琉球大学学術リポジトリ

有限 step 形状の reef による波の変形

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 琉球大学理工学部 公開日: 2013-09-30 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 河野, 二夫, 津嘉山, 正光, 筒井, 茂明, Kono, Tsugio, Tsukayama, Seikoh, Tsutsui, Shigeaki メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/26436

有限 step 形状の reef による波の変形

河　野　二　夫*
津嘉山　正　光*
筒　井　茂　明*

Propagation of Water Waves over a Finite Step

T. KONO, S. TSUKAYAMA and S. TSUTSUI

Theoretical and experimental results are presented for the reflection and transmission of water waves, passing over a step bottom with a finite depth.

An integral equation is derived for the horizontal velocity component on the cut above the step. This integral equation is solved numerically. The model, in this paper, is a finite step type as shown in a figure **1**.

1 概　　説

波動の中におかれた物体による波の変形の問題については従来から理論的にも，実験的にも多く研究されている。無限水深の垂直板による波の変形問題を取扱った Ursell[1] や，波のエネルギー収支の関係から潜堤の問題を取扱った Fuchs[2] らの研究，step 形状に対する Miles や Mei and Blacks[3] の積分方程式の変分法による解法，Newman[4] や高野[5] による積分方程式の数値解法などがある。また，井島[6]や，日野[7]などの研究もめざましいものがある。ただ，これらの研究の中では実験的に乏しいと思われるものもある。

本研究は，沖縄諸島独得な reef状 の海岸における波の変形の問題に対する研究過程で得られた理論的，実験的な成果の一部を示すものである。

2 理論式とその解法

2.1) 速度ポテンシャル

a) 速度ポテンシャル

図—1において速度ポテンシャル Φ (x,z,t) を次式で仮定する。

$$\Phi(x,z,t) = \phi(x,z)\cdot e^{i\sigma t} \qquad (2.1)$$

ただし，$\sigma = 2\pi/T$，$i = \sqrt{-1}$，t：時間，T；波の周期である。

b) 境界条件

$$z = 0 \quad で \quad \partial\phi i/\partial z = (\sigma^2/g)\phi i, \quad (i = 1,2) \qquad (2.2)$$

$$\left.\begin{aligned} z = -h \quad &で \quad \partial\phi_1/\partial z = 0 \\ z = -sh \quad &で \quad \partial\phi_2/\partial z = 0 \\ x = 0 \quad &で \quad \partial\phi_1/\partial x = 0 \end{aligned}\right\} \qquad (2.3)$$

ここに，gは重力の加速度である。

c) ϕ

Laplace の式と(2.3) 式から次式がえられる。

$$\phi_1 = \left\{A\,e^{ik_0x} + Be^{-ik_0x}\right\}\frac{\cosh k_0(h+z)}{\cosh k_0h} + \sum_{n=1}^{\infty} C_n\,e^{-k_nx}\,\frac{\cos k_n(h+z)}{\cos k_nh} \qquad (2.4)$$

$$\phi_2 = Fe^{ik'x}\,\frac{\cosh k'(sh+z)}{\cosh k'sh} + \sum_{l=1}^{\infty} G_l\,e^{k_l'x}\,\frac{\cos k_l'(sh+z)}{\cos k_l'sh} \qquad (2.5)$$

受付　昭和49年10月31日
＊琉球大学理工学部土木工学科

2.2) 固 有 関 数

(2.2), (2.4), (2.5) 式から次式により固有値が与えられる。

$$\left.\begin{aligned} \sigma^2 h/g &= kh \cdot \tanh kh = -k_n h \cdot \tan k_n h \\ \sigma^2 sh/g &= k'sh \cdot \tanh k'sh = -k_l' sh \cdot \tan k_l' sh \end{aligned}\right\} \quad (2.6)$$

2.3) 連続条件と接続条件

x = 0 で速度およびエネルギー流束の接続条件から

$$\left.\begin{aligned} \partial\phi_1/\partial x &= \partial\phi_2/\partial x, & 0 > z > -sh \\ \partial\phi_1/\partial x &= 0, & -sh > z > -h \\ \partial\phi_1/\partial t &= \partial\phi_2/\partial t, & 0 > z > -sh \end{aligned}\right\} \quad (2.7)$$

が成立する。

2.4) 連立方程式

(2.4), (2.5) 式を (2.7) 式に代入すると，未知係数A，B，C_n, G_l, Fに関するつぎの連立方程式がえられる

$$ik(A-B) \cdot \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} - \sum_{n=1}^{\infty} k_n \cdot C_n \cdot \frac{\cos k_n(h+z)}{\cos k_n h}$$

$$= ik'F \cdot \frac{\cosh k'(sh+z)}{\cosh k'sh} + \sum_{l=1}^{\infty} G_l \cdot k_l' \frac{\cos k_l'(sh+z)}{\cos k_l' sh}, \quad (0 > z > -sh)$$

$$= 0, \quad (-sh > z > -h) \quad (2.8)$$

$$(A+B) \cdot \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \cdot + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cdot \frac{\cos k_n(h+z)}{\cos k_n h}$$

$$= F \cdot \frac{\cosh k'(sh+z)}{\cosh k'sh} + \sum_{l=1}^{\infty} G_l \cdot \frac{\cos k_l'(sh+z)}{\cos k_l' sh}, \quad (0 > z > -sh) \quad (2.9)$$

2.5) 方程式の解法

関数系 cosh k (h+z), cos k_n (h+z) は 0 > z > − h で，cosh k′ (sh+z), cos k_l' (sh+z) は 0 > z > − sh で直交関数であるから，(2.8) 式に coshk (h+z), cos k_n (h+z), (2.9) 式に cosh k′ (sh+z), cosk_l' (sh+z) を乗じて，それぞれ 0 > z > − h, 0 > z > − s h で積分すると次式がえられる。

$$\left.\begin{aligned} 1 - \frac{B}{A} &= i \sum_{l=1}^{\infty} \frac{G_l}{A} \cdot \xi_1(l) - \frac{F}{A} \xi_2(l, n) \\ \frac{C_n}{A} &= -\sum_{l=1}^{\infty} \frac{G_l}{A} \cdot \zeta_2(l,n) + i \frac{F}{A} \zeta_1(n), \quad (n = 1, 2, 3, \cdots) \\ \frac{F}{A} &= -\eta_1 - \frac{B}{A} \eta_1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{C_n}{A} \eta_2(n) \\ \frac{G_l}{A} &= -\delta_2(l) - \frac{B}{A} \delta_2(l) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{C_n}{A} \delta_1(n, l), \quad (l = 1, 2, 3 \cdots) \end{aligned}\right\} \quad (2.10)$$

ただし，

$$\left.\begin{aligned} \xi_1(l) &= \frac{4\cosh kh}{2kh + \sinh 2kh} \frac{\sinh kh(1-s)}{\cos k_l' sh} \frac{k k_l'}{k^2 + k_l'^2} \\ \xi_2 &= \frac{4\cosh kh}{2kh + \sinh 2kh} \frac{\sinh kh(1-s)}{\cosh k'sh} \frac{k k'}{k^2 - k'^2} \\ \zeta_1(n) &= \frac{4\cos k_n h}{2k_n h + \sin 2k_n h} \frac{\sin k_n h(1-s)}{\cosh k'sh} \frac{k_n k'}{k_l'^2 + k_n^2} \end{aligned}\right\}$$

$$\left.\begin{aligned}
\zeta_2(l,n) &= \frac{4\cos k_n h}{2k_n h+\sin 2k_n h}\,\frac{\sin k_n h\,(1-s)}{\cos k_l' sh}\,\frac{k_n k_l'}{k_l'^2-k_n^2}\\
\eta_1 &= \frac{4\cosh k'sh}{2k'sh+\sinh 2k'sh}\,\frac{\sinh kh\,(1-s)}{\cos kh}\,\frac{k\,k'}{k^2-k'^2}\\
\eta_2(n) &= \frac{4\cosh k'sh}{2k'sh+\sinh k'sh}\,\frac{\sin k_n h\,(1-s)}{\cos k_n h}\,\frac{k'\cdot k_n}{k'^2+k_n^2}\\
\delta_1(n,l) &= \frac{4\cos k_l'sh}{2k_l'sh+\sin 2k_l'sh}\,\frac{\sin kh\,(1-s)}{\cos k_n h}\,\frac{k_n\cdot k_l'}{k_l'^2-k_n^2}\\
\delta_2(l) &= \frac{4\cos k_l'sh}{2k_l'sh+\sin 2k_l'sh}\,\frac{\sinh kh\,(1-s)}{\cosh kh}\,\frac{k\cdot k_l'}{k^2+k_l'^2}
\end{aligned}\right\}\quad(2.11)$$

反射率 K_r，透過率 K_t は次式で与えられる。

$$\left.\begin{aligned}
K_r &= |B/A|\\
K_t &= |F/A|
\end{aligned}\right\}\quad(2.12)$$

(2.10) 式において，$l = n = 3$ として連立方程式を解き，(2.12) 式からK_r，K_tを求める。数値計算は琉球大学の電子計算機 FACOM 230 —15 によった。

3 実験方法および実験諸元

3.1) 造波水路，模型

実験に用いた水路は，延長4 m，高さ 0.65m ，幅 0.3m の小型造波水路であり，水路端には消波工（金網と小さい砕石を使用）を設置してある。reef の模型はコンクリート製である。また，reef の先端は水路端より 1.35m に設置してある。

3.2) 波高計と計測

容量式波高計を reef 上と reef の前面（沖側）に各々1台設置し，水路の上端には波高計を自由に移動できるようにするためレールを取付けてある。なお，波の波形記録はビジグラフに記録した。

reef 上の波高計測は reef 先端から 0.3m, 0.6m, 0.9m，の地点で行ない，入射波高，反射率は Healy の方法によって求めた。

3.3) 実験諸元

実験諸元を表—1に示す。

Table 1 Factors of waves and dimensions of models

Waves			models		
T (sec)	Hi (cm)	Li (cm)	h (cm)	d (cm)	d/h
0.54 ~ 1.38	2.1 ~ 5.1	46 ~ 211	34	8	0.767
			31	18	0.58
			32	28	0.875
			43	18	0.418
			40.5	8	0.198

Hi ; wave height of incident wave.

Li ; wave lenght of incident wave

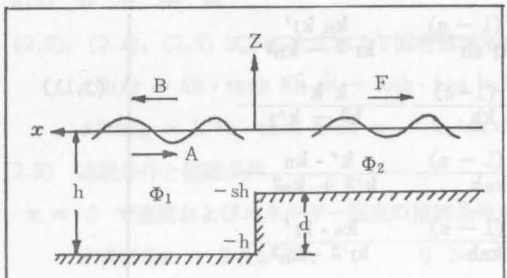


Fig. 1：Definition Sketch

4　実験結果と考察

4.1)　reef 上の波形

reef の先端から 0.3m, 0.6m, 0.9m の各点の計測結果の比較を 図—5.1（a～d）に示す。これらの

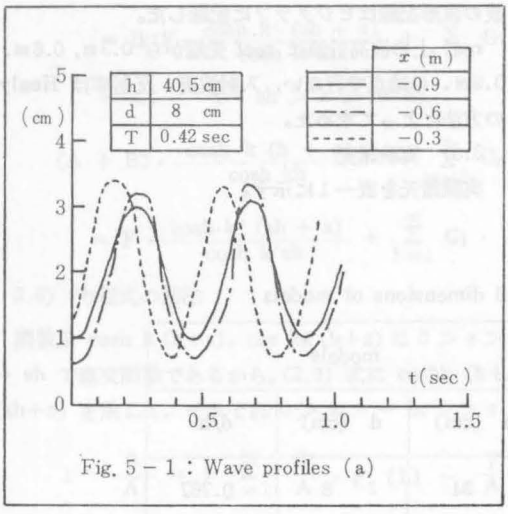


Fig. 5－1：Wave profiles (a)

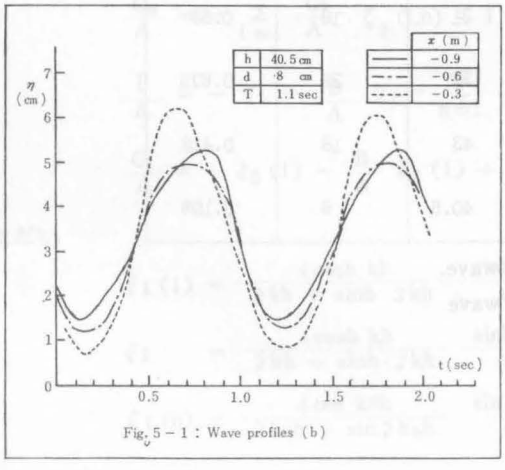


Fig. 5－1：Wave profiles (b)

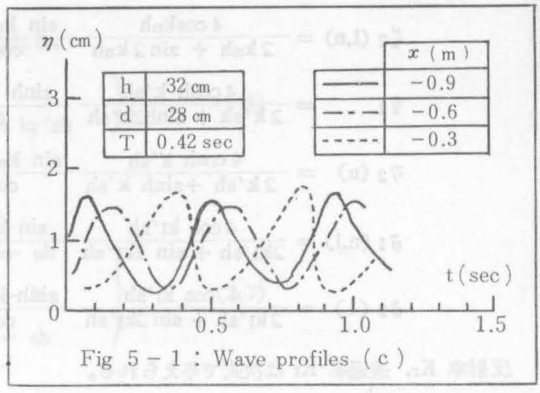


Fig 5－1：Wave profiles (c)

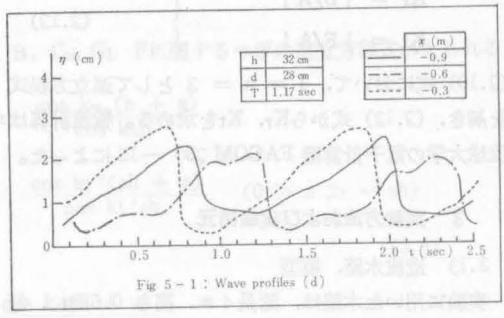
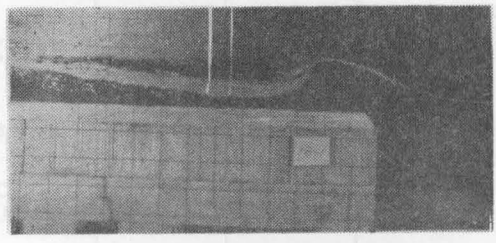


Fig 5－1：Wave profiles (d)

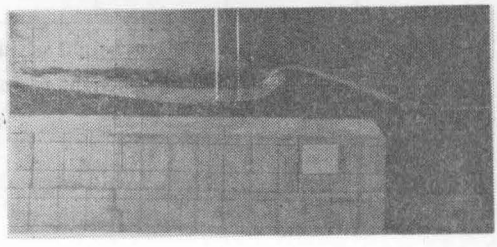
図から T＝0.42sec. の場合は，各点の波形はほぼ類似している。T＞1.0sec. の場合には，x＝−0.3m の点の波高は他のものよりかなり増大する。さらに d/h が1に接近すると各点の波形は砕波状の波形がえられる。これらの結果は，水路延長と波長との関係が影響していることもあるが，境界不連続部の流体の連続性の条件に適用限界があることを示しているとも考えられる。

次に reef 上の波形の進行状況を連続撮影出来るカメラで撮影したものが 図5.1（e～f）である。写真

(1



(2



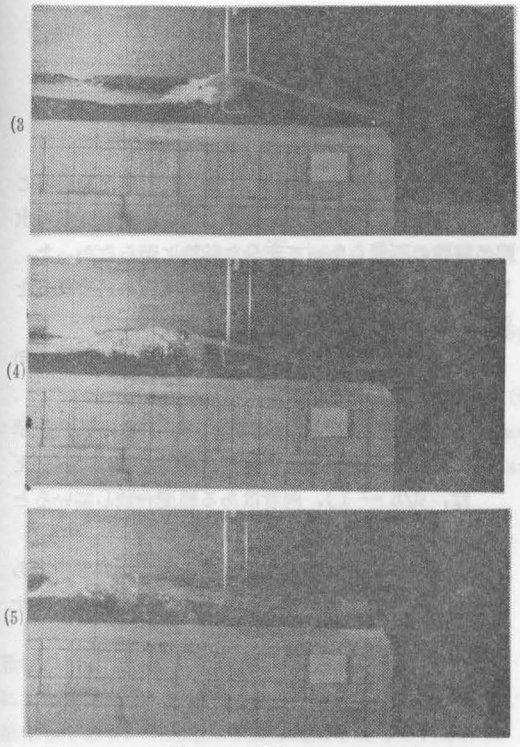
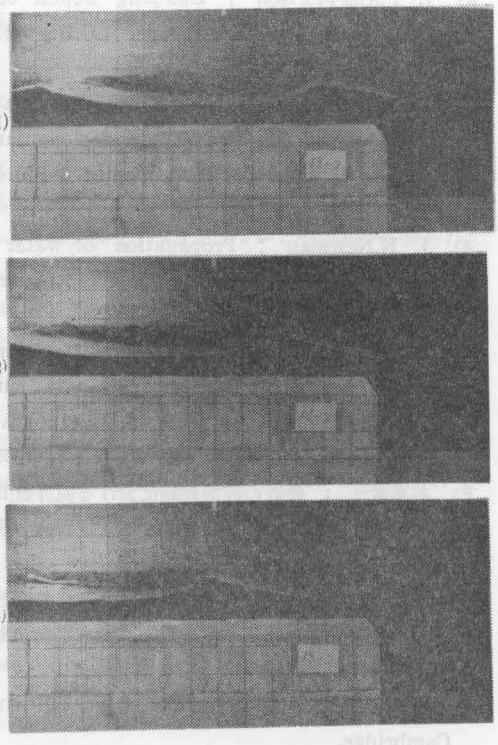


Fig. 5-1 : Wave profiles (e) passing over the reef $\left(\frac{\sigma^2 h}{g} = 2.88,\ \frac{Li}{Hi} = 0.104\right)$



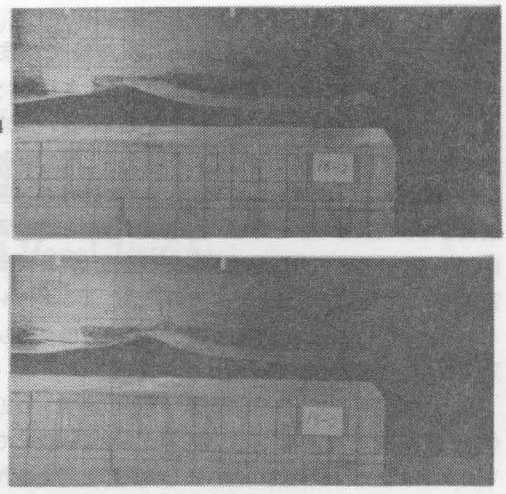


Fig. 5-1 : Wave profiles (f) passing over the reef $\left(\frac{\sigma^2 h}{g} = 2.88,\ \frac{Li}{Hi} = 0.058\right)$

で縦方向の番号 (1), (2) … (5) は撮影の時間間隔（△t = 0.33秒）を示す。いづれも q′ = q″, h = 34*cm*, d = 8 *cm* の場合である。写真 5 — 1 の (e) は沖側の波形勾配が H*i*/L*i* = 0.104 の場合であり，写真 5—1 の (f) は H*i*/L*i* = 0.058 の場合である。写真によると波形勾配がある限界を越すと波は砕波して波高は減少することがわかる。

4.2) 反射率 (Kr) と透過率 (Kt)

a)：図 — 5.2 には Kr と Kt の実験値と Lamb[2)]

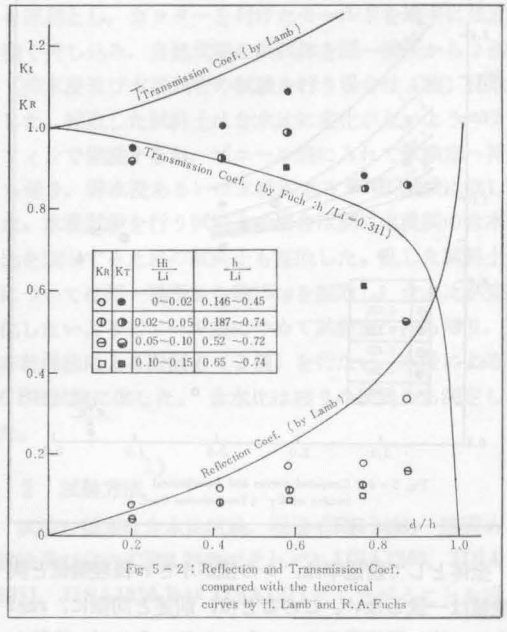


Fig 5 - 2 : Reflection and Transmission Coef. compared with the theoretical curves by H. Lamb and R. A. Fuchs

による理論値が示してある。Lamb の理論では波長が水深に対し充分長い場合に有効であるとされている。[5] 図－5.2 においても○と●印（波長が長い）が他に比較して理論値に近づいており，上述と同じ傾向を示す。しかし，全体として d/h が1に近づくと理論値とは相当異なる。とくに，透過率は理論と逆の傾向になっている。このことは入射波の特性（例えば波形勾配）によっては reef上 の波の砕波によるエネルギー逸散や，Lamb の理論曲線は[8] 長波の場合のみ適用出来ることなどが考えられる。

b)：(2.12) 式による数値計算結果と実験値との比較を 図－5.3, 5.4 に 示す。両者はあまり一致していないが，ただ，傾向的には一致していると考えられる。

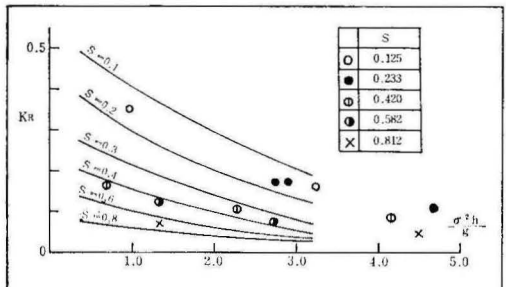


Fig. 5－3：Computed curves and experimental results on K_R (Reflection Coef.)

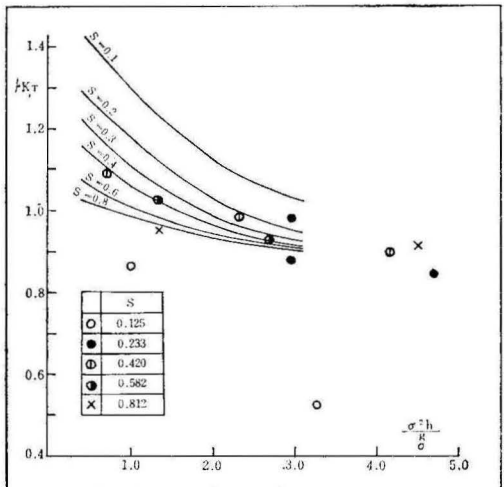


Fig. 5－4：Computed curves and experimental results on K_T (Transmission Coef.)

全体として透過率は，s の値が小さい程理論値と実験値は一致しない。このことは，前述と同様に，reef 上での波の砕波現象や reef によるエネルギー逸散と密接な関係があると思われる。

5 結　び

以上，Step 形状の reef による反射率と透過率について理論値と実験値とを比較したが，当研究室の水路の施設の不備もあって充分な結論に至らなかった。しかし，全体的な把握は出来たと考えられ，それらを要約するとつぎのようになる。すなわち，

(1) ポテンシャル理論の適用限界に関し，概略の知見がえられた。

(2) 理論と実験結果は全体的に予想される傾向を示していること，および特別な条件を除けば（例えば，d/h ≈ 1），両者はある程度一致していると考えられる。

最後に，本実験に対し琉球大学土木工学科学生である比嘉哲夫君の助力があったことを付記し謝意を表する。

References

1) Ursell, F ; Estuary and coastaline hydrodynamics: Ippen editor, Mc-Graw Hill,

2) J. Fuchs-Morison ; Damping action of submerged breakwaters, Trans. A.G.U., vol. 32, No.5, 1951

3) Chiang C. Mei and Jared L. Black : Scattering of surface waves by rectangular ofstacles in waters of finite depth, J. Fluid Mech. (1969), vol. 38, part. 3

4) J. N.Newman : Propagation of water waves over an infinite step, J. Fluid Mech. (1965), vol. 23, part. 2

5) K. Takano and H. Nakazawa ; Effet dun obstacle de parallèlèpipède rectandle sur la propagation de la houle, J. Oceanographical Socity of Japan, vol. 23, No.5, 1965

6) 井島武士 ； 最近の波浪理論における境界値問題の解法，1971年度水工学に関する夏期研修会講議集，1971.7，土木学会水理委員会

7) 日野幹雄，山崎丈夫 ； 鉛直板による波の反射率，透過率およびエネルギー逸散，土木学会論文報告集，No. 190，1971. 6

8) H. Lamb ; Hydroclynamics, 6 th, Edition, Cambridge.