

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 11 日現在

機関番号：10101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25550002

研究課題名(和文) 氷海環境リアルタイムモニタリングブイシステムの開発

研究課題名(英文) Development of real-time monitoring buoy system of ocean environment in ice-covered regions

研究代表者

青木 茂 (Aoki, Shigeru)

北海道大学・低温科学研究所・准教授

研究者番号：80281583

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、近年発展した海洋中層ブイの浮力制御技術と衛星通信技術を応用して、氷海域でも運用可能な海洋鉛直観測を行う係留型ブイ観測システムの開発を目的とし、オホーツク海知床沖で通算七ヶ月にわたる実海域試験を行った。センサーブイについては、浮上下降動作、待機深度の制御、衛星通信によるデータ通信、長期連続耐久運転、海氷下の浮上・停止動作といったプログラムした動作のすべてに成功した。また流速の実測により、ブイ浮上の限界となる流速を求めた。これにより実運用に耐えうるシステムの基盤技術を確立し、今後さらに高度な海洋条件下での運用に対応するための基盤を得た。

研究成果の概要(英文)：Based on state-of-the-art technologies like buoyancy control and satellite communication, this study aims to develop a tethered-buoy system for monitoring vertical profiles of oceanic environmental variables, which can be available in the ice-covered oceans. Field experiments of a prototype buoy were conducted for the total period of seven months off Shiretoko, Okhotsk Sea. The sensor buoy worked successfully for the programmed operations such as ascending/descending motions, controlling parking depths, data transfer through satellite system, endurance over half year period, and stop ascending near the surface in the ice covered condition. Current measurements clarified the limit of ambient current speed that allows a buoy to ascend to the surface. With these conditions surveyed and confirmed, we have established the technological basis for further variable conditions in the real ice oceans.

研究分野：海洋物理学

キーワード：環境分析 海洋機器開発 極域海洋 環境変動 モニタリング

1. 研究開始当初の背景

(1) Argo 計画は 21 世紀の海洋学にブレークスルーをもたらした。多数の中層フロートをもちいた同時観測により、表層海洋は全球規模でも概ねカバーされるに至った。背景には近年の中層フロートの動作制御技術と衛星通信技術の急速な発展がある。

(2) しかしながら、Argo では定点における観測は想定されておらず、また陸棚上のような海底地形の起伏の激しい浅海域での観測も想定されていない。さらに氷の存在する極域海洋では、浮上した場合には破損の危険が、浮上しない場合には位置特定の困難があるなど、運用に制約を抱えている。そのため極域沿岸海洋はいまだ観測の空白域として残されているが、近年の温暖化の進行とあいまって、こうした極域・沿岸海洋での定点モニタリング観測の必要性が高まっている。

(3) モニタリング観測では取得したデータをリアルタイムで送信することができれば、海況をいち早く知ることができるだけでなく、万が一係留系が回収できなかった場合でも、確実にデータを取得することができる。従来の係留系では係留系を回収するまで観測の成否は確かめられなかった。

(4) 定点でのモニタリング観測とデータ通信を達成するシステムにはモーターでワイヤを繰り出す方式なども実用段階にあり、現在さまざまな技術が提案されているところであるが、水中での稼働部が少ない点では安定的であり、中層フロートタイプにも利があると考えられる。

2. 研究の目的

(1) 本システムでは、技術的にはこなれた中層フロートの浮力制御と衛星通信の技術を利用して、極域浅海域における定点でのリアルタイム連続観測システムの構築を目指す。リアルタイムでデータを送信するため、最終的に本体を回収することができなくても観測ができる点が従来の係留系と比較して大きな利点である。

(2) 定点は、中間ブイをアンカーして設置し、それに本体ブイを係留することで実現する。プロフィール取得をしない待機時には、中間ブイの深度に本体ブイの深度を調整する。深度調整を厳密に行えば、固定深度での連続観測が実現できるが、深度制御を厳密に行うためにはそれだけ調整にエネルギーを使用することになる。

(3) 浮沈するブイを係留索で係留する本システムの実用性は海流による抵抗に大きく依存する。海流から受ける抵抗に系全体としてどの程度耐えられるかについては、数値実験である程度のシミュレーションはできる。し

かしながら、こうした方式を実用化するためには実海域での機器の耐久性や環境適応性などの試験の積み重ねが欠かせず、シミュレーションで使用したパラメータの現実的な設定についても実観測による検証が不可欠である。また、氷海域における運用では、海氷などの障害物に衝突して損壊するのを避けるために海面直下で静定する「寸止めオペレーション」が必要である。寸止めオペレーションの動作制御の成否についても実地に検証する必要がある。本研究は、試作した機器が現場海洋における実地の運用においてどのような挙動を示すか確認することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 試作した本体ブイは、現状で全長 260cm、直径約 20cm、空中重量 85kg といった形状をもつ。係留索につながれた前方にあるブレッダーへのオイルの出し入れでブイの総体積を変え、本体ブイの浮力を調整する。ブレッダーの容量は 3500cc である。後方にあるアンテナ部分が突起状になっており、浮上時に海面上に突出して衛星通信を行う。

(2) システムを構成する中間ブイとして、直径約 30cm のフロートを複数個使用し、ナイロンダブラーロープにより立ち上げて砂袋をアンカーとして係留した。本体ブイと中間ブイの間は直径 4.4 ミリのダイニーマロープで結線した。

(3) ブイ制御用のコマンドはイリジウム経由で遠隔送信することができる。コマンドの送信は 1 コマンドを 1 メールに添付して送信することで行う。サーバーが受け付けた順に、ブイに送信することになる。コマンド（例えば浮上間隔の設定等）の作成には、専用のソフトウェアが準備されている。

(4) 本研究では試験海域を知床ウトロ沖オホーツク海の水深 400m 程度の海域とした。稚内から網走までのオホーツク海沿岸海域は水深が 100m 程度の浅い海域が広がっているが、ウトロ沖では急激に深度が下がり、20 マイルほど沖側では水深が 2000m を越える。極域海洋での使用を想定すると、冬期に表面の密度成層が弱まる海域が理想的である。海氷に覆われる、南極海における大陸棚深度程度 (~500m) の水深での試験が可能な海域といえば、日本ではほとんど唯一の場所である。

(5) こうした本体ブイの挙動や中間ブイも含めたシステム全体の動作を確認する目的で、2014 年の 7 月 7 日から 8 月 5 日にかけての約 1 ヶ月、および 2014 年 11 月 18 日から 2015 年 5 月 13 日にかけての約 6 ヶ月間の二回、同海域において試験観測を実施した。

4. 研究成果

(1) 夏期の試験では、本体ブイによる計測以外に、中間ブイの位置（285m深）での圧力を計測し、係留部中間ブイの姿勢の確認を行った。なお、流速計による流動場の計測は行っていない。期間中、中間ブイの深度はほぼ一定に保たれていた。本体ブイは中間ブイからの長さが600mのロープで係留した。本体ブイのパーキング深度を285m深に設定した。今回の実験では本体ブイの待機深度からの許容ずれ深度は20mと設定した。実際に、待機深度の30m以内に制御することができた。

(2) 本体ブイには観測期間中1日ごとの海面浮上を設定した。予定された29回の浮上回数のうち、実際には計3回浮上した。浮上到達深度はほぼランダムで、平均の浮上深度は121mであった。232mまでしか浮上しない場合もあった。今回の設定では、5時間かけても浮上できない場合は、待機深度に戻るよう設定している。浮上する前には、待機深度からいったん下降し、より広い範囲での海洋プロファイルをとる設定としている。今回の沈降深度は350mに設定している。今回は、沈降がこの深度まで達してないケースは3回あったが、すべてのケースで340mまでは沈降していた。350m深から表面までのデータが取得できたときを100%としたとき、期間平均のデータカバー率は66%となった。

(3) 海面浮上後には80分間の通信時間を設定し、その間にコマンド・データの送受信を実行している。浮上した場合の3回の機会の海面滞在時間のうち2回は滞在時間の制限に満たなかった。本体ブイが流れにより海中に引き込まれたものと考えられる。3回の衛星通信の合計で、待機時を含めて7月8日から11日までの取得データを受信することができた。7月31日までの期間全体に比べると少ないが、送るデータは選択できるため、浮上時に限ってより多くのデータを取得するといった選択も可能である。

(4) 夏期試験から現実的な海洋観測結果が得られた。7月上旬には、亜表層50m深程度に低温・低塩水が存在する。14日以降のプロファイルにはこの水の痕跡が消え、高温・高塩の特性に代わっている様子が捉えられている。

(5) 冬期試験では、浮上頻度を向上させるため、150m深に待機深度を設定し、中間ブイの位置もそれに合わせて引き上げた。中間ブイから本体ブイまでの策長は900mに伸ばした。中間ブイには、圧力・水温計に加えて、流動場測定のためにドップラー式超音波流速プロファイラ（ADCP）を装着した。中間ブイを深部に設けた夏期試験時と異なり、今回の試験期間中の中間ブイの深度範囲は大きかった。直立時で水深120mであるが、最大で12

月18日の水深262mまでと142mも沈み込んだ。倒れこみ深度の期間平均値は15mであった。期間中全体を通じて、中間ブイ係留深度で観測した流速のモードは25cm/s、平均で31cm/s、最大で93cm/s程度を記録した。ただし、この一層目流速は系の傾きに応じて深度が変化する。中間ブイの深度（圧力）は流速の強さに対応し、流速が強いほど系が倒れこんでいたことを示している。

(6) ブイの待機深度は、設定した152mからの許容ずれ範囲内で概ね推移しており、深度の制御には成功しているといえる。ただし、強流速時に系が傾いたときには、ブイの深度もそれに伴って深くなっている。

(7) 冬場の開表面期間でも、本体ブイはなかなか上がってこなかった。計20回の浮上機会のうち浮上したのは3回であった。浮上の成否は流れの概ね速さに対応している（図1）。浮上ができたのは、同時計測深度流速で概ね25cm/sまでであった。それ以下の流速であっても浮上できていないケースもある。浮上の平均深度は66mである。120mまで浮上できていない場合も3回あったが、このときは流速が強く、系が大きく倒されていた。

(8) 流れが速い場合にはブイが沈降するのも難しい。今回も沈降深度を350mに設定したが、沈降の平均深度は295mである。150mからの沈降が規定深度-10mの340mまで達していたのは、14回であった。200mまですら下がっていない場合も3回あり、このときも一層目流速は強かった。期間平均のデータカバー率は66パーセントであった。

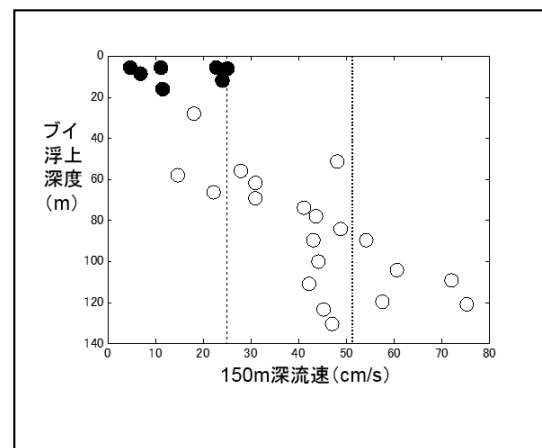


図1 冬期試験期間中における150m深での流速とブイ浮上深度との関係。黒丸は浮上に成功した場合（寸止め動作を含む）、白丸は失敗した場合をそれぞれ表す。流速が概ね25cm/sの場合に浮上した（25cm/s以下で浮上しない場合は、浅部流速が高い）。

(9) 冬期試験中1月20日から4月10日までの海水存在時期(寸止め期間)のなかで8回の寸止め機会があったが、その期間中に海面に浮上したケースはなかった。このうち30m以浅にあがったのが4回であった。流速との関係から、浮上の休止を寸止めオペレーションの成功であるか強流速によるものであるかは難しいが、寸止め動作は概ね成功したといえよう。

(10) 水温プロファイルとしては、冬期の貴重なプロファイルが得られた(図2)。例えば2月22日については、表面付近にいくにつれ水温、塩分ともに低下し、塩分で密度成層している様子が捉えられているが、結氷点で一般的な構造を示しているわけではなく、鉛直的に複雑な構造を捉えることに成功した。

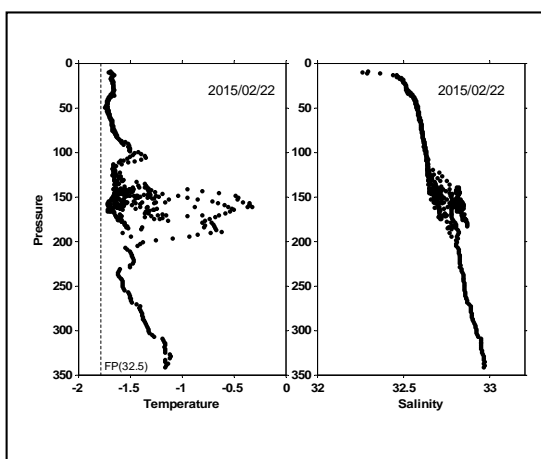


図2 2015年2月22日に観測された水温(左)と塩分(右)の鉛直プロファイル

(11) 全般的に、流速等の海況はブイの設計仕様をうわまわる厳しい条件下ではあったが、約半年間の長期にわたり、ブイ浮上沈降動作や待機深度の制御、衛星通信機能などの基本的な動作はすべて正常に作動することを確認した。海水被覆時に対応するための寸止めモードについてもほぼ正常に動作したものと考えられる。また、待機深度の制御が適切に行われていることから、プロファイラーとしての機能と同時に一定深度での時間分解能の高い観測を行う通常の係留プラットフォームとしての運用も可能であることが実証できた。

(12) 本研究では本体ブイの浮上能力と流速場の関係を明らかにした。中間ブイの立ち上げ深度と浮力の関係など、今後の実用オペレーションを考える上で重要な問題点も明らかになった。それらの問題点を踏まえて筐体の再設計やシステム全体の改善を行うことで、今後の極域沿岸海洋域での安定的な運用を目指していきたい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

伊藤進一、有馬正和、市川雅明、青木茂、奥西武、笥茂穂、長谷川大介、和川拓、安田一郎、田中雄大、黒田寛、清水勇吾、水中グライダーによる沿岸海洋観測の可能性、沿岸海洋研究、査読有、53(2)、125-133、2016.

〔学会発表〕(計 4 件)

Aoki, S.: ROBOTICA: Research of Ocean-ice Boundary Interaction and Change around Antarctica. ILTS International Symposium on Low Temperature Science, 2015年11月30日、北海道大学低温科学研究所(北海道札幌市).

Aoki, S., T. Tamura, Team ROBOTICA: Research of Ocean-ice Boundary Interaction and Change around Antarctica (ROBOTICA). The Sixth Symposium on Polar Science, 2015年11月17日、国立極地研究所(東京都立川市).

Nogi, Y., S. Aoki, T. Tamura: The prospect of the observation around the unexplored area in the Southern Ocean. The Sixth Symposium on Polar Science, 2015年11月17日、国立極地研究所(東京都立川市).

伊藤進一、有馬正和、市川雅明、青木茂、安田一郎、笥茂穂、長谷川大介、和川拓、黒田寛、清水勇吾、水中グライダーによる沿岸海洋観測の可能性、沿岸海洋研究シンポジウム「沿岸海洋学における観測研究の最前線」2015年度海洋学会春季大会、2015年3月21日、東京海洋大学(東京都・品川区).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

青木 茂 (AOKI, Shigeru)
北海道大学・低温科学研究所・准教授
研究者番号：80281583

(2) 連携研究者

小野 数也 (ONO, Kazuya)
北海道大学・低温科学研究所・技術専門職員
研究者番号：40396320

(3) 研究協力者

市川 雅明 (ICHIKAWA, Masaaki)