

## 救難・事前調査装置用 大深度光・電気複合ケーブルの試作

服部 陸男\*<sup>1</sup> 吉田 和生\*<sup>2</sup> 青木 太郎\*<sup>1</sup>  
野本 昌夫\*<sup>1</sup> 高橋 賢一\*<sup>1</sup> 金子 喜一\*<sup>1</sup>

有人潜水調査船「しんかい6500」の救難と事前調査のために必要な、救難・事前調査装置（10,000 m級無人潜水機）の1次ケーブルとして使用される、光・電気複合高強度ケーブルの試作を行った。ケーブルの試作のための仕様は、全体システムの概念設計の結果に基づき決定した。試作したケーブルは、外径45 mm、シングルモード光ファイバ4本、電線3本、ケブラ2重外装等で構成され、目標仕様は、破断強度40トン以上、耐圧1,500 kg f / cm<sup>2</sup>、送電容量80KVA（6,600V）以上、耐用時間7,500時間（又は10年間）等である。試作したケーブルについて、電気特性試験、機械的強度試験、耐圧試験等を行った。その結果は、上記の仕様を満たすものであり、1次ケーブルに関しては、無人潜水機の製作に必要な基本的要素技術をほぼ確立出来た。なおランチャーとビークル間の2次ケーブルについては設計のみを行った。

キーワード：光・電気複合ケーブル，10,000 m級無人潜水機，救難・事前調査装置

## Evaluation of an Experimental Optical — Electro — Mechanical Cable for 10,000 m Diving ROV, 「10K」

Mutsuo HATTORI\*<sup>1</sup> Kazuo YOSHIDA\*<sup>4</sup>  
Taro AOKI\*<sup>3</sup> Masao NOMOTO\*<sup>3</sup>  
Ken — ichi TAKAHASHI\*<sup>3</sup> Kiichi KANEKO\*<sup>3</sup>

A deep submergence ROV 「10K」 which is capable to operate depth up to 10,050

\*<sup>1</sup> 深海開発技術部

\*<sup>2</sup> 三井造船(株) (前深海開発技術部)

\*<sup>3</sup> Deep Sea Technology Department

\*<sup>4</sup> Mitsui Engineering & Shipbuilding Co. Ltd.  
(Formerly Deep Sea Technology Department)

m is now under designing by JAMSTEC. The vehicle is planning to develop for rescue and pre-site surveys of the manned submersible "Shinkai 6500" and scientific surveys depth up to the bottom of the deepest trench. An experimental optical-electro-mechanical cable for the vehicle was designed, built and tested prior to the detail design of the vehicle. Because the cable is one of the most important subsystems for ROV and it is most important to verify the mechanical, electrical and optical design of the cable.

The main specifications of the cable are 45 mm in diameter, breaking strength more than 40 tons, endurance time more than 7,500 hours (or 10 years). The cable is composed of 3 main conductors (more than 80KVA, 3  $\phi$ , 60Hz, 6,600V), 4 single mode optical fibers, Kevlar strength members and other materials.

It was confirmed that the performance of the cable was exceeded specifications and the design of the actual cable was determined.

**Key word:** deep submergence ROV, 「10K」, optical-electro-mechanical cable

## 1 はじめに

海洋科学技術センター（以下センターという）は、現在世界最深の潜航深度（6,500 m）を有する有人潜水調査船システム，“しんかい 6500”（以下“6.5K”という）と支援母船「よこすか」の開発を行っており、このシステムは、1990年4月にセンターに引き渡され、その後運用訓練を行う予定である。救難・事前調査装置（以下「10K」という）は、“6.5K”の万一の遭難の場合の救難と事前調査及び単独での大深度（10,050 m）までの科学調査を目的として開発される、ランチャー（中継機）方式の有索自航式無人潜水機である。現在、世界で最も深く潜航出来る有索自航式無人潜水機は、イギリス海軍の TUMS（6,000 m）、Eastport International Inc.（米国）の GEMINI II（6,000 m）及びウッズホール海洋研究所の Argo/Jason（現在 4,000 m、最終的に 6,000 m）等であり、カナダでも 5,000 m 級が 2 台製造されている。これらのビークルは、TUMS 以外は、光ファイバ通信を 1 部または全面的に使用している。ただし、ケーブルは、スチールの 2 重外装方式がほとんどで、強度メンバーとして、我が国で既に実用化されており、ここで報告する「10K」の試作ケーブルでも採用しているケブラを使用しているケーブルでの（GEMINI II の

予備ケーブルはケブラを使用しているが）深海での使用実績は報告されていない。

光ファイバケーブルを世界で最初に実用化したのは、KDD（株）、目黒研究所の MARCAS<sup>1)</sup> であり、小型ビークルに実用化したのは、センターのホーネット-500<sup>2)</sup> である。

センターにおける無人潜水機用の光ファイバケーブルの研究は、1981 年より開始された。それは、光ファイバ通信のもつ、信号の減衰の少ないこと、広い信号帯域、電磁波による無誘導性等に着目したためと、光ファイバ自身は耐圧性が高く、また、光ファイバ通信を採用することによりケーブルが細く出来ること等、無人潜水機に採用するメリットが高いことによる。まず、光ファイバ自身の耐圧性を確認するため、G.I.（グレイデッドインデックス）型光ファイバ数種、シングルモード光ファイバ数種の耐圧試験を行った。これらの試験により、シングルモード光ファイバすべてと G.I. 型の何種類かは 1,200 kg f/cm<sup>2</sup> まで加圧してもほとんど光の減衰が無いことが確認出来た。また、市販の G.I. 型光ファイバでも 600 kg f/cm<sup>2</sup> 程度までは減衰がほとんど無いことが確認出来た。

現在センターで実用に供している、3,300 m 用無人潜水機「ドルフィン-3K」も、長さ 5,000

m, 直径 30 mm の光ファイバケーブルを実用化している。「ドルフィン-3K」のケーブルの試作試験は 1982 年に行った。その後も引き続き、ケーブルの製造者である藤倉電線(株), 「ドルフィン-3K」システムの建造者である三井造船(株)とセンターの 3 者で共同研究を行い, 1986 年 4 月には, 試作した長さ 5,000 m のケーブルを海域で試験し, 水深 3,300 m まで吊り下げて光の減衰がなく, 十分実用になるケーブルであることを確認した。1987 年 8 月に「ドルフィン-3K」システムを受領後, 上記の試作ケーブル(予備品として購入)と新しいケーブルとを交替で使用して来た。運用訓練<sup>4)</sup>の後, 運航部に引き渡され, その後ケーブル引留部付近でケブラの強度の低下が認められ, 改造を行ったほかは, 実用上支障無く運用してきており, 1989 年 10 月で 58 潜航, 滞水時間は約 250 時間となった。しかし, 実用上支障なくても若干の改良を要する点が運用経験を通して見いだされたので, ケーブルのトルクバランス, ケーブル外部シースの強度等の改良や予備ケーブルの一部を解体してのケーブル寿命の推定等を目的として, 現在新たな設計のケーブル開発を上記 3 者の共同研究として行っている。「ドルフィン-3K」用の新旧 2 つのタイプのケーブルの比較は, 別の機会に報告するが, この新しいケーブルは, 1990 年 4 月には海域試験後「ドルフィン-3K」に使用する予定である。ケーブルの強度メンバーとして, 比較的新しい素材であるポリエステル樹脂含浸により強化したケブラの性質が, これらの経験により明らかとなり, これから述べる「10K」のケーブル設計, 試作試験にも生かされた。

「ドルフィン-3K」のケーブルの試作試験は, 有索自航式無人潜水機における, ケーブルの重要さと, 技術的困難さを考慮して, 建造計画の初年度に行い, あらかじめ基礎的技術を確立し, 実用化の見通しを立てることが出来た。「10K」のケーブルでも同様に, 最初に解決すべき要素技術として取り上げ, センターの特別研究として, 1987~1988 年度にかけて先行的な試作試験を行った。ここでは, 概念設計に基づいた「10K」の概要と, 試作した 1 次ケーブルの仕様, 実施した各種試験のうち主な試験の内容, 試験結果及び

設計のみを行った 2 次ケーブルについて報告する。

## 2 「10K」の概要

センターが, 1987 年より約 6 年計画で開発を進めようとしている「10K」は, “しんかい 6,500 システム”の一環として, 以下のミッションを有する。

(1) “6.5K”は, 万一の遭難の場合, 深海曳航方式による外部救難装置を有するが, 更に安全を期して, 「10K」は, 搜索, 発見, 観察し, 必要な場合, 絡んだロープ, ワイヤ等の切断, 海底堆積物に拘束された “6.5K” の解放(地切り)等を行う。

(2) 曳航調査

“6.5K”潜航のための事前調査として, 水深 6,500 m までの曳航による広域調査を行う。ランチャー単独またはビークルを搭載して, サイドスキャンソナー, サブボトムプロファイラ, CTD, スナップショット TV または超低照度 TV による調査を行う。また, ビークルが, ランチャーと分離して, 曳航されるランチャーに追尾し, 上記の調査と平行してビークルのカラー TV カメラ, スチルカメラ等による調査を行う。

(3) 自航調査

ランチャーからビークルが発進し, 主としてビークルにより最大水深 10,050 m (状況が良ければ 10,924 m の世界最深部まで) の海底調査, マニピュレータによる資料採取や測器の設置, 回収等を行う。

表 1 に「10K」の基本仕様を, 図 1 に「10K」システムの概念図を示す。

## 3 「10K」用試作ケーブルの仕様

「10K」用 1 次ケーブルは, ビークル, ランチャーへの電力の供給, 光ファイバによる信号伝送そしてビークル, ランチャーの巻き上げ, 巻き降ろし及び曳航索の役割をする。さらに “6.5K” 救難時には, 潜水船を吊り上げて地切りを行う。このため, ケーブルには, 対水抵抗を減らすため, 出来るだけ外径が細いこと, さらに高強度でかつ自身の水中重量が荷重に対する安全率を低下させるほど重くないこと等厳しい条件が課せら

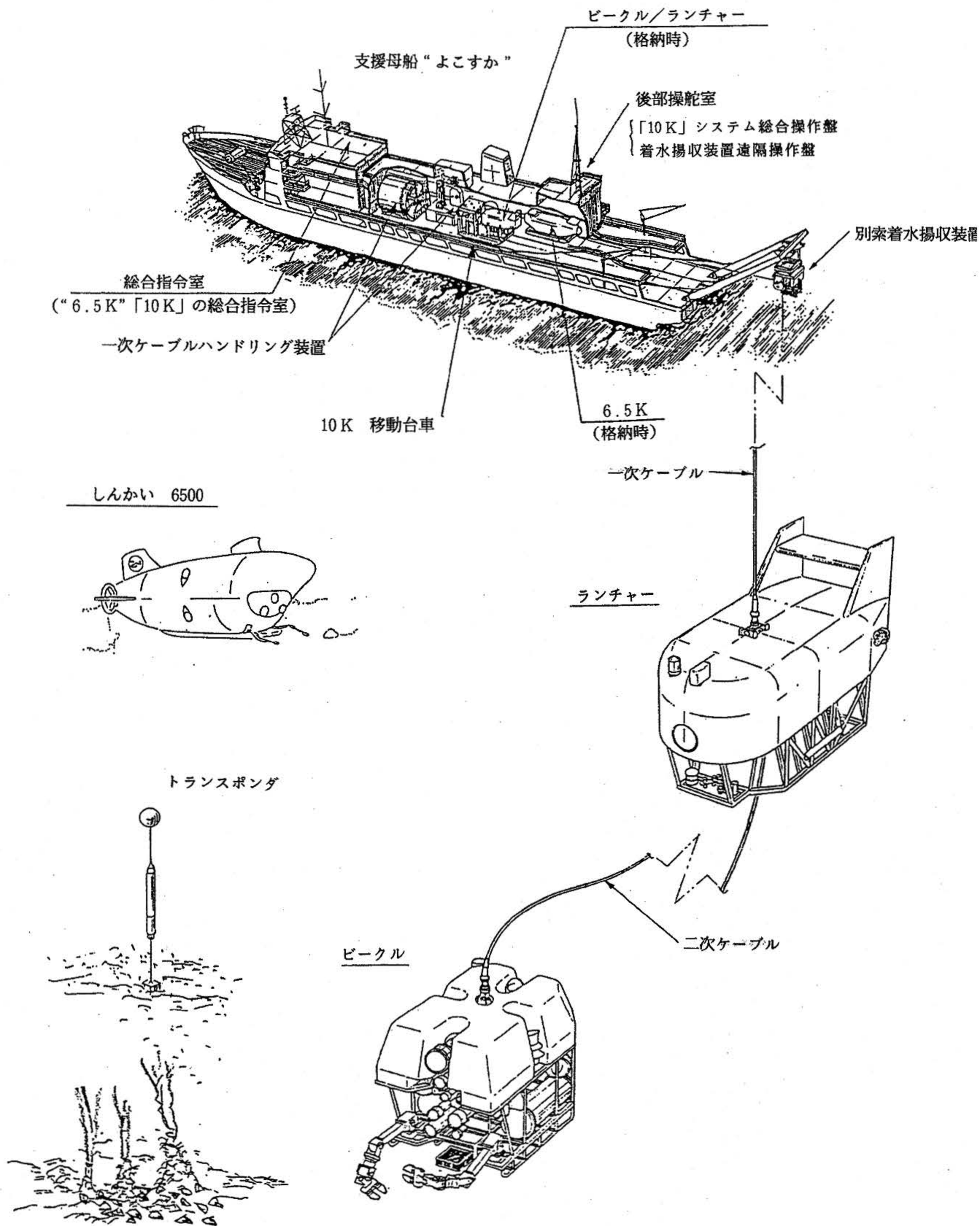


図1 「10K」システム 概念図  
 Fig.1 Concept of 「10K」 system

表1 救難・事前調査装置（「10K」）の基本仕様

Table 1 Principal specifications of 「10K」 for pre-site surveys and rescue of "Shikai 6500"

(1)	型式；	有索中継方式（ランチャー方式），曳航，自航式																																									
(2)	最大使用深度；	10,050m（ただし，曳航調査は6,500m）																																									
(3)	主要寸法	ビークル ランチャー																																									
		ビークル，ランチャー，ランチャードッキング装置を別途示す移動台車に搭載，移動可能なこと。																																									
(4)	重量	空中重量：ビークル，ランチャー 各5トン以下 水中重量：ビークル+ランチャー+一次ケーブル ≤ 8トン																																									
(5)	速力	ビークル前進速力：2ノット以上，全方向からの1ノットの流れに対し自動位置保持 ランチャー曳航速力：最大2ノット（目安）																																									
(6)	推進装置	ビークル：スラスタ8台（最大），ランチャー：スラスタ2台（最大）																																									
(7)	主要搭載機器	<table border="0"> <thead> <tr> <th>ビークル搭載機器</th> <th></th> <th>ランチャー搭載機器</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>①マニピュレータ（7自由度）</td> <td>2台</td> <td>①TVカメラ（白黒）</td> <td>1台</td> </tr> <tr> <td>②TVカメラ（放送局級カラー）</td> <td rowspan="4">} 5台以上</td> <td>②サイドスキャンソナー</td> <td>1台</td> </tr> <tr> <td>③TVカメラ（カラー，白黒）</td> <td>③サブボトムプロファイラー</td> <td>1台</td> </tr> <tr> <td>④ステレオ，スチルカメラ</td> <td>④スナップショットTVカメラ</td> <td>1台</td> </tr> <tr> <td>⑤前方障害物探査ソナー</td> <td>⑤前方障害物探査ソナー</td> <td>1台</td> </tr> <tr> <td>⑥方位探知ソナー</td> <td>1台</td> <td>⑥SSBL受波器</td> <td>1台</td> </tr> <tr> <td>⑦高度ソナー</td> <td>1台</td> <td>⑦CTD（ビークルと積みかえ可）</td> <td></td> </tr> <tr> <td>⑧深度計</td> <td>1台</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>⑨ドップラーソナー</td> <td>1台</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>⑩救難装置</td> <td>1式</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	ビークル搭載機器		ランチャー搭載機器		①マニピュレータ（7自由度）	2台	①TVカメラ（白黒）	1台	②TVカメラ（放送局級カラー）	} 5台以上	②サイドスキャンソナー	1台	③TVカメラ（カラー，白黒）	③サブボトムプロファイラー	1台	④ステレオ，スチルカメラ	④スナップショットTVカメラ	1台	⑤前方障害物探査ソナー	⑤前方障害物探査ソナー	1台	⑥方位探知ソナー	1台	⑥SSBL受波器	1台	⑦高度ソナー	1台	⑦CTD（ビークルと積みかえ可）		⑧深度計	1台			⑨ドップラーソナー	1台			⑩救難装置	1式		
ビークル搭載機器		ランチャー搭載機器																																									
①マニピュレータ（7自由度）	2台	①TVカメラ（白黒）	1台																																								
②TVカメラ（放送局級カラー）	} 5台以上	②サイドスキャンソナー	1台																																								
③TVカメラ（カラー，白黒）		③サブボトムプロファイラー	1台																																								
④ステレオ，スチルカメラ		④スナップショットTVカメラ	1台																																								
⑤前方障害物探査ソナー		⑤前方障害物探査ソナー	1台																																								
⑥方位探知ソナー	1台	⑥SSBL受波器	1台																																								
⑦高度ソナー	1台	⑦CTD（ビークルと積みかえ可）																																									
⑧深度計	1台																																										
⑨ドップラーソナー	1台																																										
⑩救難装置	1式																																										
(8)	着水揚収装置	<table border="0"> <tbody> <tr> <td>①ケーブルストアウインチ，トラクションウインチ，ラムテンション等</td> <td>1式</td> </tr> <tr> <td>②ランチャードッキング装置</td> <td>1式</td> </tr> <tr> <td>③移動台車</td> <td>1式</td> </tr> </tbody> </table>	①ケーブルストアウインチ，トラクションウインチ，ラムテンション等	1式	②ランチャードッキング装置	1式	③移動台車	1式																																			
①ケーブルストアウインチ，トラクションウインチ，ラムテンション等	1式																																										
②ランチャードッキング装置	1式																																										
③移動台車	1式																																										
(9)	ケーブル	<table border="0"> <tbody> <tr> <td>①1次ケーブル</td> <td>長さ約13,000m，</td> <td>外径45mm以下，</td> <td>破断強度40トン以上</td> </tr> <tr> <td>②2次ケーブル</td> <td>長さ約250m，</td> <td>外径35mm以下，</td> <td>破断強度9トン以上</td> </tr> </tbody> </table>	①1次ケーブル	長さ約13,000m，	外径45mm以下，	破断強度40トン以上	②2次ケーブル	長さ約250m，	外径35mm以下，	破断強度9トン以上																																	
①1次ケーブル	長さ約13,000m，	外径45mm以下，	破断強度40トン以上																																								
②2次ケーブル	長さ約250m，	外径35mm以下，	破断強度9トン以上																																								
(10)	コントロール／表示装置	「よこすか」後部操舵室に配置																																									

れる。ケーブルに対する主要な条件は、以下のとおりである。

- (1) 約 13,000 m のケーブルを通して大電力伝送、大容量のデータ通信を行えること。
- (2) ケーブル外径は出来るだけ細く、高強度で耐水圧性があり、内部シース内は浸水しても海水が伝わらないこと。
- (3) ケーブルの捩れや回転が発生しにくいよう、

良くトルクバランスがとれており、内部構造も均一なこと。

- (4) ケーブル化による光ファイバの伝送損失、ケブラ等の強度メンバーの残留歪みが極力少ないこと。
- (5) 船上の着水、揚収装置を通過する際のしごきに対し耐久性を有すること。
- (6) ランチャーの引き留めは、捩れを局部的に

表2 「10K」用試作ケーブルの仕様

Table 2 Specifications of the experimental cable for 「10 K」

項 目		規 定 値
構 成	1. 電力線 (1) 定格電圧 (2) 送電容量 (3) 電圧低下率	A. C. 6600V 80KVA, 3φ, 60Hz 13,000m 長にて10%以下
	2. 光線心 (1) 線心数 (2) 種類 (3) 伝送損失	4 本以上 シングルモード (2%スクリーニング) 0.2dB/km以下 (波長 1.55μm)
	3. 接地用線心	2 心
	4. 抗張力体 (1) 破断強度 (2) 弾性率 (3) 破断伸度 (4) 比重	100kg/mm <sup>2</sup> 以上 6,400kg/mm <sup>2</sup> 以上 2.5%以下 2 以下
	5. 外径	40mmφ以下
性 能	1. 耐用時間 2. 破断強度 3. 最小曲げ直径 4. 比重 5. 光伝送損失	7,500 時間 (又は10年間) 40トン以上 1,350mm 以下 2 以下 (又は4トン/13,000m以下) 機械試験時のロスの変動が 0.1dB/km以下

受けない構造とし、振れをケーブル上部に分散すること。また引き留め強度は、ケーブルの破断強度以上とすること。

以上を基本的条件として、概念設計の結果を参考にし、使用電圧、所要電力、支援母船、ケーブル、ビークルの運動シミュレーションに基づく必要ケーブル長、ケーブル張力等を勘案し、種々のケースについて得失を検討した後、表2に概要を示す仕様を決定した。ただし、この試作試験は、「10K」のケーブルの本格的な設計、製造に必要な基本的データの収集、製作技術の確立及び試験を通じて新たに見いだされるかも知れない問題点を明らかにし、実機用ケーブルの設計、製作に必要な技術的見通しをつけるために行ったもので、今後の詳細設計の結果や技術の進歩等により、仕様や細かな設計の変更は十分有り得ることである。なおケーブルの構造、製造法等の検討には、すでにケブラー49外装の光・電気複合ケーブルを開発した大谷他<sup>6)</sup>、村山他<sup>6)</sup>も参考とした。

図2に試作したケーブルの断面を、また構成を表3に示す。架橋ポリエチレンの内部シースの内側には、電力用電線3芯、シングルモード光ファイバ4芯を内蔵した光ファイバユニット1本、接地線2本がより合わされており、空間は水密コン

パウンドにより充填され、均圧構造となっている。内部シースの外側には、強度メンバーのケブラー49の2重外装が施され、最外層は、ポリプロピレンの編み組で、外径45mmとなっている。光ファイバユニットは、シングルモード (SM10/125) 光ファイバ4本が、それぞれ潤滑油入りのナイロンチューブ内に入り、この4本のナイロンチューブは鋼線の回りに巻かれている。これらは、ナイロンジャケット内に収められ、プラスチックコンパウンドにより空間が充填され、均圧構造となっている。このケーブル構造、構成を決めるに当たり最も留意したことを以下に示す。

- (1) 内部シースの構成要素が強度的に均一なこと、不均一だとケーブルをしごくに従い、内部構成が乱れたり、極端な場合ケーブルにうねりが生じたりする。
- (2) 光ファイバユニットの内部に空間が残されていないこと、空気等が残っていると外圧を受けたとき、光ファイバにマイクロベンディングが生じて光損失の原因となる。
- (3) ケブラー49は、強度を増すためポリエステルを含浸させているが、その結果折れと曲げに極端に弱くなっている。特にケーブル引留部付近では、折れと曲げが集中しやすいので、

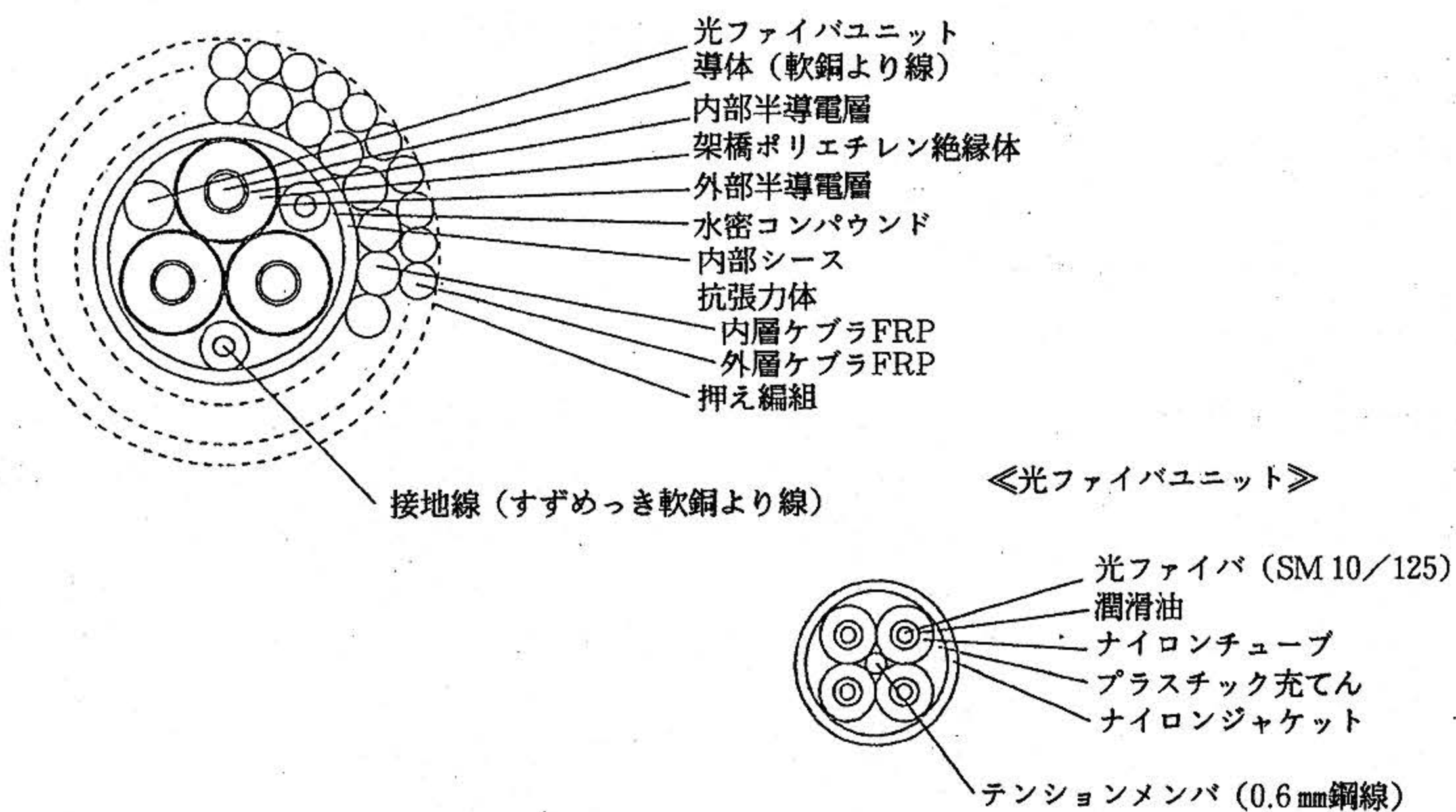


図2 一次ケーブル断面図  
 Fig.2 Cross Section of the primary cable

表3 試作ケーブルの構成

Table 3 Construction of the experimental cable

項 目		動力線心	光ファイバ線心	接地線心
線 心 数		3	4	2
線 心	光ファイバ			
	モードフィールド径 ( $\mu\text{m}$ )	—	10	—
	クラッド径 ( $\mu\text{m}$ )	—	125	—
	ユニット外径 (mm)	—	4.8	—
導 体	公称断面積 ( $\text{mm}^2$ )	6	—	1.4
仕 上 り 外 径 (約mm)		45		
概 算 重 量 (kg/km)		1,550		
水 中 重 量 (g/m)		307		
性	耐 電 圧 試 験 (V/分)	17,000/10	—	—
	導 体 抵 抗 (20℃) ( $\Omega/\text{km}$ )	3.18 以下	—	16.3以下
	絶 縁 抵 抗 (20℃) ( $\text{M}\Omega\text{-km}$ )	2,500以上	—	—
能	光 伝 送 損 失 $\lambda = 1.55\mu\text{m}$ (dB/km)	—	0.2以下	—
	ケ ー ブ ル 破 断 張 力 (トン)	40 以上		

十分分散させる対策を施す。またケブラー49のポリエステルを含浸させたロッドの外径が大きくなると、含浸強化したロッドのままではケーブル化が困難なばかりでなく、残留応力のためトルクバランスが悪くなる。したがって、「10K」のケーブルの様に強度が要求され、ケブラー49のロッドが大きくなる場合は、ケーブル化してのち、ポリエステルを熱硬化させる必要がある。この熱硬化法には、ケーブル全体を製造した後、2度熱処理する住友電気工業

(株)の方式とケブラ巻き付け中に熱硬化させる方法が考えられる。この試作試験では、後者の方法を採用した。

以上の点に注意して、ケーブルを試作し、各種試験を行い、評価した。

#### 4 試作試験

試作試験として以下の検査、試験を実施した。なお試作ケーブルの設計、試作及び試験は、藤倉電線(株)に発注した。

- (1) 構造検査
- (2) 材料検査
- (3) 電気特性試験
  - ①絶縁抵抗測定試験
  - ②耐電圧試験
  - ③導体抵抗測定試験
  - ④温度上昇測定試験（負荷試験）
- (4) 光ファイバ特性試験
  - ①光ファイバ素線の2%伸びスクリーニング（13,000 m以上一連長で製作）
  - ②ケーブル化後の光伝送損失測定試験
- (5) 疲労試験
  - ①引張り破断試験
  - ②繰返し振り曲げ試験
  - ③引張り，繰返しS字曲げ試験
  - ④耐水圧試験
  - ⑤繰返し引張試験
  - ⑥張力振動試験
- (6) ケーブル張力回転測定試験

ここでは、上記のうち主要な試験について報告するが、他の項目も仕様を満足した。

#### 4.1 温度上昇測定試験（負荷試験）

ケーブルに通電すると、発生するジュール熱により導体の温度が上昇する。計算によって選定した導体サイズが、所定の送電容量で通電したときに、温度上昇に問題が無いか確認するために、試験を実施した。この検討及びケーブル化後の負荷状態での確認が十分でないと、ケーブル温度上昇により、ウインチに巻いたケーブル内部で最も熱に弱い部分が劣化しあるいは溶ける危険がある。この許容温度は、約90℃である。またこの試験のもう1つの重要な目的は、導体最

高許容温度における送電容量を算出することで、これにより「10K」システムに供給可能な最大送電容量の見当をつけることが可能となる。

試験に使用した回路図を図3に示す。ケーブル長は120 mで木製ドラムに3層巻きされている。通電電流は、送電容量を80KVA（3φ，60Hz）、受電電圧を6,000Vと想定し、7.7Aとした。温度計測は、散水冷却した場合と、しない場合の両方について行った。

試験結果を図4に示す。散水冷却をしない場合、通電開始後5時間で周囲温度に対する温度上昇がほぼ飽和した。このときの周囲温度との温度差は、2.9℃であり、周囲温度が45℃でもケーブルの許容温度（90℃）を越えることはないと推定される。

また、散水冷却（散水量400l/時間）した場合、通電後2.5時間で水温に対する温度上昇がほぼ飽和した。このときの水温に対する温度上昇は、1.5℃であった。

上記の7.7A通電では、温度の上昇が少ないため、多層巻き時の電流低減率を算出するには誤差がおおきすぎた。そのため、より大電流を流して、試験を行い低減率を算出した。

この結果に基づき、試作ケーブルの最大送電容量及び電圧降下を再計算した(表4)。すなわちドラムに5層巻で、表2に示した設計条件である電圧降下率が10%となるときの送電容量は、冷却無しの際の周囲温度40℃または散水するときの水温32℃という厳しい条件のときに92KVAであり、散水する水の水温、ケーブルの冷却効率次第では相当の容量の送電が可能となる見通しがついた。

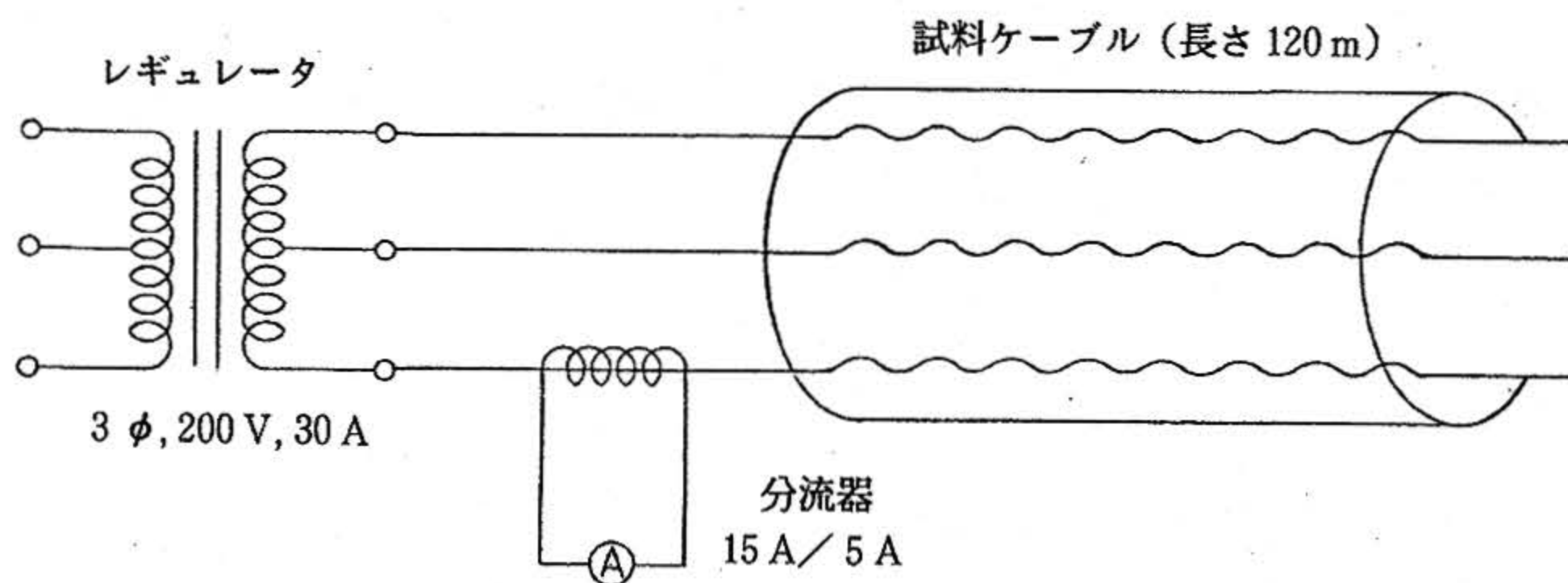


図3 温度上昇測定試験回路図

Fig.3 Circuit of the cable temperature measurement

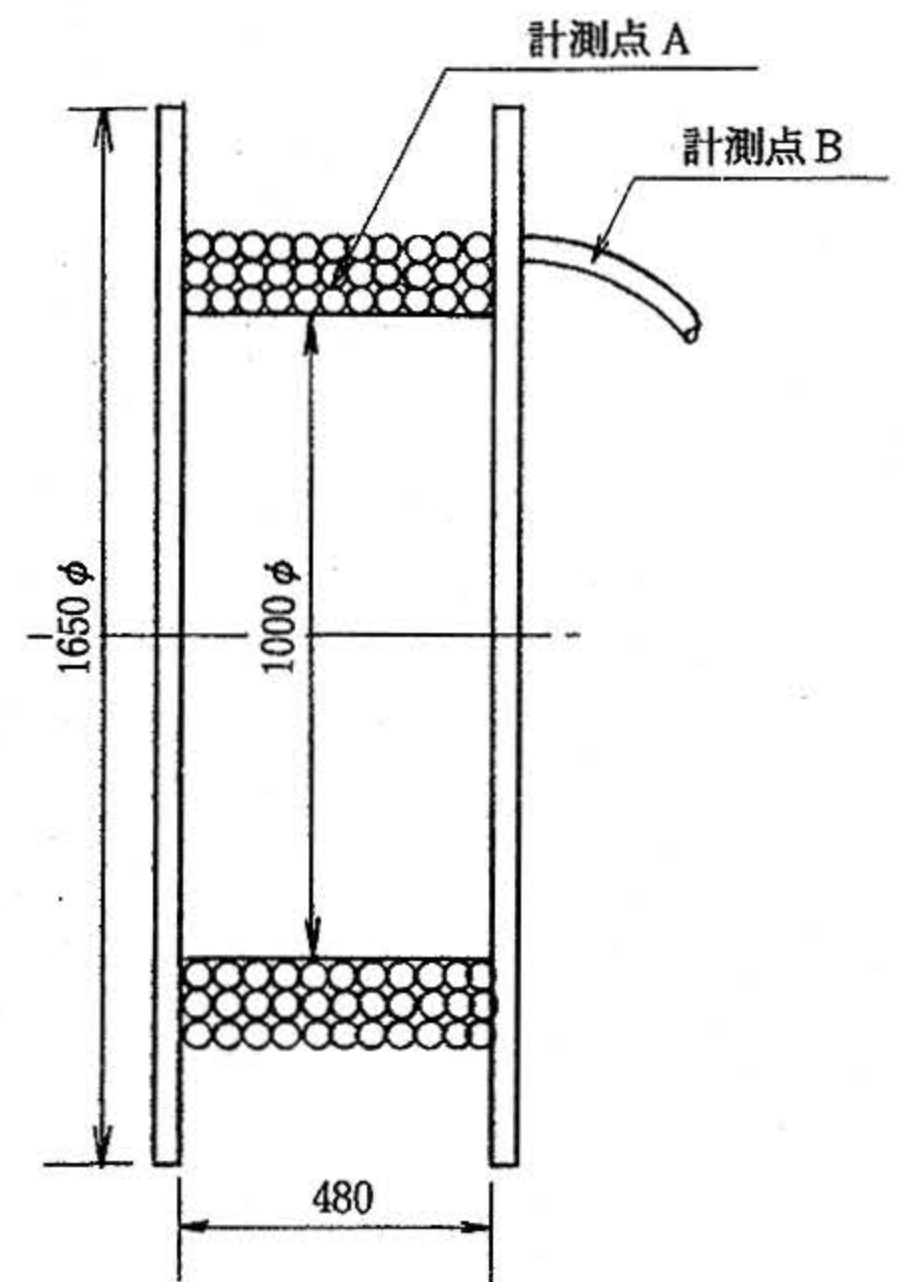
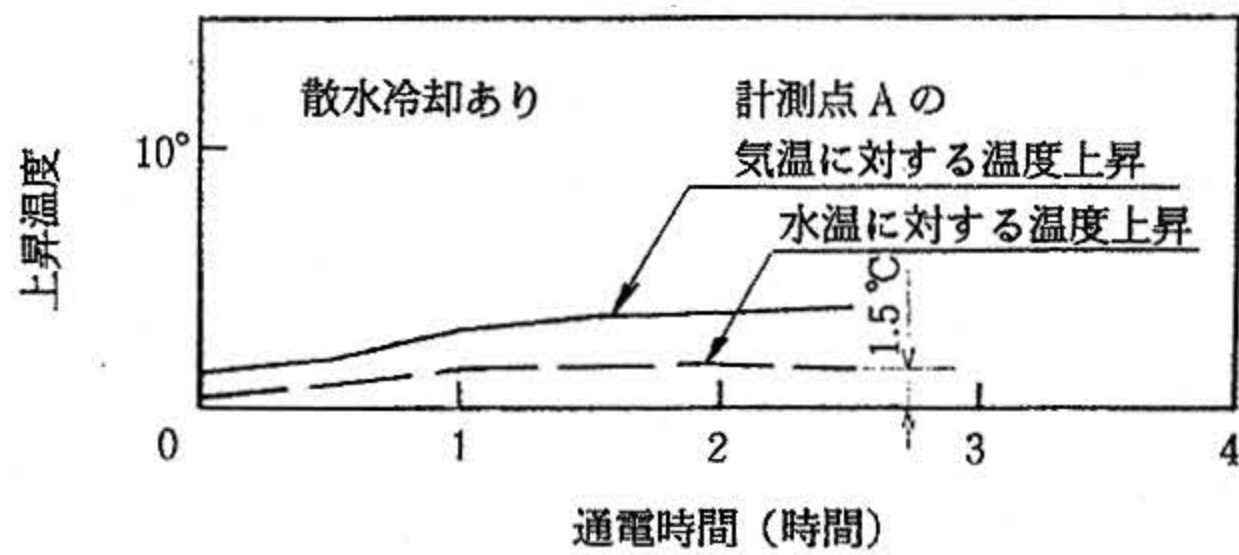
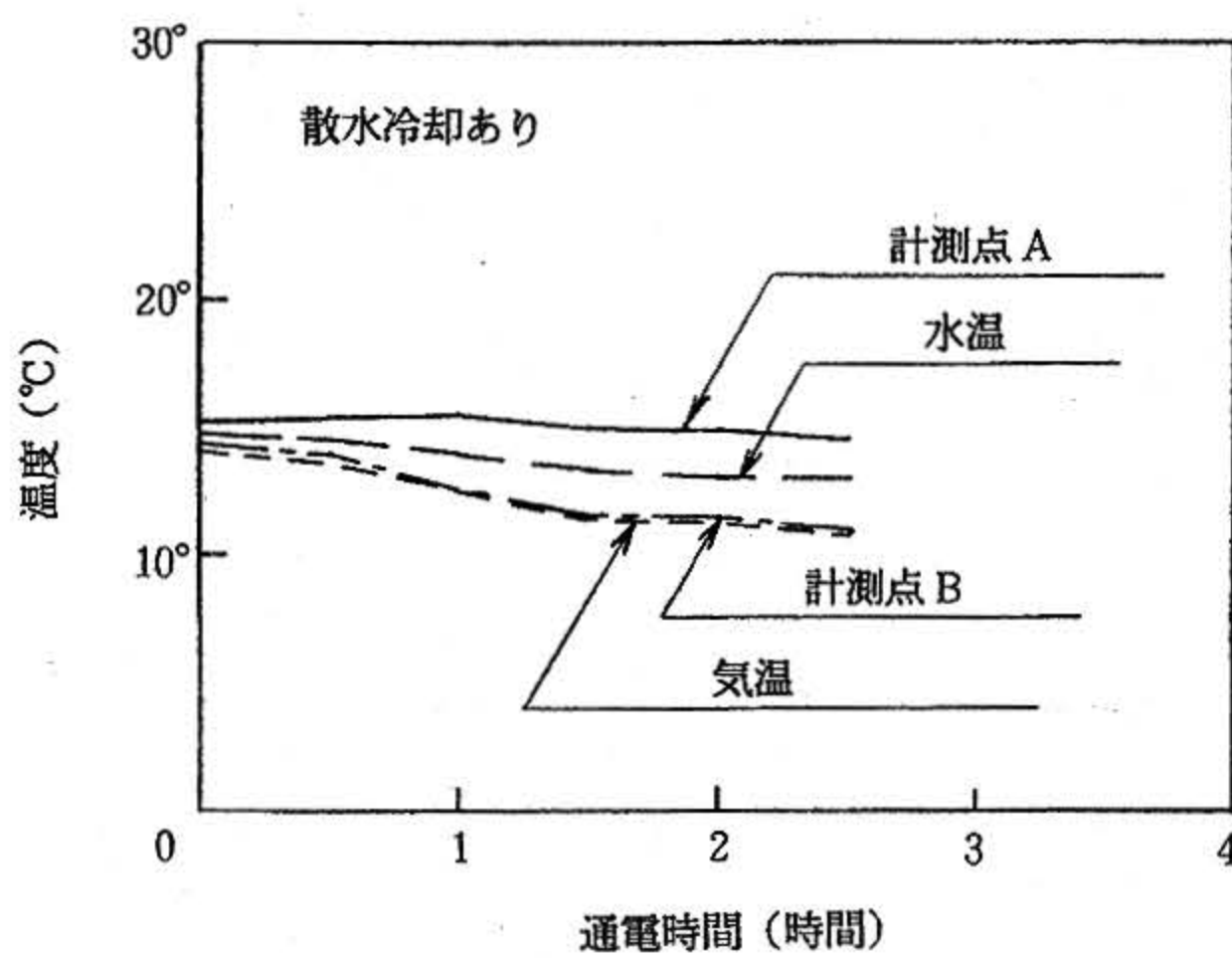
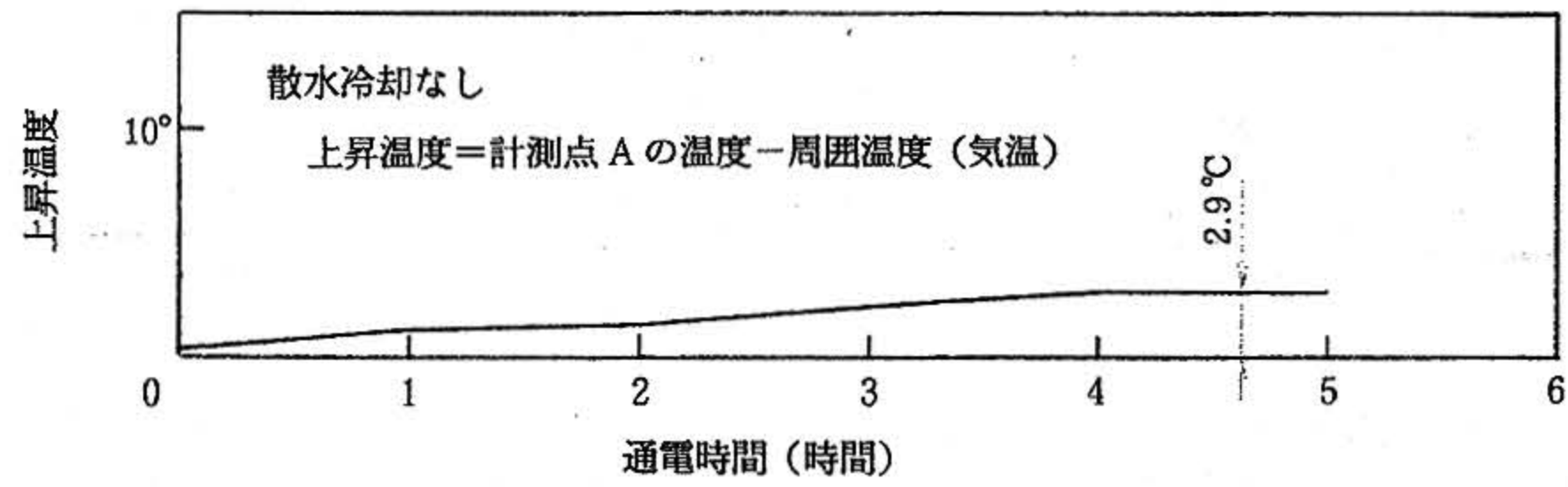
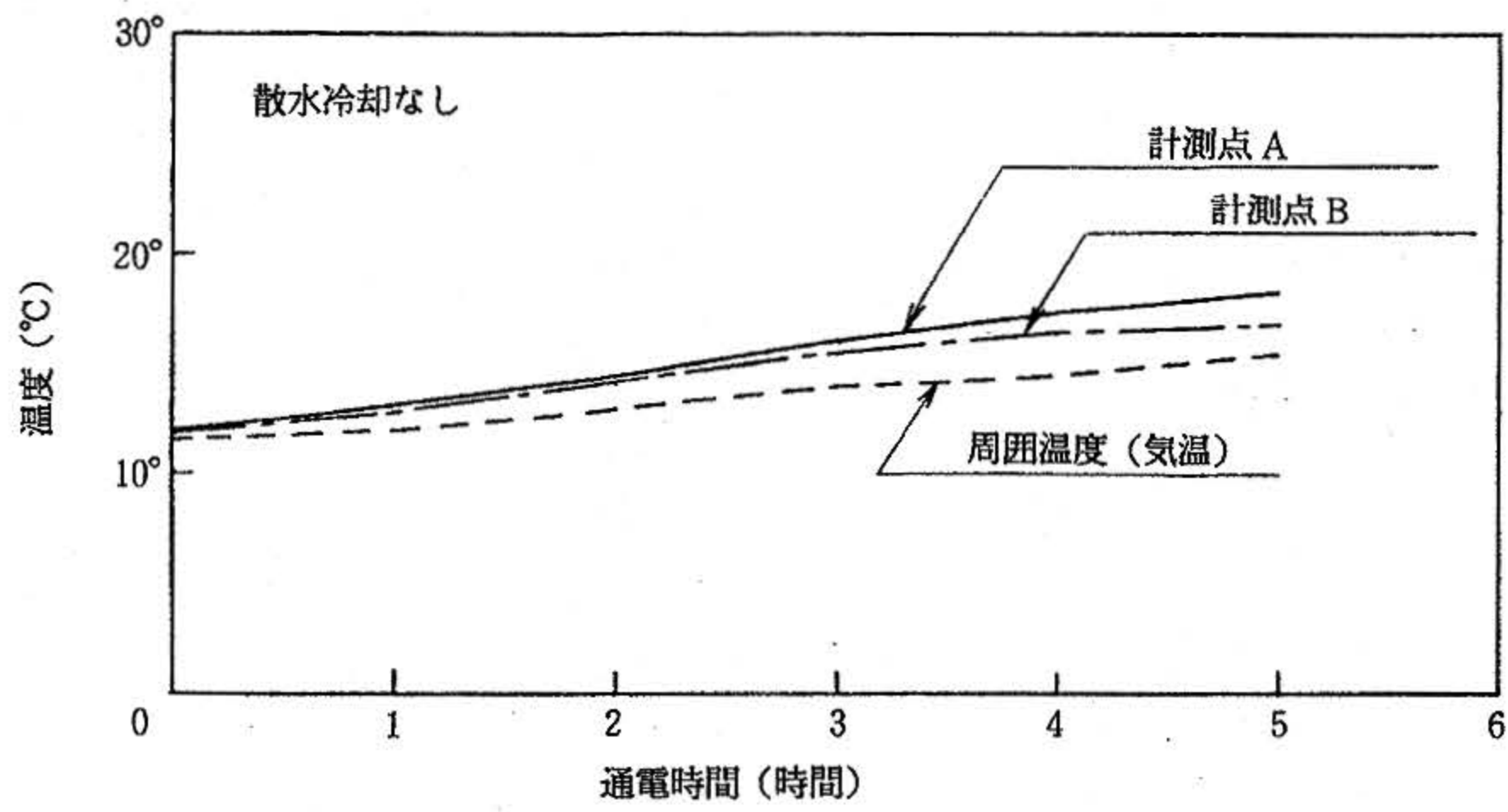


図4 温度上昇測定試験

Fig.4 Results of the cable temperature measurement

表4 電流低減率のまとめと電圧降下計算結果

Table 4 Summary of the current reduction ratio and calculated voltage drop

		ドラムに3層巻いたとき		ドラムに5層巻いたとき	
		冷却なし	散水あり	冷却なし	散水あり
多層巻き時の電流低減率		0.4	0.8	0.3	0.7
導体最高許容温度における送電容量 (KVA) *		186	400	139	350
80 KVA 送電 時	導体の温度上昇値 (°C)	8.1	1.9	14.7	2.5
	電圧降下 (V) **	507.0	482.0	518.1	483.4
	電圧降下率 (%)	8.5	8.0	8.6	8.1
電圧降下率が 10%となる とき	電流値	9.1	9.5	8.9	9.5
	送電容量	94	98	92	98

\* 冷却なしのときの周囲温度 : 40°C  
散水ありのときの水温 : 32°Cで計算

\*\* 力率  $\cos\phi = 0.8$  と仮定

#### 4.2 引張り破断試験

長さ約8mのケーブルの両端に試験用引き留め金物を取り付け、引張り破断試験を行った。写真1に試験の状況を示す。試験は、6本の試料について行った。6本の内1本は、張力41トンで破断したが、残りの5本は、47~51トンで、ケーブル部で破断した。41トンで破断した試料は、引き留め部近傍で破断しており、引き留め部内での加工処理不良によるものであろう。なおケーブルの伸びは、張力20トンまで計測したが、1.3%であり、規格値の40トンでは約2.5%と推定される。また、光ファイバの伝送損失の変動は、破断直前まで0で、0.1dB/km以下と規定値を満足した。

#### 4.3 繰返し振り曲げ試験

ケーブル部及び引き留め金物部の繰返し振り曲げに対する耐性を知るため、振り曲げ試験機に長さ約5mの試料ケーブルを取り付け、繰返し振り曲げ試験を行った(写真2)。

試験条件を以下に示す。

- (1) 振り角 : ±30度
- (2) 屈曲角 : ±45度
- (3) ケーブル張力 : 4トン
- (4) 繰返し回数 : 10万回

上記の条件で試験を行ったが、ケーブル部及び試験用引き留め金物に破断、亀裂などの異常は、生じなかった。また、試験終了後、ケーブルの解体調査を行ったが、外観、抗張力体、導体等に異常は見られなかった。

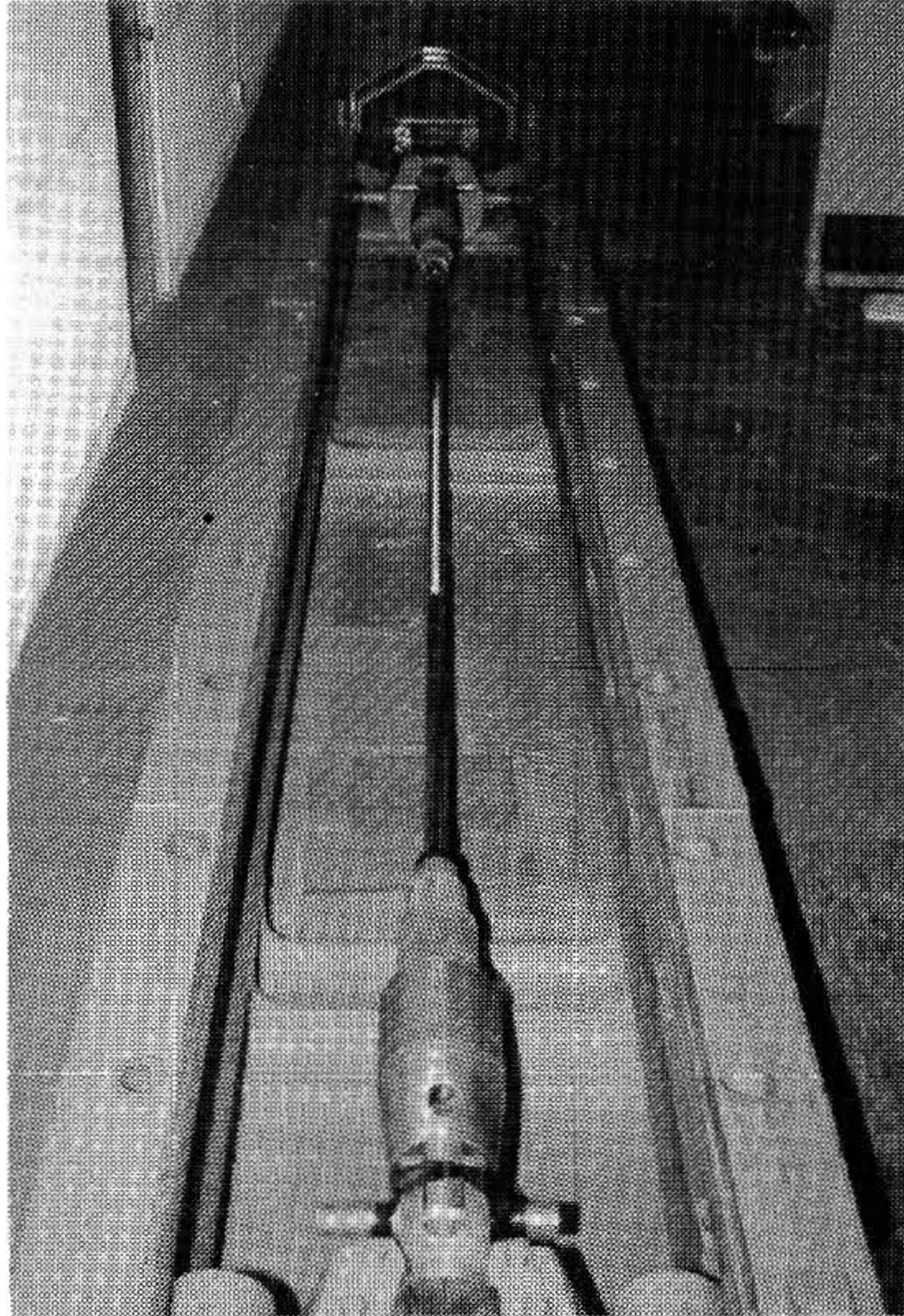


写真1 引張り破断試験  
Photo 1 Breaking test of the cable

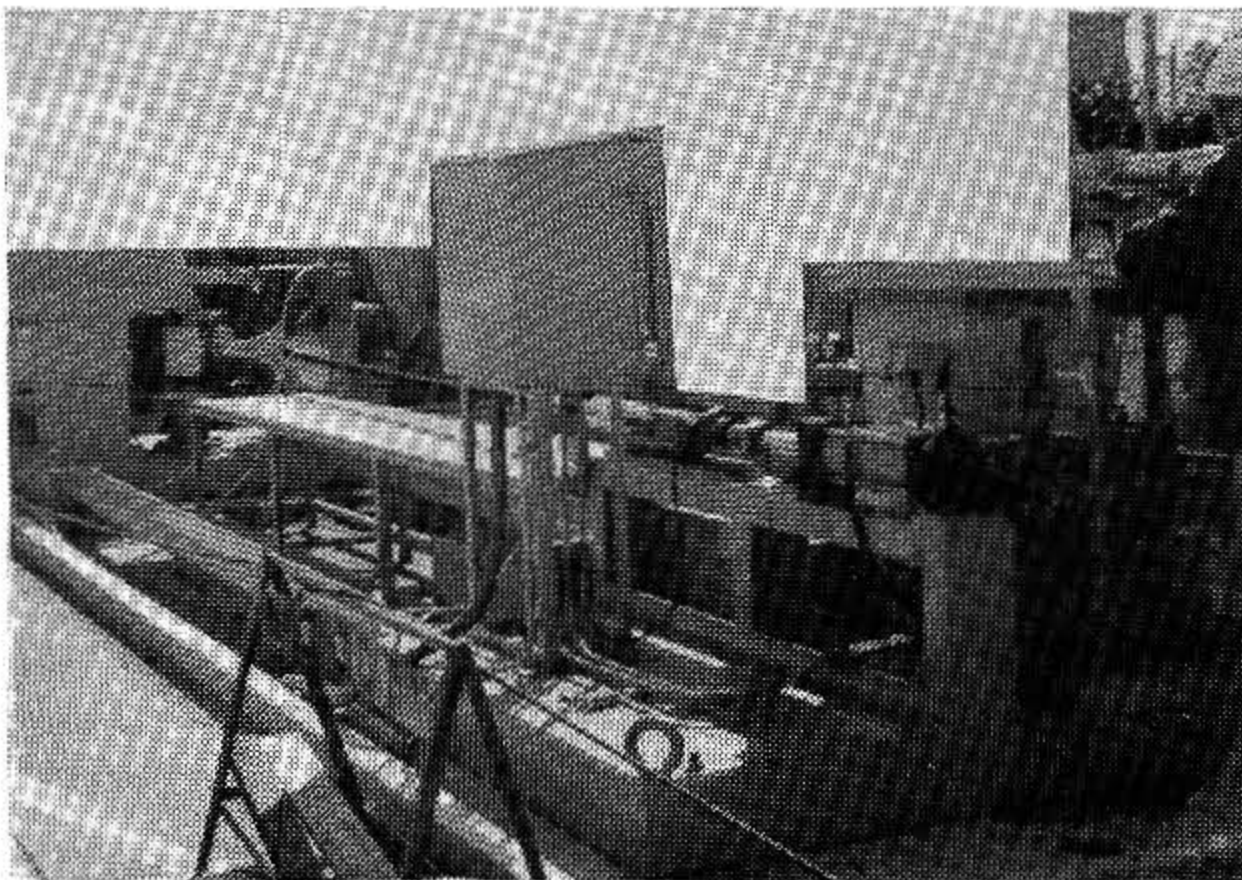


写真2 捻り曲げ試験機  
Photo 2 Equipment of the cable torsion bending test

#### 4.4 引張り繰り返しS字曲げ試験

ケーブルがシープを通過し、曲げしごきを受けるときの特性を知り、ケーブルの耐用時間を推定するため、写真3に示すS字曲げ試験機を使用し、引張り繰り返しS字曲げ試験を行った。試験条件を以下に示す。

- (1) プーリー径：1 m

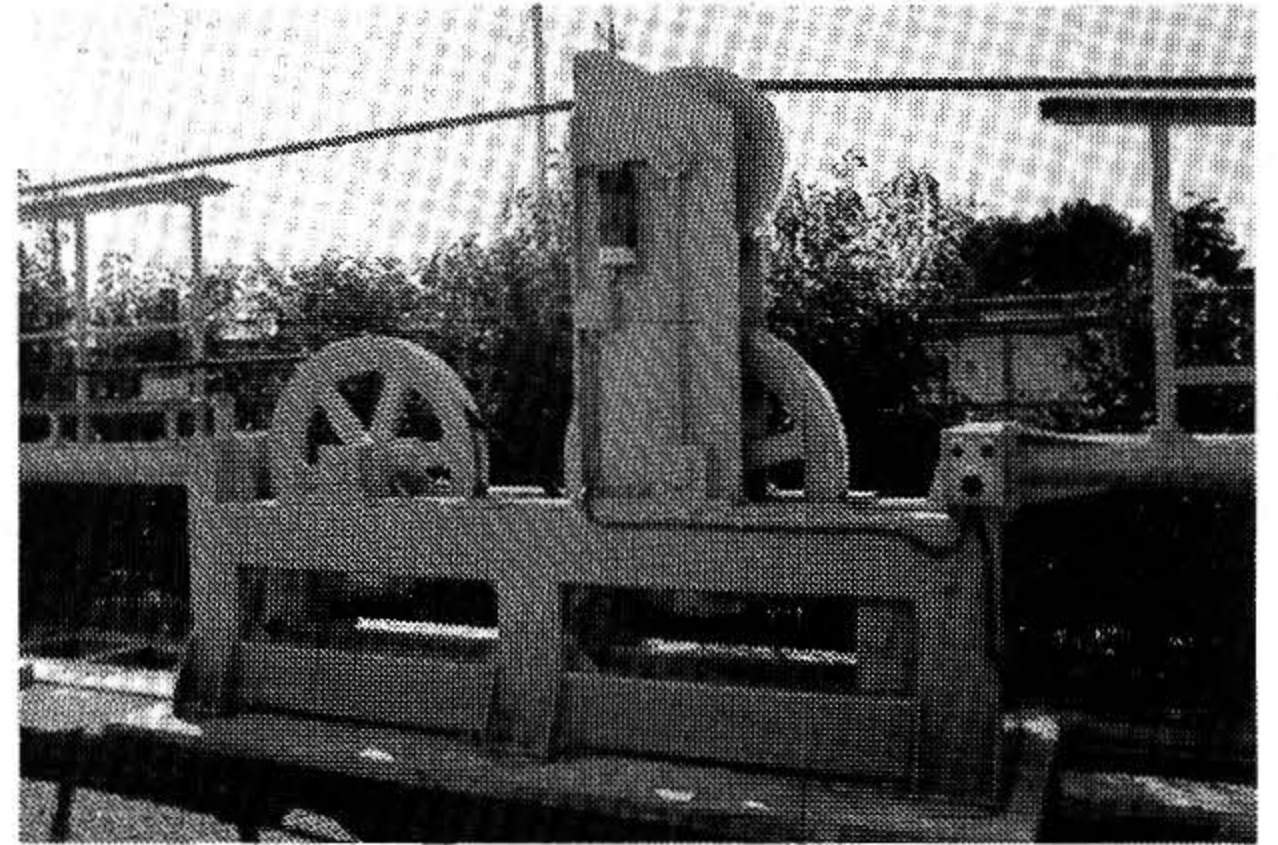


写真3 S字曲げ試験機  
Photo 3 Equipment of S-bending test

- (2) プーリー中心間距離：1.5 m  
(3) 試料ケーブル長：9 m  
(4) 引張りストローク長：4 m

試験は、3本のケーブル試料を使用し、それぞれの試料に張力10,15,20 トンを加え、最も弱い接地線が切れて導体抵抗が変化した状態を異常とみなし、そのときまでの繰り返し回数を計測した。試験結果を図5に示す。これより、実際のケーブルに作用すると想定される側圧12 トン/m (実機用に想定しているシープ径1.35 m、張力8 トン、すなわち8 トン/0.675 mと同じ値) に対する寿命サイクル数は、約20万回と外挿され、規定値の10万回を越えている。なお試験後、ケーブル外観、引き留め金物部とも異常は認められなかった。

#### 4.5 耐水圧試験

耐水圧試験は、写真4に示すように、センターの高圧実験水槽を使用して行った。ケーブルは、両端末で4本ずつの光ファイバ線芯のみを水槽外に取り出し、2本ずつシリーズに融着接続し、一方を光伝送損失測定用としてパワーメーターに接続させ、他方を光損失分布測定用にOTDR (Optical Time Domain Reflectometer) に接続させた。試験条件を以下に示す。

- (1) ケーブル長：198 m  
(2) 試験圧力：1,500Kgf/cm<sup>2</sup>  
(3) 昇圧速度：52Kgf/cm<sup>2</sup>/分  
(4) 降圧速度：70Kgf/cm<sup>2</sup>/分  
(5) 保圧時間：1,500Kgf/cm<sup>2</sup>で30分間 (損失変化に異常のない場合は15分間)

- (6) サイクル数: 3 サイクル
- (7) 光源波長:  $1.55 \mu\text{m}$
- (8) 伝送損失の変化:  $0.1\text{dB}/\text{km}$ 以下

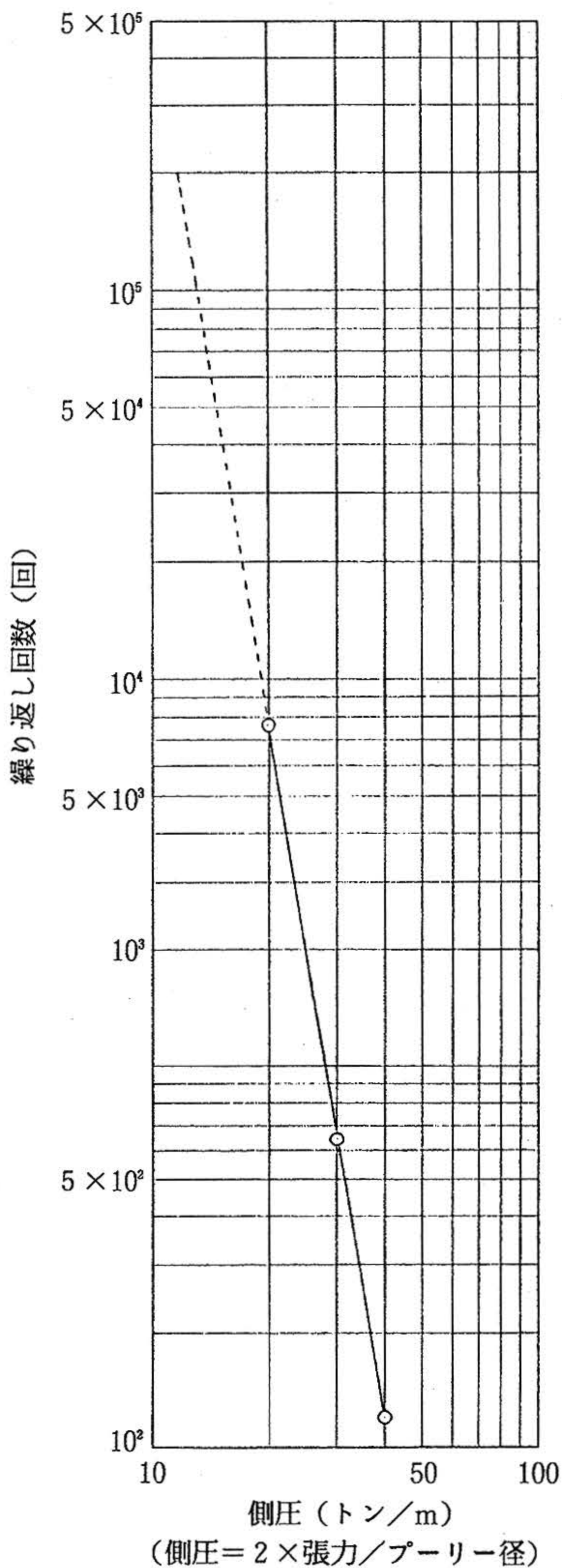


図5 引張り繰り返しS字曲げ試験結果  
Fig.5 Results of cyclic S-bending test

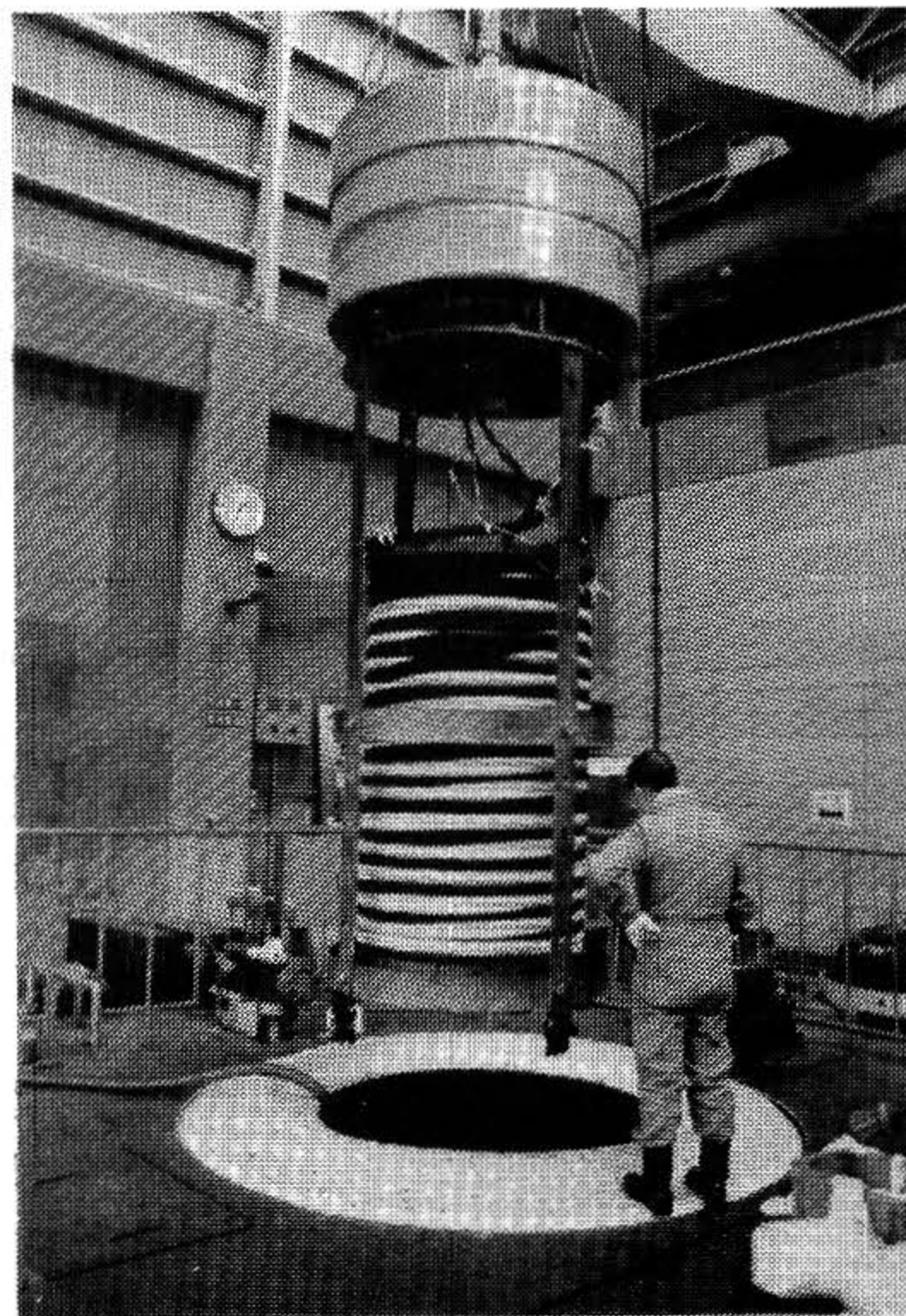


写真4 耐水圧試験  
Photo 4 Hydraulic pressure test of the cable

加圧の1サイクル目は、伝送損失の変動が最大  $0.01\text{dB}$  (長さ  $428\text{m}$  に対して) であったが、2 サイクル目は、昇圧後に最大  $0.12\text{dB}$  まで損失の変動が増加した。しかし OTDR で測定していた線芯にはほとんど損失がなかった。このため、3 サイクル目では、損失増加箇所を明確にするために計測線芯の交換を行い、OTDR で調べたところ、損失増加箇所は、ケーブル部ではなく、貫通部内部で生じていることが判明した。また、健全な方の光ファイバ線芯の伝送損失の変動は、最大  $\pm 0.01\text{dB}$  ( $0.02\text{dB}/\text{km}$ ) であり、規定値の  $0.1\text{dB}/\text{km}$  以下を満足した。

#### 4.6 繰り返し引張り試験

想定されている常用張力  $8\text{トン}$  の2倍以上、 $20\text{トン}$  の張力を加えて、ケーブルの変形の程度を計測すると共に、ケーブル、引留部に異常がないか試験した。

両端に試験用引き留め金物を取り付けた、長さ  $90\text{m}$  の試料ケーブルに  $20\text{トン}$  の張力を繰り返し加えた。試験条件は、 $130\text{秒}$  で  $20\text{トン}$  まで張力を上げ、 $60\text{秒}$  で  $0\text{トン}$  まで下げるというパター

ンを120回繰り返した。120回の繰り返し引張り後も、試料ケーブル及び試験用引き留め金物に全く異常は認められなかった。

なお、試験中にケーブル端部より30 m, 60 mの点のケーブル外径、伸び率、捩れ角を2トンごとに測定したが、いずれも最初の数サイクルで安定した状態となっている。すなわちケーブル外径の変化は、0張力のとき最初の3サイクル程度で44.3 mmから43.9 mmまで20トン張力では43.5 mmから43.2 mmまで減少しその後安定している。ケーブル伸び率の変化も最初の3サイクル程度で、ケーブル捩れ角の変化も0張力の場合最初の10サイクル、20トン張力の場合最初から安定している。図6～図8に1サイクル目と100サイクル目の張力とケーブル外径、ケーブル伸び率および捩れ角の変化の関係を示す。図8のケーブル捩れ角は、常用張力(8トン程度)付近では、ケーブル長60 mに対し15度となって安定しており、ケーブル化後10サイクル程度のプレテンション

をかければ、その後のケーブルの捩れは発生しないと推定出来る。

#### 4.7 張力振動試験

ケーブルの固有振動数(一次振動)を把握し、張力と一次振動数の関係を知ることは、運用時の参考としてばかりでなく、ケーブル張力の精密測定にも利用出来るので、計測を行った。

両端に試験用引き留め金物を取り付けた、長さ約20 mと約30 mの試料ケーブル2本を使用し、一定の張力を加えた状態でケーブル中央部に振動を与え振幅、振動数を計測した。ケーブルの振動は、加速度ピックアップでとらえ、FFTアナライザで、振幅、周波数スペクトラムを得た。計測システムを図9に示す。

図10に張力と一次振動数の関係を示す。また、次式による一次振動数の計算値もあわせて示してある。

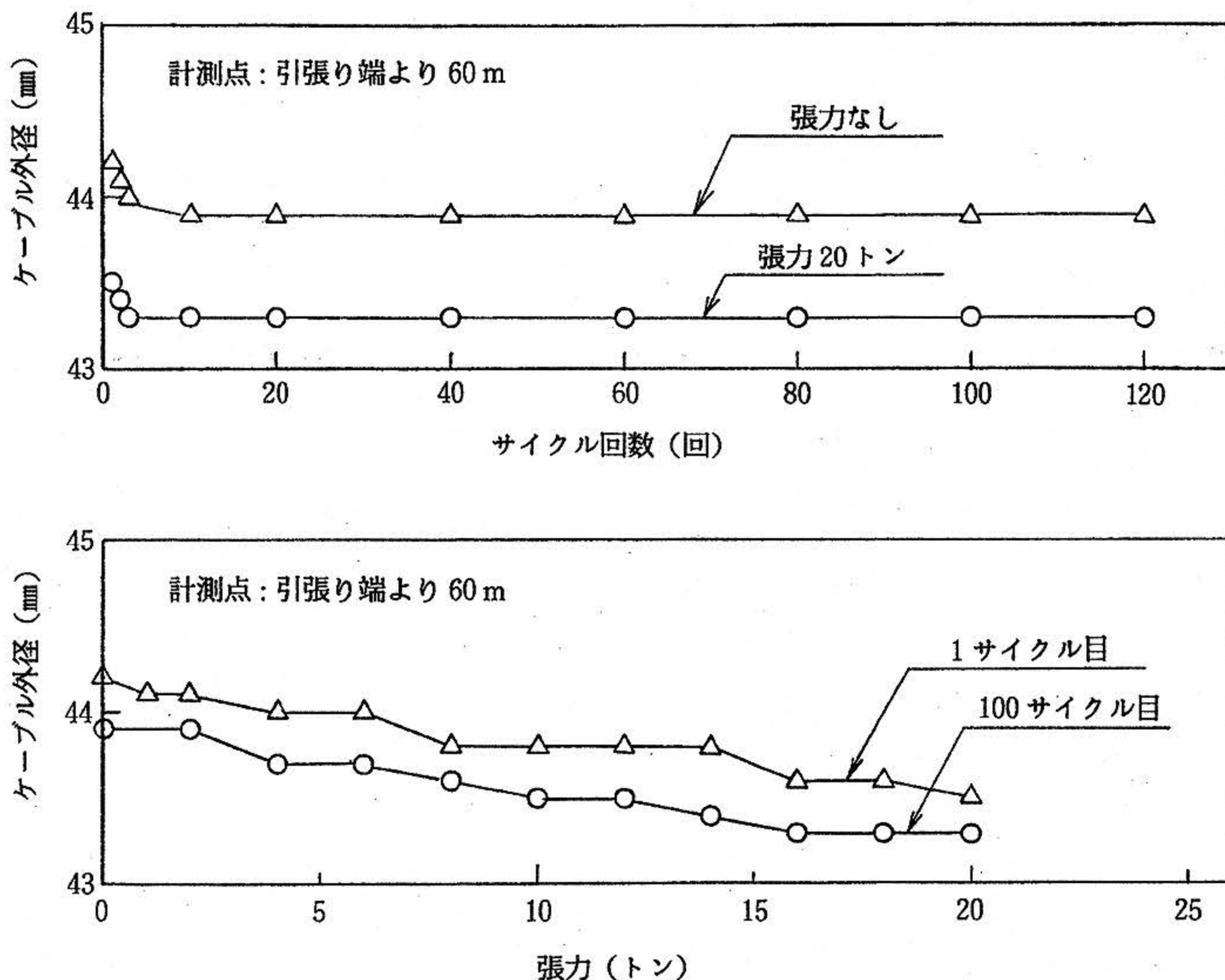


図6 繰り返し引張り試験結果(ケーブル外径)

Fig.6 Results of cyclic tension test (Cable diameter)

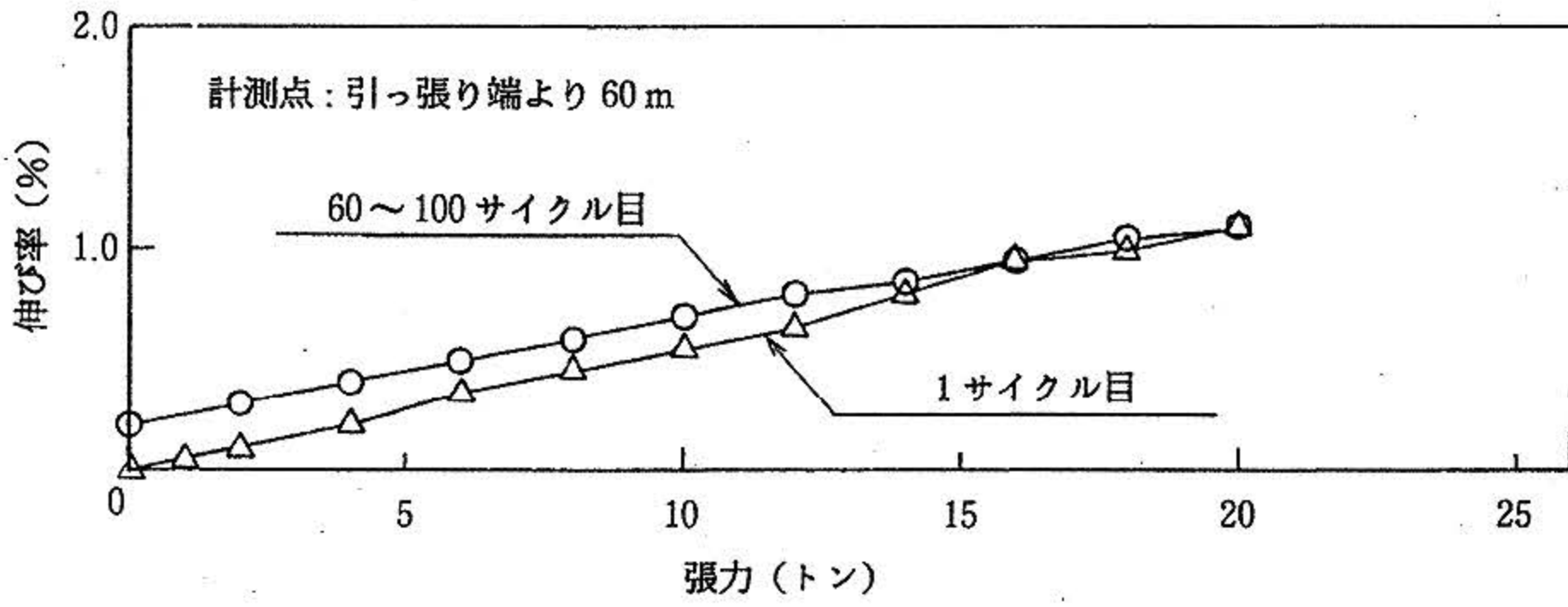
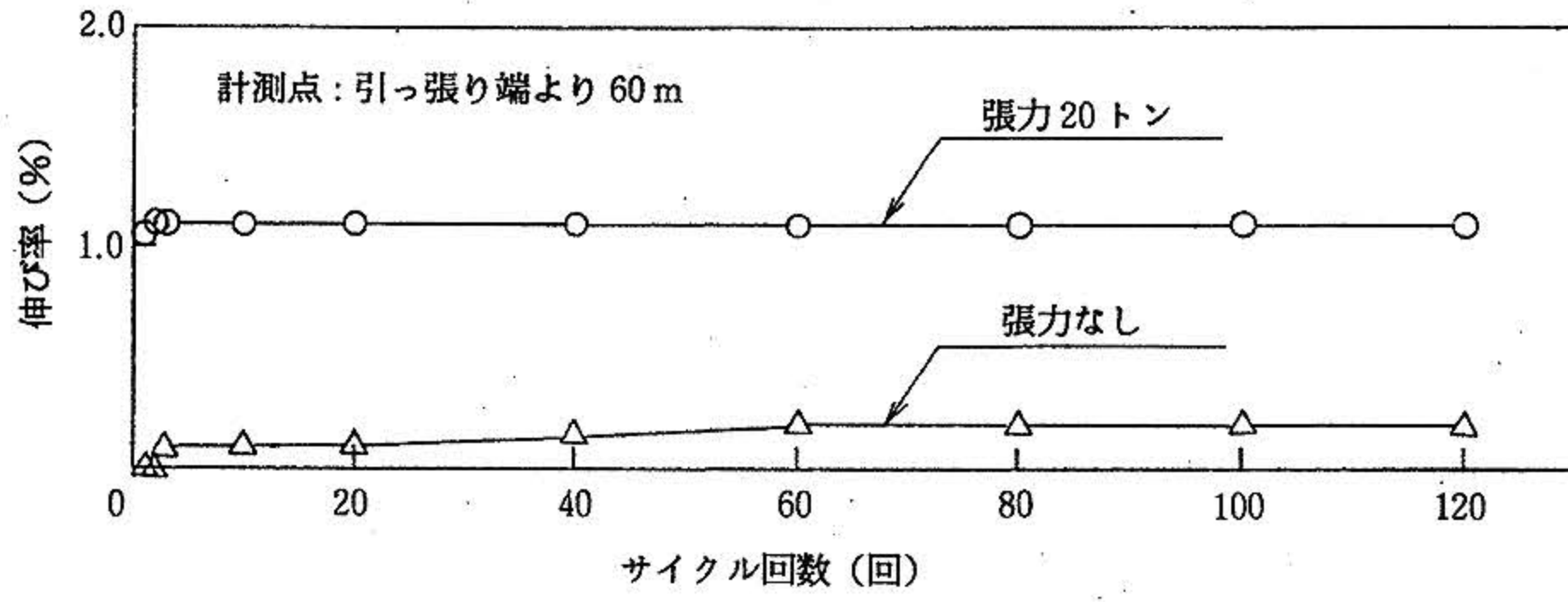


図7 繰り返し引っ張り試験結果 (ケーブル伸び率)  
 Fig.7 Results of cyclic tension test (Cable elongation)

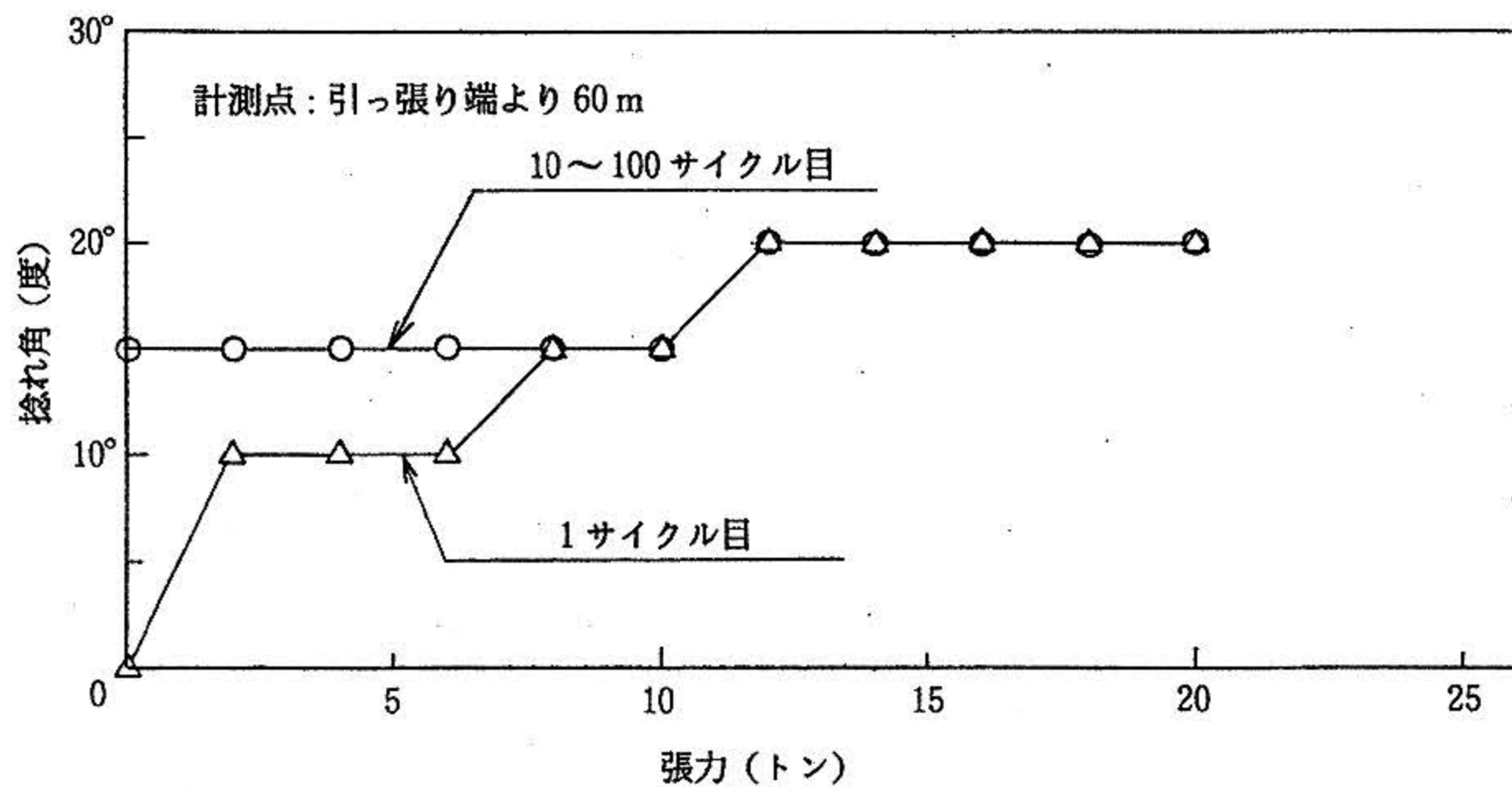
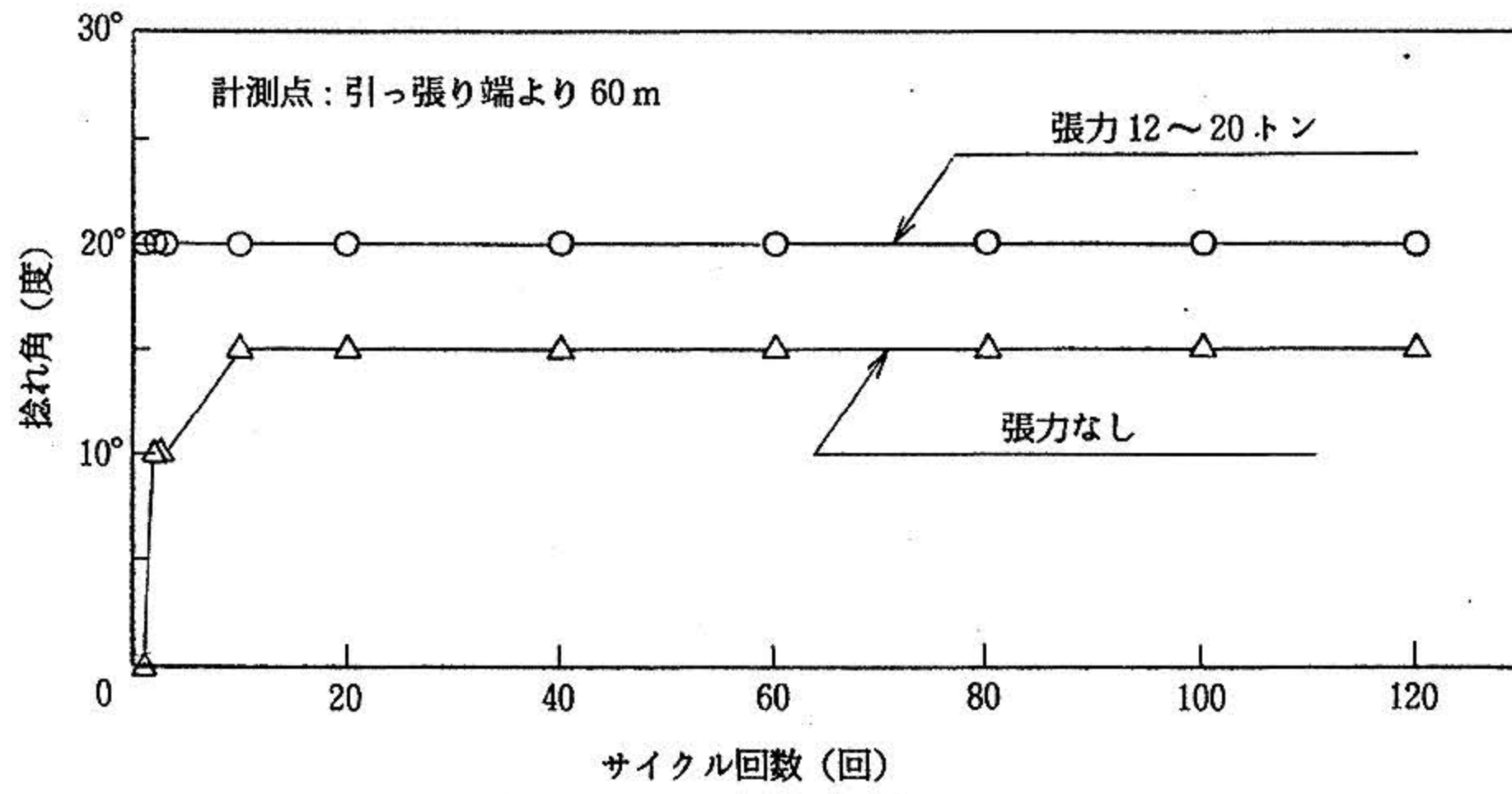


図8 繰り返し引っ張り試験結果 (ケーブル捻れ角)  
 Fig.8 Results of cyclic tension test (Cable torsion)

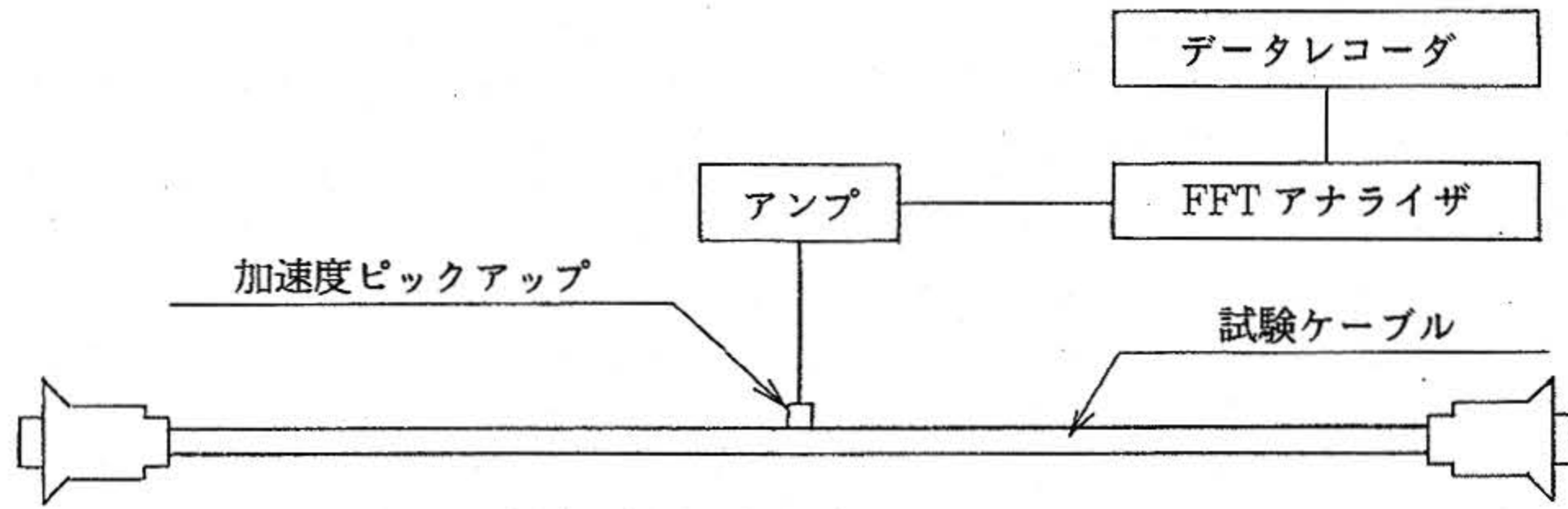


図9 引張り振動試験計測システム  
Fig.9 Set up of the cable vibration test

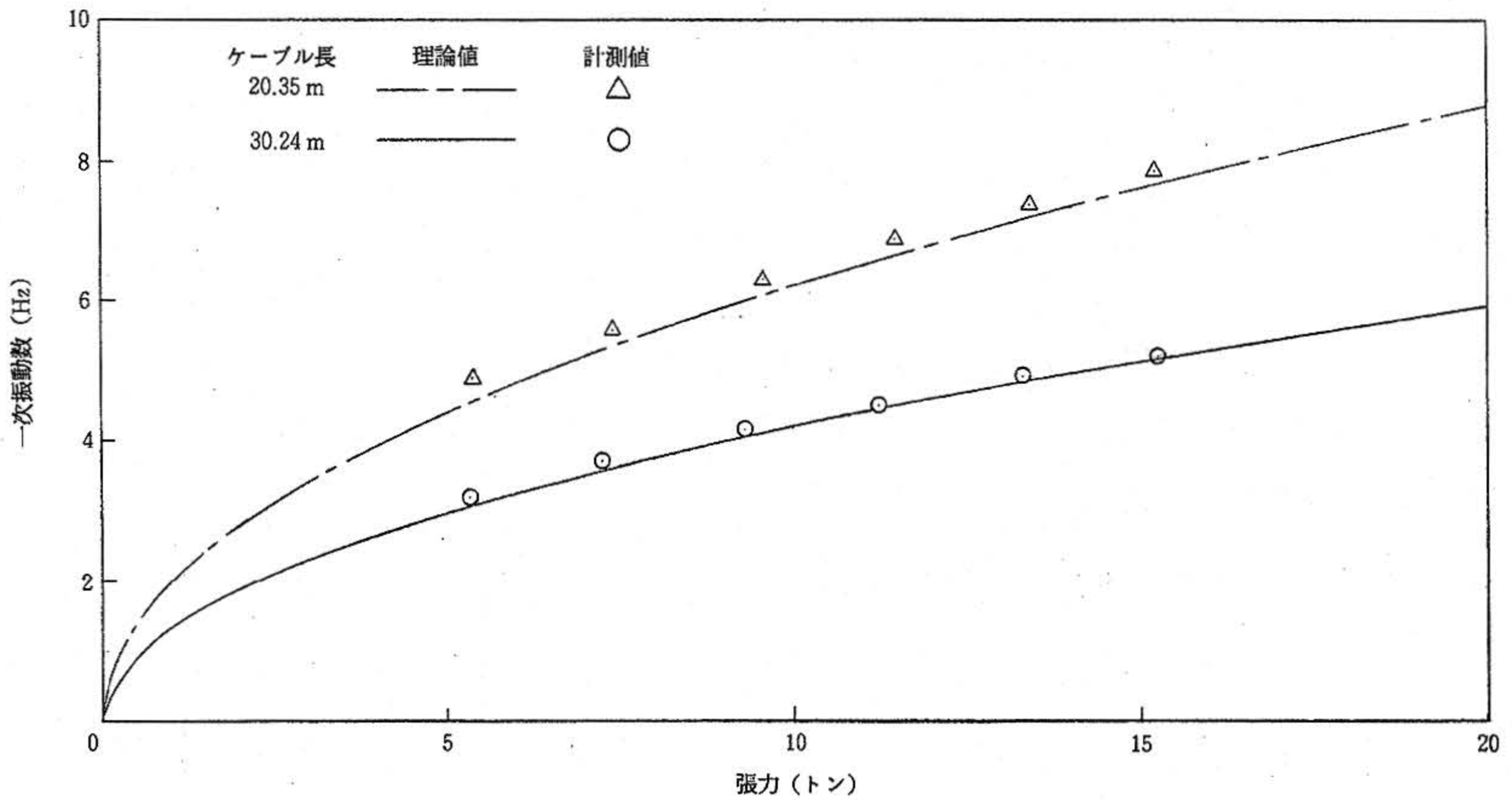


図10 引張り振動試験結果 (張力—一次振動数)  
Fig.10 Results of vibration test (Tension versus first frequency)

$$f_1 = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T \cdot g}{W}} \quad (1)$$

ここで  
 $f_1$ : 固有振動数 (一次振動)  
 $L$ : 試料長  
 $T$ : 張力  
 $W$ : 単位長さ当たり重量  
 $g$ : 重力加速度

ケーブル長が長いほど、計測値と計算値との差が小さいのは、剛性の影響が減少するためと考えられる。

また、ケーブルの振動減衰特性を得るために、次式に示す対数減衰率 ( $\delta$ ) も求めた。

$$\delta = \frac{1}{n} \log \left( \frac{A_m}{A_{m+n}} \right) \quad (2)$$

ここで  
 $A_m$ :  $m$  周期の振幅  
 $A_{m+n}$ :  $(m+n)$  周期の振幅  
 $n$ :  $A_m \sim A_{m+n}$  の周期数

図11に張力と対数減衰率の関係を示す。張力が大きいほど、また、ケーブル長が長いほど対数減衰率は小さく、減衰しにくいことが判る。

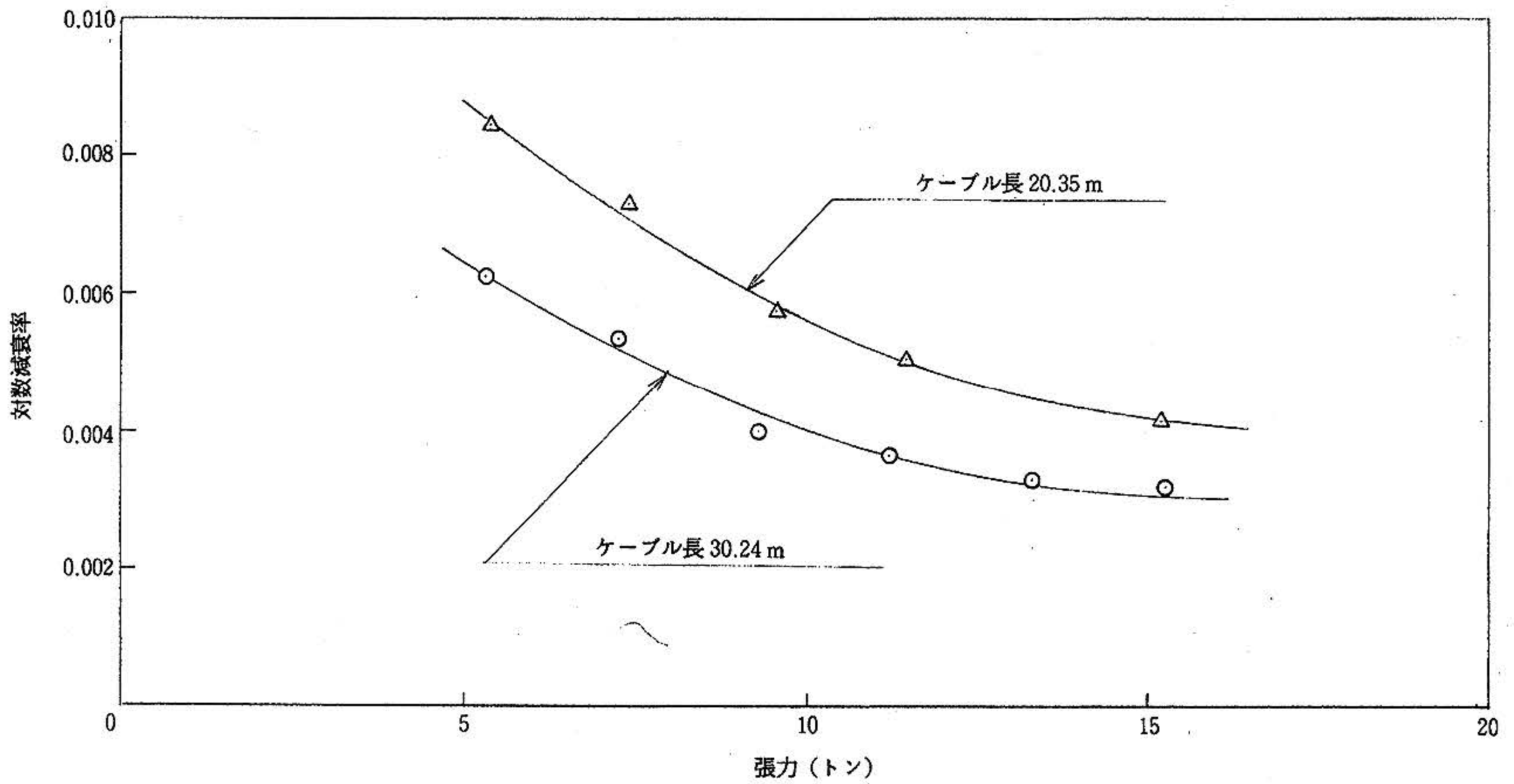


図11 引張り振動試験結果 (ケーブルの対数減衰率)  
 Fig.11 Results of vibration test (Logarithmic damping rate of the cable)

#### 4.8 ケーブル張力回転測定試験

ケーブルのトルクバランスは、長大なケーブルの場合は特に重要である。トルクバランスが悪いと、ケーブルを使用するにつれ、歪みがケーブルの特定な箇所に集中したり、捩れの一部がケーブル先端部に伝わって来たりしてケーブルがキックしたり、損傷する原因となる。

試験では、長さ 50 m の試料ケーブルをクレーンで吊り下げ、下部に荷重を加えたときの自転角度を測定した。写真5に試験の状況を示す。

初めは、荷重に対する回転角度が不安定であったが、数回繰り返した後安定した。図12に荷重と回転角度の関係を示す。自転回転角度は、8トン荷重時で約  $7^\circ / 50\text{ m}$  であり十分小さいといえる。ちなみに「ドルフィン-3K」のケーブルの、運用中に何度か計測した回転数は、ケーブル長 10 m に対し 0.32 ~ 0.34 回転で、約 30 m で 1 回転、50 m に換算すると約  $600^\circ$  位である。ただし、この回転はほぼ定着してケーブルドラムに巻き込まれており、実用上は水深約 1.000 m 程度に 2 ~ 3 潜航するとビークルの近くに、ケーブルの捩れが 1 回転位たまる程度で、2 ~ 3 潜航に 1 回ビークルを回転させて捩れを解放している。

また、ケーブルの回転方向は、外層ケブラが

緩み、内層ケブラが締まる方向で、計算による方向と同じ方向である、ただし、計算値 (8トン荷重、長さ 50 m で  $63^\circ$ ) より実測値の方がはる

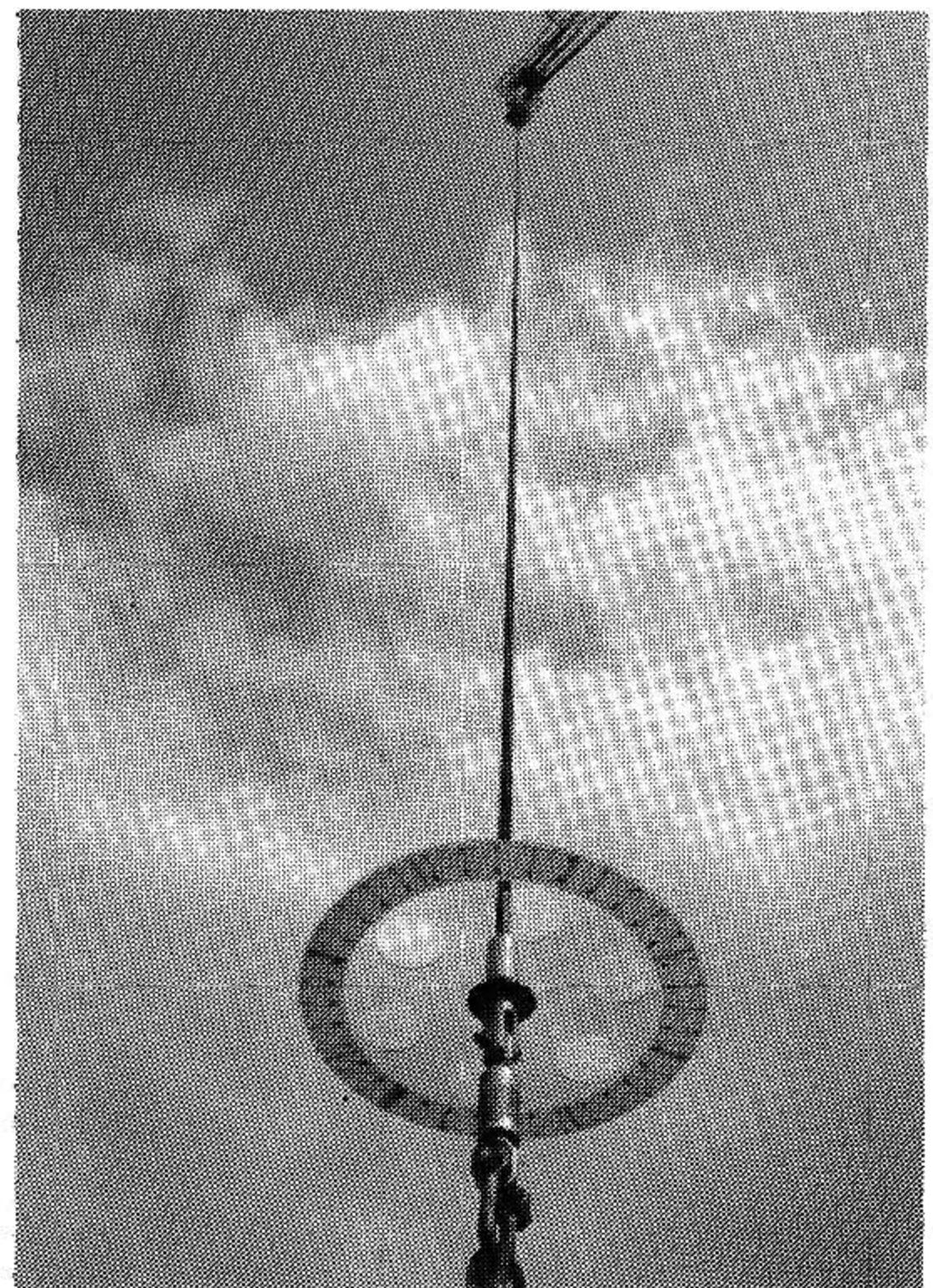


写真5 引張り回転測定試験 (自転)  
 Photo 5 Self rotation measurement of the cable

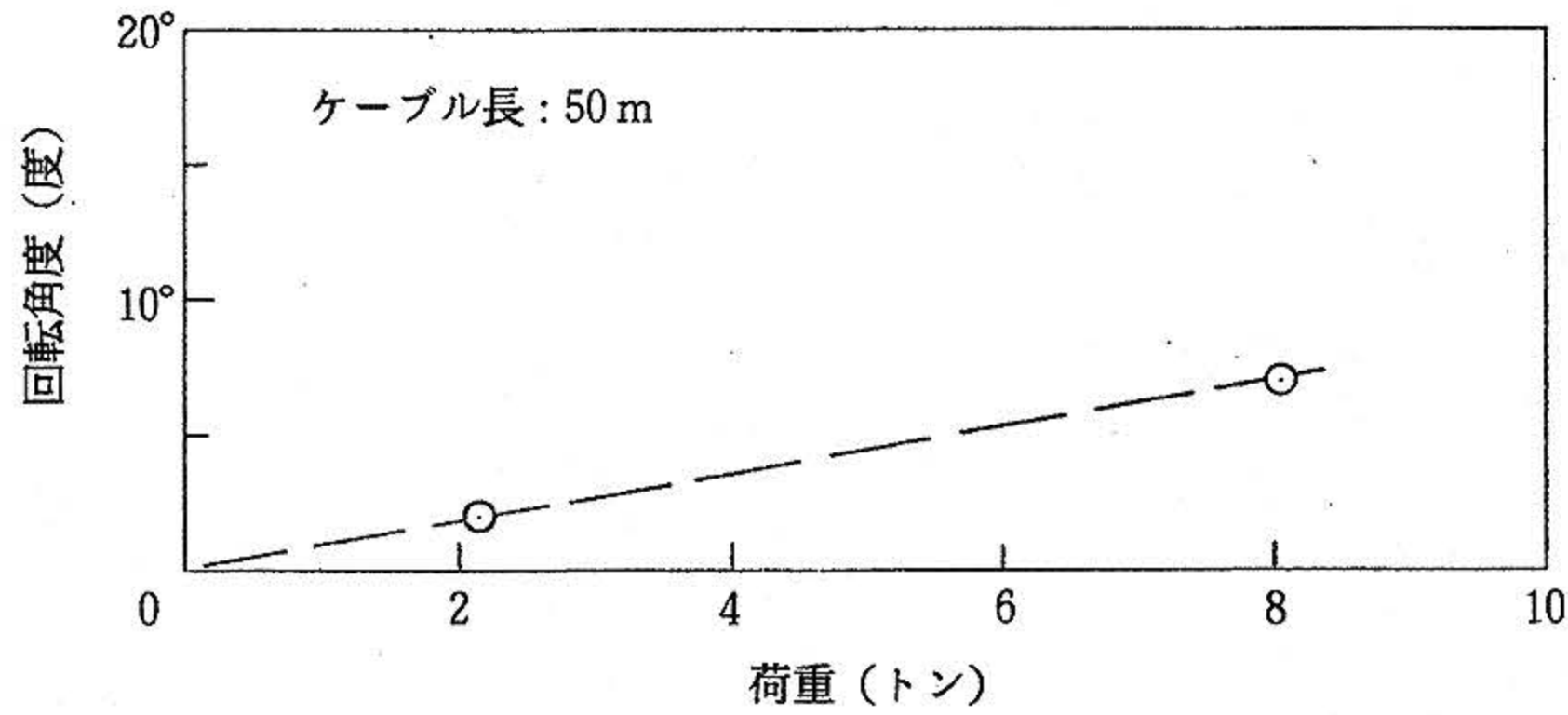


図12 張力回転測定試験結果

Fig.12 Results of the cable rotation measurement

かに回転角が小さい。計算式は R.K.Knapp の式によったがこの式は、単純な構造のケーブルの場合は良く実測値と一致するが、「ドルフィン-3K」や「10K」のような複雑な構造のケーブルの場合はあまり一致しない。ケーブルの片端をフリーにするこの方法の方が、4.6 で述べた両端固定による回転の測定より、実際の運用方法に即している。ともかく、ケーブルのトルクバランスは予想よりはるかに良く、「ドルフィン-3K」の現在のケーブルと比較しても、飛躍的に良くなっている。これは、「10K」のケーブルの内部構造が均一で、ケブラもケーブル化直後に硬化させている等、ケーブル技術の進歩によるところが大きい。「ドルフィン-3K」の新しいケーブルは、構造、ケブラの硬化方法等「10K」とほぼ同じなので、海域での試験結果も今後の参考となるであろう。

### 5 中性浮力ケーブル (2次ケーブル)

「10K」のランチャーとビークル間のケーブルについては、設計のみを行った。主要な仕様は以下のとおりである。

- (1) 破断強度：9トン以上
- (2) 外径：35 mm以下
- (3) 受電電圧：3,000V (ケーブル長 250 mの受電端において、(4)、(5)も同様)
- (4) 動力線芯：3本, AC3,000V, 3φ, 60Hz, 60KVA
- (5) 制御用動力線芯：2本, AC3,000V, 60Hz, 10KVA

- (6) 光ファイバ線芯：G.I.型3芯以上 (2%伸び以上の張力を加えて1,000 m以上一連長で製作したもの)
  - (7) 耐用時間：7,500時間または10年以上
  - (8) 比重：1.057 (680Kgf/cm<sup>3</sup>の水圧下において)
- 試設計の結果、上記の仕様をほぼ満たすケーブル製作は可能であろう、とのみとおしがついた。ただし、水中での比重については実際に試作してみないと、正確に予測することは困難である。なお、破断強度9トンの根拠は、「6.5K」地切りの際の、最悪の事態での地切りに要する張力が、2.7トンであるという検討結果から、その約3倍を採用したことに基づいている。図13にケーブルの断面を示す。

### 6 まとめ

「10K」用の1次ケーブルの試作試験を行い、試作したケーブルは、所定の性能を十分満足するものであることが明らかとなり、「10K」用1次ケーブルの設計、製作に必要な技術が確立でき、実機用1次ケーブルの開発のみとおしがついた。しかし、「ドルフィン-3K」のケーブルの実用化までに、いくつかの問題点が、運用をとおして明らかになり、対策を施す必要があったように、予期しない問題点が無いとはいきれない。そのため、ケーブルに関しては、実機用ケーブルの製作に先立ち、実証試験的な研究がぜひ行われる必要がある。なお、その他、ケーブル関連だけでも中性浮力ケーブル、水中コネクタ、水中スリッピング及び光通信装置等についても、

要素技術の一環として、「10K」システムを実用化させるまでに必要な研究項目が残されており、これらも早急に研究し技術的みとおしをつける必要がある。

最後に、本試作試験を行うにあたり種々ご協力頂いた、藤倉電線（株）海洋技術開発室の各位ならびにセンター深海開発技術部及び工務課の諸氏に謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 岩本喜直他：自航式海底ケーブル探査機－MARCAS, 海洋開発, 58号, pp.12～20, (1981)
- 2) 青木太郎他：自航式ビークル「HORNET－500」の開発, JAMSTECTR12, pp.39～49, (1984)
- 3) 服部陸男他：無人探査機「ドルフィン－3K」用光・電気複合ケーブルの試作試験, JAMSTECTR 13, pp.51～62, (1984)
- 4) 服部陸男他：無人探査機ドルフィン－3Kの開発と運用訓練, JAMSTECTR 21, pp.277～297, (1989)
- 5) 大谷昇一他：深海無人調査機用光・電気複合アンビリアルケーブルの開発, 住友電気119号, pp.1～11, (1981)
- 6) 村山芳昭他：深海ロボット用光・電気複合テザーケーブル, 古河電工時報, 80号, pp.73～88, (1987)

(原稿受理:1989年11月7日)