

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1147 December 2006

波による海浜流の発達過程と構造物による流況影響範囲に
関する数値的検討

中 村 聡 志

独立行政法人 港湾空港技術研究所
Independent Administrative Institution,
Port and Airport Research Institute, Japan

目 次

要 旨	3
1. まえがき	4
2. 海浜流計算モデルの検証	4
2.1 検証に用いた水理実験の諸条件と計算条件	4
2.2 今回用いた海浜流モデルの性能と限界	4
3. 突堤構造物による海浜流影響範囲の数値計算結果	5
3.1 数値計算に用いた諸条件	5
3.2 突堤構造物による海浜流の影響範囲	6
3.3 突堤による沿岸流速の影響範囲図	8
3.4 突堤による沿岸流速の影響範囲図の使用方法	9
4. あとがき	10
参考文献	10
付録A	11
付録B	14

Numerical Simulation of Transient Wave Induced Current and Flow Pattern around a Groin

Satoshi NAKAMURA*

Synopsis

Beach managements for the land protection or the tidal flat development require more realistic predictions of waves and currents around shore facilities because of the construction of the cost-effective and environs-uninfluential facility.

This paper presents a numerical model for 2DH wave induced current. The numerical result of the longshore current induced by obliquely incident waves on a constant slope is tested with an existing experiment result. The numerical results of flow patterns around a groin show that twice of the surfzone width is affected by the large groin in upstream side, and three times of the surfzone width plus sheltered-area width behind the groin is affected in downstream side.

Key Words: nearshore current, wave-current interaction, groin, affected-area

* Coastal and Estuarine Environment Research Group, Marine Environment and Engineering Department
Port and Airport Research Institute, Independent Administrative Institute 3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-46-844-5051 Fax : +81-46-844-1274 e-mail:nakamura_s@pari.go.jp

波による海浜流の発達過程と構造物による流況影響範囲に関する数値的検討

中村 聡志*

要 旨

近年，海岸防護や海岸環境，海岸利用の面から砂浜や干潟を保全し，あるいは，造成し，管理する必要が生じている．環境保全の効果を高めるとともに周辺への影響を少なくするためには，地形変化や水質に強い影響を及ぼす海浜流を的確に予測し，制御することが重要である．

本研究では，波の変形計算と流れの計算を相互に干渉させる平面2次元の海浜流数値モデルを作成し，規則波の斜め入射に対する海浜流の発達を計算した．あわせて，既存の実験結果を用いて数値計算結果の検証を行った．次に，突堤構造物周辺の海浜流の計算を行い，突堤構造物の海浜流に対する影響範囲は，上手側に碎波帯幅の2倍程度，突堤下手側に突堤端を通過する波の到達範囲程度に加えて碎波帯幅の3倍程度の範囲に及ぶことを示した．波や地形条件，突堤長の異なる数値計算の結果を基に，簡易な突堤周辺の沿岸流の影響範囲や流速値の推定式を提案した．

キーワード：海浜流，波と流れの干渉，突堤，流れの影響範囲

* 海洋・水工部 沿岸環境領域
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人港湾空港技術研究所
電話：046-844-5051 Fax：046-844-1274 e-mail: nakamura_s@pari.go.jp

1. まえがき

近年、海岸防護や海岸環境、海岸利用の面から砂浜や干潟を保全あるいは造成し、管理する必要が生じている。整備対象海岸および周辺海岸の環境保全のためには、海域に建設される構造物によって生じる波と流れの変化を予測し、環境保全の効果を高めるとともに周辺への影響を少なくするための手段を予め講じておくことが必要となる。波によって生じる海浜流は、整備事業の成否を表す物理的な環境指標となることの多い海浜の地形変化や水質の状態を決める主な要因となる。その発生や変化を事業実施前後において適切に予測することは重要である。しかしながら、波の変形についての算定図表や数値計算例が数多く存在するのに比べて、流れの発生や構造物による変化についての算定図表や計算例は少なく、海岸に構造物を設置した場合の流れに対する影響を予め簡便に知ることが難しいのが現状である。また、これまで多く行われてきた海浜流の計算は、漂砂量や長期の地形変化傾向の取得を目的とした平均的な波による定常計算であったり、潮流による物質移動拡散を浅海部で補うための補足的な計算であったりと、波によって生じる海浜流そのもの発生や構造物による影響を計算したものではなかった。そのため、流れそのものの変化や周辺への影響対策を講じるために用いられたことは少なかった。

本資料では、Longuet-Higgins(1970)によって提案されたradiation stressの概念による海浜流の発生・発達メカニズムを用いて、空間的・時間的に変動する波の場での海浜流の非定常な応答を数値計算によって解き、海浜流の発生や流速の空間分布特性を明らかにする。あわせて、突堤構造物による海浜流の影響範囲を図示する。次章では、数値計算に用いた海浜流発生モデルと既存の平面水槽を用いた沿岸流発生の実験結果とを比較し、モデルの検証を行う。この中で数値計算におけるパラメタ設定の任意性と本数値計算モデルの優劣、適用条件を示す。第3章では、本数値計算モデルを用いた突堤構造物周辺の波と流れの場の計算結果を示し、海浜流が影響を受ける範囲の簡便な計算法を提案する。付録Aには解析解の導出とパラメタ応答分析の結果を、付録Bに数値モデルの概要と一様勾配斜面における海浜流の発達過程の計算結果を示しておく。

2. 海浜流計算モデルの検証

2.1 検証に用いた水理実験の諸条件と計算条件

沿岸流計算の検証データとして、Visser(1991)の実験

結果4を用いた。この実験は、平面水槽実験で問題となる側壁の影響を低減するために、流量を精密に制御できるポンプを用いて、汀線から碎波位置沖側までの範囲の側壁で吸込・吐出流量の制御を行った上で、斜め入射波によって生じる沿岸流を計測したものである。実験は、水深0.35mの一樣水深部と斜面勾配1/20の滑らかなコンクリート斜面からなる平面水槽を用い、一樣水深部から波高0.078m周期1.02sの規則波を15.4°の角度で入射させ波による沿岸流を発生させたものである。沿岸流が生じた後、側壁での吸込・吐出流を起こし、波と流れの振動が収まった後に、斜面岸沖方向の4測線で染料による流速測定と2測線での抵抗線による波高と平均水位の計測を行っている。水槽内循環流が最小となるよう吸込・吐出流量と導波板長さを調整し、吸込・吐出流量を0.05m³/s、汀線から導波板端までの距離を碎波帯幅の1.2倍とした実験結果である。この実験は、沿岸流の下手での吸込みと上手での吐出しによって、これまで水槽で行われてきた他の実験結果と比較して、沿岸流速の最大値が大きく、最大流速の発生位置が岸よりに生じるなどの特徴が示されている。

今回の計算に用いた海浜流の発生数値計算モデルは、中村(2003)の碎波を考慮した非定常緩勾配方程式に波と流れの干渉項を追加した波の計算モデルと、ラジエーション応力の空間分布を外力とする非線形長波方程式による流れの計算モデルを相互に干渉させつつ、時間発展的に求解するものである(付録B)。計算地形は、岸沖方向には実験と同じ諸元を用い、沿岸方向には、15.4°の角度で斜め入射する周期1.02sの波(水深0.35mで波長1.5m)の位相が揃って入射するよう沿岸幅を22.6mとし、無限に広がる様な斜面での沿岸流を計算できるよう側方の数値境界条件を設定した。ゆえに、側方境界での流量制御は数値計算では行っておらず、純粋に波によって生じる沿岸流を計算したことになる。また、波の位相を含めた計算が十分に行えるよう、計算格子幅を0.1mと十分に細かくし、海浜流と遡上の計算に用いる計算打ち切り最小水深を0.01mmとした。波高の岸沖分布と沿岸流速分布に関係するパラメタである碎波波高水深比 γ を0.65とし、沿岸流速値を決めるパラメタである底面摩擦係数 f_w を0.01とした。これらパラメタ値は一般的に数値計算で用いられる値である。計算時間は、沿岸流がほぼ定常状態に達する150sで打ち切った(付録A式(A4)の沿岸流時間発達を表す式に実験結果の碎波水深や波向を代入し、流速値が漸近値の99%となるまでの時間を計算すると135sとなり、波の伝播時間を含めて150sとした)。

2.2 今回用いた海浜流モデルの性能と限界

図-1にVisser(1991)実験4の岸沖波高分布と数値計算結果の岸沖波高分布を示す。実験結果と数値計算結果の最大波高の発生位置はほぼ同じであるが、実験値と比較して、数値計算値は碎波前の波高は小さく計算され、碎波後の波高は大きく計算されていることが分かる。碎波後の波高が一様に減衰するのは、今回の碎波モデルが碎波波高水深比で碎波開始を定義し、碎波帯内では波高水深比が一定の条件で波高を減じる簡単な波の碎波変形モデルを用いたためである。波の碎波変形モデルを複雑にすることによって碎波後の岸沖波高分布を実験値の分布に近づけることは可能である。しかしながら、碎波前の波高が小さく計算されることについては、規則波の屈折係数や浅水係数を用いた波高の推定法によっても同様に波高は小さく、実験で得られた波高を再現することはできなかった。実験値の波高分布は、導波板による屈折制限や導波板間の反射等による波高増大の影響を受けていると思われる。

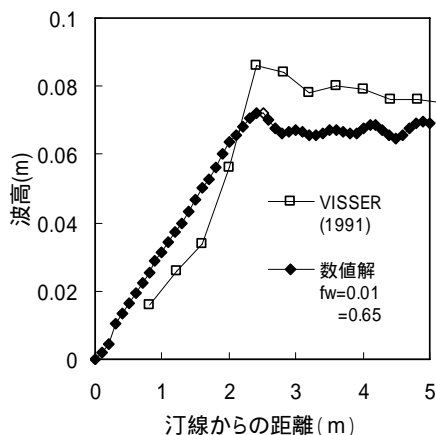


図-1 実験結果と計算結果の岸沖波高分布比較

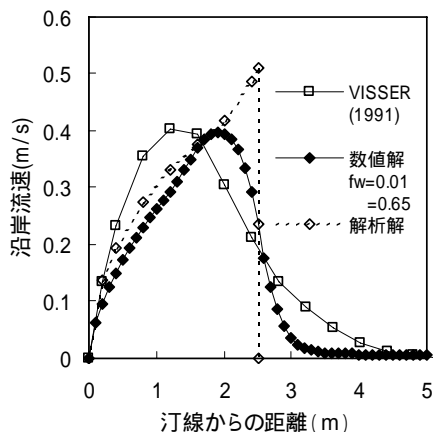


図-2 実験結果と計算結果の沿岸流速分布比較

図-2にVisser(1991)実験4の沿岸流速の岸沖分布と数値計算による沿岸流速の岸沖分布、実験結果の水深・波向を用いて計算した解析解(付録A式(A3))による沿岸流速の岸沖分布を示す。数値計算結果の沿岸流速の最大値と実験値の沿岸流速の最大値は、ほぼ一致するが、その発生位置は、実験値の発生位置が計算値に比べて岸寄りにあることが分かる。解析解による沿岸流速分布については、実験値と比較して碎波位置付近で過大に計算されており、沿岸流速値の算定には、碎波位置の前で平滑化を行う必要がある。

実験値と計算値の波高分布と沿岸流速分布の比較によって、今回用いた海浜流モデルが、水槽実験で観測された波と流れをおおよそ再現することが可能であることが分かる。これら波と流れの計算は、波による平均水位の上昇・低下とその時間変動による浜への遡上、波と流れの相互干渉を含めて行われており、碎波帯内の流れの計算において、優位性がある。逆に、浅海部で波の位相を含めた変形計算を行うためには、細かな格子間隔が必要となり、計算実行時間が長くなるという欠点があり、より高速な計算手法の開発が必要である。また、碎波波高水深比や底面摩擦係数 f_w の値によって、波高分布や沿岸流速分布が変化することから、現地における適用については、いかなる値を設定すべきか検討の必要がある。底面摩擦係数の沿岸流速に及ぼす影響については、解析解を付録Aに数値計算結果を付録Bに示す。

3. 突堤構造物による海浜流影響範囲の数値計算

3.1 数値計算に用いた諸条件

数値計算は、沿岸方向に1000m、岸沖方向に1000m(沖向きを正とする)の計算領域を設定し、計算格子間隔を5mとした。3種の斜面勾配(斜面勾配1/20, 1/30, 1/60で沖側の水深は12mで一様)の海岸に、突堤構造物を模した不透過な境界を一本、陸上部から突堤端水深が1m, 2m, 3m, 4m(計算条件によっては0m, 0.5m, 1.5mを追加)となるように設置し、静水状態から3種類の波浪条件(波高1m周期9s, 波高2m周期9s, 波高1m周期12s)の規則波を様々な角度で斜め入射させ、波によって生じる海浜流の計算を行った(付録Bと同条件)。

無限に広がる海岸に設置された単突堤による海浜流の発達、突堤による影響範囲を示すことが目的であるが、沿岸方向に繰り返す境界(沿岸方向に計算領域が連続する境界)を用いているため、計算領域に一本の突堤を設置したとしても、突堤群による海浜流発達を計算していることになる。隣接する突堤の影響をできるだけ少なく

なるよう沿岸方向の距離を広くした計算領域を設定したが、入射角度が大きい場合、隣接する突堤からの流れの影響を完全に排除することはできていない。また、突堤構造物に対しては、摩擦抵抗や波の減衰抵抗を考慮せず、海浜流に対しては滑面、波に対しては完全反射の条件とした。図-3に突堤周辺の波の計算例を示す。

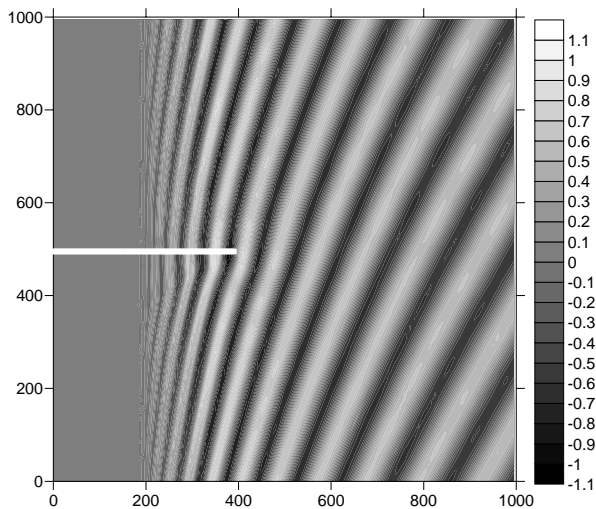


図-3 突堤構造物周辺の波形の計算例

3.2 突堤構造物による海浜流の影響範囲

突堤構造物は、海岸侵食防止や軽減を図る目的で設置され、波が斜め入射する海岸における沿岸漂砂量を制御する。この沿岸漂砂量は、沿岸流の速さやその分布に強く影響されており、沿岸流を制御することが突堤の主要な水理機能として設計される。しかしながら、沿岸流は波によって生じる海浜流の沿岸方向成分であり、突堤による流れの制御や影響を評価するためには、突堤に沿って冲向きに流出する流れや、流入する流れを含めて、突堤周辺の海浜流の流況特性を把握する必要がある。また、海浜流発生の外力となる波の場の変化についても、突堤構造物の水理機能として、検討を行う必要がある。

図-4に突堤周辺の波高分布の計算結果の一例を示す。図は、斜面勾配1/60の海岸に突堤端水深4mまで不透過な突堤を設置した条件で、波高1m周期9sの規則波を沖側境界から61.5°の角度で入射させた場合の波高分布である。突堤が無い場合の碎波開始位置は330mで碎波時の波の入射角度は25.4°である。図中、赤矢印は突堤端での波向角35.0°を示す。突堤長・波向角ともに極端な例であるが、突堤による波の制御機能を見るために例示した。

突堤背後（波の下手側で、突堤と赤矢印によって囲まれる範囲）には、波の遮蔽域が生じ、突堤前面（波の上手側）には、重複波の節腹構造が生じている。

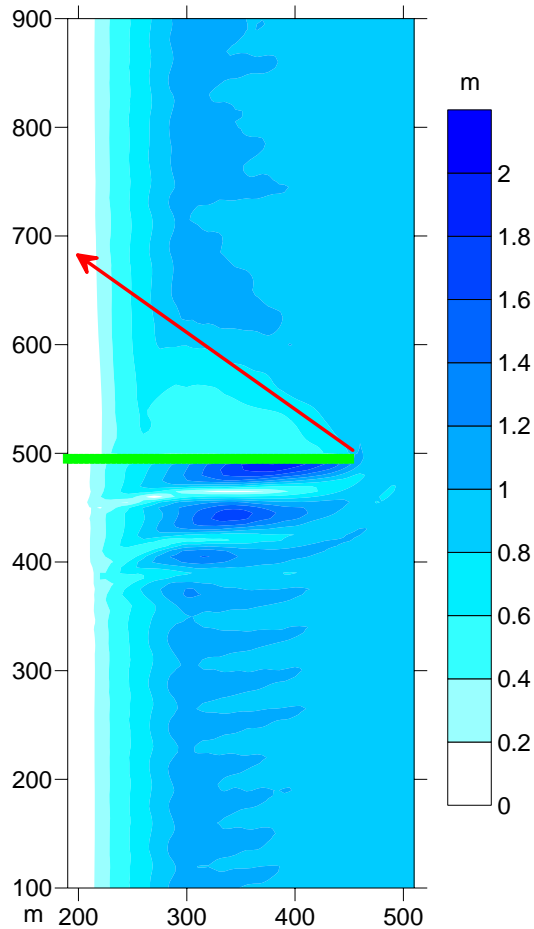


図-4 突堤周辺の波高分布（1/60,H=1m,T=9s,61.5°）

この時、波のラジエーションストレスによって生じる起流力の沿岸方向成分は、図-5のようになる。図中、青色（+）は上手から下手へ（図の下から上へ）の起流力が生じている範囲であり、赤色（-）は下手から上手への力が生じている範囲である。図を示していないが、突堤が無い様な勾配斜面場合には、全域が青色（+）の起流力によって、上手から下手へ（図の下から上へ）の沿岸流が生じる。図-5中、突堤背後には赤色（-）域が広がり、この範囲では、波の遮蔽域に流れ込む方向の力を強く受けている。また、突堤前面には、反射波による赤色白抜（-）域が生じている。海浜流は、この起流力の分布に従って生じる。突堤上手側では、突堤の影響の少ない突堤から離れた碎波帯内の青色域で上手から下手への沿岸流が生じ、突堤での流れの遮断と突堤反射波による正負が交互に生じる起流力の影響を受け、突堤に沿った縞状の分布で沖へと流出する。

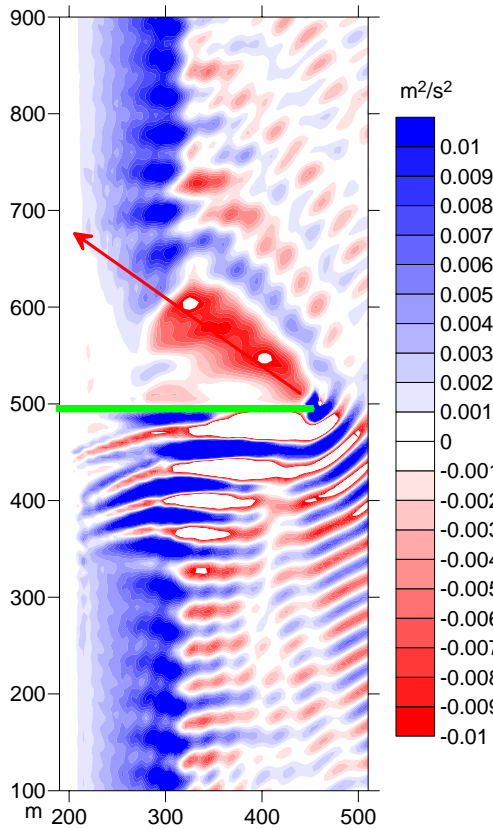


図-5 起流力の沿岸方向成分(波の入射角61.5°)

一方、突堤下手側では、突堤から遠く離れた青色域で生じた沿岸流に引きずられるように、突堤周辺にも流れが生じ、不足分を補うように、沖から流入する。図-6に突堤周辺の海浜流の発生状態を示す。図中、流速値を青濃淡で表し、流れの方向を黒矢印で表している。突堤端での波向を示す赤矢印の指し示す先端付近では、波の斜め入射によって生じる下手方向への沿岸流と、波の遮蔽域に向かう上手方向への沿岸流とに分岐する場所になっている。

突堤下手側では、この波の遮蔽域が直接的な影響範囲と考えられる。この影響範囲に加えて、影響範囲外に沖から伝播して来る波によって、途中遮断された沿岸流が改めて駆動される、この下手側で改めて駆動された沿岸流が定常状態に達するまでに必要な距離が突堤による流れの下手側影響範囲と考えられる。突堤上手側では、波の重複波の構造が強く現れる範囲(200m程度)が直接的な影響範囲であろう。

波の入射角が10.1°の場合の海浜流速分布を図-7に示す。突堤端での波の入射角は5.3°(図中の赤矢印)であり、波の遮蔽効果による流れへの直接的な影響は少ない。また、突堤下手側の波の遮蔽による突堤へ向かう沿岸流は弱く、途中遮断された沿岸流の回復は早い。

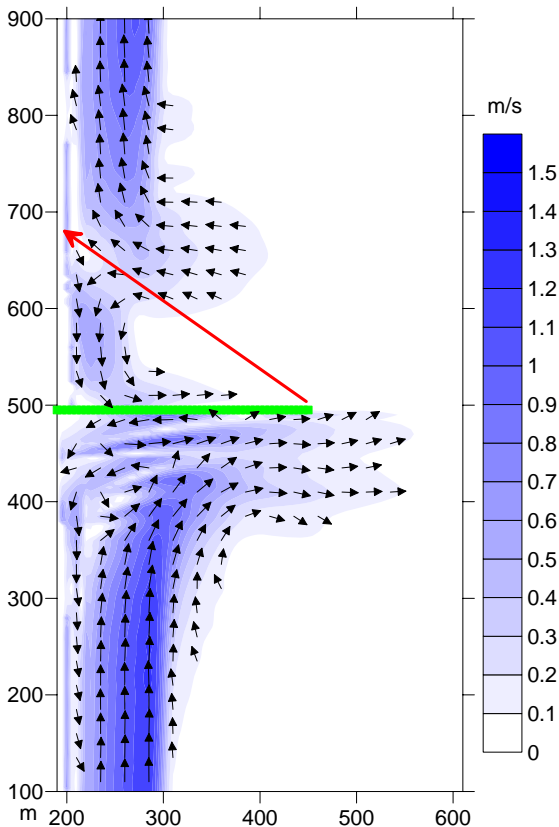


図-6 突堤周辺の海浜流の状況(波の入射角61.5°)

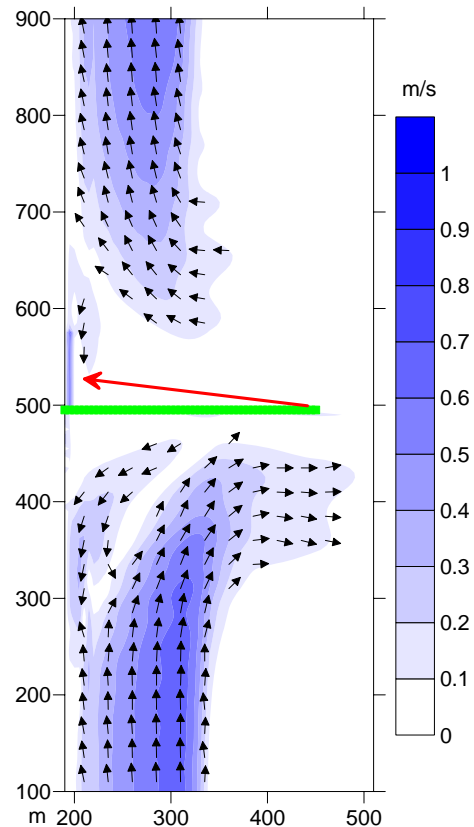


図-7 突堤周辺の海浜流の状況(波の入射角10.1°)

3.3 突堤による沿岸流速の影響範囲図

斜面勾配や波，突堤長の計算条件を変えた計算によって得られた突堤まわりの海浜流速分布を見ると，地形と波の条件によって決まる砕波帯幅（突堤が無い場合の遡上端から砕波開始位置までの岸沖距離で定義）と突堤長，突堤端位置での波向（突堤端位置に相当する突堤が無い場合の波向で定義）によって，海浜流の分布がおおよそ決まることが分かる．そこで本節では，突堤まわりの海浜流速の分布を，砕波帯幅を長さの基準として，また，突堤が無い場合の沿岸流速の最大値を速度の基準として，無次元化する．代表長と代表速度を用いて無次元化することによって，地形条件や波の条件を変えた計算結果をまとめることができる．

図-8は，突堤が無い場合に最大流速が発生する岸沖位置（砕波開始のわずかに岸側，沿岸流速の岸沖分布形は付録Bを参照）での沿岸流速 U の沿岸方向分布を示している．横軸は，突堤からの沿岸距離 Y を砕波帯幅 l_b で無次元化した Y/l_b で正方向が波と沿岸流の上手側を示す．縦軸は，突堤が無い場合の沿岸流速の最大値 U_{max} で無次元化した沿岸流速値を示す．図中のパラメタ l_r/l_b は，有効突堤長 l_r （突堤端から波の遡上端までの長さ）を砕波帯幅で無次元化したもので，パラメタ l_r/l_b が1を超えると砕波帯が突堤によって分断され，流速比は0になる．また，突堤の影響が無い場合，流速比は1になる．突堤上手側の影響範囲については砕波帯幅の2倍程度の距離であるが，下手方向の影響範囲については6倍程度まで広がっていることが分かる．下手側の影響範囲の内，砕波帯幅の2倍程度は，図-5,6の考察から，波による直接的な影響であるといえる．また，上手側で突堤に向かう沿岸流は，突堤に近づくにつれ，単調に減少し，下手側の突堤から離れる沿岸流についても突堤長パラメタ $l_r/l_b > 1$ で突堤から離れるにつれ，単調に発達する．突堤長パラメタ $l_r/l_b < 1$ の場合，突堤下手側の波の遮蔽域（範囲は砕波帯内で狭い）外での流速の発達と突堤端をまわり込んで流れる沿岸流の存在によって複雑な沿岸流速の回復過程となっている．図-9に突堤端をまわり込んで流れる沿岸流の最大値とその発生位置を示す．突堤長パラメタ $l_r/l_b > 0.6$ で突堤端をまわり込む沿岸流速の最大値は減少し始め，突堤端の少し沖側に最大流速が生じることが分かる．図-10に突堤端位置での岸沖流速 U の沿岸方向分布を示す．横軸は無次元化した突堤からの沿岸距離，縦軸は突堤が無い場合の沿岸流速の最大値 U_{max} で無次元化した岸沖流速（冲向きが正）である．上手側の突堤に沿った沖への流出域の沿岸方向幅は砕波帯幅程度であり，冲向きの流出は突堤近くに集中した速い流れとなる．

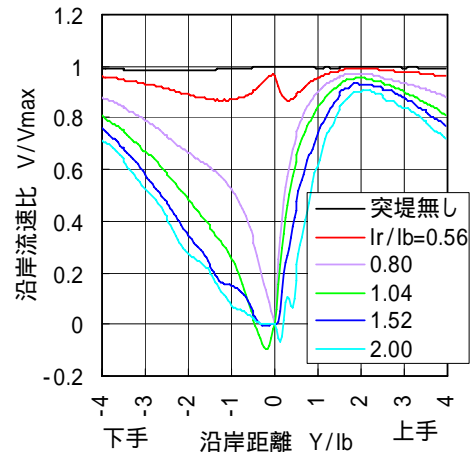


図-8 沿岸流速の沿岸分布(入射角 61.5°)

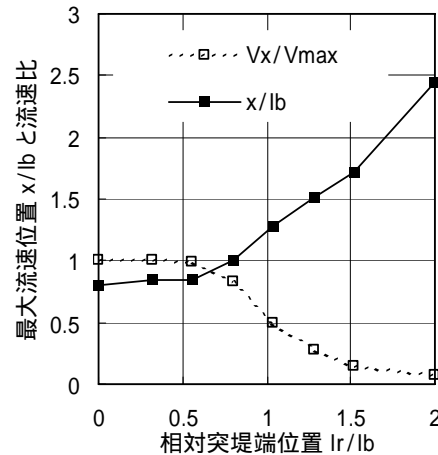


図-9 突堤端をまわり込む沿岸流速の最大値と発生位置(入射角 61.5°)

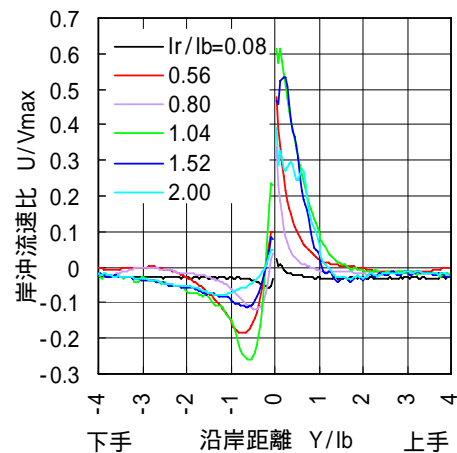


図-10 突堤端での岸沖流速の沿岸分布(入射角 61.5°)

図-11に波の入射角が小さい場合の突堤からの距離による沿岸流速の減少量を示す。図-8と同様に突堤上手側については碎波帯幅の2倍程度の範囲で沿岸流速に影響がある。また、突堤下手側の影響範囲については、碎波帯幅の3倍程度であり、入射角度の大きい場合の影響範囲の中で波の直接的影響と考えられる範囲を除いた範囲とほぼ同等である。突堤上手側の沿岸流速の減少と突堤下手側の沿岸流速の発達はいずれも直線的であり、入射角度の大きな場合との相違はない。図-12に突堤端をまわり込んで流れる沿岸流の最大値とその発生位置を示す。入射角度の大きな場合と同様の傾向である。図-13に突堤端位置での岸沖流速の分布を示す。入射角度の大きな場合の図-10と比較して、突堤長パラメタ $l_r/l_b > 0.7$ の場合、重複波によって生じる突堤に沿った強い岸向き力によって、沖へ流出する位置が突堤から離れた場所に生じている。

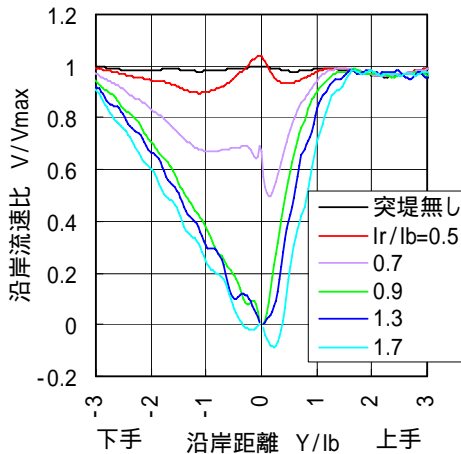


図-11 沿岸流速の沿岸分布(入射角 10.1°)

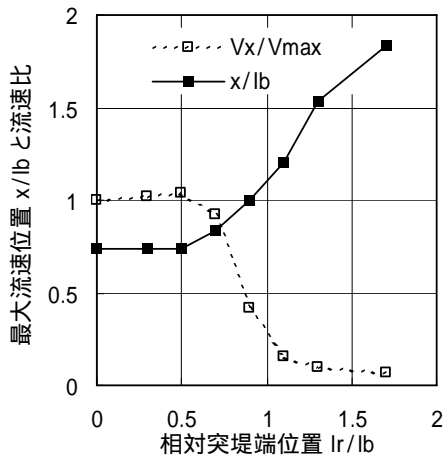


図-12 突堤端をまわり込む沿岸流速の最大値と発生位置(入射角 10.1°)

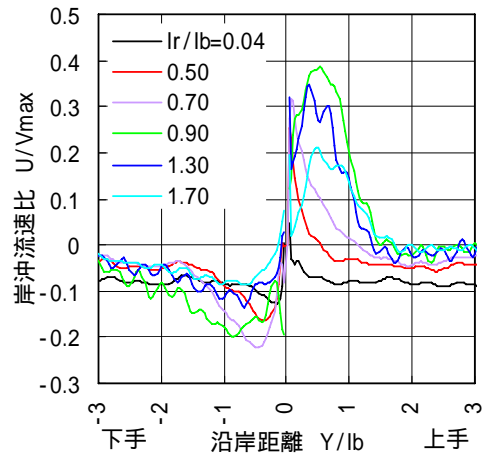


図-13 突堤端での岸沖流速の沿岸分布(入射角 10.1°)

3.4 突堤による沿岸流速の影響範囲図の使用法

異なる海底地形勾配および波の条件においても、突堤が無い場合の碎波帯幅と沿岸流速の最大値を用いて、突堤周辺の海浜流分布を無次元化することによって、前節で比較した波の入射角の大きな場合と小さな場合での沿岸流の減速と発達について得られた結果と同様の傾向となった。突堤周辺の沿岸流の上手側の減速と、下手側の発達について簡単にまとめると、突堤上手側の影響範囲は、波の入射角に影響されず、遡上開始位置から遡上端までの距離で定義される碎波帯幅 l_b の2倍で表され、

$$\text{突堤上手側影響範囲} = 2l_b$$

突堤に向かう沿岸流速は、突堤からの距離 x と突堤が無い場合の沿岸流速の最大値 V を用いて、おおよそ、

$$V(x) = V_\infty \frac{x}{2l_b} \quad (1)$$

と表される。また、突堤下手側影響範囲は、有効突堤長 l_r と突堤端を通過する波向角 θ_r (ラジアン)との積で表される波による直接的影響範囲と碎波帯幅 l_b の3倍で表される沿岸流発達の範囲との和で表され、

$$\text{突堤下手側影響範囲} = l_r \theta_r + 3l_b$$

突堤から離れる沿岸流速は、突堤からの距離 x と突堤が無い場合の沿岸流速の最大値 V を用いて、おおよそ

$$V(x) = V_\infty \frac{x}{l_r \theta_r + 3l_b} \quad (2)$$

と表せる。

突堤端が碎波帯内にある場合については、突堤端をまわり込む沿岸流速が速くなる現象(数%の速度上昇)や、その下手側と上手側で遅くなる現象がそれぞれ上手側 $2l_b$ の範囲、下手側で $3l_b$ の範囲で生じるが、その流速値についての統一的な定式化はできていない。

式(1)と式(2)を用いて突堤周辺の沿岸流速および影響範囲を求めるためには、突堤周辺の長さの基準となる突堤が無い場合の砕波帯幅、流速の基準となる突堤が無い場合の沿岸流速の最大値、突堤端位置での波向の情報が必要になる。波向や砕波位置、平均水位の上昇による汀線位置を求めるための理論式や経験式については、水理公式集(1999)第5編海岸・港湾編の第3章波の変形や多くの海岸工学に関する教科書、例えば、合田(1977)の設計実務編第3章、等に記載されている。また、波の変形計算シミュレーションによっても求めることができる。沿岸流速の最大値についても、これまで多くの理論式や実験式が提案されており、それらの式を用いて、多くの場合砕波波高や波向の条件を代入して、沿岸流速の分布形から最大値を求めることができる。付録Aの沿岸流速の解析解を用いるのも一つの方法である。ただし、この解析解で得られる沿岸流速の最大値は、砕波位置で生じるその値は実験で計測される沿岸流速の1.25倍程度の流速値となる(実験結果との比較図-2参照)。こうした計算式によって、あるいは、これから突堤構造物を建設する場合には、現地観測によって得られる波高や波向、流速の観測統計値を用いて、突堤のおおよその影響を簡易に推定することができる。

4. あとがき

波によって生じる海浜流については、古くから研究されているものの、波浪の伝播・変形計算で用いられるような簡便な式や図表があまり無い。これは、海浜流が波の伝播変形による時間平均量の空間勾配を外力として水塊の運動を記述しているため、力を受ける方向にのみ水塊が運動するのではなく、構造物境界や水塊の運動状態によって外力の流れへの作用のし方が異なるにことに起因する。今回の計算モデル作成では、できるだけ簡単な波の計算モデルと流れの計算モデルを用い、海岸や構造物、波の入射についても単純な条件を設定し、計算を実施した。こうした単純な計算モデルと諸条件を用いても、計算で得られる海浜流の分布や発達過程は複雑なものとなった。今回提案した突堤による沿岸流影響範囲の推定および流速値の推定式については、極めて理想的な条件で得られる波による海浜流計算の結果をできるだけ簡単に取りまとめたものである。突堤が海浜流に及ぼすの影響をさらに詳細に検討するためには、より多くの条件設定で計算を行うとともに、現地で生じている様々な流れ発生の要因についても考慮しなければならない。また、離岸堤構造物や他の形式の海岸構造物による海浜流影響

範囲についても検討を進める必要がある。

最後に、今回モデル検証のために行った一様勾配斜面に斜め入射する波の計算の中で、海底勾配と波の条件の組み合わせによっては、規則的な波を入射しているにも関わらず、波と平均水面変動や海浜流と干渉し、波高分布が沿岸方向に不規則に変動し、海浜流の自励的な運動が生じる現象が見られた。こうした離岸流の発生との関連を含め波と流れの干渉による海岸で生じる自然現象の解明は、今後の課題である。

(2006年8月25日受付)

参考文献

- 1) 合田良實(1977): 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, 237p.
- 2) 土木学会編(1999): 水理公式集, 平成11年度版, 713p.
- 3) 中村聡志 (2003): 波群の変形による長周期の波と流れの発生および沿岸の長周期波に伴う浜への波の遡上を考慮した地形変化モデルの構築, 港湾空港技術研究所資料, No.1062, 16p.
- 4) Longuet-Higgins, M.S. (1970): Longshore currents generated by obliquely incident sea waves, Jour. Geophys. Res., 75(33), pp.6778-6801.
- 5) Visser, P.J (1991): Laboratory measurements of uniform longshore currents, Coastal Engineering, Vol.15, pp.563-593.

付録A. 沿岸流発達解析解

A.1 沿岸流の非定常解析解

静止した水域を岸に向かって波が入射する場合の水塊の運動と水塊の岸沖運動の後に平均水面のセットアップ・ダウンが形成される平均水位の過渡応答については、日野ら(1977)によって実験的・解析的に検討がなされ、岸沖流と平均水面の収束については、波の入射開始から比較的短時間(20 波程度)で収束状態に達することが示されている。しかしながら、沿岸流については多くの解析解が定常状態を仮定して解かれており、発達過程や過渡応答を表したものは少ない。そこで、ラジエーション応力と底面摩擦力を導入した平面2次元の長波運動方程式を用いて、一様勾配斜面に波が斜め入射する場合の沿岸流過渡応答の解析解を求める。平均水位と岸沖流は初期には変動するが20 波程度で定常状態に達することから(このことは付録Bの結果でも示される)、今回の沿岸流非定常解を求める際には、長波流れの基礎式で平均水位と岸沖流は擬似的に定常状態にあると仮定し、また、浜を通過する質量輸送を0とおくことによって、沿岸方向の運動方程式から次式を得る。

$$d \frac{\partial V}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{S_{xy}}{\rho} \right) - \frac{f_w}{2} |V| V \quad (A1)$$

ここで、 d は水深、 V は沿岸流速、 S_{xy} は波によって生じるラジエーション応力、 f_w は底面摩擦係数、 t は時間、 x は沖向きを正とする距離、水平拡散項については波の不規則性を考慮することによって、その効果が生じることになるので、本解析解では式中に拡散項を導入せず、余計な拡散パラメータを排除している。式(A1)を静止状態($V(0)=0$)からの発達過程($V(t) \geq 0$)の条件で解き、 S_{xy} に波のエネルギー表示式を用い、砕波帯内の波高水深比 γ は一定、砕波位置での汀線に対する波の入射角を θ_b 、平均水位変動は小さい($d \gg h$)と仮定して式を整理し、森口ら(1956)の有理函数の不定積分公式 $I_A = I[0,1]$ を用いて積分すると、砕波帯内の沿岸流速 $V(t)$ は次式で得られる。

$$V(t) = V_\infty \tanh(T^*) \quad (A2)$$

ここで、

$$V_\infty = \sqrt{\frac{g\gamma^2 h \theta_b \tan \beta}{2f_w}} \quad (A3)$$

は、沿岸流速の漸近値、 h は初期水深、 $\tan \beta$ は海底勾配、

$$T^* = t \sqrt{\frac{gf_w \gamma^2 \theta_b \tan \beta}{8h}} \quad (A4)$$

は、無次元化された経過時間である。静止水面に規則波が斜め入射する場合、砕波帯内の沿岸流速の発達過程は、砕波状況と地形、底面条件によって決まる無次元時間経過、式(A4)、によって徐々に増加し、十分に時間が経過した後は、式(A3)の流速に漸近することが分かる。ただし、この沿岸流解析解では、砕波位置と砕波時の波向について、別途、波の屈折・変形計算から求める必要がある。

A.2 沿岸流速の岸沖分布と砕波時の波向角、底面摩擦係数との関係

沿岸流の発達の物理過程を明らかにするためには、単純なモデルを解析的に求め、その解析解がどんなパラメータによってどのように依存しているかを明らかにすることが重要である。また同時に、他のより複雑な数値モデルを検証する際の例題として、解析解を用いることができる。この節では、砕波時の波向角および底面摩擦係数が沿岸流速の岸沖分布に及ぼす影響を式(A3)を用いて考察する。

式(A3)は、一様勾配の斜面に波が斜め入射し、定常な波の状態が十分に時間が経過した後に生じる砕波帯内の沿岸流速を表している。砕波帯内の沿岸流速分布は、水深の1/2乗に比例して増加し、砕波位置で最大となる。砕波時の波向角が大きいほど沿岸流速は速くなり、また、底面摩擦が大きくなるほど沿岸流速が遅くなるのが式から分かる。図-A1に海底勾配が1/60、砕波波高水深比が0.65、砕波開始水深が3m、海底摩擦係数を0.01で固定した場合の、砕波時の波向角の違いによる沿岸流速の岸沖分布の変化を示す。Longuet-Higgins(1970)やクラウスら(1978)が示した水平拡散項無しで計算した沿岸流速の岸沖分布と比較して、本解析解は上に膨らんだ三角形形状をしている。これは、彼らの解析解は海底摩擦項に水深と波向角によって変化する海底摩擦式を用いたためである。海底摩擦と水深との関係については、様々な定式化が可能であり、また、その評価についても未だ十分に行われていないの実状である。今回の解析解のように流況を変化させるパラメータとして定式化し、現地観測された沿岸流速値を用いて、当該海岸に応じた海底摩擦係数の合わせ込みを行うことが適切であろう。

次に、砕波時の波向角は5°に固定し、海底摩擦係数の違いによる沿岸流速の岸沖分布の変化を図-A2に示す。海底摩擦係数の増加は、沿岸流速を減じ、その岸沖分布を

岸沖で一様な分布とする。橋本ら(1978)は、現地海底摩擦係数を平均的には0.012と推定している。また、海浜流計算では0.01程度の値がよく用いられる一方で、沖合で海底摩擦係数を0.01とし、汀線部で0.25まで連続して変化させた計算例もある。このように評価の定まっていない海底摩擦に関する項を定式化して用いること、現地観測データを用いて海底摩擦係数の合わせ込みの作業を行わなければならないことが、海浜流の計算式や図表による簡便な予測計算を未だに困難にしている一つの原因と思われる。

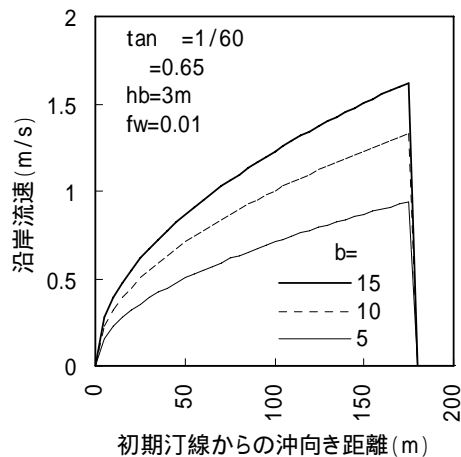


図-A1 砕波時の波向角の違いによる沿岸流速の岸沖分布の変化

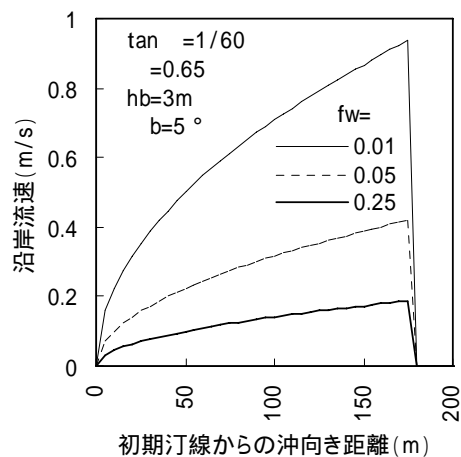


図-A2 底面摩擦係数の違いによる沿岸流速の岸沖分布の変化

A.3 沿岸流速の収束時間と砕波時の波向角、底面摩擦係数との関係

海浜流の研究でこれまであまり考慮されていなかった特性として、海浜流の発達減衰に関する時間経過がある。実験的研究では、静水状態からの造波によって生じる海浜流は過渡的な状態にあり、沿岸流が十分に発達するまでの長い時間の実験ができない。また、現地観測では、波の状態が一定でないため、様々な状態の波によって生じた重ねあわせの流れが観測され、観測された海浜流がどれくらい前の波の状態に影響を受けているかを判断することが難しい。今回の解析解では、静水状態を初期条件として求解した。これは、水槽実験時における波の作用時間と沿岸流の発達と収束状況を知るためと、付録Bの数値解析における発達過程の検証を行うことを目的としたからである。なお、ある一定の流れ場を初期条件として、式(A1)を解けば、現地海岸における波の場の変化を想定した、波の場が突然変化した場合の沿岸流速の過渡応答を求めることも可能である。この場合の沿岸流速の時間応答解も式(A2)のようなtanh型の関数を持ち、時間とともに波の場と地形によって規定される沿岸流速の漸近値に収束する。

この節では、砕波時の波向角および底面摩擦係数が沿岸流速の発達に及ぼす影響を式(A2),(A4)を用いて明らかにする。式(A4)は、一様な勾配の斜面に斜め入射する定常な波が生じさせる沿岸流の発達時間を無次元化するための変数であり、水深が浅いほど沿岸流は短時間で収束し、また、砕波時の波向角が大きいくほど、底面摩擦が大きいくほど、短時間に収束することが分かる。図-A3に海底勾配が1/60、砕波波高水深比が0.65、砕波開始水深が3m、海底摩擦係数を0.01で固定した場合の、砕波時の波向角の違いによる砕波位置での沿岸流速の時間発達を示す。縦軸は、沿岸流速値を沿岸流速の漸近値で除した値となっており、値が1に近いほどよく収束していることを示す。図-A4に砕波時の波向角を5°で固定した場合の海底摩擦係数の違いによる砕波位置での沿岸流速の時間発達を示す。砕波時の波向角が5°で海底摩擦係数が0.01の場合波の作用開始から10分程度経過しても、約8割の沿岸流速にしか達していないことが分かる。

数値計算が収束するまでの時間を求める一例として、付録Bの数値計算の結果(一様勾配 $\tan \beta = 1/60$ の海岸に水深12mの沖から10°の角度で入射する波高1m・周期9sの波の変形計算)を用いて、海底摩擦係数の違いによる、砕波点での沿岸流の漸近流速と沿岸流速の99%収束($\tau^* = 2.65$)までの時間 t を計算した(表-A1)。沿岸流速の漸近値と収束までの時間は、一般的に用いられる $f_w = 0.01$ では、

130波以上の経過時間が必要であり，日野ら（1977）による平均水位と岸沖流の安定までにかかる30波程度と比べて経過時間が長い．これは，沿岸方向に一樣な波によって生じる岸に平行な小さな起流力と底面摩擦力が釣り合うよう流速が決定されるためである．

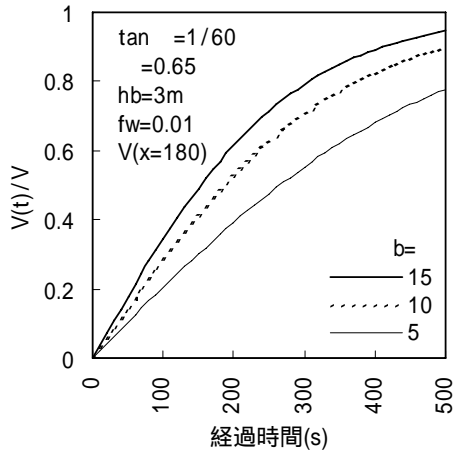


図-A3 砕波時の波向角の違いによる沿岸流速の発達状況の違い

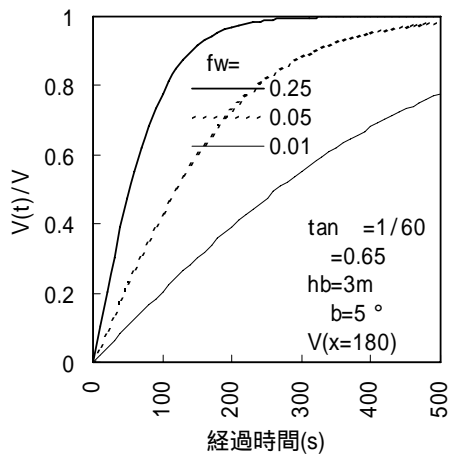


図-A4 底面摩擦係数の違いによる沿岸流速の発達状況の違い

表-A1 海底摩擦係数と沿岸流漸近速度，収束時間(波数)

f_w	V (m/s)	t (s)
0.01	0.85	1224 (136波)
0.05	0.38	547 (60波)
0.25	0.17	245 (27波)

参考文献

- A1) 日野幹雄，沢本正樹（1977）：非定常過程としての海浜流の研究(1)，海岸工学論文集，第24巻，pp.596-599.
- A2) ニコラス クラウス，佐々木民雄(1978)：沿岸流速分布に及ぼす入射角の影響について，海岸工学論文集，第25巻，pp.430-434.
- A3) 橋本宏，宇多高明(1978)：海浜流と摩擦係数の現地観測，海岸工学論文集，第25巻，pp.435-444.
- A4) 森口繁一，宇田川銈久，一松信(1956)：岩波数学公式I(微分積分・平面曲線)，岩波書店，318p.
- A5) Longuet-Higgins, M.S. (1970): Longshore currents generated by obliquely incident sea waves, Jour. Geophys. Res., 75(33), pp.6778-6801.

付録B．波と流れの相互干渉を考慮した数値計算

B.1 計算モデルに用いた波と流れの基礎式

離岸流の消長や寄せる波の遡上の不規則性でわかるように、海浜流や波の遡上は、極めて非定常な現象である。海浜流は、沖から来襲する波によって励起され、その外力となる波は、浅海域を伝播する過程で海底地形や構造物の影響を受け、屈折、浅水変形、砕波変形、回折、反射によって、波高や波向きが変化する。こうした波の変形と流れの励起を計算するためには、波の変形を位相を含めて精度よく推定し、また、遡上域を含めた計算を行うことが重要となる。波の伝播変形計算としては、波の振幅と位相を計算するモデルとして、波の不規則性を考慮した上、波と流れを同時に計算するBoussinesq方程式を用いたモデルがあるが、境界条件処理の問題や基礎方程式の適用範囲の問題、広領域計算における計算時間の問題があるので、ここでは波の不規則性を犠牲にするけれども、これらの問題の比較的少ない非定常緩勾配方程式を用いることとする。非定常緩勾配方程式は波の主要な変形を扱うことができ、規則波を用いた式であるため、波の変形が顕著に現れること、波の一周期の間の積分によって定義されるラジエーションストレスを簡便に計算できるという特長を持つ。また、波の連なり（波群）に対しても入射波の振幅の変調を行うことにより、波群の効果を簡単に導入することができる。一方、海浜流の計算については、砕波帯内で顕著に現れる平均水面の上下動や、汀線での平均水位の上昇とその変動による水塊の遡上流下を考慮する必要がある。

今回の海浜流数値モデルでは、波の変形・伝播と海浜流の発生、海浜流の過渡応答を検討するために、中村(2003)の砕波を考慮した非定常緩勾配方程式に波と流れの干渉項を追加した式(B1)とラジエーション応力の空間分布を外力とする長波方程式、式(B2)、(B3)を用いて、波と流れを相互に干渉させつつ、時間発展的に求解した。波から流れへの干渉は、波の伝播変形計算の一周期積分操作で計算されるラジエーションストレスを流れの外力として与え、流れから波への干渉は、海浜流の計算結果を波の一周期ごとに波の変形計算における流れの場として与えることにより考慮した。

$$\frac{D^2\phi}{Dt^2} + (\nabla \cdot U) \frac{D\phi}{Dt} = \nabla \cdot (cc_g \nabla \phi) - k^2 c^2 (1-n)\phi - f_D \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (B1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(d) + \frac{\partial}{\partial x_\alpha}(d\hat{u}_\alpha) = 0, \quad d = h + \hat{\eta} \quad (B2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(d\hat{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_\alpha} \left(d\hat{u}_i^2 + \frac{1}{2}gd^2\delta_{i\alpha} \right) = -F_i - \tau_i + gd \frac{\partial h}{\partial x_i} \quad (B3)$$

ここで、 ϕ ：水表面ポテンシャル、 $\hat{\eta}$ ：平均水面変動、 h ：初期水深、 $U=(\hat{u}_x, \hat{u}_y)$ ：海浜流ベクトル、 c, c_g ：波速と群速度、 n ：群速度波速比、 k ：波数、 f_D ：砕波減衰係数（砕波波高水深限界比によって定義される係数で波高水深比が $\sqrt{2}$ を超えると超過割合に応じて水表面ポテンシャルを減じることによって、砕波による減衰を計算している）、 F_i ：式(B1)で逐次計算される ϕ （波動成分の η, u, v ）を波の一周期の間で積分することによって得られるラジエーション応力による起流力、 τ_i ：底面摩擦抵抗を表す。式(B1)中の微分演算子は、以下の演算とする

$$\frac{D}{Dt} = \left(\frac{\partial}{\partial t} + U \cdot \nabla \right), \quad \nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right).$$

汀線の取り扱いについては、階段状の地形への段波の浜への遡上として、平均水面の上下動および流速変動を計算した。

B.2 一様勾配斜面における海浜流の発達計算

数値計算は沿岸方向に1000m、岸沖方向に1000m（沖向きを正とする）、計算格子間隔5mの計算領域を設定し、斜面勾配1/60で沖側水深12mの海岸に、静水状態から規則波を様々な角度で斜め入射させ、波によって生じる海浜流の応答計算を行った。無限に続く一様勾配海浜での海浜流の計算を行うため、沿岸方向の両境界は繰り返し境界（沿岸方向に計算領域が連続する境界）とし、規則波の入射角度を沖側境界で波長の整数倍の位相が生じる角度とした。具体的には、周期9sの時、入射波向は10.1°、31.8°、61.5°の3種を用い、周期12sの時は、14.2°、29.4°、47.5°を用いた。沿岸方向に一様な海岸を想定し、沿岸方向の境界条件を繰り返し境界としているため、沿岸流の発達過程を計算し、単に解析解との比較をすることを目的とするのであれば、沿岸方向の計算領域を狭くすることによって、計算時間を短くすることができるが、第3章で行う突堤を配置した場合の計算で、突堤の影響を受けない部分をできるだけ広くするため、また、波の入射角の種類を多くするため、沿岸方向に広い領域での海浜流（沿岸流）計算を行った。図-B1に、一例として、沖側境界（右端）から波高1m周期12sの波を29.4°で入射させた場合の波の位相分布を示す。

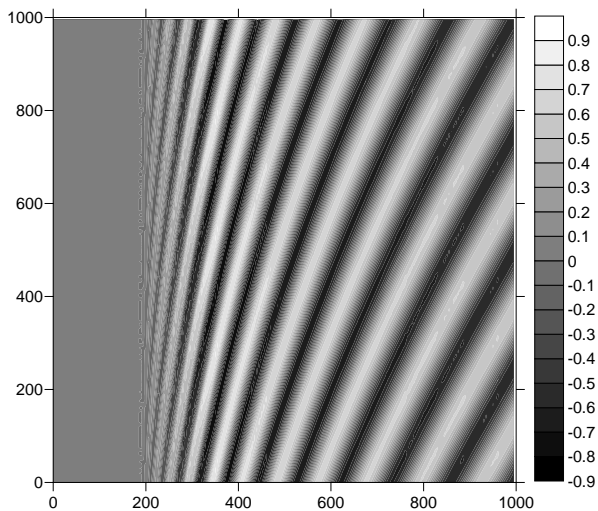


図-B1 波の位相分布の計算例

図-B2は、斜面勾配1/60の海岸に沖側境界から 10.1° の角度で波高1m周期9sの規則波が入射する条件で計算し、沿岸流速がほぼ定常に達した時点（800s）での沿岸流速分布（破線）と波高の岸沖分布（太実線）の結果である。合わせて、入射開始から180s秒間の波高分布を示す。平均汀線位置は190m、砕波開始位置は345m、砕波波向角は 5.3° 、波高の最大値1.46mは330m地点で生じ、沿岸流速の最大値0.66m/sは305m地点で生じた（砕波判定は $\gamma=0.65$ とし、底面摩擦係数は $f_w=0.01$ とした）。波高は入射開始後144s（16波）程度で汀線まで到達し、早期に安定した岸沖分布になっている。また、沿岸方向に波高分布についても、一様で安定した状態となっている。

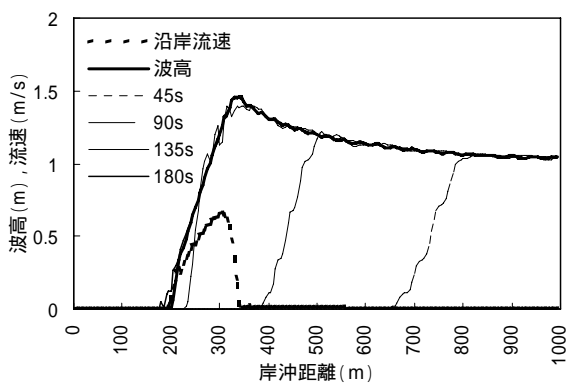


図-B2 波高と沿岸流速の岸沖分布

図-B3は、沖側境界から 10.1° で波が入射する場合の沿岸流速の最大値が発生する305m地点における平均水位（細線）、岸沖流速（点線）、沿岸流速（実線）の応答を示したものである。岸沖流速は沖向きを正とする。静止水面上に入射する規則波に対する過渡応答として、入射100s後に先頭波によって生じた平均水位の上昇と岸向き流れ

が到達している。到達後100～300sの間に平均水位と岸沖流速の変動が生じ、その後は安定している。この平均水位と岸沖流速の初期変動については、日野ら（1977）による実験でも、波の入射開始から比較的短時間（20波程度）の間に生じ、その後は収束することが示されている。この現象は、初期静水状態から波を入射させる場合、先頭波到達時に波の進行方向の波高分布が急激に変化するため、岸向の起流力 F_x （図-B4中の細線）が大きく生じ、岸向き流れと水面上昇によってバランスした後、先頭波が汀線で反射し、重複波が安定的に形成され、波高の岸沖分布が安定するまで、平均水面と岸沖流速が振動するためである。一方、沿岸流速の発達については、先頭波の到達時の変動は小さく、時間とともに漸増する。これは、一様勾配斜面に規則波が斜め入射する場合、沿岸方向の波高分布はほぼ一様であり、ラジエーション応力 S_{yy} の沿岸方向勾配が極めて小さいため、沿岸方向の起流力 F_y （図-B4中の太線）が生じにくいためである。この時の沿岸方向の起流力 F_y は、主にラジエーション応力 S_{xy} の岸沖勾配によって生じており、その大きさは、岸沖方向の起流力 F_x に比べて一桁小さい。

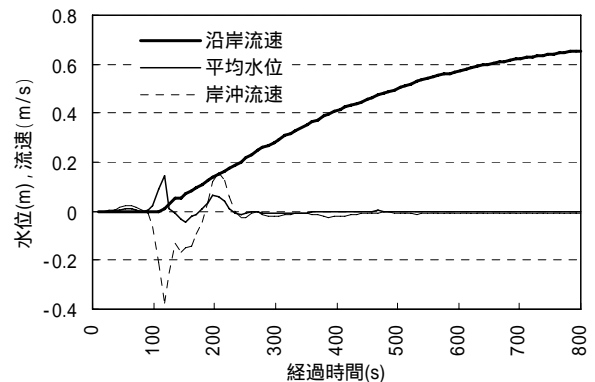


図-B3 平均水位・岸沖流速・沿岸流速の応答

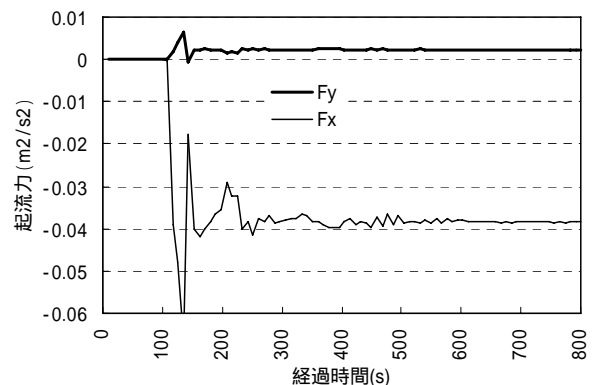


図-B4 岸沖方向起流力と沿岸方向起流力

次に、岸流速岸沖分布形状についての数値解と解析解との比較を示す。図-B5は、斜面勾配1/60の海岸に沖側境界から10.1°で波が入射する場合の沿岸流速の分布を静水時の汀線を基準点として示したものである。解析解は、数値解から得られる碎波時の波向角と碎波水深を用いて式(A3)を図化した。解析解は平均水面の上昇による汀線の移動を考慮していないので、岸向き距離0mから沿岸流が生じているが、数値解では、平均水面の上昇に応じた汀線位置までの沿岸流が計算されている。碎波開始点近くでの解析解と数値解の乖離は大きい、そのほかの場所では、沿岸流速値はよく一致している。碎波開始点近くの乖離が大きい原因として、解析解の理論的な最大沿岸流速値と収束値に向かって増加する数値計算値との違いや、数値計算による碎波の状況が解析解で用いた過程とは異なり、碎波開始点から徐々に碎波減衰が生じていること、数値計算による分散効果が生じていることなどが考えられる。

図-B6は、図-B5で沿岸流速の最大値が生じている岸沖距離90m地点の沿岸流速の発達を数値解と解析解、式(A2)で比較したものである。数値解と解析解はほとんど一致しており、また、数値解は90%程度の収束状況であることが分かる。図中のV(x=90)は解析解の漸近値、式(A3)を表す。図-B7は、波の入射角を31.8°とした場合の斜面勾配1/60の海岸における沿岸流速の分布を示したものである。図-B5の場合と同様に遡上域の沿岸流速分布が生じており、碎波点での乖離が大きい。全体の分布形状の一致は良好である。図-B8は、波の入射角を61.5°とした場合の斜面勾配1/60の海岸における沿岸流速の分布を示したものである。図-B5、B7、B8から数値解による碎波時の波向角の違いに対する沿岸流の岸沖分布形状は、解析解による変化の傾向とほぼ一致しており、また、図-B6から沿岸流速の発達の状況も再現しているといえる。

図-B9に海底摩擦係数の違いによる碎波位置での沿岸流速の岸沖分布を示す。なお、横軸は碎波開始点から遡上端までの距離で定義した碎波帯距離で無次元化してある。海底摩擦係数の増加は、沿岸流速を遅くし、その岸沖分布を一様にし、解析解の傾向と一致している。

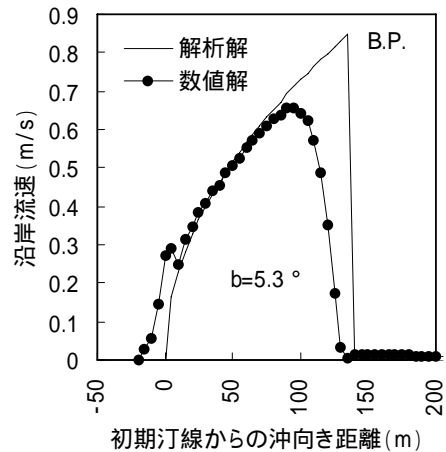


図-B5 沿岸流速の岸沖分布比較(入射角=10.1°)

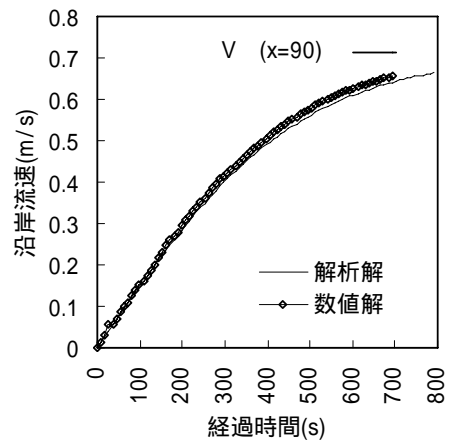


図-B6 沿岸流速の発達過程の比較

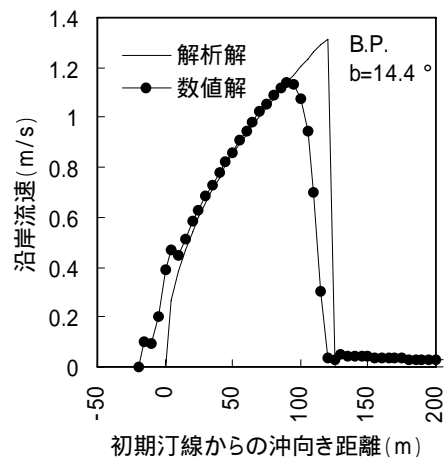


図-B7 沿岸流速の岸沖分布比較(入射角=31.8°)

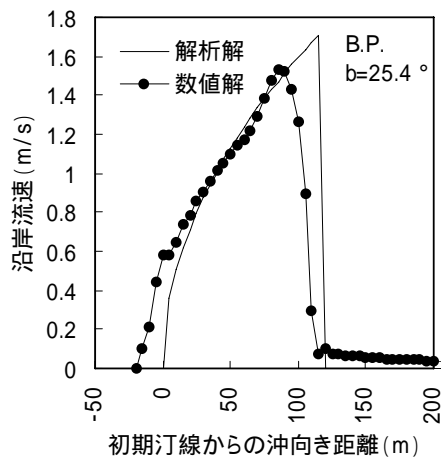


図-B8 沿岸流速の岸沖分布比較(入射角=61.5°)

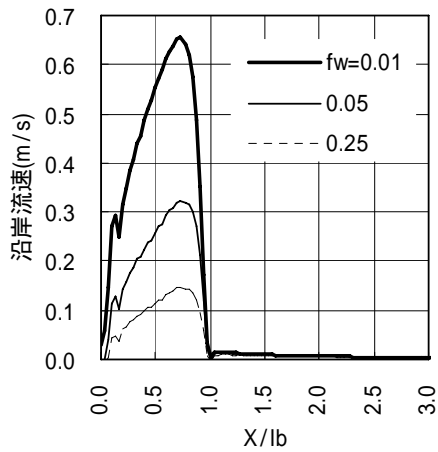


図-B9 底面摩擦係数による沿岸流速分布の違い

参考文献

- B1) 日野幹雄, 沢本正樹 (1977): 非定常過程としての海浜流の研究(1), 海岸工学論文集, 第24巻, pp.596-599.
- B2) 中村聡志 (2003): 波群の変形による長周期の波と流れの発生および沿岸の長周期波に伴う浜への波の遡上を考慮した地形変化モデルの構築, 港湾空港技術研究所資料, No.1062, 16p.