

浮体係留の諸問題

合 田 良 実

1. まえがき

土木工学の分野では、もともと、大地や海底にしっかりと固定された構造物を対象としており、浮体あるいは浮遊式構造物とはなじみが薄い。しかし、浮棧橋や浮防波堤は立派な浮遊式構造物であり、また係船浮標やシーバースの設計では波浪中の船体動揺を正確に推定することが必要である。さらに、昭和58年度から事前工事が始まった洋上石油備蓄基地（上五島および白島地区）のプロジェクトでは、巨大な貯蔵船の係留の安全性を確認しておかなければならない。一方、大型橋脚のケーソンや海中貯油タンクなどのように、施工段階で浮体としての係留が問題になる場合が増えている。

浮体係留の問題は、解析手法の取り扱いなどからいえば、船舶工学関係者のほうがなじみやすい。しかし、現実に解決を求められるのは土木工学の場のことが少なくない。したがって、土木関係者も浮体係留に関する基本的な事項を理解し、必要に応じて専門家の助力を得て問題の解決に当ることが望まれる。本稿はその意味で浮体の動揺および係留問題に関する手引きとして利用されることを願い、基礎的事項・用語の解説と主要文献の紹介を試みたものである。実際の構造物の問題では数値計算に頼らざるを得ないので、文献もその点を考慮して選んでいる。ただし、時間的制約などのため調査が十分にできず、文献リストとしては不完全であることをお断わりする。

浮体の問題を取り扱うには、浮体運動の基礎知識が必要である。これには、たとえば元良（監修）の本〔A-1〕が良い。その上で、故田才教授の講義ノート〔A-3〕が役に立つ。〔A-6〕はこの講義ノートの一部である。〔A-5〕は水工学シリーズの中で講演されたものであるが、初学者には必ずしも取りつきやすくない。〔A-2〕はシンポジウムの講演集で、浮遊式海洋構造物に関する各種の問題が論じられている。

土木技術者は、設計荷重あるいは設計外力の語で表わされるように、一定の力が外から作用するという概念に慣らされており、外力の設計公式を作り、改良することに努力してきた。しかし、浮体の係留力の問題は以下に述べるように、係留力が浮体の運動を拘束し、そうした浮体の運動によって係留力が規定されるという関係にある。したがって、係留力に関する一義的な設計公式は本質的にあり得ないことを最初にお断りしておく。

2. 浮体の運動方程式とその解法

(1) 運動方程式

水面に浮遊している物体は、一般に次の3種類の並進運動と3種類の回転運動を行う。すなわち、6自由度の運動系である（図-1参照）。

- | | |
|-------------------------|---------------|
| 1. 前後揺れ（サージング surging） | 浮体の長軸方向の並進運動 |
| 2. 左右揺れ（スウェイング swaying） | 浮体の短軸方向の並進運動 |
| 3. 上下揺れ（ヒービング heaving） | 浮体の鉛直方向の並進運動 |
| 4. 横揺れ（ローリング rolling） | 浮体の長軸回りの回転運動 |
| 5. 縦揺れ（ピッチング pitching） | 浮体の短軸回りの回転運動 |
| 6. 船首揺れ（ヨーイング yawing） | 浮体の鉛直軸回りの回転運動 |

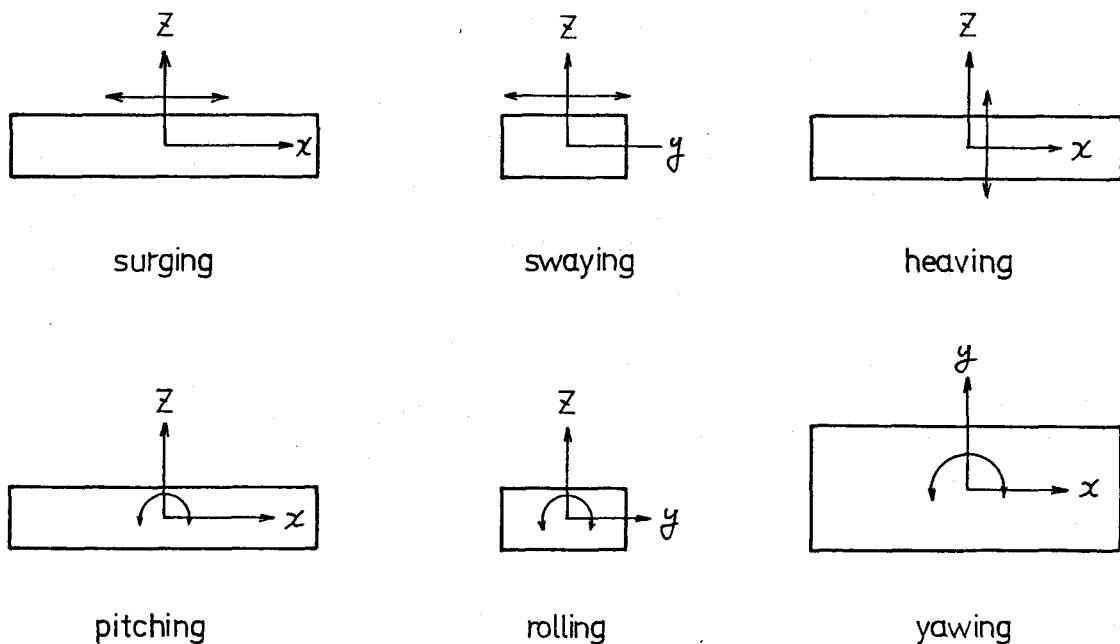


図-1 浮体運動の成分と名称

なお、浮体の長・短・鉛直軸は浮体の重心を通るように選定される。係留浮体の運動では、こうした浮体に固定した座標軸系と空間に固定した座標軸系とを併用し、適宜、使い分ける。

係留浮体も一つの力学系であるから、ニュートンの法則に基づいて運動方程式が立てられるのであるが、作用する力が複雑なので、通常は次のように記述される。

$$\sum_{j=1}^6 \left\{ (M_{kj} + m_{kj}) \ddot{x}_j + N_{kj} \dot{x}_j + C_{kj} \dot{x}_j | \dot{x}_j | + B_{kj} x_j + R_{kj}(x_j) \right\} = X_k(t) \quad : k = 1 \sim 6 \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 x_j は上述の 1～6 の運動量で、変位あるいは回転角である。 M_{kj} は浮体の慣性力マトリックスで、 j 方向の運動に起因する k 方向の慣性力に係わる質量あるいは慣性モーメントである。 m_{kj} は浮体が水中で運動することによって波を発生し、それによって浮体を受ける流体抵抗のうちの加速度に比例する成分の係数であって付加質量係数（以下、回転運動についてはモーメントも含めていう）と呼ばれる。この流体抵抗のうち、速度に比例する成分の係数が造波減衰係数と呼ばれ、 N_{kj} で表わされている。 C_{kj} は抗力で表わされるような水の粘性に基づく非線型な減衰係数である。 B_{kj} は静的復元力係数である。 $R_{kj}(x_j)$ は係留系の拘束力を表わす。一般に、係留力は平衡位置からの変位に比例せず非線型な挙動を示すので、このように関数表示が用いられる。なお、以上においては係数の語を用いているが、いずれも次元を持った量である。船に関しての各係数の算定式は小林ほか〔C-7〕に詳しく記述されている。

一方、右辺の $X_k(t)$ は上記以外のすべての外力を表わす。通常は以下のものを考える。

- 1) 波強制力（1次成分） $F_{w,k}(t)$ …… 浮体が固定された状態のときに作用する力のうち、波振幅に比例する力である。
- 2) 波浪漂流力 $F_{D,k}(t)$ …… 浮体をゆっくりと波の進行方向に押しやる力で、波振幅の 2 乗に比例し、不規則波中では時間とともに変動する。

- 3) 風圧力 $F_{A,k}(t)$ 風速の時間的変化を考慮し、変動外力として与えることが多い。
 4) 流れによる力 $F_{V,k}$ 定常外力として扱われるのが普通。

式(1)の左辺が運動量 x_j の $j=1\sim 6$ の和の形であるのは、浮体の運動のうち複数のものが常に同時に関連して起こるため、これを連成運動という。たとえば、図-2のように矩形断面浮体を水平に動かすと、左右の側面に働く水圧が変化する。このため重心回りの回転モーメントが発生し、これによって浮体は横揺れを起こす。すなわち、左右揺れと横揺れは連成する。

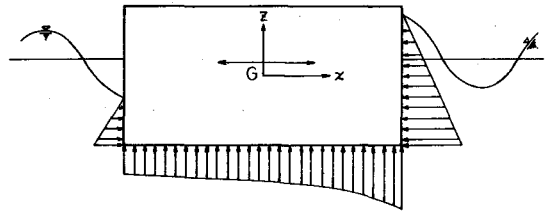


図-2 浮体の水平運動に伴う水圧分布

さらに船のように前後に対称形でない3次元浮体では、船首揺れとも連成する。また、上下揺れと縦揺れも連成する。前後揺れは、船のように細長かつ左右対称な浮体においては他の運動と連成しないと見てよい。係留力についても $j=1\sim 6$ の和となっているのは、係留索・鎖などの取付点が1方向に変位すると、これによって張力が変化し、それが他の方向成分にも波及するためである。

(2) 運動方程式の一般的解法

運動方程式に現われる各項については次節以下で解説することとし、ここではまず運動方程式の解き方について述べる。式(1)は実際には $k=1\sim 6$ の2階微分方程式であり、しかも C_{kj} で表わされる非線型減衰力、 $R_{kj}(x_j)$ の係留力、変動波浪漂流力の存在などのために非線型な方程式群となっている。この解析方法は次のように分類できる [B-9, 10]。

a) 周波数応答解析 (Frequency Domain Analysis)

- a-1) 線型方程式法 非線型項をすべて無視する。
- a-2) 等価線型化法 非線型項を等価な線型項で置き換える。

b) 時系列解析 (Time Domain Analysis)

- b-1) 恒常係数法 m_{kj} , N_{kj} などを一定値として扱う。
- b-2) 畳み込み積分法 造波による流体抵抗を過去の運動の履歴影響として算定する。

周波数応答解析では方程式が線型化されているので、波の周波数ごとに各運動量と波振幅の比が求められ、不規則波に対してもスペクトル計算を行えばよい。計算時間は時系列解析よりも短い、非線型効果は無視あるいは近似的にしか扱っていないので、現実の浮体係留の問題に対しては十分な結果が得られない。一方、時系列解析は運動方程式を微小な時間ステップごとに数値積分するもので、計算時間はかかるけれども不規則波中の係留問題を適切に解くことができる [B-1, B-2, F-6, G-1, H-3, H-6 など]。

時系列解析の第2の手法の畳み込み積分法は、本来 m_{kj} , N_{kj} が周波数の関数であるため、不規則な周期で動揺する浮体に対しては m_{kj} , N_{kj} の値を適切に評価するのが困難になることを解決するために工夫された手法である。これは Cummins の船体のインパルス応答の考え方を用いて Van Oortmerssen [B-9, 10] が定式化したもののようで、造波抵抗の項を次のように書き直す。

$$m_{kj}(\omega) \ddot{x}_j + N_{kj}(\omega) \dot{x}_j \longrightarrow m_{kj}(\infty) \ddot{x}_j + \int_{-\infty}^t K_{kj}(t-\tau) \dot{x}_j(\tau) d\tau \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 ω は角周波数、 $m_{kj}(\infty)$ は周波数無限大における付加質量係数(一定値)である。 K_{kj} はメモリ-影響関数(高木・斎藤 [B-7] の用例による)と呼ばれるもので、次のように造波減衰係数から求められる。

$$K_{kj}(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} N_{kj}(\omega) \cos \omega t d\omega \quad \dots\dots\dots (3)$$

周波数に依存する $m_{kj}(\omega)$, $N_{kj}(\omega)$ は、逆に K_{kj} のフーリエ変換で与えられ、次のように表わされる。

$$m_{kj}(\infty) = m_{kj}(\omega) - \frac{1}{\omega} \int_0^{\infty} K_{kj}(t) \sin \omega t dt \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$N_{kj}(\omega) = \int_0^{\infty} K_{kj}(t) \cos \omega t dt \quad \dots\dots\dots (5)$$

浮体に係わる計算では $m_{kj}(\omega)$, $N_{kj}(\omega)$ が先に求められるので、式(4)は式(3)で求めた K_{kj} の精度を確認するのに利用される。たとえば、数個の周波数について式(4)の右辺の値を計算し、それが一定値に収まることを確認する [B-9]。これは、高周波数領域での N_{kj} の算定が精度不足になりやすいため、精度確認が必要とされることによる。Van Oortmerssen [B-9] は連成運動に対する N_{kj} の高周波数領域での値を試行錯誤で推定しており、これに対して高木・斎藤 [B-7] は漸近解を用意して K_{kj} の計算精度の確保に努めている。

式(2)の置き換えを行って式(1)の運動方程式を数値積分する際、 K_{kj} を含む畳み込み積分の下限は適当なところで打ち切る。文献 [B-9, 10] では、20万 DWT タンカーのシーバース係留を計算するのに時間ステップを $\Delta t = 0.2 \text{ s}$ として、積分の下限を $t - 25 \text{ s}$ にとっている。

恒常係数法と畳み込み積分法との比較は高木・斎藤ほか [B-7 (5), (6)] が行っており、非線型係留系での2次元浮体(半円筒断面)の波浪中の運動が後者によって良く説明できることを例示している。図-3はこの比較結果で、左右揺れの変位と遊びのある係留ロープの張力の実験値と計算値を示しており、C.C. が恒常係数法、C.I. が畳み込み積分法による結果である。

(3) その他

時系列解析法の難点は計算時間がかかりすぎることである。このため Seidl と Wybro [B-6] は、係留系の予備設計の段階では静的計算と周波数応答解析、あるいは時系列解析でも前後揺れ、左右揺れ、船首揺れの平面運動に限った計算法を活用するのが得策であると計算例を挙げて説明している。また、井上 [B-3, 4] は浮体係留の解析フローの全体を説明している。

後述するように、係留浮体は波の周期よりもはるかに長い周期の運動を伴うのが普通である。このため、波周

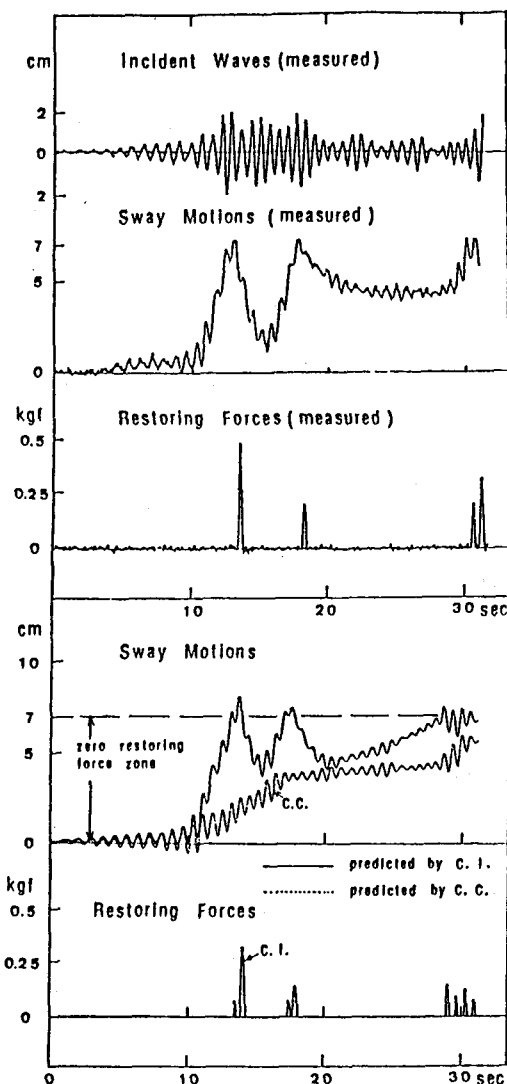


図-3 水平円筒の波による左右揺れの実験値と計算値(高木・斎藤ほか[B-7(6)]による)

期のオーダーの運動と長周期の運動とを分けて計算し、あるいは後者のみを解析するにとどめて計算時間を節約することも試みられる [B-5, G-1]。このように時間スケールの異なる二つの合成運動の解析については、Triantafyllou [B-8] が理論的考察を与えている。

なお、井島ほか [C-1~4] その他によって解かれているように、浮体の運動を式 (1) の形ではなく、運動している浮体表面の境界条件を満足する速度ポテンシャルを直接に求める方法もある。これは、①係留系の荷重-変位曲線が線型と見なし得る、②非線型減衰力が無視できる、③浮体が長周期動揺をほとんど起こさない、の条件をすべて満たすときに適切な方法である。しかし、実際の浮体係留の問題ではこのいずれも満足されないことが多いので、この解法は次節に述べるような流体力の算定手法として活用するのが良いと思われる。

3. 流体力とその算定

(1) 流体力の名称

造波抵抗は、静水中で浮体が周期的運動をするとき、その周囲に波を立てることによって生じる力である。発生した波は発散して行くところから Radiation Force と呼ばれ、ラディエーション流体力あるいは単に流体力とも称される。若し浮体の吃水が深く、下面がほとんど水底に接するようなときは、造波板に働く波動圧の問題になる。造波板の場合には加速度と同位相の慣性波動圧と、速度と同位相の正規波動圧が現われる。浮体の造波抵抗でも同様に、浮体の加速度と同位相の慣性力と、速度と同位相の造波減衰力とが現われる。流体力等の語はこの両者をまとめていうときに使われる。

波強制力は、浮体が固定された状態のときに働く力を指し、普通は波振幅に比例する線型力を対象にする。土木工学でいうところの波力である。波強制力は浮体による回折散乱波を考慮した速度ポテンシャルの解を求め、浮体表面での圧力分布を計算して積分すれば求められる。ただし、船舶工学では理論計算の便宜上からこれを次のように二つの力の和として取り扱う。

$$F_w = F_w^{(FK)} + F_w^{(D)} \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 $F_w^{(FK)}$ はフルード・クリロフ (Froude・Krylov) の力と呼ばれ、 $F_w^{(D)}$ は物体による回折散乱波 (反射波も含めて考える) による力で Diffraction Force と呼ばれる。フルード・クリロフの力は、進行波だけの状態で浮体の没水表面に相当する面に働く水圧を積分して得られる力で、いわば入射波のみによる力である。

Diffraction Force は回折散乱波の速度ポテンシャルから計算するのが本当であるが、便宜的には Radiation Force の計算値を準用して推定されることが多い。すなわち、固定された浮体に波が作用するときは、浮体の没水表面で水粒子の運動が阻止されるわけであるから、そのときに生じる力は、浮体が静水中で水粒子の運動に等しい速度と加速度で運動したときの Radiation Force に等しいと考えるのである。もっとも、水粒子の運動は位置によって異なるので、水平方向の力については浮体の吃水の $1/2$ の深さ、鉛直方向の力については作用面の中心など、適切な代表地点の値を用いる。

ラディエーション流体力、波強制力の両者とも、水の粘性に起因する非線型な力を伴う。矩形断面浮体の横揺れでは、隅角部から発生する渦による減衰が無視できない [C-8]。また、表面の流体摩擦抵抗による力もある。こうした非線型減衰力の係数は、浮体の自由減衰振動試験に適合するように定めるのが一般的である。一方、小口径の円柱部材からなる構造物では、波強制力のうちのフルード・クリロフの力や Diffraction

Forceに比べて抗力が卓越する。この場合は、浮体と水粒子の相対速度が基準速度として用いられる。

流体力の語は、狭義にはラディエーション流体力のみを指す[C-7 の用例など]。広義には、フルード・クリロフの力、Diffraction Force、非線型減衰力、抗力、さらには流れによる力などまでも含めるようである[A-1, pp.129-155, pp.228-229 など]。本稿ではラディエーション流体力と波強制力を合せたものを言うことにする。

(2) 流体力の算定理論

流体力を具体的に算定するには、かなり面倒な数値計算を実行しなければならない。例外は、矩形断面浮体および直立円柱浮体に対する伊藤ほか[C-5, 6]の近似理論であり、この場合は一つの計算式で求められる。数値計算の方法は、文献[A-1]によれば①多重極展開法、②特異点分布法、③有限要素法、④領域分割法(または固有関数展開法)、の4種類に分けられる。以下、文献[B-3]等も参照し、それらの特徴を述べる。

① 多重極展開法

速度ポテンシャルを浮体の中心に置いた吹き出しと多重特異点の和として表わし、無限級数の形で解くものである。本来は水平円柱を対象としたが、その後、等角写像変換が可能な形の断面形にまで拡張されている。そうした形の一つがルイスフォーム(Lewis form)で、船体断面に近い形を与えるところから船舶工学で多用されている。この解法は無限水深域におけるもので、水深効果は取り入れることができない。

また、多重極展開法は2次元断面を対象としているため、3次元浮体に対してはストリップ法という便法が用いられる。これは、浮体の平面形が細長体であることを前提に、浮体の短軸に平行な鉛直面で浮体を薄切り(ストリップ)にし、その一つずつを2次元断面と見なして流体力を求め、その結果を長軸に沿って加え合せる方法である(具体的な計算式等は[C-7]参照)。したがって、多重極展開法のみにとどまらず、領域分割法で流体力を求める場合にもストリップ法が応用される[H-6 など]。ただし、前後揺れの流体力は求められない。船体運動では前後揺れの減衰力を無視し、付加質量係数は元良[C-9]の実験結果を用いたり[C-7],あるいはこれも無視したりしている[A-1, p.60]。しかし、波浪中の係留浮体は長周期の前後揺れを起こすことが多く、その振幅は減衰力係数に支配されるので、たとえ微小であってもその正確な評価が望まれている。なお、模型実験を行うときは、弱いばねで係留したときの自由減衰振動から定めることができる。また、上田・白石[F-6]は、実船観測との照合に基づいて減衰定数として $h = 0.016$ の値を用いて数値シミュレーションを行っている。

② 特異点分布法

浮体の没水表面上に多数の周期的吹き出し(source)を分布させ、その強さを未知関数として積分方程式を解く方法である。浮体の形状、水深などの制約を受けず、応用範囲が広い。たとえば、Van Oortmerssen[B-9, 10]は広い水域での船体の流体力(浅水効果を含む)だけでなく、岸壁係留の場合の値も鏡像原理を利用して計算している。この方法を用いると、波強制力も直接に計算できる。欠点は計算時間が長いことであり、実務計算では演算時間の短縮に工夫がこらされる。

③ 有限要素法

浮体運動に対しても有限要素法は利用されている。フランス石油公社の1点係留ブイの数値計算プログラム[G-1]では、流体力および次節の波浪漂流力の計算にFEMを使っている。ただし、FEMによる計算は非常に時間を要するので、あらかじめ代表的な船型(吃水、水深も数種類用意)について多数の周波数および運動方向について計算を行っておき、これをパーマネントファイル化して引き出す方法をとっている。

こうした準備は、特異点分布法を用いて各種の船舶係留計算を実施している機関でも同様に行っていると考えられる。

④ 領域分割法

井島ほか[C-1, 2]が矩形断面浮体および直立円柱浮体に対して用いた方法で、流体領域を浮体の直下と外側に分け、それぞれの速度ポテンシャルを求めた上で分割境界上で接続する。井島ほか[C-3, 4]はグリーン関数を用いて3次元浮体にまで領域分割法を拡張している。伊藤ほか[C-5, 6]の近似理論は、速度ポテンシャルのうちの定常的減衰波に相当する級数項を省略したものであるが、近似精度はかなり良い。領域分割法では水深の効果が的確に取り入れられ、2次元矩形断面浮体については実験値と良く一致することが井上[B-3]によって報告されている。また、円柱浮体について特異点分布法と比較すると、計算時間が $1/100$ オーダーで短縮されたとのことである[B-3]。なお最近、高山・諸石[C-10]は鉛直軸を中心とした任意曲線回転体浮体の動揺問題を領域分割法で解き、ディスクスプイその他の実験値と一致する結果を得ている。

4. 波浪漂流力と浮体の長周期動揺

(1) 波浪漂流力の計算式

浮体は一般に、波によってゆっくりと岸側に押しやられる。この力を波浪漂流力という。浮体の寸法が波長に比べて非常に小さいときは、波強制力に比べて波浪漂流力が無視できる大きさでしかないが、浮体が大きくなると波浪漂流力のほうが支配的になってくる。波浪漂流力に関する文献リストは、1979年までのものがChakrabarti [D-2]によって挙げられている。

規則波中での2次元浮体の波浪漂流力は、丸尾[D-6]の理論によって次のように波振幅の2乗に比例する形で与えられる。ただし、水深効果は野尻・村山[D-7]による。

$$F_D = \frac{1}{4} \rho g a_i^2 B (1 + K_R^2 - K_T^2) (1 + 2kh \operatorname{cosech} 2kh) \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 ρ ：海水の密度、 g ：重力加速度、 a_i ：入射波の振幅、 B ：浮体の投影幅、 K_R ：反射率、 K_T ：透過率、 k ：波数（ 2π /波長）、 h ：水深、である。

式(7)は、波の運搬する運動量が浮体の前方と後方とで食い違うため、運動量の時間変化が力を生むという運動量理論から導かれたものである。3次元浮体についても、発散波（浮体動揺による発生波と浮体固定時の回折散乱波の重ね合せ）の持ち運ぶ運動量を計算することによって求められる。

波浪漂流力の算定には、こうした遠方領域での波の挙動に基づく方法と、浮体の没水表面に働く2次オーダーの圧力を積分して求める方法とがある。後者は特に不規則波群中での変動波浪漂流力の算定に不可欠である。Pinkster [D-9, 10]によると、波浪漂流力は速度ポテンシャルの摂動解の1次項 $\phi^{(1)}$ と2次項 $\phi^{(2)}$ を用いて次のように表示される（モーメントについては省略）。

$$\begin{aligned} \vec{F}_D = & -\frac{1}{2} \rho g \int_{wL} \eta_r^{(1)2} \cdot \vec{n} \cdot d\vec{l} + \frac{1}{2} \rho \iint_{s_0} |\nabla \phi^{(1)}|^2 \cdot \vec{n} \cdot d\vec{s} \\ & + \rho \iint_{s_0} \left\{ \vec{x} \cdot \vec{\nabla} \phi_i^{(1)} \right\} \cdot \vec{n} \cdot d\vec{s} + \vec{a} \times (M \cdot \vec{\ddot{x}}_G) + \rho \iint_{s_0} \phi_i^{(2)} \cdot \vec{n} \cdot d\vec{s} \dots\dots (8) \end{aligned}$$

ここに、 $\vec{F}_D$ は波浪漂流力ベクトル、 $\eta_r^{(1)}$ は浮体と波面との相対水位(摂動解の1次項)、 $\vec{n}$ は浮体表面の

外向き法線ベクトル， $\vec{x}$ は浮体の並進運動の位置ベクトル， $\vec{\alpha}$ は浮体の回転運動ベクトル， $\vec{x}_G$ は浮体重心の変位ベクトルである。右辺第1項の積分は水線長にわたり，その他の2重積分は没水表面についてのものである。

式(8)の波浪漂流力の第1項は，浮体の静水中の吃水線を基準にとり，浮体表面での時々刻々の水面と吃水線との間の領域の水圧を積分した力である。一般に浮体周囲の相対水位振幅は発散波の影響で後面よりも前面のほうが大きくなるので，水線長にわたって積分すると平均して岸側へ向う力が生じる。第2項は，水粒子運動の速度水頭だけ圧力が低下することによる力である。この力はあまり大きくないが，浮体を沖側へ引き戻す方向に働く〔D-9〕。第3項は，1次圧力勾配のある場で浮体がある位置を平行移動したことによる圧力変化の力である。第4項は浮体の回転による慣性力の変化を表わす。第5項は，2次の速度ポテンシャルに起因する圧力である。StandingとDucunha〔D-13〕はさらに鉛直方向の2次圧力項が存在することを指摘している。

式(8)は時々刻々の波浪漂流力を与える式である。規則波に関しては，1周期にわたる時間平均を取ることによって式(7)と同一の結果(2次元浮体の場合)を与える。これはKimとDalzel〔D-4〕が例証している。規則波中の平均漂流力の計算結果では，式(8)の第1項の影響が最も大きいのが一般的である。

(2) 不規則波中の波浪漂流力

浮体に不規則な波群が作用すると，波高変動に応じて波浪漂流力も変動する。HsuとBlenkarn〔D-3〕は直観的なアプローチであるが，不規則波中の各波の山，谷ごとに振幅と半周期を読みとり，それぞれが規則波に対応すると仮定して波浪漂流力をステップ状に変化する波形で与える方法を提案している。Pinkster〔D-8〕はこの考えを発展させ，連続関数で与えられるように改良した。いま，不規則波形を成分波の重ね合せとして

$$\eta = \sum_{i=1}^N a_i \cos(\omega_i t - k_i x + \epsilon_i) \dots\dots\dots (9)$$

で与えると，波浪漂流力は規則波に対する定常漂流力係数を $f_D (= 2F_D / \rho g a_i^2 B)$ として次のように表わされる。

$$F_D(t, x) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N a_i a_j f_D \left(\frac{\omega_i + \omega_j}{2} \right) \cos \left[(\omega_i - \omega_j)t - (k_i - k_j)x + (\epsilon_i - \epsilon_j) \right] \dots\dots\dots (10)$$

上式の F_D は，不規則波形を構成する各成分波の周波数の差をそれ自身の周波数成分として持つ。したがって，漂流力は長い周期で不規則に変動することになる。

その後Pinkster〔D-9, 10〕は，漂流力係数を成分波の干渉を考慮して算定するように改めている。また，Molin〔G-1〕は漂流力係数を

$$f_D(\omega_i, \omega_j; \psi) = \sqrt{f_D(\omega_i, \psi) f_D(\omega_j, \psi)} \operatorname{sgn} [f_D(\psi)] \dots\dots\dots (11)$$

と二つの周波数に対する幾何平均で近似することにより，変動波浪漂流力の計算式が次のように書き換えられ，計算時間が節約されることを示している。ただし， ψ は浮体の出会い角(長軸と入射波の方向とのなす角)であり， $\operatorname{sgn}[x]$ は x の符号を表わす。

$$F_D(t, x; \psi) = \left\{ \left[\sum_{i=1}^N a_i \sqrt{|f_D(\omega_i, \psi)|} \cos(\omega_i t - k_i x + \epsilon_i) \right]^2 + \left[\sum_{i=1}^N a_i \sqrt{|f_D(\omega_i, \psi)|} \sin(\omega_i t - k_i x + \epsilon_i) \right]^2 \right\} \operatorname{sgn}[f_D(\psi)]$$

..... (12)

不規則波中の漂流力が規則波の場合と異なるのは、速度ポテンシャルの2次項 $\phi^{(2)}$ が成分波の干渉効果（二つの周波数の差の周波数を持つ拘束波を生み出す）によって無視できない大きになることである。この $\phi^{(2)}$ は入射波だけでなく、回折波も考慮したものでなければならない。このうち、入射波の $\phi^{(2)}$ についてはBowers [D-1]が具体的に計算しており、その結果はPinkster [D-9, 10] その他によって利用されている。なお、Bowersの2次干渉速度ポテンシャルは、表現は異なるけれども浜田 [J-2]の結果と一致することが確かめられる。回折波も含めた速度ポテンシャルの2次項を計算することは、特異点分布法などを使えば数値的には可能である。しかし、計算量が非常に多くなるので、入射波の2次干渉拘束波をあたたかも通常の進行波であるかのように見なして波強制力を求める近似法がPinkster [D-9, 10]によって用いられている。また、StandingとDucunha [D-13]はフルード・クリロフの力と同様に浮体の存在の影響を無視し、浮体の没水表面に相当する面で $\phi_i^{(2)}$ を積分して漂流力を推定している。

なお、入射波の2次干渉による拘束波の速度ポテンシャルは、長周期の水面変動と1対になっている。この水面変動は、Longuet-HigginsとStewart [J-4]が指摘したwave set-down, すなわち不規則波群が伝播している水域では波高の大きなところの水位が下り、波高の小さなところの水位が高まる現象に対応する。この意味で近年、浮体係留の研究ではset-downの問題やwave groupingの影響 [D-12]が論じられることが多い。

(3) 係留浮体の長周期動揺

係留浮体は、不規則に変動する波浪漂流力の作用によって長周期の運動をする。HsuとBlenkarn [D-3], RemeryとHermans [D-11]の論文（1970～71年）などはこれを最初に指摘した研究である。前出の図-3もその1例であり、個々の波周期の10倍以上の周期で左右揺れを起こしている。長周期動揺はゆるい係留系のときに顕著に現われ、船舶の荒天係留その他で大きな問題になっている。

5. 係留ラインの解析

船の係留は係留索（ワイヤー、ロープ、ホーサー）と防舷材、ポンツーンや浮防波堤などの係留はチェーンによるのが普通である。こうした浮体とアンカーとを結ぶ係留ラインは、浮体の変位によって張力が変化し、張力の変化が浮体の運動を拘束するという関係にある。したがって、係留ラインの解析は微小な時間ステップごとに浮体の運動と交互に解くことになる。

水深が数十m程度の比較的浅い水域での係留では、係留ラインはカテナリー曲線として解析される。井上 [E-1]は中間シンカーや中間ブイも含めた係留ラインの平衡位置と張力を求める方法を述べ、上田・白石 [E-5]は浮体に働く定常力と浮体の動揺振幅の推定値に基づいて最適な係留チェーンを選定する方法を提示している。

カテナリー理論では、係留ラインは常に静的な平衡状態を保つと仮定される。水深が深くなったり、あるいは浮体の運動が激しくなると係留ラインの動的応答が問題になる。その場合は、係留ラインに沿って有限個の質点を分布させる lumped mass 法 [E-2]や有限要素法 [E-4], あるいは等価ランブドマス法

[E-3]などが用いられる。

6. 変動風圧力および不規則波強制力

実際の浮遊式構造物の係留問題を解析するには、外力をできるだけ現実に近い形で与える必要がある。2節で述べた時系列解析法では、不規則外力の導入が容易である。

変動風圧力および波強制力は、あらかじめ設定した周波数スペクトルに基づいてシミュレートする。風についてはDavenportのスペクトル[J-1]が使われることが多い。このスペクトルは周期数十秒の付近(風速により変化)にピークを持つが、近年のノールウェーその他、海上での観測では、低周波数になるほどスペクトル密度が増加し、Davenportのスペクトルよりも大きな値になることが報告されている[J-3]。スペクトルに基づいて風速の時間変化がシミュレートされれば、これから風圧力の時間変化を計算し、式(1)の $X_k(t)$ の中の $F_{A,k}(t)$ として与える。風向の時間的変化や変動風の空間特性については良く分っていないので、風向一定で横方向には一様な変動風として扱われることが多い。

波についてはBretschneider・光易型やJONSWAP型の周波数スペクトルが用いられる。波のスペクトルは6自由度の運動成分に対する波強制力のスペクトルに変換した上で、波強制力 $F_{w,k}(t)$ の時間変化をシミュレートするのが普通である。ここで考えている波強制力は波高に比例する線型力なので、こうした伝達関数によるスペクトル変換が利用される。ただし、小口径部材の抗力など非線型流体力が無視できないときは、水粒子速度の時系列を求めることが必要である。また、ブイ係留の船舶のように大振幅の船首揺れを起こす場合は、波との出会い角が時間とともに変化するため、各成分の波強制力の時系列も出会い角の変化に対応できるように工夫することが必要である。

なお、波の方向スペクトル特性を取り入れて波強制力を計算することは原理的には容易である。ただし、計算量が増えるためなのか、そうした計算は行われていないようである。

波浪漂流力 $F_{D,k}(t)$ は、与えられた波のスペクトルから表面波形を式(9)のような級数で表示した上で、式(10)あるいは式(12)で計算する。

7. 固定バースでの船舶係留

英国やヨーロッパの水理研究所では、港内静穏度を係留船舶の動揺量で測定する手法を1960年代から取り入れており、係留ラインや防舷材の模型製作や模型船の運動測定に工夫をこらしている。既に、1973年には不規則波中での巨大タンカー係留実験例が報告[F-1, F-7]されており、長周期の左右揺れによって生じた間けつ的なフェンダー反力の増大が例示されている。また、アプローチはやや異なるけれども、永井ほか[F-2]は1969年にシーバースに係留中のタンカーとドルフィンの衝突問題を規則波で実験している。最近、樺木・久保[F-3]は港湾の岸壁配置の観点から不規則波中の係留船舶の動揺問題を検討している。

一方、上田・白石[F-4~6]は船舶の安全性および稼働限界の観点から実船観測、数値計算法の開発、

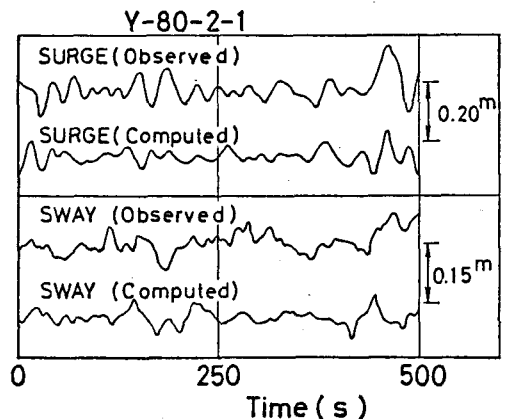


図-4 実船観測における船体の前後揺れと左右揺れ(上田ほか[F-5]による)

系統的な模型実験等を実施している。図-4は総トン数3,584 tの艀装中のコンテナ船が平均風速14 m/sの風を受けたときの前後揺れと左右揺れの観測値と計算値である。ただし、風はDavenportのスペクトルを仮定してシミュレートしたもので、計算値と観測値は1対1に対応はしていない。

船舶係留の模型実験では、係留索および防舷材の非線型な荷重-変位曲線の特性をどのように模型で再現させるかに苦心する。係留索についてはナイロントックンをほぐして使ったり[F-6]、数本の線型ばねを直列につないだりしている。線型ばねを係留索や防舷材の模型に利用することは基礎理論の検証実験などでは行われるが、実際の浮遊式構造物の係留の模型実験用としては適當でない。

8. 1点係留ブイでの船舶係留

従来の係留ブイは港湾内の遮蔽水域に設置され、波浪の影響を考慮する必要がほとんどなかった。しかし、石油タンカーが巨大化するにつれて固定バースを港内に設けることがコスト的に次第に困難となり、遮蔽されない水域にバースを設ける例が増えている。1点係留ブイはその代表であり、種々のタイプのものが北海その他に建設されている。外海に面した地点としては、我が国でもむつ小川原油備蓄基地のブイが1983年に完成し、福井石油備蓄基地のブイも建設中である。

1点係留ブイに係留された船舶の挙動の問題は、歴史が比較的新しいために経験則が成り立たず、そのつど模型実験で確認せざるを得なかった。これに関しては、オランダ船舶模型試験所(N.S.M.B.)が最も豊富な経験を有しており、PinksterとRemery[G-2]は実験法について解説している。しかし最近は数値計算の手法が発達し、フランス石油公社[G-1]を初めとしていろいろな機関が数値解析プログラムを開発し、使用している。

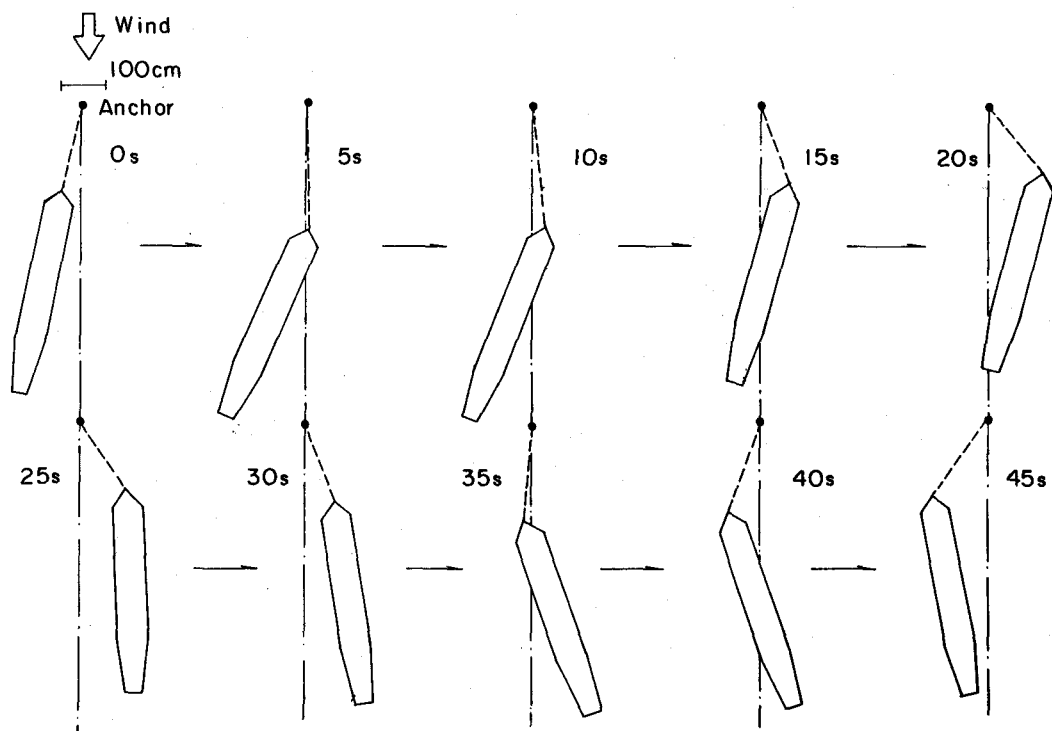


図-5 1点係留ブイにおける船舶の振れ回り運動の実験例
—空載タンカー、模型風速6.2 m/s—(鈴木・諸石[G-3]による)

1点係留ブイでの船の挙動の特性は、一定風の下でもゆっくりとした大振幅の運動を起こすことで、これを振れ回り運動という。図-5はその1例〔G-3〕で、数値は模型量（想定縮尺 $1/30$ 程度）である。振れ回り運動は一種の不安定問題である。風に対して一度船首が偏角すると、斜め風となって回転トルクが生じ、偏向角を一層大きくする。あるところまで行くと係留索の引き戻す力で逆方向に移動し始める。この解析は Wichers〔G-5〕が行っているように、空間座標系に関する運動方程式系と船体固定座標系に関する運動方程式系とを相関させながら解かなければならない。鈴木・諸石〔G-3〕はこうした方法で数値計算を行い、実験値と良く一致する結果を得ている。図-6はその1例で、図-5の条件で船首の x 、 y 座標、船首の偏れ角、および係留力の時間変化を示している。

なお、数値計算にあたっては風圧力の合力およびその作用点の位置が風の方角によって変化するデータを正確に把握しておかなければならない。流れによる力についても同様である。

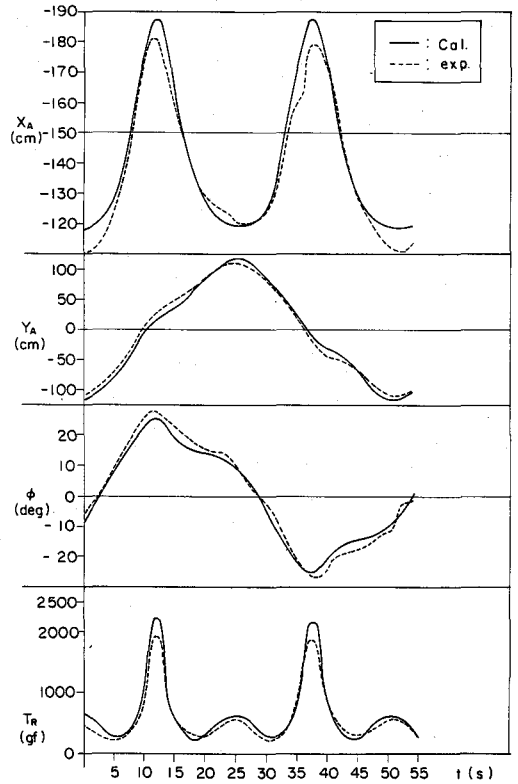


図-6 振れ回り運動の実験値と計算値の比較
（鈴木・諸石〔G-3〕による）

9. 直方体浮体の係留

直方体形状の係留浮体は浮防波堤、浮桟橋、石油備蓄船などの構造物ばかりでなく、起重機船や台船などの作業船、あるいは施工途中の大型ケーソンなど、港湾事業や海洋建設事業に用いられることが多い。

直方体浮体であっても係留の解析方法は一般と変わらず、式(1)の運動方程式を数値的に解かなければならない。やや扱い易さがあるのは、造波抵抗や波強制力を矩形断面浮体に対する井島ほか〔C-1〕の領域分割法あるいは伊藤〔C-5〕の近似理論で計算できることである。直方体の長さが幅よりも十分に大きいときは、船体に対するストリップ法の手法を使って前後揺れ以外の5個の運動成分に対する広義の流体力係数を求めることができる〔H-6〕。もっとも、実験値と照合して補正するのであれば、正方形浮体に適用することもできる。

チェーン係留の場合の概略計算としては、波浪漂流力、風圧力、流れの力を定常外力と見なしてカテナリー理論でチェーンの平衡位置を求める。そして、その位置でのチェーンの等価ばね係数を使って運動方程式の線型解を求め、浮体の変位振幅に対応したチェーンの張力を計算し、許容値以下であることを確かめる〔E-5〕。本来は時間的に変動する波浪漂流力を定常外力として評価する際は、木暮ほか〔D-5〕の実験を参照して、式(7)に有義波の諸元を代入するのが一法であろう。また、浮体の変位振幅を求める際は最高波を対象とすべきである。なお、浮体と係留系の設計が固まったならば、時系列解析を行って係留浮体の挙動を確認する。

直方体浮体の係留時の挙動解析としては、洋上石油貯蔵船に係わる数値計算および模型実験〔H-2, 3, 5, 6〕が興味深い。貯蔵船はその寸法が $390\text{ m} \times 97\text{ m} \times 27.6\text{ m}$ または $397\text{ m} \times 82\text{ m} \times 25.4\text{ m}$ （長さ×幅×

深さ)の巨大なもので、大型のセル型防舷材を装備したケーソン式ドルフィンにはさまれてその間を遊よくするように設計されている。実験ならびに数値計算の結果では、動揺が大きいのは空載のときである。これは波だけが作用するときでもそうである。空載時は吃水が浅いので波強制力が小さいけれども、付加質量および造波減衰力が大幅に減少するため、同一の波浪条件であれば空載時のほうが大きく動揺する。

実験と数値計算の比較結果から、左右揺れおよび横揺れの減衰係数を1.5～3.0倍に割り増し、また空載時の左右揺れの付加質量を3倍に評価することが必要とされた[H-5, 6]。こうした流体係数の修正は船舶の横揺れに対して行われているが、直方体浮体ではその必要性が強いようである。もっとも、適切な非線型減衰係数を導入すれば、割り増し率を引き下げることが可能であろう。

10. ヒンジ式直立浮体の動揺

1点係留ブイの中でも水深が大きいものは、下端をヒンジ構造とした直立浮体(articulated tower or loading platform)が使われる[I-2, 3]。また、航路標識の灯標としても利用され始めている。この構造体は、基本的には入射波の方向に縦揺れをするので1自由度の運動系であり、浮体の運動方程式としては単純である。ただし、文献[I-1]に示すように、波強制力および造波減衰力の両者とも流速の2乗に比例する抗力の影響が顕著になるので、運動方程式としては非線型となる。したがって、解析としては時系列解析によらなければならない。

一様断面の直立円筒浮体を用いた灯標について室内実験および海上実験の結果は、非線型運動方程式の数値計算結果と一致しており、計算法の信頼性が確認されている。浮体の断面が高さ方向に変化する場合には、軸対称浮体の流体力理論[C-10]で線型造波抵抗および波強制力を求めれば良い。

計算では縦揺れしか予測できないが、実際には波向きと直角方向の横揺れを起こすことがあり、その場合には真上から見て長円形あるいは8の字の軌跡を描く[I-1]。これは直立円筒の下流側に発生するカルマン渦による変動揚力に起因すると推察されるが、詳細は未解明である。

11. あとがき

海上に係留された浮遊式構造物の風、波、流れに対する応答は、結局のところ浮体形状・係留方式に適合した数値計算プログラムを用意し、これを使って解析せざるを得ない。予備計算としては線型解析で間に合うこともあるが、実際の構造物の設計を固める時点では時系列解析を行って、浮体の挙動ならびに係留力を把握しなければならない。この意味で、優れたプログラム開発の必要性が大きい。また、外力条件を十分に再現できる施設を使った模型実験も必要になる。現在までのところ、波は一方向不規則波として扱われてきたが、方向スペクトルを持つ波の発生装置が各国で整備されてきているので、これを利用して新しい知見が得られることが期待される。

基礎的問題としては、wave groupingあるいはwave set-downと波浪漂流力の関係をもっと明確にしておくことが望まれる。また、浮体の前後揺れについての検討が不足している。さらに、非線型減衰力についても不明瞭な点が多い。

浮体係留の問題は非常に間口が広い。本稿でも、テンション・レグ・プラットフォーム(TLP)やガイド・タワーなど今後の大水深の浮遊式構造物については触れることができなかった。また、浮防波堤についてもほとんど紹介できずに終わった。土木工学の範ちゅうから外れるけれども、半潜水式浮遊構造物(semi-submersibles)については各国の造船関係者が熱心に研究中である。

まえがきでもお断わりしたように、本稿は浮体係留の問題を新しく勉強される方への手引きに過ぎない。取り敢えず引用した参考文献からさらに専門的な文献を検索し、各位で研さんを積まれて浮遊式構造物に対する理解を深めて頂ければ、筆者の何よりも喜びとするところである。

参考文献*

A. 総論

- [A-1] 元良誠三(監修): 船体と海洋構造物の運動学, 成山堂, 1982, 362 p.
- [A-2] 日本造船学会: 第2回海洋工学シンポジウム(浮遊式海洋構造物の係留問題を中心にして), 1976, 162 p.
- [A-3] 大楠 丹: 浮遊構造物に作用する流体力とその運動について — 田才福造教授の講義ノート(その1~5) —, 日本造船学会誌, 第641号(pp.19-26), 647号(11-23), 649号(2-13), 650号(15-24), 651号(12-25), 1982年11月~1983年9月.
- [A-4] 鈴木康正・合田良実: 波浪中の浮体動揺と係留力の推定について, 昭和54年度港湾技研講演集, 1979, pp. 29-70.
- [A-5] 田才福造: 浮遊構造物の動揺と波浪荷重, 1976年度水工学研修会講義集, 1976, pp. B-7-1~18.
- [A-6] 田才福造: 波浪に対する浮遊構造物の動的応答, 第1回海洋工学シンポジウム, 日本造船学会, 1974, pp. 67-88.

B. 浮体の運動方程式とその解法

- [B-1] 新井信一・根角幸明・高木又男: 不規則波中の係留浮体の運動に関する研究, 日本造船学会論文集, 第140号, 1977, pp. 151-160.
- [B-2] 新井信一: 不規則波中における係留系の非線形現象, 第26回海講論文集, 1979, pp. 485-489.
- [B-3] 井上義行: 浮遊式海洋構造物の波浪中における運動および係留特性, 石川島播磨技報, 第17巻第2号, 1977, pp. 143-152.
- [B-4] 井上義行: 係留システムの設計法, 日本造船学会論文集, 第145号, 1979, pp. 95-99.
- [B-5] Schellin, T.E., Scharrer, M., and Matthies, H.G.: Analysis of vessels moored in shallow, unprotected waters, 14th Offshore Tech. Conf., 1982, OTC 4243.
- [B-6] Seidl, L.H. and Wybro, P.G.: Methods for dynamic analysis of floating vessels with application to single point moorings, Proc. 2nd Int. Symp. Offshore Mechanics and Arctic Engg., 1983, ASME, pp. 290-303.
- [B-7] 高木又男・斎藤公男ほか: 非周期的造波問題の周波数領域での取扱い(第1~7報), 関西造船協会誌, 第182号(pp. 39-48), 184号(85-93), 187号(85-91), 188号(31-39), 191号(51-59), 192号(121-127および129-140), 1981年9月~1984年3月.
- [B-8] Triantafyllou, M.S.: A consistent hydrodynamic theory for moored and positioned vessels, Jour. Ship Res., Vol. 26, No. 2, 1982, pp. 97-105.
- [B-9] Van Oortmerssen, G.: The motions of a moored ship in waves, Netherlands Ship

* 各文献はいずれかの項目に分類したが、本文中でも見られるように、複数の項目にまたがるものが多いので注意されたい。

Model Basin, Pub. No. 510, 1976, 138 p.

- [B-10] Van Oortmerssen, G. : The behaviour of moored ships in waves, 9th Offshore Tech. Conf., 1977, OTC 2882.

C. 流体力の算定法

- [C-1] 井島武士・田淵幹修・湯村やす：有限水深の波による矩形断面物体の運動と波の変形，土木学会論文報告集，第202号，1972，pp. 33-48.
- [C-2] 井島武士・田淵幹修・湯村やす：有限水深の波による円柱状浮体の運動，土木学会論文報告集，第206号，1972，pp. 71-84.
- [C-3] 井島武士：有限水深域の構造物および浮体による波の変形（2次元および3次元問題），1974年度水工学研修会講義集，1974，pp. B-3-1~32.
- [C-4] 井島武士・吉田明徳・湯村やす：有限水深域の波による楕円および矩形浮体の運動と波の変形，土木学会論文報告集，第244号，1975，pp. 91-105.
- [C-5] 伊藤喜行・千葉 繁：浮防波堤の水理に関する近似理論と応用，港湾技研報告，第11巻第2号，1972，pp. 137-166.
- [C-6] 伊藤喜行・木原 力：円柱の動揺に伴う造波抵抗，港湾技研報告，第11巻第3号，1972，pp. 37-58.
- [C-7] 小林正典ほか：船舶の耐航性に関する理論計算プログラム（その1．理論計算式），三井造船技報，第82号，1973，34 p.
- [C-8] 小舟浩治・谷本勝利：矩形断面浮体の波浪動揺と係留力について，第25回海講論文集，1978，pp. 382-385.
- [C-9] 元良誠三：船体運動に対する附加質量および附加慣性モーメントについて — その2．前後動に対する附加質量 — ，造船協会論文集，106号，1960，pp. 59-62.
- [C-10] 高山知司・諸石一幸：波浪中における軸対称浮体の動揺計算，第30回海講論文集，1983，pp. 425-429.

D. 波浪漂流力と長周期動揺

- [D-1] Bowers, E.C. : Long period oscillations of moored ships subject to short wave seas, Trans. Roy. Inst. Naval Archtit., Vol. 118, July 1976.
- [D-2] Chakrabarti, S.K. : Steady and oscillating drift forces on floating objects, Proc. ASCE, Vol. 106, No. WW2, 1980, pp. 205-228.
- [D-3] Hsu, F.H. and Blenkarn, K.A. : Analysis of peak mooring force caused by slow vessel drift oscillation in random seas, 2nd Offshore Tech. Conf., 1970, OTC1159.
- [D-4] Kim, C.H. and Dalzell, J.F. : An analysis of the quadratic frequency response for lateral drifting force and moment, Jour. Ship Res., Vol. 25, No. 2, 1981, pp. 117-129.
- [D-5] 木暮・鈴木・溝内・片桐・武井：浮防波堤に作用する波漂流力について，第30回海講論文集，1983，pp. 440-444.
- [D-6] Maruo, H. : The drift of a body floating on waves, Jour. Ship Res., Vol. 4, No. 3, 1960, pp. 1-10.

- [D-7] 野尻信弘・村山敬一：規則波中の2次元浮体に働く漂流力に関する研究，西部造船会会報，第51号，1976，pp.131-152.
- [D-8] Pinkster, J.A. : Low-frequency phenomena associated with vessels moored at sea, Soc. Petroleum Engrs. Jour., Dec. 1975, pp.487-494.
- [D-9] Pinkster, J.A. : Low frequency second order wave exciting forces on floating structures, Netherlands Ship Model Basin, Pub. No. 650, 1980, 204 p.
- [D-10] Pinkster, J.A. and Huijsmans, R.H.M. : The low frequency motions of a semi-summersible in waves, Proc. BOSS '82, 1982, pp.447-466.
- [D-11] Remery, G.F.M. and Hermans, A.J. : The slow drift oscillations of a moored object in random seas, 3rd Offshore Tech. Conf., 1971, OTC 1500.
- [D-12] Spangenberg, S. and Jacobsen, B.K. : The effect of wave grouping on slow drift oscillations of an offshore structure, Proc. Int. Symp. Ocean Engg. and Ship Handling, 1980, pp.8:1-8:14.
- [D-13] Standing, R.G. and Ducunha, N.M.C. : Slowly-varying and mean second-order wave forces on ships and offshore structures, Proc. 14th Symp. Naval Hydrodynamics, 1983, National Academy Press, pp.279-318.

E. 係留ラインの解析

- [E-1] 井上義行：任意係留ラインの静的特性計算，石川島播磨技報，第16巻第5号，1976，pp.552-558.
- [E-2] 小田一紀・富岡健一：係留鎖の動的張力に関する基礎的研究，第27回海講論文集，1980，pp.275-279.
- [E-3] 栖原寿郎・小寺山 亘はか：振動する繫留鎖の挙動と張力，日本造船学会論文集，第148号（pp.128-137），152号（350-360），154号（183-191），1980～1983年.
- [E-4] 辻 松雄・加納 勇：シンカー付係留ラインの衝撃張力，第28回海講論文集，1981，pp.421-425.
- [E-5] 上田 茂・白石 悟：カタナリー理論による最適係留鎖の選定法および計算図表，港湾技研資料，No. 379，1981，55 p.

F. 船舶の固定バース係留

- [F-1] Lean, G.H. : Sway motions of ships moored against stiff fenders and subjected to random seas, Proc. NATO Advanced Study Institute on Analytical Treatment of Problems in the Berthing and Mooring of Ships, Wallingford, 1973, pp.237-249.
- [F-2] 永井莊七郎・小田一紀・重藤宗之：横波を受けるシーバースタンカーのdrifting, swaying, および rolling によってドルフィンに働く衝撃力に関する研究，第16回海講講演集，1969，pp.341-351.
- [F-3] 榎木 亨・久保雅義・青木伸一：港湾 slip 内における船体運動および定常漂流力について，第29回海講論文集，1982，pp.511-515.
- [F-4] 上田 茂・白石 悟・柳沢雄博：超大型タンカーの係留時動揺特性，第25回海講論文集，1978，pp.602-606.

- [F-5] 上田 茂・白石 悟・飯牟礼信幸：強風時における係岸船舶の動揺測定，第28回海講論文集，1981，pp. 431-435.
- [F-6] 上田 茂・白石 悟：係留船舶の動揺計算法とその評価，港湾技研報告，第22巻第4号，1983，pp. 181-218.
- [F-7] Van den Bunt, J.D. : Model study on mooring forces due to regular and irregular waves, Proc. NATO Advanced Study Institute on Analytical Treatment of Problems in the Berthing and Mooring of Ships, Wallingford, 1973, pp. 251-266.

G. 1点係留ブイと船舶係留

- [G-1] Molin, B. : Three-year experiences in the numerical prediction of the slow-drift motion of moored tankers, 15th Offshore Tech. Conf., 1983, OTC 4533.
- [G-2] Pinkster, J.A. and Remery, G.F.M. : The role of model tests in the design of single point mooring terminals, 7th Offshore Tech. Conf., 1975, OTC 2212.
- [G-3] 鈴木康正・諸石一幸：ブイ係留船舶の荒天時の振れ回り運動，港湾技研報告，第21巻第2号，1982，pp. 107-150.
- [G-4] 高山・鈴木・永井・蜂須賀：一点係留ブイバースに働く波浪中の係留力に関する模型実験，第26回海講論文集，1979，pp. 471-475.
- [G-5] Wichers, J.E.W. : Slowly oscillating mooring forces in single point mooring systems, Proc. BOSS '79, 1979, pp. 27-1~27-32.

H. 直方体浮体の係留

- [H-1] 藤田・阪東・支岐・中込・利穂：矩形構造物の動揺および係留力に関する研究，第30回海講論文集，1983，pp. 445-449.
- [H-2] 北沢・山本・新井・高木：洋上備蓄基地における貯蔵船の運動シミュレーション，第27回海講論文集，1980，pp. 298-301.
- [H-3] 珠久・島田・藤井・豊田・池上・安藤：浅海浮上式備蓄タンクの係留に関する研究 — 非線型モデルによる数値シミュレーション — ，日本造船学会論文集，第146号，1979，pp. 245-254.
- [H-4] 田中良弘：テンション・レグ係留浮体の運動および係留特性，第27回海講論文集，1980，pp. 280-284.
- [H-5] 高山・永井・菊地・諸石：大型矩形浮体の波浪中の動揺と係留力に関する研究（第1報） — 模型実験による検討 — ，港湾技研報告，第19巻第3号，1980，pp. 71-103.
- [H-6] 上田 茂・白石 悟：大型矩形浮体の波浪中の動揺と係留力に関する研究（第2報） — 数値シミュレーション手法について — ，港湾技研報告，第19巻第3号，1980，pp. 105-143.

I. ヒンジ式直立浮体の運動

- [I-1] 合田良実・鈴木康正・蜂須賀和吉：直立式円筒浮体の波浪中の動揺振幅に関する研究，港湾技研報告，第17巻第4号，1978，pp. 89-120.
- [I-2] Hays, D.L., McSwiggan, M. and Vilain, R. : Operation of an articulated oil loading column at the Beryl Field in the North Sea, 11th Offshore Tech. Conf., 1979, OTC 3563.
- [I-3] Kim, C.H. and Luh, P.A. : Prediction of pitching motions and loads of an

articulated loading platform in waves, 14th Offshore Tech. Conf., 1982,
OTC 4247.

J. その他

- [J - 1] Davenport, A.G. : The spectrum of horizontal gustiness in high winds, Quart. Jour. Roy. Meteor. Soc., Vol. 87, 1961, pp.194-211, or Proc. ASCE, ST3, 1967, pp.11-34.
- [J - 2] Hamada, T. : The secondary interactions of surface waves, Rept. Port and Harbour Tech. Res. Inst., No. 10, 1965, 28 p.
- [J - 3] International Towing Tank Conference : Report of the Ocean Engineering Committee, 17th ITTC, Sept. 1984.
- [J - 4] Longuet-Higgins, M.S. and Stewart, R.W. : Radiation stresses in water waves : a physical discussion, with applications, Deep-Sea Res., Vol. 11, 1964, pp.529-562.
- [J - 5] 高木又男 : 海洋構造物に関する流体力学の問題の動向について, 日本造船学会誌, 第 659 号, 1984年 5 月, pp. 2-13.