

Gabriel, J.J., Reinhardt, E.G., Peros, M.C., Davidson, D.E., van Hengstum, P.J. and Beddows, P.A., 2009. Palaeoenvironmental evolution of Cenote Aktun Ha (Carwash) on the Yucatan Peninsula, Mexico and its response to Holocene sea-level rise. *Journal of Paleolimnology* 42 (2), 199-213.

メキシコ、ユカタン半島のセノーテ・Aktun Ha (Carwash)の古環境学変動と完新世の海水準上昇に対するその応答

Abstract

61cmのコアをメキシコ、ユカタン半島のセノーテ・Aktun Haで、地下水面より4m下で採取した。セノーテは、カリブ海の海岸から8.6kmの地点にあり、その形成と変化は海水準変動による影響が大きい。コア基底部の年代は、暦年代6,940-6,740年前であり、その上の堆積物は、その後200年の間で急激に堆積した。花粉記録は、セノーテがレッド・マングローブ(*Rhizophora mangle*)やシダ(Polypodiaceae)の優占した湿地から開放水域系へと変化したことを示す。これらの植生変化は海水準や塩分によってコントロールされ、それ故、過去の海水準の有用な代替指標である。基本的に、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ の同位体比は陸生の植生の影響(-29‰ VPDB)を反映するが、コア上部ではより負の値(-33‰ VPDB)へ変わる。これは、冠水したセノーテプール内の粒子状物質からの影響を示唆する。微化石集団の群集は、コアのほとんどでは見られなかったが、コア上部6cmの微化石群集は未成熟の有孔虫 *Ammonia tepida* と有殻質根足虫類種の *Centropyxis* が優占している。これらの群集は、セノーテが開放的な状態であったことや、カリブ海海盆における海水準上昇と関連する大規模な環境変化が暦年代で6,600年前にあったことを示す。これらのデータは、既に確立されているカリブ海の海水準曲線とよく一致する。我々のセノーテ・Aktun Haにおける環境史の復元は、この地域の植物相の歴史や水文学的歴史の解明に役立ち、カリブ海における完新世の海水準の履歴を研究するにあたってセノーテの堆積物の有用性を強調する。

はじめに

メキシコのユカタン半島は、始新世の石灰岩から構成され、その内部は第四紀の海岸線にオフラップするシーケンスである(Weidie 1985)。この半島は、後期更新世から構造地質学的に安定であった(Szabo et al., 1978)。石灰岩は、海岸において淡水と塩分を含み、侵入してくる海水の上に浮かぶ淡水レンズを伴う密度成層した帯水層である。淡水と海水の境界における混合は、 CaCO_3 について不飽和な水のゾーンを生み出し(Back et al., 1986; Smart et al., 1988)、カリブ海と水文学的に繋がった、大規模で曲がりくねった地下水の洞窟システムの形成をもたらす(Smart et al., 2006)。メキシコのQuintana Roo州では、現在165の調査済みの地下水系があり、それぞれ全長170kmと155kmとされる、世界最長の2つの地下洞窟系であるOx Bel HaとSac Actunを含む(QRSS 2008)。洞窟システムには、地下の洞窟が崩壊したことによって形成された多数の陥没した穴やセノーテがあり、洞窟を

地表に開放させている。セノーテの堆積物は、あまり研究がされておらず(e.g. Alvarez Zarikian et al., 2005), 完新世の海水準上昇を通じたそれらの環境的变化については、ほとんど知られていない。

この研究の目的は、セノーテの堆積物の記録が環境アーカイブや海水準の指標として有用かどうかを評価することだ。具体的には、我々は、全岩分析(すなわち、有機物含有量)、微化石(有孔虫、有殻質根足虫類、貝形虫)、有機物の炭素同位体 ($\delta^{13}\text{C}$)、炭酸塩の同位体比($\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{18}\text{O}$)、花粉学の様々なアプローチを使って、Quintana Roo 州の Carwash として一般に知られるセノーテ・Aktun Ha の堆積物を検討した。ここに提示した結果は、セノーテの堆積物記録は、(1)セノーテの内とその周辺の過去の植生や水文学的状态に関する情報をもたらし、(2)既存のカリブ海西部における海水準変動曲線(e.g. Lighty et al. 1982; Fairbanks 1989; Blanchon and Shaw 1995; Toscano and Macintyre 2003; Gischler and Hudson 2004)を検証し、改良するのに極めて高い可能性があることを示す。

研究地域

セノーテ・Aktun Ha(UTM coordinates: 16Q 449224 2241909)は、メキシコのユカタン半島の Quintana Roo 州の Tulum という街の 8km 北西に位置している(Fig. 1a)。ユカタン半島の東海岸における現生の植生は、熱帯乾燥で、中規模林である。セノーテは卵形をしており、面積は大きく(～1,000m²)、最大深度は 4.5m である。セノーテは、海岸から 8.6km 離れており、水位は平均海水準(msl)とほぼ同じである。なぜなら、半島の重力的な水の勾配は約 0.5～1.0cm/km だからである(Marin and Perry 1994; Beddows 2004)。平均水温は 25°C で、塩分は 1.5ppt である。セノーテは洞窟システム Aktun Ha と繋がっており、Aktun Ha は 2.8km の範囲で全体の調査がなされていて、海岸方向にも内陸方向にも通路が走っている(Fig. 1b)。セノーテとそれに隣接する洞窟の水の物理化学的状态は、2004～2007 年にかけて行った定期的なモニタリング(Beddows 2004; Beddows et al., 2007)に基づけば、季節的にも、年ごとにも一貫性があり、1 日約 2 回の水位変動は約 5cm かそれ以下だった(Beddows 2004)。

研究史

後氷期の海水準上昇

カリブ海盆の後氷期の海水準の履歴を扱う研究は、多数ある。Lighty et al. (1982)は、熱帯西大西洋の礁縁サンゴ(*Acropora palmata*—海水面より 5m 以内に生息する)の年代を決定し、過去 10,000 年間に及ぶ海水準変動曲線を提示した。Barbados の *A. palmata* を用いた Fairbanks (1989)による更なる研究は、海水準変動曲線を 17,000 年前まで引き延ばした。*A. palmata* の成長休止に基づいて、2 回の海水準の急激な上昇期間を検出した：融氷イベント IA(mwp-IA)(12,000 year BP)と融氷イベント IB(mwp-IB)(9,500 year BP)。約 7,600 年前の 3 度目の急激な海水準上昇期も、カリブ海のいくつかの

場所で検出されており、その上昇速度は 45mm/year である(Blanchon and Shaw 1995; Blanchon et al. 2002). しかし、運搬あるいは浸食などの化石化作用を被っていない信頼性のあるサンゴの試料を採取することは、困難である。潮間帯のマングローブの泥炭もまた、海水準上昇の指標として用いられてきたが(e.g. Ellison 1993), 他の研究者は、これらのデータには、有機物の絶え間ない分解と圧密による問題があると異議を唱えている(e.g. Gischler 2006). 最近では, Toscano and Macintyre (2003) は、海水準の上限と下限を制約するために、新旧の公表されたサンゴやマングローブの泥炭のデータを統合して作られた較正された海水準変動曲線を提示した。この曲線は, Lighty et al (1982) や Fairbanks (1989)によって提示されたものと似ているが、この方法の精度は、2m 以下の小規模な海水準変動を記録するには不十分である(Scott et al. 1995). 湿地の有孔虫群集とマングローブの泥炭を用いて、Blum et al. (2001)が示した、メキシコ湾のテキサス沿岸からの完新世の海水準データは、中期完新世(～6,800-4,800 year BP)の海水準が現在の海水準よりも 1.95m 高かったことを示す。Blum et al. (2001)は、西アフリカ、南アメリカ東部、オーストラリアなどの他の低緯度海岸地域において同様な高海水準期を引き合いに出している。しかし、今のところ、この高海水準期を立証するカリブ海地域の研究はない。

完新世の気候変動

この地域における古環境研究のもう一つの主要な焦点は、完新世の気候史とそれの古代マヤ文明に対する影響である(e.g. Curtis et al. 1996; Leyden et al. 1996; Whitmore et al. 1996; Hodell et al. 2001; Leyden 2002). これらの研究では、洞窟システムを伴うかどうかは不明の孤立した内陸の湖(つまり、閉鎖した湖)からの堆積物記録を用いて、水文学的入出力の基本である降水と蒸発を検討した。降水に対する蒸発の割合は、貝形虫や腹足類の殻の $\delta^{18}\text{O}$ 分析を通じて決定した(Curtis et al. 1996; Hodell et al. 2001). Hodell et al. (2001)は、過去 2,600 年間の記録において 208 年間の干ばつの卓越周期を発見し、この周期は太陽活動と密接な関係にある。これらの閉じた海盆湖は、一般的にカリブ海沿岸から 40km 以上あり、それらを地域的な気候変動を研究するためには理想的なものにしているが、海岸に近接した洞窟システムにあるセノーテの変動に力を注いだ類似の研究はない。

花粉学

ユカタン半島南東の花粉学的研究で、この地域の植生を形づくる気候プロセス、海水準プロセスあるいは人為的プロセスを扱っているものはほとんどない。この地域で最も長い記録としては、Leyden et al. (1998)が、Coba の考古学的サイトにある Coba 湖から～8,400 年前の花粉記録を見いだした。植物相は、初期は半落葉性の湿地の森林が優占だった。イネ科やアカザ科の花粉などの森林破壊の指標は、暦年代で～3,600 年前に出現し始め、この地域の開墾の指標であるトウモロコシ科の花粉は～2,800 年前から出現する。西暦 1,240 年までには Coba の人口は減少し、森林が攪乱前の状態に回復し始めた。

より南の、ベリーズ国境付近の Rio Hondo 地域では、Torrescano and Islebe (2006)はマングローブ

と熱帯雨林の変化の～5000年間の記録を明らかにするコアを研究した。この地域は初め、クワ科やマメ科の樹木によって優占した森林によって構成されていた。暦年代で4,600～4,000年前、マングローブの *Rhizophora mangle* と *Conocarpus erectus* はより豊富になり、これは、海水準の上昇に伴う Rio Hondo の浸水への応答である。その後、*R. mangle* は衰退していき、*C. erectus* が記録上優占していた。これは、もしかすると、高塩分化や季節的な乾燥化の環境へのシフトを反映しているのかも知れない。堆積休止により、最近2,500年間の記録は損失している。

Islebe and Sanchez (2002)は、Cancun の約30km南に位置する海岸線付近のマングローブからのコアを調査した。彼らは、¹⁴C年代で2,500～1,500年前には、湿潤な状態であったことを推察し、この時期、*R. mangle* の花粉とその近くの半常緑樹熱帯林の成分がコアを優占していた。¹⁴C年代で1,500～1,200年前には、*C. erectus* が優占しており、これをIslebe and Sanchez (2002)はマヤ文明の衰退期と関連しているかも知れないと示唆する、より乾燥していてより開放的な環境であったことを示す。その後、*R. mangle* は、約200年の間、再度優占し、その後、¹⁴C年代で1,000年前までに *C. erectus* が再び現れて、現在まで持続する。

古環境指標

Thecamoebians(有殻質根足虫類)や有孔虫は、海岸システムの環境条件を復元するのに非常に有用な、testate根足虫門である。なぜなら、それらはほぼ全ての水生環境に生息していることで知られており、塩分や水温、富栄養化に非常に敏感だからである(Scott et al., 2001)。その組織は、極めて高い保存性を持ち、それらは一般的に、大量に産する(>10³/cc)ので、詳細な環境復元が温暖・熱帯両地帯から多数の研究で行われてきた(e.g. Miller et al. 1982; Honig and Scott 1987; Hodell et al. 2005; Reinhardt et al. 2005; Peros et al. 2007a)。有殻質根足虫類は、ユカタンのセノーテや洞窟から報告されたことが今までになく、たった1つの有孔虫の分類群が、半島にある2つの閉じた海盆湖である Aguada X'caamal (Hodell et al. 2005)と Chichancanab 湖(Hodell et al. 1995)から報告されたに過ぎない。しかし、バルバドス島では、池に有殻質根足虫群集が生息していることが分かった(Roe and Patterson 2006)。それらは、一般的に存在度と多様性がともに低く、汽水の環境条件を示唆する centropyxid によって主に優占されている(Riveiros et al. 2007; van Hengstum et al. 2008a)。これらの数少ない研究以外で、有殻質根足虫類や有孔虫の分布は、セノーテや洞窟システム内では事実上知られていない(van Hengstum et al. 2008b)。

花粉分析も同様に、セノーテ・Aktun Ha の植生史を記載するために用いられ、そして、堆積盆の水文学的变化を推測した。マングローブの群生は、カリブ海を取り巻く静かな水域環境では一般的で、これらシステムについての最近の花粉学的研究は、この地域における海水準変動と気候変動の証拠をもたらす(e.g. Torrescano and Islebe 2006; Peros et al. 2007a, b)。カリブ海的主要マングローブの種は、保護されたシステム内の汽水域で典型的に生育する、*Rhizophora mangle* (レッドマングローブ)

である(Tomlinson 1986). その花粉は大量に生産され、風と水の両方によって分散されるが、現在の海岸堆積物についての最近の研究は、*R. mangle* の花粉が花粉の総量の 30%を超える時、その供給源の植物はコアの採取地点から半径 5m 以内にあるようだ(Davidson 2007). このように、*R. mangle* の花粉は地域の植生ダイナミクスの良い指標であり—これは汽水環境への親和性によるものである—、過去の塩分の指標としても用いることができる.

$\delta^{13}\text{C}$ 分析は、セノーテや洞窟システムへの有機炭素と無機炭素の主要源を特定できる可能性を持っている. Pohlman et al. (1997)は、Naranjal 地下水系の一部である、セノーテ・Maya Blue の中とその周辺からの有機物の $\delta^{13}\text{C}$ データと、セノーテ内と洞窟の通路からの全有機炭素(TOC)値を示した. セノーテ・Maya Blue は、海岸から約 5.5km に位置し、約 8.6km 離れた Aktun Ha の研究サイトと非常に似たシステムである. 彼らの結果は、陸地の植生の $\delta^{13}\text{C}$ は -29‰ で、一方、セノーテ内の水柱に存在する全ての有機物を表現する粒子状有機物プールの $\delta^{13}\text{C}$ は -35‰ だった(Fig. 2). Pohlman et al. (1997)によって提示された堆積物の TOC 値は、有機炭素が、浸水した洞窟の入口で 24%で、60m 以上洞窟内部に入ったところで 0.1%ほどになる.

方法

直径 5cm の堆積物コアが、2006 年 8 月にスキューバダイバーによって、現在の海水準より 4m の深さのセノーテの天井の崩落した高まりの比較的平坦な頂上から採取された. 攪拌した堆積物を避けるために、天井の崩落した高まりの側面から離れた高い中央の位置を選択した. 石灰岩のブロックでできた天井の崩落した高まりの間の堆積物がたまっている隙間を見つけるためには、何回かのコアの押し込みが必要だった. 堆積物へは 1.3m 貫通したが、得られたコアの長さは 61cm だった. この矛盾の原因は堆積物の圧縮にあるようだ. なぜなら、この堆積物は有機物含有量(平均 55%)が高く間隙率が高いためである. コアの先端部で堆積物が詰まったことによる過度の押し込みは除外できないが、堆積物のコンシステンシーの緩さは、これが原因ではないことを示唆する.

花粉化石は、コアからの 18 のおおよそ均一に分けられたサブサンプルを、希釈した HCl, KOH, アセトリシス溶液, HF で処理し、150- μm と 7- μm のナイロンメッシュの両方でふるった(Faegri and Iversen 1989; Cwynar et al. 1979). 既知数のコケ・*Lycopodium clavatum* の胞子を、それぞれのサブサンプルに加えたので、花粉濃度(粒子数/cc)を見積もることが出来た. 同定は、公表済みのアトラス(Palacios Chávez et al. 1991; Roubik and Moreno 1991)と Neotropical Pollen Database (Bush and Wang 2007)を用いて行われた. 18 のサブサンプルの大半で、少なくとも 300 の花粉や胞子がレベル毎に列挙された; いくつかのサブサンプルでは、花粉濃度が低いため、この数に届いていない.

微化石サンプルは、シルトからクレイサイズの粒子を除くため、45 μm で湿式ふるい分けされ、濡れた状態で実体顕微鏡(最大 80 倍)を用いて観察された. サンプルは、湿式分割装置と標準的な方法でランダムに分割された(Scott and Hermelin 1993). この群集は、公表済みの分類学的情報(Moore 1961;

Medioli and Scott 1983; Pointier 2001; Scott et al. 2001)を用いて種レベルで同定された。個体数は、サンプル数/cm³の層位分布として示される(Table 1)。

10 の全堆積物試料は、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ の同位体比のために分析される。始めに、それぞれのサンプルを殻の破片、あるいはカルサイト粒子などの炭酸塩を酸化させるために、12 時間、30ml の 10%塩酸で溶解して洗浄した。そして、サンプルを蒸留水で 2 回洗浄し、67°Cのオーブンで 24 時間乾燥した。残った有機物を、すり鉢とすりこぎで細かく均質な粉末にすり潰した。重さ 40-50 μg のサブサンプルは、Costech 製の元素分析装置にかけて燃焼し、Delta Plus XP 質量分析計で分析した。その結果は、国内と IAEA と NIST の標準試料(NBS21, ANU-Sucrose)に対して比較した。同位体比は、Vienna PeeDee Belemnite (VPDB)に対してパーミル(‰)の標準デルタ表記法(δ)で表記した。

貝形虫 *Cytheridella ilosvayi* の成体標本は、コアを通じて 9 つの区間の 250 μm の堆積物粒子から抽出した。バルクの有機物を除去するために、その背甲を蒸留水中で洗浄、超音波洗浄した。サンプルは、カナダのオンタリオ州のロンドンにある西オンタリオ大学の安定同位体科学の研究所の VG Optima 質量分析計を用いて $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ と $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ の同位体比を分析した。

全有機炭素量(TOC)は、Heiri et al. (2001)によって提示された強熱減量(LOI)法を用いて、29 のバルクサンプルについて分析された。

放射性炭素(AMS)分析は、コアの 4 つの区間で採取された 3 つの小枝と 1 つの貝について、フロリダのマイアミにある Beta analytic Radiocarbon Dating 研究室にて行われた。小枝のサンプルは、全ての炭酸塩と二次的有機物を除去するために酸/アルカリ/酸の手順で前処理し、一方、貝は酸エッチング法で前処理した。そして、サンプルは、放射性炭素年代を分析し、IntCal04 データベース(Reimer et al. 2004)を用いて較正された。ここに示されているデータは、暦年代(cal year BP)である。

結果

堆積相と LOI

4~61cm までのコアのほぼすべてが、暗色の有機物の多い泥炭であり、いくつかの木片や腹足類の全殻や破片を含む。0~4cm までは、腹足類の全殻と破片そして植物片を含む粗いフィラメント状の藻類から成っていた。LOI 値は、コアを通じて変化に富む(Fig. 3)。その値は、平均 55.8%(重量比)だったが、高いと 71%、低いと 32%だった。しかし、明瞭な傾向はこのコアには見られなかった。

花粉

花粉の分類群(Fig. 3; Table 2)に基づいて、3 つの花粉帯に分けられる。花粉帯 3 は、最下部のサンプル(51-61cm)であり、レッドマングローブ種の *Rhizophora mangle* が優占する。少量のシダ(Polypodiaceae)の胞子や、おそらく *Acrostichum* (マングローブのシダ)の胞子と思われるもの、いくつかの樹木種(例えば、Sapotaceae, Solanaceae, and *Spondias mombin*)も、この花粉帯を特徴付けて

いる。形態から、このコアの Solanaceae のほとんどは、*Solanum* であると思われ、一方、Sapotaceae は *Pouteria campechiana* (カニステル) のようだ。花粉の濃度は、花粉帯 3 が最も低い。

花粉帯 2 (7-51cm) は、Polypodiaceae と花粉濃度の増加、*Rhizophora* と花粉帯 3 で見られたいくつかの樹木や低木の減少によって特徴付けられる。46cm では、Malphiaceae (キントラノキ科) が、樹木と低木の総数の 10% まで増加する。花粉帯 2 の花粉濃度は、他のゾーンよりも遙かに高く、ある深度では、およそ 48,000 個/cc に達する。

花粉帯 1 は、0-7cm の表層のサンプルである。Polypodiaceae の多産と、花粉濃度の急激な減少(花粉帯 3 に類似)にもかかわらず、花粉帯 1 の花粉群集の豊富さ(Birks and Line 1992; Peros and Gajewski 2008 で定義)は高く、様々な樹木や低木、草本植物を含む。*Spondias monbin* (モンビンノキ) は、この花粉帯で最も豊富で、*Ipomoea* (アサガオ) や Compositae (キク科) のような、他の分類群はより下位の層準と比べて、非常に高い濃度を記録している。

微化石

コアの上部の区間(0-6cm)の群集は、我々が、有孔虫 *Ammonia tepida* の未成熟個体として同定したものが優占する(Fig. 3)。全ての標本が十分に発育しておらず、初室(prolocus)に 1-2 室が付随したものが多く。成熟した標本はこの群集からは見られない。この標本が *A. tepida* の未成熟個体と考えたのは、塩分が 3.3 ppt であることを示す、有殻質根足虫類の *Centropyxis constricta* と *Centropyxis aculeata* が共に見つかったためであり、3.3ppt という値は現在の海水の塩分と一致するからである。この密接な随伴に基づいて、我々は、これらを新種とするよりは、*A. tepida* の未成熟個体であると解釈した；*Ammonia tepida* と *Centropyxis* spp. は、エスチュアリーの上流で見つかる(e.g. Scott et al., 2001)。これらの未成熟個体の公表されたデータはないが(D.B. Scott pers. comm. 2007)、それらのサイズが小さい(~50 μ m)ため、記録されていないのかも知れない。多くの微化石研究は、本研究で使用した 45 μ m のふるいに対して、63 μ m のふるいを用いる。それゆえ、本研究で列挙された多くの小さい標本は、既存の研究で見落とされていたのかも知れない。もし、この解釈が正しいとすれば、未成熟個体が多いことは、それらの大量発生を促す高塩分化が短期間であったためか、成熟するほどの期間が続かなかったことを示唆する。基本的に遠洋性の原生生物である淡水湖沼の tintinnids 科も、この区間に存在する。6-61cm のコアの残りは、貝形虫 *Cytheridella ilosvayi* と *Darwinula stevensoni* 及び、腹足類 *Pyrgophorus coronatus* が優占している。貝形虫は、カリブ海の他の研究(e.g. Holmes)で記載されており、淡水~わずかに塩分のある、アシが繁茂する沼地や開水域までの浅い水域に生息している。

同位体地球化学

$\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 値は、コアトップ(0-6cm)において、-32.8‰から-28.8‰へ、より正の値への顕著なシフトを示

し、6-61cmでは、安定的に、再びより負の値にシフトする(〜29.5‰)(Fig. 3; Table 3). 同様の傾向は、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ でも見られ、コアのトップ(2-3cm)で最も負の値(-12.4‰)を持ち、7-8cmで-9.7‰まで上昇し、コアの下部に向かって小さな変動を示し、平均は-10.2‰である。最後に、 $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ 値は、コア全体を通して-4.21〜-5.25‰まで変動するが、6cm付近でより負の値になった。6cmにおける石灰岩と有機質の破片の両方の $\delta^{13}\text{C}$ と $\delta^{18}\text{O}$ のシフトは、セノーテ内の水の化学的性質と有機物生産/堆積の両方が大きく変化したことを示す。

年代

^{14}C 年代決定のために選別された、3つの木片と貝殻は、コアの下方に向かって、年代がわずかに古くなった。コアの基底54-55cmは、暦年代で $6,840 \pm 100$ 年前で、55-57cmから産した貝殻の年代(暦年代で $7,340 \pm 90$ 年前)とだいたい同じである；その差は多分、地下水の無機炭素による硬水効果によるものかも知れない。より上位のサンプル(34-36cm, 5-6cm)は、暦年代で $6,580 \pm 90$ 年前という似た同じような値を示す(Table 4)。この年代は、5-57cmのコアの大部分で堆積速度が0.65cm/yearであったことを示唆する。5-6cmの暦年代で $6,580 \pm 90$ 年前という年代は、過去6,500年間の堆積速度は 1.9×10^{-3} cm/yearで、それ以前の約1/1000倍になったことを示し、つまり、これはTorrescano & Islebe (2006)で報告された堆積休止仮説である。

5つ目の ^{14}C 年代値は、Coke et al. (1991)によって深度27mのAktun Ha洞窟システム内の通称：暖炉からの一切れの木炭の年代決定から得られた。木炭は、古代人の部屋として知られる洞窟の区間にあり、 $8,250 \pm 80$ 年前、暦年代で $9,230 \pm 200$ 年前(IntCal 04によって再校正; Reimer et al. 2004)と年代決定され、その当時、洞窟内の水位がこの高度よりも下位にあったことを示す。

議論

セノーテ・Aktun Haの環境復元

花粉記録は、セノーテ内の水位の上昇した期間、3つの明瞭な花粉相を示す。基底の花粉帯は、基本的に*R. mangle*の量は高いが、かなり変動するという特徴を持つ。この植物は、同時期の海水準の良い指標を提供する。なぜならば、レッドマングローブが汽水環境の潮間帯内で生育するからである。マングローブの環境でよく見つかる、シダの*Acrostichum*は、花粉帯2で量が多くなる。マングローブの多くの花粉量に伴って、これは、暦年代で6,500〜7,000年前には、その環境が湿潤な陸地で、水位が崩壊物の高まりの頂上とほぼ等しかったことを示す(Fig. 4)。コア中のこれらの花粉粒子の高い量は、地域的な流入よりも、セノーテのくぼみ内の崩壊物の高まり中に生育する、植物や樹木からの局所的な流入を示唆する。似たような環境は、いくつかの現在の冠水したセノーテ、例えば、セノーテ・Eden(16Q 473097 2265716)などで見られ、このセノーテは、崩壊物の高まりの部分がセノーテプール

の中央に、シダや低木、草本植物などの小さな島を形成する(Fig. 5). 崩壊物の高まりの裂け目に堆積している堆積物は、有機物が豊富かつ、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 値は最大-29‰で、陸生植生の指標となる(Fig. 2).

9cmにおける花粉濃度の減少と花粉帯 1 と 2 にかけての *R. mangle* の減少は、暦年代で 6,500 年前に崩壊物の高まり(平均海面より 4m 下位)の冠水を示す(Fig. 4b). 海水準の継続的上昇は、コアトップ 5cm に記録されたように、冠水したセノーテを形成した(Fig. 4c). 暦年代で約 6,500 年前には、この上昇する地下水面(と海水準)は、崩壊物の高まり上の植生を全滅させ、この植生からの花粉粒子の直接流入の休止を引き起こした. コアトップ 5cm は、花粉の豊富度の増加と草(Poaceae イネ科), そして、おそらく雑草(Compositae キク科)と思われるものの出現を示し、過去 6,500 年間にわたって、地域的植生の攪乱があったことを示唆する. にもかかわらず、堆積速度が非常に遅かったため、植生変化の正確なタイミングを決定することは不可能である. 上部 2-3cm の $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 値の-29‰から-32‰へのシフトは、水没があったことを示す. この水位の上昇は、海藻の生産性を高め、PPOM のより早い集積とより負の $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 値のシフトをもたらした.

コア中の微化石群集は、花粉と同じような傾向を示し、2 つのはっきり異なる生物相(Fig. 3)が同じような冠水史を示す. コアのトップ(<6cm)における生物相 1 の微化石群集は、やや汽水の環境(~3 ppt)の冠水したセノーテへのシフトを示唆し、汽水環境は *A. vulgaris*, *Centropyxis* spp., 未成熟の *A. tepida*, 遠洋性の tintinnids (van Hengstum et al. 2008a)によって示唆されている. コアの 6cm から下位は、有殻質根足虫類や有孔虫の欠如によって特徴付けられるが、貝形虫の *C. ilosvayi* と *D. stevensoni*, 淡水の腹足類 *P. coronatus* に優占されている. 2 種の貝形虫は、マングローブ周辺の崩壊した積み重なるの近くの浅水域に生息する傾向がある. これらの種は、ユカタンの他の湖でも見つかっている(e.g. Curtis et al. 1996; Whitmore et al. 1996; Hodell et al. 1995, 2005).

コアの 6cm から下位における有孔虫と有殻質根足虫類の欠落の理由は、定かではないが、湿地/マングローブにおいて、厳しい環境条件(つまり、低酸素状態)が原因であったかもしれない. 湿地とマングローブの堆積物は、通常、保存状態の良好な有孔虫や膠着した組織を持つ有殻質根足虫類を含み(Scott et al., 2001), 花粉や貝形虫の保存状態は、有孔虫や有殻質根足虫類も同様に保存されることを示唆する. この部分の相対的に速い堆積速度(0.65cm/year)が原因で、有殻質根足虫類や有孔虫の濃度が低いということもあり得る. 有機物の腐食により起こりうる無酸素状態と連動したことで、個体密度を更に制限し、標本がわずかという単純な理由で、発見されなくなったのかもしれない. 対照的に、上部の堆積速度の遅い層準の微化石密度が相対的に高いのは、水位の変化とセノーテが開放的な状態になったことに伴って、有機物の流入が減少したからである.

約 6cm 前後から始まった、 $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ と $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ の急激なより負の値への変化(それぞれ-11.59‰と-5.25‰)もまた、より塩分の低い環境への移行を示唆するのかも知れない. 現在の開放的なセノーテの全無機炭素(DIC)の $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ は-14‰で、一方、塩分躍層の下の海水は-3‰である(Pohlman et al. 1997). このように、負の値へのシフトは、 $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$ 値にも見られる、わずかな低塩分化のシフトを反映しているのかも知れない. これは、コアの基底においてマングローブが優占していること、つまりより汽

水的環境を示す花粉記録と調和的で、より塩分の低い環境と調和する。しかし、塩分が変化した原因は、これらのデータからは明らかでない。マングローブ phase の間に塩分が高くなったのは、浅い水塊からの蒸発が増加したためかも知れない。上昇する海水準と変化する水文学的条件によるその後の冠水は、塩分の低下を引き起こしたかも知れない。あるいは $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 値のシフトについては、上昇する水位に伴うセノーテ内の生産性の変化と関連している可能性がある。

展望

コアから得られた年代は、Toscano & Macintyre (2003)(Fig. 6)の較正された海水準変動曲線と比較され、他のカリブ海地域におけるマングローブ泥炭のデータ点とよく一致することを示した。この結果は、他のセノーテで検証されなくてはならない。セノーテの記録を使うことには、2つの主なメリットがある：(1)崩壊物の高まりは高さが安定しており、(2)湿地から開放的な冠水したセノーテの状態への移行が確認でき、正確で精密な海水準点を決定出来る。カリブ海における完新世の海水準上昇の高分解能の時間スケールは、高さの異なる「崩壊した高まり」のある他のセノーテの調査から構築できる。カリブ海における現在の海水準点は、海拔(正確さ、精密さ)に関係した方法論的な問題があるので、セノーテは、これらの議論を検証するさらなる指標をもたらすことができた。マングローブの泥炭は、圧縮の影響を受けやすい上、古い根元の泥炭が新しい泥炭とコンタミしていることがしばしばあり(Gischler 2006)、一方で、礁縁サンゴ(*A. palmata*)は、最大 10m の誤差範囲があり(Blanchon 2005)、約 1-2m オーダの小規模な海水準変動を決定することを難しくしている。さらに、より古い海水準点のサンプルを得るには、深い海(>100m; Fairbanks 1989)で掘削する必要がある。ここに示した結果は、複数の指標からのアプローチと、セノーテにおける、半陸性の湿地から開水域の状態への移行年代の決定は、これらの問題を克服することを示唆する。このように、より古い海水準の情報、より深い場所で collapse pile を伴う、セノーテのサンプリングによって得られる。例えば、海岸から 11.7km に位置する、セノーテ・Angelita(16Q 439555 2226701)は、深度 30m に collapse pile があり、更に時間を遡った海水準変動を追跡できる可能性をもたらす。

セノーテ・Aktun Ha からのデータもまた、カリブ海地域をまたぐ、中期完新世における沿岸の環境変化を報告した、増えている文献とも一致する。中央キューバの北海岸に位置する 67km² の湿地、Laguna de la Leche からの最近の古環境研究で、Peros et al. (2007a, b)は、花粉学・微古生物学的証拠を用いて、海水準上昇によって暦年代で 6,500 年前までに湿地が形成したことを示した。ベリーズでは、Yang et al. (2004)が、*R. mangle* の泥炭の厚い層がある Chetumal 湾から、堆積物コアを採取した。泥炭は、現在の海水準よりも下位の深度 5.2m にあり、更新世の石灰岩の最上部の上に堆積しており、その基底の年代は、6,330±70 年前(未較正)である。ジャマイカ島の同じような環境において、Digerfeldt and Hendry (1984)は、5,790-6,080 年前(未較正)と年代決定された *R. mangle* の泥炭から、現在の海水準よりも～4.5m 下位に海水準点を得た。ジャマイカのサイトと同時期に、フロリダの花粉学的証拠は、中期完新世におけるカシ科の優占する植物相からマツ科の優占する植物相の移行を示し

(Grimm et al. 1993), これは、半島をまたいで、乾燥した状態から湿潤な状態へシフトならびに貝形虫の殻の $\delta^{18}\text{O}$ の富化は、乾燥した状態から湿潤な状態へのシフトと海水準の上昇を示す(Alvarez Zarikian et al. 2005). フロリダ、キューバ北部、ベリーズ、セノーテ Aktun Ha といった、構造地質学的に安定した地域の全てで起こった変化は、カリブ海沿岸の植生と水文学的システムが、地下水の帯水層への海水準上昇の効果を通じて、海進に対する直接的、あるいは間接的な応答として、暦年代で～約 6,500 年前の広範囲にわたるシフトを被ったことを示す。カリブ海の沿岸地域全体にわたる、地質構造学的に安定な地域からの、他の同じような研究がセノーテ・Aktun Ha で確認された変化と同様の変化を示すだろう、と我々は推定する。

結論

西カリブ海盆の完新世の海水準史の議論が活発である。東ユカタン半島の Tulun 近くの、セノーテ・Aktun Ha から集められた古環境学的データは、この地域の相対的海水準史、及び、その地域の水文学と、植生への海水準の影響を解釈するのを助ける証拠を提供する。このコアを用いた複数の指標による研究は、カリブ海において、海水準上昇に直接的に結びつけることができ、暦年代で～6,800 年前から現在までのセノーテ内の環境変化を復元することができた。我々の結果は、相対的海水準が暦年代で～6,800 年前までに現在の水位から 4m 下の位置に達したことを示し、これは、カリブ海における既存の海水準変動曲線と一致する。更なる調査が必要とされるが、これらの予備的な結果は、セノーテの堆積物記録がカリブ海における有用な海水準の指標かも知れない、ということを示唆する。

(北村晃寿・玉置周子)