

流れと漂砂の数値シミュレーション に関する調査研究

河野 健^{*1}

近年のめざましい大型計算機の発達によって長足の進歩を遂げた数値シミュレーション技術に関して、流体力学の分野を中心に調査を行った。

また、この数値シミュレーション技術を、沿岸開発上の重要な課題である漂砂の問題に適用するべく、調査を行った。

そして、将来性、汎用性の面で優れた三次元海浜変形モデルについて詳しく調査し、今後の方針として、砂をある粘度をもつ流体として取り扱うことによって新たな三次元海浜変形モデルを開発することを検討した。

キーワード：数値シミュレーション，三次元海浜変形

Study about Numerical Simulation of Flow and Drifting Sand

Takeshi KAWANO^{*2}

The technique on the numerical Simulation about Hydrodynamics, which has made remarkable progress with advance of computer, is investigated.

And in order to apply this technique to the problem of sand-drift, the literatures on it are investigated.

And the model of three-dimensional seashore transformation, which has many advantages about possibilities, is studied. Then the plan about the new model is considered.

Key word : Drifting Sand, Numerical Simulation Three-dimensional seashore transformation

*1 海洋開発研究部

*2 Marine Research and Development Department

1 はじめに

これまで機械工学の分野においては船の抵抗軽減のための船型改良や空力特性の良い自動車や飛行機的设计など、海洋工学・海洋土木工学の分野では波や流れによる海浜地形の変化の予測や構造物に働く流体力の予測など、流れや波と物体の間の相互干渉にかかわるさまざまな問題は、主として経験則や模型実験に頼ってきた。しかし、近年の大型計算機の発達によって、数値シミュレーションの技術は飛躍的に進歩し、これらの問題へのアプローチも可能となった。数値シミュレーションの結果と実際の現象や実測値とが定量的に良好な一致をするという段階にはいまだに至っておらず、結果の信頼性という点では、経験則や模型実験に一步譲る場合もあるが、数値シミュレーションにはそれに代わる利点もある。

船舶や自動車、飛行機などの模型実験を行う場合、一般的には相似則によって縮尺模型を作り、それに合わせて条件を設定し、実験を行う。しかし、相似則によって全ての要因が妥当に縮尺されるとは限らない。実験の対象となるものによっては、相似則が確立していない場合もある。しかし、数値シミュレーションによれば、相似則を用いずに実際と同じ条件で計算することも可能である。さらに、模型実験には、大規模な実験施設と模型作成のための多大な労力が必要であるが、数値シミュレーションの場合、一旦プログラム・コードができてしまえば、計算条件を変える（即ち、模型実験において実験条件や供試模型を変えることに相当する）ことは比較的容易である。また、数値シミュレーションによれば、得られるデータの量は模型実験に比べて大変多い。従って、模型実験と数値シミュレーションとを相補的に用いることによって、従来よりも効率良く、信頼できる予測が可能となる。

以上のような数値シミュレーションの可能性を踏まえて、沿岸開発の上での重要な問題の一つである漂砂の問題について、数値シミュレーションによるアプローチを試みるべく調査を行った。漂砂の計測法に関しては、文献1)に詳しいが、このなかで数値シミュレーションに関しては、海岸線の変化のみに注目した汀線変化モデルにしか触れられていない。国土の狭い日本においては、沿

岸域の開発が今後ますます重要度を増して行くと考えられ、沿岸域に構造物を設置する機会も増加することが予想される。こういった場合、海岸線の変化の予測が重要であることは言うまでもないが、それ以外にも、構造物の脚部の洗掘や構造物の近傍海域での海底地形の変形の予測もまた重要な課題である。汀線変化モデルが概して2次元モデルであり、既に実績のある手法であるのに対し、海底地形変形3次元モデルは、まだ開発の端にいたばかりであるが、その応用範囲は広いと思われる。以下、第2章において、主として支配方程式としてナビエ・ストークス方程式を用いて、これを差分法によってtime-marchingしながら解くという汎用性の高い数値シミュレーション技術を中心に、その利点や問題点について漂砂以外の分野における数値計算例を調査した結果を述べる。また、第3章において、海底地形変形を中心とした漂砂の数値シミュレーションの現状についての調査結果を、最後に第4章において、今後の研究の方針について述べる。

2 漂砂以外の分野における数値シミュレーションの例

数値シミュレーションはいろいろな分野に適用されている。特に流体力学の分野においては、ナビエ・ストークスの方程式と連続の式をいろいろな境界条件の下で解くことによって、一つには、流力特性に優れた船舶や自動車、航空機を設計するための道具として、もう一つには、海況や構造物に働く力、波の変形などの予測手段として、さらには、学術的な使い方として、流体力学上の基礎的な問題に適用し、実験とは違った方向から問題の解決を図る手段として、といった大別して3つの用いられ方をしている。これらの3種の適用方法について、いくつかの例を挙げながらその利点と問題点について述べる。

2.1 設計上の道具としての利用

船舶や自動車、航空機の場合、形状によってその流体力学的性能が異なる。即ち、流線形に代表されるようなできる限り滑らかな形状にすることで、抵抗値を軽減できるからである。従って、設計の際に、少しずつ形状を変えた何種類もの模型を製作し、これらを比較するという必要が生じる。

こういった場合には、数値シミュレーションは大変有利である。シミュレーションの場合には、対象となる物体の形状を変えることは、計算条件を変えることにすぎず、容易にできる場合が多い。模型をいくつも作ることを考えれば、時間的にも経済的にも効率が良い。

まず、船舶に関する数値シミュレーションの例である。船が進行する時、船首部には、非線形性の強い自由表面衝撃波が形成され²⁾、従来の線形理論のみでは説明しきれないケースがある。そこでMiyata et. al.^{3), 4)}は、MAC法をベースに、自由表面と物体表面の取り扱い方に独自の改良を加えたTUMMAC法を考え、船体造波シミュレーション用のプログラム・コードTUMMAC-IVを開発した。図1は、このプログラム・コードによって船首部の造波シミュレーションを行う際の計算領域である。物体として、船舶の船首部の片側を考えている。この計算領域を格子(セル)に分割して、各子点において速度と圧力を計算し、さらに自由表面の変形を時間を追って求めていく。図2は、この数値シミュレーションによって得られた波高の等高線図を実験結果と比較したものである。上側が計算結果、下側が実験結果である。深さ方向の格子間隔を船長の1%以下としており、実験結果と良好な一致を示している。図3は、船首部での造波の様子を鳥瞰図で示したものである。

上側がバラスト状態、下側が満載状態である。

この数値シミュレーションによって得られた波の形状や、船体表面圧力の積分値から造波抵抗値を推測し、それによって船首形状の優劣を比較することができるので、実際の設計の為の道具として利用することが可能である。

この方法では粘性流はシミュレートできないが、波と粘性流の両方が混在し、お互いに影響を及ぼし合っているのが実際の現象である。そこで、Miyata et. al.⁵⁾は、さらにWISDAM法を開発し、波と粘性流の相互干渉をシミュレートしている。WISDAM法では、自由表面と物体表面の両方に格子系を引きつけた境界適合座標系を用い、支配方程式として運動量と運動エネルギーの両方を保存する回転形のナビエ・ストークス方程式を用いている。図4はレイノルズ数 ($Re = U \cdot L / \nu$ U:流速 L:代表長さ ν :動粘性係数) $Re = 10000$ におけるシミュレーション結果である。船の長さ方向に軸を持つ剥離渦が船体の回りで生じている様子が良くとらえられている。図5は、同じ方法でシミュレートされた船首近くの断面での圧力の等高線図であるが、自由表面が無い場合(左側)と、自由表面がある場合(右側)とで著しい相異があり、波と粘性流の相互干渉が重要であることを示している。

一方、自動車の場合でも、空力特性の向上のため

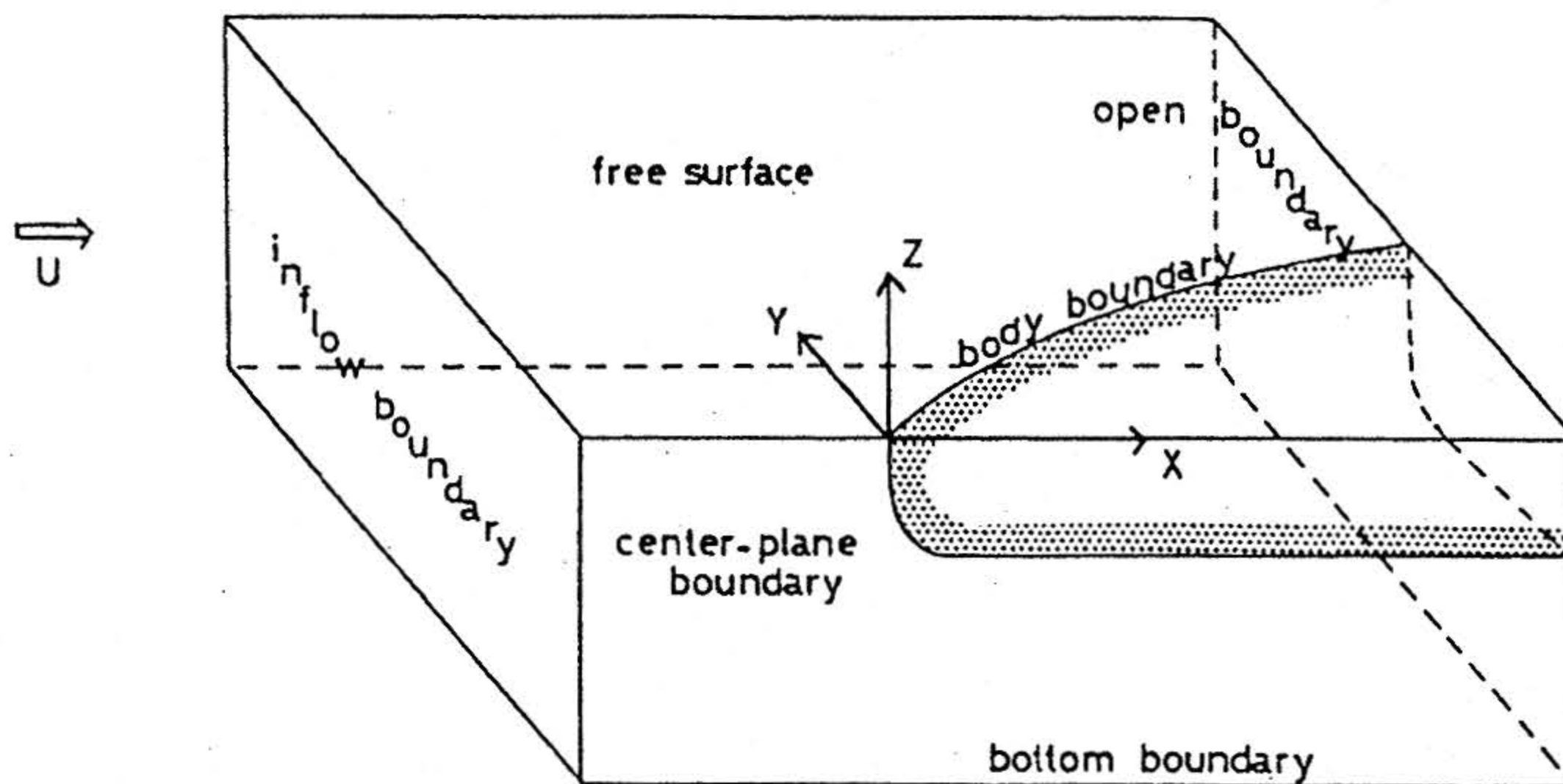


図1 船首造波シミュレーション: 計算領域の例³⁾

Fig. 1 Example of Computational Region of Wave-Making Simulation³⁾

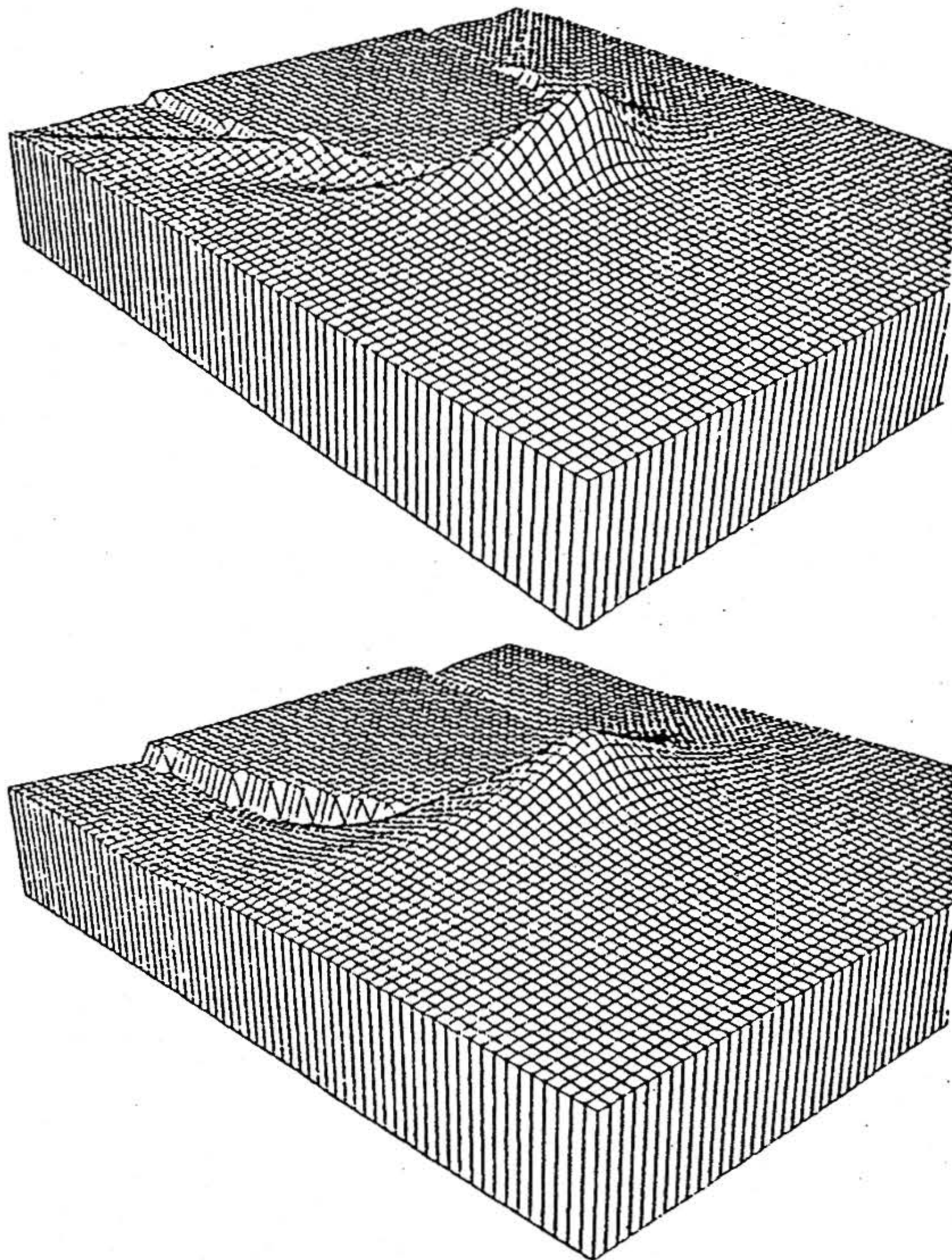


図 3 船首造波シミュレーション：計算結果の鳥瞰図⁴⁾
バラスト状態（上）と満載状態（下）

Fig. 3 Perspective Views of Computed Bow-Wave :
Ballast Condition (alove) and Full-Load Condition (below)⁴⁾

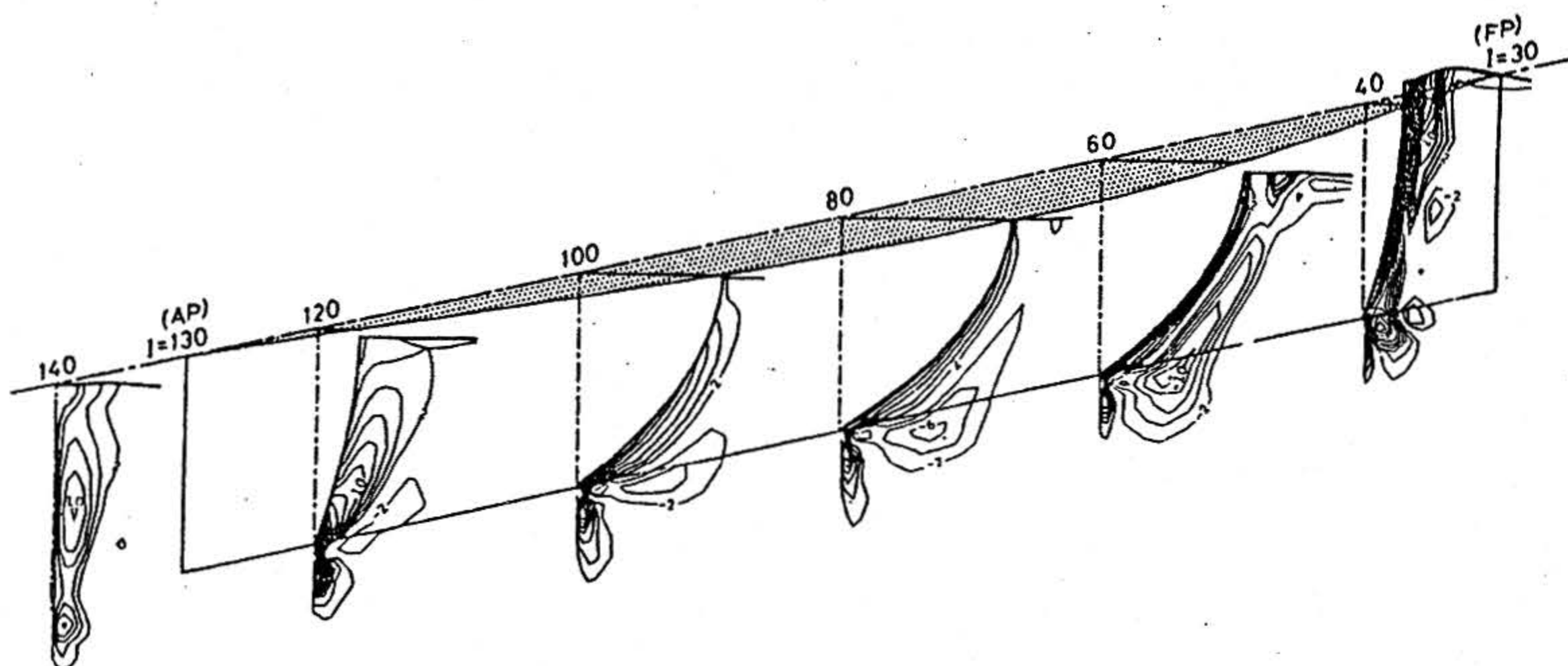


図 4 船舶回りの波と粘性流のシミュレーション：流れ方向に軸をもつ渦度の等高線図⁵⁾

Fig. 4 Contour Map of Computed Vorticity around a ship⁵⁾

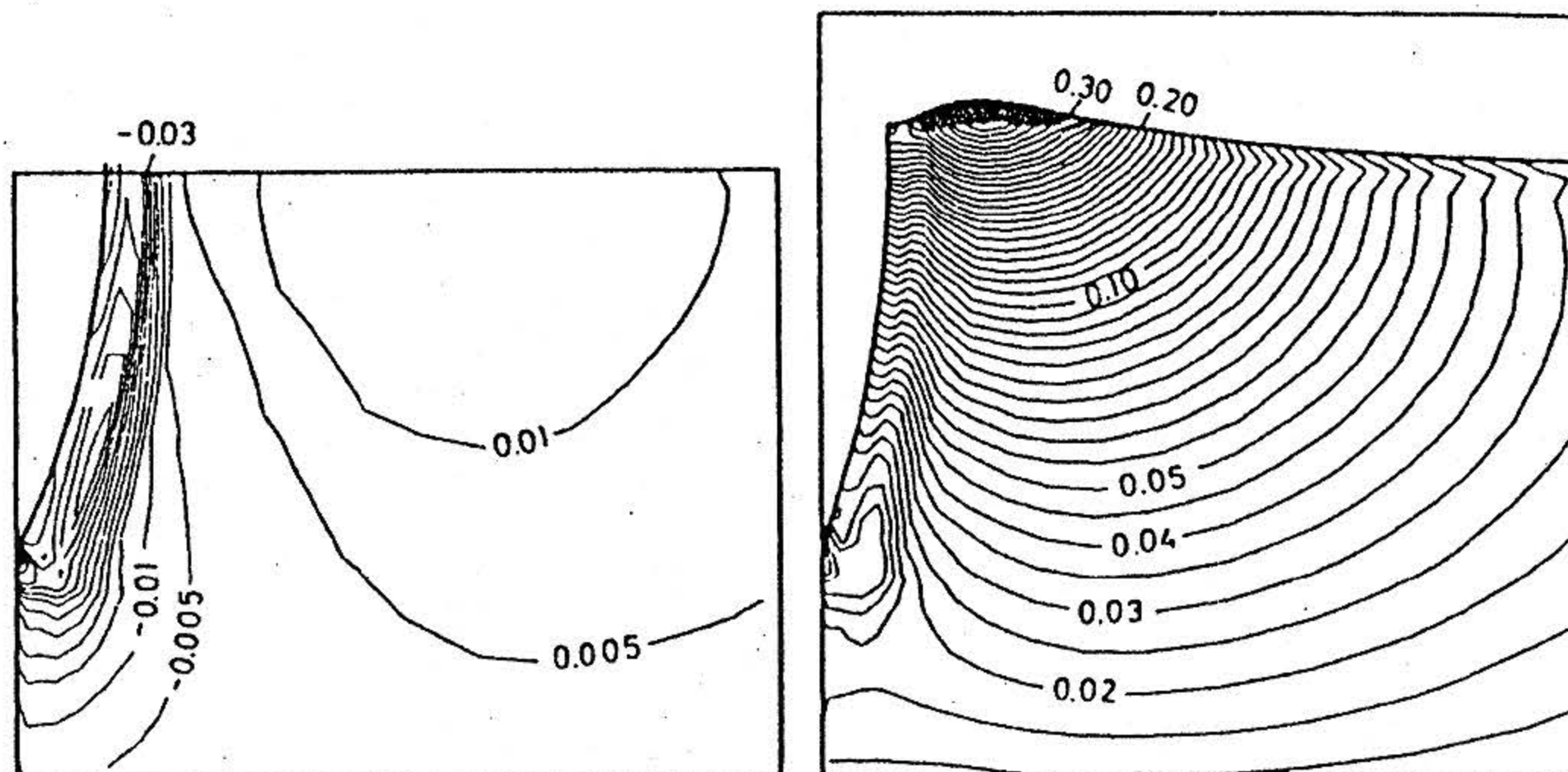


図 5 船舶回りの波と粘性流のシミュレーション：船首近くの断面での圧力の等高線図⁵⁾

Fig. 5 Contour Maps of Computed Pressure : Double-Model-Flow (left) and with Free-Surface (right)⁵⁾

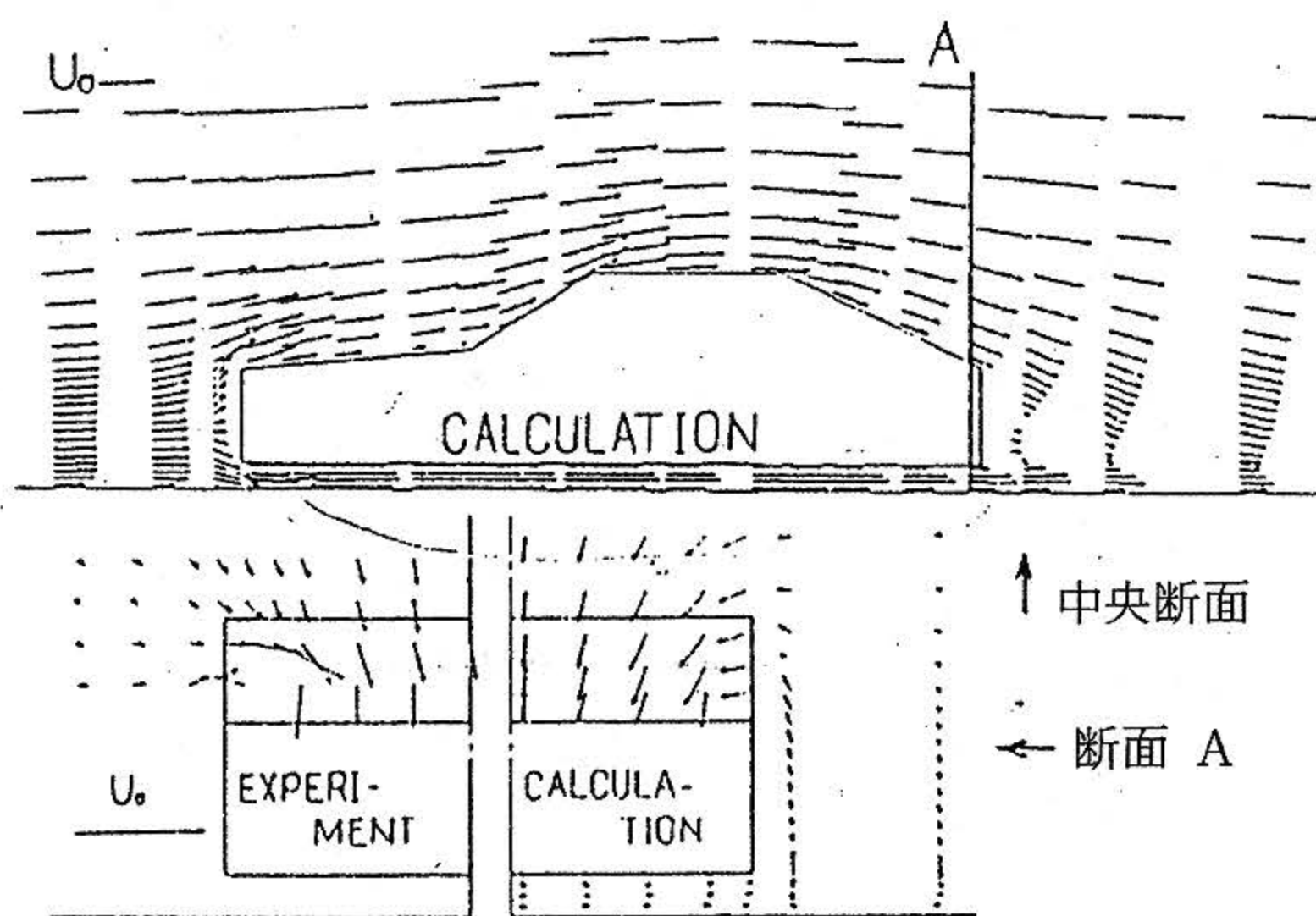


図 6 自動車回りの流れのシミュレーション：速度ベクトル図⁶⁾

Fig. 6 Computed Velocity Vector Field around an Auto-Mobile⁶⁾

2.2 波浪等の予測のための利用

次に海況や波浪，構造物に働く流体力をあらかじめ予測するための数値シミュレーションである。漂砂に関するシミュレーションも，このカテゴリーに含まれるが，これに関しては第3章で述べる。

まず，波の変形や波浪によって物体に働く流体力に関する数値シミュレーションである。Miyata et. al.⁷⁾は，深水域を進行する浮体の前面にでき

る波（図7）や浅水流中の半円状突起によって誘起される波（図8），没水柱体に規則波が当たる場合の波の変形（図9）について，砕波を含めた数値シミュレーションを行っている。波に関する問題も砕波を供なう現象は大変複雑であり，実験も難しい。図7～図9は，先に2-1で述べた船体造波シミュレーションに用いたTUMMAC法の2次元バージョンで，砕波シミュレーション用

に改造されたものである。自由表面に segment-in-cell 法といった手法を用い、砕波後の自由表面の複雑な運動をシミュレートできるように工夫されている。

さらに Miyata et. al.⁹⁾ は、この方法に、特に差分展開時の精度の向上と乱流モデルの導入といった改良を加え、没水円柱に規則波が作用する場合と、平らな海底から盛り上がったバンプに規則波が作用する場合について、波の変形の数値シミュレーションを行い、実験と比較している。図 10 は没水円柱に作用する規則波の変形の計算結果である。砕波後の渦の形成など実験と一致する点も多いが、円柱に作用する力が、実験結果と定量的に一致するというまでには至っていない (図 11)。図 12 は、海底地形が規則波をどのように変化させるかの数値シミュレーション結果である。規則波が変形し、序々に急峻となって砕波する過程が良くとらえられている。

また、差分法ではなく有限要素法での数値シミュレーションであるが、高梨らは、^{9),10)} 津波のシミュレーションを行っている。これは、地震の発生日点と大きさを設定することによって、津波の海岸への到達時間や高さなどが数値データとして得られるというものである。高梨はこれを 1983 年 5 月 26 日の日本海中部地震に適用し、250km 四方の解析領域の数値シミュレーションから、津波が岸に向かって伝播して、地震発生から約 10 分後に第 1 波が深浦に到達していることを明らかにした。(図 13, 14)

以上のような波や構造物に働く流体力の予測のために数値シミュレーションを行う場合には、実験結果や実測結果と数値シミュレーション結果とが、定性的のみならず定量的にも一致する必要がある。しかし、数値シミュレーションの場合、差分展開時に生じる誤差などから、定量的な一致をみるのは難しい場合もある。

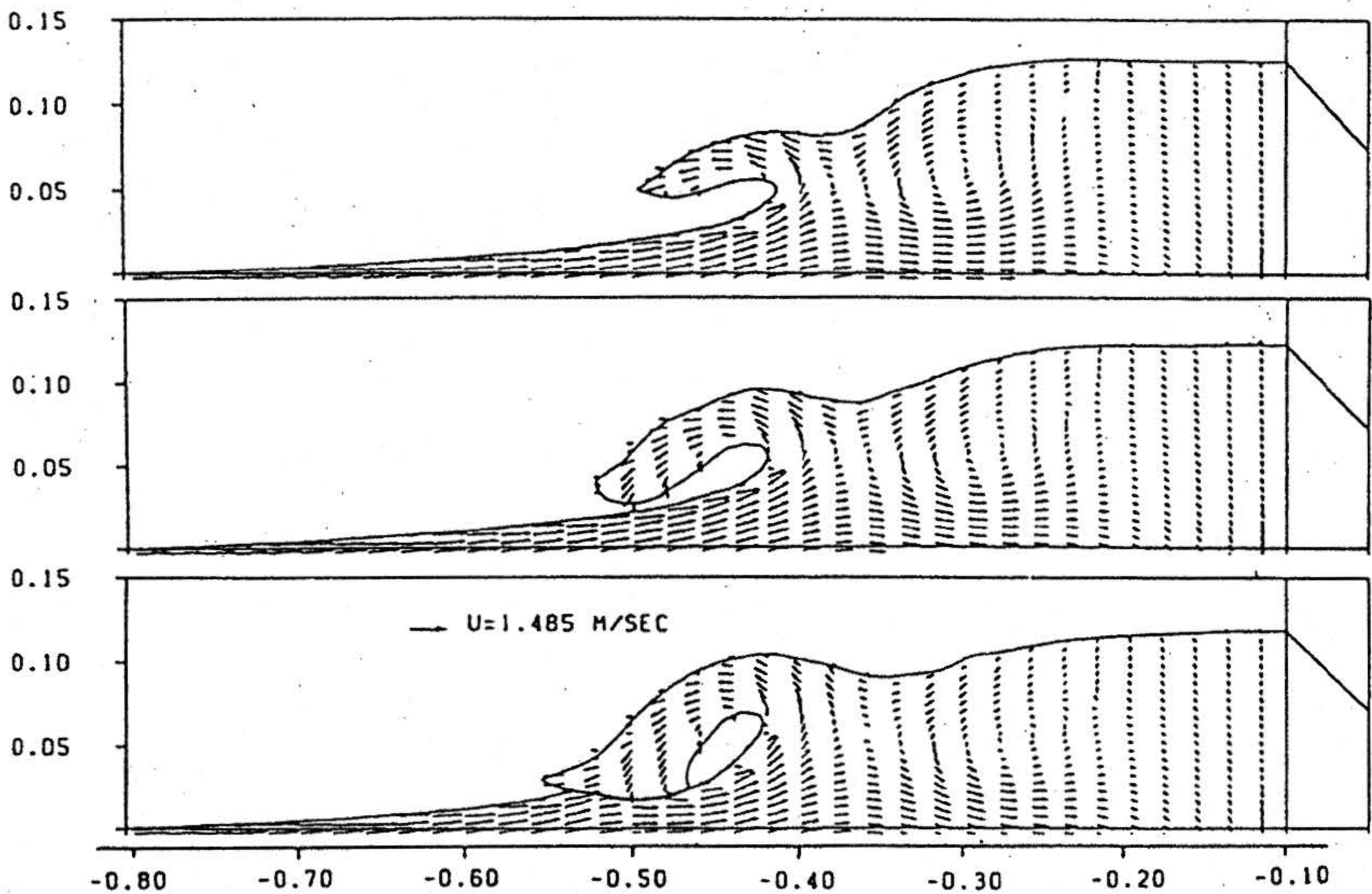


図 7 深水域を進行する浮体前面に生じる波と流れのシミュレーション：波形と速度ベクトル図⁷⁾
 Fig. 7 Computed Wave Profile and Velocity Vector Field by advancing floating body⁷⁾

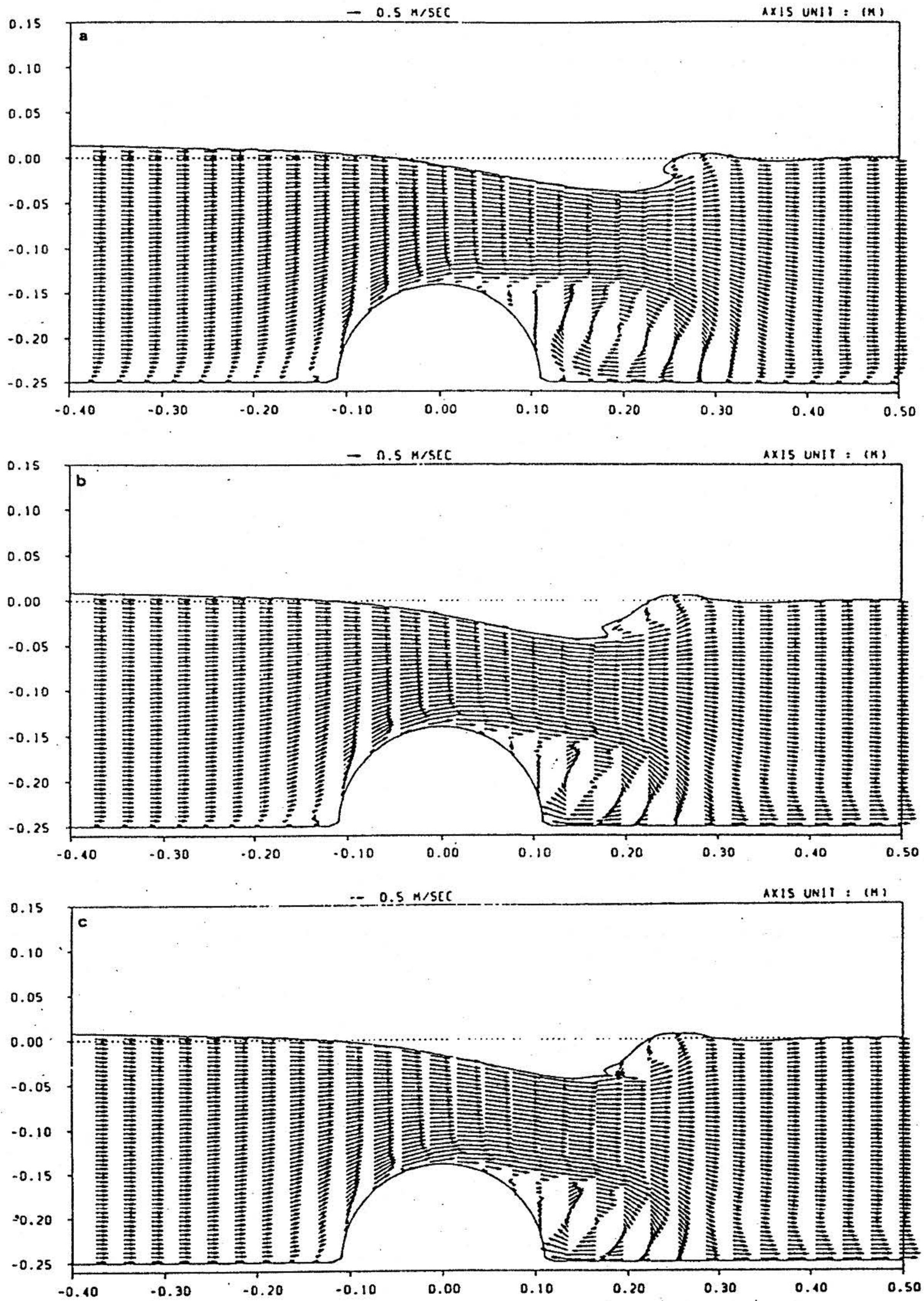


図 8 浅水流中の半円突起によって生じる波と流れのシミュレーション：波形と速度ベクトル図⁷⁾

Fig. 8 Computed Wave-Profile and Velocity Vector Field by lump in the Stream⁷⁾

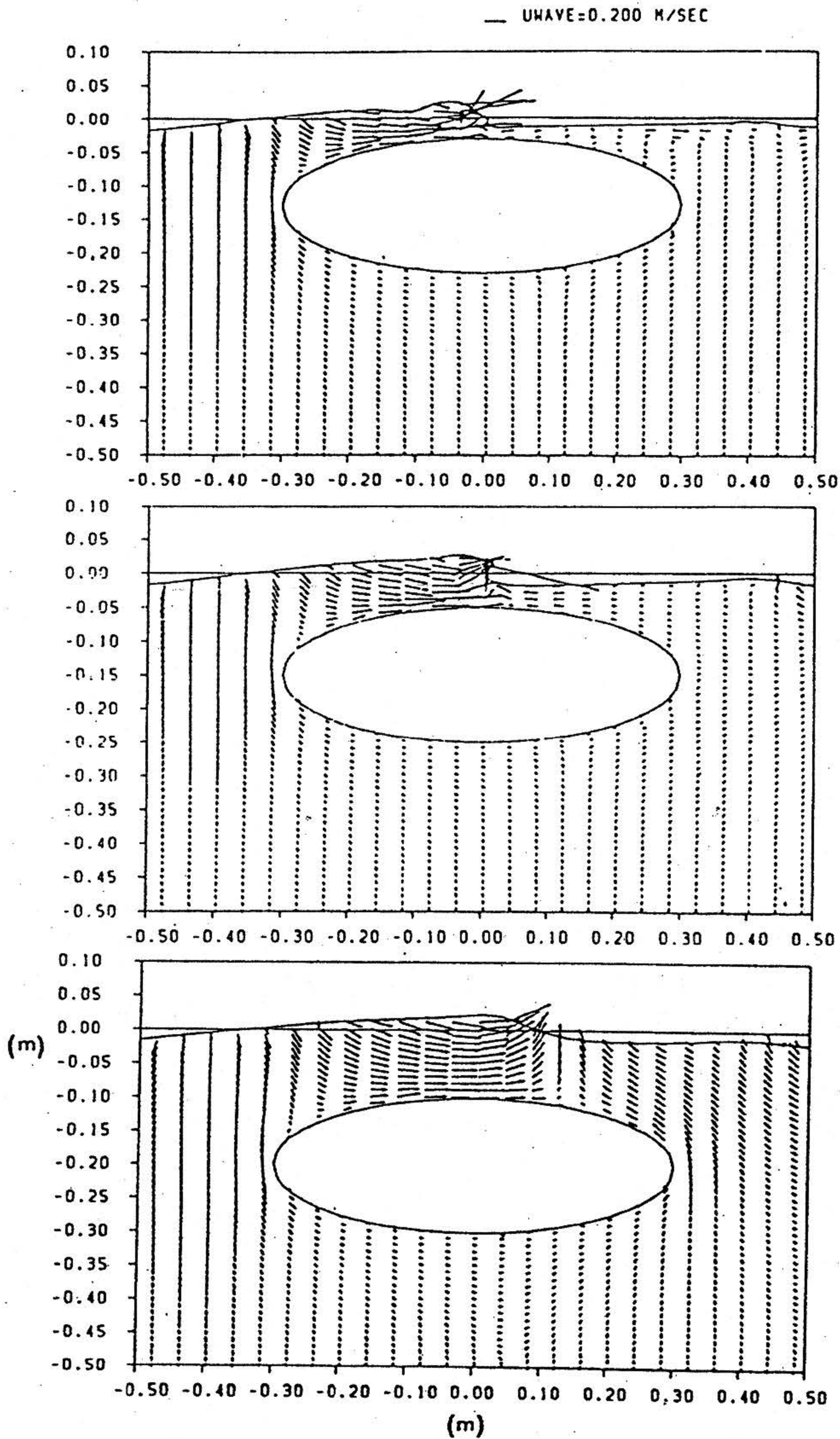


図 9 規則波中の没水柱体による波と流れのシミュレーション：波形と速度ベクトル図⁷⁾

Fig. 9 Computed Wave-Profile and Velocity Vector Field by Submergible in Wave⁷⁾

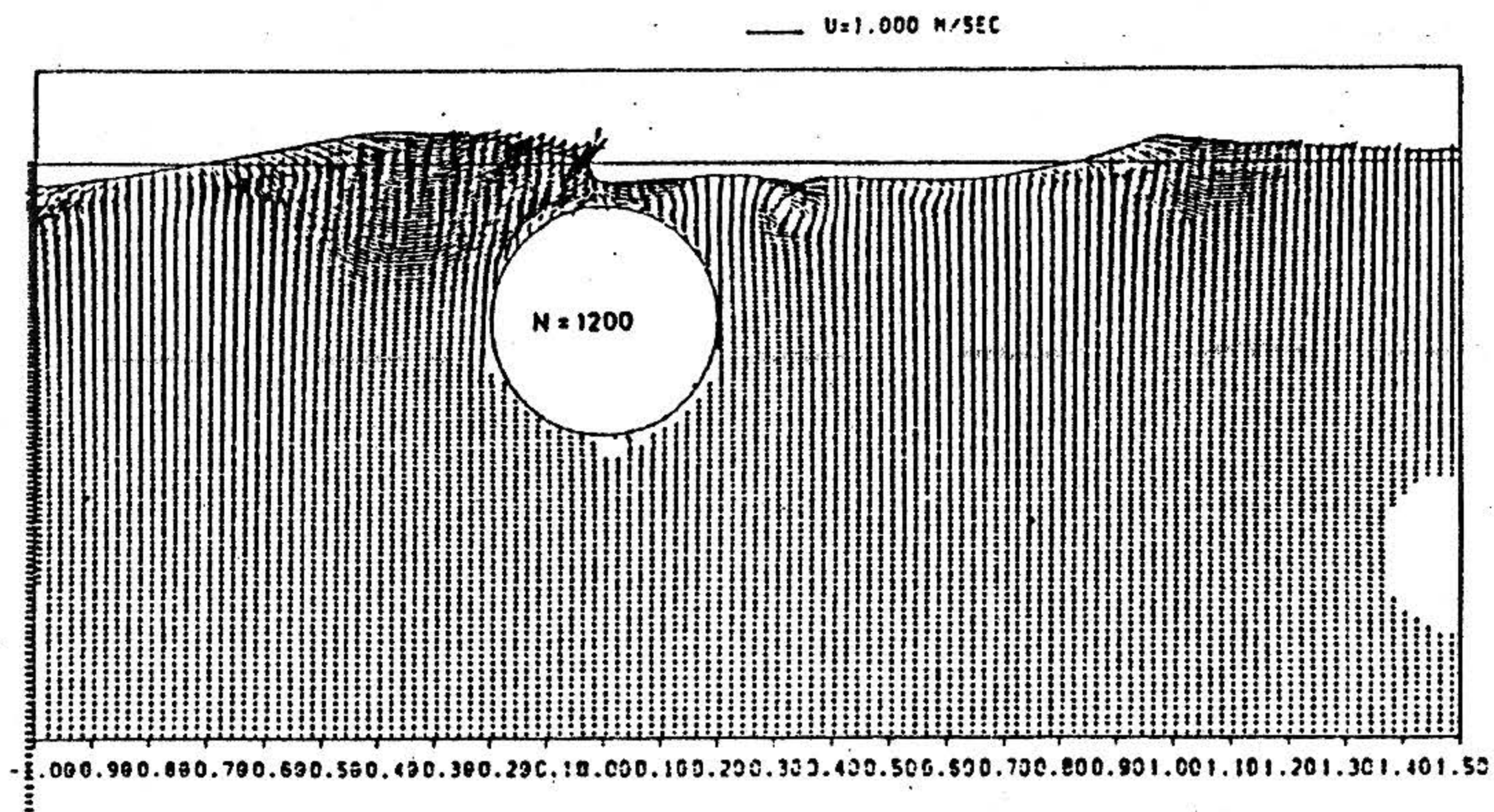
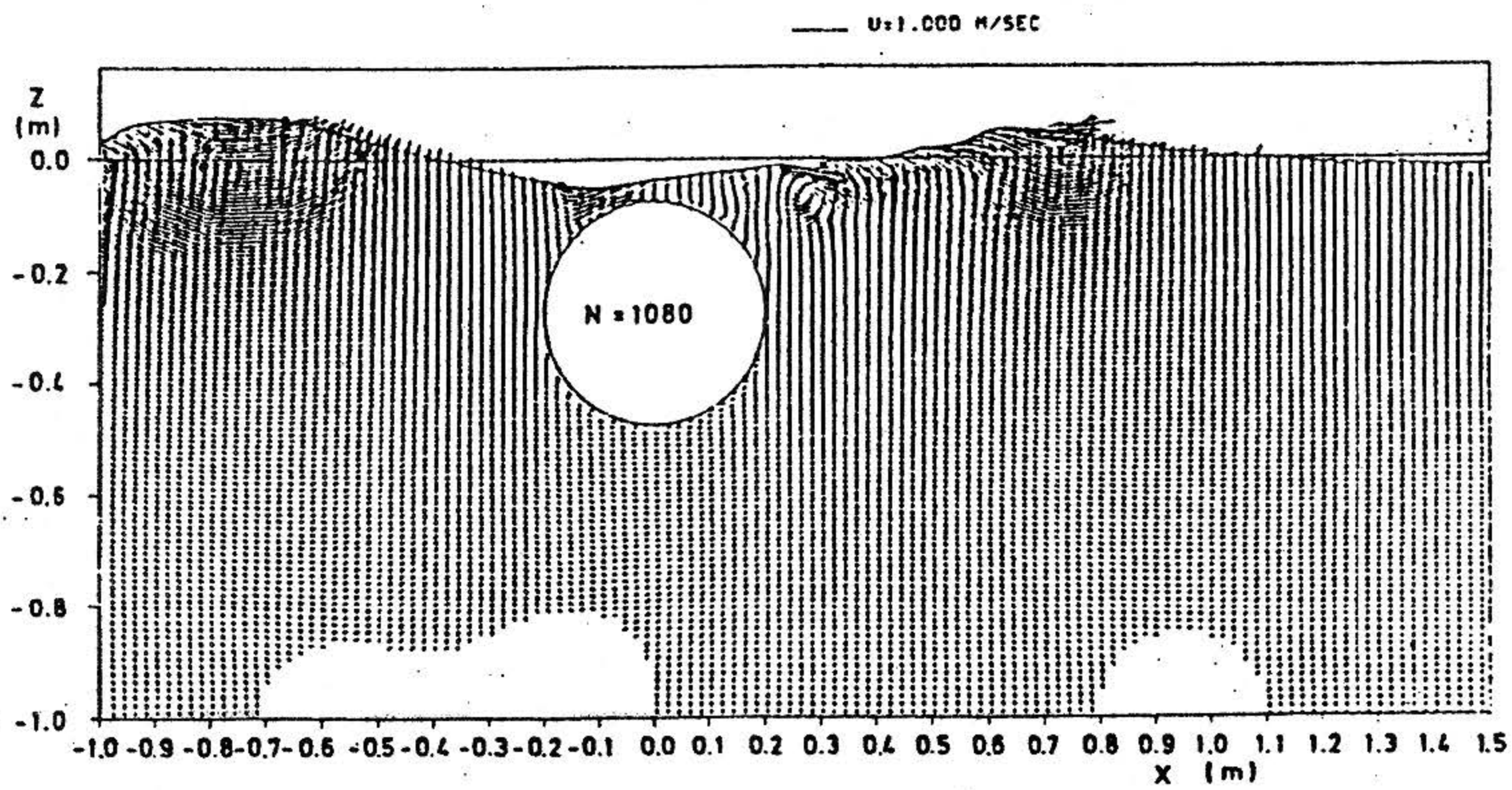


図 10 規則波中の没水柱体による波と流れのシミュレーション
 : 波形と速度ベクトル図⁸⁾

Fig. 10 Computed Wave-Profile and Velocity Vector Field by
 Submergible in Wave⁸⁾

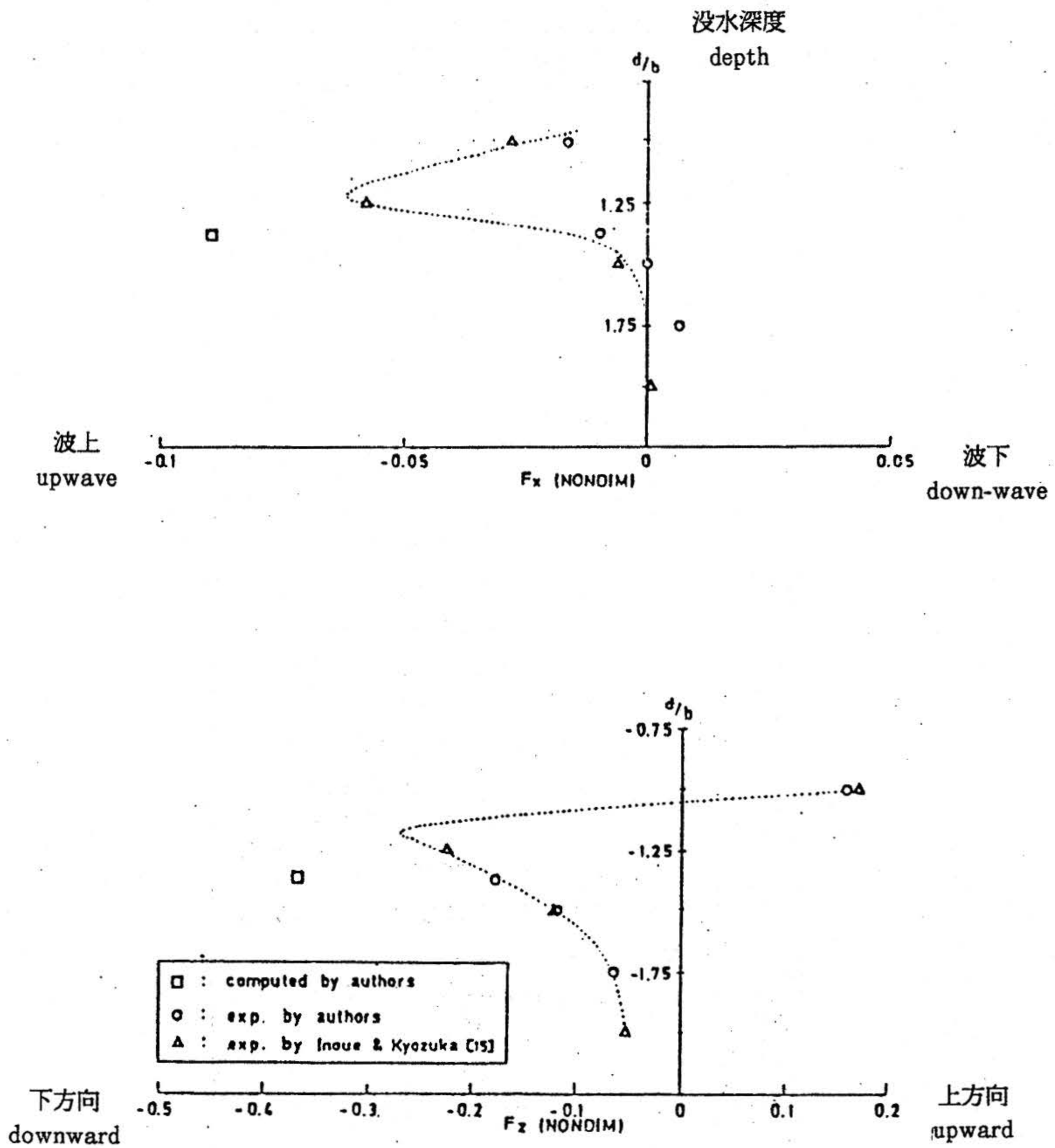


図 11 没水円柱に働く流体力：水平方向（上）と鉛直方向（下）⁸⁾

Fig. 11 Mean Horizontal (above) and Vertical (below) Forces on a Submerged Circular Cylinder⁸⁾

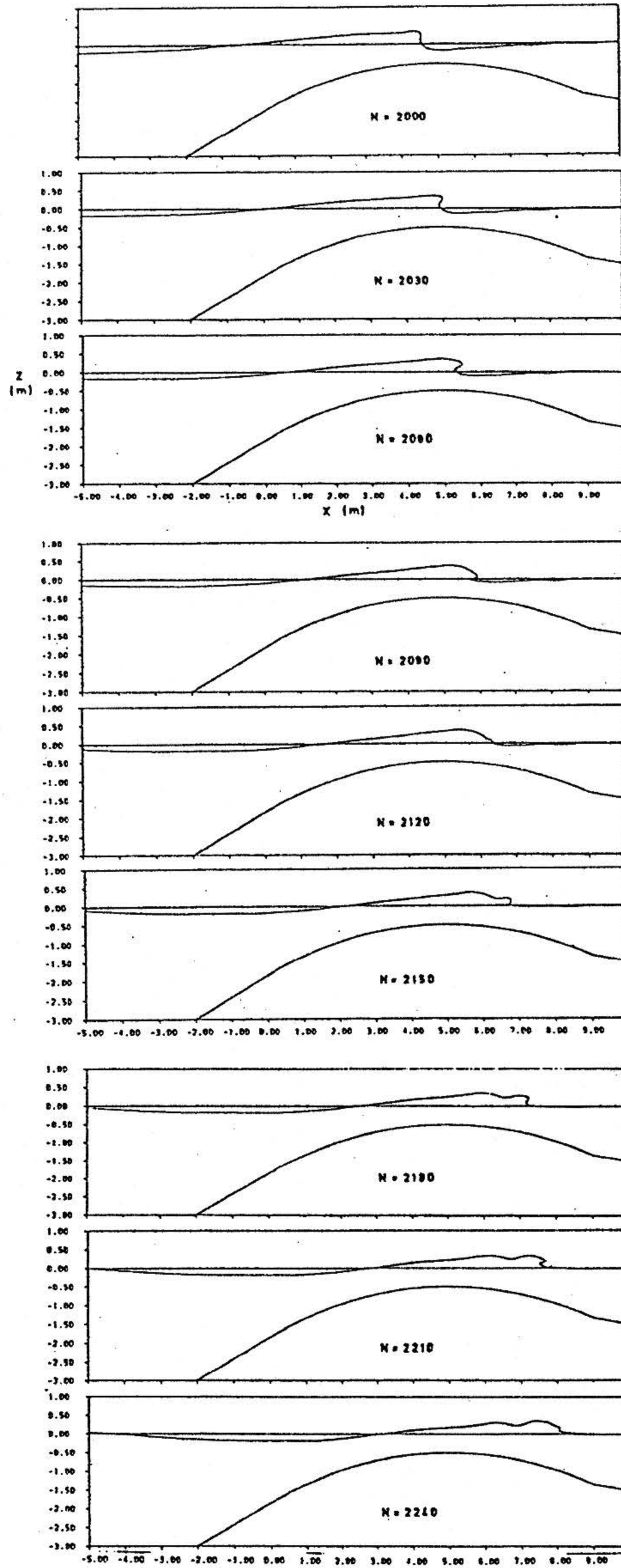


図 12 規則波中のバンプの上の波と流れのシミュレーション：波形図⁸⁾
 Fig. 12 Computed Wave Profilfl on a Bump in Wave⁸⁾

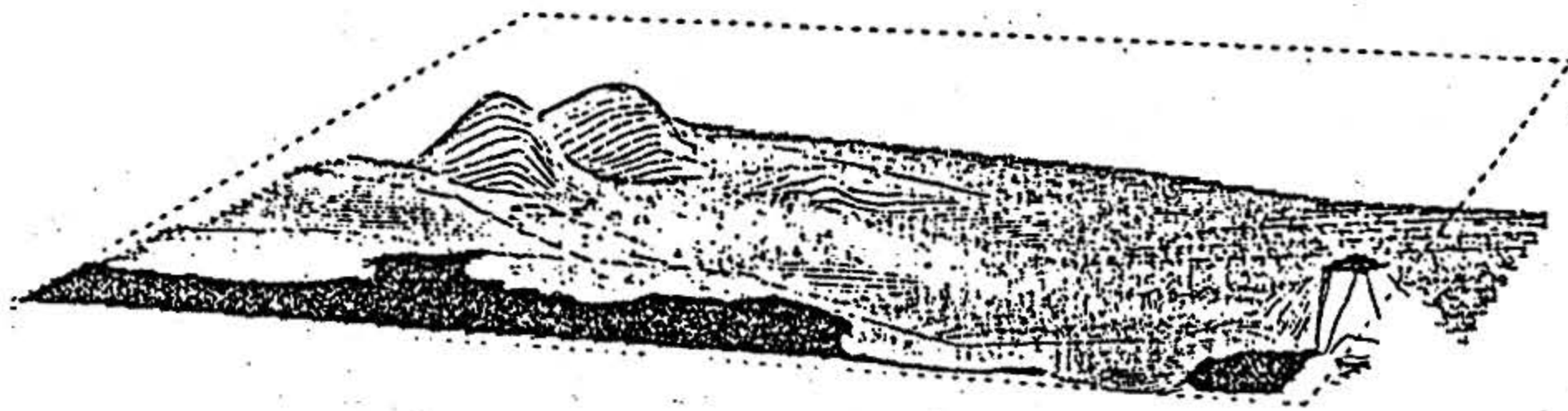
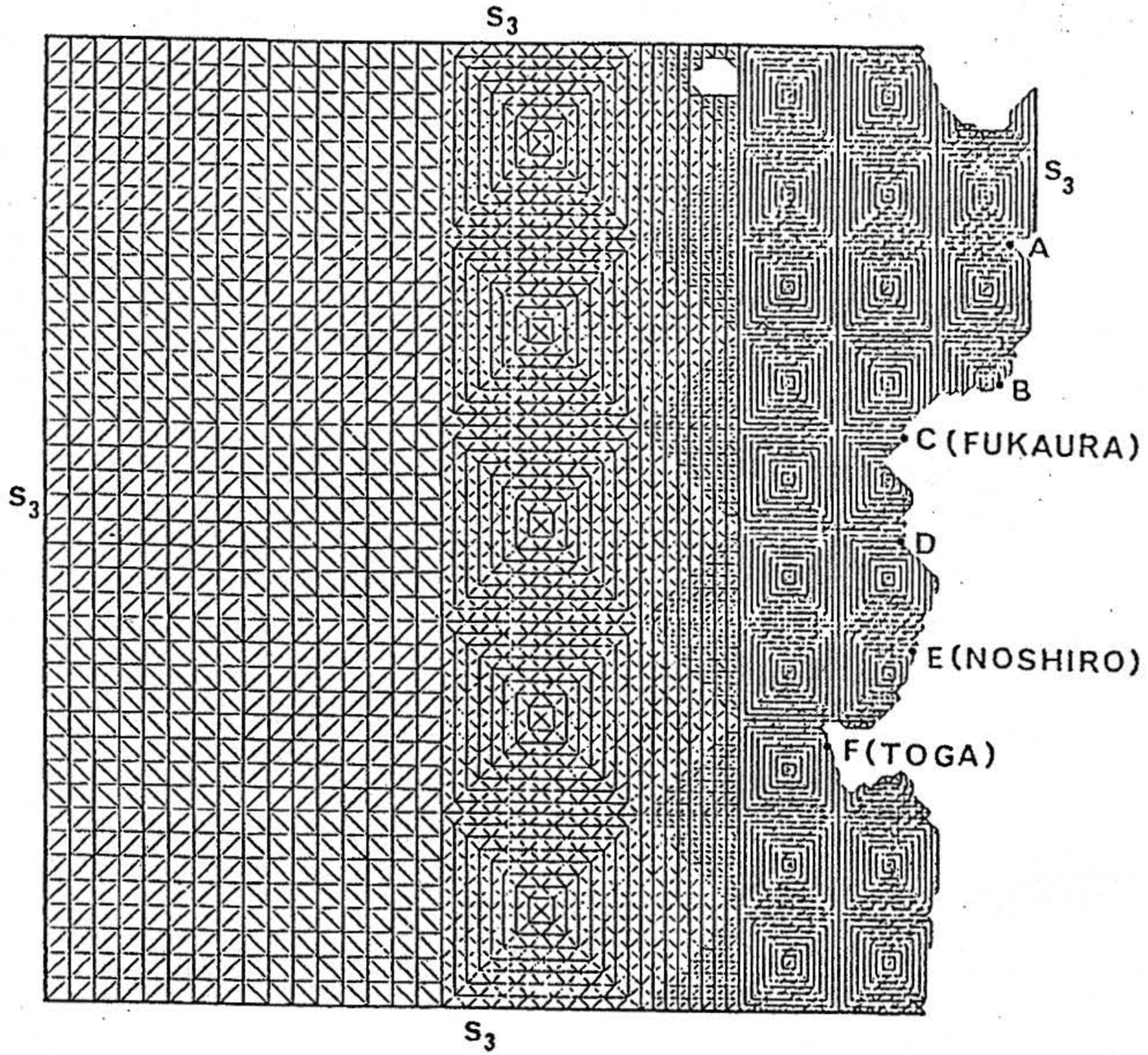


図 13 津波のシミュレーションの計算領域：メッシュ（上）と海底地形（下）¹⁰⁾
 Fig. 13 Computational Region of Simulation of Tsunami-Wave : Mesh
 Idealzation and Topography of Sea-Bed¹⁰⁾

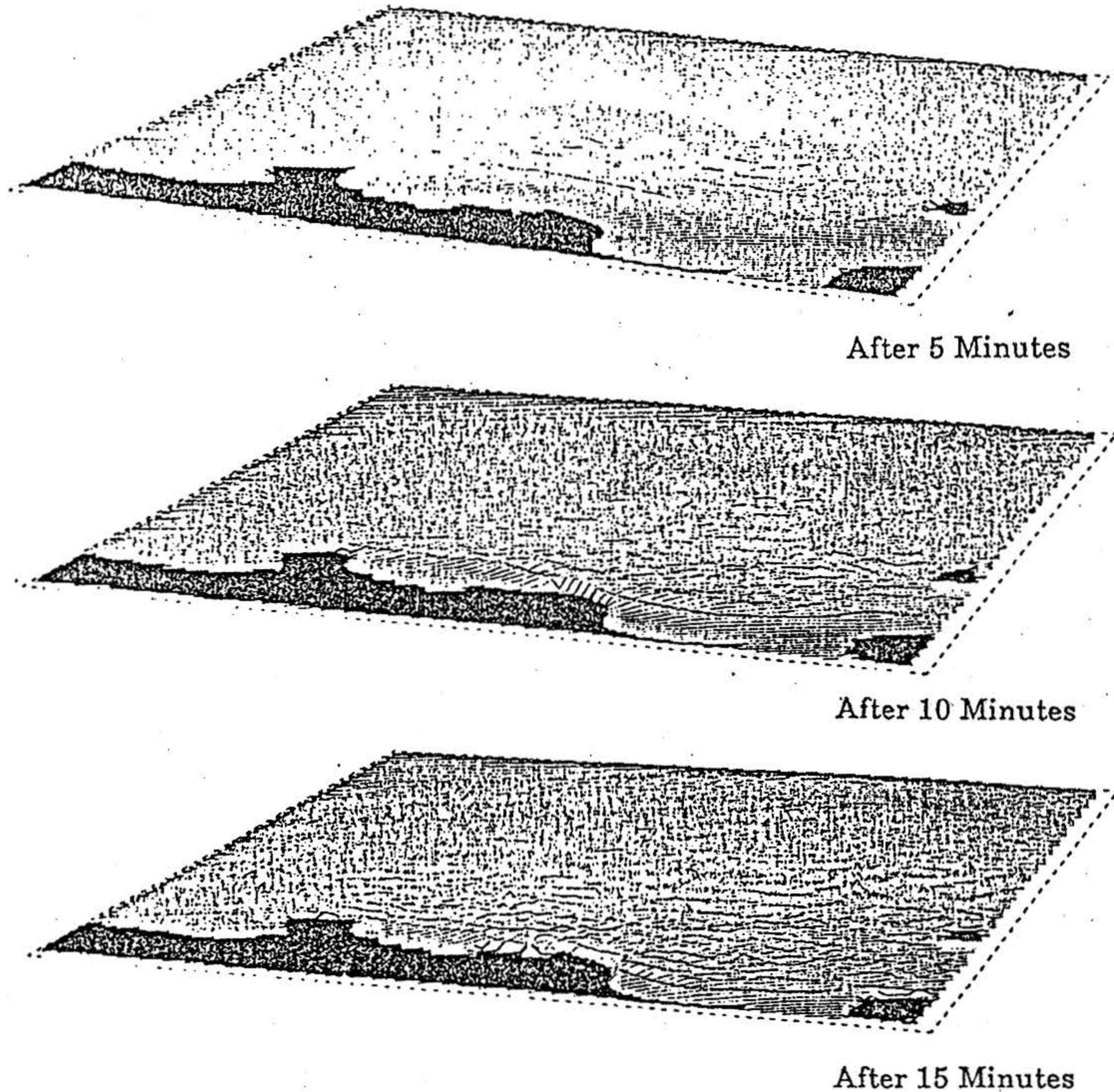


図 14 津波の伝播の計算結果¹⁰⁾
 Fig. 14 Propagation Profile of the Tsunami Waves¹⁰⁾

2.3 学術的な利用

数値シミュレーションの利点の一つに、得られるデータの多さがある。模型実験をする際には、例えばセンサの数や、センサの大きさなどの制約から十分な情報を得られない場合がある。図 15 は Baba et. al.¹¹⁾ による振動流中におかれた円柱からの剥離渦のシミュレーションである。図 15 は速度ベクトルを示したものであるが、実験では、これほどの多点の流速を同時に計測することは不可能であるし、また、このような円柱の近傍で流速を計測することも難しいと言える。

しかし、数値シミュレーションの場合、得られるデータは確かに多いが、その結果がどの程度信頼できるかどうかを、何らかの方法で判定する必要がある。というのは、支配方程式を差分展開す

る際に生じる誤差や物体表面の取り扱い方から生じる誤差などが計算結果に悪い影響を与え、計算結果が現象を忠実にシミュレートしていない場合があるからである。Baba et. al. による例（文献 11）は、この誤差をできる限り小さくするため、物体に適合した座標系を生成するなどさまざまな工夫をし、精度の向上に努めている。速度ベクトル図と実験とを比較することは困難なので、同一の手法によって一様流中の円柱の回りの圧力分布を計算し、これを実験と比較している（図 16）。レイノルズ数が実験と計算とで多少異なることを考慮すれば、比較的よく一致していると考えられる。図 17 は渦度の等高線図であるが、回転の方向が異なる渦どうしの複雑な運動が明らかになっている。

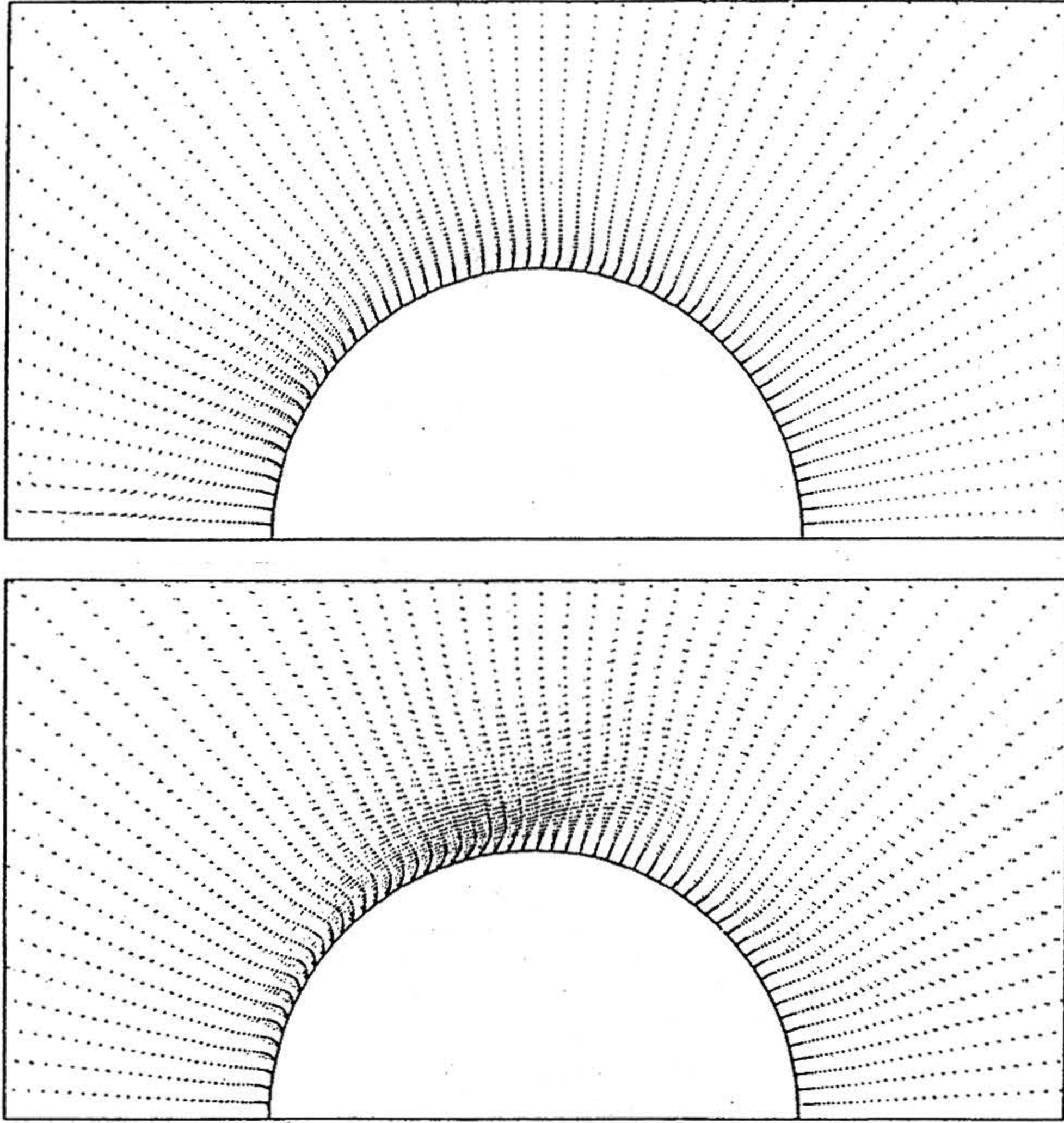


図 15 振動流中の円柱の周りの流れのシミュレーション：速度ベクトル図¹¹⁾
 Fig. 15 Computed Velocity Vector Field around the Circular Cylinder in an Oscillatory Flow¹¹⁾

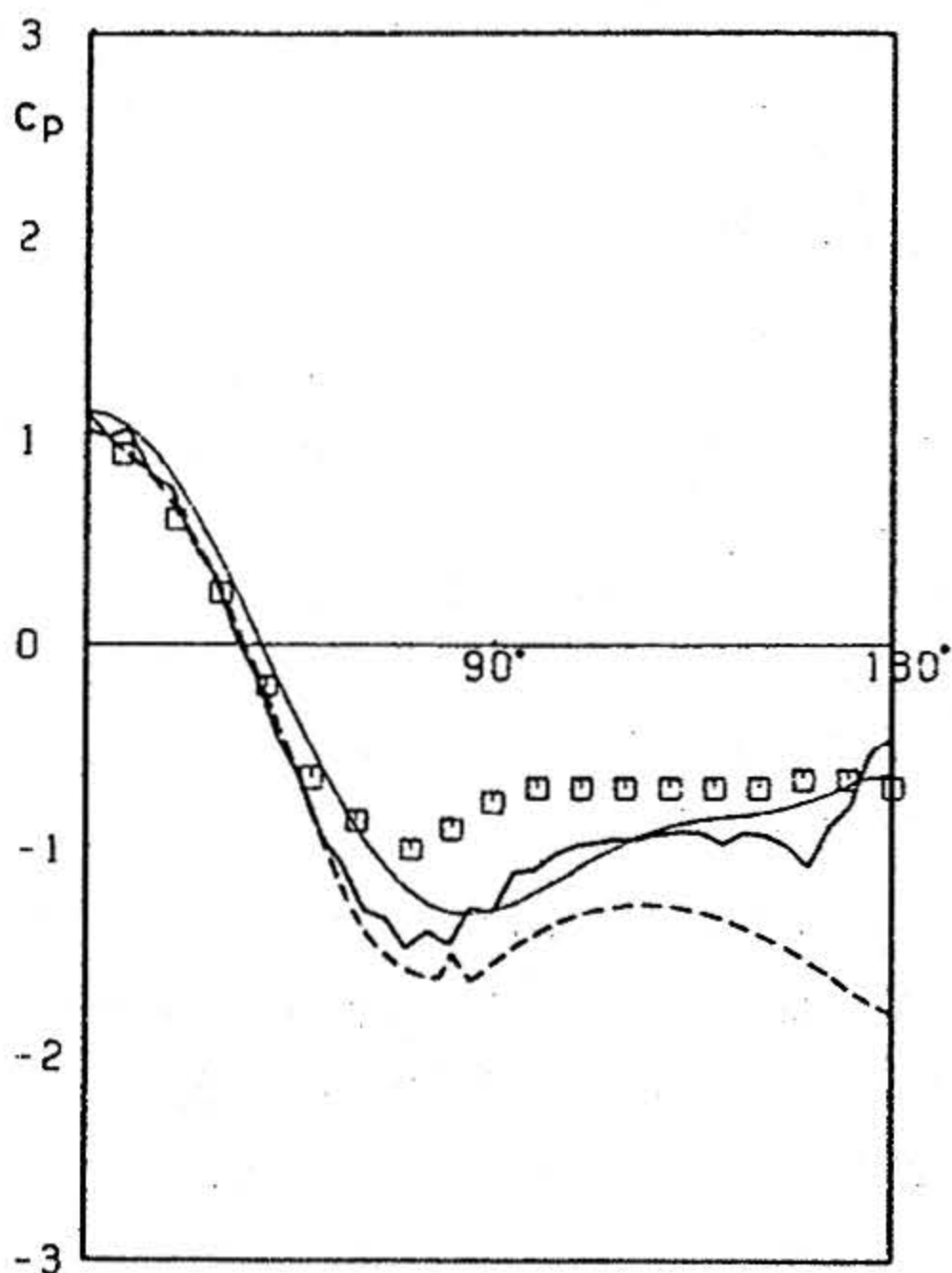


図 16 円柱回りの圧力分布¹¹⁾
 — $R_e = 1000$ の計算結果
 - - - $R_e = 100$ の計算結果
 - · - $R_e = 2000$ の計算結果 (Kawamura et. al.)
 □ 実験結果 $R_e = 2800$ (Goldstein)

Fig. 16 Pressure Distribution on a Circular Cylinder Advancing Steadily¹¹⁾

- Computed at $R_e = 1000$
- Computed at $R_e = 100$
- - - Computed at $R_e = 2000$ (Kawamura et. al.)
- Computed at $R_e = 2800$ (Goldstein)

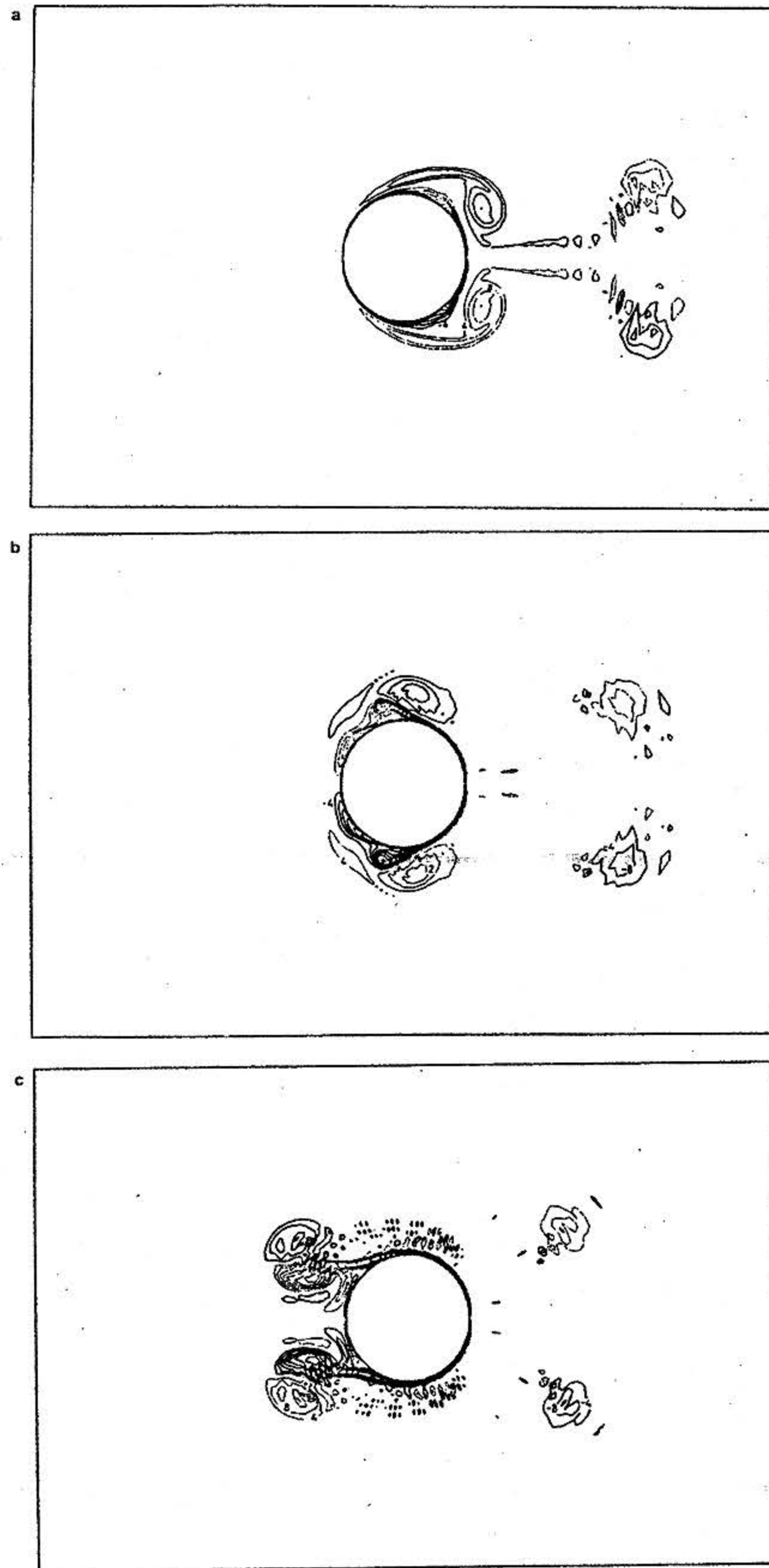


図 17 振動流中の円柱の周りの流れのシミュレーション：渦度の等高線図¹¹⁾
 Fig. 17 Contour Maps of Vorticity around the Circular Cylinder in an Oscillatory Flow¹¹⁾

図 18 は Miyata et. al.¹²⁾ によって行われた平板上の流れのシミュレーション結果である。この計算は、平板上の流れに急激な剪断が生じた場合、流れがその後どのように変化していくかを、普通の平板と流れ方向に極微小の溝（リブレットと呼ばれる）をもつ平板とで、比較したものである。リブレットは、摩擦抵抗を軽減させる（即ち普通の平板よりリブレットのある平板の方が摩擦抵抗が少ない）手法として知られているが、なぜ

摩擦抵抗が減るかについては明かではない。リブレットの大きさが 1 mm 以下と小さいこともあって、実験が非常に困難であるからである。図 18 は、流れ方向に軸を持つ渦度の等高線図である。この数値シミュレーションの結果、リブレットの存在によって、流れの 3 次元的な構造が規則的で強固なものとなって、そのため乱れが成長しにくくなるのではないかという推測がなされているが、この文献では実験との比較がなされていない。

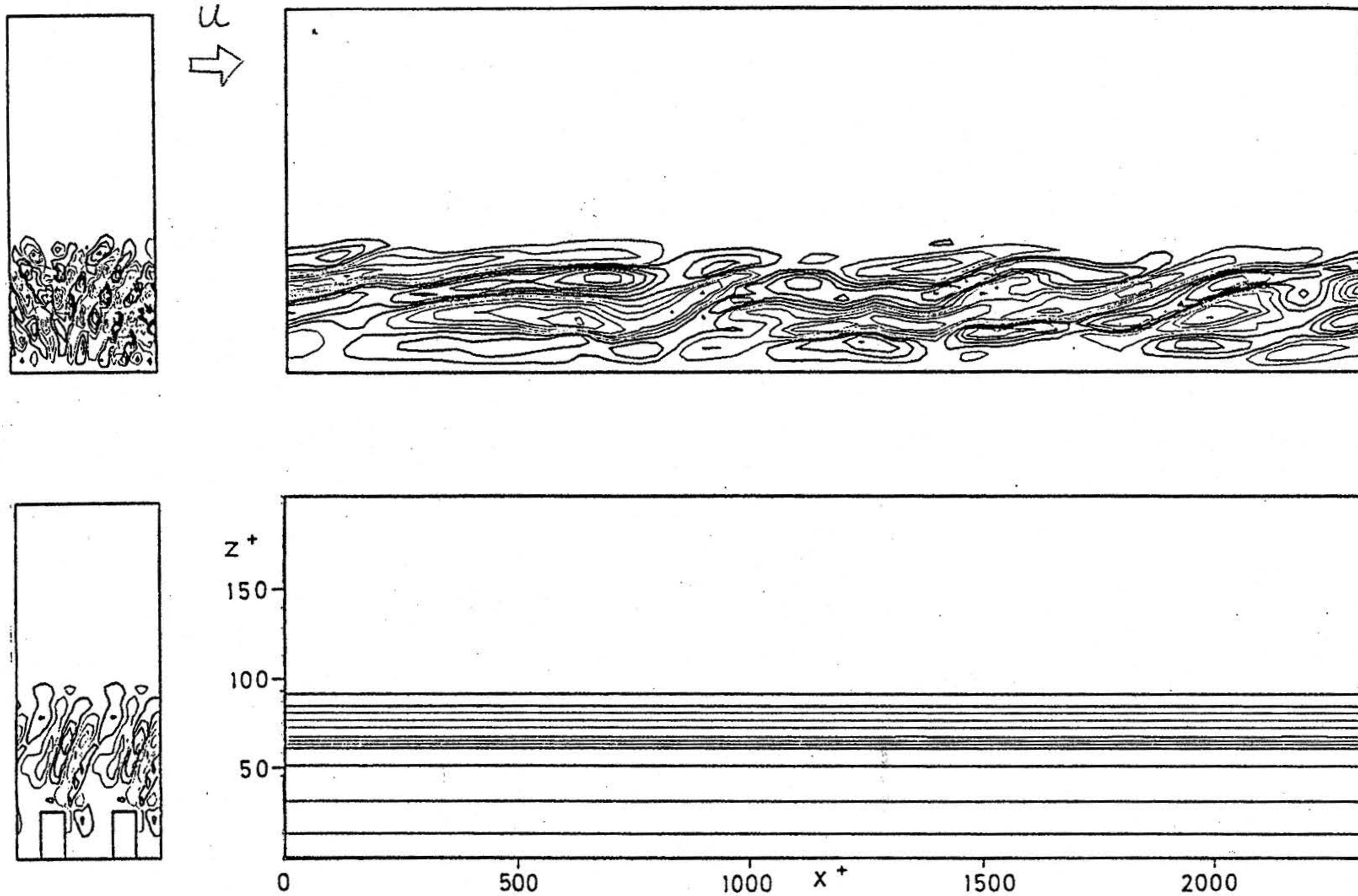


図 18 平板上の流れのシミュレーション：流れ方向に軸を持つ渦度の等高線図：
 リブレットなし（上）とリブレットあり（下）¹²⁾

Fig. 18 Comparison of Contour Map of Streamwise Vorticity¹²⁾

2.4 差分法の問題点

以上のような例の他にも、田村ら¹³⁾によるビル周りの風を予測するための計算や、Kubota et al.¹⁴⁾によるキャビテーションの発生をも含めた計算例などもあり、差分法を中心とする数値シミュレーションの適用範囲はたいへん広いが、この数値シミュレーション技術に全く問題がないわけではない。それは、数値計算の精度と安定性、汎用性、経済性にかかわる問題である。精度の良い計算を行おうとすると、プログラムが敏感となり、少しの計算条件の変更でも計算が発散する（正常に計算出来ない）ことがある。また、物体に適合した格子間隔のたいへん小さい格子系を生成して計算を行えば、確かに精度のよい計算ができる。しかし、その代償として、格子系の生成には多大な労力が必要で、さらに格子点数が多いので、長い計算時間を必要とする。学術的には、この方向が望ましいが、設計に応用するとなると、汎用性、経済性の面で好ましいとは言えない。確かに精度の面では劣るが、格子系の生成に労力が不要な矩形格子による計算でも、計算が安定で、しかも物体形状の入力のみで計算できるという単純さがあり、設計など定性的な比較が重要となる分野においては有力な方法である。このように、精度と安定性、汎用性、経済性は同時には満足させることは出来ない。どのような対象物で、どの程度の精度、どの程度の汎用性・経済性が必要とされるかは、その計算によってどのようなことをしたいかにより、それらのバランスを充分見極めて格子系の選択や差分展開法を考慮することが重要である。

また、未解決の問題の一つに乱流モデルがある。現実の流体現象は多くの場合乱流である。しかし、乱流のような微細な3次元構造を持つ現象を、差分による数値シミュレーションによって解析するためには、たいへん細かい格子によらなければならない。非常に長時間の計算時間を要する。乱流の構造を解明するという学術的目的から、約40万セルの格子系でチャンネルフローを解いた例¹⁵⁾もあるが、設計に応用するなどの観点に立てば、このように大量のセルに分割することは実際的ではない。そこで、このように細かいメッシュに分割せず、乱流による効果をモデル化して計算を行う方法が用いられている。しかし、乱流モデルには、

0方式モデル、2方程式モデル、SGSモデルなどいろいろなものが提案されているが、これらのモデルには前提条件や経験定数が含まれており、まだ完全に確立されたモデルとは言えない。¹⁶⁾

3 漂砂の数値シミュレーション

近年の沿岸海域の開発の活発化に伴い、設置される各種構造物も大型化してきた。そして、周辺海域への影響もより広域に及ぶようになり、その深刻さを増してきている。このため、より精度の高い予測手段が必要とされるようになってきている。そこで、近年進歩のめざましいコンピュータによる数値シミュレーションを用いた予測が試みられつつあるが、その概要について調査した。

3.1 数値予測モデルの種類

漂砂による海浜地形変形の数値シミュレーションは、大別して、汀線変化モデルと3次元海浜変形モデルに分けられる¹⁷⁾。

(1) 汀線変化モデル

汀線変化モデルは、海岸線の位置の変化を求めるものである。基本的には沿岸漂砂量の海岸線に沿った分布を求め、これをもとに海岸線の変形を予測する方法である。従って、漂砂量計算の前段階として必要となる波浪場を計算する際にも、海岸線に沿った碎波波高や波向に重点がおかれる。

汀線変化モデルは、実現象をかなり単純化しており、短時間のうちに計算結果を得ることができ、従って、長期間にわたる現象をシミュレートできるが、一般的に、計算の対象となる海域に設置された構造物が複雑な場合などでは信頼性がうすい。

なお、この汀線変化モデルに関しては、文献1)でも紹介されている。

(2) 3次元海浜変形モデル

対象海域全域にわたって波浪場や流場を計算し、それにもとづいた各計算点における局所的な漂砂量と移動方向を算定し、底質の保存式から海底地形の変形を予測するのが3次元海浜変形モデルである。この方法は原理的には、(1)の汀線変化モデルより汎用性が広いと言えるが、計算領域全体にわたって波浪場と流れ場を計算する必要もあり、計算に要する時間が汀線変化モデルに比べてたいへん長い。従って長期にわたる現象をシミュレートするには、現在の所不向きである。

3次元海浜変形モデルは、大きく分けて「波浪場の計算」、「海浜流の計算」、「海底地形変形の計算」の3つのパートから成り、図19に示すようなフローチャートに従って進められる¹⁷⁾。

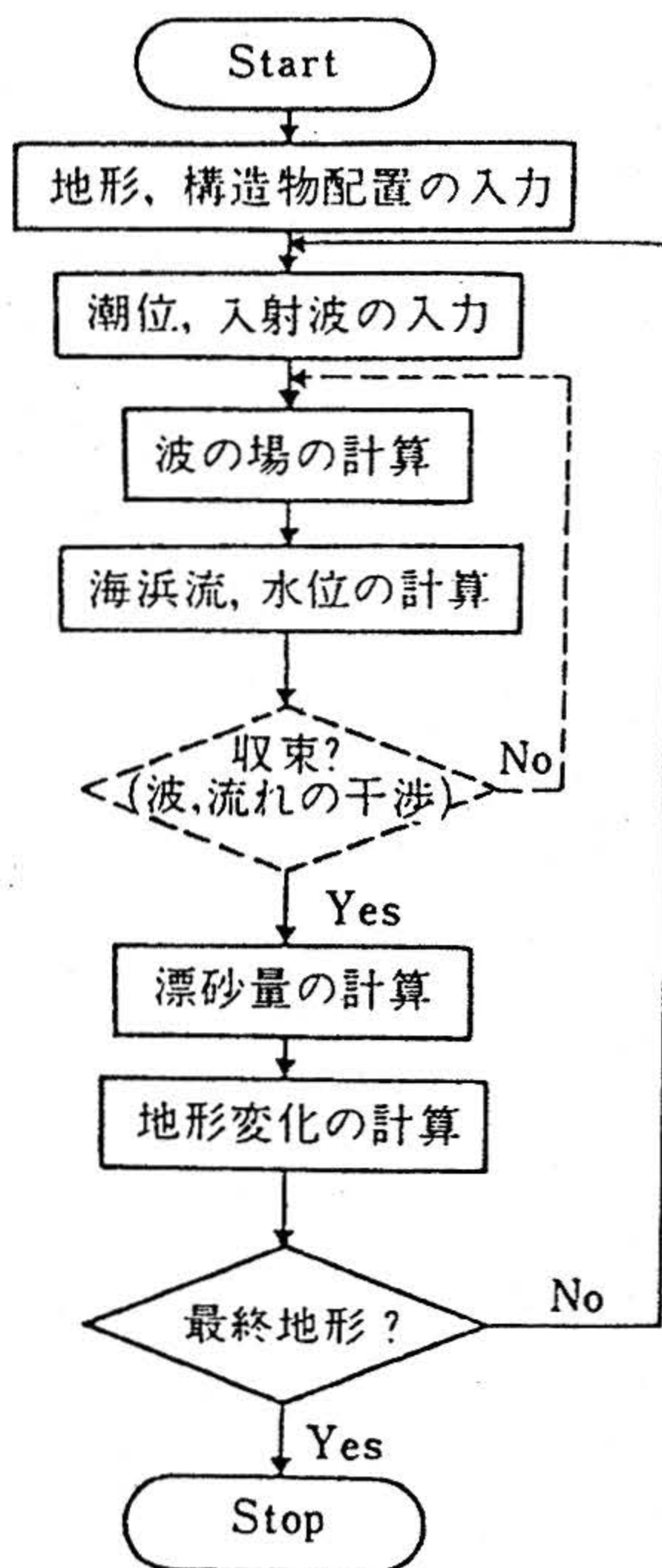


図19 3次元海浜変形モデルのフロー・チャート¹⁷⁾

Fig. 19 Flow Chart of 3 D-Seashore-Transformation Model¹⁷⁾

①波浪場の計算

地形、構造物の配置を入力し、潮位、入射波を入力する。これらから、波浪場を計算する。この波浪場の計算には、屈折、浅水変形、構造物による反射や回折、砕波変形などを考慮する必要がある。

またここで、海浜流計算に必要な Radiation Stress と、底面波動流速を計算する。

②海浜流場の計算

①で求めた Radiation Stress を条件として、平均流と平均水位に関する運動量方程式と連続の式を解き、流速と平均水位を求める。

ここで、海浜流場と波浪場は、相互に影響を及ぼし合っているため、この2つの計算を交互に繰り返して反復計算を行う必要がある。

③海底地形変形の計算

求められた波浪場と海浜流場、及び与えられた底質の条件などから、漂砂量算定式を通じて漂砂量分布を求め、底質量の保存則から地形変化を求める。

ここで、波浪場及び海浜流場と、この海底地形もまた相互に干渉しあっているため、①、②とこの海底地形変形の計算を交互に反復計算する必要がある。

以上が一般的な計算のながれである。

3.2 3次元海浜変形モデルの例

渡辺らは^{18), 19)}、波浪場の支配方程式として非定常緩勾配方程式²⁰⁾

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial t} + C^2 V \zeta + f_D Q &= 0 \\ \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{n} V \cdot (nQ) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned} V &= (\partial/\partial x, \partial/\partial y) \quad \zeta: \text{水面変位} \quad C: \text{波速} \\ Q &= (Q_x, Q_y): \text{線流量ベクトル} \\ Q_x &= \int_{-n}^0 u dz, \quad Q_y = \int_{-n}^0 v dz \\ n &= \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \\ k &: \text{波数} \quad h: \text{静水深} \\ f_D &= \alpha_D \tan \beta \sqrt{(g/h)(\dot{Q}/Q_r - 1)} \\ \dot{Q} &= \sqrt{\dot{Q}_x^2 + \dot{Q}_y^2}, \quad Q_r = r' \sqrt{g h^3} \\ \alpha_D, r' &: \text{定数} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

また、海浜流場の支配方程式として、平均流に関する連続の式

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial U(h+\bar{\zeta})}{\partial x} + \frac{\partial V(h+\bar{\zeta})}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

ζ : 平均水位の上昇量

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + F_x - M_x + R_x \\ + g \frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + F_y - M_y + R_y \\ + g \frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial x} = 0 \end{aligned} \right\} (4)$$

ここで、 F_x , F_y は摩擦項で、

$$\left. \begin{aligned} F_x = \frac{2f}{\pi(h+\bar{\xi})} \left[\left(w + \frac{\bar{u}^2}{w} \cos^2 \theta \right) U \right. \\ \left. + \frac{\bar{u}^2}{w} \sin \theta \cos \theta V \right] \\ F_y = \frac{2f}{\pi(h+\bar{\xi})} \left[\frac{\bar{u}^2}{w} \sin \theta \cos \theta U \right. \\ \left. + \left(w + \frac{\bar{u}^2}{w} \sin^2 \theta \right) V \right] \end{aligned} \right\} (5)$$

$$\left. \begin{aligned} w = \sqrt{U^2 + V^2 + \bar{u}^2 + 2W\bar{u}} \\ + \sqrt{U^2 + V^2 + \bar{u}^2 - 2W\bar{u}} / 2 \\ W = U \cos \theta + V \sin \theta, \quad \bar{u} = 2\hat{u}/\pi \\ \hat{u} = \omega_0 H/2 \sinh k(h+\bar{\xi}) \end{aligned} \right\} (6)$$

θ : 波向角 ω_0 : 入射波の角周波数
 H : 波高

また、 M_x , M_y は水平拡散項で、

$$\left. \begin{aligned} M_x = \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon \frac{\partial U}{\partial y} \right) \\ M_y = \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon \frac{\partial V}{\partial y} \right) \end{aligned} \right\} (7)$$

ϵ : 定数

R_x , R_y は Radiation Stress 項で、

$$\left. \begin{aligned} R_x = \frac{1}{\rho(h+\bar{\xi})} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) \\ R_y = \frac{1}{\rho(h+\bar{\xi})} \left(\frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) \end{aligned} \right\} (8)$$

(S_{xx} , S_{yy} 等については文献 20) 参照)

さらに、漂砂量算定式として、流れによる漂砂量 q_c と波による漂砂量 q_w の和を考え、

$$q = q_c + q_w \quad (9)$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned} q_c = A_c \frac{(\tau - \tau_{cr})U}{\rho g} \\ q_w = F_D A_w \frac{(\tau - \tau_{cr})u_b}{\rho g} \end{aligned} \right\} (10)$$

A_c, A_w : 定数 τ : 波・流れ共存下での底面摩擦応力

τ_{cr} : 底質の移動限界摩擦応力

U : 海浜流速 u_b : 軌道流速振幅

F_D : 漂砂移動方向関数

また、底面高変化の算定式として、海底勾配の影響も考慮した

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial z_b}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} \left(q_x - \epsilon_s |q_x| \frac{\partial z_b}{\partial x} \right) \\ - \frac{\partial}{\partial y} \left(q_y - \epsilon_s |q_y| \frac{\partial z_b}{\partial y} \right) \end{aligned} \right\} (11)$$

を解き、3次元海浜変形の計算を行った。

図20はその結果であり、5時間5分後に相当する時間における砕波線の数値シミュレーション結果と実験結果との比較である。さらに、図21は6時間55分後の等深線図である。シミュレーション結果と実験値が比較的よく一致しており、本手法が有効であることを示していると思われる。

3次元海浜変形の計算例としては、この他に、山口ら²¹⁾によるものがあるが(図22)全体としてはまだまだ少なく、その手法の開発は端についたばかりである。

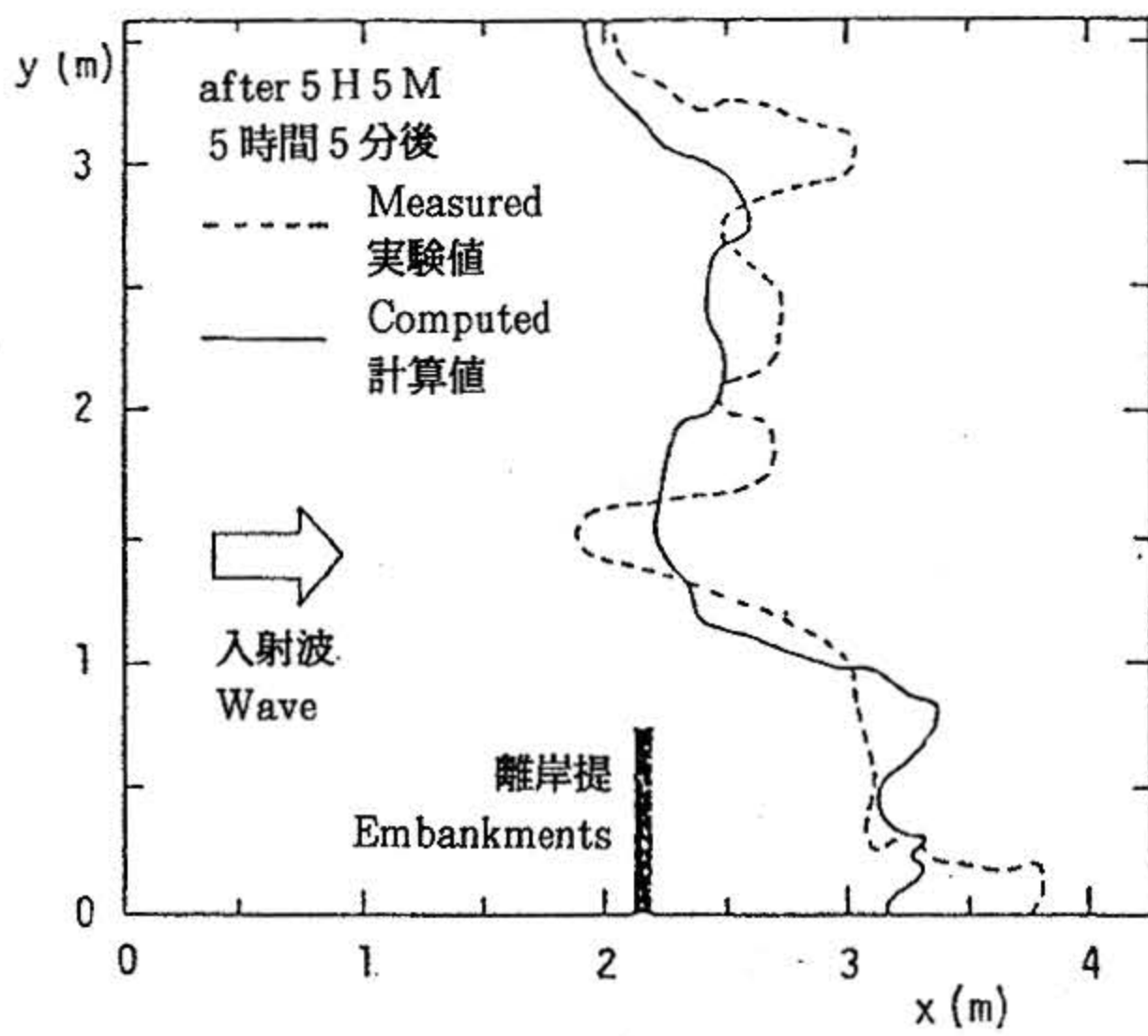


図20 3次元海浜変形モデルによるシミュレーション：砕波線の比較²⁰⁾
Fig. 20 Comparison of Computed and Measured Wave-Bearing line²⁰⁾

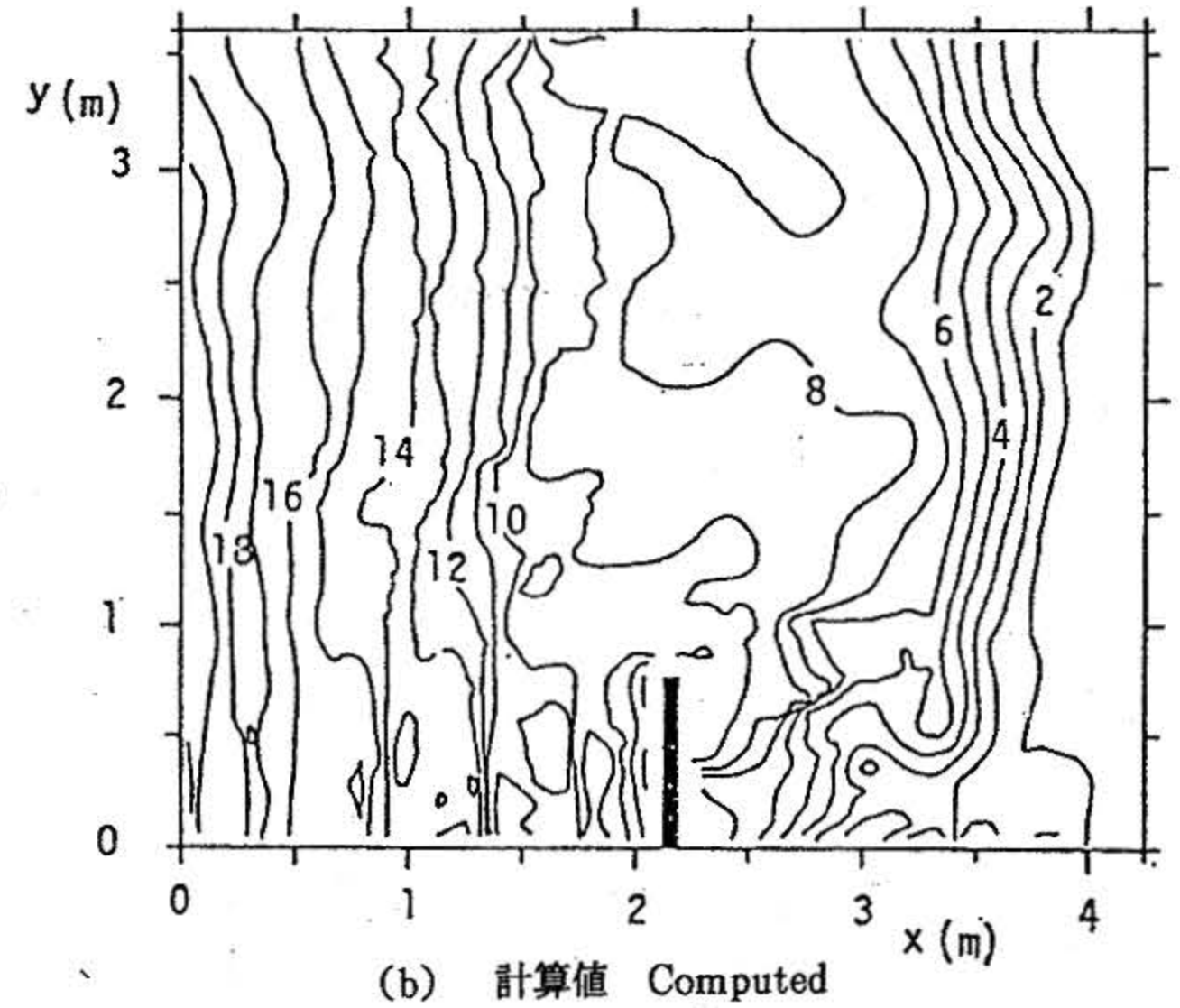
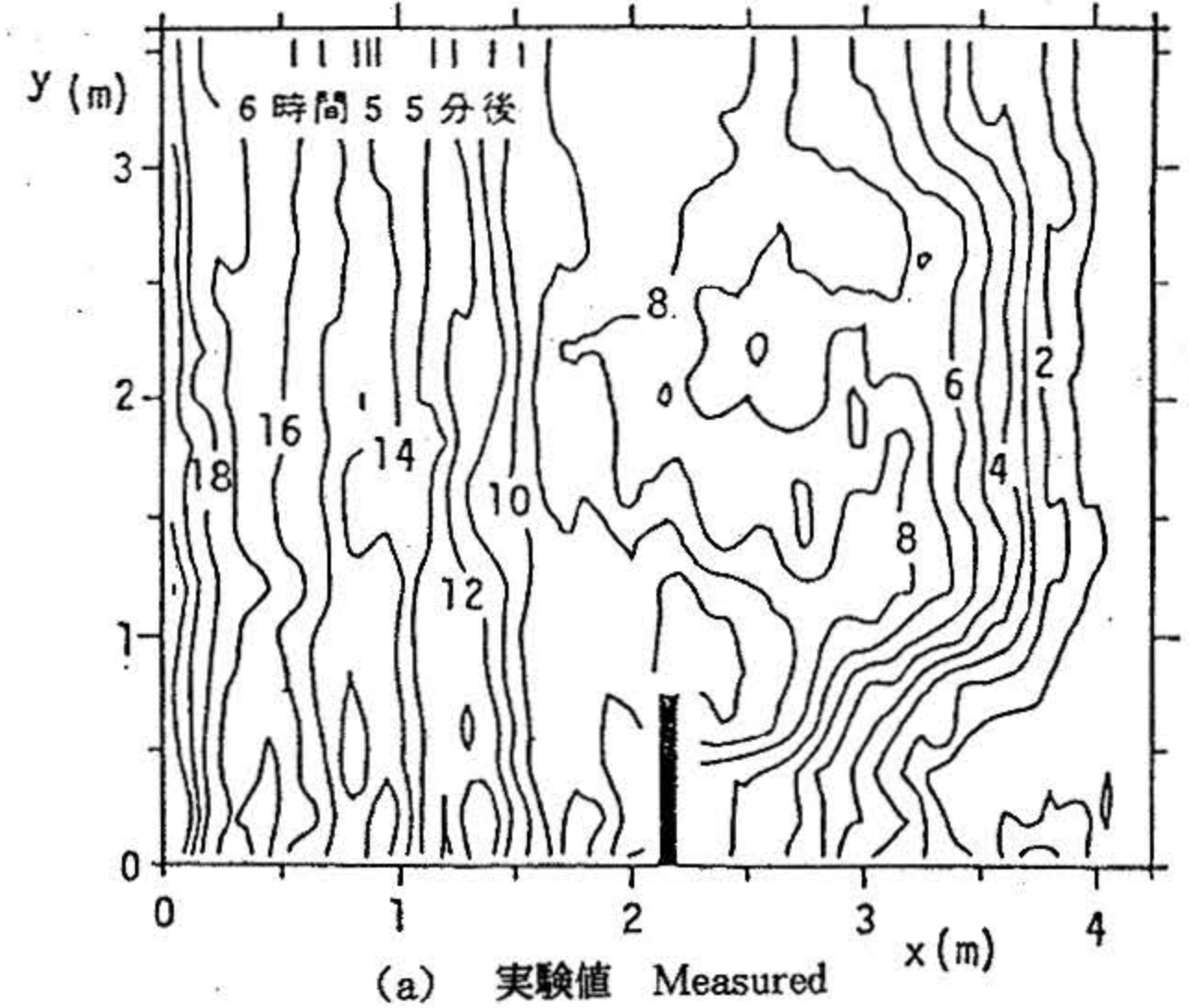


図21 3次元海浜変形モデルによるシミュレーション：等深線図の比較²⁰⁾
Fig. 21 Comparison of Contour Map of Measured depth (above) and computed depth (below)²⁰⁾

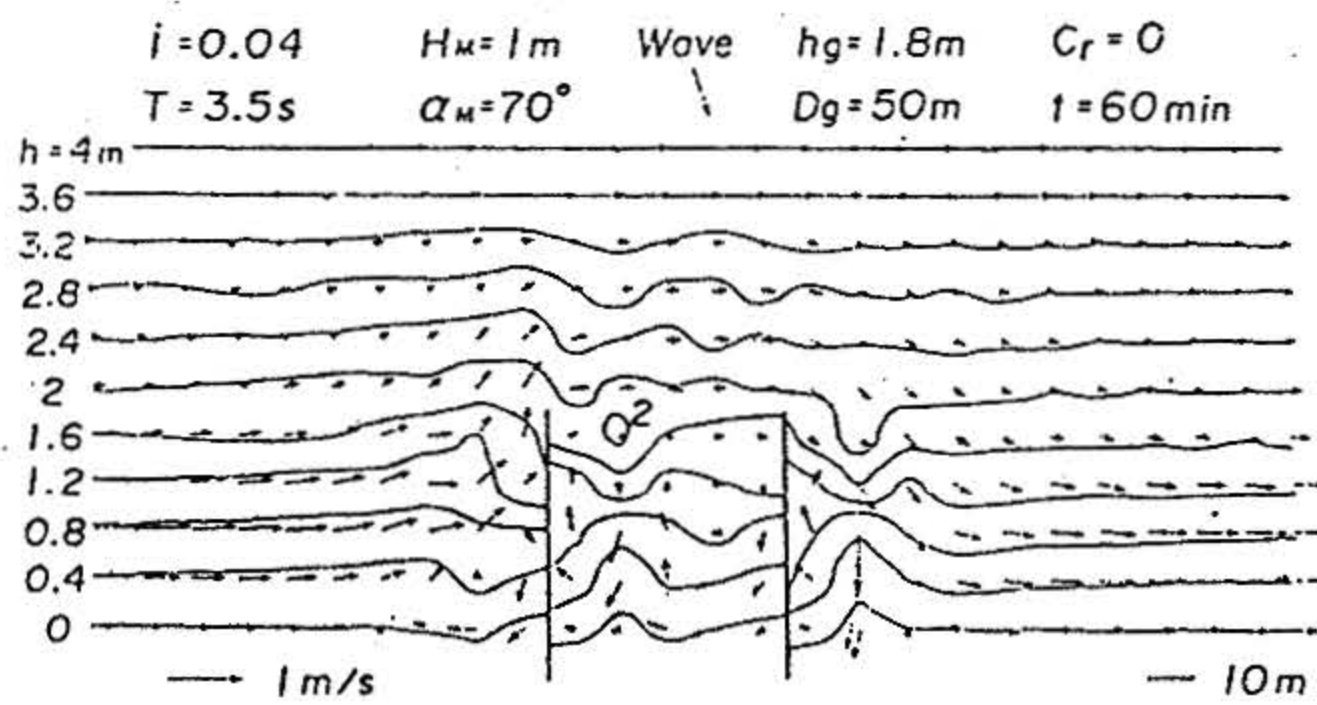


図22 3次元海浜変形モデルによるシミュレーション：二本の突堤による流れと地形の変化²¹⁾
Fig. 22 Contour Map of Computed Depth and Velocity Vector Field by Two Embankments²¹⁾

4 今後の研究の方針

3次元海浜変形モデルの手法を確立するために重要な要素は、波浪場、海浜流場の解析手法の検討もさることながら、適切な漂砂量算定法を確立することである。

一般に、砂の移動は、図23に示される様な形で行われる¹⁷⁾。振動流水槽などで、底面の流速を大きくし、底面の摩擦応力を徐々に大きくしてゆくと、

- a) 底面は平坦で、底質は掃流状態で移動する。
- b) 底面に砂れんが形成され、砂れん近傍に発生する渦の作用によって底質が浮遊状態で移動

する。

- c) 底面摩擦力が大きい状態で砂れんが崩壊し、砂は層状態で表面から数層にわたって移動する。

というようにな移動形態をとる。

このように複雑な移動形態を示すため、漂砂量を適切かつ単純に算定するモデルを作ることは大変難しい。

従来の任意方向の漂砂量算定法をまとめると表1の様になる¹⁷⁾。

今後の研究の方針として、この漂砂の移動に関する新しいモデルを考え、これを3次元海浜変形

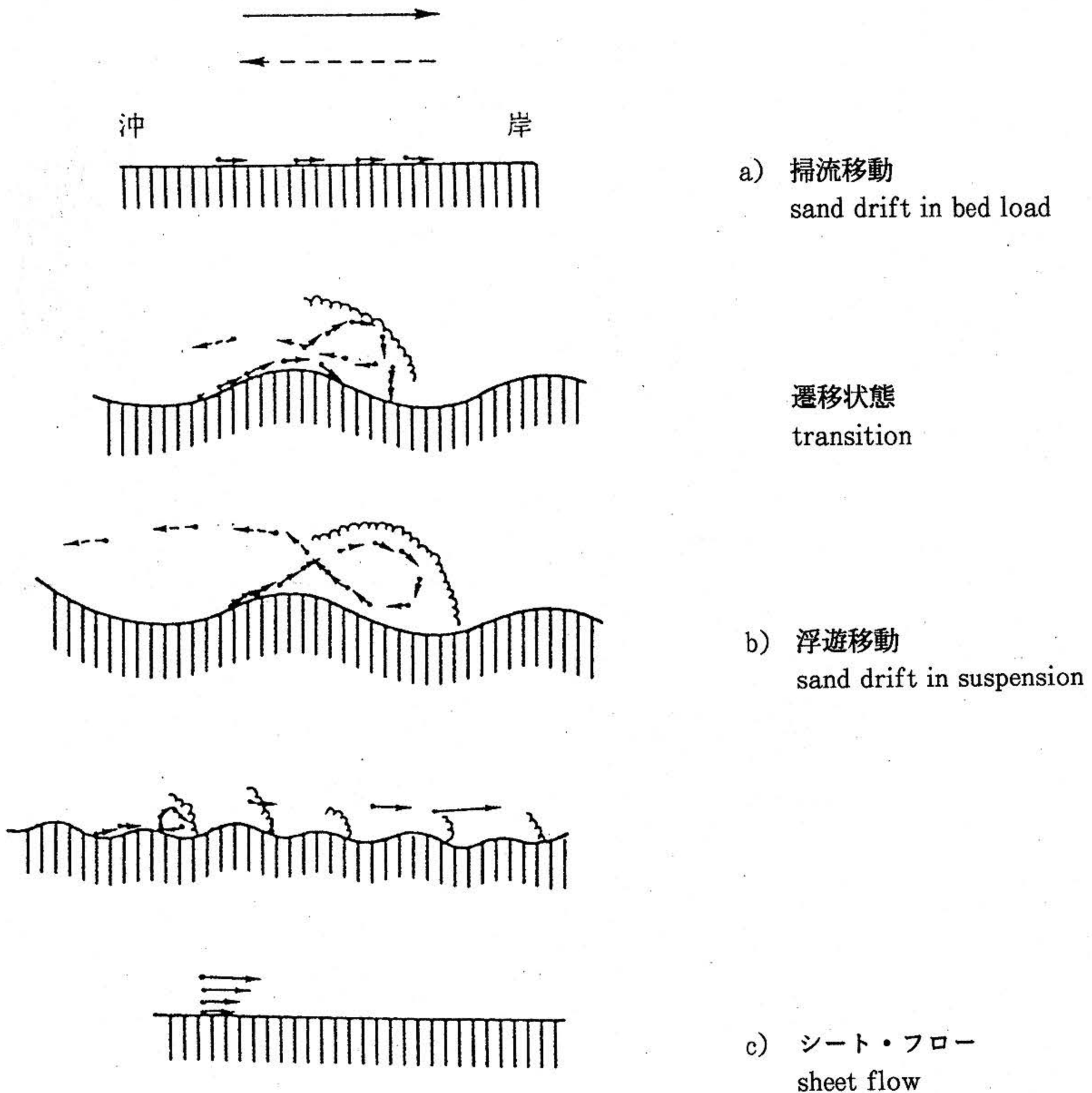


図23 底質の移動機構¹⁷⁾
Fig. 23 Pattern of sand-drift¹⁷⁾

表 1 波と流れの共存場における任意方向の漂砂量算定式¹⁷⁾
 Table 1 Expressions of the mass of drifting sand on flow and wave field¹⁷⁾

提案者	底面付近の流速あるいは底面せん断応力		波のエネルギー または波高	係数値 (漂砂量の単位)	検 証 デ ー タ			適用域	備 考																																				
	底面付近の流速	底面せん断応力			粒径(mm)	比重	外力の大きさ			底面地形																																			
Willis [1978]	$q = \rho g V X$ $X = \frac{s'd}{h} \left(\frac{V}{u_{ic}^*} \right)^{n'} K \left(\frac{F_{gr}}{A} - 1 \right)^{m'}$ (1) $F_{gr} = \frac{u_{fs}^{*n'} \cdot u_{cg}^{*1-n'}}{\sqrt{s d g}}$, 粗粒子 $n' = 0$ 細粒子 $n' = 1$ $u_{ic}^{*2} = \frac{V^2}{C_h^2} + W_c^2 \frac{f_w}{4} u^2$				室内実験 (移動限界に関する実験から係数 W_c を決定したが、 漂砂量については検証されていない。)			Ackers・White [1973] が一 方向流に関して示した式(1), (3)を海岸の漂砂現象に適用 するために、砂の動き易さを 示す F_{gr} の表現を工夫した。																																					
	粗粒砂のとき (i=c) $C_h = 5.75 \log \frac{11h}{d}$ 細粒砂のとき (i=f) $C_h = 5.75 \log \frac{11h}{\eta}$ (3)			$w_c = \sqrt{0.6}$																																									
渡辺 [1981]	流れによる漂砂量 $q_x = F_c V_x$ $q_y = F_c V_y$ $F_c = A(f_c V^2 + u_*^2 - u_{*c}^2)/g$ 波の軌道運動に伴う漂砂量 $q_x = F_w u_* \cos \alpha$ $q_y = F_w u_* \sin \alpha$ $F_w = B(u_*^2 - u_{*c}^2)(1 + \alpha r)/g$			$A = 1$ $B = -5$ ($\text{cm}^3/\text{cm/s}$)	利穂ら [1981] の実験結果を参考にして、海浜変形モ デル [渡辺, 1981] において漂砂量式の係数を便宜的 に決定した。			波と流れの計算結果から容易 に地形変化が計算でき安定な 解を与える漂砂量式を提案し た。 流れによる漂砂と波の軌道運 動による漂砂を分離して扱う ことにより現象が単純化され、 従来の研究成果を取り組むこ とが容易である。																																					
清水ら [1983]	波の進行方向成分 $q_w = A(q'_{on} t_1 - q'_{off} t_2)/T$ $q' = F \bar{u}_w$ $F = B(\tau_m - \tau_c)/\rho g$ 波の進行方向と直角な成分 $q_n = (F_{on} t_1 + F_{off} t_2) \bar{u}_n / T$			$A = 1 \text{ or } -1$ $B = 0.3$ ($\text{cm}^3/\text{cm/s}$)	室内実験 Sawaragi・Deguchi [1978] の室内実験データを利 用した。	内,外		漂砂量を波の進行方向と、そ れと直角な方向に分けて表現 した。底面せん断応力 τ は、 田中・首藤 [1981] の理論を 用いて計算した。																																					
<table border="0"> <tr> <td>q : 漂砂量</td> <td>u_{cg}^* : 粗粒子に対する摩擦速度</td> <td>A, K, n', m' : 粒径の関数 [Ackers・White, 1973]</td> <td>r : 海底面縦断プロファイルの波向き方向 2 次微係数</td> </tr> <tr> <td>V : 定常流速</td> <td>u_{ic}^* : 細粒子</td> <td>W_c^2 : 補正係数 (= 0.6)</td> <td>α' : 定数</td> </tr> <tr> <td>u : 波の軌道流速</td> <td>u_* : 波の軌道運動</td> <td>d : 底質の粒径</td> <td>αr はプロファイル中の凹凸の極度な増大を防ぐ</td> </tr> <tr> <td>h : 水深</td> <td>u_{*c} : 移動限界</td> <td>s : 水中比重</td> <td>T : 底面流速変動 u の周期</td> </tr> <tr> <td>α : 波向</td> <td>F_{gr} : 底質の動き易さを示す係数</td> <td>s' : 空中比重</td> <td>t_1 : 1 周期内で u が波の進行方向である時間</td> </tr> <tr> <td>添字 x, y : 水平面内の直行座標の 各方向成分を表わす</td> <td>f_c : 定常流速に対する摩擦係数</td> <td>θ : 重力加速度</td> <td>t_2 : 波の進行方向に直角である時間</td> </tr> <tr> <td></td> <td>f_w : 波の軌道流速</td> <td>η : 砂れんの高さ</td> <td>添字 on : 岸向き流速時</td> </tr> <tr> <td></td> <td>C_h : 無次元 Chézy 係数</td> <td></td> <td>添字 off : 沖向き流速時</td> </tr> <tr> <td></td> <td>A, B : 係数</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>										q : 漂砂量	u_{cg}^* : 粗粒子に対する摩擦速度	A, K, n', m' : 粒径の関数 [Ackers・White, 1973]	r : 海底面縦断プロファイルの波向き方向 2 次微係数	V : 定常流速	u_{ic}^* : 細粒子	W_c^2 : 補正係数 (= 0.6)	α' : 定数	u : 波の軌道流速	u_* : 波の軌道運動	d : 底質の粒径	$\alpha r $ はプロファイル中の凹凸の極度な増大を防ぐ	h : 水深	u_{*c} : 移動限界	s : 水中比重	T : 底面流速変動 u の周期	α : 波向	F_{gr} : 底質の動き易さを示す係数	s' : 空中比重	t_1 : 1 周期内で u が波の進行方向である時間	添字 x, y : 水平面内の直行座標の 各方向成分を表わす	f_c : 定常流速に対する摩擦係数	θ : 重力加速度	t_2 : 波の進行方向に直角である時間		f_w : 波の軌道流速	η : 砂れんの高さ	添字 on : 岸向き流速時		C_h : 無次元 Chézy 係数		添字 off : 沖向き流速時		A, B : 係数		
q : 漂砂量	u_{cg}^* : 粗粒子に対する摩擦速度	A, K, n', m' : 粒径の関数 [Ackers・White, 1973]	r : 海底面縦断プロファイルの波向き方向 2 次微係数																																										
V : 定常流速	u_{ic}^* : 細粒子	W_c^2 : 補正係数 (= 0.6)	α' : 定数																																										
u : 波の軌道流速	u_* : 波の軌道運動	d : 底質の粒径	$\alpha r $ はプロファイル中の凹凸の極度な増大を防ぐ																																										
h : 水深	u_{*c} : 移動限界	s : 水中比重	T : 底面流速変動 u の周期																																										
α : 波向	F_{gr} : 底質の動き易さを示す係数	s' : 空中比重	t_1 : 1 周期内で u が波の進行方向である時間																																										
添字 x, y : 水平面内の直行座標の 各方向成分を表わす	f_c : 定常流速に対する摩擦係数	θ : 重力加速度	t_2 : 波の進行方向に直角である時間																																										
	f_w : 波の軌道流速	η : 砂れんの高さ	添字 on : 岸向き流速時																																										
	C_h : 無次元 Chézy 係数		添字 off : 沖向き流速時																																										
	A, B : 係数																																												

に導入することを目標とする。その指針としては、砂層をある粘度をもつ流体と仮定し、砂と流れの関係を多層流としてとらえていくという方向で検討している。砂をある粘度をもつニュートン流体と見なして解析する手法は、榎木ら²²⁾、灘岡ら²³⁾にある。実際の現象からはかなりの簡略化となるが、底質粒子が底質の濃度によって動きやすくなるという現象をシンプルな形で取り込んだものとなっている²³⁾。砂の運動を、

- ①海底砂層は μ_s という仮想的な粘性係数をもつニュートン流体とする。
- ②砂層はその上部の流体運動による境界剪断力及び圧力勾配によって移動する。

と仮定し、砂と水を多層流としてとらえて計算することにより、砂と水の境界が水波問題で言うところの自由表面と似た取り扱いができ、底地形の変形を自由表面の変形としてとらえられる可能性がある。

ころの自由表面と似た取り扱いができ、底地形の変形を自由表面の変形としてとらえられる可能性がある。

Miyata et. al.²⁴⁾は、進行する角柱によって生じる波を、空気と水の二層流の中を角柱が進行するととらえて数値計算を行い、3次元の碎波のシミュレーションに成功している。(図24)このなかで、Miyata et. al. は、砂層をレイノルズ数100の流体と仮定し、静止した砂の上を0.5m/sの水が流れる場合の角柱のまわりの洗掘をシミュレートしている。(図25)この手法に、砂の粘度や、あるいは砂の移動限界摩擦速度など、砂の物性に関する考察を加えることで、新たな海浜変形モデルと開発することが可能と思われる。

まず、第1段階として、振動流中の砂の移動を考える。図22において掃流状態(a)から砂れ

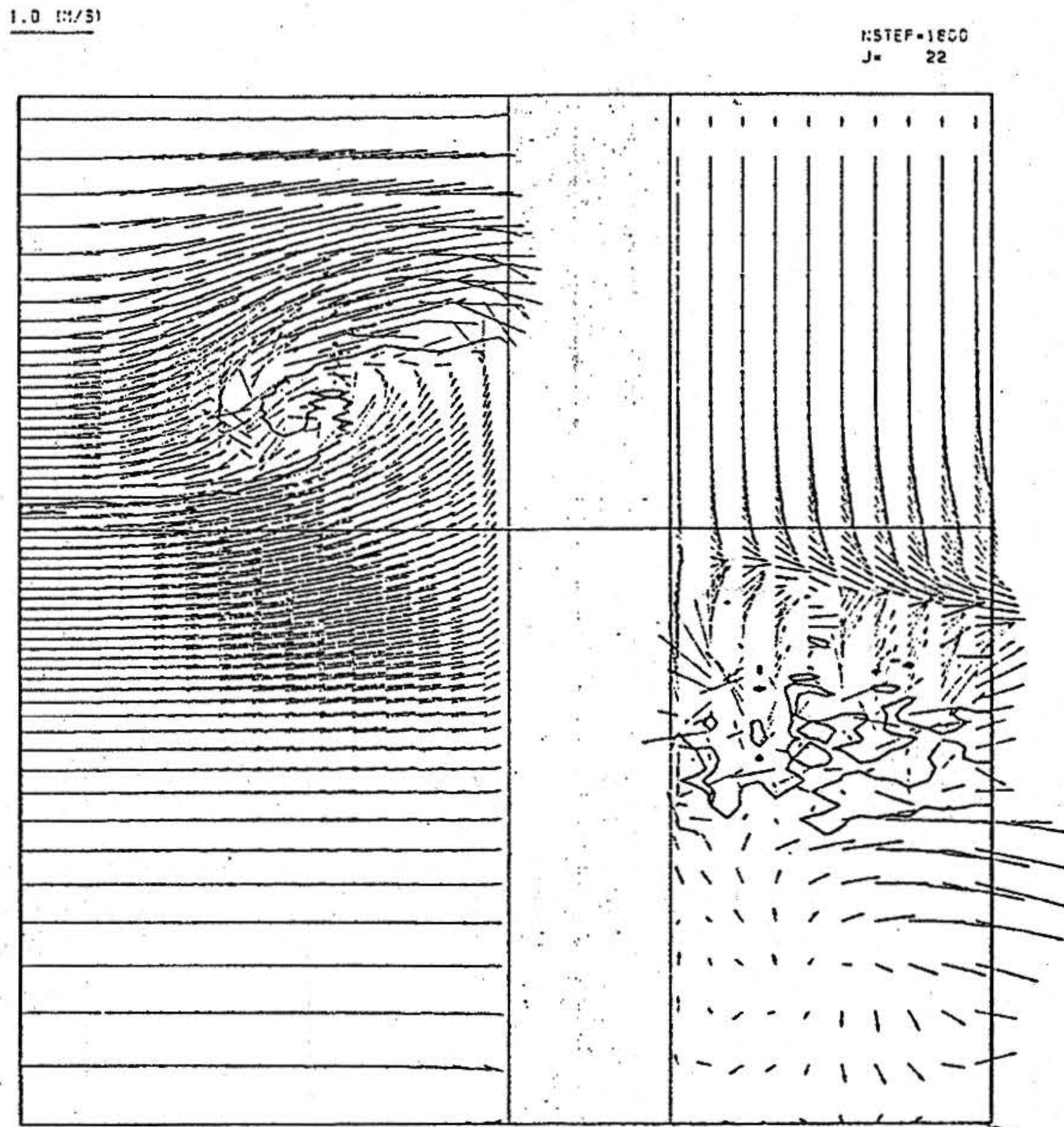


図 24 進行する角柱によって生じる波と流れのシミュレーション：波形とベクトル図²⁴⁾

Fig. 24 Computed Wave Profile and Velocity Vector Field by Advancing Rectangular Cylinder²⁴⁾

んの形成 (b), 消滅 (c) までをシミュレートすることを検討した。これにより, 新たな漂砂の移動・地形変形モデルを考える。その後, 波浪場, 海浜流場のシミュレーションを行い, これに新たなモデルを応用して局所洗掘や, 比較的広い範囲の海底地形への適用を検討した。

また, この方法は, 単に漂砂の問題のみにとどまらず, 懸濁物の拡散や, シルトなどの底泥の運動と流れの関係などの数値シミュレーションにも拡張が可能で, 環境問題への応用も可能であると考えられることから, 将来性もあると思われる。

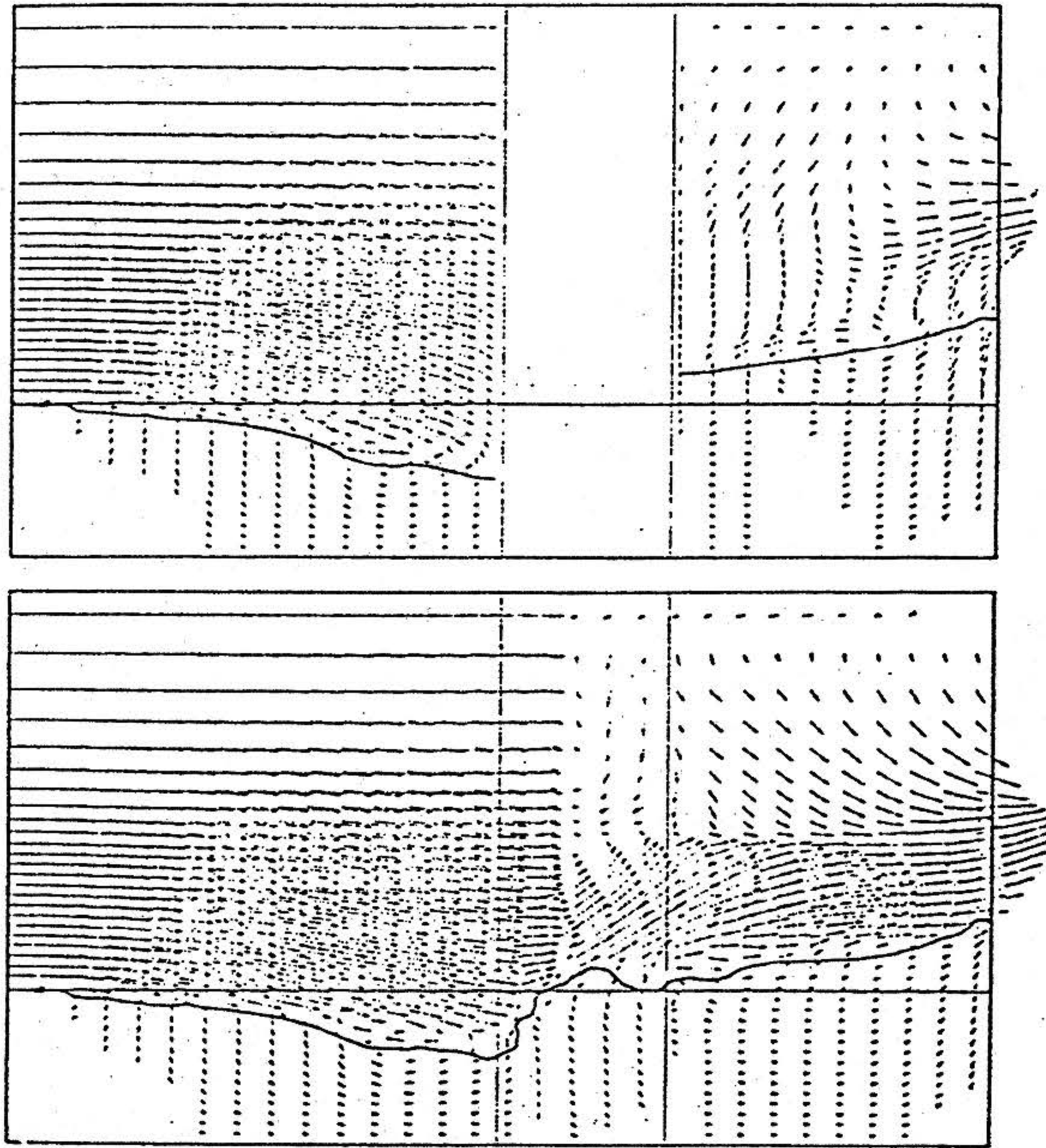


図 25 粘性の異なる2つの流体の流れのシミュレーション: 境界の形状と速度ベクトル図²⁴⁾

Fig. 25 Interface Profile and Velocity Vector Field of Two-Layer Flow²⁴⁾

参考文献

- 1) 本多牧生, 續辰之介, 工藤君明: 没水平板設置予定海域の特性 — その2 漂砂評価手法の現状と漂砂調査結果について, 海洋科学技術センター試験研究報告 第22巻 pp203-231, (1989)
- 2) H. Miyata and T. Inui: Nonlinear Ship Waves, Advances in Applied Mechanics, Vol. 24, pp215-288, (1984)
- 3) H. Miyata, S. Nishimura and A. Masuko: Finite Difference Simulation of Nonlinear Waves Generated by Ships of Arbitrary Three-Dimensional Configuration, J. Computational Physics, Vol. 60, pp391-436, (1985)
- 4) H. Miyata and S. Nishimura: Finite-difference simulation of nonlinear shipwaves, J. Fluid Mech., Vol. 157, pp327-357, (1985)
- 5) H. Miyata, T. Sato and N. Baba: Difference Solution of a Viscous Flow with Free-Surface Wave about an Advancing Ship, J. Computational Physics, Vol. 72, pp393-421, (1987)
- 6) 谷口伸行: 自動車周り流れの乱流解析, 東大機械工学研究報告, 第21巻, pp89-90, (1986)
- 7) H. Miyata: Finite-Difference Simulation of Breaking Waves, J. Computational Physics, Vol. 65, pp179-214
- 8) H. Miyata, H. Kajitani, M. Zhu, T. Kawano and M. Takai: Numerical Study of Some Wave-Breaking Problems by a Finite-Difference Method, J. Kansai Soc. Naval Architects, No. 207, pp11-23, (1987)
- 9) 高梨和光, 清川哲志: 有限要素法による津波波動シミュレーション, 清水建設研究報告 第41号, pp81-89, (1985)
- 10) W. Takanashi: Simulation Analysis of Marine Structures Subjected to Tsunami Waves, Ocean Space Utilization'85, pp217-224, (1985)
- 11) N. Baba and H. Miyata: Higher-Order Accurate Difference Solution of Vortex Generation from a Circular Cylinder in an Oscillatory Flow, J. Computational Physics, Vol. 69, pp362-396, (1987)
- 12) H. Miyata and T. Kawano: Numerical Simulation of the Pseudo-Physical Transition to a Suddenly Stopped Flat-Plate with and without Riblets, J. Society of Naval Architects of Japan, Vol. 165, pp17-28 (1989)
- 13) 田村哲郎, 白山晋, 桑原邦郎: 立方体周辺における風の流れおよび風圧力の直接シミュレーション, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), pp19-20, (1986)
- 14) A. Kubota, H. Kato and H. Yamaguchi: Finite Difference Analysis of Unsteady Cavitation, Proc. 5th Int. Conf. on Numerical Ship Hydrodynamics, pp472-487, (1989)
- 15) J. Kim, P. Moin and R. Moser: Turbulence statistics in fully developed channel flow at low Reynolds number, J. Fluid Mechanics, Vol. 177, pp133-166, (1987)
- 16) 日本流体力学会編: 流体力学ハンドブック — 第5章 乱流 —, 丸善, pp176-185 (1987)
- 17) 本間仁監修, 堀川清司編: 海岸環境工学, 東大出版会, (1985)
- 18) 渡辺晃: 海浜流と海浜変形の数値シミュレーション, 第28回海岸工学講演会論文集, pp285-289, (1981)
- 19) 渡辺晃, 丸山康樹, 清水隆夫, 榊山勉: 構造物設置に伴う三次元海浜変形の数値予測モデル, 第31回海岸工学講演会論文集, pp406-pp410, (1984)
- 20) 渡辺晃, 丸山康樹: 屈折・回折・碎波減衰を含む波浪場の数値解析法, 第31回海岸工学講演会論文集, pp103-pp107, (1984)
- 21) 山口正隆, 西岡洋一: 離岸堤群および突堤群による3次元海底地形変動の数値計算法, 第30回海岸工学講演会論文集, pp239-pp243, (1983)
- 22) 榎木亨, 出口一郎, 松山章: 掃流砂の移動層

厚と移動速度に関する一考察, 第31回海岸工学講演会論文集, pp277-pp280, (1984)

23) 灘岡和夫, 上野成三, 八木宏: 波動場と振動流場の違いに着目したシートフローの理論解析, 第35回海岸工学講演会論文集, pp292-pp296, (1988)

24) H. Miyata, M. Katsumata, Y. G. Lee and H. Kajitani: A Finite-Difference Simulation Method for Strongly Interacting Two-Layer Flow, J. Society Naval Architects of Japan, Vol. 163, pp1-16, (1988)

(原稿受理: 1989年11月20日)