

講 演

1993年11月24日(水)・北海道・東北地方懇談会(東北大学青葉記念会館)

講師・題目

阿部 博之:「地殻熱エネルギー抽出への挑戦」

日本工学アカデミー

THE ENGINEERING ACADEMY OF JAPAN

地殻熱エネルギー抽出への挑戦

阿部 博之



1936 年生まれ

1959年3月 東北大学工学部機械工学科卒業

1967年3月 工学博士

1967年4月 東北大学講師(工学部)

1968年10月 "助教授(工学部)

1977年10月 〃 教授 (工学部) 現在に至る

1993年4月 〃 工学部長 現在に至る

固体力学が専門:破壊力学を数ミクロンのき裂(電子、 情報材料) および数キロメートルのき裂(地下高温岩体) に先導的に展開し、とくに後者については文部省科学研 究費特別推進研究(昭和58年)に採択。また、生体軟組 織(左心室など)の有限変形,き裂の非破壊評価に独自 の方法を考案し, 内外から賞を受ける。これらの分野で 日米セミナー (日本学術振興会) など多くの国際会議を 主催し、また組織委員となる。

日本機械学会賞, 米国実験力学学会賞など学会賞 (論

文賞) 8回,表彰2回。

司 会(桜井専務理事) それでは最初に、講師 の御紹介をしていただきたいと思います。安達先 生、よろしくお願いします。

安 達 (東北大学工学部教授) 本日は, 西沢総 長が最初にお出になれば、お話があるところでし たけれども, 西沢先生は懇談会の時間には間に合 うとおっしゃっておりました。私にお世話役をや れということを言われまして、まずい点もいろい ろございましたと思いましたが、講師の阿部先生 のご紹介をさせていただきたいと思います。

阿部先生は、皆さんよくご存じですが、一通り ご紹介させていただきます。 阿部博之先生は、昭 和34年に東北大学工学部の機械工学科をご卒業 になりました。42年に工学博士の学位を取られ、 同年に工学部の講師,翌年には助教授に就任され ました。その後、昭和50年、51年にかけまして、 米国のノースウエスタン大学の客員研究員をな さっておられました。52年10月に東北大学の教 授におなりになりました。今年4月からは、工学 部長として毎日非常にお忙しい責務をこなしてい らっしゃいます。

先生のご専門は、非常に著名な方とは知ってお りますが、内容まではよくわかりませんが、材料 力学, 固体力学, 破壊力学のご研究をなさってお られまして、その道の権威者でいらっしゃいます。 特にきょうの演題に関係しましては、昭和58年、 文部省科研費の特別推進研究を主宰なさっておら れます。その後の研究の進展もあろうかと存じま すのでこの研究を中心的立場で推進された阿部先 生からお話が伺えるのは大変幸運と存じます。賞 としましては、日本機械学会賞、これは3回も受 賞なさっておられて、稀ではないかというふうに 伺っています。それに米国実験力学学会からの R・E・ピーターソン賞を含めまして日米の固体 力学、破壊力学関係での学会賞をいろいろ受賞し ておられるわけでございます。

以上が専門のほうでございますが, 先生は, 東 北大学の漕艇部の部長を昭和58年から5年間な さっております。その道でも知られた方でござい

以上、非常に簡単でございますが、先生の略歴 をご紹介させていただきました。本日のお話であ りますが「地殼熱エネルギー抽出への挑戦」とい うことで、お話を伺えるということは非常にあり がたいことでございます。先生、よろしくお願い します。

阿 部 安達先生から過分のご紹介をいただいた わけですが、安達先生を通じて、この講演を引き 受けるというお話がございましたが、会合の趣旨 がよくわからなくて、ご命令でお引き受けしまし

たら、大変格調の高いお席で少し緊張しております。きょうのお話は、実は大平先生とか神山先生 には、既に一度ならずお聞きいただいたことがあ ろうかと思いますが。

では、早速でございますが、本題に入らせてい ただきます。

まず、今、地下からエネルギーを取るというと きに,一体どのくらいのエネルギーが地下にある かが問題です。今、通産省等によるいわゆる地熱 の位置付け, エネルギーの将来の見込みからする と非常に小さいんです。今でも電力の1%にはま だまだなんです。21世紀になっても、 $2\% \sim 3\%$ とか、そういう予測を立てる方はまだいいほうだ と思います。しかし、それはエネルギーのポテン シャルが小さいということではございません。図 1に示しました様に、地表から地下にどんどん穴 を掘ってまいりますと、温度がだんだん高くなっ てくるわけですが、その中に縦、横、高さが5キ ロメートルのサイコロを考えまして, 今, 仮に 100 度の温度差のエネルギーを取ることができるとい たします。どういうことかといいますと, 仮に 400 度の岩がありましたら、それが300度になるまで の100度を利用できたとしますと、これが現在の 日本で使われているエネルギーの総量と同じでご ざいます。エネルギーの総量というのはどういう ことかといいますと、産業用電力、照明ももちろ

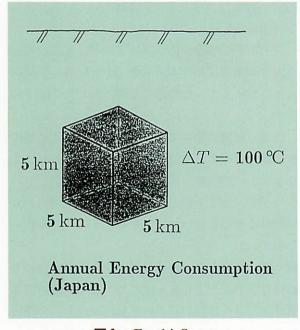


図 1 Earth' Crust

んですが、自動車のガソリンから、ジェット機の燃料まで全部ひっくるめた総量でございます。そのくらいのポテンシャルがあるわけで、5キロメートルというのは、仙台の地下でもこれよりはるかに大きいわけです。現在、この熱エネルギーを有効に取り出す方法が完成していないわけであります。

私、よく言うんですけれども、仮にこれの2、3%だけを取ることができて、97、8%がロスでなくなったとしても、なくなるといいましても、これは取る過程でロスがあるということで、地殻の中に残っているわけですから、別にむだになるということじゃないんですが、仮に2、3%ぐらいしか利用できない、ほとんど大部分をロスしてしまうとしましても、日本の各県に1個ずつ、こういう発電所ができれば、全部賄えるぐらい大きいということを申し上げているわけであります。これはもちろん、算術の話でありまして、実際にどれだけ取れるかというのは、また別の技術的な問題がたくさんあるわけでございます。

図2はどうやって取るかということの原理を示 したものであります。この地表から穴を掘る。井 戸を掘る。井戸は10センチとか20センチの内径 でございます。それがある温度のところ、例えば 300度とか350度の岩に到達しましたら、井戸の ある箇所に水圧をかけまして亀裂をつくってやる わけです。水圧をかけて亀裂をつくることを、水 圧破砕, ハイドローリック・フラクチャリングと いいます。亀裂をつくって水をどんどん押し込ん でやりますと、 亀裂がどんどん大きく成長してま いります。ある一定の大きさですね。何百メート ルか,あるいは1キロメートルとか,そういう広 がりになったときに、もう1本の井戸をそれに目 がけて掘っていくんです。そういたしますと、1 つのサーキュレーションのシステムができ上がり ます。地上から冷たい水を入れてやりまして,こ の入水井から狭い、これは人工の亀裂、クラック とか, フラクチャーとかいうんですが, その中を 水が通ってまいりますと,温度が上がります。亀 裂はどのくらい狭いかといいますと、熱をどのく らい取るかによって、だんだん時間がたちますと、 岩が冷えるものですから、このすきまが広がって

くるわけですが、当初は例えば零点何ミリとか、 そんなオーダーだとご理解いただければいいと思 います。その零点何ミリの狭いすきまを水が通っ ていきますと、当然のことながら、岩の熱を水が もらいますので、そこから温度の高くなった水、 あるいは蒸気を地上に回収して、これを発電に使 うというのが原理で、一般に高温岩体発電といわ れています。

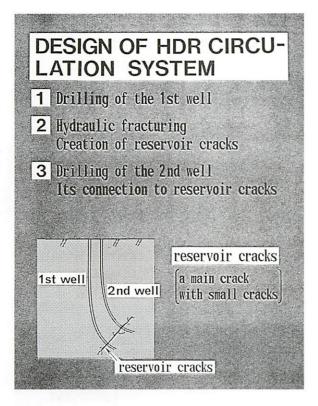


図2 DESIGN OF HDR CIRCULATION SYSTEM

この原理なんですが、実は絵にかきますと簡単なんですけど、いろいろな問題がございます。これは私が最初ではございせんで、実は最も早くからチャレンジをしたのは、アメリカのロスアラモスの研究所であります。ロスアラモスの研究所の第2期計画なんですが、図3にありますように地下約4.5キロメートルに井戸を掘ったのです。私がお見せする井戸は、全部右側に曲がっているので、右側にしか曲がらないんですかということを聞かれたことがあるんですが、これは今は井戸を掘るのに、自由に角度を変えながら掘っていくことが、相当の精度で可能であります。細かく言いますと、ピースワイズリニアで直線のつながりに

ほぼ近いんです。ロスアラモスの辺は花崗岩なんですが、温度が350度ぐらいか、もうちょっと高いのです。EE 2 という井戸と EE 3 という井戸と2つを掘りまして、ここから水圧を作用させて亀裂をつくりました。

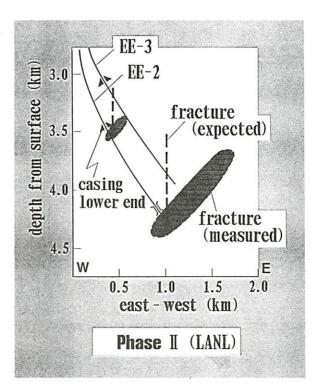


図3 Phase II (LANL)

アメリカのロスアラモスのグループは、鉛直に 亀裂ができると思っていたんです。ところが、実際に水圧をかけて水を押し込んでみますと、傾斜 した亀裂ができた。これは何でわかるかというと、 亀裂が進展するときに音が出ますので、その音の 震源決定というか、音源決定をしますと、これも いろいろ問題があるんですが、こういうふうに斜 めにいきまして、とにかくつながらなかった。つ ながらないと、入れてやった水を回収するサー キュレーションのシステムができないことになり ます。

そこで、3.5 キロメートル附近から水圧破砕を 行えば、ぶつかるんじゃないかということで、水 圧をかけましたら、図の上のように亀裂ができた。 この辺だと、斜めにいってもつながるだろうとい うことでやったわけですが、実際はつながりませ んでした。この絵ではつながっているように見え ますが、3次元的に EE 3の井戸のずっと向こうのほうに行っちゃっていたんですね。こっちから見ていると、重なっているように見えますが、実際は3次元的にずれていたわけであります。

どうしてこういうことが起きたかといいますと. 1981年の春に、私がロスアラモスに行きましたと きに、私はこういう地下の亀裂をきちんとデザイ ンできるような基礎研究をやっておかなければい けないということで、いろんな提案をしたんです が、全部無視をされたんです。それは私の実力が ないから無視されたということもあるんですが、 もっと大きい理由がございました。それは、この 第2期計画の前に、浅いところで、数キロメート ルしか離れていない近いところなんですが、第1 期計画の実験をやりまして、 それが非常にうまく いったんです。非常にうまくいったのは、そのと きにこの亀裂が縦にできた。そうすると、今度も 縦にできるだろうと、鉛直になるだろうと思って、 ワシントンの DOE (エネルギー省) に、非常に大 きい予算でプロポーザルを申請をしたわけであり ます。

そうすると、非常に大きい予算でありますから、 当然、ワシントンのほうはいろいろと確認をとり ますし、注文をつけるわけです。ロスアラモスは 第1期計画で基礎研究は第1期計画で確立したか らそれをもとにして大規模実験をやるんだという ことで、第2期計画を始めましたわけですから、 私が基礎的なことをやらないとだめだということ を言ったら、非常に困るんですね。一たんそうい うことで、DOEをイエスと言わせたのに、今さら また基礎研究が未了だとは言えないので聞いてく れなかったことも大きい理由になっているんです。

それで、これは学生に計算せさるぐらいのことでわかるんですが、数キロメートルぐらい離れていても、こういうところは温度の分布がございますので、熱応力が場所によって異なります。あとからごらんに入れますが、き裂の進展は地殻の応力の影響を非常に強く受けて斜めになるということは、十分考えられるわけですが、ロスアラモスではそういう検討をしておりませんでした。

それからもう一つ、2本の井戸を先に掘ってしまってから、亀裂をつくるというのは、私のやり

方と違うわけですが、ロスアラモスのほうとしては、先に2本掘ったほうがお金が安いものですから、掘ったわけですが、私は先ほどごらんに入れましたように、1本掘ってから亀裂をつくったほうがいいということを言っているわけであります。

図3でのべましたようにロスアラモスが、非常に大きい失敗をしましたために、私が飯を食っているところがございまして、人の失敗で仕事をしているのはあんまりよくないんですが、私の考え方を改めてごらんに入れましょう。図4にプレディクションと書いてありますが、亀裂をつくろうとする位置です。亀裂は熱交換面でございます。どこに亀裂をつくるかということですが、最初は、地質学者の知恵をお借りしながら、場所を決めるんです。ここにつくろうじゃないかということが決まりましたら、井戸を掘るんです。井戸を堀りますと、地下岩体に関する情報量が非常に増えます。岩体の温度分布だとか、亀裂の分布だとかいろんなことが、情報量として、たった20センチか10センチぐらいの井戸ですけれども、わかるわけです。

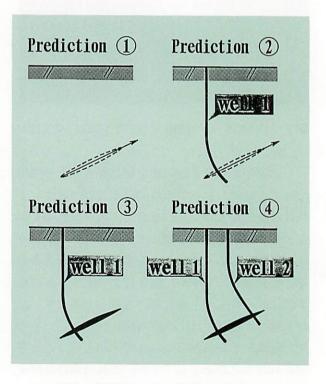


図4 循環システム作成のプロセス

そうすると、水圧をかけたときに亀裂がどんな ふうにできるであろうかということについて当然 ながら修正が入ります。新しい修正された熱交換 面を想定できるわけでありますが、そこで水圧を かけるわけです。水圧をかけるときに、特定な場 所だけ水圧がかかるように、パッカーという道具 で場所を区切るんです。そこで水圧をかけて亀裂 をつくります。人工の亀裂であります。次に人工 亀裂がどこにどの位の大きさでできたかというこ とを、いろんな計測方法で特定してから、2本目 の井戸を掘る。これが私の考え方なわけでありま す。そうすれば、3次元的に確度の高い幾何学的 な位置決定ができます。亀裂がどこにどうふうに できたかということを、きちんと地表で予測する ということが一番大切になるわけです。

その後世界的に見ても、2本目の井戸を亀裂作成の後に掘るやり方をだんだんとるようになったんですが、だれも私の名前を呼んでくれる人はおりませんので、私の方法だということにはなっておりません。しかし、ロスアラモスのような方法をとるグループは、ほとんどいなくなりました。

それで、先ほどご紹介していただいた科研費の特別推進研究に入るわけですが、その前に、私がこの仕事を最初に始めましたのは、1975年に、先ほどご紹介いただきました米国のノースウエスタン大学に1年間行っていたときでございます。私の場合は、気が小さいせいだと思うんですが、大学紛争でなかなか大学を離れられなくて、ようやく大学紛争が下火になったときに出させていただいたわけであります。ノースウエスタン大学というのは、固体力学とか、破壊力学のメッカの1つのようなところでございます。そこに大きなグループができまして、NSFからたくさんのお金がでて、ロスアラモスの研究の基礎的なバックグラウンドを研究しようということでスタートしたわけです。

そのときに、最初に問題になりましたのは、地下に破壊力学を適用できるだろうかということです。なぜそんなことが問題になったかといいますと、普通の破壊力学は、普通というのは、私ども機械屋が承認している破壊力学では、亀裂が成長して、それが全体の破壊に至るわけですけれども、

亀裂が成長してある大きさになりますと、不安定 破壊を起こして全体が壊れてしまうというのが、 一般的に理解されている現象でございます。とこ ろが、地下がそういう不安定破壊を起こすのでは 非常に困るわけでありますが、どうもそうでなさ そうだけれども、どうなんだというのが最初の命 題でございます。

これは実は、誠に簡単なことで、地下の亀裂というのは、水の質量が亀裂の間を無理やり押し分けて入っていくということで、変位制御のために極めて安定的に出来るわけですが、そういう非常に基本的なことを最初に確認したわけであります。

その次に私がやりましたのは、零点何ミリとかいう亀裂の中に水が流れていくわけですが、当然、 粘性流体になるわけです。流体力学の神山先生がおられる前で恥ずかしいんですけれども、ナビエ・ストークスの式に支配されるわけですが、亀裂の先端近傍で水がどういう挙動をするかということがわからないで、そこがブラックボックスで議論されていたわけです。議論が始まっていたというほうが正しいかと思います。水を入れてやりますと、亀裂が成長するんですが、亀裂が進んでいるときは、水をどんなに注入してやっても、亀裂の先端にこないという、そういう理論的な論文を書きまして、それが今、元になっているんじゃないかと思います。

それから、日本に帰ってまいりまして、この仕 事をずっとやってきたわけですが, 破壊力学を地 下に応用するということでは、内外から随分叱ら れました。まず、地質学者、地球物理学者からは、 ものすごく怒られましたし、鉱山、資源工学の方 からも随分叱られましたが、最近は大体あきらめ たのか、叱る方はおられなくなりました。なぜ叱 るかといいますと、地下のように複雑なところに 破壊力学が、インホモジニアスなものに破壊力学 が適用できるかということです。私は当時から申 し上げていたんですが, 例えば鉄鋼材料だって, 亀裂の進展をよく見ると、インホモジニアスの、 材料の中で亀裂が進展しますから, あっちに曲が りこっちに曲がりいっているわけです。破壊力学 は、もう少しマクロな現象を説明しておりまして, 実際に遠くから眺めると、もう少しマクロな量に

よって亀裂の進展が支配されます。そういうエンジニアリング・セオリーが破壊力学ですので、当然、インホモジニアスな影響があっても、適用できるだろうと考えたわけです。

それからもう一つは、地下はジョイントがたくさんあります。天然の亀裂とか、断層みたいなものがたくさんございますので、それをどう考慮するかの問題があります。これがまさに地下の破壊力学の重要なところでございまして、随分いろいろと仕事をさせていただきました。そうしていますうちに、科研費の特別推進研究で、3億3,000万円というお金を頂いたわけですが、これは制度が発足して2年目なんです。普通には3億円までしか出ないもので、上限が3億円なんです。私はあまりそういうことをきちんとフォローしないで、科研費の計画調書を書きまして、3億4,200万~3億4,300万円で出してしまいました。

そうしましたら、審査会を通った後で文部省か ら呼び出されまして,これは多過ぎると。普通は, みんなアッパーリミットより少し少なく書くんで すね。私も普通の科研費は、300万円だと、例えば 299万と書くわけですけれども、このときは少し 抜けておりまして、3億4千何百万と書いて出し ました。通った後は、文部省では話が非常に好意 的で, 先生, 多過ぎるから削ってくださいと言わ れ,私は3億円以下に削られるのかなと恐れてい ましたら、先生、幾ら多くともせいぜい1割増し にしてくれませんかとの話でした。しめたと思っ たんですが、しめたというわけにいかないので渋 い顔をして、3億3,000万円で結構です、何とか やります、頑張ってみますというようなことを申 し上げたんですが、その後見てみますと、3億 3,000万円というのは、これは58年の話ですが、 その後も若干名おられます。どうもアッパーリ ミットみたいですね。大変助かりました。

そのほかにも1億1,000万頂きまして,資源工学科の横に,あとでご紹介しますがオートクレーブの実験室をつくりました。これは文部省の特別設備で,その1年前の概算要求で認めていただいたものであります。

特別推進研究の中身について簡単に申しますと、これはフェーズ I, II, III とございまして、フェー

ズIというのは、とにかくできるだけ大きいテストピースを使って実験してみようというものです。地下の亀裂を見た人はいませんので、いろんなことを言う人がいるもんですから、おまえの理論は、絵にかいた餅でだめじゃないかなんていう人がたくさんおられましたので、とにかくできるだけ大きなテストピースでということで、10メートルぐらいの大きさの岩石まで実験しました。

フェーズIIというのは、今度は地下のほうでありますが、これも文部省の3億3,000万円というのは地熱の世界から言うと、小さいお金なんですね。それでお金の制約もありますが、比較的浅い地下でこの亀裂設計、先ほど申し上げましたような方法で、亀裂の設計をやるという考えを実証しようということであります。

フェーズIIIは、実際の地下は非常に温度が高く、 圧力が高いわけですので、それに合ったような環 境下で、岩の亀裂の進展の挙動がどうなるかとい う考えを調べるわけであります。

図5が10メートルクラスの岩のプロポーザルを書いたときの絵であります。穴をあけまして, 亀裂をつくりまして, 亀裂が進展するときに, 聴 診器みたいなものを置いて, 音で震源決定, 位置 決定なんかをやろうというような, 多目的実験を 企画したわけであります。

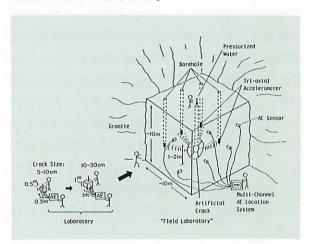


図5 Project —Phase I —

図6は10メートルクラスの岩でございまして, 福島県の飯館村というところの石切場でやったわけです。岩はもっと下まであるんですが,途中に 板があります。我々が行ったり来たりする橋であ ります。図の中に人がいますので、岩の大体の大きさは見当がおつきになるかと思います。ここに井戸を掘って、そこで亀裂をつくるということをやったわけであります。このくらいの大きさの岩ですと、亀裂をあとで、平たい言葉で言うと、解剖して見ることができます。



図6

図7がその1例ですが、もう少し小さいテストピース、サイズ効果なんかがありますので、いろんなサイズを実験したんです。中央の線が井戸なんです。圧力のかかる区間をつくりまして、そこで色のついた水を入れて圧力をかけて、亀裂をつくった。この白いのは、岩を割るために石屋のプロが、石目に沿ってうまく穴をあけて、その中にデトネーターを入れて割る穴です。これはサイエンスの世界じゃなくて、経験の世界であります。石目に沿って割ると亀裂が見えるわけです。亀裂の形は理論的な結果と非常によく合っている。岩のような雑な材料でもよく合っているんです。

図8は実は、一番大きい亀裂の1つなんです。 この亀裂もほとんどペニーシェィプドクラック (penny-shaped crack)です。私の論文はペニー シェィプドクラックについてが最初でございまし て、よく理論と合っています。これは地下を奥深 く行きますと、ペニーシェィプドクラックの形が 変わってまいりますし、もちろん、断層があった り、いろんな影響がありますと変わってまいりま すが、このくらい雑な材料でも、相当よく理論に 合うということであります。



図 7



図8

サイエンティフィックな結果にどういうものがあるかということですが、いろいろあるんですけれども、1つだけお見せしたいと思いますのは、図9で、横軸が亀裂の大きさなんです。先ほどのペニーシェィプドクラック、ペニーシェィプというのは円盤状の亀裂のことです。縦軸は亀裂の進展を支配する応力拡大係数という量で書いています。亀裂進展抵抗なんです。亀裂が小さいうちは、応力拡大係数は小さい値で亀裂が進展するんです。ところが、亀裂が大きくなっていきますと、だんだん大きい亀裂進展抵抗が必要になります。

亀裂進展抵抗は、初めから大きい亀裂をつくった場合でもやはり小さいです。亀裂が進展するときは、亀裂の先端の前にプロセスゾーンという、マイクロクラックのゾーンが成長して、そこがエネルギーを吸収するものですから、ある程度の大きさまで亀裂進展抵抗が増加するんです。どのくらいまで増加するかというのがわかりませんでし

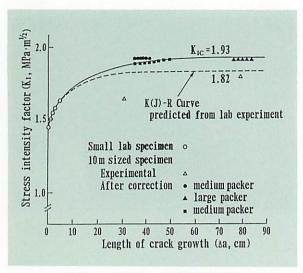


図9 岩石内のき裂進展抵抗

たが、このようなばかでかい実験をやって、初めてわかったということです。だれも、このようなばかげた実験する人がいない。従来のテストピースは、せいぜい2メートル~3メートルぐらいの大きさまでで、普通の実験室内でできるのは、その程度が最高でしたんで、図9の結果も今回の成果の1つであります。

次はフェーズIIでの地下の実験でございます。 先ほどの 10 メートル級実験の結果を踏まえまして、地下に穴を掘った。岩手県北西部の東八幡平 というところで、地下の実験をやりました。

図 10 がフェーズ II で 500 メートルぐらいで浅い岩を対象にしています。これはエネルギーを取るというよりは、亀裂のサーキュレーションシステム、2本の井戸と亀裂とが組み合わさったサーキュレーションシステムを、破壊力学に基づいて、破壊力学だけを使うわけじゃないですが、設計の基礎を確立していこうというのが我々のスタンスであります。数本井戸がありますのは、この目的のために開発しなければいけないいろんな基本的な技術がございまして、そのために使った井戸でございます。こんなにたくさん、いつも要るわけでありません。

亀裂の設計のパラメーターは3つあります。何かといいますと、先ほどロスアラモスの亀裂が、彼らは縦にできる、鉛直にできると思ったのが斜めにできた。じゃあ、何が亀裂の進展の向きを支配するかということであります。ロスアラモスは、

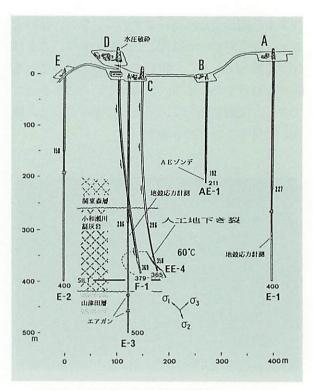


図10 Γ計画 東八幡平実験フィールド

そういうことに研究のターゲットを向けなかった ために、何で斜めになったかはわからないんです が, 我々いろんなシミュレーションであるとか, 室内実験なんかをやりまして, これだろうという ことに到達したものが3つあります。その1つは, 地下の岩は四方八方から圧力を受けていますが, その応力分布の状態による,影響を亀裂進展が受 けることです。次は先ほどちょっとごらんに入れ ました亀裂の進展抵抗です。亀裂の進展抵抗が大 きいところと小さいところがございますので、そ の分布に亀裂進展が影響されるということです。 もう一つは、地下がどんなジョイントを持ってい るか、不連続面を持っているかに影響されること です。この3つを押さえておけばいいというのが、 我々の大体の結論でございまして, それをもとに 亀裂の設計をやったわけであります。

図11の写真の方は流体科学研究所にいる林一 夫教授なんですが、当時、私の助教授をしており ましたので、ここに立っていますが、岩は凝灰岩 なんです。穴を掘ったときにコアという円柱状の サンプルをとることができるんですが、あの場所 では、コアを連続的にとれるんです。それではな ぜこういうところを選んだかといいますと、私が



図 11

いつも口を酸っぱくして言っているんですが、こういう難しいシステムのデザインをするときは、最初は非常に条件のいいところからやらないといけない。あまり複雑なところからやりますと、何がどういうふうに影響しているかわからないということです。地下の大きいジョイントのないところを選ぼうということで、コアが連続してとれるような場所を選んだんです。よく見ますと、いろんな小さい細かい亀裂がありますが、これは破壊力学的に見て影響のない小さい亀裂でございます。

それから、地下の亀裂進展抵抗はどうやって調べるかということですが、今のコアに図12のような予亀裂を入れまして、これで3点曲げをして、壊れるときの荷重から換算をして、亀裂進展抵抗を出すということをやったわけです。なおいろんな方法があり、破応研の高橋秀明教授なんか非常に得意としているところなんですが、いろいろな簡便な方法、実用的な方法もグループ内で提案され、いろんな特許も取りましたけれども、図12の方法が基本になっているわけであります。

一番苦労しましたのは、実は地下の応力分布によって支配されるという以上、地下の応力を測定する方法を開発しなければいけないことです。ところが、井戸は大きくとも直径が20センチぐらいですから、人が入っていくわけにはいかないし、地下の応力状態をどうやって調べるかというのは、

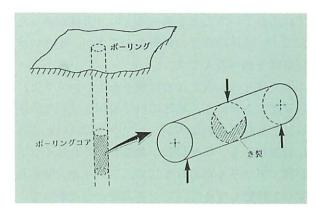


図 12

非常に大変なんですね。地下は主応力の状態で表示しますと、図13のようにS1、S2、S3という、圧縮の主応力が3方向から作用していますが、そのうちの一番小さい圧縮応力を今、S3としますと、S3に垂直に亀裂が成長するという基本的な性質があるわけです。そうすると、一番小さい圧縮の主応力ですね、このS3の方向を探せばいい。大きさは水圧に関係するんですが、方向を探せばいい。どうやったら探せるかということで、随分苦労いたしました。

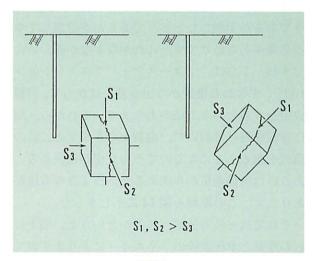


図 13

これは先ほどの林助教授(現流体科学研究所教授)が、部隊長みたいな形で、ものすごくいい仕事をしてくれたんです。それまでどういう方法があったかといいますと、1つの主応力を鉛直軸と同じ方向だと仮定しますと、もう2つの主応力が出てくるわけです。これが水平面内にあるわけですね。これら2つの主応力がどっちのほうを向い

ているかということを調べるという方法があった んです。地球物理学の分野なんですが、小さい水 圧破砕を調べるんです。

例えばどういうところに使うかといいますと, 数年前に NHK が、地球の科学番組を連続で放送 したことがございますが、ヒマラヤの高いところ に貝殼がある。なぜ貝殼があるか。それはインド が昔、アフリカにありまして、アフリカ大陸から ずっと移動してきて、アジア大陸につながって、 アジア大陸を北に押し上げている。それを証明す るために, インド側と中国側に井戸を掘って水平 面内の最大の圧縮応力がどっちを向いているかを 調べている人がいます。高温岩体の研究開発をし ているドイツ人のプロフェッサーもその一人です。 地球物理学の方は2次元ですが、熱抽出のための 地下応力は2次元ではだめなんですね。3次元計 測でないといけない。3次元的なのをどうするか ということで、 苦心してその方法の開発をやった わけであります。

そういうことで、水圧をかけて、亀裂をつくりますと、方向や大きさが予測された亀裂ができるわけです。次に亀裂ができた後に実際に亀裂がどうであるか予測したとおりであるかを計測してやる必要があるわけです。これがなかなか難しいんですね。1つは、アコースティックエミッション(AE)、すなわち亀裂から出る音をはかって、音源決定をするという方法があります。それから、別に音源を設けておいて、亀裂ができますと、音の流れを遮ることになるのでその変化から決める。あるいは流動電位から決めるというような方法があります。この原理を図14に示しました。

それではどの方法がベストかというと、地下の 岩の性質と水圧破砕のエネルギーによりますので、 何とも言えないのです。しかし、一般に今、音が 有用だということにはなっております。

図 15 は、地下の AE 測定を目的としてつくった装置です。これは東レ科学振興会から 1,500 万円の助成で作ったわけですが、実際は、今の資源の新妻教授、当時、これをスタートしたころは、電気系の佐藤利三郎先生の研究室の助手だったか、中鉢先生のところの助手か助教授だったわけですが、彼がほとんどやりました。私は、こういうこ

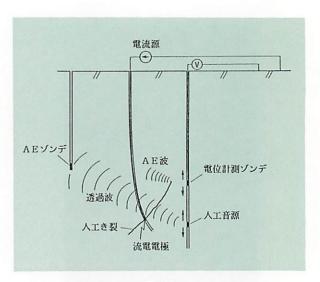


図 14

とが必要だということと、お金を持ってきたこと ぐらいです。これには海底ケーブル用のアーマー ドケーブルが使われておりまして、1,000メート ルぐらいの深さまで利用出来ます。油圧装置がつ いています。この車で高速道路を行ったり来たり、 のろのろ運転しながら使いました。この装置は普 通の地熱発電に対しても、きょうはお話ししませ んが、いろんなコントリビューションをした歴史 をもっています。



図 15

図 16 がそのときの最初につくったゾンデであります。ここは電気系の建物の玄関でございまして,近くで人間が立って手をたたいただけでも信号が出てくるぐらいの感度を持っているものです。今は新妻先生がだんだん改良を重ねて,もっと短くなってきていますが,これは初期のものであり

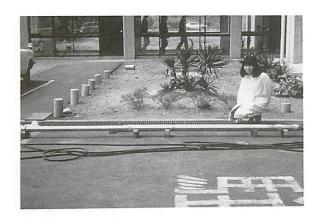


図 16

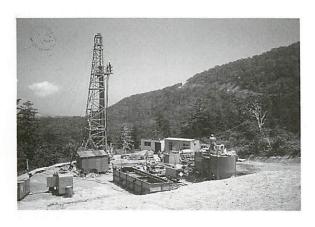


図 17

ます。

図17が東八幡平の現場でありまして,東北大学が借りており,現在も使っています。

さて、我々の考え方をもう少し申し上げますと、地下の亀裂の方向を決めるのに3つのパラメーターがあると言いましたが、こういうものに基づいて、亀裂がどっちの方向に成長していくかということをプレデクションするということをまずやります。しかし、それはあくまでもプレデクションでありますので、次にいろんな方法で、即ち電気的に、あるいは音で、あるいはもっと幾何学的な方法で、実際にできた亀裂のマッピングをするわけですが、万能のものは、今の段階ではございません。これらプレデクションとマッピングによる2つの情報量をもとに、亀裂の場所であるとか、大きさであるとか、傾きであるとかを推定してやるということであります。

昭和61年のことでありますけれど、このような

考え方に基づきまして,つくった亀裂に対して2 本目の井戸を掘っていったわけであります。2本 目の井戸を掘っていく途中で、2、3のマスコミ から、先生、いつうまくつながるんですかという ようなことを聞かれました。そのうち、そのうち なんて言っていたんですが、これは実験ですから、 どんな問題が起きてくるか。その当時もいろんな 問題が起きてきて、何とかかんとか、1つ1つ解 決しながらきていましたので, いつ成功するかわ からないわけです。そのうち教えるからと言って いましたが、だんだん約束したマスコミがわから なくなりまして、それで、これはまずいというこ とで,成功した直後に記者クラブに申し出て発表 することにしたんです。それで生まれて初めて記 者発表というのをいたしました。そうしたら,こ の結果が、当時の「NC 9」という NHK の夜 9時 からのニュースの時間に出まして、大変大きい PR になったんです。

さて2本目の井戸を掘っていくときに、どういうことが起きるかということです。1本目の井戸の水によって若干圧力がかかっています。2本目を掘っていき、亀裂を通過すると急に水のヘッドが変わりまして、サーキュレーションが生じます。亀裂に井戸が連結したわけですが、どこか別の箇所で連結したのではないかと言われると困るんで、亀裂面を染めたんです。フェーズIと同じように、色のついた水を入れて染めました。そうすると、掘っていった2本目の井戸のコアに、その染めた跡が残っていれば、ちょうどうまくいったということなんですが、これを図18でごらんに入れたいと思います。

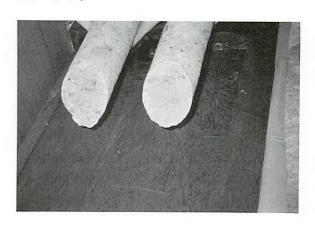


図 18

これがその証拠でございまして、亀裂の面に、 プロッパントといって、亀裂がとじないように砂 を入れているんです。それも残っているんです。 コアの断面が、まさにこの亀裂をあらわしている わけであります。

それからもう一つ, 亀裂の方向について補足しておきたいと思います。図19が実際にできた亀裂

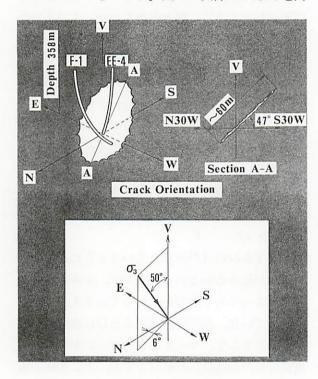


図19 Direction of Minimum Compressive Stress at 350 m

を書いたものなんですけれども、最大の傾斜が47度なんです。ところが、最小主応力の方向が鉛直軸から50度で、3度の違いはありますけれども、ほとんど合っているということで、我々の方法が妥当であったことの実証になったわけです。そのくらいこの地下の応力計測というのは役に立つわけです。

フェーズ II のほうは終わらせていただきまして, 次に、資源工学科の横にあります設備でのフェー ズⅢの, 高温高圧といいましても, 400 度とか, 200 気圧とか、特別な場所は600気圧ぐらいのがあり ますけれども、そういう中で亀裂がどんなふうな 挙動を示すかの実験を行っておりました (図 20)。圧力と水によりまして、あるいは温度により まして進展抵抗がものすごく変わってくるんです。 また亀裂のすきまを水が流れますと、いろんなも のが溶け出したり, 析出したりします。アメリカ で成功したフェーズ I では、たまたまうまくいっ たとは言え, 歴史的な成果なんですが, 飲める水 を入れてやればほとんど飲める水が出てくるとい うことを PR にして、飲める蒸気が出てくるとい うことになっていますが、 実際はいろんなものが 溶け出すわけです。

図 20 右下は、アコーステック・エミションは音速が元になっていますので、温度、圧力、水環境下で、音速がどうなるかを調べるために使った装

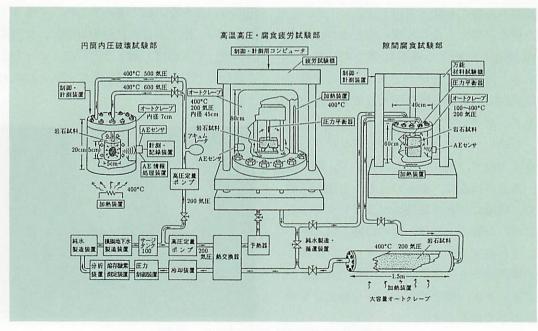


図20 地殼深部岩石環境強度試験装置

置でございます。

図21がそのときの釜でございまして,これが資源工学科の横にある1億1,000万円の装置の一部でございます。現在は、破壊力学応用研究施設と資源の第2講座の松木先生の研究室で、精力的にいろんな仕事をしてくれております。

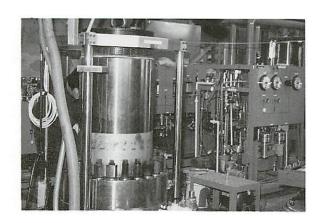


図 21

私が今日お話申し上げましたのは、高温岩体といいまして、地下に水がないものに水を入れてやる話なわけですけれども、これが在来型の地熱とどこが違うか。在来型の地熱は掘ってやりますと、そこにお湯のたまりがあれば、うまく当たれば噴き出してくれるわけですが、これは天然の貯留槽で、浅部の非常に恵まれた箇所だけですので、これだけを対象にしていますと、とても代替エネルギーとしてはポテンシャルが小さいのです。まだまだ開発すべきところはたくさんあるんですが、しかし、そういうところを全部考えても、非常に限られたポテンシャルになります。それに対して、今申し上げた高温岩体型というのは、原理的にはどこでも可能だということであります。この違いを表にまとめたのが表1です。

それから次に地層としては、一般に従来の地熱発電所というのは、非常に複雑なんですが、これは今、ガンマ計画——私のほうの特別推進研究は、ガンマ計画といいます。説明が遅れてしまいましたけれども。ガンマ計画では比較的均一な岩体を、第一段階として対象にして、デザインの基礎を示したということであります。

じゃあ,世界中で一体,どんなところで研究を

表1

	在 来 型	HDR型	
開発対象	天然の貯留層, 浅部の 恵まれた箇所	原理的には地殻内の どこでも可	
地 層	複雑	比較的均一な岩体を 第一段階として対象 可	
流路	主として天然き裂, 破 砕帯	主として人工き裂	
生産井流体	含有成分に依存	クリーン	
設計対象	地下熱交換面には及 ばない	システム全体	
抽出方式	受動的	能動的	
農業との対比り	自然採取型	栽培型	

しているかということですが、先ほど申し上げましたロスアラモスのほかに、イギリスだとか、フランスでもドイツでもやっているんですが、対象が少しずつ違います。我々は、比較的均一な岩体を出発点にすべきだということですが、日本でも現在、NEDOの肘折プロジェクトというのがありまして、これは準実証レベル試験みたいなものなんですが、そこはもともと在来型の地熱発電を計画したところで、ほとんど熱水が出てこなかったところです。まあ、多少は出てきたんですが。そこを対象にしたために地層が複雑になっているんです。複雑だと、いろいろ難しい問題がありますが、時間とお金をかけて何とかやっている。私もいろんなお手伝いをしております。

さて、人工亀裂には髭みたいなのはいくらあっ てもいいんですが、単一亀裂と見なすことができ るようなところは、岩石破壊力学がカギになりま す。それから界面が若干あるようなところも、こ れは界面の岩石破壊力学というものをベースにし てデザインをやるべきだということです。イギリ スの対象は表2に示すようにさいころの目みたい になっているんですね。これは2本の井戸をつな げるのは非常に楽なんですが、 さいの目みたいに なっていますと、水がどこに行くかわからないん ですね。理論的には、ある体積内に閉じこめられ ることを, 私の研究室の計算でも出てくるんです が、それでも地下にどんどん入れた水が、どこに 行っちゃうかわからないというのは非常に心配な んです。地震を誘発するというようなことは、今 まで出てないんですが、やっぱり心配ですので、

表2 熱交換面の形態とその設計

地	下 構 造	設計因子	熱交換面設計諸言	水圧破壞設計諸元	アプローチ
■天然き裂, 弱面のほ とんどな い場合	単一き裂	・岩体の特性 ・地殻応力 ・地層層序			・岩石破壊力学
■卓越した 天然き裂, 弱面が存 在する場 合	複数き裂	・岩体の特性・地殻応力・弱面, 天然き裂の力学特性・弱面, 天然き裂の 機何学的構造	・大きさ・方向・位置	・破砕流体 (prepad, gel, proppant ・破砕流体の量 ・流量, 圧力 ・圧入時間	・界面岩石破壊力学
■網目状に 天然き裂, 弱面が発 達してい る場合	網目状き裂	・岩体の特性・地殻応力・弱面, 天然き裂の 力学特性・弱面, 天然き裂の 幾何学的構造			・界面岩石破壞力学 ・DEM*

* DEM: Discrete Element Method

地下に入れた水は、ほとんど大半を回収できるようにしておかないといけないだろうと思っている わけです。

それから、NEDOのプロジェクトですが、NEDO は山形県の肘折で実験していますが、深度 1,800メートルぐらいのところでやっていまして、2,200メートルのところにも亀裂をつくっています。このプロジェクトでは井戸を掘っては亀裂をつくって、それに2本目をめがけて掘って、また 亀裂をつくって、また別の井戸を亀裂にめがけて掘ってということで何回もやっています。私の方法とは呼んでくれておりませんが、先ほどご紹介したような方法で、実証試験に結びつく要素技術の開発をしているので、多少時間はかかりますけれども、いろんなデータが集積できています。

そのほか、秋田県の秋の宮というところで、電力中研が同じぐらいの規模の開発をやっておりまして、これもいろいろな成果や問題があるんですが、NEDOと大体似たようなレベルでございます。入れてやった水がなかなか出てこないということを心配しているんですが、それは狭い通路でもあってちょろちょろでも出てきていれば、流しているうちに、サーマル・コントラクションで亀裂のすきまが大きくなりますので、必ずうまくい

くから心配するなと申し上げているんですけれども。やっぱり複雑なところを最初からねらっているので苦労していると思います。以上我々の今説明したガンマ計画ですが、これは比較的均一な岩体を対象にしたんですが、学術的研究としては、その基本は大体第一段階として終了したものと思っています。もちろん実証レベルはこれからです。

一方ガンマ計画とは別の新しいアプローチが提案されています。こちらは、もともと多数の亀裂があるんだということから、フラクタルという概念で地熱開発ができないかということを言い出して、科研費の重点領域研究に採用されたのが、高橋秀明教授を中心とする研究であります。これは始まったばかりで、私がご説明するのは適切でないんですが、ちらっと申し上げますと、コアみたいなものの亀裂の分布と、もう少し大きい地表に出ている岩の亀裂の分布、それから地下の亀裂の分布との間に、フラクタル的な一種の物差しが存在するだろうということで、全国的なグループで考え方の可能性を追求しています。

そのほか地下の熱利用の関連で、補足的な話で 恐縮なんですが、マグマの利用があります。今ま でのお話は温度は高いけれど、全部岩の話なんで すが、今度はマグマの利用についてお話し申し上げます。地球は6,400キロメートルぐらいの半径なんですが、地殻という高温岩体が存在しているところは、1%にも満たないんですね。10キロメートルかせいぜい40キロメートルぐらいの厚さの卵の殻みたいな固体があって、その中は溶けているか、それに近い状態になっているわけです。半径のほとんど99%以上が1,000度以上であるというのが、この地球の実態なわけであります。

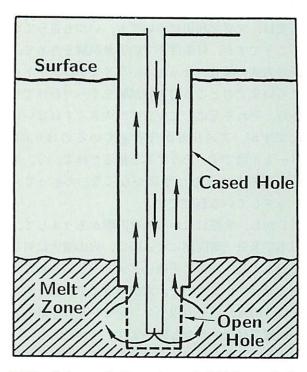
そのものすごい熱量を何とかして利用できないかというので、やっぱりアメリカというところはとんでもないすごいところで、高温岩体が始まったころに、サンディア・ナショナル・ラボラトリーズで、大学も含まれておりますが、フィージビリティ・スタディが始まっております。アメリカ大陸の深さ10キロメートル未満で、マグマの出ているようなところだけで、アメリカの1年間のエネルギー消費量の650年から6500年分あるというようなことで、エネルギー省が1975年、ちょうど私がアメリカで高温岩体の仕事をしているころに、既に調査を始めております。

マグマの物理的、化学的性質も調べておりますが、実際に小さいレベルの試験をしました。これはハワイ島にありますキラウェアの小キラウェアというんですか、熔岩が表面近くまできているところです。表面はアッパークラストで固まりになっているんですが、そのすぐ下にマグマがあるというような場所がありまして、そこでマグマからエネルギーを実際にとってみせたんです。これは玄武岩ですが、900キロワットぐらいの熱出力を抽出しております。入れた水がどのくらい回収されているかといいますと、95%から100%ぐらいです。材料の実験を同時にしているんですが、高い温度に耐える材料を使う。ただし、通常は材料が直接マグマに触らないようにしているんです。

マグマに穴を掘るわけですが、普通、ビットというので、我々は地下に穴を掘るんです。マグマに直接当たるということを避けるために、ビットの表面から水をどんどん噴き出すんです。そうすると、マグマは固まります。固まったところをドリルビットで掘る、そういうやり方をとっているわけあります。

実際にどういうやり方をとったかというと,図 22 のような二重管でありまして、中から水を入れ まして,下はオープンホールになっていますが, その辺が深度65メートルぐらいです。小さい フィールドの装置です。水が通る付近のマグマは 固まっておりまして、図23の様に細かい亀裂の中 を熱交換面にして戻ってくるというやり方です。 亀裂の部分がないと、とても熱交換面が小さくて, 全く話にならないので、いかにしてそういうもの をつくるかということです。現在アメリカで考え られているのは、途中までしか二重管になってい ないんです。その下はずっとパイプが1つなんで す。黒い矢印がありますが、ここを水が上がって くるんです。固まったところにひび割れがどんど ん出来、そのたくさんの亀裂の中を水が上がって くる。このハッチッグしたところの外はドロドロ 溶けている。ハッチングのところは,固体でも液 体でもないような、プラスチックなゾーンになっ ているわけです。

これも亀裂をうまくつくって、亀裂を利用して 水を回収をしないと、とてもエネルギーの総量が 足らなくなるわけです。亀裂の役割というのは非



Schematic Drawing of 1981 Lava Lake Open Heat-Exchanger Experiment (afer Dunn, 1981).

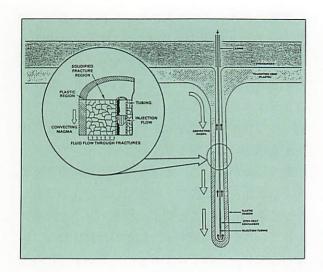


図23 Current conceptual representasion of a single well during steady operation of a direct-contact heat exchanger. (Chu et al. 1990)

常に大きいわけです。亀裂の面積を大きくしてやる必要があるんですが、どのくらいにできるかというのは、これも、流体研の林先生と私のところで少しやっております。アメリカでは実は今、マグマ利用の研究開発は高温岩体と同様にトーンダウンしておりまして、進んでおりません。我々としては、マグマ利用についても、いつも言っていることですが、好条件下での実証試験を含めて、設計方式の確立。せっかくハワイで105メートルぐらいまでのところで実証試験をやったわけですから、それを元にして少しずつ大きくすればいいんですが。アメリカが今考えているのは6,000メートル級です。そうすると掘るだけで、今、半分も掘らないうちに予算がなくなっちゃってストップしているわけです。

しかし、実際にはいろんな問題がありまして、 日本で多分一番問題になるのは、火山噴火に対し て日本人は、非常に手痛いダメージというか、災 害を受けていますので、火山の近くで試験をする というのは、原子力以上にコンセンサスを得るの が大変ではないかなと思います。

図 24 で,また岩のほうに戻らせていただきますが,これは私の仕事で恐縮なんですが,これは破壊力学の分類なんです。普通の破壊力学は,機械構造物対象ですから,亀裂の大きさが1ミリメー

トルか、今はもう少し小さいところから大きいものでせいぜい数十センチぐらいですね。この地下の亀裂、岩石破壊力学と私が言っていますのは、 亀裂の大きさが1キロメートルか、もっと大きくてもいいんです。地震の世界はさらに大きいんですが、地震の世界に破壊力学をアプライしている人もいますが、それはむしろ、現象のモデル化とか解釈で、実際に亀裂をつくるとか、そういうこととはちょっと違うんです。

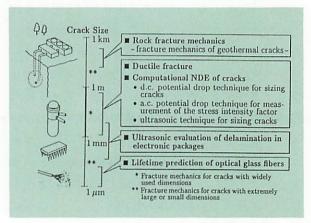


図 24 Fracture Mechanics

そういうことで、私の研究室でも普通の亀裂を 対象にしたものもやっているんですが、ここだけ ですと、世界中に、破壊力学に関して仕事をして いる企業の人も含めれば、数えたことはありませ んが、何千人よりは多く万という人数がいるん じゃないかなと思います。そこでどんなにいい仕 事をしてもなかなか目立たない。地下の大きい亀 裂のほうは、やっている人がほとんどいなかった ということで新しいことばかりです。

それからもう一つは、エレクトロニクスの発達とともに、非常に小さい亀裂の進展が問題になってきて、例えば私のところでやっているのは、オフティカル・グラスファイバー、これは髪の毛ぐらいの太さの中に、数ミクロンぐらいの亀裂があったら、どんなふうにそれが挙動するかと言う問題です。これも非常におもしろいことがあるんですが、きょうはミクロの方は割愛させていただきます。日本全体としても、この小さいほうをやる人は、非常に今増えてきております。

そんなことで、破壊力学というのも、いろんな 大きい展開が出てくるんじゃないかというふうな ことを申し上げてお話を終わります。

司 会 阿部先生、どうもありがとうございました。せっかくのチャンスでございますので、阿部 先生、お差し支えがなければ、ちょっと質問をお 受けいただけますでしょうか。

昔,私も地熱に関係したことがございまして, 先生のほうでない,浅いところの,今の八幡平で 実験されたところの西のほうの,澄川というとこ ろの地熱開発の初期の,リーガル・アレンジメン トをパートナーとつくり上げる仕事を,今から10 年ほど前にやらせていただきまして,澄川もよう やく蒸気が出て,何か起業化の方向に進んできた ようでございますので,私もやってよかったと 思っております。

今のお話で、私からもしお伺いさせていただければ、地下相当深部の高温岩体にフラクチャーをつくって地熱を回収する話と、もっとうんと浅い、マグマが地表近く上がっているところで、マグマをフリーズさせてそこをうまいぐあいに加工して地熱をとる話と、2つのお話のものが出てきたような気がするんですけれども、特に地下の深部のところにフラクチャーをつくるときの水圧というのは、どの程度のけたのものをおかけになるんですか。

阿 部 最初に、日本及びアメリカで、一体どのくらいの水圧をかけて亀裂をつくっていたかということを申し上げますと、地表で100 気圧か、あるいは大きくとも200 気圧~300 気圧、その程度でございます。これはもちろん、ヘッドがあるわけです。どうしてあまり大きくないかといいますと、破壊力学の話になるんですが、結局、今から亀裂をつくろうとするところへ、何らかの人工ないし天然の切り欠きみたいなのがあれば、それが水圧の大きさに非常に大きくデペンドしますので、実際に実験室で岩の破壊をすることからの評価からすると、はるかに小さい水圧で亀裂を進展させることができます。

私は実は、当初破壊力学、そんなものを地下に 当てはめておかしいということを盛んに批判され 始めた頃に、ポンプの圧力は破壊力学に基づいて 亀裂の大きさを考えるとこれだけ違うんですよというのを、2、3回、シンポジウムか何かで説明したことがあるんです。そんなことで、現状はさっき申し上げましたように、大した圧力でございません。地下の状態によって変わります。

司 会 ほかにせっかくのチャンスでございます ので,ご質問ございませんでしょうか。

竹 田 キラウェアのお話がございましたけれども、例えば日本で雲仙その他で非常に困っているわけですけれども、本当に採算がとれるような、あるいは安定した熱源としてああいう火山の場合、マグマが非常に近くまで来ているんじゃないかと、僕は思うんですけど、どうなんでしょうか。噴き出している場合はそばに来ているんでしょう。

阿 部 おっしゃるとおりですが、非常に難しい質問で、私がいつも申し上げているのは、キラウェアみたいなところは非常におとなしいわけですね。マグマが近くまで上がってきていますけれども、もちろん、噴火というのはあるわけですが、それに数メートルぐらいの、堅いのが上にかぶっているだけです。そこに穴をあけてやって、別にそれによって爆発が起こるとか、そういうことはないようなものなんです。

ところが、日本の火山というのは、私は火山学者でないのでわかりませんが、予知自体が非常に難しいような、突然出てくるというようなところがありまして、例えば桜島なんかも、あのエネルギーを何とか使うことを考えろなんていうことを、私も学内の先生から言われたことがあるんですが、どういうふうに使ったらいいかというときに、今のようなことで、火山を怒らせたら困るんじゃないかという、一般市民の理解を得ることのほうが、はるかに難しいんじゃないかと思います。

ですから、キラウェアみたいなああいうおとな しいところで実績を積んで、こんなふうに利用で きるんですよという事例を重ねていくことが、先 ではないかと思っています。日本ではあんまりそ ういう話に乗らないし、また実際に乗ろうとして もできないんですけど、そういうふうに理解して います。

野 ロ 破壊のメカニズムはどのくらいクリアに わかるものなんですか。例えばモデルとして, ど ういうパラメーターがどのくらい与えられれば、 確率的にどういうパスでクラックが走るというこ とがわかるとすごいと思うんですけどね。力学的 には大変難しいと思いますが。

阿 部 先ほどごらんに入れましたように、1つは地下の応力の分布がある程度わかる必要がある。それから、亀裂進展抵抗と申しましたが、亀裂が進展しやすい場所としにくい場所の、その物性値みたいなものですね。それがある程度わかる。それからもう一つは、天然のジョイントがどういうふうに走っているかということの情報がある程度つかめる。その3つの量がつかめれば、概略の亀裂、例えば水圧をかけてどのくらい水を送ってやったら、どのくらいの亀裂ができるかというのはこのエンジニアリングの目的に合う程度のものはデザインできると思います。

今、概略と申しましたのは、例えば地下の応力 分布でも見えないところを克明に、インホモジニ ティを考慮して正確に知るということは、もとも とできませんので、そこは丸めたある程度の量、 例えば井戸を掘ると、井戸の周辺ということで、 ほかのジョイントの影響がどのくらいあるかとい うことは考慮するにしても, 井戸の周辺何百メー トルということになると、非常に複雑な状況です と, うんと近くしか当てはまらないことになりま す。かなり均一ですと、かなり広い容積の中の亀 裂をデザインでカバーできます。その兼ね合いで すが、今、ガンマ計画でごらんに入れましたのは、 400メートル~500メートルぐらいのところの話 ですけれども,もうちょっと複雑で,もうちょっ と深くても、そういう方法は可能です。少なくと も原理的には可能です。

野 ロ フラクタルの理論というのはそういう意味ですか。

阿 部 フラクタルはこの次の研究として、高橋

秀明教授が全国組織でスタートしたばかりなんで, これからどのくらい可能性があるかということを 検討するわけです。つまり、地上で得られる、極 端に言いますとコア、井戸からとられるコアとか、 地表に出ている岩の亀裂の分布から、どれだけ地 下の役に立つ情報量が得られるかということで今, けんけんがくがくやっているところです。私のほ うは, うんとシンプルなほうからスタートしてい るわけです。飛行機の設計で言えば、ものすごく 天気がよくて、向かい風も何もないようなところ で、ライト兄弟レベルの話ですけれども、条件の いいところからやろうということです。高橋教授 はむしろ、もう地下はものすごく複雑なんだから、 初めから, そっちからの複雑なほうからのアプ ローチもあるんじゃないかという、そういうプロ ポーザルを最近始めたわけです。高橋教授は我々 のグループと一緒でしたから、もちろん、我々の 仕事を十分踏まえた上で, 今度別なほうからアプ ローチしようということのリーダーシップをとっ ています。きょうお話しした私の特別推進研究を 中心としたお話の中には, フラクタルの概念は全 く入っていません。

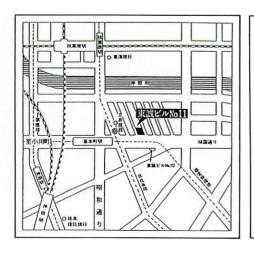
司 会 よろしゅうございましょうか。

本日は阿部先生から、我々の立場からすると、 ノントラディショナルというか、アンコンベン ショナルというか、まだ相当夢だと思っていた高 温岩体からの地熱回収についての基礎的な研究が 着々と進んでおって、それからのアプリシアブル な量のエネルギーの回収も夢ではない、だんだん 実現に近づいているというような印象を強く受け ました。大変有益なお話を承りましてどうもあり がとうございました。最後に拍手でお礼を申し上 げたいと存じます。

(拍手)

MEMO

MEMO



1994年3月1日

編集 発行 日本工学アカデミー

〒101 東京都千代田区岩本町3-8-16 東誠ビル8階 TEL. 03-5820-6771~2 FAX. 03-5820-6773