講 演
 Lecture

炭素繊維強化プラスチックを用いた深海掘削用軽量 マリンライザーの検討*

関 均**・藤田 研***

(Received September 19, 2013 : accepted October 26, 2013)

The Development of marine riser utilizing CFRP composite material for deepwater drilling

Hitoshi Seki and Kiwamu Fujita

Abstract : The marine riser with carbon fiber reinforced plastics (CFRP) is under developing for deepwater drilling, especially for deep sea drilling vessel CHIKYU owned and operated by Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC). Previous steel riser is so heavy that water depth for drilling with CHIKYU is limited up to 2,500 m, which is far below CHIKYU's final water depth goal for drilling, 4,000 m. Therefore, new marine riser with much lighter material is required and CFRP is the best candidate. Moreover, high stiffness is required for riser materials due to prevent large vibration even in case of storm condition. To fulfill this requirement, pitch-based carbon fiber is more desirable because of its higher stiffness coming from higher graphitization. Our early stage of case study shows that water depth over 4,000 m can be achieved with pitch-based CFRP riser. Present assignments and recent developing program is also discussed briefly.

Keywords : Riser, Deepwater drilling, Composite, Carbon fiber

1. はじめに

近年、深海での油田・ガス田の開発が進んでいるが、浮遊式リグから掘削できる水深は、リグから海底の暴噴制御装置まで降ろす掘削用マリンライザーの口径、重量、材質、上下端拘束条件等によって制限される。ちなみに 2013 年 6 月時点での世界記録は、2013 年 2 月に Transocean 社保有の掘削船ディルバイ (Dhirubhai) Deepwater KG1 によってインド東沖にて掘削された 10,385 ft (3,165 m) となっている (その後、さらに 7 月に同船によって 10,411 ft (3,174 m) まで記録が更新されている)。

その理由の 1 つとして、大水深で使用するマリンライザーでは、荒天時のハングオフ状態においても損傷を生じさせないために、船体動揺とマリンライザーとの同調を避けて過大な荷重が生じさせないようにする必要性が挙げられる。今日まで一般的に使用されてきた鋼管製マリンライザーは高強度な半面で高比重なため、水深が増してライザー管の総延長が増すに連れて重量が過大となり、荷重レベルも危険なものになってしまう。さらには、ライザーが

長くなるとともに、縦振動の固有周期が長くなって波周期の範囲に入ってしまう、荒天時に危険な状態となる可能性が高くなってしまう (田村, 2005)。

これに対して、新たなマリンライザーの材料として、軽量・高弾性な炭素繊維強化プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Plastics, CFRP) を採用すれば、重量を軽減しながら、さらなる高強度化・高剛性化を図ることができるため、稼働水深を 4,000 m 以上と大きく延ばすことが期待できる。本稿では CFRP 製マリンライザーの設計・製作に向けた技術検討について以下に紹介・説明する。

2. メソフェーズピッチ系炭素繊維について

炭素繊維は比重 1.8 ~ 2.2 の炭素のみから成る繊維材料であり、比重 7.9 の鉄と比べると、1/4 という軽量さに大きな特徴がある。炭素繊維は出発原料によって PAN 系とピッチ系の 2 種に大別される。今回の検討では、このうち高弾性のメソフェーズピッチ系炭素繊維を採用することで、軽量・高剛性のメリットを最大限に発揮した CFRP 製ライザー管を製作する計画である。そこで本章では、このメソフェーズピッチ系炭素繊維について詳述する。

ピッチ系炭素繊維は、コールタールピッチや石油ピッチを出発原料として、これを精製・改質して紡糸した後に、熱処理を経て製品となる。紡糸段階でのピッチが光学的に等方性な場合は、得られる炭素繊維 (汎用炭素繊維、GPCF などと称される) は強度・弾性率といった機械特性

* 平成 25 年 6 月 27 日、平成 25 年度 (2013 年) 石油技術協会 春季講演会 作井部門シンポジウム「進歩する機器・素材と坑井デザイン ~多様化するデマンドへの対応~」で講演 This paper was presented at the 2013 JAPT Drilling Symposium entitled "Advances in drilling equipment, materials and well design - How to meet diversifying demands?" held in Tokyo, Japan, June 27, 2013.

** 三菱樹脂株式会社 Mitsubishi Plastics, Inc.

*** 三菱商事石油開発株式会社 Mitsubishi Corporation Exploration

図1 メソフェーズピッチの分子構造モデルと紡糸時の配向挙動

図2 メソフェーズピッチ系炭素繊維の主な性能
各種素材との比較

図3 ピッチ系炭素繊維、PAN系炭素繊維の引張特性

はそれほど優れておらず、断熱材や摺動材などに使用される。一方、偏光顕微鏡で観察すると光学的に異方性な紡糸ピッチ（メソフェーズピッチと称される）は、分子構造レベルでは、図1に示すような縮合多環芳香族高分子の集合体であり、液晶構造を有している。このため、紡糸段階で芳香族の高分子構造が繊維の軸方向に配向しやすく、この構造を引き継いだまま熱処理されることで、最終的に黒鉛

結晶が繊維軸方向に配向した、黒鉛質の炭素繊維となる（大谷，2007）。よって、得られたメソフェーズピッチ系炭素繊維（以下では「ピッチ系炭素繊維」と略す）は、汎用炭素繊維と違って機械特性に優れ、繊維軸方向で黒鉛結晶に近い物性を示し、軽量でありながら、高弾性、高熱伝導、低熱膨張という特徴を有する（図2）。一方、PAN系炭素繊維は、鎖状高分子であるポリアクリロニトリル（Polyacrylonitrile, PAN）を出発原料としているため、ピッチ系炭素繊維のように黒鉛質とはなりにくいが、軽量で高強度な製品が得られることが特徴である（図3）。

ピッチ系炭素繊維を使用した強化プラスチック、すなわちピッチ系 CFRP は、ピッチ系炭素繊維に由来する、軽量・高剛性、高熱伝導、低熱膨張というユニークな特性を持ち、PAN系炭素繊維とは違った用途展開を果たして今日に至っている（深川，2011）。なかでも、最も必要とされ、他の材料の追随を許さないのが、軽量・高剛性という特徴を活かした一連の用途である。

一例として、フラットパネルディスプレイ（FPD）や半導体の生産ラインで使用される搬送用ロボットハンドの場合、大面積ながら薄くて脆いガラス基板を載せて、前後・左右・上下と高速での移動を繰り返す。この際、ロボット

図4 各種材料の振動減衰挙動

図5 メソフェーズピッチ系 CFRP 製の工業用ロール

ハンドをピッチ系 CFRP 製として軽量化、高剛性化すれば、自重による撓みを抑えて、ガラス基板を配置する位置精度を高められ、さらには駆動系の負荷を軽減してロボット全体の重量低減やコストダウンを図ることができる。また、図4に示すように、ピッチ系 CFRP は高弾性であることに伴い、他の材料と比較して高い固有振動数と素早い振動減衰性能を有するため、急停止した際に発生する振動が速やかに収まり、直ちに次の動作に移行できることで、タクトタイム（製造ラインの各工程で製品1個分の作業に要する時間）を短縮でき、FPDの生産性向上に貢献している。

図5は、フィルム製造工場で使用する、長さ9mのCFRPロールである。製紙やフィルムの生産ラインで使われるこのような工業用ロールも、ピッチ系 CFRP の軽量・

高剛性を活かした用途の1つである。フィルムの生産性を高めるためには、ラインをより幅広にしたり、ラインスピードを高速にしたい、というニーズがあるが、既存の鉄製ロールでは、長尺化することで、自重で撓んでしまったり、重くて高速回転できないため、生産性向上には限界がある。これを、軽量・高剛性のピッチ系 CFRP に置き換えることで、長尺化・高速化が可能になり、生産性を向上できる。

ピッチ系 CFRP のこれらの特徴は、長尺、大面積になればなるほど、その効果が顕著となることから、「重厚長大」「軽薄短小」ならぬ「軽薄長大」を実現できるエコマテリアル（優れた特性を持ちながら、環境負荷が少なく、人に優しい材料）と言える。

3. ピッチ系 CFRP 製掘削ライザーの潜在能力と課題

(独)海洋研究開発機構の保有する地球深部探査船「ちきゅう」は、地球深部の学術調査のため、マントルを掘削・採取することを究極の目的としており、そのためには、水深4,000 m 超の海域で、7,000 m 以上の掘削を行なう必要がある。しかし、現状の「ちきゅう」の鋼管製掘削ライザーでは、オペレーション条件を考慮して、水深2,500 m が適用範囲とされており、さらなる大水深の稼動には軽量掘削ライザーの開発が最重要課題の1つとなっている。三菱樹脂および三菱商事グループは、このニーズに対する提案として、ピッチ系 CFRP の長尺管生産技術を掘削ライザーに

適用すべく、検討中である。

探査船「ちきゅう」で現在使用されている掘削ライザー（図6）は、内径φ495 mm、外径φ552 mm、長さ27 mの鋼製（X-80）本管を、両端のフランジ構造によってボルト・

図6 地球深部探査船「ちきゅう」の掘削ライザー管

図7 CFRP製ライザー管の概念図

ナットで互いに接続し、2,500 mもの長さにまで延長している。この鋼管断面にかかる引張荷重は、定格で18,000 kNにも及ぶ。また、本管の周辺には、浮力体および複数の副管（Choke/Kill Line, Conduit Line, Booster Line）が配されている。ライザー管の重量は、27 m長の1ユニット当たりで20 tonにも及び、このうち、本管部分が半分の10 tonを占める。そのため、水中重量を軽減させる目的で

図8 CFRPライザー管のケーススタディ例

表1 ライザー管：本管部分のみの軽量化が稼働最大水深に及ぼす効果

鋼管部肉厚 (mm)	CFRP部肉厚 (mm)	総肉厚 (mm)	本管重量 (ton)	フランジおよび副管重量 (ton)	総重量 (ton)	軽量化率	想定稼働最大水深 (m)
6.0	22.5	28.5	4.11	10	14.11	70.2%	3,563
9.5	19.0	28.5	4.99	10	14.99	74.5%	3,355
14.0	14.5	28.5	6.15	10	16.15	80.3%	3,114
18.0	10.5	28.5	7.21	10	17.21	85.5%	2,923
22.0	6.5	28.5	8.29	10	18.29	90.9%	2,749
28.5	0.0	28.5	10.11	10	20.11	100.0%	2,500

表2 ライザー管：本管およびフランジ・副管の軽量化が稼働最大水深に及ぼす効果

		フランジおよび副管 重量																	
本管重量		重量 (ton)	軽量化率	想定稼働 最大水深 (m)	重量 (ton)	軽量化率	想定稼働 最大水深 (m)	重量 (ton)	軽量化率	想定稼働 最大水深 (m)	重量 (ton)	軽量化率	想定稼働 最大水深 (m)	重量 (ton)	軽量化率	想定稼働 最大水深 (m)	重量 (ton)	軽量化率	想定稼働 最大水深 (m)
鋼管部 肉 厚 (mm)	重量 (ton)	3.38	34%		4.26	43%		5.13	51%		6.00	60%		6.88	69%		10.00	100%	
6.0	4.11	7.50	37%	6,707	8.37	42%	6,007	9.24	46%	5,439	10.12	50%	4,969	10.99	55%	4,573	14.11	70%	3,562
9.5	4.99	8.37	42%	6,005	9.25	46%	5,437	10.12	50%	4,968	11.00	55%	4,572	11.87	59%	4,236	14.99	75%	3,354
14.0	6.15	9.53	47%	5,276	10.40	52%	4,832	11.28	56%	4,458	12.15	60%	4,137	13.03	65%	3,859	16.15	80%	3,113
18.0	7.21	10.59	53%	4,748	11.46	57%	4,386	12.34	61%	4,075	13.21	66%	3,806	14.09	70%	3,569	17.21	86%	2,922
22.0	8.29	11.67	58%	4,307	12.55	62%	4,007	13.42	67%	3,746	14.30	71%	3,517	15.17	75%	3,314	18.29	91%	2,749
28.5	10.11	13.50	67%	3,725	14.37	71%	3,499	15.24	76%	3,298	16.12	80%	3,119	16.99	85%	2,959	20.11	100%	2,500

注釈：浮力体の影響を除いた重量での比較

浮力体を採用している。

図7はCFRP製ライザー管の概念図である。本管の内部には、掘削屑による摩耗や、ドリルパイプの接触による損傷を防止するために、最低限の厚さの鋼管製ライナーを配し、両端のフランジも合わせた形で、その外側をCFRP管で包んで一体化させる構造を計画している。CFRP化によって、この本管部分の重量は4 tonを下回ることも可能であり、大きな重量軽減が見込める(図8)。

本管部分に要求される性能としては、定格荷重に対して十分な安全率の強度と並んで、前述した荒天時の波浪に伴う縦振動や、さらには潮流による水平方向の流れが引き起こすVortex Induced Vibration (VIV) に対する振動減衰性能が挙げられる。このうち、振動減衰については、本管の固有振動数を高くすること、すなわち高剛性とするのが好ましい。CFRP管を設計するに当たっては、これらの要求性能を満足するように、炭素繊維の種類(さまざまな強度・弾性率のグレードのうちからどれを選択するか)、積層構成(管の軸方向に対していくつかの配向角とした複数の繊維層を、それぞれどのくらいの割合で配置していくか)、厚さ(外径と内径)を考慮することになる。図8は初期段階でのケーススタディの一例だが、高強度タイプのPAN系炭素繊維を使用した場合には、剛性が鋼管より低くなり、振動面で不安があるのに対して、高弾性タイプ、あるいは超高弾性タイプのメソフェーズピッチ系炭素繊維を使用した場合は、現行の鋼管や、新たに検討されているチタン合金やアルミ合金に対して同等かそれを上回る高い剛性が期待でき、大水深用の掘削ライザーとしてはより好ましいことが分かっている。

なお、表1に示すように、フランジおよび副管の重量が現状のままであれば、本管部分だけを軽量化しても水深4,000 mは達成できない。よって、表2に示すように、水深4,000 mを実現するには、本管部分の軽量化と併せて、フランジおよび副管部分の軽量化も不可欠である。これについては、本管のCFRP化に目処がついた段階で検討に着手する予定であるが、このうち副管部分については、本管部分と同様にCFRP化が有効と考えている。

現時点(2013年6月)では、フランジ部分と本管CFRP部分とが、定格荷重に対して十分な安全率を持った接合強度を発現するように、接合部分の形状・構造を検討中であり、有限要素法による解析や小スケールモデルでの実験を通じて最適化していく予定である。

4. ピッチ系CFRP製掘削ライザー 今後の開発計画

探査船「ちきゅう」での使用を想定したピッチ系CFRP製掘削ライザーを開発するため、短期的には、製造の基本仕様を確立し、その性能を検証することを本年度の目標としており、具体的には、2013年度下半期に以下の3つの試験・評価を予定している。

- 1) 基礎物性確認のためのクーポン試験片による材料評価
引張試験、圧縮試験、曲げ試験、層間剪断試験、接着強度試験(CFRP/鋼板)、耐食性試験、耐候性試験
- 2) フランジ付CFRP管 小スケール試験体(φ100 mm×1,000 mm長さ)での要素試験
引張試験、圧縮試験、曲げ試験、ねじり試験、疲労試験、耐圧試験、複合サイクル試験
- 3) フランジ付CFRP管 の実物サイズ試験体(φ495 mm×4,000 mmL)での検証試験
引張試験、疲労試験

さらに次年度以降の中長期的な開発については、以下の段階を踏んで順次取り進める考えである。

Phase-1 … 大型CFRPライザー管の製造方法確立および製造体制整備、さらなる信頼性試験の積み増し

Phase-2 … 副管の軽量化(=CFRP化)、フランジ接続部の軽量化・簡便化

Phase-3 … 探査船「ちきゅう」での実証試験

最終的に探査船「ちきゅう」でのCFRP掘削ライザーの使用実績ができれば、将来的には、油田・ガス田掘削などの商業利用への道が開けることで、今後の深海資源開発に大きく寄与できることになる。この大きな目標を達成するために、目の前の課題を1つずつ着実に解決しながら開発を進めていきたいと念じている。

参 考 文 献

- 田村兼吉, 2005: 大水深・大深度掘削技術の現状と技術課題, マリンエンジニアリング, 40(2), 168-172.
- 大谷朝男, 2007: 炭素の事典, 370-380, 朝倉書店.
- 深川敏弘, 2011: 高弾性ピッチ系炭素繊維複合材料の特徴と用途, 第24回複合材料セミナー・テキスト, 9-18.