

水中沈降時のテンプレートに生じる「木の葉運動」の抑止法

生駒 哲夫
(技術開発センター)

竹内 啓五
(技術研究所)

§1. はじめに

1940年代初頭に、海洋における油田開発がスタートして以来、最初沿岸域であった施設も、掘削水深が増すと共に、坑口を大気中に設置可能な固定式プラットフォームから、TLP (Tension Leg Platform) まで、開発プラントの概念も次々と変遷を見てきた。TLPとは、海上に浮体構造をもち、海底には通常テンプレートと呼ばれる板状アンカー部分が設置され、この両者がテンドンと呼ばれる係留索によって互いに連結された構造形式に対して与えられた名称である。

いま、海洋石油生産基地の設置水深は900mに達し、数年以内には1000mに到達するのは確実とみられている。こうした趨勢をみると、今後はTLPが多く用いられてゆくことが予想される。それは、水深が増加しても構造上の影響が少なく、かつ北海のように気象、海象条件がきびしい環境の中にあっても、高い稼働率を維持することが出来るとされるからである。

ところで、TLPを構築する際には、テンプレートの設置水深が深いだけに、テンプレートを所定の海底にどのように沈設するかということが一つの大きな問題となる。一般に考えられるその問題の解決方法の一つとしては、従来のクレーン船あるいはクレーン台船による吊り下げ方式である。しかしその方法によると、水深が深くなるにつれ、またテンプレート重量が大きくなるにつれ、吊り下げワイヤーは太さと共に長さも増大し、ワイヤー巻き付け用のドラムには深さ分を巻ききれなくなる可能性がでてくること、また巻ききれたとしても一つあたりのドラムの大きさが大きくなるためにクレーン船甲板は広い面積が要求されることになるし、また深さ分を余裕をもって巻ききれないとすると、途中で何回かの盛り替え作業が避けられなくなるなどが大き

な問題となりうる。

ここに、いわゆる従来の吊り下げ方式にはよらずにテンプレートが所定の海底に自律的に安定姿勢を保ちながら沈降できる方式を開発することの意義が生まれてくる。

一般に平板は、たとえ水中を自然落下するときにも、あたかも木の葉が空気中を舞うときのように、いわゆる「木の葉運動」をする事はよく知られている。テンプレートも一般には板状物体である。したがって、テンプレートを姿勢を安定化させながら沈めるということは、結局は、この不可避的に生じる木の葉運動を生じないようにして沈めることを意味する。この「木の葉運動」を抑止できるか否かが本方式の成否を左右するのである。

そこで、ここでは木の葉運動を生じさせないようにするためには、水路式姿勢安定化装置と呼ぶ簡易な装置を考案し、それをもって抑止することを試みた。

本論文は、テンプレートのような板状物体が水中を落下する際に生じる「木の葉運動」が生じる理由をまず明らかにしながら、その運動を抑止しようとするここでの装置がどの程度効果があるかについて実験的に研究した結果を報告するものである。

§2. 仮説

テンプレートの木の葉運動を抑止するための姿勢安定化装置を着想するに至った仮説は以下のとおりである。

『沈降する板状物体には下方からの流体が回り込んで物体後方に交番渦を生じるが、木の葉運動は、その渦が物体に不均衡力を及ぼすことによって生じる。したがって、その運動を抑止するということは、次のようにすればよいことを意味する。すなわ

ち、渦が生じることは避けられないものの、生じた渦が物体に不均衡な力を直接作用しないようにする、あるいは不均衡な力が生じても、その影響の度合いが小さくなるようにする。そのためには、渦が生じる位置を物体本体からできるだけ引離せばよい。」

この仮説に基づいて考案された「水路式」姿勢安定化装置が図-1に示されたものである。

§ 3. 実験方法

3.1 相似則

予め、本実験室レベルの流れが実海域における流れとどの程度の相似性を持っているかについてみる。両者の間でテンプレートの形状が相似形である場合、テンプレート周りの流れが一致するためには、レイノルズ数とフルード数が互いに一致しなくてはならない。それは粘性と重力が流れに対して重要な役割をなすと考えられるからである。その一致が見られたとき初めて、実海域と実験室レベルの流れについて力学的および幾何学的な相似が成立することになる。

テンプレートと周囲の流体との間の運動は相対的であることから、便宜的に、テンプレートが水中を落下するのではなく、テンプレートを空間に固定し、流体が逆向きにすなわち鉛直方向の下から上に向かって速度 U で流れる定常流として考える。

ここに、レイノルズ数とフルード数とは次のように定義される無次元量である。

$$R = \frac{UL}{\nu}$$

$$F = \frac{U^2}{Lg}$$

ただし、 U は主流の速度、 L は物体の代表的な大きさを表わす長さ、 ν は流体の動粘性係数、 g は重力加速度。

ここで、実海域レベルでのこれら二つの無次元パラメータの大きさを計算すると、

$$R = 1.0 (\text{m/sec}) \times 80.0 (\text{m}) / (1.520 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}) = 5.3 \times 10^7$$

$$F = 1.0 (\text{m}^2/\text{sec}^2) / 80.0 (\text{m}) / 9.8 (\text{m}/\text{sec}^2) = 1.28 \times 10^{-3}$$

そこで今度は実験室レベル（流体是水）での ν を 1.139×10^{-6} とすると、

$$5.3 \times 10^7 = UL / 1.139 \times 10^{-6}$$

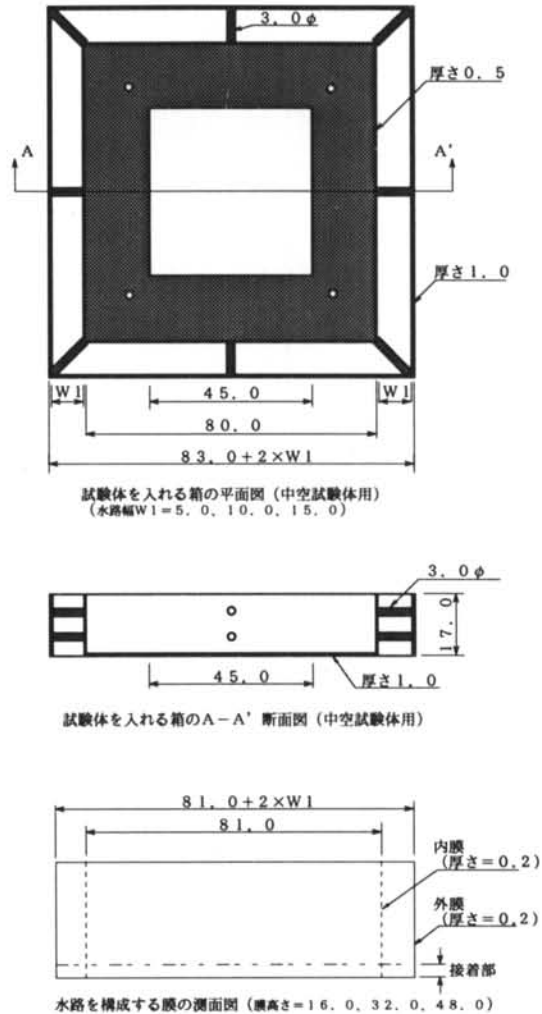


図-1 姿勢安定化装置

$$1.28 \times 10^{-3} = U^2/L/9.8$$

故に、これから

$$U = 0.911 \quad (\text{m/sec})$$

$$L = 0.664 \times 10^2 \quad (\text{m})$$

すなわち、実海域と実験室の双方での流れの幾何学的、力学的な特性が等しくなるためには、実験室レベルでの主流の速度 U は $0.91 (\text{m/sec})$ 、物体の代表的な大きさ L は $66.4 (\text{m})$ にとらなくてはならない事が分かる。

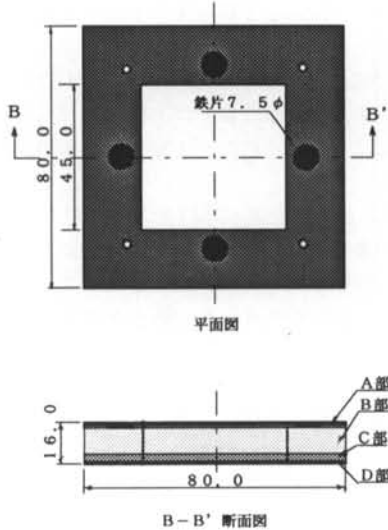
しかし、実験室レベルのテンプレート模型の大きさが 66m というのは、明らかに困難である。

そこで今度は、実験室レベルの特性量から得られる R と F を計算してみる。

$$R = 0.15 (\text{m/sec}) \times 0.08 (\text{m})$$

安定化装置に関するパラメータ		試験体形状に関するパラメータ			
水路を構成する膜高さ	水路幅	重心浮心間距離	比重	中空	中実

表一 実験パラメータの種類



図一 2 試験体構成図

$$\begin{aligned}
 & / (1.139 \times 10^{-6} (\text{m}^2/\text{sec})) \\
 & \approx 0.011 \times 10^6 \\
 & = 1.1 \times 10^4 \\
 F & = 0.15 (\text{m}/\text{sec}) \times 0.15 (\text{m}/\text{sec}) / 0.08 (\text{m}) \\
 & / 9.8 (\text{m}/\text{sec}^2) \\
 & = 2.87 \times 10^{-2}
 \end{aligned}$$

すなわち、実海域レベルと実験室レベルとでは、レイノルズ数にして三桁異なり、フルード数については一桁異なることが分かる。

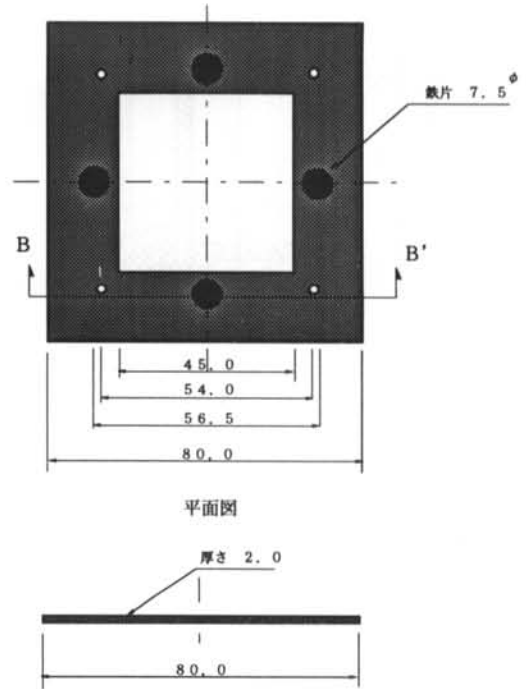
このことから、実海域レベルと実験室レベルの間で生じる流れの幾何学的かつ力学的な特性の違いに及ぼす要因では、重力よりも流体の粘性の方が大きいことを意味する。

3.2 実験パラメータ

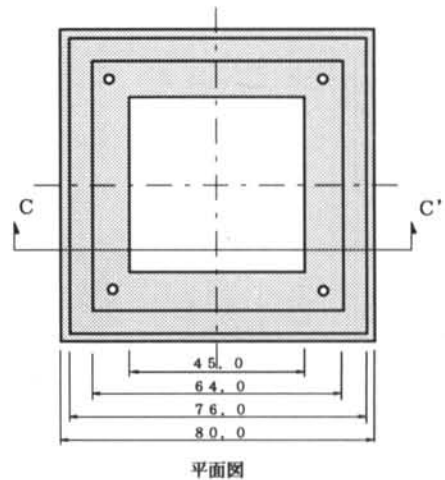
今回の実験で採用したパラメータの種類は表一に示すとおりである。

3.3 試験体の製作

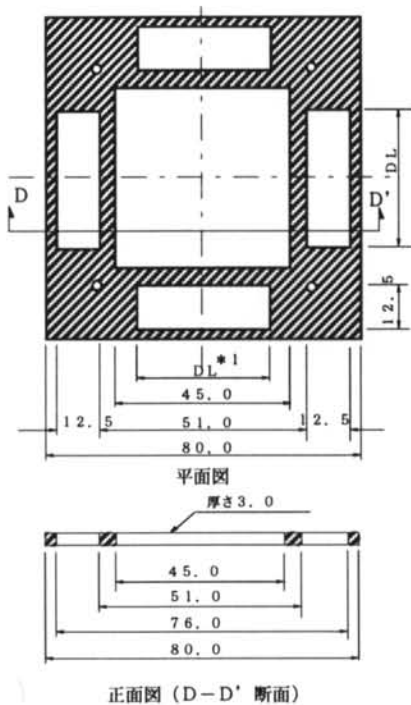
試験体は図一2のように、A、B、C、D、の4つの部分から構成されるものとし、C部分のみが重量調整できるようにして、全体比重を調整するようにした。それは、形状は相似でも、その大きさについての実機に対する縮尺率がおよそ1/1000と極めて小



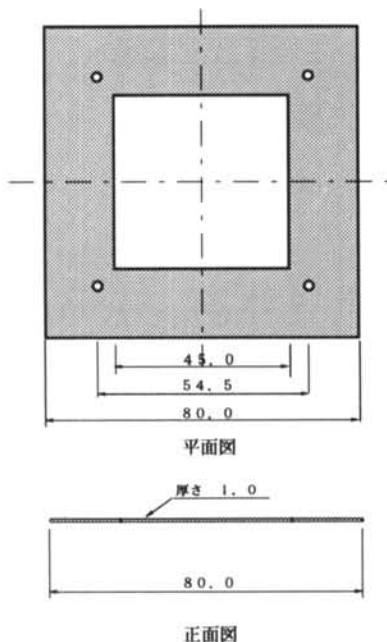
図一 3 試験体のA部分 (中空)



図一 4 試験体のB部分 (中空)



* 1 試験体全体を目標比重とするために、くりぬくべき長さ、ただし幅は一定。
 図—5 試験体のC部分(中空)



図—6 試験体のD部分(中空)
 さい試験体を用いる関係上、「比重」調整が問題となるからである。

試験体に安定化装置を装着する方法としては、試験体構成部分のA~D部までを含む透明箱を用いた(図-1参照)。箱を用いたのは、試験体が小さく試験体の側面に直接取り付けることが困難であったためである。また箱を透明としたのは、後述するように、光学的手法により試験体の挙動を計測する方法を採用したことによるものである。

用いた試験体の各構成部分の形状寸法を図-3~6に示す。ただしここでは、代表例として試験体の中央部がくりぬかれた「中空」試験体の構成部分のみについて示す。

A部は、試験体を常に水槽内の一定位置から沈降させる必要から、電磁石のオン・オフによって自動的に沈降開始させるために鉄片を埋めこんだ部分。B部は、光学的挙動測定を可能とさせるために、全体を透明とし、かつ発光剤が密封された透明チューブが設置できる溝を持った部分。C部とD部は適宜その部分の体積を削除することによって比重を調整できるようにした部分である。

なお、安定化装置を構成する本体の材質はメタクリル樹脂板(ヤング係数は7252kgf/cm²)で、膜の材質は硬質塩化ビニル板(ヤング係数は35500kgf/cm²)である。

3.4 実験水槽

用いた実験水槽の形状寸法(内法寸法)は45mm×45mm×2000mmである。

水槽の材料は、試験体の水中挙動を計測する方法が光学的な方法であることから、メタクリル樹脂板(商品名:アクリル)製を採用した。

3.5 計測法

試験体の縮尺率が実機(代表長さ=80m)の1000分の1という、小さくて軽量なために、沈降挙動は非接触で計測する必要があった。そのために開発した光学的挙動計測法とは、水槽内を発光しながら自然落下する試験体の挙動をカメラで観察記録し、その映像を後に画像処理装置に入力して沈降挙動の解析を行なうというものである。

実際には、水槽が縦に細長く、一台のカメラに収めるには細長すぎるために、水槽を上下、半分ずつに分けて観測記録した画像をマルチビューアにて合成した上で画像処理装置に入力するという方法を採用した。

画像処理において行なう挙動解析の内容は次の3

項目である。

- (1)試験体の傾き角度
- (2)沈降開始時の振れ幅
- (3)沈降速度

次に、この3項目についての解析法を示す。

(傾き角度計測)

試験体の形状が板状であることから、横から見た場合、その輪郭線は直線に見える。同様に、試験体の4つの側面近傍に設けられた溝(図-4参照)に埋め込まれた発光剤入りのチューブは外部からはやはり直線状に光って見えることになる。画像には発光するチューブの位置が試験体の位置として明るく写り込むことになる。

そこで、次の手順により画像処理する。

- 1) 画像中、発光している領域をもって試験体と見なして試験体の抽出を行なう。
- 2) 抽出領域の特徴量から、試験体の慣性主軸を求める(抽出領域の特徴量計測)。
- 3) 予め定められた基準軸からの慣性主軸の傾きをもって試験体の落下中の傾きとする。

(振れ幅計測)

試験体が画像として写る領域の重心位置を基準に計測する。

先に示した試験体抽出処理の後、画像処理装置において領域の重心位置を計測する。重心位置の揺幅がすなわち試験体としての振れ幅とみなすため、画像内での水平方向の移動距離を実際の移動距離に換算する。ここで示した振れ幅は、試験体のスタート台の中心位置から考えた鉛直線に対し、水平方向にどれだけ移動したかを示すものである。

(落下速度計測)

試験体の位置は、画像上での重心位置から知ることができる。試験体の重心が水槽底部の定められた位置に入ったときをもって着底とみなすことにより、計算機内にて着底までの時間を計ることができる。スタート位置から水槽底板までの距離は一定なので、計測した時間から平均落下(沈降)速度を求めることができる。

なお、本計測法による誤差については、傾斜角度が ± 0.5 度、振れ幅が ± 0.5 mmである。

試験体の水中落下挙動を比較するためには常にスタート位置を一定にする必要があったが、それは、水槽の天端に設けた電磁石に試験体を吸い付けるという方法で実現させた。また、実験水槽は当実験の計測法の特徴から、暗室に置いた。

§4. 実験結果とその検討

4.1 光学的に捉えた沈降挙動

テンプレート試験体が水中を自然落下する際の挙動について、姿勢安定化装置を装着しない場合(写真-1)と、装着した場合(写真-2)とを比較して示す。ただし、代表例として、中空試験体のみにして示す。

写真のなかで、白く映っているのが試験体のB部分に埋め込まれた透明チューブ内の発光剤である。

4.2 最大傾斜角度と最大振幅

図-7~18に、水路幅をパラメータとした場合の、二重膜の高さに対する最大傾斜角と最大振幅との関係を示す。これらの図より次のことが分る。

- (1)今回の膜の高さの範囲では、姿勢安定化装置の水路を構成する膜の高さが高くなるほど、試験体沈降時の最大傾斜角度と最大振幅は減少する傾向にあり沈降時の姿勢安定性は向上する
- (2)中空と中実の試験体に対する姿勢安定化装置の膜の高さの増加に伴う効果は、中空試験体に対する方が中実試験体に対するよりも顕著である。

4.3 平均沈降速度

実験結果としての沈降速度のパラツキは9.30~18.70secの範囲に及んだ。

ここで、試験体の気中重量と浮力と抗力との関係から水中落下速度 U を計算すると、次式のようになる。ただし、ここでは姿勢安定化装置の水路の膜高さ方向の水の抵抗は無視し、抗力係数を平板の一般的な値である2とした。

$$U = \sqrt{gD \left(\frac{\rho - \rho'}{\rho'} \right)}$$

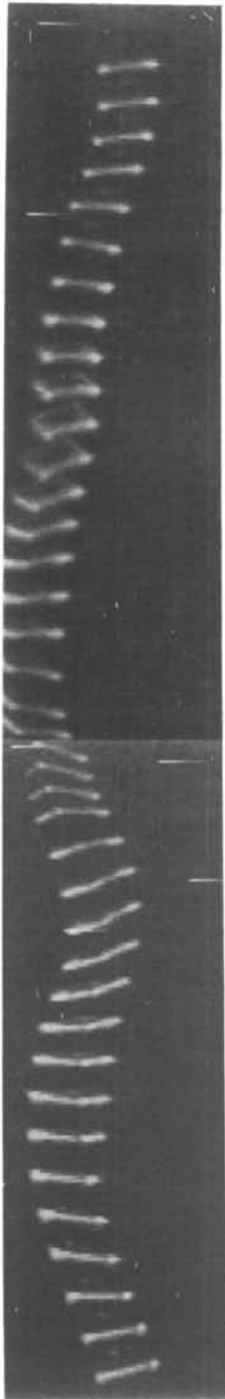
ρ および ρ' は、試験体と水の密度であり、 D は試験体の厚さ、 g は重力加速度である。

これから、水中落下速度は試験体と流体との密度差と厚さの平方根に比例して増加することが分かる。

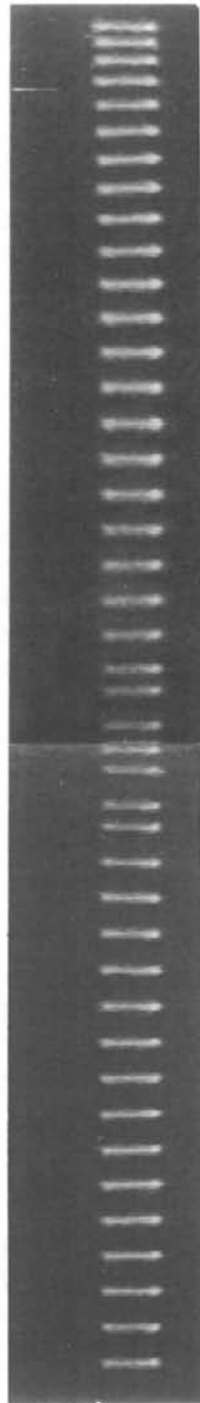
ここに、 $\rho' = 1.0 \text{ g/cm}^3$ 、 $D = 1.6 \text{ cm}$ 、 $g = 980 \text{ cm/sec}^2$ であるから、試験体の密度については $\rho = 1.18 \text{ g/cm}^3$ とすると、

$$U = 16.8 \quad \text{cm/sec}$$

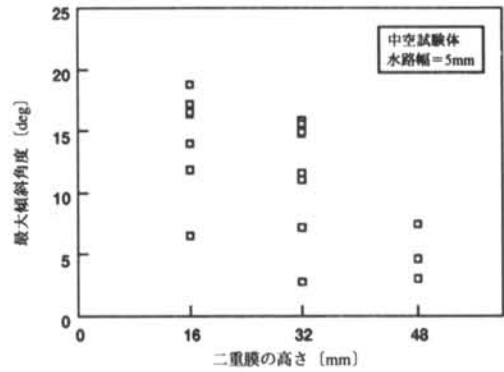
この計算値が既述のパラツキの上限値側にあり、



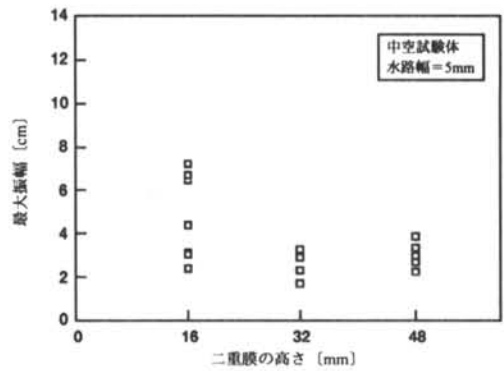
写真—1
中空試験体の沈降挙動（安定化装置なし）



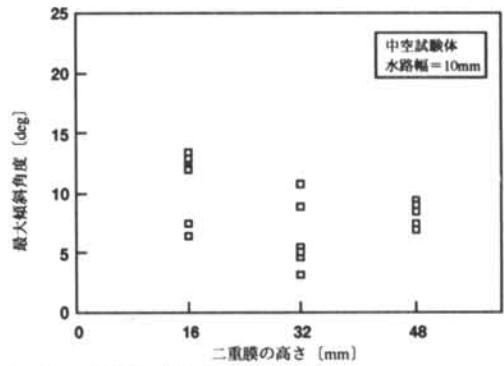
写真—2
中空試験体の沈降挙動（安定化装置あり）



図—7 二重膜の高さと最大傾斜角度



図—8 二重膜の高さと最大振幅

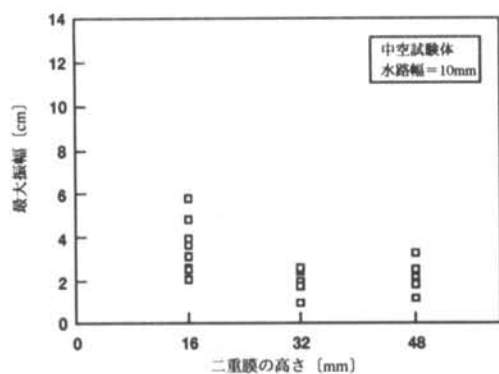


図—9 二重膜の高さと最大傾斜角度

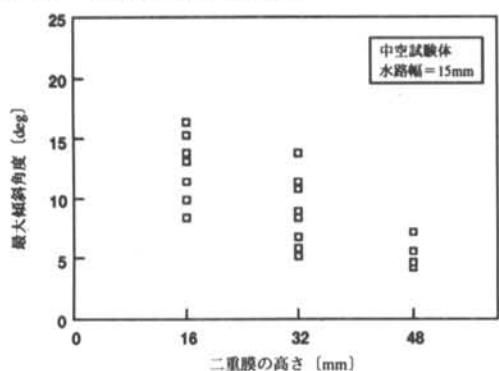
実験値が計算値よりおおむね小さい値の側におさまったのは、試験体に微小ながらも空気が侵入したこと、水路を構成する膜の変形によって水路幅に変動を生じ、その結果沈降抵抗が増大したことによるものと推察される。

4.4 水路幅の影響

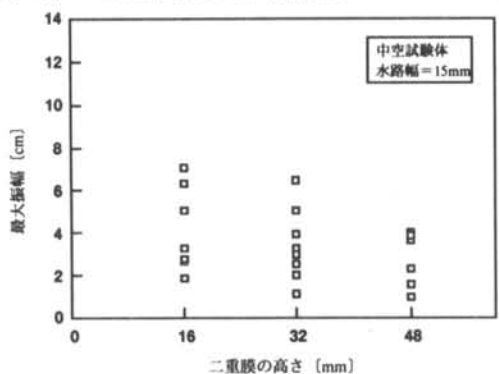
水路幅が試験体の沈降挙動にどう影響するかを見たのが図—19～20である。この図から次のことがい



図—10 二重膜の高さと最大振幅



図—11 二重膜の高さと最大傾斜角度



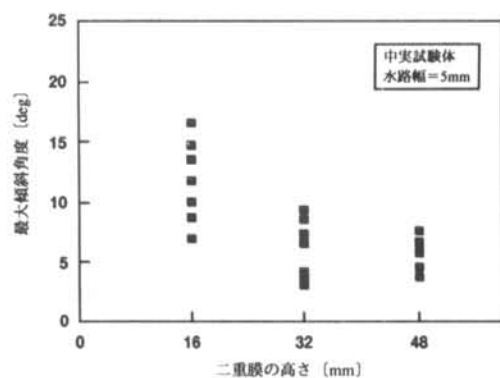
図—12 二重膜の高さと最大振幅

える。

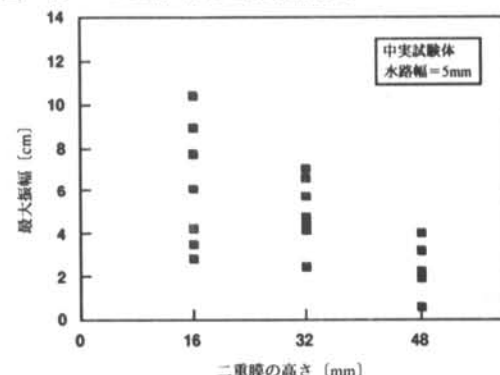
今回設定した水路幅の範囲では、水路幅が異なっても沈降時の姿勢安定化傾向には、中空、中実の二種類の試験体の間ではとくに大きな差は認められない。

4.5 その他

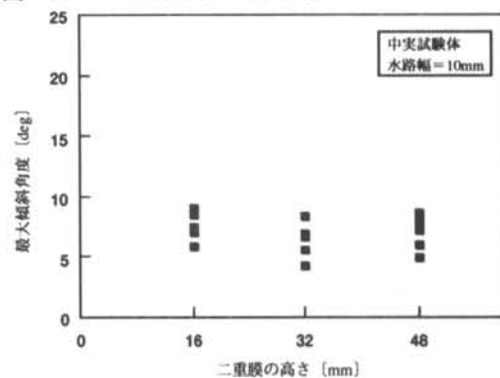
(1)比重の変動が沈降挙動に及ぼす影響については、その変動の範囲1.15~1.27に限り、沈降時の最大



図—13 二重膜の高さと最大傾斜角度



図—14 二重膜の高さと最大振幅



図—15 二重膜の高さと最大傾斜角度

傾斜角度、最大振幅に明確な相違は認められない。
 (2)重心浮心間距離(ただし重心位置が浮心位置より常に下)が沈降挙動に及ぼす影響については、その変動範囲1.03~4.99 (mm)、すなわち試験体厚さに対する比6.4~31.2%の範囲では、沈降時の最大傾斜角度、最大振幅に与える影響について明瞭な差は認められない。

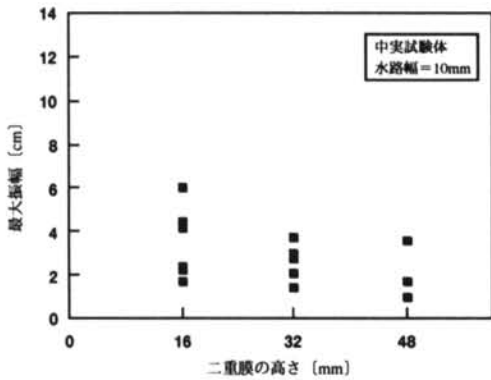


図-16 二重膜の高さと最大振幅

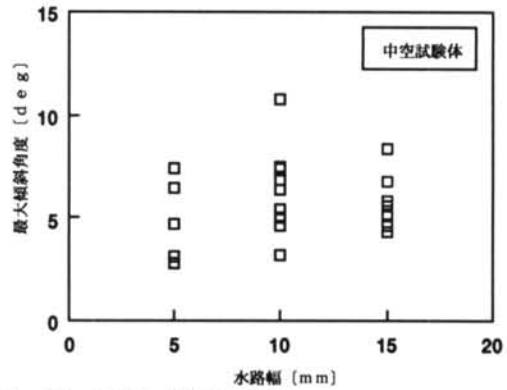


図-19 水路幅と最大傾斜角度

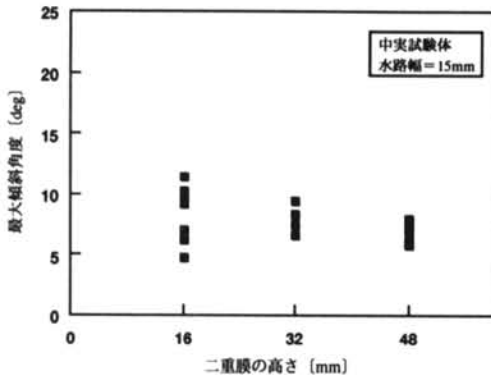


図-17 二重膜の高さと最大傾斜角度

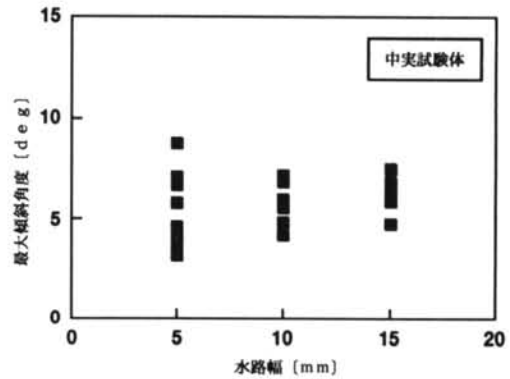


図-20 水路幅と最大傾斜角度

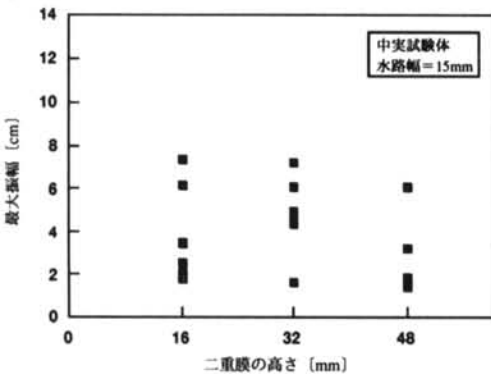


図-18 二重膜の高さと最大振幅

動に対して極めて敏感に影響をもたらした。実際にそのことが明瞭にみとめられたときには、そのつど空気抜きをしてやり直したが、必ずしも完全に抜け切れていたとは言い難いところもある。しかしそうした不確定さはあったものの、そのことは結果的には姿勢安定化装置の沈降挙動に及ぼす効果の評価としては安全側で評価することになったと言える。

§ 5. 結論

以上のことを総合すると、テンプレートの自律的沈設を目指して姿勢安定化装置を着想するに至った当初の仮説の正しさがほぼ証明されたといえる。

なお今回の実験では、細心の留意はしたものの、試験体構成部分C部の空洞部に空気が侵入してしまうことが多く、そのことは元々の試験体重量が小さいこともあって、水中を落下するときの試験体の挙

§ 6. 今後の課題

当該姿勢安定化装置を実海域に用いるには、その信頼性をより高めるために、さらに次の課題が残されているといえる。

- (1)少なくとも10分の1縮小モデルによるより厳密な検証実験の必要性
- (2)潮流に対する対策
- (3)安定化装置の海底からの回収方法に対する対策