

氏名	後藤 慎平		
学位の種類	博士(工学)		
学位記番号	博甲第 7553 号		
学位授与年月日	平成 27年 9月 25日		
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当		
審査研究科	システム情報工学研究科		
学位論文題目	自動海洋観測フロートによる広域海中音場変動解析に関する研究		
主査	筑波大学 教授	工学博士	水谷 孝一
副査	筑波大学 准教授	博士(工学)	若槻 尚斗
副査	筑波大学 准教授	博士(工学)	川村 洋平
副査	筑波大学 助教	博士(工学)	海老原 格
副査	筑波大学 教授	工学博士	武若 聡
副査	海洋研究開発機構 観測技術担当役 (東京海洋大学 連携大学院客員教授)	博士(工学)	土屋 利雄

論文の要旨

本論文の目的は、地球温暖化や地震・津波などに起因する地球環境変動が、これまであまり変動しないとされてきた深海域や極域の音速場へ及ぼす影響を明らかにすることである。この目的を達成するため、海洋自動観測フロートによって観測された実海域データ（①多くは公開されているデータ、②一部は自ら取得したデータ）から、広域かつ長期的、または短期的な海中音速場の検出を行っている。さらに、②新型の海洋観測フロートの開発にも取り組み、①従来のフロートでは明らかに出来なかった海域の実観測データから、音速場変動について解析を行っている。また、その音速場の変化が音波伝搬経路に与える影響を数値計算によって検証した。

第1章では、本研究の背景として地球環境変動に起因する海洋音響環境変動の因果関係について示している。また、従来の海洋音響研究が過去の観測データや統計データに拠るものであり、地球温暖化や季節変動などの影響が考慮されていない点に着目し、海中音速場のリアルタイム観測について重要性を示している。海洋音響環境が変動することで引き起こされる海洋調査や生態系への影響について述べ、本研究において明らかにするべき目的、及び方法を示している。

第2章では、深海域の音波伝搬に直接寄与する音速構造を明らかにし、海中音波を利用した観測例を示している。海中での音速は、水温、塩分濃度、圧力が複雑に作用することで変化するため容易に計測することはできない。そのため、これまで多くの研究者により海中音速を算出する計算式が発表されており、本章ではそれら各音速変換式の特徴について示すと共に得られる結果の違いについて比較を行っている。また、観測船により実観測されたデータを用いて音速変換式にて求めた音速プロフ

(博甲)

ファイルを比較し、海域や深度の違いによっても音速場が変化する事を示している。さらに、音波伝搬経路のシミュレーションに用いる音線理論、及び Normal Mode 理論について、実観測データから得られたシミュレーション結果を用いて両理論の特性の違いについて示している。

第 3 章では、広域海洋音響環境変動をリアルタイムで捉える手法を確立するため、先ず、2000 年に始まったアルゴ計画において、全世界の海洋に展開された水深 2000m までを観測可能なアルゴフロートデータの集取・管理手法を概説している。公開されているデータ（水温・塩分・深度・位置）は年間 10 万件を超えるが従来は手作業で管理・解析されていたため、全球的な音速場の解析は行われていなかった。そこで、著者はこれらのデータの自動収集、及び音速計算を行うシステムを新たに構築することで、即時的に全球的な音速場を視覚的に捉えることを可能としている。また、構築されたシステムを利用して音速場の季節変動解析を行い、2011 年 1 月、4 月、7 月、10 月の各月における 1 日～10 日までに、太平洋上にて観測されたアルゴデータから音速極小層（以下、サウンドチャンネル）の変化をコンターマップにて比較している。従来、サウンドチャンネルは低・中緯度海域では水温変化の小さくなる水深 1000m 付近に形成され、深度はあまり変動しないと考えられてきた。しかし、数多くのアルゴデータを取得して比較することで、サウンドチャンネルに明確な季節変化が存在することを世界で初めて明らかにしている。さらに、各季節において、経度方向、緯度方向でチャンネル深度分布を比較し、季節によって 200m 以上にも変動することを示している。

第 4 章では、従来から使われているアルゴフロートでは観測出来ない深海域まで観測可能な深海用自動観測フロート「Deep NINJA」を研究グループの一員として開発し、世界で初めて成功した南極海での水深 4000m までの長期海域試験について示している。この際に得られたデータから南極海での音速場変動解析を行っており、極域ではごく浅い海表面以外は 1 年を通して海水温の変動が小さいと考えられてきたが、今回の越冬観測により南極海においても明確な季節変動による音速場変化が起こっていることを示している。さらに、衛星画像では確認できない海氷下の音速変化を捉えることにより、氷床崩壊など沿岸部の影響により、海中音速構造が一時的に変わる可能性について述べている。また、得られた 1 年間の音速プロファイルから、シミュレーションにより各月の音波伝搬経路の変化を解析し、夏季と冬季で伝播経路が異なり、同一地点での信号レベルが変化することを明らかにしている。

第 5 章では、突発的な海洋環境変動イベント発生時における海中音速場への影響を捉える試みについて示している。第 3 章で開発したサーバーを用いて巨大津波を伴った 2004 年のスマトラ島沖地震と、2011 年の東日本大震災についてデータを取得して比較を行っている。地震・津波などが発生した後の海中音速データは、音響測深器や海中探査機による海底調査において不可欠であるが、発生場所が予測できない突発的イベントにおいては、現場海域に調査船や係留式ブイなどを予め展開し様々な海洋データを観測することは困難である。そこで本研究では、常時、グローバルに展開するアルゴフロートのデータを取得して地震・津波による音速場変動解析を行っている。本章では、まず東日本大震災前後に日本近海に展開していた 13 台のアルゴフロートデータを取得し、そのうち、震源近傍を通過した 2 台のフロートから音速変化を観測したため、この変化が海域特有の事象かを検討するため、2001 年～2014 年までの同海域における同時期のフロートデータと比較している。その結果、1 年を通して音速が安定している水深 1000m 以深のサウンドチャンネル軸付近において、2011 年の地震発生後の音速変化量は、他の年の約 2 倍大きかった事を示している。また、2004 年のスマトラ

(博甲)

島沖地震においても震源付近に展開していた2台のアルゴフロートからデータを取得し、地震・津波発生前後の約3ヶ月間の音速変化を比較している。その結果、音速変動の小さい主温度躍層である水深600m～700m付近において、地震発生後に音速上昇が確認されたことから、巨大地震発生直後には、深海域においても音速が変化する傾向が世界で初めて認められ、水温や塩分濃度の微細な変化では捉えられない地震・津波の影響を、音速変換する事で海中データが変動することを示した。このことにより、地震後に行う音響測深機による海底地形調査や探査機の位置計測のための音響測位の精度確保のために調査開始前に大深度までの音速計測を行うことが重要であることを示した。

第6章では、これら成果についてまとめると共に、自動海洋観測フロートが時間的・空間的に連続性を持つ観測に有効であることを示している。また、本研究の結果を受けて新たに考えられる課題について示している。

審 査 の 要 旨

【批評】

本論文は、地球温暖化や地震・津波などの地球環境変動に起因して起こると考えられる音速場変動について、常時グローバルに展開する海洋自動観測フロートのデータから捉えることを目的とした研究をまとめたものである。従来、低・中緯度海域におけるサウンドチャンネルはあまり変動しないと考えられてきたため、過去の観測データや統計データが用いられてきたが、フロートにより得られた水温、塩分濃度、圧力のデータを自動取得、および音速変換するシステムを構築し、得られたデータを詳細に比較することで、水温変動の少ない海域においても、季節変動や地震・津波などによる海洋音響環境変化を捉えることに成功している。また、従来の観測フロートでは観測できない深海域にも対応するため、深海用海洋観測フロートを開発し、1年を通して変動が小さいとされる南極海での音速場変動を捉え、音波伝搬経路の数値計算により夏季と冬季で伝搬経路と信号レベルに明確な差があることを示している。さらに、地震や津波などの短期的な海洋音速場変動を捉えるため、2つの地震事例について比較検討を行っている。その結果、地震発生前後のデータを比較すると、地震発生後には変動しており、さらに、他の年の同一海域での観測データと比べても音速が約2倍も変動していることを示している。これらにより、海中音波伝搬を利用する測深器や探査機測位などでは観測誤差が発生すると考えられ、また、ヒゲクジラ類など長距離音波通信を行うとされる海棲哺乳類では、エコーロケーションや採餌行動に影響を与える事が報告されていることから、得られた結果は海洋工学のみならず生物学など広範囲の研究分野に波及効果が期待できることから、評価に値する。

【最終試験の結果】

平成27年7月22日、システム情報工学研究科において、学位論文審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、学位論文審査委員全員によって、合格と判定された。

【結論】

上記の学位論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士(工学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。