

浮遊式海洋構造物の研究の現状 (その2)

——浮体の異常時の挙動, 曳航時の挙動, 模型試験法——

State of the Arts on Research of Dynamics of Moored Floating Offshore Structures (Part 2)
——Behavior in Survival and Transit Conditions, and Model Test Techniques——

前 田 久 明*
Hisaaki MAEDA

浮遊式海洋構造物は、固定式あるいは埋立式のそれに比べて、建造、設置、移動、環境対応、地震対応に多くの利点を有する。これらの利点を生かして、海洋観測ステーション、海洋石油掘削、海上空港、原子力発電所、廃棄物処理施設、海洋生物生産施設等が計画され、その一部は実現している。しかし、位置保持対策、動揺対策に問題点を有する。本稿ではこれらの問題点がどこまで解決し、何が未解決であるかについて解説するものである。(その2)では、安全性に係わる問題点と、模型試験法について述べる。

1. はじめに

本稿では係留されたライザー管付浮遊式海洋構造物の風、波、潮流の環境外力下での挙動に関する研究のうち、浮体の異常時の挙動、曳航時の挙動、模型試験法に関する研究の現状と不確かさの残る点を解説することにする。「浮遊式海洋構造物の研究の現状 (その1) —海洋の自然環境、浮体の稼働時の挙動—」と併せて、浮遊式海洋構造物の研究の現状と動向を概観するものである。

浮遊式海洋構造物の現状は代表としてセミサブ型を扱うことにし、必要に応じて船型、TLP等も想定することにする。係留方式は主としてカテナリー係留を取り上げ場合により1点係留、TLPも取り扱うことにする。

2. 浮体の異常時の挙動

2.1 IMOのMODU Code¹⁾

浮遊式大型海洋石油関連構造物の2大事故を契機に、IMO(国際海事機構)はMODU Code(移動式石油掘削装置の安全規則)の改正にのり出した。その主要な点は復原性規則の大幅な見直しであった。その結果非損傷時復原性と損傷時復原性に代替規則が導入されることになった。非損傷時の代替規則は、海水流入規則と転覆規則により構成されている。これらの規則は、水槽における模型試験により検証された転覆運動方程式に基づいて導かれたものである。

非損傷時の代替規則の適用範囲は、

$$0.48 \leq V_p / V_t \leq 0.58 \quad (2.1)$$

$$0.72 \leq Aw_p / (V_c)^{2/3} \leq 1.00 \quad (2.2)$$

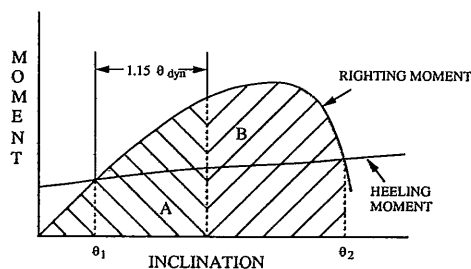


Fig. 2.1 Capsizing criteria⁽¹⁾

$$0.40 \leq Iwp / [V_c \times (L_{ptn}/2)] \leq 0.70 \quad (2.3)$$

であり、浮体形状は2ローハル・コラム型のセミサブに限定される。

1) 転覆規則

$$\text{面積 'B' / 面積 'A'} > 0.10 \quad (2.4)$$

Fig. 2.1における残存エネルギー'B'が動的応答エネルギー'A'の10%以上なければならない。この時の復原矩曲線と風による転倒モーメントは異常時の吃水に対応するものである。ただし、面積'A'はFig. 2.1での復原矩曲線で θ_1 と $(\theta_1 + 1.15\theta_{dyn})$ の間の面積であり、面積'B'は $(\theta_1 + 1.15\theta_{dyn})$ と θ_2 の間の面積である。 θ_1 は100 knotの風圧転倒モーメントとの第1交叉角であり、 θ_2 は第2交叉角であり、 θ_{dyn} は波浪と変動風による動的応答角度であり

$$\theta_{dyn} = (10.3 + 17.8C) / (1 + GM / (1.46 + 0.28BM)) \quad (2.5)$$

ただし

$$C = (L_{ptn}^{5/3} * VCP_{wl} * Aw * V_p * V_c^{1/3}) / (I_{wp}^{5/3} * V_t) \quad (2.6)$$

*東京大学生産技術研究所 第2部

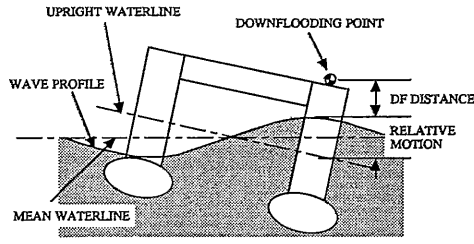


Fig. 2.2 Definition for downflooding⁽¹⁾

2) 海水流入規則

$$DFD_0 - RDFD > 0.0 \quad (2.7)$$

初期の水面から海水流入口までの距離 (DFD_0) が、異常時吃水で75 knot 風速の状況で動揺するときの水面から海水流入口までの距離の減少分より大でなければならない。

ただし DFD_0 は異常時の初期吃水 D_m から初期状態での海水流入口までの距離 (in m), $RDFD$ は海水流入口までの距離の減少分 (in m) で, SF ($k * QSD_1 + RMW$) となる. SF は非線形影響等の不確かさを考慮した安全率で1.10とする. k は修正係数で $k = 0.55 + 0.08(a - 4.0) + 0.056(1.52 - GM)$.

$a = (FBD_0 / D_m) \cdot (Sptn * Lccc) / Awp$ であり, $a \geq 4.0$, $GM \leq 2.44m$ となる. $QSD_1 = DFD_0 - (\theta_1$ における準静的海水流入距離) (in m) $\geq 3.0m$. $RMW = 9.3 + 0.11(X - 12.19)$ は θ_1 まわりの波による相対運動 (in m).

$$X = D_m (V_i / V_p) (A^2_{wp} / Iwp) (Lcc / Lptn) \geq 12.19m.$$

以上の式中の幾何学的パラメータを下記に説明する.

Awp は異常時吃水におけるブレーシング部材も含めた水線面積 (m^2). Aw は直立時の有効風圧面積で投影面積と形状係数と高度係数の積 (m^2). BM は直立時の浮心とメタセンターとの距離 (m), D_m は初期の異常時吃水 (m). FBD_0 は D_m から風雨密デッキ側面の上端部までの距離 (m). GM はメタセンター高さであって, 転覆規則に対するものは ' B/A ' が最小となる軸まわりの回転に対するものであり, この軸は通常対角方向でその方向の投影風圧面積が大きくなっている. 海水流入規則に対する GM は海水流入距離の残存量が最小となる軸まわりのものとする (一般に QSD_1 が最大となる軸方向となる) (m). Iwp は異常時吃水におけるブレーシング等の部材も含んだ水線面積の断面2次モーメントである (m^4). $Lccc$ は角部のコラムの中心間の長手方向距離である (m). $Lptn$ は各ローハルの長さである (m). $Sptn$ はローハルの中心線間の横方向の距離である (m). Vc はローハル上部からコラム上部までの全コラムの容積であり, 上部デッキに含まれる容積は除去するものとする (m^3). Vp は両ローハルの全容積であ

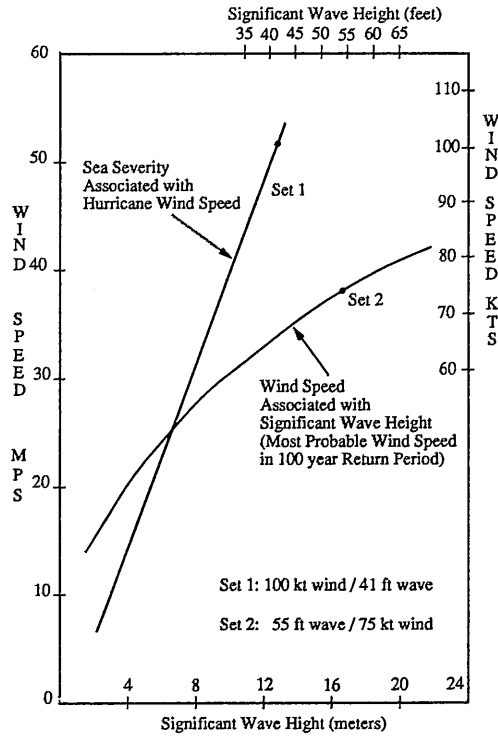


Fig. 2.3 Climate condition for MODU code⁽¹⁾

る (m^3). Vt は構造物の浮力を受持つ構造部材の全容積 (ローハル, コラム, ブレーシング) で, ベースラインからコラムの上端まで, 上部デッキに含まれる容積は除外する (m^3). VCP_{w1} は D_m 上の風圧面積の鉛直方向の中心である.

両規則に使用した海象条件を Fig. 2.3 に示す. 転覆規則に対しては風よりも波浪が厳しい Set 2 を使用し, 海水流入規則には波浪よりも風が厳しい Set 1 を用いている. Set 1 はメキシコ湾を想定し, Set 2 は北海を念頭においている.

2.2 大振幅運動方程式

転覆を含む大振幅運動を表現するためには, もはや微小振幅運動方程式 ((その1)の(3.1)式) では不足であり, 操縦運動方程式や航空機の運動方程式と同様の物体固定座標系で表示した運動方程式に依らなければならない. 転覆まで表現できる運動方程式は次式で表される²⁾.

$$\begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [T] & [O] \\ [O] & [S] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \\ p \\ q \\ r \end{Bmatrix} \quad (2.8)$$

$$\begin{Bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \\ \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{Bmatrix} = [[M] + [\mu]]^{-1} \begin{Bmatrix} F - m\omega \times V \\ \Gamma - \omega \times h \end{Bmatrix} \quad (2.9)$$

ただし, $(x_i, i = 1, 6)$ は物体固定座標で表した変位置量,

$$[T] = \begin{bmatrix} c_5c_6 & s_4s_5s_6 - c_4s_6 & c_4s_5c_6 + s_4s_6 \\ c_5c_6 & s_4s_5s_6 + c_4s_6 & c_4s_5c_6 - s_4s_6 \\ -s_5 & s_4c_5 & s_4c_5 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$c_i = \cos x_i$$

$$s_i = \sin x_i$$

$$[S] = \begin{bmatrix} 1 & s_4 \tan x_5 & c_4 \tan x_5 \\ 0 & c_4 & -s_4 \\ 0 & s_4/c_5 & c_4/c_5 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$V = [u, v, w]$ は瞬時の物体固定座標系での物体の速度, $\omega = [p, q, r]$ は角速度,

$$[M] = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & [0] \\ 0 & m & 0 & [0] \\ 0 & 0 & m & [0] \\ [0] & [0] & [0] & [I] \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$[I] = \begin{bmatrix} I_{XX} & 0 & -I_{XZ} \\ 0 & I_{YY} & 0 \\ -I_{ZX} & 0 & I_{ZZ} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

m は浮体の質量, I_{ik} は慣性乗積, h は角運動量ベクトル, F, Γ はそれぞれ全ての外力, モーメントで周波数無限大の付加質量は除外した。外力 F, Γ は, 入射波と散乱波による波強制力, 粘性流体力, 係留系等からの外力, 静水圧による力より構成される。

(2.8), (2.9) の 12 個の未知数に関する連立一次方程式を解くことにより浮体の転覆まで含めた運動を求めることができる。

セミサブの損傷時の横揺の実験と転覆運動方程式による結果を Fig. 2.4 に示す³⁾。計算結果は良好である。ま

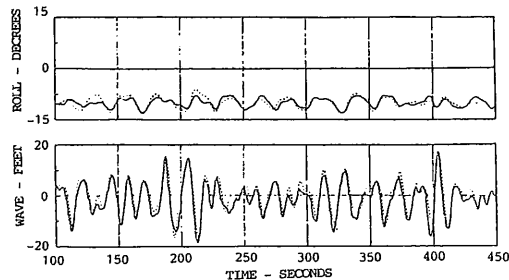


Fig. 2.4 Generic semi damaged condition⁽³⁾ Expt. —, Simulation...

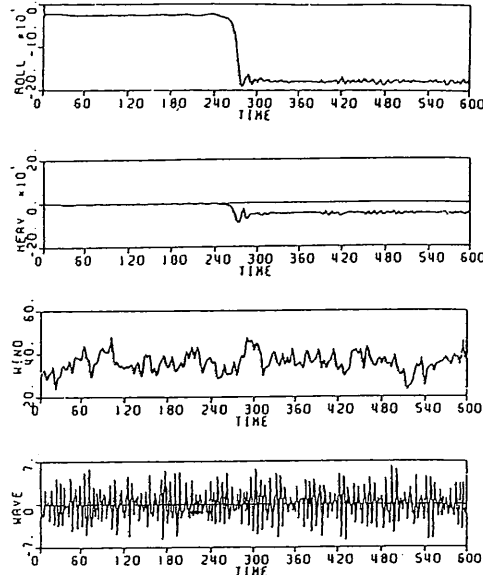


Fig. 2.5 Generic semi., damaged condition simulation of capsizing⁽³⁾

た損傷時から転覆にいたる計算例を Fig. 2.5 で示す³⁾。

2.3 転覆現象におけるカオスとフラクタル

船舶の rolling の転覆に関しては Thompson 等の一連の研究がある。彼等は復原力が 2 次の非線形となる特殊な場合を扱っている。これに対しては菅等は復原力が 3 次となる軟化スプリング系の強制ダフティング方程式を扱っている⁴⁾。転覆方程式は次式となる。

$$\ddot{\psi} + k\dot{\psi} + \psi - \psi^3 = B \cos(\Omega t + \delta) \quad (2.14)$$

この方程式の転覆に対する初期条件依存性はきわめて複雑である。初期条件 $\psi - \dot{\psi}$ の組み合わせに対して転覆した範囲を黒く図示したものが Fig. 2.6 である。強制力の振幅 B が大きくなるに従って転覆する初期条件の範囲が広がっていることが見てとれる。髭ができていいる図形を局所的に詳細に見てみると同じような図形が現れている。すなわちフラクタルとなっている。(2.14) 式のパラメータが適当であると, 跳躍, 周期分岐, カオス, 転覆に至る場合がある^{4), 5)}。

2.4 極値の統計解析

今, 長周期運動の方程式を単純化して次式で表すことにする。

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + cx = F_2(t) \quad (2.15)$$

2 次の波強制力 $F_2(t)$ のスペクトル $S_F(\mu)$ は, Pinkster によれば⁶⁾

$$S_F(\mu) = 8 \int_0^\infty S(\omega) \cdot S(\omega + \mu) \cdot \frac{\overline{F_2(\omega + \mu/2)}}{\zeta_a^2} d\omega \quad (2.16)$$

GRID = 301 x 301, $\kappa = 0.04455$, $\Omega = 0.905$

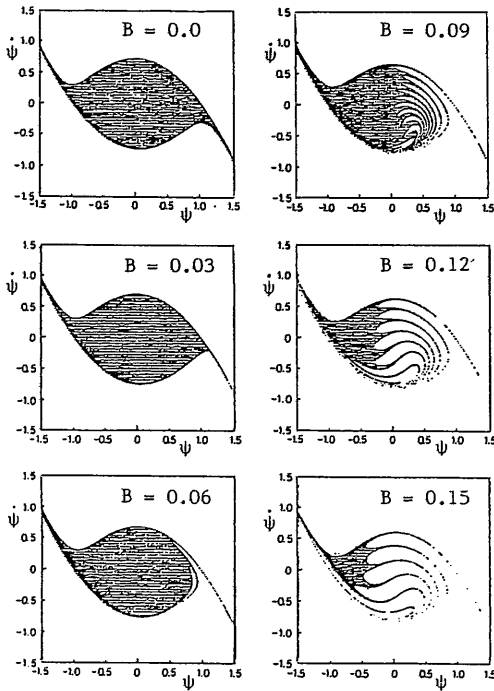


Fig. 2.6 Basin boundary metamorphoses⁽⁴⁾

ただし、 $S(\omega)$ は入射波のスペクトル、 $\overline{F_2}(\omega)$ は平均 2 次漂流力、 ϵ_a は入射波の振幅である。このとき水平変位 x の標準偏差 σ_x は

$$\sigma_x^2 = \int_0^\infty \frac{S_F(\mu) d\mu}{(c - m\mu^2)^2 + b^2\mu^2} \quad (2.17)$$

長周期運動は係留系の同調周波数 $\mu_n = \sqrt{c/m}$ 近傍でしか起こらないので

$$\sigma_x^2 \approx S_F(\mu_n) \cdot \frac{\pi}{2cb} \quad (2.18)$$

今、長周期運動の極値がレーレー分布に従うと仮定できるならば、係留系の固有周期が T_N のときの t 時間内の x の最大値の期待値は次式となる ((その 1) 参考文献¹⁹⁾).

$$x_{max} = \sigma_x (2 \log \frac{t}{T_N})^{1/2} \quad (2.19)$$

ところが実際は長周期運動は波高の 2 乗に比例するものであっても、波振幅がガウス分布に従うとしても、長周期運動はもはやガウス分布とはならず、たとえ狭帯域としてもその極値はレーレー分布とは異なる。

波周期運動 $X^1(t)$ と長周期運動 $X^2(t)$ を重ねた運動応答 $X(t)$ は Volterra 汎関数の 2 項までの展開で近似できる。さらにこの運動応答は標準正規型確率変数 $W_i(t)$ で次式のように表現できる。

$$X(t) = \sum c_i W_i(t) + \sum \lambda_i W_i^2(t) \quad (2.20)$$

この表現は、入射波が白色雑音とその重み関数で表現が可能であり、白色雑音が正規直交確率関数列と互いに独立な標準正規型確率変数で展開できることによっている。ただし、ここで重み c_i と λ_i は次のようにして求まる。

いま核関数 $K(\omega_1, \omega_2)$ を

$$K(\omega_1, \omega_2) = \sqrt{S_\xi(\omega_1) \cdot S_\xi(\omega_2)} \cdot G_2(\omega_1, \omega_2) \quad (2.21)$$

とおく。ただし、 $S_\xi(\omega)$ は入射波のスペクトルであり、 $G_2(\omega_1, \omega_2)$ は長周期運動の周波数応答関数である。ここで λ_j は積分方程式

$$\int_{-\infty}^\infty K(\omega_1, \omega_2) \cdot \Phi_j(\omega_2) d\omega_2 = \lambda_j \Phi_j(\omega_1) \quad (2.22)$$

の固有値となっている。重み c_j は

$$c_j = \int_{-\infty}^\infty G_1(\omega) \cdot \sqrt{S_\xi(\omega)} \cdot \Phi_j^*(\omega) d\omega \quad (2.23)$$

ただし、 $G_1(\omega)$ は波運動の周波数応答関数であり、 $\Phi_j^*(\omega)$ は上記積分方程式の固有関数の複素共役値である。

(2.20) 式から対応する特性関数 $\phi_x(s)$ は容易に求まりしたが、 s が虚数である場合、確率密度関数 $P_X(x)$ が求まる。

$$\phi_x(s) = \prod_{j=1}^{\infty} (1 - 2i\lambda_j s)^{-1/2} \exp[-c_j^2 s^2 (2(1 - 2i\lambda_j s))^{-1/2}] \quad (2.24)$$

$$P_X(x) = (2\pi)^{-1} \int_{-\infty}^\infty \exp(-ixs) \cdot \phi_x(s) ds \quad (2.25)$$

しかし (2.25) 式のままでは数値計算は不可能である。そこで加藤・木下が (2.20) 式の確率密度関数がラゲール展開可能であるとの近似理論に基づいて導いた式が次式である⁷⁾。

$$P_X(x) = f(\theta_1, \theta_2; \delta_1, \delta_2) \int_0^\infty (z+x-\bar{\delta}_1+\bar{\delta}_2)^{\nu_1/2-1} \cdot z^{\nu_2/2-1} \exp(-az) \cdot \exp[-(x-\bar{\delta}_1+\bar{\delta}_2)/2\theta_1] dz \quad (x \geq \bar{\delta}_1 - \bar{\delta}_2 \text{ の場合})$$

.....

$$(x < \bar{\delta}_1 - \bar{\delta}_2 \text{ の場合})$$

ただし、

$$f(\bar{\theta}_1, \bar{\theta}_2; \bar{\delta}_1, \bar{\delta}_2) = (2\bar{\theta}_1)^{-\nu_1/2} (2\bar{\theta}_2)^{-\nu_2/2} [\Gamma(\bar{\nu}_1/2) \cdot \Gamma(\bar{\nu}_2/2)]^{-1}$$

$$a = (2\bar{\theta}_1)^{-1} + (2\bar{\theta}_2)^{-1}$$

θ, δ, ν は c_i と λ_i より求められる。

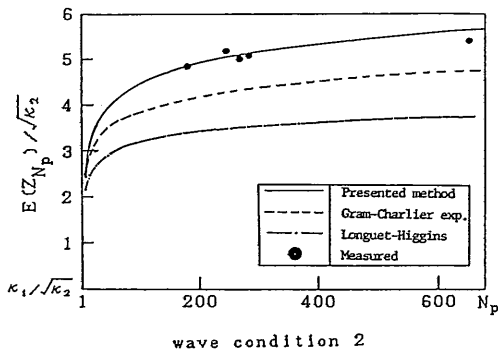


Fig. 2.7 Comparisons between observed extreme responses and estimated ones⁽⁷⁾

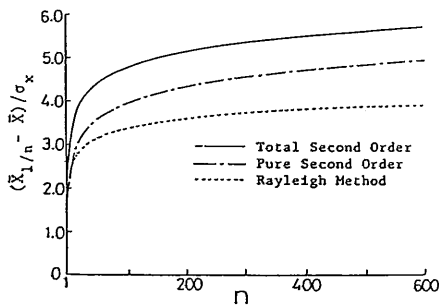


Fig. 2.8 Statistical interference between first and second order responses for heavy damping (1/n the Highest Expected Amplitude)⁽⁷⁾

運動応答の確率密度関数が求められれば、運動応答の極値の確率密度関数は容易に求められる。

いずれにしてもこれら確率密度関数を求めるには数値計算に頼らねばならず、必ずしも簡単ではない。そこで Naess は極値の統計値を求める実用的な式を提案している⁸⁾。

長周期運動のみの場合の N 回の極大値中の最大値の期待値を、厳密解とレーレー分布とした場合とを比較した例を Fig. 2.7 に示す⁷⁾。また波周期運動と長周期運動を同時に考慮した場合と別々に考えた場合の最大値の期待値を Fig. 2.8 に示す⁷⁾。

係留系の設計に重要な情報となる長周期運動の最大値の期待値は、長周期運動の極値をレーレー分布と仮定する場合には、厳密解より低目の値を推定することがあり設計上危険側にずれることがあることは注意を要する。

以上の議論は、ガウス過程の入力に対する 2 乗までの和で表される出力の最大値の期待値の推定法についてである。実際の係留索に加わる張力となる異常時の波浪は一般に非ガウス過程とも考えられる。このような場合の最大値の期待値の理論推定法はいまだ確立していない。しかし設計上は何らかの形で最大値の期待値を推定しなければならない。Stansberg は実用的な推定法を提案し

ている^{9), 10)}。

3. 浮体の波浪中曳航時の挙動

浮体が前進速度を持つ場合、または、係留浮体が潮流中におかれた場合、その相対定常速度の影響がどの程度あるかを知ることは重要である。Zhao と Faltinsen は 2 次元柱体を用いた研究で、潮流は付加質量や造波減衰力に対するよりは波強制力により大きな影響を及ぼすこと、さらに平均波漂流力を推定する場合には潮流を導入すべきことを明らかにしている¹¹⁾。Godfrey らは固定式ジャケットに作用する波荷重に対する潮流の影響を調べ、波と潮流それぞれによる荷重を単に重ね合わせただけでは正しい解が得られない場合のあることを示した¹²⁾。藤沢らはコンタタイプの構造物の曳航時の波浪中挙動の解析を行い運動モード次第で付加質量と造波減衰力には前進速度の影響が大きく出ること、ならびに波強制力には前進速度の影響は顕著には見られないことを示している¹³⁾。(Fig. 3.1, 3.2, 3.3)

波と潮流の干渉は、モリソン公式が主要な働きをする

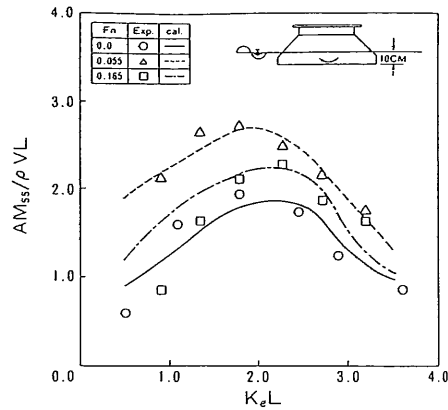


Fig. 3.1 Added mass coefficients of pitch⁽¹³⁾

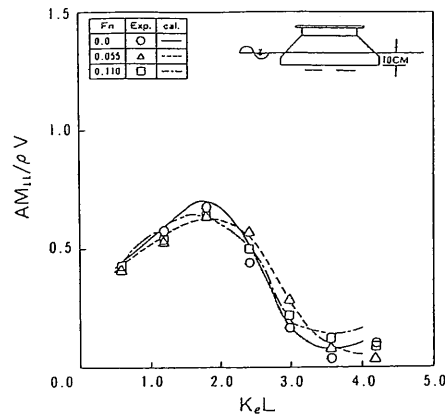


Fig. 3.2 Added mass coefficients of surge⁽¹³⁾

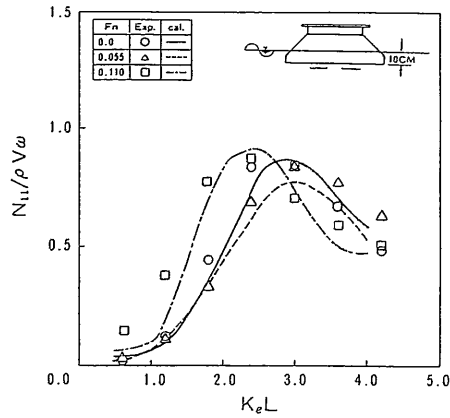


Fig. 3.3 Wave damping coefficients of surge⁽¹³⁾

波長に比べて小さな構造物（ブレーシング，ローハル等）を対象とする場合と，ポテンシャル流体力が主要項となる大型構造物の場合とに分けて検討する必要がある。

小型構造物の場合は，質量係数，抗力係数に未だ大きな不確かさが残っている。さらに潮流の鉛直分布の不確かさが波荷重の推定に大きく影響している。このあたりは今後の大きな問題である。

大型構造物の場合はポテンシャル理論に基づく流体力が主要となる。ポテンシャル理論に基づく造波理論は，前進速度が無い場合にはほぼ完成の域に達しているのに対して，前進速度を有する場合にはいくつかの大胆な仮定を導入しなければならない。以下に前進速度がある場合のポテンシャル理論の現状を示す⁽¹⁴⁾。

速度ポテンシャルの境界値問題の境界条件は，自由表面で

$$(i\omega_e - U \frac{\partial}{\partial x})^2 \phi + g \frac{\partial \phi}{\partial x} = H(\phi_0, \phi_s), \text{ on } z=0 \quad (3.1)$$

物体表面で

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = i\omega_e \alpha_j \cdot n + m_j, \text{ on } S_H \quad (3.2)$$

ただし， $m_j = [\nabla \times (\alpha_j \times V)] \cdot n \quad (3.3)$

$$\alpha_j = \begin{cases} e_j & (j=1, 2, 3) \\ e_{j-3} \times r & (j=4, 5, 6) \end{cases} \quad (3.4)$$

$$V = \nabla(-Ux + \phi) \quad (3.5)$$

速度ポテンシャル ϕ

$$\phi(P) = \frac{1}{4\pi} \iint_{S_H} \sigma(Q) \cdot G(P, Q) ds + \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{U_0^2}{g} \int_{C_H} \sigma(Q) \cdot \frac{\partial G(P, Q)}{\partial n} ds \quad (3.6)$$

流体力 F_{ij} は次式で与えられる。

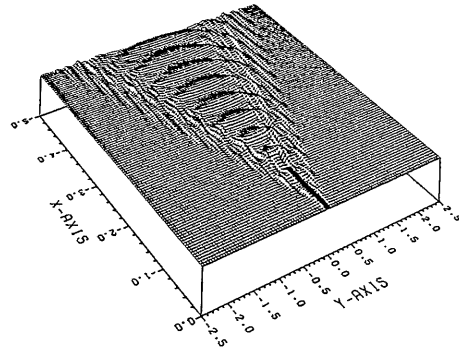


Fig. 3.4 Diffraction waves at one time instant around a restrained ship in head sea waves (Deep water)⁽¹⁵⁾

$$F_{ij} = - \int_{S_H} [\alpha_j \cdot n \cdot i\omega_e \phi_i - \phi_i \cdot m_j] ds + \int_{C_H} (\alpha_j \cdot n) (V \cdot e_3) \phi_i ds \quad (3.7)$$

以上の定式化にあたって線形化を行うために種々の仮定を導入している。それらは，運動入射波高が微小であるとか，前進速度が低速で定常ポテンシャルによる攪乱が微小であるとか，物体形状が thin とか slender とする仮定である。それでも未だこの境界値問題を解いて流体力を求めることは困難である。これらの問題点は次のとおりである。

(3.1) 式の右辺は一般に $H(\phi_0, \phi_s) = 0$ とおく。

(3.6) 式右辺第 2 項の線積分はグリーン関数が線積分 C_H 上で正則とはならないので，この項は一般に無視される。

(3.7) 式で m 項を求めるためには定常速度ポテンシャル ϕ_s を解かなければならないが，一般には $\nabla \phi_s \sim (U, 0, 0)$ としている。

Green 関数を用いる計算法は Neumann-Kelvin 法とも呼ばれるが，上述のように各種の簡略化を行っても Green 関数の計算が膨大となるところに問題があるが，大楠・岩下により Green 関数の計算の高速化で新しい進展がはかられた⁽¹⁵⁾ (Fig. 3.4)。

Neumann-Kelvin 法とは別に Rankine-Source 法がある。これは簡単な Source の特異点を全境界面に分布させる解法である。

物体の端部が Blunt になると非線形性が重要となるが，この方面の研究は未開拓である⁽¹⁶⁾。

4. 模型試験法

近年スーパーコンピュータの普及により CFD が大きな進展をとげていることから見て，将来の浮遊海洋構造物の運動性能の研究は数値水槽に依存することになると思われる。しかし数値水槽は万能というわけではなく，

数値計算結果は対応する水槽試験により検証されなければならないし、数値水槽が未開拓の分野では水槽による実験が必要不可欠である。現今の大型試験水槽は将来不用となるであろうが、水槽実験は今後共必要不可欠であるばかりではなく、その重要性は益々増大するものと考えられる。

そこで海洋構造物の水槽試験の現状を調べてみる。1970年代までの試験水槽による模型試験法は van Lammeren et al¹⁷⁾ (1957), van Lammeren¹⁸⁾ (1963), 竹沢¹⁹⁾ (1969), 竹沢ら²⁰⁾ (1977) にまとめられている。

1970年代以降の試験水槽における模型試験法の開発で特記されるものとして、まず新しい施設の開発がある。X方向にもY方向にも進む2台の曳航電車を組み合わせた曳引車をもつ平面角水槽が出現して、係留された浮遊構造物の斜波中の6自由度運動、波荷重の実験が可能となった(元良ら²¹⁾ 1970)。造波機の発達も目ざましいものがあり、任意の方向スペクトルをもつ短波項不規則波を発生できる多分割造波機が出現している。これら造波機は模型構造物からの反射波を吸収する機構を備えている。さらに新しい造波機では、長水槽の短辺に備えた多分割造波機により、長辺での反射波を利用することにより任意の方向スペクトルを有する多方向不規則波の発生が可能である(竹沢ら1989(その1)参考文献³⁷⁾)。さらに波のみならず同時に風、潮流も再現できる水槽も出現している。

模型の材料の進展を見ると、従来は木、ワックスであったものが、FRP、アクリル、金属も多用されるようになってきた。以上は剛体模型であるが、剛性を相像にした弾性模型も出現している。材料には発砲塩化ビニール²²⁾ (深沢ら1981)あるいはエポキシ樹脂とウレタンフォームの複合材料²³⁾ (Watanabe et al 1988) が用いられている。

計測装置では、サーボ機構と小型化したマイクロプロセッサの発達により多数の新しい装置が出現している。それらの一例を列挙すると、強制動揺装置²⁴⁾ (藤井ら1971)、波浪中長周期強制動揺装置²⁵⁾ (木下ら1987)、波浪中抵抗増加計測装置²⁶⁾ (経塚ら1986)、変動風スペクトルを模擬する風荷重シミュレーター²⁷⁾ (竹沢ら1988)、自航船の自動追跡装置²⁸⁾ (Rutgerssonら1987)等である。サーボ式波高計は潮流中あるいは曳引車から精度よく波高計測が出来る点で画期的と言える。電子機器の発達により、計測装置、記録装置、解析装置の精度は格段に向上した。

近年の計測システムでは、計測装置そのものは単純でロバストであるのに対して、解析システムはマイクロプロセッサを用いた複雑で高度なものとする傾向が見られる。計測は単純な装置で行い、欲しい情報は含むがノイズの多いあるいは干渉影響を多く含んだデータをその

まま記録しておき、その一方解析時に丁寧にノイズを除去し欲しい情報を精度よくとり出す方法である。これらの例として、光学式ポジションセンサーと6分力計が掲げられる。ことに光学式ポジションセンサーは長周期運動の研究に多大の貢献をした。というのは、光学式ポジションセンサーによる摩擦減衰力はきわめて小さいので、例え小さな模型であっても高い精度で2次波強制力による長周期運動を計測することが可能だからである。浮体の転覆も同種の光学式センサーであるXYトラッカーにより計測することが可能である²⁹⁾ (長谷川1990, 石田ら1990)。近年竹沢ら³⁰⁾ (1989)はレーザー型波高計を開発した。これは波高のみならず波傾斜も計測するので方向波の計測も可能である。これらの計測技術はオプトエレクトロニクスに依るものである。コンピュータグラフィックスの発達により実験結果を画像化して視覚的に評価することも可能になってきた。

以上述べたように風、波、潮流を模擬する試験水槽における模型試験技術の発展の原因、理由は、ひとえに半導体技術、コンピュータ技術、メカトロニクス・オプトエレクトロニクス技術に依るところが大である。これらの技術はそれぞれの時点での先端技術であった。1970年代以降の模型試験法をまとめて表現するならばCAT (Computer Assisted or Aided Test)と呼ぶことが出来る。

5. おわりに

係留された浮遊構造物の運動性能に関する研究のうちここで取り上げなかった分野がいくつかある。それらはたとえば、碎波時あるいは大振幅運動時の水面衝撃、海水打込、係留索あるいはライザー管の挙動、係留浮体の振れ廻り、弱非線形ポテンシャル流体力、強非線形水波などである。これらの分野を含めての研究の進展状況は完成の域に近づきつつあると言える。というのは現在では、係留浮体の設計は、起振力の原因となる自然環境外力さえ定められれば、荷重と応答の推定はほぼ可能であるからである。しかしより合理的な設計をするためには解決しなければならない課題は多数残されている。今後の検討課題をいくつか掲げるとすると、長周期運動の減衰力の推定法、特に尺度影響、大水深域での浮体、係留索、ライザー管の相互干渉影響とそれに対応する模型試験法の開発、多方向波の影響の解明、海洋構造物に対する風、波、潮流の相互干渉影響、粘性流体力の数値解法の実用化等となる。いずれの問題も特別な設備あるいはスーパーコンピュータを用いての腕力を要する研究課題である。

海事流体力学あるいは海洋構造物の性能分野以外における検討課題としては、信頼性工学に基づいた設計法の確立、海水の雰囲気における腐食疲労などである。

浮遊海洋構造物の経済性は主としてその稼働性能による。ところで稼働性能向上に対するネックの1つは、補給船から浮遊構造物への資材あるいは人の移動が、ある海象条件を越して自然環境が荒れると、大変困難となる点である。2浮体間の運動の位相を合わせるとか、相対運動を小さくするとかの技術は簡単のようではあるが大変難しいのが実状である。先端技術を備えた浮体であってもネックは意外なところにあるもので、大昔から問題はいっこうに解決されていない。永遠の課題と言うべきであろうか。

海洋工学の研究課題は浮遊構造物を対象とするもの以外にも、潜水艇、水産施設、海底鉱物資源回収装置等多数の構造物を対象としている。自律型制御とか網地の力学とか多相流とかの興味深い研究課題が多数ある。環境問題も古くて新しいテーマを提供してくれる。海洋工学はフィールドを対象とする工学であるので、ニューフロンティア開発に伴い新しい研究課題が次々と生まれている。これからの発展を楽しみにしたい。

(1992年6月25日受理)

参考文献

- Mariatime Safety Committee: Ship Design and Equipment—Revision of the 1989 MODU Code Report of the drafting group, MSC 57/WP. 12, IMO, 1989
- King, B.K.: A Fast Numerical Solver for Large Amplitude Ship Motions Simulations, Proc. of SATB' 90, NAPLES, 1990
- Paulling, J.R. and Shin, Y.s.: The Role of Numerical Simulation in the Study of Extreme Platform Response, Proc. of STAAAB' 90, NAPLES, 1990
- Kan, M., Saruta, T., Taguchi, H., Yasuno, M. and Takaishi, Y.: Model Test on Capsizing of a Ship in Quartering Waves, Proc. of STAB'90, NAPLES, 1990
- Saliman, M.S.: An Analysis of Ship Stability Based on Transient Motions, Proc. of STAB' 90, NAPLES, 1990
- Pinkster, J.A.: Low-frequency Phenomena associated with Vessels Moored at Sea, Society of Petroleum Engineers Journal, December, 1975
- Kato, S. and Kinoshita, T.: Nonlinear Response of Moored Floating Structures in Random Waves and its Stochastic Analysis (Part 1. Theory and Experiment), Papers of Ship Research Institute, Vol. 27, No. 4, 1990
- Naess, A.: Prediction of extremes of combined first-order and slow-drift motions of offshore structures, Applied Ocean Research, Vol. 11, No. 2, 1989
- Stansberg, C.T.: A Simple Method for Estimation of Extreme Value of Non-Gaussian Slow-Drift Responses, 1st ISOPE, Vol. 3, Edinburg, 1991
- Stansberg, C.T.: Basic Statistical Uncertainties in Predicting Extreme Second Order Slow Drift Motion, 2nd ISOPE, Vol. 3, San Francisco, 1992
- Zhao, R. and Falinsen, O.M.: Interaction Between Waves and Current of a Two-Dimensional Body in the Free Surface, Applied Ocean Research, Vol. 10, No. 2, 1988
- Godfrey, P.S., Townend, I.H. and Wegner, M.: Study of Sensitivity of a Jacket Design to Sea Current Profile, Offshore Tech. Report OTH 87-267, 1987
- Fujisawa, Y., Masuda, K. and Maeda, H.: Study of the Hydrodynamic Forces and the Wave Exciting Forces on Cone Type Structure With a Constant Forward Speed in Waves, Proc. of OMAE 91, ASME 1991 (to be published)
- 高木又男, 大楠 丹: 規則波中を航走する船体の動揺理論概説, 第2回耐航性に関するシンポジウム, 日本造船学会, 1977
- 大楠 丹, 岩下英嗣: 波浪中を航走する船のつくる非定常波紋について, 西部造船会報, 73号, 1987
- Newman, J.N.: The Numerical Towing Tank—Factor Fiction?, Schiffstechnik, Bd. 36, 1989
- Van Lammeren, W.P.A. and Vossers, G.: The Seakeeping Laboratory of the Netherlands Ship Model Basin. Int. Shipbuilding Progress. 4-29, 1957
- Van Lammeren, W.P.A.: Facilities and Experiment Techniques at the Netherlands Ship Model Basin. Int. Shipbuilding Progress, 10, 1963
- 竹沢誠二: 耐航性に関する水槽試験法と実船試験法, 耐航性に関するシンポジウム, 日本造船学会, 1969
- 竹沢誠二, 梶田悦司, 高橋 雄: 耐航性に関する動的船型試験法, 第2回耐航性に関するシンポジウム, 日本造船学会, 1977
- 元良誠三, 小山健夫, 藤野正隆, 伊田 力, 小柳雅志郎: 東京大学船舶航海性能試験水槽について(第1報), 日本造船学会論文集, 128号, 1970
- Fukazawa, T., Yamamoto, Y., Fujino, M. and Motora, S.: Motion and Longitudinal Strength of a Ship in Head Sea and the Effects of Non-Linearities (4th Report), J. Soc. Nav. Arch. Japan, 150号, 1981
- Watanabe, I., Takemoto, H. and Miyamoto, T.: Use of An Elastic Model in Studying Wave Loads on a Ship in Waves and Its Verification by a Full-Scale Measurement, International Symposium on Scale Modeling, JSME, 1988
- 藤井 斉, 高橋 雄: 強制動揺法による横方向運動方程式の係数の計測結果, 日本造船学会論文集, 130号, 1971
- 木下 健, 高岩千人: 係留浮体の波浪中長周期強制動揺試験について, 日本造船学会論文集, 162号, 1987
- 経塚雄策, 大楠 丹, 稲田 勝: Short Crested Wave中の抵抗増加について, 西部造船会報, 72号, 1986
- 竹沢誠二, 平山次清, 華 督宇: 係留された半没型海洋構造物の複合外力下挙動時列数値シミュレーション法, 日本造船学会論文集, 164号, 1988
- Rutgersson, O. and Ottosson, P.: Model Tests and Computer Simulation—An Effective Combination for Investigation of Broaching Phenomena, SNAME Transactions, 95, 1987
- 長谷川和彦: 波浪中の船体6自由度非接触計測システム, 関西造船協会誌, 210号, 1988
- 竹沢誠二, 宮川 清, 高山武彦, 板橋正泰: レーザー光線群による方向スペクトル波計測, 日本造船学会論文集, 166号, 1989