

潜水調査船用ロックドリルの開発

高川 真一 *1

潜水調査船により、周囲の地形や底質との関連を確認した上で、海底の岩石の柱状試料を採取したいという要望は、地球物理学や地質学の分野の研究者を中心として、かなり強いものになっている。

海洋科学技術センターではこの装置の開発に鋭意取り組んでおり、先般初めて実海域実験に臨んだ。本報告では、潜水調査船として「しんかい 2000」を対象とし、実海域実験の結果も踏まえて、潜水調査船用ロックドリルの開発を行う上での問題点と解決方法について論ずる。

キーワード：潜水調査船，ロックドリル，実海域実験，開発

Development of a Rock Drill System for a Submersible Use

Shinichi TAKAGAWA *2

Sampling of a rock core by confirming the relation with the ocean bottom topography and geology around the survey sites is becoming a strong request for the geophysicists and geologists.

A rock drilling system to be used by a research submersible is the best tool for this purpose, however, the condition to be used by a submersible is very restricted and there are only very few successes in the world.

JAMSTEC is also trying to develop this system for the 2,000 m deep manned research submersible "SHINKAI 2000" and the first trial has been carried out in 1988.

As the result, the rock core couldn't be sampled due to some trouble, however, the points to be reformed were clarified and a concrete prospect for the realization of the rock drilling system was obtained.

This paper describes the problems and resolution on the development of the rock drilling system on the basis of the sea trial.

Key word: Submersible, Rock Drill, Ocean Experiment, Development

*1 深海開発技術部

*2 Deep Sea Technology Department

1. 序

周囲の地形や底質等との関連を確認した上で、海底の岩の柱状試料を採取したいという要望は、地球物理学や地質学の分野の研究者を中心としてかなり強いものになっている。

この目的には、潜水調査船で扱うことができるロックドリルが最も適しているが、潜水調査船で用いるという条件に伴う諸々の制約が非常に厳しく、世界的にも成功した例はあまりないのが現状である。

海洋科学技術センターにおいてもこの開発に鋭意取り組んでおり、先般初めて実海域実験に臨んだ。結果的には柱状試料の採取はできなかったものの、問題点も明らかになり、潜水調査船用ロックドリルの実現に確かな見通しが得られた。本報告では、潜水調査船として「しんかい 2000」を対象とし、実海域実験の結果も踏まえて、潜水調査船用ロックドリルの開発を行う上での問題点と確決方法について論ずることとする。

2. 問題点

開発にあたっては、潜水調査船が装備している動力源から動力を得ることを考えなければならない（別途専用の動力源を持ち込むことはそれだけで相当の重量になり、潜水調査船に装備できなくなる。）ことと、それ程器用とは言えないマニピュレータで操作しなければならないという2つの大きな問題点に常に留意しなければならない。

2.1 動力源の問題

潜水調査船の動力源は電池である。そしてこの電池をエネルギー源として油圧系が運転されている。従ってロックドリルの動力源として使用できるのは、電力か油圧である。しかし「しんかい 2000」では、ロックドリルのような調査機器用の油圧ラインが用意されていないため、電池を直接の動力源とすることとした。この場合は水中電動機を運転することになるが、電動機はスイッチを入れた際の起動時の電流が非常に大きく、定常時の3倍程度にもなる。このため、定常時の所要電流が回路の許容電流値より小さくても、起動時に許容値をはるかに越え、回路を破損することが多い。そこで、特に起動時に電流が許容値以上に流れないように特殊な回路構成としなければならな

かった。

2.2 水中電動機と回転動力伝達方法の問題

深海で電動機を運転する場合には、油漬均圧型電動機を用いる方法と、電動機を耐圧容器に収納し、回転力をマグネットカップリング（駆動軸の磁力に引きずられる形で従動軸の磁石を回し、従動軸を回転させる方法。図1参照）を介して伝達する方法が現状ではある。

油漬均圧型電動機として最初から設計・製作された電動機を使うことができれば理想的であるが、そのようなものは極めて高価である。一般の陸上電動機をそのまま油に漬けて用いることも可能であるが、油の粘性による効率の低下や寿命の劣化あるいは整備の煩雑化は避けられない。ただし、市販の電動機は極めて廉価であり、上記の問題を厭わなければ十分使用できる。

電流形式には直流と交流がある。直流電動機の場合はブラシと整流子の接点におけるスパークの発生により、油の劣化（炭化）が著しいという問題がある。これは潤滑理論が示すように回転によって油がブラシと整流子の間に入り込み、両者を隔離してしまう際に生ずるスパークによって油が炭化するものと説明されており（図2参照）、フランス（IFREMER）ではブラシを押しつけるバネの力を強くし、アメリカ（WHOI）では整流子に螺旋状の溝を切って、双方共両者の接触圧を高くしているとのことである（Schumaker 元WHOI 職員の話）。筆者は市販の直流電動機にWHOI方式を試してみたが、溝を切る際に生じた導体のケバが隣の整流子電極に触れ、部分的な短絡を生じて、十分なトルクが得られなかった。また、バネを強くすることは市販品ではかなり難しい。

しかし、油の炭化を覚悟し、油の装換を厭わなければ、市販の直流電動機をそのまま油漬均圧化しても、ある程度は十分使用できる。

交流誘導電動機はブラシや整流子がないので油漬均圧化の上では非常に良好である。しかし、「しんかい 2000」では交流はAC100V、500Wまでしか供給できず、ロックドリルに用いるにはパワー不足である。

マグネットカップリング方式は大気圧空気中で運転するので、油漬のような煩わしさはない反面、

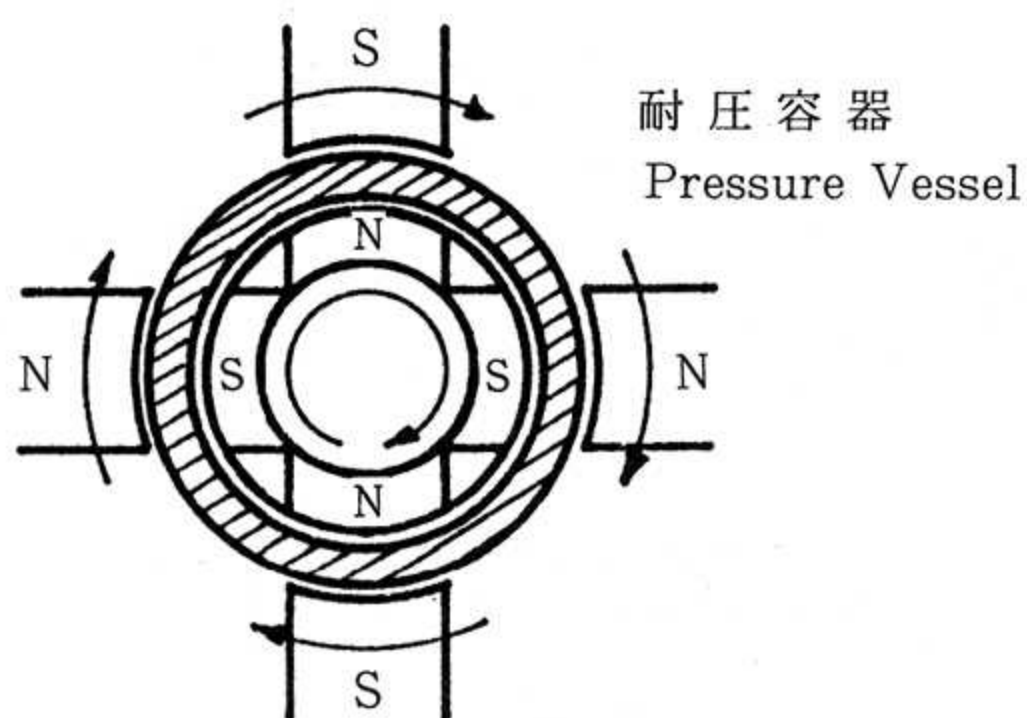
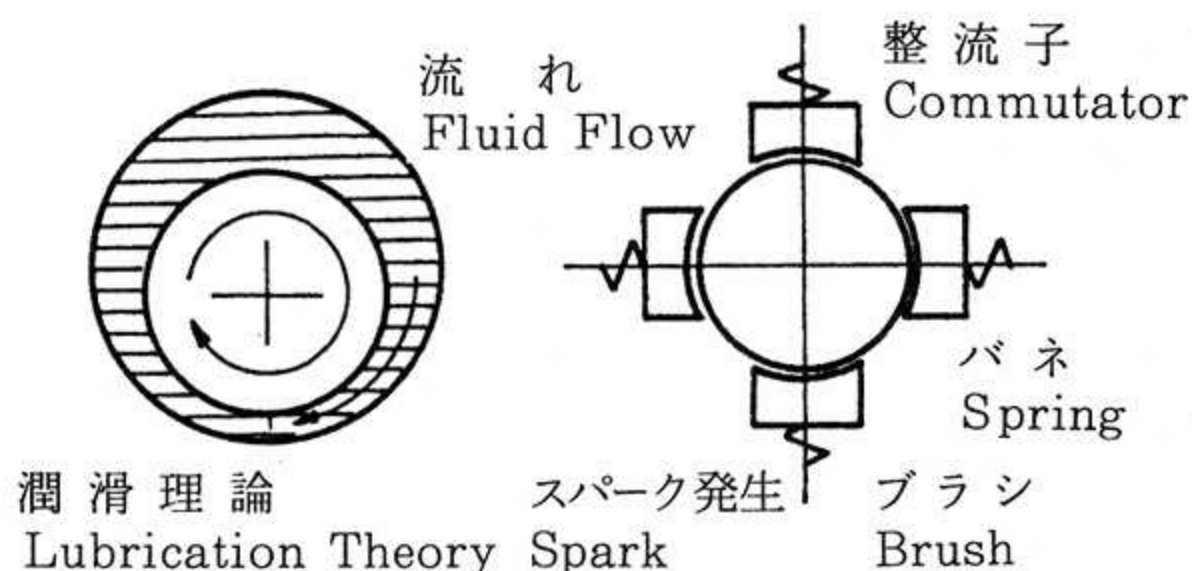


図 1 マグネットカップリング方式のトルク伝達機構

Fig.1 Torque Transmission Mechanism of the Magnet Coupling Method



面圧を大きくするための螺旋状溝
Spiral Groove to obtain large Pressing Force

図 2 潤滑理論と、スパーク発生原因並びに解決方法

Fig.2 Lubrication Theory and Spark Occurrence, its resolution

密閉容器中で運転するので、冷却について慎重な考慮が求められる。また、大きなトルクがかかるとカップリングが滑って空回りしてしまうので、ロックドリルのように大トルクが要求される装置には所要トルクと許容トルクの関連を良く把握しておかなければならない。

2.3 切込みの問題

回転しているロックドリルの刃を岩に当てると、よほどの幸運でない限り必ず刃が踊り出す。これは刃が片当たりしているためであり、刃が踊って振れないような方策が必要である。

2.4 刃先冷却・清掃の問題

刃先が岩を削る際には相当の熱が発生する。深海底では水温は高々数度であるが、水がドリルの刃先付近で滞留すると刃先が過熱するので、周囲の冷たい水を強制的に送り込んで刃先を冷却する必要がある。それと共に、岩の切粉を排除しないと切れ味が悪くなるので、冷却を兼ねて切粉を吹き飛ばす必要がある。

3. 試作したロックドリルの概要

上記のような問題点を踏まえて、「しんかい2000」用ロックドリルを試作した。以下にその概要を示す。

3.1 基本仕様

本ロックドリルの基本仕様を表1に示す。

この方式は、切込み時の刃先の振れを防ぐために、まず案内溝を切る刃をマニピュレータでドリル本体に差し込み、その刃で岩盤上に $\phi 20 \times \phi 38 \times$ 深さ約5mmの案内溝を切り、次いで刃を試料採取用のものに付け替えて刃を案内溝に挿入し、掘削する方式である。

動力としては、市販の直流電動機を直接油漬均圧化した方式を試みた。主な改造点は、電動機ケースに油の流通のための多数の孔をあけたことである。

電源としては、調査機器用に用意されている電源(DC 28V, 500W)では耐圧殻内に大電流が流れる電線を持ち込むことになり、万一の際危険であるのでそれは止め、船外照明灯用(DC 108V, 10A)の電線を直接接続して駆動する方式とした。

本ロックドリルは、無負荷運転時に油の粘性のために電流が約4A流れ、従って起動時には相当大電流が流れることから、潜水調査船の電気回路の保護のため、パワートランジスタを用いた電流制限回路を途中に設けている。この回路は、電流が設定値(12A)より小さければ抵抗値0で電流を通すが、設定値を越えると自らが抵抗体となって電流を設定値以内に抑えるものであり、一般の

表 1 基本仕様
Table 1 Principal Specifications

形 式 Type	直流電動機直結型ロックドリル Rock Drill driven directly by DC Motor
使用潜水調査船 Submersible to be used	しんかい 2000 SHINKAI 2000
エネルギー源 Energy Source	しんかい 2000 常用搭載蓄電池 DC 108V Battery of the submersible DC 108V
電動機 Motor	通常直流電動機 100V 1kw 2000 rpm Normal DC Motor 100V 1kw 2000 rpm
掘削刃形式 Type of Cutter	ダイヤモンドカッタ Diamond Cutter
刃先径 Diameter of the Cutter	
案内溝切り刃 Guide Groove Holer	$\phi 38 \times \phi 20 \text{ mm}$ $\phi 38 \times \phi 20 \text{ mm}$
試料採取刃 Sampling Holer	$\phi 36 \times \phi 22 \text{ mm}$ $\phi 36 \times \phi 22 \text{ mm}$
試料長 Sample Length	最大約 150 mm Max. 150 mm
採取機構 Sampling Mechanlcs	内蔵捻じ切り爪 Built-in Twisting Claw

電流制限回路付電源と同じである。しかし、通常は強制空冷により、発生する熱を奪い取るが、本回路は小さな耐圧容器に収納されるため、発熱が続くと過熱してトランジスタが破壊され、抵抗が 0 になる。そこでその際の過電流による事故を防ぐために更に 15A のフューズが入っている。船外照明灯用のフューズは 25A であるので、電流制限回路の方が先に飛び、潜水調査船側に悪影響がないよう考慮したものである。

3.2 詳細構造

本ロックドリルの組立構造図を図 3 に示す。

図 3 の上段の図の着色部が案内溝切り刃であり、中心線上の円錐部が先に岩に当たって、これを中心として案内溝を切り込むものであって、これにより刃の振れを抑えることを目的としたものである。

図 3 の中段の図は試料採取用の刃である。この刃は、掘り込むだけでなく、所定量掘り込んだ後に柱状試料を岩盤から分離して持って来なければならない。そこで先端部には切り込み用の刃先

を設け、内側に試料を捻じ切るための爪を設けている。掘削中は押し付け力によりこの捻じ切り爪は試料に当たらないよう凹部に隠れている（同図中心線より上）が、引き抜くために押し付け力を解除するとこの爪が出て来て試料を捻じ切り、そのまま保持するようになっている（同図中心線より下）。

図 3 の下段の図はドリル本体である。右側が電動機とその収納容器で、フランジを介してその左側に均圧ブラダと軸受が設けてある。

ブラダの材質には種々考えられ、当初は理化学用コンドームを用いてみた。しかし、膜厚が薄すぎて、わずかの引っ掛かりで簡単に破れてしまい、使用に供し得なかった。次いで、海洋科学技術センターで試作したいくつかの装置に用いられて実績のある熱収縮チューブ式ブラダを用いてみたが、油漏れの問題が生じた。そこで一端を加熱圧着したビニールホースを用いたところ、ブラダとしてうまく機能することが分かったので、これを用いることとした。

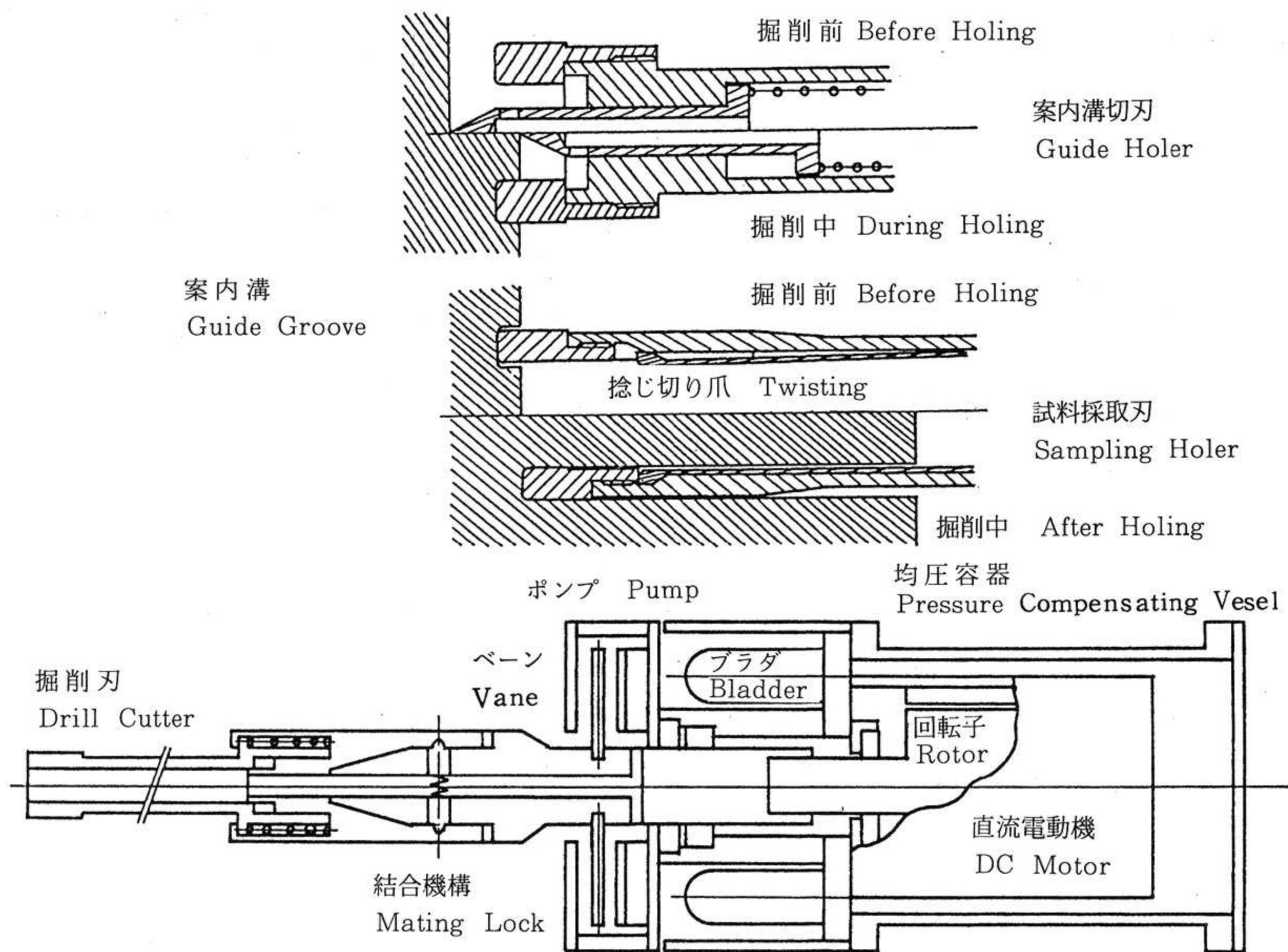


図 3 直流電動機直結型ロックドリル基本構造図
Fig.3 Structure of the Rock Drill driven directly by DC Motor

本体の図の左側にあるのが刃先冷却・清掃用の遠心ポンプである。周囲の海水はポンプのベーンで外周方向に振り飛ばされ、ベーンの右側で整流されて軸芯を通過して左側に放出される。

ポンプのすぐ右側にあるのがオイルシールであり、ここで海水と油の混入を防いでいる。

結合機構とは、刃と駆動軸を結合するものであり、刃は駆動軸に差し込むだけで取り付けられ、また、引くだけで簡単に抜けるよう考慮したものである。

4. 実海域実験

以上説明した機器を用いて、昭和63年(1988)16月29日出に相模湾熱川沖海底溶岩台地(水深約1200 m)において、第376回潜航として試験を実施した。

装備にあたっては、5番船外照明灯の電線ははずして、船外ペイロードラックに取りつけた電流制限回路につないだ。また、通常は採泥器を収納する筒に案内溝切り刃並びに試料採取刃を収納し、ドリル本体はマニピュレータで握ったままサンプルバスケットに立てておき、この状態で潜航した。

試験にあたっては潜水調査船を海底にしっかりと着座させる必要がある。10:19に潜航を開始して11:17には海底に到着した。そして、着底できる適当な場所を探すのに手間取ったが、13:01には適当な場所を見つけて着底(水深1220 m)し、試験作業に入った。

しかし、刃と本体とは容易に着脱できるようにしてあるが、マニピュレータの動きがぎこちないため、着脱の容易さが災いして、マニピュレータの衝撃的な動きで、取りつけた刃が岩に当てる前

に簡単にはずれることが繰り返され、なかなか案内溝を切るステップまで進めなかった。これは着脱装置の止め具の強さの問題であり、容易に改善できる。

6回目の試行でようやく案内溝切り刃を岩に立てることができたので、早速試掘作業を開始した。ポンプからの噴流により、うっすらと堆積していた泥が吹き上げられたと見られる茶色の煙が舞い上がり（写真1参照）、間もなく溶岩の切粉と見られる淡青い煙が舞い上がるのが観察された。しかし、視界にはほとんど影響はなかった。50秒間運転して案内溝切り作業を終了した。この際の所要電流は約6 Aであった。

続いて、案内溝切り刃をはずして収納筒に戻し、試料採取刃を取りつけて、刃先を案内溝に挿入しようとした。しかし、マニピュレータのぎこちない動きのためになかなか案内溝に挿入できなかった。

何とか挿入できたと思われる段階でドリルを駆動したところ、刃が完全には案内溝に入っていなかったために刃が踊り出したので、直ちにドリルの駆動を停止し、再度案内溝への挿入を試みた。

そして再びドリルを駆動したところ、きれいに回転し始めた（写真2参照）。この時、やはり淡青い煙が舞い上がるのが観察された。なお、掘削中の電流値は約10 Aであった。

掘削中、電動機部が重いため、ドリル本体がマニピュレータで支えられているにもかかわらず、次第に傾いてきたので2回傾斜を修正した。

試料採取刃による掘削を開始して1分50秒後に、突然ポンプベーン6本中2本が折損した。これにより回転釣合がとれなくなるので、直ちに（折損確認から7秒後）ドリルの駆動を停止し、刃を掘削孔から引き抜いた。掘削孔は目測で約15~20mm程度であり、捻じ切り爪にかかるかかからないかという程度であったため、試料採取はできなかった（写真3参照）。なお、捻じ切り爪方式は以前同様のものを試験した際、良好に機能した（長さ約20mmの試料採取に陸上試験では成功している）ものであり、ポンプベーンの折損がなければ試料採取は十分可能であったと考えられる。

ポンプベーンが折損し、回転釣合がとれないため、ドリルの駆動ができないので、試験を終了す

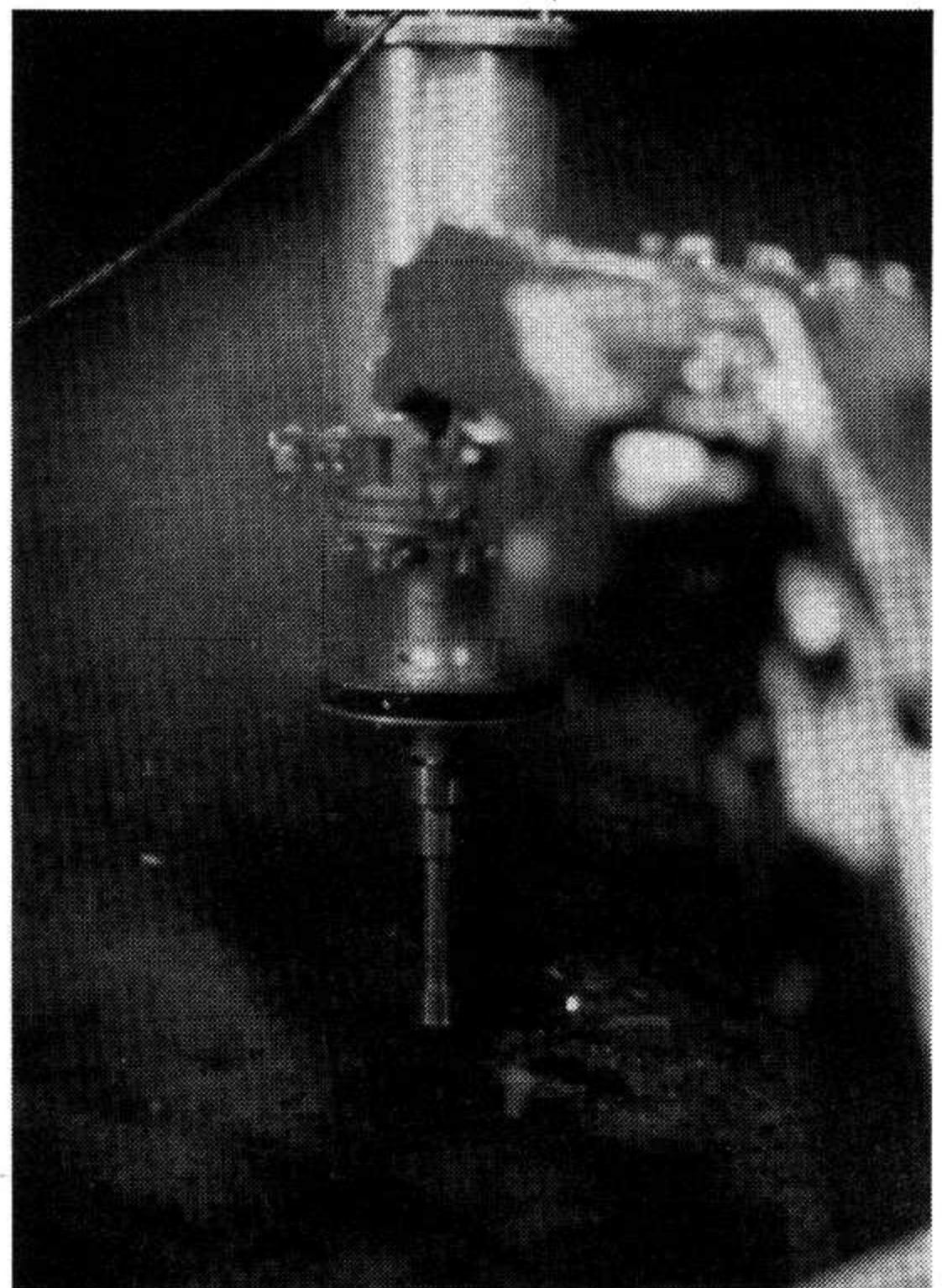


写真1 案内溝の切込み
Photo.1 Cutting of the Guide Groove



写真2 試料の掘削
Photo.2 Drilling of a Sample

ることとし、刃を所定の収納筒に戻し、折損したポンプベーンを回収した上で、ドリル本体をサンプルバスケットに戻し、離底して海面へ向かった。揚収完了は16:01であった。折損・回収した2本のポンプベーンのうちの1本は浮上途中で流されたらしく、1本しか残っていなかったが、折損状況を観察したところ、ポンプ壁が回転中心軸に対

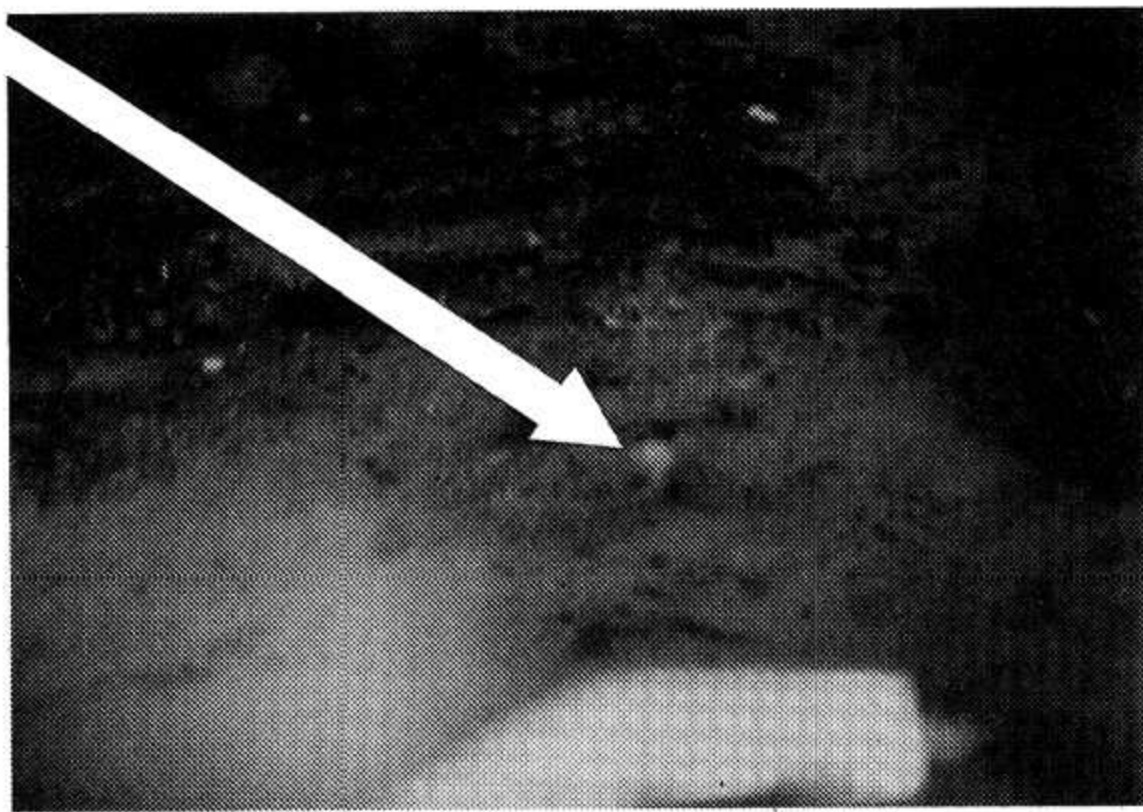


写真3 切り込まれた孔 (矢印)
Photo.3 Drilled Hole (Arrow Mark)

して垂直ではなく多少傾いていたようで、壁をこすって摩耗した跡がベーンにあり、これによる繰り返し疲労と思われる疲労痕が折損面に残っていた。従って壁とベーンの接触によるベーンの疲労が折損の原因と考えられる。

5. 今後の対応と展望

以上の試作並びに実海域実験の結果、次のようなことが分かった。

- ① 市販の直流電動機をそのまま油漬し、均圧ブラダにビニールホース、シールにオイルシールを用いる方法は非常に簡便なものであり、水中電動機としての機能は十分発揮できるので、頻繁に油の装換を行う手間を厭わなければ、簡便な水中動力源として十分用いることができる。
- ② 案内溝切り刃のように中心保持機構を設けた刃は、切り込み時にも振れて踊ることなくスムーズに掘進できるので良好である。
- ③ 本ロックドリルのように大きな瞬間電流が流れる機器には、電流制限回路が有効である。
また、問題点としては次のようなことが挙げられる。
- ① ドリル本体と刃の結合が甘く、すぐにはずれてしまう。これは、陸上で手で着脱・操作していた時には分からなかった問題であり、マニピュレータを操作して初めて分かったものであるが、保持爪の強度の問題であり、容易に修正できる。
- ② ポンプベーンが折損して、掘削作業を中断せ

ざるを得なかった。これは、加工と組立の問題であり、直ちに修正しなければならない。

- ③ 一旦あけた小さな孔に再度刃を挿入することは非常に困難である。これはマニピュレータの動きがぎこちないことにも起因するが、「しんかい 2000」のマニピュレータはパイロットグループの努力によって、本来の機能以上の機能が引き出されており、今以上の機能を望むには、マニピュレータそのものをバイラテラル方式にする等、根本的な変更が必要である。しかし、それ以前の問題として、刃の付け替えなしで一気に掘削できる機能を持つ刃を開発することが是非必要である。

- ④ 本ロックドリルの重量が重く、マニピュレータで支えることが困難である。これは、大出力の水中電動機を用いる限り避けられない問題であり、これを解消するには、油圧系が利用できるようにするしかないと思われる。なお、現在建造中の 6500m 潜水調査船には、調査観測機器油圧系が設けてあり、この場合には容易に利用できる。「しんかい 2000」でも油圧系が利用できるよう、何らかの検討をする必要がある。

今後の方針としては、問題点の①と②については直ちに修正し、また④の油圧化については検討を進めることとする。しかし③の一気に掘削できる機構については、直ちに検討し、早急にこのような機能を有するものを開発する必要がある。

6. 謝 辞

本装置の開発に当たっては、「しんかい 2000」とそのマニピュレータの能力を勘案し、小型軽量化と操作の容易性を考慮して実施してきたが、実際に「しんかい 2000」で操作してみると、かなり苦しいところがいくつか発見された。

しかし、このような問題点をかかえているにもかかわらず、「しんかい 2000」運航チームは、「しんかい 2000」が本来持っている以上の機能を、彼らの根気強い真摯な努力と奮闘によって引出し、岩盤に孔をあけるところまで実施し得た。彼らの並々ならぬ努力と奮闘に敬意を払い、ここに記して感謝の意を表する次第である。

(原稿受理：1989年5月30日)