

# 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

鈴木 猛康<sup>1</sup>

<sup>1</sup>山梨大学工学部土木環境工学科 教授 地域防災・マネジメント研究センターセンター長  
(〒400-8511 山梨県甲府市武田4-3-11)  
E-mail:takeyasu@yamanashi.ac.jp

2011年東北地方太平洋沖地震では、牡鹿半島で水平方向に5.3mの地殻変動が観測されたのをはじめ、地殻変動は東北地方にとどまらず、関東、中部、そして近畿地方まで及んだ。この地震の後、山梨県の西湖では、湖面上のボートがゆっくりと1m程度の振幅で上下に振動し、湖岸では津波のような波が押し寄せ、魚や貝が岸に打ち上げられた。本論文では、この現象をサイスミック・セイシュと考え、西湖の近くの観測地震動に含まれる1分程度の長周期地震動成分を分析し、その卓越周期と西湖の閉鎖水域の形状に基づいて定義されるセイシュの1次固有周期とを比較している。さらに、大きな波を湖岸で観察した住民に対するインタビューによって、この波がセイシュの特徴を有していることを確認した。その結果、本論文では、この現象を西湖のサイスミック・セイシュによって説明できることを示している。

**Key Words :** *Seismic Seiche, The 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, Observed earthquake ground motion, Predominant period, Saiko Lake*

## 1. はじめに

セイシュ (Seiche) は、風や気圧変動によってスイスのレマン湖の水面に発生する定常波に対して、1895年にForelによって命名された<sup>1)</sup>。その後、セイシュは、湖や内湾のような閉鎖水域の形状に依存した共振周期を有するあらゆる定常波を表す用語として拡張されることとなった。一方、サイスミック・セイシュは、1950年8月15日アッサム地震によってノルウェーと英国で観測された湖の水面変動の現象に対して、1955年にKvaleが初めて命名したとされている<sup>1)</sup>。アッサム地震とは、インドのアッサム地方で発生したMw8.6の巨大地震である。

2011年3月11日東北地方太平洋沖地震は、M9.0の巨大地震であり、この地震による地殻変動は北米プレート上にとどまらず、ユーラシアプレート上の中部、さらには近畿地方に至るまで、太平洋に向かって陸地が水平方向に移動したことが、国土地理院によって報告されている<sup>2)</sup>。このような地殻変動に伴って、震源過程によって発生する長周期振動や伝搬過程で発生する数秒から10秒程度の表面波よりも、さらに長い周期の表面波が発生した。我が国で発生したサイスミック・セイシュによる湖や内湾の顕著な水面変動は、筆者の知る限り報告されていないが、アッサム地震、1964年のアラスカ地震 (Mw9.2) のような巨大地震では、震源の遠方において湖や内湾

でサイスミック・セイシュが観測されている。したがって、東北地方太平洋沖地震で、我が国や外国においてセイシュが発生しても不思議ではない。

この地震により、富士五湖の一つである西湖において、地震の直後にボート上の釣り客がボートがゆっくりと上下するのを体験し、また湖水が湖岸の溶岩塊を駆け登るのを観察した<sup>3)</sup>。また、西湖の湖畔の住民が、砂浜で小魚や貝が打ち上げられ、津波のような大波を目撃した。本論文は、この現象がサイスミック・セイシュに起因すると考え、西湖に最も近いk-netの本栖観測サイトの地震動を用いて、この現象を分析した結果について報告する。

## 2. サイスミック・セイシュ

サイスミック・セイシュに関する最初の記述は、1755年11月1日ポルトガルのリスボンで発生した地震 (Mw8.5~9.0) であり、スコットランドのLomond, Long, Katrine, Nessの各湖、英国の内湾や池で、異常な波に関する現象が雑誌に掲載されていることが報告されている<sup>1)</sup>。さらに、Kvaleは、この地震によるセイシュについて、ノルウェーのフィヨルドや湖で29件、英国のダムで4件報告している<sup>1)</sup>。震源が海底であったため、大津波が発生して約1万人が死亡した他、死者は5~6万人とされている。

1955年アッサム地震 (Mw8.6) では、ノルウェー、英国でセイシュが観測されている。1964年3月28日に発生したアラスカ地震 (Mw9.2) では、北米の850か所、オーストラリアの4か所で、湖や河川の水面変動が観測された。McGarr and Vorhisは、このサイスミック・セイシュを、この地震によって伝搬した周期5~15秒の表面波によって説明している<sup>1)</sup>。

最近では、2004年スマトラ沖地震の際、インド、バングラディッシュ、ネパール、そしてタイでも、セイシュの発生が報告されている<sup>4)</sup>。以上のように、サイスミック・セイシュは、巨大地震の際に、震源域より遠方、場合によっては数千kmも離れた湖、ダム、貯水池、そして内湾 (フィヨルドを含む) 等の閉鎖水域で発生し、その周期は数秒~10分程度と非常に長いことを特徴としている。

底面と左右の鉛直壁、そして自由水面を有する矩形断面の閉鎖水域に発生する定常波としてのサイスミック・セイシュは、以下のように説明することができる。鉛直壁では波が完全反射され、完全重複波が形成される。鉛直壁の位置は、重複波の腹の位置と一致する。この境界条件を満たすのは、両端が鉛直壁の場合、水域の長さ $l$ が1/2波長の倍数のときである。セイシュは長波であるので、伝搬速度 $C$  (m/sec) は、

$$C = \sqrt{gh} \quad (1)$$

で与えられるので、その周期 $T$ (sec)は、(2)式で与えられる。

$$T = \frac{L}{c} = \frac{L}{\sqrt{gh}} \quad (2)$$

ここで、両端が鉛直壁の場合、

$$L = 2l/n, N = 1, 2, 3, \dots \quad (3)$$

一端が鉛直壁で他端が自由な場合、

$$L = 4l/n, N = 1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

なお、地震に起因するかしないにかかわらず、湾や湖に斜面崩壊等による大量の土砂が短時間で流れ込むと、津波と同様な現象が起こり、その結果、湾や湖でも高波が発生する。古くは島原大変肥後迷惑で知られた眉山の崩壊による1792年に発生した有明海の津波がある。また、1990年フィリピン・ルソン地震では、Baguioの東にあるAmbuklaoダムで、貯水池近くの斜面が崩壊し、大量の土砂が貯水池に流れ込み、貯水池全体で最大約5mの津波が約30分間続いたことが報告されている<sup>5)</sup>。このような、斜面崩壊による津波ではなく、明らかに長周期地震動による共振によって、湾あるいは湖の閉鎖水域で水面が周期的に変動することを、本論文ではサイスミック・セイシュと定義する。

### 3. 東北地方太平洋沖地震で観察されたサイスミック・セイシュ

#### (1) 西湖のサイスミック・セイシュ

平成23年3月11日14時46分に東北地方太平洋沖地震が発生し、死者15805人、行先不明4040名 (9月22

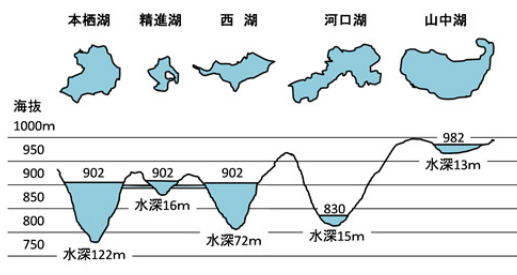


図-1 富士五湖の形状と湖面の高さの比較



写真-1 岸に打ち上げられたボート



写真-2 西湖の北岸に打ち上げられた魚と貝

日現在) の犠牲者を出した東日本大震災に至った。

この地震により、富士五湖の一つである西湖では、波浪とは明らかに異なる周期が長く、底をさらうような高波が観察された。ボートで釣りをしていた会社員は、「突然、目の前の水位が上がり始めた。ザザーという音とともに湖水が湖岸の溶岩塊を登った。波というより湖岸の水が1mくらい上がったように見えた。波ならず引くが、このときは水位がゆっくり上がり、ゆっくり下がった。」と語っている<sup>2)</sup>。

いつも西湖で釣りを楽しんでいる高齢の男性は、地震発生の際には西湖の北岸中央に位置する駐車場にいたが、大きな揺れを感じたため、湖に浮かべておいたボートが気になって戻ったところ、大きな波が引いていくところで、砂浜に多くの小魚や貝が打ち上げられ、ボートが浜へと移動しているのを見つけた (写真-1)。男性はすぐに湖畔でレストランを経営する甥を車で呼びに行き、浜に戻ったところ、二人は大きな波がゆっくり浜を駆け登り、戻ってい



くのを目撃した。この現象を目撃したこの二人にインタビューしたところ、①湖が沖合50m程度まで濁っていた、②通常の波とは違い、ゆっくりと水面が盛り上がるように、高波が移動した、③引き波を見た後は、大波は確認していない、等の証言が得られた。

写真-1と写真-2は、そのレストランを経営する男性が撮影した浜の写真である。通常は砂の中に生息しているはずの大きな貝が打ち上げられており、岸辺に漂っているはずの枯れた草が砂浜に打ち上げされていることがわかる。二人は砂浜で跳ねる魚や大きな貝を、急いで湖に戻したと語っている。二人にお願いして、3月11日と同様に現地を移動してもらった。その結果、地震の後、高齢の男性が駐車場から軽ワゴン車で北岸西の砂浜に約2km移動するのに、地震の揺れが終息してから少なくとも5分間程度要した。また、この男性が砂浜から70～80m離れたレストランへ軽ワゴン車で行って甥に事情を説明し、甥をその車に乗せて砂浜に引き返すのに、2分程度要した。

以上より、高齢の男性は高波を2度目撃しており、1度目は地震動の終息から5分程度経ってから、2度目はその約2分後であった。1度目に見た波が、第1波であったかどうかかわからないが、跳ねている魚を湖に戻したことから、この男性が目撃した第1波は、セイシュの第一波あるいは第二波ではないかと思われる。また、セイシュの周期は、1分あるいは2分程度であろうと推測された。

なお、西湖の北岸ならびに南岸の東側には、土石流と急傾斜地の特別警戒区域が多く分布するが、地すべりや崖崩れは発生しておらず、湖岸の道路にも何ら異常は報告されていない。

西湖は富士五湖の一つである。しかし、その他の4つの湖では、このような高波は観察されていない。図-1は平面形状と水深に関する富士五湖の比較について、国土交通省が模式的に整理した図<sup>6)</sup>を加筆修正したものである。図のように、西湖と本栖湖の水深が、それぞれ約70m、120mであるのに対して、残りの3つの湖の水深は10～20mと浅いことがわかる。水深の浅い3つの湖では、セイシュが発生したとしても、湖面変動は小さいと考えられる。西湖と本栖湖の平面形状には大きな相違があり、西湖が東西方向に長く、比較的南北方向には一定の幅を有しているのに対して、本栖湖は湖岸が入り組んでいる。

図-2は電子国土から、西湖の等水深線図を抽出したものである。図中の青線は、水深約65mの等水深線を示しており、青線で囲まれた緑の水域は、平均水深約70mの等水深水域と見なすことができる。図のように、東北東方向を軸とした幅約350m、長さ750mにわたる約70mの等水深水域と北東方向を軸として幅約250mにわたる約70mの等水深水域が存在している。どちらも、南側は溶岩のほぼ鉛直な壁であり、その他の領域境界も水深が急激に浅くなっているので、閉鎖水域と見なし、以後の分析を行う。図中の矢印は、セイシュによる湖面の変動が発生したと思われる方向を示している。

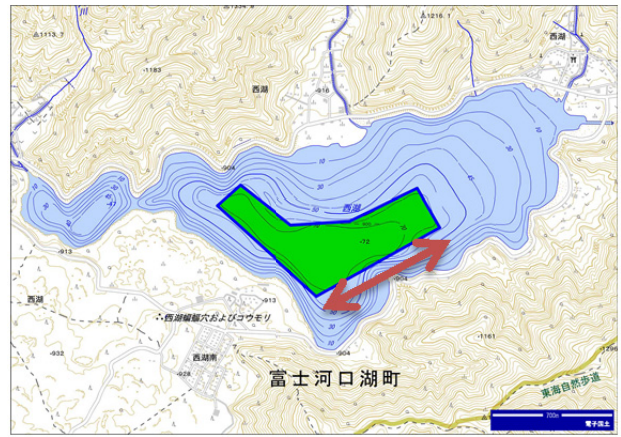


図-2 西湖の等水深線図（電子国土より）

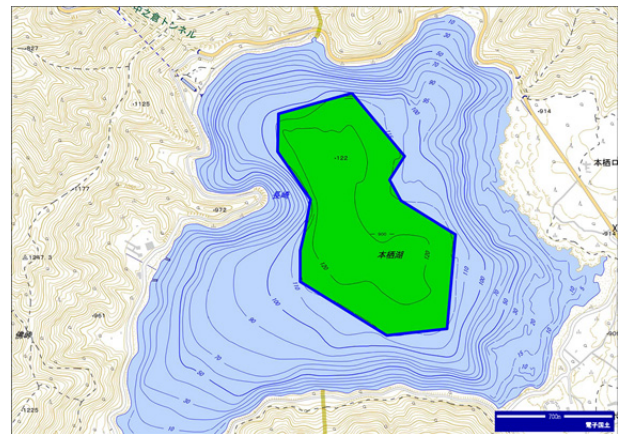


図-3 本栖湖の等水深線図（電子国土より）

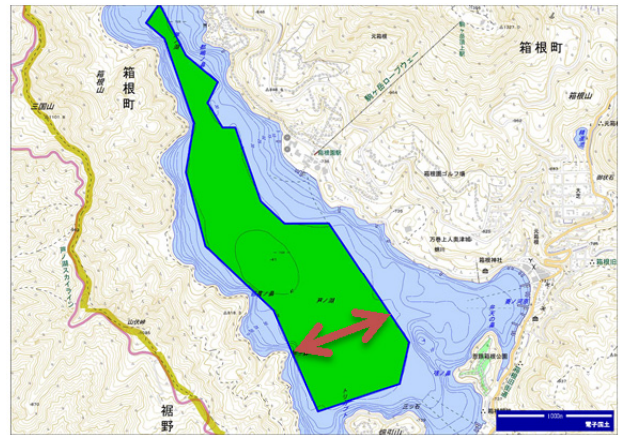
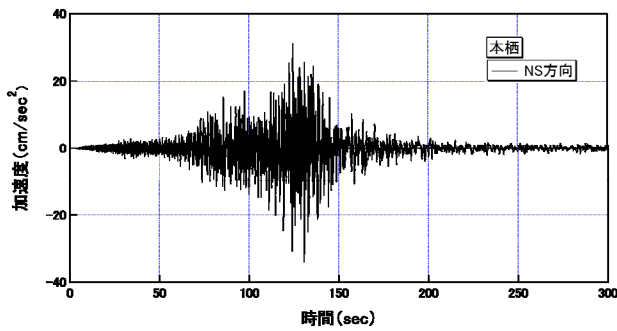
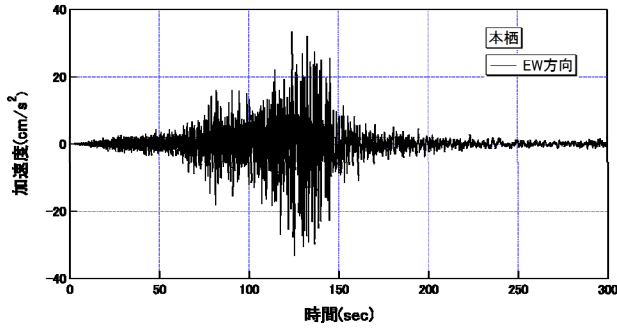


図-4 芦ノ湖の等水深線図（電子国土より）

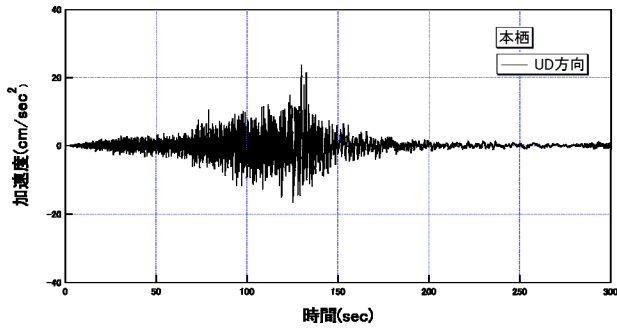
一方、図-3は本栖湖の等水深線図を示している。本栖湖の最大水深は122mであり、西湖よりも一段と深い。西湖について行ったと同様に、約110mよりも深い水深の領域を赤色で囲ってみた。110m～最大水深までの水域は、面積は西湖よりも広いが、湖岸の入り組んだ形状を反映させて、水域の形状も複雑で、西湖のように長方形の閉鎖水域は存在しない。したがって、西湖では、図-2に示す等水深の水域、すなわち矩形断面の閉鎖水域に起因する固有振動であるサイスミック・セイシュが発生しやすいが、本栖湖では共振が発生しにくい水域の形状であった。



(a) 加速度 NS 方向成分

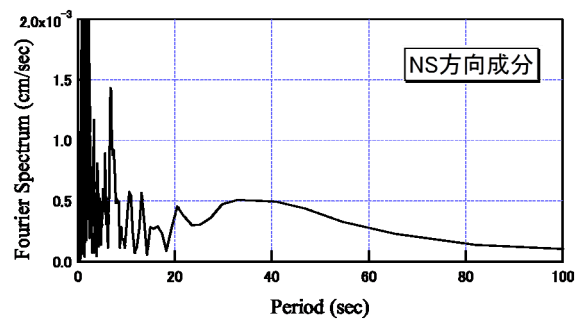


(b) 加速度 EW 方向成分

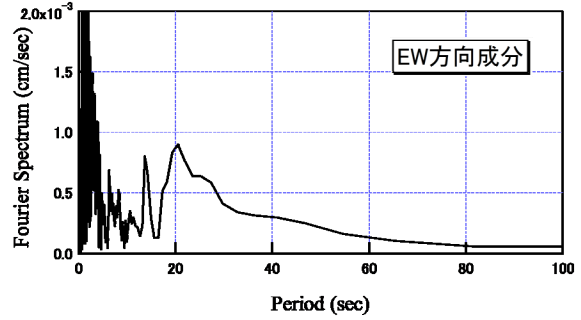


(c) 加速度 UD 方向成分

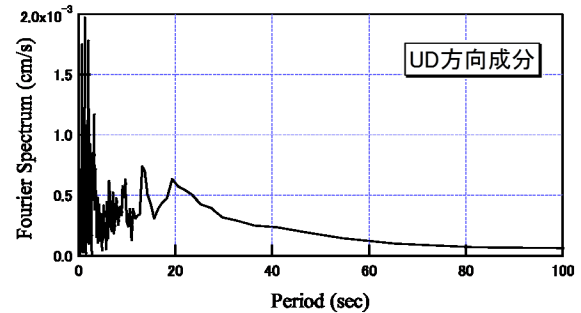
図-5 k-net 本栖観測サイトの観測地震動



(a) NS 方向成分



(b) EW 方向成分



(c) UD 方向成分

図-6 観測波のフーリエスペクトル

と推測した。

## (2) 芦ノ湖のサイスミック・セイシュ

神奈川県芦ノ湖でも、2011年東北地方太平洋沖地震の際のセイシュが観察され、その動画が3種類 YouTubeに投稿されて公開されている<sup>7)-9)</sup>。投稿された3つの動画の投稿者は同一人物である。動画には、波が岸をゆっくり遡上する様子が、短時間であるが記録されている。また、水は砂浜に仮置きした貸ボートを通り越し、貸ボートの看板を倒して通路まで達した形跡があることから、波の高さは50cm~1mであったと推測された。砂浜上に残された痕跡が、動画の撮影される前に、既に2度は高波が襲来したことを示していた。

電子国土から芦ノ湖の等水深線図を抽出して、図-4に示した。芦ノ湖については、水深約40mの水域を青線で囲んでみると、東北東方向を軸として、幅幅700m~1000mの等水深の閉鎖水域が広く分布していることがわかる。図中には、この閉鎖水域で発生するセイシュによる湖面変動の方向を示している。この方向は、西湖の湖面変動の方向とほぼ一致しており、さらに、国土地理院によって計測された山梨

県における地殻変動の方向とも一致している。本論文では、芦ノ湖に関する詳細な検討は行わないが、芦ノ湖のサイスミック・セイシュの存在は、西湖のサイスミック・セイシュを説明する上でも、重要な事実を提示している。

## 4. 本栖観測サイトの地震動

### (1) 観測波形

本栖湖の北東約1kmの地点にk-net本栖観測地サイトがある。この観測サイトから西湖までの水平距離は約6kmである。したがって、本栖観測サイトで観測された地震動は、西湖の湖底における入力地震動とほぼ等しいと言える。そこで、2011年東北地方太平洋沖地震における本栖観測サイトの観測地震動を分析することにより、西湖におけるセイシュについて説明を試みることにした。図-5は、k-net本栖観測サイトで観測された3方向成分の加速度波形である。図のように、NS（南北）、EW（東西）方向とも最大加速度は30cm/sec<sup>2</sup>程度、UD（上下）成分は10cm/sec<sup>2</sup>程度であった。主要動が2分間程度と長く、



波形をよく見ると、水平方向の加速度波形には、数十秒の長周期成分が含まれているように見える。  
 (2) フーリエスペクトル

図-6は本栖観測サイトの観測地震動の3方向成分のフーリエスペクトルを、横軸を周期 (Period) として示したものである。NS方向成分のフーリエスペクトルには、5~20秒の間に3つの明瞭なピークがあり、さらに20秒、そして約40秒をピークとする広い周期帯で、長周期成分が存在することがわかる。これに対して、EW方向成分ならびにUD方向成分のフーリエスペクトルの長周期成分には、NS方向と同様の20秒のピークが認められるが、このピークは周期とともになだらかに低減し、NS方向成分に見られる40秒以上のピークは存在しないことがわかった。

### 5. 長周期地震動とセイシュ

西湖のサイスミック・セイシュを説明するため、k-net本栖観測サイトで観測された地震動の長周期成分について考察する。図-7は周期50秒以上の長周期成分の加速度時刻歴波形を、NS方向、EW方向、そしてUD方向に分けてプロットしたものである。加速度の絶対値としてはNS方向で最大0.2cm/sec<sup>2</sup>、EW方向、UD方向で最大0.1cm/sec<sup>2</sup>と小さいが、50~60秒の単一波の波形を呈していることがわかる。また、この長周期振動は、観測記録の300秒の後でも継続していることが推測される。

図-8に50秒以上の長周期地震動の変位波形のNS方向成分を示す。長周期地震動の最大加速度は0.2cm/sec<sup>2</sup>にも達しないが、最大変位は両振幅で45cmと大きい。国土地理院によるGPS観測によれば<sup>2)</sup>、山梨県でも3月11日の本震の後、約10cmの東西方向の地殻変動が観測されており、地殻変動と長周期地震動の変位のオーダーが一致している。

図-9に50秒以上のNS方向成分とUD方向成分の時刻歴波形を重ね合わせてプロットした。図のように、NS方向成分はUD方向成分に対してやや位相が進んでいるが、両波形の位相差は、全時刻にわたってほぼ一定であることがわかる。そこで、図-7に示した加速度の周期50秒以上の長周期成分について、粒子軌跡を図-10のように描いてみた。図-10のNS方向成分~UD方向成分ならびにEW法制成分~UD方向成分の粒子軌跡は、回転方向が一定の楕円軌道を描いている。一方、NS方向成分~EW方向成分の粒子軌跡は、楕円を描くことなく、ほぼ直線である。したがって、50秒以上の長周期の加速度成分は、Rayleigh波の性質を有していると言える。

図-2に示した西湖の閉鎖水域に、(2)式で与えられるセイシュの1次固有周期を当てはめると、

$$T = \frac{2 \times 750}{\sqrt{9.8 \times 70}} = 55 \text{ (sec)} \quad (5)$$

ページは打たない

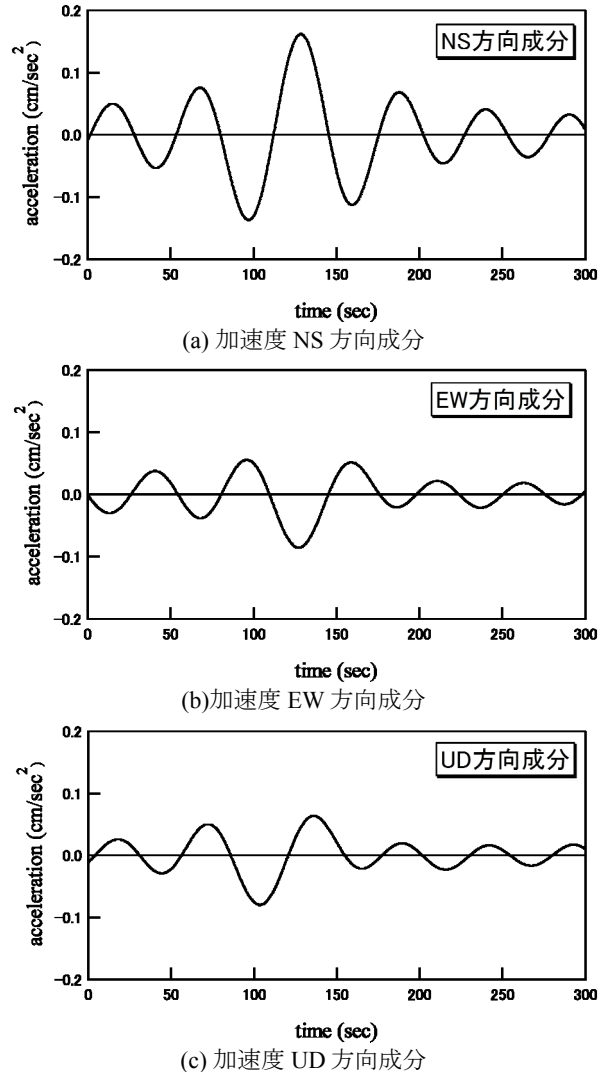


図-7 周期 50 秒以上の長周期成分

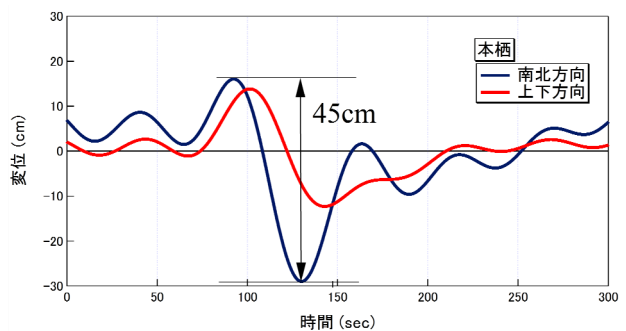


図-8 長周期成分の変位波形

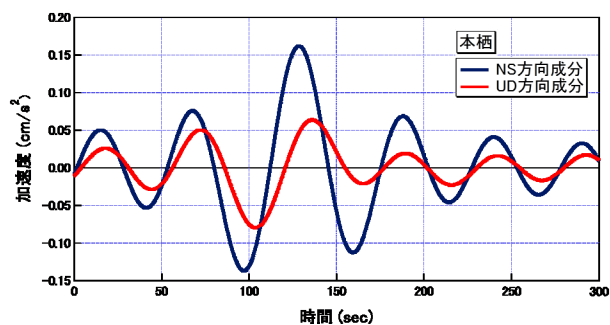


図-9 NS成分とUD成分の重ね合わせ

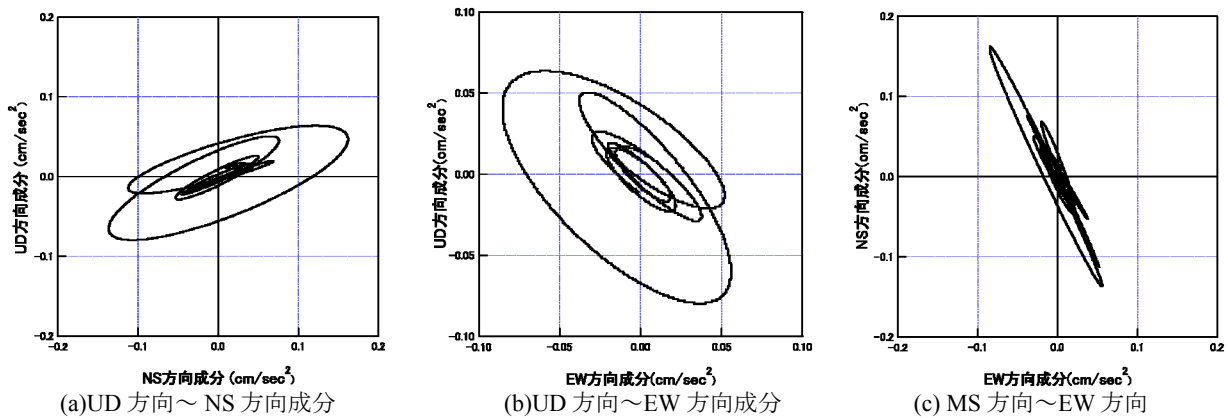


図-10 周期50秒以上の加速度長周期成分の粒子奇跡

となり、この周期は観測地震動の卓越周期（50～60秒）ならびにセイシュの目撃者の証言（1分あるいは2分）と一致することを確認した。

## 6. まとめ

2011年東北地方太平洋沖地震の際、山梨県の富士五湖の一つである西湖で、津波のような現象が観察され、魚や貝が岸に打ち上げられた。本論文では、この現象をサイスミック・セイシュと考え、西湖近くのk-net本栖観測サイトの観測地震動に含まれる50～60秒の長周期地震動成分を分析した。その結果、この長周期地震動の最大変位は両振幅で45cmに達しており、Rayleigh波の性質を有する表面波であることがわかった。一方、西湖の湖底の形状に基づいて算定されるセイシュの1次固有周期は55秒であることがわかった。さらに、神奈川県のアサノ湖でも同様な長周期の高波が観察されていた。以上より、西湖で観察された津波に似た現象を、サイスミック・セイシュと結論づけた。

なお、周期50～60秒の長周期地震動が、どのような振幅で何回入力されると、西湖のサイスミック・セイシュが発生するかについては、模型振動実験あるいは数値解析によるさらなる検討が必要であり、

今後の課題である。

## 参考文献

- 1) McGarr, A. and Vorhis, R. C.: Seismic Seiches, *U. S. Geological Survey Professional Paper, 544-E, pp.196-236, 1965.*
- 2) 国土地理院：平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震に伴う地殻変動について <http://www.gsi.go.jp/common/000059672.pdf>（最終アクセス日：2011年9月23日）
- 3) <http://sankei.jp.msn.com/affairs/news/110419/dst11041914210030-n1.htm>（最終アクセス日：2011年9月23日）
- 4) <http://en.wikipedia.org/wiki/Seiche>（最終アクセス日：2011年9月23日）
- 5) 土木学会：1990年フィリピン・ルソン地震被害調査報告, pp.73-75, 1993.
- 6) 国土交通省中部地方整備局富士砂防事務所：富士山噴火を物語る個性豊かな湧水湖, [http://www.cbr.milt.go.jp/fujisabo/fuji\\_info/mamechisiki/b04/index.html](http://www.cbr.milt.go.jp/fujisabo/fuji_info/mamechisiki/b04/index.html)（最終アクセス日：2011年9月23日）
- 7) <http://www.youtube.com/watch?v=9FwmOhLrW-8>（最終アクセス日：2011年9月23日）
- 8) <http://www.youtube.com/watch?v=vOLEpiTVpAo>（最終アクセス日：2011年9月23日）
- 9) <http://www.youtube.com/watch?v=-gziFI5zeQs>（最終アクセス日：2011年9月23日）

## SEISMIC SEICHE OCCURRED AT SAIKO LAKE DUE TO THE 2011 OFF THE PACIFIC COAST OF TOHOKU EARTHQUAKE

Takeyasu SUZUKI

A phenomenon similar to a tsunami was observed by anglers and an inhabitants at Saiko Lake, which is one of five lakes located on the foot of Mt. Fuji. In order to clarify the mechanism of this phenomena, the author examined earthquake ground motions observed near the lake. As a result, surface wave exhibiting the nature of Rayleigh wave with predominant period ranging from 50 to 60 seconds in the observed motion coincided with the resonant period of closed water body of Saiko Lake. Then, the author concluded that the phenomenon was seismic seiche.