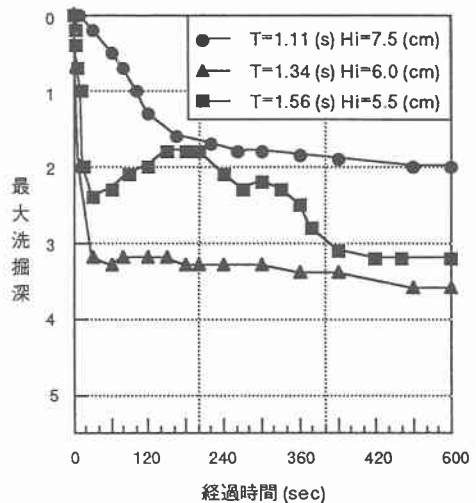


図-11 最大洗掘深の時間変化

### 3.3 カーテン壁下部の実験流速

カーテン壁下部では、図-12に見られるように渦を形成し砂を巻き上げながら局所洗掘が進行する。また、カーテン壁直下の洗掘領域では、ある洗掘深で流出入土砂量のバランスを保つ動的な平衡状態が存在する。そのような平衡条件を形成する局所領域の流速を完全に把握するのは、複雑な要因が混在しており困難である。そのため本実験では、流速計を間隙中央の地盤から5(cm)の地点、またカーテン壁から後方(岸側)へ5(cm)の間隙の出口地点に固定し、その点での流速状況を把握することとした。

測定した流速は、洗掘の進行、平衡状態の検討を行った際に測定した流速である。得られたデータは、岸向き成分と沖向き成分に分け算出し、また鉛直方向についても同様に鉛直上向きと、下向きに分け算

出した。

ここでは代表して周期  $T=1.56(s)$ 、入射波高  $H_i$  が 5.5、7.5(cm)の流速ベクトルを図-13に示す。図より岸向きの流れのとき鉛直方向平均流速は上向きに、また沖向きの流れの時には、鉛直下向きの方を示した。これは、測定した地点がカーテン壁直下部分より岸側であるためと考えられる。さらに岸向き平均流速が沖向き平均流速よりも支配的であるのも測定箇所がカーテン壁の岸側であったためと考えられる。ベクトル図によれば、入射波高の2.0(cm)弱の変化により、測定地点における岸向・沖向方向平均流速の変化はともに小さい。しかし、流速の小さな変化が、掃流砂量に影響を与え、洗掘状況を変化させる要因の1つであると推測する。

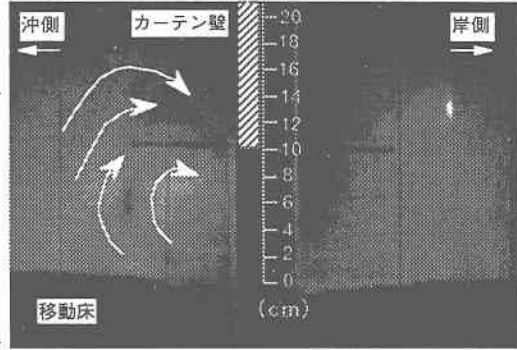


図-12 カーテン壁下端の様子  
(周期  $T=1.56$  波高  $H=5.5$ )

### 結び

本研究の結論を以下にまとめる。

- 1) 今回の実験で入射波高による表層移動限界波高は、佐藤・田中の値と比べ、若干大きいことが認められた。
- 2) カーテン壁下部の洗掘は、初期段階で急激な局所洗掘が卓越し、その後安定した変化となる。
- 3) カーテン壁下部の地形は、時間の経過とともに左右対称的な地形を形成する。

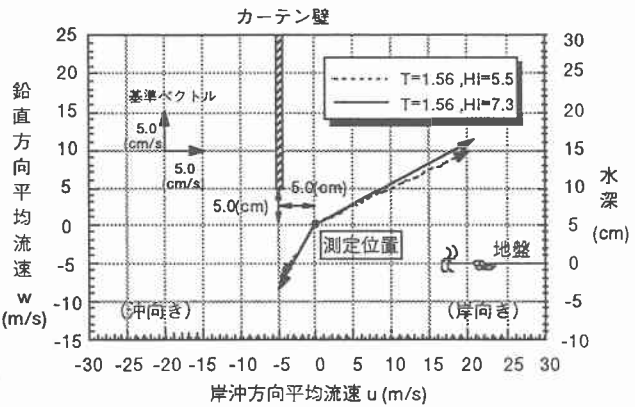


図-13 流速ベクトル

### 今後の課題

本研究での流速の測定は、ある1点に限ったものである。そのため洗掘領域の流れ場を十分に把握できていない。よって今後の課題として、洗掘領域や間隙周辺の流速の検討を行いたいと考える。また波浪条件、間隙の広さなどと洗掘状況についての関係について検討を行いたいと考える。

### 謝辞

本研究の実験を協力して頂いた 本学建設システム工学科4年生の安田佳乃子さんに厚く感謝いたします。

本研究は、文部省科学研究費補助金(A-2)、「海岸保全と波浪発電のためのハイブリッドシステム」(代表者：近藤俊郎)によるものである。

### 参考文献

- (1) 近藤俊郎・藤間 聡・加藤 満・飯島 徹・渡部富治・浦島三郎・太田典幸(1998): 波浪発電と海岸保全のためのハイブリッドシステム, 第45回海岸工学論文集, pp1226~1230.
- (2) 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊地 治(1976): 不規則波実験における入・反射の分離推定法, 港湾技術資料, 運輸省港湾技術研究所, No.248, pp1-24.
- (3) (4) 吉川秀夫(1985): 流砂の水理学, 丸善株式会社出版, p543.