



# HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	噴火湾の潮汐の数値実験
Author(s)	室伏, 哲郎; MUROFUSHI, Tetsuro; 小賀, 百樹 他
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 42, 239-251
Issue Date	1983-10-25
DOI	<a href="https://doi.org/10.14943/gbhu.42.239">https://doi.org/10.14943/gbhu.42.239</a>
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/14113">https://hdl.handle.net/2115/14113</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	42_p239-251.pdf



## 噴火湾の潮汐の数値実験

室伏 哲郎・小賀 百樹・金成 誠一

北海道大学理学部地球物理学教室

(昭和58年3月15日受理)

### Numerical Study of Tides in Funka Bay

By Tetsuro MUROFUSHI, Momoki KOGA and Sei-ichi KANARI

Department of Geophysics, Faculty of Science,

Hokkaido University

(Received March 15, 1983)

The tide of Funka Bay is studied using a two dimensional numerical model with 2 km square meshes. The patterns of the tidal currents show that the currents in shore of Muroran is stronger than that of Mori, and the change of current direction near Mori precedes that near Muroran. Residual currents are very weak except for a few points near the mouth of the bay, where residual currents velocity reaches 2-8 cm/sec. Results of spectral analysis in the time series of elevation and velocity show several peaks in addition to the peak of the tidal period. Among them, 1.26 and 2.66 hour periods are common to both elevation and velocity spectra. These two periods seem to be the first and the second modes of the bay oscillations.

#### I. はじめに

噴火湾は北海道南部に位置し、湾口は太平洋側に開いているが、湾口南西部は津軽海峡の北岸の一部を形成する渡島半島につながっている (Fig. 1). このような配置のために、ふたつの外洋水、すなわち親潮起源の冷水塊と黒潮起源の津軽暖流水が半年毎に交替流入するきわめて特徴ある湾と考えられている (大谷・木戸, 1980).

このような外洋水の交替流入に加えて、湾内沿岸からの融雪水の流入および夏期の表層の加熱等の影響により春から秋にかけて湾内水は顕著な密度構造を形成する。冬期は表層の冷却と強力な対流混合作

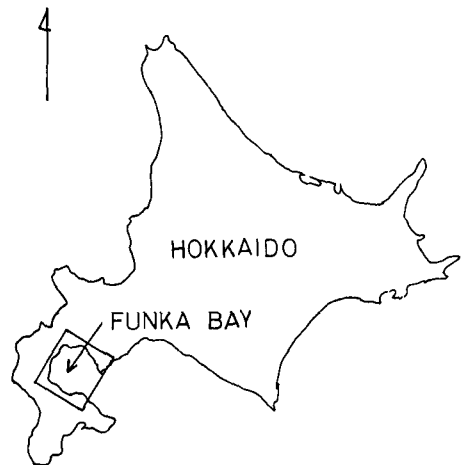


Fig. 1. Location map of Funka Bay.

用により、湾内水はほぼ一様な密度構造となる。このような噴火湾海域の流動場が湾内の生物生産あるいは物質循環に密接な係りを持つことはいうまでもないが、残念ながら、従来、噴火湾内流動場の組織的な観測例は殆んどなく、湾内の流れの特性はあまり知られていない。

本研究の最終目標は噴火湾海域の湾内水と外洋水の水の交換過程を究明することにあるが、その手始めとして湾内の潮流特性を数値実験的手法により調べ今後の観測の一助とするものである。

通常、沿岸域の流れは密度場、風の応力、起潮力、海岸および海底地形が複雑に関係しているが、本研究では密度成層が消失する冬期の噴火湾に的をしばり、湾内の潮位、潮流分布並びに副振動について考察する。

## II. 基礎方程式と境界条件

右手座標系で水平に  $x, y$  軸、下向きに  $z$  軸をとり、座標原点を平均海水面に一致させる。平均海水面からの水位上昇を  $\zeta$  で表わすと、 $x, y$  方向の鉛直積分流量成分  $M, N$  に関する潮流の基礎方程式および連続の方程式はそれぞれ次式で与えられる。

$$\frac{\partial M}{\partial t} = fN - g(h + \zeta) \frac{\partial \zeta}{\partial x} - (h + \zeta) \left\{ \frac{\partial \bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}\bar{v}}{\partial y} \right\} - \frac{\gamma^2 M}{(h + \zeta)} \sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2} + A_H \left( \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} = -fM - g(h + \zeta) \frac{\partial \zeta}{\partial y} - (h + \zeta) \left\{ \frac{\partial \bar{u}\bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}^2}{\partial y} \right\} - \frac{\gamma^2 M}{(h + \zeta)} \sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2} + A_H \left( \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

ここに、 $f$  はコリオリのパラメータ、 $g$  は重力の加速度、 $h$  は水深、 $\gamma^2$  は海底の摩擦係数を表わし、 $M, N, \bar{u}, \bar{v}$  は次式で定義される量である。

$$M = \int_{\zeta}^h u dz, \quad N = \int_{\zeta}^h v dz \quad (4)$$

$$\bar{u} = \frac{M}{(h + \zeta)}, \quad \bar{v} = \frac{N}{(h + \zeta)} \quad (5)$$

Fig. 2 は計算に用いた一辺 2 km の正方格子から成るモデル海域の周辺地形並びに等深図であるが、チキウ岬と出来潤埼を結ぶ線 ( $I = 1$  の線) を湾口とし、湾口に平行に  $x$  軸、湾口に直角に湾奥を向けて  $y$  軸をとってある。Fig. 2 では  $x$  軸方向に  $J$  軸、 $y$  軸方向に  $I$  軸を対応させてある。

湾口では湾口に直角方向に水の出入りは自由であるから、湾口の流速条件は

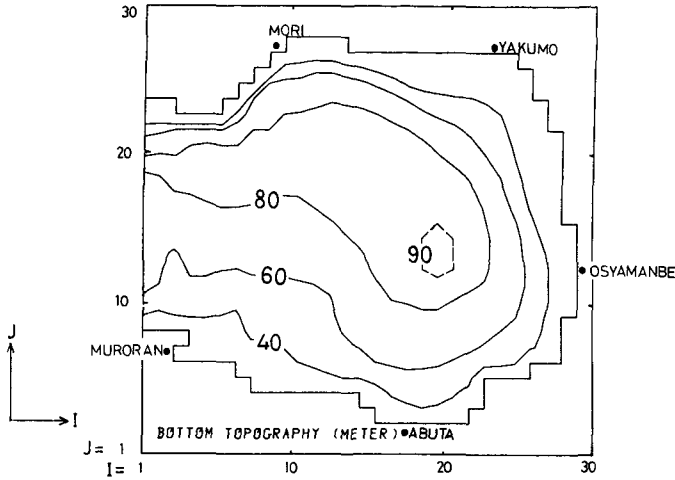


Fig. 2. Bottom topography of Funka Bay and the domain for the numerical calculation.

$$-\frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad \text{at } x=0 \tag{6}$$

で与えられる。また、湾口潮位は湾口線上で同一位相の変化をするものと仮定して

$$\zeta(t) = \zeta_0 \sin \frac{2\pi}{T} t \quad \text{at } x=0 \tag{7}$$

で表わされる強制振動を与える。

湾内の周辺条件は岸に直角な流れが岸で零になるとして、

$$\mathbf{V} \cdot \mathbf{n} = 0 \quad \text{at boundary} \tag{8}$$

である。ここに  $\mathbf{V}$  は流速ベクトル、 $\mathbf{n}$  は岸に直角な単位ベクトルである。

以上の条件のもとに(1), (2)および(3)式の差分式を逐次積分して各時間ステップ毎に  $M, N$  および  $\zeta$  を求めるのであるが、(1), (2)式中の水平渦動粘性項はこのまま計算せず、宮崎の方法(宇野木, 1964)にならって、平滑化係数、 $D = A_H \cdot \Delta t_s / 4 (\Delta S)^2$  による  $\Delta t_s$  ステップ毎の平滑操作で代用した。ここに  $\Delta S$  はモデルの格子間隔である。

初期値はすべて零とし、湾口でのみ潮汐周期の水位を与える。噴火湾の調和定数は、室蘭、森、有珠の三地点について得られており、このうち湾口に最も近い室蘭の振幅を湾口振幅として採用

Table 1. Amplitudes of  $M_2$ ,  $K_1$ , and  $O_1$  tides.

PERIOD (hours)	MURORAN		USU		MORI	
	AMPLITUDE (cm)	PHASE (degree)	AMPLITUDE (cm)	PHASE (degree)	AMPLITUDE (cm)	PHASE (degree)
$M_2$ (12.42)	36.7	0.0	35.0	-10.2	31.0	-13.2
$K_1$ (23.93)	26.0	0.0	23.0	-6.8	20.0	-6.8
$O_1$ (25.82)	21.0	0.0	18.0	-8.6	17.0	-16.6

した。計算は  $M_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$  分潮について各々  $t=0$  から 120 時間まで行なった。与えた周期と振幅は Table 1 (中野 1945) に示してある。

数値計算の時間ステップは安定条件、

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} > \sqrt{2gh_{max}}$$

によって決まり、 $\Delta S=2\text{km}$ ,  $h_{max}=90\text{ m}$  に対して

$$\Delta t < 47.61\text{ sec}$$

となり、今回のモデルでは  $\Delta t=40\text{ sec}$  を採用した。

### III. 結果と考察

本研究では、将来観測データと比較することを考えて代表地点の陸岸付近と、陸岸の影響のないような沖合の点で 30 分毎に計算結果を出力した。以後、記述の簡略化のために、モデル海域内の代表点の座標を各々 2 桁の整数を用いて [I J] のように表わすことにする。例えば、[0807] は  $I=8$ ,  $J=7$  の座標点を意味する。代表地点としては、室蘭 [0807]、森 [1026]、虻田 [1904]、八雲 [2426]、長万部 [2813] を選んだ。

#### 1. 水位と流速の時間変化

Fig. 3 (a)~(c)は湾口でそれぞれ  $M_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$  分潮を与えた場合の [0616] (湾口中央部) での水位と流速の時間変化を示す。Fig. 3 各(a)から(c)の上段は流速ベクトルの時間変化を示し、ベクトルは時間軸方向に  $u$ 、それに直角上方向に  $v$  である。したがって、中心軸より上にあるものは湾奥に向う流れである。下段は水位の時間変化を示す。

まず水位の時間変化に着目する。どの潮汐周期の場合も、およそ、その周期の水位変動が卓越している。図からわかるように、この上に 2~3 時間周期の変動がのっているように思われる。これはデータをとったどの点においてもいえるので、この変動はおそらく噴火湾固有の副振動であろう。この点に関しては、水位、流速のスペクトル解析の結果のところで詳しく述べる。

次に流速の時間変化をみる。やはり水位と同様にどの地点においても潮汐周期の変動が卓越している。流速の絶対値は日周潮流より半日周潮流の方がどの地点においても大きい。

#### 2. 速度場

速度場の時間変動の例として、Fig. 4 に  $M_2$  分潮の場合の計算時間の最後の 1 周期に対応する変動を示す。 $t=109$  時間および  $115$  時間がそれぞれ湾口部で低潮時および高潮時の時刻に対応する。

流速の絶対値あるいは振動の方向は場所により大きく違う。いずれの時刻でも流速の絶対値は湾口から湾奥に入るにつれて小さく、Fig. 4 の(c), (f)のように湾口から水の出入りがある時刻では、室蘭側が森側に比べて流速が大きい。これは Fig. 2 に見られるように室蘭側の水深が浅いためであろう。虻田よりやや湾奥よりの位置 ([2005] 付近) ではどの時刻でも岸向きの比較的強い

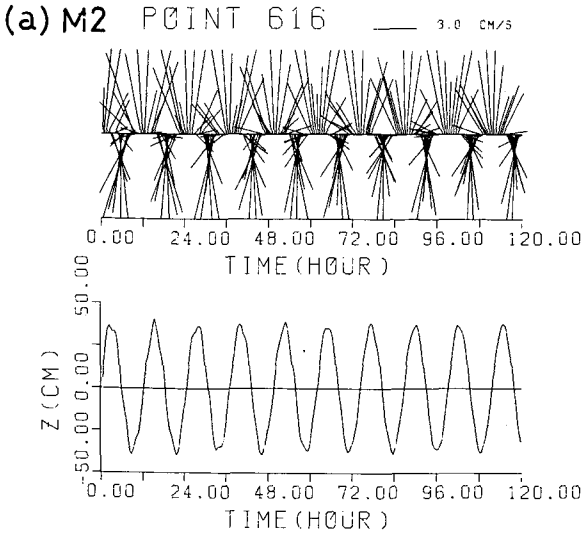
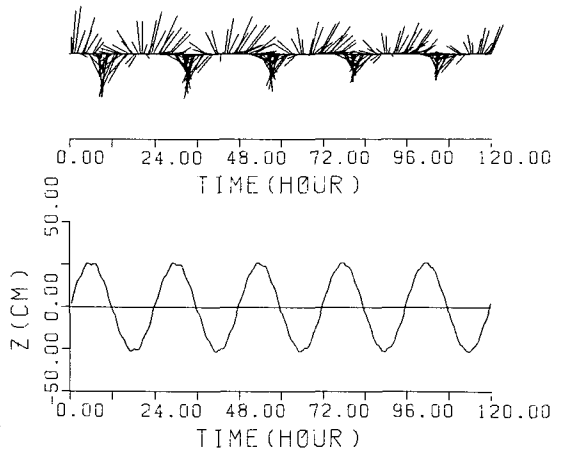
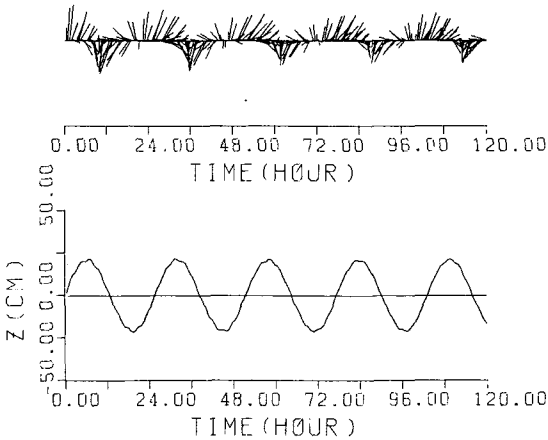


Fig. 3. Variations of elevation and tidal currents, for M<sub>2</sub>, K<sub>1</sub> and O<sub>1</sub> tides at POINT 616, respectively. Upper : Stick diagram of tidal currents. Lower : Time variations of elevation.

(b) K1 POINT 616 — 3.0 CM/S



(c) O1 POINT 616 — 3.0 CM/S



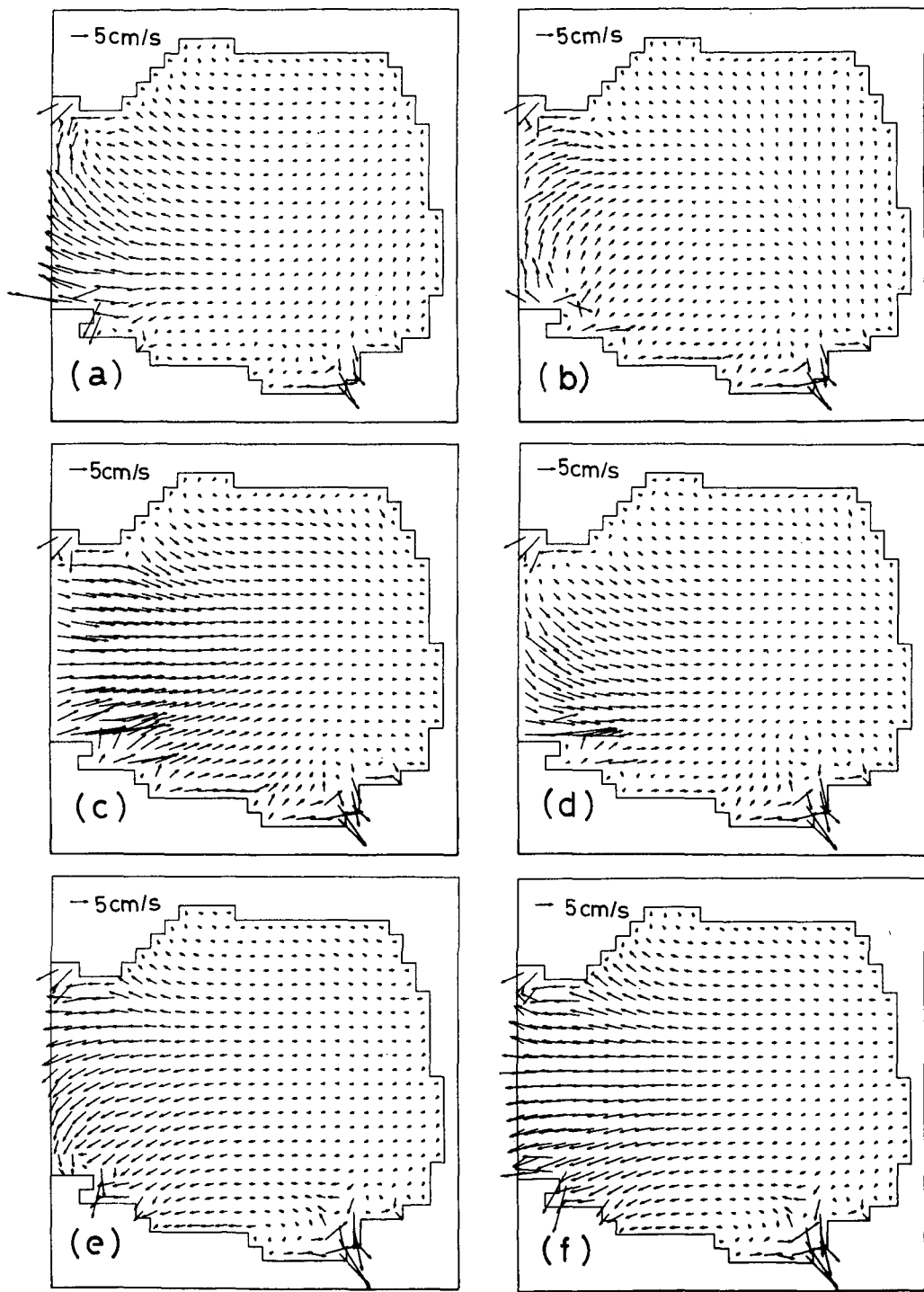


Fig. 4. Patterns of tidal currents for  $M_2$  tide.

Figures from (a) to (f) show the flow patterns at every 2 hours after 108 hours run.

(a) Time = 108 hours, (b) Time = 110 hours, (c) Time = 112 hours, (d) Time = 114 hours, (e) Time = 116 hours, (f) Time = 118 hours.

流れが見られる。これは  $M_2$  分潮の場合のみに見られ、 $K_1$ 、 $O_1$  分潮の場合には見られなかった。この点に関しては、まだ明瞭な解釈ができていない。また、流れの方向の変化は森側からはじまる。これは森側の流速が小さいため慣性が小さく、水位に対する応答が早まるからであろう。

Fig. 5 は残差流の分布を示し、流速の最後の1周期にわたる平均より得られたものである。噴火湾の残差流は湾口付近を除き非常に小さく  $0.1 \text{ cm/sec}$  程度である。湾口付近の幾点かで残差流の少し大きいところがあり、 $2 \text{ cm/sec}$  から最大で  $8 \text{ cm/sec}$  である。これは、 $K_1$  分潮および  $O_1$  分潮の結果に対しても同様である。

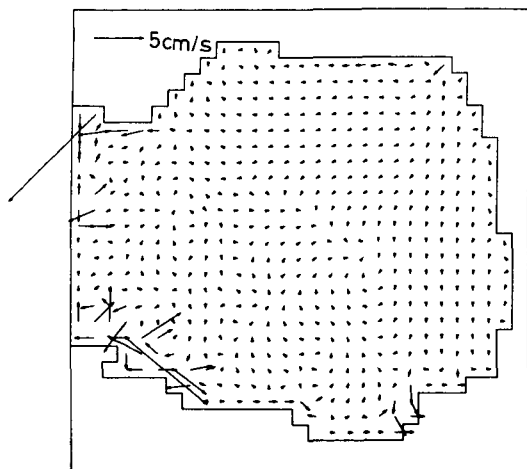


Fig. 5. Pattern of residual currents for  $M_2$  tide.

### 3. 水位と流速に関するスペクトル解析の結果

先に示した水位の時間変化の図 (Fig. 3) から噴火湾には2~3時間周期の変動があることが予想された。このことを確かめるため、水位および流速についてスペクトル解析を行った。 $M_2$  分潮および  $K_1$  分潮の場合のスペクトル解析の結果をそれぞれ Fig. 6, Fig. 7 に示す。

まず  $M_2$  分潮の水位に関しては、潮汐周期 (12.42 時間) 以外に 5.31, 3.36, 2.66, 2.20, 1.26 時間のところにピークがみられる。一方、流速スペクトルに関しては、場所により、あるいは  $u$ 、 $v$  成分により様子がまったく違う。これは水位を決める要因が、湾口における境界条件であるのに対し、流速には、地形やコリオリ力などいろいろな要素が関係しているためであろう。しかし、どの点においても潮汐周期 (12.42 時間) の他に 2.66 時間および 1.26 時間のところに共通してピークが見られる。また後で述べるように、周期 2.66 時間および 1.26 時間の変動は  $K_1$  分潮の場合にも見られる。したがって、この 2.66 時間および 1.26 時間の変動は、先に考察したように、噴火湾固有の副振動であろう。この振動の性質については III-4. 振幅および位相の分布のところできさらに詳しく述べる。

一方、残りのピークの周期はどのように説明されるであろうか。いま仮に流速が

$$\bar{u} = U_0 \sin(k_0 x - 2\pi f_0 t) + U_1 \sin(k_1 x - 2\pi f_1 t) \quad (9)$$

の変動を持つとする。このような流速場の運動が非線形項によりどのように変化するか調べる。方程式(1)~(3)の中に非線形項はいくつかあるが、仮に  $\partial \bar{u}^2 / \partial x$  を例にとると次のようになる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}^2}{\partial x} &= k_0 U_0^2 \sin(2k_0 x - 2 \cdot 2\pi f_0 t) + 2U_0 U_1 \sin\{(k_0 + k_1)x - 2\pi(f_0 + f_1)t\} \\ &+ k_1 U_1^2 \sin(2k_1 x - 2 \cdot 2\pi f_1 t) \end{aligned} \quad (10)$$

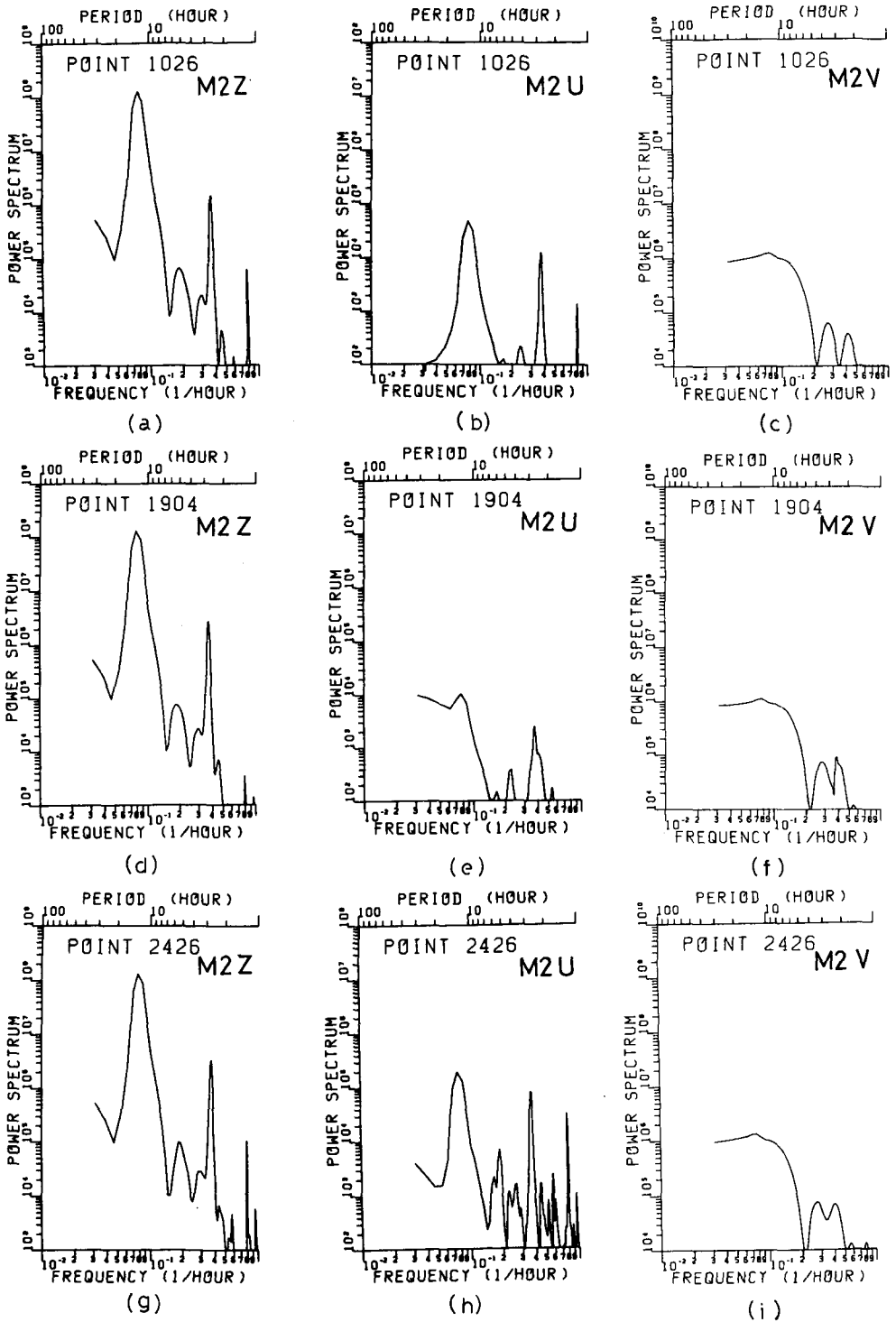


Fig. 6. Spectra of elevation Z and velocity components U, V at POINTS 1024, 1904 and 2426, for M<sub>2</sub> tide.

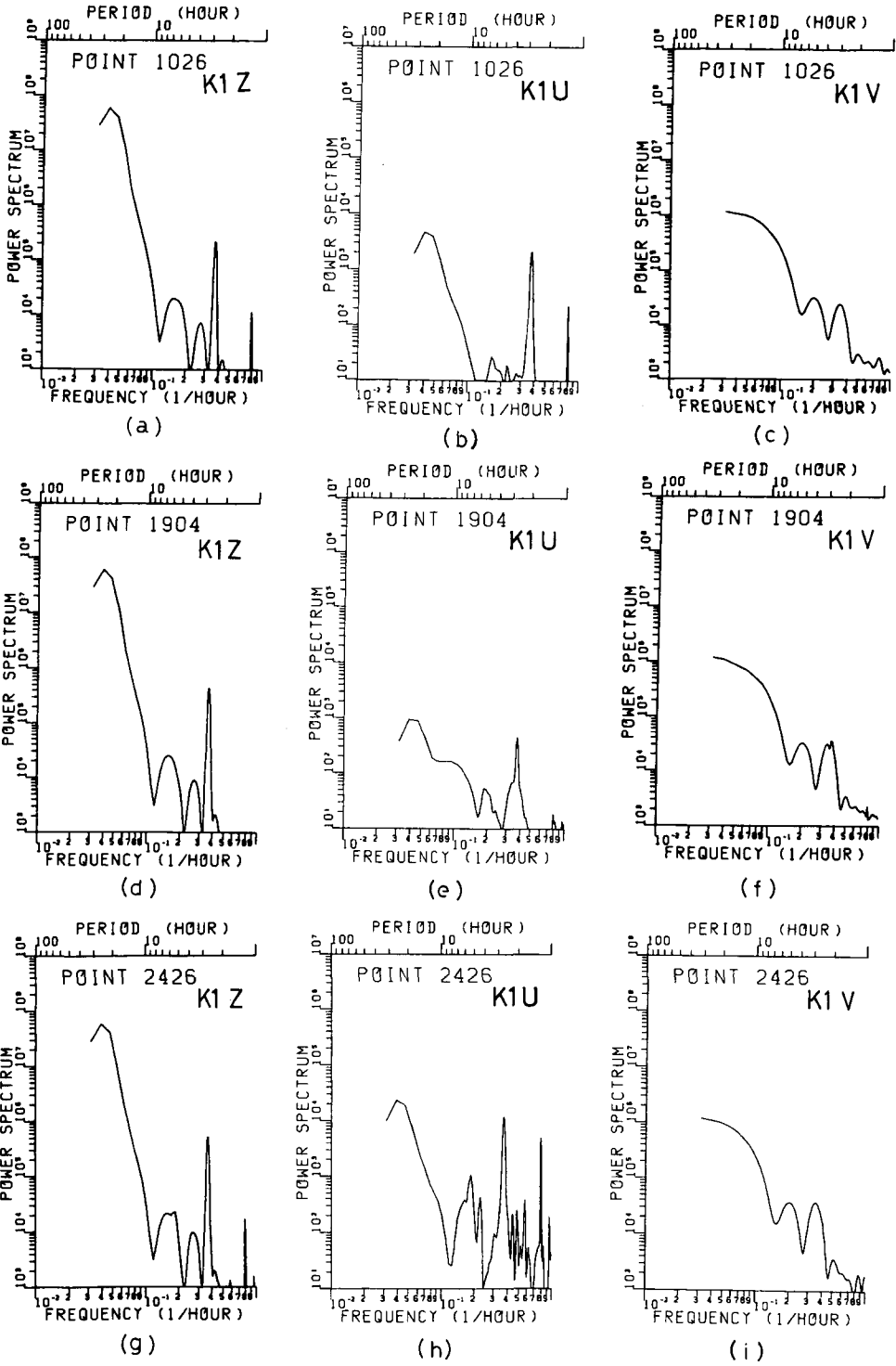


Fig. 7. Same as Fig. 6 but for  $K_1$  tide.

また仮に

$$\begin{cases} \bar{u} = U_0 \sin(k_0 x - 2\pi f_0 t) \\ \bar{v} = V_0 \cos(k_1 y - 2\pi f_1 t) \end{cases} \quad (11)$$

とすれば、非線形項  $\partial \bar{u} \bar{v} / \partial y$  は次のようになる。

$$\frac{\partial \bar{u} \bar{v}}{\partial y} = \frac{U_0 V_0 k_1}{2} [\cos\{k_0 x + k_1 y - 2\pi(f_0 + f_1)t\} - \cos\{k_0 x - k_1 y - 2\pi(f_1 - f_0)t\}] \quad (12)$$

したがって、周波数  $f_0$ ,  $f_1$  のふたつの振動が共存すれば、非線形項を通じて、 $2f_0$ ,  $2f_1$ ,  $f_1 \pm f_0$  等の周波数成分の波動にエネルギーが輸送され得る。ここでは  $f_0$ ,  $f_1$  としてそれぞれ潮汐周期、副振動周期を考え、残りのピークがどの程度説明できるか調べてみよう。

まず、 $M_2$  分潮に関して水位および流速のスペクトルに共通してみられた周期 12.42 時間および 2.66 時間に対応する周波数  $f_0$  および  $f_1$  を考えれば、0.081 cph, 0.376 cph となる。このとき  $2f_0$ ,  $2f_1$ ,  $f_0 + f_1$ ,  $f_1 - f_0$  はそれぞれ 0.162 cph, 0.752 cph, 0.456 cph, 0.295 cph となる。これに対し残りのピーク、周期 5.31, 3.36, 2.66, 2.20, および 1.26 時間の周波数を求めると、それぞれ 0.188 cph, 0.298 cph, 0.455 cph, 0.794 cph, となる。これより周期 1.26 時間の変動は  $2f_1$ , 周期 2.20 時間の変動は  $f_0 + f_1$ , 周期 3.36 時間の変動は  $f_1 - f_0$ , 周期 5.31 時間の変動は  $2f_0$  にそれぞれ相当するようと思われる。周期 5.31 時間の変動に対してはややずれた値となっているが、その他の周期に対してはよく一致している。

次に  $K_1$  分潮の水位に関しては、潮汐周期 (23.93 時間) 以外に 6.38, 3.64, 2.71, 2.32 および 1.26 時間のところにピークがみられる。流速については場所によって、あるいは  $u$ ,  $v$  成分によってまったく様子が違っている。しかし、 $K_1$  分潮に関しても、先に述べたように 2.71 時間と 1.26 時間のところに共通のピークがみられる。

$M_2$  分潮の場合と同様に潮汐振動 (0.042 cph) および副振動 (0.369 cph) を  $f_0$  および  $f_1$  とおけば、 $2f_0$ ,  $2f_1$ ,  $f_0 + f_1$ ,  $f_1 - f_0$  は、それぞれ、0.084 cph, 0.738 cph, 0.411 cph, 0.327 cph となる。これに対し残りのピークの周期 6.38, 3.64, 2.32, および 1.26 時間に対応する周波数を計算すればそれぞれ、0.157 cph, 0.275 cph, 0.431 cph, 0.794 cph となり、周期 1.26 時間のもは  $2f_1$ , 周期 2.32 時間のもは  $f_0 + f_1$ , 周期 3.64 時間のもは  $f_1 - f_0$  に相当すると思われる。ただ周期 6.38 時間のもは  $2f_0$  に相当すると考えると少し差が大きい。

以上まとめれば、 $K_1$  分潮の周期 6.38 時間の変動については今後検討する必要があるものの、その他の変動周期については、 $M_2$  分潮、 $K_1$  分潮のいずれの場合も、上記の考え方でほぼ説明がつく。

#### 4. 振幅および位相の分布

スペクトル分布においてピークのみられた周期成分をとりだし、それが一体どういう運動であるかを調べるために、その位相と振幅の分布を求めた。分布の例として、 $M_2$  分潮を与えた場合の、

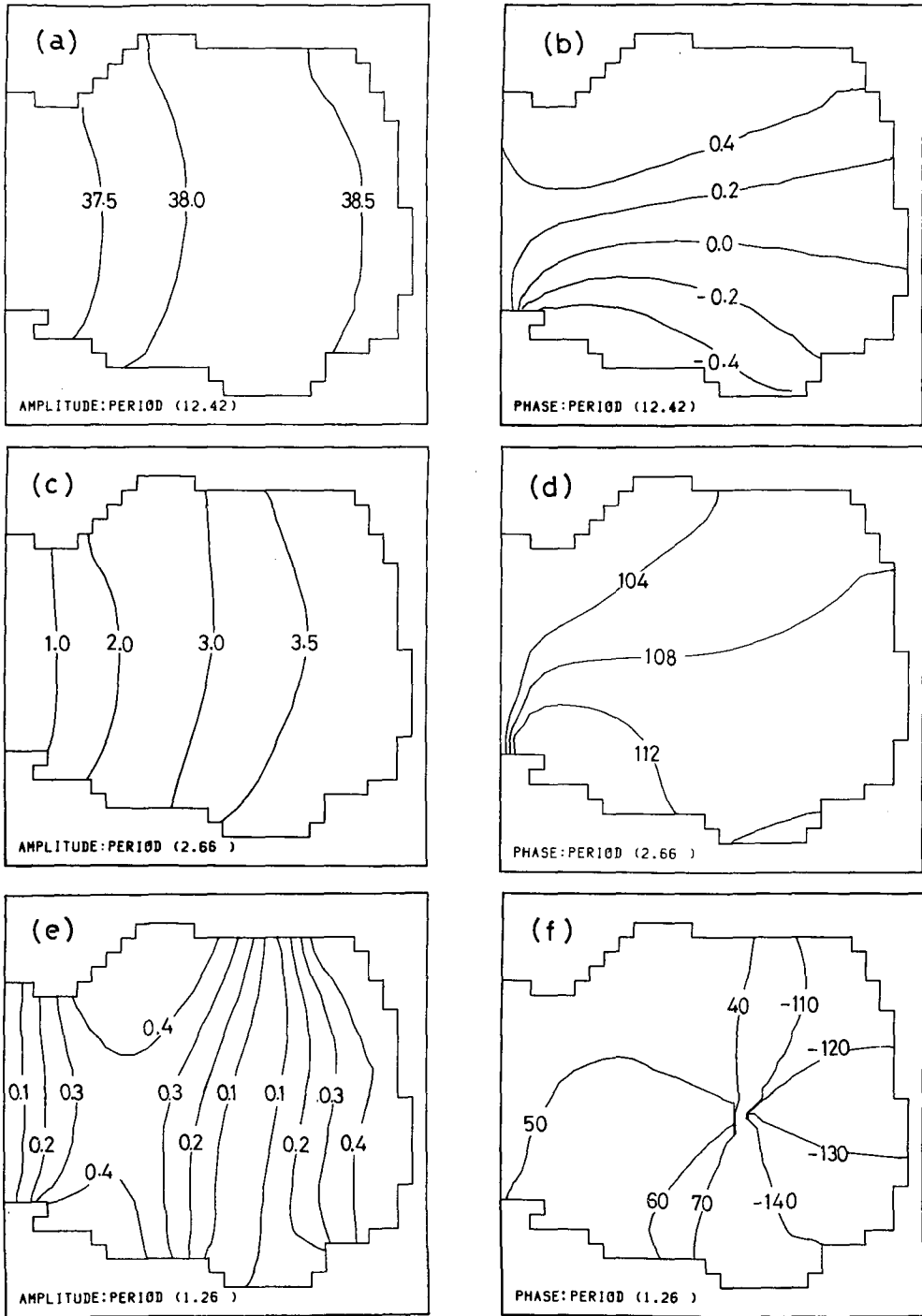


Fig. 8. Amplitude and phase patterns of elevation of frequency components corresponding to the spectral peaks of periods of 12.42, 2.66 and 1.26 hours, respectively.

12.42 時間, 2.66 時間, 1.26 時間の周期成分について, 振動および位相の分布をそれぞれ Fig. 8 (a); (b), (c); (d), (e); (f)に示す。

$M_2$  分潮の場合, 周期 12.42, 5.31, 3.36, 2.66, 2.20 時間の振幅は, いずれも湾口で一番小さく, 湾奥で最大である。代表例として周期 12.42 時間の場合の Fig. 8(a), (b)を参照されたい。

$K_1$  分潮の周期 23.93, 6.38, 3.64, 2.71, 2.32 時間の振幅も湾口で小さく湾奥で大きい。しかし  $K_1$  分潮の場合, 湾口と湾奥での振幅の差は小さく, 湾全体として振動している。

次に先に副振動と推察された 2.66~2.71 時間の周期についてみてみよう。一般に深さ一様な矩形の湾において, 湾の長さを  $l$ , 水深を  $h$  とすれば,

$$T = \frac{4l}{(2n-1)\sqrt{gh}} \quad (n=1, 2, \dots) \quad (13)$$

で表わされる固有周期を持つ定常波 (副振動) が存在し得る。この定常波は湾口で節, 湾奥で腹となる。これは, Fig. 8(c), (d)に見られる  $M_2$  分潮の場合の周期 2.66 時間成分の振動と位相の分布とよく一致する。

いま  $l=60$  km,  $n=1$ ,  $g=9.8$  m/sec<sup>2</sup>,  $h=70$  m とすれば,  $T=2.54$  時間となる。また  $n=2$  とすれば  $T=0.85$  時間となる。したがって,  $n=1$  の場合の周期 2.54 時間と先に得られた 2.66~2.71 時間周期とほぼ一致する。

一方,  $M_2$ ,  $K_1$  分潮のどちらにも存在した 1.26 時間周期の運動は Fig. 8(e), (f)に見られるように湾口と湾の中ほどに節があり, 湾奥で腹となっている。振動の様子から, これは副振動の第 2 モードのように見える。周期 1.26 時間と, 上で述べた  $n=2$  における周期 0.85 時間の差は 25 分であり, 少し差が大きく感じられる。しかし深さ一様な単純なモデルを考えているので, この程度の差は十分出てくる可能性がある。

#### IV. まとめと今後の課題

Table 1 に示した調和定数表によると,  $M_2$  分潮に関して室蘭と森では約 13°の位相差があり, また  $K_1$  分潮に関しては約 7°の位相差がある。ところが本実験では, ほとんど位相差があらわれていない。これは湾口での潮位の境界条件として位相差を与えなかったこと, あるいは水平渦動粘性係数  $A_H$ , 海底摩擦係数  $\gamma^2$  の値の選び方等いろいろ原因が考えられる。今後さらに実験してみる必要がある。

水位, 流速のスペクトルにおいて,  $M_2$  分潮,  $K_1$  分潮いずれの場合でもピークを示した 2.66~2.71 時間周期の変動は, 噴火湾固有の副振動の第 1 モードであり, 1.26 時間周期の変動はその第 2 モードであろう。またそれ以外の周期の変動は, 非線形項の影響によるものと思われる。

本実験はまだはじまったばかりであり, 現実の観測データと比較するにはまだ多くの改良すべき点がある。また実験結果がどの程度「現実的」であるか検討するにはまだまだ観測データが不十分な面もある。今後さらに多くの観測を行う必要もあろう。

謝辞 本論文をまとめるにあたり、計算機データ処理に関して御助言および御助力をいただいた当教室の竹内謙介講師に厚く謝意を表する。

なお、計算には北海道大学大型計算機センターの HITAC M-200 を使用した。

文 献

- 宇野木早苗, 1964. 東京湾における高潮の推算, 第二港湾建設局, p.125  
大谷清隆・木戸和男, 1980. 噴火湾の海洋構造, 北海道大学水産学部研究彙報, **31**, 84-114.  
中野猿人, 1940. 潮汐学, 生産技術センター (1975) 518 pp.