

「ちきゅう」&DONET のトータル観測ステーション計画：海底～大気の同時貫通観測

A total station plan combined with “Chikyu” and DONET: simultaneous observation from seafloor to atmosphere

*有吉 慶介¹、藤 亜希子¹、町田 祐弥¹、西田 周平¹、宮澤 泰正¹、美山 透¹、吉田 聡¹、内田 裕¹、永野 憲¹、長谷川 拓也¹、脇田 昌英¹、桑谷 立¹、青池 寛¹

*Keisuke Ariyoshi¹, Akiko To¹, Yuya Machida¹, Shuhei Nishida¹, Yasumasa Miyazawa¹, Toru Miyama¹, Akira Kuwano-Yoshida¹, Hiroshi Uchida¹, Akira Nagano¹, Takuya Hasegawa¹, Masahide Wakita¹, Tatsu Kuwatani¹, Kan Aoike¹

1. 国立研究開発法人海洋研究開発機構

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

1. はじめに

南海トラフ沿いで発生する” ゆっくり地震” [1] の一種である超低周波地震は、地震発生帯の深部側遷移域に位置する30kmの等深線上に沿って分布しており、その震源が走行方向に移動する現象が陸上の稠密観測網から捉えられている [2].

この” ゆっくり地震” は、地震発生帯の浅部側の遷移域でも起きると考えられていたが [3], 最近になって、東北沖でも見出された [4].

本講演では、海溝型巨大地震サイクルとゆっくり地震活動の変化について、海溝型巨大地震サイクルの数値シミュレーションから検証した概要について述べる。その結果に基づいて、東北地方太平洋沖地震と東南海地震の震源域周辺で敷設が展開されている海底圧力計に着目し、その解析データを用いた検知手法と課題について議論する。

2. 東北沖の浅部ゆっくり地震から見出されたプレート間固着の特徴

Ariyoshi et al. [5] は、東北沖の海溝に近い浅部側にも超低周波地震が局所的に発生していることに着目し、プレート境界面上に速度/状態依存摩擦構成則 [6] を適用した数値シミュレーションに基づいて、浅部超低周波地震の活動とプレート間固着との関係を調べ、その結果を東北地方太平洋沖地震へ適用することを試みた。その結果、以下の見解を示した。

(1) 岩手沖・茨城沖・福島沖は、東北地方太平洋沖地震の震源域外縁部に位置し、巨大地震に伴う余効すべりによって浅部超低周波地震が活発化したと考えられる。

(2) 宮城沖は、東北地方太平洋沖地震の震源域外縁部に位置し、地震直後から強い固着が近傍で生じるため、浅部側において浅部ゆっくり地震の活動が静穏化する。

(3) 宮城沖での浅部超低周波地震活動の静穏期間が数十年以上続くことになれば、近傍でのプレート間固着が百年以上耐えられる可能性を示唆する証拠となり得る。

3. 浅部ゆっくり地震活動に基づく南海トラフのモニタリング

2章で述べた浅部ゆっくり地震活動に基づくプレート間固着の推定を、南海トラフにも適用した。その結果、現在の固着状況について以下の2つを推定した。

(4) 超低周波地震が三河沖で不活発、熊野沖で活発となっているのは、東南海地震震源域の中央部と西縁部に位置しているためだと考えられる。

(5) 豊橋沖で不活発となっているのは、東海・東南海地震のセグメント間で固着が強いことを示唆する。この考えは、東海地震がこれまで単独で発生していない事実とも整合的である。

この推定を多角的に検討するためには、超低周波地震活動のみならず、それに伴う海底地殻変動も検出する必要がある。Ariyoshi et al. [7] では、浅部超低周波地震に伴ってDONET観測点で期待される上下変動につい

て、数値シミュレーションから試算した。

その結果、DONET観測点は浅部超低周波地震の震源域から近いため、同一ノード内で上下変動のセンスが異なる。そこで、同一ノード内の平均値を取り除くことによって、海洋変動成分を除去したかたちで地殻変動成分を抽出する手法の有効性を示したが、精度を高めるためには、海流変動やドリフト成分などの寄与を観測点ごとに算出する必要がある。

このような経緯から我々は、「ちきゅう」を使った孔内観測点とDONETの接続作業時やDONET地震計の埋設時などのタイミングを狙って、海底から大気までの同時観測という着想に至り、現在、既存データの解析を進めている。

参考文献： [1] S. Ide et al., *Nature* 447, 76-79 (2007). [2] K. Obara & S. Sekine, *Earth Planets Space* 61, 853-862 (2009). [3] S.Y. Schwartz & J.M. Rokosky, *Rev. Geophys.* 45, RC3004 (2007). [4] T. Matsuzawa et al., *Geophys. Res. Lett.*, 42, 4318-4325 (2015). [5] K. Ariyoshi et al., *Earth Planets Space* 66(55) (2014). [6] A. Ruina, *J. Geophys. Res.* 88, 10359-10370 (1983). [7] K. Ariyoshi et al. *Mar Geophys. Res.*, 35(3), 295-310 (2014).

キーワード：沈み込み帯、海溝型巨大地震、海洋変動

Keywords: subduction zone, megathrust earthquake, ocean current

XBT集中観測で見られた短周期内部重力波とGPS音響測距観測に与える影響

Intensive XBT measurement reveals short-period gravitational internal wave in the sea: its impact on GNSS/acoustic seafloor geodetic survey

*木戸 元之¹、松井 凌²、今野 美冴²、本荘 千枝¹

*Motoyuki Kido¹, Ryo Matsui², Misae Imano², Chie Honsho¹

1. 東北大学 災害科学国際研究所、2. 東北大学 理学研究科

1. International Research Institute for Disaster Science, Tohoku University, 2. Graduate School of Science, Tohoku University

海上局のキネマティックGNSS測位と海底に設置したトランスポンダとの間の音響測距を組み合わせたGNSS/音響結合方式の海底測位解析は、海中の音速構造の時間変化に強く影響される。殆どの場合、海中音速構造は時間変化する水平成層構造でよく近似でき、通常のGNSS/音響解析も、その仮定を前提としている。その仮定から外れる水平不均質が存在すれば、海底トランスポンダの水平位置の見かけ上の揺らぎとして観察される。実際に、この揺らぎは数時間から1日程度の時間スケールでのランダムな変動として見られることが多いが、時には30分から1時間程度の明瞭な短周期振動として現れることもある。このような短周期の振動は、海中の内部重力波によるものと解釈できる。そのGNSS/音響解析への定量的な影響は、音速場の局所勾配、すなわち内部重力波の鉛直速度勾配、振幅、波長の逆数の積で評価することが可能である。しかし、この仮説を実証できるような観測データはこれまで得られていなかった。

そこで我々は、2016年に南海トラフ沿いの熊野灘において、定点のGNSS/音響観測と並行してXBTの集中観測を実施した。これにより、10分間隔で12回（計2時間）分の温度プロファイル、および集中観測の最後のXCTD計測による、内部重力波の基本性質を支配する密度プロファイルを得た。得られた温度プロファイルには振幅20mに達する明瞭な振動が水深600m程度まで見られた。次の段階の解析として、得られたデータから内部重力波の水平波長を推定し、GNSS/音響解析で見られる水平測位結果の揺らぎと比較するための局所的な音速場の実効勾配を計算する。このような短周期の海水の振動に関する基礎データは、海底圧力の微小揺らぎの解釈にも役立つと考えられる。

この研究は、SIP「レジリエントな防災・減災機能の強化」および科研費15H04228、15K13557により行われた。

キーワード：音響測距、GNSS音響結合方式、内部重力波、海中音速、海底測地

Keywords: acoustic ranging, GNSS/acoustic, internal gravitational wave, sound speed, seafloor geodesy

2004年～2005年に発生した黒潮大蛇行に伴う海底圧力変動

Bottom pressure variation associated with 2004-2005 Kuroshio large meander south of Japan

*永野 憲¹、長谷川 拓也¹、松本 浩幸¹、有吉 慶介¹

*Akira Nagano¹, Takuya Hasegawa¹, Hiroyuki Matsumoto¹, Keisuke Ariyoshi¹

1. 海洋研究開発機構

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

2004年7月下旬、日本南岸沖で黒潮大蛇行が形成され、2005年8月頃まで続いた。大蛇行流路の形成前には、黒潮小蛇行と呼ばれる流路の擾乱が九州南東に発生し、その東方伝播と発達を足摺沖に設置した圧力計付きInverted Echo Sounder (PIES)と室戸沖の海底地震観測システムの海底圧力計で捉えることが出来た。本研究では、大蛇行流路の形成に焦点をあて、海底圧力、衛星海面高度、およびPIES音波往復時間からGravest Empirical Mode (GEM)法を用いて算出したジオポテンシャル距離の変動を解析した。その結果、小蛇行の通過に伴うと考えられる深層の低気圧性渦の通過によって海底圧力は減少し、この海底圧力の減少は海面高度の減少に約2カ月先行していることが分かった。この表層と深層の位相のずれは、大蛇行に発展しなかった小蛇行の場合に比べると有意に大きかった。これは、大蛇行の発生に傾圧不安定が重要な役割をしていることの証拠であると考えられる。さらに、大蛇行流路の形成直後、海面高度が上昇し、その約2カ月後、黒潮直下の海底圧力が上昇した。海底圧力の高い状態は、大蛇行の崩壊の始まる2005年2月頃まで続いた。大蛇行期の海底圧力の上昇は、海底付近の流れが非大蛇行期よりも強く、海底地形による制御を受けて安定化していることを示唆している。このことは、大蛇行期初期の2004年7月下旬～2005年2月初旬に小蛇行が発生しなかった事実と一致する。

キーワード：黒潮、大蛇行、海底圧力、Inverted Echo Sounder、地震観測システム

Keywords: Kuroshio, Large meander, Bottom pressure, Inverted Echo Sounder, Seismic observing system

マイクロスケール海洋擾乱場がGPS-A海底地殻変動観測に与える影響 Microscale ocean disturbance that affects the GPS-A seafloor geodesy

*横田 裕輔¹、石川 直史¹、渡邊 俊一¹

*Yusuke Yokota¹, Tadashi Ishikawa¹, Shun-ichi Watanabe¹

1. 海上保安庁海洋情報部

1. Japan Coast Guard, Hydrographic and oceanographic department

Seafloor geodetic observations accomplished several monumental works in the fields of seismology and geodesy. Many seafloor geodetic works were performed using the GPS-Acoustic ranging combination technique (GPS-A) [e.g., Gagnon et al., 2005, Nature; Sato et al., 2011, Science; Kido et al., 2011, GRL; Yokota et al., 2016, Nature]. In this technique, we observe using vessels (or buoys) on the sea around the seafloor acoustic mirror-type transponders set within the range of 1 - 3 km. Seafloor absolute positions were determined using this acoustic data, the attitude data and the GPS data on the vessels. Although the GPS-A technique achieved establishment of the stable and sophisticated seafloor observation network, an observation precision ($1\sigma = 2 - 3$ cm: horizontal) remains lower than other geodetic observation techniques.

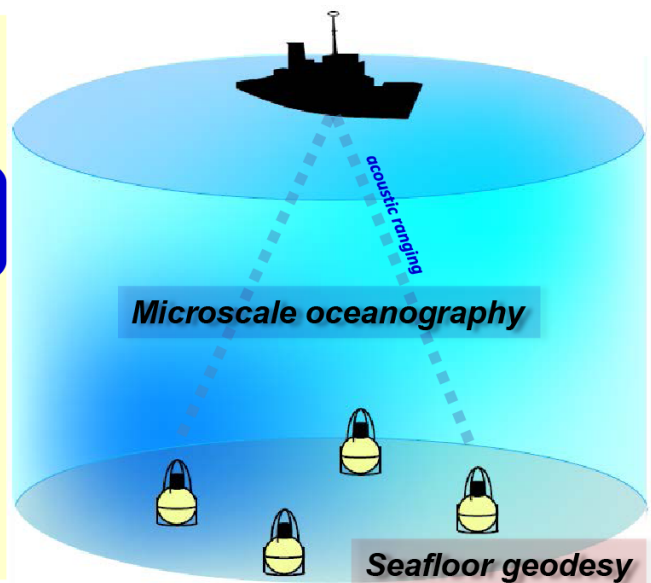
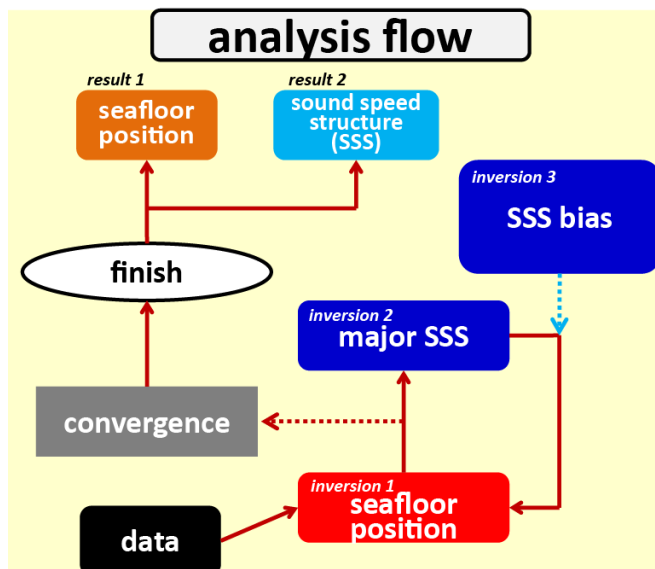
The observation precision is affected by ocean disturbances strongly. We have reduced this effect using analytical approaches in this decade (Figure). In that process, spatial and temporal changes of undersea sound speed structures (SSS) were approximated as fields modelled using high-order temporal functions [Fujita et al., 2006, EPS]. In the recent study, we found out a possibility that spatial biases of the SSS were also able to be modelled by using the similar method. These methods could make contributions to upgrade the precision of the GPS-A data. In this presentation, we'd like to review our current analysis flow and discuss effects of these analytical approaches.

Additionally, we remark the SSS modelled in our analysis. Although it was just noise for us, it is able to be considered as an important parameter visualizing an ocean event. The obtained SSS has very small spatial and temporal scales, a km-scale and an hour-scale, and is difficult to be acquired in other observations. Therefore the GPS-A may have possibility to open a new window to see a microscale ocean event.

Acknowledgements: We thank the Geospatial Information Authority of Japan (GSI) for high-rate GPS data for kinematic GPS analysis, and for daily coordinates of the sites on the GSI website.

キーワード：マイクロスケール海洋学、GPS-A観測、海底地殻変動観測

Keywords: Microscale oceanography, GPS-Acoustic ranging combination technique, Seafloor geodetic observation



地球深部探査船「ちきゅう」のための海流予測

Ocean Current Prediction for Deep-Sea Scientific Drilling Vessel CHIKYU

*美山 透¹、宮澤 泰正¹、ヴァーラモフ セルゲイ¹、青池 寛²、町田 秀介³、副島 広道³、藤野 恵子³

*Toru Miyama¹, Yasumasa Miyazawa¹, Sergey M. Varlamov¹, Kan Aoike², Susuke Machida³,
Hiromichi Soejima³, Keiko Fujino³

1. 国立研究開発法人海洋研究開発機構・アプリケーションラボ、2. 国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球深部探査センター、3. 日本海洋事業株式会社

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Application Laboratory, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Center for Deep Earth Exploration, 3. Nippon Marine Enterprises, Ltd.

1. はじめに

海洋研究開発機構の地球深部探査船「ちきゅう」は、巨大地震発生域への大深度掘削を可能にする世界初のライザー式科学掘削船である。「ちきゅう」は、国際深海科学掘削計画（IODP）の主力船として地球探査を行っている。掘削を行うには、「ちきゅう」は海に対して静止する必要がある。しかしながら、「ちきゅう」が日本周辺で掘削を行う場所は黒潮流域付近であることが多く、流速の大きな変動は掘削作業の脅威となる。そこで、2016年に行われた3航海を対象として、航海中に海洋モデルによる海流予測を行った。本講演では、航海中にみられた海洋現象、「ちきゅう」の海洋観測プラットフォームとしての可能性、海流予測の現状と課題について議論する。

2. 対象航海

海流予測の対象は、**[航海1]** 熊野灘でのIODP第365次研究航海「南海トラフ地震発生帯掘削計画(3月26日～4月27日)、**[航海2]** 室戸沖のIODP第370次研究航海「室戸沖限界生命圏掘削調査（T-リミット）」(9月10日～11月10日)、**[航海3]** 沖縄本島北西の「沖縄トラフ熱水性堆積物掘削III」(11月16日～12月15日)、の3航海である。「ちきゅう」は海面から1000m以深まで海流を観測している。風速・風向等の気象要素の観測も行っている。また、航海中には「ちきゅう」支援を目的とした船が参加しており、その流速観測により、「ちきゅう」周囲の海流の状態を知ることができる。

3. 海流予測モデル

それぞれの海域で重要と考えられる現象に対処するために、航海ごとに異なる予測モデルを選択した。黒潮の影響が強い熊野灘域での航海1では、黒潮変動の誤差が大きな流速の変化にあらわれることから、ensemble Kalman filterをデータ同化に用いた新開発のアンサンブル予測**KFSJ** (ensemble Kalman Filter for South of Japan, Miyazawa et al. 2012)を投入した。一方、黒潮からはやや離れた航海2では、風などによる短周期の変動が相対的に重要になると予想されたことから、短周期変動の取り扱いに特長のある予測モデル**JCOPE-T** (Varlamov et al. 2015)の2種類を使用した。同じく、黒潮からやや遠く、潮汐の影響も重要になる東シナ海で行われた航海3では、潮汐も計算し、対象海域を計算範囲に含む**JCOPE-T**の一つを使用した。

4. 結果

航海の行われた海域ごとに特徴的な海洋現象が見られた。航海1では、黒潮フロントの変動による大きな流速の変動が見られた。KFSJでもそのような傾向が捉えられた。残念ながら流速の変動の大きさの予測には課題が残ったが、モデルの予測を実際の現象と比較しながら検証できた意義は大きい。航海2では、黒潮から離れ全体的に流速が小さい中、短周期の流速変動が見られた。特に、台風16号が近くを通過した時には、風の影響による慣性重力波の流速変動が捉えられた。航海3では、潮汐の影響とみられる約半日周期の変動が見られた。航海1と2に関しては、航海中にリアルタイムに観測と予測の報告を行っており、以下のURLを参照されたい。

<http://www.jamstec.go.jp/aplinfo/kowatch/?tag=ちきゅう>

References

Miyazawa Y, Miyama T, Varlamov SM, Guo X, Waseda T (2012) Open and coastal seas interactions south of Japan represented by an ensemble Kalman filter Ocean Dynamics 62:645-659
doi:10.1007/s10236-011-0516-2

Varlamov SM, Guo X, Miyama T, Ichikawa K, Waseda T, Miyazawa Y (2015) M-2 baroclinic tide variability modulated by the ocean circulation south of Japan J Geophys Res-Oceans 120:3681-3710
doi:10.1002/2015jc010739

キーワード：海流予測、ちきゅう、黒潮

Keywords: ocean current prediction, Chikyu, Kuroshio

北太平洋海洋深層への爆弾低気圧の影響：シミュレーションと観測 Impact of explosive cyclones on the deep ocean in the North Pacific: Simulations and observations

*吉田 聡¹、佐々木 英治¹、笹井 義一¹、細田 滋毅¹

*Akira Kuwano-Yoshida¹, Hideharu Sasaki¹, Yoshikazu Sasai¹, Shigeki Hosoda¹

1. 国立研究開発法人海洋研究開発機構

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

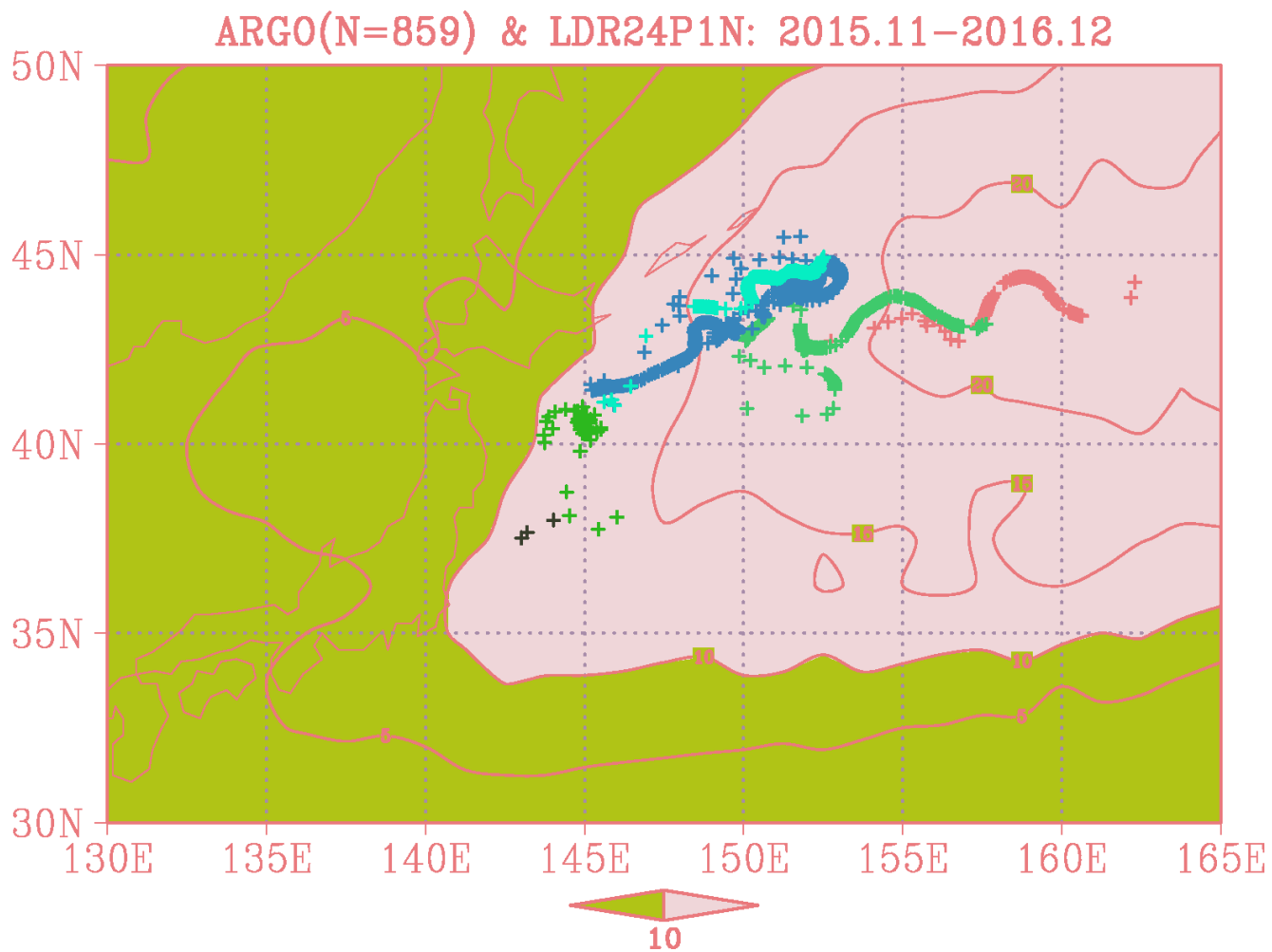
北西太平洋は冬季に爆弾低気圧が頻繁に発達する海域の中で最も深い海洋である。渦解像準全球海洋大循環モデルOFESによる34年間の過去再現実験データを用いたコンポジット解析によって、爆弾低気圧が急発達する際、海洋混合層内では強い発散が起これ、2000m深に達する上昇流が励起されることが見出された。また、爆弾低気圧活動の年々変動が海洋深層の鉛直流の振幅と日スケールの水温変動に影響することが示された。しかし、通常の海洋観測網では爆弾低気圧に対する海洋応答を捉えることはできない。深い冬季混合層のため、衛星観測による海面水温では爆弾低気圧による変化は見えない。また、10日毎のアルゴフロート観測は1日程度の爆弾低気圧の急激な観測をするには長すぎる。そこで、爆弾低気圧に対する海洋応答を観測するため、北西太平洋でのアルゴフロートを用いた高頻度観測を2015/2016と2016/2017の2冬季

(11月～3月)に実施した。今回用いたアルゴフロートは観測の時間間隔と観測深度を衛星通信によってリアルタイムに変更できる。気象庁の週間アンサンブル予報を元に、観測海域で爆弾低気圧が高確率で予測された場合には6時間毎、650m深までの観測を実施し、それ以外は1日毎、2000m深の観測を実施した。2016年12月までに爆弾低気圧活動が活発な海域の859プロファイルを観測した。

参考文献: Kuwano-Yoshida, A., H. Sasaki, and Y. Sasai, *Geophys. Res. Lett.*, 44, 320-329 (2017).

キーワード：爆弾低気圧、アルゴフロート、海洋大循環モデル

Keywords: explosive cyclone, ARGO float, OGCM



十勝・釧路沖における海底圧力変動と海洋傾圧性渦との関連 Relationship between Ocean Bottom Pressure Variations and Baroclinic Eddy off Kushiro-Tokachi

*長谷川 拓也¹、永野 憲¹、松本 浩幸¹、有吉 慶介¹

*Takuya Hasegawa¹, Akira Nagano¹, Hiroyuki Matsumoto¹, Keisuke Ariyoshi¹

1. 国立研究開発法人海洋研究開発機構

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

本研究は、海底圧力変動と海洋気候変動との間に観られる関係を解明することを目的とする。そのために、十勝・釧路沖においてJAMSTECによって観測された長期海底圧力データ、衛星観測海面高度データ、船舶観測水温塩分データ（CTD）などを解析する。十勝・釧路沖に設置された二点（ステーションPG1およびPG2）の海底圧力データは、2004年から2013年の観測期間中、2006年から2007年を除く期間は良く似た変動を示した。両者が異なる変動を示す2006年から2007年に注目すると、PG1の海底圧力変動は海面高度変動と連動した振る舞いを示していたが、PG2は海面高度変動と連動していなかった。その理由を探るために、PG2の近傍で実施されている繰り返し海洋観測ライン（A-Line）の水温・塩分データを解析した。その結果、2006年から2007年には他の期間で見られないレンズ状の傾圧性渦が海洋中層1500dbarから2000dbarに存在することが明らかになった。この傾圧性渦の存在によってPG2の海底圧力が2006年から2007年にはPG1とは異なり、海面高度変動と連動しなかった可能性がある。この結果は、海底圧力変動の理解のためには海面高度に加えて、海洋内部の水温・塩分観測が必要であることを示唆する。

キーワード：海底圧力変動、海洋渦

Keywords: ocean bottom pressure variation, oceanic eddy

GPS 音響結合方式による海底地殻変動観測で推定した平均海中音速の時間変化と CTD 等による実測値について

Comparison between temporal variation of sound velocity derived from GPS/acoustic and CTD measurements

*松井 凌¹、木戸 元之²、本荘 千枝²、富田 史章¹

*Ryo Matsui¹, Motoyuki Kido², Chie Honsho², Fumiaki Tomita¹

1. 東北大学大学院理学研究科、2. 東北大学災害科学国際研究所

1. Graduate School of Science and Faculty of Science, Tohoku University, 2. International Research Institute for Disaster Science, Tohoku University

GPS/音響測距結合方式 (GPS/A) は、GPS測位で船舶の位置を求めると同時に、音響測距で船舶と海底局の位置関係を求めることで海底地殻変動を検出する測位手法である。この手法では、3台以上の海底局で構成される海底局アレイの水平変位を音響測距1ショットごとに推定可能である。水平変位と同時に推定される往復走時残差の鉛直投影成分（鉛直走時遅延量=GNSS解析で使われる天頂遅延量に相当）は、海中平均音速の時間変化を反映する量である。鉛直走時遅延量は、海水温等の計測データから算出される海中音速のスローネスプロファイルを海面から海底まで積分することで実測値として得られる。Kido et al. (2008) では鉛直走時遅延量のGPS/A 推定値と実測値との比較を行い、少なくとも半日周期の変動については両者がよく一致することを示した。本研究では、その応用として次の2つの事例について調べた。

1つ目に、GPS/A 解析から推定される鉛直走時遅延量の短時間（～1 h）スケールの変動についても海中音速変化を反映するかどうかを検証した。まず、XBT 計測を6分間隔で計1時間程度連続で行う短時間集中観測を実施し、得られた温度プロファイルから鉛直走時遅延量を算出した。各XBTのバイアス誤差を適切に補正し、GPS/A 解析による推定値との比較を行ったところ、短時間変化についても両者が整合した。よって、GPS/A解析により海中平均音速の短時間変化も推定可能であることが確かめられた。

2つ目に、CTD計測で得られる高精度な海中音速プロファイルを用いた海底上下変位の検出可能性について検証した。GPS/A解析における鉛直走時遅延量の絶対値には海底局の深度不確定性が含まれる。しかし、この深度不確定性に相当する鉛直走時遅延量はキャンペーン観測間で不変である。つまり、正しい音速を与えれば、キャンペーン観測間の鉛直走時遅延量の絶対値変化は、上下変位があった場合にのみ生じると考えられる。そこで、各観測点でCTDのup-castとdown-cast時の鉛直走時遅延量とGPS/Aの推定との違いがどの程度一致するかをみることで上下変位検出精度の推定を行った。CTDの温度誤差と計測時間誤差（有限の計測時間内の海中音速変化による実測値不確定性）を考慮したところ、およそ15 cmの精度で上下変位を検出可能であることがわかった。

キーワード：海底測地、GPS/A 観測、海中音速、CTD 計測

Keywords: seafloor geodesy, GPS/acoustic observation, sound velocity, CTD measurements

海底地殻変動観測データを用いた

Chen and Millero/Del Grosso海中音速算出式の評価

Evaluation of the sound speed equations for seawater proposed by Chen-and-Millero and Del-Grosso using GPS/Acoustic observation data

*本庄 千枝¹、木戸 元之¹、富田 史章²

*Chie Honsho¹, Motoyuki Kido¹, Fumiaki Tomita²

1. 東北大学災害科学国際研究所、2. 東北大学理学研究科

1. International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, 2. Graduate School of Science, Tohoku University

現在よく用いられる海中音速の算出式には Chen and Millero (CM) の式 (Chen and Millero, 1977) と Del Grosso (DG) の式 (Del Grosso, 1974) とがあり、前者は国際標準である UNESCO 式としても知られる。いずれも圧力、水温、塩分濃度を変数とする多項式で、CM 式は 42、DG 式は 19 の係数で定義される。現実的な海水温と塩分濃度においては DG 式のほうが CM 式よりも小さい音速を与える。両者の差は海面近くでは比較的小さいが、圧力（深度）とともに増大し、水深 3000 m 以深では 0.6 m/s に達する。両式はともに実験に基づく経験式で、その後海洋での実測に基づく検証がなされてきた (Spiesberger and Metzger, 1991a; 1991b; Dushaw et al., 1993; Meinen and Watts, 1997)。これらの研究は、DG 式のほうが CM 式よりも精度が高いという同じ結論に至っているが、DG 式の具体的な精度については評価が様々である。本研究では、2012 年以降の東北沖における海底地殻変動検出を目的とした GPS/Acoustic 観測データを用いて、両算出式の評価を行った。本研究の利点は、これまでの観測の蓄積により大量の走時データが利用できることと、観測点の水深が大きい（ほとんどの観測点で 3000 m 以上）ため、DG 式と CM 式とで音速に有意な差が生じる大水深部を通過した走時データが多いことである。

東北沖の 20 の観測点で 2012～2016 年に行われた計 120 のキャンペーン観測で得られたデータを使用した。各観測点では、海底に設置された 3～6 台のトランスポンダが三角または四角形のアレイを構成する。その各海底トランスポンダと船のトランスデューサとの間の往復走時を、10 マイクロ秒の精度で測定する。測定は 30-60 秒間隔で行われ、1 回のキャンペーンでの観測時間は平均 15 時間ほどである。解析は観測点ごとに行い、その観測点で期間中に行われた 3-8 回のキャンペーン観測のデータを同時にインバージョン解析した。解析においては、アレイ形状は不変であり、地殻変動による変位は全トランスポンダで共通と仮定し、初回キャンペーン観測時における各トランスポンダの座標値と、その後の各キャンペーン観測時におけるアレイ変位とを求めた。海中音速については、まず各キャンペーン観測中に実施された XBT や CTD、XCTD 観測のデータに基づき、CM 式または DG 式を用いて基準となる海中音速の鉛直プロファイルをキャンペーンごとに作成する。そして解析では、水平成層構造を仮定したうえで、全深度にわたり同じ倍率で音速が変化するモデルを用い、潮流や内部重力波に起因する音速の時間変化を、基準音速プロファイルに掛けるべき倍率の時間変化として求める。結果的に、インバージョン解析から、アレイ位置とともに各キャンペーン観測中の音速の時間変化が得られる。CM 式を用いた解析では、基準音速プロファイルに対する倍率は 1.0 よりかなり小さく求められた。キャンペーン観測ごとに時間平均した倍率は平均 0.9994、標準偏差 0.0001 であった。これは音速に換算すると、全深度にわたる -0.9 ± 0.2 m/s の補正に相当する。一方、DG 式を用いた解析では、平均 0.9997、標準偏差 0.0001、音速補正量にして -0.5 ± 0.2 m/s という結果を得た。DG 式のほうが CM 式より小さい補正量となったことは過去の研究と整合的である。しかし、DG 式による音速も依然実測よりは大きめであり、CM 式の場合の半分程度の補正が必要とされたことは、DG 式の精度をこれまでの研究の中で最も低く評価する結果である。また、DG 式を用いた場合に限り、音速倍率と観測点の深度との間に相関が認められ、深い観測点ほど

音速倍率が1.0に近づく傾向のあることが判った。このことは、DG式による音速の誤差が、深部ではなくむしろ浅部にあることを示唆している可能性がある。

※引用文献はいずれも *J. Acoust. Soc. Am.* より

キーワード：海中音速、GPS/Acoustic観測

Keywords: sound speed in seawater, GPS/Acoustic observation

Sea-level records analysis with empirical mode decomposition and its variations: Boundary effect improvement and mode reconstruction method

*李 漢洙¹

*Han Soo Lee¹

1. 広島大学

1. Hiroshima University

Sea-level records analysis with empirical mode decomposition and its variations: Boundary effect improvement and mode reconstruction method

Han Soo Lee¹

¹Graduate School for International Development and Cooperation, Hiroshima University.

1-5-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima 739-8529, Hiroshima, Japan

A common goal of most time-series analysis is to separate deterministic periodic oscillations in the data from random and aperiodic fluctuations associated with unresolved background noise (unwanted geophysical variability) or with instrument error. For many applications, the sea level records are treated as linear combinations of periodic or quasi-periodic components that are superimposed on a long-term trend and random high-frequency noise. The periodic components are assumed to have fixed or slowly varying amplitudes and phases over the length of the record. Fourier analysis is one of the most commonly used methods for identifying periodic components in near-stationary sea-level data. If the sea-level data are strongly non-stationary, then more localized transforms like Wavelet transform can be used. However, the sea-level is a naturally non-linear process and data with the non-linear interactions among the physical processes with different time scales causing sea-level changes.

Empirical Mode Decomposition (EMD) is an adaptive (data-driven) method to analyse non-stationary signals stemming from non-linear systems (Huang et al., 1998). It produces a local and fully data-driven separation of a signal in high and low frequency oscillations, called intrinsic mode functions (IMFs), and a monotonic trend (residual). Detailed information on EMD and EEMD are referred to Huang *et al.* (1998) and Wu and Huang (2009). The CEEMDAN is an important improvement of EEMD (Torres et al., 2011), achieving a negligible reconstruction error and solving the problem of different number of modes for different ensemble numbers with signal plus noise. The improved CEEMDAN is a further improvement of CEEMDAN for solving the problem of residual noise in modes and spurious modes (Colominas et al., 2014). For the sake of paper length, readers refer to the relevant literature above for detailed algorithms of EMD and its variations. For applications of EEMD, refer to Lee *et al.* (2012).

In this study, we illustrate two improvements in the signal decomposing and analysis process of EMD; the boundary effect and reconstruction method for decomposed intrinsic mode functions (IMFs). We use the mirror method for boundary effect and statistical significance test for reconstruction of IMFs to improve the statistical significance of each modes. The artificial signal test show that the proposed mirror method for boundary effect and the statistical significance test for reconstruction of IMFs improve the decomposing results dramatically compared to the original artificial signal components.

キーワード：経験的モード分解、境界効果、固有モード関数再構成法、海面観測データ

Keywords: empirical mode decomposition, boundary effect, mode reconstruction method, sea-level records