

# メガフロートの構造詳細部の波浪変動応力解析

正員 岡 正義\* 正員 岡 修二\*  
 正員 正 信 聡太郎\* 正員 河 邊 寛\*  
 正員 井 上 清\*\*

Wave induced stress analysis for detailed structural members on a very large floating structure (Mega Float)

by Masayoshi Oka, *Member* Shuji Oka, *Member*  
 Sotaro Masanobu, *Member* Hiroshi Kawabe, *Member*  
 Kiyoshi Inoue, *Member*

## Summary

The estimation of wave induced response of a very large floating structure has been calculated by a coupled structure fluid interaction program. The evaluation of the calculated responses is mainly carried out on amplitude of motions, such as vertical displacements, accelerations. Although the nominal stress on the structure can be calculated by the program, it is very hard to obtain a detailed structural stress because the scale ratio of the detailed structure to whole floating structure is very large.

This paper is concerned in the wave induced stress response calculation procedure for the detailed structure on a very large floating structure. The calculation method consists of two steps. First step; Internal loads such as wave induced bending moment and shear force and external load such as wave induced water pressure,  $A_{ikc,s}(\omega, \chi; x, y)$ , are calculated by 3D coupled structure fluid interaction program. Second step; When these loads act in the same time on the structure, wave induced stress for the detailed structure,  $\sigma_{ikc,s}(\omega, \chi; x, y)$ , can be calculated by using stress factor,  $k_j$ .

$$\sigma_{ikc,s}(\omega, \chi; x, y) = \sum_{j=1}^N k_j A_{jkc,s}(\omega, \chi; x, y)$$

To verify the procedure, we conduct a full scale measurement of 200×100 m scale floating structure for 2 months. The estimated stress of detailed structure, for example stress around scallop at transverse bulkhead, shows very good agreement with measured stress.

## 1. 結 言

海上の空間を超大型浮体式構造物（メガフロート）により利用する技術は、平成7年度から平成13年度にかけて理論的研究、水槽模型試験および実海域の大型実証実験などが実施され、その実用性、安全・信頼性、経済性が各方面から検討され実現に向けて歩み出そうとしている。

メガフロートは波浪中に浮かぶ巨大な構造物である。したがって、常に構造部材には波浪によって誘起される変動応力が発生する。波浪中の構造応答はメガフロートと波浪場を一体として計算する流体・構造連成弾性応答計算法が開発されているが、そのアウトプットは主として上下変位などの運動の検討などに用いられることが多い<sup>1)</sup>。隔壁と補強縦通材との交叉部などのように応力集中が発生するような構造詳細の波浪による応力応答を見積るような検討例は、井上<sup>2)</sup>、賀田ら<sup>3)</sup>、笹島<sup>4)</sup>が各種手法を提案している。これらのメガフロート構造の応力応答の理論予測を、実際の海面で実スケール規模のメガフロート構造を用いて応力計測を実施して検証した例は、メガフロート技術研究組合が実施した1000 m規模の浮体の実証実験により有用性が

\* 海上技術安全研究所

\*\* 日立造船

原稿受理 平成14年7月10日

秋季講演会において講演 平成14年11月14, 15日

確認されている<sup>5)</sup>。

本研究では、200×100 m規模のメガフロートを対象に、波浪によりメガフロート構造詳細部に誘起される応力応答の理論計算法の開発を行うとともに、実海域の実証実験を実施し応力推定の検証を行ったものである。応力の理論計算手法は、メガフロートの波浪による公称レベルの応力応答を「詳細3次元解析法<sup>1)</sup>」で求め、構造詳細部をズームした有限要素法により計算する2段階解法<sup>6)</sup>を用いて行った。この結果を用いて、メガフロートの長期の使用期間にわたり構造部材に蓄積される疲労被害度の計算を行った。これらの予測手法を実海域の実証試験により検証し、開発した手法の有用性を報告する。

## 2. メガフロートの構造詳細部の波浪によって誘起される応力応答解析

### 2.1 解析対象とするメガフロートの概要

Fig. 1に示すドルフィン・フェンダー方式で係留された、長さ $L=200$  m、幅 $B=100$  m、高さ $D=3$  m、喫水1 mのポンツーン型メガフロートの構造に生じる応力を解析する。メガフロートはFig. 2に示す東京湾南西部の住友重機械工業(株)横須賀造船所の北岸壁沖に係留されている。設置海域の水深も同図に示してある。メガフロート内の構造箇所を表示するために、メガフロートの中央に原点

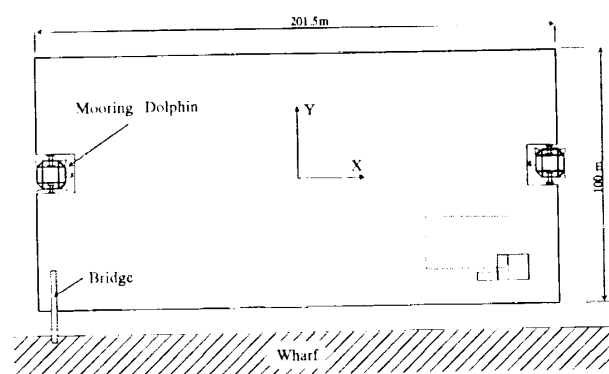


Fig. 1 VLFS model and mooring dolphin

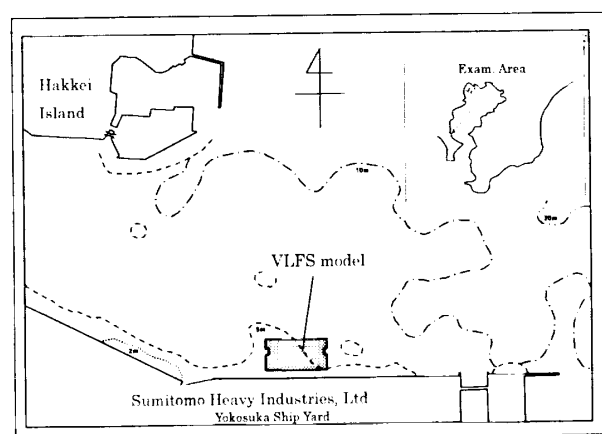


Fig. 2 Location for examination

を取り、長さ方向に $x$ 軸、幅方向に $y$ 軸とする。 $x$ 軸、 $y$ 軸は、それぞれ東、北方向とほぼ一致している。

メガフロートの内部空間は、約12 m間隔で配置された長さ方向のロンジバルクヘッド、約4 m間隔で配置された横方向のトランスバルクヘッドで区画されている。それぞれの区画は、喫水確保のための水バラストタンク、内部の空間利用のためのドライな空所として使用される。また、甲板裏と底板には、それぞれ長さ方向に810 mmの等間隔のロンジスペースでアングル型のロンジ材により補強されている。ロンジ材がトランスバルクヘッドと交叉する箇所は、空所ではロンジ材が貫通するためにトランスバルクヘッドにスロットが設けられ、水バラストタンクにおいてはスロットを完全に塞いでいる。このような縦横の構造部材が貫通、交叉する構造の不連続箇所は、同時に応力集中部となり損傷が発生する可能性のある箇所と考えられ、それを防ぐためにその部材に生じる応力の正確な見積もりが必要となる。

メガフロートの構造部材の応力集中部となる箇所を、応力評価の対象部材として、以下の構造詳細部について応力解析を行う。

- 底部ロンジ部材フェイス (ロンジ)
- 底部ロンジ貫通スロット周り (スロット)
- 水密隔壁とロンジの交叉部 (ウォータタイト)

以下にそれぞれをロンジ、スロット、ウォータタイトと称する。

### 2.2 メガフロートの構造詳細部の応力解析の基本方針

メガフロートの波浪中応答計算は、メガフロート技術研究組合において開発された「詳細3次元弾性応答解析プログラム」を用いる。この解析プログラムは、メガフロートの構造の様式を考慮でき、周辺の設置海域の状況も組み込むことができるので、現在最も信頼できる解析法である<sup>1)</sup>。付録に本論文で実施したメガフロートの詳細3次元弾性応答解析の概要を示す。しかし、メガフロートのような大規模構造物の構造の詳細部の疲労強度評価にも対応できる応力解析は、詳細3次元弾性応答解析の構造有限要素であっても十分な精度を得るほどの詳細な有限要素のモデル化をすることができない。そこで、メガフロートの構造詳細の応力計算を行うにあたり、次のような手順の2段階解法<sup>6)</sup>を採用する。

- ①詳細3次元弾性応答計算によりメガフロートの構造応力計算に必要な項目の内力および外力を求める。
- ②構造詳細についてFEMによるズーム応力計算で各荷重成分の単位荷重に対する構造詳細の応力係数を求め、さらに、これらを合成して応力を求める。

Fig. 3に計算フローを示す。

### 2.3 応力応答関数の計算法

応力応答関数の計算は、次の規則波の範囲で行った。

波周波数： $\omega=0.8\sim 2.0$  [rad/s] (0.1 rad/s間隔)

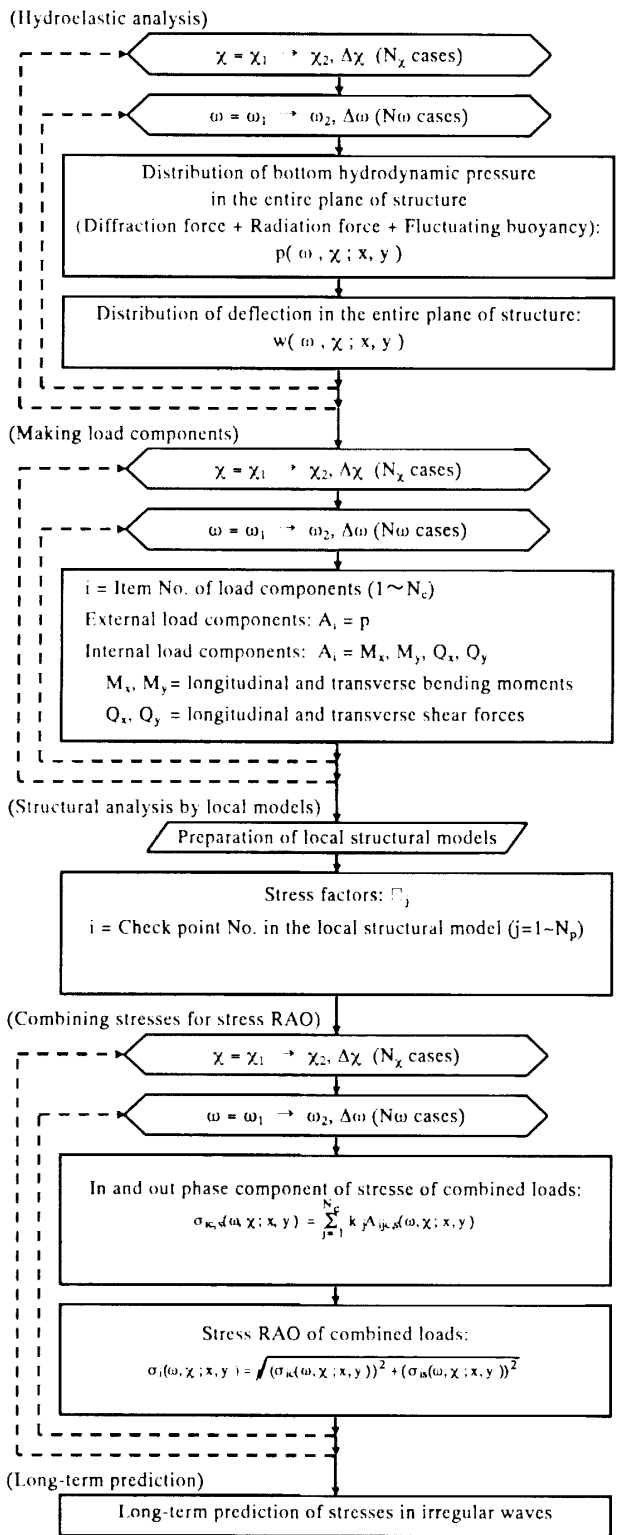


Fig. 3 Flow of stress analysis for multiple load components using stress factor

波向き  $\chi = 0^\circ \sim 90^\circ$  ( $15^\circ$  間隔)

波周波数は浮体の設置海域の波浪統計から代表的な波周期を捉えて、 $T = 7.85 \text{ s} \sim 3.14 \text{ s}$ の範囲とし、波向きは波浪推算結果から、西側からの波のエネルギーの流入は微小であると判断し、東側の  $x$  軸の正の方向からの入射波を  $0$  度として反時計回り  $90$  度 (北側) までの範囲とした。

### 2.3.1 内力, 外力の計算

メガフロート構造に波浪によって誘起される外力としては変動流体圧  $p$ 、慣性力等の外力があり、また、内力としては剪断力  $Q_x, Q_y$ 、曲げモーメント  $M_x, M_y$  等の荷重成分がある。これらの荷重成分は、メガフロートに入射する規則波を振幅  $h_0$ 、円周波数  $\omega$ 、入射角  $\chi$  とし、メガフロートの中央の原点に波の山がきた時を基準とすると、メガフロートの位置  $(x, y)$  と位相の関数として表される。

$$h(\omega, \chi) = h_0 \cos(\omega t)$$

$$p(\omega, \chi; x, y) = p_c(\omega, \chi; x, y) \cos(\omega t) + p_s(\omega, \chi; x, y) \sin(\omega t)$$

$$Q_x(\omega, \chi; x, y) = Q_{xc}(\omega, \chi; x, y) \cos(\omega t) + Q_{xs}(\omega, \chi; x, y) \sin(\omega t)$$

$$Q_y(\omega, \chi; x, y) = Q_{yc}(\omega, \chi; x, y) \cos(\omega t) + Q_{ys}(\omega, \chi; x, y) \sin(\omega t) \quad (1)$$

$$M_x(\omega, \chi; x, y) = M_{xc}(\omega, \chi; x, y) \cos(\omega t) + M_{xs}(\omega, \chi; x, y) \sin(\omega t)$$

$$M_y(\omega, \chi; x, y) = M_{yc}(\omega, \chi; x, y) \cos(\omega t) + M_{ys}(\omega, \chi; x, y) \sin(\omega t)$$

ここで、 $p_c, p_s$  等は波に対する応答の位相差を表すために、入射波と同位相成分及び  $90$  度の位相差の成分の表示を意味する。

変動流体圧  $p$  は、詳細 3 次元弾性応答解析の計算出力より得ることができる。

内力の縦剪断力及び横剪断力  $Q_x, Q_y$ 、縦曲げモーメント及び横曲げモーメント  $M_x, M_y$  等は、詳細 3 次元弾性応答解析から求められるメガフロートの鉛直たわみ  $w$  から次式によって得られる。

$$M_x = -EI_x \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)$$

$$M_y = -EI_y \left( \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)$$

$$Q_x = -EI_x \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)$$

$$Q_y = -EI_y \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

ここに、 $I_x, I_y$  は、それぞれ浮体の縦曲げ、横曲げに対する単位幅断面の断面 2 次モーメントである。

鉛直たわみ  $w$  は、入射波の周期と入射角、メガフロート上の位置によって、振幅および波との位相が異なるので、 $w_c(\omega, \chi; x, y)$ 、 $w_s(\omega, \chi; x, y)$  と表現される。従って、上記の微分操作は鉛直たわみ  $w$  の  $w_c, w_s$  成分のそれぞれに対して実施することによって内力の波との同位相、逆位相成分を計算する。これらの微分は鉛直たわみを空間  $(x, y)$  について数値微分を行い求めた。

この段階までが応力計算の第 1 段階である。

### 2.3.2 FEM モデルによるズーミング応力計算

メガフロートから構造の一部を取り出し、Fig. 4 に示す詳細な FEM モデルを作成して前項で求めた外力、内力

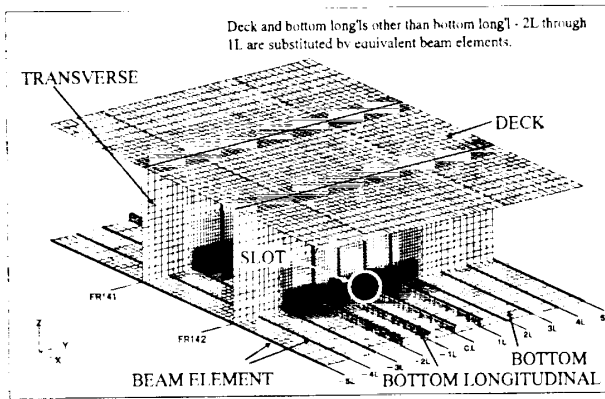
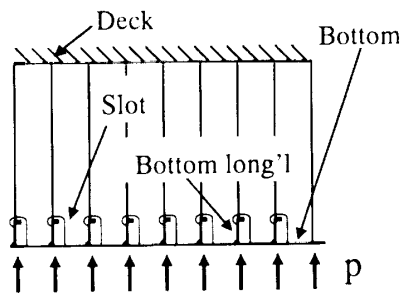
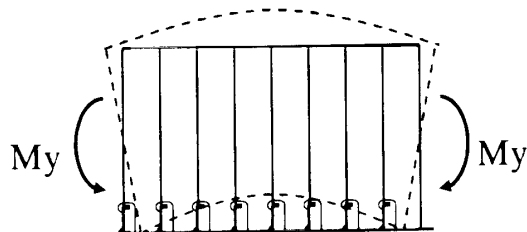


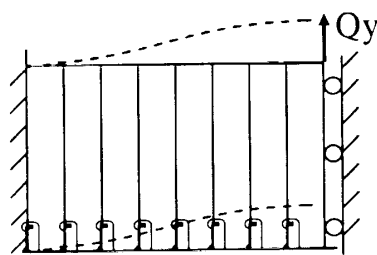
Fig. 4 Local FEM model to calculate stress factors



a) Load component = Hydrodynamic pressure



b) Load component = Transverse bending moment



c) Load component = Transverse shear force

Fig. 5 Unit loads and boundary condition for the local FEM model to calculate stress factors

を同時に負荷してロンジ、スロット、ウォータタイト部の応力を計算する。

この応力計算において次の仮定を設ける。

(1) 外力、内力が異なる振幅、位相で作用するが、それぞれの荷重成分によって構造部材に生じる応力の干渉はないものと仮定する。したがって、荷重成分ごとに応力値

を計算し次式のように重ね合わせて荷重の同時性を考慮する。

$$\begin{aligned} \sigma(\omega, \chi; x, y) &= \sigma_c(\omega, \chi; x, y)\cos(\omega t) \\ &\quad + \sigma_s(\omega, \chi; x, y)\sin(\omega t) \\ \sigma_c(\omega, \chi; x, y) &= \sigma_{pc}(\omega, \chi; x, y) + \sigma_{Qxc}(\omega, \chi; x, y) \\ &\quad + \sigma_{Qyc}(\omega, \chi; x, y) + \sigma_{Mxc}(\omega, \chi; x, y) \\ &\quad + \sigma_{Myc}(\omega, \chi; x, y) \\ \sigma_s(\omega, \chi; x, y) &= \sigma_{ps}(\omega, \chi; x, y) + \sigma_{Qxs}(\omega, \chi; x, y) \\ &\quad + \sigma_{Qys}(\omega, \chi; x, y) + \sigma_{Mxs}(\omega, \chi; x, y) \\ &\quad + \sigma_{Mys}(\omega, \chi; x, y) \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 $\sigma_{pc}$ ,  $\sigma_{Qxc}$ ,  $\sigma_{Mxc}$ 等は、荷重成分の変動流体圧  $p$ , 剪断力  $Q_x$ ,  $Q_y$ , 曲げモーメント  $M_x$ ,  $M_y$ 等によって生じる応力成分である。

(2) メガフロートの任意の箇所(ロンジ、スロット、ウォータタイト部)の応力  $\sigma_{pc}$ ,  $\sigma_{Qxc}$ ,  $\sigma_{Mxc}$ 等は、その箇所に作用する外力  $p$ , 内力  $Q_x$ ,  $Q_y$ ,  $M_x$ ,  $M_y$ の荷重成分に応力係数(stress factor)  $k_p$ ,  $k_{Qx}$ ,  $k_{Qy}$ 等を掛け合わせて求めることができるものと仮定する。

ここで、応力係数とは、浮体の詳細なFEM局部モデルに単一の荷重成分の単位荷重を作用させた場合の応力計算を行ない、対象とするロンジ、スロット、ウォータタイト部の算出された応力であると定義する。

$$\begin{aligned} \sigma_{pc,s}(\omega, \chi; x, y) &= k_p p_{c,s}(\omega, \chi; x, y) \\ \sigma_{Qxc,s}(\omega, \chi; x, y) &= k_{Qx} Q_{xc,s}(\omega, \chi; x, y) \\ \sigma_{Qyc,s}(\omega, \chi; x, y) &= k_{Qy} Q_{yc,s}(\omega, \chi; x, y) \\ \sigma_{Mxc,s}(\omega, \chi; x, y) &= k_{Mx} M_{xc,s}(\omega, \chi; x, y) \\ \sigma_{Myc,s}(\omega, \chi; x, y) &= k_{My} M_{yc,s}(\omega, \chi; x, y) \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、 $k_p$ : Fig. 4の詳細FEMモデルに単位の水圧を作用した時の応力検討部の応力。

$k_{Qx}$ ,  $k_{Qy}$ : Fig. 4の詳細FEMモデルに単位のせん断力を作用した時の応力検討部の応力。

$k_{Mx}$ ,  $k_{My}$ : Fig. 4の詳細FEMモデルに単位の曲げモーメントを作用した時の応力検討部の応力。

よって、一般に、対象とする構造詳細部を  $i$ , 荷重成分を  $j$ とすると、その箇所の波浪による応力応答の波浪と同位相、逆位相の応力成分  $\sigma_{ic,s}(\omega, \chi; x, y)$ は、外力、内力成分の波浪と同位相、逆位相成分を  $A_{jic,s}(\omega, \chi; x, y)$ , それらによる応力係数  $k_j$ とすれば、次式から求めることができる。

$$\sigma_{ic,s}(\omega, \chi; x, y) = \sum_{j=1}^N k_j A_{jic,s}(\omega, \chi; x, y) \quad (5)$$

応力振幅は、次式となる。

$$\sigma_i(\omega, \chi; x, y) = \sqrt{(\sigma_{ic}(\omega, \chi; x, y))^2 + (\sigma_{is}(\omega, \chi; x, y))^2} \quad (6)$$

応力係数を計算するFEM局部モデルは、浮体内部の荷重再配分などの性質を考慮した適切な設定が必要である。FEM局部構造モデルについては次の点に留意する必要がある。

ある。

- ① 局部構造モデルは、単一の荷重成分に対応させるために他の荷重成分の影響が混入しないように適切な荷重条件と境界条件の設定が重要である。
- ② 局部構造モデルは、通常、弾性応答解析のモデルよりも詳細化されているため弾性応答解析においては現れない荷重の再配分が生じるため、その影響を考慮したものとする必要がある。

### 2.3.3 計算例

底板縦通材のスロットを例として、内力、外力が同時に作用するときの具体的な計算法を以下に示す。

トランスバークヘッドに設けられる底板スロットの応力は主として変動水圧  $p$ 、横曲げモーメント  $M_y$  及び横剪断力  $Q_y$  の三つの荷重成分によって生じると考えることができる。底板スロットの応力係数を Fig. 4 の構造 FEM モデルから求める場合、前項において述べた FEM 構造モデルの変動水圧  $p$ 、横曲げモーメント  $M_y$  及び横剪断力  $Q_y$  の荷重成分に対する周辺条件は、Fig. 5 のようになる。具体的な注意点は以下のとおりである。

#### a) 底板水圧： $p$

スロットに対して水圧による応力のみが生じるような荷重と境界条件とする。そのためにスロットから最も離れたモデルの上縁を固定し底板に水圧を作用させる。この状態でこの局部構造モデルの曲げ変形及び剪断変形は生じない。モデル両端の影響を受けないモデル中央部スロットの応力分布を応力係数として採用する。

#### b) 横曲げモーメント： $M_y$

浮体の幅方向の純曲げ状態となる荷重と境界条件とする。図では表示の便宜上モデル両端に曲げモーメントを作用させているが、実際には剛体変位が生じないように、これと応力分布が同一になる条件として一端を固定し他端にモーメントを作用させる。a) と同様、モデル中央部スロットの応力分布を応力係数として採用する。

#### c) 横剪断力： $Q_y$

浮体の幅方向の剪断力のみが作用する状態となる荷重と境界条件とする。図に示す荷重と境界条件によってモデルは剪断曲げ荷重によって曲げモーメントと剪断力が混在する状態となるが、モデル中央のみで曲げモーメントが 0 となり剪断力のみが作用する状態となる。従って、剪断力の影響のみを抽出するためにはモデル中央部スロットの応力分布を応力係数として採用することが必須である。

Fig. 5 に示すようなそれぞれの荷重成分に対応する境界条件から求めた単位荷重によるスロット周辺の応力分布は Fig. 6 のようになる。スロット周上では、荷重成分の種類によって応力分布形状が異なる。Fig. 6 では、スロット周上に有限要素の番号  $i$  を図に示すように付けている。本研究では、Fig. 6 の要素番号 21~26 の間のスロット周応力の最大値を対象としてスロットの応力係数とした。

メガフロートの任意の箇所  $(x, y)$  のスロット応力振幅  $\sigma_{SL}$  は、Fig. 5 に示すような境界条件のもとで詳細 FEM 構造から応力係数を計算し、位置  $(x, y)$  の変動水圧  $p$ 、横曲げモーメント  $M_y$  及び横剪断力  $Q_y$  より次式で算出できる。

$$\sigma_{SL}(\omega, \chi; x, y) = \sqrt{\sigma_{SLp}(\omega, \chi; x, y)^2 + \sigma_{SLM}(\omega, \chi; x, y)^2 + \sigma_{SLQ}(\omega, \chi; x, y)^2}$$

$$\sigma_{SLp}(\omega, \chi; x, y) = k_p p_c(\omega, \chi; x, y) + k_{Qy} Q_{yc}(\omega, \chi; x, y) + k_{My} M_{yc}(\omega, \chi; x, y)$$

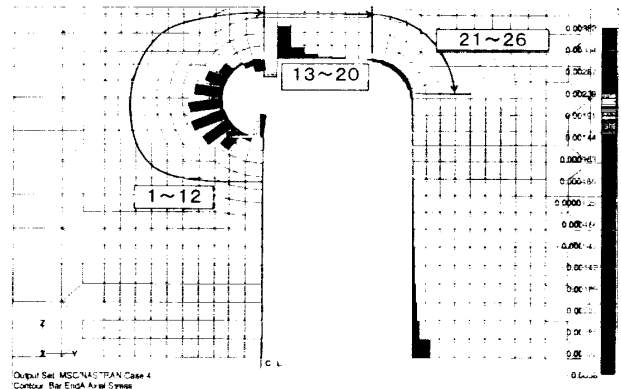


Fig. 6(a) Stress factors of the slot (Load component - Hydrodynamic pressure)

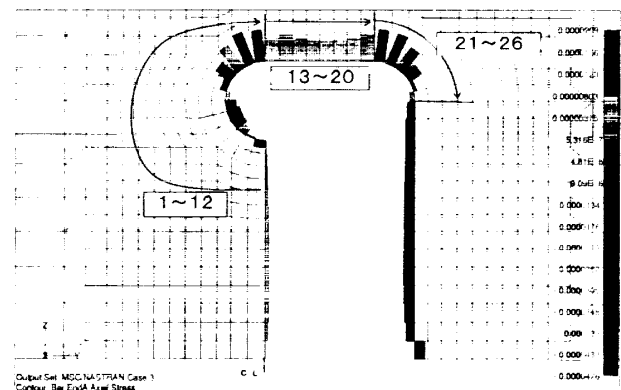


Fig. 6(b) Stress factors of the slot (Load component - Transverse bending moment)

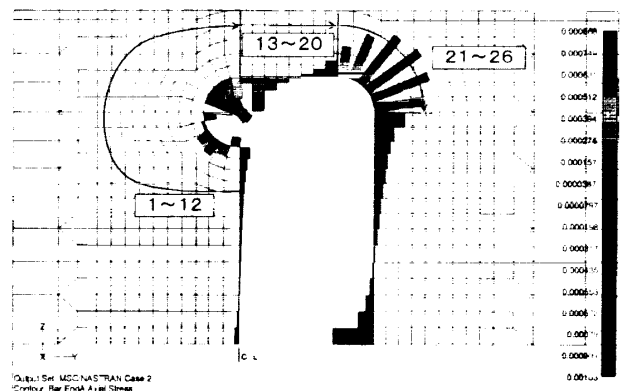


Fig. 6(c) Stress factors of the slot (Load component - Transverse shear force)

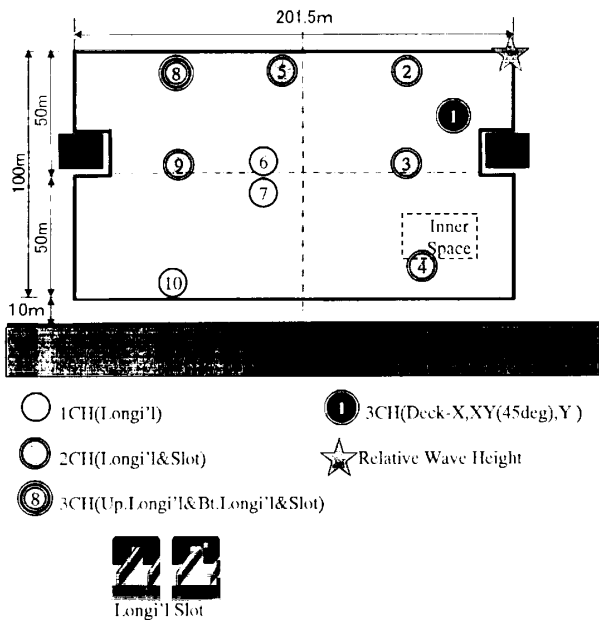


Fig. 7 Positions and details of measuring point

$$\sigma_{SLs}(\omega, \chi; x, y) = k_p p_s(\omega, \chi; x, y) + k_{qy} Q_{ys}(\omega, \chi; x, y) + k_{My} M_{ys}(\omega, \chi; x, y) \quad (7)$$

本方法の長所として、同一構造詳細が浮体の全体にわたって配置されていると仮定した解析が可能であることと、弾性応答解析結果が共通に使用できるため同一構造詳細で無い時は、詳細構造を入れ替えることによって各種の構造詳細に対する検討が可能であるということがあげられる。

浮体構造には波荷重に起因する変動水圧や慣性力、縦横の曲げモーメントや剪断力などの単一または複数の荷重成分の荷重が作用する。これらの荷重に対して応力係数法は、上記の計算例を含み構造隔壁の大開口部、浮体内部鉄道のトンネル構造、甲板桁と底板桁で構成される空洞構造、係留支承部の複雑構造、底板縦通材、甲板開口部など各種の詳細構造に適用できると考えられる。

以上のような2段階解法によって、Fig. 7に示す箇所のロンジ、スロット、ウォータタイト部の応力応答関数を計算した。Fig. 8に一例を示す。

#### 2.4 不規則波中の応答

応力応答関数  $\sigma_i(\omega, \chi; x, y)$  と波スペクトル  $f(\omega, \chi; H, T)$  とを線形重ね合わせ、不規則波中の応力応答スペクトル  $S_i(\omega, \chi; x, y, H, T)$  を求める。

$$S_i(\omega, \theta; \chi; x, y, H, T) = \sigma_i(\omega, \chi; x, y)^2 f(\omega, \theta; \chi; H, T) \quad (8)$$

ここに、 $\theta - \chi$  は、波の主進行方向  $\theta$  と波の方向分布成分  $\chi$  との差である。

短期不規則海象中の応力応答の標準偏差  $R(\theta; x, y, H, T)$  は、次式より計算される。

$$R(\theta; x, y, H, T) = \sqrt{\int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^{\infty} S_i(\omega, \theta; \chi; x, y, H, T) d\omega d\chi} \quad (9)$$

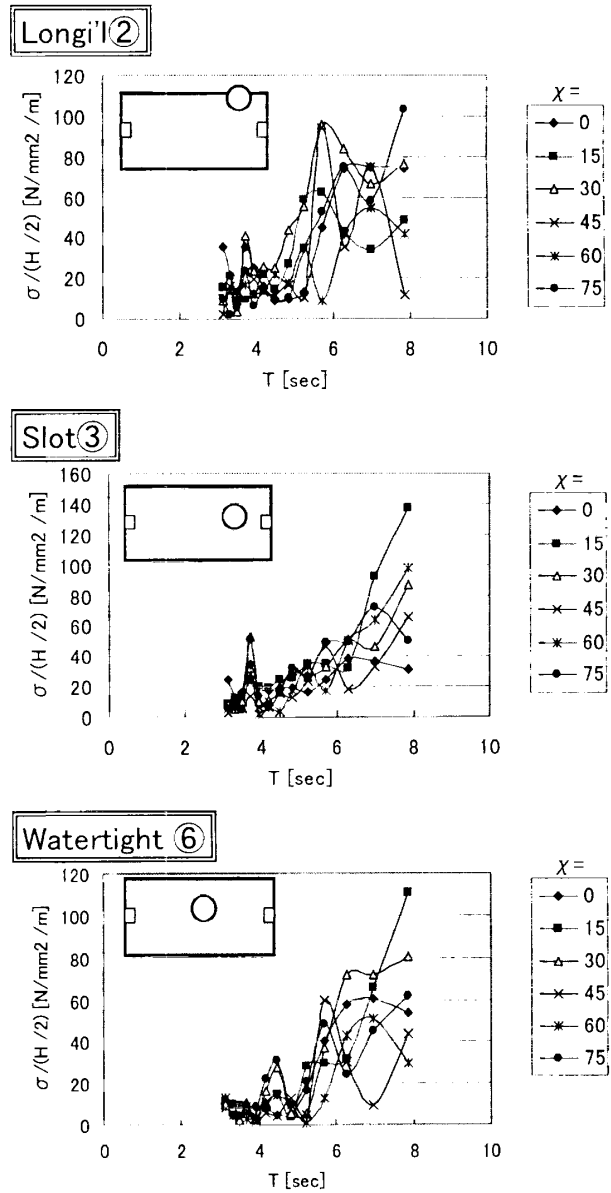


Fig. 8 Response function of local stress in regular wave

短期不規則波中の応力応答の確率分布が Rayleigh 分布に従うとすると、応力の有義値  $\sigma_{i,0.3}(\theta; x, y, H, T)$  は次式で近似できる。

$$\sigma_{i,0.3}(\theta; x, y, H, T) \approx 2R(\theta; x, y, H, T) \quad (10)$$

ここで、波スペクトルはメガフロートの設置海域の海底、風の吹送距離を考慮して、比較的浅い水深のスペクトルに対応する JONSWAP 波スペクトルを用い、波の方向分布は大洋に比べて集中度が高い方向分布関数である  $\cos^4$  乗分布を採用した。

#### 2.5 長期使用にわたる疲労被害度の計算

応力応答関数の応用例として、メガフロートが長期間にわたり使用されたときの構造部材に蓄積される疲労被害度の計算法を示す。

メガフロートの構造部材に生じる応力は、不規則な波浪

によって誘起されるので、ランダム荷重による疲労強度評価となる。そのような場合の疲労強度評価手法は、累積疲労被害度 (Miner 則) あるいは亀裂進展予測法などが提案されている。現在のところ、主要船級協会の船体構造の疲労強度評価は、累積疲労被害度を用いて行われている。メガフロートの構造部材の疲労強度評価も累積疲労被害度を採用する。

前節で検討したメガフロートの底部のロンジ、スロット、ウォータタイト部材について累積疲労被害度の計算を行う。計算の仮定は以下のとおりである。

### 2.5.1 構造部材の経年劣化を考慮にいたった疲労被害度の計算法

有義波高  $H$ 、平均波周期  $T$  の短期の不規則海面での応力の頻度分布は、Rayleigh 分布とし、そのパラメータ  $R$  は前節のようにして求める。メガフロートの位置  $(x, y)$  における構造に対して、この海象中において  $n_0$  時間の間に波浪により構造に生じる変動応力値が  $\sigma$  の作用回数  $n(\sigma)$  は次式となる。

$$n(\sigma) = \frac{n_0 \times 3600}{T} \frac{\sigma}{R^2(\theta; x, y, H, T)} \times \exp\left\{-\left(2R^2(\theta; x, y, H, T) \frac{\sigma^2}{R^2(\theta; x, y, H, T)}\right)\right\} \quad (11)$$

構造物の疲労亀裂発生 of S-N 線図を次式で表されるものとする、

$$\sigma = C\{N(\sigma)\}^n \quad (12)$$

ここで、 $C, n$  は構造、材料によって決まる常数。

短期不規則波中での構造物に蓄積される疲労被害度  $D_s(\theta; x, y, H, T)$  は次式となる。

$$D_s(\theta; x, y, H, T) = \int_0^\infty \frac{n(\sigma)}{N(\sigma)} d\sigma = \frac{n_0 \times 3600}{T} C^{1+n} 2^{1+2n} I\left(1 - \frac{1}{2n}\right) R(\theta; x, y, H, T)^{1+n} \quad (13)$$

メガフロートの設置海域において、短期の不規則海象  $(\theta; H, T)$  の統計頻度が  $p(\theta; H, T)$  と与えられていると、1 年間に蓄積される疲労被害度  $D$  は次のように計算される。

1 年間に遭遇する短期の不規則海象の総合計は、

$$N = \frac{365 \times 24}{n_0} \quad (14)$$

回である。したがって、短期の不規則海象  $(\theta; H, T)$  の発生回数は

$$N \times p(\theta; H, T)$$

である。

よって、その海象  $(\theta; H, T)$  による年間の疲労被害度は

$$N \times p(\theta; H, T) \times D_s(\theta; x, y, H, T) \quad (15)$$

となる。

すべての波向き、波高、波周期の組み合わせを合計すれば、1 年間に蓄積される疲労被害度  $D(x, y)$  は求められ

る。

$$D(x, y) = \int_0^\infty N \times p(\theta; H, T) \times D_s(\theta; x, y, H, T) d(\theta; H, T) \quad (16)$$

メガフロートは長期にわたる使用を目的としている。海水環境において、浮体の鋼材は経年化により腐食の発生と進行の可能性がある。これによる構造の断面積変化に伴う応力の増加を考慮することが必要である。腐食による鋼材の板厚減耗率の長期の計測例は、一般の商船の報告例<sup>5)</sup>はあるが、メガフロートでは取得されていない。そこで、腐食減耗率の経年変化としてバルクキャリアーの Oil 系塗装された貨物倉内の倉内肋骨上部の減耗統計値を使用する。文献<sup>7)</sup>では腐食減耗の発生と進行モデルが提案されている。多数の腐食減耗データを統計解析して得られた平均的な腐食減耗の進行データとして 50% のカーブを採用する。メガフロートの使用形態から考えると、多様な貨物を積載するバルクキャリアーのデータはやや過酷な減耗率とも言えるが、安全性の確保と言う意味で採用する。与えられる減耗率を用いて年と共に板厚が同様減耗すると仮定し、応力の応答関数を更新して疲労被害度を計算する。

2.5.2 S-N 線図, 短期の不規則海象  $(\theta; H, T)$  の統計繰り返し荷重によって疲労亀裂が発生する状況を表す S-N 線図は、部材ごとの幾何学特性および材料特性に応じて異なるとも考えられるが、ここでは船舶の疲労被害度の検討に用いられる DNV の S-N 線図<sup>9)</sup>を使用する。すなわち、 $C = 19800$  [N],  $n = -1/3$  を用いる。

メガフロートの設置海域の長期の波浪統計は、沿岸開発技術センターにより計測された東京湾の第 2 海保の統計<sup>9)</sup>を用いる。

### 2.5.3 メガフロートのスロット、ロンジ、ウォータタイトの疲労被害度予測分布

メガフロートを長辺方向に 51 分割、短辺方向 27 分割し、その格子点上の応力応答関数を 2.3 の方法によって計算し、不規則波中のパラメータを求める。このパラメータから上記の計算法によってスロット、ロンジ、ウォータタイトの経年化を考慮に入れた疲労被害度を計算する。次にメガフロートを  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$  のブロックに分け、そのブロックの中の疲労被害度の平均値をブロックの疲労被害度と定義をする。

メガフロートの全体の中でスロット、ロンジ、ウォータタイトの疲労被害度がどのように分布をしているかを表現するため、使用年数を 100 年とした時の各ブロックの疲労被害度の値から内挿を行い疲労被害度の等高線を Fig. 9 のように求めた。疲労被害度は、全般に波上側の構造が高い。船舶と同様に、疲労被害度は、波向きに敏感であることが分かる。この図によって、メガフロート内部構造のどの位置のどの部材がもっとも疲労亀裂が発生の可能性が高いか見ることができ、重点検査箇所を特定することができ

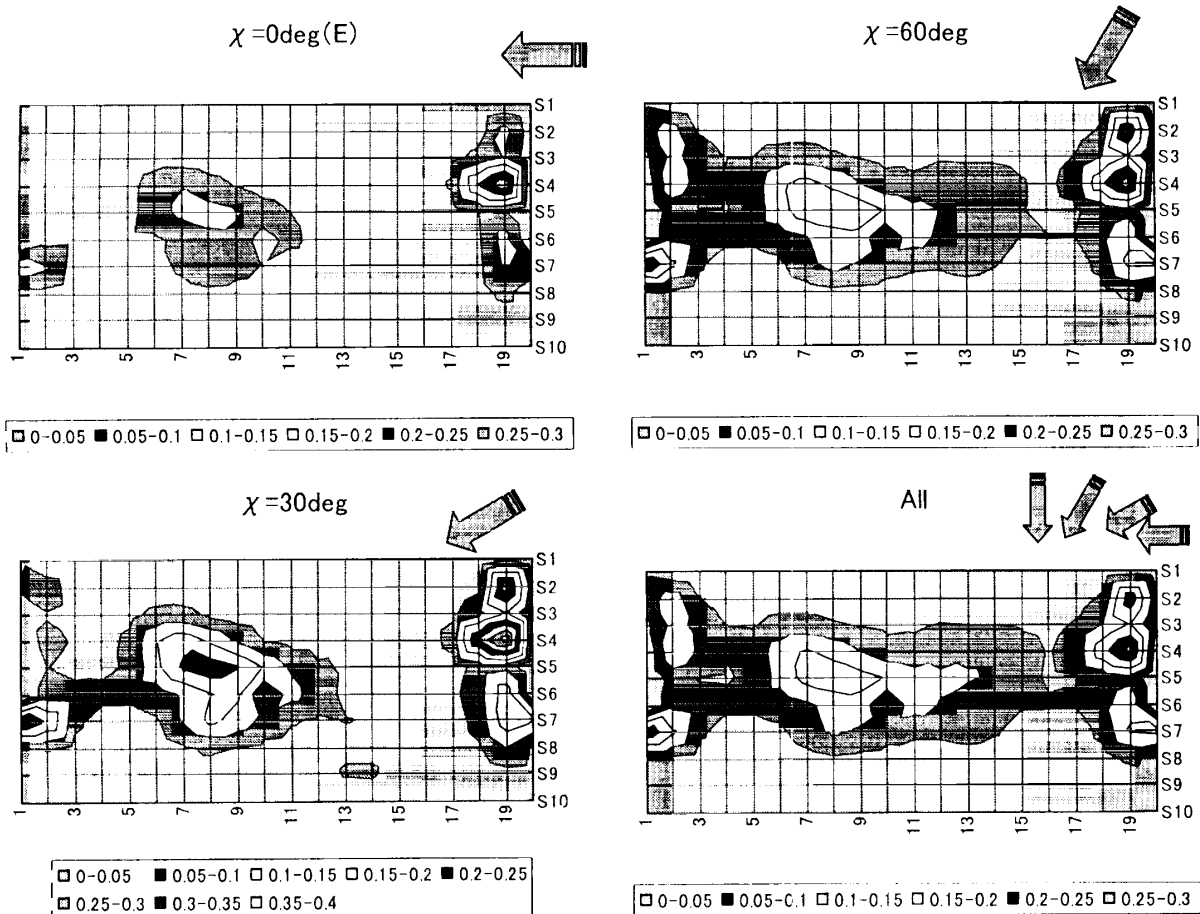


Fig. 9 Distribution of cumulative fatigue damage of Slot after 100 years from construction

るので便利である。

### 3. 実海域実証試験

#### 3.1 計測方法

メガフロートの全体構造の応力状態が把握できる箇所をモニタするため、縦通材のフェイス部、横隔壁の縦通材貫通スロット周り等に合計20点の歪ゲージを貼付した。歪ゲージは長期間の計測に耐えられるよう溶接タイプのKCW 5 120 G 10 11 G 3 m 3 s (共和電業製)を使用した。計測箇所をFig. 7に示す。

計測は毎正時から30分間の自動計測によって行い、ほぼ半年分のデータをPCに記録した。また、データ収録のサンプリング周波数は5 Hzに設定した

#### 3.2 データ処理方法

計測によって得られた時系列データの中には、電気的ノイズが含まれているものがあるため、スパイクノイズが確認されるデータについては解析の対象から外し、また、時系列波形に含まれる高周波ノイズの成分を除去するため、移動平均により応答のピーク値を落とさない程度の平滑化処理を施した。本研究では冬季のデータで正常な計測が行われた約1000の30分間の短期海象中における計測時系列データを解析対象とした。

また、30分間を短期海象としたときの波浪条件は、波高、波周期については浮体の北東端に設置した波高計によって計測された相対波高データの解析結果を使用し、波向きについては沿岸気象情報配信システム (Coastal Oceanographic Meteorological Information System; COMEINS) により提供されたデータを参考にした。

#### 3.3 短期海象中での浮体の構造応答

30分間の歪の計測データからゼロアップクロス法によりPeak to Peak間の頻度分布を求め、統計解析を行った。Fig. 10にPeak to Peakの平均値と有義値及び1/10最大値の関係を示す。1番目の図は、浮体の沖側で計測を行った相対波高の統計解析結果で、2番目、3番目はロング、スロットの構造応答の統計解析結果を表している。図中の直線は、頻度分布がRayleigh分布に従うと仮定したときの理論値である。また、Fig. 11に1例として解析を行った中で構造応答の大きかった計測データのPeak to Peakの確率密度分布を示す。このときの出会い波の数は493であった。これらの解析結果から30分間の計測時間ではカウント数が少ないため、多少のばらつきが認められるものの、今回の実験海域においては、波浪条件及び浮体の構造応答は共にRayleigh分布に従うといえる。

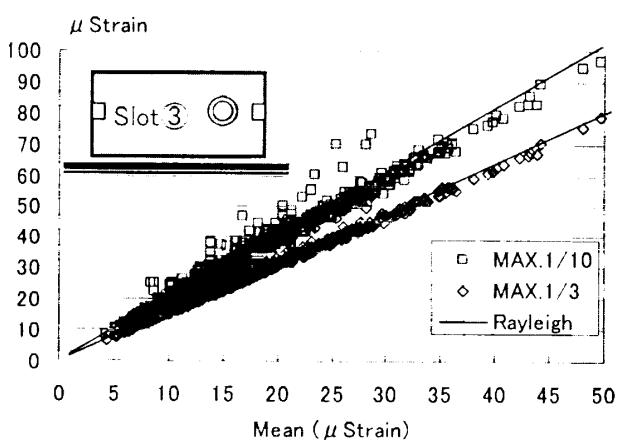
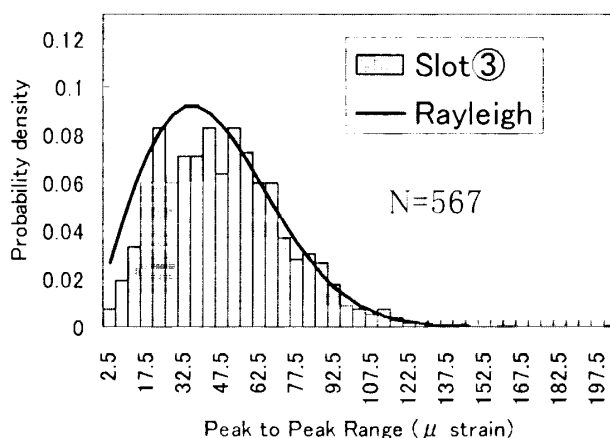
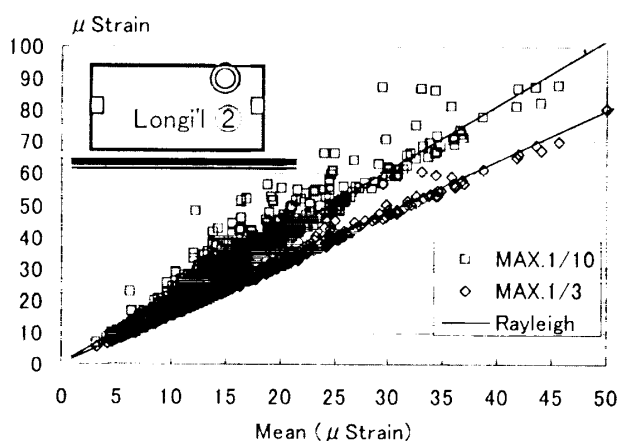
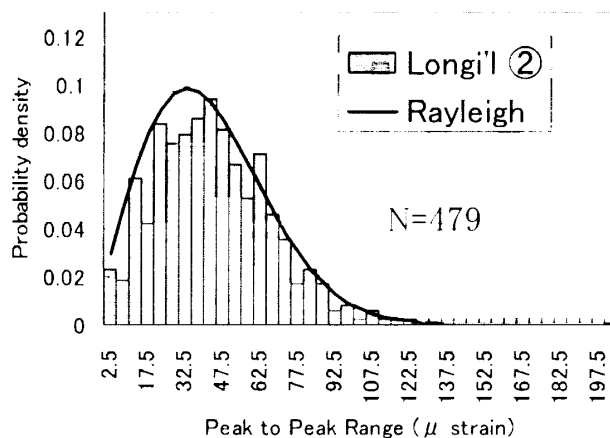
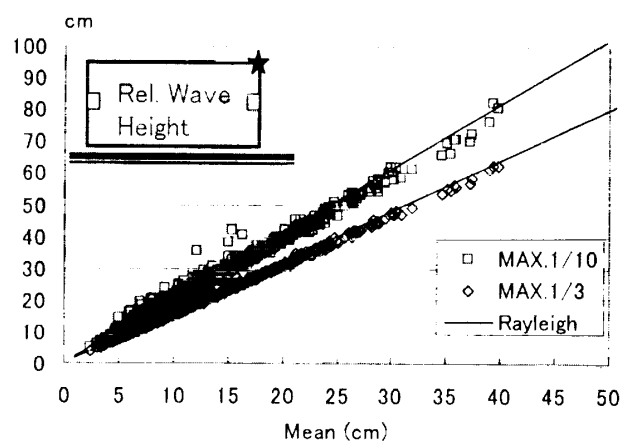


Fig. 11 Fittings of Rayleigh distribution in short term wave condition

Fig. 10 Correlation between peak to peak mean and significant value

### 3.4 計測箇所による構造応答の差異

Fig. 12 に応力の Peak to Peak の有義値とピークカウント数の例を示す。このときの平均波周期, 有義波高, 波向きはそれぞれ  $T_s=3.65$  秒,  $H_s=58$  cm,  $\chi=60^\circ$  であった。ロングについては, 波上となる沖側 (②, ⑤, ⑧), 東側 (②, ③, ④) の応力が大きく, 波下となる岸壁側 (④, ⑩), 西側 (⑧, ⑨, ⑩) の応力が小さくなる傾向にある。スロットは計測点数が少ないため評価し難いが, 計測箇所④で応力が大きいのは, 内部空間を利用するために

トランス及びロングバルクヘッドの一部に大きく開口が設けられているので, 局所的な剛性が減少したことが影響したと考えられ, 沖側 (②, ⑤, ⑧) の計測箇所では応力が小さいのは, 浮体北側の自由端付近であるため変形による横曲げモーメント・横せん断力が作用しなかったことによるものと考えられる。

また, ピークカウント数 (繰り返し応力の発生数) については, ロングでは浮体の中央部 (③, ⑥, ⑨) で少なく, 浮体のコーナー部に近い箇所 (②, ④, ⑧, ⑩) で多くなる傾向にある。この理由としては, 岸壁側では波の反射による影響からカウント数が多くなり, 浮体中央部ではロング応力の応答が小さかったためゼロアップクロスのカウントにかからない波形があったことが原因として考えられる。さらに歪計測箇所の固有振動数の差異や入射波エネルギーの散逸による変動水圧の周期の変化なども原因となっていると考えられる。Fig. 13 は全解析データの繰り返し応力の累積発生数であり, ほぼ同様の傾向となる。例での繰り返し応力の数はスロット部で出会い波の数を上回る箇所があるが, 累積データでは出会い波の数を上回る箇所は減少し, 繰り返し応力の発生回数と出会い波の回数はほぼ同程度の結果となった。よって疲労強度計算において設

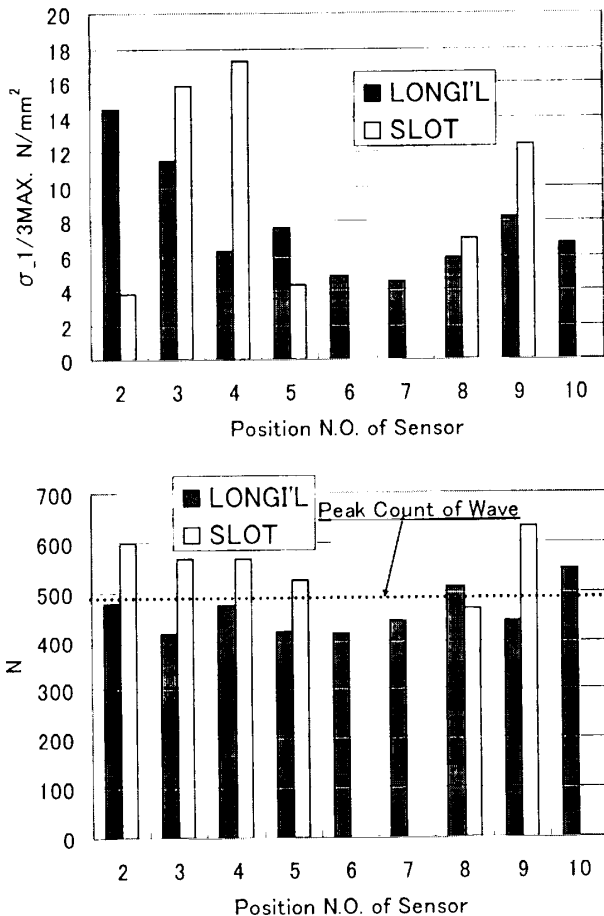


Fig. 12 Measured stresses and peak counts in a case of wave condition

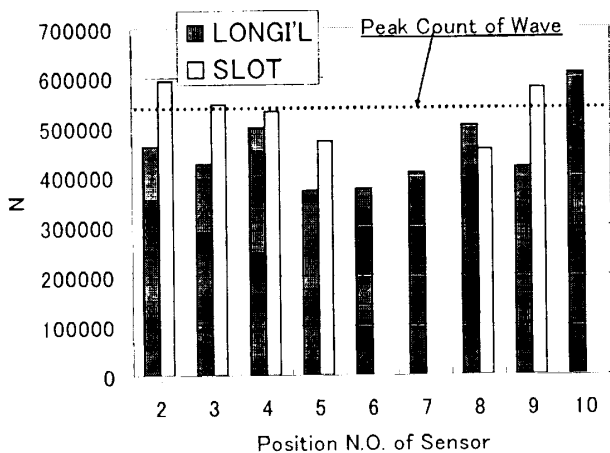


Fig. 13 Total peak counts through the all analyzed data

置海域の平均波周期を使用することは安全上問題ないといえる。構造詳細部で見ると全体的にロンジの応力の繰り返し数よりもスロットの応力の繰り返し数のほうが多く、ロンジとスロットの局所的な構造の違いによって同一箇所でも最大3割程度の差が生じたものの、疲労強度に影響を及ぼすほど大きな差は確認されなかった。

### 3.5 入射波の波周期に対する応力応答

波周期による応力応答を Fig. 14, Fig. 15 に示す。グラフの表示位置は浮体上の計測位置に対応している。グラフの横軸には有義波周期をとっており、プロットは全実験データの応力の有義値をデータ毎の有義波高で割った値、曲線は2段階解法による不規則中応答の計算値である。実験値の有義波高、波周期は、浮体上の北東部に設置された相対波高の時系列データの統計解析値を使用した。

ロンジについて、計算値は実験値との比較から、良好な計算精度を有しているといえる。前述の例で示した沖側、東側で応力応答が大きく、岸壁側、西側で応力が小さくなる傾向は全解析データについていえることが分かり、また、計算値もその傾向を定性的にも定量的にも良く捕らえている。計算値に見られるような明確なピーク周期は実験では見られなかったが、長周期になるにつれて応力が頭打ちとなる傾向はロンジ応力の全ての計測箇所において確認でき、また、計算のピーク値を超えるデータも本実験からは得られていないことから、本計算法は疲労強度計算を行う際の応力推定法として有効であるといえる。

スロットについては、応力集中の大きい箇所であるということもあり、ロンジほどよい精度を得ていない。沖側の3点(②, ⑤, ⑧)で実験値が計算値と比べて大きいのは波エネルギー吸収装置であるカーテンウォールが浮体の沖側に取り付けられているため、理論では端部でゼロとなる横曲げのモーメントが実際には作用していたことが原因と考えられるが、沖側の計測箇所の実験値は他の計測箇所と比べて相対的に小さいため問題にはならない。言い換えるとカーテンウォールに作用する波浪荷重は浮体の強度上は問題ないレベルであったといえる。幅方向の中央の2点(③, ⑨)は、計算値が実験値を上回る結果となった。その原因としては、実証浮体はγ=0のラインで2ユニットの接合により形成されているため、接合部付近で強度部材が密となり応力が発生しにくかったことや計算過程における数値微分の精度等が挙げられるが、スロット周りは応力集中が発生しやすい構造詳細であることから、このレベルの安全余裕を持った推定値で強度評価を行うことは信頼性を図る上で必要であるといえる。計測箇所④は、計測位置が内部空間付近であるため、実験値が相対的に見て大きい、推定精度としては良好な結果を得ている。

以上の結果から、構造詳細部の疲労強度評価に係る応力応答の計算手法として本計算法の有効性が、実験的に確認された。

### 3.6 疲労被害度

Fig. 7 のスロット、ロンジ、ウォータタイトの応力の短期計測の頻度分布から疲労被害度を求め、この手順を約1000の短期計測に対して繰り返し合算し、計測期間中の各計測点の疲労被害度を求める。この疲労被害度は、約20日の稼働日数に対する値である。この値を(365/24×

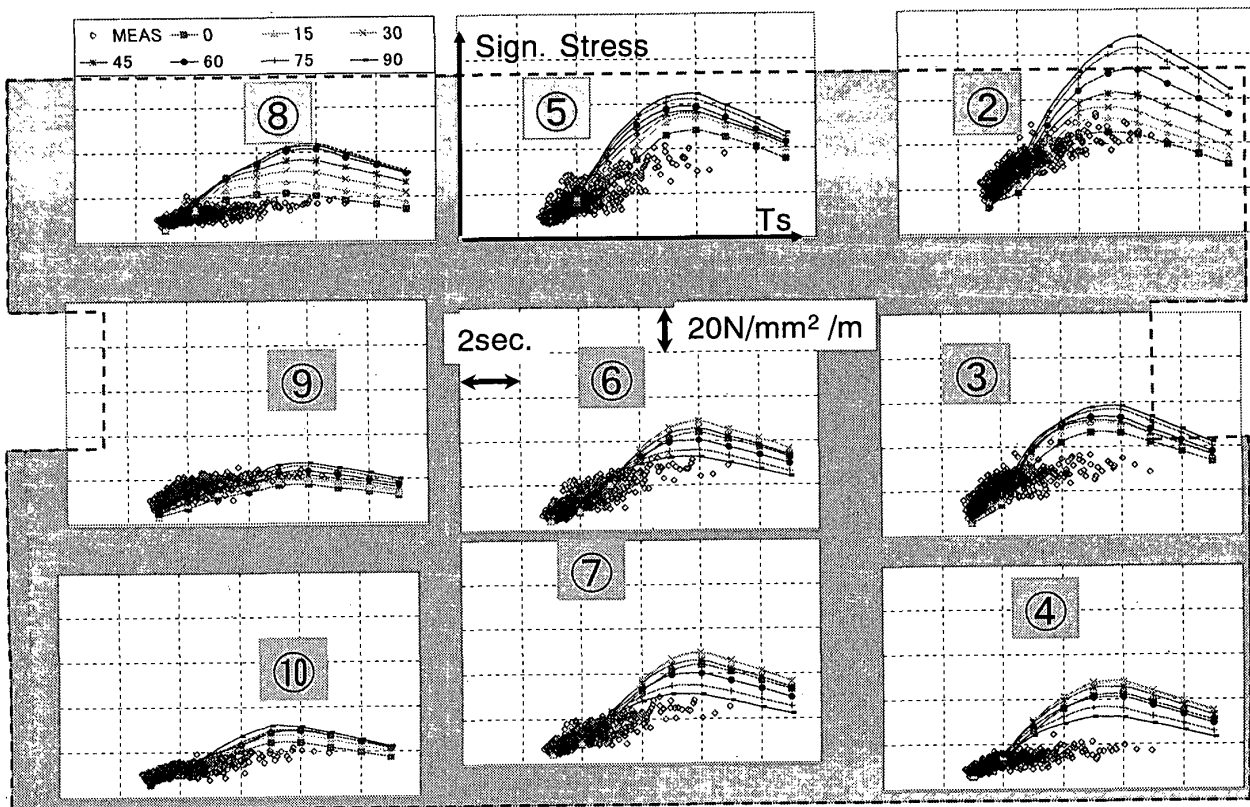


Fig. 14 Comparison of bottom longitudinal stresses in irregular wave between measurement and calculation

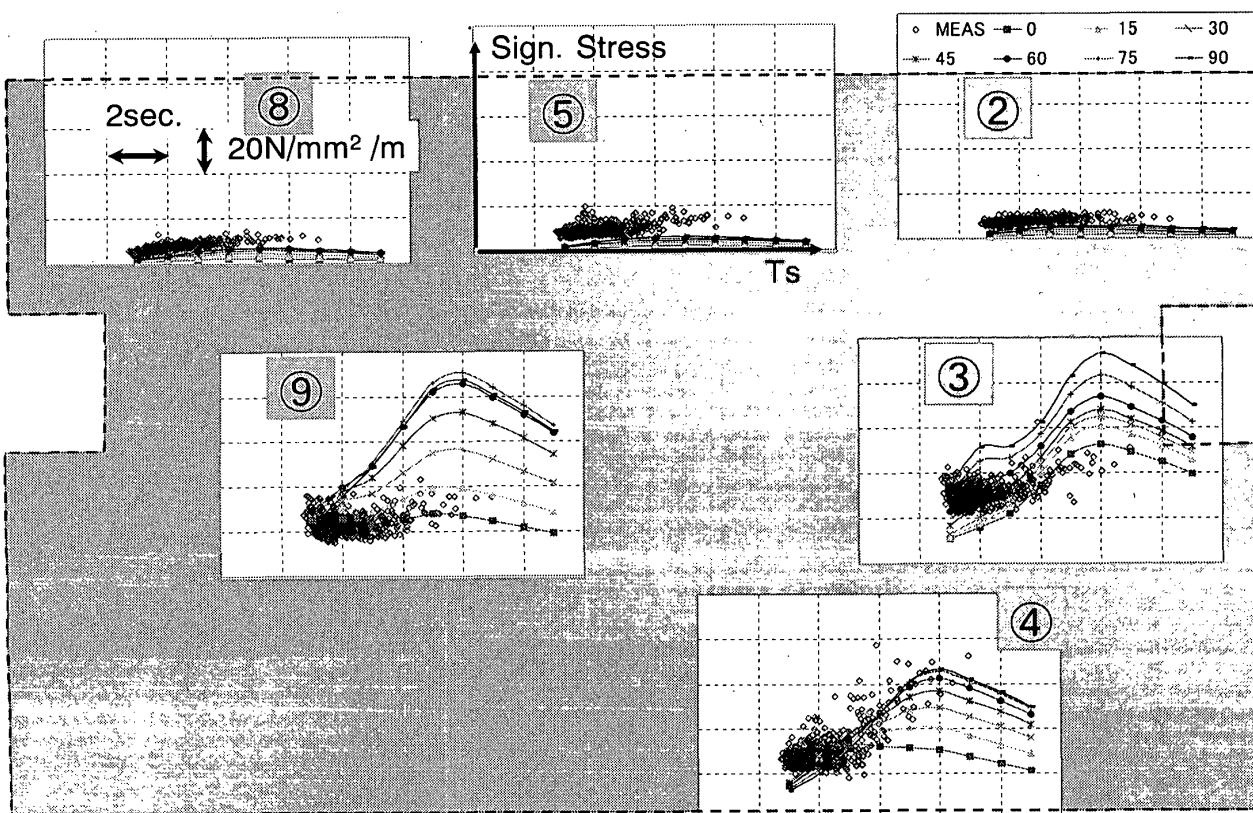


Fig. 15 Comparison of bottom slot's stresses in irregular wave between measurement and calculation

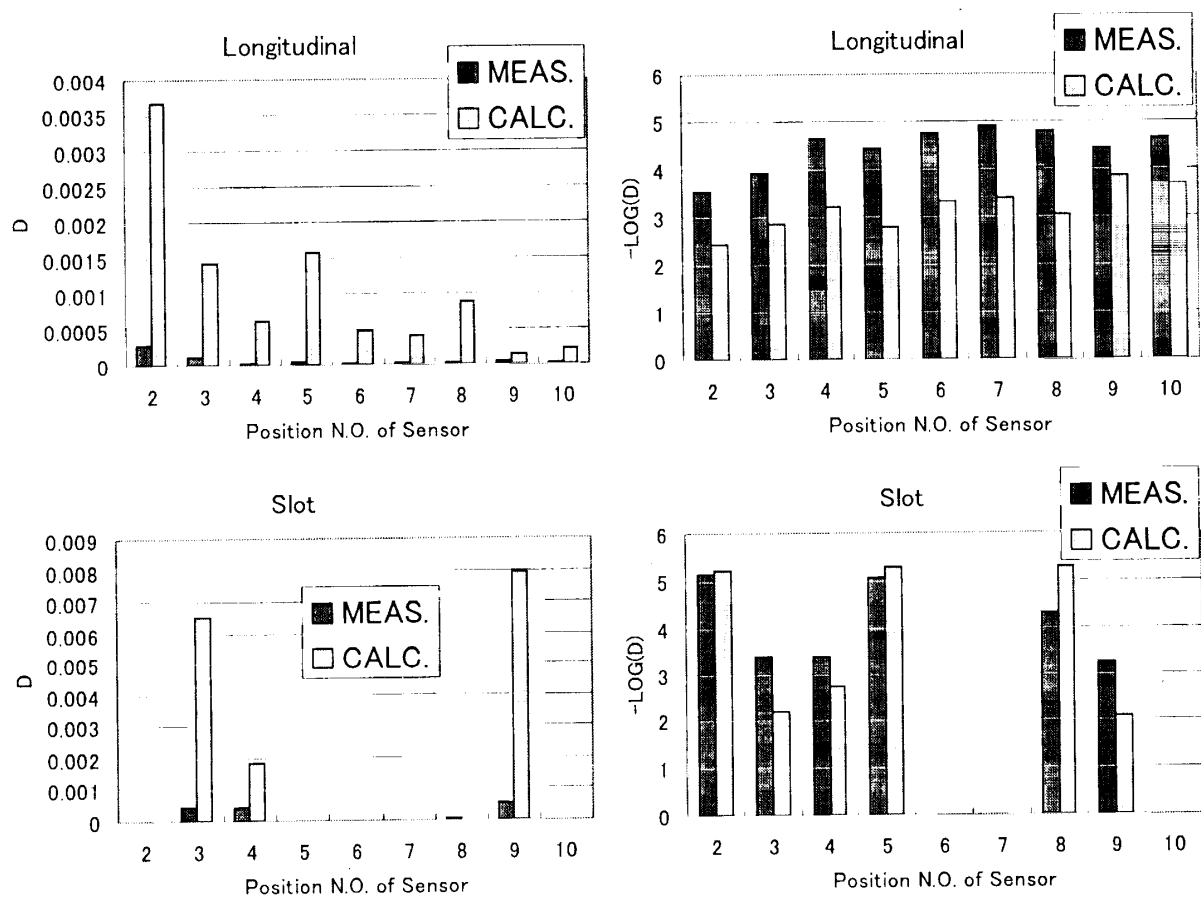


Fig. 16 Measured and calculated damage (Longitudinal & Slot) after 20 years from construction

20) 倍し, 20 年稼働後の疲労被害度に外挿した。対応する箇所の応力応答関数から 2.5 節の方法により 20 年稼働の疲労被害度の計算を行い, 計測値から予測される値との比較を Fig. 16 に示す。

図は横軸に Fig. 7 の対応する計測番号, 縦軸に疲労被害度を示している。この結果から, 計算値は計測値よりも疲労被害度を若干大きく見積もっていることが分かる。この原因は, Fig. 14, 15 の応力の短期計測と計算値との比較に見られるように, 計算値は計測値よりもやや大きい値となっているためである。疲労被害度は 2.5 節の式(13)に見られるように, 短期海象中の応力応答の標準偏差の  $1/n$  乗に比例する。SN 線図の傾き  $n$  は  $1/3$  であるので, 疲労被害度は標準偏差の 3 乗に比例する。したがって, 式(13)の応力の標準偏差の計算値と計測値との僅かな差が疲労被害度では拡大されて現れる。しかし, 疲労被害度の計測値と計算値は, オーダーおよびメガフロートの各位置の相対的な分布状況は表現できており, 本研究で行った構造詳細部の応力計算方法の妥当性を示している。

#### 4. 結 言

本研究は, 波浪中においてメガフロートの構造部材に生じる応力を詳細部に至るまで見積もる技術の開発を行い,

以下のような結論を得た。

- (1) メガフロート全体の波浪による公称応力応答を「詳細 3 次元解析法」で求め, 構造詳細部をズームした有限要素法により計算する 2 段階解法を用いて詳細部の応力応答を計算する手法を開発した。
- (2) 構造詳細部の応力応答計算の応用例とした, メガフロートの長期の使用期間にわたり構造部材に蓄積される疲労被害度を計算法を示した。使用中の構造健全性の目安として疲労被害度の分布表示をした。
- (3) 実海域の実証試験を行い, 構造詳細部の応力を精度よく予測できることを確認した。

#### 謝 辞

本研究は「メガフロート情報基地機能実証試験」として海上技術安全研究所が国土交通省より受託した各種の開発研究の一部を取りまとめたものである。熱心な御指導とご討論をいただいた国土交通省海事局技術課および当研究所海洋開発領域の関係各位に深くお礼を申し上げます。

#### 参 考 文 献

- 1) 瀬戸秀幸, 越智真弓, 太田 真, 河角省治: 超大型浮体式構造物における規則波中弾性応答の理論解析

- (第4報), 日本造船学会論文集, 第189号, (2001), pp. 47-54
- 2) 井上 清: 波荷重を受けるメガフロート浮体の構造解析, 日本造船学会論文集, 第187号, (2000), pp. 277-285
  - 3) 賀田和夫, 池淵哲朗, 浅尾元秀, 藤田卓也, 北林研一: FEM振動解析モデルを用いたメガフロートの剛性変化部の応力解析, 日本造船学会論文集, 第187号, (2000), pp. 287-294
  - 4) 笹島 洋: 大型浮体構造物の直接荷重法による局部強度解析, 日本造船学会論文集, 第187号, (2000), pp. 295-300
  - 5) メガフロート技術研究組合, (財)沿岸開発技術研究センター: メガフロートの総合安全性評価手法に関する研究P115, (2001)
  - 6) 井上 清: 超大型平板状弾性浮体構造物の構造解析法に関する研究, 九州大学学位論文, (2002)
  - 7) 山本規雄: 確率モデルに基づく浮力の発生及び進行の評価, 日本海事協会誌, No. 245, pp. 183-213, (1998)
  - 8) Det Norske Veritas: Fatigue Assessment of Ship Structure, 2001
  - 9) (財)沿岸開発技術研究センター: 全国港湾海洋波浪観測25ヵ年統計資料NOWPHAS 1970-1994, (1996)

#### 付録 波浪中弾性応答解析

浮体の波浪中応答は, 詳細3次元弾性応答解析プログラム<sup>1)</sup>(以下, 詳細3次元PGM)によって求めた。

詳細3次元PGMは, 防波堤・岸壁に扶まれた閉鎖性水域での超大型浮体の規則波中の弾性応答解析プログラムで, 複雑な浮体形状, 剛性・重量変化, 喫水変化まで含めた実機対応モデルの解析が可能である。構造部にNAS-TRAN またはそれと同等な汎用有限要素法を, 流体部に有限要素法の優れた数値計算特性と境界要素法並みの離散化特性を実現した領域分割型ハイブリッド有限/無限要素法を, 構造・水波の大規模連成解析にはモード法を採用して, メガフロートの各レベルの構造モデルとその実機形状や実海域に則したより実際に近い流場のモデル化に基づく構造・水波連成解析を実現している。

詳細3次元PGMの検証はこれまで多く行われており, その妥当性は確認されているが, 海底起伏がある海域での計算は, 単純な海底地形についてのみしか検証されていない。本実証実験の海域は複雑な海底地形を有しているため, 水槽において1/50縮尺の模型実験を行い海底地形モデルの妥当性について検討した。そのときの実験結果の一例をFig. A-1に, 海底地形モデルをFig. A-2に示す。

Fig. A-3に示すように, 構造モデルに関しては, 実機モデルを参考に, ロンジヤスティフナを考慮した等価なパネルでデッキ, ボトム, 隔壁をモデル化して, 全体として実証実験用浮体の諸元を満足するように設定した。なお構造モデルでは, Fig. A-4に示すバラスト重量, 内部空間,

IT実験棟による重量変化も考慮した。なお, 構造モデルの要素数は14,494, 節点数は5,436であった。

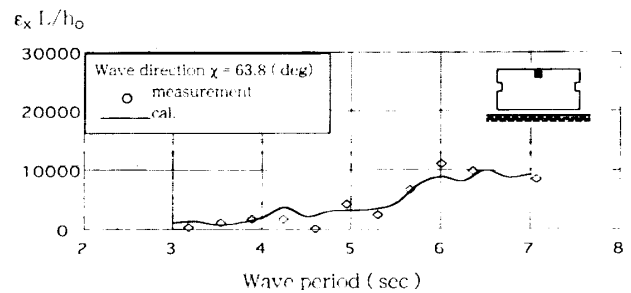


Fig. A-1 Comparison of wave induced deck strain of 1/50 scale mega float model between calculation and measurement

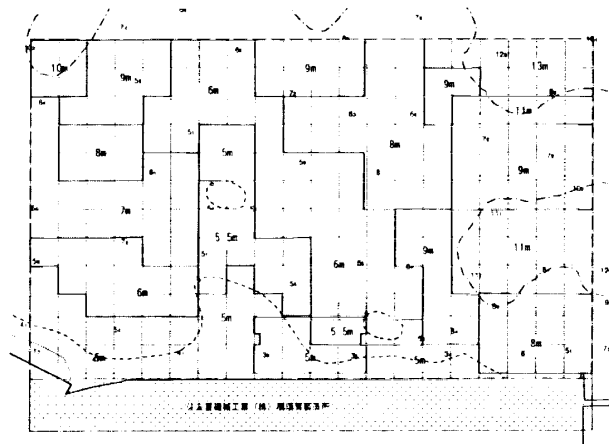


Fig. A-2 Model of the seabed around mega float for numerical calculation

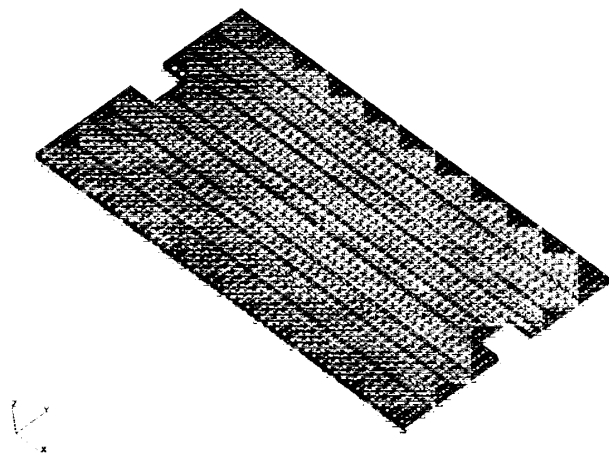


Fig. A-3 FEM model of mega float

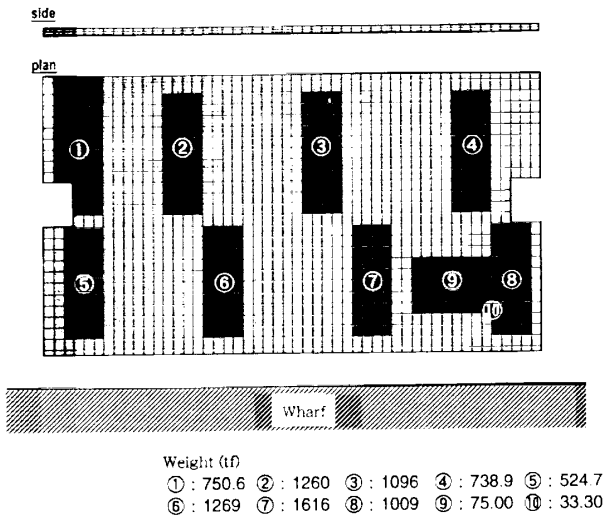


Fig. A-4 Weight distribution