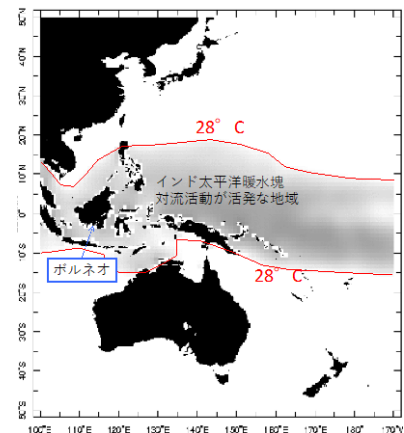


化学の力で古環境を読み解く

山本 正伸

地球環境と人類社会の将来を予測するうえで、過去の環境変動を知ることが重要です。本講義では、過去の環境をどのように復元し、その変動をどのように解釈してゆくのか、古環境学における方法を解説します。私の進めたマレーシアボルネオの研究を例にとり、泥炭地における調査と試料採取、実験室での化学分析、データの解析、他分野との協同等について、実体験にもとづいて説明します。

ボルネオは日本の南方にある南シナ海、ジャワ海、セレベス海、スル海に囲まれた世界第三位の面積を持つ巨大な島です。このボルネオは地球の気候を考えるうえで極めて重要な場所に位置します。ボルネオを中心とする西部熱帯太平洋とインド洋東部は地球表層でもっとも暖かい地域であり、インド太平洋暖水塊地域と呼ばれます（右図）。太平洋の赤道付近を東から西へと吹く貿易風が暖められた海水を太平洋の西側に掃き寄せるため、太平洋の西縁には水温が 28 度を超える暖かな水が分厚く蓄積されます。これが大気を暖める熱源となり、水蒸気を多く含む空気が暖められ上昇します。上昇した空気塊は高度 10 km を超える高さまで上昇し、東西南北に移流し、遠く離れたどこかで冷やされ沈降し、再び地表付近に戻ります。ボルネオはこの対流と呼ばれる空気の流れにおいて、暖かな空気が上昇する場所の中心に位置しています。空気が上昇し、冷却すると水蒸気が凝縮し液体の水が形成され、雨粒となって地表に降り注ぐ。ボルネオ付近は、この作用が特に活発なので、世界でもっとも雨の多い地域となっています。



歴史時代の気候変動をみると、世界の離れた地域で同調した変動を示すことが多い。熱帯域の対流活動が活発なときには、低緯度から高緯度への大気経由の熱輸送が活発化し、地球全体の気候に影響を及ぼしているのではなかろうか。パーティンらは、ボルネオ北部の鍾乳洞の中から鍾乳石を採取し、その酸素同位体比から対流活動が過去 3 万年間に大きく変化したことを示しました (Partin et al., 2007)。ボルネオの大気対流活動は 1 万年スケールで長期的に変化してきているらしい。では、もう少し短い時間スケールではどうか。たとえば、現在よりも気温が低かったとされる 200-700 年前の小氷期ではどうか、また今と同様に温暖であったとされる 1000 年前の中世温暖期ではどうだったのか知りたい。人類が今直面している温暖化は、まさにこの時間スケールでの変化であるので、この疑問に答えることは重要です。これを明らかにするには、鍾乳石以外の方法で調べてみる必要があります。

ボルネオ研究に先立って、私たちは利尻島南浜湿原から採取した泥炭試料の研究を行い、過去の気候変動を復元することに成功しました。ボルネオの泥炭を用いることにより、熱帯の大気対流活動を復元できるに違いないと考えました。さて、このようなテーマで日本学術振興会の科学研究費基盤研究 B 海外学術調査に応募したところ、2015 年春に採択の通知が届きました。私の研究室の卒業生がマレーシアのトレンガヌ大学で上級

講師として働いているので、彼に連絡し、マレーシア政府への調査許可手続きを進めるとともに、準備を開始しました。

札幌からボルネオまでは遠い。成田空港経由でクアランルンプール空港へ飛び、そこで国内線に乗り換えます。サンゴ礁の点在する南シナ海を越え、深緑の密林の中に大蛇がうねるような茶色の水の流れが見えたならばクチンに到着です。19世紀・20世紀前半のサラワク王国の首都であり、現在もサラワク州の州都として栄えている町です。市街の中央をサラワク川が流れ、下町から川越しに望む州議会議事堂の金色のとんがり屋根が印象的な風情のある町です（右写真）。



2015年夏に初めてのボルネオ渡航。クチンにあるマレーシア鉱物地質局（JMG）とサラワク政府首相府直轄の熱帯泥炭研究施設（TPRL）を訪問、調査研究の協力を得られることになりました。

2015年秋の調査では、日本から4名、JMGとTPRLスタッフ、さらに現地で4名を雇用し、計16名でサラワク北部のバラム川左岸の泥炭地で泥炭のコア（柱状試料）を採取しました。泥炭の採取によく使われるのはロシア式ピートサンプラーと呼ばれるものです。この年の調査では、このサンプラーに加えて、シンウオールコアラーを持参し、用いました（右写真）。この手法は泥炭内の構造を乱さない。泥炭コア中で炭が層状に入っていることや、葎の根茎が地中に伸びている姿を認識できたのは、この手法のおかげでした。



バラム川の南西岸には、かつてサラワク最大の泥炭地が広がっていました。その大きさは南北に40 km、東西に20 kmにわたるもので、ドーム条の地形を示す高層湿原でした。現在では、この広大な土地の大部分はヤシ畑となっています。この泥炭地に関しては20年前にTPRLのワン博士により植生の調査が行われています。我々は、その植生図を参考に、ドーム中央部の植生がみられたドームの2ヶ所で、合計5日かけて、9メートルの長さの泥炭コアを採取しました。泥炭は植物起源の有機物を多く含む堆積物の総称ですが、試料を採取してみて、ボルネオの泥炭が利尻の泥炭とはずいぶん異なることに気がつきました。利尻の泥炭はミズゴケが主体で、それに細かい根や草本類の茎や葉が混じっています。ボルネオの泥炭はほとんど植物の太い根茎（こんけい）や細かい根、根や茎の表皮、樹木の葉が破片化したものでできていて、コケはみられない。ひとくちに泥炭といっても、素材の違いを重視するならば別物と考えたほうが良い。

コアはコアリング地点において肉眼で記載し、はさみを用いて試料を切り、スプーンを使って台所用ビニール袋に小分けした。コアの分割に用いた道具はすべて現地の雑貨屋で購入した。これは往路において航空会社に預けた荷物が紛失し、ついに出て来なかったためでした。

2016年8月はサラワク南部のマルダム泥炭地で泥炭コアを採取した。日本から2名、TPRLから若手6名が参加しました。リングアの船着き場で漁船を2隻チャーターし、4人ずつに分かれて乗り込みました。マルダムの海岸まで約30分。マルダム側の船着き場に

は栈橋はありません。岸に船を近づけ、泥の中を裸足で歩いて上陸します。そこから小屋まで4 kmを約1時間かけて歩きました。小屋に着くのは夕方になりました。水たまりの腐植を含む焦げ茶色の水で体を洗い、夕食を作り、食べました。小屋は鉄骨高床式であり、外壁の下半部は鉄板で覆われており、上半部は開放されています。そこから虫が入ってくるので、めいめいに蚊帳を吊って寝ます。

翌朝、掘削地点まで徒歩で移動しました。目標地点は泥炭ドームの頂上です。マルダム泥炭地では海岸からドーム中央に向かい徐々に標高が高くなります。これは中央部では泥炭が堆積し、その分が高まりになっているためです。丸太の上を歩き、倒木を乗り越え、水たまりを腰までつきながら歩きました。目的地点まで標高差はほとんどありませんが、重い機材、食料、水、寝具を背中に担いで深さ数十 cmの水たまりに頻繁に出入りするのは思いの外、体力を消耗します。6時間ほどで泥炭ドーム頂上の掘削地点に着きました。この場所には、現場の木で作った簡易宿泊所があります。ベッドの上に、毛布を敷き、蚊帳を吊れば寝床の出来上がりです。水たまりの水を濾過し、沸かし、夕食を作り、食べます。汗をかき塩を消費したのか、塩味が体にしみるように旨いです。

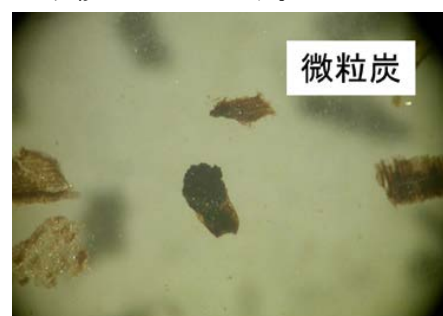
夕方はかすかに風が吹きます。日中我々を痛めつけた太陽は急ぎ足で傾き、木々を金色に染めます。虫除けの焚き火の煙があたりを漂います。ジャングルの夜は騒々しい。日本の秋の夜のように、虫の音が途切れずに続きます。木々の合間から見る星は大振り輝きが強い。天の川が力強く頭上をまたぎ、蠍座が天頂を飾ります。南半球の星々が惜しげもなくその姿をさらしています。朝は急に訪れます。少し明るくなったかと思うと、鳥がさえざりはじめ、瞬く間に周囲は明るくなり、暑さと湿気を増してゆきます。一日の始まりです。

コアリングはロシア式サンプラーを用いて行いました。シンウオールコアラーは重すぎてコアリング地点まで人力で運べないと判断したためです。コアリングは順調に進み午前中には12 mまで掘削し、泥炭基底の泥に達しました(右写真)。6 m深よりも深い層準で炭が頻繁に出現しました。炭層の上には葎の根茎が多くみられました。野火のあとに葎を主体とする草地が広がった可能性が考えられた。午後にもコアを掘削し、作業を終了した。翌朝、小屋までの戻りは行きと同じであるが、背中にかついだ試料の重みがつらかったり、嬉しかったりした。



このようなことをして採取した試料を段ボール箱につめて、札幌に送りました。泥炭は土壌に分類されるので、植物検疫を通しての輸入という扱いになります。

数百個にもなった試料の微粒炭の分析は、修士課程の菊池隼史君が行いました。微粒炭とは野火のさいに不完全燃焼により燃え残った有機物の小さな粒子です。右写真の真ん中の黒い粒子が微粒炭です。泥炭の中に含まれる微粒炭の数を計測することにより、過去の野火の頻度を復元することができます。泥炭を一定の容積で量りとり、それに水酸化カリウム水溶液を加え、粒子を分散させます。その溶液を目の細かなフルイを通して、粒径をそろえたうえで、シャーレに移し、乾燥します。そ



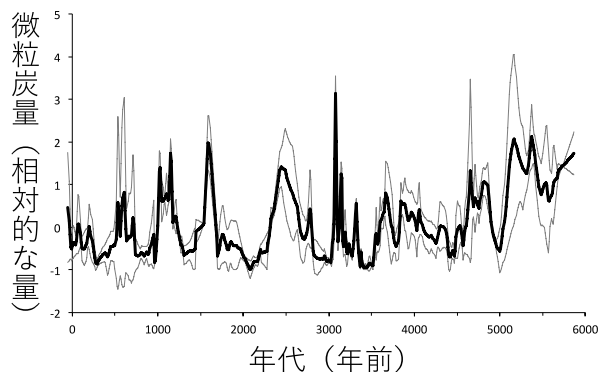
れを实体視顕微鏡で覗きながら、微粒炭粒子の数を数えます。そうすると少ない試料では数個、多い試料では数百個の微粒炭粒が数えられます。

泥炭の放射性炭素年代測定は、学部生の櫻井弘道君が行いました。放射性炭素は生物の体内に取り込まれた後、壊変し、濃度が一定速度で減少して行きます。その減少の割合を調べることでより年代を推定する方法です。この作業は、東京大学の研究室で、櫻井君が大森先生の指導を受けながら進めました(右写真)。手順をひとつ間違えると試料が失われてしまうので、注意力が必要です。上野のホテルで、真夜中、ベッドのうえに座り、櫻井君が手順を何度も繰り返し、復習していたのを思い出します。この結果、ボルネオで採取したコアがいずれも過去 6000 年間をカバーしていることが明らかになりました。



さて、菊池君の計測した微粒炭量と櫻井君が計測した放射炭素年代測定の結果をあわせて、グラフを作ったときの驚きは忘れられません。460 km 離れた 2 地点の微粒炭量はほとんど同じ変動をしており、およそ 600 年間隔でピークを示しました(下図)。現在のボルネオでは、年間降雨量が 3 m を下回ると野火が発生します。我々のデータは、ボルネオでは 600 年ごとに降雨量が減少したことを意味しています。さらに、アイスコアのベリリウム 10 濃度から推定された過去の太陽放射量変動(太陽の輝きの強さの変動)と比較したところ、1000 年前から 4000 年前には、太陽の輝きが強いときに降雨量が減少していたのに対して、それ以外の時代では、逆に降雨量は増加していたことが分かりました。ボルネオの降水量の変動の原因が太陽放射量変動であることは明らかになりましたが、対応関係が逆転するメカニズムについては今後の考察が必要です。さらに、ボルネオ微粒炭の変動は中国とインドの鍾乳石の酸素同位体比の変動と対応しており、ボルネオ付近で大気対流活動が活発な時期に、中国及びインドでは降水が多かったことが示されました。降水が少ないとき、中国・インドでは王朝交代が起きており、地理的には無関係なボルネオ付近の大気対流活動が間接的に関係していることが示唆されます。

ボルネオの泥炭中の微粒炭量の変動



現在につながる過去の気候変動を知ることは、気候の現状を理解し、将来を予測するのに役立ちます。IPCC のとりまとめにおいても古気候研究の成果が大きな比重を占めているのは、このためです。また過去の気候変化と人間社会の関係を調べることで、将来起きうる人間社会への影響を予測し、対策するための基礎材料を得ることができます。後者の研究ははじまったばかりですが、今後の古気候研究における重要課題です。