

港湾技術研究所報告

REPORT OF PORT AND HARBOUR TECHNICAL RESEARCH
INSTITUTE MINISTRY OF TRANSPORTATION, JAPAN

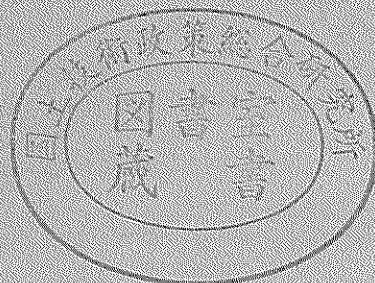
第3卷 7号

Vol. 3 No. 7

長周期波に対する防波堤の効果に関する計算(第2報)……伊 藤 喜 行
土 岐 祥 介
森 平 倫 生

1964年12月

運輸省港湾技術研究所



長周期波に対する防波堤の効果に関する計算（第2報）

目 次

I 計算ケース, A, BおよびC	
§1. 概 要	5
§2. 1次元考察	9
2.1 港口の伝達率と反射率	9
2.2 湾奥水位の時間的变化	12
2.3 湾口の伝達率と反射率	16
2.4 湾口の逆伝達率と逆反射率	18
2.5 湾奥水位の時間的变化	20
§3. 損失項・慣性項の評価	23
3.1 港口損失項の評価	23
3.2 底面摩擦項の評価	25
3.3 慣性項の評価	26
II 計算ケースDおよびE	
§4. 計算の内容	31
§5. 計算結果	38
5.1 湾奥水位に対する屈曲部の影響	38
5.2 屈曲部における慣性項の評価	39
5.3 防波堤の効果についての前回推定値との比較	42
III 計算ケースG	
§6. 計算の内容	45
§7. 計算結果	47
§8. 1次元考察	48
IV 計算ケースOおよびOB (大船渡湾に関する計算)	
§9. 計算の内容	51
9.1 概要	51
9.2 計算点の配置	51
9.3 湾内計算点に対する方程式	55
9.4 湾外計算点に対する方程式	55
9.5 湾口附近の計算点に対する方程式	56
9.6 湾口流速点に対する方程式	56
9.7 初期条件	56
9.8 境界条件	57
9.9 計算ケース	57
§10. 計算結果	58
10.1 現況における大船渡湾の振動特性	58

10.2 津波防波堤の効果	59
10.3 今後に残された問題点	60
附図—1～12, 19, 27～30, 33 の水位及び流速曲線の位置表示	61
附図—1～12 水位・流速の時間的変化 (D, E)	62
// 13～18 水面曲線 (D, E)	74
// 19 水位振幅の時間的変化 (D, E)	80
// 20 流速振幅の時間的変化 (D, E)	81
// 21～26 屈曲部附近の流速分布 (D, E)	82
// 27～30 水位・流速の時間的変化 (G)	88
// 31～32 水面曲線 (G)	92
// 33 水位振幅の時間的変化 (G)	94
// 34 流速振幅の時間的変化 (G)	95
// 35～44, 50, 51の水位及び流速曲線の位置表示	96
// 35～44 水位・流速の時間的変化 (O, OB)	97
// 45～49 水面曲線 (O, OB)	107
// 50 水位振幅の時間的変化 (O, OB)	112
// 51 流速振幅の時間的変化 (O, OB)	113
// 52～56 等水位線 (O, OB)	114
// 57～61 等最高水位線 (O, OB)	119

Digital Computation on the Effect of Breakwaters Against Long-period Waves. (2nd Report)

*Yoshiyuki Ito

**Shosuke Toki

***Michio Morihira

Synopsis

The effect of breakwaters against long-period waves, such as tsunami, is investigated in this report by numerical computation and its analysis, continuously to the preceding report published in 1962.

One of the main items to be studied is the phenomenon of resonance. However, as a tsunami usually attacks initially calm basin, the problem should be treated not only as a stationary state, but also as a transient state.

In principle, the calculation is to solve the equations of motion and the equation of continuity for two-dimensional long wave of small amplitude under certain initial and boundary conditions. The basic equations are transformed into difference equations and numerical computations are executed by electronic computers.

The incident wave profile is assumed to be a train of sinusoidal waves with a constant amplitude and period. These waves invade through a breakwater gap or a bay-mouth into a restricted water basin where the water is originally at rest.

There are various factors which will affect the phenomena. The investigation was begun with simplified cases so as not to lose the way and was put forward step by step examining the influence of each factor.

In the preceding report, the behaviour of waves through a breakwater gap situated in a semi-infinite channel with a rectangular crosssection of uniform depth was studied first. The wave invasion into a rectangular bay was also treated. After analyzing the result of these two-dimensional calculations, an approximate one-dimensional method was proposed.

The influence of the shape of bay and the reflexion from the innermost boundary inside the basin are discussed in the present report. In the last chapter of this report, the calculating method is applied to Ōfunato-bay, where a new anti-tsunami breakwater is under construction, taking into account the actual topographic condition and water depth distribution.

Although there remain some items which should be further investigated, the computation method established in the reports is widely applicable and is able to give us fairly definite informations necessary for planning and designing of anti-tsunami breakwaters. The approximate one-dimensional method is also useful for getting general resonance characteristics of the basin.

* Chief of Breakwater Laboratory, Hydraulics Division.

** Former Research Engineer, Breakwater Laboratory, Hydraulics Division.

*** Research Engineer, Breakwater Laboratory, Hydraulics Division.

長周期波に対する防波堤の効果に関する計算 (第2報)

*伊藤喜行, **土岐祥介, ***森平倫生

ま え が き

津波対策施設の一つとしての津波防波堤の効果を検討するため、われわれは種々の計算を行なって来た。その基本的なものは、すでに第1報において報告したとおりである。

その後、いくつかの問題点を検討した後、大船渡湾における具体的な地形条件に対応する計算を行なった。それらの結果が、この第2報に述べられている。

本報告の終りに述べているように、なお若干の問題点が残されて居り、それらが今後の課題となるものである。

なお、本報告における種々の計算は、昭和37年度に実施したものであるが、著者らの都合により、報告書の刊行がかなり遅れることとなった。

* 水工部, 防波堤研究室長

** 元水工部, 防波堤研究室

*** 水工部, 防波堤研究室

I. 計算ケースA, BおよびC

§1. 概要

計算ケースA, BおよびCに関する計算は昭和36年度に実施したもので、その内容はすでに第1報* に詳述されている。したがって本節では、そこで用いられた計算方法の要旨を再録するにとどめる。

津波のような長周期の波に対する防波堤の効果を求めるにあたって、われわれは“流入方式”と“波動方式”との2種類の計算方式によって検討を進めて来た。

第1報には流入方式による計算結果も述べられている。この方法は、港外に來襲した津波が港内との水位差に応じて港口から流入し、その水量によって港内水位が一様に上昇するという考え方に基づくものである。計算は比較的容易であるが、各点における水位や流速の分布を求められないほか、特に津波の波動的性質を考慮に入れていないため、湾の固有周期と津波の周期とに関係した共振的現象を解明することができず、これが最大の欠点となっている。

波動方式による計算は、流体の運動方程式および連続の方程式を適当な初期条件および境界条件のもとに解くことによって、上述のような共振的現象も含めて問題を究明しようとするものである。しかしながら、來襲する津波の諸性質、湾の形状の影響、計算の方法などのそれぞれに多くの問題点があるため、いきなり特定の具体的なケースについて計算を始めることは望ましくない。

そこで単純化されたモデルについての基礎的な計算から出発し、いろいろな要素の影響を検討しながら段階を追って計算を進めることとして、われわれはまず以下のような3ケースを取上げたわけである。

“計算ケースA”——図-1.1 に示すような等深等幅員の半無限矩形水路内に防波堤を設置し、最初静止していた水域に正弦波形の津波が來襲する場合を考えたもの、現象に係る要素として、來襲波の周期と防波堤内の固有周期（港口が閉じられたものとした場合の）との比 T/T_0 、港口のしほり B/b 、港内水域の細長比 l/B を取上げた。

“計算ケースB”——図-1.2 外海に開口する矩形湾の中へ津波が侵入する場合を対象としたもの。実際の計算では、外海を幅員 B_1 の矩形水路におきかえている。

“計算ケースC”——ケースAにおいては、港口における断面の急変に伴う水頭損失を無視したが、ケースCはこれを考慮に入れて計算を行なったものである。

以上の3種のモデルについて、パラメータをいろいろに変えて計26ケースの計算を電子計算機 (USSC) によって行なった。各ケースごとのパラメータの値は表-1.1 に示すとおりである。

しかしながら、実際に防波堤が設置されるのは、計算ケースAやCで扱ったような半無限水路の中ではなく、多くの場合外海に開口する湾の中のどこかである。このようなケースに対しても、全く同様な方法で計算を進めることができるが、第1報では上記諸ケースの計算結果を総合して、近似的な方法による推定を試みるだけとした。

図-1.1

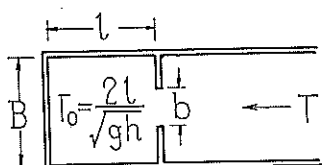
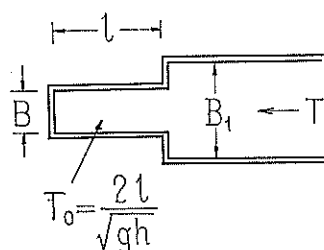


図-1.2



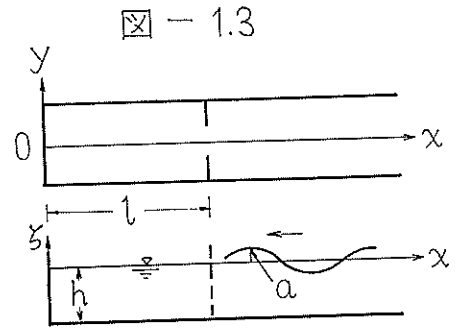
* 長周期波に対する防波堤の効果に関する計算：運輸省港湾局調査設計室，昭和37年3月。

第1報で用いた波動方式の計算法の概要は以下のとおりである。

(1) 基本方程式

図-1.3のように座標軸をとり、最初静止している水域へ、半無限正弦波形の波がx軸の負の向きに進行してくるものとする。来襲波の波長は水深に比して十分大きいものとし、したがって長波としての取扱いを行なう。

運動方程式および連続の方程式は、高次の項を省略すると次のとおりである。

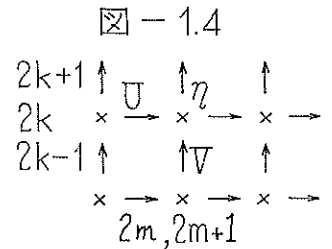


$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial t} &= -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} \\ \frac{\partial \zeta}{\partial t} &= -h \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \end{aligned} \right\} \text{ (1.1)}$$

実際の数値計算は、微分方程式を差分方程式に変換し、かつ無次元化をほどこして行なわれる。すなわち、無次元量として次のような値を導入する。

$$\eta = \frac{\zeta}{a}, \quad U = \frac{u}{\sqrt{\frac{g}{h}} a}, \quad V = \frac{v}{\sqrt{\frac{g}{h}} a}$$

計算点は図-1.4に示すように配置され、(1.1)式に対応する差分方程式は次のようになる。



$$\begin{aligned} & \eta_{2m+1,2k}(2n+1) - \eta_{2m+1,2k}(2n-1) \\ &= -\sqrt{E} \{ U_{2m+2,2k}(2n) - U_{2m,2k}(2n) \} \\ & \quad - \sqrt{F} \{ V_{2m+1,2k+1}(2n) - V_{2m+1,2k-1}(2n) \} \end{aligned} \text{ (1.3)}$$

$$\begin{aligned} & U_{2m,2k}(2n+2) - U_{2m,2k}(2n) \\ \text{[F]} \quad &= -\sqrt{E} \{ \eta_{2m+1,2k}(2n+1) - \eta_{2m-1,2k}(2n+1) \} \end{aligned} \text{ (1.4)}$$

$$\begin{aligned} & V_{2m+1,2k+1}(2n+2) - V_{2m+1,2k+1}(2n) \\ &= -\sqrt{F} \{ \eta_{2m+1,2k+2}(2n+1) - \eta_{2m+1,2k}(2n+1) \} \end{aligned} \text{ (1.5)}$$

ただし

$$\sqrt{E} = c \frac{\Delta t}{\Delta x}, \quad \sqrt{F} = c \frac{\Delta t}{\Delta y}, \quad (c^2 = gh)$$

注) 第1報では、無次元流速として

$$U = \frac{h}{a} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x} u, \quad V = \frac{h}{a} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta y} v \text{ (1.6)}$$

を用いたので、各方程式の形が本報告に示すものと異なっている場合があるから注意を要する。

(2) 港口損失を考慮した運動方程式

計算ケースCでは、港口における損失水頭を

$$d\zeta_l = f \frac{u^2}{2g} \quad \text{————— (1.7)}$$

とにおいて、港口流速 $U_{2\mu,0}(2n)$ を次式であたえている。

$$\left. \begin{aligned} U_{2\mu,0}(2n+2) &= \frac{1 - \sqrt{1+2KR}}{K\sqrt{E}} && R \geq 0 \text{ のとき} \\ &= \frac{-1 + \sqrt{1-2KR}}{K\sqrt{E}} && R \leq 0 \text{ のとき} \end{aligned} \right\} \text{————— (1.8)}$$

ただし

$$R = E \{ \eta_{2\mu+1,0}(2n+1) - \eta_{2\mu-1,0}(2n+1) \} + \frac{KE}{2} U_{2\mu,0}(2n) | U_{2\mu,0}(2n) | - \sqrt{E} U_{2\mu,0}(2n)$$

$$K = \frac{a}{h} \cdot \frac{f}{2}$$

(3) 初期条件

静止水域へ来襲する半無限正弦波の先端が防波堤設置位置に達したときを $t=0$ とし、そのときの流速分布 $U(0)$, $V(0)$ と、 $t=-4t/2$ における水位分布 $\eta(-1)$ とを初期条件としてあたえる。すなわち

$$\left. \begin{aligned} \eta_{2m+1,2k}(-1) &= \sin\left(\frac{2\pi}{L} \cdot \frac{2m+1-2\mu-\sqrt{E}}{2} \Delta x\right) && , m \geq \mu \\ &= 0 && , m < \mu \\ U_{2m,2k}(0) &= -\sin\left\{\frac{2\pi}{L}(m-\mu) \Delta x\right\} && , m \geq \mu \\ &= 0 && , m < \mu \\ V_{2m+1,2k+1}(0) &= 0 \end{aligned} \right\} \text{————— (1.9)}$$

となる。

(4) 境界条件

境界条件には2種類ある。第1は港奥、防波堤、水路側壁などにおいて、それらに直角方向の流速成分 U または $V=0$ とおくものである。

第2は、沖側の計算範囲終端における流速の時間的変化をあたえるもので、次式で示される。

$$U_{2M,2k}(2n) = -\sin n\theta \quad \text{————— (1.10)}$$

ただし

$$\cos\theta = 1 - E(1 - \cos\varphi), \quad \varphi = 2\pi \Delta x / L$$

この沖側境界は、一般に防波堤から3波長離れたところに設けられる。防波堤からの反射波がこの位置に到達してから後では、ここの流速は(1.10)式ではあたえられないが、計算の時間範囲すなわち6周期分の時間内ではその影響が堤内にまで及ぶことはない。同様に、8周期あるいは4周期分を計算の時間範囲とするときには、沖側境界は防波堤からそれぞれ4または2波長離れた位置に設けられる。

ケースA, B, Cに対する計算結果は、種々の観点から整理され、グラフとして第1報附図におさめられている。すなわち、各点における水位・流速の時間的変化、水位および流速振幅の時間的変化、各時刻ごとの水面曲線、港内最高水位や港口最大流速と各パラメータとの関係などのグラフである。

表-1.1 第1報計算ケース総括表

ケース	T/T_0	l/B	B/b	$l/\Delta x$	λ	α	β	E	E'	F	μ	$L/\Delta x$	$T/\Delta t$	θ	M	N	K	K'	沖側境界	波数	プリント	
A-1	1	2	3	5	1.2	1.562	1.302	0.4098	0.4098	0.5902	5	10	15.62	22°49'1	35	93	0	0	3L	6	全	
3			8	"	"	"	"	"	0.1537	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	
5		4	5	"	2.4	2.600	1.083	0.1479	0.08874	0.8521	"	"	26.00	13°39'1	"	155	"	"	"	"	"	
7		6	3	"	3.6	3.736	1.038	0.07163	0.07163	0.9284	"	"	37.36	9°29'3	"	223	"	"	"	"	毎2	
9			8	"	"	"	"	"	0.02686	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	
13	2	4	3	"	2.4	2.600	1.083	0.1479	0.1479	0.8521	"	20	52.00	6°53'7	65	311	"	"	"	"	毎3	
15			8	"	"	"	"	"	0.05546	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	
19	3	2	3	"	1.2	1.562	1.302	0.4098	0.4098	0.5902	"	30	46.85	7°40'5	95	281	"	"	"	"	"	
21			8	"	"	"	"	"	0.1537	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	
23		4	5	"	2.4	2.600	1.083	0.1479	0.08874	0.8521	"	"	78.00	4°36'5	"	467	"	"	"	"	毎4	
25		6	3	"	3.6	3.736	1.038	0.07163	0.07163	0.9284	"	"	112.08	3°12'4	"	671	"	"	"	"	毎6	
27			8	"	"	"	"	"	0.02685	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	
31	5	4	5	3	4.0	4.123	1.031	0.05882	0.03529	0.9412	3	30	123.69	2°54'3	63	495	"	"	"	"	毎8	
32	1.3	3.2	5.5	5	1.92	2.165	1.128	0.2134	0.1164	0.7866	5	13	28.15	12°41'6	44	168	"	"	"	"	全	
33		5.3	5.5	"	3.18	3.334	1.048	0.08999	0.04909	0.9110	"	"	43.34	8°14'0	"	259	"	"	"	"	毎2	
34	3.5	3.2	5.5	3	3.20	3.353	1.048	0.08897	0.04853	0.9110	3	21	70.41	5°05'4	66	419	"	"	"	"	毎4	
35		5.3	5.5	"	5.30	5.395	1.018	0.03438	0.01875	0.9656	"	"	113.30	3°09'8	"	678	"	"	"	"	毎7	
(B ₁ /B)																						
B-28	1	6	(3)	5	1.2	1.562	1.302	0.4098	—	0.5902	—	10	15.62	22°49'2	35	93	—	—	3L	6	全	
29	2	6	(3)	"	"	"	"	"	—	"	—	20	31.24	11°29'7	65	187	—	—	"	"	毎2	
30	3	6	(3)	"	"	"	"	"	—	"	—	30	46.85	7°40'5	95	281	—	—	"	"	毎3	
C-36	1	4	5	5	2.4	2.600	1.083	0.1479	0.08874	0.8521	5	10	26.0	13°39'1	45	208	0.21	0.35	4L	8	全	
38	1.3	"	5	"	"	"	"	"	"	"	"	13	33.8	10°33'5	31	135	"	"	"	"	毎2	
39	2	"	3	"	"	"	"	"	0.1479	"	"	20	52.0	6°53'9	45	208	"	0.21	0.21	2L	4	毎3
41	2	"	8	"	"	"	"	"	0.05546	"	"	"	"	"	"	"	"	0.56	"	"	"	"
43	3	"	5	"	"	"	"	"	0.08874	"	"	30	78.0	4°36'5	65	312	"	0.35	"	"	"	毎4
45	5	"	5	3	4.0	4.123	1.031	0.05882	0.03529	0.9412	3	"	123.7	2°54'3	63	495	"	"	"	"	毎8	

§2. 1 次元の考察

ケースA, B, Cに対する計算は、平面的に2次元の現象として取扱ったものであるが、計算結果によると、湾口や港口の近傍を除くと、水路の横方向における変化は極めて小さいことがわかった。したがって、横方向の変化を無視した1次元の取扱いによってもかなり良好な近似を得ることができると考えられる。

特に、ケースAおよびBのように、湾の形状が単純で、基本式中に慣性項や損失項を含んでいない場合には、1次元計算法の誘導も比較的容易である。

第1報では、ケースA, Bの定常状態に対する1次元計算法を導びいたほか、1次元の観点から2次元計算結果の考察を試みた。ここでは過渡状態をも含めた更に一般的な取扱いを示すことにする。

2.1 港口の伝達率と反射率

無限長水路内に防波堤を設置した場合、来襲波の1部は防波堤によって反射され、1部は港口を通過して伝達される。ここで、来襲波、反射波および通過波の無次元化された水位・流速を次のように考える。

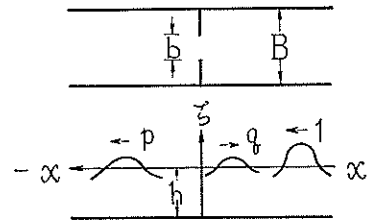


図 - 2.1

$$\left. \begin{array}{l} \text{来襲波 : 水位 ; } \eta_i = \sin(kx + \sigma t) \\ \text{流速 ; } U_i = -\sin(kx + \sigma t) \end{array} \right\} \text{----- (2.1)}$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{反射波 : 水位 ; } \eta_r = q \sin(kx - \sigma t - \rho_1) \\ \text{流速 ; } U_r = q \sin(kx - \sigma t - \rho_1) \end{array} \right\} \text{----- (2.2)}$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{通過波 : 水位 ; } \eta_t = p \sin(kx + \sigma t - \rho_2) \\ \text{流速 ; } U_t = -p \sin(kx + \sigma t - \rho_2) \end{array} \right\} \text{----- (2.3)}$$

ただし

$$k = 2\pi/L, \quad \sigma = 2\pi/T$$

ここで、 p および q はそれぞれ伝達率および反射率を示し、また ρ_1, ρ_2 は反射または通過に伴う位相の変化をあらわす。

防波堤内外の水位および流速は

$$\text{堤外 : } \eta = \eta_i + \eta_r, \quad U = U_i + U_r$$

$$\text{堤内 : } \eta = \eta_t, \quad U = U_t$$

となる。

港口流速 $U(0, t)$ に対する差分化された運動方程式と、 $U(0, t)$ を含む同じく連続の方程式は、1次元的に考えると次のような形となる。

$$U(0, t + \Delta t) - U(0, t) = -\sqrt{E} \left\{ \eta \left(\frac{\Delta x}{2}, t + \frac{\Delta t}{2} \right) - \eta \left(-\frac{\Delta x}{2}, t + \frac{\Delta t}{2} \right) \right\} \text{----- (2.4)}$$

$$\eta \left(\frac{\Delta x}{2}, t + \frac{\Delta t}{2} \right) - \eta \left(\frac{\Delta x}{2}, t - \frac{\Delta t}{2} \right) = -\sqrt{E} \left\{ U(\Delta x, t) - \frac{b}{B} U(0, t) \right\} \text{----- (2.5)}$$

$$\eta \left(-\frac{\Delta x}{2}, t + \frac{\Delta t}{2} \right) - \eta \left(-\frac{\Delta x}{2}, t - \frac{\Delta t}{2} \right) = -\sqrt{E} \left\{ \frac{b}{B} U(0, t) - U(-\Delta x, t) \right\} \text{----- (2.6)}$$

ここで、1 次元的に取扱う場合には更に

$$\sqrt{E} = \sqrt{gh} \frac{dt}{dx} = 1$$

とおいて簡単にすることができる。

まず (2.5) 式に (2.1) および (2.2) 式を代入すると

$$\frac{b}{B} U(0, t) = -\sin \sigma t - q \sin(\sigma t + \rho_1) \quad \text{-----} \quad (2.7)$$

となる。同様に (2.6) 式に (2.3) 式を代入すると

$$\frac{b}{B} U(0, t) = -p \sin(\sigma t - \rho_2) \quad \text{-----} \quad (2.8)$$

となる。したがって

$$p \sin(\sigma t - \rho_2) = \sin \sigma t + q \sin(\sigma t + \rho_1) \quad \text{-----} \quad (2.9)$$

あるいは

$$\left. \begin{aligned} p \cos \rho_2 &= 1 + q \cos \rho_1 \\ p \sin \rho_2 &= -q \sin \rho_1 \end{aligned} \right\} \quad \text{-----} \quad (2.10)$$

なる関係が得られる。

次に (2.4) 式左辺に (2.8) 式を用い、また右辺には (2.1) ~ (2.3) 式を代入して、両辺の $\cos \sigma t$, $\sin \sigma t$ の係数をそれぞれ等しいとおくと

$$\left. \begin{aligned} \frac{B}{b} \sin \varphi \cdot p \cos \rho_2 + \left(\frac{B}{b} - 2 - \frac{B}{b} \cos \varphi \right) p \sin \rho_2 &= \sin \varphi \\ \left(\frac{B}{b} - 2 - \frac{B}{b} \cos \varphi \right) p \cos \rho_2 - \frac{B}{b} \sin \varphi \cdot p \sin \rho_2 &= -(1 + \cos \varphi) \end{aligned} \right\} \quad (2.11)$$

ただし

$$\varphi = k \Delta x = \sigma \Delta t$$

となり、これを解くと

$$\left. \begin{aligned} p \cos \rho_2 &= \frac{1}{1 + \left(\frac{B}{b} - 1 \right)^2 \tan^2 \frac{\varphi}{2}} \\ p \sin \rho_2 &= \frac{\left(\frac{B}{b} - 1 \right) \tan \frac{\varphi}{2}}{1 + \left(\frac{B}{b} - 1 \right)^2 \tan^2 \frac{\varphi}{2}} \end{aligned} \right\} \quad \text{-----} \quad (2.12)$$

またこの関係を (2.10) 式に代入すると

$$\left. \begin{aligned} q \cos \rho_1 &= -\frac{\left(\frac{B}{b} - 1 \right)^2 \tan^2 \frac{\varphi}{2}}{1 + \left(\frac{B}{b} - 1 \right)^2 \tan^2 \frac{\varphi}{2}} \\ q \sin \rho_1 &= -\frac{\left(\frac{B}{b} - 1 \right) \tan \frac{\varphi}{2}}{1 + \left(\frac{B}{b} - 1 \right)^2 \tan^2 \frac{\varphi}{2}} \end{aligned} \right\} \quad \text{-----} \quad (2.13)$$

が得られる。

これらが港口における通過波および反射波の波高変化ならびに位相変化をあたえる式である。

なお上式によると

$$\left. \begin{aligned} p^2 &= \frac{1}{1 + \left(\frac{B}{b} - 1\right)^2 \tan^2 \frac{\varphi}{2}} \\ q^2 &= \frac{\left(\frac{B}{b} - 1\right)^2 \tan^2 \frac{\varphi}{2}}{1 + \left(\frac{B}{b} - 1\right)^2 \tan^2 \frac{\varphi}{2}} \end{aligned} \right\} (2.14)$$

であるから、

$$p^2 + q^2 = 1$$

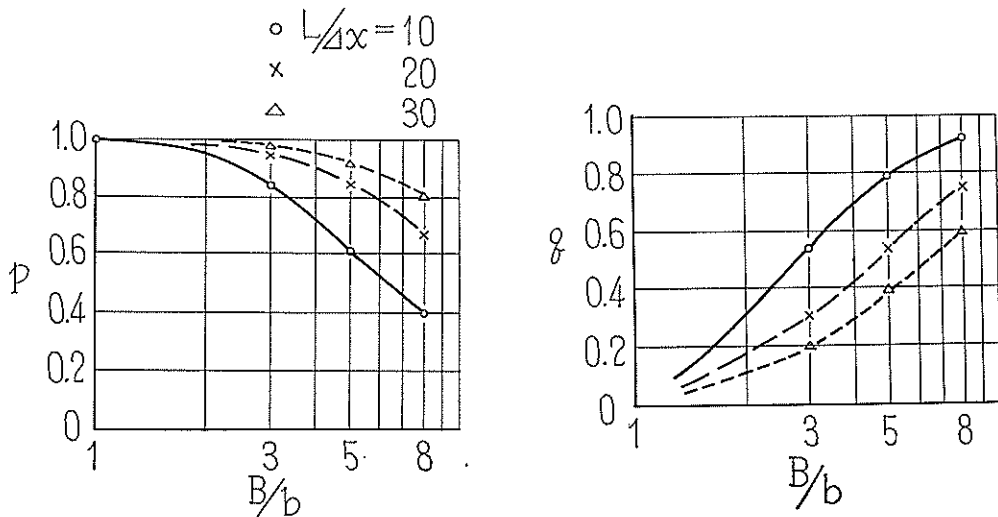
となってエネルギー保存の関係が満足されている。

(2.12), (2.13) 両式を用いた若干の計算例を示すと、表—2.1 および図—2.2 のようになる。

表—2.1 港口伝達率および反射率

$L/\Delta x$	B/b	p	ρ_2	q	ρ_1
10	3	0.839	32°58'	0.545	236°59'
	5	0.610	52°25'	0.793	217°32'
	8	0.402	66°18'	0.915	203°48'
20	3	0.953	17°38'	0.301	252°29'
	5	0.845	32°20'	0.535	237°39'
	8	0.670	47°56'	0.743	222°01'
30	3	0.979	11°46'	0.205	258°10'
	5	0.922	22°47'	0.388	247°10'
	8	0.806	36°18'	0.593	233°38'
13	5	0.712	44°36'	0.702	225°25'

これによると、 p および q の値は B/b が等しくても、格子間隔すなわち $L/\Delta x$ のとりかたによってかなりの差が見られる。第1報では2次元計算の結果を解析して港口伝達率および反射率を算出し、その変化を T/T_0 の



図—2.2 港口伝達率および反射率

違いによる影響と考えて図示したが(第1報図—6.13 および図—6.15), これは T/T_0 に応じて $L/\Delta x$ を変えていたことに起因するものと修正する方が妥当と考えられる。

2.2 港奥水位の時間的变化

防波堤の背後の領域が無限長でなく、港奥が限られている場合の港内水位は、港口からの通過波のほかに、その波の港奥からの反射波、更にその港口からの反射波、………の重ね合せとなる。

いま最初の波の先端が港奥に到達したときを $t=0$ として、各成分波の波高変化および位相のおくれを考慮して重ね合わせると、港奥水位 η_0 の時間的变化は次のように表わされる。

$$\begin{aligned}
 t=0 \sim T_0 & ; \quad \eta_0 = 2p \sin at \\
 t=T_0 \sim 2T_0 & ; \quad \eta_0 = 2p \sin at + 2pq \sin (at + \rho_1 - \pi - \lambda) \\
 t=2T_0 \sim 3T_0 & ; \quad \eta_0 = 2p \sin at + 2pq \sin (at + \rho_1 - \pi - \lambda) \\
 & \quad + 2pq^2 \sin (at + 2\rho_1 - 2\pi - 2\lambda) \\
 & \dots\dots\dots \\
 & \dots\dots\dots \\
 t=nT_0 \sim (n+1)T_0 & ; \quad \eta_0 = 2p \sum_{n=0}^n q^n \sin [at + n(\rho_1 - \pi - \lambda)]
 \end{aligned}$$

ただし

$$T_0 = \frac{2l}{c}, \quad \lambda = 2\pi \frac{T_0}{T}$$

定常状態に対しては $n \rightarrow \infty$ とおくことにより

$$\begin{aligned}
 \eta_0 &= 2p \{ \sin at - q \sin (at + \rho_1 - \lambda) + q^2 \sin (at + 2\rho_1 - 2\lambda) \dots\dots\dots \} \\
 &= \frac{2p}{1 + q^2 + 2q \cos (\rho_1 - \lambda)} \{ [1 + q \cos (\rho_1 - \lambda)] \sin at - q \sin (\rho_1 - \lambda) \cos at \} \dots\dots\dots (2.15)
 \end{aligned}$$

この合成波の振幅 A は

$$A = \frac{2p}{\sqrt{1 + q^2 + 2q \cos (\rho_1 - \lambda)}} \dots\dots\dots (2.16)$$

で示される。この式における p, q, ρ_1 に対して (2.12) ~ (2.13) 式を用いると、定常状態について導びいた第1報 (6.13) 式と完全に一致する。

なお、(2.12) ~ (2.13) 式は無限水路中での定常的な状態に対して導びかれたものであるから、静水トを進行する波の先端附近には必ずしもあてはまらないかも知れない。しかし、上述の方法によって過渡状態における水位変化の状況がよく理解される。

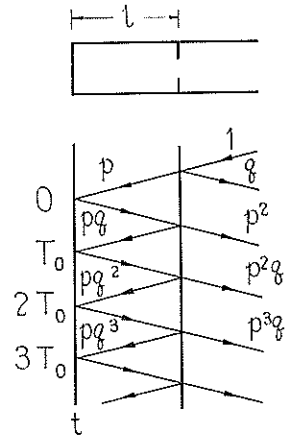
図—2.4 は港奥における水位振幅の時間的变化を数例について画いたもので、その傾向は2次元計算の結果とよく一致している。特に $T/T_0=1$ の場合に、水位振幅がビート状に変化しながら次第に定常状態に向う状況がよく示されている。

波が港口から反射するときに位相のずれを伴うので、 $T/T_0=1$ のときには共振現象は起らない、港内に共振を生ずる条件は

$$\rho_1 - \pi - \lambda = -2m\pi \quad (m=1, 2, 3, \dots\dots) \dots\dots\dots (2.17)$$

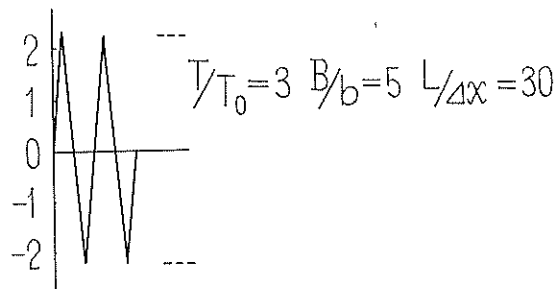
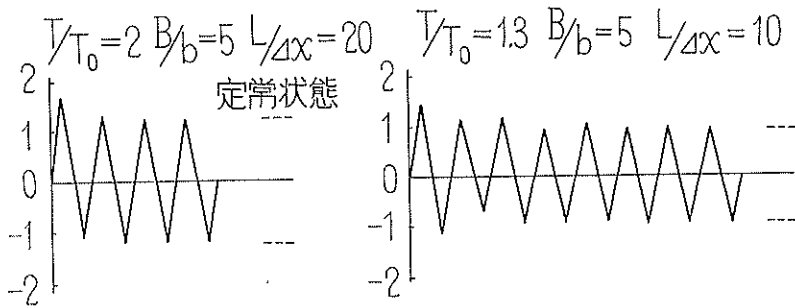
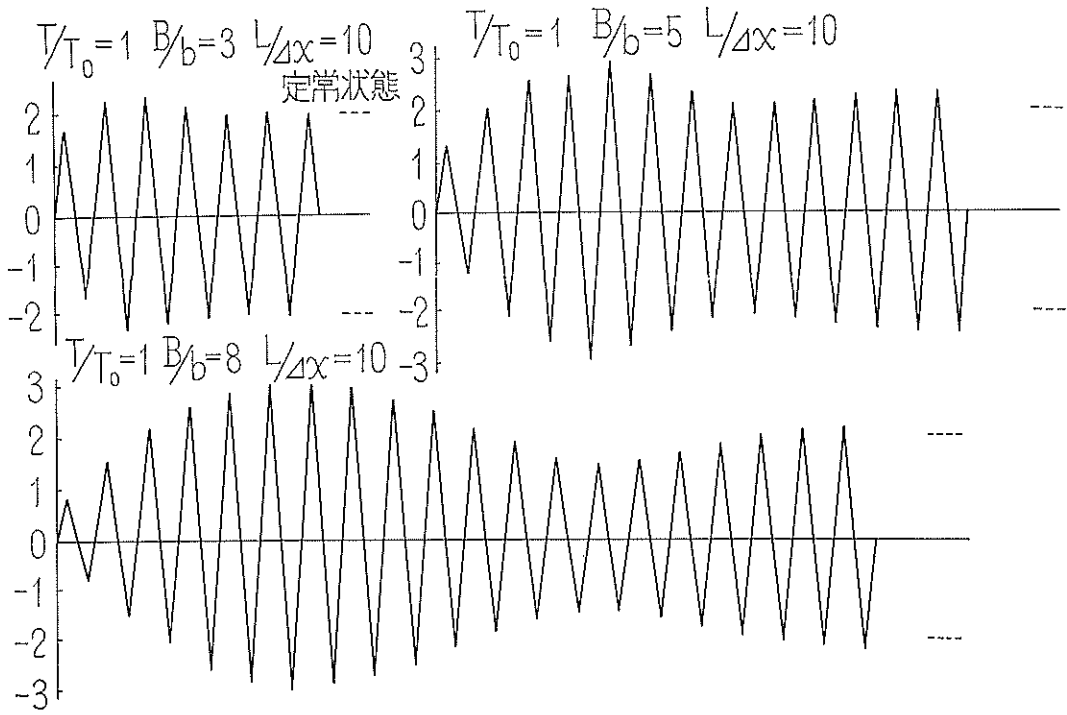
であたえられる。すなわち共振周期の条件は

$$\begin{aligned}
 \frac{T}{T_0} &= \frac{2\pi}{\lambda} \\
 &= \frac{2\pi}{\rho_1 + (2m-1)\pi} \dots\dots\dots (2.18)
 \end{aligned}$$



図—2.3

図-2.4 港奥水位の時間的变化



となる。表—2.2 はこれから算出された T/T_0 の値を示すものである。

しかし、このような共振時にも港奥水位は無限に増大するわけではない。(2.17) 式の共振条件は

$$\cos(\rho_1 - \lambda) = \cos\{(2m+1)\pi\} = -1 \quad \text{————— (2.19)}$$

と書きかえることができ、これと (2.16) 式とから、極限における港奥水位振幅は

$$A = \frac{2p}{\sqrt{1+q^2}-2q} = \frac{2p}{1-q} \quad \text{————— (2.20)}$$

で示されることがわかる。表—2.3 および図—2.5 に若干の計算例を示す。

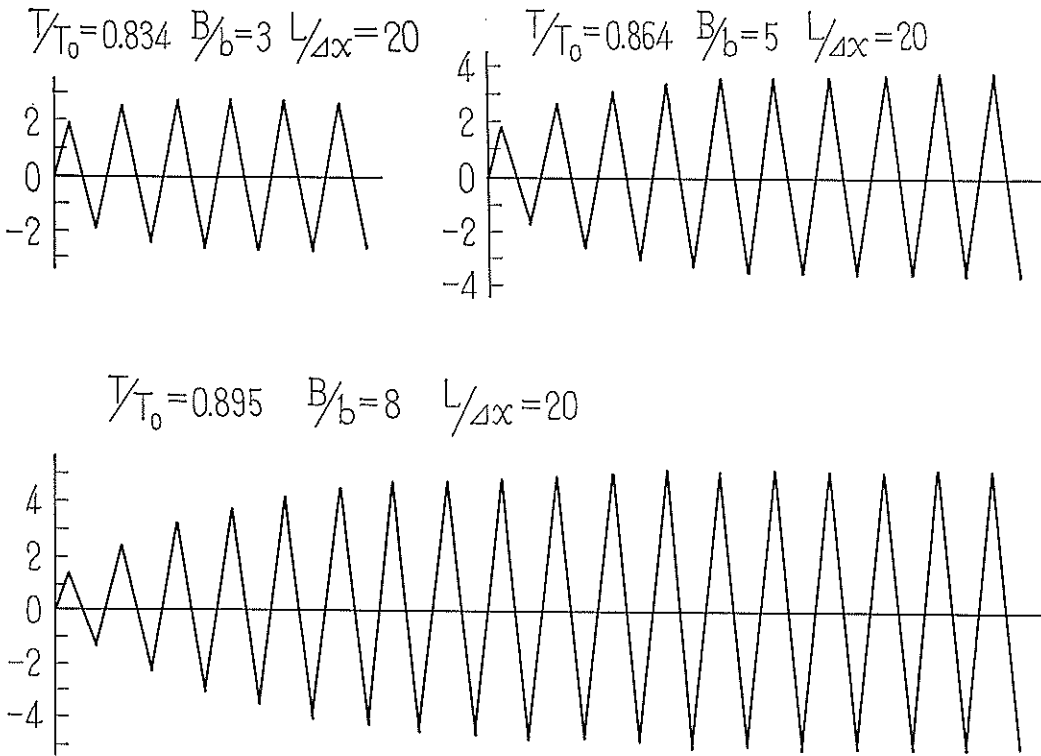
表—2.2 共振周期

$L/\Delta x$	B/b	T/T_0		
		$m=1$	$m=2$	$m=3$
10	3	0.864	0.463	0.317
	5	0.906	0.475	0.322
	8	0.915	0.485	0.326
20	3	0.834	0.454	0.312
	5	0.864	0.463	0.316
	8	0.895	0.473	0.321
30	3	0.823	0.451	0.311
	5	0.844	0.457	0.314
	8	0.870	0.466	0.318

表—2.3 共振時の港奥水位振幅

$L/\Delta x$	B/b	p	q	A
10	3	0.839	0.545	3.69
	5	0.610	0.793	5.89
	8	0.402	0.915	9.45
20	3	0.953	0.301	2.72
	5	0.845	0.535	3.64
	8	0.670	0.743	5.21
30	3	0.979	0.205	2.46
	5	0.922	0.388	3.02
	8	0.806	0.593	3.96

図-2.5 共振時の港奥水位の時間的变化



注) 港内における水位変化の作図法

港内の任意点における水位の時間的变化は、上述の考え方を応用した作図法によって、以下のように求めることができる。

港奥から x なる距離にある点を考え、港口から侵入した第1波の先端がここに到達したときを $t=0$ とすると、 $t=2x/c$ 以後は、港奥からの反射波がこれに加わる。それから更に $2(l-x)/c$ 時間以後は、港口からの再反射波が位相の変化を伴ってこれに加わり、更にまた $2x/c$ 時間以後は、その波が港奥から反射して加算され、以下同様なことがくり返される。

いま、例として

$$L=2l, \quad (T/T_0=1)$$

$$B/b=5$$

$$L/\Delta x=10$$

$$x=l/3$$

とすると、表-2.1 から

$$p=0.610$$

$$q=0.793$$

$$\rho_1=217^\circ 32'$$

が得られる。 x 点を港奥へ向って通過した波が、港奥から反射して戻って来るのに要する時間は、角度として考

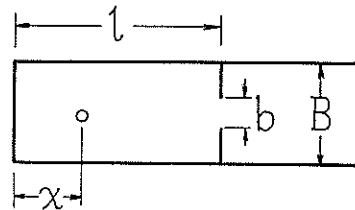


図-2.6

えると

$$\begin{aligned} \frac{2\pi}{T} \cdot \frac{2x}{c} &= 4\pi \frac{x}{l} \cdot \frac{l}{L} \\ &= 720^\circ \times \frac{1}{3} \times \frac{1}{2} \\ &= 120^\circ \end{aligned}$$

また、 x 点を港口へ向って通過した波が港口から反射して戻って来るまでの時間は、同じく角度で表わすと

$$\begin{aligned} \frac{2\pi}{T} \cdot \frac{2(l-x)}{c} &= 4\pi \frac{l-x}{l} \cdot \frac{l}{L} \\ &= 720^\circ \times \frac{2}{3} \times \frac{1}{2} \\ &= 240^\circ \end{aligned}$$

港口から反射するとき、 $\rho_1 - \pi = 37^\circ 32'$ だけ位相が進むので、上記の 240° の代りに、 $240^\circ - 37^\circ 32' = 202^\circ 28'$ 以後から港口からの反射波が加算されるものとする。

さて、水位の時間的变化は、円周上を移動する点の射影として求められる。図-2.7 において、先ず半径 $\overline{OA} = p$ なる円周上を A 点から出発した点は、 120° だけ進行して A' 点に達したとき、港奥からの反射波と合成される。すなわち、 $\overline{A'B} = p$ として B 点に移動する。

B 点から $202^\circ 28'$ だけ進んで B' 点に達すると、港口からの反射波が加わるので、 $\overline{B'C} = pq$ なる C 点へ移る。そこから 120° 進んで $\overline{C'D} = pq^2$ なる D 点へ、更に $202^\circ 28'$ 進んで $\overline{D'E} = pq^3$ なる E 点へ移り、以下同様な手順がくり返される。各円周が鉛直軸を過ぎる点が、各山または谷の水位を示すこととなる。

図-2.7 作 法

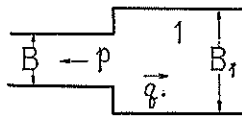
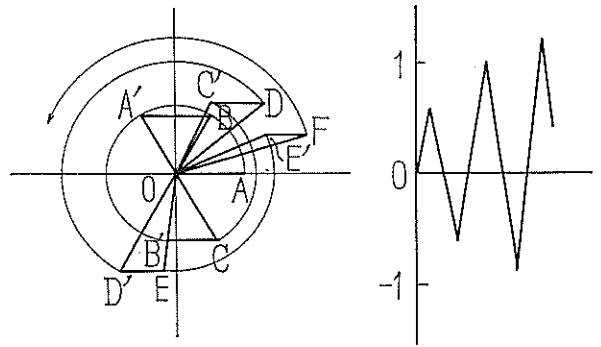


図-2.8

2.3 湾口の伝達率と反射率

来襲波、反射波、伝達波の水位・流速は、港口に対するのと同じく (2.1) ~ (2.3) 式であたえられるものとする。湾口流速に対する運動方程式は (2.4) 式と同じであるが、連続の方程式は次のようになる。

$$\eta \left(\frac{Dx}{2}, t + \frac{Dt}{2} \right) - \eta \left(\frac{Dx}{2}, t - \frac{Dt}{2} \right) = -\sqrt{E} \left\{ U(Dx, t) - \frac{B}{B_1} U(0, t) \right\} \quad (2.21)$$

$$\eta \left(-\frac{Dx}{2}, t + \frac{Dt}{2} \right) - \eta \left(-\frac{Dx}{2}, t - \frac{Dt}{2} \right) = -\sqrt{E} \left\{ U(0, t) - U(-Dx, t) \right\} \quad (2.22)$$

前と全く同様の方法で、(2.21) および (2.1), (2.2) 式より

$$\frac{B}{B_1} U(0, t) = -\sin \omega t - q \sin(\omega t + \rho_1) \quad (2.23)$$

また (2.22) および (2.3) 式より

$$U(0, t) = -p \sin(\sigma t - \rho_2) \quad \text{-----} \quad (2.24)$$

したがって

$$\frac{B_1}{B} \left\{ \sin \sigma t + q \sin(\sigma t + \rho_1) \right\} = p \sin(\sigma t - \rho_2) \quad \text{-----} \quad (2.25)$$

あるいは

$$\left. \begin{aligned} \frac{B_1}{B} (1 + q \cos \rho_1) &= p \cos \rho_2 \\ \frac{B_1}{B} q \sin \rho_1 &= -p \sin \rho_2 \end{aligned} \right\} \quad \text{-----} \quad (2.26)$$

次に (2.4) 式左辺に (2.24) 式を用い、右辺に (2.1) ~ (2.3) 式を代入して両辺の $\cos \sigma t$, $\sin \sigma t$ の係数を等しいとおくと

$$\left. \begin{aligned} \frac{B_1}{B} \sin \varphi \cdot q \cos \rho_1 + \left(1 + \frac{B_1}{B} \cos \varphi\right) q \sin \rho_1 &= -\left(\frac{B_1}{B} - 1\right) \sin \varphi \\ \left(1 + \frac{B_1}{B} \cos \varphi\right) q \cos \rho_1 - \frac{B_1}{B} \sin \varphi \cdot q \sin \rho_1 &= -\left(\frac{B_1}{B} - 1\right) \cos \varphi \end{aligned} \right\} \quad \text{-----} \quad (2.27)$$

となり、これを解くと

$$\left. \begin{aligned} q \cos \rho_1 &= -\frac{\left(\frac{B_1}{B} - 1\right) \left(\frac{B_1}{B} + \cos \varphi\right)}{\left(\frac{B_1}{B}\right)^2 + 2\frac{B_1}{B} \cos \varphi + 1} \\ q \sin \rho_1 &= -\frac{\left(\frac{B_1}{B} - 1\right) \sin \varphi}{\left(\frac{B_1}{B}\right)^2 + 2\frac{B_1}{B} \cos \varphi + 1} \end{aligned} \right\} \quad \text{-----} \quad (2.28)$$

また

$$\left. \begin{aligned} p \cos \rho_2 &= \frac{\frac{B_1}{B} \left(\frac{B_1}{B} + 1\right) (1 + \cos \varphi)}{\left(\frac{B_1}{B}\right)^2 + 2\frac{B_1}{B} \cos \varphi + 1} \\ p \sin \rho_2 &= \frac{\frac{B_1}{B} \left(\frac{B_1}{B} - 1\right) \sin \varphi}{\left(\frac{B_1}{B}\right)^2 + 2\frac{B_1}{B} \cos \varphi + 1} \end{aligned} \right\} \quad \text{-----} \quad (2.29)$$

が得られる。

なお、これらによって

$$\left. \begin{aligned} p^2 &= \frac{2 \left(\frac{B_1}{B}\right)^2 (1 + \cos \varphi)}{\left(\frac{B_1}{B}\right)^2 + 2\frac{B_1}{B} \cos \varphi + 1} \\ q^2 &= \frac{\left(\frac{B_1}{B} - 1\right)^2}{\left(\frac{B_1}{B}\right)^2 + 2\frac{B_1}{B} \cos \varphi + 1} \end{aligned} \right\} \quad \text{-----} \quad (2.30)$$

であるから

$$Bp^2 + B_1q^2 = B$$

となってエネルギー保存の関係が満足されることがわかる。

格子間隔を細かくして $\varphi \rightarrow 0$ なる極限を考えると

$$\left. \begin{aligned} p &= \frac{2 \frac{B_1}{B}}{\frac{B_1}{B} + 1}, & \rho_2 &= 0 \\ q &= \frac{\frac{B_1}{B} - 1}{\frac{B_1}{B} + 1}, & \rho_1 &= \pi \end{aligned} \right\} \quad (2.31)$$

となり、この場合には $p=1+q$ なる関係が見出される。

計算ケースBでは $B_1/B=3$ として2次元計算を行なったが、(2.31)式からはこれに対して $p=1.5$ なる値が得られ、2次元計算の結果とよく一致している。

数値計算例を表-2.4 および図-2.9 に示す。この場合には、前の港口伝達率あるいは反射率とちがって、格子間隔のとり方の影響は極めて小さい。

図-2.9 湾口伝達率および反射率 (2.31)式による

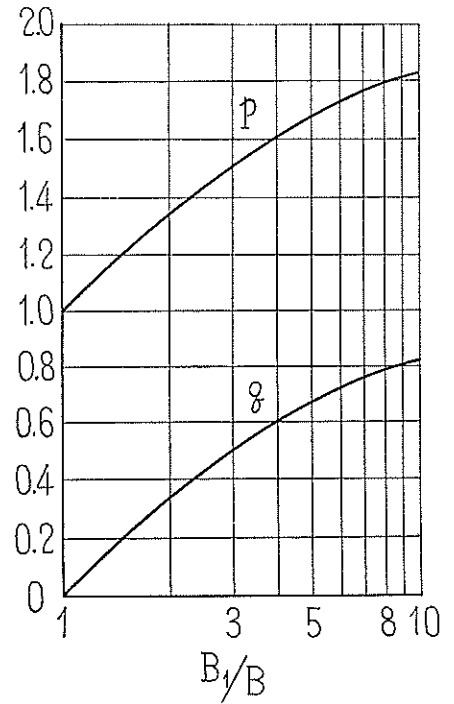


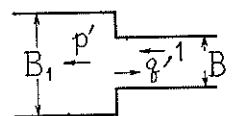
表-2.4 湾口伝達率および反射率

$L/\Delta x$	B_1/B	p	ρ_2	q	ρ_1
10	3	1.481	9°13'	0.519	188°47'
20	3	1.495	4°32'	0.505	184°28'
30	3	1.497	3°00'	0.502	182°59'

2.4 湾口の逆伝達率と逆反射率

今度は波の進行方向に断面の拡大がある場合について考える。これまでと同様な方法で次の結果が得られる。

図-2.10



$$p' \cos \rho_2' = \frac{\left(\frac{B_1}{B} + 1\right)(1 + \cos \varphi)}{\left(\frac{B_1}{B}\right)^2 + 2\frac{B_1}{B} \cos \varphi + 1}$$

$$p' \sin \rho_2' = \frac{\left(\frac{B_1}{B} - 1\right) \sin \varphi}{\left(\frac{B_1}{B}\right)^2 + 2\frac{B_1}{B} \cos \varphi + 1}$$

$$q' \cos \rho_1' = \frac{\left(\frac{B_1}{B} - 1\right)\left(\frac{B_1}{B} \cos \varphi + 1\right)}{\left(\frac{B_1}{B}\right)^2 + 2\frac{B_1}{B} \cos \varphi + 1}$$

$$q' \sin \rho_1' = -\frac{\frac{B_1}{B} \left(\frac{B_1}{B} - 1\right) \sin \varphi}{\left(\frac{B_1}{B}\right)^2 + 2\frac{B_1}{B} \cos \varphi + 1}$$

$$p'^2 = \frac{2(1 + \cos \varphi)}{\left(\frac{B_1}{B}\right)^2 + 2\frac{B_1}{B} \cos \varphi + 1}$$

$$q'^2 = \frac{\left(\frac{B_1}{B} - 1\right)^2}{\left(\frac{B_1}{B}\right)^2 + 2\frac{B_1}{B} \cos \varphi + 1}$$

この場合にも

$$B_1 p'^2 + B q'^2 = B$$

となってエネルギー保存の関係が満足されている。

また、 $\varphi \rightarrow 0$ なる極限では

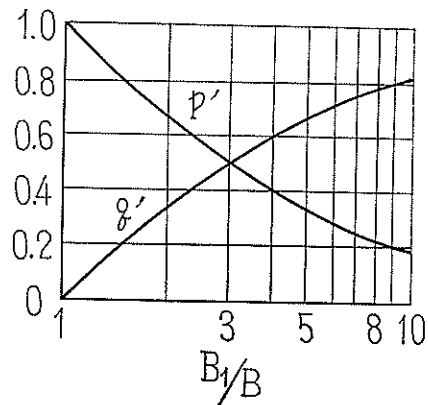
$$p' = \frac{2}{\frac{B_1}{B} + 1}, \quad \rho_2' = 0$$

$$q' = \frac{\frac{B_1}{B} - 1}{\frac{B_1}{B} + 1}, \quad \rho_1' = 0$$

となって、 $p' = 1 - q'$ なる関係がある。

表-2.5 および図-2.11 に若干の計算例が示されている。

図-2.11 湾口逆伝達率と逆反射率



表—2.5 湾口逆伝達率および逆反射率

$L/\Delta x$	B_1/B	p'	ρ_2'	q'	ρ_1'
10	3	0.494	9°14'	0.519	-27°12'
20	3	0.498	4°31'	0.505	-13°31'
30	3	0.500	3°00'	0.502	-9°00'

2.5 湾奥水位の時間的变化

湾奥における水位の時間的变化は、さきの湾奥水位の場合と同じ考え
方によって

$$t = nT_0 \sim (n+1)T_0;$$

$$\eta_0 = 2p \sum_{n=0}^{\infty} q'^n \{ \sin \omega t + n(\rho_1' - \pi - \lambda) \} \quad \text{--- (2.36)}$$

であたえられる。

定常状態に達したときの振幅は

$$A = \frac{2p}{\sqrt{1+q'^2+2q' \cos(\rho_1' - \lambda)}} \quad \text{--- (2.37)}$$

となり、この中の p, q', ρ_1' に (2.29) および (2.33) 式を用いると、
第1報 (6.25) 式と完全に一致する。

この場合の共振条件は

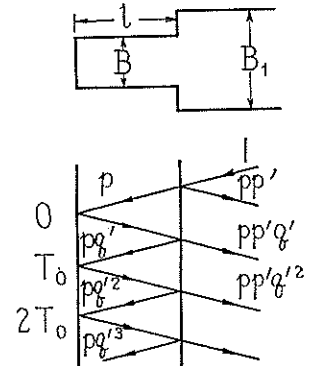
$$\frac{T}{T_0} = \frac{2\pi}{\rho_1' + (2m-1)\pi} \rightarrow \frac{2}{2m-1} \quad \text{--- (2.38)}$$

であり、湾奥水位振幅は

$$A = \frac{2p}{1-q'} \rightarrow 2 \frac{B_1}{B} \quad \text{--- (2.39)}$$

となる。表—2.6 および図—2.13に若干の計算例が示されている。

図—2.12

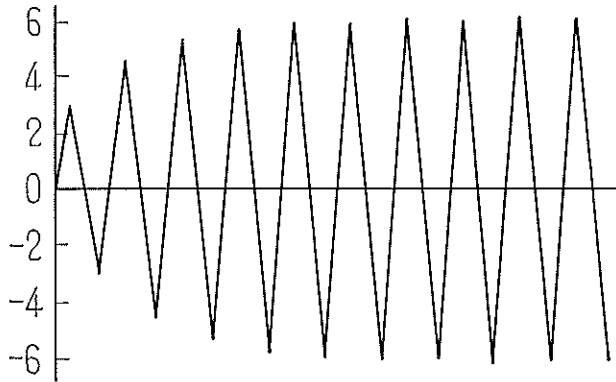


表—2.6 共振周期および湾奥水位振幅

$L/\Delta x$	B_1/B	T/T_0			A
		$m=1$	$m=2$	$m=3$	
10	3	2.35	0.702	0.412	6.16
20	3	2.16	0.684	0.403	6.04
30	3	2.10	0.678	0.404	6.01

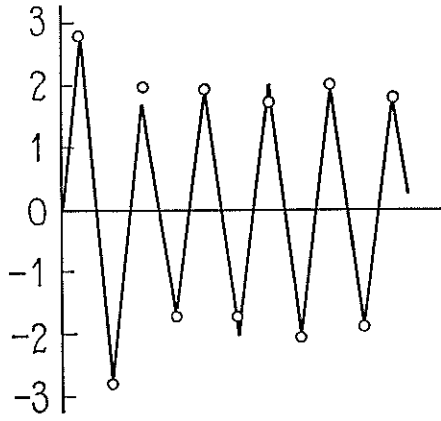
図—2.13 共振時の湾奥水位の時間的变化

$$T/T_0 = 2.16 \quad B_1/B = 3 \quad L/\Delta x = 20$$

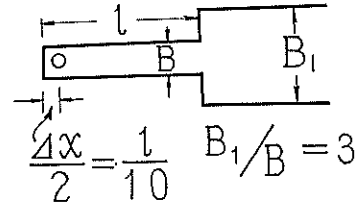


湾奥以外の任意の点についても、同様な考え方で入射波、反射波、再反射波……を重ね合わせることで、水位の時間的变化を求めることができる。ケースBにおける最も湾奥寄りの水位点についてこれを求めて見ると、図—2.14のようになる。同図に示された2次元計算の結果と比較することによって、この1次元近似計算法の精度をうかがい知ることができる。

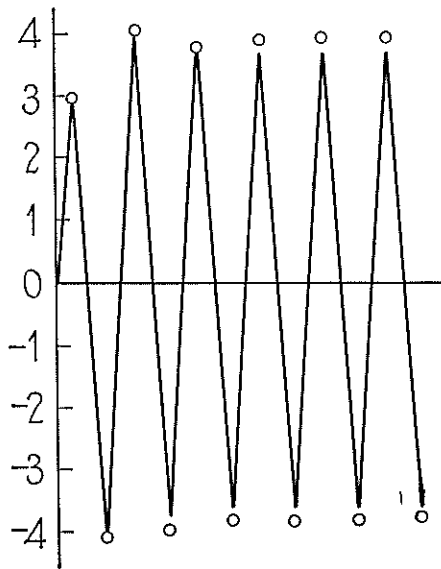
B-28 $T/T_0 = 1$ $L/\Delta x = 10$



— 1次元計算
○ 2次元計算



B-30 $T/T_0 = 3$ $L/\Delta x = 30$



B-29 $T/T_0 = 2$ $L/\Delta x = 20$

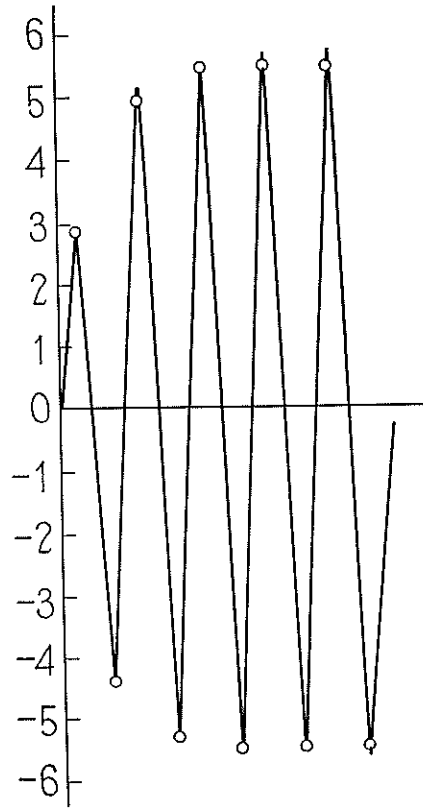


図-2.14 湾内水位の時間的变化

§3. 損失項・慣性項の評価

計算ケースA, B, Cの2次元計算に用いた基本方程式は、微小振幅の長波に対するものである。ケースCで港口損失を考慮に入れたほかは、慣性項・損失項などすべての高次の項は省略されている。

しかし、厳密に云えばこれらの項を無視するわけには行かない場合が生ずる筈である。そこで、各項が方程式中に占める重要さについて、ケースCの計算結果を利用して検討を試みることにする。

3.1 港口損失項の評価

ケースA（港口損失を無視した場合）とケースC（港口損失を考慮した場合）との計算結果を比較してわかるように、この損失項の影響はかなり大きい。

港口損失は $\Delta \zeta_t = f u^2 / 2g$ で表わされ、港口の流速点に対する無次元化された運動方程式は

$$\Delta_t U = -\sqrt{E} \Delta_x \eta - \frac{a}{h} \cdot \frac{f}{2} \sqrt{E} U|U| \quad \text{———— (3.1)}$$

である。したがって港口損失項と加速度項との比は

$$\frac{a}{h} \cdot \frac{f}{2} \frac{\sqrt{E} U|U|}{\Delta_t U} \quad \text{———— (3.2)}$$

となる。

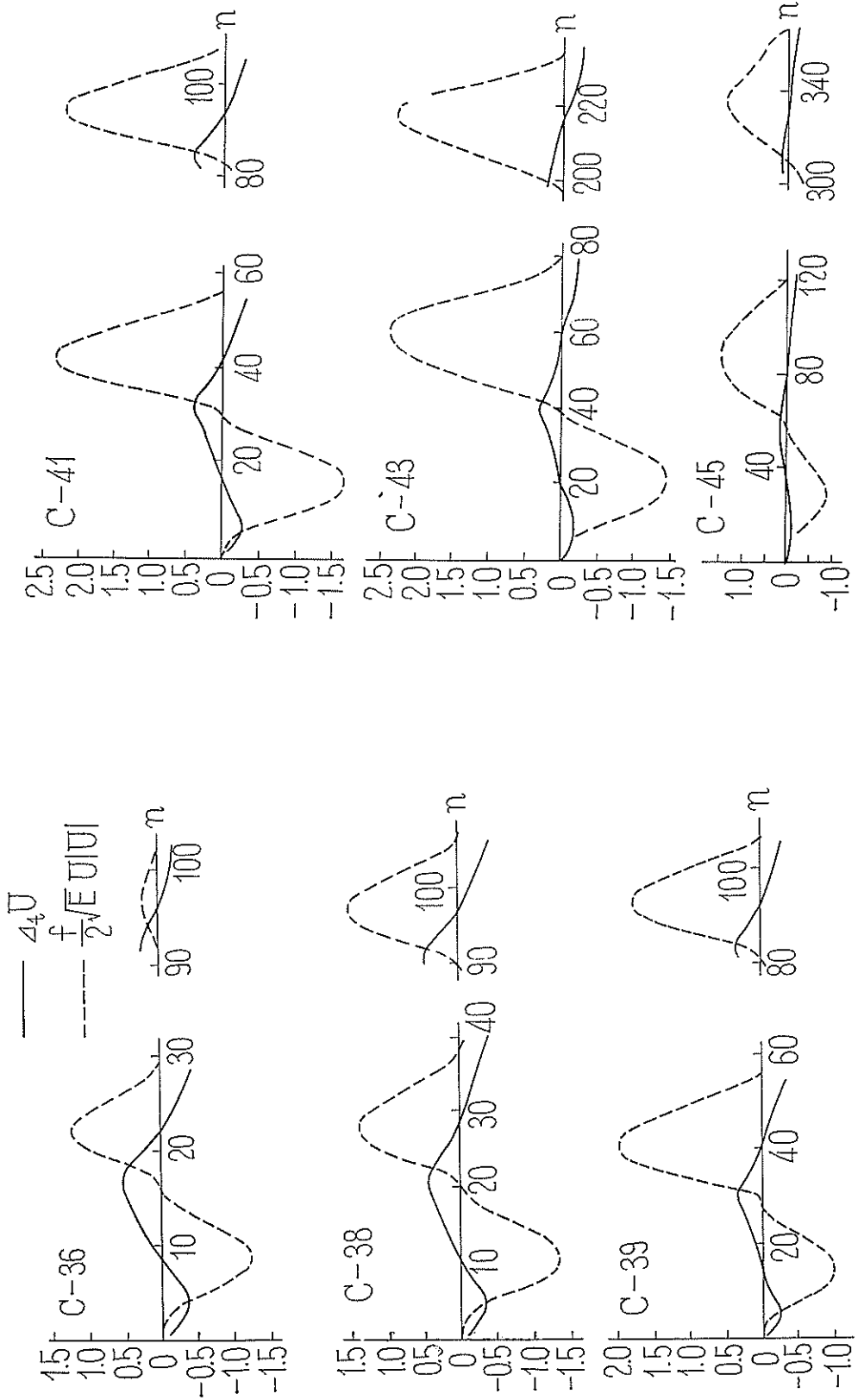
さて、ケースCの計算結果から、 $\Delta_t U$ と $f\sqrt{E} U|U|/2$ とを算出して比較してみると図-3.1のようになる。また、表-3.1はそれぞれの最大値を示すものである。

表-3.1 加速度項と港口損失項との比較

ケース	過渡状態 ¹⁾		定常状態 ²⁾	
	$\Delta_t U$	$\frac{f}{2} \sqrt{E} U U $	$\Delta_t U$	$\frac{f}{2} \sqrt{E} U U $
C-36	0.55	1.22	0.26	0.26
38	0.47	1.40	0.49	1.53
39	0.34	1.98	0.34	1.77
41	0.42	2.31	0.42	2.21
43	0.31	2.36	0.26	2.31
45	0.16	1.44	0.21	1.36

1) 最初の1周期, 2) 第2~3波目

図-3.1 港口流速における加速度項と損失項の比較



これによると、 $f\sqrt{E}U|U|/2$ は d_tU よりもはるかに大きい場合が多い。この両者の比に a/h を掛けたものが損失項と加速度項の比を表わすから、もし両者が同程度で a/h が小さいときには損失項を省略してもその影響は小さい。しかし、 $f\sqrt{E}U|U|/2$ が d_tU の数倍にも達しているような場合には、 a/h がかなり小さくても損失項は加速度項と comparable な値になり得るから、それを無視することは適当でない。ケースCでは $a/h = 0.2 \sim 0.3$ 程度と考えて計算を行ない、その結果として損失項の影響がかなり見られたわけである。

$f\sqrt{E}U|U|/2d_tU$ も a/h も共に大きい場合には加速度項を無視することができ、(3.1)式は

$$\frac{a}{h} \cdot \frac{f}{2} U|U| = -d_x \eta$$

すなわち

$$u = \frac{1}{\sqrt{f}} \sqrt{2g d_x \zeta} \quad \text{--- (3.3)}$$

の形となる。これは流入式の計算に用いられている関係である。

3.2 底面摩擦項の評価

海底摩擦に対して Manning の抵抗法則が適用されるものと考え、運動方程式は

$$\frac{Du}{Dt} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{gn^2}{(h+\zeta)^{4/3}} u|u| \quad \text{--- (3.4)}$$

のように表わされる。

半波高 A なる微小振幅の長波では、粒子速度 u および粒子加速度 $\partial u/\partial t$ の最大値はそれぞれ

$$U_{\max} = \frac{c}{h} A, \quad \left(\frac{\partial u}{\partial t}\right)_{\max} = \frac{2\pi}{T} \cdot \frac{c}{h} A \quad \text{--- (3.5)}$$

である。これを用いると底面摩擦項の最大値は $(gn^2/h^{4/3}) \cdot (c^2 A^2/h^2)$ となり、したがって加速度項との比は

$$\frac{T}{2\pi} \cdot \frac{gn^2}{h^{4/3}} \cdot \frac{c}{h} A = \frac{T}{2\pi} \cdot \frac{g^{3/2} n^2}{h^{5/6}} \cdot \frac{A}{h} \quad \text{--- (3.6)}$$

となる。

いま、 $h=10 \sim 30\text{m}$ 、 $T=10 \sim 60$ 分を考え、 $n=0.025$ (m-sec) として (3.6) 式を計算してみると表-3.2 のような値となる。

表-3.2 底面摩擦項と加速度項の比較

h	T	(3.6) 式
10 m	10~60分	(0.27~1.61) $\frac{A}{h}$
20	"	(0.15~0.91) $\frac{A}{h}$
30	"	(0.11~0.65) $\frac{A}{h}$

これによると、水深がかなり小さく、周期がかなり長い場合を除くと、一般に底面摩擦項と加速度項との比は A/h よりも更に小さいオーダーとなって、その影響はそれ程大きくない。

次に港口における底面摩擦項と港口損失項とを比較してみよう。港口をはさむ距離 d_x 間の底面摩擦による損失水頭は $n^2 u^2 d_x / h^{4/3}$ であるから、港口損失水頭 $f u^2 / 2g$ との比は

$$\frac{2gn^2\Delta x}{fh^{4/3}} = \frac{2g^{3/2}n^2T}{fh^{5/6}} \cdot \frac{\Delta x}{L} \quad (3.7)$$

となる。この比は水深が小さく、周期が長い程大きくなるから、いま $h=10\text{m}$, $T=60\text{分}$, $L/\Delta x=30$ として計算してみると 0.45 となって、港口部では底面摩擦よりも港口損失の方が支配的であることがわかる。

3.3 慣性項の評価

半波高 A なる微小振幅の長波についての流速を用いると、慣性項 $u \partial u / \partial x$ と加速度項 $\partial u / \partial t$ との比は A/h となる。したがって波高が水深に比して小さい限り、慣性項は近似的に省略される。

しかし、2次元的に運動している場合、特に港口や湾口附近のように流況が急変するところでは、慣性項が著しく増大することが考えられる。

いま慣性項・加速度項を (1.2) 式によって無次元化すると

$$u \frac{\partial u}{\partial x} = \left(\frac{c}{h} a \right)^2 U \frac{\Delta_x U}{\Delta x}, \quad \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{c}{h} a \frac{\Delta_t U}{\Delta t}$$

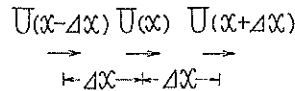
であるから、その比は

$$\frac{u \frac{\partial u}{\partial x}}{\frac{\partial u}{\partial t}} = \frac{\sqrt{E} U \Delta_x U}{\Delta_t U} \cdot \frac{a}{h} \quad (3.8)$$

図-3.2

で表わされる。

図-3.2 のように配置された流速点について



$$(U \Delta_x U)_x = U(x) \frac{U(x+\Delta x) - U(x-\Delta x)}{2} \quad (3.9)$$

ととり、ケースCの港口附近数点における慣性項・加速度項の最大値を求めてみると表-3.3 のような値が得られる。

これを見ると、港口では $\Delta_t U$ と $\sqrt{E} U \Delta_x U$ とがほぼ同程度となっている場合が多く、したがって慣性項は加速度項にくらべて a/h のオーダーだけ小さい。これに反して、隣接流速点では $\Delta_t U$ よりも $\sqrt{E} U \Delta_x U$ の方がはるかに大きく、多くの場合4~5倍程度にまで達している。したがって、そこでは a/h が小さくても必ずしも慣性項を無視することはできない。

表-3.3 港口附近における慣性項と加速度項の比較 (ケースC)

計算ケース	流速点 ㊸		流速点 ㊹		流速点 ㊺	
	$\Delta_t U$	$\sqrt{E} U \Delta_x U$	$\Delta_t U$	$\sqrt{E} U \Delta_x U$	$\Delta_t U$	$\sqrt{E} U \Delta_x U$
C-36	0.55~0.26	0.36~0.34	0.23~0.29	0.42~0.31	0.33~0.42	0.29~0.21
38	0.47~0.49	0.42~0.36	0.13~0.10	0.23~0.23	0.23~0.23	0.23~0.23
39	0.34~0.34	0.13~0.10	0.08~0.08	0.34~0.31	0.10~0.10	0.10~0.03
41	0.42~0.42	0.21~0.21	0.10~0.05	0.18~0.16	0.10~0.10	0.16~0.16
43	0.31~0.26	0.13~0.10	0.05~0.05	0.29~0.23	0.05~0.05	0.05~0.05
45	0.16~0.21	0.12~0.12	0.04~0.04	0.16~0.16	0.04~0.04	0.08~0.04

1) 流速点の位置は図-3.3のとおり 2) 数値は、過渡状態~定常状態の各最大値を示す

これらは港口における流れの集中のために生じたもので、港口の隣接点では速度勾配 $\partial u/\partial x$ が極めて大きいため、 $u \partial u/\partial x$ も大きな値となる。これに反して、港口では流速がその附近の最大であるから $\partial u/\partial x$ が小さく、 u が大きいても $u \partial u/\partial x$ はそれ程大きくない。

また港口付近では、水路の軸方向における流速の変化のほかに、横方向の流況変化を生じているため

$$\frac{Du}{Dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y}$$

の右辺第3項 $v \partial u/\partial y$ が問題となる。われわれの用いた基本方程式は、港口流速点以外では (1.1) 式であるから

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial v}{\partial x} \quad \text{———— (3.10)}$$

なる関係がある。したがって

$$v \frac{\partial u}{\partial y} = v \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial (v^2)}{\partial x} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta_x v^2}{\Delta x} \quad \text{———— (3.11)}$$

となり、これを無次元化して加速度項との比をとると

$$\frac{v \frac{\partial u}{\partial y}}{\frac{\partial u}{\partial t}} = \frac{\frac{1}{2} \sqrt{E} \Delta_x V^2}{\Delta_t U} \cdot \frac{a}{h} \quad \text{———— (3.12)}$$

となる。

また、これと比較するために、 $u \partial u/\partial x$ に対しても (3.8) 式の代わりに次のような表現を用いる。

$$\frac{u \frac{\partial u}{\partial x}}{\frac{\partial u}{\partial t}} = \frac{\frac{1}{2} \cdot \frac{\partial (u^2)}{\partial x}}{\frac{\partial u}{\partial t}} = \frac{\frac{1}{2} \sqrt{E} \Delta_x U^2}{\Delta_t U} \quad \text{———— (3.13)}$$

計算ケースCの第2～3波目についてこれらの値を算出してみると、図—3.4 に示すような分布が得られる。 $\sqrt{E} \Delta_x U^2/2$ は前の結果と同様に、港口とその隣接点との間で極めて大きな値となっている。しかし、 $\sqrt{E} \Delta_x V^2/2$ はここで求められた限りでは極めて小さい。

図—3.5 はケースBの計算結果から同様の作業を行なったものである。この場合には、湾内における慣性項がかなり大きくなっているが、これは次のように考えることができる。

定常状態における湾内の定常波を

$$\zeta = A \cos kx \cos \sigma t \quad \text{———— (3.14)}$$

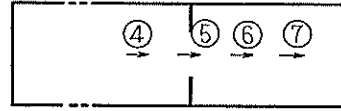
と表わすと、その流速は

$$u = \frac{c}{h} A \sin kx \sin \sigma t \quad \text{———— (3.15)}$$

となる。これを用いれば

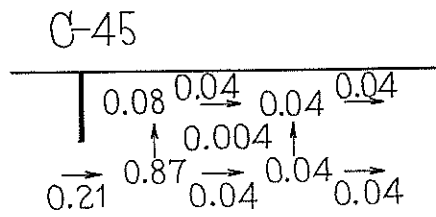
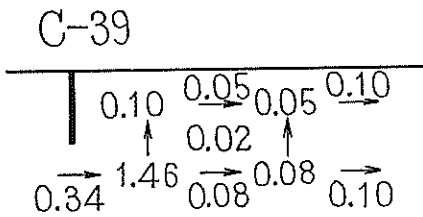
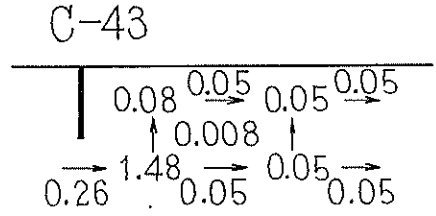
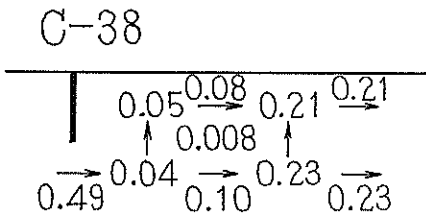
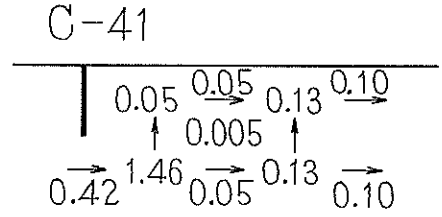
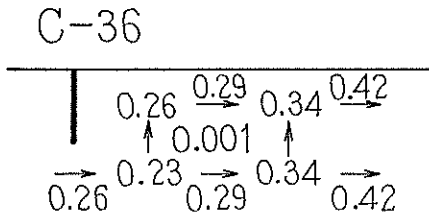
$$\left. \begin{aligned} u \frac{\partial u}{\partial x} &= k \left(\frac{c}{h} \right)^2 A^2 \sin kx \cos kx \sin^2 \sigma t \\ \frac{\partial u}{\partial t} &= \sigma \frac{c}{h} A \sin kx \cos \sigma t \end{aligned} \right\} \text{———— (3.15)}$$

となり、したがって慣性項は $\sin 2kx=1$ 、すなわち定常波の腹と節とのちょうど中間において最大となる。

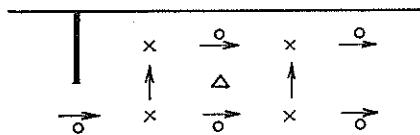


図—3.3

図-3.4 慣性項と加速度項との比較
(ケースC, 定常状態.)



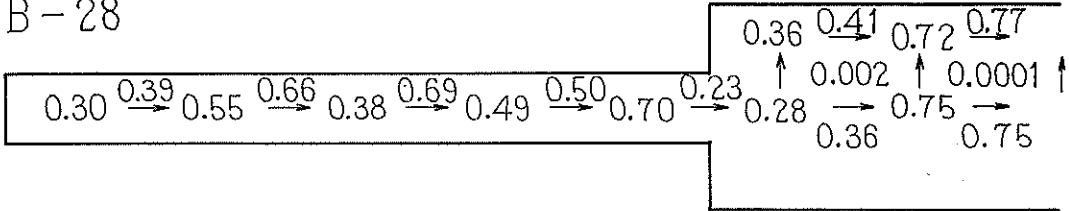
凡 例



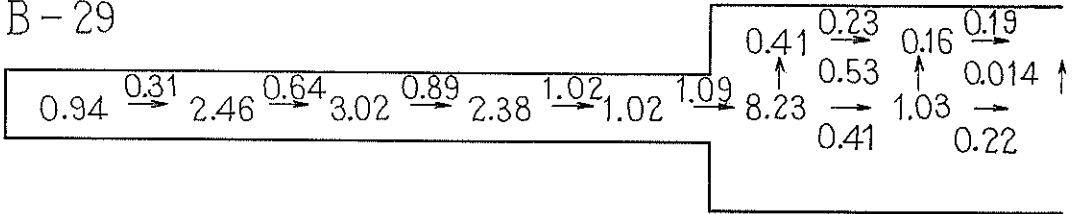
$$\begin{aligned}
 \circ & \Delta_t U \\
 \times & \frac{\sqrt{E}}{2} \Delta_x U^2 \\
 \triangle & \frac{\sqrt{E}}{2} \Delta_x V^2
 \end{aligned}$$

図-3.5 慣性項と加速度項との比較
(ケースB, 定常状態)

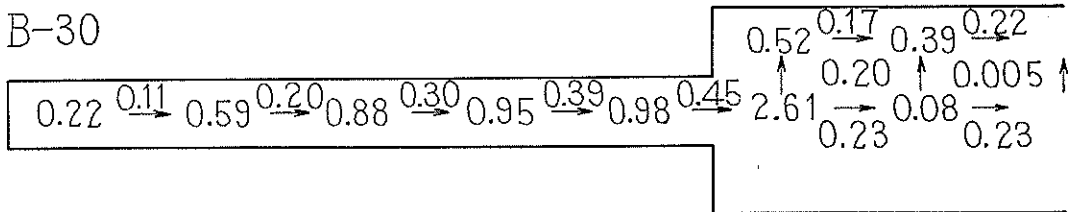
B-28



B-29



B-30



この位置は、ケースB-28では湾奥および湾口からそれぞれ湾長の 1/4 の点、B-29では湾の中央、B-30では湾口から 1/4 の点に相当する。

また、(3.15) 式から慣性項と加速度項との比は

$$\frac{k}{a} \cdot \frac{c}{h} A \cos kx = \frac{a}{h} \cdot \frac{A}{a} \cos kx \quad \text{———— (3.16)}$$

となるが、これは両者の比が定常波の腹の附近で他よりも大きいことを意味している。

以上述べて来たように、波高が水深に比してかなり大きい場合や流況の急変するところでは慣性項を考慮することが必要である。もっとも上記の数値は、慣性項を無視して行なった計算結果を用いて算出したものであるから、これを考慮して行なった計算では若干異なるものとなるかも知れないし、また最終的な水位や流速の値にどの程度の影響をもつものであるかを予測することはできない。このほか、実際の計算にあたっては、慣性項をいかなる形で計算式の中へとり入れるか、また格子間隔をどの程度にとるかなどが問題となるであろう。

II. 計算ケース D および E

§4. 計算の内容

これまでの計算では、湾の平面形は細長い矩形として取扱って来た。しかし、例えば大船渡湾のように、湾のほぼ中央部で湾軸がほとんど直角に曲っているようなところもある。

本章における計算は、主としてこのような湾軸の曲りの影響を検討しようとしたものである。なお、屈曲部では慣性項が重要となってくることが予想されるが、今回はひとまずそれを無視して計算を行なってみた。

図-4.1 は今回の計算の対象とした湾のモデルで、等幅等深で直角に折れ曲っている。これを図-4.2 に示す各区域に分割し、それぞれを closed basin と考えたときの固有周期の比を求めると次のようになる。

$$T_0 : T_1 : T_2 : T_3 : T_4 : T_5 = 8 : 5 : 2 : 4 : 2 : 6 \quad \text{----- (4.1)}$$

図-4.1 モデル湾(ケースD,E)

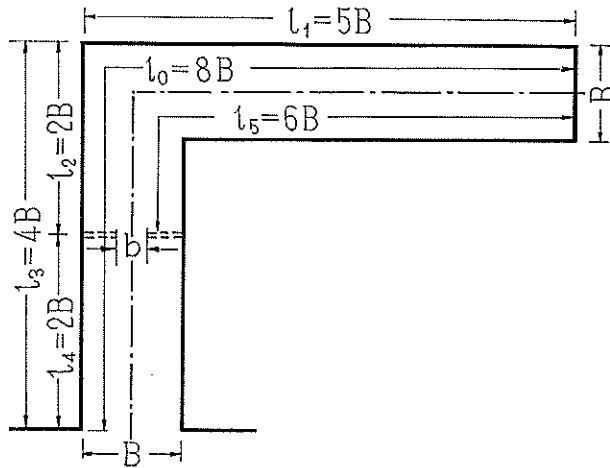
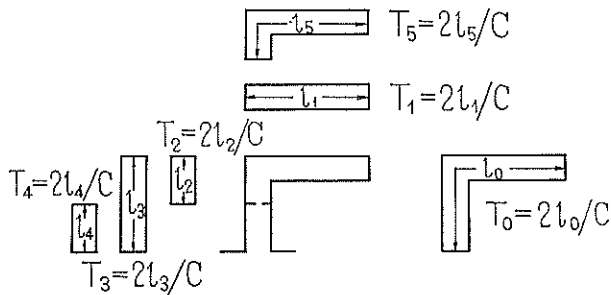


図-4.2 振動系



これらの固有周期によって表わされる振動系が存在するものとする、これと共振する来襲波の周期は次のとおりである。

$$\begin{aligned}
T/T_0 &= 0.625 & (T/T_1 &= 1.0) \\
T/T_0 &= 0.25 & (T/T_2 &= 1.0) \\
T/T_0 &= 1.0 & (T/T_3 &= 2.0) \\
T/T_0 &= 0.50 & (T/T_4 &= 2.0) \\
T/T_0 &= 0.75 & (T/T_5 &= 1.0)
\end{aligned}$$

実際には、仮に共振を生ずるとしても上の値とは異なった周期においてであるかも知れないが、これらを勘案して、今回の計算には次の6種類の周期を用いることにする。

$$T/T_0 = 0.25, 0.50, 0.625, 1.0, 2.0, 3.0$$

このそれぞれについて、防波堤の無い場合(ケースD)と、防波堤を設置した場合(ケースE)とを行なうから、計算は全部で12ケースとなる。

計算点は図-4.3および図-4.4のように配置する。湾外の仮想外海幅は、これまでと同じく湾の幅員の3倍とするが、計算量の節約をはかるため、湾外では1次元的に計算する。

湾内における格子間隔は次のとおりである。

$$\text{図-4.3} : \Delta x = \Delta y = B/2$$

$$\text{図-4.4} : \Delta x = 2\Delta y, \Delta y = B/2$$

時間間隔 Δt は前と同様に次式によって定める。

$$\Delta t = \frac{1}{c\sqrt{\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2}}} \quad \text{————— (4.2)}$$

したがって

$$\Delta x = \Delta y \text{ のとき } \Delta t = \Delta x / \sqrt{2} c$$

$$\Delta x = 2\Delta y \text{ のとき } \Delta t = \Delta x / \sqrt{5} c$$

となる。

計算の方法は、基本的にはケースA, B, Cに対するものと全く同様で、微小振幅の長波として取扱い、ケースEでは港口損失を考慮した式を用いる。各点に対する計算式は以下のとおりである。

○ $\eta_{2m+1, 2k+1}$

 ……湾内の一般水位点
$$\begin{aligned}
\eta_{2m+1, 2k+1}(2n+1) &= \eta_{2m+1, 2k+1}(2n-1) \\
&\quad - \sqrt{E} \{U_{2m+2, 2k+1}(2n) - U_{2m, 2k+1}(2n)\} \\
&\quad - \sqrt{F} \{V_{2m+1, 2k+2}(2n) - V_{2m+1, 2k}(2n)\} \quad \text{————— (4.3)}
\end{aligned}$$

◎ $\eta_{2\nu+1, 1}$

 ……湾口の水位点

この水位点は、湾内の2次元計算領域と湾外の1次元計算領域とを接続する点である。

この点に対する連続の方程式は

$$\begin{aligned}
B_1 \frac{\zeta_{2\nu+1, 1}(2n+1) - \zeta_{2\nu+1, 1}(2n-1)}{\Delta t} \\
= -h \frac{B_1 u_{2\nu+2, 1}(2n) - \frac{B}{2} \{u_{2\nu, 1}(2n) + u_{2\nu, 3}(2n)\}}{\Delta x}
\end{aligned}$$

である。これを無次元化し、かつ $B_1 = 3B$ とおくと次のようになる。

- $r_{2m+1, 2k+1}$: $\begin{cases} m=0 \\ k=0 \sim 9 \end{cases}$ $\begin{cases} m=1 \sim 3 \\ k=0, 1 \end{cases}$
 - ◎ $r_{2\nu+1, 1}$: $\nu=4$
 - $r_{2m+1, 1}$: $m=5 \sim M-1$
 - $U_{2m, 2k+1}$: $\begin{cases} m=1 \sim 4 \\ k=0, 1 \end{cases}$ $\begin{cases} m=5 \sim M-1 \\ k=0 \end{cases}$ (Eケースのみ)
 - $U_{2\mu, 2k+1}$: $\begin{cases} \mu=2 \\ k=0, 1 \end{cases}$ (Eケースのみ)
 - ↑ $V_{2m+1, 2k}$: $\begin{cases} m=0 \\ k=1 \sim 9 \end{cases}$ $\begin{cases} m=1 \sim 3 \\ k=1 \end{cases}$
 - > $U_{2m, 2k+1}$: $\begin{cases} m=0 \\ k=0 \sim 9 \end{cases}$ $\begin{cases} m=1 \\ k=2 \sim 9 \end{cases}$
 - ⇒ $U_{2M, 1}$: $\begin{cases} m=0 \\ k=1, 10 \end{cases}$ $\begin{cases} m=1 \sim 3 \\ k=0, 2 \end{cases}$
 - ↑ $V_{2m+1, 2k}$: $\begin{cases} m=0 \\ k=1, 10 \end{cases}$ $\begin{cases} m=1 \sim 3 \\ k=0, 2 \end{cases}$
- (Eケースでは $m \neq \mu$)

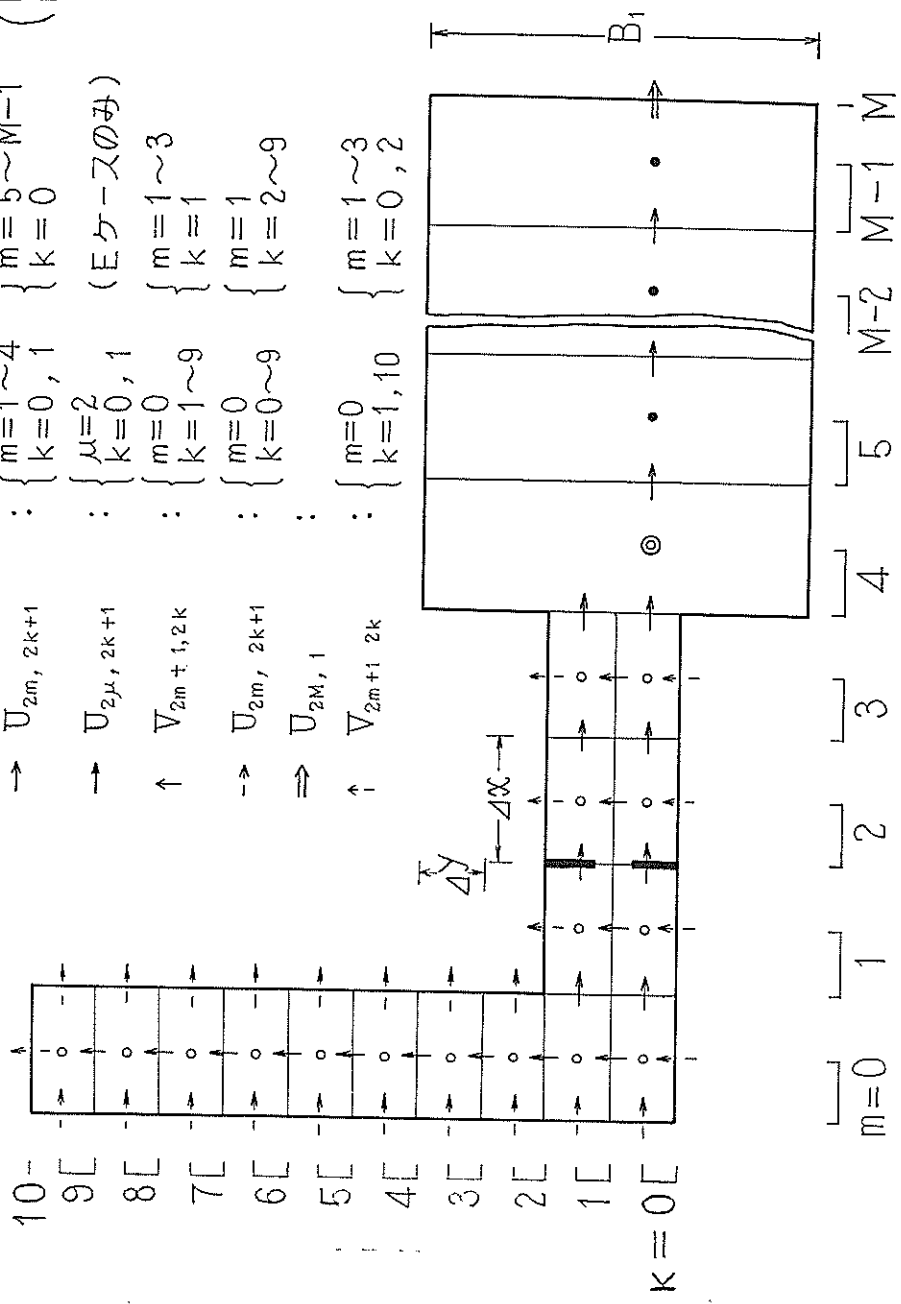


図-4.3 計算点の配置 (ケースD-46~48, E-52~54)

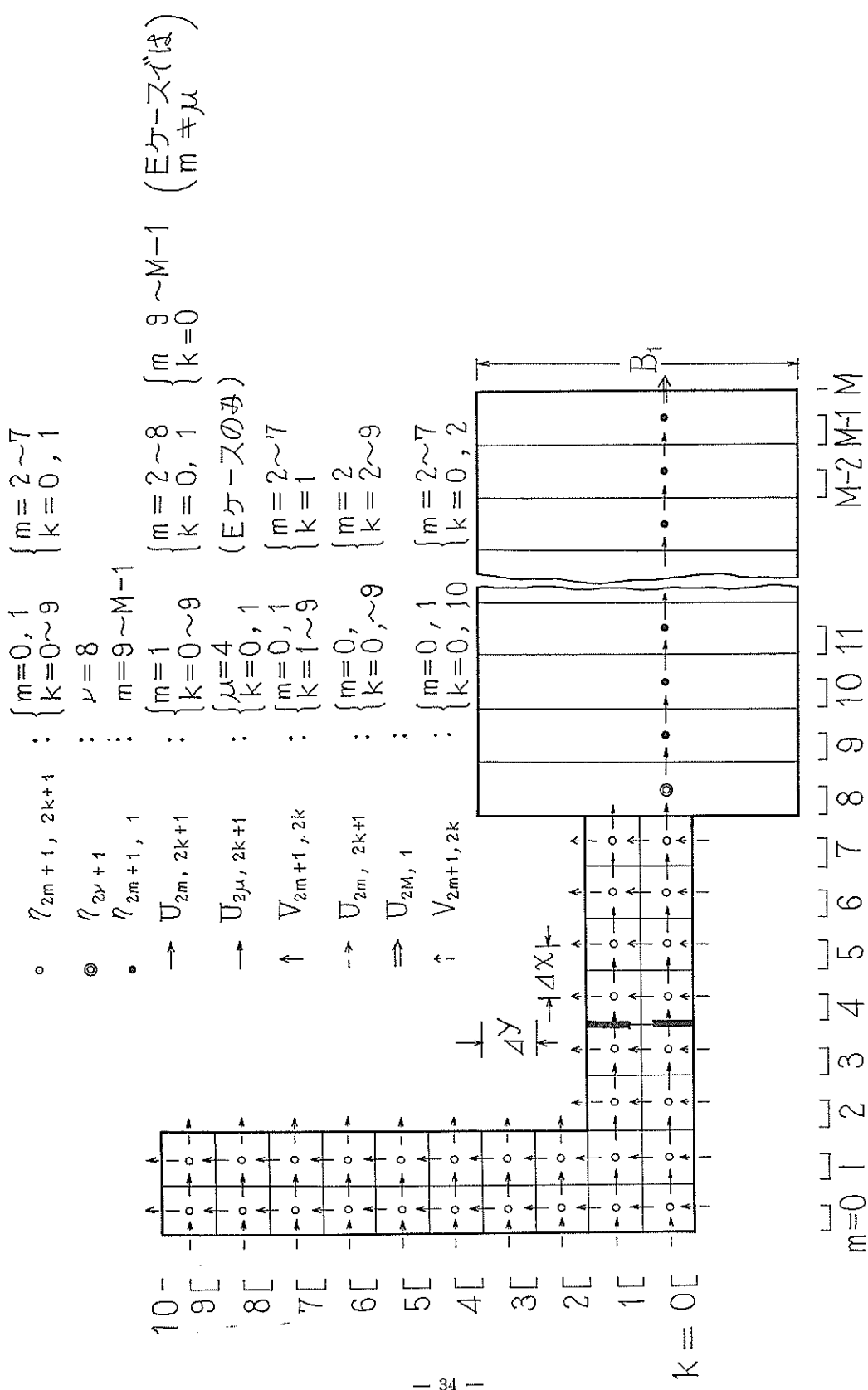


図-4.4 計算点の配置 (ケースD-49~51, E-55~57)

$$\eta_{2\nu+1,1}(2n+1) = \eta_{2\nu+1,1}(2n-1) - \sqrt{E} \left[U_{2\nu+2,1}(2n) - \frac{1}{6} \{ U_{2\nu,1}(2n) + U_{2\nu,3}(2n) \} \right] \quad (4.4)$$

● $\eta_{2m+1,1}$ …… 湾外の一般水位点

$$\eta_{2m+1,1}(2n+1) = \eta_{2m+1,1}(2n-1) - \sqrt{E} \{ U_{2m+2,1}(2n) - U_{2m,1}(2n) \} \quad (4.5)$$

→ $U_{2m,2k+1}$ …… 湾内外の一般流速点 (x 方向)

$$U_{2m,2k+1}(2n+2) = U_{2m,2k+1}(2n) - \sqrt{E} \{ \eta_{2m+1,2k+1}(2n+1) - \eta_{2m-1,2k+1}(2n+1) \} \quad (4.6)$$

注) 湾口の流速点のうち、 $U_{2\nu,3}$ に対しては、この式中に代入すべき $\eta_{2\nu,3}$ が存在しないため、その代りに $\eta_{2\nu,1}$ を用いる。

→ $U_{2\mu,2k+1}$ …… 港口流速点

これはケースEにだけ用いられる。ケースDでは一般の流速点に対する式を用いる。

$$U_{2\mu,2k+1}(2n+2) = \begin{cases} \frac{1 - \sqrt{1+2K'R'}}{\sqrt{E} K'} & R' \geq 0 \\ \frac{-1 + \sqrt{1-2K'R'}}{\sqrt{E} K'} & R' \leq 0 \end{cases} \quad (4.7)$$

ただし

$$R' = E' \{ \eta_{2\mu+1,2k+1}(2n+1) - \eta_{2\mu-1,2k+1}(2n+1) \} + \frac{EK'}{2} U_{2\mu,2k+1}(2n) | U_{2\mu,2k+1}(2n) | - \sqrt{E} U_{2\mu,2k+1}(2n) \quad (4.8)$$

$$\left. \begin{aligned} E' &= \frac{b}{2Ay} \quad E = \frac{b}{B} E \\ K' &= K \frac{2Ay}{b} = \frac{B}{b} K \end{aligned} \right\} \quad (4.9)$$

なお、ここに求められる流速 $U_{2\mu,2k+1}$ は、港口幅と格子間隔との差を考慮して換算したもので、実際の(無次元)流速 $U_{2\mu,2k+1}^*$ と次のような関係にある。

$$U_{2\mu,2k+1} = \frac{1}{Ay} \cdot \frac{b}{2} U_{2\mu,2k+1}^* = \frac{b}{B} U_{2\mu,2k+1}^* \quad (4.10)$$

今回の計算では、港口幅 b は湾幅 B の $1/5$ 、すなわち $B/b=5$ とし、また港口損失係数は前回と同様 $K=0.21$ ととった。

↑ $V_{2m+1,2k}$ …… 湾内の一般流速点 (y 方向)

$$V_{2m+1,2k}(2n+2) = V_{2m+1,2k}(2n) - \sqrt{F} \{ \eta_{2m+1,2k+1}(2n+1) - \eta_{2m+1,2k-1}(2n+1) \} \quad (4.11)$$

次に境界条件は以下のようにあたえられる。

$\rightarrow U_{2m, 2k+1}$	……湾内側壁における流速点
$\uparrow V_{2m+1, 2k}$	

$$U_{2m, 2k+1}(2n) = V_{2m+1, 2k}(2n) = 0 \quad \text{————— (4.12)}$$

$\Leftrightarrow U_{2M, 1}(2n)$	……沖側境界の流速点
---------------------------------	------------

湾口から 3 (または 2) 波長だけ沖側における流速の時間的変化をあたえる。

$$U_{2M, 1}(2n) = -\sin n\theta \quad \text{————— (4.13)}$$

ただし

$$\cos\theta = 1 - E(1 - \cos\varphi), \quad \varphi = 2\pi\Delta x/L \quad \text{————— (4.14)}$$

初期条件も前回と全く同様に、湾口に正弦波の先端が到達したときを $t=0$ とし、湾内では最初静止していたものとしてあたえる。

湾内 ($m < \nu$):

$$\eta_{2m+1, 2k+1}(-1) = U_{2m, 2k+1}(0) = V_{2m+1, 2k}(0) = 0$$

湾外 ($m \geq \nu$):

$$\left. \begin{aligned} U_{2m, 1}(0) &= -\sin(m-\nu)\varphi \\ \eta_{2m+1, 1}(-1) &= \sin\frac{2m+1-2\nu-\sqrt{E}}{2}\varphi \end{aligned} \right\} \quad \text{————— (4.15)}$$

計算の時間範囲は、6 波目または 4 波目の終端が湾口に到達するまでとする。

各ケースごとの定数値、計算範囲などを一括して表-4.1 に示す。

なお、計算ケース D, E ならびに次章のケース G に関する 2 次元数値計算は、IBM-650 によって行なわれた。

表—4.1 ケースD, E総括表

計 算 ケ ー ス	防 波 堤	B/b	T/T_0	$l_0/\Delta x$	$L/\Delta x$	$T/\Delta t$	E	E'	F	K'	φ	θ
D—46	な し	—	0.25	16	8	11.3	1/2	—	1/2	—	$\pi/4$	31°24'0
47	"	—	0.50	"	16	22.6	"	—	"	—	$\pi/8$	15°51'5
48	"	—	0.625	"	20	28.2	"	—	"	—	$\pi/10$	12°42'1
49	"	—	1.0	8	16	35.8	1/5	—	4/5	—	$\pi/8$	10°00'2
50	"	—	2.0	"	32	71.5	"	—	"	—	$\pi/16$	5°05'9
51	"	—	3.0	"	48	107.3	"	—	"	—	$\pi/24$	3°21'1
E—52	あ り	5	0.25	16	8	11.3	1/2	1/10	1/2	1.05	$\pi/4$	31°24'0
53	"	"	0.50	"	16	22.6	"	"	"	"	$\pi/8$	15°51'5
54	"	"	0.625	"	20	28.2	"	"	"	"	$\pi/10$	12°42'1
55	"	"	1.0	8	16	35.8	1/5	1/25	4/5	"	$\pi/8$	10°00'2
56	"	"	2.0	"	32	71.5	"	"	"	"	$\pi/16$	5°05'9
57	"	"	3.0	"	48	107.3	"	"	"	"	$\pi/24$	3°21'1

計 算 ケ ー ス	μ	ν	波 数	沖 側 境 界	M	N	計 算 点 数				計 算 点 総 数	プ リ ン ト
							η	U	V	計		
D—46	—	8	6	3L	32	68	56	48	24	128	8,832	全
47	—	"	"	"	56	136	80	72	24	176	24,112	"
48	—	"	"	"	68	170	92	84	24	200	34,200	毎 2
49	—	4	4	2L	36	143	48	40	12	100	14,400	"
50	—	"	"	"	68	286	80	72	12	164	47,068	毎 4
51	—	"	"	"	100	429	112	104	12	228	98,040	毎 6
E—52	4	8	6	3L	32	68	56	48	24	128	8,832	全
53	"	"	"	"	56	136	80	72	24	176	24,112	"
54	"	"	"	"	68	170	92	84	24	200	34,200	毎 2
55	2	4	4	2L	36	143	48	40	12	100	14,400	"
56	"	"	"	"	68	286	80	72	12	164	47,068	毎 4
57	"	"	"	"	100	429	112	104	12	228	98,040	毎 6

453,304

§5. 計算結果

2次元計算の結果は、次のようなグラフとして附図におさめられている。

附図—1~12…各点水位・流速の時間的变化

附図—13~18…各時刻ごとの水面曲線

附図—19 …水位振幅の時間的变化

附図—20 …流速振幅の時間的变化

附図—21~26…屈曲部附近の流速分布

5.1 湾奥水位に対する屈曲部の影響

まずケースDの水位—時間曲線を見ると、湾口から湾内へ入った波は、半波高1.5に増大して進行していくことがわかる。これはケースBにおいても認められ、また1次元計算によってすでに示したところでもある。

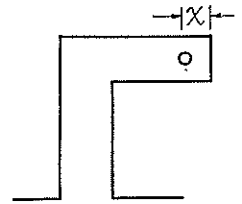
この侵入波は、やがて湾の屈曲部に到達すると、1部は反射して湾口へ向い、他は湾奥に向かって進行を続ける。もし屈曲部がなければ、湾内水位点における第1波の最高水位は、1次元的に考えると次のようになる（第1報 p—36参照）

$$\left. \begin{array}{l} x < \frac{L}{6}, \quad \eta_{\max} = 2p \cos \frac{2\pi}{L} x \\ x > \frac{L}{6}, \quad \eta_{\max} = p \end{array} \right\} \text{----- (5.1)}$$

ただし、湾口からの再反射波の影響のある場合を除く。

表—5.1 はこれによる算定値と2次元計算結果とを比較したものであるが、ケースD—46を除けば、両者の間にはほとんど差がない。

図—5.1



表—5.1 湾内第1波の最高水位

ケース	x/L	η_{\max} (1次元)	η_{suffix} (2次元)
D—46	1/16 (<1/6)	2.72	2.0
47	1/32 (")	2.92	2.9
48	1/40 (")	2.96	3.0
49	1/64 (")	2.99	3.0
50	1/128 (")	3.00	3.0
51	1/192 (")	3.00	3.0

図—5.2 は §2 で述べた1次元的方法をケースD—46~48に適用して、屈曲部がないとしたときの湾内における水位変化を求め、それをケースDの2次元計算結果と比較したものである。これに用いた諸数値は表—5.2 に示されている。

表—5.2 湾口伝達率および逆反射率

ケース	$L/\Delta x$	B_1/B	p	q'	ρ_1'
D—46	8	3	1.47	0.53	$-34^\circ 12'$
47	16	3	1.49	0.51	$-16^\circ 55'$
48	20	3	1.50	0.50	$-13^\circ 32'$

また、図—5.3 はケースD—49~51の結果をそれぞれ対応するケースBの結果と比較したものである。

以上のような比較によると今回の計算結果が示す限りにおいては、比較的周期の短い（あるいは格子分割のあらい）D—46のケースを除けば、屈曲部の影響は極めて小さい。

しかし、この結果から直ちに、現象それ自体において屈曲部の影響が小さいと結論づけることはできない。その理由として、第1は、われわれの計算では慣性項を省略していることであり、この点については次項で検討を加える。第2は、先にも述べたように、仮に共振的現象を生ずるとしても、今回選んだものは異なる周期において生ずるのかも知れないということである。また第3に、格子間隔のとり方が果して適当であったかどうかということも考えられる。

5.2 屈曲部における慣性項の評価

x, y 方向の運動方程式

$$\left. \begin{aligned} \frac{Du}{Dt} &= \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \\ \frac{Dv}{Dt} &= \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \end{aligned} \right\} \text{ (5.2)}$$

のそれぞれについて、§3 と同じく慣性項と加速度項との比をとると次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{u \frac{\partial u}{\partial x}}{\frac{\partial u}{\partial t}} &= \frac{\frac{1}{2} \sqrt{E} \Delta_x U^2}{d_t U} \cdot \frac{a}{h} \\ \frac{v \frac{\partial u}{\partial y}}{\frac{\partial u}{\partial t}} &= \frac{\frac{1}{2} \sqrt{E} \Delta_x V^2}{d_t U} \cdot \frac{a}{h} \\ \frac{u \frac{\partial v}{\partial x}}{\frac{\partial v}{\partial t}} &= \frac{\frac{1}{2} \sqrt{F} \Delta_y U^2}{d_t V} \cdot \frac{a}{h} \\ \frac{v \frac{\partial v}{\partial y}}{\frac{\partial v}{\partial t}} &= \frac{\frac{1}{2} \sqrt{F} \Delta_y V^2}{d_t V} \cdot \frac{a}{h} \end{aligned} \right\} \text{ (5.3)}$$

図—5.4 は、附図—27~38 に示した流速から、これら慣性項を算出してその最大値の分布を求めたものである。ところによっては慣性項はかなり大きな値を示していることがわかる。

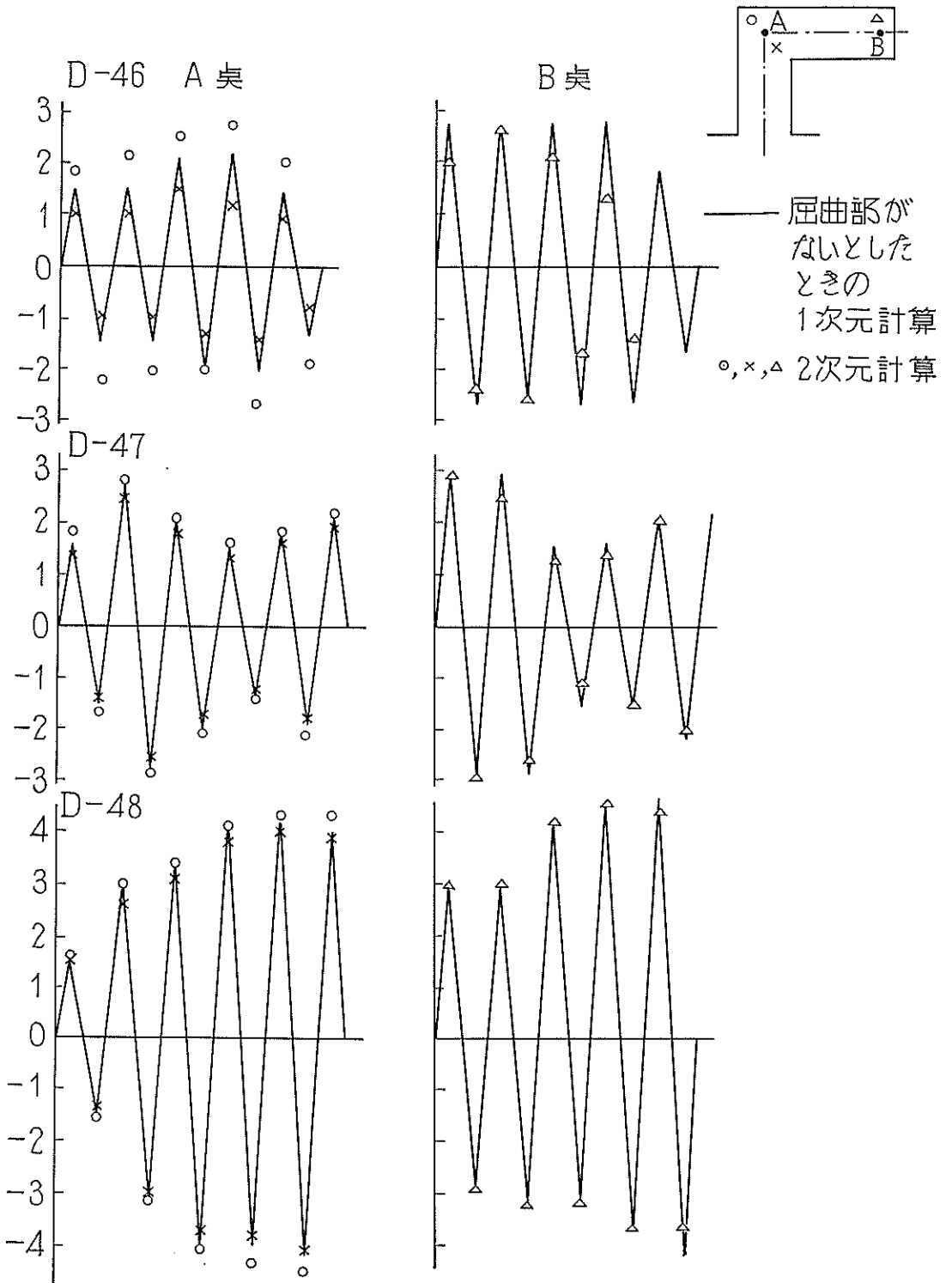
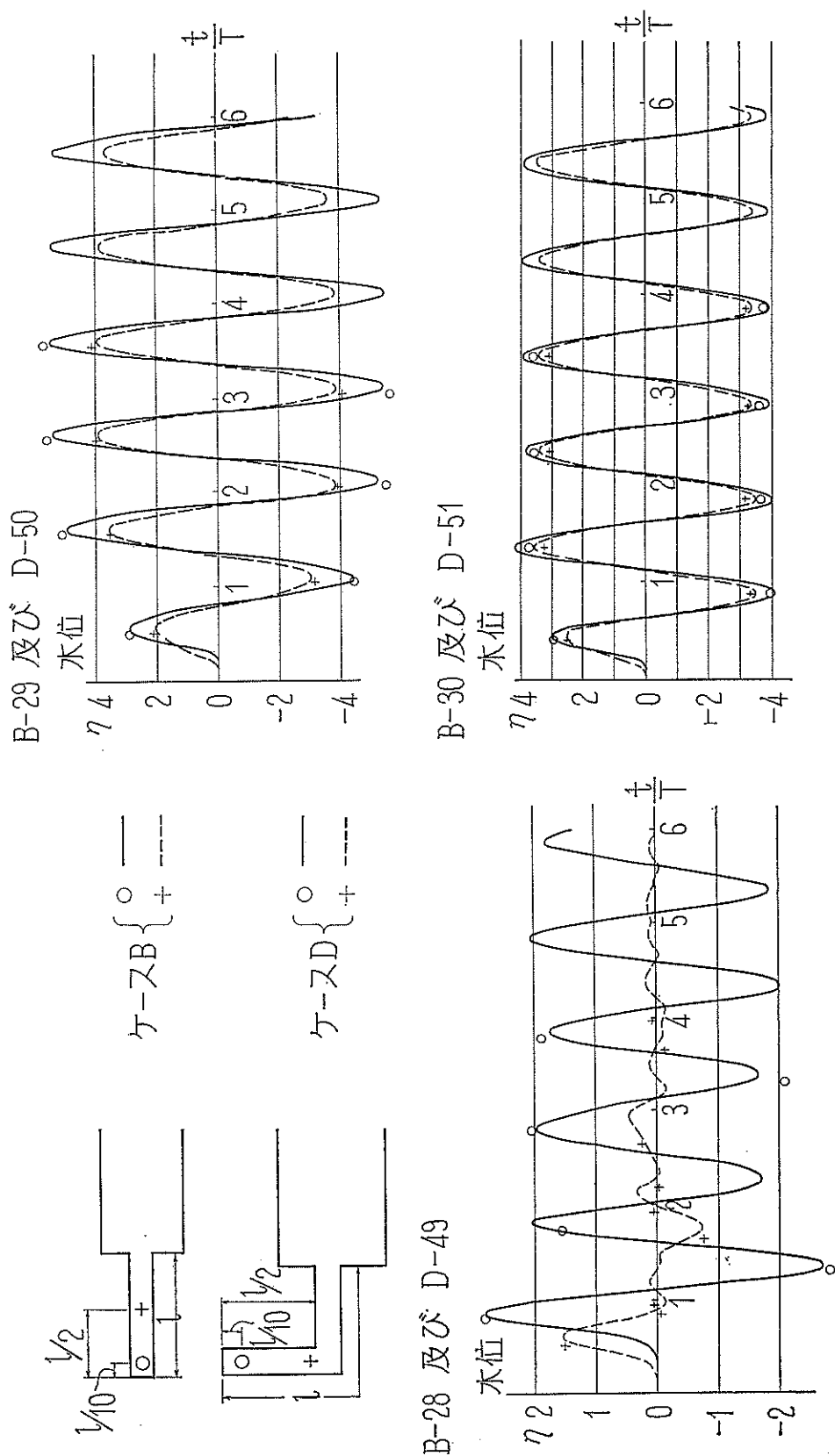


図-5.2 屈曲部の影響（1次元計算との比較）

図-5.3 屈曲部の影響 (ケースBとの比較)



5.3 防波堤の効果についての前回推定値との比較

ケースD, Eの計算結果において湾の屈曲の影響が少ないものとする、これらは先にわれわれが第1報で湾内に防波堤を設置した場合に対して用いた推定法の一つの検証ともなり得るものである。

すなわち、ケースAおよびCは、防波堤を半無限水路内に設置した場合に対する計算であって、外海に開口する湾の中に防波堤を設けた場合についての2次元計算はまだ実施していない。ケースEはほぼこれに相当するわけであるから、その計算結果を利用して、1次元計算法の検証をすることができる。

まず、湾内に設置された防波堤の効果について先に用いた推定法をもう一度述べると以下のとおりである。
(第1報所載のものに若干の修正を施してある)

(1) 防波堤設置前の湾奥最高水位

定常状態に対して(2.37)式を用い、簡単のため $\varphi \rightarrow 0$ とにおいて(2.31)ならびに(2.35)式を用いると、湾奥における水位振幅は

$$A = \frac{2\sqrt{2}\frac{B_1}{B}}{\sqrt{\left\{\left(\frac{B_1}{B}\right)^2 + 1\right\} + \left\{\left(\frac{B_1}{B}\right)^2 - 1\right\} \cos \frac{2\pi T_0}{T}}} \quad (5.4)$$

で表わされる。

また、過渡状態として第1波の湾奥振幅を考えると

$$A = \frac{4\frac{B_1}{B}}{\frac{B_1}{B} + 1} \quad (5.5)$$

となる。

この両者のうち大きい方が防波堤設置前の湾奥最高水位で、 $B_1/B=3$ としてグラフを画くと図-5.5に示すようになる。

(2) 防波堤設置後の港奥最高水位

定常状態における港奥の水位振幅を、港口損失を無視した1次元の方法で求めると次のようになる(第1報P-29参照)。

$$\begin{aligned} \frac{4}{A^2} \left(\frac{B_1}{B}\right)^2 = & \left(\frac{B_1}{B}\right)^2 \left\{ 2\left(\frac{B}{b} - 1\right) \sin \frac{\pi T_1}{T} \cos \frac{\pi}{T} (T_0 - T_1) \tan \frac{\pi}{L} \Delta x - \cos \frac{\pi T_0}{T} \right\}^2 \\ & + \left\{ 2\left(\frac{B}{b} - 1\right) \sin \frac{\pi T_1}{T} \sin \frac{\pi}{T} (T_0 - T_1) \tan \frac{\pi}{L} \Delta x - \sin \frac{\pi T_0}{T} \right\}^2 \quad (5.6) \end{aligned}$$

港口損失を考慮した場合の1次元計算は困難であるから、ケースAとCの計算結果を比較して港口損失を考慮したことによる港奥振幅減少率を定め、それによって(5.6)式から算出される値を補正する。

過渡状態としては、ケースCの計算結果から第1波の港奥水位振幅を求める。この値と上に求めた定常状態の値とのうち、大きい方が防波堤設置後の港奥最高水位である。

図-5.5に示すものは、 $B_1/B=3$, $B/b=5$, $T_1/T_0=0.75$, $l_0/\Delta x=16$ とした場合の値である。またこの図には、計算ケースD, Eの最も港奥寄りの水位点における最高水位をもあ

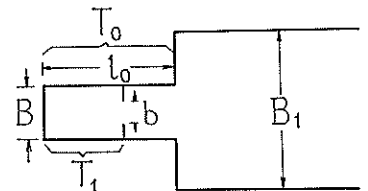


図-5.6

$$\begin{aligned}
 & \circ 4_t U \quad \Delta 4_t V \quad \Delta \frac{1}{2} \sqrt{E} 4_x U^2 \quad \Delta \frac{1}{2} \sqrt{F} 4_y V^2 \quad \square \frac{1}{2} \sqrt{E} 4_x V^2 \quad \square \frac{1}{2} \sqrt{F} 4_y U^2 \\
 & \text{湾奥} \quad \uparrow \quad \text{湾} \quad \rightarrow \quad \square
 \end{aligned}$$

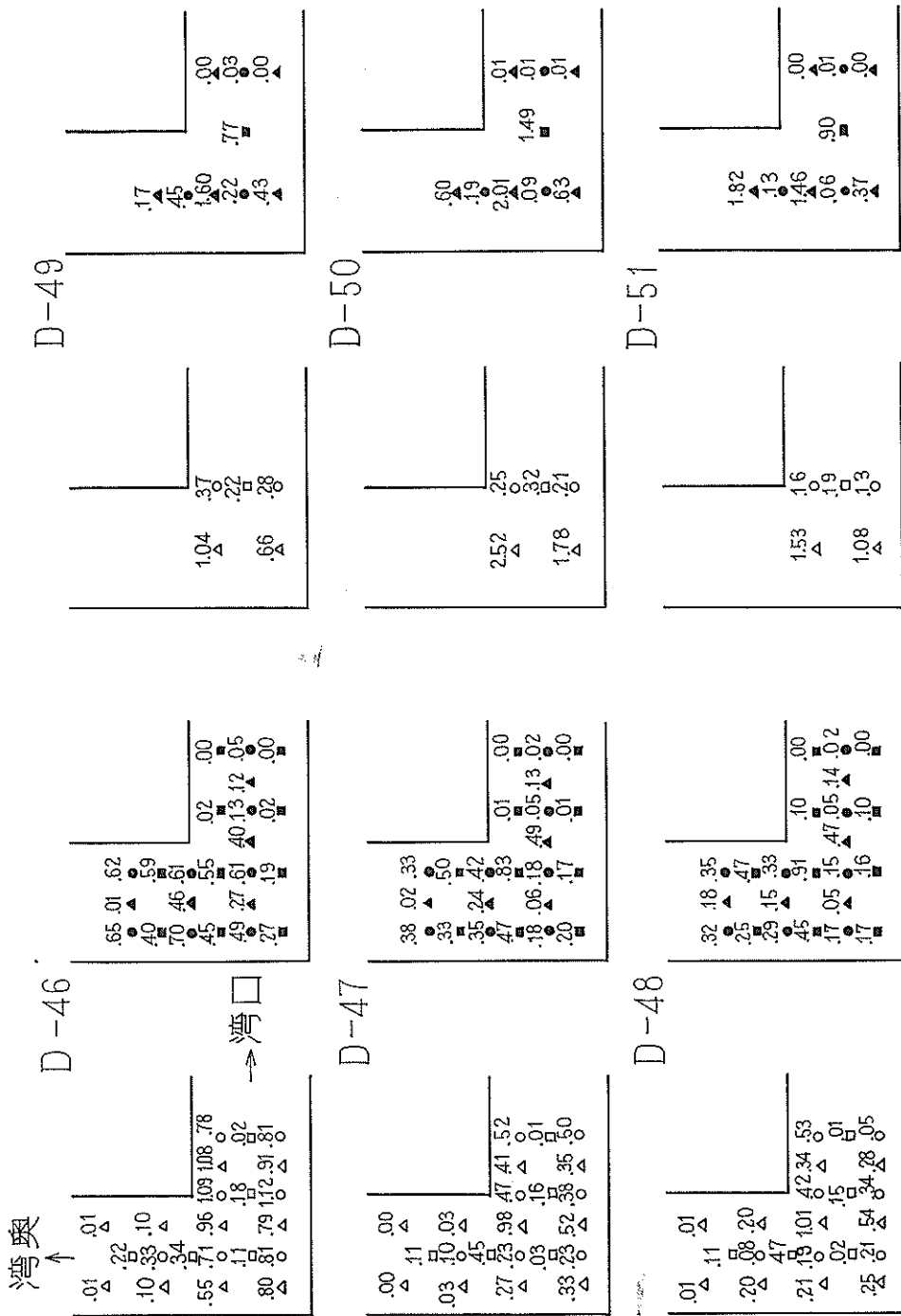
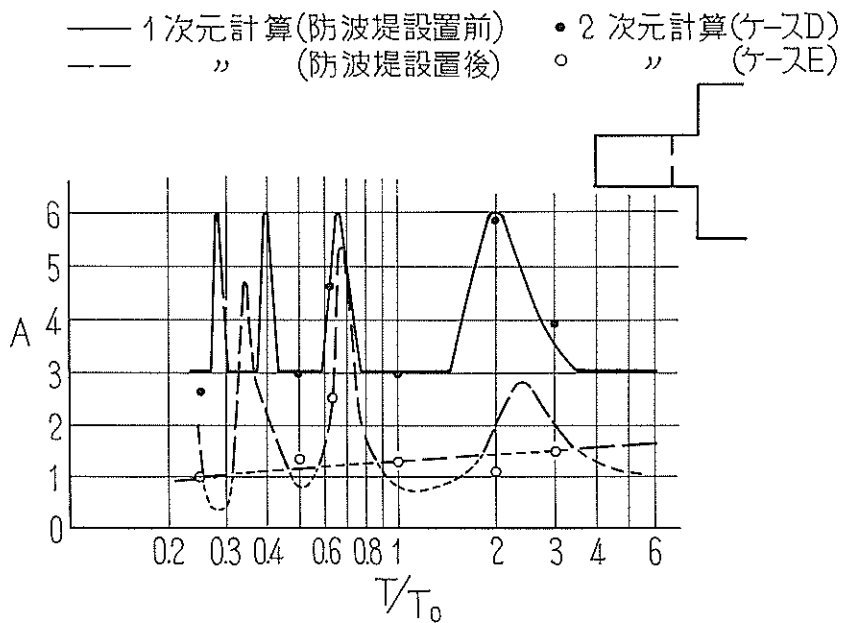


図-5.4 慣性項と加速度項の比較

わせて記してある。この比較によると、われわれの用いた推定法はあくまで便宜的なものではあるが、かなり良好な値を示していることがわかる。



図—5.5 1次元推定値と2次元計算との比較

III. 計算ケース G

§6. 計算の内容

長周期波による港内の擾乱に対して、港奥や側壁からの反射が著しい影響をもつてであろうことは想像に難くない。これまでの計算では、このような境界からはすべて完全反射するものと仮定し、したがってそれに直角方向の流速成分をゼロとおいて境界条件とした。

実際には、港内に流入する河川や水路への遡上とか、砕波あるいは溢流などの形で、入射エネルギーの一部は通過または消滅する。

本章における計算は、このような点を考慮して、港奥の反射率の影響を検討するために行なったものである。ケース A と同じく、半無限水路内に防波堤を設置した場合を対象とし（港口損失は無視する）、水路の側壁では従来と同じく完全反射するものとして扱うが、港奥では完全反射はしないものとする。

ここで、港奥における境界条件のあたえ方が問題となるが、われわれは図-6.1 のように港奥に小水路を接続せしめ、入射波の一部が小水路内へ伝播するようにした。この方法によって、現象的にも港内に河川などが流入している場合に対応させることができるし、また小水路の幅を変えることによって、港奥反射率の大小と関連をもたせることができる。

今回の計算では、同図に示すように、小水路の幅 B_2 は水路幅 B の $1/3$ と $2/3$ との 2 種類とした。また、小水路の長さ l_2 は有限としたが、その終端からの反射波が計算の時間範囲内では港内に影響を及ぼさないように、沖側境界位置の設定に用いたものと同じ方法で l_2 を定めてある。

計算点の配置や計算式はケース A とほとんど同様である。すなわち、図-6.2 のように計算点を配置し、水路中心線に関して対称であることを考えに入れると、一般の点に対する計算式は次のようになる。

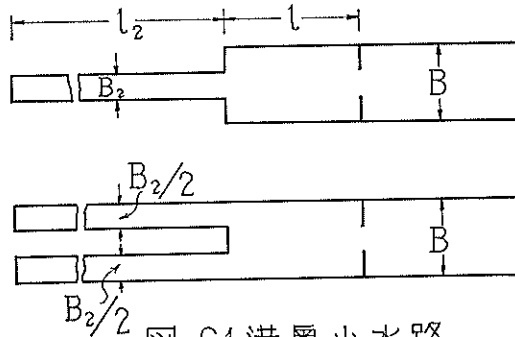


図-6.1 港奥小水路

$$\left. \begin{aligned} \eta_{2m+1,0}(2n+1) &= \eta_{2m+1,0}(2n-1) \\ &\quad - \sqrt{E} \{U_{2m+2,0}(2n) - U_{2m,0}(2n)\} - 2\sqrt{F} V_{2m+1}(2n) \\ \eta_{2m+1,1}(2n+1) &= \eta_{2m+1,1}(2n-1) \\ &\quad - \sqrt{E} \{U_{2m+2,1}(2n) - U_{2m,1}(2n)\} + \sqrt{F} V_{2m+1}(2n) \end{aligned} \right\} \text{--- (6.1)}$$

$$\begin{aligned} U_{2m,k}(2n+2) &= U_{2m,k}(2n) \\ &\quad - \sqrt{E} \{\eta_{2m+1,k}(2n+1) - \eta_{2m-1,k}(2n+1)\} \end{aligned} \text{--- (6.2)}$$

$$\begin{aligned} V_{2m+1}(2n+2) &= V_{2m+1}(2n) \\ &\quad - \sqrt{F} \{\eta_{2m+1,1}(2n+1) - \eta_{2m+1,0}(2n+1)\} \end{aligned} \text{--- (6.3)}$$

次に小水路内では、 $B_2/B=1/3$ のケースでは中央部 ($k=0$) における、 η , U だけを計算し、また、 $B_2/B=2/3$ のケースでは $k=1$ における η , U だけを計算すればよい。また常に $V=0$ である。したがって、小水路部に対する計算式は以下のとおりとなる。

$$\begin{aligned} \eta_{2m+1,k}(2n+1) &= \eta_{2m+1,k}(2n-1) \\ &\quad - \sqrt{E} \{U_{2m+2,k}(2n) - U_{2m,k}(2n)\}, \quad m=0 \sim \nu-1, k=0 \text{ or } 1 \end{aligned} \text{--- (6.4)}$$

$$\begin{aligned} U_{2m,k}(2n+2) &= U_{2m,k}(2n) \\ &\quad - \sqrt{E} \{\eta_{2m+1,k}(2n+1) - \eta_{2m-1,k}(2n+1)\}, \quad m=1 \sim \nu, k=0 \text{ or } 1 \end{aligned} \text{--- (6.5)}$$

$$V_{2m+1}(2n) = 0 \quad m=0 \sim \nu-1 \quad \text{----- (6.6)}$$

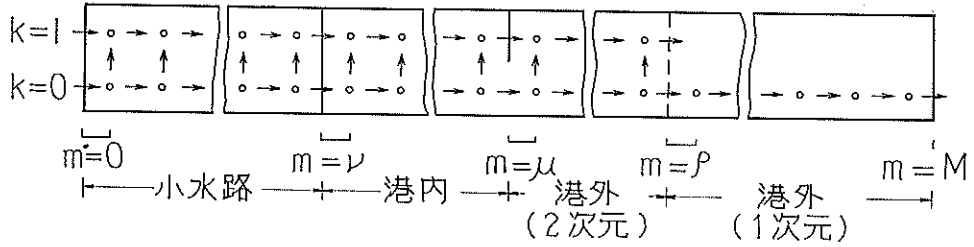


図-6.2 計算奥の配置

これと同時に、小水路の終端および港奥の境界条件を次のようにおく。

$$\left. \begin{array}{l} B_2/B=1/3 \text{ のとき,} \\ B_2/B=2/3 \text{ のとき,} \end{array} \right\} \begin{array}{l} U_{0,0}(2n) = U_{2\nu,1}(2n) = 0 \\ U_{0,1}(2n) = U_{2\nu,0}(2n) = 0 \end{array} \quad \text{----- (6.7)}$$

また港口流速は

$$\begin{aligned} U_{2\nu,0}(2n+2) &= U_{2\nu,0}(2n) \\ &\quad - \frac{b}{3B} \sqrt{E} \{ \eta_{2\nu+1,0}(2n+1) - \eta_{2\nu-1,0}(2n+1) \} \end{aligned} \quad \text{----- (6.8)}$$

であたえられ、防波堤における境界条件は

$$U_{2\nu,1}(2n) = 0 \quad \text{----- (6.9)}$$

となる。

すでに述べたように、ケースAの計算では、港口の近傍を除けば水路の横方向における流況の変化は極めて小さく、1次元的な取扱いが十分可能である。したがって今回の計算では、計算量の節約をはかるため、港口から1波長以上沖側では、水路中心線上の計算点だけについて1次元計算を行なうこととする。

すなわち

$$\begin{aligned} \eta_{2m+1,0}(2n+1) &= \eta_{2m+1,0}(2n-1) \\ &\quad - \sqrt{E} \{ \eta_{2m+2,0}(2n) - U_{2m,0}(2n) \}, \quad m=\rho+1 \sim M-1 \end{aligned} \quad \text{----- (6.10)}$$

$$\begin{aligned} U_{2m,0}(2n+2) &= U_{2m,0}(2n) \\ &\quad - \sqrt{E} \{ \eta_{2m+1,0}(2n+1) - \eta_{2m-1,0}(2n+1) \}, \quad m=\rho+1 \sim M-1 \end{aligned} \quad \text{----- (6.11)}$$

この1次元計算領域と2次元計算領域との接続点では次式を用いる。

$$\begin{aligned} U_{2\rho,i}(2n+2) &= U_{2\rho,i}(2n) \\ &\quad - \sqrt{E} \{ \eta_{2\rho+1,0}(2n+1) - \eta_{2\rho-1,i}(2n+1) \} \quad i=0, 1 \end{aligned} \quad \text{----- (6.12)}$$

$$\begin{aligned} \eta_{2\rho+1,0}(2n+1) &= \eta_{2\rho+1,0}(2n-1) \\ &\quad - \sqrt{E} \left[U_{2\rho+2,0}(2n) - \frac{1}{3} \{ U_{2\rho,0}(2n) + 2U_{2\rho,1}(2n) \} \right] \end{aligned} \quad \text{----- (6.13)}$$

沖側の境界条件は

$$U_{2M,0}(2n) = -\sin n\theta \quad \text{(6.14)}$$

ただし

$$\cos\theta = 1 - E(1 - \cos\varphi), \quad \varphi = 2\pi dx/L$$

である。

これまでと同じく、半無限正弦波の先端が港口に達したときを $t=0$ とし、港内および小水路内では最初静止の

状態にあったものとする。したがって初期条件は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \eta_{2m+1,k}(-1) &= 0 & , m < \mu \\ &= \sin \frac{2m+1-2\mu-\sqrt{E}}{2} \varphi & , m \geq \mu \end{aligned} \right\} \text{--- (6.15)}$$

$$\left. \begin{aligned} U_{2m,k}(0) &= 0 & , m < \mu \\ &= -\sin(m-\mu)\varphi & , m \geq \mu \end{aligned} \right\} \text{--- (6.16)}$$

計算ケースは、ケースA-5およびA-23に対応する条件について、それぞれ $B_2/B=1/3, 2/3$, とした計4種類である。各ケースごとの定数値および計算範囲は、表-6.1 に一括して示されている。

表-6.1 計算ケースG総括表

計算ケース	T/T_0	l/B	B/b	B_2/B	$l/\Delta x$	$L/\Delta x$	$T/\Delta t$	φ	θ	E	F	波数	
	計算ケース	沖側境界	小水路長	ν	μ	ρ	M	N	計算点数				計算点総数
								η	U	V	計		
G-61	1	4	5	1/3	5	10	26	$\pi/5$	13°39'1	1/6.76	5.76/6.76	8	
62	"	"	"	2/3	"	"	"	"	"	"	"	"	
63	3	"	"	1/3	"	"	78	$\pi/15$	4°36'5	"	"	4	
64	"	"	"	2/3	"	"	"	"	"	"	"	"	
G-61	4L	4L	40	45	55	85	208	100	100	15	215	44,935	全
62	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"
63	2L	2L	60	65	95	125	312	160	160	35	355	111,115	毎4
64	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"

312, 100

§7. 計算結果

各点の水位・流速の時間的变化は附図-27~30に、各時刻ごとの水面曲線は附図31, 32に示されている。

また附図-33, 34は、各点の水位振幅および流速振幅をケースAの計算結果と対照して画いたもので、これによって港奥反射率の影響を知ることができる。なお、図-7.1 は振幅減少率を示している。すなわち、ケースGにおける各点の水位振幅と、港奥で完全反射をするケースAの対応する値との比をとったものである。これによると、一般に港内では振幅が減少しても、堤外ではかえって増大する場合があることがわかる。

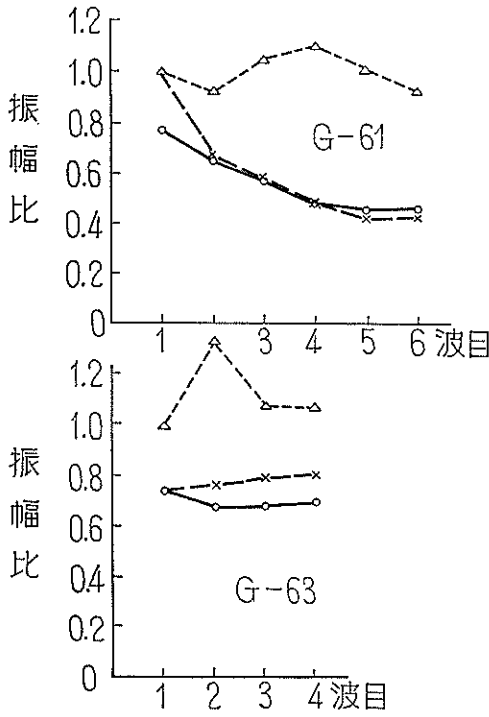


図-7.1 振幅減少率 (ケースAとの比較)

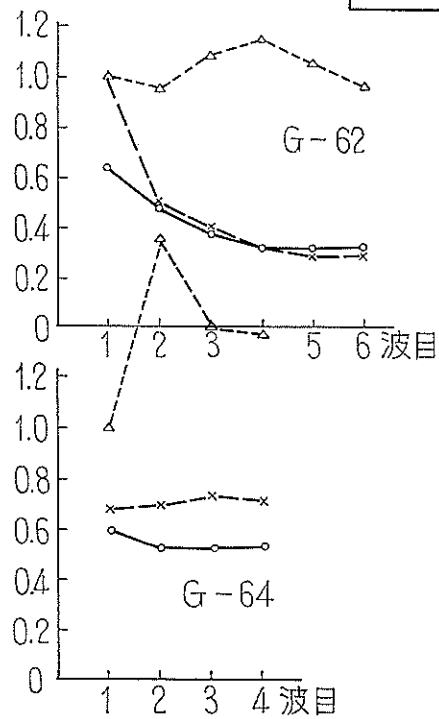


図-8.1

§8. 1次元の考察

計算ケースGに対しても、ケースAやBと同じく1次元の近似計算を行なってみる。ただし、小水路の奥部は限られていないものとする。

まず、港奥に接続する小水路内への波の侵入は、ケースBにおける湾口の問題と全く同一であるから、その伝達率および反射率は次式であらわされる。

$$p = \frac{2 \frac{B}{B_2}}{\frac{B}{B_2} + 1}, \quad q = \frac{\frac{B}{B_2} - 1}{\frac{B}{B_2} + 1} \quad (8.1)$$

ただし、簡単のため $\varphi (=kdx) \rightarrow 0$ とおいてある。

いま定常状態を考えると、小水路の中には進行波が存在するが、港内および港外では、それぞれ部分重複波を生じている筈である。したがって、各水域の水位および流速は次のように表わすことができる。

$$\left. \begin{aligned} \text{小水路: } \eta_2 &= fp \sin(kx + \sigma t) \\ U_2 &= -fp \sin(kx + \sigma t) \end{aligned} \right\} (8.2)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{港内: } \eta_1 &= f(1+q) \cos kx \sin \sigma t \\ &\quad + f(1-q) \sin kx \cos \sigma t \\ U_1 &= -f(1+q) \sin kx \cos \sigma t \\ &\quad - f(1-q) \cos kx \sin \sigma t \end{aligned} \right\} (8.3)$$

$$\left. \begin{aligned}
 \text{港 外 : } \eta_0 &= (1+Q) \cos k(x-R) \sin \sigma t \\
 &+ (1-Q) \sin k(x-R) \cos \sigma t \\
 U_0 &= -(1+Q) \cos k(x-R) \cos \sigma t \\
 &- (1-Q) \sin k(x-R) \sin \sigma t
 \end{aligned} \right\} \text{--- (8.4)}$$

上式において、 fp は小水路内の進行波の半波高を表わす。また、港内の部分重複波の腹は港奥にあって、その半波高は $f(1+q)$ である。更に、港外の部分重複波の腹は、港奥から R の距離にあり、 $(1+Q)$ なる半波高を有する。

次に、港口における運動および連続の方程式は次のとおりである。

$$\left. \begin{aligned}
 U(l, t+Dt) - U(l, t) &= -\sqrt{E} \left\{ \eta \left(l + \frac{Dx}{2}, t + \frac{Dt}{2} \right) - \eta \left(l - \frac{Dx}{2}, t + \frac{Dt}{2} \right) \right\} \\
 \eta \left(l + \frac{Dx}{2}, t + \frac{Dt}{2} \right) - \eta \left(l + \frac{Dx}{2}, t - \frac{Dt}{2} \right) &= -\sqrt{E} \left\{ U(l+Dx, t) - \frac{b}{B} U(l, t) \right\} \\
 \eta \left(l - \frac{Dx}{2}, t + \frac{Dt}{2} \right) - \eta \left(l - \frac{Dx}{2}, t - \frac{Dt}{2} \right) &= -\sqrt{E} \left\{ -\frac{b}{B} U(l, t) - U(l-Dx, t) \right\}
 \end{aligned} \right\} \text{--- (8.5)}$$

これらの条件から、以下のような結果が導びかれる。

$$f = \frac{1}{\sqrt{1 - 2\left(\frac{B}{b} - 1\right)q \sin \frac{2\pi T_0}{T} \tan \frac{\varphi}{2} + \left(\frac{B}{b} - 1\right)^2 \left(1 + q^2 - 2q \cos \frac{2\pi T_0}{T}\right) \tan^2 \frac{\varphi}{2}} \text{--- (8.6)}$$

$$Q = \sqrt{1 - f^2(1 - q^2)} \text{--- (8.7)}$$

また、港外の部分重複波の腹の位置は

$$\left. \begin{aligned}
 \cos k(R-l) &= f \left\{ \cos kl - \left(\frac{B}{b} - 1\right)(1+q) \sin kl \tan \frac{\varphi}{2} \right\} \\
 \sin k(R-l) &= -f \left\{ \sin kl + \left(\frac{B}{b} - 1\right)(1-q) \cos kl \tan \frac{\varphi}{2} \right\}
 \end{aligned} \right\} \text{--- (8.8)}$$

によって求められる。

表-8.1 は、ケースG-61~64に対して上の諸式を適用した結果を示すものであるが、これらは2次元計算の結果とかなりよく一致している。

表-8.1 1次元計算値

ケース	B/b	B/B_2	T/T_0	L/Dx	p	q	$fp=f(1+q)$	$1+Q$	$(R-l)/L$
G-61	5	3	1	10	1.50	0.50	1.26	1.69	0.41
62	5	1.5	1	10	1.20	0.20	0.83	1.73	0.37
63	5	3	3	30	1.50	0.50	1.54	1.45	0.76
64	5	1.5	3	30	1.20	0.20	1.16	1.33	0.76

図-8.2 は、港奥の反射率 q をパラメータとして、港内最高水位 $f(1+q)$ と周期 T/T_0 との関係を示すものである。

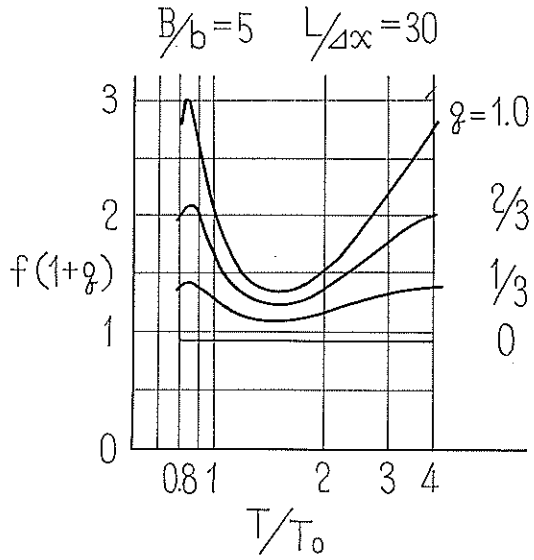


図-8.2 港内最高水位と反射率との関係

IV. 計算ケース O および OB

(大船渡湾に関する計算)

§9. 計算の内容

9.1 概要

われわれはこれまで単純化されたモデルを対象とし、ケースA～Gの2次元計算や、それらの結果についての1次元の考察などを行なって、現象に関連した種々の要素の影響を検討して来た。検討すべき事項は更に多数残されているが、この辺で基礎計算をひとまず打ち切り、大船渡湾について具体的な湾形や水深の分布を考慮した計算を試みることとなった。

もっとも、これまでのモデルにおいても、湾幅や湾長などの想定に大船渡湾その他の寸法が考慮されており、特にケースD、Eは大船渡湾の平面的湾形をとり入れたものである。しかし、それらはあくまでも一樣幅員、一樣水深に単純化されている。今回の計算では、湾の平面形状や各点の水深は実際に近いものを用いた。

また、これまでの計算ケースでは、津波を微小振幅の長波として扱ってきたが、すでに述べたように、慣性項や摩擦項の省略は必ずしも許容できない場合があり、したがって本来は有限振幅波としての計算を行なうべきである。しかしその場合には、高次の項の差分化、格子間隔のとり方などの問題点があるので、今回は従来と同じく微小振幅波として扱うこととした。上記のような問題点については、今後段階を追って検討を続けて行く予定である。

大船渡湾は三陸海岸のほぼ中央部に位するため、しばしば津波に襲われており、最近のものとしては、明治29年および昭和8年の三陸大津波、昭和35年のチリ地震津波による災害が特に顕著である。チリ地震津波以後、恒久的な津波対策の一つとして、図-9.1に示すような防波堤の建設が計画されるに至った。本章に述べるものは、この津波防波堤の効果に関する具体的な計算の第一段階となるものである。

なお、この計算に用いられた電子計算機は IBM-7090 である。

9.2 計算点の配置

水位点・流速点の配置様式はこれまでと同様で、大船渡湾を図-9.2に示すような格子に分割して各計算点を配置した。湾内では各方向の格子間隔は相等しく、 $\Delta x = \Delta y = \Delta S = 280\text{m}$ となっている。

湾外には一樣幅員の仮想外海を設けてあるが、計算量を節約するため、湾内に比べて格子間隔はあらくなっている。すなわち、波の進行方向には $\Delta x = L/10$ ととり (L は湾外における津波の波長)、またそれと直角方向には $\Delta y = 6\Delta S$ ととっている。

なお、この仮想外海は湾の開口する方向に設けられているが、すべての津波がこの方向から来襲するとは考えられない。しかし、今回の計算では津波の来襲方向の影響についてはふれないこととする。

また、仮想外海では、実際的水深の如何にかかわらず、計算上は一樣水深 (40m) としてある。したがって、そこでの計算結果は、実際の外海における津波とただちに対応するものではなく、むしろ湾内へ侵入する波の計算上の供給源と考えるべきものである。

水深は各流速点ごとに、図-9.3 のようにあたえられる。この値は平均潮位以下の水深であって、津波来襲時の天体潮位の変化などは考慮していない。

実際の現象としては、水深が比較的小さいところで、津波の引き波により海底が露出するような場合も生じ得る。しかし、これに対しては、通常の運動および連続の方程式はもはや適用できない。そこで、計算上このような状態を生じないようにするため、われわれは最小水深を10mに制限することとした。

図-9.1 大船渡湾平面図

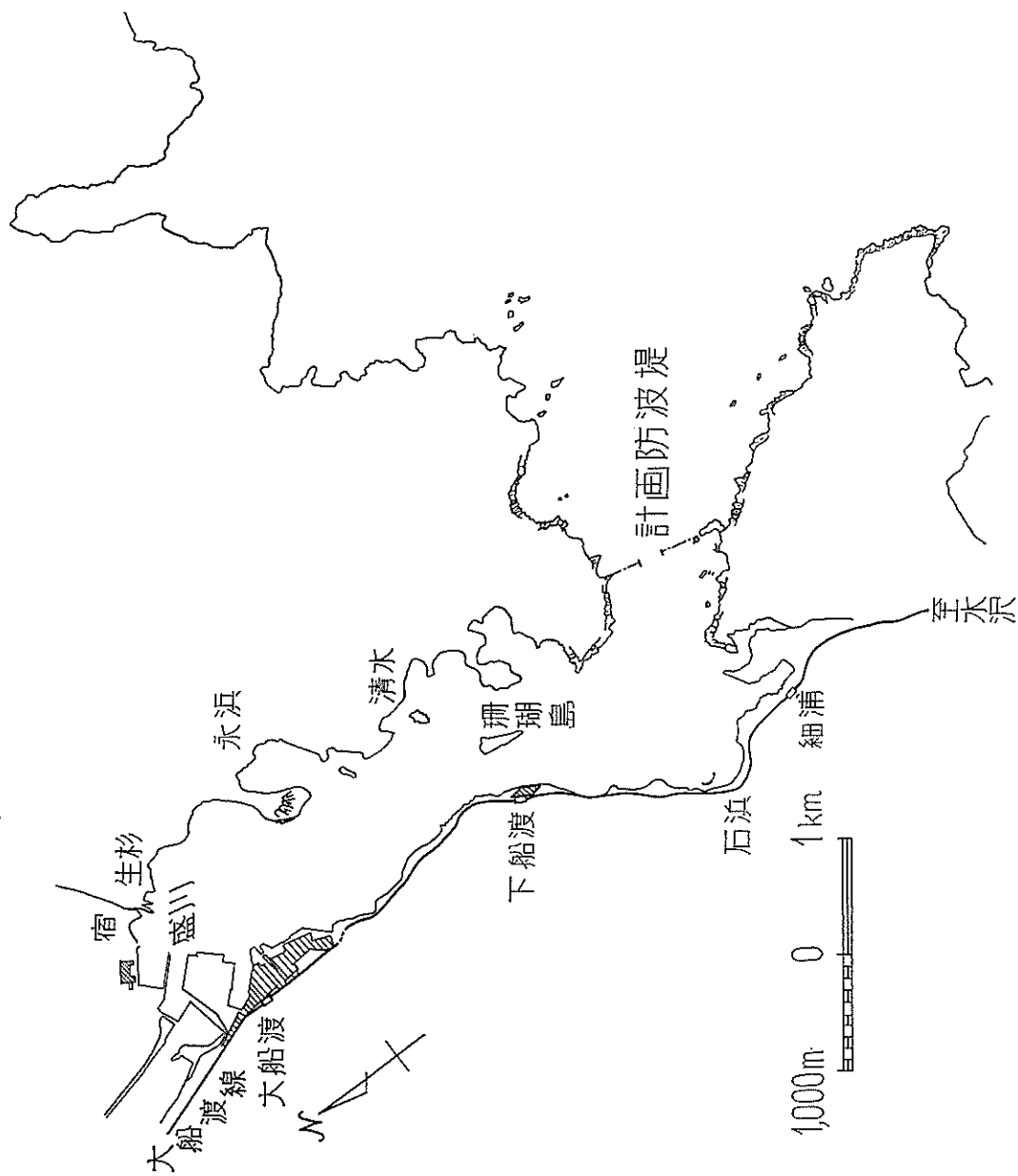
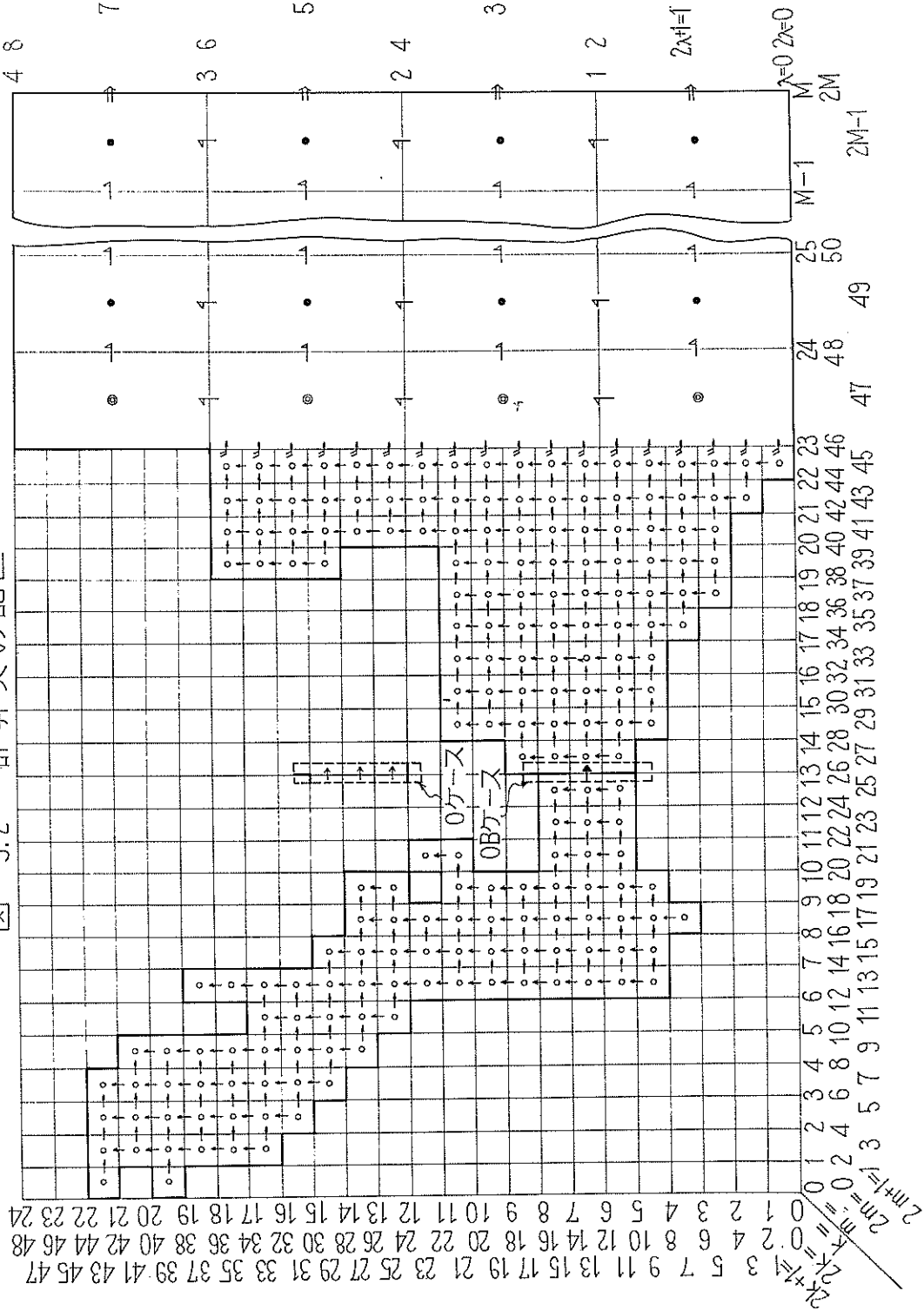


図-9.2 計算表の配置



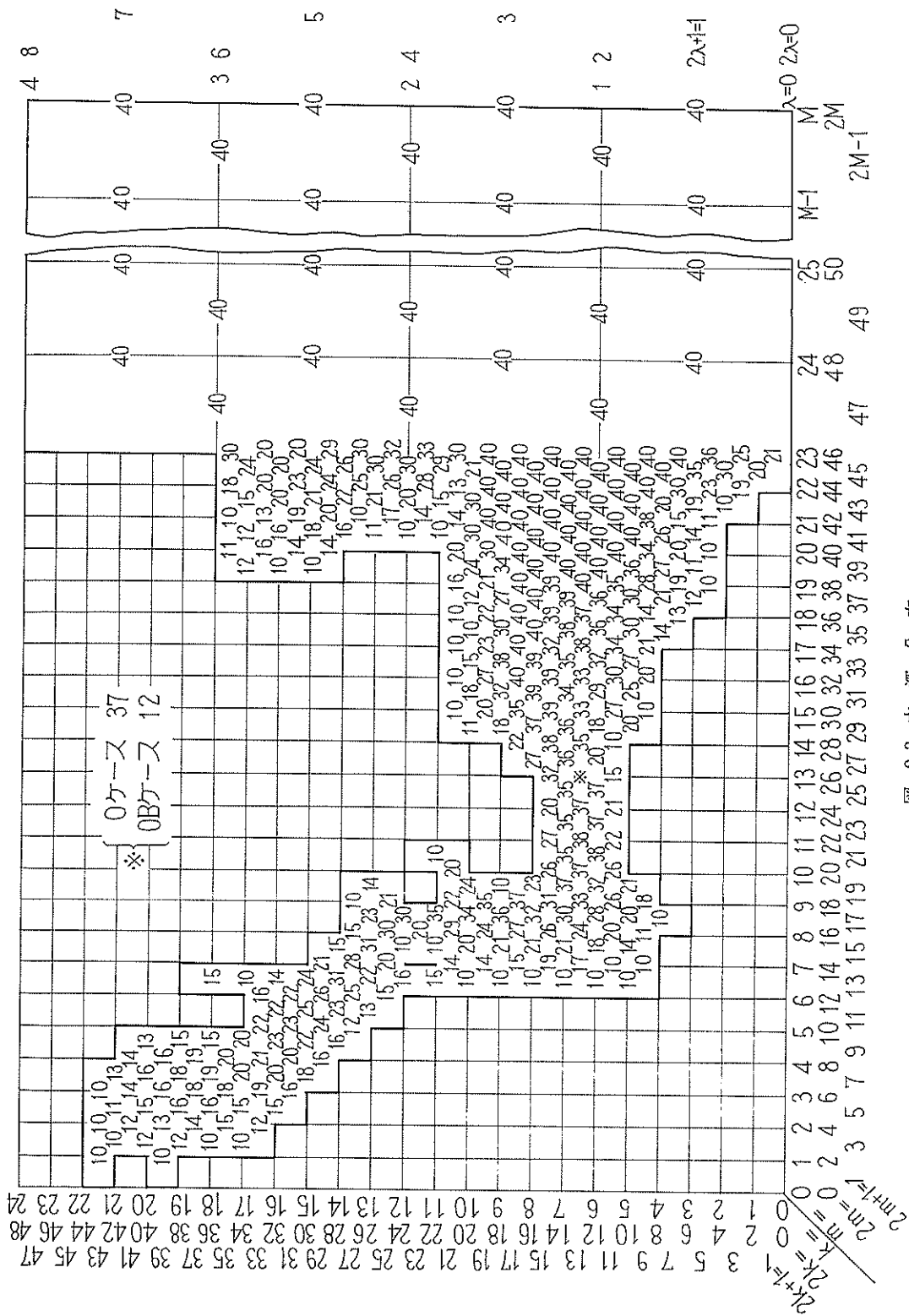


図-9.3 水深分布

また、湾内の最大水深は、湾外の一様水深と等しく40mにおさえている。実際には湾口附近の一部が40m以上の水深を有するが、その影響は小さいものと考えられる。なお、珊瑚島は1本の線によって表わしているので、両側の水路部分では、断面積が実際と等しくなるように補正した水深をあたえてある。防波堤設置後の港口水深についても、後述のような補正が施されている。

9.3 湾内計算点に対する方程式

運動方程式および連続の方程式は次のとおりである。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial t} &= -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} \\ \frac{\partial \zeta}{\partial t} &= -\frac{\partial}{\partial x}(hu) - \frac{\partial}{\partial y}(hv) \end{aligned} \right\} \text{--- (9.1)}$$

湾内では $dx=dy=ds$ であるから、上式に対応する差分方程式は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} u_{2m,2k+1}(2n+2) &= u_{2m,2k+1}(2n) \\ &\quad - g \frac{\Delta t}{\Delta s} \{ \zeta_{2m+1,2k+1}(2n+1) - \zeta_{2m-1,2k+1}(2n+1) \} \\ v_{2m+1,2k}(2n+2) &= v_{2m+1,2k}(2n) \\ &\quad - g \frac{\Delta t}{\Delta s} \{ \zeta_{2m+1,2k+1}(2n+1) - \zeta_{2m+1,2k-1}(2n+1) \} \\ \zeta_{2m+1,2k+1}(2n+1) &= \zeta_{2m+1,2k+1}(2n-1) \\ &\quad - \frac{\Delta t}{\Delta s} \{ h_{2m+2,2k+1} u_{2m+2,2k+1}(2n) - h_{2m,2k+1} u_{2m,2k+1}(2n) \\ &\quad + h_{2m+1,2k+2} v_{2m+1,2k+2}(2n) - h_{2m+1,2k} v_{2m+1,2k}(2n) \} \end{aligned} \right\} \text{--- (9.2)}$$

9.4 湾外計算点に対する方程式

(9.1) 式から次の差分方程式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} u_{2m,2\lambda+1}(2n+2) &= u_{2m,2\lambda+1}(2n) \\ &\quad - g \frac{\Delta t}{\Delta x} \{ \zeta_{2m+1,2\lambda+1}(2n+1) - \zeta_{2m-1,2\lambda+1}(2n+1) \} \\ v_{2m+1,2\lambda}(2n+2) &= v_{2m+1,2\lambda}(2n) \\ &\quad - g \frac{\Delta t}{\Delta y} \{ \zeta_{2m+1,2\lambda+1}(2n+1) - \zeta_{2m+1,2\lambda-1}(2n+1) \} \\ \zeta_{2m+1,2\lambda+1}(2n+1) &= \zeta_{2m+1,2\lambda+1}(2n-1) \\ &\quad - h \Delta t \left\{ \frac{u_{2m+2,2\lambda+1}(2n) - u_{2m,2\lambda+1}(2n)}{\Delta x} + \frac{v_{2m+1,2\lambda+2}(2n) - v_{2m+1,2\lambda}(2n)}{\Delta y} \right\} \end{aligned} \right\} \text{--- (9.3)}$$

ただし、この第3式右辺の h は湾外の一様水深を意味するものである。

9.6 湾口附近の計算点に対する方程式

湾内と湾外とで格子間隔が異なるため、湾口附近の計算点に対しては、特殊な形の差分方程式が必要となる。まず湾口の流速点では

$$u_{46,2k+1}(2n+2) = u_{46,2k+1}(2n) - g \frac{2\Delta t}{\Delta s + \Delta x} \{ \zeta_{47,2\lambda+1}(2n+1) - \zeta_{45,2k+1}(2n+1) \} \quad (9.4)$$

となる。ここで、 $k=6\lambda \sim 6\lambda+5$ に対して $\zeta_{47,2\lambda+1}$ を共通に用いる。

また、湾口に最も近い湾外水位点に対しては次のようになる。

$$\zeta_{47,2\lambda+1}(2n+1) = \zeta_{47,2\lambda+1}(2n-1) - \Delta t \left\{ \frac{h u_{48,2\lambda+1}(2n) - \frac{1}{6} \sum_{k=6\lambda}^{6\lambda+5} h_{46,2k+1} u_{46,2k+1}(2n)}{\Delta x} + h \frac{v_{47,2\lambda+2}(2n) - v_{47,2\lambda}(2n)}{\Delta y} \right\} \quad (9.5)$$

9.6 港口流速点に対する方程式

防波堤設置後の港口流速には、港口損失を考慮してケースCで用いたのと全く同じ方法を適用する。したがって、無次元化された(1.8)式に対応して次式が得られる。

$$u_{26,13}(2n+2) = \begin{cases} \frac{1 - \sqrt{1 + fR}}{\frac{f}{2} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta s}}, & R \geq 0 \\ \frac{-1 + \sqrt{1 - fR}}{\frac{f}{2} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta s}}, & R \leq 0 \end{cases} \quad (9.6)$$

ただし

$$R = g \left(\frac{\Delta t}{\Delta s} \right)^2 \{ \zeta_{27,13}(2n+1) - \zeta_{25,13}(2n) \} + \frac{f}{4} \left(\frac{\Delta t}{\Delta s} \right)^2 u_{26,13}(2n) | u_{26,13}(2n) | - \frac{\Delta t}{\Delta s} u_{26,13}(2n) \quad (9.7)$$

なお、計画防波堤の港口は、幅員200m、水深16.9mであり、この幅員は格子間隔280mとは異なる。そこで、港口に隣接する水位点に対する連続の方程式を他の点に対するものと同じ形にするためには、幅員200m、水深16.9mの港口の代りに、幅員280m、水深12m ($= 16.9 \times 200 / 280$) を考えればよい。図-9.3には、この補正水深があたえられている。

9.7 初期条件

初期条件のあたえ方は、これまでの計算ケースと全く同様である。すなわち、最初静止している領域へ正弦波形の津波が来襲するものと考え、その先端が湾口に達したときをもつて $t=0$ とし、 $t=0$ における流速および $t=-\Delta t/2$ における水位の分布を初期条件としてあたえる。

湾内：

$$\left. \begin{aligned} u_{2m,2k+1}(0) &= v_{2m+1,2k}(0) = 0 \\ \zeta_{2m+1,2k+1}(-1) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (9.8)$$

湾外：

$$\left. \begin{aligned} u_{2m, 2\lambda+1}(0) &= \sqrt{\frac{g}{h}} a \sin\left(2\pi \frac{m-23}{L} \Delta x\right) \\ v_{2m+1, 2\lambda}(0) &= 0 \\ \zeta_{2m+1, 2\lambda+1}(-1) &= -a \sin 2\pi \left\{ \frac{\Delta x}{2L} (2m-45) - \frac{\Delta t}{2T} \right\} \end{aligned} \right\} \text{--- (9.9)}$$

なお、上式に示すように、今回の計算では津波は引き波から始まるものとしてあたえた。しかし、防波堤設置前についてはすべての方程式が線型であるし、防波堤設置後の港口流速を求める式も u や v の正負を入れかえることができるので、結果の符号だけ考えれば、押し波から始まるものと見なしても差支えない。

実際の津波は、このような一定波高、一定周期の正弦波ではなく、波高・周期ともに変化し、また波形には高調波成分も含まれているものと考えられる。津波の来襲方向についてもすでに述べたような問題点があるが、これら来襲波の諸性質が湾内の現象に及ぼす影響については、今後の課題として検討を進めて行くこととした。

9.8 境界条件

湾内における境界条件は、水際線（ケース OB における防波堤を含む）に直角方向の u または $v=0$ であたえられる。ただし、珊瑚島は既述のように 1本の線によって代表されている。また、湾奥における盛川の河口は閉じられたものと考え、河道への津波の侵入は取扱わない。

湾外では、仮想外海の側壁において $v=0$ とするほか、沖側境界における流速の時間的変化があたえられる。すなわち

$$\left. \begin{aligned} u_{2M, 2\lambda+1}(2n) &= \sqrt{\frac{g}{h}} a \sin n\theta \\ \sin \frac{\theta}{2} &= \sqrt{gh} \frac{\Delta t}{\Delta x} \sin \frac{\pi \Delta x}{L} \end{aligned} \right\} \text{--- (9.10)}$$

である。

約 4 周期の時間範囲について計算するため、この境界は湾口から 2 波長沖側に設けられている。

9.9 計算ケース

計算ケース O は大船渡湾における防波堤設置前、OB は防波堤設置後をあらわす。

周期は三陸大津波にほぼ相当するものとして 10 分、チリ地震津波にほぼ相当するものとして 40 分を考え、これらを含んで 10, 15, 25, 40, 60 分の各ケースを計算することとした。

湾外の津波波高がどのような値であるかについての明確な資料はないが、湾内における実際の記録やこれまでの計算結果などを参照して、今回はすべて a （仮想外海における津波半波高）= 0.5m と定めた。

各計算ケースに対する定数値、計算範囲などは、表—9.1 に一括して示されている。

表—9.1 計算ケース総括表

ケース	0—10	0—15	0—25	0—40	0—60
	OB—10	OB—15	OB—25	OB—40	OB—60
ΔS (m)	280	280	280	280	280
Δx (m)	1190	1780	2970	4760	7140
Δy (m)	1680	1680	1680	1680	1680
Δt (sec)	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
g (m/s ²)	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8
f	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
a (m)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
h (m)	40	40	40	40	40
L (m)	11,900	17,800	29,700	47,600	71,400
T (sec)	601.041	899.036	1500.07	2404.16	3606.24
θ	5°53'7	3°56'4	2°21'6	1°28'4	0°58'9
M	43	43	43	43	43
N	240	360	600	960	1440
プリント	毎5	毎7	毎12	毎20	毎30

注) $\Delta x = L/10$
 $\Delta y = 6\Delta S$
 $\Delta t = \Delta S / \sqrt{2gh}$
 $T = L / \sqrt{gh}$
 θ : (9.10) 式

§10. 計算結果

湾内の代表的地点について、水位・流速の時間的変化を附図—35~44に、湾の中心線に沿う各時刻ごとの水面曲線を附図—45~49に示す。

附図—50, 51は、各点の水位振幅および流速振幅の時間的変化を示すものである。また附図—52~56は、湾内の振動状況を見るために、湾奥水位が第2波または第3波のピークに達したときの、湾内の水位分布を等水位線によって示したものである。

更に、附図—57~61に、計算範囲内における湾内各点の最高水位が示されている。

10.1 現況における大船渡湾の振動特性

計算ケースOについて、水位振幅の時間的変化を附図—50にみると、津波の周期が15分と40分のときに、湾内水位が著るしく高まることが認められる。すなわち、大船渡湾の固有周期は、これらの周期で共振を生ずるような値を持っていることがわかる。

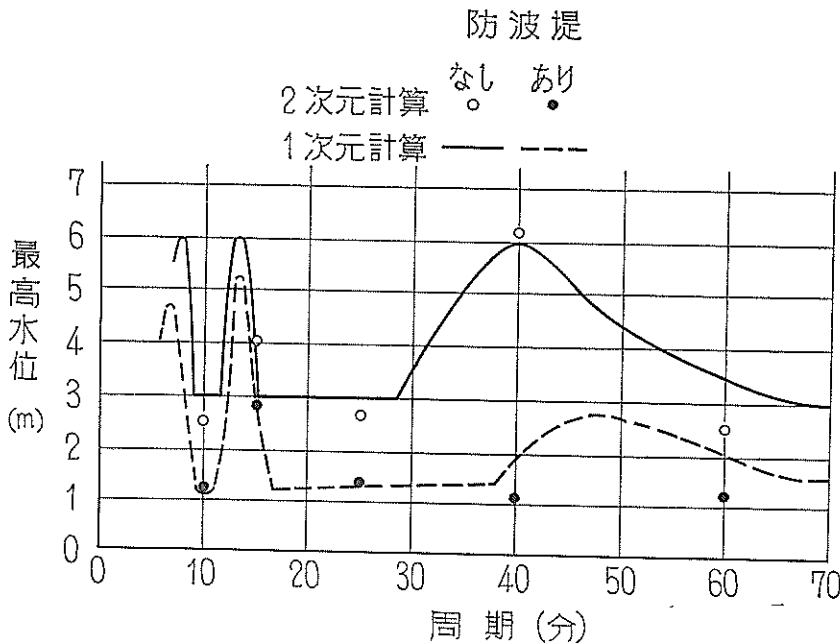
40分周期の場合には、湾奥において腹を、湾口のやや外側に節を有するような水面振動を生じている。これ

は、この湾の基本振動に相当するもので、その様子は、附図—48や同—55によく現われている。このとき、湾奥における最高水位は、静水面上6 m前後に達し、また流速は、湾口および珊瑚島附近で最強で、その値は3.5m/sec程度である。これらの数値は、いずれも仮想外海における津波の半波高を0.5mとしたときのものである。しかし、防波堤設置前の方程式は線型であるから、外海の波高が変わっても、水位や流速の増幅率は不変である。

一方、15分周期の振動では、附図—36や同—53が示すように、湾奥および湾の屈曲部が腹となり、両者の中間および湾外に節をもっている。これは、第2共振点に近いものである。すなわち、すでに計算ケースD、Eによって検討したように、屈曲部の影響は小さいので、屈曲部より内側の水域における固有振動との共振と考えるよりは、湾全体の倍振動と考える方が妥当であろう。このときの最高水位は、湾奥および石浜・細浦で3.5~4.0mに達し、流速は珊瑚島附近が最強で2.5m/secとなる。

次に、10分、25分および60分周期の場合をみると、ほぼ定常状態の湾奥水位は1.0~1.8mと極めて低く、最高水位はむしろ過渡状態のときに現われ、2.5m前後に達している。これらの周期が大船渡湾の共振周期から外れているためである。

こうした過渡状態および定常状態を通じての最高水位を、湾内各点の平面的分布として画いたのが、附図—57~61であり、湾奥におけるその値を周期に対してプロットしたものが、図—10.1である。この図には、次節に述べる防波堤設置後の値と、図—5.5に1次元計算結果として画いた値とを併せて示してある。ただし、この1次元計算結果を大船渡湾に適用するにあたって、水位は図—5.5の縦軸目盛をそのままm単位で読みとり、また周期は、 T_0 (湾口で閉じられた水域における固有周期)を20分と考えた。大船渡湾のように複雑な形状をした湾の場合でも、単純なモデルにおきかえた1次元計算によって、ある程度まで振動特性を推定することができる。



図—10.1 湾奥最高水位と周期との関係

10.2 津波防波堤の効果

まず、水位振幅の変化を附図—50にみると、防波堤設置前に比して著しい減少が認められる。周期15分の場合に水位振幅が波数と共に増大するのを除けば、第1波から余り変化せず、最高でも1.0~1.5mの大きさにとどまっている。特に、周期40分の場合には、設置前の最高水位6.0mから、設置後の1.0mへと減少が著しい。

こうした湾内水位に対する防波堤設置の影響は、湾奥における最高水位を各周期についてプロットした。

図—10.1によつて明らかに示される。湾の基本振動周期は、防波堤設置前に40分であったものが、設置後は約50分に増加したため、40分周期の津波に対する効果は極めて大きい。また、新たな固有周期と合致する50分周期の津波に対しては、防波堤の効果として1.5~2.0m程度の水位低下が期待される。

これに反して、15分周期の場合には第2共振点に近いが、ここでは防波堤設置の効果がそれ程大きくはない。

なお、津波の周期によつては、防波堤の外側における水位が、堤の設置後に若干増大する。しかし、堤外における水位振幅の絶対値は、防波堤開口部の沖側で、周期15分のときに1.9m、それ以外の周期で最大1.4mであつて、無堤時の15分周期の場合に対する2.7mよりはるかに小さい。

次に流速については、当然のことながら防波堤開口部に3.5~3.8m/sec程度の強い流れを生ずる。この強さは、津波の周期に余り関係せず、また遅くとも第2波目でほぼ定常状態に達している。しかし、この開口部を除くと、湾内の流速は防波堤の設置によつて著しく減少する。

10.3 今後に残された問題点

これまで述べて来たように、われわれは基本的な形状として一様半無限水路内に防波堤を設けた場合から計算を始め、種々の要素の影響を検討しながら、大船渡湾における津波防波堤の効果を算定する段階に至つた。しかしながら、なお考察すべき事項が幾つか残つて居る。今後更にこの種の問題を究明して行くため、残された主な点を拾ひ上げて見る。

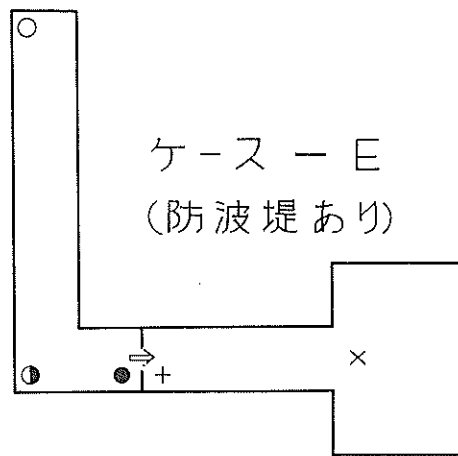
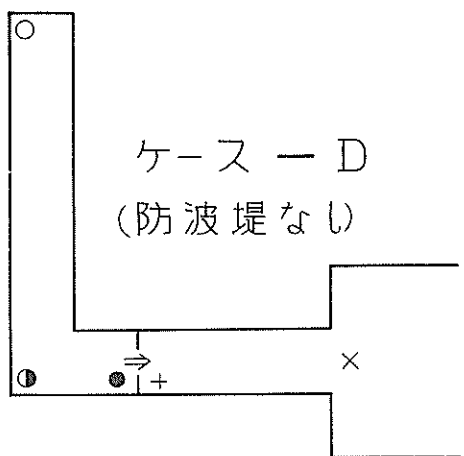
その一つは、来襲波の波形に関する点である。これまでの計算では、来襲波は一定周期、一定波高の正弦波列としてあたえられて居り共振的現象に対しては最もきびしい条件であろうと予想されるが、波高や周期が変化する不規則な波列についても検討の要がある。この場合、実際の津波を代表してどのような波形をあたえるのが妥当であるかが問題である。

また、これまでの計算ではすべて微小振幅波と考へて取り扱つて来た。しかし、水深に比して水位の変化が大きかったり、防波堤開口部や屈曲部のように流況変化がはげしかったりすれば、当然慣性項が影響して来る。すなわち有限振幅波として取り扱う必要が出て来る。同時に底面摩擦も考へる必要があるであろう。また、水深が著るしく浅いところでは、引き波に伴つて海底の露出を生ずることとなるが、これをどのように計算に取り入れるかが問題である。

次に、計算を行なう場合の格子間隔のとり方なども検討すべき点の一つである。すでに1次元の考へによつて示されて居るように、分割のしかたは結果にある程度の影響をあたえる。地形の複雑さや来襲波の波長などとの関係で、最も有効な格子間隔がとられなければならない。

この他には、港口損失係数を防波堤その他の形状に応じていかにとるか、また仮想外海をどのように設定するか、特に湾口に対して斜めの方向に来襲する津波の場合のその方法など、実際の計算にあつて問題となる点が少なくない。これらのすべてを解明しつくすことは極めて困難であるが、われわれとしては、若干の実験をも含めて更に考へを続ける予定である。

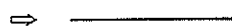
附図-1~12,19,27~30,33の水位及び流速曲線の位置表示



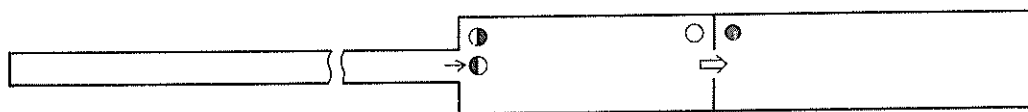
水位 点

- ————
- ————
- ————
- + ————
- x ————

流速 点



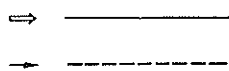
ケース - G



水位 点

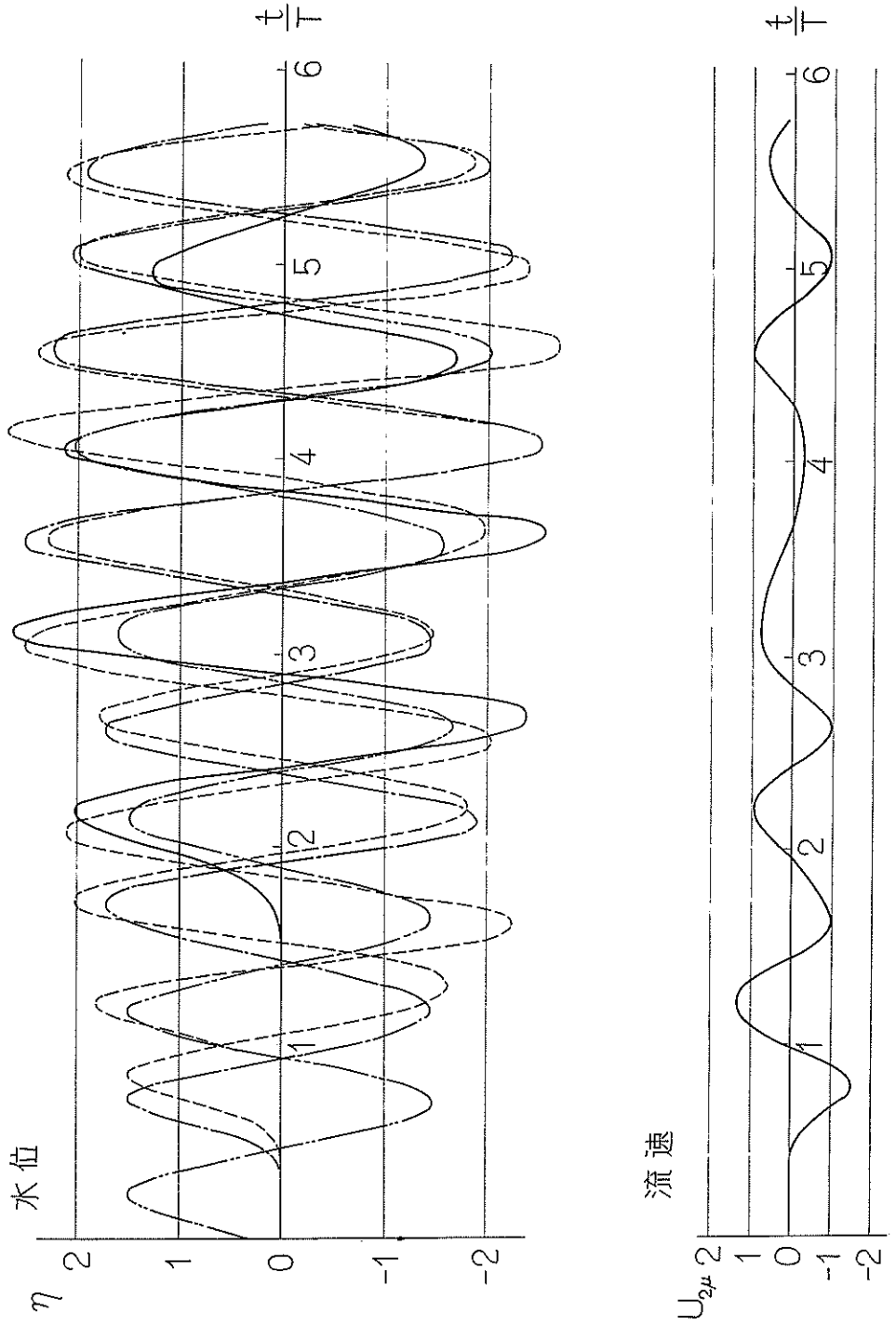
- ————
- ————
- 2 点間平均
- ————

流速 点



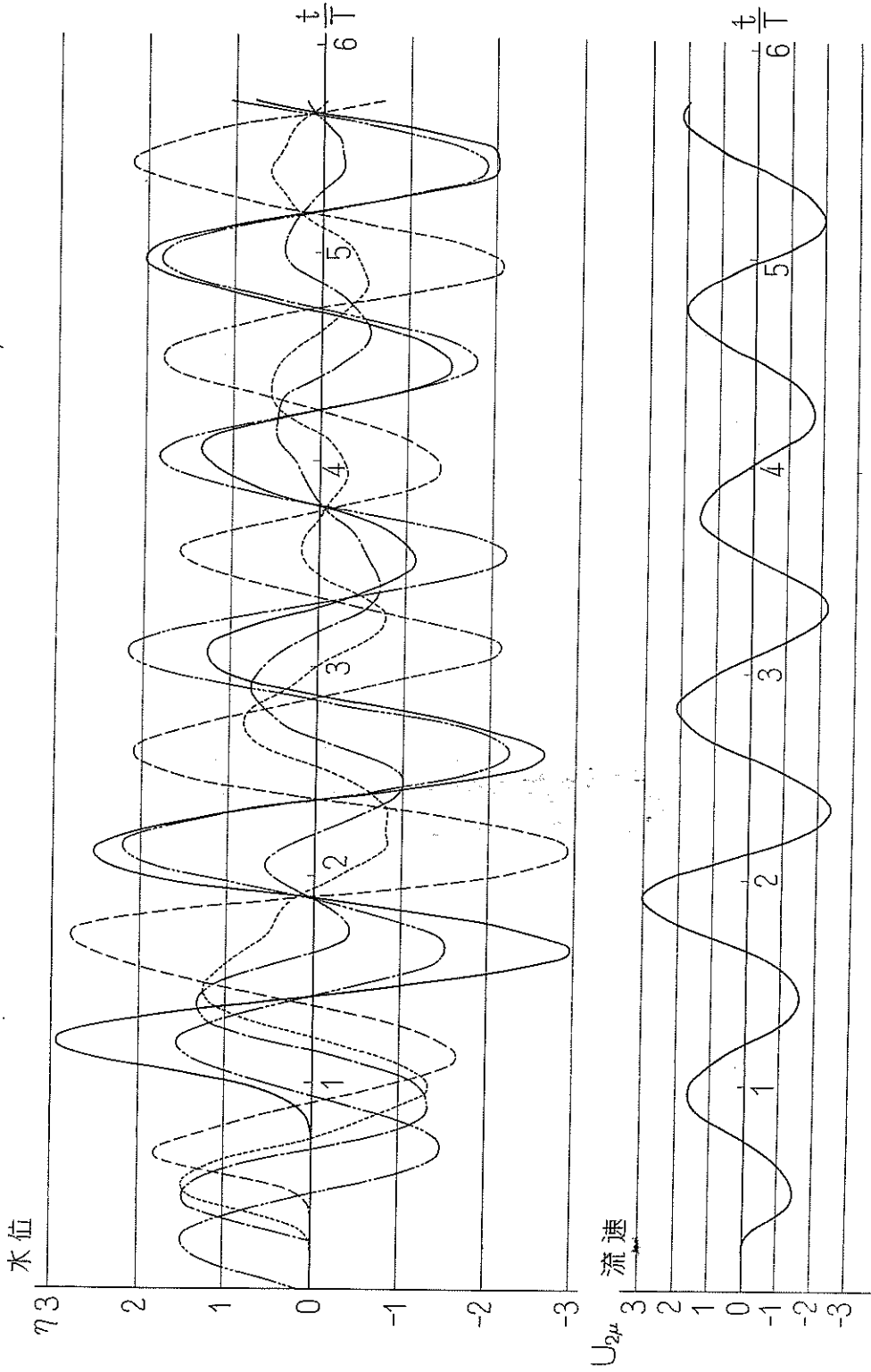
附圖 -1 水位及び流速の時間的变化

CASE D-46 $T/T_0=0.25$ $B/b=1$



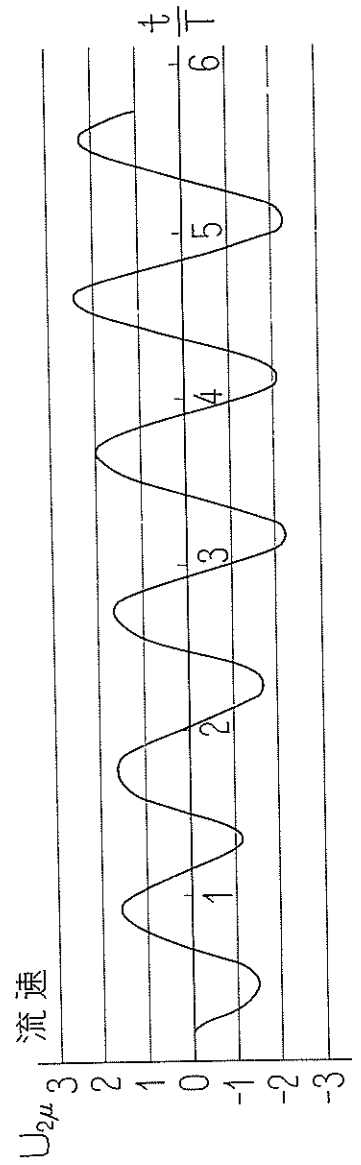
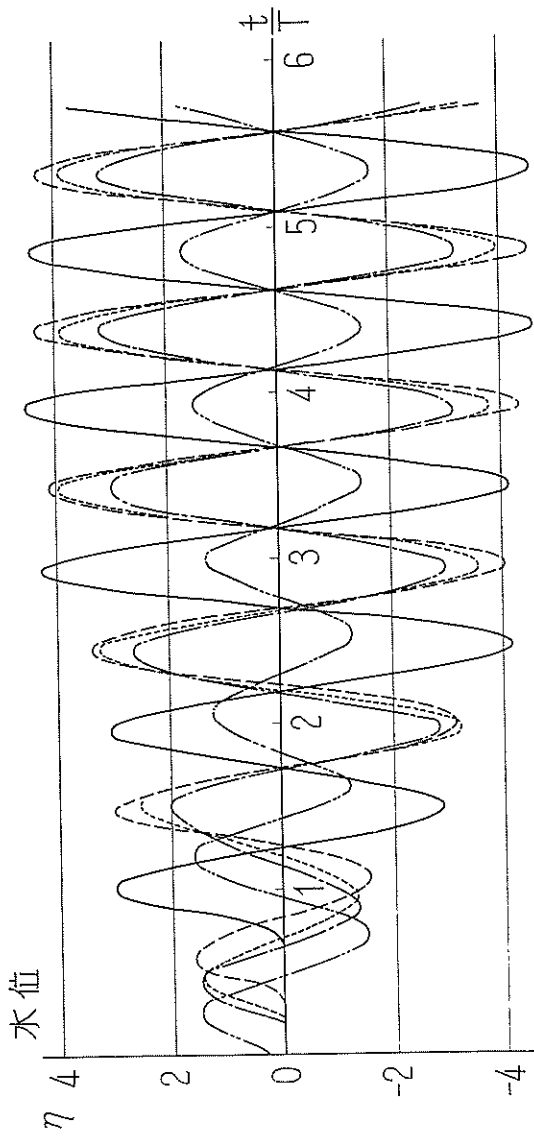
附図-2 水位及び流速の時間的变化

CASE D-47 $T/T_0=0.5$ $B/b=1$



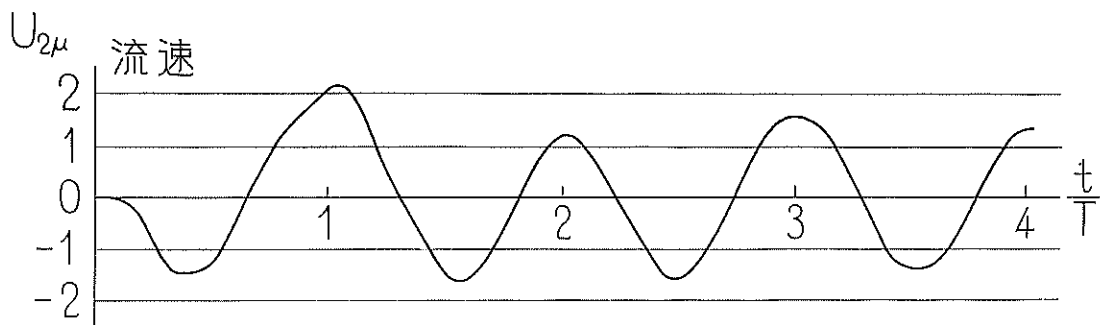
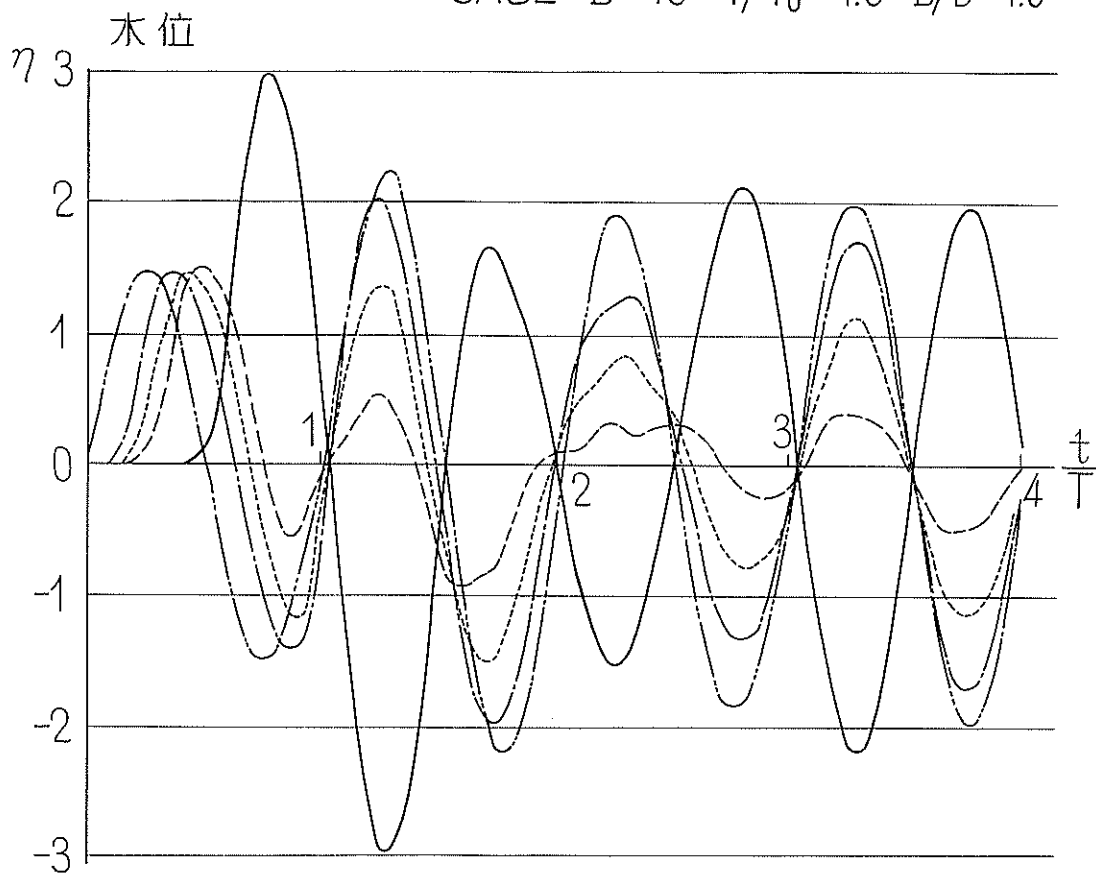
附図-3 水位及び流速の時間的变化

CASE D-48 $T/T_0=0.625$ $B/b=1$



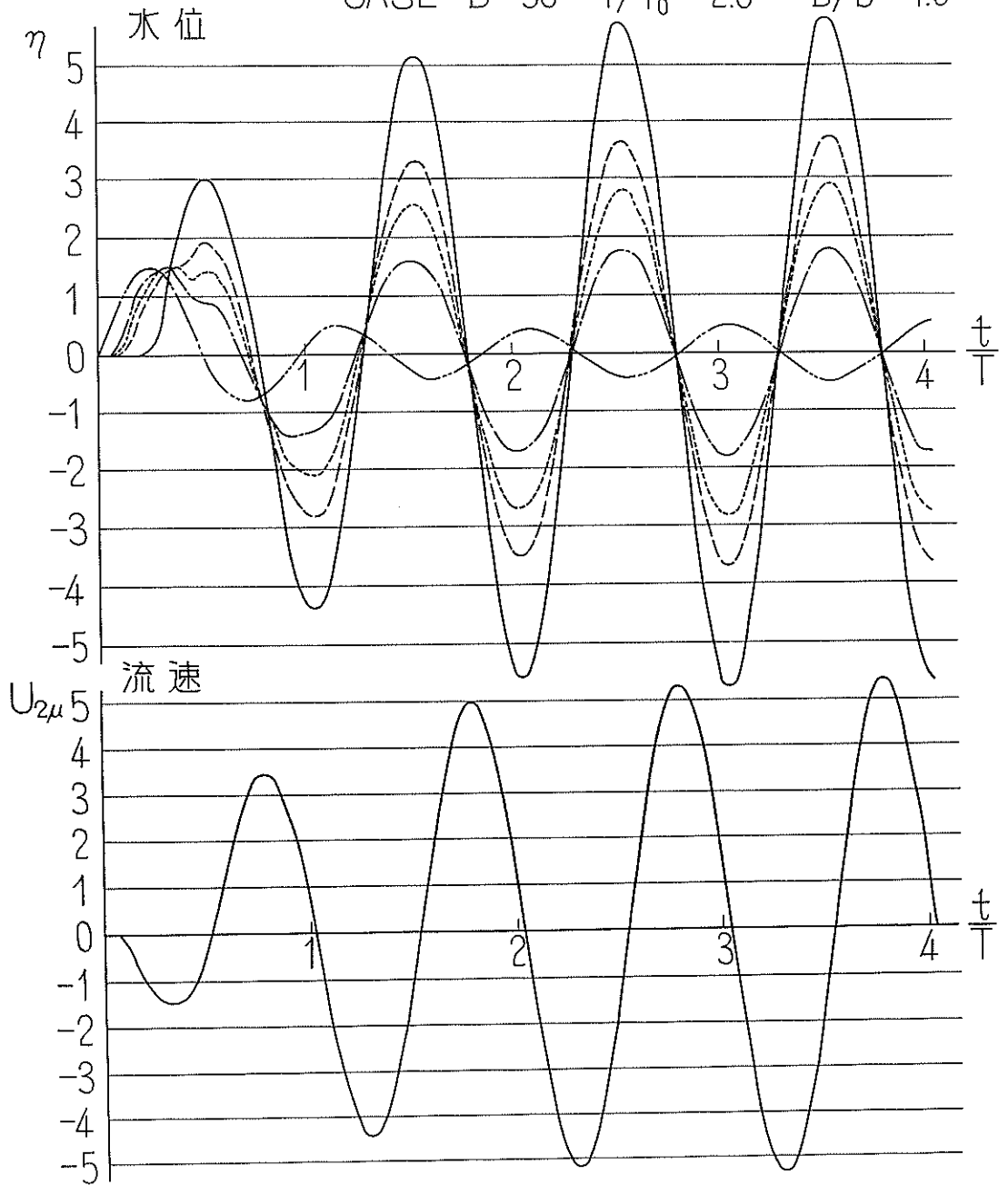
附図-4 水位及び流速の時間的变化

CASE D-49 $T/T_0=1.0$ $B/b=1.0$



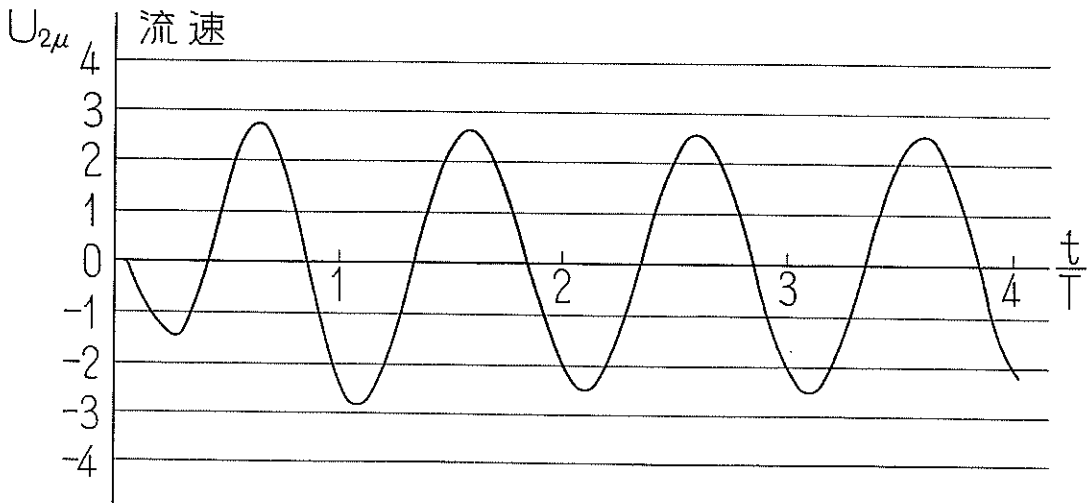
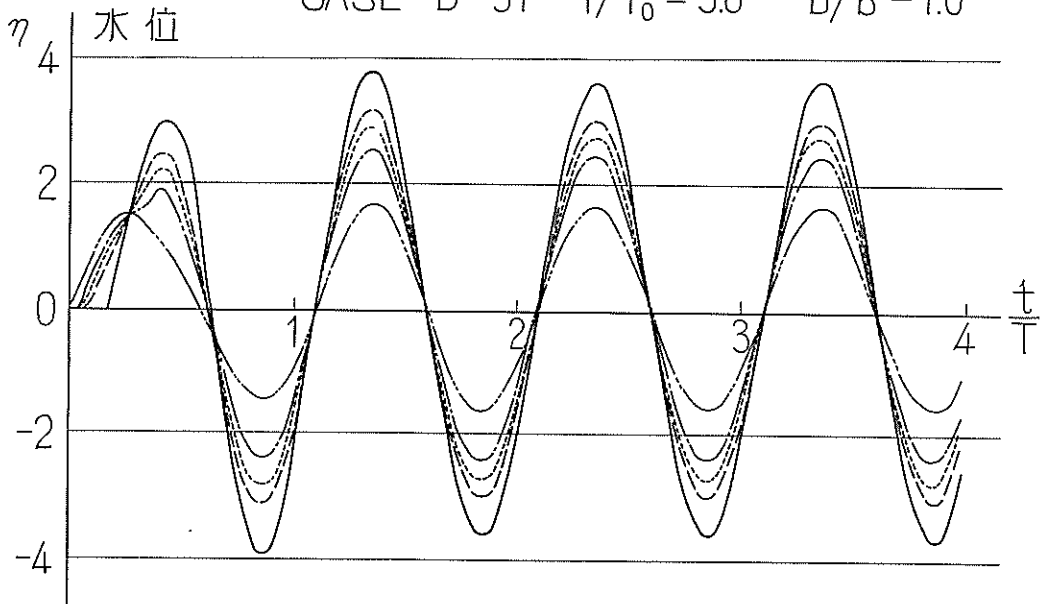
附図-5 水位及び流速の時間的变化

CASE D-50 $T/T_0 = 2.0$ $B/b = 1.0$



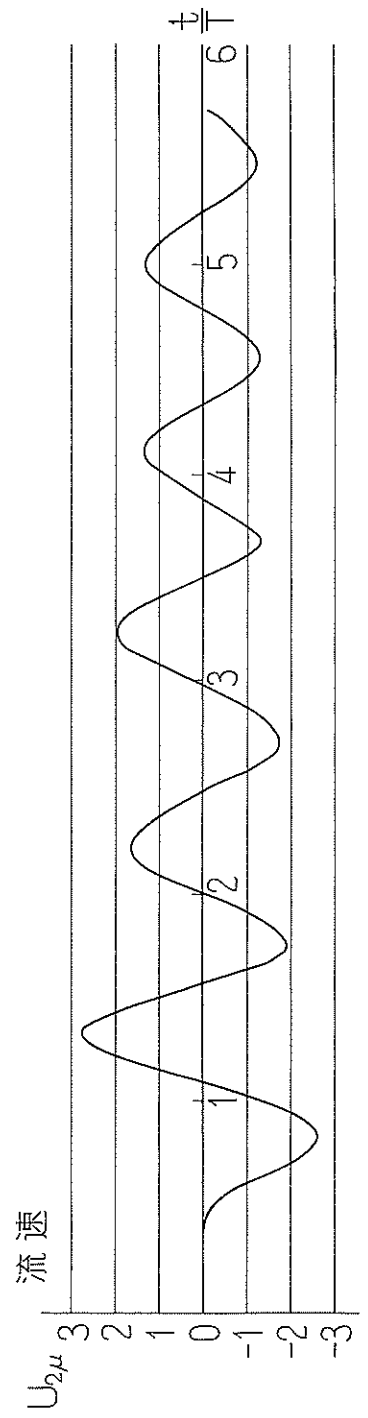
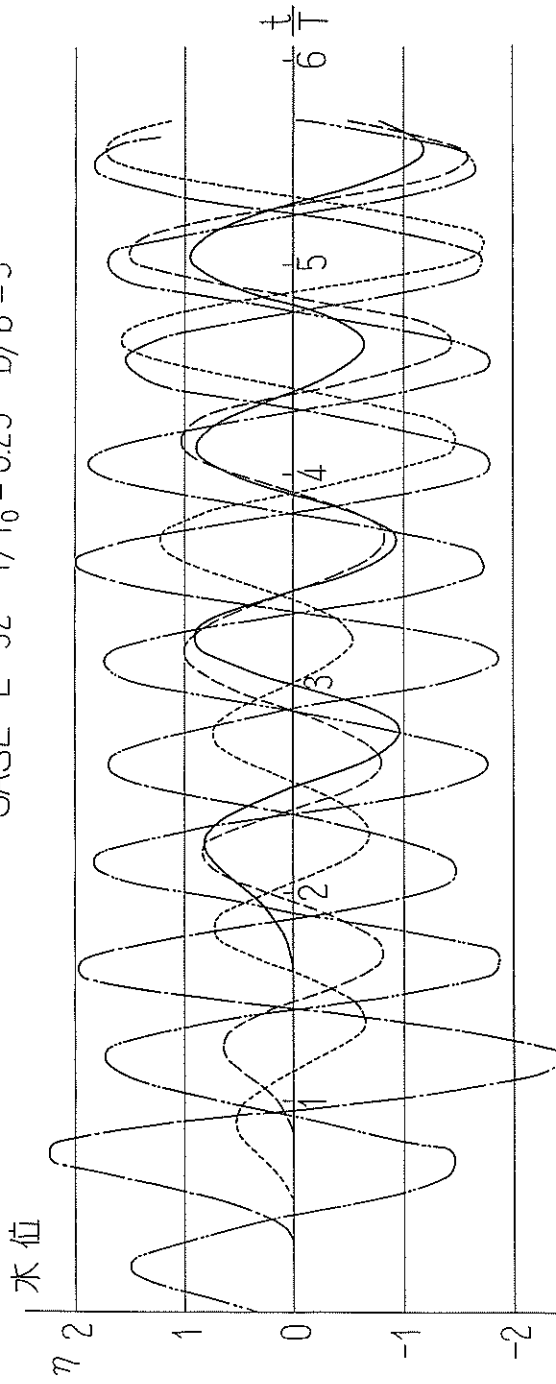
附図-6 水位及び流速の時間的变化

CASE D-51 $T/T_0 = 3.0$ $B/b = 1.0$



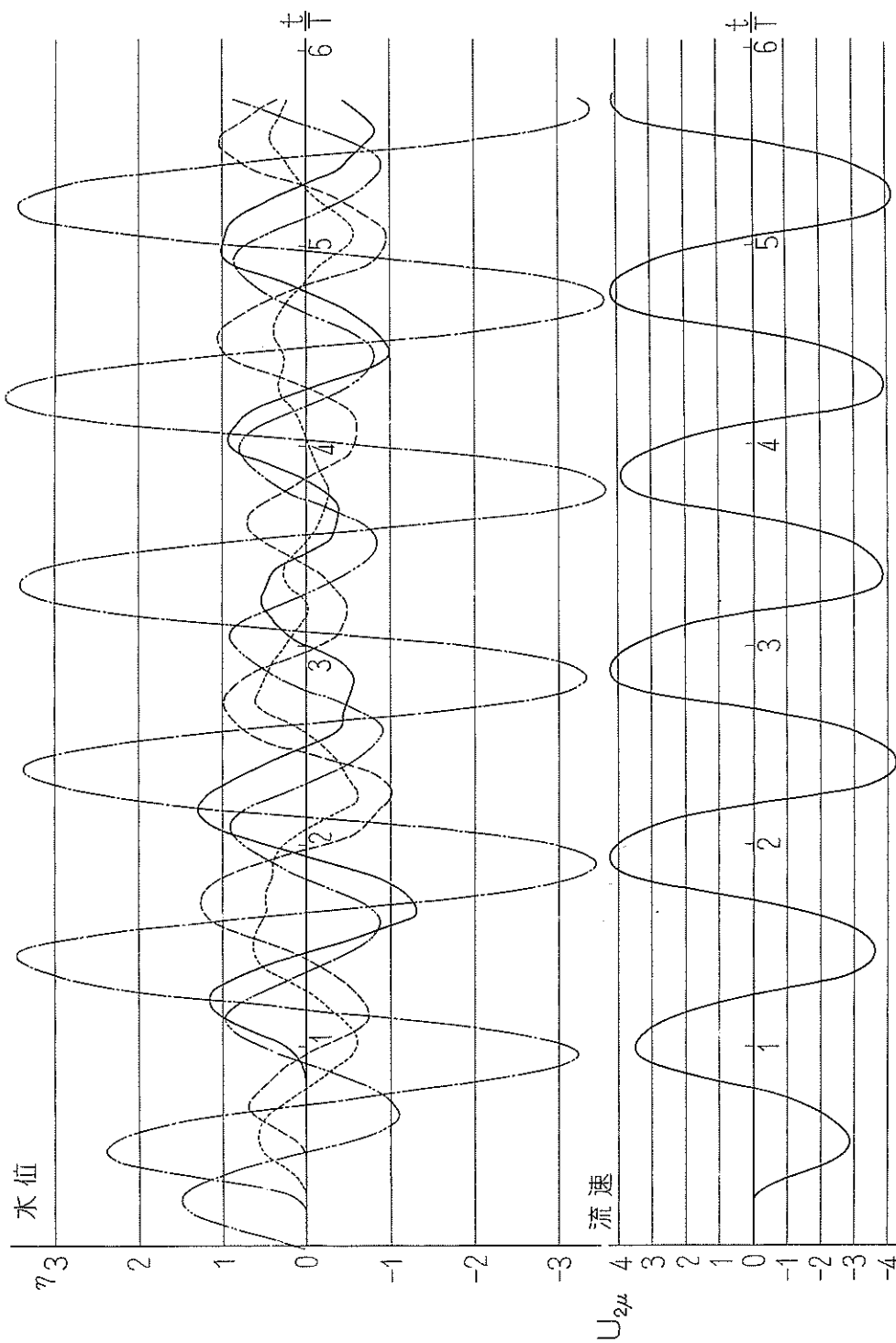
附圖-7 水位及び流速の時間的变化

CASE E-52 $T/T_0 = 0.25$ $B/b = 5$



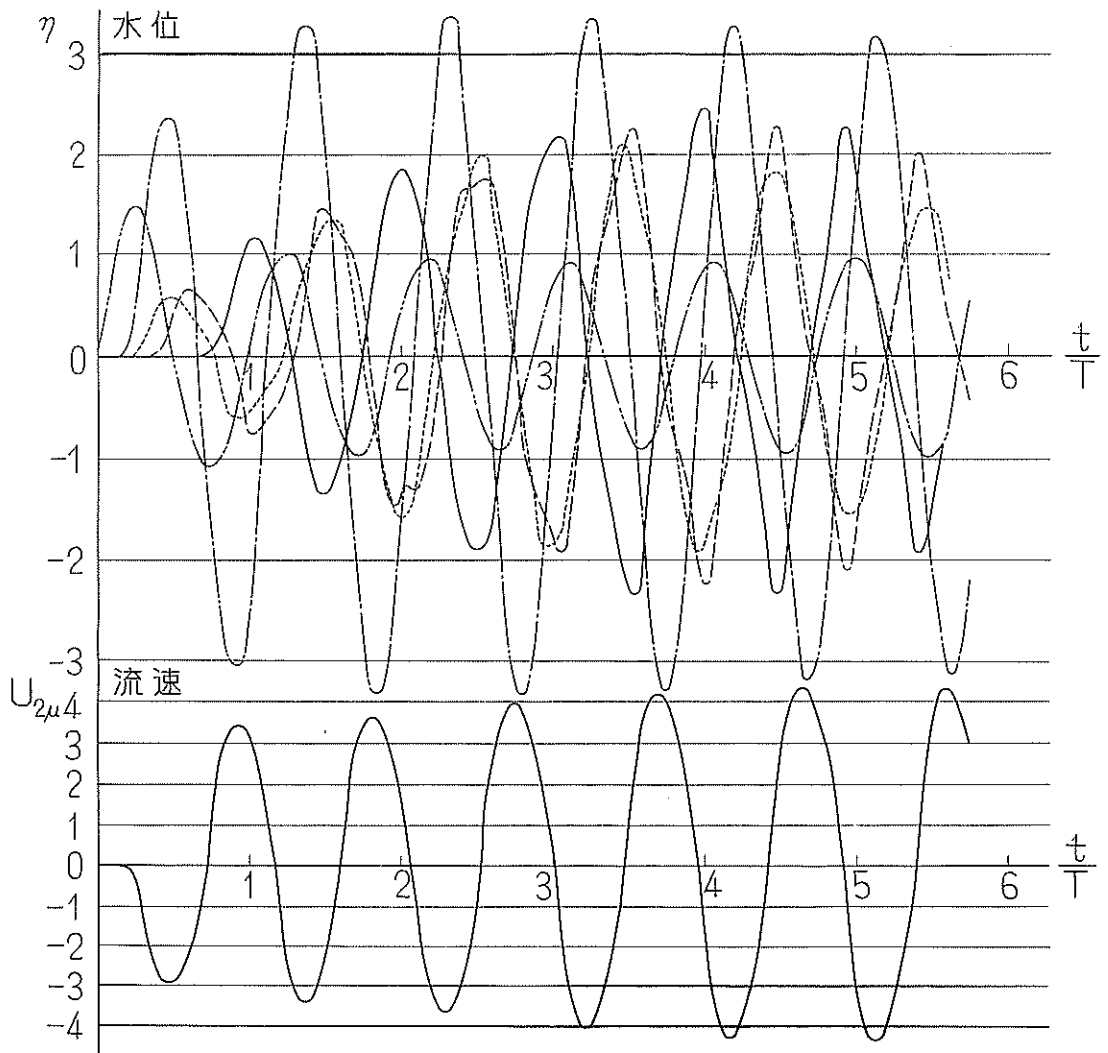
附図-8 水位及び流速の時間的变化

CASE E-53 $T/T_0 = 0.5$ $B/b = 5$

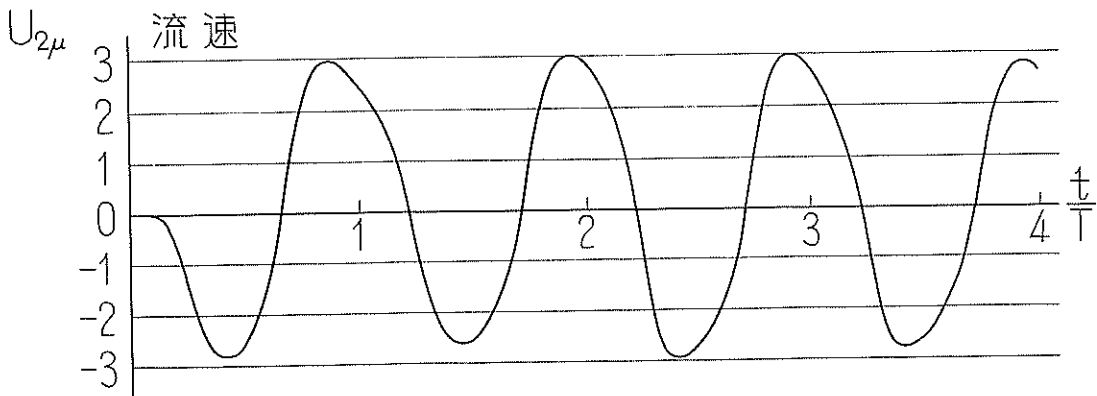
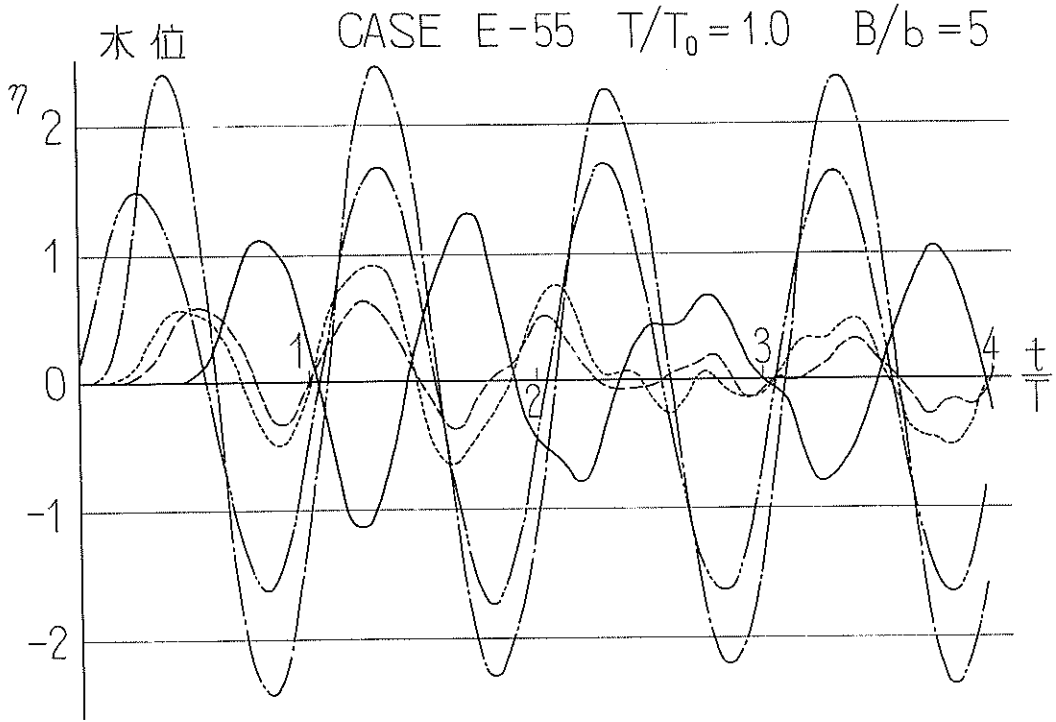


附図-9 水位及び流速の時間的变化

CASE E-54 $T/T_0 = 0.625$ $B/b = 5$

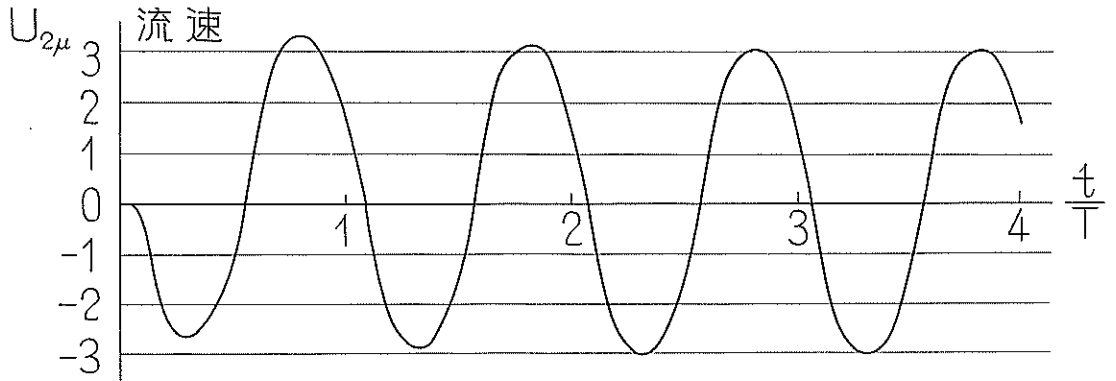
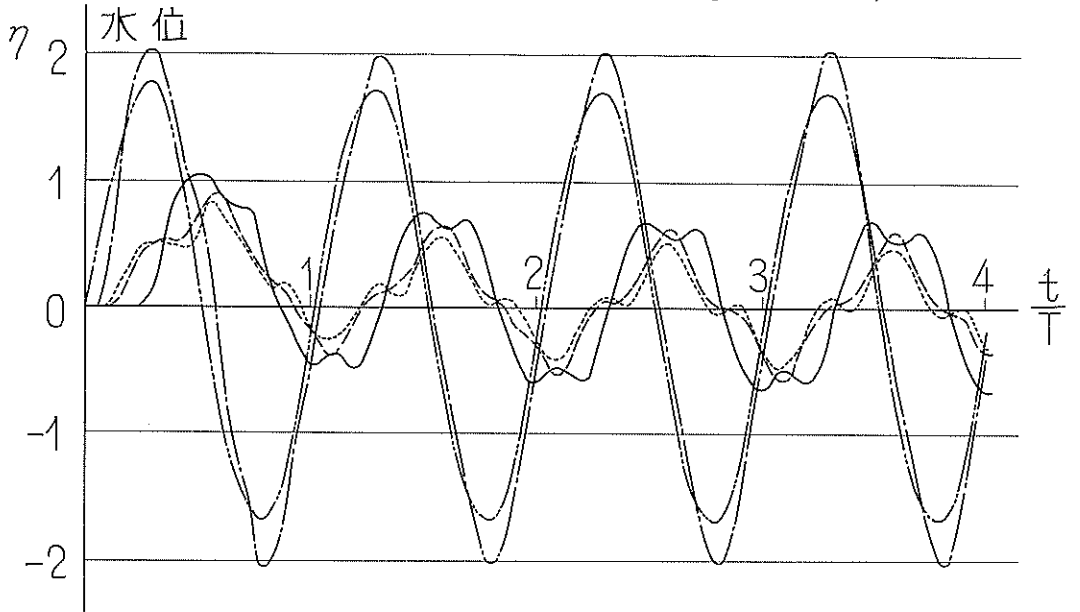


附図-10 水位及び流速の時間的变化



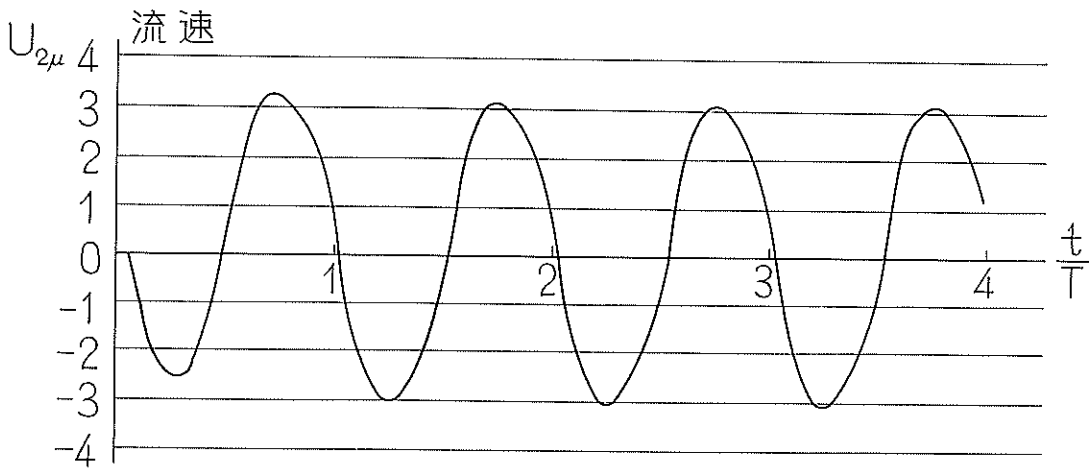
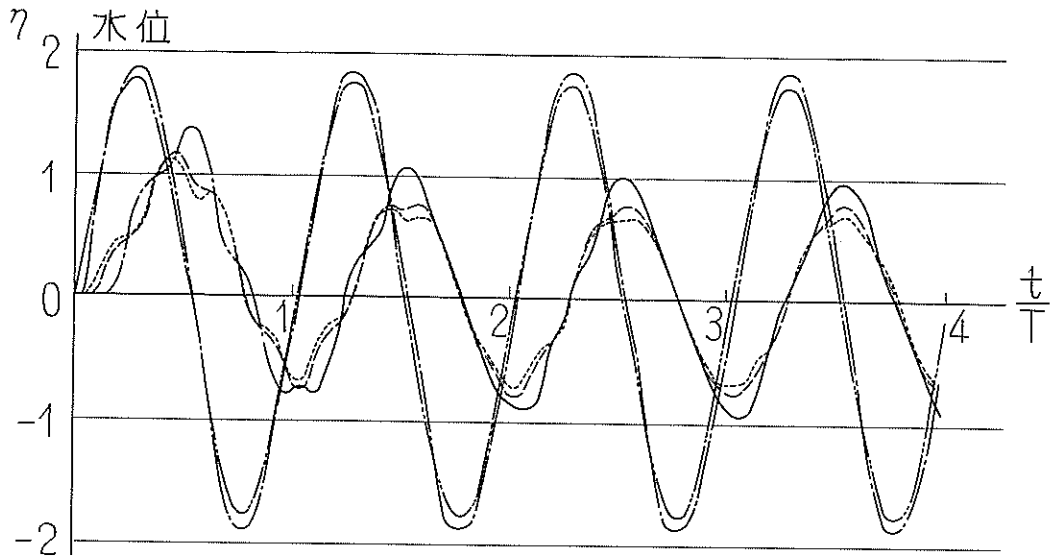
附図-11 水位及び流速の時間的变化

CASE E-56 $T/T_0 = 2.0$ $B/b = 5$



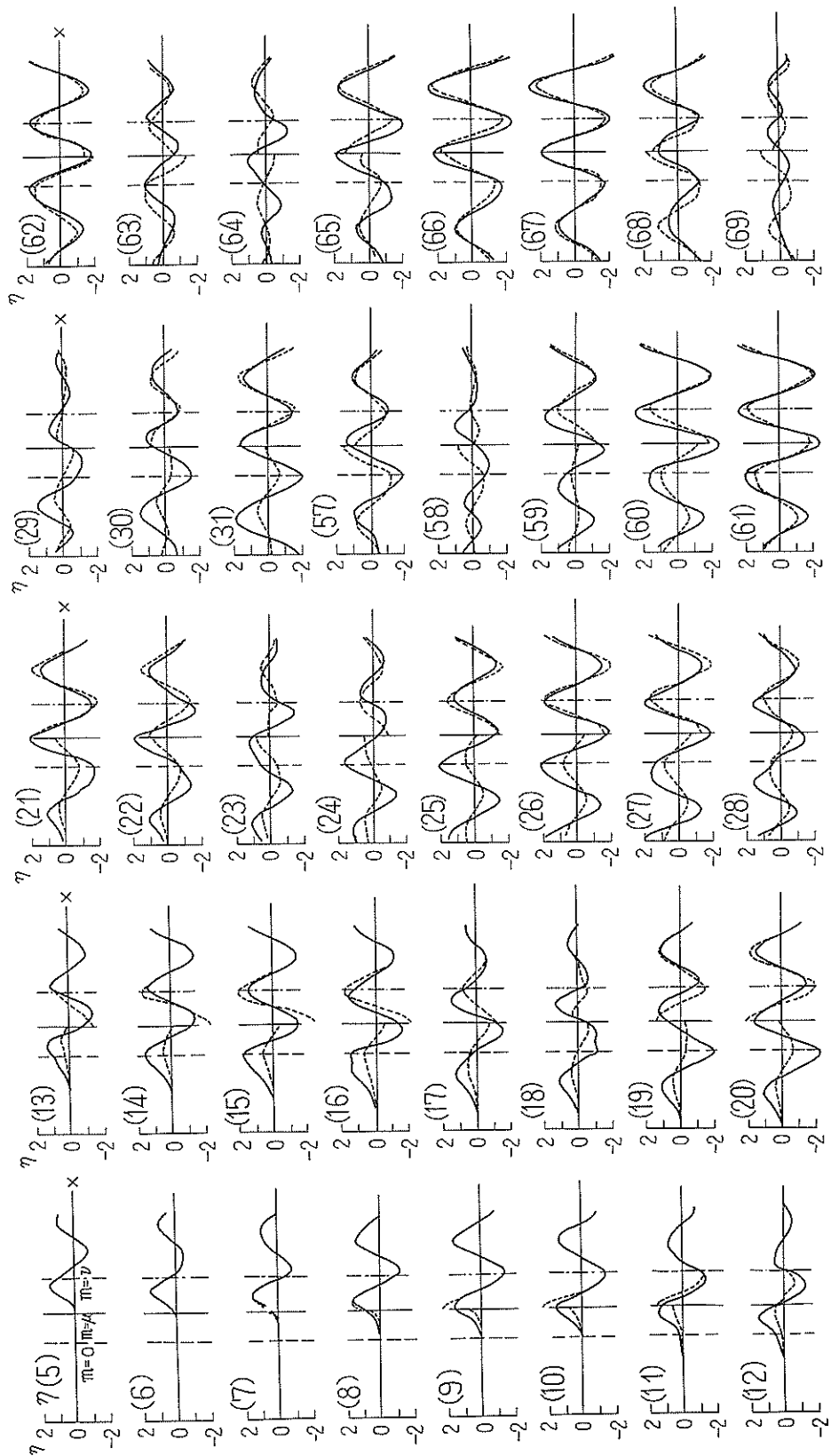
附図-12 水位及び流速の時間的变化

CASE E-57 $T/T_0=3.0$ $B/b=5$



附图-13 水面曲线

$T/T_0 = 0.25$ — : D-46 $B/b = 1$
 : E-52 $B/b = 5$

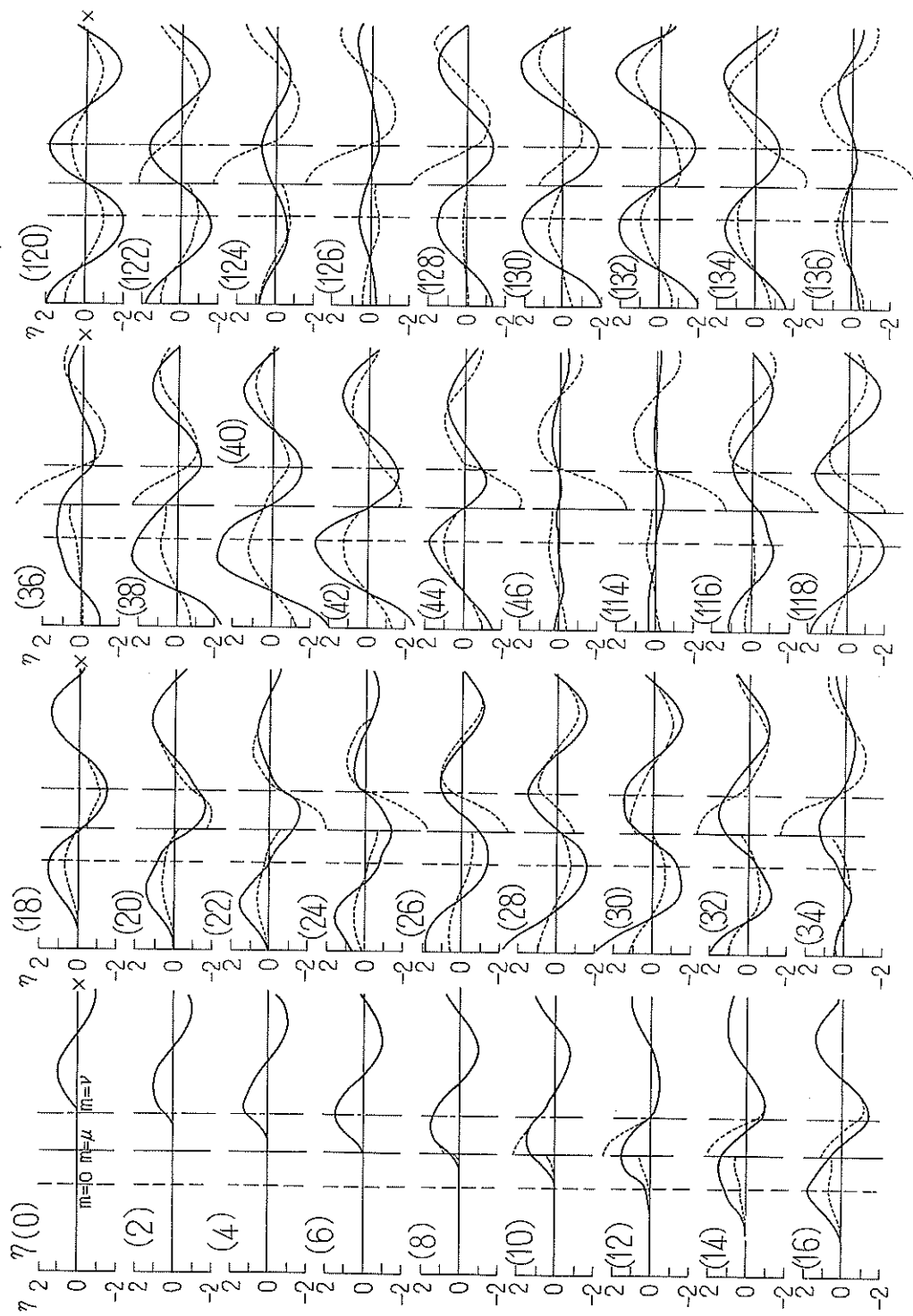


附图-14 水面曲線

$T/T_0 = 0.5$

——: D-47 $B/b = 1$

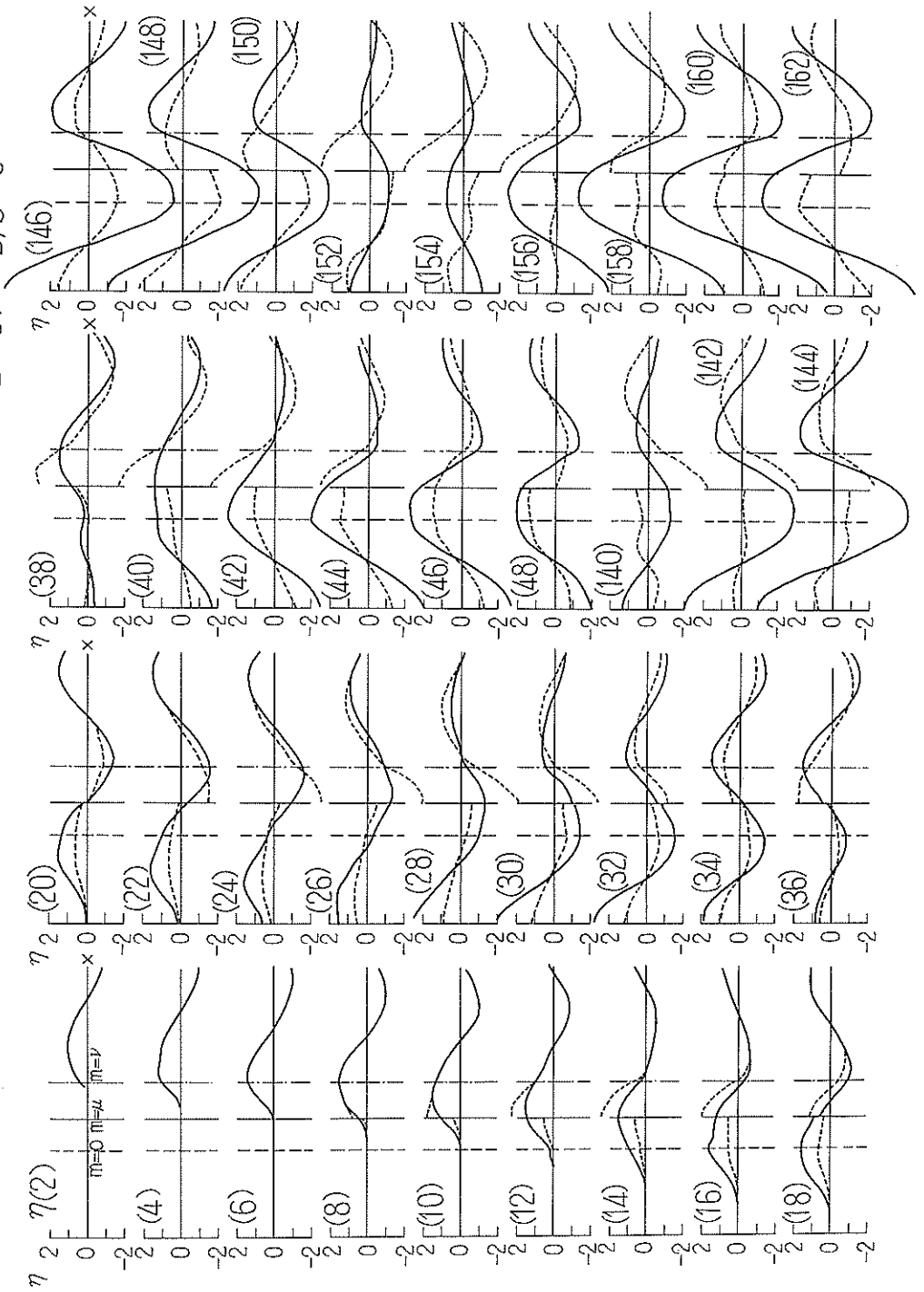
-----: E-53 $B/b = 5$



附图-15 水面曲線

$T/T_0 = 0.625$

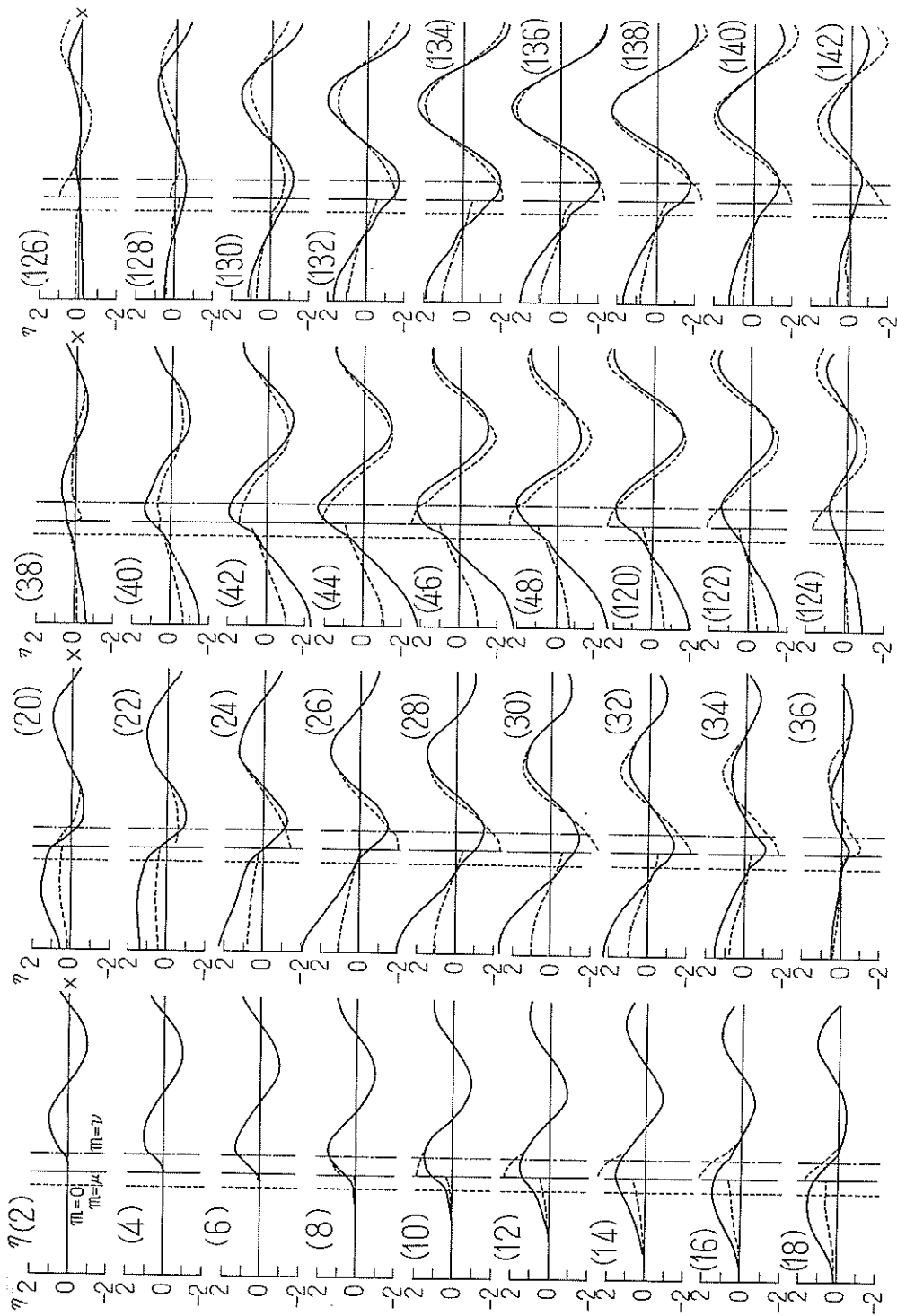
——: D-48 $B/b = 1$
 - - - - : E-54 $B/b = 5$



附圖-16 水面曲線

$T/T_0 = 1.0$

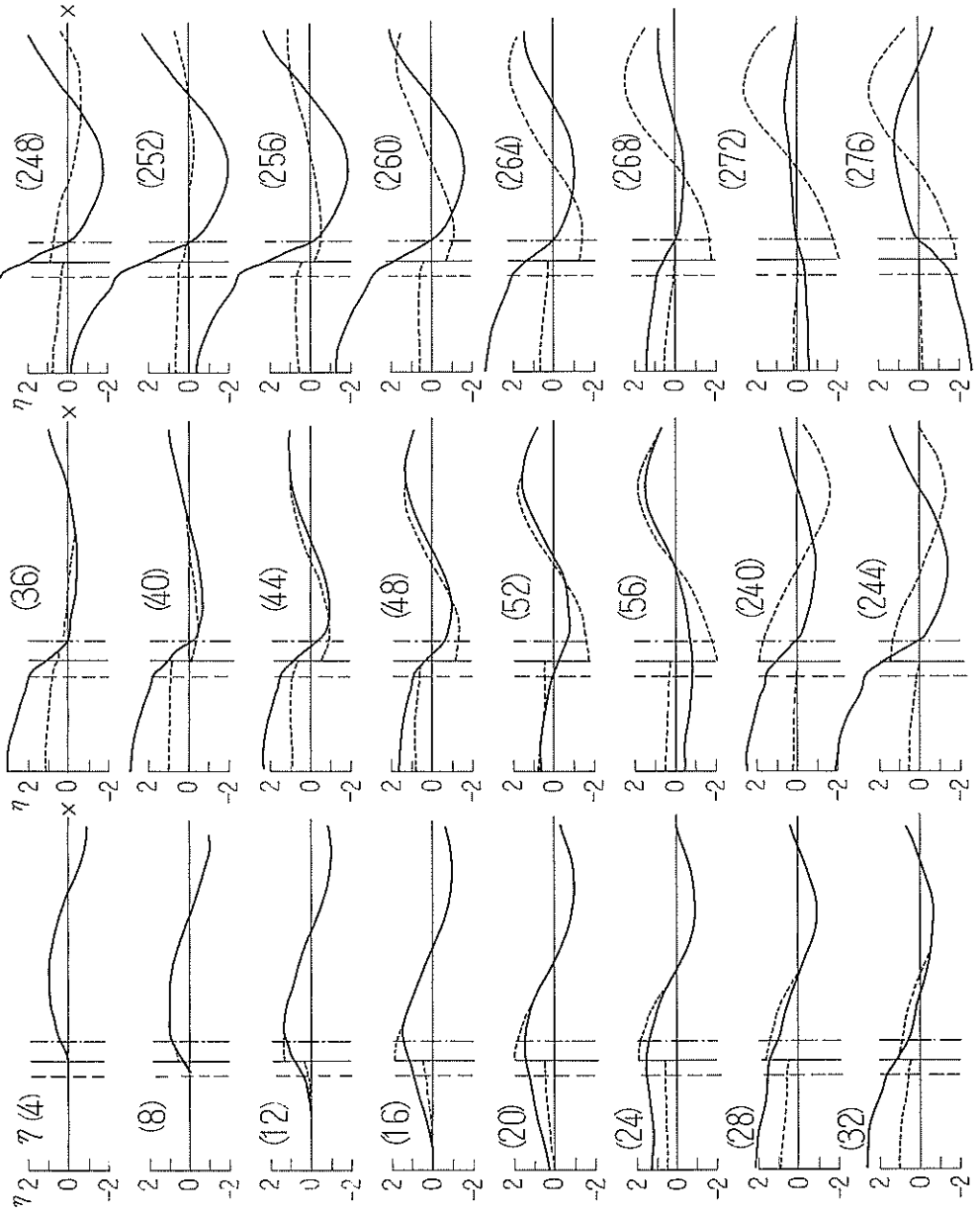
D-49 $B/b = 1$: ———
 E-55 $B/b = 5$: - - - - -



附图-17 水面曲线

$T/T_0 = 20$

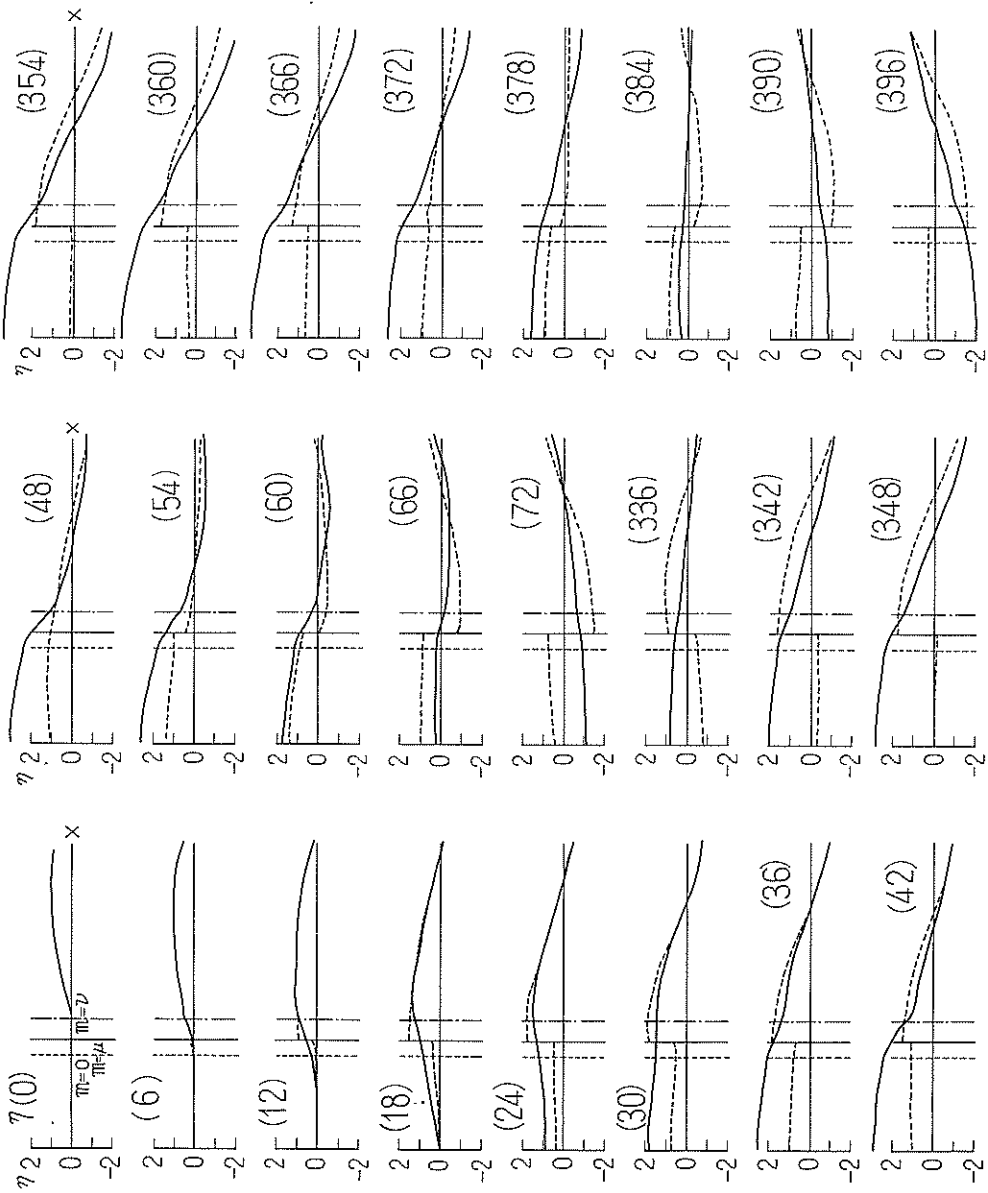
—— : D-50 B/b = 1
 - - - : E-56 B/b = 5



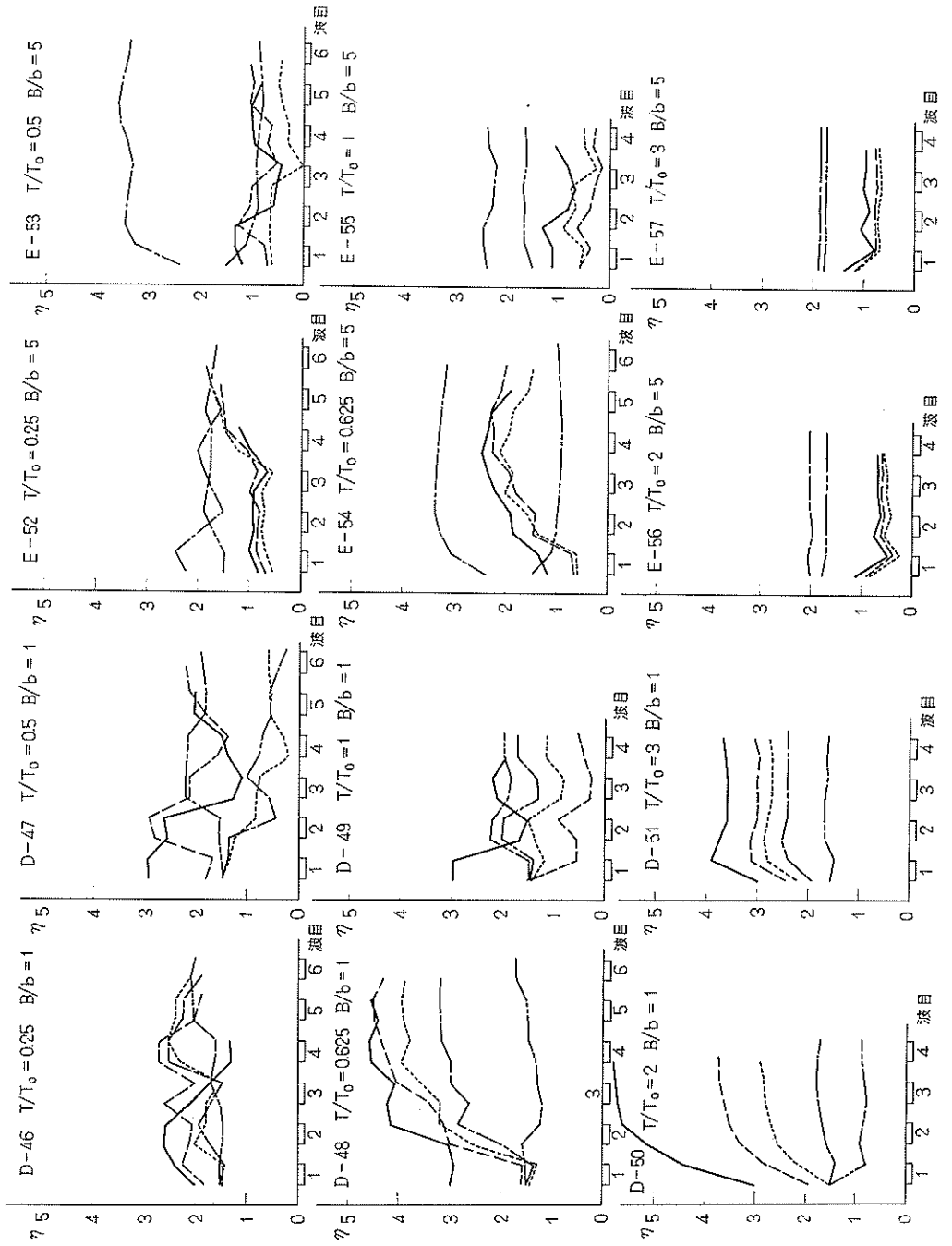
附图-18 水面曲线

$T/T_0 = 3.0$

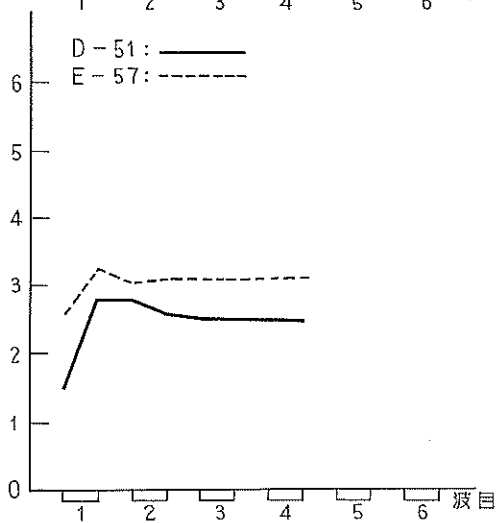
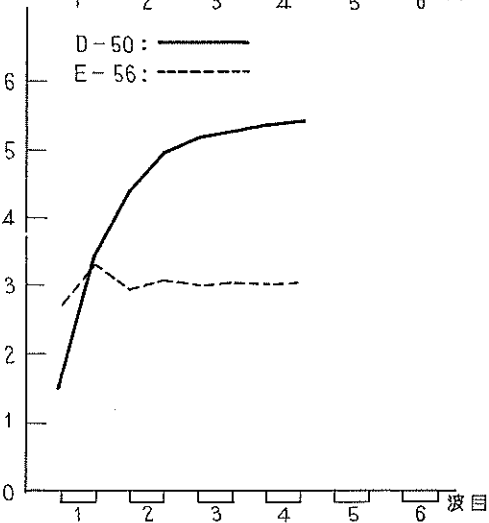
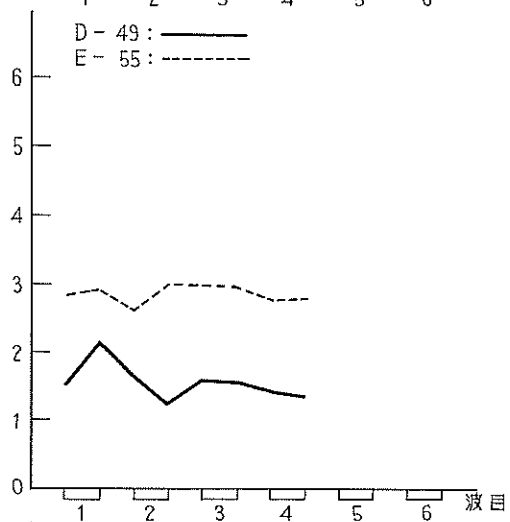
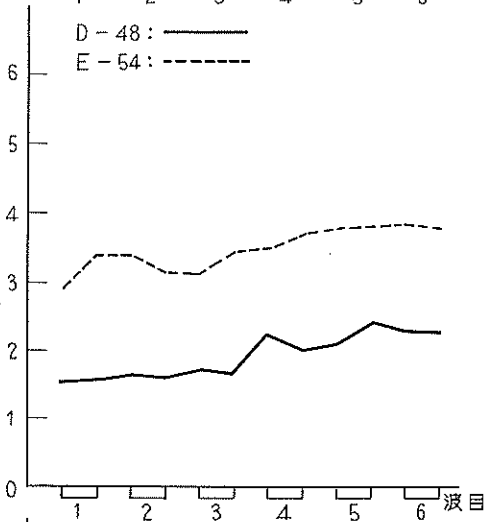
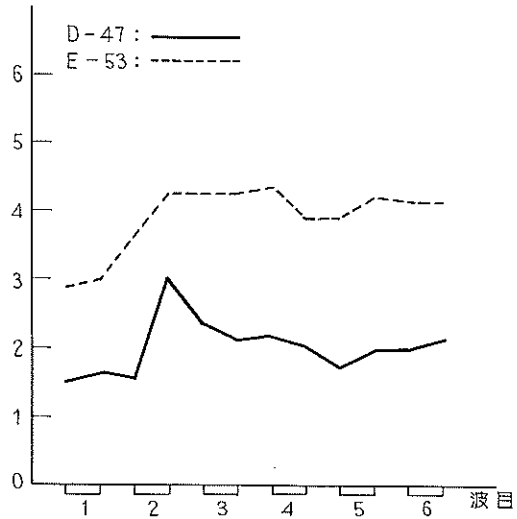
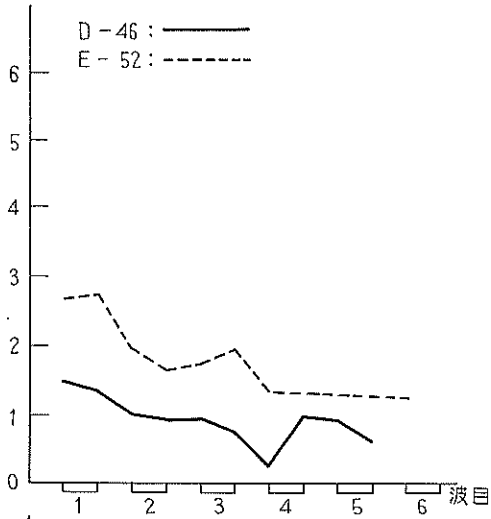
——: D-51 B/b = 1
 - - - - : E-57 B/b = 5



附圖-19 水位振幅の時間的変化

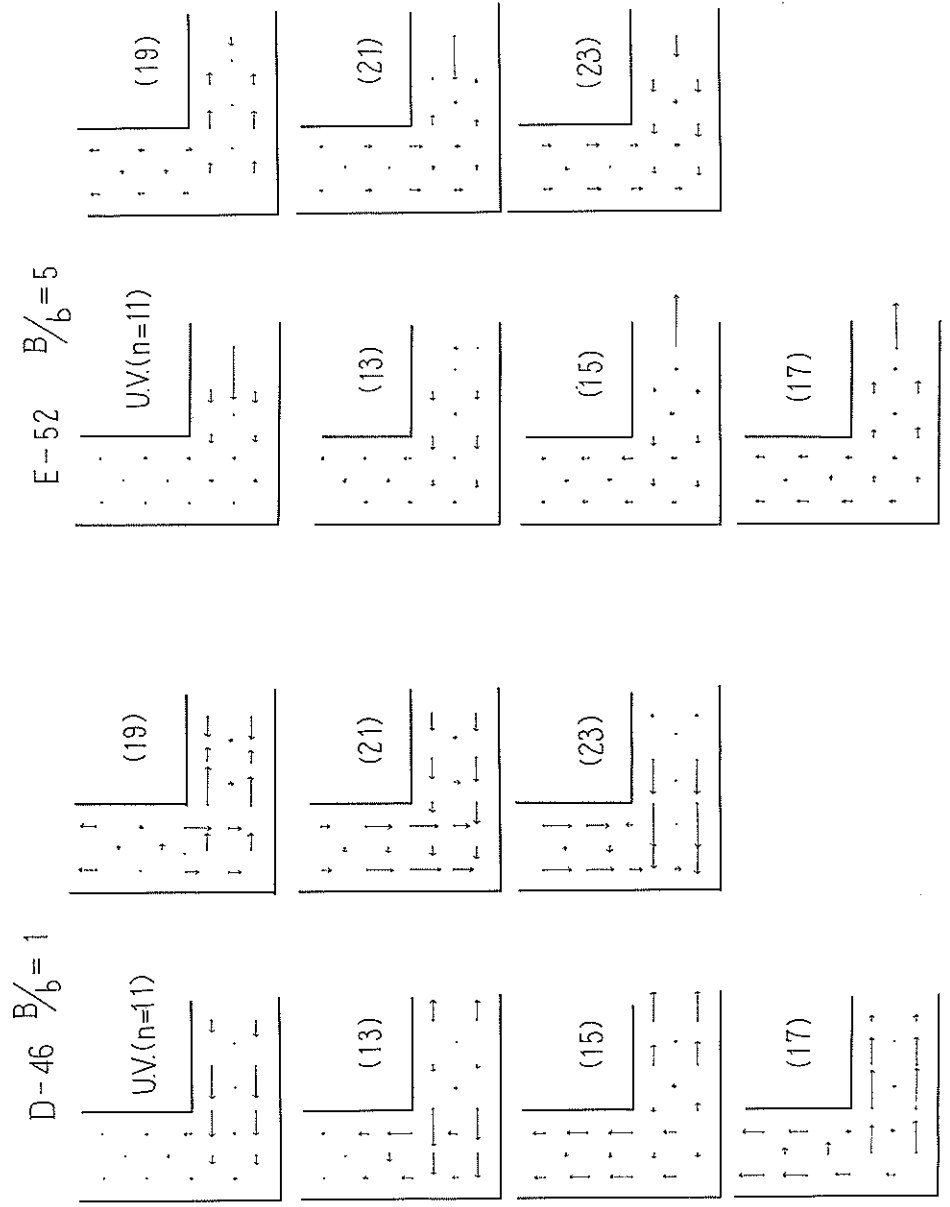


附図-20 流速振幅の時間的变化



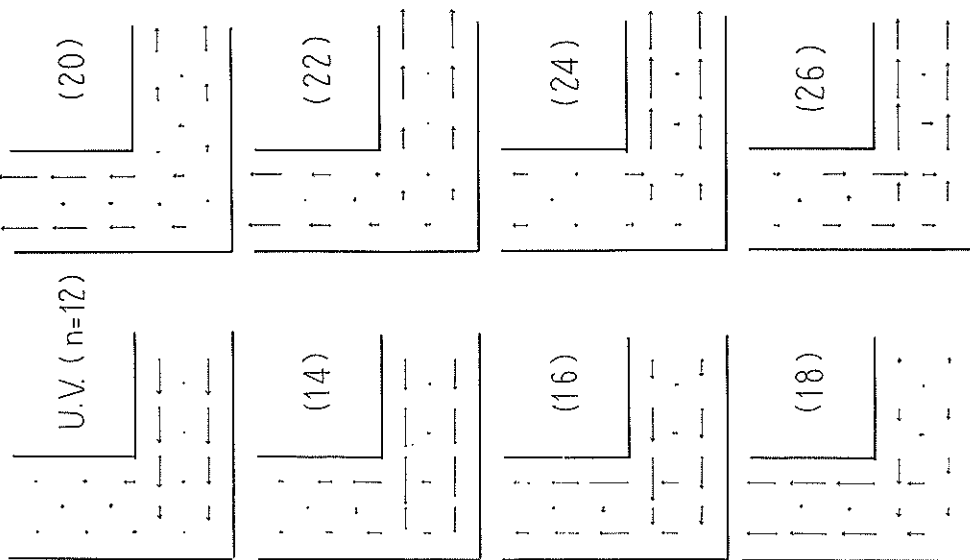
附図-21 屈曲部の流速分布

$T/T_0 = 0.25$

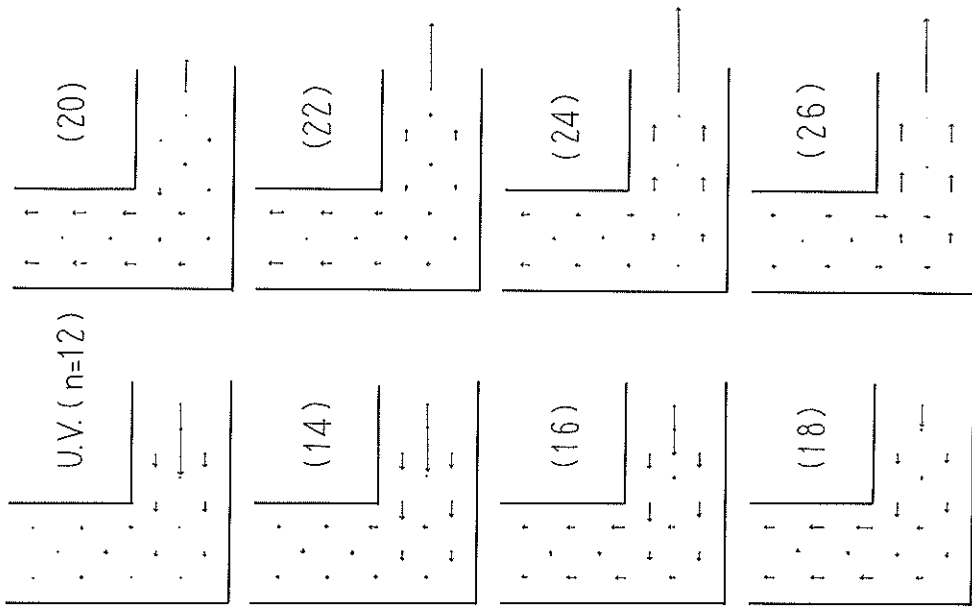


附図-22 屈曲部の流速分布 $T/T_0 = 0.5$

D-47 $B/b = 1$

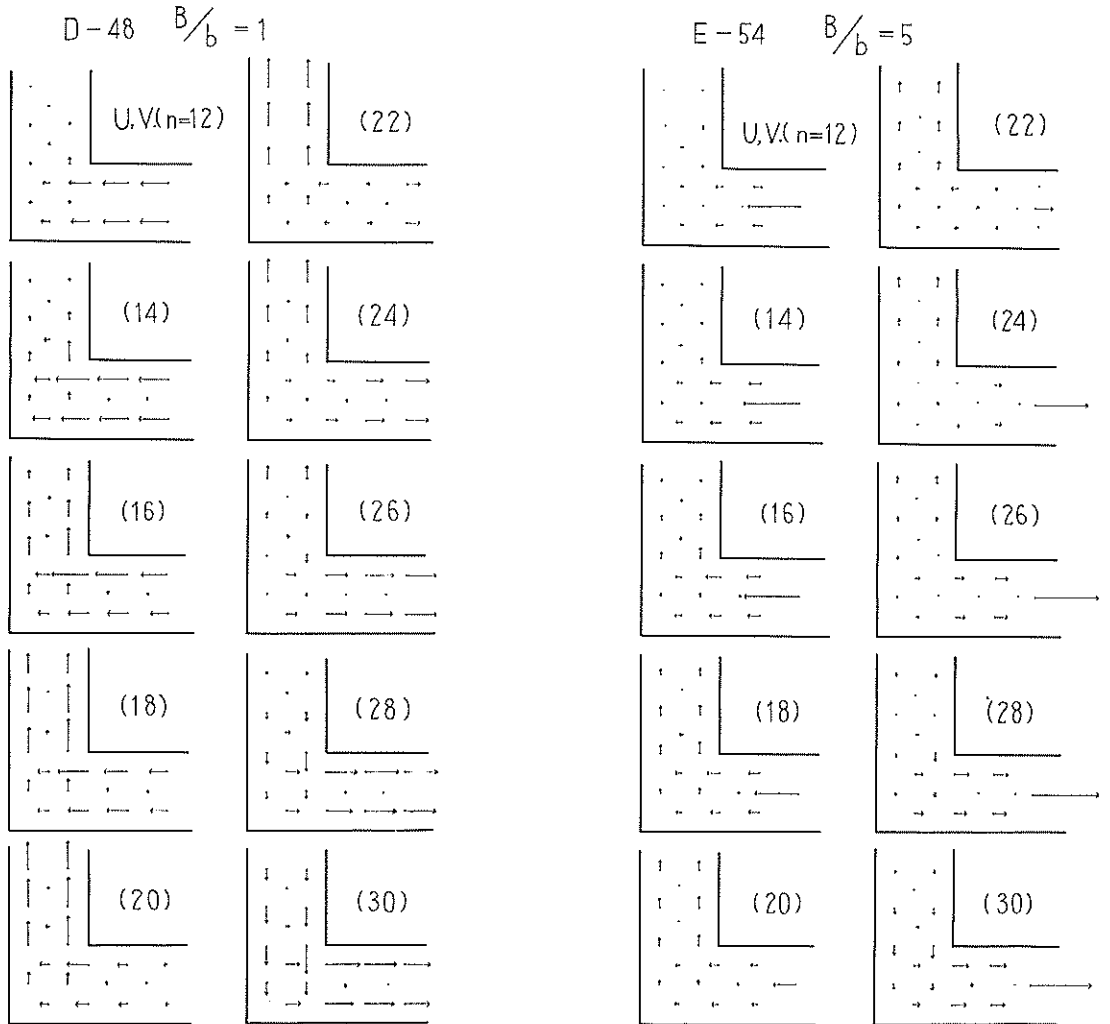


E-53 $B/b = 5$

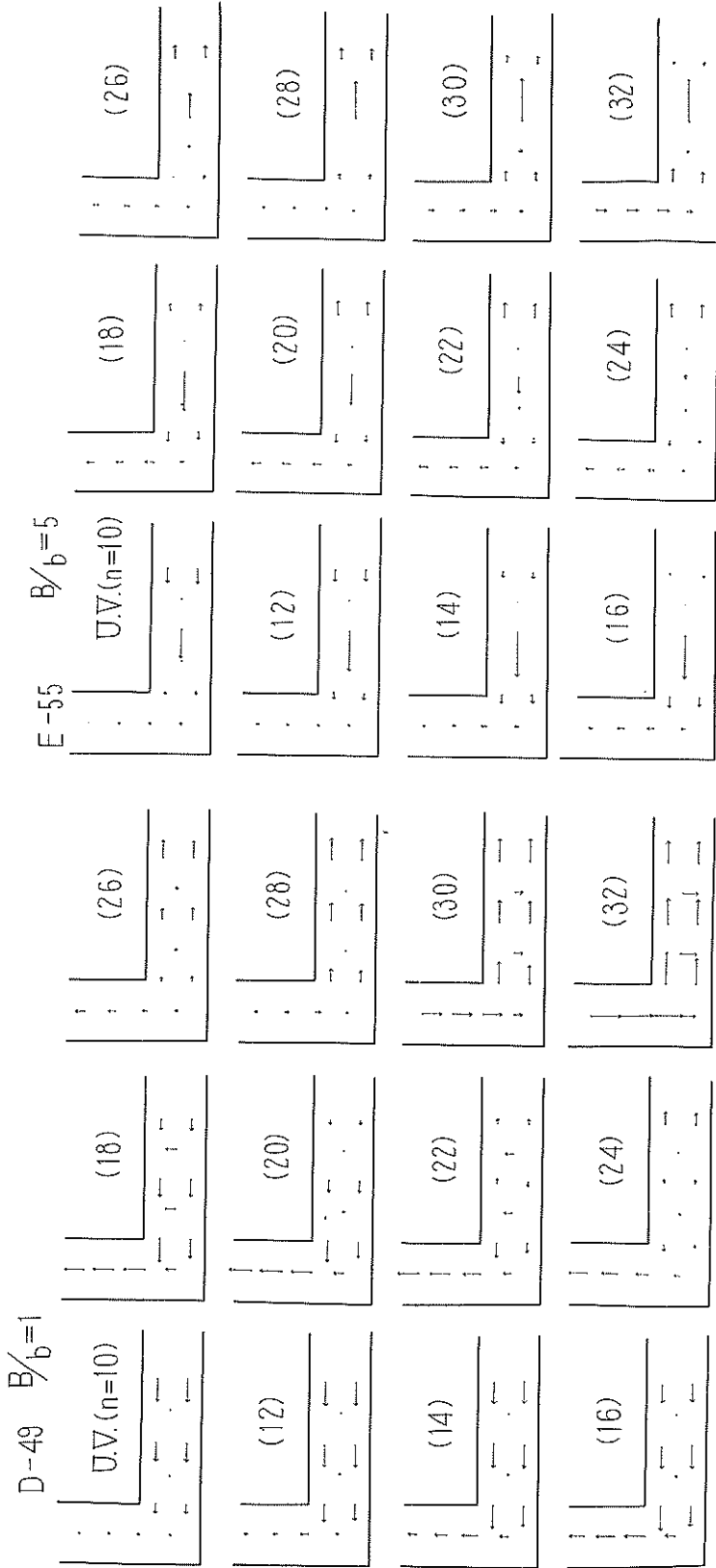


附図-23 屈曲部の流速分布

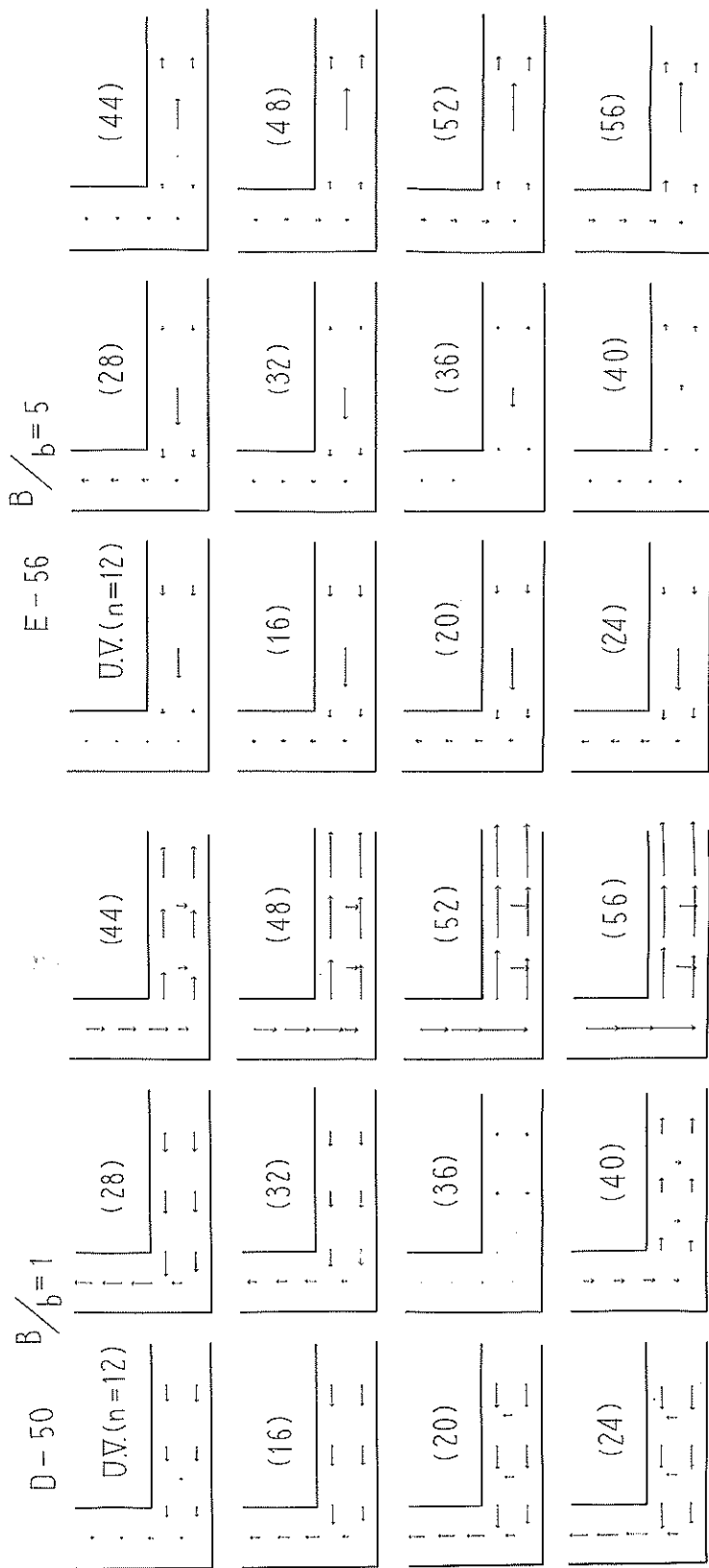
$$T/T_0 = 0.625$$



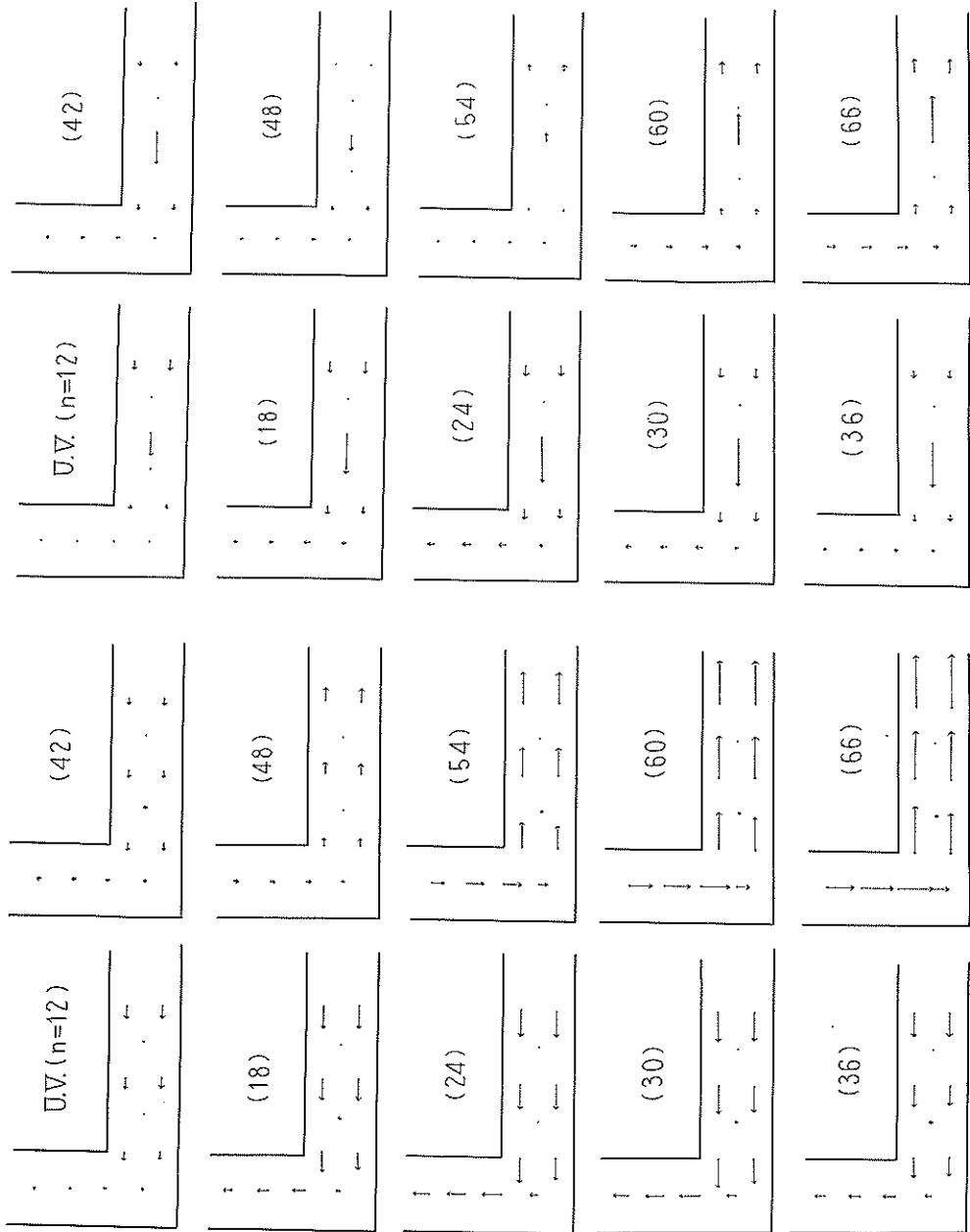
附圖-24 屈曲部の流速分布 $T/T_0 = 1.0$



附図-25 屈曲部の流速分布 $T/T_0=20$

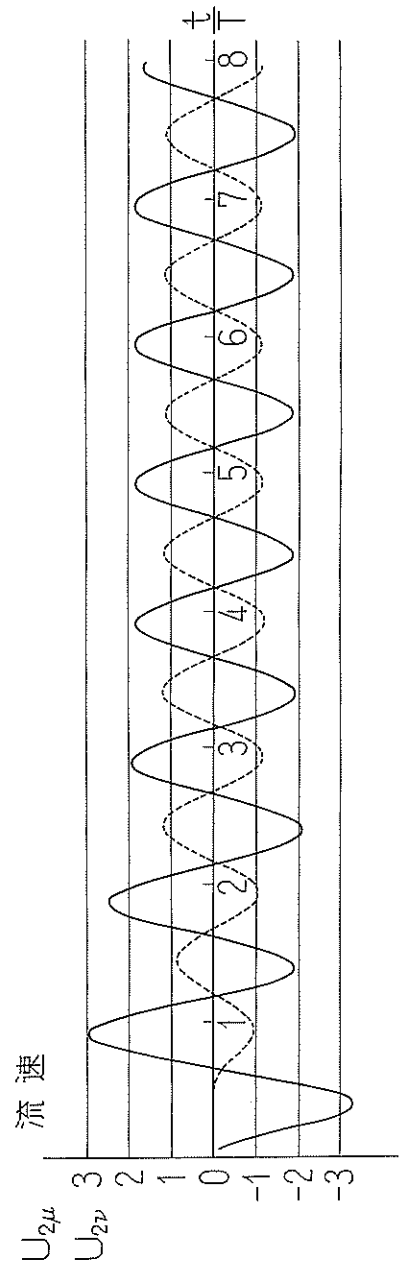
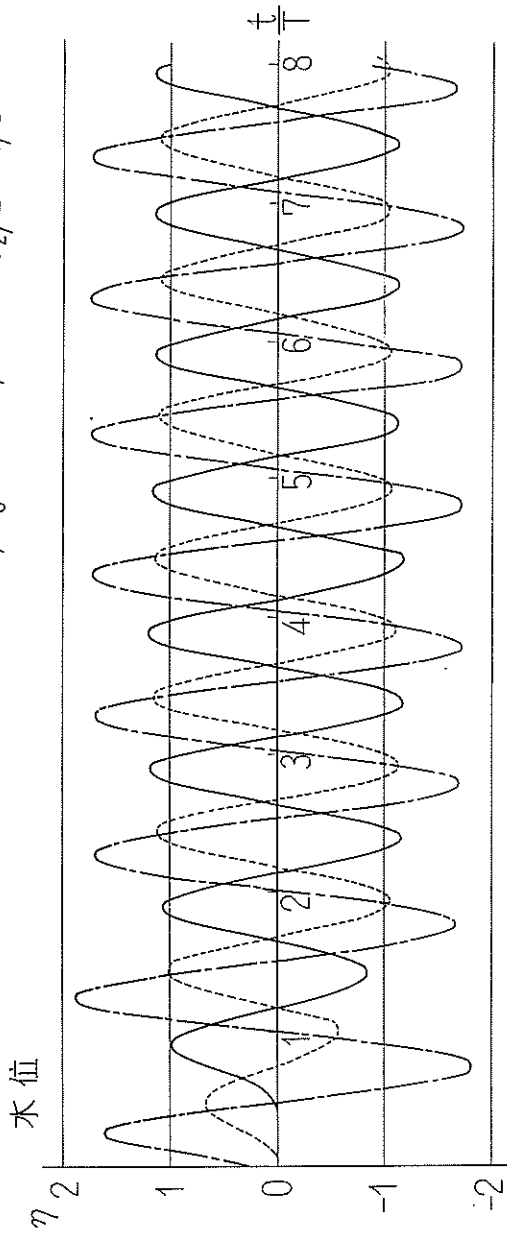


附図-26 屈曲部の流速分布 $T/T_0=30$
 $B/b=1$ $E-57$ $B/b=5$



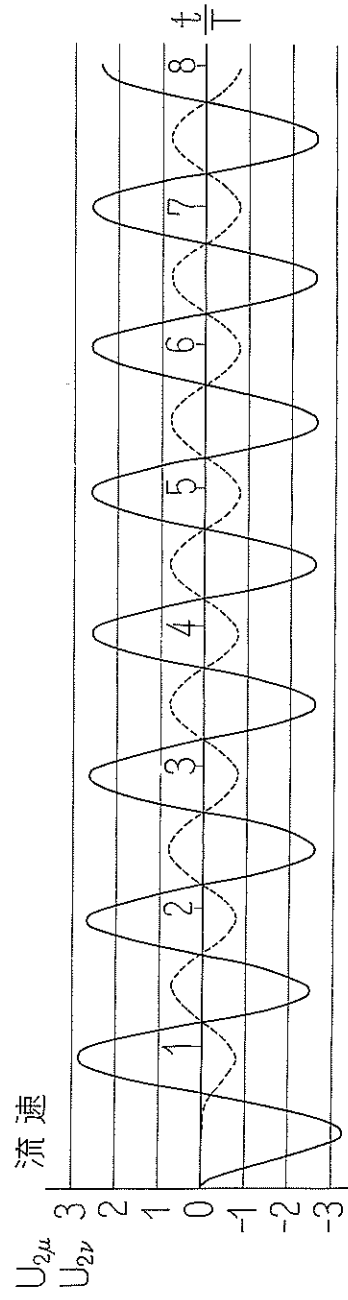
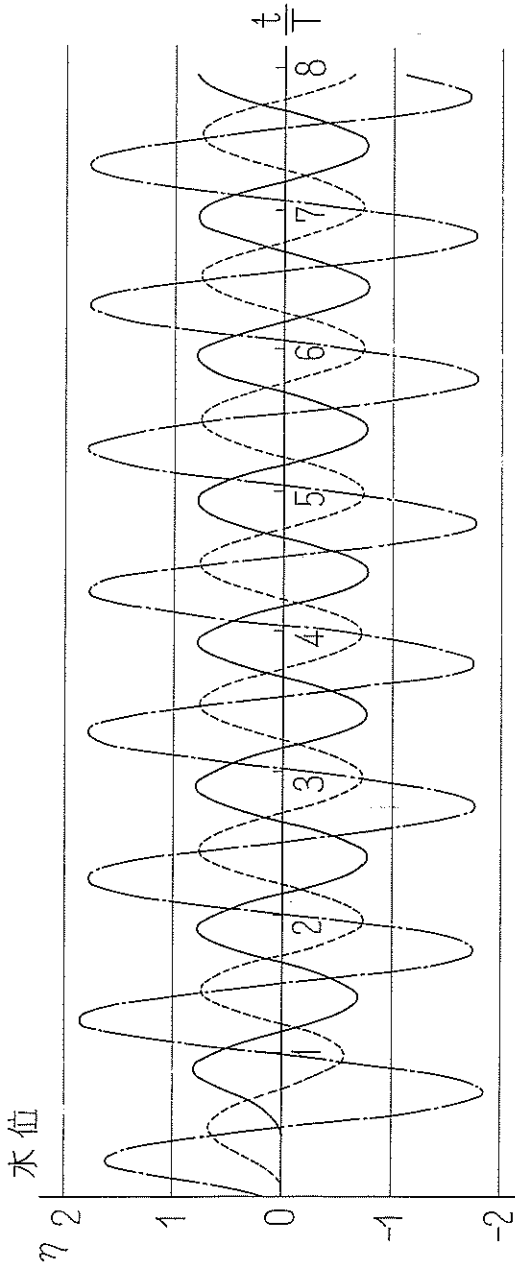
附図-27 水位及び流速の時間的变化

CASE G-61 $T/T_0 = 1.0$ $B/b = 5$ $B_2/B = 1/3$



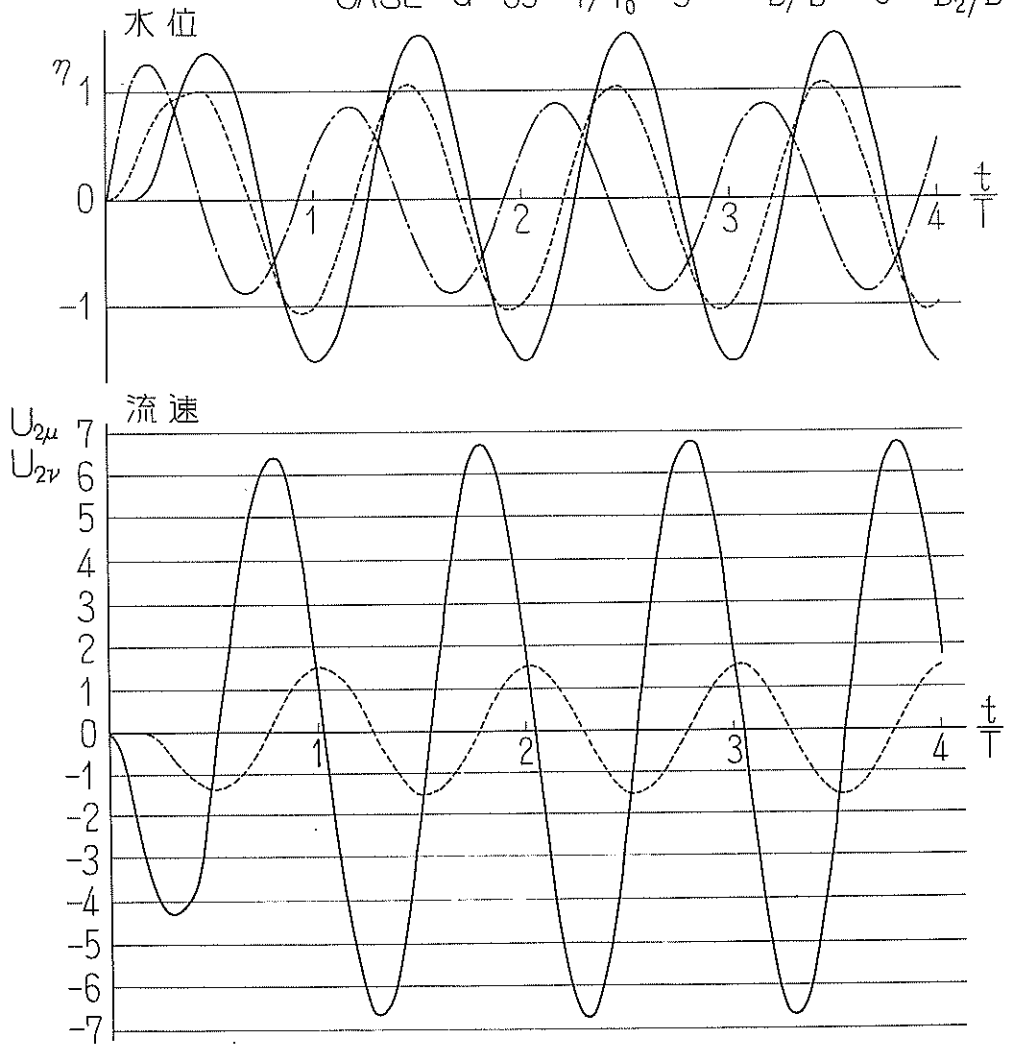
附図-28 水位及び流速の時間的变化

CASE G-62 $T/T_0 = 1.0$ $B/b = 5$ $B_2/B = 2/3$



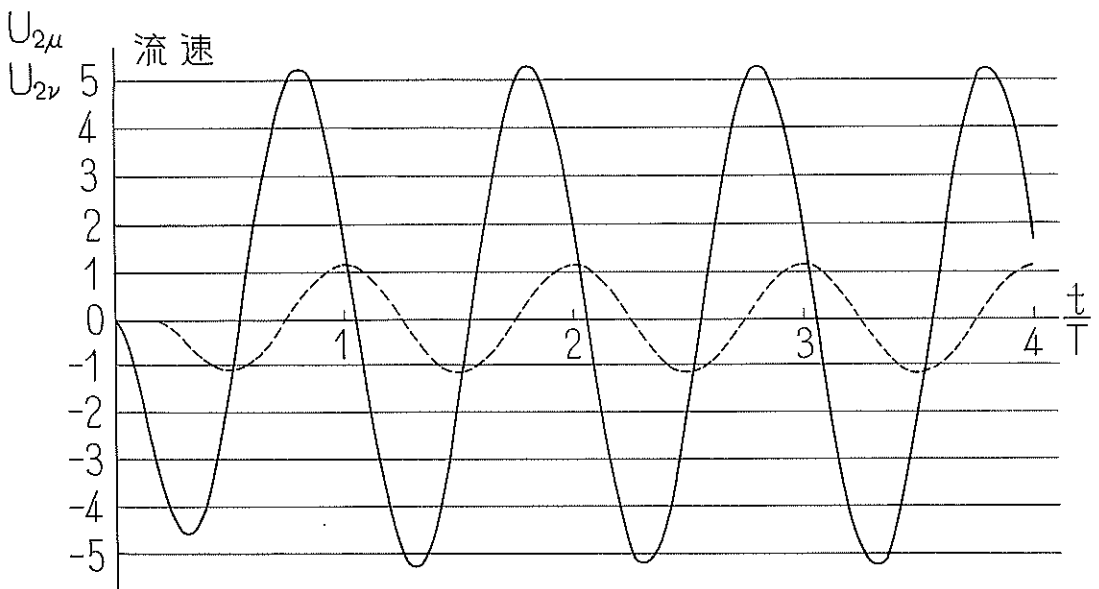
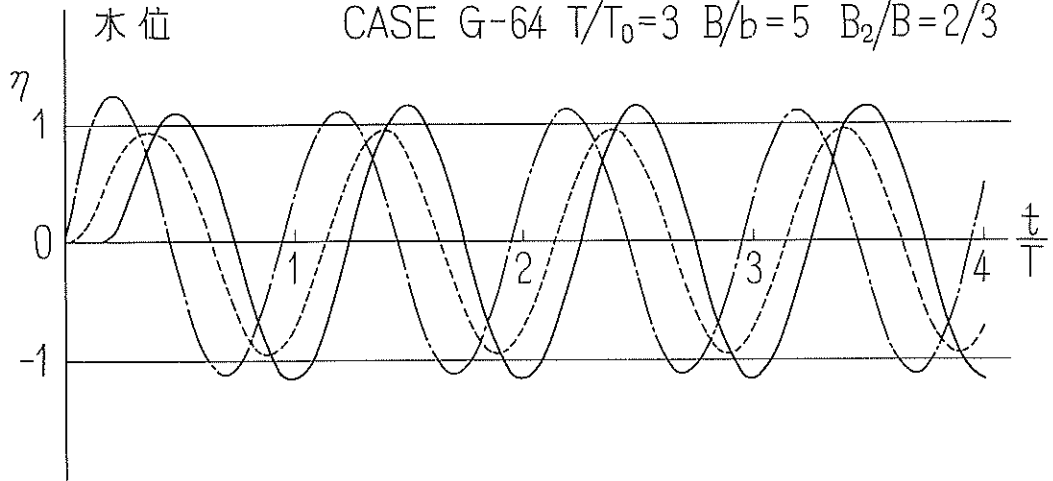
附図-29 水位及び流速の時間的变化

CASE G-63 $T/T_0 = 3$ $B/b = 5$ $B_2/B = 1/3$



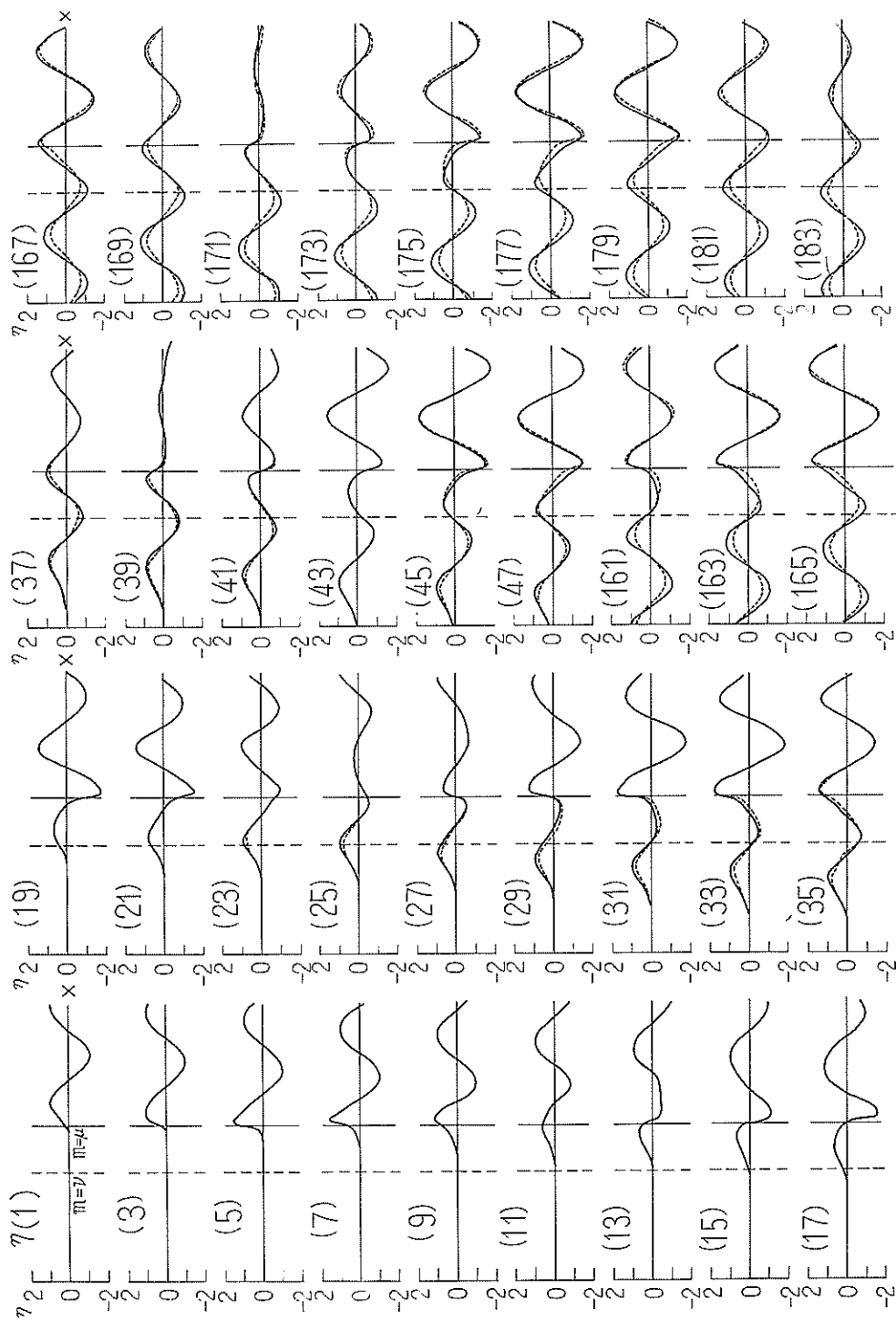
附図-30 水位及び流速の時間的变化

水位 CASE G-64 $T/T_0=3$ $B/b=5$ $B_2/B=2/3$



附图-31 水面曲线

$T/T_0 = 1$ —: G-61 $B_2/B = 1/3$
 $B/b = 5$ - - -: G-62 $B_2/B = 2/3$

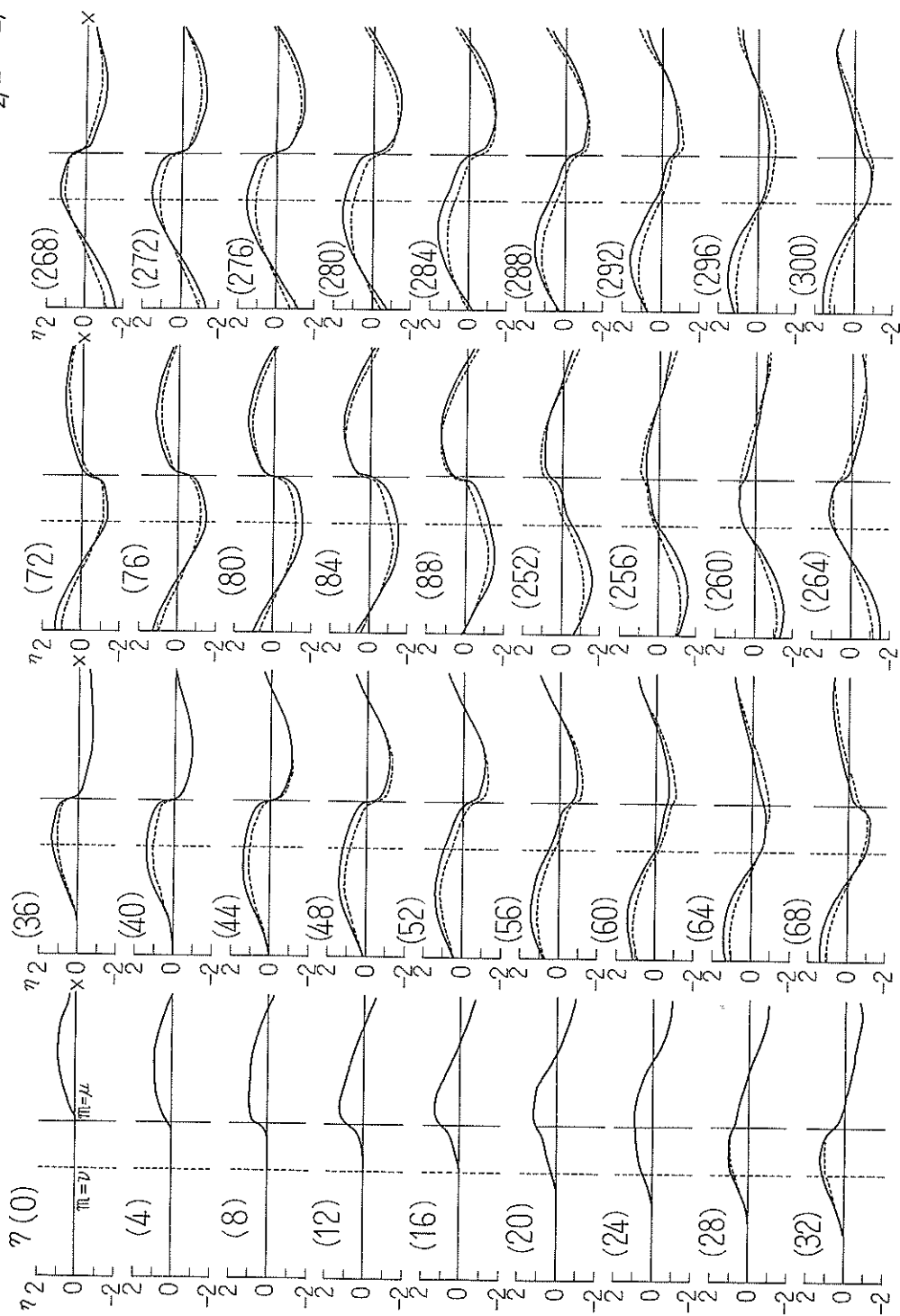


附图-32 水面曲线

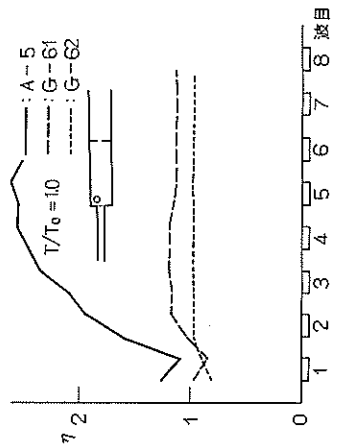
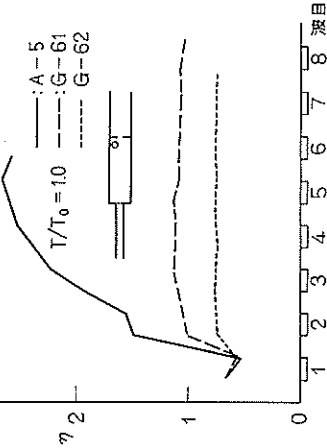
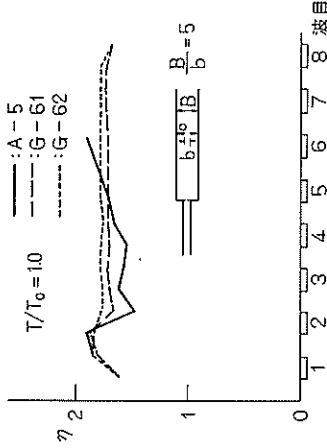
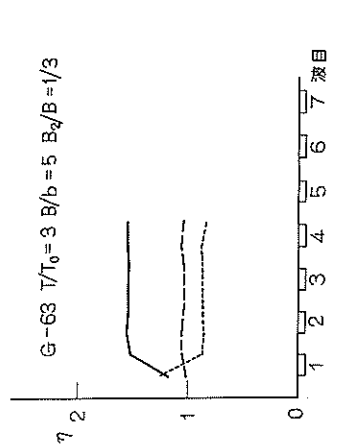
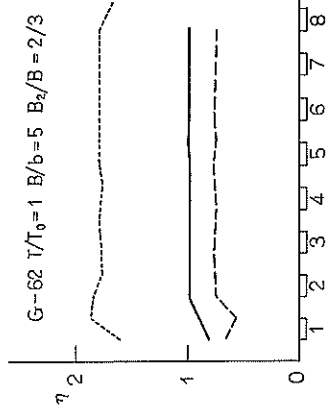
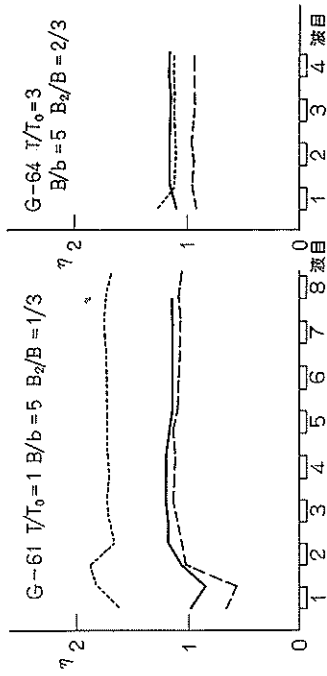
$T/T_0 = 3.0$ $B/b = 5$

—— : G-63 $B_2/B = 1/3$

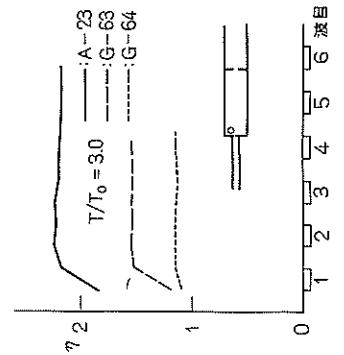
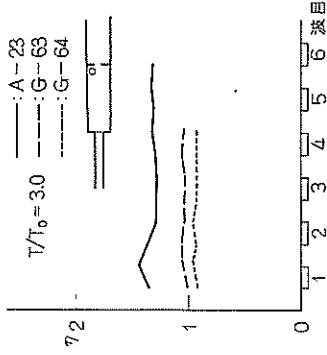
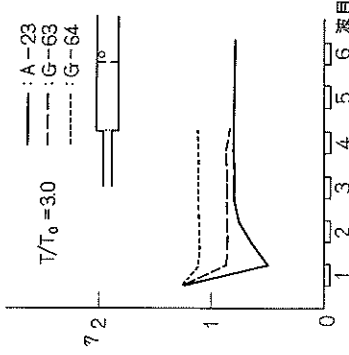
----- : G-64 $B_2/B = 2/3$



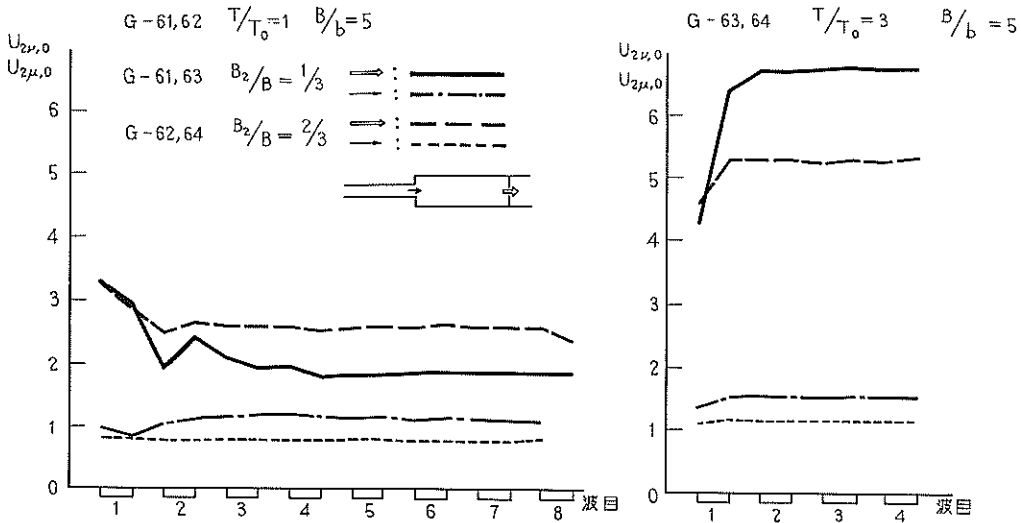
附図-33A 水位振幅の時間的变化



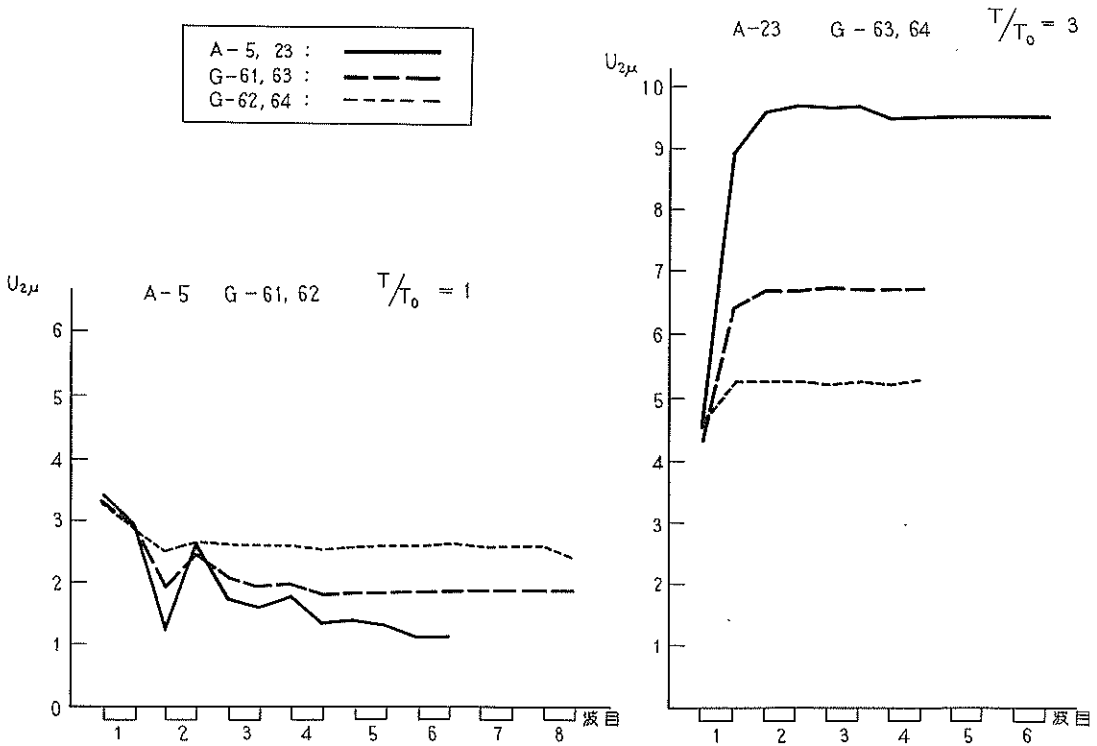
附図-33B ケースA,Gの水位の振幅の時間的变化



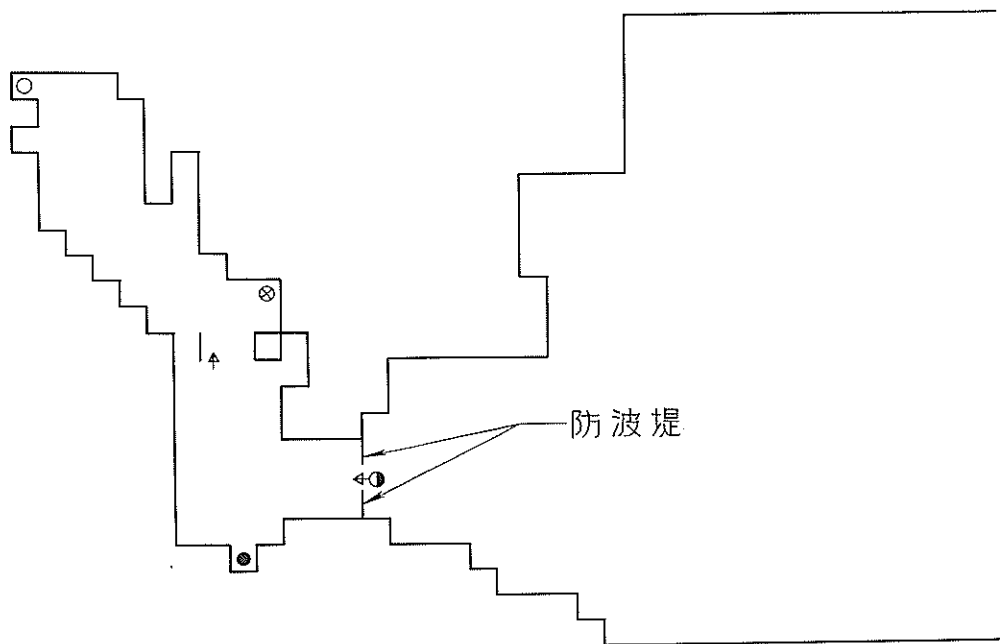
附図-34(A) 流速振幅の時間向変化



附図-34(B) A, G ケースの港口流速の比較



附図-35~44,50,51の水位及び流速曲線の位置表示



O : 防波堤なし

OB : 防波堤あり

例えば OB-25 は防波堤設置後に周期25分の津波が来襲したことを表わす

水位点の表示

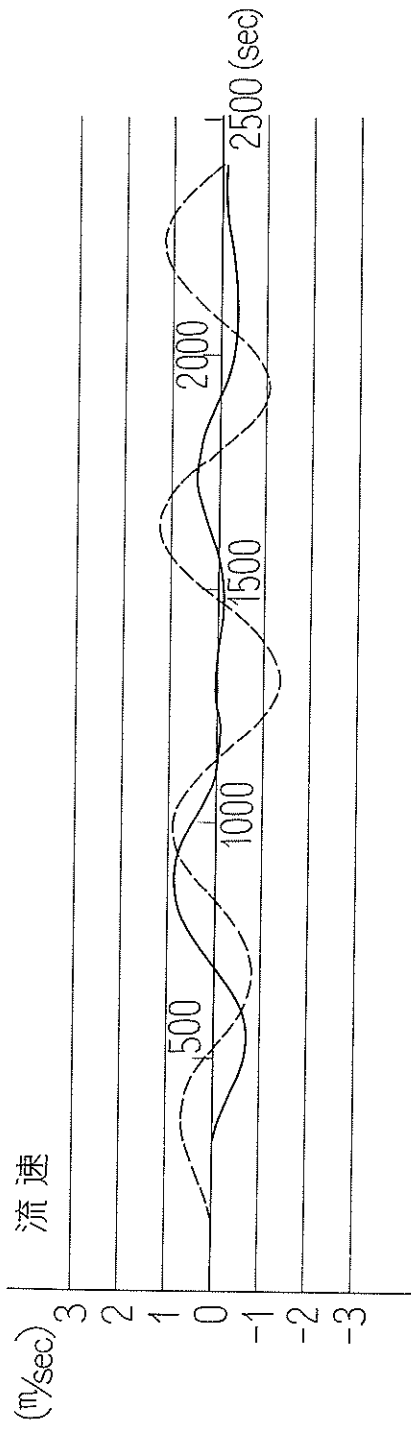
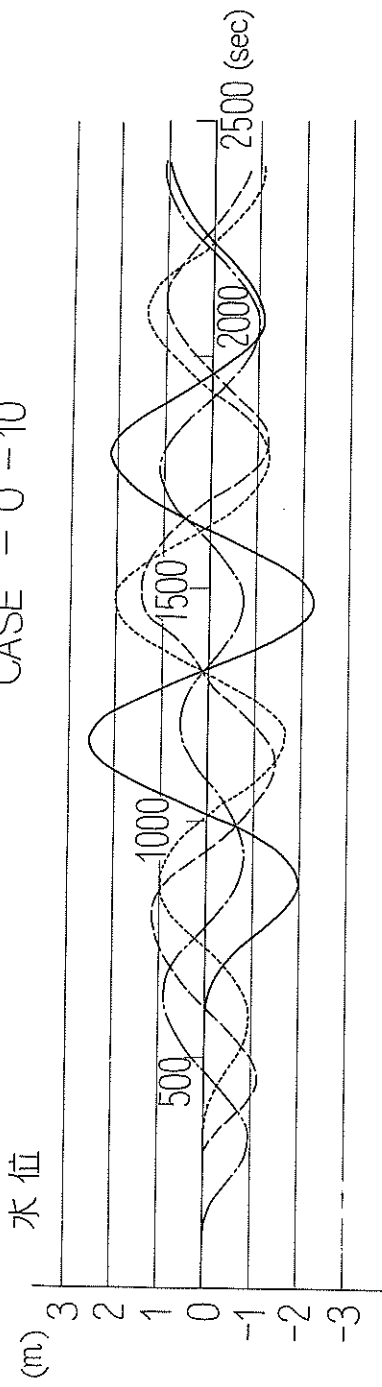
- (湾奥) —————
- (細浦) - - - - -
- (港口) - - - - -
- ⊗ (清水) - - - - -

流速点の表示

- ← (珊瑚島) —————
- ← (港口) - - - - -

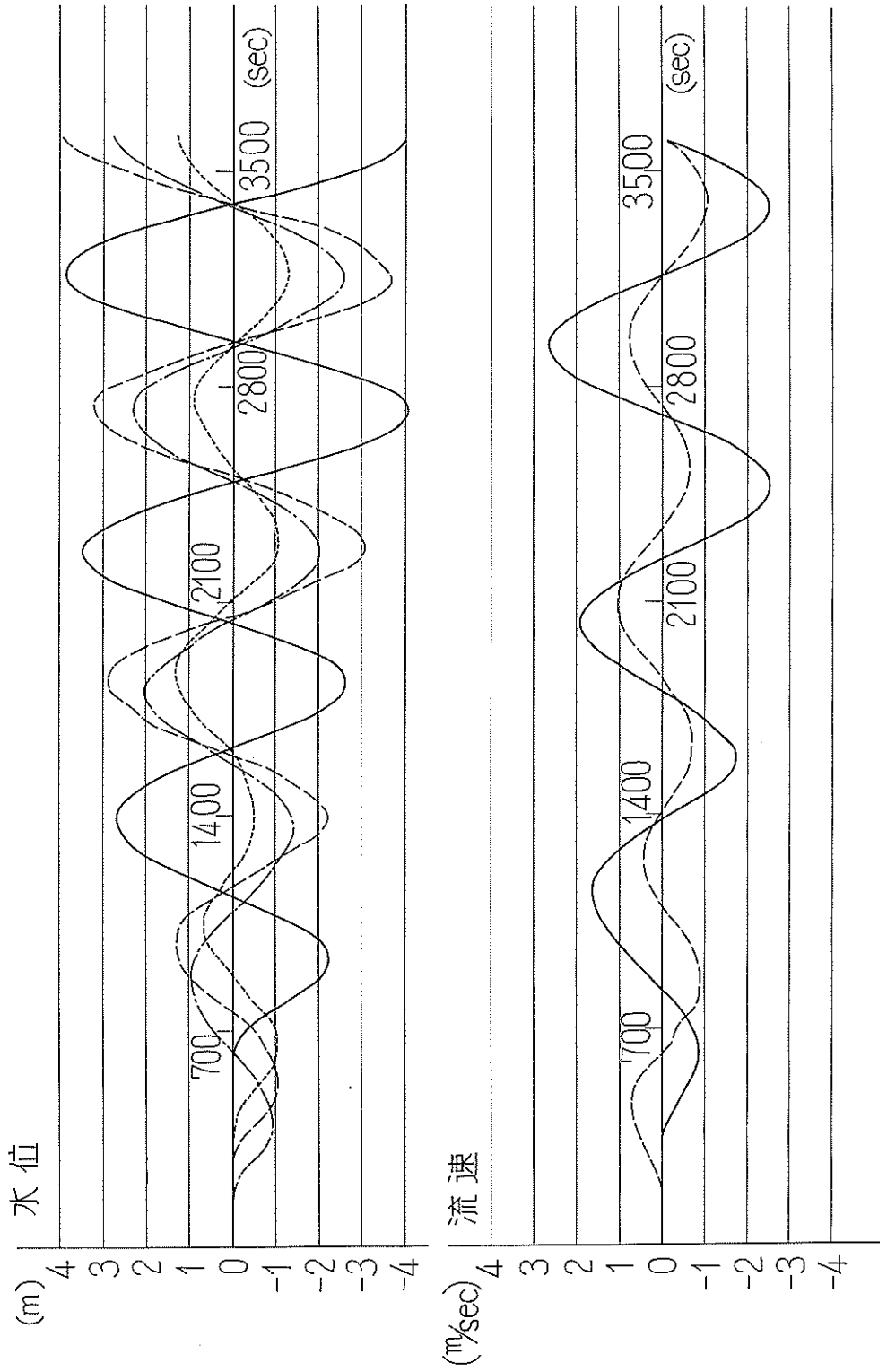
附図-35 水位及び流速の時間的变化

CASE - 0 - 10



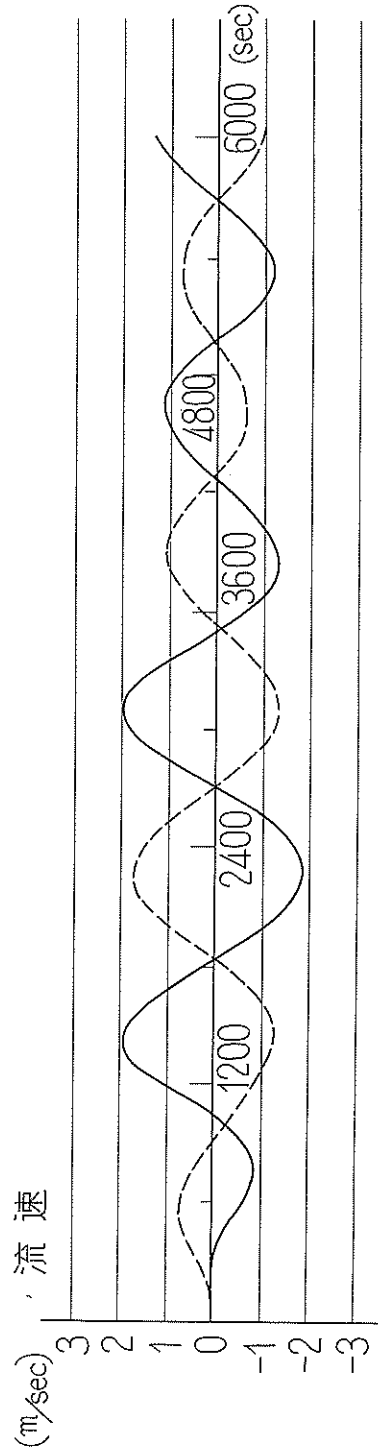
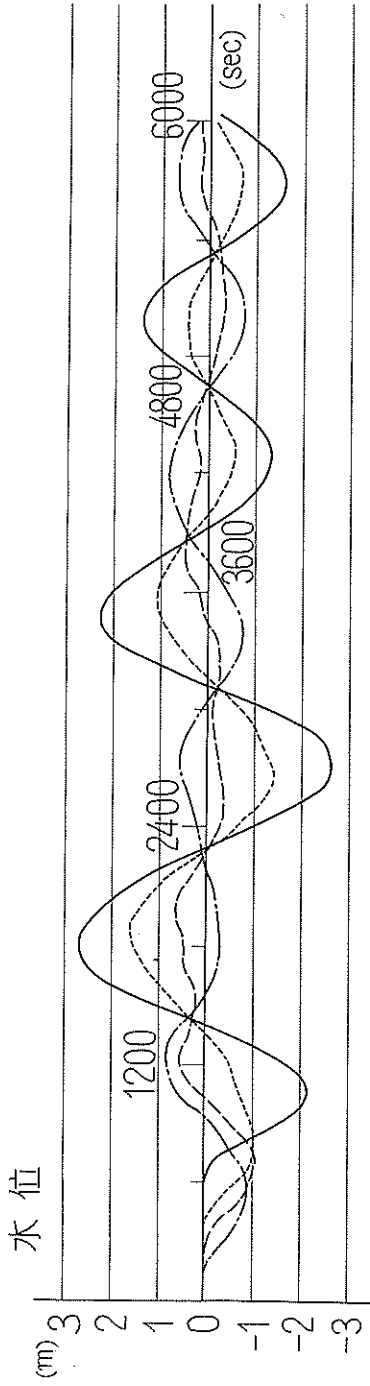
附図-36 水位及び流速の時間的变化

CASE - 0 - 15

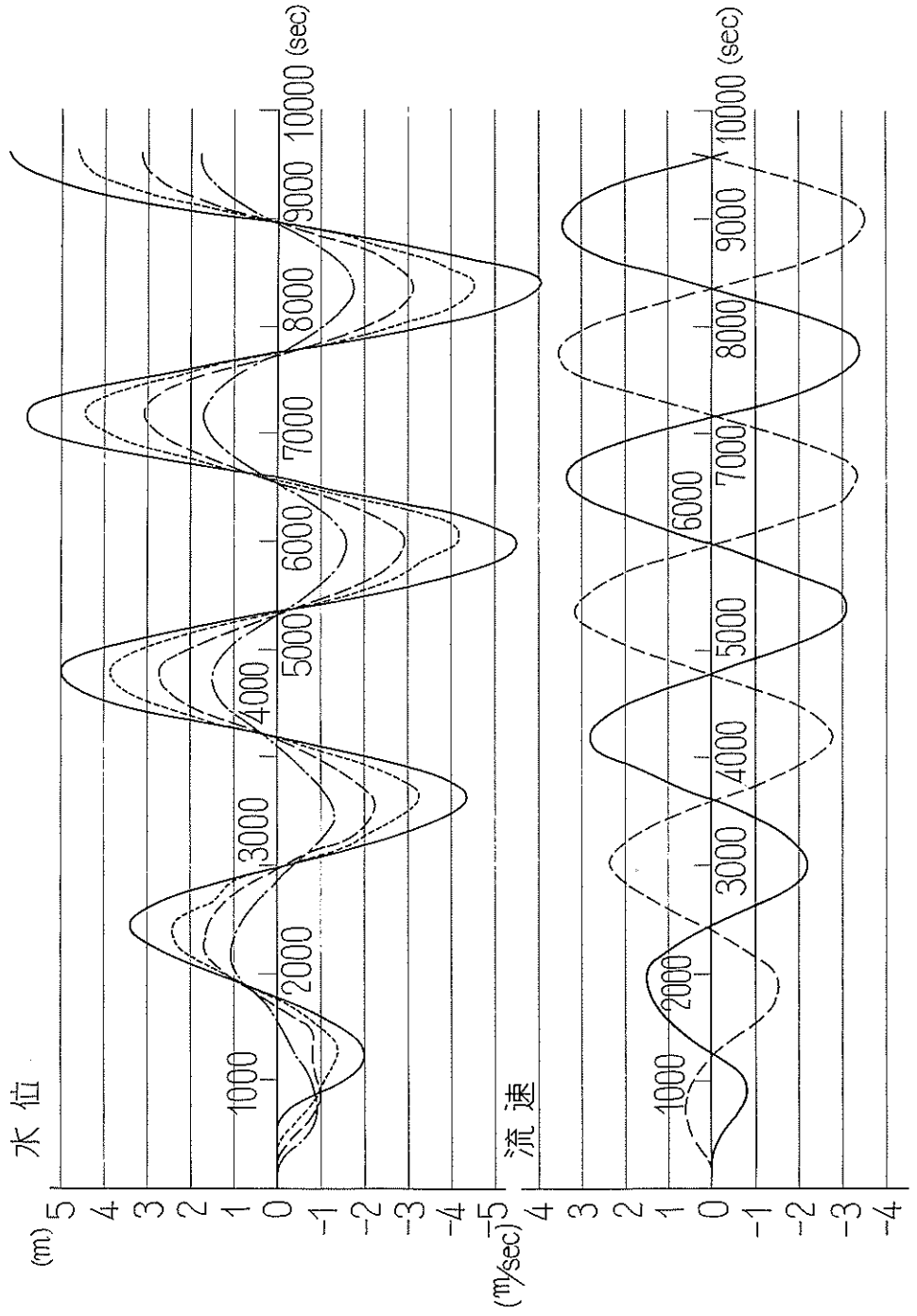


附図-37 水位及び流速の時間的变化

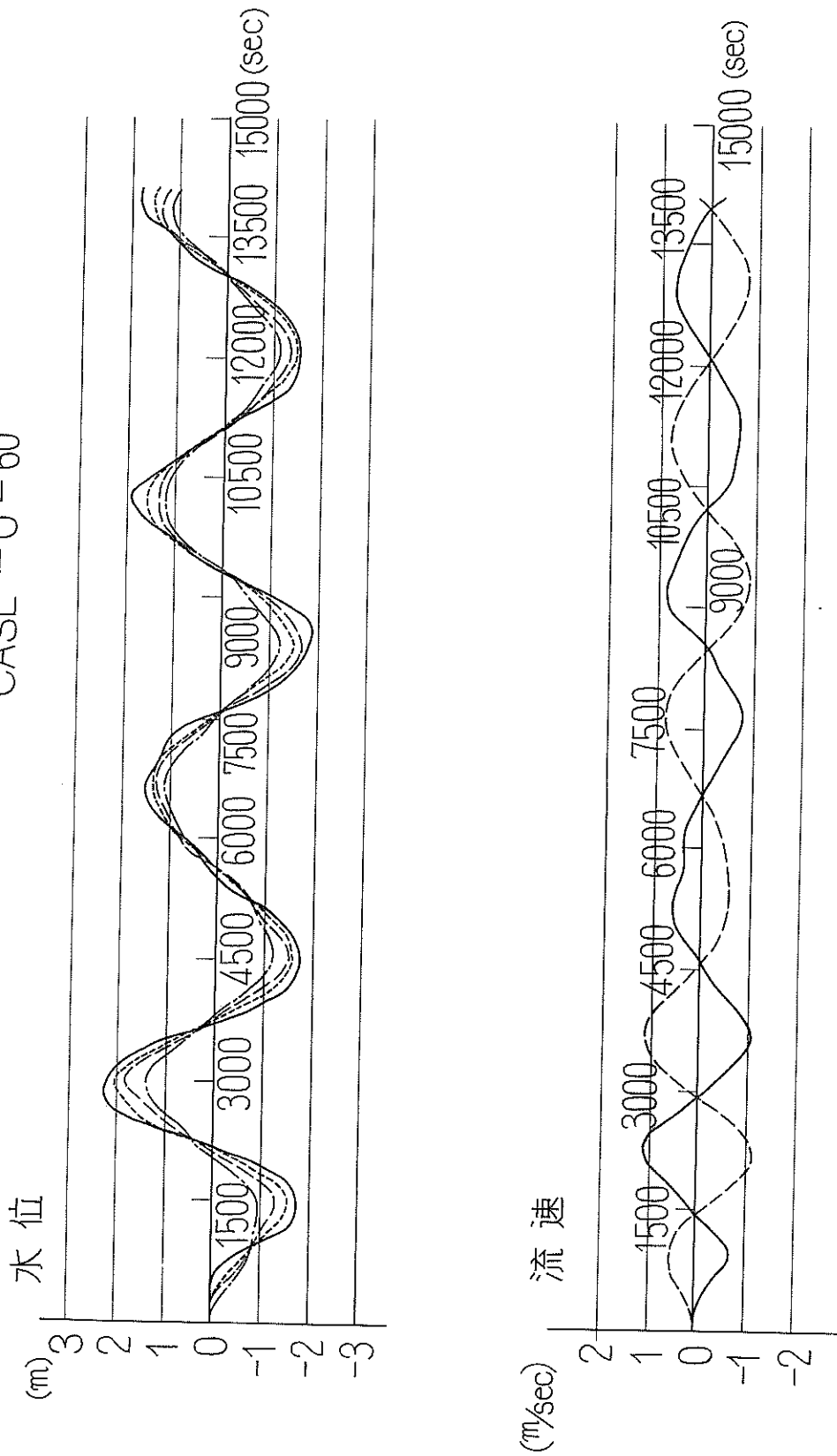
CASE -0-25



附図-38 水位及び流速の時間的变化
CASE - 0 - 40

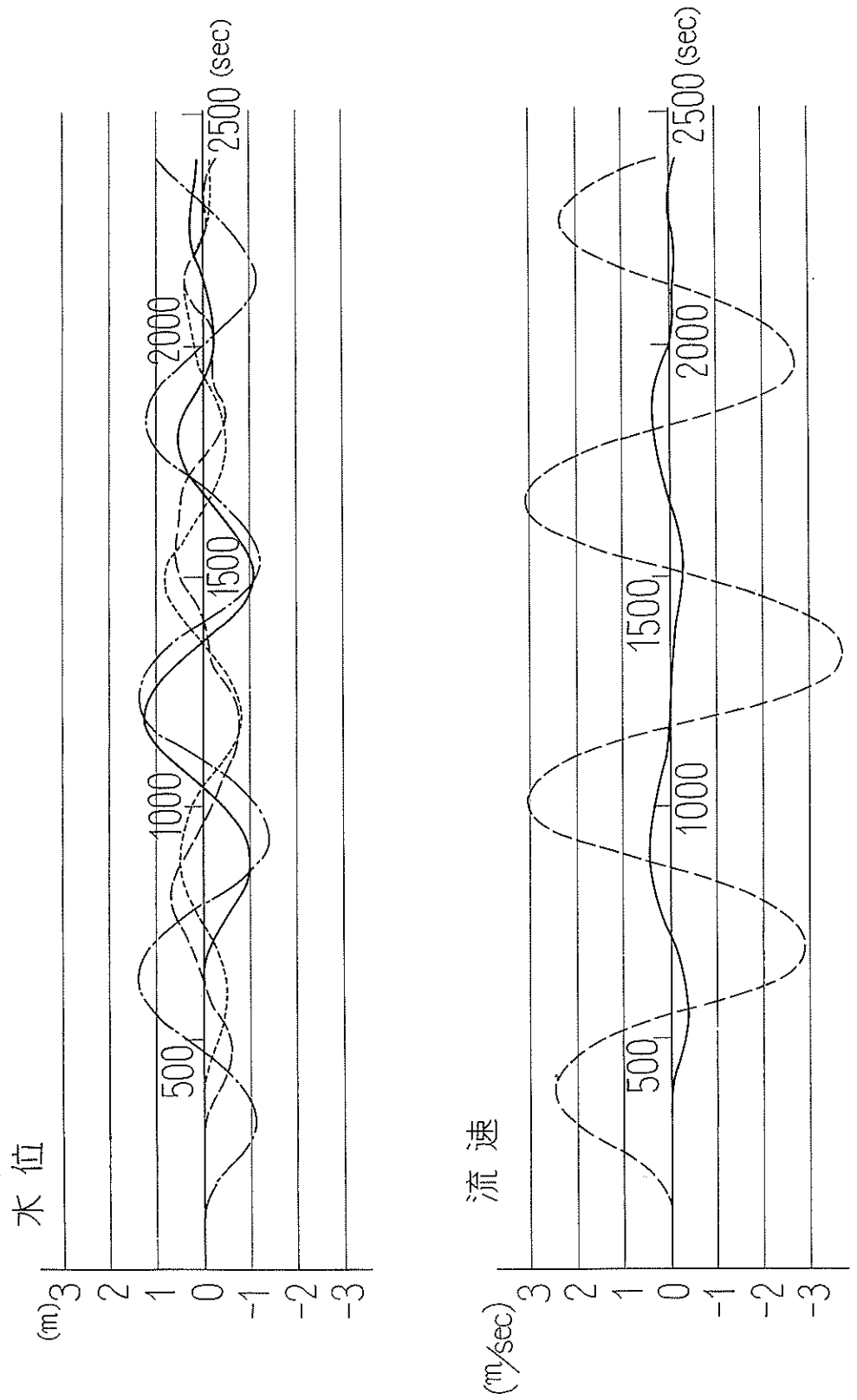


附図-39 水位及び流速の時間的变化
CASE -0-60

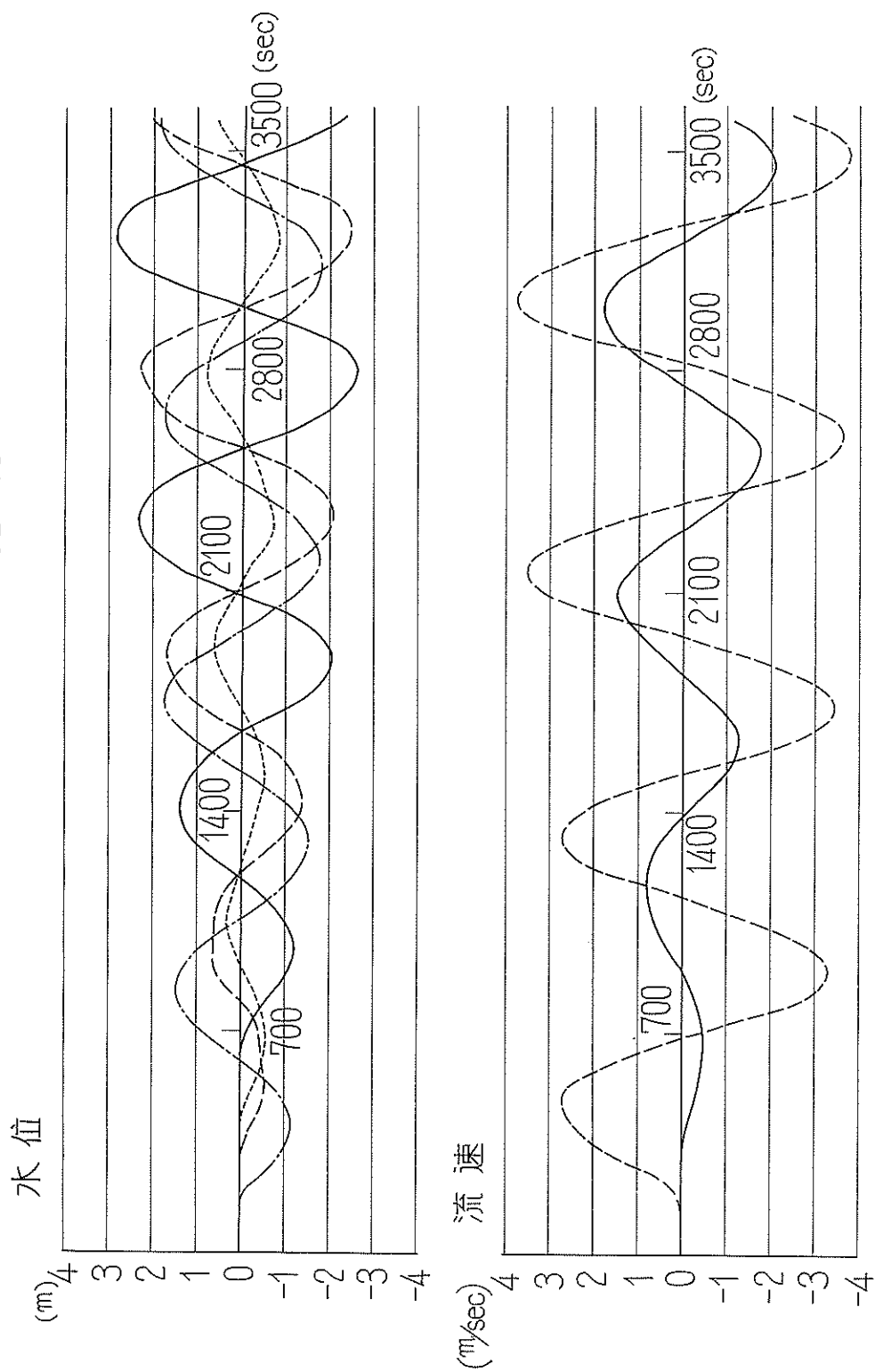


附図-40 水位及び流速の時間的变化

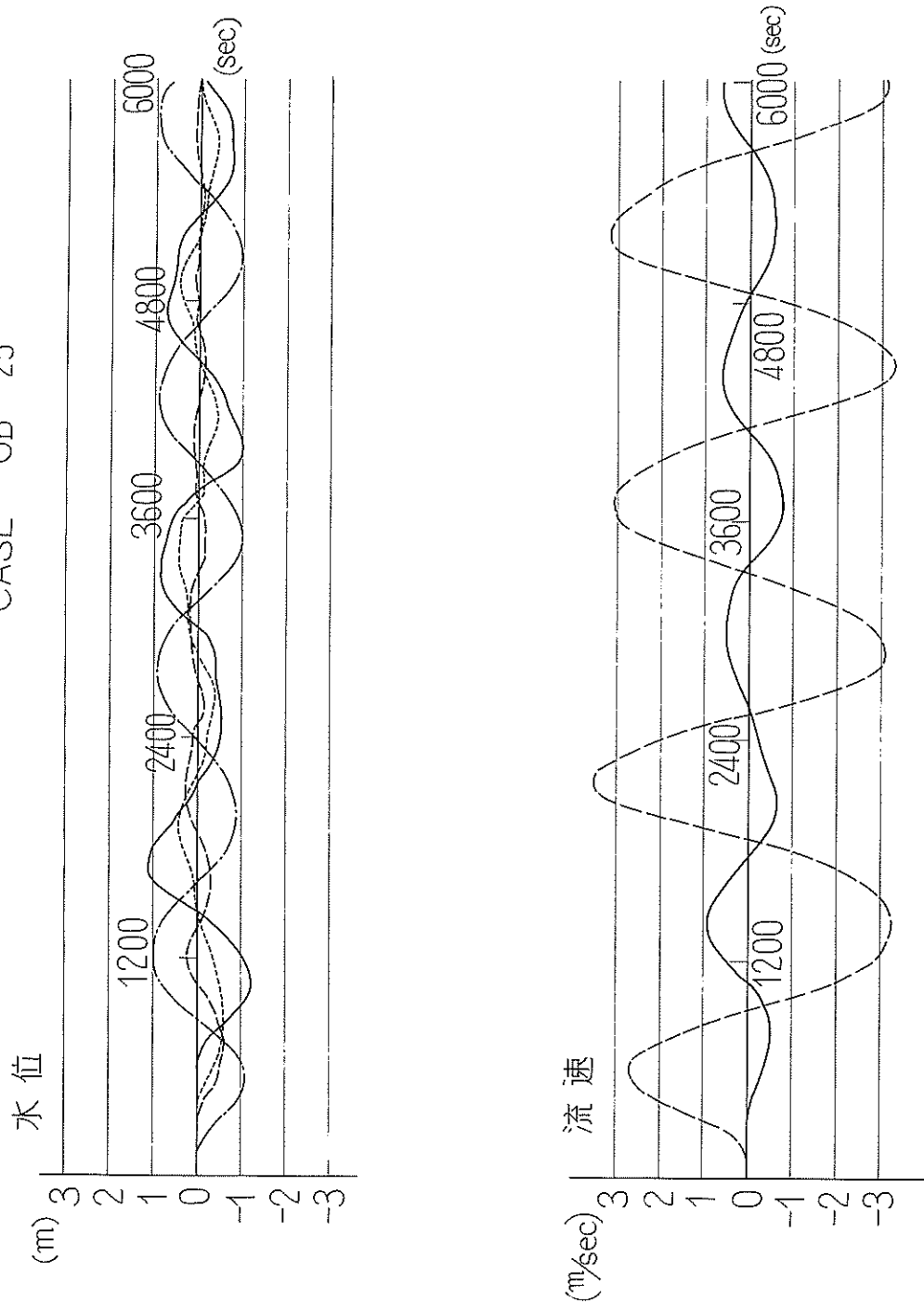
CASE - OB - 10



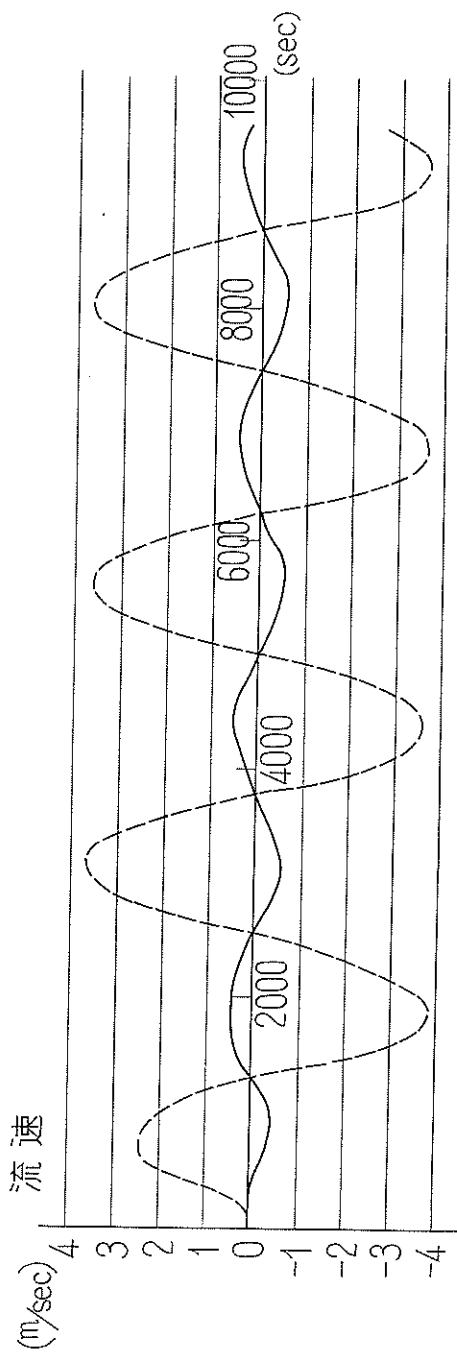
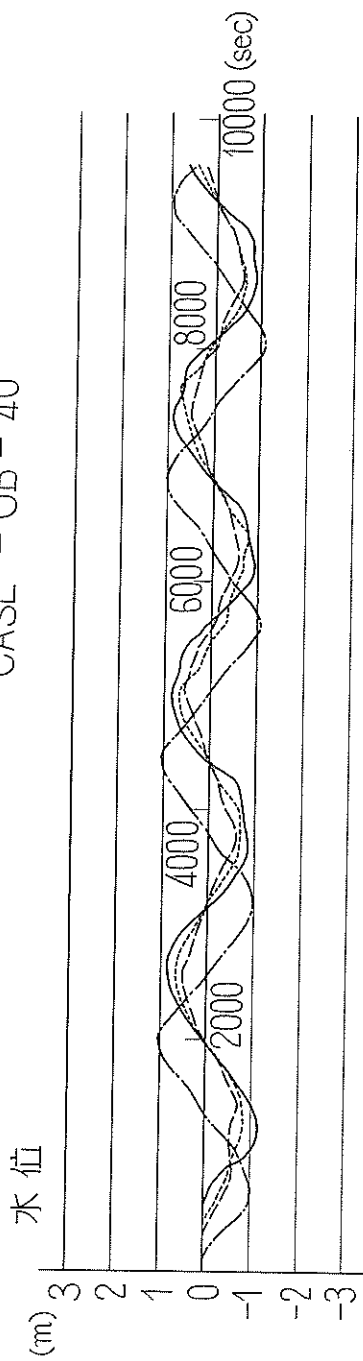
附図-41 水位及び流速の時間的变化
CASE -OB-15



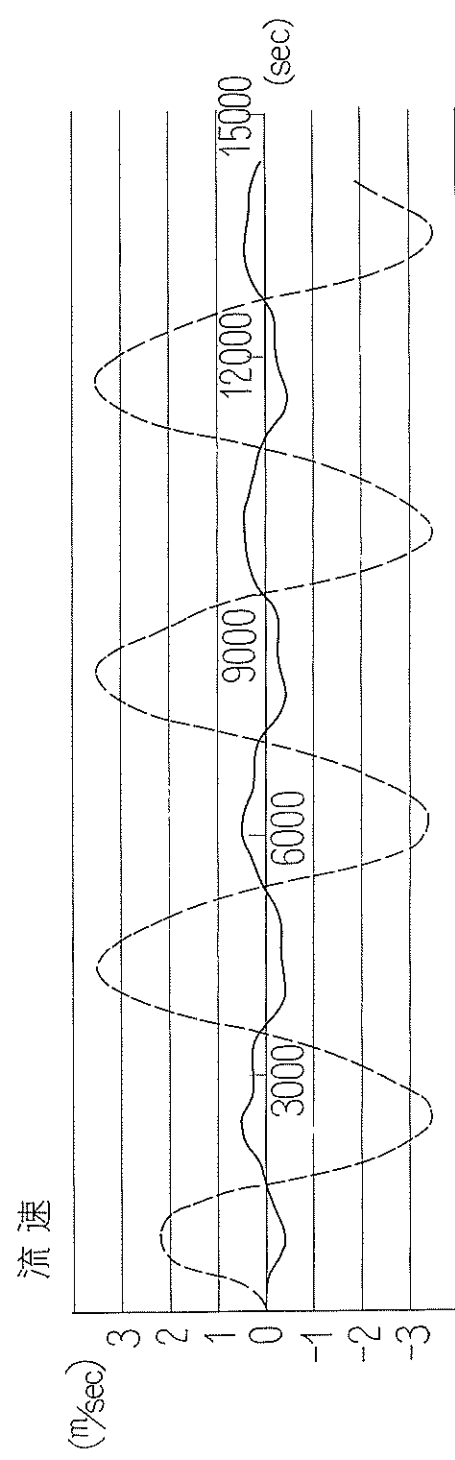
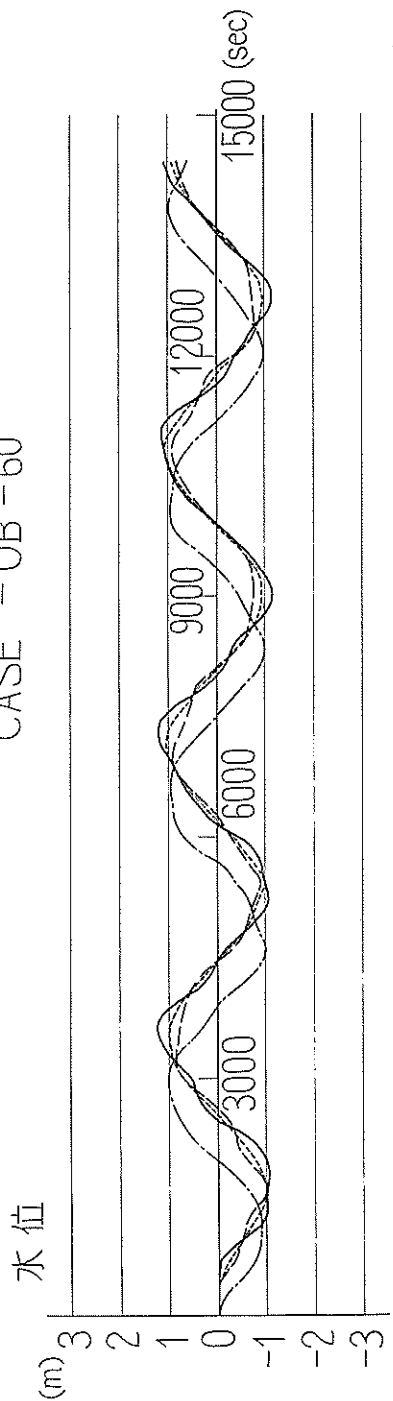
附図-42 水位及び流速の時間的变化
CASE - OB - 25



附図-43 水位及び流速の時間的变化
CASE - OB - 40



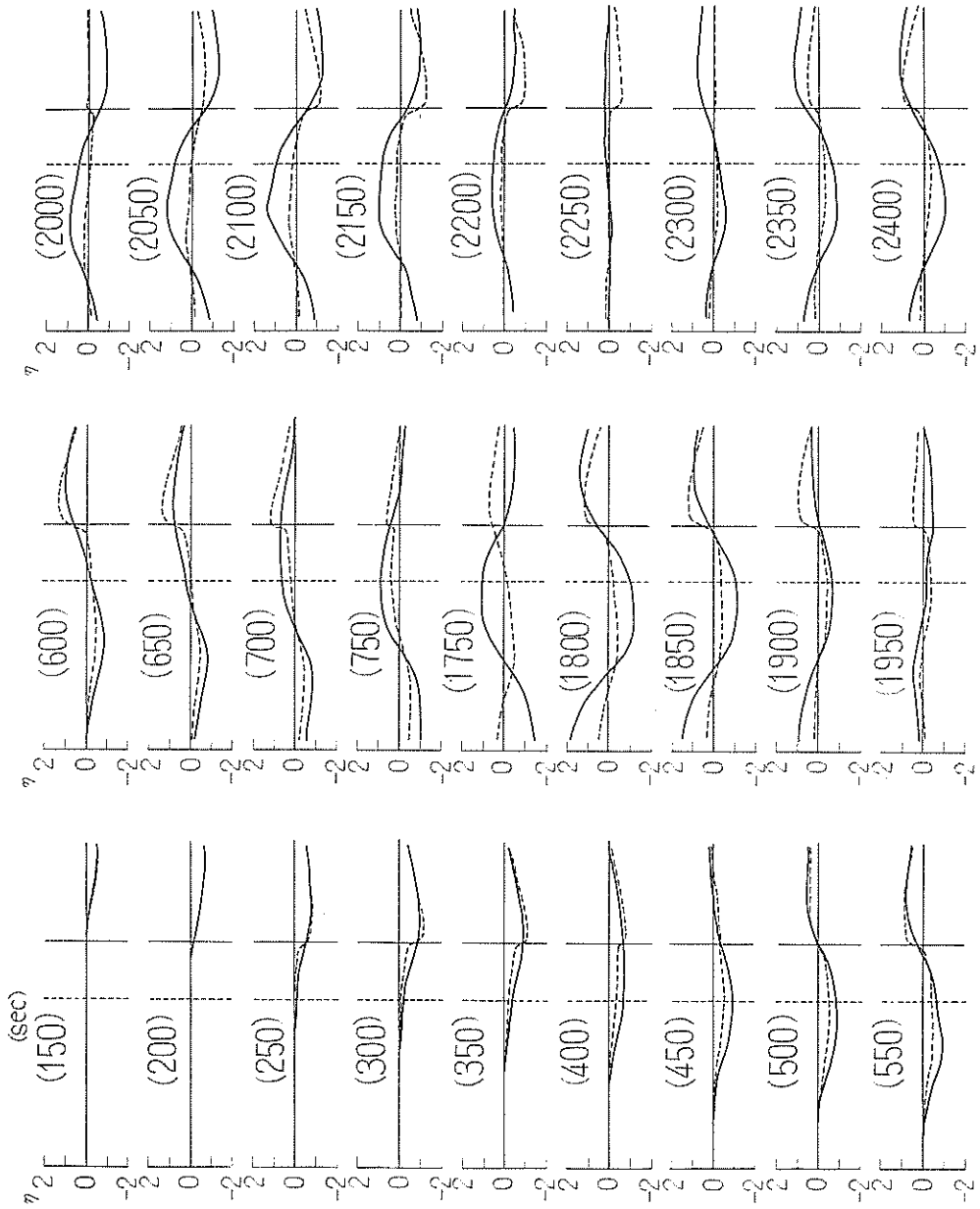
附図-44 水位及び流速の時間的变化
CASE - OB - 60



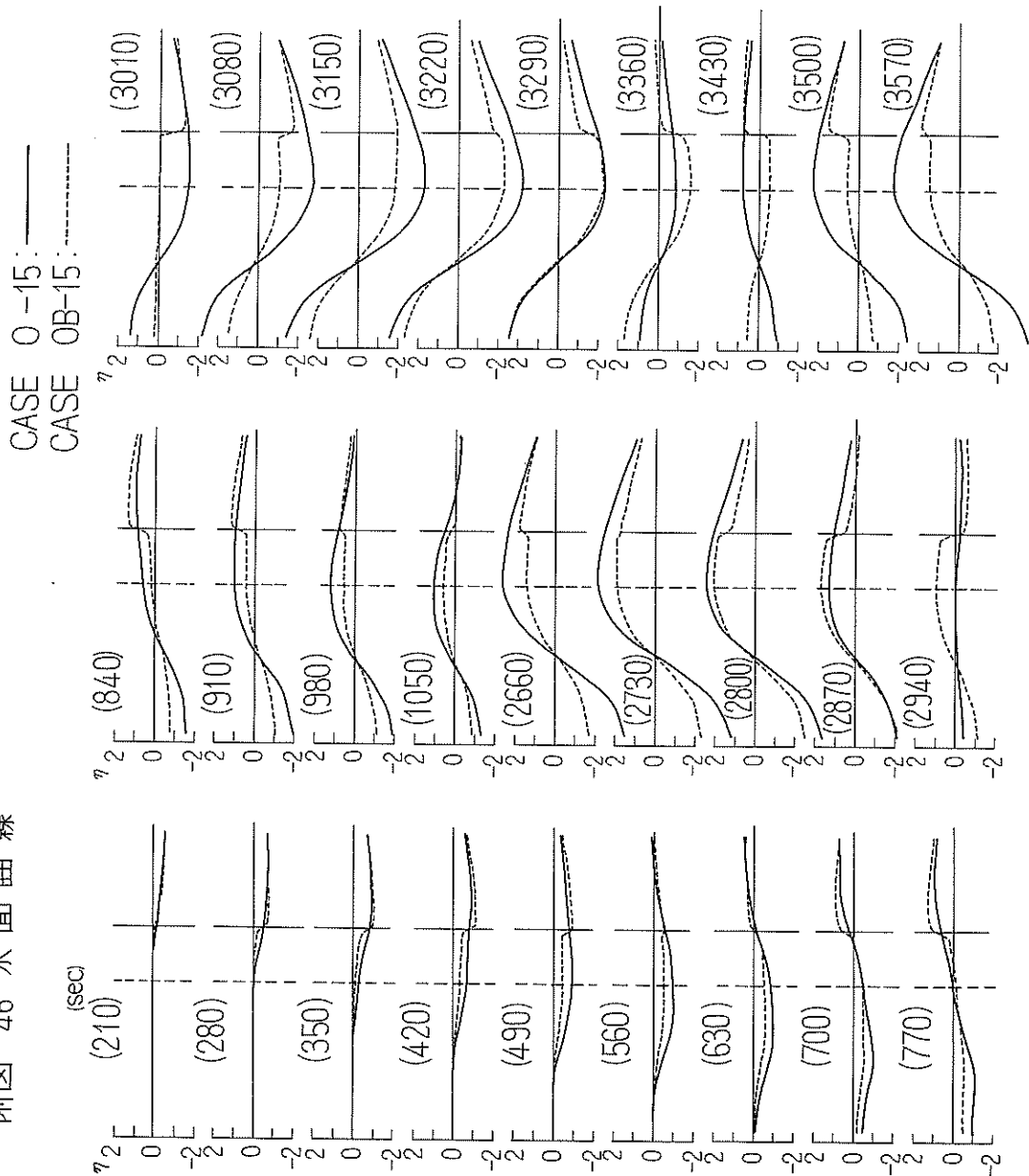
附图-45 水面曲线

CASE
CASE

0-10 : —
OB-10 : - - -

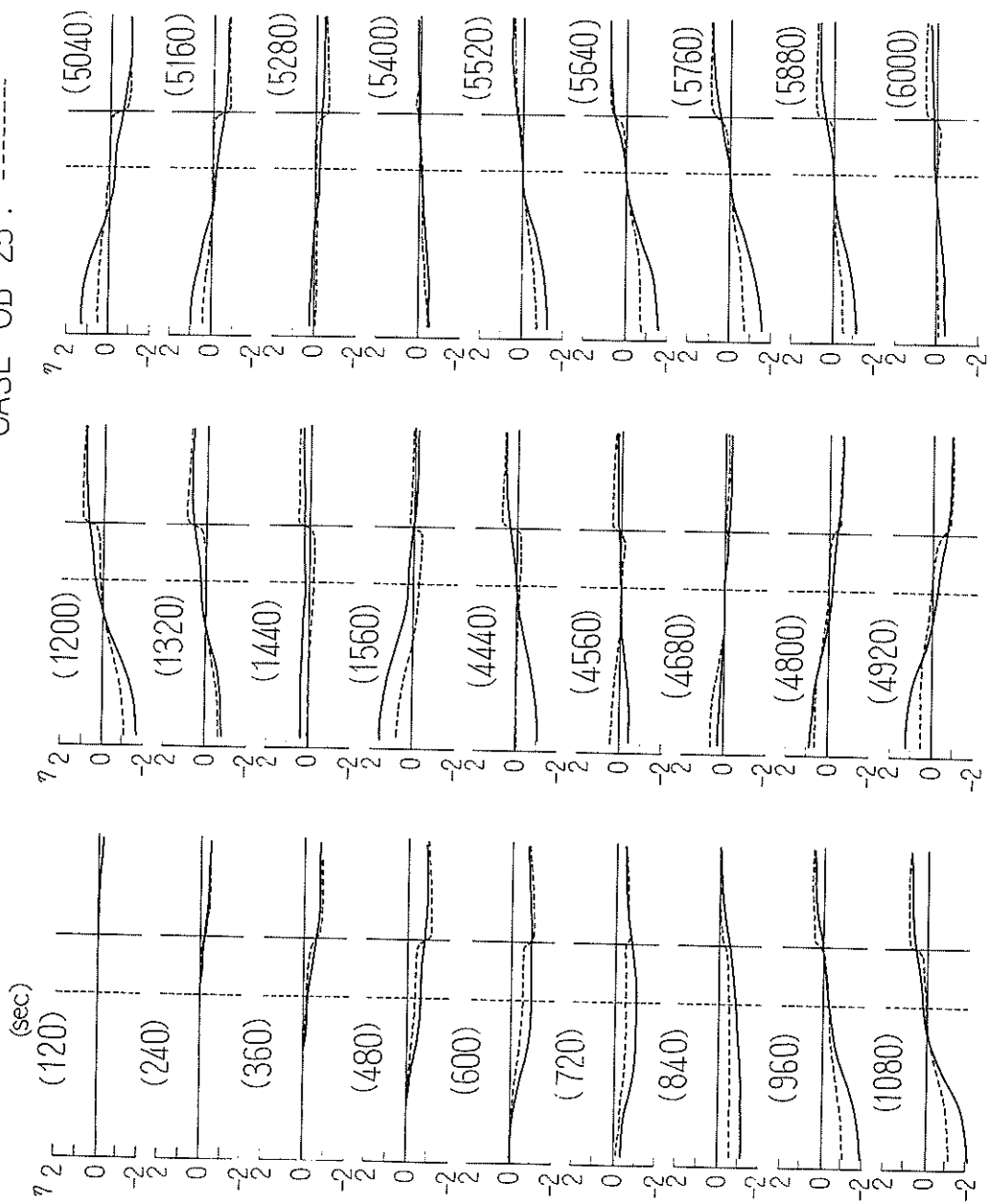


附图-46 水面曲线



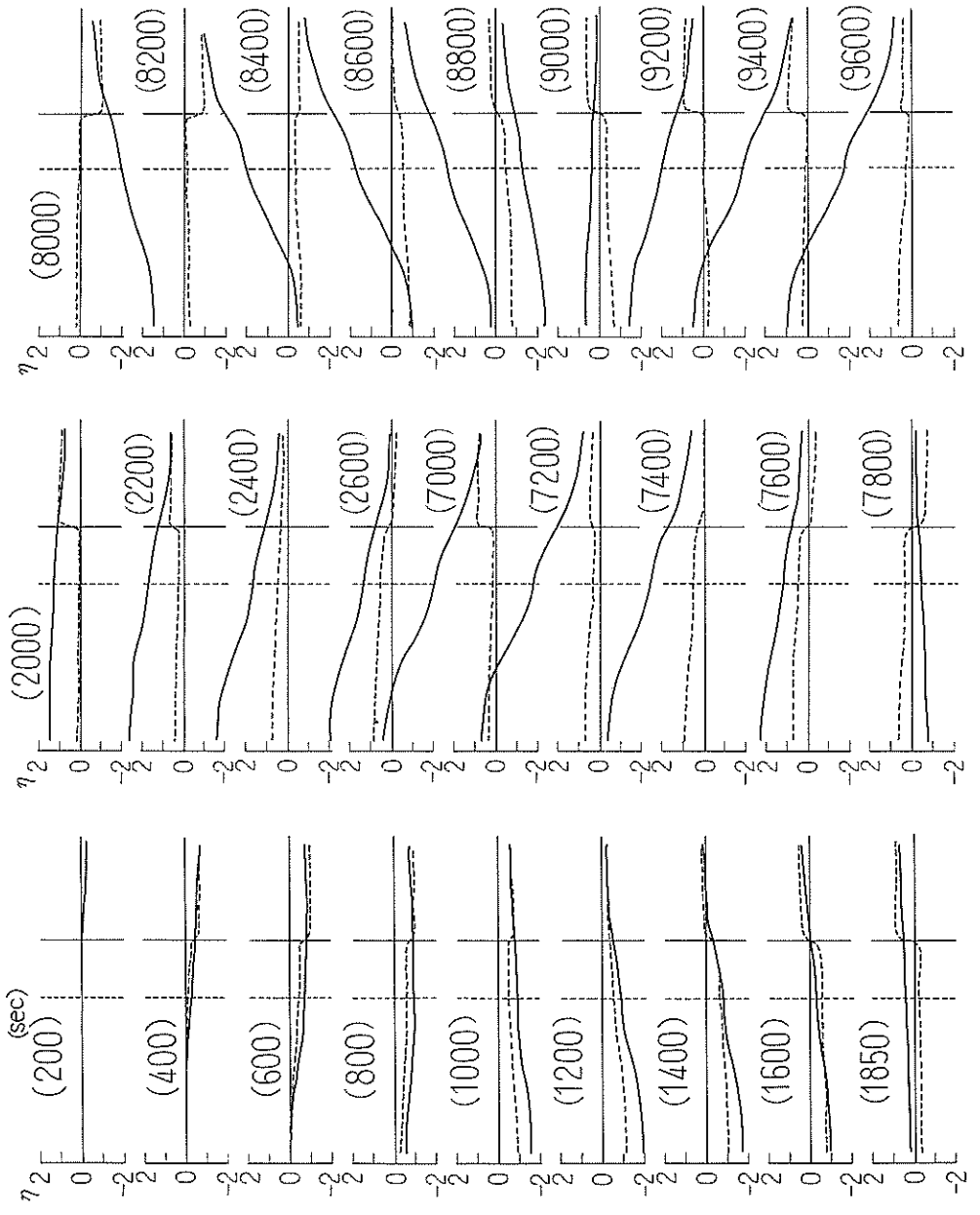
附圖-47 水面曲線

CASE O-25: ———
 CASE OB-25: - - - -



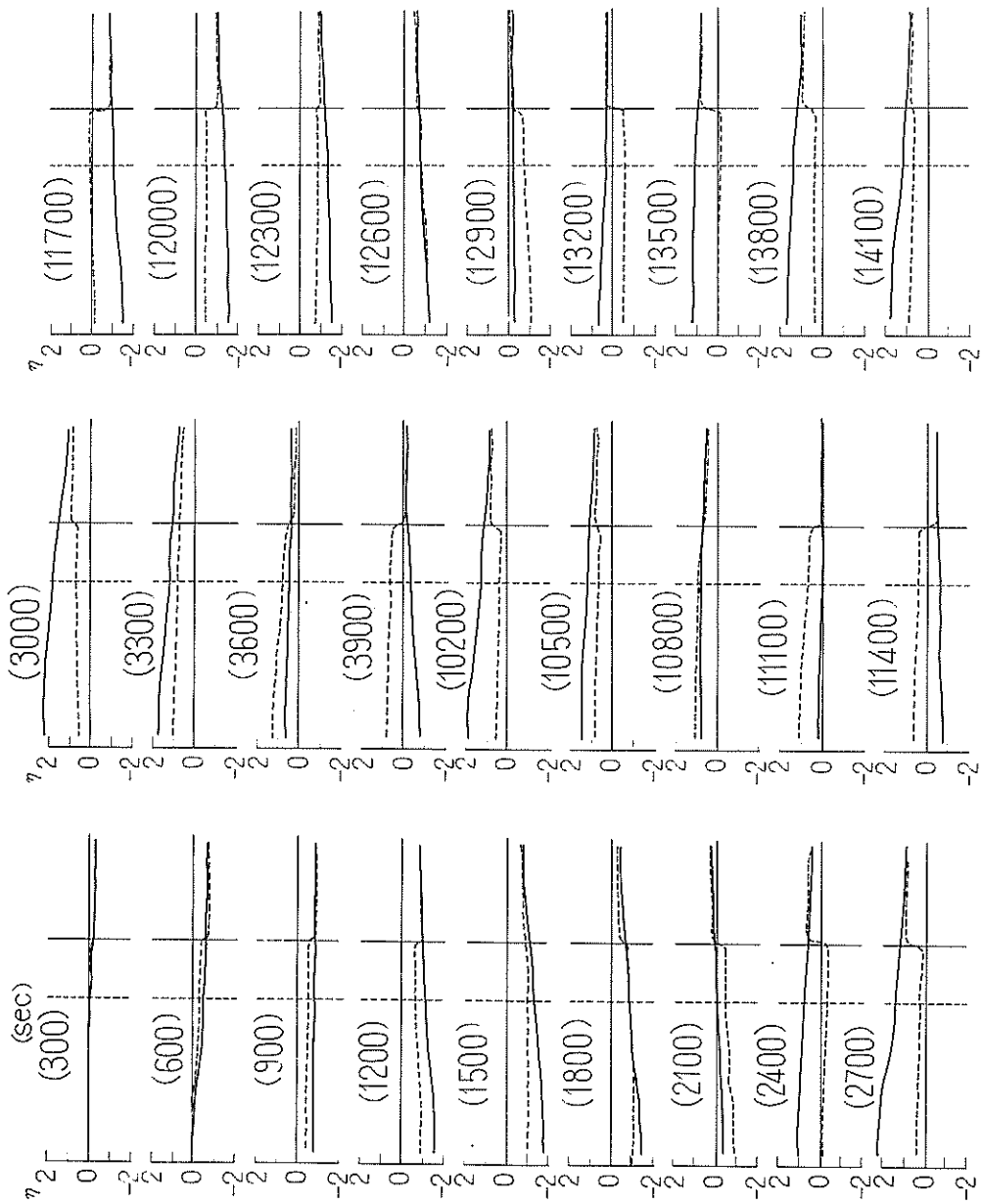
附圖-48 水面曲線

CASE 0-40 : ———
CASE OB-40 : - - - - -

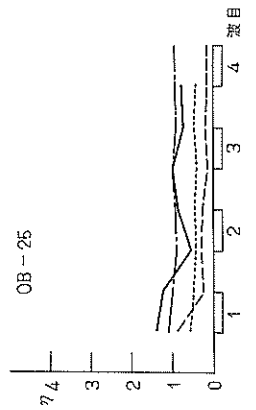
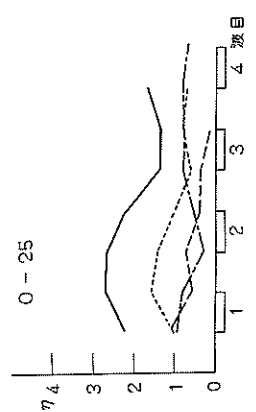
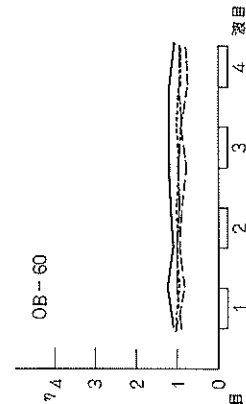
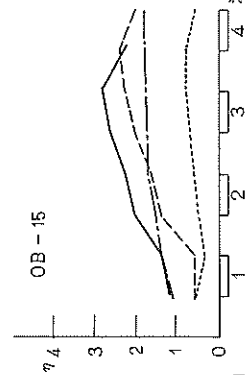
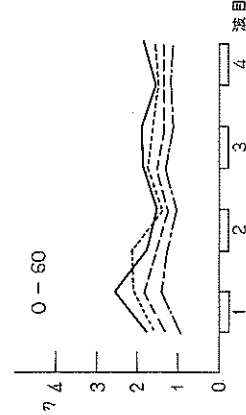
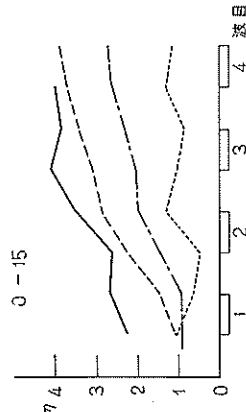
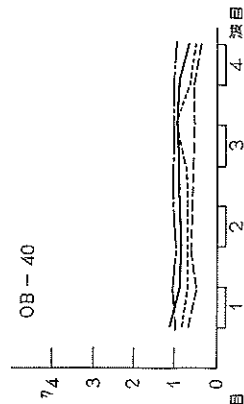
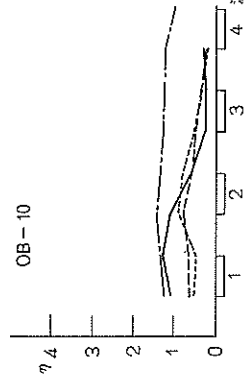
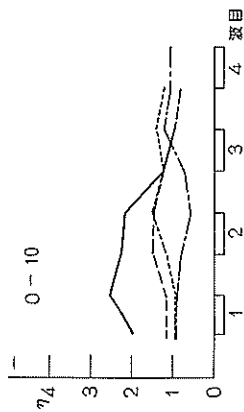
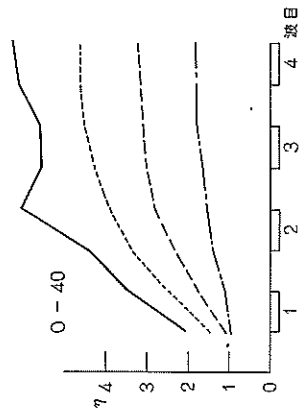
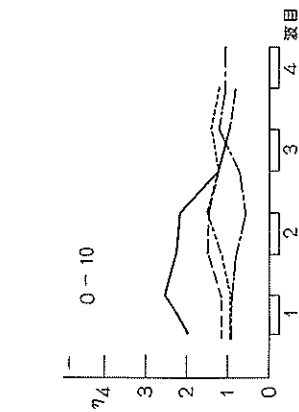


附图-49 水面曲线

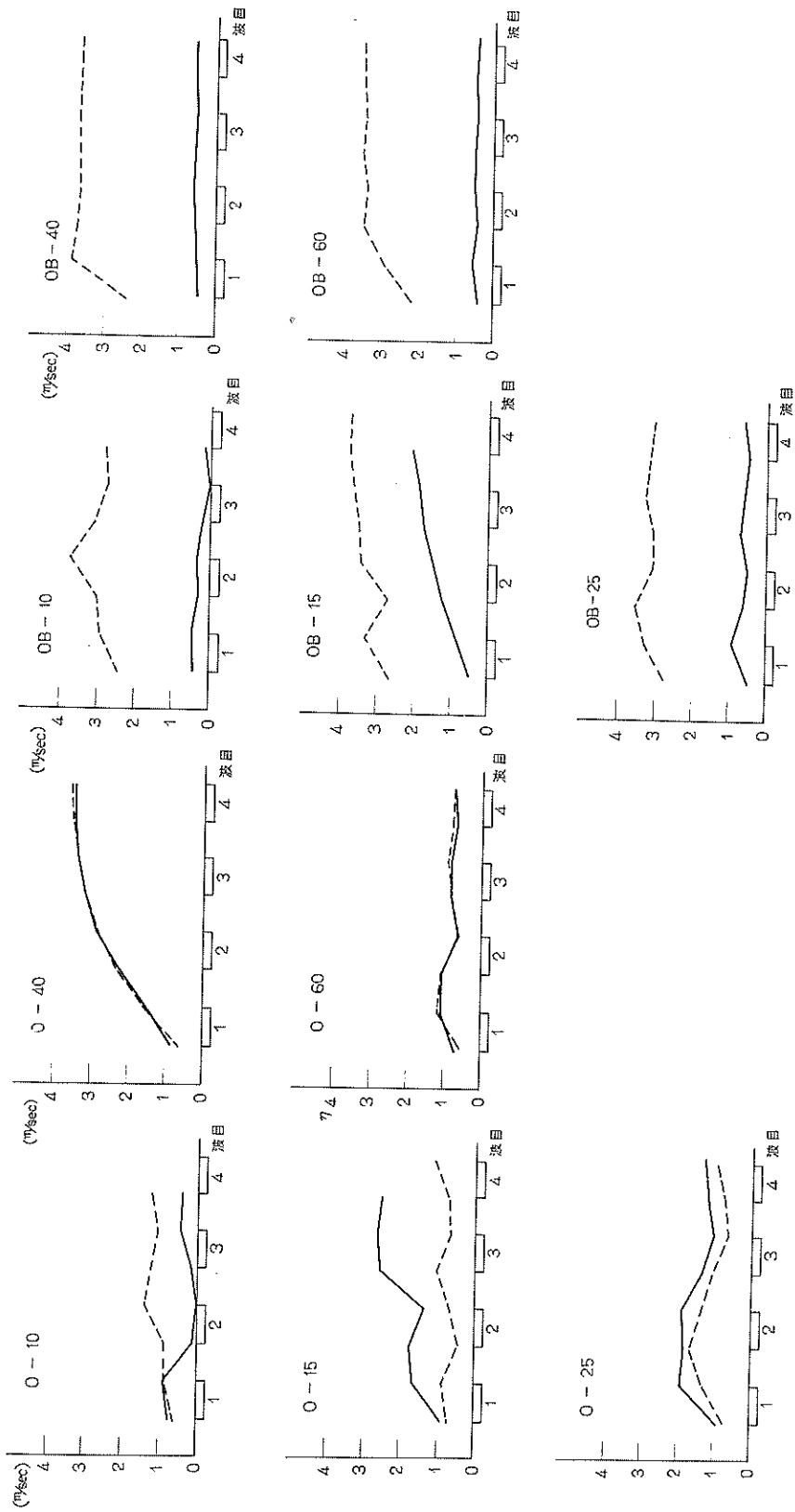
CASE 0-60 : ———
 CASE 0B-60 : - - - - -



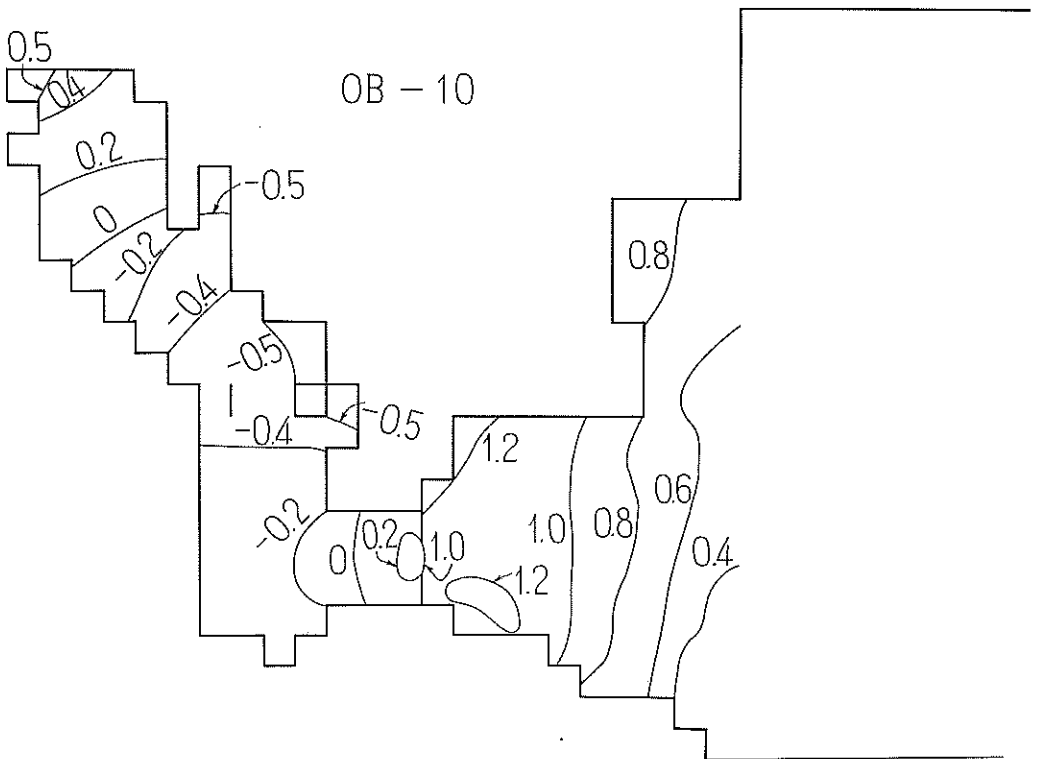
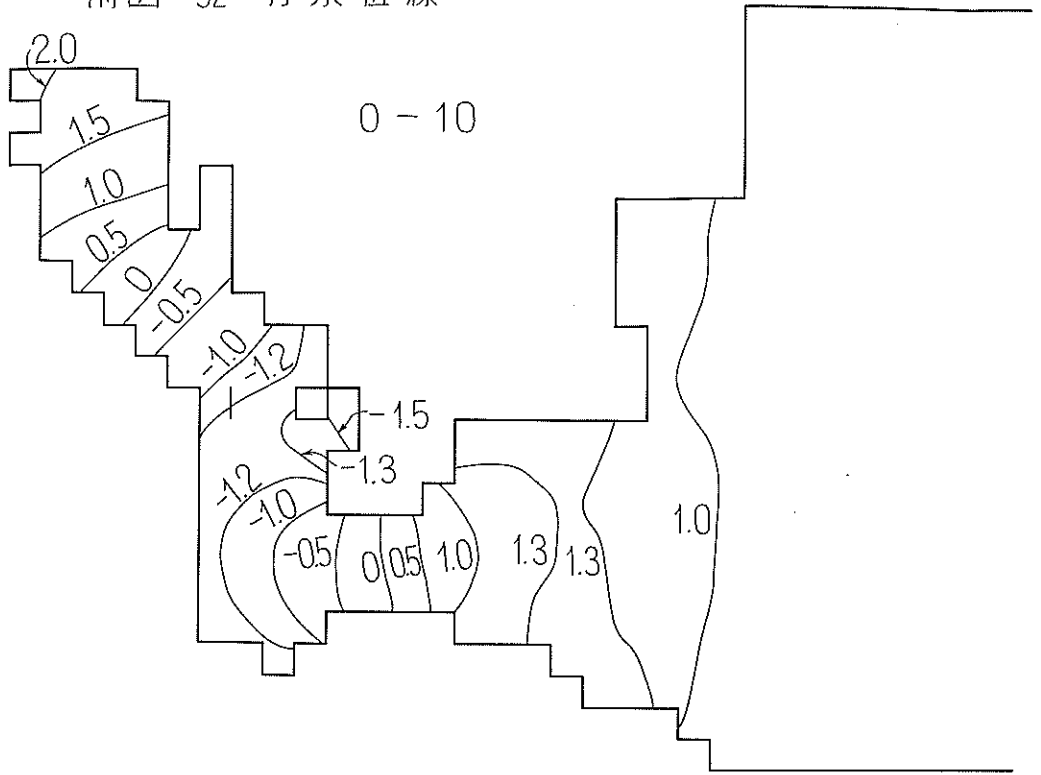
附圖-50 水位振幅の時間的变化



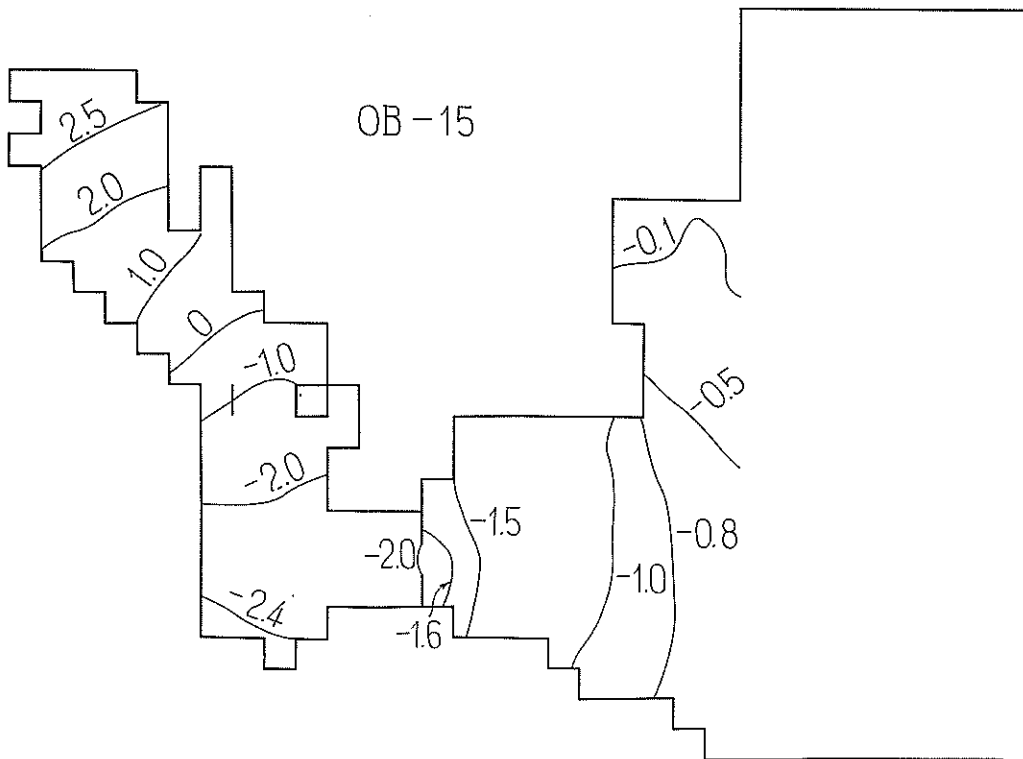
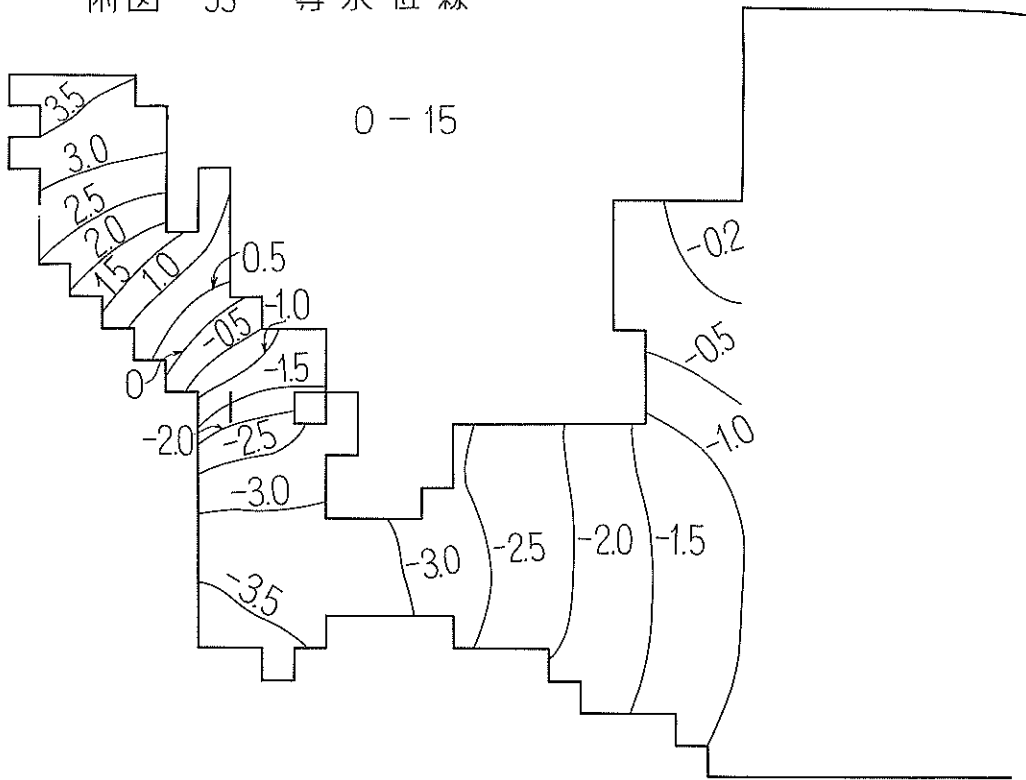
附圖-51 流速振幅の時間的变化



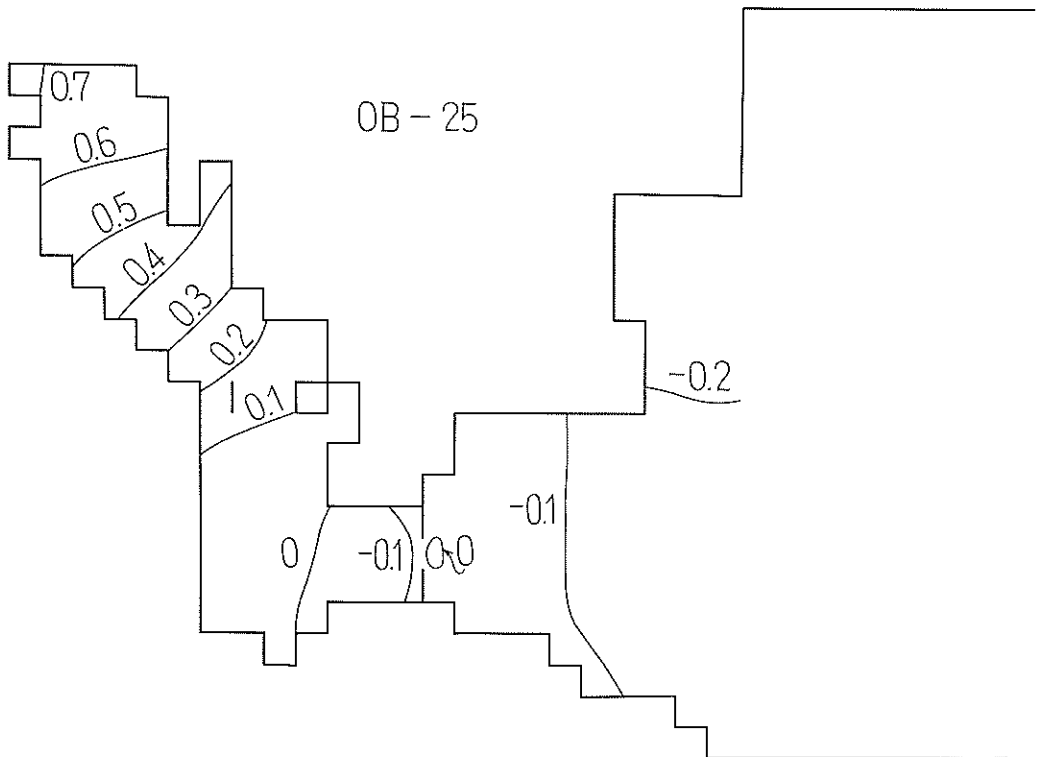
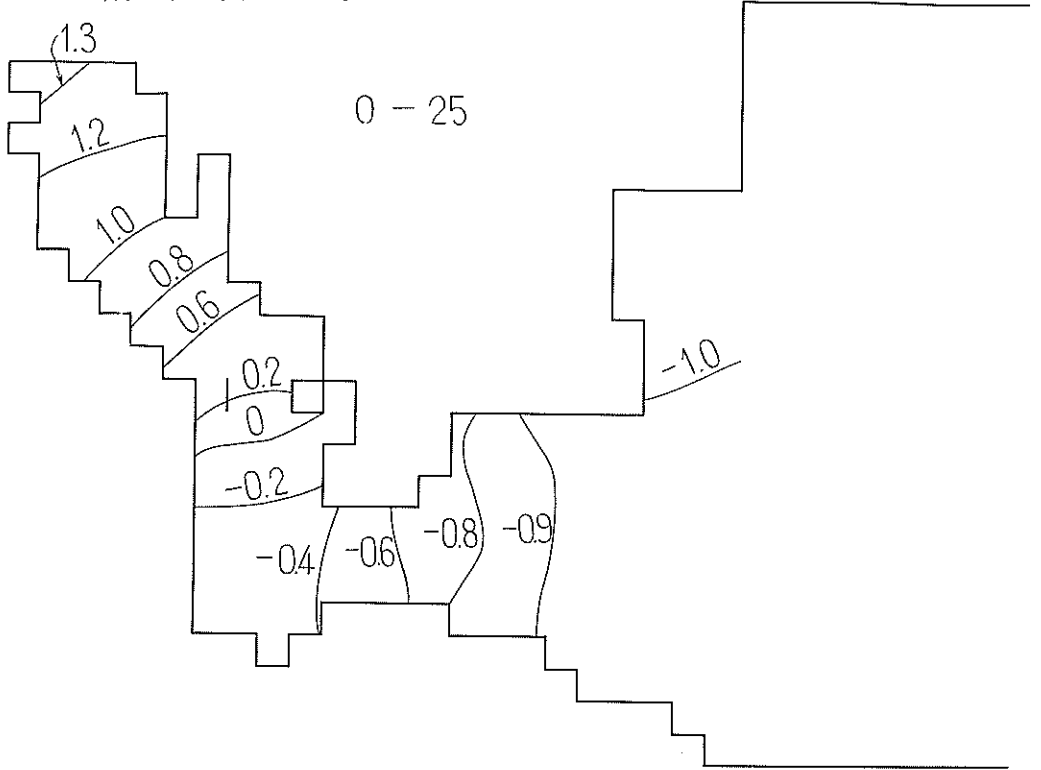
附圖-52 等水位線



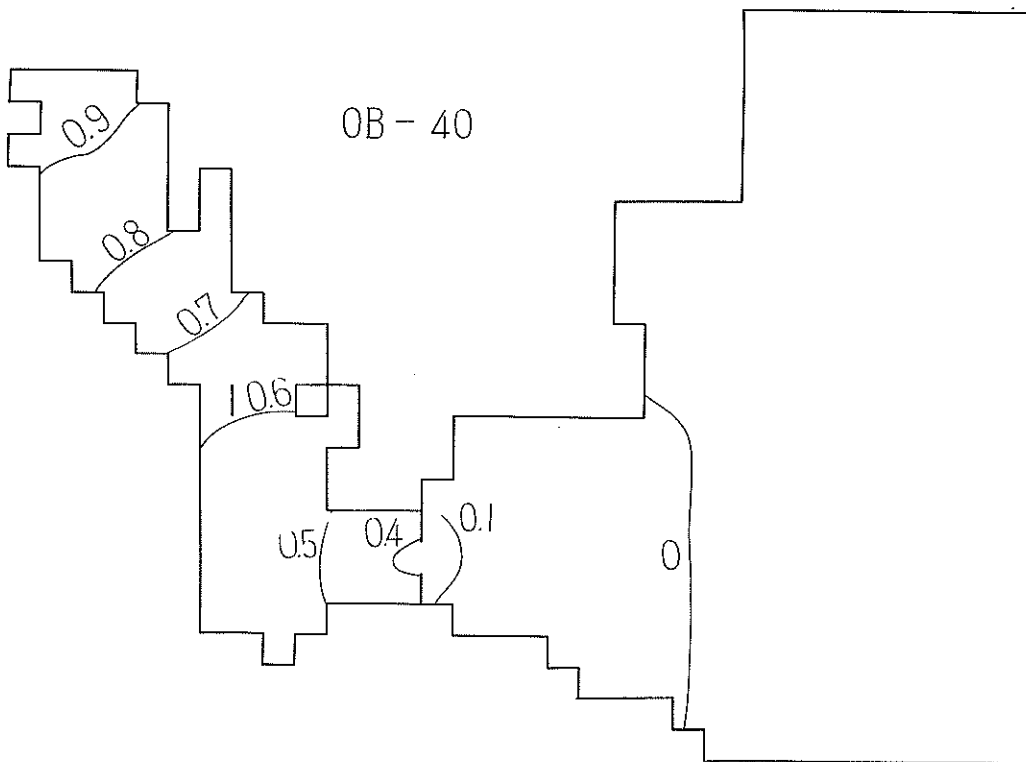
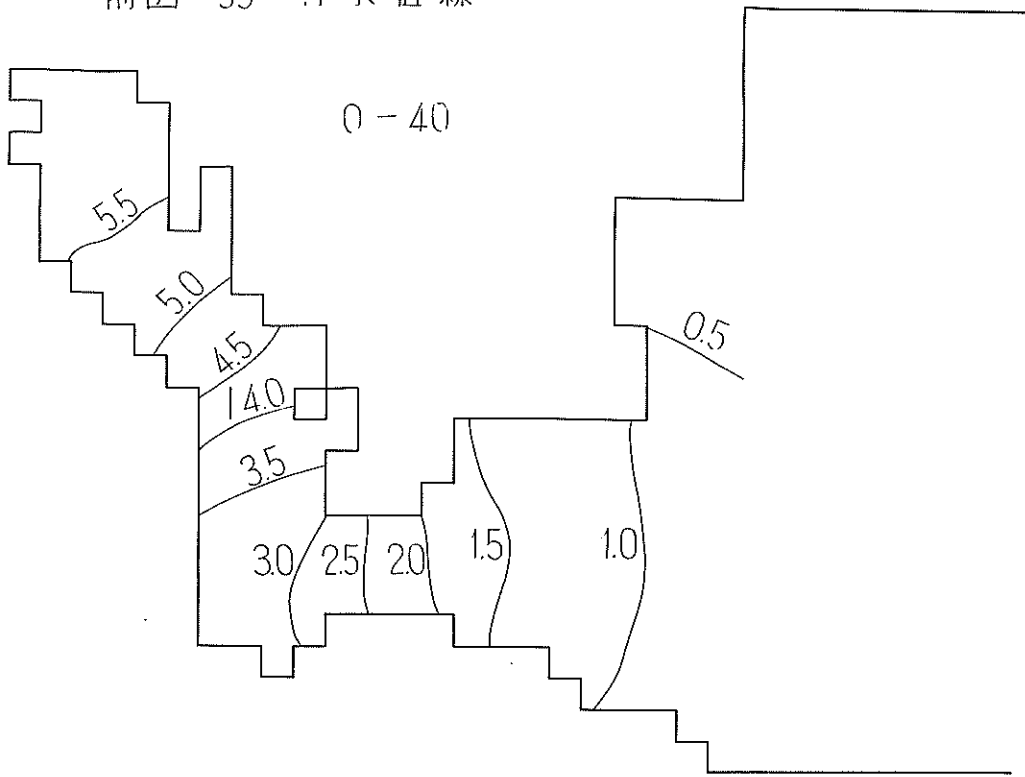
附圖-53 等水位線



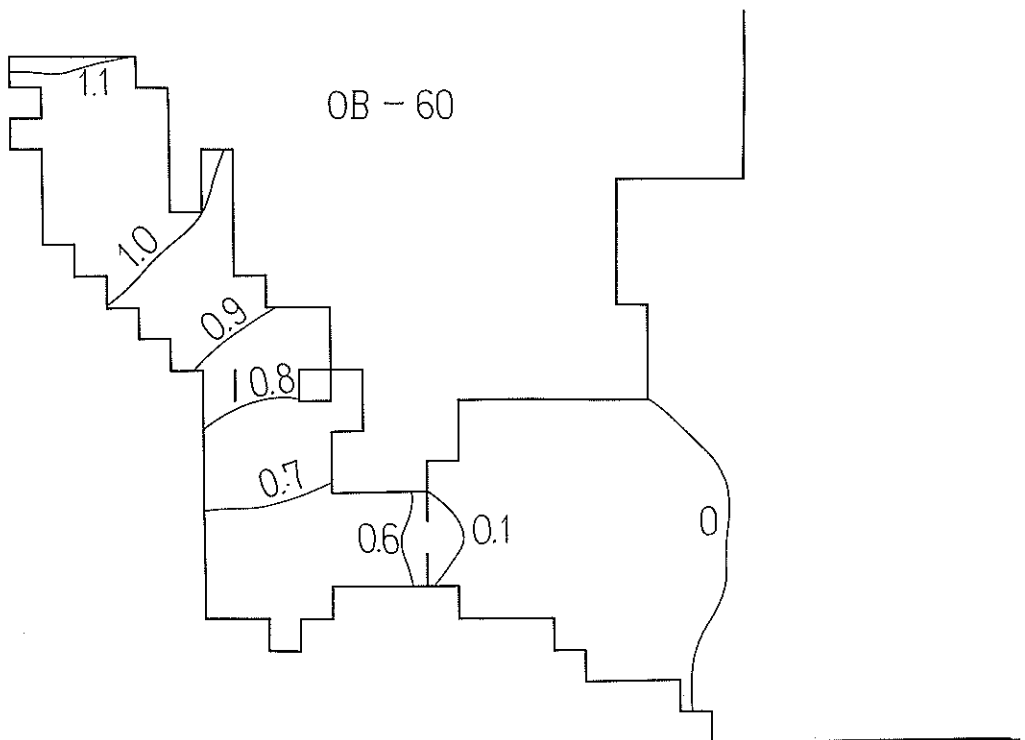
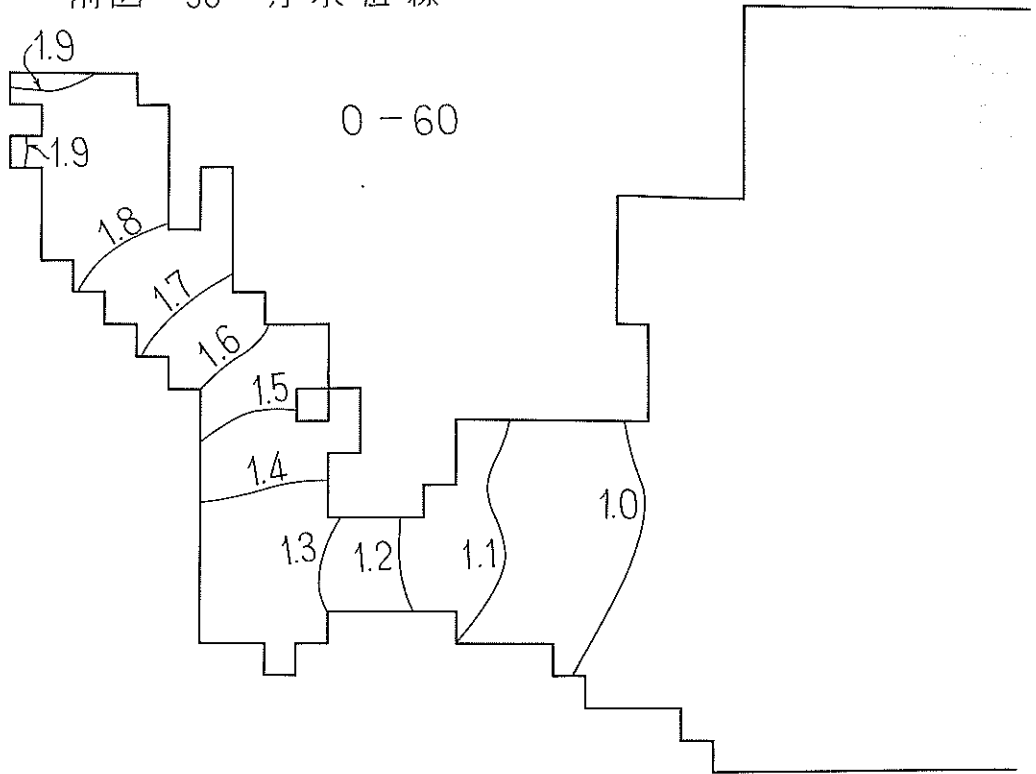
附圖-54 等水位線



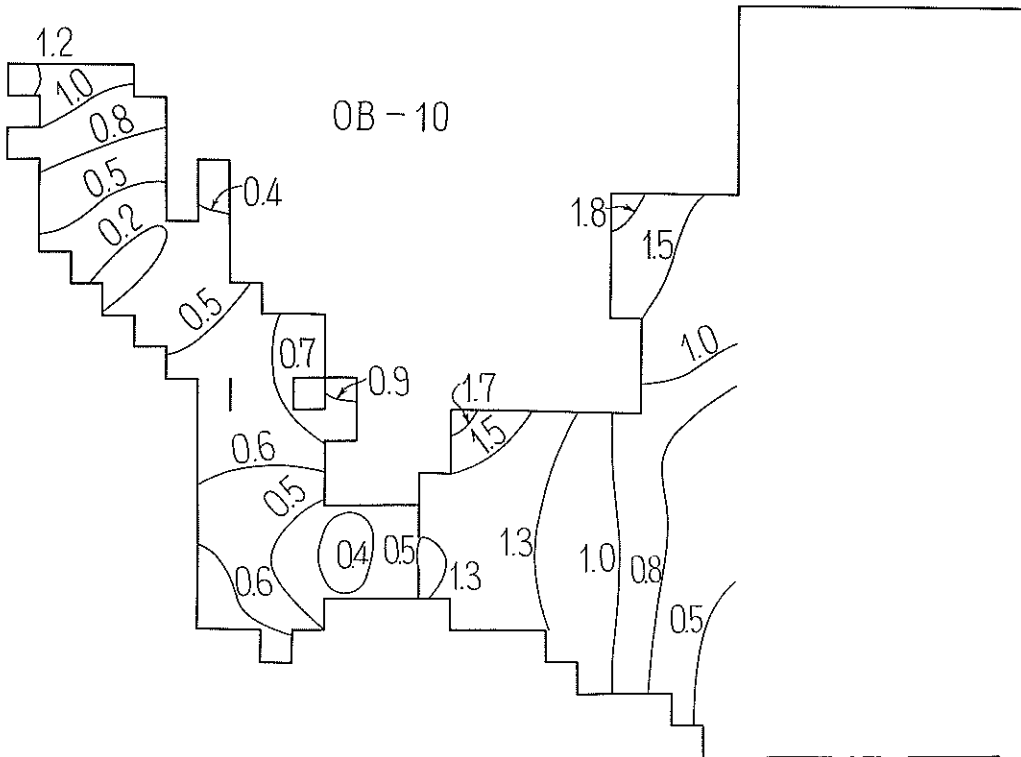
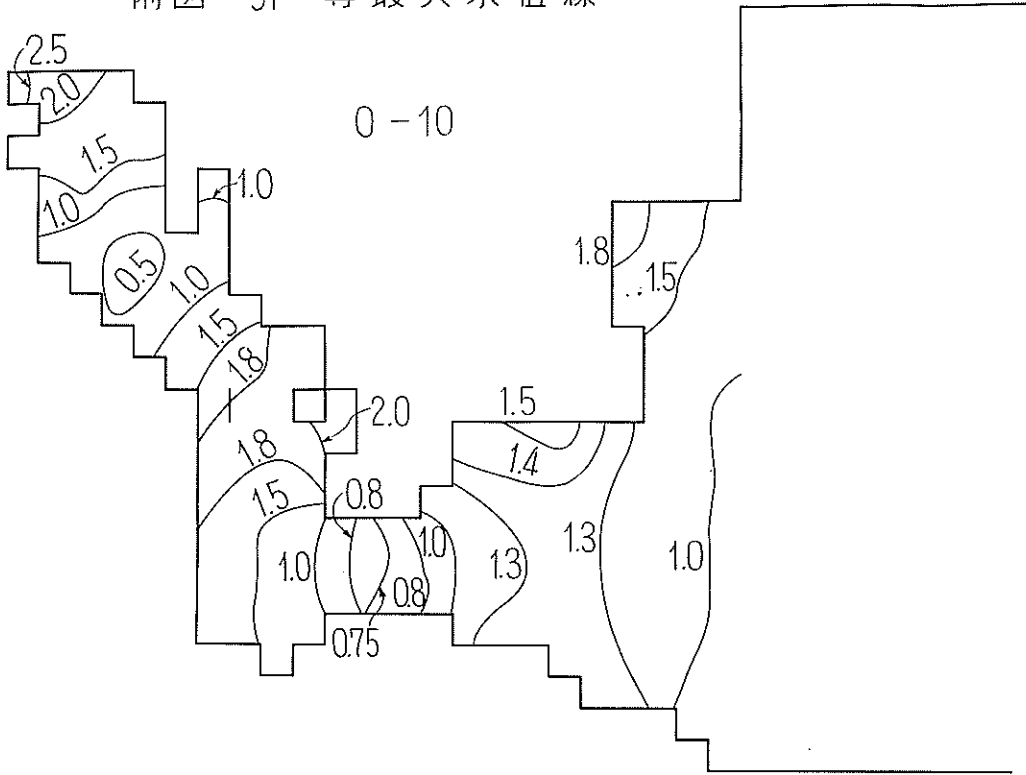
附図-55 等水位線



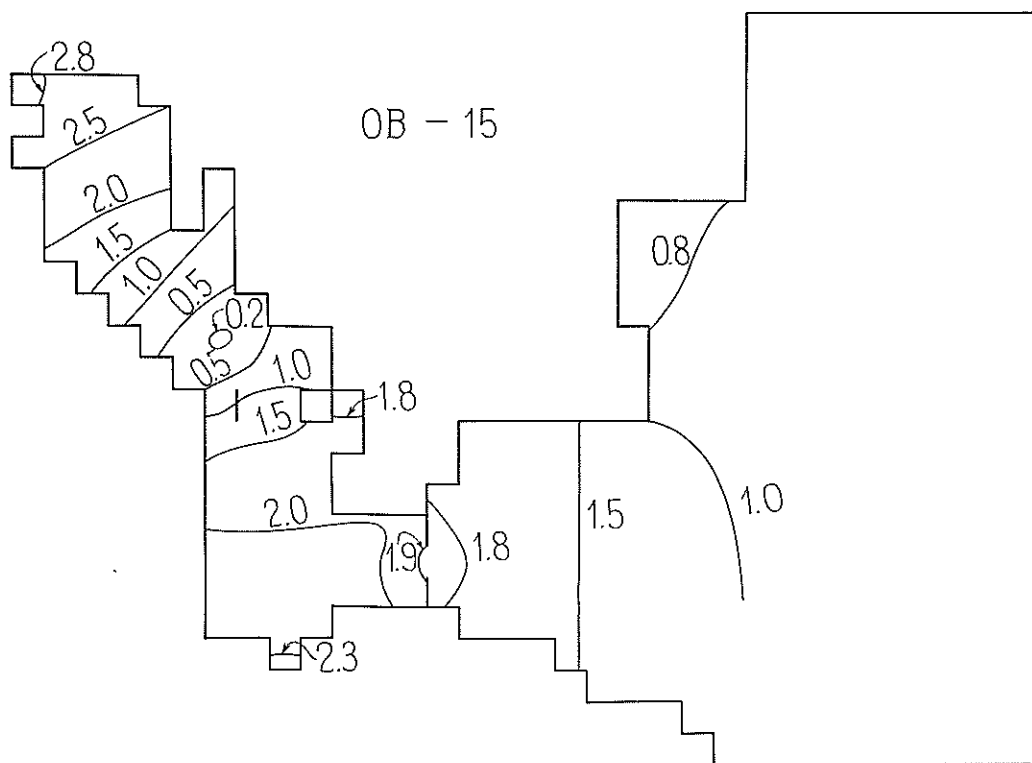
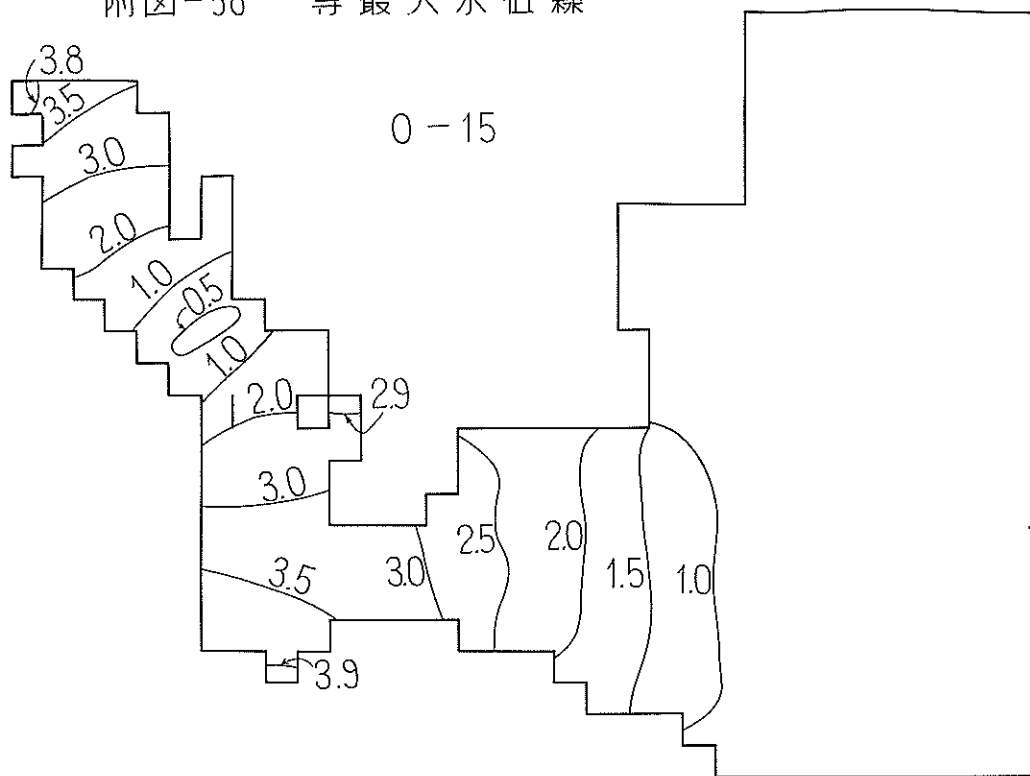
附圖-56 等水位線



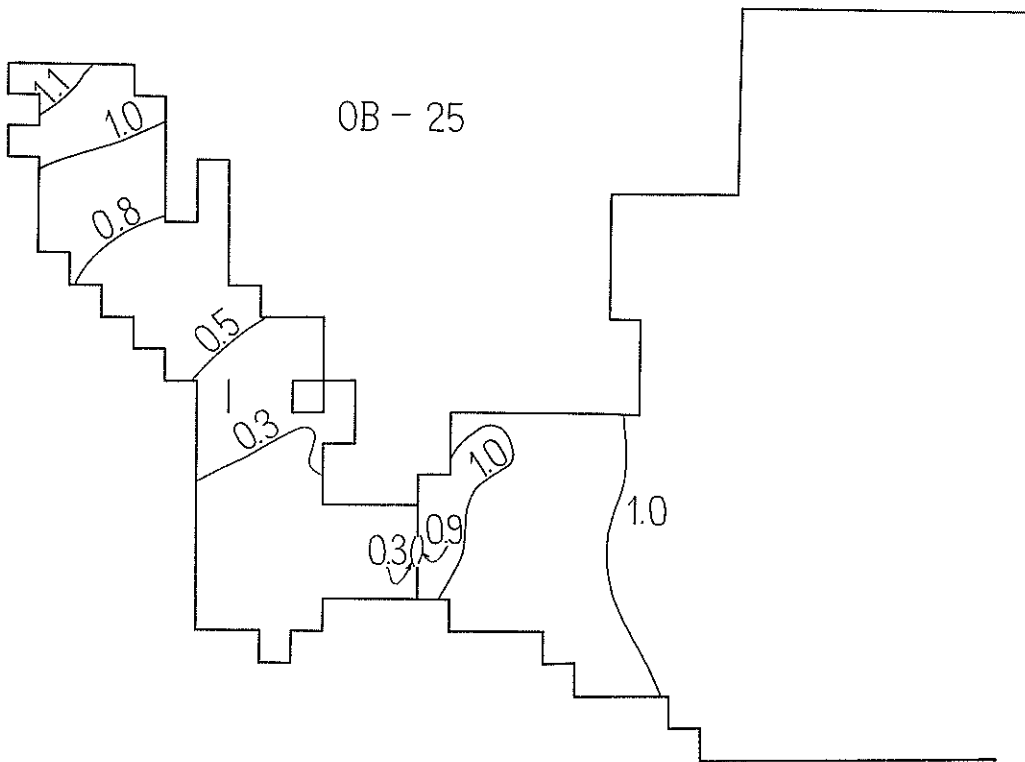
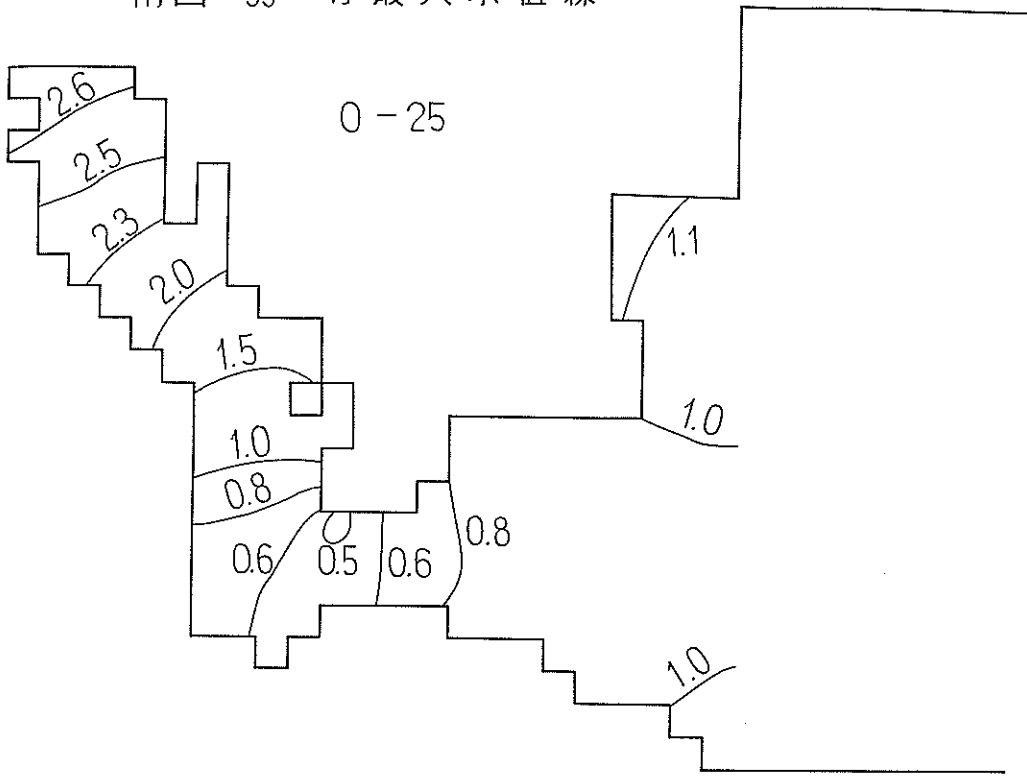
附図-57 等最大水位線



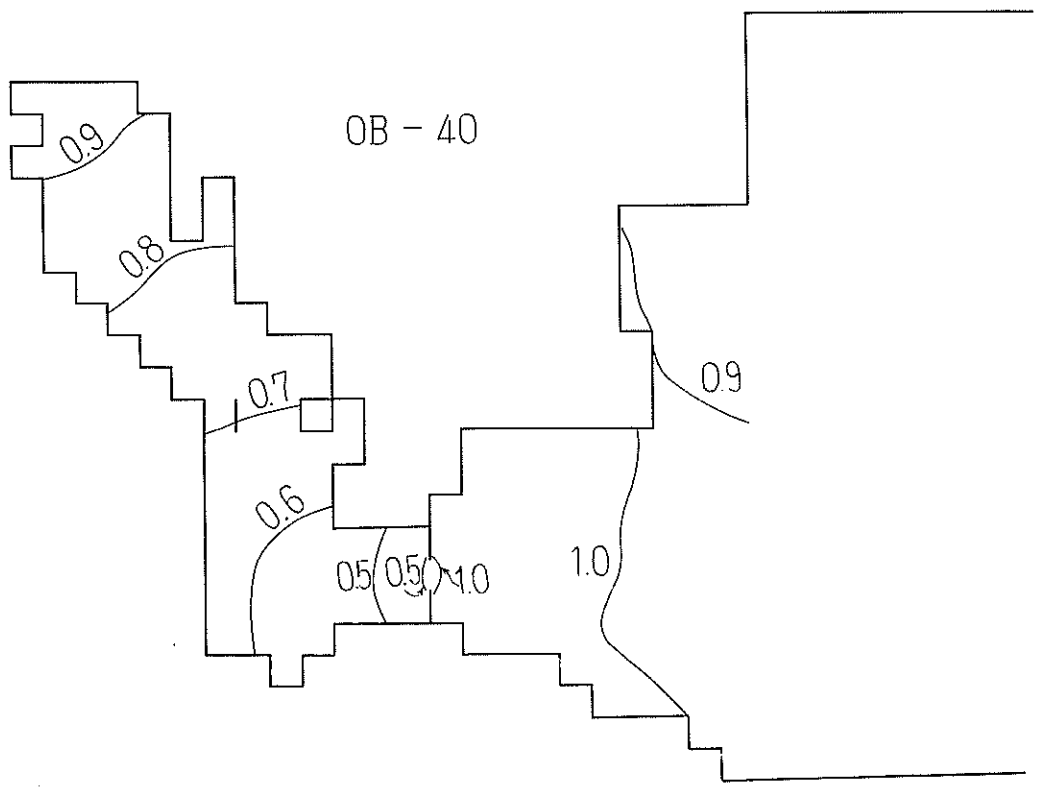
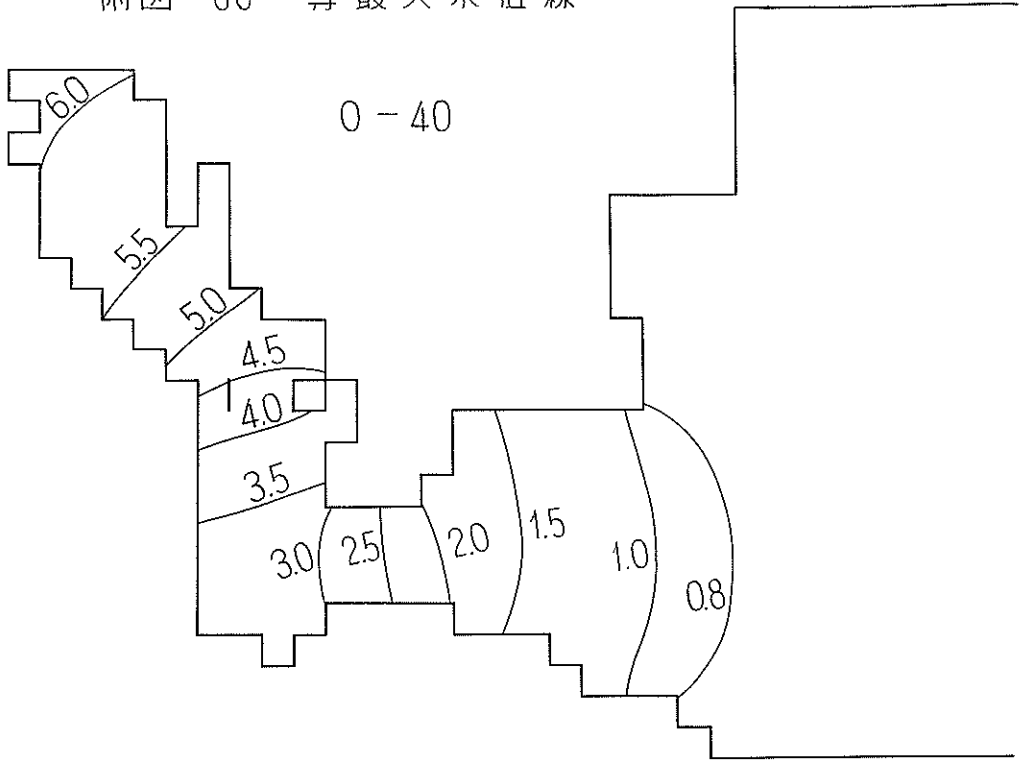
附圖-58 等最大水位線



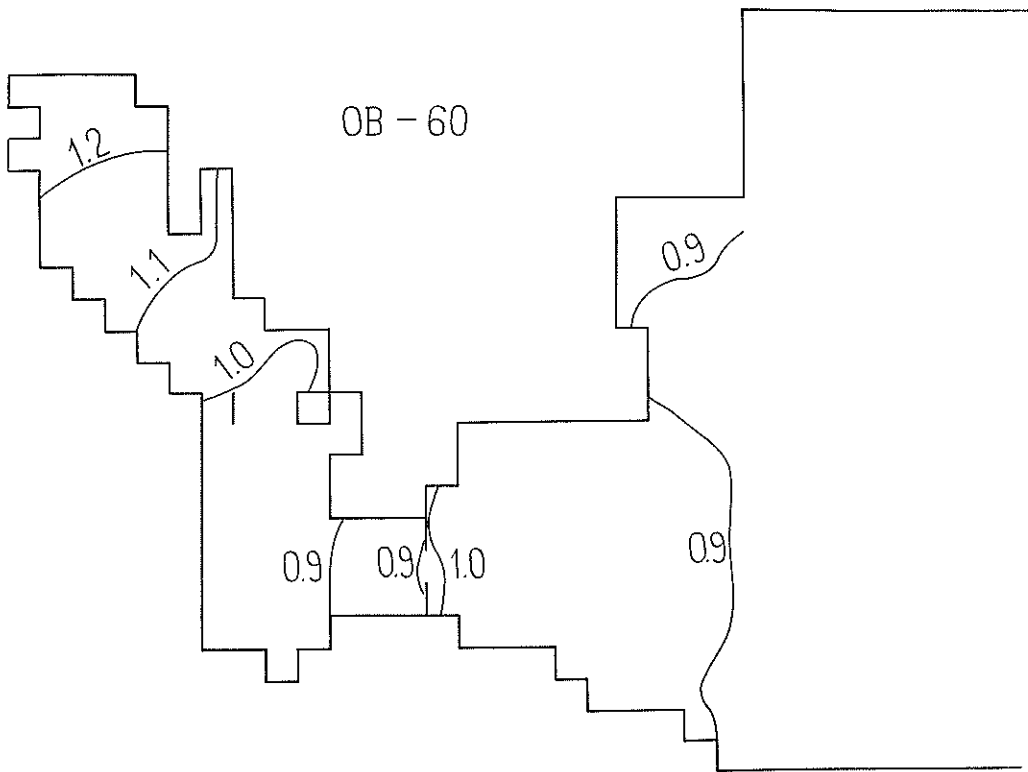
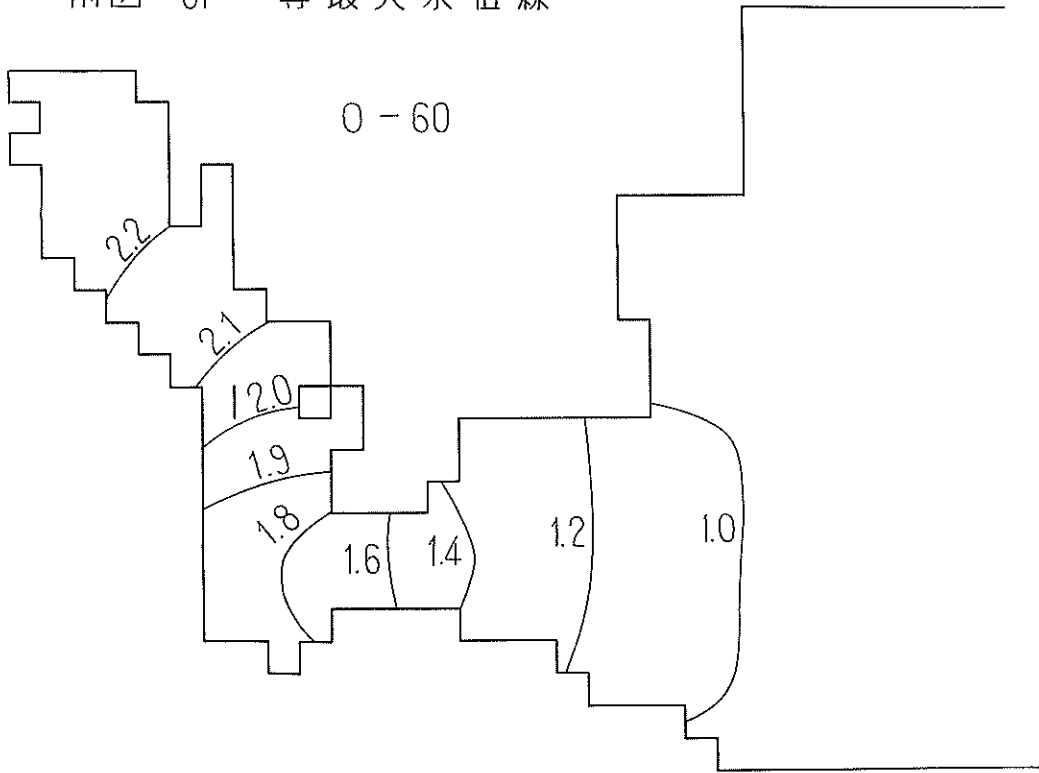
附圖-59 等最大水位線



附圖-60 等最大水位線



附図-61 等最大水位線



港湾技術研究所報告 第3卷7号

1964年12月

編集兼発行者 運輸省港湾技術研究所

発 行 所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市川間162

印 刷 所 柿野屋印刷所
横浜市鶴見区鶴見町394