

[共同研究成果]

海底圧力観測データから海底鉛直変位を検出するための海洋モデルの開発

稲津大祐*・日野亮太・藤本博己

東北大学大学院理学研究科 地震・噴火予知研究観測センター

*現在 独立行政法人 防災科学技術研究所

東北大学サイバーサイエンスセンターのスーパーコンピュータシステム SX-9 を利用し、現場海底圧力観測データから cm スケールの海底鉛直変位を検出するために有効な全球海洋シミュレーションモデルを開発してきた。開発した海洋モデルは、2011 年東北地方太平洋沖地震の発生直前の約 2 日間にゆっくりと進行した数 cm の海底鉛直変位を、現場海底圧力観測データから明瞭に検出することに奏功した。

1. はじめに

印加される圧力によって周波数が変化する水晶振動子を組み込んだセンサーを搭載した自律型ゲージ[1]を用いることで、海底において圧力を連続的に観測できる。この海底圧力の観測方法は、海洋物理学および測地学といった地球物理学的観測に用いられてきた[2, 3]。得られた海底圧力観測データ ($p_B(t)$) には、諸々の地球物理学・非地球物理学的シグナルが含まれる。

$$p_B(t) = p_{ref} + \Delta p_B(t),$$

$$\Delta p_B(t) = \Delta p_C(t) + \Delta p_T(t) + \Delta p_O(t) + \Delta p_A(t) + \Delta p_D(t) + \varepsilon(t).$$

ここで $\Delta p_B(t)$ は水深に相当する圧力 p_{ref} からの圧力偏差である。添え字の C 、 T 、 O 、 A 、 D はそれぞれ、海底鉛直変位、潮汐、非潮汐海洋変動、大気圧、測器ドリフトを表す。 $\varepsilon(t)$ はそれらからの残差である。我々はこれらのうち地殻変動に関係する海底鉛直変位のシグナルを抽出したい。特に、超巨大地震に関係し得るマグニチュード 7 クラスの地震を反映する cm スケールの海底鉛直変位を正確に抽出したい[4]。地殻変動は、地震時にほぼ瞬間的に変位するものと、非地震性のゆっくりとしたものに分けられる。特に、ゆっくりとした地殻変動を抽出するためには、変動の時間スケールが重なる海洋変動を正確に見積もり、除去する必要がある。

我々はこの目的のために、東北大学サイバーサイエンスセンターのスーパーコンピュータシステム SX-9 を利用し、海洋起源の海底圧力変動を現実的に表現できる海洋シミュレーションモデルを開発してきた[5]。本稿では、開発した海洋モデルについて簡単に記述し、そのモデルを現場海底圧力データの解析に適用することで、2011 年東北地方太平洋沖地震に関係するゆっくりとした数 cm の海底鉛直変位を明瞭に抽出できたことを報告する。海底ケーブル等を利用した海底圧力リアルタイムモニタリングシステムへの適用についても言及しておく。本稿の技術的詳細については学会誌で公表済である[6]。

2. 海洋モデル開発と SX-9 利用

東北大学地震・噴火予知研究観測センターでは、これまで想定されてきた宮城沖地震[7]に関係する海底の鉛直変位を直接観測するために、宮城沖で現場海底圧力観測を行ってきた[4]。宮城沖に代表される日本海溝だけでなく、海溝型巨大地震が発生するその他の世界のプレート沈み込み帯においても同様な観測を行うことは重要であるため、それらへの適用も意識し、モデル開発は全球海洋を対象とした。この海洋モデルは実海洋を一層海洋で近似するものである[8, 9]。モデル海洋は気象再解析データ（気圧・海上風）によって駆動される。モデルの精度は、我々の宮城沖の観測データを含む、全球の深海（水深 1000m 以深）の現場海底圧力データによって評価した[6]。

ベースとなるシミュレーション（以下、Control Run と呼ぶ）について説明する。計算の空間解像度は東西・南北方向ともに $1/12^\circ$ であり、全格子数は 4320×2160 である。東北大学サイバーサイエンスセンターの SX-9 システムの利用による、ノード内の 16CPU を用いる自動並列処理（ジョブクラス p16 : 1.6TFLOPS）による計算で、海洋変動の 1 年分のランが約 3 日で完了できる。これは Intel 社の Core2Duo プロセッサ搭載のパソコン（15GFLOPS）での計算と比べ、実性能で約 200 倍であった。MPI チューニングを施すことで、自動並列処理 p16 の場合と比べ、さらに約 3 倍の計算速度が達成可能となった。ベクトル化率は 99.68% であった。

SX-9 を利用することで、空間解像度が $1/30^\circ$ の計算まで現実的に行うことができた。その結果、解像度を向上させればさせるほどモデル精度が向上するわけではなく、解像度が $1/12^\circ$ のときに最もモデル精度が高くなることがわかった。この問題について、風によってモデル一層海洋に入力されるエネルギーが、高解像度で表現される急峻な海底地形によって非現実的に強く消散してしまう、という一層海洋モデルによる近似の限界が要因の一つと考えられる[6]。

このように、本研究のモデルの枠組みにおいては、Control Run が最も現実的な海底圧力変動を推定・予測できることがわかった（図 1）。Control Run は気象庁の気象再解析データ JRA-25[10] で駆動されている。現在、JRA-25 は現時点から約 2 日後にはデータ取得可能なシステムになっている。それに従い、現時点から約 2 日遅れで海洋モデルも更新可能となっている。

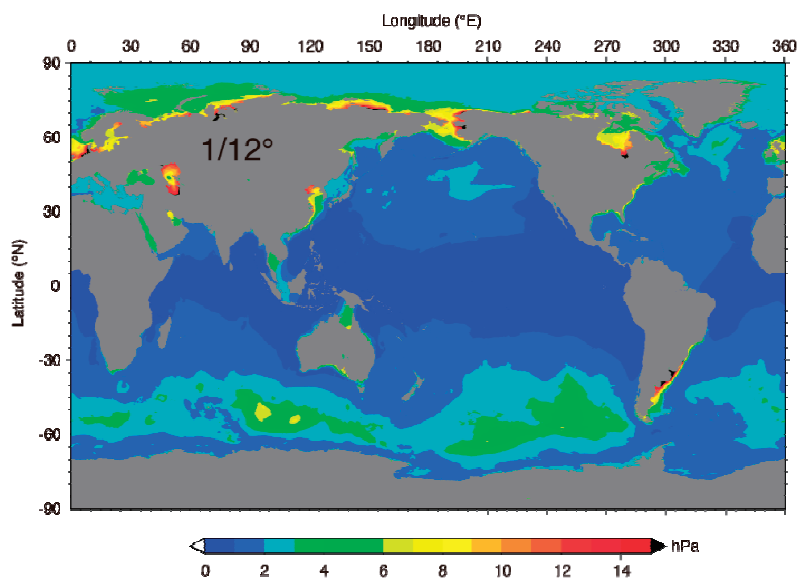


図 1 : Control Run による海底圧力変動の RMS 振幅。

3. 現場海底圧力データへの適用 —2011 年東北地方太平洋沖地震—

Control Run は現場海底圧力データの非潮汐海洋変動成分を RMS 振幅で約 18% 減少させることができる[6]。東北大学による宮城沖の観測データでは、非潮汐海洋変動成分の RMS 振幅を 2.1hPa から 1.5hPa（海底圧力の 1hPa の変動は、海底または海面の 1cm の変位に相当する）にまで減少させることができる[5]。

宮城沖の観測を継続している最中、2011 年 3 月 11 日に東日本大震災を引き起こした 2011 年東北地方太平洋沖地震（以下、東北沖地震）が、この観測網で囲まれる領域を破壊の開始点として発生した。本震は非常に巨大（マグニチュード 9）であり、宮城沖を主な破壊域として数十 m の断層すべりが生じた[11]。このすべりは日本海溝に近いほど大きく、鉛直方向で数 m の海底変位となり、この鉛直変位が災害の主要因となる、沿岸域で 10m を優に超える津波を引き起こしたと考えられている[12]。東北大学の海底圧力観測網でこうした鉛直変位が直接観測された[13]。この m スケールの海底鉛直変位は、海洋変動や測器ドリフトと比べ桁違いに大きく、何の補正もなしにははっきりと認識できた（図 2）。

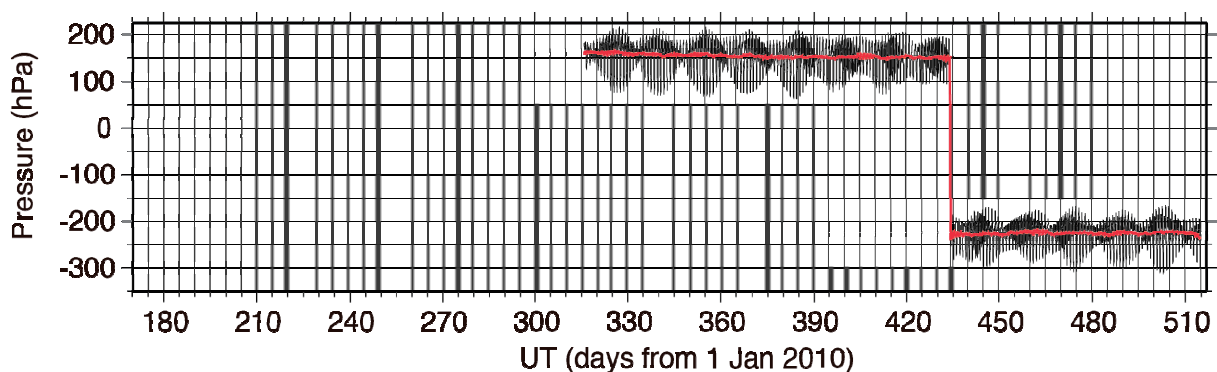


図 2：宮城沖のある観測点（GJT3：図 3 参照）の海底圧力偏差。黒線が生時系列で、赤線が潮汐だけを補正した時系列である。434 日目（2011 年 3 月 11 日）に約 400 hPa の圧力減少（約 400 cm の海底隆起）が確認できる。

一方で、本震発生の 2 日前に、東北沖地震の前震と考えられているマグニチュード 7 の地震が発生し、その後活発になった地震活動が本震につながったと考えられている[14, 15]。我々は、東北沖地震に関係する海底鉛直変位を精密に検出するために、宮城沖の現場海底圧力データから、潮汐成分に加え、本研究で開発した海洋モデルによって推定される海洋起源の海底圧力変動を差し引く補正を施した（図 3）。その結果、海洋変動補正後の現場海底圧力データ（図 3c）では、特に観測点 GJT3 において、本震までの 2 日間に約 5 cm のゆっくりとした海底の隆起（圧力減少）が明瞭となった。

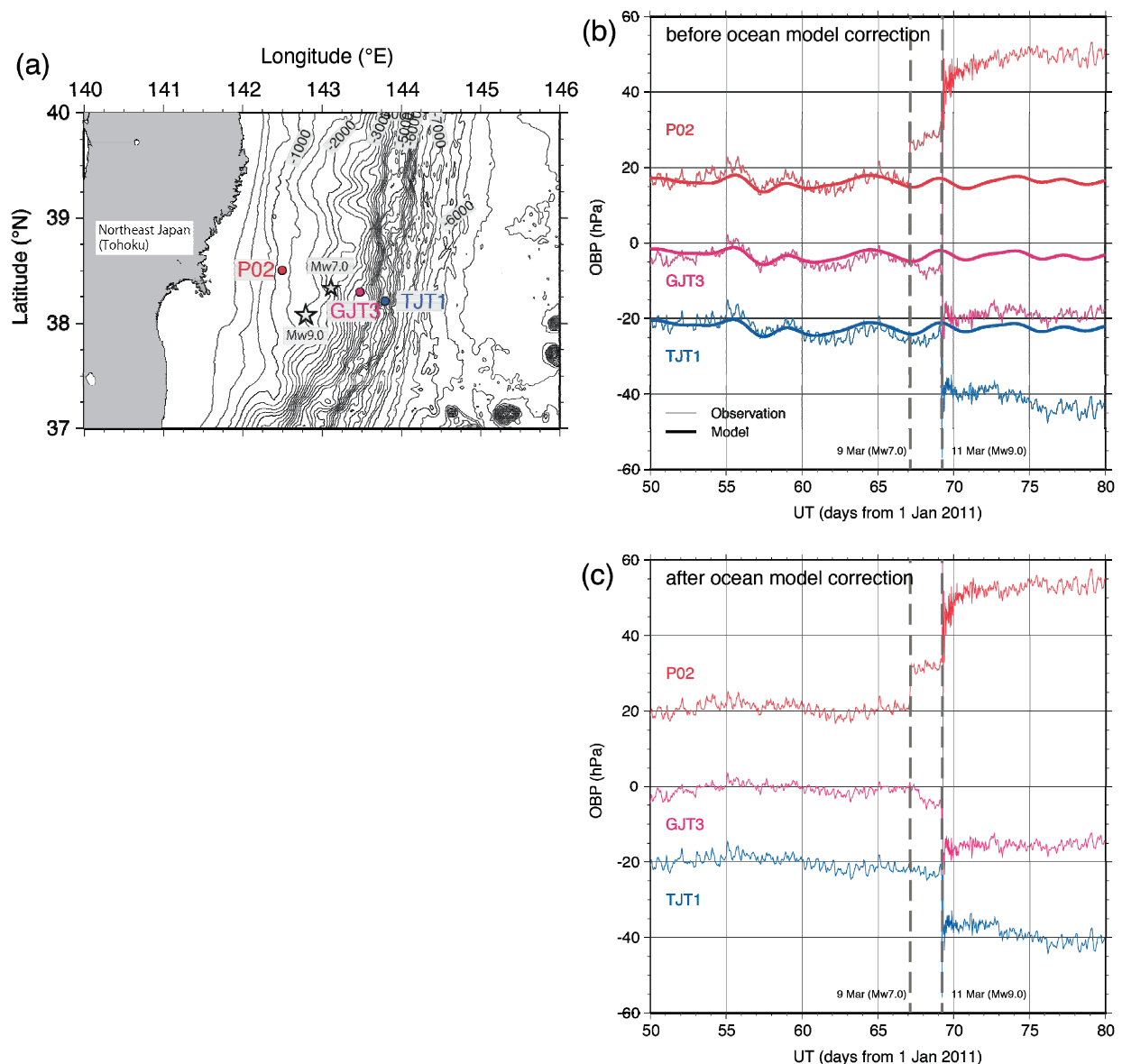


図3：(a) 震源位置を含む海底圧力観測点配置と (b, c) 本震時（69 日目）を含む 30 日間の海底圧力偏差時系列。(b) では、潮汐だけを補正した時系列に、モデルで推定される海洋変動成分を重ねたものを表示した。(c) では、潮汐に加え、推定された海洋変動成分を差し引いた時系列を表示した。(b, c) において、本震時の数百 hPa の変位は枠に入るよう縮めて表示した。

前震や本震といった地震時の瞬間的な変位は、ゆっくりとした海洋変動と変動の時間スケールが異なるため、その特定・検出は比較的容易であるが、前震から本震にかけて見られたゆっくりとした変位は、海洋変動成分の補正無しには明確に指摘することはできない（図 3 b, c）。このように、本共同研究で開発してきた海洋モデルの適用によって、海底のゆっくりとした鉛直変位が実際に検出できる一例を示すことができた。現在、東北沖地震の発生に至る過程[15]や発生後進展する余効変動[16]について、精力的に研究が行われてきているが、震源近傍で取得されたデータを用いることで、より詳細な調査が可能となるだろう。

4. まとめと展望

本稿では、東北大学サイバーサイエンスセンターとの共同研究で開発した海洋モデルとその利用例について報告した。この海洋モデルは、現場海底圧力観測データから cm スケールのゆっくりとした海底鉛直変位を検出するために開発された。結果として、2011 年東北地方太平洋沖地震の発生 2 日前から進行した数 cm のゆっくりとした海底鉛直変位を明瞭に検出できた。

巨大地震および津波発生ポテンシャルのある領域は、基本的に陸から遠い海溝に近い海底にある。こうした海底の変動や津波をリアルタイムでモニタリングするための海底観測網は、これまでも主に日本沖合で構築されてきた[17]が、海洋研究開発機構の DONET[18, 19]や NEPTUNE-Canada[20]などの最新の大規模な海底ケーブルシステムでも実用的に運用されるようになった。この他のリアルタイムモニタリングシステムとして、海上ブイを経由し海底圧力データを転送する NOAA の DART[21]、および、港湾空港研究所の NOWPHAS[22]も、より信頼度の高い早期津波警報の観点で重要な役割を果たしている。東日本大震災を受け、今後、防災科学技術研究所が主導となり、日本海溝沿いでより広範囲な海底観測網が構築される予定である(図 4)[23, 24]。こうした海底圧力観測網は、早期津波警報のための沖合津波観測を主目的とするが、本稿で示したように観測点直下の海底鉛直変位も計測している。我々が開発してきた海洋モデルは全球海洋をカバーしており、これらのオンラインデータへの利用が可能である。

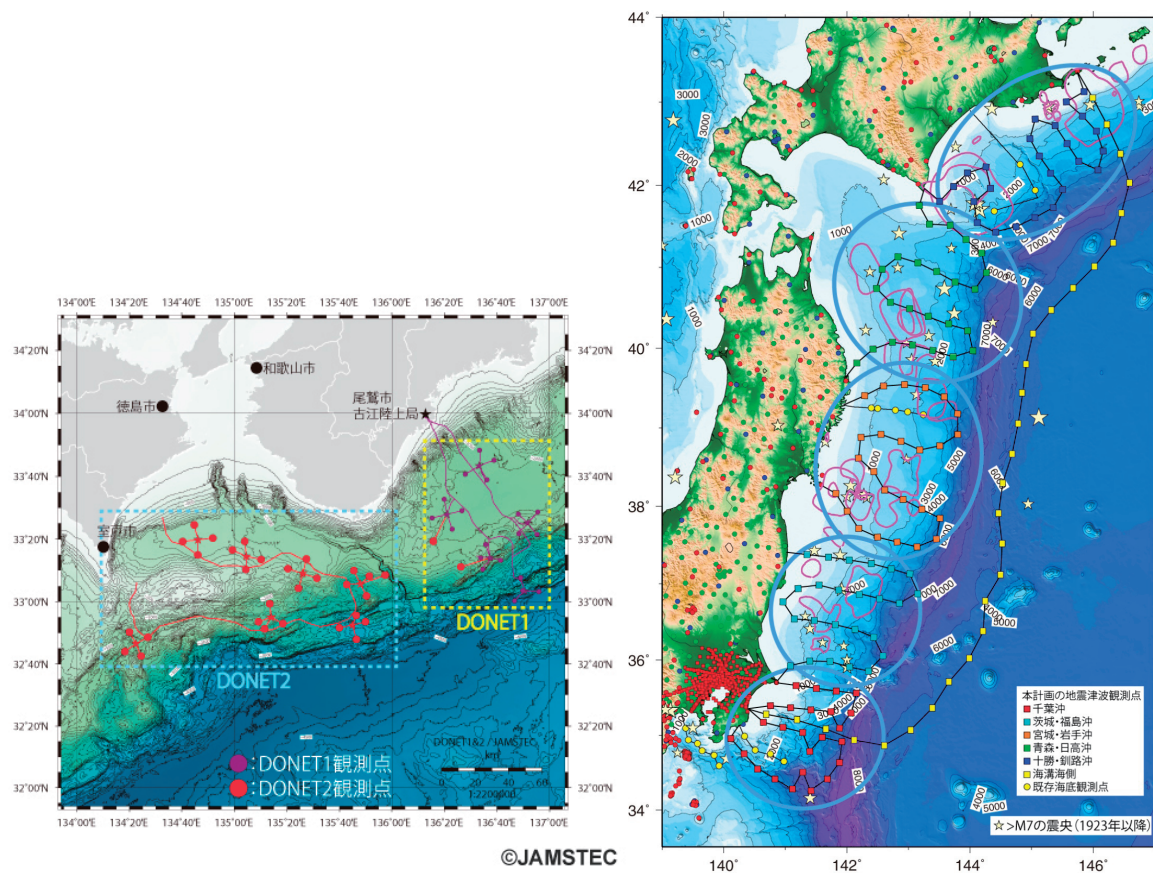


図 4 : 海底ケーブルによる海底観測網の例。左図は海洋研究開発機構の DONET と DONET2[18]、右図は防災科学技術研究所で設置予定の海底ケーブルシステム[24]をそれぞれ示す。

前述したように、現在の気象再解析データの公開タイミングの制限で、オンラインモニタリングデータに対し、約2日遅れで海洋変動の補正が可能となっている。気象予報データを利用しモデルを駆動すれば、まさに現時点での海洋変動の予測が行われ、リアルタイムデータへの利用まで現実的になる。たとえば、気象庁の全球数値気象予報モデル GPV (GSM) は、最長 192 時間後の予報まで利用可能であり、十分実用的と期待できる[25]。今後、開発してきたモデルをオンラインモニタリングデータに即座に適用できるシステムに組み込む必要がある。将来の海溝型巨大地震に関係し地殻が変形するならば、それをできるだけ早い段階で検知できるようになることを期待する。

謝辞

本研究は文部科学省の委託研究である「東海・東南海・南海地震の連動性評価研究」の一環として行われた。また、東北大学サイバーサイエンスセンターとの共同研究「海海底鉛直地殻変動検出のための数 km スケールを解像する全球海底圧力モデリング」により多くの数値実験を行うことができた。一部の計算は海洋研究開発機構の地球シミュレータの SX-9 によっても行った。シミュレーションコードのチューニングにあたり、同センターのテクニカルアシスタントの沢田雅洋氏と山下毅氏から多大な協力を受けた。ここに謝意を示す。

参考文献

- [1] Eble, M. C., F. I. González, D. M. Mattens and H. B. Milburn, Instrumentation, field operations, and data processing for PMEL deep ocean bottom pressure measurements. *NOAA Tech. Memo. ERL PMEL-89*, 71 pp., 1989.
- [2] Fujimoto, H., M. Mochizuki, K. Mitsuzawa, T. Tamaki and T. Sato, Ocean bottom pressure variations in the southeastern Pacific following the 1997–98 El Niño event. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 1456, doi:10.1029/2002GL016677, 2003.
- [3] Donohue, K. A., D. R. Watts, K. L. Tracey, A. D. Greene and M. Kennelly, Mapping circulation in the Kuroshio Extension with an array of current and pressure recording inverted echo sounders. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **27**, 507–527, doi:10.1175/2009JTECHO686.1, 2010.
- [4] Hino, R, S. Ii, T. Iinuma and H. Fujimoto, Continuous long-term seafloor pressure observation for detecting slow-slip interpolate events in Miyagi-Oki on the landward Japan Trench slope. *J. Disast. Res.*, **4**, 72–82, 2009.
- [5] 稲津大祐・日野亮太・藤本博己, 大気擾乱によって駆動される短周期全球順圧海洋モデルの解像度依存性. *SENAC*, **44**, 41–48, 2011.
- [6] Inazu, D., R. Hino and H. Fujimoto, A global barotropic ocean model driven by synoptic atmospheric disturbances for detecting seafloor vertical displacements from in situ ocean bottom pressure measurements. *Mar. Geophys. Res.*, **33**, 127–148, doi:10.1007/s11001-012-9151-7, 2012.

- [7] 地震調査研究推進本部 : http://www.jishin.go.jp/main/choukihyoka/ichiran_past/ichiran20110111.pdf
- [8] Kim, C.-H. and J.-H. Yoon, Modeling of the wind-driven circulation in the Japan Sea using a reduced gravity model. *J. Oceanogr.*, **52**, 359–373, doi:10.1007/BF02235930, 1996.
- [9] Hirose, N. and J.-H. Yoon, Barotropic response to the wind in the Japan Sea. *Proc. 4th CREAMS Works.*, 39–43, 1996.
- [10] Onogi, K. and Coauthors, The JRA-25 reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, **85**, 369–432, doi:10.2151/jmsj.85.369, 2007.
- [11] 鷲谷威, 2011 年東北地方太平洋沖地震—3.11 から 1 年で何が分かったのか—. *日本地球惑星科学連合ニュースレター JGL*, 8, 2, 2012.
- [12] Fujii, Y., K. Satake, S. Sakai, M. Shinohara and T. Kanazawa, Tsunami source of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. *Earth Planets Space*, **63**, 815–820, doi:10.5047/eps.2011.06.010, 2011.
- [13] Ito, Y. and Coauthors, Frontal wedge deformation near the source region of the 2011 Tohoku-Oki earthquake. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L00G05, doi:10.1029/2011GL048355, 2011.
- [14] Ando, R. and K. Imanishi, Possibility of Mw 9.0 mainshock triggered by diffusional propagation of after-slip from Mw 7.3 foreshock. *Earth Planets Space*, **63**, 767–771, doi:10.5047/eps.2011.05.016, 2011.
- [15] Kato, A. and Coauthors, Propagation of slow slip leading up to the 2011 Mw 9.0 Tohoku-Oki earthquake. *Science*, **335**, 705–708, doi:10.1126/science.1215141, 2012.
- [16] Ozawa, S. and Coauthors, Coseismic and postseismic slip of the 2011 magnitude-9 Tohoku-Oki earthquake. *Nature*, **475**, 373–377, doi:10.1038/nature10227, 2011.
- [17] Hirata, K. and Coauthors, Integration of seafloor geodetic observation and offshore tsunami observation - toward researches on tsunami forecast. *Proc. 21st Ocean Eng. Symp.*, OES21-181, 2009.
- [18] DONET: <http://www.jamstec.go.jp/donet/e/>
- [19] Lubick, N., Earthquakes from the ocean: Danger zones. *Nature*, **476**, 391–392, doi:10.1038/476391a, 2011.
- [20] NEPTUNE-Canada: <http://www.neptunecanada.ca/>
- [21] DART: <http://nctr.pmel.noaa.gov/Dart/>
- [22] NOWPHAS: <http://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/>
- [23] Monastersky, R., Tsunami forecasting: The next wave. *Nature*, **483**, 144–146, doi:10.1038/483144a, 2012.
- [24] 防災科学技術研究所, 防災科研ニュース, **176**, pp. 24, 2012 : http://www.bosai.go.jp/activity_general/pdf/k_news176.pdf
- [25] 気象業務支援センター, 全球数値予報モデル GPV (GSM) : <http://www.jmbse.or.jp/hp/online/f-online0a.html>