深海水槽を用いたライザー模型実験方法

海洋開発研究領域　＊前田　克弥、田村　兼吉、安藤　裕友，新冨　恭子

１．はじめに

深海技術の重要な技術の一つとしてライザー技術がある。ライザー技術は海底掘削や海底・海中資源の回収に不可欠なライザー管等に関する技術であるが，ここではライザー管のみに着目する。

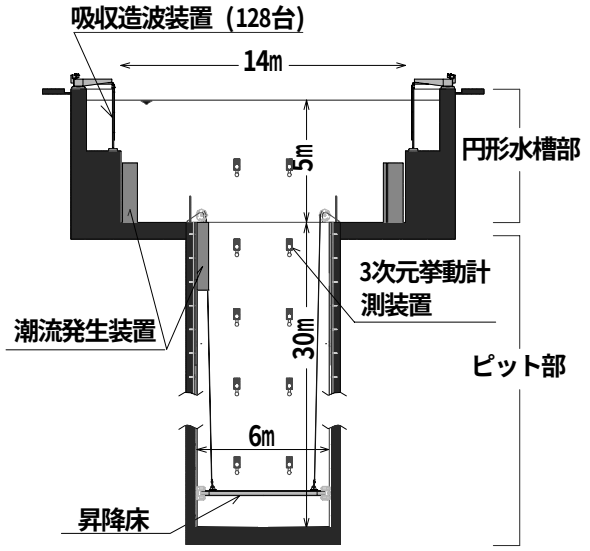
ライザー管は水圧，潮流，自重及び浮体の動揺等が作用することにより，様々な挙動を示す。特にライザー管が長くなるにつれ，その挙動は複雑なものとなる。このライザー管の挙動を正確に把握することはライザー管の構造を決定する上で重要である。ライザー管の挙動を把握には実海域において計測することが最も好ましいが，水深が大きくなるにつれて困難を極めるために，数値計算や模型実験に頼らざるを得ない。しかしながら，大水深（4000m 程度）に対応した数値計算法や模型実験法は未だ確立されておらず，早急な対応が望まれている。

そこで当領域においては，深海水槽においてライザー管の挙動を模型実験により把握するための研究が進めており，本稿では，模型製作方法，実験方法及びその結果について紹介するとともに，ライザー模型実験が抱える問題点についても言及するものである。

２．深海水槽

２．１　概要

深海水槽は直径 14m，深さ 5m の円形水槽部及び直径 6m，深さ 30m のピット部から構成されており，最大水深は 35m である。本水槽の断面図を図―1 に示す。主な特徴としては，(1) 円形水槽部全周にわたり設置されている吸収式造波装置により，任意の多方向不規則波の造波が可能なこと，(2)円形水槽部及びピット部に設置されている潮流発生装置により潮流を発生することが可能なこと，(3) ピット部に設置されている昇降床により水深を 5m から 35m まで変更可能なこと，(4) ３次元挙動計測装置により深海水槽内に設置されている水中構造物の３次元挙動が計測可能なこと，などが挙げられる。

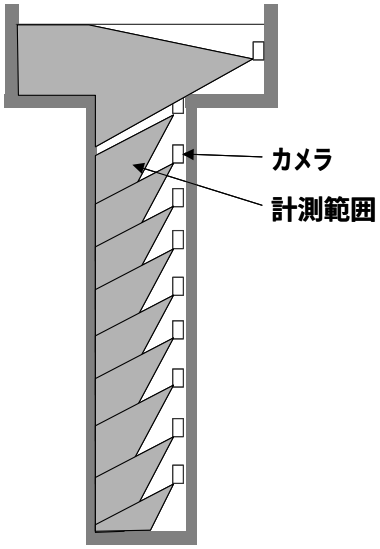


図－１　深海水槽断面図

２．２　計測装置

深海水槽における模型試験では，ライザー管などの水中における挙動を計測することが重要である。この水中構造物の挙動を歪みゲージなどのセンサーを模型に取り付けて計測する方法(接触型)では，模型の挙動を拘束すること，センサー用のケーブル重量やケーブルの挙動が模型挙動に大きな影響を与えることが予想される。従って，特にライザー管などの水中線状構造物の計測には非接触型の装置により計測する必要がある。そのため，深海水槽では，2 台の CCD カメラにより 1 つの対象物を追尾することにより，対象物の 3 次元挙動を計測する 3 次元挙動計測装置が円形水槽部及びピット部に計 10 組設置されている。本装置による

鉛直方向の計測範囲を図－２に示す。



図－２　鉛直方向計測範囲

２．ライザー管模型

２．１　模型条件

模型製作の対象とした実機ライザー管は鋼製，長さ 3500m，外径 416.6mm，内径 367.5mm とし，模型縮尺は 1/100 とした。表－１に実機及び 1/100 理想模型の主要目を示す。なお，張力 T による伸び ℓ 及び曲げ荷重 F による撓み δ はそれぞれ以下の式により求めている。

$$\ell = LT / AE, \quad \delta = FL^3 / 48EI \qquad (1)$$

ここで，L は模型全長，A は断面積，E は縦弾性係数，I は断面２次モーメントである。

表－１　模型条件

項目		実機	理想模型
材質		X90	
比重		7.800E+00	
縦弾性係数	[N/m^2]	2.058E+11	**2.059E+09**
全長	[m]	3500	35
外径	[m]	0.4160	**0.0042**
内径	[m]	0.3670	**0.0037**
断面積	[m^2]	3.012E-02	3.012E-06
空中重量	[kg]	8.222E+05	0.8022
断面2次モーメント	[kgf/m^4]	5.796E-04	5.796E-12
張力	[kg]	1000000	1
曲げ荷重	[kg]	1000	0.001
両端支持距離	[m]	3500.0000	35.0000
伸び	[m]	5.5338	**0.0553**
撓み	[m]	73390.1310	**733.9013**

２．２　模型材料の選定

ライザー模型製作に当たり最も重要な点は，外径，伸び及び撓みを満足する素材を選定することにある。表－２に主要な模型材料の種類，比重，引張弾性率（縦弾性係数）を示す。引張弾性率に着目すると，多くの材料において，幅を持った値になっている。これは，模型の伸びが実際に製作した模型を用いて計測しなければどのような値になるか予想が困難であることを意味している。

また，４ふっ化エチレン(PTFE)やポリアセタール(POM)，ポリカーボネート(PC)などは引張弾性率に幅が無い。このような材料はライザー模型に適している。しかしながら，模型が持つべき引張弾性率が安定した弾性率を持つ材料と一致する場合は少なく，ライザー模型製作が困難となる要因の１つになっている。

表－２　主要な材料特性

		比重	引張弾性率 [kg/mm²]
ポリ塩化ビニール	PVC	1.35～1.45	25～42
ポリ塩化ビニリデン	PVdC	1.65～1.72	3.5～5.6
ポリスチレン	PS	1.04～1.07	28～35
低密度ポリエチレン	PE	0.91～0.93	1～3
高密度ポリエチレン	PE	0.94～0.96	4～13
超高分子ポリエチレン	UHMW	0.94	1～8
エチレン･酢酸ビニール共重合	EVA	0.92～0.95	0.1～0.5
ポリプロピレン	PP	0.90～0.91	11～16
酢酸セルローズ	CA	1.23～1.34	4.6～28
4ふっ化 エチレン	PTFE	2.14～2.20	4.1
4ふっ化･6ふっ化プロピレン	FEP	2.12～2.17	3.5
4ふっ化エチレンエチレン共重	ETFE	1.7	8.4
3ふっ化塩化エチレン	PCTFE	2.1～2.2	10.5～21.1
ふっ化ビニリデン	PAdF	1.76～1.77	8.4
ポリアセ タール	POM	1.41	28.8
ポリフェニレン ･オキサイド	PPO	1.06	26.7
ポリカーボ ネイト	PC	1.2	24.6
ポリウレタン	PU	1.05～1.25	3.5～24.6
ポリエルテルエラストマー	PETP	1.31～1.38	19.6

２．３　模型構造の選定

模型構造としては，単一素材を用いた円柱，もしくは円管，また，金属材料を心棒とし，外径を合わせるために外周に柔らかい素材も用いた被覆をする，の３種類の構造が考えられる。

円柱の場合では外径及び材料のみが模型特性のパラメータとなり，円筒の場合では外径，内径及び材料となる。また，心棒を用いた場合でも円柱の場合と同様である。

構造上の制約条件としては，１）模型外径は縮尺に沿うこと，２）精度良く模型が製作できる構造であること，３）水深 35mの環境下においても形状が安定していること，を条件とすると，先に示した３通りの構造はどれも一長一短がある。これらの条件のうち，何を優先するかは実験内容などを考慮して決定する必要がある。

また，模型の組み立て，水槽内に設置する方法等についても熟慮する必要がある。

２．４　製作した模型

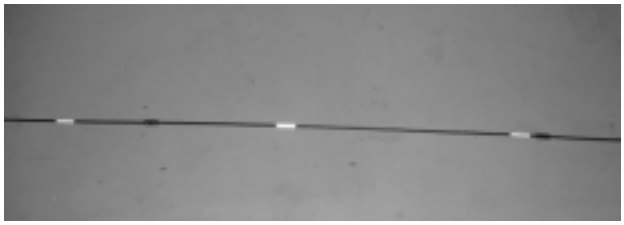
理想模型に対し，模型材料及び構造を検討した結果を以下に示す。

まず，本模型を用いた実験目的としては，１）深海水槽における模型実験方法の確立，２）計測方法の確立，３）全体挙動の把握, が挙げられる。

そのため，本模型製作に当たっては，張力による伸び及び曲げ荷重による撓みを優先的とし，模型精度を保つことができる模型外径を選択することとした。

表－３　模型主要目

項目		理想模型	作製模型
材質			PE
比重			2.170E+00
縦弾性係数	[N/m^2]	2.059E+09	1.960E+08
全長	[m]	35	35
外径	[m]	0.0042	0.0055
内径	[m]	0.0037	0.0000
断面積	[m^2]	3.012E-06	2.375E-05
空中重量	[kg]	0.8022	1.8035
断面2次モーメント	[kgf/m^4]	5.796E-12	4.492E-11
張力	[kg]	1	1
曲げ荷重	[kg]	0.001	0.001
両端支持距離	[m]	35.0000	35.0000
伸び	[m]	0.0553	0.0737
撓み	[m]	733.9013	994.3174



図－３　ライザー管模型

検討の結果，材質には低密度ポリエチレンを用い，外径 5.5mm のものが，現実的であると判断し，製作を行った。表－３に理想模型と製作した模型の主要目を，図－３に製作した模型の写真を示す。図－３の黄色及び青色のマーカーは 0.5m 刻みで設置した反射テープであり，このマーカーの挙動を前述の 3 次元挙動計測装置により計測している。なお，模型は長さ 1.0m のものを 35 本製作し，各々を接続し実験に用いている。

また，ライザー模型の総水中重量は 0.11kg である。

３．ライザー模型実験

３．１　強制動揺試験

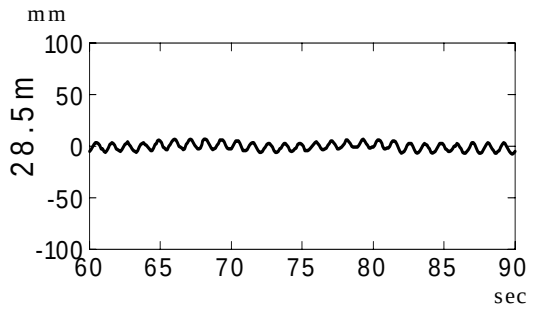
強制動揺試験は加振方向が 1)X 軸方向，2)Z 軸方向の 2 種類について行った。

また，X 軸方向のみの強制動揺の場合は，ライザー管下端が固定されている場合とされていない場合について計測を行った。

強制動揺周期は X 軸方向の場合は 0.1～1.8Hz であり，Z 軸方向では 0.54～2.00Hz とし，振幅についてはどちらの場合も 50mm もしくは 100mm とした。

３．２　計測結果

３次元計測装置により計測した時系列の一例を図－４に示す。図は水深 33.8m の位置での X 方向変位を示しており，縦軸は X 方向変位[mm]，横軸が時間[sec]である。図－４より，３次元挙動計測装置により安定した計測が行えていることが分かる。

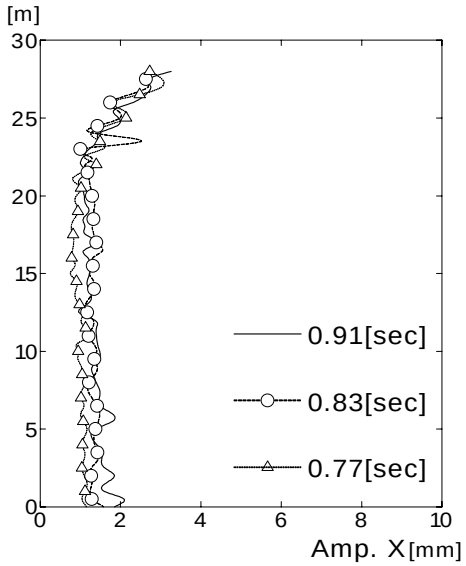


図－４　計測した時系列例

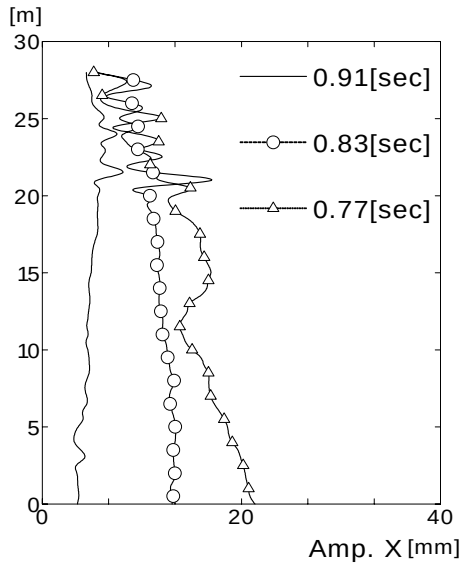
計測結果例として，ライザー管模型の下端が固

定されていない場合でのX軸及びZ軸方向への強制動揺試験結果を図－５及び６ に示す。

図はライザー管の振幅分布を表しており，横軸は計測したX軸方向の振幅であり，縦軸は下端からの距離を示している。



図－５　X方向強制動揺試験結果



図－６　Z方向強制動揺試験結果

４．深海水槽における模型実験の問題点

４．１　相似則

言うまでもなく，レイノルズの相似則を満足することは不可能である。一方，ライザー管の挙動を考えた場合，粘性力が支配的である。そのため，模型試験における挙動計測結果は実現象を過小評価した結果であることを考慮する必要がある。

４．２　計測

ライザー管模型の挙動を接触型の計測装置を用いて計測することは，挙動を拘束することを意味する。従って，計測には非接触型の計測装置を用いる必要があり，CCD カメラを用いた計測手法が計測範囲，耐水圧等の面から有効であるが，時間及び空間分解能力に問題がある。特に空間分解能はライザー管の模型外径が小さいほど，計測誤差が現れるために，深海水槽の場合では追尾対象物の外径 10 mm 程度とすべきである。

４．３　模型製作

模型製作に置いては，材料面での制約が極めて大きい。特に縮尺比が大きくなるにつれ，模型材料は柔らかいものとなるが，材質の均一性が乏しくなる。そのため，ライザー管模型の特性が理論値と製作後の計測値との間に大きな差が生じるために，目的とした特性にならない場合がある。

また，実機に対する相似条件を満足する材質も豊富に有るとは言い難く，幾何学的条件の全てを満足する模型を製作することは困難なものである。

４．まとめ

深海水槽におけるライザー模型実験を通して，以下の事柄に留意して行う必要があることを確認した。

１）模型製作においてはその材料や構造を幾何学的相似則のみで決定するのではなく，実験目的や計測誤差の観点を考慮して決定すべきである。

２）模型材料に関しては特性が均一なものを用いる必要がある。

３）模型実験結果は実現象を完全に評価していないために，取扱には注意する必要がある。

４）３次元計測装置を用いて計測を行う場合，追尾対象物の外径を少なくとも 10mm 程度にすべきである。