

# 不規則波による越波の出現頻度と越波流量の変動性に関する数値実験

## Numerical Experiments on Appearance Frequencies of Wave-overtopping due to Random Waves and Its Variations

山城 賢<sup>1</sup>・吉田明徳<sup>2</sup>・清水将貴<sup>3</sup>

Masaru YAMASHIRO, Akinori YOSHIDA and Masaki SHIMIZU

Generally, it is extremely difficult to determine the exact wave-overtopping rate by random waves because of the irregularity of waves. In this study, the influence of the number of waves acting a seawall on the wave-overtopping rate was investigated by conducting a large number of computations with a numerical simulation model "CADMAS-SURF" based on VOF method. The main conclusions obtained from the results of numerical experiments are: 1) it is necessary to measure about 500 overtoppings to obtain the convergent wave-overtopping rate in a wave train. 2) However, if the appearance frequency distribution of overtopping quantity by individual waves is sufficiently expressed with an exponential distribution, the reliable wave-overtopping rate can be obtained, even if the number of overtopping is about 50 or 60 times.

### 1. はじめに

水理模型実験や数値計算によって不規則波による越波を検討する場合には、ある一定の時間での平均越波量である越波流量が利用される。越波流量は、たとえ同一のスペクトルを有する不規則波を対象としても、入射波の波列の違いにより大きく変動することが知られており、合田ら(1975)は、越波流量推定図を作成した際に、推定値に対する真値の想定範囲を示した。従って、通常、信頼できる越波流量を得るためには、同じスペクトルで入射波の波列を変えた複数回の実験や計算を実施し、できるだけ多くの波を作用させる必要がある。ある波列における作用波の数については、数100波程度が目安とされることが多いように思われるが、具体的な指針のようなものではなく、実験や計算で得られた越波流量が妥当なものかどうか判断することは難しい。このような越波流量に対する作用波数の影響について、Reisら(2008)は混成堤を対象に、入射波の波列と作用波数を変えた実験を行い、作用波数が1,400波程度までは作用波数の増加に伴い越波流量の変動幅が小さくなるが、それ以上作用波数を増やしても越波流量は明確には収束しないと述べている。一方で、一波毎の越波量(あるいは越波流量)や短時間越波流量に関する研究も行われており、例えば、泉宮ら(2006)は消波護岸を対象に現地観測を行い、越波流量の確率分布が指数分布となることを示している。

本研究では、不規則波による越波を検討する際の、信頼性の高い越波流量を得るために必要な作用波数を明らかにすることを目的に、数値シミュレーションモデルによる越波の数値実験を多数実施し、不規則波による越波流量の変動性と不規則波中の個々の波による越波の出現頻度との関連について検討した。

### 2. 数値実験の内容

#### (1) 計算条件

数値モデルには、越波の検討に実績のある数値波動水路CADMAS-SURF Ver.4.0(財団法人沿岸開発技術研究センター, 2001)を使用した。計算条件は、合田ら(1975)による越波流量推定図を参考に、海底勾配1/10の直立護岸(堤前水深 $h=5\text{m}$ 、天端高 $hc=2.6\text{m}$ )を対象とし、入射波は、換算沖波波高 $H_0'=2.48\text{m}$ 、有義波周期 $T_{1/3}=8.7\text{s}$ を設定した。この条件での無次元越波流量は $10^3$ オーダーである。

計算領域を図-1に示す。領域のサイズは、現地スケールで造波ソースから護岸前面までの水平距離を160m(有義波の波長で約1.8波長)、鉛直方向の高さを30mとし、造波位置の水深は15mとした。セルのサイズについては、護岸近傍での越波の状況を精度よく再現する必要があるため可変格子を採用して、水平方向は造波ソースから護岸前面まで0.64~0.5mと変化させ、鉛直方向は静水面の上下5.5m程度の範囲を0.2mとして、それ以外を0.24mと設定した。数値波動水路のセルのサイズについては、一般的な推奨値が示されているが、越波や波の打上げのような複雑な現象を対象とする場合、特に護岸近傍については、問題に応じてより細かなセルを用いる必要があるとされている(財団法人沿岸技術研究センター, 2008)。本研究での設定は、一般的な推奨値に比べて十分に小さ

1 正会員 博(工) 九州大学助教 大学院工学研究院環境都市部門  
2 学生会員 工博 九州大学准教授 大学院工学研究院環境都市部門  
3 正会員 修(工) 株式会社大林組

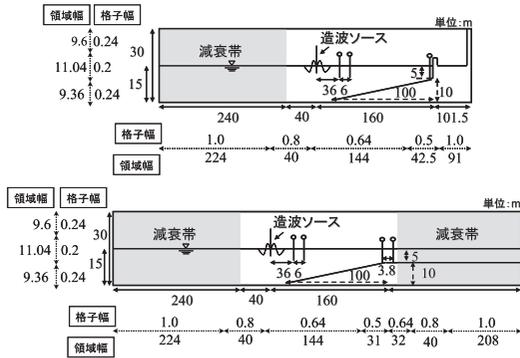


図-1 計算領域

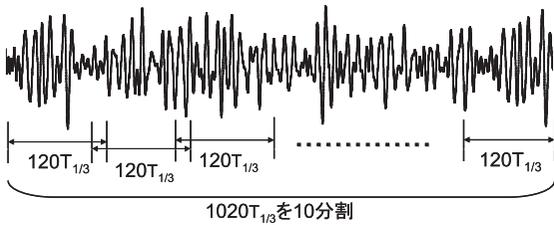


図-2 造波信号の分割

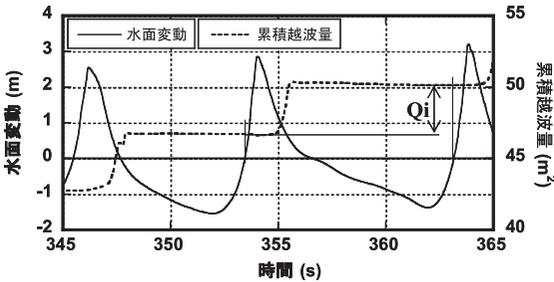


図-3 個々の波による越波量の算定

く、このセルの設定により想定した越波流量を再現できることを予め確認した。なお、護岸位置での入射波を計測するため、図-1下図に示す護岸を除いた領域についても計算を実施した。

入射波は、Bretschneider-光易型スペクトルを有する不規則波とし、造波位置での水深が $h=15\text{m}$ であるため浅水変形を考慮して、有義波高 $H_{1/3}=2.27\text{m}$ 、有義波周期 $T_{1/3}=8.7\text{s}$ とした造波信号を藤原(2005)の方法により作成した。なお、護岸位置( $h=5\text{m}$ )では、有限振幅効果を考慮すると、浅水変形により有義波高は $H_{1/3}=3.02\text{m}$ と推測される。

計算ケースは入射波の初期位相の組合せを変えた波列が異なる4ケース (Case-1~Case-4) とした。各ケースについて $1020T_{1/3}$  (8874s) の造波信号を作成し、計算の安定性を考慮して、図-2に示すように $120T_{1/3}$ 毎に10分割して計算を行った。

計算は、まず、護岸を除いた領域について行い、護岸

設置位置での2箇所の水位変動記録 (波高計間隔 $3.8\text{m}$ ) から、入射波分離推定法により入射波のスペクトルを求め、これが目標のスペクトルに一致するように造波信号の調整を行った。その後、護岸を除いた領域で再度計算を行い、護岸設置位置の水面変動を計測し、ゼロアップクロス法により入射波の個々の波について波高と周期および平均水位を求めた。次に、同じ造波信号を用いて、護岸を設置した領域での計算を行い、護岸背後に設置した越波柵内に流入する水量を記録した。越波流量は、最初の $20T_{1/3}$  (174s) を除いた $100T_{1/3}$  (870s) について、越波柵に流入した水量から算定した。また、図-3に示すように、護岸を除いた領域での計算で得た護岸位置での水面変動と護岸を設置した領域で計算した越波柵内の累積越波量から、一波毎の越波量を求めた。

(2) 入射波の変動

図-4に護岸設置位置における入射波のスペクトルの例を示す。図中の実線は、目標としたBretschneider-光易型スペクトルであり、全ての入射波について、図に示す程度に一致することを確認した。

各波列のケースについて、 $100T_{1/3}$ 毎にゼロアップクロス法で求めた有義波高、有義波周期の平均値と標準偏差を表-1に示す。有義波高は目標値に比べて大きく、 $3.5\text{m}$ から $3.9\text{m}$ 程度である。有義波周期は $8.2\text{s}$ から $8.5\text{s}$ 程度で、目標値よりも短い。この理由は、図-4に示したスペクトルにみられる、高周波数領域の非線形成分と考えられる。ただし、ケース毎の有義波高と有義波周期の標準偏差は小さく、平均値に対する割合 (変動係数) は3%

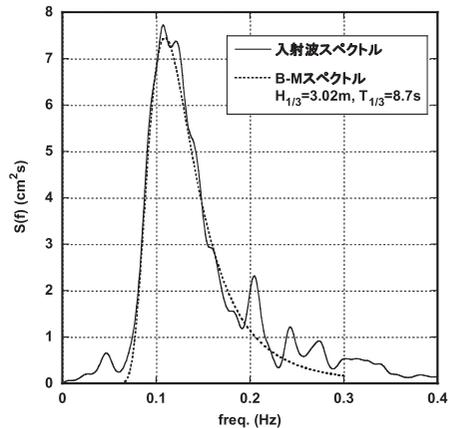


図-4 護岸設置位置での入射波スペクトルの一例

表-1 護岸設置位置での有義波高、有義波周期、平均水位

	有義波高 (m)		有義波周期 (s)		平均水位 (m)	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差
Case-1	3.92	0.078	8.17	0.068	-0.23	0.013
Case-2	3.74	0.076	8.32	0.130	-0.24	0.009
Case-3	3.48	0.071	8.53	0.117	-0.20	0.005
Case-4	3.54	0.095	8.25	0.185	-0.22	0.006

未満である。目標とした有義波高，有義波周期を正確に再現できてはいないが，越波流量の変動性についての検討が主たる目的であるため，これらの入射波を用いて護岸を設置した領域における越波の計算を行った。

### 3. 波の作用時間による越波流量の変動

#### (1) 有義波高と越波流量の関係

図-5は各ケースにおける累積越波量の時系列で， $120T_{1/3}$  間毎に10分割して計算した結果から最初の $20T_{1/3}$ 分を除き， $100T_{1/3}$ 分の累積越波量を繋げて $1,000T_{1/3}$ 間の変化を示している。また，図-6は $100T_{1/3}$ 毎に求めた有義波高と越波流量との関係で，入射波の護岸設置位置での有義波高で無次元化している。なお，図中の $1,000T_{1/3}$ は，各ケースの $1,000T_{1/3}$ 間で算定した無次元越波流量である。

ある期間についての越波流量は，その期間の累積越波量の勾配を示すため，直線的に増加していれば，どの期間を抽出しても越波流量は一定ということになる。図-5より，各ケースの増加率は異なっているものの，いずれ

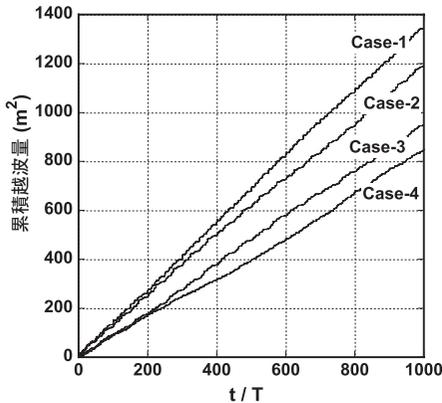


図-5 累積越波量の時系列

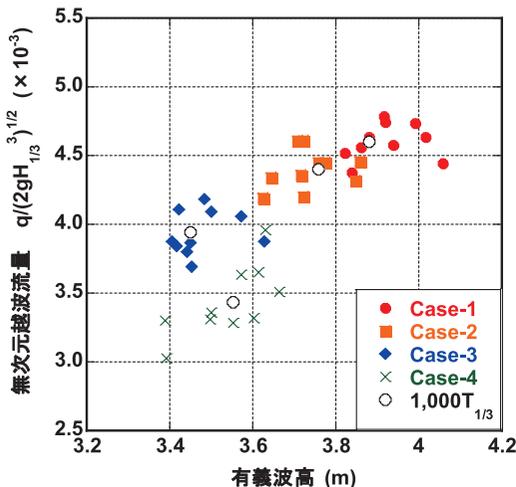


図-6 有義波高と無次元越波流量の関係

のケースも累積越波量は一見するとほぼ直線的に増加しているように見える。しかし，実際には直線ではないため，図-6に示すように， $100T_{1/3}$ 毎に求めた越波流量は $1,000T_{1/3}$ 間での越波流量のまわりにはばらついており，抽出した期間によって越波流量は変動する。なお，有義波高と越波流量の関係をみると，全体的には，有義波高の増大に伴い無次元越波流量は増加している。しかし，有義波高が同程度であるCase-3とCase-4を比較すると，Case-4の越波流量はCase-3に比べて小さくなっている。

#### (2) 波の作用時間による越波流量の収束

図-7に波の作用時間の増加による越波流量の収束を示す。図中の■は通算無次元越波流量で，横軸に示す波作用時間で求めた無次元越波流量である。一方，●は $100T_{1/3}$ 毎に算定した越波流量である。なお，太線で示した一定値は $1,000T_{1/3}$ 間で求めた越波流量である。図より， $100T_{1/3}$ 毎の越波流量は変動しているが，通算の越波流量をみると，Case-1では，最初の $100T_{1/3}$ で得た越波流量からほぼ $1,000T_{1/3}$ で求めた越波流量と等しく，Case-3においても $300T_{1/3}$ 程度でほぼ収束している。収束が遅いCase-2やCase-4においても， $800T_{1/3}$ 程で収束していることがわかる。

#### (3) 越波の回数による越波流量の収束

作用する波の全てが越波を生じるわけではないため，越波が生じた回数による越波流量の収束の状況を調べた。図-8は図-7に示した通算の無次元越波流量( $q_0$ と表記)を越波回数に対して再整理したもので，各ケースとも $1,000T_{1/3}$ 間で求めた無次元越波流量( $q_{0;1,000}$ と表記)により正規化している。本研究で設定した条件では，作用波数に対する越波回数の割合が45%から55%程度で，頻繁に越波が生じる状況である。いずれのケースも無次

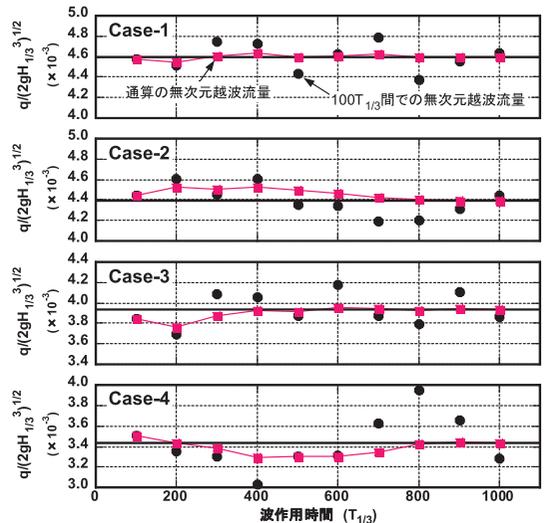


図-7 波の作用時間による無次元越波流量の収束

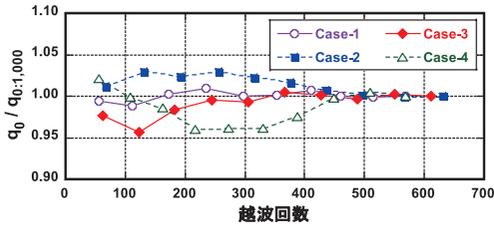


図-8 越波回数による正規化無次元越波流量の収束

元越波流量の変動幅は、1,000T<sub>1/3</sub>における無次元越波流量の±5%以内である。収束の様子をみると、最も収束が遅いケースでも、概ね500回程度の越波回数で無次元越波流量がほぼ一定となっている。また、前述のCase-3とCase-4の越波流量の差は、越波回数異なることが一因と思われ、高波の連りの程度など入射波の波列の特徴が異なるためと考えられる。

4. 越波量の出現頻度と越波流量の変動性

(1) 越波量の出現頻度

図-9は、Case-4について、1,000T<sub>1/3</sub>の波作用時間のうち、最初の100T<sub>1/3</sub>間、最初から連続した200T<sub>1/3</sub>、500T<sub>1/3</sub>、そして1,000T<sub>1/3</sub>間における越波を生じた波の波高（便宜上、越波波高と呼ぶ）の出現頻度分布とそれらの波における越波量の出現頻度分布を示したものである。ただし、波の作用時間が異なると度数が異なるので、縦軸は確率密度で示している。また、横軸は、いずれの作用時間についても、1,000T<sub>1/3</sub>での平均越波波高および平均越波量で正規化しており、階級幅はそれぞれ0.1と0.5である。図中に示す曲線は、越波波高については、正規分布と対数正規分布、越波量については指数分布を示しており、これらの分布は、1,000T<sub>1/3</sub>での結果に当てはめたものを他の作用時間についても示している。

越波波高の出現頻度分布は、入射波全体の波高の出現頻度分布の波高が大きい部分に相当する。図に示すケースでは、平均越波波高より少し小さい側にピークを示している。χ<sup>2</sup>適合度検定の結果では、正規分布と対数正規分布はともに適合しているとはいえなかったが、図のケースについては、感覚的には対数正規分布により近いように思われる。ただし、他のケースでは正規分布に近い形状を示す場合もあった。越波量の出現頻度は、既往の研究で報告されているように指数分布を示し、図にみられるように、波の作用時間（越波回数）が増加するにつれ、指数分布により一致する傾向が明確に認められる。

(2) 越波量の出現頻度分布と越波流量の変動との関連

作用波数が増えれば、越波回数も増加し、個別波の越波量の出現頻度は理想的な指数分布に近づく。また、図-8に示したように、越波回数の増加に伴って越波流量は一定値へ収束する。したがって、越波量の出現頻度と指数

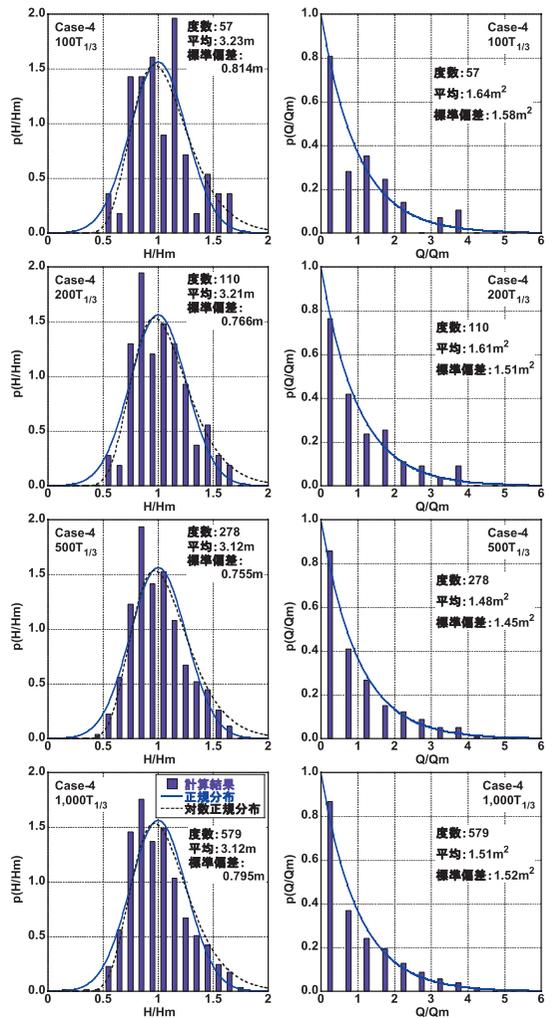


図-9 越波波高と個別波の越波量の出現頻度

分布との一致の程度は越波流量の変動に関連していることが容易に推測される。指数分布との一致の程度を定量化するには、前述のχ<sup>2</sup>による適合度等が利用できるが、これらの適合度は標本数が影響するため、越波回数が異なる場合の比較に難がある。そこで、自乗平均平方誤差(RMSE)を利用した。ただし、越波量の大きさを重み付けしたRMSE (w-RMSE) を次式により求めた。

$$w-RMSE = \sqrt{\left\{ \sum_i^N \{(Q_i/Q_m)(p_c(i) - p_e(i))\}^2 \right\} / N} \dots\dots(1)$$

ここで、Nは図-9に示した分布の階級数、Q<sub>i</sub>/Q<sub>m</sub>はi番目の階級の中央値、p<sub>c</sub>(i)は計算結果による越波量の確率密度、p<sub>e</sub>(i)は指数分布の値である。

図-10にw-RMSEと越波流量との関係を示す。凡例の100T<sub>1/3</sub>は全てのケースにおける波作用時間100T<sub>1/3</sub>（越波回数は50から60回）で算出した正規化無次元越波流量であり、200T<sub>1/3</sub>以上とあるのは、各ケースで波作用時間

を $200T_{1/3}$ から $1,000T_{1/3}$ まで変化させた場合の正規化無次元越波流量である。この図より、 $100T_{1/3}$ での越波流量はw-RMSEが大きい範囲にあり変動幅も大きい。一方で、w-RMSEが小さい範囲には $200T_{1/3}$ 以上（越波回数で100回以上）の越波流量が集中し、変動幅も小さくなっている。このプロットの状況から判断して、プロットの存在範囲の上限と下限を定めると、図中に示す破線のようになる。このように破線を決めると、w-RMSEが0の時に1.0へ収束しないが、これは、図-9にみられるように、正規化の基準とした $1,000T_{1/3}$ での越波量の分布自体に指数分布との差があるためである。ところで、この上下の破線の間隔が越波流量の変動範囲を表わすとすれば、越波流量の変動の範囲はw-RMSEに対して、図-11に示すようになる。すなわち、w-RMSEが0.06から0.03に減少すると、越波流量の変動幅は、16%から5%に減少する。したがって、越波量の出現頻度の指数分布への一致度は越波流量の変動性を見積もる一つの目安となり得る。

## 5. おわりに

不規則波による越波流量を検討する際の越波流量の変動性について、波の作用時間や越波回数および個々の波による越波量の出現頻度との関連を数値実験の結果をもとに考察した。検討の結果、一連の波列に対する越波流量については、500回程度の越波回数でほぼ一定値に収束することがわかった。ただし、少ない越波回数でも収束値に近い越波流量が得られる場合もあり、今回の検討の範囲では、 $100T_{1/3}$ 間（越波回数で50～60回程度）で算定した無次元越波流量の90%は、 $1,000T_{1/3}$ での無次元越波流量との差が±5%以下であった。少ない越波回数でも、無次元越波流量が収束値に近い値を得られているか判断するには、越波量の出現頻度の指数分布への一致度が一つの目安となり、指数分布によく一致しているほど越波流量の変動幅は小さく、収束値に近い値が得られることを示した。

本研究では、越波量の出現頻度の指数分布への一致度を表わすために重み付きRMSEを利用したが、指数分布への一致度と越波流量の変動性を関連付ける適切な指標については検討の余地がある。また、目標となる指数分布を得るには、それなりの越波回数が必要であり、現状では、ある波列の入射波について多くの越波を生じさせて、越波量の頻度分布から推定するしかないと思われる。したがって、非常に小さい越波流量の場合、越波量の頻度分布が得られるほどの越波回数を実験や数値計算で生じさせるのは現実的ではなく、別の観点からの検討が必要と思われる。加えて、波列の特徴によると考えられる越波流量の変動については更なる検討が必要である。

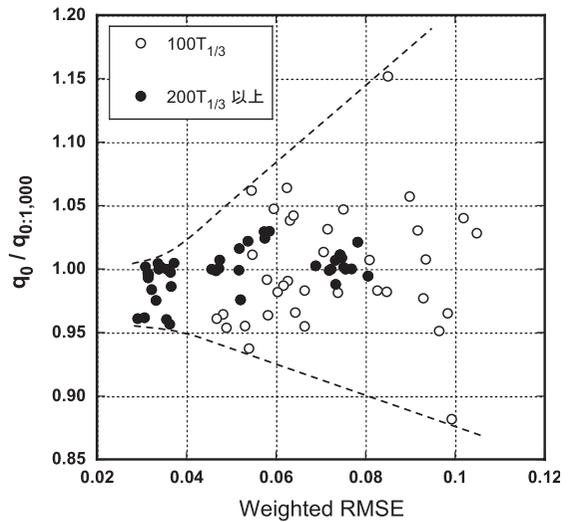


図-10 重み付きRMSEと正規化無次元越波流量の関係

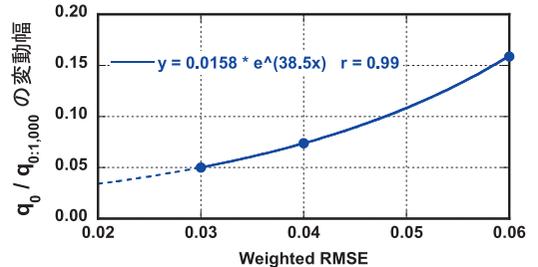


図-11 重み付きRMSEと正規化無次元越波流量の変動幅

謝辞：本研究を実施するにあたり、データの整理および図表の作成には、修士課程の岩崎裕志君と村上邦宏君に協力頂きました。ここに記して感謝の意を表します。また、本研究における数値実験には九州大学情報基盤研究開発センターの研究用計算機システムを利用しました。

## 参考文献

- 泉宮尊司・濱田良平・石橋邦彦（2006）：消波護岸の越波流量の確率分布特性に関する研究，海岸工学論文集，第53巻，pp. 716-720.
- 合田良実・岸良安治・神山 豊（1975）：不規則波による防波護岸の越波流量に関する実験的研究，港湾技術研究所報告，第14巻，第4号，44p.
- 財団法人沿岸開発技術研究センター（2001）：数値波動水路の研究・開発，沿岸開発技術ライブラリー，No.12，296p.
- 財団法人沿岸技術研究センター（2008）：CADMAS-SURF実務計算事例集，沿岸開発技術ライブラリー，No.30，306p.
- 藤原隆一（2005）：数値波動水路内で線形理論を用いて発生させた不規則波の特性及び適用限界に関する一考察，海岸工学論文集，第52巻，pp.41-45.
- Reis, T. M. and M. G. Neves (2008) : Investigating the lengths to scale model tests to determine mean overtopping discharges, Coastal Engineering Journal, Vol.50, No.4, pp. 441-462.