

論文

海洋観測フロートによって観測された大規模海底地震の震源近傍における音速プロファイルの変化

後藤慎平 (JAMSTEC / 筑波大学)*^{1, †}, 土屋利雄 (JAMSTEC / 東京海洋大学)*²,

日吉善久 (JAMSTEC)*³, 水谷孝一 (筑波大学)*⁴

(2014年12月9日原稿受付, 2015年3月27日原稿再受付)

Abstract:

The Tohoku region Pacific Ocean earthquake that occurred on March 11, 2011, resulted in extensive damage in a vast area ranging from the Tohoku to Kanto. However, at the time of the earthquake, no research vessel was confirmed to be investigating marine life in the seas adjacent to epicenter area, so physical data like water temperature and salinity, as well as ocean sound speed data required for the echo sounder, could not be acquired. Therefore, in this study, we compute the sound speed profile from the Argo system data (water temperature, salinity, pressure) that was being deployed near the area of the epicenter both before and after the earthquake, and attempt to detect the change in the sound speed field. In addition, the Tohoku region Pacific Ocean earthquake and the Sumatra earthquake in December 2004, which were accompanied by a giant tsunami, were also investigated. Results showed that in the main temperature front between the central thermocline and deep-sea isothermal layer, water temperature did not change very much. However, we confirmed the tendency for the underwater sound speed to suddenly increase dramatically after an earthquake.

Classification: その他(観測, 計測等)

Keywords: 海中音速, 津波, アルゴシステム, 海洋物理データ, 東北地方太平洋沖地震, スマトラ島沖地震

Change of Sound Speed Profile in the Epicenter near the Large-scale Undersea Earthquake Observed by Ocean Observation Float

* 1 Shinpei GOTOH (JAMSTEC / University of Tsukuba)

* 2 Toshio TSUCHIYA (JAMSTEC / Tokyo University of Marine Science and Technology)

* 3 Yoshihisa HIYOSHI (JAMSTEC)

* 4 Koichi Mizutani (University of Tsukuba)

† E-mail: gotohs@jamstec.go.jp

1. はじめに

2011年3月11日に太平洋三陸沖を震源として発生したM9.0の東北地方太平洋沖地震(以下, 東日本大地震)は, 東北から関東に及ぶ広大な地域に甚大な被害をもたらした。従来, 地震等に起因する海底変動による海中の音速場の変化の記録などは報告されていない。ところが, 3/11の地震発生当時, 震源域近海で海洋観測をしていた船舶は存在せず, 水温や塩分のような海洋物理データの変動などは取得できていない。特に, これらの海洋データは海底地形計測や探査機運用の際には大きな影響を与えるため, 観測・運用前には必ずXBT(eXpendable Bathy Thermograph)による水温データから海中音速を求めている。そのため, 急激な水温変化はこれらの機器に観測誤差などの影響を及ぼす可能性が考えられる。

そこで, 本研究では, 海洋自動プロファイリングシステム(アルゴシステム^{1),2)}に注目し, 2011/3/11の東日本大地震発生前後に, 震源域から東方の北西太平洋を観測していた13台のアルゴフロートのデータ(水温, 塩分, 圧力)を取得した。そして, このデータから音速プロファイルを算出し, 海中音速場の変化を調査した。さらに, 2004/12/26に発生したスマトラ島沖地震についても, 地震発生前後に震源付近を観測していたアルゴフロートからデータを取得し, 音速場の変化を調査した。

2. ARGOシステムの概要

海洋における音響環境データを解析するには, 水温, 塩分, 圧力(深度)の物理的な観測データを基に, Del Grosso³⁾やCoppens⁴⁾, Mackenzie⁵⁾, UNESCO(Chen and Millero, 1977)^{6),7)}などの音速変換式を用いて間接的に音速に変換する手法が一般的である。海洋観測データは, 多数の海洋観測船などが計測したデータを公的機関が収集し, 品質管理を行った後に公開している。しかし, 従来の観測手法では, 地球規模の観測データを陸上の研究者がリアルタイムで入手することはほぼ不

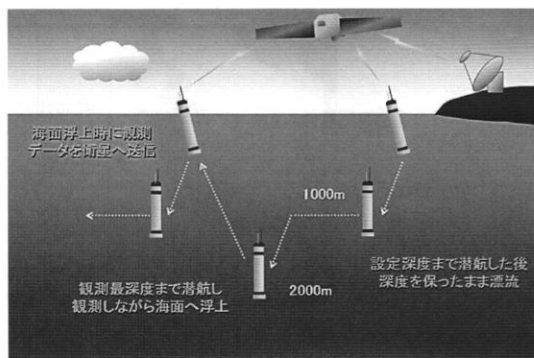


Fig. 1 Observations by the ARGO float.

可能である。特に, 船舶を用いた観測では, 非常に高品質なデータが取得できる反面, 同じ場所での連続観測が困難であり, さらに, 運用コストなどの課題がある。一方で, Levitusデータセット⁸⁾や四次元変分法海洋環境再現データセット⁹⁾等で, 世界中の海洋観測データも公開されているが, これらもあくまで過去の観測データである。しかし, 近年, 大規模な海洋環境変動が地球環境に与える影響に注目が集まっており, 地球規模での詳細な観測が求められている。そこで, 2000年に始まったARGO計画では, 全世界の海洋に約3,600台(2014年4月現在)の海洋自動プロファイリングフロート(通称: アルゴフロート)を展開し, 人工衛星経由でほぼリアルタイムに水深2,000mまでの水温と塩分データを捉えることを可能とした^{1),2)}。これにより, 従来のような船舶や係留式ブイによる大掛かりな観測システムを使用することなく, 地球的規模の海洋構造を即時的かつ容易に把握できるようになった¹⁰⁾⁻¹²⁾。Fig. 1にアルゴフロートの概要を示す。

3. 解析手法および調査海域

本論文では, 北西太平洋で我が国が展開しているアルゴフロートの内, 東日本大地震の震源域付近の海域でデータを取得した13台のフロートを選び, 2011/3/11を中心に, 地震前後3~4週間のデータ(観測回数: 5~7回分)を取得した。アルゴフロートは所有する国や研究機関により観測

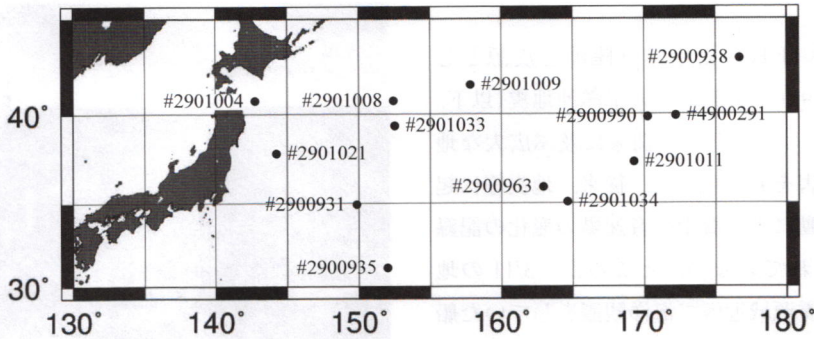


Fig. 2 Position of the Argo float used for the analysis.

間隔や観測深度がさまざまである。また、観測データが欠測しているケースもある。そこで、本論文では、データの精度を統一するため、フロート位置(GPS 位置情報)・水温・塩分・深度の4要素において欠測がないことを条件とした。Fig. 2では、データを取得した13台のフロートうち、2011/3/11に最も近い浮上日のGPS位置情報をプロットした。ここで、各数字はアルゴフロートの機体固有ナンバーである。これらのフロートから各データをnetCDF形式でダウンロードし、変換ツール^{(13),(14)}によりASCII形式のCSVファイルに変換した。そして、それらのファイルは海洋音響計算サイトを用いて、UNESCOの音速変換式にて音速プロファイルを算出した^{(6),(7)}。今回の解析に使用したアルゴフロートに搭載されたCTDセンサー(SBE41CP)は、水温分解能が $\pm 0.002^{\circ}\text{C}$ 、

塩分分解能が $\pm 0.003\text{mS/cm}$ である。

4. 解析結果

Fig. 3, Fig. 4に2011/3/11頃に震源域に近い海域を観測していた#2901004の航跡図とフロートデータから得られた音速プロファイルを示す。これらの図から、3/11の前後(3/9~3/19)での移動距離は55km程度であるが、Fig. 4を見ると水深350m付近での音速プロファイルが地震発生前よりも急激に大きくなっているのが見て取れる。さらに、地震発生3日後の3/14に震源付近で観測していた#2901021の航跡図と音速プロファイルをFig. 5, Fig. 6に示す。こちらも#2901004同様、水深200m付近において地震発生前よりも音速が大きくなっている。一方、震源域から南東に1,000km以上離れた場所を観測していた#2900935の約2カ月間の音速プロファイルを

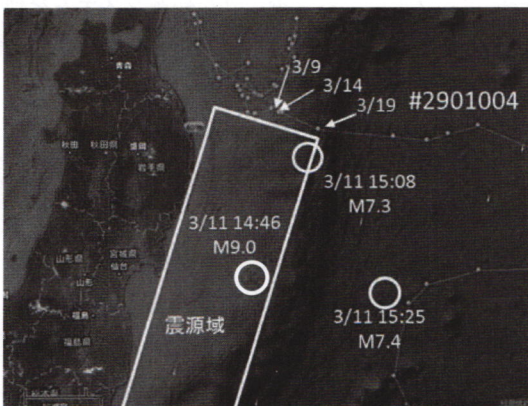


Fig. 3 The track chart of ARGO float #2901004, and the hypo-central region of 03/11/2011.

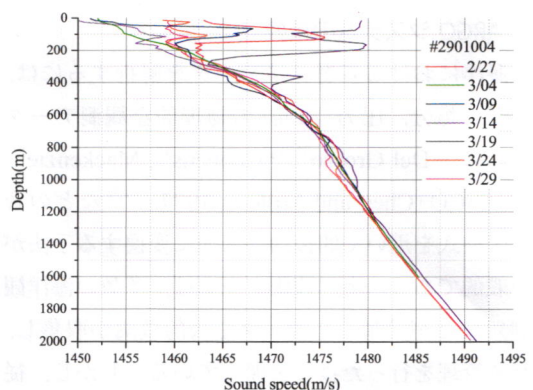


Fig. 4 Daily profile of sound speed by float #2901004 (2/27/2011~3/29/2011).

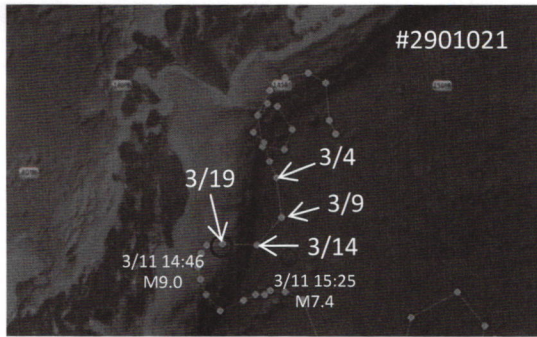


Fig. 5 The track chart of ARGO float #2901021, and the hypo-central region of 03/11/2011.

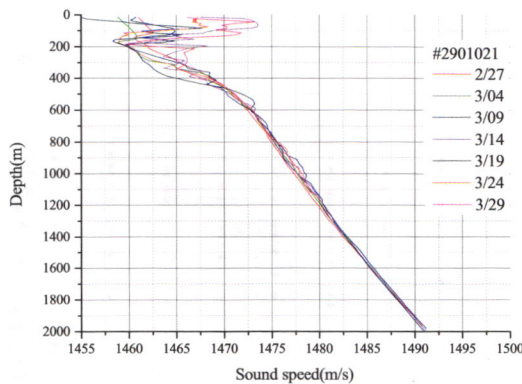


Fig. 6 Daily profile of sound speed by float #2901021 (2/27/2011–3/29/2011).

Fig. 7 に示す。この図を見ると、2/11~4/12 までの約 2 カ月間における深度ごとの音速変化は極めて小さい。また、他のフロートについても同様に音速変化を観察したが、前述の 2 機のような特徴的な音速変化は観測されていなかった。

そこで、変化の大きかった #2901004 と #2901021 について、各深度における日別の音速変化を Fig. 8, Fig. 9 に示す。ここでの経過日時は、地震発生の 2011/3/11 を 0 day とし、それより前を (-), 後を (+) としている。これらの図を見ると、水深 100 ~ 200m において、3/11 以降の海中音速が 5 ~ 15m/s 以上も急激に上昇していることがわかる。さらに、水深 800m 以深でも音速上昇が見られる。これらは、アルゴフロートに搭載された CTD センター (SBE41CP) の水温分解能が $\pm 0.002^{\circ}\text{C}$ 、塩分分解能が $\pm 0.003\text{mS/cm}$ である

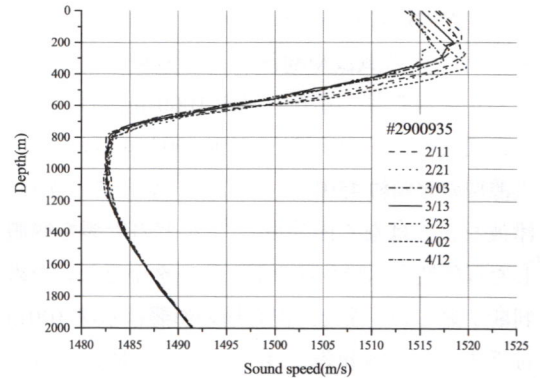


Fig. 7 Daily profile of sound speed by float #2900935 (2/11/2011–4/12/2011).

ことに鑑みれば、観測誤差とは異なる大きな変化であることがわかる。

そこで、さらに詳細に観察するため各深度における音速変化に着目する。まず、水深 100 ~ 300m 付近に着目すると、地震発生前後の観測

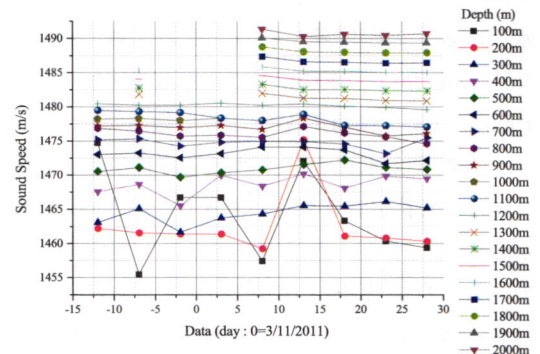


Fig. 8 Daily changes of the sound speed at each depth by float #2901004.

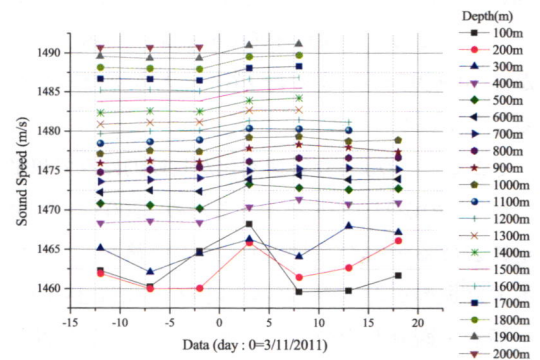


Fig. 9 Daily changes of the sound speed at each depth by float #2901021.

データが大幅に乱高下している。これは、表層付近(混合層)の風浪や潮汐などの影響として見る事ができる¹⁵⁾。また、水深1000mにおいても音速変化が見られるが、#2901004においては、震源域の北側約450kmで観測していたことから、津波などではなく内部波^{16),17)}などの影響を観測した可能性も示唆されるが、データが乏しいため判断が難しい。また、混合層の影響は水深100m付近までとする報告¹⁸⁾もあるが、海域によっても異なる。そのため、ここでは地震発生時に最も震源の近くを観測していた#2901021の観測データに絞って検証する。Fig. 9を見ると、3月11日以降の水深500m以深の観測データでは、急激に音速が変動しているのが見て取れる。これは、風浪や潮汐などの影響をあまり受けない主温度躍層や深海等温層において、このような音速変化が起こっていることは興味深い。これらの層は季節や海域によって深度範囲が変化するため、一概に水深で表すのが困難である。そのため、本論文では水深500~1000mまでを主温度躍層、水深1000m以深を深海等温層として扱っている¹⁸⁾。これを踏まえ水深500m以深に着目すると、地震発生数日後に音速変化が大きくなっていることがわかる。まず、水深500mでは、地震発生前の3月9日の音速が1470.187m/sであったのに対し、地震発生後の3月14日には1473.268m/sまで約3.1m/s大きくなっている。さらに、水深1000mにおける地震発生前後を比較すると、1477.399m/sから1479.212m/sまで約1.8m/s大きくなっており、深度1900mでは、1489.33m/sから1490.974m/sまで約1.6m/s大きくなっていることがわかった。

そこで、このような音速変化が長期的にみて頻繁に起こるかどうかを検証するため、2005~2014年における地震発生同時期(3/11前後)に、東日本大震災の震源近海(東経142.86°, 北緯38.10°)を通過・観測したフロートからデータを取得した。今回の解析には各年において単一フロートのデータを利用した。(付録にフロートの航跡を示

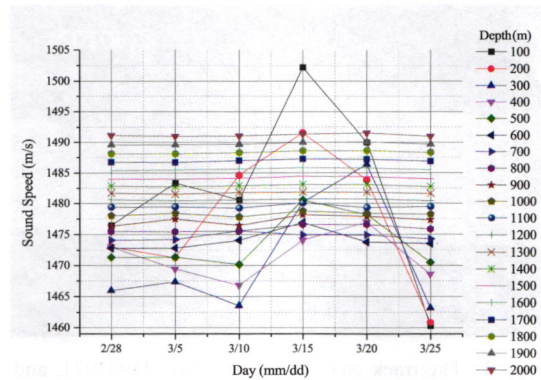


Fig. 10 Daily changes of the sound speed at each depth by float #2900949 in 2010.

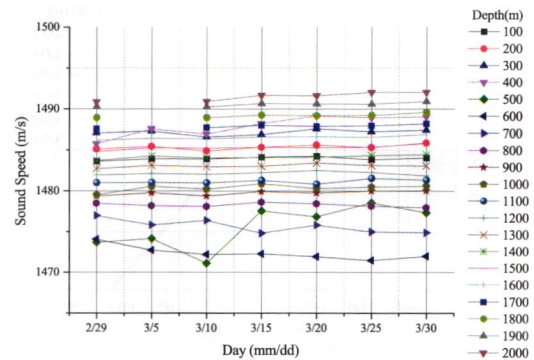


Fig. 11 Daily changes of the sound speed at each depth by float #2901028 in 2012.

す。)また、深海での音速変化を詳細に観察するため、水深2000mまでの観測値において、3章で述べた4要素に欠測がないものとした。ここでは、まず、地震発生前後の直近のデータとして、Fig. 10に2010年、Fig. 11に2012年の音速日別変化を示す。この結果を見ると、水深500m付近までは音速の大きな変化が見取れるが、これはFig. 8, Fig. 9同様、表面層の影響と考えられる。一方で、風浪の影響をあまり受けない主温度躍層や深海等温層では、音速はほぼ一定となっている。Fig. 9の2011年における水深1000m以深と比較すると、地震発生前後で音速に変化が起こっていることが見て取れる。Fig. 9では、深度によっては観測されていないケースも見受けられるが、おおむね各層のデータが観測されているため地震発生前後の音速変化を調査する上で有力なデータと

いえる。そのため2011年についてのみ、欠測ケース以外のすべてのデータを利用した。これを踏まえ Fig. 10, Fig. 11 の水深 1000m に着目すると、震災前後の年ではあまり音速変化が起こっておらず、2～3月の最大音速と最小音速の差(最大変化量)は約 0.56m/s であった。また、同時期にお

ける深度 1900m における最大変化量は約 0.46m/s であった。これらの結果から鑑みると、2011年の地震発生前後に起こった音速変化が極めて大きいことがわかる。

そこで、さらに長期的な検証を行うため、前述の 2005～2014年のアルゴフロートデータを用

Table 1 Changes of the sound speed at a depth of 1000m at offing of Sanriku.

The observed year (Float number)	2005 (#2900417)	2006 (#2900406)	2007 (#2900579)	2008 (#2900659)	2009 (#2900960)
Max (m/s) (The observed day)	1478.096 (3/24)	1478.584 (1/31)	1478.222 (3/16)	1479.225 (1/3)	1479.836 (2/10)
Min (m/s) (The observed day)	1477.204 (3/14)	1477.183 (1/1)	1477.165 (1/25)	1478.462 (2/22)	1477.259 (3/2)
Maximum amount of change (m/s) (Max–Min)	0.892	1.401	1.057	0.763	1.267
The observed year (Float number)	2010 (#2900949)	2011 (#2901021)	2012 (#2901028)	2013	2014 (#5904027)
Max (m/s) (The observed day)	1478.857 (1/9)	1479.332 (3/19)	1480.881 (3/15)	Not applicable of float	1478.208 (3/25)
Min (m/s) (The observed day)	1477.825 (3/10)	1476.618 (2/2)	1479.533 (2/29)		1477.410 (2/28)
Maximum amount of change (m/s) (Max–Min)	1.032	2.714	1.348		0.798

Table 2 Changes of the sound speed at a depth of 1900m at offing of Sanriku.

The observed year (Float number)	2005 (#2900417)	2006 (#2900406)	2007 (#2900579)	2008 (#2900659)	2009 (#2900960)
Max (m/s) (The observed day)	1490.162 (1/13)	1489.263 (1/1)	1489.951 (2/4)	1490.161 (2/2)	1489.923 (2/10)
Min (m/s) (The observed day)	1489.765 (1/23)	1488.958 (1/31)	1489.373 (3/21)	1489.293 (2/22)	1489.447 (3/30)
Maximum amount of change (m/s) (Max–Min)	0.397	0.305	0.578	0.788	0.476
The observed year (Float number)	2010 (#2900949)	2011 (#2901021)	2012 (#2901028)	2013	2014 (#5904027)
Max (m/s) (The observed day)	1490.070 (3/20)	1491.147 (3/19)	1490.887 (3/30)	Not applicable of float	1489.600 (3/15)
Min (m/s) (The observed day)	1489.604 (3/5)	1489.292 (1/3)	1490.115 (1/10)		1489.053 (3/20)
Maximum amount of change (m/s) (Max–Min)	0.466	1.855	0.772		0.547

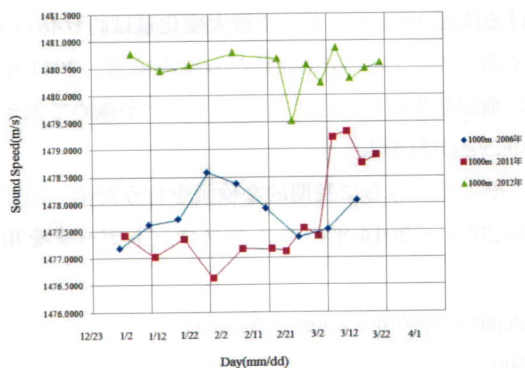


Fig. 12 Sound-speed changes from January–March in 2006, 2011, and 2012 at a water depth of 1000 m.

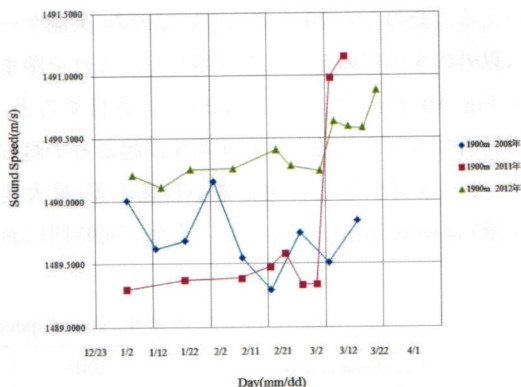


Fig. 13 Sound-speed changes from January–March in 2008, 2011, and 2012 at a water depth of 1900 m.

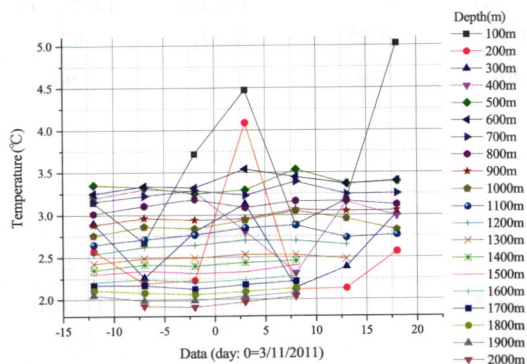


Fig. 14 Daily changes in temperature at each depth by float #2901021.

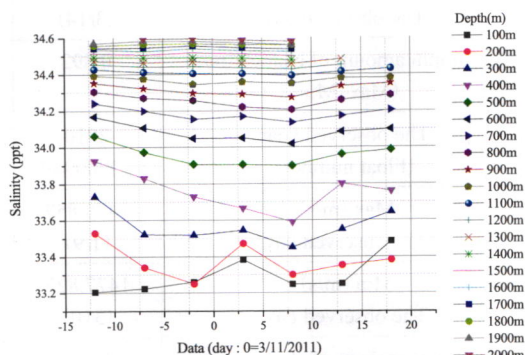


Fig. 15 Daily changes in salinity at each depth by float #2901021.

いて2011年との比較を行った。季節変動による音速変化の影響を排除するため、データの期間は季節水温躍層が比較的安定している1~3月とした。また、2013年については同時期に震源海域付近を観測していたアルゴフロートが存在しなかったためデータが欠損している。これらの観測データ、およびフロートナンバーを **Table 1**, **Table 2** に示す。音速変化量は、各年の同期間に観測された全データから、最大音速と最小音速を抽出して差を求めた値である。さらに、地震の起きた2011年に対して、その他の年で最大変化量が最も大きかった年(1位:2011年, 2位:2006年, 3位:2012年)について、水深1000mにおける3カ月間の音速変化の比較を **Fig. 12** に示す。また、**Fig. 13** では水深1900mにおける

最大変化量が最も大きかった年(1位:2011年, 2位:2008年, 3位:2012年)について比較したものである。

これらの表を見ると、ほぼすべての年において、2011年のような急激な音速変化は確認できない。**Fig. 12** および **Table 1** に示す水深1000m付近の観測結果では、季節水温躍層と思われる影響により、最大音速と最小音速の変化量は約0.8~1.4m/sとやや大きくなっている。しかし、2011年の音速変化量を見ると、他の年に比べ約2倍の2.714m/sとなっており、音速最大値は地震発生後の3/19に観測している。次に、**Fig. 13** および **Table 2** に示す水深1900mにおける音速の経年変化に着目すると、例年は約0.3~0.77m/sと変化量も小さいが、2011年においては約1.86m/sと

2倍以上の変化量を記録しており、こちらについても音速最大値は地震発生後の3/19に観測している。今回、解析に使用したフロートは、おおむね3月頃に震源域付近の三陸沖を観測していた物を用いているが、1~3月の間に釧路沖から三陸沖まで漂流していた機体もあり、水深1000m以浅の音速変化には、緯度の違いや季節変化による水温変化の影響が含まれる。一方で、1年を通して水温が安定している深海等温層においては、2011年の音速が急激に変化しており、さらに、地震発生後の3/19に音速が最も大きくなっている。

そこで、当該海域での音速変化に対する水温・塩分の依存性を調べるため、#2901021で取得された水温と塩分変化をプロットした。これらをFig. 14, Fig. 15に示す。ここでの経過日時は、2011/3/11を0 dayとし、それより前を(-)、後を(+))としている。まず、地震発生後における水温と塩分の変化に着目すると、水深1000mから2000mにおいては地震発生後に上昇傾向が見られる。特に、水深1000mに着目すると、地震発生3日後から水温が上昇し始め、8日後には地震発生前と比べ約0.3°Cの水温変化が起こっており、さらに、水深2000m付近においても同様の変動が見られ、地震発生前後で約0.2°Cの水温上昇が起こっている。一方、同期間の塩分に着目すると、水深1000mから2000mでは地震発生前後ではあまり変化が起こっておらず、地震発生8日後の水深500m付近(主温度躍層)において、約0.1 pptの上昇が見られた。これらの変化は極めて小さいように見えるが、あまり変動が起らない深海等温層では音速変化に影響を与えると考える。また、この水温と塩分の変化開始時期の違いについては、現状ではデータ数が少ないため、これらの解析結果から簡単に断定はできないが、地震発生直後に水温と塩分がわずかに変化したことで、音速変化をもたらしたと考えられる。

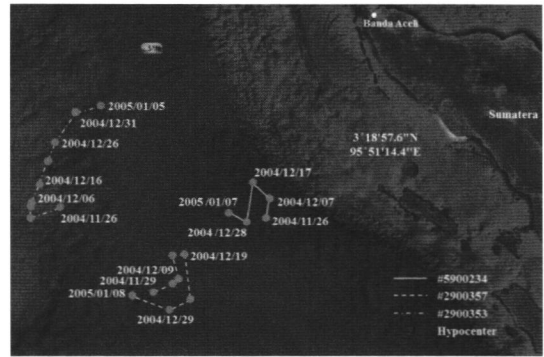


Fig. 16 The track chart of the ARGO floats deployed before and after the Sumatra earthquake.

5. スマトラ島沖地震

東日本大地震との比較のために、同様な大規模津波を伴った場合について調査を行った。ここでは、2004年12月26日に、インドネシア西部、スマトラ島北西沖のインド洋にて発生した「スマトラ島沖地震(M9クラス)」について調査を行った。この地震は、インドネシアスマトラ島バンダ・アチエ南南東250km(北緯3度18分57.6秒、東経95度51分14.4秒)を震源とし、最大34mの津波が発生した。この地震発生前後に震源付近を観測していたアルゴフロートの分布図をFig. 16に示す。

ARGO計画がスタートして間もない2004年時点では、アルゴフロートの展開数がまだ少ないため得られるデータも少ない。震源付近の海域には3機のアルゴフロートが確認できたが、このうち、震源に近いフロート(#5900234, #2900357)について、地震発生前後の観測データをダウンロードし、3章と同様に音速計算を行った。今回は、地震発生前後の音速プロファイルと比較するため、地震発生前後の約40日間の観測データを取得した。各フロートの音速プロファイルを図. 17, Fig. 18に示す。今回は調査海域が浅く水深2,000mに満たないケースが多く見受けられた。そのため、ここでは水深1,000mまでのデータを示す。また、12/26に最も近い観測プロファイルを太線で示した。

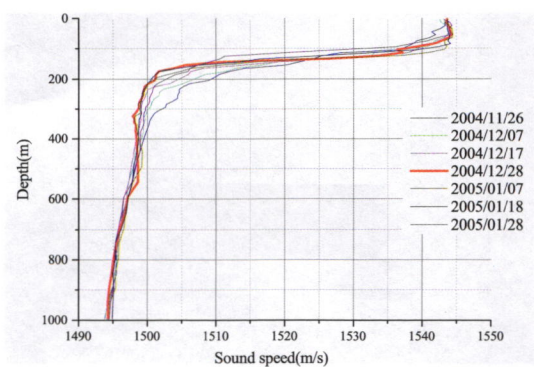


Fig. 17 Daily profile of sound speed by float #5900234..

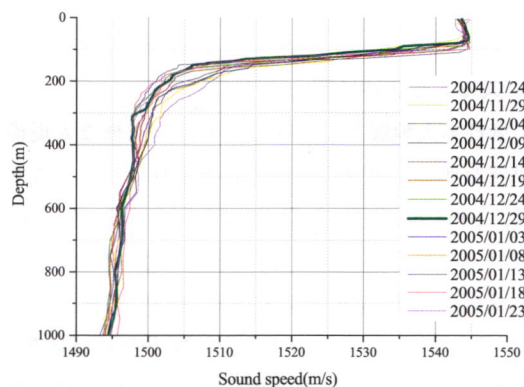


Fig. 18 Daily profile of sound speed by float #2900357.

まず Fig. 17 を見ると、地震発生直後の 12/28 の水深 300 ~ 550m 付近において、地震前後よりも音速が大きく変化する傾向が確認できる。さらに、Fig. 18 では 12/29 の水深 300m 付近に急激な音速変化が見られた。そこで、これらの音速変化をさらに詳細に観察するため、各フロートの 2004 年 11 月 ~ 2005 年 1 月における各深度の音速日変化について Fig. 19, Fig. 20 に示す。ここでの経過日時は、地震発生の 2004/12/26 を 0 day とし、それより前を(-), 後を(+)としている。

まず、Fig. 19 に示す地震発生 2 日後に震源に最も近い海域(震源西側約 200km)を観測していた、#5900234 (投入国: アメリカ)の音速日別変化に着目すると、地震発生後の水深 400m 以深において音速が大きくなる傾向が見て取れる。その中でも水深 500 ~ 600m 付近(Fig. 19 中 A 点)に着目すると、12/26 の地震発生後に音速が約

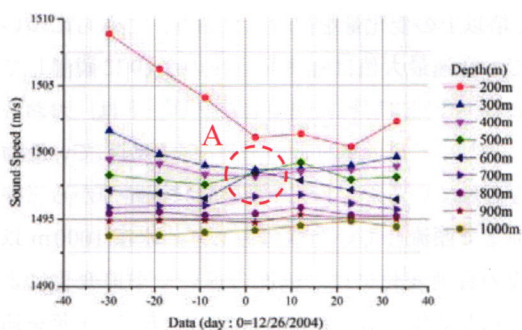


Fig. 19 Daily changes of the sound speed at each depth by float #5900234.

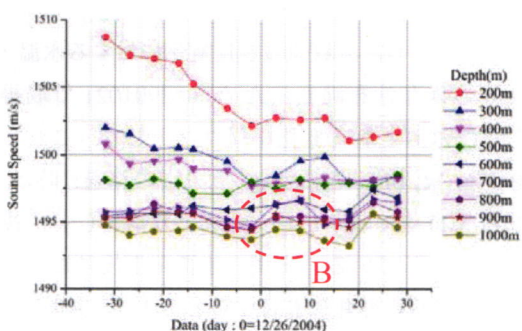


Fig. 20 Daily changes of the sound speed at each depth by float #2900357.

2m/s 以上大きくなっているのが見て取れる。次に、Fig. 20 に示す #2900357 (投入国: インド)の日別変化に着目する。当該フロートは地震発生 3 日後に震源南西側約 300km を観測しており、この図においても水深 700m (Fig. 20 中 B 点)で音速が約 2m/s 大きくなっていることが見て取れる。これら変動は風浪や潮汐の影響を受ける混合層よりも深い層で起こっており、また、当該海域は赤道付近に位置しており、付近に流入する河川などもないことから、短期間での急激な水温上昇は考えにくい。このことから、スマトラ島沖地震においても、東日本大地震の結果と同じ傾向にあるのがわかる。地震発生当時は、ARGO 計画が始まって間もないため、当該海域に展開するアルゴフロートの数も少なく、今回観測した音速変化が、地震に起因する特異な現象かどうかを明確に判断することは難しい。また、東日本大地震の結

果と比べ、浅海域で音速変化が起こっているのは、今回の震源域が浅かったためと想像できる。今後、さらにデータを収集し分析を進めることで、より具体的な原因を解明していく必要がある。

6. まとめ

東日本大地震前後の北西太平洋におけるアルゴフロート13台のデータから、海中音速プロファイルを計算した。その結果、地震発生直後に震源近傍を通過した2機のフロートでは、水温変化の小さい主温度躍層や深海等温層において音速が上昇する傾向が認められた。また、同一海域における地震発生前後の年について2005年から2014年までの過去10年間のアルゴフロートデータを取得し、長期的な音速プロファイルの変化を検証した。その結果、風浪の影響をあまり受けることのない水深1000mの主温度躍層では、2011年を除く2005～2014年までの1～3月期の変化量が約0.8～1.4m/sであったのに対し、2011年の同期間の変化量は約2倍の約2.714m/sであったことがわかった。さらに、1年を通して水温の安定している深海等温層の水深1900mにおいては、他の年が約0.3～0.77m/sの変化量であったのに対し、2011年の地震発生後には約1.86m/sと2倍以上の音速変化が起こっていることがわかった。

さらに、比較のため2004年12月に発生したスマトラ島沖地震についても検証を行った。この地震においても巨大津波を伴ったことから、地震発生時に震源近傍に展開していた2機のアルゴフロートデータを解析した。その結果、地震発生後に水深400～700m付近において音速が約2m/s以上変化し、地震発生10日後には地震前の値に戻ることが確認された。このことから、スマトラ島沖地震においても、東日本大地震の結果と同じ傾向にあることがわかる。

以上より、地震発生後の数日間は、海中音速が通常と異なるプロファイルを示すことが示唆された。しかし、このような音速変化は、海流、潮汐、

内部波、および、大規模地震による地殻変動とそれに伴う津波^{19),20)}による影響等が可能性として挙げられる。しかし、アルゴフロートによる観測データだけではその原因を特定することは困難である。他の観測データの解析を含めた海洋物理学的なさらなる究明が必要であり、今後の課題である。

一方で、このような音速変化は、音響測深器などの計測結果に大きな誤差を生じさせるため、地震後の海底地形調査を行う場合、海底変動がもたらす音速変化について、XBTなどにより詳細に計測を行う必要がある。

さらに特筆すべきは、巨大地震や津波のような突発的なイベントにおける海洋物理データ取得においては、常時グローバルに展開しているARGOシステムの有用性が再確認できた。今後、さらに観測網が発達することで、より有用なデータが取得できるようになると考える。

参考文献

- 1) Argo Project Office, "Argo part of the integrated global observation strategy," <http://www-argo.ucsd.edu/> (2014/08).
- 2) Argo JAMSTEC, "Japan Argo Delayed-mode Data Base," http://www.jamstec.go.jp/ARGO/argo_web/argo/index.html/ (2014/08).
- 3) V. A. Del Grosso, "New equation for the speed of sound in natural waters (with comparisons to other equations)," *J. Acoust. Soc. Am.*, **56**(4), 1084-1091 (1974).
- 4) A. B. Coppens, "Simple equations for the speed of sound in Neptunian waters," *J. Acoust. Soc. Am.*, **69**(3), 862-863 (1981).
- 5) K. V. Mackenzie, "Nine-term equation for the sound speed in the oceans," *J. Acoust. Soc. Am.*, **70**(3), 807-812 (1981).
- 6) N. P. Fofonoff and R. C. Millard Jr., "UNESCO technical papers in marine science," No. 44, Division of Marine Sciences.,

- UNESCO, Place de Fontenoy, 75700 Paris, (1983).
- 7) 土屋利雄, "海洋音響計算WEBサイト <http://www.tsuchiya2.org> の作成・公開," 海洋音響学会誌, **38**, 79-87 (2011).
 - 8) International Research Institute | Columbia University, "LEVITUS Data Library," <http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/LEVITUS> (2014/08).
 - 9) JAMSTEC, "Data Research System for Whole Cruise information in JAMSTEC," <http://www.jamstec.go.jp/cruisedata/mirai/j/index.html/> (2014/08).
 - 10) 土屋利雄, 日吉義久, 布田浩二, "ARGO データを用いた地球規模の音速場解析," 2011 年春季日本音響学会研究発表会(CD-ROM), 1-11-6 (2011).
 - 11) 土屋利雄, 日吉義久, 布田浩二, "ARGO データによる北西太平洋の音速場解析," 海洋音響学 2011 年度研究発表会, 講演論文集, 9-12 (2011).
 - 12) JAMSTEC, "Aic MAP," http://www.jamstec.go.jp/J-ARGO/aic_map/latestAicMap.png/ (2014/08).
 - 13) JAMSTEC, "netCDF Viewer tools," http://www.jamstec.go.jp/ARGO/argo_web/tools/tools.html/ (2014/08).
 - 14) The Unidata Program Center, "netCDF tools," <http://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/> (2014/08).
 - 15) 鈴木美幸, 遠峰菊郎, 小笠原英子, "2007 年 7 月 18, 19 日, および 2010 年 1 月 29, 30 日の三陸沖海洋上層構造からみた海中音波伝搬の研究," 海の研究, **21**(1), 17-32 (2012).
 - 16) 北出裕二郎, 松山優治, "海嶺域での内部潮汐の生成と伝播について," 数理解析研究所講究録, **908**, 21-31(1995).
 - 17) 小田卷実, 稲積 忍, 高橋 渡, "海底設置型 ADCP によって観測された仙台湾の沿岸流の鉛直構造とその変動特性," 海洋調査技術, **6**(1), 19-27 (1994).
 - 18) R. J. Urick, 水中音響の原理(共立出版株式会社, 東京, 1978), pp. 116-121.
 - 19) 富士原敏也, 小平秀一, 野 徹雄, 海宝由佳, 藤江 剛, 中村恭之, 高橋 努, 山本揚二郎, 佐藤 壮, 木戸ゆかり, 高橋成実, 金田義行, "2011 年東北地方太平洋沖地震前後の海底地形調査から明らかになった海底変動," ブルーアースシンポジウム 2012 予稿集, 16-17 (2012).
 - 20) Newton Press 編, M9 超巨大大地震(Newton Press, 東京, 2011), pp. 14-27.

付録 2005年～2014年の解析に用いたアルゴフロートの航跡図。#は機体固有番号を表す。

