

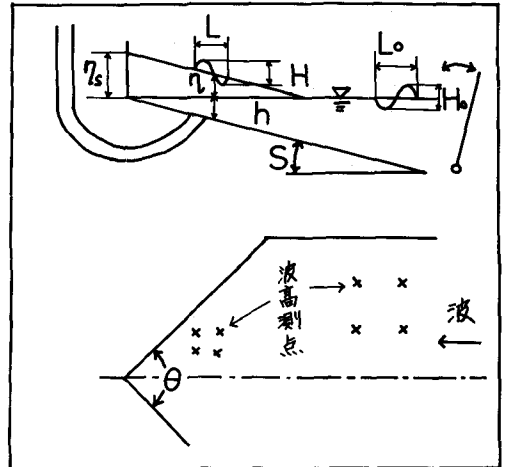
護岸と防波堤によって囲まれる隅角域の波高分布とWave set up について

北大工	正員	佐伯 浩
北大工	学生員	○住田 徹
北大工		小野敏行
北大工	正員	岸崎 晃

1)はじめに

昭和47年11月30日から12月1日にかけて、礼文島の香取港においては、低気圧による暴風が継続し、波浪のため防波堤背後地に多大な損害を与えた。この香取港の北防波堤の堤脚部の水深は、通常±0～-0.5メートル程度であり、生起しうる波高はきわめて小さなものとなるはずである。北防波堤の天端高は、約4メートルであり、この防波堤を波が越波するためには、堤体前面にかなりの量の水位上昇があったと考えられる。低気圧による吸い上げ、潮位、風による吹き寄せ、波の集中などを考慮しても、Radiation stressによる、かなりの量の水位上昇(Wave set-up)が考えられる。Radiation stressによる平均水位の変化と理論的考察ならびに実験は、これすべしといっている。Longuet-Higginsらは、斜面上を進行する波では、破波点より沖側では平均水位の低下(Set-down)を理論的に明らかにし、破波後の平均水位の上昇(Set-up)は、Bowen が明らかにしている。Saville, 豊島、佐伯らは理論値と実験値が良く一致することを実験により示している。しかしこれらはいずれも水路中一定の二次元水槽における結果である。通常、防波堤法線と海岸護岸は、 $90^\circ \sim 120^\circ$ の角度をなす。我々の実験は、このような隅角域内においての平均水位の上昇を実験的に求めたものである。隅角域内においては、反射、屈折等の影響が顕著で、波高はばらつきが大きく、そのため、波高分布はきわめて複雑となる。しかし、等波峰線図を描くことによりある程度の波高分布を予測することが可能である。隅角域内での水位上昇に関しては、波高分布が複雑なため、波の進行方向に直角な断面をとり、各断面の平均波高を採り、各断面の波高を代表させて議論を進めた。

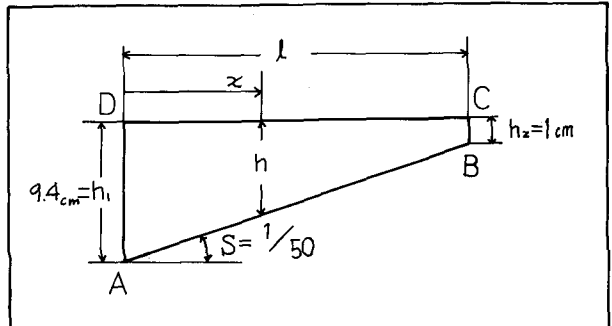
Fig-1



2)実験装置および測定

実験装置をFig-2に示す。実験は、平面水槽(10.95M×7.35M×0.50M)を使用し、水槽内に角形鋼管、木材で骨組みを造り、耐水ベニヤを張り海底とした。また、海底に垂直にベニヤを立て、海岸護岸防波堤とし、双方とも波の進行方向に対称のかたちとした。波高測定は、抵抗線式波高計を使用し、測点は隅角域内240cm間隔、汀線近傍では20cm間隔と密に行った。平

Fig-2



均水位の測定には、版(海底)の中心線上に20cm間隔に穴をあけ、各点からビニールパイプを水槽外に伸ばし鉛直に立て測定を行った。なお、ビニールパイプの長さを十分にすることにより、ダンピングの効果で、実際の水面変動は数センチであつたにもかかわらず、数ミリのオーダーに水位上昇の振動を減少させることができた。沖波波高に関しては、造波板近傍において、反射、屈折等の影響を受ける以前の波高を測定し、その数ヶ所の測定の波高を平均し沖波とした。

記号を以下に示す

H:波高, L:波長, h:水深, H₀:沖波波高, L₀:沖波波長, S:海底勾配, θ:海岸護岸と防波堤法線とのなす角度, η:平均水位の上昇高, η_s:防波堤堤脚部の平均水位の上昇高, H_{av}:断面の平均波高, T:周期

実験は、隅角θは90°と120°の2種類、海底勾配はS=1/15, 1/30, 1/50の3種類について行い、周期T=1.64, 1.31, 1.00, 0.86秒の4種についてそれぞれ2回ずつ測定を行った。

3) 等波峰線図

Fig-2は中心線を小さくした断面であり、h₂は防波堤の堤脚水深, h₁は最も沖側の水深である。ABは海底, DCは静水面を示す。D点よりXセンチの位置にある水深をhとすると長波の波速で近似すると、波速Cは、

$$C = \sqrt{g h} \quad (1)$$

$$t = \int_0^x \frac{dx}{C} \quad (2)$$

図より

$$h = h_1 - S x \quad (3)$$

これより

$$t = - \int_{h_1}^h \frac{1}{\sqrt{g h}} \cdot \frac{1}{S} dh$$

これを2

$$h = h_1 - 2t \cdot \frac{S \sqrt{g h_1}}{2} + t^2 \left(\frac{S \sqrt{g}}{2} \right)^2$$

これより、t秒後の波の位置xは、

$$x = - \frac{g S}{4} t^2 + \sqrt{g h_1} t \quad (4)$$

となる。

いま、S=1/50, T=1.00秒, θ=90°の場合を考えると、g=980cm/sec², h₁=9.4cm, h₂=1.0cmとなり、(4)式にそれぞれ値を代入し、t秒後

Fig-3

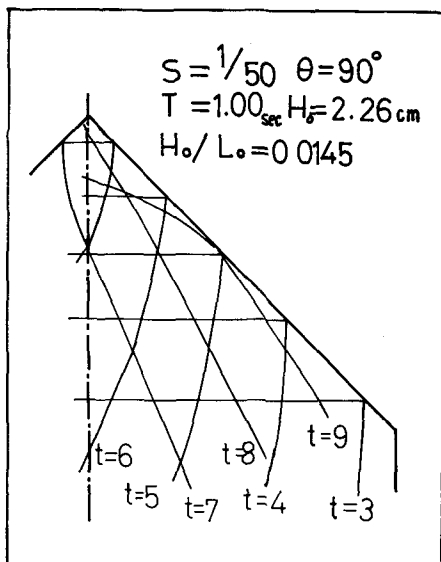
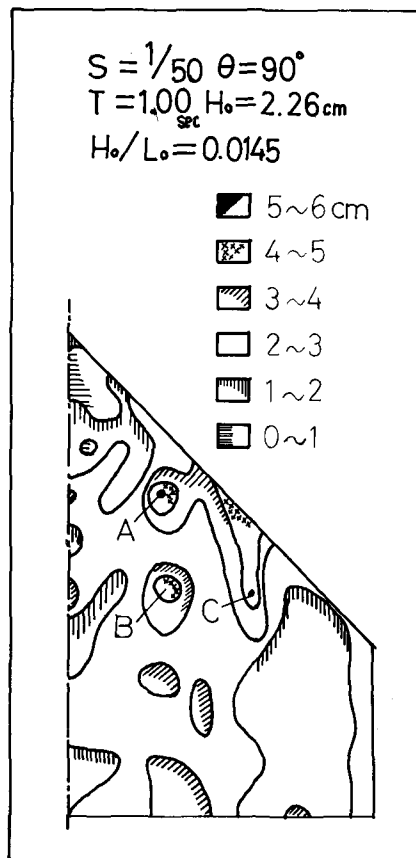


Fig-4



の波の位置を求め、それらの軌跡を結んだものがFig-3の等波峰線図となる。ただし、この場合、 $\theta = 90^\circ$ であるため、反射後の波は進行波と直交し、波速 C は水深 h に關しては一定値 $\sqrt{g h}$ となる。

4) 波高分布について

隅角域内の波高分布は、さきめて複雑である。Fig-4からみさうかなように、沖波波高と同程度の波高を有する領域がもっとも大きく、なかに数ヶ所ではあるが沖波波高の2〜3倍の波高を有する部分がある。A点、B点、C点がその代表例であるが、Fig-3の等波峰線図を描くことによりある程度の予測が可能である。例えば、A点に関しては、 $t = 4$ 秒の進行波と $t = 5$ 秒の右側からの反射波、および $t = 8$ 秒の左側からの反射波の3波が影響しあい大きな波高が生じたものと考えられる。B点においては、 $t = 5$ 秒、 $t = 7$ 秒、 $t = 3$ 秒の3波が重なりあつた点と考えられる。C点は、 $t = 3$ 秒、 $t = 4$ 秒、 $t = 8$ 秒の波が重なりあつた点と考えられる。

5) 平均波高について

隅角域内においては、反射、屈折の影響が大きく、数々の実験においては、波の進行方向ばかりでなく、各断面内においても波高の値は、ばらつきが大きい。そのため理論的な取りあつかいが困難である。そこで、波の進行方向に直角な断面をとり、各断面で波高を単純平均しその断面の波高として代表させ議論を進めた。Fig-5からみさうかなように、平均波高の変化は、隅角域外では、水深が浅くなるにしたがって波高が増大する。これはLinear theoryのShoalingとよく一致する。なお、 H_T は係外振中波の理論値をあらわし、中心線上での破波点B.P.で示す。平均波高の変化で最大値を示す点は、反射、屈折する以前の波の破波点とは一致しているが、現実には必ずしもこの点で破波しているわけではなく、解析のための必要な仮想の破波点と考えて良い。なお、 $S = 1/15$ の実験においては、明確な破波は見られず、反射波の影響がさきめて大きく、反射波と進行波とが干渉しあい、中心線上において、重

Fig-5

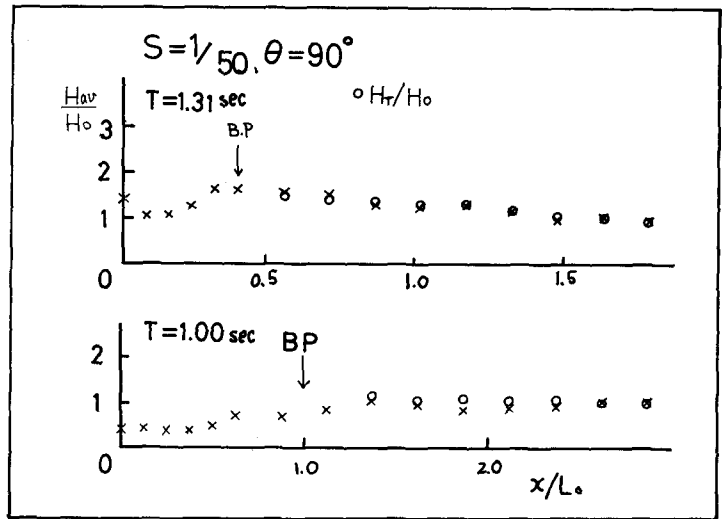


Fig-6-(P)

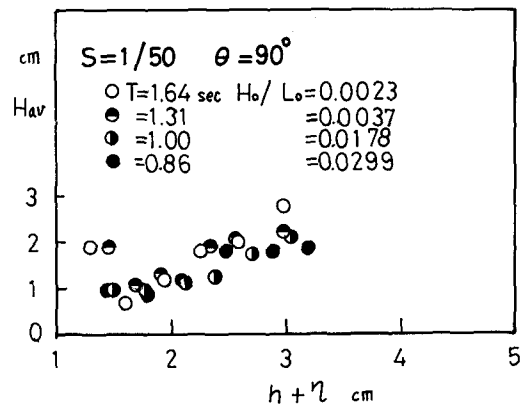
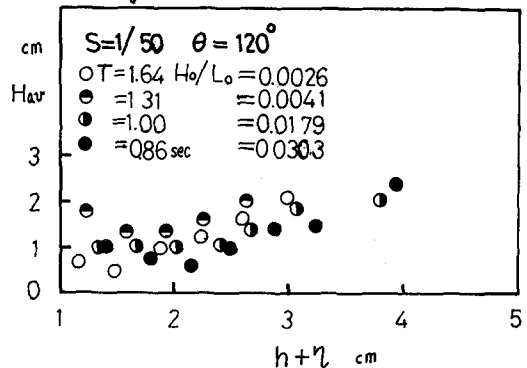


Fig-6-(I)



複数的な破波が見られ。

6) 平均水位の上昇について

潮水波が斜面上を進行する際、波の波長がしだいに短くなり、波形勾配は大きくなり破波する。しかし、破波後も波高の減少とともにいながら進行をつづける。平均水位の変化と理論的な考察に関しては、これまで種々の研究、実験がなされてきている。Longuet-Higgins と Stewart は、Radiation stress と平均水位の差によって生じる圧力差が釣り合うことにより、破波点より沖側では破波点に近づくにつれて平均水位が低下する (Set-down) を理論的にあきらかにした。Saville, 豊島, 佐伯らは、それぞれ異なる水深勾配において、実験値と理論値とが良く一致することを示している。また、破波後の平均水位の上昇 (Set-up) については、Bowen が Longuet-Higgins らの理論を応用して式を導いている。

まず、破波後の波高の変化を次式のように仮定する。

$$H = \gamma (h + \eta) \quad (5)$$

ここで、 h : 静止水深, η : Radiation stress による静止水面より平均水面までの Set-up の量, H : 静止水深 h の点の波高, γ : 係数である。

Radiation stress と圧力差とが釣り合うことにより平均水面が勾配を有し、Set-up の現象が生じるから次式を得る。

$$\frac{d\eta}{dx} = -K \frac{dh}{dx} \quad (6)$$

ただし、 K は次式で示される。

$$K = \frac{1}{1 + \frac{8}{3f^2}} \quad (7)$$

数々の実験においては、破波後の平均波高 H_{av} と平均水深 ($h + \eta$) の関係は、可線近傍をのぞいて Linear な関係が見られ、(5) 式の仮定を満足している。これを Fig-6-(ア) ~ (エ) に示す。

平均水位の上昇量 η と静止水深 h の関係を Fig-7-(ア) ~ (エ) に示す。実験諸元は Fig-6-(ア) ~ (エ) と同じである。これより、 K の値は、同一の θ であれば、 θ が小なる程、 K は大となり、沖波波形勾配 (H_0/L_0) には無関係である。このことは、水路

Fig-6-(ア)

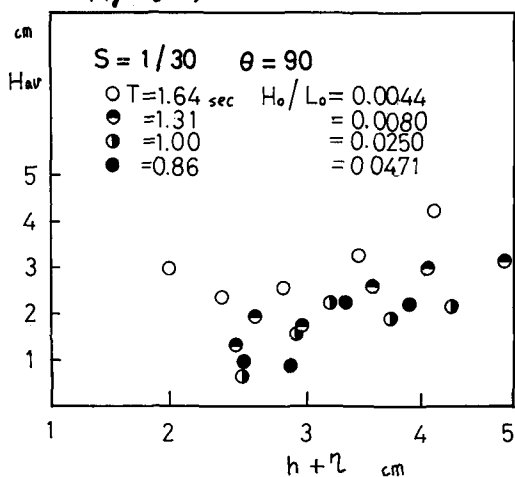


Fig-6-(イ)

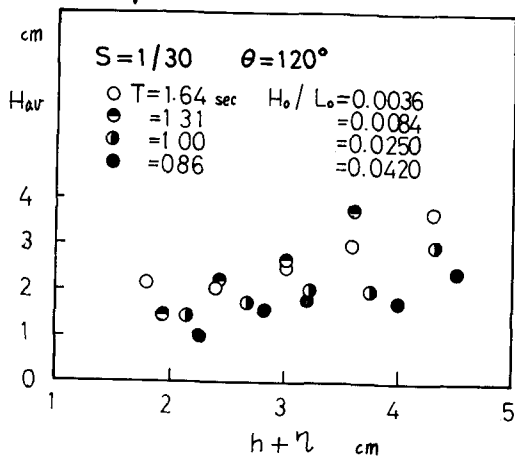


Fig-7-(ア)

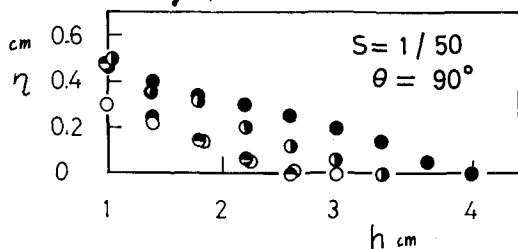
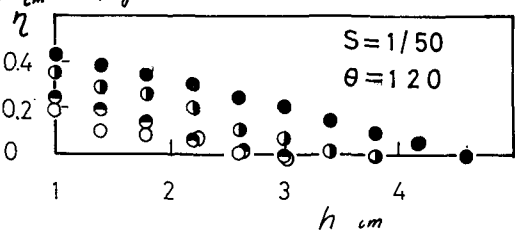


Fig-7-(イ)



中一定の二次元水槽 ($\theta = 180^\circ$) の場合と良く一致する。同一の θ であれば、 δ が大なる程、 K の値も大となる。 K の値については、 $\theta = 120^\circ$ の場合、 $\delta = 1/50$ で、 $K = 0.13$, $\delta = 1/30$ で、 $K = 0.15$, $\delta = 1/15$ で、 $K = 0.21$ となり、 $\theta = 90^\circ$ の場合は、 $\delta = 1/50$ で、 $K = 0.18$, $\delta = 1/30$ で、 $K = 0.19$, $\delta = 1/15$ で、 $K = 0.25$ との結果を得た。Fig-9 は、 K と δ の関係であるが、各 θ に関して linear な関係が見られる。これも、 $\theta = 180^\circ$ の場合と良く一致する。直線は二次元水槽の場合であるが、佐伯らの実験の結果では次の関係が示されている。

$$K = 3.85\delta + 0.015$$

ただし

$$\frac{1}{90} \leq \delta \leq \frac{1}{12}$$

$$0.006 \leq H_0/L_0 \leq 0.05$$

である。

$\theta = 180^\circ$ の場合と比較して、 $\theta = 120^\circ$, 90° とは勾配がなだらかであるが、これは、反射の影響によるものであると思われる。

Fig-7 より得た K と、Fig-6 より得た η の関係を Fig-10 に示す。これより、隅角域を有する水面においては、(7) 式は満足せず、Fig-6 より得た η はより大きな K の値を与える。

7) 防波堤取付部における水位上昇

平均水面の勾配を示す式 (6) を積分し、 $h=0$ の時、 $\eta = \eta_s$ とすると、

$$\eta = -Kh + \eta_s \quad (8)$$

となる。この式より、 η_s が求まれば、

水深 h の水位上昇量 η が求まる。 (η_s/H_0) と (H_0/L_0) の関係を Fig-11 に示す。これより、 (η_s/H_0) の値は、ほぼ一定値をとり (H_0/L_0) には無関係である。 (η_s/H_0) の値は、 $\delta = 1/50$ では、 $\theta = 90^\circ$ で、 $(\eta_s/H_0) = 0.23$, $\theta = 120^\circ$ で $(\eta_s/H_0) = 0.20$, $\delta = 1/30$ では、 $\theta = 90^\circ$ で、 $(\eta_s/H_0) = 0.25$, $\theta = 120^\circ$ では

Fig-7-(ウ)

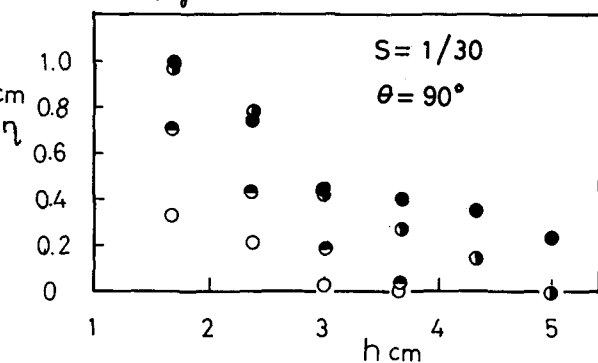


Fig-7-(エ)

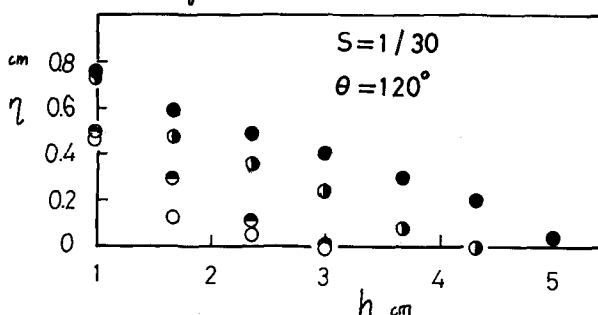


Fig-8

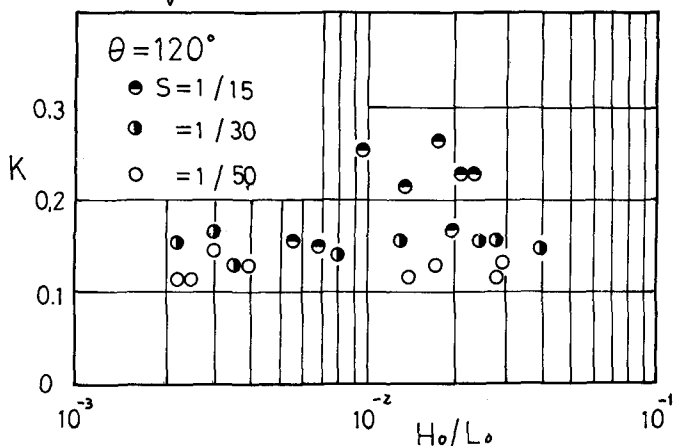
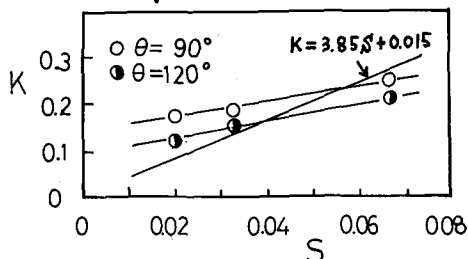


Fig-9



$(\eta_s/H_0) = 0.22$ 。 $S = 1/15$ では、 $\theta = 90^\circ$ で $(\eta_s/H_0) = 0.65$ 、 $\theta = 120^\circ$ で $(\eta_s/H_0) = 0.40$ となる。これを Fig 12 に示す。これより同一の θ の場合、 S が大なる程、 (η_s/H_0) も大となり、同一の S の場合、 θ が小なる程 (η_s/H_0) は大となる。以上の結果より、沖波の波長 L_0 と波高 H_0 ($L_0 = gT^2/2\pi$) が与えられれば、 η_s が求まる。また、 S と θ が与えられれば、 K が実験値より得られるので、平均水位の上昇量 η の式が求まる。

8) 現地への適用

香茅港において、被害当時の沖波は、SMB法によりおのらわれているが、 $H_0 = 6.5M$ 、周期 $T_0 = 10$ 秒である。また、香茅港の北防波堤と海岸護岸とのなす角は、 $\theta \approx 120^\circ$ である。同港の海底勾配 S は、範囲のとり方により異なるが、 $S = 1/30 \sim 1/50$ である。波形勾配 (H_0/L_0) と S と θ が与えられているので、 K と η_s を決定することが出来る。

香茅港の海底勾配 $S = 1/30$ 、 $\theta \approx 120^\circ$ とすると、Fig-9より $K = 0.15$ が得られる。また、 $(H_0/L_0) = 0.0416$ 、Fig-11より、 $\eta_s/H_0 = 0.23$ 以上あり、 $\eta_s = 0.23 \times 6.5 = 1.50M$

実験値から香茅港北防波堤の取付部における波浪による平均水位の上昇量は、 $1.50M$ となる。現地の防波堤取付部の水底は、工事基準面になが一致しているの、暴風時の潮位、これまでのべてき Wave set-up、低気圧による吸いあげ、風による吹き寄せ、波の集中等を考慮すれば、天端高 $+4.0M$ の防波堤を波口越えることになる。なお、この時の平均水位の式は次の如くである。

$$\eta = -0.15h + 1.50 \quad (\text{単位: } M)$$

なお、 h はその点の水深である。

我々の実験の適用条件として、引線近傍においての水位は、 $\pm 0M \sim$ 沖波波高の $2 \sim 3$ 割である。本実験は、防波堤取付部が隅角域内にある場合の水位上昇の目安、また、防波堤天端高のある程度の基準と与えるものと思う。

参考文献

- 1) Wave 'Set-Down' and 'Set-up' A.J. Bowen, et.al Journal of Geophysical Res. Vol.73 No.8
- 2) Radiation stress in water waves. M.J. Longuet-Higgins and R.W. Stewart. Deep-Sea Res 1964 Vol. 11

3) 波浪後の波の変形に関する研究 佐伯浩、佐々木幹夫 オ20回 海岸工学講演論文集

4) " " " オ21回 " "

