

港内の波と流れの非線形相互作用の数値解析に関する研究

水谷法美*・許 東秀**・前田祐介***

波と流れが共存する場合、流れと波は相互に影響を及ぼしながら変形する。このような波と流れの相互作用問題をより精度良く予測するために、VOF 法と造波ソース、および減衰領域からなる三次元数値波動水槽に波と流れを同時に生起させて解析を行った。まず、有限幅の長水路に波と流れを生じさせ、波が流れを遡上する際に波高の減少が生じること、さらにその減衰率が実験結果と良好に一致することを確認した。さらに、港に河川が流入する場合の数値解析を行い、港内に流れによる平均水位の勾配が発生することを確認した。また、流れのみを考える場合に比べ、波が共存することにより港内の流れ場は変化することを明らかにした。

1. 緒 言

我が国の港湾は港内への流入河川や運河を有していることが多く、出水時に運ばれる土砂の港内への堆積が問題になることがある。そのため、導流堤を設置するなど、港内の流れを変化させて堆砂を生じさせにくくするなどの対策が必要となる。しかし、例えば導流堤などの最適な配置・形状を決めるには港内の流入水の挙動を精度よく予測する必要があり、そのために数値計算の果たす役割は大きい。従来、このような問題は主に流れを対象に検討されてきているが、出水時は荒天時と重なることが多く、港内波浪が流れ場に及ぼす影響が無視できない場合も多いと考えられる。したがってこのような問題を波・流れ共存場として扱う必要がある。

波・流れ共存場に関する研究は、これまでにいくつかのモデルが提案されている。例えば、Kirbyら(1984)は wave action の保存則から回折、反射、流れによる波の変形の方程式を導いているが、大中ら(1987)らは平面波浪場の計算方法として広く使用されている非定常緩勾配方程式にこの Kirby らの方程式を取り入れて流れによる波の変形をも考慮した非定常緩勾配方程式を導いた。また、Mohiuddinら(2000)は、Mohiuddinら(1999)が提案した新しい波・流れ分散関係式を、拡張型 Boussinesq 方程式(Madsen・Sorensen, 1992)に取り入れた 2次元波・流れ数値解析モデルを提案している。しかし、これらの方程式は既知の流れが波に及ぼす影響を主に扱っており、波が流れに及ぼす影響を解くことはできない。

近年、波変形に関する計算手法は飛躍的に進歩しており、VOF 法を使った数値波動水槽は砕波現象までをも再現しうる強非線形数値解析手法として実用化の段階に入っている。特に、数値波動水槽の一つの特徴であるソースによる無反射造波システムは、任意の流速の時間変化

に拡張できる利点を有する。そこで、本研究では、ソースによる無反射造波を河川のような一方向流にも適用することを試み、波動を中心に開発されてきた数値波動水槽に流れも同時に取り組む 3次元の波・流れ共存場の強非線形数値解析モデルの開発を行う。

2. 数値解析

3次元での波・流れ共存場の数値解析に用いる基礎方程式は、非圧縮性粘性流体に対する連続式(式(1))と運動方程式((2)~(4))、VOF 関数 F の移流方程式(式(5))から構成される。それぞれの式には、造波ソースと付加減衰領域に対応する付加項が加わっている(許, 2000)。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = q^*, \quad q^* = \frac{q(y, z, t)}{\Delta x_s} \dots\dots\dots(1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \\ = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) \dots\dots\dots(2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \\ + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right) - \frac{2\nu}{3} \frac{\partial q^*}{\partial y} \dots\dots\dots(3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g \\ + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) - \frac{2\nu}{3} \frac{\partial q^*}{\partial z} - \beta w \dots\dots\dots(4) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial F u}{\partial x} + \frac{\partial F v}{\partial y} + \frac{\partial F w}{\partial z} = F q^* \dots\dots\dots(5)$$

ここに、 u, v, w : それぞれ x, y, z 方向の流速成分, t : 時間, g : 重力加速度, ρ : 流体密度, ν : 動粘性係数, Δx_s : $x=x_s$ での x 方向のメッシュの長さ, τ : セン断応力, β : 付加減衰領域のみで正の値を持つ減衰係数, q : 造波位置での湧き出し強さ, F : VOF 関数, である。

本研究では、解析対象領域に付加減衰領域を接続し、その岸・沖側端で開境界条件としてすべての物理量の水

* 正会員 工博 名古屋大学助教授 大学院工学研究科土木工学専攻
** 正会員 工博 名古屋大学助手 大学院工学研究科土木工学専攻
*** 正会員 工修 豊田市産業部農地整備課

平勾配が0となる条件を課した。一方、底面と鉛直壁面の境界条件として、法線方向に不透過条件を、接線方向に対して slip 条件を課した。

また、本研究では、造波ソース以外にソースをもう一箇所設け、そこに一定の流速を与え、河川からの流れを与えた。流れの水深方向の分布は、河道を矩形断面の開水路と考え、乱流の対数分布式と同様な分布になるように与えた。分布式は次式で表される。

$$\frac{U}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{U_* z}{\nu} + A, \quad U_* = \sqrt{ghI} \dots \dots \dots (6)$$

ただし、 U_* : 摩擦速度, h : 水深, I : 河床勾配, κ : カルマン定数, A : 積分定数, である。本研究では, $\kappa=0.412$, $A=5.29$ を使用した。

3. 計算結果と考察

(1) 長水路における波と流れの相互作用

まず、波と流れの相互干渉の実態と再現性を確認するため、単純な水域である長水路を考え、その両端から流れと波を与えて両者の相互作用を検討する。これに関しては既に岩崎・佐藤 (1971) が水理実験を行っており、波が流れを遡上する場合、波の進行にともなって波高が減衰することが確認されている。本研究では、岩崎・佐藤らの実験との比較を念頭に、表-1 に示す条件で計算を行った。なお、水路は、矩形断面の水平床直線水路で、幅を 200.0 cm, 静水深を 10.0 cm とし、上流から流れを、下流から規則波を入射させた。

まず、 $x=400$ cm における水位の時間変化について、Case-A の条件における計算結果を図-1 に示す。波の有無にかかわらず計算開始後しばらく水位が一様に上昇する。これは、計算開始直後の計算の不安定性を防ぐため、流量を徐々に増加していることによる。流量が所定の値に達した後は、流れのみの場合の水位は一定値を示す。一方、流れに波が遡上する場合、波が到達すると平均水位が上昇していることがわかる。これは、波の存在により流れが抵抗を受けて流速が減少したために水位が上昇したと考えられる。すなわち、この平均水位の上昇は波と流れの相互干渉の結果であると考えられる。

入射波高で無次元化した無次元波高 H/H_1 の造波境界からの距離にともなう変化特性を図-2 に示す。同図より、波が流れを遡上するにともなって波高が減少する傾向がわかる。エネルギー流束の保存則に基づいて流れによる波の変形を考えると、波が流れを遡上する場合、波高は増大する。しかし、今回の計算では、これとは全く異なる結果となっている。両者の差異は、まず、微小振幅波理論は、粘性を無視した完全流体の微小運動を仮定した理論であるのに対し、本計算では、粘性を考慮した非線形理論に基づいている。そのために波のエネルギー

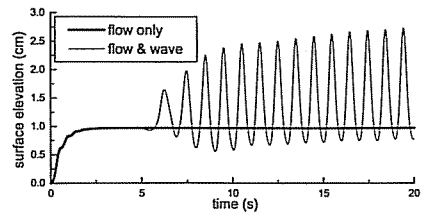


図-1 水位の時間変化 ($u=6.3$ cm/s, $H_1=3.0$ cm, $T=1.05$ s)

表-1 計算ケース

	平均流速 u	波高 H_1	周期 T
Case-A	6.3 cm/s	3.0 cm	1.05 s
Case-B	6.3 cm/s	3.0 cm	1.25 s

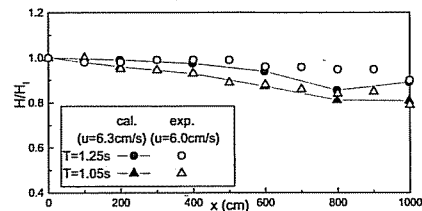


図-2 波高減衰率の比較

が一定ではなく、先に述べたように、波と流れが相互作用し、流れの干渉によるエネルギーの逸散などが生じているものと推察される。

図には、岩崎・佐藤の実験結果 (1971) を読み取った値も合わせて示してある。与えた流れの流速が若干異なるが、入射波周期の異なるいずれの場合も実験値と計算値はよく一致しており、本計算が妥当に波と流れの相互作用を計算しているものと判断できる。また、実験と計算のいずれの場合も入射波の周期が大きいほど波高の減少の程度が小さくなっている。これは、周期が長くなると波速が速くなるため、単位距離を進むのに要する時間が短く、その間に流れとの相互干渉によって生じるエネルギー消費が小さくなったと解釈できる。図-3 は異なる流速の流れ中を同一の波が進行する場合の波高の変化を比較した結果である。同図に例示したように、波高の減衰率は流れが早い方が大きく、流れの流速が波との相互作用の重要な支配パラメーターの一つであることが確認できる。

これらの波高減衰の程度と図-1 に示した平均水位の上昇量は密接に関係しており、図-4 に示すように、平均水位上昇量は同一の河川流の流速に対しては入射波の周期の短い方が大きく、また、同一の入射波周期に対しては流速の大きい方が大きくなる。

以上より、河川を波が遡上する場合、波の進行にとも

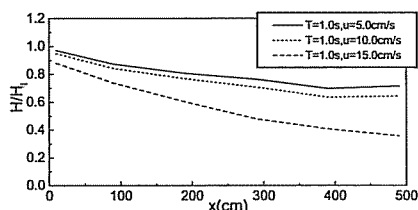


図-3 波高減衰に及ぼす流速の影響

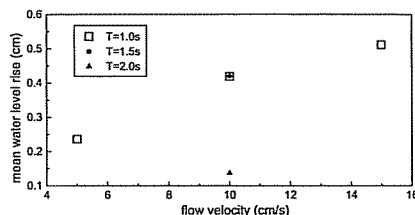


図-4 平均水位の上昇量

なって徐々にエネルギーが減少し、波は減衰していくものと考えられる。そして、流れが速くなるにともなって、早くエネルギーが消費され、波が遡上できる距離も減少するものと考えられる。

(2) 三次元場における波と流れの相互作用

矩形海域に直線河川が流入する場合について、流れのみを考慮した場合の流速ベクトルと平均水位の空間分布をそれぞれ図-5と図-6に示す。河川からの流れが海域に流入すると、河口部で渦が形成される。y方向の流速の変化に着目すると、yが小さい範囲の河川流下領域では比較的流速が大きく、yが大きくなる河口からはなれるにしたがって流速は小さくなる。そして、これに対応して平均水位はyが大きくなるにしたがって大きくなる傾

向がある。ただし、渦が形成される河口部では、ほぼ渦の中心で最も平均水位が下がる現象が計算されている。

図-7と図-8は波と流れが共存する場合の平均流速と平均水位の空間分布をそれぞれ示したものである。まず、流速分布については、波による定常流成分のために流向が上流に向かう部分が局部的に現れるなど複雑な分布になっている。しかし、河口部の渦は波のある場合も形成されている。一方、平均水位は流れのみの場合と比較して全般的に大きくなっているが、これは長水路における波と流れの相互作用で既述した平均水位の上昇が生じているものと考えられる。ただし、渦の形成されている箇所は周囲に比べて平均水位は下がる傾向があるのは流れのみの場合と同様である。

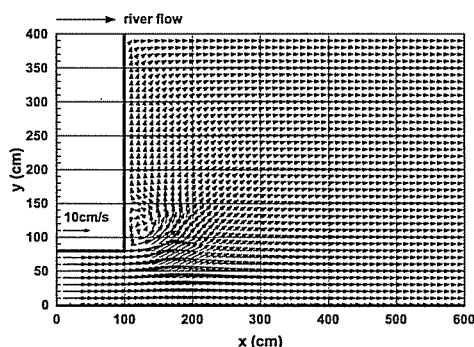


図-5 流れのみの場合の平均流速ベクトル (u=10.0 cm/s)

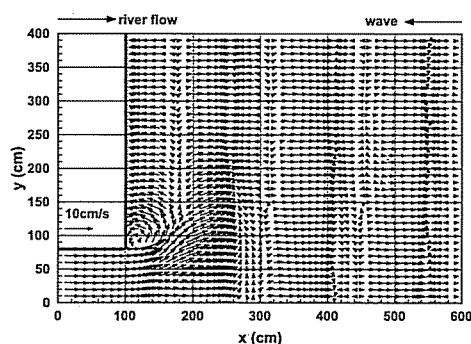


図-7 波・流れ共存場の平均流速ベクトル (u=10.0 cm/s, H_I=3.0 cm, T=1.5 s)

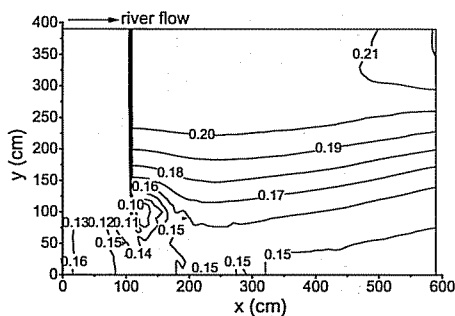


図-6 流れのみの場合の平均水位 (u=10.0 cm/s)

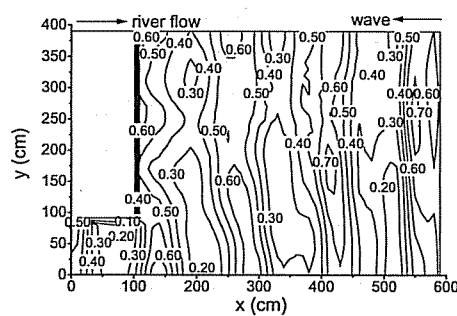


図-8 波・流れ共存場の平均水位 (u=10.0 cm/s, H_I=3.0 cm, T=1.5 s)

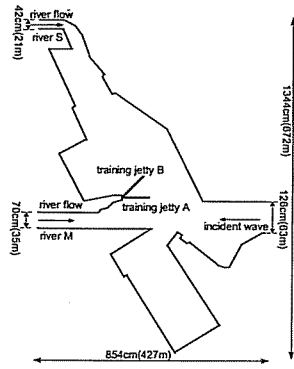


図-9 モデル漁港の概要

波と流れが共存する場合、流下方向に等平均水位線がシフトする傾向が認められる。これも波と流れの相互作用による現象と考えられる。

ところで、図-7では流れの逆転する地点が現れていたがこれは静水面近傍の質量輸送の大きい位置での特有の結果であり、中層や底面近傍の下層部では上流に向かう平均流は確認されなかった。

(3) モデル港湾への適用例

つぎに本数値解析の工学的な応用を試みる。ここでは、出水時に港内埋没の一原因となる流入土砂を搬入しうる河川が存在する小規模漁港を考える。漁港の形状は、図-9に示すものであり、港口部の反対側に流入河川があり(河川Mとする)、泊地は河川と湾口を結ぶ線の両側に設けた。また、片側の泊地の奥にも流入河川を設けた(河川Sとする)。

いま、河川Mからの流れに着目すると、泊地の入口部

で流積が大きくなり、そのため流速が低下し、土砂が堆積しやすいと考えられる。この対策工としては、導流堤の設置が考えられ、本計算では図-9に示すように2種類の突堤を設置した場合の計算を行った。なお、幾何形状を1/50に縮小して計算を行った。漁港の大きさは図-9に示すとおりである(カッコ内の値は現地換算値)。なお、水深は一定とし、 $h=10.0$ cm (現地換算5.0 m)とした。

計算では、2本の流入河川のうち、河川Mを主な河川と考え、河川Mの流速を15.0 cm/s、河川Sの流速を5.0 cm/s、入射波の波高を3.0 cm、周期を1.2 sとした。

導流堤Aを設置した場合について、図-10と図-11にそれぞれ流れのみの場合と波と流れを同時に入力させた場合の平均流速の空間分布を示す。波がない場合、導流堤下流端部で流向を変化させ、泊地に向かう流れ成分が見られるが全般的には港口部に向かう流れが卓越する。しかし、波が存在する場合、港口部から上流部に向かって流向が細かく変化する。そしてその影響は左岸側の泊地内でも認められる。両図のそれぞれに対する平均水位の空間分布を図-12と図-13に示す。まず、流れのみの場合の図-12より、泊地奥部で平均水位が上昇する傾向が確認できる。一方、これに波が加わった図-13では、波動成分に起因すると考えられる平均水位の高低以外に、泊地内の平均水位の上昇が生じていることが確認できる。そして、その傾向は平均流速分布でより波の影響が強く現れた左岸側の泊地でより大きく平均水位の上昇が生じていると見なせる。

以上より、港内への河川からの流入水の挙動を考える場合、波の影響を考慮する場合としない場合では結果に

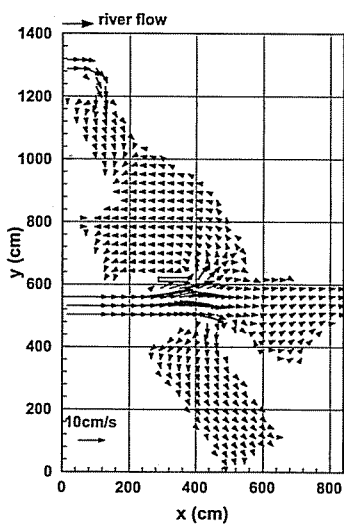


図-10 流れのみの場合の平均流速ベクトル

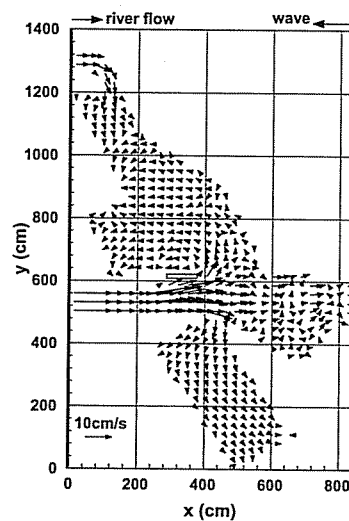


図-11 波・流れ共存場の平均流速ベクトルの分布

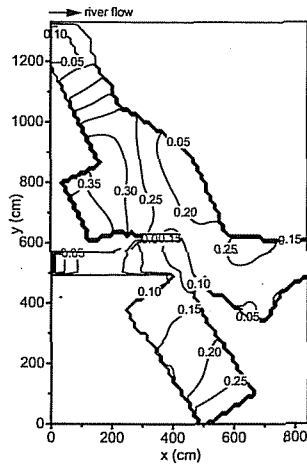


図-12 流れのみの場合の平均水位

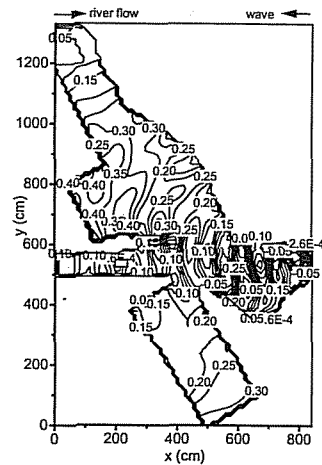


図-13 波・流れ共存場の平均水位

差があることが明らかとなった。したがって、波と流れの相互作用を考慮することは重要であると考えられる。

4. 結 言

本研究では、波と流れの相互作用を解明するための数値解析手法を提案し、その妥当性と有効性について検討した。以下に、本研究で得られた主要な結論を要約する。

- 1) 長水路内における波と流れの相互作用より、波が河川を遡上すると波高は減衰する。波高の減衰率は既往の実験結果と良好に一致する。また、波高の減少率は、波の周期が大きくなると小さくなる。
- 2) 河川が流入する港では、河川からの流れは波との干渉により波がない場合に比べて変化する。したがって、波の影響を考慮した検討が必要である。
- 3) 波と流れの相互作用によって平均水位が上昇する。水位の上昇量は港の奥部で大きくなる。

参 考 文 献

岩崎敏夫・佐藤道郎 (1971): 流れを遡る波のエネルギーの減衰

について (II), 第 18 回海岸工学講演会論文集, pp. 55-59.

大中 晋・渡辺 晃・磯部雅彦 (1987): 波・流れ共存場に拡張した非定常緩勾配方程式による波動場の数値計算, 第 34 回海岸工学講演会論文集, pp. 91-95.

富永晃宏・江崎一博・藤川智仁 (1990): 急勾配開水路流の流速分布特性, 水工学論文集, 第 34 巻, pp. 439-444.

許 東秀 (2000): 潜堤による多方向不規則波の碎波特性と潜堤上の構造物に作用する波力特性に関する基礎的研究, 名古屋大学大学院博士論文, pp. 11-24.

Mohammad Mohiuddin・富樫宏由・平山康志 (1999): 傾斜海底上における波・流れ相互干渉のモデル構築, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 71-75.

Mohammad Mohiuddin・富樫宏由・平山康志 (2000): 波変形に対する流れの影響のモデル化, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 16-20.

Kirby, J. T. (1984): A note on linear surface wave-current interaction over slowly varying topography, J. of Geophysical Research, Vol. 89, pp. 745-747.

Madsen, P. A. and Sorensen O. R. (1992): A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics, Coastal Eng., Vol. 15, pp. 371-388.