

# 南極海棚氷下の生物調査用水中ロボットの検討

正員 加藤 直三<sup>\*1</sup>      正員 柴田 陽三<sup>\*2</sup>  
 正員 川崎 忠幸<sup>\*2</sup>      正員 小原 敬史<sup>\*3</sup>  
 正員 広川 潔<sup>\*4</sup>        正員 井田 匡彦<sup>\*4</sup>  
          藤本 勝樹<sup>\*5</sup>        松 廣 紀 夫<sup>\*6</sup>

## Study on the Underwater Robot for biological research under ice shelves in the Antarctic Ocean

by Naomi Kato, *Member*      Yoza Shibata, *Member*  
 Tadayuki Kawasaki, *Member*    Takashi Obara, *Member*  
 Kiyoshi Hirokawa, *Member*    Tadahiko Ida, *Member*  
 Katsuki Fujimoto                Norio Matsuhira

**Key Words:** Underwater Robot, Antarctic Ocean, ice shelf

### 1. 緒言

南極海棚氷下には未知の生物群の生息していることが、同じ南極海生息の‘ひげアザラシ’のデータロギング調査の過程での特異な潜水行動から明らかになっている。また最近のドイツ、オーストラリアなどの国際研究チームの調査によると、近年の地球温暖化による気温上昇の影響で、棚氷の消失も目立ち始めており、かつて棚氷に覆われていた海域から新種のヒトデや深海性の魚類、甲殻類などが多数発見されている。このように棚氷下の生物の生態を解明するために生物調査を実施することは地球環境にとって非常に大きな意義があると考えられる。<sup>1)2)3)</sup>しかしそのような用途に適した有効な調査手段が現在は見当たらない。そこで生物調査用に使用する水中ロボットに関して検討会を新たに組織し、生物調査の目標設定、水中ロボットのミッションの設定、水中ロボットに関する要素技術の検討、水中ロボットの概念設計等について検討中である。

### 2. 南極海棚氷下の環境

南極大陸の面積は約 1,390 平方 km であり日本の国土の約 37 倍である。その 95%以上が平均厚さ 2,000m 以上の氷床に覆われている。この南極大陸を覆う氷床は内陸部から沿岸部へと長期間かけて押出されるように流れ出し、そのまま海に浮かんだ状態で大陸とひと続きの氷原となる。この氷原が棚氷と呼ばれている。南極大陸の周辺には多くの棚氷が発達しており、ロス棚氷やロンネ棚氷など 40 万平方 km を超える広大なものも存在する。

\*1 大阪大学大学院工学研究科

\*2 (株)川崎造船 神戸工場

\*3 三井造船(株) 玉野艦船工場

\*4 三菱重工業(株) 神戸造船所

\*5 広和(株)

\*6 古野電気(株)

原稿受付 平成 19 年 4 月 13 日

春季講演会において講演 平成 19 年 5 月 24, 25 日

©日本船舶海洋工学会

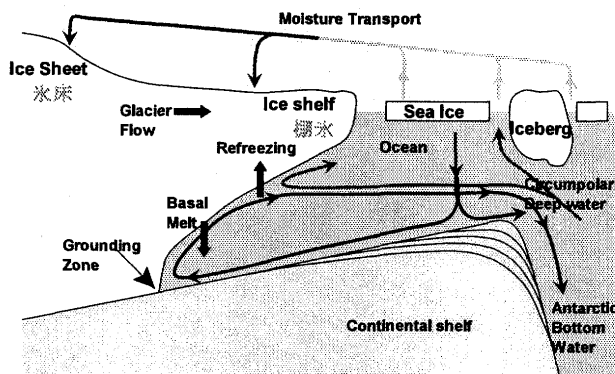


Fig.1 南極海の氷、海水の流れ<sup>4)</sup>

水中ロボットが生物調査を実施する南極海棚氷下は非常に特異な環境下であり、日本近海でのオペレーションとは違い運用においては困難を伴うと予想される。棚氷下の特徴を以下に示す。

#### (1) 狭隘な地形

棚氷下は閉鎖空間であり中には洞窟のような地形も存在する。上方には氷があるこのような環境下では音波による通信が困難である。

#### (2) 多数の突起物

棚氷下には大小の突起物が多数存在するため、ロボットやケーブルが引っ掛かる危険がある。

#### (3) 複雑な海流

南極大陸の周囲には南極周遊流(南極還流)の存在が知られている。棚氷下ではさらに複雑な流れを形成していることが予想される。

#### (4) 極低温下の環境

極域独特の極低温下の環境のため、調査海域の海面が氷結し塞がれてしまう可能性が考えられる。また回収後に水中ロボットが氷結し、装備機器類等を損傷させる危険がある。

#### (5) 海水密度の変化

日本近海の海域と異なり特に棚氷下では海水密度の変化が非常に大きく、海水密度が極端に変動する層が存在することも知られている。

(6) 運用の制約

水中ロボットの直上から母船による監視や支援が不可能なため、運用が大きく制約されてしまう。

3. 調査用水中ロボットの要求機能・運用概念

3.1 水中ロボットの氷海域調査の現状

欧米では南極及び北極などの極域における調査観測にも水中ロボットが使用されている。ここではAUV(自律型無人潜水機)、ROV(ケーブル式無人潜水機)での使用実績のあるものについて代表的なものを以下に示す。

(1) Autosub

英国サザンプトン海洋研究所を中心に開発・運用されている大型 AUV で、英国 Natural Environment Council の資金を得て、2000 年より Autosub Underice project として南極の氷海下やグリーンランドの棚氷下での調査運用が行われている。

(2) THESEUS

カナダ ISE 社の大型 AUV で 1996 年 4 月にカナダ Ellesmere 島から氷海下(深度約 50m~600m)に約 175km 光ファイバーケーブルを敷設している。厚さ 1.7m の海水に熱水カッターで約 2m×13m の穴を開けて投入し、回収は開口部近くに帰還した THESEUS に ROV で網をかけて揚収している。

(3) ALTEX (Atlantic Layer Tracking Experiment)

米国モントレー海洋研究所の中型 AUV で大西洋の暖かい海水の北極への流入調査をミッションとし、目的に応じてセンサ部や電池等のモジュールを交換することが可能である。

(4) ROV

米国 NOAA(海洋大気庁)の Global Explorer、フランス IFREMER(国立海洋開発研究所)の VICTOR 6000 などが極域調査に使用されている。

Table 1 極域調査用 AUV の例<sup>5)6)7)12)</sup>






	AUTOSUB2	THESEUS	ALTEX
所有者	サザンプトン海洋研究所(英国)	カナダ海軍	モントレー海洋研究所(米国)
目的	グリーンランド、極域の調査	北極海での光ファイバ敷設、調査	大西洋、地層調査、北極海調査
機体寸法	全長:約7m 重量:約3.6トン	φ約1.27m×10.7m 重量:約8.6トン	φ約0.53m×5.5m
使用深度	1600m	1000m	4500m
機体外観			

Table 2 極域調査用 ROV の例<sup>8)9)14)</sup>

	Global Explorer	VICTOR 6000	
所有者	NOAA(米国)	IFREMER(フランス)	
目的	極域調査観測	極域調査観測	
機体寸法	約2m×1m×1m 重量:約1トン	約3.1m×1.8m×2.1m 重量:約4トン	
使用深度	約3000m	6000m	
調査観測装置	HDTVカメラ、サクシオンサンプラー	CCDカメラ、TVカメラ、採水装置、サクシオンサンプラー	

3.2 水中ロボットの要求機能

南極海棚氷下での生物調査を実施するための水中

ロボットには以下の機能が必要である。

- ①棚氷直下及び海底直上において未知の生物サンプルの採取が可能。
- ②生物サンプルの画像データを取得。
- ③環境調査(流速及びCTDの計測、採水)の実施。
- ④位置情報の把握。(回収ポイントへの確実な帰還を含む)

※(棚氷端部から数 km、水深数百 m 海域を生物調査)

3.3 オペレーション及びミッション

生物調査用水中ロボットの運用ミッションは以下の流れが考えられる。

- ①母船より水中ロボットを着水。潜入開始。
- ②調査ポイントに向けて航行。
- ③調査ポイントの棚氷下部及び海底直上にて、生物サンプルの採取、流速、CTD(電気伝導度、水温、深度)を計測、採水を実施。
- ④調査終了後、回収ポイントに向けて航行。
- ⑤母船へ水中ロボットを回収。

なお水中ロボットにはテザーケーブルを介して母船とリンクする ROV 型とリンクしない AUV 型が考えられる。ROV 型はケーブルを延ばしての調査を考えると、ケーブルハンドリングの調整、カタナリーの影響から棚氷下数百メートルの範囲が限界と考えられる。一方、AUV 型は棚氷下での調査の自由度が増すという利点があるが、生物調査というミッションを考慮すると、長時間モニタリングができるよう、母船との間で大容量高速通信リンクを持つことが望ましい。本ミッションでは棚氷端部から数 km の範囲にわたり調査を実施する必要から、調査用水中ロボットは光ファイバーケーブルリンクによる UROV 型として検討する。

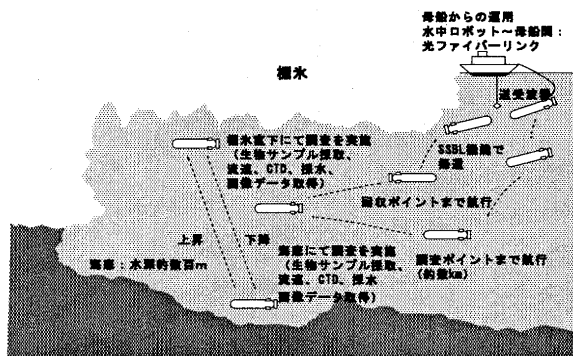


Fig.2 水中ロボットのミッション例(母船による運用)

4. ロボット本体及び要素技術の検討

水中ロボットの南極海域での運用を想定した場合、いくつか要素技術についての課題(リスク)が考えられる。それらを整理、検討し、その解決策について以下のようにまとめて示す。

4.1 構造及び推進運動機構

水中ロボットは棚氷直下、海底直上において生物調査を繰り返さなければならない。したがって少なくとも前後、上下方向の運動、さらに回頭運動の3自由度運動が可能な構造とする必要がある。(例:スラスタ2台装備構造) なお上下方向の運動には棚氷下の海水密度分布の状況を考慮し、水中ロボットに装備した浮量調整機能を利用する。また極力小型軽量化するとともに、現地での機器交換や整備を容易にするためにオープンフレーム構造として検討する。

また南極海では海水密度の急激な変動が発生するため、生物調査を繰り返す過程において、水中ロボットは深度コントロールを行うことが非常に困難となる可能性が高い。この場合も浮量調整機能を利用することを検討する。

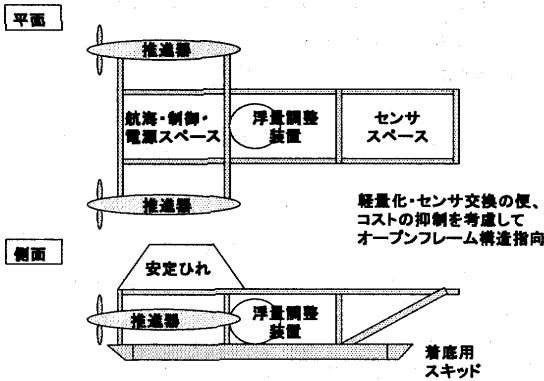


Fig.3 生物調査用水中ロボットイメージ例

4.2 生物サンプル採取技術

生物調査では棚氷直下、海底直上に生息する生物サンプルを発見し、それらを確実に採取しなければならない。ROV等にはポンプで比較的大型の生物類(クラゲ、植物など)を吸引し搭載容器に収納するタイプの生物採取装置が装備されたものがあるが、小型生物類(プランクトン、微生物など)を採取対象としたスプリングによるピストン動作式の採取装置などもある。採取対象の生物にあわせて考慮する必要があるが、小型で消費電力の小さい後者の方式の方が有利である。

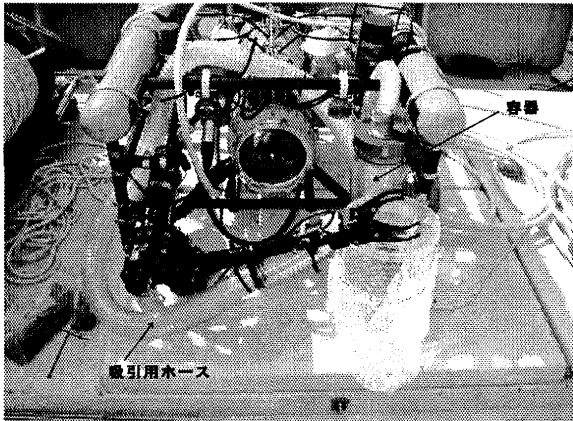


Fig.4 スラップガン方式生物採取装置(例)

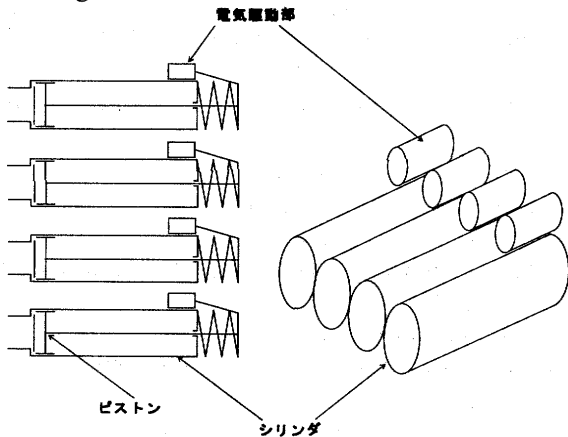


Fig.5 シリンダー方式生物採取装置(例)

Table 3 生物採取装置の比較

方式	スラップガン方式	シリンダー方式
概要	ポンプで生物を吸引、容器に収納	スプリングによるピストン動作により吸引
対象生物	大型生物、クラゲ等	プランクトン、微生物
適応ピークル	大型ピークル	小型ピークル
消費電力	大電力	小電力

4.3 位置計測技術

通常、調査観測用の水中ロボット等には慣性航法装置(INS)が装備されているが、極域においては高緯度領域(南極海棚氷は南緯 70~80 度付近)であるがゆえに方位誤差の増大に伴う位置計算誤差が大きくなり、水中ロボットの運用において障害となることが懸念される。よって INS 及びドップラーソナーによるハイブリッド方式の航法装置と音響測位(SSBL)との併用による実用的な航法を検討する必要がある。<sup>13)</sup>

また SSBL 機能に必要なトランスポンダの運用について棚氷環境下での設置場所、設置方法、回収方法等の検討が重要である。

4.4 回収技術

生物調査終了後、水中ロボットを確実に回収しなければならない。運用においては INS/ドップラーソナーによるハイブリッド方式の慣性航法装置により、水中ロボットを回収ポイント付近まで帰還、母船側の音響ホーミング用送受波器等に対して水中ロボットの SSBL 機能を利用して回収ポイントまで到達させ、専用設備により回収する。

水中ロボットの回収方法としては以下の方法が考えられる。

(1) 母船設備を利用した回収方法

水中ロボット専用の支援母船、あるいは調査用としてチャータした船舶の着水回収設備(Aフレームクレーン、多関節クレーンなど)により、回収ポイントまで帰還した水中ロボットを回収する。この方法は通常の海域での AUV, ROV 等の回収と同様の方法であり、AUTOSUB 2 などの支援母船では母船設備による回収を極域でのミッションにおいて実施している。またスリップウェイ方式の例もある。

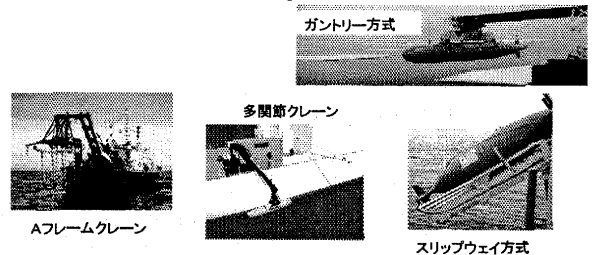


Fig.6 母船設備を利用した回収例 <sup>5) 10) 11)</sup>

(2) 棚氷設置の回収用設備を利用

棚氷端部等に設置した貫通穴から回収用設備(クレーン、ウィンチ等)を使用した水中ロボットの回収も考えられる。極地探査用 AUV の THESEUS では氷上に穴を開け専用のチェーンホイストにより回収が行われている。しかしながら、棚氷の規模、周囲の環境などから考えると作業には多くの困難が予想される。



Fig.7 水上設置の回収設備の利用例<sup>6)</sup>

また南極海は極低温環境のため、回収ポイントの海面が氷結し回収不可能となる可能性も考えられる。その場合、水中ロボットへ回収ポイント変更のコマンドを送信し、回収ポイントを氷結していないポイントに変更するなどの処置をとる必要がある。

4.5 緊急対応策

南極海棚氷下の環境について先述したが、棚氷下は狭隘な地形及び多数の突起物が存在する特有の環境でもあることから、水中ロボットの調査ミッション時及び完了後に無事に回収する上で通常のミッションよりも以下に示す多くのリスクが考えられる。それらに対する水中ロボットの要求機能とあわせてまとめて示す。

(1) 突起物等の影響による航行不能

①突起物との干渉、衝突を回避するため安全な操縦を行う必要がある。そのため前方監視ソナー、上方監視ソナー、下方監視ソナー等で水中ロボットの周囲の監視を随時行う。

②水中ロボットにトランスポンダを装備する。

(2) 水中ロボット～母船間のケーブルが破断

①応急用パラストを離脱して水中ロボットを(棚氷下)海面へ浮上させる。

②水中ロボットにトランスポンダを装備する。

③ケーブルへの絡まり防止対策等を実施する。

(3) 水中ロボットが故障、航行不能

①応急用パラストを離脱して水中ロボットを(棚氷下)海面へ浮上させる。

②水中ロボットにトランスポンダを装備する

(4) 回収後に装備機器類が氷結

①水中ロボット回収後、水中ロボット及び関連機器類をコンテナ設備等へ保管し保温対策を実施する。

②装備機器類に氷結防止用のコーティングを実施する。

南極海棚氷下の生物調査用水中ロボットの概略仕様及び装備機器類の配置案を以下のとおり検討した。

Table 4 水中ロボットの概略仕様

調査用装置	生物採取装置、TVカメラ、水中ライト、CTD計、採水装置、ドップラーソナー
センサー類	監視ソナー(前方、上方、下方) 上方、下方はドップラーソナーが兼用
制御装置	慣性航法装置、ドップラーソナー、音響ホーミングソナー、トランスポンダ
推進装置	スラスタ
動力源	搭載型動力源
通信装置	光通信装置、音響通信装置
緊急装置	浮量調整装置、応急用パラスト
支援装置	クレーン、充電装置、監視装置(コンテナ)など

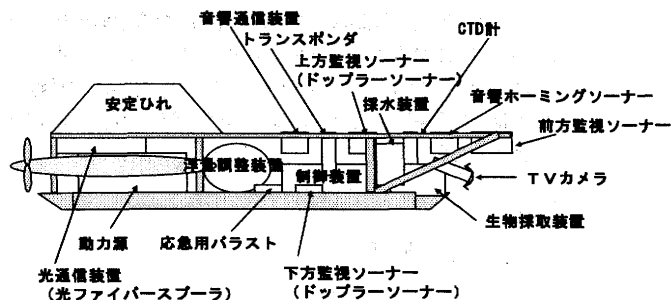


Fig.8 水中ロボット装備機器類の配置案

5. 結 言

南極海棚氷下の生物調査用水中ロボットの運用ミッションの設定、ロボット本体、要素技術に関する課題及び解決策を検討した。今後は他の研究機関との共同研究も視野に入れながら、さらに水中ロボットの設計検討、実際の運用を想定した準備検討を進めていく。

謝 辞

南極海棚氷下の生物調査用水中ロボットの検討を実施するにあたっては、生物調査の目的、意義、現状等について前国立極地研究所教授でバイオロギング研究所所長の内藤靖彦氏、国立極地研究所助教授の渡邊研太郎氏に非常に的確な助言を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) Y.Naito : New steps bio-logging science, proceedings of the international symposium on bio-logging science, National Institute of Polar Research, March 17-21, 2003, pp.50-57.
- 2) T.Hoshiai, Y.Naito : Proceedings of the fifth Symposium on Antarctic Biology, National Institute of Polar Research, 1982.
- 3) 渡邊研太郎：画像及び3次元行動データロガーを用いた海洋高次捕食者による中・深層生物の研究，国立極地研究所，2005.
- 4) [http://www.aad.gov.au/asset/mag\\_autumn01/p02\\_21\\_science.pdf](http://www.aad.gov.au/asset/mag_autumn01/p02_21_science.pdf)
- 5) [http://www.noc.soton.ac.uk/CASEE/CASEE2/pages/Masterclass/Autosub\\_Steve.pdf](http://www.noc.soton.ac.uk/CASEE/CASEE2/pages/Masterclass/Autosub_Steve.pdf)
- 6) [http://www.noc.soton.ac.uk/CASEE/CASEE2/pages/Masterclass/Theseus\\_Hopkin.pdf](http://www.noc.soton.ac.uk/CASEE/CASEE2/pages/Masterclass/Theseus_Hopkin.pdf)
- 7) [http://www.noc.soton.ac.uk/CASEE/CASEE2/pages/Masterclass/MBARI\\_Hans.pdf](http://www.noc.soton.ac.uk/CASEE/CASEE2/pages/Masterclass/MBARI_Hans.pdf)
- 8) [http://www.ifremer.fr/fleet/systemes\\_sm/engins/victor.html](http://www.ifremer.fr/fleet/systemes_sm/engins/victor.html)
- 9) <http://www.globalexplorerrov.com/>
- 10) <http://www.brooke-ocean.com/>
- 11) <http://km.kongsberg.com/>
- 12) [http://www.onr.navy.mil/sci\\_tech/32/reports/docs/hl/01/hlbellin.pdf](http://www.onr.navy.mil/sci_tech/32/reports/docs/hl/01/hlbellin.pdf)
- 13) [http://www.rdinstruments.com/pdfs/auv\\_nav.pdf](http://www.rdinstruments.com/pdfs/auv_nav.pdf)
- 14) Jaen-Louis Michel et al. : "VICTOR6000 Design Utilization and First Improvement", proc. of the 2003 International Offshore and Polar Engineering Conference.