

河口から流出した流れと波の 相互作用に関する研究

A STUDY ON INTERACTIONS BETWEEN EFFLUENT CURRENTS AND INCOMING WAVES NEAR AN ESTUARY

李光浩¹・大堀文彦²・水谷法美³・桑原真吾⁴

Kwang-Ho LEE, Fumihiko OHORI, Norimi MIZUTANI, Shingo KUWABARA

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 千代田区麹町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)

⁴学生会員 名古屋大学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 wave-current interaction and proposes a numerical model to simulate hydrodynamics in wave-current coexisting fields. The experimental results show that the wave height increases initially, and then decreases gradually with the wave propagations. Decrease of wave celerity causes deformations of wave crest lines, which results in the convergence of waves near the river mouth. Furthermore, the current velocity decreases with continuous wave-current interactions. The wave period, the intensity of currents, and the angle of the incident wave are confirmed to be key parameters to govern the wave-current interaction. The proposed numerical model is found to reproduce well the experimental results.

Key Words : wave-current interaction, numerical wave tank, solitary wave, periodic wave, tsunami

1. はじめに

河口部では、河川からの流れと沖から入射する波が共存することにより複雑な流動場が形成されている。このような流れと波の共存場において、両者の相互作用の実態を明らかにすることは、河口部における漂砂機構の解明、沿岸生態系や津波の河川遡上など海岸工学全般にわたる重要な課題であるといえる。これまでに波と流れの相互作用に関する研究は多数行われているが、既往の理論や数値解析モデルでは、複雑な波・流れ相互作用を適切に評価する段階には至っていないのが現状である^{1), 2)}。

例えば、大中ら³⁾は、非定常緩勾配方程式に流れの効果を取り入れたモデルを提案し、波浪場、海浜流場、地形変化における波・流れの相互干渉の影響を評価しているが、定量的な評価までは至っていない。また、多くの研究は鉛直2次元的な場を対象にしている⁴⁾が、河口部においては平面的な変化を伴うため、両者の相互作用は3次元で捉える必要がある。黒岩ら⁵⁾は、準3次元波海浜流モデルを構築し、

河口に形成される砂州の評価について有用な知見を提供しているが、波と流れの相互干渉については十分考慮されていない。このように多くの数値モデルでは、波による流れの変化を考慮しておらず、時間的に変化しない流れを用いていることから、波と流れの相互作用の時間領域解析には適用が困難である。そこで、李ら²⁾は、波と流れ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、2次元の波・流れ相互作用を精度良く解析できることを示した。しかし、3次元性が卓越する河口部における波・流れの共存場に関しては十分な検討がなされていないのが実情である。

本研究では、河口部における波・流れ共存場での両者の相互作用を解明するための基礎的な研究として、河川からの流れが海域へ流出した場合を想定し、周期波と流れの相互作用を3次元水理模型実験から考究すると共に、数値波動水路に基づいた波と流れの相互作用を仮定なく適切に評価する3次元数値モデルを構築し、実験結果と比較して波・流れ相互作用の再現性の検証を行うことを目的とする。

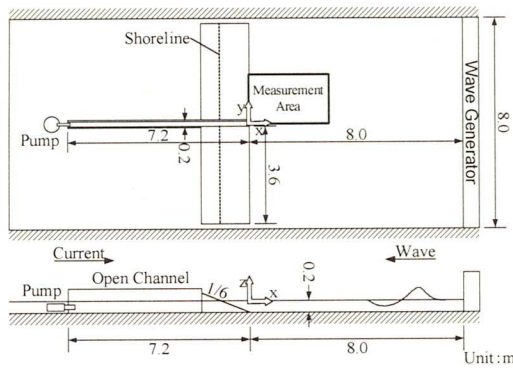


図-1 実験水槽と水路模型の概要例（平行入射時）

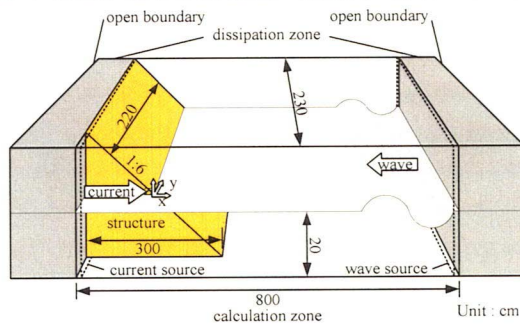


図-2 数値計算領域の概要例（平行入射時）

2. 実験方法

水理模型実験は、名古屋大学の長さ 28 m、有効幅 8 m、深さ 0.8 m の平面波浪水槽で行った。実験は、海岸に波が直角に入射する場合と斜めに入射する場合を想定した。波が直角入射する場合は図-1 に示すように、全長 7.2 m、深さ 0.46 m、幅 0.2 m の直線水路と、水路前面に幅 3.6 m の斜面勾配 1/6 の海岸線を水槽内に設置することにより単純な河口部を模し、直線水路を造波板と直角になるようにした。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。想定した流れは、水槽内の水路上端部に 1 台の水中ポンプを設置し、水路内に水を供給し、流れを発生させた。水深は 20 cm で一定とし、水路内鉛直断面平均流速を 3 種類 ($\bar{U}=10, 20, 40$ cm/s) 変化させ、そこに風波を想定した周期波を入射させた。入射波の波高を 2 種類 ($H_i=3.0, 5.0$ cm) 変化させ、周期を 2 種類 ($T=1.2, 1.6$ s) 変化させた。それぞれの条件に対し、水位変動は容量式水位計、流速は 3 次元ドップラー流速計を使用し、一点法により計測した。また、現象を視覚的に捉えるため、染料による可視化を行った。

3. 数値解析手法

これまでの波と流れの相互作用に関する数値計算手法は、線形理論や、代表断面流速下での非線形理論に基づいてモデル化したものが一般的であり、その適用範囲には制約がある。そこで本研究では、様々な波・流れの相互作用の問題に適用できるよう、

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、波・流れの非線形相互作用をシミュレーションできる 3 次元数値モデルを構築する。

(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)、および自由表面を追跡するための VOF 関数 F に関する移流方程式(3)で構成されている。

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

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

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

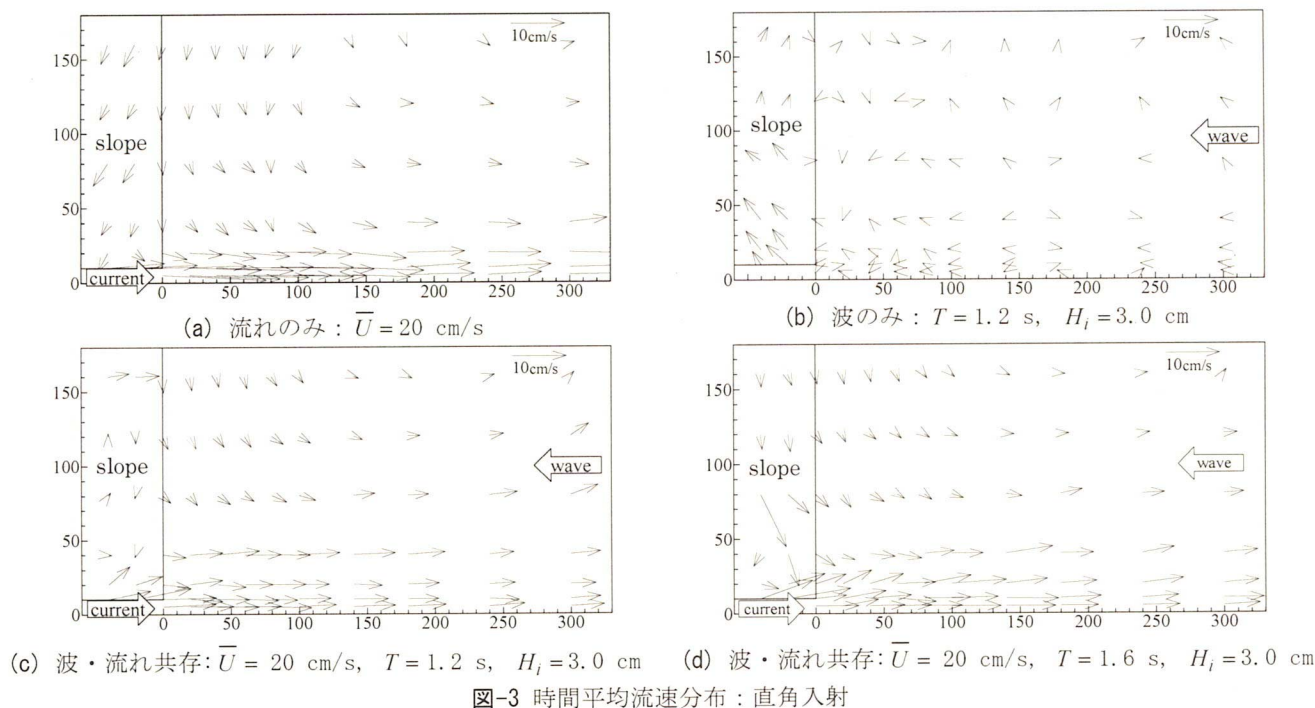
ここに、 $\vec{V}$: 流速ベクトル、 t : 時間、 $\vec{g}$: 重力加速項、 ρ : 流体密度、 ν : 動粘性係数、 $\vec{f}$: 計算領域での反射波を制御するための減衰項、 F : セル内の流体の体積率を示す VOF 関数、 $\tilde{q}$: 流れや造波のためのソース項である。

(2) 数値計算手法および計算条件

基礎方程式を、Staggered mesh に基づく有限差分法により解析した。また、圧力補正に関するボアソン方程式を解く段階のみ、一般座標系に座標変換し連立 1 次方程式を構成し、それを MICCG 法により解いた²⁾。この方法により、自由表面付近での複雑な圧力近似をせずに、高精度の圧力変動を求めることができる。

計算条件は、図-2 に示す概略図のように、波と流れの進行方向が逆になる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 8.0 m、幅 2.3 m、深さ 0.5 m とし、格子数を 160×115×50 (格子幅 5 cm×2 cm×1 cm) とし計算を行い、領域内に構造物を設置し、0.1 m の水路を再現している。斜め入射の場合は、長さ 9.0 m、幅 6.0 m、深さ 0.5 m とし、格子数を 180×150×50 (格子幅 5 cm×4 cm×1 cm) 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 条件としている。

計算では、まず流速 $\bar{U}$ の流れを発生させ、流れが安定したら波を発生させ、波と流れの共存場の解析を行った。また、図-2 に示すように解析領域は、実験と異なり河口部から沖側前面の範囲を領域とし、計算負荷を押さえながら実験条件にあわせた計算を実施し、水路内の波高変化の比較を行った。



4. 結果と考察

(1) 波による流れの変化

従来の研究において評価されていない波による流れの変化について検討を行う。図-3は、波が直角入射する場合における流れのみ、波のみおよび波と流れが共存する場合の3つのケースに対し、実験から得られた計測範囲内の時間平均流速の空間分布を示したものである。まず、流れのみの同図(a)より、水路から流出した流れは水槽内に循環流を形成し、河口からの移動距離に従い、水路延長上で次第に減速することが確認できる。一方、水路延長上の近傍では流出した流れの流速が次第に加速する。波のみを示す同図(b)では、波により斜面上に沿岸方向の流れの発生が確認でき、斜面上においては、流れのみの場合と同程度の流速の発生が確認できる。波と流れの共存場を示す同図(c)では、同図(a)に比べて流速が水路延長上において減速し、その近傍で加速していることが確認できる。これは、流れと逆に進行する波が流れの抵抗になるためといえる。そのために、河口部および沖側300 cm付近において沿岸方向の流れが発生したと考えられる。また、同図(c)の流速は、単純に同図(a)と同図(b)の流速を足し合わせたものではないことが見て取れる。これについては、波と流れが共存する場合、波による流れの変化のみならず、波も流れにより変化し、波浪成分の流速も同図(b)と比較して変化していることが考えられる。同図(d)に示す周期が長い場合の流速分布も周期が短い場合と類似しているが、同図(c)に比べて水路延長上の流速の減少が小さく、斜面上に形成される沿岸方向流れが同図(a)に類似している。これは、周期が長い場合は波と流れの相互作用が小さくなるという従来の研究結果²⁾に一致するもので

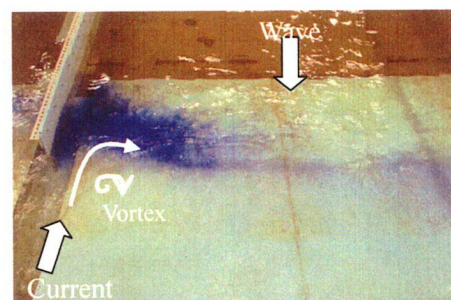


図-4 可視化実験：河口における渦の影響

ある。これらの傾向は、 $\bar{U} = 40 \text{ cm/s}$ における波・流れ共存場においても同様に確認される。 $\bar{U} = 10 \text{ cm/s}$ の場合には、流れに対して波による流動が顕在化し、波の抵抗と波により河口に渦が形成され、渦が流れに対して卓越する。それにより、河口からの流れは沖側ではなく、沿岸方向へ流出するといった異なる傾向を示す。この流出を、染料を用いて視覚的にとらえたものを図-4に示す。河口からの流れは渦により沿岸方向へ偏向し、さらに、図-3(b)に示される斜面上の流れにより沿岸方向へ広がる。

このように、波・流れ共存場における流動の形成は流れの流速と波の周期により特徴づけられているものと考えられる。

(2) 流れによる波の変化

図-5に、波が直角入射する場合における波・流れ共存場の無次元波高の空間分布に対する実験結果を示す。波のみの場合においてはほぼ一定の波高分布であるのに対し、流れが共存する場合は流れの存在により波高の増大が確認できる。特に波高の増大は、図-3(a)に確認された流れの流速が最も大きい河口付近において顕著である。また、目視観察より、水路延長上で波速が変化し波峰が凹型に変化するこ

とが確認されている。沖側の局所的な波高増大は、この波変形を受けた波動場の乱れにより発生したものと考えられる。このような水路延長上における波高増大の、流速毎の比較を図-6 に示す。同図より、約 0.5 波長の間隔で極大値が発生し、 $\bar{U}=40$ cm/s の場合において波高が最も増大していることが分かる。これに対し、周期および入射波高の影響は流速の影響に比べ小さいことが確認されており、波の変化には流速が最も重要なパラメータとして起因すると考えられる。また、同図中の $\bar{U}=20$ cm/s の流速分布から分かるように、波の進行に伴い波が受ける流速が次第に増大することも、波の進行に伴う波高の増大に寄与しているといえる。また、これらの波高分布は、部分重複波と波峰線の変化、それに伴う流れの変化等により形成されていると考えられる。

(3) 波が斜めに入射する場合

これまでは波が直角に入射する場合を想定したが、現実的な面を考えるとその状況は稀であることから、ここでは波が斜めに入射する場合を想定し、流動特性の検討を行う。流れのみの場合は、波が直角入射する場合の実験と同様に、水路からの流れにより発生する主流とその両側に緩い循環流が発生する事が確認された。しかし、波のみの場合では、波が斜面に対して斜め入射するため、斜面上とその付近に斜面に沿った流れが発生する。波が斜め入射する場合

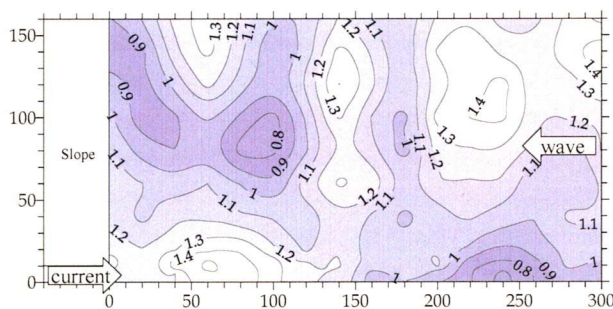


図-5 無次元波高分布：直角入射
波・流れ共存： $\bar{U}=20$ cm/s, $T=1.2$ s, $H_i=3.0$ cm

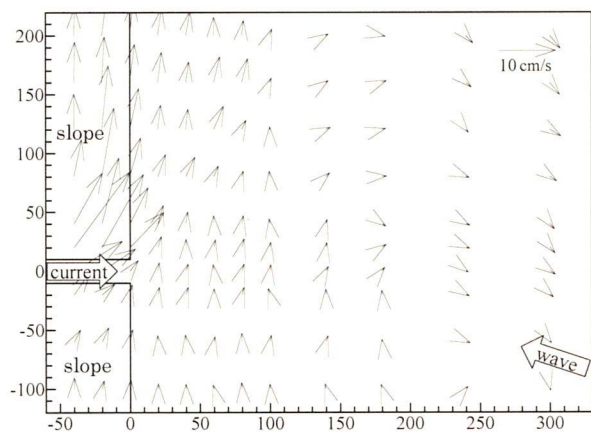


図-7 時間平均流速分布：斜め入射
波・流れ共存： $\bar{U}=20$ cm/s, $T=1.2$ s, $H_i=3.0$ cm

の波・流れ共存場を示す図-7 では、水路から流出した流れが波による沿岸流の作用を受け、沿岸方向に大きく偏向し、斜面と平行な流れを形成していることが確認できる。この傾向は波のみの場合に類似する。また、直角入射時に流動に大きな影響を与えた河口の渦に関しては、水路の沿岸正方向側のみに発生し、規模は直角入射時より大きいことが確認された。これが沿岸方向へ流れを広範囲に拡散させた要因の一つといえる。一方、周期の影響は直角入射より顕著に現れている。特に周期が長い場合、主流方向は周期の短い場合と同様に偏向を受けているが、偏向量は小さく、主流の両側に循環の発生が認められた。図-8 に示す波・流れ共存場における波高の空間分布においては、波のみの場合と明確な差が認められない。これは、直角入射と異なり、波と流れが向かい合っておらず、波の進行に流れが抵抗とならないためと考えられる。このように、流れの速度と波周期に加え、波と流れの作用角の影響は、波・流れ相互作用において重要なパラメータとなることが明らかとなった。また、波の斜め入射により流動が大きく変化することから、流れの時間的发展を考えることは重要であることが示された。

(4) 数値解析結果とその考察

まず、数値解析モデルの波・流れ相互作用の再現性について検討する。図-9 に数値計算から得られ

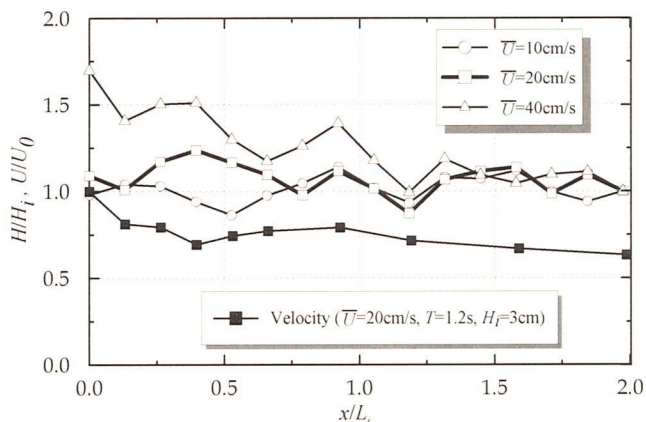


図-6 水路延長上の波高に及ぼす流速の影響
 $T=1.2$ s, $H_i=3.0$ cm

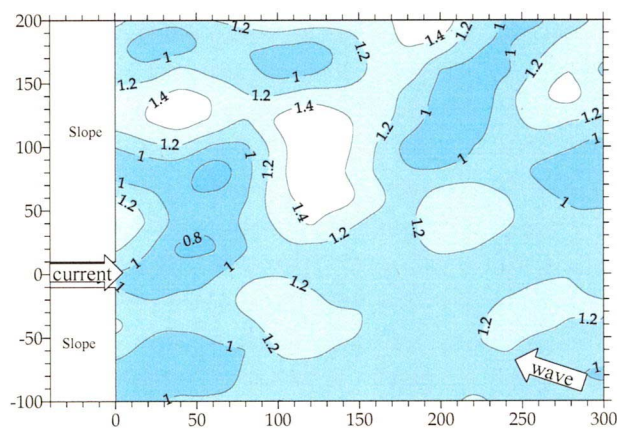
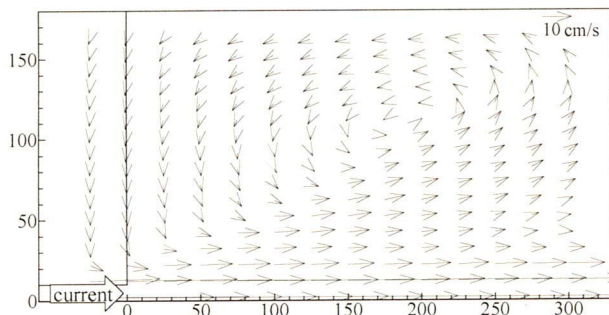
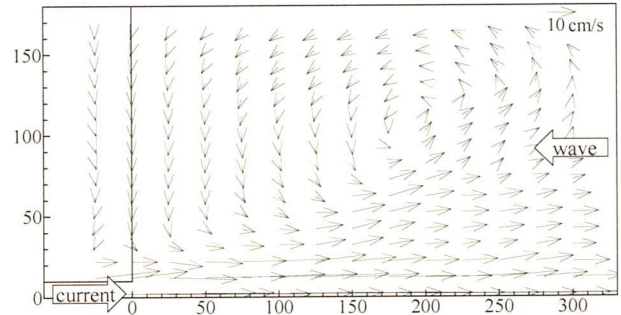


図-8 無次元波高分布：斜め入射
波・流れ共存： $\bar{U}=20$ cm/s, $T=1.2$ s, $H_i=3.0$ cm



(a) 流れのみの場合



(b) 波・流れ共存場 ($T = 1.2$ s, $H_i = 3.0$ cm)

図-9 直角入射における時間平均流速分布図 ($\bar{U} = 40$ cm/s)

た直角入射時の平均流速分布を示す。流れのみの場合を示す同図(a)に比べ、波・流れ共存場を示す同図(b)において河口から流出した流れが広範囲に広がる様子が確認できる。この一つの要因として、水路延長上の流速の減少があげられる。水路延長上における河口からの距離に伴う流速の変化を図-10に示す。波の有無による比較を行うと、流れのみの場合の沖側 $x/L = 2.0$ ($X = 300$ cm) の位置では、河口における流速に比べ2割程度の減速であったのに対し、波と流れの共存場においては4割程度減速している。このように、波と流れの進行が向かい合う場合、波は流れの大きな抵抗となることから流れが広域に広がったといえる。同図において、水路から流出する流れの影響に着目する。 $\bar{U} = 40$ cm/s と比較すると、 $\bar{U} = 20$ cm/s における流速の減速が著しい。流れが小さい場合、流れが波の影響を受けやすいことを示しており、流動の変化は水路からの流出量に特徴づけられていることがわかる。しかし、周期の影響はほとんど確認されず、実験と同様の傾向が得られている。このような流れが強い場合において流れの変化が小さくなるのは、波と流れの相互作用の時間が短く、波から受ける影響が小さくなるためであるといえる。また、同図に示す実験値との比較では、河口における流れの拡散の程度に差がみられるものの、沖に向かうにつれ同程度の減速がみられる。

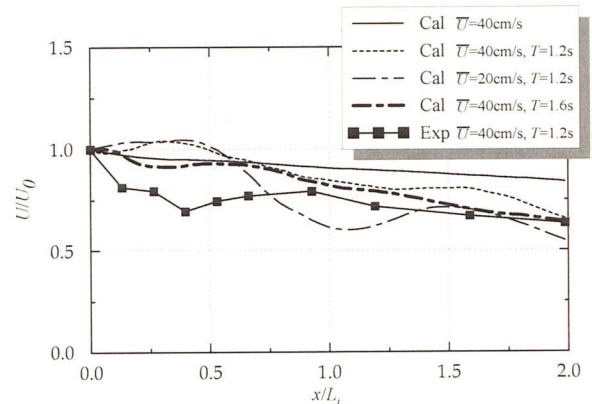
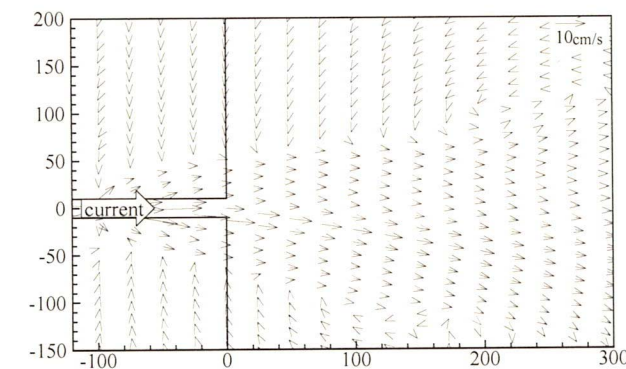


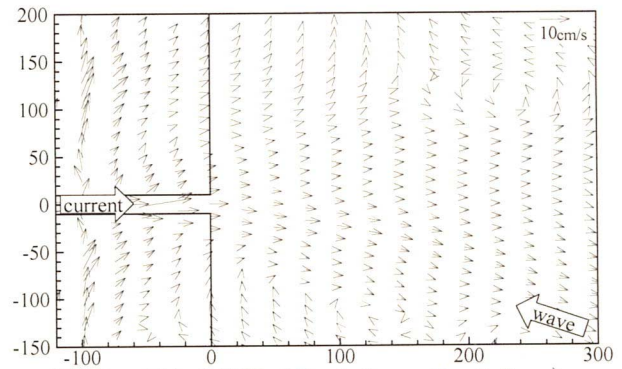
図-10 水路延長上の河口からの距離に伴う流速の変化 ($\bar{U} = 40$ cm/s)

形成されているのに対し、波と流れが共存する同図(b)では、沿岸正方向の斜面上および近傍において波進行方向の影響を受け流れが発生していることが確認できる。これは、実験と同様に、波による斜面上の波進行方向と同方向の流れの発生の影響を受けた点と、流れが波からの影響を側方から受けた点が考えられる。波による流れの変化は、波の周期、波と流れの作用角と流れの速度によって決定される。

つぎに、流れによる波変形に着目する。図-12は波と流れが共存する場合のある時間における水位の空間分布を示したものである。同図(a)に示す波が直角入射する場合においては、水理模型実験と同様に波の進行とともに波高が増大していることが確認できる。このような波高の増大は、水路内流速に比例して顕著となる。特に同図(a)に示すような

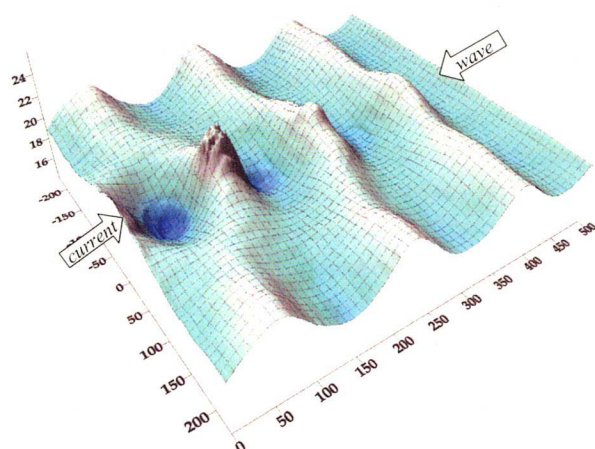


(a) 流れのみの場合

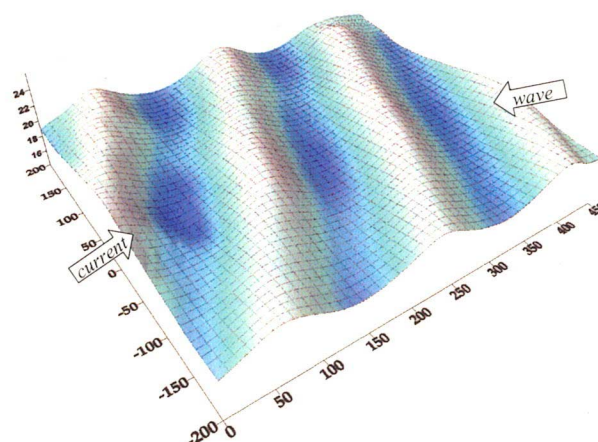


(b) 波・流れ共存場 ($T = 1.2$ s, $H_i = 3.0$ cm)

図-11 斜め入射における時間平均流速分布図 ($\bar{U} = 20$ cm/s)



(a) 直角入射
($\bar{U} = 40 \text{ cm/s}$, $T = 1.2 \text{ s}$, $H_i = 3.0 \text{ cm}$)



(b) 波・流れ共存場 ($\bar{U} = 20 \text{ cm/s}$,
 $T = 1.2 \text{ s}$, $H_i = 3.0 \text{ cm}$)

図-12 水位の空間分布

$\bar{U} = 40 \text{ cm/s}$ においては、波高の増大により波峰で spilling 型碎波が生じており、河口近傍で波高が減衰する。また、波峰線の変形が確認できる。この変形は波高の増大と同様、流れの強さにより変形量が変化し、波の進行に伴い顕在化する。流れが波速に影響してくる地点から特定の地点までの流れの影響が累積した遅れとなって現れているといえる。このような波峰線の変形は、岸沖方向の波運動に傾きを生じさせる。この流れによる波の変化が、流れの広がりをもたせると考えられる。これは、図-12(b) が同図(a)に比べ流れがより広域に広がったことから確認できる。この波高変化が著しい水路延長上において実験と数値解析の波高の比較を図-13 に示す。同図から、数値解析は実験をよく再現していることが確認できる。図-12(b) に示す波が斜めに入射する場合においては、同図(a)と異なり波の変形が発生しておらず、流れに由来する波高の増減は確認できない。同図(a)のような波と流れが向かい合う場合においては強い流れの影響が波の特定の地域に集中する。斜めに作用する場合はそれとは異なり、流れの作用する地域が進行とともに変化するため、波に流れの影響がほとんど現れず、波速や群速度が影響を及ぼさないものと考えられる。3次元の波と流れの相互作用を考える上で、波と流れの作用角が現象に大きく影響することが数値解析においても確認された。

5. 結論

本研究では、波が河口部のような広域場に水路からの流れが流出する場合を想定し、波・流れ共存場における波変形の特性和機構を検討した。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により、波高の増大が確認された。向い流れが強い地域においては波速が減少し、波峰線が凹型に変形する。波の変形は流速に依存するが、流れと波が斜めに作用する場合、その影響は小さくなる。流れは、波の作用により拡

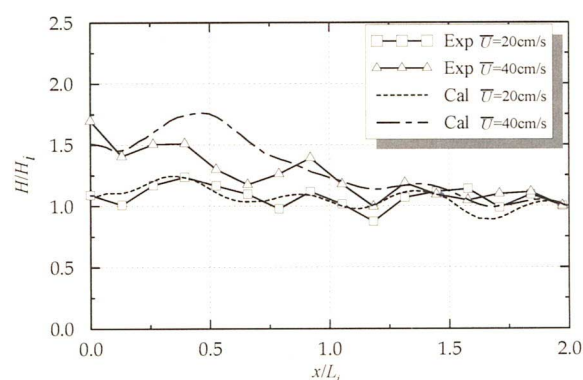


図-13 水路延長上の河口からの距離に伴う波高の変化の比較 ($T = 1.2 \text{ s}$, $H_i = 3.0 \text{ cm}$)

散し、これらは、周期が短い場合に顕著になる。相互作用は波の周期、波と流れの作用角と流速により特徴づけられていることが明らかとなった。

2) 波と流れの相互作用を考える上で、両者の変化は考慮すべき重要な要因である。本数値解析モデルは、実験により確認された波と流れの相互作用による両者の特性を精度良くシミュレートできることを示した。

参考文献

- 1) 水谷法美・李光浩・小松克弘・許東秀：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21巻，pp. 307-312，2005。
- 2) 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。
- 3) 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。
- 4) 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。
- 5) 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。