

2011 年東北地方太平洋沖地震によって励起された芦ノ湖のセイシュ（静振）

原田昌武*・板寺一洋*・行竹洋平*

Seiche at Lake Ashinoko triggered by the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake

by

Masatake HARADA*, Kazuhiro ITADERA* and Yohei YUKUTAKE*

Abstract

The 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (M9.0) occurred on March 11, 2011. After this earthquake, water level at Lake Ashinoko vibrated for some hours. We observed water level, which had a larger amplitude and different phase comparing with a steady state. The maximum amplitude of the observed vibration in water level was about 0.2m. This phenomenon was seismic seiche. We analyzed time series data of water level, and estimated natural periods (seiche) at Lake Ashinoko. The results showed that the lake had the seiche periods of 15.16 (T_1), 6.58 (T_2), 4.48 (T_3), 3.88 (T_4), 3.13 (T_5), and 2.19 minutes (T_6). T_1 , T_2 , T_3 , and T_5 vibrated under a steady state, even before the earthquake. The amplitudes of T_3 , and T_5 were activated after the earthquake. In addition to these periods, T_4 and T_6 were generated only after the earthquake. The seismic seiche excited by the earthquake continued at the maximum for about 20 hours. The observed natural periods of seiche at Lake Ashinoko were in very good agreement with theoretical ones estimated from a simplified model.

1. はじめに

湖の水位は、その形状や水深などによって規定される固有周期を持ち、その周期によって振動する。この振動現象はセイシュ（seiche、静振）と呼ばれている。19世紀後半、F.A. Forel によってスイスのレマン湖（またはジュネーブ湖）におけるセイシュの調査がなされたことが、この分野の研究のはじめだと言われている（宇野木, 1959；鈴木, 2012）。

芦ノ湖におけるセイシュの研究も古くから行われており、最初の論文は中村・吉田（1901）と思われる。彼らは芦ノ湖および琵琶湖において水位観測を行い、定常振動の周期、すなわち固有周期を求めた。その後、山中湖、河口湖、浜名湖、洞爺湖、中禅寺湖においても同様の観測を行い、Nakamura and Honda（1911）にまとめている。彼らの解析結果によれば、定常時の芦ノ湖の水位は T_1 から T_5 の5つの固有周期を持つことが示されている（表1）。

これらの研究の後、1930年11月26日に芦ノ湖直近（南側）にある北伊豆断層帯で北伊豆地震（M7.3）が発生した。この地震の際、芦ノ湖の水位は“異常な定常振動”（今村・小平, 1932）が発生したことが指摘されている。今村・小平（1932）は、この地震によって励起された芦

ノ湖のセイシュ、いわゆるサイスミック・セイシュの周期は、Nakamura and Honda（1911）によって指摘された T_1 と T_2 が卓越しており、特に T_2 の振動が顕著であったことを明らかにしている。また、鈴木（1936）はセイシュの原因は鉛直変位による地殻の傾斜によって生じしていると指摘し、鈴木（1937）このサイスミック・セイシュの周期を Periodogram analysis および Phase diagram の方法によって再計算した。

2011年3月11日14:46頃に発生した東北地方太平洋沖地震（M9.0）は日本全国を揺らし、気象庁によれば箱根町湯本では震度4が観測されている。この時に芦ノ湖岸には通常とは違う波が打ち寄せている様子が、インターネット上に掲載されていた。また、富士五湖の1つである西湖でも同様の現象が認められている。鈴木（2012）は、東北地方太平洋沖地震後に西湖で見られた波浪とは異なる長周期の高波について、目撃者のからのインタビューや湖岸の状況観察からサイスミック・セイシュが発生したことを報告している。

このような状況から、芦ノ湖においても東北地方太平洋沖地震によって励起されたサイスミック・セイシュが発生したと考えられる。本論では芦ノ湖の水位データを用いて、同湖における通常時のセイシュ（水位変動の固

* 神奈川県温泉地学研究所 〒250-0031 神奈川県小田原市入生田 586

論文, 神奈川県温泉地学研究所報告, 第46巻, 9-16, 2014

表 1 芦ノ湖におけるセイシュの固有周期。単位は分。Nakamura and Honda (1911) および鈴木 (1937) による結果、および、本研究によって求められた結果と簡略化したモデルから予測される周期を示す。斜字体は地震によってのみ励起された固有周期を、また L_1 、 L_2 は仮定した矩形の長さを表す。

Table 1. Periods of seiche at Lake Ashinoko. Unit is minute. We listed results from Nakamura and Honda (1911), Suzuki (1937) and this study. Italics mean that the period triggered only earthquake. The theoretical natural periods based on a simplified model were also shown. L_1 and L_2 represent the length assumed a rectangle axis.

Period (min)	Nakamura and Honda (1911)	Suzuki (1937)	Observed (This Study)	Simplified Model (This Study)
T_1	15.38	15.16	15.16	13.10 (L_1)
T_2	6.76	6.59	6.58	6.55 (L_1)
T_3	4.63	4.57	4.48	4.37 (L_1)
T_4	3.90		3.88	3.81 (L_2)
T_5	3.11		3.13	3.27 (L_1)
T_6			<i>2.19</i>	2.18 (L_1)

有周期)、および東北地方太平洋沖地震によって励起されたサイスミック・セイシュの特徴を論じる。

2. 芦ノ湖の水位データと解析方法

温泉地学研究所では、芦ノ湖北端部の早川につながる湖尻水門付近において水位の観測を行っている。観測地点を図 1 に示す。水位の観測データは、テレメータ装置によって 1Hz サンプルングデータが温泉地学研究所へリアルタイムに送信される。これらの秒値データから、

毎分 0 秒から 59 秒の平均値を算出し、1 分平均値データをデータベースに収録している。我々は、この 1 分平均値データを解析に用いた。使用したのは 2011 年 3 月 11 日 00:00 から 12 日 23:59 までの 2 日間のデータで、その観測結果を図 2(a) に示す。また、気圧、平均風速、降水量を図 2(c) から (e) に示す。観測地点については、図 1 に記している。これらのうち、平均風速と降水量については気象庁のアメダスによるもので、平均風速は御殿場、雨量は箱根における観測データである。雨量につ

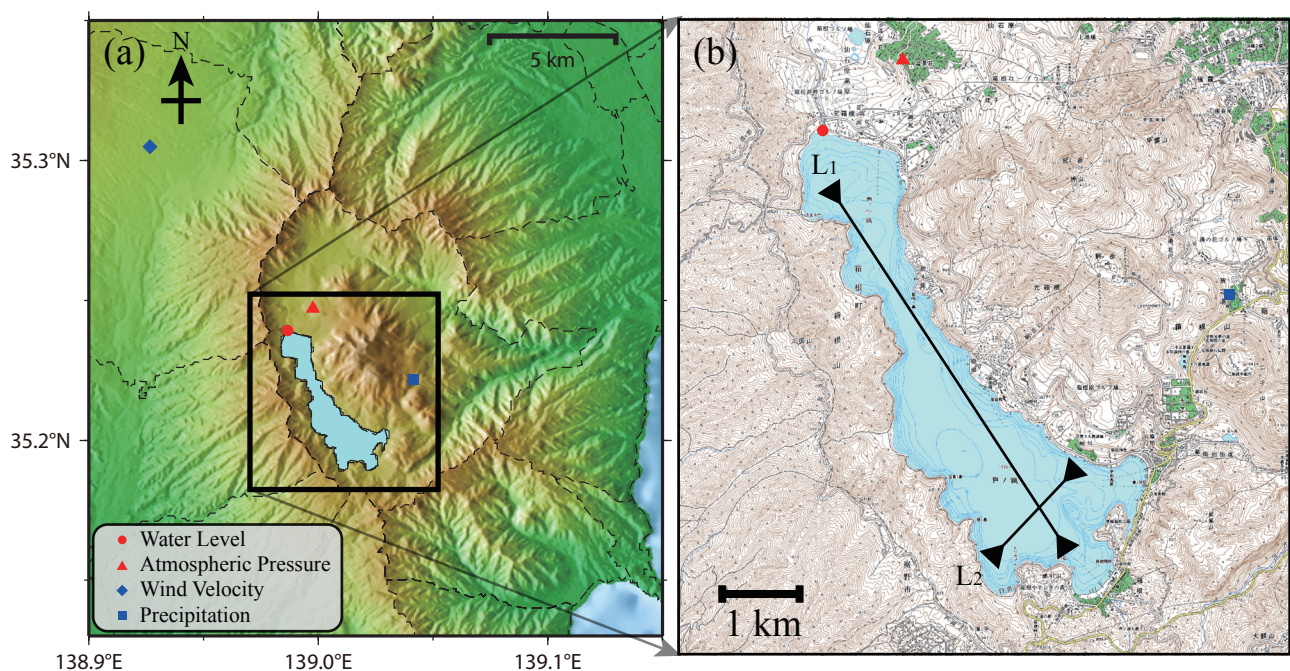


図 1 観測点分布図。(b) の L_1 、 L_2 の実線は固有周期の理論計算に用いた矩形の長軸、短軸の長さを示す。地形図は、国土地理院による 50m メッシュ標高および 2 万 5 千分の 1 地形図を使用した。

Fig. 1. Distribution of observation site. Thick lines L_1 and L_2 in (b) indicate a rectangle axis for theoretical natural period calculation.

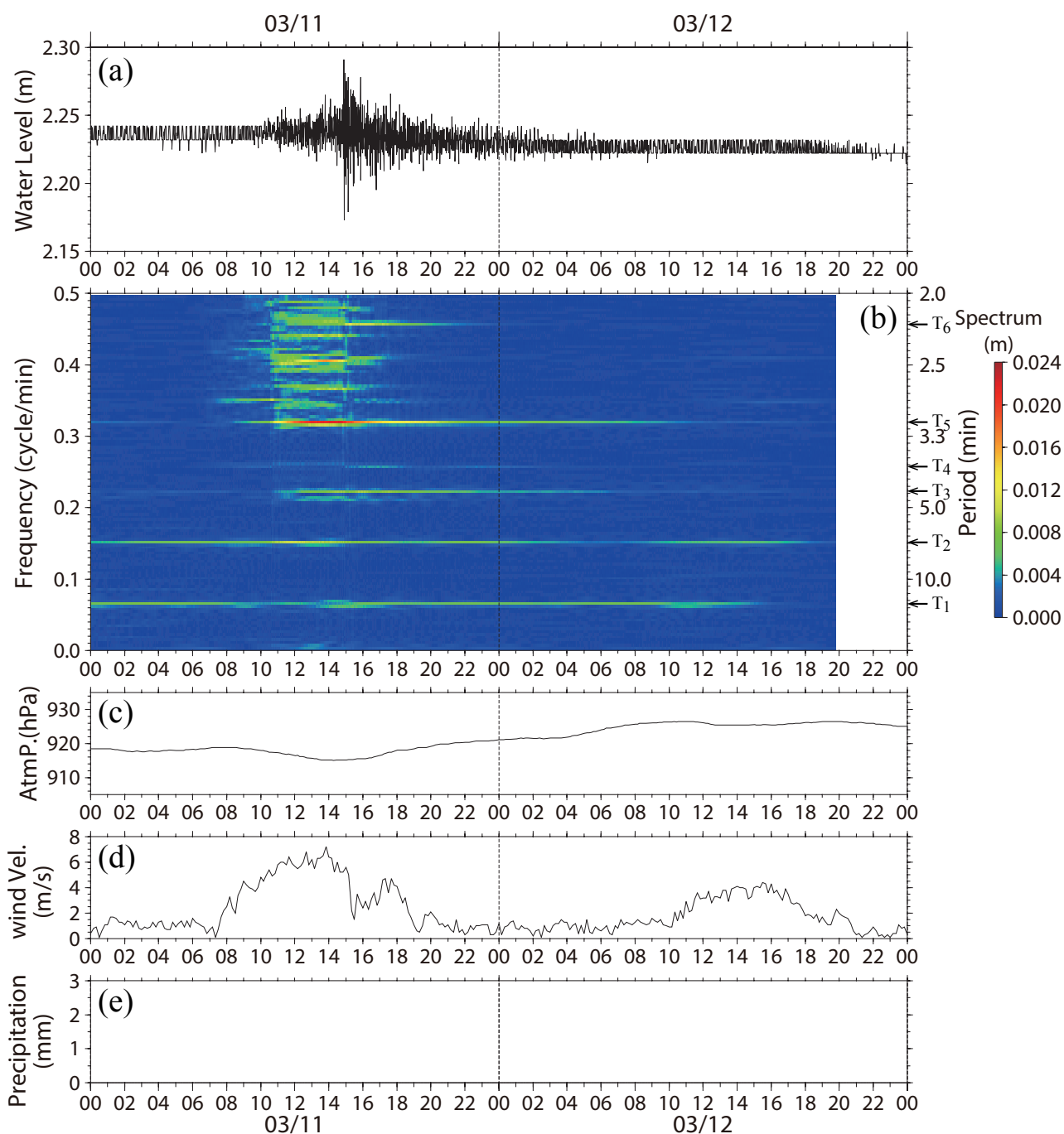


図2 (a) 芦ノ湖における水位観測結果 (2011 年 3 月 11 日 00:00 ~ 12 日 23:59 の 1 分平均値)。 (b) 水位データのランニング・スペクトル。 (c) 仙石原観測点における気圧。気象庁アメダス観測点における 10 分間の、 (d) 平均風速 (御殿場)、および、 (e) 降水量 (箱根)。観測地点については図 1 に示している。

Fig. 2. (a) Water level observed at Lake Ashinoko (1 minute sampling data from 00:00 on March 11, 2011 to 23:59 on March 12, 2011). (b) Running spectrum of water level. (c) Atmospheric pressure at Sengoku-hara. (d) Mean wind velocity at Gotemba, and (e) precipitation at Hakone. These site are shown in Fig. 1.

いてはグラフ中に何も書かれていないが、この期間中、降水は確認されていないことを示している。

水位データに含まれる周期を計算するため、FFTによって振幅スペクトルの計算を行った。解析にあたってはDC成分を除去し、FFTのタイムウィンドウ（データ長）は256分とした。また、解析データの開始時間を2分ごとにずらしながらスペクトルを計算し、サイスミック・セイシュの時間変化を推定した。このようにして算出したランニング・スペクトルの解析結果を図2(b)に示す。スペクトルの時間軸については、0から255分の解析結果を0分にプロットする方法で作図しており、よってデータが256分に満たない最後の255分については、計算を行っていない。

3. 芦ノ湖におけるセイシュ

3.1. 定常時の固有周期

セイシュは地震によって励起されるだけではなく、気圧変動や風などの気象的な要因や、湖に振動を与える外的要因によっても発生する。そのため、定常時においても特定の固有周期で水位が振動していることは中村・吉田（1901）によっても示されている。我々は現在の観測機器及び解析処理（FFT）によってこれを確認するため、静穏時のスペクトルを計算した（図3(a)）。

図3(a)は東北地方太平洋沖地震前の3月11日02:00から256分間のスペクトルである。図2(c)から(e)を見ると、気圧の変化もなく風も穏やかで、降水はなかったことがわかる。つまり、気象的な要因ではセイシュが発生しづらい環境下で、芦ノ湖の定常時に観測される固有周期を計算することに相当する。

この時のスペクトルからは、3つの顕著なピークと1つのやや大きな振幅が見られる。低周波側から見てみると、1つ目のピークは0.066 cycle/min（周期15.16分）、2つ目は0.152 cycle/min（周期6.58分）、3つ目は0.320 cycle/min（周期3.13分）である。1つ目の周期15.16分はNakamura and Honda（1911）によって示された T_1 に、2つ目の周期6.58分は T_2 、3つ目の周期3.13分は T_5 と非常に良く一致している。また、これらに比べて顕著ではないものの、0.223 cycle/min（周期4.48分）前後にやや大きな振幅がみられ、これは T_3 とほぼ調和的である。なお、ここでは T_4 （周期3.90分）に相当する周期の振動は、現れていない。

3.2. 東北地方太平洋沖地震時のセイシュ

芦ノ湖の水位変動は3月11日10時頃より高周波のノイズが目立つようになる（図2(a)）。図2(d)を見ると、

御殿場では同日7時頃から急激に風速を増し、10時頃から平均4 m/s以上を記録している。このことから、高周波ノイズは風によるものと思われる。水位変動はその後、14:51頃から大きく振動し、14:53～54にpeak to peakで約0.12 mの変動を記録している。これはこのデータ期間中で最大の振幅である。それに次いで15:08～09にかけて約0.10 mの振幅が観測されている。なお、1Hzサンプリングデータでは、14:52～54にかけて、約0.2 mの振幅が観測されている（図4(a)）。

これらの水位変化が観測された時間帯には、土砂崩れや土石流が芦ノ湖に流入したという報告はない。また、気圧の変動は小さく、風速は減少傾向にあることから、この水位変化は土砂の流入や気象的な要素によるものとは考えにくい。前述の通り、東北地方太平洋沖地震は14:46に発生し、その表面波は14:49頃から箱根火山を通過している（Yukutake *et al.*, 2011）。水位データに観測された0.12 mの大きな振幅は、東北地方太平洋沖地震発生時の広帯域地震計（防災科学技術研究所による都留菅野観測点、図4）による表面波の到着時刻から2～3分後であり、これが励起源であると考えられる。

水位変化の様相は、ランニング・スペクトルにも顕著に表れている（図2(b)）。FFTのタイムウィンドウ（256分）に注意しながら見ると、3月11日8時頃から風速の増大による高周波ノイズが若干ではあるが見られ、タイムウィンドウに14:51頃からの振動が入り始める10:30頃から0.3 cycle/min以上の高周波成分が明瞭になる。これは同日12:00のスペクトル（図3(b)）を見ると、高周波成分が卓越していることから分かる。それと同時に0.223 cycle/minや0.152 cycle/minの周波数を持つ成分が顕著になっている。14:51頃からは、タイムウィンドウ内は地震後の水位データのみになり、地震によって励起されたと考えられる成分の変化が顕著である。

ランニング・スペクトルの結果といくつかの時間におけるスペクトル（図3）をあわせて、特徴的な周波数についてみると、0.066 cycle/min（ T_1 、周期15.16分）の成分は、地震の影響を受けず、概ね一定の大きさを保っている。0.152 cycle/min（ T_2 、周期6.58分）については、地震時の水位変化がタイムウィンドウに入っているときは静穏時よりも大きくなっているが、その振幅は地震後短時間で戻っているように見える。0.223 cycle/min（ T_3 、周期4.48分）の成分は、静穏時に比べて地震後は明らかに増大しており、3月12日7時頃まで（地震後16時間程度）継続している。地震前後における0.320 cycle/min（ T_5 、周期3.13分）の成分の増大は最も顕著であり、その継続時間も3月12日11時頃まで（地震後20時間

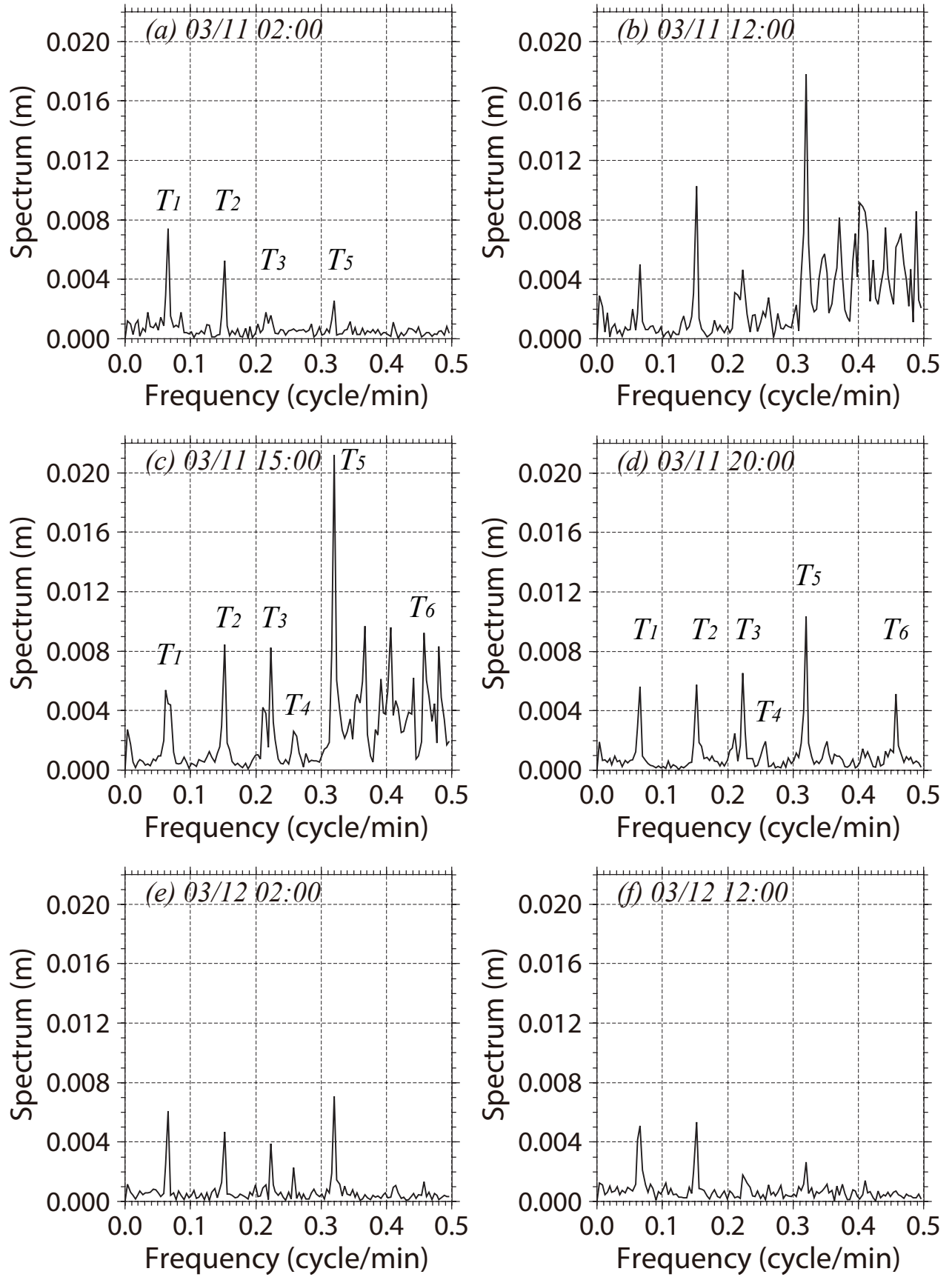


図3 振幅スペクトル。それぞれ、(a)2011年3月11日02:00、(b)12:00、(c)15:00、(d)20:00、(e)2011年3月12日02:00、(f)12:00から256分間のスペクトル。

Fig. 3. Snapshot of amplitude spectra. (a) 02:00 on March 11, 2011, (b) 12:00, (c) 15:00, (d) 20:00, (e) 02:00 on March 12, 2011, and (f) 12:00.

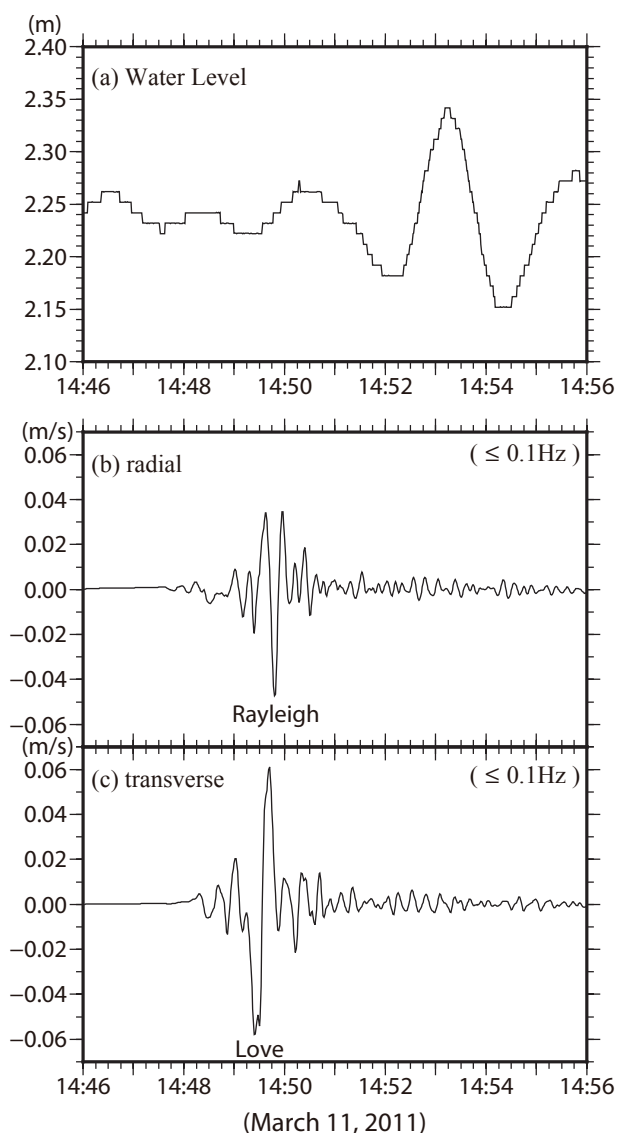


図4 (a)2011年3月11日14:46から10分間の芦ノ湖における水位観測結果(1秒値)。(b)と(c)は広帯域地震計による波形記録(Yukutake *et al.*(2011)を一部改編)。地震波形記録は、(独)防災科学技術研究所F-netの都留菅野観測点のデータから(b) radial成分と(c)transverse成分に変換した。

Fig. 4. (a) Water level observed at Lake Ashinoko (1 Hz sampling data for 10 minutes from 14:46 on March 11). (b) and (c) show observed velocity waveforms on the same time (Modified of Yukutake *et al.*, 2011). (b) Radial component and (c) transverse component.

程度)見られる。

これら定常時にも明瞭な T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_5 に加えて、地震後に顕著となった周波数成分がいくつか見られる。地震直後のスペクトルである図3(c)と静穏時のスペクトル図3(a)を比較しそれらの成分を抽出すると、0.258 cycle/min (周期 3.88 分)、0.367 cycle/min (周期 2.72 分)、0.410 cycle/min (周期 2.44 分)、0.457 cycle/min (周期 2.19 分)、0.480 cycle/min (周期 2.01 分)の5つのピークが地震後に発生している。これらのうち3つは短時間で消えているが、0.258 cycle/min (周期 3.88 分)、および、0.457 cycle/min (周期 2.19 分)の2つの成分は小さいものの、地震後も数時間から10数時間継続しているとみられる。0.258 cycle/min (周期 3.88 分)については、その周期から T_4 に相当すると考えられる。0.457 cycle/min (周期 2.19 分)については Nakamura and Honda (1911)では報告されていないが、ここでは T_6 としておく。

なお、上記では地震後のスペクトルの変化を論じているが、ここで言う地震とは、東北地方太平洋沖地震だけでなく、その余震や3月11日15:08に北伊豆断層帯北端部(箱根峠周辺)で発生したM4.8の地震も含まれている可能性がある。特に水位データには15:08~09にかけて複振幅で0.10 mの振幅が観測されているが、これは後者の地震によるものと考えられる。この両者の地震による水位変動を分離することは不可能であり、よってタイムウィンドウ(256分)とした本論のスペクトルの変化も両者の影響が含まれていると考えるのが自然であると思われる。ただし、北伊豆断層帯北端部の地震は、東北地方太平洋沖地震によって誘発された地震であることが指摘されており(Yukutake *et al.*, 2011; 原田ほか, 2012)、芦ノ湖へ与えるインパクトを考える上では2つの地震を一連の励起源と見なし、広い意味で東北地方太平洋沖地震によって芦ノ湖のサイスミック・セイシュが励起されたと指摘する。

4. 理論的に予測される周期

芦ノ湖のような閉鎖性水域では、湖の形状を矩形で近似し、矩形の面は鉛直壁で波が全反射すると仮定することによって、そこで発生するセイシュの固有周期 T が次式によって計算できる(Merianの式)。

$$T = \frac{2L}{\sqrt{gh}}$$

ここで L は矩形の長さ(湖の径)、 g は重力加速度(9.8 m/s²)、 h は水深を表す。つまり、湖の長さと水深を与えれば、固有周期のおおよその値が計算できる。

そこで我々は矩形の長さとお水深について、次のような仮定をした。芦ノ湖の形状とお水深の変化を考慮し長軸(北西―南東方向)の長さ $L_1 = 5500 \text{ m}$ 、短軸(北東―南西方向)の長さ $L_2 = 1600 \text{ m}$ とした (図 1(b))。水深については最深部で 41m 程度あるが、平均的な水深として $h = 20 \text{ m}$ とする。このようにパラメータを簡略化してセイシュの固有周期を求めた結果を表 1 に示す。

矩形の長軸を振動する場合 ($L_1 = 5500 \text{ m}$) に予測されるセイシュの固有周期は 13.10 分が得られる。これを基本振動とし、その 2 倍振動は 6.55 分、3 倍振動は 4.37 分、4 倍振動は 3.27 分、6 倍振動は 2.18 分となる。芦ノ湖の形状を荒く近似しているため、基本振動と T_1 は 2 分程度ずれているものの、その他の周期はそれぞれ T_2 、 T_3 、 T_5 、 T_6 の固有周期と非常によく一致している。また、矩形の短軸を振動する場合 ($L_2 = 1600 \text{ m}$) に予測されるセイシュの固有周期は、3.81 分が基本振動となり、これは T_4 の固有周期とほぼ一致する。このことから、 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_5 、 T_6 の固有周期は芦ノ湖の長軸方向における振動であり、 T_4 の固有周期は同湖の短軸方向の振動であることがわかる。

簡略化して計算したセイシュの固有周期と観測された静穏時および地震後のセイシュの固有周期を表 1 に示す。この表には Nakamura and Honda (1911)、および、鈴木 (1937) らの先行研究もあわせて示しているが、我々が求めた周期は鈴木 (1937) によって得られている結果と非常に調和的である。また、Nakamura and Honda (1911) の報告している周期については、我々の結果よりもやや周期が長いが、良く一致している。このわずかな差は、水深が 1m 程度変化したと考えれば説明が可能である。

5. まとめ

芦ノ湖では、東北地方太平洋沖地震後に最大で約 0.2m の振幅を持つ水位変化が観測された (1Hz データによる)。我々は、地震前および地震後の同湖の水位データについてスペクトル解析をすることによって、セイシュの固有周期には次のような特徴があることを明らかにした。

芦ノ湖の北西―南東方向における基本振動の固有周期は 15.16 分 (T_1) であり、固有周期 6.58 分 (T_2)、4.48 分 (T_3)、3.13 分 (T_5)、2.19 分 (T_6) は、その倍振動である。また、固有周期 3.88 分 (T_4) は芦ノ湖の北東―南西方向における基本振動である。

T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_5 は定常時にも発生している固有周期である。それらのうち、 T_1 は地震 (表面波) によるインパクトを受けても定常時とおおよそ同程度の振幅を持つ

のに対し、 T_3 、 T_5 の振幅は地震によって大きく増大している。また、 T_4 、 T_6 の周期は定常時には見られないが、地震によってのみ励起される。地震によって励起された振動は最大で 20 時間程度 (T_5) 継続している。

東北地方太平洋沖地震後に芦ノ湖で励起されたサイスミック・セイシュは上述の通りであるが、さらに近い場所で大きな地震が発生した場合には、地震波そのものの衝撃が大きく、また強振動により土砂崩れが発生し芦ノ湖に流入することも考えられる。2008 年 6 月 14 日に発生した岩手・宮城内陸地震の際には、地滑りによる土砂が荒砥沢ダムに流入し、目撃者の証言によれば 3 ~ 4m 程度の津波 (段波) が生じたことが報告されている (小田原ほか, 2009)。また、箱根火山活動が活発になった場合も同様に、土石流や火砕流などが芦ノ湖のセイシュを励起する可能性がある。それらの時の水位変化は今回よりも大きな波 (振幅) が予想されるため、海岸沿いにおける津波対策に準じるような防災対応を考えることも必要なのかもしれない。

謝辞

気象庁によるアメダス観測データを使用しました。また、(独) 防災科学技術研究所による F-net のデータを使用しました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 今村明恒・小平孝雄 (1932) 地動に因りて誘起せられたる蘆の湖のセイシュに就て, 地震 1, 4, 57-70.
- 原田昌武・明田川 保・伊東 博・本多 亮・行竹洋平・板寺一洋・吉田明夫 (2012) 2011 年東北地方太平洋沖地震によって誘発された箱根火山の群発地震活動, 地震 2, 64, 135-142.
- 中村清二・吉田 吉 (1901) 湖水ノ定常振動ニ就テ, 東京数学物理学会報告, 1, 115-123.
- Nakamura, S. and K. Honda (1911) Seiches in some lakes of Japan, *J. Coll. Sci. Imp. Univ. Tokyo*, 28, 1-95.
- 小田原 啓・板寺一洋・原田昌武 (2009) 2008 年岩手・宮城内陸地震現地調査報告, 温泉地学研究所観測日より, No. 59, 3-8.
- 鈴木武夫 (1936) 昭和 5 年 11 月 26 日北伊豆地震に伴へる蘆ノ湖の静振, 地震 1, 8, 331-346.
- 鈴木武夫 (1937) 昭和 5 年北伊豆地震に伴ひたる蘆ノ湖静振の解析 (I), 地震 1, 9, 205-215.
- 鈴木猛康 (2012) 2011 年東北地方太平洋沖地震で発生した西湖のサイスミック・セイシュ, 土木学会論文集 A1, 68(4), I_152-I_160.

宇野木早苗 (1959) 港湾のセイシュと長周期波について,
海岸工学講演会講演集, **6**, 1-11.

Yukutake, Y., Honda R., Harada M., Aketagawa T., Ito H., and
Yoshida A. (2011) Remotely-triggered seismicity in the
Hakone volcano following the 2011 off the Pacific coast
of Tohoku Earthquake, *Earth Planets Space*, **63**, 737-
740.