

水月湖ボーリングコアを用いた天正地震 (AD 1586) 前後の 湖底堆積物の分析

齋藤めぐみ¹⁾ 山田和芳²⁾ リチャードスタッフ³⁾
中川毅⁴⁾ 米延仁志⁵⁾ 原口強⁶⁾
竹村恵二⁷⁾ クリストファーラムジー³⁾

An Assessment of the Magnitude of the AD 1586 Tensho Tsunami Inferred from Lake Suigetsu Sediment Cores

Megumi SAITO-KATO¹⁾, Kazuyoshi YAMADA²⁾, Richard A. STAFF³⁾,
Takeshi NAKAGAWA⁴⁾, Hitoshi YONENOBU⁵⁾, Tsuyoshi HARAGUCHI⁶⁾,
Keiji TAKEMURA⁷⁾ and Christopher BRONK RAMSEY³⁾

[Received 10 November, 2011; Accepted 31 January, 2013]

Abstract

Sediment cores from Lake Suigetsu, Japan, reveal the absence of seawater intrusion into the lake caused by the historically documented tsunami of AD 1586 (Tensho Tsunami). A high-precision chronology of the cores established by Bayesian modeling radiocarbon determinations enables us to ascertain the precise position of the historical event in the sediment depth. Diatom analysis of the core shows that a diatom assemblage dominated by freshwater taxa persisted through the period. This makes a clear contrast with the core section around AD 1664 when the lake was artificially connected to the sea by a channel, and the subsequent intrusion of seawater was clearly recorded in the sediment cores by the occurrence of marine diatom fossils.

Key words : Lake Suigetsu, Wakasa Bay, Tensho Tsunami, radiocarbon dating, Bayesian modeling, diatom analysis, varve

キーワード : 福井県水月湖, 若狭湾, 天正津波, 放射性炭素年代測定, バイズモデル, 珪藻分析, 年縞

¹⁾ 国立科学博物館地学研究部

²⁾ 早稲田大学人間科学学術院

³⁾ オックスフォード大学考古学美術史学研究所

⁴⁾ ニューカッスル大学地理学教室

⁵⁾ 鳴門教育大学大学院学校教育研究科

⁶⁾ 大阪市立大学大学院理学研究科

⁷⁾ 京都大学大学院理学研究科

¹⁾ Department of Geology and Paleontology, National Museum of Nature and Science, Tsukuba, 305-0005, Japan

²⁾ School of Human Science, Waseda University, Tokorozawa, 359-1192, Japan

³⁾ Oxford Radiocarbon Accelerator Unit, Research Laboratory for Archaeology and the History of Art, University of Oxford, Oxford OX1 3QY, UK

⁴⁾ Department of Geography, University of Newcastle, Newcastle upon Tyne NE1 7RU, UK

⁵⁾ Graduate School of Education, Naruto University of Education, Naruto, 772-0051, Japan

⁶⁾ Department of Biology and Geosciences, Osaka City University, Osaka, 558-8585, Japan

⁷⁾ Beppu Geothermal Research Laboratory, Faculty of Science, Kyoto University, Beppu, 874-0903, Japan

I. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震では、大きな津波が発生し、それによって甚大な被害が発生した。この災害をふまえ、過去に起こった津波の規模を推定し、それに見合った防災対策を講じることが日本列島各地において急務となっている。本報告では、西暦1586年(天正13年)天正地震の際に若狭湾沿岸に被害をもたらしたとされる津波がどの程度の規模であったのかを検証するために、福井県の若狭湾岸に位置する水月湖から採取されたボーリングコアの堆積構造、年代モデル、およびそこに含まれる珪藻化石群集を検討した。

歴史記録によれば、天正津波を引き起こしたとされる天正地震の揺れの範囲は、東海から北陸地方におよぶとされ、岐阜県飛騨地方での地震被害が大きかったことを伝えている(宇佐美, 1996)。その一方で、戦国時代から江戸時代初期の京都吉田神社神主である吉田兼見は、その著書『兼見卿記』のなかで、天正13年(西暦1586年)11月29日に「子刻大地震、屋宅厩ユリ壊躰也、(後略)」と大地震があったことを記述し、翌30日に地震による被害状況を述べるなかで、「(中略)丹後・若州・越州浦邊波ヲ打上在家悉押流、人死事不知数云々、(後略)」と丹後・若狭・越州の湾に波が打上げ家屋がごとごとく押流され、数知れずの死者が出たことを伝え聞いたと書いている。この史料および欧州に伝わった伝承(フロイス『日本史』など)自体の信憑性は低いとされる(松浦, 2012)一方で、歴史的な文書とは独立した証拠をもって過去の地震津波を検証することも現代における課題である。本研究では水月湖ボーリングコアを用いて、歴史記録に書き残されているこの1586年天正津波が若狭湾沿岸の水月湖に到達した堆積学的な証拠が認められるかどうかを検討することとした。

II. 研究地点の特徴

水月湖は福井県の日本海岸に位置する汽水湖であり、湖面の標高は0mである。これまでの研究においても、自然災害や人為的な地形改変の

堆積学的な証拠が検討されてきた。福沢ほか(1994)は、堆積物の粒子比重と鉱物組成を検討し、そのスパイク的な異常値と地震や洪水、人為的な地形改変との関連を議論している。それによれば、深度55cm以浅の13層準が西暦1449年以降の地震と、15層準が西暦1633年以降の洪水と、6層準が西暦1642年以降の人為的な地形改変と対比される可能性が指摘される。しかしながら、これらのイベント層準と歴史記録との対応関係において確実性が高いのは、1662年寛文地震とその直後の1664年の人工水路(浦見川)開削による水月湖内への海水の浸入のみである。本研究では、より精度を上げて堆積年代を推定し(Staff *et al.*, 2011; Nakagawa *et al.*, 2012)、1586年天正地震の際の津波堆積物の検出を試みた。なお、水月湖が汽水湖になったのは1664年に人工的に海水が導入されたためであり、1586年の天正地震当時は淡水湖であったことが知られている(Masuzawa and Kitano, 1982; 福沢ほか, 1994など)。

水月湖を津波の検出計として見た場合、湖の北側および西側は標高100~400mほどの山に囲まれているが、北東側は平野および隣接する湖を介して海に通じており、津波がここを通った場合の海岸から水月湖縁までの道のりは4.8kmである(図1)。2万5千分1地形図(三方)によれば、この想定される津波の経路上の最高地点は気山地域であり、その現在の標高は10mを超えることが読みとれる(図1)。水月湖東岸の日向断層は1662年寛文地震時に約3mの上下変動が認められており(小松原, 2006)、日向断層より東側の上盤側にある気山地域も同程度隆起をしたと考えるのが自然である。したがって、1586年天正地震の際には、この最高地点の標高は10m~10数mであったと推測される。すなわち、海岸から4.8km以上陸上あるいは浅い湖(久々子湖)を遡上する津波であれば海浜砂や低湿地の堆積物などを運搬し水月湖の堆積物中に痕跡を残した可能性が高いが、それより小規模の津波については水月湖のデータからその有無を検証することはできない。水月湖に津波の記録があった場合、海岸

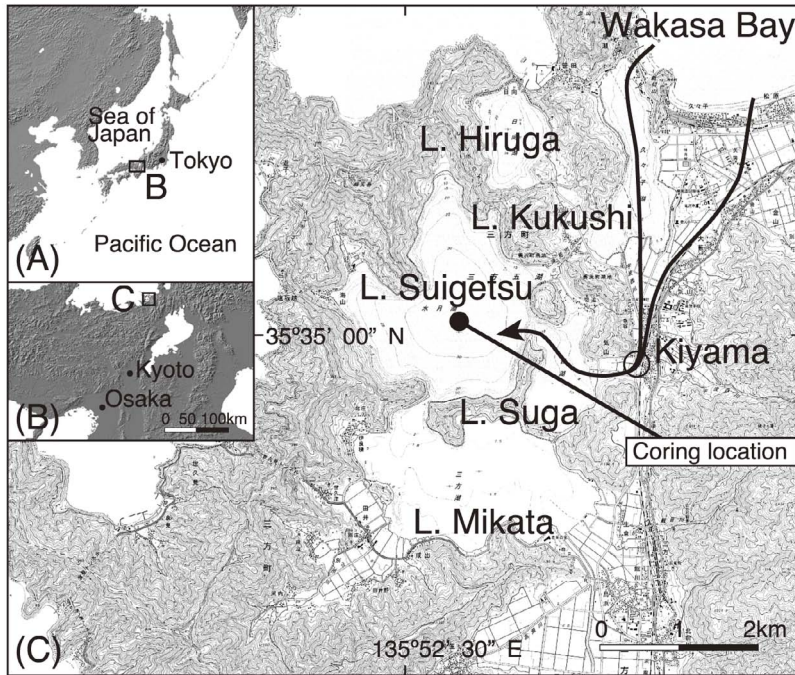


図 1 試料採取地点と予想される津波の浸入経路。久々子湖を通る経路および平野の東縁を通る経路を矢印で示した。どちらも旧気山川河道の気山地域と菅湖を通り、経路上の最高地点は白丸で示した辺りで標高 10 m の等高線より上にある。(C) は国土地理院発行 2 万 5 千分 1 地形図「早瀬」「三方」「西津」「常神」より作成。

Fig. 1 Locality maps showing the SG06 coring site in Lake Suigetsu, Fukui prefecture, with potential paths of the AD 1586 Tensho tsunami (arrow). An open circle shows the highest area (> 10 m above sea level) on the paths. Topographical map (C) is based on topographical maps (Hayase, Mikata, Nishitsu, Tsunekami) published by Geospatial Information Authority of Japan.

線の位置を現代と同じとするならば、得られる結論は、津波が少なくとも 4.8 km 以上内陸に及んだとする下界（下限ではないことに注意）推定である。同様に、水月湖に津波の記録がなかった場合に得られる結論は、津波が 4.8 km 内陸には及ばなかったとする上界（上限ではない）推定である。

III. 研究に用いた堆積物試料

水月湖からは数多くのボーリングコアが採取されているが（例えば, Kitagawa and van der Plicht, 1998; Fukusawa *et al.*, 2002; Yasuda *et al.*, 2004; Katsuta *et al.*, 2007), もっとも連続性が高いのは、日英独の国際研究グループによって 2006 年に湖心部より採取された SG06 と呼ばれ

るコアである（図 1）。SG06 は少なくとも約 13.5 万年前の層準にまで届く長尺のコアであり、放射性炭素年代測定と年縞の計数による詳細な年代決定が行なわれて、古気候・古環境アーカイブとして、また放射性炭素年代較正モデルを改善するための有力な材料として、世界的にも注目されている (Nakagawa *et al.*, 2012)。SG06 コアのうち、完新世と晩氷期に対応する部分から得られた 180 点以上の放射性炭素年代の分布を詳細に検討したところ、コアの連続性はきわめて高く、堆積が一時的に中断したような証拠はいっさいみられないことがわかった (Staff *et al.*, 2011)。すなわち SG06 コアは、津波によって特徴的な碎屑物が供給されたり、湖沼生態系の変化が引き起こされたりした場合、その記録を堆積相や微

化石記録のなかに欠落なく保持している可能性が高い。なお、シンウォールサンプラーを用いた2006年の機械ボーリングでは、含水率の高いコア最上部を湖底表層から完全に採取することは不可能であった。この問題を補うため、2011年1月に凍結フィンガー法を用いて新たに数十cm程度の不攪乱コアを湖底表層から採取し、堆積構造の対比によってSG06コアと連結させた(図2)。これにより、現在(西暦2011年)から遡るより正確な年代モデルの構築が可能になった。

水月湖2006年コア(SG06コア)のコンポジット深度24~120cmにおける堆積物の層相は、全体としてシルト質粘土層からなり、洪水の堆積物と考えられる層厚数mm程度の灰色粘土層を挟する(図2)。コアの最上部は、この灰色粘土層および黄褐色の珪藻質ラミナ、あわせて8層準を用いて、2011年採取の凍結コアと非常によく対比された。SG06コアにおいて未採取の表層堆積物は、層厚10cm程度と見積もられた。本研究では、SG06コアのコンポジット深度79~149cmを1586年天正津波の検討のために用いた。深度90cm付近には層厚4cmの暗色層があり、福沢ほか(1994)との堆積相対比にもとづけば、1662年の寛文地震の時に形成された地震性タービダイト層であると推定される。この粘土層の直上から、顕著な葉理構造が観察されて、寛文地震直後の1664年の人工水路開削にともない海水が流入して水月湖の湖心部底層に無酸素水塊が存在するようになったためであると解釈される。コンポジット深度109cm付近には、陸上大型植物片が多く含まれていたが、一般に水月湖堆積物には陸上大型植物片が多く含まれており(Nakagawa *et al.*, 2012)、陸上大型植物片が多少多く含まれているだけを根拠に何らかのイベント堆積物を認定することはできない。この層準において、堆積構造の変化や堆積物が粗粒になるなどの層相の変化は認められなかった。

IV. 堆積物の深度・年代モデル

肉眼による年縞の計数の結果、図2にAと示した層の年代はAD1976±2であることが明らか

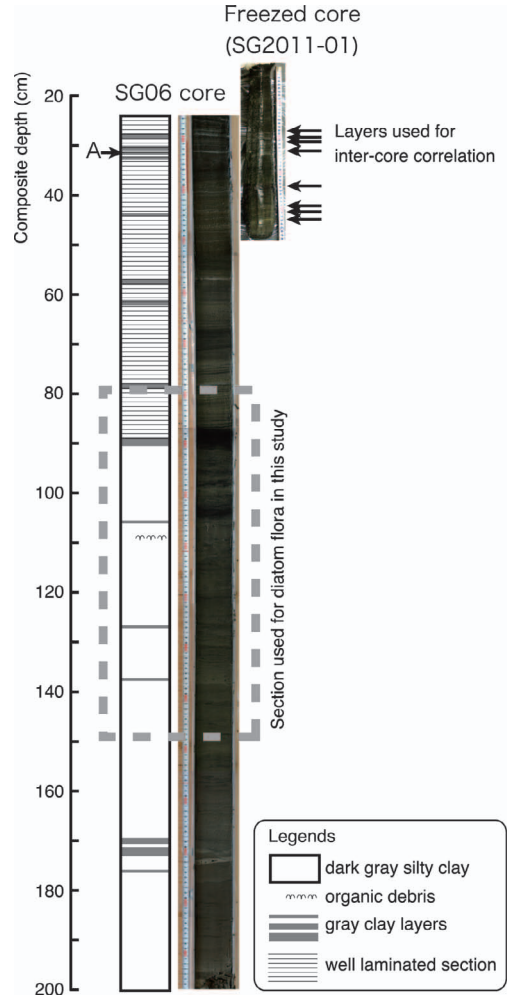


図2 2006年コアの層相および堆積構造柱状図および2011年の凍結コアと2006年コアの写真。図中にAと示した層準を、2011年コアの年縞の計数から西暦1976±5年であるとして、年代モデルの構築をおこなった。

Fig. 2 Columnar section of the SG06 core and correlation of the SG06 core top with a frozen core taken in 2011. Horizon "A" in the figure was dated to AD 1976 ± 5 by varve counting the 2011 frozen core, and was used as a constraint for Bayesian modeling chronology.

かになった。ここから、さらに安全のために誤差を誇張したAD1976±5を同層の深度(32.5cm)に対する既知の年代として与え、さらに完新世と最終氷期末期から得られた182点にのぼる放射

性炭素年代を、IntCal09のうち年輪年代が与えられている部分(0~12,550 cal BP)に対してウィグルマッチングすることで、高精度の深度・年代モデルを構築した(Staff *et al.*, 2011)。ウィグルマッチングには、Bronk Ramsey (2009)で提案されたベイズ統計モデルならびにソフトウェア(OxCal: <http://c14.arch.ox.ac.uk>)を使用した。堆積速度履歴のモデルにはP_Sequenceを用いた。また放射性炭素年代値の間隔には、イベント堆積物を除いた深度で制約を与えた。モデルの柔軟性を示すk値には2を採用した。これらの仮定の蓋然性については、Staff *et al.* (2011)で詳述している。

以上の結果、寛文の地震(1662年)に対応する層準はコンポジット深度およそ87 cm、また天正地震(1586年)に対応する層準はコンポジット深度およそ107 cmであることが明らかになった(コンポジット深度の定義についてはNakagawa *et al.*, 2012に詳しい)。これらの地震イベントを含む層準について、上記の方法による年代決定の誤差は、1標準偏差相当で±9ないし12年程度、2標準偏差相当でも±27年程度である。言い換えるなら、年代が既知である事象に相当する層準の深度を絞り込もうとするとき、その深度推定の誤差は1標準偏差でおよそ2 cm、2標準偏差でおよそ5 cm程度に押さえられる。なお今回行ったウィグルマッチングの結果を図3に示した。

V. 津波の指標

珪藻はおもに塩分によって棲み分けており(澤井ほか, 2010)、そのフロラは塩分環境を反映して大きく変化する。このため珪藻化石群集組成は、津波に代表されるような、淡水湖への海水の流入をとまなうイベントを検出するための指標として有効である。例えば澤井らは、層相の変化を詳細に観察し珪藻化石群集の層序学的な変化とあわせて検討することで、海岸平野や湿地の地下より津波堆積物を見だし、津波の浸水範囲やそれを引き起こした海溝型地震の再来間隔を議論している(例えば、澤井ほか, 2007, 2008; Sawai *et al.*, 2009a, b)。

また、Sawai *et al.* (2008)では湖沼堆積物に挟在する津波堆積物を認定している。

本研究では、水月湖2006年コアのうちコンポジット深度79 cmから149 cmまでの層準を、5 mm四方の水平断面で層厚1 cmごとに切り分け、珪藻分析に供した。分析した層準の年代は、上記の深度・年代モデルによれば西暦およそ1390年から1730年までであり、誤差を考慮したとしても寛文・天正の両歴史地震を確実にカバーしている。また分析した層準のなかに不整合の存在を示すような堆積構造は認められなかった。堆積物は湿潤なまま全量を蒸留水中に懸濁させ、物理的あるいは化学的な珪藻殻の破壊を小さくすることに努めた。懸濁液を15 mlに定量し、ここから適量を取り出して希釈して、カバーガラスに塗布して乾燥させ、それを紫外線硬化樹脂(ノーランド社製、UV adhesive NOA 61)を用いてスライドガラス上に封入した。紫外線ランプを照射して樹脂を十分に固化させてから、光学顕微鏡(微分干渉装置付のオリンパスBX51)で観察した。18 mm四方のスライドガラス上に任意の側線をとって視野どうしが隣り合うように走査し、視野のなかに観察される珪藻殻を同定して計数した。すべてのプレパラートにおいて200殻以上(ほとんどの場合600殻以上)を計数した。

VI. 結果と解釈

珪藻群集組成の層序学的な変化を図4に示した。それによれば、分析した層準の全体を通じて、*Aulacoseira ambigua* (Grunow) Simonsenと*A. subarctica* (O. Müller) E.Y. Haworthが優占しており、単位体積あたりの殻数は2倍程度の振幅をもって変動する。現在の琵琶湖の固有種である*Stephanodiscus suzukii* (Tuji & Kociolk) Kato *et al.*は、上位に向かって産出殻数が減少する傾向を示す。同様に、*A. granulata* (Ehrenberg) Simonsenの厚殻の個体も上位に向かって減少し、深度104.3~103.3 cm以浅ではほとんど産出しなくなる。ここにおいて、小型の*Cyclostephanos*属と*Stephanodiscus*属(両者を

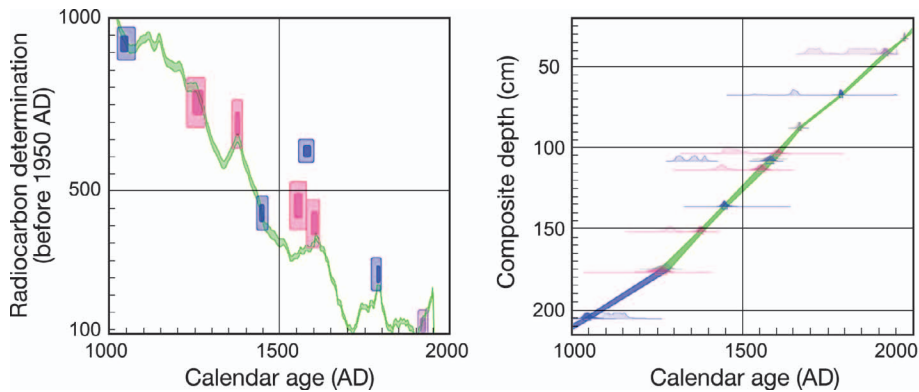


図 3 SG06 堆積物コアの年代モデルについて説明する図. A: SG06 コアから得られた放射性炭素年代測定の結果 (青: オックスフォード大学, ピンク: NERC 放射性炭素分析施設) を, IntCal09 (緑の線) に対してウィグルマッチした結果. 青とピンクの濃淡の領域は, 1 および 2 標準偏差に対応する. B: ウィグルマッチングによって得られた暦年代を, コアのコンポジット深度に対してプロットした深度・年代モデル. 領域の幅を示す線は 1 標準偏差に対応する. 背景の淡色のグラフは, 各年代測定値を IntCal09 によって個別に校正した場合に得られる, 暦年代の確率密度分布. 濃色のグラフは, ウィグルマッチング後に得られたモデル年代の確率密度分布. ウィグルマッチングには, イベント層を除いた相対深度を拘束条件としたベイズ統計モデルを用いた (Bronk Ramsey 2009; Staff *et al.*, 2011). ウィグルマッチングの結果, 分析対象とした区間内に不整合の存在を仮定する必要性は認められなかった.

Fig. 3 Diagrams showing chronological modeling of the SG06 sediment core. A: plot illustrating the placement of the uppermost SG06 radiocarbon determinations (blue: Oxford Radiocarbon Accelerator Unit, ORAU; pink: NERC Radiocarbon Facility-Environment, NRCF-E) against the IntCal09 calibration curve (green; Reimer *et al.*, 2009). B: plot of the same results against SG06 composite depth (CD). Radiocarbon data and Bayesian model construction are the same as in Staff *et al.*, 2011, with the additional inclusion of known-age constraints at 32.5 cm CD (AD 1976 ± 5) and 90 cm CD (AD 1664). For simplicity, all data are plotted at 1s/68.2% probability ranges.

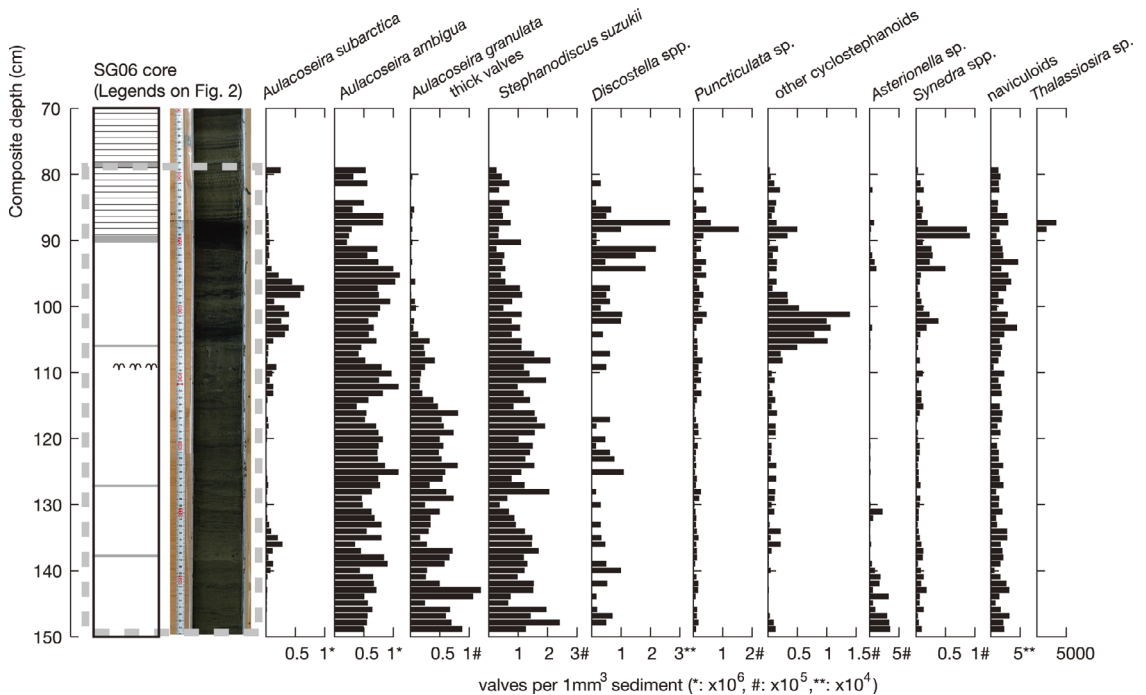


図 4 珪藻化石群集の層序学的な変化.

Fig. 4 Diatom diagram of the SG06 sediment core.

あわせて *cyclostephanoids* として計数), *Syne-
dra* spp., *Asterionella* sp. が間欠的に増加して
おり, *Puncticulata* sp. も増加する傾向が認めら
れる。これら変化は, 栄養環境の変化などに応答
した珪藻群集内での競合関係の結果を反影したも
のであると推定される。これらの珪藻タクサは,
どれも淡水の環境下で堆積したと考えて矛盾な
い。また, 底棲種である舟形の珪藻を *navicu-
loids* として計数した。ボーリングコア採取地点
の水深は 34 m と十分に深く, 底棲珪藻の産出は
より水深の浅いところからの堆積物の流れ込みを
示していると考えられる。その産出殻数には, 著
しい層序学的な変化は認められず, 灰色粘土層
においても顕著な増加は認められなかった。した
がって, この研究対象層準における粘土層はすべ
て, 浅水部の底泥を巻き上げて堆積したもので
はないと考えられる。

一方, 深度 88.3 ~ 87.3 cm と 87.3 ~ 86.3 cm
の 2 層準において汽水生と考えられている *Thalas-
siosira* sp. (おそらく *Thalassiosira bramapu-
trae* (Ehrenberg) Håkansson & Locker) が認
められた。これは寛文地震後の西暦 1664 年に人
工水路である浦見川が開削され, その時に久々子
湖湖底の堆積物あるいは久々子湖を経由した海水
や汽水が流れ込んだという史実に対応するもので
あると考えられる。水月湖で大規模な海水の流入
事件があった際には, 久々子湖由来の堆積物や水
質の変化が珪藻化石群集の変化として記録される
可能性が高いとする推定が支持される。なお歴史
学的には, 水月湖は西暦 1664 年以降は汽水湖と
なったとされるが, それに対比される堆積物中の
珪藻群集には依然として, 汽水化以前から優占し
ていた珪藻種 (*A. ambigua*, *A. subarctica*) な
どが優占している。これは, 海水が水月湖深部に
とどまる一方で, 表層水においては海水浸入後す
みやかに淡水化が進んだことを示している。現在
汽水湖とされる水月湖はまさにそういった状況に
あり, Kondo *et al.* (2000) によれば, 水深 6 ~
8 m 以深にのみ海水が存在し, 珪藻が増殖する
それ以浅の水塊は淡水で両者が混ざることはない。
本研究における珪藻群集組成の検討結果は, 浦見

川開削直後から水月湖において, 少なくとも季節
的には珪藻が生育する表層の有光層は淡水のまま
であった可能性を示唆している。

これらの観察結果によれば, 天正地震の起こっ
た西暦 1586 年の層準 (1 標準偏差で深度 111 ~
107 cm, 2 標準偏差で 114 ~ 94 cm の間のどこか)
においては, 珪藻群集に顕著な変化は認められな
い。その下位および上位の層準と同様に, *A. am-
bigua* および *A. subarctica* が優占して, そのほ
かの淡水生浮遊性珪藻が随伴する。このような群
集組成は, 同時代にもし海水 (および海底や久々
子湖湖底の泥) の流入があった可能性が著しく低
いことを示している。また今回の研究では, 堆積
物試料を連続的に分割し, その全量を分析に供し
たため, 珪藻群集を観察していない層準は理論上
存在しない。すなわち 1586 年に相当する層準に
おいて, 海生珪藻は実際に検出限界以下であっ
た。この結果に基づくかぎり, 水月湖湖心におけ
る海底や久々子湖底由来の碎屑物の堆積, あるいは
大規模な海水の浸入による水月湖湖水の塩分変
化はなかったと考えるのが妥当である。

以上のことから, 西暦 1586 年の天正地震の際
には, 水月湖に堆積物を運搬するような海水の遡
上はなかった可能性が高いことを指摘する。つま
り, 若狭湾沿岸に被害を与えたとされる 1586 年
天正津波は, 仮にその発生自体は史実であったと
しても, 水月湖の沿岸に被害を与える規模のもの
ではなかった可能性が高い。

VII. 発見の意義

2011 年東北地方太平洋沖地震津波は, 岩手・
宮城・福島県において浸水高および遡上高ともに
10 m を超える巨大なものであったことが確認さ
れている (東北地方太平洋沖地震津波合同調査グ
ループ, 2011)。過去 620 年分の水月湖の地質学
的記録を根拠にするかぎり, 若狭湾岸でこのよう
な規模の津波の発生を想定する必然性は認められ
ない。しかしながら, 本研究は, 16 世紀より前
に起こったより大規模な津波の可能性を否定する
ものではない。また, 西暦 1586 年に小規模な津
波が発生した可能性まで排除するものではない。

ところで、本研究とは別に、当地域において、天正地震に関する津波堆積物調査が行われた（関西電力株式会社，2011）。この調査では、水月湖より海側にある菅湖、久々子湖と中山湿地においてボーリングコアが採取されており、それらすべてにおいて、天正地震の時代にたまったと推定される層準に肉眼で識別可能な異質な堆積構造や急激な層相の変化は認められておらず、珪藻化石を含む微化石の産出状況からも津波の侵入は示唆されていない。さらに、文献調査と若狭湾周辺の13の神社における聞きとりにおいても津波の記録がないことが述べられている。

堆積物の年代を的確に推定すること、そこにおいて津波の侵入があったかどうかを判断することは容易ではない。本研究では、関西電力株式会社（2011）で報告されている以上の精度で天正13年の層準を特定し、そこに堆積学的な異変があるかどうかについて珪藻化石の分析をもふまえて検討した。津波侵入の経路や浸水範囲などの面では、津波堆積物の検討には必ずしも十分ではなかった可能性はあるが、本研究で実施されたこれ以上ないほどに精密な手法は過去に起こった津波被害の評価のために役立てられるべきだと考える。

謝 辞

本研究は、イギリスの科学研究費（Natural Environment Research Council grants: NE/D000289/1, NE/F003048/1, および NERC Radiocarbon Facility allocation 1219.0407）、ドイツの科学研究費（Deutsche Forschungsgemeinschaft grant: TA-540/3-1）、および文部科学省科学研究費補助金新学術領域研究（研究代表者：米延仁志、課題名：年縞堆積物による環太平洋諸文明の高精度環境史復元、課題番号：21101002）の一部を使用した。国立科学博物館地学研究部の谷村好洋博士には、珪藻分析の方法と結果について議論していただいた。3人の匿名の査読者からいただいたご意見により、本論文は大いに改善された。記して感謝致します。

文 献

Bronk Ramsey, C. (2009): Bayesian analysis of radiocarbon dates. *Radiocarbon* **51**, 337-360.

- 福沢仁之・小泉 格・岡村 真・安田喜憲法 (1994): 福井県水月湖の完新世堆積物に記録された歴史時代の地震、洪水、人間活動イベント. 地学雑誌, **103**, 127-139. [Fukusawa, H., Koizumi, I., Okamura, M. and Yasuda, Y. (1994): Historical earthquake, flood and human activity events recorded in the Holocene sediments of Lake Suigetsu, Fukui Prefecture, central Japan. *Journal of Geography (Chigaku Zasshi)*, **103**, 127-139. (in Japanese with English abstract)]
- Fukusawa, H., Kato, M. and Fujiwara, O. (2002): Changes of eco-systems in the last 500 years caused by human impacts in Lake Suigetsu, central Japan. *Geographical Reports of Tokyo Metropolitan University*, **37**, 41-49.
- 関西電力株式会社 (2011): 平成 23 年東北地方太平洋沖地震の知見等を踏まえた原子力施設への地震動及び津波の影響に関する安全性評価のうち天正地震に関する津波堆積物調査の結果について. [Kansai Electric Power Co. Inc. (2011): *Research Results Regarding Tsunami Deposits Following Tensho Earthquake*. (in Japanese)*]
- Katsuta, N., Takano, M., Kawakami, S., Togami, S., Fukusawa, H., Kumazawa, M. and Yasuda, Y. (2007): Advanced micro-XRF method to separate sedimentary rhythms and event layers in sediments: Its application to lacustrine sediment from Lake Suigetsu, Japan. *Journal of Paleolimnology*, **37**, 259-271.
- Kitagawa, H. and van der Plicht, J. (1998): Atmospheric radiocarbon calibration to 45,000 yr B.P.: Late glacial fluctuations and cosmogenic isotope production. *Science*, **279**, 1187-1190.
- 小松原 琢 (2006): 寛文二年 (1662) 近江・若狭地震の地震像と被災地区の歴史地理的考察. 京都歴史災害研究, **5**, 21-38. [Komatsubara, T. (2006): A consideration of damages by Kanbun Omi-Wakasa Earthquake from a viewpoint of historical geography. *Historical Disaster Studies in Kyoto*, **5**, 21-38. (in Japanese)*]
- Kondo, R., Kasashima, N., Matsuda, H. and Hata, Y. (2000): Determination of thiosulfate in a meromictic lake. *Fisheries Science*, **66**, 1076-1081.
- Masuzawa, T. and Kitano, Y. (1982): Sulfate reduction and sulfur fixation in sediment of a historically meromictic lake, Lake Suigetsu, Japan. *Journal of the Oceanographical Society of Japan*, **38**, 21-27.
- 松浦律子 (2012): 天正地震に関する欧州史料の素性と確実な内容. 地震, **65**, 1-7. [Matsu'ura, R.S. (2012): What is concrete from historical materials in Europe on 1586 Tensho Earthquake. *Journal of the Seismological Society of Japan, 2nd ser (Zisin)*, **65**, 1-7. (in Japanese with English abstract)]
- Nakagawa, T., Gotanda, K., Haraguchi, T., Danhara, T., Yonenobu, H., Brauer, A., Yokoyama, Y., Tada, R., Takemura, K., Staff, R.A., Payne, R., Bronk Ramsey, C., Bryant, C., Brock, F., Scholout, G., Marshall, M.,

- Tarasov, P., Lamb, H. and Suigetsu 2006 Project Members (2012): SG06, a fully continuous and varved sediment core from Lake Suigetsu, Japan: stratigraphy and potential for improving the radiocarbon calibration model and understanding of late Quaternary climate changes. *Quaternary Science Reviews*, **36**, 164-176.
- Reimer, P.J., Baillie, M.G.L., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J.W., Blackwell, P.G., Bronk Ramsey, C., Buck, C.E., Burr, G.S., Edwards, R.L., Friedrich, M., Grootes, P.M., Guilderson, T.P., Hajdas, I., Heaton, T.J., Hogg, A.G., Hughen, K.A., Kaiser, K.F., Kromer, B., McCormac, F.G., Manning, S.W., Reimer, R.W., Richards, D.A., Southon, J.R., Talamo, S., Turney, C.S.M., van der Plicht, J. and Weyhenmeyer, C.E. (2009): IntCal09 and Marine09 radiocarbon age calibration curves, 0-50,000 years cal BP. *Radiocarbon*, **51**, 1111-1150.
- 澤井祐紀・宍倉正展・岡村行信・高田圭太・松浦旅人・Than Tin Aung・小松原純子・藤井雄士郎・藤原治・佐竹健治・鎌滝孝信・佐藤伸枝 (2007): ハンディジオスライサーを用いた宮城県仙台平野 (仙台市・名取市・岩沼市・亶理町・山元町) における古津波痕跡調査. 活断層・古地震研究報告, **7**, 47-80. [Sawai, Y., Shishikura, M., Okamura, Y., Takada, K., Matsu'ura, T., Aung, T.T., Komatsubara, J., Fuii, Y., Fujiwara, O., Satake, K., Kamataki, T. and Sato, N. (2007): A study on paleotsunami using handy geoslicer in Sendai Plain (Sendai, Natori, Iwanuma, Watari, and Yamamoto), Miyagi, Japan. *Annual Report on Active Fault and Paleoseismicity Researches*, **7**, 47-80. (in Japanese with English abstract)]
- Sawai, Y., Fujii, Y., Fujiwara, O., Kamataki, T., Komatsubara, J., Okamura, Y., Satake, K. and Shishikura, M. (2008): Marine incursions of the past 1500 years and evidence of tsunamis at Suijinuma, a coastal lake facing the Japan Trench. *The Holocene*, **18**, 517-528.
- 澤井祐紀・宍倉正展・小松原純子 (2008): ハンドコーラーを用いた宮城県仙台平野 (仙台市・名取市・岩沼市・亶理町・山元町) における古津波痕跡調査. 活断層・古地震研究報告, **8**, 17-70. [Sawai, Y., Shishikura, M. and Komatsubara, J. (2008): A study on paleotsunami using hand corer in Sendai plain (Sendai City, Iwanuma City, Watari Town, Yamamoto Town), Miyagi, Japan. *Annual Report on Active Fault and Paleoseismicity Researches*, **8**, 17-70. (in Japanese with English abstract)]
- Sawai, Y., Jankaew, K., Martin, M.E., Choowong, M., Charoentitirat, T. and Prendergast, A. (2009a): Diatom assemblages in tsunami deposits associated with the 2004 Indian Ocean tsunami at Phra Thong Island, Thailand. *Marine Micropaleontology*, **73**, 70-79.
- Sawai, Y., Kamataki, T., Shishikura, M., Nasu, H., Okamura, Y., Satake, K., Thomson, K.H., Matsu-moto, D., Fujii, Y., Komatsubara, J. and Aung, T.T. (2009b): Aperiodic recurrence of geologically recorded tsunamis during the past 5500 years in eastern Hokkaido, Japan. *Journal of Geophysical Research*, **114**, B01319, doi:10.1029/2007JB005503.
- 澤井祐紀・谷村好洋・加藤めぐみ・須藤 斎・南雲保 (2010): 珪藻. デジタルブック最新第四紀学. 日本第四紀学会. CD-ROM. [Sawai, Y., Tanimura, Y., Kato, M., Suto, I. and Nagumo, T. (2010): Diatom. *Digital Book: Progress in Quaternary Research in Japan*. Japan Association for Quaternary Research. (in Japanese)*]
- Staff, R.A., Bronk Ramsey, C., Bryant, C.L., Brock, F., Payne R.L., Schlolaut, G., Marshall, M.H., Brauer, A., Lamb, H.F., Tarasov, P., Yokoyama, Y., Haraguchi, T., Gotanda, K., Yonenobu, H., Nakagawa, T. and Suigetsu 2006 Project Members (2011): New ¹⁴C determinations from Lake Suigetsu, Japan: 12,000 to 0 cal BP. *Radiocarbon*, **53**, 511-528.
- 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ (2011): 2011年東北地方太平洋沖地震津波に関する合同現地調査の報告. 津波工学研究報告, **28**, 129-133. [The 2011 Tohoku Earthquake Tsunami Joint Survey Group (2011): Field survey report of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake tsunami. *Tsunami Engineering Technical Report*, **28**, 129-133. (in Japanese)*]
- 宇佐美龍夫 (1996): 新編日本被害地震総覧 [増補改訂版]. 東京大学出版会. [Usami, T. (1996): *Materials for Comprehensive List of Destructive Earthquakes in Japan: Revised and Enlarged Edition*. Tokyo University Press. (in Japanese)]
- Yasuda, Y., Yamaguchi, K., Nakagawa, T., Fukusawa, H., Kitagawa, J. and Okamura, M. (2004): Environmental variability and human adaptation during the Lateglacial/Holocene transition in Japan with reference to pollen analysis of the SG4 core from Lake Suigetsu. *Quaternary International*, **123-125**, 11-19.

* Title etc. translated by M.S.