

熊本県天草諸島下島・池田池における 過去7500年間の珪藻化石群集変動

福本侑¹・箕田友和²・鹿島薫²・原口強³・山田和芳⁴

要旨 熊本県天草諸島下島の南端に位置する池田池において採取されたボーリングコア試料について珪藻分析を行い、過去7500年間の海跡湖の環境変遷とともに高潮や洪水などのイベント履歴の復元を行った。コア最下部の縄文海進期では海水—汽水性の珪藻が優占したが、約6.7千年前以降は淡水性種が90%以上産出した。これは砂州が形成されて外洋から隔てられたためと考えられる。淡水湖になってからは浮遊性種が優占していたが、湖底の堆積により水深が浅くなり、約3.9千年前以降は付着性種が増加していった。約6.6-4.4千年前の層準において明暗互層が確認され、この部位で化学分析（CNS、CHN分析）を追加で行った結果、暗色層は陸上の植物に由来していることが明らかとなった。また同層は湖水のかく乱を示す珪藻種を多く含んでいることから、台風などによる洪水によってできた非定常的な堆積物である可能性が示された。淡水湖沼が形成された6.7千年前から現在までに、津波や高潮によると思われる海水浸入イベントが6回、陸域からの急な堆積が起こった洪水イベントが3回、海水性種や付着性種の増減から確認された。今研究では、珪藻群集から認定したイベント層と、コア試料の層相の間では明瞭な関係は見られなかった。このことはイベント履歴の復元のためには、層相だけでなく複数の指標を用いることが必要であることを示唆する。

キーワード：湖沼堆積物、珪藻化石、イベント堆積物、完新世、西南日本

I はじめに

池田池は九州西岸域の東シナ海に面した熊本県天草諸島下島の南端に位置し、面積約0.05km²、水深約3mの小規模な海跡湖である（図1）。上流域は湿地が発達しており、大きな流入河川はない。湖と外洋を隔てる砂州は長さ約300m、標高2-3mであり、1965年の台風15号による高潮の影響を受けて以降、砂州上にテトラポットと標高3mを超える護岸が設置されている。

九州西岸域は完新世の後半においては海水準が比較的安定しており、これまでの研究で6千年前以降、池田池周辺の相対海水準は1m以下の上昇があったとされている（Nakada *et al.* 1991, Yokoyama *et al.* 1996）。一般的に、過去数千年に渡る緩やかな海面上昇は、砂州を安定的に支持し、海面高度に対してほぼ固定されると考えられている（Woodruff

1：立命館大学・環太平洋文明研究センター 2：九州大学・理学研究院 3：大阪市立大学・理学研究科
4：ふじのくに地球環境史ミュージアム

et al. 2013、Woodruff *et al.* 2015)。このような沿岸湖沼では、湖底堆積物中に過去の津波や洪水などのイベントの痕跡が残されている可能性があり、Woodruff *et al.* (2009) は鹿児島県上甕島の海跡湖のコア試料の分析を行い、およそ縄文海進期以降の高潮発生の頻度と、エルニーニョ現象との相関を議論した。池田池においては Woodruff *et al.* (2015) が 4 本のコア掘削を行い (最大長 5.5m)、過去 2000 年間における沿岸洪水の復元を行った。彼らはコア深度約 2m 前後において、元寇時のいわゆる神風台風 (西暦 1274・1281 年) によって引き起こされたとされる高潮のイベント層準をコア試料の CT スキャンや元素分析のデータから特定した。今回、より長期的な完新世における高潮や津波イベント発生の履歴とサイクルの解明、元寇時におけるイベントの相対的規模の評価を目的として、新たに 2016 年に全長 22m のコア (IKD16) が採取された。今論文では、IKD16 コアのおよそ縄文海進期以降の部位について珪藻分析を行った結果、これらのイベントを示唆する化石群集の変動が見られたため報告する。

当コアの深度約 12.5-8.5m において灰色シルト層と黒色有機質層の明暗互層が確認されている。この互層は、この約 2 千年間の層準に断続的に見られるため、イベント性ではない周期的な環境変化による堆積物の可能性も考えられる。同様の明暗互層は、地中海の完新世の海底堆積物からも知られており、暗色層に関しては、夏季モンスーンが強化される時期に地中海に河川水が多量に流入することで塩分躍層が形成され、表層では生物生産が続く一方で、海底では有機物が分解されず堆積することが成因としている (Rohling *et al.* 2015)。また、浮遊性の珪藻がこの暗色層の主な構成物であることから、河川水とともに栄養塩が供給され、珪藻がブルーミングを起こすことが互層の成因であ

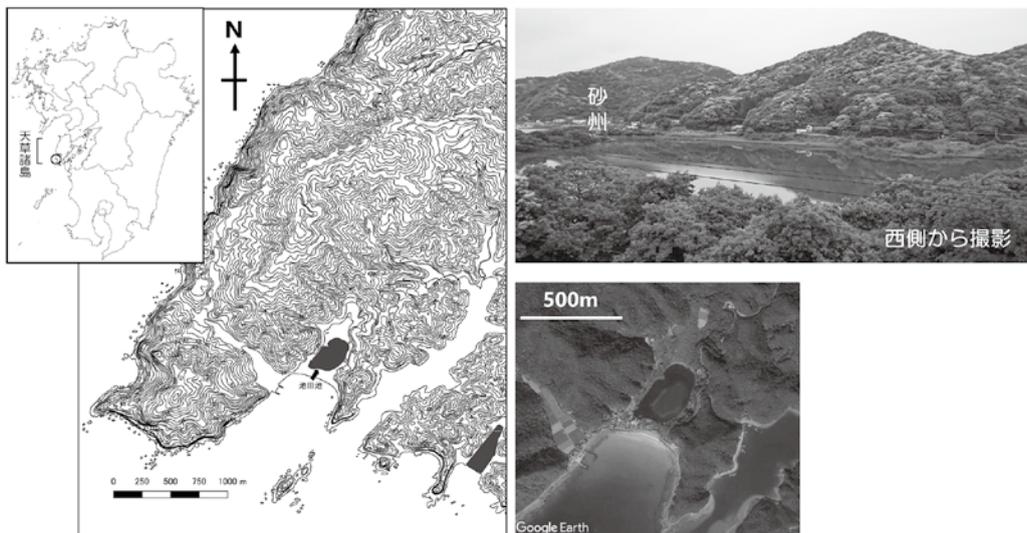


図 1 池田池周辺の地形図 (左) と池田池の風景と衛星写真 (右)

るとした (Kemp *et al.* 1999)。このように、珪藻は明暗互層形成時の水質環境に対して鋭敏に反応する可能性がある。今回この互層について構成物や形成過程を明らかにするため、化学分析を追加で行った。

II 試料採取と層相

1 試料採取

本研究で用いる IKD16 コアは池田池の湖心で採取された全長 22.0m のピストンコア試料である (図 1)。採取地点は、北緯 32° 14'50.11"、東経 129° 59'8.94"、水深は約 3m、掘削表面の標高は - 0.65m、コア長は 22m である。鉛直方向に半裁したピストンコア試料の堆積断面を用いて、肉眼観察による層相記載を行い、各種分析のために深度 17-0m において L チャンネルによる連続試料のサブサンプリングを行った。

2 層相

IKD16 コアの柱状図を図 2 に示す。コアの最深部にあたる深度 22.00-21.20m は砂礫層、深度 21.2-20.12m は粗砂層である。深度 20.12-19.73m はシルト層で、深度 19.95m に貝殻片を含む。深度 19.73-15.35m は粘土層で、深度 19.31m、16.50m に木片、深度 16.40-16.23m は細砂からなる生痕が認められた。深度 15.35-15.10m は粘土層と細一中砂層の互層である。深度 15.10-14.14m はシルト層で、断片的に平行葉理が認められ、時折黒一暗灰色粘土薄層を挟む。深度 14.14-13.37m は、粗砂層中に軽石や火山ガラスを含み、上位にいくにつれてシルトへと上方細粒化しており、色相などからテフラ層準と考えられる。深度 13.37-12.49m はシルト層で、粘土層と細一中砂層が時折狭在し、断片的に平行葉理が認められる。深度 12.49-8.48m はシルト層と黒色有機質層の明暗互層である。明色のシルト層中には断片的に平行葉理が形成されているが、黒色有機質層は厚さが約 1-8cm で無層理である。深度 8.48-6.50m もシルト層であるが、上位にいくにつれて平行葉理から無層理へと変化し、時折、中砂層や暗色層を挟む。深度 6.50-0.00m は粘土層で、下位に中砂薄層と暗色層が認められ、上位は時折、より明色の粘土薄層を挟む。Woodruff *et al.* (2015) において深度約 2m で報告された、元寇堆積物に相当すると思われる粗粒化した層準は、当コアの肉眼観察では確認できなかった。

III 分析手法

1 堆積物の年代測定

IKD16 コアについて 7 点の木や炭片の放射性炭素年代を測定した。得られた炭素年代の暦年較正は Intcal13 (Reimer *et al.* 2013) をデータベースとし、較正ソフトの Oxcal 4.3

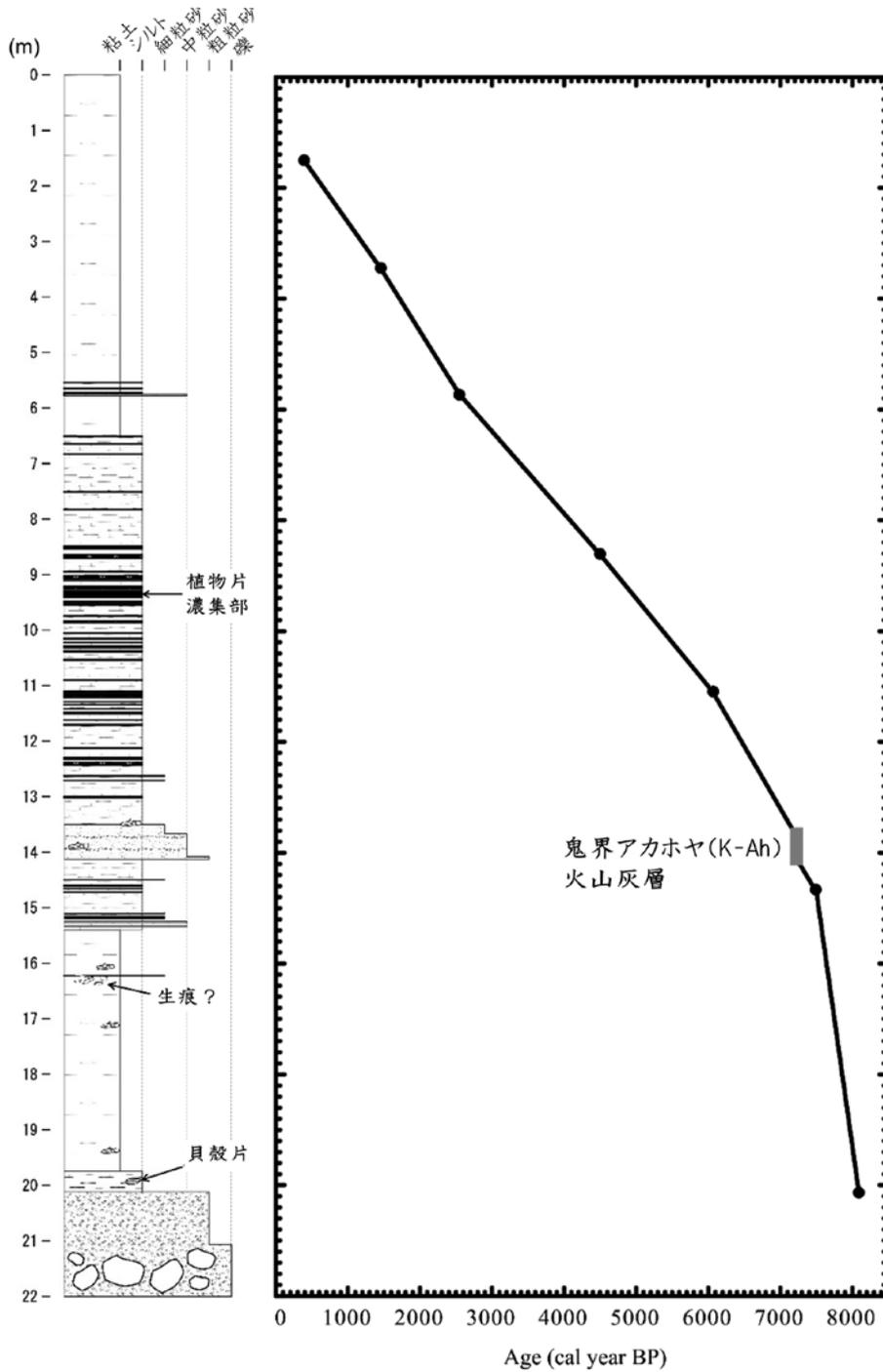


図2 IKD16 コアの層相と炭素年代測定結果をもとにした年代モデル
年代モデルの横軸は暦年補正済みの年代。鬼界アカホヤテフラ (K-Ah) の年代は Smith et al. (2013)
より 7303-7165 cal yr BP とした。

(Bronk Ramsey 2009) で行った。本稿で用いる「年前」、「千年前」の語はすべて、この暦年較正を行った西暦 1950 年からさかのぼった年代を表す。また、深度 14.14-13.37m のテフラ層準について鬼界アカホヤテフラ (K-Ah: 町田・新井 1978) と同定されており (吉永私信)、Smith *et al.* (2013) によると K-Ah の降下年代は 7303-7165 年前である。コアの年代モデルは、このテフラ層準の深度と年代を考慮に入れたうえで、測定年代値間を直線で結んで作成した。

2 珪藻分析

およそ縄文海進期以降と考えられた、深度 16-0m において主に 4cm 間隔で珪藻化石の分析を行った。淡水—汽水—海水性種の間で出現率に大きな変動のあった部位や明暗互層が特に発達する深度 10-9m においては 2cm 間隔になるよう追加で分析を行った。試料は過酸化水素水による処理後、Elix 水を加えて懸濁液を作成し、設定温度 50℃ のホットプレート上に置いたカバーガラスに滴下して乾燥させた。スライドグラスへの封入はマウントメディア (和光製薬製) を用いた。光学顕微鏡 (倍率: 1000 倍) を用いて珪藻殻 200-300 個の同定・計数を行い、各属種の産出頻度を算出した。黄金色藻の胞子も計数を行い、合計数に含めた。種の同定には Round *et al.* (1990)、渡辺 (2005)、小林ほか (2006)、Tomas (1996) を主に用い、適宜論文を参照した。

3 化学分析

深度 12.5-8.5m にかけて、灰色シルト層と黒色有機質層からなる明暗互層が見られた。この互層の堆積環境、供給源を明らかにするため、互層が顕著に発達する深度 10-9m において以下の方法で CNS 元素分析、CHN 元素分析を行った。CNS 元素分析は 2cm 間隔の 46 試料について行った。60℃ のオーブンで一晩乾燥させた試料をメノウ乳鉢・乳棒を用いて粉末状に細かく粉砕し、電子天秤を用いて 8-12mg 秤量した上で銀製コンテナに入れた。1mol/L の塩酸を加えて炭酸塩を取り除いたのち、100℃ のホットプレート上で 2-3 時間ほど乾燥させた。そしてそれを錫製コンテナ内に封入して分析を行った。分析機器は、静岡県ふじのくに地球環境史ミュージアム所有の Flash EA-1113 (Thermo Electron Corporation) を使用した。測定結果は全有機炭素 (TOC)、全窒素量 (TN)、全硫黄量 (TS) の質量パーセント (wt%) で算出した。CHN 元素分析は黒色有機質層の 5 層準それぞれから採取した 5 試料について行った。試料はいずれも不定形、黒色不透明の有機物とみられる (図 5)。凍結乾燥させた試料をメノウ乳鉢・乳棒で粉末状に細かく粉砕した後、九州大学理学部中央分析所に委託して分析した。全有機炭素量 (TOC)、全水素量 (TH)、全窒素量 (TN) の質量パーセント (wt%) を測定し、試料量と灰分、各原子量から試料中の H/C と O/C の原子数比を求めた。

IV 結果

1 年代測定

暦年較正を行った年代結果から作成した深度—年代図を図 2 に示した。コア最下部に近い深度 20.12-20.09m の炭片の測定結果は、約 8.1 千年前であった。深度 14.14-13.37m の火山灰層の層準を除いて、急激な堆積速度の変化や年代の逆転は認められなかったが、コア下部の深度 20.09-14.72m 間で堆積速度が比較的大きかった。

2 珪藻分析

深度 16-0m における珪藻化石各種の産出頻度のダイアグラムを図 3 に示した。海水から淡水性にまたがる珪藻種が産出し、合計で 38 属 30 種を同定した。深度 16.0-15.0m (7.6-7.5 千年前) では珪藻がほとんど産出しなかった。深度 15.0-12.6m (7.5-6.7 千年前) では海水から汽水性の種が優占し、汽水・浮遊性の *Cyclotella atomus* がしばしば 80% 以上産出した。また、海水・浮遊性の *Thalassiosira* spp. と *Thalassionema* spp. が、それぞれ約 10% 程度産出した。深度 12.6m 以浅では淡水性種が優占するようになり、主に *Achnanthes minutissima* complex、*Staurosira* spp.、*Discostella stelligera* が継続して多産した。*Aulacoseira* spp. は時折急激に 60-80% まで増加した。およそ 10-20% の産出であった *Staurosira* spp. は深度 7.9m (3.9 千年前) 以降に増加して 40% 以上の層準が現れ、深度 2m 前後では連続的に 60-80% を占めるようになった。また *Discostella stelligera* は深度 6.5m まではしばしば 60% 以上のピークを見せるが、以降は急減した。深度約 1m 以浅 (約 0.3 千年前以降) では淡水・浮遊性の *Aulacoseira* spp. (主に *A. granulata*、*A. granulata* var. *angustissima*) が増加し、表層 20cm では 80% に達した。それまで多産した *Staurosira* spp. は表層に向かって減少した。

以上の珪藻群集の変遷の中で、突発的な産出頻度の変動が見られ、短期間に堆積した海水浸入イベントや洪水イベントを示している可能性がある。深度 12.6m 以浅は淡水性種が優占するが、そのなかで海水性種の突発的な増加が主に 6 回見られた (M1-M6 : 図 3)。おもに *Cyclotella atomus* と *Chaetoceros* 属の休眠胞子の増加によるもので、M1 (11.86-11.82m : 6.4 千年前)、M2 (8.2m : 4.2 千年前)、M3 (7.88-7.26m : 4.0-3.6 千年前)、M4 (4.38-4.32m : 1.9 千年前)、M5 (3.28-3.24m : 1.3 千年前)、M6 (2.72-2.68m : 1.0 千年前) である。また層厚に幅のある M3 のイベントは、さらに 3 つのイベントから構成されていると見ることもできる (a : 4.0 千年前、b : 3.8 千年前、c : 3.6 千年前)。一方、深度 12.6m より増えた淡水性種は、多くが比較的水深のある湖沼に住む浮遊性あるいは半浮遊性の珪藻であった。そのなかで一時的な付着性種の増加が 2 回 (F1、F3 : 図 3)、黄金色藻の胞子の増加が 3 回 (F1、F2、F3) 見られた。F1 (10.84-10.62m : 5.9-5.8 千年前)

と F3 (1.9-1.3m : 0.6-0.3 千年前) では *Cymbella* spp. と *Navicula* spp. に加え、腐植質な環境に多く出現する *Eunotia* spp. や *Pinnularia* spp. が増加した。また F2 (5.7m : 2.5 千年前) では単一の深度であるが、黄金色藻の休眠孢子が 40% に達した。

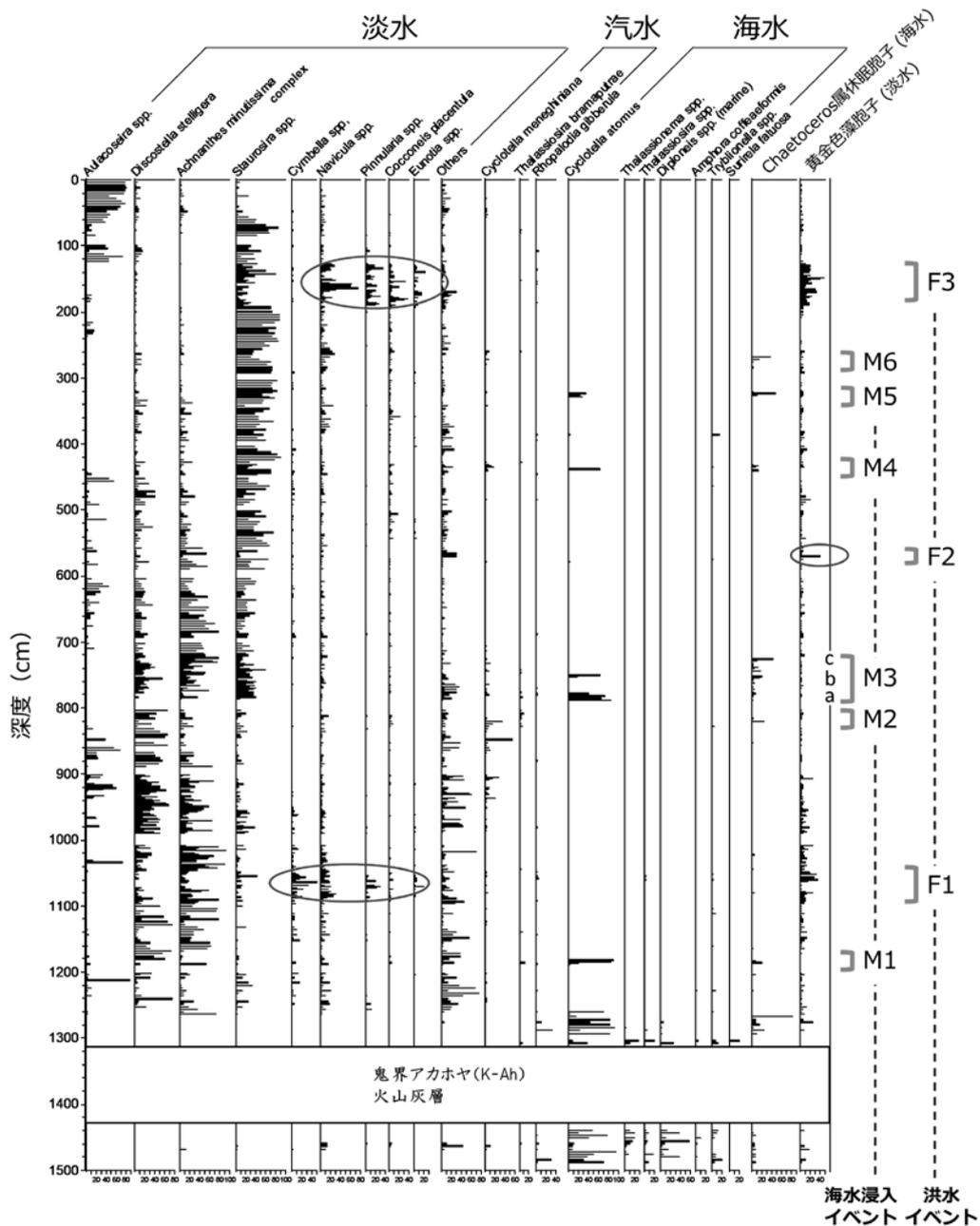


図3 IKD16 コア、深度 0-15m の珪藻ダイアグラム

黄金色藻の休眠孢子の相対頻度もダイアグラム右端に示した。海水の浸入イベント層準 (M1-M6)、洪水イベント層準 (F1-F3) を右端に示した。明瞭化のため、洪水イベント層準については該当する群集変動の部分に丸枠で囲んだ。

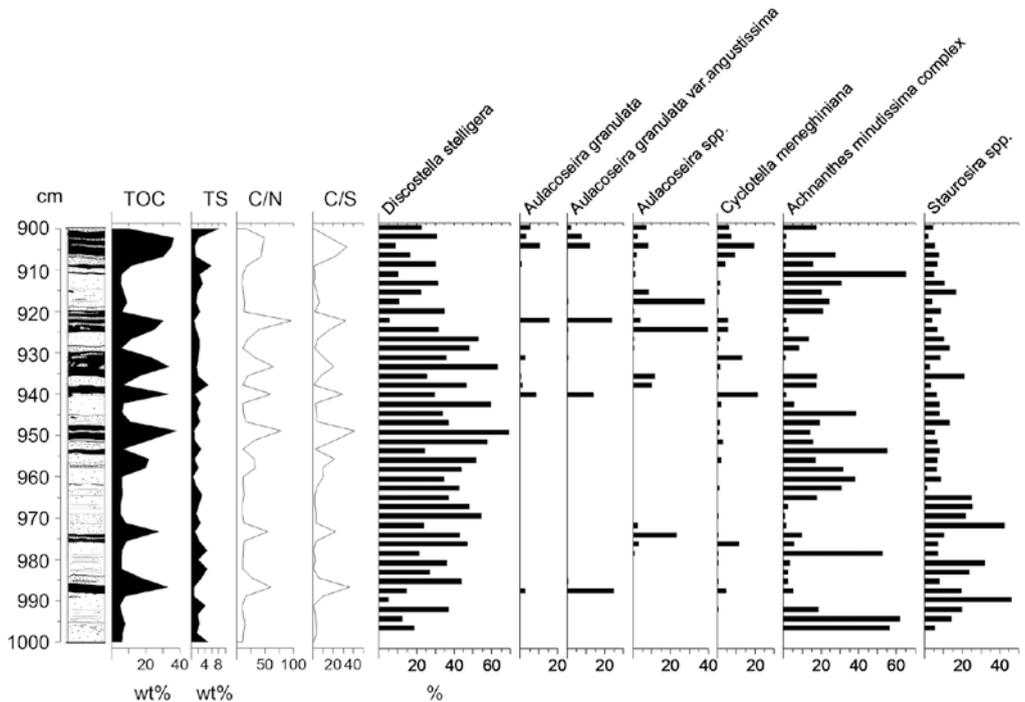


図4 IKD16 コア、深度 10-9m の CNS 分析による各成分量と珪藻ダイアグラム
明暗互層のスケッチ図を左端に示した。珪藻ダイアグラムは主要な構成種のみ示した。

3 化学分析

(1) CNS 元素分析

深度 10-9m (5.4-4.8 千年前) の明暗互層における CNS 元素分析の結果の一部を図 4 に示した。TOC は暗色層については平均 28.5%、明色層については平均 7.1% で、暗色層で明瞭な増加傾向を示した。TN は平均 0.6% で、互層全体を通じて 0.3-0.9% の範囲の値で漸移するが、深度 9.20m の暗色層で急減した。TS は平均 1.5% で 0.9-3.1% の範囲で変動し、おおよそ暗色層で減少する傾向を示した。C/N 比と C/S 比はともに暗色層で急増し、明色層で減少する傾向を示した。

(2) CHN 元素分析

深度 10-9m (5.4-4.8 千年前) の黒色有機質層の試料について行った CHN 元素分析より求めた、H/C と O/C の原子数比の分布を表す Van Krevelen ダイアグラムを図 5 に示した。TH は平均 3.9% で範囲は 3.4-4.6%、TOC は平均 30.2% で範囲は 24.9-37.4%、TN は平均 0.6% で範囲は 0.4-0.8% である。O/C と H/C の原子数比を算出すると、H/C は 1.46-1.66、O/C は 0.77-1.05 である。

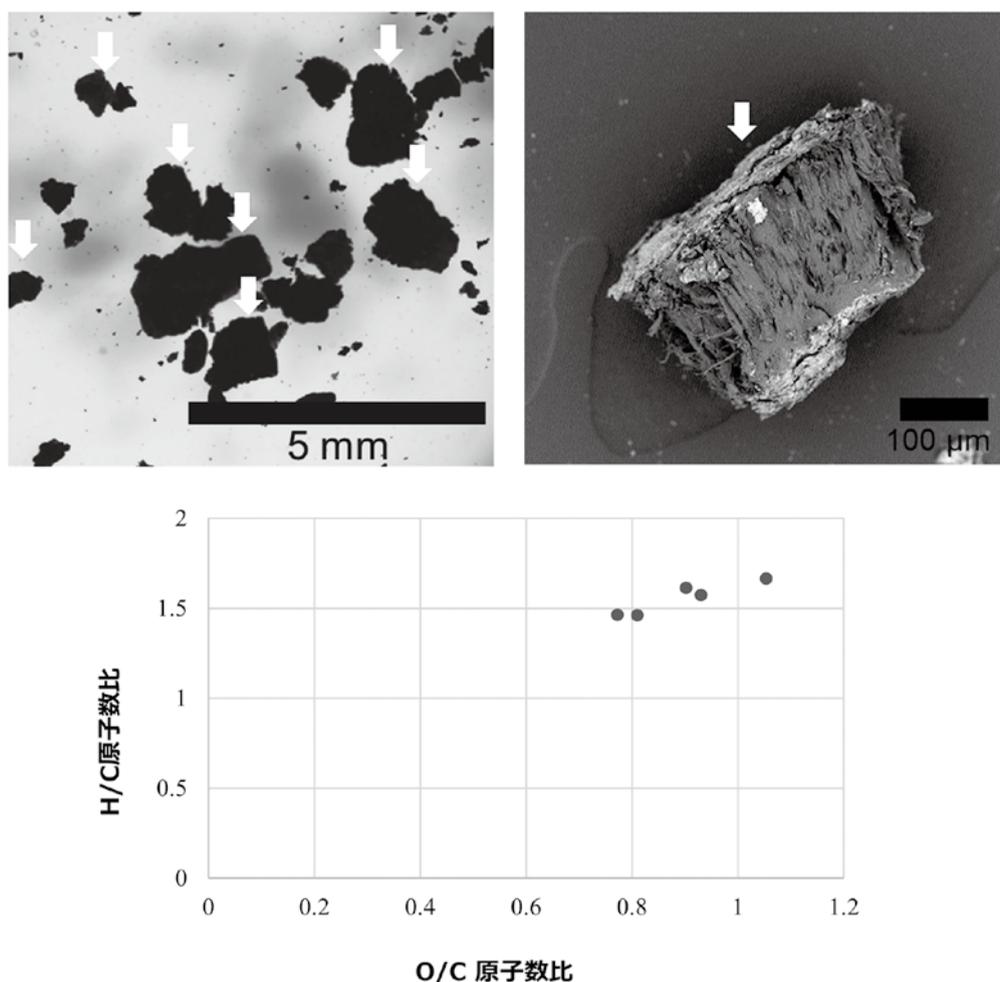


図5 暗色層から見出された黒色有機物の、光学顕微鏡とSEMによる写真(上)と当有機物のEDS分析による元素組成のVan Krevelenダイアグラム(下)

V 考察

1 池田池の完新世の環境変動

珪藻化石は深度 15.0m 以深 (7.5 千年前以前) では産出しなかったものの、以降は環境変遷の記録としておおよそ連続的に残されていた。深度 15.0-12.6m (7.5-6.7 千年前) ではテフラの層準を挟んで、汽水性の *Cyclotella atomus* が優占し、海水性の *Thalassiosira* spp. や *Thalassionema* spp. も産出したことから、当時の池田池はまだ砂州または礫洲が閉じておらず、海水と淡水が入り混じる汽水湖沼または河口域だったと推察される。鬼界アコハヤテフラ (K-Ah) の層準 (深度 14.14-13.37m (7303-7165 年前, Smith *et al.* 2013)) からは珪藻が産出しなかったため、火山灰堆積時の環境については不明である。肉眼観

察による層相記載では、K-Ah 下位の粗砂層中に白色の軽石が確認されている。町田・新井 (2003) によると、池田池が位置する天草諸島下島は、幸屋降下軽石 (K-Kyp) や幸屋火砕流堆積物 (K-Ky) の一次堆積の及ぶ地域ではないとされている。そのため、池田池で確認された軽石は二次的に堆積したものである可能性が高い。つまり、軽石を伴う多量の火山噴出物が海洋や周辺の流水域を介して池田池に供給され、珪藻が生息できないほどの速い堆積速度で堆積していったと考えられる。

深度 12.6m (6.7 千年前) より、海水—汽水性種から淡水性種へと群集組成が大きく変化した。これは、池田池の湖水表層が 6.7 千年前以降に淡水化したことを示しており、この時期に砂州ないし礫洲が形成されて、外海から隔てられたと考えられる。一般的に、地殻の変動の少ない安定した地域において、過去数千年に渡る限定的な海面上昇は、砂州を安定的に支持するため、砂州の高さは地域の海面高度に対して、ほぼ固定されると考えられている (Woodruff *et al.* 2013・2015)。池田池周辺の海域においては 6000 年前以降の相対海水準は 1m 以下の緩やかな海面上昇があったと示されている (Nakada *et al.* 1991, Yokoyama *et al.* 1996)。そのため 6.7 千年前以降、砂州または礫洲の発達が海水の浸入を防ぎ、淡水性珪藻の優占を継続させたと考えられる。

深度 7.9m (3.9 千年前) より淡水・付着性の *Staurosira* spp. の産出が増加し、*Cyclotella* spp. (主に淡水浮遊性の *Discostella stelligera*) が上位に向かって漸減した。これは湖底の堆積により水深が徐々に浅くなってきたためと考えられる。また層相に関して、およそ深度 8.5m から 6.5m にかけて平行葉理が不明瞭になり無層理の粘土層が増えていった。これらの結果から、3.9 千年前前後より、湖沼が埋積されたことによって浅化し、湖底のかく乱が徐々に大きくなったと考えられる。

深度 1.0m 以浅 (0.3 千年前以降) は、淡水・浮遊性で富栄養性種の *Aulacoseira* 属 (主に *A. granulata* と *A. granulata* var. *angustissima*) が多産した。現在の池田池上流側は低層林が広がる湿地であるが、1972 年の空中写真 (国土地理院) によると、当時は水田として土地利用されていた。水田として土地利用がいつ始まったのかは不明であるが、日本では江戸時代以降、沿岸部の低湿地帯で新田開発による干拓が行われてきた。池田池上流側においても低湿地帯の土地利用に伴い、陸域から栄養塩が供給されたことで、富栄養性種の *A. granulata* や *A. granulata* var. *angustissima* が増加したと考えられる。

2 明暗互層 (縞模様) の成因

主に深度 12.5-8.5m (6.6-4.4 千年前) に分布する明暗互層のうち、特にそれが明瞭な深度 10-9m (5.4-4.8 千年前) において行った珪藻と化学分析から、当時の堆積環境について知見が得られた。深度 10-9m における主な珪藻種のダイアグラムを図 4 に示した。淡水・浮遊性 *Discostella stelligera* は 5-69% の範囲の大きな変動を示すものの、層の明暗とは関係なく多産する傾向にあった。暗色層では *Aulacoseira granulata* が特徴的に増

加し、4つの深度において3-15%のピークを示した。*Aulacoseira granulata* var. *angustissima* も多くの暗色層で約20%に急増した。*Aulacoseira* spp. は前の2種とは異なる深度ではあるものの、同様に暗色層で増加した。一方で深度9.55-9.45mにかけて分布する暗色層では上記の3種は産出しなかった。これら*Aulacoseira* 属は明色層ではほとんど産出せず、*Aulacoseira* spp. が深度9.18mで38%のピークを示したのみであった。汽水・浮遊性の *Cyclotella meneghiniana* も5%未満であるが暗色層で特徴的に産出し、深度9.41と9.05mでは約20%のピークを示した。一方で、*Achnanthes minutissima* complex は0-65%の範囲で急変動するが、明色層でピークが多く認められた。*Stausosira* spp. は最下部から上位に漸増して深度9.89mで40%以上を示し、同じ明色層の深度9.81m、9.72mでも急増したが、深度9.63m以浅は5-10%程度で推移した。*A. granulata* は、主に富栄養湖や懸濁した低光量の水域に出現し (Kilham *et al.* 1986)、*A. granulata* var. *angustissima* も同様な生態とされている (Kilham 1990)。*Achnanthes minutissima* complex と *Stausosira* spp. は、いずれも様々な基質に付着して生息する広域適応種である。

CNS分析の結果では、暗色層は明色層に比べてTOCが高く、TSが低い傾向があった。また、C/N比も暗色層で高い傾向にあったが、これは陸生起源の有機物が多く含まれていることを示す (Meyers 1994)。明色層はTSが高いことから、湖水底層はパイライト鉱物などが生成しやすい嫌気的な環境、つまりかく乱の少ない安定した化学躍層が発達していた可能性がある。また一方で、有機物の急激な堆積によりTSが希釈されて、暗色層では見かけ上減少した可能性も考えられる。暗色層について行ったCHN元素分析では、Van Krevelen ダイアグラム (図5) にプロットされたH/C比 (1.46-1.66)、O/C比 (0.77-1.05) は、Killops *et al.* (2005) によって示されたWood・Celluloseの値 (H/C: 約1.5-2.0、O/C: 約0.7-1.0) と非常に近い。したがって、この層の有機物は陸生植物由来である可能性が高い。

以上を踏まえると、暗色層の形成は、陸源物質の湖内への突発的な流入イベントによるものと考えられ、一時的に湖水がかく乱されて富栄養化した可能性がある。明色層の方でも、付着性の *Achnanthes minutissima* complex と *Stausosira* spp. の増加は、湖岸や集水域からの珪藻や土砂の流入、堆積があったことを示している。しかし、暗色層では珪藻に加えて陸生植物が流入したことから、より強い、突発的な流入だったと考えられる。この陸生植物などの突発的な流入の要因としては激しい降水や台風が考えられる。夏季の東アジアにおいては、アジア低気圧に南東から吹き込むモンスーン風が梅雨前線を生み出し、東南アジアや中国南東部、日本に大量の降水をもたらす (多田 2005)。池田池で明暗互層が形成される時期 (6.6-4.4千年前) はおよそ完新世中期に相当するが、中国南部各地の石筍鉱物から復元された夏季モンスーン強度のデータによると、東アジア地域において完新世中期は現在よりも降水量が多かったとされる (Yang *et al.* 2019)。そのため、九州西南部も高頻度で大雨に見舞われ、陸源物質の激しい流入により、暗色

層が形成された可能性がある。また、湖水のかく乱に依存して生活することが知られる *Aulacoseira* 属が特に増えることから、台風の通過時に、降水と同時にかく乱要因である強風が暗色層の堆積に寄与した可能性も考えられる。

3 高潮、洪水イベントの履歴

過去 7.5 千年間の珪藻群集のデータより、6 回の海水浸入イベント (M1-M6) と 3 回の洪水イベント (F1-F3) が認められた。洪水イベントのうち、2 回 (F1, F3) の珪藻群集の変化は主に *Navicula* spp. や *Pinnularia* spp., *Eunotia* spp. の増加によるもので、明暗互層の暗色層で見られた *Aulacoseira* 属の増加とは異なっていた。*Aulacoseira* 属はおおよそ浮遊性種であるが、洪水イベントで増加したこれらの種は全て付着性種で、泥炭などの腐植質の表面に生息する種が多かった。このことは、暗色層の堆積よりもさらに強い陸源物質の流入が起こったことを示唆する。しかし一方で、これら F1, F3 の層準ではともに陸生植物の堆積を示す暗色層は含まれていなかった。F3 では水深がそれまでよりも浅いことにより、有機物が堆積後に分解されたことも考えられるが、なぜ植物体の堆積が少ない一方で植物に付随する珪藻が多く産出したのかは不明である。F1~F3 における黄金色藻の休眠胞子の増加は、腐植質の流入による湖水の酸性化あるいは貧栄養化によってもたらされた可能性がある (Rivera-Rondón *et al.* 2017)。F3 (0.6-0.3 千年前) は層厚が 60 cm にわたるが、炭素年代の測定数が少ないため元寇時 (西暦 1274・1281) に通過した台風による洪水に相当するかどうかは不明である。相当するならば、元寇時の堆積物において海水性種よりも淡水の湖岸に生息する種が増えることから、当時は海域よりも陸域からの堆積の寄与が大きかったことを意味する。これは池田池や上甕島における元寇時付近の堆積物で、海生の貝や藻類が主な供給源であるストロンチウムの増加を報告した研究 (Woodruff *et al.* 2009・2013) とは対照的である。

6 回の海水の浸入イベントは台風時の高潮や、地震による津波の発生を示している可能性がある。古文書などの人文資料では、南海トラフを震源とする地震については西暦 684 年の天武地震から記録が残されている (宇佐美 2013)。記録にある歴史時代の地震と、今研究の海水浸入イベントの年代を単純に比べてみると、M5 は天武地震 (西暦 684 年)、M6 は仁和地震 (西暦 887 年) に当てはめることができ、南海トラフからの津波が池田池まで到達した可能性を示唆する。また西日本の太平洋沿岸各地の海跡湖からコア試料を採取し、主に層相変化からイベント履歴の復元を行った岡村・松岡 (2012) は、約 2 千年前において過去 3 千年間で一番大きな津波イベントがあったとしており、これは今研究の M4 に対比される。また研究地は東シナ海に面していることから、琉球海溝で発生した地震の津波の影響も考えられる。例えば、琉球諸島での津波堆積物の年代測定から、西暦 1771 年の明和津波に加えて、約 2 千年前に大きな津波が発生したことが示されている (Ando *et al.* 2018、河名・中田 1994)。ただ、今研究で地震発生の詳細な時期や

周期性を論じるためには、今後追加の炭素年代測定を行い、年代モデルの精度を上げる必要がある。

イベント堆積物は一般に層相の変化から認定されることが多く、特に津波堆積物では粒径の粗粒化が見られることが多い（藤原 2016、Woodruff *et al.* 2009）が、今研究の珪藻群集の変動の多くは層相との明らかな相関は見られなかった。F1-F3 はいずれも粗粒化の層準とは一致せず、M1-M6 では M1 と M4 のみが一致した。このことは、層相からではわからない高潮、津波、洪水イベントがあったことを示唆する。また、イベント堆積物の層相変化には様々なパターンがあることが知られているため（藤原・谷川 2017）、今後コアの CT 撮影画像を含めて層相との詳細な対比を行っていくことが必要と考えられる。

VI 結論

池田池のボーリングコアの珪藻化石群集の分析の結果、およそ 6.7 千年前に礫洲ないし砂州の形成により海から隔てられて海跡湖になり、以降は淡水湖沼が現在まで続いたことが明らかになった。また湖底の堆積により水深の浅化が現在まで進んでいる状況や、およそ 0.3 千年前以降に上流の湿地における人間の土地利用によって湖水の富栄養化が進んだことが読み取れた。6.6-4.4 千年前にかけて形成された灰色シルト層と黒色有機質層からなる明暗互層について行った分析結果から、暗色層の構成物は主に陸生の植物起源であり、明色層よりも強い湖水のかく乱と富栄養化が発生したことが分かった。これは集水域からの急な流れ込みを示唆し、夏季モンスーン強化に伴う降水や台風の強風による非定常的な堆積物と考えられた。過去 7.5 千年間の珪藻群集のデータから、6 回の海水浸入イベント、3 回の洪水イベントが認められた。そして洪水イベントは明暗互層の暗色層で発生したものよりもさらに強い陸域からの流入であったと推測された。今研究では、コアの層相に認められないようなイベントの痕跡も珪藻化石などに残されている可能性が示された。そのためイベント履歴の復元のためには、珪藻など各種分析を含めて総合的に議論することが必要と考えられる。

謝辞

防災地質研究所の吉永祐一氏には、試料に関わるデータの提供をして頂いた。九州大学大学院理学研究院の山内敬明准教授には、明暗互層について有益なご意見を頂いた。九州大学理学部中央分析所の方々には CHN 分析をして頂いた。ここに併せて、厚くお礼申し上げます。

引用文献

- 宇佐美龍夫 2013 『日本被害地震総覧 599-2012』 東京大学出版会。
岡村 眞・松岡裕美 2012 「津波堆積物からわかる南海地震の繰り返し」『科学』 82 (2) : 182-191。

- 河名俊男・中田 高 1994 「サンゴ質堆積物の年代からみた琉球列島南部周辺海域における後期完新世の津波発生時期」『地学雑誌』103 (4) : 352-376。
- 小林 弘・出井雅彦・真山茂樹・南雲 保・長田敬五 2006 『小林弘珪藻図鑑 第1巻』内田老鶴圃。
- 多田隆治 2005 「アジア・モンスーンの進化と変動—そのヒマラヤ—チベット隆起とのリンケージ—」『地質学雑誌』111 (11) : 668-678。
- 藤原 治 2016 「津波堆積物研究の新展開に向けて」『第四紀研究』55 (3) : 93-106。
- 藤原 治・谷川晃一郎 2017 「南海トラフ沿岸の古津波堆積物の研究：その成果と課題」『地質学雑誌』123 (10) : 831-842。
- 町田 洋・新井房夫 1978 「南九州鬼界カルデラから噴出した広域テフラ—アカホヤ火山灰」『第四紀研究』17 (3) : 143-163。
- 町田 洋・新井房夫 2003 『新編火山灰アトラス：日本列島とその周辺』東京大学出版会。
- 渡辺仁治 2005 「淡水珪藻生態図鑑：群集解析に基づく汚濁指数 DAIPo, pH 耐性能」内田老鶴圃。
- Ando, M., Kitamura, A., Tu, Y., Ohashi, Y., Imai, T., Nakamura, M., Ikuta, R., Miyairi, Y., Yokoyama, Y. and Shishikura, M. 2018 Source of high tsunamis along the southernmost Ryukyu trench inferred from tsunami stratigraphy. *Tectonophysics* 722 : 265-276.
- Bronk Ramsey, C. 2009 Bayesian analysis of radiocarbon dates. *Radiocarbon* 51 (1) : 337-360.
- Kemp, A. E. S., Pearce, R. B., Koizumi, I., Pike, J. and Rance, S. J. 1999 The role of mat-forming diatoms in the formation of Mediterranean sapropels. *Nature* 398 : 57.
- Kilham, P. 1990 Ecology of *Melosira* species in the Great Lakes of Africa. *Large Lakes*, Tilzer, M.M. and Serruya, C. (Eds.), pp. 414-427, Springer.
- Kilham, P., Kilham, S. S. and Hecky, R. E. 1986 Hypothesized resource relationships among African planktonic diatoms. *Limnology and Oceanography* 31 (6) : 1169-1181.
- Killops, S. D. and Killops, V. J. 2005 *Introduction to Organic Geochemistry*, Second Edition. Blackwell publishing Ltd.
- Meyers, P.A. 1994 Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter. *Chemical Geology* 114 : 289-302.
- Nakada, M., Yonekura, N. and Lambeck, K., M. 1991 Late Pleistocene and Holocene sea-level changes in Japan : implications for tectonic histories and mantle rheology. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 85 : 107-122.
- Reimer, P., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J.W., Blackwell, P.G., Bronk Ramsey, C., Buck, C.E., Cheng, H., Edwards, R.L., Friedrich, M., Grootes, P.M., Guilderson, T.P., Haffidason, H., Hajdas, I., Hatté, C., Heaton, T.J., Hoffmann, D.L., Hogg, A.G., Hughen, K.A., Kaiser, K.F., Kromer, B., Manning, S.W., Niu, M., Reimer, R., Richards, D.A., Scott, E.M., Southon, J.R., Staff, R.A., Turney, C.S.M. and van der Plicht, J. 2013 IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0-50,000 years cal BP. *Radiocarbon* 55 : 1869-1887.
- Rivera-Rondón, C.A. and Catalan, J. 2017 The ratio between chrysophycean cysts and diatoms in temperate, mountain lakes : some recommendations for its use in paleolimnology. *Journal of Paleolimnology* 57 : 273-285.
- Round, F. E., Crawford, R. M. and Mann, D. G. 1990 *The diatoms. Biology and morphology of the genera*. Cambridge University Press.
- Rohling, E.J., Marino, G. and Grant, K.M. 2015 Mediterranean climate and oceanography, and the periodic development of anoxic events (sapropels). *Earth-Science Reviews* 143 : 62-97.
- Smith, V. C., Staff, R. A., Blockley, S. P. E., Bronk Ramsey, C., Nakagawa, T., Mark, D. F., Takemura, K., Danhara, T. and Suigetsu 2006 Project members 2013 Identification and correlation of visible tephra in the Lake Suigetsu SG06 sedimentary archive, Japan : Chronostratigraphic markers for synchronising of east Asian/west Pacific palaeoclimatic records across the last 150 ka. *Quaternary Science Reviews* 67 : 121-137.
- Smol, J. P. 1985 The ratio of diatom frustules to chrysophycean statospores : a useful paleolimnological index.

- Hydrobiologia* 123, : 199-208.
- Tomas, C. R. 1996 *Identifying marine diatoms and dinoflagellates*. Academic Press, Inc.
- Woodruff, J. D., Donnelly, J. P. and Okusu, A. 2009 Exploring typhoon variability over the mid-to-late Holocene : evidence of extreme coastal flooding from Kamikoshiki, Japan. *Quaternary Science Reviews*, 28 (17-18) : 1774-1785.
- Woodruff, J. D., Irish, J. L. and Camargo, S. J. 2013 Coastal flooding by tropical cyclones and sea-level rise. *Nature* 504 : 44-52.
- Woodruff, J. D., Kanamaru, K., Kundu, S. and Cook, T. L. 2015 Depositional evidence for the Kamikaze typhoons and links to changes in typhoon climatology. *Geology* 43 (1) : 91-94.
- Yang, X., Yang, H., Wang, B., Huang, L.J., Shen, C.C., Edwards, R.L. and Cheng, H. 2019 Early-Holocene monsoon instability and climatic optimum recorded by Chinese stalagmites. *The Holocene* 29 (6) : 1059-1067.
- Yokoyama, Y., Nakada, M., Maeda, Y., Nagaoka, S., Okuno, J., Matsumoto, E., Sato, H. and Matsushima, Y. 1996 Holocene sea-level change and hydro-isostasy along the west coast of Kyushu, Japan. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 123 (1-4) : 29-47.

【2020年1月17日受理】

Diatom fossil assemblages during the past 7500 years in Lake Ikeda, Shimojima at Amakusa Islands, southwestern Japan

**FUKUMOTO Yu¹, MITA Tomokazu², KASHIMA Kaoru², HARAGUCHI Tsuyoshi³,
YAMADA Kazuyoshi⁴**

Abstract : Diatom fossil assemblages were analyzed on core sediment taken from Lake Ikeda, located in Southwestern tip of Amakusa Island, western Kyushu. The lake is a lagoon system facing outer ocean through low altitude sand bar, which facilitates us the discovery of the traces of event deposits (tsunami, storm surges etc.). On the 22m length of core sediment, diatom fossils were analyzed at the surface 15m length that covers the past 7.5 thousand years of sedimentation. Diatom flora was dominated originally by marine-brackish water taxa, but replaced by fresh water taxa at 6.7 cal kyr BP indicating that formation of sand or gravel bar separated the lake area from outer ocean. Long term sedimentation and shallowing of lake bottom, and recent eutrophication caused by human activity were also reflected in diatom assemblages. In the course of diatom floral succession dominated by planktonic taxa, temporal increase of marine and benthic taxa were observed at 6 and 3 times, respectively. They could be event deposits although accurate periodicity could not be found. We additionally carried out a chemical analysis on laminae structure of black and grey color distributed at 6.6-4.4 cal kyr BP showing that black layers were consisted mainly of terrigenous plants. Diatom taxa of turbulent water conditions also increased. It is therefore likely that sudden inflow of terrigenous materials possibly by typhoon rainfalls caused the deposition of these black layers. Event deposits found from diatom assemblages and lithological units did not match precisely in this study. This implies that use of multiple proxies is required for secure detection of event deposits.

Keywords : Lake sediments, Diatom fossils, Event deposits, Holocene, Southwestern Japan

1 : Research Center for Pan-Pacific Civilizations, Ritsumeikan University

2 : Faculty of Science, Kyushu University

3 : Faculty of Science, Osaka City University

4 : Museum of Natural and Environmental History, Shizuoka