水深・幅ともに変化する二層水域での表面長波と界面長波

木村 晴保・宗景 志浩

(1984 年 5 月 4 日受理)

Surface Long Waves and Interfacial Long Waves in a Two-Layer Basin with Variations in Depth and Width

Haruyasu KIMURA* and Yukihiro MUNEKAGE*

Equations for surface waves and interfacial waves and their relations in a basin with depth discontinuities were given by Lamb, Le mehaute, Takano, and Ratray.

If the length of the bay is much larger than the width, and the curvature of the bay axis is small, it is possible to consider that the surface long waves, i.e. the tidal waves and the interfacial long waves generated in these basins can be treated as a one dimensional problem.

The bay can be divided into many rectangular segments as shown in Fig. 1, and each of the divided segments corresponds to any of the model segments as shown in Fig. 2. The basic equations for the surface and the interfacial long waves in the model canals are given on the basis of Lamb and Takano's theory. The numerical computations for the surface long waves and the interfacial waves generated in a two layer basin with variation in depth and width, can be carried out by using the basic equations in the model canals.

水深の急変した水域において、密度躍層が発達すると、表面波に伴って内部波が発生することは RATTRAY¹⁾ や TAKANO²⁾ らにより指摘されている。実際、高知県浦の内湾での夏季成層期の水温、塩分、流向、流速の観測結果^{3),4)} でも、内部潮汐に起因すると思われる現象が見られる。そしてこれらの現象は海水流動ひいては海水交換に少なからず影響しているものと考えられる。しかしながら、浦の内湾の様に、水深、幅ともに変化している水域の場合、どの程度の規模の内部波が潮汐によって励起され、どの程度海水流動に寄与するかを推算することは RATTRAY や TAKANO らの方法では困難である。

ところで、水深、幅ともに変化する場合でも、湾幅に比べて湾軸が十分に長く、かつ湾軸の曲率が小さい湾においては、そこに存在する表面長波（潮汐波）や界面長波は一次元的取扱いが可能であり、湾は Fig. 1 の様に長方形水域に分割できる。この場合、Fig. 1 における表面長波、表面長波によって励起される界面長波は Fig. 2 に示す 5 ケースの水域での表面長波、表面長波と界面長波の関係式を用いて推算することが可能である。

ここでは、LAMB⁵⁾ や TAKANO らの考え方にに基づき、上記 5 ケースの水域の表面長波、表面長波と界面長波の関係式（以後、算定基礎式と呼ぶ）を導く。そして、表面長波については LAMB の結果と、表面長波に励起さ

れる界面長波については TAKANO らの結果と比較し、算定基礎式の妥当性を確認する。つづいて、算定基礎式を用い、水深、幅ともに連続的に変る水域での表面長波、表面長波によって励起される界面長波の波高、流速等を推算する算定法を示す。算定法の妥当性は、表面長波についてはケーニヒス湖 (Königssee) の固有振動周期を求め、既往の結果と比較する。一方、表面長波に励起される界面長波については実験結果と比較する。

算定基礎式の誘導

流体は完全流体とする。また表面長波および界面長波は微小振幅波とし、非線型項と上下層流体の mixing は無視できるものとする。

座標系は時間を t 、空間を x で表わし、 x は湾軸に沿って右方を正に取る。断面の変る地点の x 座標を x_n とし、これより左側の水域を $[n]$ 、右側の水域を $[n+1]$ と記すことにする。水深、幅および上層々厚はそれぞれ d, b, D で、上下層流体の密度は ρ_1, ρ_2 で表わす。また表面長波および界面長波の波形関数は x に対して進行するものについてはそれぞれ f, f' で、逆行するものについては g, g' で表わす。これら諸量のうち水域ごとで異なるものについては水域の記号を付記する。

ケース (1) (Fig. 2, CASE (1), $0 < D < d_n, d_{n+1}$) $[n]$

* 高知大学農学部 (Faculty of Agriculture, The University of Kochi, Monobe, Nangoku 783, Japan)

Fig. 1. An example of a basin divided into rectangular parts. The basin is filled with two-layered water.

Fig. 2. Vertical sections of examples of depth discontinuities in canals filled with two-layered water.

における表面長波による水面波形 η_n および断面流速 u_n は次式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} \eta_n &= \{f_n(t-x/c_n) + g_n(t+x/c_n)\} \\ u_n &= \frac{c_n}{d_n} \{f_n(t-x/c_n) - g_n(t+x/c_n)\} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここに、 c_n は表面長波の波速で、 g を重力加速度とすると次式で与えられる。

$$c_n = \sqrt{gd_n} \quad (2)$$

界面長波による界面波形 η'_n および上下層の断面流速 v'_n, u'_n は次式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} \eta'_n &= \{f'_n(t-x/c'_n) + g'_n(t+x/c'_n)\} \\ v'_n &= -\frac{c'_n}{D} \{f'_n(t-x/c'_n) - g'_n(t+x/c'_n)\} \end{aligned} \right\}$$

$$u'_n = \frac{c'_n}{d_n - D} \{f'_n(t-x/c'_n) - g'_n(t+x/c'_n)\} \quad (3)$$

ここに、 c'_n は界面長波の波速で次式で与えられる。

$$c'_n = \sqrt{\frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2} g \frac{D(d_n - D)}{d_n}} \quad (4)$$

$[n+1]$ における表面長波と界面長波の波形および断面流速は (1)~(4) 式において n を $n+1$ で置換したものとなる。

$x=x_n$ では両水域の水面および界面がそれぞれ等しく、かつ上下層の流量が保存されるべきものとして、 $x=x_n$ での境界条件式を次式で与える。

$$\eta_n = \eta_{n+1}$$

$$\left. \begin{aligned} \eta_n' &= \eta_{n+1}' \\ Db_n(u_n + v_n') &= Db_{n+1}(u_{n+1} + v_{n+1}') \\ (d_n - D)b_n(u_n + u_n') &= (d_{n+1} - D)b_{n+1}(u_{n+1} + u_{n+1}') \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

求めるべき算定基礎式 (1) は (1), (3), (5) 式より次式を得る。

$$\left. \begin{aligned} F_n &= \frac{1}{2} \left\{ \left(1 + \frac{b_{n+1}c_{n+1}}{b_n c_n} \right) F_{n+1} e^{-i(k_{n+1} - k_n)x_n} \right. \\ &\quad \left. + \left(1 - \frac{b_{n+1}c_{n+1}}{b_n c_n} \right) G_{n+1} e^{i(k_{n+1} + k_n)x_n} \right\} \\ G_n &= \frac{1}{2} \left\{ \left(1 - \frac{b_{n+1}c_{n+1}}{b_n c_n} \right) F_{n+1} e^{-i(k_{n+1} + k_n)x_n} \right. \\ &\quad \left. + \left(1 + \frac{b_{n+1}c_{n+1}}{b_n c_n} \right) G_{n+1} e^{i(k_{n+1} - k_n)x_n} \right\} \\ F_n' &= \frac{1}{2} \left\{ \left(1 + \frac{b_{n+1}c_{n+1}'}{b_n c_n'} \right) F_{n+1}' e^{-i(k_{n+1}' - k_n')x_n} \right. \\ &\quad \left. + \left(1 - \frac{b_{n+1}c_{n+1}'}{b_n c_n'} \right) G_{n+1}' e^{i(k_{n+1}' + k_n')x_n} \right. \\ &\quad \left. + D \left(1 - \frac{d_n}{d_{n+1}} \right) \frac{U_n(x_n)}{c_n'} e^{i(k_n' x_n)} \right\} \\ G_n' &= \frac{1}{2} \left\{ \left(1 - \frac{b_{n+1}c_{n+1}'}{b_n c_n'} \right) F_{n+1}' e^{-i(k_{n+1}' + k_n')x_n} \right. \\ &\quad \left. + \left(1 + \frac{b_{n+1}c_{n+1}'}{b_n c_n'} \right) G_{n+1}' e^{i(k_{n+1}' - k_n')x_n} \right. \\ &\quad \left. - D \left(1 - \frac{d_n}{d_{n+1}} \right) \frac{U_n(x_n)}{c_n'} e^{-i(k_n' x_n)} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

ここに、 F, G, F', G' は各波の振幅に相当するもので (7) 式で、 k, k' は表面長波と界面長波の波数で (8) 式で、 $U_n(x_n)$ は表面長波による $x=x_n$ における断面流速の振幅に相当するもので (9) 式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} f(t-x/c) &= F e^{i\sigma(t-x/c)} \\ g(t+x/c) &= G e^{i\sigma(t+x/c)} \\ f'(t-x/c') &= F' e^{i\sigma'(t-x/c')} \\ g'(t+x/c') &= G' e^{i\sigma'(t+x/c')} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

ただし、 σ は角周波数である。

$$k = \sigma/c, \quad k' = \sigma/c' \quad (8)$$

$$U_n(x_n) = \frac{c_n}{d_n} \{ F_n e^{-ik_n x_n} - G_n e^{ik_n x_n} \} \quad (9)$$

ケース (2) (Fig. 2 CASE (2), $0 < d_{n+1} \leq D < d_n$) 境界条件式は次式で与える。

$$\left. \begin{aligned} \eta_n &= \eta_{n+1} \\ d_n b_n u_n &= d_{n+1} b_{n+1} u_{n+1} \\ u_n + u_n' &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

算定基礎式 (2) は (1), (3), (10) 式より求まり、表面長波については (6) 式の第 1 と第 2 式で、界面長波については次式で与えられる。

$$G_n' = F_n' e^{-i2k_n' x_n} + (d_n - D) \frac{U_n(x_n)}{c_n'} e^{-ik_n' x_n} \quad (11)$$

ケース (3) (Fig. 2 CASE (3), $0 < d_n \leq D < d_{n+1}$) これはケース (2) で d_n と d_{n+1} を入れ換えたものに相当する。よって境界条件式は (10) 式で n と $n+1$ を入れ換えたものとなる。算定基礎式 (3) は表面長波については (6) 式の第 1 と第 2 式が成り立つ、界面長波については (11) 式で x_n を除いた n を $n+1$ で置き換えればよい。

ケース (4) (Fig. 2 CASE (4), $0 < D < d_n, d_{n+1}=0$) 境界条件式は

$$u_n = 0, \quad u_n' = 0 \quad (12)$$

となり、算定基礎式 (4) は次式で与えられる。

$$F_n = G_n e^{i2k_n x_n}, \quad F_n' = G_n' e^{i2k_n' x_n} \quad (13)$$

ケース (5) (Fig. 2 CASE (5), $0 < D < d_{n+1}, d_{n+1}=0$) 境界条件式は (12) 式で n を $n+1$ で置き換えればよい。算定基礎式 (5) は (13) 式で x_n を除いた n を $n+1$ で置き換えればよい。

算定基礎式の検証

表面長波の算定基礎式は界面長波に関係なく成り立つから、表面長波については Lamb の結果と比較する。表面長波によって励起される界面長波については TAKANO らの結果と比較する。

Lamb との比較 Fig. 3 のように表面長波 f_1 が [1] から [2] へ伝播する場合を考える。このとき、[1] には反射波 g_1 が、[2] には伝達波 f_2 が形成される。これら各波の関係式は (6) 式の第 1, 第 2 式において $n=1$ と置き、 $x_1=0, G_2=0$ を代入し次式を得る。

$$\left. \begin{aligned} \frac{f_2}{f_1} &= \frac{F_2}{F_1} = \frac{2b_1 c_1}{b_1 c_1 + b_2 c_2} \\ \frac{g_1}{f_1} &= \frac{G_1}{F_1} = \frac{b_1 c_1 - b_2 c_2}{b_1 c_1 + b_2 c_2} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

(14) 式は Lamb の結果¹⁾に他ならない。

Fig. 3. Horizontal and vertical sections of the canal for comparison of the present analysis with Lamb's theory.

Fig. 4. Vertical sections of the canal for comparison of the present analysis with Takano's analysis.

Takano らとの比較 TAKANO らは Fig. 4 に示す水域を含め 5 ケースの水域について表面波と界面波の関係式を導いている。そこでは表面波および界面波はともに波長が任意であることから、筆者らのものに比べて適用波の範囲は広い。しかし、水域幅は一定であること、また、表面波と界面波の関係式が複雑であることなどから次項で述べる形状が任意な水域への適用は困難である。

TAKANO らの結果で表面波の波長を無限大と置けば長波となり、筆者らの方法で水域幅を一定としたものと一致する。よって、Fig. 4 に示す水域を例に、表面長波と界面長波の波高比を両者から求め、これらの値を比較することにより前述の算定基礎式の妥当性が検討できる。

Fig. 4 に示す幅一定な水域において、表面長波 f_1 が [1] から [2] へ伝播し、表面長波 g_1, f_2 が、界面長波 g_1', f_2' が形成される場合を考える。これら各波の関係式は (6) 式において $n=1$ とし、 $x_1=0, b_1=b_2, G_2=0, F_1'=0, G_2'=0$ を代入することにより次式を得る。

$$\left. \begin{aligned} \frac{f_2}{f_1} &= \frac{F_2}{F_1} = \frac{2c_1}{c_1+c_2} \\ \frac{g_1}{f_1} &= \frac{G_1}{F_1} = \frac{c_1-c_2}{c_1+c_2} \\ \frac{g_1'}{f_1} &= \frac{f_2'}{f_1} = \frac{F_2'}{F_1} \\ &= -\frac{D}{d_1} \left(1 - \frac{d_1}{d_2}\right) \frac{c_1}{c_1'+c_2'} \left(1 - \frac{g_1}{f_1}\right) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

ただし、

$$c_1 = \sqrt{gd_1}, \quad c_2 = \sqrt{gd_2},$$

$$c_1' = \sqrt{\frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2} g \frac{D(d_1 - D)}{d_1}}$$

いま、 $(\rho_2 - \rho_1)/\rho_2 = 0.001, D=10\text{m}, d_1=23\text{m}, d_2=15.1\text{m}$ とし、(15) 式の第 1～第 3 式の値を求めると、それぞれ 1.10, 0.10, 7.32 を得る。一方、これは TAKANO らの case (b), Fig. 6²⁾ で $D=0.51, E=1.3, W \rightarrow 0$ に相当し、上記に対応する値を図から読み取るとそれぞれ 1.2, 0.1, 7.4 を得る。読み取り誤差を考慮に入れば両者は良く一致している。

形状の任意な水域への応用

算定基礎式の応用例として、(1) 湖ないし湾の固有振動周期の算定 (2) 表面長波により励起される界面長波の周期、振幅等の算定法について述べる。(1) についてはインピーダンス法をはじめ多くの手法が提案されているが、(1) の手法は (2) で表面長波を計算する手法と共通していることから、(1) の妥当性を検証することは、間接的ではあるが (2) で述べる表面長波の算定法を検証することになる。

湖ないし湾の固有振動周期 Fig. 5 に基づき説明する。これはケーニヒス湖を水深、幅の異なる 3 つの長方形水域で近似したもの⁵⁾で、これら水域を左より順に水域 [1], [2] および [3] で表わすと水域 [3] の右半分は Fig. 2 CASE (4) に相当する。よって $x=x_3$ の境界条件式は (13) 式の第 1 式において $n=3$ と置き次式を得る。

$$F_3 = G_3 e^{i \cdot 2k_3 x_3} \quad (16)$$

$x=x_2, x=x_1$ の境界条件式は (6) 式の第 1 式と第 2 式において n をそれぞれ 2 および 1 と置き式 (17), (18) 式を得る。

Fig. 5. Horizontal and vertical sections of Königssee simplified for the analysis⁵⁾.

$$\left. \begin{aligned} F_2 &= \frac{1}{2} \left\{ \left(1 + \frac{b_3 c_3}{b_2 c_2} \right) F_3 e^{-i(k_3 - k_2)x_2} \right. \\ &\quad \left. + \left(1 - \frac{b_3 c_3}{b_2 c_2} \right) G_3 e^{i(k_3 + k_2)x_2} \right\} \\ G_2 &= \frac{1}{2} \left\{ \left(1 - \frac{b_3 c_3}{b_2 c_2} \right) F_3 e^{-i(k_3 + k_2)x_2} \right. \\ &\quad \left. + \left(1 + \frac{b_3 c_3}{b_2 c_2} \right) G_3 e^{i(k_3 - k_2)x_2} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= \frac{1}{2} \left\{ \left(1 + \frac{b_2 c_2}{b_1 c_1} \right) F_2 e^{-i(k_2 - k_1)x_1} \right. \\ &\quad \left. + \left(1 - \frac{b_2 c_2}{b_1 c_1} \right) G_2 e^{i(k_2 + k_1)x_1} \right\} \\ G_1 &= \frac{1}{2} \left\{ \left(1 - \frac{b_2 c_2}{b_1 c_1} \right) F_2 e^{-i(k_2 + k_1)x_1} \right. \\ &\quad \left. + \left(1 + \frac{b_2 c_2}{b_1 c_1} \right) G_2 e^{i(k_2 - k_1)x_1} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

$x=x_0$ の境界条件式は (12) 式の第 1 式において $x_n=x_0=0$, n を 1 と置き次式を得る。

$$F_1 = G_1 \quad (19)$$

Fig. 5 に示す湖の固有振動周期は (16)~(19) 式を用いて以下の手順で求めることができる。

Fig. 5 より所与の条件を Table 1 に示す。

Table 1. Given data from Fig. 5.

n	$x_n(\text{m})$	$d_n(\text{m})$	$b_n(\text{m})$	$c_n(\text{m/s})^*$
0	0	0	0	0
1	5,280	114.5	695.0	33.50
2	5,660	30.0	270.0	17.15
3	7,880	59.8	644.0	24.21

* $C_n = \sqrt{g d_n}$

$G_3=0.5\text{m}$ (0 を除く任意の値でよい) と置き, 種々の角周波数 $\sigma(2\pi/T)$, T は表面長波の周期) に対する $k_1 \sim k_3$ は (8) 式より, F_3 は (16) 式より, F_2, G_2 は (17) 式より, F_1, G_1 は (18) 式よりそれぞれ求め, $|F_1 - G_1|$ との関係を図示する (Fig. 6)。

$|F_1 - G_1| = 0$ なる σ を小さい順に $\sigma_1, \sigma_2, \dots$ と記すと, これらは (19) 式を満足することから, σ_1 は Fig. 5 の基本固有周期の角周波数であり, σ_2 はモード 2 の角周波数である。

計算の結果, 基本固有周期は 10.46 min であった。一方, インピーダンス法では 11.0 min (インピーダンス法による筆者らの計算では 10.42 min であった) であり, 観測結果は 10.6 min である。これらの結果から前記の算定法は適切なものと言える。

Fig. 5 において水域 [1] が $x=x_0$ で外海に接続して, $x=x_0$ で節となるための条件は

$$F_1 = -G_1 \quad (20)$$

で与えられることから, 湾の固有振動周期は (19) 式の

Fig. 6. Relationship between $|F_1 - G_1|$ and σ calculated by the present method under conditions in Table 1.

代りに (20) 式を用いることにより, 前法と同様に求めることができる。

表面長波により励起される界面長波 数値計算法を Fig. 1 に基づき説明する。すなわち二層の水域が $x_2 \sim x_{N-1}$ の区間に存在し, 湾口から潮汐波 f_0 が入射して表面長波 f_n と g_n が, また界面長波 f'_n と g'_n が形成される場合で, これらは以下の方法で求めることができる。

表面長波について

① $x=x_N$ での境界条件式

$$F_N = G_N e^{i \cdot 2k_N x_N} \quad (21)$$

において, $G_N = 0.5\text{m}$ (0 を除く任意の値) を与え F_N を求める。

② $x=x_n$ ($0 \leq n \leq N-1$) での境界条件式は (16) 式の第 1 式と第 2 式において n をそれぞれ $N-1, N-2, \dots, 0$ で置き換えたもので, これらより $G_N = 0.5\text{m}$ に対応した全ての F_n, G_n が求まる。

界面長波について

③ $x=x_{N-1}$ での境界条件式は (11) 式の n を $N-1$ で置き換えたものである。よって F'_{N-1} を (22) 式で表わし (R', θ') に対する F'_{N-1} と G'_{N-1} を求める。

$$F'_{N-1} = R' e^{i\theta'} \quad (22)$$

④ $x=x_n$ ($3 \leq n \leq N-2$) での境界条件式は (6) 式の第 3 式と第 4 式において n をそれぞれ $N-2, N-3, \dots, 3$ で置き換えたもので, これらより (R', θ') に対応した F'_n, G'_n が求まる。

⑤ $x=x_2$ での境界条件式は

$$G'_3 = F'_3 e^{-i \cdot 2k'_3 x_2} + (d_3 - D) \frac{U_3(x_2)}{c'_3} e^{-ik'_3 x_2} \quad (23)$$

であることから, ④で得られた F'_3, G'_3 は (23) 式を満足しなくてはならない。

すなわち, 表面長波により励起される界面長波の算定

Fig. 7. An experiment for amplitudes of surface and interfacial waves. The curve of the bottom is based on the numerical calculation.

は (22) 式において (23) 式を満たす (R', θ') を求めることに帰結する。これには次の方法がある。

$R' = R_1'$ の一定値に対して (24) 式で定義した ΔE が最小となる θ' を③～⑤の手順で求め、これを θ_1' とする。つぎに、 $\theta' = \theta_1'$ の一定値に対し ΔE が最小となる R' を③～⑤で求め、これを R_2' とする。このとき、 ΔE が許容誤差以下となれば (R_2', θ_1') が求めるべき (R', θ') であり、でなければ R_1' を R_2' と置き上記の手法を繰り返す。

$$\Delta E = |GA - GB| \quad (24)$$

ここに、 GA は④で得た G_3' である。 GB は④で得た F_3' を (23) 式に代入し求めた G_3' である。

水面変位 η_n は (1) 式の第 1 式と (7) 式の第 1 式より、界面変位 η_n' は (3) 式の第 1 式と (7) 式の第 2 式より次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \eta_n &= F_n e^{i(\sigma t - k_n x)} + G_n e^{i(\sigma t + k_n x)} \\ \eta_n' &= F_n' e^{i(\sigma t - k_n' x)} + G_n' e^{i(\sigma t + k_n' x)} \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

ただし、 $x_{n+1} \geq x \geq x_n$ とする。

表面長波による断面流速 u_n は (1) 式の第 2 式と (7) 式の第 1 式より次式で与えられる。

$$u_n = -\frac{c_n}{d_n} \{F_n e^{i(\sigma t - k_n x)} - G_n e^{i(\sigma t + k_n x)}\} \quad (22)$$

上層の流速 U_1 と下層の流速 U_2 は (1) 式の第 2 式、(3) 式の第 2、第 3 式および (7) 式より次式を得る。

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= -\frac{c_n}{d_n} \{F_n e^{i(\sigma t - k_n x)} - G_n e^{i(\sigma t + k_n x)}\} \\ &\quad - \frac{c_n'}{D} \{F_n' e^{i(\sigma t - k_n' x)} - G_n' e^{i(\sigma t + k_n' x)}\} \\ U_2 &= -\frac{c_n}{d_n} \{F_n e^{i(\sigma t - k_n x)} - G_n e^{i(\sigma t + k_n x)}\} \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

$$+ \frac{c_n'}{d_n - D} \{F_n' e^{i(\sigma t - k_n' x)} - G_n' e^{i(\sigma t + k_n' x)}\}$$

実験との比較 数値計算法を検証する目的で以下の実験を行った。実験装置の縦断面図を Fig. 7 の上段に示す。水槽幅が 20 cm と狭いため水域幅を変えた実験はできなかった。二層の流体には石油と淡水を用いた。造波機の前面には消波材を置き、水槽左端での反射波を防いだ。このような条件の下で種々の周期の表面長波を与え、そのときの界面の変動と水槽右端での水面の変動を実測した。

Fig. 7 は実験結果の一例を示したもので、水深の一定な水域 [III] および斜面上の水域 [II] と、界面振幅 (η_n') の計算値は実験結果の特性を良く表現している。また、図中中段に示す水面変動の分布図 (計算値) は表面波が斜面上端 (x_0) で節となっていたことを示す。このときの水槽右端での水面変動量 ($2|\eta_n|$) は 0.6 cm であった。数値計算は斜面水域 [II] を 100 等分し行なった。

文 献

- 1) M. RATTRAY, JR.: *Tellus*, **12**, 54-62 (1960).
- 2) K. TAKANO and N. IIDA: *La mer*, **7**, 150-160 (1979).
- 3) 宗景志浩・木村晴保・宮本一之: 第 29 回海岸工学講演会論文集, 560-564 (1982).
- 4) 宗景志浩・木村晴保: 夏季および秋季における浦の内湾の水理環境と海水流動機構について。第 30 回海岸工学講演会論文集, 526-530 (1983).
- 5) H. LAMB: *Hydrodynamics*, 6th ed., Dover, 1932, pp. 262-263.
- 6) A. DEFANT: *Physical Oceanography II*, Pergamon Press, 1961, pp. 176-186.