

連携記事

マントル掘削を可能とするパイプ類の開発について

Drill Pipe and Riser for Deepwater Drilling Operation and Applied Technologies for Mantle Drilling

国立研究開発法人海洋研究開発機構
研究プラットフォーム運用開発部門
技術開発部 基盤技術研究開発グループ
グループリーダー代理

井上朝哉
Tomoya Inoue

国立研究開発法人海洋研究開発機構
深海資源生産技術開発プロジェクトチーム
レアアース泥回収技術開発ユニット
ユニットリーダー

宮崎英剛
Eigo Miyazaki

1 大深度掘削用ドリルパイプ

1.1 ドリルパイプの概要

ドリルパイプは、図1に示す通り、両端がネジとなった鋼管である。両端をアプセット加工した管体部と厚肉鋼管にネジ加工を施した継手部品であるツールジョイントを摩擦圧接にて接合する。この際、圧接後に圧接部を高周波加熱により部分的に熱処理する。ドリルパイプの要目や引張強度、ツールジョイントの要目やネジ仕様、引張強度試験や衝撃特性試験を含めた品質検査などが、API (American Petroleum Institute) のSpec5, Spec7, RP7Gなどで示されており、それに準拠することが一般的である。例えば、引張強度はグレードで示され、APIでは、E, X, G, Sに分類され、Sが最も強度が高く、S135と称され最小耐力135ksi (930MPa) である。また、長さもAPIの規定で、レンジ1~3で示され、「ちきゅう」で用いるものは、レンジ2で27~30ft (8.2296~9.144 m) である。

1.2 「ちきゅう」建造時に開発した大深度科学掘削ドリルパイプ^{1,2)}

「ちきゅう」が目指す大深度掘削を実現するために、「ちきゅう」建造時に、石油掘削で一般に用いられるAPI S135ドリルパイプより高強度素材を用いたドリルパイプを開発した。高強度素材を用いると、靱性の低下の懸念される。特に使用環境中にH₂Sが含まれる場合の硫化物応力腐食割れや湿潤環境で遅れ破壊性能低下が懸念されたため、API S135素材と同等以上の破壊に対する抵抗力を備えることを条件とした。また、ツールジョイントは、高トルクに耐え、かつ、疲労強度にも優れたものが求められる。そこで、図2に示す、ダブルショルダーツールジョイント (DSTJ) を開発した。雌ネジを有するボックスと雄ネジを有するピンで構成される。図2に示す通り、APIネジは、ボックス頂部がピン肩部と衝接する。一方、DSTJは、ボックス頂部とピン肩部の衝接と同時に、ピン頂部とボックス肩部が衝接する。これにより、高いトルク性

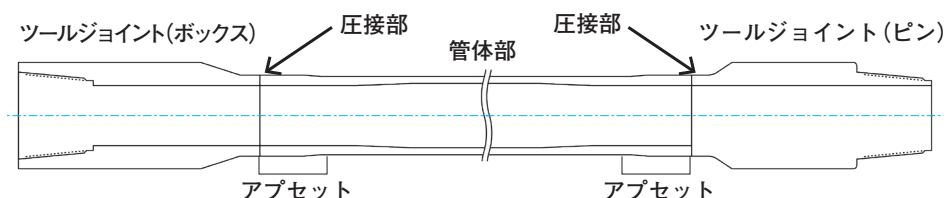


図1 ドリルパイプ概略図

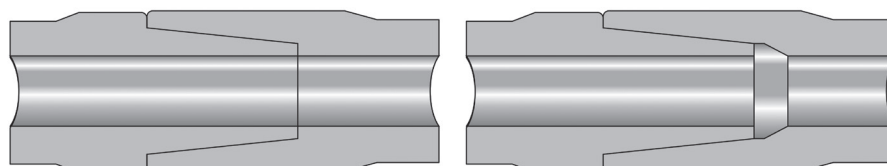


図2 API ツールジョイント (左) とダブルショルダーツールジョイント (右)

能を得るとともに、曲げ応力の抑制を実現する。

海底下の地層サンプルを採取するコアリングが科学掘削の主目的の一つであるが、この際、コアリングツールがドリルパイプ内部を通るため、一定のドリルパイプ内径 (4-1/8in : 104.8mm) の確保が必要である。これは、科学掘削特有の制限であり、ドリルパイプの設計において、特にアブセットやツールジョイントの設計に制限を与えるものである。

そして、高強度素材S140およびS150を用いて、「5-1/2" S140 (肉厚0.415in)」および「5-1/2" S150 (肉厚0.506in)」ドリルパイプの試作を行い、管体部、ツールジョイント、および圧接部の試験片による、衝撃特性試験、破壊靱性試験、SSC試験、遅れ破壊試験、CO₂腐食試験などの耐破壊性能試験、更には、実管での引張試験や疲労試験を行い、API S135ドリルパイプと同等以上の耐破壊性能を有した高強度ドリルパイプの性能を確認した。その後、5"S140 (肉厚0.362in) を加えて、大深度科学掘削ドリルパイプとした。

1.3 大深度科学掘削ドリルパイプに関する開発動向

(1) 高強度化および応力緩和

建造時に開発を行ったS150鋼を用いて、耐力上限を管理することで、遅れ破壊特性などの耐破壊性能を確保し、S155 (最小耐力：155ksi) グレードとしてのドリルパイプ製造を実現した³⁾。更に、新たな素材開発を行い、S160 (最小耐力：160ksi) グレードのドリルパイプを開発した³⁾。その後、石油業界では更なる高強度ドリルパイプであるUD165 (最小耐力：165ksi) が開発されている。

また、大深度掘削実現に向けては、応力低減も高強度化と同じく意義のある一つの対応となる。そこで、ツールジョイントのネジ部スタビングフランク面にR加工を施し、Stress Relief Groove加工を考案⁴⁾し、これにより応力緩和を実現し、疲労強度の向上を図った。

(2) 応力推算および疲労推算の高精度化

ドリルパイプに高強度が求められるのは、操業中に発生する最大応力、および過酷な使用環境による疲労が背景にある。この観点から、ドリルパイプに高強度化と同じくして、最大応力および累積疲労の推算精度の向上が重要となる。

掘削中のドリルパイプの挙動は多岐に亘り複雑である。「ちきゅう」が目指す大深度掘削においては、ドリルパイプの長大化に伴い挙動がより複雑となると共に、ドリルパイプの固有周期が波浪の卓越周期に近づくため、大きな動的挙動が発生し結果として、石油掘削では遭遇しない大きな動的応力の発生が想定される⁵⁾。ドリルパイプ挙動の推算は掘削作業の効率化およびドリルパイプ強度検討の両面から重要であり、ドリルパイプダイナミクスの解析を進めている。

また、ドリルパイプ全長の長大化に伴い、ドリルパイプ上

端には自重による大きな軸応力が作用する。この大きな平均軸応力の作用下で、繰り返し応力が発生するため、大深度掘削では疲労も厳しい。そこで、船体動揺の発現確率を基にした応力発現確率による疲労推算手法⁶⁾や時系列応答による疲労推算手法⁷⁾を提案し、南海トラフ掘削を始めとする科学掘削の計画時に疲労強度の推算を行い、安全性を確認している。

2 ライザーについて

2.1 ライザー掘削システムの概要

ライザー掘削にあたっては、石油やガスの噴出を防ぐために海底に噴出防止装置 (BOP : Blow Out Preventer) を設置する。ライザーとは、海上の掘削リグと海底のBOPとを接続する大口径の鋼管 (標準的には呼び径21in) のことである。BOPを船上でライザー下端に取り付けて海底まで降下し (図3~8参照)、掘削孔上に設置後に掘削が開始される。掘削中は船上の高圧ポンプ (マッドポンプ) により掘削流体がドリルパイプからライザーへと循環される。ドリルパイプ下端のドリルビットから噴射された掘削流体は、掘削により生じた掘りくず (カッティングス) とともに掘削孔内からライザーを通して掘削リグまで上昇し、掘りくずが除去される。

2.2 ライザーパイプの構成

ライザーの単管は、主管、その周囲の付属管および浮力体から構成される。

ドリルパイプは、ライザーパイプの主管の中を通して孔坑底まで降下され、掘削流体が循環される。その素材は、アメリカ石油協会のラインパイプについての規格 (API 5L) でのX80グレードの鋼管が一般に適用されている。主管の両端には、単管同士の接続用のコネクタが溶接で接合される。コネ

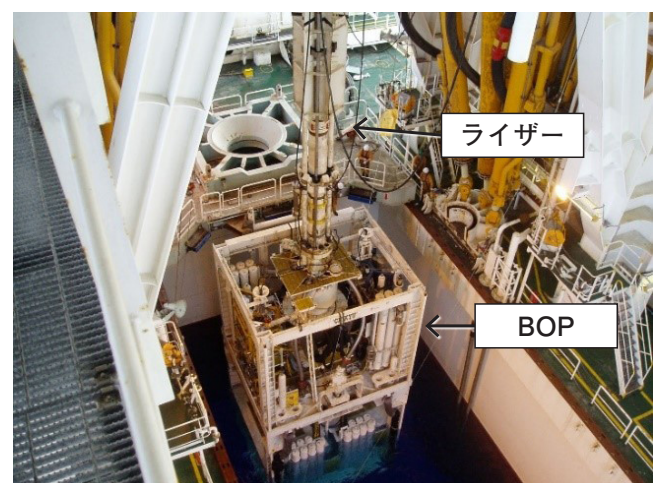


図3 海面下に降下されるライザー下端とBOP



図4 ライザーラックから吊り上げ



図7 ドリルフロア内でライザーを吊り上げる様子



図5 浮力体なしライザーパイプ



図8 ドリルフロアでのライザー接続作業

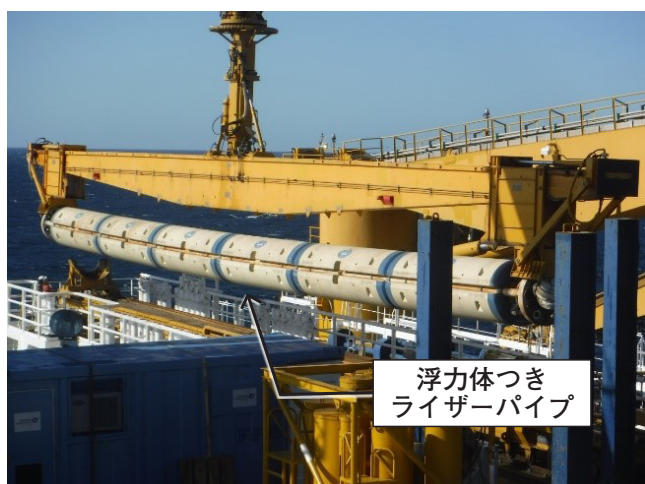


図6 浮力体つきライザーパイプ

クタは、「ちきゅう」含めてフランジをボルトで接続する形式が多い。その他、ドックを嵌めて接続する形式なども用いられている。

付属管は、チョーク・キルライン、プースターライン及び

ハイドローリックラインである。掘削時に石油・ガスなどの地層流体が孔内に浸入した際にはBOPを一時閉鎖するが、チョークラインは、その後に孔内から地層流体を船上で絞りながら排出するラインである。キルラインは、孔内に浸入した石油・ガスを地層内に押し込むための重比重の泥水を送るラインである。チョーク・キルラインは内径110mm程度のAISI4130鋼管であり、冗長的に使用される。また、大水深用では103MPa程度の内圧を保持でき、また耐硫化水素性を有する。プースターラインは、ライザー内の掘削流体中の掘り屑が問題なく上昇するように、追加の掘削流体をライザー下端から投入して上昇流速を上げるためのラインであり、内径100mm程度のAISI4130鋼管である。ハイドローリックラインは、掘削リグ上からBOPへの油圧供給ラインであり、内径76mm程度のステンレス鋼管である。

また特に大水深用ライザーでは、その水中重量を低減するために、大部分のライザーパイプの周囲に浮力体を取り付け

られる。

オペレーション中は、ライザーパイプに圧縮荷重が加わると座屈する可能性があるため、上端をライザーテンショナーで吊り上げ常に引張荷重が加わる状態とする。またAPI RP 16Qで、掘削リグの動揺下でのいかなる状態でも、ライザーにかかる荷重が降伏荷重の3分の2以下とすることが求められている。その荷重は主管で受けるが、特に「ちきゅう」などの大水深用では、チョーク・キルラインで荷重分担を図るものもある。

大水深用ライザーパイプの定格荷重は通常15,600kN (3,500KIPS) だが、「ちきゅう」の場合は南海トラフなど日本周辺でのオペレーション時に頻繁に台風が来ることを考慮して、その場合でもライザーを揚収せず吊り下げたままの状態に耐えられるように、より高い定格荷重として約17,800kN (4,000KIPS) の設計としている。

2.3 南海トラフ掘削での渦励振対策

「ちきゅう」のライザー掘削システムで、ライザーの安全対策に最も力を入れたのは南海トラフ掘削であった。ここでは、黒潮という強流中でのオペレーションが特に大きな課題となった。

ライザーのような細長の円柱構造物に流れが当たると渦励振 (VIV : Vortex Induced Vibration) が生じる。掘削オペレーションでは、ライザーは数か月間の長期にわたって海中に設置されるため、その間に黒潮の強流を受け続けると、ライザーパイプが渦励振により疲労破壊を起こしてしまう可能性があった。このため南海トラフ掘削では、VIV発生抑制のためライザーフェアリングを適用することとした。フェアリングについては、数種類の模型による水槽試験の結果に基づきその形状を決定し、流速の早い水深に位置する。

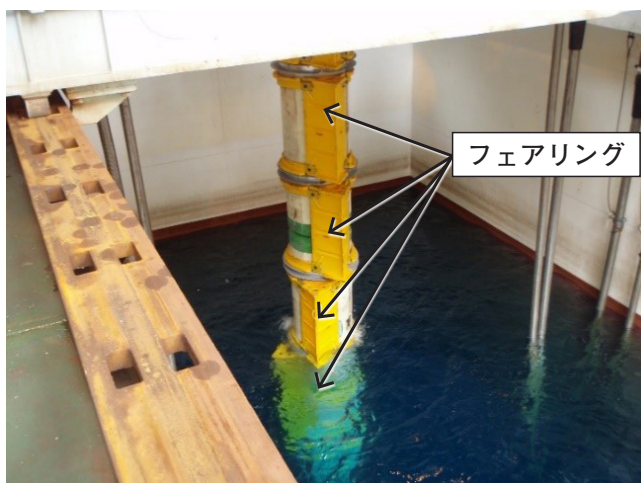


図9 フェアリングを外側に取り付けたライザー

ライザーパイプにそれらを取り付けた (図9参照)。またVIV抑制対策として、ライザーテンショナーで通常よりも高い張力をライザーにかけた状態とした。さらに、実際のライザーの挙動を把握するため、ライザーの数か所に加速度センサなどの挙動センサを取り付け (図10参照)、VIV発生状況をリアルタイムで把握して疲労寿命を予測するVIVモニタリングシステムも適用した。

以上のVIV対策及びモニタリングを行った結果、海流の最大流速が5ノット以上となることもあったが、ライザーのVIVはほとんど発生することがなく、またライザーの累積疲労も無視できるほどであった。このようにして、強流中でのオペレーションにおいて十分安全にライザーを運用することができた。

2.4 マントル掘削へ向けて

ライザーの稼働水深について、現在の大水深掘削リグで適用されている最も高い仕様のもは水深3,657m (12,000ft) である。実際のライザー掘削システムを利用した最大水深記録は3,400m (2016年, Maersk Venturer) となっている。しかし、マントル掘削では、海底下の大深度に存在するマントルへの到達が必要のため、水深4,000m超の海域でライザー掘削を行うことが求められており、既存のライザーの仕様を超えるものが必要となる。

この方策の一つとして、管体に新たな素材を適用し軽量化することが挙げられる。現行ライザー管で最高強度のものはX80 (降伏強度 : 551MPa) であるが、陸上のパイプライン用のラインパイプについてはX120 (降伏強度 : 827MPa) も実用化されている。海洋では波浪などによる変動荷重がかかるため、それに対応する疲労特性も必要になり、X100のライザー開発も行われているが、まだ実用化されていない。マ



図10 VIV挙動計測センサの取り付け

ントル掘削のためには、このようなより高強度グレードライザーの実用化が待たれるところである。

鋼鉄以外の素材候補としては、アルミ合金やチタン合金、炭素繊維強化プラスチック (CFRP) が挙げられる。アルミ合金については、比強度が鋼鉄より高いことから、ライザーではより良い素材となりうる。掘削用のライザーとしても実用化されている (Noble Drilling)。しかし電蝕などの問題のためか、最近では使用しない方向とされている。チタン合金については、比強度がアルミ合金と鋼鉄の中間で、剛性もアルミ合金より高いため、ライザーに有効な素材となる。しかし、試作されたチタン合金ライザーはあるが、やはり高コストであることや摩耗しやすいこともあり、実用化には至っていない。CFRPについては高強度高剛性であり、特にピッチ系は比剛性が高く、海中でのライザーの挙動に有利であり、その素材として非常に有効である。JAMSTECにおいても外径が実機大の短管試験体を試作して引張試験 (図11参照) などを行っているが、ライザーの端部鋼製フランジとCFRP管体との接合部の高強度化やその信頼性向上などが課題となっている。

ライザー管形状として、標準より小径のライザーを用いることも考えられる。これについては、BOPを海底ではなく船体付近に設置するSurface BOPとして実用化されている。ライザー付属のチョーク・キルラインがなく、さらにライザーそのものを軽量化できるが、ライザーがBOPより下になるためBOP作動時にはライザーの内圧が高くなる。このため、高压に耐えられるライザーにする必要があり、ライザー接続部のシール性などの課題がある。さらに小径であることから、海底下大深度の掘削が難しくなるという課題もある。

ライザー掘削システムの構成として、中間切り離しが可能なシステムという構成も有効である。これはライザーの中間に大型の中空構造物を接続し、それより下のライザーの重量はその中空構造物の浮力で吊り上げ、またBOPはこの中空構造物に接続して支えるというものである。これにより、中空構造物の上下に接続するライザーは、既存のものを使用することもできる。しかし、中空構造物が多くの荷重を受けるため大型となり、その設置などが非常に大掛かりとなるなどの課題がある。

以上のとおり、マントル掘削に向けたライザーの増深化のため、素材面や構成面から様々な検討を進めているところである。それぞれにおいて課題はあるものの、今後さらに検討を進め、新たなライザー掘削システムによりマントル掘削を実現していきたいと考えている。



図11 CFRPライザーの試験体の引張試験

参考文献

- 1) 山田次郎, 高川真一, 和田一育, 市川祐一郎, 中村寿男 : 「OD21特殊試料採取システムの開発—高強度ドリルパイプの開発」成果, 石油技術協会春季講演会, (2001), 88.
- 2) 和田一育, 宮崎剛 : JAMSTEC INNOVATION News, 9 (2009)
- 3) T.Inoue, M.Kyo, T.Miyazaki, K.Sakura and T.Fukui : SPE International Conference and Exhibition on Oilfield Corrosion, SPE-155004, (2012), 124.
- 4) 佐倉弘持, 福井俊彦, 成川知之, 井上朝哉, 宮崎剛, 許正憲 : 特許第6528292号, (2019)
- 5) T.Inoue, M.Kyo, K.Sakura and T.Fukui : Proceedings of the ASME 2012 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE2012), OMAE2012-83965, (2012), 691.
- 6) T.Inoue, K.Sakura, T.Fukui and M.Kyo : IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference, SPE-170539-MS, (2014), 679.
- 7) T.Inoue, M.Fujikubo, K.Nakano and N.Sakurai : Proceedings of the ASME 2019 38th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE2019), OMAE2019-95896, (2019)

(2019年12月23日受付)