

# 越波型波力発電装置開発に向けた波の打上げ特性に関する研究

## Study on Characteristic of Wave Runup to Develop Wave Overtopping Type Wave-Power Device

田中博通<sup>1</sup>・淀川已之助<sup>2</sup>・鈴木厚志<sup>3</sup>

Hiromichi TANAKA, Minosuke YODOKAWA and Atsushi SUZUKI

In wave-power generation, it is important to clearly identify the running-up characteristics of irregular waves, because the facilities are installed in actual marine waters. The experiment was conducted using a two-dimensional wave-making channel of 52.0 m in length, 1.0 m in width, and 1.5 m in depth. A model scale of  $\lambda=1/25$  was used taking into account the size of the experiment facility, wave-making capacity, wave conditions, etc. The results showed that gentler slopes tended to cause breaking waves, while steeper slopes tended to cause surging waves, and that the difference in wave forms influenced the run-up height of waves. Slopes created the most efficient run-up waves when  $\cot\theta=2.75$  ( $20^\circ$ ).

### 1. はじめに

日本沿岸の波エネルギーの賦存量は、全国平均で6MW/mと推測されているが(高橋・安達, 1986), この波エネルギーはわが国においてほとんど利活用されていないのが現状である。わが国における波力発電は、1970年代後半から世界に先駆けて実用化研究がなされ、実験船「海明」(益田, 1987)で1978年から2カ年にわたって波力発電の実験を行った。その後数々の実証試験が行われたが(田中, 2009), いまだ実用化に至っていない。一方、欧米諸国においては、波力エネルギー技術への関心は高く、欧州における波力エネルギーの実証プロジェクトでは、地域の送配電網への接続が実現し、欧州での海洋エネルギー利用技術の開発は、欧州委員会の地球温暖化対策としての再生可能エネルギーの利用を基本においた政策に支えられ、様々なタイプの波力発電が開発されている。(田中, 2009a) イギリスでは投資総額7000億~1兆円で6カ所の波力発電所と4カ所の潮力発電所を建設することが決定された。このような再生可能エネルギー開発が活発な世界の状況と海洋基本法および海洋基本計画が制定および策定されたわが国においても、まだ商業電力と成りえていない海洋エネルギーを積極的に利活用する技術を開発する必要がある。

著者らは、消波機能と送水機能(ポンプ機能)を兼ね備えた円錐形状浮体を開発し(田中ら, 2005), その後、越波型の波力発電装置に改良してきた。(田中ら, 2009b; Tanakaら, 2009c)

本研究は、波エネルギーを有効に使うために越波型(固定式)波力発電装置開発の基礎的研究として、波高、

周期、傾斜板の角度を変化させて越波高の実験を行い、最も効率の良い角度、すなわち波が高く打ち上がる角度を求めることを目的としたものである。

本研究において、傾斜板に衝突する波は、壁面で碎波して遡上するbreaking waveの場合と碎波しないで遡上するsurging waveの場合とに分けて検討した。

従来、比較的短周期の波の遡上に関する研究としてSaville (1958), Hunt (1959), Savage (1958), 岩垣ら(1966), 細井ら(1962), 湯(1963), 豊島ら(1964, 1965), 高田(1970, 1975)のものがあ、不規則波に関してはBattjes (1974), Mase (1989)などによる研究がある。

本研究は、実海域における様々な波高と周期の条件について波の打上げ高を求める必要性から既往の研究より広い波条件について実験を行った。

### 2. 実験内容

研究開発する波力発電は、図-1に示す固定式の越波型波力発電装置である。波力発電の原理は6種類に大別されるが(田中, 2009b), ここでは越波型とすることから

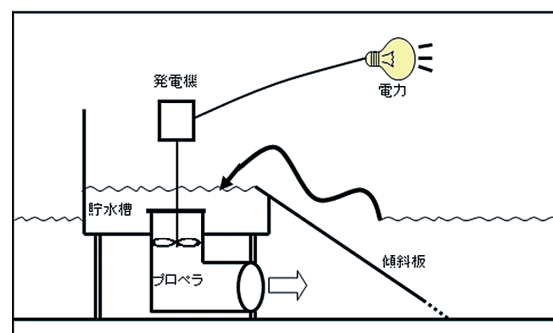


図-1 越波型波力発電の仕組み

1 正会員 工博 東海大学教授海洋学部海洋建設工学科  
2 東海大学研究員  
3 学生会員 修(工) 東海大学大学院海洋学研究科海洋工学専攻

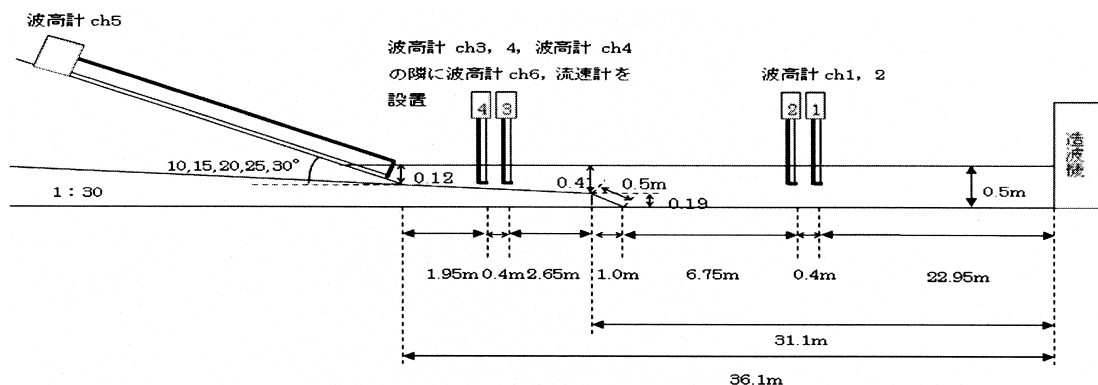


図-2 越波高実験概要図 (水路幅1.0m)

波の打上げ高と越波量の評価が重要となる。海岸防災の観点から、波の打上げ高に関する研究は、R2% (高い方から2%に当たる打上げ高) などのように被災を防ぐための指標を評価することであった。しかし、波力発電の効率を上げるためには、波の打上げ高をより大きくして位置エネルギーを増加することに意義がある。

そこで、東海大学海洋学部臨海実験所にある長さ52.0m、幅1.0m、深さ1.5mの2次元水路を使用して、斜面勾配が規則波では15°から25°、不規則波では10°から30°の範囲で打ち上げ高の実験を行い、連続記録した入射波高と打上げ高を解析して波の諸量と海底勾配を考慮した打上げ高に関する知見を得ることを目的に実験を行った。水路の条件を考慮した上で模型縮尺を1/25とし、実験条件はFroudeの相似則から決定した。

実験方法と解析方法は下記の通りである。

①模型配置図および計測機器配置図を図-2に示す。  
Ch5の波高計は打ち上げ高さ(距離)を計測するものである。また、沖波を計測するために造波機から22.95mの位置に0.4mの間隔で2個の波高計を設置し、この計測値から反射率を求めた。

②実験水深を50cmで固定した。

③実験パラメータの組み合わせを次に示す。

- ・波高  $H_{1/3}$  (cm) : 1.2, 2.4, 3.6, 4.8, 6.0, 8.0, 10.0
- ・周期  $T_{1/3}$  (s) : 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 2.0, 2.4
- ・傾斜板の角度 (°) : 10, 15, 20, 25, 30

上記の実験パラメータを組み合わせで240ケースの実験を行った。

④収録データの仕様は、データ総数8192個、サンプリング時間20Hz、実験ケース240ケースである。

⑤実験は、規則波と不規則波で行なった。不規則波の入射波スペクトルは、Bretschneider-光易型のスペクトルである。実測値から求めた実験波のスペクトルと Bretschneider-光易型はほぼ一致していることも確

認した。しかし、波高が1.0cm前後の小さい時にはエネルギーが若干小さくなった。これは、造波機の制御の限界であるための現象であり、周波数ピークが一致しているため問題はないものとする。よって、今回の実験は実海域の波による実験と見なすことができる。

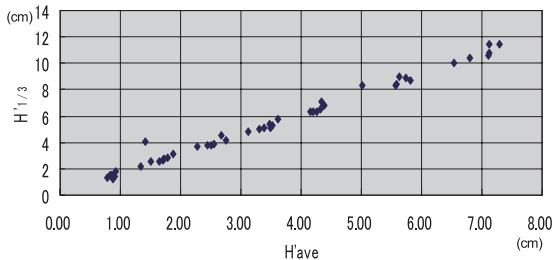
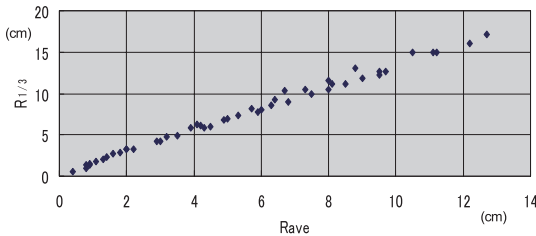
⑥造波開始してから2分30秒後の波が定常になってから計測を開始した。

⑦実験条件を表-1に示す。表-1には現地の値と模型実験の値を記載してある。

⑧本実験において斜面上の波高計で計測した波形デー

表-1 実験条件

| 物理量  | 対象物理量        | 現地量   | 模型量<br>(1/25縮尺) |
|------|--------------|-------|-----------------|
| 長さ L | 波高 $H_{1/3}$ | 0.3m  | 1.2cm           |
|      |              | 0.6m  | 2.4cm           |
|      |              | 0.9m  | 3.6cm           |
|      |              | 1.2m  | 4.8cm           |
|      |              | 1.5m  | 6.0cm           |
|      |              | 2.0m  | 8.0cm           |
|      |              | 2.5m  | 10.0cm          |
|      | 法先水深 H       | 3.0m  | 12cm            |
|      | 沖水深 H        | 12.5m | 50cm            |
| 時間 T | 周期 $T_{1/3}$ | 3s    | 0.6s            |
|      |              | 4s    | 0.8s            |
|      |              | 5s    | 1.0s            |
|      |              | 6s    | 1.2s            |
|      |              | 7s    | 1.4s            |
|      |              | 8s    | 1.6s            |
|      |              | 10s   | 2.0s            |
|      |              | 12s   | 2.4s            |
|      | 波の作用時間T      | 2048s | 409.6s          |

図-3  $H'_{ave}$  と  $H'_{1/3}$  の比較 ( $\cot\theta = 5.67$ )図-4  $R_{ave}$  と  $R_{1/3}$  の比較 ( $\cot\theta = 5.67$ )

タに対し、静水面を基準としてプラスで推移した波高を  $H$  とし、それら全てのデータを平均したものを  $H'_{ave}$ 、大きい波から順に  $1/3$  を並べて平均したものを  $H'_{1/3}$  とした。また、求めたそれぞれの波高に  $\sin\theta$  を掛けて打ち上げ高さ ( $R$ ) に変換した値を  $R_{ave}$ 、 $R_{1/3}$  とした。この波の打ち上げ高さの算定は高田 (1970) による解析方法と同様である。

本実験結果 (不規則波) から  $H'_{ave}$  と  $H'_{1/3}$ 、 $R_{ave}$  と  $R_{1/3}$  を比較した結果、図-3 と図-4 のようになった。図より  $\theta = 10^\circ$  ( $\cot\theta = 5.67$ ) と  $30^\circ$  ( $\cot\theta = 1.73$ ) それぞれについて  $H'_{ave}/H'_{1/3} = 0.63$ 、 $R_{ave}/R_{1/3} = 0.70$  と  $H'_{ave}/H'_{1/3} = 0.63$ 、 $R_{ave}/R_{1/3} = 0.63$  となった。換言すれば  $H'_{1/3}$  と  $R_{1/3}$  はそれぞれの平均値の約 1.6 倍である。以後、本研究では平均的に波エネルギーを得ることに意味があることから、過去の論文 (高田, 1970; Mase, 1989) を参考に  $R_{ave}/H'_{1/3}$  の値について考察する。

### 3. 実験結果

斜面に入射波が遡上すると波エネルギーは碎波と底面摩擦によって一部のエネルギーを失いながらポテンシャルエネルギーに変換され、天端の高さによっては越波を生ずる。エネルギー損失および越波の多いほど反射エネルギーは小さくなる。このように、波の遡上、越波および反射は、波動エネルギーとして相互に関連性を持っているが斜面の法勾配、波形勾配、水深および海底勾配などによってそれらの現象は著しく異なる。

今回の波の打上げ高の定義は、斜面を最高に昇りきった瞬間の遡上高とする。遡上高は静水面からの高さ  $R$  と

し、沖波の波高  $H_{1/3}$  に対する相対遡上高  $R/H_{1/3}$  で表わした。また、傾斜板角度 ( $^\circ$ )、波高  $H_{1/3}$  (cm)、周期  $T_{1/3}$  (s) を変化させて実験を行い、斜面角度と相対遡上高 ( $R_{ave}/H_{1/3}$ )、イリバーレン数 ( $Ir$ ) と相対遡上高 ( $R_{ave}/H_{1/3}$ ) の関係について検討した。有義波高  $H_{1/3}$  は沖波波高であり、波長 ( $L$ ) は沖波有義波周期に対する波長である。

#### (1) 規則波

##### a) $H_{1/3}/L$ に対する各傾斜板の角度と $R_{ave}/H_{1/3}$ の関係

図-5 は  $H_{1/3}/L$  が 0.051 における斜面勾配 ( $\cot\theta$ ) と  $R_{ave}/H_{1/3}$  との関係である。ここで  $L$  は沖波から換算した波長である。この図には本実験結果と高田, Saville, Savage らの実験結果が併記され、これらの実験結果とはほぼ重なることが分かる。しかし、 $H_{1/3}/L = 0.019$  において傾向が若干異なった結果となった。これは実験ケースが少なく、彼等の実験は  $H_{1/3}/L = 0.019$  に対し本実験が  $H_{1/3}/L = 0.020$  である点や他の研究とは海底勾配、 $h/H$  の相違が影響したものと考えられる。

##### b) イリバーレン数 ( $Ir$ ) と $R_{ave}/H_{1/3}$ の関係

図-6 は、イリバーレン数 ( $Ir$ ) と  $R_{ave}/H_{1/3}$  の関係である。実験時に波の様子を観測し、観測時間の  $2/3$  以上の現象をもって breaking waves と surging waves であるか判断し整理した。従来、波の打上げ高はイリバーレン数の関係でよく表すと言われているが、斜面角度によって傾向が異なり、全体的に斜面角度が増加するほど  $Ir$  の値が同じ場合、 $R_{ave}/H_{1/3}$  は小さくなった。これは、斜面角度

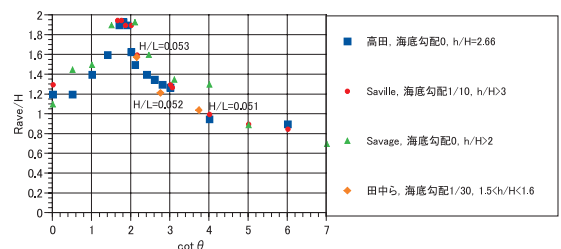
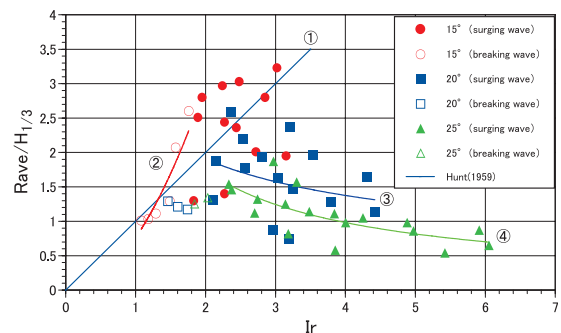
図-5  $H_{1/3}/L = 0.051$  における  $\cot\theta$  の  $R_{ave}/H_{1/3}$  の変化

図-6 イリバーレン数と平均打上げ高の関係

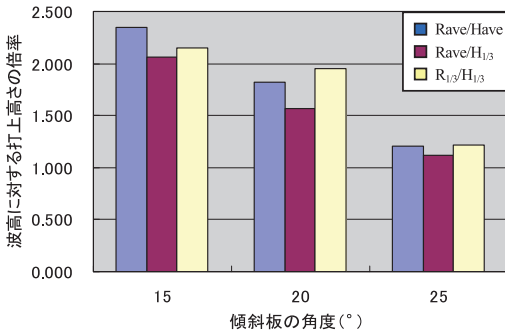


図-7 各角度に対する相対打上高の倍率

が大きくなると反射率が増加し、遡上する運動エネルギーが減少することによるものである。Ir>2 以上においては斜面角度に関係なく surging waves となった。図中の数字で示す既往の研究 (Hunt, 1959) と今回得た実験式は下記の通りである。

- ①  $R/H_0 = Ir$  ( $0.1 < Ir < 0.3$ ) (Hunt)
- ②  $Rave/H_{1/3} = 0.761 Ir^{1.97}$  ( $\theta = 15^\circ$ , breaking waves)
- ③  $Rave/H_{1/3} = 2.64 Ir^{-0.471}$  ( $\theta = 20^\circ$ , surging waves)
- ④  $Rave/H_{1/3} = 3.09 Ir^{-0.823}$  ( $\theta = 25^\circ$ , surging waves)

図から分かるように、斜面勾配  $15^\circ$  の場合は surging waves と breaking waves の境界が明瞭でなく、surging waves についての定式化は敢えて行わない。

#### c) 傾斜板の角度による打ち上げ高さ

図-7は各傾斜板の角度における Rave/Have, Rave/ $H_{1/3}$ ,  $R_{1/3}/H_{1/3}$  の全てのデータから平均を求めた打ち上げ高さである。規則波による遡上し易い最適な角度は  $\cot\theta = 3.73$  ( $15^\circ$ ) であると言え、その時の波高に対する打ち上げ高は Rave/Have, Rave/ $H_{1/3}$ ,  $R_{1/3}/H_{1/3}$  の順に 2.35, 2.06, 2.15 倍となった。規則波の場合、図-6と図-7より、波の打ち上げ効果のある斜面角度は  $15^\circ$  であった。

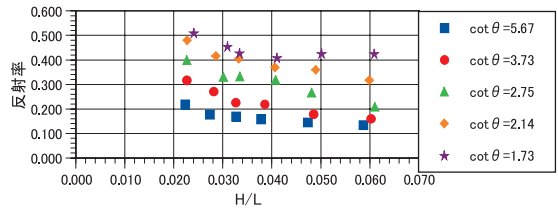
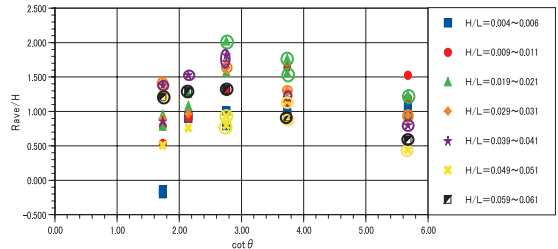
#### (2) 不規則波

##### a) 反射率

図-8は  $H_{1/3}/L$  に対する各傾斜板角度の反射率である。実験条件より波高を固定し周期を変化させて示してある。図より波高が変化しても傾斜板の角度が大きい程反射率が高く、傾斜板の角度が低い程反射率が低いことが分かる。打上げ効率が良かった  $\cot\theta = 2.75$  では反射率が  $0.2 \sim 0.4$  付近で推移している。また、 $H_{1/3}/L$  が大きいほど反射率が低くなる傾向にあるが、これは波の性質と後述する breaking waves の影響があるものと考えられる。

##### b) $H_{1/3}/L$ に対する各傾斜板の角度と Rave/ $H_{1/3}$ の関係

図-9は  $H_{1/3}/L$  をパラメータとして各傾斜板の角度と Rave/ $H_{1/3}$  についてまとめたものである。図中のプロットに対して○が付いているが breaking waves であり、○の付いていないプロットは surging waves となっている。ほ

図-8 反射率 ( $H_{1/3}=10.0\text{cm}$  固定,  $T_{1/3}=1.0 \sim 2.4\text{s}$ )図-9 各  $H_{1/3}/L$  における  $\cot\theta$  と Rave/ $H_{1/3}$ 

ぼ全ての  $H_{1/3}/L$  において  $\cot\theta = 2.75$  のときに Rave/ $H_{1/3}$  が最大となることが分かる。波形勾配が大きい  $H_{1/3}/L = 0.059 \sim 0.061$  のときは角度が小さい  $\cot\theta = 1.73$  の方が run up でき、波形勾配が小さい  $H_{1/3}/L = 0.004 \sim 0.006$  のときは  $\cot\theta = 5.67$  の方が run up できることが分かる。 $H_{1/3}/L = 0.019 \sim 0.021$  において breaking waves と surging waves の境目であり、surging waves から breaking waves に変化する過程で Rave/ $H_{1/3}$  が大きくなる。 $H_{1/3}/L = 0.019 \sim 0.021$  において Rave/ $H_{1/3}$  では波高に対して 2 倍近く run up した。打上げに最適な角度は  $\cot\theta = 2.75$  ( $20^\circ$ ) である。

##### c) イリバーレン数 (Ir) と Rave/ $H_{1/3}$ の関係

図-10は、イリバーレン数 (Ir) と Rave/ $H_{1/3}$  の関係である。規則波の実験と同様に、実験時に波の様子を観測し breaking waves と surging waves であるか判断した。この図に示す Ir 数の範囲は、既往の研究よりも広範囲となつて

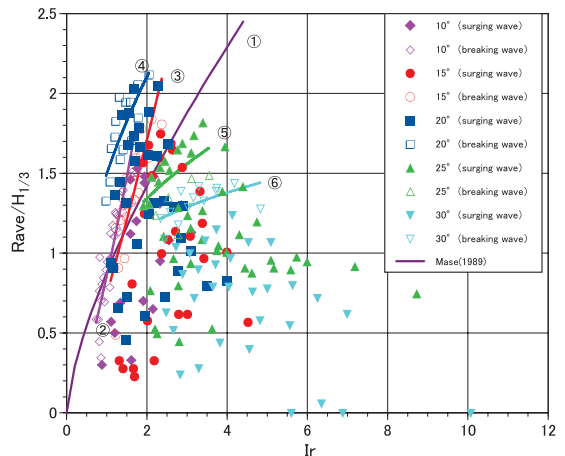


図-10 イリバーレン数と平均打上げ高の関係

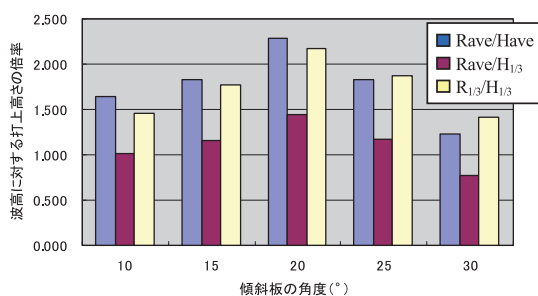


図-11 各角度に対する相対打上高の倍率

いる。規則波同様、波の打上げ高は $Ir$ 数だけでなく斜面角度によって傾向が異なり、斜面角度 $20^\circ$ までは増加し、その後減少する傾向となった。breaking wavesとsurging wavesの区別も斜面角度で異なった。波高と波形勾配が増加するにつれ、沖で碎波することになり、斜面板の位置における波の現象のみで打上げ高を評価することは限界がある。図中の数字で示す既往の研究(Mase, 1989)と今回得た実験式は下記の通りである。ここでは、傾向が明らかなbreaking wavesについて記す。

- ①  $R/H_0 = 0.88Ir^{0.69}$  ( $1/30 < \tan\theta < 1/5$ ) (Mase)
- ②  $Rave/H_{1/3} = 0.860Ir^{1.34}$  ( $\theta = 10^\circ$ , breaking waves)
- ③  $Rave/H_{1/3} = 0.740Ir^{1.20}$  ( $\theta = 15^\circ$ , breaking waves)
- ④  $Rave/H_{1/3} = 1.49Ir^{0.490}$  ( $\theta = 20^\circ$ , breaking waves)
- ⑤  $Rave/H_{1/3} = 1.04Ir^{0.369}$  ( $\theta = 25^\circ$ , breaking waves)
- ⑥  $Rave/H_{1/3} = 1.00Ir^{0.234}$  ( $\theta = 30^\circ$ , breaking waves)

#### d) 傾斜板の角度による打ち上げ高さ

図-11は、各傾斜板の角度に対して $Rave/Have$ ,  $Rave/H_{1/3}$ ,  $R_{1/3}/H_{1/3}$ の全てのデータの平均値を示したものである。この図から、不規則波による遡上し易い最適な角度は $\cot\theta = 2.75$  ( $20^\circ$ )であることが分かる。その時の沖波波高に対する打ち上げ高は $Rave/Have$ ,  $Rave/H_{1/3}$ ,  $R_{1/3}/H_{1/3}$ の順に2.23, 1.45, 2.17倍となった。

## 4. 結論

以下に主要な結論を述べる。

- 1) 最も効率良くrun upした傾斜板の角度は、規則波で $15^\circ$ 、不規則波で $20^\circ$ の時であった。
- 2) 規則波、不規則波とも波の相対打上げ高 ( $Rave/H_{1/3}$ ) はイリバーレン数 ( $Ir$ ) と関係はあるが、さらに斜面勾配、斜面までの波の状況および反射率と関係する。

- 3) 越波型波力発電においては、 $Rave/H_{1/3}$ が1.0以上である周期1.0s (実海域で5.0s)以上の海域が波力発電の立地として望ましいと言える。

謝辞：本研究は、独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構の「新エネルギー技術研究開発」による成果であることを付記する。

## 参考文献

- 岩垣雄一・井上雅夫・大堀晃一 (1966)：のり面上の波の遡上機構に関する実験的研究，第13回海講講演集，pp. 198-205.
- 高田彰 (1970)：波の遡上，越波および反射の関連性について，土木学会論文集，第182号，pp. 19-30.
- 高田彰 (1975)：規則波の打上げ高および越波量の定式化について，第22回海講講演集，pp. 377-390.
- 高橋重雄，安達崇 (1989)：日本周辺の波パワーとその利用に関する一考察，第36回海講論文集，pp. 874-878.
- 田中博通・鈴木厚志・淀川巳之助 (2009a)：沿岸5地点の波エネルギー賦存量と越波型波力発電装置の開発，第21回海洋工学シンポジウム講演論文集，日本海洋工学会，pp. 1-6.
- 田中博通，鈴木厚志，淀川巳之助 (2009b)：波力発電の現状と重力式（越波型）波力発電装置の開発，海洋開発論文集，第25巻，pp. 359-364.
- 田中博通・長津安洋・真鍋安弘 (2005)：浮遊渚（円錐形状浮体）の消波特性及び送水特性に関する実験的研究，海洋開発論文集，第21巻，pp. 553-558.
- 豊島修・首藤伸夫・橋本宏 (1964)：海岸堤防へのうちあげ高－海底勾配1/30－，第11回海講講演集，pp. 260-286.
- 豊島修・首藤伸夫・橋本宏 (1965)：海岸堤防へのうちあげ高－海底勾配1/20－，第12回海講講演集，pp. 180-192.
- 細井正延・三井宏 (1962)：碎波点より陸側にある海岸堤防への波のうちあげ，第9回海講講演集，pp. 143-148.
- 益田善雄 (1987)：日本の波力発電，霞出版社.
- 湯鱗武 (1963)：碎波付近の遡上に関する研究，第10回海講講演集，pp. 121-126.
- Battjes, J. A. (1974): Surf Similarity, Proc. 14<sup>th</sup> Coastal Engrg. Conf., ASCE, pp. 466-480.
- Hunt, I. A. Jr. (1959): Design of Seawalls and Breakwaters, J. of Waterways and Harbors Div., ASCE, Sept., pp. 123-152.
- Mase, H. (1989): Random Wave Runup Height on Gentle Slope, J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Eng., Vol. 115, No. 5, pp. 649-661.
- Saville, T. Jr (1958): Wave Run-up on Composite Slopes, Proc. 6<sup>th</sup> Eng. Conf., ASCE, pp. 691-699.
- Savage, R. P. (1958): Wave Run-up Roughed and Permeable Slope, Proceedings, ASCE, WW 1, Aug, Paper 1640.
- Tanaka, H., A. Sumita, A. Suzuki and Y. Manabe (2009c): Experimental Study on Water Flow Characteristics of Conical Floating Structure, 28<sup>th</sup> International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE2009), ASME, OMAE2009-79817.