

南極湖沼調査に資する小型水中無人探査機（ROV）の開発

後藤慎平^{1*}・山崎 晋²・大村竜義²・牛山和人²・脇嶋智晴³・井手一充³・田邊優貴子^{4,5}

Development of Small Underwater Vehicle (ROV) for Antarctic Lake Survey

Shinpei Gotoh^{1*}, Susumu Yamazaki², Tatsuyoshi Oomura², Kazuto Ushiyama²,
Tomoharu Wakishima³, Kazumitsu Ide³, Yukiko Tanabe^{4,5}

(2019年4月9日受付; 2020年1月7日受理)

Abstract: In the recent study, unique ecosystemic existence became clear in the lakes around the Syowa Station. On the lake bottom of Naga, Hotoke, and Kuwai Lakes in Skarvsnes on the Sôya Coast, a cone-shaped biological community structure mainly consisting of mosses, algae and cyanobacteria have been confirmed. On the other hand, the process leading to fixation and growth from the invasion of the creature has not been elucidated. Conventionally, these lake surveys have been carried out by scuba diving. However, an extensive, effective investigation is difficult because time limitation is rigid for a diving investigation in the low-temperature environment. Therefore, it is difficult to investigate the distribution of lake bottom communities widely and efficiently in various lakes, and it is one of the major factors that limit the progress of research. In this study, we aimed to create visual information as “Habitat mapping” from the lake surface and underwater by developing a new ROV, which is usable at the Antarctic lake surveys during the 58th and 59th Japanese Antarctic Research Expeditions.

Keywords: Underwater vehicle (ROV), Antarctic lakes, Habitat mapping, navigation device, small diameter and lightweight cable

要旨: 南極大陸の露岩域に点在する湖沼では、南極独自の生態系の存在が近年の研究で明らかになってきた。宗谷海岸露岩域スカルブスネスの長池、仏池、くわい池では、コケ類・藻類・シアノバクテリアを主体とする円錐状の生物群集構造物が湖底に確認されている。一方で、この構造物の定量的な分布情報は得られておらず、調査手法も確立されていない。従来、これら湖底生物群集の観察・調

¹ 国立大学法人東京海洋大学. Tokyo University of Marine Science and Technology, 2-1-6 Etchujima, Koto-ku, Tokyo 135-8533.

² カシオ計算機株式会社. CASIO COMPUTER CO., LTD., 2-1 Sakaecho 3-chome, Hamura-shi, Tokyo 205-8555.

³ 岡野電線株式会社. OKANO CABLE CO., LTD., 1-5-28 Fukami-nishi, Yamato-shi, Kanagawa 242-8501.

⁴ 情報・システム研究機構国立極地研究所. National Institute of Polar Research, Research Organization of Information and Systems, Midori-cho 10-3, Tachikawa, Tokyo 190-8518.

⁵ 総合研究大学院大学複合科学研究科極域科学専攻. Department of Polar Science, School of Multidisciplinary Sciences, SOKENDAI (The Graduate University for Advanced Studies), 10-3 Midori-cho, Tachikawa, Tokyo 190-8518.

* Corresponding author. E-mail: sgoto00@kaiyodai.ac.jp

査は、人が直接潜水することによって行われてきた。しかし、低温環境かつ隔離環境での潜水調査には時間的な制約が大きいうえに、人員・物資等の輸送が大規模なオペレーションになる。そのため、様々な湖沼で湖底生物群集の分布を広範囲に効率的に調査することが難しく、研究の進展を律速する大きな要因の一つとなっている。そこで本研究では、湖底生物群集の分布を定量化するため、南極湖沼の水中を調査することが可能な小型無人探査機 (ROV) を新たに開発し、第 58 次および第 59 次日本南極地域観測隊で試験的調査・運用を行った。

キーワード： 水中無人探査機 (ROV)、南極湖沼、ハビタットマッピング、航法デバイス、細径・軽量ケーブル

1. はじめに

昭和基地のある宗谷海岸露岩域には多数の淡水湖沼が点在している。これらの湖沼のうちスカルプスネスにある長池、仏池においては、これまでの調査においてコケ類・藻類・シアノバクテリアを主体とする生物群集構造物である「コケボウズ」の存在が確認されている (田邊, 2007; Kudoh et al., 2009; 工藤・他, 2009)。コケボウズは湖底を覆うように広く分布しており、円錐形や円柱形といった独特な 3 次元構造を有している (図 1)。コケボウズは、第 36 次南極地域観測隊 (1994-1996) の調査において初めて確認されて以来 (Imura *et al.*, 1999)、スキューバダイビングにより人が潜って計測やサンプリングをする潜水調査が実施されてきた。しかし、冬季は湖面が分厚い氷に閉ざされることから長期的な観測が難しく、経年変化をモニタリングすることが困難であった。そこで、2003 年にはインターバル撮影が可能な水中設置型のビデオカメラによる長期モニタリングが開始された (工藤・他, 2010)。カメラのビューポート部には藻類の付着による視界の遮りを防ぐワイパーが装備されており、毎日正午に 10 秒間の映像と静止画が記録可能なシステムである。これにより、これまで明らかとなっていなかった湖底生物群集の成長過程における光環境への応答や水中環境の視覚的な知見を得ることに繋がり、南極湖沼調査での工学デバイスの有用性を示した。一方で、このビデオカメラシステムは定点観測を目的とした装置であることから、面的な生物群集の分布度や群集のサイズなどの定量的な情報が不足していた。さらに、ビデオカメラシステムの設置や回収、コケボウズの計測には、人力による潜水作業が不可欠であった。長池の最深部は約 11 m で、潜水作業を行ううえでは浅い場所であるため、法令で定められた潜水業務時間としては長めの活動が認められているが、水温が 0~4°C 程度の南極湖沼での潜水調査には体力的な限界がある。また、潜水作業実施時には設置するビデオカメラシステムやダイビング用の機材のほかに、ビデオカメラシステムを設置ポイントまで曳航するゴムボートや体温低下を防ぐためのテントなど多くの装備・物資の輸送が必要となる。表 1 は第 51 次日本南極地域観測隊での湖沼潜水調査における役割分担と人員配置である (工藤・他, 2010)。この表を見ると、ダイバー以外に作業統括やボート支援、陸上支援、医療支援、レスキュー準備を含めた総勢 10 名にてビデオシステムの設置が行われたことが分かる。また、



図 1 南極湖沼に棲息する特異な三次元構造を有する生物群集 (コケボウズ).
 Fig. 1. A unique three-dimensional biological community living in Antarctic lakes (Kokebouzu)

表 1 第 51 次隊の湖沼潜水調査における役割分担と人員配置表.

Table 1. Role assignment and personnel assignment table of the Submersible Survey at Naga lake in the 51st Japanese Antarctic Research Expedition.

役割	人員数	備考
作業進行・統括	1 名	全体作業の監視と管理
主ダイバー	1 名	ビデオカメラシステム設置作業, 水中での位置調整, フォーカス調整, 撮影
副ダイバー	1 名	潜水作業補助, 撮影
ボート支援	4 名	ゴムボート操船, ビデオシステムの牽引搬送, 降下設置, 設置位置 GPS・水深測定
陸上支援	1 名	昭和基地への潜水開始・終了連絡, 陸上作業記録
医療支援	1 名	潜水者の健康チェック, 緊急時対応
水中監視・レスキュー準備	1 名	水中作業の監視, 水中レスキュー待機

潜水調査に伴う物資の輸送には往復ともにヘリコプターを使用している。非常に多くの人員と装備を要するようになるが見えるが、1年間の長期モニタリングを行うシステムであるため、設置の確実性と作業者の安全性を確保するうえでは不可欠な人員と言える。

一方で、より簡便な手法で面的な情報を得るシステムの開発が求められている。コケボウズの分布が最も多いと考えられる長池は、南北約 400 m、東西約 100 m、最深部は約 11 m の貧栄養淡水湖である。これまでは潜水調査により密集度や個体の大きさなどを目視観察していたが、湖全体を網羅的かつ定量的に計測するのは困難であった。そこで、本研究では湖底の連続画像を撮影し、深度ごとのコケボウズの分布図となる「ハビタットマップ」を作成するための水中探査機 (Remotely Operated Vehicle: ROV) の開発を行った。

2. 南極湖沼調査における機器開発への制約

南極湖沼調査に用いる研究機器の多くは、国内での観測とは異なる制約を受ける。極限環境下での安定した動作を実現するための堅牢性が求められるだけでなく、電源の種類や重量などにも制約がある。今回、調査を実施する湖沼は、図 2 に示す宗谷海岸のスカルプスネス周辺に点在している。ここは昭和基地のある東オングル島から約 60 km 南下した場所にあり、調査の際には生物観察小屋である「きざはし浜小屋」をベースにして、調査対象の湖沼とを往復する。しらせ搭載のヘリコプターは他の野外観測や輸送などの運航スケジュールが厳密に管理されていることから、個々の調査に頻用することは困難である。また、スカルプスネス

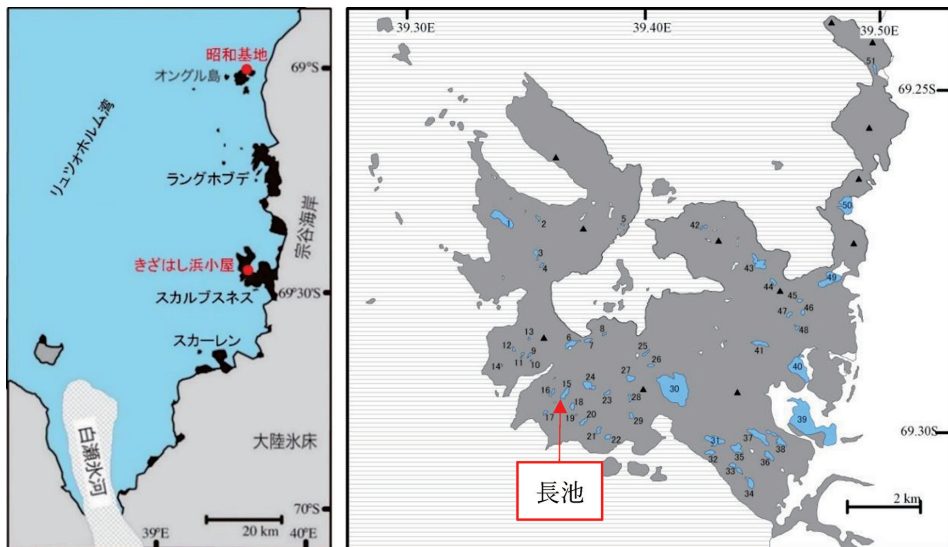


図 2 スカルプスネス露岩域および長池の位置

Fig. 2. Location of the Skarbsness an uneven outcrops area and Naga lake.

スをはじめとする宗谷海岸露岩域は図3に示す通り起伏の激しい岩肌が露出した露岩域であることから、スノーモービルや雪上車を使用することもできない。そのため、調査対象の湖沼までは徒歩で移動する必要がある。片道1時間以上掛かる場合もあり、観測機器以外に防寒具やビバーク用のキャンプ用品、食糧なども一緒に背負って携行する必要があるため、観測機器には小型・軽量化が求められる。しかし、ROVの高性能化と小型・軽量化はトレードオフの関係にあり、目的とする調査を十分に行うためには不可欠な部品も多い。例えば、GPSなどの電波の使えない水中での自機の位置を確認するには、加速度センサやジャイロセンサが必要になる。これらをコンポーネント化した慣性航法装置（Inertial Navigation System: INS）と呼ばれる内界センサも存在するが、高精度なものは体積が大きく小型ROVへの搭載には不向きである（後藤・他、2012）。さらに、南極と言う特殊な環境であることから、機器の堅牢性と同時に簡略化も求められる。万が一、機器が故障した際には、現地の隊員と装備のみで修理をしなければならず、予備の部品も限定的である。さらに、現地には水中機器の構造に詳しい隊員がいるとは限らないため、複雑な回路や機構は修理時間が長期化し、調査のタイミングを逃すことにつながる。そのため、使用する部品点数の削減や機構部分の簡略化が求められる。

調査機器を動作させる電源には、重い発電機やガソリンは運搬することができないため、多くの場合、低温環境でも安定動作する二次電池を用いる。しかし、リチウムイオン電池な

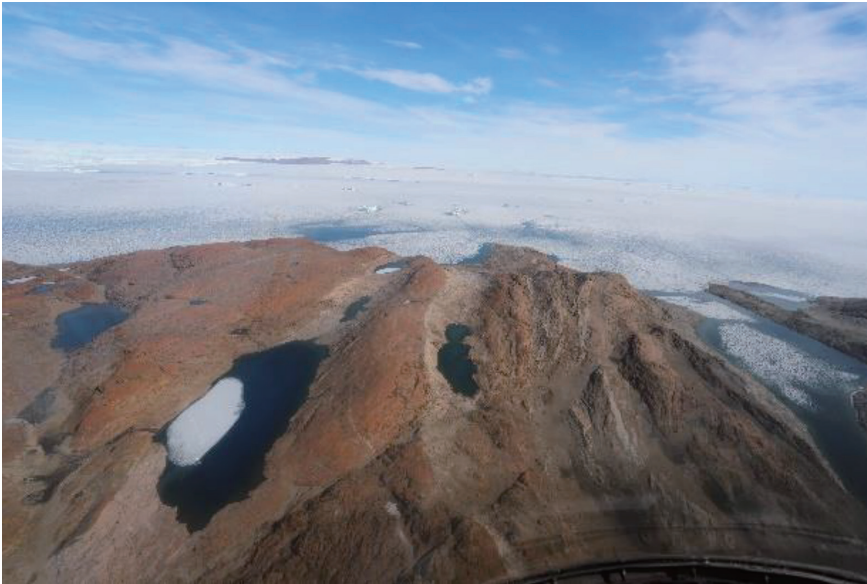


図3 スカルプスネス長池周辺の露岩域の様子

Fig. 3. State of an uneven outcrops area around the Sukarvousness Naga lake.

どの二次電池は、低温環境では電池性能が低下する傾向にあり、最悪の場合、電源が入らないこともある。電池以外の電子部品も同様に、定格として動作温度の範囲が決められている。そのため、低温環境での動作が予め保障されている部品を使用するか、低温庫での長時間稼働試験により正常動作を確認できた部品を使用する必要がある。特に後者の場合では、開発期間の長期化につながるため、予め低温環境での動作が確認されている航空・宇宙産業などに用いられる電子部品を使用することが望ましい。

これらのことから、南極湖沼調査で使用する観測機器を開発する際には、現地での運搬・運用方法のほか重量や電源の制約を十分に理解する必要がある。今回、新たに開発した南極湖沼調査用の ROV は、これらの制約を満たすための工夫を行った。

3. ROV のシステム構成

ROV システムを構成するパーツは、大きく分けると図 4 に示す通り、水中部、ケーブル、操縦部の 3 つのパートから構成される（後藤，2019）。水中部は高い水圧に耐える必要があるため、深度が増すにつれてカメラや制御機器を格納する耐圧容器が大型化する。ケーブルは調査深度が深いほど必要となるケーブルも長くなり全体重量も増加する。さらに、ケーブルが長くなると内部の電力・信号線の電気抵抗も増加し電力損失も大きくなるため、ケーブルを太くして電流量を増やすか高い電圧で送電する必要がある。また、大深度の湖沼の調査では、潜航開始から湖底に到着するまでに時間を要するため、十分な調査を行うには大容量・大出力の電源が必要となることから、操縦部が大型化することになる。そのため、本研究で開発するシステムは、システム全体を前述の 3 つのパートに分割することにより、それぞれの小型・軽量化を図った。前述の通り、現地では調査対象の湖沼まで徒歩での運搬となることから、他の携行品の重量なども鑑みて、各パートの空中重量は 10 kg 以下を目標として設計を行った。

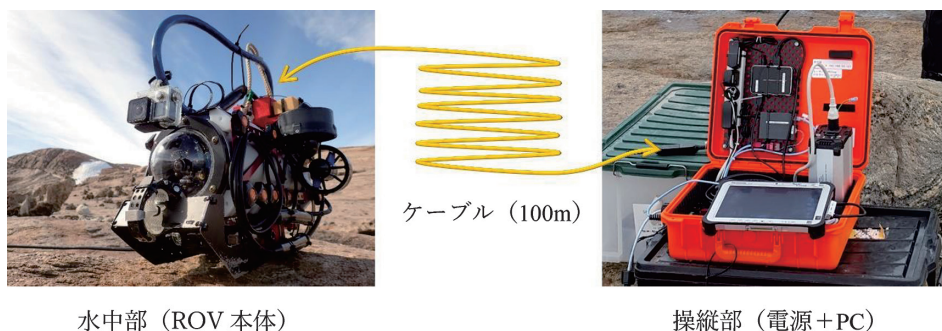


図 4 ROV システムの概略図
Fig. 4. Schematic of the ROV systems.

また、現地では防寒用の分厚い手袋を着用していることから、細かな作業が困難であるため、本システムでは運用面においても取り扱いが容易であることを念頭にシステム開発を行った。特に、操縦装置は専用コントローラや映像録画機などの配線作業が必要であることから、準備に時間を要してしまうことが多い。こういった作業時間は、低温環境での人の作業性を低下させ、さらに天候の変わりやすい南極では貴重な調査時間を犠牲にする可能性がある。そのため、本システムでは操縦装置をコンポーネント化し、ROV 本体と操縦装置をケーブルで接続するだけで運用が開始できるシステムとした。これにより、ROV 側は水中コネクタ、操縦装置側は通信コネクタ (2 系統)、電源のコネクタの合計 3 か所のみとなり、コネクタの接続間違いや接触不良などによる故障を軽減し、万が一の故障の際には原因究明が容易となった。

電源は陸上から AC100V でケーブルを使って ROV に給電される。エンジン式発電機の運搬が困難であることから、今回は市販のリチウムイオン電池を使用した。国立極地研究所の低温室 (-20℃) にて、実際の調査時間を考慮した稼働試験を実施し、問題なく電力供給できることを確認した。一方で、リチウムイオン電池は前述の通り使用環境の温度に影響を受けることが多い。そのため、基本システムはリチウムイオン電池からの給電で稼働するものとしているが、万が一の場合に備えて鉛バッテリーからも給電できるシステムとしている。鉛バッテリーは雪上車やスノーモービルなどにも使用されており、南極での緊急時にも入手性の高い電源の 1 つである。この鉛バッテリーから AC100V を生成するための DC/AC コンバータを ROV の操縦装置内に搭載し、冗長性を持たせた。

4. 水 中 部

今回新たに開発した ROV は、長さ 50 cm × 幅 35 cm × 高さ 30 cm (浮力材取付時は高さ約 35 cm)、空中重量 9.9 kg、耐圧深度 100 m である。スラスタ (推進器) は垂直 2 機、水平 2 機、操縦用カメラは視野角 180 度かつ、ハイビジョン動画の撮影が可能なカメラを搭載している。また、これとは別に機体下部にはハビタットマッピング用のステレオ撮影カメラを 2 台搭載している。本 ROV は、機体の徹底した小型・軽量化を行うため、まず、内部機器に用いる部品の選定と機器配置の検討から行った。2 章でも述べた通り、南極湖沼で使用する ROV には堅牢性と同時に操作性、メンテナンス性などにおける使いやすさが求められる。このことから、本 ROV では水中での自機方位や深度の確認には、現地での GPS アライメントなどの特殊な操作を必要とする慣性航法装置 (Inertial Navigation System: INS) などのデバイスを使用せず、ジャイロや圧力センサなどの代わりに民生品の腕時計を改造して使用することとした。これはカシオ計算機と東京海洋大学が、G-SHOCK (型番: GWF-D1000) をベースとして水中探査機用に共同開発しているもので、航法デバイスとしての特殊なファームウェアを搭載した改良型である (図 5)。このファームウェアでは、市販品と異なる以下の機能

を搭載している。

1. DIVE モード時の方位、深度、潜水経過時間の表示

DIVE モードでは、ROV のナビゲーションに必要な情報を時計の画面上に表示する設定とした。

2. 方位計測時間のリミット解除

通常、方位はコンパスモードにおいて計測を行うが、概ね数秒～10 秒程度で計測が終了してしまう。しかし、時々刻々と方位が変化する ROV では、連続して機首方位を計測し続ける必要がある。そのため、DIVE モードでは計測時間のリミットを解除し、バッテリーが続く限り計測し続ける仕様とした。

また、GWF-D1000 では、デフォルトの機能として傾斜計測に対応していることから、時々刻々、水中での姿勢が変化する水中探査機において、傾斜状態で機体の正確な状態を確認できるメリットがある。本 ROV では、この GWF-D1000 を操縦用のカメラに映し込むことで、機種方位や深度を把握できるようにした。さらに、民生品を航法デバイスとして使用することで、ROV 内部の部品点数を削減することが可能となり、万が一の際には GWF-D1000 を交換するだけで修理が迅速に行える。

ROV のスラストやカメラなどの制御の中枢を担う制御コンピュータには、Windows10 ベー



図 5 航法デバイスとして ROV 機首部に取り付けた GWF-D1000

Fig. 5. GWF-D1000 attached to ROV nose a navigation device.

スの産業用小型コンピュータを採用した。スラスタやカメラの応答性を向上させるため、CPUはGPU (Graphics Processing Unit) 搭載の Intel Core i5 とした。これにより遅延することなく信号命令系の処理と同時に映像系の伝送が可能となった。さらに、これら機器は主にDC電源で動作するため、機体内部にAC/DCコンバータを搭載した。各部品は体積を削減するため筐体を取り外し、基板状態としてROV内のシャーシに取り付けた。その際、基板の隙間などによって大きくなる体積を削減するため、3D-CAD上で組み換えを行いながら内機の体積を1mm単位で削減し、内部空間を徹底的に削減した耐圧容器を作製した。図6はROVの内機と耐圧容器の外観図である。無駄な空間を減らすため、各基板を積層している。

さらに、耐圧容器を搭載するフレームは厚さ1mmのアルミ合金を使用し、トラス状に打ち抜くことで強度を維持しつつ軽量化を図った。フレームは耐圧容器を囲むように4面に配置し、各フレームにはスラスタやステレオ視カメラ用の補機台を取り付けた。4枚のアルミ合金板の接続には、水中での比重が1.0以下のポリエチレン製樹脂を採用し、これらを図7のように組み立てることで、約1kgの軽量な機体フレームを実現した。

5. 航法デバイス

本ROVでは前述の通り、航法デバイスとして民生品の腕時計のファームウェアを航法計

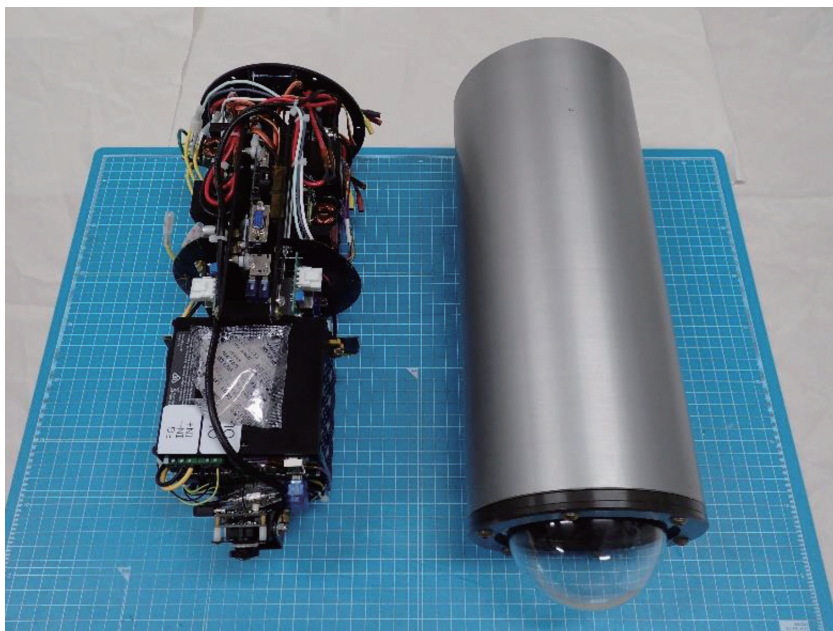


図6 ROVの内機(左)と耐圧容器(右)の外観図

Fig. 6. External view of ROV's internal equipment (left) and pressure housing (right)

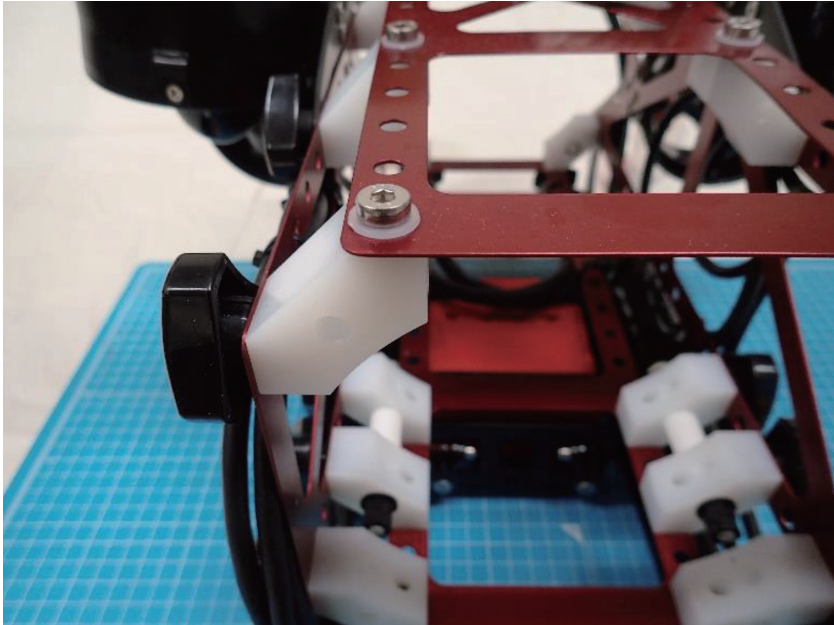


図 7 アルミ合金製の外板とポリエチレン樹脂により軽量化したフレーム
Fig. 7. A lightweight frame made of aluminum alloy and polyethylene resin.

器用に特別にチューニングしたデバイスを使用している。カシオ計算機では、20年以上前から方位計測機能付きのデバイスの開発に取り組んでいる。従来のデバイスでは、環境温度変化も含めて傾斜角 ± 10 度という精度（時計が水平であり、かつ正確な2点補正実施の前提）での計測を実現していたが、水中で使用するデバイスは陸上と異なり3軸6自由度の運動を行うことになる。特に、潜水活動をするダイバーや探査機は時々刻々その姿勢が変化するうえ、強潮流の中での活動などでは水平姿勢を維持することが困難な場合がある。さらに、ランドマークのない水中では自身・自機の位置を見失うことは事故につながる恐れがあり、デバイスの性能に左右されずに状態を確認できることが求められる。そこで、航法デバイスとして採用したGDF-D1000では、デバイスの傾斜を自動で計測して補正する機能が追加されている。この「自動水平補正機能付方位計」を実現するには、時計の傾きを検知するために加速度センサを使用する必要がある。しかし、使用するセンサが1つ追加されることで、誤差要因も増えることになる。そのため、当該機能の実現に必要な要素は、主に以下のポイントにある。

- ① 地磁気センサの直線性、感度、原点の安定性、温度特性
- ② 加速度センサの直線性、感度、原点の安定性、温度特性
- ③ 地磁気センサ、加速度センサ共に3軸の原点補正と他軸感度の補正

上記①, ②では, 各センサに対して具体的な目標値を設定し, これらをクリアし低消費電力であるセンサ（ローム製・磁気センサ）を採用している. また, 上記③を実施するには, 以下のような係数を算出する必要がある.

$$\begin{pmatrix} \text{補正後 X} \\ \text{補正後 Y} \\ \text{補正後 Z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \text{補正前 X} \\ \text{補正前 Y} \\ \text{補正前 Z} \end{pmatrix}$$

このC11～C33の9個の係数について, 製品ごとに地磁気センサ, 加速度センサの値を個々に算出し, 毎回, センサ計測時に上記演算を実施する. この係数の算出は生産工程で実施する（以後トリミングと言う）が, この係数算出の正確性がシステムとしての仕上がり精度に影響を与える.

そこで, 加速度センサのトリミングは図8のような装置を作成し, 自動でデバイスを6方向に正確に回転させて, 重力加速度1gを使用して係数を算出する. この装置における各姿勢の角度誤差は±1度未満である. このトリミング装置で算出された係数C11～C33を使用して, 加速度センサの計測を実施することで, 高い精度でデバイスの傾斜角度を算出することが可能となった. さらに, 地磁気センサも同様の手法で地磁気の変化させる必要がある. これには従来のカシオ製品でも採用している2軸（X軸, Y軸）の地磁気シミュレーターを使用している. これにより, 姿勢が安定しない水中においても, 水平に対し最大傾斜角80度まで正しい方位計測が可能となった.

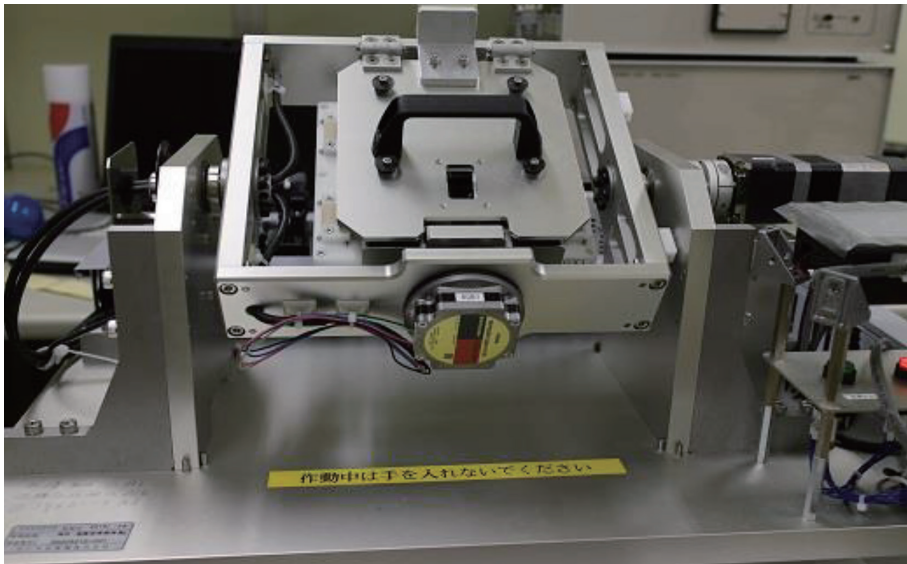


図8 加速度自動トリミング装置

Fig. 8. Acceleration automatic trimming device.

6. 軽量細径複合ケーブル

電波の届かない水中で活動する ROV を、リアルタイムで操作し映像を伝送するには、水中部と操縦部をケーブルで結ぶ必要がある。一般的にケーブルには ROV 本体を動かすための電力を送電する電力線と、映像やコントロール信号を通信するための信号線が組み込まれた、電力・通信複合ケーブルが用いられる。近年ではこの信号線は、大容量の通信が可能な光ファイバを用いることが多くなった。光ファイバは 1 本のファイバ内に複数の制御信号を重畳可能であることから、4K 画質（ハイビジョンの 4 倍の画質）の大容量な映像伝送にも対応可能である。一方で、光ファイバ用の水中コネクタは高価であることと、メタル線に比べて許容曲げ半径が大きく取り扱いが難しいことから、本 ROV ではメタル製の複合ケーブルを開発することとした。しかし、メタルケーブルとすることで心線数が増え、直径や重量が大きくなる。さらに、水中機器に使用するケーブルは、水中での水圧や引張に耐える必要があるため、抗張力体などを介在させることが多く、これらもケーブルの直径を大きくする要因となる。一方で、水中では潮流やダウンカレントなどにより、ケーブルが流されて水中機器自体の動きを制限する要因となるため、細径・軽量であることが求められる。しかし、細径化することは、引張や側圧に弱く破断する可能性があり、水中機器に求められるケーブルの仕様とはトレードオフの関係と言える。また、通常のケーブルに用いられる外部シース（被覆）は、低温環境での使用には向かない仕様であることが多い。キャブタイヤなどに用いられるゴム製シースは、低温や紫外線においてヒビ割れを起こすことが知られている (Ishizawa *et al.*, 2011)。今回は、南極と言う低温環境かつ強紫外線環境での使用であり、さらに露岩域の岩石上を引き回す可能性があることから、これらの要因によるケーブル強度の低下を防ぐ、新しい細径・軽量ケーブルの開発を行った。図 9 に新たに開発したケーブルの断面図を示す。

今回開発したケーブルは、信号線に軟銅線、動力線にスズメッキ軟銅撚線を採用した。軟銅線とすることでケーブル全体に柔軟性を持たせ、曲げ半径を小さくすることで収納時の体積を減らして運搬時の負担軽減を狙った。また、信号線にはカテゴリ 5e の Ether-NET を用いることから伝損の少ない単線を採用した。信号用の A 心線は 2 対のツイストペアケーブルとなっており、Ether-NET 信号を通すことができる。A 心線の外側には電力用の B 心線と抗張力体により構成されている。A 心線内には B 心線のノイズの影響を低減するための遮蔽材として、アルミポリエステルテープの重ね巻きとした。外部シースには、ポリウレタンを採用し、抗張力と耐摩耗性の向上を図った。その結果、1m 当たりの重量は 100g、ケーブル直径 11mm、引張強度 100kgf の軽量・細径な抗張力ケーブルが完成した。

7. 現地での試験的調査・運用

第 58 次日本南極地域観測隊（以下、第 58 次隊）、および第 59 次日本南極地域観測隊（以下、第 59 次隊）によるスカルプスネスでの調査（2016 年 11 月～2018 年 3 月）において、

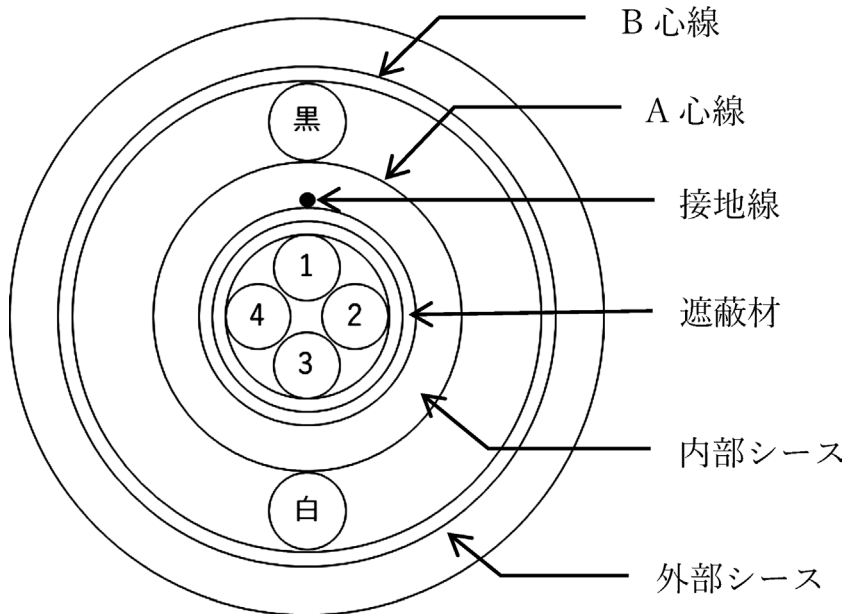


図 9 新たに開発した南極 ROV 用ケーブル

Fig. 9. Schematic of the newly developed cable for Antarctic Research ROV.

開発した ROV システムを用いた湖沼調査を行った。第 58 次隊（夏期間）では南極湖沼における浮力の微調整と動作確認を実施し、第 59 次隊（夏期間）では、スカルスネスの長池、くわい池、仏池での湖底調査を行った。くわい池、および仏池の調査では、夏季の終わりまで湖水が残存していたため GPS ソナーによる湖盆図の作成ができず、湖底のステレオ視撮影のみを実施した。前述の通り、これらの湖底にはコケボウズが分布しており、中でもくわい池についてはコケボウズの大きさや形状などの詳細な情報がこれまで得られていなかった。そのため、今回の ROV 調査で初めて詳細なコケボウズの姿を撮影することに成功した。くわい池、仏池共に、最深部は 3m ほどと水深が浅いため、第 59 次隊のように湖面に氷が残存し湖岸付近まで張り出している状態では、大きなエアボンベを背負ったダイバーが湖水と湖底の間にアプローチして調査することは困難である。一方、今回開発した ROV は全高が 30 cm と小型であることから、図 10 のような湖面の氷と湖底との間隙からでも湖の中央部に向けてアプローチすることが可能であった。このことから、湖底へ接近して撮影が可能であり、各湖沼に棲息するコケボウズの違いを観察することができた。図 11 に各湖沼の湖底の様子を示す。これらを見比べると仏池、くわい池では長池のような円錐状のコケボウズの形成はあまり見られず、コケボウズの表面の状態も違っているのが分かる。仏池では全体的に表面が毛羽立っていて他の湖沼との違いが明瞭である。また、くわい池のコケボウズは、仏池や長池のように鉛直方向へ成長するものは少なく、こぶ状のコケボウズが多い。

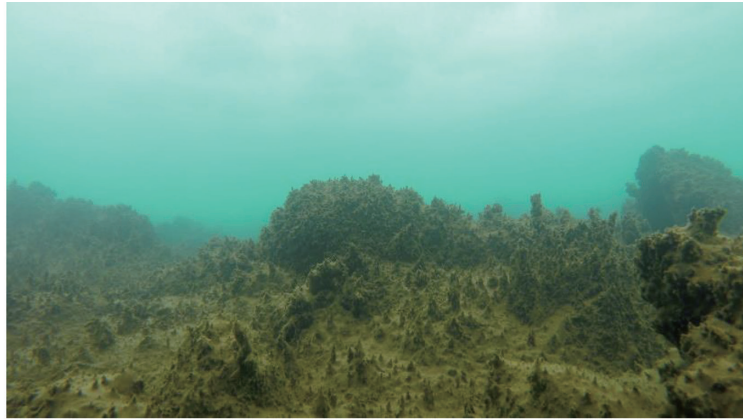


図 10 湖面の氷と湖底との間にできた約 50 cm の間隙 (仏池)

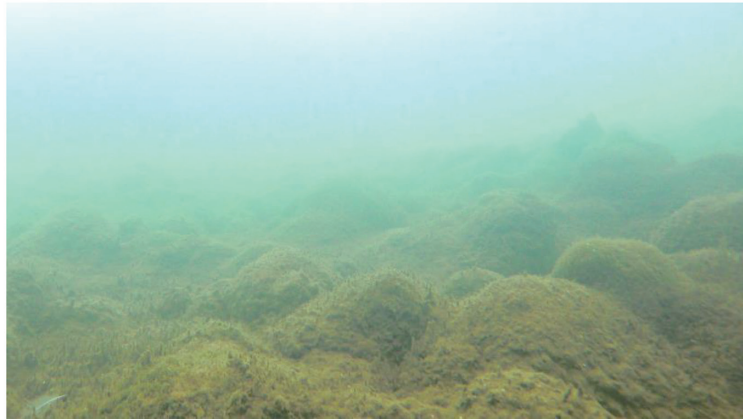
Fig. 10. A gap of about 50 cm between the ice on the lake surface and the bottom (Hotoke Lake).

さらに、長池では深度によってコケボウズの大きさが異なることも確認できた (図 12). 長池での ROV 調査では湖岸から湖心部に向けて直線的に ROV を航走させ、ROV 下部に取り付けたステレオカメラにより湖底の様子を連続写真として撮影を行っている。現在これらの画像を解析し、モザイク画像の製作を行っている。今後、この画像を等深線図に重畳させたハビタットマップを作成することで、深度などとコケボウズの成長の因果関係を明らかにすることができると思われる。

仏池



くわい池



長池



図 11 仏池, くわい池, 長池に棲息するコケボウズの形状の違い
Fig. 11. The difference in the shape of Kokebouzu in Hotoke, Kuwai, and Naga lakes.

水深 3~4m 付近

小型のコケボウズが散見される



水深 5~6m 付近

コケボウズの群生密度が高くなる



水深 7~8m 付近

大型のコケボウズがみられるが、群生密度が低くなる



水深 9m 付近

コケボウズがほぼ姿を消す



水深 10m 付近

親指程度のコケボウズが姿を現す



図 12 深度によるコケボウズの形状の比較図

Fig. 12. Shape comparison figure of kokebouzu with water depth.

謝 辞

本研究の ROV での現地調査を実施するにあたり、第 59 次隊および第 58 次越冬隊員諸氏からの、直接・間接的な大きな支援をいただいた。特に第 59 次隊の土井浩一郎隊長には、ROV というこれまでの南極湖沼観測においては未知な道具へのご理解を賜り、また、ヘリコプター輸送の日程調整などにおいても協力していただいた。多数の隊員の支援を得ることができた。また、現地観測へ参加に向けて国内でのコーディネートをしていただいた国立極地研究所 工藤栄博士、先行して現地入りしていた第 59 次隊先遣隊の菅沼悠介博士、香月興太博士、柴田大輔博士、川又基人氏のおかげで、現地入りして直ちに観測作業に携わることができた。また、外国研究者の Dale T. Andersen 博士、Rachel Rudd 氏には、活動中に機材の運搬などを手伝っていただいたおかげで、観測がスムーズに実施することができた。各所で支援をいただいた静岡大学・村越真博士には、「しらせ」船上での観測物資の搬入出などにご協力いただき、滞りなく観測作業を進めることができた。また、「しらせ」での観測機材の搬入出、およびヘリコプターでの人員物資輸送などでは、「しらせ」宮崎艦長はじめ、航海科・運用科・補給科・飛行科ほか皆様の快い支援を得ることができた。ここに記して深く感謝の意を示したい。

文 献

- 後藤慎平・大澤弘敬・中條秀彦・宮崎剛・澤隆雄・平田和好・宇津木裕美・松浦正己・石橋正二郎 (2012): 大深度遠隔操作型無人探査機 (ROV) の開発. 海洋工学シンポジウム講演要旨集 (CD-ROM) (海洋工学シンポジウム講演論文集 (CD-ROM)), 23rd, ROMBUNNO.OES23-009.
- 後藤慎平 (2019): 深海探査ロボット大解剖 & ミニ ROV 製作 [動画付き]. 東京, CQ 出版社, 38, ISBN-10: 4789841375.
- Imura, S., Bando, T., Saito, S., Seto, K. and Kanda, H. (1999): Benthic moss pillars in Antarctic lakes. *Polar Biology*, **22** (2), 137–140, doi: 10.1007/s003000050401.
- Ishizawa, Y., Matushita, T., Takeshita, K., Yamahira, M. and Yamashita, A. (2011): CABLE DEGRADATION CAUSED BY INDOOR LIGHTING AND ACTION AGAINST IT. *Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*. 748–752.
- Kudoh, S., Tanabe, Y., Matsuzaki, M. and Imura, S. (2009): In situ photochemical activity of the phytobenthic communities in two Antarctic lakes. *Polar Biology*, **32** (11), 1617–1627, doi: 10.1007/s00300-009-0660-z.
- 工藤栄・田邊優貴子・飯田高大・辻本恵・小川麻里・伊村智 (2009): 第 49 次南極地域観測隊夏隊における湖沼観測. *南極資料*. **52** (3), 421–436, doi: 10.15094/00009468.
- 工藤栄・田邊優貴子・内田雅己・堀克博 (2010): 南極湖沼通年観測用ビデオカメラシステムの開発と設置. *南極資料*. **54** (3), 226–235, doi: 10.15094/00009545.
- 田邊優貴子 (2007): 南極淡水湖沼における藻類群集の強光・紫外線に対する適応戦略. *光合成研究*. **17** (3), 58–62.