



Title	GPSによる地球自由振動検出の続報 : スタッキング法の改善と時間-周波数解析
Author(s)	望月, 一磨; 三井, 雄太; 日置, 幸介
Citation	測地学会誌, 63(1), 23-31
Issue Date	2017-08-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/67856
Type	journal article
File Information	JGSJ63-1 23-31.pdf



GPS による地球自由振動検出の続報： スタッキング法の改善と時間-周波数解析

望 月 一 磨¹⁾・三 井 雄 太²⁾・日 置 幸 介³⁾

1) 静岡大学大学院総合科学技術研究科

2) 静岡大学理学部地球科学教室

3) 北海道大学理学研究院

(2016 年 3 月 14 日受付, 2016 年 8 月 28 日改訂, 2017 年 3 月 2 日受理)

Further Study about GPS Detection of Earth's Free Oscillation: Improvement of Stacking Method and Time-frequency Analysis

Kazuma Mochizuki¹⁾, Yuta Mitsui²⁾, Kosuke Heki³⁾

1) Graduate School of Integrated Science and Technology, Shizuoka University,
Ohya836, Suruga-ku, Shizuoka 422-8529, Japan

2) Department of Geosciences, Shizuoka University, Ohya836, Suruga-ku, Shizuoka 422-8529, Japan

3) Graduate School of Science, Hokkaido University, N10W8, Kita-ku, Sapporo

(Received March 14, 2016; Revised August 28, 2016; Accepted March 2, 2017)

Abstract

In a previous study, GPS (Global Positioning System) was presented as a new instrument for detecting Earth's free oscillation in three-direction displacement. We improve a method of the data stacking and perform two types of time-frequency analyses as additional tests, using the GEONET data after the 2011 Tohoku-oki earthquake analyzed by a kinematic PPP method. We find that a time-domain stacking notably reduces background noise in spectra, although the time-domain stacking seems improper at frequencies higher than 3.5 mHz. The STFT (short-time Fourier transform) time-frequency analysis and the CWT (continuous wavelet transform) time-frequency analysis reveal temporal changes of the spectral peaks for the Earth's free oscillation at frequencies higher than 1 mHz. In several fundamental modes of the Earth's free oscillation, the amplitudes of the spectral peaks tend to increase after their temporal decreases. The results of the analyses indicate that the stacked GPS data truly detected the low-frequency ground oscillation. But we additionally note that we might not be able to exclude effects of satellite clock error especially at very low frequencies (< 1 mHz).

1. は じ め に

球体地球表面の自由境界条件を満たすように伝播する表面波は、低周波成分において、グローバルな地球の内部構造を反映した固有モードの足し合わせで表される。このような固有振動数にスペクトルピークを持つ低周波の地震波は、地球自由振動と呼ばれ、1960 年チリ地震の後に歪み計・地震計や重力計による検出報告がなされた (Benioff et al., 1961; Ness et al., 1961; Alsop et al., 1961)。現在では、地震後に限らず、常に地球が一定の周波数で揺れ続ける常時地球自由振動 (Nawa et al., 1998; Kobayashi and Nishida, 1998; Suda et al., 1998) の存在まで明らかになっている。

一方、上記の機器に比べて計測精度の低い Global Navigation Satellite System (GNSS), 特に Global Positioning System (GPS) によっても、数百点の観測点データをスタッキングすることによって地球自由振動のスペクトルピークを検出できることが、Mitsui and Heki (2012) によって示された。彼らは、2011 年東北地方太平洋沖地震直後の期間の東日本の GEONET 観測点に着目し、キネマティック PPP 法 (Zumberge et al., 1997) により解析された時系列データの振幅スペクトルを、周波数領域でスタッキングした。その結果、広帯域地震計単点のデータよりもノイズは大きい、GPS が地球自由振動の特にスフェロイダル (伸縮) 成分の基本モードのスペクトルを十分に検出可能なことがわかった。Niu et al. (2016) は、日本全国の GEONET 観測点データを用いて、2011 年東北地震後に地球を周回してきた表面波を Mitsui and Heki (2012) よりもやや高周波の帯域で検出した。

GPS は、観測点単点の計測精度こそ低い、地震計と異なって周波数応答の補正を必要としないこと、および、歪み計や重力計と異なって空間 3 成分のデータを解析できることから、地球自由振動の研究のための新しいデータセットとしての可能性を秘めている。そこで本研究では、Mitsui and Heki (2012) の続報として、スタッキング法の改善および時間-周波数解析を行う。

2. 手 法

本研究で用いるデータは、Mitsui and Heki (2012) と同じ、30 秒サンプリングの時系列データである。解析法は RTnet によるキネマティック PPP 法で、電離圏遅延は 2 周波の搬送波位相の線形結合により除去し、対流圏遅延は勾配ベクトル項なしでの推定を行っている。暦は IGS の最終暦 (15 分間隔)、時計は IGS のハイレート時計 (30 秒間隔) を使用している。波数不確定性の推定は行っていない。

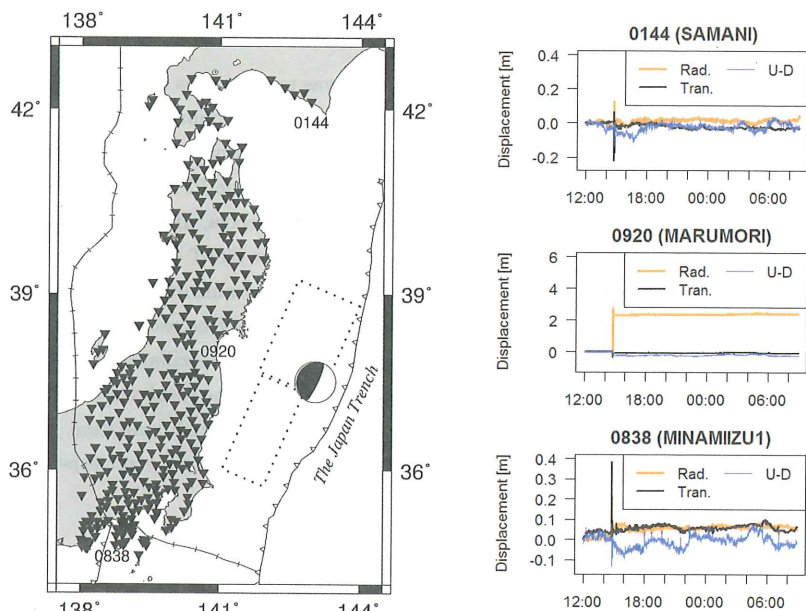


Figure 1. (Left figure) Locations of 341 GEONET stations (solid triangles) in North Eastern Japan. The beach-ball symbol shows the GCMT solution (Nettles et al., 2011) of the 2011 Tohoku earthquake along the Japan Trench. The dashed squares represent the ruptured area of the 2011 Tohoku earthquake estimated by Geospatial Information Authority of Japan (2011). The plate boundaries are drawn referring to Bird (2003). (Right figures) Observed displacement data at selected GEONET stations in three directions of radial, transverse, and Up-Down. The horizontal axes represent the time on March 11 and 12, 2011. The 0144 station is located at (142.935°E, 42.131°N), the 0920 station is at (140.728°E, 37.825°N), and the 0838 station is at (138.763°E, 34.690°N).

Figure 1の左図に、国土地理院のGEONET観測網のうち、本研究においてデータを使用した341箇所の観測点を示す。東北地震は、2011年3月11日の14:46 (JST) に、日本海溝から沈み込む太平洋プレートと陸側プレートとの境界で発生したマグニチュード9の低角逆断層地震である。Figure 1の右図に、観測点での変位波形の例を示す。30秒サンプリングのため、1秒サンプリングデータに基づく先行研究 (Yue and Lay, 2011; Ohta et al., 2012; Mitsui and Heki, 2015) よりも本震時の動的変位は抑制されている。

周波数で4 mHz以下 (周期250秒以上) の帯域に着目する。以下、周波数解析を行う際には、GPSの変位波形ではなく、数値微分して速度波形に直したものをを用いる。これは、変位のオフセットが低周波のスペクトルを底上げしてしまうのを防ぐためである。

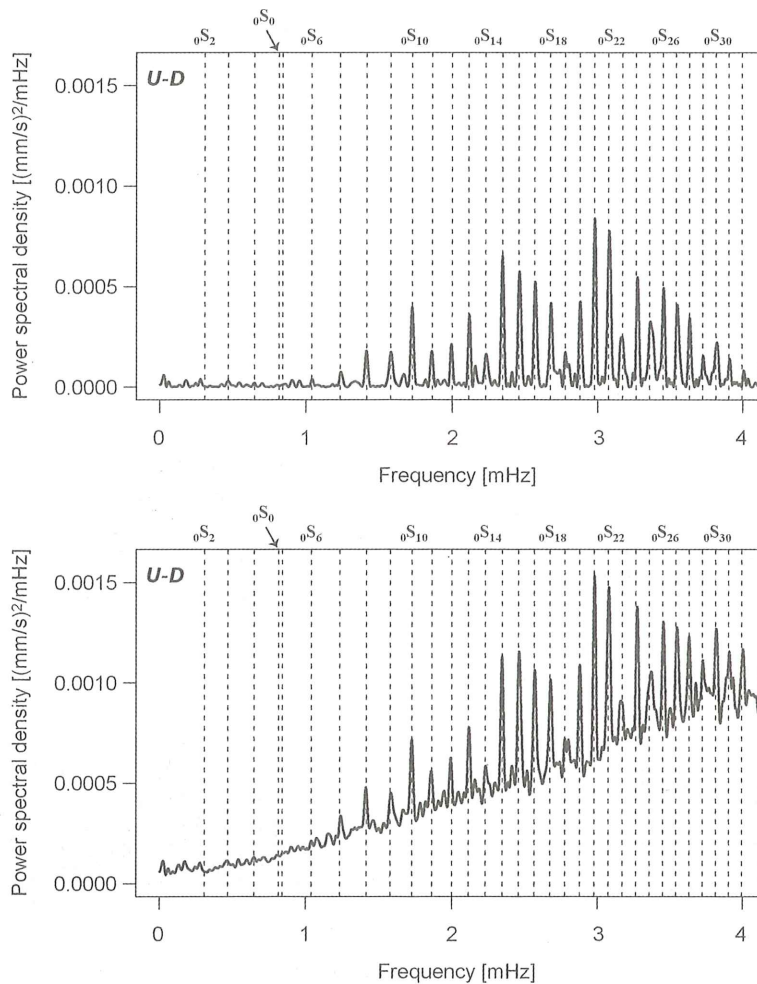


Figure 2. The upper figure shows the “time-stacked” power spectral density of the U-D direction data for a period from 15:00 (March 11) to 9:00 (March 12) in JST. The lower figure exhibits the “frequency-stacked” power spectral density for the same data. The vertical broken lines represent the frequencies of the fundamental spheroidal modes based on PREM (Dziewonski and Anderson, 1981).

3. 結 果

3.1. スタッキング法の改善

Mitsui and Heki (2012) では、まず各観測点のデータの振幅スペクトルを計算し、その単純平均を取るという形のスタッキングを行った。しかし、観測点ごとの速度波形を平均したスタッキング波形を算出した上で、その振幅スペクトルを得る方法も考えられる。便宜上、前者の方法を“frequency-stacked”，後者の方法を“time-stacked”と呼ぶ。

Figure 2 は、2011 年東北地震（14:46）後の 15:00 から翌日の 9:00 まで、18 時間分の上下成分のパワースペクトル密度を、上記の 2 種類の方法で計算した結果を表す。どちらの方法でも、まず各観測点での時系列データを de-trend した後に Hann window をかけた。その後、“Frequency-stacked”では、先にパワースペクトル密度を算出して位相情報を捨ててから、観測点平均を取った。“Time-stacked”では、先に時系列データの観測点平均を取ってスタッキング波形を計算し、そのパワースペクトル密度を算出した。Figure 2 では、パワースペクトル密度の結果と同時に、標準的な 1 次元的速度構造 PREM (Dziewonski and Anderson, 1981) に基づく、地球自由振動のスフェロイダル成分の基本モード (${}_0S_n$) の周波数を示した。 ${}_0S_0$ を例外として、次数 n が大きいほど高周波側にスペクトルピークが立つ。

Figure 2 の双方の図において、スフェロイダル成分の基本モードの大半（1 mHz 以上のものは全て）に相当するスペクトルピークが確認できる。Figure 2 の上下の図を比べると、上の“time-stacked”の結果のほうが、下の“frequency-stacked”の結果に比べてバックグラウンドノイズレベルが低く、スペクトルピークがより明瞭であることがわかる。

“Time-stacked”ではノイズがスタッキングによって打ち消されているのに対し、“frequency-stacked”ではノイズが残っているということは、GPS 解析結果に含まれるノイズの位相がランダムであることを表している。また、“frequency-stacked”で周波数の 1 乗程度に比例する形のバックグラウンドノイズが表れている点については、もともとの変位波形では周波数に依存しないホワイトノイズ的であったものが、数値微分によって速度波形に変換された際に周波数の 1 乗に比例する形となった、として解釈できる。

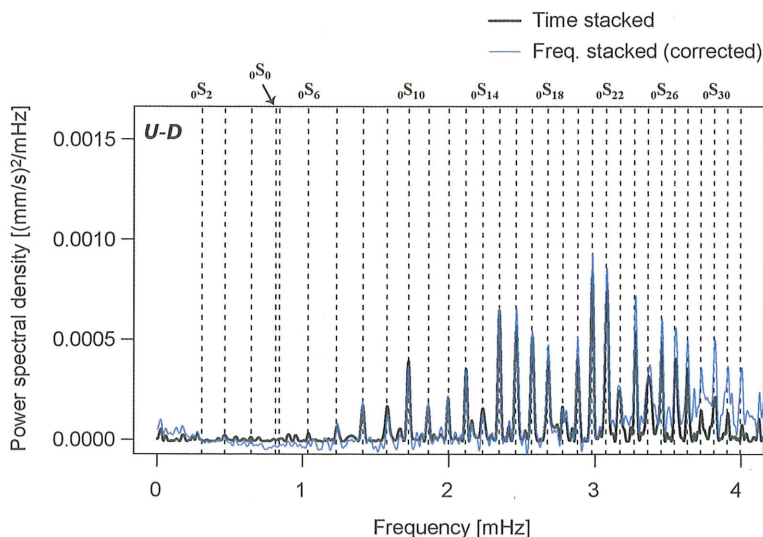


Figure 3. Comparison of the “time-stacked” power spectral density with “frequency-stacked” one with correction, for the same data of Figure 2. We corrected the “frequency-stacked” power spectral density with ${}_1 = {}_1 - 0.0002{}_1$, where ${}_1$ is the power spectral density after correction, ${}_1$ is the one without correction (the lower figure in Figure 2), and ${}_1$ is the frequency.

さらに, “Time-stacked” と “frequency-stacked” のパワースペクトル密度の形を比較する (Figure 3). 後者の “frequency-stacked” のバックグラウンドノイズを, 周波数の 0.0002 倍に比例するものとして補正している. “frequency-stacked” のほうの結果に, 補正しきれていないバックグラウンドノイズが若干残っているが, 全体としてはほぼ同様の結果となった.

詳細にみると, Figure 3 の低周波数側では “Time-stacked” のほうのみ, いくつかの高次モードの周波数に対応するピークが見られる. 具体的には, ${}_1S_7$ (1.65 mHz) が ${}_0S_{10}$ の左側に確認できる. 加えて, ${}_1S_3$, ${}_2S_2$, ${}_3S_1$ などが対応する 0.94 mHz 前後にもピークがある. 一方, 右端の 4 mHz に近い高周波数帯では, “frequency-stacked” のほうが基本モード (${}_0S_n$) の周波数に対応するシグナルが大きい傾向にある. これは, 高周波になるほど, “time-stacked” が成り立つために必要な同位相という仮定が崩れることを意味している. 本研究のセッティングの場合は, 3.5 mHz 以下の周波数帯であれば, バックグラウンドノイズの影響が小さい “time-stacked” を使用可能であると考えられる.

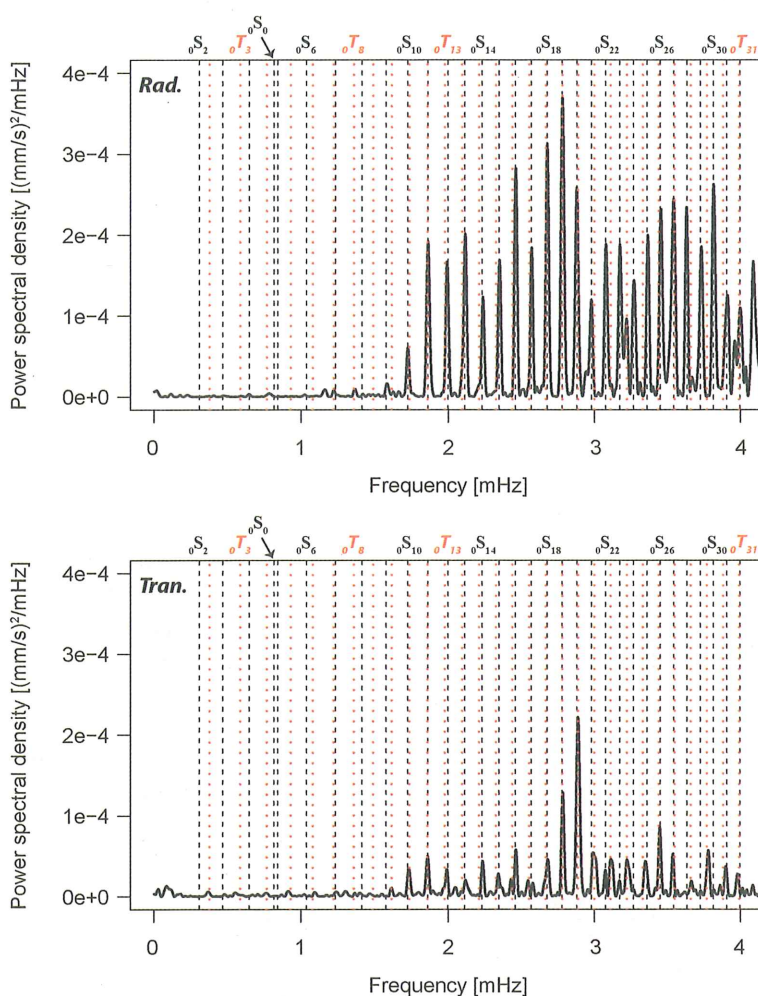


Figure 4. The upper figure illustrates the “time-stacked” power spectral density of the radial direction data for the same period as Figure 2. The lower figure shows that of the transverse direction data. The black broken lines represent the frequencies of the fundamental spheroidal modes, and the red broken lines represent those of the fundamental toroidal modes, based on PREM (Dziewonski and Anderson, 1981).

そこで、以下の解析では、この“time-stacked”によるスタッキング波形データを用いる。

Figure 4 に、東北地震の GCMT 解の場所に対する、水平方向の radial および transverse 成分のデータを、同様に“time-stacked”したパワースペクトル密度を示す。水平方向なので、地球自由振動のスフェロイダル（伸縮）成分だけでなく、トロイダル（振れ）成分の基本モード（ ${}_0T_n$ ）の周波数も示している。スフェロイダルモードとトロイダルモードのスペクトルピークは近接していて区別つかないケースが多いが、全体としては、radial 成分の結果に対して 1 mHz 以上のスフェロイダルモードのピークがよく対応している。 ${}_0T_8$ および ${}_0T_{24}$ のトロイダルモードのピークが紛れ込んでいるのも確認される。一方、transverse 成分の結果に対しては、トロイダルモードのピークが対応しているが、一部スフェロイダルモードのピークも混ざっている。

3.2. 時間-周波数解析 (STFT)

次に、スペクトルピークの時間発展を調べるために、時間-周波数解析を行う。まず、“time-stacked”に従ってスタッキング波形を作成した。このとき、前節の場合と異なり、スタッキングの段階では detrend のみ行い、Hann window はかけなかった。それから、短い期間の時間窓の範囲内で Hann window をかけてパワースペクトル密度を算出し、窓をずらしながら時間発展を求める短時間フーリエ変換 (STFT) により解析した。例として、Figure 4 と同じく、2011 年東北地震 (14:46) 後の 15:00 から翌日の 9:00 まで、18 時間ぶんの transverse 成分のデータを用いた。時間分解能と周波数分解能との間にトレードオフがあるため、試行錯誤で時間窓の幅を決定した。その結果、時間窓の幅を 6 時間程度取れば、周波数分解能が失われないことがわかった。

Figure 5 に、STFT によるスペクトログラムを示す。時間窓の幅は 6 時間、時間窓の移動のステップは 2 時間ごととした。なお、周波数 1 mHz 以下にスペクトルピークがほとんど見られなくなったため、1–4 mHz の帯域のスペクトログラムとした。Figure 5 から、トロイダル成分の基本モードのスペクトルピークが徐々に時間減衰していく経過がわかる。興味深いのは、いくつかのモードにおいて、一度減衰したスペクトルピークが 2:00 から 6:00 にかけて再度増大していることである。たとえば、図に凡例として示したように、 ${}_0T_{13}$ 、 ${}_0T_{17}$ 、 ${}_0T_{20}$ 、 ${}_0T_{23}$ 、 ${}_0T_{27}$ などでのこの傾向が見られた。これは、Stein and Geller (1978) や Davis (1985) により報告された、実際の地球の構造が球対称でないことに起因するスペクトル振幅の振動である可能性がある。

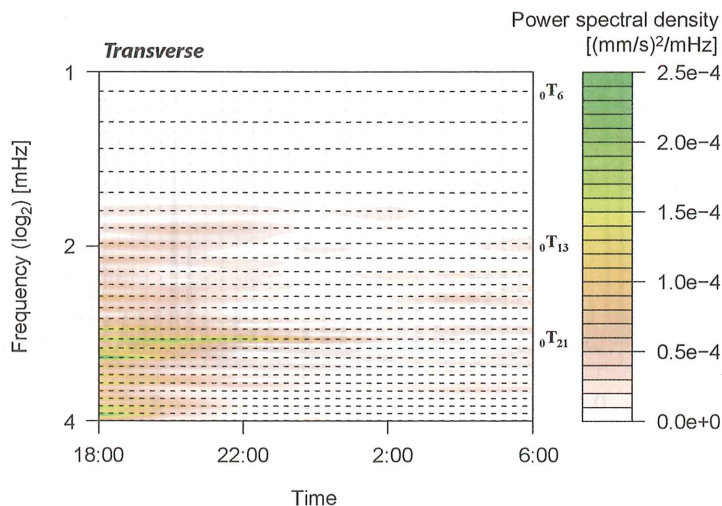


Figure 5. Spectrogram of the transverse direction data for the same period as Figure 2 by STFT. The time window is 6 hours and the increment of the window shift is 2 hours.

3.3. 時間-周波数解析 (CWT)

STFT では、解析期間の初めと終わりの部分で、それぞれ時間窓の半幅の長さずつスペクトルを推定できない期間がある。このため、前節の STFT による解析では、東北地震発生直後の約 3 時間のスペクトルを推定できなかった。そこで、STFT とは別個に、連続ウェーブレット変換 (CWT) による時間-周波数解析も試みた。元の時系列データ $g(t)$ に対し CWT を行うことで得られるウェーブレット係数 $W\{g\}$ は、以下で定義される。

$$W\{g\} = \int g(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt$$

ここで、 a はスケーリングパラメータ、 $\psi(t)$ はマザーウェーブレットである。本研究では、スケーリングパラメータを $a = 2^{X+k/Y}$ とする。ここで、 X と Y は任意の自然数、 k は 0 から $Y-1$ までの整数列である。マザーウェーブレットは、モルレーウェーブレット

$$\psi(t) = e^{-0.5t^2} e^{i2\pi ft}$$

の形とした。 f は中心周波数と呼ばれる。CWT では、時間分解能・周波数分解能が周波数 (疑似周波数) 自体に依存して変化する。中心周波数 f よりも低周波になるほど、高い周波数分解能 (低い時間分解能) となる。

Figure 6 に、Figure 5 と同じ transverse 成分のデータを CWT で解析した結果の一例を示す。対象とする周波数領域で Figure 5 の STFT と同程度の時間分解能を保ちながら、周波数分解能を向上させることを試みた。Figure 6 と Figure 5 とを見比べると、前節の最後に触れたスペクトルピークの減衰からの再増大は双方の結果で確認でき、両者の時間分解能に明確な差は見られない。一方、3-4 mHz 程度の周波数帯域に着目すると、Figure 6 の CWT のほうが Figure 5 の STFT と比べ、全般に鋭いスペクトルピークを検出できていることがわかる。CWT は、(時間・周波数分解能が周波数自体に依存する特性から) 限定的な周波数帯域内でのスペクトルの時間発展を詳細に調べる場合には、STFT より有効な手法になり得ると考えられる。

4. 議 論

スタッキング法を “time-stacked” とした後の時間-周波数解析により、2011 年東北地震後の超低周波帯域における小振幅の地表振動が GPS でよく捉えられていることがわかった。しかし、これらの信号が GPS のキネマティック PPP 解析のプロセスで紛れ込んだものであって、実際の地表振動ではない、という可能性も残っている。

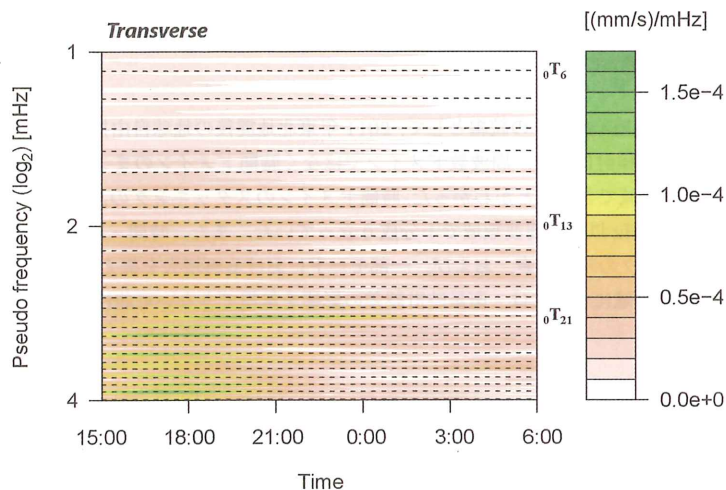


Figure 6. Scalogram of the transverse direction data for a period from 15:00 (March 11) to 6:00 (March 12) in JST by CWT. The color contours illustrate the absolute values of the wavelet coefficients. The parameters are $\tau_1 = 9_{\tau_1} = 100, \tau_1 = 30$ [Hz].

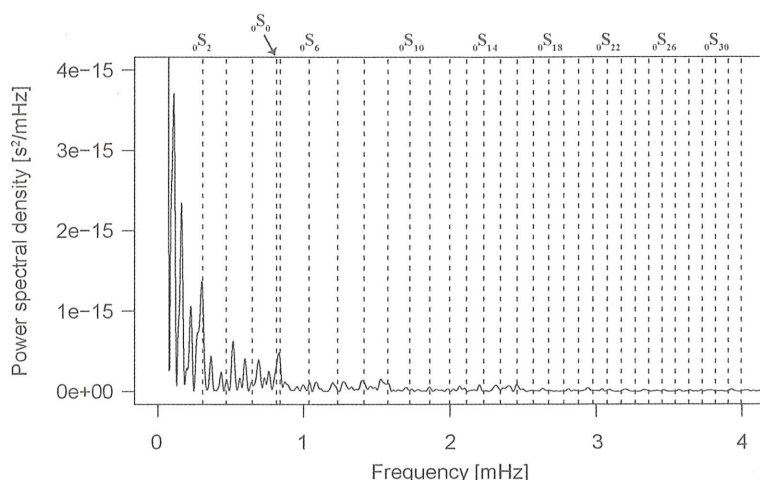


Figure 7. The "time-stacked" power spectral density of 31 GPS satellite clocks (in IGS final orbit products) for a period from 15:00 (March 11) to 9:00 (March 12) in JST.

そこで、一連のデータ解析を行ったのと同じ期間（2011年3月11日15時から3月12日9時まで）の、GPS衛星時計の推定誤差データ（IGSの最終暦における30秒サンプリングデータ）の周波数解析を行い、地球自由振動のモードに相当するスペクトルピークが出ていないかを調べた。当該期間においては、G02-G32までの31機の衛星データが公開されている。これらを時系列データで"time-stacked"によりスタッキングし、Figure 2と同様にパワースペクトル密度を算出した。

結果をFigure 7に示す。地球自由振動のスフェロイダル成分の基本モードのピークはほとんど見られないことがわかる。ただし、 S_2 や S_0 、 S_6 などの1 mHz以下の超低周波モードに関しては、対応するスペクトルピークが存在するようにも見える。これらについては、GPS衛星時計の推定誤差に反映されている可能性がある。とはいえ、本研究の前章で主に解析を行った1 mHz以上の周波数帯域においては、時計誤差の影響は僅少であると考えられる。

5. ま と め

本研究では、Mitsui and Heki (2012)の続編として、2011年東北地震後の地球自由振動のGPSによる検出を行った。まずスタッキング法の再検討により、周波数ドメインではなく時間ドメインのままスタッキングを行うほうが、バックグラウンドノイズを軽減できることがわかった。時間ドメインのスタッキングのために必要な同位相の仮定は、本研究の条件では、約3.5 mHz以下の周波数域で十分成り立っていた。また、時間-周波数解析により、GPSが地球自由振動のスペクトルピークの時間減衰、および、一部モードにおける再増大を捉えていることがわかった。ただし、1 mHz以下の超低周波帯域については、衛星時計誤差の影響を無視できない可能性がある。

謝 辞

西田究氏にはスタッキング法に関してヒントをいただいた。査読者の須田直樹氏、匿名査読者1名、並びに編集者の新谷昌人氏のコメントにより、本稿は大きく改善された。図の作成にはGMT (Wessel et al., 2013)を用いた。使用したGPSデータについて、国土地理院、NGDS, VERIPOS/APEX service, Hitz, GPS Solutions, ならびに岩淵哲也氏に御礼申し上げる。

参 考 文 献

- Alsop, L.E., G.H. Sutton, and M. Ewing (1961): Free oscillations of the Earth observed on strain and pendulum seismographs, *J. Geophys. Res.*, **66**, 631-641.
- Bird, P. (2003): An updated digital model of plate boundaries, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, **4**(3), 1027.
- Benioff, H., F. Press, and S. Smith (1961): Excitation of the free oscillations of the Earth by earthquakes, *J. Geophys. Res.*, **66**, 605-619.
- Davis, J. P. (1985): Variation in apparent attenuation of the Earth's normal modes due to lateral heterogeneity, *Geophys. Res. Lett.*, **12**, 141-144.
- Dziewonski, A.M., D.L. Anderson (1981): Preliminary reference Earth model, *Phys. Earth Planet. Int.*, **25**, 297-356.
- Geospatial Information Authority of Japan (2011): The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake on March 11, 2011: fault model, Available at: <http://www.gsi.go.jp/cais/topic110422-index-e.html>, last accessed February 20, 2016.
- Kobayashi, N., K. Nishida (1998): Continuous excitation of planetary free oscillations by atmospheric disturbances, *Nature*, **395**, 357-360.
- Mitsui, Y., K. Heki (2012): Observation of Earth's free oscillation by dense GPS array: After the 2011 Tohoku megathrust earthquake, *Sci. Rep.*, **2**, 931.
- Mitsui, Y., K. Heki (2015): Report on a characteristic oscillation about 38 mHz (26 s) in northeastern Japan following surface wave of the 2011 Tohoku megathrust earthquake, *Geophys. J. Int.*, **202**, 419-423.
- Nawa, K., N. Suda, Y. Fukao, T. Sato, Y. Aoyama, and K. Shibuya (1998): Incessant excitation of the Earth's free oscillations, *Earth Planets Space*, **50**, 3-8.
- Ness, N.F., J.C. Harrison, and L.B. Slichter (1961): Observations of the free oscillations of the Earth, *J. Geophys. Res.*, **66**, 621-629.
- Nettles, M., G. Ekstrom, and C.K. Howard, C.K. (2011): Centroid-moment tensor analysis of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake and its larger foreshocks and aftershocks, *Earth Planet Space*, **63**, 519-523.
- Niu, J., C. Xu and L. Yi (2016): Detecting multiple surface waves excited by the 2011 Tohoku-Oki Earthquake from GEONET observations, *Bull. Seis. Soc. Am.*, **106**(2), 806-811.
- Ohta, Y., T. Kobayashi, H. Tsushima, S. Miura, R. Hino, T. Takasu, H. Fujimoto, T. Iinuma, K. Tachibana, T. Demachi, T. Sato, M. Ohzono, and N. Umino (2012): Quasi real-time fault model estimation for near-field tsunami forecasting based on RTK-GPS analysis: Application to the 2011 Tohoku-Oki earthquake (Mw 9.0), *J. Geophys. Res.*, **117**, B02311.
- Stein, S., R.J. Geller (1978): Attenuation measurements of split normal modes for the 1960 Chilean and 1964 Alaskan earthquakes, *Bull. Seis. Soc. Am.*, **68**, 1595-1611.
- Suda, N., K. Nawa, K. and Y. Fukao (1998): Earth's background free oscillations, *Science*, **279**, 2089-2091.
- Yue, H., T. Lay (2011): Inversion of high-rate (1 sps) GPS data for rupture process of the 11 March 2011 Tohoku earthquake (Mw 9.1), *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L00G09.
- Wessel, P., W.H.F. Smith, R. Scharroo, J.F. Luis, and F. Wobbe (2013): Generic Mapping Tools: Improved version released, *EOS Trans. AGU*, **94**, 409-410.
- Zumberge, J.F., M.B. Heftin, D.C. Jefferson, M.M. Watkins, and F.H. Webb (1997): Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks, *J. Geophys. Res.*, **102**, 5005-5017.