

海洋開発，深海調査分野へのチタン材の適用 — 超深海10 000m への挑戦 —

Application of Titanium to Ocean Development — A Challenge to Waters of Depths to 10 000m —

山 本 昌 幸^{*(1)} 山 田 直 臣^{*(1)} 長 谷 泰 治^{*(2)}
Masayuki Yamamoto Naomi Yamada Taiji Nagatani

抄 録

海洋分野におけるチタンの適用は，これまでは比較的特殊な深海分野を中心に展開されてきたが，最近，一般船舶や漁業のような分野でチタンの利用が注目されるようになってきている。本報では，まず，海洋分野におけるチタン物性の利用の考え方と用途例を紹介し，つぎに，新日本製鐵が納入した超深海10 000m へ挑戦する無人探査機“かいこう”のビークル用耐圧容器とフレーム，及び東大海洋研究所“白鳳丸”の採水用ロープとCTD観測用ケーブルについて，それぞれの製造過程や品質などの概要を述べた。

Abstract

Hitherto, the application of titanium to ocean development has been limited to the projects in the deep sea under comparatively special conditions. In recent years, however, the application of titanium to such areas as general ships and fishery has been receiving wide attention. This paper describes the concepts underlying the effective use of the physical properties of titanium in ocean development, introduces some examples of titanium application, and outlines the manufacturing processes, quality, etc. of the pressure vessel and frame delivered by Nippon Steel for use with the 10 000m class unmanned research vehicle “Kaiko”, the water sampling rope for the research ship “Hakuho Maru” of the Ocean Research Institute of the University of Tokyo, and the cable for the observation of conductivity, temperature and depth (CTD).

1. 緒 言

海洋分野におけるチタンの利用は，歴史もあり幅広いものがあるが，それを大別すると次の三つに分類される。

- (1) 経済性よりもチタンの持つ性能（特に軽量，高強度）が評価される場合（深海調査，深海開発）
 - (2) チタンの持つ最も優れた特性である耐海水性が活用される場合（熱交換器，シュノーケル）
 - (3) 軽量，高強度，耐海水性に加え，更にそれ以外のチタンの持つ性能が多面的に利用される場合（漁礁，スクリュー，ライザー管）
- これまでは(1)の比較的特殊な深海分野を中心に利用されてきたが，最近一般船舶や漁業のような分野で，チタンの利用が注目されるようになってきている。以下，このような状況について，簡単に紹介する。

2. 海洋分野におけるチタン物性の利用の考え方と用途例¹⁾

2.1 複合物性の利用

海洋においては，チタンの三大特長（耐海水性，軽量，高強度）を複合的に利用する分野は極めて大きい。
組合せ別にみると，以下のようである。

(1) 三大特長の利用

ハイドロfoil等を利用して浮き上がって走行する高速艇の場合には，飛行機のイメージに近い特性要求となり，チタン合金の持つ高比強度が十分に利用される。超深海用CTD(Conductivity, Temperature, Depth)測定ケーブルは，比強度の点でチタンでのみ可能である。

(2) 軽量，強度の利用

耐圧殻，駆動軸は比較的肉厚で，負荷応力に耐える構造体であり，防食要求については余り厳しくないが，比強度の高いチタン合金が検討，使用されている。有人深海艇“しんかい6500”，無人深海探査機“かいこう”はその代表的な例である。

(3) 軽量，耐食性能の利用

応力が低く，肉の薄い構造では，ある程度の剛性は求められるが，前項ほどの高強度は求められない。有人深海艇“しんかい2000”や無人深海探査機“ドルフィン3K”等に実例がある。

2.2 耐食性能の利用

海水を冷媒とする熱交換器にチタンを使用することは，陸上の事情と同様である。温度の高い排ガスと海水の共存する潜水艦シュノーケルは，極めて強い腐食環境にさらされる構造であり，従来からチタンが使用されている。

^{*(1)} チタン部 部長代理

^{*(2)} 日鐵溶接工業(株) 課長(元 技術開発本部 鉄鋼研究所 接合研究部 主任研究員)

2.3 無毒性の利用

チタンは金属イオンの溶出しにくい優れた生体材料であり，医療，インプラントの分野での利用は知られているが，海生物の付着，及び寄生などを目的とした構造物（漁礁）などを検討する際に必要な特性である。実際に，チタンを海水中に浸漬した場合，多数の海生物の付着が観測されている。

2.4 非磁性の利用

チタンの非磁性の程度は，アルミニウムより若干劣るが，ステンレス鋼の1/10～1/100である。旧ソ連のオールチタン製潜水艦は，この特性を活用している。

2.5 表面滑り性の利用

堅固な酸化チタンに覆われているため，チタンの表面には異物が固着しにくい特性が見出されている。現在研究されているものに，滑雪性，氷結性，海生物の剝離性などがある。

2.6 低ヤング率の利用

最近，300m以上の海底から石油を掘削する際，プロダクションライザー（鋼製，外径254mm）との干渉防止の点より，ドリリングライザー（外径609.6mm）にチタン合金が採用されつつある。以上の内容をまとめて図1に示す。

3. 超深海に挑戦する新日本製鉄チタン製品

超深海10 000mのなぞに挑戦する新日本製鉄チタン製品実績を表1に示す。新日本製鉄製品がこの知られざる深海の世界を探索し，10 000mのふちから世界で初めてテレビ画像を送信するのに今後威力を発揮するであろう。以下，超深海10 000mのなぞに挑戦する新日本製鉄チタン製品について紹介する。

3.1 無人探査機“かいこう”ピークル用耐压容器及びフレーム

神秘に満ちた10 000m級の深海を最新のハイテク技術で本格調査しようとする目的で，海洋科学技術センターは無人探査機“かいこう”の開発を決定し，1993年に完成した。10Kサブシステムの構成を図

表 1 超深海10 000mの謎にチャレンジする
新日本製鉄チタン製品実績

	製品名	納入先	納入時期	観測実績
1	無人探査機“かいこう” ²⁾ ・ピークル用耐压容器 ・ピークル用フレーム	三井造船/海洋 科学技術センター	1992年 2月	1994年3月 マリアナ海溝 チャレンジャー海淵
2	海洋観測船“白鳳丸” ³⁾ ・CTD観測用ケーブル ・採水用ロープ	東京大学 海洋研究所	1991年 1989年	1992年12月 マリアナ海溝 チャレンジャー海淵 (10 966メートル)

2に示すが，“かいこう”の主目的は(1)深海の科学調査と，(2)有人深海底のトラブル発生時の救難である^{2,3)}。

“かいこう”はランチャー（水中発射台）とピークル（自航調査機，最大深度11 000m）とから構成されており，新日本製鉄はピークル用耐压容器及びフレームを製造した。写真1に“かいこう”の外観写真を示す。

3.1.1 耐 圧 容 器

耐压容器については，以前にTi-6Al-4V合金製で先行開発試験を実施した⁴⁾。その結果を踏まえ，更に各種改善を加えて今回製造を行った。製作容器としては，通信制御容器と電源容器の2個であるが基本的にはほぼ同一の仕様であった。表2に主要基本仕様を示す。製造に当たっては，寸法形状的に鍛造丸棒からの機械加工（削出し）とし，(1)大断面均質金属組織を得る鍛造方法と条件，(2)強度確保のための成分と熱処理方法，及び(3)高精度でミスのない機械加工方法に配慮して製造した。

(1) 製 造 工 程

図3に製造工程の概要を示す。

(2) 製 造 結 果

(i) 化 学 成 分

主要な成分を表3に示す。高強度を狙うため，Al，Vについては

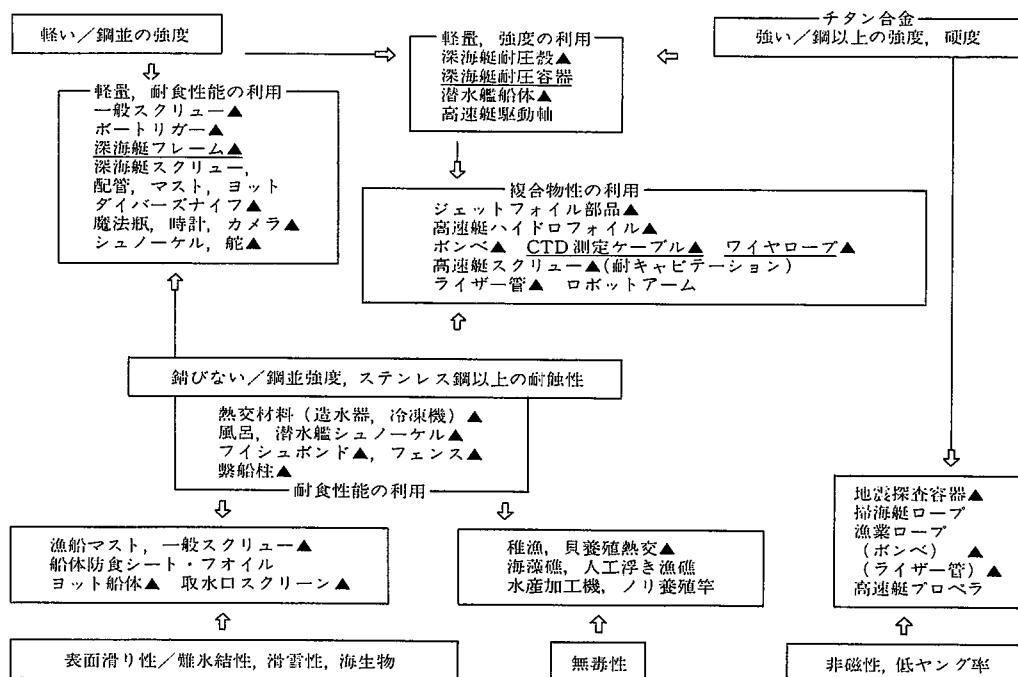


図 1 チタンの特徴，特性と用途（▲は実例，試験例あり）

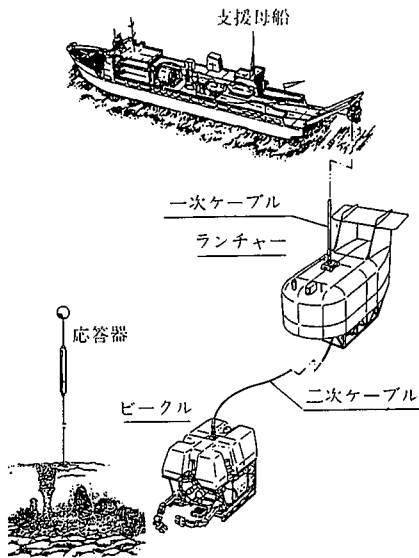


図 2 深海調査システム—10K サブシステム概念図

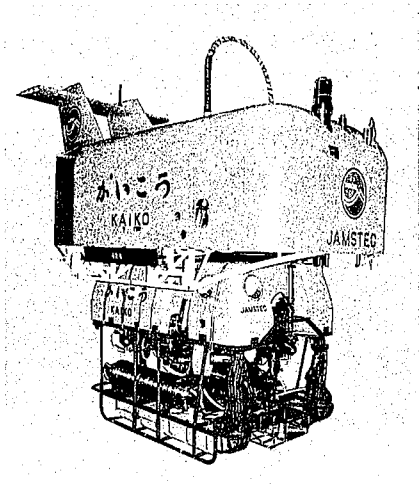


写真 1 “かいこう” 外観写真
(海洋科学技術センターの提供)

表 2 容器材基本仕様

・設計条件:	(1) 設計圧力	最大使用圧力	113.75 MPa
		圧壊圧力	147.77 MPa
	(2) 耐圧試験圧力		119.64 MPa
・容器材仕様:	(1) 材料	Ti-6Al-4V	
	(2) 0.2%耐力	835 N/mm ² 以上(目標 880 N/mm ² 以上)	
	(3) 引張強さ	880 N/mm ² 以上(目標 980 N/mm ² 以上)	
	(4) 伸び	10%以上	
	(5) 弾性係数	110 620 N/mm ² 以上	

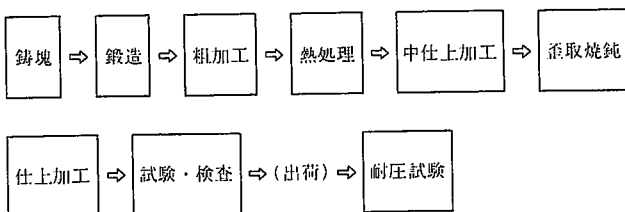


図 3 ビークル用耐圧容器製造工程の概要

表 3 耐圧容器材の化学成分 (主要元素のみ)
(単位 wt %)

区 分	Al	V	Fe	O	H
規 格 (AMS4928 準拠)	5.50 ～ 6.75	3.50 ～ 4.50	≤0.30	≤0.20	≤0.0125
実 績	6.44	4.13	0.14	0.19	0.0024

開発試験時より狙いを高く設定し，O については上限を狙いほゞ狙い通りの結果が得られた。

(ii) 鍛 造

鋳塊から直径約470mm の丸棒に鍛造し機械加工用とする必要があるが，組織微細化，径方向のみならず三次元方向のマイクロ組織均質性の確保のため，1)直径約830mm(5t 級) の大型鋳塊を使用し，又2)鍛伸のみでは減面率が約68%と小さいため，高温β域で据込みと鍛伸を繰り返した後で，微細均質な組織を得るためα+β域で鍛伸を行った。この場合，鍛伸途中と最終段階で等軸α晶の達成のための方法を織り込んだ(鍛造は日本鍛鋼㈱にて実施)。写真2に円筒胴相当部のマイクロ組織(熱処理後)を代表として示すが，その他の部位，方向においても同様に極めて均質で微細な組織が得られた。

(iii) 機 械 加 工

開発試験で得られた知見を生かし，段取りや治・工具選定等を効果的にを行い効率的な作業を行った。加工はすべてNC旋盤を使用した。一方，補修が許されないため，ミスの発生のない細心の作業を行った結果，表4に示すように極めて良好な寸法精度の容器が加工できた。写真3に加工完了後の耐圧容器の外観写真を示す。

(iv) 熱処理と材質特性

高強度確保のため熱処理としてはSTOA (940°C×2h WQ → 720°C×2h AC)処理を実施，この場合焼入れ時水冷開始までの遅れを最小にするため炉の改善を行った。歪取焼鈍は540°C×4h ACの条件で実施した。機械試験結果を表5に示すが均質かつ安定した結果が得られた。

(v) 耐圧試験

内質，表面関連の検査を終えた耐圧容器は，発注先である三井造船㈱に納入後，海洋科学技術センターの高圧水槽にて耐圧試験を実施，119.64MPaまで昇圧した結果，変形，水漏れ等発生せず11 550

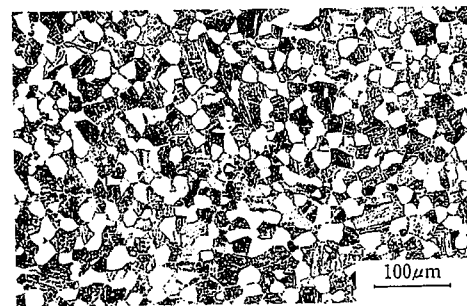


写真 2 円筒胴に相当する部分のマイクロ組織

表 4 代表的な部位の測定結果

部 位	項 目	基準値(mm)	公差(mm)	実 測 (mm)
胴 部	肉厚	30	±0.5	-0.05 ～ +0.15
	内径	φ 280	±0.5	+0.01 ～ +0.06
鏡 部	肉厚	35	±0.5	+0.01 ～ +0.07
	内径	φ 280	±0.5	-0.04 ～ 0
	高さ	168	±0.5	+0.01 ～ +0.03

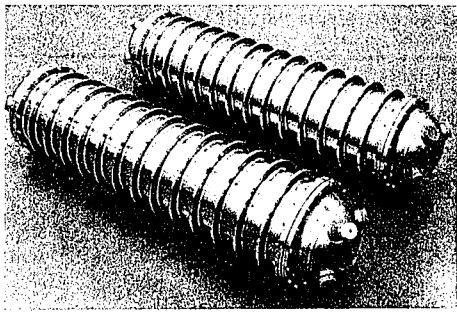


写真 3 耐圧容器外観 (胴長 1400mm)

表 5 機械試験結果

部位/方向	0.2%PS(N/mm ²)	T S(N/mm ²)	E1 (%)	RA (%) (参考)
電源用容器	893~947	963~1 003	11.8~16.6	28.1~37.0
電信制御用容器	905~949	979~1 009	12.8~16.2	30.1~36.0
仕 様	≥835	≥880	≥10	—

(胴・鏡を含む 3 軸方向 8 点の最小~最大値)

m 水深相当の深海に耐える容器であることが確認された。

3.1.2 フレーム

ピークルの運転性の面から軽量化が望ましいので部材の高強度化を要請され、部材には J I S 3 種及び A S T M Gr 4 の丸パイプ及び角パイプを用いた。なお溶接材料には継手性能として高強度が必要のため、当該工事に開発した TIX-80 を使用した。表 6 には TIX-80 の化学成分を、又、表 7 には溶接部の試験結果を示す。

溶接作業性は他の純チタンと同等で特に問題はなく、曲げ試験、継手引張性能も良好な値が得られた。製造工程の概略を図 4 に、表 8 に構成部材を示す。

フレーム本体の溶接は、健全な溶接部を得るために溶接施工技術管理者の管理の下にチタン溶接技術者がクリーンルーム (防風、防塵対策) 内で溶接作業を行い、更に大気との遮断を完全に行うために、バックシールド及び各溶接箇所には、溶接構造に合わせたシー

表 6 TIX-80 の化学成分 (wt %)

使用材料	銘 柄	寸法(mm)	O	N	Fe	C	H	Ti
母 材	TIX-80	20t	0.21	0.05	0.50	0.014	0.0006	REM
溶接材料	TIX-80	1.6φ	0.20	0.05	0.54	0.014	0.0023	REM
溶接金属			0.29	0.042	0.51	0.014	0.002	REM

表 7 溶接部の試験結果

試 験 項 目	溶接金属の評価
溶接金属化学分析	H : 0.002%, N : 0.042%
硬さ試験	Hv : 251~281
マクロおよびミクロ組織	健全な組織
短ゲージ引張試験	σ_s : 718N/mm ²
衝撃試験	$vE_{20^\circ C}$: 40J
曲げ試験 (表曲げ, 側曲げ)	ローラー曲げ (R=5t) 良好

表 8 構成部材

構成要素	部 材 数			溶 接 数	
	材 質	形 状	延べ数	継手数	延べ長さ
フレーム本体	ASTM Gr4	□40 φ40	40.6m 21.9m	226	36.66m
	JIS 3 種	□40 φ40	15.4m 15.7m		
	Ti-6Al-4V	板	24.3kg	24	5.44m
機器取付金物 (204個)	JIS 2 種	□, 板 φ, L	428個	523	54.88m
合 計				773個	96.98m

ルド治具を多数工夫し活用した。又、継手部の継手性能と寸法精度の確保のために低入熱と低いパス間温度条件で溶接した。又、定盤上に各ブロック拘束組立を行い、溶接歪を防止するために対称交互溶接を励行した。組立状況を写真 4 に示す。狭い箇所の多い部分の溶接は、溶接部のシールドを完全にするために、写真 5 に示すチャンパー内に溶接部を挿入後、真空に引き、Ar ガスを封入し、溶接を行った。

完成フレームの外観写真を写真 6 に示す。寸法公差及び総重量はいずれも基準値 (表 9 参照) を満足し、良好な組立精度が得られた。材質結果も表 10 に示すごとく十分要求仕様を満足した。

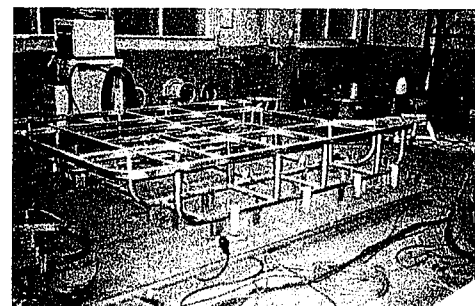


写真 4 組立状況

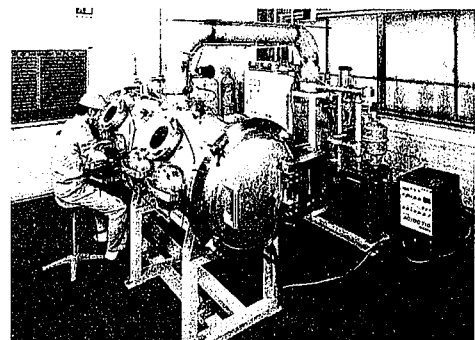


写真 5 チャンパー内溶接状況

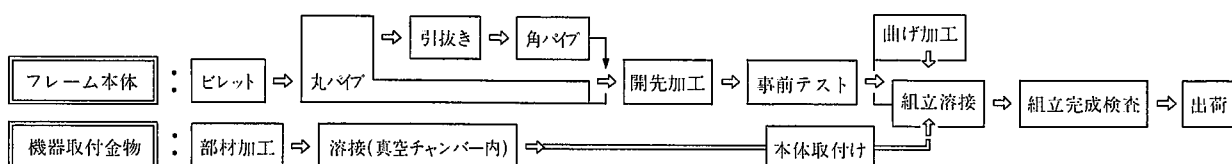


図 4 製造工程の概略図

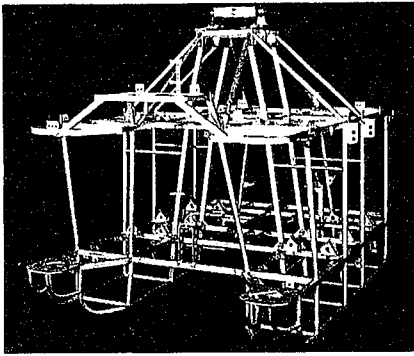


写真 6 完成フレームの外観写真

表 9 寸法公差および総重量

部 位	基準値(mm)	公 差(mm)	実 測(mm)
高 さ	2 130	± 4	-0.5~+1
幅	2 000	± 4	-4~-1
長 さ	2 750	± 4	-2~-0
重 量	予想 250kg		247kg

表 10 主要材質製作結果

	0.2%耐力(N/mm ²)	引張強さ(N/mm ²)	伸び(%)
規 格	≥483	≥550	≥15
母 材	520	686	20
溶接継手強度	—	657	—

(1) 主要部材角パイプ特性の一例 (ASTM B348 Gr4 相当) 40×40×13

3.2 東大海洋研究所“白鳳丸”採水用ロープと

C T D 観測用ケーブル

1988年に完成した東京大学海洋研究所の白鳳丸(3 987トン)には世界で初めて深海用長尺チタンワイヤロープとチタン合金製アーマーカーケーブルが採用され，新日本製鐵グループ(ロープ：鈴木金属工業㈱—新日本製鐵，ケーブル：古河電気工業㈱—鈴木金属工業㈱—新日本製鐵)で製造納入した⁵⁾。

3.2.1 採水用チタンロープ

表11にチタンロープの仕様を示す。

(1) 製造工程

図5に製造工程の概要を示す。

(2) 製造結果

(i) ワイヤロープ寸法

ロープ径6.51mm(1.15mmφ素線, 3×7構成)で製造し，撚り方向としては下撚りにはS撚りを，上撚りにはZ撚りを採用した。

(ii) ワイヤロープの化学成分と機械的性質

素材としては，高強度純チタン(ASTM Grade 4相当)を採用した。表12にワイヤロープの化学成分を，表13に素材の機械的性質を示す。完成したワイヤロープの破断強度は24 320N(要求仕様23 500

表 11 チタンロープ仕様

項 目	規 格 値
1. ロープ外径(mm)	6.40+0.26, -0
2. ロープ構成(素線径)	3×7 (φ1.15mm)
3. 撚り方向(上撚り/下撚り)	Z撚り/S撚り
4. 撚りピッチ	ロープ外径の9~12倍
5. 引張強度(N)	23 500 以上
6. 一条の長さ(m)	12 000 以上

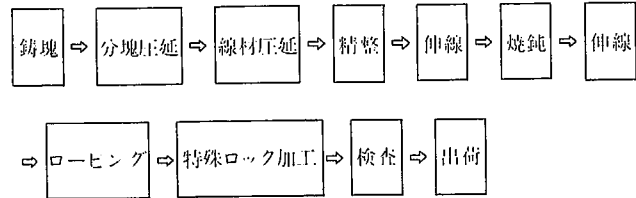


図 5 チタンワイヤロープ製造工程概要

表 12 ワイヤロープ化学成分 (単位 wt %)

区 分	O	Fe	N	H	備 考
規 格	≤0.40	≤0.50	≤0.050	≤0.0125	ASTM Grade 4
実 績	0.35	0.43	0.004	<0.01	相当

表 13 機械的性質

区 分	線 材 (φ6.0)				線 (φ1.15)
	0.2%PS(N/mm ²)	TS(N/mm ²)	El(%)	RA(%)	TS(N/mm ²)
目 標	≥480	≥550	≥15	≥25	≥1 180
実 績	627~677	755~794	28~33	44~51	1 333~1 451

N以上)であり仕様を満足した。

(iii) その他の特性(鈴木金属工業㈱測定結果)

ロープの持つ特性としては，荷重が掛かったときの自転によるキンクの発生とシーブとの擦れによる耐久性の評価が必要である。今回前者の対策としては撚り構成及びロック加工により，ロープの自転性を極くわずかなプラス回転(ロープがしまる方向の回転)に制御した。図6に自転性試験結果を示す。後者に対しては，ワイヤ表面の酸素侵入層の残存がシーブによる耐疲労特性を劣化させるため，今回材は中間段階で表層部を完全除去の上，無酸化膜加工により製造した。その結果，図7に示すような良好なシーブ耐久試験結果が得られた。

なお，ワイヤロープの製造については，鈴木金属工業㈱と新日本製鐵の共同で実施した。

3.2.2 C T D 観測用チタン合金ケーブル

軟銅撚線を導体とし，高強度β型合金であるTi-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr(通称Beta C)ワイヤをアーマーとする12 000mのケーブルを古河電気工業㈱，鈴木金属工業㈱及び新日本製鐵の3社共同で製造した⁶⁾。詳細内容については，別項に譲るためここでは省略する。

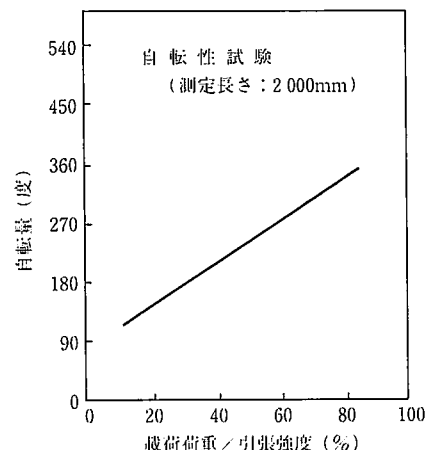


図 6 自転性試験結果 (測定長さ: 2 000mm)

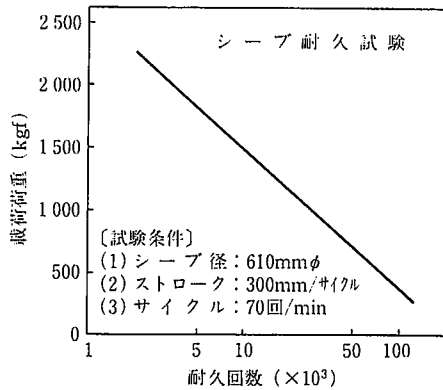


図 7 シーブ耐久試験

4. 結 言

太平洋に弧状に連なるマリアナ諸島。その南端グアム島から南にさらに320km 進んだ地点に世界の最深部チャレンジャー海淵がある。水深はおよそ11 000m といわれている。

新日本製鐵チタン製品を主要部品とする日本の“かいこう”は、

新聞報道によると1994年3月10 909m の最深部に到達した(3月28日 NHK テレビ放映)。技術シンボリックな製品であり数多く世に出るものではないが、関係者のロマンをくすぐったことは確かである。海洋国日本にとって、海洋の利用はますます多様化すると共に平面的利用から立体的利用へと利用構造も高度化、複合化が進展するものと予想される。これらの分野からのニーズの高まりに、チタンがいかに対応し、大規模開発プロジェクトにいかに関与できるかにより、チタンに対する需要構造も大きく変革することになる。

チタンが主要材料としてその地位を確保するには、この分野への参入が肝要であろう。

参 照 文 献

- 1) 酒井和夫：チタニウム・ジルコニウム. 37(3), 3(1989)
- 2) 藤井弘道：第21回白石記念講座. (1991) 31
- 3) Takagawa, S.: Proc. 3rd Japan International SAMPE Symposium. (1993), 1, 1
- 4) 藤井秀樹, 山本昌幸, 小林雅志：チタニウム・ジルコニウム. 37 (2), 21(1989)
- 5) 平 啓介：海洋. 号外 No.5 188(1993)
- 6) 東京大学海洋研究所ニュースレター “オーシャンフラックス” (8), 3 (1993)
- 7) 村山芳明, 土屋 桂：古河電工時報. (88), 119(1991)