

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 6 日現在

機関番号：32644

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360360

研究課題名(和文) 越波型波力発電開発に向けた越波量の定式化とそのシミュレーション技術の開発

研究課題名(英文) Formulation of volume of overtopping towards wave overtopping type wave power generation development and development of the simulation technology

研究代表者

田中 博通 (Tanaka, Hiromichi)

東海大学・海洋学部・教授

研究者番号：90134014

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：海洋エネルギーを活用する技術を研究開発するために現在、越波型波力発電装置の開発を行っている。この越波型波力発電装置の実用機を設計するために一番必要となる要素は、波高と周期が変化する海洋波の越波量を把握することである。そこで本研究は、実際の海洋波である不規則波の有義波高と有義波周期に対する越波量を実験結果および波の統計解析と波動理論により定式化するとともに、砕波と越波現象を平面的に数値計算することが可能な数値計算ソフトを応用して、越波量を算定するシミュレーション技術を開発した。
その結果、越波量を波エネルギーの関係で定式化するとともに、越波現象を数値シミュレーションする手法を確立した。

研究成果の概要(英文)：In order to do research and development in the technology of utilizing ocean energy, development of wave overtopping type wave power generation equipment is performed now. The element which is most needed in order to design this wave overtopping type wave power generation equipment is grasping the volume of overtopping of the sea wave from which wave height and period change. Then, this research formulized the volume of overtopping to the significant wave height and the significant wave period of an irregular wave which are actual sea waves by experimental findings, and the statistical analysis and the wave theory of the wave. Moreover, the simulation technology which calculates volume of overtopping was developed. As a result, while formulizing volume of overtopping due to wave energy, the technique of carrying out the numerical simulation of the wave overtopping phenomenon was established.

研究分野：流体力学

キーワード：波力発電 海洋エネルギー 越波量 不規則波 数値シミュレーション 越波式波力発電

1. 研究開始当初の背景

わが国は 1970 年代後半からおもに振動水柱型の波力発電の研究開発は行ってきたが、未だ実用化に至っていない。一方、近年欧米諸国においては、海洋エネルギー利用技術の開発が積極的に行われ、様々なタイプの波力発電が開発されている。当初、フロート式の円錐形状浮体式の越波式波力発電装置を開発していたが、より波エネルギーを無駄なく得るために固定式とした。固定型越波式波力発電は、波が斜面を遡上することにより波エネルギーが位置エネルギーに変換され、貯水槽の水位と周囲海域の水位差によって自然放流するときの運動エネルギー（送水エネルギー）をプロペラ等が受けるトルクにより発電機で発電する方式である。この越波式波力発電を設計し、実用化するために必要なことは、波エネルギーに対する越波量を求めることである。

2. 研究の目的

本研究は、全国港湾波浪情報網 (NOWPHAS) の 10 年間の観測データを基にわが国沿岸の年間波エネルギー賦存量を把握想定し、波データを統計処理することによって波高と周期の頻度分布について考察し、有義波高 ($H_{1/3}$) と有義波周期 ($T_{1/3}$) に対する越波量を実験と波動理論により定式化するとともに、砕波と越波現象を平面的に数値計算することが可能なソフトを応用して、越波量を算定するシミュレーション技術を開発することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 全国港湾海洋波浪情報網 (NOWPHAS) の 10 年間の波高・周期別頻度統計を使って、全国周辺海域の波浪特性を調査し、波高と周期の頻度分布を求める。

(2) 波高と周期および越波揚程を変化させて越波量の実験を行い、その結果を基に波の諸量に対する不規則波のエネルギー特性と越波量の関係を求める。

(3) 実験データの波形を境界条件として砕波現象を平面的に数値計算できる流体計算ソフトを応用した越波量のシミュレーション技法を開発する。

4. 研究成果

(1) 国土交通省が長年観測している全国港湾波浪情報網 (NOWPHAS) の年間データを基にわが国沿岸の年間波エネルギー賦存量を把握し、発電効率を仮定して発電量の試算をするとともに、NOWPHAS の 20 分間の平均波高と平均周期の頻度分布を作成し、Rayleigh 分布などの既往の分布との比較を行い、さらに新たな頻度分布の概念を提案した。

Bretschneider-光易スペクトルから求められる不規則波の波エネルギー式である (1)

式から単位幅当たりの波パワー (P_w) を求めた。

$$P_w = 0.441H_{1/3}^2 T_{1/3} \quad (\text{kW/m}) \quad (1)$$

61 地点の年間波エネルギー量を算定した結果、東北地方の年間波エネルギーが 30,000kW/m を超え、特に日本海側では 40,000kW/m を超える観測所がある。稼働率 (95%)、発電効率 (15%) として年間発電量を求めると酒田では 12,800kW/m となる。

波高の頻度分布は、図 1 に示すように標準偏差を考慮した (2) 式の Rayleigh 分布で表すことができる。

$$p\left(\frac{H}{H_m}\right) = \left(\frac{H_m}{\sigma}\right)^2 \frac{H}{H_m} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{H_m}{\sigma}\right)^2 \left(\frac{H}{H_m}\right)^2\right\} \quad (2)$$

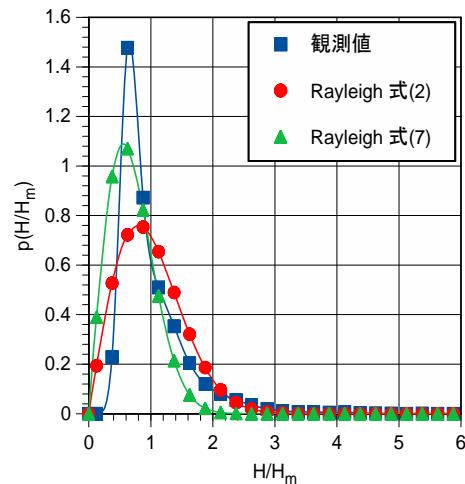


図 1 $p(H/H_m)$ の分布と Rayleigh 分布

(御前崎 2006 年)

ピーク値は異なるが、上式は比較的観測値と一致している。他の観測所の平均波高の頻度分布もよく一致した。

周期の頻度分布は、(3) 式の Weibull 分布の 4 次が観測値とよく一致した。図 2 に

$$p\left(\frac{T}{T_m}\right) = \beta m \left(\frac{T}{T_m}\right)^{m-1} \exp\left\{-\beta \left(\frac{T}{T_m}\right)^m\right\} \quad (3)$$

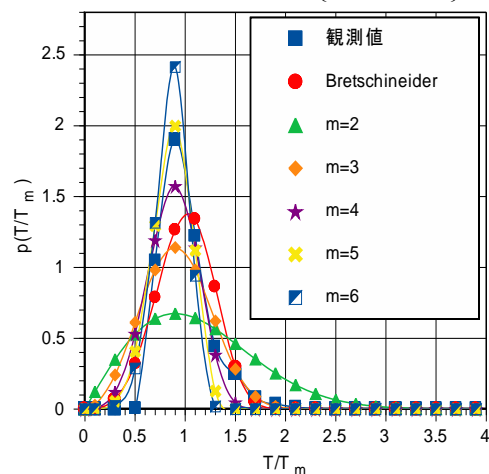


図 2 $p(T/T_m)$ の分布と Bretschneider の分布、

Weibull 分布比の較 (御前崎 2006 年)

Weibull 分布の $m=2\sim5$ としたときの分布と Bretschneider 分布を示す。また、各観測所の B は一定値でなく、 σ_T/T_m に関係することがわかった。

(2) 波高、周期と越波揚程を変化させて単水槽と多段水槽の場合の越波量について実験を行い、波特性と越波量の関係について検討した。

①単水槽の場合

越波量特性実験は、東海大学海洋学部臨海実験場の平面水槽 (22.0m×23.0m×1.2m) に、図 3 に示す貯水槽 (2.0m×1.0m×0.8m) を設置して行った。この貯水槽の前面は傾斜板を取り付けるようになっており、様々な越波揚程 (R) に対応すべく上下に可動式になっている。なお、模型縮尺は、1/10 模型、実験条件は Froude の相似測を考慮して決定した。

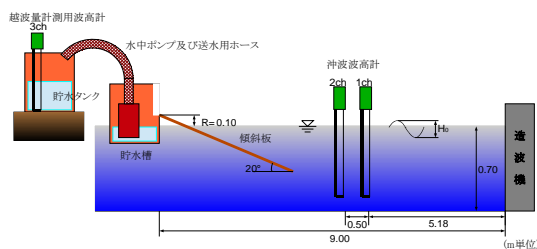


図 3 越波量実験概要図(単水槽)

図 4 は、越波揚程が $R=0.8m, 1.0m, 1.5m, 2.0m$ に対する波エネルギーと越波量の関係である。それぞれの越波揚程において、越波量は波エネルギーに対して直線的に増加する。ここで波エネルギーと越波量の関係式を $q = \alpha E$ (q : 単位幅当たりの越波量、 E : 単位幅当たりの波エネルギー、 α : 係数) で表すと、越波揚程 (R) が $0.8m, 1.0m, 1.5m, 2.0m$ のときの α の値はそれぞれ $0.02312, 0.02234, 0.01390, 0.00840$ となった。

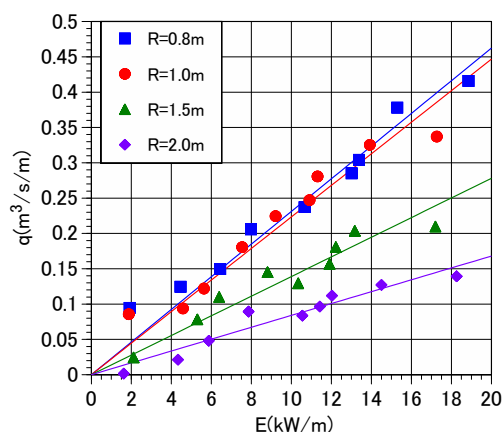


図 4 波エネルギーと越波量の関係

(単水槽)

②多段水槽の場合

図 5 に示す 4 段の水槽を作成し、それぞれの水槽に流入する越波量を計測した。実験で使用する多段水槽の 1 つの寸法は、幅 2.0m、

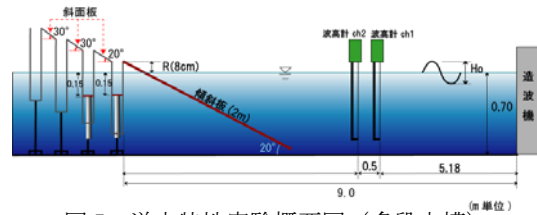


図 5 送水特性実験概要図(多段水槽)

奥行 $0.1m$ 、高さ $1.0m$ であり、水槽間隔は水槽間に取り付けた斜面板 (水を遡上させる板) の角度により異なり、斜面板角度が $20^\circ, 30^\circ$ の場合はそれぞれ $0.22m, 0.14m$ とした。図 5 の多段水槽の概要に示すように、波データは、傾斜板前方に設置した 2 本の波高計により得られたデータを用いて沖波波高および周期を求め、入射波分離法より反射率を求めた。また、各水槽に流入する越波量は、各水槽に接続されたダイヤフラムポンプを起動し、各段の水槽ごとに用意した貯水タンクに貯水した。また、貯水タンク内に設置した波高計により水位変化を求め、その水位変化に水槽の底面積を乗じて越波量とした。なお、模型縮尺は、1/10 模型、実験条件は Froude の相似測を考慮して決定した。

図 6 は 1 段目の貯水槽の高さ (越波揚程: R) を $0m, 0.8m, 1.5m$ としたときの各段の水槽の越波量と 4 段の水槽の越波量を合計した全越波量をと波エネルギー (E) の関係である。各水槽の越波揚程が高くなるにつれ越波量は急激に減少する。各越波揚程について入射波エネルギー E (kW/m) と単位幅当たりの越波量を q ($m^3/s/m$) について係数 α を求めると、越波揚程 $R=0m, 0.8m, 1.5m$ のときの α の値はそれぞれ $0.02484, 0.02221, 0.01035$ となった。

越波揚程 (R) に対する越波量を波エネルギーの関係から求めることができれば、各地域の NOWPHAS データを基に波力発電の発電量を見積もることが可能となる。

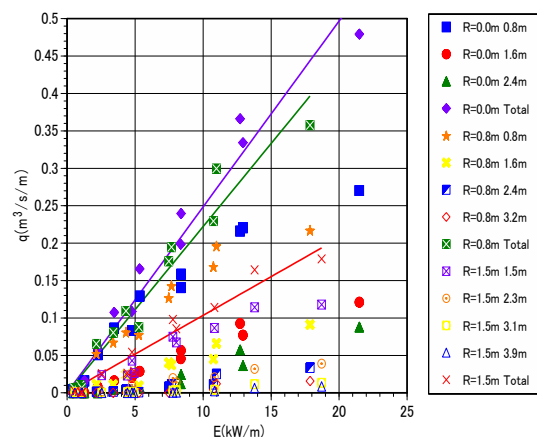


図 6 波エネルギーと越波量の関係(4段水槽)

(3) 砕波をとまなう越波現象の数値シミュレーションする技術を開発した。支配方程式は、連続の式 (質量保存則)、運動方程式 (運動量保存則)、エネルギー式 (エネルギー保存

則) である。これら 3 つの式をある空間内において時間的に満足するように連立方程式を組み立てて計算を行った。数値計算を行う際に、計算格子に存在する流体の体積含有率を 0~1 の値で流体界面を表現する手法である VOF 法を用いた。

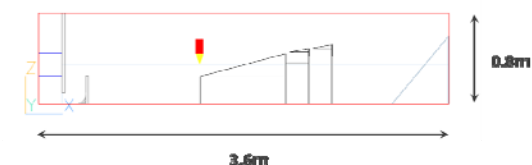


図 7 多段式越波式波力発電模型の形状

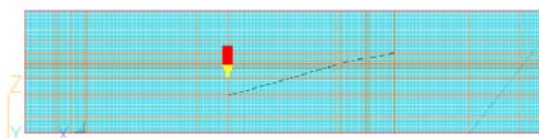


図 8 メッシュ分割図 (二次元)

二次元で作成した模型を図 7、模型にメッシュを入れたものを図 8 に示す。全メッシュ数は 17,451 個である。

本研究では、16 種類の乱流モデルでそれぞれ数値計算を行い、その中で最も実験時の波の動きに近いものを選び、波高や水位変化を算出した。16 種類のモデルのうち、波の動きの特徴を分類すると大きく LES モデル (サブグリッドスケール)、Kato-Launder モデル、プラントルの 1 方程式モデルの 3 通りに分類できる。この 3 つのモデルを比較すると、プラントルの 1 方程式モデルが最も実験時の波の挙動に似ており、他のモデルのように波が上方方向に進んでしまうことがなく、水面の変化が再現されていた。従って、このモデルを使用して水位変化を計算することとした。

規則波の水位変動を与えたときの越波状況を図 9 に示す。遡上部沖側法先地点における自由水面の水位変化を実験値と計算値で比較した。VOF 値を 0.2 に設定したところ、波高に関して、計算した平均波高は実験値の約 82% であり、8 割の再現性が確認できた。

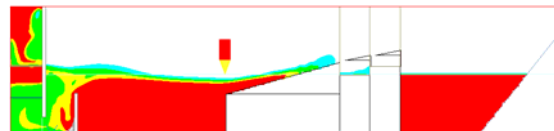


図 9 規則波の計算結果 (H=0.37m、T=1.15 s)

実海域における波は不規則波であるため、不規則波の水位変動を作製した。本研究では同一方向、多周波数の規則波が重なり合ったものを不規則波とした。不規則波を作製するにあたり、周波数スペクトル解析を行った。周波数スペクトルは、日本で最も使用されている Bretschneider・光易スペクトルを用いて不規則波を作製した。

不規則波の水位変動を与えたときの越波

の状況を図 10 に示す。

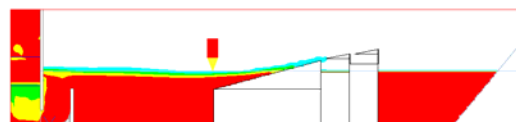


図 10 不規則波の計算結果

(H=0.37m、T=1.15 s)

どの計算ケースでも水位について計算値が理論値よりも大きい値になった。これは、規則波、不規則波とも VOF 値を小さく設定してしまったからであり、初期水位をずれてしまった分を調整すれば解決する。さらに、すべての計算ケースにおいて、計算値よりも小さい水位変化となった。これは、不規則波は規則波と違い複雑な波形となっているため、小さな変動には追従できているが、急激な大きい変動には追従できていなかったことが原因であると考えられる。すべての計算ケースについて、理論値の波形が計算値の何倍か計算した結果、約 1.8 倍であることが分かった。また、計算値が実験値よりも小さい波形を示しているため、流量は実験よりも少なく評価してしまっている可能性がある。特に、不規則波について、波高が実験値の約半分となっているため、不規則波の波形を作製する際には初期の入力波高を調整しなければならないことが分かった。さらに、VOF 値を小さく設定してしまったため、初期水位の調整も必要であることも分かった。規則波に関しては実験と計算は同様の結果となった。次に規則波と不規則波を比較してみると、不規則波にすることにより二段目の越波が少なくなった。

次に、越波式波力発電装置を二次元から三次元に拡張し、かつ寸法を実海域に換算して計算を行った。実海域の対象は、静岡県御前崎港で、水深は 12~13.5m、装置形状は幅 10m、奥行き 15m、高さ 5.46m、スロープ角度 20 度と仮定した。計算メッシュ分割図を図 11 に示す。全メッシュ数は 622,440 個とした。

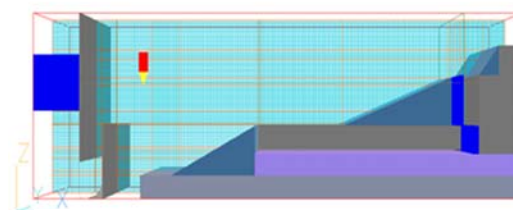


図 11 メッシュ分割図 (三次元)

水位変化を比較することにより、VOF 値を 0.5 に設定することで入射波条件を最も満足させることができるということが分かった。したがって、二次元では VOF 値を 0.2 と設定したが、三次元での計算は VOF 値を 0.5 に設定して計算した。

図 12 に不規則波の場合の計算結果を示す。なお、不規則波を作製する際は、波高を 1.8

倍して入力した。まず、規則波は途中計算値が大きくなってしまっているものを除けば、水位変化の計算値と理論値の差は1%未満であり、高い再現性があることが分かった。次に、不規則波の場合は、水位変動を1.8倍することにより、水位変化はBretschneider・光易スペクトルを用いた水位変動とほぼ一致した。

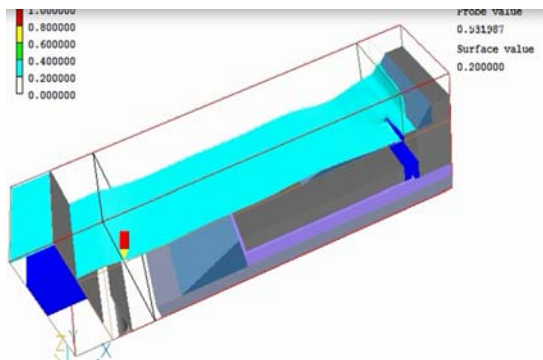


図 12 不規則波の計算結果 (三次元)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 6 件)

- ① 田中 博通、居波 智也、櫻田 哲生、越波式波力発電装置開発のための越波量と送水量の特性、土木学会論文集B2(海岸工学)、査読有、Vol. 70、No. 2、2014、pp. I __1301-I __1305
- ② 田中 博通、居波 智也、櫻田 哲生、波力発電の国内外の現状と越波式波力発電の研究開発、エネルギーと動力、査読有、No. 283、2014、pp. 68-79
- ③ 田中 博通、山梨 温、居波 智也、わが国沿岸の波エネルギー賦存量と平均波高、平均周期の頻度分布、土木学会論文集B2(海岸工学)、査読有、Vol. 69、No. 2、2013、pp. I __1291-I __1295
- ④ Masato Minami、Hhiromichi Tanaka、Research on The Wave Overtopping Quantity of Overtopping、Proceedings of International Workshop on Ocean Wave Energy、査読有、2013年、pp.1-8
- ⑤ 田中 博通、波力発電の現状と将来展望、日本エネルギー学会誌、査読無、Vol. 92、2013、pp. 241-247

[学会発表] (計 13 件)

- ① Masato Minami、Hhiromichi Tanaka、Development of overtopping-type wave power generate equipment、1st International Conference on Renewable Energies Offshore、2014年11月26日、Lisbon(Portugal)

② 居波 智也、田中 博通、櫻田 哲生、越波式波力発電の沿岸域への適応可能性、日本沿岸域学会、2014年7月25日、東海大学海洋学部(静岡市清水区)

③ 居波 智也、田中 博通、櫻田 哲生、越波式波力発電装置の一次変換特性、日本エネルギー学会、2014年7月19日、九州大学箱崎キャンパス(福岡市東区)

④ 田中 博通、波力発電の現状と将来の展望および越波型波力発電技術の紹介、日本沿岸域学会(招待講演)、2014年3月3日、日本大学理工学部駿河台校舎(東京都千代田区)

⑤ 居波 智也、田中 博通、山梨 温、越波式波力発電装置開発に向けたわが国の波エネルギー賦存量と地域特性、日本エネルギー学会、日本エネルギー学会、2013年8月5日、工学院大学(東京都新宿区)

⑥ 荷川取将史、田中 博通、居波 智也、越波式波力発電装置開発に関する越波量と放流手法について、日本エネルギー学会、2013年8月5日、工学院大学(東京都新宿区)

⑦ 荷川取 将史、田中 博通、越波型波力発電装置開発に向けた傾斜板長と越波量の関係について、日本エネルギー学会、2012年8月6日、工学院大学(東京都新宿区)

⑧ Hhiromichi Tanaka、Development of Wave Overtopping Type Wave Power Generation Devices、The Proceedings of Isope-2012 Conference、2012年6月21日、Rodos(Greece)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
取得年月日：

国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

[http://sdb01.scc.u-tokai.ac.jp/subject/
env/teacher/htanaka.php](http://sdb01.scc.u-tokai.ac.jp/subject/env/teacher/htanaka.php)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中 博通 (TANAKA, Hiromichi)

東海大学・海洋学部・環境社会学科・教授

研究者番号：90134014

(2) 研究分担者

南 将人 (MINAMI, Masato)

八戸工業高等専門学校・建設環境工学科・

教授

研究者番号：60280319

(3) 連携研究者

()

研究者番号：