

「琵琶湖深層掘削 - その後」 竹村恵二教授 (地球熱学研究施設)

地球熱学研究施設、以前の地球物理学研究施設の教授をしている竹村です。別府と阿蘇に研究所があることはご承知と思いますが、この両施設が統合されて地球熱学研究施設という名前になり12年が経っています。別府と阿蘇はつかず離れずで、1924年に別府、28年に阿蘇の火山センターが出来、先ほどの尾池先生のお話にありましたように戦後一緒になり、50~60年頃に分離して、また1990年代の後半に再び一緒になった歴史をたどっています。尾池先生が言われたように、fieldという点に関して地球物理学教室は日本中にいろいろ付属施設を作ってきました。今日お話をする一つは琵琶湖古環境実験施設であり、1977~1987年の10年間にわたり地球物理学教室の先生方のいろんなバックアップがあって、珍しく掘削だけに特化した事業を琵琶湖でやりました。古環境実験施設が閉鎖されて、ほとんどのデータや資料は別府に移されました。もちろん、堀江教授も移られて1987年から3年間教授として教育研究をなされました。今日はその10年間の仕事が今とどう繋がっているかなど、その辺の話をさせていただきます。昨年夏に堀江先生は亡くなられましたので、ご報告かたがたということをお会の幹事に申し出た次第です。懇親会の折にでもご意見やご提案などお聞かせ頂きたいと思います。1990年の退所記念会の写真ではいつもと違って堀江先生が珍しく笑っておられます。昔は酒を飲まれたようですが、後半は飲まれませんでした。

堀江先生のご専門は陸水学で、いろんな機会に琵琶湖を掘ってこられました。1965年にはピストンコアリングを行ない1972年には200mまで掘りました。私が大学院を終わった頃ですが1982~3年には琵琶湖のド真ん中で、基盤まで掘削しました。海底掘削と違って、自分たちで配船はもとより全てやらなければなりません。多くの難しい政治的交渉が含まれる部分があります。海洋掘削は船が先に存在していてプログラムを考えますが、陸上とか湖底は、どういう掘削をやるかが最初の問題であります。京大理学部附属の古環境実験施設は1978年から87年まで、近江高島の萩の浜に建てられていました。施設長は国司先生、専任教授が堀江先生でありました。そして10年間、琵琶湖掘削だけに特化した研究施設が存在したのです。ダイナマイトによる地下構造調査、反射法地震探査、重力調査などを実施して場所を決定し、基盤までの掘削を行いました。その資料の分析を行いまして学際的研究の先駆けとして高い評価をされて、京大の地球科学の中では最後の学士院賞を受賞されています。先ほどから話題になっている気候変動もその中に含まれています。

地球物理学教室はいろんな場所に附属施設をおいて観測研究をして、そこから出てくるデータをもとに教育を熱心にやってきました。今残されているのが別府と阿蘇、それと地磁気センターのみになっている現状であります。1987年に古環境実験施設が閉鎖された後、一連のデータとかサンプルは別府へ移動しました。この10年間の成果は基本的には毎年、出版物「Paleolimnology of Lake Biwa and the Japanese Pleistocene」として報告公表されてきました。全て英文で毎年300ページに達しております。私が1980年にドイツへ行き、ボン大学の図書館で琵琶湖の話をしていたとき「ここにあるよ」と言われてびっくりしました。堀江先生はかなりの部分を外国に送っておられ、琵琶湖といえばこの本によっていろんな研究が知られていることを実感しました。

1979年から行われてきた multi-channel profile の結果をご覧くださいますと、水平に見えるのが堆積物の中にある反射面で、下の方が基盤岩(硬い岩石)です。琵琶湖の底の構造をこの時

はじめて断面としてきれいに見ることができました。このような測線が 10 数本得られており、これをつなぐことにより琵琶湖の基盤構造が確定でき、この作業が一つの重要な仕事でありました。この仕事では 講座出身の井川さんが中心になり、がんばってやって下さいました。基盤までの深さが 1400m ありますが、なぜ琵琶湖を掘るのかといえば、基本的にはいろんな目標があります。湖底が現在ですから、深く掘ればそれが過去で、これを知って未来を考えることこそ地球科学であろうと考えております。つまり過去と未来の両方のことを考えていくことが大切であると思えます。その目標の一つが気候変動で、たとえば琵琶湖ですと短期変動をある時間スケールで見ていきます。テクトニクスの観点から言えば、琵琶湖には西側に大きな危険度が高いといわれる琵琶湖西岸断層が延びており、古地震が調べられます。琵琶湖自体がどういう経過で出来てきたのかということも課題となります。また、あまり気がつきませんが、琵琶湖の堆積物の中には火山灰がいっぱい入っています。今まで掘った中に大体 60 枚程度の火山灰があり、琵琶湖周辺に第四紀の火山がないことから、どこかから運ばれてきている訳です。一万年に 1 回は琵琶湖がすっかり真っ白な灰に覆われた情報を得ることができました。それはとりもなおさずスーパー ボルケーノといわれるものが、この付近ではこのサイクルで襲ってくることを示しています。火山活動に関連して偏西風によって火山灰も運ばれてくるので、当時の古気候や気象条件も頑張れば分るかもしれません。それからやはり湖底堆積物の一番上のところにはいろんな人間の活動、縄文時代から弥生時代とか、原田さんが言われたような人間活動と関係するパラメータなど、琵琶湖の場合はいろんなタイプの情報がとれます。出来れば 1 万年、1000 年、100 年、さらには 10 年のインターバルのデータを取りたいと考えています。堆積物を自然の古文書だと思って取り扱っていけばよいと思っています。

これに関連して、ではどのようなことをやっていけばいいか、ということになります。戦略をかんがえると、近畿地方は活断層がたくさん密集しています。琵琶湖はその西側にもっとも大きな活断層が存在しているのが特徴でもあります。レコーダーとしての平均的な堆積速度を見てみると、普通深海底を 10m 掘れば 100 万年くらいの時間をかせぐことができます。1000 年当たり 1cm のデータになりますから、100 年インターバルの話は出来ないだろうと思います。それからシベリアのバイカル湖の堆積物をみると、これは 10cm が 1000 年くらいになります。琵琶湖では 15cm から 1m が 1000 年ですから年 1mm で堆積物が溜まっています。したがって 10m 掘れば 1 万年の時間ですので、湖では海の解像度の 100 倍くらい仕事ができます。ただし 100 倍の仕事となりますので、大変な労力が必要になります。

過去には 1965 年、1967 年のピストンコアリング、1971 年の 200m 掘削、1982 年にはほとんど同じ地点で 1400m の掘削をしています。そこまで琵琶湖の全体像が一応解りました。この結果を踏まえて申請しても、研究費は一切通りませんでした。何故やるのかがどうしても理解してもらえませんでした。解像度を上げてより高精度に解析すると言っても、昔のサンプルでやったらどうですか、とかいろいろ言われました。最近やっとこの重要性がクリアされつつあります。解ってもらえつつあります。そこで琵琶湖のこれまでの成果についてまとめてみます。琵琶湖の基盤岩の上に約 900m の堆積物が溜まっています。1400m 掘削しましたが、下部の 500m を掘ったデータは、琵琶湖の歴史を考える上ではあまり役に立っていないのが実情です。もう一つ重要なことは、湖底から約 250m 下のところに反射面があります。この上は非常にきれいな連続層が続くことが解っていて、深い静かな環境がこの反射面の時代から現在まで続いていることを示して

います。ではこれらの時代がいつかということ調べてみようということですが、最近 revise をかけました。私は二百数十万年前からの歴史として論文を書いていたが、分析をもう一度やり直してみても、琵琶湖は堆積物が連続的にきれいな直線的な溜まり方をしている入れものであることが分り、約 100 万年を超える堆積物がいっていることがわかりました。100 万年間というのは、古地磁気、火山灰、放射性元素による年代測定の結果ですが、琵琶湖では 100 万年前から堆積物は連続的に残されている可能性が高いと結論づけられてきました。上述の約 250m 深度にある反射面は大体 40 万年前であろうと推定でき、40 万年から現在まで精度のいい環境変動のレコーダーとして使えることが解っております。一例として花粉分析の結果を調べますと、周辺の植生だとか湿度、温度の情報が得られます。湖内に生きているプランクトンからは湖内の productivity が解ります。これらを使って、例えば、暖かい寒いなどを zoning することができ、これらを調べると長期にわたる環境変動サイクルが残されているだろうと推定されます。ここまでは普通に地質学者がやる仕事ですが、これでは地球物理の気候の人達と全く話ができません。こんな定性的なデータがあるとと言われても困る、ということになりますので、最近はどうしているかと言いますと、定量的な気候復元をやるということ、仕事を進めています。日本列島もそうですが世界中、表層に花粉がいっぱい溜まっています。花粉のデータをいろんな地点で分析をしていますので、このデータから何百種もの花粉のダイヤグラムを作ることができます。それをもとにいろんな計算をし、統計をとることによって、パターン化することができます。これを日本にあるいろんな気象観測のデータと全部つぎ合わせてやります。そうすると、例えば夏の雨の量だとか、温度などと比較していくことができます。花粉分析の第 1 主成分を使ったパターンから持ってきた夏の気温が図のようなパターンになって、冬の気温はこれでといった結果が得られます。これは何を見ているかと言いますと、まず海の堆積物でまとめられてきた長期環境のサイクルのパターンを表しているわけです。琵琶湖ではすでに 40 数万年間について決められていますので、この両者（海のデータと琵琶湖のデータ）のコリレーションをとることができます。ここまでは普通に解っていたことですが、この中でたとえば冬と夏の気温差をとると、氷期環境の琵琶湖は環境が全然違ってきますので、日本海があるかないかで大きく違ってきます。どちらが似ているかということを見ていくことができるわけで、そうしますと 10 万年周期といわれたパターンの中に 4 万年周期とか 2 万年周期などが見えてきます。そんなことが分り始めてきました。スペクトル解析をしてみると全体や第一主成分では 10 万、4 万、2 万周期がみられますが、第二主成分では 4 万、2 万しか出てこない、10 万が出てこないといったデータもあることもわかってきました。このような手法で、現在の気候とのマッチングや気候変化の原因との関連を少しずつ付けていくという仕事が進みつつあります。地球温暖化のように過去 100 年といった話ではないのですが、気候変動といわれているもののいろんな時間スケールのもを琵琶湖の堆積物データから検出できることが解ってきました。私達のグループは、堀江先生のグループのお弟子さんたちがやっているようなものですが、国際的には国際陸上科学掘削 ICDP というグループがあります。海の方では総合海洋掘削 IODP が有名であります。私達の方はお金がないということで、国際的な予算を申請し採択されても、自前で掘るということが前提になっております。ですからなかなかうまく行かないのですが、私達のグループはいろんなプログラムを作りながらやっている状況です。ここですごく大事なことのひとつは、今まで掘削されたコアデータの利活用であろうと思っています。尾池先生は Archive の話をされましたが、archive はなかなか難しく、生サ

ンプルとか生データと言われるものをきちんと archive して使えるようにしておくことはすごく大変なことであることは皆様よくご存知の通りであります。とくに物理探査をやっておられる方は、先ほどお見せしました琵琶湖の反射法探査に関するファイルのデータはどうなっているかなど、問題はいっぱいあります。テープを巻き戻したりすると何年もかかるといったこともあります。試料分析でも同様のことがあります。「乾いたサンプルは使いたくない」という人達は大勢おられますが、乾物でもすごくおいしい分析ができることもあります。これを私は「干物プロジェクト」といっております、そういった例として紹介した火山灰の分析やりなおしとか花粉データの取り直しなどをやって、昔採取したコアが活用できるといったこともあります。それから、以前分析されたデータを現在の考え方でもう一度解析させてみることもできます。こんなことも解ってきましたので、堀江先生が掘られました 1400m のコアがまた生き返りつつあるというのが現在の状況でもあります。ただし、ナマ物でないとうしようもないこともあります。それは例えば古地磁気の分析であるとか、有機物の分析などは採取された瞬間の試料でなければならないからです。むかし私が堆積物を記載・採取していたころに偉い先生に注意されたことがあります。「あなたが触ると人間ですから有機物が付くんですね、手袋をちゃんとしてサンプリングしなさい」とよく言われました。「そんなことをおっしゃるのでしたら先生やって下さい」といってしまったことがありますけれども、それくらいナマ物である必要があることもあります。これらの研究を進めるために、いくつかの試料採取プログラムを考えて仕事をしています。現在からいくつかの時間サイクルをカバーするもの、45 万年で 4, 5 回のサイクルをカバーするもの、約 70 万年から 80 万年まで、さらに基盤までということで 100 万年まで、以上の 4 つを今ターゲットにしながら仕事をしています。このためには費用と掘削方法の課題が大きいということ、琵琶湖の場合水深が中途半端に深いこと、30m より浅ければ何の問題もなく掘削ができるが 40m を超えるととたんに掘削方法が難しくなる、ということがあります。それとともに大型船が入って来られませんが、自分たちで特注しないかぎり、琵琶湖周辺にある道具立てでやらなければなりません。因みに簡単に見積もってみますと、大体 6 億から 7 億円になります。琵琶湖のコアは現在も京大にあります、危うくなくなりかけました。1400m の掘削については、基盤岩類の試料は別府にあります。堆積物の 900m は京大の総合博物館に入っております。火山灰は約 60 層ありますが、これは同志社に保管されていたものを今京大に移管させております。今は幸いなことに科学研究費の基盤研究 A を受けることができましたので、それに合わせて仕事をしております。平成 19 年度は浅い部分で調査を進め、20 年度は 100m 級で調査することによって 20 万年の年数をかせごうとしています。話に出ておりましたけれども京大理学研究科の地球惑星科学専攻の地球科学輻合部との連携もきちんと取ることによって、その重点研究の気候変遷科学の研究推進にも貢献したいと考えています。このほか今回の科研費で購入した音波探査の器械を使って琵琶湖を 300km ほど走りました。南北 70km ですから緯度約 1 分間隔で走ってデータを集めました。これらの探査断面から物性の変わる火山灰の深度データが得られましたが、掘削やコアリングは 1960 年代の作業風景とほとんど変わりません。以前は、学生さんたちが作業に参加していましたが、最近では学生さんたちの動きが昔より圧倒的に悪くなっていることで、こちらは怖くて仕方がないですが、やはり触らせてみるのが大切であります。魚は釣らせて、生きていて刺し身が出来つつあるところへ参加させるのでなければ研究への興味も乏しくなると考えています。ただ現場の危険性を理解してもらわないととても参加させられないということを感じます。やはり歴史

がかわったかなと思っています。音波探査については琵琶湖の北湖を全部カバーしました。掘削地点をカバーしていますので、火山灰の対応から5万年の間に入ったということがわかります。ピストンコアリング方法も改良されていますが原理的には1960年代とそれほど変わりません。取れたサンプルは研究者仲間の同志社大学の廊下などに置かれ、学生さんたちが各自おいしい料理のためのサンプルをとります。挟まれている火山灰が音波探査では反射面として出てくることが解りました。鬼界アカホヤ火山灰は鹿児島島の南から運ばれた約7300年前に噴いた、大体縄文時代の中頃の火山灰とされています。これが多分世界最後のスーパーボルケーノと考えられています。このスライドは鬱陵島の火山灰ですが一万年前に噴いたことが分かっていますので、それを時計として仕事をします。6本のコアを並べてみると、桜島の始良カルデラから噴出した3万年前の火山灰が見えます。いわゆるシラスを作った火山灰です。ほかに50000年、18000年など時刻がどんどん入ってきます。琵琶湖はこういうもののレコーダーとしても良いことになります。今年度は4月から掘削をはじめました。普通は法人化というのは悪い話ばかりが多いのですが、これだけは法人化が良かったなというのが私の印象です。掘削は4月15日から開始しております。これは科研費ですが、科研費を大規模なプロジェクトに4月から使うことは難しいので、大学に協力頂きました。これはすごく有難いシステムです。もう一つ、6月にお金が来ましたが、もしその時まで使えなかったとしたら、この時期までに掘削関連の材料費がめちゃくちゃ上がりましたので、予定された費用では、この計画は実施出来ませんでした。つまりお金がどうしてもなくなりまして、このプロジェクトは今年にやれずにひょっとしたら計画がつぶれたかも知れないということです。こういったことをある程度先を見越してやっておくことが必要であるということ、そして京都大学はすごくいい所だということあらためて感じました。サポートの事務の人達がすごくよく手伝ってくれましたので、これが出来ました。6月30日には100mまで2本掘削して終わりました。この成果は5月23日の連合大会ではもう話しておりますので、まさにやりつつあることを紹介できてすごく良かったと思っています。結果としては、沖島の沖で2本を掘りました。ピストンコアは1時間あれば作業が終わってしまいますが、これが1ヶ月、2ヶ月と一箇所に居りますと漁業の問題とか、安全の問題とかが起こってきます。以前は数少ない交渉相手でよかったのですが、最近の2万5千分の1地形図を見ていただくと、琵琶湖の真中に線がたくさん入っています。これは行政区画で、琵琶湖の場所によって異なる許可申請が必要でした。県または国の出先機関の、たとえば地方振興局の許可をも貰わねばならない、といったことをあらためて知りました。琵琶湖の中にこういう境界があるということを実感させられたプロジェクトでもありました。そして最新鋭の機器をつかって位置決めをし、2本掘削をしました。特筆すべき点は、いつ風が来ても掘削台船が移動できることでした。固定をせずに、湖底から繋がってくるガイドパイプと、掘削するパイプは連結されていない、ということです。横風が吹いたり、強い風のときには逃げられるシステムを作ったことです。ガイドパイプを浮かせるためのフロートも新たに設計をしました。ズーッと繋いでいって最後には湖から立ちあがって、そこにやぐらを立て、台船の上に作業場を作ってここで掘削します。これを抜いてしまえばガイドパイプだけが湖の上に残り、湖面上にちょっと出ている形です。得られたコアに火山灰がきれいに見えてくるということで、時間を決めることができます。この2本のコアで北側で30万年、南側で20万年分の記録がとれました。このように火山灰を使って近畿地方のいろんな地域を対比することができるようになりました。最近の研究成果としては大体1万年に1回くらいの広域 tephra といっ

ていますが、大超爆発の火山灰を使って仕事ができることです。

最後ですが、琵琶湖だけを掘っているわけではありません。日本列島古環境変遷プロジェクトも進めています。日本海側の水月湖など三方五湖、これは日本海沿岸環境変遷、琵琶湖は日本海型と内陸型変動の組み合わせであり、京都盆地は内陸型、関西空港は内陸型および太平洋域環境変動の古文書であろうと考えられますから、これを先ほどの火山灰を使ってつないでしまおう、ということです。水月湖の場合は何が大切かといえば、1年毎の縞模様を使った1年周期の仕事ができるだろうということで、2006年にイギリスへ行っている共同研究者、中川毅さんがイギリスのfundを取ってきて水月湖を掘りました。これは国際プログラムとして、現在進行しています。この試料から1年毎の環境データベース化ができる筈です。京都盆地でも、尾池先生も話されましたが、いろんな地球科学情報も入ってきています。掘削もおこなわれています。京都盆地の地下はこうなっているということが地球物理学的手法できちんとわかる状況になってきています。宇治川断層がありますが、烏丸十条あたりで掘ったボーリングの結果から、200mまでで硬い岩盤に達することがわかっています。その中には大阪の方から入ってきた海進期の堆積物が数層入っていることがわかっていて、この資料はいま京都大学総合博物館の最初のコーナーに飾ってあります。関西国際空港ですが、2期工事中8月のまだ工事が完成していない部分で掘削を行いました。空港で最初に岩盤まで届いた掘削を、オールコアで実施することができました。そうすると地下には300万年を超える堆積物の存在が明らかになりましたので、先ほどのプログラムは日本海から太平洋に抜ける、古環境変遷プログラムとなって実施出来ると考えます。

ここまでが私のお話ですが、今日お話をさせて頂いたのは、一つは古環境実験施設という地球物理学教室を中心として出来てきた附属施設の当時の状態と、現在どうなっているかということ、そのプログラムがどう発展しているかということのご紹介をさせていただきました。