

# 不規則波に対する繫留円筒浮体の応答

渡 辺 晃\*・島田 保之\*\*・堀川 清司\*\*\*

## 1. 緒 言

浮遊式構造物に作用する波力や構造物の動揺特性に関しては、従来多数の研究がなされてきた。著者らもこれ迄、円筒形浮体を対象に規則波のもとでの応答特性に関して理論および実験的研究<sup>1)~4)</sup>をすすめ、特に共振条件近傍での浮体運動に対して、抗力すなわち非線形流体力の寄与が大きいことを示した。これはとりもなおさず、現実の波浪のような不規則波に対しても非線形応答を考慮に入れなければならないことを意味するものと思われる。

本研究では、以前に提案した非線形抗力を導入した回折波理論<sup>5)</sup>を規則波による実験結果に基づいて検討したのち、不規則波に対する応答に関して得られた実験データに考察を加える。

## 2. 実験装置

実験装置は前回<sup>3)</sup>のものとはほぼ同様である。その概要を図-1に示す。

実験には長さ 25m, 幅 80cm, 深さ 100cm の不規則波造波水路を用いた。規則波は低周波発振器よりの正弦波形, 不規則波は電子計算機で発生させた不規則信号

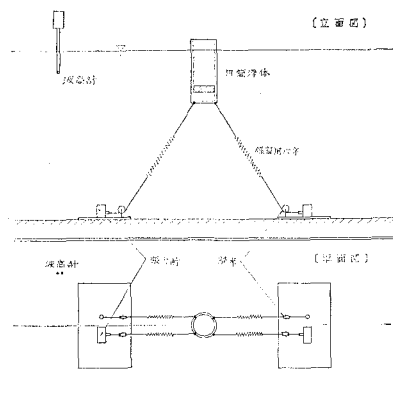


図-1 実験装置の概要

表-1 模型浮体の諸元

| 諸 元     | 数 値                                      | 諸 元    | 数 値       |
|---------|------------------------------------------|--------|-----------|
| 全 長     | 25.0 (cm)                                | 繫留前吃水深 | 16.0 (cm) |
| 半 径     | 5.47 (cm)                                | 〃 重心深さ | 10.3 (cm) |
| 重 量     | 1506 (gr)                                | 繫留後吃水深 | 22.5 (cm) |
| 慣性モーメント | $7.16 \times 10^3$ (gr・cm <sup>2</sup> ) | 〃 重心深さ | 16.8 (cm) |

表-2 繫留用ばねの諸元

| ばね番号 | 材質 | 外 径      | 全 長       | ばね定数         | 最小荷重*    |
|------|----|----------|-----------|--------------|----------|
| 1    | 鋼  | 0.5 (cm) | 15.0 (cm) | 11.9 (gr/cm) | 100 (gr) |
| 2    | 鋼  | 0.4 (cm) | 15.0 (cm) | 31.3 (gr/cm) | 140 (gr) |

\* 最小荷重: ばねに伸びを生じさせるに必要な最小の荷重

を、造波機駆動信号として所要の入射波を得た。

円筒形浮体模型は外径約 11cm, 肉厚 5mm のアクリル樹脂パイプで、その内部に鉛の円盤型錘を入れて重量や重心位置を調整した。浮体の諸元を表-1に、繫留用ばねの諸元を表-2に示す。ばねは径 0.3mm の鋼製ワイヤに連結して所定の長さの繫留索とした。

図-1に示すように、沖側・岸側各2本のばねにより対称に係留し、各1本について歪ゲージ式張力計により張力変動を測定したが、以下の解析には沖側索張力のみを用いた。浮体の応答は重心位置に取付けた豆電球の運動を非接触電子光学式変位計で追跡することにより、水平成分と鉛直成分を測定した。また水面変動の測定には容量式波高計を使用した。

## 3. 規則波に対する応答

### (1) 実験方法

繫留角とばねを変えた3種の繫留条件で、規則波に対する応答を調べた。ケースⅠとⅡはばね1(ばね定数  $K$ : 11.9 gr/cm)を用い、繫留角  $\alpha$  をそれぞれ  $45^\circ$  と  $30^\circ$  にしたもので、ケースⅢはばね2 ( $K$ : 31.3 gr/cm) で  $\alpha=30^\circ$  とした場合である。水深は不規則波の場合も含めて 80cm に保たれた。

波高は 2cm を標準とし、共振条件近傍では 1cm, 3cm の波高条件を追加した。

### (2) 結果と考察

図-2(a)~(c)は、ケースⅠ~Ⅲのそれぞれに対し、

\* 正会員 工博 東京大学助教授 工学部土木工学科

\*\* 正会員 東京電力(株)

\*\*\* 正会員 工博 東京大学助教授 工学部土木工学科

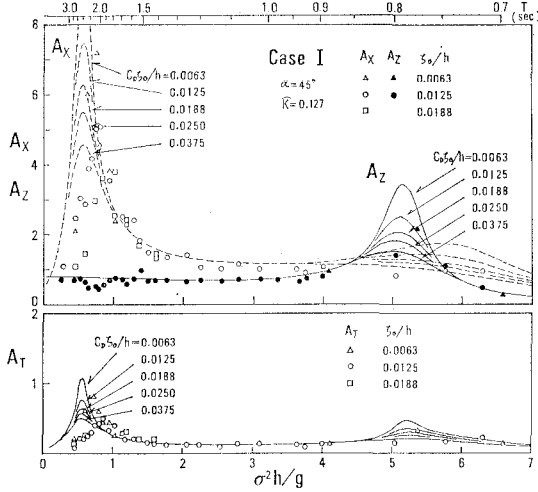


図-2 (a) 規則波に対する応答 (ケース I)

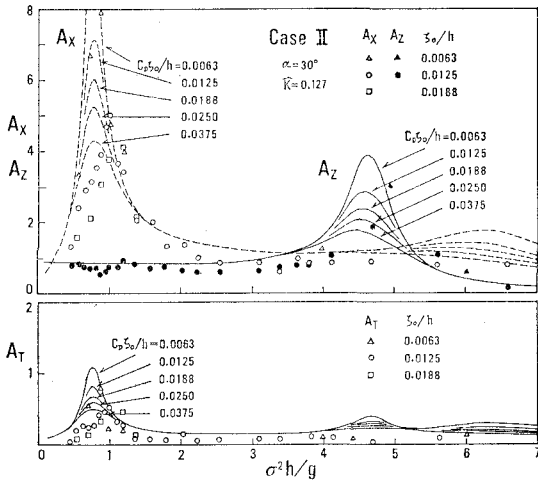


図-2 (b) 規則波に対する応答 (ケース II)

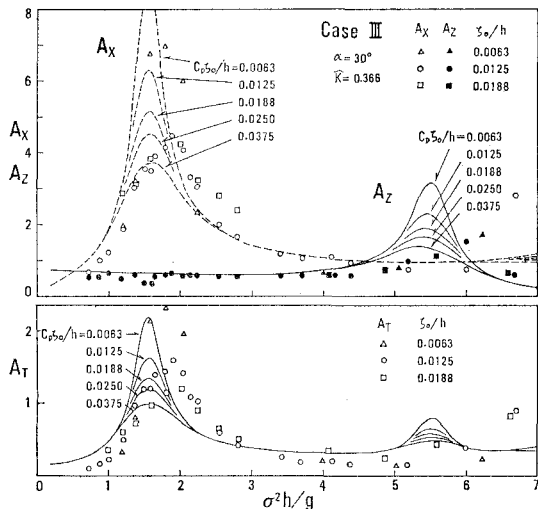


図-2 (c) 規則波に対する応答 (ケース III)

浮体の運動振幅および索張力の実験値を理論解と比較したものである。浮体運動については水平・鉛直振幅と入射波振幅  $\zeta_0$  の比  $A_x$ ,  $A_z$  を、索張力についてはその振幅を  $\pi \rho g a^2 \zeta_0$  ( $\rho$ : 水の密度,  $a$ : 浮体の半径) で除した値  $A_T$  をとり、それらと無次元パラメタ  $\sigma^2 h/g$  ( $\sigma = 2\pi/T$ : 入射波角周波数,  $h$ : 水深) との関係で、入射波振幅・水深比  $\zeta_0/h$  別にプロットされている。(図中  $\hat{K} = K/\pi \rho g a^3$ ,  $K$ : ばね定数)

非線形抗力項を導入した理論解<sup>4)</sup>は  $\zeta_0/h$  に抗力係数  $C_D$  を乗じた量をパラメタとした曲線群で示してある。運動振幅、張力振幅共に、理論解と実験値は全体的に良い対応を示している。

共振を生じる周波数あるいは  $\sigma^2 h/g$  の値は、実験値の方が多少大きめであり、入射波振幅  $\zeta_0$  が増加するほど差違も増大する傾向がある。 $\zeta_0$  の増加は抗力項(非線形減衰力)の増加を意味するから、 $\zeta_0/h$  の増大に伴ない共振周波数が増加するというこれらの実験結果は、一般の振動系に対する常識に反するものであり今後更に検討を要する。

共振条件近傍で  $\zeta_0/h$  が増加するにつれて、無次元変動量  $A_x$ ,  $A_z$ ,  $A_T$  が減少する傾向が、実験値、理論値共に顕著に認められる。今回の模型浮体および繫留条件では、鉛直運動の共振は周期  $T=0.8$  sec 前後(図-2(a)上の  $T$  のスケールを参照)にあらわれ、その近傍での特性を詳細に調べるためには周期を  $1/100$  sec 単位で変化させねばならず、十分なデータが得られなかった。

水平運動と張力変動のピーク値についてより詳細にみると、ある  $\zeta_0/h$  に対する実験値がその2倍の  $C_D \zeta_0/h$  の理論値とほぼ対応することが認められよう。つまり抗力係数  $C_D$  を2程度にとることにより、両者がよく対応する。これは浮体底端のエンド効果によるものと思われるが、ケース III の  $A_T$  のように  $C_D \approx 1$  で良い対応を示す場合もあり、今後の検討課題である。

#### 4. 不規則波に対する応答

##### (1) 実験方法

実験に用いた不規則波は9種類であり、表-3 にそれ

表-3 入射不規則波の諸量

| 波番号 | $f_p$<br>(Hz) | $\langle S_z^2 \rangle_p$<br>( $\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ ) | $H_{1/3}$<br>(cm) | $T_{1/3}$<br>(sec) | $\bar{H}$<br>(cm) | $\bar{T}$<br>(sec) |
|-----|---------------|---------------------------------------------------------------|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------|
| 1   | 0.95          | $1.51 \times 10^{-2}$                                         | 0.86              | 0.94               | 0.55              | 0.84               |
| 2   | "             | 3.06                                                          | 1.24              | 0.94               | 0.81              | 0.87               |
| 3   | "             | 5.27                                                          | 1.63              | 0.95               | 1.04              | 0.87               |
| 4   | 0.85          | 1.69                                                          | 0.86              | 1.16               | 0.55              | 1.02               |
| 5   | "             | 3.15                                                          | 1.16              | 1.17               | 0.76              | 1.06               |
| 6   | "             | 5.05                                                          | 1.45              | 1.17               | 0.93              | 1.04               |
| 7   | 0.60          | 2.90                                                          | 1.04              | 1.60               | 0.73              | 1.35               |
| 8   | 0.40          | 3.43                                                          | 0.92              | 2.28               | 0.55              | 1.67               |
| 9   | 1.20          | 1.82                                                          | 1.26              | 0.94               | 0.81              | 0.81               |

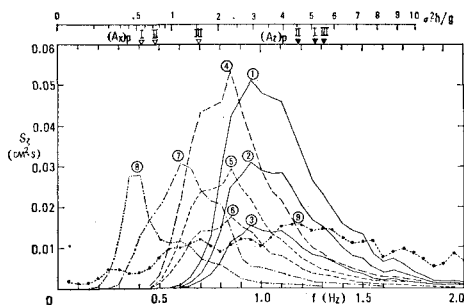


図-3 入射波のスペクトル

ぞれピーク周波数  $f_p$ , ピーク密度  $(S_z)_p$ , 有義波高と周期, 平均波高と周期が示されている。図-3 に示されたスペクトル密度分布からもわかるように, 波-1~3, 波-4~6 はそれぞれ密度分布が相似で, エネルギー密度のレベルが異なる。また, 波-9 は周波数帯域が極めて広くホワイトノイズに近い不規則波である。

3 (1) で定義したケース I の繋留条件の浮体には不規則波-1~8 を, ケース II と III に対しては波-2, 5, 9 を作用させ, 合計 14 種の組合せで実験を行なった。図-3 の上には, 対応する  $\sigma^2 h/g$  のスケールおよび回折理論より予想される  $A_x$  と  $A_z$  の共振周波数位置が示されている。

入射波の水面変動は浮体設置前に浮体位置で測定し, 浮体設置後に同一条件の波を作用させて重心位置や張力の変動を測定して, 同一時刻に対応する記録を解析に用いた。

## (2) 結果と考察

前節で述べたように, 浮体の応答は特に共振条件の近傍において非線形性の強い現象であるが, ここではそれ自身としては通常のスペクトル解析の手法が適用できるものとする。図-4 (a)~(e) は実測された浮体の水平変位, 鉛直変位, 張力変動の周波数スペクトル  $S_x, S_z, S_T$  を入射波スペクトル  $S_z$  と共に, 代表的なケースについて示したものである。(ケース I-2 は繋留条件 I の浮体に不規則波 2 を作用させた場合である。) ただしそれぞれのピーク値  $S_p$  で正規化してある。

まずケース I の場合 (図-4 (a)~(c)) をみると, 入射波のスペクトル形状特にピーク周波数の変化につれて, 浮体運動や索張力変動のスペクトルが大きく変化することがわかる。入射波のピーク周波数が応答の共振周波数と大きく異なる場合には, 入射波のピークに対応した位置に応答のピークがあらわれてくる。周波数帯域の広い波を作用させた場合の結果である図-4 (d), (e) では, 水平・鉛直運動共に理論より予想される共振周波数に極めて良く合致した位置に, 応答スペクトルのピークがあらわれている。

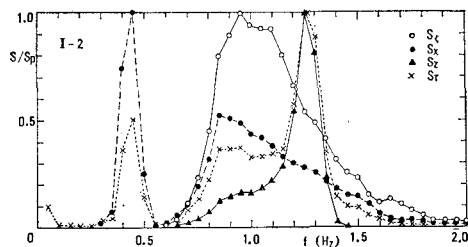


図-4 (a) 不規則波中の応答特性 (ケース I-2)

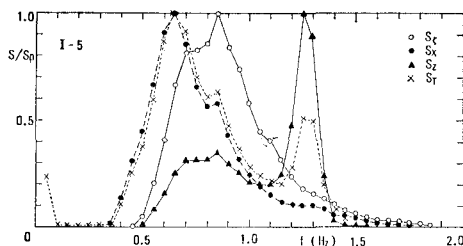


図-4 (b) 不規則波中の応答特性 (ケース I-5)

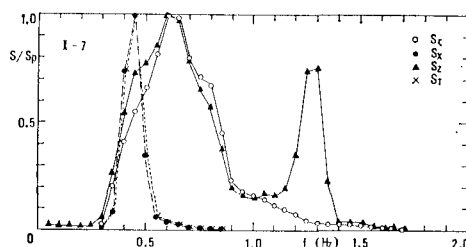


図-4 (c) 不規則波中の応答特性 (ケース I-7)

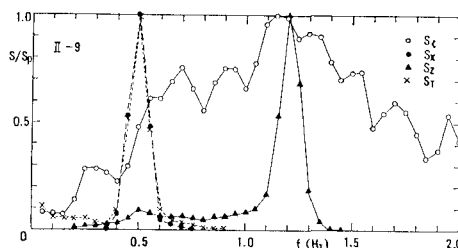


図-4 (d) 不規則波中の応答特性 (ケース II-9)

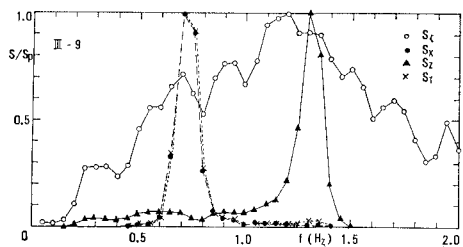


図-4 (e) 不規則波中の応答特性 (ケース III-9)

次に水面変動, 浮体の変位の時間変動それぞれにゼロアップクロス法を適用し, 有義波高  $H_{1/3}$  ならびに対応する変位の 1/3 最大全振幅  $X_{1/3}, Z_{1/3}$  を求めた。一方,

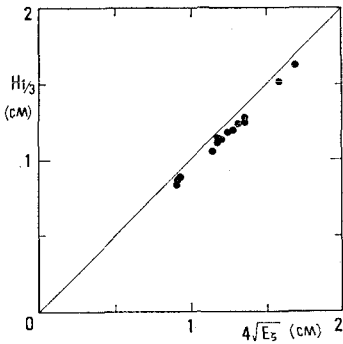


図-5 (a) 有義波高

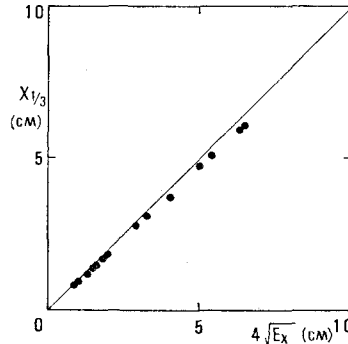


図-5 (b) 1/3 最大水平全振幅

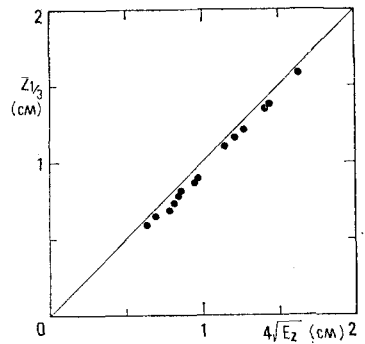
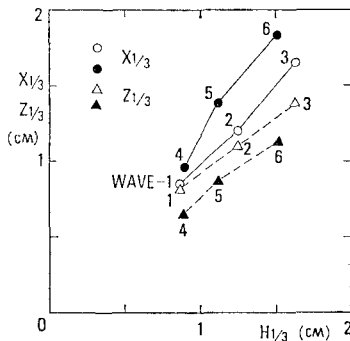
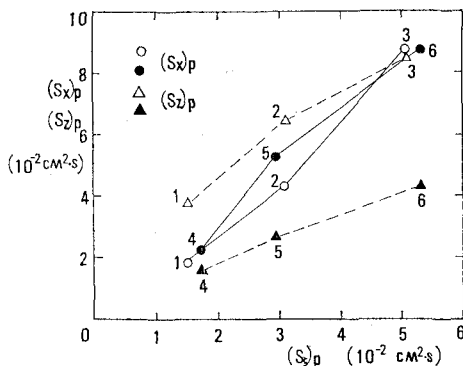


図-5 (c) 1/3 最大鉛直全振幅

スペクトル  $S(f)$  の積分値  $E = \int_0^\infty S(f)df$  を求め、全 14 ケースについて両者の関係をみたのが図-5 (a)~(c) である。これらの図からゼロアップクロス法で定義された変動全振幅はほぼレーリー分布に従うことが示唆されよう。

さて、紙面の都合で省略したが、係留条件 1 の浮体に波 2 あるいは波 5 のそれぞれと相似のスペクトルを有する不規則波を作用させたときの応答スペクトルは、それぞれ図-4 (a) あるいは (b) とほとんど一致する。浮体応答の非線形性をみるために、これらのケースに対して  $H_{1/3}$  と  $X_{1/3}$ ,  $Z_{1/3}$  の関係を示したのが図-6 である。

図-6  $H_{1/3}$  と  $X_{1/3}$ ,  $Z_{1/3}$  の関係図-7  $(S_z)_p$  と  $(S_x)_p$ ,  $(S_z)_p$  の関係

同様に図-7は水面変動スペクトルのピーク値  $(S_z)_p$  と水平・鉛直運動スペクトルのピーク値  $(S_x)_p$ ,  $(S_z)_p$  の関係を示している。この条件範囲では非線形性は余り顕著にあらわれていない。しかしながら、水面変動と浮体運動のコヒーレンスを求めたところ、共振条件近傍を除いてはコヒーレンスがほぼ 1.0 になるのに対し、共振周波数では鉛直運動のコヒーレンスは 0.6 以下に、水平運動では 0.2 程度に低下することが全ケースについて認められた。これは共振時の強い非線形性を意味するものであ

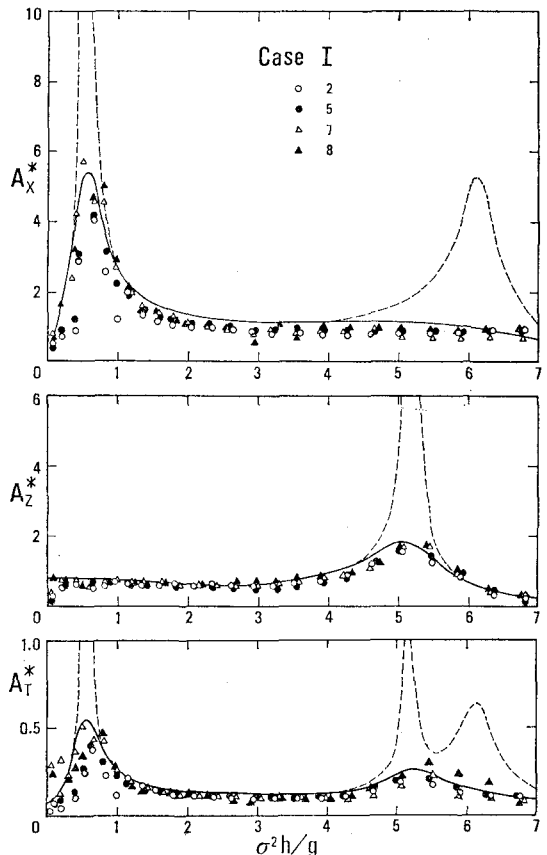


図-8 (a) 不規則波に対する応答関数 (ケース I)

り、共振周波数近傍にピークを有しエネルギーレベルの異なる不規則波を作用させた検討が更に必要であろう。

水面変動と浮体運動あるいは張力変動のクロススペクトルから、それぞれの応答関数  $A_x^*$ ,  $A_z^*$ ,  $A_T^*$  を求めたものが図-8(a)~(c)に示されている。図中の数字は作用させた不規則波の種類を意味する。また非線形抗力項を導入した理論解で  $C_D \zeta_0 / h = 0.025$  に対応するものを実線で、抗力を無視した理論解を破線で示してある。

いずれの場合も抗力を無視した理論解は過大な値を与えることがわかる。(合田ら<sup>5)</sup>の厚円盤型ブイの不規則波応答に関する実験結果は線形理論では説明がつくが、これは顕著な共振現象を生じない浮体を対象としていることから当然である)。鉛直運動の応答関数  $A_z^*$  およびケース I の水平運動・張力変動の応答関数  $A_x^*$ ,  $A_T^*$  は非線形理論解とかなり良く一致する。しかしケース II, III の共振条件近傍での  $A_x^*$  および高周波数側での  $A_T^*$  の対応は充分に良いとはいえない。エネルギーレベルの低い周波数域での応答関数の計算精度は当然低下するので、更に条件を変えた実験を追加する必要がある。

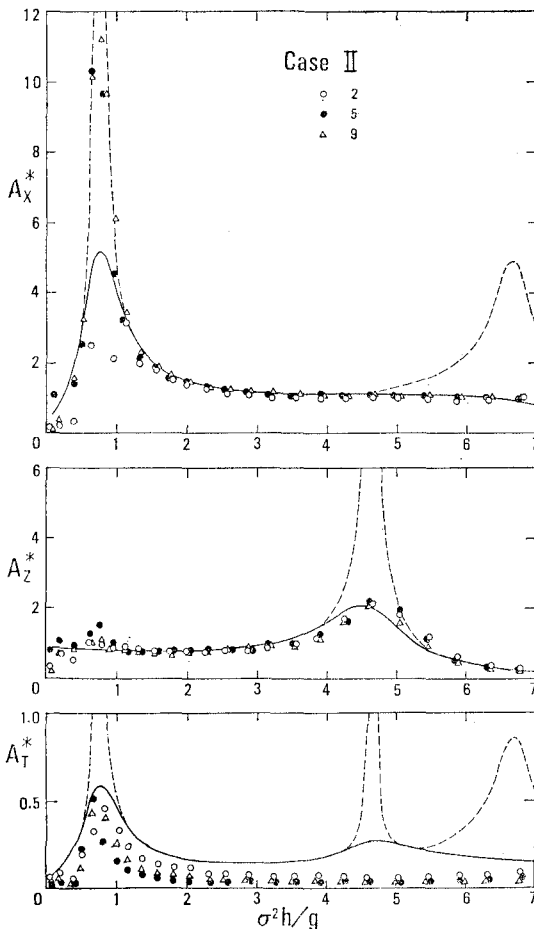


図-8(b) 不規則波に対する応答関数(ケース II)

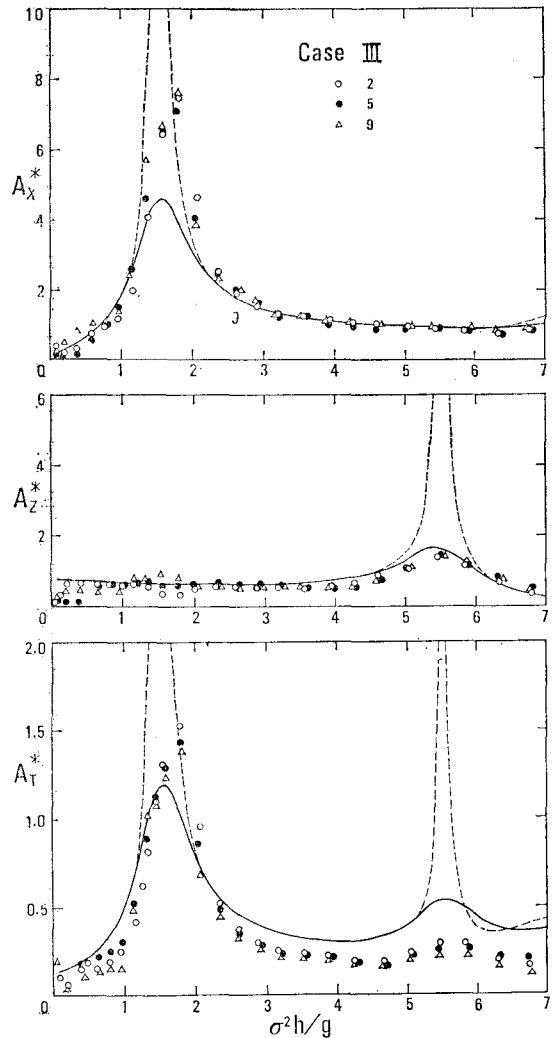


図-8(c) 不規則波に対する応答関数(ケース III)

## 5. 結 語

非線形抗力を考慮した回折理論により、円筒形浮体の不規則波応答がある程度まで説明できることを示した。抗力係数に対する浮体端部の効果や、不規則波における有効抗力係数の扱いについて今後研究を継続していく予定である。

最後に、図面の作成にあたり御助力を頂いた東京大学工学部助手の三村信男氏に謝意を表する。

## 参 考 文 献

- 1) 堀川清司・渡辺 晃: 円筒形浮体と浅海波の相互作用, 第19回海講演文集, pp. 419~425, 1972.
- 2) 堀川清司・渡辺 晃・山田恭央: 浅海波による円筒形浮体の運動, 第28回年講演集, pp. 35~36, 1973.
- 3) 堀川清司・渡辺 晃・丸山康樹: 係留円筒形浮体の応答特性と索張力, 第21回海講演文集, pp. 507~513, 1974.
- 4) 渡辺 晃: 波による円筒形浮体の運動, 第25回海講演文集, pp. 377~381, 1978.
- 5) 合田良夫・鈴木康正・蜂須賀和吉: 厚円盤型ブイの波浪中応答特性, 第25回海講演文集, pp. 392~396, 1978.