

アブレイシブウォータージェット式水中切断装置の開発

出村 憲二^{*1} 山口 仁士^{*1}

海中作業環境の深々度化や作業の高度化に対応できる海中切断技術として、アブレイシブウォータージェット式水中切断技術を取り上げ、実用化に備えた安全性の検討を行うための試験機を開発した。

試験機は、水中深々度での使用を考慮したものであり、陸上の機器と異なる機能・構成を有する。設計のポイントは、アブレイシブの連続安定供給である。陸上方式の適用では、供給ホース内の閉塞や不均一供給等の問題が生ずるため、アブレイシブをスラリー化することとし、スラリーのノズルヘッドへの供給は、チューブポンプによる連続圧送方式を検討した。また環境の保全を考慮して、水中の駆動部は油圧や電気を使用しない水圧モータとした。

ここでは、水中深々度で使用するための独特の機能・構成を有している試験機の設計概念と装置の詳細について報告する。

キーワード：アブレイシブ、切断、水中、ウォータージェット

Development of Underwater Cutting System by Abrasive Water-jet

Kenji DEMURA^{*2} Hitoshi YAMAGUCHI^{*2}

The technology to cut objects in ocean depths with abrasive water jets was examined for possible application, in view of the greater water depths and sophistication involved in work on ocean floors today. A test model has been developed to study this technology's safety and practicality.

The test model was designed for use at great water depths and has functions and configuration that are unlike equipment used on land. Continuous, stable supply of abrasive is a distinctive design feature. In land application, there had been problems of tube plugging and uneven supply. For this reason, abrasive has been converted to slurry form, and a continuous pressurized tube pump system was adopted for supply to the nozzle head. Also, a hydraulic motor that does not employ oil or electric power has been used to provide underwater drive that is environment-friendly.

* 1 海域開発研究部

* 2 Marine Development Research Department

This report outlines the technology's general design concept, including its distinctive functions and configuration to adapt for use at great depths, and provides great detail on the equipment.

Key words : Abrasive, Cutting, Underwater, Water-jet

1 はじめに

昨今の海中作業のニーズは大規模化しており、有人海中作業の規模拡大に伴う安全性の確保についての検討が必要とされてきている。ダイバーが海中作業を安全かつ効率よく行うためには、潜水技術の開発のほかダイバーの作業能力を高める作業機器の開発が必要である。

ダイバーによる海中作業は目視観察・検査（撮影）、測量・計測、切断、溶接などに大別される。ニューシートピア計画では水深300mまでの飽和潜水技術を確立し、目視観察・検査、測量・計測については300mの海底でも十分に対応できることが判明した¹⁾。一方、切断、溶接の作業は、構造物の設置・補修・撤去等において不可欠な要素技術であるにもかかわらず、海中作業の高度化や作業環境の深々度化に十分対応できる段階には至っていない。そこで新しい海中切断技術として有力なアブレイシブウォータージェット式水中切断に

着目し、実用化に備えた海中作業の安全性検討を行うため、試験機の開発を行った。

海中での切断は鋼材を対象とした酸素アーク切断が主として用いられてきたが、切断面は粗く、切断面加工の機能はない。またプラズマアーク切断等の他の切断技術は、環境空間密度の大きさ等から水中深々度への適応は事実上困難とされている²⁾⁻⁴⁾。アブレイシブウォータージェット式切断は、高速（マッハ2前後）の水噴流に粒径0.1~0.3mmの硬度の高い鋳物研磨材を混入し、あたかも細かいヤスリを高速でかつ無限に動かした状態に似た形で、対象を研磨・切断する方法である（図1）。そのため材質や厚さに関わらず正確な切断面が得られ、周囲環境への影響がほとんどないことが特徴であり、陸上においては既に実用化され、金属、コンクリート、岩盤、複合材等の切断加工に利用されている。しかし、水中では鋼管パイルのカッティング等に利用されつつあるが、基本的には陸

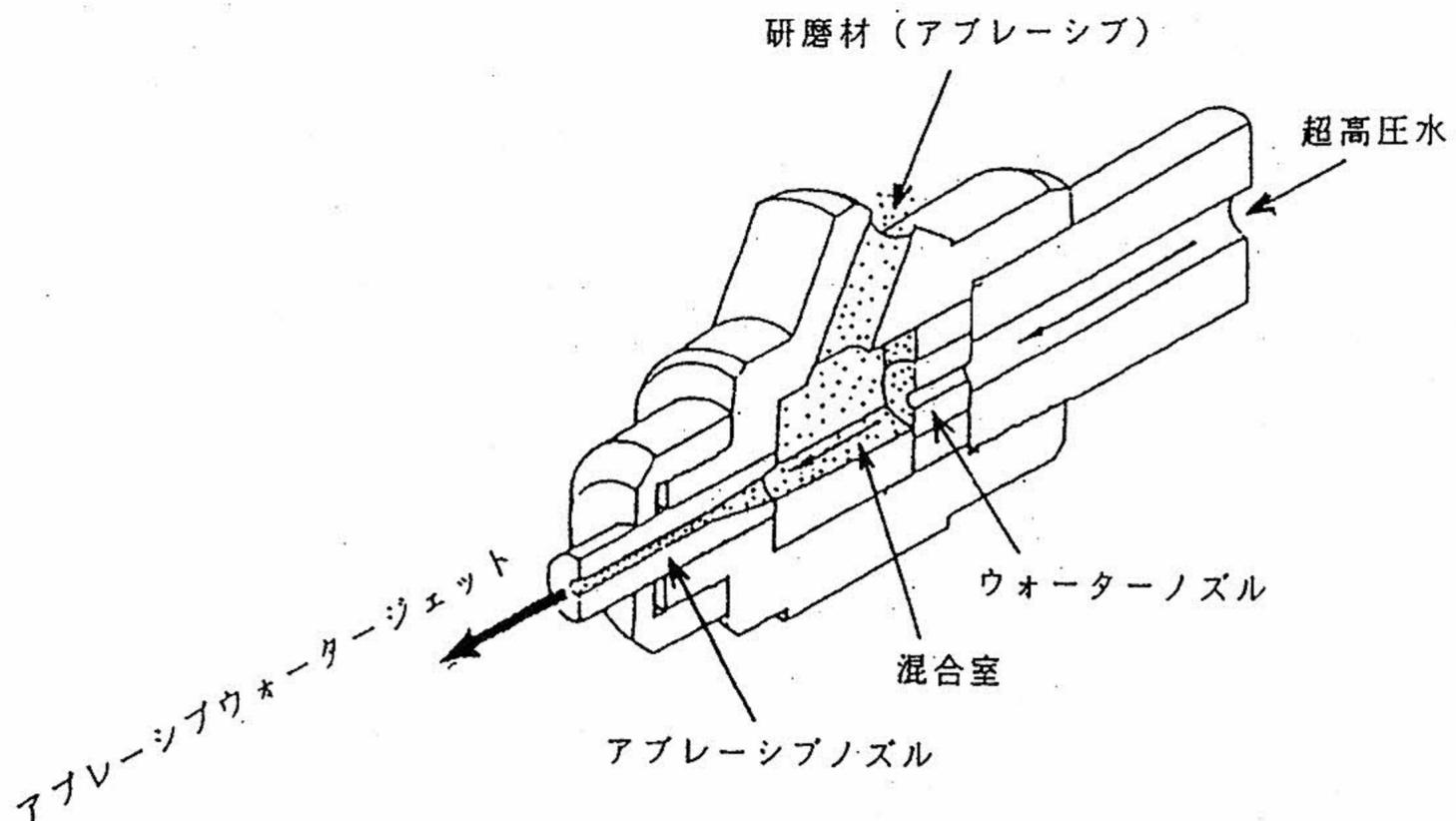


図1 アブレイシブウォータージェットのノズル部概念図

Fig.1 Schematic diagram of nozzle head of abrasive water jet.

上方式に多少の工夫を施し、水中に適応させているのが現状であり、その利用可能範囲は水深20~30mまでが限度と考えられている。本稿では、当該試験機の海中深々度で使用するための独特の機能・構成に関し、その設計概念と装置の詳細について報告する。

2 設計概念

水中深々度にてアブレーションウォータージェット式水中切断を適用するには様々な課題が考えられ、新しい概念によるシステムの構築が必要である。既存の装置を水中深々度に適用した場合に大きな問題となるのは、水中のノズルへアブレーションを安定供給できるかという点である。

アブレーションの供給方法として、アブレーションをドライ状態のままエアに搬送させ、ホースにて海底のノズルまで送る方法があり、アブレーションをそのまま使用でき、切断効率も高く、アブレーション供給装置のメンテナンスも容易であるため、陸上における装置の多くはこの方法を用いている。しかし、水中深々度では次のような問題がある。

- ① 供給ホースが長くなるとホース内でアブレーションが沈殿しやすい。鉛直長距離搬送では、さらにこの傾向が大きくなる。またホース内が常に乾燥状態を保っていないとアブレーションの沈殿・閉塞は顕著となる。ホース内で沈殿し始めるとノズルへの供給ができず、切断能力が著しく低下するうえ、供給ホース内のアブレーション除去が困難となる。
 - ② 水深300mの海底までの搬送には、約30kgf/cm²のエア圧が必要となり、ホース及び供給装置の耐圧性を考慮する必要が生じ、機器構成が重厚化する。
- またもう一つの方法として、アブレーションを水と混合し、スラリー状にしてホース内を高速で送る方法があり、湿気や水に強く、ある程度長い距離の搬送が可能という特徴を有しているが、以下のような問題がある。
- ③ 長いホースを経由する必要があるため、ホース内のスラリー量が非常に多くなり、ホース全体が重量増加を伴うほか、短時間の切断を行う場合にはアブレーションの無駄が生ずる。
 - ④ 比重が大きいため長い距離を下向きに送る

とアブレーション柱の静圧が増大し、供給を均一に制御することが困難となる。

- ⑤ 切断の中断等によりアブレーションスラリーの流れを止めた場合は、ホース内やノズルヘッド内でアブレーションが閉塞し、再び切断を開始することが困難となる。

以上の課題に対処するため、アブレーションと水の混合時に高分子ポリマーを適量添加したスラリーを用い、スラリータンクを水中のノズル付近に設置することとした。アブレーションと水に高分子ポリマーを添加したスラリーは、アブレーションがコロイド状に保持された状態のため、流動性に優れ、アブレーションの沈殿速度が遅くなる。また水と混ざりにくい性質のためホース内に水がある場合でもスラリーの粘性は低下しないという特徴を持つ。したがってホース内やノズル内での閉塞を防止することができ、切断の中断・再開が容易にできるようになった。またスラリータンクを水中のノズル付近に設置することにより供給ホースが短くなり、ホース内のアブレーションの無駄を少なくすることができた。長時間の切断を行う場合には、水上から水中に設置されたタンクにスラリーを定量的または連続的に補充することができるため、大きなタンクを必要としない。さらにタンクは均圧式とし水圧の影響を受けない構造にできるため耐圧性を考慮する必要がない。アブレーションのノズルへの供給はタンク下部に取り付けたチューブポンプにて連続供給する方式とした。また水中の駆動は全て水圧モーターを使用し、油圧や電気による駆動機器は使用しないこととした。

3 装置の構造

装置全体の系統を図2に示す。装置は、常用圧力2,500 kgf/cm²の高圧水系、アブレーション供給装置、ノズル移動装置、補機駆動水系等からなる。

3.1 高圧水系

(1) 超高圧水ポンプ

超高圧水ポンプは、増圧機、アキュムレータ、油圧ユニット、給水ポンプ、給水フィルターユニット及び制御盤より構成されている。主な仕様を次に示す。

- ・吐出圧力：最高 3,000 kgf/cm²

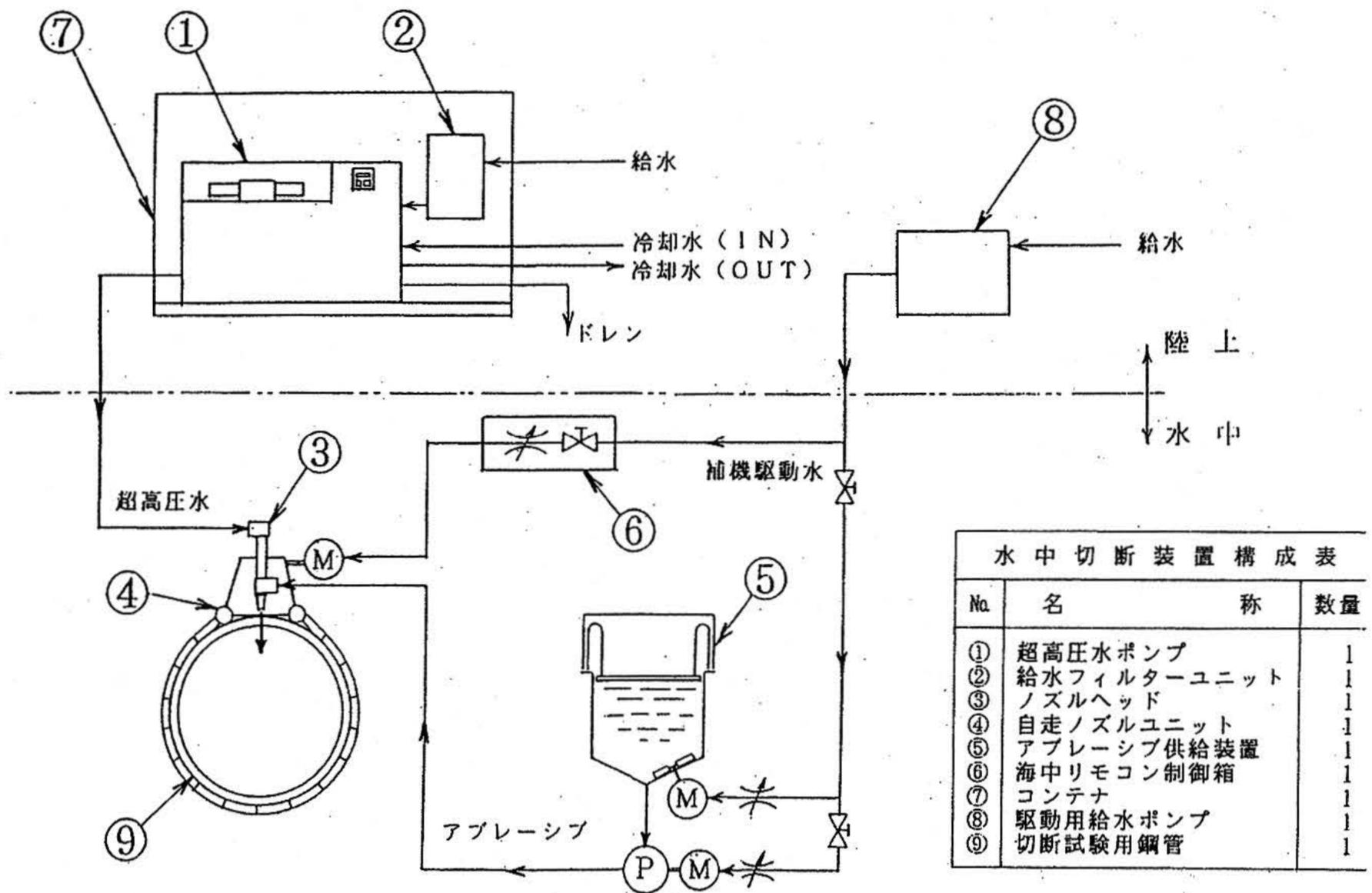


図2 アブレイシブウォータージェット式水中切断装置系統図

Fig.2 Diagram of underwater cutting systems by abrasive water-jet.

- 常用 2,500 kgf/cm²
- 吐出流量：最大 13.5 l/min
(吐出圧力2,500 kgf/cm²時)
- 外形寸法：2,200mm × 1,550mm
× 1,700mm(H)
- 概算重量：4,300kgf (作動油含)
- 所要電源：
 - 油圧ポンプ用電動機
75kw, 4P, 3φ, 400/440V, 50/60Hz
 - 給水ポンプ用電動機
1.5kw, 2P, 3φ, 440V, 60Hz
 - 滴下潤滑ポンプ用電動機
3w, 1φ, 50/60Hz
- 所要水量：吐出給水 (清水) 20 l/min以上
オイルクーラー冷却水 (海水
28°C以下) 120 l/min以上

(2) ノズルヘッド (図3)

ノズルヘッドは、ウォーターノズルから超高压

水を噴出させ、混合室でアブレイシブを吸引混合し、あわせてアブレイシブノズルから噴出させる方式とし、各ノズル及びホース類の交換が容易な構造とした。ウォーターノズル径と吐出流量の関係は表1により求められる⁵⁾。アブレイシブノズルは、混合されたアブレイシブの加速と混合流の収束を目的とし、混合室で十分な吸引混合が行われるようなウォーターノズル径とアブレイシブノズル径の比率と長さを選定することが必要である。超高压水の圧力と流量、アブレイシブの粒度、切断対象物の種類、水中の抵抗等の多くの因子が複雑に影響するため、本装置のノズルは切断能力テストを行い、口径φ1.5mm、長さ50mmに決定した。

(3) 超高压水ホース

超高压水ホースは超高压水ポンプとノズルヘッド間の接続用ホースであり、概略仕様を次に示す。

- 最高使用圧力：2,500kgf/cm²
(最低破壊圧力6,000kgf/cm²)
- ホース径：ID φ4.3, OD φ15

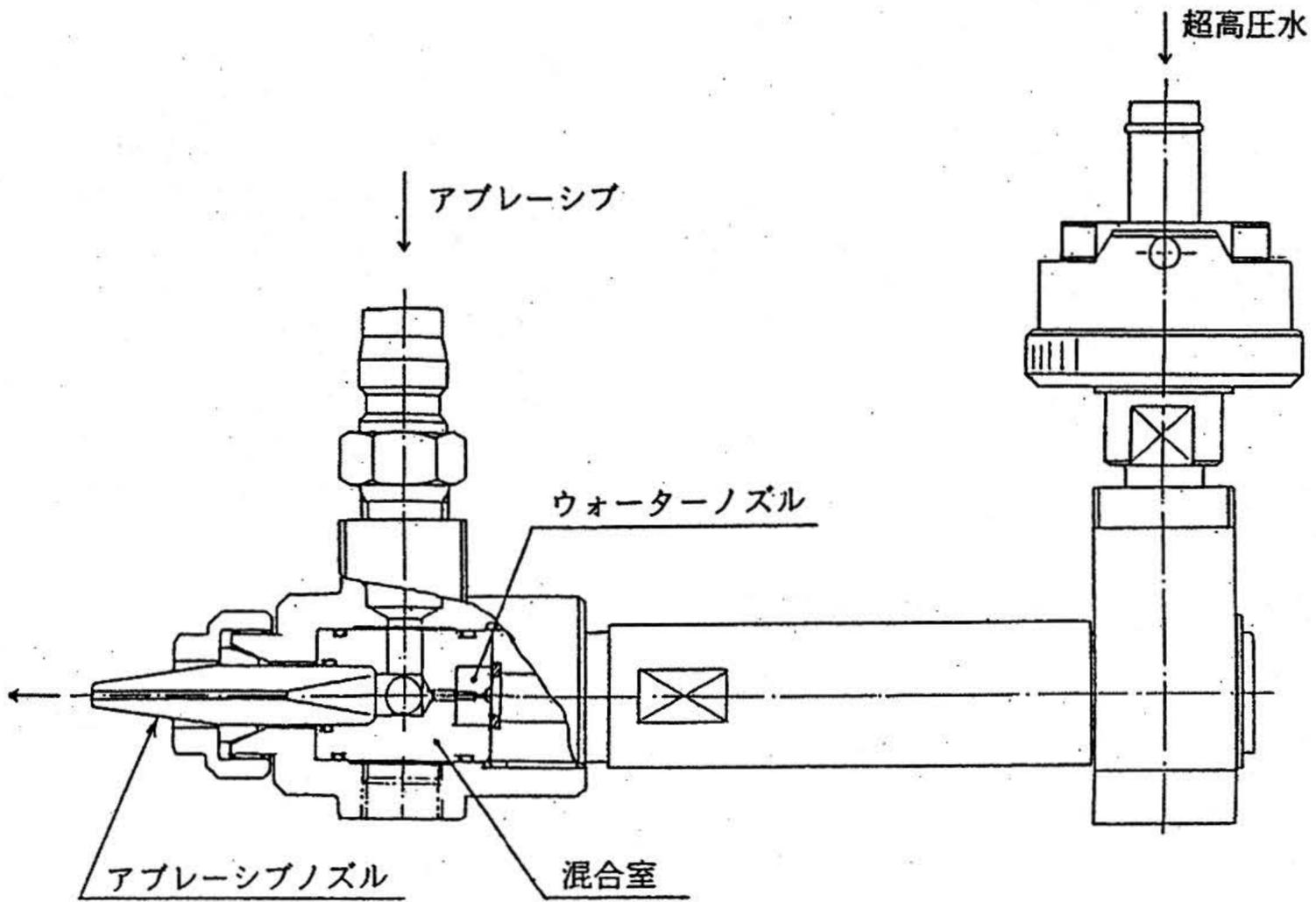


図3 ノズルヘッド外観図

Fig.3 Appearance of nozzle-head.

表1 ウォーターノズル径と吐出流量の関係

Table 1 Correlation between diameter of water nozzle and flow rate of water jet.

$$Q = 0.5 \times dn^2 \times \sqrt{P}$$

Q : 吐出流量 (l/min)

dn : ノズル径 (mm)

P : 吐出圧力 (kgf/cm²)

単位 : l/min

P (kgf/cm ²)	1500	2000	2500	3000
dn (mm)				
0.15	0.44	0.50	0.56	0.62
0.20	0.77	0.89	1.00	1.10
0.25	1.21	1.40	1.56	1.71
0.30	1.74	2.00	2.25	2.46
0.35	2.37	2.74	3.06	3.35
0.40	3.10	3.58	4.00	4.38
0.50	4.84	5.59	6.25	6.85
0.60	6.97	8.05	9.00	9.86
0.70	9.49	10.96	12.25	13.42

- ホース全長 : 20m×2本
- ワンタッチカップラ, 両面反射テープ付

3.2 アブレイシブ供給装置 (図4, 写真1)

アブレイシブ供給装置はアブレイシブの定量供給に主眼を置き, スラリー状の流体の輸送に適したチューブポンプ移送方式とした。アブレイシブの移送距離を短縮するための海中設置型のタンクとし, 構成はスラリートank, 均圧用ゴムブーツ, 攪拌用スクリー, チューブポンプ, 水圧モーター及び架台からなる。概略仕様を以下に示す。

- タンク容量 : 26ℓ
- 使用研磨材 : 高粘度高流動性高分子材を添加したガーネット研磨材#100
- 研磨材供給量 : 0.5~1.3kgf/min
- 連続使用時間 : 約30分
- 均圧方式 : 薄ゴム膜式

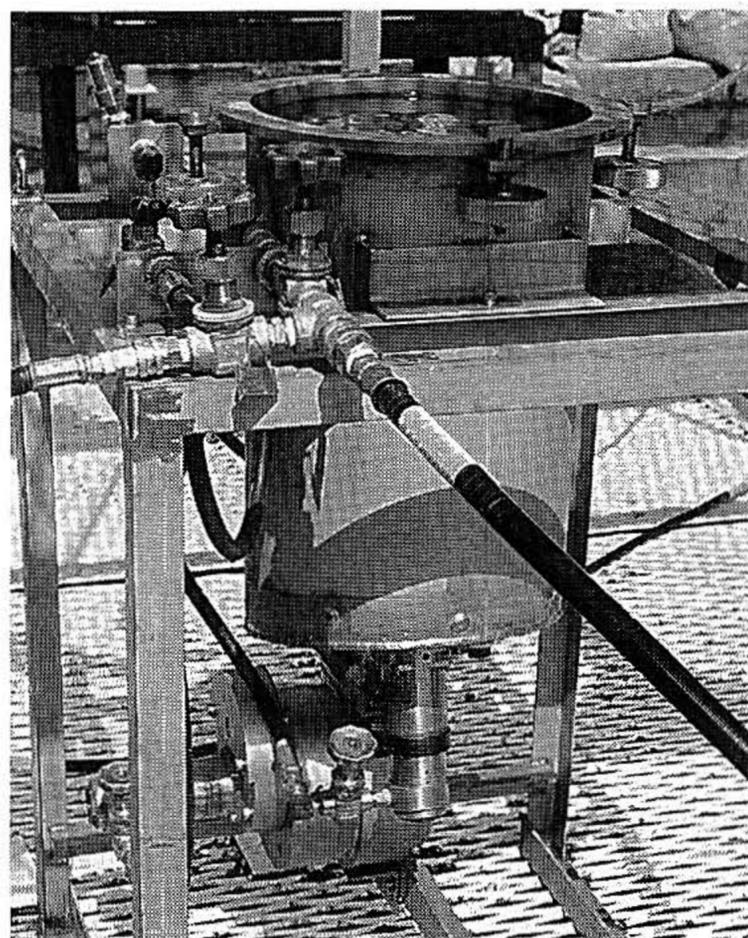
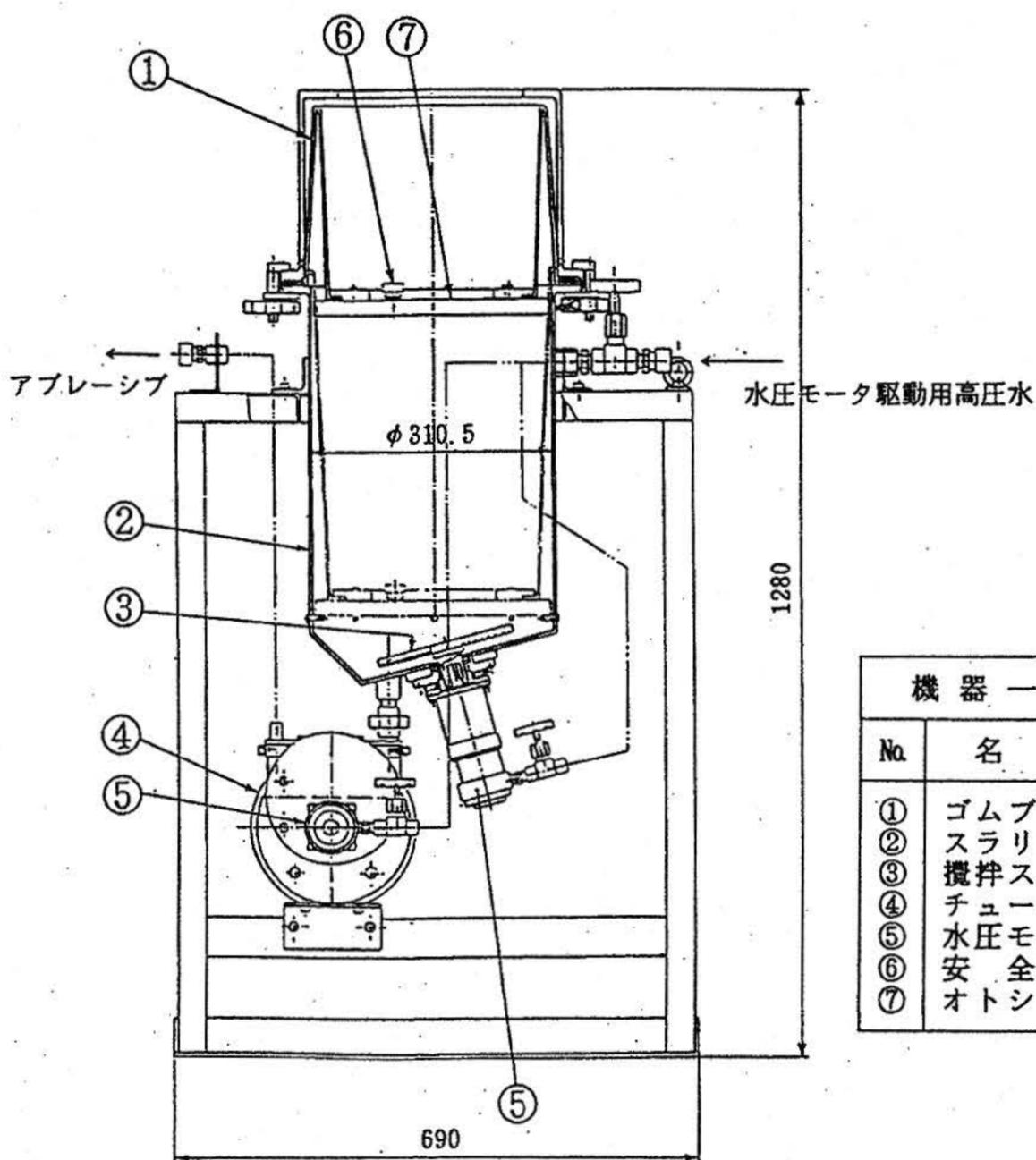


写真1 アブレイシブ供給装置

Photo 1 Supply apparatus of abrasive.



機器一覧表	
No.	名称
①	ゴムブーツ
②	スラリートank
③	攪拌スクリー
④	チューブポンプ
⑤	水圧モーター
⑥	安全弁
⑦	オートシブタ

図4 アブレイシブ供給装置断面図

Fig.4 A section for the supply apparatus of abrasive.

- ・攪拌方式 : 攪拌スクリー
- ・供給方式 : チューブポンプによる移送
- ・モータ形式 : 水圧モータ
- ・外形寸法 : 700mm×700mm×1,200mm(H)
- ・概算重量 : 約90kg

(1) スラリータンク部

アブレイブスラリーの沈殿の防止を目的として、タンク底部に攪拌スクリーを設置し、またタンク内への海水の混入を避けるためネオプレンゴム製の薄膜ゴムブーツ（写真2）による均圧方式にて設計・製作したが、切断試験を実施した結果、スラリーの沈殿速度が遅いこと及び水に対し容易に溶けないことから、攪拌スクリーと薄膜ゴムブーツがなくてもアブレイブの供給は十分可能であることが判明した。

(2) チューブポンプ

チューブポンプの断面図を図5に示す。比重の大きいアブレイブスラリーは自重によりチューブポンプ吸入口からチューブ内に入り、2個のローラーによりノズルヘッドへ定量的に押し出される。アブレイブの供給量の調整はこのチューブポンプの回転数の調整により行う。チューブポンプ回転数とアブレイブ供給量の関係を図6に示す。

3.3 ノズル移動装置

ノズル移動装置は、水中において鋼管の外周を自走してノズルの移動を行う自走ノズルユニット

と送行・停止及び送行スピードの調整を行う海中リモコン制御箱から構成される。自走ノズルユニットの構造は、本体ベース部、走行用スプロケット、水圧モータ等を取り付けたスライダ部及びノズルヘッド部からなる（図7、写真3）。鋼管と本体はワンタッチで着脱可能なチェーンで固定され、スプロケットを回転させて遊星ギヤのように鋼管の外周を自走する。また、縦置き鋼管や精確な切断を行う場合には、鋼管にガイドチェーンを固定して本体を誘導することができる。適用鋼管径は300～1,500mmとした。また、駆動は水圧モータによって行い、走行スピードは40～100mm/min（水圧モータ駆動圧力50kgf/cm²時）の範囲で設定可能である。走行スピードの調整は海中リモコン制御箱（写真4）にあるニードルバブルにて行う。バブル開度と走行スピードの関係を図8に示す。

3.4 補機駆動水系

補機駆動水系は水圧モータとその駆動用給水ポンプ及び高圧ホースからなる。

系内圧力は最高63kgf/cm²、常用50kgf/cm²で、駆動水流量は水圧モータ1台につき20 l/min、系全体で60 l/minである。駆動水流量をコントロールバブルにて調整することにより攪拌スクリー、チューブポンプの回転数及び自走ノズルユニットの走行スピードを制御する。水圧モータ



写真2 薄膜ゴムブーツ

Photo 2 Boots of rubber skin.

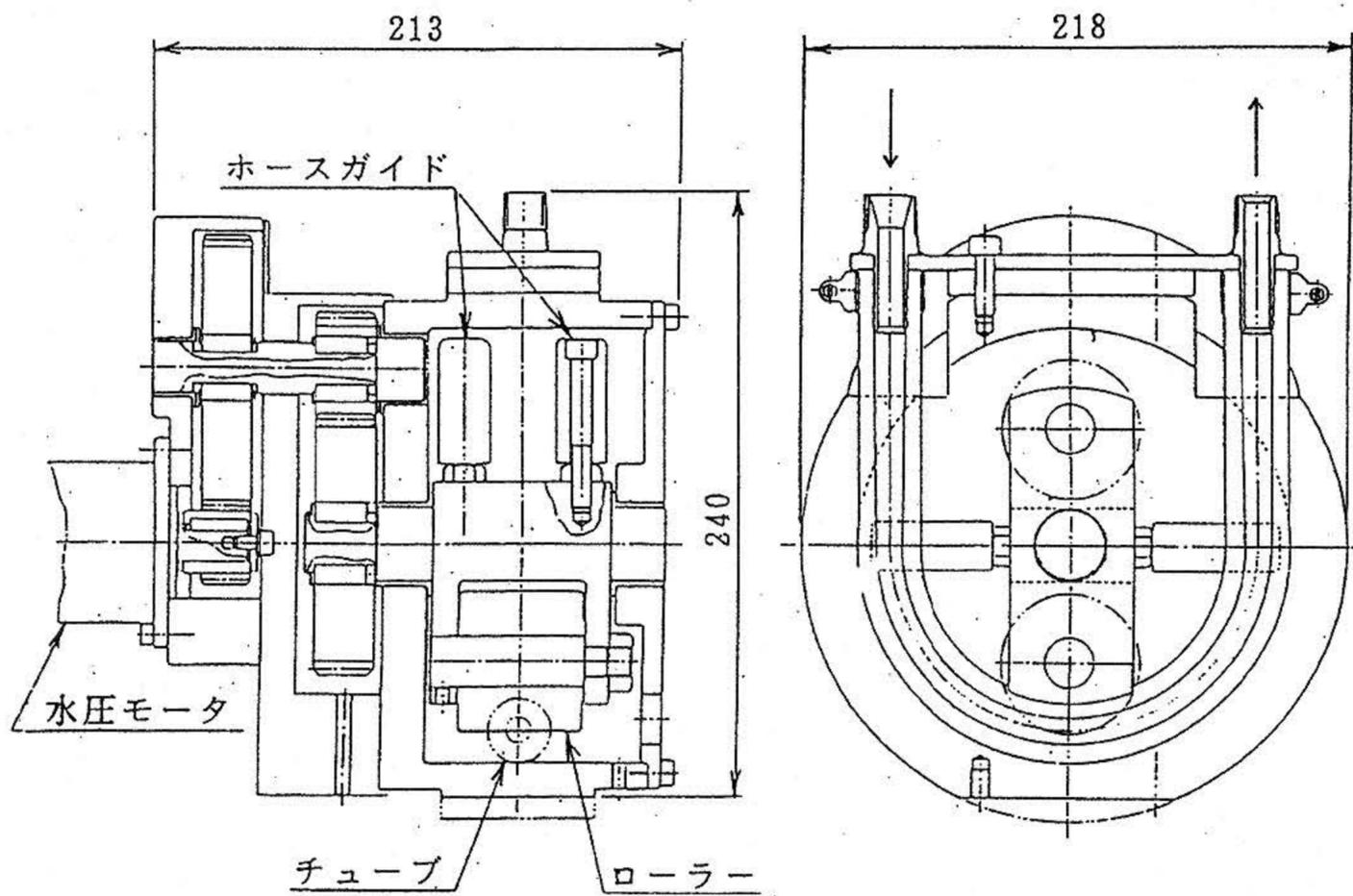


図5 チューブポンプ断面図
Fig.5 A section of tube-pump.

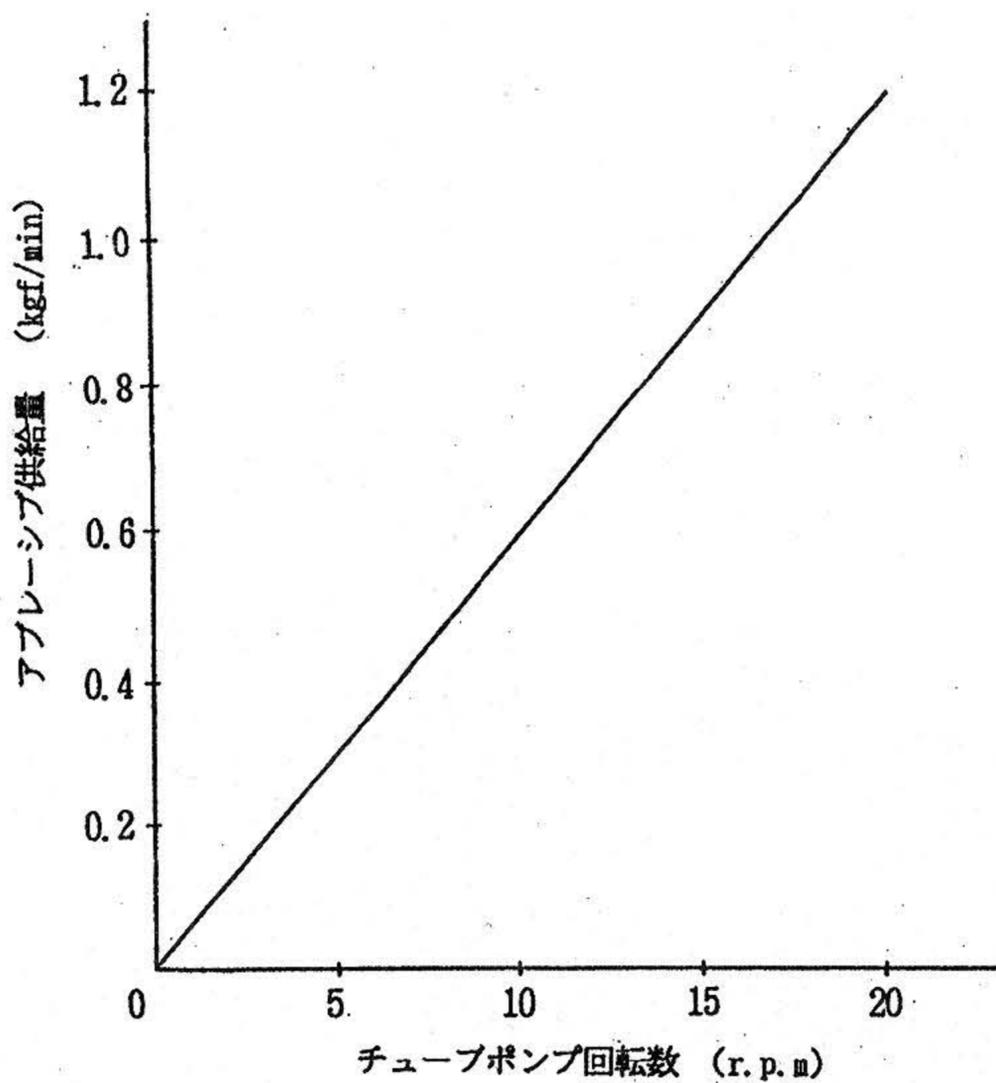


図6 チューブポンプ回転数とアブレイシブ供給量の関係 [アブレイシブ: ガーネット #100]
Fig.6 Correlation between revolution of tube-pump and supply amount of abrasive.
[Abrasive: garnet #100]

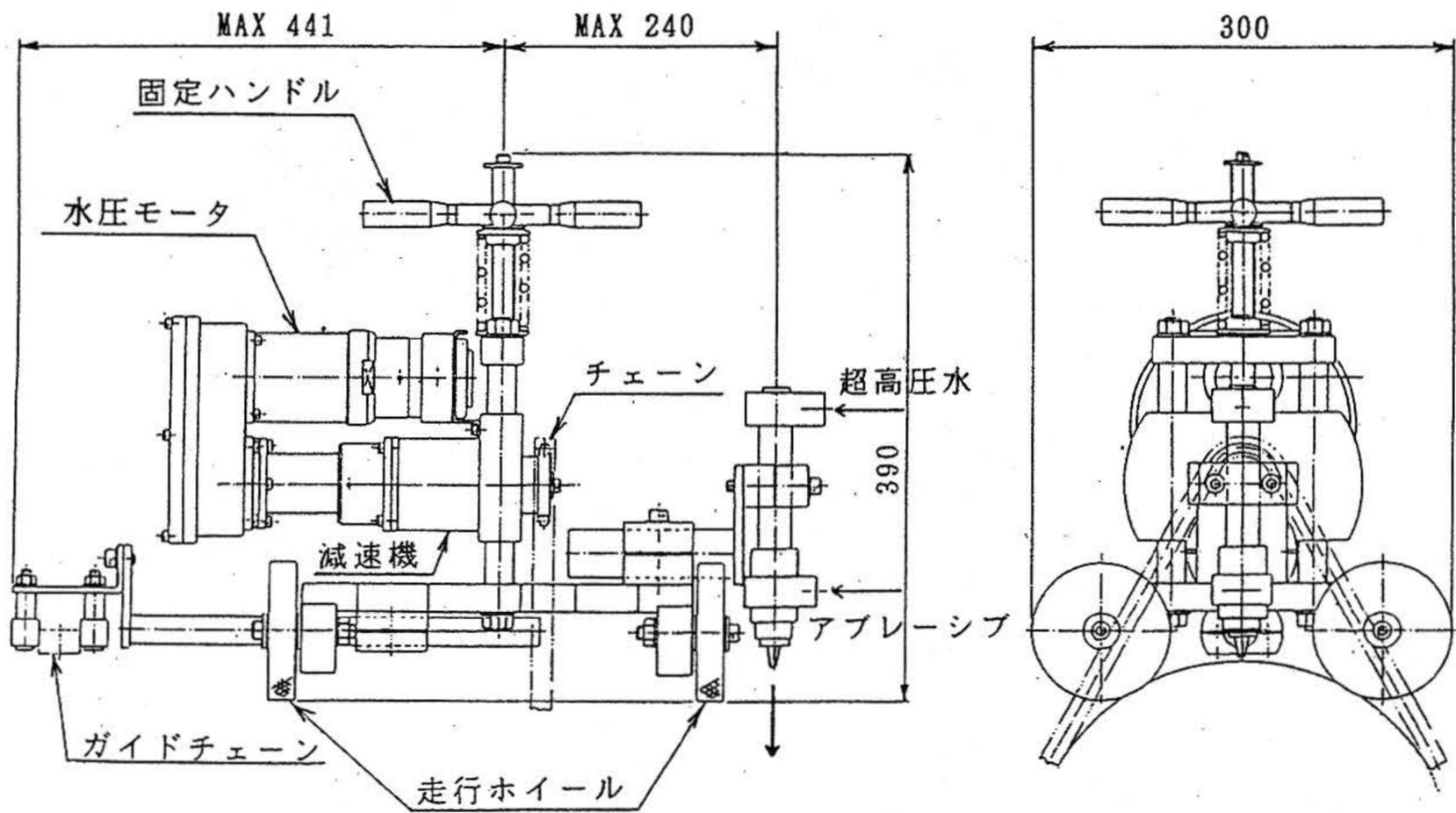


図7 自走ノズルユニット外観図

Fig.7 Appearance for the automatical driving nozzle unit.

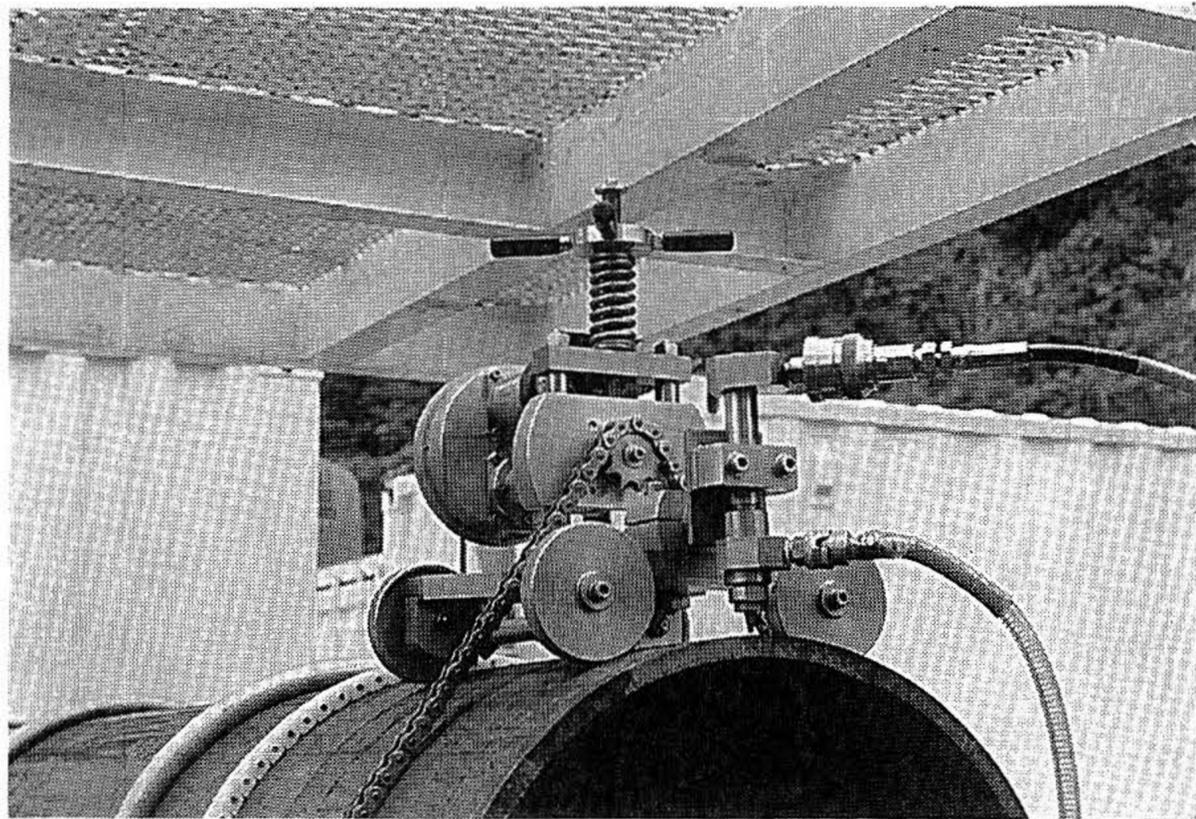


写真3 自走ノズルユニット

Photo 3 Automatical driving nozzle unit.

は水中専用の駆動用モータで、海水・清水等を作動流体として使用するため環境汚染や漏電の危険がない。

3.5 その他

アブレーションウォータージェット式水中切断の基本特性把握試験等を実施するために準備した機

器類を以下に示す。

(1) 水中切断特性計測装置

・水中音測定器：ハイドロホンST-8004
〔沖電気〕

・振動測定器：振動センサPV-10B, 振動計VM-80〔リオン〕

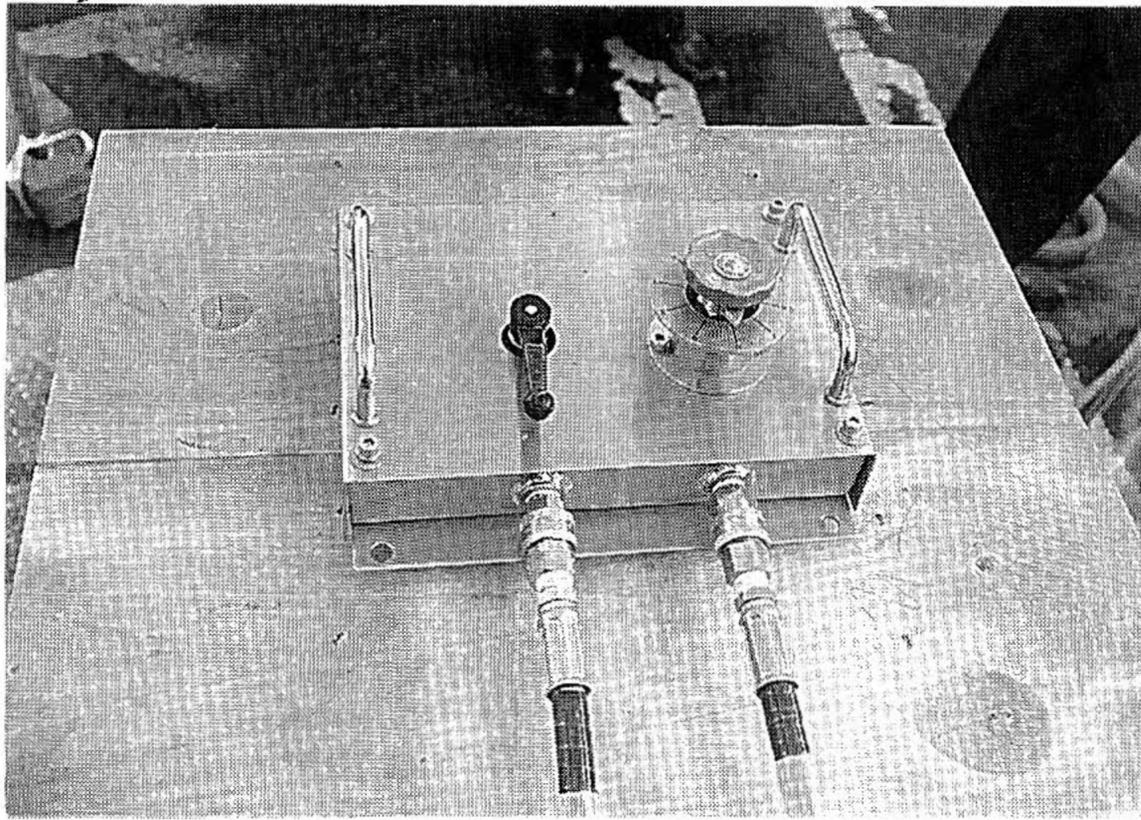


写真4 海中リモコン制御箱

Photo 4 Remote control box under water.

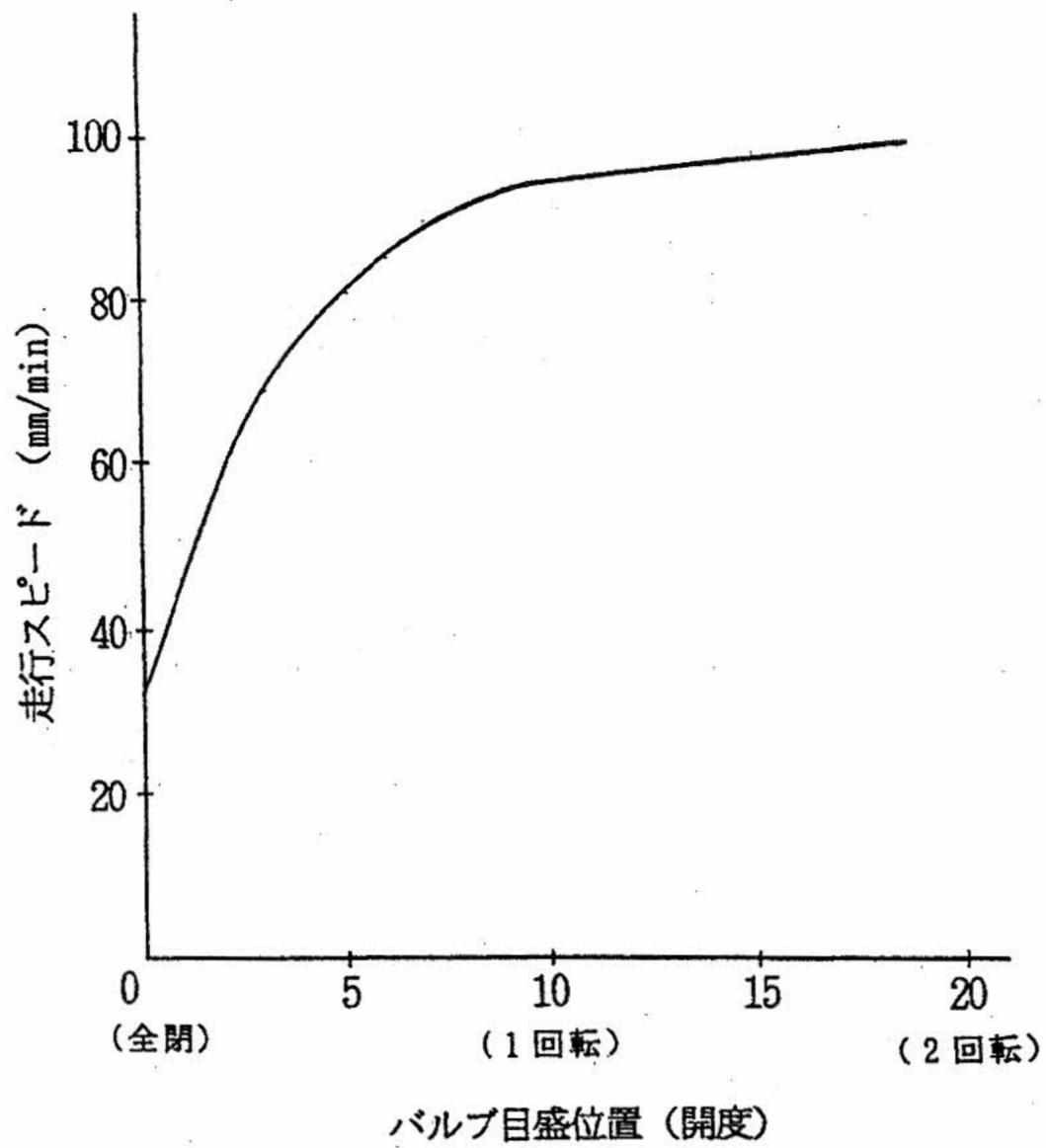


図8 バブル目盛位置と走行スピードの関係 [水圧モータ駆動圧力: 50kgf/cm²]

Fig.8 Correlation between graduated position of valve and moving velocity of nozzle.
[Driving pressure of hydraulic aquamotor: 50kgf/cm²]

- 反力測定器 : ロードセルT₂Fi-100 [オリエンテック], 動ひずみ計6M82 [日本電気三栄], デジタルスケーリングメータAS-143-13-15 [旭計器]
- 解析装置 : デジタルスペクトラムアナライザーR9221A, XYプロッタR9833 [アドバンテスト]

(2) 機器収納用コンテナ

: 6,058mm×2,438mm
×2,591mm(H),
装備重量 約7,500kg
超高圧水ポンプ等を設置・保管する。

(3) アブレイシブ混合ミキサー

(4) 予備品・特殊工具

4 アブレイシブスラリーについて

本装置では高粘度高流動性高分子材（高分子ポリマー）を添加したスラリー状アブレイシブを使用した。アブレイシブをスラリー化したことにより、チューブポンプ等での定量供給が可能となり、

ホース内への少量の水の侵入に対しても何ら問題のないものとなった。さらに高分子ポリマーの添加によりスラリーの沈殿速度を抑制し、スラリー状態を長く保たせることができ、ホース内の詰まり防止や切断中断後の再切断開始時のスムーズなアブレイシブの供給が可能となった。また流動性に優れているため長い距離の移送も容易となり、水上からの補充も行うことができるようになった。今回使用した高分子ポリマーはウォータージェット工法用添加剤WJ-1000（アニオン性ポリアクリルアמיד重合体ハイモ(株)製）で、有害となる重金属は含まれておらず水産生物に対する影響もほとんどないと考えられている⁶⁾。アブレイシブの物性を表2に示す。

5 まとめ

本試験機の開発にあたって、既存のアブレイシブウォータージェット式切断装置を水中深々度に適用した場合に生ずる問題の解決方法を検討した。その検討結果をもとに水中深々度におけるアブレイシブの連続安定供給の方法を確立し、本試験機の開発に至った。

表2 アブレイシブ物性値

Table 2 Mechanical properties of abrasive.

製品名	ガーネット# 100	
主成分	SiO ₂	37.5 %
	Al ₂ O ₃	23.0 %
	FeO	25.65%
	Fe ₂ O ₃	1.93%
	MnO	0.54%
	MgO	6.80%
	CaO	1.21%
	TiO ₂	1.63%
	硬度	10 (新サーモ)
比重	4.07	
かさ比重	1.9 (実測値)	
スラリー状アブレイシブ比重		
1.85 (実測値)		

アブレーションの連続安定供給を可能にした要因として、アブレーション供給装置の海底設置、高分子ポリマーを添加したスラリー状アブレーションの使用、均圧式スラリータンクの使用、チューブポンプの使用などが挙げられる。海底設置型の供給装置により、供給ホースの長さを短くすることができ、アブレーションの無駄が減少した。高分子ポリマーを添加したスラリー状アブレーションは、流動性に優れ、沈殿速度が遅く、水と混ざりにくい性質を持ち、ホース内やノズル内の閉塞を水中においても防止でき、長い距離の移送も容易にした。また周囲の海水に容易に混ざらないことから水上から水中深々度に設置したタンクへのアブレーションの補充が可能となった。そのためアブレーション使用量及び切断時間に関わらず適当な容量の同一タンクを使用した連続切断が可能となった。またタンクは均圧式であるため耐圧容器に比べ安価で製作も容易となった。さらにノズルへのアブレーションの供給をチューブポンプで行うことにより連続定量供給を可能とした。

また、水中駆動機器を水圧モータとし、環境汚染のない安全な装置としたことも本試験機の特徴のひとつである。

参考文献

- 1) 畠山 清：映像による実作業の紹介—パイプ組立、構造物設置回収、測量等—。ニューシートピア シンポジウム講演集, 83-88.(1991)
- 2) 小川洋司・住友 敬：水中切断技術の研究開発（その1）。ウォータージェット, 7 (1), 13-43.(1990)
- 3) 小川洋司・住友 敬：水中切断技術の研究開発（その2）。ウォータージェット, 7 (2), 9-18.(1990)
- 4) 小川洋司・住友 敬：水中切断技術の研究開発（その3）。ウォータージェット, 7 (3), 12-19.(1990)
- 5) 山口仁士・富田慎一・出村憲二：アブレーションウォータージェットによる水中切断の基本特性。海洋科学技術センター試験研究報告, 29, 88-99.(1993)
- 6) ハイモ (株) 編：高分子凝集剤。ハイモロック衛生資料集。

(原稿受理：1993年5月21日)