

波と流れの相互作用が 河口周辺の地形変化に及ぼす影響に関する研究

EFFECTS OF WAVE-CURRENT INTERACTIONS ON TOPOGRAPHIC CHANGES AROUND A RIVER MOUTH

李光浩¹・桑原真吾²・水谷法美³
Kwang-Ho LEE, Shingo KUWABARA, Norimi MIZUTANI

¹正会員 博(工) 名古屋大学助教 大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

²正会員 修(工) 日本工営(株) コンサルタント国内事業本部 流域・都市事業部 河川・水工部
(〒102-8539 千代田区麴町5丁目4番地)

³正会員 工博 名古屋大学教授 大学院工学研究科社会基盤工学専攻
(〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

This study investigates experimentally how wave-current interactions influence topographic features near a river mouth and simulates numerically the flow field in which wave and currents coexist. In model experiment, a terrace formed in the river mouth is defined as initial condition, which is deposited by discharged sediment from the river, and the deformation of terrace by wave-current interactions is investigated. The mechanism of topographic changes is confirmed by numerical results; the strong velocities with radial direction are generated on the terrace by the wave-current interactions and the change of water depth. These flow patterns explain well how the topography is changed.

Key Words : Wave-current interaction, river mouth terrace, topographic changes

1. はじめに

河川から海岸への砂供給過程に関する議論は、海岸侵食問題を考える上で不可欠である。しかし、河川から流出した土砂が海岸へと供給される経路およびその機構については、まだ十分明らかにされていない。その原因として、河口部の存在が挙げられる。河口部のような波と流れが共存する場においては、波は流れにより、流れは波によりそれぞれ変化するという波と流れの相互作用が生じる。波と流れ相互作用による波高の増大や流向の変化は、非常に複雑な流動場を形成するため、流路の変化やそれに応じる河口周辺地形変化に影響を及ぼすと考えられるが、両者の関係については十分把握されているとは言い難い。

近年、波と流れの相互作用について、数値計算によりその実態を解析する試みが活発化している。しかし、多くの数値モデルでは、係数の決定法が未確立¹⁾、鉛直2次元的な場を対象としている²⁾、波による流れの変化を考慮していない³⁾、流れは時間的に変化しないといた点が存在することから、河口部における波と流れの相互作用の解析に適用するには不十分である。そこで、李ら⁴⁾は波による流れの変

化と流れによる波の変化の両方を同時に解析可能な、Navier-Stokes運動方程式に基づいた3次元数値解析モデルを構築し、水理模型実験結果との比較により、波・流れ共存場における波変形の特性和機構を検討した。その結果、同モデルは波と流れの相互作用の特性を精度良くシミュレート可能なことが示された。しかし、波と流れの相互作用と地形変化との関係については検討がなされていないのが実情である。

一方、河口テラスに代表される河口部の地形変化を対象とした研究には、須賀⁵⁾らによる土砂堆積形状の実態把握および室内実験を行ったものや、粒度組成に着目した研究がある。また、柴山⁶⁾らは、河口周辺の海浜変形モデルを開発し、平面移動床実験によって検証を行っている。しかし、これらの多くは、波のみによる地形変化を主な対象とするなど、波と流れの相互作用の取り扱いが不十分であり、波と流れの相互作用が及ぼす地形変化への影響をより適切に評価することが求められている。

そこで本研究では、海岸を模した砂浜斜面と流入河川を模した水路を用いた3次元水理模型実験により、波・流れ共存場における地形変化の把握を行う。さらに、その際に形成される流動場を数値波動水槽により計算し、実験結果と比較することで、河口テ

ラスに代表される河口周辺の地形変化や流路の変化、河口閉塞等に波と流れの相互作用が及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。

2. 実験方法

水理模型実験は、名古屋大学の長さ 28m、有効幅 8m、深さ 0.8m の平面波浪水槽で行った。波と流れの 3 次元的变化に着目し、海岸に波が直角入射する場合と斜め入射する場合の 2 種類を想定した。波が直角入射する場合は図-1 に示すように、河川を模した全長 7.2m、深さ 0.46m、幅 0.2m の直線水路と、砂浜海岸を模した幅 3.6m の斜面勾配 1/6 の砂浜斜面を設置し、斜面上および水路内には珪砂（中央粒径 0.45mm）を 10cm の厚さで敷いた。一方、斜め入射の場合は、水路や海岸線を造波板に対して 22.5°回転させることにより再現した。河口部両脇に関しても、沿岸方向に同様の勾配で整形し、河口部の地形を再現した。水深は 20cm で一定とし、水路上流端の水中ポンプによって水路内に流れを作用させ、3 時間経過後に形成された地形を河口テラスが形成された状態と仮定する。その後、流れと波を同時に作用させ、60 分経過後の地形を波・流れ作用後の状態とする。各ケース毎に、初期地形・河口テラス・波流れ作用後の計 3 段階について、非接触型砂面計を用いて地形の計測を行った。測定範囲は、水路中央・斜面法先を中心に 2.5m×2.5m とした。実験条件は、水路内の水深平均流速を 3 種類 ($\bar{U}=0, 34, 40\text{cm/s}$)、入射波は周期を 2 種類 ($T=0.8, 1.2\text{s}$)、波高を 3 種類 ($H_i=3, 5, 8\text{cm}$) 変化させた。

3. 数値解析手法

本研究で行った実験では、砂の移動と同時に流動場も変化し、河口部とその周辺において大規模な堆積や侵食が生じることから、流動場や波浪場の実験的計測が困難である。そのため、本研究では、李ら⁴⁾による 3 次元数値モデルを用いて流動場を計算し、その特性を把握する。同モデルは、同一の計算領域で無反射ソースを用いて波と流れを同時に発生させることによって、様々な波・流れの相互作用問題への適用を可能にしている。

(1) 基礎方程式

基礎方程式は、3次元非圧縮性流体を対象とする連続式(1)と、運動方程式(2)、VOF関数 F に関する移流方程式(3)で構成されている。

$$\nabla \cdot \vec{V} = \tilde{q} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = \vec{g} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \left\{ \nabla^2 \vec{V} + \frac{1}{3} \nabla \tilde{q} \right\} + \vec{f} \quad (2)$$

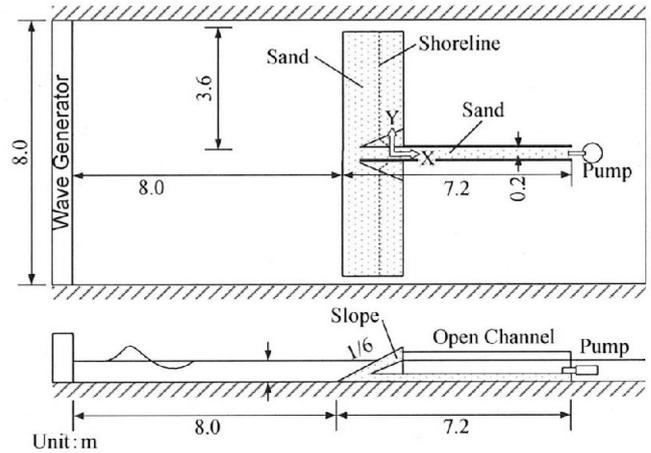


図-1 実験水槽と水路模型の概略図（直角入射時）

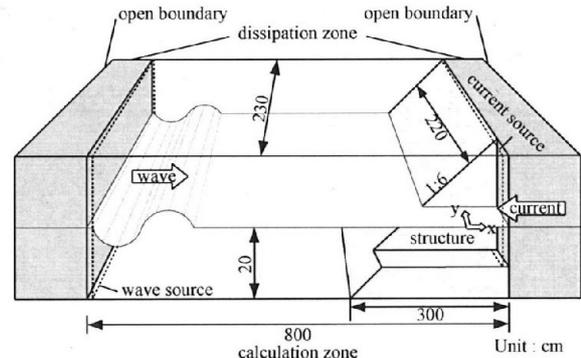


図-2 数値計算領域の概略図（平行入射時）

$$\frac{\partial F}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) F = F \tilde{q} \quad (3)$$

ここに、 \vec{V} ：流速ベクトル、 t ：時間、 \vec{g} ：重力加速項、 ρ ：流体密度、 ν ：動粘性係数、 \vec{f} ：計算領域での反射波を制御するための減衰項、 F ：セル内の流体の体積率を示すVOF関数、 \tilde{q} ：流れや造波のためのソース項である。

(2) 数値計算手法および計算条件

基礎方程式を、Staggerd mesh に基づく有限差分法により解析した。また、自由表面付近での高精度の圧力変動を求めるため、圧力補正に関しては、一般座標系に基づいてポアソン方程式を構成した。

計算条件は、図-2 に示すように、沖側に造波境界、水路側に流入境界を設定する。計算領域は、直角入射の条件では半断面を対象に、長さ 8.0m、幅 2.3m、深さ 0.5m とし、格子数は 160×115×50（格子幅 5cm×2cm×1cm）であり、領域内に構造物を設置し、0.1m の水路を再現している。斜め入射の場合は、長さ 9.0m、幅 6.0m、深さ 0.5m とし、格子数を 180×150×50（格子幅 5cm×4cm×1cm）とし、構造物設置を斜めに設置して波の斜め入射を再現している。沖・岸側境界条件はすべての物理量の水平勾配がゼロとなる条件 ($\partial\phi/\partial x$) とし、側壁境界は、slip 条件を適用した。

計算では、まず流速 \bar{U} の流れを発生させ、流れ

の安定後に波を発生させ、波と流れの共存場の解析を行った。水路内の水深や地形を実験において設定したものとし、固定床ではあるが波と流れの相互作用の再現に重点をおいて流動場を再現した。河口テラスの形状に関しては、河口部から放射状に円弧を形成し堆積したものとした。

4. 結果と考察

(1) 河口部周辺の地形変化

本研究では、初期地形作成後、水路内に流れのみを3時間作用させて形成された河口部の地形を河口テラスとしている。形成された河口テラスの一例を図-3に示す。以下の地形図は、 x , y 軸をcm単位で、図中の等深線の値をmm単位で表示しており、流れは図の右部中央から、波は左部から入射する。同図を見ると、河道が広がり始めた位置から沖側にかけてテラス状の地形が形成されており、流路の最小水深は約4cmと、河道内の水深よりも浅い。各実験ケースとも、同図と概ね同一の形状を持った河口テラスが形成されている。

図-4(a)に、 $H_i = 3\text{cm}$, $T = 1.2\text{s}$ のもとで流れが作用しないケースにおける地形図を示す。波のみが作用した場合には河口テラスが上流側へと大きく後退する。一方、その上流側では大規模な堆積が生じ、河口が閉塞していることがわかる。河口テラスの側面における波の屈折から、河口テラス上への波の集中が生じるため、河口テラス側面の砂が河口部へと輸送されることによって河口閉塞を引き起こされたものと考えられる。このことから、河川流入量が少ない場合には、河口テラスの存在が河口閉塞を引き起こす要因となりうると考えられる。図-4(b)に、波高 $H_i = 3\text{cm}$, 周期 $T = 1.2\text{s}$ のもとで水路内平均流速 $\bar{U} = 34\text{cm/s}$ が作用するケースにおける地形図を示す。河口テラスの沖側および沿岸方向への伸張と、流路の側方への偏向、流れの脇に発生する戻り流れによる右岸側の侵食が生じていることが確認できる。

河口テラスの伸張は、水路からの流れと沖からの波による相互作用によって沿岸方向の流れが形成されることにより生じていると考えられる。河口テラスの中心は流路の偏向に伴って右岸・沖側へ移動しており、対して流れの弱まった左岸側では、河口テラスが侵食されて沿岸方向への漂砂移動が見受けられる。図-4(c)に、 $H_i = 5\text{cm}$, $T = 1.2\text{s}$ のもとで $\bar{U} = 34\text{cm/s}$ が作用するケースにおける地形図を示す。同図では、河口テラス上において河口閉塞に似た激しい堆積が見られ、水路流の右岸側への偏向や汀線近傍の侵食、それらによる新たな流路の形成が生じている。波高が比較的大きいため、波と流れの相互作用がより明確に表れていると考えられ、側方への流路偏向がより顕著に表れている。

波と流れが存在する河口部では、波と流れの相互作用により波が流れの抵抗となって作用し、波高の増大とともに流れが拡散して沿岸方向の流速成分が生じる。流水断面積の増大に伴う流速の減少や河口テラス上の浅水変形に加え、この効果が河口部に局部的に作用することによって沿岸方向への流速成分が生じ、河口テラスの沿岸方向への伸張が生じる。

(2) 河口部周辺の流動場

河口テラスは沖へ放射状に形成され、条件によつ

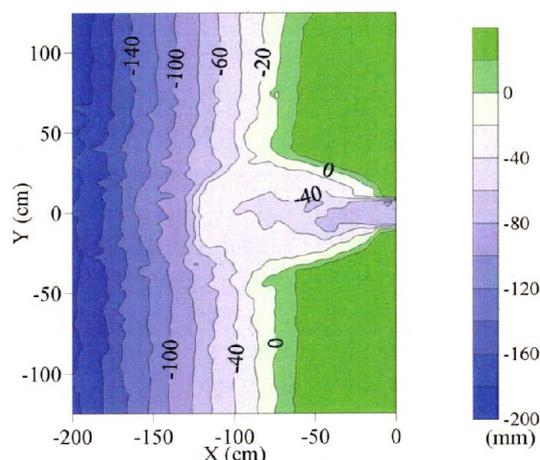


図-3 河口テラス地形

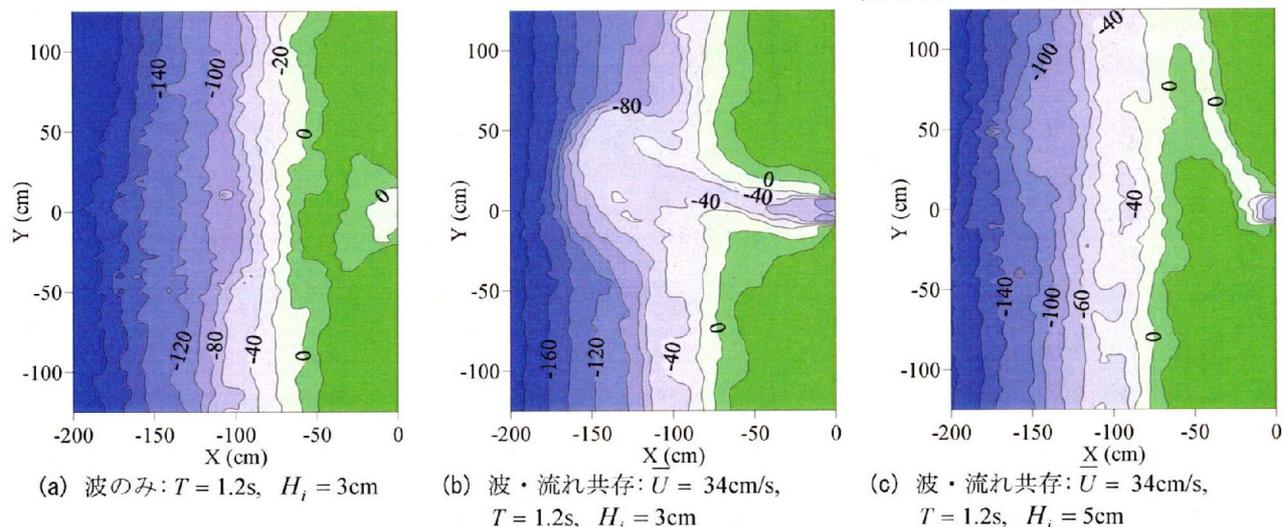


図-4 各実験ケースにおける河口部周辺の地形図

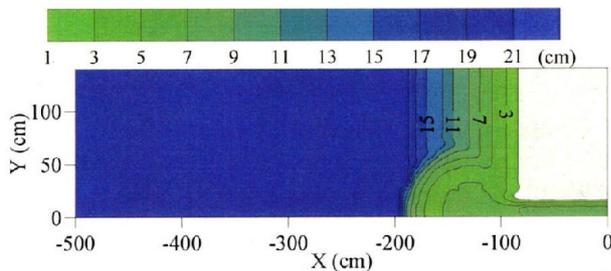
ては浅瀬や砂州が円弧状に形成され、波の屈折および集中・河口テラス沖側の浅水変形・水路流の拡散などが生じる。このような円弧状河口テラスを想定し、図-5(a)に示す地形データを設定して計算を行った。図中右下から左向きに流れが、左側から右向きに波が入射し、図中の数字は水深(cm)を示す。

図-5(b)~(d)に、 $H_i = 3\text{cm}$ 、 $T = 1.2\text{s}$ のもとで水路内平均流速 $\bar{U} = 34\text{cm/s}$ が作用するケースにおける流動場計算結果を示す。同図(b)の平均水位分布からは、汀線付近と水路内の水位上昇に加えて、円弧状河口テラスの外縁部に沿った水位低下と、円弧状浅瀬上の局所的な水位上昇が確認できる。同図(c)の無次元波高分布も考慮すると、波高増大は円弧内側と、円弧沖側に沿って生じている。これは、円弧状の斜面に沿った屈折と浅水変形に加えて、河口テラス沖側の水深変化による波高増大と、波と流れの相互作用による波高増大が同位置において生じたことによって、局所的な波高増大が生じたものと考えられる。同図(d)の平均流速分布からは、汀線に沿った河口部方向の流れと、円弧の中心から放射状に伸びる流速が確認できる。この放射状の流れは沿岸方向にも岸沖方向に匹敵する流速を持ち、円弧状の浅瀬を越えたところで急速に減少しており、沖合における流速値は他の流れがあるケースに比べて十分小さい。これらの計算結果は、形成された放射状

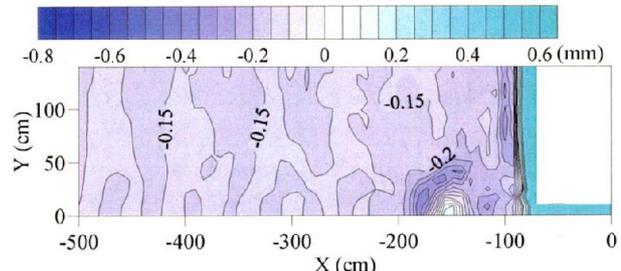
の流れが河口テラスを沿岸方向に進展させるという、実験結果を説明するものとなっている。

図-6に、 $H_i = 3\text{cm}$ 、 $T = 1.2\text{s}$ のもとで水路内の流れはないケースにおける平均流速分布を示す。なお、同図は流向把握のために拡大表示しており、流速値は比較的小さいことに注意する。汀線に沿った河口部方向の流れと、円弧状の浅瀬に沿った反時計回りの循環が生じている。河口テラス脇から円弧の内側へと入射する屈折波が、汀線に沿った河口部方向の流れを形成し、円弧内側に水位上昇が生じる。それが円弧の外側へ流れ出すことで、循環流が形成されると考えられる。汀線付近に河口部方向の流れが存在することから、このような形状に起因する流動場が河道閉塞や河口テラスの挙動に大きな影響を与えている可能性がある。

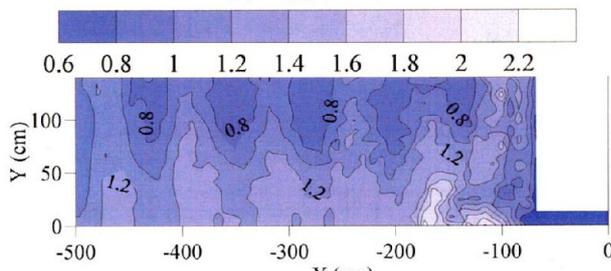
図-7に、 $H_i = 5\text{cm}$ 、 $T = 1.2\text{s}$ のもとで $\bar{U} = 34\text{cm/s}$ が作用するケースにおける平均流速分布を示す。沿岸方向の流れがより大きな値を示しており、波の存在や砕波が流れの抵抗となって作用していることがうかがえる。このことから、波高の大きな波が入射した場合には、沿岸方向への河口テラスの進展がより促進されると考えられる。また同時に、汀線付近の河口部へ向かう沿岸方向の流れも大きくなっており、流れ両脇の流れに加えて屈折波による影響も含まれていると考えられる。



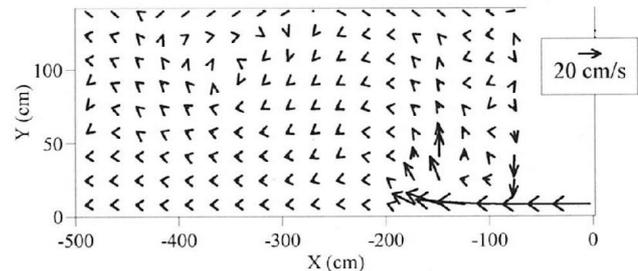
(a) 地形データ



(b) 平均水位分布



(c) 無次元波高分布



(d) 平均流速分布

図-5 流動場の各計算結果： $H_i = 3\text{cm}$ 、 $T = 1.2\text{s}$ 、 $\bar{U} = 34\text{cm/s}$

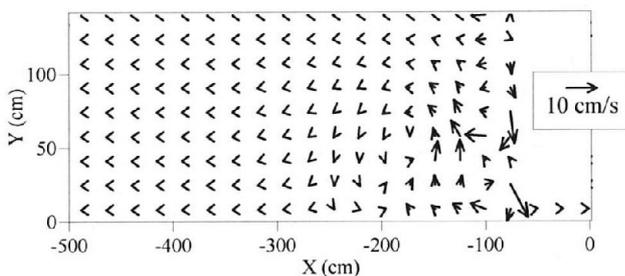


図-6 計算平均流速分布 $H_i = 3\text{cm}$ 、 $T = 1.2\text{s}$ 、 $\bar{U} = 0\text{cm/s}$

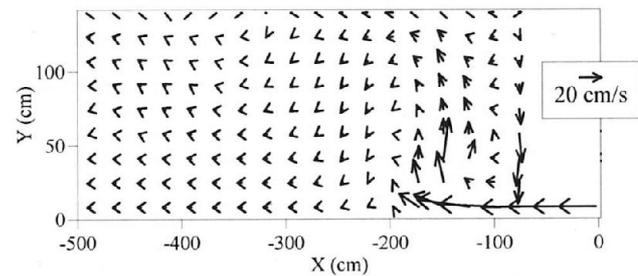


図-7 計算平均流速分布 $H_i = 5\text{cm}$ 、 $T = 1.2\text{s}$ 、 $\bar{U} = 34\text{cm/s}$

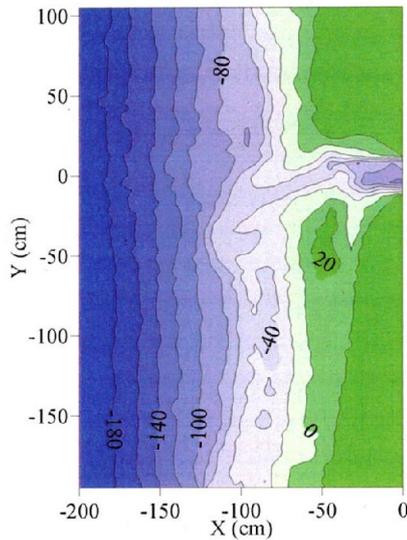


図-8 地形図: $H_i = 3\text{cm}$, $T = 1.2\text{s}$, $\bar{U} = 34\text{cm/s}$

(3) 斜め入射の場合の地形変化と流動場

波と流れの相互作用は、その影響が相対する条件下において最も明確に表れることから、波が流れに対して斜めに入射する条件について実験を行った。

図-8に、 $H_i = 3\text{ cm}$ 、 $T = 1.2\text{ s}$ のもとで $\bar{U} = 34\text{ cm/s}$ が作用するケースにおける地形図を示す。同図より、河口テラスの波下手側への移動や、砂州や岸に沿った流路の形成が確認できる。これらは、波が図の左上から入射するため、左岸側への沿岸漂砂と、水路からの流れの偏向および拡散が生じたためと考えられる。沿岸漂砂が直角入射に比べて激しく、河口テラスによる沿岸漂砂の堆積による影響は、河口砂州の形成という形でより顕著に表れている。

図-9に、 $H_i = 8\text{ cm}$ 、 $T = 1.2\text{ s}$ のもとで $\bar{U} = 34\text{ cm/s}$ が作用する、より大きな波高を想定したケースにおける地形図を示す。同図においては、水深40mmまでの浅瀬が広範囲に形成されている点が特徴的である。巨大な河口砂州が示すように、大波高の斜め入射によって沿岸漂砂量は増加しており、河口テラスによって河口部付近に大量の砂が堆積することとなる。さらに、大波高になると水路流は下手側汀線近傍にまで押しやられるため、これが汀線を後退させることによって生じた大量の砂が、ステップ状の浅瀬を広範囲に形成したものと考えられる。

斜め入射に関しても直角入射の場合と同様に、流動場の計算を行った。図-10に、 $H_i = 3\text{ cm}$ 、 $T = 1.2\text{ s}$ のもとで $\bar{U} = 34\text{ cm/s}$ が作用するケースにおける平均流速分布を示す。同図より、汀線近傍に形成された沿岸流と、河口部における放射状流れが確認できる。放射状の流れは左岸方向に偏向しており、沿岸流の影響によるものと考えられる。河口部右岸側斜面では、入射波と相対する方向に流れが形成されているがその値は小さく、波が抵抗として作用していると考えられる。

図-11に、 $H_i = 5\text{ cm}$ 、 $T = 1.2\text{ s}$ のもとで $\bar{U} = 34\text{ cm/s}$ が作用するケースにおける平均流速分布を示す。同図より、波高の大きな波が入射することによって、沿岸流がさらに幅広く、汀線付近の値も大きくなっ

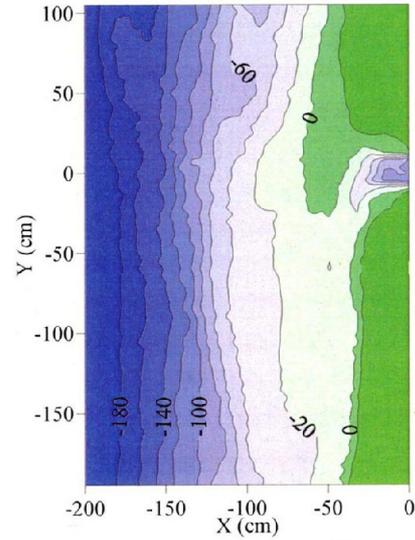


図-9 地形図: $H_i = 8\text{cm}$, $T = 1.2\text{s}$, $\bar{U} = 34\text{cm/s}$

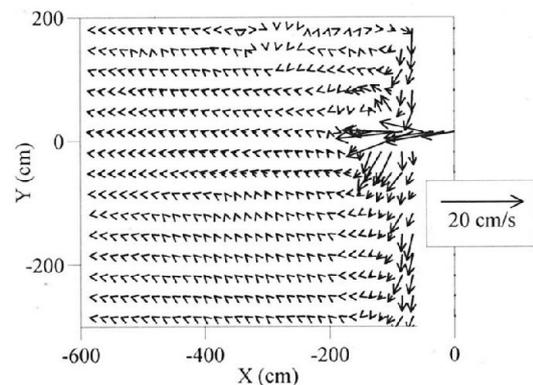


図-10 計算平均流速分布 $H_i = 3\text{cm}$, $T = 1.2\text{s}$, $\bar{U} = 34\text{cm/s}$

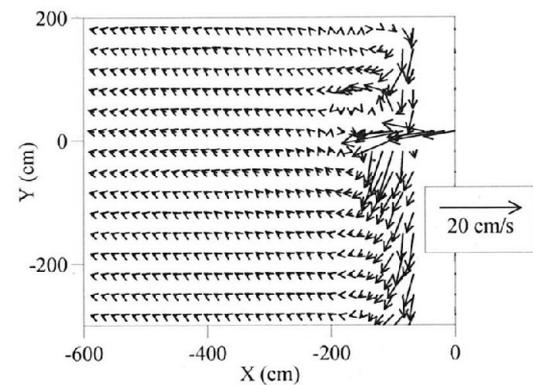


図-11 計算平均流速分布 $H_i = 5\text{cm}$, $T = 1.2\text{s}$, $\bar{U} = 34\text{cm/s}$

ている。水路からの流れは沿岸流によって大きく偏向し、沖側の流れはほぼ一様である。

波が斜め入射する場合には、波によって生じられる沿岸流の影響が大きく、河口部において偏向が生じるため、波と流れは相対しにくい。河口テラスにより放射状の流れが生成するため、波と流れが相対する領域が一部存在し、波と相対する方向の流れが形成される。比較的波高の大きな波が入射した場合には流れの偏向がより顕著に表れ、沖側に向かう平均流速の減衰が激しくなる。対して、波高の小さな波の場合には、流れが沿岸流を沖へと偏向させるとともに、横からの波の抵抗を受けて蛇行する。

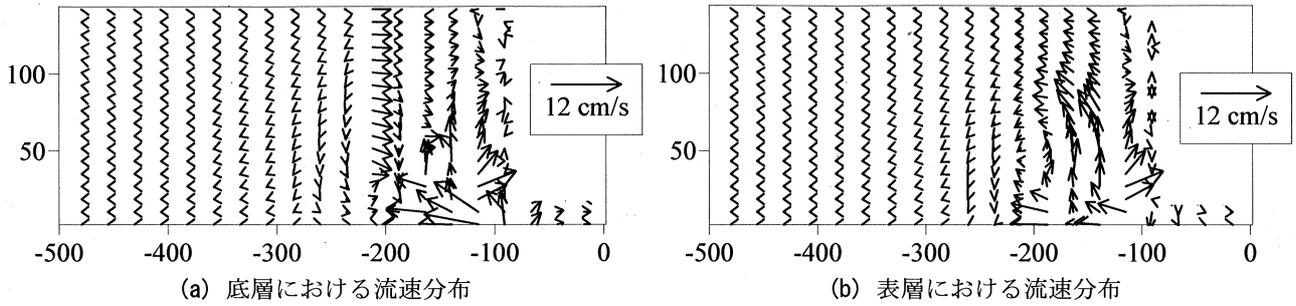


図-12 波流れ作用時の各層における平均流速分布 $H_i = 3\text{cm}, T = 1.2\text{s}, \bar{U} = 34\text{cm/s}$

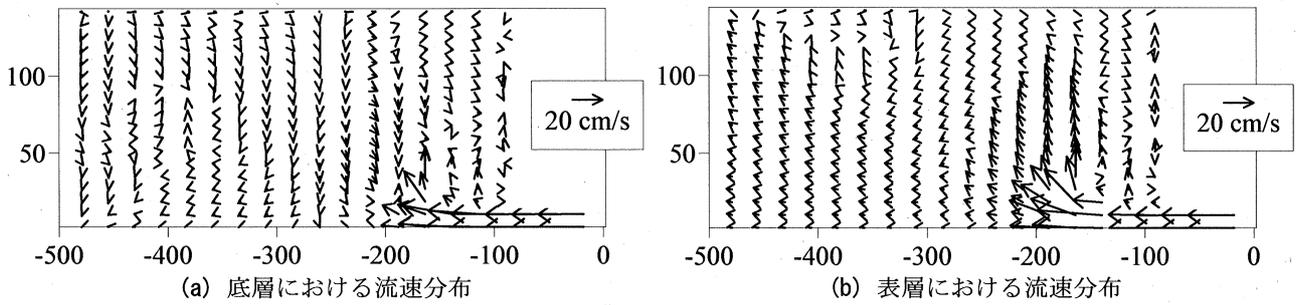


図-13 波のみ作用時の各層における平均流速分布 $H_i = 3\text{cm}, T = 1.2\text{s}, \bar{U} = 0\text{cm/s}$

(4) 計算した流動場の平面構造

前節では、水深方向に平均した流速分布を用いて考察を行ったが、波と流れの相互作用という3次元的に変化する現象のさらなる理解のためには、流動場をより詳細に見る必要がある。そこで、底面から一定の距離を持つXY平面における平均流速分布を計算した。なお、底面から1cm離れた平面を底層、底面から16cmを表層とした。

図-12に、 $H_i = 3\text{cm}, T = 1.2\text{s}$ のもとで $\bar{U} = 34\text{cm/s}$ が作用するケースにおける各平均流速分布を示す。同図から、表層および底層においてほぼ同様の傾向を示していることが確認できる。このことから、流速の大きな場合には、水深方向に平均した平面流速分布によってその傾向を把握可能であるといえる。また値は沿岸方向に関しても十分大きく、掃流漂砂の存在を示している。

図-13に、 $H_i = 3\text{cm}, T = 1.2\text{s}$ のもとで水路内の流れはないケースにおける各平均流速分布を示す。波のみが作用する場合には、底層と表層で沿岸方向の流速成分が異なる傾向にあることがわかる。これは、複雑な形状による循環の形成といった、3次元的な流れの存在を示している。さらに、同現象は地形が複雑に変化する地点において生じており、本研究で用いたような3次元数値解析モデルの、河口部の解析に対する有効性を示唆している。

5. 結論

本研究では、河口部のような波・流れ共存場における地形変化を把握し、その際の流動場の傾向を計算した。本研究で得られた結論を以下に要約する。

1) 波と流れの相互作用は、沿岸方向流速成分を伴った放射状の流れを生じさせ、地形変化に大きな影響を及ぼす。これは比較的波高が大きい

場合に顕著であり、生じた流れは河口テラスの沿岸および沖方向への伸張の原動力となり、広範囲に浅瀬を生成する。

- 2) 波が斜め入射する場合には、波による沿岸流と河口テラスによる放射状流れにより、波と流れが相対する領域が限定される。比較的波高の大きな波の場合には流れの偏向がより顕著に表れ、沖側に向かう流れの減衰が激しくなる。対して波高の小さな波の場合には、流れが沿岸流を偏向させるとともに、横から波を受けて蛇行する。
- 3) 波と流れの相互作用により形成される、河口テラス近傍の3次元的な流れは、複雑な地形変化の要因となりうると考えられ、3次元数値解析モデルの有効性を示唆している。

参考文献

- 1) 大中晋・渡辺晃：波・流れ相互干渉を考慮した波動場・海浜流場・地形変化の数値計算，海岸工学論文集，第36巻，pp. 399-403，1989。
- 2) 森信人・岡崎拓人・金井聡・角野昇八：波・流れ共存場における波高減衰に関する基礎的研究，海岸工学論文集，第53巻，pp. 41-45，2006。
- 3) 黒岩正光・口石孝幸・松原雄平・砂川真太郎：準3次元海浜流モデルを用いた3次元河口砂州形成数値シミュレーション，海洋開発論文集，第23巻，pp. 159-164，2007。
- 4) 李光浩・大堀文彦・水谷法美：河口から遡上する孤立波および周期波と流れの相互作用に関する基礎的研究，海洋開発論文集，第23巻，pp. 159-164，2007。
- 5) 須賀堯三・石川忠晴・灘岡和夫・田中仁：河口前面テラスの形成とその消長，土木学会論文集，第381号/II-7，pp. 227-230，1987。
- 6) 柴山知也・山田晶子・小林顕：河口周辺の海浜変形モデルとその検証，海岸工学論文集，第41巻，pp. 466-470，1994。