

第35回 理工学部門研究談話会

日時 : 令和 3年 10月20日(水) 13:30~15:00

方法 : Microsoft Teams によるオンライン配信

話題及び提供者

『宇宙から地球を測る』

田部井 隆雄

『比熱測定のおい出』

西岡 孝

『小さな巨人・有殻原生生物は地球を変える?』

氏家 由利香

教職員, 大学院生, 学生, 一般の方々のご参加をお待ちしております
(お問い合わせ: ryooka@kochi-u.ac.jp)

宇宙から地球を測る

田部井隆雄（地球環境防災学科）

（2021年10月20日 理工学部門研究談話会）

1. はじめに

ある現象を詳細に記録しようとする場合、一般には対象物に近づく。ところが、地殻変動観測では、これとは全く逆の行動が主流になっている。すなわち、地面の動きを観測するのに、地表間で測定するのではなく、電波を使って人工衛星-地上間の長距離測定を行う。その代表的なものがGPS（Global Positioning System：全地球測位システム）観測である。

なぜこのようなことになったか、第1の理由は高精度化である。地上測量の際、光波はつねに大気層に低角度で入射するため、屈折の影響が非常に大きい。さらに、大気層は時間的・空間的に激しく変動する。つまり、光路は屈曲し視線方向に相手がいない、今朝と夕方測定結果が異なる、方角によって結果が矛盾する、という事態が生じる。人工衛星-地上間の測定では大気層に対する電波の入射角度が大きくなり、屈折の影響が激減し、大気中の光路長も短くなる。第2の理由は長距離化である。地上間の観測では、測定点間に山や建物が存在すれば障害物となるし、地球自身も曲率という障害物を持っている。衛星を仲介することで、互いの視通は不要となる。

一步離れてみたら見えないものが見えてきた、地殻変動観測に限った話ではないような気がするが、それはさておき、本講演ではGPSによる地殻変動観測の概要を紹介する。

2. GPS 観測の原理

今ではほとんどのスマートフォンにGPSが実装されている。その利用形態は単独測位法と呼ばれるもので（図1）、リアルタイムに自身の位置を時々刻々決定できる。位置の時間差分

から速度も求まる。ただし、測位精度は数mに限定され、地殻変動観測の要求を満たさない。なお、単独測位の決定量として、位置に加えて時刻も含まれる。GPS衛星にはきわめて高精度の原子時計が搭載されており、4個以上のGPS衛星からの電波を受信することで、受信側に仮想的な原子時計が実現する。単独測位の未知量は受信点の3次元位置と時刻の計4個である（図1）。

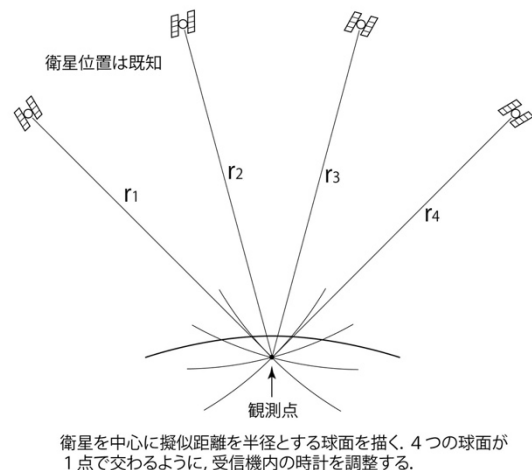


図1. GPS 単独測位

地殻変動のような微小変化を検出するには、GPS相対測位法を用いる（図2）。静止状態の複数の地上点において、複数のGPS衛星からの電波（より正確には電波の位相）を、ある一定時間以上（一般には数時間以上）記録する。観測終了後それぞれのデータを持ち寄り、衛星1-観測点A間および衛星1-観測点B間の位相の差を計算する（位相の一重差）。この段階で、2つの経路に共通する誤差要因（衛星軌道、電離層内および対流圏内電波伝搬遅延）が相殺する。同様に衛星2に対する一重差を作り、さらに2組の一重差の差を計算する（位相の二重差）。最後まで残っていた誤差要因（観測点時計誤差）もこの段階で相殺する。すなわち、位相の二重差からは単独測位の誤差要因がすべて消滅している。これを使って、観測点間の相対位置を決定するのが相対測位法である。リア

ルタイム性が失われたことと、位相観測につきものの波長の整数倍の不確定性を解決するという問題が生ずるものの、位置決定精度は数 mm と、単独測位の精度を 3 桁上回る。

同じ GPS という名称でも、単独測位と相対測位とでは使用機材、データ処理方法そして位置決定精度が全く異なる。

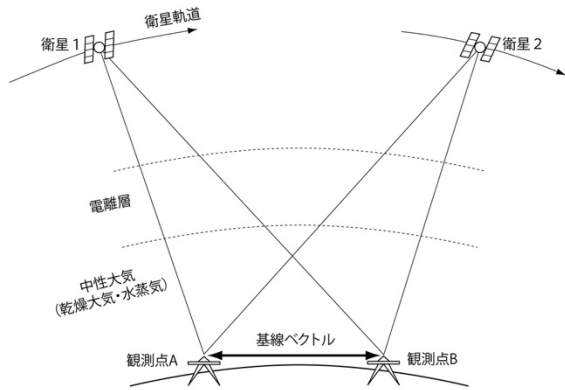


図 2. GPS 相対測位

3. GPS による地殻変動観測

ここまで漠然と地殻変動という単語を使ってきたが、運動学的観点から分類される地球最表層はプレートであり、変動を生み出す原動力はプレート運動であることから、「プレート運動とその相互作用によって生じるプレートの内部変形」を広義の地殻変動として再定義する。

GPS 観測機材は高精度に加えて小型軽量、比較的安価であることから、地殻変動観測の主流となっている。機材を固定し 24 時間連続してデータを取得する GPS 連続観測点が、世界中に多数展開されている。そこで取得された生の観測データ、算出された座標値、座標時系列から計算された平均変位速度などがインターネットを通じて公開されている。日本では、国土地理院が 1300 箇所以上の地点に GPS 連続観測網 GEONET を展開している。

GEONET は世界で最高密度の観測網であるが、それでも観測点間の平均距離は 15-20 km にとどまる。内陸活断層や火山の活動を監

視するには、空間密度がなお不足する。また、商用電源と電話回線に依存しているため、山岳地域、半島先端、離島などでは観測の空白域が生じている。観測対象によっては、期間を限定して GPS 観測資源を集中的に投入する臨時観測が行われる。

海外では、連続観測網が希薄なため、広域のプレート運動の決定はできても、詳細な地殻変動を検出できない場合が多々ある。このような場合も、GPS 臨時観測が威力を発揮する。

本講演では、筆者がこれまで実施した GPS 臨時観測の概要をいくつか紹介する。

4. 西南日本における定常的地殻変動

西南日本における GEONET 観測成果に、筆者らによる中央構造線臨時観測成果および近年の海底地殻変動観測成果を加えて、南海トラフ・プレート境界面上の固着状態を推定した(図 3)。土佐湾下の深さ 10-15 km に固着がほぼ 100% の最大領域が存在する。この領域は 1946 年南海地震 (Mw 8.1) の最大津波発生域に相当し、次の地震に向けて着々とひずみを蓄積中であることが認められる。

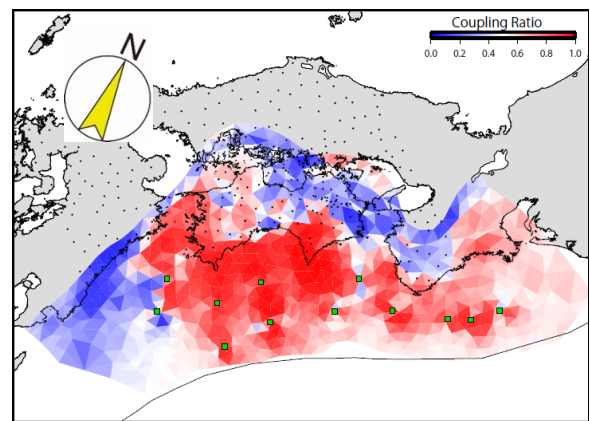


図 3. 南海トラフ・プレート境界面上の固着推定結果。陸上の黒点は解析に用いた GEONET 点の位置、海域の緑色の四角は海底地殻変動観測点の位置を示す。

比熱測定についての思い出話

理工学部門 数学物理学分野 物理科学コース 西岡 孝

私が今なぜ、高知大学にいられるかという、比熱測定装置の開発が強く関係しています。これについて、お話していきたくと思いますが、時間内では終わりそうにありませんので、少し詳しく、この概要（というより詳細ですが）に書いていきます。時間があればご一読ください。

私の研究は、物性物理の中の磁性実験ですが、行っていることは、学部の4年生のころからほとんど変わらず、1 K程度の極低温における物性測定装置の開発です。もちろん、測定に必要な試料の作成は行いますが、装置開発がメインとなります。この装置開発に対する取り組みが数年前に退職された松村先生に評価されて、2004年度から高知大学で研究をさせて頂くことができました。

理工学部門談話会では、みなさん、研究に関する高度なことを語っておられますが、今回私は、研究を進めていくうえでの表にはあまり出てこない泥臭いお話をさせて頂きたいと思います。たまには、そういう話が合ってもいいのではないかと思います。気楽に聴いていただければいいと思います。

私の行っている研究は、物性物理学の中でも基礎に近いものだと思います。物理の研究は、加藤先生がいつも言われているように、試料を作って、測定して、考えて、成果を発表するという流れになっています。目的は、考えて、成果を発表することですから、測定装置があれば利用すればいいのです。試料にしたって、アイデアは必要ですが、物理をまったく知らない技官に作ってもらってもいいし、外注してもいい。いまでは、1億円程度の物性測定装置を購入すれば、装置開発に時間をかける必要は全くないのです。

ところが、私が研究を始めた1980年代の中ごろの私たちの分野の状況は現在と非常に異なっていました。私たちの研究は、いわゆる素励起に関するものですので、1 K以下の物性測定が必要になります。ところが、そのころの応用面では、そのような低い温度にしてもあまり意味がないので、極低温測定装置は市販されていませんでした。自分で作るしかなかったのです。私の指導教官の都先生は、そのあたりが特に厳しく、実験データは、自分の作った装置で出さなければならないことを基本としていました。実際に、私が研究室に入ったときの先輩たちは、みな自分で作った装置で実験をしていました。私が命じられたのは、表題の比熱測定装置の製作でした。比熱はエントロピーに直結している重要な物理量ですので、物性測定には、磁性に限らず必要なものなのですが、測定がかなり大変で、その当時は一番嫌われた実験だったのではないのでしょうか。当時は、手動測定がほとんどで、比熱測定は少なくとも1日は徹夜をして、数日は解析が必要でした。一つのデータを得るのに1週間もかかるのです。ほかの実験は1日でできてしまいますので、比熱だけはやりたくない、という声を何度も聞きました。そういう状況でしたので、比熱測定ができるだけで、全国から試料が集まってきて、いくらでも研究ができるという都先生のお言葉でした。比熱測定装置は、先輩たちがミニコンで自動化プログラムを作っており、さらに ^3He を用いた1 K以下までの比熱装置も開発途中でした。私が命じられたのは、 ^3He までの

比熱測定装置を作り、当時出始めたパソコンで完全自動化プログラムを作ることでした。ほぼこの開発で、修士課程が終わってしまいました。あるとき、先生に、装置ばかり作っていても、さっぱり成果が出ないので大丈夫でしょうか、と尋ねたことがあります。そんなことは心配しなくてもいい。装置ができれば自然に研究は進むというものでした。とにかく俺を信じろというわけです。そんなこんなで、無心に装置開発を続けていって、M2の夏ごろに、大まかな装置は完成しました。そこで、自分の装置で、目的の試料を測定することができたのは、夏が過ぎたころだと思います。この時の喜びは忘れられません。ほどなくして、都先生がおっしゃったように、あちこちの大学から測定依頼があり、これでいくつかの論文ができました。私のテーマにしても、比熱測定の結果が出たことで、研究会で発表し、論文も何とか出すことができました。1年以上もうまくいかないことの連続でしたので、先生を恨んで、研究室の人たちに愚痴を言うこともしばしばでしたが、ある先輩は「俺は、都先生が太陽が西から出るといえば信じる」といわれ、そんなものかなと思ったことがあります。先生を信頼してよかったと思っています。

自分の比熱測定装置で得られた結果が国際的に評価されて、D2の冬にフランスに半年に留学することになりました。行先はネール研究所のモラン先生のところ。ネールは反強磁性転移の名前になっているノーベル物理学賞の受賞者で、磁性研究をやっているネールの名前を知らない人はまずいません。そこには、磁性だけで80人もの研究者いました。モラン先生はかなり活躍されていた先生でした。ところが、フランスに行くと驚いたことがあります。フランスでは、私が日本でやっていた装置開発を研究者や学生が行うことは全くなく、すべて技官が行います。試料にしたって、技官が作っていました。モラン先生が言うには、フランスでは、分業体制がしっかりできていて、研究者の仕事は物理を考えて発表することであり、それ以外のことをやってはいけない仕組みになっているというのです。私の研究活動のほとんどを費やした装置開発は、技官の仕事に犯すことになるというわけ。そういった状況だったので、フランスではデータを取って、解析するだけの仕事になっていました。モラン先生の言われることはもっとも思いましたが、日本ではそのような組織はありませんので、装置を作らなければ、実験結果を出すことができないので、しかたなく装置を作るという状況でした。ただし、モラン先生も、日本のように研究者が装置開発や試料作成を行うことは重要であると考えているとおっしゃっていました。これに関する話は、名古屋大学でも言われたことがあります。宇宙関係の先生が、研究者が工作をしたりしてはいけない。そんなことをするために給料を払っているわけではない。装置作りは高卒でもできる、といった内容だと思います。宇宙物理学は相当な予算がありましたので、そんな言葉が出てきたのだとは思いますが、物性物理学は、技官を雇う余裕も外注する余裕もありません。

ところが、時代が進むにつれて、極低温の重要性がだんだん世間にわかってきました。それにともない基本的な物理量を測定するシステムが市販されるようになりました。これさえ購入すれば、論文は書けるという質の高いものです。21世紀になったころから普及し始めましたが、私が当時在籍していた研究室では、購入できずに、相変わらず自作の装置で実験をしていました。20世紀の最後のころ、私は名古屋大学で紺谷先生の助手として研究をしていましたが、名古屋で学会が開催された折に、松村先生が私たちの研究室を訪れたようです。松村先生は、紺谷先生

の後輩にあたるかたです。そこで、いろいろな装置を紹介して、すべて西岡君が作ったんだと言ってくれたそうです。松村先生は、ずっと高知大学におられましたので、同じように自分の研究に関するものはすべて手作り行っていましたので、私の状況がよくわかったようです。その記憶のおかげで、私は高知大学に来ることができました。

私は、2004年度に高知大学に着任しました。このころは、市販の物性測定装置はかなり普及しており、数年後には私が所属していた名古屋大学の研究室でも導入されましたが、私は高知大学に来たために、時代から取り残されたような感覚でした。「何もありませんから」といおう松村先生のお言葉通り、実験に関するものは全くありませんでした。予算も必要経費を差し引いたら10万円程度だったと思います。ところが、松村先生と加藤先生が協力してくださり、学長裁量経費を2年連続でいただくことができ、そのほとんどを使わせてくださり、研究に必要なものをかなりそろえることができました。といっても、市販の物性測定装置が購入できるほどの金額ではありません。そのなかで、2005年度に4 K GM 冷凍機を購入することができました。GM 冷凍機はボタン一つで3 K 程度まで下がるのですが、かなり大きな温度振動がある上に、私が興味を持っている1 K 程度まで下げることができません。幸いなことに、熱心な学生が研究室に入ってきて、冷凍機を何とか1 K 以下まで下げることができました。このことで、JST からも評価され、研究費をいただいたり、何度も招待講演を行ってきました。今年の11月にもオンラインでの講演を依頼されています。

その冷凍機を使って、私がまず行いたかったのは比熱測定でした。冷凍機に比熱測定ユニットを取り付けて実験したところ、熱浴は1.2 K まで下がっているのに、試料台（アデンダと呼びます）は12 K 程度までしか下がりません。12 K 以上での比熱測定はできるのですが、私の興味のある物質ではほとんど重要な情報を得ることができません。12 K までしか下がらないのは、冷凍機の機械的振動のせいで、冷凍機で比熱を測定するのは、本質的に不可能なんだと思い、以降比熱測定には全く手を付けていませんでした。ところが、数年前にある学生が、比熱測定を行いたいといってきました。私は、「10年くらい前に取り組んだことがあるけれども、冷凍機では、測定は不可能だよ」と答えました。ところが、その学生は、それでもやってみたいといいます。結果として、アデンダの温度が熱浴の温度と同じ程度の温度まで下がったのです。10年以上前の実験との違いは、冷凍機の冷却ステージに取り付けた4 K shield の存在でした。4 K shield は10年前でも取り付けたことがありましたが、熱浴の温度にはほとんど影響しませんでしたので、4 K pot は不要であると思い、10年前の比熱測定の時にもつけてはいませんでした。それをたまたまつけた装置で、その学生は実験したのです。温度が下がらなかった原因は、冷凍機の温度振動ではなく、熱輻射だったのです。比熱は断熱状態で測定するために、わずかな熱の流入でも温度を下げるができないのです。ところが、アデンダの温度振動はかなり大きく、温度は下がったものの、比熱を測定する状況ではありませんでした。ところが、熱浴の温度はほとんどゆらいでいませんでした。そこで、その学生は、アデンダの温度が揺らいでいる原因は、冷凍機の機械的振動からずれている振動のせいではないかと考え、なるべくアデンダがゆらがないように、アデンダの固定の仕方をいろいろ試しました。その結果、4 K 付近では熱浴の温度ゆらぎと同じ程度まで温度振動を低減することができました。ところが、熱浴を1.2 K まで下げると、

アデンダの温度は 1.8 K 程度までしか下がらずに、温度振動はかなり大きくなってしまいました。これでは、4 K 程度からの比熱は精度よく測れますが、それ以下は精度良く測定ができません。

そこで、昨年度コロナ明けに転機が訪れました。冷凍機の機械的振動が問題ならば、冷凍機を止めてしまえばいいのではないかと、思って、学部学生に実験をしてもらいました。ただし、我々が液化しているヘリウムの量は 30 cc 程度ですので(通常の液体ヘリウムの実験では 10,000 cc)、冷凍機を停止すると、液体ヘリウムはすぐに蒸発すると思っていたのです。ところが、思いのほか長持ちし、1 時間程度ならば、低温を維持することができるということがわかったのです。これは、比熱を 1.3 K 付近から 10 K くらいまで測定することのできる時間です。これで、液体ヘリウムを用いたものと同じ実験ができるということがわかったので、今年の春の物理学会で発表しました。ところが、アデンダの温度は冷凍機の電源を切ると、徐々に上がってしまいますので、試料を乗せると、試料が冷えるまでに温度が上がってしまい、2 K 以下の測定はまずできません。ところが、熱浴の温度は液体ヘリウムが無くなるまで、1.5 K 以下を保っていました。そこで、熱浴の周りにも shield を付けたらいいのではないかと考え、その学生に試してもらったところ、アルミ箔を巻いただけの簡単な構造なのですが、アデンダの温度は熱浴の温度と同じような温度変化をすることがわかりました。このことがわかったころは、卒論が終了した後なのですが、卒論が終わっても毎日大学に来て実験をしてくれました。その実験を引き継いでくれたのが、今の 4 年生の一人です。その学生もかなり熱心に、いろいろなことを調べてくれたのですが、4 月の初めころに、冷凍機が壊れてしまいました。仕方がないので、現在使っていない別の冷凍機に比熱測定ユニットを取り付けることにしましたが、これがなかなかうまくいきませんでした。なんとか元々の冷凍機と同じ程度にすることができたのが夏休み直前でした。しかし、結果は見事なもので、1.3 K 程度からきれいに比熱を測定することができたのです。これは、液体ヘリウムを使った実験よりも低い温度であり、比熱測定には液体ヘリウムは不要であるということが出来るのです。そこで気をよくして、つい先日開催された、物理学会と国際会議で発表いたしました。国際会議では、ヘリウム危機が叫ばれている中で画期的な開発であるという高い評価をいただきました。

話が長くなりました。学部 4 年生の時に比熱測定装置の開発を始めて、いま再び、その時の状況に戻ってきたという感覚です。これから、1 K 以下まで温度を下げ、いろいろ作ってきた試料の測定をどんどんやって、論文をどんどん書いていこうと思っています。今の時代は、私が教育を受けた時のように、データは自分の作った装置でしか取ってはいけない、ということはありません。しかし、学生時代に強烈に言われたことが潜在意識の中にあるのか、共同利用で装置を使わせてもらうとか、誰かに依頼して測定することには、強い抵抗があります。10 年ほど前に、かなり面白い研究をして、それで日本物理学会論文賞をいただきましたが、その実験のほとんどは、高知大学ではできず、全国いろいろな人が行ってくれました。自分の出した結果で議論ができなかったのはほんとうにつらいことでした。いま、そういった共同研究がすべて終了し、比熱測定もようやくできるようになって、自由な気持ちで研究を楽しめる状況になりました。こんなにのんびりと研究を進められるのは、高知大学の自由を尊重する学風のおかげだと思います。

小さな巨人・有殻^{ゆうかく}原生生物は地球を変える？

氏家 由利香(海洋コア総合研究センター・分子古生物学)

真核生物というと、動物や植物が思い浮かべられます。しかし、真核生物の多様性の大部分を占めるのは、単細胞の生物(原生生物)なのです。さらに面白いことに、原生生物には、“一つの細胞＝体”であるにも関わらずバイオミネラル(生体鉱物)を分泌し、殻・骨格を形成するグループが多く存在します。バイオミネラルの形成は、動物にみられるような体サイズの大規模化や複雑化といった進化的意義、環境中のCO₂の消費・固定という環境的意義の両側面があります。私は、こうした有殻原生生物、特に海洋に生息する生物群に着目して研究を行なっています。海洋の有殻原生生物は、CaCO₃(炭酸塩)やSiO₂(珪酸塩)、SrSO₄(硫酸塩)などのバイオミネラルを形成します。その中で、今日は炭酸塩殻を形成する有孔虫という原生生物について、世界で初めて明らかにした殻形成(バイオミネラリゼーション)の分子メカニズムと、現在行なっている発展研究についてご紹介します。

有孔虫は、海水中の溶存イオン(Ca²⁺やHCO₃⁻)やガス(CO₂)を利用して炭酸塩殻を形成する系統が存在し、全球の炭酸塩生成の約25%を担っています。さらに、有孔虫は環境中の炭素や酸素などを殻へ閉じ込め、それら殻が化石として海底堆積物中に多く保存されるため、昔の環境を記録する指標として地球科学の分野で重用されています。例として、皆さんがよくみかける“氷期—間氷期”の環境変動は、有孔虫の殻の同位体分析や化学分析に基づくものです。しかし、有孔虫が“どのように殻を作るのか？”という分子メカニズムは、これまで全く不明でした。そのため、経験則によって有孔虫殻の同位体比などから水温の換算式をたてるほか、ありませんでした。また、進化的な面で、有孔虫は炭酸塩を分泌する最古の系統であることから、バイオミネラリゼーションの分子メカニズムを解明するうえで、重要な情報を持っている可能性があります。これまで有孔虫は実験室での培養が難しく、必要な遺伝子量の確保が難しかったため、分子生物学的な研究は限られていました。その点、本研究では、有孔虫の培養系を確立したこと、また有孔虫の個体観察から、殻形成のタイミングをつかむことに成功しました。そして、底生有孔虫(*Ammonia beccarii*)の個体を用い、殻を形成中の個体と、形成していない通常状態の個体の各々からRNAを抽出し、比較トランスクリプトーム(発現遺伝子)解析を行なうことにより、殻形成時に高い発現を示す遺伝子群を抽出することができました。こうした殻形成に関連する遺伝子群の代謝経路を推定することにより、有孔虫のバイオミネラリゼーションの分子メカニズムの全容がみえてきました。

有孔虫は(有性・無性)生殖後、段階的に細胞を成長させながら、新しい殻室を作る

=殻形成を行います。つまり、有孔虫の殻形成は細胞成長に伴っています。そのため、有孔虫は積極的に Ca^{2+} を海水中から細胞内、そしてミトコンドリアへ取り込み、ATP 生成を加速させています。 Ca^{2+} は一般的に細胞伝達など多様な細胞プロセスに必須のイオンですが、細胞やミトコンドリア内でその濃度が高くなりすぎると、細胞死(アポトーシス)を招くというジレンマがあります。有孔虫はこの Ca^{2+} のジレンマに陥らないよう、細胞内で Ca^{2+} の小胞を形成し、細胞膜上のカルシウムポンプやイオン輸送体によって細胞外(=殻を形成する場所)へ放出していることがわかりました。さらに、 Ca^{2+} 関連遺伝子について、近縁生物や炭酸塩殻を形成しない有孔虫と比較した結果、有孔虫は殻の有無に関わらず、他の近縁生物より Ca^{2+} 関連遺伝子を多様化させていることがわかりました。特に、炭酸塩殻をもつ有孔虫は、より多様性が高いことが示されました。こうした結果と、有孔虫が原生生物の中でも体(細胞)サイズが数 mm と“巨大”であることから、有孔虫は祖先系統からすでに Ca^{2+} を利用して体サイズを巨大化し、その後、細胞内の過剰な Ca^{2+} を排出し炭酸塩分泌に使用するようになったと考えられました。一方、炭酸塩分泌に必要な陰イオン(HCO_3^-)についても非常に大切な発見がありました。有孔虫の細胞膜上に、水分子(H_2O)を取り込む膜タンパク質(アクアポリン)と、 H_2O と CO_2 を HCO_3^- と H^+ に変換する酵素(炭酸脱水酵素)に関する遺伝子が、殻形成時に高発現であることがわかりました。炭酸脱水酵素は、他の炭酸塩を分泌する貝やサンゴなどでも検出されていますが、有孔虫は炭酸脱水酵素について2つのファミリーがあり、特に1つのファミリーでは系統樹上、独自のクレードをもちます。これらの炭酸脱水酵素は、少なくとも2種類以上:細胞内と炭酸塩を分泌する膜周辺であり、 HCO_3^- の生産に関しても複数のルート:細胞外(海水中)由来の CO_2 、炭酸脱水酵素の変換に伴う CO_2 、有孔虫の呼吸などで排出される CO_2 が挙げられました。このように複数のルートによる CO_2 が炭酸塩分泌に使用されるため、有孔虫殻と海水の同位体比などが非平衡状態であることがわかりました。本研究により、炭酸塩を分泌する最古の真核生物・有孔虫は、 Ca^{2+} による細胞プロセスをすでに発展させ、 Ca^{2+} のストック/廃棄物として炭酸塩を形成しているユニークな進化をしていることが示唆されました。これまで、殻の形成は外敵からの防御などのため進化したという考えに、新しい意義を示したことになります。さらに、こうした炭酸塩生成は炭素循環の主翼となり、地球環境の形成に大いに貢献したと考えられます。

本研究において、 Ca^{2+} の排出や HCO_3^- の生産を担う遺伝子が同定されたため、異なる環境(水温など)におけるそれら遺伝子の働きの違いを、現在検証しています。これらの知見は、将来、地球環境の変化を推定する上で、精度の高い指標になると期待されます。