

越波問題に関する最近の研究について

Recent studies on wave overtopping

水口 優

Masaru MIZUGUCHI

0. 水工学に関する夏期研修会について

水工学に関する夏期研修会は今回で33回を迎えるが、海岸工学委員会としてBコースの構成に直接に携わるのは、今回で2回目である。そのあたりの経緯を少し書き残しておきたい。

従来、水工学に関する夏期研修会は、水理委員会の主導のもとに行われていた。具体的には、B（海岸・港湾）コースについても、水理委員会のメンバーの中でこの分野を専門とする人が担当者となり、個人的に講演者をお願いし、その講演者が希望するテーマを集成したものがプログラムとなるという形であった。さらに、水理委員会内での夏期研修会の位置づけがどちらかというと支部の持ち回りでの研究報告会的なものになっているためにBコースもそれに近いものになっていたのも否めなかった。そんな状況に対して、海岸工学委員会の中では、海岸工学委員会としてBコースに責任を持つべきだという意見もかなり以前からあったと聞く。しかし、この問題は、海岸工学委員会と水理委員会との関係という微妙な問題も含んでいて、一筋縄ではいかなかったようである。

一方で、海岸工学委員会の活動も①海岸工学論文集の発行と講演会の開催、②英文誌 Coastal Engineering in Japan (Coastal Engineering Journal と改称予定) の刊行といういわば裏方的なものから、研究現況レビュー小委員会、地球環境問題研究小委員会の設置による積極的な学会主導型の研究活動の展開を組織するという状況に拡がった。その中で、海岸工学の分野で仕事をしようとする若手の社会人や大学院生を対象とし、かつ土木学会の主催する研修会である夏期研修会（の内容）と海岸工学委員会（の活動）が無関係というもおかしい話では無いかという認識が関係者の間で高まってきた。あわせて、海岸工学を専門とする研究者・技術者のほとんどが、その大学時代において、水理学とは独立した（応用流体力学的な）海岸工学の学習者となるという時代を迎えた。そんな状況の中で、数年前から海岸工学委員会に形の上での協力要請があるようになっていたが、昨年度（第32回）からBコースの構成については海岸工学委員会が直接担当することとなった。それにあわせて、講義集の担当委員会名も変更になっている。

さて、Bコースのテーマについては、秋の海岸工学委員会（海岸工学講演会の期間中に開催される）で検討、決定され、それに基づいて幹事長と開催地の海岸工学委員とでプログラムを作成する形を取っている。昨年度は「漂砂」を、今年度は「構造物と設計」をキーワードとして構成されている。講師の選定にあたっては、暑い中を遠路はるばる聞きに行って見たいなあと思わせるようにと、老壮青、産官学を越えて適材適所をお願いするように心がけている。昨年、今回といずれもが、それなりに魅力的なプログラムになっていると自負している。なお、水理委員会の中では、夏期研修会の抜本的見直しという話も出ていると聞く。海岸工学委員会でも常に議論しながら、今後ともこの研修会が海岸工学に携わる人の技術の向上に役立つものであり続けるようにしたいものである。

1. はじめに

閑話休題？いや閑話続行？

最近、「研究とはそもそもなんぞや」というようなことが気になるようになってきた。「年をとり損ねてしまった永遠の青年」というイメージを大事にしてきたものの、自分を取り巻く環境と物理的な年輪の積み重ねに徐々に負け始めたということであろうか？それとも、産学共同ならぬ産学連携なるスローガンのもとに、大学を取り巻く環境そのものが「趣味」としての研究を許さない方向に進みつつあるということを見せられているということであろうか？

海岸工学という分野は、自然現象としての海岸に（海の側から見ながら）工学的にアプローチするところである。そこは、結果として「役に立つ」ことを拒否するものではないが、現象の理解とそれに基づく制御（もしくは折り合い）・利用について考えるというプロセスそのものが最高のゲームと心得たいと思っているものにとっても、住み心地の悪くないところである。以下、そんな僕が「越波」という現象に取り組んだ話である。これからの勉強・研究・仕事を楽しみながらやっていくという点で参考にしてもらいたい話である。

では、まず「何故に越波なのか」ということから始めたい。もう7、8年前になるが、ある時、文部省の科研費（自然災害特別研究）の仲間に入れてもらった。その全体としてのテーマが研究の有用性をうたったものである上に、やはり税金を使って何かを行う以上役に立つというのが見やすいテーマに越したことは無い。で、ぐるっと見回してみたところ、越波という現象が目にとまったというわけである。工学的に見たときの研究の必要性は明らかである。それでいて、設計にあたっては、実験曲線からの読みとりもしくは模型実験を行うしかないというのでは、現象のからくりを探るという意味で残されたものは多いはずであり、その探求の結果としてのよりよい理解が工学的に意味のあるものに結びつく可能性も高いと判断したわけである。

というわけで、「越波に関する最近の研究」という意味は越波現象のからくりにせまるという意味での「最近の研究」である。であれば、ここ何年かにわたり中央大学土木工学科の水口研究室で行ってきた研究を中心にした話となる。

なお、越波とはその字の如しのようなものであるが、厳密には、水の波による越流である。

2. 越波のからくりについて

2. 1 思考実験に基づく越波モデル

越波の研究に着手した1992年頃の越波という現象に対する認識は、下記の参考文献をもとに以下の3点に要約できよう。吉川・椎貝・河野(1967)、土屋・山口(1970)、高田(1970)、井上(1973)、合田(1977)。

①設計においては、標準的な構造物については実験曲線から、一般的でないものについては実験を行い、フルードの相似則に基づいて越波量を推定する。ただし、スケール効果がありそう。

②越波壁前面での波の場は部分重複波として扱えそう。ただし、反射率については、越波量と関連はあるものの、波峰の増大率 k （前面での峰高の最大値 $\eta_{\max}$ と入射波高 H_1 の比）を経験的に定めることで対処。

図-1参照。

③越波壁全面での水位変化 $\eta_w(t)$ が与えられれば、一波あたりの越波量 q^* は次の定常な場合の堰の越流公式を適用することによって求めることができる。

$$q^* = \int_{h_e > H_c} \int_{H_c}^{\eta_e} u_e dz dt \quad (1a)$$

$$= \frac{2\sqrt{2}g}{3} m \int_{h_e > H_c} (h_e - H_c)^{3/2} dt \quad (1b)$$

$$= \frac{2\sqrt{2}g}{15} m (kH_i)^{3/2} (1 - H_c/kH_i)^{5/2} \quad (1c)$$

ただし、 $\eta \cdot (t)$ は壁前面での水位変動、 $u \cdot (z, t)$ は越流速 ($=\sqrt{2g(\eta \cdot - z)}$)、 H_c は鉛直壁の静水面からの高さである。縮流係数 m はこれまた経験的に定めるもので、定常流での実験値は約0.5であるがこれは接近流速のある場合であり、ほぼ完全重複波に近い状態では水平流速成分は非常に小さく、縮流はまず無視できて $m=1.0$ と取って十分であると考えられる。なお、(1b)式を用いれば時々刻々の越波量を算定できる。

そこでまず考えたことは、波峰の増大率 k をもう少し合理的に決める方法があるのではということである。そのために、まず理想的な場合を取り上げるとして、素過程としての越波を考える。すなわち図-1に示すような状況である。入射波が途中で何の変形もなくやってきて、鉛直壁に到達する。鉛直壁で越波はするもののその量はあまり大きくはなく、ほぼ完全に反射され、反射波が返っていく。この現象は、水深、越波壁の状況および入射波が定まれば全て定まっている。ここでは、堰の越流公式があてはまるように壁の厚さが無視できるほどに薄い場合を考える。

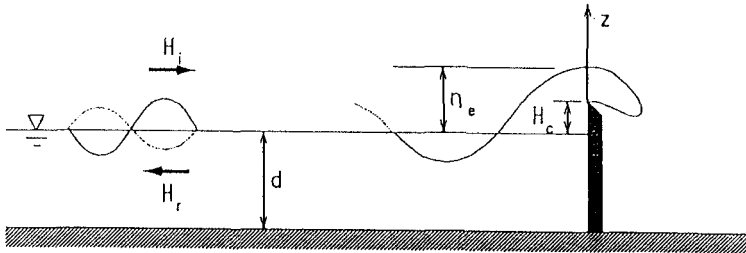


図-1 鉛直壁における越波の模式図

では、入射波、越波、反射波の3者を結びつけるものは何かということである。解析の王道は、越波壁近傍の流体力学的解析を行い、その解の壁からの遠方近似と沖側での入・反射波解をmatchingすることで関係づけることであろう。が、近傍での解の流体力学的議論は大変そうなので以下のように考えた。進行波としての水の波を定義づける物理量は波高と周期である。周期は明らかに不変である。で、水の波が伝えているものはエネルギーまたは運動量であること、運動量の保存則には壁体に働く力も関係してきて面倒になることに留意すれば、3者を結びつける鍵はエネルギーフラックスということになる。すなわち、入射波の持つエネルギーフラックス F_i は、越波によって失われるエネルギー F_e と反射波として生き残るエネルギー（フラックス） F_r の和となるはずである。それを数学語で表せば

$$F_i = F_r + F_e \quad (2)$$

となる。で、越波により失われるエネルギーは、(1)式が失われる体積を計算していることを考えれば、次のように表されることになる。

$$\begin{aligned} F_e &= \frac{1}{T} \int_{H_c}^{H_e} \int_{H_c}^{H_e} u_e \left(\frac{\rho}{2} u_e^2 + \rho g z \right) dz dt \\ &= \frac{2\sqrt{2}g}{3T} \rho g \int_{H_c}^{H_e} H_e (H_e - H_c)^{3/2} dt \end{aligned} \quad (3)$$

なお、この表現は単位時間当たりになおしてある。また、ここでも既に述べたように縮流はまず無視できて $m=1.0$ と取って十分であると考えている。

あとは、壁前面での水位 $\eta \cdot$ をどう表すかである。第1近似は微小振幅波としての入射波と反射波の線形和

である。

$$\zeta_e = \frac{1}{2}(1+K_r)H_i \cos \omega t, \quad \omega = 2\pi/T \quad (4s)$$

こう考えると、波峰高比 k は $(1+K_r)$ である。微小振幅波では近似の程度も低いし、越波という場合には過小評価になる可能性も高いので、やはり有限振幅波理論を用いるべきだとなると、越波が問題になるような浅海域の波としては、やはりクノイド波ということになる。幸いに Isobe (1985) によるまあ簡単な計算法がある。

$$\zeta_e = H_i \left[cn^2(\theta; \kappa_i) - \overline{cn^2} \right] + H_r \left[cn^2(\theta; \kappa_r) - \overline{cn^2} \right], \quad H_r = K_r H_i \quad (4c)$$

ここで、 $\theta(x, t)$ は位相関数で鉛直壁位置を原点にとれば $\theta(0, t) = K(\kappa)t/T$ である。 $K(\kappa)$ は第一種完全楕円積分で楕円関数の基本周期の半分である。 κ は楕円関数の母数であり、 κ_i 、 κ_r はそれぞれ入・反射波に対応するものでそれぞれのアーセル数から求められる。クノイド波の線形和というのはちょっと矛盾するようだが、入射波と反射波の非線形干渉というのは、その干渉時間も短く、線形和で十分なはずである。

以上が越波を実験定数なしに算定するからくりである。具体的には、まず、エネルギーフラックスの関係式 (2) を、それぞれの波動理論に応じて表してやる必要があるが、クノイド波理論を用いる場合は次のようになる。

$$H_i^2 \sqrt{gd} f_{2i} = H_r^2 \sqrt{gd} f_{2r} + \frac{2\sqrt{2}g}{3T} \int_{\zeta_e > H_c} \zeta_e (\zeta_e - H_c)^{3/2} dx \quad (2c)$$

ここで、 f_2 はクノイド波理論においてエネルギーと波高 (の 2 乗) を結びつける係数である。この式に (4c) 式を考慮すれば、水深 d 、入射波高 H_i および周期 T と天端高 H_c が与えられれば、未知数は反射率 K_r のみとなる。すなわち、この式が成立するように反射率が定まっていると言えよう。実際の計算は反射率を 1.0 から徐々に減らしていった等式が成立するところを捜せばよい。もちろん、積分は数値的に実行する。このようにして求めた反射率 K_r を (4c) 式に代入し、さらにそれを (1b) 式に放り込んで数値積分を実行すれば、一波あたりの越波量 q^* が求まる。

このからくりと計算例を示したものが越波に関する一連の論文の中の第一の論文となる Mizuguchi (1993) 「Wave overtopping rate over a vertical wall and reflection coefficient」である。

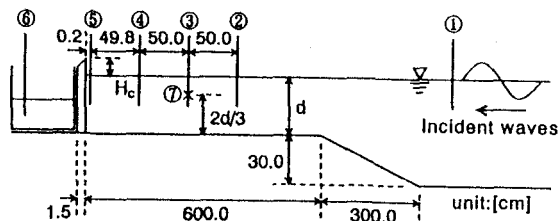


図-2

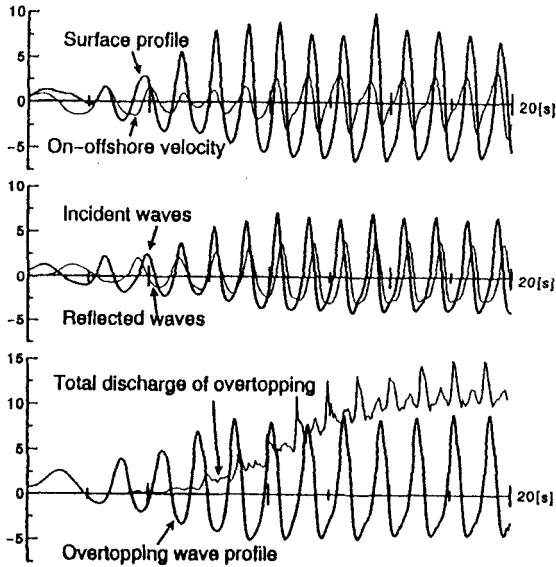
実験装置と計器の配置図(図中①～⑥は新容量式水位計, ⑦は電磁流速計を表し、底面から水深の 2/3 の所に設置した。)

2. 2 思考実験の物理実験による検証

上記モデルの検証ということで室内実験に取り組んだものの成果が横山・水口 (1993) 「鉛直壁における越波量と反射率について」である。実験は図-2 のようなセッティングで行った。得られたデータの例が図-3 である。なお、解析には入射波が定常に達してから造波板からの再反射が戻ってくるまでの間のデータを用いた。同時に、高速ビデオにより越波状況を記録したがそのひとつの例が図-4 である。図-4 より越波においてはナップ (越流水塊の飛び出し形状) 下側での縮流はほとんどなく $m=1.0$ でよいことがわかる。実験のポ

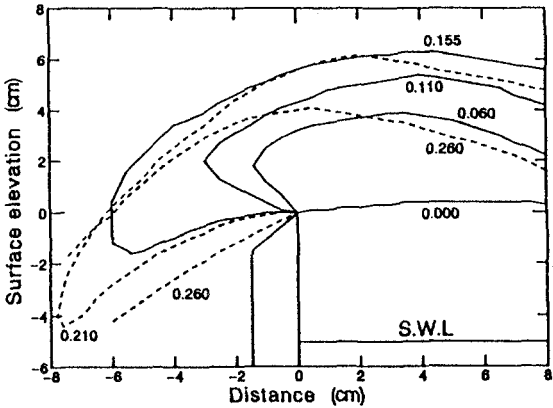
イントの一つは、壁体前面で水位と岸沖流速を測定して、入・反射波の分離を行ったことである（図－3 中段）。分離にはいわゆる疑似非線形長波理論に基づく手法を用いている（久保田ら、1989）。得られた反射率と越波量を上記のモデル（クノイド波版）と比較した例が図－5である。結果は非常に満足すべきものである。エネルギーフラックスに着目することにより越波を決定論的に扱うことができるということに確信が持てた

図－3



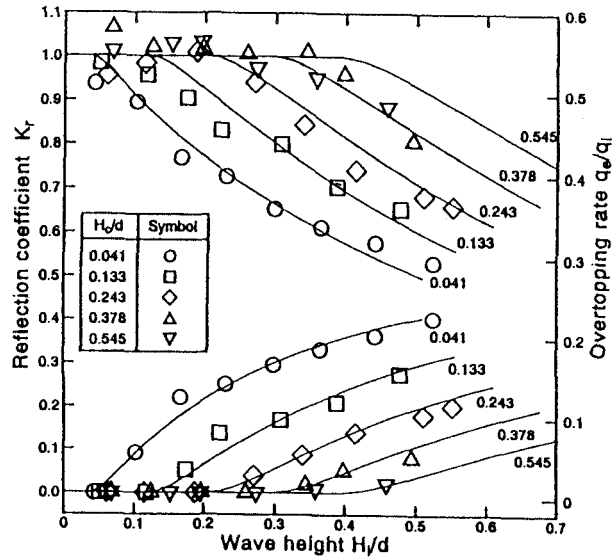
水面計，流速変動，越波量，越波波形の生データと，分離後の入射波形，反射波形（縦軸の単位は流速については×10 cm/s，越波量は cm²/s，水位は cm である。横軸は時間である。）
 $d=22.5\text{ cm}$ ， $T=1.32\text{ s}$ ， $H_i=10.79\text{ cm}$ ， $K_r=0.650$ ， $U_s=36.4$ ， $H_i/d=0.480$ ， $d/gT^2=0.01317$

図－4



高速ビデオカメラによる越波時の水面形（図中の数字は，越波開始時刻を 0 とした時の時間(s)，実線は上昇時の，点線は下降時の越波波形である。越波波形の鉛直座標は鉛直壁上端を原点としている。）
 $d=20.5\text{ cm}$ ， $T=1.32\text{ s}$ ， $H_i=11.26\text{ cm}$ ， $K_r=0.662$ ， $U_s=45.0$ ， $H_i/d=0.549$ ， $d/gT^2=0.01219$

図-5



反射率、越波量と相対入射波高(上方は反射率で左軸の目盛に、下方は越波量で右軸の目盛に対応する。図中の線は Mizuguchi (1993) のクノイド波モデルによるものである。数字は天端高水深比を表す。周期は 1.32 s である。)

のがこの段階である。あわせて、越波波形についても検討を加え、鉛直壁前面の波の場をクノイド波の線形重ね合わせで近似することの妥当性も確認した。その結果、得られた水位に堰の越流公式を適用して越波量を算定する方式の妥当性も確認されたと言えよう。以下、この考え方を「エネルギーフラックス+越流公式」モデルと呼びたい。

3. より現実的な状況への拡張

越波という現象を、一様水深部の鉛直壁に直角に規則波が入射する場合に限るとはいえ、エネルギーフラックスに着目することにより決定論的に扱うことができるとなると、もう少し複雑な場合にもその考え方が適用できるのではと考えるのは自然なことである。現地の現象に近づくという意味での複雑化は上記の下線部の限定条件にどう対処するかであろう。以下、その1つずつの持つ意味について検討する。

①一様水深でない場合(鉛直壁+規則波)

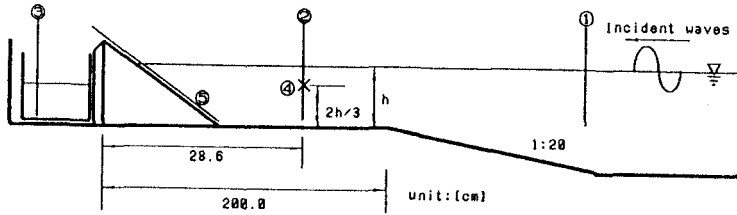
越波という観点から見れば、越波壁前面までの入射波の変形は預かり知らぬところである。斜面、小段、消波工などによる変形を終わった後の波を入射波として扱えばそれまでである。細かく見れば越波壁直前でのナップ上側の水位が下がる部分にまで消波工があるという状況etcであれば、多少の影響はあり得ると思うが。確かめてみたいと思うが、「考えなくてよい」という結論が予想されている研究はやはり元気が出ないものである。

今の所は、越波量の算定にあたっては壁直前の水深とそこまでの変形を終えた波を入射波とすればモデルに変更を必要としないということになる。

②鉛直壁で無い場合(規則波)

傾斜壁での越波問題である。図-6のような状況である。この問題については高田(1970)によって実験的

図-6



実験装置図

な検討が行われ、斜面勾配だけを変化させていくと越波量の極大値が存在すること、越波量の増加と反射率の低下が対応することなどが知られていた。

この状況に「エネエルフラックス+越流公式」を適用する場合の課題は、かなり急勾配な斜面上での部分重複波の波形をどう表すかである。斜面上の有限振幅波理論として有名なCarrier-Greenspanの解（以下CG解）を使えないかと考えていろいろやってみたのが仲山・水口(1994)「斜面上の有限振幅重複波理論解の実用性と越波問題への適用」と仲山・水口(1995)「傾斜壁における越波量と反射率について」である。以下その挑戦を簡単に紹介する。

CG解は非線形長波方程式の一樣勾配の場合の完全重複波解である。詳しくは例えばMei(1983)を参照。そのCG解を強引に部分重複波解に拡張すると次のようになる。

$$\eta = A_s \left[\frac{1+K_r}{2} J_0(\alpha\sigma) \sin \alpha \lambda - \frac{1-K_r}{2} Y_0(\alpha\sigma) \cos \alpha \lambda \right] - \frac{gg}{\sigma^2} A_s^2 \left[\frac{1+K_r}{2} J_1(\alpha\sigma) \cos \alpha \lambda + \frac{1-K_r}{2} Y_1(\alpha\sigma) \sin \alpha \lambda \right]^2 \quad (5)$$

ここで $\alpha = \omega/2 \tan \beta$ 、 $\sigma = 4\sqrt{g(x \tan \beta + \eta)}$ 、 $\lambda = 2(u - t \tan \beta)$ である。 $\tan \beta$ は斜面勾配、 u は水平流速である。(5)式を実座標系 (x, t) で計算してやれば、斜面岸側端での水位の時系列として η が求まる。汀線振幅 A_s については斜面先端での水深を十分に浅い一樣水深部とみなしてやれば、次式で入射波波高と関係づけられる(Shuto, 1972)。

$$A_s = H_i \left[J_0^2(4\pi d/L \tan \beta) + J_1^2(4\pi d/L \tan \beta) \right]^{-1/2} \quad (6)$$

ただし、 $L = T\sqrt{gd}$ である。反射波も同様に一樣水深部に接続できて、結局(5)式から求まる斜面端での水位を η とみなして(4)式と組み合わせれば K_r が定まる。なお(5)式中の0次のノイマン関数 Y_0 は汀線 $\sigma=0$ で発散するが、越波している場合は越波により入射波のエネルギーが一部吸収されと考えれば尤もらしく使えそうである。越波していない場合の $\sigma=0$ の値については適当に外挿して計算する。

傾斜壁での越波の最大の課題は、斜面上で生じるであろう碎波の扱いである。碎波後の波をどう表すかである。碎波後生き残った波について(5)式を適用するというのがbestと考え、碎波後の生き残り率については、Guza et al. (1984)による次のような半実験式を用いた。

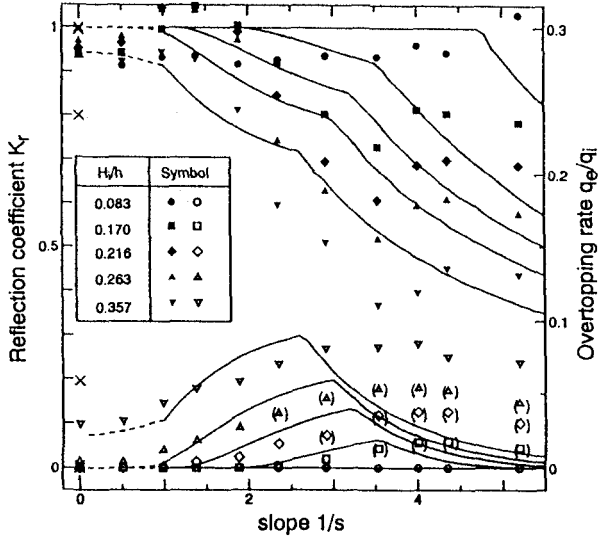
$$A_s \omega^2 / g \tan^2 \beta = 3 \quad (7)$$

以上のような考えに基づく計算結果と比較すべく室内実験を行った。セッティングは図-6に示すとおりであり、反射率、越波量についての比較が図-7である。この図から、斜面勾配があまり急でなくかつ碎波しない場合にのみモデルと実験の一致は満足すべきであるということになろうか。急勾配の場合は非線形長波方程式が成立しないし、碎波後の場合は、波を(5)式で表すのが単純化しすぎているというばかりでなく、

段波状の波の持つ水平流速成分を無視することによる越波量の過小評価という問題もあるということであろう。今後つついてみる価値のありそうなところである。

一方で、(5) 式のような面倒な計算をやるくらいなら、非線形長波方程式に岸側の境界条件として越波を取り込むという方法も考えられる(荻原、1993)。この方法だと傾斜壁上の粗度や摩擦の効果などを考慮することも可能である。ただし、越波境界条件を合理的に与える必要がある。この場合も急勾配および碎波する場合の定量的評価は難しいであろう。

図-7



反射率、越波量と傾斜壁勾配(上方は反射率で左軸の目盛りに、下方は越波量で右軸の目盛りに対応する。図中の実線は本モデルによるものであり、×は鉛直壁モデルの計算値、越波量の()印は斜面上で破波している場合である。なお、 $H_i/h=0.357$ のケースは全一様水深部において部分重複波状態で破波している。)

③直角入射の規則波でない場合(鉛直壁)

要は多方向不規則波浪場での越波問題である。一気にそこまで行くのは難しいので、少しずつその方向に向かう。

a) 斜め入射規則波

まず規則波が斜めに入射する場合を検討してみたのが、森屋・大福・水口(1994)「鉛直壁における斜め波の越波と反射率について」である。波向きがある場合の越波量についてはいくつかの実験的研究があり、直角入射に比べて越波量が落ちることは知られていた(例えば高山ら、1984)。

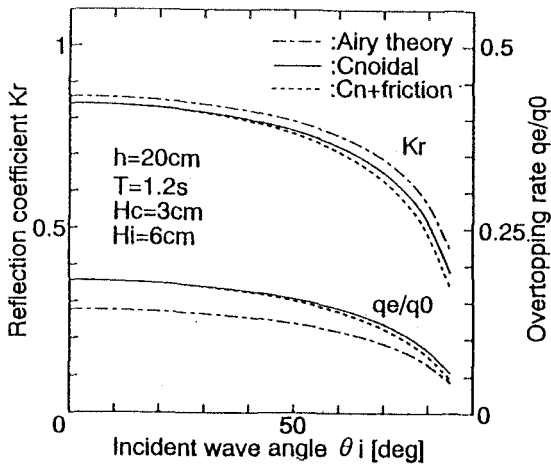
「エネルギーフラックス+越流公式」モデルの拡張は以下の通りである。理想的な場合として鉛直壁も入射してくる波も無限に続いているとすれば、現象は壁に沿った方向(y方向)には一様と見なせる。とすると、鉛直壁前面付近でのエネルギーフラックスの関係は、次式となる。

$$F_i \cos \theta_i = F_r \cos \theta_r + F_e \tag{8}$$

ここでは、反射角は幾何学的に決まるものとしている。一方、斜めクノイド波の線形重ね合わせによる鉛直

壁全面での波の場は水位としては(4c)式と同じになる。これによる越波流量および越波エネルギーも基本的には(1b)式および(3)式で計算される。論文では、接近流速(壁に直な成分)や壁にその成分を考慮した場合を扱っているが、それらの効果は小さい。以上を組み合わせれば、水深 d 、鉛直壁の天端高 H 、入射波の波高 H_i 、周期 T と波向き角 θ_i を与えれば反射率 K_r 、越波量 q が求まる。このモデルに基づいて入射角の効果を計算してみたものが図-8である。図中には、波の理論として微小振幅波を用いた場合、摩擦を考慮した場合の結果も示してある。角度の効果は越波量の減少ばかりでなく反射率の低下ももたらすことが分かる。越波量は減少するもののエネルギー損失としては $(1/\cos \theta_i)$ で効くので反射率も低下することになる。ただし、かなり斜め(45度以上)にならないと定量的には問題とならないとも言えよう。

図-8



入射角に対する反射率と無次元越波量

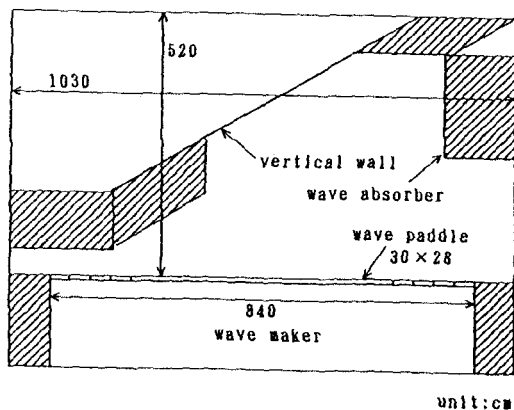
次は実験的確認である。これが意外と難しかった。角度の効果に絞って検証する事にしたのだが、モデルの前提である壁に沿って様な現象という条件を満足させるのに工夫を要した。結局図-9に示すようなセッティングになった。多方向造波装置に端部制御法(筧田・水口・森屋、1994)を用いて入射波の一様性を確保し、鉛直壁の両端に消波工を配置して回折効果を抑えた結果、ようやく、中央部にある程度の波の場の様な領域を確保でき、そこを測定領域とした。データの解析にあたっては斜め反射の場合の入・反射波の分離を行った(森屋・大福・水口、1994b)。同一地点における水位と水平流速2成分の時系列データに線形長波理論をあてはめて、反射角、入・反射波それぞれの波高を求めるものである。実験結果とモデルによる算定値を比較したものが図-10である。両者の一致は満足すべきもので、モデルの妥当性を主張するには十分である。ただし、角度の大きい場合の反射率には、測定上の問題点に加えて、入射波と壁面のなす角度が30度以下になるといわゆるマッハシステム状態になり、入・反射波の分離は難しくなるという事情もある(森屋ら、1995)。

b)直角入射不規則波

では、不規則波に対してはどうするか？これに答えるべく、波別解析された個々の波を規則波に置き換えて算定式を適用するという単純なアイデアの妥当性を実験的に検討したものが田中・水口(1995)「不規則波による越波」である。越波において個々波を規則波とみなすという考え方は既に木村・瀬山・山田(1981)によって採用されているが、関心が別のところにあるだけでなく、規則波の算定式が経験式であることもあってアイデアそのものの妥当性を検討するまでには至っていなかった。

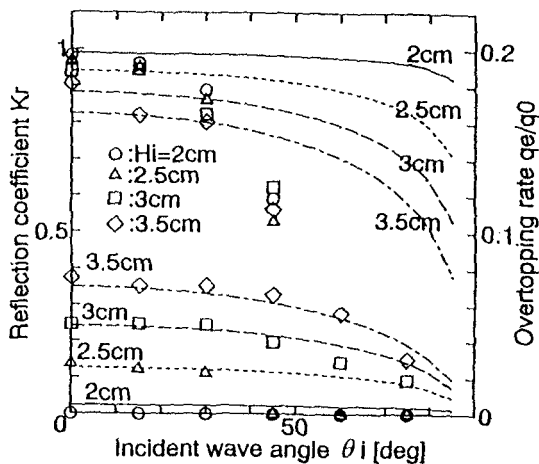
実験の状況を図-11に、測定結果の一例を図-12に示す。実験結果は図-13である。一言で言えば、ゼロダウソクロス法で波を定義しそれに平均水位(長周期波)を考慮すれば、個々の波を規則波に置き換えて良さそ

図-9



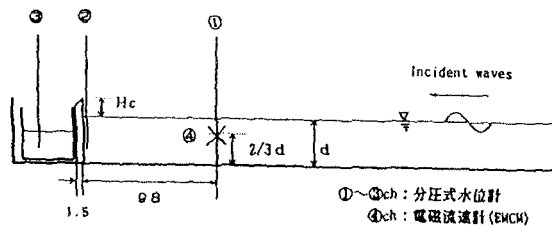
実験装置（鉛直壁及び消波工の設置位置は、入射角 30°, 45° のケースのもの）

図-10



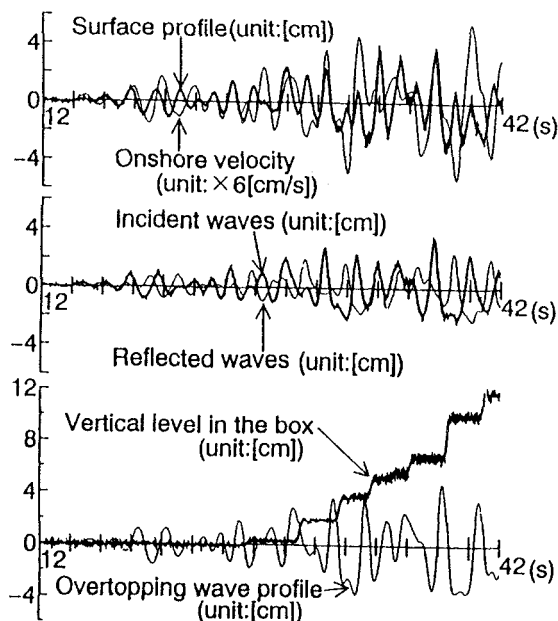
反射率と越波量

図-11



実験装置（単位は cm）

図-12



水面形、流速変動、越波量、集水箱内の水位変動の生データと、分離後の入射波形、反射波形(各量の単位は、各図の縦軸に対して図中に示してある)

$H_{1/3}=3.7$ cm, $T_{1/3}=1.75$ s, $d=24.5$ cm, $H_c/d=0.049$

うである。なお、不規則入射波をその波高と周期の結合確率分布で定義して、統計量として越波量分布を比較したものが図-14である。統計的に見れば、十二分である。

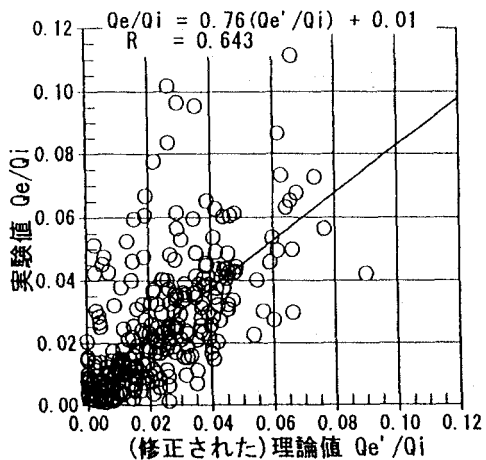
不規則波の個々の波を規則波に置き換えることの誤差(図-13に残るばらつき)についてちょっと厳密な議論を試みたのが西受・水口(1995)「鉛直壁における2成分合成波の越波算定手法について」である。壁面直前での個々の波が2山形だった場合にはどうするかというような話である。入・反射波の分離後、入射波を波別解析して得られた個々波をさらに2つのクノイド波の和に分解して議論するのだが、越波によるエネルギーフラックスをどう分けるかという点で難問が残った。当時は比例配分的なモデルを採用したが、今は、越波現象を一種の造波問題と捉えて対処するのが手のような気がする。

c) 多方向不規則波の場合

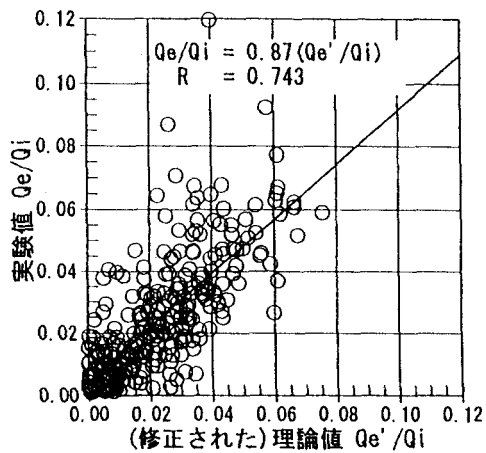
残念ながらこの場合に「エネルギーフラックス+越流公式」モデルを適用するのは難しそうである。前面での入射波を波高・周期・波向で定義される個々の波に置き換えるというのも考えられるが、その反射波およびエネルギーフラックスの関係はというとまだまだイメージがわからない。たぶん、室内実験でもぼーっと眺めることから始めるしかない? 今後の楽しみです。

4. 越波の関連問題

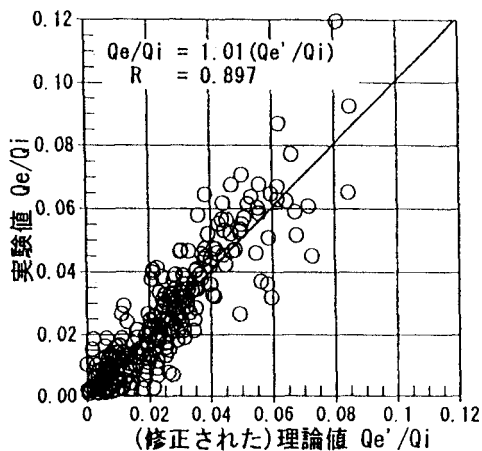
「エネルギーフラックス+越流公式」モデルの応用によって現象の理解が進みそうだと思って取り組んだものが西受・水口(1996)「越波による伝達波について」である。越流量を時系列的に算定できるのでそれを境界条件とした造波問題として考えれば、越波伝達波も経験定数なしに予測できるはずである。図-15が状況の概念図でもあり、実験装置と計測器の配置図でもある。図-16が伝達波の発生状況の写真の例であり、図-17



越波量の理論値と実験値との比較
全実験ケース (総波数 756 波) 中の越波した波 285
波 (ゼロアップクロス法)



越波量の理論値と実験値との比較
(ゼロダウンクロス法)



越波量の理論値と実験値との比較
(ゼロダウンクロス法+平均水位の補正)

図-13

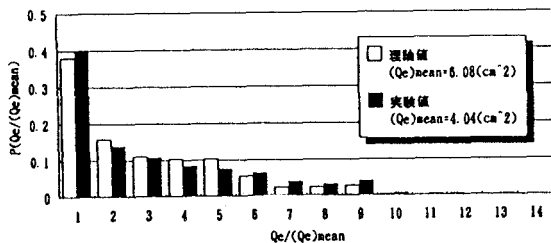
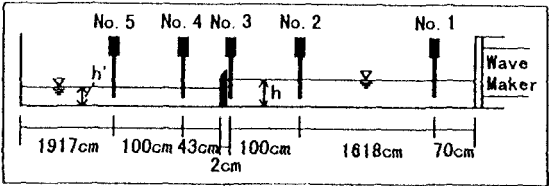


図-14

越波量分布

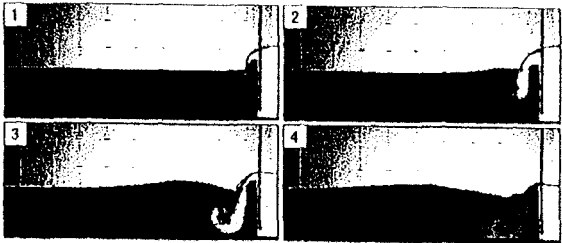
が理論と実験の比較例である。造波の話に用いた理論は、線形初期値問題（倉田、1981）、線形境界値問題（Mizuguchi、1996）、full nonlinear の境界要素法による境界値問題としてのシミュレーションの3種である。図-17の条件では、越波量が小さいときは境界値問題としての定式化によるものが実験値と非常によい一致を示す。越波量が増大して伝達波が大きくなっても非線形性を考慮すれば満足すべき結果となっている。ただし、背後の水深が浅くて射流状の流れが観察されたり、越流塊の落下距離が大きくて顕著な渦が発生する場合には、当然のごとくに一致は悪かった。

図-15



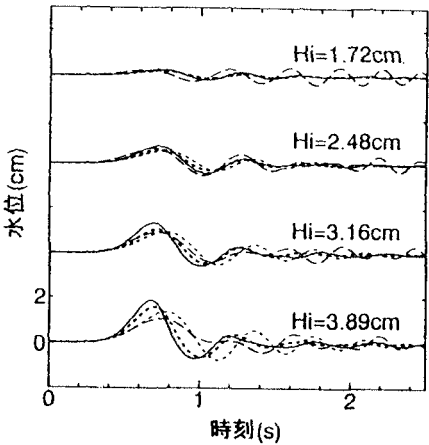
実験装置

図-16



越波流が突っ込む様子 (2/15 秒間隔)

図-17



越波伝達波 (A-1～4 の 4 ch 水位データ, 細実線: 実測値, 細破線: C.P.波解, 太点線: ピストン造波モデル強非線形ポテンシャルモデル計算値, 細点線: ピストン造波モデル線形解)

造波問題としての越波という定式化が可能ならば、それを時系列解析的な数値計算に取り込むことも容易に思いつくアイデアである。ということで、Boussinesq方程式を用いて防波堤先端部で回折・散乱だけでなく越波も起きているような状況に取り組んでみたものが森屋・水口(1996)「回折散乱波を考慮した越波問題」である。越波がない場合の防波堤はそこでの垂直流速を0と置くことにより表現されるが、越波がある場合はその垂直流速(または流量)を堰の越流公式により局所的な水位から求まるものとしてやるだけである。計算の例を図-18に示す。こういうこともできるということである。防波堤前面での水位、越波量については実験との比較も満足すべきものであった。

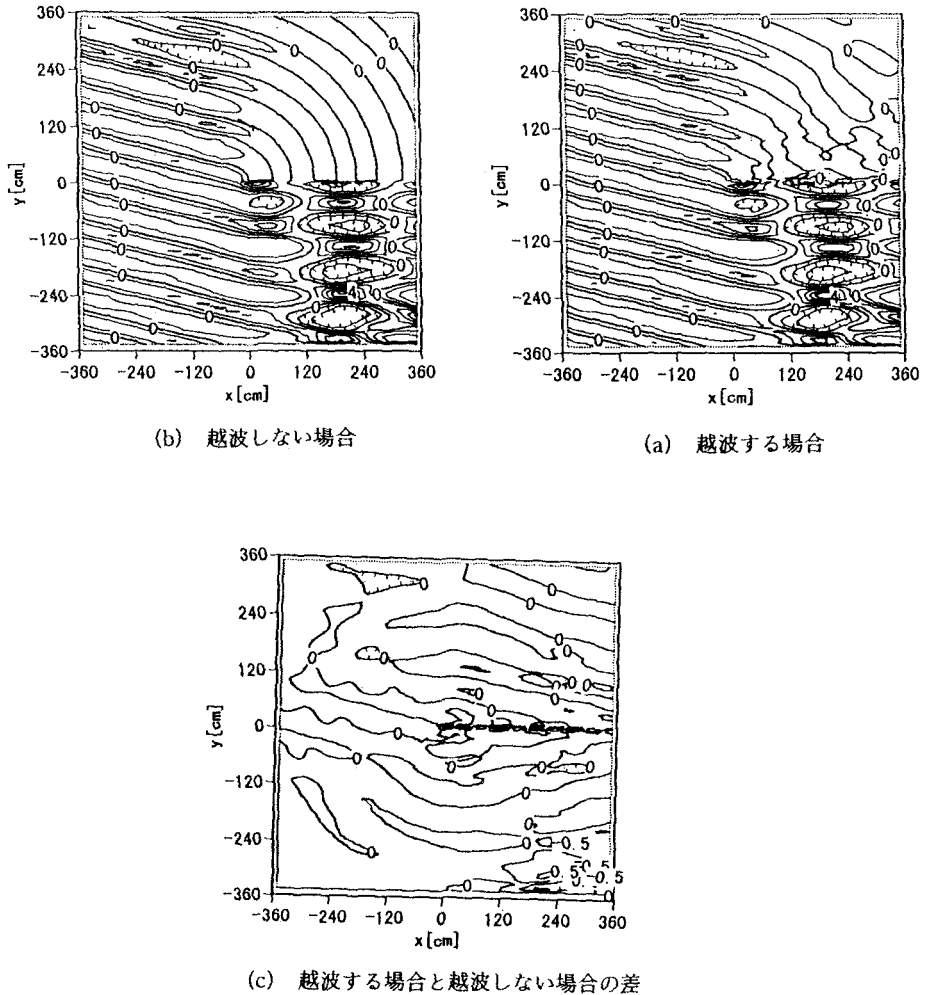


図-18

5. 終わりに

閑話終了である。

越波という現象を取り上げて、理想的な状況での現象の把握から始まって実際現象の定量的記述という目標に向かう流れを自分の研究を中心に追ってみた。「エネルギーフラックスに着目する」というアイデアを

もとに越波という古いテーマを見直したものである。なお、このモデルにおいては越波そのものについては、フルードの相似則が成立する。模型実験等においてフルードの相似則が成立しないのは、越波に至るまでの波の変形を分けて考えていないためであろう。

この流れの中で残された課題はいくつもある。例えば、①堤体幅が有限である場合の効果、②最近流行の長周期波との関係などである。今しばらく楽しんでみるつもりである。自然現象を相手に理屈をこねてみて、なるほどという気分を味わう楽しさは何物にも代え難い。

参考文献

- 井上雅夫(1973)、海岸堤防の越波機構について、第20回海岸工学講演会論文集、107-112。
萩原運弘(1993)、特性曲線法による傾斜壁護岸の越波量算定モデル、海岸工学論文集、40巻、706-710。
吉川秀夫・椎貝博美・河野二夫(1967)、海岸堤防の越波に関する基礎的研究(1)、第14回海岸工学講演会講演集、118-122。
木村 晃・瀬山 明・山田敏彦(1981)、不規則波の短時間越波流量の確率特性、第28回海岸工学講演会論文集、335-338。
久保田 進・水口 優・堀田新太郎・竹沢三雄(1989)、現地遡上波における反射波の特性、海岸工学論文集、36巻、120-124。
倉田克彦(1981)、越波による伝達波高、第28回海岸工学講演会論文集、339-342。
合田良実(1977)、港湾構造物の耐波設計、鹿島出版会、333p。
高田 彰(1970)、波の遡上、越波および反射の関連性について、土木学会論文報告集、182号、19-30。
高山知司・永井紀彦・西田一彦・関口忠志(1984)、斜め入射不規則波を用いた護岸の越波特性実験、第29回海岸工学講演会論文集、542-546。
田中浩生・水口 優(1995)、不規則波による越波、海岸工学論文集、42巻、796-800。
土屋義人・山口正隆(1970)、越波のある場合の重複波の特性について、第17回海岸工学講演会論文集、79-84。
笈田博章・水口 優・森屋陽一(1994)、多方向造波装置において一様な波の場を作るための端部制御方式、海岸工学論文集、41巻、106-109。
仲山高志・水口 優(1994)、斜面上の有限振幅重複波理論解の実用性と越波問題への適用、中大理工紀要、37巻、77-94。
仲山高志・水口 優(1995)、傾斜壁における越波量と反射率について、海岸工学論文集、42巻、791-795。
西受由裕・水口 優(1995)、鉛直壁における2成分合成波の越波算定手法について、第50回年次学術講演会概要集、土木学会、II-395、790-791。
西受由裕・水口 優(1996)、越波による伝達波について、海岸工学論文集、43巻、726-730。
森屋陽一・菊地正行・松立博樹・水口 優(1995)、浅海域における周期波のマッハ反射について、海岸工学論文集、42巻、6-10。
森屋陽一・大福浩之・水口 優(1994a)、鉛直壁における斜め波の越波と反射率について、海岸工学論文集、41巻、671-675。
森屋陽一・大福浩之・水口 優(1994b)、斜め反射の場合の入・反射波の分離手法について、第49回年次学術講演会概要集、土木学会、II-B、656-657。
森屋陽一・水口 優(1996)、回折散乱波を考慮した越波問題、海岸工学論文集、43巻、711-715。
横山 健・水口 優(1993)、鉛直壁における越波量と反射率について、海岸工学論文集、40巻、676-680。
Guza, R. T., E. B. Thornton and R. A. Holman(1984), Swash on steep and shallow beaches, Proc. 19th ICCE, Houston, 708-723。
Isobe, M. (1985), Calculation and application of first-order cnoidal wave theory, Coastal Eng., Elsevier, Vol. 9, 309-325。
Mei, C. C. (1983), The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves, John Wiley, 740p。
Mizuguchi, M. (1996), Analytical solutions of non-periodic wave generation and its inverse problems, CEJ, JSCE, Vol. 39, No. 1, 1-9。
Mizuguchi, M. (1993), Wave overtopping rate over a vertical wall and reflection coefficient, CEJ, JSCE, Vol. 36, No. 2, 37-47。
Shuto N. (1972), Standing waves in front of a sloping dike, CEJ, JSCE, Vol. 15, 13-23。