

円柱に作用する砕波の波力

光 易 恒*・本 多 忠 夫**

1. 緒 言

円柱に作用する波力の問題は、主として石油掘削用プラットフォームの設計等に関連して、1950年代の初めより研究がはじめられ、現在に至るまでにおびただしい研究結果が報告されている^{1)~9)}。しかしながら、これらの研究の大部分は、非砕波領域の波力の解明を対象としたもので、浅海部で変形過程にある波あるいは砕波が円柱に作用して生じる波力の問題に関しては、実際的にはきわめて重要な問題であるにもかかわらず、理論的な取扱いおよび実験計測のむづかしさなどの理由であまり研究が行われていない。浅海部の直立円柱に作用する砕波の波力に関して従来行われた研究の代表的なものとしては、Hall の研究¹⁾、合田・原中・北畑の研究²⁾、さらに最近の合田・池田・笹田・岸良の研究³⁾があげられるにすぎず、この問題に対しては現在のところまだ十分な解決は得られていない。

本研究は、砕波点を含む浅海部に直立した円柱に作用する波力の特性を実験的に調べたものである。動的応答特性のはっきりした測定系に取付けられた円柱を、実験水槽の一樣水深部ならびに砕波点を含む傾斜水底上（勾配 1/15）の所定の水深に設置し、砕波形式を支配する沖波波形勾配を変化させて、この円柱に作用する全水平波力の測定を行なった。この実験の結果、浅海部で変形過程にある波が円柱に及ぼす波力の特性ならびに砕波による最大波力の大きさおよびその発生水深と、これらに対する来襲波の波形勾配および水底勾配の影響等を明らかにすることができた。

2. 実験方法

(1) 実験水槽および実験波

実験は、図-1に示されたような造波水槽（幅：0.6

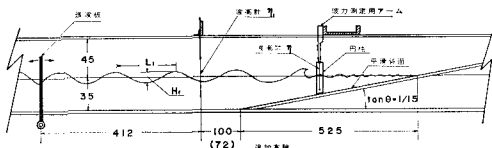


図-1 実験水槽（単位 mm）

m, 水深：0.35 m, 長さ：13.4 m) において、単一周期の規則波を使用して行なわれた。造波機と反対側に勾配 1/15 の不透過で平滑な斜面板を設け、浅海部に対応させた。

実験波として、最初次表の諸元の波を選んだ。

A	H_0 (cm)	D/H_0	T (sec)	H_0/L_0
	10.0	0.48	1.13 1.46 1.80	0.05 0.03 0.02

B	H_0 (cm)	D/H_0	T (sec)	H_0/L_0
	5.0	0.96	0.80 1.03 1.27 1.80	0.05 0.03 0.02 0.01

しかしながら、波高 $H_0=5$ cm の波は、発生する波力が小さく精度が悪いこと、特に波形勾配 $H_0/L_0=0.01$ の波は不安定であるなどの理由で、これらの波を用いた実験は途中より中止し、後半は A 群の 3 種類の波により実験を行なった。沖波波高 H_0 および波長 L_0 は、実験水槽の一樣水深部における波高および周期の測定値より微小振幅波理論を適用して計算したものである。

砕波形式は、周期 $T=1.13$ sec の波はくずれ波型、 $T=1.46$ および 1.80 sec の波は巻波型であった。 $T=1.46$ sec の波が最も沖側で砕波が始まった。 $T=1.80$ sec の波は、砕波水深が従来の実験曲線（たとえば、Iversen）で予期される水深に比較し浅かったが、これは実験水路が短いので波がまだ定常状態に達しない傾向があること、反射波の影響を受けやすいことなどにより、波が不安定であったことに原因するものと考えられる。

(2) 波力の測定法

波力の測定系は、硬質ビニールの円形パイプ（直径 $D=4.8$ cm）を鉄製の波力測定用アームに取付け、このアームを図-1に示されたように実験水路の上部に固定した溝型鋼に取付けたものより構成されている。半導体ゲージが貼付された波力測定用アームは小および中アームと名づけられた 2 種類のものが用意され、このうち、波力が比較的小さい非砕波領域の波力の測定には、ひずみ量が大きく出る小アームが使用され、衝撃力の生じる砕波点を含む領域の測定には、固有振動数の高い中アームが使用された。非砕波領域の波力の測定においては、波

* 正会員 理博 九州大学教授 九州大学応用力学研究所
** 正会員 九州大学助手 九州大学応用力学研究所

力および波は動ひずみ計から直接電磁オシログラフに記録された。砕波領域の波力の測定においては、衝撃波力を忠実に記録するためと、後のデータ処理を容易にするために、動ひずみ計の出力を一度データ・レコーダにテープ速度 30 in./sec で記録したあと、今回の処理では、このテープを 6 in./sec で再生し、遮断周波数 $f_0=5.6$ Hz のローパス・フィルタを通してペン書オシログラフに記録した。このことは、テープ速度の変換比を考慮すると、実際には $f_0=28.0$ Hz のフィルタを記録波形にかけたことになる。

(3) 波力測定系の周波数応答

砕波による衝撃的波力のようにきわめて速い時間的変動をする力を正確に測定するには、十分応答特性のよい測定系を使用する必要がある。小アームと円柱で構成される系は、非砕波領域の波力の測定に使用されたので、その応答特性はほとんど問題とはならない。中アームと円柱で構成される系は、砕波領域における衝撃的波力の測定に使用されるので、十分高い応答特性が要求される。しかしながら、測定精度の関係上、応答特性を十分なものとすることはできなかったため、測定結果の精度を判定するため、その応答特性を詳しく調べた。

まず、円柱を波力の測定時と同様に各測点に固定した状態で、系の振動特性を調べた。その結果、系の固有振動数 f_N は 65~90 Hz、減衰定数 β は 0.0198~0.0327 であることがわかった。波力測定系を2階型の振動系で近似し、上記の振動特性をもとにして周波数応答関数を計算した。その一例が図-2に示されている。

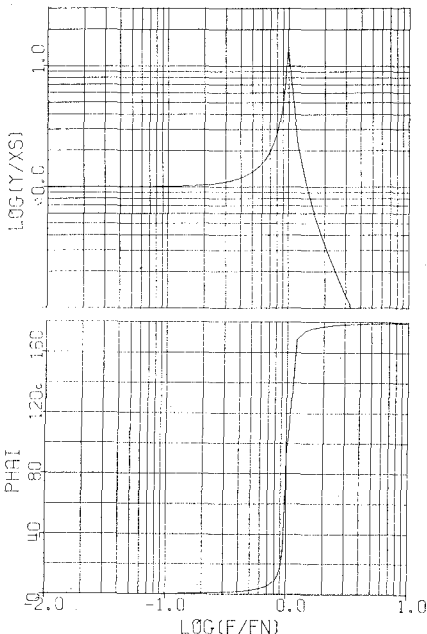


図-2 波力測定系の周波数応答 (水深 $h=13$ cm)

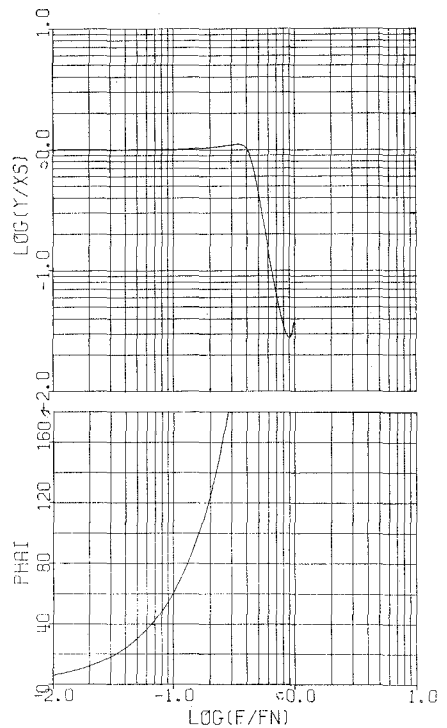


図-3 測定系の総合周波数特性 (水深 $h=13$ cm)

減衰定数が非常に小さいので、周波数応答の振幅特性は系の固有振動数のところで鋭い大きなピーク値をもっている。この共振点でのピーク値をさげるために、砕波領域の波力の測定においては、遮断周波数 $f_0=28.0$ Hz のローパス・フィルタを用いた。このフィルタを組合わせた系の総合周波数特性をはっきりさせておくため、記録計その他の応答は完全なものとみなして、(測定系)+(フィルタ)の周波数特性を計算した。計算結果の一例が図-3に示されている。これらの結果をみると、振幅特性はフィルタの遮断周波数位までは一応フラットとみなすことができる。位相遅れは少しみられるが、これは、砕波による衝撃力の最大値の測定にこの実験の目的がおかれているので、波力の時間的変動の中に高調波成分が含まれていないならば、あるいは含まれていてもそのパワーが小さければ、それほど問題とはならないであろう。

ただ、ここで注意しておかなければならないことは、今回われわれが使用した波力の測定系は、その特性がはっきりしているとはいえ、必ずしも十分な応答特性を有しているとはいえない点である。衝撃的波力の測定値は、測定系の応答に著しい影響を受けるので、今回測定された波力の絶対値の解釈に関しては、上記のような点を考慮する必要があるであろう。

3. 円柱に作用する波力の無次元表示

測定された全水平波力は次式のような形に無次元化され、

$$\hat{F}_m = F_m / \rho g D^2 H_0 \dots\dots\dots (1)$$

$$\hat{F}_m = F_m / \rho g D H_0^2 \dots\dots\dots (2)$$

ρ : 水の密度, g : 重力加速度

F_m : 円柱に作用する水平波力の極大値

これらの無次元波力が無次元水深 h/H_0 の変化に応じて、どのように変化するかを実験的に調べた。その際、比較のため Morison の式⁴⁾をもとにして微小振幅波理論より計算される無次元波力を求め、実測される無次元波力がこれとどのように一致し、あるいはどのようにはずれていくか調べた。波力の計算式としては、微小振幅波理論より求められる水平速度 u および加速度 $\dot{u}$ を Morison の式に代入し、さらに抵抗係数 C_D および慣性係数 C_M を一定と仮定して、抗力と慣性力の和を水底から波面 η まで積分して求められる次式を使用した。

$$F = F_D + F_I$$

$$F_D = C_D \frac{\rho g D a^2}{2} \cdot \frac{kh}{\sinh 2kh} \times \left[\frac{\sinh \{2kh(1+\eta/h)\}}{2kh} + (1+\eta/h) \right] \times |\cos \sigma t| |\cos \sigma t| \dots\dots\dots (3)$$

$$F_I = -C_M \frac{\rho g \pi D^2 a}{4} \cdot \frac{\sinh \{kh(1+\eta/h)\}}{\cosh kh} \times \sin \sigma t \dots\dots\dots (4)$$

h : 水深, η : 波面の高さ $a = H/2$,

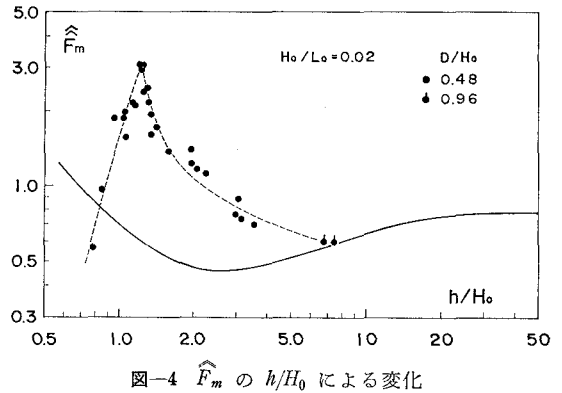
$k = 2\pi/L$, $\sigma = 2\pi/T$

4. 実験結果および考察

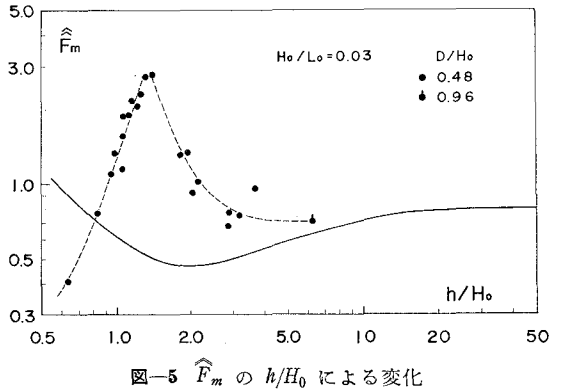
(1) 波力の測定結果

実測された無次元波力 $\hat{F}_m$ の h/H_0 および H_0/L_0 に対する変化ならびに、微小振幅波理論による値との比較は図—4, 5 および 6 に示されている。ここで、特に $\hat{F}_m$ を使用したのは次のような事情によるものである。一様水深部のデータの一部分に、波高 5 cm, したがって $D/H_0 = 0.96$ のデータが使用されているが、これは残りの大部分のデータ (波高 10 cm, したがって $D/H_0 = 0.48$) とは D/H_0 を異にするので、本来別図に示すべきである。しかしながら、式 (3) および式 (4) より推定されるように、 $\hat{F}_m$ は慣性力が卓越する場合には H_0/L_0 および h/H_0 によってほぼ一義的に決まり、 D/H_0 には無関係となる。今回の実験条件では、一様水深部では $D/H_0 = 0.48$ の場合においても慣性力が卓越するので、 $\hat{F}_m$ を使用すれば、近似的に D/H_0 に無関係となる。事実、測定データはつじつまのあった傾向を示している。

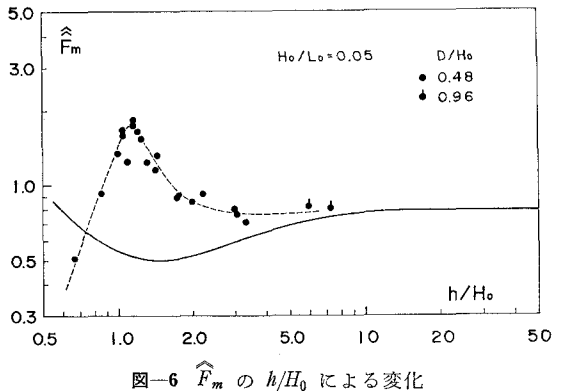
図—4, 5 および 6 をみると、 $h/H_0 \approx 6 \sim 7$ 倍、すなわ



図—4 $\hat{F}_m$ の h/H_0 による変化



図—5 $\hat{F}_m$ の h/H_0 による変化



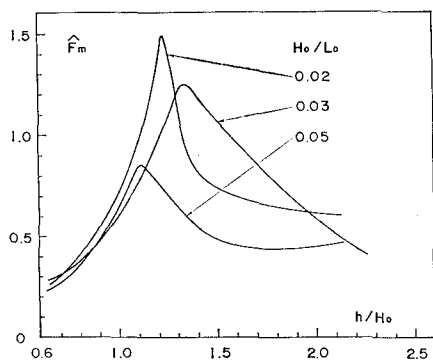
図—6 $\hat{F}_m$ の h/H_0 による変化

ち沖波波高の 6~7 倍程度の水深では、微小振幅波理論および Morison の式を適用し、さらに $C_D = 1$ および $C_M = 2$ と仮定して計算した波力と実測波力とは比較的よく一致しているが、これより浅海部においては実測値が理論値からはずれていくことがわかる。この Morison の式の適用限界水深は波形勾配によって変動するが、今回の実験の範囲内では、沖波波形勾配が大きいくほど小さくなる傾向がみられる。無次元波力 $\hat{F}_m$ は、無次元水深 h/H_0 の減少とともに急速に増大し、 $h/H_0 \approx 1.2 \sim 1.4$ において極大値に達し、そこでは、微小振幅波理論で計算された値の 4~5 倍となる。この点をすぎると $\hat{F}_m$ は

h/H_0 の減少とともに急速に減少する。

図—4, 5 および 6 の各曲線のピーク付近にある特異点 ($h/H_0 \approx 1.1$ 付近) は本実験で新たに見出されたもので, plunging point の直前の位置に対応している。この水深においては, 砕波により水粒子は斜め下方に突込んでいるので, 鉛直下方の波力が増大し, 水平波力はむしろ減少したものと考えられる。

他の研究者のデータと比較するために, 式(2)で定義した無次元波力 $\hat{F}_m$ が, H_0/L_0 をパラメータとして, まとめて図—7 に示されている。ただし, この図においては図の幅狭をさけるため, 個々の測定値は省略され各平均曲線のみが示されている。



図—7 $\hat{F}_m$ の h/H_0 による変化

(2) 最大波力発生水深ならびに最大波力を支配する要素

以前, 筆者らの一人⁵⁾ は, 傾斜水底上に固定された直立壁に作用する波力の測定を, 今回の実験に類似した方法で行なって, 波力の水深による変化, ならびに波力と波形勾配および水底勾配との関係などを明らかにした。そして最大波力発生水深 h_M に関して, 水底勾配 $\tan \theta = 1/50 \sim 1/10$ の範囲で次のような実験式を得た。

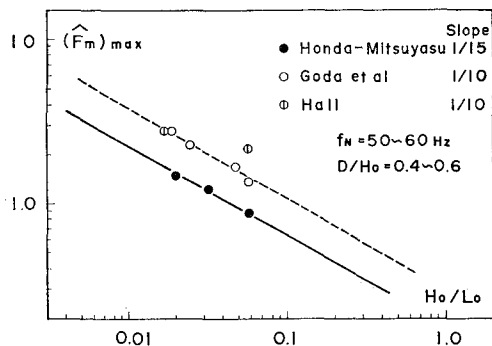
$$(h_M/H_0) = C_m (H_0/L_0)^{-1/4} \dots \dots \dots (5)$$

$$C_m = 0.59 - 3.2 \tan \theta \dots \dots \dots (6)$$

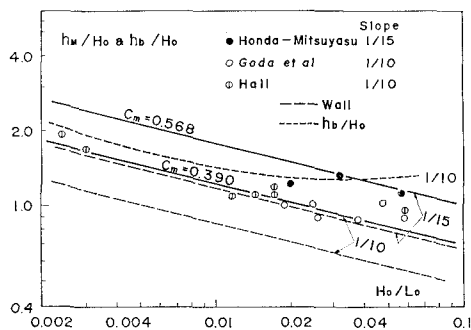
図—7 にまとめて示された今回の直立円柱に作用する波力の結果も直立壁に作用する波力と非常に類似した性質を示している。すなわち, 無次元波力 $\hat{F}_m$ は, 波が深海部より浅海部に進んでくるとしだいに増大し, 砕波点に近い水深で最大値をとり, その無次元波力の最大値は沖波波形勾配が小さいほど大きい。水深がさらに減少すると無次元波力は急速に小さくなる。

われわれの今回の実験は水底勾配が $1/15$ の場合に限られているので, 無次元最大波力 $(\hat{F}_m)_{\max}$ ならびにその発生水深 h_M/H_0 に対する水底勾配の影響を調べるために, Hall²⁾ および合田⁵⁾ の実験データを使用した。これらの実験データでは, 波に関しては周期および砕波波

高のみが与えられ, 沖波波形勾配が与えられていないので, 砕波指標を使用して逐次近似法で H_0 を算定した。図—8 はこれらのデータを使用して, $(\hat{F}_m)_{\max}$ と H_0/L_0 および $\tan \theta$ との関係調べたものである。ただし, 衝撃的波力のピーク値は, 波力の測定系の応答特性によって影響を受けるので, 固有振動数はもとより減衰特性も一致した場合のデータが望ましいが, このようなデータは得られないので, 固有振動数のみが概略一致するデータを選んで使用した。



図—8 $(\hat{F}_m)_{\max}$ と H_0/L_0 との関係



図—9 h_M/H_0 と H_0/L_0 との関係

図—8 に示された結果より, 無次元最大波力が沖波波形勾配の増大と共に減少すること, 水底勾配の増大と共に増大することなどがわかる。実験データが少ないこと, 合田および Hall の波力測定系の応答はわれわれのものとは若干異なっていることなどを考慮すると, それほど精度の高いものとはいえないが, 図—8 の結果より円柱に作用する無次元最大波力 $(\hat{F}_m)_{\max}$ に関する実験式をつくると次式が得られる。

$$(\hat{F}_m)_{\max} = 0.18 (H_0/L_0)^{-0.55} \quad (\text{水底勾配 } 1/15) \dots \dots \dots (7)$$

$$(\hat{F}_m)_{\max} = 0.30 (H_0/L_0)^{-0.55} \quad (\text{水底勾配 } 1/10) \dots \dots \dots (8)$$

これより, 無次元最大波力がおおざっぱに沖波波形勾配の平方根に逆比例することがわかる。

図-9 は無次元最大波力の発生水深 h_M/H_0 と沖波波形勾配 H_0/L_0 および水底勾配 $\tan \theta$ との関係を調べたものである。この図の中には、以前筆者らの一人⁵⁾により求められた直立壁に作用する波力の無次元最大波力に関する同様な結果が破線で、砕波指標のうち水底勾配が1/10の場合のものが点線でそれぞれいっしょに示されている。われわれの今回のデータのうち、 $H_0/L_0=0.02$ の測定値の点がかなり直線よりずれているが、その原因はこの実験波が不安定であったためと考えられる。

図-9 の結果より、次のようなことがわかる。(i) 傾斜水底上に固定された直立円柱に作用する無次元波力が最大値をとる無次元水深は、沖波波形勾配あるいは水底勾配の増大と共に減少する。(ii) この無次元最大波力が発生する水深は、直立円柱の場合の方が直立壁の場合よりも全体的に大きい。(iii) 無次元最大波力が発生する水深と沖波波形勾配との関係は、直立円柱の場合も直立壁の場合も類似しており、近似的には式(5)で表現される。ただし、水底勾配に依存する係数 C_m は式(6)とは異なっている。水底勾配が2種類のデータしかないので、少し乱暴ではあるが、直立壁の場合と同様に C_m と $\tan \theta$ とが直線関係にあると仮定して実験式をつくると次のようになる。

$$C_m = 0.92 - 5.3 \tan \theta \quad \dots\dots\dots (9)$$

式(9)と式(6)とを比較すると、直立円柱に作用する無次元波力の最大値が発生する水深は、直立壁の場合に比べて約1.6倍深いところであることがわかる。

5. 結 語

今回の研究より明らかになった主要な結果をとりまとめると次のようになる。

(1) 円柱に作用する波力を、Morison の式および微小振幅波理論を適用し、さらに $C_D=1$ ならびに $C_M=2$ と仮定して計算される波力と比較してみると、このような仮定に基づく波力の計算式が比較的妥当な値を与えるのは、 $h/H_0 \geq 6$ と水深が比較的深い領域のみであって、浅海部 $h/H_0 \leq 6$ においては、実測される波力の方が大きく、しかも水深の減少と共に両者の差は増大した。

(2) 最大波力は砕波点の近くで発生し、今回の測定では、その大きさは Morison の式ならびに微小振幅波理論を適用して計算される値の5倍程度に達した。

(3) 無次元最大波力 $(\hat{F}_m)_{\max} (= [F_m / \rho g D H_0^2]_{\max})$ の大きさならびにその発生水深 h_M/H_0 は、入射波の沖波波形勾配 H_0/L_0 が小さいほど、水底勾配 $\tan \theta$ が大きいほど大きい。 $(\hat{F}_m)_{\max}$ および h_M/H_0 と H_0/L_0 および $\tan \theta$ との間の関係が実験的に求められ、それらの

関係は式(7)および式(8)ならびに式(5)と式(9)とでそれぞれ与えられる。 h_M/H_0 は、直立壁の場合に比較して、直立円柱の場合の方が大きい。

(4) 最大波力発生水深を過ぎると、波力は水深と共に減少し、砕波帯の $h/H_0 \approx 0.6$ 付近では、無次元波力 $\hat{F}_m$ は0.20~0.25程度の値となる。

(5) 最大波力の発生する水深よりわずかに浅いところに、水平波力が急激に減少する特異点がある。これは砕波が下向前方に突込むいわゆる plunging point に相当し、そこでは水平波力は一時的に減少するものと考えられる。

本研究は最初、川崎重工業株式会社よりの委託により行われたものである。研究の実施にあたり御配慮をいただいた野村襄氏をはじめ関係各位に感謝いたします。本研究は、その後、さらに文部省科学研究費により継続された。本実験の遂行およびデータ整理において、一貫して助力を受けた本研究所の江藤賢次氏、ならびに後半の実験で助力を受けた岡英一氏に感謝いたします。なおデータの解析には本研究所に設置されている電子計算機 FACOM 270-20 がおもに使用され、一部のデータの解析には本学の FACOM 230-60 が使用された。

参 考 文 献

- 1) Hall, M. A. : Laboratory study of breaking wave forces on piles, Univ. California, Dept. Eng., Inst. Eng. Res., Wave Res. Lab., Tech. Rep. Series 95, Issue 2, 1957.
- 2) 合田良実・原中祐人・北畑正記：直柱に働く衝撃砕波力の研究，港湾技術研究所報告，第5巻6号，1966.
- 3) 合田良実・池田彦彦・笹田正・岸良安治：岩礁上の円柱の設計波力に関する研究，港湾技術研究所報告，第11巻，第4号，1972.
- 4) Morison, J. R., Johnson, J. W and O'Brien M. P. : Experimental studies of forces on piles, Proc. 4th conf. on Coastal Eng. 1953.
- 5) Mitsuyasu, H. : Experimental study on wave forces against a wall, Report of Transportation Tech. Res. Inst., No. 47, 1962.
- 6) 本多忠夫・光易 恒：大口径円柱に作用する波圧に関する研究，九州大学応用力学研究所所報，第40号，昭和48年（印刷中）
- 7) Dean, R. G. and Harleman : Interaction of structure and waves, Estuary and Coastline Hydrodynamics, McGraw-Hill, 1966.
- 8) 土屋義人・山口正隆：波による円柱の抗力係数及び質量係数について，第19回海岸工学講演会論文集，1972.
- 9) 大楠 丹：複数本の鉛直円柱に働く波力について 日本造船学会論文集，第131号，1972.