

深海ケーブルへのチタン合金線材の適用と製造技術

Application of Titanium Alloy Wire Rod to Underwater Cable and Manufacturing Techniques of the Wire Rod

山下 義人^{*(1)} 土屋 桂^{*(2)} 入江 暢泰^{*(3)} 山田 直臣^{*(4)}
Yoshito YAMASHITA Katsura TSUCHIYA Nobuyasu IRIE Naomi YAMADA

石王 章文^{*(5)} 森井 惇雄^{*(6)} 村山 芳昭^{*(7)}
Shobun ISHIOU Atsuo MORII Yoshiaki MURAYAMA

抄 録

チタンは耐海水腐食性に優れ、比強度が高いため、海洋に使用されるケーブルのアーマ材（外装）として最適である。今回、世界で初めて β 型チタン合金線材を用いて、最深海溝の調査を可能とする長さ12 000mのチタン合金製アーマケーブルの開発に成功した。本報はまずケーブル用チタン合金材料の選定について簡単に触れ、次に線材圧延・シェーピング・伸線・ケーブル加工からなるケーブルの製造工程を述べた。さらに、これらの工程の実績、及びそこで得られた線材、ワイヤー、ケーブルのそれぞれの材質について紹介した。

Abstract

Because of its excellent corrosion resistance in seawater and high strength-weight ratio, titanium is the best armoring material for the cables to be used in the oceans. Using β -type titanium alloy wire rod for the first time in the world, Nippon Steel Corporation has developed 12 000 m long armored cable which is usable for exploration in the deepest sea in the world. This paper outlines the selection of titanium alloy material for the cable and describes the cable manufacturing process, consisting of wire rod rolling, shaving, drawing and processing into cable. Moreover, the results of production by this process and the mechanical properties of the wire rod, wire and cable produced by this process are described.

1. はじめに

近年、環境問題がクローズアップされる中で海洋観測の必要性が高まってきている。その観測方法の一つとしてセンサーや採水器をケーブルの末端に取り付け、これらを船からつり下げるか、曳航する方式があり、気象庁や東京大学海洋研究所で実施されている。このケーブルのアーマ材（外装）として、通常亜鉛メッキ鋼線が使用されているが、(1)比強度（破断強度／比重）が低いために深度6 000 m程度までしか使用できない、(2)海水耐食性が低く、防食剤の塗布や錆のために採水サンプルを汚染するという問題がある。

10 000m級の世界最深部を調査するには、この二つの問題点を解決したケーブルが必要となる。この問題点を解決する材料としてチタン合金が注目され、1988年に完成した東京大学海洋研究所新白鳳丸(3 987ton)には、世界で初めてチタン合金製アーマケーブルが採用された。このケーブルの製造を古河電気工業㈱、鈴木金属工業㈱及び新日本製鐵の三社が共同で担当したので、その結果を紹介する。

2. チタン合金材料の選定

ケーブルのアーマ材に要求される特性としては、(1)引張強さが鋼線の1 373N/mm²レベルの高強度、(2)冷間加工減面率が90%レベルの高加工性（ワイヤーは直径約1mmまで伸線加工されるため）である。これに関して、チタン合金の機械的性質を表1に示す。

チタン合金は、 α 型、 $\alpha+\beta$ 型、 β 型に大別される。材料の要求特性とこれらの機械的性質を比較して考えると、 α 型及び $\alpha+\beta$ 型合金は強度及び加工性とも不十分であるが、 β 型合金は両者を満足することができる。さらに、 β 型合金の中ではTi-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr（通称 Beta C）が冷間加工により最も高い強度が得られる。そこで、今回のケーブル用アーマ材料として Beta C 材を採用することにした。

3. 製造方法

3.1 成 分

今回用いた Beta C 材の成分を表2に示す。これは Beta C 材の典

*⁽¹⁾ 光製鐵所 生産技術部 掛長

*⁽²⁾ 東邦チタニウム㈱ 企画室 主席技師長

*⁽³⁾ 東邦チタニウム㈱ 品質管理部 部長

*⁽⁴⁾ チタン部 部長代理

*⁽⁵⁾ 光製鐵所 製鋼・線材部 掛長

*⁽⁶⁾ 鈴木金属工業㈱ 技術開発本部 部長

*⁽⁷⁾ 古河電気工業㈱ 光伝送事業部 技師長

表 1 チタン合金材料の機械的性質

合金の種類			機械的性質				仕上	高強度化後の引張強さ (N/mm ²)
			仕上	0.2%耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)		
α 型	Ti-5Al-2.5Sn など		Ann.	≥1 109	≥1 177	≥10	—	—
$\alpha + \beta$ 型	Ti-6Al-4V		Ann.	≥1 177	≥1 275	≥10	STA	≥1 472
	Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo など		Ann.	≥1 226	≥1 324	≥ 8	STA	≥1 619
β 型	Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr		STA	≥1 570	≥1 668	≥ 6	CW	≥1 766
	Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn など		STA	≥1 373	≥1 422	≥ 7	CW	≥1 570

Ann.: 焼鈍 STA: 溶体化処理時効 CW: 減面率90%以上の冷間加工

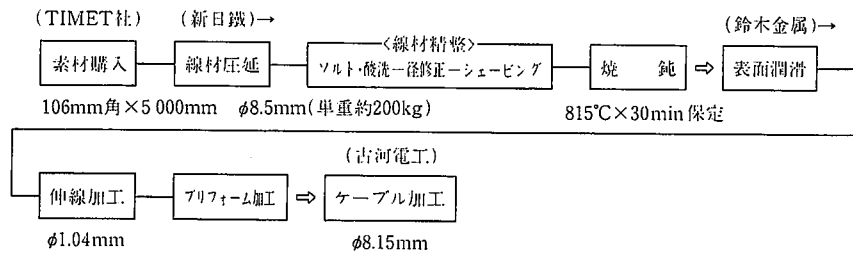


図 1 ケーブル製造工程

表 2 Beta C 材の化学成分 (wt %)

Al	Zr	Mo	V	Cr	Fe	C	N	H	O	Ti
3.5	3.8	3.7	7.6	6.2	0.12	0.01	0.01	0.01	0.09	Rem.

型的な成分である。

3.2 製造工程

素材の購入からケーブル加工までの製造工程を図 1 に示す。線材の製造は新日本製鐵 光製鐵所、伸線加工は鈴木金属工業㈱、アーマ―材を用いたケーブル加工は古河電気工業㈱と三社の工程を通過している。

素材の Beta C は、国内での調達が困難なためにアメリカの TIMET 社より線材圧延用ビレット (106mm 角 x 5 000mm) を購入した。これを光製鐵所の全連続式圧延機で直径 8.5mm に熱間圧延し、線材コイルを製造した。圧延ままの線材の表面には、酸化スケール及び硬化層が生成されるため、これをソルト・酸洗処理を行い溶削した。酸化硬化層が残存すると冷間加工工程で、線材の表面にクラックが発生するため完全に除去することが重要である。次にローラ―ダイスと呼ばれる V H ロールで減面率約 10% の冷間圧延を行い、真円度を向上させた後、シェービングダイスと呼ばれる疵取り用ダイスの中に線材を通すことにより、表面疵を除去した。この工程で線材は加工硬化しているため真空焼鈍炉にて軟化焼鈍を行った。

このようにして製造した線材製品を、鈴木金属工業㈱にてまず最初に線材表面の潤滑処理を行い、多筒伸線機で直径 1.04mm に伸線加工した。次にこのワイヤーに、ケーブルアーマ―を製造したときのアーマ―の“ゆるみ”を防止するための特殊なスパイラルプリフォーム加工を施した。

古河電気工業㈱は、このワイヤーを別に製造していたケーブル芯の上に巻き付けて直径 8.15mm のケーブルの組立てを行った。

3.3 線材圧延

3.3.1 圧延機の仕様

線材圧延機の設備仕様を表 3 に示す。ビレットは 150mm 角と 106

表 3 線材圧延機の仕様

区 分	仕 様
ビレット寸法	150mm 角×12 000, 6 000mm 106mm 角×12 000, 6 000mm
製品寸法	最大 φ34.0mm 最小 φ 5.5mm
圧延速度	最大 87m/s (φ 5.5mm の場合)
圧延機	粗圧延機 8 基 中間圧延機 8 基 プレフィニッシングミル(4VH) 1 基 フィニッシングミル(10VH) 1 基 レピーター 1 基

mm 角の 2 サイズがあり、チタンの場合は製品が一般に小ロットかつ多サイズであることから、106mm 角を標準的に使用している。圧延設備は、粗圧延機(8スタンド)、中間圧延機(8スタンド)、予仕上げ圧延機(4スタンド)(以後、P FM と記す)及び仕上げ圧延機(10スタンド)(以後、FM と記す)で構成され、全部で 30 スタンドがタンデムに配置されている。そして、中間圧延機と P FM の間には張力を調整するためのレピーターがある。又、P FM と FM の構造は V H ロールのブロックミルで、圧延中に線材がねじられないため高速圧延に適している。

3.3.2 圧 延 条 件

Beta C 材の加熱温度は、1 140±10°C に設定し、大気雰囲気中にて加熱を行った。一般にチタンは加熱による表面酸化が顕著であるために、極力低い温度での加熱が好ましいが、圧延機的能力との関係から 1 140°C を選定した。なお、Beta C 材の熱間強度としてグリーンブル試験結果を図 2 に示す。1 140°C で純チタンの強度が約 10N/mm² であるのに対して、Beta C は約 150N/mm² で、この強度が粗圧延機での制約である。

ビレットの加熱温度の管理は、加熱炉 1 バッチ当たりビレットを 13 本装入し、その内 1 本は温度管理用の短尺ビレット (106mm 角×

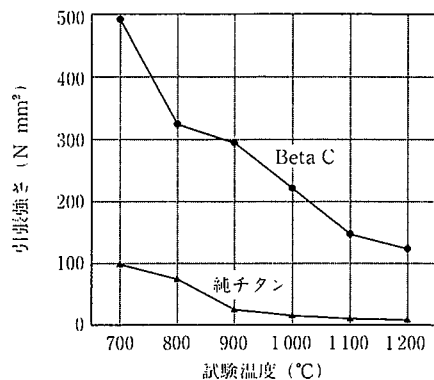


図 2 グリーブル試験結果

1 000mm) であり、これを用いて行った。このピレットには表面及び中心部に熱電対が埋め込まれ、両方とも所定の温度に達した時点でプッシャーにて加熱炉から圧延機に抽出し、直径8.5mmの線材に圧延した。圧延速度は圧延中の材料の温度低下による圧延負荷の増大を軽減するために、ステンレス鋼と同レベルの40m/sの高速で圧延した。又、圧延中のロール冷却水は使用しなかった。

3.3.3 高温用酸化防止剤

チタン線材の圧延用ピレットには、加熱中の酸化スケールに起因する圧延疵を低減するために、標準的に酸化防止剤を塗布している。純チタンの場合は、加熱温度が約700°Cであり、約900°Cまで効果のある $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 系の酸化防止剤を使用している。Beta Cの場合は加熱温度が1 140°Cと高温であるために、特別に $\text{SiO}_2\text{-(NH}_4)_2\text{HPO}_4\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 系の酸化防止剤を適用した。その組成を表4に示す。

3.4 シェーピング条件

シェーピング用ダイスの材質は、従来から弁ばね等の高強度材に用いている超硬合金(WC)の表面にTiCNを被覆したものを使用した。切削速度は、切削抵抗を軽減しダイスのチップング(欠損)の発生を軽減するために、20m/minの低速で行った。

3.5 伸線条件

チタン合金線材の伸線加工においては、良好な潤滑が極めて困難であり、一般的には数 μm オーダーの酸化皮膜(酸化スケール)を線材表面に付与している。この方法では酸素の浸入により線材の表層が硬化するために、高い減面率の冷間加工が困難であり、その結果、高強度を得ることができない。そこで今回、独自のノンスケール潤滑による伸線加工技術を開発し、この方法により減面率が約90%の伸線加工を実施した。

3.6 ケーブル加工条件

ケーブルは、張力が加わるとアーマーの撚りが戻ろうとして回転する性質(自転性)がある。自転性が大きいと、船の上下振動でキンクが発生して、ケーブルが損傷することがある。これを防止するために、ケーブル芯の外周にBeta Cのワイヤー(アーマー材)を2層に配列し、各層を相互反対方向に撚りあわせてケーブルの自転の少ないアーマー設計を行った。

表 4 高温用酸化防止剤の組成 (wt %)

SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO	TiO_2	$(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ ほか
58.8	8.0	7.8	1.4	0.25	23.75

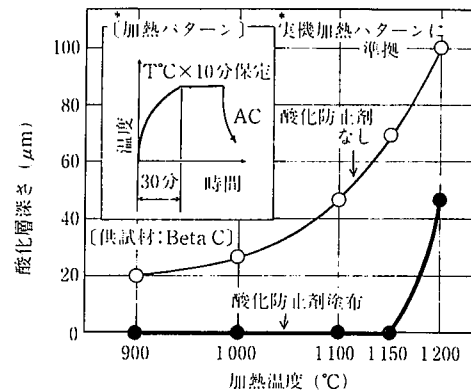


図 3 Beta Cの加熱温度と酸化層深さの関係

4. 製造結果

4.1 酸化防止剤の性能調査

Beta C線材圧延の事前調査として、酸化防止剤の性能調査結果を図3に示す。Beta Cピレットから20mm角の試料を切り出して、半分の面に酸化防止剤を塗布したものを900~1200°Cまで実機での加熱パターンに準拠して、大気雰囲気中で加熱〜冷却を行った。この試料の表面酸化層厚さをミクロ組織的に測定した。その結果、この酸化防止剤は1 150°Cまで効果があることが判明した。なお、1150°Cで酸化防止剤を塗布しない場合は、酸化層厚さが70 μm あるのに対して、塗布した場合は酸化層を少なくすることができる。

4.2 線材圧延の結果

圧延用に購入したピレットは全部で、単重約210kgが24本である。これを用いて、先行試験及び出荷製品の量産製造を行ない、約2.5tの線材製品を製造した。

4.2.1 線材の外径

圧延に際しては、先行試験として圧延ロール隙基準をA(SUS316ベース)、B(A水準の実績補正)の2水準変化させて線材の偏径差を比較した。その結果、A水準は偏径差1.37mmの楕円形状であるのに対して、B水準は偏径差0.33mmで良好な形状が得られた。

そこで、量産圧延はB水準のロール隙にて行い、外径の実績は $\phi 8.31\text{mm} \sim 8.72\text{mm}$ で目標 $\phi 8.50 \pm 0.4\text{mm}$ を満足した。

4.2.2 線材の表面疵及び酸化層

圧延された線材の表面には、全長にわたって酸化層起因と推定されるヘゲ・折込み状の疵が発生していた。その深さは約0.10~0.20mmであり、これらはシェーピングを2回行うことにより除去できるレベルである。酸化層の深さは、ミクロ組織観察の結果約50~100 μm であった。

4.2.3 圧延温度

加熱炉よりピレットを抽出したときからFM出口までの材料表面の温度推移の一例を図4に示す。温度は粗圧延機#7スタンドが950°Cで最も低いが、中間圧延機からFMの間では加工発熱のために温度が上昇し、FM後は1 085°Cとなっている。

4.2.4 圧延負荷

粗圧延機からFMまでの圧延負荷の推移の一例を図5に示す。圧延負荷は粗圧延機#7スタンドが93%で最も高く、これは前述の圧延温度がこのスタンドで最も低くなることに起因するが、許容範囲100%以下である。

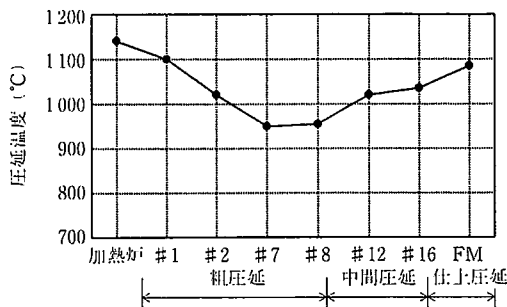


図 4 Beta C 線材の圧延温度推移

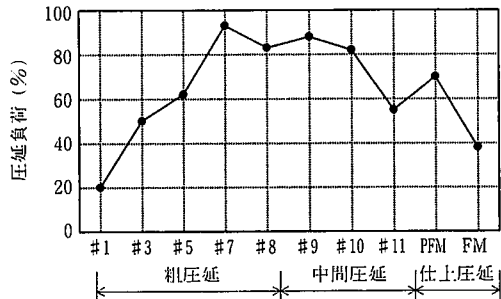


図 5 Beta C 線材の圧延負荷推移

4.3 シェーピングの結果

シェーピングでは、その途中でダイスのチップング（欠損）が起ったため、線材表面に疵残りが部分的に発生した。チップングの原因は、シェーピング前の線材の径修正をローラーダイスで行ったため、完全な真円を得ることができず、そのために不均一切削となりダイスへの負荷が局部的にオーバーしたものと考えられる。又、シェーピング後のコイルの巻取りにおいて、ステンレス線材と比較してスプリングバックが大きいために“線材のもつれ”が生じ、連続作業が困難であった。今後、径修正の方法及びコイルの巻取り方法の改善が必要である。なお、チップングによる線材表面の疵残り部は、グラインダーにて手入れ除去した。

4.4 線材の材質

シェーピング等により、疵取りが完了した線材を焼鈍（815°C×30 min 保定）した製品の機械的性質を表 5 に示す。目標としていた線材の品質を満足している。

4.5 ワイヤの材質

上述した線材を直径1.04mm に伸線加工したワイヤの機械的性質を表 6 に示す。最も重要な特性である引張強さは、1 697N/mm² で仕様1 373N/mm²以上を満足している。

表 5 Beta C 線材の機械的性質

	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)	絞り (%)
仕 様	863~961	≥10	≥40
実 績	893	24	58

表 6 Beta C ワイヤの機械的性質

	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)
仕 様	≥1 373	—
実 績	1 697	2

4.6 ケーブルの材質

ケーブルはケーブル芯（軟銅撚線）を絶縁体（ポリエチレン）で包み、その上にチタン合金線アーマー（Beta C）を撚ったもので、その構造を図 6 に、外観を写真 1 に示す。ケーブルの詳細は村山等¹⁾の論文に記述しているので、ここでは簡単に結論を述べる。ケーブルの構造を決定するために、表 7 に示す A、B、C、D 4 タイプの試作を行った。各タイプの主な相違点は、ケーブル芯が A タイプは 4 芯、B 及び C タイプは同軸芯、D タイプは単芯である。なお、B タイプはアーマーの内外層間にプラスチックの緩衝層を挿入している。これら 4 タイプにつき、機械的性質及び電気的性質の観点より評価した結果、D タイプが最も優れていることが判明した。そこで、今回のケーブルには D タイプを採用した。

今回製造したケーブルの特性を表 8 に示す。いずれの項目も設計品質を満足しており、特に重要な(1)破断荷重は約 $37 \times 10^3 \text{N}$ で目標 $32 \times 10^3 \text{N}$ を大きくクリア、(2)しごき回数は約 5 200 回で目標 5 000 回以上を満足している。

このケーブルを実際に東京大学海洋研究所新白鳳で使用した観測システムの例を図 7 に示す。ケーブルの末端に CTD（塩分、温度、深度）測定用センサーを取り付け、海洋に投下し、逐次その情報を得るものである。

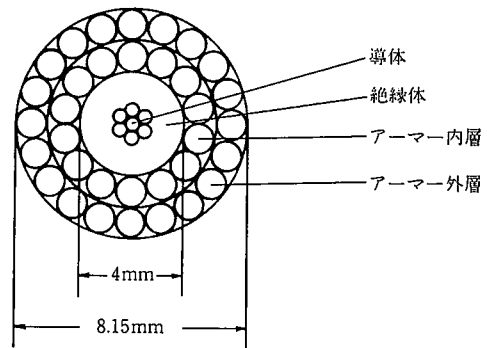


図 6 深海観測用ケーブルの断面図構造

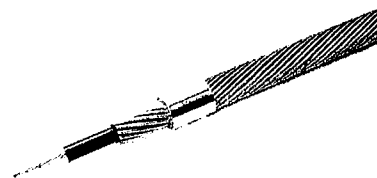


写真 1 深海観測用ケーブルの外観

表 7 試作ケーブルの構造と機械的試験結果

項目	タイプ	A	B	C	D
ケーブル構造	ケーブル芯	4芯	同軸	同軸	単芯
	アーマー内層	φ0.85mm	φ0.75mm	φ1.04mm	φ1.04mm
	緩衝層	無	有	無	無
	アーマー外層	φ0.65mm	φ0.75mm	φ1.04mm	φ1.04mm
試験結果	破断荷重(×10 ³ N)	28	28	39	35
	しごき回数	4 700	5 200	6 000	4 300~6 800
	ケーブル自転性	—	-280°/ton・m	-94°/ton・m	—

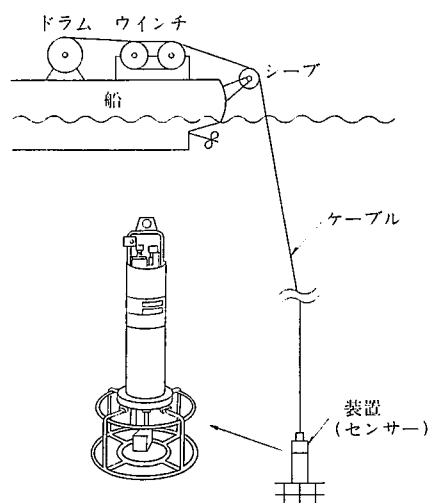


図 7 海洋観測方法(一例)

5. おわりに

チタンは海洋ケーブルのアーマー材（外装）として最適であるにもかかわらず、これまで加工が困難なため実用化されなかった。今回、古河電気工業㈱、鈴木金属工業㈱、新日本製鐵の三社が共同で、高強度β型チタン合金線の製造及びこれを用いたケーブルの製造に世界で初めて成功した。1993年12月に本ケーブルを使用して、世界で初めてフィリピン沖マリアナ海溝最深部チャレンジャー海淵にて、CTD（塩分、温度、深度）の測定が成功裏に行われたと報告されている²⁾。

今後、当初の目的である海洋観測以外にも石油等の海洋資源の調査や地震・地磁気観測等の広い分野での活用が期待される。

参 照 文 献

- 1) 村山芳昭 ほか：古河電工時報、(88)、119(1991)
- 2) 平 啓介：オーシャンフラックスニュースレター、(8)、3(1993)

表 8 深海観測用ケーブルの構造と特性の設計と実績

項 目	設 計 品 質	実 績
ケ ー ブ ル 構 造	導体（軟銅撚線）	φ0.45mm 素線×7本
	アーマー（Beta C）	φ1.04mm 素線×14本
		φ1.04mm 素線×20本
	外径(mm)	7.90～8.40
機 械 的 性 質	破断荷重(×10 ³ N)	32以上
	しごき回数	荷重14×10 ³ Nで往復5 000回に耐えることと
	自転性	150°/9 800N・m以下
	S字曲げ	往復3 000回以上
	耐水圧	11 770N/mm ² 以上
電 気 的 性 質	導体抵抗	17.0 Ω/km以下
	絶縁抵抗	1kmΩ・km以上
	絶縁耐力	D.C.1 000Vに1分間以上耐えること
	アーマー抵抗	約74Ω/km