

平成12年度研究開発課題評価(中間評価)報告書

評価課題「陸域地下構造フロンティア研究」

平成12年8月

核燃料サイクル開発機構
研究開発課題評価委員会

(陸域地下構造フロンティア研究課題評価委員会)

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4-49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184

Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2000

JNC TN1440 2000-005

2000年8月

平成12年度研究開発課題評価（中間評価）報告書
評価課題「陸域地下構造フロンティア研究」

核燃料サイクル開発機構
研究開発課題評価委員会
(陸域地下構造フロンティア研究課題評価委員会)

要 旨

核燃料サイクル開発機構(以下、サイクル機構)は、「国の研究開発全般に共通する評価の実施方法の在り方についての大綱的指針」(平成9年8月7日、内閣総理大臣決定)及びサイクル機構の「研究開発外部評価規程」(平成10年10月1日制定)等に基づき、「陸域地下構造フロンティア研究」に関する中間評価を研究開発課題評価委員会(陸域地下構造フロンティア研究課題評価委員会)に諮問した。

これを受け、陸域地下構造フロンティア研究課題評価委員会は、本委員会によって定めた評価方法に従い、サイクル機構から提出された課題説明資料及び委員会における議論に基づき、本課題の評価を行った。

本報告書は、その評価結果をサイクル機構の関係資料とともに取りまとめたものである。

目 次

1. 概要	1
2. 陸域地下構造フロンティア研究課題評価委員会の構成	1
3. 審議経過	1
4. 評価方法	2
5. 評価結果（答申書）	5

参考資料（核燃料サイクル開発機構）

参考資料1 研究開発課題の中間評価について（諮問）

参考資料2 評価結果に対する措置

参考資料3 陸域地下構造フロンティア研究（課題説明資料）

参考資料4 陸域地下構造フロンティア研究（OHP資料）

1. 概要

核燃料サイクル開発機構(以下、サイクル機構)は、「国の研究開発全般に共通する評価の実施方法の在り方についての大綱的指針」(平成9年8月7日、内閣総理大臣決定)及びサイクル機構の「研究開発外部評価規程」(平成10年10月1日制定)等に基づき、「陸域地下構造フロンティア研究」に関する中間評価を研究開発課題評価委員会(陸域地下構造フロンティア研究課題評価委員会)に諮問した。

これを受け、陸域地下構造フロンティア研究課題評価委員会は、本委員会によって定めた評価方法に従い、サイクル機構から提出された課題説明資料及び委員会における議論に基づき、本課題の評価を行った。

本報告書は、その評価結果をサイクル機構の関係資料とともに取りまとめたものである。

2. 陸域地下構造フロンティア研究課題評価委員会の構成

本委員会は、平成12年3月に設置され、関連分野の専門家から構成されている。

(委員長)

入倉孝次郎 京都大学防災研究所教授、日本地震学会会長

(委 員)

上田 誠也 理化学研究所地震国際フロンティア研究グループ ディレクター、
東京大学名誉教授

木村 学 東京大学大学院理学系研究科教授

深尾 良夫 東京大学地震研究所教授

藤井 直之 名古屋大学大学院理学研究科教授

(附属地震火山観測研究センター長)

3. 審議経過

(1) 第1回目の委員会開催： 平成12年3月13日～14日

- ・評価方法の決定
- ・課題内容の説明・検討
- ・東濃鉱山(研究実施場所の一つ)の視察

(2) 第2回目の委員会開催： 平成12年3月31日

- ・評価結果の検討
- ・評価結果に対する被評価者側の意見聴取

(3)評価結果(答申書)のまとめ

上記の審議結果に基づき、委員長が評価結果をまとめ、各委員の了承を得て答申書とした。

(4)答申：平成12年5月30日

4. 評価方法

以下の評価作業手順及び評価項目に従い、評価を行った。

(1)評価作業手順

1) 第1回目の課題評価委員会における審議

(評価方法の決定、課題内容の把握・検討)

- ・評価方法を定める。
- ・被評価者から課題の説明を受け、内容を把握・検討する。
なお、欠席した委員に対しては、別途、対応させる。

2) 各委員の評価作業

- ・各委員は、第1回目の課題評価委員会開催後、課題説明資料及び委員会における説明を基に、評価項目に従って評価を行い、評価意見を書面で委員長に提出する。
- ・委員長は、これらをまとめ、評価結果案を作成する。

3) 第2回目の課題評価委員会における審議（課題の評価）

- ・上記の評価結果案を基に、評価内容の検討を行う。
- ・検討した評価内容について、被評価者と議論を行い、反映すべき点があれば、評価結果に反映させる。

4) 評価結果(答申書)のまとめ及び答申

- ・委員長は、上記の審議結果に基づき、委員会としての評価結果をまとめ、理事長に答申する。
- ・答申書には、次項に示す各評価項目について、委員会としての評価結果を記述する。
- ・上記と異なる意見がある場合には、答申書にその意見を併記する。

5) その他

- ・評価をより的確なものとし、また評価に対する被評価者の理解を深めるため、

課題評価委員会には研究実施責任者及び担当者を出席させ、議論に参加させるものとする。

(2)評価項目

評価項目は次のとおりとする。(○は評価の視点)

また、研究開発を進めていく上での提言、留意点があれば、コメントする。

1) 研究の目的・意義

- 目的・意義は明確かつ的確か。
- 重要性、緊急性が高いか。

(長期的に見て重要性が高いものか、将来に備えて今から対応しておくべき課題か、という視点を含む。)

- 社会的ニーズ、民間のニーズはあるか。
- 国の計画・方針との整合性
- 関連技術動向が的確に把握されているか。

2) 研究目標

- 目標の設定・水準は適切か。
- 目的・意義達成のために十分な目標設定となっているか。
- ブレークスルーすべき点が明確か。
- 状況に応じて適切に見直しが行われているか。
- 関連技術動向が的確に反映されているか。

3) 研究計画

- 計画内容(研究項目の設定・内容、スケジュール、項目相互間の関連性等)は具体的で妥当なものか。
- 研究内容は独創性、創造性に富んだものになっているか。
- 計画見直しの機動性(状況に応じて計画の見直しを適切に行っているか。)
- 使用する施設・設備は適当か。
- 関連技術動向が的確に反映されているか。

4) 研究実施体制

- 組織、人員・人材の配置、研究グループ間の連携、委員会の活用、運営等は妥当なものか。

○ 他機関との協力・連携（国際協力を含む）は適切か。

5) 資金計画

○ 研究開発計画、期待される成果等から見て、予算規模は妥当なものか。

6) 研究成果

①得られた成果の内容

○達成された具体的な成果について、水準、質、意義、当該分野への寄与の程度等の評価

○計画と比較した達成度（要因分析を含む）

②得られた成果の普及、公開

○ 波及効果は期待できるか。

○ 成果発表、特許出願・取得等の実績

○ 広報は積極的、効果的に行われているか。

7) 今後の展開

① 第1フェーズの研究のまとめ方

○ 研究の取りまとめ方針は妥当か。

○ 取りまとめに向けて課題設定が適切になされているか。

② 今後の研究課題

○ 第1フェーズの成果を踏まえ、抽出された今後の研究課題は妥当なものか。

③ 今後の展開に関するコメント

8) その他（上記項目に当てはめ難い評価意見）

9) 総合評価

○ 上記各項目の評価を踏まえた総合的な判断

(3)評価基準

各評価項目について評価を行い、研究の進捗状況、進め方等の妥当性、計画見直しの必要性等を総合的に判断する。

5. 評価結果（答申書）

平成12年5月30日

核燃料サイクル開発機構

理事長 都甲 泰正 殿

研究開発課題評価委員会

(陸域地下構造フロンティア研究課題評価委員会)

委員長 入倉 孝次郎



研究開発課題の評価結果について（答申）

当委員会に諮問[11 サイクル機構（経企）073]のあった下記の研究開発課題の中間評価について、その評価結果を別紙のとおり答申します。

記

研究開発課題「陸域地下構造フロンティア研究」

以上

陸域地下構造フロンティア研究課題評価委員会報告書 「陸域地下構造フロンティア研究」の評価結果（中間評価）

評価結果の概要

陸域地下構造フロンティア研究の位置付け

阪神・淡路大震災を契機に「地震に強い国造り」への国民の期待を担って議員立法として作られた地震防災対策特別措置法（平成7年6月施行）に基づき、科学技術庁長官を本部長とする地震調査推進本部が総理府に設置され、地震調査研究を強力に推進することになった。科学技術庁は、地震調査研究のイニシアティブとして、傘下の関係研究機関に地震総合フロンティア研究（5年間）を発足させた。その一環として核燃料サイクル開発機構（サイクル機構）は陸域地下構造フロンティア研究を推進している。

本フロンティア研究は地下深部での地殻の動きに着目し、地震発生機構の解明を目指すとともに、新たな地震観測手法の開発を目的としており、「地下深部の地質環境」の解明を進めているサイクル機構の研究目的に合致するもので、同機構が地震総合フロンティア研究の一環として分担するのは適当である。

個別研究テーマ

陸域地下構造フロンティア研究は、（1）地震発生に関する研究、（2）地震発生と地下水挙動に関する研究、（3）活断層帯での地殻活動研究、の3つの研究テーマから成る。これらの3テーマは、陸域地下構造を共通ターゲットとしており、サイクル機構東濃地科学センターを中心に岐阜県東濃鉱山および神岡鉱山を活用して実施するテーマとして適当である。

人員・予算などからみて、各表題テーマのすべてをカバーすることは期待できないが、その重要な要素を選択し挑戦せんとする点で、いずれも明確かつ的確な目的・意義を持つといえる。

これらのテーマは、全体としてみると、「フロンティア計画」の名にふさわしい野心的あるいは他ではできないユニークな研究が行われており高く評価できる。しかし、これまで3テーマの間の連携が十分にはなされていないなど総合化の取り組みが不足しており、成果はすべて個別的で「陸域地下構造フロンティア研究」としての総合的なものとはなっていない。テーマ間の連携に関して今後の展望としても明確ではなく、今後の改善が強く望まれる。

評価の要旨

地震発生に関する研究

アクロスのための存否セプストラム解析理論、FM 送信理論等の理論的成果、送信装置の開発などで多大の成果があった。わずか数年で基礎的開発から実器製作そして実用運転にまで到ったことは賞賛に値する。これまでの成果を専門誌に論文として発表することが強く望まれる。

本研究は第2フェーズにおいてさらに発展的展開が期待できる。

地震発生と地下水挙動に関する研究

興味ある観測事実がいくつか見つかっている。これらの成果を踏まえて次のステップへ進む道筋は必ずしも明確になっていない。研究成果は数多く発表されているが、大部分は観測機器の開発、観測結果の報告であり、査読付き国際誌へ投稿し研究成果に対するレビューを受ける必要がある。本課題は統一的指針に欠けグループ内の連携も不十分なように見受けられる。

テーマ自体の重要性は高いので、活性あるグループ形成を図り、研究戦略を明確にした上で、研究継続が望ましい。

活断層帯での地殻活動研究

活断層を地下で貫くという試みは独創的であり、活断層の地殻活動の研究に極めて有効である。その結果として理想的な地震観測が可能となり、断層トラップ波の検出に成功したのは特筆に値する。その他にも各種観測システムが設置され、いわば結果待ちの状況に到達した。活断層の破碎帯の構造が地下水科学から 1 km、トラップ波から数 10 m、構造地質学的断層岩研究から 1 m 以下の顕微鏡的サイズなど、異なるスケールで同時観測がなされており、成果が期待される。弾性波速度変化、比抵抗変化の測定には調査坑道のメリットを生かした更なる工夫が求められる。

この研究は、観測坑道の機能を最大限に生かす方策を図った上で、継続して第2フェーズへと発展させていくべき課題である。

総合評価

上記 3 テーマは研究開始から 4 年間に精力的に各種計器開発・観測を進め一定の成果をあげてきた点は高く評価される。これらのテーマは長期継続した観測、実験を必要とし、第1フェーズの成果を踏まえ第2フェーズに続行した研究が必要と考える。

しかし、現状ではテーマによって進展状況や成果にばらつきが見られる。これは 3

テーマの研究がそれぞれ独立に進行し、グループ間の協力、連携が不足していることに一因がある。本プロジェクト研究の継続に際しては、関連する外部研究者を交えて「今後のフロンティア計画のあり方」について議論を行い、グループの再編・統合を含む発展的改組の検討が望ましい。

評価結果

1. 地震発生に関する研究

(1) 研究の目的・意義

本研究は極めて野心的・独創的なものであり、フロンティア計画の精神である「地震研究の中でも未踏であり先端的な部分の研究を、組織の枠組みを超えて総合的に推進」を最も忠実に反映した部分と言える。

地震発生の解明には地下を“見る”最高の手段を開発する必要があるという見地から ACROSS 技術の開発に焦点を絞っている。多様なアプローチの中からこれを選択したのは見識であり、資金・人員規模、東濃の立地条件などからみても適当と考えられる。

ただ敢えて注文をつけるならば、本研究は極めて多様な個別課題を扱っており、目的・意義に即してそれぞれの課題に優先順位をつける必要がある。アクロスを全ての物探手法に置き換わるものとした開発研究は緊急性ある課題とはいえない。

アクロスが独自の威力を発揮するのは、「地下構造の時間変化の検出」であると考える。それを目的としたアクロス開発は、重要性、緊急性は高い研究と考えられるが、これはいまだ前人未踏の観測法であり、基礎的研究を継続して進めしていくため、長期的展望に基づくサポートを必要とする。そのためにも、研究の進め方としては本研究の目的・意義に応じた優先度を考慮していく必要がある。

(2) 研究目標

研究目標は出発当初「現在考えられる最高性能の実現」としており、必ずしも具体的ではなかった。しかし、わずか4、5年でここまで達成したのは、実現可能な範囲を常に念頭において目標を設定し、それに向けて緻密な計画を立ててそれを実施してきた結果であると言える。その意味で目標は十分妥当なものであったと評価できる。多くの研究者が不可能としてきた高い水準の技術開発を、基礎理論、機器の nuts and bolts まで含めて 短時日の間に進めてきた点は高く評価される。

今後の問題として、地球内部のどのような構造ないしその時間変化が地震発生に関わっているのか、その検出にはどれだけの性能が必要・十分であるか、それにはいかなる科学的意義が考えられるかという検討がなされる必要がある。科学研究目標としては、「地震発生に関して」より具体的で説得性のあるイメージの明示が望まれる。

(3) 研究計画

概念設計からはじめて、音波アクロス・電磁アクロス開発、実地試験観測等を理論開発とともに順次推進してきた。その過程では新たな困難・発見に即応して適切な見直しが行われた。これには高度の独創性・創造性が發揮されたと考えられる。東濃地科学センターの立地条件は極めて良好だが、観測点の設置などでの地域社会の理解を得る一層の努力がサイクル機構当局に望まれる。

(4) 研究成果

アクロスのための存否セプストラム解析理論、FM 送信理論等の理論的成果、送信装置の開発などで多大の成果があった。わずか数年で基礎的開発から実器製作そして実用運転にまで到ったことは賞賛に値する。しかし、これだけの材料を揃えながら論文が1つもない点は問題がある。広報的作業はかなり行われているが、科学論文の発表・出版は自然科学研究の最低必要条件であり、格段の努力が払われるべきであろう。

(5) 今後の展開

今後の課題として提示された音波アクロスの向上とその連続観測、電磁アクロスの立ち上げなどは地道なものとして評価される。東海地域などの総合観測システムの構築には本計画の規模をはるかに越える実施体制が必要となるに違いないが、そのための周囲のサポートを得るにも成果の明示が不可欠である。

第1フェーズのまとめとなる残りの1年で、1) 当面のターゲットをもっと絞り込むこと、2) その延長として当面の装置で何が検出できるかの定量的評価を行うこと、3) 特定のターゲットに向けた観測を実際に行ってアクロスの有用性をデモンストレーションすること、そして4) これまでの成果を専門誌に論文として発表すること、以上4点が強く望まれる。

上記の提言が生かされるならば、本研究は第2フェーズにおいてさらに発展的展開が期待される。本テーマは基礎的な研究と現場での観測研究をリンクして推進させるべき性格のものであり、実用化そのものに縛られない自由な研究が必要である。

2. 地震発生と地下水挙動に関する研究

(1) 研究の目的・意義

本テーマは「地殻歪一地下水一地下ガスの連成現象と地震前兆現象の把握」を目的として掲げられている。この課題は地震学における最も未解明な分野への挑戦として高く評価できる。この課題は、地震予知の観点からは重要性・緊急性ともに高いが、

地下水変動が地震前兆現象の一つであろうという認識以上には、研究は十分にはなされてこなかった。

この目的を達成するためには歪・傾斜を基本データとした総合観測が必要であるという意義は理解できるが、最終的に何が得られれば目的を達成したと言えるのかが必ずしも明確になっていない。また、地下流体の挙動は、地震前兆にとどまらず、地震発生機構そのものにも重大な関わりを持つであろうことが近年注目されてきているが、本テーマの目的・意義の中でこの点についての研究戦略が不明確である。

(2) 研究目標

1994年～5年、東濃鉱山SN-3号孔で見られた遠地大地震での水位変化に刺激されて、その現象の解明を求めて東濃での観測を開始したのは適切な目標設定であったといえる。さらに、水位変動のみならず、地殻歪み、ラドン、地下ガス観測など総合観測手法の開発・実施を図ったのも適切であった。インテリジェント回収型歪計とそれを利用した応力解放法による地殻応力測定のような新しい試みがなされている。このように多項目の観測システムを立ち上げたこと自体は高く評価される。

しかし、これらの目標を地震発生場の状態検出にどう結びつけるか、という視点の検討は必ずしも十分にはなされてこなかったように見える。

(3) 研究計画

多種の観測がなされているが、研究計画全体としての戦略が不明確で、それぞれの研究の焦点が浮かび上がっていないように見える。東濃鉱山はこれまで多くの水理学的知見が蓄積されている。これらの情報と環境・設備が本研究計画に十分には生かされていない。

当初の予想に反して、近傍の井戸での水位変化はSN-3号孔でのそれとは同期せず、困難に直面した。ここにおいてその原因を徹底的に究明する努力、現象の基礎からの見直しなど研究計画の軌道修正が必ずしも十分なされてこなかったように見える。また、水位計測と孔中歪測定の比較など、各種観測の相互比較についても、全体的戦略の中での位置付けが必ずしも明確となっていない。

グループ内および他グループとの連携が図られるべきと思われる。

(4) 研究成果

興味ある観測事実がいくつか見つかっている。これらの成果を踏まえて次のステップへ進む道筋は明確には見えない。研究成果は数多く発表されているが、大部分は観

測機器の開発、観測結果の報告であり、これらの成果を査読付き国際誌へ投稿しレビューを受ける必要がある。グループ内での日常的情報交換、討議が十分にはなされていないようにみえることも問題である。若手研究者に対する指導も不足している。

(5) 今後の展開

提示された項目はやや展望に欠ける。例えば、地下ガス測定は殆ど大気組成を測っていることが判明したとの説明があったが、それでは今後、この地下ガス測定をどうするのかについて方針はいまだ明確でないように見える。総じて本課題は統一的指針に欠けグループ内の連携も不十分なように見受けられる。最も重要なのは、リーダーシップの確立と一体感のあるグループ作りであろう。

テーマ自体の重要性は高いので、活性あるグループ形成を図り、研究戦略を明確にした上で、研究継続が望ましい。

3. 活断層帯での地殻活動研究

(1) 研究の目的・意義

本課題は、活断層を横断する調査坑道を掘削し、それを利用して種々の観測を行うことにより活断層の形成メカニズムを明らかにすることを目的とする。活断層を横断する調査坑道という点はユニークであり、それにより他では真似のできない質の観測が可能になるなど、本研究の意義は極めて高い。

本研究の特徴は活断層を種々のスケールで観察し、それを同じ時間上に並べ比較検討することにある。研究対象として跡津川断層系を選択し、集中的調査・観測を行ない活断層の実態に迫るという研究戦略は明確である。しかし、対象は長年月をかけて進行する現象であり、通常の意味での緊急性の枠には必ずしも当てはまらないだろう。国が相当の投資をして全国的に進めている活断層調査に基本的情報を提供するという点での科学的価値は大きい。

(2) 研究目標

極めて多項目の観測を同時追跡できるようにすることで活断層の活動様式を明らかにしようというのが目標である。異なるスケールの構造を同時に観測し、そこから断層および近傍の地殻岩石の挙動を読み取る試みは高く評価できるものである。

(3) 研究計画

既存の神岡鉱山の地下トンネルを利用して、活断層を地下で貫くという試みは独創的であり、活断層の地殻活動の研究に極めて有効である。活断層の破碎帯の構造を、地下水科学から 1 km、トラップ波から数 10 m、構造地質学的断層岩研究から 1 m 以下の顕微鏡的サイズなどの、異なるスケールの観測で解明する試みは評価できる。

弾性波速度変化、比抵抗変化の測定も行われているが、これらは「断層を横断」した坑道を生かした測定とは言えずもう一工夫必要かもしれない。

(4) 研究成果

断層を貫く地下トンネルにより断層トラップ波に対して理想に近い地震観測が可能となり、信頼性の高いトラップの検出に成功したのは特筆に値する。国際的にもこのようにきれいなトラップ波の観測は初めてあり、数値シミュレーションとの比較により活断層地下形状の解明に重要なデータを提供すると考えられる。その他、地下水化学組成変化や酸素同位体変化などでも坑道利用の成果が既に得られている。

ようやく成果が得られ始めた段階であるが、国際誌への成果の投稿など今後に十分な期待がもてる。

(5) 今後の展開

ようやく多項目観測の体制が整った現在、少しでも早く同時観測を始めて、断層の特性の解明とそれに由来する状態揺らぎの検出等に関する成果の報告が望まれる。弾性波速度変化、比抵抗変化の測定には調査坑道のメリットを生かした更なる工夫が求められる。

グループ内での異なる課題間の協力・連携は必ずしも十分には行なわれていないよう見える。研究発足時の状況および 5 年計画という時間制限におされてそれが困難であったことは理解されるが、この点は抜本的に改善する必要がある。

第 1 フェーズのまとめは、全体像を総合的に統一した形にする必要がある。それが、次のステップへの戦略策定に有効・必須になると考えられる。諸観測結果の時系列データを同一時間軸でならべて考察することは重要である。茂住断層のみならず、跡津川断層にも大規模掘削の実施が望まれる。

日本列島に多数存在する他の活断層の研究に対し、ここでの研究成果を生かして、より簡便で経済的に本質を抽出できる研究方法、観測方法の総合的提案を期待する。

この研究は、観測坑道の機能を最大限に生かす方策を図った上で、継続して第 2 フェーズへと発展させていくべき課題である。

4. 研究実施体制

地震発生に関する研究

グループ内の体制は良好と見られる。本研究のリーダーシップは卓抜である。反面、若い研究員達がそれに頼りすぎ、やや自主性を發揮しない点はないかと危惧される。実験観測段階を迎える現時点では、例えば理化学研究所国際地震フロンティアなど他機関との協力体制が進捗し始めている。

本研究プロジェクトを遂行する上で、東濃地科学センターの研究支援は研究成果に大きな貢献をしていることが理解される。

地震発生と地下水挙動に関する研究

本研究は3つのグループから成っているが、グループ間に連携が殆ど見られず、1グループの見出した注目すべき現象を他の2グループも加わって多面的に検討するという気迫が感じられない。基本的には本テーマを総合的に推進していく上でリーダーシップについての問題点が指摘される。

活断層帯での地殻活動研究

自然現象を実験室的スケールで観測できるという理想的フィールドであり、異なったスケールの多種多様の観測が行われているにも関わらず、全体に統一性が感じられるのは優れたリーダーシップが存在するからと考えられる。しかし、研究者相互の討論・連携に改善の余地がある。また、研究対象には他グループの対象と密接に関連するものがあり、相互の連携が必要である。

5. 資金計画

特段に意見なし。

6. その他

積極的に国際会議を組織したり、国内外の会議で特別セッションを設けるなどの活動は高く評価される。

7. 総合評価

本研究は3テーマからなり、各テーマの研究グループはそれぞれに成果をあげていると判断される。各グループとも、研究開始から4年という短期間に精力的に各種計器開発・観測を進めてきた点は高く評価される。本フロンティア研究の掲げているテーマは長期継続した観測、実験を必要とする。第1フェーズの成果を踏まえ第2フェーズに続行してこそ研究が生かされると考える。

しかし、現状ではテーマによって進展状況や成果にバラツキが見られる。これは3テーマの研究がそれぞれ全く独立に進行し、グループ間の協力、連携を取る努力がなされなかったことに一因があると考えられる。研究発足時の状況および5年計画という時間制限におされてそれが困難であったことは理解されるが、この点は抜本的に改善する必要がある。

グループ2（地震発生と地下水挙動に関する研究）に関しては、グループ内での研究協力体制に不十分さが感じられる点があり、再編成も検討すべきであろう。現場の常勤研究員と、指導的立場の外部非常勤研究員との間の一体感が感ぜられなかつた。困難な問題だが、重要な点であろう。

他研究機関で行なわれている諸観測との相関を常時検討するなどの他機関との協力・連携にも改善の余地がある。国際協力も十分とはいえない。

本研究の成果発表の多くは学会発表に留まっており、国際誌などへの論文発表は十分とはいえない。論文発表とともに、マスコミなどを通じた一般(tax payers)への説明責任(accountability)にも配慮が必要である。

本プロジェクト研究の継続に際しては、関連する外部の研究者を交えて「今後のフロンティア計画のあり方」について議論を行い、グループの再編・統合を含む発展的な改組の検討が望ましい。

参考資料

核燃料サイクル開発機構

参考資料目次

参考資料 1 研究開発課題の事前評価について（諮問）	(1)
参考資料 2 評価結果に対する措置	(3)
参考資料 3 陸域地下構造フロンティア研究（課題説明資料）	(10)
[研究開発課題説明資料本文]	(11)
[用語解説]	(117)
参考資料 4 陸域地下構造フロンティア研究（OHP資料）	(124)

参考資料1

研究開発課題の中間評価について（諮問）

11 サイクル機構(経企)073

平成12年3月13日

研究開発課題評価委員会

(陸域地下構造フロンティア研究課題評価委員会)

委員長 入倉 孝次郎 殿

核燃料サイクル開発機構

理事長 都甲 泰正



研究開発課題の中間評価について（諮問）

研究開発外部評価規程第7条第1項に基づき、次の事項について諮問致します。

・ 諒問事項

「陸域地下構造フロンティア研究」に関する中間評価

以上

参考資料2

評価結果に対する措置

研究開発課題評価委員会
「陸域地下構造フロンティア研究」の評価結果に対する措置

平成 12 年 7 月 27 日
核燃料サイクル開発機構

研究開発課題評価委員会（陸域地下構造フロンティア研究課題評価委員会）において、標記研究の第 1 フェーズの成果について高い評価を頂きました。また、本研究の成果の一部をサイクル機構が進める地層科学研究に反映することができました。平成 13 年度からの第 2 フェーズを実施するにあたり、第 1 フェーズの評価に際して頂いたご意見、ご指摘を反映した計画を策定し、改めて研究開発課題評価委員会に付議、評価を頂いた上で実施することとします。

頂いた主なご指摘に対しては以下の措置をとるとともに、その他のご指摘についても計画に反映し研究を進めていきます。

1. 研究テーマ間の連携と総合化

3 テーマ間の連携が十分でないなど、総合化の取り組みが不足しております、テーマ間の連携に関して今後の展望が明確ではない点について改善が望まれる、

関連する外部研究者を交えて“今後のフロンティア計画のあり方”について議論を行い、グループの再編・統合を含む発展的改組の検討が望ましい、と言うご指摘に対し、

- ・ 第 1 フェーズにおいて各テーマについて研究の基盤が整備でき、様々な側面からのデータが取得、蓄積される段階となりました。そこで、今後、テーマの再構成や各テーマの研究内容の合理化、テーマ間での観測データの共有化、各テーマ間の観測の相互乗り入れ、テーマ間にまたがる種々のデータの総合解析、評価、例えば神岡鉱山の活断層調査坑道やその周辺への各テーマの観測の集

中等、第2フェーズへ向けて連携・総合化の視点から検討し、第2フェーズの計画に具体化することとします。

- 上記の検討結果に従い研究体制についても見直し、検討することとします。

2. 地震発生に関する研究

2-1 研究ターゲットの絞込み

アクロス開発は極めて多様な個別課題を扱っており、目的・意義に即してそれぞれの課題に優先順位をつける必要がある、

2-2 具体的イメージの明示

特定のターゲットに向けた観測を実際に行って、アクロスの有用性をデモンストレーションすること、と言うご指摘に対し、

- これまでの4年間で、送信系、受信系、解析系について、機器/技術開発/適用試験、理論構築など多様な要素技術を研究し、アクロスを一つの計測技術システムとして開拓してきました。その結果アクロス技術の基礎を確立でき、これが現実的な汎用の実用技術となることが示せたと考えています。次ぎの段階では、御指摘のように、具体的な観測事例に基づく地下構造の時間変化を分かりやすい形で示すデモンストレーションを目標として設定し、これに向けて研究を行います。
- まず、第1フェーズ最終年度には、東濃鉱山周辺地域において観測・解析を行い、アクロスでしかできない地下構造解析と状態変化検出の具体例を提示できるように努力します。ただし、既存の物理探査法と同じ様態で比較できる構造解析などには、相応の観測機器などがまだありませんので、原理的にできません。それは第2フェーズの課題になります。
- 「模索的開発要素」を含むテストフィールド実験、および、その有用性の「単純明解なデモンストレーション」については、別のフィールドも設定するべく、今後検討をいたします。また、アクロスの次ぎの飛躍的発展への基礎研究の場を確保するのも、第1フェーズの積み残し課題であると認識し、第2フェーズではさらに

努力を重ねるつもりです。

- ・また、第2フェーズでは、地下構造解明評価と精密監視に特化したアクロス技術の開発と、その有用性のデモンストレーションを行います。

3. 地震発生と地下水挙動に関する研究

3-1 研究戦略の明確化

テーマ自体の重要性は高いが、地震発生機構に重大な係わりを持つ地下流体の挙動についての研究戦略を明確にする必要がある、と言うご指摘に対し、

- ・地震と地下水挙動に関する研究では、遠隔地の地震や地殻変動に対し敏感に変動を示す東濃鉱山周辺における流体挙動の解明を研究対象とし、観測体制を整備してきています。一方、地震発生機構に地震発生領域の流体が重大な関わりを持つであろうことは多くの研究者の指摘するところですが、現在の観測の場では震源域での地下流体の挙動に関する情報の取得を目指すことは困難です。
- ・第2フェーズにおいては、整備された観測体制によりデータの蓄積を図るとともに、これと、ウラン資源探査や地層科学的研究により蓄積されている地質構造や地下水流動に関する情報と総合して、この地域の地震時地下水/地下ガス/地殻変動のメカニズムの解明を目指します。
- ・また、第2フェーズを立ち上げるにあたっては、上記の研究を地震発生機構と地下流体挙動の関係の解明につなげていくため、研究対象を東濃鉱山周辺地域に加えて、より効果的な地域にも展開していくこととします。

3-2 グループ内の連携とリーダーシップの確立

グループ内での研究協力体制を整えて若手研究者への指導も充実させるなど、リーダーシップの確立と一体感のあるグループ作りが重要である、と言うご指摘に対し、

- ・チームリーダーや指導的立場の研究者と若手研究者、特に常勤の客員研究員とで定期的なセミナーの開催など交流・指導の機会を増やし、人材育成を銳意進めます。
- ・第2フェーズでは、各研究者からチームリーダーへの定期的研究報告書の提出、これに対するチームリーダーの個別指導や上記セミナーでの議論等の仕組みを設けることによりチームの一体感の醸成に努めます。
- ・また、研究をより効果的に進めるために、広い場から研究者の参入を募るなど、チームの再編成を考えています。

4. 活断層帯での地殻活動研究

4-1 坑内精密測定の改良

弾性波速度変化、比抵抗変化の測定を始めとして、「断層を横断する坑道」のメリットを生かした更なる工夫が必要、と言うご指摘に対し、

- ・ご指摘の観測項目については、調査坑道で観測する意義を明確にし、その継続の要否を、観測位置、観測項目等について再検討することとします。なお、活断層を地下深部で貫く調査坑道は極めて貴重な調査研究の場であり、ご指摘の観測項目を含めて活断層調査坑道をどのような実験室としていくかは、第2フェーズの重要な検討課題と考えています。観測坑道の機能を最大限に活かす構想を進めていきたいと思います。

4-2 グループ内での協力・連携とデータの統合化

グループ内での異なる課題間の協力・連携を進め、得られたデータの全体像を総合的に統一した形にすることが、次のステップへの戦略策定に有効・必須である、と言うご指摘に対し、

- ・非常に幅広い研究領域にわたる調査研究を実施してきており、情報共有するために開設したホームページにおいて同一時間軸上で異なる種々の測定値をリアルタイムないし準リアルタイムに表示するシステムを構築し、この試みを通じて研究者間の協力・連

携を深めて参りたいと思います。

- ・第2フェーズでは、陸域地下構造フロンティア研究全体、さらには他機関の研究とも情報交換を行い、広範な研究者との連携を目指した研究体制の推進を図りたいと思います。

5. 成果論文の発表

各チームについて、科学論文の発表・出版は自然科学研究の最低必要条件であり格段の努力を払うこと、論文発表とともに、マスコミなどを通じた一般（tax payers）への説明責任にも配慮が必要である、と言うご指摘に対し、

- ・ご指摘の通り、成果を科学論文とし、広く客観的な評価を求め、また、その成果を普及していくことはサイクル機構の理念であり、地震総合フロンティア研究の目指すところであると認識しています。
- ・第1フェーズでは、観測体制の整備等に勢力を傾注し、その成果は、適宜、学会等での評価を受けてきましたが、ご指摘のとおり、それが不充分でした。現在、データが取得、蓄積できる段階に至ったので、今後、チームリーダーの強力なリーダーシップのもと、これまでの成果を国内の学会誌のみならず査読付きの国際学会誌へ投稿するなど科学論文として公表し、批判を受けるとともに成果を普及する努力をいたします。併せて、陸域地下構造フロンティア研究全体のホームページを開設し研究成果を掲載します。
- ・本研究については、活断層調査坑道の完成、国際シンポジウムの開催などイベントがあるごとにマスメディアを通じた広報を行ってきましたが、今後とも研究成果の論文発表は勿論のこと、一般の方々にも研究内容や成果を理解していただける分かり易い内容でホームページに掲載すること、第1フェーズでも行ったように、地元の小中学生を対象とした地球科学教室の開設などにより、地球科学のおもしろさ等の情報を発信していきます。

6. 観測点の確保

東濃地科学センターの立地条件は極めて良好だが、観測点の設置などで地域社会の理解を得る一層の努力が必要、と言うご指摘に対し、

- ・今後とも地元自治体などとの良好な関係の維持に努めるとともに地域に開かれた研究を進めていきます。そのためにも、フロンティア研究の魅力や地震防災の観点から、研究の意義や効用について一般市民を対象とした地球科学セミナーを開催し、地域に情報を発信してきています。

参考資料3

**陸域地下構造フロンティア研究
(課題説明資料)**

【研究開発課題説明資料】

本資料は、課題評価委員会の評価
意見等により改訂したものである。

陸域地下構造フロンティア研究

平成 12 年 3 月

(平成 12 年 8 月改訂)

核燃料サイクル開発機構

目 次

1. 陸域地下構造フロンティア研究の概要	1
1.1 地震総合フロンティア研究	1
1.2 陸域地下構造フロンティア研究	1
1.2.1 地震発生に関する研究	1
1.2.2 地震発生と地下水挙動に関する深地層総合研究	2
1.2.3 活断層帯での地殻活動研究	3
2. 地震発生に関する研究（アクロス研究）	5
2.1 研究の目的・意義	5
2.2 研究目標	5
2.3 研究計画	5
2.4 研究成果	6
2.4.1 東濃音波アクロスシステムの開発成果とその総合化	9
2.4.2 キホメタル領域の構造解明監視観測に向けた可搬型弾性波送信技術の開発	20
2.4.3 東濃における電磁アクロス送受信システムと試験観測の結果	29
2.4.4 電磁アクロス信号論・レーダ領域数値実験・MT領域方法論 -信号処理の視点から見た探査方法の最適化	33
2.5 今後の展開	36
(地震発生に関する研究 研究業績一覧)	42
3. 地震発生と地下水挙動に関する研究	48
3.1 研究の目的・意義	48
3.2 研究目標	48
3.3 研究計画	48
3.3.1 深層観測井の掘削	48
3.3.2 地下水位・水圧・水温連続観測	48
3.3.3 地殻歪の変化に関する研究	49
3.3.4 地下ガス濃度連続測定	49
3.3.5 多成分観測データの地震動に対するレスポンスの比較	49
3.3.6 多成分観測データの収録、相互比較	49
3.3.7 観測井・観測機器の設置	49
3.4 研究成果	51
3.4.1 東濃鉱山周辺における地下水位・水圧観測結果	51
3.4.2 地殻活動総合観測装置による地殻変動観測とその応用としての初期応力測定	53

3.4.3 東濃鉱山周辺におけるラドン観測結果	56
3.4.4 東濃鉱山およびその周辺における地下ガス観測	59
3.5 今後の展開	62
3.5.1 現時点でのまとめ	62
3.5.2 平成12年度の予定	64
3.5.3 今後の課題	66
(地震発生と地下水挙動に関する研究 研究業績一覧)	67
4. 活断層帯での地殻活動研究	71
4.1 研究の目的・意義	71
4.1.1 本研究の特徴－調査坑と広域調査	71
4.1.2 跡津川断層－茂住断層の選定理由	72
4.2 研究目標	72
4.3 研究計画	73
4.3.1 調査坑内の計画	73
4.3.2 調査坑外の広域にわたる計画	73
4.3.3 今後の課題	74
4.4 研究成果	76
4.4.1 広域地震観測	76
4.4.2 GPS地殻活動観測	79
4.4.3 活断層研究チーム地質グループからの報告	82
4.4.4 活断層調査坑道における断層岩調査	85
4.4.5 ガイドウェーブ観測による茂住－祐延断層、跡津川断層深部構造の推定	88
4.4.6 坑内精密計測および応力測定	90
4.4.7 茂住断層調査坑道地下水の科学的調査	95
(活断層帯での地殻活動研究 研究業績一覧)	99
5. 研究実施体制	103
6. 資金計画	103
用語の説明	104

1. 陸域地下構造フロンティア研究の概要

1.1 地震総合フロンティア研究

阪神・淡路大震災を契機に、地震防災対策特別措置法が平成7年6月に成立した(図1-1)。同措置法に基づき科学技術庁長官を本部長とする地震調査研究推進本部が総理府に設置され、国内の地震観測網を強化するとともに今後の地震研究を強力に推進することとなった(図1-2、1-3)。これを受け、科学技術庁においては、科技庁傘下の関係研究機関(核燃料サイクル開発機構、理化学研究所、海洋科学技術センター、日本原子力研究所、宇宙開発事業団)が地震総合フロンティア研究を進めている(図1-4)。

1.2 陸域地下構造フロンティア研究

サイクル機構では、地下深部での地殻の動きに着目し、地震発生機構の解明を目指すとともに、新たな地震観測手法の開発を行う陸域地下構造フロンティア研究を実施している(図1-5)。本研究は図1-6に示すように、(1)地震発生に関する研究、(2)地震発生と地下水挙動に関する深地層総合研究、(3)活断層帯での地殻活動研究の3つの研究テーマからなり、岐阜県東濃鉱山および神岡鉱山を活用して実施している(図1-6)。

1.2.1 地震発生に関する研究(図1-8～1-12)

[研究の目的]

プレート境界^{*1)}あるいは内陸活断層で起こる大地震の発生機構を解明するため、精密制御定常信号システム(アクロス)を開発し、地下深部の断层面近傍で起こる微小な地殻内変動を遠隔監視観測する。

[調査研究の内容]

○アクロスシステムの開発

地震波速度の分布構造(音波アクロス)および電気伝導度^{*2)}の分布構造(電磁波^{*3)}アクロス)をリモートセンシング^{*4)}で解明し、さらに地殻の微小変動を常時モニターするための地下探査法を開発する。アクロスシステムの原理は、複数の周波数の正弦波^{*5)}を精密に制御した人工地震波を定的に発信し、信号を時間区間蓄積記録装置(TSS)によって受信するものである。

音波アクロス震源装置は平成8年7月に東濃鉱山に設置され、震源のGPS^{*6)}制御定常運転が確立し、平成11年6月からは連続運転を開始した。受信実験は東濃鉱山とその周辺で主に行っており、震源から100km離れた岐阜県上宝町でも受信に成功している。

電磁アクロス送信電極は、平成11年11月に東濃鉱山に設置され、平成12年1月

から運転を開始した。受信実験は主に東濃鉱山周辺で行っており、送信源から 3km 離れた地点で受信実験を実施している。

○地殻変動観測

地震発生が予測される地域において、地下深部の地殻歪み、応力や地下水の状態などをアクロスシステムによって常時モニターし、地震発生に至る地殻変動の時間変化の解析を行う。この段階になれば、同システムは地殻変動調査のみならず、地下資源調査や火山噴火予知研究などの調査手法としても活用可能となる。

[今後の展開]

連続観測試験データの蓄積と解析を進め、東濃アクロスシステムのレベル向上や、神岡電磁アクロス基準信号送信所の立ち上げなどを行う。

1.2.2 地震発生と地下水挙動に関する深地層総合研究（図 1-13～1-18）

[研究の目的]

地震発生に関連して、震源域では地殻変動や地下流体変動が発生して、その影響が地表付近に及び、岩盤中の応力や歪・地下水圧・地下ガスの濃度に変化をもたらす可能性が指摘されている。地殻変動や地下流体変動の関連・メカニズムを解明するための基礎データを得るため、高精度の観測機器の開発とともに、歪・傾斜－地下水－地下ガスなどの精密な連続観測体制を確立する。得られたデータから、地震発生に伴う地震前・地震時・地震後の変動を把握して、地震発生との因果関係を解明する。

[調査研究の内容]

○地震発生と歪の関係に関する研究

3成分歪み計、傾斜計、加速度計（3成分）を組み込んだボアホール^{*7)} 総合観測装置を用いて、東濃鉱山の坑道内や試錐孔内において連続観測を行い、地震発生と地殻歪み等との関係を解析している。ボアホール総合観測装置は、平成9年度までに東濃鉱山と三浦半島の油壺観測所（東大地震研究所）に埋設された。伊豆半島の伊東観測点に埋設された本装置は、伊豆の群発地震活動に関連した前兆的な地殻変動を検出し、本装置の性能の一端が示された。また、地盤の初期応力を計測する新たな機器として、深度 1000m まで適用可能なバッテリー駆動式の回収型歪計の開発を進めた。

○地震と地下水挙動および地下ガス濃度の関係に関する研究

東濃鉱山周辺の試錐孔には地下水位計^{*8)}（3箇所）、間隙水圧計^{*9)}（2箇所）、地下水温計、気圧計、雨量計、マスフィルタ型四重極質量分析装置^{*10)}を設置して、連続観測を行い、地震発生と各観測項目との関係を解析している。東濃鉱山周辺の観

測井では、地震前兆の可能性がある地下水位などの変動を多くの地震について検知した。このような強い地震応答性を持つ観測井は、地震前兆現象の研究に重要である。

東濃鉱山の調査坑道にラドン^{*11)}計（8箇所）を平成8年度から順次設置し、連続観測を行っている。坑道排気口にもラドン計およびマスフィルタ型四重極質量分析装置を配置することにより、坑道全体を一つのセンサーとして地震前後でわずかに変化する地下ガス濃度の観測を可能にしている。

また、平成10年、11年には、種々の観測データを一元的に管理するための観測ネットワークの整備を行った。

[今後の展開]

地下水・地殻変動・ガス成分の総合的な比較検討を行う。また、観測システムを拡充・高精度化し、地震前兆変動のメカニズム解明を目指す。

1.2.3 活断層帯での地殻活動研究（図1-19～1-24）

[研究の目的]

活断層の形成（地震の発生）メカニズムを解明するため、活断層を横断する調査坑道を掘削し、活断層の深部構造と断層破碎帶^{*12)}の性状などを調査研究する。さらにGPS観測や微小地震観測を行い、活断層の活動様式を明らかにする。

[調査研究の内容]

○跡津川断層の活動様式の把握

跡津川断層系は、我が国の断層では特異なクリープ^{*13)}性の変位を伴う可能性が示唆されている。これらのメカニズムを解明するため、主に地震学的および測地学的手法を用いて、跡津川断層上で生じているスリップの量をmmのオーダーで明らかにする。このため、周辺域の広域的地震活動、および近傍の微小地震観測、連続GPS観測（平成8年度から）を実施している。これらの観測によって、跡津川断層のクリープをモデル化することを試みている。

また、断層破碎帯を伝わるトラップ波^{*14)}の観測を平成9年度から行っており、断層破碎帯の地下構造の解明を進めている。

さらに、断層周辺の基礎情報取得のため、断層周辺の広域地質調査、空中写真判読、反射法地震探査^{*15)}（バイブロサイズ^{*16)}、TDEM探査^{*17)}、トレーンチ調査^{*18)}および地層抜き取り調査などを実施している。

○茂住断層調査坑道における活断層研究

跡津川断層と併走する茂住－祐延断層を対象として、地表下300mにおいて断層を貫く延長480mにわたる調査坑道を、平成8年度に掘削した。このような活断層研究

のための調査坑道は世界でも初めてであり、活断層を直接かつ連続的に調査することが可能である。

坑内では、断層面周辺の力学的歪みの連続観測、弾性波^{*19)}や比抵抗^{*20)}の精密測定、間隙水圧測定などを行っており、断層近傍における岩盤透水性の変化などの解明を進めている。

また、調査坑道から湧出する地下水の化学組成・同位体組成を分析し、断層運動に関連する断層内の水の流れや岩石-水反応を調査している。岩盤の破碎の強弱と水質との関係などが明らかにされつつある。

[今後の展開]

地震活動、GPS、トラップ波、坑内精密計測、地球化学データなどを、同じ時間軸上に並べて相互の関係を比較検討し、破碎帯の物理化学挙動を解明する。また、活断層の活動履歴などを読みとる技術を、茂住抗を利用して確立する。

2. 地震発生に関する研究（アクロス）

2.1 研究の目的・意義

当初の提示目的：能動的に地下の構造と状態を直接見る「光」と「目」、すなわち、地下の地震波速度と電気伝導度の分布構造、さらにそれらの微小変動をリモートセンシングする刷新的な地下探査手法（アクロスシステム）を一つの技術体系として開発し、その実用化をはかる。

意義：次のように多面的である。

- (1) 日本が世界に発信できる新手法の開拓
- (2) 新しい地下構造探査、監視技術の開発研究の遂行
- (3) 地震発生場の監視観測の基礎確立による地震予知研究戦略
- (4) 地下のカラーホログラフィー^{*21)}は大気中で宇宙線による核反応で、あるいは太陽から直接避雷するものにより大気中に常時供給され、降雨によって陸水及び表面海水中に移行する。に発展できる技術の出発点
- (5) その他、全ての地下構造解析、監視の理工学的に有用な基礎と実用など

2.2 研究目標

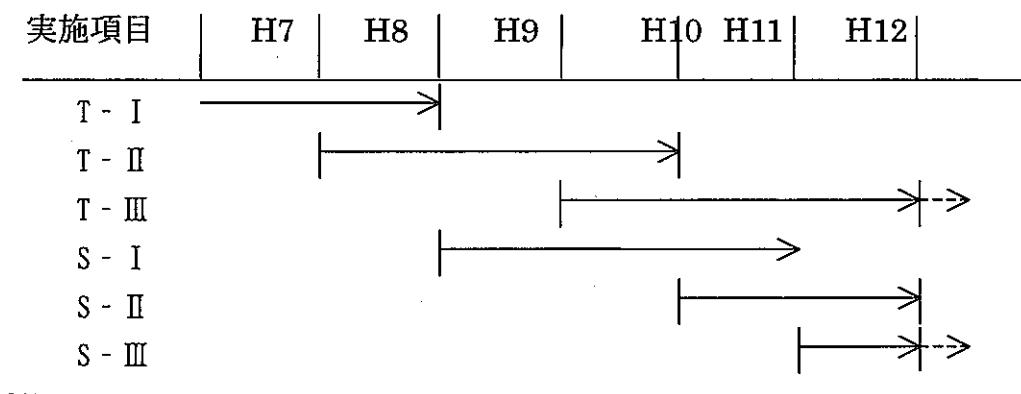
当初の提示目標：地震発生が予測される地域において、地下深部の地殻歪、応力や地下水の状態など地震発生過程を制御する諸要因をアクロスシステムによって常時モニターし、これによる地震発生場と物理過程の時間発展の解明。

現時点における研究目標：上の多様な「意義」で述べた将来の発展に資することを考慮しつつ、これまでの地震予知・噴火予知研究で専ら地表面近傍に発生する諸現象の受動的な観測に依存しているのを補完するのが目的である。

本研究課題の5年間の達成目標は、アクロスの理論的・技術的基盤の確立、およびテストフィールドにおける具体的な事例の提示に基づいて、地震発生場である日本列島地下状態監視システムの具体的設計を提案することである。

2.3 研究計画

互いにリンクした二つの側面、即ち、(T) ハードウェアの技術開発+データ解析理論と計算アルゴリズム^{*22)} の開発研究、およびそれらによる(S) 地下構造解明を3つのステップとする年次計画とした。(但し、この計画は、予算規模、可能な研究員規模、研究条件などについての資料のない段階で設定したものである。)



註 1. 実施項目の内容

[技術開発研究 (T)]

T - I : アクロスシステム基本技術実証

T - II : アクロスシステム標準的手法の確立

T - III : アクロスシステム実用性の向上

[地下構造と地震発生場の研究 (S)]

S - I : 実用目的の試験観測による技術蓄積

S - II : 日本列島地下常時モニタリングシステム設計

S - III : 日本列島地下常時モニタリングシステム具体化

註 2. |→ = 研究は JNC の枠をはみ出して発展して行くことを示す

2.4 研究成果

(1) 短い要旨

名古屋大学で構想段階にあったアクロスは、地震総合フロンティア研究において、基礎研究と開発研究が積上げられ、実用化への堅実な発展を果たすことができた。個別課題については、それらを担当した各研究スタッフが成果現状を報告する。

(2) 研究成果の構造についての要旨

[理論的基盤の確立]

アクロスでは非破壊的な連続サイン波を定常に地下に送信し、その受信信号の解析によって、遠距離でも高い S/N 比^{*23)} で複数の波の走時^{*24)} を高精度で決定できる、と主張して出発した。当時、それは原理的に不可能だと考える研究者が主だった。現在は、線形力学系の励起入力－応答関係を記述する伝達関数の基本的性質の分析、情報理論に基づいた信号と雑音の性質に基づく存否セプストラム理論^{*25)} の定式化などを行い、アクロスの理論的基礎をほぼ確立した。また、アクロスは電磁波にも適用できると述べるだけの段階であったが、

高周波数の地中レーダー領域から、低周波数の MT^{*26)} 領域（電磁的変動は拡散場）までを一元的に記述する伝達関数を導き、アクロスを用いて波線にそった群速度の周波数依存性を決定する理論を定式化した。弾性波と電磁波の分散と吸収がアクロスの観測量であり、地震発生場の構造敏感性についての研究に有用であることが明らかになった。特に、電磁物性の周波数依存性（誘電分散）が、地下に存在する H₂O 分子を介した電気化学反応の効果で、地震発生場の水が可能な遠隔監視観測対象であることを理論的に示した。

[技術的基盤の確立]

本研究の出発時点では、名古屋大学構内において 20Hz, 数 10 kgfまでのプロトタイプ音波送信装置とテレメータ同期の受信による試験が行われた段階で、実用装置の実現は技術的に極めて困難、と言うのが大方の見方であった。フロンティア研究の成果として、東濃鉱山に 50Hz, 20tonf までの実用試験装置を開発設置し、遠方への音波信号送信を実証した。その同期制御精度はサブマイクロ秒を達成し、開発した時間区間蓄積記録装置を使った FM 送受信（複数の正弦波の同時扱い）と多重送受信（混信なく複数の送信装置で同じ周波数帯信号の同時扱い）を実証した。さらに時間区間蓄積記録装置の試作試験、多種の地震計とその地下アレイの特性試験などの積み重ねにより、弾性波の伝播時間測定精度として、数マイクロ秒も達せられる基盤を確立した。

しかし、アレイ観測に必要な廉価高忠実地震計の開発確保には対応不適の結果、目標を果たしていない。また、機動性のある可搬型音波送信装置、電磁アクロス送信装置などの技術開発も行いつつある。

[テストフィールド事例研究]

「東濃アクロスシステム」としては、東濃鉱山音波送信装置から送信する信号は 100km 離れた地点でも検出された。一方、東濃鉱山周辺 5km の探査では、名大の瑞浪地震観測壕内の地震計アレイによって、この地域の地下に散乱体が存在することを確認したが、それを同定する観測システムは未だ十分でない。これはそのための地震計確保がまだ出来ていないからである。しかし、現状での最高水準の地震計を使用した観測システムの整備は進めており、東濃鉱山のボアホール内に設置した地震計によって S/N 比約 10⁴ という高精度の伝達関数の連続データ取得を実現し、地震波速度の微小な日変化と降雨による変化も検出している。また、地下 130m に GPS 同期坑内地震計アレイ設置し、アレイとしてのデータ取得も始めた。電磁アクロスでは、プロトタイプ送信装置と鉱山近傍の受信試験によって数 km までの信号検出ができる事を確認した。これで、東濃アクロスシステムとして弾性波と電磁波の同時連続送信による構造解明、状態監視システムのプロトタイプがほぼ形作られ、本研究の最終年度におけるデータ取得が始まることになった。

なお、東濃アクロスシステムの他に、淡路島の野島断層と岐阜県各務原にも音波送信装置を設置し監視観測を積み上げている。野島断層では断層を貫く試錐孔への注水によって近傍の地震波速度と電気伝導度の微細な変化がとらえられたと報告を受けている。淡路、東濃とともに、潮汐歪みと相關する地震波速度変化は現在の検出限界以下($<10^{-4}$)である。

(3) 研究成果の提示内容

アクロスの開発研究では、これまでの概念と異なる視点での理論的枠組みにあるアクロスを具体的実用技術にするため、当初は必要な要素技術が何であるのかさえ必ずしも明らかではなかった。アクロスは線形力学系の構造を調べる汎用手法であるから、その適用対象にも目標にも方法にも多数の分岐がある。しかも研究者の関心の対象も社会的ニーズの方向も広い。例えば、アクロスの目標を限定し集中投資すべきだ、という意見があつたし、現在でも各方面から我田引水の開発要求が来る。その対象限定の提案として、例えば、地震予知研究の他に、地殻構造のトモグラフィ、市街化地域の潜在断層の非振動検出、場所の特定はなくてもよいから地震波速度の潮汐変動を検出、物理探査の手段、マグマ溜まりの検出、物性測定の手段、構造物の非破壊試験、トンネルの崩落予測、廃棄物処分場の監視など、実に広範にわたる。従って、アクロスとしての大局的方向は明白でも、局所的・個別的には、基礎理論、装置開発、観測システムなどの方法、適用の対象すべての面で極めて模索的な要素が大きく、多くの思考錯誤、試行錯誤を行う必要があった。

アクロスは論文を書かないで研究の食い散らしをやっている、という指導的立場の研究者からの酷評が出るのももともな面がある。しかし、存在していないものを創り上げて行く段階での食い散らしは非常に重要なアプローチであったと確信している。食い散らして関連領域を見た成果として、食い散らした中から色々な要素や急所が次第に見えてきたし、アクロスのもつ意味や位置付けも明解になって来たのである。そのことは「研究成果」とは通常は呼ばないが、本研究のまぎれもない成果の一つである。

本フロンティア研究で評価を受けるために提示する個別研究成果は、莫大な模索研究のうちで、個別研究課題について東濃地科学センターに常勤している担当者の限られた時間でお目にかけられる形にできたものだけである。また、名古屋大学の共同研究者の寄与を網羅していないが、それは単に時間などの物理的制約によるものである。

アクロスの開発研究は、いずれ一つの理論体系／技術体系として形をなす途中の過渡段階にあるので、そのつもりで見ていただきたい。

2.4.1 東濃音波アクロスシステムの開発成果とその総合レビュー

陸域地下構造フロンティア研究プロジェクト・アクロス研究チームは、岐阜県土岐市に位置する東濃鉱山をテストサイトとして、地下構造とその時間変動とを精密計測する手法の開発を行っている。この4年間足らずにおけるアクロス研究チームにおける開発成果のうち音波アクロスに特定してレビューを行う（図2.4.1-1）。

（1）東濃地域における音波アクロス研究

正弦波による周波数領域の伝達関数を調べる手法は、ものの性質を調べるために汎用手法である。これを弾性波や電磁波による地下探査に適用するための技術開発を、我々アクロス研究チームは行ってきた。これまでの研究は、これが未開拓の汎用手法であるので、当面は特定の調査対象をリジットには限定せず、装置の開発や改良および解析法、探査手法などを広く考え、しかし地道に進めてきた。本報告では、東濃でのアクロス研究を探査システムの開発とフィールドスタディ2つに分類して説明する（図2.4.1-2）。両者の関係は相補的であり、出来上がった探査システムは即座にフィールドに持ち込まれ、テストされ、改造・改良を繰り返していくという方針で進めてきた。

探査システムの開発

探査システムには、震源装置、観測装置およびデータ処理（ソフトウェア）の開発が含まれる。

震源装置については、20tonf級回転型アクロス震源の製作や試験の他、2tonf級可搬式回転型アクロス震源（HIT）の改良などが進められている。紙上の段階では、遠距離低周波送信装置、磁気駆動式直線加振型震源装置などの検討や設計を行っている。本報告では、20tonf級回転アクロス震源装置に焦点を当てる。

観測装置では、種々の地震計の試験、地震計の開発や検定に関する検討、およびデータロガーに関する検討と種々の時間区間蓄積型記録計の開発などが上げられる。

データ処理では、探査システムの一部としては、時系列データを周波数系列データに変換し、震源関数（現状では回転周波数から、発生力・変位・速度・加速度を計算）を除すことで周波数領域での伝達関数を求めるところまでを含む。その後の解析法としては、走時解析・モード解析などの手法の考案やプログラム作成が進められてきている。

フィールドスタディ

主として、20tonf級回転型アクロス震源装置を用いて地下構造と時間変動のそれぞれをターゲットとした実験を進めている。理想的には両者は同じ一連の探査で得られるものであるが、現実的には、後者は、変動が非常に大きい場合

を除いて、かなり S/N を稼がないと紛れが大きく検出が困難なため、近距離で信号レベルが大きい探査を除いて、ここでは便宜的に分けている。

(2) 震源装置の開発

現時点で稼動している回転型アクロス震源装置について説明する。この震源装置の開発は、大きく 4 段階に分けることができる（図 2.4.1-3）。

1) 回転型アクロス震源装置の開発

20ton 級東濃アクロス音波送信装置の基本設計は平成 6 年から名古屋大学で行われ、阪神淡路大震災を挟んで、平成 7 年度に着工、平成 8 年 7 月に完成した（図 2.4.1-4）。 $6 \times 3.5 \times 2.3\text{m}$ の鉄骨コンクリートの基礎（岩盤カプラー^{*27)} に偏心モーメントの異なる 3 機の回転型アクロス震源装置が組み込んである。それぞれの震源装置は、異なる回転周波数で最大約 20tonf (10^5N) の力を発生する。縦置きと横置きの二通りの設置方法により、極性の異なる地震波を発生することができる。偏心質量の回転は、サーボモータにより行われ、外部制御パルスによる位相制御方式となっている。岩盤カプラーは、20tonf の発生力に対しても周囲地盤の疲労破壊強度を超えない 1/10 気圧以下の応力となるサイズに設計された。岩盤カプラーは、第三系^{*28)} の泥岩中に設置されている。これは、岩盤とは言えない硬さであるが、かなり固結しており、建築上の基礎としてはしっかりととした地盤である。

2) 位相・周波数制御の精密化と回転計測

サーボモータの回転は、外部制御パルス（以下制御パルス）による回転位相制御が行える（1 パルス 1/2000 回転）。震源制御では、この基準となる制御パルス列を如何にデザインし精密化するかと、モータ回転が制御パルスにどの程度忠実に追従するかを調べるところからスタートした。

制御パルス

まず、制御パルスの基準クロックとして我々は GPS クロックを採用した。これは、後で述べる観測装置との同期を取り易いことと、非常に安定した周波数基準となり得ることからである。GPS クロックは、単独で用いる場合、衛星条件がよければ UTC^{*29)}（世界協定時）に対して 40nsec~ $1\mu\text{sec}$ レベルで同期した時刻信号（1 PPS）を生成する。また、良い GPS クロック（例えば True Time XL-DC）などでは、nsec オーダーで 1 PPS に同期したサンプリングクロック（1k, 1M, 5M, 10MPPS）を発生している。以下に述べる制御パルス発生装置は、この 10MPPS を基準として用いている。

さて、地下構造を精密に求めるためには、周波数毎の伝達関数が時間変動する影響を避けるために、同時に複数の周波数データを取得することが必要であ

る。一台の回転型アクロス震源装置でこれを実現する唯一の方法は、周波数変調（FM）である。制御パルス周波数を正確にスイープ^{*30)}させることでモータの回転周波数を変化させ、FM送信を実現できる（図2.4.1-5）。

本研究では、GPSに同期しながらも、任意の周波数のFM変調パルス列を発生させる装置をDDS（Direct Digital Synthesizer）により実現した（図2.4.1-6）。市販の32bitDDSを用いることで、アクロス回転周波数に換算して58nHz(5.8×10^{-8} Hz)の分解能が得られる。DDSはGPSクロックを基準として非常に精度の高い周波数を発生することができるが、量子化による丸めにより、設定値に対して微小なずれ（上述の分解能）を本的に有している。このことは、震源の位相が直線的にドリフトすることを意味している。その程度は最大で 6.6×10^{-4} rad/hourである。このため、長時間観測の場合は、1時間毎にファイル化したデータから位相の直線ドリフト分を補正した後に、必要な時間数だけのスタッキング^{*31)}を行っている。ドリフト分を震源側でフィードバック制御することも可能だが、PCによっては動作の信頼性が低い場合もあるので今のところ採用していない。現在では48bitのDDSが入手可能となったため、来年度には、パルス発生装置の改良を行う予定である。これにより実現できる周波数分解能は、0.89pHz(8.9×10^{-13} Hz)に達し、位相のドリフト量は7.5年間で 6.6×10^{-4} radとなる。

理想的なFM信号波のデザインも試みており、送信周波数帯域で振幅を均一化するためにはノコギリ波が良いこと、帯域制限を行うためには、サイン波が良いことがこれまでの研究で分かっている。モータの制御パルスに対する追従性から前者は困難であり、後者はパワーをもたない周波数が存在することから、これまで、up-sweepとdown-sweepの時間比率を3:1ないしは7:1程度にした三角波を用いてきた。最近ではサイン変調を複数組み合わせて、振幅の均一化をほぼ満たしつつも、同時に帯域制限にも優れ、なおかつモータの追従性も良好な複合サイン変調を考案し、実戦投入している。次の課題は、回転型アクロスの発生力が周波数の2乗に比例して大きくなることによる振幅の不均一性を、低い周波数ほど滞留時間を延ばすというセンスで、如何にデザインするかということになる。

実際の送信波形とモータ回転

上述の装置を用いた実際の送信波形の例を複合サイン変調について示す（図2.4.1-7）。FM信号波は、変調周期10秒をもつ基本のサイン波に、その2倍高調波（5秒周期）を合成してある。2倍高調波の周波数偏差を決めるには、結果として得られるFM送信波のスペクトルデータにおいて、ターゲット周波数帯域内での振幅の最小値が最大になる場合を数値的に求めている。

比較として上げた、3:1三角波と比べて、振幅のばらつきは同程度であるが、

ターゲット周波数帯域の外側での振幅が急峻に減少しており、良好な帯域制限がなされている。また、モータ回転の計測からも、制御パルスに対するモータの追従性が良いことが理解できる。なお、実測データにおけるギザギザは、モータ回転におけるサーボ系の揺らぎを示していると考えられる。これは一定周波数回転の場合にも見られることであり、位相で見て 10^{-3} rad 以下のランダムな揺らぎとなっている。

精密制御により得られる恩恵

制御パルスのタイムキーピングを厳密にすることで、アクロスでは様々な観測方法が可能となる。その最たる方法の一つが、複数の震源装置を同時に稼動させながらも、相互に混信を起こさない多重送信である（図 2.4.1-8）。FM 送信の中心周波数を適切に選択することによって、ある FM 信号の周波数系列データを別の FM 信号の周波数系列に入れ子にしたり、帯域をずらしたりすることでお互いに干渉しない観測を行うことができる。図 2.4.1-9 には、実際に 2 台の送信を行ったスペクトルデータを示す。周波数系列を互いに入れ子にした場合と、帯域を変えて送信した場合の実例を示している。

さて、上述のように回転型震源の偏心質量の回転位相と周波数のコントロールは極めて精密に行えるようになった。これは、発生力の大きさと位相のコントロールが精密にできることを意味しており、発生力は既知のものとして扱えるようになったと言ってよい。しかし、力が既知であっても、実際に発生する波動は、周囲の媒質に依存するため、震源関数は実際の振動を測定しなければ分からぬ。ここで、震源開発は振動計測という段階に入った。

3) 岩盤カプラー振動の精密測定

震源開発における次の課題は、ファーフィールドに送信される波動場（震源関数）を如何に知るかである。この課題に対して、岩盤カプラー上での振動計測からスタートした。図 2.4.1-10 は、No.3 ACROSS を用いて、5Hz 刻みの FM 変調送信した際に得られた、岩盤カプラー上でのサーボ式加速度計による測定の一例である。制御パルスから計算できる FM 波形による震源（本体）関数を除して、各周波数毎の岩盤カプラー上での伝達関数（振幅と位相）を表している。振幅や位相における、例えば 23.5Hz や 27.5Hz に見られる凹みや段差は、設置・メンテナンス用に設けているチェーンブロックを支持するためのアングルの共振を拾ったものである。こうした震源室内にある共鳴体が、遠方へ送信される波動にどの程度の影響を与えるものかは現在までのところ明確でなく、次の研究課題の一つである。

また、このことは、送信所の建物や岩盤カプラーの設計をどうするかについての示唆を与えている。典型的な例が、淡路島のアクロス送信所である。東濃

と同等の震源装置が設置されているが、花崗岩の岩盤中にコンクリート基礎（岩盤カプラー）があるということと、震源装置を囲む建物は東濃に比べると大きく堅牢であると言う違いがある。図 2.4.1-10 には、淡路島の岩盤カプラー上で得られた地震計（速度計）の記録の一例も示してある。東濃に比べて周波数による振幅変化が極めて大きいことが一目瞭然である。この原因としては、花崗岩自体がパワーショベルで掘れるほど亀裂が多く、岩盤の条件としては良くなかったのではないかということと、建物内の空気の共鳴を地震計が拾ってしまっていることの 2 点を考えているが、その後の十分な詰めはなされていない。震源近傍に 2 点、10m 深度のボアホールが掘削されて、そこで観測が出来るようになったので更なる原因究明に臨みたい。

4) 震源関数の精密決定問題

今後は、岩盤カプラー周辺での計測も更に進めて、震源関数を精密に推定するという課題にアプローチしていきたいと考えている。また、この課題に対しては、計測だけでなく、地下構造推定とそれによる振動場のモデル化・モデル計算などを同時に進めるべきであり、その筋の専門家とも共同して進めていく必要があると考える。

(3) 観測装置の開発

音波アクロスの観測装置は、地震計と時間区間蓄積型記録計から構成される（図 2.4.1-11）。計測の基本は、送信正弦波の位相・振幅を精度良く求めることに尽きるが、精度と言う言葉のうち、特に重要と思われる点をまずまとめ、その後地震計と時間区間蓄積型記録計についての個別問題に言及する。

応答の直線性

センサーを始めとして観測装置の非線型応答があると、特に FM 信号のように複数の周波数を扱う場合には、周波数間でクロストーク^{*32)}が発生し、本来の信号に高調波などが被り、振幅・位相データにバイアス^{*33)}を生じる。非線型性が無視できないような観測装置においては検定を適切に行い、出力の振幅値から入力の振幅が正確に補正できるようにしておく必要がある。

1) 特性の安定性

微妙な時間変動を捉えようとする場合は、観測装置自体にそれ以上の変動があると何を見ているのか分からなくなる。観測装置自体を環境変動に強いものとするか、装置自体がある程度環境の影響を受けても、温度など設置環境を安定させたり、温度特性などを予め検定したり、また、常時キャリブレーションを行って補正できるようにするなどして、装置特性変動を取り除く必要がある。

2) 精度よく検定された周波数特性

地動（変位、速度、加速度）という物理量を紛れなく測るために、装置自体の振幅や位相などの周波数特性が良く検定されて予め分かっている必要がある。これは、特に多数のセンサー・観測装置を使用する場合に大変重要となつてくる。

地震計の検討（図 4.2.1-12）

アクロス観測用の地震計として求められる性能は、他の地震研究用で望ましいと考えられるものと異なるものではない。結局、地動の変位か速度か加速度を、忠実に出力するセンサーである。忠実にと言うことを多少整理してみると、

- a) 周波数特性が適切に検定されている
- b) 感度の直線性に優れている
- c) 特性の安定性に優れている
- d) 橫感度が小さい
- e) 自己ノイズが小さい

と言うことになる。e)は他と異なり、地動ノイズとの比較で相対的に決まる条件である。a)の条件は、物理量を計測する以上当然のことである。特に観測の守備範囲が広がってくれれば、異なる種類の地震計を用いざるを得なくなるはずであるが、相対的に比較ができなければ話にならない。現状で、b)～d)の条件を満たし得る地震計の方式は、バネや磁束の性質が良好な部分だけを動作範囲に設定して精度を上げているフィードバック式の地震計であると考えられる。

一方、個別の性能以外に地震計に求められることがある。地下探査において、地表付近の不均質性は、地下構造を歪めて見せるバイアスあるいは雑音として働く。これを取り除くためには、多数の地震計をアレーとして用いて、表層の不均質による補正をしてやる必要がある。また、補正という観点だけでなく、興味ある構造の空間波数に応じて、エリアシング^{*3 4)}を起こさないような密度の空間サンプリングが必要である。こうした観点から、地下構造を精密推定するためには、性能の良い地震計を多数用意する必要がある。小型で取り扱いが簡便で、かつ比較的安価なフィードバック式地震計となると、強振計に用いられているサーボ式加速度計が候補に上がる。しかし、小型のサーボ式加速度計は自己ノイズが大きく、地動ノイズが小さいところでより小さい信号を観測しようという用途には適さない場合が多い。そこで、当面は少なくともテストフィールドである東濃鉱山での地動ノイズ（5～100Hz で約 $10^{-6} \text{m/s}^2 \text{Hz}^{1/2}$ をやや下回る程度）以下の自己ノイズの地震計を特定する目的で、種々の加速度計の自己ノイズ測定を行い、結果として A を選定した。これらの過程で、自己ノイズの最も大きな原因が振り子の位置検出感度不足に起因することを突き止め、自己ノイズが小さいサーボ式加速度計の概念設計を行った。

採用した地震計は、坑道内およびボアホールに設置する前に、レーザー干渉計により振動校正を行う空気軸受け加振装置により全数検定を行った。その際、メーカーの提供する従来の検定方式では、特に位相特性、直線性、横感度の検定において、様々な問題を有していることを突き止め、検定法の方向性に関する考察を進めた。現在、二重回転円盤式検定装置や3軸加振装置などの検定方式などについても、計量研究所やメーカー等と協同して検討を進めつつある。来年度には、より簡便な検定方法として、基準加速度計を6個以上設置した剛体ブロックを、アクロス震源で加振して剛体ブロックの運動の推定とそこに設置した地震計の検定とを同時に行う装置の製作を行っていく予定である。

時間区間蓄積型記録計（図2.4.1-13）

送信される信号がFM波であり、含まれる周波数の数も実験によって異なることを前提として、対応が容易な時系列取得方式の受信装置を開発してきた。受信装置としては検波方式も可能であるが、低周波の受信では以下のような困難があるためである。

段階的に周波数をスイープして周波数をスキャンする方式では、全周波数を終えるまでに地下や周囲環境の時間変動によるバイアスが生じる。FM波の周波数成分すべてを同時に受信する検波装置の製作が難しい。また、時系列データを取得することにより時間領域と周波数領域の両方でデータを吟味でき、特に時間領域で現象を扱い慣れた者にとっては現象を理解しやすいというメリットもある。

時系列でデータを取得する場合に、送信信号の位相情報を精度よく求めるためには、送信装置との間で時計の同期精度が重要となる。上で説明したように、我々は、震源装置をGPSによりUTCに対して常時 $1\mu\text{sec}$ 以内で同期したクロックを基準に制御しており、そのため、受信装置も同様にGPSクロックを用いて、A/D^{*35)}のサンプリングクロックを同期させてやれば、近距離から遠距離まで同期精度が保証されることになる。

アクロスの観測では、これは計測における理想であるが、ノイズフリー、バイアスフリーデータの取得を目指すということを念頭においている。

ノイズフリーの理想に少しでも近づくために、センサーやデータロガーの自己ノイズを極力排除することはもちろんとして、アクロスでは長時間の観測によるS/Nの向上を積極的に取り入れる。取得データのフーリエ変換^{*36)}を考える。理想的な正弦波の振幅は時間によらず一定であるが、ランダムノイズのパワースペクトル密度^{*37)}はデータ取得時間が長いほど減少するので、長時間のデータ取得を行えばS/Nを向上させることができる。現実的には、闇雲に長いデータを取得することは、記録媒体や計算などの手間を増大させるため工夫を

要する。アクロスの場合は、見たい信号の周波数が既知であるため、その整数倍の時間区間で区切ってスタッキングを行うことで、S/N を向上できる（時間区間蓄積）。時間区間の整数分の 1 の周期をもつ正弦波信号は加算回数に比例してその振幅が増大するが、一方ランダムノイズは、加算回数の平方根でしか振幅が増えない。こうした考えに立って、種々の時間区間蓄積型記録計（Time Segment Stacking-recorder : TSS）を開発してきた。

バイアスフリーという意味では、地震計と同様に

- ・周波数特性が適切に検定されている
- ・直線性に優れている
- ・安定性に優れている

と言ったことを時間区間蓄積型記録計にも課すこととなる。アナログ回路に関しては、周波数特性分析器やネットワークアナライザのような周波数領域の伝達関数をダイレクトに測定できる装置があり、比較的精度良く検定が行えるが、A/D 変換器に関しては、メーカスペックに頼らざるを得ない段階が現状である。

今までに開発してきた時間区間蓄積型記録計の一覧を図 2.4.1-14 に示す。様々な観測形態に対応出来るように機種を揃えてきた。バッテリー駆動・小型の機動観測用、センサーにダメージを与えない光通信型ボアホール用、多チャンネルのアレー観測用などである。それぞれ欠点があるが、改良が現在も進められている。

(参考) A/D を駆動するサンプリングクロックは、GPS クロックにより生成する。これまでに開発した時間区間蓄積型記録計のサンプリングクロックは、それぞれの方法で GPS クロックとの同期を試みており、その精度はまちまちである（図 2.4.1-14）。最近の PLL 技術を応用した方法では、GPS エンジンから 1 PPS を取り出し、このタイミングを常時データロガーの内部時計として用いる周波数電圧制御型－温度特性補償機能付水晶振動子（VC-TCXO : Voltage Controlled – Temperature Compensated Crystal Oscillator）の発振周波数にフィードバックしてやり、GPS クロックと常に同期したサンプリングクロックを生成させる方法が、確実に精度が得られる。ちなみに、GPS エンジンからの 1 PPS には揺らぎがあるので、ある程度の時定数をもったフィードバックが必要である。この方法で常時数 nsec～μ sec 以内で平均的 GPS 1 PPS に同期したクロックができる。なお、単独で GPS クロックを用いる場合は、UTC に対しては 100nsec から μ sec 程度の同期であるが、同じ GPS エンジンを用いた 2 つのシステムを近くで使用する場合の相対精度は更に良いはずである。

(4) 東濃地域実験サイトの構築

東濃鉱山を中心として大きさは 100km の遠方まで、音波アクロス震源の守備範囲と考え、東濃地域実験サイトを構想した。地下構造を精密に求めるためには、震源関数を精密に求める必要があるが、これには、震源近傍ほど波数の大きな構造まで知る必要がある。これは、受信点においてもしかりで、アレー観測が是非とも必要である。近くほど密にというイメージは、ちょうどパワーズ・オブ・テン的な発想で地理的配置を考えるのが分かりやすい（図 2.4.1-15）。近傍の速度構造 (V_p : 約 2~3km/s) と送信周波数 (5~50Hz) を考慮すると、数百m以内に密に地震計を並べて観測し、震源関数とその時間変動を常時モニターするのが望ましいと考えられるが、種々の制約の中、未だその対応は充分できているとは言えない。

東濃鉱山アクロス施設位置図（図 4.2.1-16） 半径 500m スケール

現時点では岩盤カッター上以外では、ボアホール(98SE-01:深度 203m)に 1 点、鉱山坑道内に 8 点の観測点を設置している。坑道内の地震計アレーは、2000 年 2 月末から観測体制に入ったばかりで、データ取得を進行中である。今年度中には、97FT-01 号孔の地震計に TSS を接続して観測を開始する予定である。また、来年度には、98SE-01 号孔の地上部、98FE-01 号孔の孔底 (150m) と地上部とに地震計を設置する予定である。ニアフィールドを含む観測点として、震源関数の把握およびその変動を捉えること、深部からの反射波および各務原アクロスなどの遠方からの信号を捉えることを目的としている。また、地下水の遮水壁の役割を果たしていると考えられている月吉断層の両側での地震波の伝播や地震波速度変動の差異を追うなどの興味深いテーマもある。更には、自然地震の観測も同時に行っていく予定である。震源関数の把握のためには、臨時に観測点を置いて密に観測していく必要があるが、アクロス震源が鉱山用地の端に位置するため地震計を設置できる場所の制約があり、偏りがあるのが残念である。

東濃鉱山周辺臨時観測点（図 2.4.1-17） 半径 5~10km スケール

水理試験などの目的で、ボアホール (DH シリーズ孔) が掘削された借地を利用した臨時観測点である。現在、各観測点のサイト調査を行っている。 $10 \times 10m$ ~ $30 \times 30m$ の面積の敷地があるため、ここに地震計アレーをおき、深部反射波など種々の地震波相の検出を目指す。 $10km$ はちょうど土岐花崗岩体のスケールであり、この規模の地下構造体への適用試験となる。

名古屋大学テレメータ地震観測点（図 2.4.1-18） 半径 50~100km スケール

遠方での観測は、名古屋大学のテレメータ観測点のデータを活用させて頂いている。現在、大学の多くのテレメータ観測点では、GPS に同期したサンプリングクロックを用いて A/D 変換を行っており、連続データを取得している。この連続記録を必要に応じてスタッキングしてやれば、TSS と同じに使える。單一周波数信号 (25Hz : 10tonf) の送信では、これまでに 101km (上宝 : 京都大学防災研究所) まで信号が約 6 日間のデータで確認されている。また、FM 信号 (13Hz±3.5Hz : 13Hz で 5.4tonf, 0.1Hz 刻み 70 本の周波数の同時送信) の観測では、約 9 日のデータで、29km (豊田) まで信号が確認されている。

(5) 実験結果概要

1) 到達距離試験－距離による振幅減衰の一例－ (図 2.4.1-19)

アクロス震源装置で探査を行う場合に、観測点までの距離と地動ノイズレベルから、どの程度の時間のスタッキングが必要であるかの目安を得るために、單一周波数 (25Hz : 10tonf) であるが、距離による振幅減衰の観測試験を行った。図 2.4.1-19 で、20km までの観測点は 1 時間のデータ、20km 以遠の観測点は、6 日間のデータから求めている。

信号の振幅は、ほぼ距離の 2 乗に反比例して減少している。図では、地震観測点の代表的なノイズレベルが時間領域での値で記されているが、信号が検出できるかどうかは送信周波数付近のノイズのスペクトル振幅密度による。図の右側の目盛りは、発生力 1 N 当たりにした振幅で、震源の能力あるいは FM で各周波数での発生力を知って、どの程度の距離とノイズレベルのところで検出可能かが推定できる。

2) 地震波相分離および走時解析実験 (図 2.4.1-20)

孔底地震計を利用して震源距離 209m における伝達関数を求めた。震源は、No.3 ACROSS (縦置き、35Hz 機) で、5 Hz~35Hz の周波数を 4 分割して FM 送信して得られた周波数系列データを、モータ回転のデータから導いた震源関数で除した伝達関数とそれをフーリエ変換して求めた時系列データの一例 (上下動) とを示す。図では、0.064 秒と 0.164 秒に地震波相の到達が見られ、それぞれ P 波^{*38)} (3300m/s) と S 波^{*39)} (1300m/s) に対応すると考えられる。存否法による更に詳しい解析は現在進行している。また、モータの右回転と左回転場合の両方のデータを取得しており、この 2 つのデータを合成することで直線加振の場合のデータが得られるので、各地震波相のパーティクルモーションとの対応なども調べている。

3) 地震計アレー観測実験（図 2.4.1-21、2.4.1-22）

鉱山から 2.4km の距離にある、名古屋大学地殻変動観測壕の中に地震計を 8m 間隔で 13 点 L 字型に配置し、アレーによる観測を行った。No.3 ACROSS を用いて 3:1 の三角波による FM 送信を行い、17.5～22.5Hz で 0.1Hz 間隔に 51 点得た。観測壕は高速道路の近くにあり、周囲の工事などでノイズレベルが高く、S/N を確保するために約 5 日間のデータをスタッキングして用いた。

アレイの解析は、周波数領域で見かけ速度に合わせて位相をずらし、時間領域に戻して足し合わせてビームフォーミング^{*40)}するという、センブランス法^{*41)}と同様な手法であるが、計算は全て周波数領域で行っている。この方法によって波の到来方向と見かけ速度が分かる。

図 2.4.1-22 は、震源方向からの平面波を仮定して、アレイ解析を行った結果である。地震波相の同定はまだ十分とは言えないが、走時と別の探査で分かっている付近の地震波速度構造を参考に、到来方向がほぼ震源方向である P 波、S 波、表面波^{*42)}、深部からの反射波、到来方向が震源と反対方向からの地震波相を検出した。

4) 時間変動観測実験（図 2.4.1-23）

1999 年度の後半から連続運転が可能となり、同じ観測点で、震源から到来する信号の変動を調べる実験を行った。観測点は、2) の実験と同じ震源距離 209m の孔底地震計によるものである。一例として紹介するのは、9.5～15.5Hz で 0.1Hz 刻みで送信した結果である。これより大きい周波数帯では、気温変化に連動した振幅・位相変動が大きいため、その影響が小さい帯域でどんな変化が検出されるかを狙った。

得られた記録から周波数系列データを求め、観測開始時を基点として、それぞれの周波数の位相・振幅の相対的な変化だけを抽出した（図 2.4.1-23）。日周変動が見られるが比較的小さく、周波数によってその位相が異なっている。それに比べてステップ状に変化する比較的大きな位相・振幅変動が目に付く。この変化は、鉱山で観測している降雨データと比べると、変動の大きさと降雨量とが非常に良い相関を示していることが理解できる。

この変化は、岩盤カプラー上での振動の位相・振幅変動は 209m 先の変動に比べると桁で小さいため、送信状態の変動によるものではないと考えられる。予備的に行った岩盤カプラーの周りでの散水実験（1.5ton 程度）でも変化が見られないことから、震源周囲の比較的広い範囲の変化を総合して捉えているのではないかと考えられる。今後、この問題は、坑道アレーでの観測や散水実験などを継続してアプローチして行きたい。

(6) 平成 12 年度の予定（図 2.4.1-24）

最終年度にあたる平成 12 年度は、震源装置・観測装置の更なる性能向上を図るとともに、これまでに準備してきた観測点を用いた実験を行っていく予定である。個別課題については、既に上で触れている。同時に比較的遅れている解析用のソフトウェアおよび解析法自体の研究を進めていく。また、これまでの膨大な開発・実験成果をまとめ、論文・報告書としてまとめる。

(7) 今後の展望（図 2.4.1-25、26）

東濃鉱山を中心とした、中部地域をテストフィールドとして実験を進めてきた。ここで得られた様々な知見をもとに、平成 12 年度にまとめる報告書には、日本列島地下常時モニターへの展望と提案とを盛り込む予定である。そのうちの未完成なビジョンを、絵巻物としてまとめてみた。図で大出力アクロス震源とは、現在設計中の 100tonf 級回転型アクロス震源装置（低周波遠距離送信装置）を想定しており、中出力アクロス震源とは、20tonf 級回転型アクロス震源装置を想定している。

2.4.2 キメ-トル領域の構造解明監視観測に向けた可搬型弾性波送信技術の開発

(1) はじめに

可搬型弾性波アクロス震源（通称 HIT）は、火山や内陸地震の発生場など特定地域や物理探査などの限定された領域（数 km 領域）での弾性波による構造解明および監視観測を行うための「機動的観測手法」である。

HIT は、1997 年度 NEDO のプロジェクトとして、名古屋大学・小川克郎教授の指揮の下、地熱地帯における構造探査手法として設計・開発され、1997 年 12 月の名古屋大学構内での実験を経て、1998 年 1 月には鹿児島県山川地熱発電所で送信実験が行なわれた。山川実験では、さまざまな問題が浮上し実用化に向けての課題が残された。残念なことに、それ以後、実験および関連技術の研究・開発は一時休眠状態に入り、今日に至る。

地震の震源想定地域や火山の地下（根）では、物性や構造の変化がもたらす弾性波特性の変化が生じると考えられる。それらを監視観測することは、地震や噴火の予知への積極的アプローチであり、陸域地下構造フロンティア研究プロジェクトにおいて最も重要な課題の 1 つである。我々は、本プロジェクトにおいて 1999 年度より、HIT の技術研究開発を再開し、従来の様々な問題の解決に必要な技術開発と、将来の機動的観測に必要な基礎データの取得を行う準備を開始した。本報告書では、従来の HIT 開発研究の概要と実用化に向けての研究課題について整理するとともに、本プロジェクトにおける技術開発研究の進行

状況を報告する。

(2) HIT の特長と実用化に向けた技術開発の課題

開発理念にそった HIT の四つの特長についての簡単な説明と、これまでに確認された問題点の整理をおこなう。

1) 特長 I 移動観測システム

HIT システムは、主に、加振部・制御部・電源部・震源特性計測部、の四つのシステムから構成されている。a) 加振部は、震源装置や地表面カプラー板など、地表面に設置し実際に地下へ弾性波を送信する部分である。b) 制御部は、モータ制御盤や位相制御のためのパソコン・GSP 時計などで構成され、アクロスの特徴である精密制御を行う。c) 電源には交流電源(200V, 15A)または発電機を用いる。d) 震源持性計測部は、地震計および波形計測システムから構成される。これらは、ユニック付 3t トラックで運搬できるように大きさと重量が設計されている(図 2.4.2-1 参照)。上記 a) ~ c) は、従来開発の段階でほぼ一通り完成しているが(図 2.4.2-2 参照)、d) のシステムの確立は今後の重要な課題になっている。HIT では、設置する地盤と加振部との接触度によって震源特性が変化するので、震源特性を記述するための計測システムは必要不可欠である。よって、本研究では早急なシステム確立を目指している。

2) 特長 II リニア・ユニットによる加振

固定型弾性波送信震源(FIT)では、一個の回転体「シングルユニット」を用いるのに対し、HIT では、二つの回転体からなる「リニアユニット」方式を採用している。図 2.4.2-3 に示すように、2 つの回転体を互いに逆位相で同期回転させることで、一定方向に振幅が正弦的に変化する波を発振できる。これによって、ターゲット構造に対して、直接的に水平方向・上下方向の分極性波動を送信することが可能になる。分極性波動を正確に地中に送信するには、a) 加振部が剛体運動を行っていること、b) 加振部と地盤との接触が適切に行わっていることが必要である。b) の問題については後述するとして、ここでは、加振部に関する問題を整理する。

HIT の加振機本体は、大きさ 660 (mm) × 520 (mm) × 400 (mm)、重さ約 300 kg の鉄の直方体である。これが、大きさ約 1500 (mm) × 1500 (mm) × 50 (mm) の地表面カプラー板の中心に固定され、加振部の最小単位となる。加振部は、地盤との摩擦力によって地表面に固定される。地表面カプラー板には、追加荷重用カプラー板もあるが、基本構造は同じなので、本体取付け用カプラー板には、加振に対する強度を持たせる工夫が必要である。以下は、山川

実験において明らかになった、従来型本体取付け用カプラー板と本体に関する主な問題点である。

- イ) 水平力支持剛性の不足
- ロ) たわみ剛性の不足
- ハ) 二種類の本体取付けカプラーが存在
- 二) HIT - V 型ではモーメント変更窓がカプラーへの取付け面側に存在

これらは震源特性に直接反映される因子であり、早急に解決すべき問題で、本研究の重点課題である。

3) 特長III 偏心モーメント変更による発生力の調整

偏心モーメントを変更できると、設置する地盤に破壊を生じさせない程度の発生力で広い周波数範囲の弾性波送信が可能になる。これにより、様々な条件の地表面への HIT の設置が可能になる。

単一の偏心おもりによって地面にかかる単力 F は、偏心質量 M 、偏心半径 R 、偏心おもりの回転周波数 f を用いて、

$$F = MR(2\pi f)^2$$

で表される。HIT の一次モーメント MR は最大で 0.15 kg m で、 $f=50 \text{ Hz}$ で回転させる場合には、発生力は約 $1.5 \times 10^4 \text{ N}$ となる。

HIT では、2つの回転柱のほぼ中間に 82 mm 径のネジ穴があり、その中を径方向に約 100mm おもりが移動し、 $0 \sim 0.15 \text{ kg m}$ の範囲で偏心モーメントが変更できる。図 2.4.2-4 は、偏心半径とカプラー板上で得られる加速度の関係を表したものである。振動周波数は一定 (30 Hz) である。回転軸からの偏心おもり重心までの距離が離れるのに比例して一次モーメントは大きくなる。

ここで問題となるのが、偏心おもりの位置の測定方法である。従来の実験では、回転するおもりを手動で固定しながら、基準点からの距離をノギスで測定し、偏心半径に換算する手法をとってきた。しかし、回転するおもりの面に対し、再現性のある距離測定は予想以上に困難で時間を要し、作業効率を損なわせる。従って、実験を行っていく上で、偏心おもり位置の測定を、正確かつ簡便にできるジグ^{*4 3)} があることが望ましい。

4) 特長IV 地表面設置における工夫

HIT を用いた精密な構造探査は、加振部を平坦で一様な堅さの面に適切に設置することから始まる。地表面の不均一性は、応力集中を生み、これがカプラー板の滑りや加振部からの力が均等に地盤に伝わることを妨げる原因の一つになるので、我々が HIT を実用化するには、適切な設置面を常に確保できる工夫が重要になる。しかし、地表面には傾斜と凸凹があり堅さの分布も一様でない

ため、地表面カプラー板を地面に密着させるのは極めて困難である。

図 2.4.2-5 は、東濃鉱山施設内に HIT を設置した際に行なった床養生の様子である。ここでは従来の方法と同じく、枠内に砂を敷き詰め、平らな台座を作り、装置を設置した。このとき均等に均したと思われた設置面でも凸凹や堅さの分布は一様ではなく、運転時の振動も場所によって変わると予想される。山川実験においては、カプラー底面と地盤表面との接触面積は 30% 程度だったという報告もある。

このように、HIT 設置において、平坦で堅さ分布の一様な設置面を確保することは最重要課題であり、本プロジェクトにおける大きな開発目標である。

5) HIT と FIT の特徴の比較

図 2.4.2-6 に、HIT と固定型弾性波送信震源（通称 FIT）との特徴の比較をまとめる。両者は、送信周波数帯域や発生力の違いから、探査のターゲットとする地下構造の規模が異なる。前述したが、HIT がその機動性を生かし火山など比較的限定された領域の探査を目的とするのに対し、FIT は大規模な破碎帯や地震断層などの比較的大きな構造探査と長期変動の検出を主目的としている。このように、我々がアクロス震源による構造探査や監視観測を行うにあたっては適切な装置を選択することが重要である。

（3）陸域地下構造フロンティア研究における HIT の技術開発研究

現在、我々は、前章で述べた幾つかの技術的・構造的問題点に対して次の四つの開発目標

- 1) カプラー板上の振動計測システムの確立
- 2) 新型カプラー板の設計・製作と本体の改良
- 3) 作業性向上のためのジグ開発
- 4) 送信安定性確保のための構造敏感シート（OZAB）の開発

を挙げ、そのための技術開発研究を行っている。ここでは各々の進行状況について報告する。

1) カプラー板上振動計測システムの確立

高精度の構造探査と監視観測を実現するには、弾性波送信を行っている間は震源での振動特性を常時モニターし、震源特性を正確に把握しなければならない。ここで言う震源とは加振部とその近傍の領域を指し、震源特性は両者の振動応答特性を反映したものを使う。HIT の場合、加振部の設置は地表面に行うので、震源は加振部とごく近傍の地盤表層部と考えるのがよい。一般に、地盤の震動特性は構造や地盤種によって異なるので、設置の都度、震源特性を調査

する必要がある。従って、震源特性計測システムは、加振部に組み込まれているのが望ましい。

そこで本研究では、本体取付け用カプラー板の上に地震計を固定設置し、記録計等とともに一括したシステムとして確立することを目指している。図 2.4.2-7 は、現在製作中の計測部のシステム概略図である。カプラー板上での振動計測に適当な地震計として、リオン製 LS-10c 加速度地震計を採用した。地震計には、固定用の台座を製作し三成分計として用いている。カプラー板の四角には LS-10c を、また加振機の天頂部にはアカシ V401 加速度地震計（三成分）を設置した。得られる波形は、アンプ・フィルター回路を通して、KISS (Kunitomo Interface Signal System) によって記録される。KISSについては、本報告書を参照されたい。

上記の基本システムのほか、カプラー板周辺には、アカシ V401 地震計を 2 組配置し、加振部から近傍地盤へどのように振動が伝わっていくのかも観測する。周辺部の地震計は場所を変えて測定する用途もあるため、移動させやすいように記録計には独立型の白山データマーク LS-8000SH (ACROSS) を用いている。なお本システムでは、使用する全ての機器について周波数応答特性を調べ、今後それらを一次処理用データベース化していく予定である。

2) 新型本体取付け用カプラー板の開発と本体の改良

前述したように従来型の本体取付けカプラー板には、力学剛性の不足による送信不安定性や用途限定などによる不具合がある。これらの問題点を解消するため、我々は新規の本体取付け用カプラー板の製作に当たっている。ここでは、現在の開発状況を報告する。

a) 基本概念

HIT 加振部の運動の基本は、加振機本体の運動に対して、それを支えるカプラー板が剛体運動することである。よって加振部に要求される機能は、①加振機本体に対しては正確な運動性能、②カプラー板に対して加振機の運動を地下へ線形的に効率良く伝達する性能、である。また、③加振方向に制約されないカプラー板、④操作性のよい加振機本体、であることも必要である。

本節では、上記の機能を有するため、水平・上下加振共用の新型カプラー板を作成し、本体の改良提案を含めた改良型 HIT 加振部の開発について述べる。

b) 水平・上下加振共用カプラー板の製作

水平加振と上下加振に共用できるカプラー板を製作するには、従来の各加振方向に対応するように作られたカプラー板の力学的問題を解決し、両方向の加

振に耐えられる強度をもつ構造を考案しなければならない。水平加振時のロッキング振動や、上下加振時のたわみ発生の原因として、①回転重心に対する水平支持剛性の不足、②本体とカプラー板の側面までの底面のたわみ剛性不足、③他のカプラー板との接合の為に設けたカプラー側面の切れこみによる剛性低下、などが挙げられる。

新型カプラー板では、たわみ低減方策として、板の底面に本体の傍にまで伸びるヒレ（底面に対して鉛直な鉄板）を複数配置した。本体の水平支持のためには、背の高いヒレで本体を固定・支持することにした。また、側面の切れこみは排除し、接合はボルト締め方式に変更し、側面剛性の補強策とした。図 2.4.2-8 の下部はその概念図である（設計図は添付資料 2.4.2-1）。本装置は現在製作中で、間もなく実験開始の予定である。

c) 加振機ギアボックスの改良の提案

従来の上下加振用装置では、偏心モーメントの変更窓が本体下面側に位置したため、偏心モーメントの変更作業では本体をカプラー板から一度取り外さなければならないなどの不便があった。これは、ギアボックスの油循環系の構造的制約によるものであった。しかし、本研究の検討により、この問題はギアボックスの交換によって解消されることが判明し、名古屋大学によって現在改良されている。

d) 反転機能付本体アタッチメントの製作

前述の本体の改良によって、加振機の向きを変更させることが可能になるので、カプラー板もしくは他の部品による反転機構を装備すれば、加振方向を自由に選択できることになる。そこで、我々は本体を 90 度回転させるための反転機能付本体アタッチメントを製作している。

アタッチメントに要求される機能は、①加振中も安定して本体を支持できる強度、②ハンドル操作などによる簡単な反転操作、③カプラー板への容易な取付け作業、などである。考案されたアタッチメントの概念図を図 2.4.2-8 に示す（設計図は添付資料 2.4.2-2）。本体を両側面から支え、その側面を回転させることで本体も回転する仕組みになっている。アタッチメントは本体よりひと回り大きな箱型なので、カプラー板への取付け床面積は広く、結果として加振部の力学剛性の増強にも役立つ構造になっている。

e) そのほかの機能

これまで加振部の移動にはクレーンを用いていたが、キャスターを四隅に付

設することで、実験現場での水平移動を容易にした。キャスターは、加振装置とカプラー板の重量を支えられる強度をもち、本体への取り外しが可能になっている。また高さの調節も可能にしている。

3) 作業性向上のためのジグ開発

2.3 節で述べたように、偏心おもりの位置の測定は極めて作業性が悪く、実験現場での作業効率を損なわせる。そこで、我々は、位置測定のためのジグの設計・製作を行った。ジグが満たすべき条件は、①0.1mm の精度での再現性のある距離測定、②簡易な取り扱いと操作性、③容易に入手できる軽量かつ剛性のある素材で製作、である。図 2.4.2-9 は、その概念模式図である（設計図は添付資料 2.4.2-3 を参照）。現在製作中であり、今年度末には実験に利用できる予定である。

4) 送信安定性確保のための構造敏感シート（OZAB）の開発

カプラー板の設置には、平坦で一様な堅さの設置面の確保が最も重要であるが、実際の野外設置ではこれは非常に難しい条件である。そこで我々は、様々な地表面条件に対して、適切に加振部が設置できるように、地表面カプラーと地盤の間をつなぐ「形状と強度を自在に制御できるシート状カプラー」（通称 OZAB）の開発に着手した。ここでは、試作第一号の開発状況について報告する。

a) 基本概念

OZAB は加振部と地表面との間に挿入して用いる。OZAB に要求される主な機能は、①上面は加振部に密着する、②下面是凸凹のある地面の形状に合わせて変形しながら地表面に密着する、③シート内部素材は高い剛性を有する、④上部の運動がそのまま下部の地盤へと線形的に伝達される、⑤簡単な作業・操作で制御ができる、の 5 点である。

b) 形状と強度の制御可能な素材

形状と強度を自在に制御できる素材の選択について述べる。まず重要なのは、「何」によって制御を行うかである。考えられる方式は、①OZAB の内部素材による制御と②外部構造による制御である。OZAB 試作第一号では①の方式による制御を試みることにした。

我々は「制御できる素材」として砂を試験的に採用した。砂は、含水量や受ける実効圧力の変化によって構成粒子間の接触構造が敏感に変化し、力学的性質が著しく変化する性質を持つ「構造敏感物質」の一つである。水分含有量の調節と扱いが比較的容易で、入手しやすい素材であることが採用理由である。

c) OZAB の機能に関する定量的検討

基本概念で述べた OZAB に要求される機能①～④に必要な OZAB 構成要素の力学的性質の定量的検討を行った。

まず、HIT を上下方向に加振する場合の OZAB 上面の強度について述べる。加振部の最大発生力は 2 ton-f であるから、加振部が空中に浮かないようには、加振機本体・地表面カプラー板の総重量が 2 ton 以上あればよい。このとき、加振部と設置面との間に働く応力は法線応力だけであるから、カプラー板の設置面、つまり OZAB 上面は、加振部との接触で破壊されないように平坦で、 $0.89 \text{ ton-f/m}^2 (= 0.0876 \text{ bar})$ 程度の法線応力に対する強度があればよい。

一方、水平加振の場合には、イ) 加振部と OZAB との接触とロ) OZAB と地盤との接触の度合が問題となる。加振部の総重量 2 ton (接触面積 2.25m^2) で、2 ton-f の発生力で運転させる時、加振部が横滑りしないためには、接触面との摩擦係数は 1 以上、せん断応力は約 0.1bar 以上必要である。実際の地表面では摩擦係数は 0.3 以下であるから、これまで山川実験のように、荷重用カプラー板を増設し設置面積を拡大することで、摩擦力を上げせん断応力を低下させることで対応していた。しかし、複数枚カプラー用の巨大な OZAB を製作することは現実的でないので、ここでは一枚のカプラー板の設置で摩擦力を増加させることを考えた。

OZAB 内を減圧すると砂を押し固める圧力を与えることになる。例えば 0.5 気圧に減圧しただけでも砂を固める静圧として 0.5 bar 与えたことになり、約 10 ton の追加荷重を地表面カプラーで与えたことに相当し、摩擦力も大きくなる。しかも、OZAB 内部の強度は非常に高まり、剛体力カプラー板に近い性質をもつことになる。つまり、加振部と OZAB を組み合わせて地盤に設置することは、地表面に直に設置するより、凸凹への密着性が増すと共に、地盤との摩擦力も上げることになる。

以上より、加振部と地表面との接触に関して考慮すべき点は、①地表面カプラー板と OZAB との間の摩擦強度と②地面の強度、の二点に集約される。前者は加振部の重量と OZAB 上面との摩擦係数の問題で、後者は設置場所によって変化する条件があるので、設計には主に①を考慮した。

次に、OZAB 下面のシートの選択について述べる。シートは、①直下の地表面の凹凸形状に整合できる柔軟性、②水を漏らさない防水性、③準真空に対応できる不通気性と強度、④せん断応力に対する適度な引張強度と破断強度、などの機能を有することが必要である。候補として、数種のゴムシートやテント生地などが挙がっているが、試作第一号では、0.15 mm 厚の土木用防水シートを試験採用した。ゴムシートなので延性などの問題点もあるが、優れた防水性と柔軟性、加工が容易であることが選択理由である。

d) OZAB 試作第一号の構造と機能

図 2.4.2-10 は現在製作中の OZAB の完成予想図である。上面は鉄板(1500 mm x 1750 mm x 10 mm)、下面是土木用防水シート(厚さ 0.15 mm)で構成されている。流体や空気が漏れないように、シートを金属平板で上面に圧着し、中には砂と流体の混合物を封入して用いる。空気や流体の注入・排出用パイプを内部に通し、注入・排出用口は OZAB 上面隅に配置した。

OZAB を実際に機能させる仕組みを簡単に説明すると、まず、OZAB 内に流体を注入し加振する。このとき、内部の砂が流動し、下面の凸凹と上面の平面に整合する形状になる。次に、形状を保ったまま流体を排出し、真空ポンプ等を使ってさらに減圧する。すると大気圧とカプラーの荷重による応力が、砂の粒子間に圧縮応力として働き、砂の実効強度と実効剛性が増加する。これによって、上部の加振部と地盤は密着し、加振部は平坦で均等な堅さ分布をもつ面に設置される。つまり、任意形状に柔らかく変形させその形を保ったまま硬化させたり、また必要に応じて軟化させたりが、外部操作で簡単にできる OZAB が実現される。

現在は製作最終段階にあり、間もなく実験開始の予定である。上記の機能のほか、内部の水の排出を効率よくできるようにヒータ機能の追加やシート・内部素材の変更など、まだ考慮すべき点もあるが、最終的には誰もが簡単な操作で扱うことのできる OZAB を製作していく予定である。

(4) 今後の HIT 研究の課題

これまで行ってきた各種の技術開発に引き続く、主な研究課題は、

- ①移動観測に簡便なシステムを実用システムとしてデザインを行う
- ②新型カプラー板と改良型本体の性能試験により、構造や強度等の確認を行うとともに、実用化に向けたマニュアルを作成する
- ③OZAB 試作第一号の加振実験による性能試験の結果から、適切な素材や構造の検討を行い、第 2 号を設計・製作する
- ④震源の動的振動特性を記述する方法を確立し、運転時にも準リアルタイムでモニターできるソフトウェアを開発する

である。いずれも HIT の実用化に欠かすことのできない技術開発と研究であり、今後の HIT の技術開発研究における重要な課題である。

(5) まとめ

本報告書では、1999 年度より開始した可搬型弾性波送信震源 HIT に関する技術開発研究の内容とその進行状況について報告した。現在の HIT はまだ技術開発の段階であり、改善すべき課題や未知の問題点を含んでいると考えられるが、

HIT による構造探査および監視観測の技術は、近い将来我々に大きな恩恵をもたらすであろう。

2.4.3 東濃における電磁アクロス送受信システムと試験観測の結果

(1) はじめに

東濃アクロスシステムの一角をなす電磁アクロスについての概略を示す。

地震波探査が行える音波アクロスが存在するところでなぜ、電磁探査に相当する電磁アクロスを行うかについて説明する。第一に、地震探査^{*44)}と電磁探査^{*45)}では、それぞれ物性値として全く独立な情報を得られ、地下の構造や物性について異なる側面から調べることが可能である点が上げられる。第二に、特に電磁波探査で求まる電気伝導度は水の存在によって桁で変化し、地中の水に関連する状態を調べるために電磁波の方が有利である点が挙げられる。このように弾性波と電磁波の探査を同時にすることによって、地殻内応力、応力に伴うクラックの変動、移動する水の挙動などの推定が行えるであろう。これらの変動は、地震発生場の監視においても重要な観測量であろう。水と地震に関する地殻の構造敏感性は複雑に結びついていると考えられ、そのメカニズム解明のためにも、地震波・電磁波両方の探査を同じ場所で行うことが有用である（図 2.4.3-1）。

このような考え方で電磁アクロスを立ち上げ、実現するために必要な理論上の考察、技術開発を進めてきた。

(2) 電磁探査法としてのアクロスの特徴

電磁探査法の一種としての電磁アクロスの特徴は、

- ① 送受信点間の伝達関数を求める手法
- ② 精密制御信号を用いることによる高い S/N 比のデータ取得
- ③ 拡散現象から波動現象まで統一的に解析
- ④ 分散性の大きな伝播も解析可能

などが挙げられる（図 2.4.3-2）。

①は地下の三次元構造と時間変動を測定するのに最も基本的な情報を取得する観測手法であることを示しており、詳細は 2.4.4 のセクションで説明する。

②は送信信号も精密に制御することによって、受信側でのスタッキングでノイズレベルを下げ、信号成分を取り出せることを示している。このことにより、信号伝播中の減衰・位相ズレを精密測定することが可能である。

③は電磁波を用いた探査を周波数範囲に依存せず統一的に取り扱えることを示している。一般の電磁探査法では、使用する周波数領域ごとに基礎方程式を

近似して用いている。例えば地下数 km の探査を行う MT などでは、周波数範囲は数 mHz から数 kHz の電磁波を用い、Maxwell 方程式を拡散方程式に近似して取り扱う。一方、細かな地層や数 m オーダーの不均質性を見る地中レーダでは、周波数は数百 kHz から数百 MHz で波動方程式を用いる。この両者の中間の周波数領域では近似を使わないで解析する必要がある。そのため周波数領域ごとの近似を使わずに 2 点間の伝達関数を求める解析手法を理論的に求めた。

④は低周波数の領域では伝達関数の分散が大きいのが特徴であるが、その場合にも対処できることを示している。解析に存否法を用いると狭い周波数範囲内のデータから群速度を求めることができ、周波数範囲を少しずつ変えていくことにより、群速度の細かい分散性を明らかにすることが可能である。

(3) 東濃電磁アクロスシステム

前章で示したように、アクロスでは使用する周波数範囲を特定する必要はないが、先行している音波アクロスのことを考慮し、

- ① 音波アクロスの記録装置を共用できること
- ② 音波アクロスとの相補的な探査を目指す
- ③ 試験結果を通じてハードウェアの必要な性能を導き出す
- ④ アクロスによる探査に適した解析法の開発
- ⑤ 空中電磁探査などで行われた東濃鉱山周辺 10km 四方の結果との対比を行うことが目標である。そのため、まず遠くまで信号が届き、かつ音波アクロスで用いている 100Hz 以下の低周波数範囲の探査実施にしばり、それに必要な探査システムの開発を進めてきた。

1) 送信システム

送信システムは東濃鉱山敷地内に設置した（図 2.4.3-3）。

〔電極〕 低周波数で効率良く地下に電磁波を送れるように、接地電極間に電圧をかけ電流を投入する方法で送信を行うことにした。電極は東濃鉱山敷地内で間隔をできるだけ広く取るように三点設置した。その三点は辺長およそ 100m の三角形の頂点に位置する。W 電極は試錐孔のケーシング^{*46)}（地表付近のみで長さ 6m）を用い、N,S 電極は長さ 1m 程度のステンレス棒を接地抵抗低減剤と混ぜながら 8 本ずつ打ち込んだ。接地インピーダンス^{*47)}は極力抑えるようにしたが、ケーシングで 1Ω、他の 2 点は 20Ω 程度であった。

〔制御送信装置〕 電極をつなぐケーブルを鉱山倉庫内のアクロス観測室まで引き込み、送信装置と接続した。精密に位相制御された信号を送信するために、送信機器は GPS 時計に同期させている。信号発生方法は現在、二方法から選択でき、一つは安定化直流電圧入力から GPS 時計に同期したスイッチングによつ

て交流出力とする方法である。この装置は 48V, 5A の電力を出力可能である。もう一つはパワーアンプで、ファンクションジェネレータ^{*4 8)}などで作った信号を電圧増幅して出力する装置である。こちらは最大出力 150V, 2A の装置を使用している。

[送信信号監視装置] これらの装置から出力される信号はコンピュータでモニターし、電極間電圧・電流を連続記録している。これは伝達関数を求める際の送信側の波形を把握しておくために必要であるのと同時に、送信点近傍の状態の変動もモニターできることになる。

2) 受信システム

送信点から 2.2 km 離れた東濃地科学センター内に、電磁アクロス定常観測点を設置した（図 2.4.3-4）。

[電極] 受信電極は微小な電位差や正確な電位差波形を記録できるように、銅・硫酸銅水溶液の非分極電極を用いた。電極間隔は 40m で、東西・南北の電場 2 成分を観測している。

[データロガー] データ取得も GPS 同期していることが必要であり、また時間区間蓄積型記録計を用いることにより、データ量を増やさずにデータの S/N 比を向上できる。現在は DATAMARK LS8000 を用いている。

[臨時観測点] 定常観測点の他に、鉱山周辺の電磁波放射の様子を調べるためにサイクル機構の試錐孔用地内などで臨時観測を行った。範囲は鉱山からの距離約 3km までの 5 点である。臨時観測点では、金属棒電極による東西・南北電場 2 成分の測定を行っている。

（4）試験観測

前章で述べた送受信システムを用いた試験観測を行った。結果が示されている観測期間は平成 12 年 1 月から現在までである。また、実験期間中、送信信号は 0.5Hz 周期の矩形波を用いた。観測は 200Hz サンプリングで行った。

1) 時間連続記録

まず、送信信号がどのようなもので、受信点でどのようなものが観測されるかを見た。図 2.4.3-5 には、送信している信号の様子、およびそれと同時刻に観測された受信信号を示している。送信モニターで観測された電流と電圧は 0 秒で符号を変え、0.5 Hz であることが確認できる。このような矩形波に近い送信信号なので、基本周波数の奇数次高調波も同時に送信されている。

送信点から約 150 m 離れた監視区域内の観測点の NS 成分では、時間記録データを見ただけでも 0.5 Hz の矩形波が到達していることがわかる。パワースペ

クトル密度でみると高調波までよく分かりピークが鋭いことから、装置の同期精度が良いことも確認できる。ただし、信号のピークは商用電源からのノイズと比べると小さい。

一方、送信点から約 2.2 km 離れた東濃地科学センターの NS 成分の観測では、時間変動とパワースペクトル密度とともに信号が届いているように見えない。

2) スタッキングの効果

遠距離において微小な信号を見るために、センターでの NS 成分の結果についてスタッキングを行った。図 2.4.3-6 には、200 秒のデータから得られた 10 Hz までのパワースペクトル密度と、200 秒のデータを 145 回スタックしたデータのスペクトルを示した。200 秒のデータでは見られなかったピークが 145 回スタックした結果では見えてくることがわかる。これは、ランダムノイズのパワースペクトラム密度がスタッキング時間の平方根に反比例する一方、送信信号は一定であるので、信号が到達していたことが確認できた。逆に 200 秒のデータではノイズレベルがシグナルレベルより大きいか同程度であったため信号が確認できなかったことが分かる。約 8 時間 (200x145 sec) のスタッキングでの基本周波数の信号の S/N 比は約 10 である。

つぎに、スタッキングとともにある周波数成分がどのように変化するかを見た。送信信号に含まれている周波数は、スタッキングが少ない間は値の変動が大きいが、ある程度スタックされていくと一定値に落ち着くことが分かる。一方、信号成分ではない周波数では、変動しながらもだんだん時間と共に減少していくことが分かる。

3) 距離減衰

スタッキングによって求められた受信信号が、送信点からの距離に応じてどのように変わっていくかを見た。比較するのは各観測点で観測された 0.5 Hz の電場の絶対値である。送信がダイポール放射^{*49)} とみなせるので、ダイポールの軸からの角度に応じた絶対値の補正を行っている。送信点からの距離 200 m から 3200 m の間に信号の絶対値が 10^{-4} V/m から 10^{-6} V/m まで変化しているので、距離約 3 km 程度までは、距離依存性はほぼ距離の 2 乗に反比例するという結果が得られた。これらの信号成分の大きさは商用電源によるノイズレベルよりも小さかったにも関わらず、送信信号が確認できている。

4) 受信信号の周波数依存性

まず伝達関数の絶対値の周波数依存性を求めた (図 2.4.3-7)。ただし、距離依存性は確かめたので 0.5 Hz 信号を基準にして高調波成分の振幅比がどのような

依存性を示すかを見た。比較したのは送信点からそれぞれ 200 m と 1300 m の監視区域と DH9 の観測点である。どちらも高周波数になると減衰しているが、遠距離の DH9 の方が振幅減衰の大きいことが分かる。

次に各観測点では南北・東西の 2 成分を観測しているので、周波数成分の軌道を水平面で表してみた。各周波数成分は一般には橢円で表されるので、その長軸と N 軸となす角度 θ と南北成分に対する東西成分の位相差 ϕ を、放射方向を特徴付けるパラメータと考え、これらの周波数依存性を求めた。比較したのは、送信点からそれぞれ 1300 m と 2200 m 離れた DH9 とセンターでの観測結果である。位相差 ϕ の結果は周波数依存性としては同じトレンドを示しているが、 θ の方は傾向が異なっていることが分かる。この違いは、信号の伝播途中および受信点での地下の特性を表しているのではないかと考えられる。これらの詳しい検討は現在進めている。

(5) まとめ

音波アクロスと相補的な探査が行えるような電磁アクロスシステムを開発・研究してきた。これまでの実績は図 2.4.3-8 にまとめたように、

1) 低周波数での探査の開発：東濃鉱山とセンターに送信装置・定常観測点の設置

2) 約 3 km 離れた観測点で送信信号を確認

残っている問題点としては、

①ハードウェアの改善：特に高出力化と高周波数化

②観測点：特に人工物による影響を避ける、および影響の評価

③得られたデータから地下情報への焼き直し

などが挙げられる。特に電磁波の場合、送信信号をデザインすることが音波アクロスに比べ容易なので、現在使っているスイッチングによる送信と波形増幅による送信方法の特性比較を通じて、送信方法別による違いも検討課題の一つである。東濃電磁アクロスシステムとしては、実際に音波アクロスとリンクした探査を行えるようにするのが課題である。

2.4.4 電磁アクロス信号論・レーダ領域数値実験・MT領域方法論

－信号処理の視点から見た探査方法の最適化－

(1) はじめに

アクロス技術開発の今後の方向性を検討するために、信号処理の視点からアクロス信号について考察する。つまり、アクロスの目指す目的を達成するのに適した信号を理論面から検討する。ただし、地震波アクロスと電磁波アクロス

ではハードウェア実現が可能な信号が異なるので、本稿では電磁波アクロスに焦点をあてた。

(2) アクロスの目的と実現方法

アクロスの目的は3次元構造とその時間変化を測定することである。図2.4.4-1に示すように、3次元構造を測定するにはその情報を集めやすい量を使う必要がある。また、構造の変位量は定常量に比べて非常に小さいと考えられるので、これを検出するには精密測定が必要になる。また、連続観測も要求される。

これらの要求は次の3つの条件からなる適切な信号方式を用いることで満足できる。

- ①複数周波数を含む時系列の測定
- ②同じ波形の繰り返し出力・スタック保存
- ③条件を満たす波形の設計・使用

最初の条件は3次元情報を得るためにものである。図2.4.4-2にある2つの電磁探査法のうちインピーダンスを用いる方法は、受信点近傍の2次元構造の探査に適している。これに対し、電場・磁場の時間変化を測定すると3次元構造の情報を得やすい。また、単一周波数よりも複数周波数を使用する方が多くの情報を得られる。

2番目の条件はノイズレベルを下げ、精密測定を実現するためのものである。このために、同じ波形を繰り返し送信し、受信側でこれを何周期かごとにスタックする。

最後の条件はS/N比を向上させ、かつ一定にするためのものである。ただし、S/N比が定義される量はデータの解析方法に依存する。そこで、この条件について説明する前にデータの解析法について触れておく。

(3) 解析方法

1) 解析モデル

アクロスで使用する精密制御信号は従来のコントロールソース法^{*50)}と比較して量的な違いを持つ。しかし、この違いは従来非線形であった解析モデルシステムを線形システムに帰着させるという質的違いをもたらす。従って、アクロスで使用するモデルと解析方法は従来のコントロールソース法とは異なるものになる。

送信点から送り出された電磁波は図2.4.4-3のように3次元構造中での反射や透過を繰り返し、複数の経路を経て受信点に至る。これをレイパス的イメー

ジで捉えるとマルチチャンネルの伝達関数を持つモデルで表現できる。このモデルの受信信号は送信信号と伝達関数のコンポリューションであり、このシステム全体は非線形である。

従来のコントロールソース法は送信信号が未知の部分を含むが、アクロスの精密制御された送信信号は既知である。従って、アクロスの場合には受信信号から送信信号の影響を取り除くことができ、図 2.4.4-3 の非線形システムは図 2.4.4-4 下部に示す線形システムに置き換えられる。このときには伝達関数が間接的な測定量となる。

さらにこのシステムを変形すると個々の関数を直列につなぎ変えた形になり、プロニー型の自己回帰モデル^{*51)}で表現できる。従って、このモデルのパラメータを推定すれば個々のチャンネルの伝達関数を推定できる。

2) 解析例

解析の具体的なイメージをつかむために人工的に合成したデータとその解析結果を示す。図 2.4.4-5 に示す 2 層水平構造に 0.5MHz の矩形チャープ信号^{*52)}を送信する設定を考える。電磁波のパスは矢印で示した 2 つを仮定し、受信信号には 20 dB のランダムノイズを付加する。

解析では図 2.4.4-6 のように送受信信号をまずフーリエ変換し、除算により伝達関数に直す。次に、この伝達関数をプロニー型の自己回帰モデルに当てはめてパラメータ推定を行う。その結果は図 2.4.4-6 下図のようになり、解析用データと推定値が良く一致した。また、インパルスレスポンスにあたるプロニースペクトルでは、2 つのピークが直達波と反射波の到達時間を良く表している。

(4) S/N 比の制御

1) 波形の設計

上述の解析方法を想定すると S/N 比は伝達関数の次元で定義される。ただし、送信信号のノイズが小さい場合には、伝達関数の S/N 比は受信信号のそれとみなせる。

従って、S/N 比を大きくするには、受信信号のスペクトル振幅を大きくすればよい。そのためには、狭い周波数帯域の信号を使用し、その遮断特性を急峻にする。また、解析の精度を上げるには受信信号の S/N 比を一定にする必要もある。

このような要求はディジタル信号を用いることで簡単に実現できる。図 2.4.4-7 は、一様媒質の探査に適した送信信号波形を設計した例である。振幅特性に伝達関数をかけるとノイズと平行な曲線になり、S/N 比が一定になるよ

うに設計してある。この例では周波数帯域は 2.0–4.0 Hz、サンプリング間隔は 5.0 ms、サンプル数は 1000 である。この場合の離散周波数の間隔は 0.2 Hz となり、対象帯域には 11 の離散周波数が存在する。

時系列振幅が最小となるように、この振幅特性にランダムな位相を与えると図 2.4.4-7 下の時系列波形になる。この波形の繰り返しを送信信号として使用すれば高精度の結果を得ることができる。

2) 最適化

上述の波形設計法ではノイズの特性と伝達関数が既知でなければならぬ。そこで、実際には図 2.4.4-8 に示す手順で設計と探査を交互に行う必要になる。まず、ノイズや装置の特性を測定した後、表層抵抗等の予備的情報を用いて直達波の検出に適した波形を設計する。次にこの信号を使って伝達関数を測定し、その結果を利用して透過や反射波をも検出しやすい波形に修正する。この操作を繰り返すことで、最終的に最適な波形を得ると共に高精度の伝達関数を決定することができる。

(5) おわりに

現在までに 2 次元精密測定を行うための信号方式について理論的に考察した。特に解析モデルについて整理し、従来のコントロールソース法との違いを明らかにした。また、S/N 比を制御するための波形の設計方法も考案した。この方法を取り入れることで従来得られなかった高精度の結果を得られると期待できる。

今後は理論とハードウェア技術やコスト等との妥協点を探りつつ、目的に近づくことが課題である。

2.5 今後の展開

(1) 平成 12 年度に行う予定の仕事

1) 東濃アクロスシステムの技術レベル向上と試験データ取得解析

現路線の延長飛躍；連続観測試験データの蓄積と解析

2) 神岡電磁アクロス基準信号送信所の立ち上げ

スーパーカミオカンデ^{*53)}、重力波望遠鏡^{*54)}と併せた神岡科学 3 点セットの一つとして、活断層監視とリンクさせて地下監視システムの実用プロトタイプを作る。東濃は立地的に不適切。

3) 個別理論と個別技術の拡充

各報告で詳細に述べた。テクニカルドキュメントとして重要なのは次の5件。

[アクロス術語集]

アクロスにはこれまでなかった新しい概念、手法、装置があり、既にある術語でも新しい意味付けができた場合もあるので、それらを編纂する。

[アクロスプロトコール]

将来、信号の送信受信が異なる領域で行われると予測されるので、時間空間座標のとり方、データフォーマットや記号の混乱、さらに信号の混信、などの問題が発生する。(既にアクロス研究グループの中でも混乱発生。) 遠からず、多チャンネル多重送受信を始めるので、周波数バンド割り当て(例えば、地中音波管理法)などが必要になる。

[アクロスマニュアル]

アクロスは従来の地下探査法と質的にも似て非なる部分があるので、適切なマニュアルが発展と普及に必須と考えられる。

[装置技術の規格化と商品カタログ化] 確立した装置を広く使えるようにするために、適切な規格化をしてカタログ商品にして普及を図る。多様なユーザーの厳しい要求が技術水準の向上に役立つと考える。

[新規開発に着手すべき技術とその具体的設計ポイント] 例えば、アクロスアレイ用地震計、遠距離音波送信装置、など

4) 論文作成出版

国際学術誌への投稿(これまでの出版がないのは最も怠慢とされて来た。)
弁明: 日進月歩で常時動いてルーチンにならない研究現場での論文出版は現研究スタッフの力量を超えた仕事であった。

5) 最終報告書の作成

- ・成果のとりまとめ
- ・地震予知研究のための日本列島地下監視システムの具体的提案
- ・次期研究計画の提案(詳しくは後述)

(2) 現状のレビューとしてのまとめ

アクロスは、レーザーのように位相のそろった波を使う精密遠隔観測監視システムである。理論も要素技術もほとんど存在しなかったこの新技術は、理論体系と個別要素技術の開拓、試験観測と経験の蓄積の結果、地震場などの監視観測に刷新的な実用技術になることを実証できた、と考えている。

しかし、アクロスは底が深い。ミリメートルスケールの物性計測から地球の巨大構造解明まで対象になる。質的な原理面でアクロスは既に確立したと述べたが、現状は現在も原理面で次々と新しい着想がでて、できないと思っていたことが技術面での開発と合わせてできるようになる。例えば、弾性波の伝播時間測定の精度を1マイクロ秒（地震波が5ミリメートル伝播する時間に相等）にすることもできるだろう。多チャンネル多重バンド送受信は、地下情報データ取得に刷新をもたらすはずである。適切な研究投資を行えば10年以内に高分解能力カラーホログラフィを実現できよう。予想される計算装置の進歩を考慮すると、必要なアルゴリズムの開発研究を行うことによって、リアルタイムのカラーホログラフィに進化すると考えられる。ここでカラーと言うのは、周波数依存性のことである。それは幾何学的現象的な「構造」だけでなく、物質の質の物理的、物理化学的「状態」を反映する量であるから、物質の構造敏感性についての物質科学的研究と合わせることによって、地下状態の本当の解明と監視を実現できるであろう。現時点では、アクロスに代る、あるいはそれより優れていると思えるアプローチを空想することができない。

このようなアクロスを実用技術として具体化するには、基礎的研究から実地現場での経験蓄積まで、相応の研究投資蓄積を必要とする。ところが、小規模テストフィールドとしての東濃の立地条件では、地下構造を試験的にでも決定できる送受信点分布は確保できないし、既存の物理探査法の結果と比較すべき観測研究を行う体制条件とハードウェアは供給されていない。また、JNCの本来の使命が限定されているから、社会に役立つ重要な研究開発課題（例えば地下資源開発、災害対応技術、地震火山予知研究）でも、それらに必要な基礎研究と応用研究開発を推進するのに馴染まない。また、海域で使える方式のアクロスを実現する構想と技術的展望もあるが、陸域地下構造という名前の制約からこのような研究も困難である。東海地震の想定断層面の浅部は海域までの広域にあり、日本附近の他の全てのプレート間巨大地震も海域に発生する。

このような状況を勘案したとき、現時点で最も重要なことは（目前の研究開発課題の推進は当たり前）、次期の開発研究計画の企画にある。

（3）次期研究計画の暫定提案

基本方針は次ぎの3つに要約してよいのではなかろうか？

評価委員のご意見を承り、その線で考え方の再検討や変更、および具体化の詳細計画検討を平成12年度の課題の一部としている。

1) 基礎的な研究開発を行う研究組織を確保

[研究]

地球理工学としての基礎研究を推進し、高分解能の周波数領域3D構造順逆問

題、長波長の波を使うホログラフィの理論、アレイ送信理論と技術、物質の構造敏感性の研究、地殻内の H_2O が関与する物理過程と電気化学的特性、遠距離送信用の装置の開発、高信頼度地震計の開発、などを行う。さらに地震予知方法論の研究も行う。

[開発]

社会工学的に重要な新しい手法の開拓を目標とし、人工稠密市街地域で地下埋没活断層の調査、軟弱地盤の評価、地下水流动場の評価、土木建築構造物の非破壊検査など、実社会のニーズに即応する技術の開発を行う。

[教育] 研究開発だけでなく一種のスクールの機能をもつ。これまで存在しなかったアクロスには、既存の物理探査と似ているが基本的に異なる側面があるので、従来技術のベテランには逆に分かりにくい。現場技術者の実習の場。

2) 特定広域(例えば東海)における地震発生場の監視と技術開発

[既存監視法とのリンク]

従来の音波放射(極微少地震)と電磁放射(SES)による地震発生場の遠隔監視に音波と電磁波アクロスアレイによる能動的監視をリンクさせ、地震発生のはるか前から事後の経過で何がどう起こるか継続的に観測を行う。このような観測的研究の実地での経験積み上げによって、能動的観測技術を磨きあげてゆく。SESと電磁アクロスの組み合わせは未開拓分野で特に重要である。

[観測システム・手法の構築]

広域監視観測には相応の戦略と技術を必要とするので、その開発推進を図る。例えば、日本列島地下常時監視システムの構築には、高速道路にそった送信アレイを具体化する、海域の観測手法の具体化など、多数の課題がある。

[想定されるフィールド] おそらく東海が最も重要だと考えられる。他には、釜石を中心とした三陸、紀州から南の南海道、あるいは内陸地震を対象にした松代、富士川沿いなどが考えられる。個々の地域の特徴などを見極めた監視計画立案も課題である。

3) 特定小スケル(数 km) 地域の特定問題に対する構造解析監視観測と技術開発

[観測システムの技術開発]

特定小スケールの探査においては、信号送信距離が限定されており、ある意味で機動的で簡便な手法が有用と考えられる。そういう方向での技術のレベルアップは関連する全てのアプローチに共通の基本課題であり、(2)の広域監視の基礎と補完の役割も担う。さらに例として以下に述べるフィールドで必要とされる調査や監視には、その地域の個性と対象に合わせた最適化が必要である。

[想定されるフィールド]

内陸地震予想発生域、噴火が予想される特定火山地域、地熱開発地域、場所が限定された断層発生予想地域、地滑り崩落予想地域など。

4) 全体としての考察

上には典型的な 3 つの方向を示したが、その相互関係を考えると相互補完関係にあると見られる。まず、上の 3)から始めて 2)、1)と逐次それぞれの問題点を以下に検討する。

[3)について]

従来地下構造や状態の実効的遠隔監視技術と言えるものは存在していないので、アクロスはこの目的のために掛け替えのない新兵器であると考えられる。従って、他にも様々な候補領域があるが、現時点では JNC が地下構造解明とそこに起こる諸過程の監視技術の開発に速やかに着手することが適切であろう。

しかしながら、JNC の使命は、技術の開発立ち上げよりも、国より与えられた使命の達成に必要な課題を既存の技術の組み合わせで速やかに達成していくべき状況にある。いわば、試行錯誤の繰り返しで積み上げて新技術を開拓する、あるいはフロンティア研究からアクロスの技術移転を受けるゆとりはない。従って、JNC とは別の組織に技術開発とそれに必要な基礎研究の場を設定し、そこから必要な技術とノウハウをカタログ商品のようにして JNC に供給する手立てを講ずることが肝要であると考えられる。

このような考察のもとに、上の 1) を項目に上げたのである。

[2)について]

これは、神戸地震発生を契機に地震総合フロンティア研究立ち上げの動機ともなった国家的目標である。我々の判断では、日本（世界）の地震予知研究に、アクロスという新しい強力な具体的手段を他の国に先駆けて開拓した。時間スケールの大きい地震場の時間変動の監視には、地震発生よりはるかに前からの継続的観測データを必要とするから、できるだけ早く着手するのがよい。しかし、この計画の実施には大きな経費と組織、さらに入材を必要とするので、気象庁や科学技術庁の機関など、比較的強力な組織が担当するのがよい。しかしながら、大きな組織は立ち上げに長期間を要するのが普通で、しかも場合によっては出発の核となる人材を擁していない場合もある。

アクロスは最近提案され研究者人口が少ないので、適切な人材の即確保は困難かも知れない。しかも、広域地震発生場の諸問題は、単にアクロスの技術だけでなく、他の多様な手法と諸研究を包括した総合科学工学の性格をもつから、学術研究と実用研究の密接な協力体制のとれる場が必要であろう。大学の研究者の知恵と才覚を必須のものと考えるが、国立大学教官の散漫な集団では扱い

かねる面もある。では、具体的に何処がどのようにこの計画を推進するのがよいか、という問題になると、その判断は、我々の力量と立場を超える。ただ、その検討に時間をかけているのは適切ではない。このような視点で考えたとき、時限でやや小規模な研究組織で、とにかく速やかに出発するのが適切であろうと判断する。そこで 1) の検討に入る。

[1]について

上で 2) 3) の両方にあった問題を解決する方向としての提案がこれである。実用的な目的をもち、それに必要な基礎的な研究と教育や人材育成も行うあまり大きくない機能的な時限の組織を想定する。アカデミックでリベラルな雰囲気を確保し、大学の研究者の知恵や創造性、人材育成のノウハウまでを吸収できることが肝要である。こう考えると、我々には理化学研究所の国際地震フロンティアの進化発展型様態が最適ではないかと思われる。他に思い付けないことの他の理由は、次のとおりである。

①理研の国際地震フロンティアでは SES の観測的研究を推進してきた。これは電磁放射の受動監視に基づくが、SES の信号伝播経路が未知であるため、電磁信号源を同定できない。電磁アクロスは、SES 観測用電極を共用してその近傍の地下の電気的性質の空間分布を解明し、また近傍の電気的物性の変動監視を能動的に行うことができる。これは、理研の従来研究と JNC のアクロス研究のジョイントが $1 + 1 = 8$ にもなる大きな発展をもたらすと予測される。

②理研の地震フロンティアの研究拠点は東海地震の想定断層面真上の東海大学にあり、東海地震の広域遠隔監視の諸問題を能動的主体的に検討し、かつ実地に着手してゆく最適の地理的環境にある。これは上の(2)の核となる研究基盤を創造するのに最適の場所であろう。

③すなわち御前崎（東海大学）と東濃（地中音波アクロス信号送信所が稼動、電磁アクロス信号送信も間もなく開始）を結ぶ線は、アクロスを含めて密接な協力関係にある名古屋大学が東海地震地表監視観測計画をもち逐次充実してゆく計画であると聞く。この観測測線を北方に延長すると、現在京都大学の安藤雅孝教授（来る 4 月から名古屋大学に転任）がチームリーダの活断層監視の跡津川断層系に至る。その周辺には、理研グループの SES 観測点が多数分布する。因みに、アクロスグループは H12 年度には、理研グループと安藤グループと協力して、跡津川（神岡）に地中電磁アクロス送信所を設置する予定である。これらは、これまで地震総合フロンティアと称しながら、それぞれが立ち上げに忙しく総合の実がなかったのを、日本で最も重要と考えられる東海地域に多様な手法と人材を結集して「総合の実」を上げることができる。

④理研は成立から現在まで、そのリベラルなスタンスと実用研究のバランス

を継承しており、我が国の研究組織としては研究者には最も魅力のあるところであり、有為の研究者を集めやすい。理研フロンティアの研究拠点はJNCの東濃とも地理的に近く、地下の遠隔監視技術の開発と供給、技術移転、人材養成にも適している。

地震発生に関する研究 研究業績一覧

1998年陸域地下構造フロンティア国際ワークショップ

International Workshop on Frontiers in Monitoring Science and Technology
for Earthquake Environments at Tono Geoscience Center

1. Hasada, Y., Yoneda, A., Nomura, T., and Kumagai, H. (1998): ACROSS as a general measurement system of a linear system -Example of material characterization for a mm scale sample in laboratory, AP3-1.
2. Hasada, Y. and Kumagai, H. (1998): Numerical experiments of the complex Sompi cepstrum method using synthetic wave forms. AP3-3.
3. Hirai, M. and Kumazawa M. (1998): Linear motion-type seismic source utilizing two arrays of rotating magnets -Theory of an ideal seismic source with the least energy loss without eigenfrequency. AP1-5.
4. Kobayashi, K., Yamaoka, K., Miyakawa, K., and Kunitomo, T. (1998): Monitoring of the temporal variation of the fault after 1995 Kobe earthquake with ACROSS system. AP1-13.
5. Kumazawa, M. (1998): A new light and new eye to look into the solid Earth and a potential monitoring methodology of geodynamic states - Introduction to ACROSS. A1.
6. Kumazawa, M. (1998): Theoretical basis, development and prospect of EM ACROSS -An approach unifying low frequency MT and highfrequency radar. A2-2.
7. Kumazawa, M. (1998): Sompi cepstrum analysis method for general wave element deconvolution -Towards the real time color holography. A2-3.
8. Kumazawa, M., Nakajima, T., and Hasada Y. (1998): Theoretical basis of EM ACROSS and its prospect -General theory on the electromagnetic signal transmission in the Earth as a conductive dielectric medium. AP2-1.
9. Kumazawa, M., Hasada, Y., Nakajima, T., Suzuki, K., and Nishiyama, E.

- (1998): Wave element deconvolution of radar data by means of Sompi cepstrum to analyze the travel time and physical dispersion of electromagnetic wave transmitted between the two bore holes. AP3-2.
10. Kunitomo, T., Inoue, S., Watanabe S., and Kumazawa M. (1998): Microhertz control technology of frequency -modulated rotary type transmitter to radiate a set of plural sinusoids with a 20 tonf in amplitude. AP1-2.
 11. Kunitomo, T. and Kumazawa M. (1998): A strong demand for the high fidelity seismometers with stability and low cost -Results of the measurements of frequency characteristics. AP1-7.
 12. Miyakawa, K., Kobayashi, K., Yamaoka, K., and Kunitomo, T. (1998): Temporal variation of phase in ACROSS signals for monitoring the underground states -A trial of detecting the tidal strain. AP1-12.
 13. Moriguchi, K., Miyakawa, K., Yamaoka K., and Kumazawa M. (1998): Linear motion-type seismic source utilizing electromagnetic force - Experiment on its versatile utility and performance. AP1-4.
 14. Nakajima, T., Kumazawa, M., Kunitomo, T., and Tsuruga, K. (1998): Current approach and the preliminary results on the EM ACROSS utilizing the diffusional transmission of electromagnetic signals in the MT range - DF (diffusion field) ACROSS with low frequency electromagnetic signals. AP2-4.
 15. Nakano, M., Miyakawa, K. Nakatani M., and Kumazawa M. (1998): Method of simultaneous calibration of moving-coil type seismometer to detect the unbiased across signals. AP1-8.
 16. Ogawa, K., Kumazawa M., Suzuki, K., Nakatani, M., Ishihara, K., Miyakawa, K., Ikeda, N., Hasada, Y., Kunitomo, T., Fujii, N., and Yamaoka, K. (1998): Portable type ACROSS technology for geophysical prospecting and the experiments in the geothermal area in Yamagawa - Towards the technical development of handy tool for the field works on routine basis. AP1-6.
 17. Takei, Y., Suzuki, K., and Kumazawa, M. (1998): Basic theory of active seismic source -Radiation mechanism, force type, efficiency, stability, controllability, mechanical constraints and so on. AP1-1.
 18. Takei, Y., Hasada, Y., Yamaoka, K., Tsukada, S., Suzuki, K., Nakano, M., Miyakawa, K., Ikeda, N., Inoue, S., and Kumazawa, M. (1998): The first successful experiment of seismic ACROSS in the Nagoya University

campus. AP1-9.

19. Tsuruga, K., Kunitomo, T., and Kumazawa, M. (1998): Characteristics of ground motion driven by a rotary-type ACROSS at the Tono test site. AP1-3.
20. Yamaoka, K. (1998): General theory and overview of the AC ACROSS. A2-1.
21. Yamaoka, K., Kunitomo, T., Ishihara, K., Hasada, Y., Miyakawa, K., Ikeda, N., Yamada, M., Nakano, M., Kumazawa M. (1998): The first successful experiment of remote synchronization of ACROSS system using GPS clock. AP1-10.
22. Yamaoka, K., Ikeda, N., Miyagawa, K., Kunitomo, T., and Kumazawa, M. (1998): Array observation of ACROSS signals at Mizunami and Yamagawa and the result of data analysis. AP1-11.
23. 熊澤峰夫・藤井直之・小川克郎・山岡耕春・渡辺誠一郎・熊谷博之・鈴木和司・石川秀蔵・山田守・中野優・羽佐田葉子・西原真仁・池田典宏・井上修一・宮川幸治・福和伸夫・石原競・三浦和孝・山田聰・武井康子・東原紘道・島崎邦彦・新谷昌人・中谷正生・東田進也・安藤雅孝・西上欽也・山川稔・坪田浩二・長谷川健・花木達美・圓尾等・長谷吉二・小金井義則・大島宏之・立石博 (1996) : アクロスシステム開発研究の現状報告, 地球惑星科学関連学会 1996 年合同大会予稿集, E21-03.
24. 熊澤峰夫・石原競・鈴木和司・小川克郎 (1996) : SH 波発生用アクロスの地表面カップラー(I), 日本地震学会講演予稿集 1996 年度秋季大会, P42.
25. 國友孝洋・石原競・池田典宏・山岡耕春・熊澤峰夫・小川克郎 (1996) : 回転型 ACROSS の周波数安定性, 日本地震学会講演予稿集 1996 年度秋季大会, P47.
26. 小川克郎・熊澤峰夫 (1996) : 音波と電磁波のアクロスによる地殻内の水と応力と物理的状態の常時リモートセンシングへむけて, 日本地震学会講演予稿集 1996 年度秋季大会, P45.
27. 山岡耕春・武井康子・熊澤峰夫・藤井直之・小川克郎・熊谷博之・鈴木和司・渡辺誠一郎・東田進也・中野優・羽佐田葉子・池田典宏・井上修一・宮川幸治 (1996) : 火山の地下構造をさぐる ACROSS システムの開発, 地球惑星科学関連学会 1996 年合同大会予稿集, C22-11.
28. 山岡耕春・國友孝洋・花木達美・石原競・池田典宏・羽佐田葉子・宮川幸治・中野優・熊澤峰夫 (1996) : 精密制御定常震源と時間区間蓄積記録装置の GPS 刻時による遠距離同期計測実験, 日本地震学会講演予稿集 1996 年度秋

季大会, P46.

29. 池田典宏・山岡耕春・国友孝洋・平井誠・小川克郎・宮川幸治・小林和典・熊澤峰夫 (1997) : ACROSS のアレイ観測と解析, 地球惑星科学関連学会 1997 年合同大会予稿集, Ad-p003.
30. 熊澤峰夫・國友孝洋・山岡耕春・小川克郎・花木達美・湯佐康久・中司昇・何培明・青木和弘 (1997) : 東濃地科学センターにおけるアクロス研究 □現状と展望□, 地球惑星科学関連学会 1997 年合同大会予稿集, C42-P01.
31. 熊澤峰夫・鈴木和司・石原競・中谷正生・小川克郎・三浦和孝 (1997) : HIT 型アクロス(II)震源装置の設計と製作, 地球惑星科学関連学会 1997 年合同大会予稿集, C42-P02.
32. 熊澤峰夫・武井康子 (1997) : 地下構造ホログラフィ用アクロスアレイ, 地球惑星科学関連学会 1997 年合同大会予稿集, C42-P05.
33. 熊澤峰夫・中野優・中谷正生・宮川幸治・山岡耕春・小村英智・関淳・小白井敏明・新谷正人 (1997) : 地震計の不安定性と精密加速度計測系の開発 - アクロス信号の信頼できる 取得のために, 地球惑星科学関連学会 1997 年合同大会予稿集, C42-P10.
34. 熊澤峰夫・羽佐田葉子・熊谷博之 (1997) : 拡散場アクロス, 日本地震学会 講演予稿集 1997 年度秋季大会, P58.
35. 國友孝洋・熊澤峰夫・山岡耕春・石原競 (1997) : 回転型 ACROSS の精密周波数変調制御, 地球惑星科学関連学会 1997 年合同大会予稿集, C42-P07.
36. 國友孝洋・平井誠・熊澤峰夫・宮川幸治・小林和典・山岡耕春 (1997) : 回転型 ACROSS の周波数変調制御による多チャンネル同時送信の精度, 日本地震学会講演予稿集 1997 年度秋季大会, P60.
37. 宮川幸治・國友孝洋・山岡耕春・熊澤峰夫 (1997) : ACROSS による地震波速度構造の時間変化の検出, 地球惑星科学関連学会 1997 年合同大会予稿集, C42-P10.
38. 小川克郎・熊澤峰夫・熊谷博之 (1997) : 電磁アクロス : 電気電動度構造解析の新手法, 地球惑星科学関連学会 1997 年合同大会予稿集, C42-P04.
39. 山岡耕春・國友孝洋・熊谷博之・石原競・中谷正生・中野優・羽佐田葉子・池田典宏・宮川幸治・奥田隆 (1997) : 淡路島における ACROSS 探査実験 1. 実験の概要, 地球惑星科学関連学会 1997 年合同大会予稿集, C42-12.
40. 山岡耕春・小林和典・熊澤峰夫・安藤浩・岩崎慎 (1997) : DATAMARK LS8000SH を用いた ACROSS 時間区間蓄積型記録装置, 日本地震学会講演予稿集 1997 年度秋季大会, P59.
41. 熊澤峰夫 (1998) : 地震フロンティア「アクロス研究」の現状および地下の高分解能監視機能確保に不可欠な高性能地震計スーパーアレイ構築の必要

- 性, 地球惑星科学関連学会 1998 年合同大会予稿集, P21.
42. 熊澤峰夫・中島崇裕・羽佐田葉子 (1998) : 電磁アクロスの一般理論と実用化の意義, 日本地震学会 1998 年秋季大会, P-B07.
43. 熊澤峰夫・中島崇裕・國友孝洋・鶴我佳代子・鈴木敬一・西山英一郎・坪田浩二・長谷川健・藪内聰 (1998) : アクロスレーダの開発とその展望, 日本地震学会 1998 年秋季大会講演会, P86.
44. 熊澤峰夫・中島崇裕・羽佐田葉子・鈴木敬一 (1998) : 連続波地中レーダデータの存否セプストラム解析, 日本地震学会 1998 年秋季大会講演会, P87.
45. 國友孝洋・鶴我佳代子・熊澤峰夫 (1998) : 回転型 ACROSS の震源特性 - 送信条件の安定化-, 日本地震学会 1998 年秋季大会講演会, P79.
46. 國友孝洋・熊澤峰夫・平井誠 (1998) : Across 用地震計の選定, 日本地震学会 1998 年秋季大会講演会, P80.
47. 中島崇裕・國友孝洋・熊澤峰夫・鶴我佳代子 (1998) : 電磁アクロス : 拡散場アクロスの送受信技術開発の中間報告, 日本地震学会 1998 年秋季大会講演会, P85.
48. 中島崇裕・熊澤峰夫・羽佐田葉子・坪田浩二 (1998) : 電磁アクロス : 一般的な電気伝導性誘電体中の伝達関数, 日本地震学会 1998 年秋季大会講演会, P84.
49. 鶴我佳代子・國友孝洋・熊澤峰夫・中島崇裕 (1998) : 回転型 Across による周辺地盤の震動特性解析, 日本地震学会 1998 年秋季大会講演会, P81.
50. Tsuruga, K., Yomogida, K. and Ito, H. (1998) : Detection of Localized Small Scale Heterogeneities in the Nojima Fault and Hanshin-Awaji Region by Anomalous Amplification of Coda Level, The 4th SEGJ International Symposium, pp. 169-176.
51. 熊澤峰夫 (1999) : 放射性廃棄物質地層処分の論理と倫理 -全地球史解読研究からの視点-, 地球惑星科学関連学会 1999 年合同大会予稿集, CD-ROM 予稿集, Am-002.
52. 熊澤峰夫 (1999) : 高レベル放射性廃棄物地層処分の方法論と技術論, 地球惑星科学関連学会 1999 年合同大会予稿集, CD-ROM 予稿集, Am-003.
53. 熊澤峰夫・中島崇裕・鶴我佳代子・國友孝洋 (1999) : アクロスデータの構造逆解析法 : モード解析法試論, 地球惑星科学関連学会 1999 年合同大会予稿集, CD-ROM 予稿集, Se-P008.
54. 熊澤峰夫 (1999) : 地震電磁気現象に関する未解決問題の整理と具体的アプローチの検討, 日本地震学会講演予稿集 1999 年度秋季大会, C48.
55. 熊澤峰夫・國友孝洋・横山由紀子・中島崇裕・鶴我佳代子 (1999) : 日本列島地下常時監視ステーションの一つとしての釜石坑道, 日本地震学会講演予

稿集 1999 年度秋季大会, C63.

56. Kumazawa, M., Nakajima, T., and Yokoyama, Y. (1999) : A New Electromagnetic Sounding Method, EM-ACROSS, American Geophysical Union 1999, GP31C-12.
57. 國友孝洋・熊澤峰夫・山岡新春 (1999) : ACR0SS における周波数変調の有効性と送信装置特性を考慮した変調波形の最適化, 日本地震学会講演予稿集 1999 年度秋季大会, P177.
58. 國友孝洋・熊澤峰夫 (1999) : 降雨による地盤振動特性の変動 -回転型 ACR0SS の連続運転実験-, 日本地震学会講演予稿集 1999 年度秋季大会, P171.
59. 國友孝洋・山岡新春・熊澤峰夫・井上修一, 池田典宏・宮川幸治・渡辺誠一郎 (1999) : 精密制御定常信号システム (ACR0SS) における FM 送信技術とその有効性, 物理探査学会第 101 回学術講演会講演論文集, pp. 79-83.
60. 中島崇裕・熊澤峰夫・國友孝洋・鶴我佳代子・羽佐田葉子 (1999) : 電磁アクロスと CSMT の特性比較, 地球惑星科学関連学会 1999 年合同大会予稿集, CD-ROM 予稿集, Eb-P006.
61. 中島崇裕・横山由紀子・熊澤峰夫 (1999) : 電磁アクロス探査法の最適化, 第 106 回地球電磁気・地球惑星圈学会講演会講演予稿集, B22-P065.
62. 鶴我佳代子・蓬田清・伊藤久男 (1999) : コーダ振幅異常による野島断層および阪神淡路地域の微細不均質構造の検出, 東京大学地震研究所平成 10 年度特定共同研究 B 報告書.
63. 鶴我佳代子・熊澤峰夫・中島崇裕 (1999) : 弹性波および電磁波動場における吸収境界条件とその特性 -密度・誘電率を複素数にしての数値計算-, 地球惑星科学関連学会 1999 年合同大会予稿集, CD-ROM 予稿集, Se-P007.
64. 鶴我佳代子・熊澤峰夫・國友孝洋・山岡新春 (1999) : 可搬型アクロス震源 (通称 HIT) の振動特性, 日本地震学会講演予稿集 1999 年度秋季大会, P78.
65. 横山由紀子・中島崇裕・熊澤峰夫 (1999) : 周期信号を用いた電磁気探査でのデータ処理方法, 第 106 同地球電磁気・地球惑星圈学会講演会講演予稿集, B22-P066.

3. 地震発生と地下水挙動に関する研究

3.1 研究の目的・意義

地震発生に関連して、震源域の周辺では地殻変動が生じ、地殻深部では地下水や地下流体に変化が起こる可能性が指摘されている。地殻変動、地下流体変動のメカニズムを解明する基礎データを得るために、各種のボーリング井を利用して3次元深層総合観測を実施する。具体的には、岩盤歪、地盤傾斜、地下水圧、地下水温、ラドン濃度、希ガス^{*55)}放出量などについて、必要に応じて機器を開発し連続測定を行う。観測データから地震発生に伴う地震前、地震時、地震後の変化を把握し、地震発生との因果関係を解明する。

地震発生と地下水挙動に関する研究では、測定精度を向上させることとならび長期間安定した観測を続けることが重要である。我々のグループが取り組んだ課題の多くは、測定システムが未完成のまま観測を開始したものが多く、長期連続観測を可能とするシステムを目指したことを付言したい。

この中で、インテリジェント回収型歪計^{*56)}の開発や長周期の地震波の解析に適した歪地震計へのボアホール総合観測装置の改良、観測装置への落雷対策などが今後の地震観測に威力が示されることが期待される。

3.2 研究目標

地震の先駆現象を見つけることは災害を軽減する上で重要である。地下深部での地殻歪みの変化を高感度歪計、地下水、溶存ガスの変化などを利用して効果的に検出する。

地震は地下深部で発生することから、地下深部に存在する流体の移動に関する知識が欠かせない。現状では、こうした研究に対する組織的観測はほとんど行われておらず早急に実施する必要がある。

3.3 研究計画

3.3.1 深層観測井の掘削

観測に適した観測井を複数掘削し、相互比較を行う（図3.3-2、3.3-4）。

3.3.2 地下水位・水圧・水温連続観測

空間的に密に分布する観測井を用いて、地層中の地下水位・水温の観測を行う。幾つかの観測井では多深度での水圧・水温観測を行う。地層ごとに水理的性質及び地殻歪に対する応答特性を把握する。地震に関連した地下水位・水圧・水温変化を検出する。そして、地震による地下水変化の特徴や空間的な広がり

を理解し、地下水変化のメカニズム解明に繋げる（図 3.3-2、3.3-4、3.3-7）。

3.3.3 地殻歪の変化に関する研究

掘削孔底にボアホール地殻活動総合観測装置を設置し、岩盤歪（3成分）、傾斜（水平直交2成分）、加速度（3成分）の連続観測を行う。さらに、初期応力推定のためのオーバーコアリングによる回収型多成分歪計を開発する（図 3.3-2、3.3-4、3.3-8）。

3.3.4 地下ガス濃度連続測定

(1) 新しく開発された PIN フォトダイオード^{*57)} 型ラドン計を用い、東濃鉱山内の地下水および岩盤から放出されるラドンの濃度を連続観測し、地震現象と比較する（図 3.3-5、3.3-6、3.3-8）。

(2) シリコン中空糸型気体分離モジュール^{*58)} とマスフィルタ型四重極質量分析装置を用い、孔底の地下水溶存気体を連続測定する機器を開発する（図 3.3-2、3.3-6～3.3-8）。

3.3.5 多成分観測データの地震動に対するレスポンスの比較

地震による P 波や S 波、表面波から長期の余効変動までの変動に対応して、加速度計や歪計（歪地震計）、地下水位などの様々なデータが得られる。この地震動に対する個々の観測項目のレスポンスを、条件が異なるボアホール毎に比較することにより、観測項目の変動のメカニズム解析の手がかりを掴む。

3.3.6 多成分観測データの収録、相互比較

多成分観測データの比較検討のため、多種多様なデータの一元的収録・表示システムを開発する。

3.3.7 観測井・観測機器の設置

東濃鉱山の位置図、及び地震地下水チームが観測機器を設置している東濃鉱山周辺の観測井の分布図を、それぞれ図 3.3-1、図 3.3-2 に示す。東濃鉱山周辺の地質は、土岐・瑞浪市街を中心にほぼ円形に分布する白亜紀末期に貫入した基盤の土岐花崗岩の上に、中新統の瑞浪層群の湖成又は海成堆積層（下層から土岐夾炭累層下部・上部、明世累層、生俵累層）が堆積して形成されている。また、鉱山をほぼ東西に月吉断層が横切っている（図 3.3-3～3.3-5）。この断層は北盤下がりの逆断層で上下の変位は約 30m である。東濃地域及び鉱山周辺の北北西－南南東断面と図 3.3-2 に示した観測井の地質柱状図を図 3.3-4 に示す。

ここには同時に、地下水位観測（3箇所）の対象としている深度や、水圧観測位置（2箇所×5深度）、ボアホール総合観測装置（坑道内も含めて2箇所）の埋設位置などを示す。鉱山の坑道と地質分布との位置関係は、図3.3-5になる。坑道内のボアホール総合観測装置（1箇所）、ラドン観測装置（8箇所）、マスフィルタ型四重極質量分析装置（1箇所）の配置は図3.3-6に示す通りである。各観測機器の設置概要を図3.3-7、図3.3-8に示す。

多深度水圧観測では、幾つかのパッカーリング⁵⁹⁾で区切られた内の観測対象区間に水圧プローブを設置して水圧・水温を連続観測している。ボアホール総合観測装置は、周囲の岩盤と馴染むようにモルタル⁶⁰⁾を使用して埋設されている。

各観測点毎に観測項目・対象としている地層を整理すると以下のようになる。

観測点	観測項目	対象としている地層	月吉断層との位置関係
<坑道外>			
SN-1	地下水位・水温	土岐夾炭累層下部	北側（下盤）
SN-3	地下水位・水温 (・気圧・雨量)	土岐花崗岩	北側（下盤）
97FT-01	地下水位・水温 ・溶存ガス・歪・傾斜・加速度	土岐花崗岩	北側（下盤）
98FE-01	地下水位・水温	土岐花崗岩	北側（下盤）観測開始直後
TH-8 P1	地下水圧・水温	土岐花崗岩	北側（下盤）
TH-8 P2	地下水圧・水温	土岐花崗岩/夾炭累層	北側（下盤）
TH-8 P3	地下水圧・水温	土岐夾炭累層上部	北側（下盤）
TH-8 P4	地下水圧・水温	明世累層	北側（下盤）
TH-8 P5	地下水圧・水温 (・気圧・気温)	生俵累層	北側（下盤）
TH-7 P1	地下水圧・水温	土岐花崗岩	南側（上盤）
TH-7 P2	地下水圧・水温	土岐花崗岩	南側（上盤）
TH-7 P3	地下水圧・水温	土岐花崗岩/夾炭累層	南側（上盤）
TH-7 P4	地下水圧・水温	土岐夾炭累層上部	南側（上盤）
TH-7 P5	地下水圧・水温 (・気圧・気温)	明世累層	南側（上盤）
<坑道内>			
BH-1	歪・傾斜・加速度	土岐花崗岩	南側（上盤）
node1ch.0	ラドン[岩盤より]	明世累層	南側（上盤）
node1ch.1	ラドン[岩盤より]	土岐夾炭累層上部	南側（上盤）
node2ch.0	ラドン[地下水より]	土岐花崗岩/夾炭累層	北側（下盤）

(KNA-2)	・流量・水質（・気圧）	
node2ch.1	ラドン[地下水より]土岐花崗岩/夾炭累層?	不明
	・流量	
node2ch.2	ラドン[岩盤より] 土岐花崗岩	南側（上盤）
	（・気温・湿度）	
node3ch.0	ラドン[岩盤より] 土岐夾炭累層下部	南側（上盤）
node3ch.1	ラドン[岩盤より] 土岐夾炭累層上部	北側（下盤）
node3ch.2	ラドン[坑道内空気より]主に土岐夾炭累層下部	南側（上盤）
通気立坑	坑道内空気組成（・気温・湿度）	

これらの観測点は一部を除いてネットワーク化され、そのデータが電話回線を通じて、東濃地科学センターや関連大学に回収されている（図 3.3-9）。また、特に坑道内の 8箇所のラドン計では、データをネットワーク化して 1箇所のデータロガーに集めて、ワークステーションに取り込んでいる（図 3.3-10）。

3.4 研究成果

3.4.1 東濃鉱山周辺における地下水位・水圧観測結果

地震に関連した地下水位変化のメカニズム解明を目指して、空間的に密に分布している東濃鉱山周辺の観測井で観測研究を行ってきた。幾つかの観測井では特徴を持った地震に関連する地下水位・水圧変動を検出した。そして、地殻変動・地下水溶存ガス成分の測定結果との比較による総合的な評価の礎とするために、各地層の水理的性質を調査し、地震に関連した地下水位・水圧変動の基礎的な評価を行った。その結果を以下に報告する。

東濃地域の様々な地層中の地下水をターゲットとして、東濃鉱山周辺の観測井 SN-1 号孔, SN-3 号孔, 97FT-01 号孔, TH-7 号孔, TH-8 号孔で地下水位・水圧の測定を行っている（図 3.3-4）。これらの観測井での長期連続観測の結果を図 3.4.1-1 に示す。地下水位・水圧には（図 3.4.1-1 のスケールでは分からぬが）

- (1) 日常的な地球潮汐^{*6 1)} に対応する変動
- (2) 日常的な気圧変化に対応する変動 が観測されている場合がある。

また、地震の前後には

- (3) 地震前の SN-3 号孔の地下水位変動
- (4) 地震直後の SN-3 号孔の地下水位の急な低下
- (5) 地震後の長期にわたる地下水位・水圧の上昇
- (6) 地震前の SN-1 号孔の地下水位の上昇

(7) 地震波に対応する SN-3 号孔の地下水位の振動（図 3.5-2）などの多岐にわたる現象が、個別に或いは複合して観測された。

(1), (2) の地下水位・水圧の潮汐・気圧への応答は、

○ SN-1 号孔の地下水位は潮汐に対応した変動を示さないが、気圧に対する変動は示す。

○ 97FT-01 号孔の地下水位は潮汐・気圧に応答した変動は示さない。

○ SN-3 号孔の地下水位、TH-7 号孔の P1,P2,P3 での水圧、TH-8 号孔の P1,P2,P3 での水圧は潮汐・気圧に対応した変動を示す。

であった。

潮汐・気圧応答の解析（その一例を図 3.4.1-2）から明らかになった事は、

○ 1-2cycle/day の周波数の範囲では、土岐花崗岩中の地下水の歪感度は 1-2mm/10⁻⁹strain 程度である。

○ 土岐夾炭累層下部中の地下水は被圧が良い（地表との間の水理的な繋がりが悪い）。

などである。

(3) 1994 年 10 月 4 日の北海道東方沖地震や 1994 年 12 月 28 日の三陸はるか沖地震などの大地震の前に SN-3 号孔の地下水位が著しく低下するなどの変動が認められた（図 3.4.1-3）。この原因を解明することが地下水位観測の出発点であった。水位低下に関連して、KNA-2 号孔から漏水があったとの記録があり、両者の関連性が検討された。そこで、1998 年に KNA-2 号孔において、リーク（パッカーをはずしての漏水）テストを行い、SN-3 号孔の地下水位が低下することが確かめられた。

すなわち、大地震前の SN-3 号孔の地下水位変動は KNA-2 号孔で生じた漏水の結果であると推測された。しかし、KNA-2 号孔で漏水が生じた原因については、KNA-2 号孔のパッカーへ供給する窒素ガスボンベの圧力低下によると解釈されるほか、帶水層そのものが地震前に変化したとも考えられ、さらに、原因の追求が必要である。ちなみに、1994 年 10 月 4 日の北海道東方沖地震の前の変動については、ボンベ圧の低下速度があまりに大きすぎる。

(4) 地震発生直後の SN-3 号孔の地下水位変化を 1989 年以降で 35 回以上観測した（図 3.4.1-4）。この変化は常に水位の低下で、地下水位低下量は数 cm～数十 cm であった。周辺の観測井では、類似の現象は見られなかった。SN-3 号孔の地下水位の歪感度を考えると、地震の震源でのズレによる広域の地殻変動が地震発生直後の SN-3 号孔の地下水位低下の直接の原因ではないと推測できる。これは SN-3 号孔のごく近傍だけに起きた地震誘発現象を表わしている可能性が

強い。

(5)SN-3号孔では地震後長期の地下水位上昇を何度も観測した(図3.4.1-5)。特に、愛知県東部地震後は、多くの観測井(図3.3-4)で地下水位・水圧の上昇を観測した(図3.4.1-6)。空間分布からは、土岐花崗岩を中心として東濃地域の地殻全体で起きた現象であることが分かる。時間スケールは地殻の余効変動^{*62)}と言われる現象に近いと思われる。

(6)地震発生の1週間程度前からSN-1号孔の地下水位が10-30cm程度上昇する例が数度見られた(図3.4.1-7)。これらは潮汐・気圧では説明できない変化である。今のところ、人為的な要因である可能性も見つかっていない。なお、SN-3号孔の地下水位を始めとする他の観測井の地下水位・水圧には、類似の地震前の変動は見られない(詳しくは、3.5節の図3.5-1で示す)。この地震前の地下水位変動は、巨礫を含む堆積岩である土岐夾炭累層下部の中の地下水にだけ起きた現象と推測できる。

SN-1号孔、SN-3号孔の地下水位変化の有無と地震のマグニチュード・震源距離との関係を調べた。大きく近い地震ほど、地下水位変化を引き起こしやすいという大まかな関係があることが分かった(図3.4.1-8の上)。しかしながら、SN-3号孔の地震直後の地下水位低下量と地震のマグニチュード・震源距離との間に明確な関連は見られない(図3.4.1-8の下)。これは(4)で行った「地震の震源でのズレによる広域の地殻変動が、地震発生直後のSN-3号孔の地下水位低下の直接の原因ではない」との推定の間接的な裏付けになる。

3.4.2 地殻活動総合観測装置による地殻変動観測とその応用としての初期応力測定

東京大学地震研究所により開発されたボアホール式の地殻活動総合観測装置は、全国約50ヶ所に設置され、地震予知のための基礎データを提供している。特に、地震研究所の伊東観測点では、群発地震活動の前から最大地震の発生に至る過程に明瞭な前兆的地殻変動を観測した。この観測装置を東濃鉱山周辺や地震研究所の油壺地殻変動観測所に設置して地殻変動連続観測を行い、伸縮変化や傾斜変化、加速度計による記録と、他の地震予知研究に関連する観測項目とを比較した。また、総合観測装置の改良と関連する測定装置の開発を行った。

フロンティア研究では地震の前兆現象の解明を目的として、地殻活動総合観測装置による地殻変動の連続観測を始めた。この本来の目的だけでなく、フロンティア研究を持続する中で、総合観測装置の応用範囲を広げることができ、

地震発生に関連する研究だけでなく、深地層に関連する他の多くの分野の研究に貢献できることが分かった。

図 3.4.2-1 は、伊東観測点の位置と群発地震の震源、及び、伊東観測点に設置した代表的な構成の地殻活動総合観測装置を示す。この観測装置は、小型でありながら多項目の観測を高精度で行える。最近では、ジャイロ方位計^{*63)}の代わりに、フロンティア研究により新しく開発した磁気方位計を使用し、観測装置を埋設した後は、この磁気方位計を用いて、今まで得られていない地下深部における地磁気変化の連続測定が行えるようになった。

図 3.4.2-2 は、伊豆半島沖の群発地震の活動に関連した、傾斜ベクトルと最大主歪の時間的变化を示す。何れの地震活動においても、群発地震の活動に 2 日ほど先行する前兆的傾斜ベクトルと最大主歪変化が観測され、最大地震の発生の前に、この傾斜ベクトルと最大主歪の方向がテクニカルな応力の方向になることが分かる。この例のように、地震の前後で地球潮汐の振幅程度の異常な現象が生じれば、その変化を検出できる。この観測装置は地震予知だけでなく、地辺りや土石流の予測に利用できるし、高温に耐える観測装置に改良すれば、噴火予知研究に利用できる。

図 3.4.2-3 は、1998 年 4 月 22 日に発生した地震前後の東濃鉱山における地殻活動総合観測装置による観測結果である。図の上方が加速度、下方が歪と傾斜変化である。1 ガルを越える加速度を受けながら、地殻活動総合観測装置は安定に作動したことが分かる。平成 11 年度には、新しくデータ収録システムを開発し、地殻活動総合観測装置の歪計の出力を歪み地震計として利用できるようになり、加速度計との比較も可能になった。地震直後に観測された歪変化と地下水位の変化等がよい相関を示し（図 3.5-2）、この種の資料が蓄積すれば、地震発生に関連する地殻の異常変動の物理的なメカニズムの解明が期待できる。

図 3.4.2-4 は、油壺観測所における 40 m の長さの水管傾斜計と地殻活動総合観測装置内の改良後の傾斜計の記録を比較したものである。図の左方の写真が、地殻活動総合観測装置内の傾斜計である。記録の比較から分かるように、地殻活動総合観測装置内の傾斜計は、小型でありながら水管傾斜計と同程度の測定精度を有することが分かる。フロンティア研究により傾斜計の測定精度を向上させることができたため、図 3.4.2-2 で示したような地震発生に関連する異常現象を検出できる可能性がより多くなった。図示はしないが、油壺観測所における地殻活動総合観測装置によるボアホール式の加速度計による記録は、横坑内に設置されている通常のサーボ型加速度計による記録と遜色のない良質の記録である。

地殻活動総合観測装置は、センサー部を地下深部にモルタルで埋設するため、

修理することはできない。多くの場合、落雷によりセンサー部が損傷する。フロンティア研究で、歪計や傾斜計の信号を地下で高精度のデジタル値に変換し、そのデータを光ファイバーで地表に伝送する、落雷対策を施した高精度のデータ収録システムを開発した。開発した新システムでは、歪計や傾斜計のデータを GPS 時計に同期して 20 ビット、200 Hz でサンプリングできる。このため、この収録システムを使用すれば、地震動の帯域を対象とする地殻変動の研究が可能であるし、サンプリングされたデータを積算し平均化することで、従来の長周期の地殻変動帯域の歪み変化や傾斜変化の測定精度が向上する。

センサー部に振子を使用する長周期の地震計は、水平方向の振動と地震計が受ける傾斜変化との区別ができず、水平成分の記録は不正確で解析に適していない。しかし、地殻活動総合観測装置の歪計は、大地震の場合であっても水平方向の大きな振動を正確に記録できる。今まで、大地震の場合の正確な水平方向の振動の記録は得られたことはなく、新システムによる歪地震計の記録が蓄積すれば、地震工学の分野の研究に重要な知見を与えるデータとなる。将来は、この分野へのボアホール歪計の応用が期待できる。

現時点では、ボーリング孔の孔底に歪計を設置する構成であるが、同じボーリング孔に深度を変えて複数設置できる歪計を開発し、広域の観測網を展開すれば、地殻変動と歪地震動の観測を 3 次元的に行うことができ、深地層の挙動がより正確に把握できる。

図 3.4.2-5 の上方に、図 3.4.2-1 で示した地殻活動総合観測装置の歪計を応用した、インテリジェント回収型歪計を示す。この回収型歪計は、高精度の歪計のセンサー部を低消費電力化し、マルチプレクサー^{*64)}・A/D 変換器・メモリー・電池を一体化したもので、測定装置に信号ケーブルや電源ケーブルがない。この測定装置を地下深部に埋設し、モルタルの固化後にオーバーコアリングを行って初期応力を解放する。そして、オーバーコアリング前後の歪変化から、インバージョンで初期応力を測定する。信号ケーブルや電源ケーブルがないため、地下深部であってもオーバーコアリングが行える。図 3.4.2-5 の下方に、東濃地方のボーリング孔で行ったオーバーコアリングの前後の、インテリジェント回収型歪計による歪変化を示す。オーバーコアリング前後の歪変化や、測定装置回収時の水圧による歪み変化が明瞭に記録されている。解析結果から、主歪の方向と大きさは、

N54.2° E 方向が、3.32 MPa

N35.8° W 方向が、2.52 MPa

の様になった。

この測定装置により、2000 年 1 月に、500m の深度で初期応力の測定に成功した。この測定方法は、水圧破碎法^{*65)}と異なり岩盤を破壊しないため、同じ

地点に地殻活動総合観測装置を埋設できる。地震予知を目的とする地殻変動の連続観測は新時代を迎えるつある。すなわち、岩盤に作用している初期応力と岩盤の破壊強度に関する情報を知り、その同じ地点で地殻変動の連続観測を行い、歪変化を介して地震発生に関連する応力の時間的变化が測定できる、地震予知にとっての新時代になった。その先駆けとしての初期応力測定装置と測定方法を、フロンティア研究により開発できた。この測定装置や測定方法は、深さ 1 Km 以上であっても使用でき、今後、深地層に関わる研究に貢献する。

3.4.3 東濃鉱山周辺におけるラドン観測結果

(1) 観測目的と概要

ラドン (Rn) を使用して地下水挙動を調べ、地震に伴う変化を検出しようとする研究は、東京大学や地質調査所により 20 年以上に及ぶ着実な観測研究が積み重ねられており、他の溶存ガス・水位・圧力・水温などとともに重要な指標となっている。岐阜大学で新たに開発された PIN フォトダイオードを利用した高感度 Rn 検出器を使って、リアルタイム、安価という特質を利用して東濃鉱山における多点観測を継続中である。

東濃鉱山内での本観測の利点と意義は、以下のようにまとめられよう。

- 1) 地下深部のため、環境要素（特に、気温や降水）の影響を受けやすい Rn 濃度観測では、極めて有利な観測条件となっている。
- 2) 地表からの深度の異なる観測が可能で、地質条件の異なる地層のデータも得られる。
- 3) 水量は少ないが安定して湧出している地下水があり、水質等のデータも蓄積されている。
- 4) 地表付近では 1)のような条件のため殆ど不可能な、岩盤から直接放出されるラドン濃度の測定が実施できる。
- 5) 坑道全体を「1つの Rn 放出体」と考えた、新しいアイディアの観測を実行できる。
- 6) 他の基本観測データも多く、Rn 濃度変化の原因を定性的・定量的、総合的に評価することができる。

(2) 観測点の配置

上記の利点を活かす観測として 8 箇所の観測点を配置し、1997 年より観測を開始した。これらの観測では、上記 3)に相当する観測点を 2 箇所、4)の観測点を 5 箇所、5)の観測点を 1 箇所設置した（図 3.3-6）。また、これらの観測点で

得られたデータをネットワーク化して構内の 1 箇所に集め、ワーク・ステイションに取り込んでいる（図 3.3-10）。

（3）観測結果

初期には、落雷などによる送電不良や坑内作業などで観測の中止が多数回発生しており、そのために観測システムが大きな影響を受けることも多かった。1998 年以降では、未だ改良を検討する余地も残されているが、かなり安定してデータが得られており、その概要を以下に述べる。

1) Node2 のデータ（岩盤及び湧水中からの Rn 放出量の変化）

1998 年 1 月～1999 年 12 月までの Node2 ch.1 の観測データを図 3.4.3-1 に示した。Node2 ch.0 (95m 試錐室) はこの間、他の目的である地下水のリーケテストなどで Rn データは不安定であり、長期的な変化を議論することはできないが、Node2 ch.1 (120m 回避所付近) では季節変化などを含めた変化を知ることができた。また、Node2 ch.2 の岩盤からの Rn 濃度変化が、湧水量の変化とは異なった季節変化（2か月程度のずれ）をしていることが観測された。メカニズムを含め、原因と 2 点間の相互関連を検討するには、さらに長期の観測を必要とする。

2) 湧水中の Rn 濃度

Node2 ch.0 および Node2 ch.1 の観測点の湧水については、その帶水層が同一か否かについて過去の研究でも検討されてきたが、明確な結論は得られていない。Rn 濃度変化から、両点は 20 m 程度しか離れていないにもかかわらず、短周期（24 時間以下）の相関は低く（1998.03 ～ 06 の解析）、その係数も時期的な変化があることが今回明確になった。しかし、その原因については幾つかの可能性を指摘できるのみである。長周期の相関はかなり高く（0.54 以上）なっている。

3) 岩盤中からの放出 Rn 濃度

岩盤中からの Rn の放出量については、1998 年の 1 年間について 4 箇所（Node3 ch.0 を除く）のデータを詳しく検討した（図 3.4.3-2）。その結果、短周期（24 時間以下）の変化については、弱い 1 日程度の周期が見出されているが潮汐変化ではなく、気温・気圧変化との相関も低いことが確かめられた。長周期変化から確認できた観測点相互の変化は極めて類似しており、相関係数も 0.72 ～ 0.90 である。また、位置は離れているが、深度の大きな花崗岩中の観測点(Node 2 ch.2)と土岐夾炭累層上部(Node3 ch.1)の観測点の 2 点間の相関が

極めて高いことは興味深い。下表に、各地点間の相関係数を示した。

	Node1 ch.1	Node2 ch.2	Node3 ch.1	
Node1 ch.0	0.75	0.74	0.72	
Node1 ch.1	-	0.73	0.81	
Node2 ch.2	-	-	0.90	

4) 坑道内大気の Rn 濃度

坑道内大気は主扇風機の排気能力 ($550 \text{ m}^3/\text{sec}$) よって計算すると約 20 分で入れ替わり、吸入される大気温も大きく変化している(図 3.4.3-3)。坑道内の温度・湿度の場所的な分布を 11 ~ 12 月の測定から見ると、立坑より吸入された外気が湿度は $10\% / 100 \text{ m}$ 、温度は $3 \text{ }^\circ\text{C} / 100 \text{ m}$ 程度の急激な変化をしている(図 3.4.3-4)。攪拌による大気の混合等も考慮すると、実際に坑道壁からの Rn 放出量を代表するのに十分な滞留時間であるとは断言できないが、一定の変化を検出できる状態であると考えられる。1998 年 1 ~ 8 月の坑道内大気温度と Rn の相関は図 3.4.3-5 に示したようであるが、時間的な遅れや湿度・気圧との重相関などについてさらにデータ集めて解析を進める必要がある。

5) 湧水中の Rn 濃度の異常変化

a) 1998 年 6 ~ 8 月の KNA-2 号孔のリークテストに伴い湧水の状態が変化した。

特に、6 月 9 日から Node 2 ch.0 への導水が止まったため、計器の動作状態を Rn の半減期からチェックする機会となった(図 3.4.3-6)。

b) 同上の実験に際して Node 2 ch.1 への影響を見ると、リークテストが開始されてから Node 2 ch.1 の Rn 濃度変化は短周期成分が無くなり、殆ど一定値を示している。このことは、両湧水間には何らかの相互作用が働いていると考えられるのであるが、2)に述べたように、短期間変化の差異を考慮に入れると原因を明確にはできない。

c) 地震による Rn 濃度変化について調査すると、この間に観測地域周辺に発生した顕著な地震として、1997.12.14 の愛知県北東部地震 (M 4.2)、1998.04.22 岐阜県・三重県境付近の地震 (M 5.4)、1998.08.12 および 16 の長野県中部地震 (M 4.7, M 5.4)、1999.11.29 の愛知県西部の地震 (M 4.7) などが上げられる。この中で幾つかの地震については、不明瞭な変化が見られるが、特に最新の愛知県西部地震の折には、Rn 濃度の Co-seismic な変化と考えられるような異常を検出している(図 3.4.3-7)。

(4) まとめ

東濃鉱山内における Rn 濃度の観測では、環境要素との詳しい検討などのため

に、さらに長期の観測を必要としている。また、その成果を高めるために、本観測システムについては静電捕集型の高感度 Rn 測定計器としての利点を活用しつつ、環境要素の影響を実験的により詳しく調査することも必要である。

1999 年 8 月より坑道内の観測データは、電話回線を使用し岐阜大学で直接監視しデータの異常検出などもできるようになった。現在、研究者にはパスワードを発行して、データを公開し、活用に努めている。

3.4.4. 東濃鉱山及びその周辺における地下ガス観測

(1) 観測目的と概要

地震に伴う変動と地下から放出されるガスの関連を指摘する研究が、ラドンを始めとして数多く紹介されている。地震に伴う変動が報告された様々なパラメータ（歪・傾斜・地下水位・間隙水圧・ラドン濃度など）と地下ガスとの関連を研究することを目的として、マスフィルタ型四重極質量分析装置（QMS: 図 3.4.4-1a）を用いた地下ガスの連続観測方式を新たに試みた。

具体的には、以下の様な段階を踏んで地下ガス観測を実施した。

- ① 東濃鉱山において、坑道全体をセンサーとみなして、換気の為に坑道全体の空気が収斂する通気立坑から直接空気を吸引してマスフィルタ型四重極質量分析装置に導入し、連続観測を実施する（1997 年 3 月末より観測開始）。
- ② ①の実績を踏まえて、観測井中の地下水にシリコン中空糸型気体分離モジュールを投入して、地下水に溶存しているガスを直接連続的に採取し、同分析計で連続観測を実施する（1998 年 3 月末より観測開始）。

ガス採取のための吸引には、小型のダイヤフラム型真空ポンプを用いた（図 3.3-8）。採取されたガスの一部を、可変リークバルブを通じて質量分析装置（QMS）に導き、分析器本体の真空ポンプで引きながら連続測定を行った。典型的な大気組成のガスが入って来た場合、その質量数毎の（ピーク強度の）スペクトルパターンは図 3.4.4-1b（縦軸：log スケールのピーク強度、横軸：質量数）のようになる。この内、質量数 2(H₂)・4(⁴He)・18(H₂O)・28(N₂)・32(O₂)・36(³⁶Ar)・40(⁴⁰Ar)・44(CO₂)等を選択して、連続観測を行った。

(2) 観測結果

1) 東濃鉱山における地下ガス（坑内空気）の連続観測結果

1997 年 3 月～1999 年 12 月までの観測データを図 3.4.4-2 にまとめた。一部時間軸を拡大したものを図 3.4.4-3 a,b に示した。分析計内部に導入するガスの圧力によるピーク強度の違いを補正するために、³⁶Ar を基準にした組成比・同位体比で示した。また、H₂・H₂O・CO₂ を除いて、基準大気の測定によって補正を行った。坑道内での電気工事の関係上、観測データは所々断続している。停電の間隔が短いため、その都度プランクの測定や大気標準の測定が行えず、時

期によって測定値に段差が見られる。また、CO₂等は停電復旧後に比の値が回復するまで時間がかかる(図 3.4.4-2)。しかし、一覧してガスの種類毎の特質を以下のように明確に分類できた。

- ① $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ ： 全体として年周変動など周期的な変動を示さず、ほぼ大気の値(295.5)で一定だった。
- ② $^{18}\text{H}_2\text{O}/^{36}\text{Ar}$ ： 年周変動及び日周変動を示す。この変動を、外気の影響を受け易い測定室付近の温湿度及び受け難い通気立坑入口付近の温湿度と比較した結果、相対湿度には相関せず、測定室付近の気温の年周・日周変動との相関が極めて良いことが分かった。
- ③ $^2\text{H}_2/^{36}\text{Ar}$ ： H₂は実際のH₂と分析管内でH₂Oより分解したH₂の混合気体を測定している。そのため短期的にH₂O変動の影響を受けることがあるが、長期変化は異なる。しかし、ばらつきは大きい。図3.4.4-3aの2/9, 2/10の変動は、QMSのガス取入れ部の改造によるものである。
- ④ $^{44}\text{CO}_2/^{36}\text{Ar}$ ： 人為的な変動を示す(入坑者の呼気を捉える)。
- ⑤ $^4\text{He}/^{36}\text{Ar}$ ： 通常はほぼ一定。組成比は大気の値よりも高く、ウランからの壊変起源の⁴Heの影響と考えられる。稀に人為的な変動を示す(坑道内の鉱石室の扉を開閉した際の⁴He放出を捉える)。(図3.4.4-3a)

以上より、平常時のデータが把握できた。人為的な変動などの影響が現れることから、ガスの取込み及び測定が正常に行われていることが確認できた。

地震に伴う変動について、例を同じ図3.4.4-3a,bに示す。1998.02.10岐阜県中部の地震(M 4.2)の前後に見られる一部の変動は、前述の通りQMSの改造に伴う変動である。また、Rnで変動が見られた1999.11.29愛知県西部の地震(M 4.7)においても、それ以外の地震に対しても、平常時の変動に匹敵する程の観測に掛かる顕著な変動は確認できなかった。

2) 97FT-01号孔における地下水溶存ガスの連続観測結果

1998年3月～1999年12月までの観測データを、³⁶Arまたは²⁸N₂を基準にした組成比・同位体比に直して図3.4.4-4a,bにまとめた。また、H₂・H₂O・CO₂を除いて、基準大気の測定によって補正を行った。1998年3月～1999年8月までの観測結果には、以下の特徴が見られた。

- ・ $^4\text{He}/^{36}\text{Ar}$ ： 観測当初、大気の値(0.167)の2倍程の値を示すが、98年5月中旬から急速に低下し、以後大気組成とほぼ同様の値を示す。
- ・ $^{32}\text{O}_2/^{28}\text{N}_2$ ： 全体として大気の値より低い期間が多い。顕著に低い時期は、観測開始当初(98年3月末～6月上旬)及び98年11月～12月間だった。
- ・ 全体として、間歇的なピークが多数存在する。
- ・ $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ ： 大気の値(295.5)より高い比を示す間歇的なピーク以外は、大気とほぼ同じで一定であった。

図に見られた間歇的なピークを詳しく見るために、生の観測量を図3.4.4-5a,bにまとめた。但し、後者は各観測項目毎の変動を比較するために、各ピークの

スケールを無視して並べたものである。間歇的なピークが多く見られるのは、①観測開始当初(98年3月末～6月上旬)及び②98年9月中旬～12月頃、である。また特徴として、ガスの種類によって逆相関を示し、 $^2\text{H}_2$, ^4He , $^{18}\text{H}_2\text{O}$, $^{28}\text{N}_2$, Arは増加を示すのに対して、 $^{32}\text{O}_2$, $^{44}\text{CO}_2$ は減少を示す。

観測開始当初、及び間歇的なピークの示すガス組成に共通して見られる特徴は、低濃度の酸素を含むことであり、これは、溶存酸素濃度が低い東濃鉱山周辺の地下水の特徴に合致している。このことから、純粋な地下水溶存ガスは、観測開始当初及び間歇的なピークの時のみ測定されていて、それ以外の大部分は大気が混入したガス成分を測っていたものと考えられる。

その原因としては、97FT-01号孔の地下水位が、観測当初から一方的に低下するだけ(図3.4.1-1)であり、且つストレーナー^{*66)}設置位置にある花崗岩の透水性が低いため周囲の帶水層からの水の供給が乏しかったことが挙げられる。このため、観測井に溜まっている地下水中の溶存ガスを観測することになり、98年6月上旬で溶存ガスが枯渇したため、ガスを吸引するためのダイヤフラムポンプ(図3.3-8)から大気組成のガスがQMSの中に逆流していたと考えられる。99年末までに水位が上昇したのは(リークテスト終了後の)98年9月中旬～11月頃のみで、この時、間歇的なピークが多く観測されており、かつ低酸素ガスも観測されていたことから、溶存ガスの供給があったことを支持する。

地下水溶存ガスの組成は、大気組成に比べ低酸素濃度であること以外に、 $^4\text{He}/^{36}\text{Ar}$ や $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比が大気よりも高い可能性がある。

98年11月末からの地下水位の低下について、当初99年5月頃に上昇に転じる予定が伸び伸びになったことから対策が遅れたが、99年10月末より、ダイヤフラムポンプによるガスの吸い上げを停止して、QMSに直結している真空ポンプでガスを導入することで、ポンプを通した大気の混入を防いでいる。但し、 ^{36}Ar がバックグラウンドレベル以下に低下するなど、ガスの導入量が極端に落込んでしまっているという問題点がある。2000年1月末から97FT-01号孔の水位が上昇に転じたことから、再び地下水溶存ガスが観測できることが期待される。

地下水溶存ガスの観測においては、東濃鉱山の場合と異なり、観測そのものに問題があつて、多くの期間、地震時の変動を考慮できる状態ではなかつた。正常に観測できていた頃、1998.04.22岐阜県・三重県県境(三重県北部)の地震(M 5.4)があつたが、これに伴う変動は明確でなかつた。

(3) まとめ

地下ガス観測に関しては、人為的な変動を含めた環境要素の変動を捉えることが十分可能であり、これに匹敵する変動が生じれば検出は可能である。しかし、現段階まで地震に関連した変動を捉えることは出来なかつた。地下水溶存

ガス測定においては、シリコン中空糸型気体分離モジュールの適用試験を兼ねている面もあるが、地下水位の一方的な低下及び透水性の低さから、十分なガス観測に至らなかった。成果を高めるためには、より透水性の高い観測井に適用することも含めた改善や、基礎データの蓄積が必要である。

3.5 後の展開（第1フェーズのまとめ、および今後の課題）

3.5.1 現時点でのまとめ

- ①地下水観測では、地殻歪変化に対して極めて高い応答感度をもつ SN-3 などの観測井戸をみつけ、それらの井戸で観測されていた幾つかの大地震前の水位低下が地震前兆であるか、人為的要因であるかを解明することがおもな目的であったが、現在までの研究では結論を得るに到っていない。
- ②地殻変動観測では、新しい観測装置および観測手法の開発に成功し、満足する成果を得ている。
- ③気体関連の観測では、収録したデータの解析に留まっている。
その中で、主な成果を紹介する。

(1) 多成分観測データの相互比較の例

- 1) 1999 年 8 月 20 日岐阜県美濃中部の地震(M 3.9)及び 1999 年 8 月 21 日和歌山県北部の地震(M 5.4)に関連した現象の考察 (図 3.5-1)

地震発生の 1 週間程度前から土岐夾炭層下部を対象とした SN-1 号孔の地下水位に上昇が見られた。同時に、土岐花崗岩を対象とした 97FT-01 号孔での地殻歪観測（直線トレンドは取り除いてある）にも変動が見られた。さらに地震後には、土岐花崗岩を対象とした SN-3 号孔の地下水位の低下、及び土岐夾炭層下部と土岐花崗岩の境界部の地下水溶存ラドン濃度を測定している Node2 ch.0 (KNA-2 号孔) で、ラドン濃度の低下が観測されている。ただし RaA/RaC' も変化しているのでラドン計の測定条件が変化した可能性もある。

主歪 1 は梢円形の長い方の成分（最小主応力の方向）、主歪 2 は梢円形の短い方の成分（最大主応力の方向）であり、地殻歪の観測結果は、（フィリピン海プレートによる？）広域の応力場が少し変化したことを意味していると思われる。なお、図 3.4.1-7 で示した地震前の SN-1 号孔の地下水位上昇が表われた幾つかの地震は、その震源の深さが 40–70km 程で、潜り込んだフィリピン海プレートで起こった地震であり、上部地殻中の地震ではないという共通点を持っている。

地質的水理的な特徴からは以下の事が言える。月吉断層北盤側の堆積岩類は基盤である土岐花崗岩の上の狭い範囲のみに存在し、月吉断層南盤側の堆積岩とは難透水面としての性質を持つ月吉断層によって水理的には遮蔽されている。このような状態での月吉断層北盤側の土岐夾炭累層下部中の地下水は被圧が良い。そのことから SN-1 号孔の地下水位上昇は、長周期の地殻歪に対する応答が原因である可能性がある。しかしながら、同時期の土岐花崗岩中の地下水位には地震前の上昇が見られないことを考慮すると、地殻歪のみで説明できるとは考えにくい。現時点では、これ以上の詳細は不明である。

2) 地震波に対応する歪・傾斜・地下水位の振動（図 3.5-2）

日本時間 1999 年 9 月 21 日 2 時 47 分に発生した台湾地震（M 7.7）による長周期の地震波（表面波）に対応して、97FT-01 号孔での歪や傾斜、SN-3 号孔の地下水位に変動が起きたことが分かった。これは地殻内での歪・間隙水圧の関連性や地層の弾性的・水理的性質を知る重要な手がかりとなる。今後の事例の蓄積によって、地震に関連する地殻内部現象を把握する上で重要な知見が得られると期待できる。

また、ボアホール総合地殻活動観測装置が歪地震計として高い性能を持つことを示している。地殻内部での流体を含む地層での歪・地下水の観測結果は、液状化現象を始めとする地盤の震動特性の研究に貢献できるであろう。

3) 1999 年 11 月 29 日の愛知県西部の地震(M 4.7)に関連した現象の考察（図 3.5-3）

この地震の直前に、土岐夾炭累層下部と土岐花崗岩の境界部の地下水溶存ラドン濃度を測定している Node2 ch.0 (KNA-2 号孔) でラドン濃度の低下が観測されている。測定結果は、RaA の低下が RaC' の低下より少し先行し、全体として RaA/RaC' が一定している。ラドン計の内部へ取り込んでいる地下水溶存ラドン濃度の低下が起きた場合に期待できる変動パターンであり、測定条件の変化の可能性は小さい。他の測定項目には、地震前の変動は見られない（注釈：地下水位の上昇は気圧応答である）。地震直後には、SN-3 号孔での地下水位低下と 97FT-01 号孔での傾斜のステップが見られる。

RaA や RaC' を低下させるには、観測対象としている地下水が、ラドン濃度のより低い地下水と混合した等の流動状態を変化させた可能性が考えられるが、現時点では詳細は不明である。

(2) 全体のまとめ

これまでの 5 力年計画では、地震発生に対して応答性の高い東濃地域の特徴

を生かし、地下水変化や地殻変動に関する総合観測研究の基礎を確立することに重点を置いてきた。同時に、本研究では新観測手法の開発にも力点をおいてきた。観測における主な成果と、新観測手法の開発における主な成果は以下のようになる。

1) 観測における主な成果

- ・東濃鉱山周辺において、多くの地震に関連する地下水位変動、多深度間隙水圧変動、地殻変動、水中ラドン濃度変動を検出した。
- ・幾つかの観測井における地下水位・間隙水圧変動に関して、地震前・地震直後・地震後(数日～1ヶ月後)のそれぞれの変動を捉え、特に地震直後及び地震後の変動の原因を推定した。地震前の変動に関しては、その原因の特定までは至っていない。
- ・地球潮汐・気圧・地震動といった地殻歪、及び地下水位・間隙水圧に変動をもたらす現象から、東濃鉱山周辺地域の土岐花崗岩における基本的な特性としての、地殻歪と地下水位・間隙水圧との関係の周波数応答特性を導いた。
- ・ボアホール総合観測装置によって、伊豆の群発地震活動に関連した地殻変動を検出した。

2) 新観測手法の開発における主な成果

- ・深い試錐孔に適用可能かつ回収によって再利用可能な、インテリジェント回収型歪計を開発した。現在まで、その適用深度は約 500m まで及んでいる。
- ・ボアホール地殻活動観測装置を改良し、その中の石井式歪計を、水平動を正確に記録できる歪地震計として利用できる体制を確立した。また、傾斜計を改良することで、従来の水管傾斜計並みの測定精度を実現した。
- ・四重極質量分析計を用いて、地下ガス成分を連続的に高精度で測定する手法を確立した。また、地下水溶存ガスを地下水から連続的に直接採取する手法を取り入れた。
- ・東濃鉱山坑道での各深度におけるラドン観測や、多深度間隙水圧観測など、地域を立体的に捉える観測点を整備し、連続観測を実施した。更に、深さ 1000m の試錐孔における多深度間隙水圧観測に着手した。

今後、地震現象との関連性を解明するのに役立つデータが得られることが期待できる。また、1000m もの深さの試錐孔に適用可能な初期応力の測定法など世界に誇れる新技術の実用化にも明るい見通しが得られている。

3.5.2 平成 12 年度の予定

平成 11 年度の各種観測を継続するとともに、以下の研究を新たに実施する。

- (1) 東濃鉱山周辺での地震後の 1 週間～1 ヶ月間にわたる地下水位・水圧上昇の現象が土岐花崗岩規模の現象である可能性が高いことから、現象の理解のために土岐花崗岩以外の場所での応答との比較をする必要が生じた。この点を念頭に設置場所を吟味してボアホール地殻活動総合観測装置を埋設し、観測を開始する。
- (2) 地震予知の基礎となる初期応力の推定のために開発したインテリジェント回収型歪計を、掘削したボアホールに埋設・回収することで各所の初期応力測定を行う。平成 12 年度は、サイクル機構が掘削予定である深さ 1000m の試錐孔の孔底部に初めて回収型歪計を投入して、初期応力を測定する。これにより、深い試錐孔に適用した際の初期応力測定法を確立すると共に、得られた測定結果を浅所での値と比較し、地殻の応力状態に関して新たな知見を得る。また、東濃鉱山坑道内において、試錐孔を用いて初期応力測定を行い、従来の水圧破碎法による測定結果との比較・検定を行う。更に、坑道内において、平成 11 年度に地震に関連して特異な地下水位変動を示した土岐夾炭累層下部における初期応力を調べる。
- (3) サイクル機構が掘削した 1000m クラスの試錐孔 MIU-2 において、平成 11 年度末に多深度間隙水圧計が設置された。これによって、従来よりも深い深度における間隙水圧変動を連続観測し、地震時の間隙水圧の深さ方向の応答特性を把握すると共に、東濃鉱山周辺の地震応答特異性の機構解明に役立てる。
- (4) 平成 11 年度に開発した高周波数サンプリングが可能な A/D ボードを用いて、従来のボアホール総合観測装置の歪計を歪地震計として活用し、短周期の歪変動に対する東濃地域の地下水応答の特性を調べる。
- (5) 能動的な地下水変動（揚水・リークなど）を計画的に発生させ、周囲の間隙水圧・水位・歪・ラドン・地下ガスなどの応答を調べ、東濃鉱山周辺の各パラメータの応答特性を解明し、地震に対する応答特性の解明に役立てる。
- (6) これまで部分的に確立された各観測データ回収のネットワークを拡充し、東濃地科学センター及び関連各大学の研究者間におけるデータの速やかな

共有を構築・維持するためのネットワークの整備を行う。

(7) 陸域地下構造フロンティア研究プロジェクトの最終年度であり、地下水・地殻変動・地下ガス変動の総合的な比較検討を行って、5年間の研究を通して得られた成果の取りまとめを行う。

3.5.3 今後の課題

地震研究では、良質の観測地点において、精度の高い観測を長期間継続することが第一であり、その意味で地震に伴う地下水位・間隙水圧・地殻歪の変動がしばしば検出される東濃地域は、研究を継続する上で望ましい条件を揃えている。

これまでの各種観測を継続し、地震に対する応答性の解明と、新しい観測手法の開発を軸に研究を進め、地殻監視(Geo-monitoring)体制を確立する。地殻監視体制は、下記の項目に重点をおいて整備を進める。

- ・ 観測点の地震応答特性及び前兆的な変動のメカニズム解明に向けた観測の継続・拡充。
- ・ 最初の 5 カ年計画によって、多深度における同時観測の有効性が認識されたことから、既存のものを利用した、或いは新規に掘削した多数の 1000m クラスの試錐孔における多深度間隙水圧・水温観測網を確立すると共に、多深度観測に適用可能なラドン計の開発などを行う。
- ・ 東濃地域の土岐花崗岩の特性を調べるため、近傍の土岐花崗岩以外の基盤における地下水位・間隙水圧、地殻変動観測点を確立する。
- ・ 従来の観測機器をそのまま適用した場合、測定精度やサンプリング間隔に不満が残った。これらの克服を目的とした、機器の改良・開発を行う。

我々の研究対象としている地下水変動・地殻変動・地下ガス変動は、地震の震源近傍、震源から観測点までの伝播、観測点周辺のそれぞれの場において、違った関係を示す可能性がある。まずは観測点周辺の場における相互の関係を把握するために、多深度観測点を確立することと並行して、人工的な水圧変動・地下ガス変動を与えて観測し、応答特性を把握する研究を行う。

地震と地下水挙動に関する研究 研究業績一覧

1998年陸域地下構造フロンティア国際ワークショップ

International Workshop on Frontiers in Monitoring Science and Technology
for Earthquake Environments at Tono Geoscience Center

1. Ishii, H. and T. Yamauchi (1998): Multi-component Borehole Instrument for Earthquake Prediction Study and It's Application for Rock Mechanics. W2-5.
2. Wakita, H.(1998): Introduction to geochemical, hydrological, and strain measurements. W1.
3. Kawabe, I., T. Ito, K. Kawasaki, K. Nagamine, K. Yamamoto and M. Adachi(1998): Seismo-geochemical monitoring at a deep bore-hole well of Nagashima spa in Yoro-Ise Bay fault zone, central Japan. W2-2, 1-4.
4. King, C.-Y., S. Azuma, G. Igarashi, M. Ohno, H. Saito and H. Wakita (1998): Earthquake-Related Water-Level Changes at 16 Closely Clustered Wells in Tono, Central Japan. W2-3.
5. Igarashi, G. (1998): Temporal variations of tidal response of well water level related to earthquakes. W2-4.
6. Ishii, H. and T. Yamauchi(1998):Multi-component Borehole Instrument for Earthquake Prediction Study and It's Application for Rock Mechanics. W2-5, 1-6.
7. Azuma, S. and the Earthquake/Groundwater Research Team(1998): Monitoring groundwater behavior, emitted gases, and crustal activities (accompanying earthquakes) in and around the Tono Mine. WP-3, 1-5.
8. Sasaki, Y., S. Tasaka, D. Mutou, A. Miwa, R. Suzuki and S. Azuma (1998): Observations of Ground Water Radon Concentration at the Tono Mine, Gifu Prefecture, Central Japan. WP-4, 1-4.
9. Tasaka, S., Y. Sasaki, M. Matsubara, D. Mutou and H. Takada(1998): Continuous Monitoring of Underground Water at Atotsugawa Fault- Relation of Radon Concentration, Water Temperature and Water Flow Rate to Series of Earthquakes near the Nagano and Gifu boundary -. FP-5; 1-4.
10. 脇田宏・五十嵐丈二・梅田浩司 (1996) : 岐阜県土岐における地下水位観測
－遠地大地震前の変化－. 地球惑星科学関連学会 1996 年合同大会予稿集,

11. 田阪茂樹・佐々木嘉三・山内常生・宮島力雄・和田博夫 (1997) : 岐阜県神岡鉱山における地下水中のラドン濃度連続観測. 月刊地球, Vol.18, 28 - 35.
- 石井 紘 (1997) : 深部ボアホール地殻活動総合観測と今後の地震予知研究. 月刊地球号外, No.18, 109-114.
12. Kusumoto,F., H. Ishii and K. Soma (1997): A study on rock behavior of diverging tunnels using the new measuring system, Proceedings of ISRM 8th congress, 1403-1406.
13. H. Ishii, T. Yamauchi and F. Kusumoto (1997): Development of High Sensitivity Borehole Strain meters and Application for Rock Mechanism and Earthquake Prediction Study Rock Stress, 253-258, Balkema.
14. H.Ishii, G.Chen and Y.Ohnishi (1997): Estimation of Far-field stresses from borehole strainmeter observations. Rock Stress, 259-264, Balkema.
15. 吾妻瞬一・地震地下水研究チーム (1998) : 97年3月愛知県東部の地震に対する東濃鉱山周辺の地下水応答特性, 地球惑星科学関連学会1998年合同大会予稿集, P352.
16. 山内常生・石井 紘・松本滋夫・平田安廣 (1998) : 初期応力測定用メモリ一内蔵回収型歪計の開発. 地下深部における地殻変動連続観測に向けて研究会 収録, 8-13.
17. 吾妻瞬一・大澤英昭・地震地下水研究チーム (1998) : 東濃鉱山周辺における地震に対する地下水位・間隙水圧の変動特性. 日本応用地質学会平成10年度研究発表会, 21-24.
18. 吾妻瞬一・地震地下水研究チーム (1998) : 総合観測井における水位・歪・傾斜・水温・地下水溶存ガスの同時連続観測. 日本地震学会1998年秋季大会講演会, P65.
19. 浅井康弘・青木治三・大久保慎人・吾妻瞬一 (1998) : 岐阜県瑞浪市における地下水位連続観測. 日本地震学会1998年秋季大会講演会, P67.
20. 石井 紘 (1998) : 深部ボアホール地殻活動総合観測の重要性・今後の短期予知研究と地殻変動連続観測. 月刊地球号外, 新地震予知研究, No.20, 198-204.
21. 石井 紘・藤森邦夫・向井厚志・中尾 茂・松本滋夫・平田安廣 (1998) : 深度800mのボアホールにおける地殻活動総合観測. 月刊地球号外 断層解剖計画, No.21, 14-20.
22. 藤森邦夫・石井 紘・向井厚志・中尾 茂・松本滋夫・平田安廣 (1998) : 注水試験に伴う地殻変動. 月刊地球号外 断層解剖計画, No.21, 38-43.
23. 石井 紘・大倉敬宏 (1998) : 南アフリカ金鉱山における歪観測と地震発生

— 震源近傍における観測 —. 月刊地球, No.7, 419-422.

24. 石井 紘 (1998) : 地震予知研究のためのボアホール地殻活動総合観測装置と岩盤工学への応用. 第 19 回西日本岩盤工学シンポジウム論文集, 3-10.
25. 山内常生・石井 紘・松本滋夫・平田安廣 (1998) : 初期応力測定用メモリ一内蔵回収型歪計の開発. 第 19 回西日本岩盤工学シンポジウム論文集, 73-78.
26. 石井 紘・中尾 茂・松本滋夫・平田安廣(1998) : ボアホール地殻活動総合観測装置で観測された伊豆半島東方沖群発地震の前兆的地殻変動. 地下深部における地殻変動連続観測に向けて, 研究会集録, 47-51.
27. 吾妻瞬一・地震地下水研究チーム・脇田宏 (1999) : 地震に対する東濃鉱山周辺の地下水応答 (構造敏感性か, 間隙水圧の伝播か?), 地球惑星科学関連学会 1999 年合同大会予稿集, CD-ROM 予稿集, Sj□P005.
28. 三輪篤・佐々木嘉三・田阪茂樹・鈴木亮・武藤大輔 (1999) : 東濃鉱山におけるドン観測. 地球惑星関連科学会 1999 年合同大会予稿集, CD-ROM 予稿
29. King, C. Y., Azuma, S., Igarashi, G., Ohno, M., Saito, H. and Wakita, H. (1999) : Earthquake-related water-level changes at 16 closely clustered wells in Tono, central Japan, Journal of Geophysical Research, Vol.104, 13,073-13,082.
30. 山内常生・石井 紘・松本滋夫・平田安廣 (1999) : 初期応力測定用インテリジェント回収型歪計の開発. 日本地震学会講演予稿集 1999 年秋季大会, C02.
31. 石井 紘・山内常生・松本滋夫・青木治三・吾妻瞬一 (1999) : 深いボーリング孔のオーバーコアによる歪み観測と初期応力測定. 日本地震学会講演予稿集 1999 年秋季大会, C11.
32. 池田隆司・小村健太郎・飯尾能久・石井 紘・松本滋夫・山内常生 (1999) : 阿寺活断層ドリリング (II)- 岐阜県福岡町における地殻応力測定 - . 地震学会講演予稿集 1999 年秋季大会, C13.
33. 石井 紘・山内常生・佐野 修・平野 享・松本滋夫・平田安廣・中尾 茂 (1999) : 釜石鉱山における 3 次元歪み・応力観測 - トンネルの 2km 奥, かぶり 450m 地点での 2 本のボアホールにおける歪み観測による - . 日本地震学会講演予稿集 1999 年秋季大会, C60.
34. 吾妻瞬一・地震地下水研究チーム (1999) : 土岐花高岩体は地下の覗き窓か? (地下水応答を示す地震と領家帯の分布の相関の有無). 日本地震学会講演予稿集 1999 年度秋季大会, P124.
35. 北川有一・地震地下水研究チーム・浅井康広 (1999) : 岐阜県土岐市東濃鉱

山周辺の観測井での地震に伴う地下水位・間隙水圧変化. 日本地震学会講演予稿集 1999 年度秋季大会, P158

36. 浅井康広・青木治三・北川有一・吾妻瞬一・山内常生 (1999) : 岐阜県東濃地域で観測された, 1999 年 3 月 16 日滋賀県北部地震 (M4. 9) に伴う歪・地下水位変化. 日本地震学会講演予稿集 1999 年度秋季大会, P159.
37. 北川有一・吾妻瞬一 (2000) : 東濃鉱山周辺における地下水位の歪・気圧応答の周波数特性と地震に伴う変動の一考察, サイクル機構技報 No.7, 予定

共同発表

38. 熊澤峰夫・國友孝洋・脇田宏・吾妻瞬一・安藤雅孝・何培明 (1997) : 「陸域地下構造フロンティア研究」の現状. 動燃技報 No.10, 495-106.
39. 國友孝洋・吾妻瞬一 (1998) : 遠隔観測手法で地殻の動きを監視. SEISMO 第 2 卷第 7 号, 2-3.
40. 斎藤宏・湯佐泰久・小出撃・松井裕哉・太田久仁雄・濱克宏・川瀬啓一・杉原弘造・中島崇弘・吾妻瞬一 (1999) : 東濃地科学センター, 東濃鉱山, 超深地層研究所計画用地, 日本地質学会第 106 年学術大会, 見学旅行案内書, pp□1-18
41. Saito, H., Yusa, Y., Koide, K., Matsui, H., Ota, K., Hama, K., Kawase, K., Sugihara, K., Nakajima, T. and Azuma, S. (1999) : THE TONO MINE (Geoscientific studies) , The 7th International Conference on Radioactive Waste Management and Environmental Remediation (Field Trip) , The 7th International Conference Proceedings on Radioactive Waste Management and Environmental Remediation, ASME1999 (ICEM '99) , pp.1-30.

4. 活断層帯での地殻活動研究

4.1 研究の目的・意義

活断層はどのような構造をもつのか、いかなる過程を経て地震発生に至るのか、多くの点が不明なままである。本研究の目的は、数十キロメートルから、破碎帶の岩石の顕微鏡で見る数ミリメートルまでの、広い範囲のスケールの研究を通して、活断層の構造と挙動を明らかにしようとするものである。ここでは、地震計とGPS受信機を用いて広域の動きをさぐり、地質学的、精密計測の手法を用いて破碎帶およびその近傍の岩石の性質を理解しようとする。

地震の予測ないし予知は、地震のメカニズム研究の究極の目標である。もちろん一足飛びに達成は難しい。断層周辺でどのように応力や歪みが蓄積され、断層の破壊に至るのか、地震発生の場と物性の理解が必要である。本研究は、跡津川断層系（図4-1）に焦点を当て、断層の構造や挙動を集中的に観測、観察を通して、断層のメカニズム研究を進める。

4.1.1 本研究の特徴－調査坑と広域調査

本研究の特徴は、世界で始めて掘削された活断層調査専用の坑を用いた研究にある。この調査坑を見学した世界の研究者は、「こんな素晴らしい施設が活断層研究のためだけに作られたのか」と一様に驚いている。地震研究におけるこの調査坑の持つ意味は大きい。

活断層破碎帶は侵食されやすく、破碎帶が地表で観察できる場合は希である。たとえ観察できても、地表に現れた破碎帶の岩石は風化や侵食により変質し、地震断層が生じたときの物理・化学的状態を示さない。従って、この種の変質した岩石の分析を通して、地震発生時の状態を推定することは難しい。また、地震観測のような機器を用いる測定でも、断層付近は一般に谷や窪地を作り、地形的影響を強く受けるため測定そのものが困難なことが多い。活断層を貫いた茂住調査坑はこれらの難点を解決してくれた。

ただし、活断層を貫くトンネルは数多く掘削されてきた。それにもかかわらず、茂住調査坑が必要だった。一般に、活断層の破碎帶部分はもろく掘削は困難であり、多くの場合、掘削と同時にコンクリートを注入し、壁を固めトンネルを安定させる。通常のトンネル工事では、活断層調査に必要な地質や物性の調査や試料の採集などは、十分に行われないまま掘り進む。さらに掘削終了後、トンネル内で精密観測はもとより、長期にわたる繰り返しの調査観測は不可能である。調査坑は”わざわざ”掘らなければならない。

4.1.2 跡津川断層－茂住断層の選定理由

地震研究にとって興味深い、かつ断層を貫く調査坑を掘削することが可能な活断層はどこにあるのだろうか？このような条件を満足させる断層や地点は日本では限られる。跡津川断層の近くには、現在も稼働している神岡鉱山があることから、ここが最適調査地点として選ばれた。

神岡鉱山（岐阜県神岡町）の茂住坑道は、茂住断層まで 300m の位置にある。日本で最も活断層にアクセスしやすい坑道であろう。掘削の装置や施設も、既存のものが利用できる。掘削後も、調査坑の維持・管理や運用も容易である。神岡鉱山は新しい地下利用に力を入れており、東大宇宙線研究所のスーパーK ミオカンデも誘致している。

さらに、茂住坑は、岐阜県北部にある跡津川断層系の中にある。本地域では、京都大学防災研究所が、1967 年に観測所を設置し、地殻変動と地震観測を行ってきた。1976 年より地震観測網をテレメータ化し、その後観測点は能登地方にも拡げた (Mikumo et al., 1981)。20 数年間の観測を通して、跡津川断層に沿う線状の地震分布、北アルプス火山の間での地震活動の相補性、地震空白ブロックの存在など興味深い現象が発見された (図 4-2)。一方、国土地理院により、跡津川断層の東側 (跡津地域) でクリープが、測地測量の手法により明らかにされた。日本で最初に発見された活断層上のクリープでもあり、その解明も本研究のテーマの一つである。

4.2 研究目標

本研究は、調査坑内の調査ばかりでなく調査坑を取り囲んで、広域集中的に観測を行う。跡津川－茂住断層を取り囲み、大規模 (約 50 km)、中規模 (5 km)，小規模 (500 m、調査坑サイズ) の異なるスケールで断層およびその周辺の構造や動きを観測や観察を通して追跡する。どのような背景を持つテクトニクスの場にあり、どのような構造を持つ断層型であるかを知った上で、断層に関する総合的研究である。

茂住調査坑 (図 4-1) の利用には二つの目的がある。それらは、①深部での活断層破碎帯の観察や観測を行うため、②地下深くの良好な観測に適した環境を利用する。各研究項目は、これらのそれぞれの特質を活かす。破碎帯は過去の地震を記録する記録紙であり、どんな温度・圧力条件の下でどのような破壊が生じたかを明らかにできる。茂住坑内の調査から、茂住断層のすべりは急激なものではなく、ゆっくりしたクリープ性の可能性も指摘されている。破碎帯の物質を採取して、破碎帯の年代 (地震発生の年代)、すべりの様相を推定する。

4.3 研究計画

本研究では、坑内における観測や調査をはじめ、活断層を取り囲む広域の地殻の構造や変形の様相を追跡する。同じ時間軸上に異なるスケールと異なる項目の変動を並べて、活断層の応力蓄積過程を追跡するのが、本研究の計画の柱である。

4.3.1 調査坑内の計画

調査坑を利用する重要な計画として、断層破碎帯のトラップ波の観測がまず挙げられる。480mの長いトンネルは、この種の観測を可能としている。断層に直交して地震計を10mおきに設置し、破碎帯の中を伝わる波をキャッチし地下深部で断層が、どのようにつながっているか明らかにできる。トラップ波の観測は、茂住坑の4km南の跡津坑道（神岡鉱山）でも行われる。跡津坑道では、さらに地質調査所により、地殻歪の観測も進められている。活断層付近で応力がどのように変化するかも重要な課題である。地形の効果も考慮しつつ応力測定や解析が進められる。

坑内ではほぼ一年中温度が一定に保たれ、降雨の影響も少ない。トンネルの中の温度は一年中一定で、雨が降った影響も現れにくい。このため地殻歪、電気伝導度、地震波速度変化など精密な測定が可能となる。佐野（1996）は、極めて興味深い観測結果を釜石鉱山で得た。GPS観測結果と地震波速度変化は、地震時の瞬間的な変動に対して同じような性質を示すが、地震後のゆっくりした変動に対しては、地震波速度は異なるレスポンスを示した。地殻が応力緩和を起こしているためかも知れない。岩石中の割れ目を水が移動すると、地震波速度は回復する。このメカニズムを明らかにするために、比抵抗、地殻歪、地震波速度を同時に測定する必要がある。このような測定により初めて、気象擾乱を取り除き、テクトニックな信号を取り出すことができる。本研究では「一面破碎法」と呼ばれる応力測定法の開発研究も行われる。

さらに、破碎帯にとって、地下水がどのように化学的、物理的な作用をするかは重要な課題である。地下水が破碎帯の鉱物と反応し、破碎帯を変質させ、その反応した地下水はさらに下部の破碎帯と反応を続ける。地下水がなければ破碎帯は急速に成長しない。このような地下水研究を、調査坑を利用して化学的および陸水学的な面から行う。

4.3.2 調査坑外の広域にわたる計画

跡津川断層の大きな特徴は“クリープ”が進んでいることであろう（図4-4）。このために、国土地理院は、1976年より跡津川断層沿いの2ヶ所で断層を挟んで辺長測量を続けてきた。B地点付近で、右ずれのセンスで年2mm程度の割

合でずれるのが分かったが、A 地点付近の測線網ではずれは見つかっていない。断層には、ずるずるすべる部分（前者）とぴったり固着している部分（後者）との両方があると考えられる。この 2 つの性質がからみあって、断層の性質が決められる。地理院の測線距離はほぼ 2 km 程度だが、断層からの直線距離は 500 m 以内のため、クリープが断層面上のどの深さで進んでいるのかが分からない。深い部分までクリープが進んでいれば、その動きは断層の両側に拡がっている。浅いところにクリープが集中すれば、変動は断層のすぐ近くだけに集中するはずである。これらの変動は、断層を囲む広い地域で観測して解明を目指す。このため、断層を挟んだ 12 点で GPS 観測が進められている。さらに、現在クリープが起きている部分では、微小地震が起きていないことが明らかになった。

従って、地震観測と GPS 観測を基本に、広域の変動と跡津川断層のクリープとの関連を明らかにする。また、地質調査をもとに跡津川断層とそれに付随すると思われる茂住断層との関連を明らかにする。地下で見られる断層が、どのような頻度で地震を発生させてきたのか、重要な断層のパラメータを追求する。

4.3.3 今後の課題

今後は、地震活動、GPS、トラップ波、坑内精密計測（比抵抗、地震波速度変化、歪み、間隙水圧、地下水位）、地球化学データなど全ての時系列データを同じ時間軸上に並べて比較検討する。ここから、岩石および破碎帯の物理化学的挙動が明らかにされよう。このような時間軸上に全てのデータを並べることにより断層の動きをリアルに捉えることが可能となる。

（1）起こりうる想定イベント

まず、跡津川断層の地震空白域にクリープが生じる。直ちに、跡津坑道内に設置された歪計（地質調査所）、4 km 離れた茂住坑内の精密連続観測に動きが検出される。同時に、地震空白域両端付近と群発地震常習地点で微小地活動が始まる可能性が高い。跡津川断層稠密 GPS 観測網から、クリープの大きさが推定される。まもなく、国土地理院によるメコメータ辺長測量が始まり、浅部でのずれの大きさが分かる。これらのデータを総合して、クリープの大きさの断層沿いの分布が分かる。さらに、茂住坑内の種々の精密連続観測からは、クリープにより生じた応力が、時間と共に緩和していくことも明らかになるだろう。

原因が、クラック内の水の移動であることも分かるかもしれない。さらに、国土地理院の広域の GPS 観測から、飛騨地方全域に変動が生じているが分かり、その原因は深部の水平すべりであると説明されるだろう。この時には、広域の地震活動も変化するだろう。これにより地震活動が地殻応力の指標であること

がここでもはっきり示される。このような動きが、本研究計画の観測からよみとれるかも知れない。もちろん、これは一つのシナリオに過ぎないが、実際にも起きるものと我々は確信している。

(2) 次の課題

主断層の跡津川断層をいつ掘るのか？

茂住断層は跡津川断層と平行に走るいわば二次的な断層である。主断層の跡津川断層に挑戦する方が研究対象としても興味深い。しかし、いきなり跡津川断層に挑戦するには解決すべき難問がある。

1) 跡津川断層には地下深くからアクセスする坑道がないため、縦坑または斜坑を掘って深度をかせぐ必要がある。これは大きな費用がかかる。

2) 跡津川断層の破碎帯は茂住断層に比べて厚く、破碎帯中軸部だけでも 100 m に達する。このため、破碎度も進んでおり、難工事が予想される。この計画の目的は、調査坑内で観察や観測を続けることだから、調査坑の壁を保存しつつ掘削しなければならない。いきなり大断層よりまずは茂住断層で経験を積む必要がある。

3) 跡津川断層は百万年以上も動き続けてきたため、その歴史は複雑で、読みとるノウハウも積み重ねが必要である。それに対し、若い茂住断層は、断層の歴史も単純で最初に取り組む相手としては容易である。

断層の大小にかかわらず、断層の基本的な性質は同じはずである。従ってまず茂住坑から、何が読みとれるかを明らかにするのは大切である。その後、茂住調査坑研究の成果を足がかりに、跡津川断層に挑戦すべきことはもちろんである。これが我々の課題である。

文献

- 松田時彦 (1966) : 跡津川断層の横ずれ変位, 地震研彙報, 44, 1179-1212.
活断層研究会 (1991) : 新編日本の活断層, 東大出版会, 437p.
Mikumo, T., Wada, H. and Koizumi, M. (1988): Seismotectonics of the Hida region, central Honshu, Japan, Tectonophysics, 147, 95-119.
佐野修、村上忠輔、田中義晴、平田篤夫、高分解能弹性波速度モニタリングと地震 (1996) : 日本地震学会講演予稿集, 2, C52.

図 4-1 跡津川活断層系（日本の活断層より）

図 4-2 北部中部地方を中心とする震源マップ（京大防災研地震予知研究センターによる。期間は 1980-1990 年、マグニチュードは 1 以上）。跡津川断層や茂住断層に沿って線状の地震の配列が見られる。

図 4-3 茂住調査坑と既存抗動との関係。茂住調査坑は 2 つの並行する断層を貫く。

図 4-4 跡津川断層沿いの測地測量結果（国土地理院による）。A 地域ではクリープは観測されていないが、B 地域では、年間 1.5 mm 程度のクリープが観測されている。

図 5-5 （上）広域、中規模、坑内観測の関係。〔下〕断層と推定スリップ面との関係。

図 4-6 フロンティア研究による観測点の配置図。右上枠内には、活断層調査坑および試推孔、および破碎帯の位置を拡大して示した。

4.4 研究成果

4.4.1 広域地震観測

（1）研究の目的

跡津川断層系では、地震の震央^{*67)}分布が地表に見られる活断層と極めてよく一致している。跡津川断層系ではその 3 つの主な断層に沿って地震が線状に並ぶ。この断層では 1858 年に M 7.0 安政飛騨（飛越）地震が発生している。また、断層の一部でクリープ運動が見いだされている。

茂住断層を横断して掘削された観測坑内では種々の観測が実施されているが、この結果を上記のような断層系における地震活動との関連で理解するためには、断層系全体における地震活動を背景として理解しておく必要がある。従って、観測坑周辺を含む断層系全体における調査を、観測坑に対するサイトサーベイとして実施し、坑内計測結果と関連づけて、応力の蓄積、地震発生過程を明らかにすることが本研究の目的である。また、坑内計測のために、震源データなどを提供することも目的の一つである。

（2）研究の目標

微小地震観測によって、震央分布と活断層の対応が良いことが分かった。しかし、この地域の観測網は観測点間隔が約 30 km もあり、地震の深さを議論するには十分ではない。この観測網のデータで、地震が上部地殻のみに発生していることが明らかにされた。さらに進んで、断層面と活断層の関連を調査するためには、観測網の充実が必要であった。この断層の一部において、クリープ現象が見出された。クリープ地域は、サン・アンドレアス断層^{*68)}では、熱流量^{*69)}が高く地震の震源が浅い。しかし、跡津川断層では、クリープ地域の震源が浅いとは言えずむしろ深い。これが震源決定の誤差によるものかどうか、

クリープ地域と他の地域とはどのような違いがあるのか、これらの調査を地震観測の最初の目標とした。

(3) 研究計画

観測網を密にすることが震源の精度向上の第一歩である。跡津川断層周辺に6点の臨時観測点を年次計画で順次設置し観測を続けている。データは京都大学防災研究所上宝観測所に伝送し、他の観測点のデータとともに処理されるようにした。こうして図4.4.1-1に示すような、広域かつ高密度な観測網を稼働させることができた。実際には、東京大学地震研究所、名古屋大学理学部、防災科学技術研究所などの観測点のデータが収録されている。1997年には地質調査所によって三川原に300mの深井戸観測点が設置され、この観測点の地震計のデータも観測網に加えて解析している。

全観測点のデータは上宝観測所に集められて、定常観測網とともに解析されている。既設観測網が存在したので、本プロジェクトの地震観測は、支障なく進めることができた。地震調査研究のために既設の観測網のデータをほぼリアルタイムで有効に利用できるようにすることは、今後の研究にとって大切だと思われる。

(4) 研究成果

1) 断層沿いの震源分布

図4.4.1-2には、臨時観測点など断層近傍の観測点を含むデータのみを用いて再決定した震源分布を示す。三川原、洞、茂住、山ノ村、祐延、寺路、天生の観測点が含まれたデータでP波の観測データが6点以上のものを用いた。震央距離分布にはそれほど大きな違いは見られず、3つの断層に沿って地震が並ぶ傾向は同じである。一方、深さ分布は著しく改善された。まず、地震の下限が明瞭になり、断層沿いでの変化が良く分かるようになった。また、地震の上限が下限とほぼ平行に変化することが分かる。特にクリープしているとされる地域では、深さ7km程度までは地震が非常に少なく、その下方で地震が17-18kmの深さまで発生している。さらに、震源が決定できない小さな地震も少ないと、茂住観測点のS-P時間⁷⁰⁾の頻度分布でも確認されているが、全く発生しないかどうかは、さらに長期間の観測を要する。

2) 断層沿いの地震活動

断層北東部の祐延観測点を含むことによって、深さのばらつきが小さくなり、この付近では地震発生層の厚さが薄くなる傾向があることが分かってきた。一般に、地震発生層が浅くなる地域では、地震発生層の厚さも薄くなる傾向があ

るようである。このことは地殻内地震発生のメカニズムを知る上で重要であると思われる。しかし、これはさらにデータを蓄積して確認する必要がある。図 4.4.1-3 には跡津川断層に沿う地震の時空間分布を示す。示した範囲は図 4.4.1-2 の断面と同じで断層に沿って 70 km の長さをとっている。地震活動はクリープ地域の両側で活発であり、クリープ地域はランダムに地震が発生しているように見える。

図 4.4.1-4 には跡津川断層沿いの地震数と地震の M を深さの断面図とともに示す。地震数は断層から幅 20 km の地震について、2 km ごとの数を示した。数の議論にはマグニチュードの下限を考慮すべきであるが、今回は数が少ないので全データを用いた。M を考慮しても大勢は変わらないが、これは M の分布（図 4.4.1-4 の中図）を見ればわかる。図 4.4.1-4 上図により茂住付近のクリープ地域の両側で地震が数多く発生していることがわかる。また、この地域では M 3.2 の地震が最大で両側の M 4.3 程度の最大マグニチュードと比較して、放出される地震のエネルギーが少ないことがわかる（図 4.4.1-4 中図）。

3) クリープ運動との関連についての検討

クリープ地域の地震の深さが深いことは、カリフォルニアのサン・アンドレアスと比較すると全く逆になる。サン・アンドレアス断層でのクリープ地域は、熱流量が高く、地震の下限が浅い。しかし、跡津川断層では逆であることが分かった。今のところ完全な答えはないが次のように考えることができる。断層は両側の動きを受けて止まっている。これを支えているのが地殻上部の地震発生層だと考えると、歪速度が大きい地域では深いところまで地震が発生して全体を支える必要がある。図 4.4.1-5 にはこの様子を模式的に示した。クリープ地域は歪速度が大きく、この両側で地震が数多く発生する。これは歪の不連続のためであろう。クリープ地域の深い地震のストレスドロップ^{*71)} は大きく、この地域は大きな歪を蓄積しているのではなかろうか。従って、通常は地震活動が低く、大きな地震も発生しない。この付近が破壊すれば大地震が発生するのではなかろうか。GPS の稠密観測結果ともこのモデルは調和的だと言える。すなわち、断層は shear zone を形成しており、全体としてはロックしている。断層地域は両側の動きを支えていることになる。このことはより広い地域の GPS 測定からも確かめられつつある。

(5) 今後の課題

これまでの解析では、跡津川断層系を一つの断層として扱ってきた。これは跡津川断層沿いの地震はマグニチュードが比較的小さく、観測期間がまだ短いので、十分なデータが得られていないからである。今後は 3 つの断層を分離し

て、それぞれの断層での地震活動の様子を明らかにする必要がある。断層沿いの応力分布は地震のメカニズムから決定できる。観測網が密になったので、P波初動によるメカニズムをマグニチュード2以下の地震について決定することができるようになった。現在データを蓄積しているのでこれらによって、3つの断層に関する応力場の方向を知ることができる。断層とP、T軸の向きの関係が分かる。3次元的には精度の問題があるが、数が増えればストレス・インバージョンなどの方法での解析も可能になる。特に応力の深さ方向の勾配はストレスをどの深さで支えているかの指標になる。この断層付近で地殻応力測定を実施することが望まれる。また、波形解析から、ストレஸドロップなどを知ることができるので、この面からの研究をさらに進めることも大切である。

震源深さの絶対精度は地殻の速度構造に依存するので、速度構造調査もこれらの改善に役立つ。浅い部分の無地震層の深さなどには決定的に影響するので、さらに詳細な議論のためには速度構造調査が必要だと思われる。また、これらの構造不均質自体の調査も断層運動と関連すると思われるので、重要である。

一方、坑内計測などでは面的な変化ではなく、時間変化が検出される。広域においても時間変化を検出するための研究を行い、坑内計測との関連を探ることが必要である。広域における時間変化としては、GPSなどの地表における地殻変動だけでなく、地震発生層の中での変化を観測する必要がある。これには地震の深さ変化、メカニズムからの応力場の変化、地震波速度の変化、反射面の変化などが考えられる。

4.4.2 GPS 地殻活動観測

(1) 研究の目的・意義

跡津川断層系の動きを、大きなスケールから中規模スケール変動の場から捉え、断層面およびその深部延長部での、固着の状態やすべり分布の詳細を明らかにすることを目的としている。これにより、内陸活断層における応力蓄積形態の解明を目的とする。最近の国土地理院全国GPS観測網による観測成果により、新潟から跡津川断層を通り、琵琶湖に抜ける変位速度場の急変帯が注目される(図4.4.2-1)。この変位速度場の急変帯には過去の内陸地震が帶状に分布し、測地測量からのインバージョン解析^{*72)}からも内陸地震活動からも、活発なゾーンであることが指摘されている。このゾーンに位置する跡津川断層では、微小地震が断層に沿って分布し、断層中央部直上では国土地理院の精密光波測量観測より1.5mm/年の変位速度を持つクリープが観測されており、跡津川断層は日本で唯一、地表クリープ運動が確認されている断層である。

(2) 研究目標

図 4.4.2-1 から分かるように、跡津川断層周辺の国土地理院全国 GPS 観測網の観測点分布は粗く、跡津川断層系での、固着・すべり分布の詳細を明らかにするには適していない。従って、跡津川断層に直交する基線上に 7 点（上宝 KMTK、神岡 KAMI、割石 WARI、牧 MAKI、茂住 MOZU、猪谷 INOT、榆原 NIRE）からなる稠密 GPS 観測点（図 4.4.2-2 中▲、また図中●は国土地理院 GPS 観測点を表わす）を設置して、1997 年 4 月末より観測を開始している。研究目標は、跡津川断層系における変位速度場を 1 mm/年の精度で観測することにより、地表クリープまで含めた断層の固着・すべりの詳細を明らかにすることである。

(3) 跡津川断層稠密 GPS 観測網

観測点は谷間にあることから、できるだけ受信状況を良くするために、主として公共の建造物の屋上に設置されている。ただし、茂住観測点（MOZU）のみ、3 m のアンテナ柱を建て観測を行っている。受信機は 2 周波 GPS 受信機アシュテック Z-12 を用い、各観測点でデータは 30 秒サンプリングで取得され、京都大学防災研究所地震予知観測センター上宝観測所に公衆回線で収録されている。

データ解析には GPS 解析ソフトウェア BerneseVer.4.2 を用い、周辺の国土地理院 GPS 観測点のうち 5 観測点データと本研究で設置している 7 観測点データを併せて、1 日毎に解析している。まず、上宝 KMTK 観測点の座標を筑波から ITRF96 座標系で求め、上宝の座標を固定して、2 時間毎の遅延量とともに各観測点の座標を日々推定している。図 4.4.2-3 に時系列解析例として、KMTK を固定点とした MAKI、WARI、KAMI の 3 観測点の東西成分時系列を示す。

(4) 研究成果

1) 観測結果

図 4.4.2-4 は、1997 年 5 月 – 1999 年 3 月までの解析結果を示したものである。解析結果は上宝 KMTK に対する相対座標変化であるが、それを跡津川断層上の国土地理院観測点 950279 に対する水平変位速度ベクトルとして、矢印でプロットしてある。黒矢印は国土地理院の日々の解析結果を示したものである。本研究での解析結果（本研究の跡津川観測網 7 観測点 + 国土地理院 5 観測点）は、赤い矢印で描いている。国土地理院での黒矢印と赤矢印がほぼ一致していることから、2 つの独立な解析はほぼ同じ変位速度場を与え、本研究での解析精度は国土地理院と同程度を有していることが分かる。なお、解析から求められた形式誤差は、1 mm/年 以下を達成しているが、断層直上で観測されている 1.5 mm/年の変位速度を持つ地表クリープによる変動まで解明する観測精度を達成する

にはあと2-3年の観測期間を要するであろう。

まず、断層から離れた国土地理院観測点、例えば跡津川断層からそれぞれ約25 km離れた南の観測点940058は西に6.5 mm/年の速度で、北の観測点950249は東に5 mm/年の速度で変位しているのが分かる。また、観測点KMTKから北へ跡津川GPS観測網を見していくと、観測点KMTKから観測点KAMI、WARIと断層に近づくにつれ、変位速度が小さくなりまた変位速度ベクトルの方向が断層に平行成分を持つようになる。さらに、北上して跡津川断層を超えると、変位速度ベクトルの向きは逆転し、MAKI・INOTといった跡津川断層と牛首断層に挟まれた観測点では、変位速度が小さくなっている。さらに北上して牛首断層を超えた観測点NIREでは再び大きな変位速度を示している。

2) 断層固着モデル（1次モデル）

上記のGPS観測を説明しうる簡単なモデルを図4.4.2-5に示す。跡津川断層下約15 kmの深さまで固着しており、断層の東西の厚さ15 kmの弾性地殻ブロックが東西に約20 mm/年の収束速度で衝突しているというモデルである。このモデルから計算される変位速度ベクトルを図4.4.2-4に青矢印で示している。図4.4.2-4から分かるように、この単純なモデルは跡津川断層と牛首断層に挟まれた領域の外側では観測された変位速度ベクトルを良く説明している。しかしながら、領域の内側では速度ベクトルが小さく跡津川断層と牛首断層といったゾーンで固着したモデルを考える必要があろう。

（5）今後の展開

まず、定常観測を継続することによって、変位速度で1 mm/年の精度で跡津川断層と牛首断層に挟まれた領域における小さな変位速度場の詳細を明らかにする。これらのデータをもとに現在の跡津川断層だけしか考慮していない簡単な固着モデル（図4.4.2-5）に加え、茂住・牛首断層での固着も考慮に入れた、跡津川断層系での固着モデルの構築を目指す。定常観測に加え、国土地理院の精密光波測量でクリープが観測されている、MAKI観測点付近を囲むように3点の1周波GPS観測点を山頂に設置し、1999年の夏季に観測を行った（図4.4.2-3△）。山間部であるため電源がなく、消費電力の小さな1周波GPS受信機を用い、太陽電池を用い、メモリーにデータをため込み収録を行った。冬季には積雪のため観測はできず、今後夏季3-4ヶ月程度の観測を行い、断層直上でのクリープ運動の検証を行う。また、本研究では断層を横切る1側線しか設けていないので、断層の他の領域での動きを見るため、東の有峰湖周辺で、これも夏季のみであるが2点のGPS観測を行った（断層東部位置する△）。点線の三角の地点に可能ならもう一点増設して、今後毎年観測を行い、有峰湖周辺

での変動場も明らかにする予定である。

4.4.3 活断層研究チーム地質グループからの報告

(1) 研究目的・意義

地質グループが主体となって解明すべき問題として、「茂住祐延断層と跡津川断層との関係」「クリープ現象の検出」、「茂住祐延断層は、現在成長中の断層か」、「茂住断層は安政飛越地震で動いたか」などがある。地質グループは、これらの諸問題の解明が内陸地震を引き起こす活断層の形成過程を明らかにすることに大きく貢献するものとして、地表および坑内地質調査を実施してきた(図4.4.3-1)。

(2) 研究目標

本研究の地質グループに関わる主な研究目標は、以下の4項目である。

- ・茂住祐延断層通過位置の確認ならびに断層形態の解明
- ・活断層調査坑道内地質調査および断層破碎帶の記載、断層ガウジ^{*73)}の物理性解析
- ・茂住祐延断層に関する活動性の解明と評価（茂住祐延断層ストリップマップ^{*74)}の作成）
- ・跡津川断層系全体における茂住祐延断層の位置づけならびに形成過程の解明

(3) 研究計画

平成8-9年度には地表踏査と坑内断層岩の分析調査、平成10-11年度は、ジオスライサー^{*75)}やトレンチ調査による活断層の活動履歴の調査を主に実施する。

(4) 研究成果

1) 坑内地質

活断層調査坑道の地質は、神岡鉱業株による探鉱資料、調査坑道掘削先進ボーリング・調査ボーリング、掘削中の地質観察により明らかにされた。調査坑道ならびにその周辺の地質は白亜紀前期の手取層群長棟川累層に属する砂岩・泥岩互層（猪谷互層）からなる。調査坑道内では、この手取層群を切ってA、B2つの顕著な破碎帶が確認された(図4.4.3-2)。いずれも明瞭な破碎帶構造が観察されたとともに、地表で延長が推定される茂住祐延断層の断層面の方向（走向N50°E、傾斜80°S）と一致し、ほぼ水平ないし低角な条線が認められた。

破碎帶物質の検討からは右横ずれの断層運動が重複して起こっている破碎組織が認められること、断層内生成物質の解析からは破碎帶が浅いところで形成されたことが明らかにされた。これらのことから A、B 2つの破碎帶は右横ずれの茂住祐延断層のものであると結論された。

2) 茂住祐延断層の活動性

茂住祐延断層については平成 9 年度に高原川－茂住峠－広川にかけた範囲で地表踏査を行い断層の地表トレース、活動性の解明を目指した。この結果、茂住祐延断層に沿って明瞭な変動地形・第四紀層の変形が確認され、詳細な断層トレースが明らかにされた(図 4.4.3-3)。活断層としての総変位量は最大 0.5 km 程度であるが、調査範囲内では西に向かって減少し、高原川付近では活断層としての証拠が認められないことが判明した。すなわち、活断層調査坑道付近は「活断層の先端部」とみられる。また長棟川左岸の段丘礫層では、断層運動による傾動が認められた。傾動をもたらした断層の垂直変位は 2 m 以上と考えられ、変位の時期は 1860 ± 70 yBP 以降であることが判明した。

地表調査の結果を受けて平成 10 年度には茂住祐延断層の通過が予想された茂住峠東方地点で簡易トレンチ調査(ジオスライサーによる地層抜き取り調査)を行った(図 4.4.3-4)。抜き取られた地質断面は、茂住祐延断層の断層破碎帯とそれを覆う新期の堆積物から構成され、断層による変形が明瞭に認められた。断面には少なくとも 3 回の地震イベントが記録されており、最新イベントは 1858 年の安政飛越地震であること、活動周期は約 1.3 万年であることが明らかになった。

3) 跡津川断層の活動履歴

跡津川断層沿いには明瞭な変動地形が随所に認められ、1858 年に発生した安政飛越地震では断層のほぼ全線ですべりが生じたとされている(松田, 1966; 竹内, 1998)。跡津川断層中央部では宮川村野首地区で行われたトレンチ調査により、約 1 万年前以降の詳細な活動履歴が明らかにされている(跡津川断層発掘調査団, 1989; 粟田・佃, 1993)が、跡津川断層東部の活動履歴の詳細については不明な点が残されていた。このため地質チームでは跡津川断層東部においてトレンチ調査を行い活動履歴の解明を試みた(平成 12 年度トレンチ調査)。

トレンチ調査の実施地点は、常願寺川の支流である真川沿いに発達する段丘に跡津川断層が変位を与えていることが観察される露頭(真川露頭)の上部に選定された(図 4.4.3-5)。トレンチ内で観察された堆積物には、断層活動に起因すると考えられる地滑り構造等が認められ、最近約 2.4 万年間に 6 回以上のイベントがあったことが推定される(図 4.4.3-6)。トレンチ調査地点の地震イベント

の詳細については現在解析中であるが、跡津川断層東部のイベントと跡津川断層中央部のイベントとは、一部は重なるもののその時代は必ずしも常に一致しているわけではない。跡津川断層東部の活動性は中央部と異なる可能性がある。国土地理院の報告によるクリープ現象が断層西部では見られないことや、微小地震活動の区域性なども考慮すると、跡津川断層はセグメント構造をもつことが明らかになった。

4) 跡津川断層と茂住祐延断層の関係

跡津川断層と茂住祐延断層は真川付近で接しているが、活断層としての茂住祐延断層の地表トレースについての調査は十分になされておらず、有峰湖以東で両断層がどのような関係で会合しているのかは今のところよく分かっていない。真川露頭上部トレンチ調査地点は、従来、跡津川断層の延長上とされていた（山田・竹内, 1993）が、跡津川断層とは斜交するリニアメント^{*7 6)} 上に位置し、跡津川断層本体とは別のセグメントに属する可能性もある。このリニアメントはむしろ茂住祐延断層に連続するようにも見える。跡津川断層と茂住祐延断層の会合関係を明らかにすることは、両断層を含めた跡津川断層系全体の運動メカニズムを検討する上で重要なポイントである。このため、平成12年度には両断層の地表トレースを明らかにするため、祐延湖-真川露頭にかけた地表踏査を予定している。

(5) 今後の展開

上記1. 節で述べたように、本研究は陸域地下構造の解明、特に活断層の形成メカニズムの解明をめざした総合的な調査・研究を目的としており、今後は事例研究の対象としている跡津川断層系の全体像を総合的に明らかにし、一般化することを目指す。この観点から、5カ年計画最終年度である平成12年度は、これまで4年間の地質学的な調査研究をまとめるとともに、測地・地球物理や地球化学的な研究分野のグループと共同で跡津川断層系における茂住祐延断層の位置づけを明確にする。その際、茂住祐延断層の深部形態（「茂住祐延断層は地下で跡津川断層と連結しているか」）を知ることが不可欠であり、平成12年度には、今年度実施できなかったガイドウェーブ観測を成功させる必要がある。

今後は、跡津川断層系の主断層である跡津川断層本体について、茂住祐延断層と同様に、地表破碎帯調査・各種物理探査・試錐調査などの基礎調査を行い、跡津川断層系の「活断層沿いの歪みの局在化の実態」、「断層破碎帯の物性解析とすべり様式」、「セグメント構造と活動特性」、「断層形成史および活動史」などを明らかにしつつ、断層破碎帯の形成メカニズムを総合的に解明する。

なお、茂住活断層調査坑道の今後については、まず、跡津川断層系の総合長

期観測ステーションにする方向に加え、同調査坑道は「萌芽的な活断層の先端」という位置にあると見られることから、断層破碎帯形成発達過程に関する実験場として利用する方向が考えられる。

4.4.4 活断層調査坑道における断層岩調査

(1) 研究の目的

国土地理院の光波測量によって、跡津川断層がクリープしている可能性が指摘された。本プロジェクトでは、interseismic period におけるクリープの性質をより深く理解するため、地震波観測、GSP 測量、活断層掘削坑道内における精密測定、および断層の地質学的調査が行われてきた。このうち、筆者は活断層掘削坑道における、断層帶の直接および断層掘削コアの観察、岩石および鉱物の組織による変形速度の推定、および変形実験を行ってきた。このうちの一部は、米国の Utah State Univ. の Prof. Jim Evans との共同研究となっている。

断層の運動は、必ず断層破碎帯の岩石に記録されている。本研究の目的は断層岩から断層のすべり様式、とりわけクリープの様式を読み出し、その速度を推定することにある。この結果は、測地を始めとする地球物理学的な現位置測定の結果と対比し、その合理性を検討する。またクリープを伴う破碎帯の物質、組織分布を明らかにすることによって、切断面をすべて地震性のものとして取り扱っている活断層研究や、かつての地下深部の震源域地震断層が削剥によって地表に現れた断層帶の震源域挙動の研究にも一石を投じることができるであろう。

(2) 研究経過

平成 9 年度

断層掘削坑道に現れた 2 つの断層破碎帯から直接試料採取した(千葉大学:伊藤谷生教授による)。鉱物分析、および微細組織解析を行い、断層帶中軸部の岩石に流動組織が発達することを見いだした(図 4.4.4-1)。この組織からクリープ性運動を定性的に推定した。すべり速度の推定に流体力学が有効である可能性を述べた。

平成 10 年度

2 つの破碎帯の全体構造を把握するために、先進掘削の際に掘削されたドリルコアの観察を行い、コア研磨組織標本の観察、顕微鏡下の微細組織観察、化学組成分析を行った。Prof. Jim Evans との共同研究となっている。断層破碎帯に見られる流動破碎帯は、乱雑構造(高速変形構造)破碎帯が「重複して」発達

している。このことは、地震が発生した「後に」流動が起こっていることを表している。従って postseismic か interseismic の構造であるものと考えられる。また、流動破碎帯の厚みが >10 cm に達する部分が認められた。地表付近における地震断層面の地震時の運動速度は 0.1 m/s 以上であるにも関わらず、現れる断層面はカミソリで切ったような産状を示している。このような高速すべりの時に 10 cm 以上の流動層が形成されることは難しいものと考えられる。しかし、postseismic の時の afterslip のゆっくりとした動きで形成される可能性は否定できない。

平成 11 年度

平成 11 年 4 月～11 月、平成 12 年 1 月～3 月の 2 つの期間に、USGS の Earthquake Hazard Team の Dr. David Lockner の岩石変形実験室において、茂住断層破碎帯の主力鉱物であるスメクタイトの常温粘性挙動を速度ステップ試験により調べた。この実験の経緯は以下のとおりである。

- ① 茂住－祐延断層の断層面から採取した断層岩には流体の流線軌跡に類似した流動構造が顕著に現れていた。
- ② X 線回折分析の結果、同断層内で生成された主要な鉱物は、粘土鉱物の一種のスメクタイトであった。
- ③ このことから、この鉱物は岩石力学の常識を裏切っており、低速ならば常温で粘性流動を起こすことが推定された。

1999' May - 2000' Feb. の期間にクリープ実験を行った。実験範囲は、常温、地下 2km および 3km の静水圧条件 (封圧 60 & 90 MPa, 間隙水圧 20 & 30 MPa)、滑り速度 $0.0001 \mu\text{m/s} \sim 10 \mu\text{m/s}$ で 10^6 の速度範囲である。この範囲でスメクタイトは常温下で粘性流動を起こすことを確かめた (図 4.4.4-2)。実験の最低速度は、 3.1mm/year に対応し、跡津川断層の 2mm/year と桁としてほぼ同じである。San Andreas 系は、この約 10 倍の速度なので、実験速度範囲に含まれている。また伊藤久男氏が見つけたように Episodic creep (継続時間 24 時間以内) の場合も、実験の範囲に入っている。実験の最高速度は 13m/year に対応する。

この範囲の構成則は

$$\tau = \tau_0 + \eta' \Omega^n$$

(τ : 剪断強度⁷⁷⁾、 τ_0 : 降伏強度⁷⁸⁾、 η' : plastic viscosity、 Ω : シアレイト⁷⁹⁾、 n : flow index)

で記述できた(図 4.4.4-2)。 τ_0 は計測できないので、 $\tau - \tau_0 = \tau$ とおいてプロットしている。plastic viscosity (粘性率ではない) は、粘性層の厚みが粘土層全

体(100 % = 1 mm) の場合 4.07×10^7 、1 % の場合、 1.66×10^7 となった。また、flow index は 0.226 となった。相関係数は、 $R = 0.998$ (!) であった。粘性率は上式を微分すことにより得られる。flow index < 1.0 なので、シアレイトが大きくなるほど粘性率が小さくなる、すなわちより強度が低下することが分かる。

以上から、地下浅部におけるクリープの変形速度では、スメクタイトはストークス流^{*80)}とみなせる流動を示すことが分かった。常温の臨界シアレイトは、少なくとも $0.01/s((10 \mu m/s = 0.01 mm/s) / 1mm)$ よりは大きい。

平成 12 年度 (計画)

①コアに見られる変形機構の詳細な記載

調査 A、先進 1 に見られる断層破碎岩類の詳細な構造観察を行う。研磨標本と薄片の観察を引き続き行う。

②特集号 (物質科学版)

USGS に滞在している間に、Prof. Evans (Utah State Univ.) と断層帶の物質科学に関する International Journal の編集について相談する。複数本の論文が集まるようであれば、特集号を計画する。

(3) 研究担当者

愛媛大学・理学部・田中秀実

千葉大学・理学部・伊藤谷生

Utah State University James P. Evans

(4) 今後の展開

平成 12 年度には、クリープ領域の精密な断層岩分布図が完成する予定である。1995 年の兵庫県南部地震の際に活動した野島断層の断層岩分布図はほとんど完成している(Tanaka et al., 2000) ので、地震性の物質分布とクリープ性のそれを対比することができると考えられる。いずれも地下の深い部分であるが、他の exhumed fault^{*81)} の研究例からは、地下 7 ~ 10 km まではよく似た物質および組織が分布していることが推定される。我が国でなされた研究例も参考にしながら、地下深部震源域での物質挙動が地表付近にどのように反映されているのか、その関連性を考えていく。また、跡津川断層系の中で微小地震を多発している、Locking section との対比も興味深い。

4.4.5 ガイドウェーブ^{*82)} 観測による茂住一祐延断層、跡津川断層深部構造の推定

(1) 研究の背景

ガイドウェーブは断層破碎帯内を伝播する境界波であり、トラップ波とも呼ばれる。トラップ波は観測点と震源の両方が同じ断層破碎帯内にある場合のみ観測され、その波形解析により断層深部構造を推定することが出来る。具体的には、断層を横切る地震計アレイ観測により、トラップ波を検出し、その波形モデリングにより断層破碎帯の幅、速度、Q^{*83)} 等を推定する。さらに、トラップ波の観測される観測点・震源の組み合わせから、断層破碎帯の3次元構造およびセグメント構造を推定することが出来る(図4.4.5-1)。

トラップ波の観測は、1980年代後半から主としてサンアンドreas断層に適用された。日本では1995年兵庫県南部地震の直後の余震観測により、始めてトラップ波が観測された。野島断層でのその後の研究から、ボアホール地震観測の重要性、および地表での観測波形から断層構造を推定する際には注意が必要であること等が分かりつつある。

(2) 研究の目的・意義

本プロジェクトの対象地域では茂住一祐延断層および跡津川断層がほぼ平行に位置する。跡津川断層ではその一部でクリープ運動の発生が報告されており、地震活動との対応が議論されている。また、茂住・祐延断層においても地質学的研究からクリープ運動の可能性が指摘されている。本研究では、茂住観測坑道内で高密度地震アレイ観測を行うことにより、地上観測では得られない良質の波形データを取得し、両断層の深部破碎帯構造を推定することを目的とする。

特に、断層破碎帯が深部まで存在するのか、2つの断層が深部でどのような形態で存在するか(つながっているのか)、クリープ領域と破碎帯構造との関係などに焦点を当てる。坑内観測による良好な波形データに基づき、複雑な現実的な地下構造モデルによる観測波形との比較検討は世界的にも行われておらず、本研究の進展により、断層の深部構造研究の飛躍的進展が期待される。

(3) 研究の経過

平成8年度：跡津川断層では、跡津通洞坑に地震計アレイ設置し観測を開始。茂住一祐延断層では、観測坑道掘削に伴う発破に対し地表断層上で臨時アレイ観測を行った。

平成9年度：茂住一祐延断層では、茂住観測坑道内に32点の地震計アレイを設置し観測を開始。

平成10年度：跡津川断層、茂住一祐延断層での観測データ蓄積と波形解析。

平成 11 年度：跡津川断層、茂住－祐延断層での観測データ蓄積と波形解析、および断層構造モデリング。12 年度人工地震実験の準備。

平成 12 年度（計画）：茂住－祐延断層の地表断層上（複数地点）での人工地震実験による浅部破碎帯構造の推定。

（4）研究成果

1) 観測概要及び観測波形の特徴

調査坑道内では茂住－祐延断層に関係した 2 つの破碎帯(A,B)が認められ、これらをまたいで約 15 m 間隔で 2 Hz、3 成分地震計を 32 点設置した。データはイベントトリガ方式で 24 ビット、500 Hz サンプリングで収録されている。（図 4.4.5-2）破碎帯に起因する以下のような特異な波形が得られた。

- a) 震央位置が茂住断層近傍の地震については直達 S 波の直後に見かけ速度が直達 S 波に比較して非常に大きく、卓越周波数 10 Hz 程度の波群が A, B 破碎帯の近傍に存在する（図 4.4.5-3a）。一方、震源が茂住断層から遠い地震ではこの様な波群は存在しておらず、図に示す特徴的波群がトラップ波と考えられる。
- b) 震源位置によらず直達 P 波、S 波の見かけ速度は茂住断層の A, B 破碎帯を含む幅約 200 m で低速度である。この約 200m 幅の中でさらに A, B 破碎帯部では直達 P 波、S 波の見かけ速度は低速度である（図 4.4.5-3b）。この構造は少なくとも深度 500 m 程度までは続いている。また S 波後続波部で茂住断層の A, B 破碎帯を含む幅約 200 m で反射を繰り返す。

2) 破碎帯の深部構造

幅 200 m の低速度帯が地下深部まで連続的に続くモデルを仮定すると卓越周波数 3 Hz 程度のトラップ波の発生が期待される（図 4.4.5-4a）。また、震源が破碎帯から 2 km 程度以上離れると、トラップ波に比較して破碎帯内での多重反射が卓越する事が期待される。実際の観測では 3 Hz 程度の低周波の波群はこれまで 1 度も観測されておらず、また低速度帯内での多重反射が明瞭に見て取れる。

これらのことから、浅部で確認された幅 200 m の低速度帯は深度数 km 以上の地震発生域までは達していないといえる。一方、幅 30 m の低速度帯のモデルでは卓越周波数 10 Hz 程度のトラップ波の発生が期待される（図 4.4.5-4 b）。ここで期待されるトラップ波は図 4.4.5-3a に見られる波群に近い特徴をもつ。すなわち地震発生域の深度まで幅 30 m 程度の破碎帯が存在しているものと考えられる（図 4.4.5-5）。

(5) 今後の展開

これまでの解析により、断層破碎帯に伴う低速度帯の存在およびその幅が推定された。今後さらに解析を進め、より詳細な断層深部構造の解明を目指す。具体的には、茂住－祐延断層、跡津川断層が深部でつながっているか、低速度層はどれくらいの深部まで存在するか、クリープ領域との対応はあるか、等に焦点を当てる。茂住－祐延断層では地震活動度が比較的低く、今後、更にデータの蓄積が必要である。観測の安定化、高度化（アレイの規模、形態拡大）等にも考慮する。解析においても、より複雑なモデリングが可能となるような改善が必要である。また、推定される破碎帯構造モデルの検証のため、震源を断層破碎帯内外に配置した人工地震実験を行う。

4.4.6 坑内精密計測及び応力測定

(1) 坑内精密観測

断層を ICU (集中監視室) に入れて、地震サイクルに対する知見を得るのは、地震学者なら誰でも考える夢である。それも手に取れるほど近づいてみる（坑内測定の場合は S/N 比を上げて対象を見る）と言うのが、このプロジェクトの基本思想であろう。

我々岩盤屋は、地震サイクル、と言っても跡津川－茂住断層系が日々に大地震に至る可能性は低いから、いわゆるインターライクスミックな期間に断層とそれを取り囲む周辺岩盤がどのように振舞うかを知りたいのである。次の地震までのインターライクスミックな期間に、断層は永遠の眠りにつくのか？あるいはゆっくりとしたプロセスが進行するのか？そしてそのバックグラウンドとなる、応力がビルドアップするプロセスが実際に存在しているのか？と言うような問い合わせることは、地震のサイクルを考える上で非常に重要である。しかしながら、インターライクスミックな期間の断層や周辺岩盤の動きや活動は著しく小さいと思われるし、我々がモニターする期間は、地震のサイクルと比較すれば短過ぎるかも知れない。しかし技術的に現存するさまざま測定法に改良を加えて、おのおのの測定法の持つ理論的な分解能まで測れるような技術を確立すれば、静穏期と言えども何らかのプロセスが進行するなら、それらをキャッチできる可能性がある。

我々坑内計測グループは、断層近傍で、まず岩盤の P 波速度や比抵抗の変化を精密かつ連続に測定することから始め、次には、個々の測定精度を向上させるだけではなく、アコースティック・エミッション^{*84)} の観測、ボアホールを使った 3 成分の歪計測など測定項目を増やしている。異なる物理量の精密連続

観測を成し遂げ、その結果を互いに比較検討し、整合性の高い解釈やモデル構築を行って、断層近傍の応力変化や水との複雑な相互作用を詳しく解明するのが我々のゴールだと考えている。

1) 比抵抗の連続観測

岩盤の比抵抗は、クラックのネットワーク中に存在する水のつながり具合によって決まる。そして応力はクラックのネットワークのつながり具合を大きく変える。さらに比抵抗変化は、一般的には応力変化そのものより著しく増幅されることが明らかにされている。およそ20年前、東大の油壺で行われた、いわゆる山崎メーターによる比抵抗の連続測定では、海洋潮汐による比抵抗変化が捉えられた（図4.4.6-1、図4.4.6-2）。この観測は驚きであり、油壺の岩石は鮫石とよばれた。

今回のプロジェクトでは、特殊な機械だったため普及しなかった山崎メーターを見直し、最新技術を使った汎用的な機器で継承し、さらに信頼性、精度を上げるために機器開発を行った。まず、回路を全て差動化して電気的グランドレベルを大地から絶縁できるようにし、商用電源を用いた連続測定を可能とした。流す電流も山崎メーター同様ACとし、信号の処理には、雑音が重畠しても信号を高精度に検出・測定できるようデジタル・ロックイン・アンプを採用した。この結果、誤差やドリフトの原因となるアナログ・フィルターを除去できた。このような新開発の比抵抗計を用いて、油壺において山崎メーターと平行観測を行った結果、我々の開発したシステムは山崎メーターの性能を凌駕しており、5桁の分解能があることが分かった。

一方、このシステムを使い、茂住坑内でも比抵抗の連続観測を始めた結果、次のようなことが明らかになった。
①比抵抗変化から岩盤の応力変化を取り出す以前の問題として、鉱柱^{*85)}を使った観測では、比抵抗は坑道への通気による岩盤または電極への温度擾乱に第一義的にセンシティブである（図4.4.6-3）。

②比抵抗のデータをスペクトル解析したところ、O1、M2 分潮の周期にピークがある（図4.4.6-4）。このような観測結果は、一見ネガティブに見えるけれども、電極をボーリング孔内に埋設して通気による岩盤への擾乱を避けた測定を行えば、地球潮汐に起因して変わる比抵抗を測定できる可能性があることが分かったので、現在そのためのボーリング孔を掘削している。この作業が終わり次第、新たに観測を再開する（1999年度末）。

2) P波速度変化の精密測定

岩盤を伝わる弾性波速度が岩盤の応力（+クラックに含まれる水；観測の結果分かったことであるが）の状態をよく写し出すことは誰もが予測しているが、

これを長期に安定して計測している例は、佐野が釜石鉱山と東大油壺地殻変動観測所で実施している、数十メートルの測線を使った測定のみである。この方法は基本的には、実験室で岩石試料のP波速度を測定する方法と同じであるが、現場でも高精度で測れるよう、以下のような工夫がなされている。①送波のピエゾ素子^{*86)}を高電圧で駆動する。②数千回以上のスタッキングによる信号のS/N比の向上。③送波と記録系を超安定なクロックで完全に同期すること。このような工夫の結果、現地の岩盤を透過してきたP波の初動が正確に読めるようになった。さらに付け加えるなら、既にこのようなシステムを用いて、1994年12月28日の三陸はるか沖地震の本震と余震に伴うコサイスミックな岩盤のP波速度変化(ΔV_p)を捕まえたという実績もある(図4.4.6-5、図4.4.6-6)。

我々のプロジェクトでも、岩盤の応力(+水)状態の変化をモニターするために、佐野が開発したシステムを採用し、茂住坑内の鉱柱に対して精密な ΔV_p の測定を1999年度の後半から開始した。その結果、P波の走時が数日程度の変動を繰り返しながら減少する(つまりP波速度が速くなる)ことが明らかになった(図4.4.6-7)。これは断層周辺の岩盤の応力がゆっくりと上昇することを示している。今後もこの計測を続けるとともに、2測線に増やして測定の信頼性を増す計画である。

3) AE計測(断層が擦れたり、マイクロクラックが発生してミシミシいう音)

断层面は次の地震まで永遠の眠りについているのではなく、そこではゆっくりとしたマイクロクラッキングのプロセスが進行すると考えられている。このようなマイクロクラッキングは高周波のAEを出すが、断層破碎ゾーンの周りの岩盤に従来型のAEセンサーを接着して行う計測ではAEは検出できなかった。そこで、従来型のAEセンサーではなく、水中投げ込み型のハイドロフォン^{*87)}をAEセンサーとして使った。岩盤と比較して水ないし水で飽和した岩盤は超音波をよく通すので、震源決定を含むAEモニタリングの道が開けた。2000年度には、多チャンネルのハイドロフォン・アレーを設置して、AEの震源決定を行うつもりである(図4.4.6-8、図4.4.6-9、図4.4.6-10)。

4) 石井式歪計アレーによる断层面周辺の力学的な歪の連続観測

比抵抗、 ΔV_p 、AEなどの測定諸量は、岩盤変形そのものではなく、岩盤内の応力がなんらかの道筋で変換されたものである。従って、我々の観測でも、リファレンスとして、岩盤の変形そのものを測定しておかねばならないと考えた。このためには、坑内に地殻変動の観測所と同等な設備を作り、岩盤の変形を観測することが考えられる。しかしながら、坑内の環境の通気による擾乱は避け難いので、通常の傾斜計や伸縮計は使用できない。そこで我々は、ボーリ

ング坑を使った歪測定に実績のある、石井式 3 成分歪計を使って岩盤の歪の変化をモニターすることにした。ちなみに石井式歪計の分解能は 10^{-8} である(1999 年度中に 3 点設置)。

5) 坑内ボーリング孔における間隙水圧の測定

被圧帶水層^{*88)} に井戸を掘ったとき、井戸の水位が地球潮汐に応じて変化したり、地震時に地震計的な応答をすることはよく知られている事実である。しかし、いろいろ井戸を掘っても、地球潮汐に対する応答が見られなかったり、あっても応答感度が著しく違ったりすることも研究を困難にしている。何がそのような応答の違いをもたらすかを、科学的に推論できるような研究が実施できるフィールドが必要であった。

さて、サイクル機構は、1999 年度から茂住坑内にある二つのボーリング孔(以下 B8 孔は、破碎帯を外れた硬い岩盤に掘削された長さ 650 m のボーリング孔、No.2 孔は、断層破碎帯の近くの岩盤に掘削された長さが十数 m のボーリング孔を指す)をパッカーで遮蔽して間隙水圧の測定を始めた。その結果をまとめると、①どちらの場合も、ボーリング孔を塞いでから間隙水圧が上昇して安定に達するまでおよそ 6 ヶ月かかっている。見方を変えれば、間隙水圧のビルドアップは被圧帶水層の井戸が完成していく様子を示している。②細部を拡大してみるとどちらの孔も見事に地球潮汐を描いており、S/N 比も極めて良い。③そして、スペクトルを取れば O1 と M2 に相当する周期のところに鋭いピークが現れている(図 4.4.6-11、図 4.4.6-12)。そのスペクトル振幅を読めば、各ボーリング孔(につながる被圧帶水層)の地球潮汐に対する応答(ないしはその経時変化)を決定できる。④被圧帶水層が弾性的な応答を示すことは広く認められ、次のような理論式が提案されている。

$$\Delta P = \frac{2GB}{3} \frac{1+\nu_u}{1-2\nu_u} \Delta \epsilon_{VOL}$$

ここで、G はせん断定数、B は Skempton 定数(1 ~ 0; たとえば 1 のときは、間隙弾性体にかかる外部応力が増加すると、その増分は全て間隙水圧によって担われることを意味する)、 ν_u は非排水状態のポワソン比^{*89)} である。この式の右辺の定数部を 10 GPa とすれば、 10^{-6} の歪に対して 0.01 MPa の間隙水圧または 1 m の水位上昇が作り出される。この式は、被圧帶水層において間隙水圧の変化を観測すれば、地球潮汐が観測できる理論的な根拠を与えていた。そしてこの式が、被圧帶水層のスケールに関与しないことに注意されたい。

さて地球潮汐という観点から、間隙水圧の変化のスペクトル解析を考察すると、B8 孔と No.2 孔の O1 と M2 に対する応答の時間的変化の違いは興味深い。B8 孔の場合は、間隙水圧のビルドアップの過程で感度は不变であり、No.2 孔の

場合は、感度が間隙水圧の上昇とともに変わってゆくことが分かる。すなわち、2つのエンド・メンバーとも言える井戸が同一地域でみつかったのである。^⑤さらにどちらの孔も、局所地震にも遠地地震にも応答しており、地球潮汐が作り出す岩盤の歪をボアホール歪計で測定して組み合わせれば、被圧帶水層の応答関数が正確に決められる。

(2) 乾式破碎法応力測定

1) 研究の概要と目的

乾式一面破碎プローブによる既存坑道を利用した岩盤応力分布計測をめざして、一面破碎法による応力測定のメカニズムと適用性を明らかにするための検討を行った。

また、断層など破碎性岩盤内での測定を可能にする手順の確立をめざして、リボーリングによる応力測定を提案する。

一方、将来、原位置計測を行って岩盤応力分布が得られた場合に備えて、地表面や断層の幾何学条件を考慮に入れた3次元境界要素法（BEM）解析から地表の影響を取り除いた地殻応力を算定し、かつ断層の力学的特性を把握するためのBEM解析コードのフレームを構築した。さらにこれを用いて、以前に調査坑道近傍の1点において実施された二面破碎法による岩盤応力測定の結果を利用し、ただし断層特性を適当に設定して、実際に地殻応力場の算定を試みた。

本研究の目的はこれらの成果を踏まえて、まず、破碎性岩盤を含めた岩盤内の幾つかの点において岩盤応力測定を行い、測定結果を基にして地殻応力場を算定し、かつ断層の力学的特性を把握することである。

2) 研究成果

a) 乾式一面破碎プローブによる鋼管内載荷テストおよびその数値シミュレーション（平成10、11年）

鋼管の厚みを変えた2種類の鋼管内載荷テストを行い、鋼管外周の歪を観測することによって、摩擦シェルの作用効果を調べた。また、境界要素法による数値シミュレーションにより、摩擦シェルの作用効果を明らかにした。（図4.4.6-13）

b) 乾式一面破碎法による応力測定の実規模室内実験およびその数値シミュレーション（平成10、11年）

貫通する直径65mmの孔を有する60cm立方の硬質モルタル供試体に載荷フレームとフラットジャッキを用いて種々の組み合わせの外荷重を作成させた後に、一面破碎プローブにより、まず、意図した方向（プローブ開口方向）に人

工亀裂を造成した。

次に、亀裂の再開口実験から得られた孔内載荷一孔径変化曲線から亀裂に作用する直応力成分を求め、外荷重から算定される応力成分と比較することで乾式一面破碎法による応力測定の適用性を確認した。

また、境界要素法による数値シミュレーションを行い、一面破碎プローブによる亀裂の再開口を再現した載荷一孔径変化曲線から、応力を検出できることを示した。（図 4.4.6-14）

c) 岩盤内応力測定の結果から地殻応力場と断層特性を把握するための逆解析コードの開発（平成 9、10 年）

複数箇所で計測された岩盤内応力の分布から地殻応力場と断層特性を算定するための 3 次元境界要素法逆解析コードを開発した。また、断層特性を適当に設定することにより、過去に計測された 1 点の岩盤応力場から地殻応力場を算定し、断層の存在による応力・変位場の擾乱の一例を示した。（図 4.4.6-15）

4.4.7 茂住断層調査坑道地下水の化学的調査

（1）研究の目的・意義

岐阜県神岡町の茂住鉱山の長棟坑道・断層調査坑道から湧出する地下水の化学組成・同位体比から、断層内を水がどのように流動し、それによってどのような岩石-水反応が起きているのか、そしてそれはどのように断層運動と関連しているかを知ることを目的とする。これらを知ることは、断層運動や断層内の物質を理解する上で、重要な意義を持つ。

（2）研究目標

水の化学成分・安定および放射性同位体⁹⁰から、断層帶地下水の化学的特徴およびその経時変化を知り、それが断層運動とどのように関連するのかを理解する。また断層帶周辺ではどのように水が流動しているのかを、時間の情報を含めて知ることを目標とする。

（3）研究計画

茂住鉱山の既存の長棟坑道、および 1997 年 3 月に茂住断層を貫いて掘削された断層調査坑道から湧出している地下水を定期的に採集し、その化学組成・同位体比の測定を行う。

(4) 研究成果

1) Na/Ca 比と断層破碎帯の分布

植物の呼吸作用によって根から放出された CO_2 ガスは、地下水に溶けて炭酸 (H_2CO_3) を作る。そして、この炭酸が岩石中の石灰石 (CaCO_3) と反応して、それを溶かし出し、水の中に 1 つのカルシウム (Ca^{2+}) イオンと 2 つの炭酸水素 (HCO_3^-) イオンを作り出す。そのため、普通の地下水の主要化学成分は Ca と HCO_3^- イオンである。じっさい本研究でも茂住断層から数 km 以上離れた地点で採集された、茂住坑道の入り口に近い部分の地下水では、そのような水であった（図 4.4.7-1）。

しかし、長棟坑道の奥の部分および断層調査坑道から湧出している地下水では、陰イオンは HCO_3^- イオンと変わらないものの、主要な陽イオンは Na で、普通の地下水とは大きく異なっていた。この断層破碎帯では、母岩（手取層群の砂岩・泥岩など）中にはない Ca モンモリロナイトの形成が認められている（田中, 私信）。Ca モントリロナイトは長石の風化によって形成される鉱物であり、断層に近い所の湧水で Na イオンが多いことは、Na を含む長石の風化に伴う Na イオンの溶脱や、風化の結果生じた粘土鉱物中の交換性 Na イオンと地下水の Ca とのイオン交換の結果、Na の増加と Ca の低下が起きたためと思われる（図 4.4.7-2）。このように、断層に近い所の地下水では主要な陽イオンは Na であるが、多少は Ca イオンも存在している。そこで地下水の Na/Ca 比をとると、その値は断層破碎帯内部で最も高く、それから離れるにつれて徐々に低下していた。このように Na/Ca 比と断層運動の強弱との間には対応関係が見られた（図 4.4.7-3）。地下水の Na/Ca 比は断層運動の強弱の指標として大変有用であると考えられる。また、地質調査では断層帯を通過したと判定された断層調査坑道の最奥部でも、地下水の Na/Ca 比は 1 よりも大きく、Na 型の水であった。Na/Ca 比から判断される断層破碎帯は、肉眼による判定よりもかなり広く、肉眼による判定よりも鋭敏に断層運動を検出していると言えよう。

2) 水の年齢と破碎帯の分布

水素の放射性同位体のトリチウム^{*91}および炭素の放射性同位体である ^{14}C を用いて、長棟坑道・断層調査坑道内の地下水の年代を測定した（図 4.4.7-4）。その結果、既存の茂住坑道ではすべて 10 年以内の若い水であることが判明した。

一方、新しく掘削された断層調査坑道の地下水は、一部を除いて 6000 年 - 18500 年前と、約 1 万年前後の古い水であることが判明した。

しかし、断層調査坑道の破碎帯 A の部分の地下水は、その年齢が 10 年以内の若い水であった。破碎帯 A の直上には茂住谷川が流れしており、この水が破碎帯 A を通して急速に地下に流入していることが、この結果から認められた。この

ことは、破碎帯 A は空隙が多いことを示しており、このことから破碎帯 A は活動的であることが伺える。もう一つの破碎帯である破碎帯 B から採集された地下水は、その水の同位体比から 1 万年くらい前の氷河期の水であることが推定された。破碎帯 B でこのような古い水が保持されていることは、断層粘土の充填により水の動きが少ないことを示している。それゆえ、破碎帯 B は過去には活動的であったかも知れないが、現在は活動的でないことが推定された。

3) 水の時間変化

さらに、水の化学組成の測定を連続して行った結果、破碎帯 A の 214 m 地点の地下水では、その Na/Ca 比 (meq 比) が 1998 年 1 月の 17.5 から 1999 年 5 月の 8 まで、1 年半の間に急激に減少していることが判明した。このことは、破碎帯 A に存在する断層粘土の、Ca イオンを Na へと交換するイオン交換能力 (Ca イオンを粘土に吸着し、粘土中の Na イオンを放出する能力) が落ちてきていることを示している。破碎帯 A に多量の 断層粘土があればこのような Na/Ca の減少は起こり得ず、この減衰は破碎帯 A における断層粘土の量がそう多くはないことを示している。さらに今後の Na/Ca 比の減衰の状況を把握できれば、この破碎帯 A に存在する断層粘土の量の見積もりの手がかりとなろう。

過去 3 年間の、各地下水の安定同位体比の変化の傾向を調べた所、既存の茂住坑道の CaHCO_3 型の地下水および、断層調査坑道の 252 m より奥の部分から湧出している地下水では、この 3 年間ほとんど変化していないか、やや増加する傾向であった。しかし、断層破碎帯内およびその近傍に位置する茂住坑道の NaHCO_3 型の地下水や茂住坑道 0 m - 242 m 地点の地下水では、この間に酸素同位体比は 0.2 - 0.4 ‰ 減少した。このように破碎帯での水の同位体比の変化は、明らかに断層破碎帯の外部とは違う傾向を示した。また水の酸素同位体比と水素同位体比の変動を比較した所、破碎帯の地下水は酸素同位体比が時間とともに低い方向に変化しているのに対し、水素同位体はあまり変化しない傾向を示した。このように水素同位体比は変化せずに、酸素同位体比だけが時間とともに低い方向に変化することは、1997 年当時の水は岩石と相互作用をして、岩石の高い酸素同位体比を取り込んだ水であり、時間の経過とともにそのような水が押し流されて、1999 年には、そのような岩石水反応を起こしていない水に変化しつつあることを示している。

4) 地下水の起源

断層調査坑道の破碎帯内外で岩石試料・粘土を採集し、その中に含まれるカルサイトの炭素および酸素同位体比を測定した。岩石中のカルサイトの酸素同位体比は 5 ‰ 程度であったが、破碎帯 A および B から得られた試料では 5 -

17 ‰程度と大きく違っていた。このことは、破碎帶中のカルサイトは元々の母岩のカルサイトではなく、断層運動中あるいはその後に、形成されたものであることを示している。そして、酸素同位体比から推定されるカルサイトの形成温度は、ほぼ常温であったことが判明した。このことから、断層運動に伴う熱水^{*9 2)}の上昇など、破碎帶の温度が上昇したことはなく、上で述べた、水の化学成分や同位体比変化などの岩石－水相互作用は、常温で起こったものである事が判明した。一方、岩石中のカルサイトの炭素同位体比は-9 ~ -3 ‰の範囲にあった。断層帶内部のカルサイトもその範囲にあったが、破碎帶 B の部分で試料を密に採取して測定したところ、破碎度 2 の安山岩質岩脈で-3.6 ‰と最も高く、この部分が地下深部からの CO₂ ガスなどの通路になっていた可能性がある。

(5) 今後の展開

地下水の化学組成・同位体の変動をさらにモニターするとともに、3年間の観測で断層破碎帶内の水も少しづつ流動している傾向が伺われたので、再度、水の年代測定を行って、水の移動状況についての情報を得る。

活断層帯での地殻変動研究 研究業績一覧

1999年AGU秋季大会特別セッション(99AGU (Internal Fault Structure))

1. Ando, M., Overview and purpose of the active fault prove at the Mozumi-Atotsugawa fault system
2. Masuda, K., M. L. Doan, N. Nishizawa, X. Lei and H. Ito, Laboratory System of Water - Induced Fracturing and Internal Fault Structure
3. Ito, K., H. Wada, Seismic Activity Along A Creep Fault (Atotsugawa Fault) in Central Japan and its relation to Tectonics
4. Tanaka, H., H. Ito, M. Ando, R. Ikeda, Whole View of the Four Drilling Cores Penetrating the Nojima Fault at Various Depths Down to 2000m Beneath the Surface
5. Ito, H., Y. Kumahara, T. Kiguchi, K. Fujimoto, T. Ohtani, D. Lockner, H. Naka, H. Tanaka, Subsurface Structure and Physical Properties of the Nojima Fault from Borehole and Core Measurements
6. Kuwahara, Y. and H. Ito, Borehole Observation of Trapped Waves to Deduce the Subsurface Structure of the Nojima Fault
7. Ito, H., Y. Kuwahara, K. Nishigami, Array Observation of Fault Guided Waves at the Mozumi and Atotsugawa Fault
8. Evans, J. P. and H. Tanaka, Preliminary Microstructural Analysis of Fault-related Rocks from the Mozumi Fault, Japan: Evidence for Creep Processes at Shallow Levels
9. Takeuchi, A., H. Ongirad, A. Takebe, K. Sakoguchi, T. Nohara, Results of Excavation Survey on the Mozumi-Sukenobu Fault of the Atotsugawa Fault System, Central Japan
10. Tanaka, H. and T. Ito, Creep Motion of the Mozumi-Sukenobu Fault Deduced from the Flow Texture in the Ongoing Processed Fault Rocks
11. Nishigami, K., H. Ito, Y. Kuwahara and K. Ito, Shallow Structure of the Mozumi-Sukenobu Fault Estimated from the Explosion Data
12. Yamashita, F., T. Yanagidani, Measurements of Earth Resistivity for Monitoring Stress-induced Changes Close to an Active Fault

1998年陸域地下構造フロンティア国際ワークショップ

International Workshop on Frontiers in Monitoring Science and Technology for Earthquake Environments at Tono Geoscience Center

13. Ando, M. (1998): Overview and purpose of the active fault prove at the Mozumi-Atotsugawa fault system
14. Satake, H. and M. Murata(1998): Geochemistry of groundwater in and around the Mozumi-Sukenobu fault
15. Sato, H., H. Nakahara, T. Hayakawa, T. Nishimura and M. Otake (1998): Radiative transfer theory-based inversion for the high-frequency energy radiation from an earthquake fault
16. Furumoto, M., Y. Ichimori, N. Hayashi and T. Sato (1998): Secular and tidal components of P wave velocity change in the source area of the presumed Tokai earthquake
17. Tanaka, H. (1998): Creep motion of the Mozumi-Sukenobu fault deduced from the flow texture around brecciated clast in the fault rocks
18. Ito, K., H. Wada and K. Wada (1998): Seismic Activity near the Atotsugawa fault, central Japan
19. Ito, H., K. Nishigami and Y. Kuwahara(1998): Array Observation of fault guided waves at the Mozumi and Atotsugawa Fault
20. Jin, A. and M. Ando (1998): Simultaneous determination of site response and source parameters of small earthquakes along Atotsukawa fault zone using GA inversion method
21. Nishigami, K.(1998): Deep structure of the San Andreas, Calaveras and some other active faults in central California: An inversion analysis of coda envelopes from local earthquakes
22. Hirahara, K., M. Ando, Y. Hoso, Y. Wada and T. Nakano (1998): Dense GPS network for detecting the motion of Atotsugawa fault
23. Sano, O., T. Hirano and T. Yanagidani (1998): Continuous precise measurement of sound velocity and electrical resistivity in situ
24. Yanagidani, T. and F. Yamashita (1998): AC-based earth-resistivity monitoring system using phase-sensitive-detection technique
25. Mizuta, Y.(1998): Laboratory experiments and numerical simulations to explain mechanism of sleeve fracturing by using the single fracture probe
26. Yanagidani, T. and F. Yamashita(1998): A Precise AC-Based Earth-Resistivity Measurement System Using Phase-Sensitive-Detection Technique Preliminary monitoring of ongoing stress-related process in the close vicinity of the Mozumi fault; I
27. Yanagidani, T., M. Teshima and F. Yamashita(1998): AE Monitoring in

the Site-Investigation Tunnel at the Mozumi Fault Preliminary monitoring of ongoing stress-related process in the close vicinity of the Mozumi fault; II

28. Fujinawa, Y. and Y. Honkura (1998): Understanding of Seismotectonics through a Window of Crustal Conductivity

広域地震活動観測

研究報告

29. Jin,A., K. Ito and M. Ando, 2000, Coda amplitude distribution beneath Hida region, central Japan, Earth Planets Space (submitted)
30. Jin,A.,Moya, C. A., and M. Ando, 2000, Simultaneous determination of site responses and source parameters of small earthquakes along the Atotsugawa fault zone, central Japan, Bull. Seismol. Soc. Ar., (submitted)
31. 和田博夫・伊藤 潔・大見士朗・岩岡圭美・池田直人・北田和幸 (1999) : 1998年飛騨山脈群発地震、京都大学防災研究所年報、42B-1, 81-96.
32. 伊藤 潔・和田博夫・和田一成 (1998) : 地震活動で断層の動きを追う. 月刊地球, 20, 137-141.
33. 和田博夫・伊藤 潔 (1995) : 跡津川断層付近の地震活動、京都大学防災研究所年報, 38 B-2, 235-250.
34. 和田博夫・伊藤 潔・安藤雅孝・和田一成 (1996) : 神岡鉱山・茂住坑における地震観測、京大防災研年報, 39 B-1, 241-250.

学会報告

35. 岩岡圭美・伊藤 潔・他4名 (1998) : 年飛騨群発地震の破壊域と発振機構. 地球惑星科学関連学会 1999年合同大会
36. Ito, K., and H. Wada (1999): Seismic activity along the Atotsugawa fault, central Japan and its relation to creep movement and tectonics, IUGG, Abstract, A169.
37. Jin, A., Moya, C.A. and Ando, M. (1998) : Simultaneous Determination of Site Amplificationand Source Parameters for Small Earthquakes Using GA Inversion Method, 日本地震学会 1998年秋季大会講演会, pA31.
38. 金安濁(Jin, A)・伊藤潔・安藤雅孝(1998) : Spatial Distribution of Scattered Wave Energy Beneath Hida Region, Japan, 地球惑星科学関連学会 1998年合同大会予稿集 , p370.

ガイドウェーブ観測

学会報告

39. 伊藤久男・西上欽也・桑原保人 (1997) : 跡津川, 茂住祐延断層におけるガイドウェーブ観測の概要. 地震学会 1997 年秋期大会.
40. 伊藤久男・西上欽也・桑原保人 (1999) : 跡津川断層, 茂住断層の深部構造: トランプ波の解析から. 地震学会 1999 年秋期大会.
41. 西上欽也・伊藤久男・桑原保人 (2000) : 茂住・祐延断層における破碎帯トランプ波観測. 地震研究所特定共同研究要旨集.
42. 西上欽也・伊藤久男・桑原保人 (2000) : 茂住・祐延断層における破碎帯トランプ波観測. 東京大学地震研究所特定共同研究研究会.

誌上発表

43. 伊藤久男・西上欽也・桑原保人, 1998, トランプ波から断層のつながりを追う. 月刊地球, vol. 20, No.3, 154-159.

断層岩調査

44. Tanaka, H. & Lockner, A.D. (submitting): Formulation and direct measurement of viscous behaviour of montmorillonite and its implication for fault creep. Geophysical Research Letters.
45. Tanaka, H. (submitting (need one more correction)), Direct estimation of fault creeping from the fault rocks distributed within the active fault core. An example from active fault excavation tunnel of the Mozumi-Sukenobu fault, central Japan. Journal of Geophysical Research.
46. Tanaka, H., Lockner, D. & Ando M. (1999): Nonlinear viscous behavior of clay (montmorillonite) and its implication for fault creeping. 9th Hubbert Quarum Symposium. Invited.
47. Evans, J P. & Tanaka, H. (1999): Preliminary Microstructural Analysis of Fault-related Rocks from the Mozumi Fault, Japan: Evidence for Creep Processes at Shallow Levels. 1999 AGU Fall meeting Abstracts
48. Tanaka, H. & Ito, T. (1999): Creep Motion of the Mozumi-Sukenobu Fault Deduced From the Flow Texture in the Ongoing Processed Fault Rocks. 1999 AGU Fall meeting Abstracts
49. 田中秀実・伊藤谷生・竹内 章 (1998) : 茂住-祐延断層を貫通する掘削坑道における断層破碎帯の産状, クリープ性の断層岩組織と微小地震空白域の関係について. 1998 地球惑星関連学会合同大会要旨.

5. 研究実施体制

- 地震総合フロンティア研究では、地震研究の中でも未踏であり先端的な部分の研究を、組織の枠組みを越えて総合的に推進することとされている。これを踏まえ、陸域地下構造フロンティア研究では、多分野にまたがる研究領域を対象として、広範な分野の専門的研究者を結集して、参加研究者の意志に基づく創造的、基盤的研究を実施している。
- 本研究は開かれた流動的な研究システムで実施するため、サイクル機構の規定にある客員研究員制度を活用し、大学等国内研究機関のほか、海外からも研究者を招聘して進めている。教授・助教授クラスの非常勤客員研究員に加えて、新進気鋭の若手研究者を常勤客員研究員としているところが特徴の一つである。
- 本研究は大きく3つのチーム（テーマ）に分かれて実施されており、平成12年度は表5-1の体制を予定している。各チームの研究員構成の推移は表5-2に示す通りであり、平成12年度は13大学1国立研究機関、総勢36名を予定している。
- 各チームとも大学や国立研究機関と研究協力を実施しており、アクロス研究チームは野島断層研究プロジェクト、地震地下水研究チームは東大地震研と、活断層研究チームは跡津川断層研究で地質調査所などと協力体制を築いている。
- 本研究は東濃地科学センターが所掌し、地質安定性研究グループが研究業務の執行調整および運営管理に当たっている。

6. 資金計画

- 陸域地下構造フロンティア研究の予算の推移を表6-1に示す。平成7年度に補正予算で約8.4億円が認可され、本研究が開始した。その後は毎年約2億円の予算で実施している。
- 各チームの主要調査研究項目と、それに要する観測機器等の推移は表6-2に示す通りである。

用語解説

- 1) **プレート境界**: 地球の表層部は、いくつかの堅い板（プレート）に分かれており、それらは相互に水平運動（地球表面上の回転）している。プレートの境界は、それを挟んだ両側のプレート相互の運動センスにより、2つのプレートがぶつかり合う収束（型）境界、離れていく発散（型）境界、及びそれ違う平行移動（横ずれ）境界の3つに分類される。
- 2) **電気伝導度**: 電気の通り易さの度合い。電気抵抗の逆数。
- 3) **電磁波**: 電場と磁場の振動が伝搬する現象。
- 4) **リモートセンシング**: ある対象物に対する情報を遠隔から探知する方法。
- 5) **正弦波**: 波形がサインカーブ（正弦曲線）と同じ形を持っている波を正弦波という。
- 6) **GPS**: 米国国防省で開発された全地球測位システム（global positioning system）の略称。地球を周回する20数個の衛星からの電波を地球上で受信して、受信地点の位置座標を精密に計測するシステム。衛星からの電波には非常に正確な時刻信号を含む。
- 7) **ボアホール**: 手動あるいは機械ボーリングによって地盤に掘削された孔。
- 8) **地下水位計**: 地下水面の位置を観測するために、井戸や掘削孔中に設置する水位計や間隙水圧計。被圧地下水の場合は圧力水頭を観測するためピエゾメーターで水圧を測定する。
- 9) **間隙水圧計**: 地層や岩盤の間隙の圧力水頭を測定するための計測器。圧力が小さいときは大気と通じたガラス管等の液柱の高さを測定するが、圧力が大きいときには圧力計などを介して水圧を電気的に測定する。
- 10) **マスフィルタ型四重極質量分析計**: QMS (Quadrupole Mass Spectrometer)とも呼ぶ。ガスをイオン化して、質量数毎に分別し、イオン強度（電流）として各々のガスの量を計測する装置。
- 11) **ラドン**: 原子番号86の希ガス元素。元素記号はRn。安定同位体は存在せず、約30種の放射性同位体が知られている。天然には質量数222のウラン系列、219のアクチニウム系列、220のトリウム系列の各核種が存在する。狭義には半減期が最も長い(3.82日)質量数222のものをラドンと呼ぶ。空気中や温泉水・地下水中に微量含まれており、地下水中のラドン濃度が地震の前に変化する例が報告されている。
- 12) **断層破碎帯**: 断層活動に伴う断裂・圧碎などの作用によって、岩石が角礫状や粘土状に破碎された部分。断層が動いた面を中心にはほぼ一定の幅をもった帯を形成する。
- 13) **クリープ**: ほぼ一定の速度で連続的に変位する非地震性の断層運動を指す。

- 14) **トラップ波**: 岩盤割れ目はぐさぐさになっており、地震波速度が周囲より低いことから、岩盤割れ目を伝わる特殊な地震波が存在し、これをトラップ波またはガイド・エーブと呼ぶ。岩盤割れ目内を伝わる地震波という意味でトラップ波は、震源と観測点の両方が岩盤割れ目中にある場合にのみ観測される。
- 15) **反射法地震探査**: 人工震源を用いる地震探査の一方式。地下の様々な構造から反射してきた垂直に近い波線の地震波を解析して断面図を作成する。
- 16) **バイブロサイズ**: 地震探査における反射法の一種。発振に周波数変調した信号を地下に送信する。周波数は 10–70Hz 程度で場所によって発振波を変える。発振波形と受信波形の相互関係をとって反射波を検出する。発振が連続波であるため制御しやすく、削孔も不要である。
- 17) **TDEM 探査**: 電磁探査のうち、電磁場が地中に入射したときの地下の比抵抗分布に応じた電磁応答を地表面で測定し、地下の比抵抗構造を推定する電磁法の一種。TDEM 法 (Time Domain Electromagnetic Method) は過渡現象電磁法とも呼ばれ、電流を遮断したあとの 2 次電磁場の過渡現象を測定する。
- 18) **トレンチ調査**: 地質調査のために掘られる細長い溝。活断層の既往歴などを調査目的とする。断層線（面）を横切る方向に溝を掘り、断層のずれ方や地層の年代を測定して、地震断層の動いた年代や周囲の環境（液状化の跡など）を調べる。
- 19) **弾性波**: 弹性体内部を伝わる波動を弾性波という。特に地球内部を伝播するものを地震波と呼ぶ。
- 20) **比抵抗**: 電気伝導度の逆数で単位は Ωm 。電気探査や MT 法では、電気伝導度よりも比抵抗という用語が用いられる。
- 21) **カラー ホログラフィー**: 光その他の波動の干渉性を利用して、物体から出る信号波を感光材料に記録し（ホログラム）、このホログラムに別の光波を当てることによって信号波を再生（波面再生）する方法。ここでは地震波や電磁波により地下構造を視覚化すること。
- 22) **アルゴリズム**: 本来は、ある言語を他の言語に翻訳するための規則を集めたものという。ここでは、数学または計算機で用いる、ある問題を解くための計算手順をいう。
- 23) **S/N 比**: 信号(signal)と雑音(noise)の比。この場合、雑音とは伝達しようとする信号以外の信号をすべて雑音という。
- 24) **走時**: 地震や弾性波探査において、震源（発振地点）から観測点に地震波が最初に到達した時間のこと。震源（発振点）からの距離を横軸に、走時を縦軸にとったグラフを走時曲線という。
- 25) **存否セプストラム理論**: 存否法を、周波数空間におけるデータに適用する理論。
- 26) **MT**: 時間によって変動する地磁気とそれによって誘導される地電流を測定し、地下の比抵抗分布を求める電磁探査法を MT 法と呼ぶ。

- 27) カプラー：継ぎ手、連結器、結合器のこと。
- 28) 第三系：地質時代最新の新生代のうち、氷河時代よりも前の第三紀に形成された地層のこと。
- 29) UTC：経度 0° における太陽時に 12 時間加えた時刻を世界時 (UT : Universal Time) という。また、地球の自転速度は一様でないので、天文観測から決定される補正を加えて地球の回転角を忠実に反映したものを UT1 とよぶ。原子時計と同じ速度で進み、UT1 との差が 0.9 秒以内におさまるように調整された時刻系を協定世界時(UTC : Universal Time Coordinated) という。UT1 との差が 0.9 秒を越えた場合は、月の最後に 1 秒を加除して UTC が地球自転角を忠実に表すように調整する。
- 30) スイープ：回路のパラメーターや入力信号の周波数などがある範囲で連続的に変化させること。
- 31) スタッキング：同期加算ともいう。発振と受信を繰り返し、得られた記録を発振時刻に同期させて足し合わせる処理を行うことにより、記録に含まれるノイズを除去し信号を強調することで S/N 比を向上させること。
- 32) クロストーク：本来無関係であるべき他の信号から漏れた信号があること。
- 33) バイアス：信号電圧（もしくは電流）に一定の直流または交流を加えておくこと。加えられた電圧（もしくは電流）を指すこともある。
- 34) エリアシング：観測記録に、実際には存在しない周波数成分が現れる現象。
- 35) A/D：アナログ-デジタル変換 (analog-digital conversion)。波高（振幅）など連続的に値が分布する電気信号（アナログ信号）を数 kHz～数百 MHz でサンプリングし、デジタル化する変換のこと
- 36) フーリエ変換：時間的に変化する現象を分析する手法の一種。時系列データを周波数スペクトルに変換して現象の特徴を明らかにする。
- 37) パワースペクトル密度：時系列データの周波数成分毎の強度の 2 乗（パワースペクトル）の密度で、エネルギーがどの周波数に集中しているかを示す。
- 38) P 波：岩盤中を伝搬する地震波には縦波と横波があり、縦波の方が速度が速いため、観測点には縦波の方が最初に到達する。このことから縦波のことを P 波 (primary wave) といい、横波を S 波 (secondary wave) と呼ぶ。
- 39) S 波：「P 波」参照。
- 40) ビームフォーミング：アレーで観測したデータを解析する方法。
- 41) センプランス法：ある時系列における、地震波の到来方向を解析する方法の一種。
- 42) 表面波：振動が地表面付近に限られ、地表に沿って伝わる波を表面波という。表面波にはレイリー波とラブ波がある。
- 43) ジグ：各種部品を加工する際に使用する補助具。
- 44) 地震探査：弾性波（地震波）を用いて地下構造を調べる物理探査の一種。地層内

で屈折する波動を使う屈折法と、地層境界で反射する波動を使う反射法がある。

- 45) **電磁探査**：電場と磁場の相互作用を利用した探査法。人工的方法と自然的方法（特にマグネットテルリック（MT）法）に分類され、前者は更に直流法と交流法に分かれる。また、電流の流し方により、直接地中に電流を流す導電電磁法と、大地から絶縁されたループまたはコイルに交流を流すループ法がある。
- 46) **ケーシング**：ボーリング孔壁の崩壊防止のため、補強用に挿入される管のこと。
- 47) **インピーダンス**：交流回路において、直流回路の抵抗に相当するもの。その絶対値は電圧の最大値と電流の最大値の比で与えられる。
- 48) **ファンクションジェネレータ**：様々な周波数や波形を出力する装置。
- 49) **ダイポール放射**：双極子放射ともいう。電気双極子もしくは電磁双極子の振動による放射。
- 50) **コントロールソース法**：人工の震源、電磁波源を用いた探査法。
- 51) **プロニー型の自己回帰モデル**：時系列解析のモデルの一種。
- 52) **チャーブ信号**：周波数が直線的に変化する信号。
- 53) **スーパーカミオカンデ**：神岡鉱山茂住坑内にある、東京大学宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設の大型チエレンコフ宇宙素粒子観測装置の名称。50,000 トンの超純水を蓄えた直径 39.3m、高さ 41.4m の円形水タンクと、その壁に設置された光電子増倍管と呼ばれる 11,146 本の光センサーなどから成っている。飛び込んできたニュートリノがタンク内の水と反応して発生する青白いチエレンコフ光を検出する。昭和 58 年から平成 8 年までニュートリノ観測及び陽子崩壊探索で大きな成果を上げたカミオカンデの後継施設として平成 8 年より観測を続けている。
- 54) **重力波望遠鏡**：新しい天文観測手段として東京大学宇宙線研究所が神岡鉱山で計画している、超新星爆発などで発生する重力波を検出する装置。
- 55) **希ガス**：周期表の 18 族に属する元素、ヘリウム、ネオン、アルゴン、クリプトン、キセノン、ラドン (He、Ne、Ar、Kr、Xe、Rn) の総称。化学的に極めて安定で、天然の状態では化学反応に関与することはないため不活性ガスとして扱われる。
- 56) **インテリジェント回収型歪計**：ボーリング孔に埋設し、オーバーコアリングにより回収して、地盤の初期応力を測定するために開発された自記式歪計。
- 57) **PIN フォトダイオード**：光信号を電気信号に変換するための半導体ダイオード（フォトダイオード）のうち特に光電変換高率のよいもの。
- 58) **シリコン中空糸型気体分離モジュール**：地下水中に含まれるガスを取り出す装置。撥水性、耐薬品性などに優れたシリコン製の中空糸を束ねた気体分離用のモジュール。中空糸は広い膜面積をコンパクトにまとめることが出来るので、分離用の膜として広く使われる。
- 59) **パッカー**：ボーリング孔内における水の上下方向の移動を阻止する装置。
- 60) **モルタル**：セメントと砂と水を練り混ぜたもの。

- 61) 地球潮汐：月や太陽の引力により、地球が変形する現象。
- 62) 余効変動：地震発生とともに地殻は急激な変動を示す。その後から最初はかなり急激な変動が数年続いてから、穏やかな一定速度の変動に移る。この初期の過渡的な変動を余効変動という。
- 63) ジャイロ方位計：高速で回転するこまの回転軸が空間の一定の方向を向く性質を利用した方位測定装置。ジャイロコンパスともいう。
- 64) マルチプレクサー：複数の信号から必要なデータを選択する回路。
- 65) 水圧破碎法：地殻応力の測定法の一種。ボーリング孔に栓をして水圧をかけると孔壁の円周方向に引張力が生じ、ついには引張亀裂ができる。この亀裂が開口、閉口するときの水圧は岩盤に作用している地殻応力の関数であり、この値から地殻応力を算出する。
- 66) ストレーナー：ボーリング孔の特定の深度から地下水を採取するために、ケーシングに穴もしくはスリットを開けたもの。
- 67) 震央：地震を生じる原因となった急激な破壊の開始した地点を震源といい、この震源を真上に投影した地表の点を震央と呼ぶ。震源地と言うときは震央を指すことが多い。
- 68) サン・アンドレアス断層：北米西海岸沿い、北西—南東方向に走る右横ずれ大断層。全長は 1,200km 以上。北米プレートと太平洋プレートの境界をなすトランシスフォーム断層として約 3,000 万年前に誕生し、以後現在に至るまで活動を続けている。総変位量は 300km 以上。現在の平均変位速度は約 3.4cm／年であるが、同じ断層線上でも運動様式としては、間断なく変位が振興する部分と、地震を繰り返す部分とがある。
- 69) 热流量：地球内部から地表に向かう熱の流れの量。単位は $10^6 \text{cal/cm}^2/\text{s}$ でこれを HFU と記す。地球内部には地球創生時に閉じこめられた熱、放射性物質の崩壊による熱などがあり、熱伝導・熱放射・熱対流等により徐々に地表に運ばれている。地表付近では殆どの熱が熱伝導で運ばれると考えられる。世界の平均値は約 1.4HFU である。
- 70) S-P 時間：ある観測点における、P 波の到達から S 波の到達までの経過時間。P-S 時間、初期微動継続時間ともいう。地下構造が一様とみなせるとき、S-P 時間は震源から観測点までの距離に比例する。
- 71) ストレスドロップ：応力降下ともいう。剪断応力によって断層が発生して地震が起こる場合、断層面上の剪断応力が断層発生後に発生前より低下する現象。
- 72) インバージョン解析：地下構造を解析する際に、予測されるモデルを与えてそのシミュレーションを実行することを一般に順解析（フォワードモデリング）と呼び、一方、未知の地下構造を計測して得られたデータからその構造を推論することを逆解析（インバージョン解析）と呼ぶ。

- 73) **断層ガウジ**: 断層運動に伴う破碎によって生じた細粒・未固結の断層内物質。ガウジ、ゲージともいう。断層岩類の分類では、破碎岩片が細粒基質部に対して30%未満のものをいい、それ以上のものは断層角礫と呼ばれる。断層粘土とも呼ばれ、熱水変質を伴って粘土鉱物を生じていることが多いが、粘土鉱物を伴わない場合もある。
- 74) **ストリップマップ**: 断層に沿った細長い地域の地形や地質の状況を示した図。
- 75) **ジオスライサー**: 矢板型による未固結地層の採取装置のこと。未固結の地質試料を、貫入方式により、連続的に不攪乱で採取する装置。この装置をバイブルハンマー等で地盤中に貫入させることにより、簡易にしかも短時間で良好な状態の地質試料を面的に得ることができる。
- 76) **リニアメント**: 空中写真等の映像の上で、直接・間接に地下の地質や構造を反映しているとみられる線状の特徴。地形・土壤の色調・植生・水系模様の急変等、成因・規模を問わず用いられる。
- 77) **剪断強度**: 物体内部に作用する力のうち、ある面の接線方向に働く成分を剪断応力といい、その物体が支えることができる最大の剪断応力を剪断強度という。通常は、物体が破壊するときに破断面に作用する剪断応力（破断面と平行な方向の成分）の最大値。
- 78) **降伏強度**: 岩石や地盤に荷重を加えると、初めは応力一歪み曲線（または荷重一変形量曲線）は直線的な関係を示すが、ある応力を越えると歪みが急激に増加し始める変曲点が認められる。この点を降伏点と呼び、その時の応力を降伏応力または降伏強度という。
- 79) **シアレイト**: 剪断速度 (shear rate)。剪断破壊における変位速度。
- 80) **ストークス流**: 流速が非常に小さくかつレイノルズ数が小さい（1以下）時、粘性流体を支配するナビエストークス方程式において慣性力を無視できるような流れを、ストークス流と呼ぶ。
- 81) **exhumed fault**: 古い時代の断層が被覆層の侵食削剥により地表に露出したもの。
- 82) **ガイドウェーブ**: 「トラップ波」参照。
- 83) **Q**: 媒質中を弾性波が伝わる時、粘性により振幅が減衰する。この媒質の減衰特性を表す値をQと呼ぶ。完全弾性体ではQ=無限大となり、Qの値が小さいほど減衰が大きい。岩石のQの値は20~200の範囲にあるものが多い。
- 84) **アコースティック・エミッション**: 岩石や金属などに応力や熱が加えられると、内部に応力集中が生じ、これによって微小破壊や結晶転位滑りなどの急激な運動が引き起こされる。このような急激な運動に伴って放射される高周波の弾性波をアコースティック・エミッションまたはAEと呼ぶ。
- 85) **鉱柱**: 鉱山において、採掘跡の落盤防止のため適当な大きさに未採掘で残された柱状の鉱石塊を鉱柱と呼ぶ。ここでは、調査坑道掘削時のずり搬出用トロッコの転回

用円形坑道に囲まれた円柱状の岩盤を指す。

- 86) **ピエゾ素子**: 圧電素子ともいう。ある種の結晶に適当な方向から圧力を加えると、誘電分極を起こして帶電する現象をピエゾ電気(圧電気)と呼び、この性質を利用して圧力を電気信号に変換する素子。
- 87) **ハイドロフォン**: 水中を伝搬する音を受信するために完全防水した電気音響変換器の一種。
- 88) **被圧帯水層**: 上下を不透水層または難透水層によって制限され、浸透地帯からの落差や上位の地層の荷重によって加圧されている被圧地下水によって満たされている透水層。
- 89) **ポワソン比**: 弹性体の軸方向に外力を加えたとき、軸方向の歪みと軸と直角方向の歪みとの比。
- 90) **放射性同位体**: 同位体を持つ元素で、放射能を有する同位体のこと。自然に粒子や電磁波を放出(放射性崩壊)して、別の元素に変わる。
- 91) **トリチウム**: 質量数3の水素の放射性同位体(${}^3\text{H}$)。半減期は12.3年。 ${}^3\text{H}^1\text{HO}$ を含む水はトレーサーとして陸水の移動の研究に利用される。また、トリチウムの放射壊変を利用して陸水の年代の推定にも利用される。
- 92) **熱水**: 地殻内を流動する水を主体とする高温の溶液を熱水溶液または熱水と呼ぶ。熱水の温度は50~800°Cで様々な成分を溶解していて、鉱床生成過程で重要な役割を果たす。熱水の起源は地表水、海水、マグマから分離した水、変成作用で発生した水等の異なる起源の水が混合したものである。

参考資料4

陸域地下構造フロンティア研究
(OHP 資料)

OHP資料一覧

- 図 1- 1 地震防災対策特別措置法
図 1- 2 研究開発等の推進
図 1- 3 地震総合フロンティア研究
図 1- 4 地震総合フロンティア研究組織図
図 1- 5 陸域地下構造フロンティア研究の目的
図 1- 6 陸域地下構造フロンティア研究の内容
図 1- 7 陸域地下構造フロンティア研究の観測地域
図 1- 8 地震発生に関する研究
図 1- 9 アクロスシステム概念図
図 1-10 地震発生に関する研究（アクロス研究）スケジュール
図 1-11 地震発生に関する研究の主な成果
図 1-12 今後の展開
図 1-13 地震発生と地下水拳動に関する深地層総合研究：目的と研究内容
図 1-14 地震と地下水位変化
図 1-15 地震・地下水研究総合観測井
図 1-16 地震発生と地下水拳動に関する深地層総合研究スケジュール
図 1-17 地震発生と地下水拳動に関する研究の主な成果
図 1-18 今後の展開
図 1-19 活断層帶での地殻活動研究：目的と研究内容
図 1-20 跡津川断層系における研究の特徴
図 1-21 活断層調査概念図
図 1-22 活断層帶での地殻活動研究スケジュール
図 1-23 活断層帶での地殻活動研究の主な成果
図 1-24 今後の展開
図 1-25 陸域地下構造フロンティア研究の主な会議
- 図 2.4.1-1 東濃アクロスシステムの開発成果とその総合レビュー
図 2.4.1-2 1. 東濃地域における音波アクロス研究
図 2.4.1-3 2. 震源装置の開発
図 2.4.1-4 20tonf 級東濃音波 ACROSS 震源装置
図 2.4.1-5 回転型 ACROSS 震源における FM 制御の概念図
図 2.4.1-6 GPS 同期 FM 変調制御システム
図 2.4.1-7 送信波とモータ回転

- 図 2.4.1-8 FM による同時送信
- 図 2.4.1-9 多重送信の実例
- 図 2.4.1-10 岩盤カプラーの振動計測
- 図 2.4.1-11 3. 観測装置の開発
- 図 2.4.1-12 地震計の検討
- 図 2.4.1-13 時間区間蓄積型記録計
- 図 2.4.1-14 開発済み時間区間蓄積型記録計(TSS)一覧
- 図 2.4.1-15 4. 東濃地域実験サイトの構築 (Powers of ten 構想)
- 図 2.4.1-16 東濃鉱山 ACROSS 施設配置図
- 図 2.4.1-17 臨時観測点位置図
- 図 2.4.1-18 名古屋大学テレメータ地震観測点
- 図 2.4.1-19 5. 実験結果概要 1) 到達距離試験
- 図 2.4.1-20 2) 地震波相分離および走時解析実験
- 図 2.4.1-21 3) 地震計アレー観測実験
- 図 2.4.1-22 瑞浪アレー観測実験の結果と解釈
- 図 2.4.1-23 4) 時間変動観測実験
- 図 2.4.1-24 6. 平成 12 年度の予定
- 図 2.4.1-25,26 7. 今後の展望
- 図 2.4.2-1 移動観測システムの概略
- 図 2.4.2-2 加振部・制御部のシステム系統概略図
- 図 2.4.2-3 HIT の加振原理
- 図 2.4.2-4 偏心モーメントの調整
- 図 2.4.2-5 東濃鉱山における HIT 設置面の養生
- 図 2.4.2-6 HIT と FIT の特徴比較
- 図 2.4.2-7 震源特性計測システムの概略図
- 図 2.4.2-8 新型本体取り付けカプラー板と改良型本体の完成予想図
- 図 2.4.2-9 偏心おもりの位置測定ジグの完成予想図
- 図 2.4.2-10 構造敏感力プラシート (OZAB) の完成予想図
- 添付資料 2.4.2-1、2.4.2-2 カプラー計画図
- 添付資料 2.4.2-3 偏心マス位置判定治具
- 図 2.4.3-1 電磁アクロスの目的
- 図 2.4.3-2 電磁アクロスの特徴
- 図 2.4.3-3 東濃電磁アクロスシステム：送信側
- 図 2.4.3-4 東濃電磁アクロスシステム：受信側
- 図 2.4.3-5 送信信号と受信信号

- 図 2.4.3-6 スタッキングの効果
図 2.4.3-7 観測データの周波数依存性
図 2.4.3-8 まとめ
図 2.4.4-1 アクロスの目的とその実現方法
図 2.4.4-2 3次元情報収集の原理
図 2.4.4-3 解析モデルの抽象化
図 2.4.4-4 非線形モデルの線形化
図 2.4.4-5 サンプルデータ
図 2.4.4-6 解析手順と結果
図 2.4.4-7 信号波形のデジタル設計
図 2.4.4-8 信号波形の最適化
- 図 3-1 目的
図 3-2 研究目標
図 3.3-1 東濃鉱山周辺図
図 3.3-2 東濃鉱山周辺の主な観測井の分布
図 3.3-3 東濃鉱山領域の模式的地質断面図
図 3.3-4 東濃地域の地質断面図及び観測井の位置
図 3.3-5 東濃鉱山坑道周辺の地質概念図
図 3.3-6 東濃鉱山坑道内の各種観測機器の配置図
図 3.3-7 観測井の模式図
図 3.3-8 観測装置の概要
図 3.3-9 地震地下水チームの観測データネットワーク
図 3.3-10 ラドン観測システムの概念図
図 3.4.1-1 地下水位・水圧連続観測の結果
図 3.4.1-2 地下水位・水圧の潮汐・気圧応答
図 3.4.1-3 地震前の SN-3 号孔の地下水位の変動
図 3.4.1-4 地震直後の SN-3 号孔の地下水位低下
図 3.4.1-5 地震後の長期の SN-3 号孔の地下水位上昇
図 3.4.1-6 愛知県東部地震（1997/3/16, M5.8）に関係する地下水位・水圧変動
図 3.4.1-7 地震前の SN-1 号孔の地下水位上昇
図 3.4.1-8 地震のマグニチュード・震源距離と地下水位変動の関係
図 3.4.2-1 東京大学地震研究所が開発した地殻活動総合観測装置の概観と伊東
観測点におけるボアホール設置断面図、及び伊豆半島東部において
発生した群発地震の震源分布図と伊東観測点の位置

- 図 3.4.2-2 伊豆半島沖の群発地震活動に関連した地殻活動総合観測装置による地殻変動
- 図 3.4.2-3 東濃鉱山に埋設した地殻活動総合観測装置による観測例
- 図 3.4.2-4 油壺観測点における傾斜変化の比較
- 図 3.4.2-5 インテリジェント回収型歪計の概要と初期地殻応力測定時の歪変化の例
- 図 3.4.3-1 Node2 ch.1 (120m 回避場付近) 淌水量とラドン濃度
- 図 3.4.3-2 岩盤放出ラドン濃度測定地点毎の比較
- 図 3.4.3-3 測定室付近 (縦坑より約 20m 奥) における坑道内気温の変化
- 図 3.4.3-4 坑道内の地点別温度と湿度の変化測定値
- 図 3.4.3-5 坑道内大気のラドン濃度 (Node2 ch.2) と気温の関係
- 図 3.4.3-6 Node2 ch.0 (KNA-2 号孔) のリークテストに伴う湧水停止時の RaA カウント数値の時間減衰
- 図 3.4.3-7 愛知県西部地震 (1999 年 11 月 29 日) に伴うラドン濃度 (RaA) の異常
- 図 3.4.4-1 東濃鉱山や周辺における地下ガス観測
- 図 3.4.4-2 東濃鉱山における地下ガス (坑内空気) 連続観測結果 (97.3—99.12)
- 図 3.4.4-3a 東濃鉱山地下ガス観測における各成分の特徴 (98.1.20—2.18)
- 図 3.4.4-3b 東濃鉱山地下ガス観測における各成分の特徴 (99.1.26 12.15)
- 図 3.4.4-4 97FT-01 号孔における地下水溶存ガス連続観測 (98.3 99.12)
- 図 3.4.4-5a 97FT-01 号孔での地下水溶存ガス連続観測における ${}^4\text{He}$ と ${}^{32}\text{O}_2$ の測定値 (単位 A) (98.3 99.12)
- 図 3.4.4-5b 間歇的なピークにおける各種観測項目間の関係 (98.5.17 24)
- 図 3.5-1 1999 年 8 月 20 日、21 日前後の地下水位・水圧・歪・傾斜・地下ガス成分の変動
- 図 3.5-2 地震波に対応した歪・傾斜・地下水位の振動
- 図 3.5-3 1999 年 11 月 29 日前後の地下水位・水圧・歪・傾斜・地下ガス成分の変動
- 図 3.6 地震発生と地下水挙動に関する研究の主な成果
- 図 3.7 今後の展開
- 図 4-1 Overview and purpose of active fault research at the Mozumi-Atotsugawa fault system
- 図 4-2 Seismicity map of the Atotsugawa fault and adjusent areas for the period between 1980 and 1990, located by the Kyoto Univ. seismic network
- 図 4-3 Mozumi Fault

- 図 4-4 Precise Distance Measurements
- 図 4-5 (上) Active fault Observations of the Atotsugawa Fault System
- 図 4-5 (下) Slip planes around the Atotsugawa fault system
- 図 4-6 Active Faults and instruments installed for the active fault program
- 図 4.4.1-1 観測点分布図
- 図 4.4.1-2 臨時観測点を含むデータを用いて再決定した震央と跡津川断層に沿う幅30km以内の地震の深さ断面図
- 図 4.4.1-3 跡津川断層に沿う地震の時空間分布
- 図 4.4.1-4 跡津川断層に沿う地震数、マグニチュード及び地震の深さ分布
- 図 4.4.1-5 跡津川断層付近の地震分布
- 図 4.4.2-1 国土地理院 GPS 観測網による変位速度分布（1996-1999）と中部日本における活断層
- 図 4.4.2-2 跡津川断層稠密 GPS 観測網
- 図 4.4.2-3 GPS 解析時系列例（東西成分）
- 図 4.4.2-4 観測された変位速度場とモデル値
- 図 4.4.2-5 跡津川断層固着モデル
- 図 4.4.3-1 茂住祐延断層付近地質図
- 図 4.4.3-2 活断層調査坑道地質平面図
- 図 4.4.3-3 茂住祐延断層ストリップマップ
- 図 4.4.3-4 茂住峠における地層抜き取り調査
- 図 4.4.3-5 真川露頭上部トレンチ調査
- 図 4.4.3-6 炭素 14 年代測定値の既存研究との対比
- 図 4.4.4-1 断層破碎帯試料の研磨片写真
- 図 4.4.4-2 Summary of oscillating Experiments, and Non-linear viscous behavior of Montmorillonite
- 図 4.4.5-1 トラップ波の発生モデルと断層セグメントの識別
- 図 4.4.5-2 茂住・祐延断層の調査坑道内における地震計アレイ配置
- 図 4.4.5-3 S破部分の観測波形例
- 図 4.4.5-4 トラップ波のモデル計算例
- 図 4.4.5-5 茂住・祐延断層A、B破碎帯近傍の破碎帯のモデル
- 図 4.4.6-1 油壺における比抵抗連続測定：1999年9月1日から28日における比抵抗変化と海水面の水位
- 図 4.4.6-2 油壺における比抵抗連続測定：水平面内 3 成分比抵抗測定と推定される地殻応力変化の方向

- 図 4.4.6-3 茂住坑内における比抵抗連続測定：茂住坑内の鉱柱における比抵抗と地温データ
- 図 4.4.6-4 茂住坑内における比抵抗連続測定：比較的温度変化が少ない 7 日間の比抵抗データのスペクトル
- 図 4.4.6-5 茂住断層近傍の岩盤での超精密 ΔV_p 測定：現位置岩盤の超精密 P 波速度変化の測定システム
- 図 4.4.6-6 釜石鉱山での ΔV_p の測定例
- 図 4.4.6-7 茂住と油壺で測定された ΔV_p
- 図 4.4.6-8 茂住断層の断層面での AE 計測
- 図 4.4.6-9 茂住断層の断層面での AE 計測システム
- 図 4.4.6-10 茂住断層の断層面で測定された AE 波形の例
- 図 4.4.6-11 坑内ボアホール孔における間隙水圧測定
- 図 4.4.6-12 坑内ボアホール孔内の間隙水圧測定の時系列解析
- 図 4.4.6-13 S -800 鉄管試験モデル図、及び S-800 鉄管試験の実験値と BEM 解析の比較
- 図 4.4.6-14 室内実験の外観、及び室内実験の結果
- 図 4.4.6-15 解析モデル、及び解析結果
- 図 4.4.7-1 長棟坑道ヘキサダイヤグラム
- 図 4.4.7-2 断層調査坑道ヘキサダイヤグラム
- 図 4.4.7-3 Na/Ca 比と採水地点の関係
- 図 4.4.7-4 1997 1999 の地下水の酸素同位体比の変化
- 表 5-1 陸域地下構造フロンティア研究の体制図（平成 12 年度）
- 表 5-2 陸域地下構造フロンティア研究 チーム研究員構成推移
- 表 6-1 陸域地下構造フロンティア研究予算の推移
- 表 6-2 陸域地下構造フロンティア研究 主要観測内容

研究開発課題：

陸域地下構造フロンティア研究

核燃料サイクル開発機構

陸域地下構造フロンティア研究

課題評価説明用OHP

1. 陸域地下構造フロンティア研究の概要
2. 地震発生に関する研究
3. 地震発生と地下水挙動に関する研究
4. 活断層帯での地殻活動研究
5. 研究実施体制
6. 資金計画

地震防災対策特別措置法

(平成7年6月16日公布、同7月18日施行)

目的

- ・地震による災害から国民の生命、身体及び財産を保護するため、地震防災対策を強化する。

施策 (1) 地震防災緊急五箇年計画

避難地、消防用施設の充実

(2) 地震調査研究推進本部の設置

(3) 研究開発等の推進

図1-1

科技庁

- ・地震総合フロンティア研究
- ・防災科学技術研究所 など

文部省

- ・地震・地殻変動観測など

通産省

- ・活断層調査など

運輸省

- ・地震観測網の整備など

郵政省

- ・首都圏地殻変動観測など

建設省

- ・精密測地網測量など
(国土地理院など)

図1-2

地震総合フロンティア研究

- ・ 地震研究の中でも未踏であり先端的な部分の研究を、組織の枠組みを越えて総合的に推進
- ・ 科学技術庁傘下の研究機関が、大学、海外等の研究者の参加が可能な流動的研究システムで推進

図 1-3

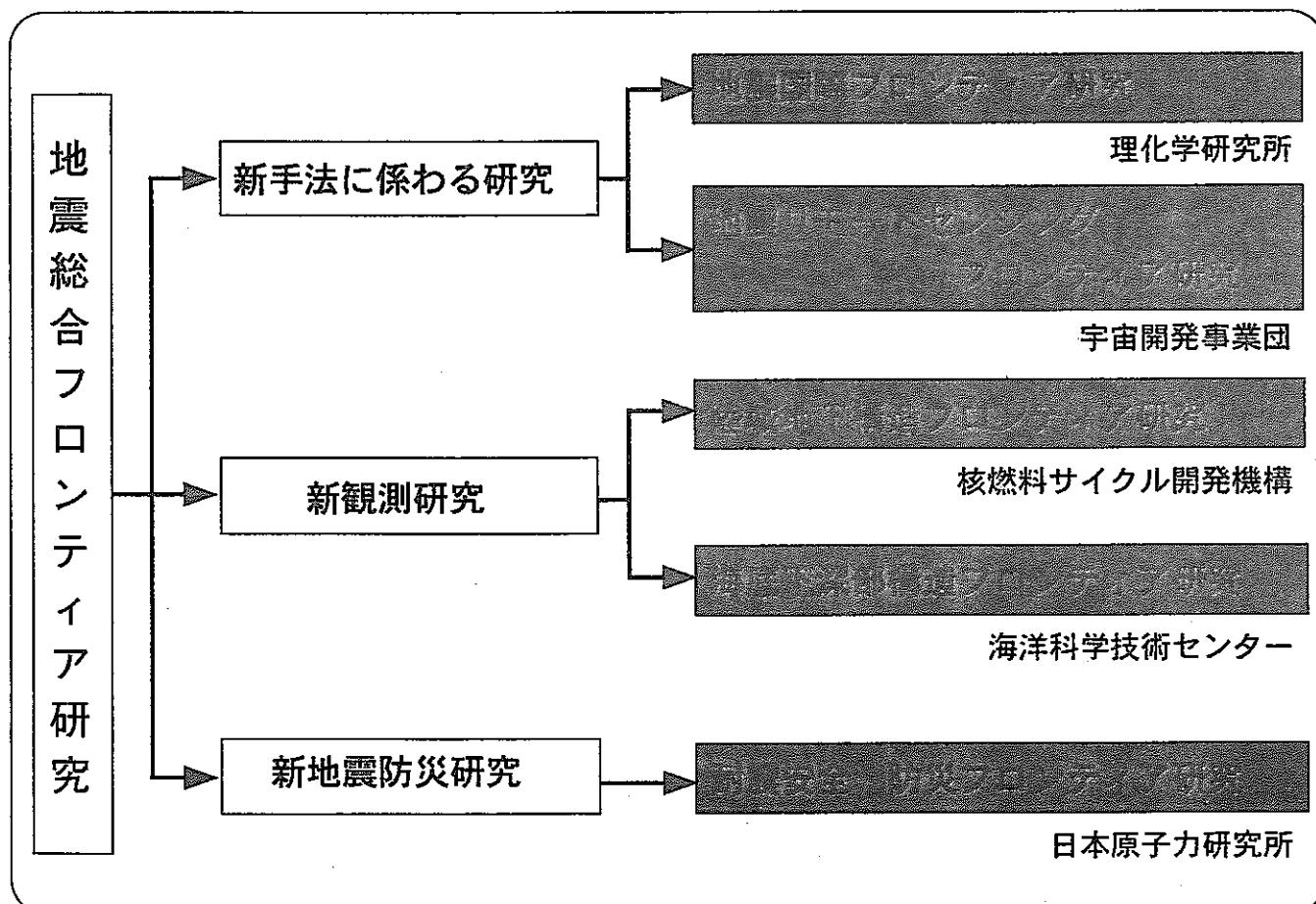


図 1-4

陸域地下構造フロンティア研究

- ・新たな地震観測手法の開発
- ・陸域地下における地殻の動きに着目した地震発生機構の研究

図1-5

陸域地下構造フロンティア研究

(1) 地震発生に関する研究

— アクロスシステムの開発と観測 —

(2) 地震と地下水拳動に関する研究

— 地震と地下水の相互作用の研究 —

(3) 活断層帯での地殻活動研究

— 活断層活動様式の研究 —

図1-6

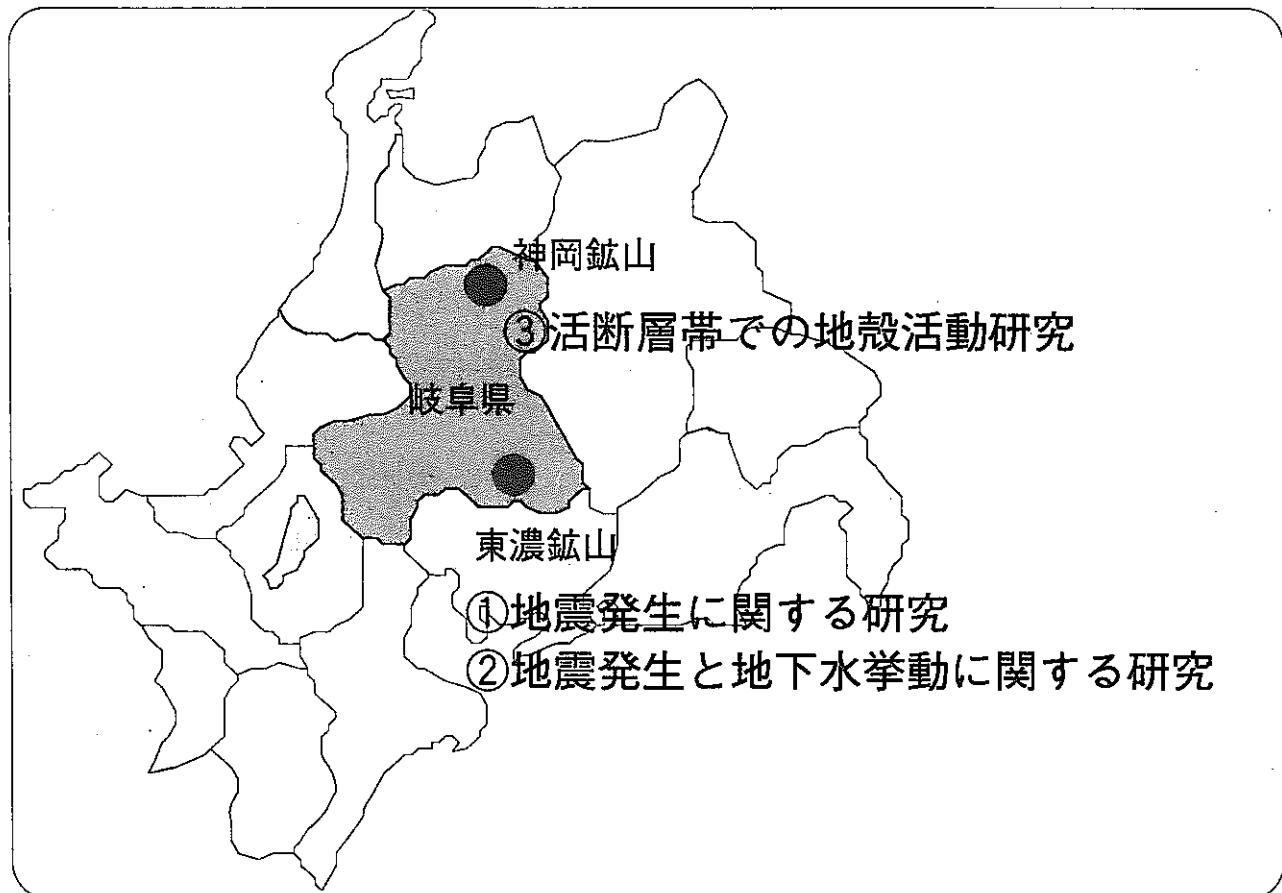


図1-7

地震発生に関する研究

目的

最新地下構造探査手法による地震発生機構の解明

研究内容

- ・精密制御測定常震源装置（アクロスシステム）の開発
- ・地殻変動の常時モニタリング

図1-8

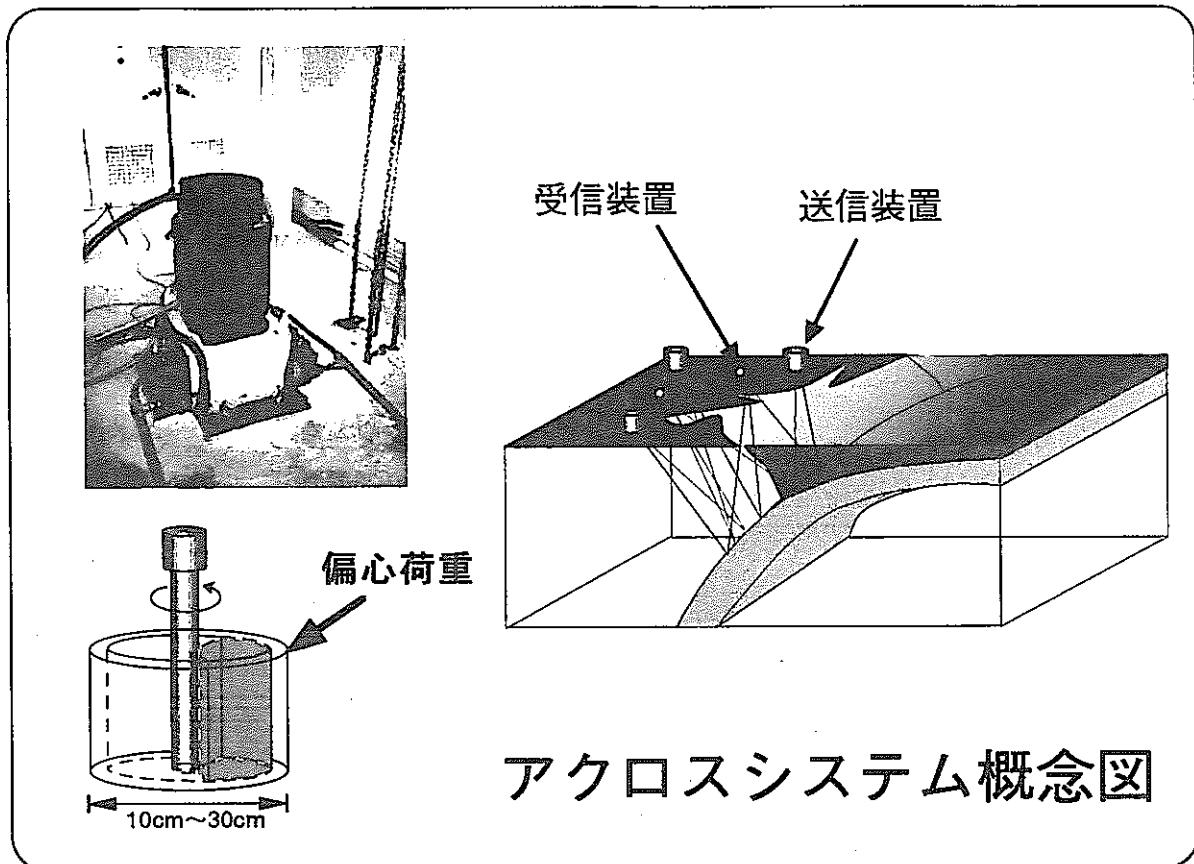


図 1-9

地震発生に関する研究（アクロス研究）

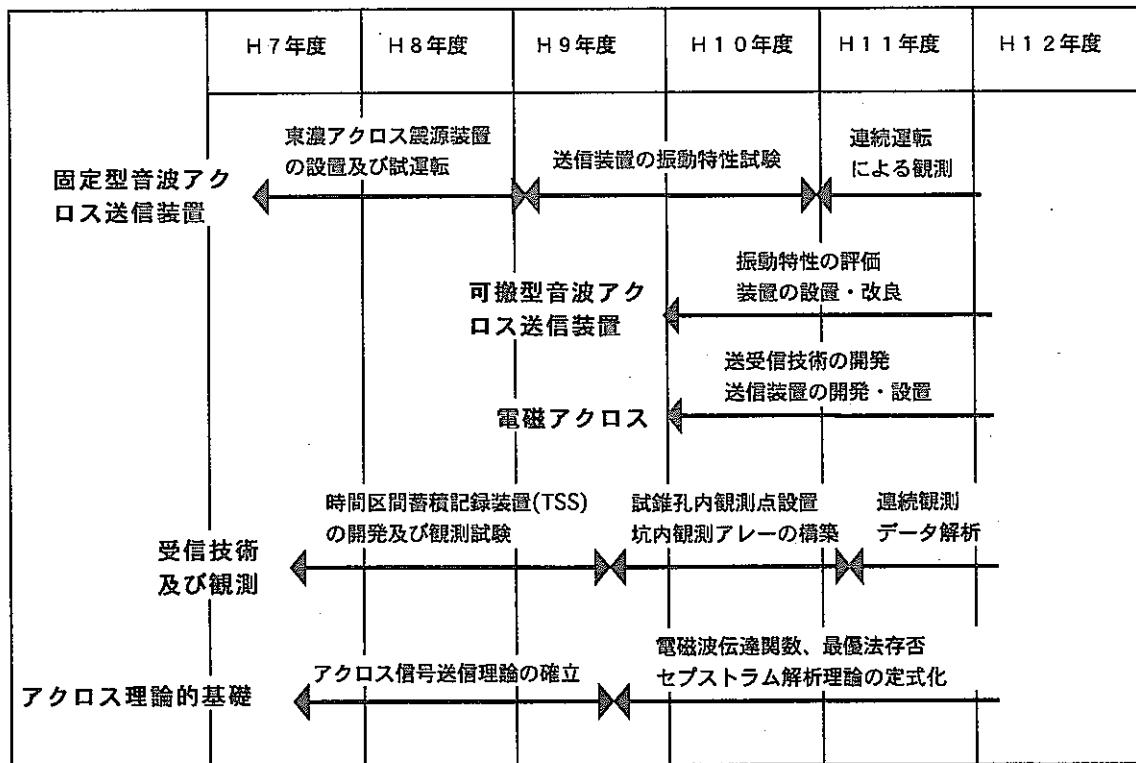


図 1-10

地震発生に関する研究の主な成果

- ・最優法存否セプストラム解析理論、FM送信理論、アクロス信号多重送信理論、電磁波伝達関数を定式化。
- ・東濃鉱山固定型アクロス音波送信装置の長時間連続運転技術及び観測体制を確立
- ・可搬型アクロス音波送信装置の振動特性解析を実施
- ・電磁アクロス送信技術を開発
- ・時間区間蓄積記録装置(TSS)を開発。野外用、孔内用及びアレー用TSSが実用化。
- ・東濃音波アクロス最大送受信距離100kmを達成

図1-11

今後の展開

課題

- ・東濃アクロスシステムのレベル向上
(連續観測試験データの蓄積と解析)
- ・神岡電磁アクロス基準信号送信所の立ち上げ
- ・個別理論と個別技術の拡充

展望

- ・特定地域(例えば東海)における総合観測システムの構築と、それを用いた実地試験による技術レベルの向上
- ・地域の個性、目的にあわせた技術と汎用技術のレベルアップ

図1-12

地震発生と地下水挙動に関する研究

目的

地殻歪み—地下水—地下ガスの連成現象の解明と
地震前兆現象の把握

研究内容

- ・地震および地殻歪みの観測手法の構築
- ・地下水挙動および地下ガス濃度の観測・解析

図1-1-3

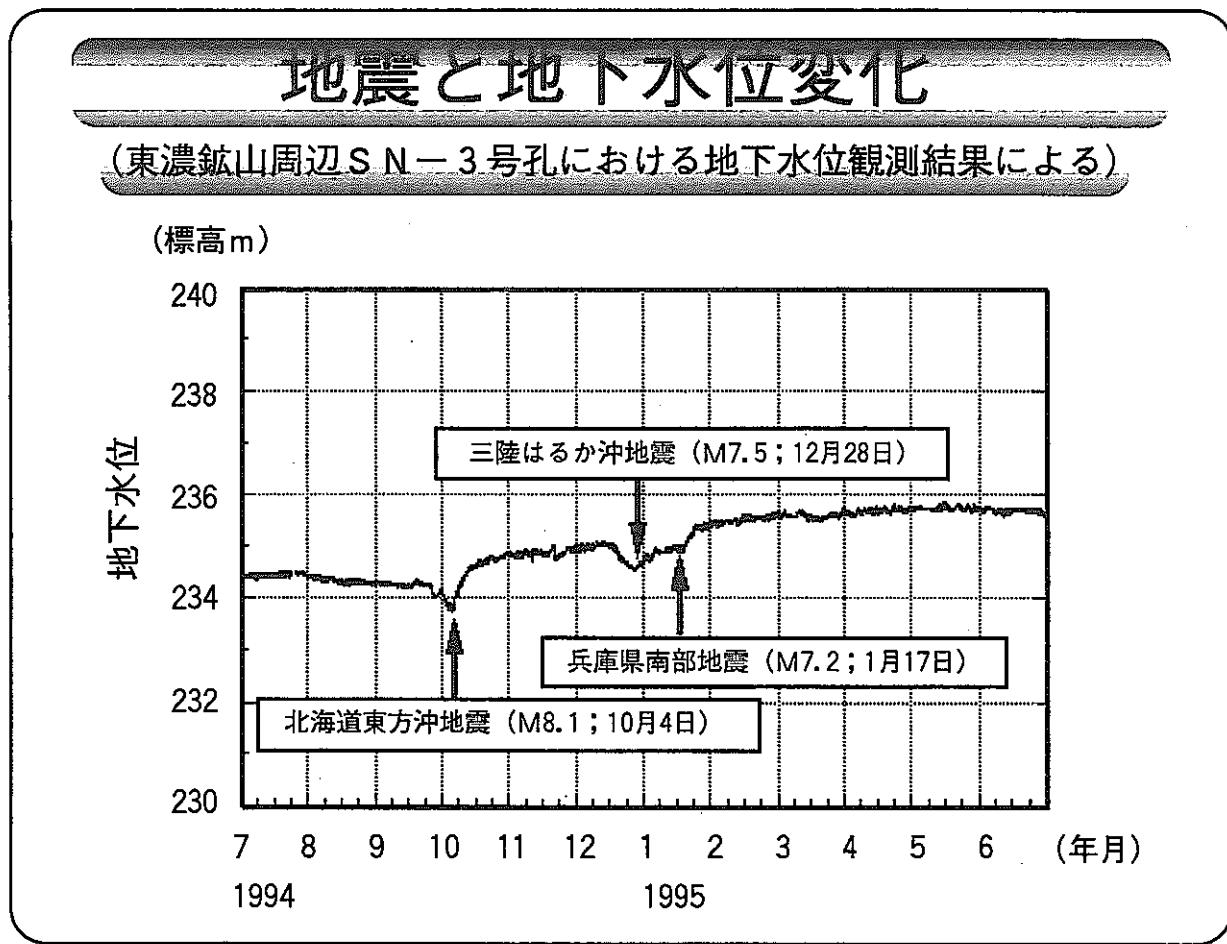


図1-1-4

地震・地下水研究総合観測井

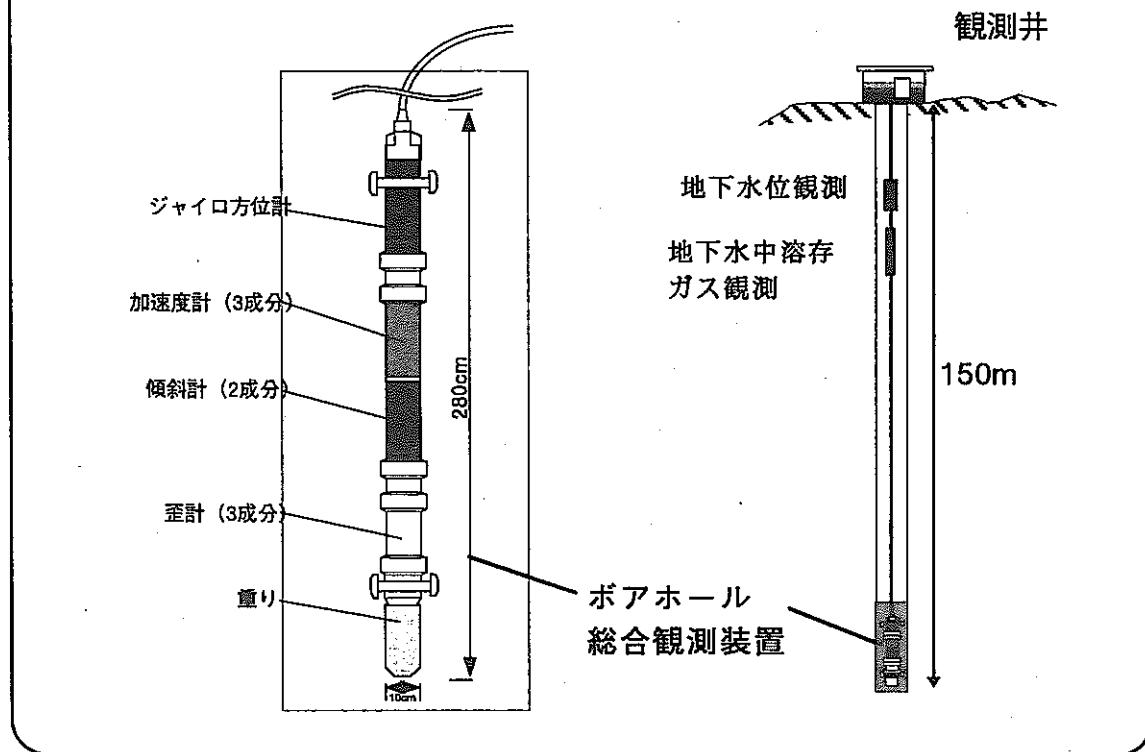


図1-15

地震発生と地下水挙動に関する深地層総合研究

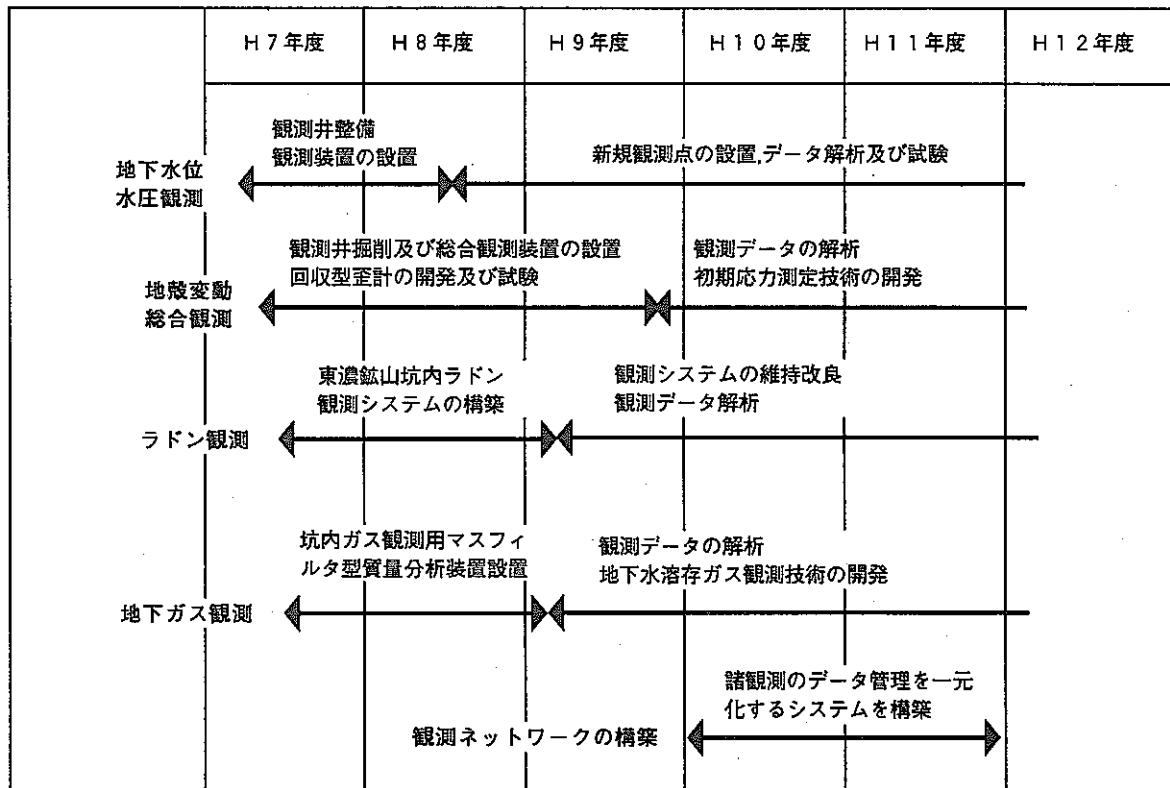


図1-16

地震発生と地下水挙動に関する研究の主な成果

- ・地殻活動観測装置の改良と回収型歪計を開発
- ・伊豆の群発地震活動に関連した地殻変動を検出
- ・東濃において多くの地震に関連する地下水位変動・地殻変動・水中ラドン濃度変動を検出
- ・質量分析計を用いて、ガス成分を高精度で測定する手法を確立。
- ・各種長期観測データの一元化管理ネットワークを構築

図1-17

今後の展開

課題

- ・地下水、地殻変動、ガス成分の総合的な比較検討
- ・地殻変動総合観測装置の新規埋設など、新たな観測項目の拡充
- ・個別の観測装置の改良

展望

- ・観測点の地震応答特性及び前兆的な変動のメカニズム解明へ向けた観測の継続・拡充
- ・測定精度向上のための観測装置の改良・開発

図1-18

活断層帯での地殻活動研究

目的

活断層の形式（地震発生）メカニズムの解明

研究内容

- ・微小地震観測およびGPS観測
- ・活断層の深部構造および断層破碎帯の調査

図1-19

跡津川断層系における研究の特徴

- ・世界で初めて活断層を貫いた研究調査坑道
- ・50km、5km、500mの異なるスケールでの地震観測
- ・断層沿いの微小地震配列→クリープ運動の示唆

図1-20

活断層帯での地殻活動研究の主な成果

- ・GPS観測と集中地震観測により、跡津川断層のクリープ運動をモデル化。
- ・茂住-祐延断層の2.7万年間の活動歴を確認。
- ・断層破碎帯に伝わるトラップ波を検出、活断層の3次元構造を推定
- ・坑内用精密比抵抗計及び精密弾性波速度測定装置を開発。乾式破碎法応力測定法の実用性を確認。
- ・茂住-祐延断層近傍の水質変化が断層運動による破碎の強弱と対応していることを把握。
- ・活断層近傍における岩盤透水性変化の情報を取得。

図1-23

今後の展開

課題

- ・地震活動、GPS、トラップ波、坑内精密計測、地球化学データなどの時系列データを同じ時間軸上に並べて比較検討
- ・岩石および破碎帯の物理化学的挙動の解明

展望

- ・活断層の活動履歴を読みとる技術を茂住坑を利用して確立
- ・主断層である跡津川断層の掘削調査

図1-24

陸域地下構造フロンティア研究の主な会議

「震源に近づく」シンポジウム

平成9年11月19日 京都

地球惑星科学関連学会1998年合同大会（特別セッション：地震フロンティア）

平成10年5月26日～29日 東京

日米地震研究協力会議

平成10年8月1日～3日 神岡鉱山

陸域地下構造フロンティア研究国際ワークショップ

平成10年11月16日～19日 土岐市・神岡町

日本－ポーランド共同シンポジウム

平成11年11月26日～27日 京都

アメリカ地球物理連合（A G U）1999年秋期大会

（特別セッション：Internal fault structure）

平成11年12月13日～17日 サンフランシスコ

地球惑星科学関連学会2000年合同大会（特別セッション：地震フロンティア）

平成12年6月25日～28日予定 東京

図1－25

東濃音波アクロスシステムの開発成果とその総合レビュー

陸域地下構造フロンティア研究プロジェクト

アクロス研究チーム 国友孝洋

1. はじめに
　　東濃地域における音波アクロス研究
2. 震源装置の開発
3. 観測装置の開発
4. 東濃地域実験サイトの構築
5. 実験結果概要
6. 平成12年度の予定
7. 今後の展望

図 2.4.1-1

1. 東濃地域における音波アクロス研究

新しい地下探査手法の開発

—テストフィールドとしての東濃地域の活用—

探査システムの開発 \longleftrightarrow フィールドスタディ

震源装置

観測装置

地下構造

時間変動

データ処理

探査手法の考案
とテスト

図 2.4.1-2

2. 震源装置の開発

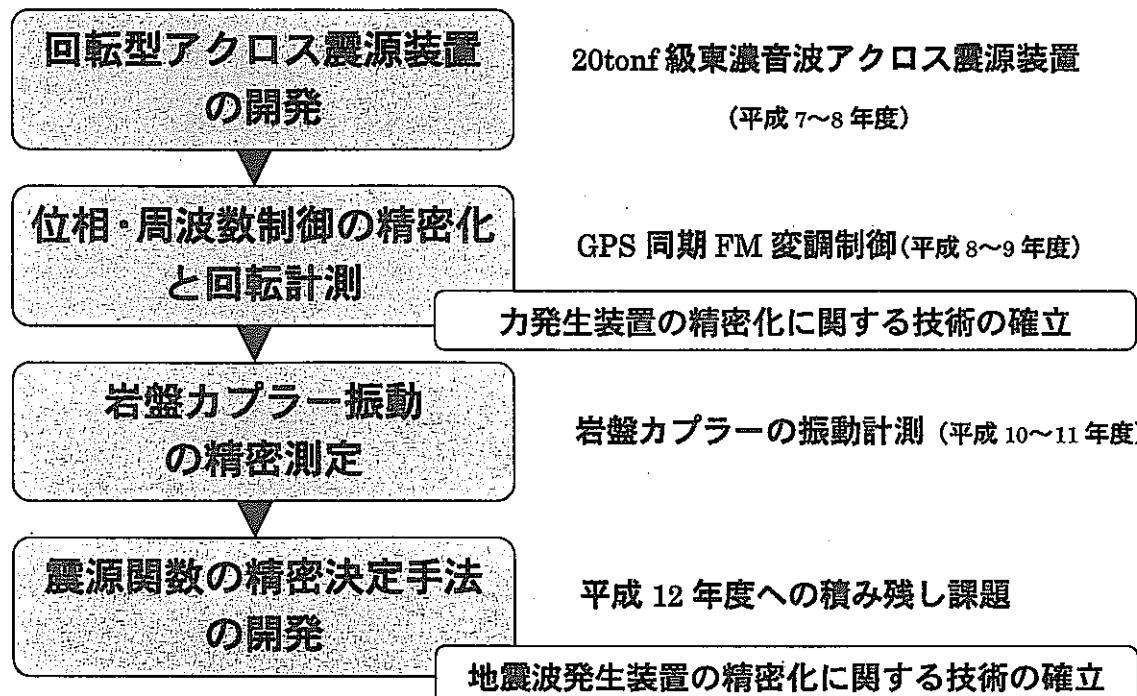


図 2.4.1-3

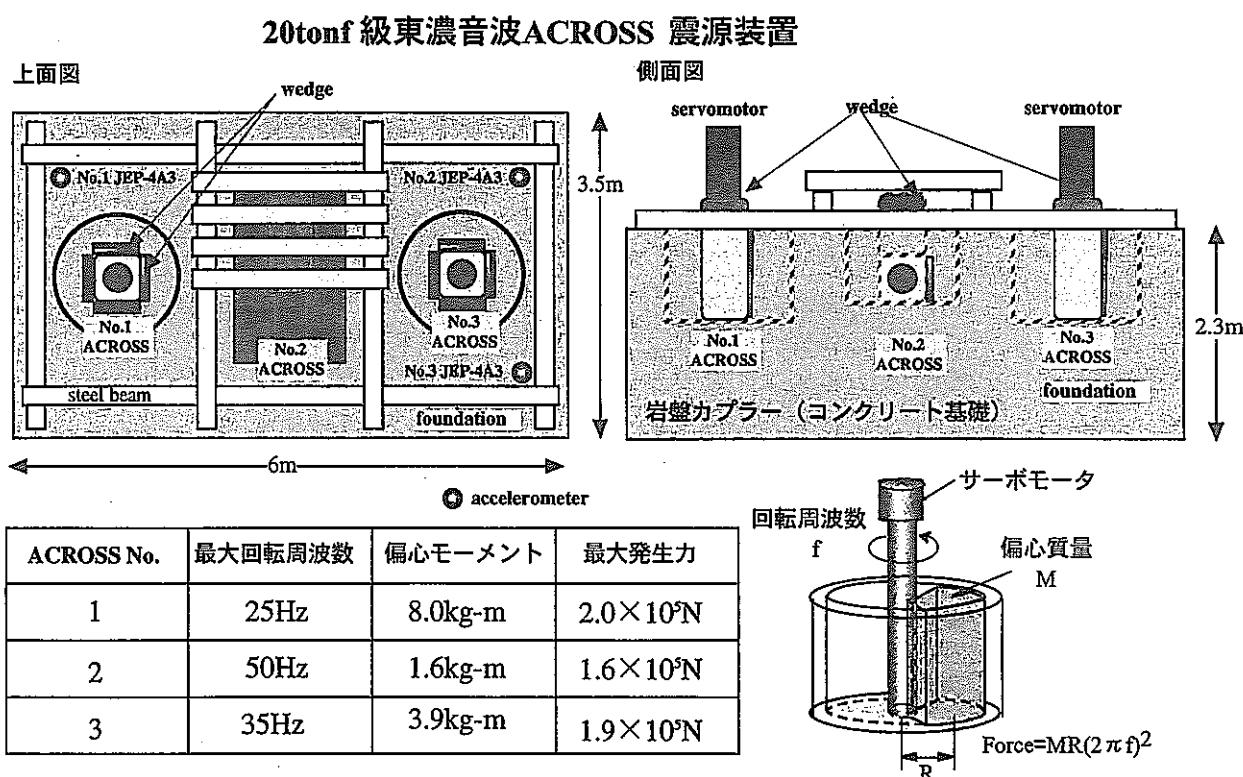


図 2.4.1-4

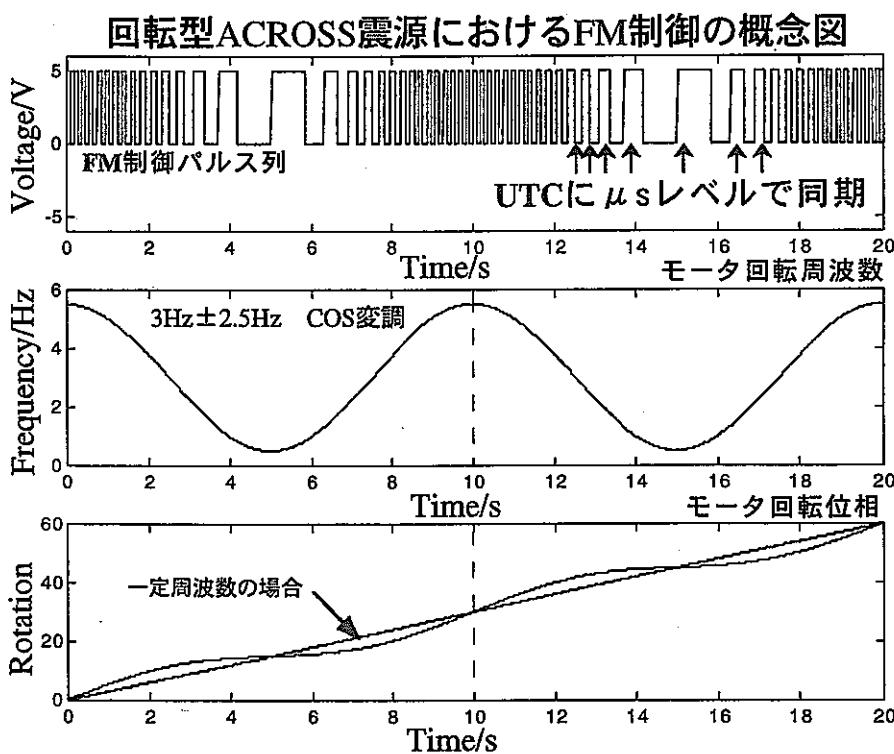
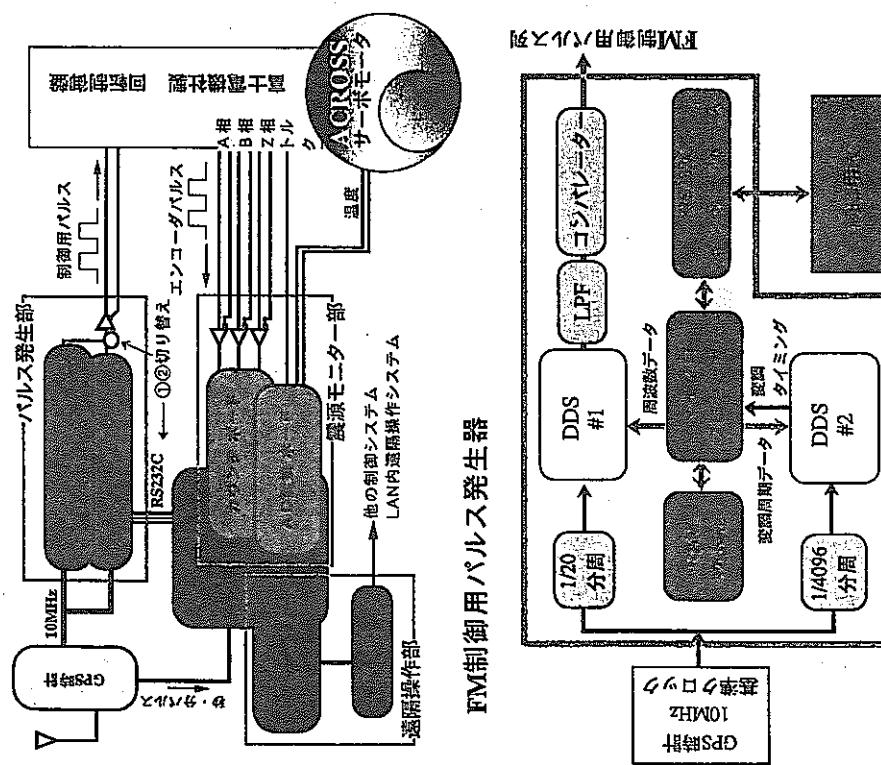


図 2.4.1-5

GPS 同期FM変調制御システム



GPS時計 (True Time XL-DC) : UTCに150nsの精度で同期
DDS(Direct Digital Synthesizer) : 32bits-ACROSS回転周波数にして58nHzの分解能

図 2.4.1-6

送信波とモータ回転

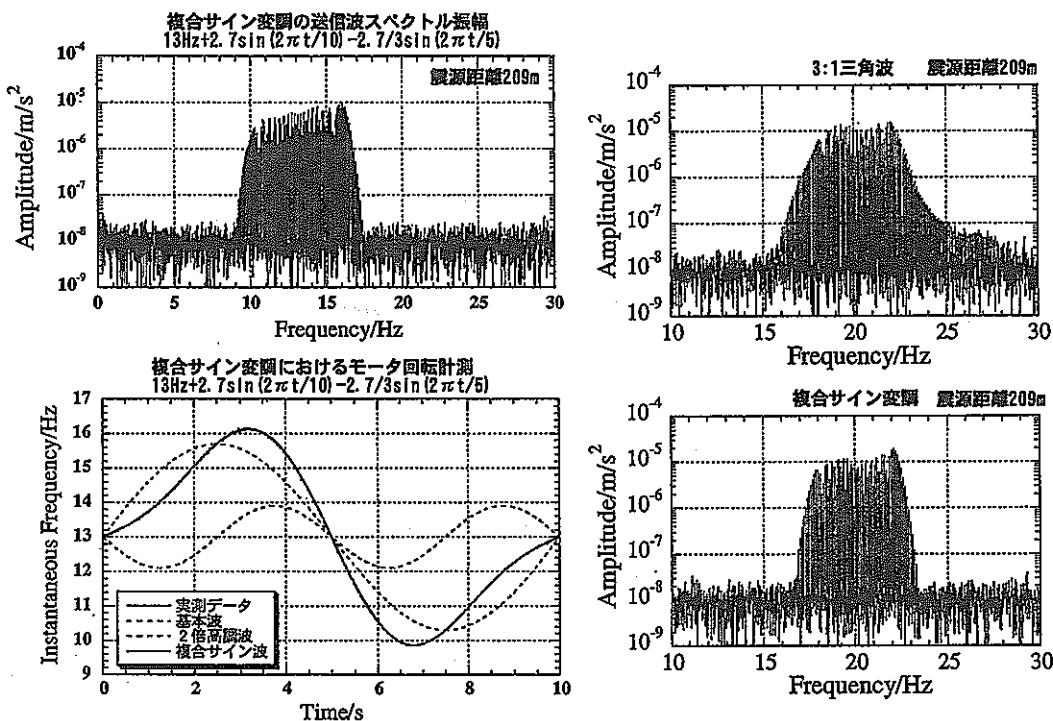
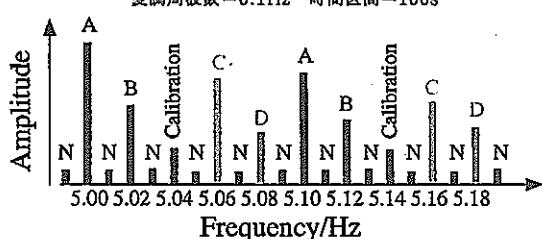


図 2.4.1-7

FMによる同時送信

周波数系列分割型送信による3次元地下連続モニター
4つの送信所を対象の周囲に配置した場合の一例
変調周波数=0.1Hz 時間区間=100s



A series : $f_0 \pm 0.1n$	C series : $f_0 + 0.04 \pm 0.1n$
B series : $f_0 + 0.02 \pm 0.1n$	D series : $f_0 + 0.08 \pm 0.1n$
Calibration Signal : $f_0 + 0.06 \pm 0.1n$	
n : integer	
N : Noise monitor and/or Reserve channels	

周波数帯域分割型送信による3次元地下連続モニター
4次元カラーホログラフィー／トモグラフィーの一例

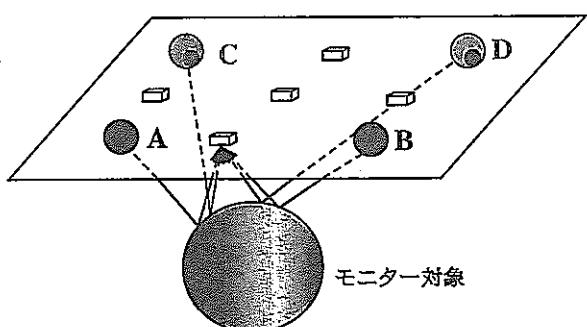
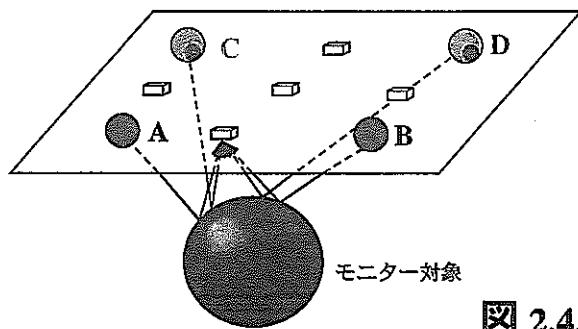
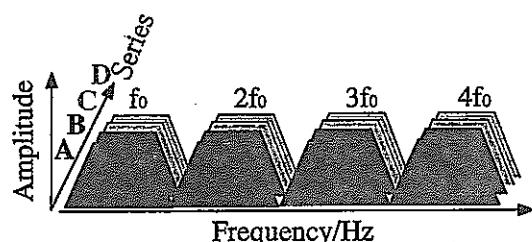
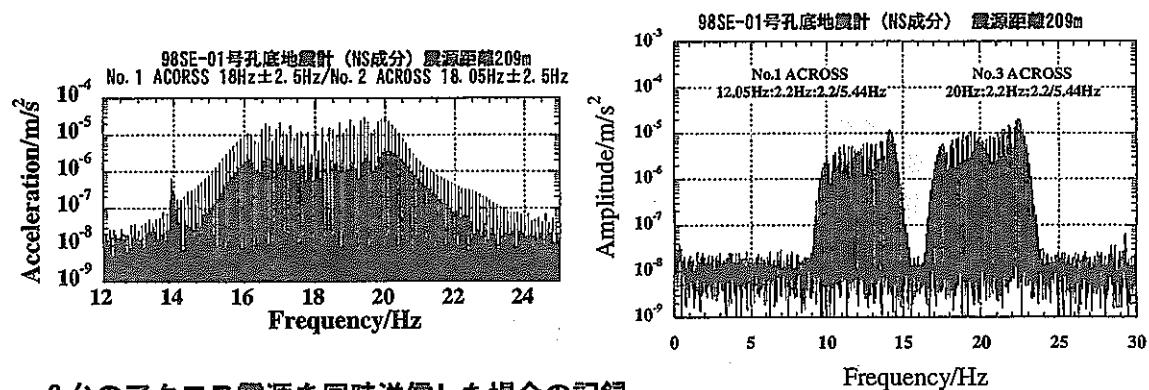


図 2.4.1-8

多重送信の実例



2台のアクロス震源を同時送信した場合の記録

左図：No. 1 ACROSS (25Hz 機) と No. 2 ACROSS (50Hz 機)

変調パラメタは両者とも 3:1 三角波変調。中心周波数を 0.05Hz ずらして送信

右図：No. 1 ACROSS (25Hz 機) と No. 3 ACROSS (35Hz 機)

変調パラメタは両者とも複合サイン変調（基本波 2.2Hz 高調波 2.2/5.44Hz）

中心周波数を 7.95Hz ずらして送信

図 2.4.1-9

岩盤力ブラーの振動計測

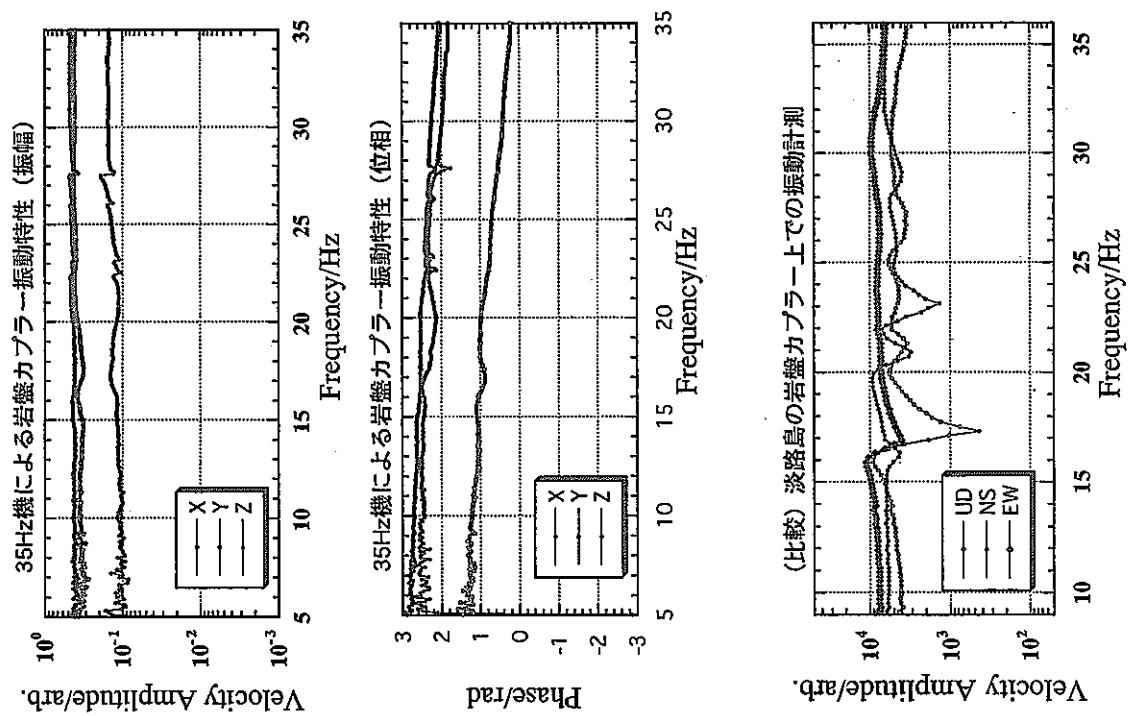


図 2.4.1-10

3. 観測装置の開発

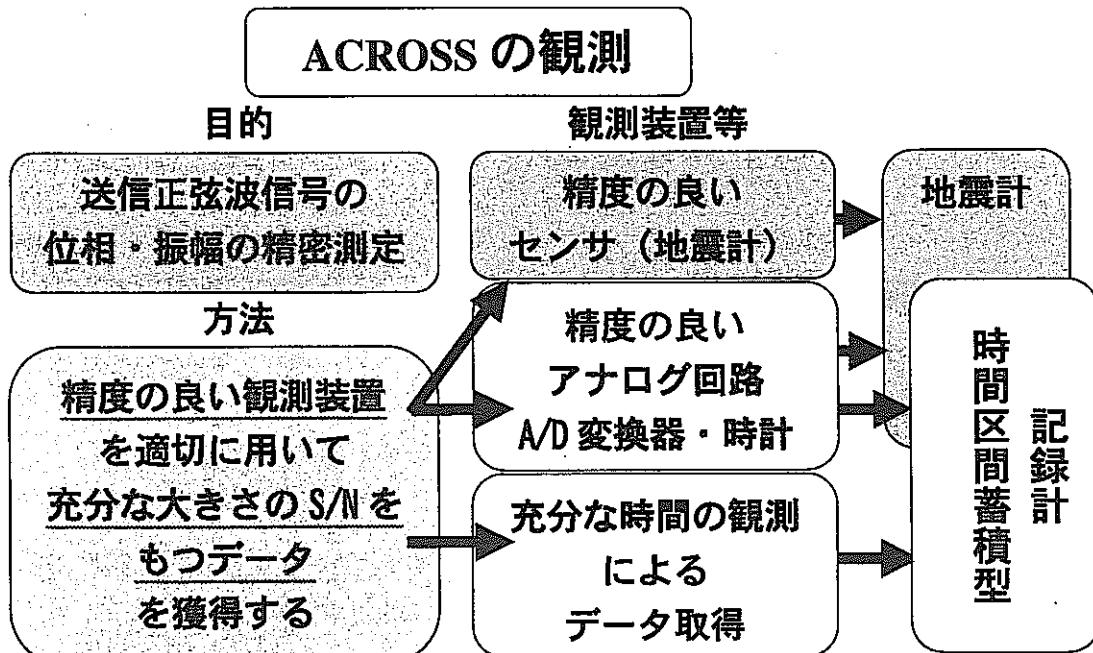


図 2.4.1-11

地震計の検討

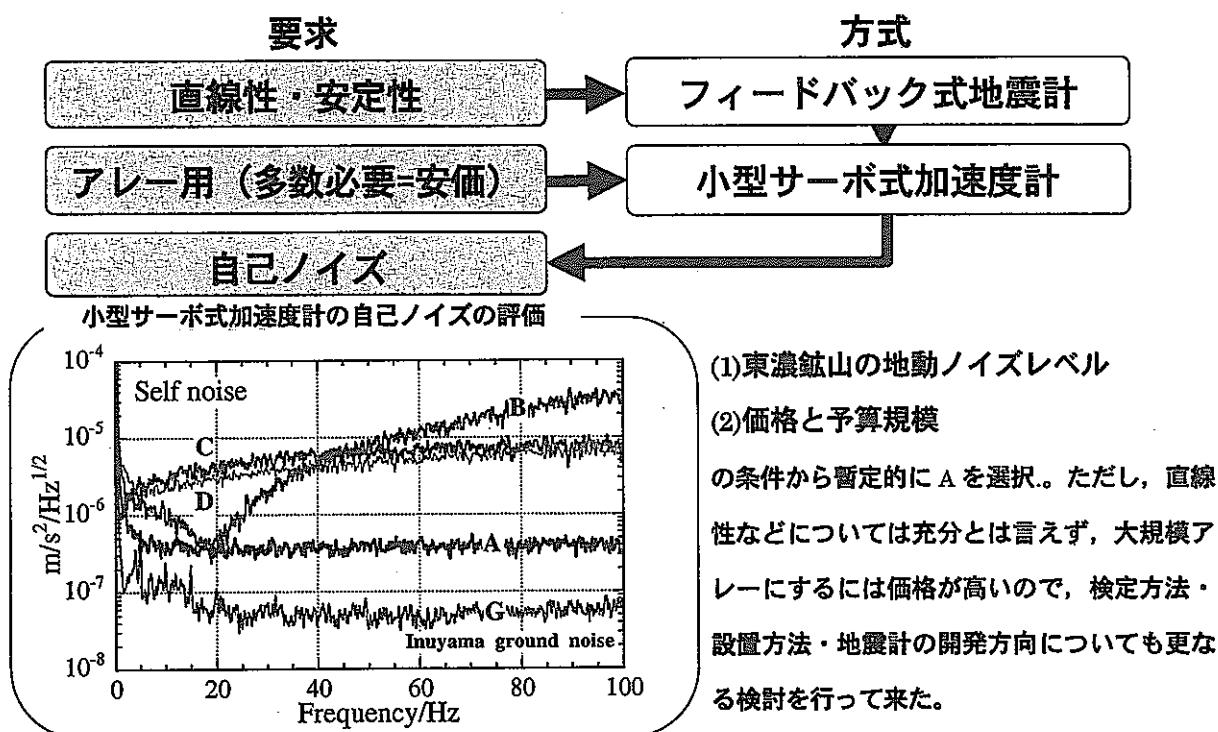


図 2.4.1-12

時間区間蓄積型記録計(Time Segment Stacking recorder : TSS)

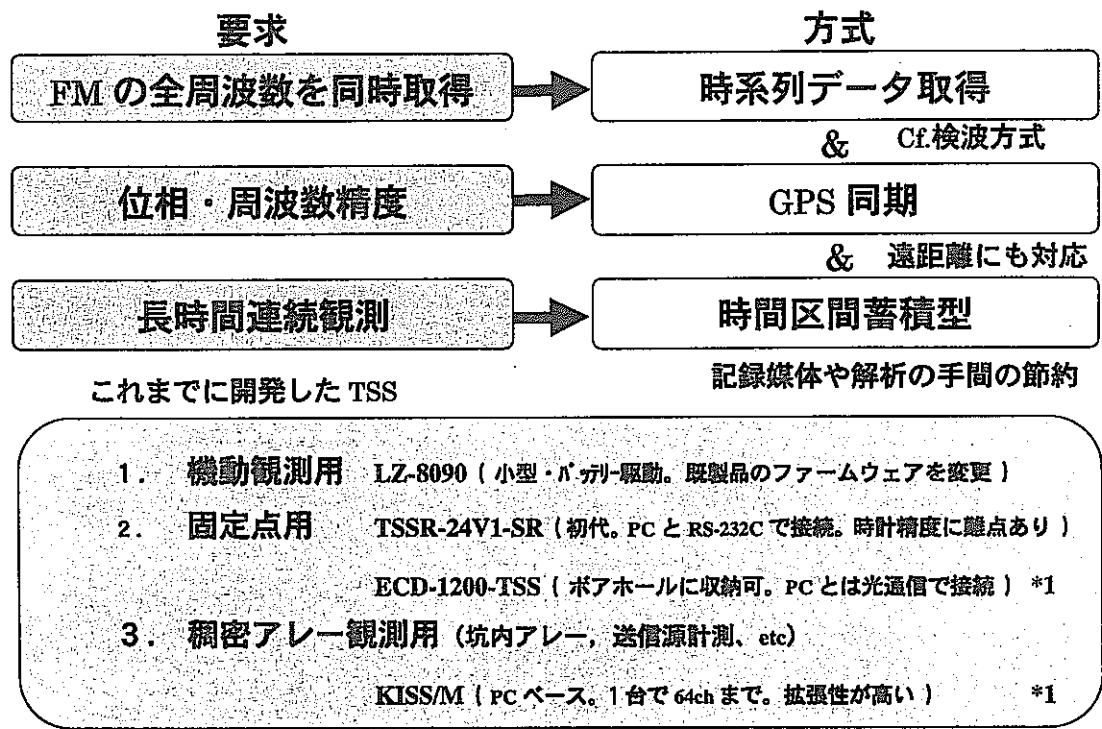


図 2.4.1-13

開発済み時間区間蓄積型記録計 (TSS) 一覧

製品名 (メーカー)	TSSR-24V1-SR (マークランド)	LZ-8090 (LS-8000SH) (白山工業)	ECD-1200-TSS (近計システム)	KISS/M (國友)
特徴	<ul style="list-style-type: none"> 高分解能 A/D A/D 部と記録部(PC)が分離 サンプリングクロックに難点がありデータが使い難い 	<ul style="list-style-type: none"> 小型 バッテリー駆動 ファームの入れ替えで大学などで多数用いられているハードが TSS として活用できる。 	<ul style="list-style-type: none"> A/D 部と記録部(PC)が分離 A/D 部は低消費電力で、ボアホール内へ収納が可能な形状。記録部とは光通信で電気的に絶縁 TSS 機能中に自然地震も観測 	<ul style="list-style-type: none"> PC ベース 多チャンネル 多機能 高クロック精度 TSS 機能中に自然地震も観測
A/D Ch 間遅延 アーチャ	ΔΣ 24bit / 同時サンプル なし	逐次比較 16bit / マルチブレクサ 30 μsec 40ns (遅延) 20ps (ジッタ)	逐次比較 16bit / 同時サンプル なし 40ns (遅延) 20ps (ジッタ)	逐次比較 16bit / マルチブレクサ 10 μsec 6ns (遅延) 100ps (ジッタ)
変換速度	163.84Hz	100, 200Hz	200Hz (10kHz からデシジョン)	1, 5, 10kHz (デシジョン機能あり)
時間区間 ウインドウ	100s 98.779s (欠測 1.221s)	100, 200s (改良中: 20, 50, 100, 200s) 98, 100s (欠測 2s : 0s へ改良中)	100s 100s	1, 2, 5, 10, 20, 50, 100s 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100s
サンプリングクロック (UTC 同期精度等)	<ul style="list-style-type: none"> GPS 時刻に数 ms から 10 μs 程度で同期スタート。 内部時計のドリフト大きい ($10^{-5} \sim 10^{-4}$) 	<ul style="list-style-type: none"> GPS 時刻にと 5 μs 以内で同期スタート。 内部時計のドリフト小さい (10^{-7} 程度) 	<ul style="list-style-type: none"> GPS の 1PPS により内部 VCO をフィードバック制御 常時 GPS 時刻に対し 2 μs 以内で同期 	<ul style="list-style-type: none"> UTC と 150ms 以内で同期。 (震源との相対精度は更に良) 常時 GPS 時刻に対して数 ns 程度で同期
GPS 時計	内蔵	内蔵	記録部 (光で 1PPS を A/D へ)	外部 (TrueTime XL-DC など)
入力 ch	3ch	3ch	4ch / module	64ch まで任意
増幅器	10, 100, 1000, 10000 倍	2, 10, 30, 100, 300, 900 倍	1 ~ 10000 倍 (抵抗で変更)	外付け (入力レンジ 2, 5, 10, 20V)
ロードインピーダンス	67.43Hz (デジタル)	30, 60, 120, 240Hz or OFF	1kHz	外付け (デジタル/アナログあり)
波形表示	記録部の PC でリアルタイム表示	表示機能なし。	記録部の PC で設定時に表示	PC でリアルタイム表示。Windows GUI
観測対象	ACROSS	ACROSS または爆破・自然地震	ACROSS・自然地震を同時観測	ACROSS・自然地震を同時観測
その他	定点観測用 時計の改造を考慮中	臨時観測用 ファームウェア改良	ボアホール地震計など デシジョン用 DSP 検討中	震源振動計測、坑内アレーなど ハンドメイドで機能付加容易

図 2.4.1-14

4. 東濃地域実験サイトの構築 (Powers of ten 構想)

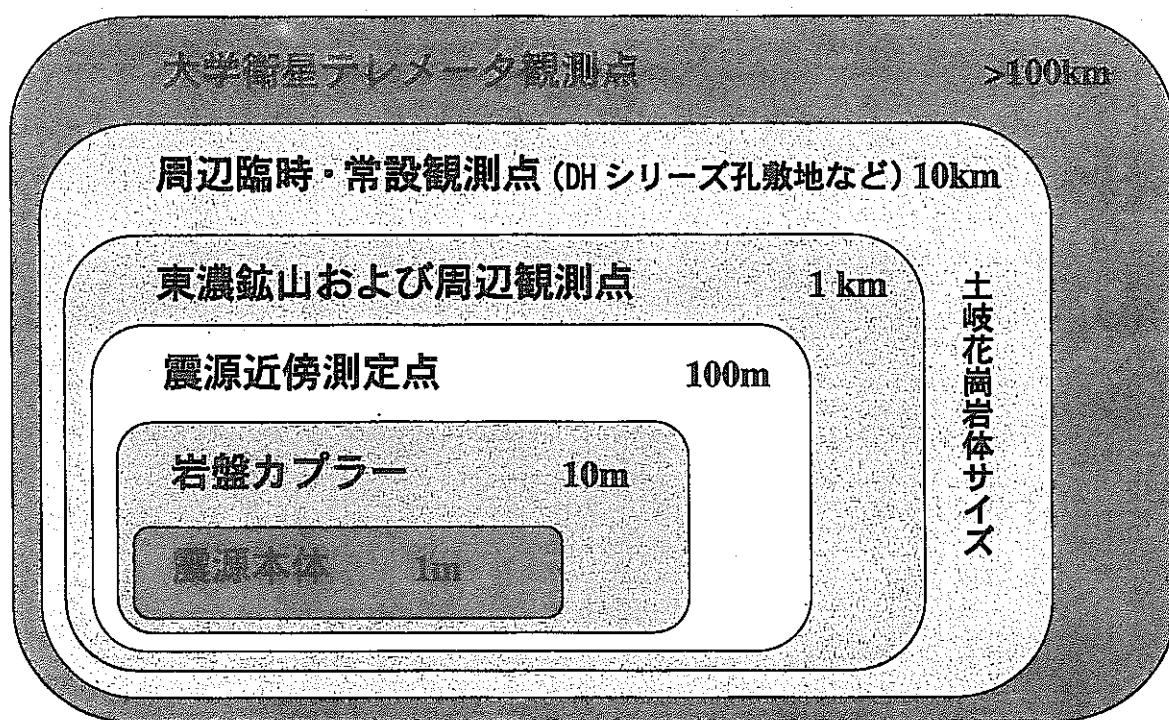


図 2.4.1-15

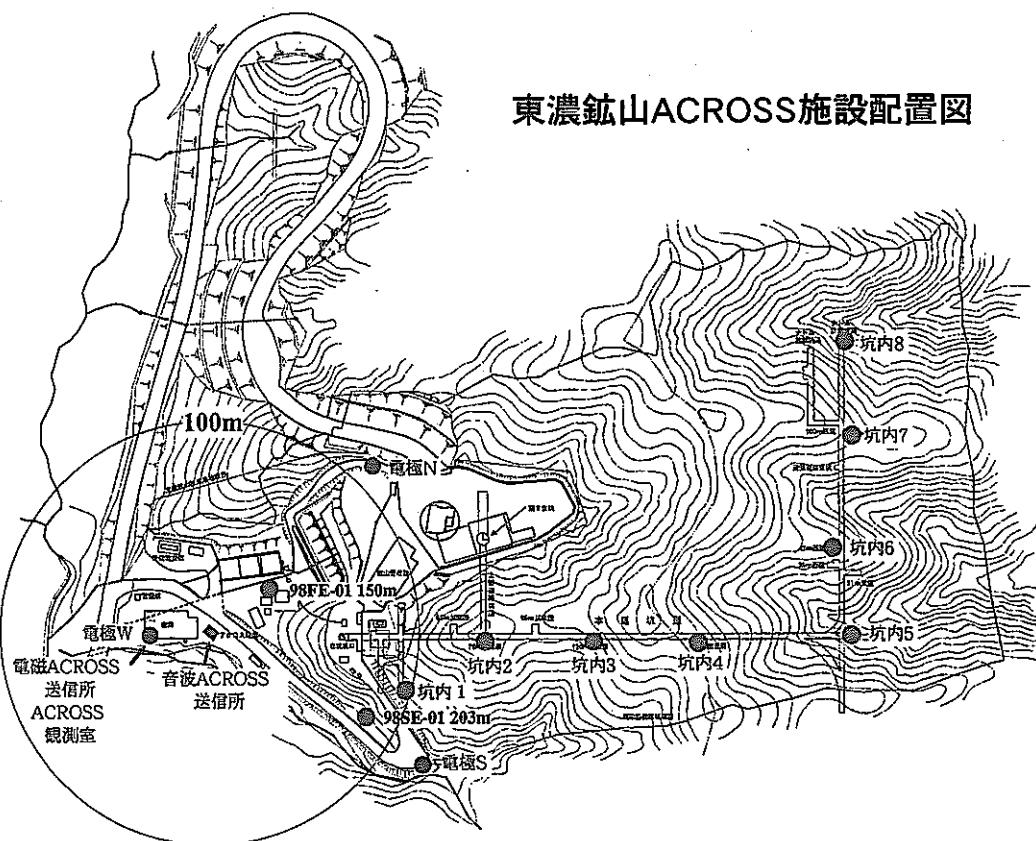


図 2.4.1-16

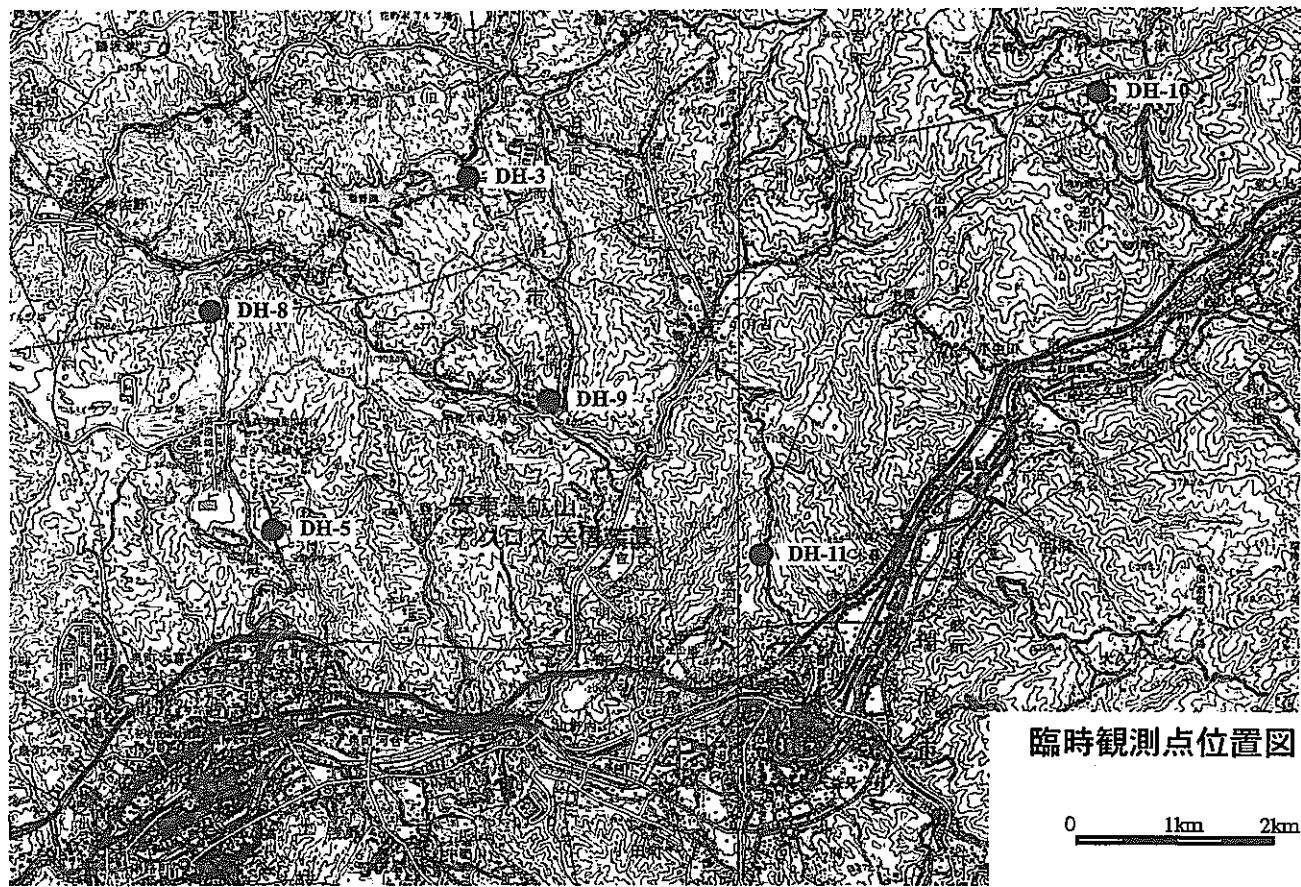
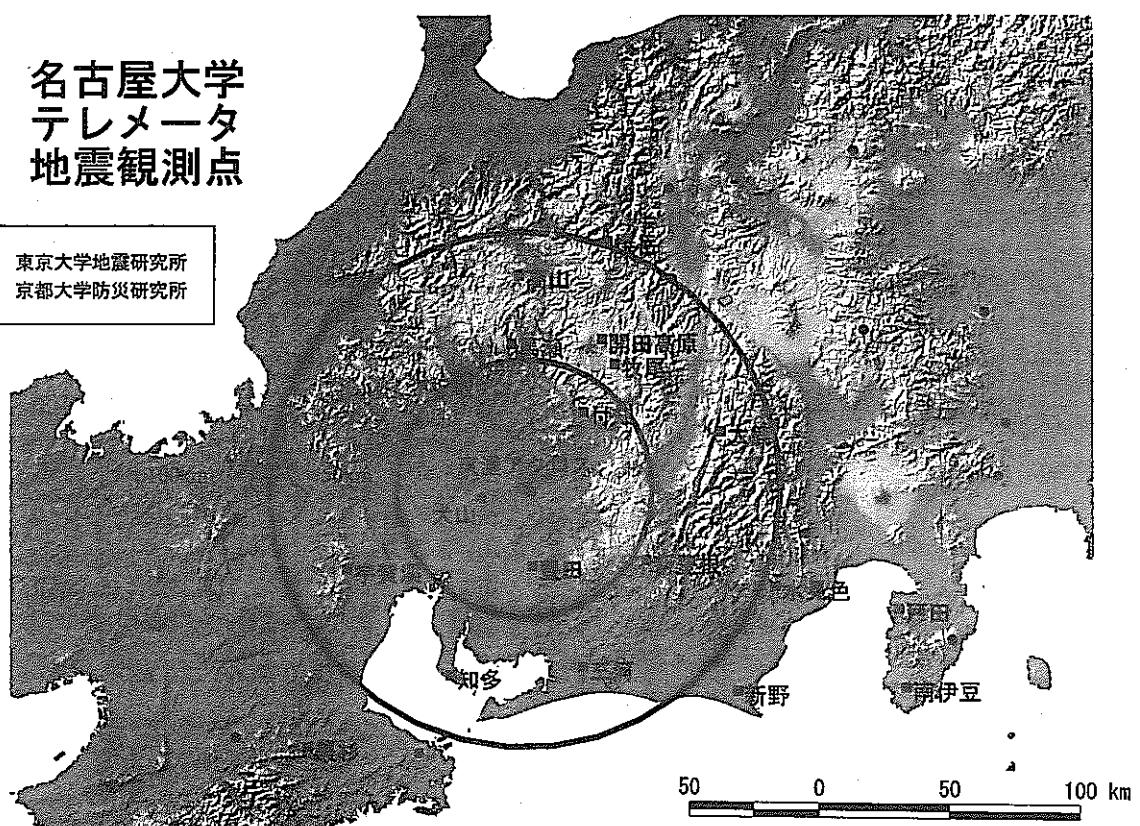


図 2.4.1-17



2.4.1-18

5. 実験結果概要

1) 到達距離試験 - 距離による振幅減衰の一例 -

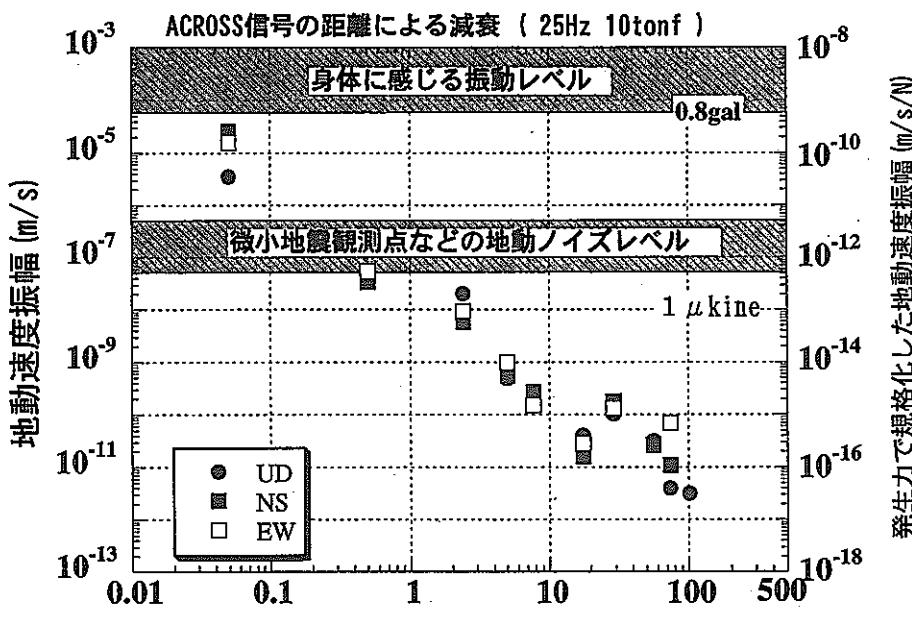


図 2.4.1-19

2) 地震波相分離および走時解析実験

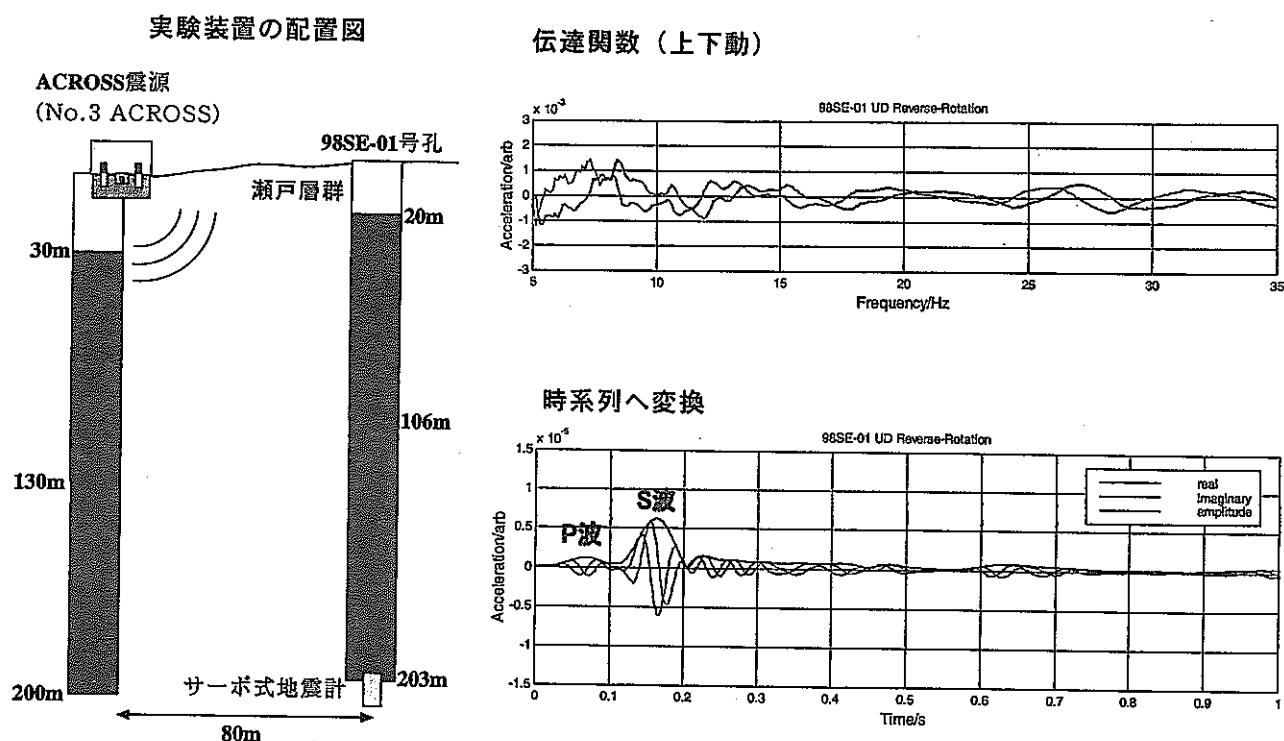


図 2.4.1-20

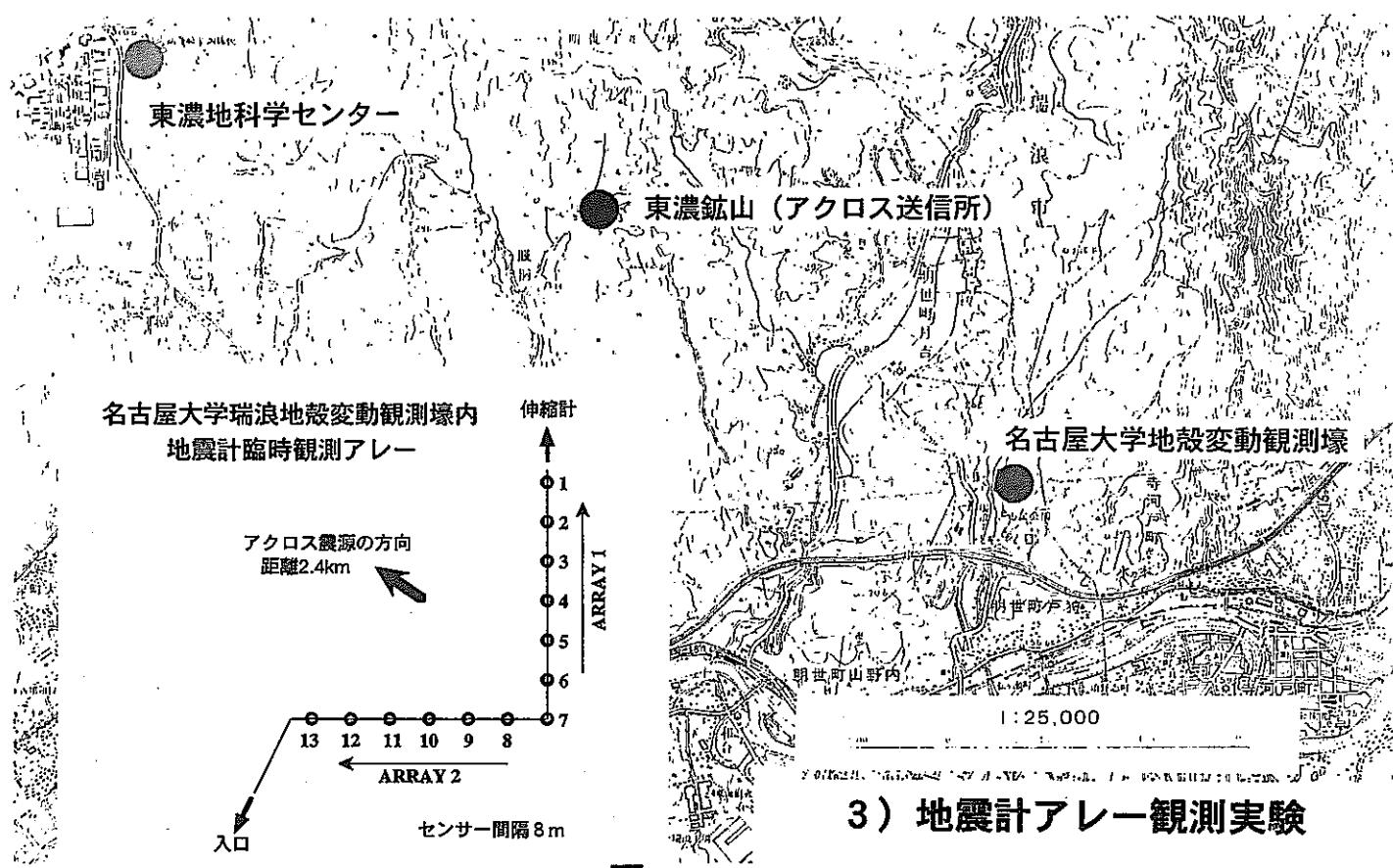


図 2.4.1-21

瑞浪アレー観測実験の結果と解釈

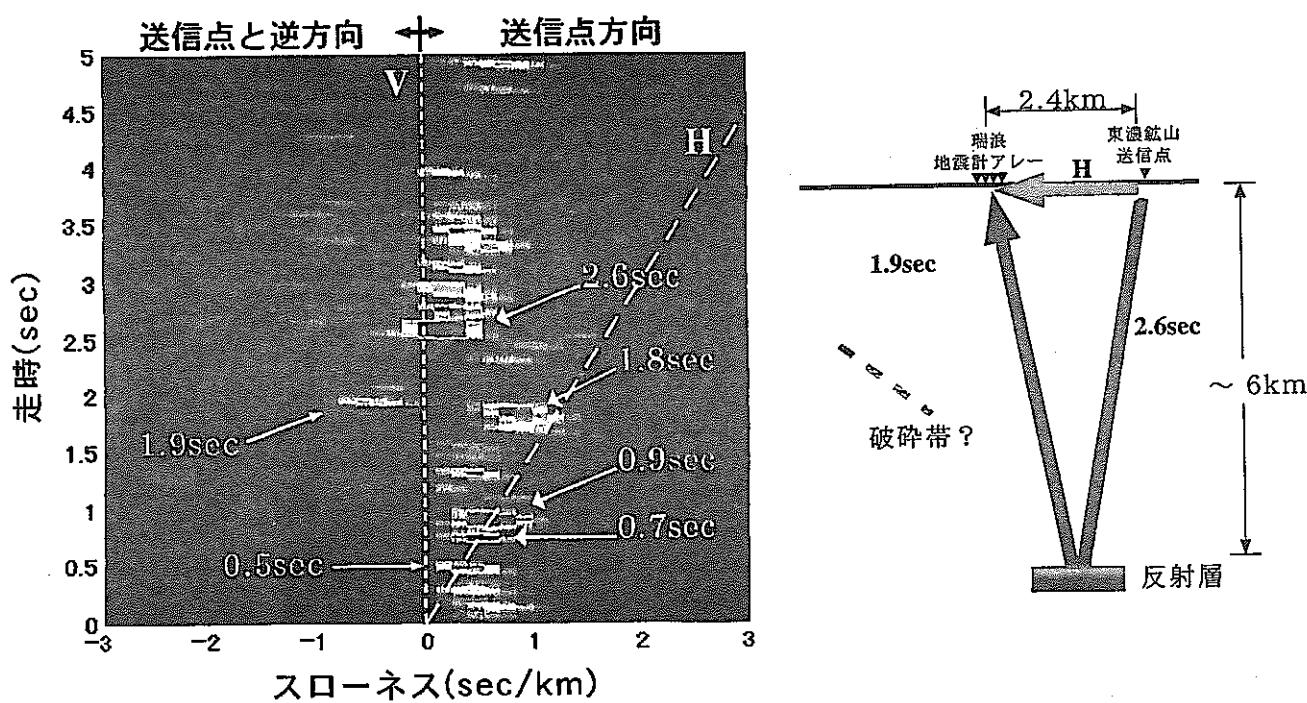


図 2.4.1-22

4) 時間変動観測実験

(例) 降雨に相關した位相・振幅変動

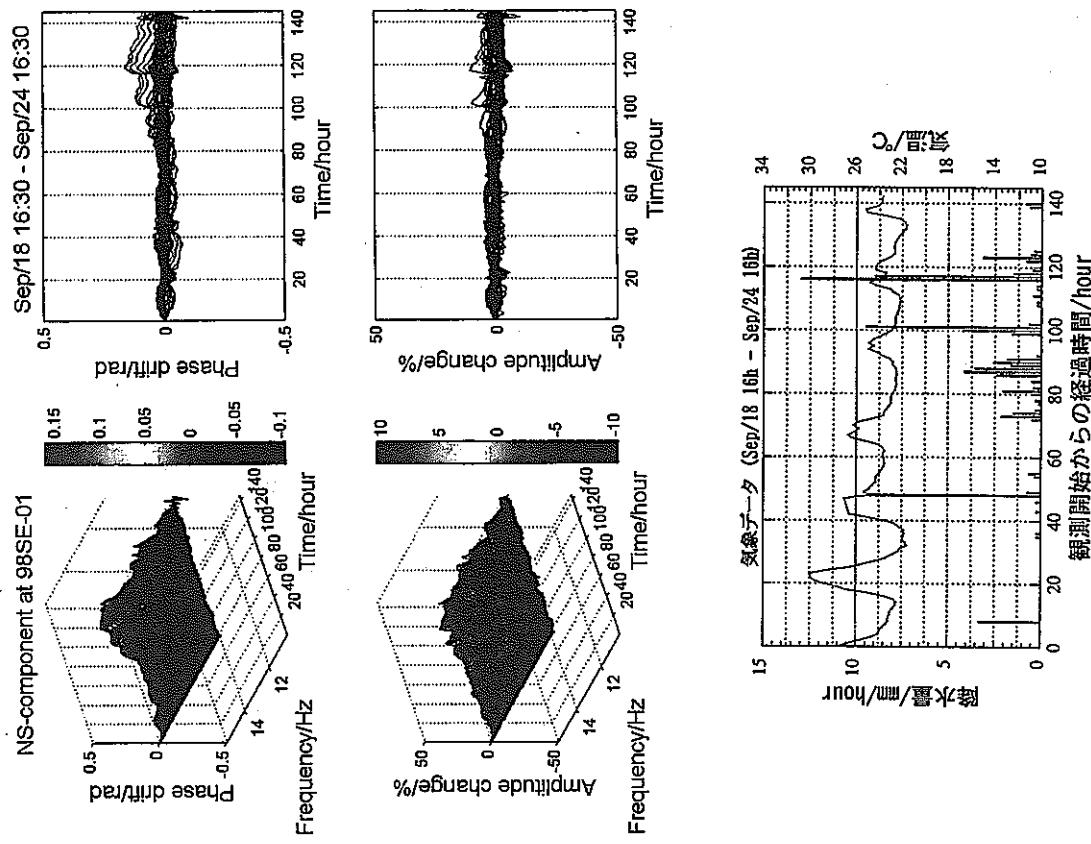


図 2.4.1-23

6. 平成 12 年度の予定

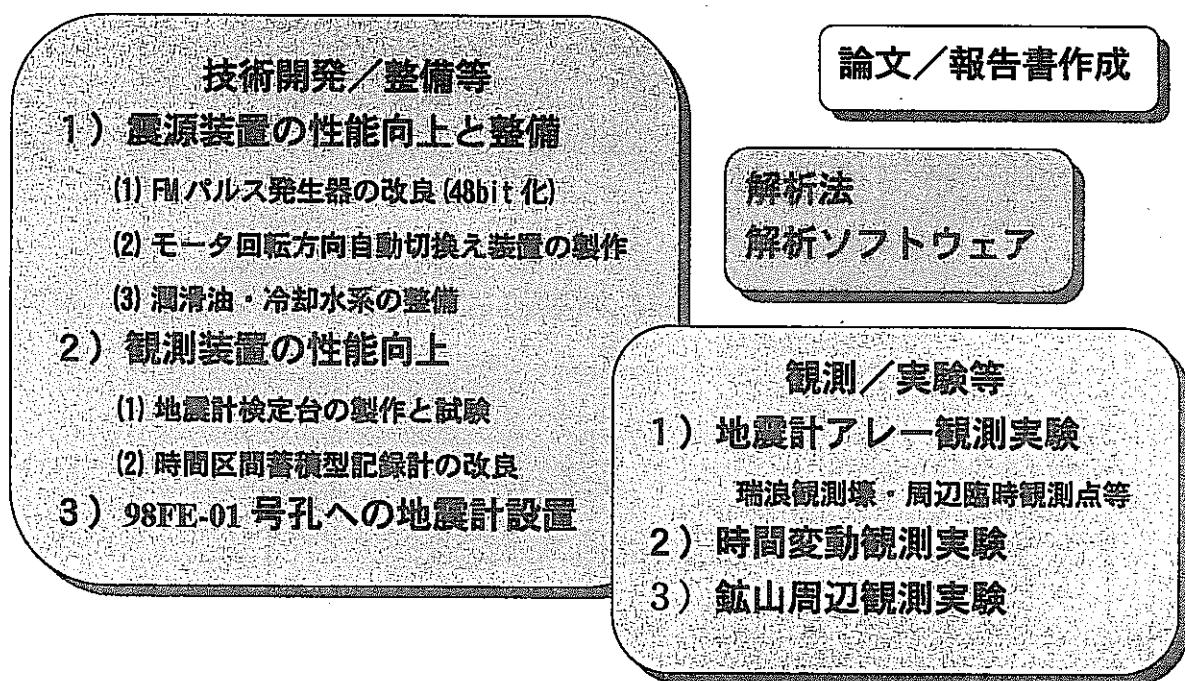


図 2.4.1-24

7. 今後の展望

日本列島地殻活動常時モニタリング計画

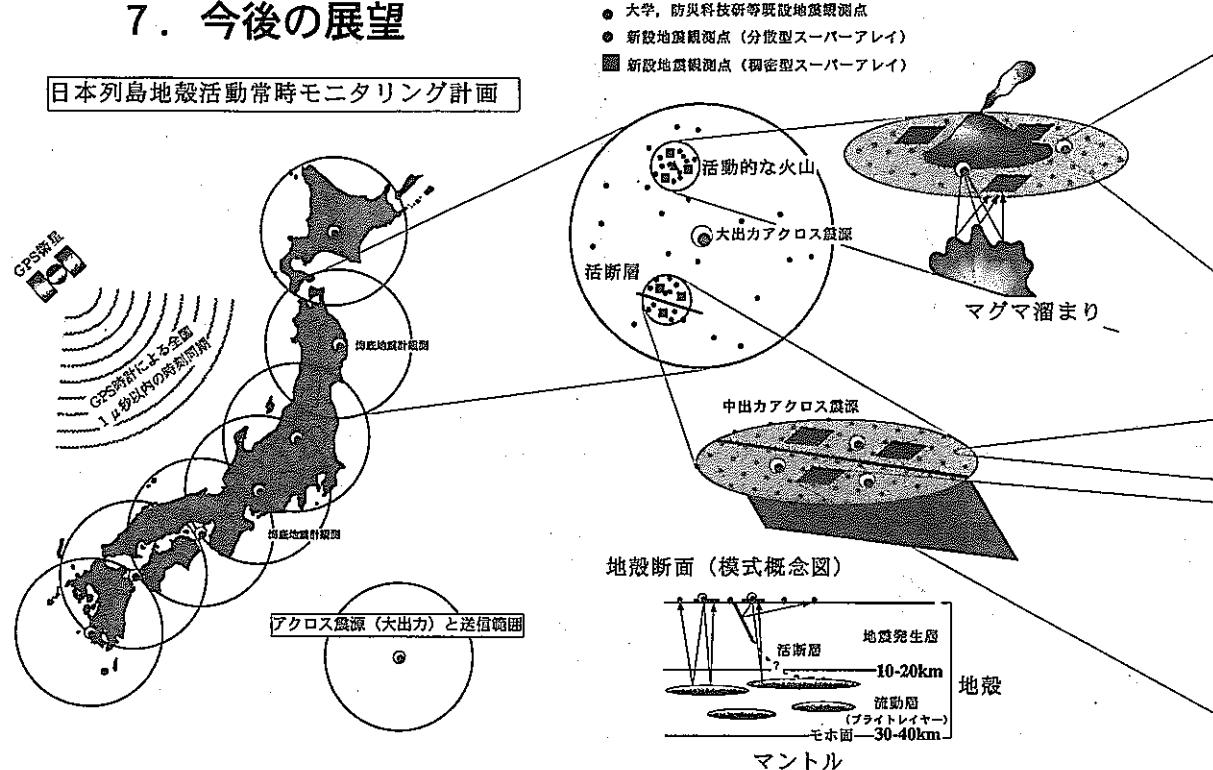
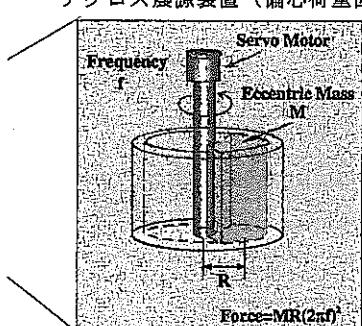


図 2.4.1-25

アクロス震源装置（偏心荷重回転型）

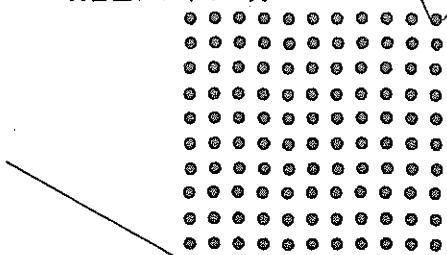


アクロス震源装置
世界協定時に対し1マイクロ秒の精度で回転位相を制御された偏心荷重回転体により、地下に人工地震波を送信する装置。現在の装置の実用送信範囲は数十km程度であるが、装置や地盤の共振を利用し、数百kmまで送信する大出力型も製作可能。

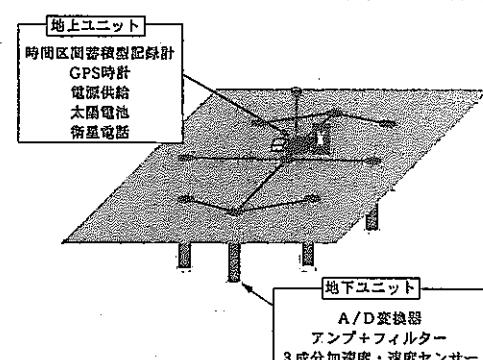
単位アレイの一例



稠密型アレイの一例



アクロス用地震計単位アレイ（簡易埋設分散型アレイ）概念図



アクロス用地震計単位アレイ（簡易埋設稠密型アレイ）概念図

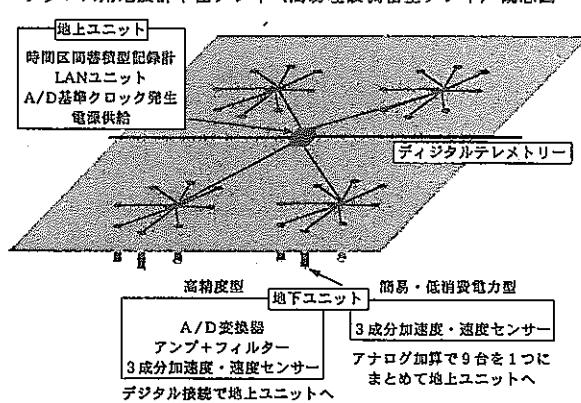
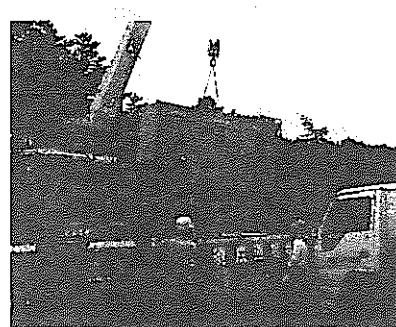
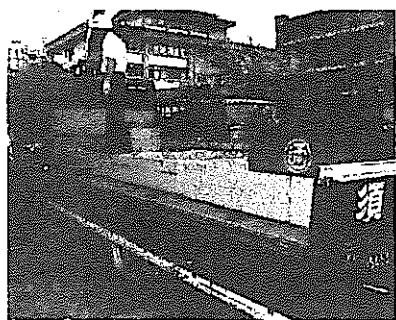


図 2.4.1-26

特長 I 移動観測システム



3 t ユニック付トラックによる輸送

加振部

(震源装置、震源取付けカプラー、地表面カプラー)

制御部

(制御盤、制御用パソコン、GPSほか)

電源部

(交流電源または発電機)

震源特性計測部

(地震計および計測システム一式)

◆加振部（加振機本体+取付カプラー）の規格

加振機本体の大きさ：450(mm) × 550(mm) × 660(mm)

おもさ：約 300 (kg)

カプラーの大きさ：1500(mm) × 1500(mm) × 50(mm)

加振部の総重量：1800 ~ 2100 (kg)

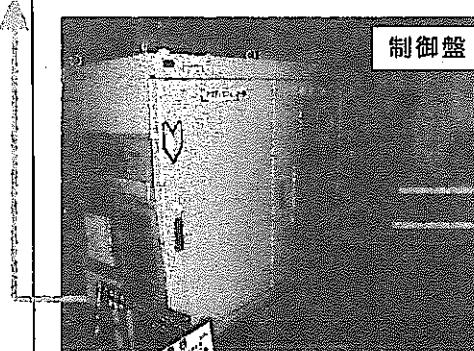
図2.4.2-1 移動観測システムの概略

加振部・制御部の構成

加振部

HIT-H型本体

本体取付けカプラー



回転制御部

GPS時計と回転
制御信号の比較

カウンタボード

制御用パソコン

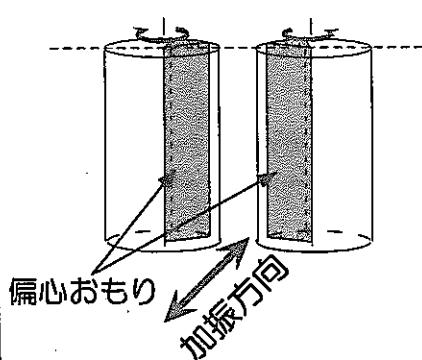
GPSに同期した回転制御信号の送信

図2.4.2-2 加振部・制御部のシステム系統概略図

特長 II リニア・ユニットによる加振

正弦波的加振の原理

2つの偏心おもりを逆位相で同期回転



一定方向に加振

ターゲット構造に対する
分極性波動送信が可能

HIT-H型（水平加振）



HIT-V型（上下加振）

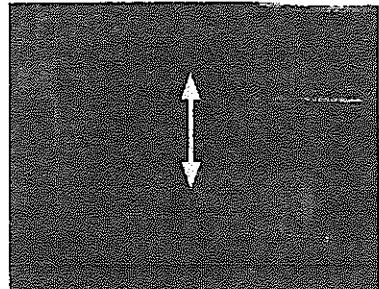
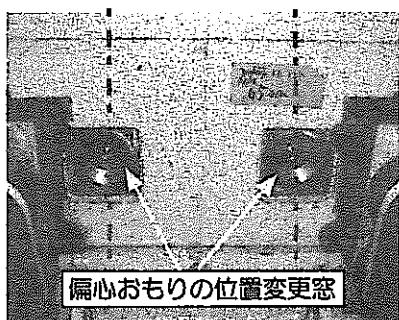


図2.4.2-3 HITの加振原理

特長 III 偏心モーメントが変更可能

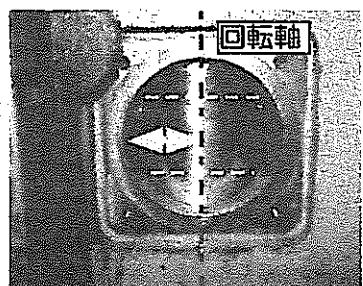
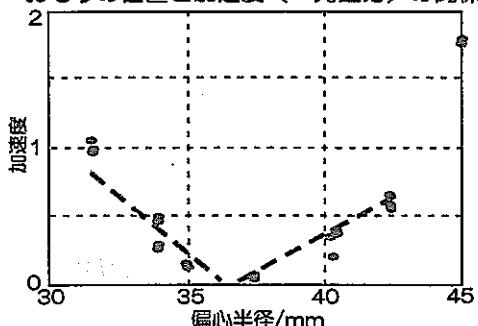
偏心モーメントを変更することで
発生力を調節できる

↓
設置する地表面のコンディション
に合わせた加振が可能



偏心モーメント $MR = 10\text{kg} \cdot F$ のとき、
 $f=50\text{Hz}$ での発生力の大きさ F は 10^5 N 程度

おもりの位置と加速度（ \propto 発生力）の関係



ネジ穴内のダブルナットを径方向に
移動させてモーメントを変更する

図2.4.2-4 偏心モーメントの調整

特長 IV 地表面設置の際の工夫

地表面のコンディションに合わせた設置

加振部の設置に要求されるファクター

- 加振部と地表面の間の高密着性
 - ・地表面の凹凸を砂等で平らにならし設置
- 加振部と設置面の間の高摩擦力
 - ・設置面に適当な素材の敷設
- 軟弱地盤でも支えられる低圧力荷重
 - ・複数の地表面カブラーを用いた設置



東濃鉱山倉庫での設置

1997年山川実験

土壤地面上に砂を敷き平らにならした後、カブラーを敷設
 → 地表面カブラーと地面との接触面積は全体の30%以下
 堅さの分布はきわめて不均一

- ⇒ 構造敏感シート (OZAB) の設計・製作
- 平坦で均一な堅さ分布をもつ設置面を確保

図2.4.2-5 東濃鉱山におけるHIT設置面の養生

HITと東濃FITとの特徴比較

	HIT	東濃FIT
スペック	ユニット形態	リニアユニット
	送信周波数	~ 100 Hz
	発生力	$2.0 \times 10^4 \text{ N}$ (2 ton-f)
	設置の形態	仮設、一時的
	設置場所	任意の場所 (軟弱地盤上も可能)
	送信所規模	カブラー板の床面積 ($2.25 \sim 183 \text{ m}^2$) および制御装置等の設置スペース
用途・機能	主な研究対象	比較的小規模な構造 (比較的短期の変動も) (例) 火山や都市部の地下構造
	機動性	あり
	実効多点送信	適
		比較的大規模な構造 長期変動 (例) 大規模破碎帯や地震発生場
		なし
		不適

図2.4.2-6 HITとFITの特徴比較

カプラー上振動計測システムの確立

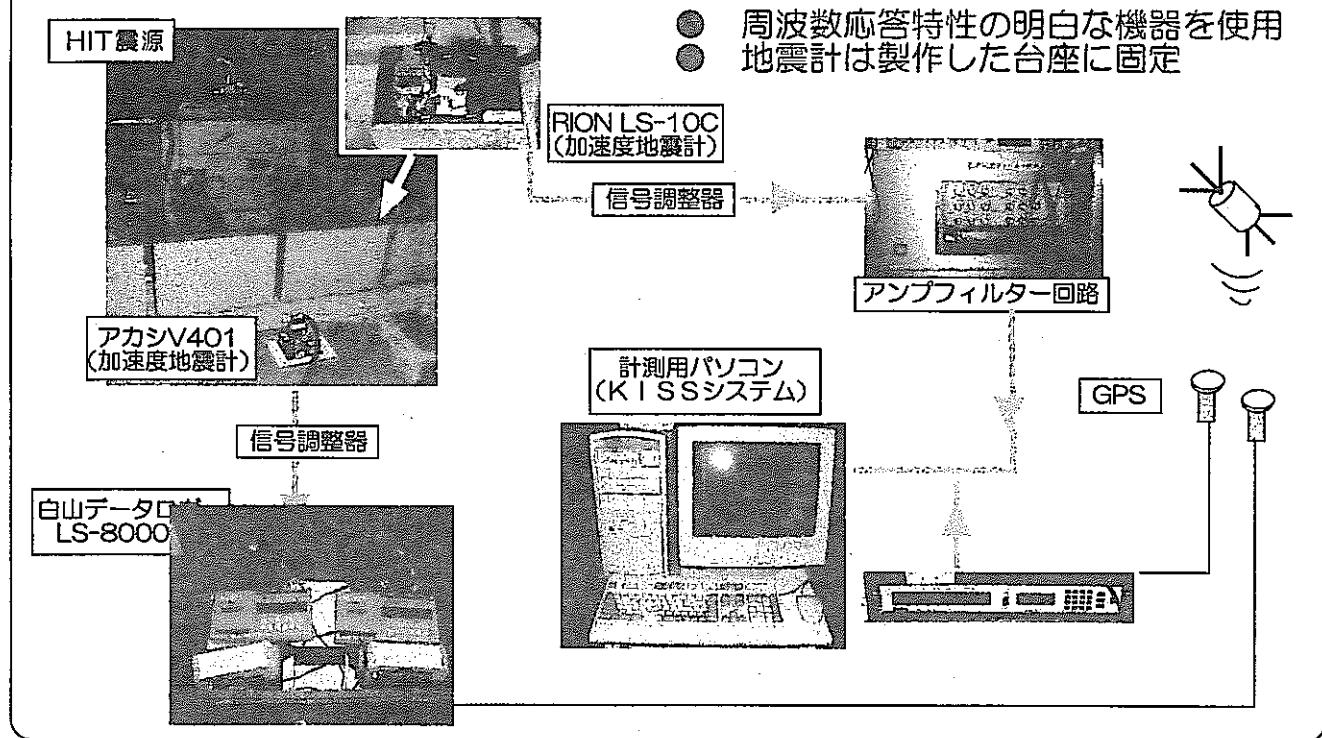


図2.4.2-7 震源特性計測システムの概略図

新型本体取付けカプラーと改良本体の完成 (予想図)

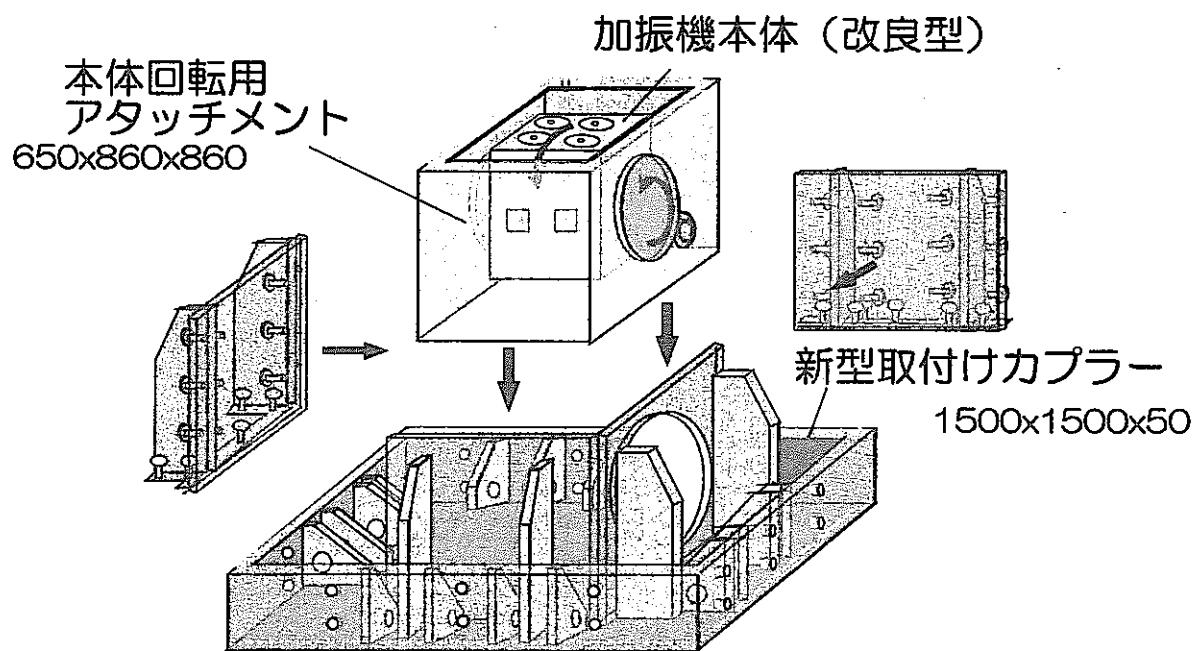


図2.4.2-8 新型本体取付け用カプラー板と改良型本体の完成予想図

偏心マス位置測定ジグの製作

固定した円筒ガイドを利用して正確な位置測定をおこなう

- 偏心マスを回転させず、垂直になるように固定する。
- 常に同じ基準点からの正確な位置を測定する。
- 容易に扱え、かつ軽量である。

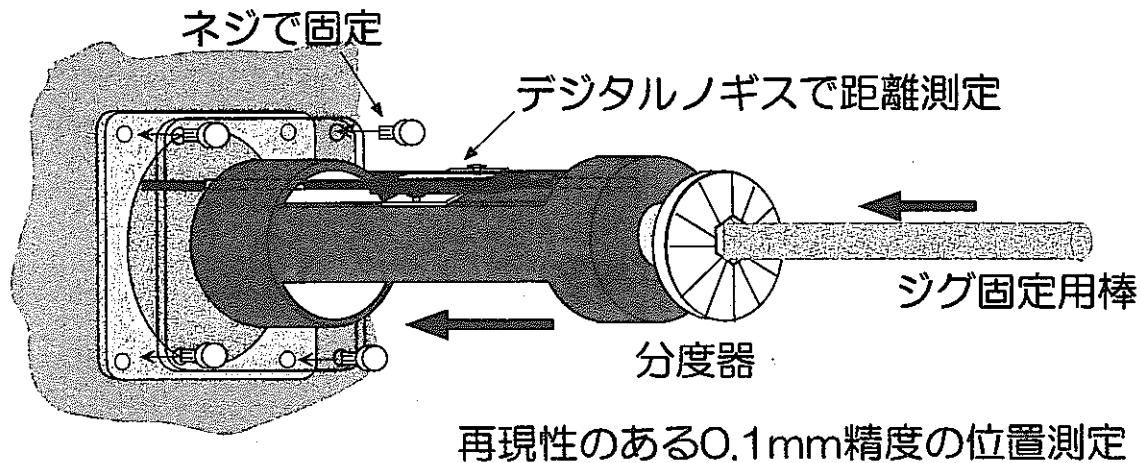


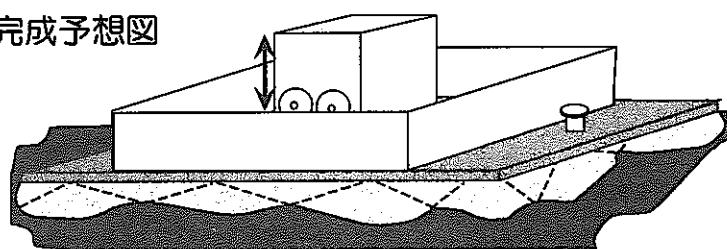
図2.4.2-9 偏心おもりの位置測定ジグの完成予想図

OZAB 試作第1号

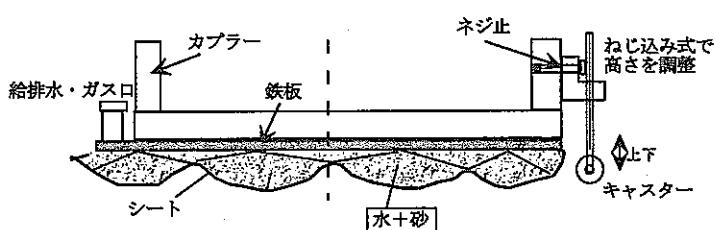
金属平板（上面）と防水シート（下面）で作られた袋の中に砂混合物を封入
外部操作による流体や空気の供給と排出で、任意形状に柔らかくさせ変形でき、形を保持したまま硬化させることができる。

OZAB製作風景

完成予想図

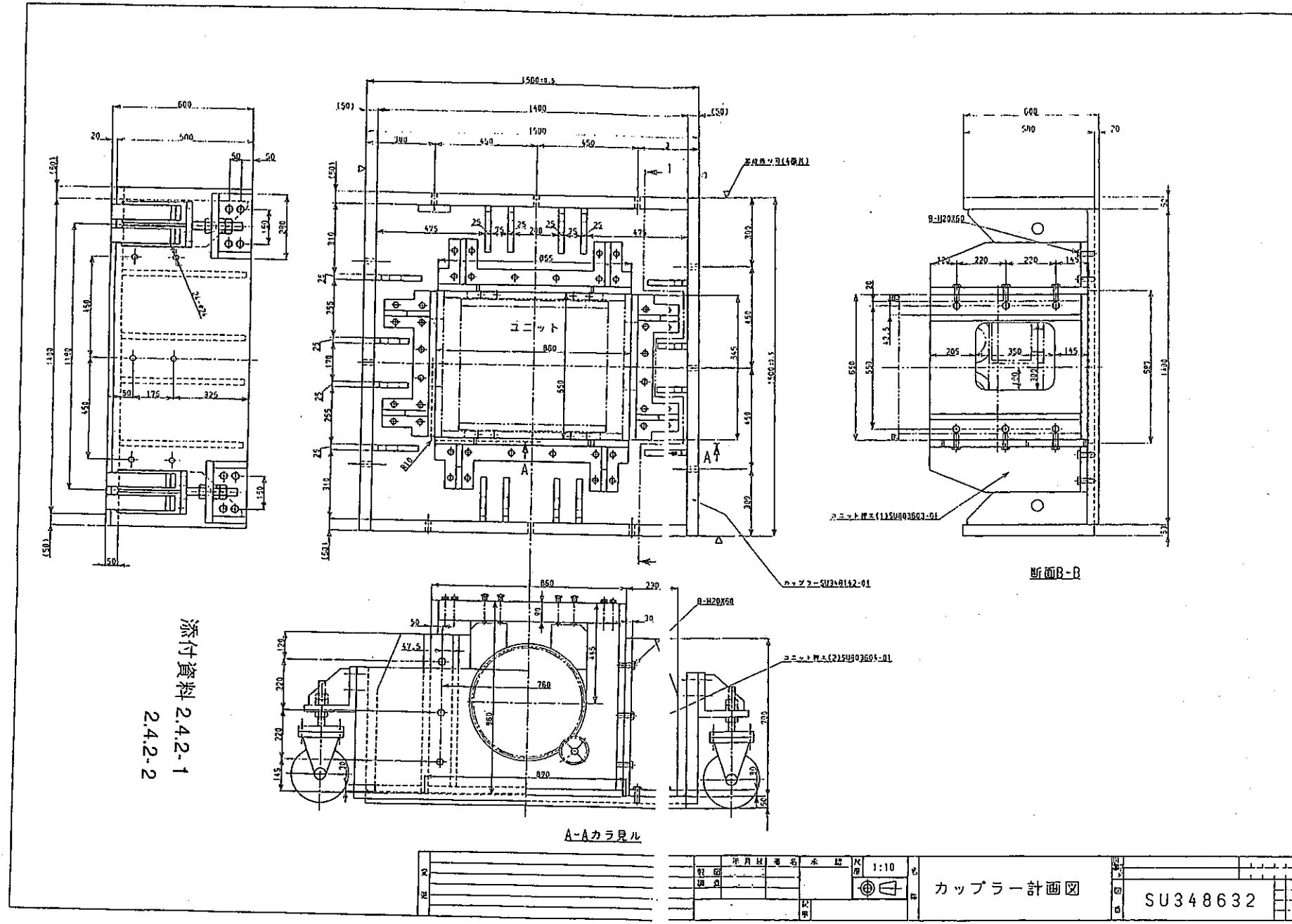


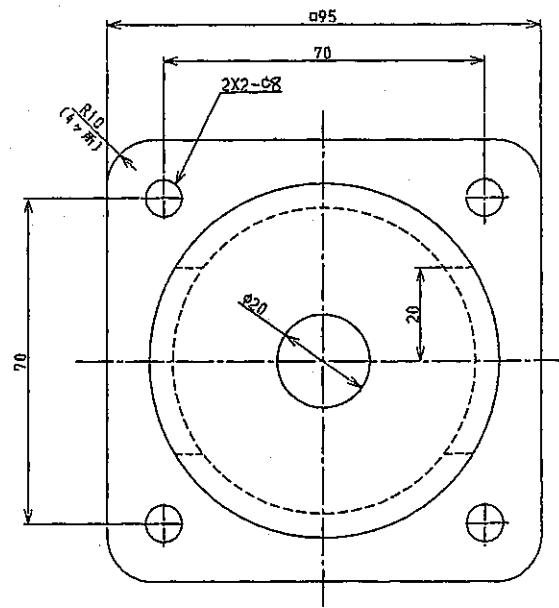
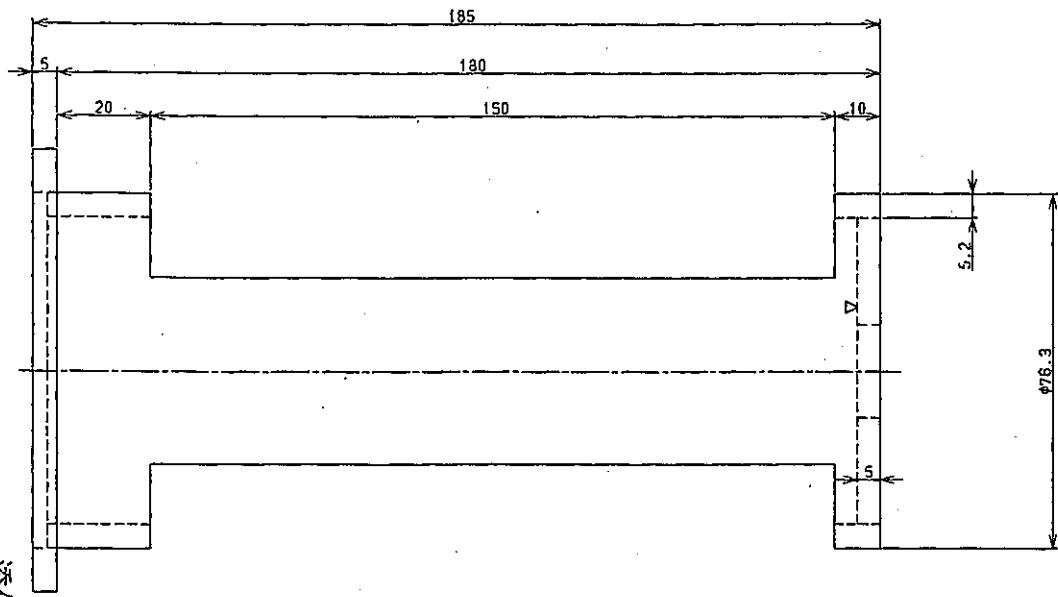
OZAB上面
フランジは流体用と気体用の給排口



OZAB内部の給排用パイプ

図2.4.2-10 構造敏感カプラーシート（OZAB）の完成予想図





添付資料 2.4.2-3

変更	年月日	登名	承認	尺度	1/1	名 称	偏心マス位置測定治具		図 番	SU803322
	製図									

偏心マス位置測定治具

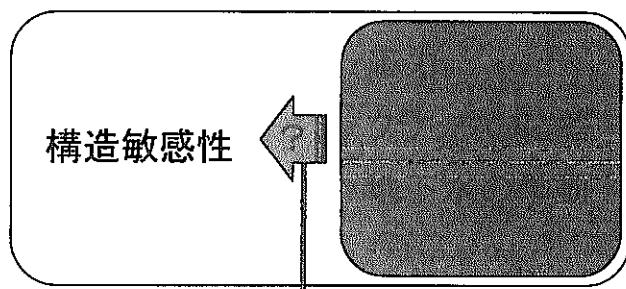
SU803322

電磁アクロスが必要な理由

なぜ電磁波を用いた探査を行うか？

- ・地震波探査と独立な情報
- ・電気伝導度は桁で変化する

⇒ 地下水の状態



音波・電磁波の同時探査が必要

目標

- ・音波アクロスとの相補性
- ・テストフィールドとして東濃鉱山周辺の探査

図2.4.3-1 電磁アクロスの目的

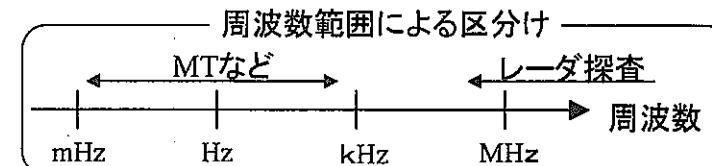
電磁探査法としてのアクロスの特徴

1. 送受信点間の伝達関数を計測
2. 精密制御信号を用いる高いS/Nのデータ取得
3. 拡散現象から波動現象まで統一的に解析

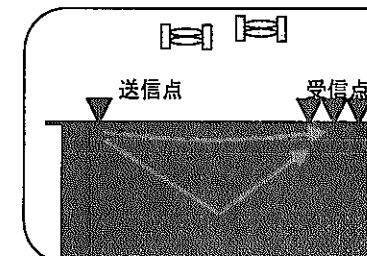
等方・一様媒質中のMaxwell方程式より

$$\epsilon\mu \frac{\partial^2}{\partial t^2} \begin{pmatrix} E \\ H \end{pmatrix} + \sigma\mu \frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} E \\ H \end{pmatrix} = \nabla^2 \begin{pmatrix} E \\ H \end{pmatrix}$$

波動 拡散



4. 分散性の大きい伝播も解析可能



新探査法(低周波数)
立ち上げ

システム・試験観測

図2.4.3-2 電磁アクロスの特徴

東濃電磁アクロスシステム(送信)

電極：接地電極3点

送信装置：GPS時計同期

1. スイッチング(48V, 5A)
2. パワーアンプ(150V, 2A)

制御装置：コンピュータ制御

電圧・電流モニター

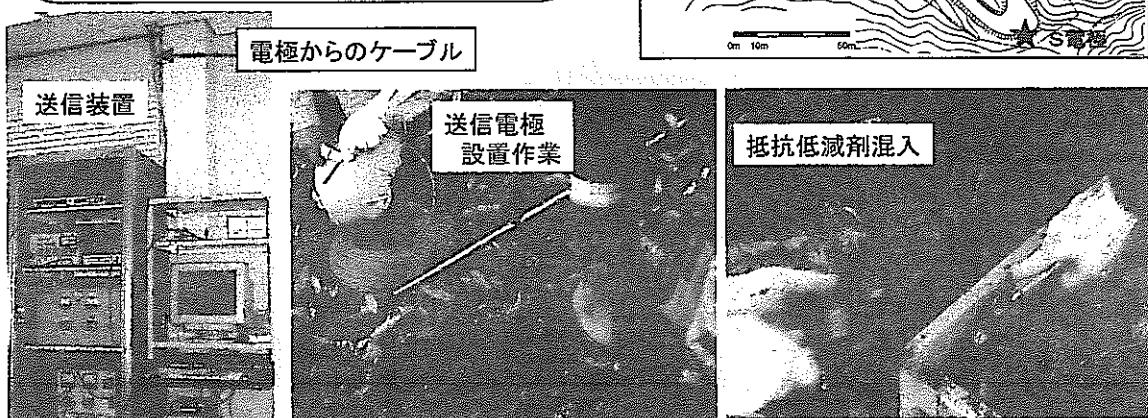


図2.4.3-3 東濃電磁アクロスシステム：送信側

東濃電磁アクロスシステム(受信)

電極：非分極電極; NS, EW2成分

(定常観測点: 東濃地科学センター)

データロガー：時間蓄積型記録計

臨時観測点：当機構試錐孔用地

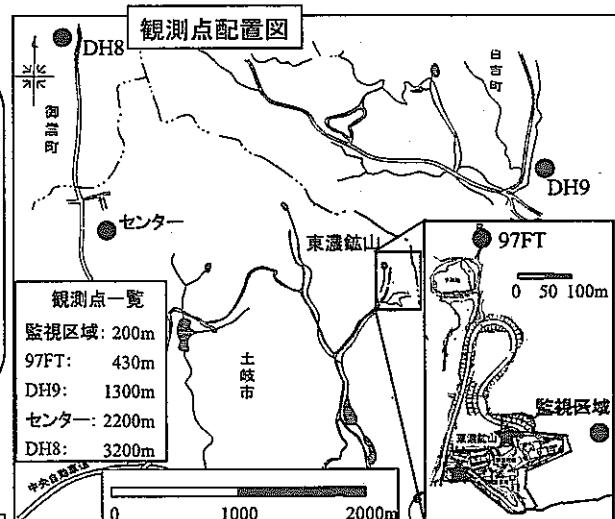


図2.4.3-4 東濃電磁アクロスシステム：受信側

送信信号と受信信号

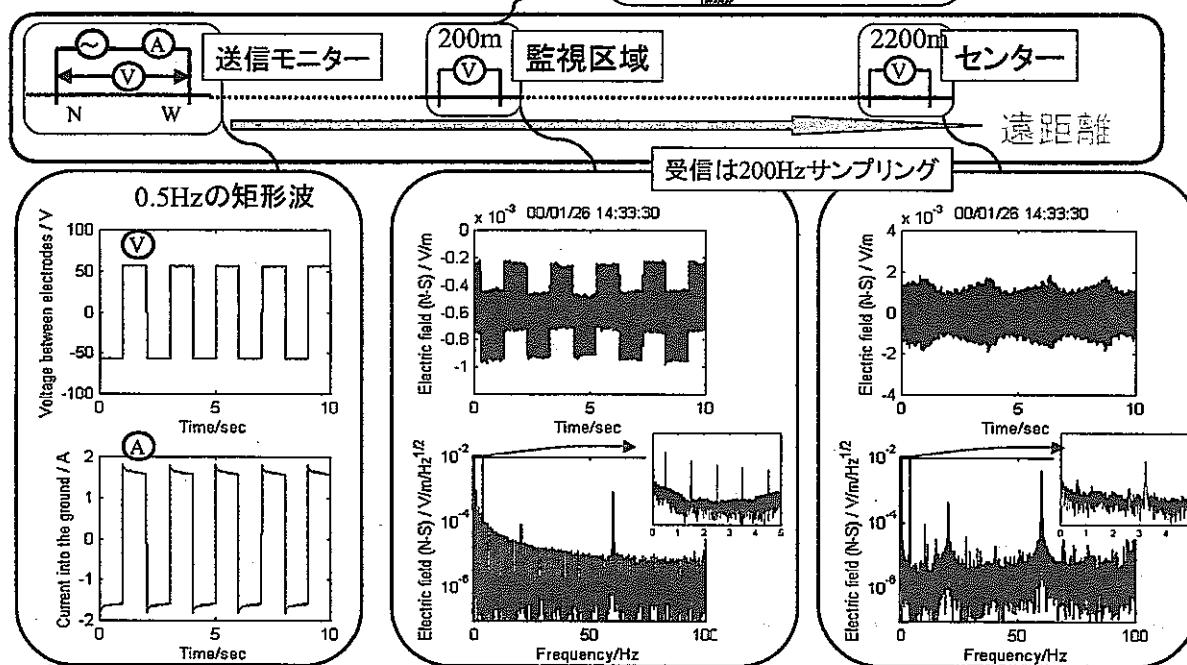
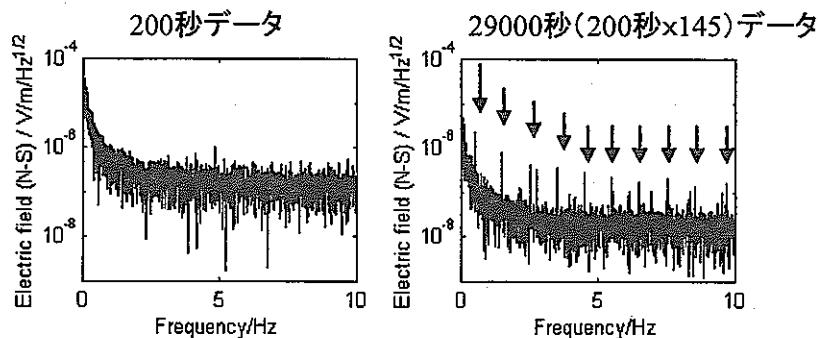
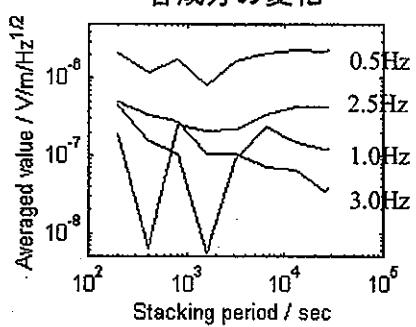


図2.4.3-5 送信信号と受信信号

スタッキングの効果



各成分の変化



距離減衰 0.5Hz成分の振幅

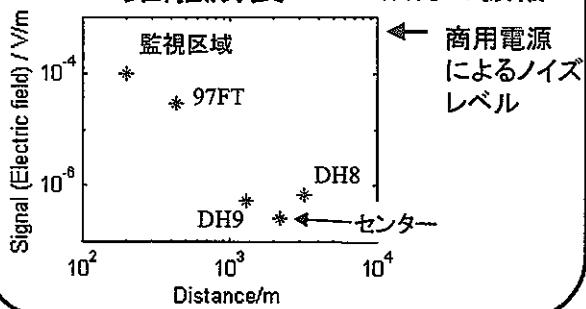
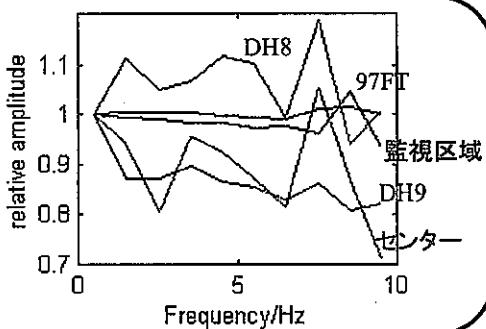


図2.4.3-6 スタッキングの効果

周波数依存性

伝達関数(振幅)
0.5Hz信号振幅で規格化



放射方向 各周波数成分のNS・EW成分の軌跡

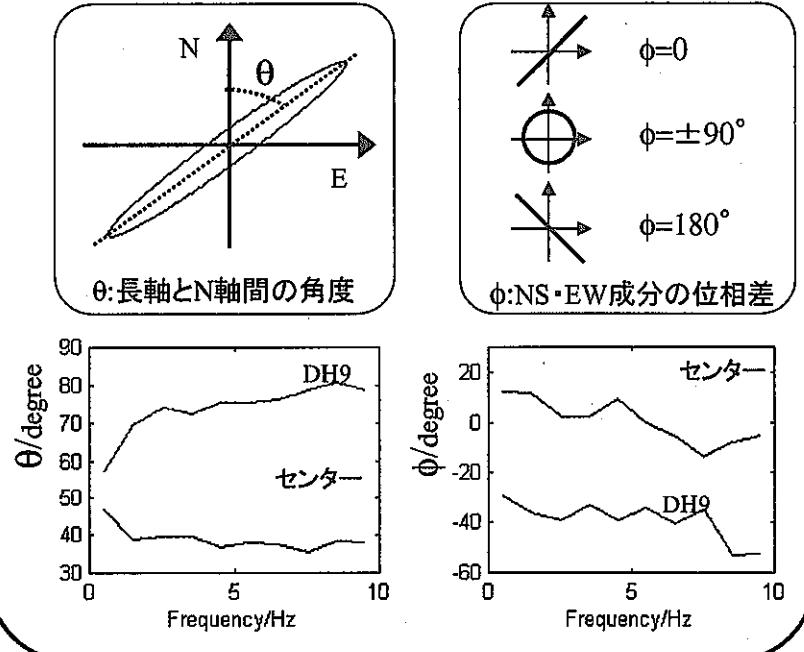


図2.4.3-7 観測データの周波数依存性

まとめ

地震波と電磁波の相補的な探査が必要

これまでの実績

- 東濃鉱山周辺に定常送信装置、観測点の設置
- 約3km離れた観測点で送信信号を確認

問題点

・ハードウェアの整備・改善

- (1) 高出力化
- (2) 高周波数での探査
- (3) 送信方式・受信方式の検討
- (4) 出力信号の最適化 → 次の講演へ

・観測点

- (1) 人工物による影響
- (2) アレイ観測

・解析法

- (1) 観測結果から地下情報推定 → 次の講演へ

図2.4.3-8 まとめ

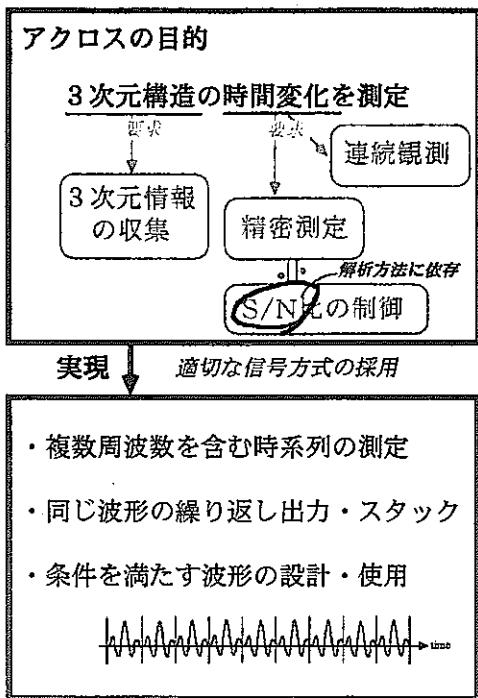


図2.4.4-1 アクロスの目的とその実現方法

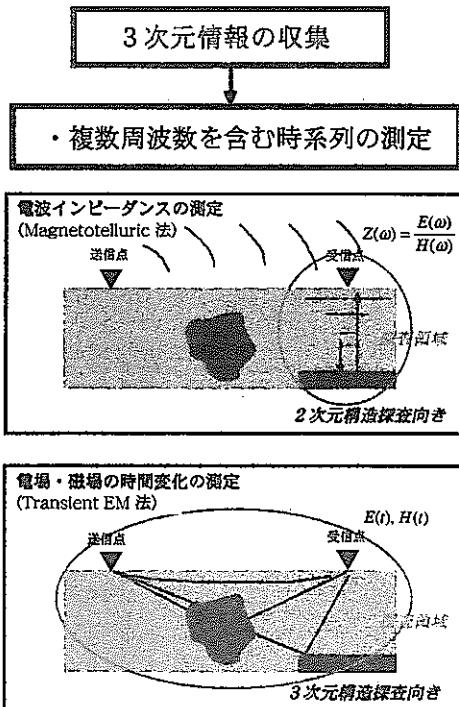


図2.4.4-2 3次元情報収集の原理

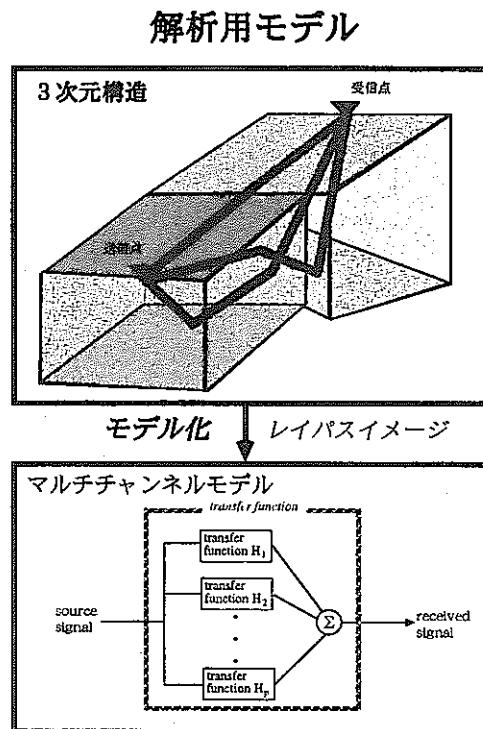


図2.4.4-3 解析モデルの抽象化

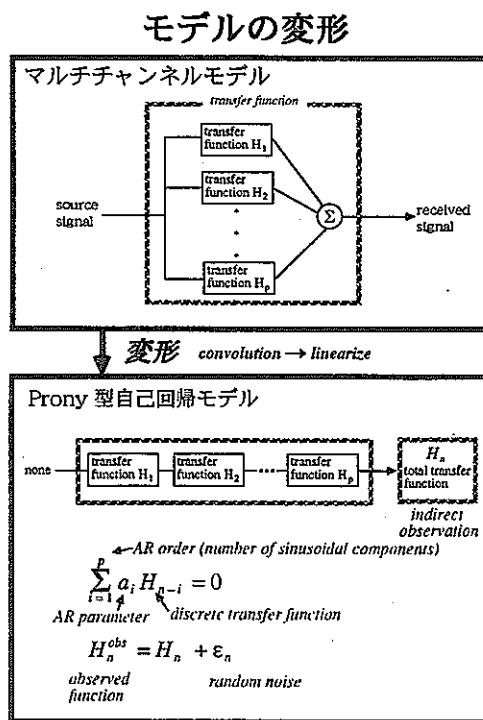


図2.4.4-4 非線形モデルの線形化

サンプルデータ

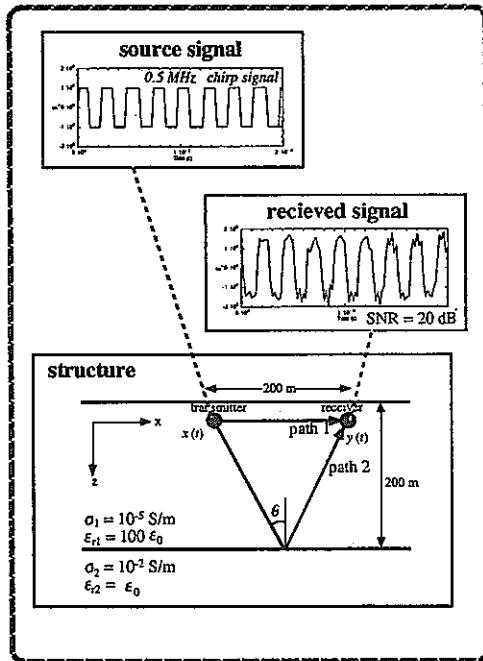


図2.4.4-5 サンプルデータ

S/N比の制御

条件を満たす波形の設計・使用

狭帯域
急峻な遮断
S/N 比一定

デジタル設計

一様媒質の場合の最適信号

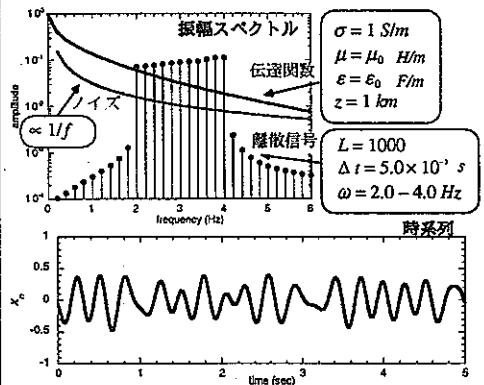


図2.4.4-7 信号波形のデジタル設計

解析手順

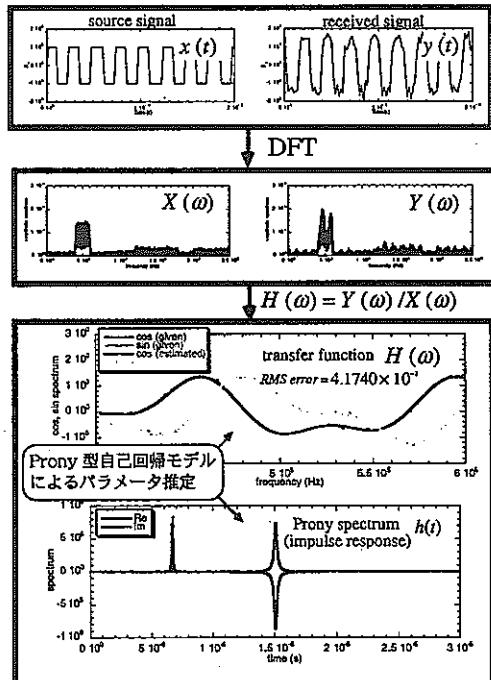


図2.4.4-6 解析手順と結果

最適化

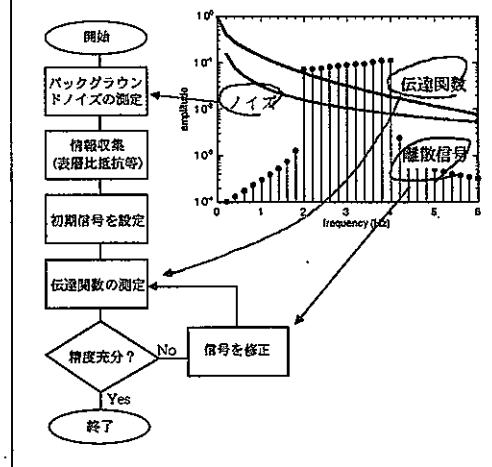


図2.4.4-8 信号波形の最適化

地震発生と地下水挙動に関する研究

—地震と地下水の相互作用の研究—

目的

地殻歪－地下水－地下ガスの連成現象の解明と地震前兆現象の把握

図 3-1

研究目標

地下深部での地殻歪の変化を高感度歪計、地下水、溶存ガスの変化などを利用して効果的に検出する。

地殻歪・傾斜、地下水圧、地下水温、ラドン濃度、希ガス放出量などの長期連続測定を行う。

必要に応じた機器の開発を行う。



地震発生に関連した地殻変動・地下流体変動のメカニズムを解明するための基礎データを得る。

図 3-2

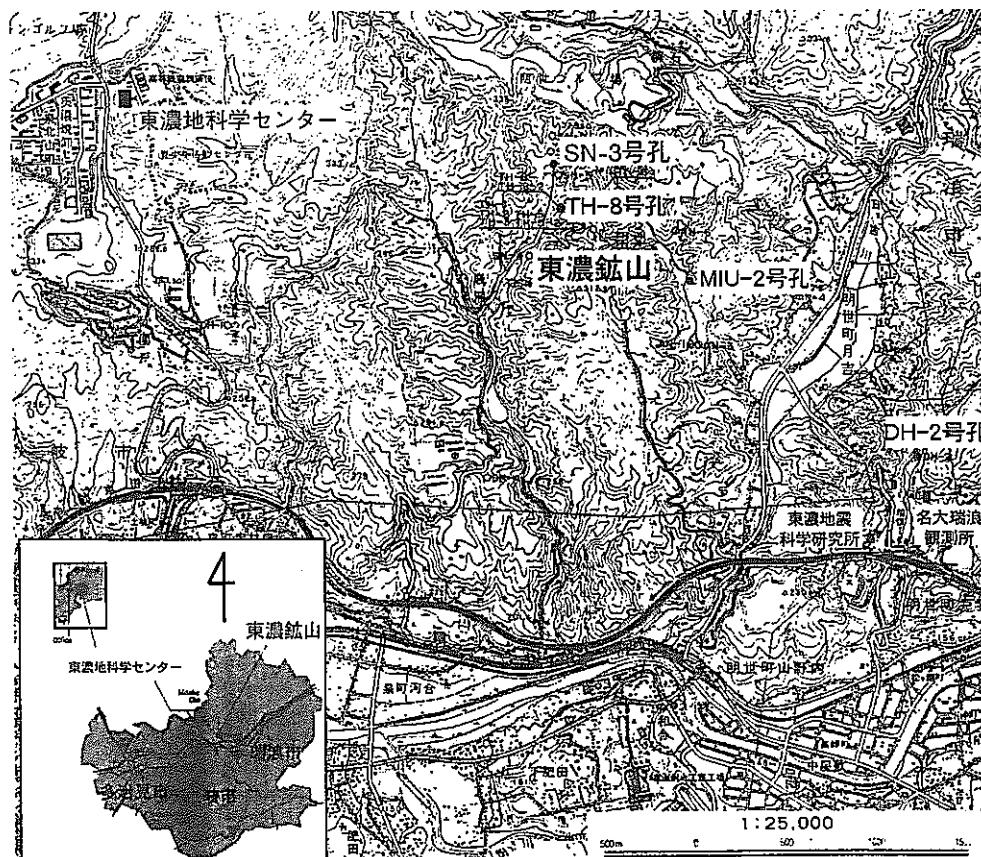


図3.3-1 東濃鉱山周辺図

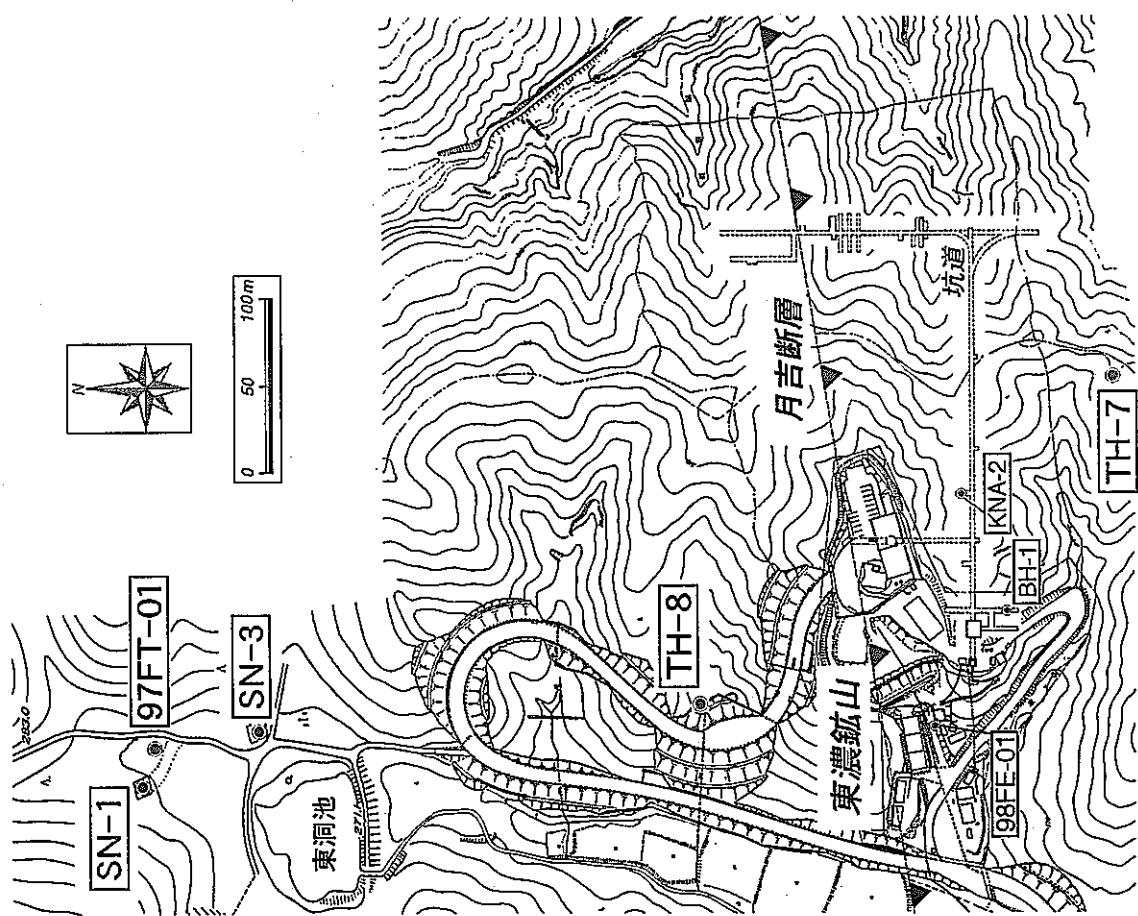


図3.3-2 東濃鉱山周辺の主な観測井の分布

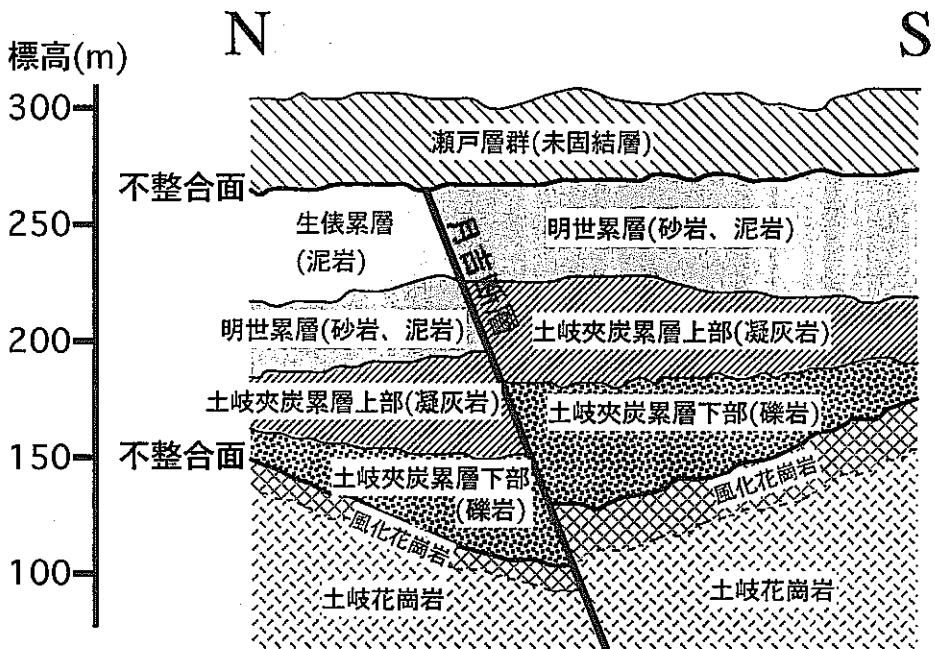
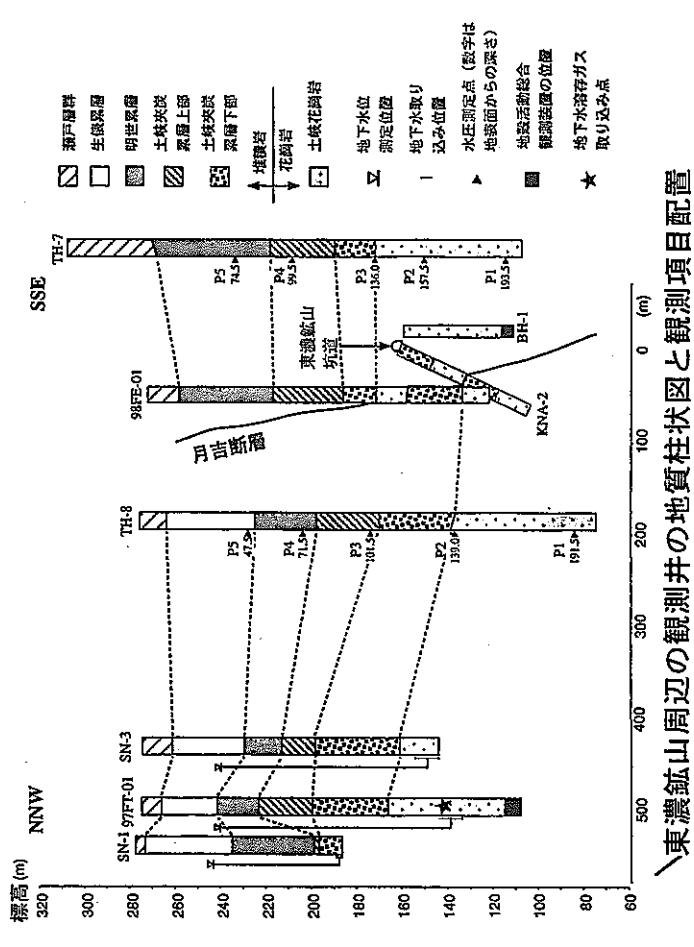


図3.3-3 東濃鉱山領域の模式的地質断面図



東濃鉱山周辺の観測井の地質柱状図と観測項目配置

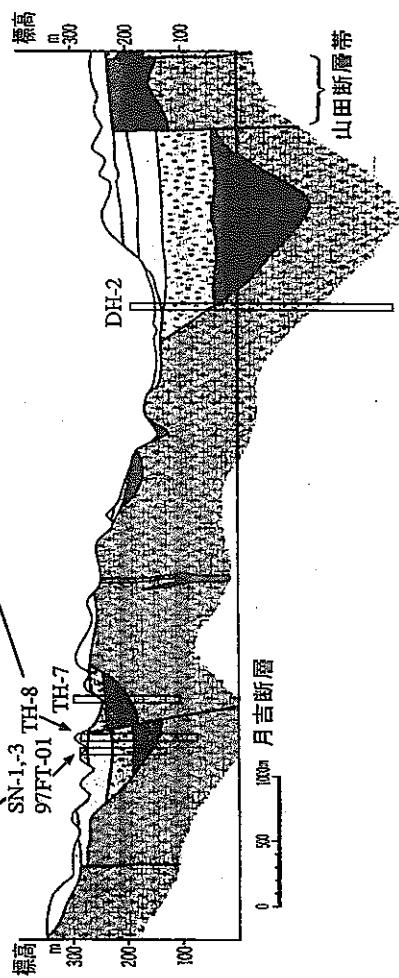
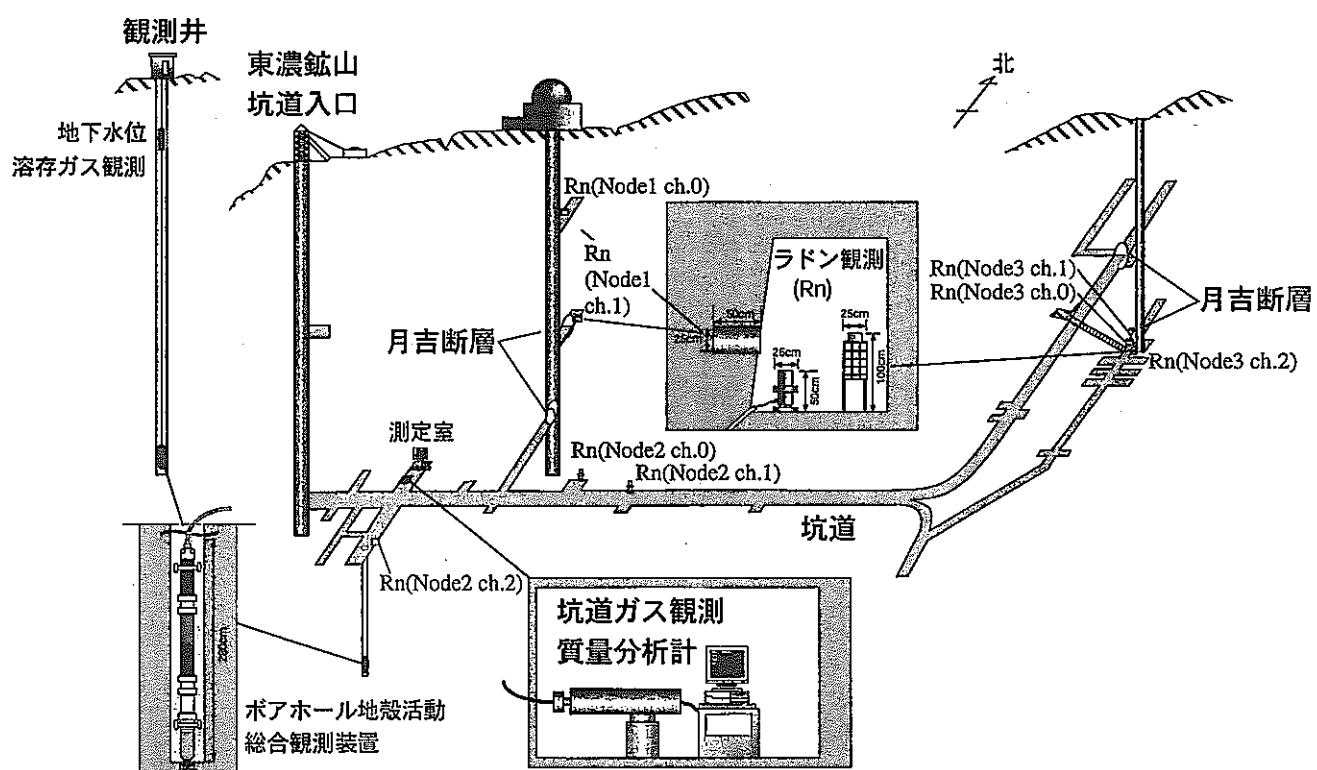
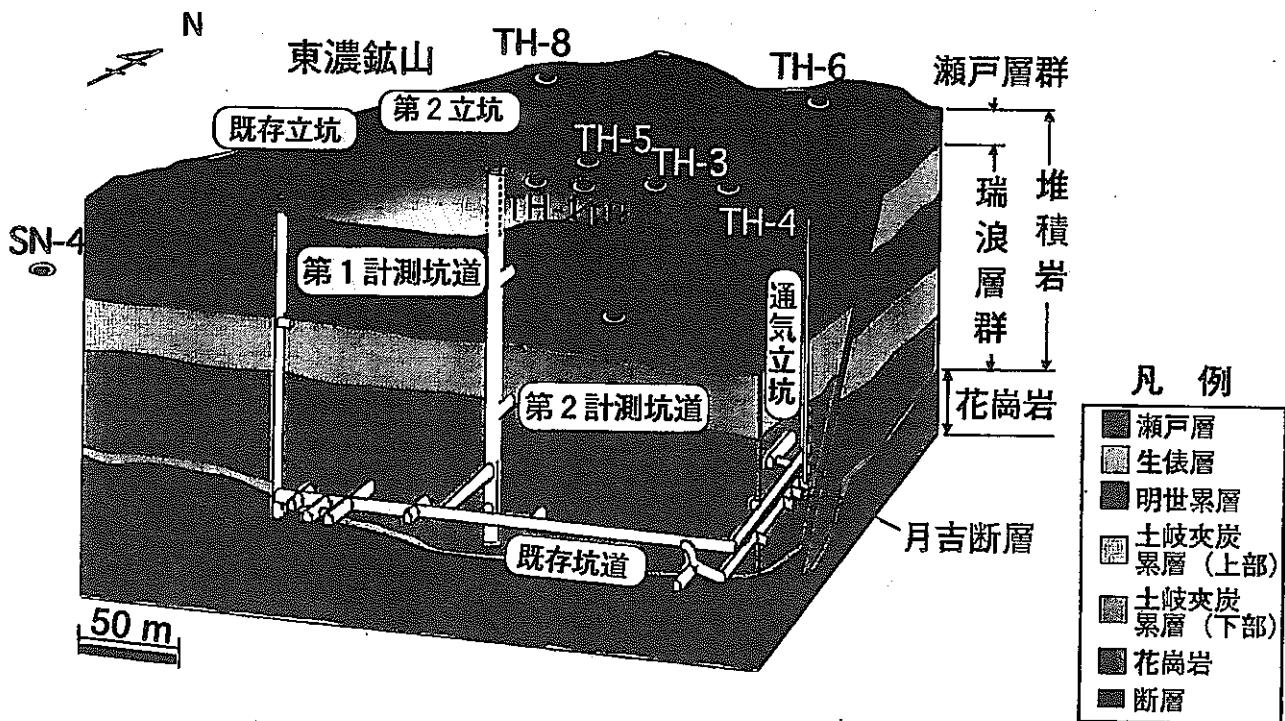
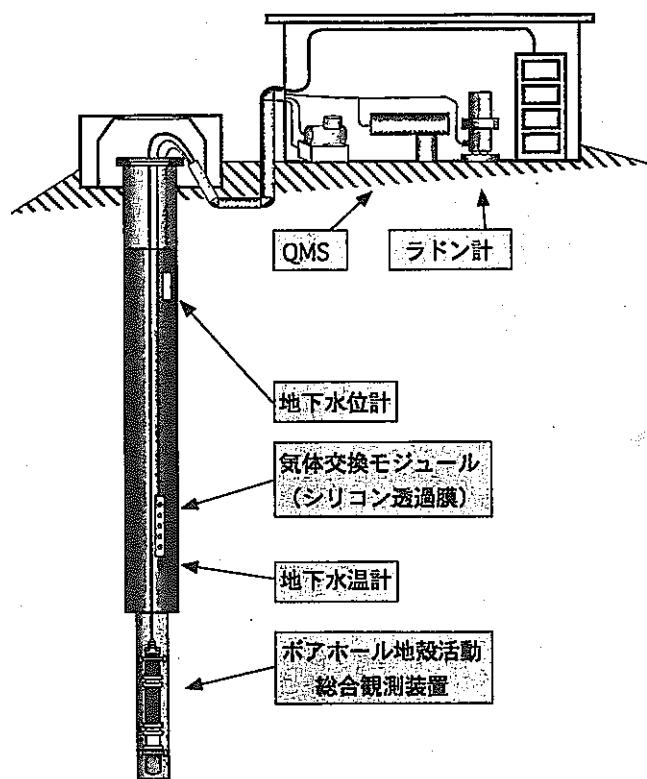
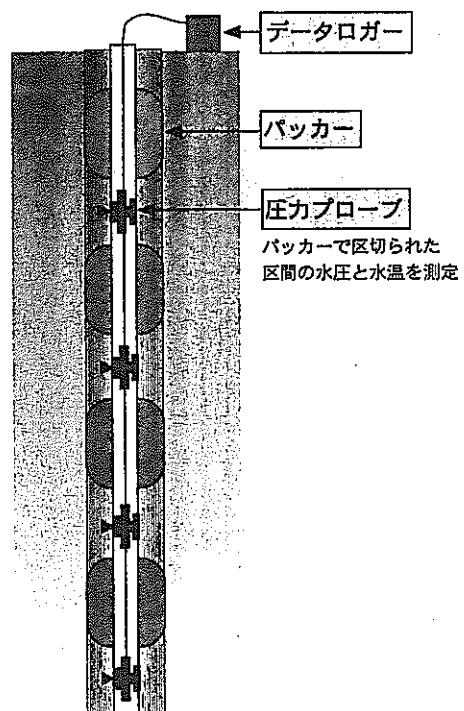


図3.3-4 東濃地域の地質断面図
及び観測井の位置



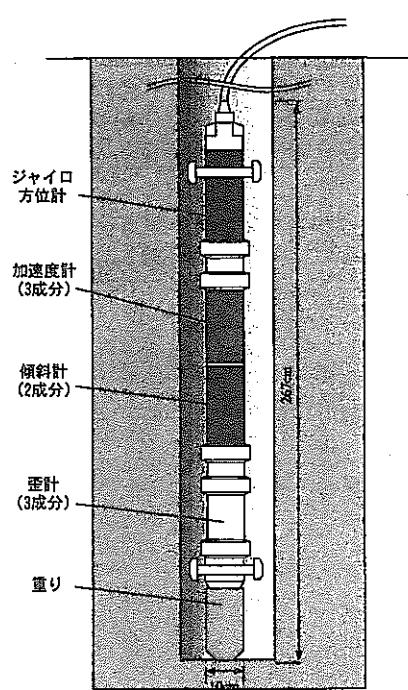


(左) 多項目総合観測井

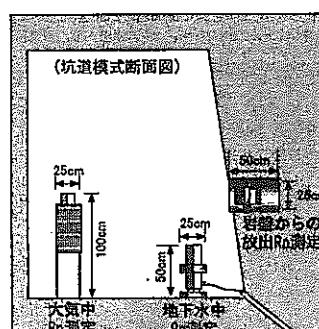


(右) 多深度水圧観測井

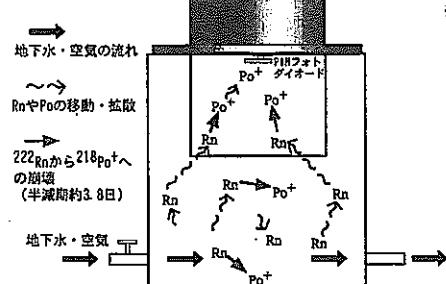
図3.3-7 観測井の模式図



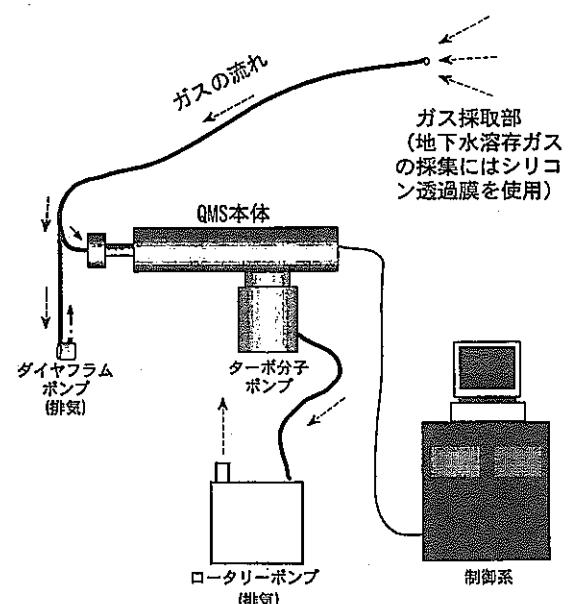
ボアホール総合観測装置



ラドン観測装置の種類



ラドン観測装置



マスフィルタ型四重極質量分析装置
(通称QMS)

図3.3-8 観測装置の概要

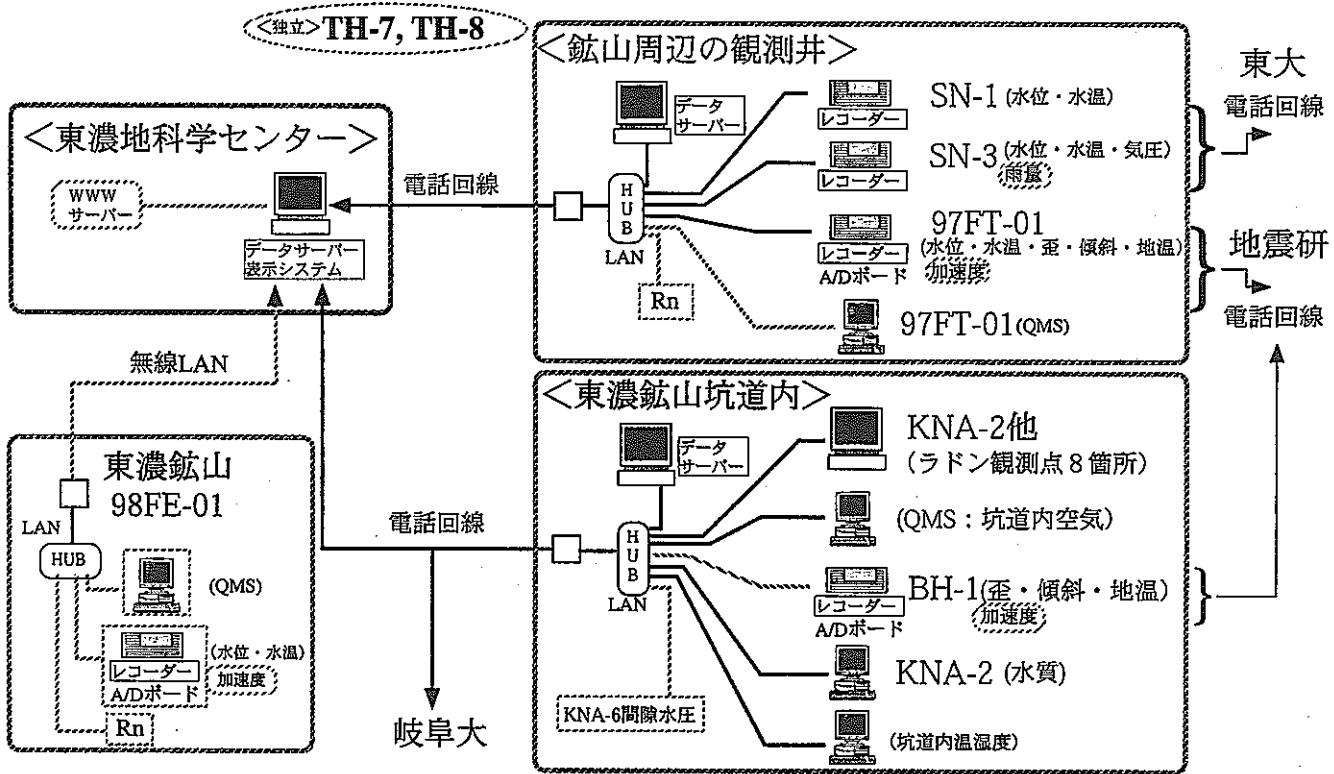


図3.3-9 地震地下水チームの観測データネットワーク

(実線：既設のマシン・LAN・電話回線、点線：計画中)

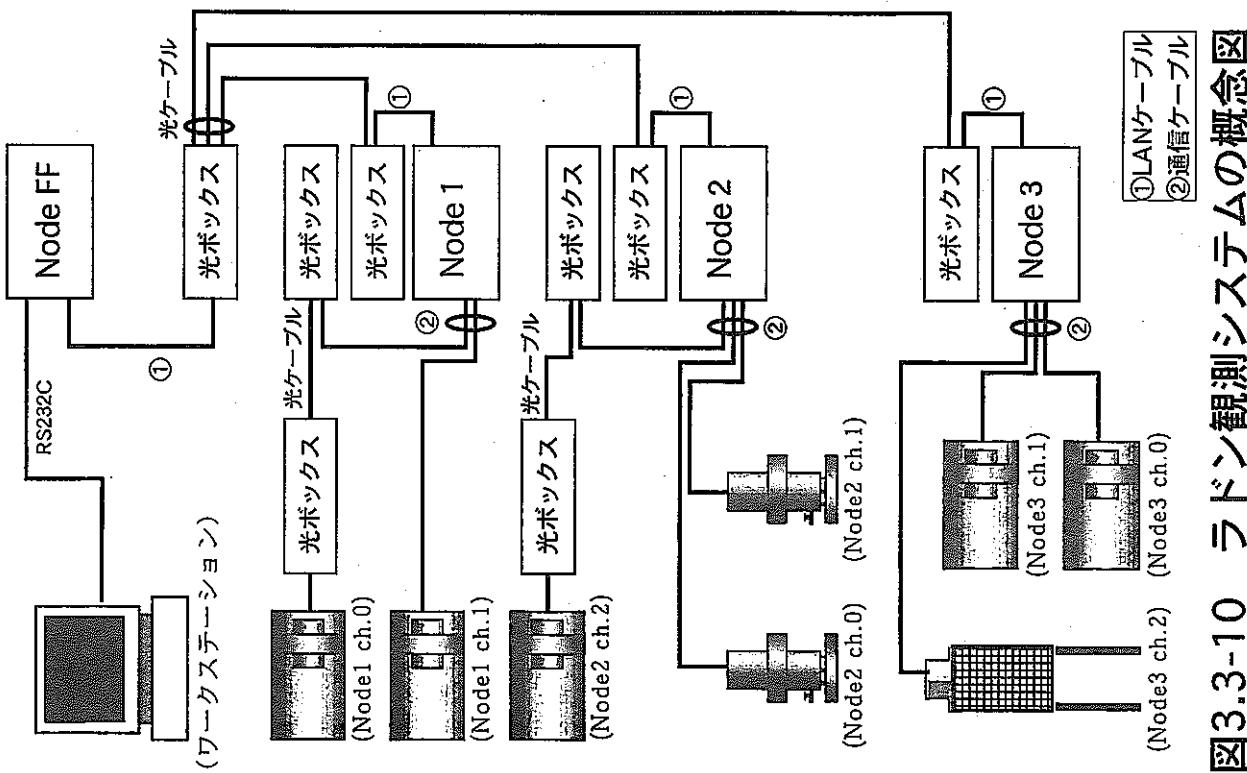


図3.3-10 ラドン観測システムの概念図

地震前後に見られた現象

- ◎地震前のSN-3号孔の地下水位の変動
- ◎地震発生直後のSN-3号孔の地下水位低下
- ◎地震後の長期の地下水位・水圧上昇
- ◎地震前のSN-1号孔の地下水位上昇

観測井の水理的性質

- ◎SN-3号孔の地下水位、TH-7号孔のP1,P2,P3での水圧、TH-8号孔のP1,P2,P3での水圧：潮汐・気圧に対応した変動を示す。
- ◎SN-1号孔の地下水位：潮汐に対応した変動は示さない。気圧に対する変動は示す。
- ◎97FT-01号孔の地下水位：潮汐・気圧に応答した変動は示さない。

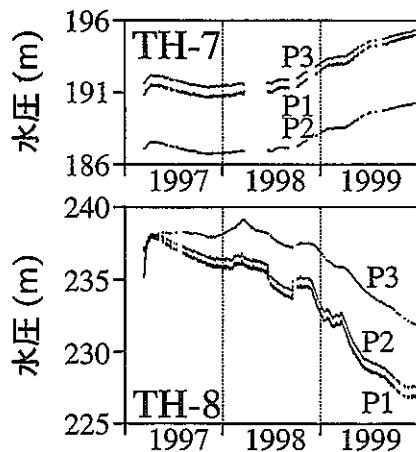


図3.4.1-1 地下水位・水圧連続観測の結果

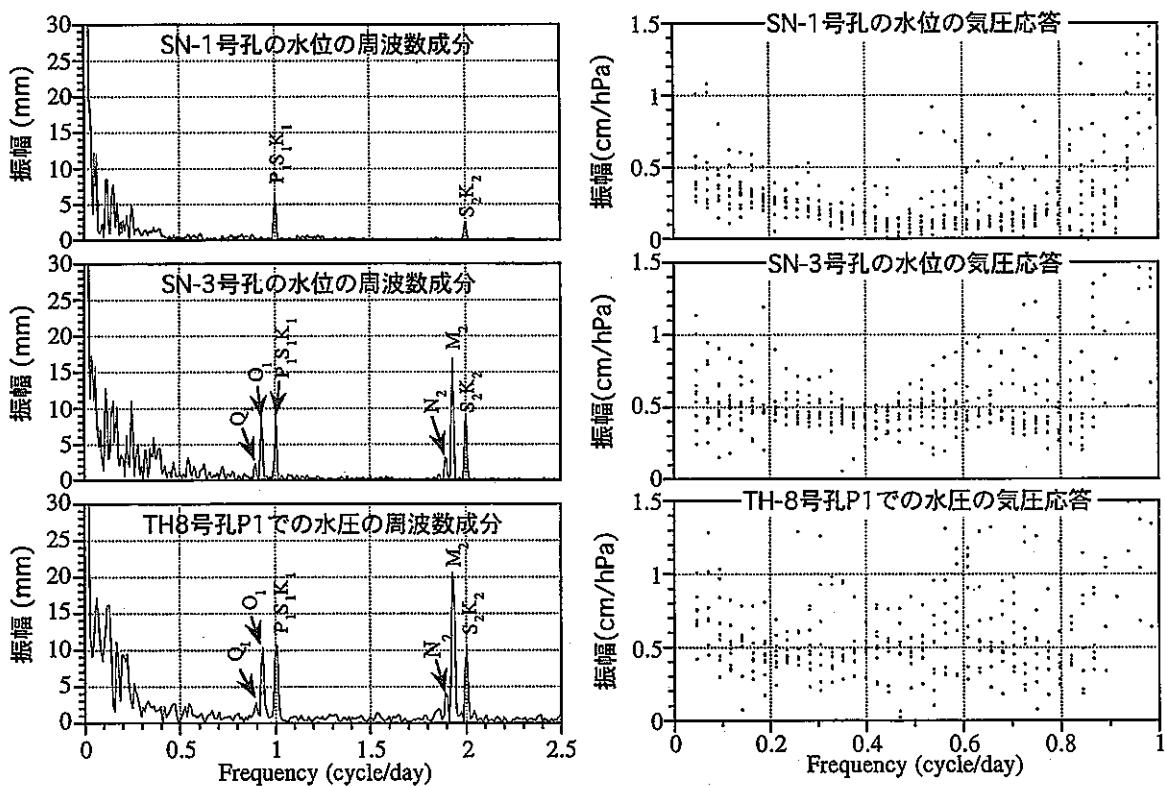


図3.4.1-2 地下水位・水圧の潮汐・気圧応答

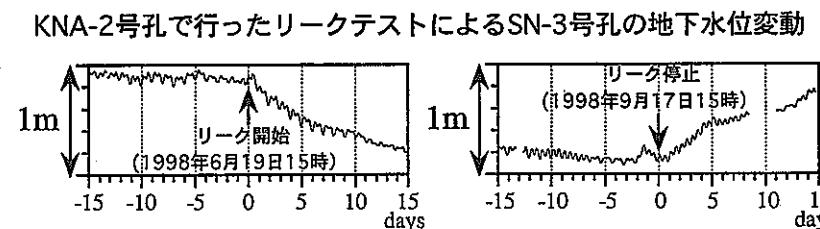
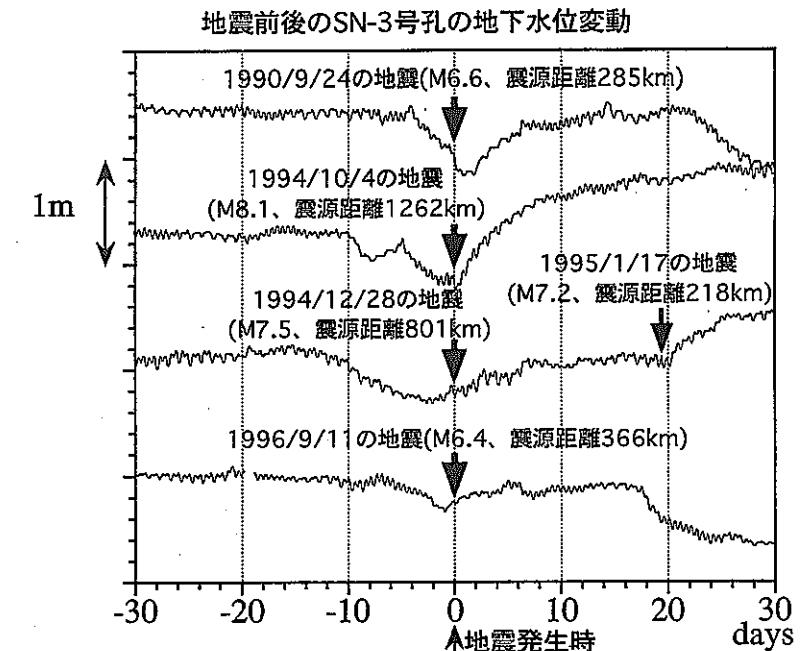
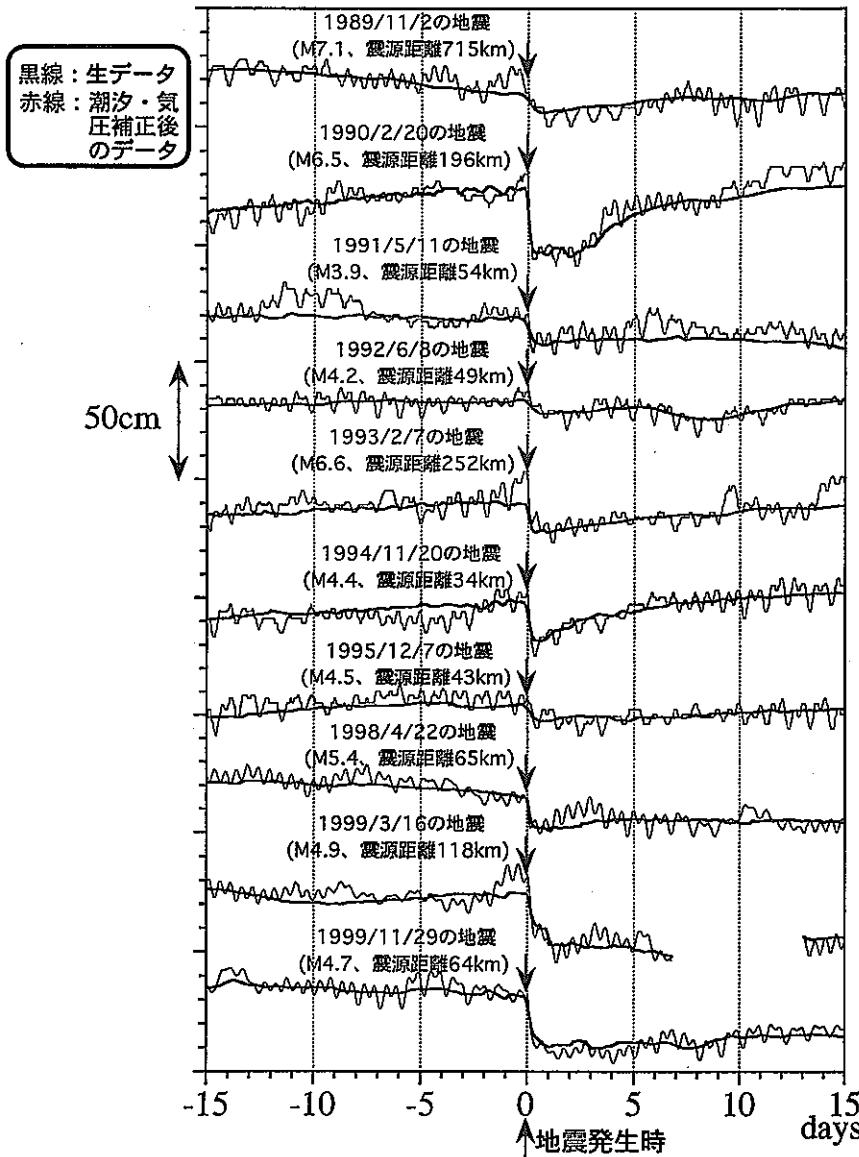


図3.4.1-3 地震前のSN-3号孔の地下水位の変動

図3.4.1-4 地震直後のSN-3号孔の地下水位低下

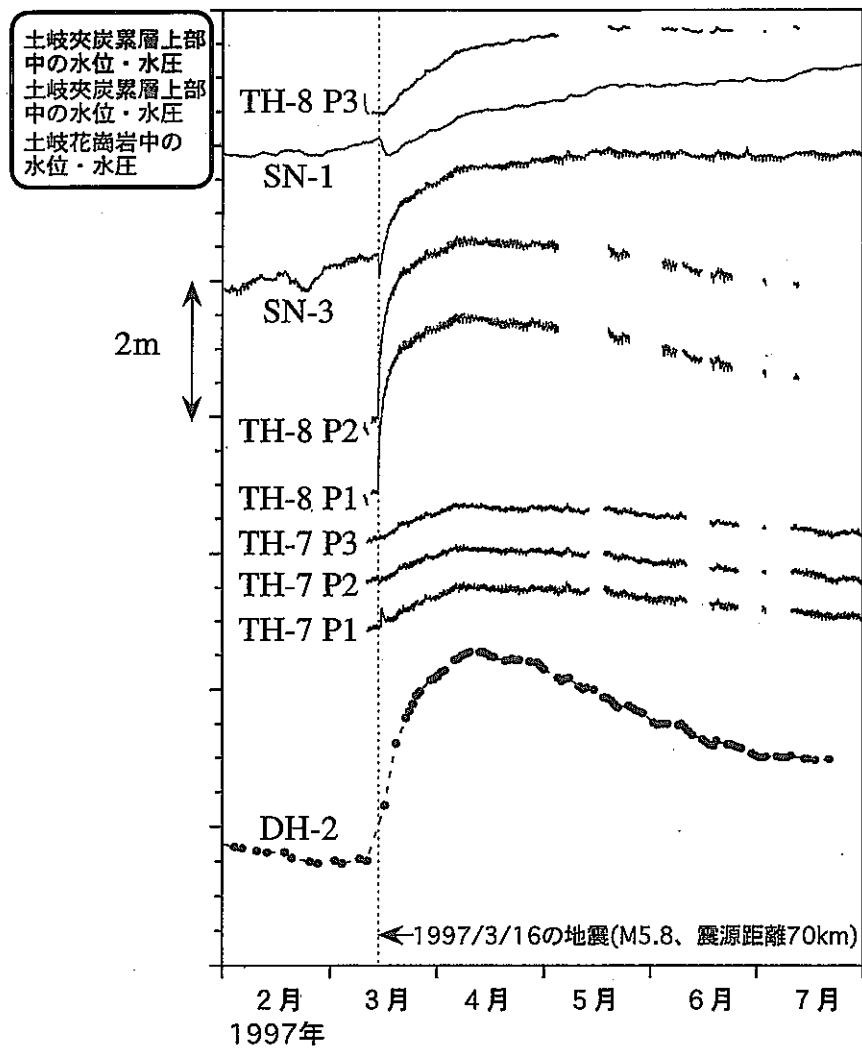


図3.4.1-6 愛知県東部地震(1997/3/16,M5.8)に
関係する地下水位・水圧変動

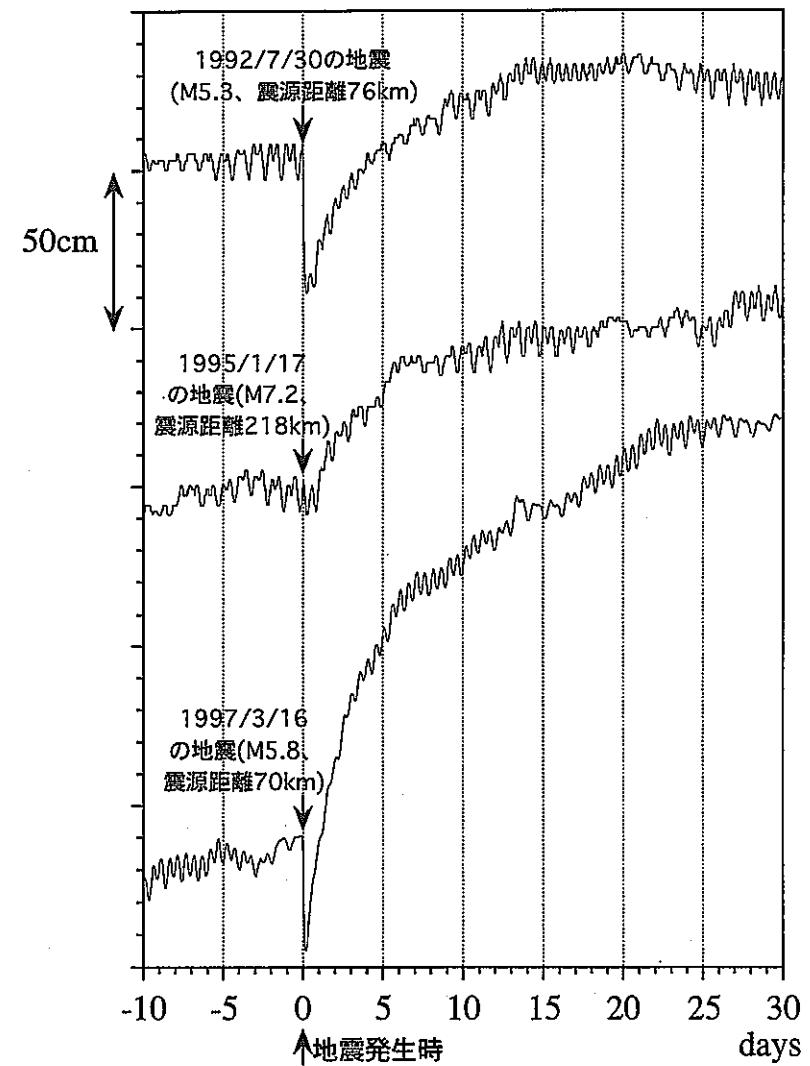


図3.4.1-5 地震後の長期のSN-3号孔の地下水位上昇

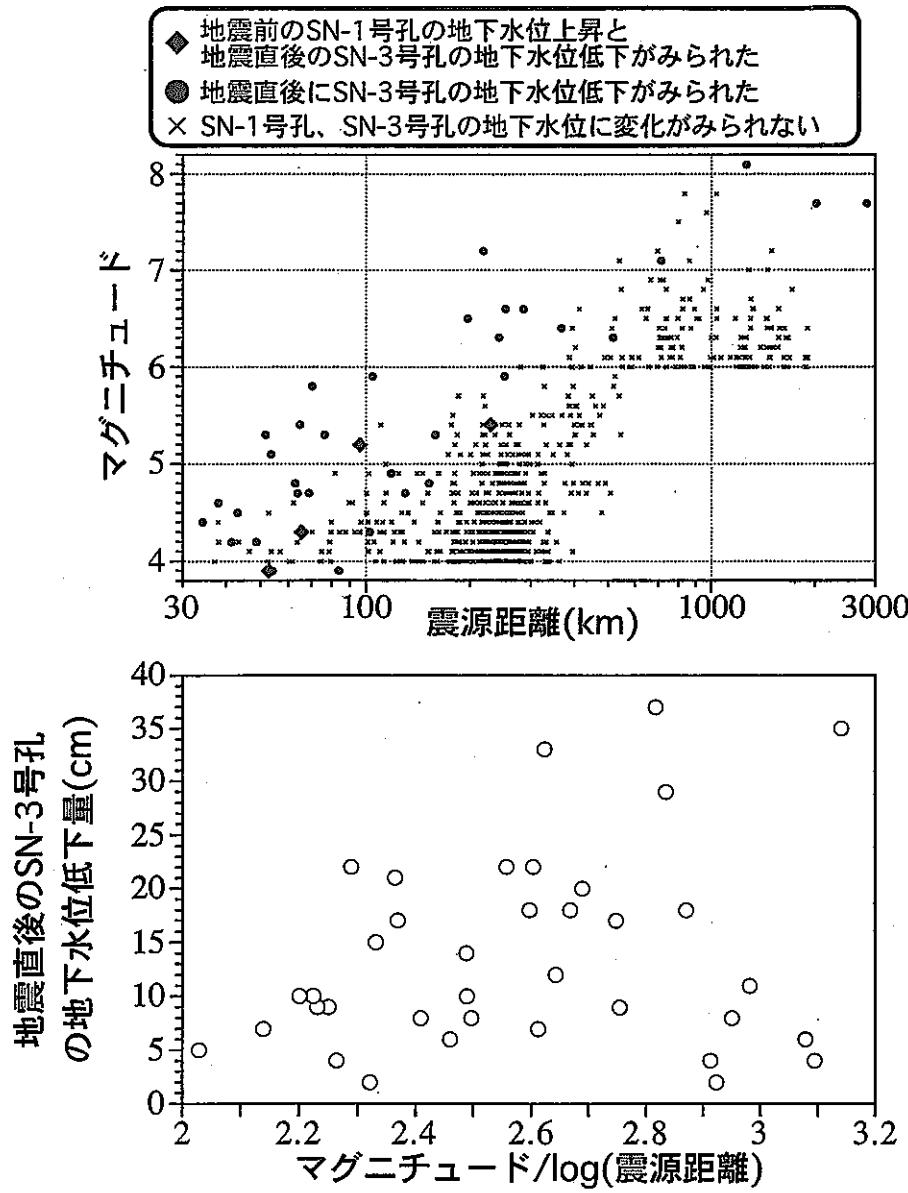


図3.4.1-8 地震のマグニチュード・震源距離
と地下水位変動の関係

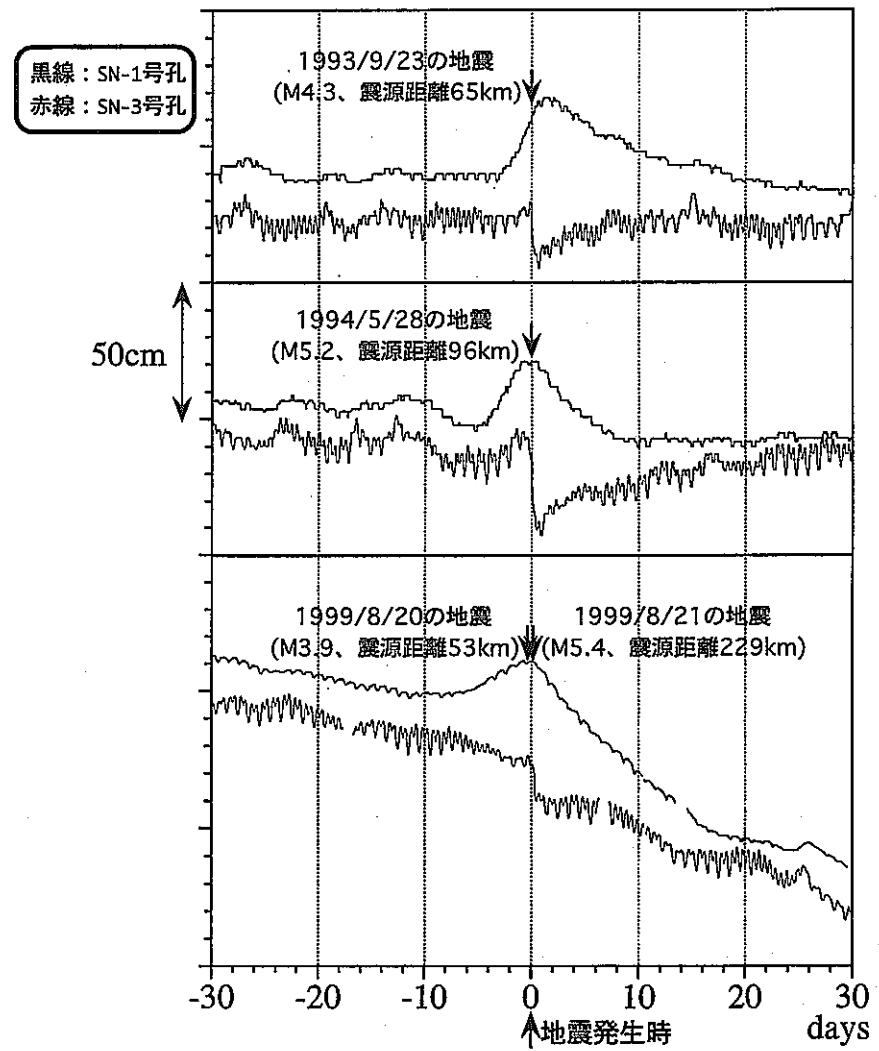


図3.4.1-7 地震前のSN-1号孔の地下水位上昇

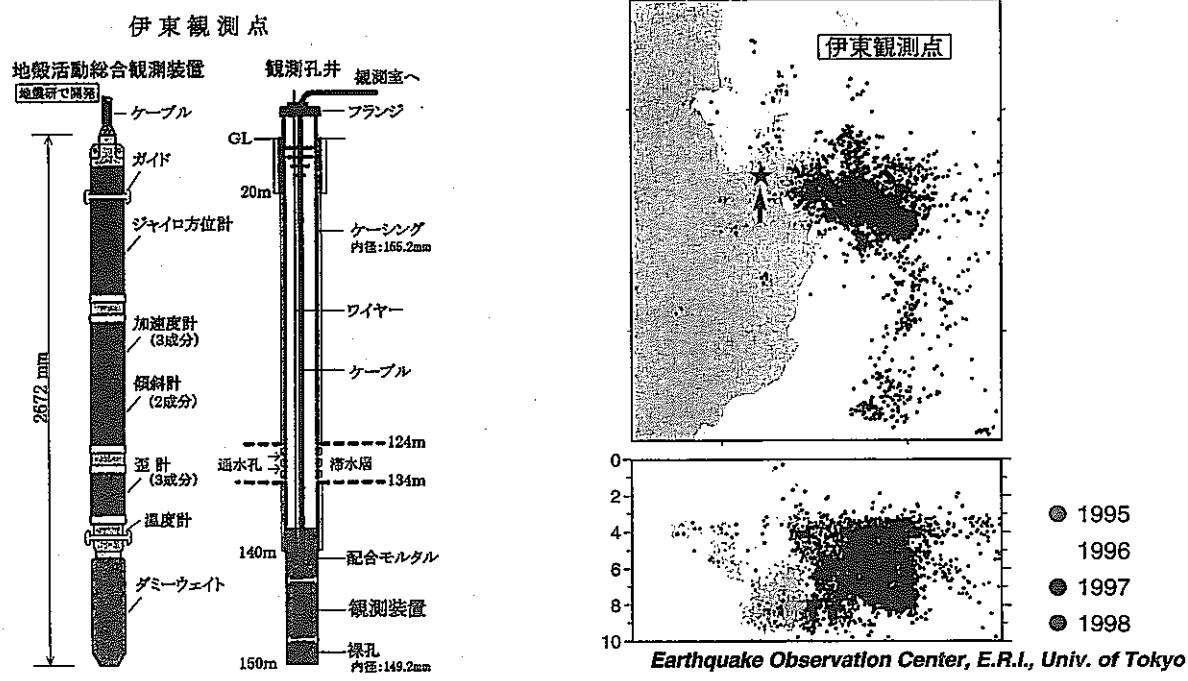


図3.4.2-1 (左) 東京大学地震研究所が開発した地殻活動総合観測装置の概観
と伊東観測点におけるボアホール設置断面図
(右) 伊豆半島東部において発生した群発地震の震源分布図と伊東
観測点の位置

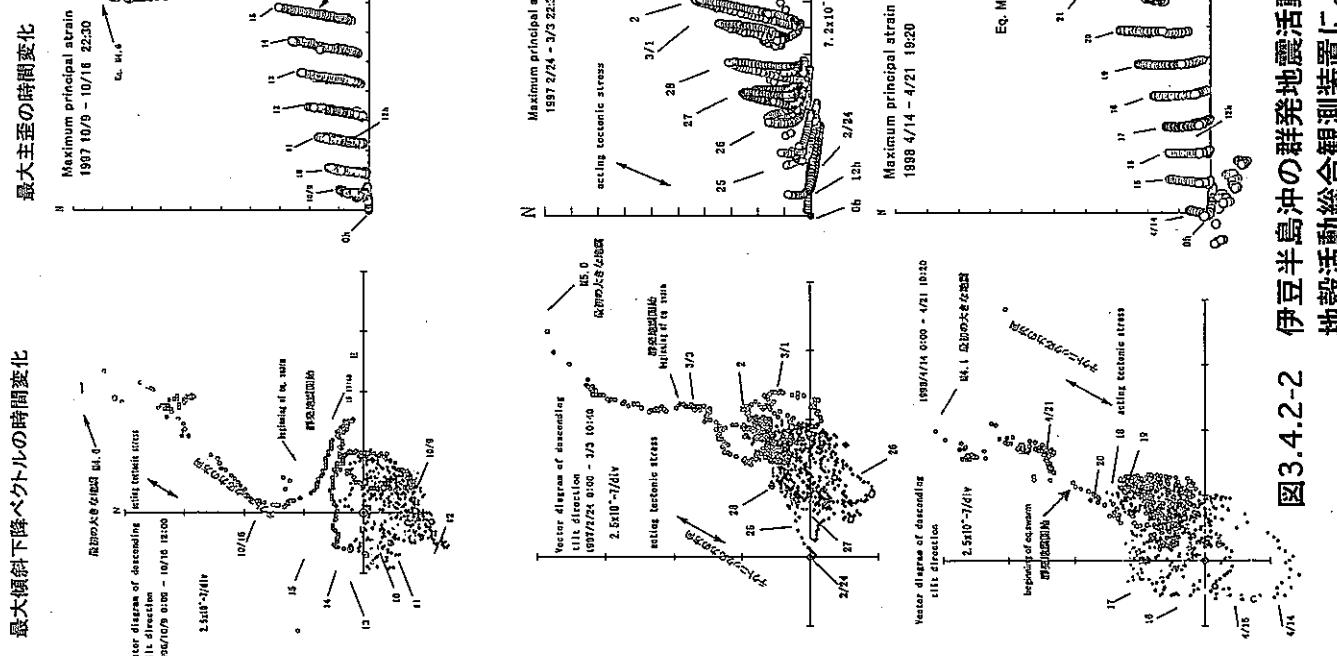


図3.4.2-2 伊豆半島沖の群発地震活動による地殻変動

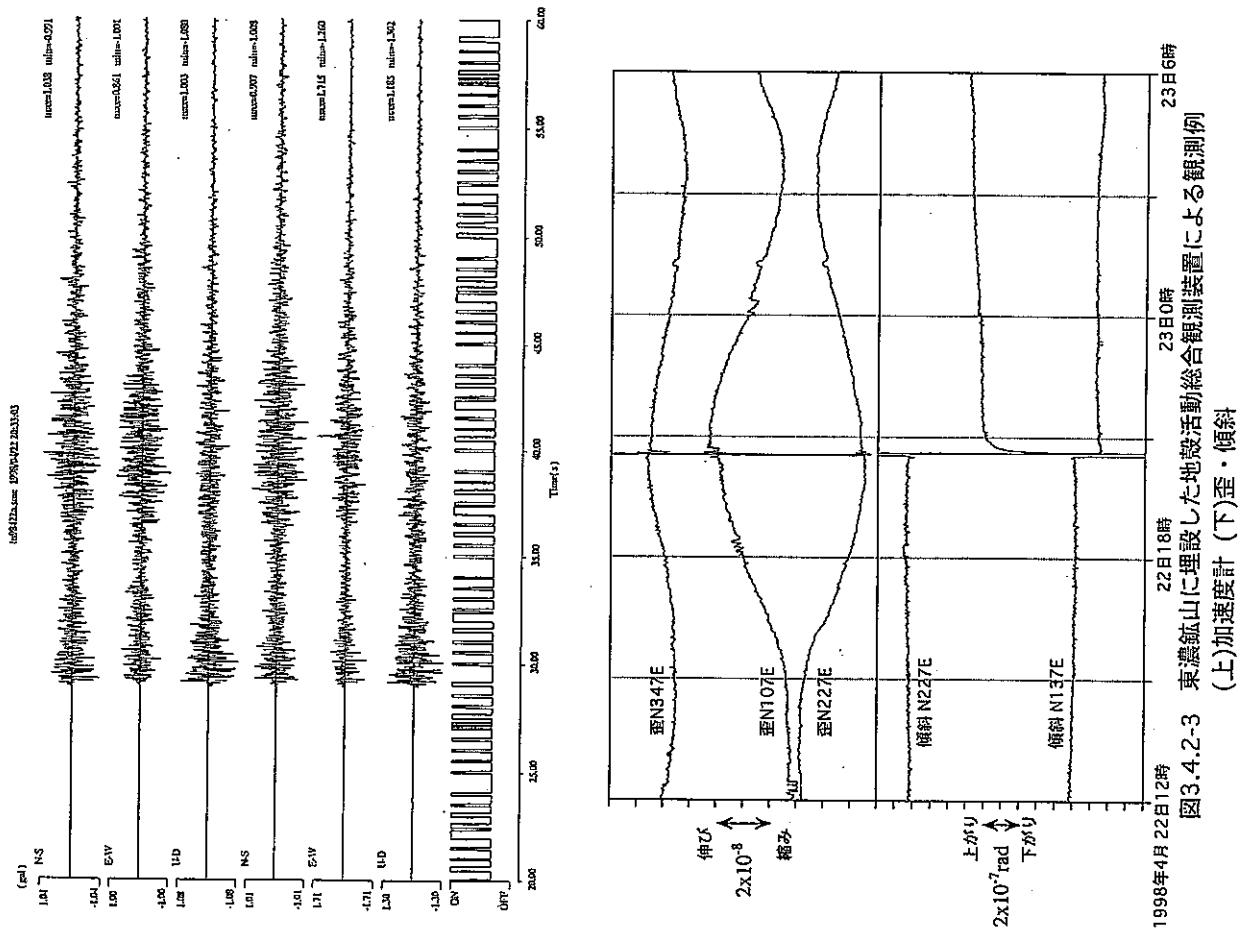


図3.4.2-3 東濃鉱山に埋設した地盤活動総合観測装置による観測例
(上)加速度計 (下)歪・傾斜
1998年4月22日12時 22日18時 23日0時 23日6時

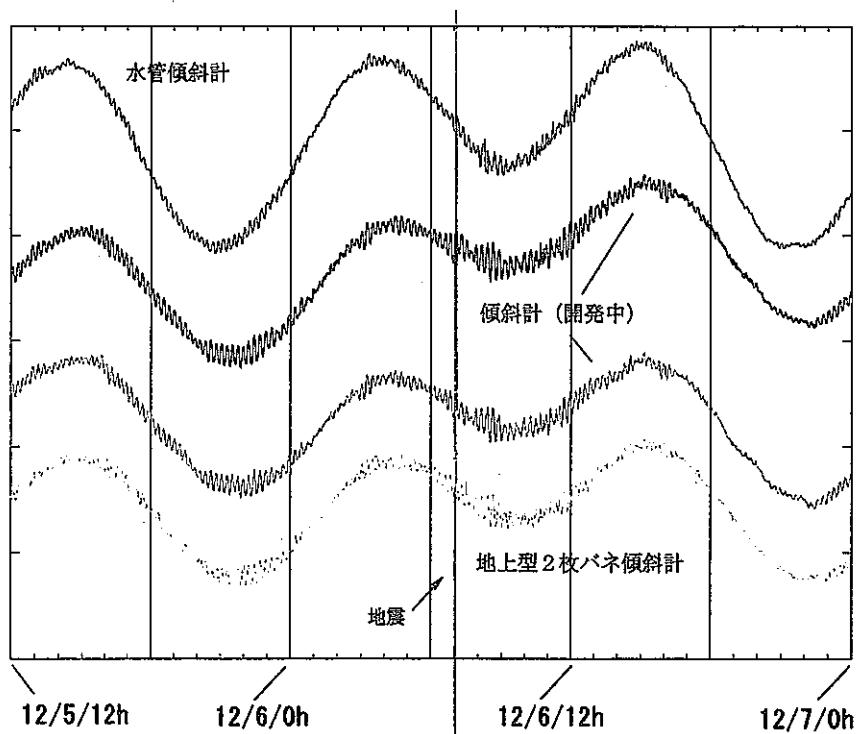
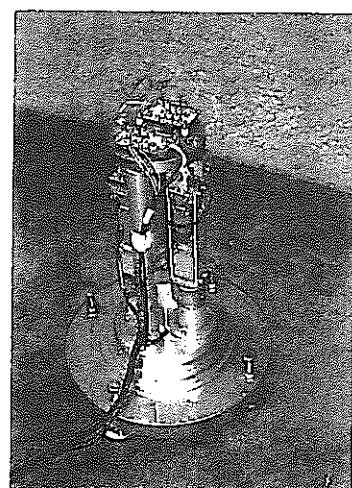


図3.4.2-4 油壺観測点における傾斜変化の比較



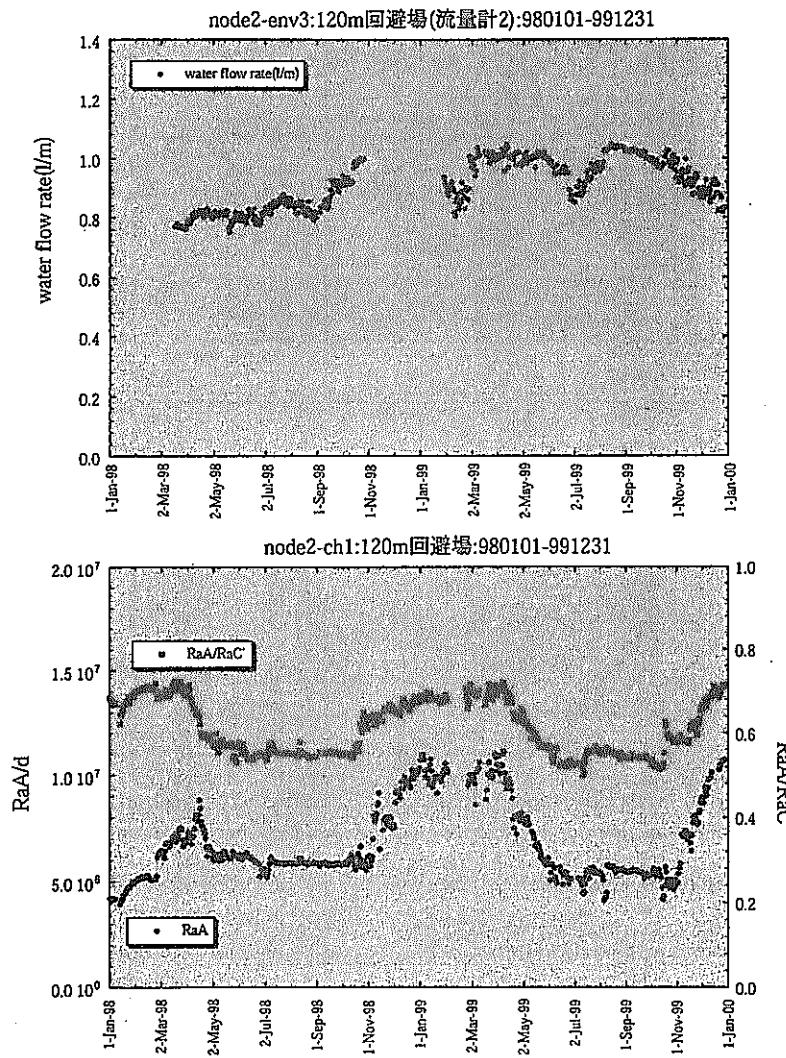


図3.4.3-1 Node2 ch.1 (120m回避場付近) 溢水量（上）とラドン濃度（下）
ラドン濃度は RaA の 1 日積算値と (RaA / RaC') 比を表示
(期間：1998年1月1日～1999年12月31日)

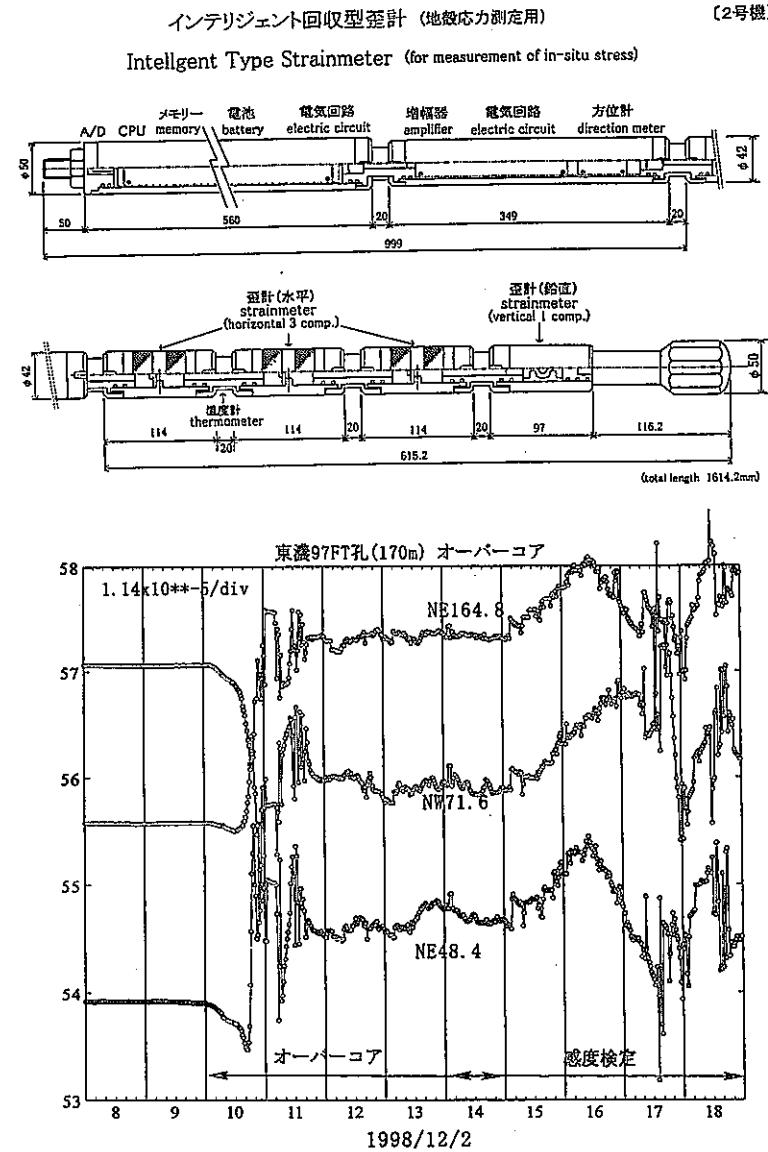


図3.4.2-5 インテリジェント回収型歪計の概要
と初期地殻応力測定時の歪変化の例

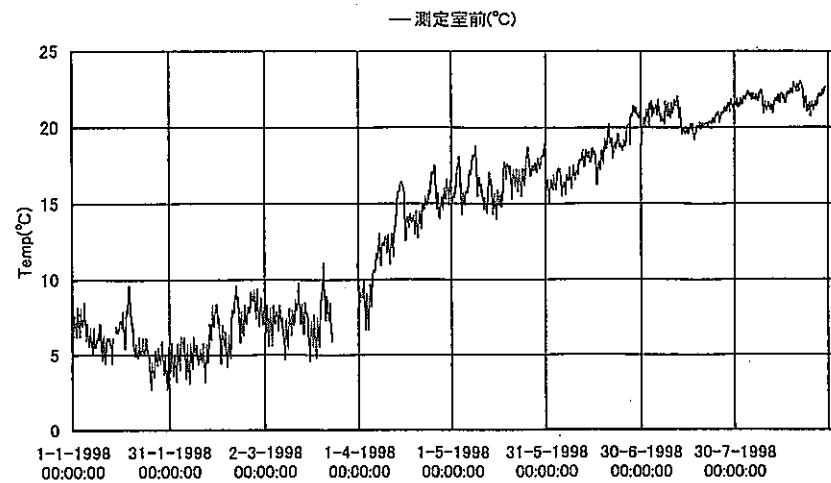


図3.4.3-3 測定室付近（縦坑より約20m奥）における坑道内気温の変化（期間：1998年1月1日～8月31日）

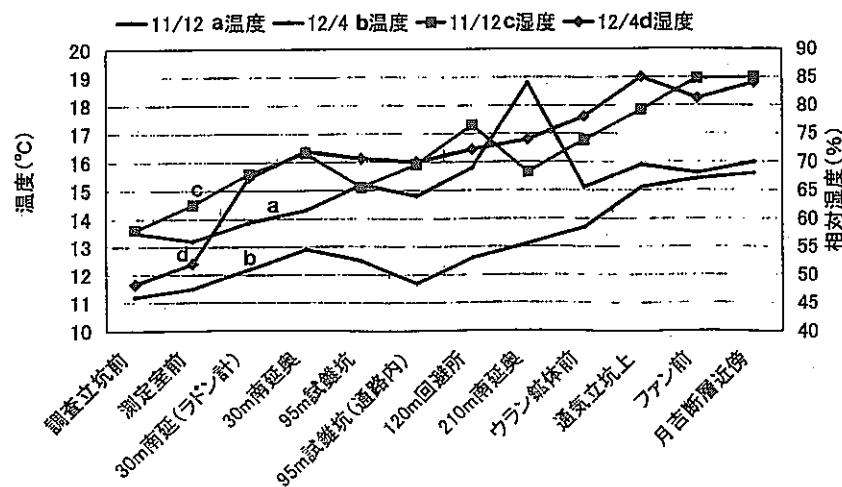


図3.4.3-4 坑道内の地点別温度と湿度の変化測定値
(1997年11月12日、1998年12月4日の2回の測定値)

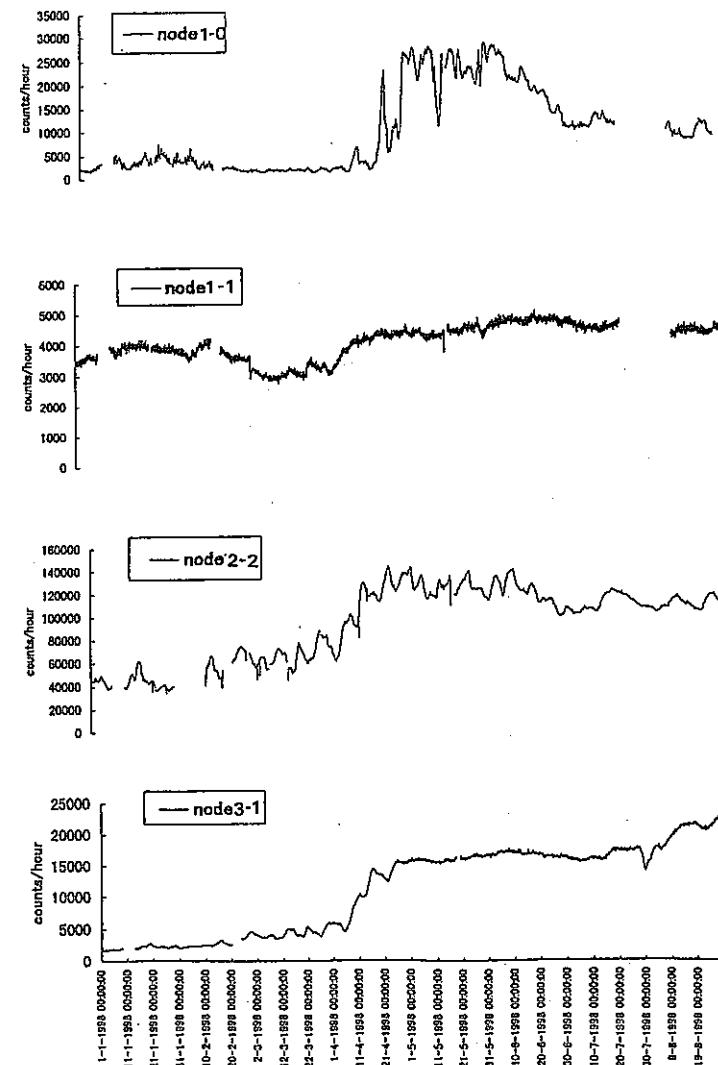


図3.4.3-2 岩盤放出ラドン濃度測定値点毎の比較
縦軸は時間当たり（RaA + RaC'）のカウント数
(期間：1998年1月1日～8月31日)

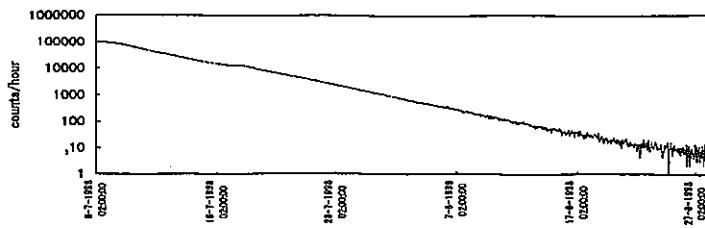


図3.4.3-6 Node2 ch.0 (KNA-2号孔) のリークテストに伴う
湧水停止時の RaA カウント数値の時間減衰
半減期3.8日が明確に現れ、観測計器の正常作動が
検証された（期間：7月8日～8月28日）

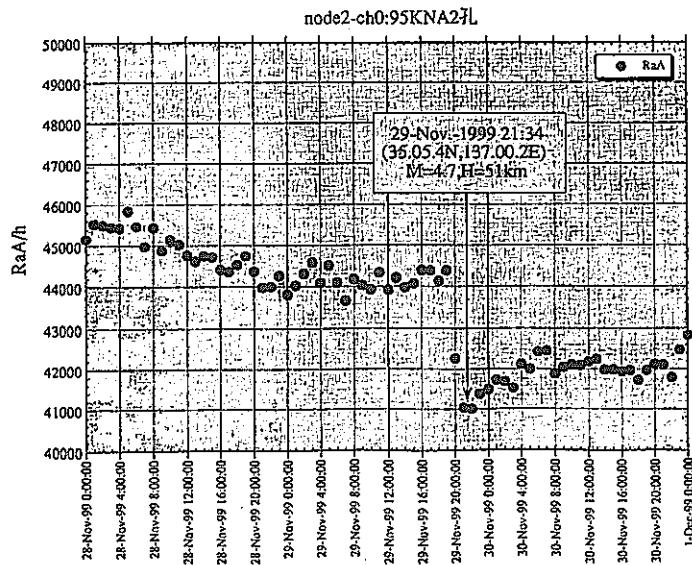


図3.4.3-7 愛知県西部地震（1999年11月29日）に伴うラドン濃度
(RaA) の異常。震源距離は約64km。
(期間：11月28日00時～11月30日24時)

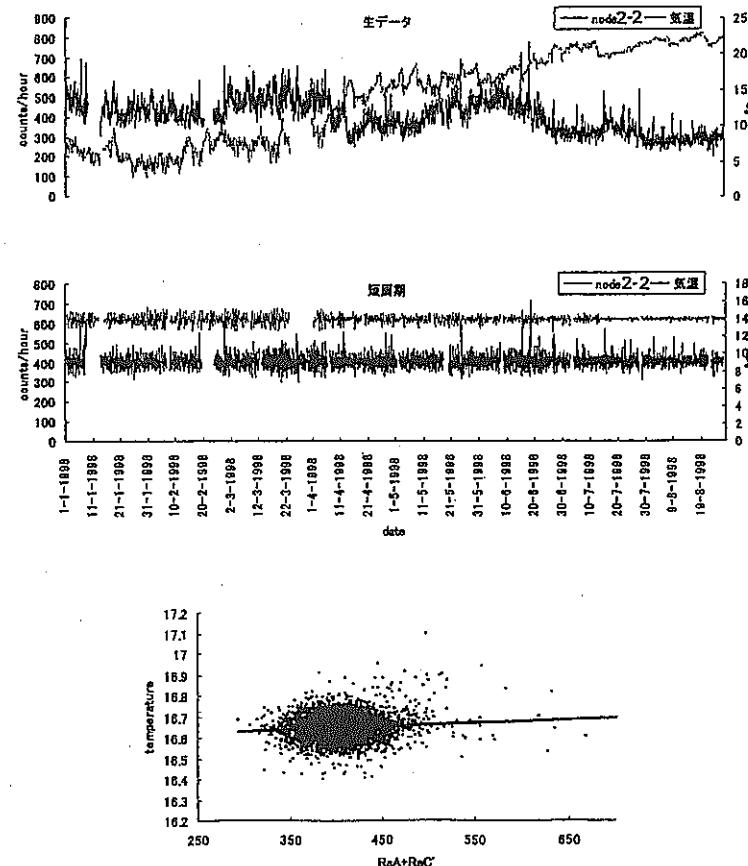


図3.4.3-5 坑道内大気のラドン濃度 (Node2 ch.2) と気温の関係
生データと短周期成分 (24時間以内) の比較
(期間：1998年1月1日～8月31日)

東濃鉱山や周辺における地下ガス観測

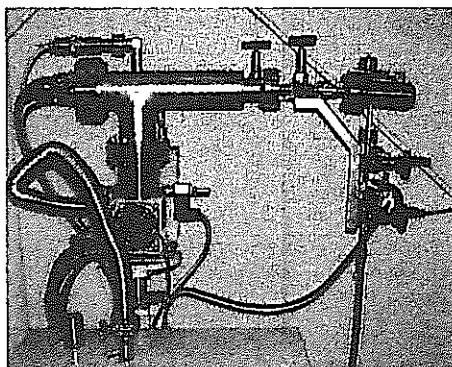


図3.4.4-1a 四重極質量分析計(QMS)

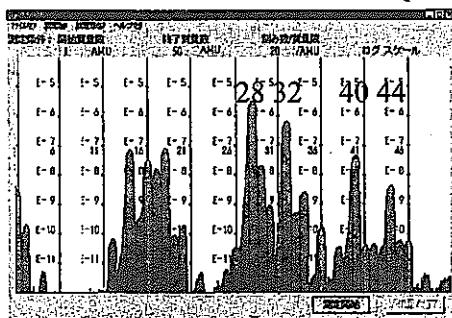


図3.4.4-1b 質量数スペクトル(質量数1~50)

[方式] 小型の真空ポンプで連続的にガスを採取し、その一部をマスフィルタ型四重極質量分析計に導入して連続観測を行う。

[観測対象]

- (1) 東濃鉱山坑道内空気(97.3~)
- (2) 97FT-01孔内地下水溶存ガス
(98.3~)

[採ガス方式]

- (1) 鉱山換気孔から直接採ガス
- (2) 地下水中にシリコン中空糸型
気体分離モジュールを投入して
連続的に採ガス

[観測項目]

質量数2, 4, 18, 28, 32, 36, 40, 44等

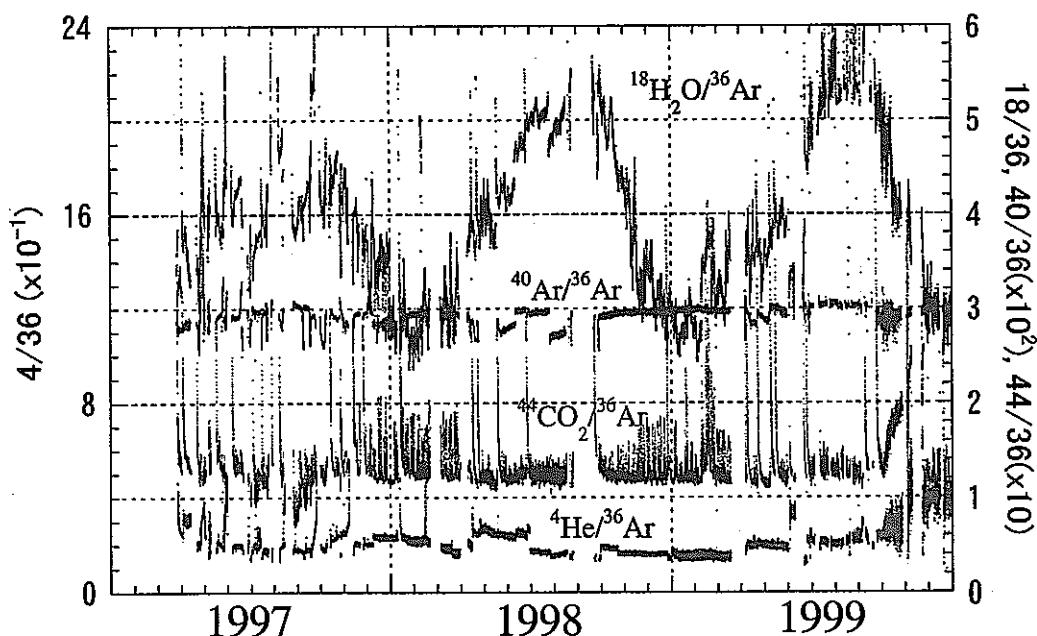


図3.4.4-2 東濃鉱山における地下ガス(坑内空気)連続観測結果(97.3~99.12)

^{36}Ar を基準にした組成比・同位体比を示す。 $^4\text{He}/^{36}\text{Ar}$ 及び $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ のみ、大気組成による補正後の値を表示している。図におけるデータの断続は、坑内停電などによる。

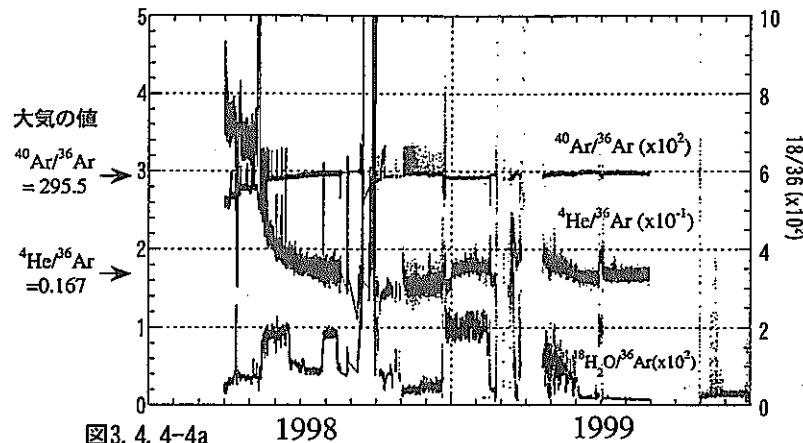


図3.4-4-a 1998 1999

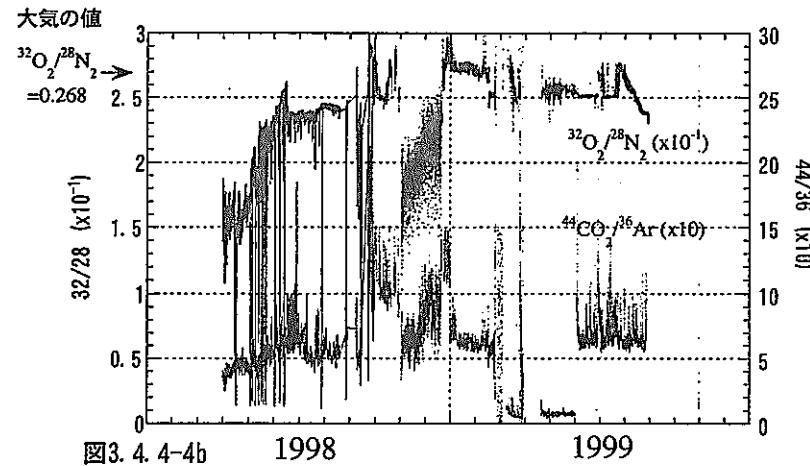
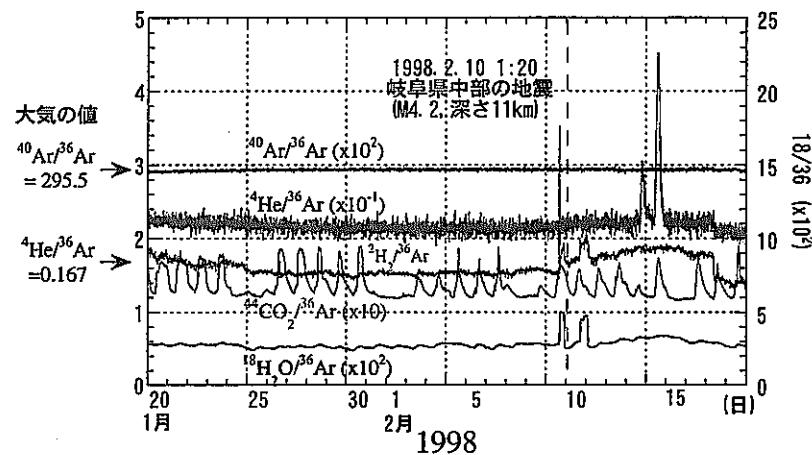
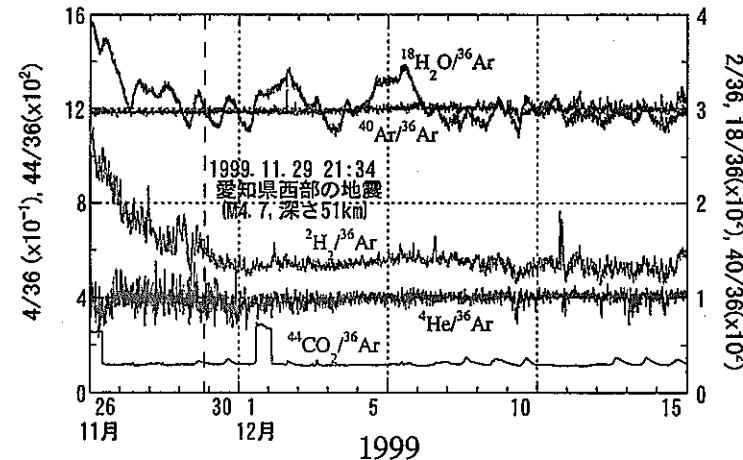


図3.4-4-b 1998 1999

図3.4-4-a, b
97FT-01号孔における地下水溶存ガス連続観測(98.3~99.12)
 ^{36}Ar 又は $^{28}\text{N}_2$ を基準にした組成比・同位体比を示す。 $^4\text{He}/^{36}\text{Ar}$, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$, $^{32}\text{O}_2/^{28}\text{N}_2$ は、大気組成による補正後の値を表示している。図におけるデータの断続は、メンテナンスなどによる。

図3.4-3-a 東濃鉱山地下ガス観測における各成分の特徴 (98.1.20~2.18)
 ^{36}Ar を基準として組成比・同位体比を示す。図3.4-3-b 東濃鉱山地下ガス観測における各成分の特徴 (99.11.26~12.15)
 ^{36}Ar を基準として組成比・同位体比を示す。

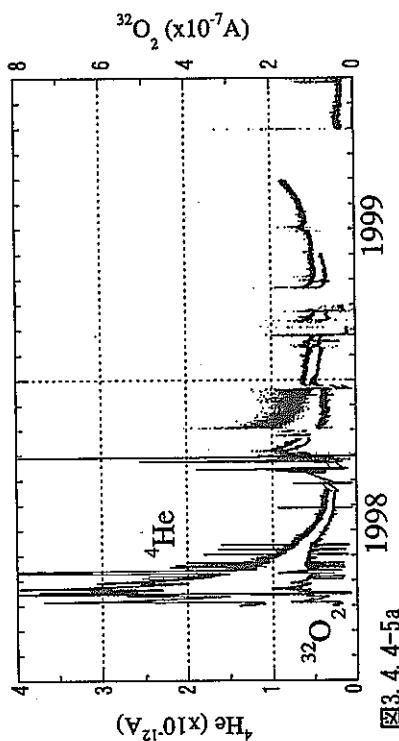


図3.4-5a
97FT-01号孔での地下水溶存ガス連続観測における ${}^4\text{He}$ と ${}^{32}\text{O}_2$ の測定値
(単位) (98. 3～99. 12)
特に98年の観測において間歇的なピークが互いに逆相関になっていることがわかる。

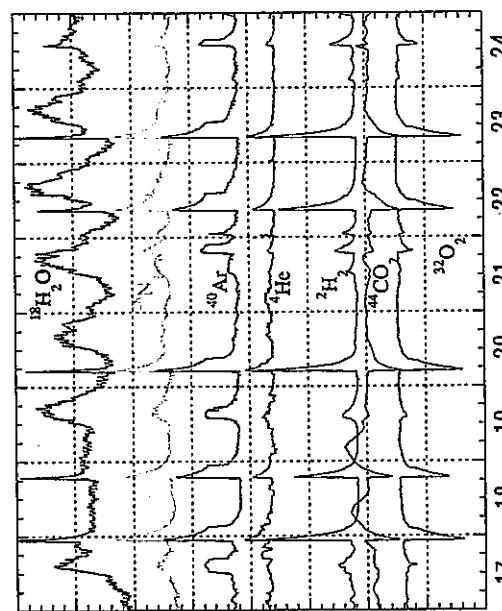


図3.4-5b
1998年5月
間歇的なピークにおける各観測項目間の関係
(98. 5. 17～24)
但し、この図においては実際のスケールを無視してパターンのみで比較している。

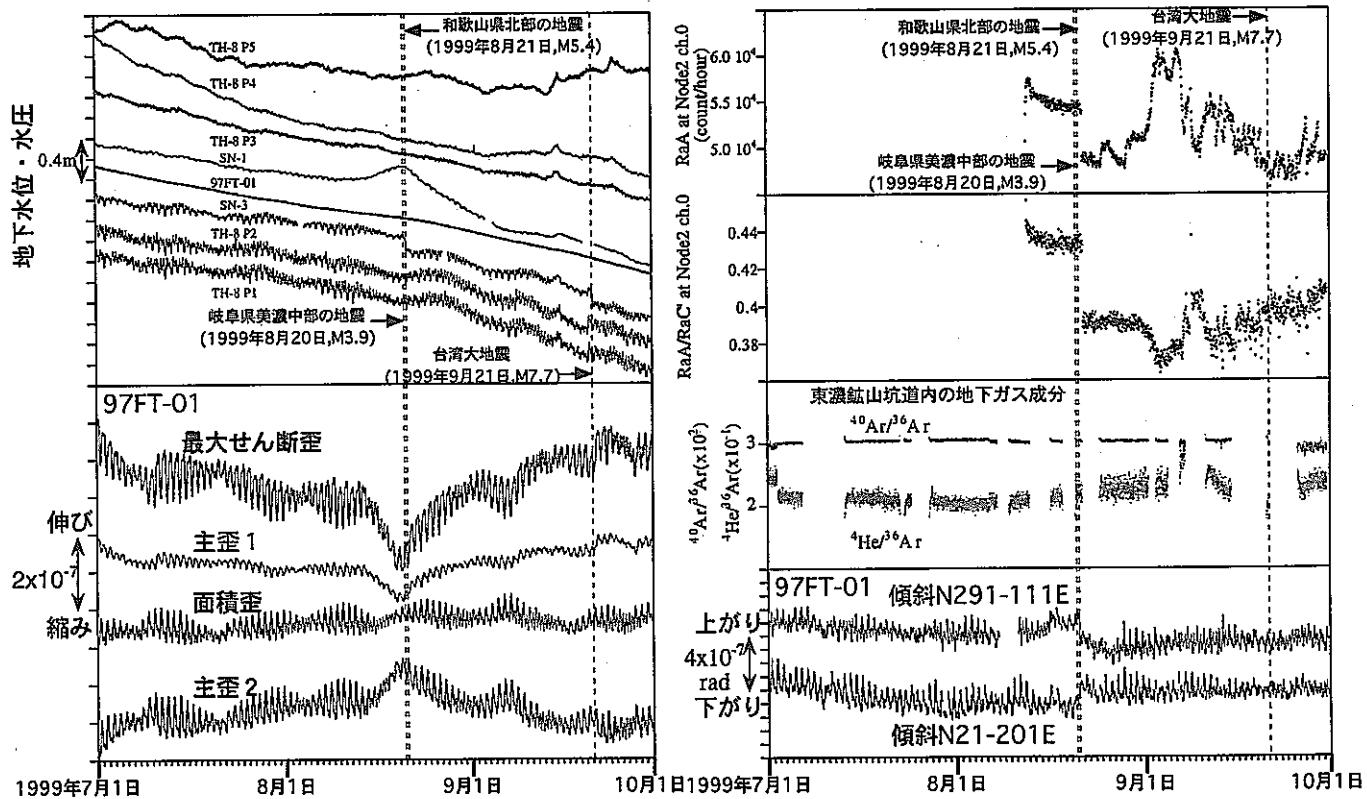


図3.5-1 1999年8月20日、21日前後の地下水位・水圧・歪・傾斜・地下ガス成分の変動

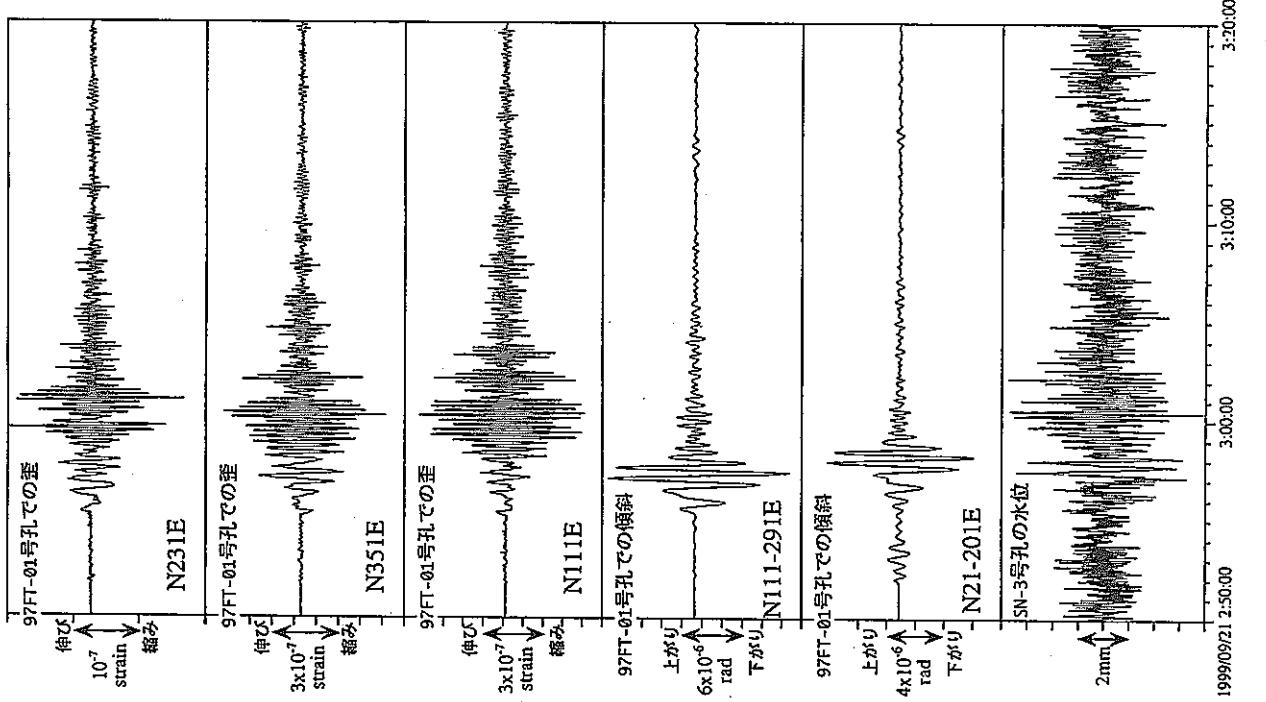


図3.5-2 地震波に応じた歪・傾斜・地下水位の振動

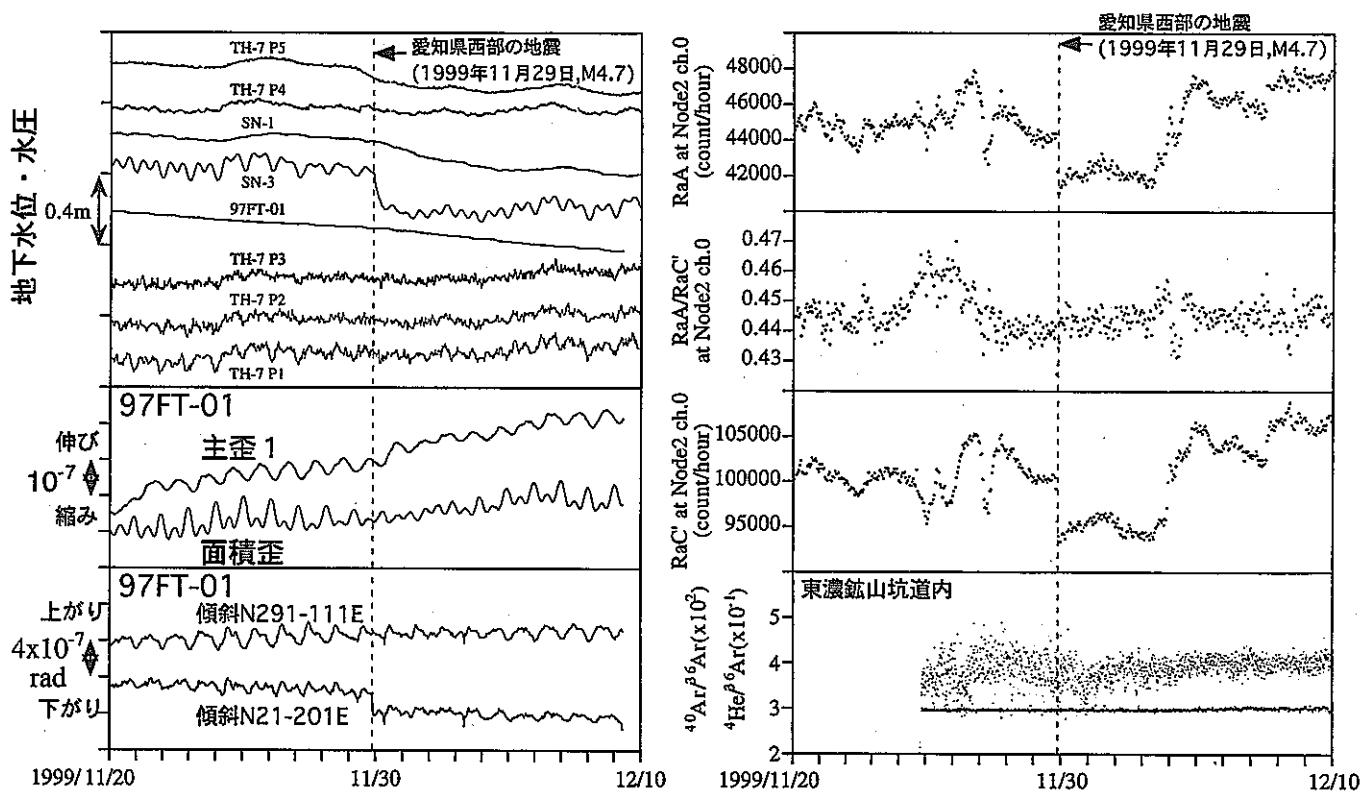


図3.5-3 1999年11月29日前後の地下水位・水圧・歪・傾斜・地下ガス成分の変動

地震発生と地下水挙動に関する研究の主な成果

観測における主な成果

東濃鉱山周辺において、多くの地震に関する地下水位・水圧変動、地殻変動、水中溶存ラドン変動を検出した。

地球潮汐・気圧変動・地震動から、東濃鉱山周辺の土岐花崗岩における地殻歪一地下水位・水圧の周波数応答特性を導いた。

伊豆の群発地震活動に関連した地殻変動を検出した。

新観測手法の開発における主な成果

深度1000mの試錐孔に適用可能な回収型歪計を開発し初期応力測定の実績をあげた。

ボアホール地殻活動総合観測装置を改良し、歪計を水平動を正確に記録できる歪地震計として利用できる体制を確立した。また、傾斜計の測定精度を向上させた。

静電捕集型ラドン計や四重極質量分析計を用いた、地下ガスを連続的に高精度で測定する手法を適用・確立した。

図 3.6

今後の展開

課題

地下水位・水圧変動、地殻変動、地下ガス変動の総合的な比較検討を行う。

ボアホール地殻活動総合観測装置の新規埋設や、土岐夾炭累層下部の水圧観測の開始など、新たな観測項目を拡充する。

深度1000mの試錐孔で回収型歪計による初期応力測定を行う。

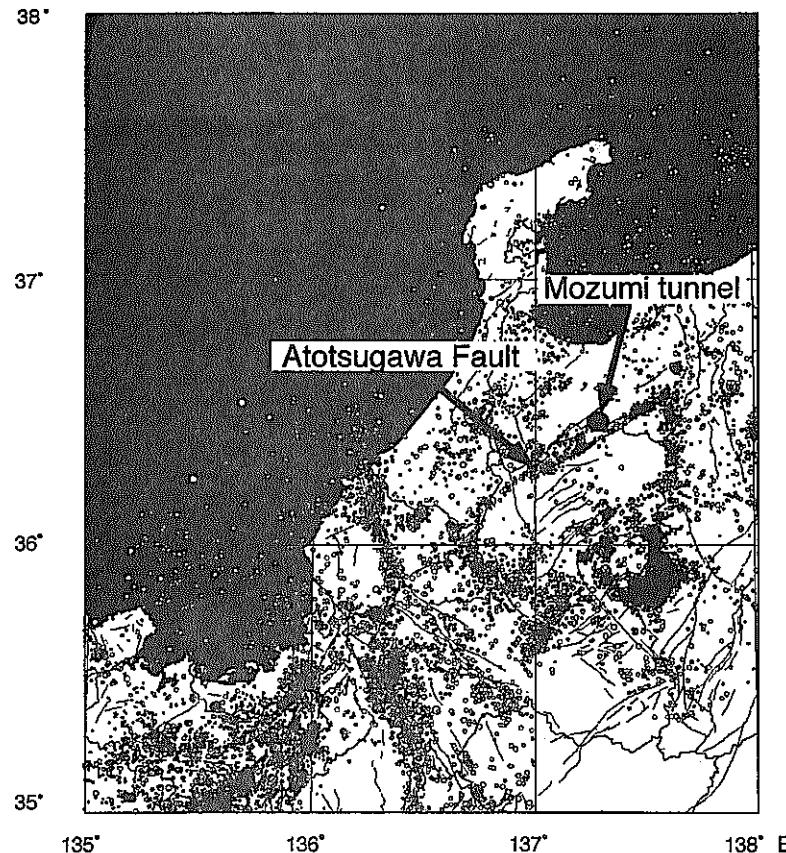
展望

観測点の地震応答特性及び前兆的な変動のメカニズム解明に向けた地殻監視体制の確立

- ・1000m クラスの既存or新規の試錐孔における多深度間隙水圧観測網の確立及び、同孔に適用可能な観測機器の開発。
- ・土岐花崗岩の特性を調べるため、近傍の土岐花崗岩以外の基盤における地下水位・地殻変動観測点を設置する。

人為的に制御された変動を与えることによる応答特性の解明

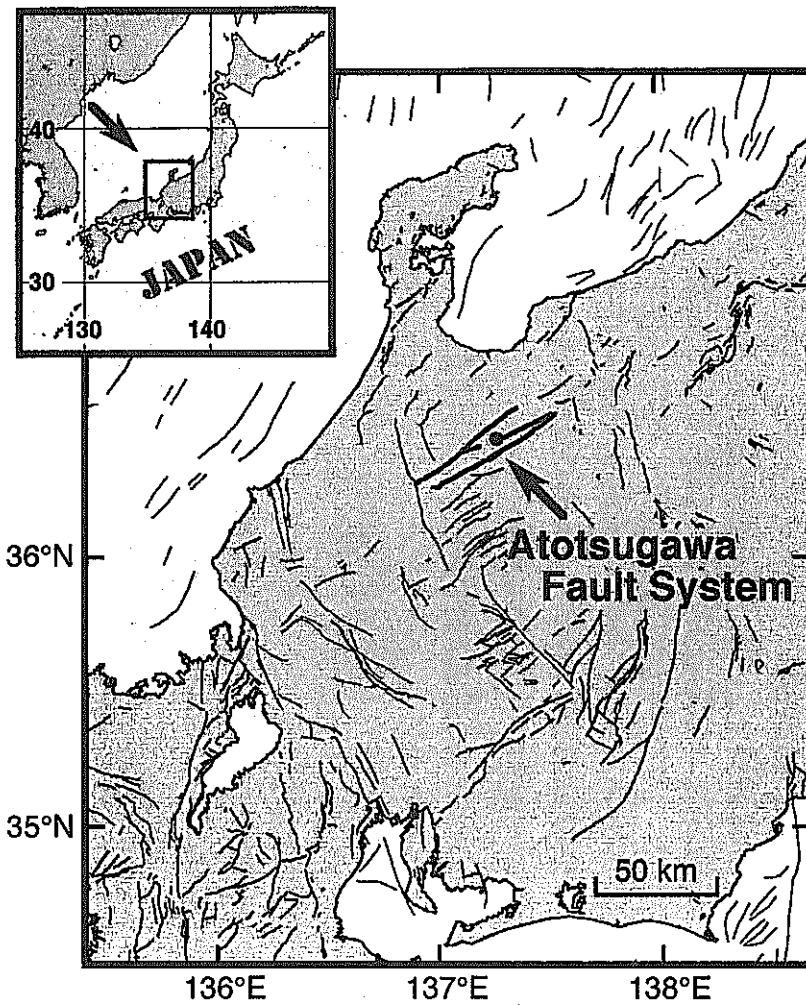
図 3.7



Seismicity map of the Atotsugawa fault and adjusent areas
for the period between 1980 and 1990, located by the Kyoto Univ.
seismic network

図4-2

Overview and purpose of active fault research at the Mozumi-Atotsugawa fault system



Masataka Ando
Disaster Prevention Research Institute
Kyoto University

図4-1

Precise Distance Measurements

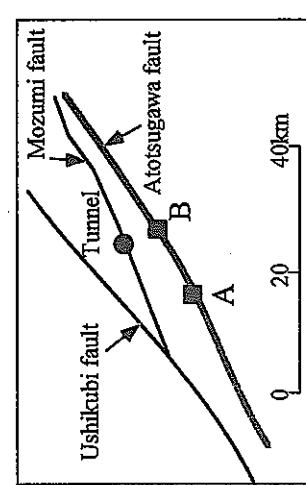
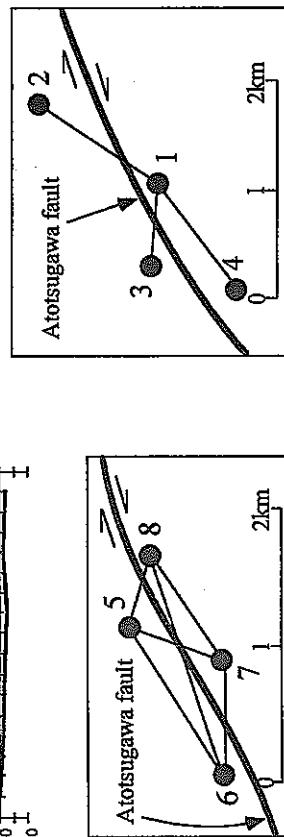
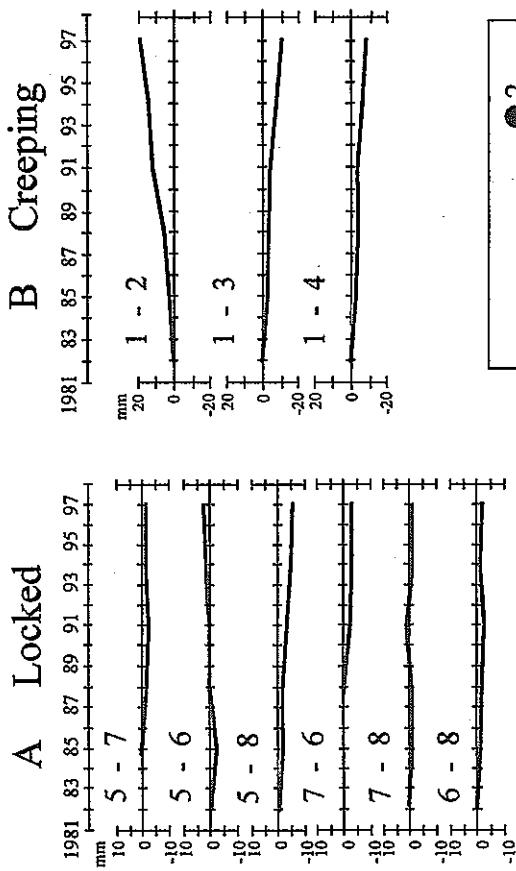
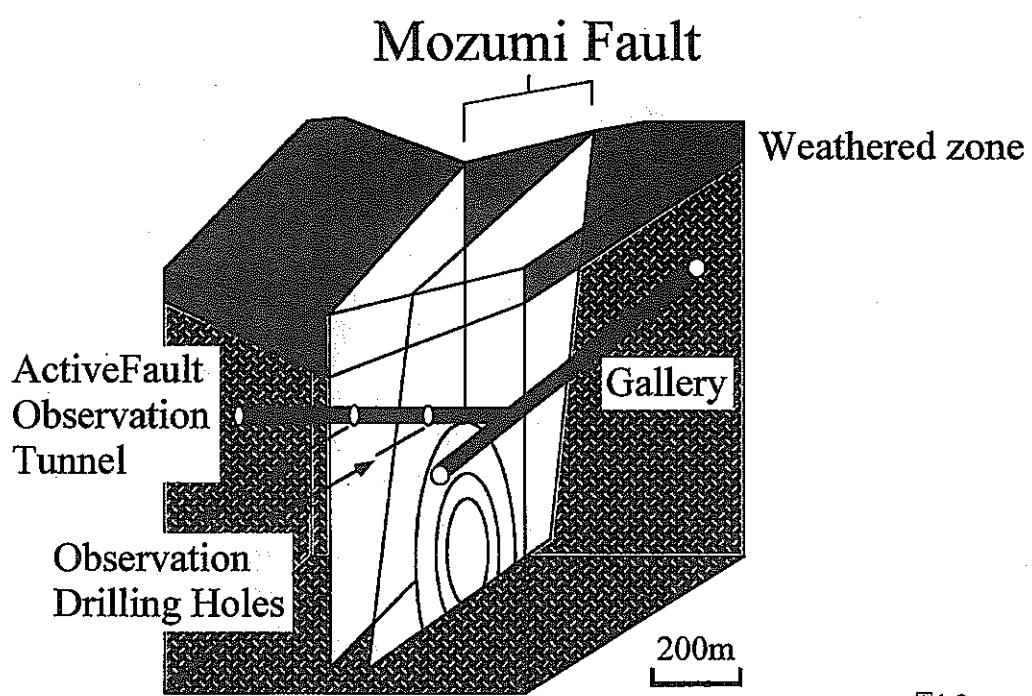


図4-3

図4-4



Active Fault Observations of the Atotsugawa Fault System

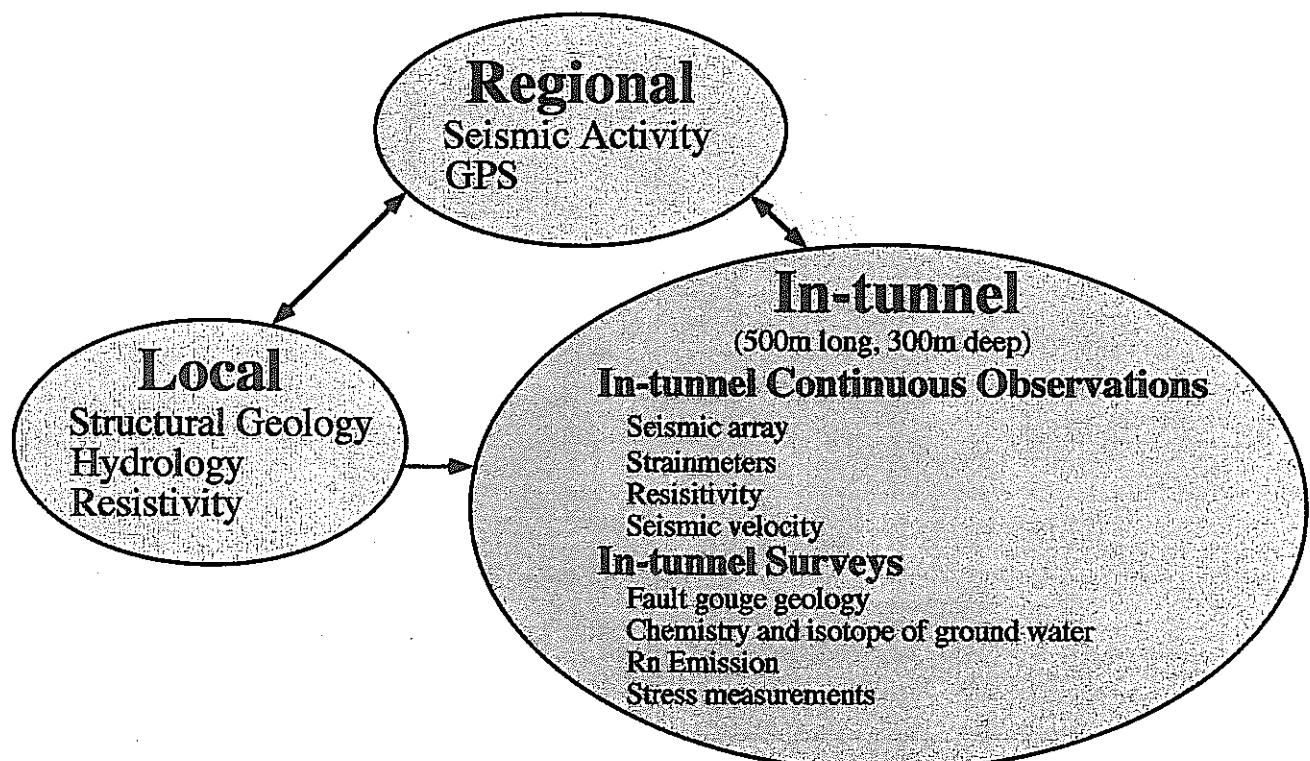


図4-5(上)

Slip planes around the Atotsugawa fault system

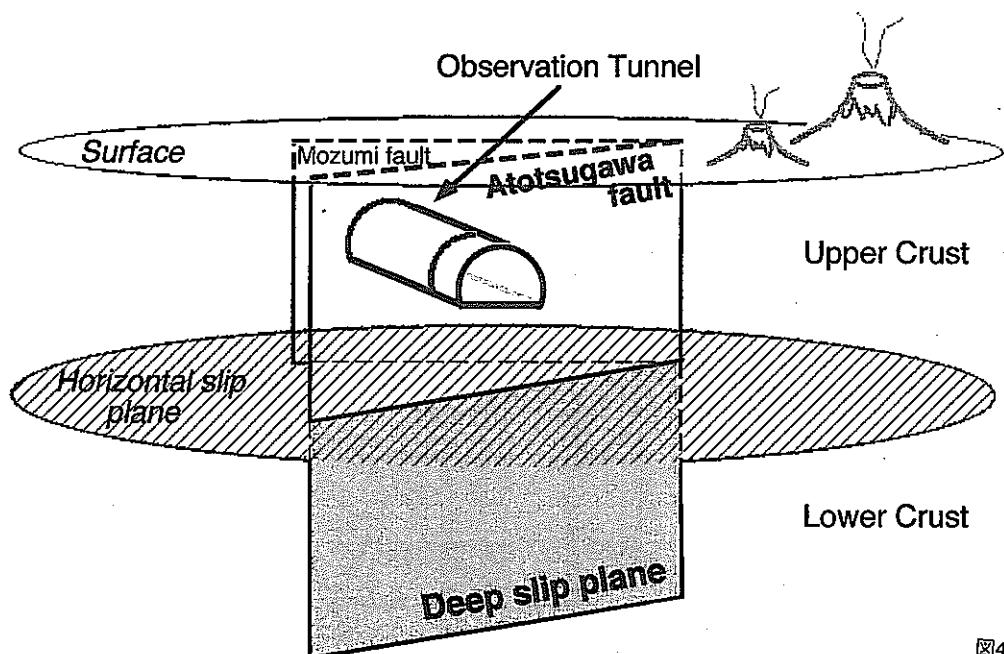
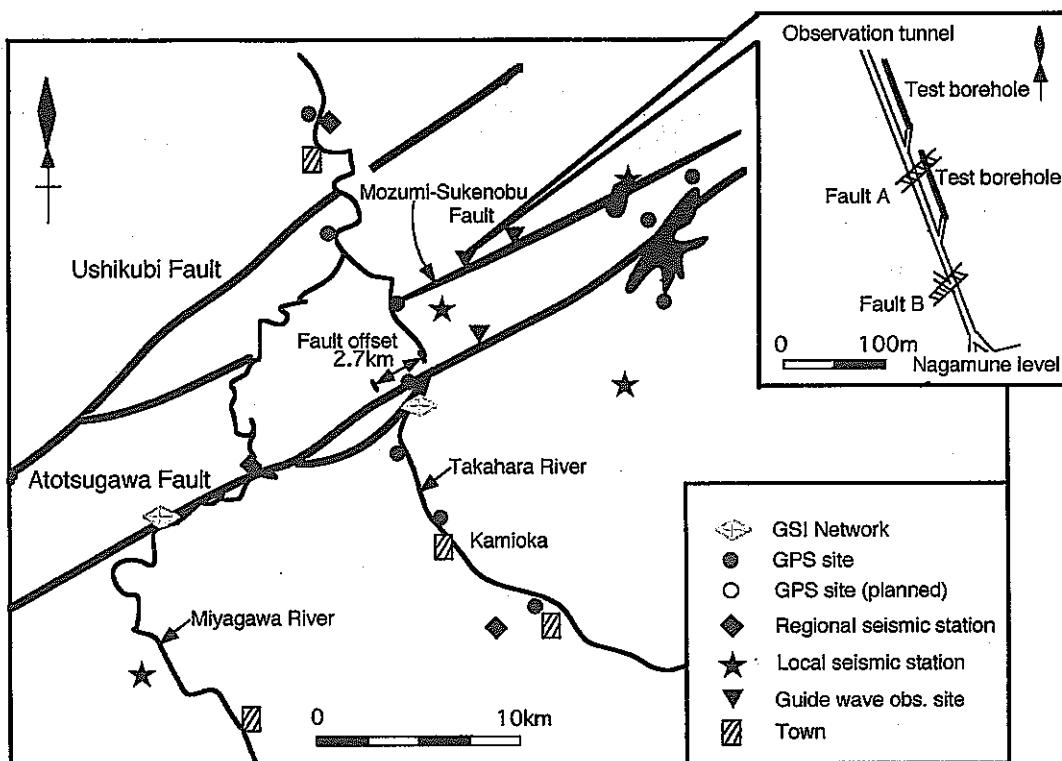
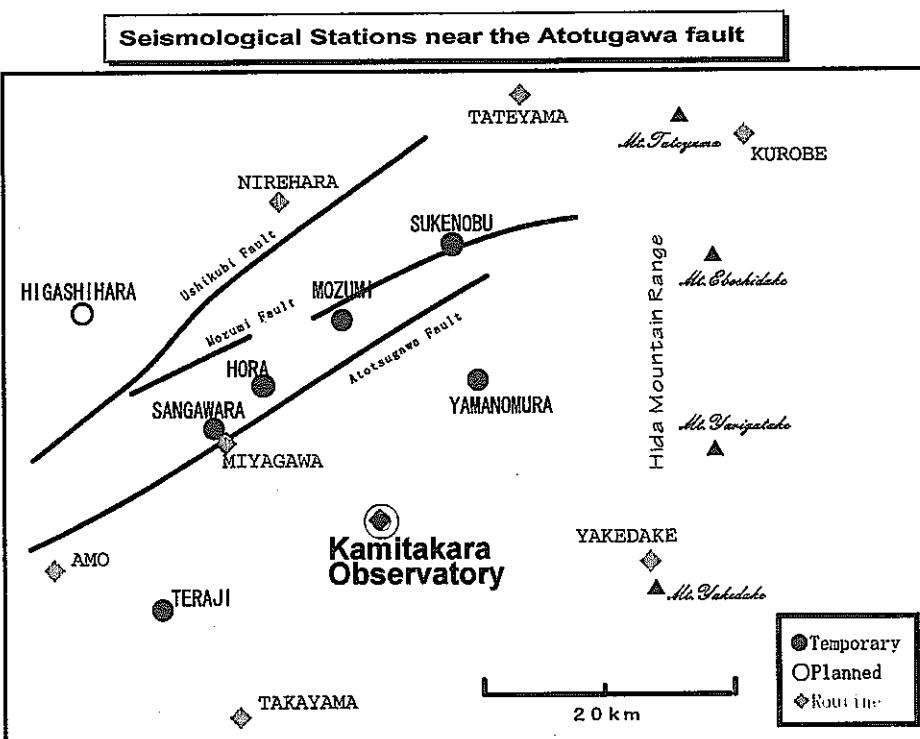


図4-5(下)



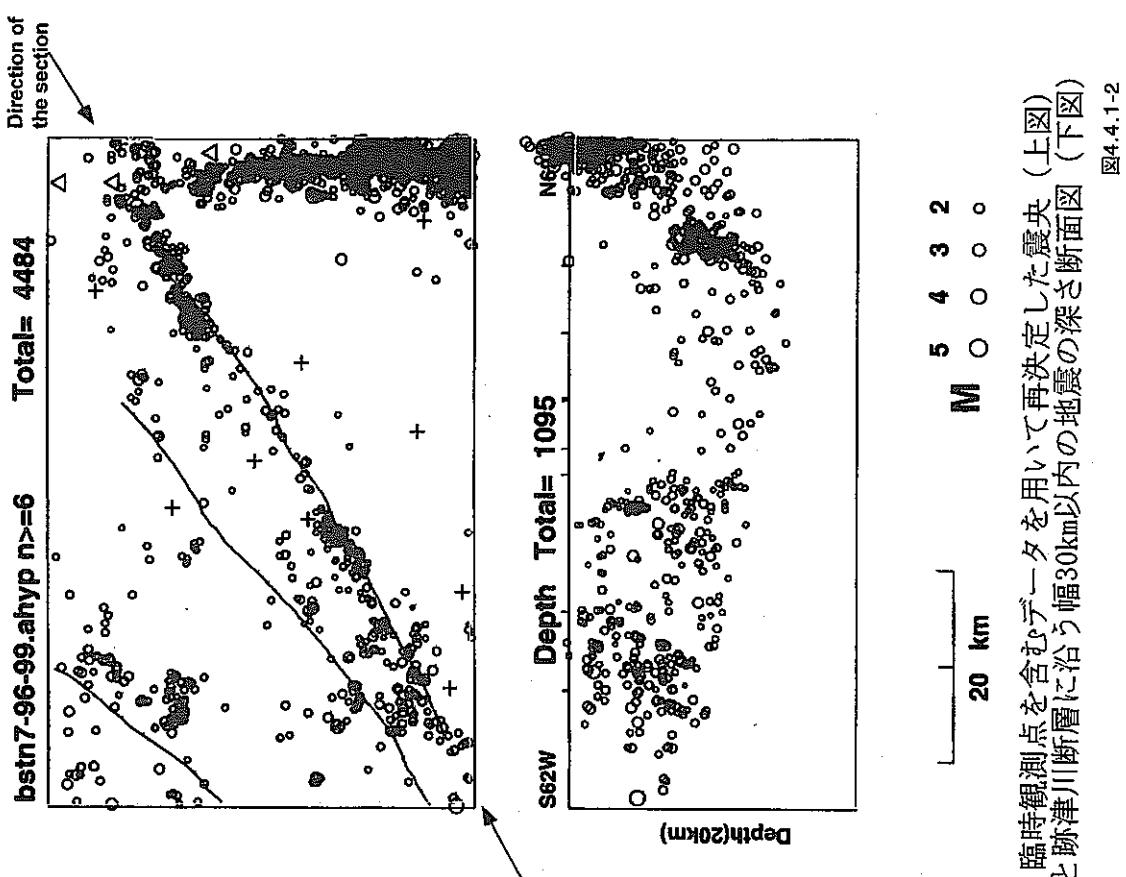
Active faults and instruments installed for the active fault program

図4-6



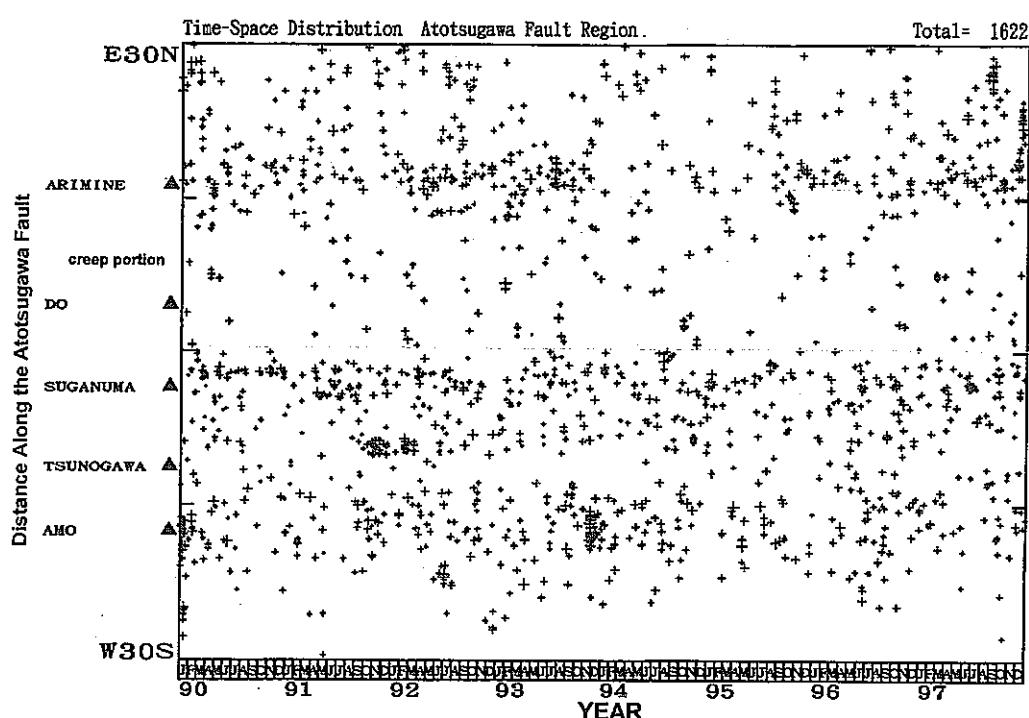
観測点分布図、既設観測点とともにデータは有線または衛星テレメータで上宝観測所に集めて処理されている。既設テレメータは京大、名古屋大、東大、地質調査所、防災科技研、気象庁などの観測点も利用している。

図4.4.1-1



臨時観測点を含むデータを用いて再決定した震央（上図）
と跡津川断層に沿う幅30km以内の地震の深さ断面図（下図）

図4.4.1-2

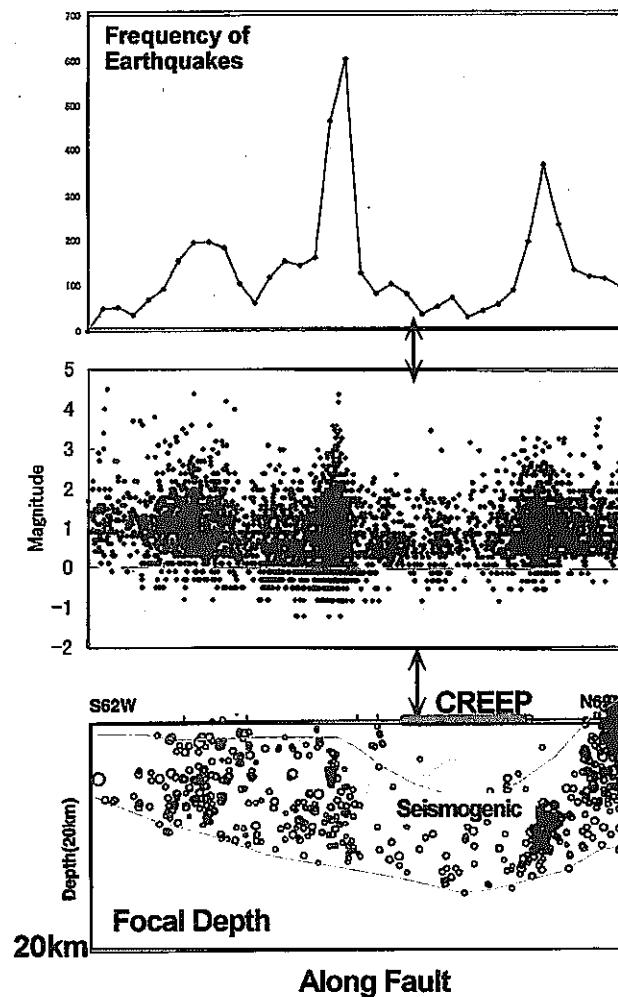
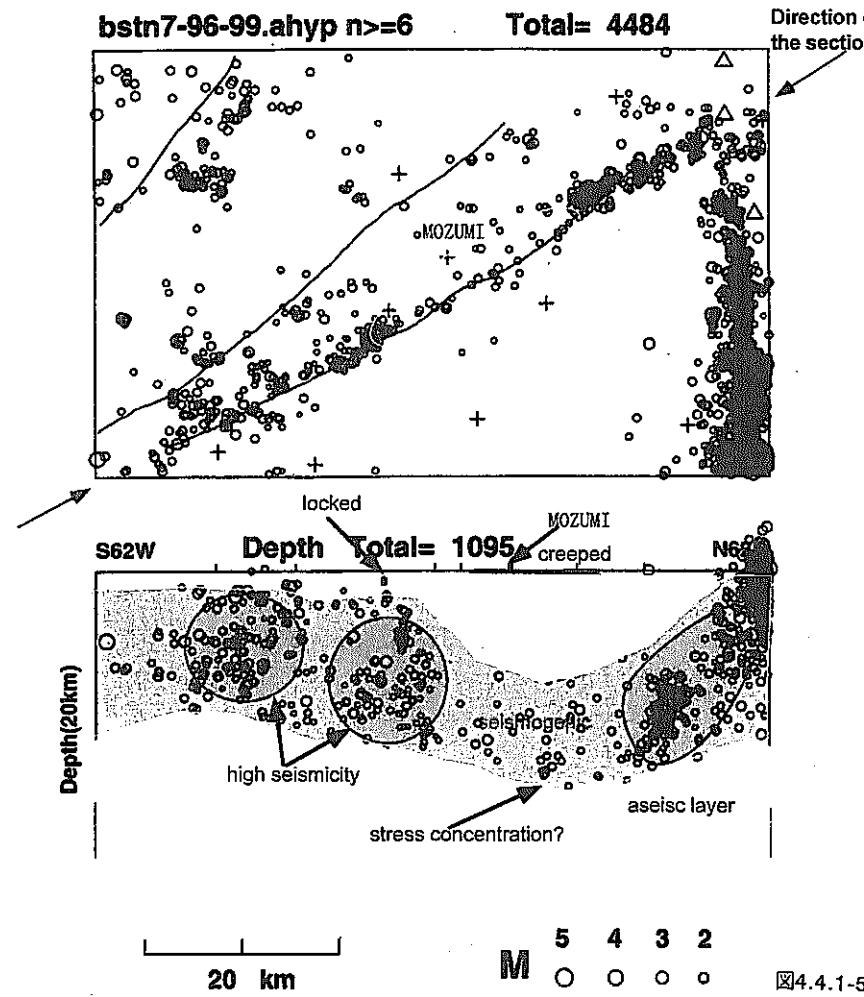


跡津川断層に沿う地震の時空間分布。クリープの部分では、地震が群発的に起こることなくランダムに起こっているように見える。この部分の地震のストレスドロップは他と比べて大きいようである。

図4.4.1-3

跡津川断層付近の地震分布

下図は断層に沿う方向の深さ断面を示す。クリープ地域では地震が
7-17kmの深さのみに発生している。



跡津川断層に沿う地震数（上図）、マグニチュード（中図）お
よび地震の深さ分布（下図）クリープの部分で地震数が少な
く、Mも小さく、地震は深さ7-17kmで発生するなど他の部分
と異なっている。

図4.4.1-4

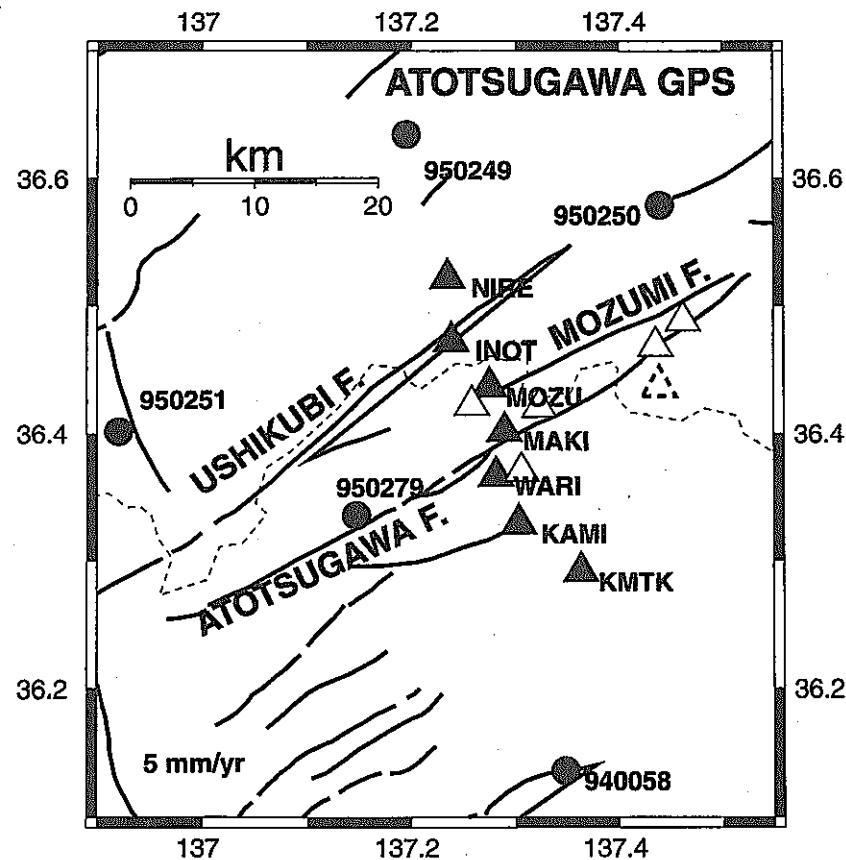


図4.4.2-2 跡津川断層稠密GPS観測網

黒三角印は本研究で設置した、跡津川断層を横切る跡津川断層稠密GPS観測網（2周波GPS観測点）、黒丸印は周辺の国土地理院GPS観測点を表す。地表クリープの観測されている地域や断層の他の領域を探るために、夏季のみの観測をしているが、白三角印は、それらの山頂及び有峰湖周辺での1周波GPS観測点、点線三角印は予定点を表す。

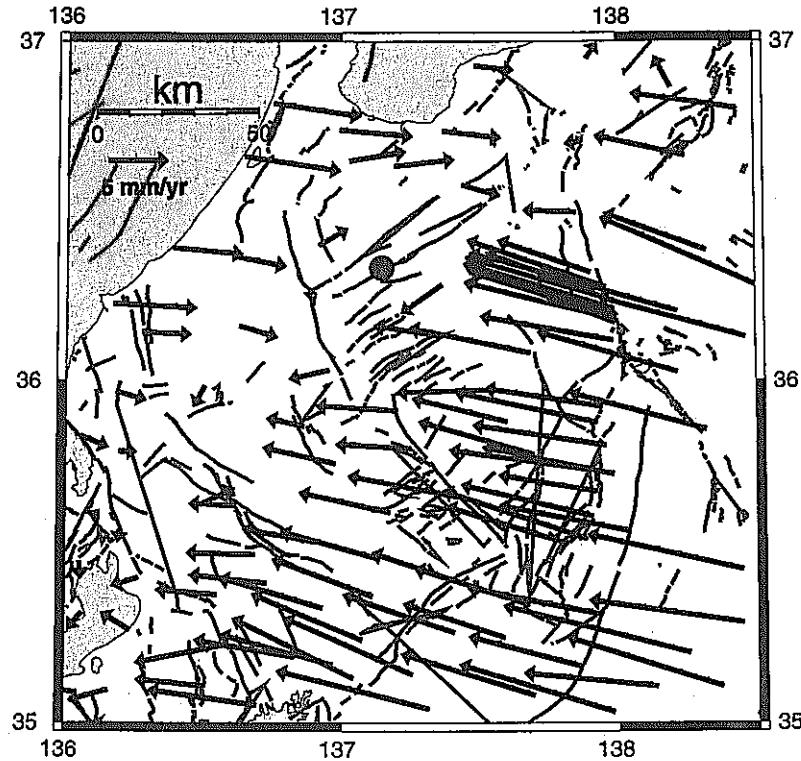


図4.4.2-1 国土地理院GPS観測網による変位速度分布(1996-1999)と中部日本における活断層

矢印は、跡津川断層上の観測点（赤丸印）に対する各観測点での変位速度分布、そして赤い線は活断層を示す。跡津川断層上の観測点で固定すると新潟から跡津川を通り、琵琶湖に抜けるゾーンにゼロ変位速度帯が引けることが分かる。なお、山間部のため、跡津川断層周辺には国土地理院GPS観測点が少ないことが分かる。

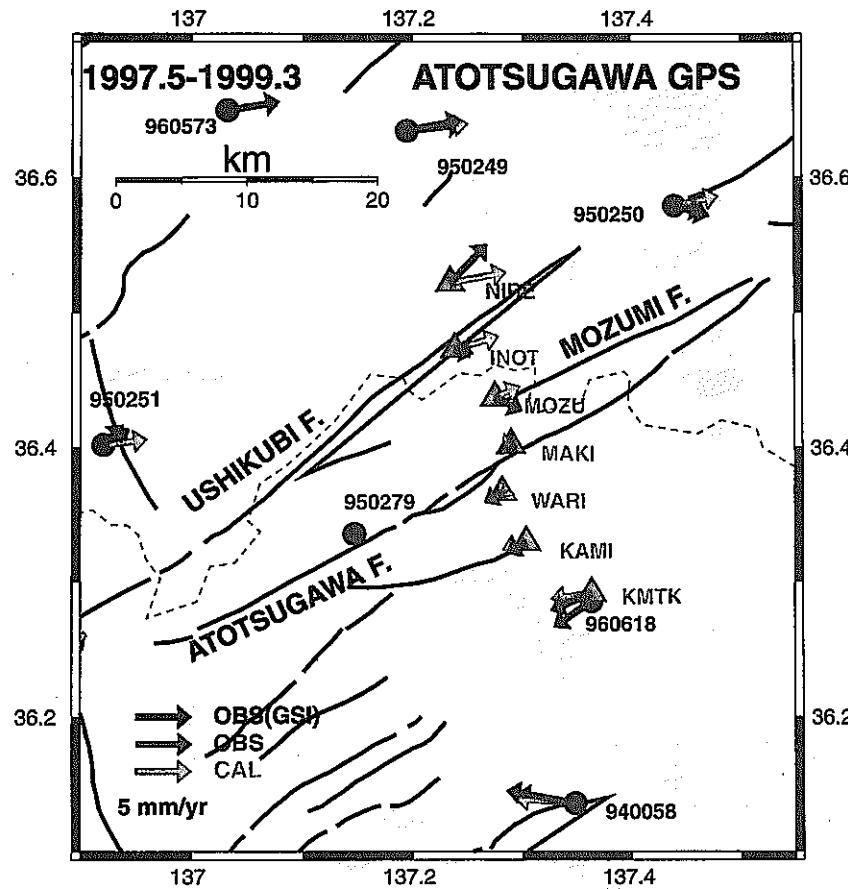


図4.4.2-4 観測された変位速度場とモデル値

矢印は、断層直上の観測点(9590279)に対する各観測点での相対変位速度ベクトルを表す。黒矢印は、国土地理院の解析、赤矢印は、本研究による解析結果、水色の矢印は、図5のモデルに基づくものである。断層から離れるに従って相対変位速度が大きくなり、東西方向に10mm/年に達しているが、跡津川断層と牛首断層に挟まれた領域では変位速度が小さい。しかしながら、跡津川断層は深さ15kmまで固着していて、東西のブロックが東西に20mm/年の速度で収束しているモデル(第1近似モデル)で、断層より外側の領域の観測は説明できる。

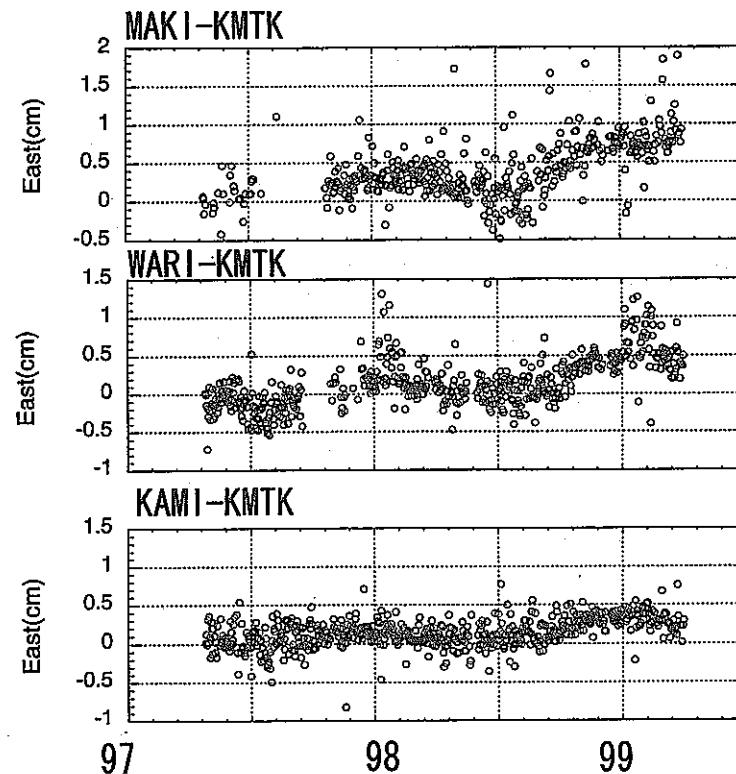


図4.4.2-3 GPS解析時系列例（東西成分）

上から順に、KMTKに対するMAKI、WARI、KAMI観測点の相対的東西変位の日々の解析結果の時系列を表す。年周成分はあるものの北に行くにつれてKMTKに対して東に変位速度が増大しているのが分かる。こういった時系列に年周成分とトレンド成分をフィットさせ、各成分毎の変位速度を推定している。

Cross-Fault Dense GPS Network

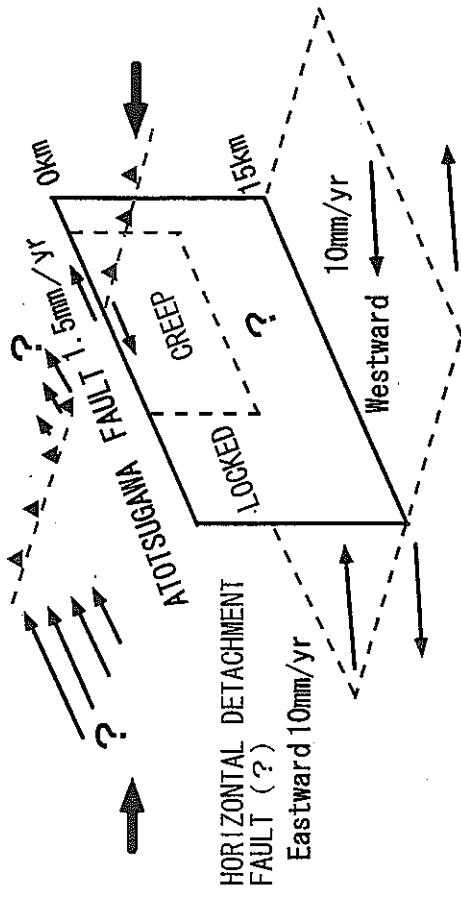


図4.4.2-5 跡津川断層固着モデル

GPS観測より得られた変位速度場(図4)を説明する簡単なモデルを示している。このモデルでは、跡津川断層は約15kmの深さ(微小地震活動の下限)まで固着しており、厚さ15kmの東西両弹性ブロックが跡津川断層を境に、約20mm/年の速度で東西に収束している。

断層上の観測点を固定してみると、断層から離れた観測点が東方に10mm/年、西側で収束し、断層に近づくに従い変位速度が小さくなりまた方向が断層に平行になる観測事実を、このモデルはよく説明している。

しかしながら、この図には書いていないが、跡津川断層と牛首断層に挟まれた領域の観測結果はこのモデルでは説明できない。今後、跡津川断層と牛首断層に挟まれたゾーンで固着しているモデルを考える必要がある。

また、現在のGPS観測からは、跡津川断層直上で国土地理院精密光波測量から得られている、約1.5mm/年の変位速度を持つクリープ運動については、まだはつきりしていない。今後の定常観測及び臨時観測の成果を待たざるを得ない。

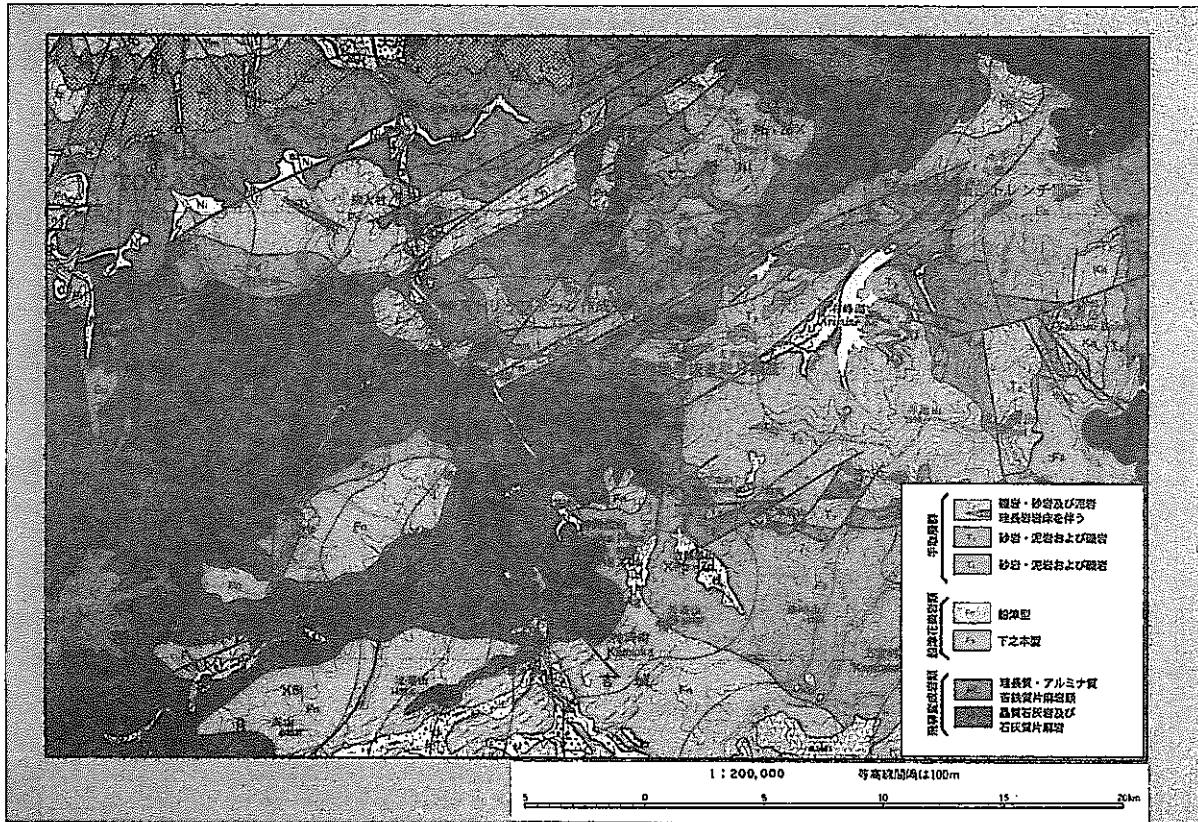


図4.4.3-1

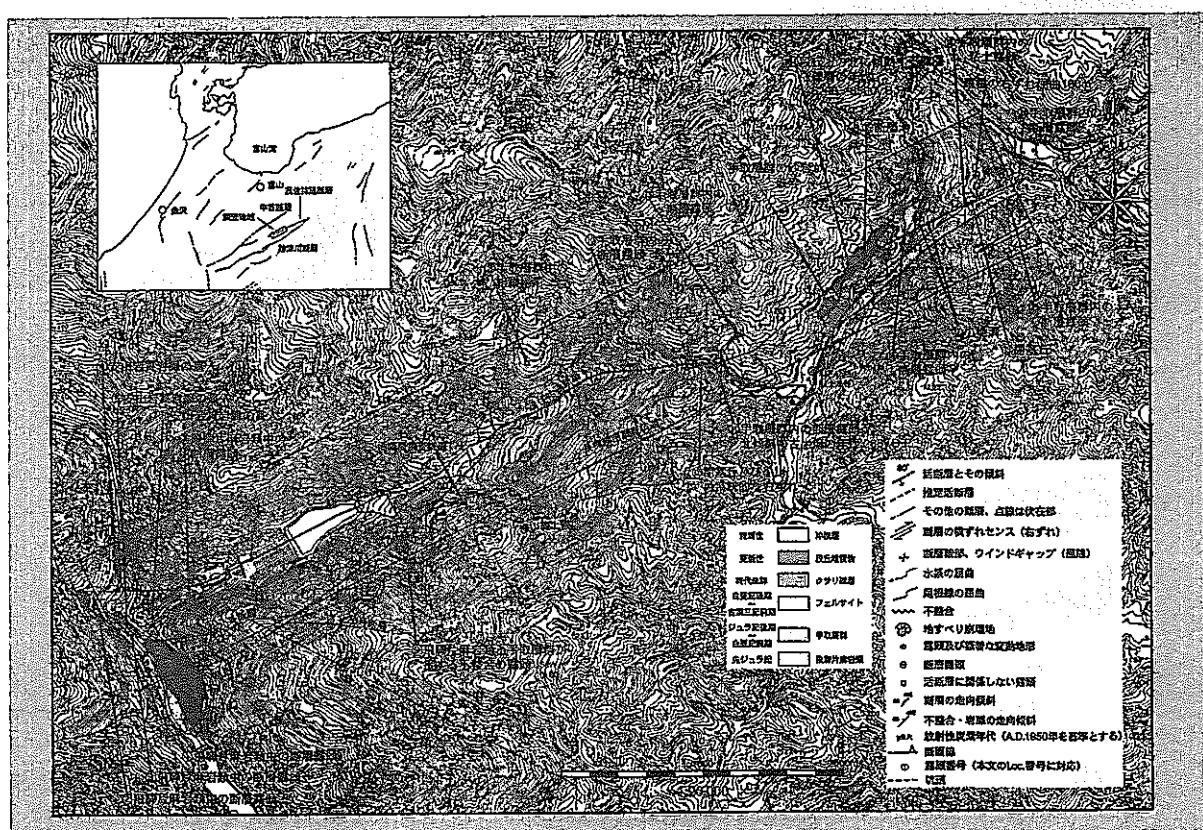
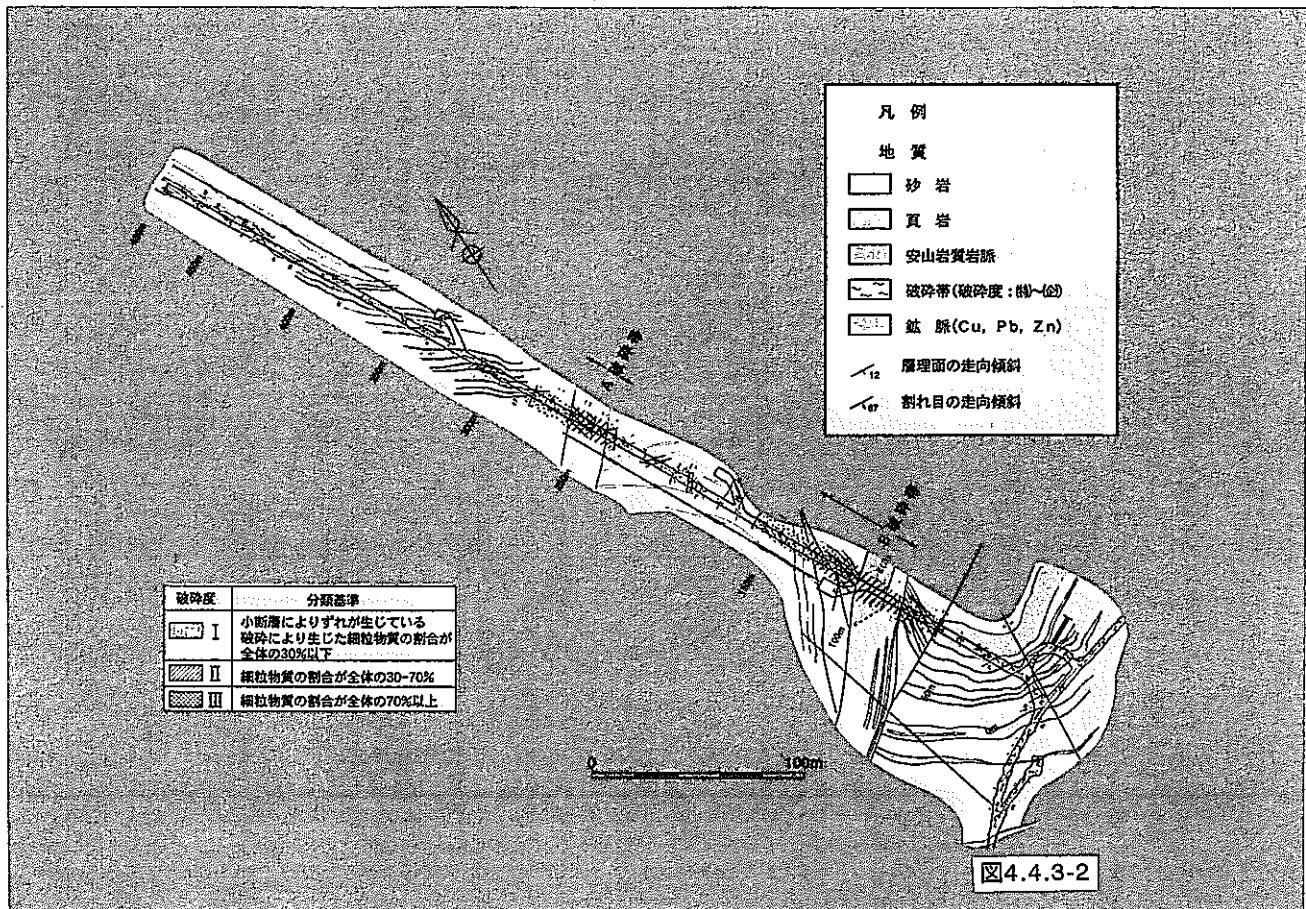
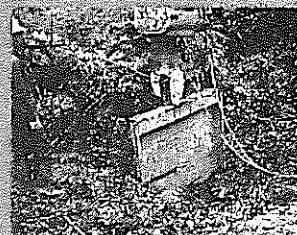
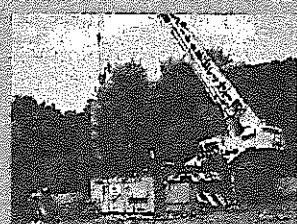
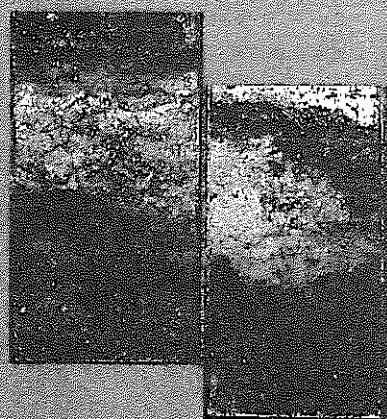


图4.4.3-3

茂住峠における 地層抜き取り調査

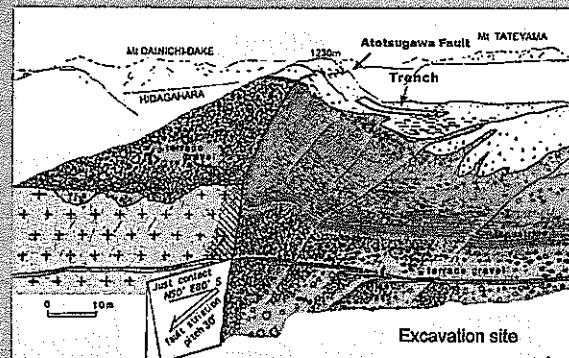


抜き取られたサンプル（B測線）

ジオスライサーによる
地層抜き取り作業

図4.4.3-4

真川露頭上部トレンチ調査



トレンチ掘削状況

トレンチ掘削地点周辺の模式断面

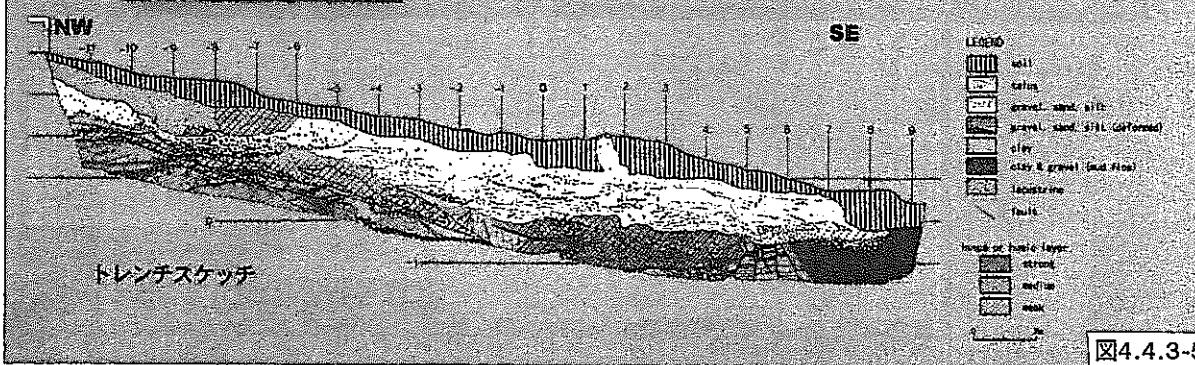


図4.4.3-5

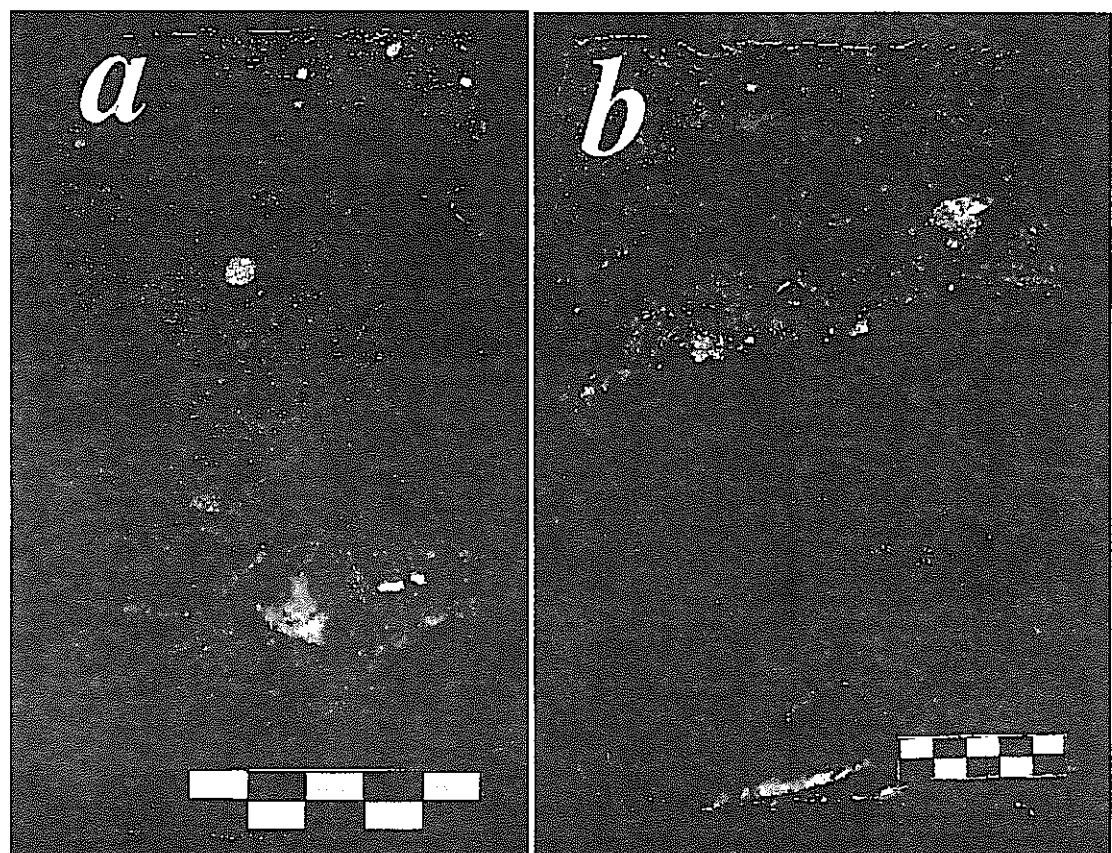
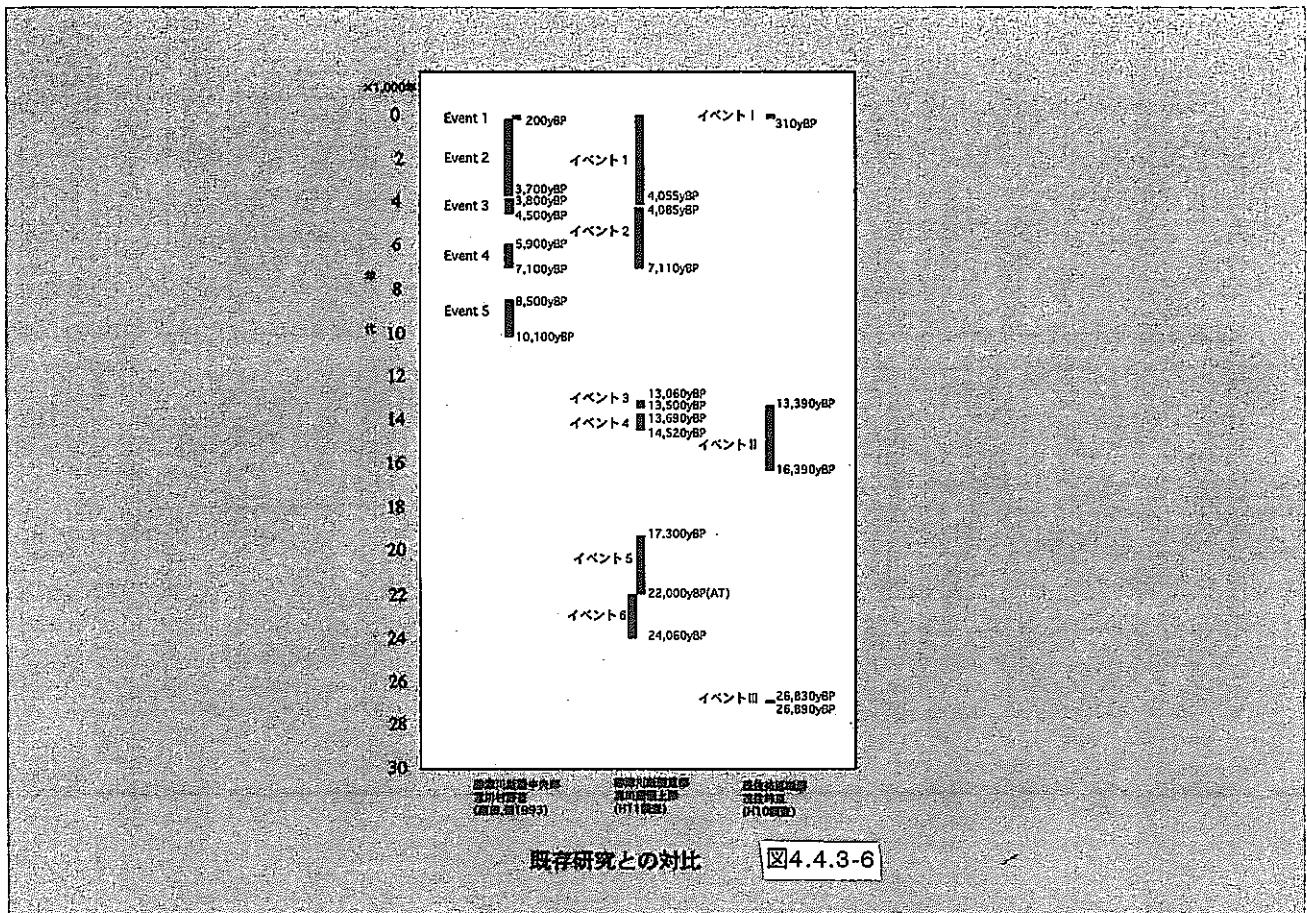
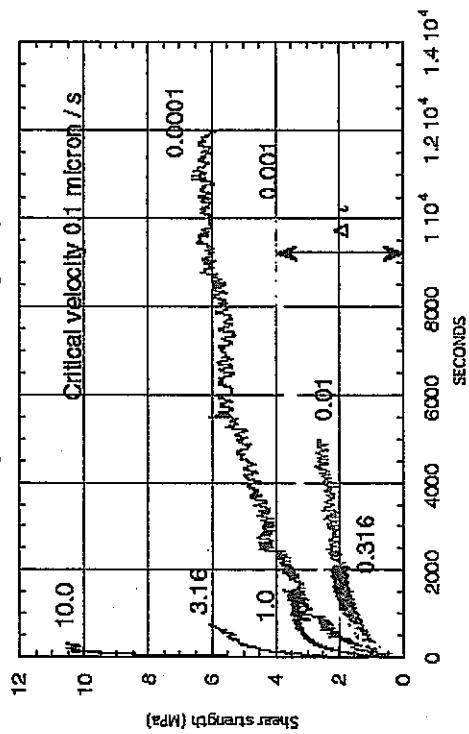


図4.4.4-1

Summary of oscillating Experiments



Non-linear viscous behavior of Montmorillonite

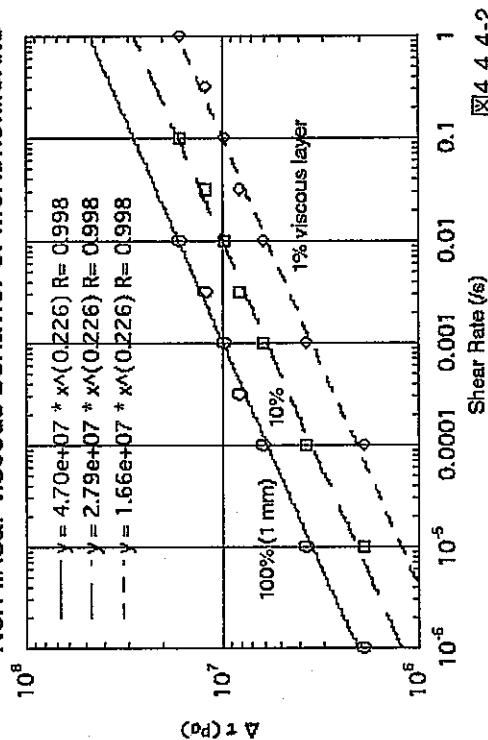
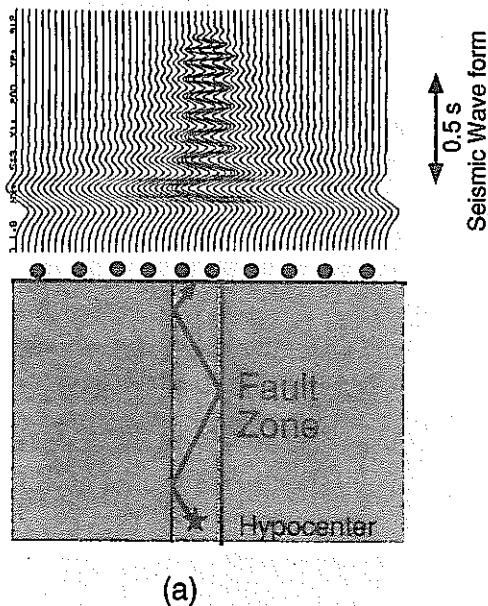
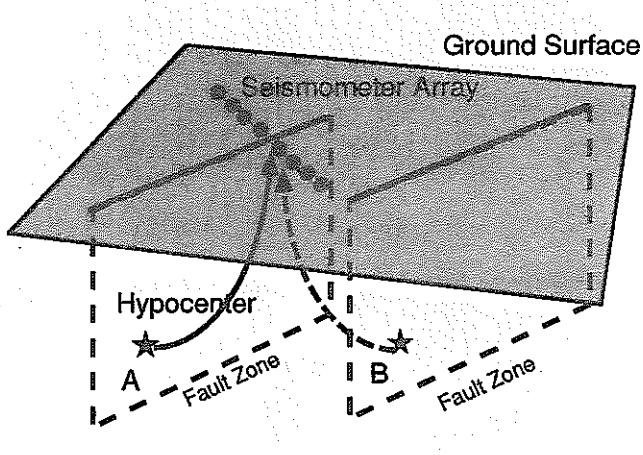


図4.4.2

Trapped Wave Excitation due to Fault Zone



(a)



(b)

図1 トラップ波の発生モデル(a)と断層セグメントの識別(b)。
(a)断層破碎帯では周囲より低速度、高減衰であるため、破碎帶中にトラップされた地震波のモードが存在する。

(b)断層破碎帯A上の観測点では、震源Aの場合は断層破碎帯を伝わるトラップ波が観測されるが、Bの場合は観測されない。

図4.4.5-1

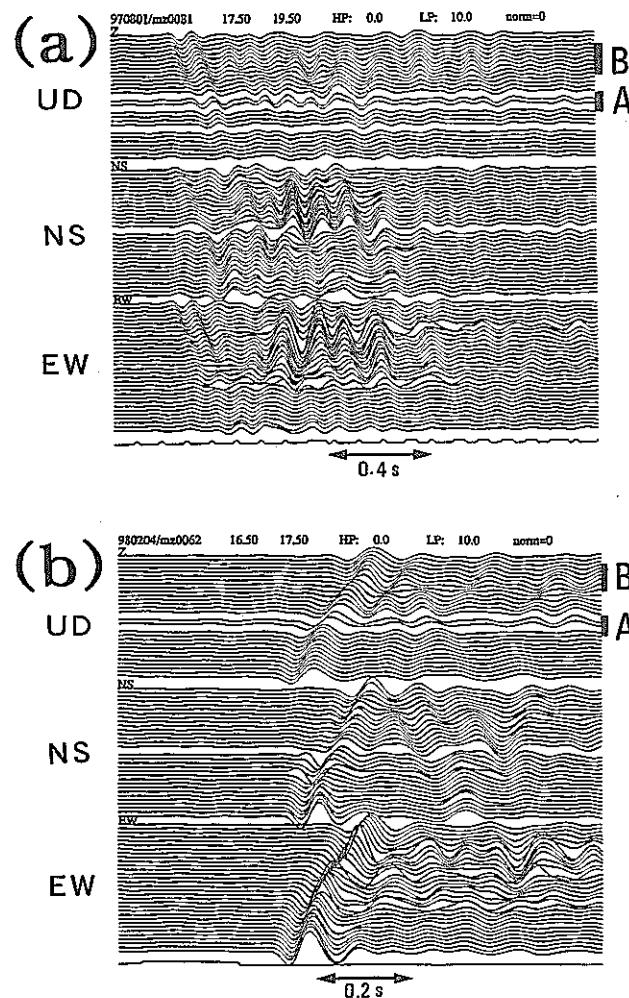


図3 S波部分の観測波形例。

- (a) 卓越周波数10Hz程度の特徴的波群が観測され、トラップ波と考えられる。震央位置は茂住・祐延断層近傍。
- (b) S波の見かけ速度はA, B破碎帯近傍で特に遅い。震央位置は茂住・祐延断層から約5kmの距離にある。

図4.4.5-3

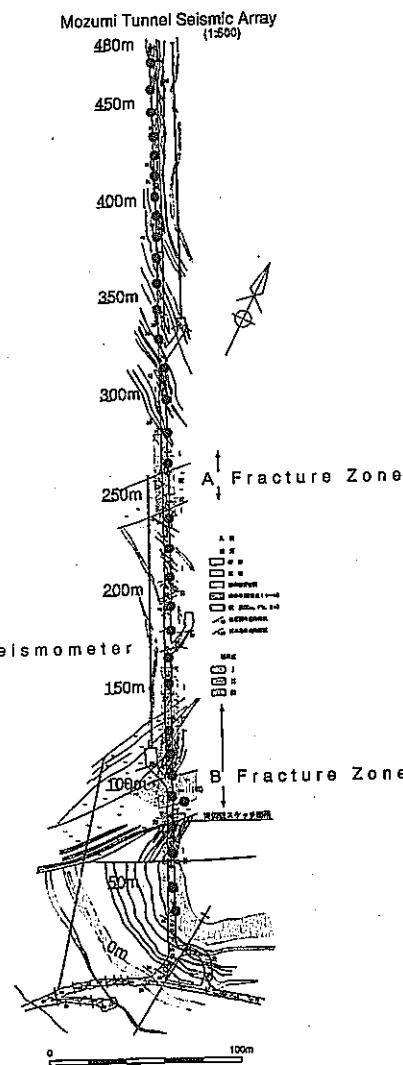


図2 茂住・祐延断層の調査坑道内における地震計アレイ配置。A, Bは破碎帯。

図4.4.5-2

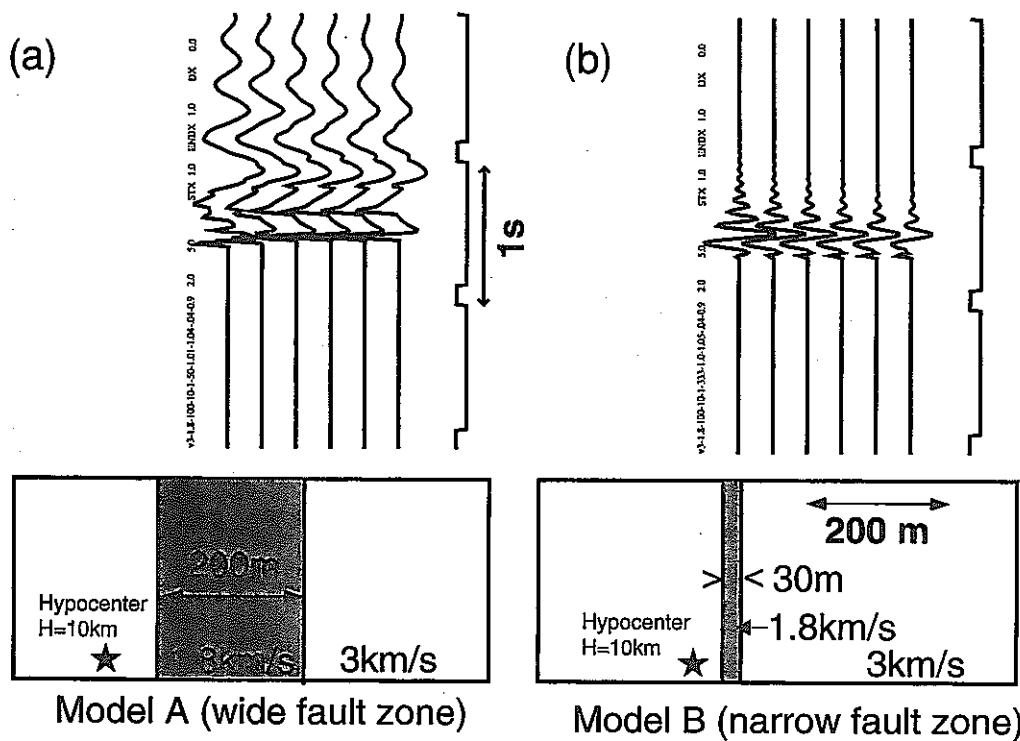


図4 トラップ波のモデル計算例.

(a) 幅200mの破碎帯の例. トラップ波の卓越周波数は約3Hz.

(b) 幅30mの破碎帯の例. トラップ波の卓越周波数は約10Hz.

図4.4.5-4

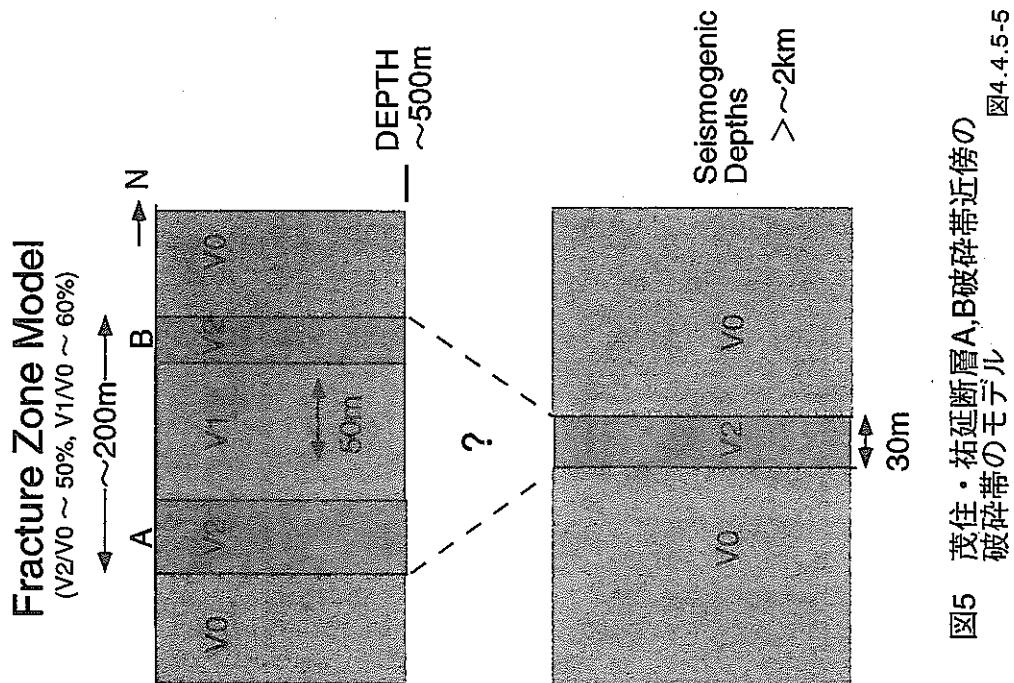


図5 茂住・祐延断層A,B破碎帯近傍の
破碎帯のモデル

図4.4.5-5

茂住坑内における比抵抗連続測定

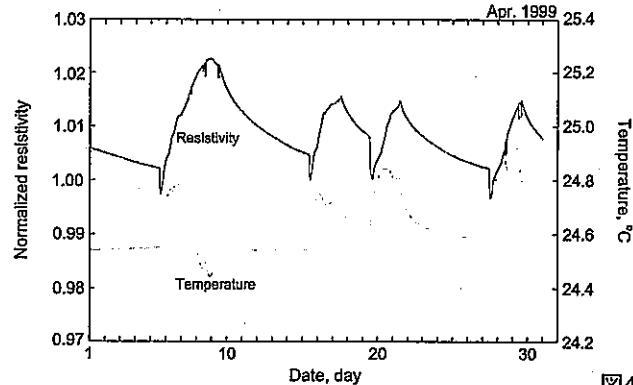


図4.4.6-3

茂住坑内の鉱柱における比抵抗と地温データ。比抵抗値は平均値で規格化されている。比抵抗変化から岩盤の応力変化をとりだす以前の問題として、鉱山の通気による岩盤または電極への擾乱に第一義的にセンシティブであることがわかった。このままの測定配置では意味のある岩盤応力(+水)の情報はほとんどえられないでの、あとで述べるような対策を講じる。

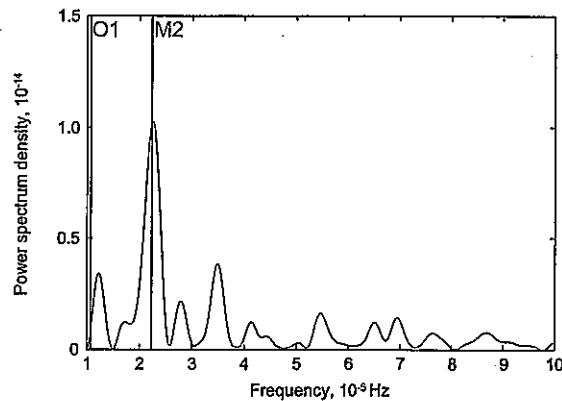


図4.4.6-4

比較的温度変化がすくない7日間の比抵抗データのスペクトル。O1およびM2分潮の周波数にピークが見られるので、坑内環境の擾乱が避けられるような配慮をおこない、システムの感度をあげて測定すれば、地球潮汐が検出可能なほどの分解能で比抵抗を測定できる可能性があることがわかった。1999年度末までに、2~3 mのボーリング孔を4本掘削して電極を地温の安定などころに移設し、さらに測線も温度の影響をうけないようにする。

山崎メーターを継承したあららしい 比抵抗測定器による実証観測 (油壺における比抵抗連続測定)

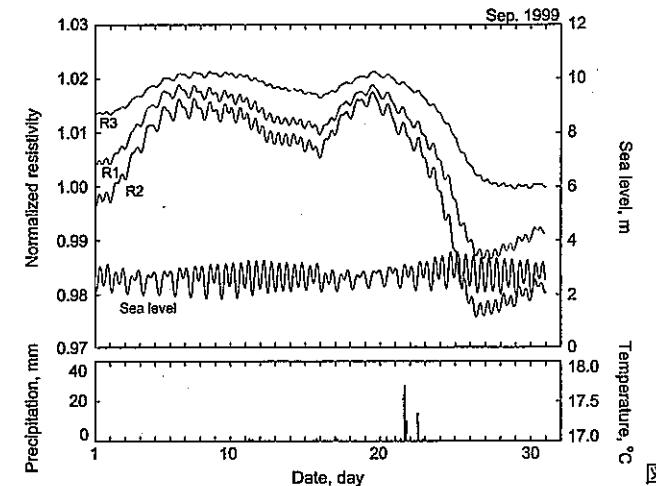


図4.4.6-1

1999年9月1日から28日における比抵抗変化（赤、青、緑）と海水面の水位（黒）、壺内地中温度（橙）。温度、気圧、降雨、地下水位等の複雑な環境変化に起因すると予想される長周期の変動も重畳するが、短周期の成分だけに注目するなら、3成分の比抵抗変化は海洋潮汐によく対応するので、比抵抗は岩盤の応力変化をとっていることがわかる。

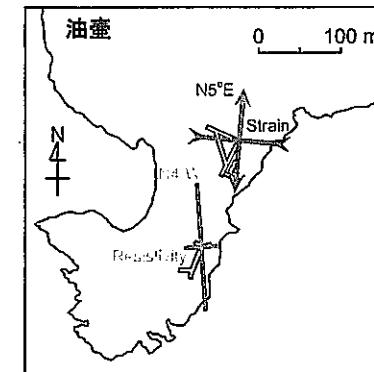
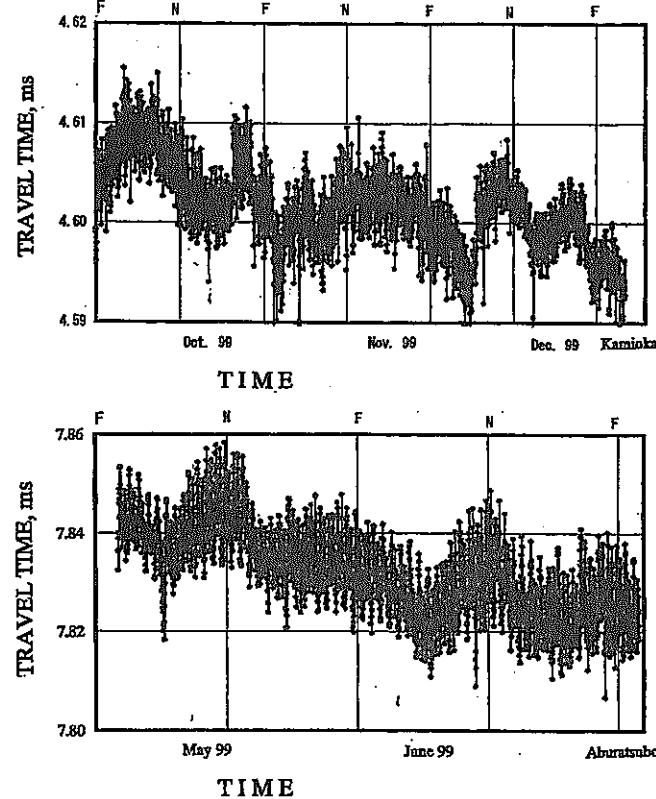


図4.4.6-2

水平面内3成分比抵抗測定と推定される地殻応力変化の方向。たがいに120°でまじわる3測線の方向の比抵抗を精度よく測定できれば、応力変化の方向が測定できる。そこで短周期の比抵抗変化から比抵抗梢円の主軸（青）の方向をきめた。同時に100 mほどはなれたところに設置されている伸縮計の3成分からもひずみ梢円の主軸（赤）方向をきめた。短周期の比抵抗変化が最大にあらわれた方位と、ひずみ梢円の最小圧縮軸の方位はよく一致している。

茂住と油壺で測定された ΔV_p 

茂住坑内の鉱柱に対しておこなった ΔV_p の測定結果。P波速度は、数日程度の変化を繰り返しながら徐々に速くなっていることがわかる。このような変動が生じる原因はわかっていないが、比抵抗の場合とは異なり、通気による岩盤の擾乱ではなさそうである。岩盤のP波速度が速くなることは、応力が上昇していることを意味する。測定の信頼性をあげるために2000年度に鉱柱とは異なる場所で ΔV_p の測定をスタートさせる計画である。下の図は参考のためにのせた油壺での観測結果で、ここでもP波速度が徐々にはやくなっていることがわかる。

図4.4.6-7

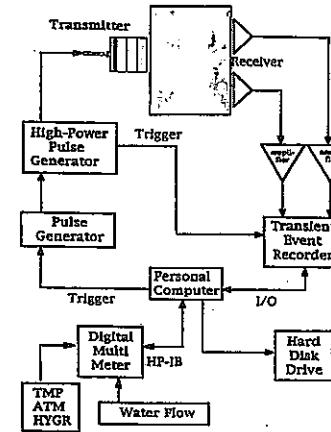
茂住断層近傍の岩盤での超精密 ΔV_p 測定

図4.4.6-5

現位置岩盤の超精密P波速度変化の測定システム。ピエゾ素子を積層に重ねたものを発振子として使用し、岩盤に装着してP波を送波する。ピエゾ素子には1000Vのパルスが付加される。岩盤を伝播してきたP波はピエゾ型の加速度計で検出する。現位置では、実際の信号のレベルは弱く通常は雑音に埋もれているが、数千回のスタッキングによって波形を回復できる。パルスの発生と記録システムは精密クロック（温度変化 $<1 \times 10^{-8}/^{\circ}\text{C}$ 、エージングレート $<1 \times 10^{-7}/\text{month}$ ）で完全に同期されている。

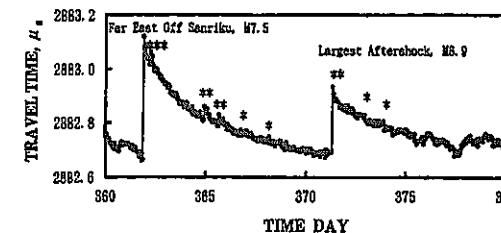
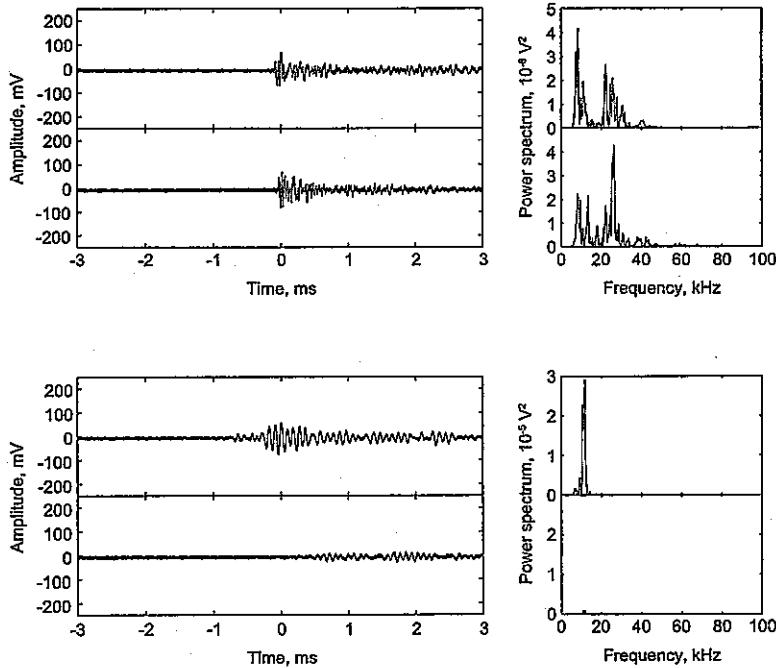


図4.4.6-6

釜石鉱山での ΔV_p の測定例。1994年12月28日の三陸はるか沖地震の本震と余震に伴うコサインスミックな ΔV_p とその変化がとらえられている。コサインスミックなステップのあと、拡散型の減衰を示している点に注目していただきたい。

茂住断層の断層面で測定されたAE波形の例



断層面でつくりだされたと思われるAE波形。震源決定をおこなうための準備段階として2チャンネルのAE測定をおこなった。AE測定は特に電気的雑音の影響をうけやすく、キャッチした波が電気的なパルス雑音であることが多いが、2チャンネルの監視をおこなえば容易にAEかどうかがたしかめられる（電気的なノイズのときには、2チャンネルとともにきわめて類似した波形が観測される）。このような測定の結果、1日あたりにすればわずか数個であるがAEを検出できた。初動やその押し引きがよめる品質の波がキャッチされているので、2000年度には多チャンネルのハイドロフォン・アレーを置いて、AEの震源決定をおこなう計画である。

図4.4.6-10

茂住断層の断層面でのAE計測

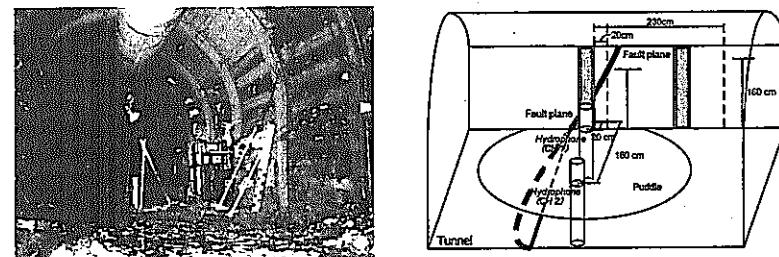


図4.4.6-8

静穏といえどもゆっくりと進行すると考えられる断層の成長プロセスの観察にはマイクログリッキングによって発生するAEのモニタリングが有用である。しかし断層ゾーンでは、岩盤はガサガサにこわされており、Q値も低いため超音波の減衰がはげしく、従来のようにAEセンサーや加速度計を直接岩盤に取り付ける方法でAEを検出することはできなかつた。

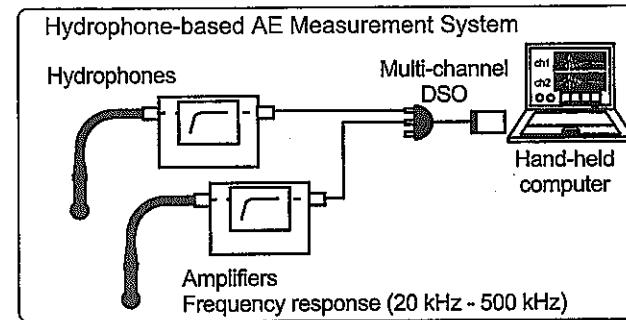
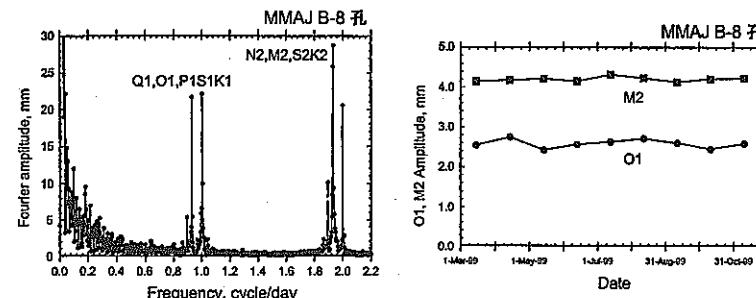


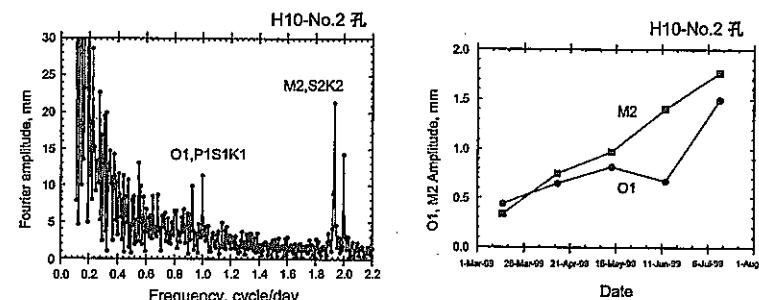
図4.4.6-9

水中なげこみ型のハイドロフォンをトランスデューサーとしてつかい、断層から発生するAEをつかまえる方法はMogiによってはじめて試みられた。われわれ坑内計測グループは、共振周波数の高いハイドロフォンを採用し、断層ゾーンにできた水溜まりになげこんでAEを測定した。

坑内ボアホール孔内の間隙水圧測定の時系列解析



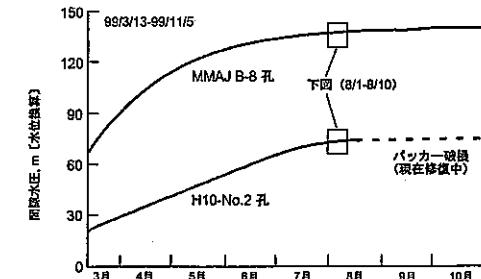
ひじょうにきれいなデータがえられたので時系列解析をおこない、各ボアホール孔の地球潮汐に対する応答の感度をフーリエ振幅で読んだ。その結果、MMAJ B-8 孔の間隙水圧は、その絶対値のいかんにかわらず、完全に弾性的な応答をしめすことがあきらかになつた。



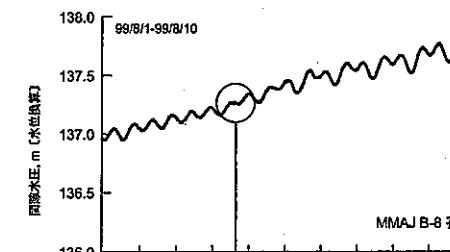
いっぽう、H10-No.2 孔に対する地球潮汐の応答をみれば、間隙水圧が上昇してゆくのに応じて次第に感度が増してゆくことがわかる。すなわち、MMAJ B-8 孔と H10-No.2 孔はまったく対照的な応答をしているのである。このような応答の違いを導き出す要因は、究極的には岩石のスケルトン（マトリックスがつくる骨格）の物性にもとめざるをえないが、定性的にいうなら、MMAJ B-8 孔のまわりの岩盤のクラックは完全に閉塞しており、それに対して H10-No.2 孔のまわりの岩盤のクラックはまだ閉塞しておらず、ひじょうにコンプライアントなのである。

図4.4.6-12

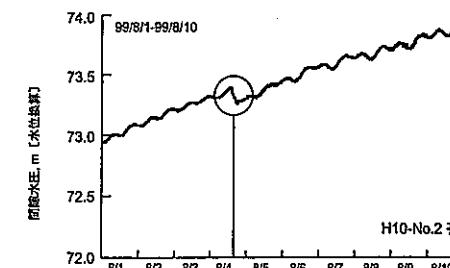
坑内ボアホール孔における間隙水圧測定 [データはすべてサイクル機構の厚意による]



地下の坑道内に調査ボーリング孔を掘削してみると、しばしば多量の湧水がみられる。サイクル機構は、このような孔を二つ選び、ボーリング孔内での間隙水圧の変化を観測した。われわれの観点からすると、これは被圧帶水層中に井戸を地底から掘削したとみなせる。このデータは、被圧帶水層の井戸が約 6 ヶ月かかって完成していく様子をしめしている。

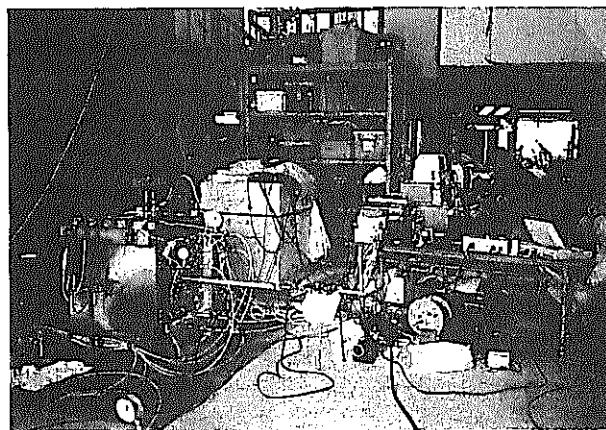


おどろくべきことに、ボーリング孔をパッカーで遮蔽した直後から、間隙水圧に細かな脈動がみられ、その周期を調べてみると、これが地球潮汐であることがわかった。さらに 8 月 4 日には、地震によると思われるステップ状の変化が見られた。MMAJ B-8 孔は、断層ゾーンからはなれたかたい岩盤に掘削された長さが約 650 m のボーリング孔である。



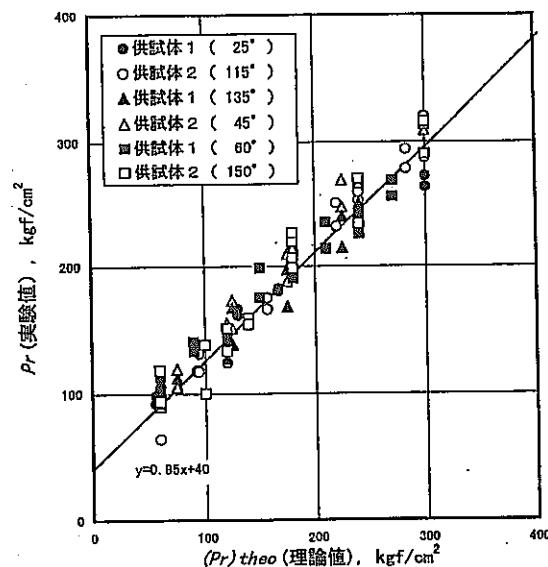
断層ゾーンの近傍ではほぼ水平方向に掘削された長さが約 15 m の H10-No.2 孔でも、地球潮汐とステップ状の変化が観測された。H10-No.2 孔と MMAJ B-8 孔では、ステップのセンスが逆になっていることに注意されたい。

図4.4.6-11



$$(P_r)_{theo} = (3Q - P) + (P - Q) \sin^2(\theta' - \alpha)$$

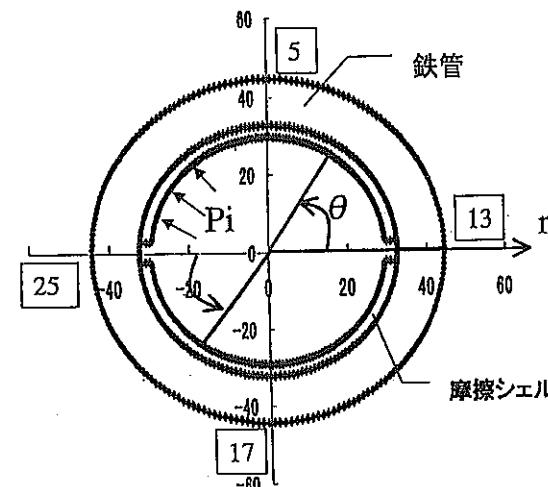
P : 最大主応力
 Q : 最小主応力
 θ' : 亀裂の方向 (x軸から反時計回り)
 α : P の方向 (x軸から反時計まわり)



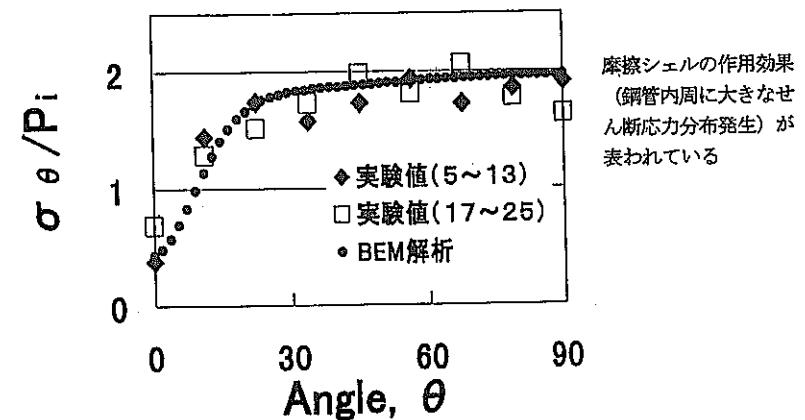
室内実験の外観：左側に載荷フレーム、供試体、プローブなどが見える
 室内実験の結果：縦軸は載荷一孔径変化曲線から検出された人工亀裂に垂直な
 応力成分 P_r 。
 横軸は摩擦シェルの作用効果を無視して弾性論から求めた P_i 。
 () 内の角度は人工亀裂の方向 θ' 。

図4.4.6-14

S-800鉄管試験モデル図



S-800鉄管試験の実験値とBEM解の比較



摩擦シェルの作用効果
 (鋼管内周に大きなせん断応力分布発生) が
 表われている

鉄管試験モデル図

鉄管外周境界：第1象限に5～13のひずみゲージが、
 第3象限に17～25のひずみゲージが貼られている
 各境界：菱形の横幅の大きさに要素分割されており、要素の位置
 は θ で表わされる。

実験値とBEM解の比較
 鉄管外周の応力：実験値は計測されたひずみに鋼のヤング率をかけたもの

図4.4.6-13

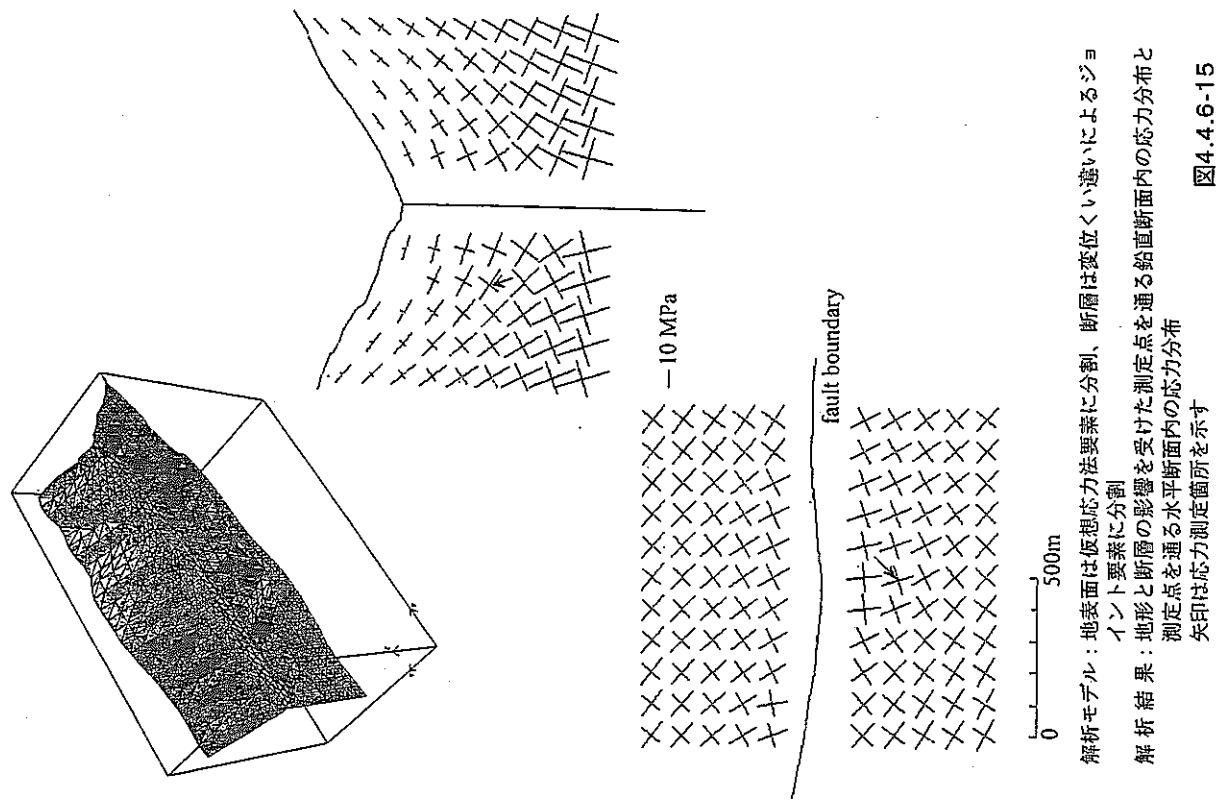


図4.4.6-15

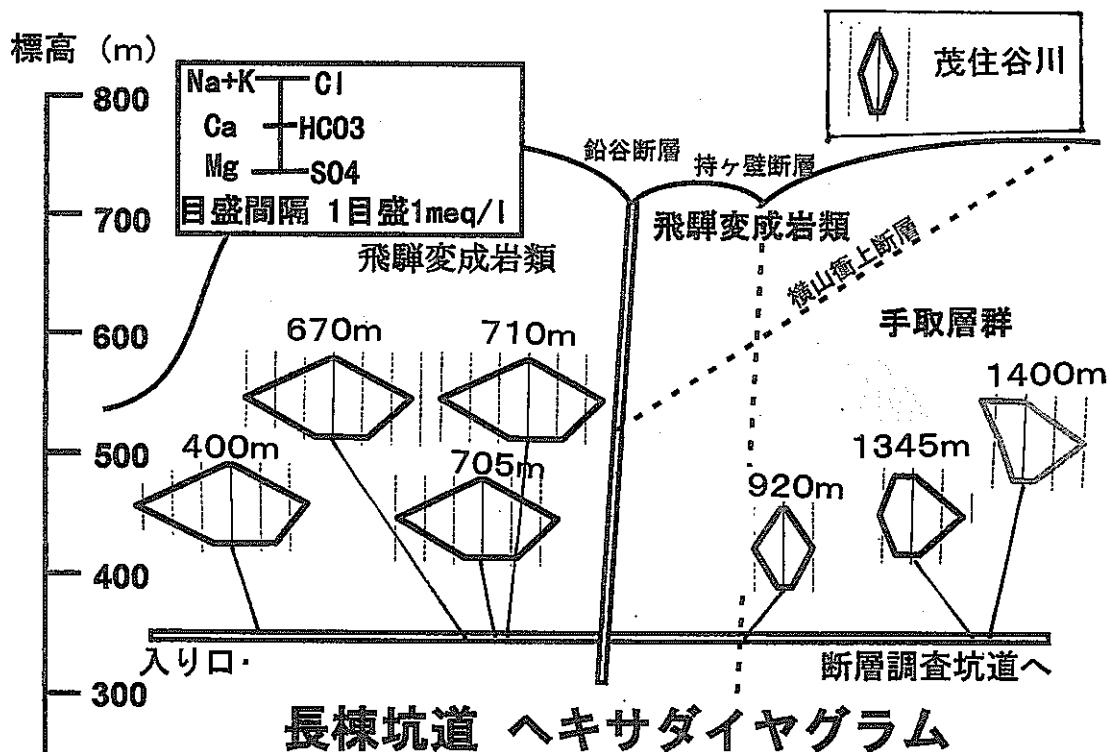
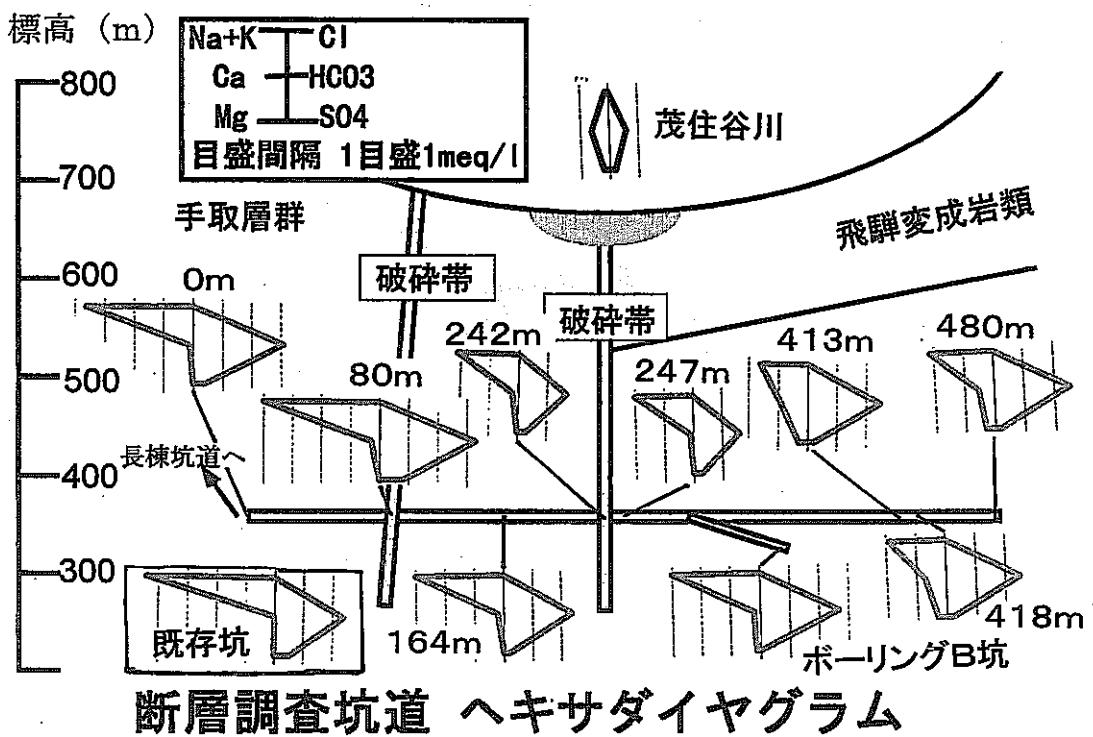


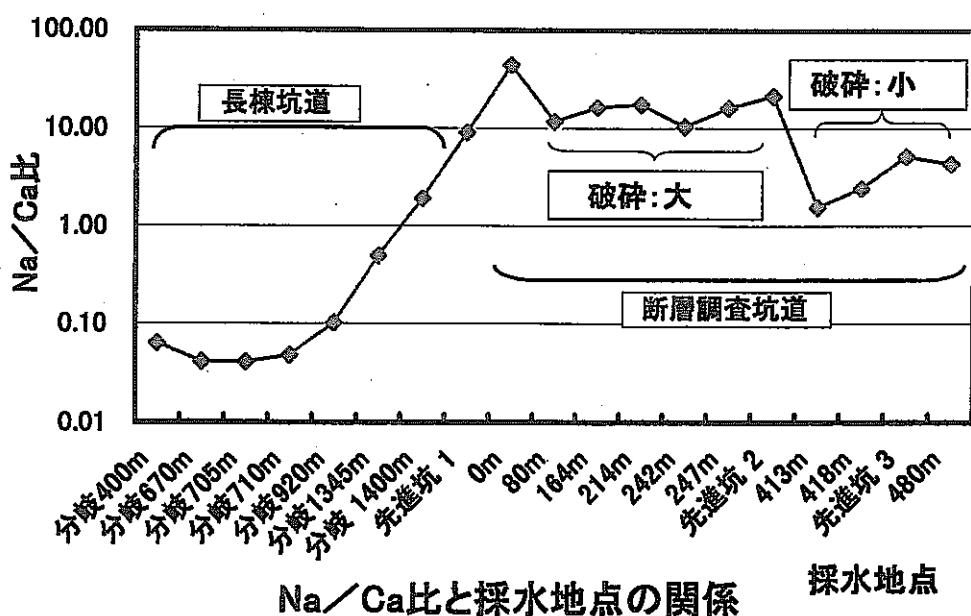
図4.4.7-1

長棟坑道の地下水の化学組成は、坑道の入口から 710 m 地点までは、カルシウム一炭酸水素型で成分濃度もほぼ同じであるが、手取層群に入った 920 m 地点では、化学成分はカルシウム一炭酸水素型であるものの、その濃度が 1/3 程度に減少している。さらに、断層破碎帯に近づくにつれてナトリウム濃度が上昇し、1400 m 地点ではナトリウム濃度がカルシウム濃度よりも高くなっている、ナトリウム一炭酸水素型の水に変化している。



調査坑道の地下水はすべてナトリウム一炭酸水素型の水であるが、その濃度が0mから80m地点では最も高く、茂住谷川直下の破碎帯ではその濃度が1/2に減少している。さらに奥に向かうに連れて、カルシウム濃度が少しずつ増加している。

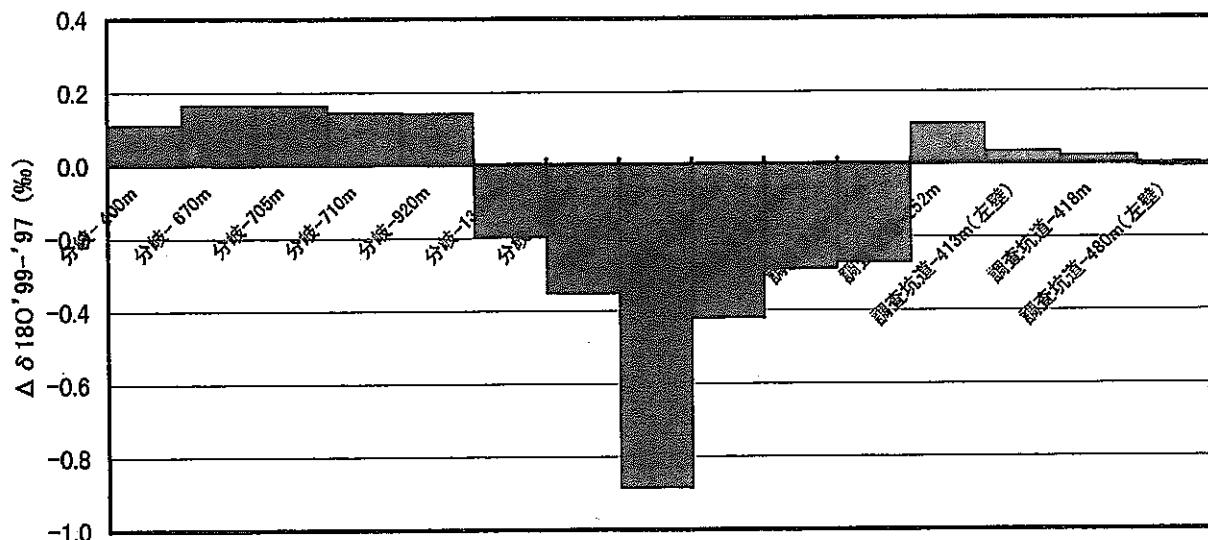
図4.4.7-2



地下水のナトリウム／カルシウム比は入口から長棟坑道の920m地点までは0.1以下であったが、その後、断層に近づくにつれて上昇し、破碎帯の内部ではその比が1.0以上と極大となった。しかし、破碎帯を過ぎるにつれてその比は減少し、調査坑道の再奥部では6～7程度に減少している。このようにナトリウム／カルシウム比は断層破碎帯で最大値となり、ナトリウム／カルシウム比は断層運動の良い指標と考えられる。

図4.4.7-3

1997～1999の地下水の酸素同位体比の変化 (‰)



地下水の酸素同位体比は、1997年から1999年の2年間に、分岐400m地点から同920m地点まで、および、調査坑道の破碎帯を過ぎた調査坑道252mから最奥部までは、変化していないか、せいぜい0.1‰程度の増加であった。しかし、分岐1345m地点から調査坑道214m地点までの、断層破碎帶内およびその近傍の地下水では、同位体比はこの2年間に0.2～0.9‰ほど減少した。このことは断層破碎帶内の水は、破碎帶外の水とはその挙動が異なることを示している。一方、破碎帶内の水の水素同位体比はあまり変化していない。ことは、1997年当時の水は岩石と相互作用をして、岩石の高い酸素同位体比を取り込んだ水であり、時間の経過とともにそのような水が押し流されて、1999年には、そのような岩石水反応を起こしていない水に変化しつつあることを示している。

図4.4.7-4

陸域地下構造フロンティア研究の体制図（平成12年度）

地震発生に関する研究 [アクロス研究チーム] 12名 チーフリーダー 熊澤 峰夫 (名古屋大学名誉教授)	震源制御法・地震計開発	國友 孝洋	常勤客員研究員	
	アクロス受信システム理論解析	山岡 耕春	名古屋大学	助教授
	高周波弹性波アクロス理論解析	佐野 修	山口大学	教授
	新方式震源装置設計研究	平井 誠	大阪大学	助手
	電磁波アクロスシステム開発	中島 崇裕	常勤客員研究員	
	電磁アクロス解析研究	本藏 義守	東京工業大学	教授
	データ解析理論・プログラム開発	横山 由紀子	常勤客員研究員	
	データ解析法研究	小川 克郎	名古屋大学	教授
	震源制御法・地震計開発	鶴我 佳代子	常勤客員研究員	
	地下構造探査研究	長谷川 昭	東北大大学	教授
	地下不均質構造研究	佐藤 春夫	東北大大学	教授

地震と地下水挙動に関する 深地層総合研究 [地震地下水研究チーム] 11名 チーフリーダー 脇田 宏 (東京大学名誉教授)	岩盤挙動理論研究	石井 紘	東京大学地震研究所	教授
	地震-岩盤挙動観測・解析	Vladimir Churikov	国際特別研究員	
	岩盤挙動観測装置開発	山内 常生	名古屋大学	助教授
	地下水挙動観測・解析	北川 有一	常勤客員研究員	
	地震-地下ガス・水圧観測・解析	川邊 岩夫	名古屋大学	教授
	ラドンガス変動解析	佐々木 嘉三	岐阜大学	教授
	ラドンガス挙動解析	田阪 茂樹	岐阜大学	助教授
	地震-地下ガス研究	野津 慶治	東京大学	教授
	地震-地下ガス・水圧観測・解析	吾妻 瞬一	常勤客員研究員	
	地下水挙動解析	五十嵐 丈二	東京大学	助教授

活断層帯での地殻活動研究 [活断層チーム] 13名 チーフリーダー 安藤 雅孝 (名古屋大学) 地震火山観測研究センター教授	構造地質解析	伊藤 谷生	千葉大学	教授
	岩盤初期応力測定	水田 義明	山口大学	教授
	G P S 地殻変動解析	平原 和朗	名古屋大学	教授
	地下水地球化学分析	佐竹 洋	富山大学	教授
	構造地質解析	竹内 章	富山大学	教授
	ガイドウェーブ・地震観測	西上 欽也	京都大学防災研究所	助教授
	地震観測・地震理論解析	伊藤 潔	京都大学防災研究所	助教授
	地下水水流動解析	渡辺 邦夫	埼玉大学	教授
	ガイドウェーブ・地震観測	伊藤 久男	地質調査所	課長
	構造地質解析	楠瀬 勤一郎	地質調査所	課長
	岩盤挙動解析	柳谷 俊	京都大学防災研究所	教授
	断層地質構造解析	田中 秀実	愛媛大学	助手

表5-1

陸域地下構造フロンティア研究 チーム研究員構成推移

研究員の構成		H8年	H9年	H10年	H11年	H12年
アクロスチーム	非常勤客員研究員	3	5	8	8	8
	常勤客員研究員	1	2	3	4	4
	国際特別研究員	0	0	0	0	0
地震・地下水チーム	非常勤客員研究員	6	6	7	8	8
	常勤客員研究員	0	1	1	2	2
	国際特別研究員	1	1	1	1	1
活断層チーム	非常勤客員研究員	11	12	13	13	13
	常勤客員研究員	0	0	0	0	0
	国際特別研究員	1	1	1	1	0
		23	28	34	37	36

表5-2

陸域地下構造フロンティア研究予算の推移（千円）

H7年 補正予算	H8年予算	H9年予算	H10年予算	H11年予算	H12年予算
840,000	200,000	200,000	194,000	195,000	185,000

表6-1

陸域地下構造フロンティア研究 主要観測内容

主要観測内容		H8年	H9年	H10年	H11年	H12年
アクロスチーム	音波アクロス送信装置	1	1	1	1	1
	可搬型アクロス送信装置				1	1
	電磁アクロス送信装置				1	1
	地震観測点（固定点）			9	9	10
地震・地下水 チーム	地殻変動観測孔	2	3	3	3	4
	地下水観測孔	5	6	6	7	7
	QMS観測点	1	2	2	2	3
	ラドン観測点	9	10	10	10	10
活断層チーム	GPS観測点	7	11	15	15	15
	微小地震観測点	3	5	6	6	7
	ガイドウェーブ観測アレー	2	2	2	2	2
	坑内観測		1	3	6	7

表6-2