

平成 23 年度修士論文要旨

(東京大学大学院 新領域創成科学研究科 海洋技術環境学専攻)

## 浮体式天然ガス液化プラントの新形式深層水取水管に関する研究

### Research on New-Style Hung-off Risers to Take Deep Sea Water for FLNG

学籍番号 47106647 松原 直哉

指導教員 尾崎 雅彦 教授

(平成 24 年 3 月 22 日修了予定)

Keywords: FLNG、取水管、海洋深層水、ランプトマス法

Keywords: FLNG, Hung-off Risers, Deep Sea Water, Lumped Mass Method

## 1. 序論

### 1.1 FLNG について

LNG(液化天然ガス)は燃焼時に発生する  $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_x$ 、 $\text{CO}_2$  の排出が少なく環境負荷の小さいエネルギーとして工業用途の使用も増加しており、一層の需要の増加が考えられる。しかし環境規制の強化に伴う環境対応コストの増加、新規ガス田の深海での発見率増加に伴うパイプラインの長距離化など従来の陸上の液化基地で LNG の生産する方式ではコスト、技術的に難しい案件が増えてきている。こうした背景から洋上で LNG の生産を行う FLNG(Floating LNG)が注目されている。

### 1.2 FLNG のガス冷却システムへの海洋深層水利用

FLNG にはデッキスペースに制限があるため、天然ガスを LNG に変えるために複雑な冷却システムを選択できず、海水を利用した冷却方法が選択される。その際に海洋深層水を利用することで低温安定性より液化効率の改善、設備の小型化や環境への影響の低減などの利点がある。

## 2. 深層水取水管について

LNG プラントのガス冷却には大量の取水が必要であるため、大口径の取水管か小口径で複数本の取水管による取水の 2 パターンが考えられる。また、海洋深層水を取水するためには全長 300m 以上の物が好ましい。鋼管での検討をしたところ、前者の場合は重いために揚降の難しさ、疲労強度の問題があり、後者の場合は揚降の複雑化、レイアウトの問題がある。よって本研究では揚降が容易で疲労強度の問題を解決する大口径の深層水取水管を提案し、実験とシミュレーションによって成立性の検証を行う。

### 2.1 新形式取水管

Fig.1 のようなモデル (以下多関節モデルと呼ぶ) が提案された。軽くて加工しやすい HDPE を材料とし、下端部とチェーンを固定しぶら下げた状態にしてチェーンを管に取り付けたピースの間を通すように管を降ろして積み上げて最後にチェーンを引っ張ることで管に圧縮力をかけ、管の形状を保持する。特徴は管と単管のつなぎの部分が開くことで管に作用する曲げモーメントを逃がすことができ、管の重量をチェーンに持たせることで自重による引張を回避できることの 2 点である。またこのモデルは管を下していくだけでよいため船上で簡単に取水管の上げ下げが可能になる。

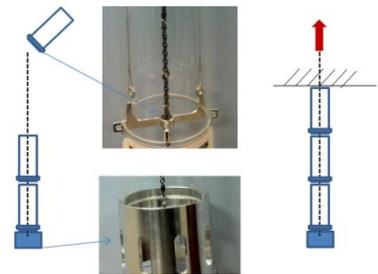


Fig.1 Structure of multi-joint model

### 3. 実験

HDPE 製多関節モデルの成立性検証のためのデータ取得を目的に海上技術安全研究所の水槽で Fig.2 の 2 種類の模型を使い加振実験（水平・鉛直方向）を行った。

#### 3.1 模型諸元

Fig.2 に示す縮尺 1/20 の模型を用いて実験を行った。30 本の単管(そのうち 6 本は流れによるチェーン振動の確認のためにアクリル)を組み合わせて構成している。諸元は Table 1 に示す。

#### 3.2 実験方法

Fig.3 に示す強制動揺装置を用い、水平・鉛直方向に加振することで実験を行った。多関節モデルは張力の挙動に与える影響の確認のために張力を変えての計測を行った(5kgf,6kgf,7kgf)。また取水による影響の確認のため同ケースで取水状態(9.0m<sup>3</sup>/h, 14.2m<sup>3</sup>/h)での計測も行った。

#### 3.3 計測方法

水槽に装備されている光学式 3 次元運動測定装置を用いて、模型に張り付けたマーカの変位を計測することで模型の挙動を評価した。計測時間はすべてのケースで 2 分とした。

#### 3.4 実験結果

多関節モデルはプレーンモデルに比べ関節が開くことにより剛性が低くなったような挙動をとることがわかった(Fig.4) また、与える張力の減少に伴い、剛性が低くなったような挙動をすることがわかった(Fig.5) 多関節モデルはプレーンモデルより取水の影響を受けるが変動振幅は少し変わるものの挙動に振動モードが変わるなどの大きな変化は今回実験した範囲では見られないこともわかった(Fig.6)。

### 4. 挙動解析プログラム

今回挙動解析をする多関節モデルの関節部分が開閉し、開かないときはパイプの弾性たわみ変形が全体形状を決定し、開いたときはその箇所では折れ角が生じるとともにパイプの見かけの全長が延びる、などの特有の非線形挙動を再現するために本研究では集中質量法 (lumped mass method) を使用して挙

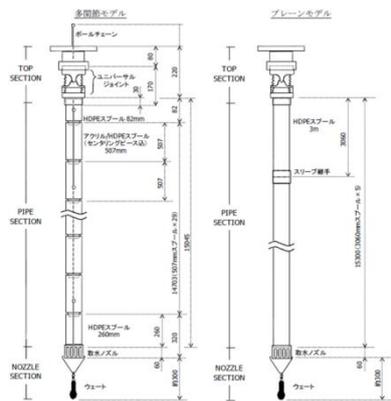


Fig.2 Experimental model

Table.1 Model specifications

項目	多関節モデル	プレーンモデル
全長[m]	15.625	15.880
空中重量[kg]	14.16	12.10
水中重量[kg]	3.82	2.53
材質	HDPE/アクリル	HDPE
単管の数	31	5
関節の数	30	0
外径[m]	0.08	0.08
内径[m]	0.075	0.075
曲げ剛性[Nm <sup>2</sup> ]	HDPE: 4.26 × 10 <sup>2</sup>	アクリル: 1.42 × 10 <sup>3</sup>
おもり[kg]	1.34	1.34

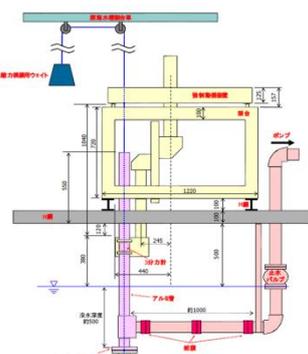


Fig.3 Experimental apparatus

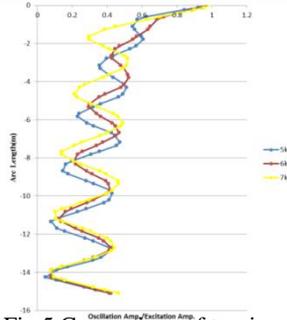


Fig.5 Comparison of tension

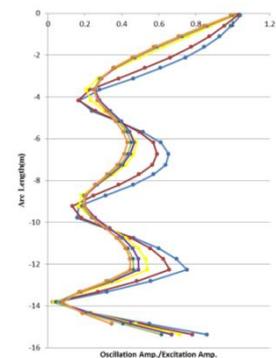


Fig.4 Behavior of multi-joint model

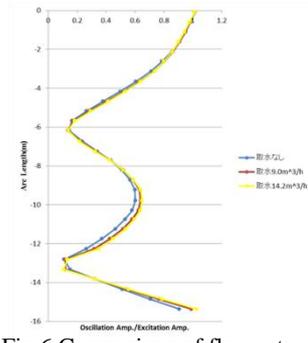


Fig.6 Comparison of flow rate

動解析を行う。また、今回  $x$ 、 $y$  方向の動きは独立していると考えたため 2 次元問題として考える。

#### 4.1 基本となる運動方程式

Fig.7 のような剛体とばねがつながっているようなモデルを考え運動方程式をたてる。  $n$  個の剛体がつながっていると考え、その中の  $i$  番目の運動方程式を考える。流体力は剛体の重心にかかっていると考え、回転方向の運動方程式には含まないと考える。 Fig.8 のようにばねによって生じる力の成分を  $x$  方向成分、 $z$  方向成分に分けて考えると運動方程式は

$$m_i \ddot{x}_i = f_{x1} + f_{x2} + f_{x3} + f_{x4} + F_i \cos \theta_i \quad \dots (1)$$

$$m_i \ddot{z}_i = f_{z1} + f_{z2} + f_{z3} + f_{z4} - F_i \sin \theta + (\rho - \rho_w) g V_i \quad \dots (2)$$

$$I_i \ddot{\theta}_i = f_{x1} \left( \frac{l_i}{2} \cos \theta_i - r \sin \theta_i \right) + f_{x2} \left( \frac{l_i}{2} \cos \theta_i + r \sin \theta_i \right) - f_{x3} \left( \frac{l_i}{2} \cos \theta_i + r \sin \theta_i \right) - f_{x4} \left( \frac{l_i}{2} \cos \theta_i - r \sin \theta_i \right) - f_{z1} \left( \frac{l_i}{2} \sin \theta_i + r \cos \theta_i \right) + f_{z2} \left( -\frac{l_i}{2} \sin \theta_i + r \cos \theta_i \right) - f_{z3} \left( -\frac{l_i}{2} \sin \theta_i + r \cos \theta_i \right) + f_{z4} \left( \frac{l_i}{2} \sin \theta_i + r \cos \theta_i \right) \quad \dots (3)$$

と書くことができる。また流体力は修正モリソン式より

$$F = \rho_w \frac{\pi D_o^2}{4} \dot{u} \cos \theta + (C_M - 1) \rho_w \frac{\pi D_o^2}{4} (\dot{u} \cos \theta - \ddot{x} \cos \theta + \ddot{z} \sin \theta) + C_D \rho_w \frac{1}{2} (u \cos \theta - \dot{x} \cos \theta + \dot{z} \sin \theta) |u \cos \theta - \dot{x} \cos \theta + \dot{z} \sin \theta| \quad \dots (4)$$

で表すことができる。

#### 4.2 弾性体モデル

前述のモデルではたわまない為に、取水管の挙動解析のモデルとしては不完全である。たわみと伸びを再現できるようにするため、さきほどの剛体モデルを分割してばねでつなぎ、 Fig.9 のように長さ  $l_1$ 、 $l_2$  とばね定数  $k$  をうまく設定することで弾性体モデルの再現することができる。

$$k = \frac{3EA}{2L} \quad \dots (5) \quad (A: \text{管の断面積}, I: \text{慣性モーメント}, r: \text{半径})$$

$$r'_1 = \frac{rk_1}{2k} = \frac{4I}{3r^2 A} \quad \dots (6) \quad r'_2 = \frac{rk_1}{2k} = \frac{2I}{r^2 A} \quad \dots (7)$$

注意しなければならないのがモーメントを求めるときの半径  $r$  は変わらないということである。以上をふまえて Fig.10 のように一つの剛体を 4 つに分けて計 3 (水平・鉛直・回転)  $\times 4 \times n$  個の運動方程式を解くことで取水管の挙動を求める。

#### 4.3 多関節モデル

このままでは多関節モデルの挙動の再現ができないため以下のように変更した。

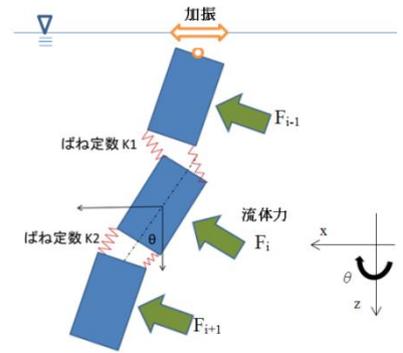


Fig.7 Simulation model

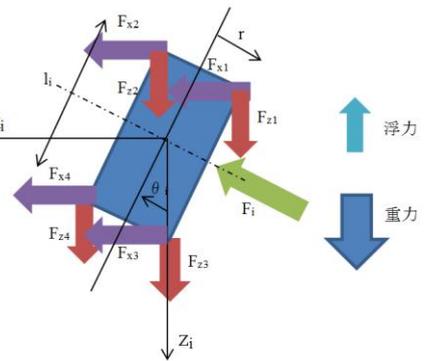


Fig.8 Forces Acting on rigid body



Fig.9 Elastic body modeling

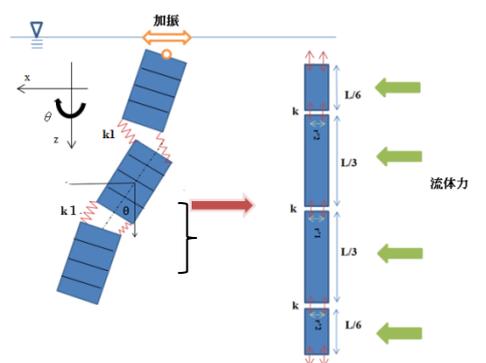


Fig.10 Each rigid body modeled into elastic body

### 4.3.1 関節部の再現

Fig.11 のように多関節モデルではチェーンに力を与え、押し付けることで管と管を固定しているため圧縮方向には力を生じるが引張方向に力がかかると離れるために力がかからない。よって単管と単管を非線形ばねでつなぐことで関節部を再現する。

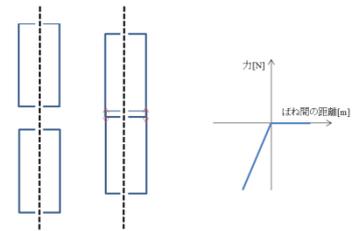


Fig.11 Forces acting at joint point

### 4.3.2 チェーンによる水平方向の復原力

Fig.12 今回の多関節モデルは関節部が開いた際、スペーサー部分でチェーンにあたるような構造をとっておりその反力で管と管の開きを閉じようとする。 $i$  番目の剛体の 4 分割にしている一番上の剛体の傾きを  $\theta_{1,i}$  ,一番下の剛体の傾きを  $\theta_{4,i}$  とするとその水平方向にかかる復原力を(7)式で与え運動方程式に含める。

$$P_i = T * ((\theta_{1,i} + \theta_{4,i}) / 2 - (\theta_{1,i+1} + \theta_{4,i+1}) / 2) \quad \dots (8)$$

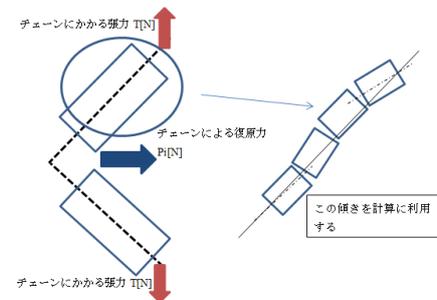


Fig.12 Lateral restitutive force

## 5. 実験との比較

実験と同じ条件にして多関節モデル、プレーンモデルともに比較を行った。プレーンモデルでは定量的に一致している(Fig.13)。多関節モデルでは定量的に同じだといえるが、変動振幅の大きさが合わない。多関節モデルは想定していたより関節部が開きやすく今回取水実験を行うため関節部から水を吸い込まないように蛇腹で固定したための影響が出ていると考え、管の開き対して減衰を与えた結果が Fig.14 の緑の線であり、実験値に近くなったため、何らかの減衰を与えられていたことが確認できた。

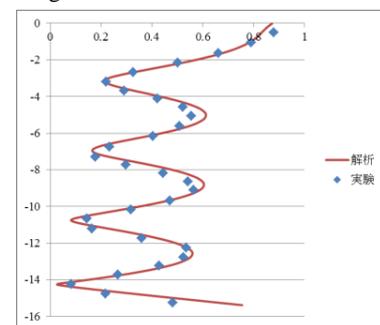


Fig.13 Comparison with plain model experiment  
振幅0.07m 周期2.24

## 6. 実機ケーススタディ

実験では挙動特性の理解および理論モデルの検討が目的であったため、実験に用いられるモデルの諸元が実機に力学的に対応していない。解析結果が実験と定性的にあっていたため、実機と同じ条件で計算を行った。実機ではさらに剛性が低くなるような結果得た(Fig.15)。さらに模型下端部のおもりの重りを変える、関節の数を増やすなどを行いどのような変化があるかを調べた。このように曲がると関節が多数開くために肝心の深層水を取水できなくなる可能性があるため、十分な張力をかけるまたは対策が必要である。

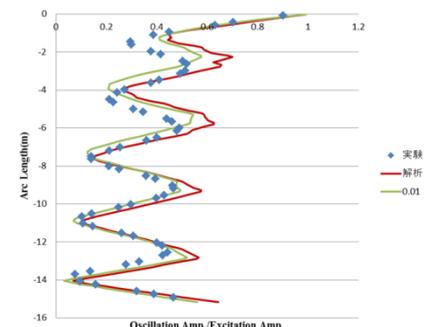


Fig.14 Comparison with multi-joint model experiment  
変動振幅

## 7. まとめ

新形式取水管を提案し、実験と計算で成立性の検証を行った。管に与える圧縮力の設定が 1 番重要であり、強すぎると曲げモーメントは減少せず弱すぎると関節部がすぐ開き挙動が不安定になるため適切な圧縮力を与えることが重要であることがわかった。

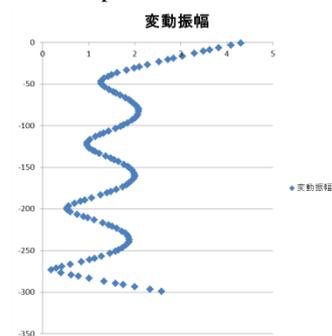


Fig.15 Simulation result with actual condition