

## ARGO データによる広域音速場解析

土屋 利雄 海洋研究開発機構  
日吉 善久 海洋研究開発機構

Global scale sound speed field analysis by the ARGO data

Toshio Tsuchiya JAMSTEC  
E-mail: tutiyat@jamstec.go.jp  
Yoshihisa Hiyoshi JAMSTEC

## Abstract

The ARGO system is observing a global marine environment change using about 3000-set automatic observation float developed to all the oceans. In this research, the sound speed profile was calculated from the temperature and salinity of 109 sets of ARGO float. And the contour map of the sound channel axis in the northwestern Pacific Ocean was expressed. Moreover, detection of the sounds speed change event possibly started by the big earthquake using the time series data of ARGO centering on March 11, 2011 was tried.

## 1. はじめに

ARGO システムは、自動観測機 (ARGO フロート) を全海洋に約 3000 台展開することにより地球規模の海洋変動を概ね 300km メッシュでリアルタイムに捉えることを可能とした観測網である。本研究では、この ARGO システムの水温・塩分/深度データから音速プロファイルを計算して、非常に広い海域における音速場の変動 (平均音速, サウンドチャンネル軸など) を検知できる可能性について検証し、3.11 の大地震における音速変動についても検出を試みた。

## 2. ARGO システムの概要

海洋における広域の音響環境データを計算するためには、海洋観測データを入手してからそれらを基に、音速などに変換するのが一般的な方法である。従来、海洋観測データは、多数の観測船などが計測した水温、塩分、深度データを公的機関が収集し、品質管理を行った後に公開することが多く、地球規模の観測データをリアルタイムで入手することは、ほぼ不可能であった。一部において Levitus データセット<sup>3)</sup>等

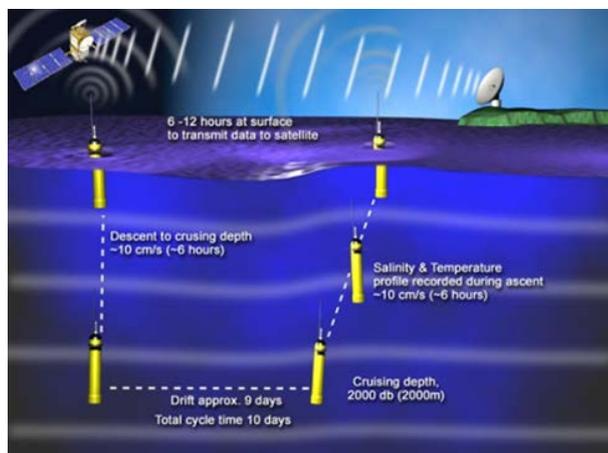


Fig. 1 ARGO フロートによる観測<sup>1)</sup>

音速データなども公開されているが、これらもあくまで過去のデータをまとめた平均値である。勿論、海洋音響トモグラフィ観測などにより、直接音響特性を観測することも可能であるが、観測そのものが大掛かりとなり、その使用は限定されていた。しかし、近年、本格的な運用モードに入った ARGO システムでは、全世界の海洋で常に稼働している 3000 台の観測機 (アルゴフロート) から Fig. 1 のような観測パターンに

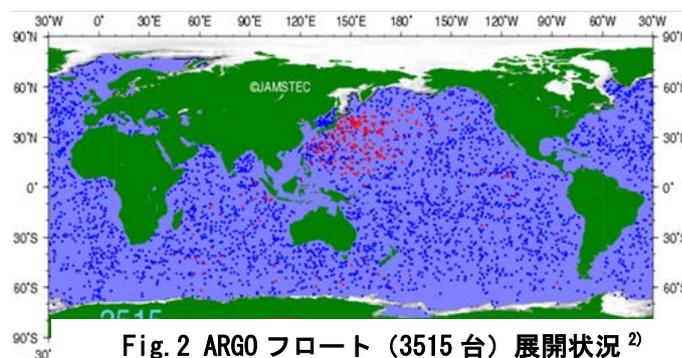


Fig. 2 ARGO フロート (3515 台) 展開状況<sup>2)</sup>  
(20012/02/12 現在)

より衛星経由でほぼリアルタイムに水深 2000m までの水温と塩分データが送られてくるようになった。これらのデータは、インターネット上でただちに公開されるため地球規模の海洋構造 (平均 300km 間隔) が簡単に把握できるようになった。Fig. 2 に全海洋における ARGO フロートの展開状況を示す。図中の赤い点が日本のフロートである。

## 3. 広い海域における音速場解析

北西太平洋に展開する ARGO フロート 105 台の水温と塩分データから音速プロファイルを算出し、音速最小値からサウンドチャンネル軸 (以下軸-) を求め、併せて、水深方向の平均値 (水温、塩分、音速) も算出し、それぞれの値から分布図を作成した。

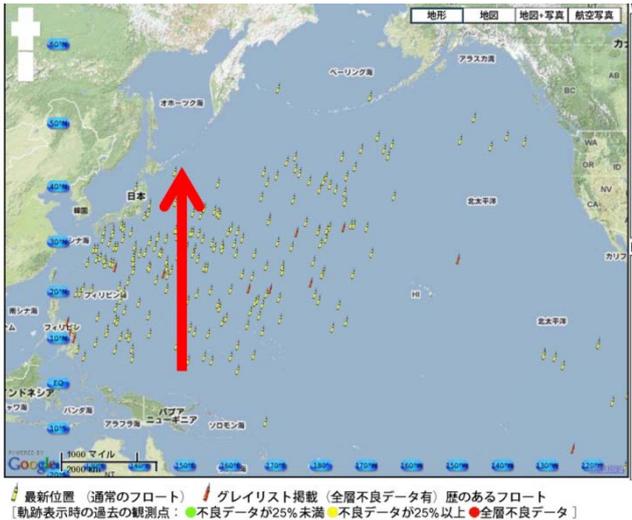


Fig. 3 解析に用いた ARGO フロートの分布

### 3.1 解析手法

今回の解析に用いた ARGO フロートの分布図を Fig. 3 に示す。この図では、2010 年 8 月 29 日～同 9 月 4 日で得られた 109 台のアルゴフロートからの水温・塩分・深度データを公開サイト<sup>4)</sup>から緯度・経度とともに netCDF 形式でダウンロードし、変換ツール<sup>5)</sup>により ASCII 形式の CSV ファイル (水深・水温・塩分) に変換した。次に、このファイルを用い、海洋音響計算サイト<sup>6)</sup>を使って音速プロファイルを計算したが、計算には、UNESCO<sup>7)</sup>の音速式を用いた。

Fig. 4 には、Fig. 3 図中の矢印付近にある 15 個のプロファイル (①水温, ②塩分, ③音速) を示した。これらの図のようにそれぞれの複雑なパターンを示したが、水深 1500m 以深では、観測値はほぼ収束していることがわかる。また、Fig. 4 の③から音速最小層は、概ね水深 600～1100m 付近に存在することが見て取れる。しかし、Fig. 4①と②図中において↓で示したように他のプロファイルと大きく異なる 2 つのデータが見られる。このようなパターンの要因は、はっきりとしないが、冬季において発生する、オホーツクに流入する河川水 (低温・低塩分) の影響が考えられる。これにより Fig. 4 の③図中↓のプロファイルの音速最小層も他のデータに比べ浅い水深にあることがわかる。

ここで、Fig. 4 のようなプロファイルをすべての観測点のデータについて並べしうと全体を把握することは不可能となるため、本研究では、長距離音波伝搬に最も大きな影響を及ぼすと考えられているサウンドチャンネルを形成する音速極小層 (サウンドチャンネル軸) の分布を調査することとした。そのために、109 個のデータすべての音速プロファイルから音速最小値を読み取り、コンターマップ (分布図) を作成した。併せて、音速計算の関係から平均水温、平均塩分、平均音速のそれぞれのコンターマップを作成した。

### 3.2 解析結果

Fig. 5 に観測値の水深 2000m までの平均値 (①水温, ②塩分, ③音速) の分布図を示す。これらのコンターマップにおける経度 180°～230° とは西経 0°～50° のことである。Fig. 5 ①では、緯度が高くなるにしたがい平均水温は漸次低くなる傾向が見られる。日本の近海では、黒潮の影響から比較的高緯度でも 12℃～13℃の等温線が北上している傾向が

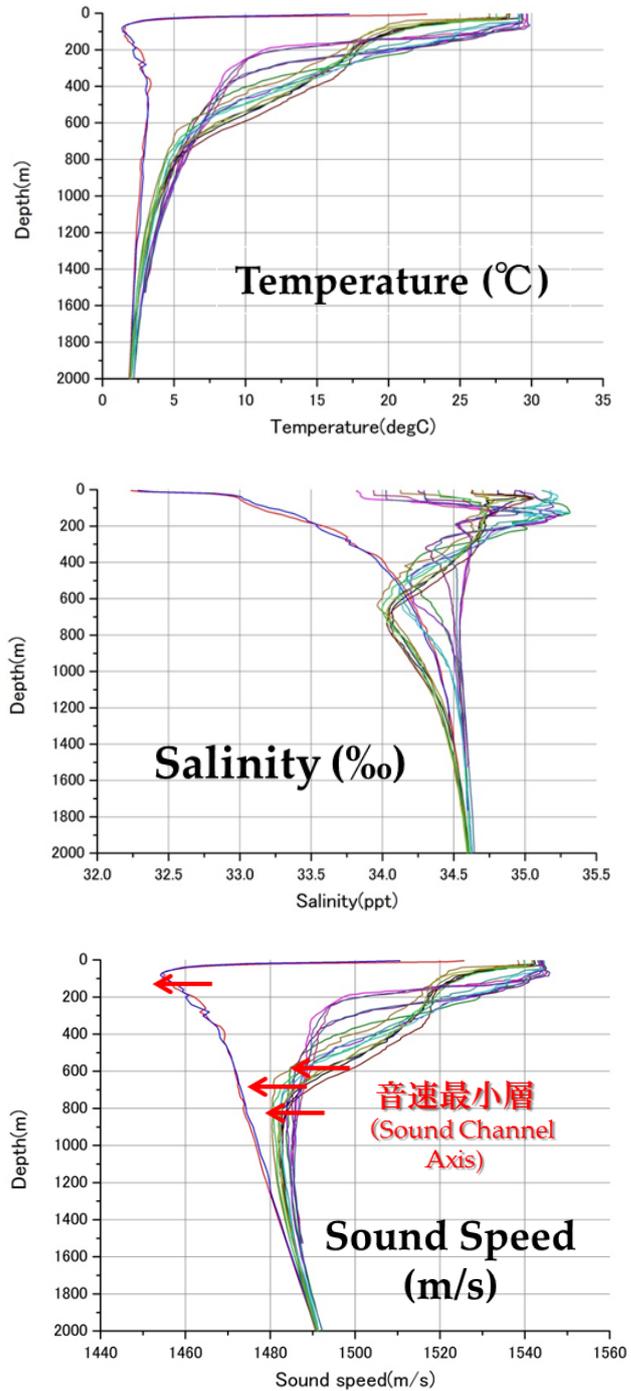


Fig. 4 Fig. 3 中の矢印付近における観測値の深度方向プロファイル

あるが、これは、逆に親潮のような寒流の影響からだと考えられる。4℃の等温線は南下しているのが見てとれる。②の塩分の平均値コンターマップから、寒冷域ほど塩分は小さくなる傾向が見られるが、北緯 20° を中心に東経 16° 以西の海域に塩分の極大海域が生じていることがわかる。Fig. 5 ③の平均音速のコンターマップでは、概ね寒冷域ほど音速は小さくなる傾向があり、北緯 15°～25°、東経 130°～160° にかけて、音速の極大点が存在している。これは、Fig. 5 ①の平均水温と同様の傾向を示してはいるが、音速の極大点 (北緯

20°，東経 145° を中心) は，Fig. 2 の水温の極大値とはズレており，塩分の影響 (Fig. 5②) も見て取れる。また，同緯度における音速は，西方海域の方がわずかに速い傾向があるが，これは水温分布の反映であると考えられる。

### 3.3 音速極小層の分布

Fig. 6 には，音速プロファイルから求めた音速極小層の深度

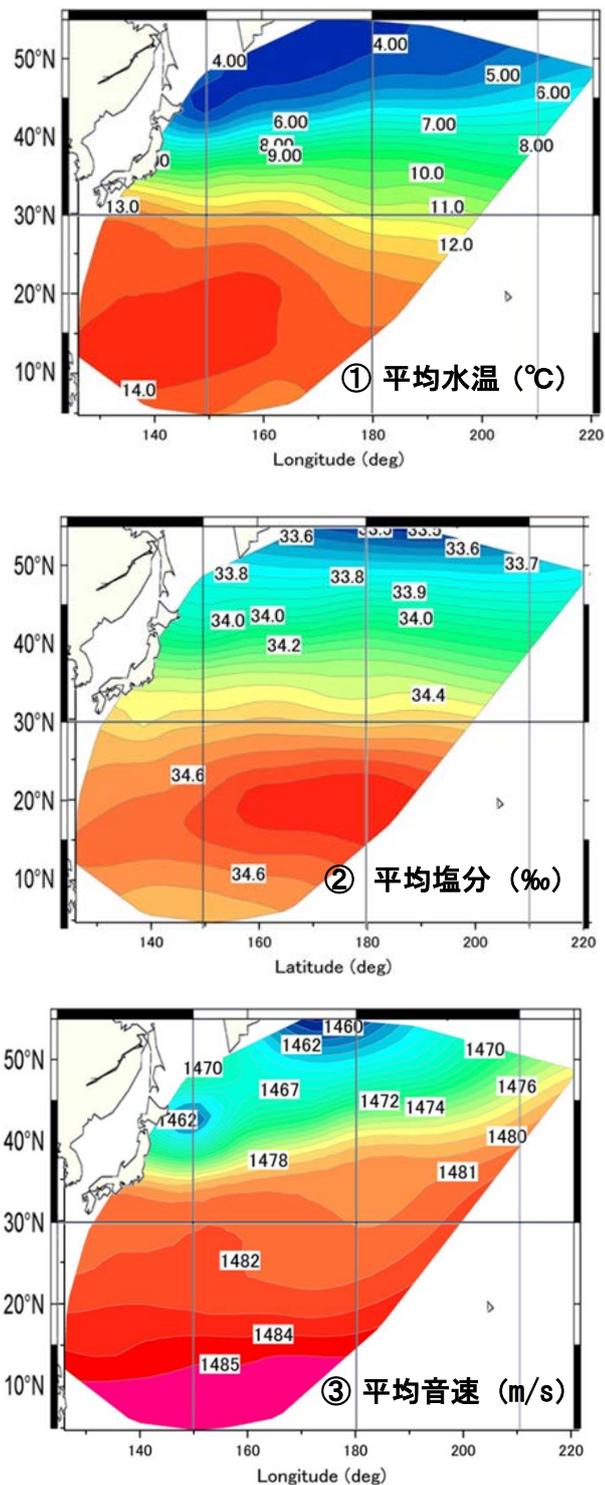


Fig. 5 ARGO データによるコンターマップ (水深 2000m までの平均値)

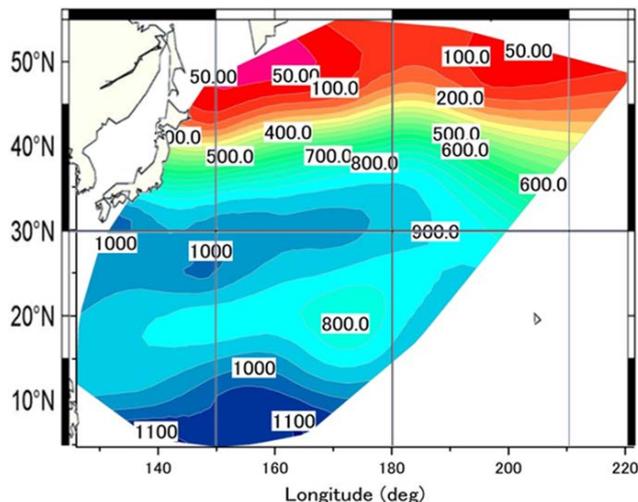


Fig. 6 音速極小層 (m) の水深分布図

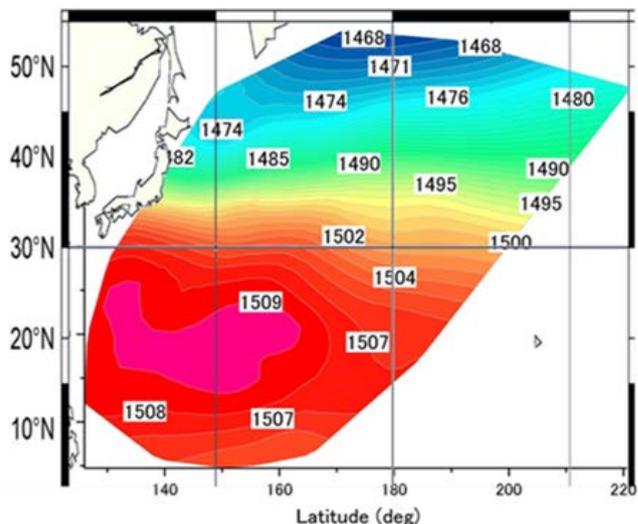


Fig. 7 音速極小層における音速分布

分布を示す。この図から，極小層の深度分布は，概ね熱帯域の 1100m から寒冷域の 50m まで漸次浅くなっていくことが見てとれる。また，日本近海域の北緯 20° から 30° において 1000m を超える軸深度の海域が広がっている。

これは，黒潮によって高水温の海水が大深度まで運ばれる結果であると考えられる。また，それに続く黒潮続流域では，800m と浅い音速極小層深度が低緯度で見られるなど，日本近海ではかなり複雑なパターンを示していることがわかる。Fig. 7 は，その深度における音速分布 (音速最小値) を示す。この図から音速最小値は，全体的には比較的単調に寒冷域に向かって小さくなっているように見えるが，1481~1482m/s の等音速線にみられる東西方向のゆらぎは，やはり黒潮やその続流域などの影響であると考えられる。

### 4. ARGO データによる海底変動の検出

2011 年 3 月 11 日に発生した宮城県沖を震源とする M9.0 の東北地方太平洋沖地震 (以下 3.11) は，広大な地域に甚大な被害をもたらした。3.11 の海底の変動があまりに大きく広大

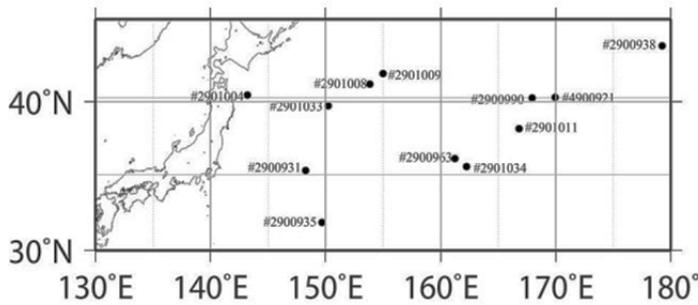


Fig. 8 解析に用いたアルゴフロートの位置

なため津波などに起因する水塊の変化も海中の音速場に何らかの変化を与えた可能性も否定できない事が考えられた。しかし、地震発生当時、震源域近辺で海洋観測が可能であった船舶は存在せず、観測データは取得されていなかった。そこで、震源域から東方の北西太平洋を浮遊している 12 台の ARGO フロートの 3/11 前後の水温と塩分データから音速プロファイルを算出し、それらを比較して海底変動による音速場変化シグナルの検出を試みた。

#### 4.1 調査海域と解析手法

通常、地震などにより海底の変動による大きな圧力波が発生しても、海中の水が大きく移動する事象は、発生しないと考えられる。しかし、今回の 3.11 では、海底の地殻変動が大

きく、地殻内からメタン等を含む水が多く漏出していることの折り返し波等により、水塊が大きく入れ替わり、水温や塩分の急激な変動により音速が変化する可能性もあると考えた<sup>9),10)</sup>。が報告されている。9)また、地震に伴う大津波による陸からそこで、北西太平洋で我が国が管理している ARGO 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フロートを中心に 12 台を選び、2011/3/11 を中心に前後 3~4 週間のデータ (5~7 回分) を取得した。Fig.3 では、解析に用いた 12 台のフロートの 2011/3/11 に最も近い浮上日の位置をプロットした。ここで、各数字は ARGO フロートの固有ナンバーである。これらの各フロートから深度、水温、塩分データを UNESCO7) の音速式を用いて音速プロファイルを算出した。

#### 4.2 解析結果

Fig.9 に 3/11 頃に震源域に最も近い海域を通過していた #2901004 の航跡図を示す。この図のように、3/11 の前後 (3/9 ~3/19) での移動距離は 50NM 程度であるが、Fig.10 のように 300m 以浅での音速プロファイル大きく変動していることが見て取れる。一方、Fig.11 のように震源域から南東に 1000km 以上離れた #2900935 では、Fig.12 のように約 2 ヶ月での音速の変化は極めて小さいことがわかる。Fig.13 に #2901004 の深度ごとの音速を日時変化としてプロットしたものを示す。

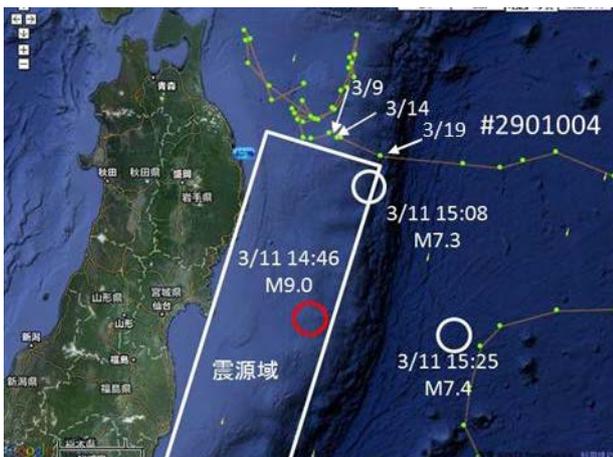


Fig. 9 フロート#2901004 の航跡と 3.11 震源域

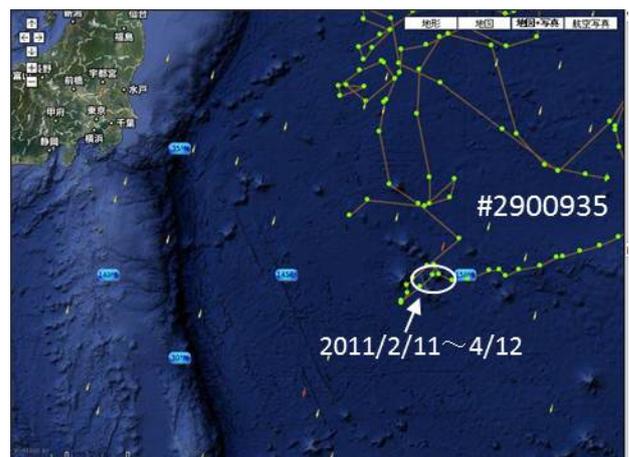


Fig. 11 フロート#2900935 の航跡

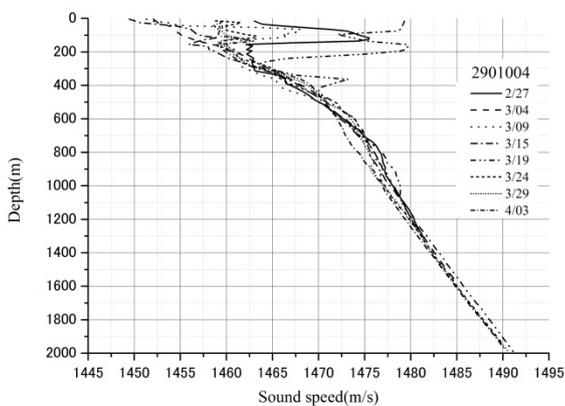


Fig. 10 #2901004 による日別の音速プロファイル (2011/2/27~2011/4/8)

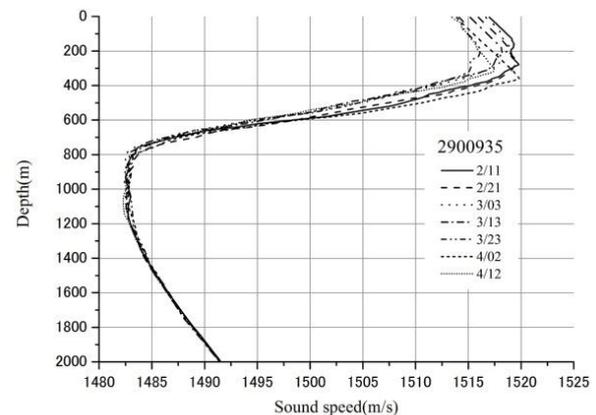


Fig. 12 #2900935 による日別の音速プロファイル (2011/2/11~2011/4/12)

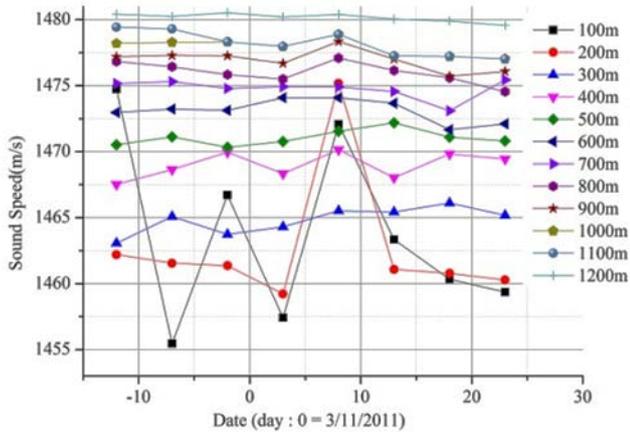


Fig. 13 #2901004 の各深度の音速日変化

ここでの経過日時は、3/11を0dayとし、それより前を(-)

後を(+)としている。この図から水深 200m 以浅において 3/11 から 4 日後から音速が 15m/s 以上も急に上昇していることがわかる。水深 1000m でも約 5m/s の音速上昇が見られる。そこで、Fig.8 の 12 台のフロートすべてについての音速の日時変化を調査した。Fig.14 では、水深 200m (海面混合層)、Fig.15 では、水深 1000m (中緯度の深海等温層) での音速をプロットした。これらの図では、震源域からの離隔の影響を調べるため、フロートの位置 (東経 140~150° E, 150~160° E 及び 160° E 以東) で分けてある。140 ~150° E においては、200m, 1000m とともに#2900931 の音速上昇がもっとも顕著であるが、このフロートでは、音速上昇が前日の 3/10 から始まっていることから、3.11 の影響があるとはいうことができない。一方、#2901004 では、3/11 から数日後に水深 200m では、約 20m/s の音速上昇が、水深 1000m では、約 1m/s の上昇が見られる。しかし、#2900935 においては、#2900931 と

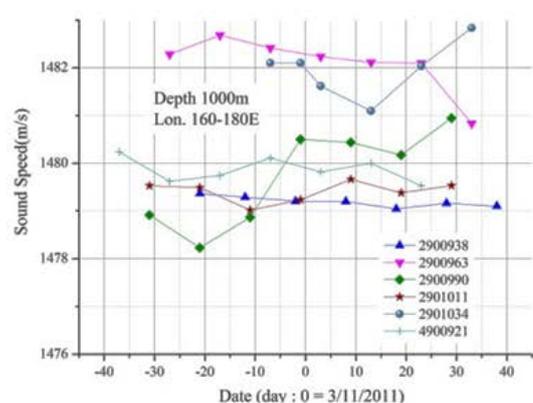
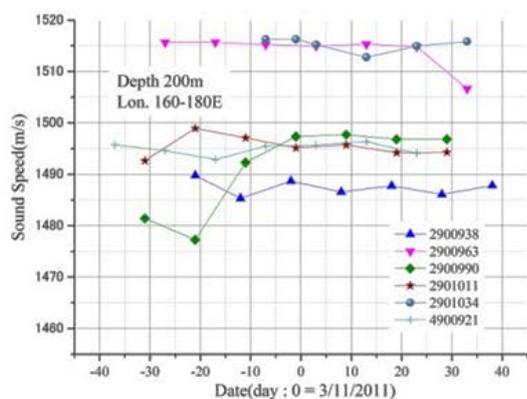
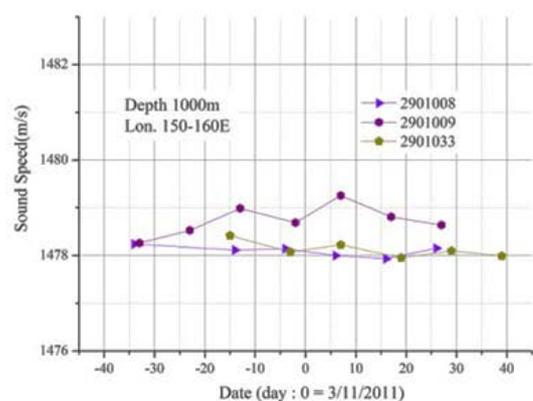
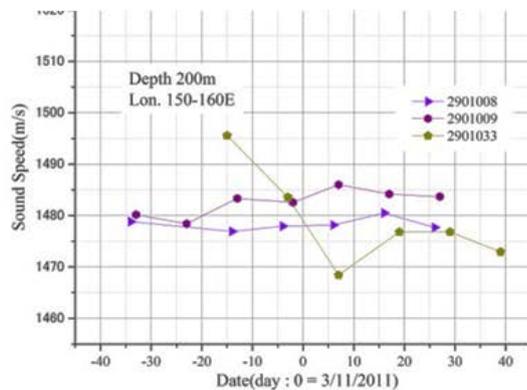
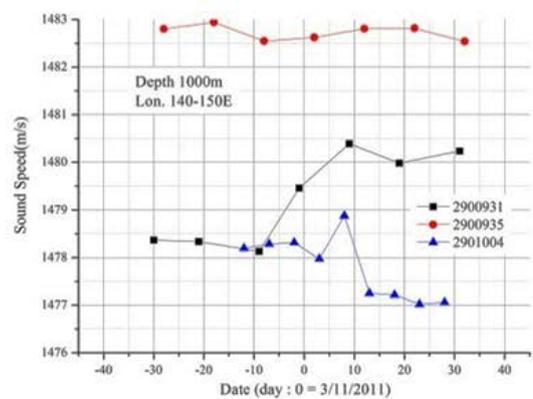
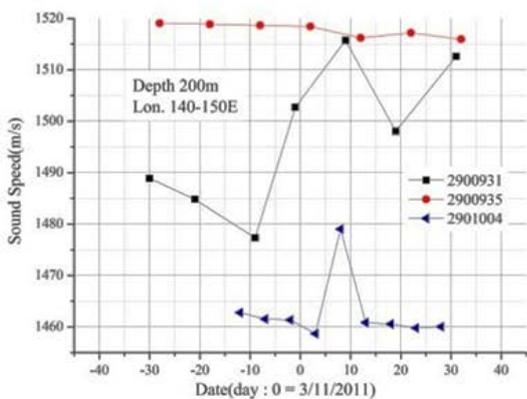


Fig. 14 水深 300m における音速の日変化 (2011/3/11=0day)

Fig. 15 水深 1000m における音速の日変化 (2011/3/11=0day)

ほぼ同じ経度 (160° E) であるにも関わらず、音速は安定して変化はみられない。また、Fig.9 や Fig.10 において 150~160° E や 160° E 以東でも #2901033 や #2900990 のように音速の大きな変化があるフロートも存在する。しかし、これらのフロートでは、3/11 の以前から音速変化が始まっており、海底変動の影響があったと断定できない。

これらの結果から、フロート #2901004 においてのみ 3/11 後における音速上昇以外は、明確な変化を確認できなかった。Fig.9 の航跡のように、このフロートは、地震発生の前後に震源域近傍の海中を通過しており、海底変動による何らかの影響を受けたことは十分想像できる。最近の JAMSTEC などの研究により 3.11 の震源域においては、大きな正断層により地殻が跳ね上がり、それに起因して津波が発生したという可能性が指摘されている。<sup>9) 10)</sup>したがって、震源域近傍では、大きく跳ね上がった地殻により、一旦押し上げられた海水が海面付近の温かい海水を数日後に再び沈み込ませた可能性も考えられる。<sup>9)</sup>

そこで、海域での水塊の変化を調べるため、#2901004 で取得された水温と塩分の日時変化をプロットした。Fig.16 から、水深 100m と 200m において 3/19 に水温が約 4°C、と Fig.17 から塩分が約 0.6‰ 上昇していることが見て取れる。

Fig.9 の航跡図から 3/9~3/19 のフロートの位置は、南下する寒流の影響下<sup>11)</sup>にあり、急激な温度上昇や塩分上昇は、あまり考えられない。しかも、3/24 には、水温や塩分の値は、3.11 前のレベルに戻っている。さらに、Fig.17 に見られるように 300m 以深においては、塩分が低くなっていることから比重

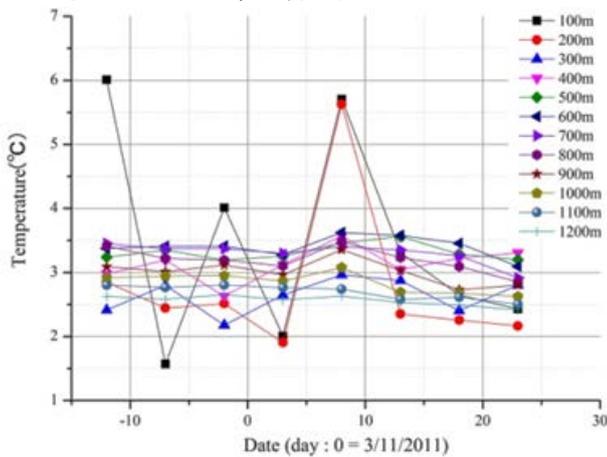


Fig. 16 #2901004 の各深度の水温日時変化

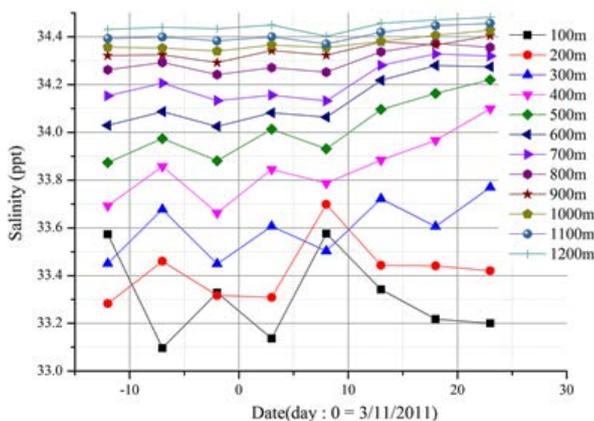


Fig. 17 #2901004 の各深度の塩分日時変化

の軽い海水が沈み込んでいることを示唆している。

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、3/19 の音速上昇は、海底変動によって引き起こされた地殻内の漏水ではなく、津波によって生じた水塊の大きな入れ替わりを音速変化のシグナルとしてとらえた可能性も十分に考えられる。また、Fig.18 で示したように #2901004 の音速プロファイルから求めた水深 1200m までの平均音速は、3/9 からの 10 日間で約 10m/s も大きくなっている。このような音速変化は、音響測深器などに大きな誤差を生じさせる可能性があるため、今後十分に検証する必要がある。

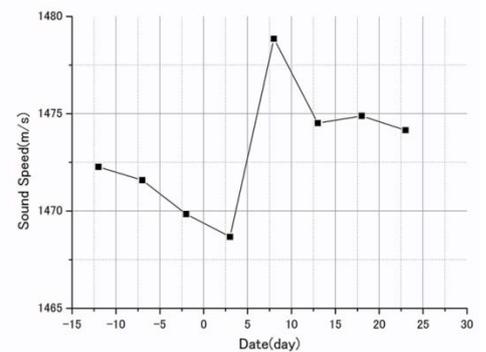


Fig. 18 #2901004 の平均音速の日変化

## 5. まとめ

ARGO データ (水温、塩分) を用いることにより、ほぼリアルタイムで、地球規模の音速構造を解析できることを示した。例として、北西太平洋での解析を行い、多くの ARGO フロートのデータから日本近海において複雑な軸深度構造が確認された。また、2011/3/11 前後 ARGO フロート 12 台のデータから音速プロファイルを計算し、震源域近傍を通過したフロートでは、大地震の後の音速の上昇のシグナルが認められた可能性を見出した。結果として、3.11 のような突発的なイベントにおける海洋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。

## 参考文献

- 1) <http://www-argo.ucsd.edu/>
- 2) [http://www.jamstec.go.jp/ARGO/argo\\_web/argo/index.html](http://www.jamstec.go.jp/ARGO/argo_web/argo/index.html)
- 3) <http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.LEVITUS/>
- 4) [http://www.jamstec.go.jp/ARGO/argo\\_web/argo/ActiveGmap.html](http://www.jamstec.go.jp/ARGO/argo_web/argo/ActiveGmap.html)
- 5) [http://www.jamstec.go.jp/ARGO/argo\\_web/tools/tools.html](http://www.jamstec.go.jp/ARGO/argo_web/tools/tools.html)
- 6) <http://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/>
- 7) 土屋, “海洋音響計算サイト <http://www.tsuchiya2.org> の作成・運用”, 海洋音響学会誌 Vol.38 No.1 2011 年 4 月
- 8) N. P. Fofonoff and R. C. Millard Jr. "Algorithms for computation of fundamental properties of seawater," UNESCO technical papers in marine science. No. 44, Division of Marine Sciences. UNESCO, Place de Fontenoy, 75700 Paris, (1983)
- 9) 富士原敏也他, ブルーアースシンポジウム予稿集, p16-17 海洋研究開発機構 (2012)
- 10) Newton Press 編, 「M9 超巨大地震」, p14-27(2011/7)
- 11) [http://www.data.kishou.go.jp/db/kaikyo/daily/current\\_jp.html](http://www.data.kishou.go.jp/db/kaikyo/daily/current_jp.html)