大水深掘削用ライザーの開発現状と技術課題

日本海洋事業株式会社　　高川　真一
海洋開発研究領域　深海技術研究グループ　*田村　兼吉

１．はじめに

近年、海底油田・ガス田は大水深化が急速に進み、水深 2000m での開発が実用化しつつある。さらに、3000m での掘削を目指した研究も欧米やブラジルを中心として盛んとなっている。一方、JAMSTEC の深海地球ドリリング計画では、2007 年に運行開始する地球深部探査船「ちきゅう」による水深 2500m、将来的には 4000m の科学的ライザー掘削を計画している。海底油田の存在は水深 3000m 程度が限界と考えられることから、4000m では日本独自の大水深掘削技術の確立が必須となっている。本論文では、現時点で考えられる 4000m ライザー掘削システムを提案するとともに、これを実現するために必要な研究課題を示すこととする。

２．4000m ライザー掘削システム

JAMSTEC が水深 4000m 掘削を表明したのは 1990 年に深海科学掘削船構想を提示して間もなくのことであり、科学者からの要望と現実的に掘削能力が付与できると当時予想された折り合いの深度と言う意味合いであった。しかし科学者から見れば、水深 4000m と言うのは Minimum Request であり、もっと深いところでの掘削と試料採取ならびに掘削孔を利用した長期計測が是非とも必要だとの要望が強くある。

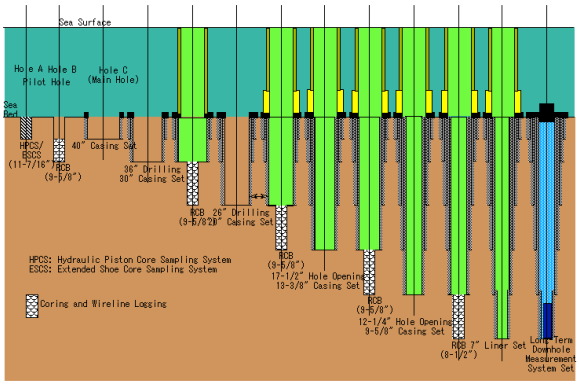
海底下深くを掘削するには、多数段のケーシングを海底下に設置する必要があり（図－１参照）、これらのケーシングが通るライザー口径の極小化が鍵となるが、この時点では口径 16 インチが限度と考えられ、これから逆算して 4000m という数値が出てきたものである。

しかし水深 4000m の表明以来 10 年以上が過ぎ、石油業界では新しい技術がどんどん現れてきている。これらの技術を適用することを考えれば、従来は障害だったことも容易に乗り越えられるようになってきており、水深 4000m という限界は取り払って考える必要がある。

２．１　膨張式ケーシング

地中深く掘削を進めるには、まず地下の地層状況を様々な手段を用いて出来るだけ正確に予想し、その地層に見合ったケーシング計画を立てるのが普通である。この場合、掘削を終了する際の最下端のケーシング口径をまず定め、上に行くに従って次第に口径を大きくしていって、最大のケーシング口径からライザー径を決定する。

掘削の順序から言うと、まずライザーを接続する以前に海底に大きな口径のケーシングパイプを設置し、その中に入る少し小さな口径のケーシングパイプをさらに挿入し、これを何回か繰り返した後に噴出防止装置（いわゆる BOP）とライザーを接続する。



図－１　従来の典型的ケーシングプログラム
深くなるほど細くなるので、予め太くしておく。

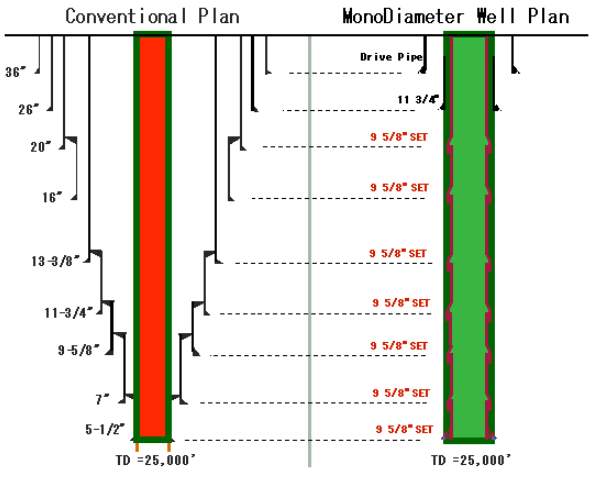
その上で今度はライザーの中を通して同じように次第に口径の小さなケーシングパイプを接続していく。このような作業プロセスをとるために、掘削深度増加とライザー小口径化とは相反する関係になっていた。

しかし OTC'01 で膨張式ケーシング技術が発表され、ケーシング口径に関する考え方が大きく変わりつつある。膨張式ケーシングとは冷間引き抜き圧延技術であり、若干厚めの鋼管の端部からマンドレル（図－２参照）を押し込んで、後から鋼管を広げるものである。板厚は引き抜き前よりも当然薄くなり、また加工硬化も現れるが、これらは織り込み済みである。

図－２
引抜用マンドレル

これを開発した会社によれば、引き抜き鋼管は板厚にムラがあるので、板を溶接して管にしたものを用いており、膨張率も 20%以下に収まるように計画しているとのことであった。

この技術を用いると､海底表面付近は別として、BOP&ライザーの設置後は同一口径のケーシングを挿入していく Mono-Bore Hole にすることができるようになる（図－３参照）。マントルまでの掘削を旗印に掲げる科学掘削に必要不可欠な技術である。



図－３　従来型ケーシングプログラムと新しい単一直径ケーシングプログラム

２．２　軽量ライザー（小口径・材料）

上記膨張式ケーシングとの組み合わせで重要なのは、ライザー口径である。科学掘削の場合、ドリルパイプ接続部分の直径は 7-1/2 インチ程度であり、最下端のビットの直径は選択による幅はあるが、大きなもので 10 インチ程度である。このように考えると膨張式ケーシングの口径は 12 インチ程度で可能となり、これを通すライザーは 14～16 インチ程度の口径で十分と、現在の 21 インチよりかなり小さくなる可能性がある。

このパイプにさらに Kill & Choke Lines を取り付ける必要がある。従来は、鉛直の力はライザー本管が全て負担するものであったが、近年はライザー本管に加えて Kill & Choke Line も力を分担するようになってきており、この方式をライザー小口径化に対しても適用するべきである。

さらに材料として鋼ではなくアルミ等の非鉄金属や、CFRP 等が使用できる可能性もあり、これらの有効性を十分見極める必要がある。

２．３　ジョイント

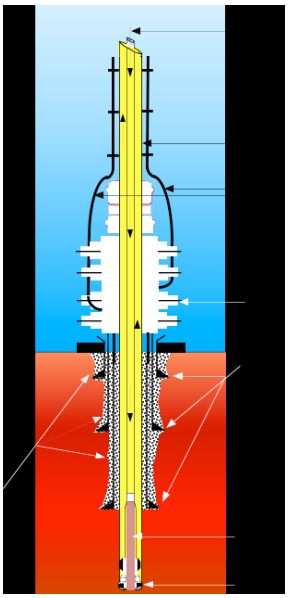
従来からライザー設計の最重要ポイントはハングオフにあるとされている。嵐が急に襲来してライザーを回収する余裕が全くなかった場合にハングオフせざるを得なくなり、この状態に耐えられるようにライザーを設計するというものであった。この背景には、現在のライザーは、ライザーコネクターというフランジ管継ぎ手をボルトで締結して接続しているため、１カ所の着脱に 20 分程度必要なことがある。深さにもよるが、水深 2500m の場合ではライザー全量を回収するのに 3～4 日かかることになる。

しかし接続方式の工夫によって簡便かつ短時間でライザーを着脱できるようになり、全揚収に１日もかからないような方式に出来れば、この問題は大きく変わってくることになる。ライザーの着脱は究極的にはワンタッチジョイントを志向しているが､現在のところこうしたものは存在しない。

新形式のジョイントの開発と評価は大水深ライザーで避けて通れない問題である。

２．４　BOP

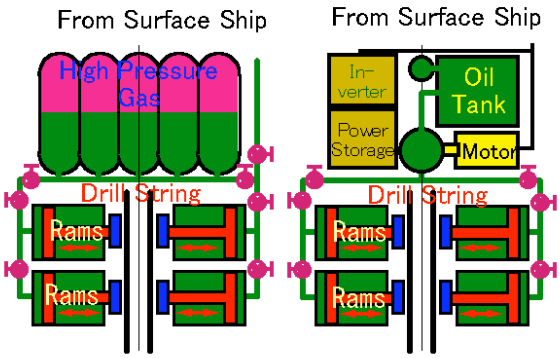
BOP は海底に設置される安全弁であって、孔底から上がってくる油やガスを含む泥水の流路を塞ぐ弁の機能（ドリルパイプを両側から挟み込んで泥水の戻り流路を遮断する）と、ドリルパイプや挿入途中のケーシングパイプを様々な理由で切断する機能、そして孔に完全に蓋をする機能を持つ。



図－４　BOP
海底面上にあるのが安全弁であり、最上段が切断＆閉鎖弁、下三段が流路閉止弁。

従来の BOP（図－４参照）ではこれらの弁機能を駆動する動力源は BOP に取り付けられたボンベ内の高圧空気のエネルギーである。概ね環境圧力（＝水圧）より 200 気圧程度高くしてあるが、水深 2500m であれば 450 気圧、水深 4000m であれば 600 気圧にもなる。ボンベの重量も相当大きいが、それ以上に、圧力が大きくなると実在気体の効果が出てきて、圧力の割にエネルギーが蓄えられないことが問題となる。しかも単なる弁の開け閉めに過ぎなくても高圧空気のエネルギーを消費せざるを得ない。

高圧空気に変わってヘリウムを用いる提案もあるが、多少良くなる程度であって根本的解決とはならないため、むしろ電気油圧方式を採用すべきだと考えている（図－５参照）。瞬発的にエネルギーを放出しなければならないので、海面からケーブルを通しての送電で間に合わないようであれば電気エネルギーを蓄えておく必要があるが、これには超大容量コンデンサー（スーパーキャパシター）の活用が有望である。この方式であれば必要なパワーの割り振りも容易であり、また何よりも水圧の影響を受けず、水深 6000m 超の世界でも運転可能となる。併せて、大きな電力をライザー下端の BOP に供給できるようになれば、ライザー下端に推進器を取り付けて船上からの制御で海底に設置されている BOP に容易に結合するといった、エネルギーの別の利用法も考えられる。



図－５　BOP 駆動新方式
従来式(左)に替えて均圧電気油圧式にする。動力は瞬発放電が可能なスーパーキャパシターを用いる。常にフローティング充電されている。

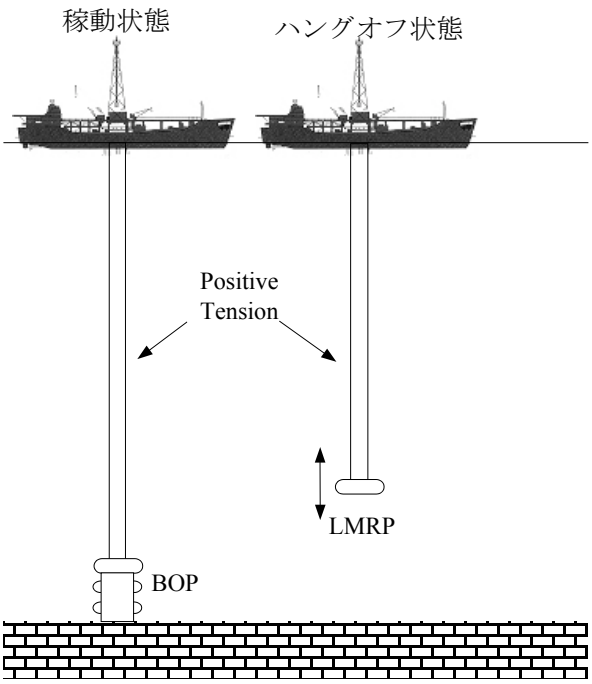
３．4000m ライザーの力学的挙動問題

4000m ライザーの力学的挙動として重要な問題を整理しておく。膨張式ケーシングの採用によりライザーが小口径となると改善に向かう問題も多いが、依然として種々の問題の検討が必要である。

３．１　縦振動による圧縮力の回避 [1)]

掘削作業中のライザーには、設置途中状態、稼働状態、ハングオフ状態、撤収状態と様々な状態が考えられるが、縦振動問題を検討すべき状態は、下端を BOP と接続した稼働状態と、新形式ジョイントの開発により時間的には短くなる可能性があるとはいえ、ハングオフ状態の２状態である（図－６参照）。

ライザーは直径に比して長大なために剛性は相対的に低下し、弾性的な応答が顕著となるが、大水深かつ膨張式ケーシング採用で小口径となると、この傾向はさらに強まり細長い弾性体としての取り扱いが可能となる。



図－６　稼働状態とハングオフ状態

圧縮力が作用すると座屈破壊することから、ライザーの縦振動問題では圧縮力を生じさせないことが最重要課題となる。常に正の張力をかけるために、ライザー上端にはライザーテンショナーが設けられているが、その容量には限度がある。

この張力は、稼働状態では BOP 直上のライザー下端で最も低くなり、ここで圧縮力を生じさせないためには、ライザーテンショナーの容量を増して張力を大きくするか、ライザー自体の水中重量を小さくする必要がある。

一方、ハングオフ状態では掘削船のヒービングによってライザー軸方向の加速度が生じ、これによって生じる張力の変動分が問題となる。変動分が静的な張力を越えると圧縮力を生じるためで、これを避けるにはライザーの水中重量を大きくして初期張力を増すか、質量を小さくして変動成分を小さくする必要がある。

掘削の水深が大きくなるにしたがってライザー重量及び泥水重量は大きくなるから、水中重量を押さえるために浮力材を利用することが通常行われるが、浮力材を利用すると質量が大きくなり、変動分を増加させてしまう。圧縮力の回避は、泥水重量、浮力材、ライザーテンショナー容量等が複雑に絡み合う問題であるが、できるだけ容量の大きなテンショナーと小口径で比重の小さいライザーを選択することが浮力材の利用を減らし、圧縮力の回避に効果が高い。

表－１　各種ライザーの鉛直方向固有周期（s）

水深	管内水の有無	21″鋼ライザー	21″アルミニウムライザー	16″鋼ライザー（付属管：Ti）	21″CFRPライザー
2500m	無	2.99	3.12	2.80	2.03
	有	3.12	3.44	2.92	2.29
4000m	無	4.67	4.52	4.34	2.86
	有	4.88	5.08	4.55	3.32

３．２　縦振動による共振回避 [2)]

ハングオフ状態でのライザーの縦振動固有周期は弾性波がライザーの全長を２往復する時間であり、ライザー長が増すにつれて長くなって波周期の範囲に入るためこれによる共振が問題となる可能性がある。表－１は 21 インチの鋼、アルミニウム、CFRP ライザーと、16 インチの鋼ライザーで、水深 2500m と 4000m のハングオフ状態でその固有周期を計算したものである。管内水有りでは、管内水の重量として管内体積の 1/2 の海水重量を考慮している。水深 2500m ではどの材質のライザーでも問題はないが、5～6 秒の波周期は頻繁に起こりえることから、水深 4000m となると 21 インチの鋼、アルミニウムライザーでも掘削船のヒービングによって共振を起こす可能性があることがわかる。固有周期はヤング率と比重の比に比例することから、16 インチの鋼ライザーの固有周期は 21 インチの鋼ライザーとあまり変わらない。この中では CFRP が 4000m ライザーの材質として有力な候補であり、縦振動の共振回避がライザー材質選択の重要なファクターであることがわかる。

３．３　撓みのコントロール

上下端のフレックスジョイントの破損を防ぐため、ライザーの撓みはコントロールされる。特に潮流速度が大きい場合、ライザーには大きな横力がかかるため、適切な張力によりフレックスジョイントの角度を一定値以下に保つことは重要である。ハングオフ状態では撓みはさらに大きくなるため、ライザーが船体と接触しないよう、注意が必要である。ただし、大水深になると撓み応答の固有周期は長周期化して応答は劣化するので、コントロールは非常に難しい。ライザー下部へスラスター装着して、リモートコントロールし、リエントリーを容易にする工夫を考慮する必要がある。

また、もちろんライザーに発生する応力や、曲げモーメントは許容範囲内にしなければならない。曲げモーメントを減らすために、上部のフレックスジョイントまたはストレスジョイントを掘削船の船底下に設置することがしばしば要求されており、機構的には設計時に様々な工夫が必要となる。

３．４　パラメトリック励振[3) 4)]

パラメトリック励振とは縦振動により撓み振動が励起されるものである。稼働状態で適切な張力がかかっている場合は、ライザー破壊につながる程ではないが、ライザーの設計上は無視できなとの指摘がある。とくにハングオフ状態では大きくなる可能性があり、その大きさを適切に計算するためのツールを整備する必要がある。

３．５　VIV の影響

生産用ライザーは長期間連続して使用するが、掘削用ライザーの使用は短期間であるため、アマゾン河口等、潮流が極めて速い特殊な条件以外では VIV は考慮していない。しかし、VIV によって発生する繰り返し荷重による疲労損傷は、もう少し注意深く検討する必要があろう。

４．4000m ライザーの構造・材料問題

４．１　ライザー材料の選定

ライザー材料の比重は小さいほど有利であり、前章で指摘した共振周期の問題もあるため、水深 4000m のライザーでは SUS、アルミ合金、Ti 合金、CFRP といった鋼以外の材料の有効性を評価しなければならない。特に張力下における疲労、衝撃、短時間の腐食、座屈等のデータは不足しており、経済的な評価も含めて充実させる必要がある。

４．２　ライザーの構造強度

Kill & Choke Line も強度部材と考えた取扱はこれまで行われていない。この場合、Kill & Choke Line の配置によっては軸周りに非等方性を考慮する必要が出てくる可能性がある。

また、新たなライザージョイント形式が出てきた場合は、当然この評価が様々な面から必要となる。

このほか、VIV 発生時、ハングオフ時の縦振動等の動的荷重の周波数を調べることにより、疲労の可能性を確認することも必要である。また、ハングオフ時の局所的スラック発生の可能性も指摘されており、4000m 水深となったことでより注意深い検討が必要である。

５．おわりに

JAMSTEC が将来予定している 4000m ライザー掘削システムについて、現時点で予測されるシステムを提案するとともに、これを実現するために必要な研究課題を力学的挙動と構造・材料に分けて考察した。この結果をもとに海技研で現在実施中の研究「大水深ライザーシステムの安全性に関する研究」を進め、その成果を 4000m ライザーの実現に着実に生かしていきたいと考える。

参考文献

1) 鈴木英之,吉田宏一郎,石坂智成, “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, pp.271-279, 1997.

2) 渡辺喜保, “4000m 水深用 CFRP 掘削ライザ

ーの妥当性について”，日本造船学会講演会論文集，第3号，pp.61-62，2004.
3) 高野浩太朗,鈴木英之,榎本一夫,岡徳昭，“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，pp.247-254，2003.
4) 西垣亮,松浦正己,仁科憲二,西岡俊二，“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，pp.255-262，2003.