

境界要素法による苫小牧東港の湾水振動解析

Harbour Oscillation analysis of Tomakomai East Port with BEM

古田泰久*・野村圭司**・濱中建一郎***

Yasuhiro Furuta, Keiji Nomura, Ken-ichiro Hamanaka

Significant oscillations of moored ships with long period are often reported in Tomakomai East Port. This long period oscillation of moored ship is considered to be caused by the long period harbour oscillation or the resonance between harbour oscillation and the mooring system. In the present paper, numerical analyses of the harbour oscillation with BEM are performed. It clarifies what types of harbour oscillation occur in what wave conditions.

Keyword: oscillation of moored ship, harbour oscillation, BEM

1. はじめに

近年、苫小牧東港において係留船の船体動揺により、荷役作業の中断や係留策の切断等の被害の報告がなされている。この時の船体動揺は主に上下方向ではなく水平方向、特にサージングである。この船体動揺を起こすメカニズムは、基本的には、港湾内の副振動による湾水振動および、係留系と湾水振動との共振であると考えられる。いずれの場合も、この現象を発生させる最初の原因は侵入してくる長周期波であるが、人為的に長周期波の発生を抑えることは不可能である。従って考えられる対策としては、適切な港湾形状の設計、適切な係留位置の選定、係留方法の工夫等となるが、どの対策を考える場合にも、最初に、どの様な波(周期、波向き)により、どの様な副振動が発生するかを知る必要がある。

このことから本研究では、数値解析のひとつである境界要素法により、湾水振動の解析を行う。港湾形状は1992年現在のものを用い、得られた結果から波高分布、水平流速分布を求め、どの様な波によりどの様な湾水振動が発生し船体動揺が起こるかを明らかにする。

2. 苫小牧東港における船体動揺

苫小牧東港においては1993年9月から12月にかけて、船体動揺の現地観測がなされた(松良ら:1994)。期間中、1993年10月9日に発生した船体動揺はビデオ撮影により動揺量の計測がなされた。ビデオ撮影は、動揺の継続時間中2度行われ、各々の測定時間は約10分間と20分間とであった。各々の測定時におけるサージ方向の最大動揺量とその周期は、264cm、95.0sおよび390cm、146.0sであり、動揺量のスペクトル解析から得られた卓越周期は各々124sと100sとであった。これらの測定結果のうち、最大動揺量に関しては、もし2度の測定を継続して1度に行えば95.0sの動揺

は最大とはならない。また、スペクトル解析に関しては、100s前後の現象を数波あるいは十数波含むだけの比較的短い測定時間のデータから求めたものであるからあまり信頼性が高いとはいえない。このことから、船体動揺の卓越周期は100sから124sにかけて、およびその前後にあったと考えても良いだろう。

3. 解析方法

対象となる波は長周期波であるが、その発生機構は種々考えられ、特に風波の非線形干渉により発生する長周期拘束波は地形変化や構造物の存在により変形を受けるとき長周期自由波となって解放されると考えられる。又、いくつかの観測結果より、港湾内外での長周期波に対しては自由波もかなり含まれることが報告されている(永井ら:1997、土田ら:1997)。このことから本研究では、入射波として長周期自由波を考え線形解析を行う。

流体運動は非圧縮・非粘性・非回転と仮定する。今、波動場が時間的に周期的であると仮定すると

$$\Phi = \bar{\phi} e^{-i\omega t}$$

となり、基礎方程式は3次元 Laplace 方程式で、線形化された水面($z=0$)と底面($z=-h$)での境界条件と共に以下の様に表される。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 \bar{\phi}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{\phi}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{\phi}}{\partial z^2} &= 0 \\ \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial z} &= \frac{\omega^2}{g} \bar{\phi} \quad \text{on } z=0 \\ \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial z} &= 0 \quad \text{on } z=-h \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

さらに

$$\bar{\phi} = \phi(x, y) \cosh k(z+h)$$

* 北海道東海大学大学院

** 学生員 北見工業大学大学院

*** 正員 北海道東海大学 工学部 (札幌市南区南沢5-1)

として変数分離を行うと、以下の Helmholtz 方程式が得られる。

$$\nabla^2 \phi + k^2 \phi = 0 \quad (2.2)$$

$$\text{ここで } \nabla^2 = \partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2 \quad , \quad gk \tanh kh = \omega^2$$

(2.2)式の Helmholtz 方程式に対する Green の公式は

$$\begin{aligned} & \int_V \{ \phi (\nabla^2 G + k^2 G) - G (\nabla^2 \phi + k^2 \phi) \} dV \\ & = \int_S \left(\phi \frac{\partial G}{\partial \nu} - G \frac{\partial \phi}{\partial \nu} \right) ds \end{aligned} \quad (2.3)$$

と表される。ここで V は考えている領域で、 S はその境界、 ν は境界上の外向法線を表す。(2.3)式における関数 G として、(2.2)式を満たし特異性を有する 0 次の第 1 種 Hankel 関数

$$G = H_0^{(1)}(kr) \quad , \quad r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \quad (2.4)$$

を用いると、特異点 $P: (x_0, y_0)$ が領域内にあるとき

(2.3)式は

$$4i\phi(P) = \int_S \left(\phi \frac{\partial G}{\partial \nu} - G \frac{\partial \phi}{\partial \nu} \right) ds \quad (2.5)$$

また、特異点が境界上にあるとき

$$2i\phi(P) = \int_S \left(\phi \frac{\partial G}{\partial \nu} - G \frac{\partial \phi}{\partial \nu} \right) ds \quad (2.6)$$

となる。さらに、防波堤や岸壁等の完全反射の境界条件として

$$\frac{\partial \phi}{\partial \nu} = 0 \quad \text{on structure}$$

として与え、港口部の港内から港外への通過波 ϕ_T に対しては、開境界条件 (Hamanaka : 1997、野村・濱中 : 1997) を適用し、

$$2i\phi_T(P) = \int_S G \frac{\partial \phi_T}{\partial \nu} ds$$

を与える。境界要素法では、(2.6)式の積分を離散化して、境界上のポテンシャルに関する連立 1 次方程式として解き、得られた境界上のポテンシャルから(2.5)式により領域内の任意の位置でのポテンシャルが求められる。

港湾内部の波高分布は、得られたポテンシャルから水面での境界条件を用いて求められる。流速振幅に関しては(2.5)式をそれぞれの方向で微分すると

$$u = 4i \frac{\partial \phi(P)}{\partial x_0} = \int_S \left(\phi \frac{\partial^2 G}{\partial \nu \partial x_0} - \frac{\partial G}{\partial x_0} \frac{\partial \phi}{\partial \nu} \right) ds$$

$$v = 4i \frac{\partial \phi(P)}{\partial y_0} = \int_S \left(\phi \frac{\partial^2 G}{\partial \nu \partial y_0} - \frac{\partial G}{\partial y_0} \frac{\partial \phi}{\partial \nu} \right) ds$$

となる。

4. 数値解析

計算に用いた、港の概略と各部の名称は、図 1 に示す。

計算に用いた境界上のセグメント幅は、与えた入射波の波長の約 1/10 と 1/20 として、1 ケース計算を行い、その結果に大きな違いがないことを確認した後、計算時間の短縮のため 1/10 程度とした。

入射波の周期は 90s~160s を 10 秒刻みに変えて計算を行い、特徴的な重複波が発生している場合は、その前後を 1 秒刻みでさらに計算を行った。波向きは、中防波堤に対し平行に入射する波を角度 0° とし反時計周りに 10 度刻みに 60° まで全ての周期に対して行った。ここで角度 0° とした場合、汀線とほぼ平行な波向きであるが、風波による非線形干渉を考えると実際に起こり得ると考えられる。

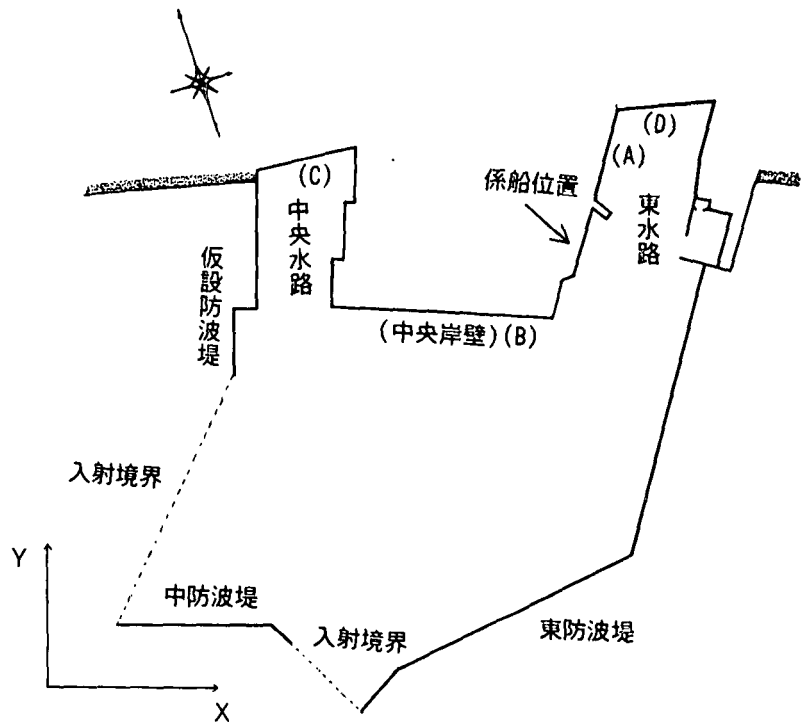


図 1 苦小牧東港

5. 解析結果

得られた結果から港内の波高分布および x 、 y 方向の流速分布を求め、図 2 以下の様な等高線図に示した。波高の等高値は入射波高 (H_0) との比 (H/H_0) を表し、流速振幅は入射波の流速振幅 (V_0) との比 ($u/V_0, v/V_0$) を表す。図中の等高値は全て細線は 1, 2 太線は 3, 4, 5 である。

これらの図から、係船位置および他の主な岸壁で、それに沿った強い流れが顕著に表れた場合の位置と波の条件を整理したのが表1である。この表から周期110s前後の波では多くの波向きで、係船位置に強い振動流を発生させていることが分かる。長周期の波であっても種々の波向きの成分を混在させた不規則波であることを考慮すると係船位置では、この110s前後の湾水振動による強い振動流の発生頻度が高いことが推測できる。実際観測された船体動揺もこの周期前後であり解析が妥当であることが分かる。図2～5は例として周期110sで波向きを各々0°、10°、20°、30°とした時の波高およびx、y方向の流速振幅を示す。これらの図からこの周期では東水路に多重重複波が発生し、係船岸壁は

節の位置となり、岸壁に沿って強い振動流が生じている様子が分かる。また、このような湾水振動は一種の共鳴現象と考えられるから、入射波の周期に対しては敏感であり、わずかな周期の違いで振動が発生したり、しなかったりする。図6～9はそれを示す例で、入射角20°のもとで、周期が108sから109sに変わることにより係船岸壁に強い振動流が現われ、111sから112sに変わることにより消滅する。

係船位置以外の岸壁でも強い振動流が発生する場合があった。周期90sで多くの波向きに対し東水路の係船位置より奥の岸壁(図1のA点)で発生した例を図10に示す。

また、周期115sでは東水路奥部のD点および中央水路のC点で強い振動流が発生した。その例を図11に示す。

6. まとめ

苫小牧東港における船体動揺の原因と考えられる湾水振動の解析を、境界要素法を用いて行った。その結果周期110s前後の入射波では、多くの入射角のもとで係船岸壁が重複波の節となり強い振動流が発生した。観測された船体動揺の周期もほぼ110s前後とみなすことが出来ることから、この船体動揺は長周期波の湾水振動によるものと考えられる。また、他の岸壁でも強い振動流が発生することがあり、それらの場合の波の条件を示した。

船体動揺に対する対策としては、以下の様なことが

表1 湾水振動が確認された条件

発生位置	周期(秒)	入射角(度)
東水路奥部 (Y方向)(A)	90	0°, 20°, 30°, 40°, 50°, 60°
	91	0°, 20°, 30°, 50°, 60°
中央岸壁 (X方向)(B)	93	0°, 10°
	94	0°, 10°
	95	0°, 10°
係船位置	108	0°, 10°, 20°
	109	0°, 10°, 20°, 30°
	110	0°, 10°, 20°, 30°
	111	20°, 30°
	112	30°
中央水路奥部 (X方向)(C)	114	0°, 30°, 40°
	115	20°, 30°, 40°, 60°
東水路奥部 (X方向)(D)	115	0°, 10°, 30°, 40°, 50°
	120	0°, 10°, 40°, 50°
係船位置	146	0°
	147	0°
	148	0°
	149	0°
	150	0°

考えられるだろう。現状の港で同じ係船位置を使う場合は、係留系の固有振動を湾水振動の周期とは異なるように工夫すること、また新たな防波堤を建設する場合は本論文で示した様な湾水振動解析を行い予定されている係船位置が重複波の節とならぬ様、防波堤の位置・長さを決定すれば良い。

参考文献

- 松良精三・渥美洋一・菅沼史典(1994): 苫小牧東港における船体動揺特性の検討、土木学会北海道支部論文報告集、第50巻、pp.618-623
- 永井紀彦・橋本典明・白石 悟・川口浩二・清水勝義・上野成二・小林昭男・東江隆夫・柴田孝雄(1997): 現地連続観測による沖合長周期波の発達・減衰過程と港内係留船舶の動揺、海岸工学論文集、第44巻(1)、pp.226-230
- 土田 充・灘岡和夫・西村剛士・佐藤恒夫・山口孝市・平石哲也(1997): 多点観測による港内外の波浪特性と港内係留船舶の長周期動揺特性について、海岸工学論文集、第44巻(1)、pp.231-235
- 野村圭司・濱中建一郎(1997): 境界要素法における開境界条件と開口部近傍の波動場、海洋開発論文集、Vol.13、pp.129-134
- Hamanaka, K (1997): Open, partial reflection and incident-absorbing boundary condition in wave analysis with a boundary integral method, Journal of Coastal Engineering 30, pp.281-29

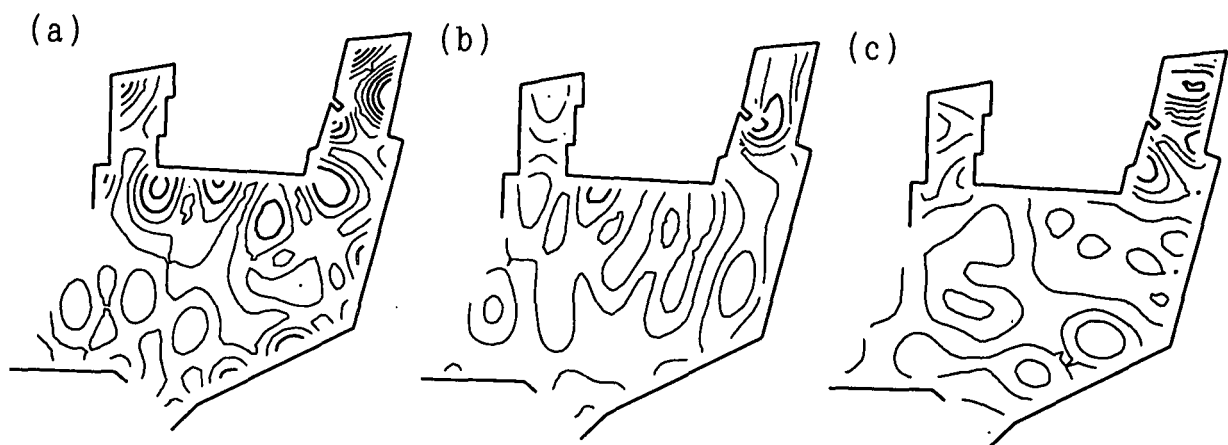


图2 等高图, $T=110$ 秒, $\theta=0^\circ$: (a) 波高(H/H_0), (b) x 方向流速(u/V_0), (c) y 方向流速(v/V_0)

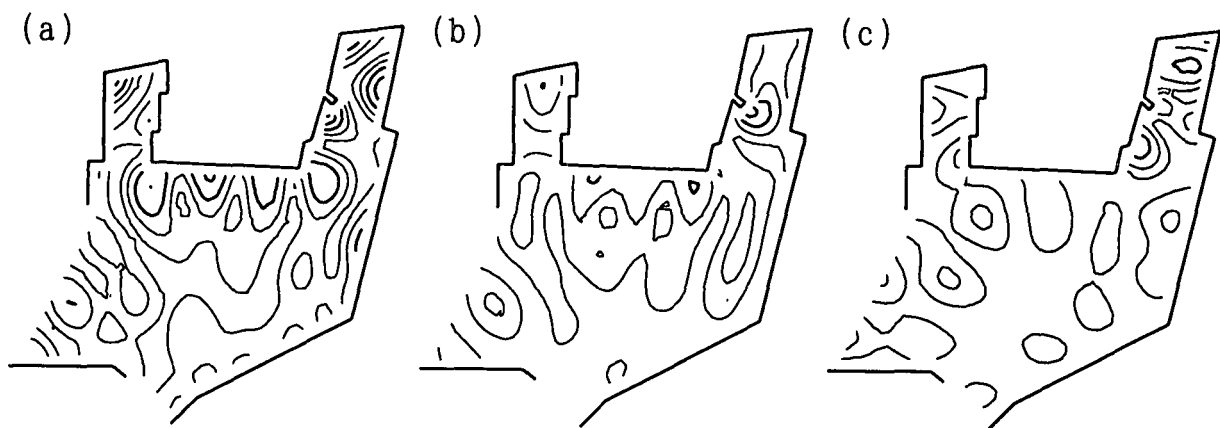


图3 等高图, $T=110$ 秒, $\theta=10^\circ$: (a) 波高(H/H_0), (b) x 方向流速(u/V_0), (c) y 方向流速(v/V_0)

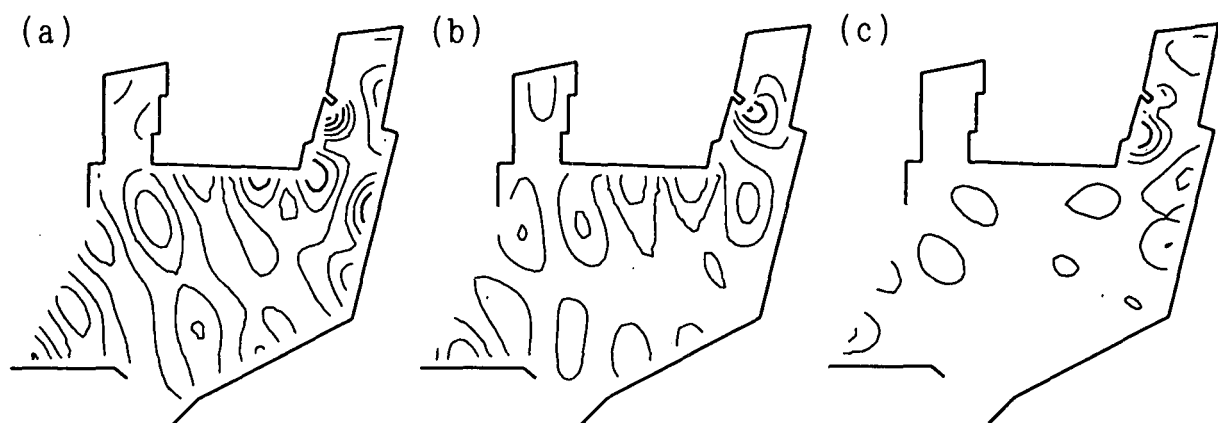


图4 等高图, $T=110$ 秒, $\theta=20^\circ$: (a) 波高(H/H_0), (b) x 方向流速(u/V_0), (c) y 方向流速(v/V_0)

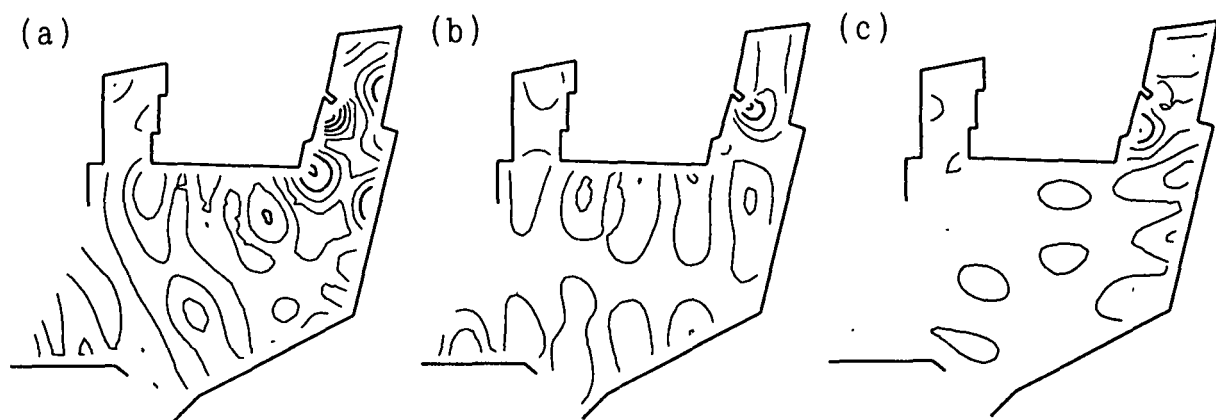


图5 等高图, $T=110$ 秒, $\theta=30^\circ$: (a) 波高(H/H_0), (b) x 方向流速(u/V_0), (c) y 方向流速(v/V_0)

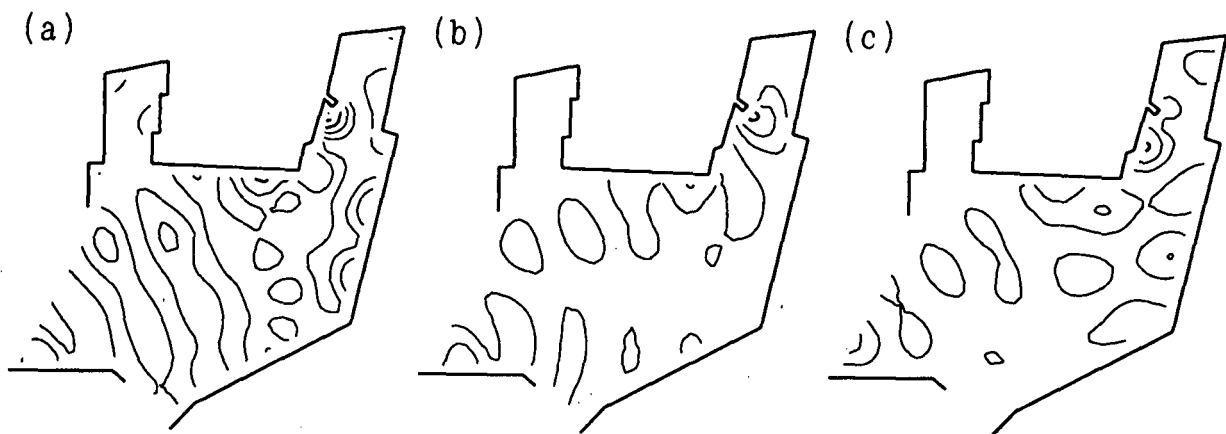


图6 等高图, $T=108$ 秒, $\theta=20^\circ$: (a) 波高(H/H_0), (b) x 方向流速(u/V_0), (c) y 方向流速(v/V_0)

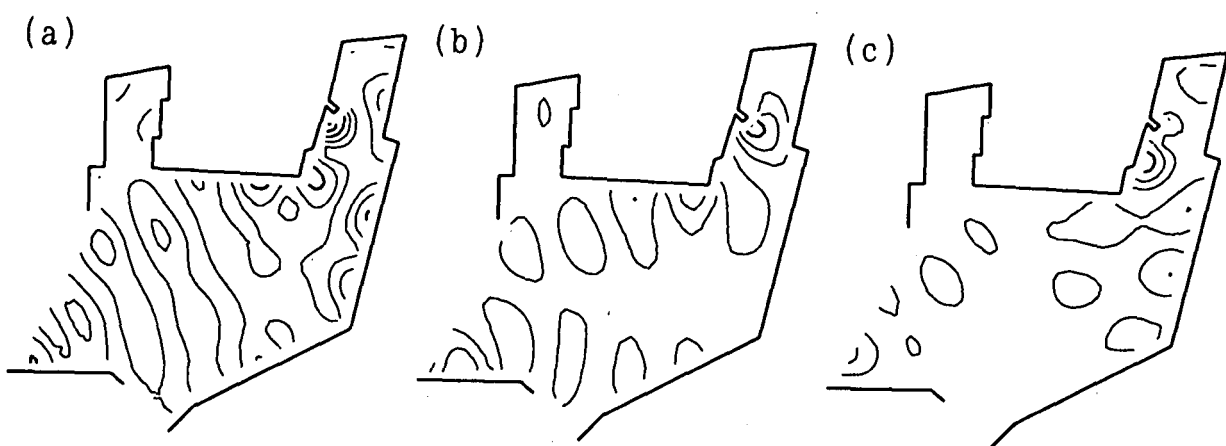


图7 等高图, $T=109$ 秒, $\theta=20^\circ$: (a) 波高(H/H_0), (b) x 方向流速(u/V_0), (c) y 方向流速(v/V_0)

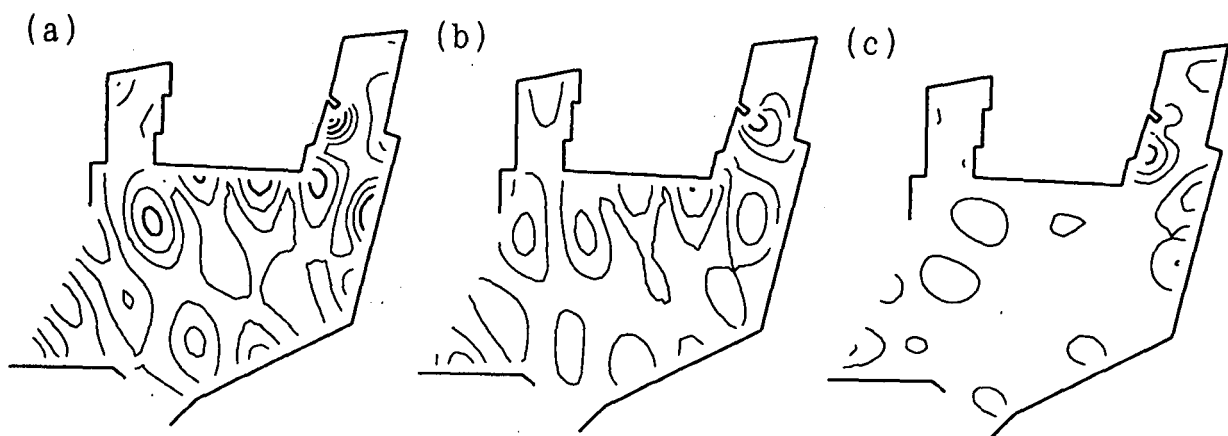


图8 等高图, $T=111$ 秒, $\theta=20^\circ$: (a) 波高(H/H_0), (b) x 方向流速(u/V_0), (c) y 方向流速(v/V_0)

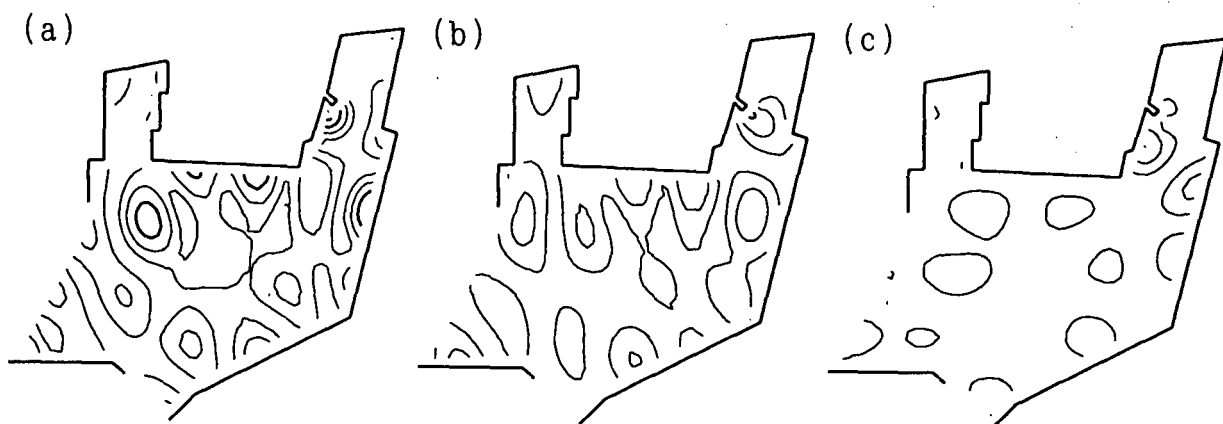


图9 等高图, $T=112$ 秒, $\theta=20^\circ$: (a) 波高(H/H_0), (b) x 方向流速(u/V_0), (c) y 方向流速(v/V_0)

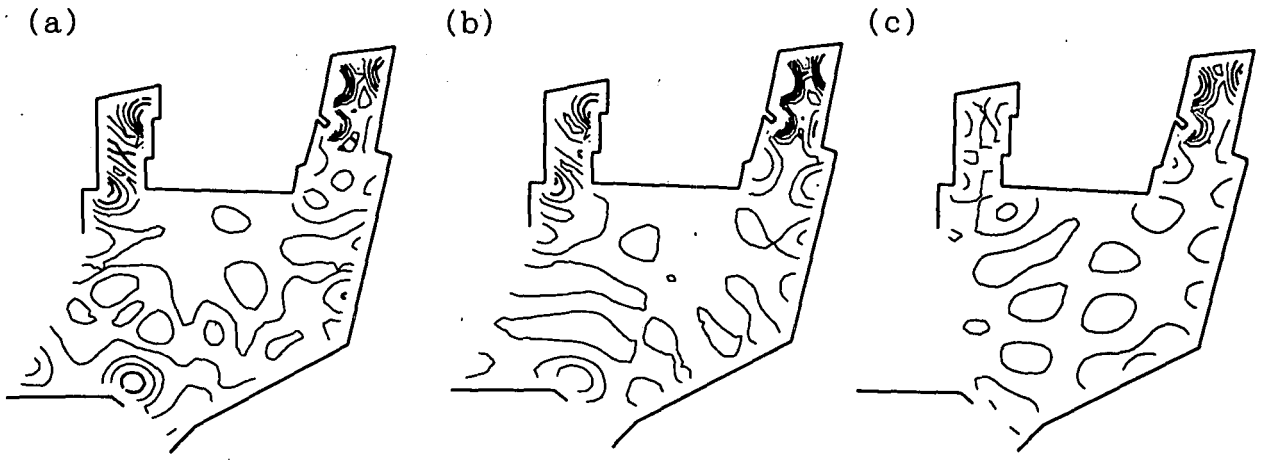


図10 等高図, $T=90$ 秒, y 方向流速(v/V_0): (a) $\theta=0^\circ$, (b) $\theta=30^\circ$, (c) $\theta=60^\circ$

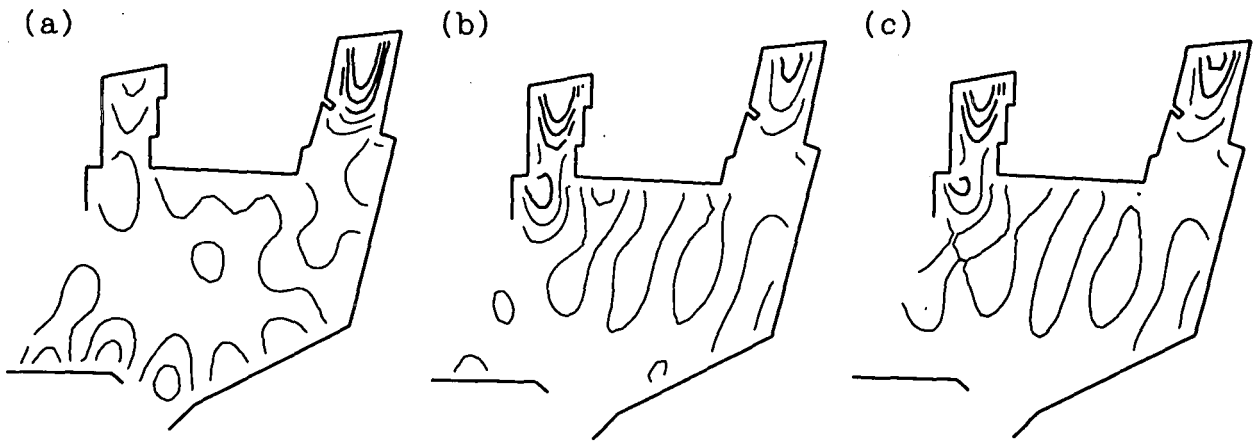


図11 等高図, $T=115$ 秒, x 方向流速(u/V_0): (a) $\theta=0^\circ$, (b) $\theta=30^\circ$, (c) $\theta=40^\circ$

注: 全ての等高値は、細線は1, 2、太線は3, 4, 5を表わす。