総 説

海洋石油・天然ガス開発における大水深ライザーの諸課題*

鈴木 英之**

(Received August 3, 2003; accepted September 12, 2003)

Discussions on the design of deepwater risers for
offshore oil and gas field development

Hideyuki Suzuki

Abstract: This paper reviews latest researches concerning the deepwater risers development. Offshore oil and gas development is moving into deepwaters and target water depth is becoming deeper year by year and the target at present moment is 2,000m for production and 3,000m for drilling. Innovative riser designs have been proposed and implemented. Steel catenary riser and its derivatives are typical innovations. Japan also has some research projects concerning the key technology development in this field. JAMSTEC is constructing a deepwater drillship for scientific ocean drilling program. Target water depth is 4,000m or more and design and design philosophy are studied. One of other activities is development of Compliant Vertical Access Riser led by JNOC. CVAR utilizes catenary configuration and it can be used for production by FPSO.

Technological challenges in deepwater riser development are handling of elastic response and utilization of reduced stiffness. Fatigue and collision are most important topics of deepwater risers. Development of analysis methodology of elastic response is reviewed. For drilling risers, analysis of dynamic behavior and its consideration in the design are key issues and latest research results are briefly introduced.

Key words: deepwater riser, catenary, VIV, elastic response, fatigue, collision

1. はじめに

世界における海洋石油の開発の動向を概観してみると、1990年以降米国メキシコ湾、ブラジル沖さらに西アフリカ沖の大水深において大規模な海洋石油・天然ガスが発見され、大水深の開発が急速に進展したことが挙げられる。その結果、図1に示すようなさまざまな形式の生産システムが開発、実用化されている。2001年時点に

における大水深石油・天然ガスの掘削実績はメキシコ湾で水深2,953m、ブラジル沖2,777m、ガボン沖2,791mとなっている。また、生産実績は表1に示すように、水深2,200m(海底仕上げ)、1,853m(DPS付きFPSO)、1,462m(SPAR)となっている。

世界におけるライザー関係の技術開発の目標は、石油・天然ガスに関しては3,000m、科学的掘削においては我が国が建造を進めている地球深部探査船の4,000m超となっている。大水深ライザー技術は天然メタンハイドレート開発や、地球温暖化対策の1つとして考えられているCO₂海洋隔離システムのCO₂投入管にも共通する汎用性の高い技術であり、我が国にとっても重要な技術分野の1つである。

2. ライザー研究の諸課題

このような動向を受けて、ライザーの大水深化の技術

*平成15年6月24日、平成15年度石油技術協会春季講演会作井部門シンポジウム「海洋石油・天然ガス開発—大水深の現状と見通し—」で講演 This paper was presented at the 2003 JAPT Drilling Technology Symposium entitled "Offshore Oil and Gas Field Development-The Trends to ward Deepwater" held in Chiba, Japan, June 24, 2003

**東京大学大学院工学系研究科 University of Tokyo, School of Engineering

図1 大水深石油生産システムの形式

表1 大水深生産システムの実績例

(2000年末現在)

生産システム	水深
Compliant Tower, CPT (メキシコ湾)	535m
Tension Leg Platform, TLP (メキシコ湾)	1,204m
Floating Production System, FPS (ブラジル沖)	1,340m
SPAR (メキシコ湾)	1,462m
Floating Production Storage and Offloading, FPSO (ブラジル沖)	1,853m
Sub-sea Production System, SPS (ブラジル沖)	1,877m

開発と研究が盛んに行われている。構造物の一般的特徴として、大型化、長大化に伴って弾性応答が顕著になることが挙げられる。これは、使用している材料が鋼材でヤング率が変わらないにもかかわらず、大型化に伴って

質量が増えるために相対的に柔軟化するためである。ライザーについても応答の顕著化を受けて、図2に示すような諸課題が検討されている。弾性応答の顕著化に対応する研究としては、強度向上と動的挙動改善のため、比

大水深ライザーの諸課題

図2 ライザー研究の課題

図3 カテナリー形状を利用した鋼製ライザーのコンセプト

強度、比剛性の高いチタン、CFRPなどの複合材料の利用に関する研究が挙げられる。

生産ライザーについては、この柔軟化を利用して、鋼管ライザーにカテナリー形状を取らせ、浮体の運動を許容する Steel Catenary Riser が考案されて用いられている。SCR は現状の鉛直リジッドライザーに比較して、浮体上のテンショナーが必要ないなど、機器の単純化やプラットフォーム上のスペース利用上のメリットが大きい。また、フレキシブルライザーに比較して、ライザーの大口径化が可能であるなどのメリットがある。また、大水深からの生産に関するコスト面や、設計が簡単になるなど利点が多い。このため、SCR は適用範囲を広げる傾向にある。SCR 以外にも図3に示すようにカテナリー形状を利用した鋼製ライザーのコンセプトが多く提案されている。その中には、我が国で開発されつつある CVAR (Compliant Vertical Access Riser) も含まれる。

一方、SCR については海底に接地する部分での曲げモーメントが大きくなる。この部分は浮体の運動に伴って移動し、ライザーに大きな内力変動をもたらすため、疲労が問題となる。このため、初期の SCR は波条件が緩やかで、浮体動揺の少ない TLP やセミサブに設置されていたが、最近では浮体の動揺の比較的大きな FPSO にも用いられようとしている。当初、SCR は流速の早い海域に設置される例が多かったことから VIV (Vortex Induced Vibration) については早い段階から

注目されてきた。カテナリー形状を用いた新しいライザー方式については、いずれも曲率が大きくなる部分があり、疲労の問題は重要である。

掘削ライザーに関しては、図4に示す運用状態のうち、大水深で強度上最も厳しい状態はハングオフ状態であり、この状態における強度面の設計の成否が大水深での成立性にかかわってくる。[Sparks 1983, 1995] この際、ライザー中の流体柱の挙動がライザーの応答にどのように影響するかという問題とその取り扱いが課題となっている。これまでの取扱いは、内部流体の質量の50~100%をライザーに付加して応答を評価する方法[安川 1999]やライザー内部の流体の動的挙動をモデル化した検討も行われている。[鈴木1999, Miller 1998] また、ハングオフ状態に関しては、長大化による弾性応答の顕著化に伴って、図2に示すように、軸振動と縦振動の連成問題が注目されている。

以下のライザーに関して研究面で注目されている2, 3の問題について紹介する。

3. 流体力学的、構造工学的課題

3.1 Vortex Induced Vibration (VIV) 解析法の開発

流れの中にあって、ライザーから放出される渦とライザーの連成挙動によって生じる渦励振 (Vortex Induced Vibration) が関心を集めており、多くの研究が行われている。これは、ライザーの設計において VIV による疲労が制約となることが多いことによる。渦励振の防止法についての検討も盛んに行われている。また、生産では複数のライザーを接近して用いることが多く、衝突問題も設計上の課題となるため、解析手法の検討が行われている。

VIV の解析に関しては、近年の計算機の計算能力の著しい進歩を背景として、CFD と FEM を組み合わせた解析法の開発が進められている。しかしながら、VIV の本質である、流体領域と構造応答の連成問題を、必要な精度と信頼度で解くことのできる解法はまだ開発されていない。一方で、実際のライザーの開発に伴って、一樣流中の応答評価など基礎的な検討から、より実際に近い、せん断流中での応答解析や内部波の考慮へと、解析

図4 掘削ライザーの稼働状態

表 2 実験式に基づく渦励振の評価手順の一例

実験式に基づく VIV 評価手順 (周波数領域)
ステップ1 流体力のテーブル作成
流れ場中において円柱の強制動揺実験を実施する。
加振振幅, 周期, 位相, 流体力, 流速をデータベース化する。
ステップ2 応答評価手順
1) ライザーを流体力評価のために要素に分割する。
2) 流れ場とライザー特注値から付加質量を評価し, ストローハル数を考慮して励起されるモードを複数抽出する。
3) 個々のモードについて, 応答が励起されるとしてデータベースを用いて要素ごとに流体力を評価する。
4) 各要素で評価した流体力に基づき, モードの応答量を求める。
5) 3)→4) の手順を収束するまで繰り返す。
ステップ3 発生モードの確定
候補となったモードのうち卓越する1つのモードが実際に発生するとして確定する。

法の適用範囲拡大が求められている。

現在開発されている計算法としては, ①固定したライザー周りの流れ場を解くもの, ②ライザーを運動させた場合のライザー周りの非定常流れを解くもの, さらに, ③ライザーの運動に伴う流れ場の変化による流体力の変化をライザーの運動に反映させる連成問題を解くものが開発されている。これらを二次元問題とする場合と三次元問題とする場合がある。三次元で③を解くものが最も現象に忠実な解法であるが, 必要な精度と信頼性で解くまでに至っていない。

3.1.1 実験式に基づく解析法

将来的には CFD と FEM の組み合わせで解析が行われると考えられるものの, 開発段階にあり実際の設計で必要とされる情報を提供できる状況でないことから, 実験結果を利用した, 半経験式ベースの解析法の研究が盛んに行われている。この解析法の標準的手順を表 2 に示す。

この方法は, まず加振円柱に作用する流体力計測を, 多くの加振パラメータの組み合わせについて実施し, その結果を加振振幅, 周期, 位相, 流体力の組み合わせとして整理し, データベース化する。計算では, ライザーの置かれた流れ場の条件から, 静止状態での流体力を評価し, 励起される可能性のあるモードを複数抽出し, 流体力データベースを参照しながら, 応答と流体力が矛盾なくなるまで繰り返し計算を行うものである。米国 MIT が開発している SHEAR 7 [Vandiver 2002] や VIVA [Triantafyllou 1999], ノルウェーにおいて NTNU が中心となって開発している VIVANA [Larsen 2001] が有名である。

この手法の課題として以下の 3 点が考えられる。

- 1) 大水深では, ライザー上部と下部に生じる応答の

周波数が異なる場合も考えられ, 複数のモードが励起される可能性への対応が必要である。

- 2) 多数の実験結果をテーブルとして整理するが, 実験は模型を用いた低レイノルズ数域のものが主で, 実機に対応する高レイノルズ数域での結果が少ない。
- 3) Steel Catenary Riser など傾斜部を有するライザーが多く実用化されようとしており, 傾斜部への対応が必要になっている。

3.1.2 揚力モデルに基づく方法 [Ferrari 1999, Morooka 2003, Suzuki 2000]

VIV はライザーから放出される渦によって励起されることに着目して, 渦放出による揚力の変動周波数をストローハル数によって与え, 流体力の大きさを相対流速によって評価し, 相対運動方向と直交する方向に作用する力として表現する方法が開発されている。この方式では流体力の変動周波数を次式で与えている。

$$\bar{f}_s = \frac{|\bar{U}| S_t}{D} \quad (1)$$

ここで, S_t はストローハル数, D はライザー直径で, は平均流速であり次式で表される。

$$\bar{U} = \frac{\int_0^t U dt}{t} \quad (2)$$

分子の積分は流れの半周期ごとに相対流速 U の平均値として評価するものである。また, 円柱の単位長さ当たりの揚力を次のように表している。

$$F_{i(t)} = \frac{1}{2} \rho U^2 D C_i \cos(2\pi \bar{f}_s t + \phi) \quad (3)$$

ただし, C_i は揚力係数の大きさ, ϕ は揚力の位相であり, ρ は流体密度である。

図5 タンデム円柱の計算モデル

図6 タンデム円柱周りの流れの計算例

3.1.3 CFD による解析

CFD による解析の試みの一例を紹介する。これは、一様流中に平行に置かれた2円柱周りの流れの解析を行ったものである。[前田 2003]解析モデルを図5に示す。また、計算結果を図6に示す。計算では高さ、直径比 $H/D=1$ とし、レイノルズ数を1000、円柱間隔比 L/D を2としている。

3.2 衝突問題および VIV 防止

大水深の生産ライザーの問題としては、狭い間隔で並べられたライザー同志の衝突現象が問題となるため、後流の干渉問題として検討が行われている。[Huse 1993, Herfjord 2002]ライザーの設計では VIV による疲労が設計上の制約要因となるため、疲労特性を向上させるために、螺旋状のストレーキ、覆い (Shroud)、分離板、フェアリング、ウォータージェットなどをライザーに取り付け、ライザーからの渦の放出を抑制するか、放出された渦に干渉する。あるいは放出される渦を細かく切断し、互いに相殺して起振力を低減するなどの試みが行われている。[Skaugset 2002]これらの対策は一般的にコスト上昇を伴うことが課題である。

4. 大水深掘削ライザーの成立性に関する問題

4.1 軸振動に関する問題

掘削ライザーについては、稼働状態とハングオフ状態の2つの状態がある。ハングオフ状態は最も厳しい状態であり、この状態を中心に掘削ライザーの強度設計が行われる。ハングオフ状態では、掘削船の上下動揺によっ

図7 ハングオフ状態の掘削ライザーに生じる張力分布

てライザーの上部が強制加振され、ライザーに張力変動を生じる。この際、圧縮力が発生すると、座屈を生じる可能性がある。また、座屈に至らなくてもさまざまな悪影響をライザーに及ぼすため、圧縮力の発生は原則として避ける。通常、ライザーには浮力体を取り付け、水中重量を軽減することが行われるが、図7に示すように浮力体を下部につけると、初期張力分布は凹型になり、浮体動揺が小さい場合でも、張力の変動振幅が初期張力を超えて、容易に圧縮力が発生する。一方、浮力体を上部に配置すると初期張力分布が凸になり、浮体動揺が大きくなっても、圧縮力が発生しないことが分かる。

ライザーの設計で、初期張力を軽減するために浮力材を配置する場合には、ライザー上部に配することが必要である。あるいは、ライザー下部を軽量化するなどの対処も有効である。また、ライザーの固有周期が浮体の上下動揺周期に近付くと、張力の変動が増加し、小さな動揺でも圧縮力が生じるので、複合材料などによってライザーの比剛性を増して、動的な張力変動の増加を抑えることも必要である。

4.2 張力変動によるライザーのたわみ振動

大水深ライザーに張力変動が生じると、これによってたわみ振動が励起される、いわゆるパラメトリック励振の発生の可能性が指摘されている。パラメトリック励振

図8 ライザー模型の最大たわみの周波数応答

図9 4,000mライザーのたわみ振動の安定性判別

は、加振周期と同周期の振動や2倍、3倍の周期の振動が励起される現象である。最初は Tension Leg Platform において、テンドンの張力変動によってテンドンにたわみ振動が励起される問題について検討され[Patel 1991]、続いて、変動張力の小さなハングオフ状態のライザーについてもたわみ振動が生じる可能性が理論的に指摘された。[鈴木 1997]さらに、スケール模型を用いた実験によりパラメトリック励振の発生が確認され、シミュレーションによる検討も行われている。[Miyazaki 2002, 高野 2003, 西垣 2003]ライザーの軸振動とたわみ振動の連成問題について以下に紹介する。支配方程式は、次式ようになる。

$$\text{軸振動: } -m_{u,k}\ddot{u} - c_{u,k}\dot{u} + E_k A_k u'' + \mu_k g = 0 \quad (4)$$

$$\text{たわみ振動: } -m_{w,k}\ddot{w} - c_{w,k}\dot{w} - E_k I_k w'''' + E_k A_k (u'w')' = 0 \quad (5)$$

ここに、 u は軸方向変位、 w はたわみである。この式において張力とたわみの積となる非線形項を通じて応答が連成する。

軸剛性と曲げ剛性に関して全長 850 m と 3,000 m の掘削ライザーに動力学的に相似な全長 10.3 m、外径 6 mm、内径 3 mm のテフロン管と全長 11 m、外径 2 mm のテフロン棒の模型を用いた実験結果を図 8 に示す。15 rad/sec と 19 rad/sec で応答が大きくなり、計測レンジを超えてしまっている部分は、加振周期の 2 倍の固有周期のたわみ応答が励起されている例である。17 rad/sec で生じている小さな応答ピークは、加振周期と同じ固有周期のたわみ応答が励起されているものであり、複雑な挙動を示すことが分かる。ライザーのパラメトリック励振では、励起されるモードが分かると、支配方程式を 1 自由度の運動方程式に変換して、安定判別図で安定不安定を判断することができる。4,000 m ライザーのケースについて、たわみモードを求め、安定不安定判別図に当てはめると図 9 のようになる。図において、

$$\varepsilon = \frac{T_d}{m} \left(\frac{n\pi}{L} \right)^2 \omega^2$$

$$\delta = \left\{ \frac{EI}{m} \left(\frac{n\pi}{L} \right)^4 + \frac{1}{m} \left(\frac{n\pi}{L} \right)^2 \left(T_L + \mu g \frac{L}{2} \right) \right\} \omega^2 \quad (6)$$

ここで、 T_d はライザー上端の変動張力振幅、 L はライザー長さ、 m はライザー単位長さ質量、 EI は曲げ剛性、 n はたわみ振動のモードの腹の数、 T_L はライザー下端の静的張力、 μg はライザー水中重量である。安定判別図から長周期の加振周期に対しては、たわみ振動は励起されず、加振周期が小さくなると励起されるモードが現れることが分かる。この評価例から、 EI の効果は小さく、また、たわみ応答を安定化するためには、下端張力 T_L 、水中重量 μg 、軸剛性 EA を大きく、変動張力 T_d 、質量 m を小さくすることによって安定領域が広がる事が分かる。

5. まとめ

ライザーは比較的単純な構造物であるが、大水深の石油・天然ガスの開発では、技術開発の中心的存在の 1 つである。解析法や設計についても新たな展開が進んでいる。本稿は大水深ライザーの技術的課題に絞ってまとめたものであるが、にもかかわらず十分にまとめ切れていないことを心配するが、読者の参考になれば幸いである。

参考文献

- Ferrari, J.A. and Bearman, P.W., 1999: Hydrodynamic Loading and Response of Offshore Risers, *18th OMAE*, Canada,
- Herfjord, K., et al., 2002: Computation of Interaction Between Deepwater Risers. Collision Statistics and Stress Analysis, *OMAE 2002-28152*.
- Huse, E., 1993: Interaction in Deep-Sea Riser Arrays, *Proceedings of the 25th Offshore Technology Conference*, Houston.
- Larsen, C.M., et al., 2001: Empirical Model for Analysis of Vortex Induced Vibrations - Theoretical Background and Case Studies, *OMAE 2001/OFT-1203*.

- 前田久明, 増田光一, 2003: 平成14年度石油・天然ガス開発促進型大型研究(大学・公的機関等単独枠)研究報告書.
- Miller, J. E., Stahl, M. J., and Matice, C. J., 1998: Riser Collapse Pressures Resulting from Release of Deepwater Mud Columns" OTC 8853, 543-551.
- Miyazaki, E., Kyo, M., Yasukawa, H., Ono, Y., Suzuki, H., AND Yamazaki, T., 2002: Experimental Analysis on Motion of Risers for IODP Deepwater Riser Drillship, ISOPE 2002.
- Morooka, C. K., *et. al.*, 2003: Dynamic Behavior of a Vertical Production Riser by Quasi 3D Calculation, OMAE2003-37158.
- Patel, M. H. and Park, H. I., 1991: Dynamics of Tension Leg Platform Tethers at Low Tension. Part-1 -Mathieu Stability at Large Parameters, *Marine Structure*, Vol. 4.
- Skaugset, K. B. *et.al.*, 2002: Suppression of Vortex Induced Vibrations of Circular Cylinders Using Radial Water Jets. OMAE 2002-28095.
- Sparks, C. P., 1983: The Influence of Tension, Pressure and Weight on Pipe and Riser Deformations and Stresses, *2nd OMAE*, 443-452.
- Sparks, C. P., 1995: Riser Technology for Deepwater Scientific Drilling in The 21st Century. *OMAE, I-B*, 271-279.
- 鈴木英之・吉田宏一郎・石坂智成, 1997: 大水深ライザーの応答挙動と設計に関する考察, 日本造船学会論文集, 第181号, 271-279.
- 鈴木英之・田中 進, 1999: 大水深ライザーのアンチリコイル制御に関する研究, 日本造船学会論文集, 第186号, 393-400.
- Suzuki, H. and Maeda, H., 2000: Reduced Models and Experiments of Vortex-Induced Vibration, Workshop on Vortex-Induced Vibration of Offshore Structures, Sao Paulo, Brazil, 14-16, 2000.
- 高野浩太郎・鈴木英之・榎本一夫・岡徳 昭, 2003: 軸力変動による大水深ライザーのパラメトリック励振に関する研究, 第17回海洋工学シンポジウム, 247-254.
- Triantafyllou, M. S., Triantafyllou, G. S., Tein, D. and Ambrose, B. D., 1999: Pragmatic Riser VIV Analysis, OTC 10931, Houston, 1999.
- 西垣 亮, 他, 2003, 長大ライザーのパラメトリック励振に関する検討, 第17回海洋工学シンポジウム, 2003, pp. 255-262.
- Vandiver, J. K., 2002: A Universal Reduced Damping Parameters for Prediction of Vortex-Induced Vibration", OMAE 2002-28292.
- 安川宏紀・尾崎雅彦・石田浩三, 1999: 大水深ライザーの変動張力に及ぼす内部流体の影響, 日本造船学会, 185.