



JAEA-Review

2010-050

アクロスワークショップ
「アクロス技術の現状と今後の展望」講演資料集

Proceedings of ACROSS Workshop on
"Current State of ACROSS Technology and View in the Future"

(編) 浅井 秀明 長谷川 健
(Eds.) Hideaki ASAI and Ken HASEGAWA

地層処分研究開発部門
東濃地科学的研究ユニット
Tono Geoscientific Research Unit
Geological Isolation Research and Development Directorate

JAEA-Review

November 2010

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

アクロスワークショップ「アクロス技術の現状と今後の展望」講演資料集

日本原子力研究開発機構
地層処分研究開発部門 東濃地科学研究ユニット

(編) 浅井 秀明※, 長谷川 健+

(2010年9月13日受理)

アクロス (ACROSS, Accurately Controlled Routinely Operated Signal System の頭文字をとったもの) は地震研究をその目的とし、動力炉・核燃料開発事業団（現：日本原子力研究開発機構）東濃地科学センターの陸域地下構造フロンティア研究プロジェクトにおいて 1996 年より様々な研究開発が行われ、2005 年に完了した。そこで培われた技術（信号の送受信技術ならびにデータの解析技術）は非常に汎用性に富むものであることから、研究坑道掘削による坑道周辺の地質環境の時間的変化や研究坑道の健全性の監視技術として利用可能かどうかについて 2007 年度から 3 年間を目途に検討を進めた。

東濃地科学研究ユニットは、今までの検討成果を紹介するとともに、各方面のアクロス技術の研究を紹介して頂き、アクロス技術と今後の展望に関して外部専門家と議論することを目的としたアクロスワークショップ「アクロスの現状と今後の展望」を、2010 年 2 月 24 日～25 日に開催した。

本報告書は、ワークショップで用いられた発表資料を収録したものである。

東濃地科学センター（駐在）：〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内 1-64

※ 技術開発協力員

+地層処分研究開発部門

Proceedings of ACROSS Workshop on
"Current State of ACROSS Technology and View in the Future"

(Eds.) Hideaki ASAII* and Ken HASEGAWA⁺

Tono Geoscientific Research Unit
Geological Isolation Research and Development Directorate, Japan Atomic Energy Agency
Akiyo-cho, Mizunami-shi, Gifu-ken

(Received September 13, 2010)

ACROSS (Accurately Controlled Routinely Operated Signal System) has developed to acquire the detailed information on the tectonically active zone. The technology, for example the transmission and receiving technique, the data analysis and the interpretation technique of the ACROSS signal, is able to apply not only to seismology but also to other field.

We considered the ACROSS technology may apply to the engineering technology of the MIU (Mizunami underground laboratory) project, for example monitoring of the change of the geological environment around shafts and also the strength of the shaft concrete itself. It was planned that the examination for three years would be made from fiscal year 2007, and the new observation site around the MIU was established, and the data acquisition and data analysis have been carried out.

We held ACROSS Workshop "Current state of ACROSS technology and view in the future" on February 24 and 25, 2010 at Mizunami. The purpose of the ACROSS Workshop was to introduce our current result of the ACROSS research, to introduce the research of the ACROSS technology to external specialists, and to discuss the view of the ACROSS technology in the future.

This report is collection of the documents used in the ACROSS Workshop.

Keywords: ACROSS, Engineering Technology, MIU Project

* Collaborating Engineer

+ Geological Isolation Research and Development Directorate

目 次

1. はじめに	1
2. 報告	2
2.1 アクロス：来し方行く末	4
2.2 弹性波アクロスの送信と観測—土岐送信を中心として—	13
2.3 森町弹性波アクロスの信号解析	30
2.4 アクロス信号の走時とプレート境界反射点の推定	41
2.5 Hi-net 下山周辺における地震計アレイを用いた森町弹性波アクロスの信号解析	49
2.6 野島断層近傍における断層強度回復過程の長期モニタリング	61
2.7 低周波直線制御震源の実験	80
2.8 鳳来アレイ連続観測記録のアクロス解析	95
2.9 気体圧力と低摩擦材料を併用した省エネ型弹性波 ACROSS 送信装置開発の現状 ...	105
2.10 弹性波アクロス送信技術のまとめ	113
2.11 弹性波アクロスによる MIU 研究坑道掘削のモニタリングの試み	123
2.12 電磁アクロスによる連続送受信信号観測	141
2.13 電磁アクロスによる MIU 研究坑道掘削モニタリングの試み	152
2.14 電磁アクロスデータの新しい解析法	159
2.15 日本の原発の地震安全性向上の技術的方向	171
2.16 アクロスによる原子力施設の振動特性精密評価に向けた試み（その 1）	178
2.17 アクロスによる原子力施設の振動特性精密評価に向けた試み（その 2）	190
2.18 アクロスによる構造物の振動特性計測の試み	198
2.19 アクロスデータの順逆問題解析のための波動方程式と逆波動方程式の代数的変換 ...	209
2.20 サウジアラビアにおける石油貯留層の変動と誘発地震解析	214
3. プログラム	218
4. おわりに	220
謝辞	220
参考文献	221

Contents

1.	Introduction	1
2.	Report.....	2
2.1	Developmental work of ACROSS: A review and a preview.....	4
2.2	Some observations of signal from the Toki seismic ACROSS station.....	13
2.3	Analysis of seismic ACROSS signal transmitted from Morimachi.....	30
2.4	Estimation of travel times and reflection points on the plate boundary of signals from ACROSS transmitters.....	41
2.5	Analysis of seismic ACROSS signal transmitted from Morimachi and observed by seismic array installed around Hi-net Shimoyama station.	49
2.6	Long term monitoring of healing process of Nojima fault after the 1995 Kobe Earthquake using ACROSS.....	61
2.7	An experiment on low-frequency linear vibrator	80
2.8	ACROSS analysis of the continuous seismic record observed at Horai seismic array	95
2.9	Status report of development of energy saving type seismic ACROSS Transmitter using gas pressure with low-friction materials.....	105
2.10	Current situation of transmitting technologies of the seismic ACROSS	113
2.11	Applicability of the seismic ACROSS as monitoring technology of geological environments affected by the excavation of the MIU project.....	123
2.12	Long term observations of the tenser transfer functions derived by EM-ACROSS.....	141
2.13	Applicability of the electromagnetic ACROSS as monitoring technology of geological environments affected by the excavation of the MIU project.....	152
2.14	A new analytical method for the EM-ACROSS data.....	159
2.15	Innovation paths toward higher seismic safety of Japanese nuclear facilities.....	171
2.16	Applicability of the seismic ACROSS as measuring technology of the vibration characteristic of nuclear installations (1)	178
2.17	Applicability of the seismic ACROSS as measuring technology of the vibration characteristic of nuclear installations (2)	190
2.18	Applicability of the seismic ACROSS as measuring technology of the vibration characteristic of artificial structures.....	198
2.19	An algebraic transform of the wave equation to the inverse wave equation for solving the forward and inverse problems demanded by the ACROSS observation.....	209
2.20	Detection of changes in oil-gas reservoir and analysis of induced seismicity in Saudi Arabia	214
3.	Program	218
4.	Concluding Remarks	220

Acknowledgement	220
References	221

This is a blank page.

1. はじめに

ACROSS（精密制御定常信号システム Accurately Controlled Routinely Operated Signal System の頭文字をとったもの）は 1994 年に名古屋大学で産声をあげた。その直後（1995 年 1 月 17 日）に発生した兵庫県南部地震を契機に翌 1996 年、動力炉・核燃料開発事業団（現：日本原子力研究開発機構）東濃地科学センターにおいて陸域地下構造フロンティア研究プロジェクトが立ち上がった。その一環として熊澤峰夫名古屋大学教授を中心とした研究チームが結成され、ACROSS に関する様々な研究開発が行われた¹⁾。このプロジェクトは 2 期 10 年にわたって実施され、所期の目的を達成し 2005 年度末をもって終了した²⁾。

陸域地下構造フロンティア研究プロジェクトにおける ACROSS の研究開発は、地震の巣であるプレート境界の物性の空間的・時間的变化を捉えることを目標としていたが、そこで培われた計測技術は他に類を見ない精度での計測を可能にすることから、他分野においても活用可能な技術である。

そこで結晶質岩工学技術開発グループでは、ACROSS が「研究坑道周辺の地質環境の時間的変化の把握」や「コンクリートライニングの健全性の評価」に利用可能かどうかについて検討することとした。具体的な検討項目は以下の 2 点である。

(1) 弹性波 ACROSS 信号の受信による既存技術の適用性評価

東濃鉱山の弾性波 ACROSS 送信所から送信中の信号を瑞浪超深地層研究所の近傍に設置した地震計で受信することにより、研究坑道の掘削が坑道周辺の地質環境にどの様な変化を及ぼしているのかをモニタリング可能かどうかについて、その適用性を検討する。

(2) モード解析の適用性評価

坑道覆工コンクリートの振動モードを常時モニタリングすることにより、坑道覆工コンクリート構造物ならびにその周辺岩盤の物性の時間的変化を非破壊的に常時検査可能とするシステムの開発について検討する。モード測定に必要な起振装置および受信装置には ACROSS の技術開発で培われてきた信号の送受信技術が現時点では最適である。

工学技術開発としての ACROSS 研究は 2007 年度から 3 年間を目途に検討を進めた。3 年間の内訳は 1 年目が ACROSS 観測網の整備、地質環境および坑道覆工コンクリートのモニタリングの可能性の基礎的検討³⁾、2 年目がデータの収集⁴⁾、3 年目がデータの解析および適用性の評価⁵⁾である。

2. 報 告

アクロスワークショップ「アクロスの現状と今後の展望」は、東濃地科学研究ユニットが今まで進めてきた検討成果を紹介するとともに、各方面のアクロス技術の研究を紹介して頂き、アクロス技術と今後の展望について外部専門家と議論することを目的として、2010年2月24日～25日に日本原子力研究開発機構 東濃地科学センター 瑞浪地科学研究館（岐阜県瑞浪市）にて開催した。

本章においては、アクロスワークショップにおいて研究報告に使われた資料を掲載する。名前はいずれも当日の発表者である。ただし発表者の都合により、一部資料については研究報告後にまとめられた資料や文章を掲載している。またタイトルがプログラムから変更になっているものもある。プログラムは3章に載せた。

2.1 アクロス：來し方行く末

熊澤峰夫（名古屋大学） 4

2.2 弹性波アクロスの送信と観測—土岐送信を中心として—

國友孝洋（原子力機構） 13

2.3 森町弹性波アクロスの信号解析

吉田康宏（気象研究所） 30

2.4 アクロス信号の走時とプレート境界反射点の推定

勝間田明男（気象研究所） 41

2.5 Hi-net 下山周辺における地震計アレイを用いた森町弹性波アクロスの信号解析

岩切一宏（気象研究所）他 49

2.6 野島断層近傍における断層強度回復過程の長期モニタリング

生田領野（静岡大学） 61

2.7 低周波直線制御震源の実験

山岡耕春（名古屋大学）他 80

2.8 鳳来アレイ連続観測記録のアクロス解析

渡辺俊樹（名古屋大学）他 95

2.9 気体圧力と低摩擦材料を併用した省エネ型弹性波 ACROSS 送信装置開発の現状

伊勢智彦，宮武拓（兵庫県立大学） 105

2.10 弹性波アクロス送信技術のまとめ

國友孝洋（原子力機構） 113

2.11 弹性波アクロスによる MIU 研究坑道掘削のモニタリングの試み

長谷川健（原子力機構）他 123

2.12 電磁アクロスによる連続送受信信号観測

中島崇裕（原子力機構） 141

2.13 電磁アクロスによる MIU 研究坑道掘削モニタリングの試み

長谷川健（原子力機構）他 152

2.14 電磁アクロスデータの新しい解析法

中島崇裕（原子力機構） 159

2.15 日本の原発の地震安全性向上の技術的方向	東原紘道（防災科技研）171
2.16 アクロスによる原子力施設の振動特性精密評価に向けた試み（その1）	熊澤峰夫（名古屋大学）（西田明美（原子力機構）代理）他178
2.17 アクロスによる原子力施設の振動特性精密評価に向けた試み（その2）	久保文男（VDOC(株)）190
2.18 アクロスによる構造物の振動特性計測の試み	長谷川健（原子力機構）他198
2.19 アクロスデータの順逆問題解析のための波動方程式と逆波動方程式の代数的変換	永井亨（名古屋大学）209
2.20 サウジアラビアにおける石油貯留層の変動と誘発地震解析	藤井直之（静岡大学）他214

2.1 アクロス：来し方行く末

2.1.1 来し方

アクロスのテストサイトを探索に東濃地科学センター（TGC）の山川稔副所長（当時）を訪問したのは、1994年9月上旬であった。山川副所長は、1980年代幌延の施設計画立案に物理学や地球科学上の諸問題を盛り込む考えで、私はその相談にあづかったことがあった。これがTGCでアクロスの研究開発が始まったきっかけだったが、それには、実に多様な背景の偶然と必然の連鎖が関わっていた。その一連の流れを、論理的命脈をつけるようにして列挙しておく。国際的な協力連携関係の経緯は、大変重要な要素であるが今回は省略する。

2.1.1.1 地球内部研究の全体背景

1960年頃当時、名古屋大学における固体地球科学研究の最大関心事は地球内部構造と対流のダイナミックスであった。波動による地球内部の状態把握：応力、異方性の可視化がもっとも直裁にみえた。その手段には、深部の地震波の観測による見えない地下構造の観測による制約には、観測量の実験的理論的予測が必要である。1960年のチリ地震で地球の固有振動が初めて検出観測されたことが刺激になって、固有振動の観測が有効だということになったが、低周波数の地震波の観測が当時は技術的に困難だったので、レイパス解析法がまず進展した。しかしマントルトモグラフィーが実現するのは、1980年代になってからだ。アクロスが使う周波数領域における観測手法は、特に日本ではあまり普及しなかった。しかし名古屋大では不思議に周波数領域で考える状況があった。その一連の流れは次のようにいた。

- 1965～ 固体の流動と岩石組織変化と物性の実験と理論
- 1968～ 共振法によるマントル鉱物（月の岩石も）の物性測定
- 1969～ 超高圧高温実験+実験惑星学
- 地球内部の物質と状態は、その資源的物質の集積形成過程に依存する。そもそも、地球を惑星の一つとして、その起源が課題
- 1980～ 隕石フラックスのスペクトル解析存否法、地球固有振動も
- 固有振動解析から深尾良夫によるトモグラフィー研究+丸山茂徳によるWET（全地球テクtonics）へ

2.1.1.2 地震予知研究という背景

- 1990～ Robert Gellerによる地震予知研究戦略+武井康子による複合物質の物性不安定性・地震発生・波動放射効率の研究。こういう背景のところにあった大きなきっかけ：東京大学地震研究所で開かれた地震予知シンポジウム1992があった
- 地震予知の「できる・できない」不毛な論争への対応構想の検討
非線形現象の原理的な予測不可能性 vs. 弱力オースの現実的な確率的予測可能性を考えると現実的な予測、さらに制御もできるはず：これは原理的制約でなく技術的制約
- それには、アンサンブル予測の確率を上げること
- それには、適切な対象の適切な監視の技術水準を上げる
- それには、適切な監視とは、見えない地下を物理的に可視化する技術：地震波パルス震源（自然or人工）、人工バイブル震源のもつ原理的限界を超える技術の問題に還元
- それには、レーザーのような精密送信信号の反射応答を見る技術で、地下の微細な状態変化：

複合物質の物性不安定性を監視観測で検出できるようする
 →地震予知研究戦略等+武井康子による地震発生・波動効率の研究
 →それには、線形力学系の周波数領域計測技術（アクロス）として体系化し、存否イベント解析法に依って、時間領域に変換して、火山や地震場の監視観測手法の確立をはかる

2.1.1.3 神戸地震の発生

- 1994.4.1 : アクロスの提案とその開発模索+名大藤井センター長
(武井、鈴木で開始+山岡、東田、羽佐田、小川、國友らの参画)
- 1995.1.17 : 神戸地震→日本の地震予知研究すべての見直し：大きなきっかけの偶然発生。
(地震フロンティア (EQFR) 1996 構造物のシステム解析監視予測を実現する理工学の基礎)
- 1996 : 科学技術庁 (STA) による地震総合フロンティア研究発足
旧動燃：坪田、長谷川、茂田
土岐送信所：國友、中島 (EM)，他
淡路島送信所：山岡、生田、他
- 1998.11 : International Workshop on Frontier in Monitoring Science and Technology for Earthquake Environment (Tono Geoscience Center)
ロシア型アプローチの把握。
- 2001 : 中国地震局が地震予知研究にアクロスを採用
連携研究支援開発を開始、および幌延深地層研究センターにおける監視試験観測開始
- 2004.6.30-7.2 : The 1st International Workshop on 'Active Monitoring in Solid Earth Geophysics' (Mizunami)
気象庁 (JMA) が東海地震の監視観測試験に着手：石川、吉田、他
静岡大（断層の上）との連携：実用的亜音波送信装置（森町）
- 2006 : 日本原子力研究開発機構 (JAEA) システム計算センターと連携融合開始：構造物のシステム解析
原子炉などの人工構造物の健全性監視へ：西田、他

2.1.1.4 研究の目標の変遷

1995-6年ごろ、EQFR が TGC で出発した時は、地震予知の基礎研究として位置付けられた。地下構造の物理探査への有用性は自明だが、深地層の科学的研究とは関係がないと考えられたからである。しかし有用性が認められたため、2001 年からは深地層の科学的研究の一部という位置付けに変更された。また幌延深地層研究センターにおいて弾性波と電磁拡散波の実験が開始された。

2.1.2 開発研究の現状レビュー

2.1.2.1 技術の位置づけの変遷

アクロスの研究開発に名古屋大学で着手した 1994 年 4 月時点における、その意義についての私の理解は誠に素朴なものであった。当時、すでに vibroseis (Conoco の登録商標) が知られて

いたので、アクロスは vibroseis を「徹底的に精密にして周波数領域データを非破壊的に長時間取得し、存否法によって時間領域に変換する新しい強力な方法」である、という程度に軽い判断であった。そのこと自体が本質的に間違っていた訳ではないが、次の 2 点において、認識が十分深くなかった。

- ①アクロスそのものの原理、あるいは技術思想が、未踏の格段に刷新的な汎用の精密計測法であること。
- ②現代社会の技術基盤の急速で飛躍的な進展に想定以上に連動していたこと。

このことが研究の進展とともに遂次明らかになってくる過程で、研究リーダーだった私がそれに適切に対処する技量をもち合わせていなかったことを、告白しておかなければならない。

例えば、アクロスの最初の命名が事態を明白に示している。ACROSS の RO は rotary の最初の 2 文字、SS は、震源装置 Seismic Source のアクロニムとしていた。その後の研究で、rotary は可能な多数のハードウェア方式の一つにすぎないこと、seismic は、その対象のごく一部にしかすぎないこと、本質的なことは「時間という情報伝達資源を最大限に活用する情報論的な信号論にある」と判明した。そこで、ACROSS を定常的信号システム Routinely-Operated, Signal System のアクロニムだと改定した。

さらに、物理の問題として分析してみると、アクロスの理論的基盤は、線形力学系のシステム特性計測の方法論にあり、線形微分方程式で記述される任意の現象すべてを包括した理論的体系の中にあるべきだと判断された。こうして、孤立力学系とみなす物理的対象の特性を記述する理論的な概念であったグリーン関数の現実的決定方法であり、環境雑音に最も強く、実用的な範囲が非常に広い現実的な計測法の基礎を与えるものであることが分かってきた。非線形系でも、線形系とみなして有用な結果が得られる場合があることも知られているし、弾性波の他に、電磁拡散波、温度拡散波、浸透流の拡散波などのアクロスの実用化については、その理論的検討と現実問題の制約の合理的な理解など、広範な関連問題が発生した。新機軸の問題であった（さらにレーザー周波数コムとの関係については、2.1.3.1 で述べる）。要するに、アクロスは理論面においても未開拓な部分があったために、研究の進展が、もっとたくさんの研究課題を生むという苦しい事態にあった。

アクロスを具体的に実現する要素技術が市販には十分でなく、それらの開発研究も極めて多岐にわたった。例えば、市販の加速度計の位相特性の信頼性は極めて低く、加速度計（地震計）の自前開発や校正法の研究までに着手し、かなりの研究投資を行った。こと地震計に関しては、Hinet（防災科学技術研究所（NIED））の普及によって、その開発を要しなくなったが、局所的なアレイ観測用の諸技術については、まだ確立するにはいたらなかった。偏心回転体の運動制御技術、適切な信号設計法、各種のデータ解析法の開発など、研究の推進にともなって次々発生する莫大多数の問題に常時対処しつつ、この新技術を自前調達する、という大変な仕事になったのだ。このため、研究戦力の拡散や専門の分化などの現実的困難に遭遇することにもなった。また、研究環境の時代による変化にも、翻弄されることもあった。

しかし、結果として、(1)原理とその具体化（例えば、周波数領域で、対象への精密入力と出力ベクトルデータの精密な取得と校正を実現するハードウェアの確保など）、(2)その運用における現実的対応（例えば、周波数範囲を実現可能な範囲に限定し、準連続的な長時間運用の信号論な

ど), (3)取得データの雑音処理方法の確立 (例えば, 伝達関数の信頼度評価の合理的方法の案出など)。(4)体系的な観測とその解析結果の実例 (弾性波アクロスと電磁アクロス) について, 莫大な試行錯誤が行われた。これらは, このワークショップその他で研究チームメンバーとの協力者達によって報告されているので, その詳細はここで述べない。

新技術の開発研究としての意義について特筆すべきことがある。それは若干先行して開発が始まったロシアの方式⁶⁾と, 日本の ACROSS 方式を輸入して発展させようとした中国の方式⁷⁾との原理面と技術面での比較検討は, 技術思想における面白い課題を提供することになった。中国方式は結果的にロシア方式と同じであって, 共に送信信号と受信信号の掛け算 (correlation) を観測量とする時間領域で発想するアメリカ産の *vibroseis* と同じ論理を踏襲するものだ。これに対して, アクロスは割り算 (transfer function) を観測量として, 周波数領域で問題に対処する。アメリカは, 地震学研究者が日本の方針を採用しようとしているが, 技術水準が低すぎて事態に対処できない。ロシアと中国では, 研究開発の動向を支配しているのが, 地震学のプロである。これに対して, 日本でアクロスを開発したのは, 耐震工学を専門とし地下構造探査には素人であった東原紘道教授 (当時地震研究所) と, 原理主義方法論研究者の熊澤であった。この違いは, 将来的には (実はすでに), 実現可能な高度化の水準に格段の違いをもたらす宿命にある。ここには, 研究開発における基本的スタンスの違い (原理的基礎的な面と要素技術の積み上げ確保に重点を置くのと, 現象的経験的基盤に立つ効率性に重点を置く) がある。本来相補的であるべきこの要素が, 必ずしもそうなっていない事態についての論評は, 科学技術開発の方法論の面白い研究課題にもなるであろう。

以上を要約すると, TGC における約 10 年間のアクロスの開発研究には, 紛余曲折を経ながらも, 送信技術, 受信技術, データ処理技術など多様な技術要素がリンクした「一つの技術システムの開発」として, 一応の成功を収めたと確信する (一例として, 図 2.1 及び図 2.2)。いろいろな欠損もあったけれども, 次世代に繋がる刷新的な開拓ができたと考えるからだ。

2.1.2.2 継続的な観測研究として

アクロスの開発研究における当初の目標は, 地震発生場の常時監視観測による長期時間変動の把握であった。2.1.2.1 で述べた莫大な研究投資の成果として, 継続的監視観測の技術は, ほぼ目途が立ったと考えられる。これまでの結果の理解では, 弾性波の伝播特性の時間変化は, 主に降雨などの気象条件の変化がごく地表近傍～地殻浅部に及ぼすものが最も大きく, 地殻深部の時間変動はほとんど検出が確認されていないことだ。このような継続的観測を実現し, 時間変動検出が実現しているのは, 亜音波の土岐送信所 (TGC) + 森町送信所 (JMA+静岡大), と既設の Hinet 観測点 (NIED) の組み合わせによる東海地震の想定断層面近傍だけであるといつてもよい。

ここで特に重要なことは, 地殻深部, とくにプレート境界近傍の想定断層面近傍を通過してきたと想定される波群についてその時間変動の情報である。地殻深部の変動とみなしえ得るものは, P 波 S 波の複数の走時が数 10 秒の後続波群ごとに, 異なる型の走時や振幅の変動 (年地表近傍の効果を除去できない周変動以外) があれば, これこそが我々の最大のターゲットであり, 将來の研究方針策定に決定的に重要である。これは鳳来観測点において確かに発見されているが, その変動振幅は極めて微弱であり, 同様の事例の発見とそのより高信頼度の継続的監視が当面の最大の課題である。電磁アクロスでは, 工業社会における電磁ノイズの大きさ故に, いまだ意味のある情報を得る段階にはいたっていない。

将来にわたる観測の継続維持とその観測地域の拡大が、新しい発見をもたらすはずである。地殻深部の流体の働きの研究が進んで、その重要性が各方面から明らかにされてきているので、かつて dilatancy-diffusion theory が予測したような大きな地下構造変化は、相変らず理論的には否定することができない。こういう観測データを得ることのできる体制の存在するところは、アメリカ、ロシア、中国の努力にもかかわらず、現時点では、土岐送信所と森町送信所、および淡路島の野島送信所からの波の到達範囲（2.2, 2.3, 2.6 を参照）以外には、世界中どこにもまだ存在していない。

2.1.2.3 深地層の研究施設における地質環境の変動の観測的研究

これは、東濃地科学センターと幌延深地層研究センターとでいくつかの試験観測とデータ解析が試みられてきた。その観測では人為的雑音などの効果もあって、データと経験の蓄積は進行している。しかし、大きな飛躍的な進展はまだない。原理的基礎基盤は明らかになったので、これも継続的な観測の遂行とテクノロジーの遂次向上が将来の成否を決めるものと考えられる。

2.1.2.4 人工構造物のモード解析におけるシステム解析と監視観測技術の研究

深地層の研究施設に限らず、一般の人工構造物のシステム解析やヘルスモニタリングにおけるアクロスの有効性は、原理的に担保されているので、その具体化が課題である。当面は、地盤と強く結合し複雑な構造をもつ原子炉施設を例題にして、研究を推進してきた。一つは簡単な構造物の一例として、土岐の弾性波アクロス送信所における梁構造についての計測試験で、もう一つは、複雑な構造物のシステム解析の理論的基礎の研究である。この研究を通じて、具体的な研究開発の戦略がほぼ明確に浮かびあがってきた段階である。この分野ではこれまで、アクロスのような精密計測の実現性が存在しなかったので、理論的考察も十分でなく、新しい技術開発の方向が提示された。これについては 2.2 でも述べる。

2.1.2.5 反省と教訓

アクロスの着想から、研究開発開始、研究資金の確保、人材確保、研究推進、成果の広報までの流れの中にある個別事項には、多様な視点がある。これらを減点法で採点すると、おそらく、非常に低い評価事項が多く、平均値は大変小さくなるものと考えられる。アクロス関係者は、このプロジェクトで最初に描いた夢が大きすぎたので、その終了で、夢を実現できて幸せだと考える人は多くないだろう。それは、研究リーダーであった熊澤の能力と才覚を超えていくつかの構造問題もあったであろう。それらは、(1)多枝多様な要素技術と研究における原理的な側面との補完調整、だけでなく、(2)異なる組織の組織原理と研究原理の背反性（理学部の基礎研究から大きな事業所におけるプロジェクト研究へ接続と連携）、(3)研究の事務的管理体制と研究現場の実務体制のつなぎなどに加えて、研究グループの人と専門のチームワークの問題などである。もちろん努力や判断の不足があったので、熊澤の責任を回避する正当な理由は有り得ないと承知しており、反省するとともに、関係者にはこの機会にお詫びを申しあげる。

時代の状況変化もあって、東濃地科学センターで開発してきた技術の新たな進展は、ローギアに入る。しかし、技術とそのキャリアは、名古屋大学や静岡大学、気象庁、と他の組織に拡散していく生きている。それは、「行く末」の事項で説明するように、アクロスという方法論が持つ原理的な有用性に依拠するものである。

送信装置コンクリート基礎上の地震計での観測により得られたスペクトルを例として

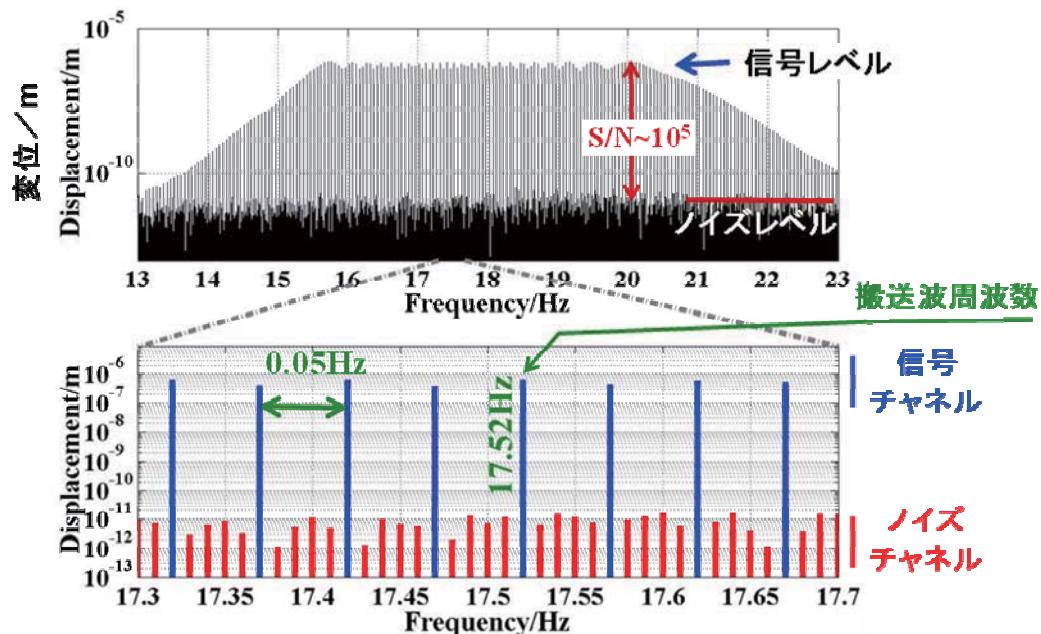


図 2.1 周波数コム信号の特徴（國友提供）

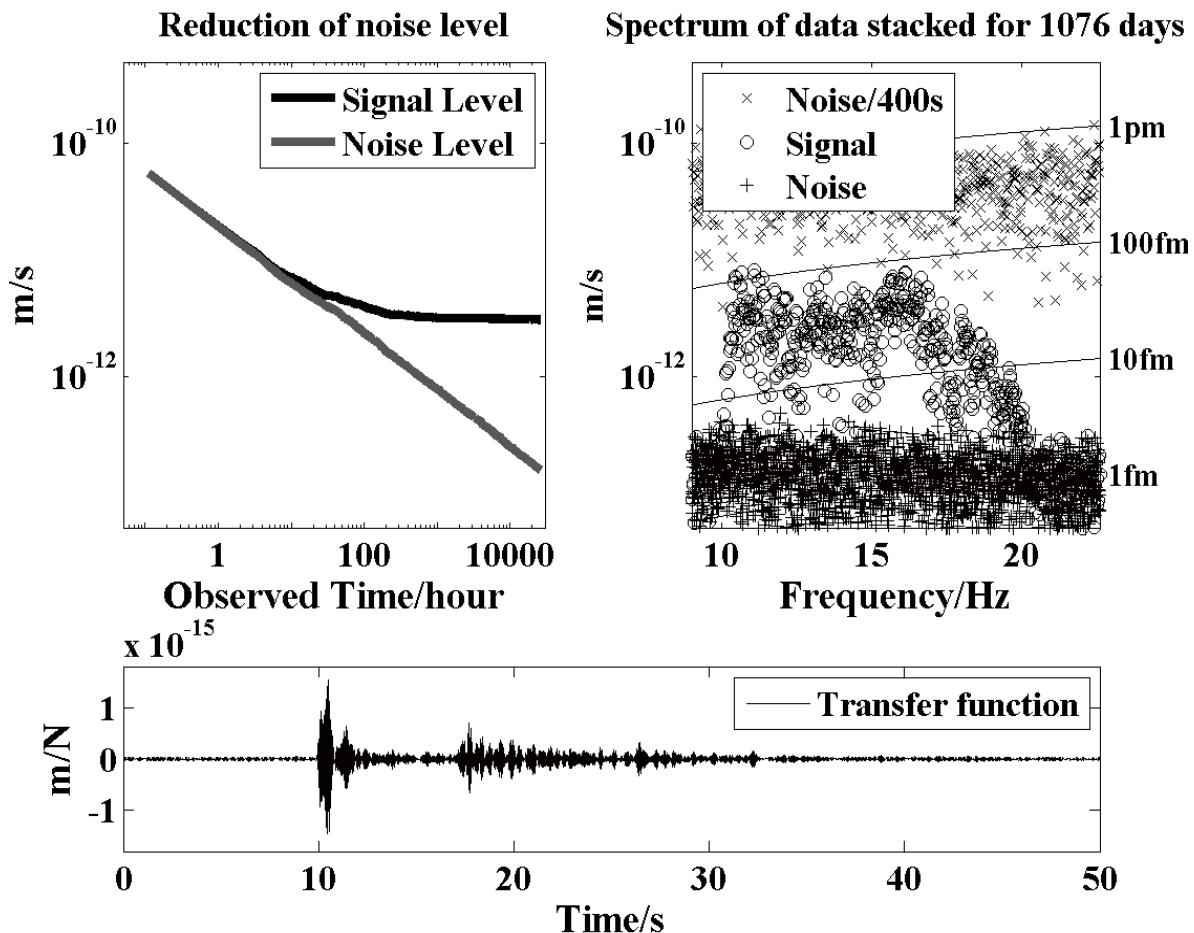


図 2.2 数フェムトメートルの振幅の信号まで検出例（國友提供）

2.1.3 行く末

アクロスは、前の章にも書いたように、開発当初想定したよりも、はるかに深い基盤があり、そのために広範な適用対象があった。このワークショップは、まとまったアクロスの研究グループの実質的解散のまとめであるが、科学技術としては、再起動される宿命にあるだろう。

2.1.3.1 レーザー周波数コムと音響周波数コムのスペクトロスコピー

Laser Frequency Comb (あるいは Optical Frequency Comb Spectroscopy) の出現は、1990年頃と推定されるが、1999年頃には技術がほぼ確立され、分子スペクトルと原子スペクトルの研究に大飛躍をもたらす metrology として、その方法の開発者である J. L. Hall と T. W. Haensch が 2005 年度ノーベル物理学賞を受けた。以下この方法を OFC と略して呼ぶことにする。ここで comb とは「櫛」のこと、信号のスペクトルが櫛の歯のように、精密にかつ密度高く制御されていることに由来する。別の表現をすると、測定する物差しに、非常に微細で正確な目盛を発明したことである。

原子の周りの電子のエネルギーレベルや、複雑な分子の持つ光学的、音響的振動のエネルギーレベルは紫外線から可視光、赤外線にまたがるので、その精密測定は多様な物質の多様な性質を理解するための観測量の取得になる。周波数は時間と長さの尺度の基準でもあり、物理学の基本でもある。わが宇宙の年齢は 4×10^{17} 秒程度だが、それを 1 秒以下の誤差で測定できるほどだともいわれている。

情報理論的には、OFC とアクロスと完全に等価であって、アクロスは、言わば、Acoustic Frequency Comb Spectroscopy (短く AFCS、あるいは AFC) である、と言ってもよい。アクロスでは、分子などの構造物に比べて大きな構造を対象にして低い周波数領域を使うというだけの違いで、音波も電磁波も扱うので、物理的にいえば、やはり全く同じ原理に立っている。対象の構造の運動を支配する基本法則も、マクロなアクロスの場合には、量子力学的な効果は扱わないが、定式化において固有値問題に帰着することでは、等価になる。固有値問題をアクロスでは存否法において、複素関数論における 1 次の極とし、留数を固有関数に対応するようになっているところも同じである。2.1.2.1 でアクロスという命名の論拠の推移について述べた。その伝で言えば、OFC は laser ACROSS、あるいは、optic ACROSS と呼んでもよい。

さて、改めて、このような ACROSS と OFC の等価性に気づいてみると、原理面でも実用面でも、独立に発達してきた両者の比較検討から、新規なアイディアの発見を目指して、様々な見直しをしてみる価値が双方にとってあるだろう。アクロスは vibroseis を改良したもの、などという程度の存在ではなかったのだ。以下では、OFC との対比で、AFC と呼ぶこともある、ということにしよう。

2.1.3.2 多様なマクロ構造物のシステム特性の精密計測と監視法として

改めてその特徴を整理しておく。

原理面で、従来の常識を桁で超えて優れた特徴をもっている²⁾。

1. 周波数領域における 9 成分伝達関数データ：グリーン関数と等価
孤立力学系の特性はノーマルモードの線形結合で表現。
2. データの精度が高く、その信頼度の合理的評価が与えられる。

周波数依存性、監視用時間依存性などの(S/N)で記述する精度は理論限界(S/No) $\sqrt{L/T}$ を達する。

(No=環境雑音の局所白色成分, L=独立測定数, T=データ取得時間)

広範な分野に適用できる掛け替えのない計測方法：将来の問題

1. 重要性は、いずれ広く認識され普及する宿命がある。各種土木建築構造物のシステムの同定と解析、監視観測、非破壊検査など（例えば、地層処分場、地下資源、原子炉、建築、トンネル、橋梁、船舶、航空機、工業製品の部品から装置、地盤、地下資源、地球の内部構造まで）
2. 周波数範囲は任意で、地下水浸透流場、熱拡散場、電磁拡散場などでは、年スケールも現実的にあり得る。高い周波数領域では、電磁波でミリ波までゆけば、OFCと接続する。音響場では、超音波の 100MHz オーダーまでは技術的にはすぐ適用も可能で、OFC とここでも接続する。

当然、AFC がまだ普及していないことにも、相応の理由がある。

1. 原理面で汎用性があっても、実用面では、まだ user-friendly な技術でない。従来のデータの質から想定されるニーズに合う解析法しかない。
2. 実用面で一般向けに有用性の見える事例がまだないから、従来想定してなかつた高度な解析目標に、まだ現実味が出ない。
3. 多様な分野の総合分として、ひとつの技術体系を構成しているので、理論面も多枝に亘り、未だにかなり難しいフロンティア研究だとみなされることもある。

2.1.3.3 当面の課題

上記の現時点での問題点をこれから解決してゆく方策について、現状と展望を述べておく。データ解析法は未開拓～継続的開発研究は進行中である。

理論面で最大の問題は、構造パラメータの順逆問題の理論と数値計算コードが未開拓なものである。

①順問題理論と計算コードの探索と開発（2002 年頃以降）

①については、PANWAVE 理論（偏微分方程式の代数方程式への変換→波動方程式と逆波動方程式の数値的変換をする理論）の開拓を名古屋大学が継続している（2.19 参照）。解析結果との比較はほぼ OK だが、数値的にまだ不十分な部分があり、その原因の究明を進めている。プログラムのコーディングエラーか、それとも本質的な間違いがあるのか、まだ明らかではない。この理論では、探索研究を開始した時点では、計算量が大きすぎて、実用的ではなかつたが、時代の推移とともに計算装置の水準が上がることを期待していた。現時点では、すでに計算装置の制約は消滅している。特に、周波数領域における PANWAVE 理論値計算の分散処理に適しているので、大きな将来性を期待してよい。

逆問題解析法の探索は、波数領域における構造モデリングと遺伝的アルゴリズムがある。ここで、波数領域でのモデリングということは、PANWAVE 理論における逆波動方程式の構造に適合するように問題設定をデザインしている。このような順逆問題計算法確保の重要性は、原子炉な

ど構造物のシステム解析分野でもその重要性が認識されており、JAEA のシステム計算センターでも新機軸の方法が開発されている。例えば、本ワークショップにおける久保氏の報告（2.17 参照）はその具体例である。したがって、複雑な構造物のアクロスデータから構造パラメータを得る順逆問題の理論と数値計算コードは、近い将来に確保できると確信している。

データ処理方法については、現時点では統一的、標準的なものではなく、最善の戦略を集約させるテキストを編纂することが、当面の課題である。

②ハードウェアの性能向上とそのノウハウ保全供給

市販にない技術の供給と技術水準維持発展の体制の欠損は重大問題である。

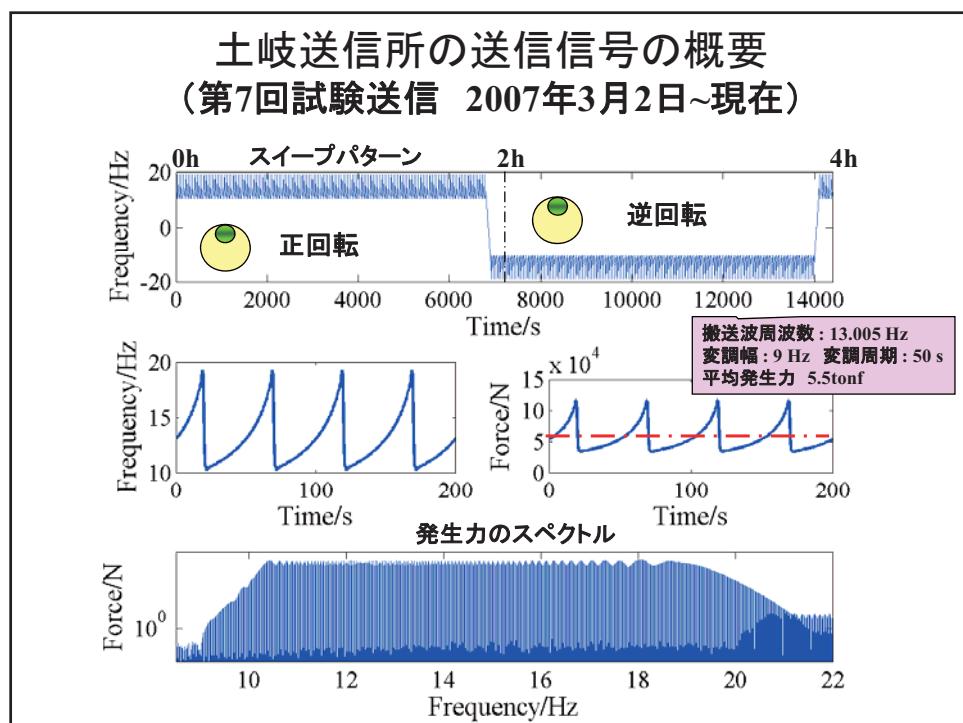
- ・弾性波アクロス送信装置の基本技術はほぼ確立したが、長距離低周波数送信装置、各種のモバイル型送信装置などは、まだ開発研究を要する。
- ・電磁アクロスでは、大出力送信装置の技術もさることながら、特に、小型高感度電磁センサとそのアレイ技術の確保などが急所になるはずで、これが重要課題である。

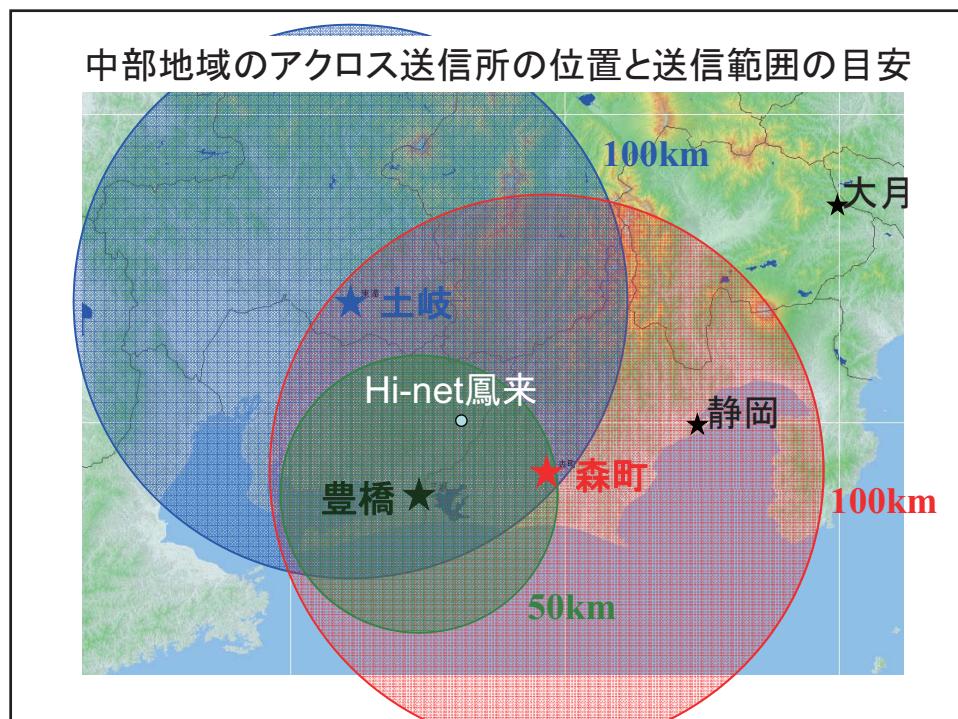
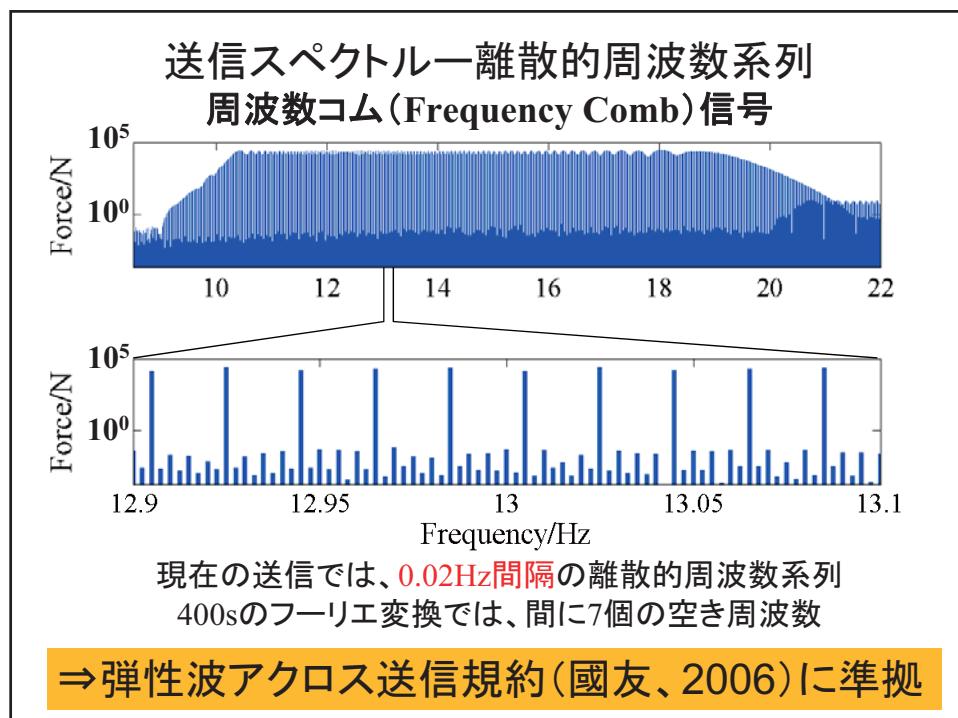
これらについては、静岡大学、兵庫県立大学、名古屋大学、などで検討中である。

追記

アクロスの研究そのものはもちろんだが、やるべきでやり残したこと（論文発表、資料整理）が残っている。今後もそれに対処して行く所存であるが、老化で仕事が遅く関係者にご迷惑をかけるかもしれない。あしからず、ご了解いただきたい。この原稿も浅井秀明さんと長谷川健さんの校閲のおかげで形をなしたのである。これまで共に働いてくれた仲間達、外部の多数の共同研究者や支援をしてくださった多くの方々に、かつてチームリーダーであった者として改めてお礼を申し上げたい。個々にお名前を挙げる余裕がなく申し訳ないことである。

2.2





送信周波数系列の割り当て (2007年3月から適用 3年間が経過)

	A	B	送信所
1	0.0000+0.02n	0.0100+0.02n	森町 1台
2	0.0025+0.02n	0.0050+0.02n	土岐 2台
3	0.0075+0.02n	0.0150+0.02n	豊橋 2台
4	0.0125+0.02n	0.0175+0.02n	ノイズ評価、臨時

※黄色:200秒以下の時間区間が可能な周波数系列

※森町はA1+B1を使用することで、最大100秒周期のFM送信が可能

※他は、最大50秒周期を想定。

高調波

A1→A1(2)(3) B1→A1(2),B1(3)
 A2→B2(2),A3(3) B2→B1(2),B3(3)
 A3→B3(2),A2(3) B3→B1(2),B2(3)
 A4→B2(2),B4(2) B4→B3(2),A4(3)

<利点>

高調波が出力されても問題が少ない。どの送信所も200秒時間区間が使用できる。

<欠点>

森町で100秒送信を行う場合は、Hi-netなどの観測データに含まれる整数(特に10Hzの倍数)の周波数が使えない。

送信周波数系列の割り当て 別案 (全ての送信所で100秒周期が可能)

	A	B	送信所
1	0.0000+0.02n	0.0100+0.02n	土岐 2台
2	0.0025+0.02n	0.0125+0.02n	豊橋 2台
3	0.0050+0.02n	0.0150+0.02n	森町 1台
4	0.0075+0.02n	0.0175+0.02n	ノイズ評価、臨時

※黄色:200秒以下の時間区間が可能な周波数系列

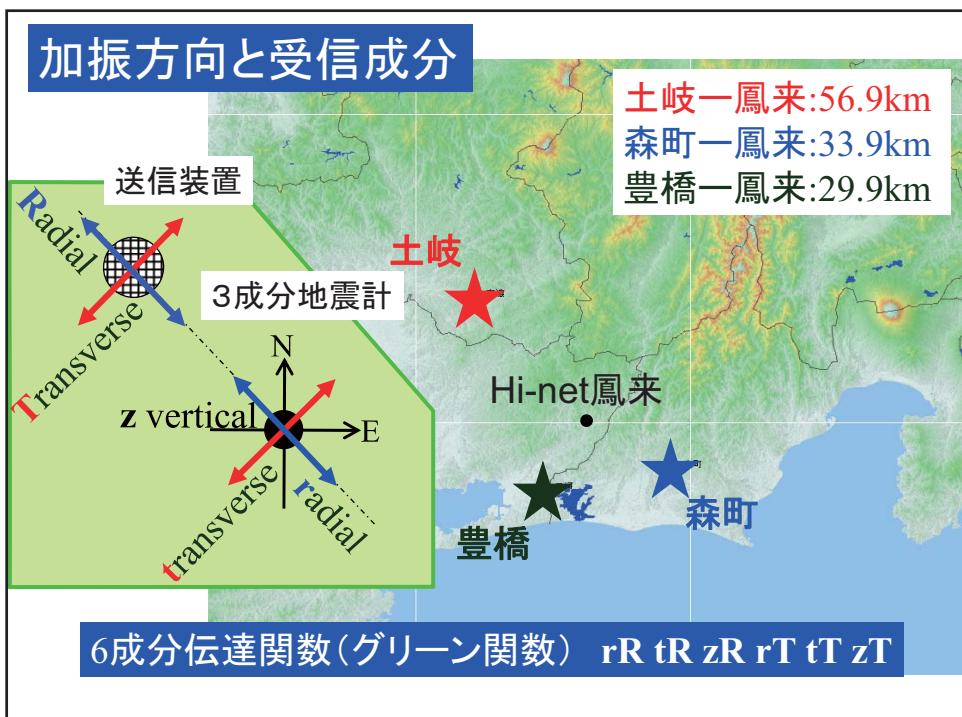
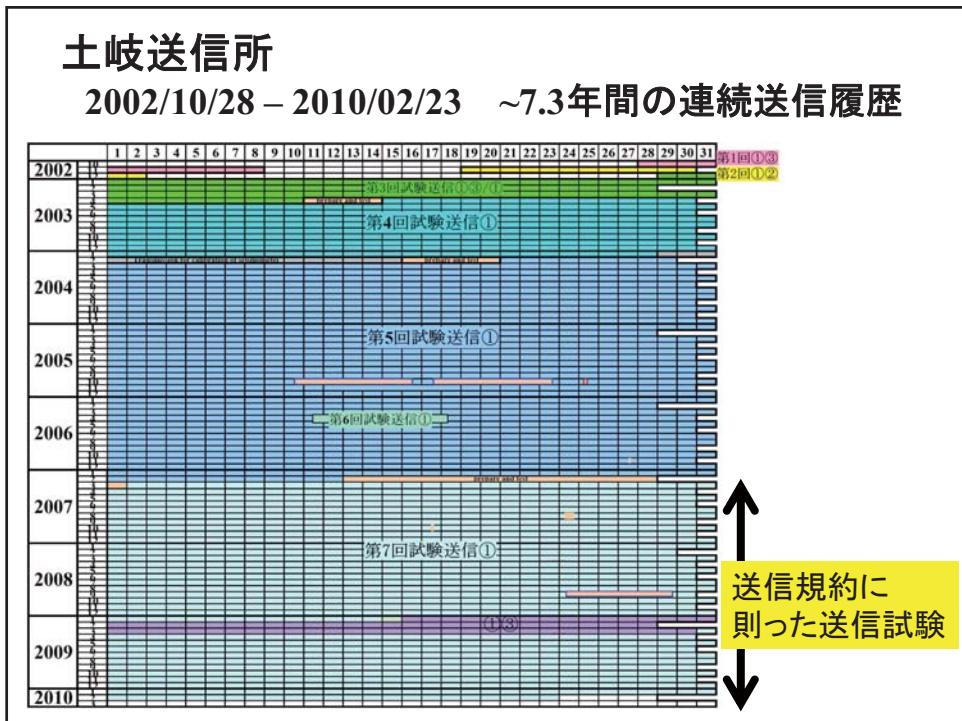
※A+Bで全送信所において最大100秒周期のFM送信が可能

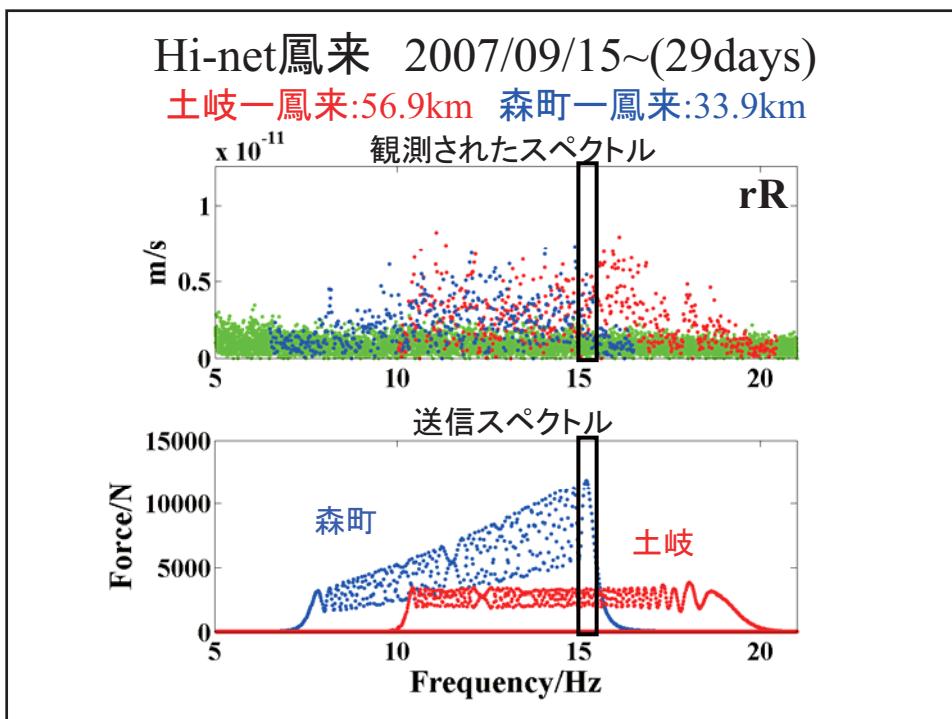
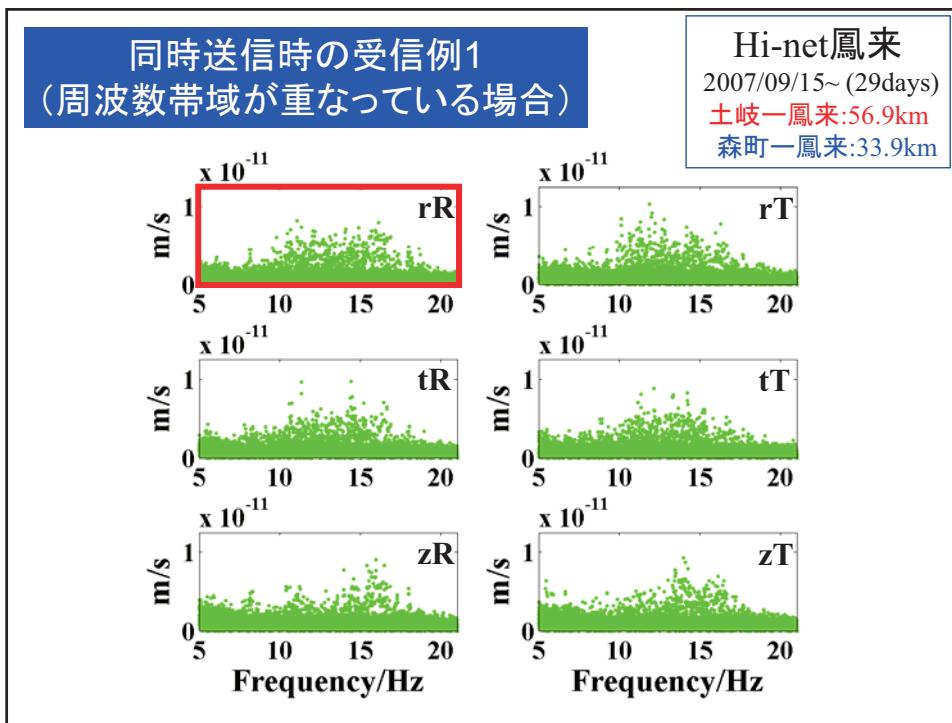
<利点>

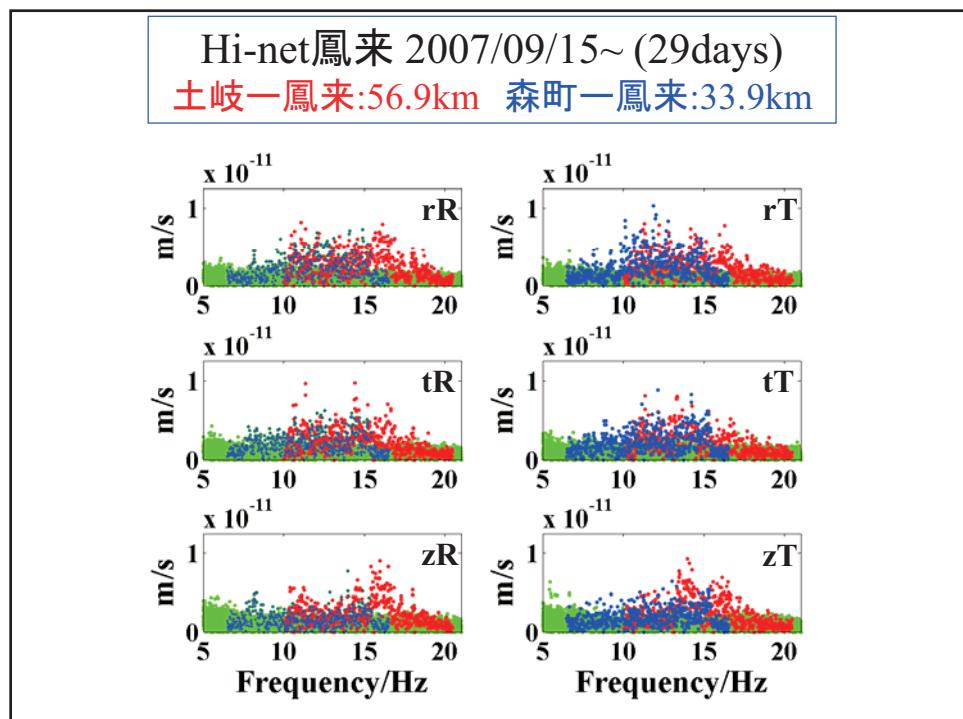
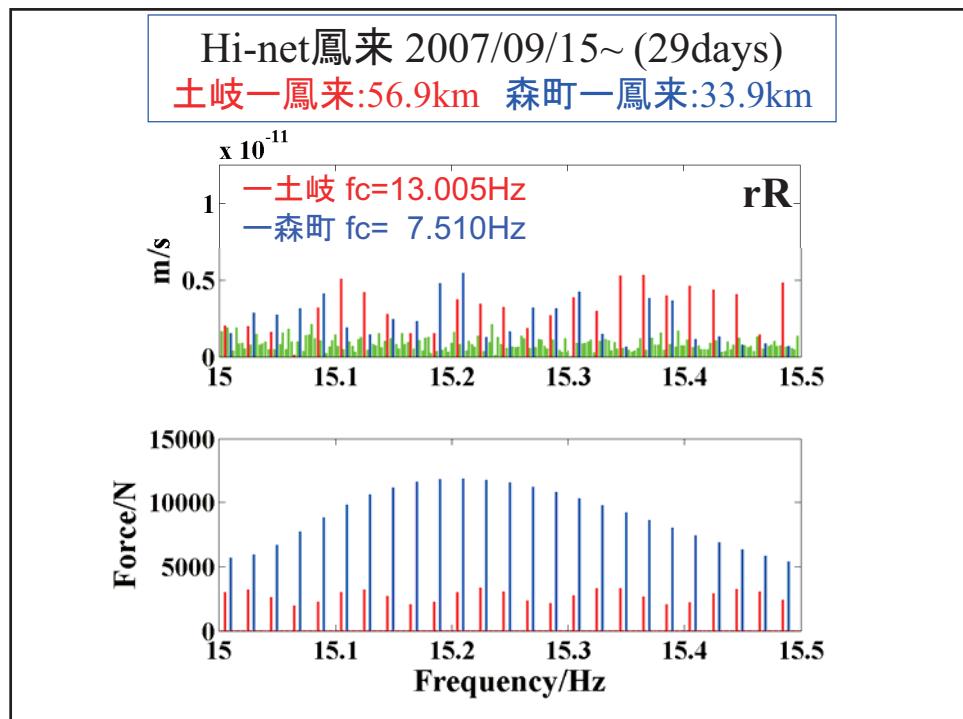
全ての送信所で最大100秒周期のFM送信が可能(ただし1台。もしくは2台を同じ周波数系列で送信)。土岐は、これまでB2で送信を行って来たため、送信パラメタの連續性が保障される。

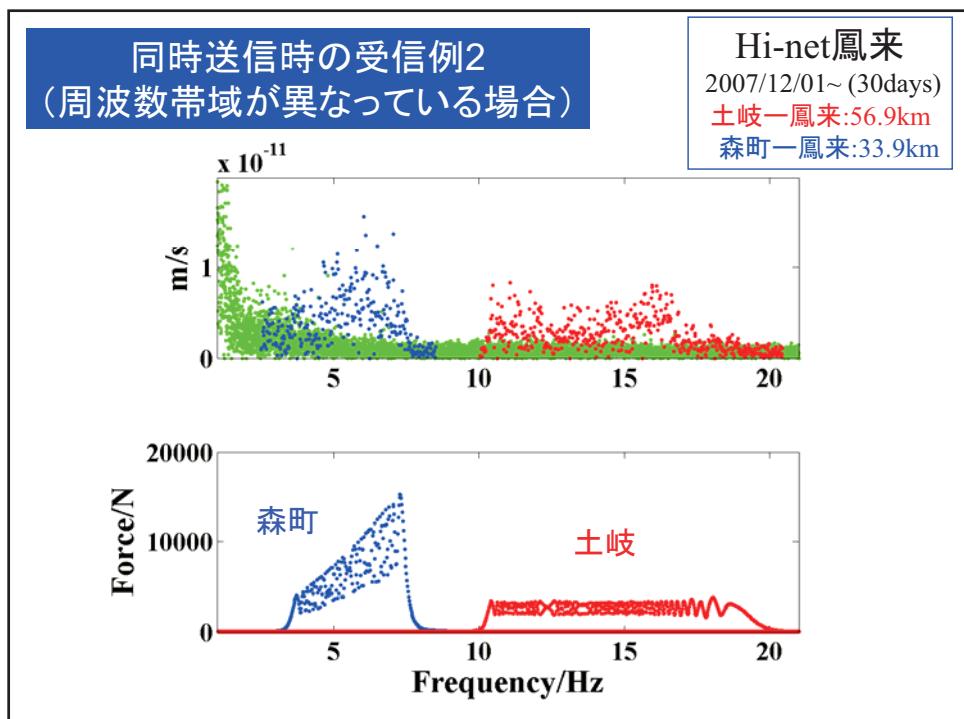
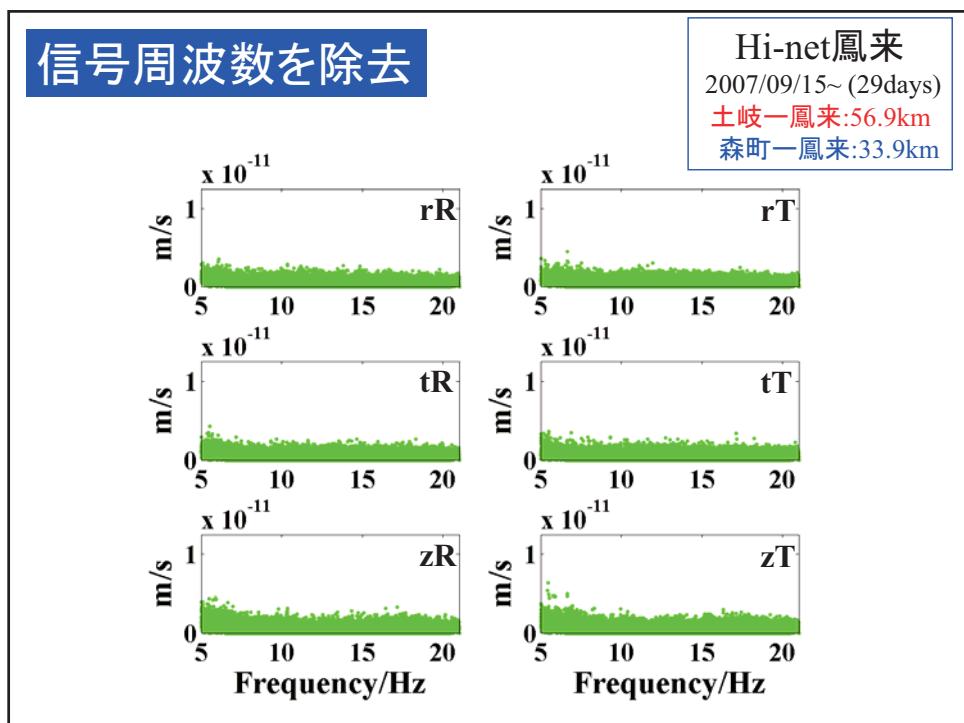
<欠点>

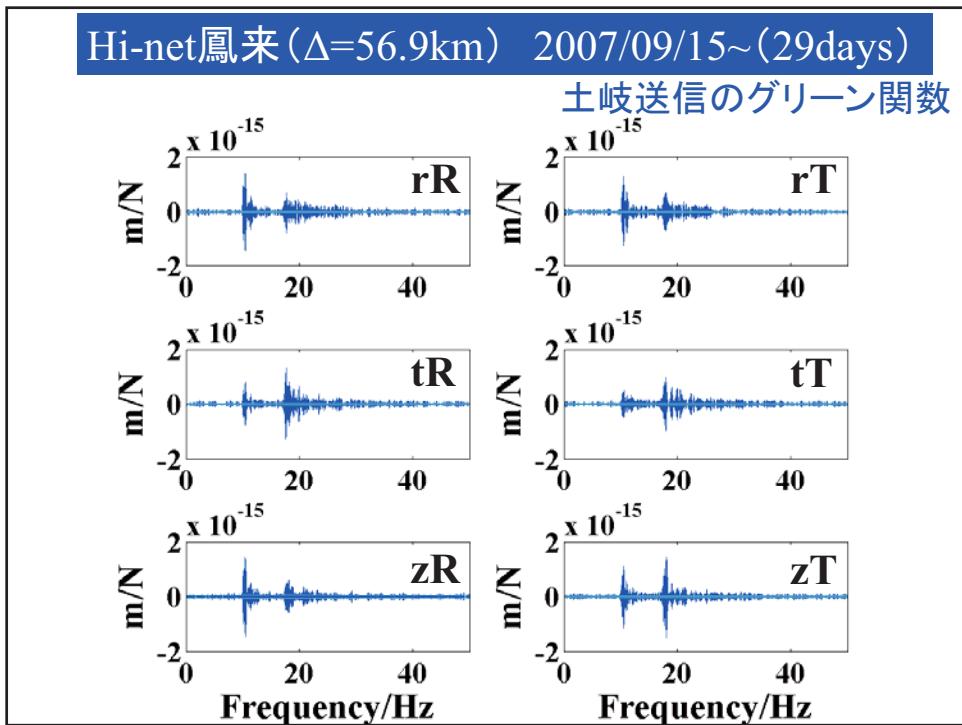
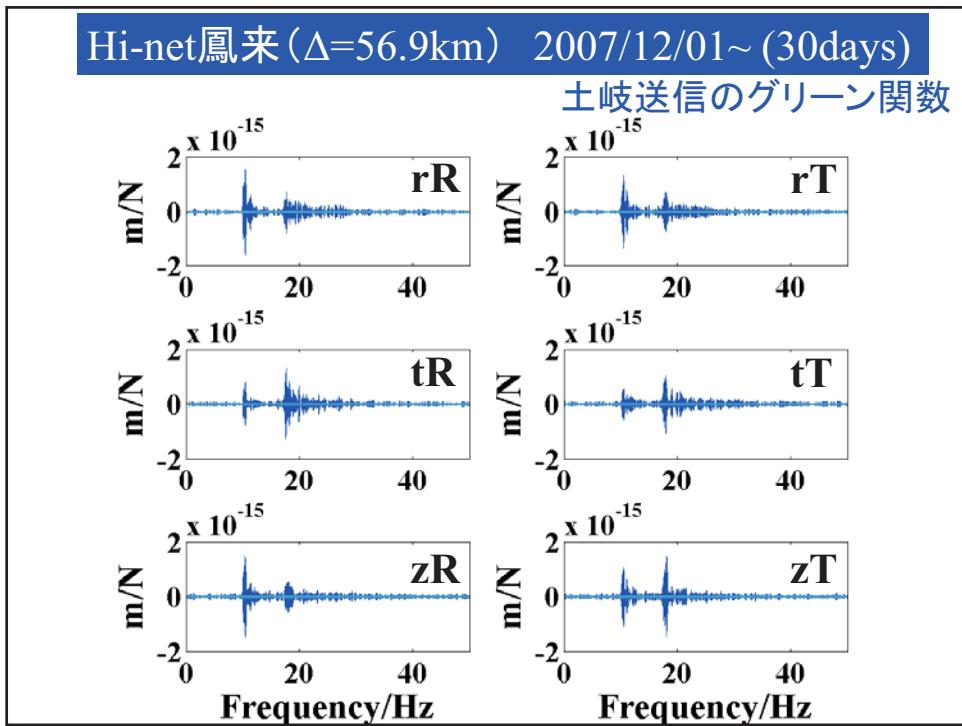
土岐でA1を用いる場合Hi-netなどの観測データに含まれる整数(特に10Hzの倍数)の周波数が使えない。



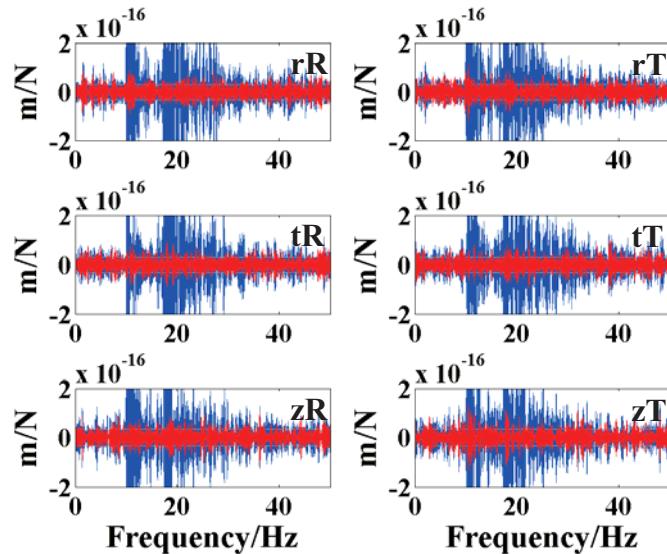




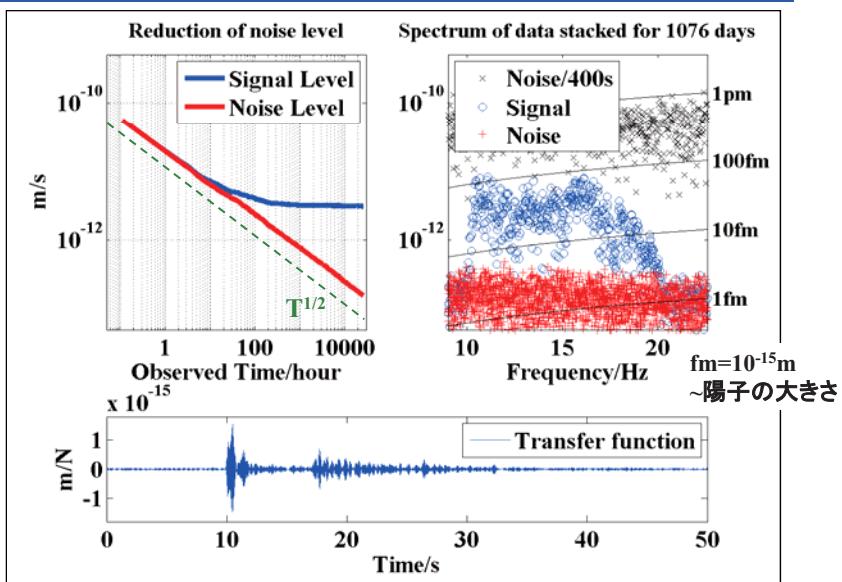


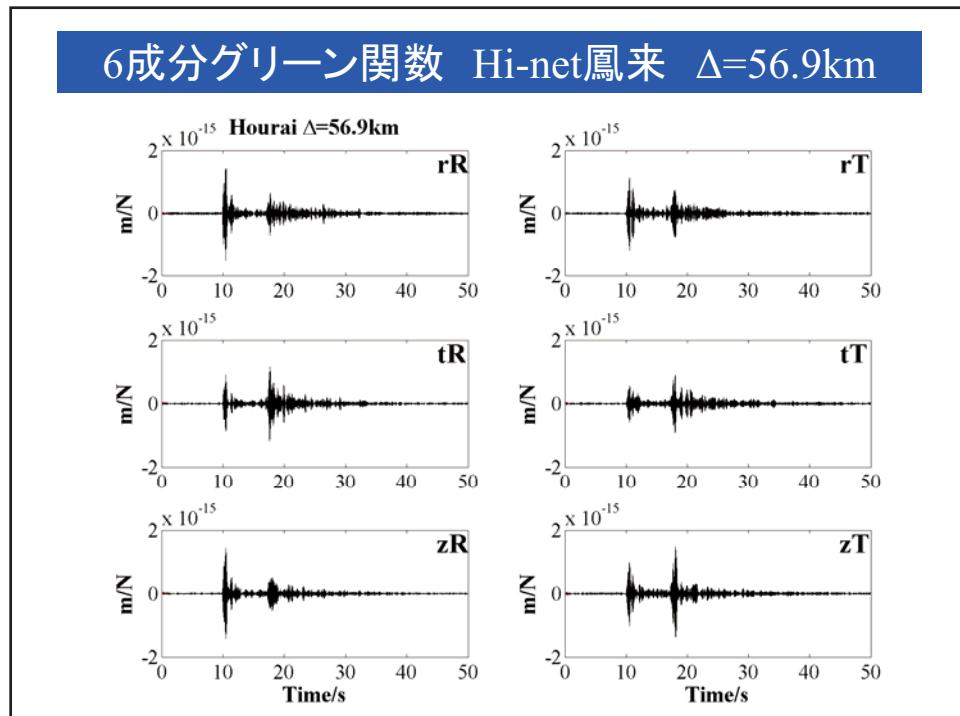
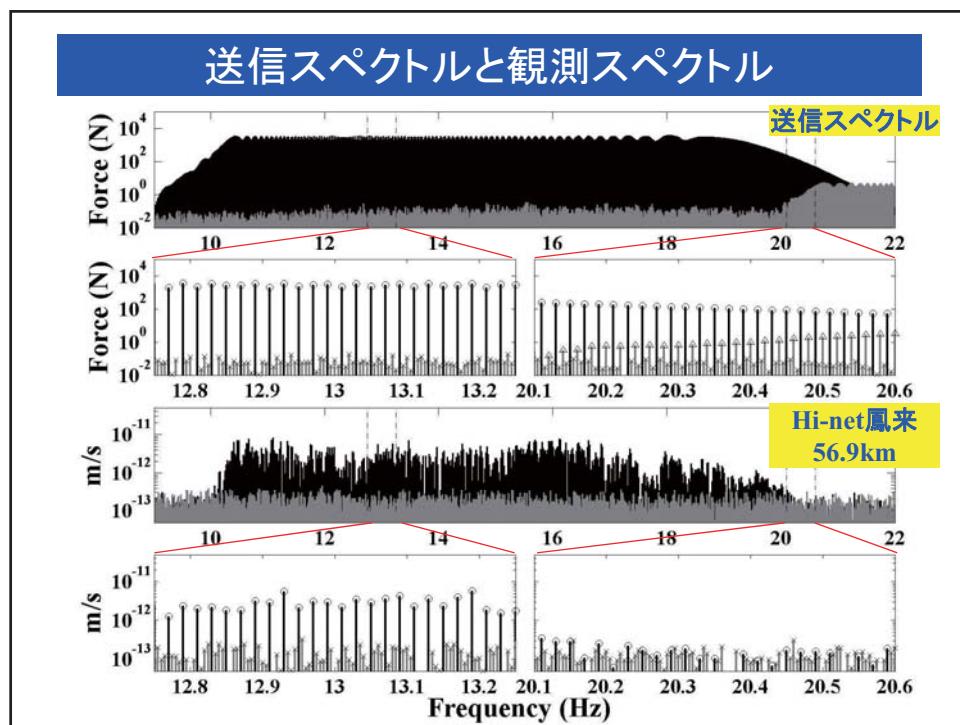


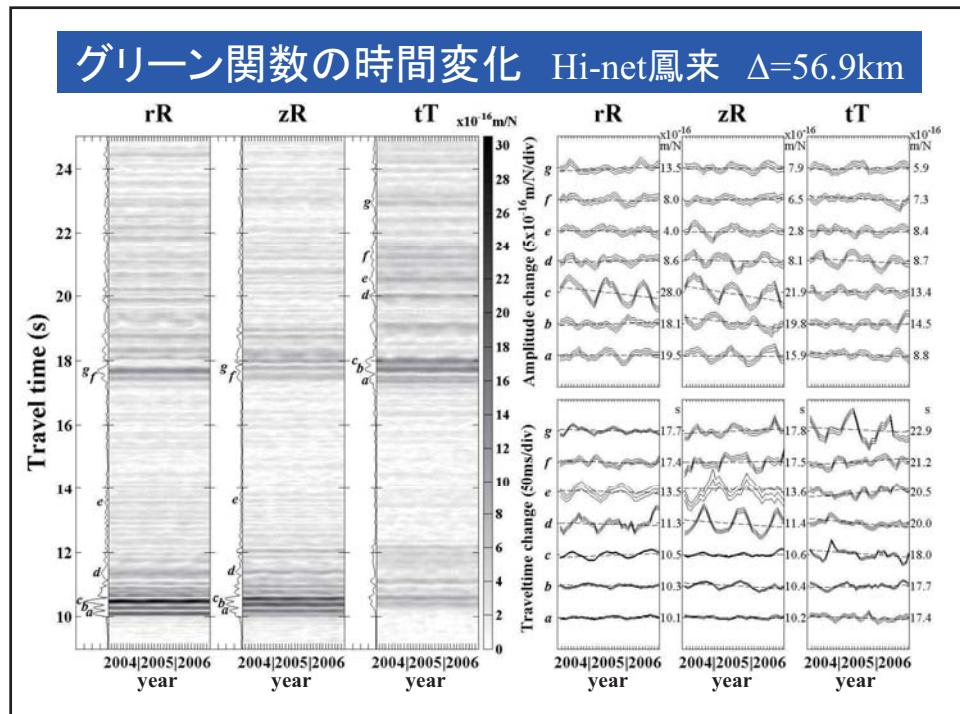
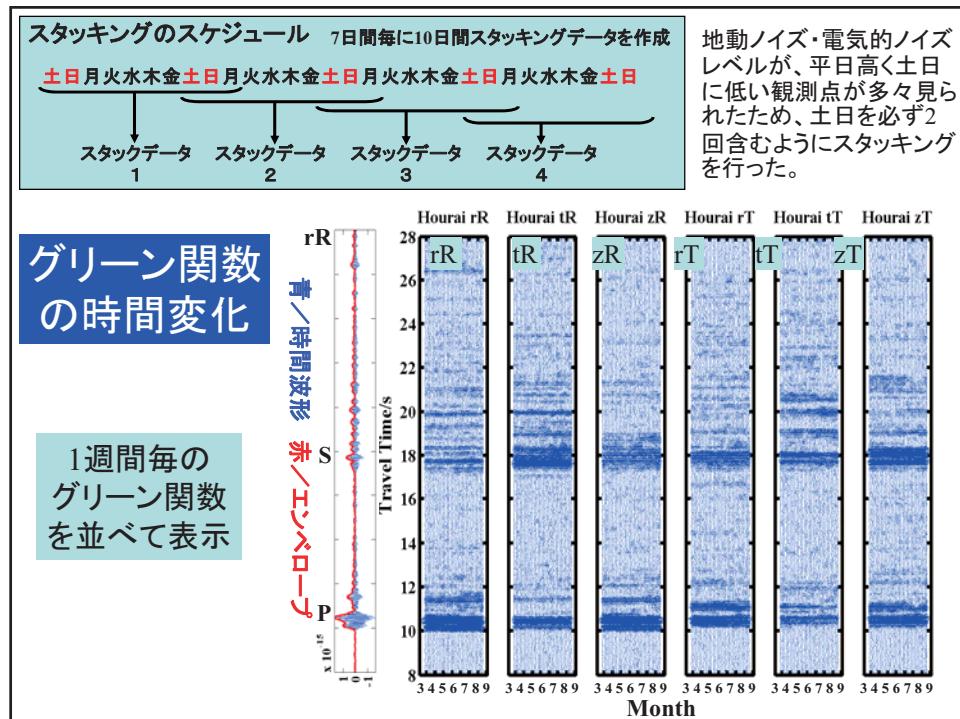
Hi-net鳳来 2007/12/01と2007/09/15との差
土岐送信のグリーン関数



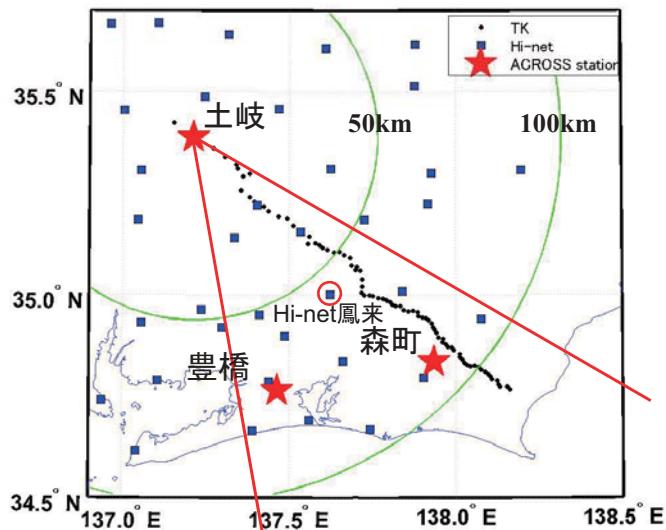
Hi-net鳳来 ($\Delta=56.9\text{km}$) 3年間スタッキング
2004/02/21-2007/02/11



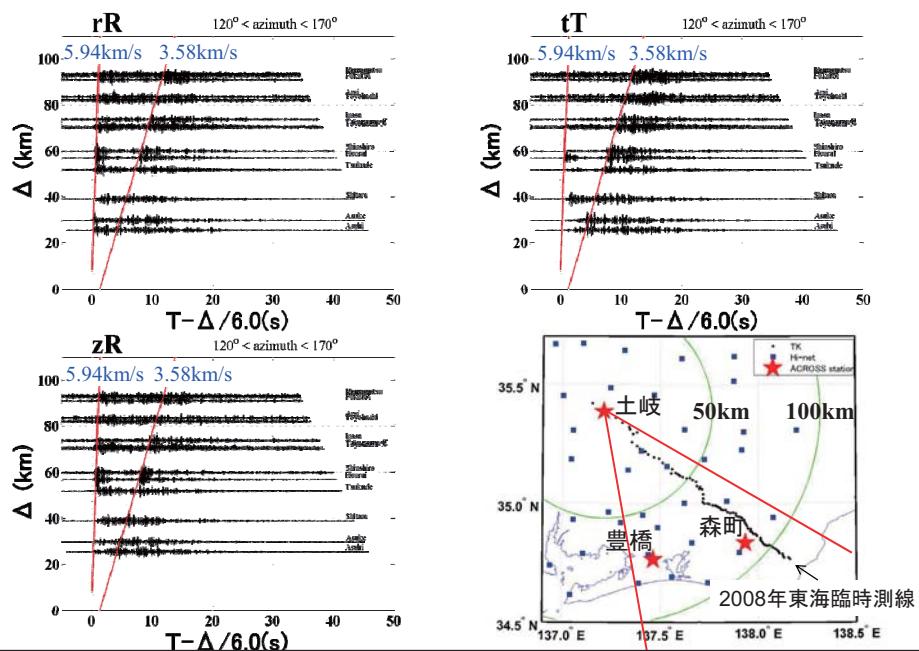


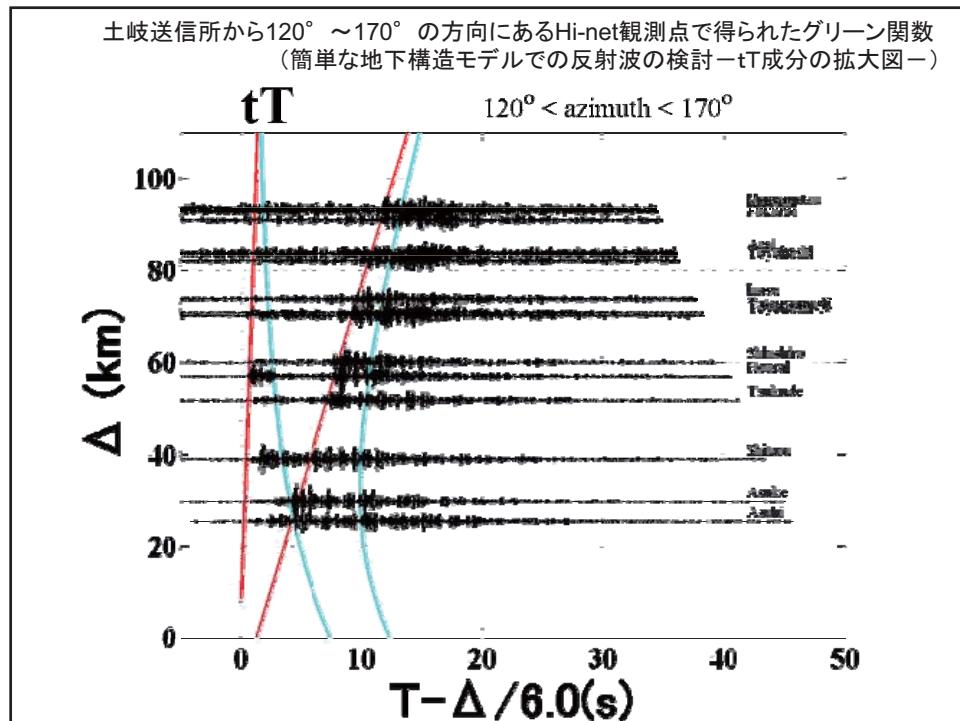
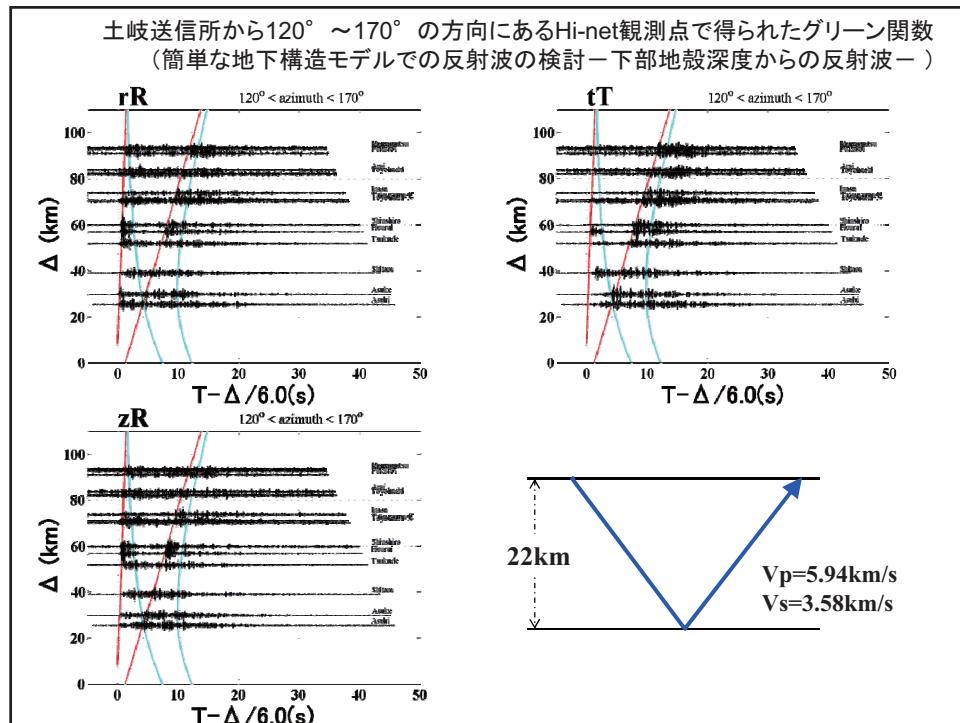


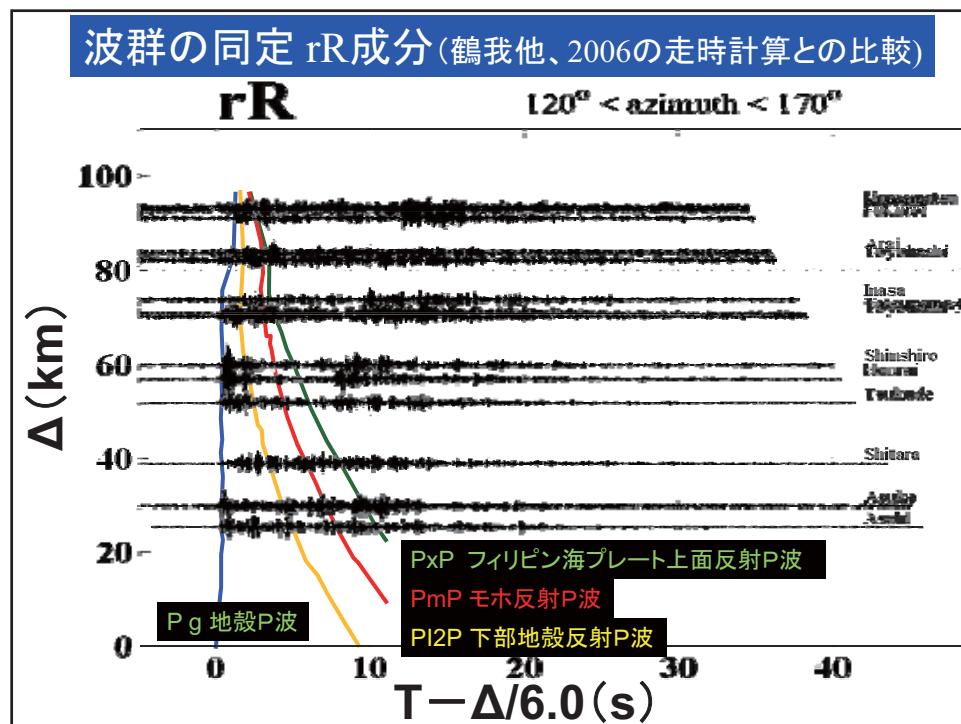
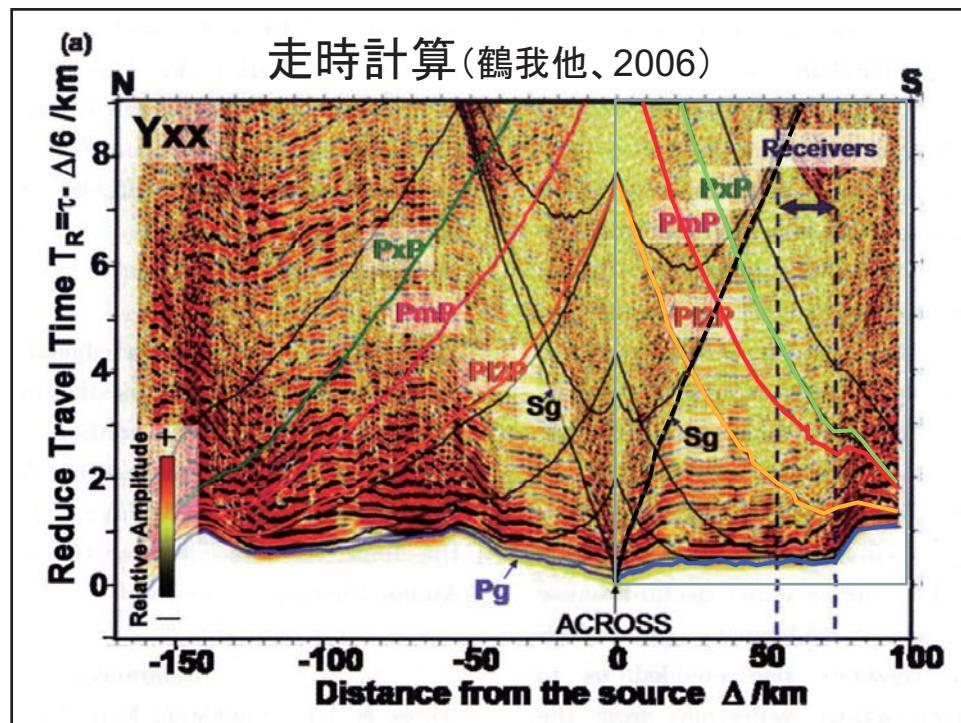
波群の径路は？ Hi-net鳳来 $\Delta=56.9\text{km}$

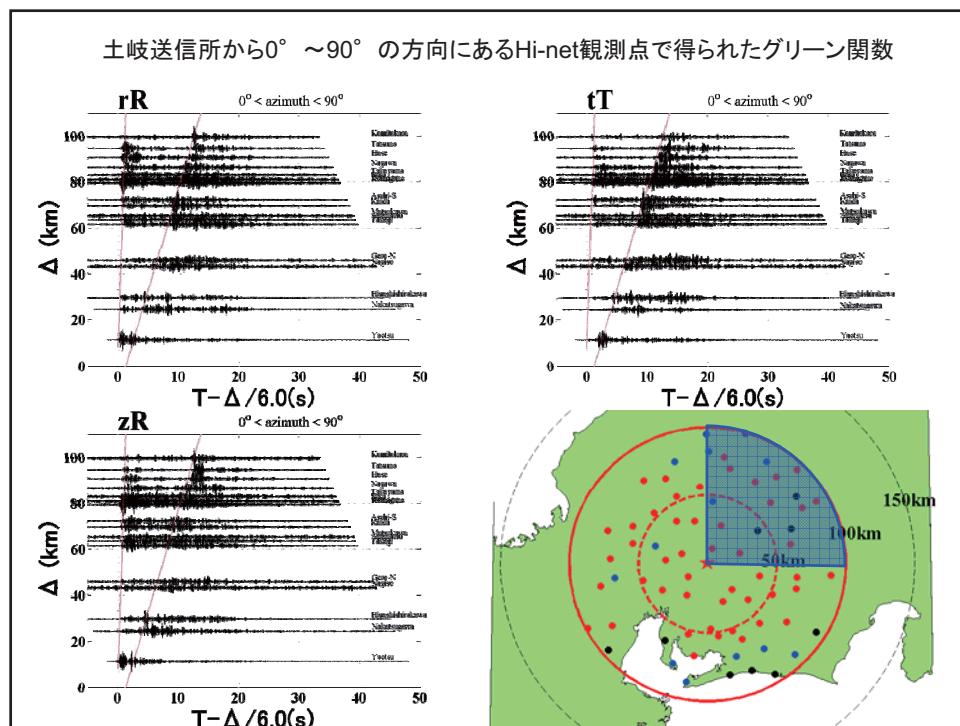
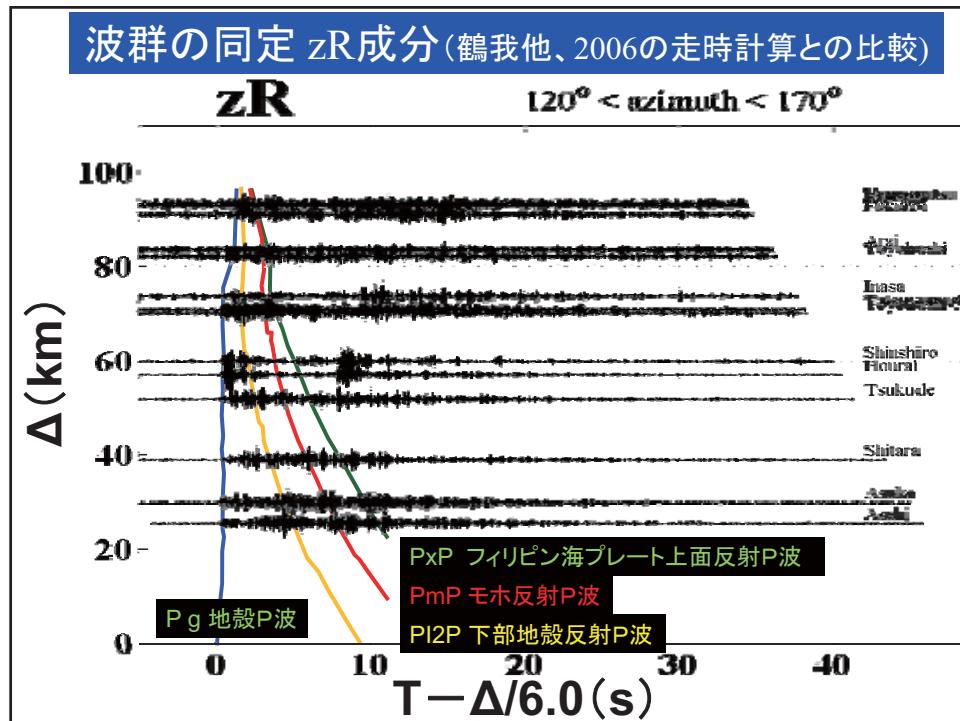


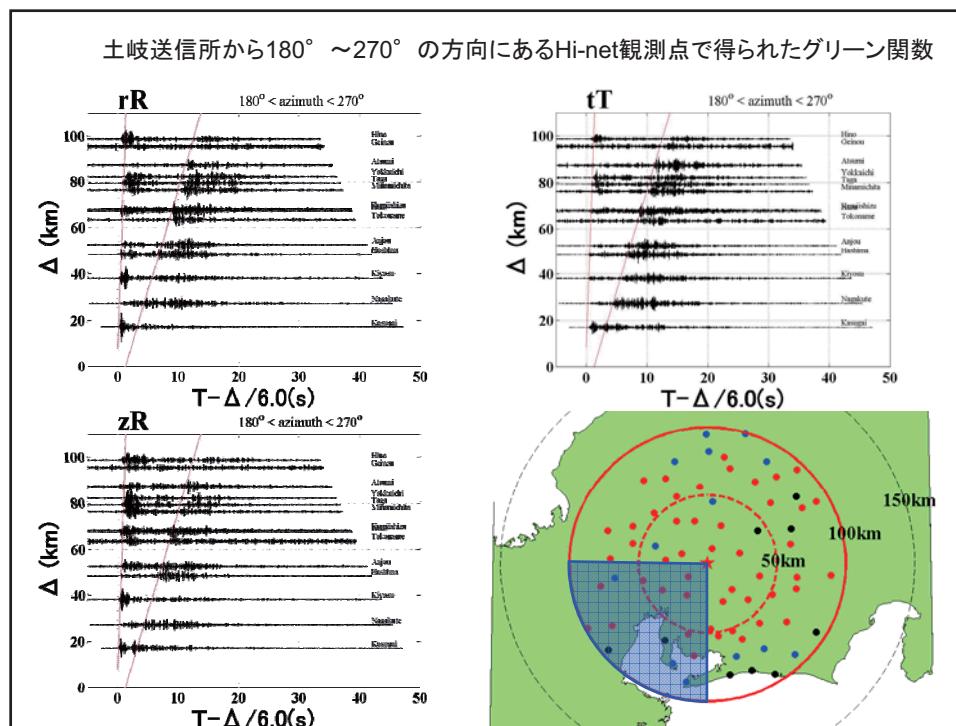
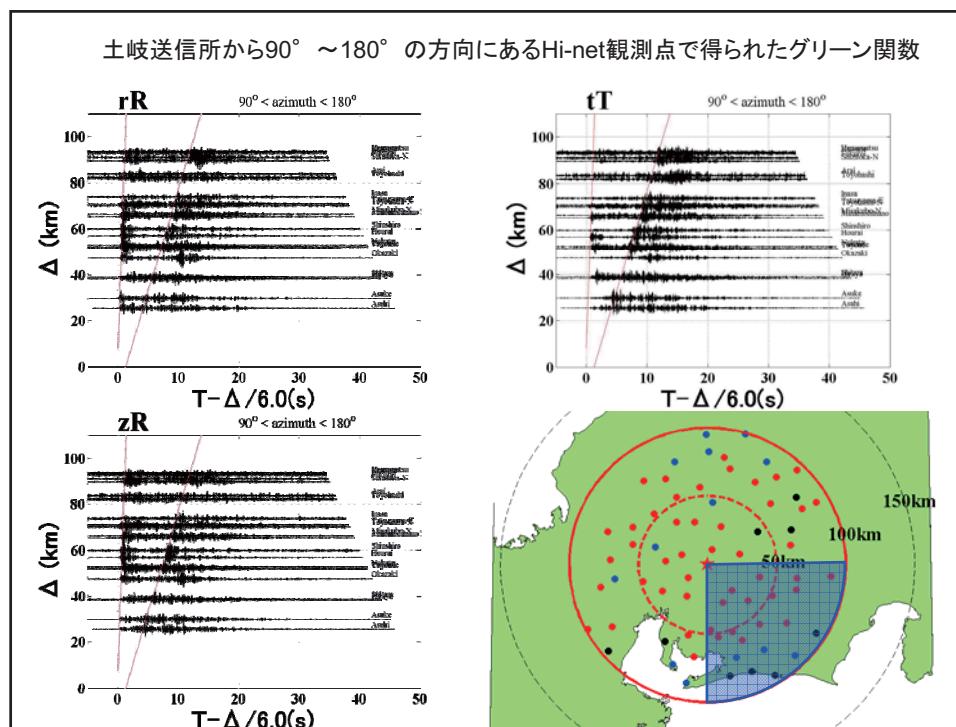
土岐送信所から $120^\circ \sim 170^\circ$ の方向にあるHi-net観測点で得られたグリーン関数
(東海地震の震源域方向へ伝わるアクロス信号)

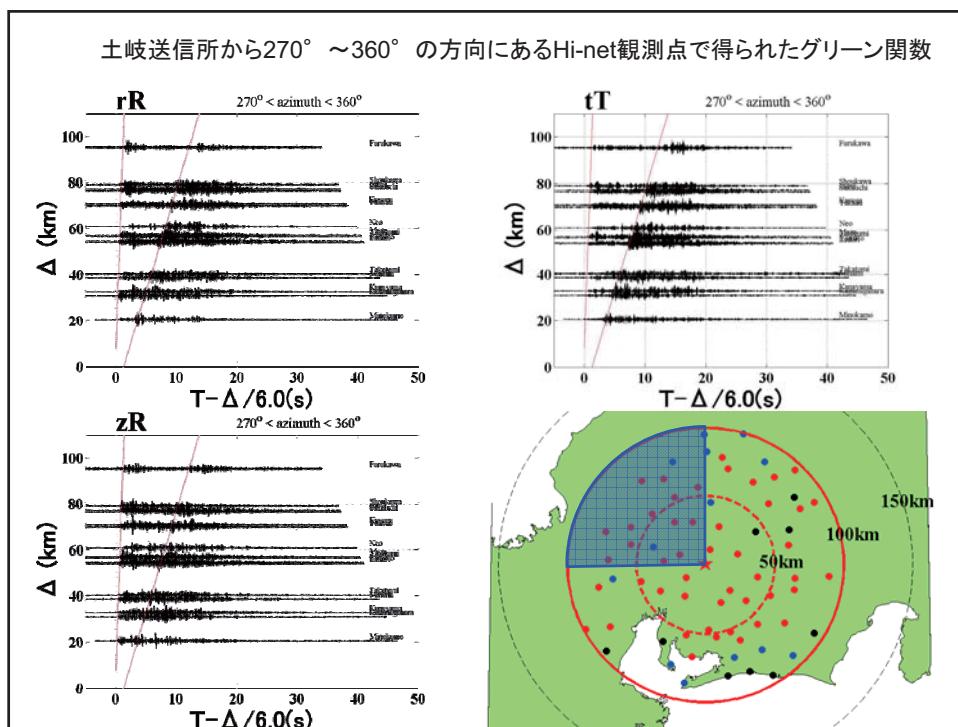












まとめ(結果と最終報告書への課題)

1. 送信規約に従った3か所からの同時送信が、約3年間に渡って順調に行われている。
2. Hi-net鳳来観測点などで、時間変化が捉えられた。
 - 1)走時によって変化が異なり、各々の径路での積算として変化していると考えられる。
 - 2)波群の同定は、地下構造のモデル計算、観測点密度などの点で不十分であるので、もう少し詰める(東海臨時測線の解析や名大のアレイ観測の結果なども参照する)
 - 3)時間変化の詳細な議論は、次期への課題。
3. 土岐送信所から360度の方向の伝達関数・グリーン関数が得られた。

全ての方向における地下構造や時間変化などについても、できる限り考察する。

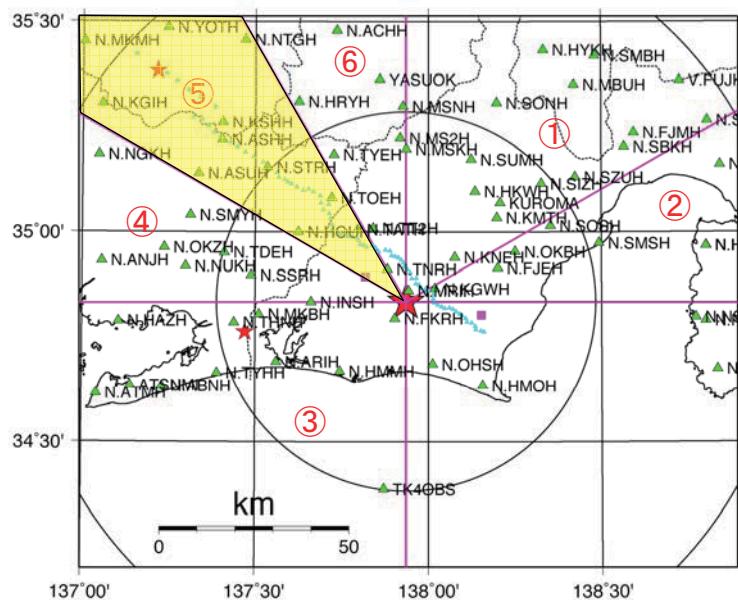
2.3



内容

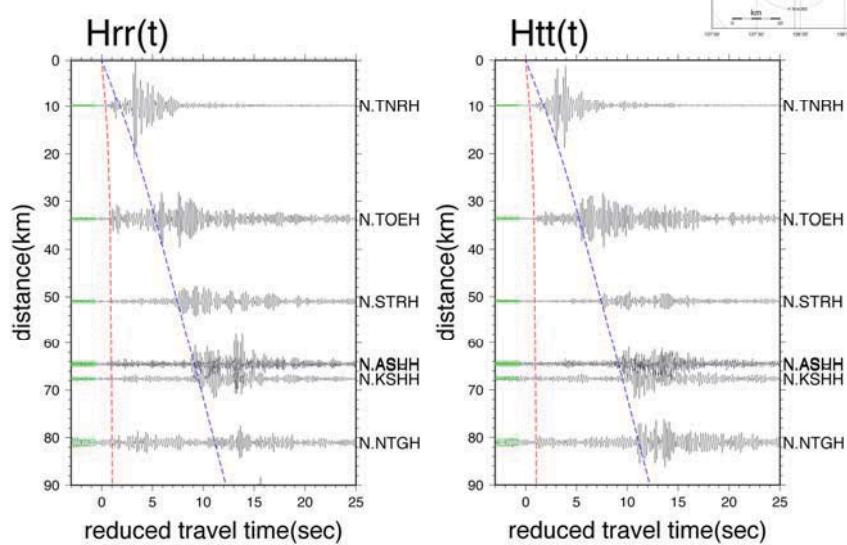
- ・ 東海臨時稠密地震観測データの解析
 - 定常観測点は密度が少ないため波群を追えない
 - ・ 10kmに 1 観測点の密度
 - ・ どこを通ってきた波かわからない
- ・ Hi-net 森観測点 (N. MRIH) における走時の時間変化
 - 近い観測点で見た走時の変化の原因を探る
 - 補正の方法はないだろうか？

定常観測点を用いた解析

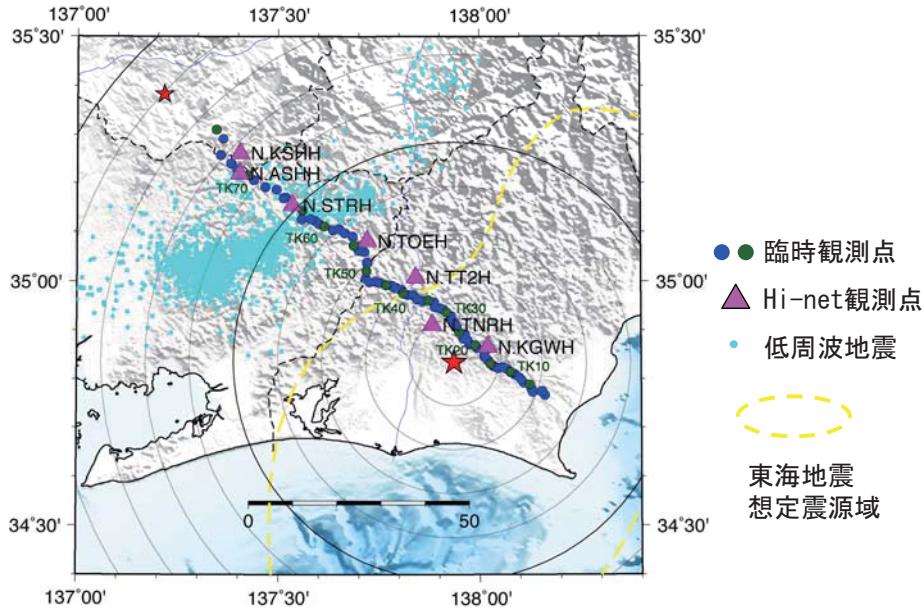


伝達関数の記録断面

⑤方位角：300～330度



東海臨時稠密地震観測の観測点分布図

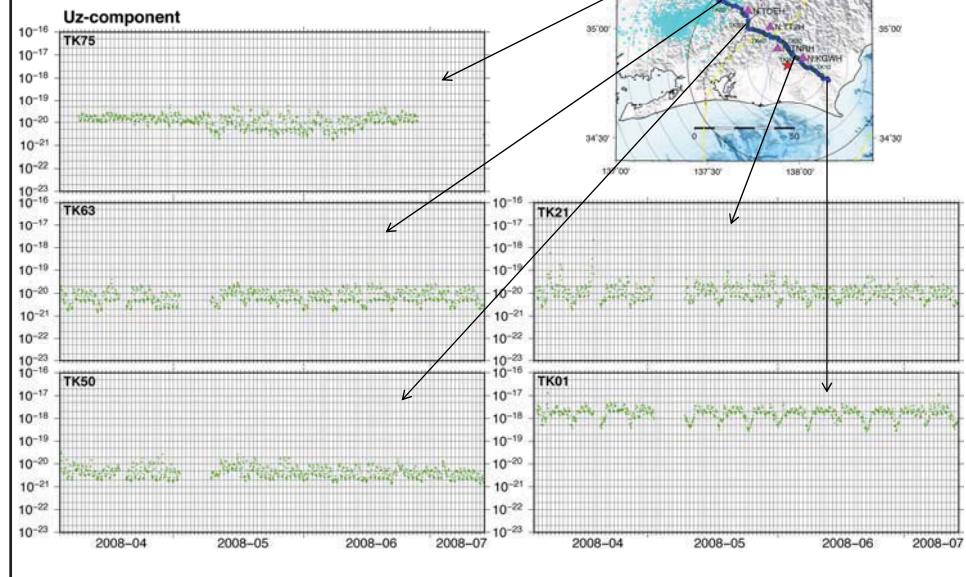


東海臨時稠密地震観測の概要

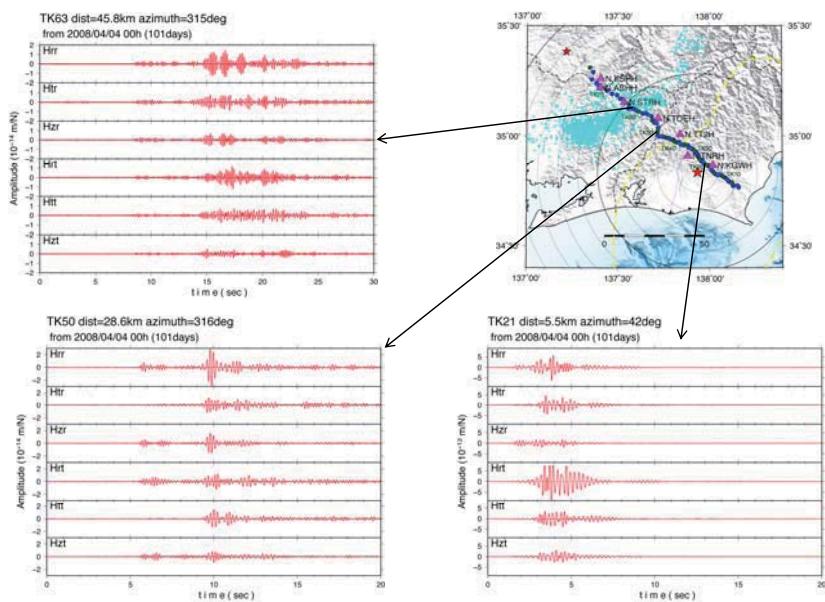
- ・期間：2008年4月～8月（約5ヶ月間）
- ・観測点密度：約100kmで75観測点
約1.3kmで1観測点
- ・地震計：3成分1Hz
- ・解析
 - 森町送信点の信号を使用
 - 低周波送信($5.51 \pm 2\text{Hz}$)を使用
 - スタック期間：約90日間
 - テンソル伝達関数を求める



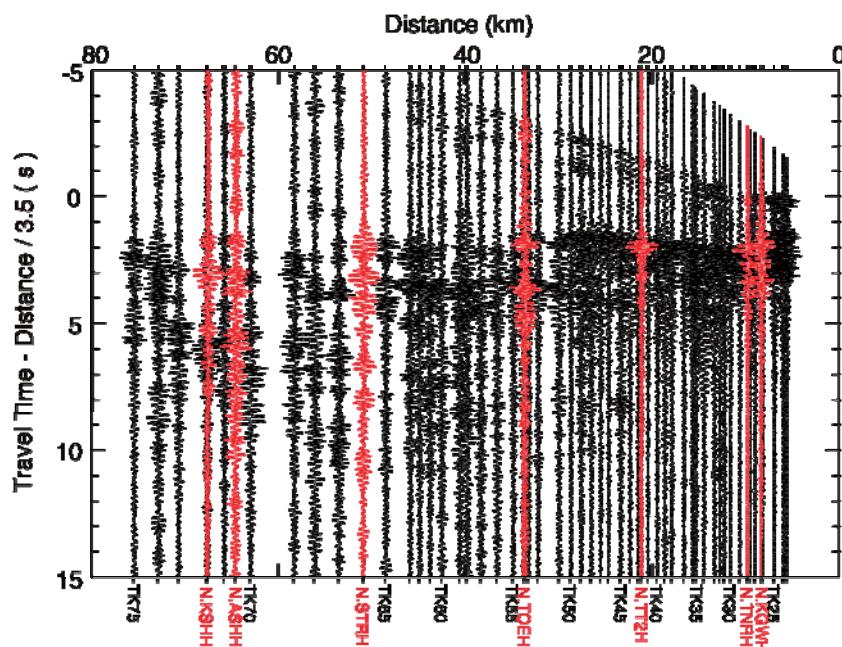
ノイズレベルの時間変化



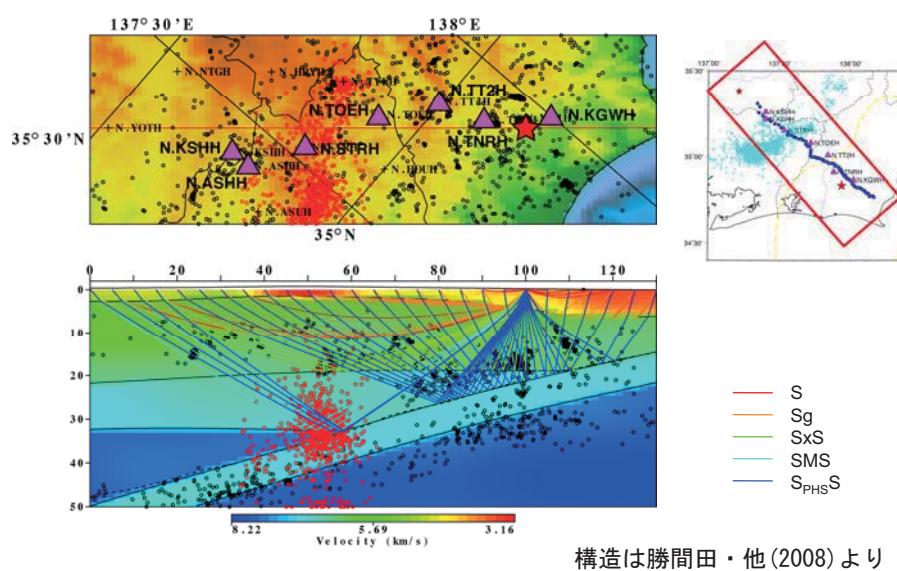
伝達関数テンソル



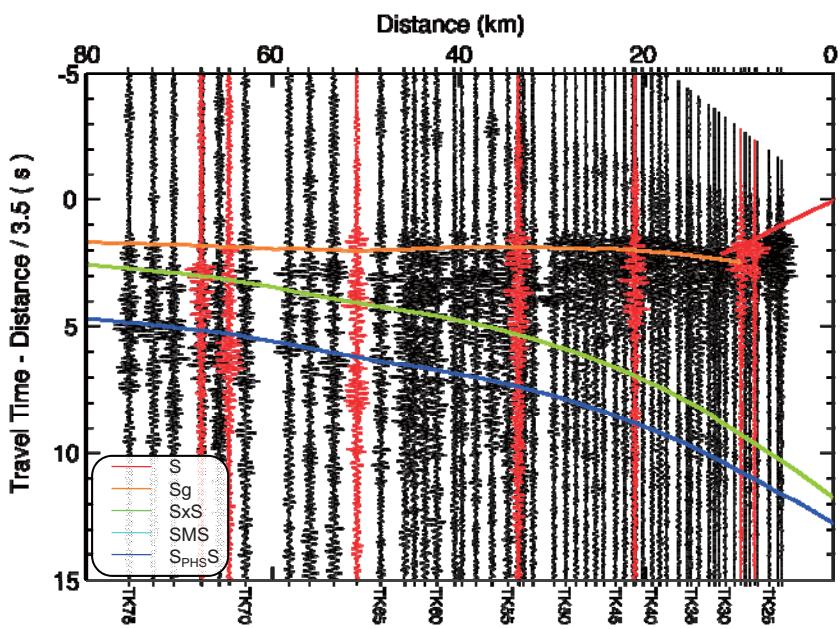
Hrr の記録断面



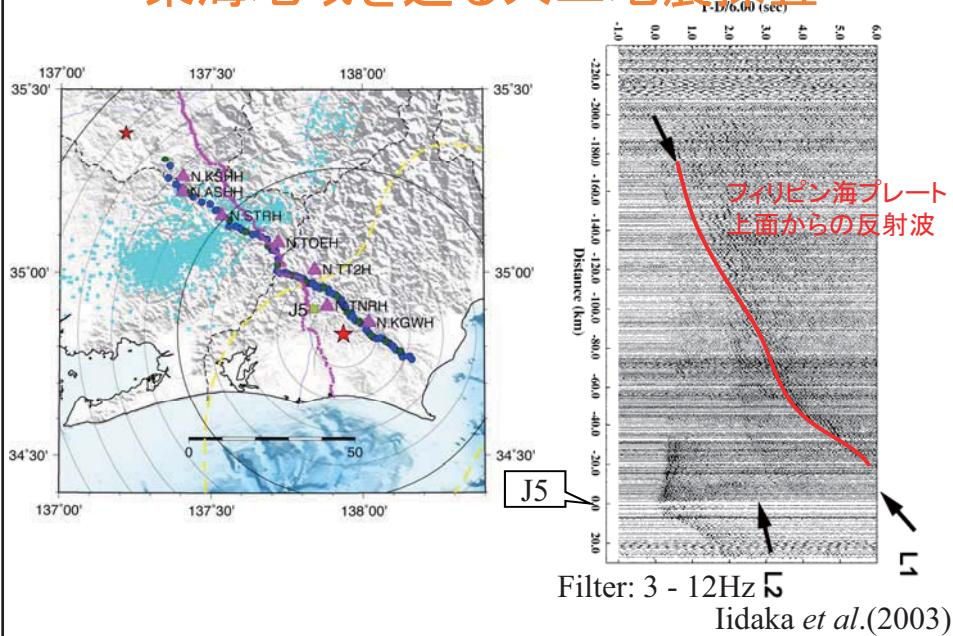
仮定した速度構造



Htt の記録断面（北西方向）

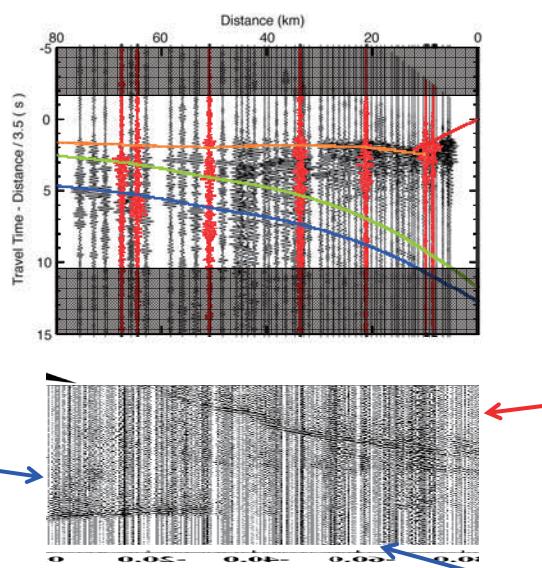


東海地域を通る人工地震探査



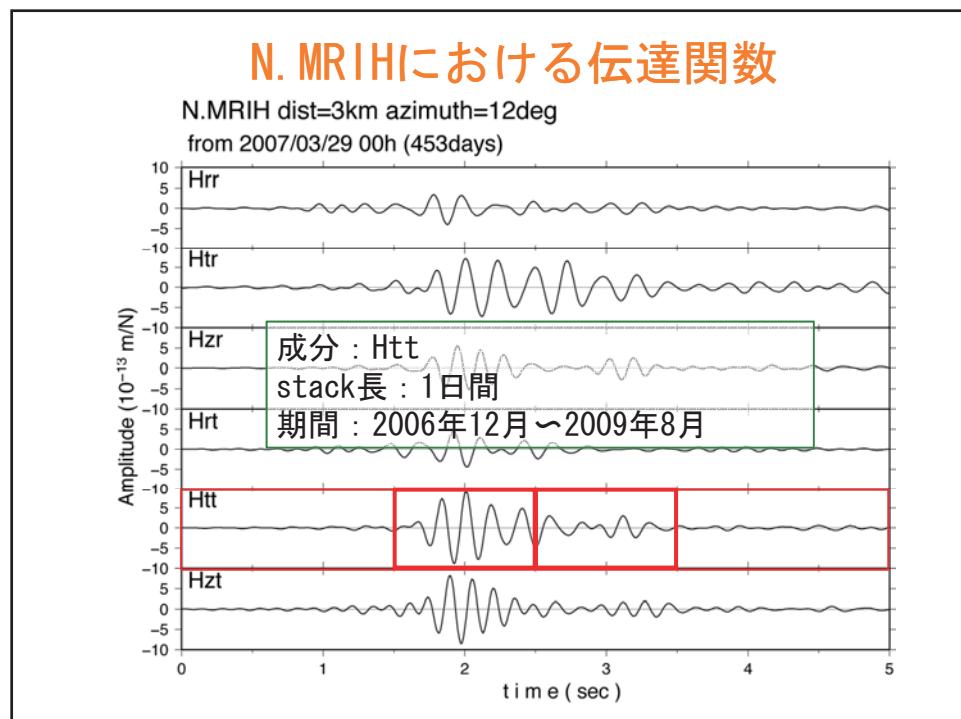
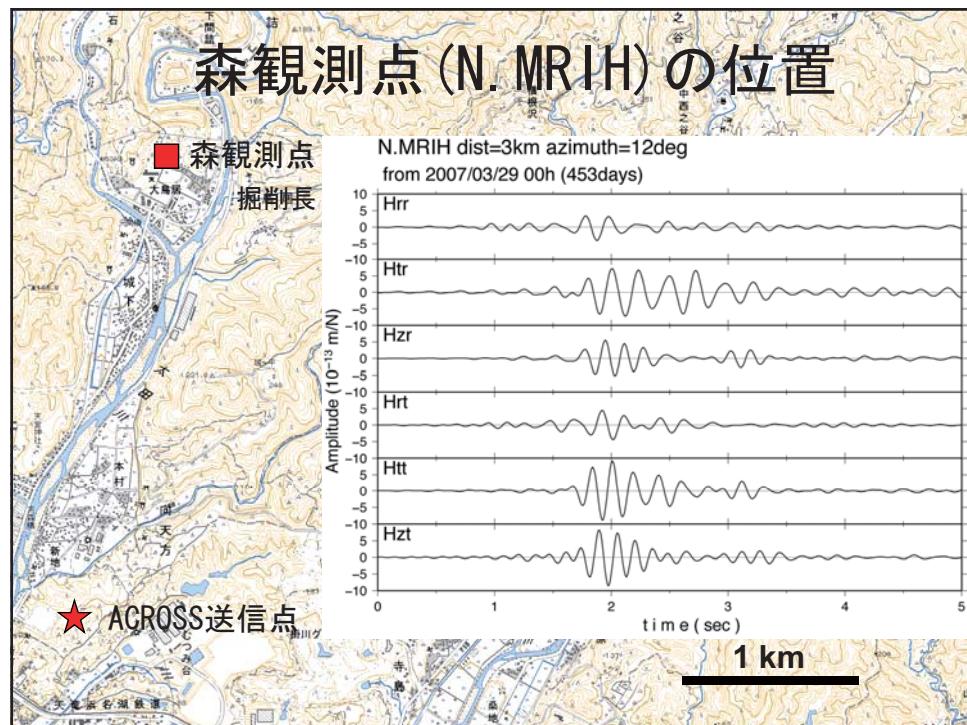
人工地震探査(2001)との比較

森町アクロス
の記録断面
(Htt成分)

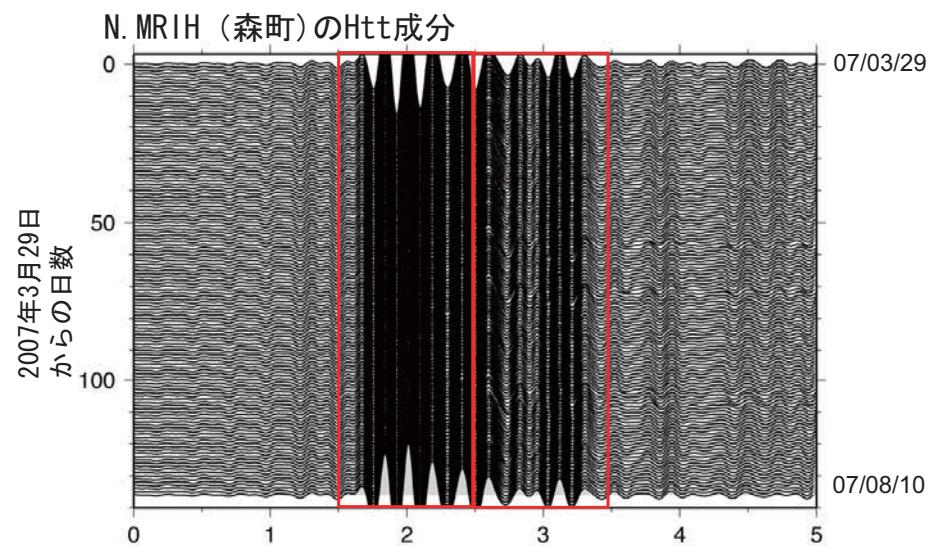


結論と今後の展望

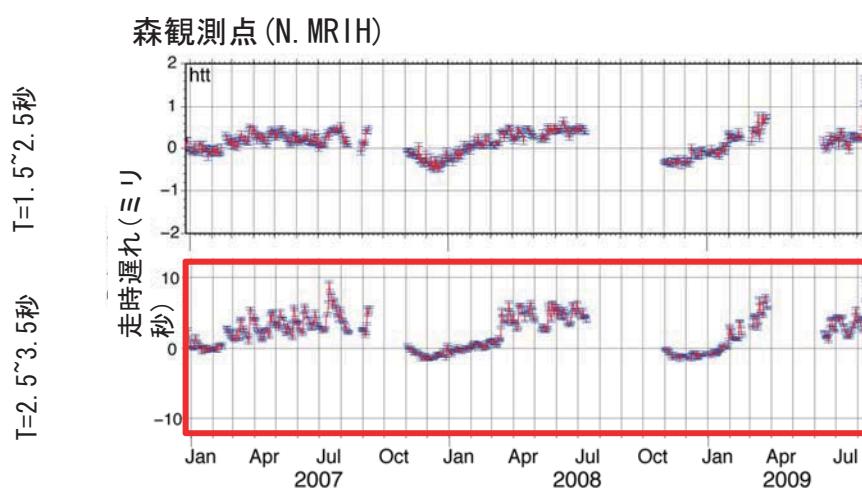
- ・ 稠密地震観測点を用いた森町アクロスの解析
 - 波群を追えるようになった
 - 既存の3次元速度構造と比較
 - ・ 今後の展望
 - 詳細な構造を入れる
 - 波形計算による比較
 - 逆測線を使って
 - 各相の時間変化を求める
- } 相の同定精度の向上



伝達関数の時間変化

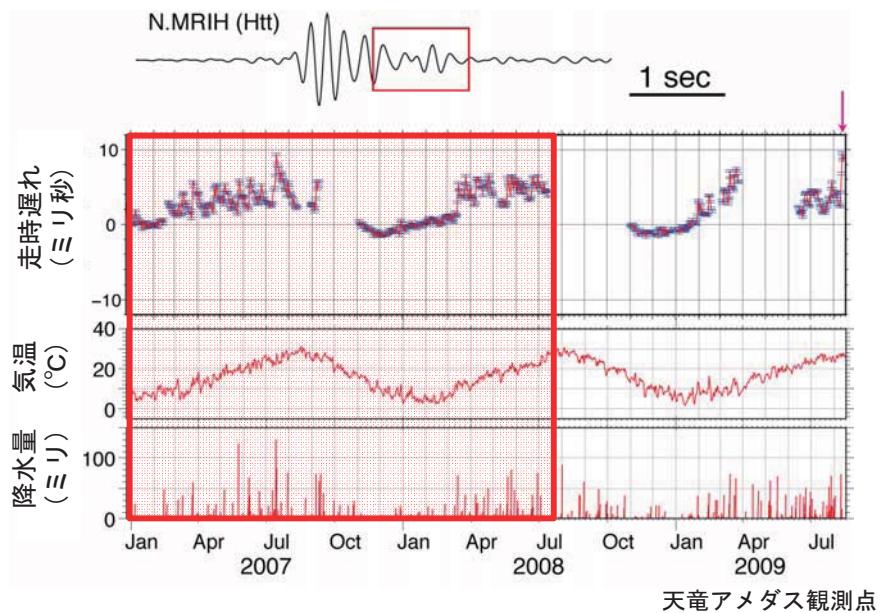


N. MRIH伝達関数の走時変化

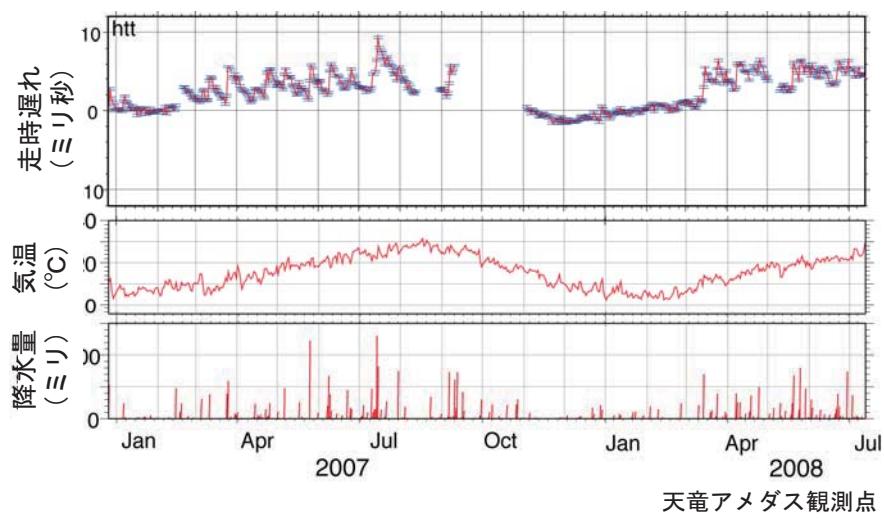


2つの周期 : ①年周変化 ②10日くらいの変化

N. MRIH伝達関数の走時変化



N. MRIH伝達関数の走時変化



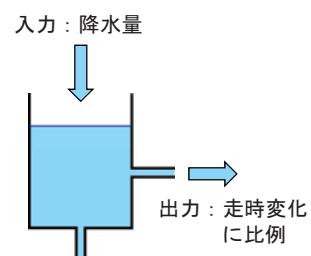
タンクモデルを使った降水量の補正

・ 歪計の降水補正

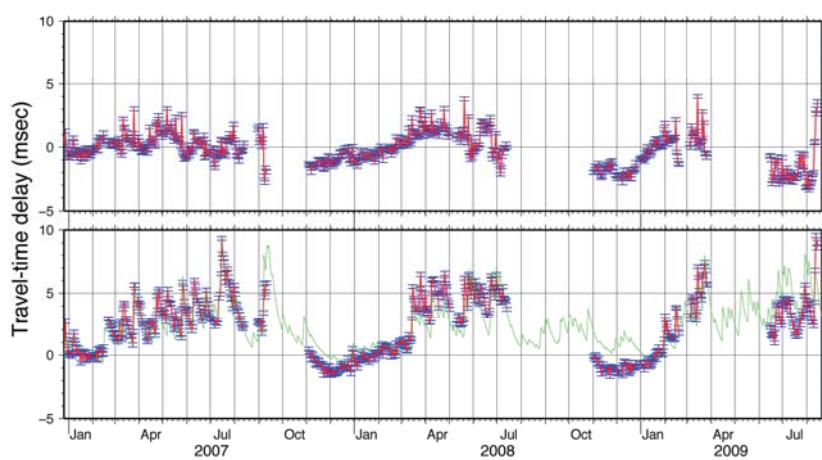
- タンクモデルがよく使われる
- 走時変化にも応用できないか？

・ タンクモデル

- 非線形性を表現できる
- 降雨流出過程という意味づけ
- 試行錯誤でパラメターを決める
- 今回は1段のタンクのみを考える
 - ・ 予備解析の結果



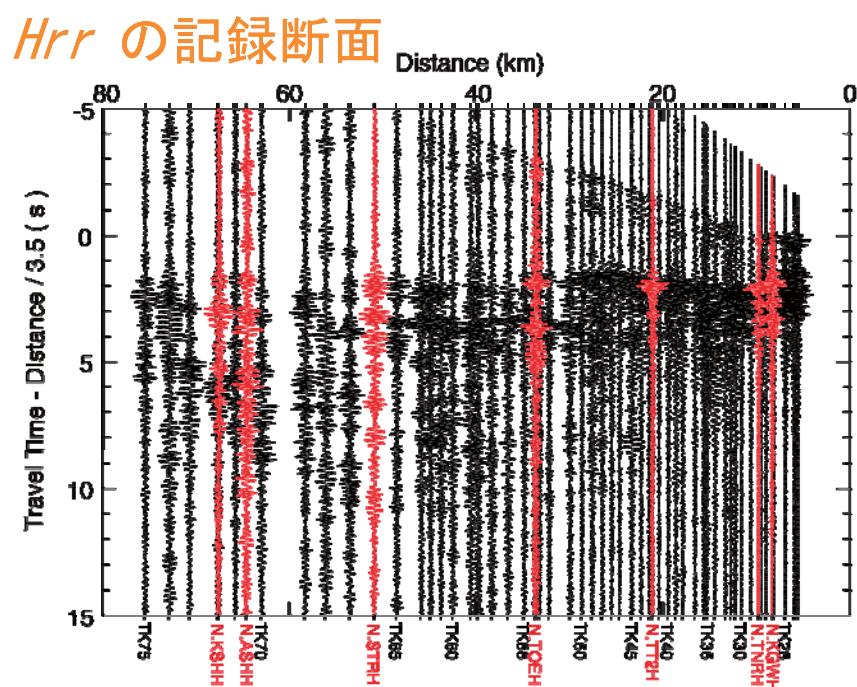
走時変化を降水量で説明できる？



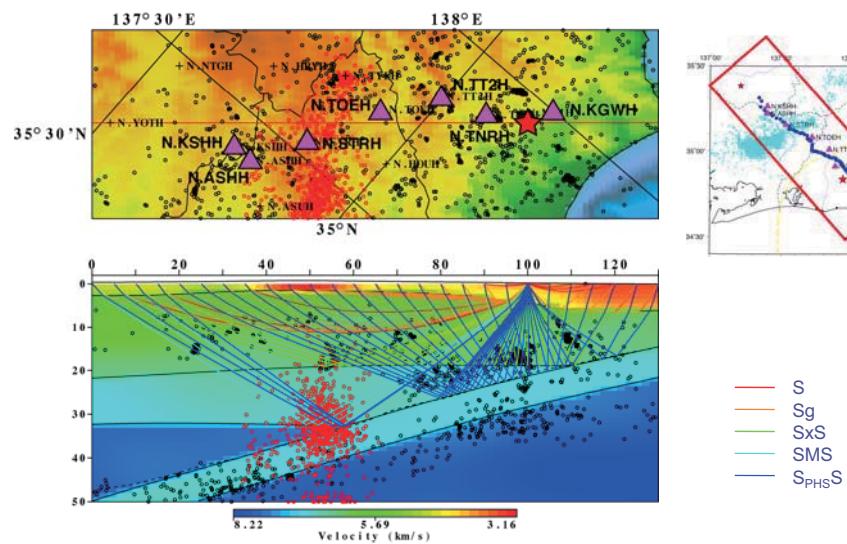
2.4

アクロス信号の走時とプレート境界 反射点の推定

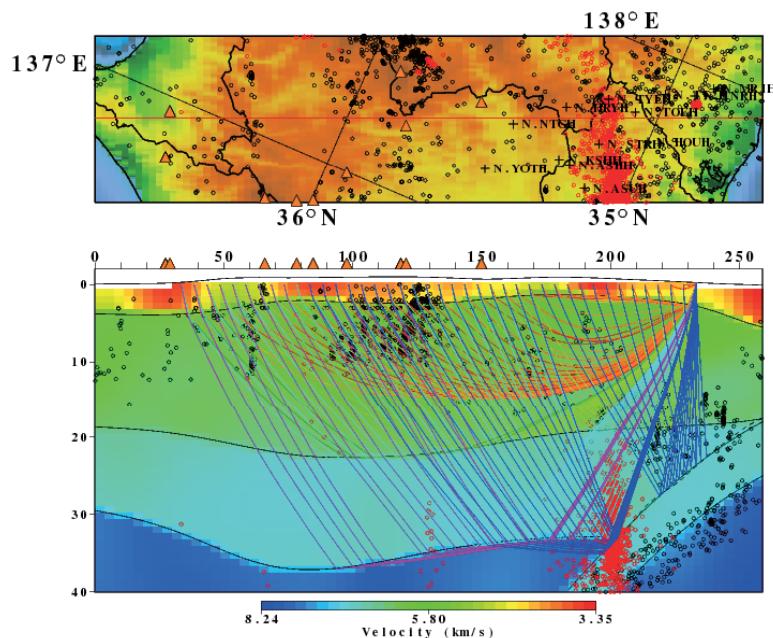
勝間田 明男 (気象研究所)



速度構造

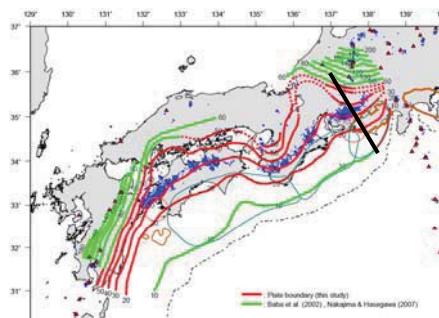


使用している構造と波線

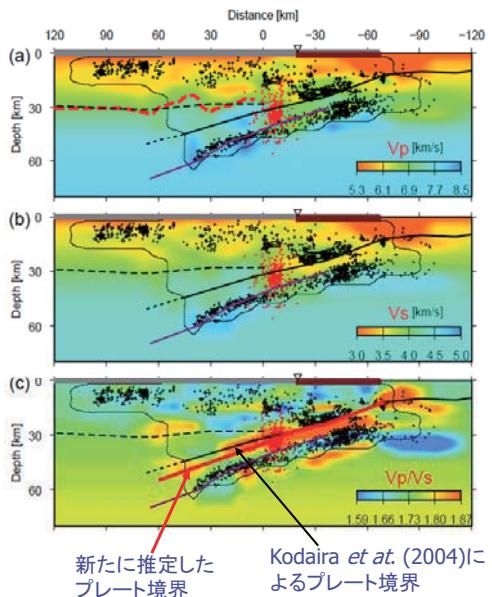


弘瀬・他(2007)によるDDトモグラフィー法に基づくプレート形状推定

測線に沿って行われた人工地震探査で得られたプレート境界面 [Kodaira *et al.* (2004)]と、上記の低Vs・高Vp/Vs層の上端はほぼ一致する。

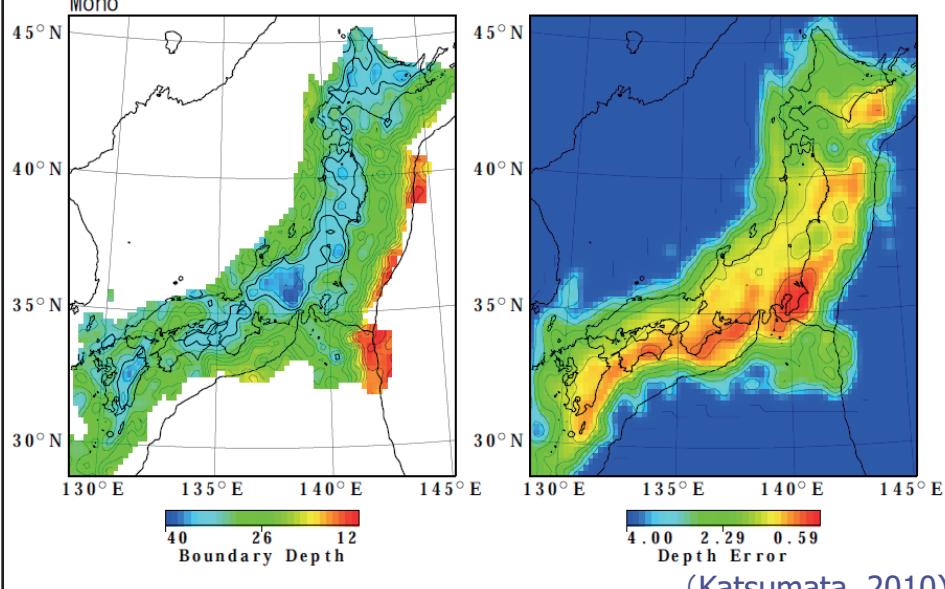


低Vs・高Vp/Vs層の上面がプレート境界に相当⇒新たなプレート形状



推定モホ面深さ

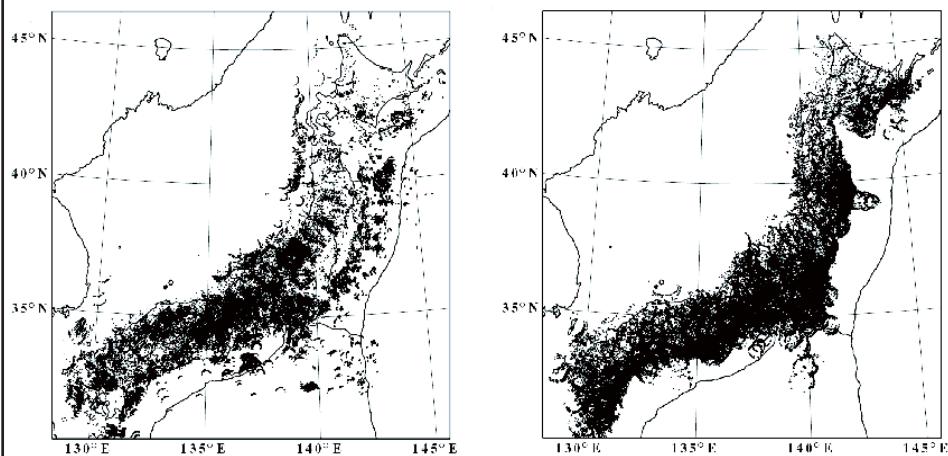
Moho



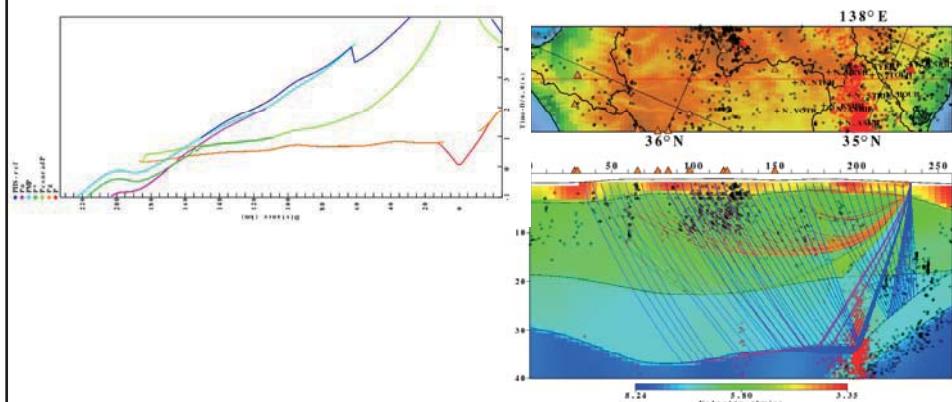
屈折波のモホ面通過点

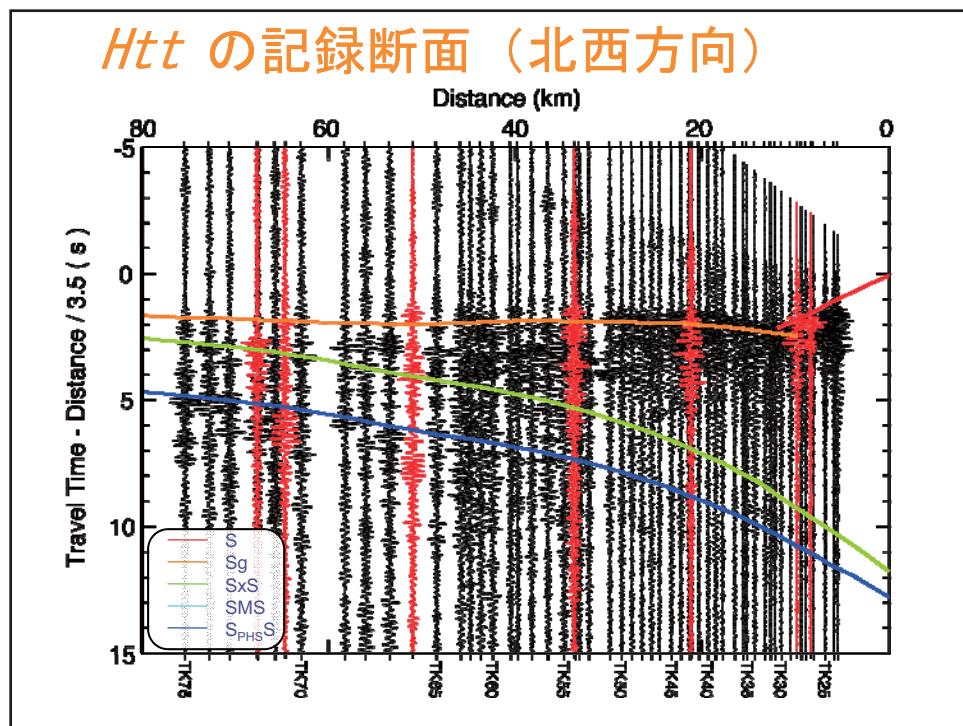
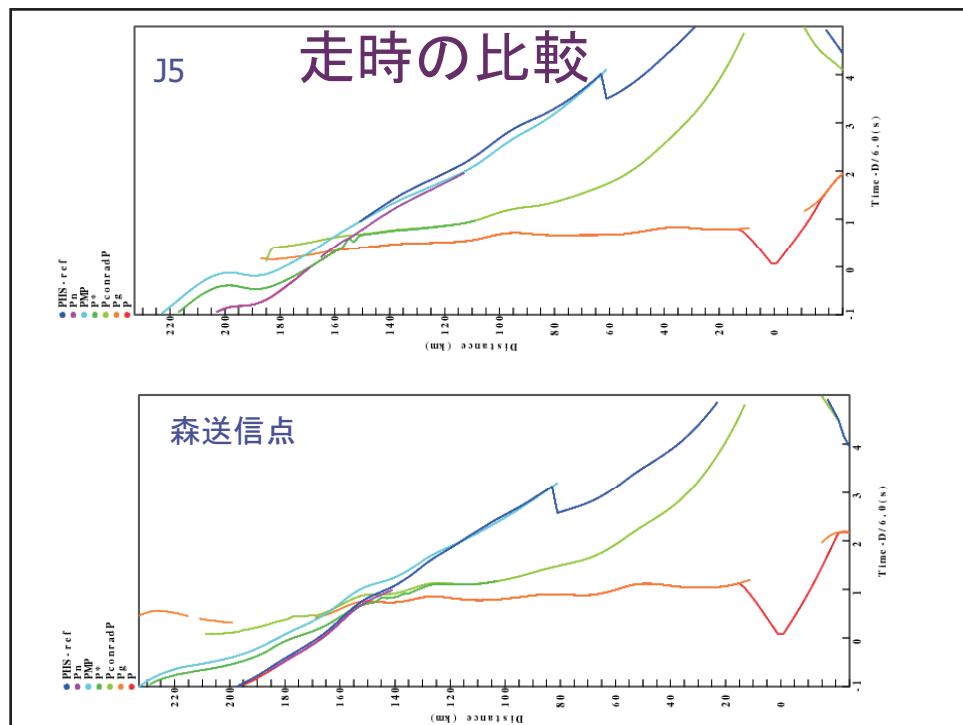
下向き

上向き



走時と構造

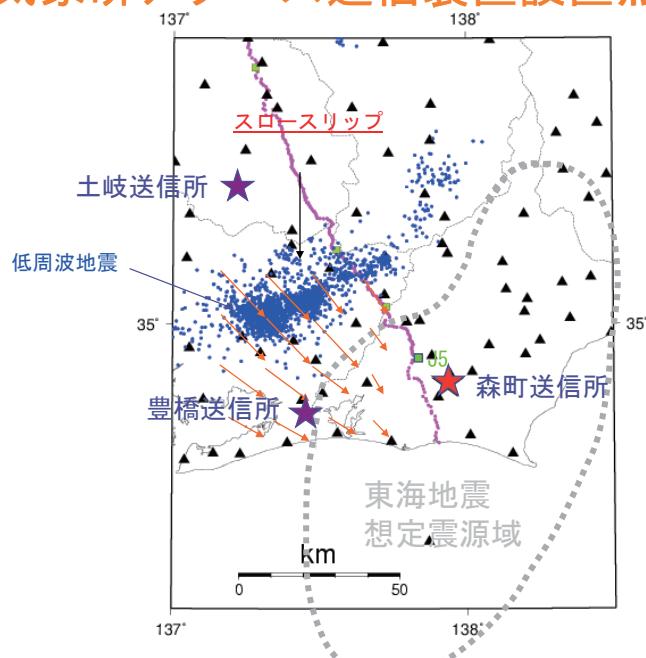




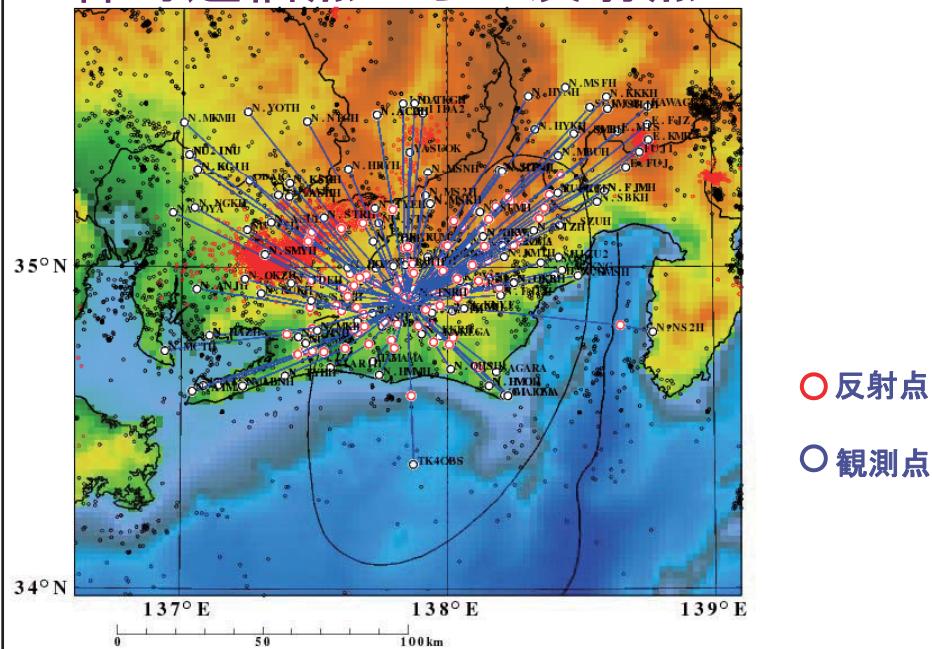
速度構造の改善について

- ・初動走時のフィット
トモグラフィーとして可能。
- ・プレート境界深さ
途中の速度とのtrade-offが大きく、独立して推定することは困難。
- ・後続波の振幅等
差分法等の波形全体の推定が必要。

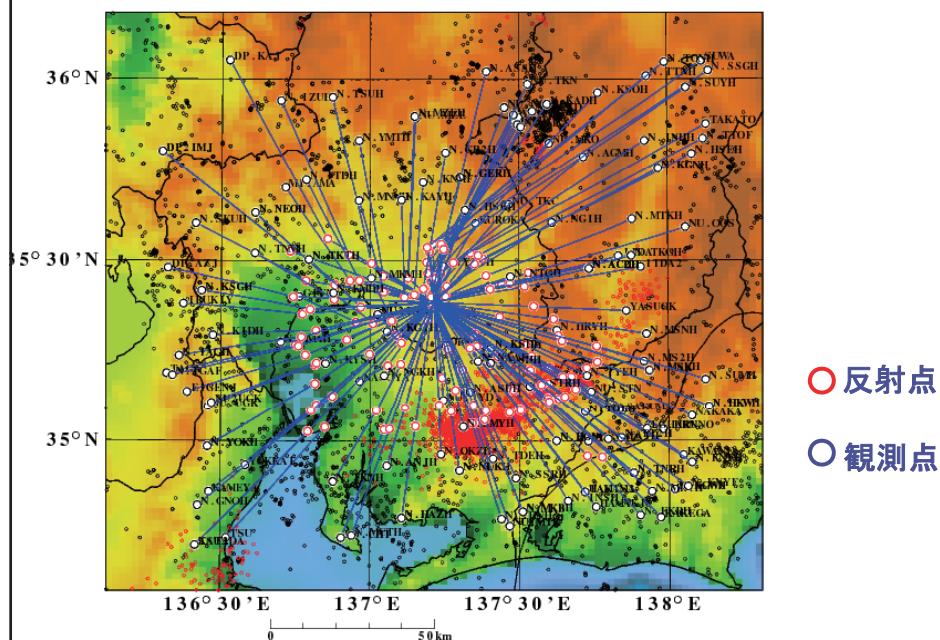
気象研アクロス送信装置設置点



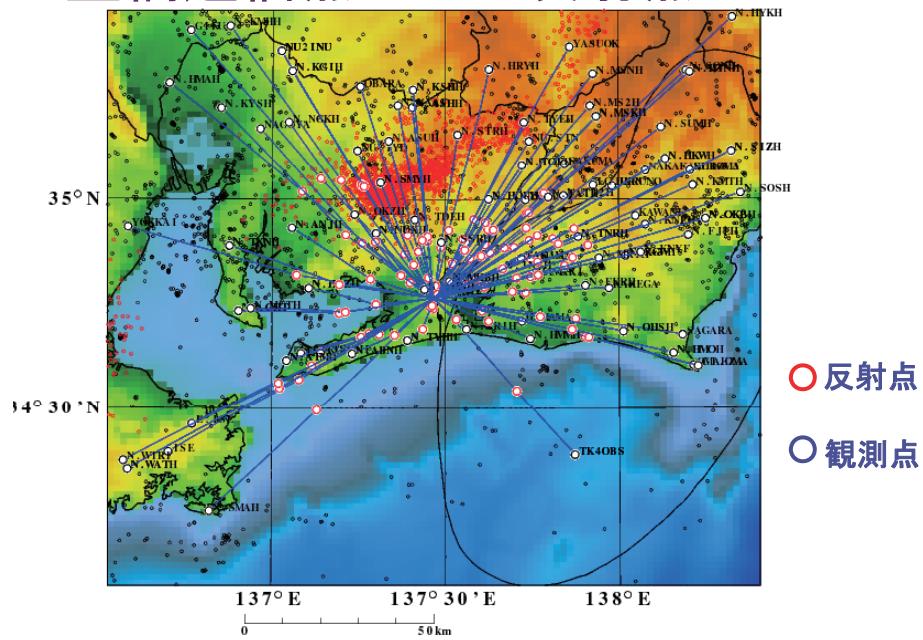
森町送信点からの反射点



土岐送信点からの反射点



豊橋送信点からの反射点



まとめ

- ◆ 速度構造を仮定して、アクロス送信点からの走時とプレート境界上の反射点の推定を行った。
- ◆ 走時計算において、Iidaka et al.(2003)と大きな差のない結果となっている。
- ◆ 森送信点からの信号は想定東海地震震源域にあるものが多いと推定される。

2.5

Hi-net下山周辺における地震計アレイを 用いた森町弾性波アクロスの信号解析 (予備解析)

岩切一宏・吉田康宏・勝間田明男・渡辺俊樹・
山岡耕春・國友孝洋・熊澤峰夫

謝辞：アレイ観測には名古屋大学学生諸氏（古川俊之、山崎賢志、小林由実、鈴木友理、辻琢允、道下剛史）の協力を得ました。防災科研Hi-netを使用しました。

アクロスワークショップ「アクロス技術の現状と今後の展望」2010/2/24,25

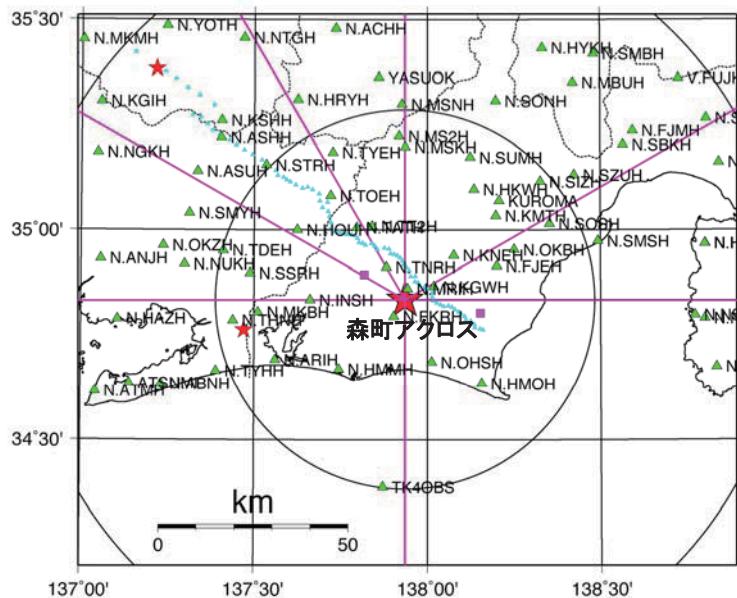
1

概要

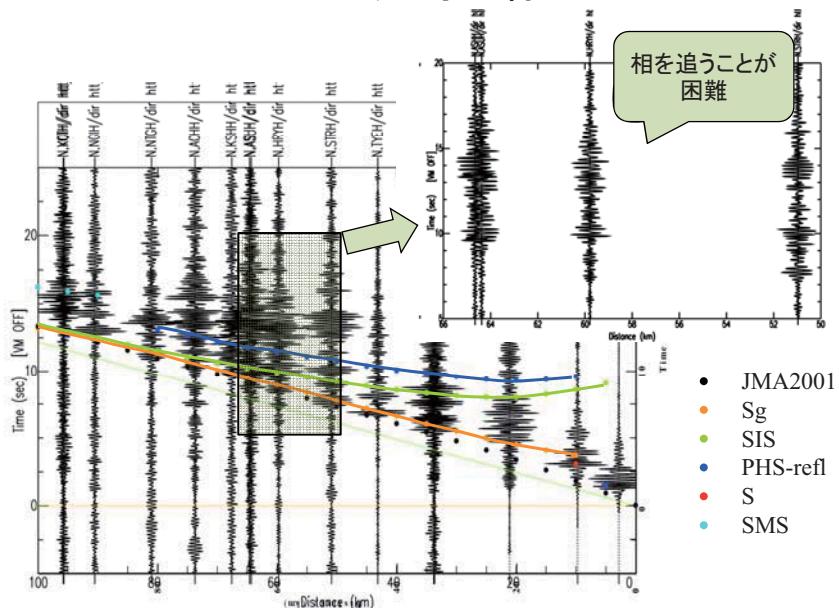
- はじめに
- アレイ観測
- アレイ応答
- スタッキングと伝達関数の取得
- アレイ解析
- まとめ

2

森町アクロス周辺の観測点



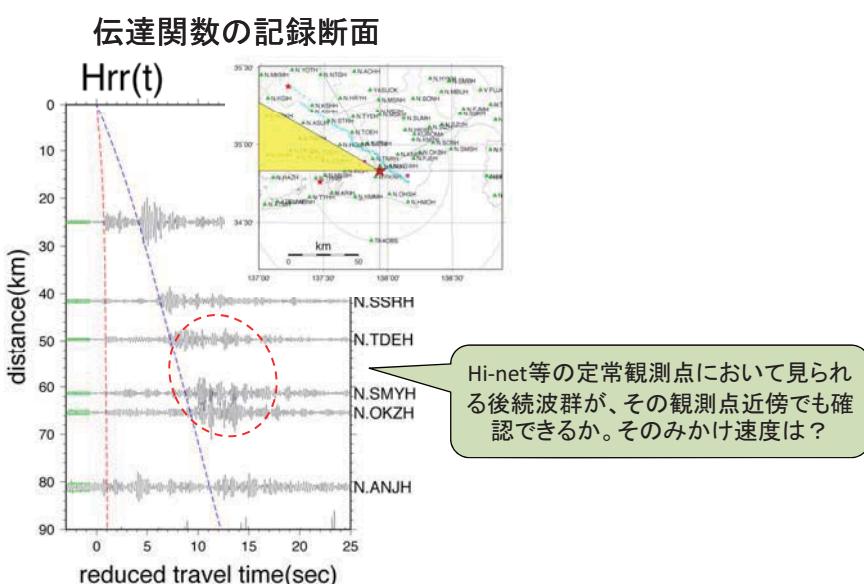
伝達関数(Htt)の記録断面（北西方向） + 走時曲線



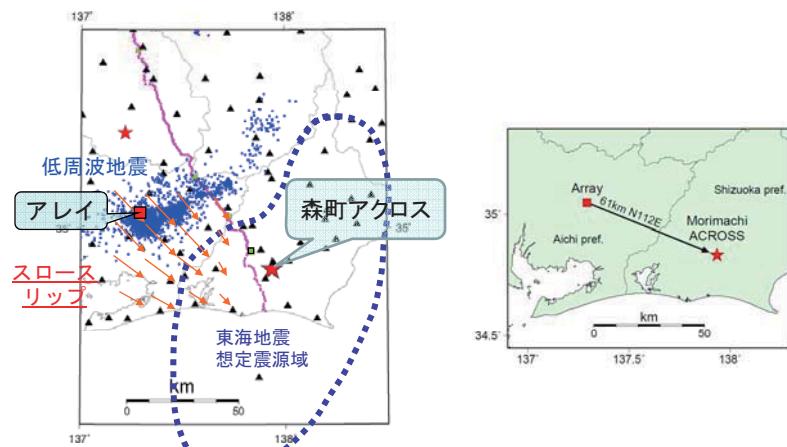
アレイ観測の目的

- 定常観測点(Hi-netなど)
 - 観測点間隔: 10km以上と広い
 - 観測点間の相関小さい
 - 相が局所的なものかどうかわからない
 - 局所的な構造の影響を評価する
 - 波の性質を明らかにする
 - 到来方向(今回はアクロス方向に限定)
 - 入射角orスローネス
- ↓
- 短スパンのアレイ観測

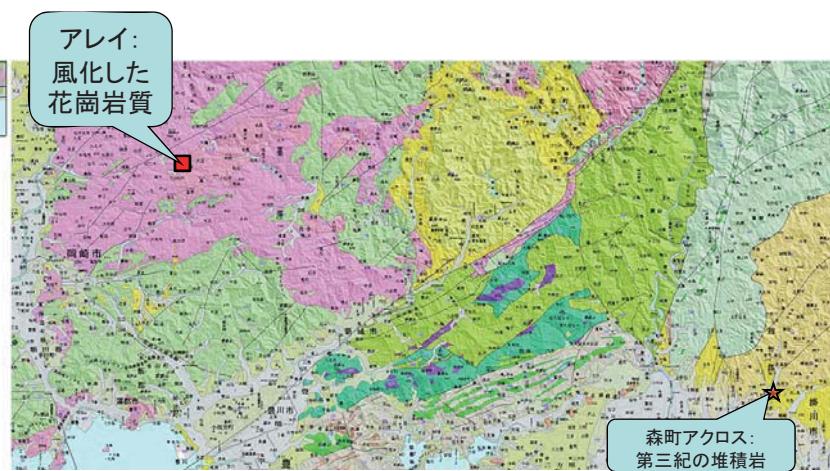
アレイ観測候補地の選定



アレイと森町アクロスの位置



地質



観測点の設置場所



9

観測点

観測点1, 2, 6, 7(名古屋大)



観測点1の様子

観測期間: 2008/10/17～2009/7/3

- ・地震計:L22D
速度型、3成分、固有周波数2Hz
- ・ロガー:白山工業LS7000
サンプリング200Hz、ゲイン20db
- ・電源
バッテリー

観測点3, 4, 5(気象研)



観測点4の様子

観測期間: 2008/10/22～2009/6/29

- ・地震計:中国製
速度型、3成分、固有周波数2Hz
- ・ロガー:白山工業LS7000XT
サンプリング200Hz、ゲイン20db
- ・電源
バッテリー + ソーラーパネル

10

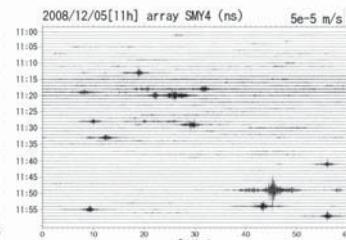
アレイ観測点の記録例

観測点4の波形(NS成分)

0時台

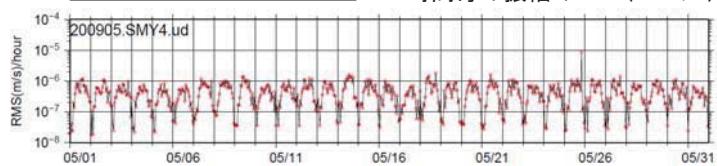


11時台



観測点4の波形(UD成分)

1時間毎の振幅のRMS(2009/5)

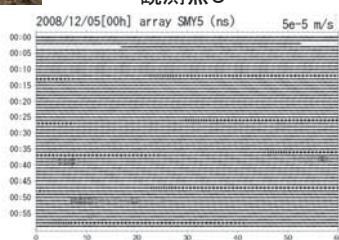


11

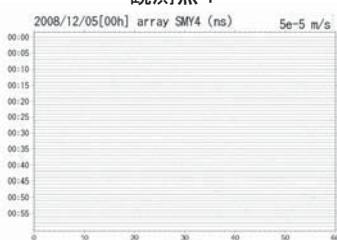
ノイズ

2008/12/5 0時台の波形(NS成分)

観測点5

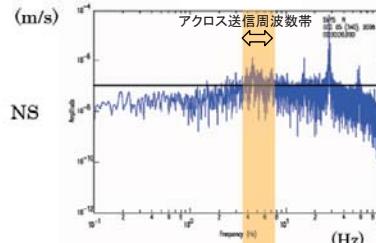


観測点4

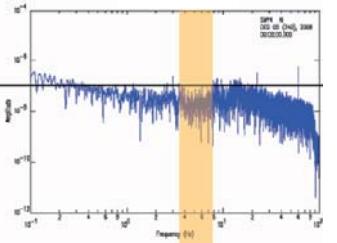


2008/12/5 0時0分から1分間のスペクトル(NS成分)

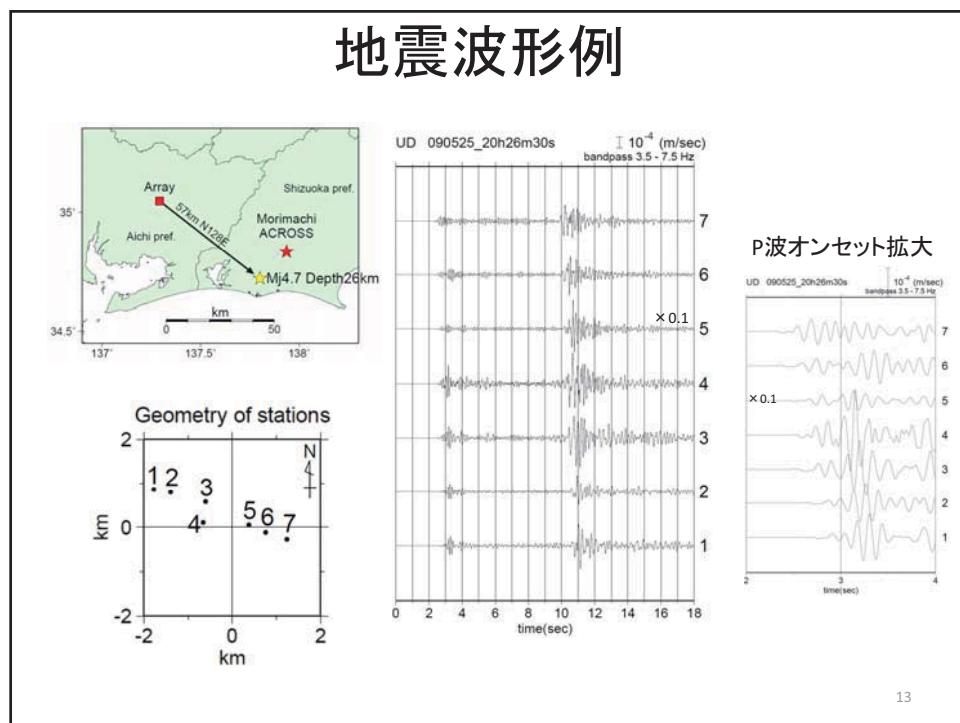
観測点5



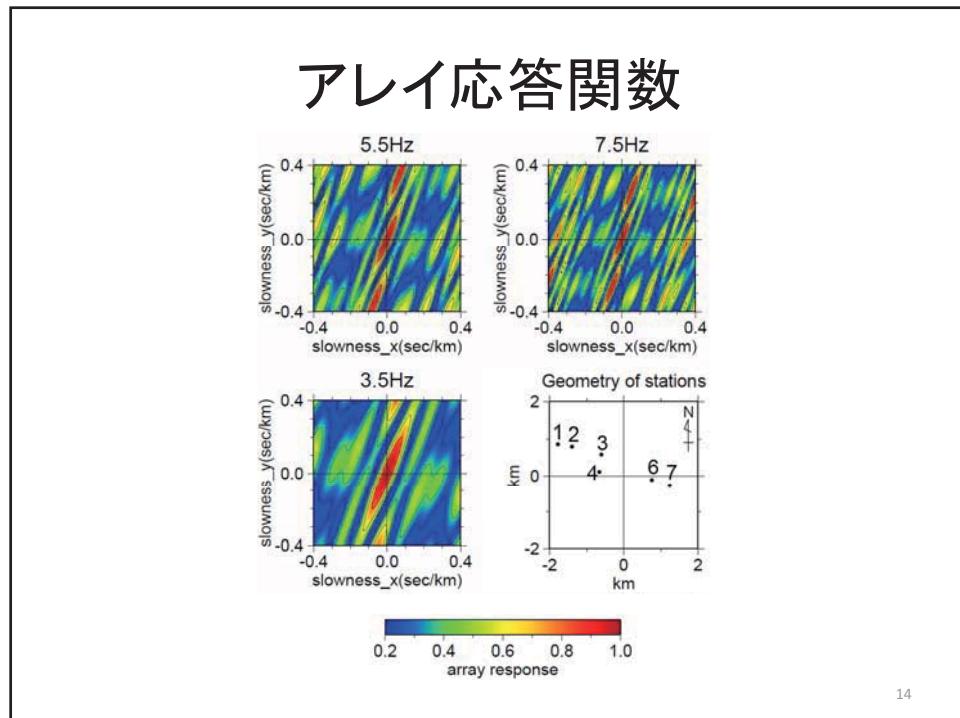
観測点4



12



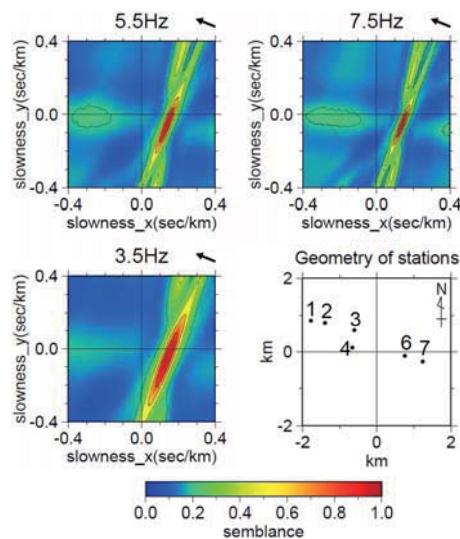
13



14

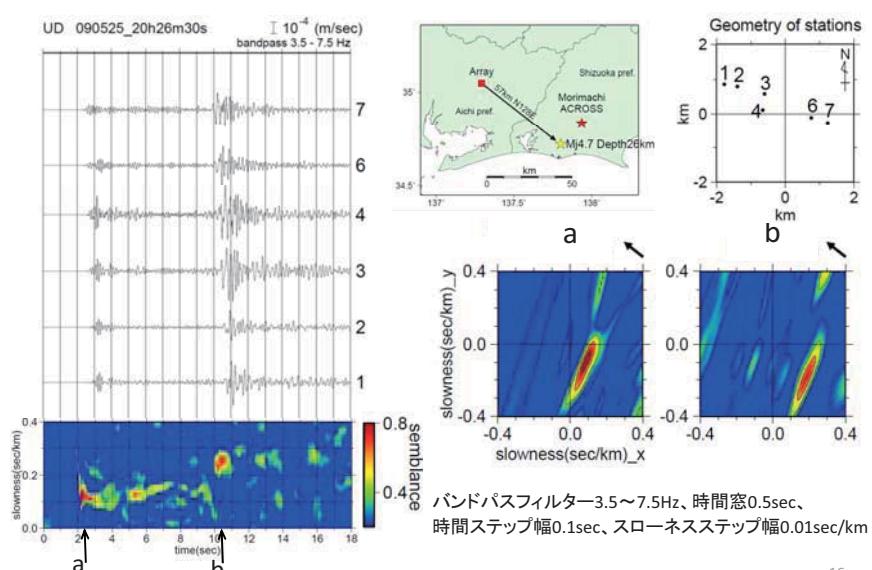
正弦波に対するアレイの応答

仮定: スローネス: 0.15 sec/km
入射方向: 森町アクロス方向(矢印)



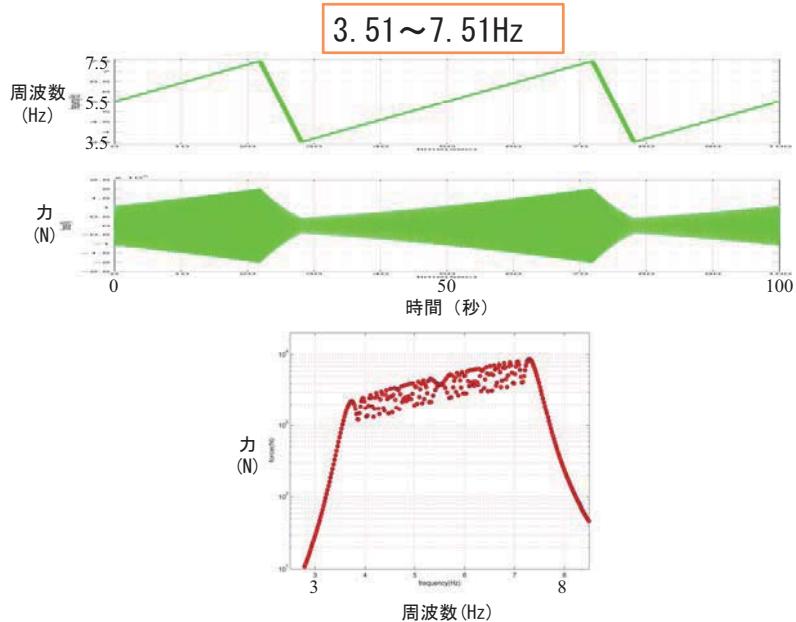
15

地震記録のアレイ解析

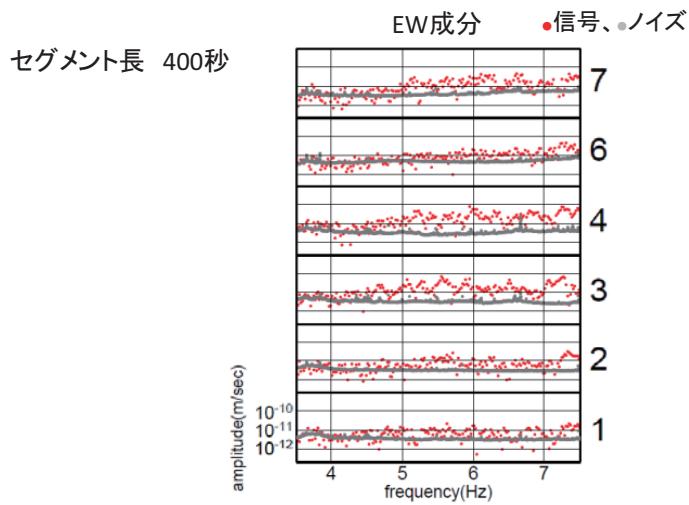


16

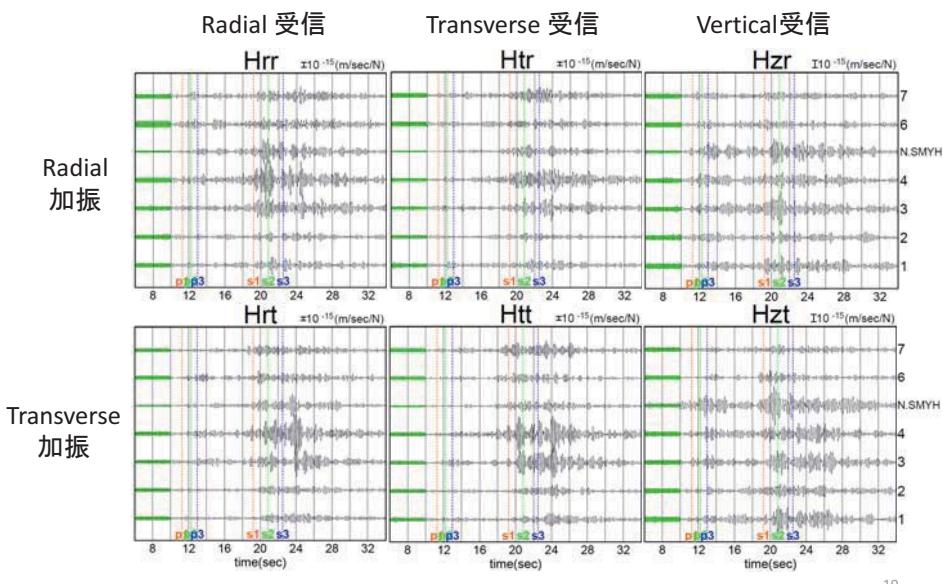
森町アクロスの周波数変調（低周波）



スタッキング

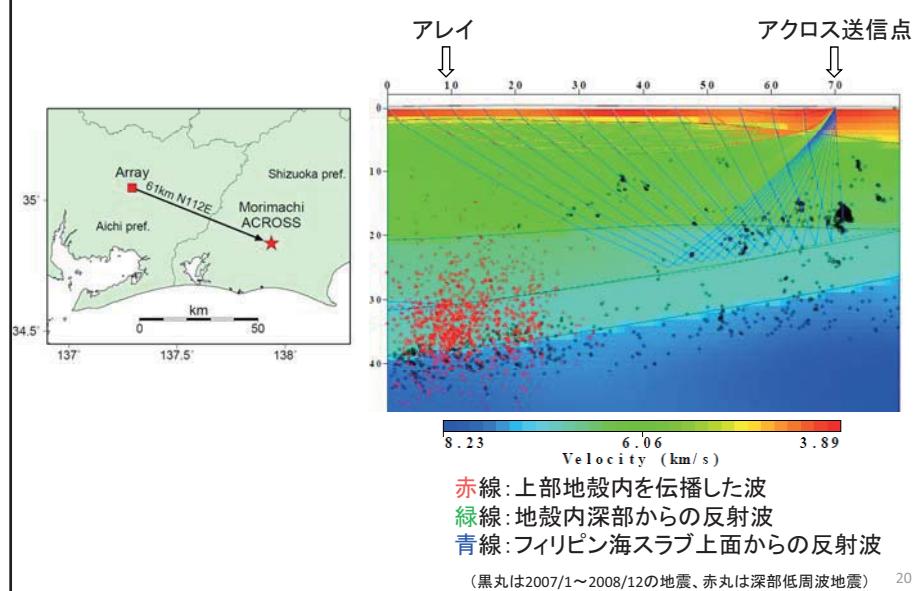


伝達関数(時間領域、6成分)



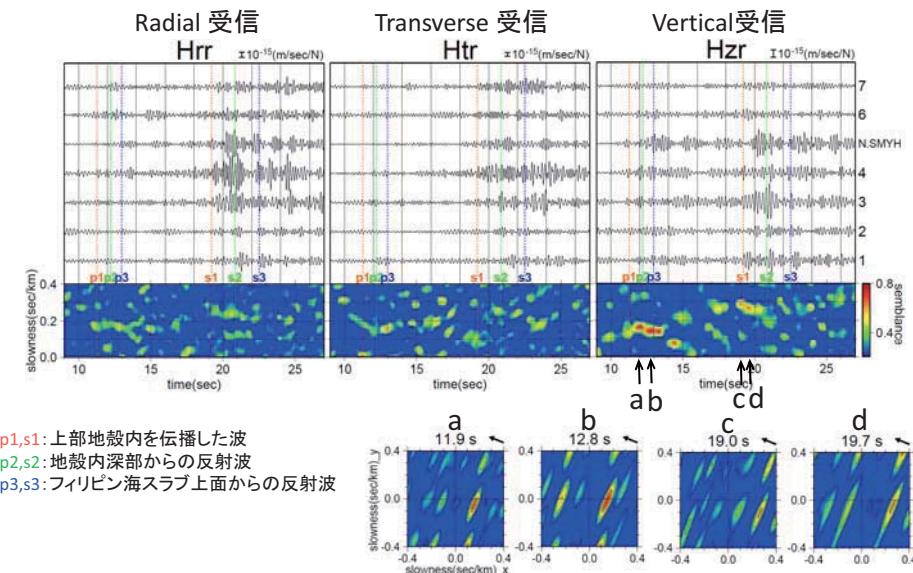
19

理論走時、スローネス



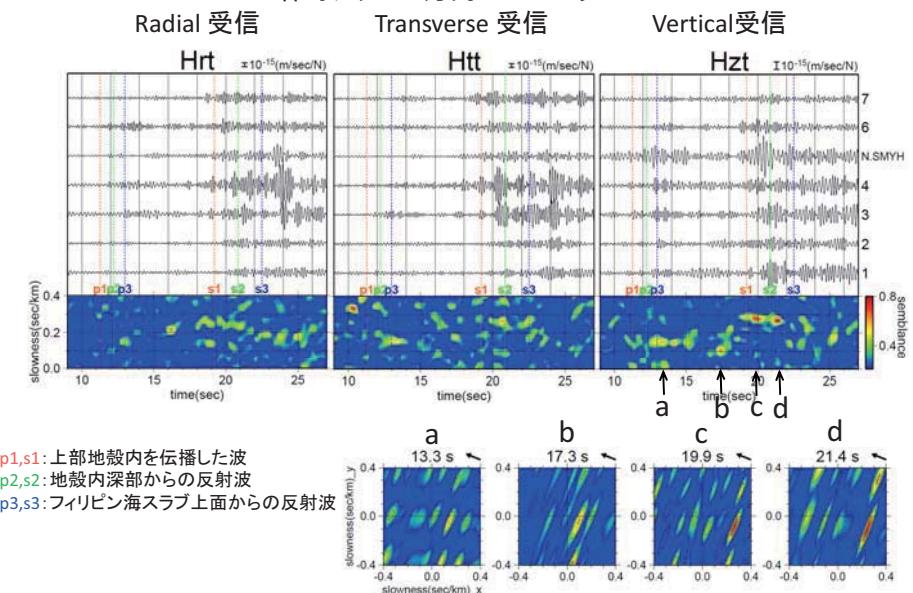
伝達関数(radial加振)のアレイ解析

森町アクロス方向のセンブランス



伝達関数(transverse加振)のアレイ解析

森町アクロス方向のセンブランス



まとめ

- Hi-net下山周辺において、森町アクロス方向から入射する平面波に対して分解能が高い、リニアアレイ観測を行った。
- 約5ヶ月間の観測データのスタッキングを行って伝達関数を求め、得られた伝達関数の時間領域の波形について予備的なアレイ解析を行った。
- 観測点間の波形の相関は弱く、アレイ直下の不均質構造の影響と考えられる
- 直達波(P波,S波)の直後に地下からの反射波とみられる波群が確認された。
- このようにアレイ解析によって同定した波群に注目して、Hi-net周辺の局所的な不均質構造による散乱の影響を除去していくことで、地下深部からの情報を得たい。

23

2.6

野島断層近傍における 断層強度回復過程の長期モニタリング

生田領野

静岡大学理学部

1

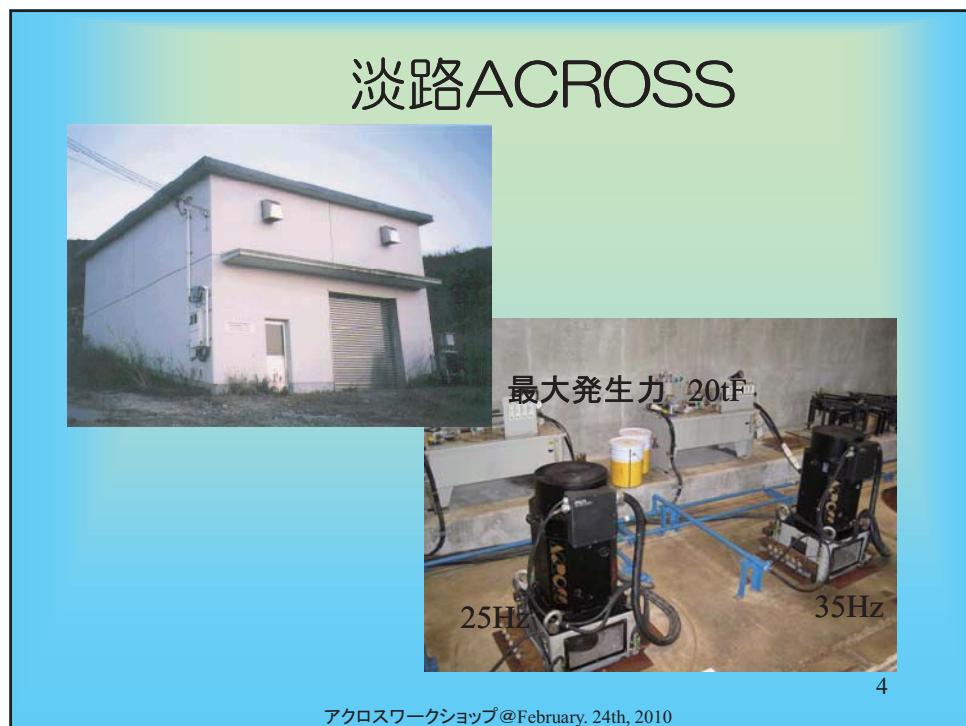
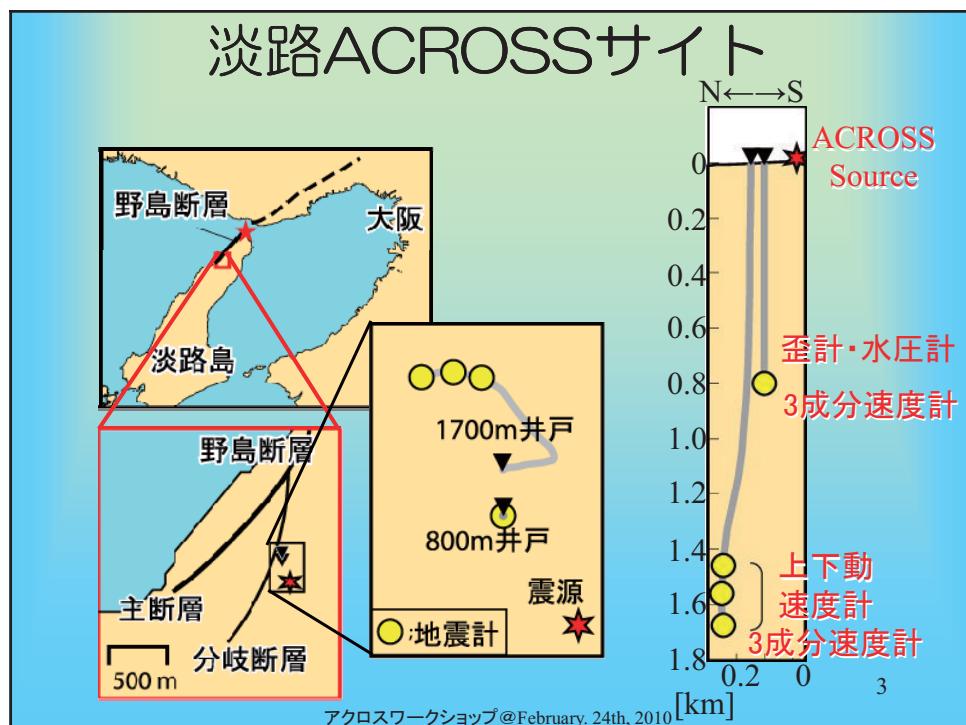
アクロスワークショップ@February. 24th, 2010

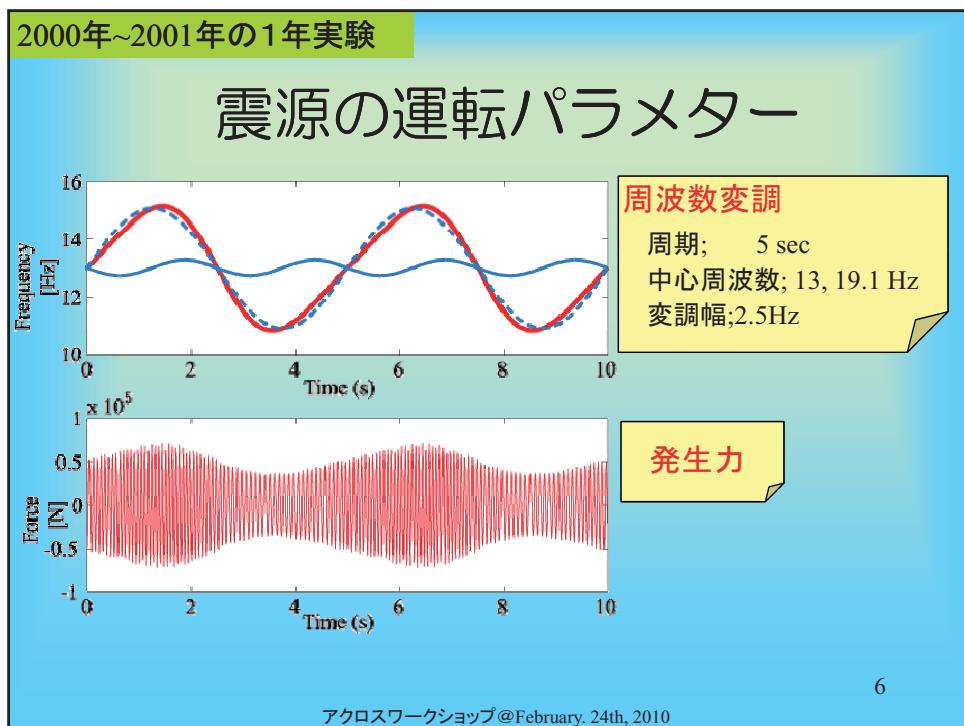
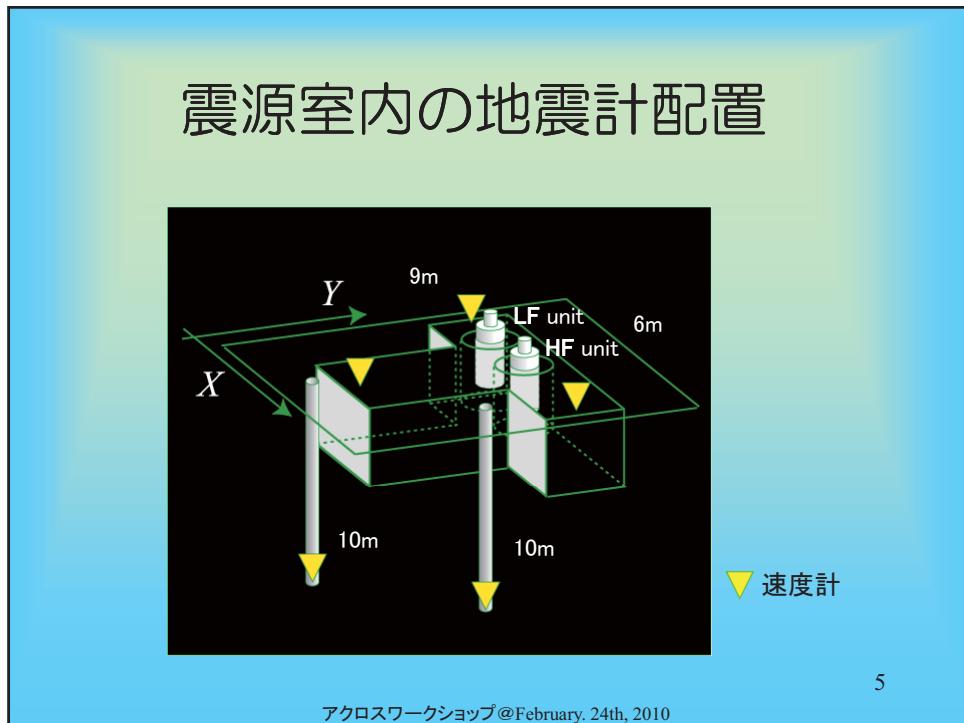
内容

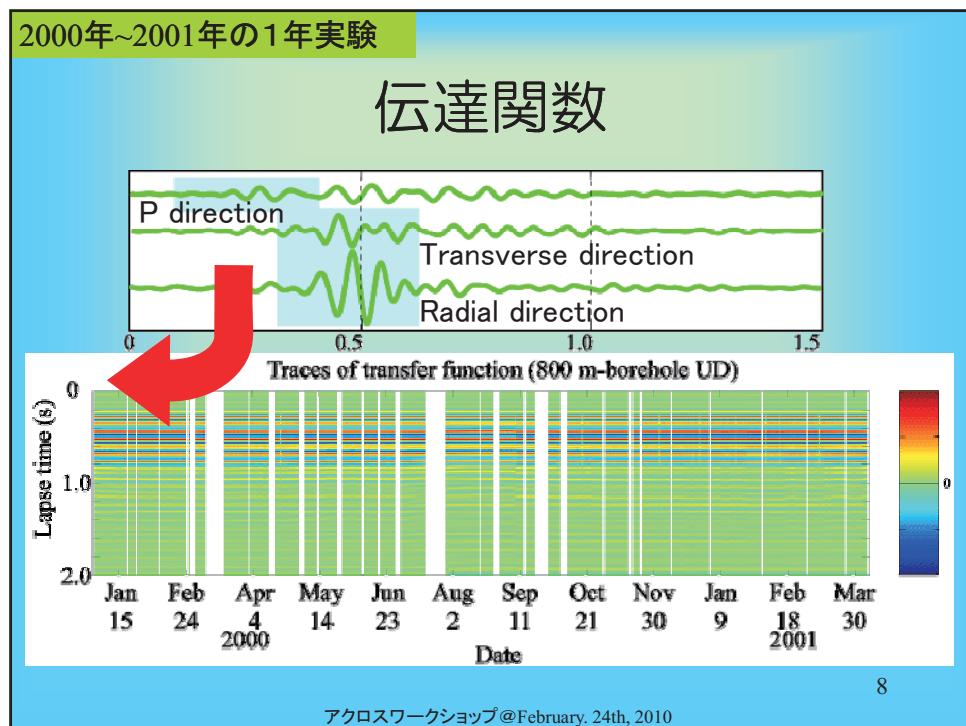
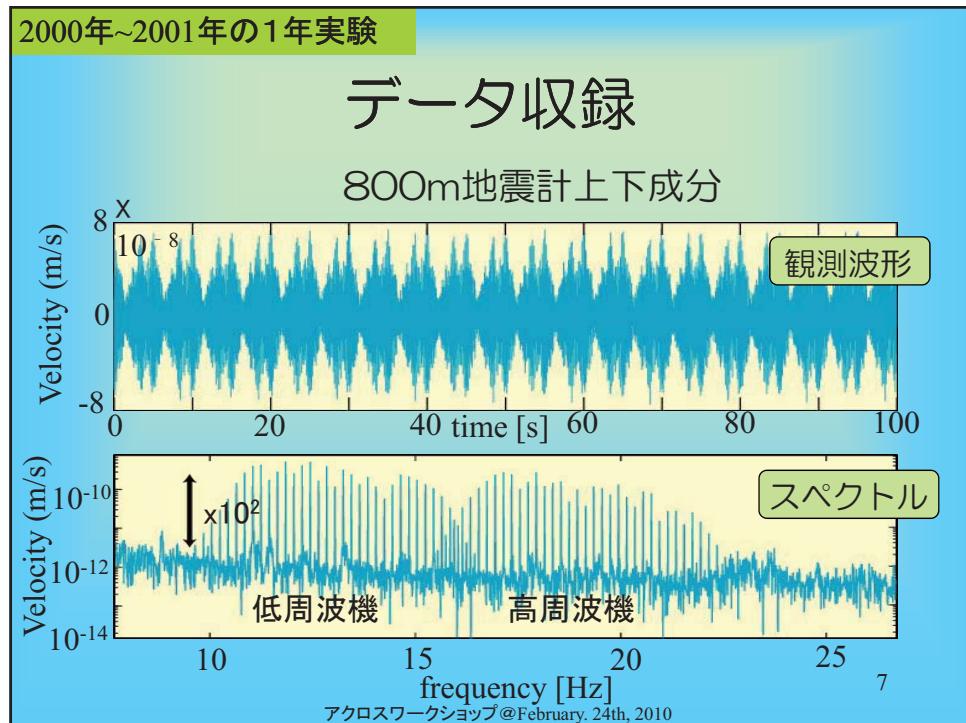
- 淡路島アクロスによる長期的な断層監視
- 地震波速度により、断層破碎帯や、周辺のクラックの回復過程を監視する
 - 相互相関法による走時変動解析
 - S波偏向異方性の変動検出実験
- 8年間で約4%の地震波走時の速まりが検出された。
 - 透水係数の減少と同じセンス
 - 異方性の変化はほとんど見られなかった

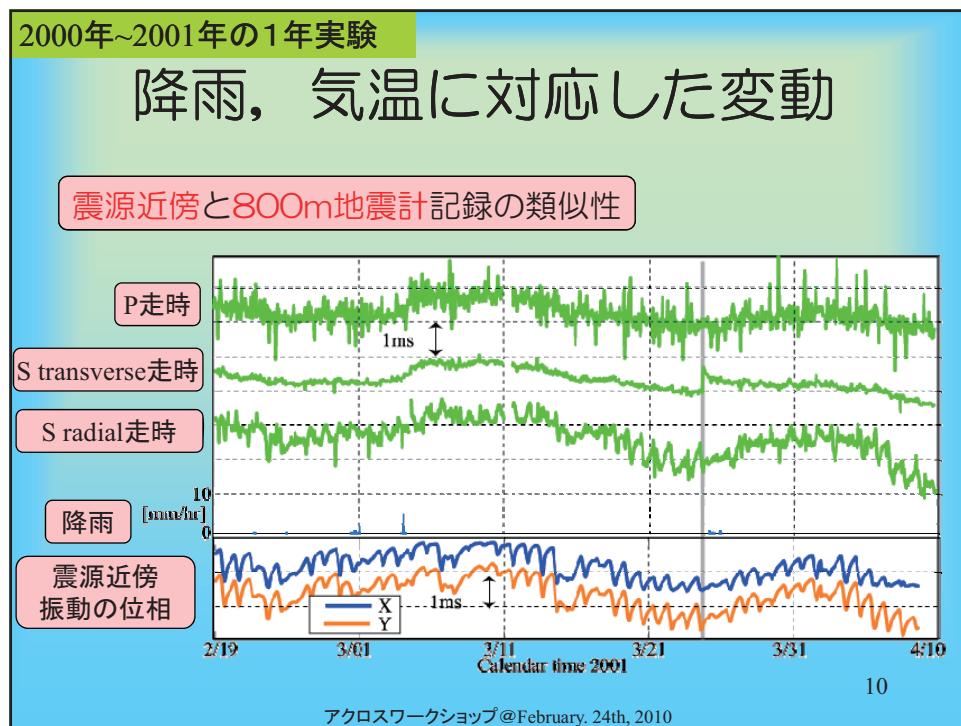
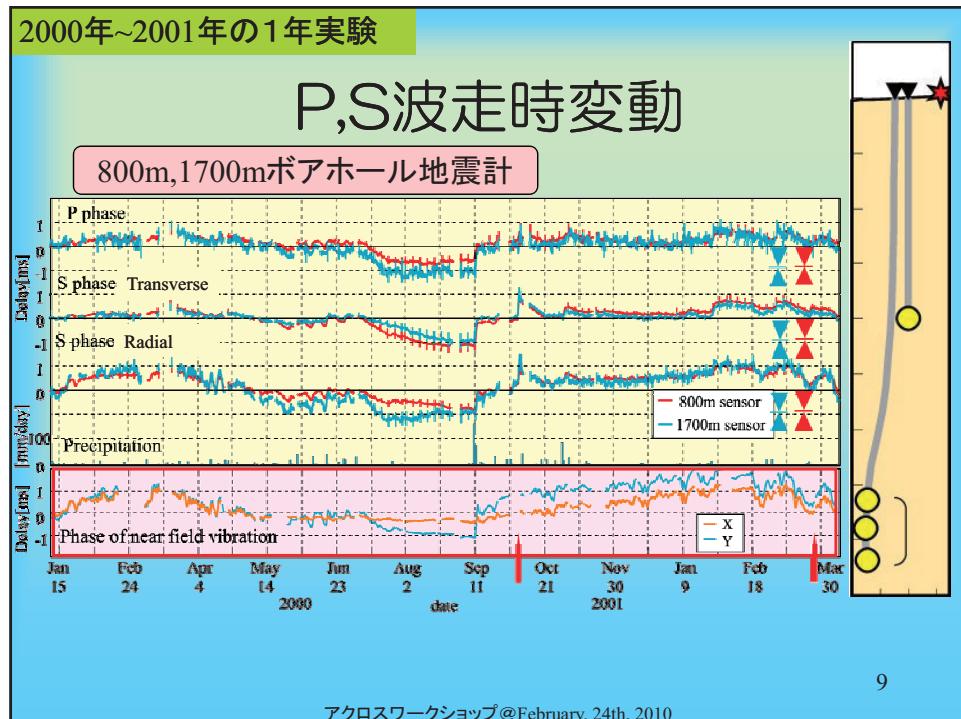
2

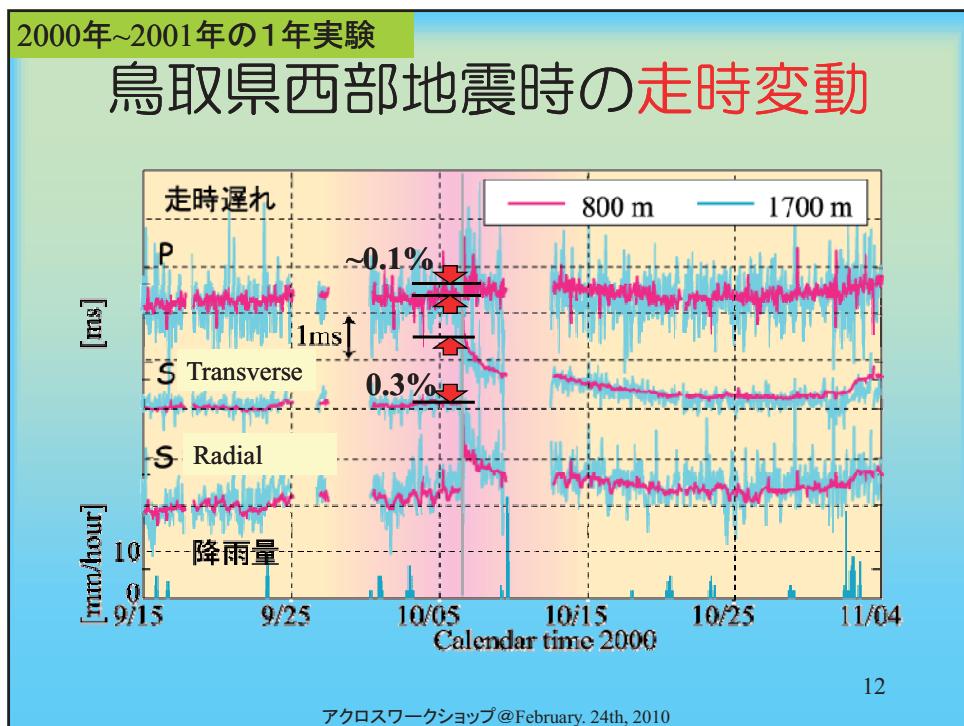
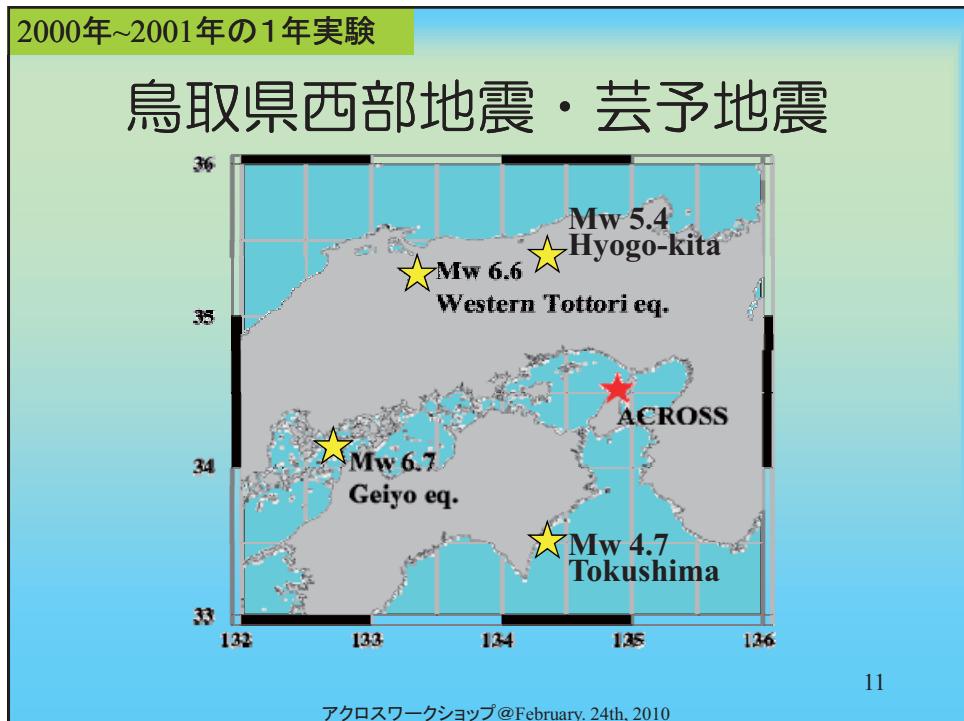
アクロスワークショップ@February. 24th, 2010

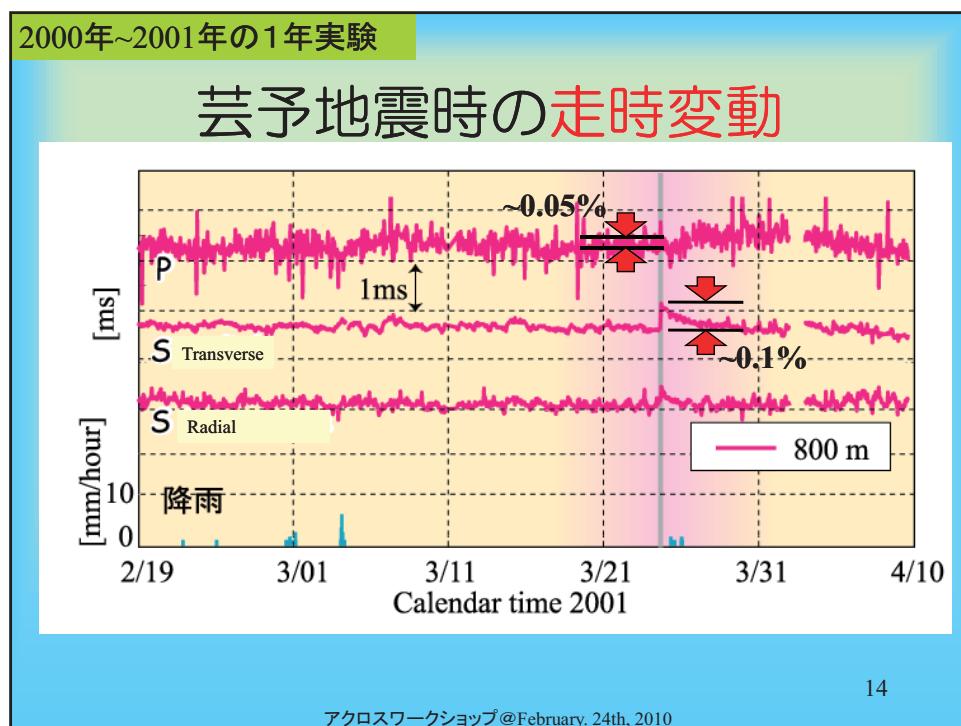
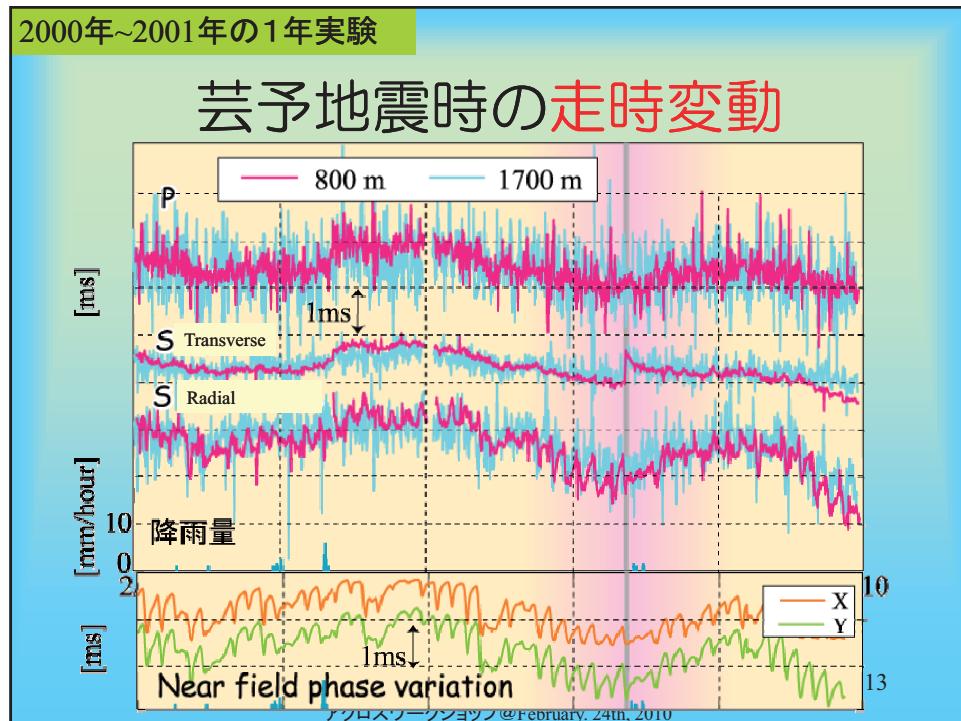


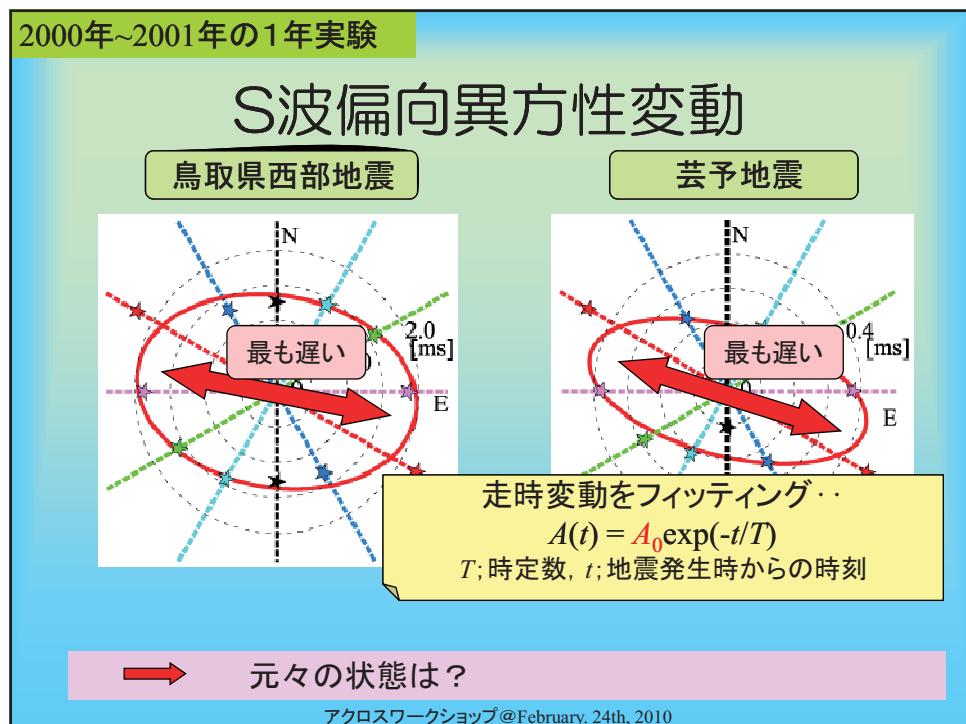
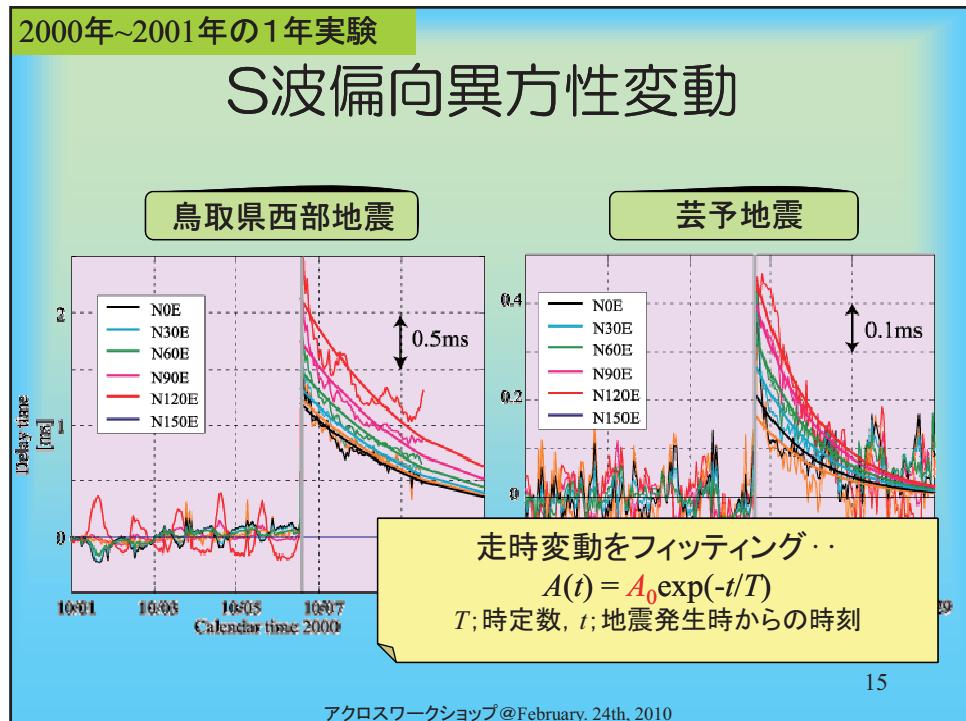








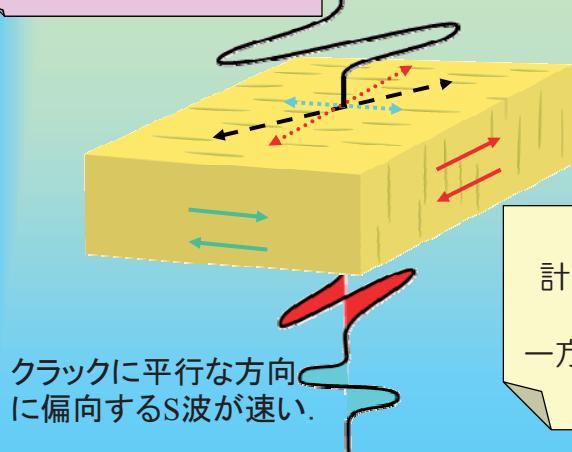




2000年~2001年の実験

S波偏向異方性の絶対値評価

S波スプリッティング



S波偏向異方性を
計測するためには……
一方向に偏向した入力波
が必要

アクロスワークショップ@February. 24th, 2010

17

2000年~2001年の実験

手法

S波偏向異方性を
計測するためには……
一方向に偏向した入力波
が必要

ACROSS震源

偏心おもり

周囲の岩盤

正回転と逆回転との
足し合わせ
↓
任意の方方位の
リニアモーション震源

アクロスワークショップ@February. 24th, 2010

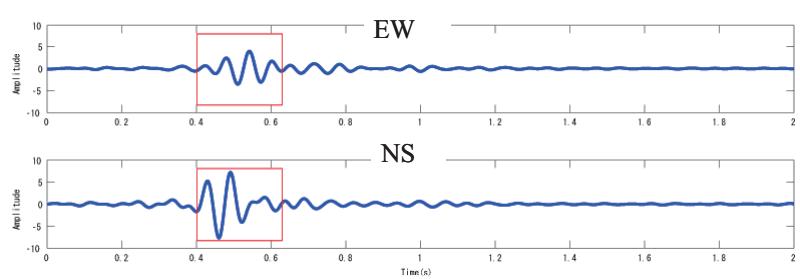
18

2000年~2001年の実験

手法

N45Eでの直線加振に対する応答

800mボアホール・水平成分



速い波の方位
遅い波の方位

を仮定し、両者の相関係数
の高い方位、遅れ時間をサーチする。

19

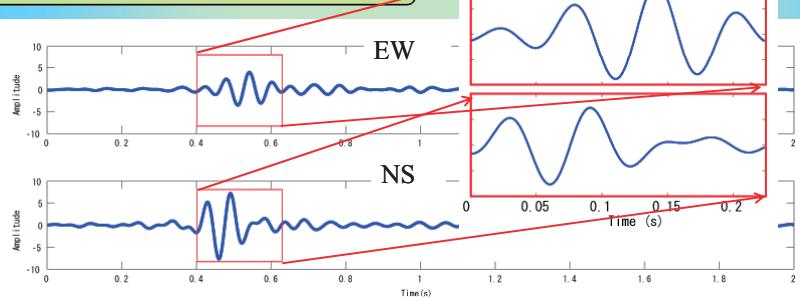
アクロスワークショップ@February. 24th, 2010

2000年~2001年の実験

手法

N45Eでの直線加振に対する応答

800mボアホール・水平成分

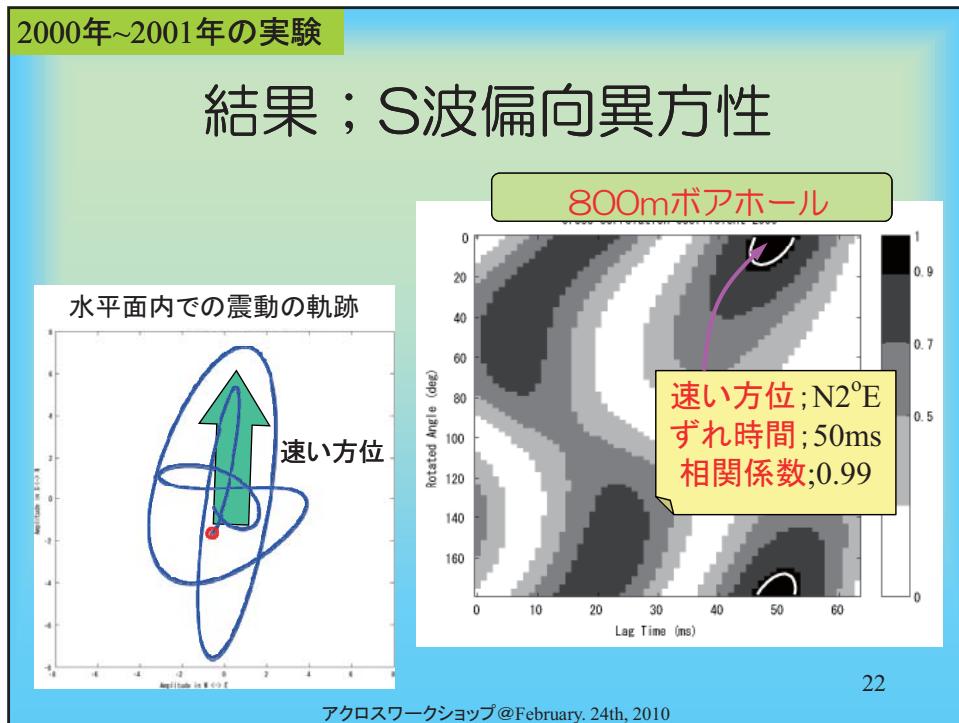
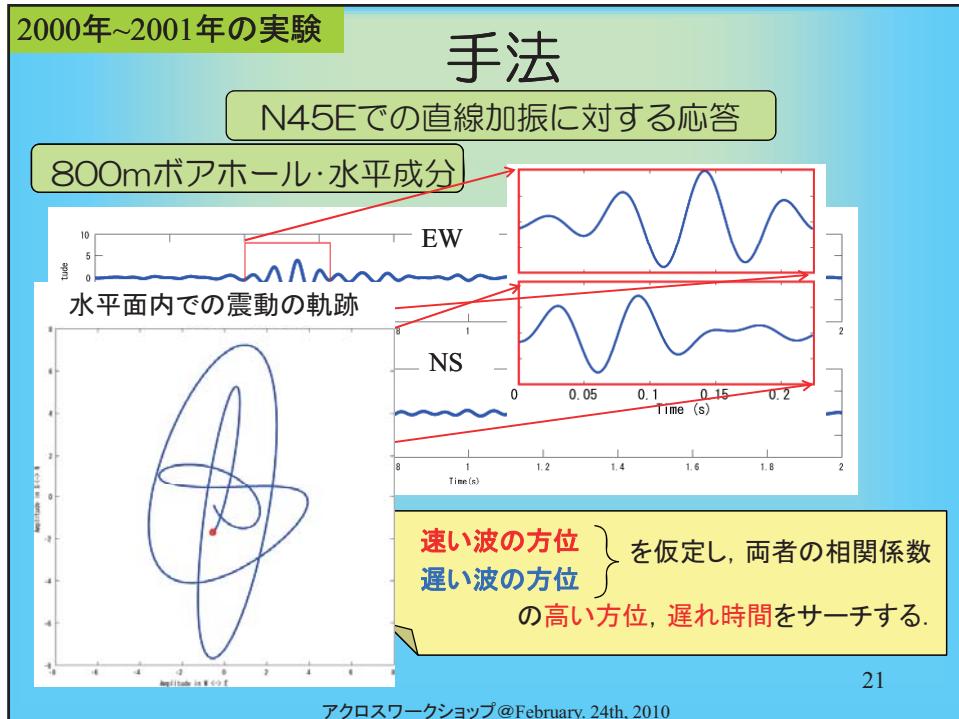


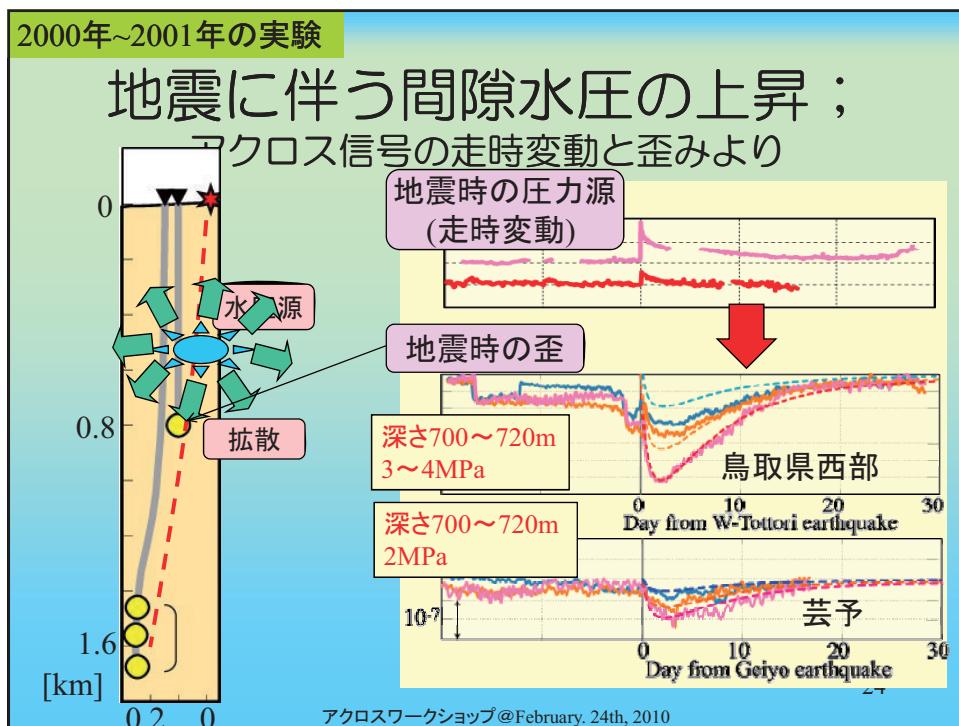
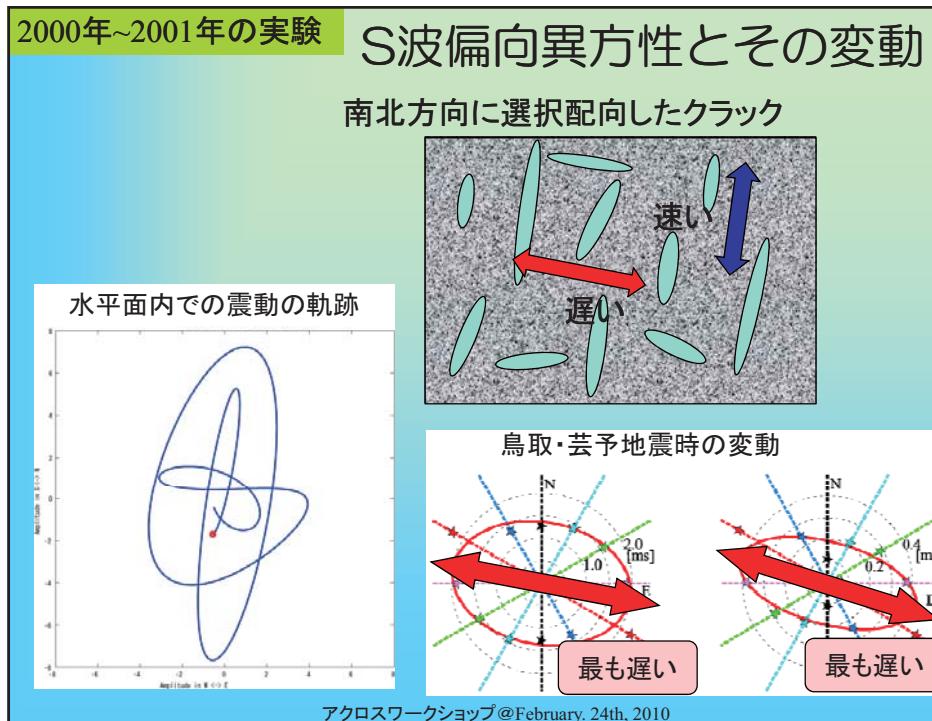
速い波の方位
遅い波の方位

を仮定し、両者の相関係数
の高い方位、遅れ時間をサーチする。

20

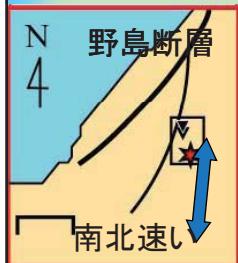
アクロスワークショップ@February. 24th, 2010



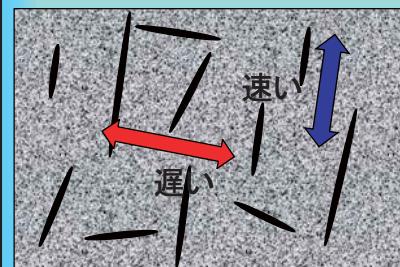


2000年~2001年の実験

定常のS波偏方向異方性



- ◆ 潜在的に南北方向が最も速い。
- ◆ 野島断層の分岐断層に平行
= 断層運動によるせん断クラック。
- ◆ 異方性の割合：
 $(\text{走時差}50\text{ms}) / (\text{S波走時}0.5\text{s}) = 10\%$



因みに1700mのボアホール底ではN20°E方向が速く、走時差は50ms (5%)だった。

25

アクロスワークショップ@February. 24th, 2010

断層破碎帯の時間変化

Tadokoro et al., 2002

- ◆ 兵庫県南部地震1年後、断層平行なフラクチャー構造を検出
- ◆ 地震3年後、フラクチャー構造は広域応力場に平行に変化

26

アクロスワークショップ@February. 24th, 2010

断層近傍のクラックの回復モデル

特定のタイムスケールで
クラックが回復し、断層の
強度も増加、次の地震に
備える？

27

アクロスワークショップ@February. 24th, 2010

2003年以降の実験 淡路ACROSSの運転履歴

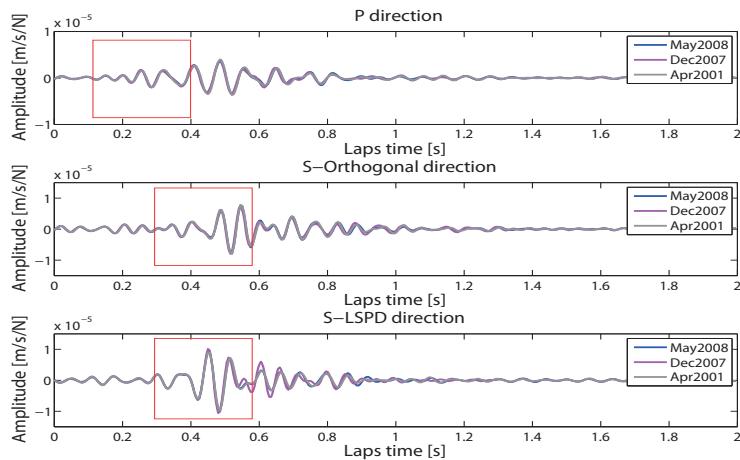
年	運転時期	継続期間	変調周期
2000 -2001	Jan. 7(2000) - Apr. 9(2001)	15ヶ月	5 sec
2003	Feb. 13 - Jun. 4	4ヶ月	20 sec
2005	Aug. 12 - Sep. 16	1ヶ月 (高周波機破損)	5 sec
2006- 2007 高周波震源装置・モータの修理			
2007	Nov. 14 - Dec. 07	1ヶ月	20 sec
	Dec. 19 - Dec. 24	1週間	5 sec
2008	Feb. 16 - Mar. 16	1ヶ月	20 sec
	Mar. 16 - May 7	2ヶ月	5 sec
2008- 2009 低周波震源装置のモータ修理・高周波装置の水没			
2009 -2010	Sep. 8 - Nov. 4	2ヶ月	20 sec
	Nov. 4 - Jan. 04 (2010)	2ヶ月	20 sec

アクロスワークショップ@February. 24th, 2010

2003年以降の実験

異なるFM変調周期による伝達関数

周期 5秒の変調で得た伝達関数

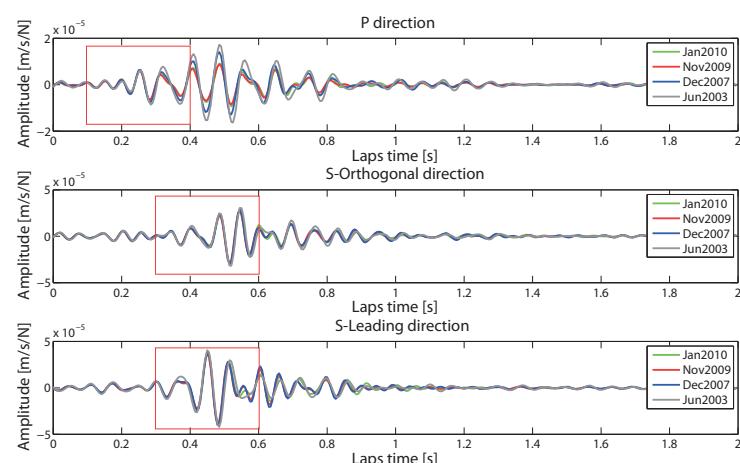


アクロスワークショップ@February. 24th, 2010

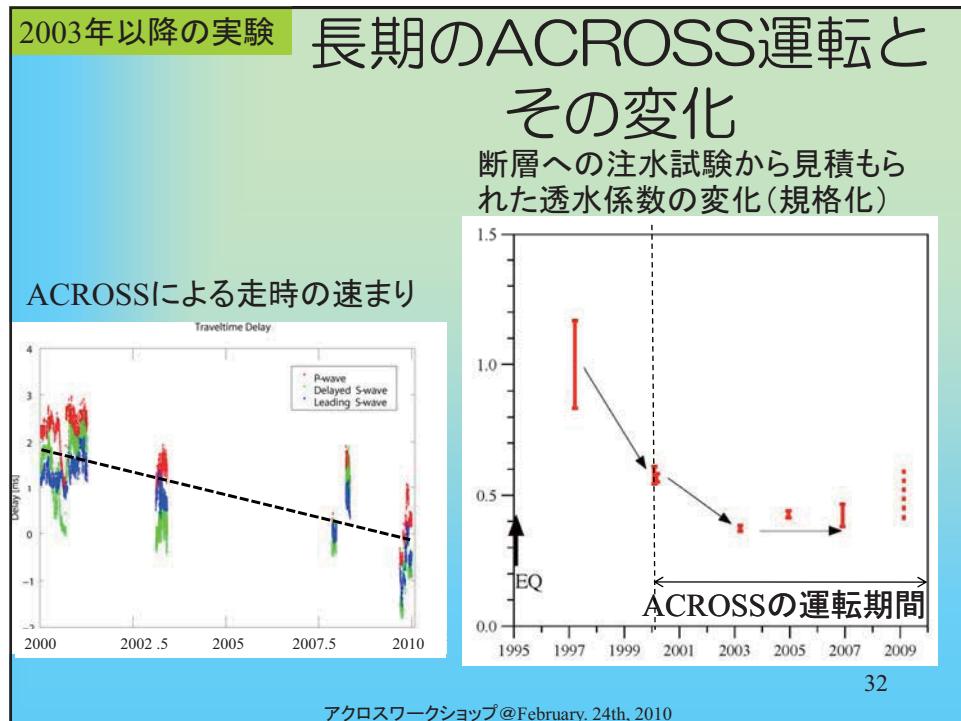
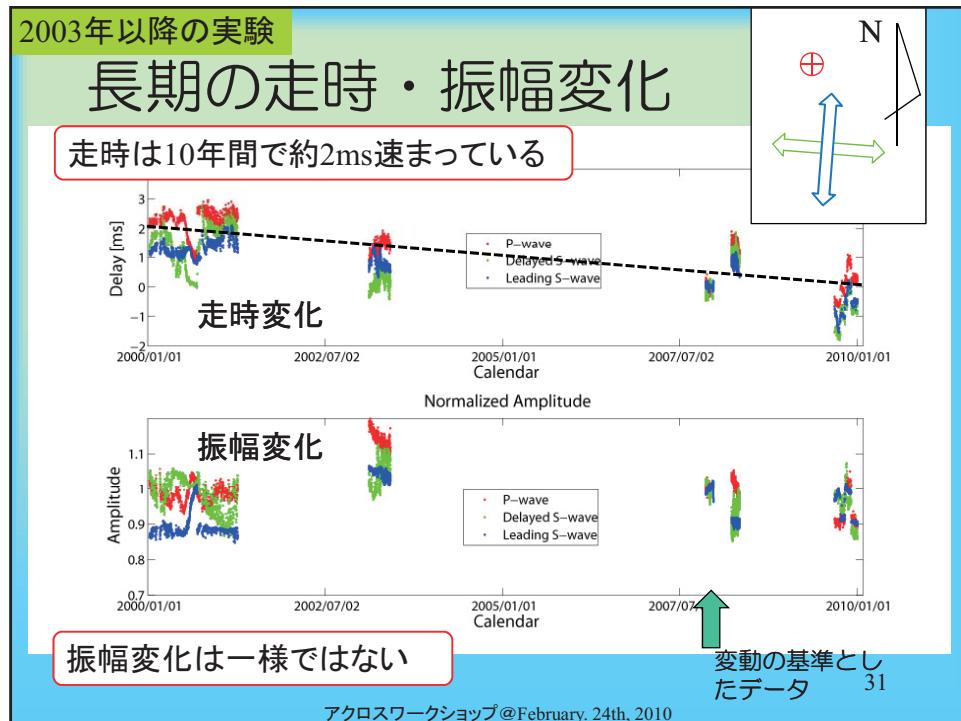
2003年以降の実験

異なるFM変調周期による伝達関数

周期20秒の変調で得た伝達関数



アクロスワークショップ@February. 24th, 2010



2003年以降の実験

長期の走時・振幅変化

- 全ての波相(P, S1, S2)の走時が同じように速まっており、異方性を持った変化は見られない。
- 何が変化したのか？

2008年
S波偏向異方性の実験
を再び行ってみた

ACROSS震源

偏心おもり

周囲の岩盤

33

アクロスワークショップ@February. 24th, 2010

2003年以降の実験

長期の偏向異方性変化

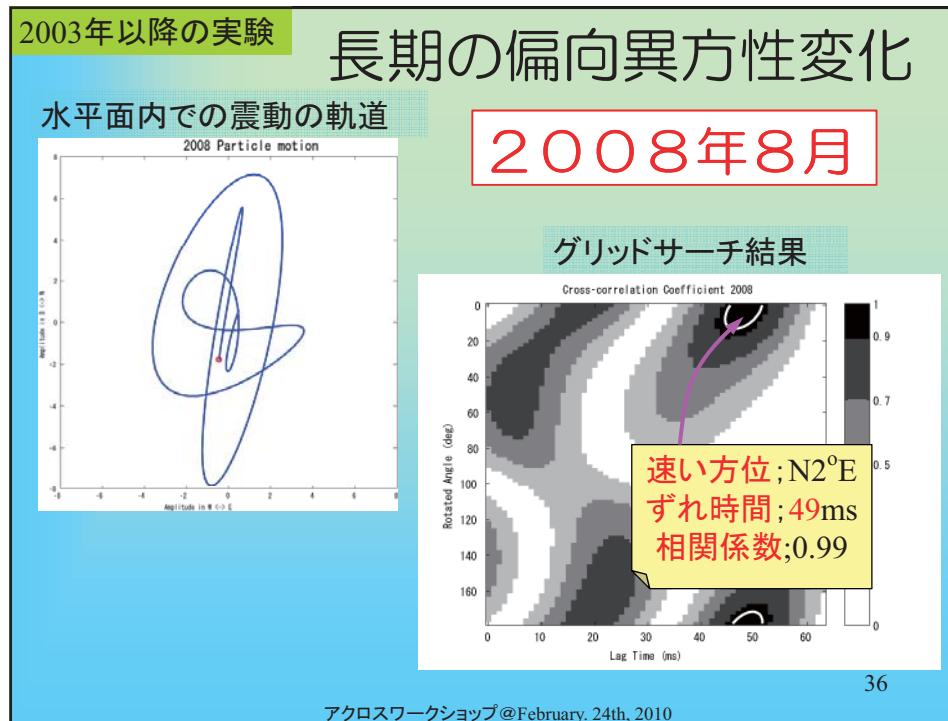
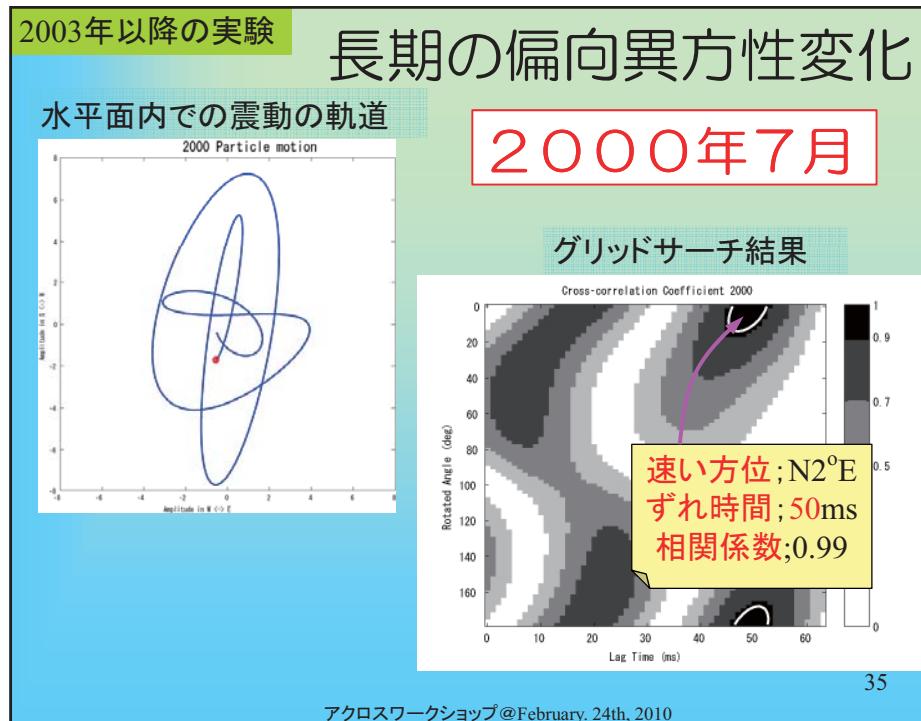
水平面内での震動の軌道

2000年7月

2008年8月

グリッドサーチ結果

アクロスワークショップ@February. 24th, 2010



2003年以降の実験

長期運転とACROSS信号の走時変化

10年間の走時・振幅モニタリングを行った.

- ◆ P, S波走時は共に**2ms**程度速まった可能性がある.
($2\text{ms}/500\text{ms} = 4\%$) → クラック密度の減少を示唆?
- ◆ 偏向異方性には**1ms**以上の変化は無かった. 選択配向したクラックのみが速度の変化に寄与しているわけではない.

更に解析を進め

- ◆ 検出された走時変動は真に速度変動を表しているか?
- ◆ 透水率 \leftarrow クラック密度 \leftarrow 地震波速度の関係
を明らかにしていきたい.

37

アクロスワークショップ@February. 24th, 2010

2.7

低周波直線制御震源の実験

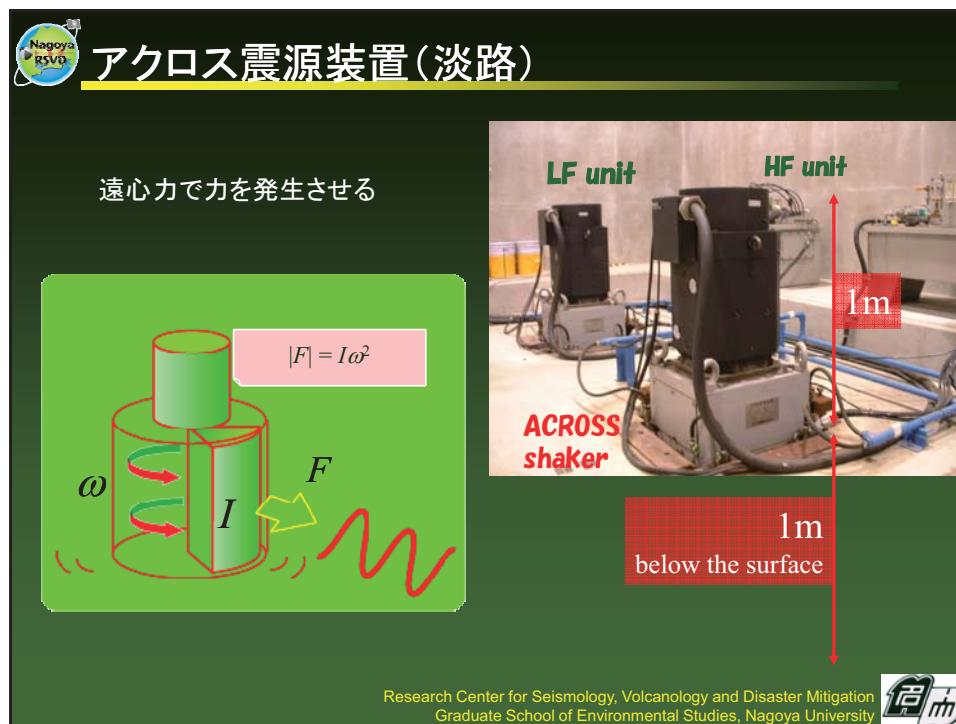
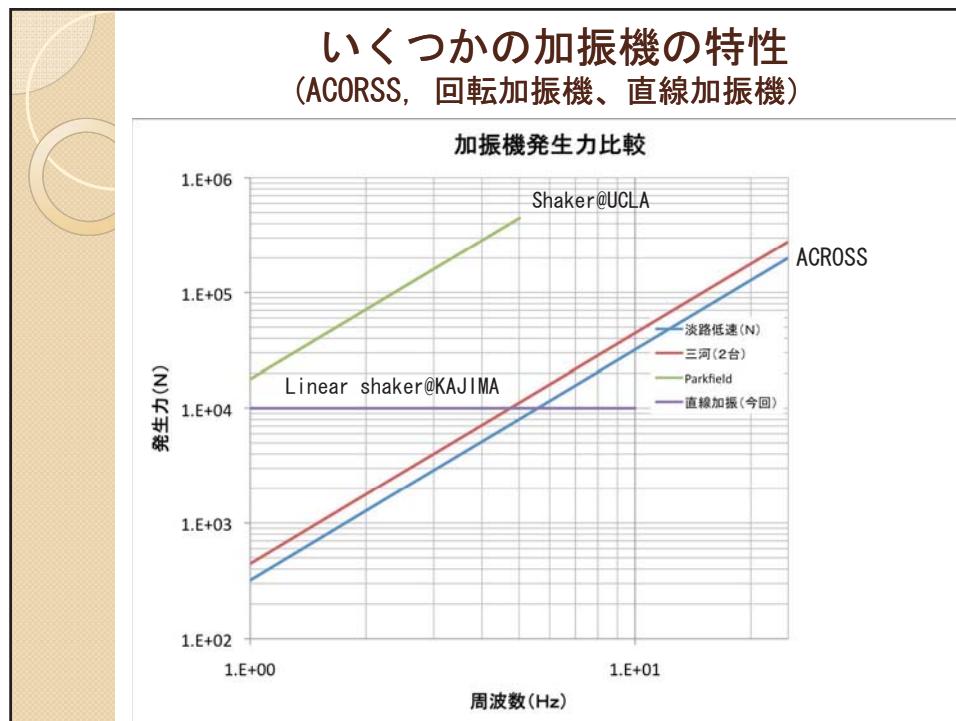
山岡耕春*・渡辺俊樹*・生田領野**
山崎賢志*・道下剛史*・國友孝洋**

*名古屋大学環境学研究科

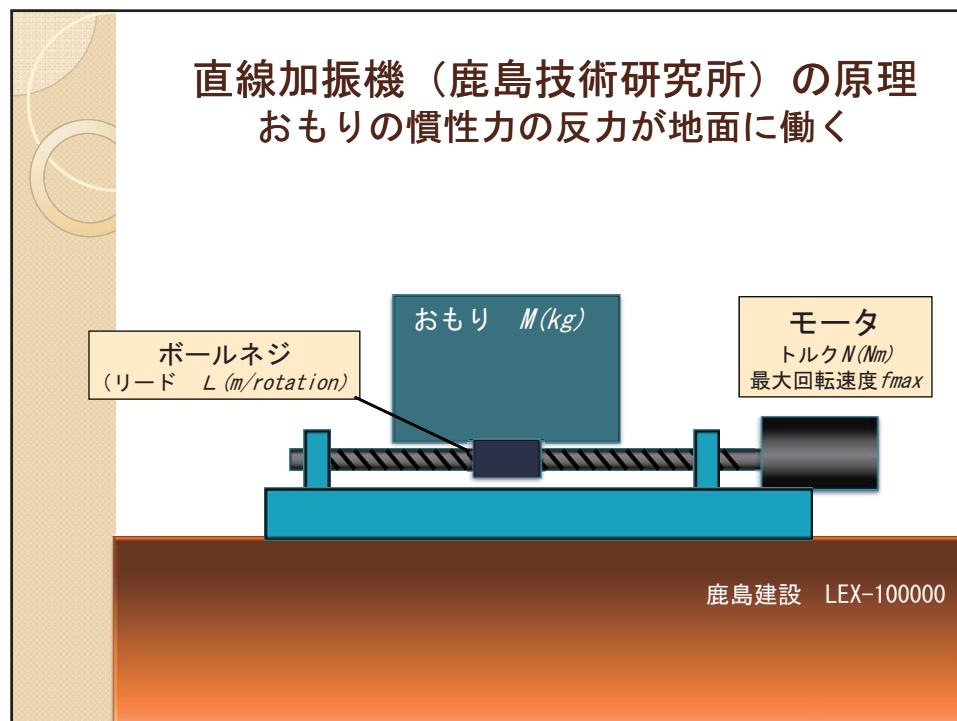
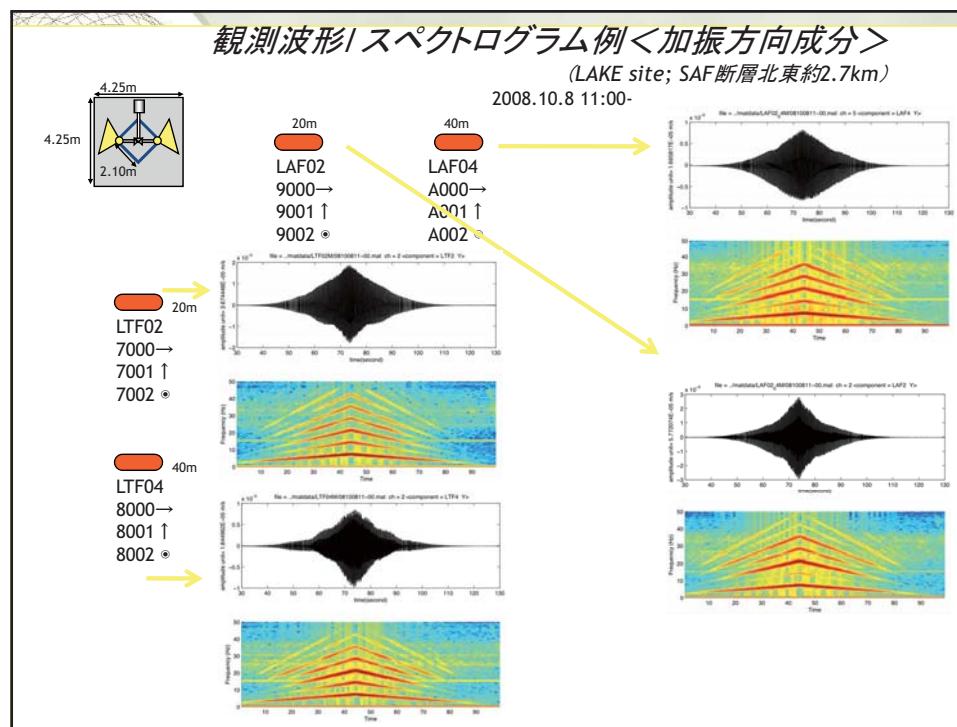
**静岡大学理学部

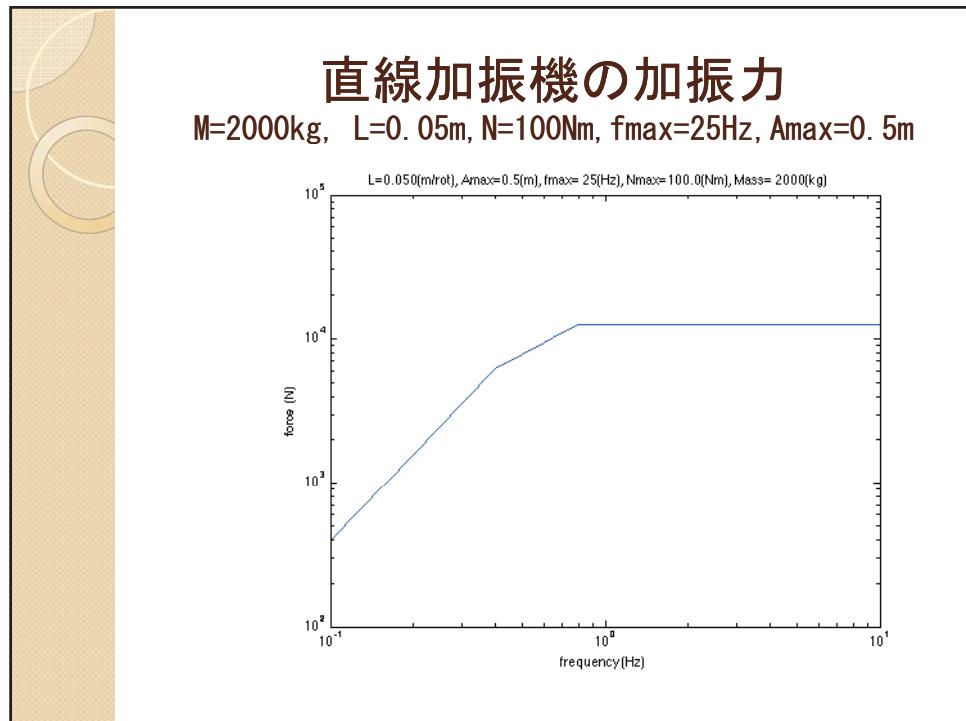
加振機の方式と特長

- 回転型
 - 遠心力により力を発生
 - 周波数の2乗に比例した発生力
 - 高度な制御性能が必要
- 直線加振型
 - おもりの慣性力により力を発生
 - 駆動力はモータトルクを直接反映する
 - 周波数によらず発生力が一定
 - 制御は比較的容易

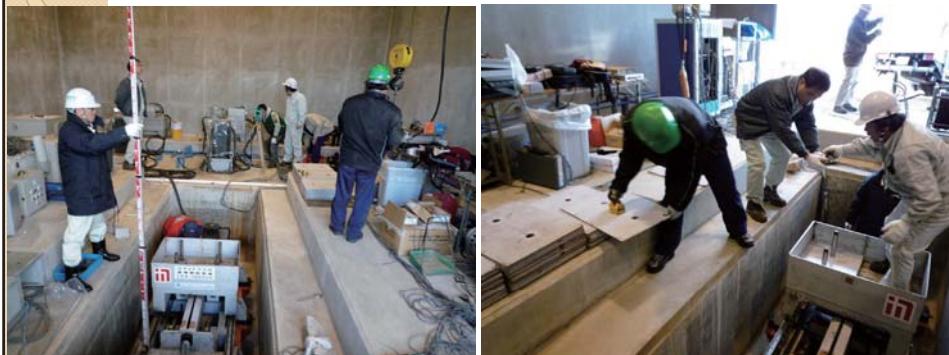








加振機の設置 @淡路島アクロス震源室



加振機の設置 @淡路島アクロス震源室



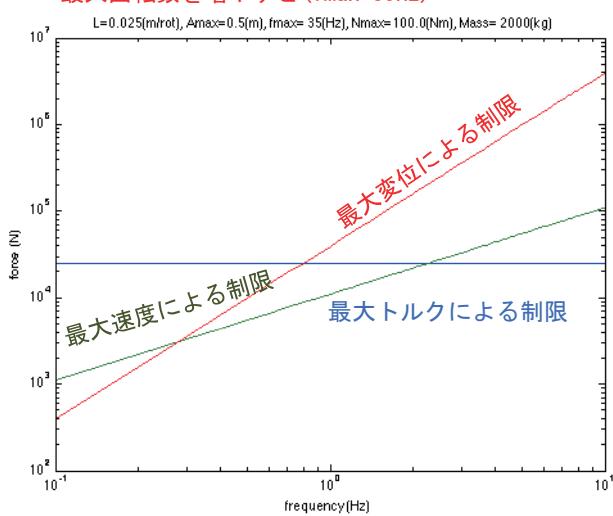
单振動駆動

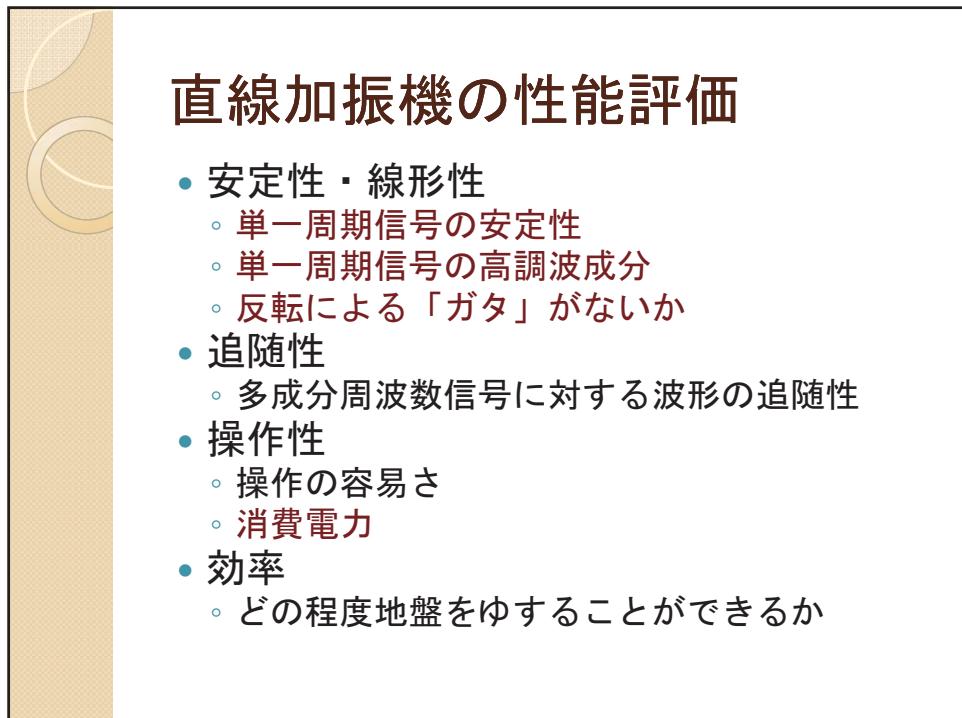
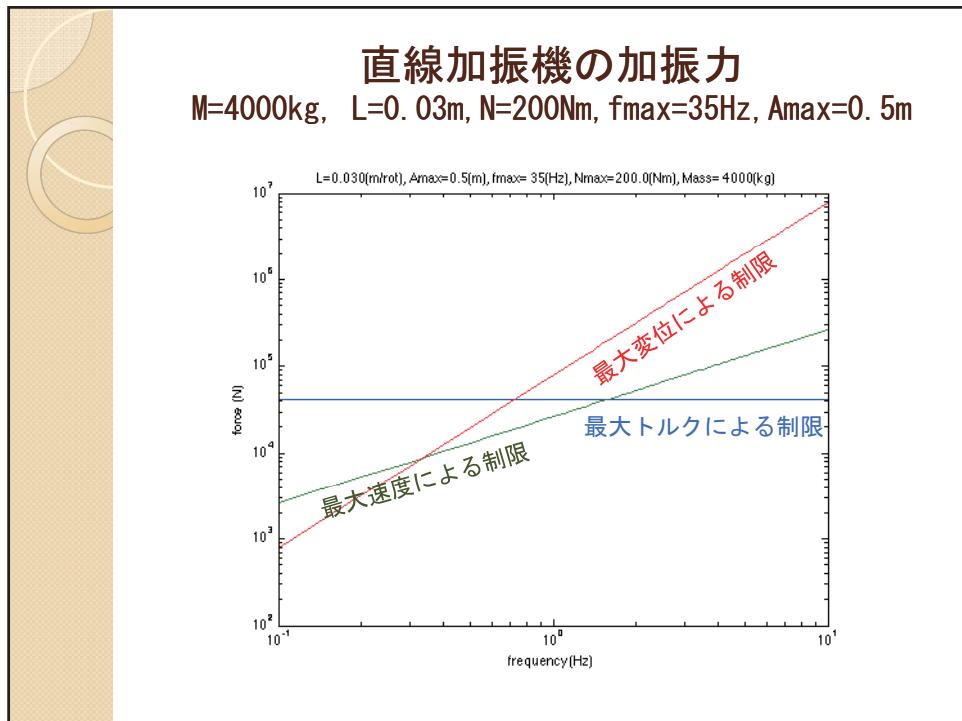


直線加振機の加振力

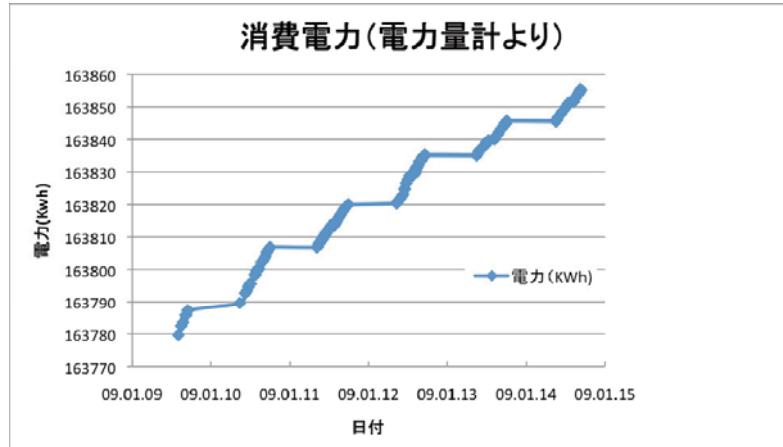
M=2000kg, L=0.05m, N=100Nm, fmax=25Hz, Amax=0.5m

リードを半分にすると (L=0.025m)
最大回転数を増やすと (fmax=35Hz)





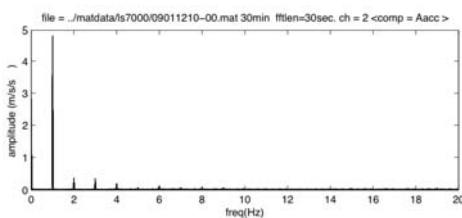
加振機の消費電力 $70\text{kWh} / (5\text{dx}8\text{h}) = 1.75\text{kw}$



加振力の安定性・線形性 (1 Hz)

1.0 - 10.0Hzで單一周波数で震動
おもりに設置した加速度計の記録
30秒間のデータのFFT、27分間の変化

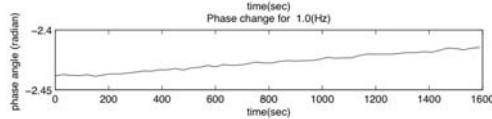
振幅スペクトル



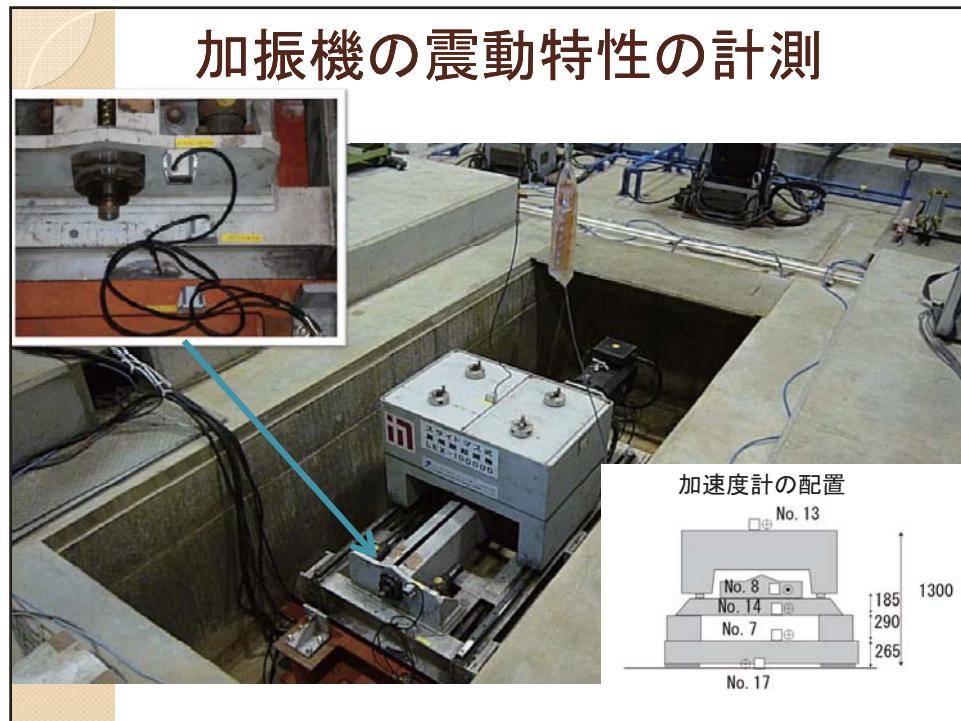
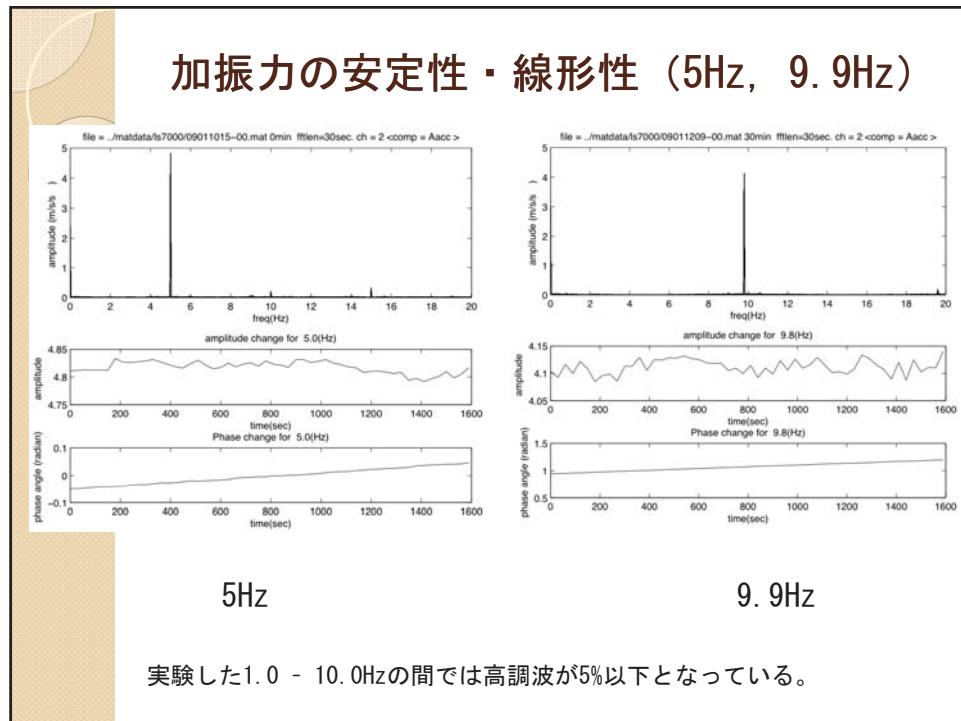
振幅の時間変化

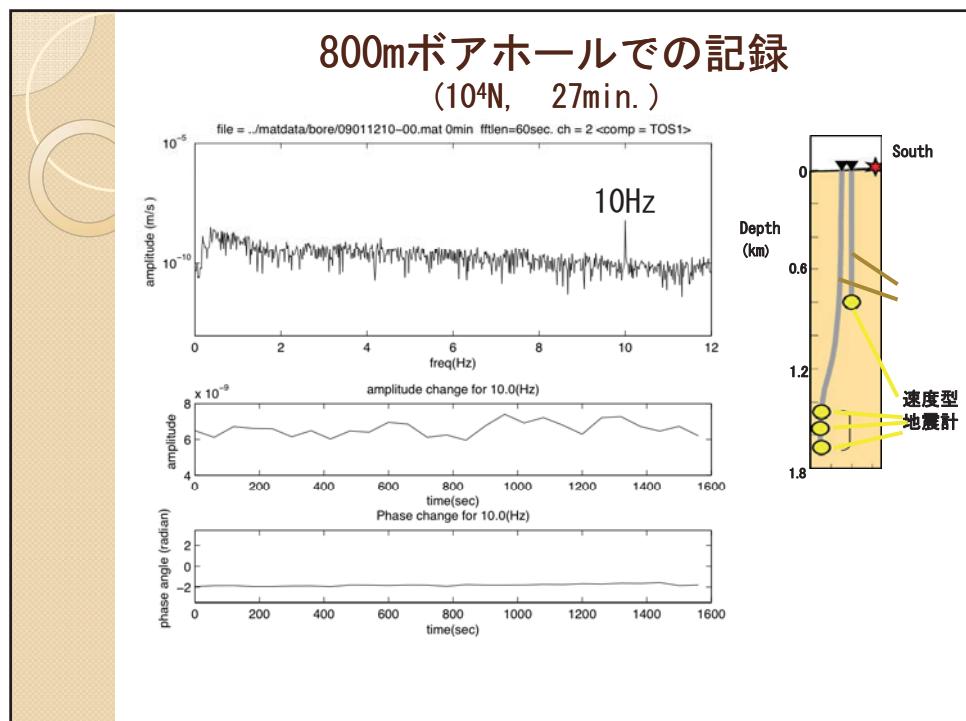
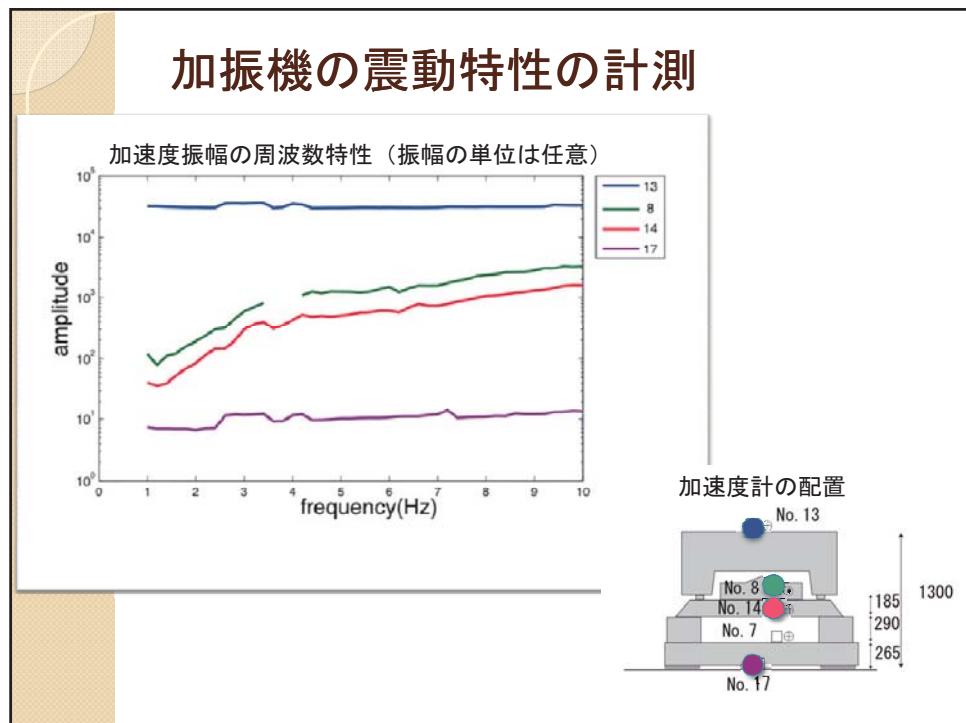


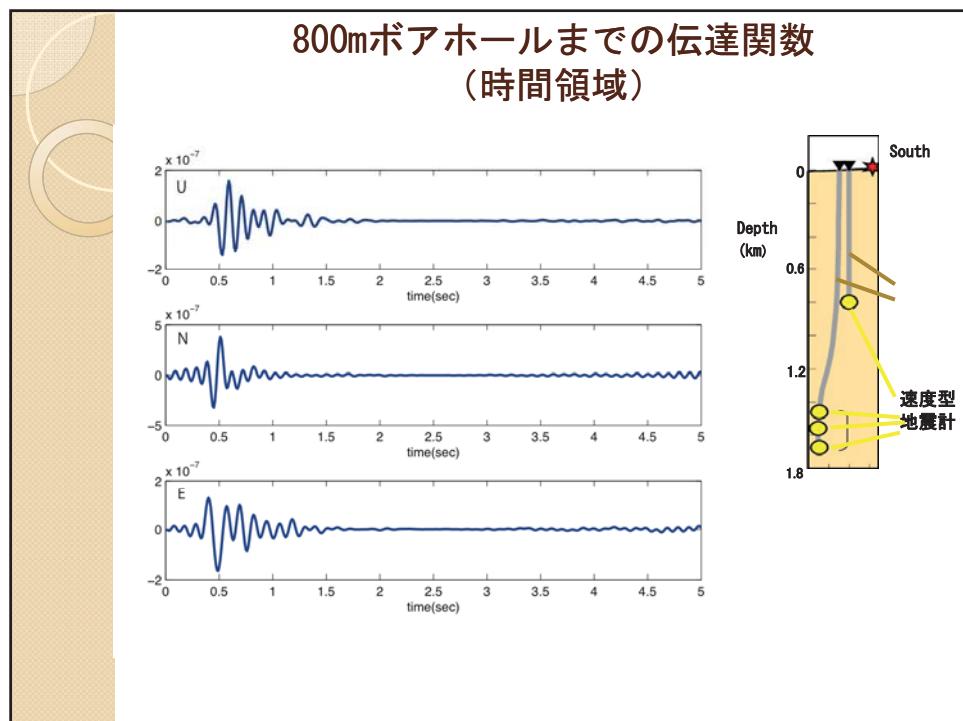
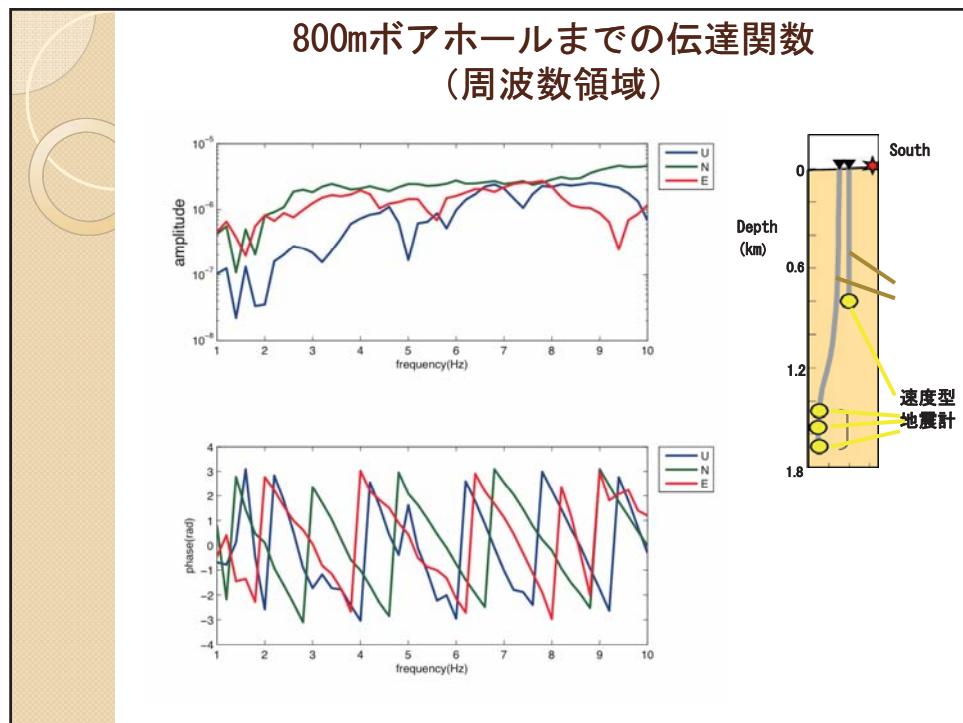
位相の時間変化

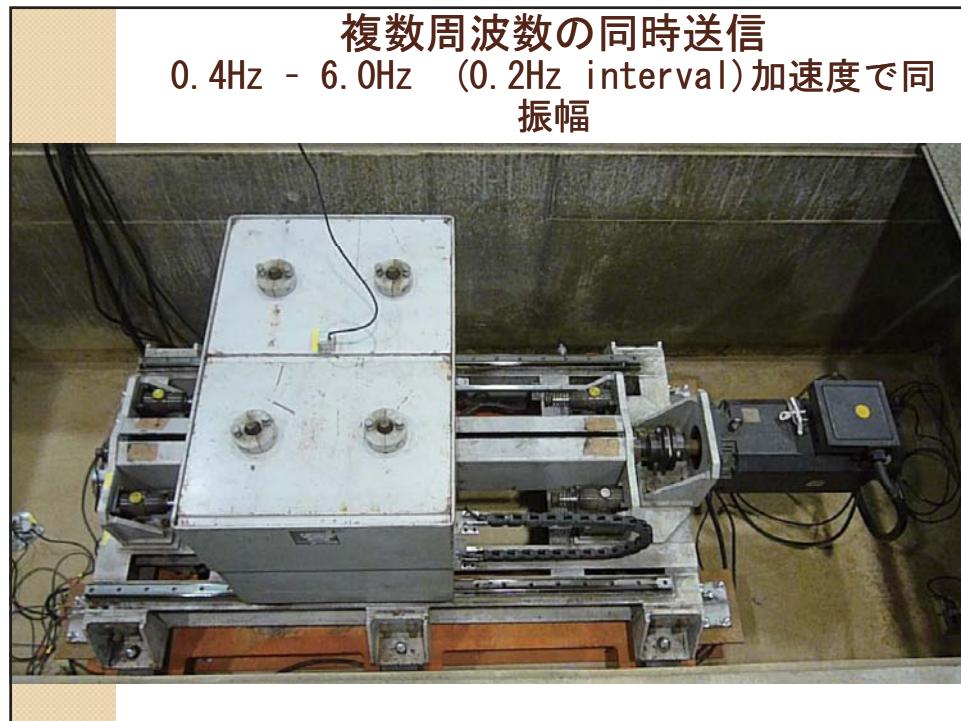
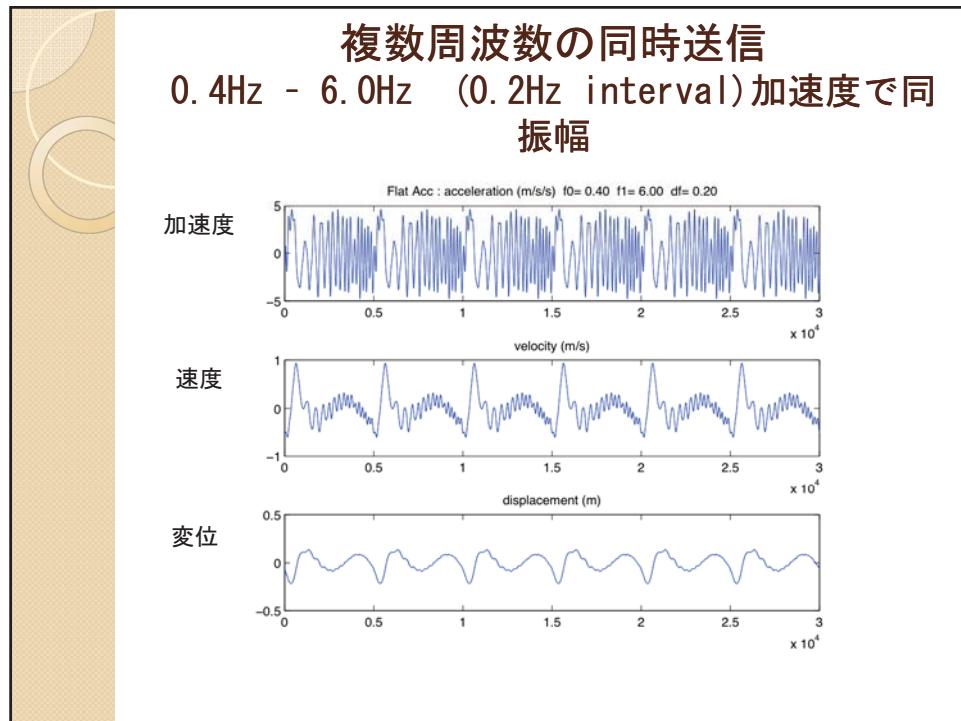


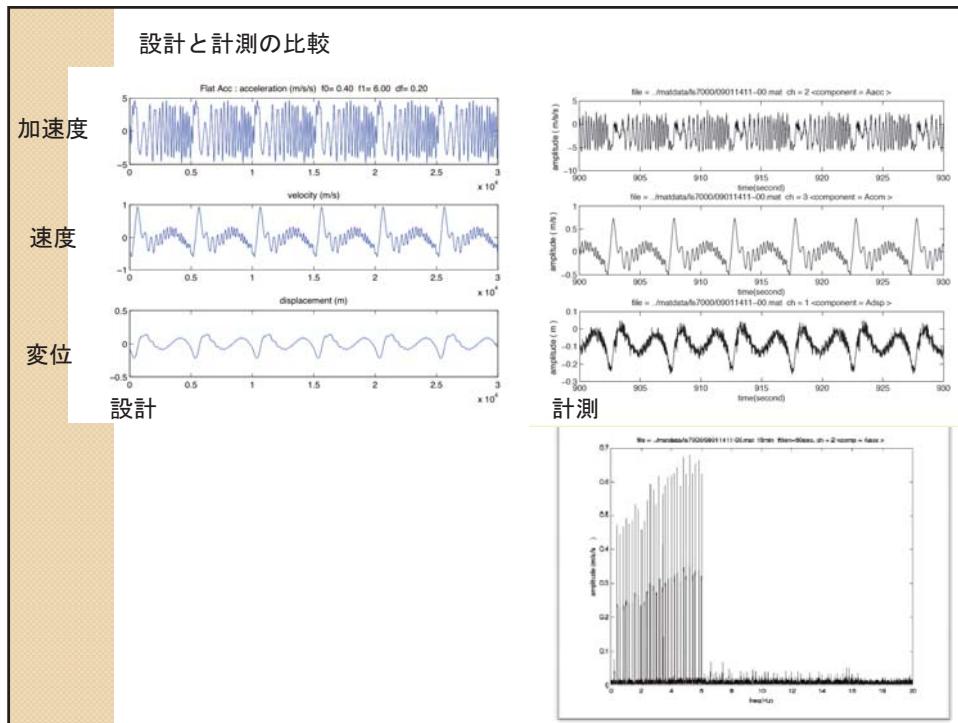
位相ずれは、制御装置がGPSに同期していないため。











現時点でのまとめ

- 直線加振装置を約1週間運転し、特性を測定した。
 - 目立ったトラブルは発生しなかった
 - 消費電力は平均2kW程度
 - 単一周波数での運転では高調波成分は5%以下
 - 800m孔の地震計間での伝達関数を得られた。
- 更に大きな力を発生させるには
 - リードなどの変更で2Hz以上で2倍の力を発生させることが可能
 - それ以上の力を発生させるには、おもりの増加、モータ出力の強化が必要
 - さらに力が必要な場合は複数加振機の連動が現実的か。
- 課題
 - 地盤の影響評価は今後の課題

謝辞

- 鹿島建設株式会社鹿島技術研究所には、直線加振機の使用にあたり、多くのご指導をいただきました。
- 科学研究費補助金（基盤研究（C））課題番号20540410を用いました。

Nagoya RSVF

2010.02.24
アクロス・ワークショップ @ 東濃

鳳来アレイ連続観測記録のアクロス解析

名古屋大学
渡辺俊樹・山崎賢志・山岡耕春ほか

謝 辞

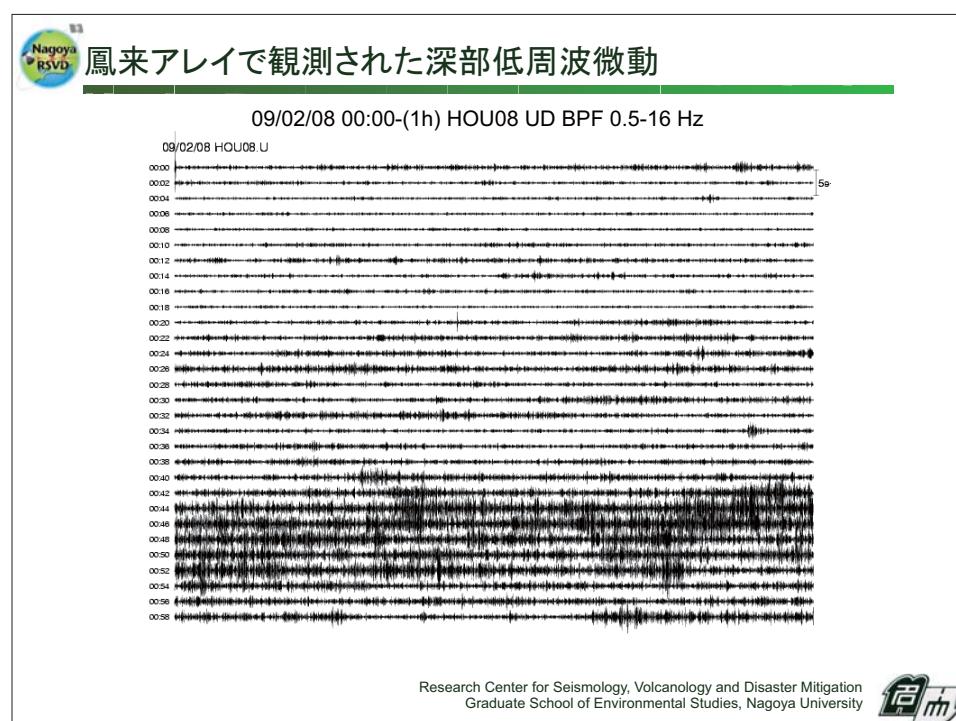
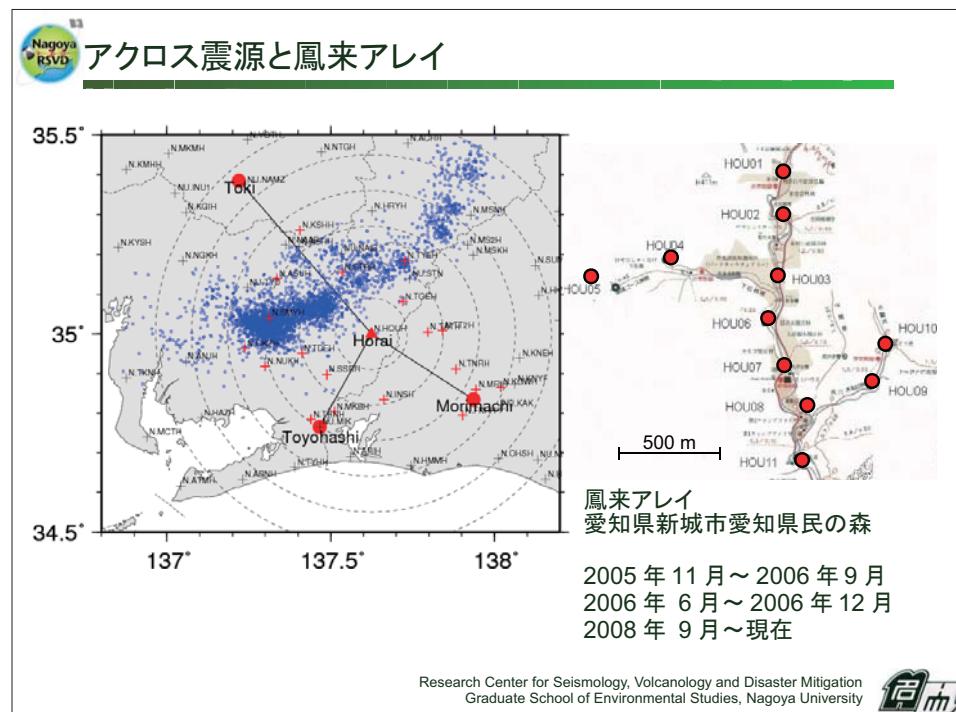
中山佳子・中道治久・堀川信一郎ほか(名古屋大学)
生田領野(静岡大学)・羽佐田葉子(大和探査技術)
國友孝洋(JAEA)・勝間田明男・吉田康宏(気象研)
ほかの皆様、防災科学技術研究所に感謝します。

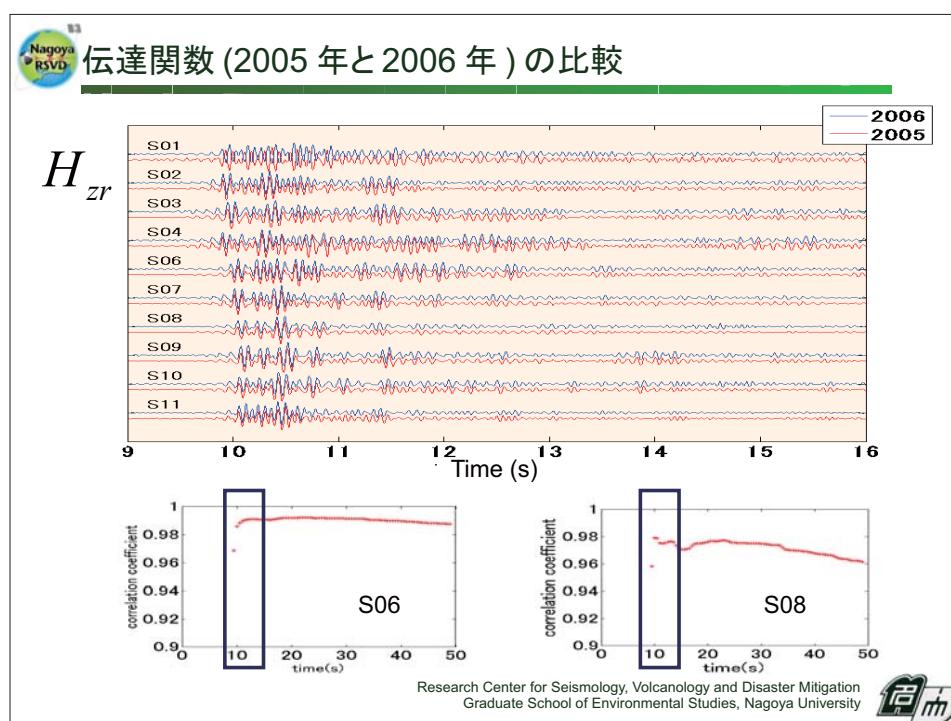
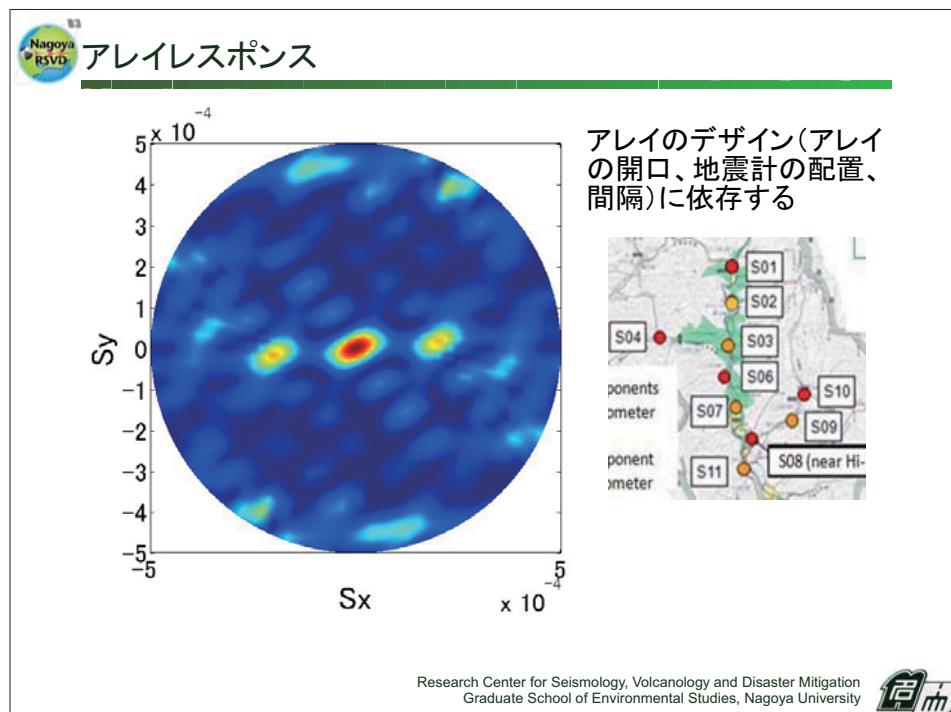
Research Center for Seismology, Volcanology and Disaster Mitigation
Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

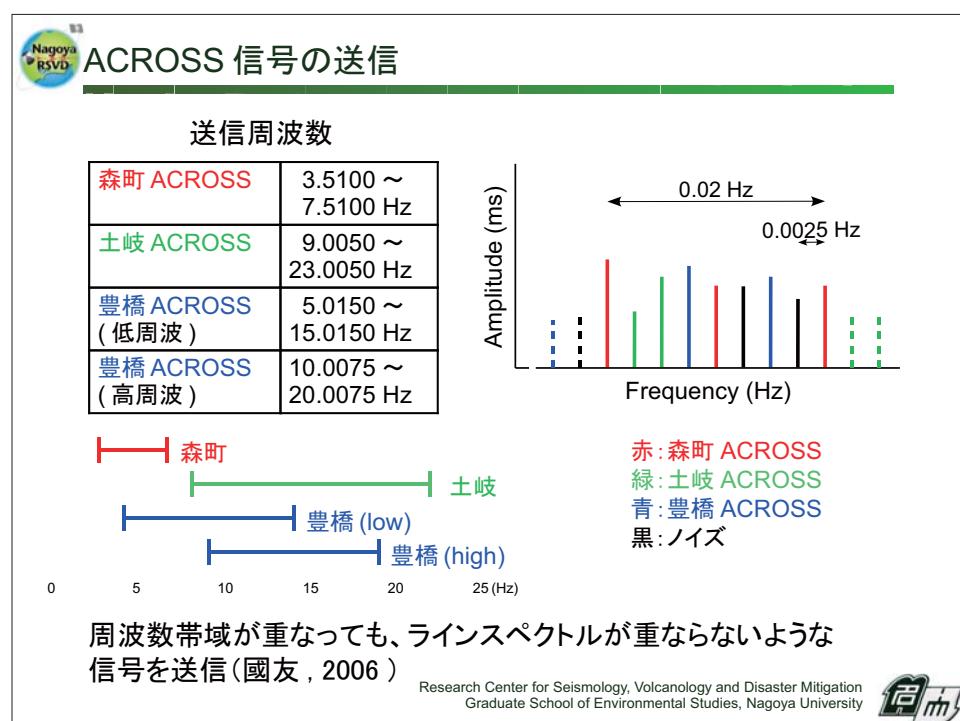
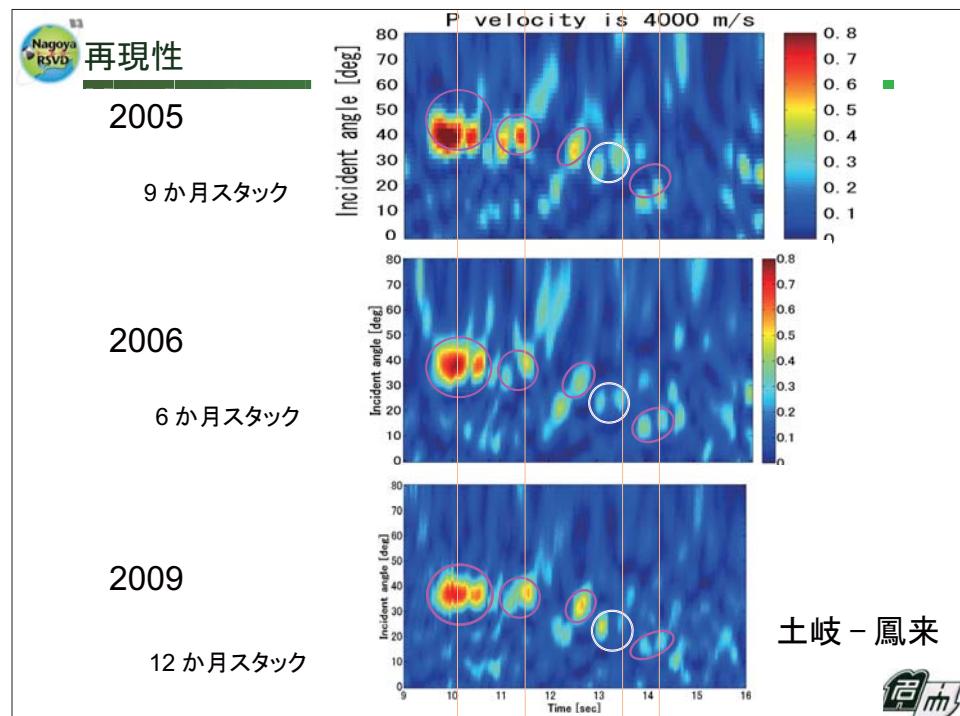
Nagoya RSVF

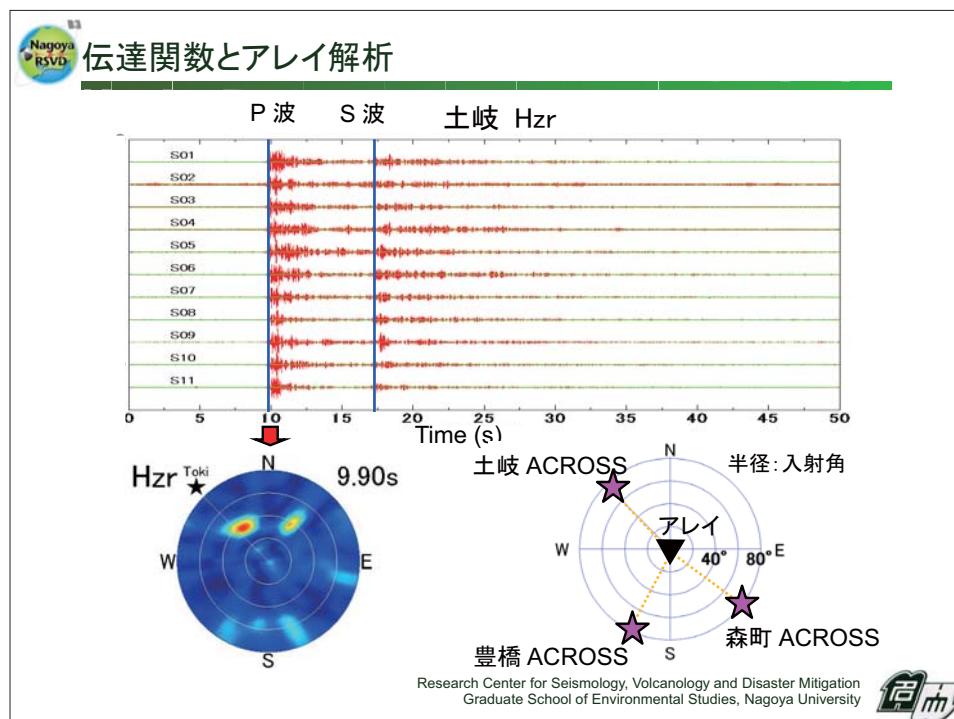
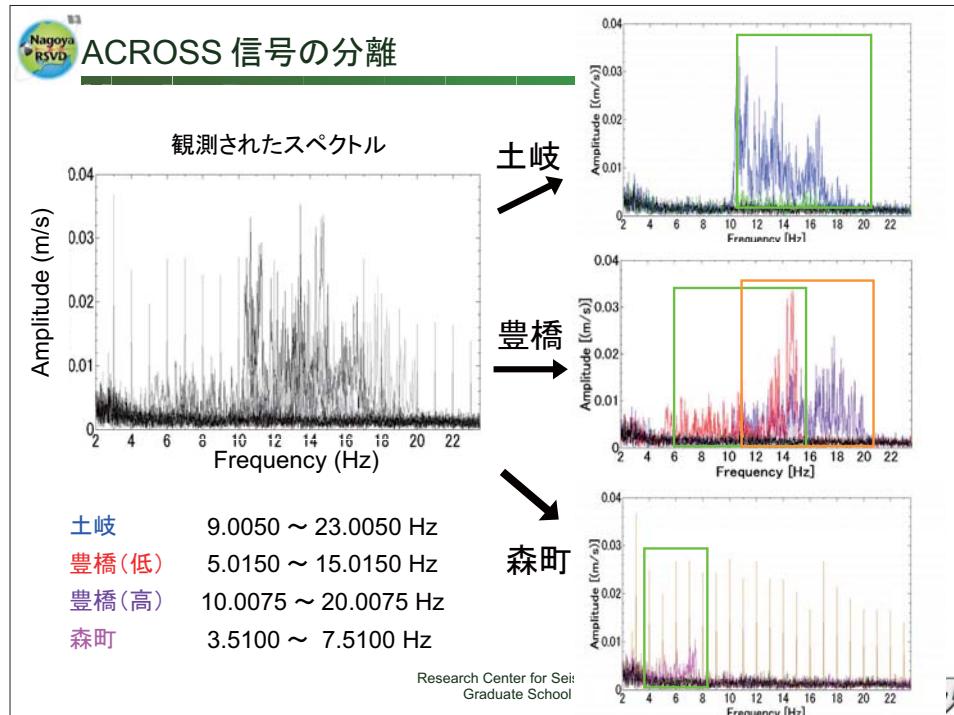
東海におけるプレート境界監視

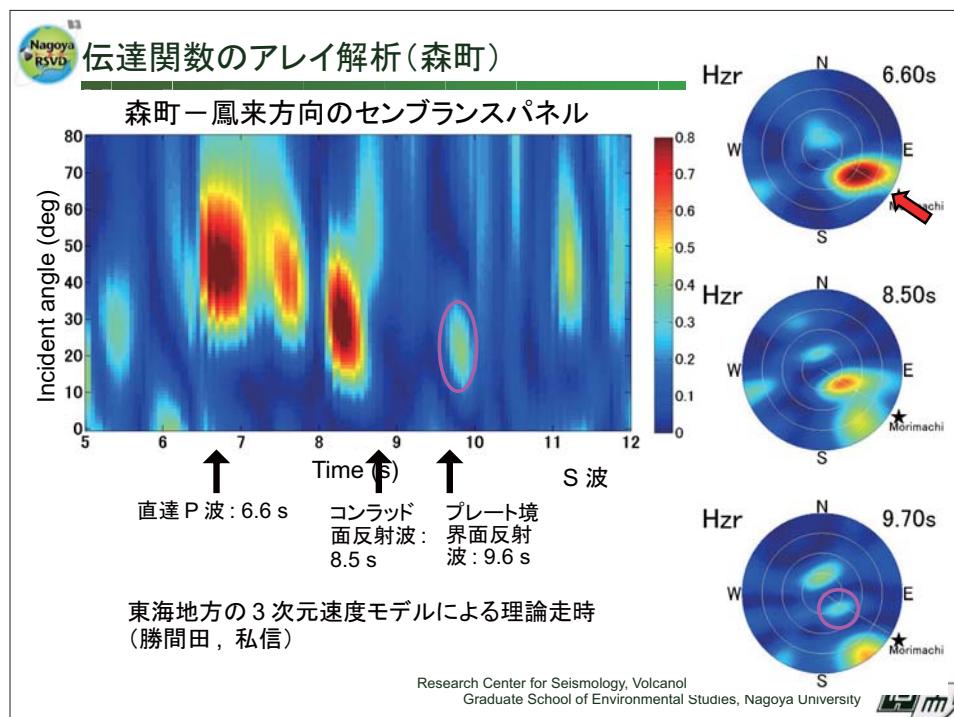
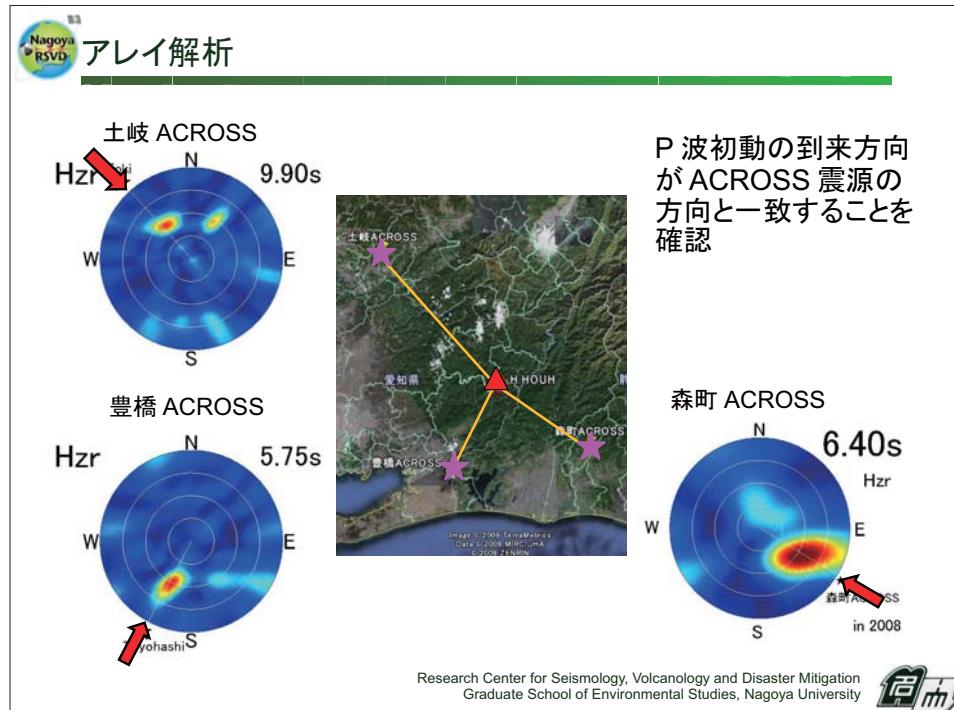
Research Center for Seismology, Volcanology and Disaster Mitigation
Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

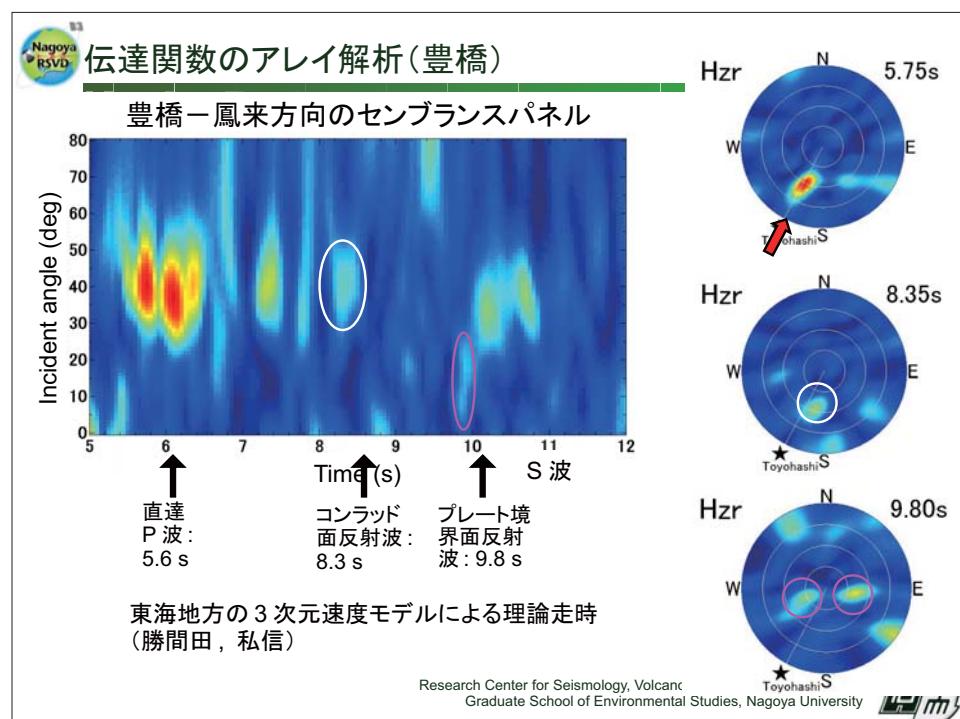
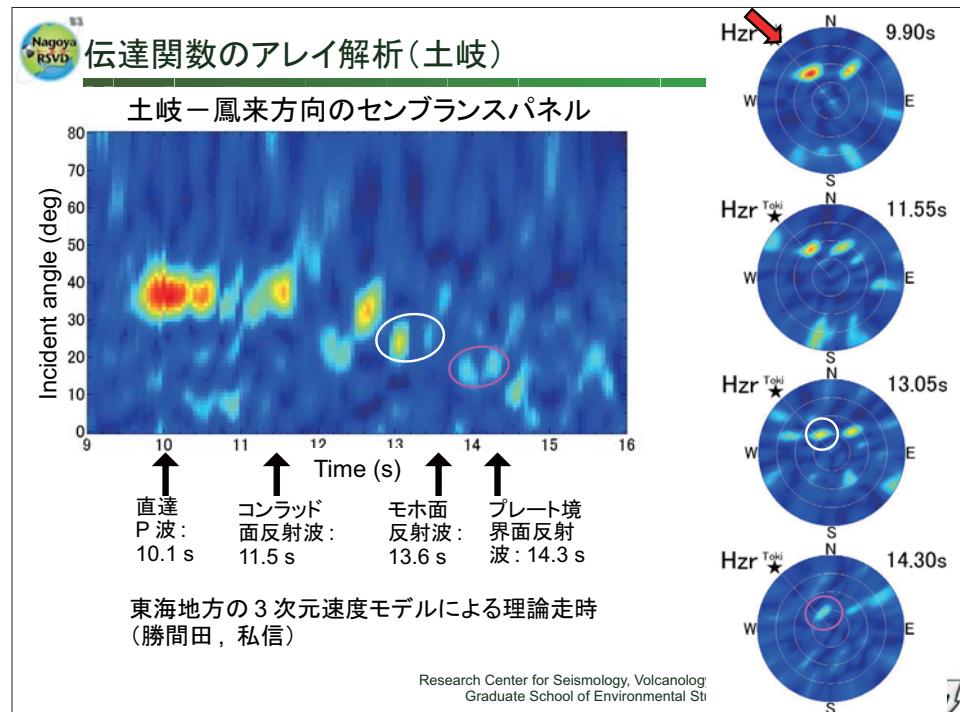


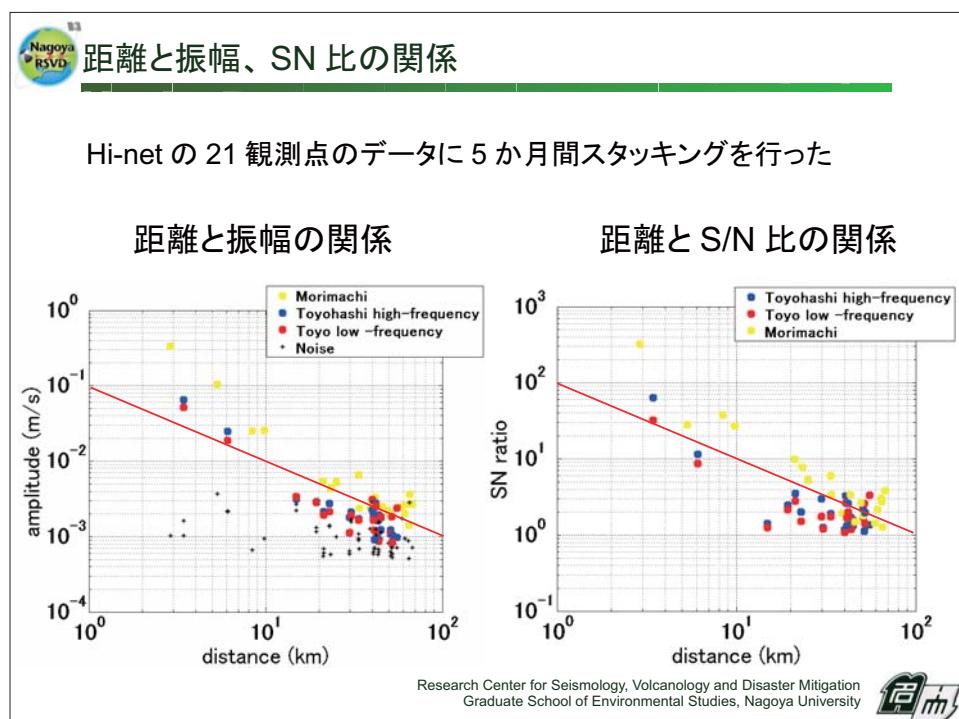
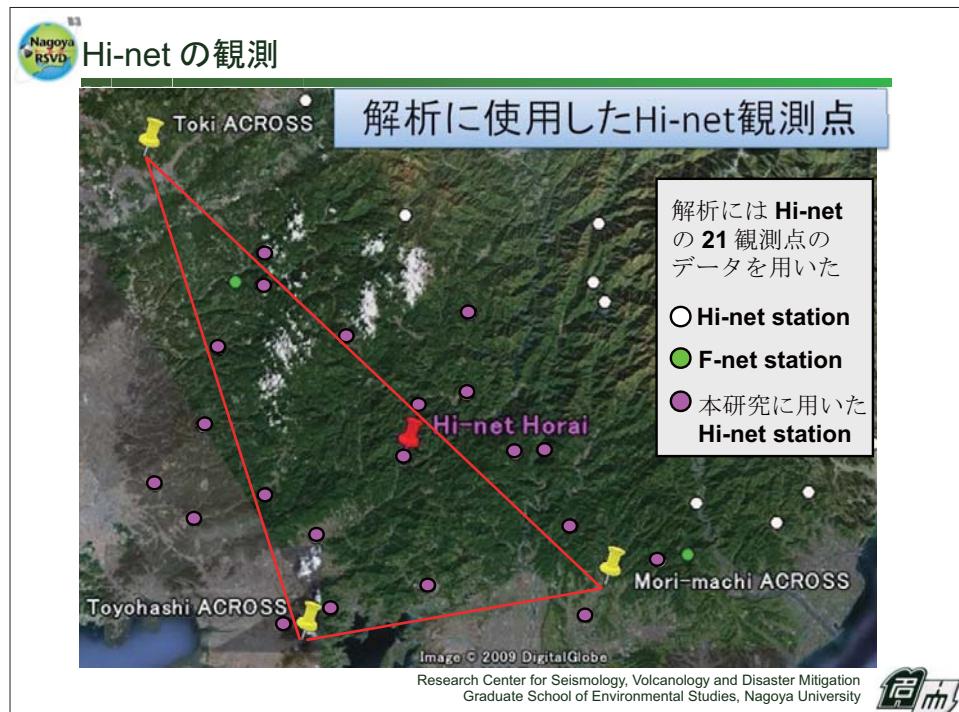


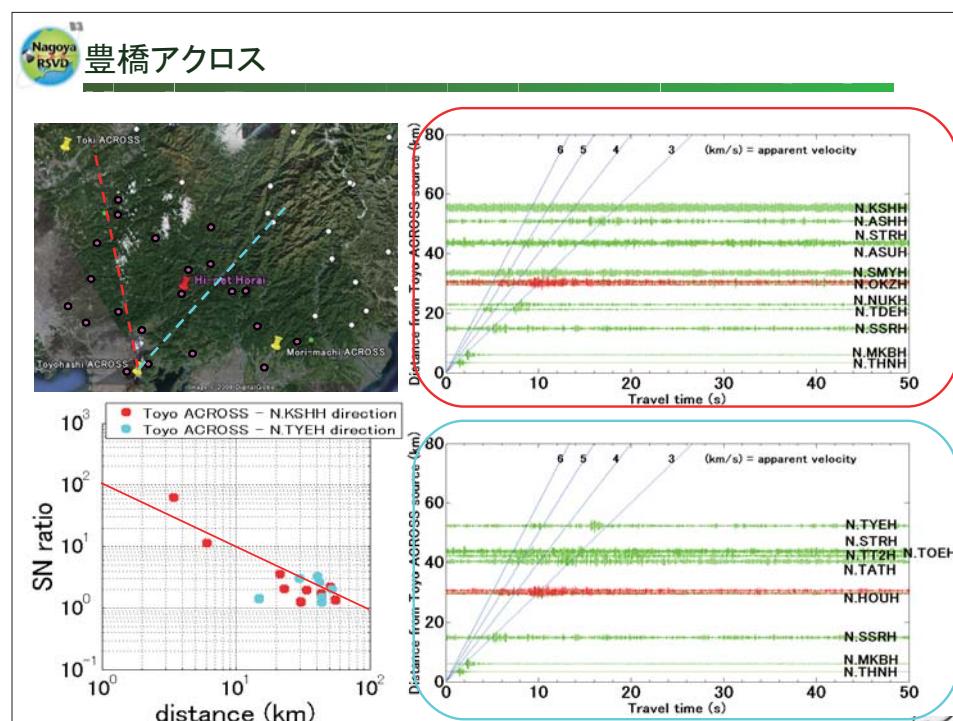
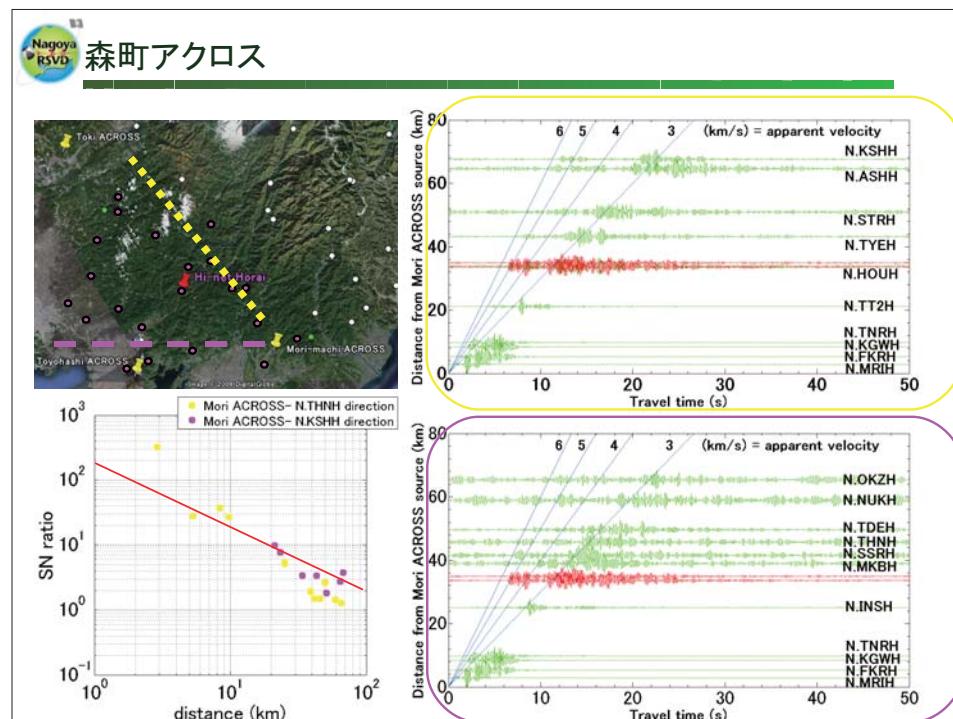














まとめ

- 地表地震計アレイでの観測の再現性が示された。
- 周波数帯域が一部重なる3ヶ所のACROSS信号を分離できることが示された。
- アレイ解析によってACROSS信号の到来方向が確認できた。
- アレイ解析によっていくつかの波群を検出した。その中に直達P波、コンラッド面・モホ面・プレート境界からの反射波と解釈される波群が含まれていると考えられる。
- 今後は、
 - 信号の変化を検出し、その物理的解釈を行う。
 - 構造モデルの信頼性を向上させる。

Research Center for Seismology, Volcanology and Disaster Mitigation
Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University



2.9

兵庫県立大学
UNIVERSITY OF HYOGO

气体圧力と低摩擦材料を併用した省エネ型 弹性波ACROSS送信装置開発の現状

兵庫県立大学
工学部 機械システム工学科
機械工学コース 動力工学研究グループ
伊勢 智彦, 宮武 拓

平成22年2月24日 ACROSSワークショップ@瑞浪地科学研究所

発表内容

兵庫県立大学
UNIVERSITY OF HYOGO

1.緒言	伊勢
2.空気軸受式弹性波送信装置およびその問題点	
3.气体圧力と低摩擦材料を併用した省エネ型 弹性波送信装置	宮武
4.実験結果	
5.結言	

平成22年2月24日 ACROSSワークショップ@瑞浪地科学研究所



1.はじめに

研究の背景

現行の弾性波送信装置:ボールベアリングを使用

軸受に大きな負荷がかかり、摩擦によって発熱が起こる



軸受摩擦損失の低減、装置の構造簡略化

空気軸受で弾性波を発生する偏心回転体を支持する装置の開発

▶ 現行装置との運転動力比較

▶ 軸受摩擦は低減可能だが、コンプレッサ動力が必要

⇒ 総運動動力では現状装置に劣る

本研究の目的

簡単な構造、メンテナンス容易、低運動動力な装置を開発すること！！

平成22年2月24日 ACROSSワークショップ@瑞浪地科学研究所

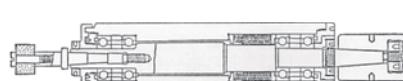
2.空気軸受式弾性波送信装置およびその問題点



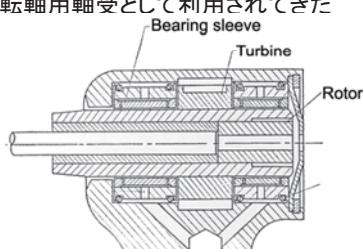
空気軸受の使用例

空気軸受：圧縮空気を作動媒体とする流体軸受

静圧型：超精密工作機械や歯科用ドリルなどの回転軸用軸受として利用されてきた



円筒研削盤主軸



歯科用ドリル

⇒ 偏心量が大きい軸を支持した例は無い

⇒ 静圧気体軸受は偏心回転体が発生する大負荷を支持可能か？

⇒ 発生力が1/100スケールの小形試験機を試作

平成22年2月24日 ACROSSワークショップ@瑞浪地科学研究所

2.空気軸受式弾性波送信装置およびその問題点

兵庫県立大学
UNIVERSITY OF HYOGO

空気軸受試験装置

Ise et. al., JAMDSM, 2007

試作した試験機
仕様: 2000 N @ 50 Hz(実際の遠心力の1/100)

50 Hzで運転可能なことを実証

平成22年2月24日 ACROSSワークショップ@瑞浪地科学研究所

2.空気軸受式弾性波送信装置およびその問題点

兵庫県立大学
UNIVERSITY OF HYOGO

動力比較

$2 \times 10^5 \text{N}$ で比較

軸受形式	転がり軸受	静圧気体軸受
軸受損失	1.5 kW	0.3 kW
周辺機器動力	1.9 kW	16.8 kW
総運動動力	3.4 kW	17.1 kW
軸受寿命	数年	∞
必要な周辺機器	・冷却ポンプ ・潤滑ポンプ ・オイルクーラー	・コンプレッサ ・ガスドライヤ ・圧力制御機器

弾性波ACROSS送信装置は通年連続運転が必要

次期送信装置には耐衝撃性に優れ、長軸受寿命、低軸受損失であることが必要

↓

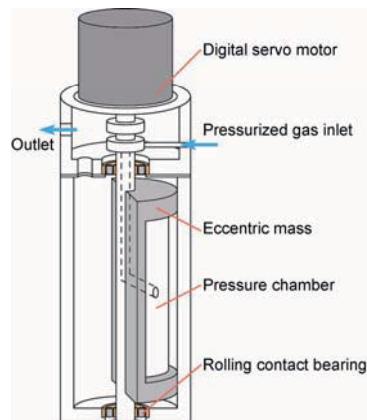
転がり軸受 + 気体圧力

平成22年2月24日 ACROSSワークショップ@瑞浪地科学研究所

2. 空気軸受式弾性波送信装置およびその問題点



概念設計した装置



特徴

- ・転がり軸受の大きな摩擦発熱を低減
- ・除熱に要した液体冷却用周辺機器とその維持に関する諸問題を解消
- ・耐衝撃性の確保
- ・発生力の支持面積の拡大
- ・長期安定運転の確保実現
- ・省エネ(CO₂対策)：空気コンプレッサと圧力制御機器を要するが、全体仕様において大きく有利

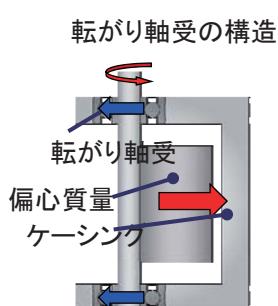
2000N級装置を試作、空気軸受の場合と動力比較

平成22年2月24日 ACROSSワークショップ@瑞浪地科学研究所

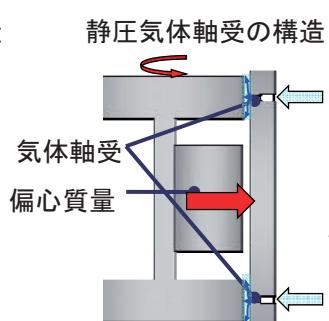
3. 省エネ型送信装置の構造



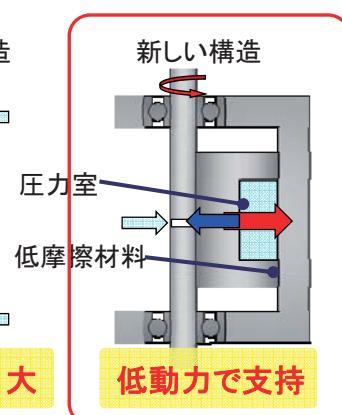
各送信装置の構造比較



摩擦熱、寿命が問題

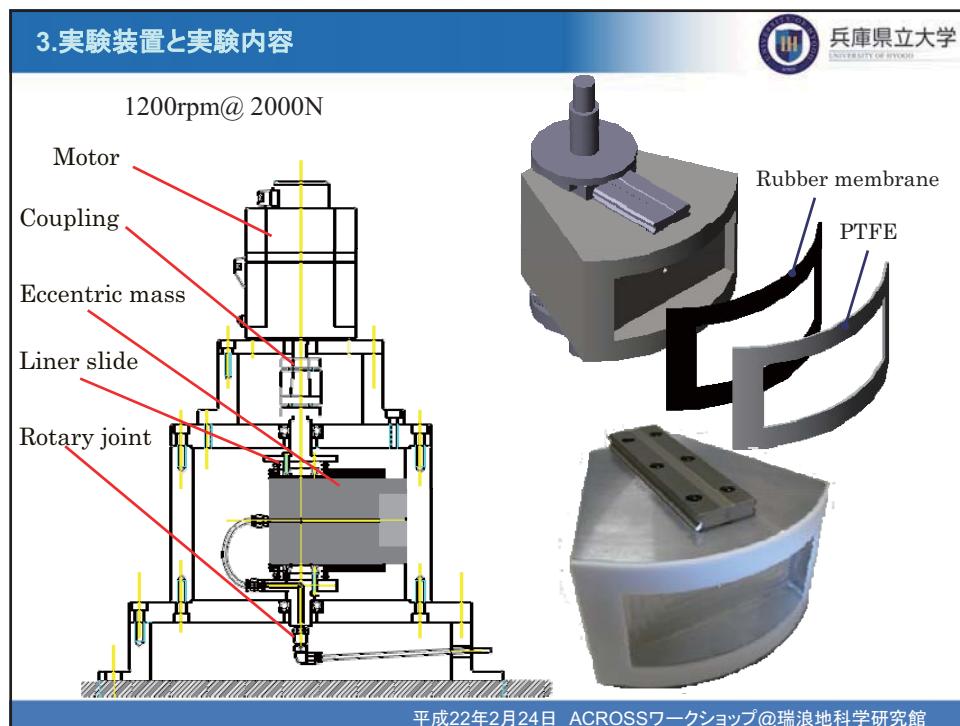
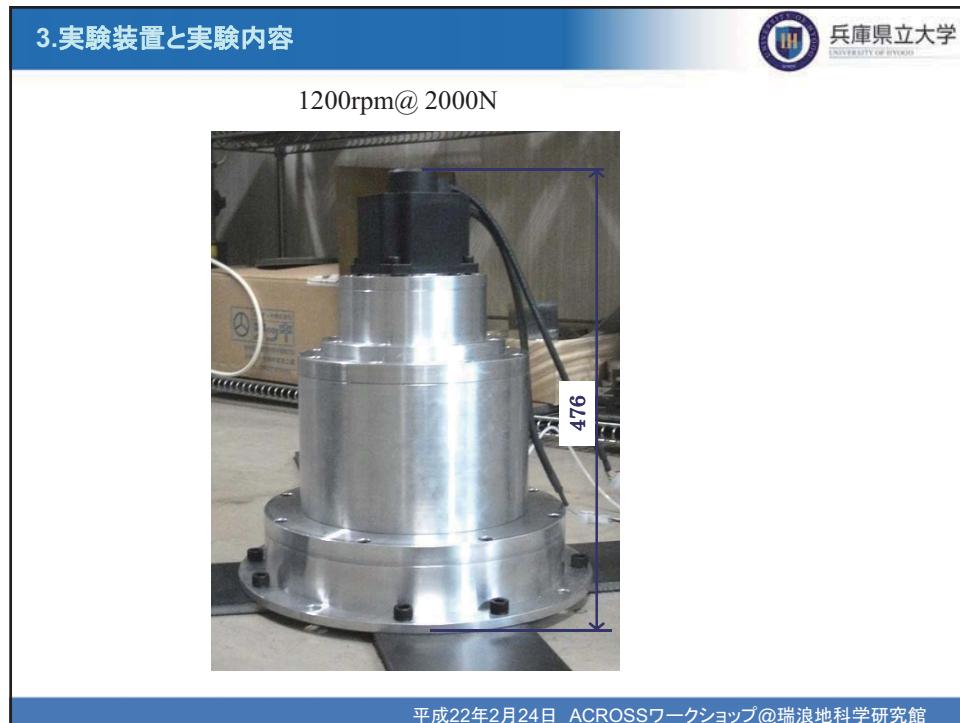


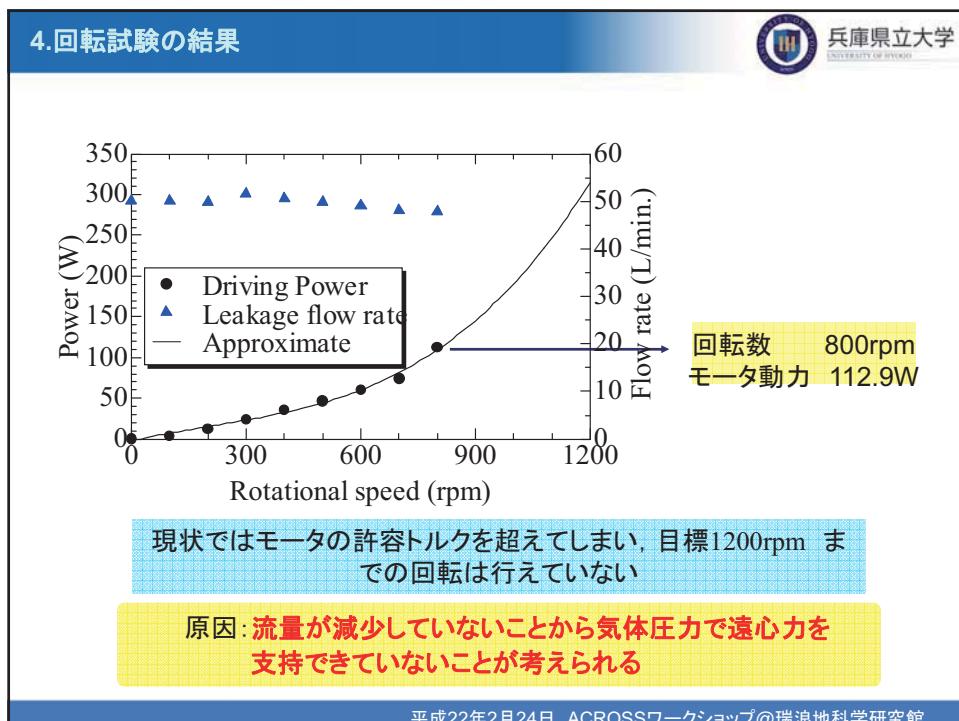
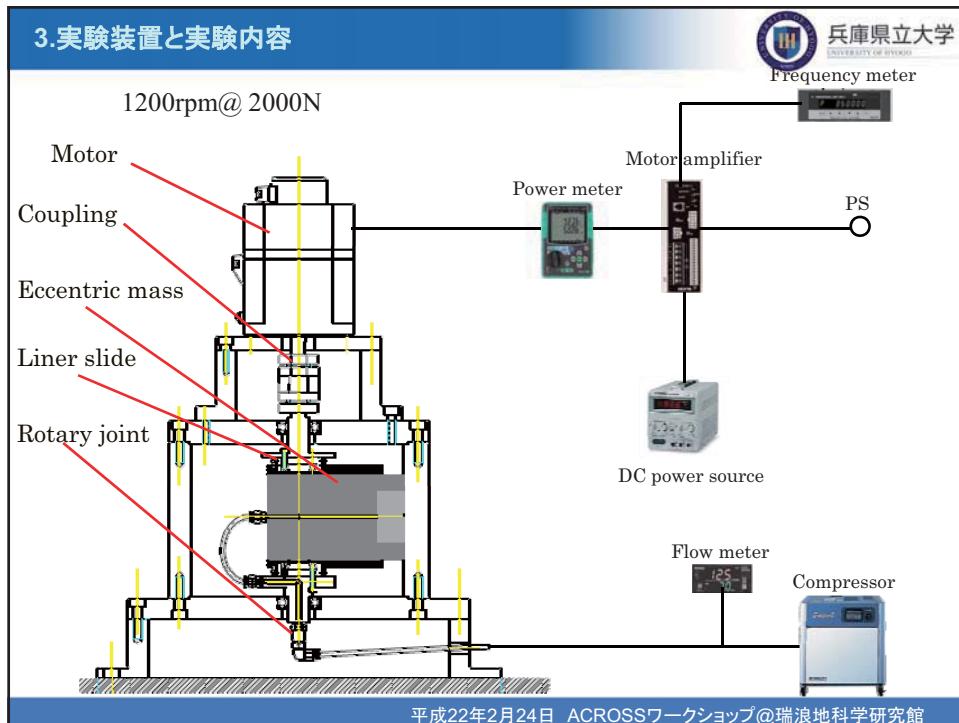
コンプレッサ動力大



低動力で支持

平成22年2月24日 ACROSSワークショップ@瑞浪地科学研究所





4. 動力比較



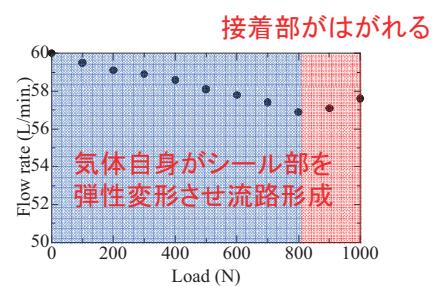
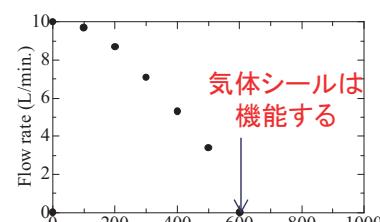
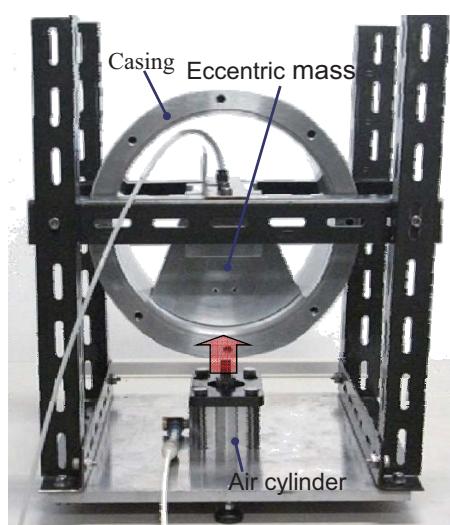
現状の回転数800rpmの場合の発生遠心力850Nで各送信装置の動力を比較

Support type	Proposed model	Ball bearing	Gas bearing
Centrifugal force		850 N	
Friction loss	102.7 W	3.0 W	0.04 W
Peripherals power	411.7 W	—	1302.1 W
Total power	524.6 W	3.0 W	1302.2 W

静圧気体軸受より運動動力は約40%と大幅に低減できる
しかし、現状のシール特性では転がり軸受式に及ばない

平成22年2月24日 ACROSSワークショップ@瑞浪地科学研究所

4. 静的シール特性評価試験と結果



平成22年2月24日 ACROSSワークショップ@瑞浪地科学研究所

5.結言



- ・低動力で弾性波ACROSS送信装置の軸受損失を低減するため省エネ型送信装置の1200rpm@2000N級試験機を製作した。
- ・回転試験の結果800rpmまでの回転を確認した。
- ・現状ではシール機能が弱いため、気体圧力で遠心力をあまり支持できない。
- ・静的シール特性試験を行った結果、ゴム膜を用いた構造の問題点が明らかになった。
- ・現状でも静圧気体軸受より大幅に動力を削減できる。

今後の展開

気体シール機能向上のため、シール部、偏心質量の形状、圧力室の構造などの改良が必要である。
ご助言よろしくお願ひします。

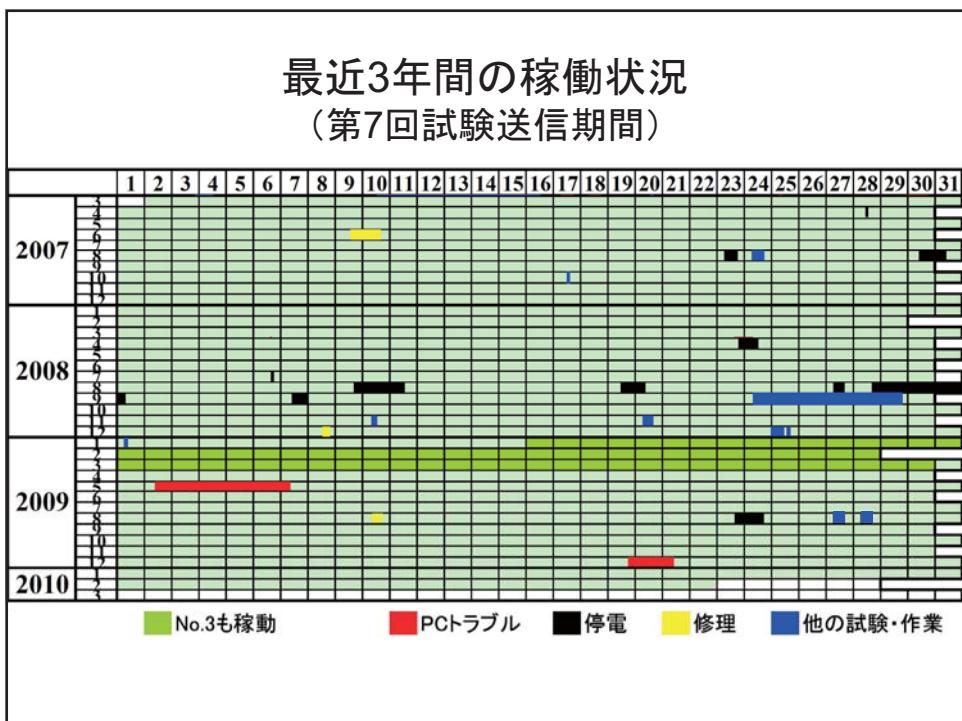
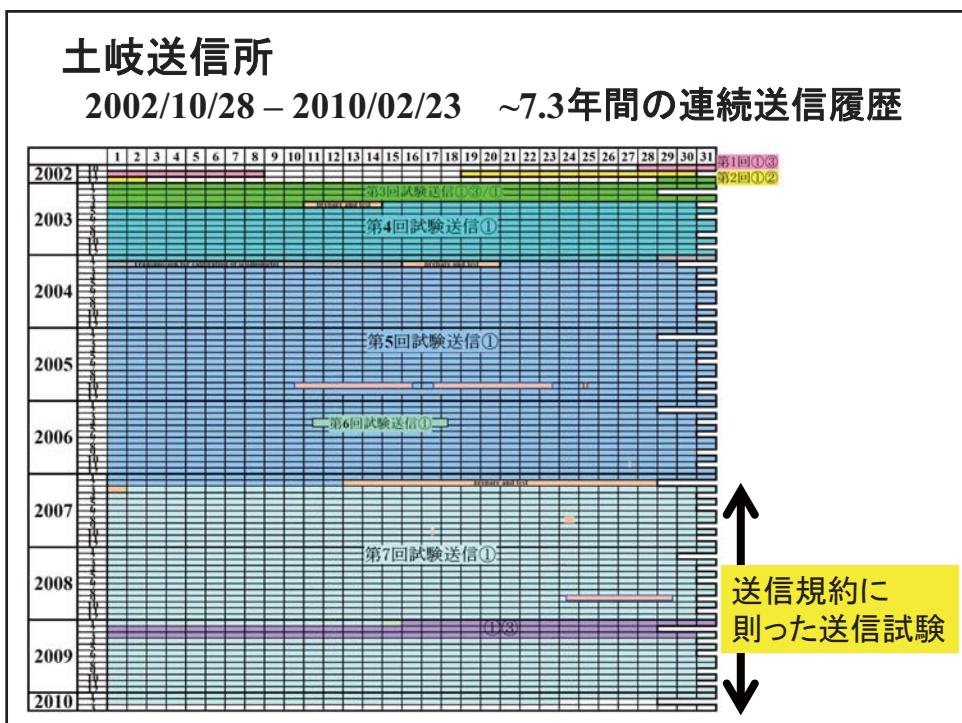
平成22年2月24日 ACROSSワークショップ@瑞浪地科学研究所

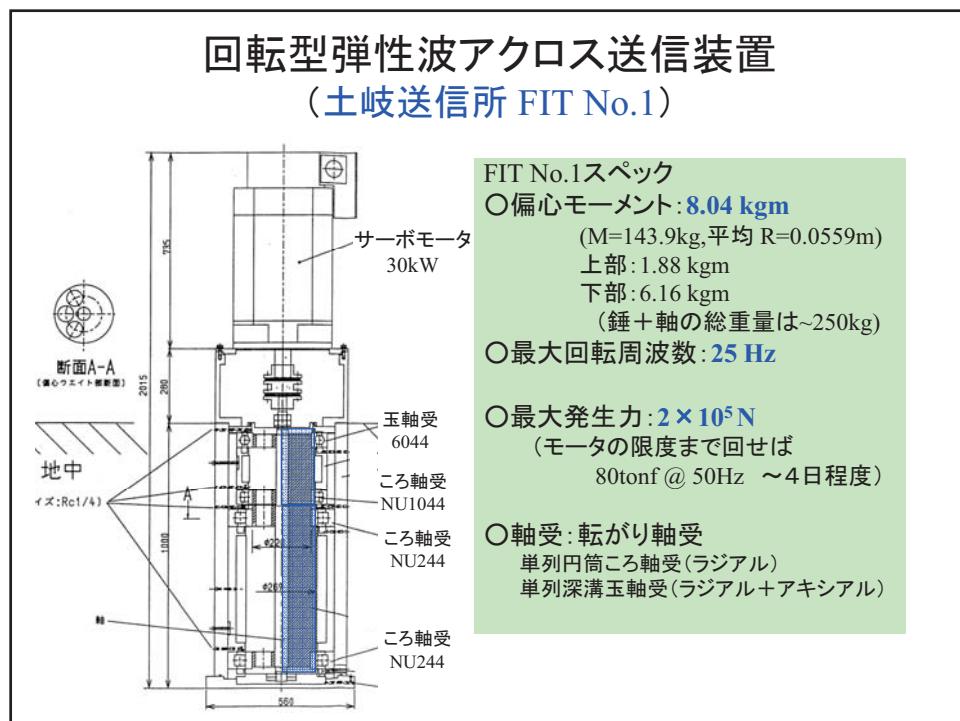
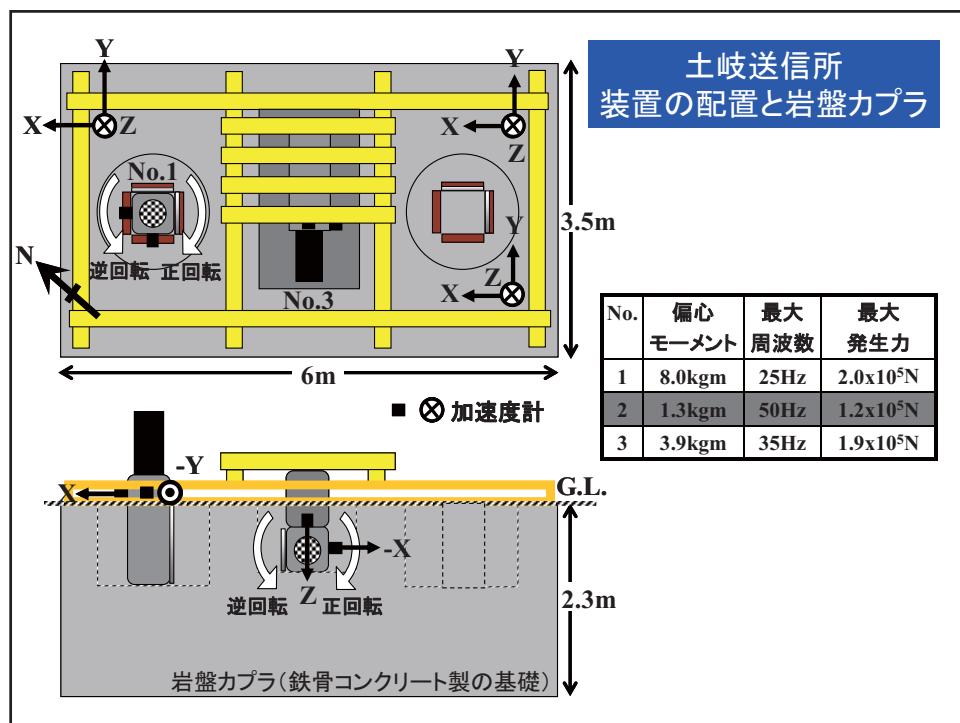
2.10

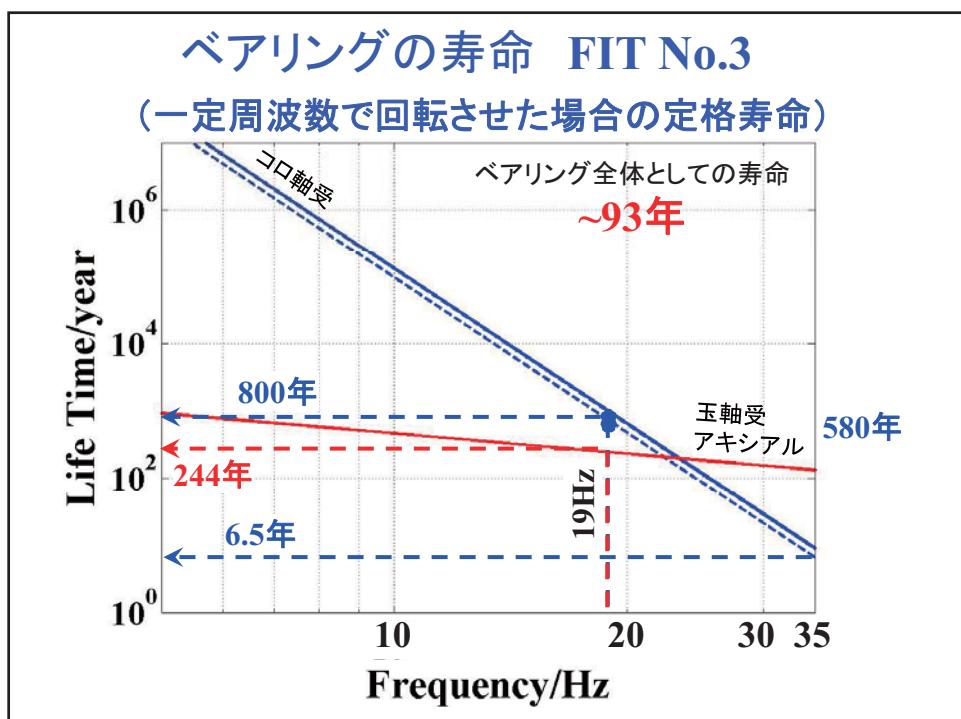
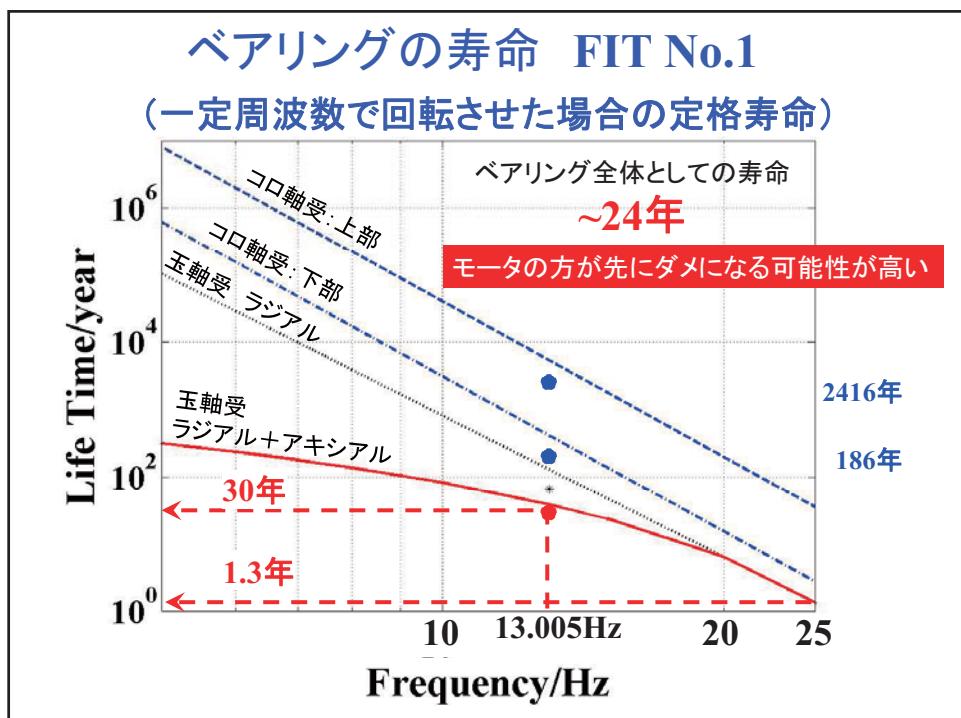


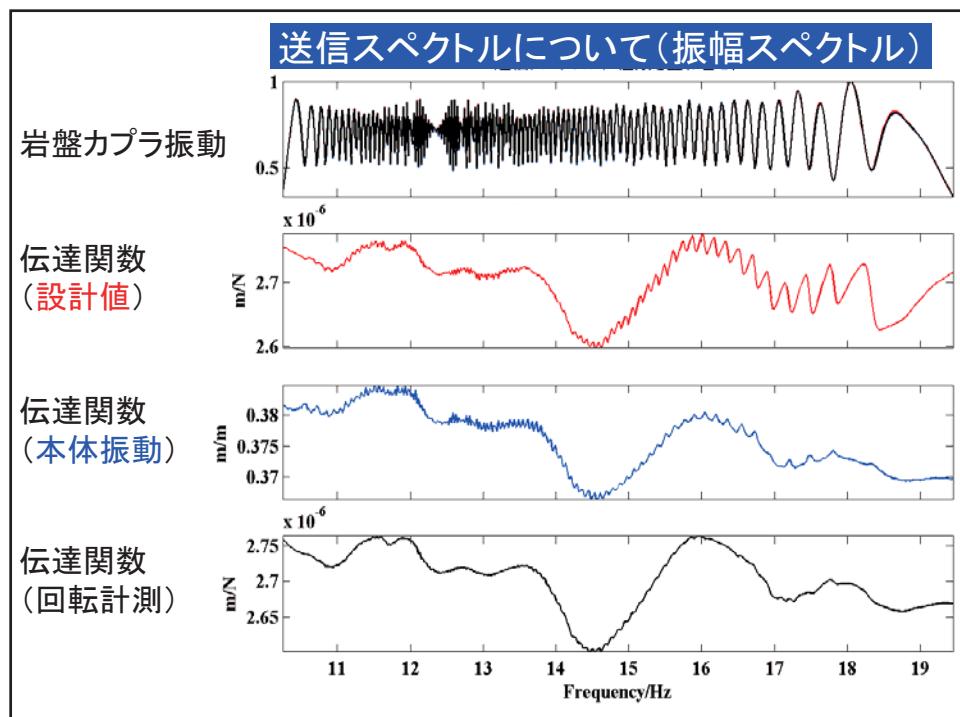
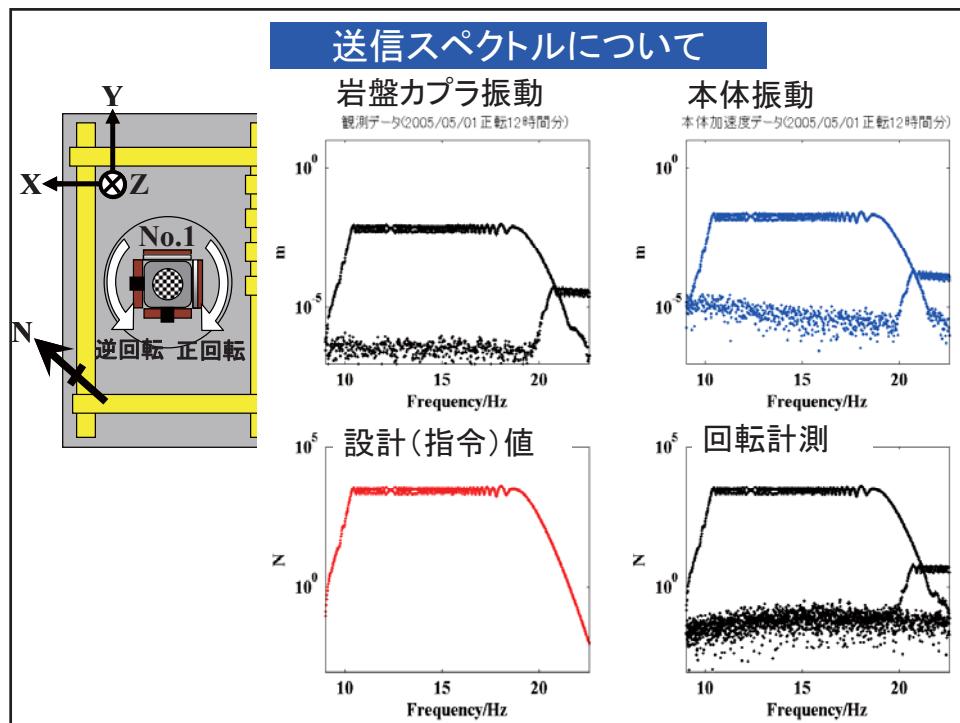
弹性波アクロス送信技術のまとめ

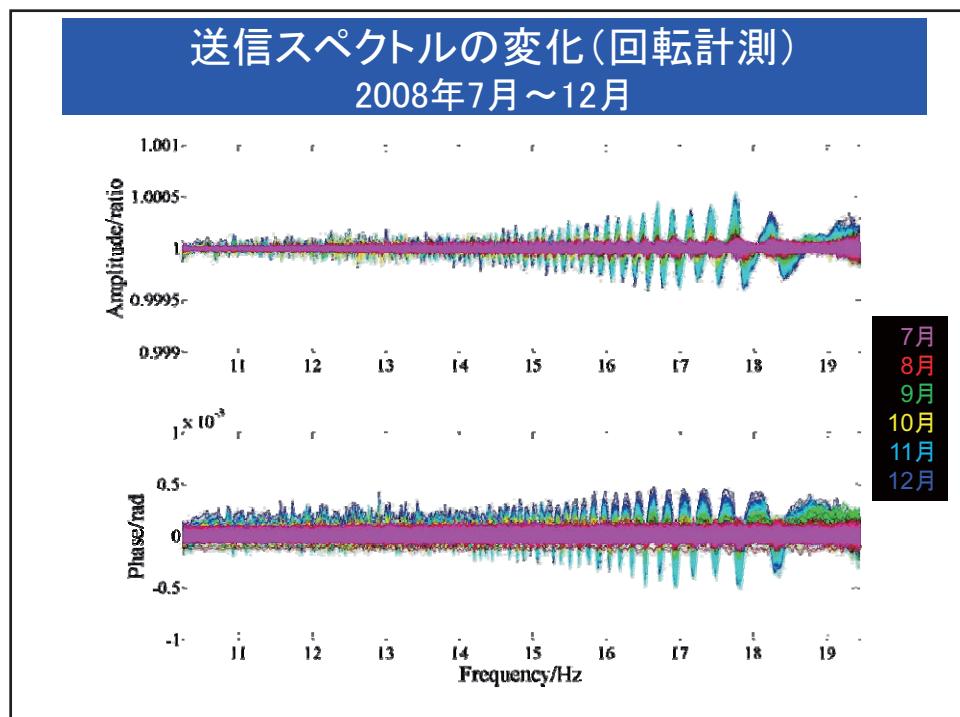
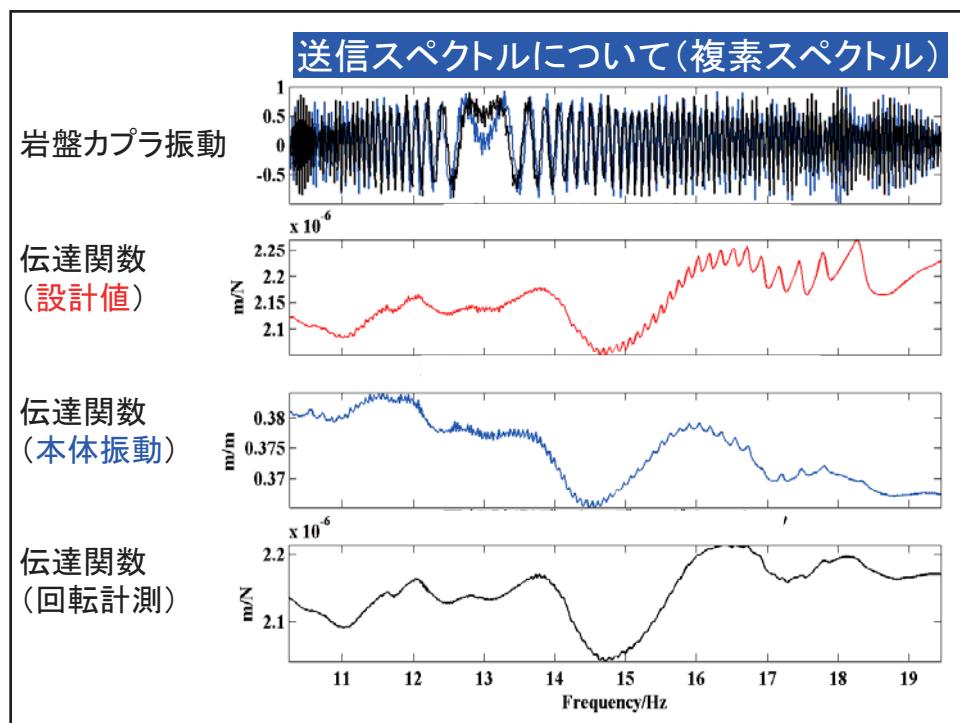
1. 送信履歴と最近3年間の稼働状況
2. 軸受寿命
3. 送信スペクトルについて
4. 送信所近傍での時間変化



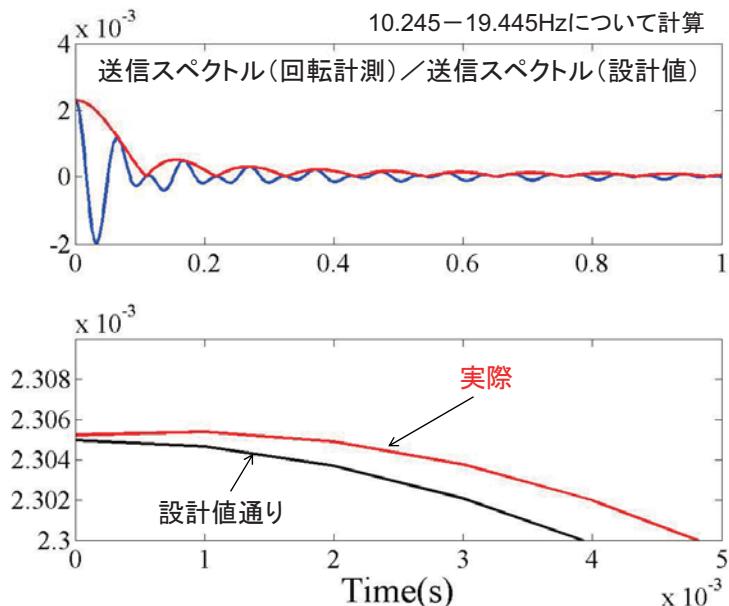




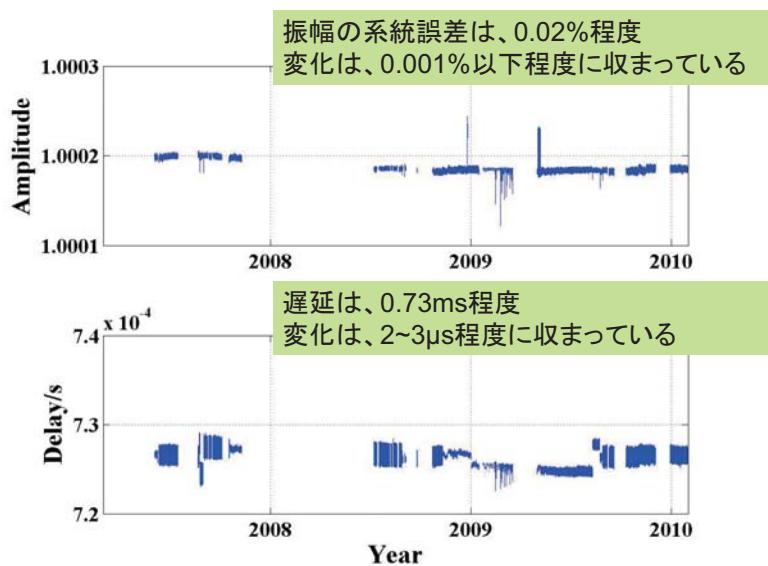


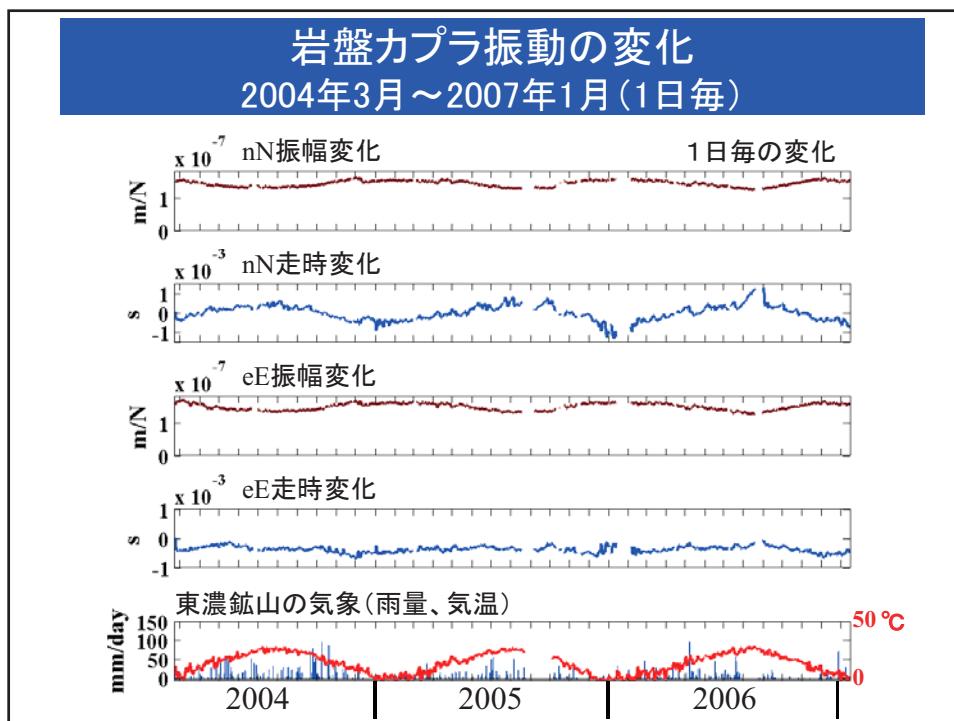
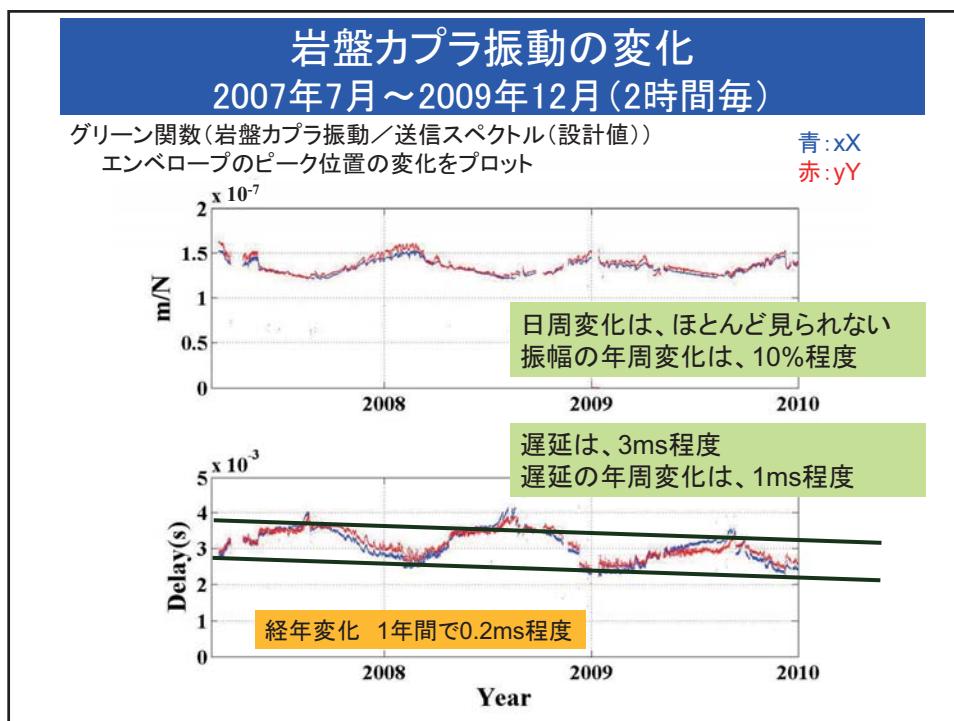


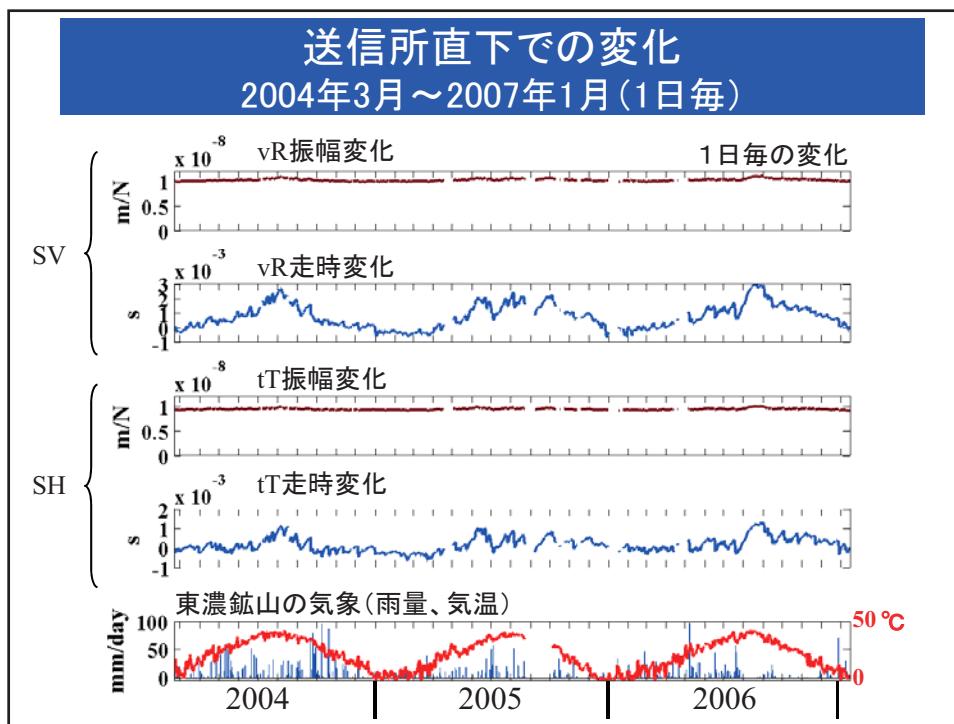
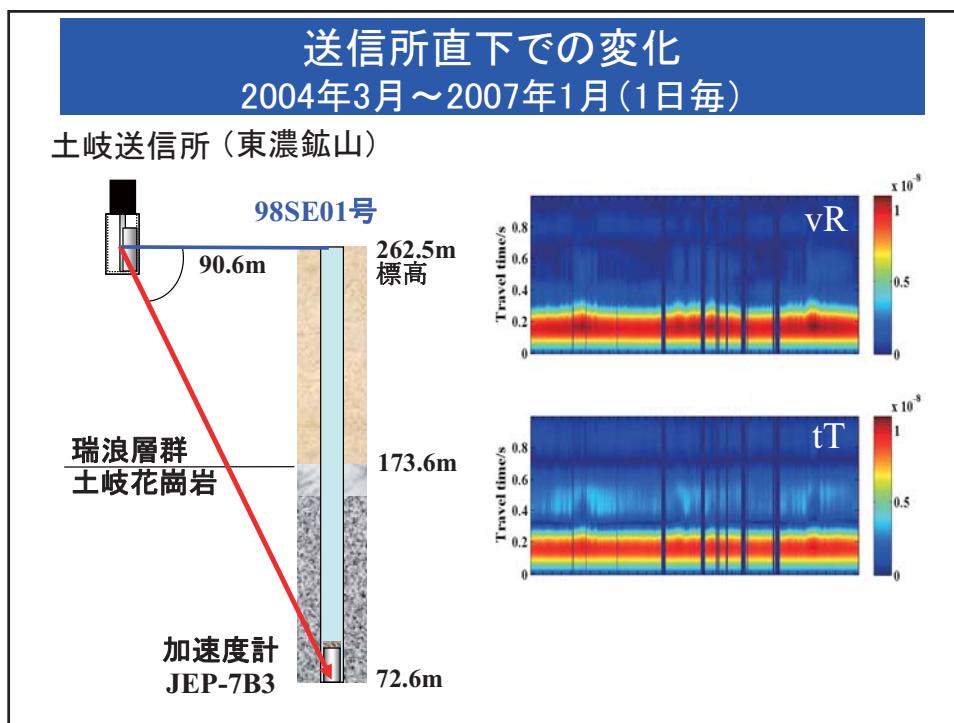
送信スペクトルの変化(回転計測／設計値) 2007年7月～2010年1月(2時間毎)



送信スペクトルの変化(回転計測／設計値) 2007年7月～2010年1月(2時間毎)







まとめ

1. 送信履歴と2007年から最近3年間の稼働状況

現在、連続送信8年目に突入している。他の実験に伴う計画停止や、軽微な周辺機器の修理(年一回程度)を除くと、停電以外では停止していない。2009年度は停電が少なく、制御PCが4カ月程度でフリーズするという現象が明らかになった(原因は調査中)。

2. 軸受寿命

設計当初に最も心配された軸受寿命は、現状の送信周波数ではほとんど問題がない。むしろモータの方が先に故障する可能性がある。

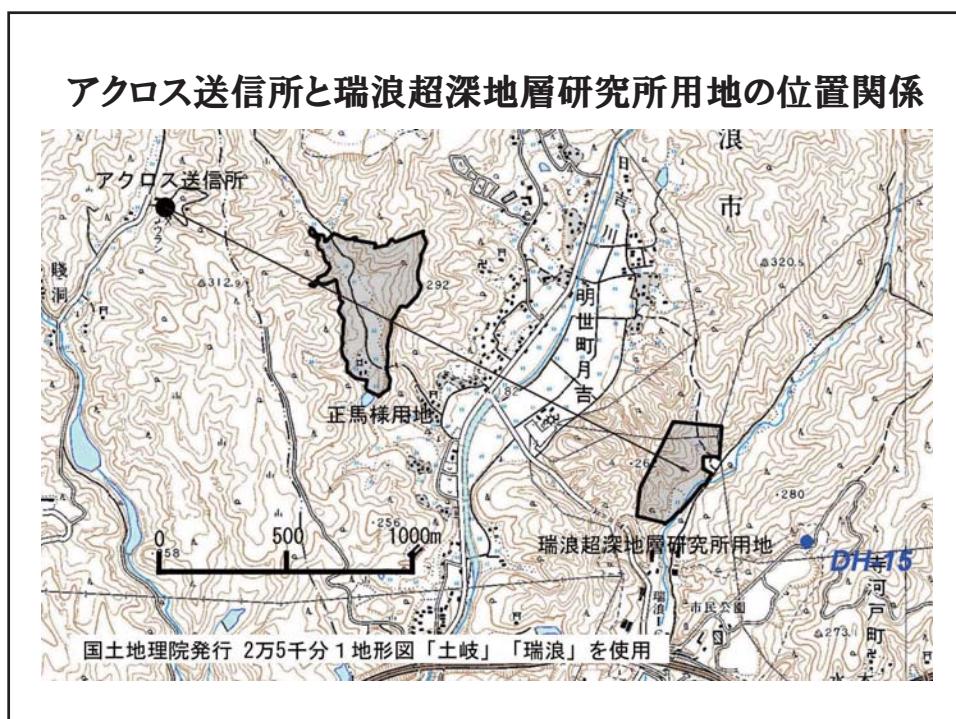
3. 送信スペクトルについて

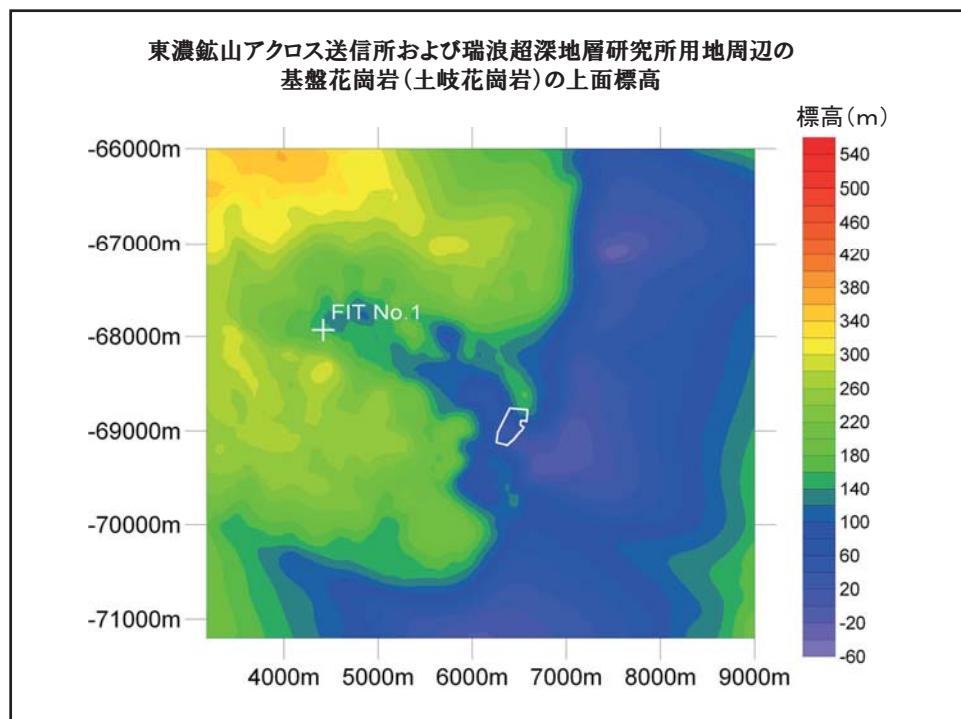
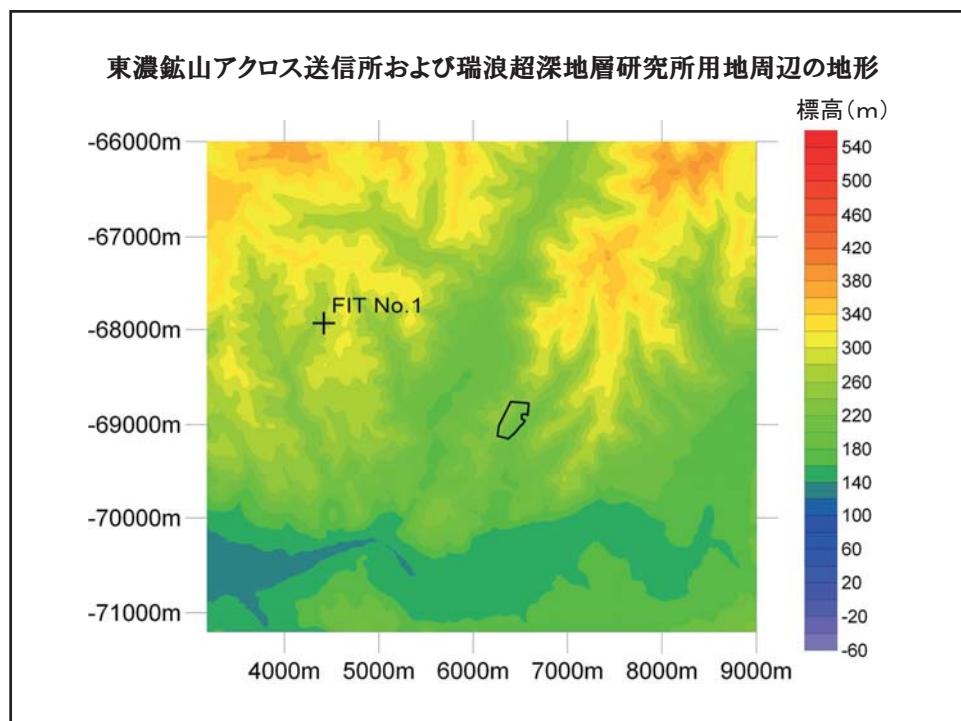
回転計測による送信スペクトルの連続観測が行えるようになった。モータ回転により推定される発生力の送信スペクトルの変化が伝達関数の推定に及ぼす影響は、振幅で0.001%以下、走時で2~3μs程度と小さい。

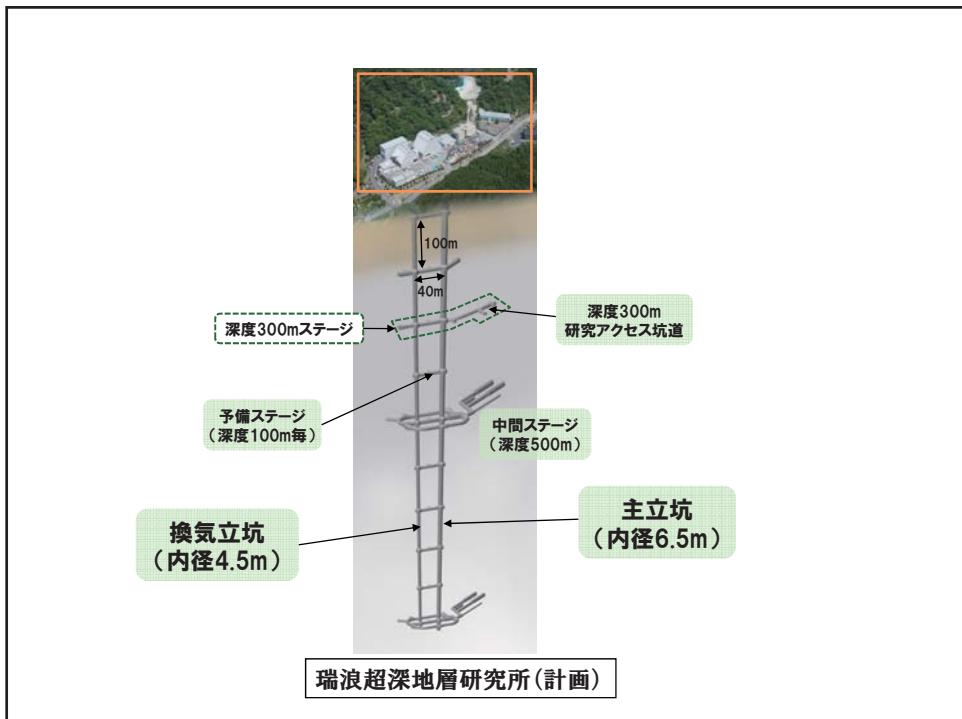
4. 送信所近傍での時間変化

発生力の送信スペクトルはほぼ一定でも、岩盤カプラや近傍での伝達関数には、気温や降水量に関係した変動が認められる。振幅は地表付近で大きく変動し、走時には、数ms程度の年周変化が認められる。

2.11







研究の目的

何をモニタリングしたいのか？

研究坑道の掘削が周囲の地質環境に与える影響

どの様な影響が考えられるのか？

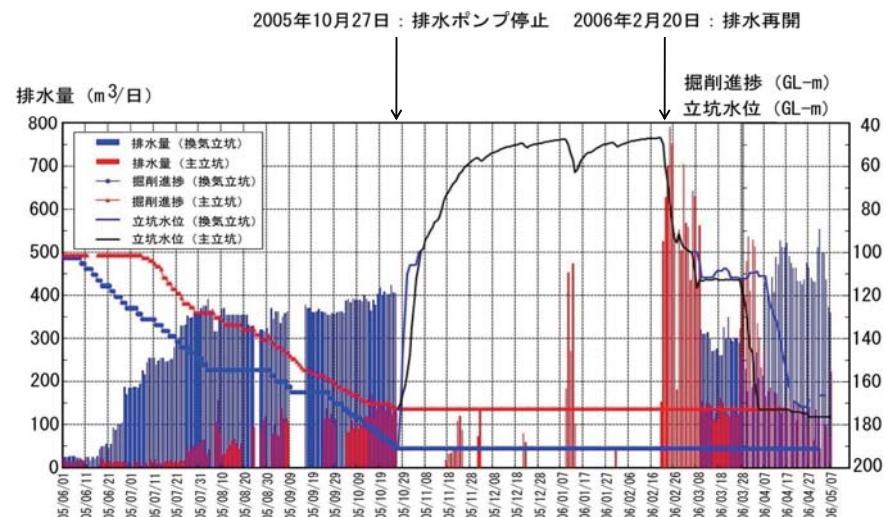
研究坑道の掘削により、周囲の地下水の水位が低下する



坑道周辺の弾性波速度構造や比抵抗構造が変化する(?)

2007年度から3ヵ年計画でアクロスの適用性について検討

瑞浪超深地層研究所の排水ポンプ停止および排水再開にともなう立坑水位の変化



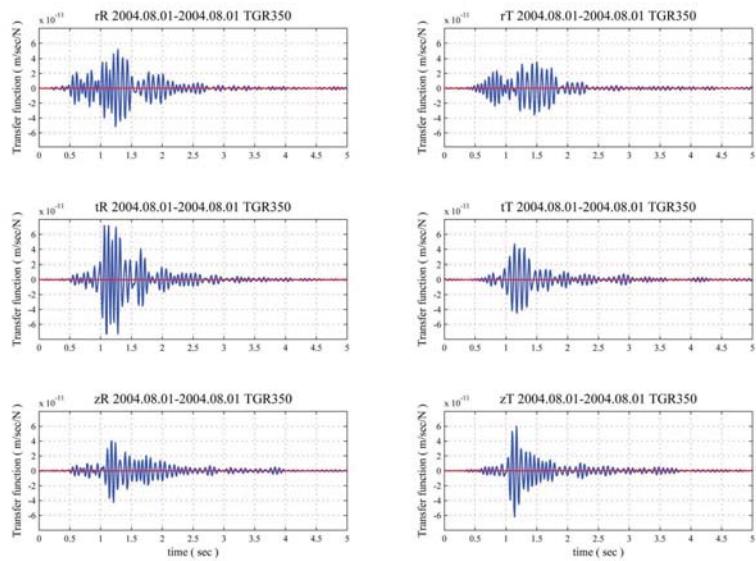
東濃地震科学研究所戸狩観測点の位置およびスペックと観測との経緯



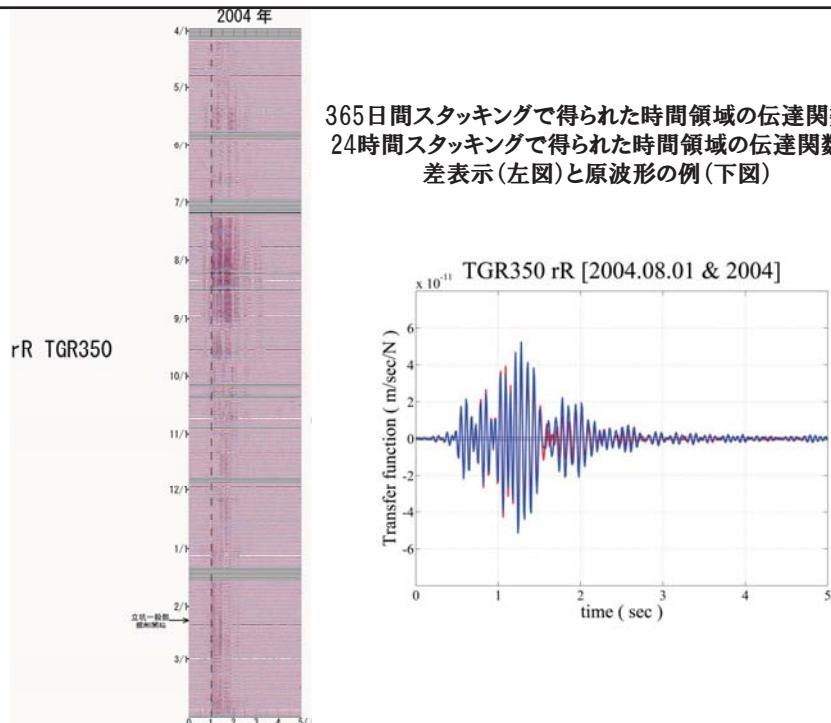
東濃地震科学研究所が2004年4月より戸狩観測点(TGR)において地震の常時観測を開始

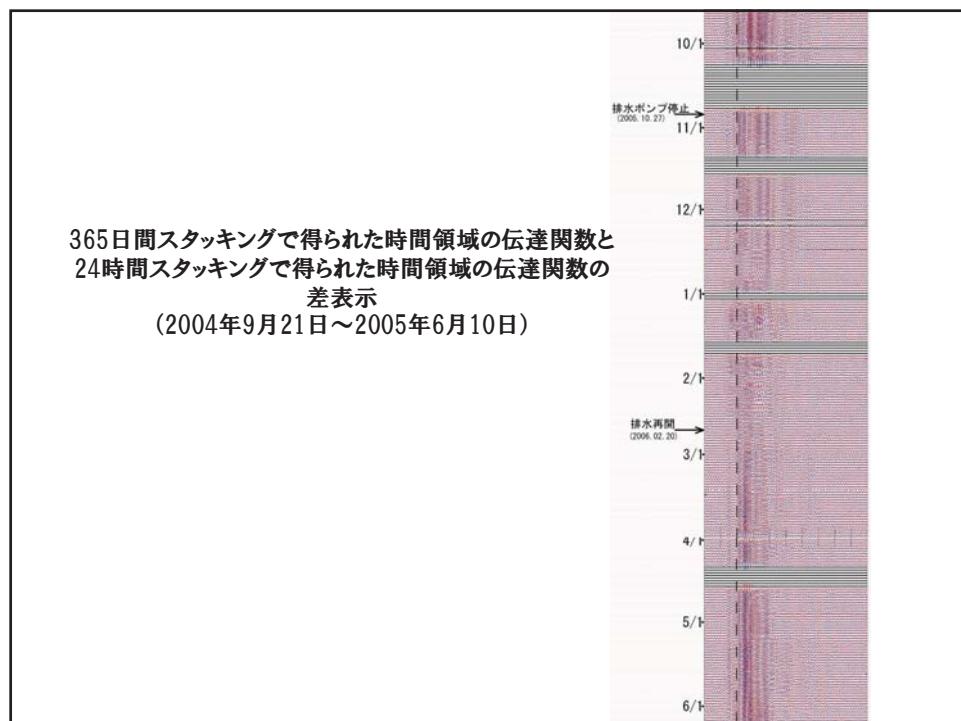
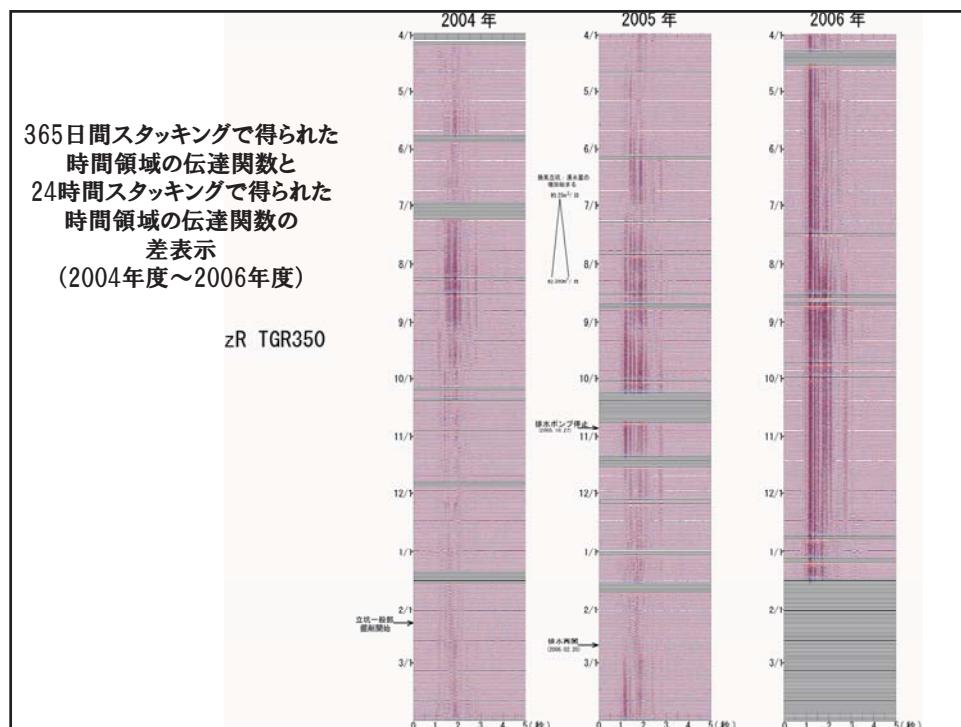
深度165mと350mに固有周波数1Hzの速度計が設置されている

戸狩観測点深度350mの地震計(TGR350)で得られた時間領域の伝達関数6成分



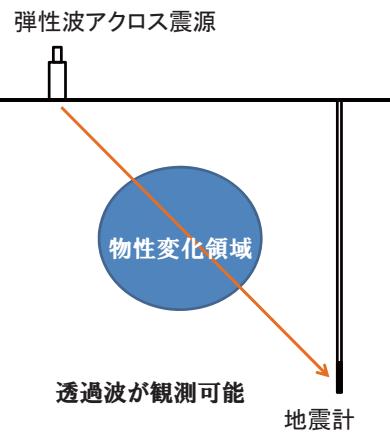
365日間スタッキングで得られた時間領域の伝達関数と
24時間スタッキングで得られた時間領域の伝達関数の
差表示(左図)と原波形の例(下図)



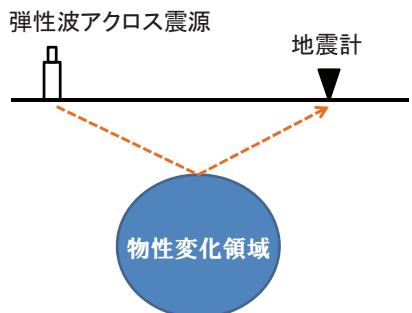


物性変化領域とアクロス震源および地震計の位置関係

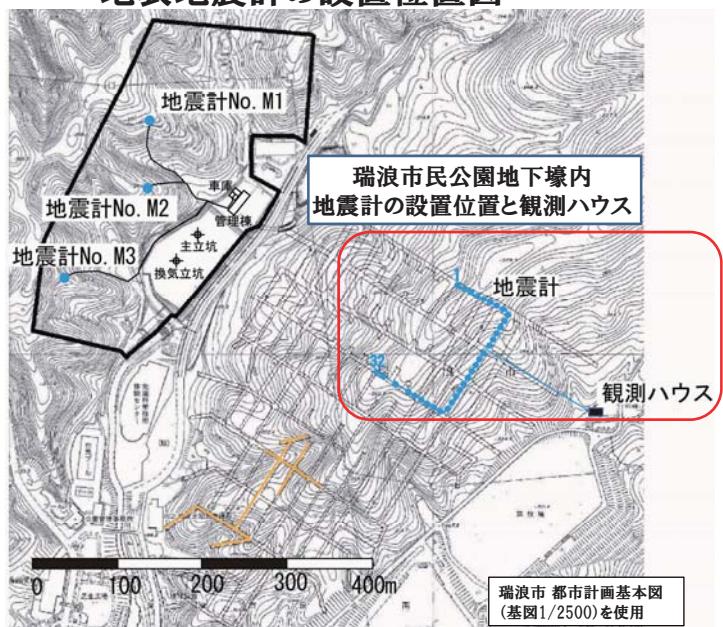
戸狩観測点の場合

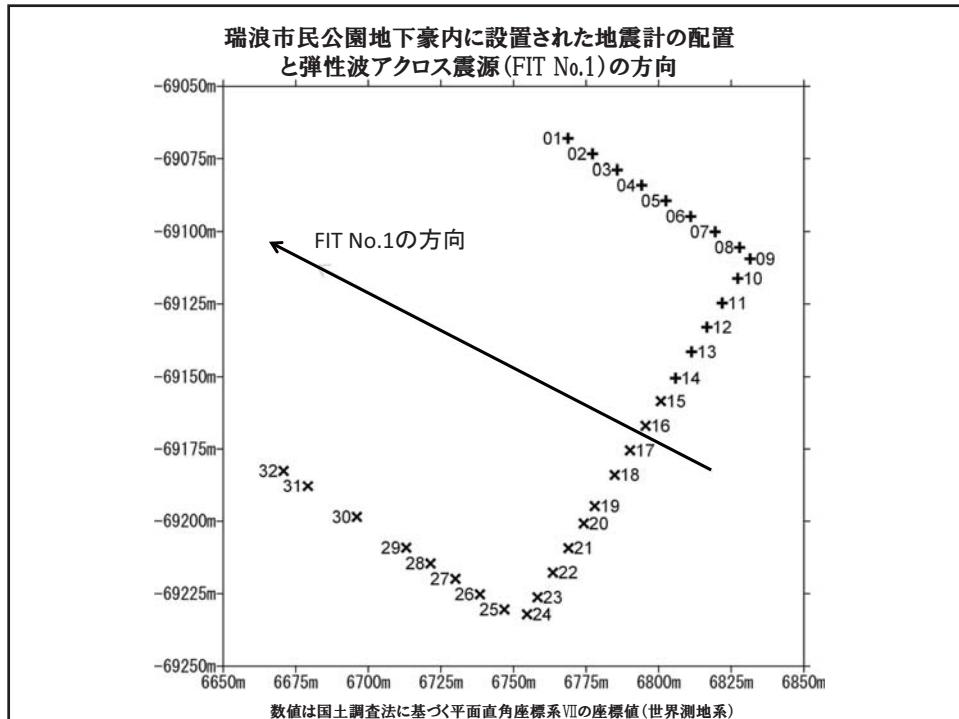


地表の地震計では？



地表地震計の設置位置図





地下壕内地震計用データ収録用観測ハウスと収録装置



研究所用地内
地震計の設置位置



瑞浪市 都市計画基本図
(基図1/2500)を使用

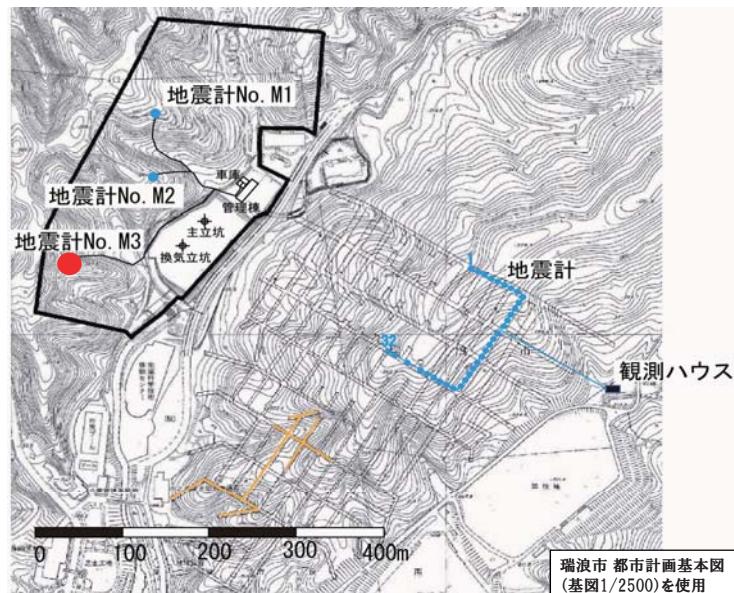
研究所用地内地震計用データ収録装置(車庫棟作業員控室内)



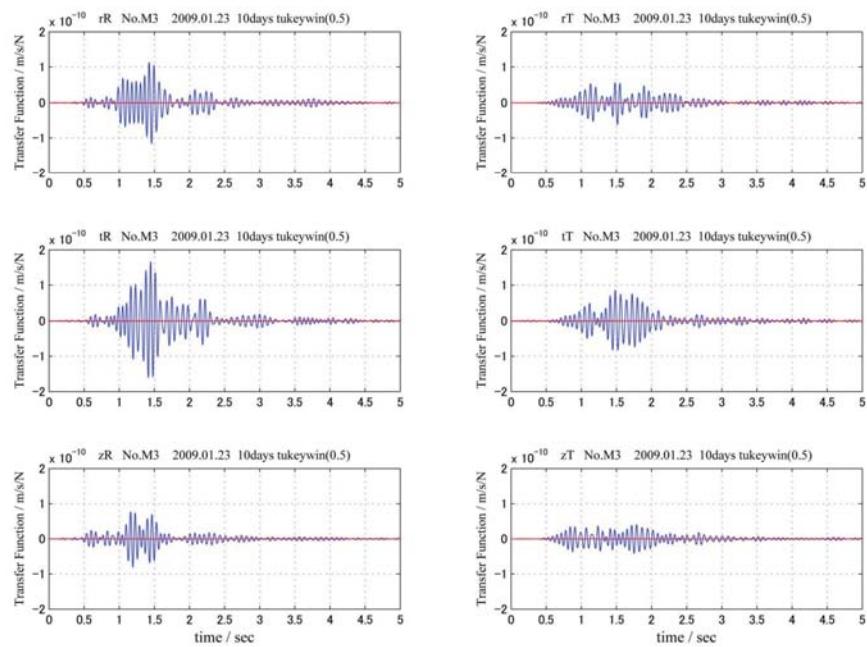
KISS:Kunitomo Interface Stacking Systemの略
パソコンとAD変換ボードをベースとした
時間区間蓄積型記録計(16bit,16ch)

16チャンネル中の9チャンネルを
地震計の信号記録用に使用

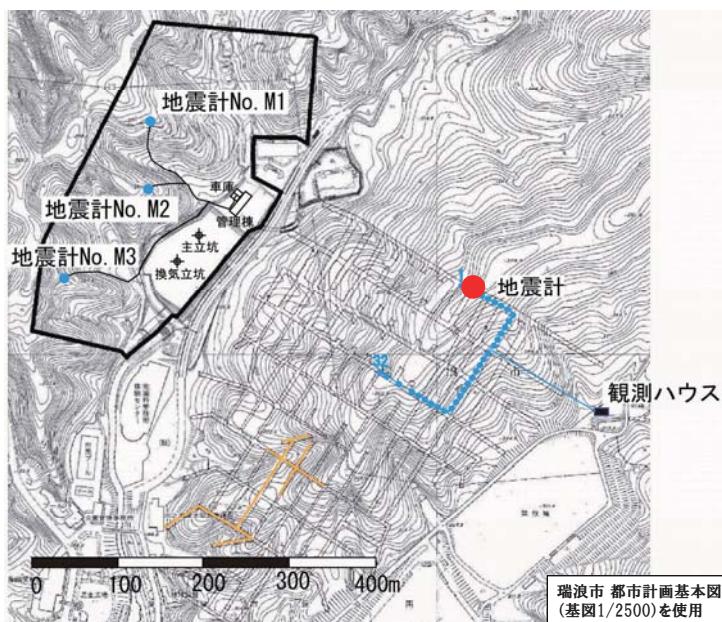
研究所用地内地震計No.M3の位置



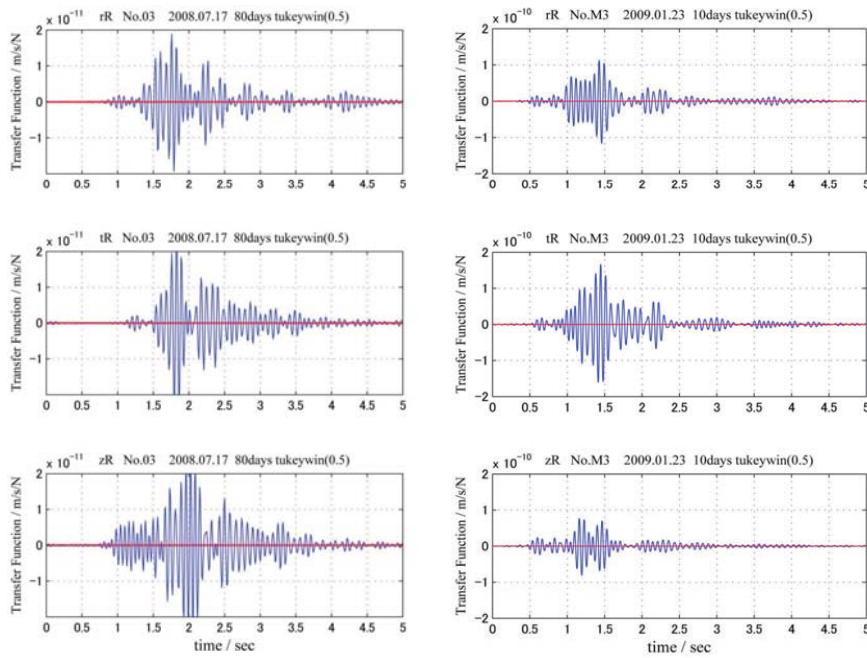
研究所用地内地震計M3で得られた時間領域の伝達関数6成分(10日間スタッキング)



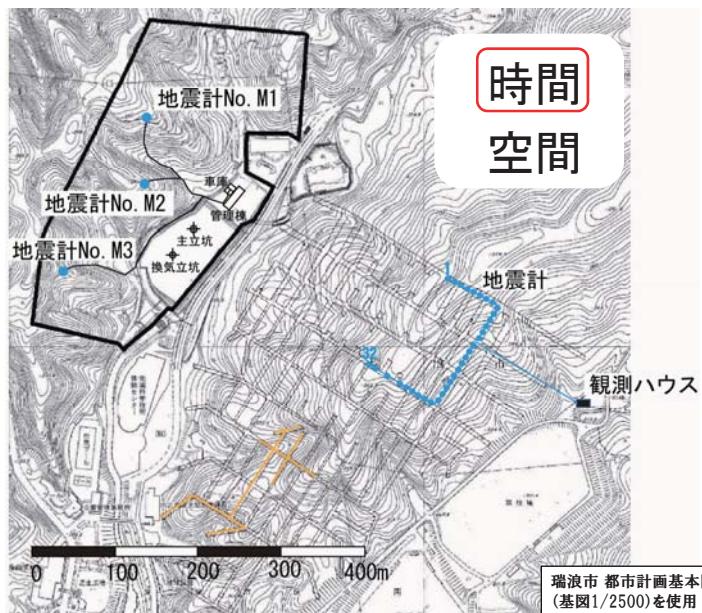
地下壕内地震計No.03の位置

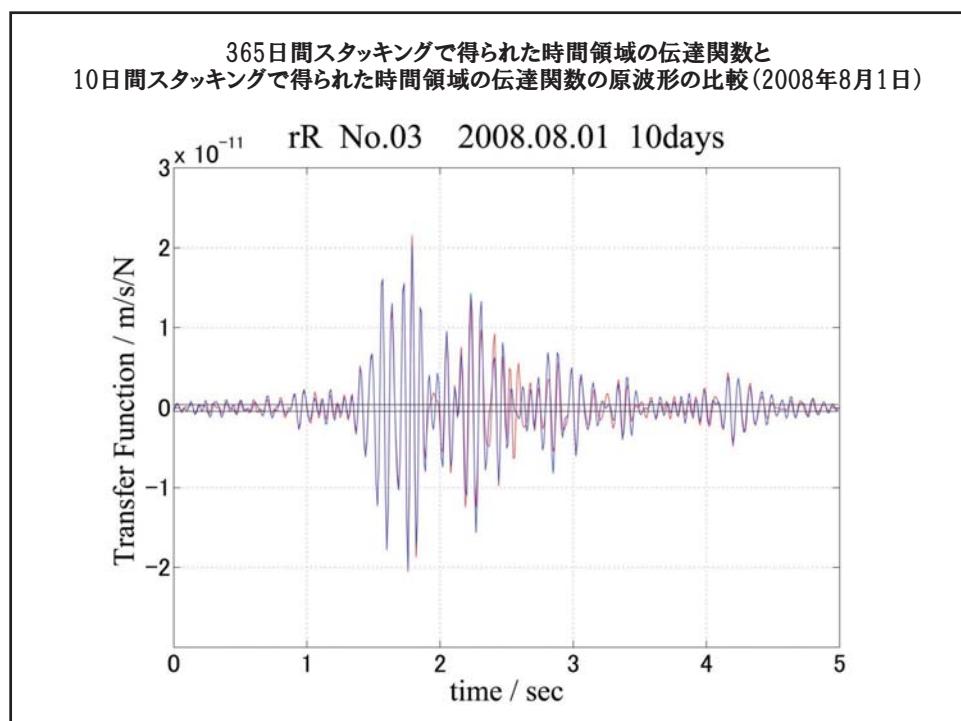
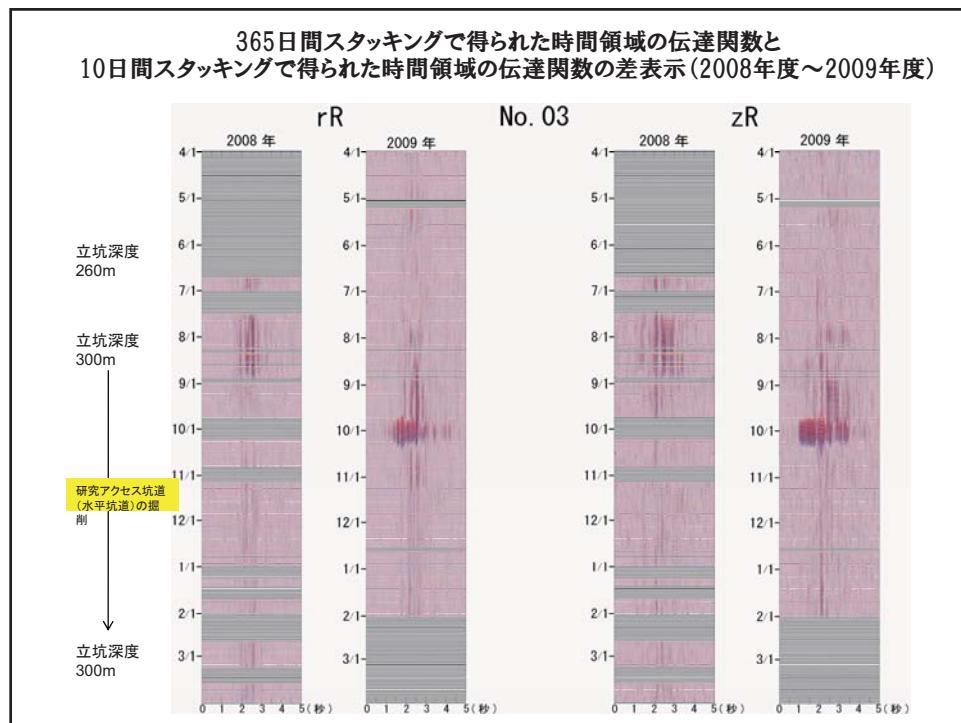


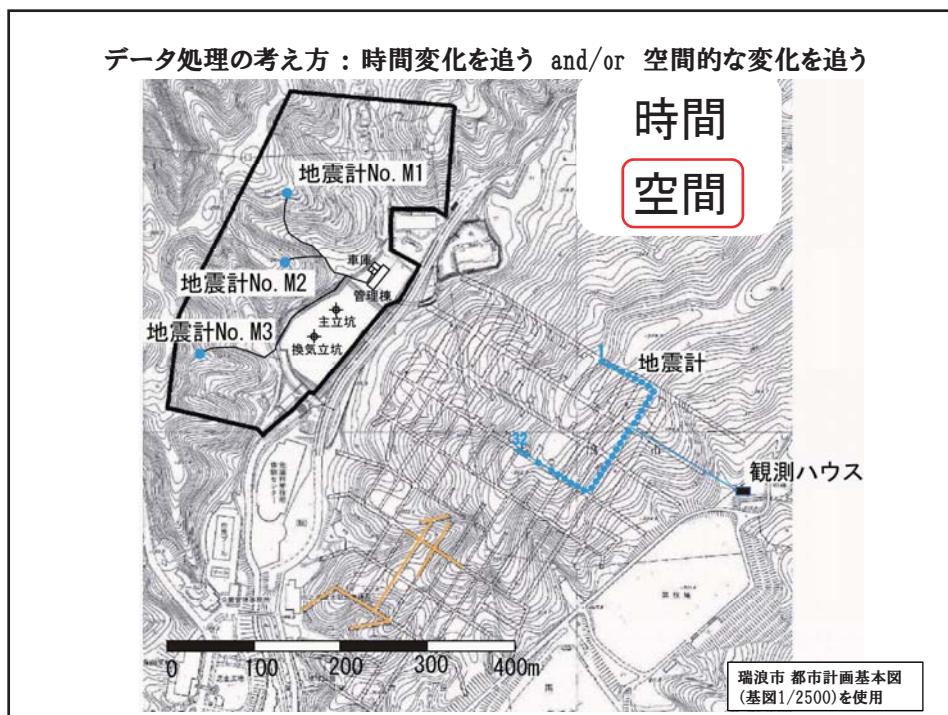
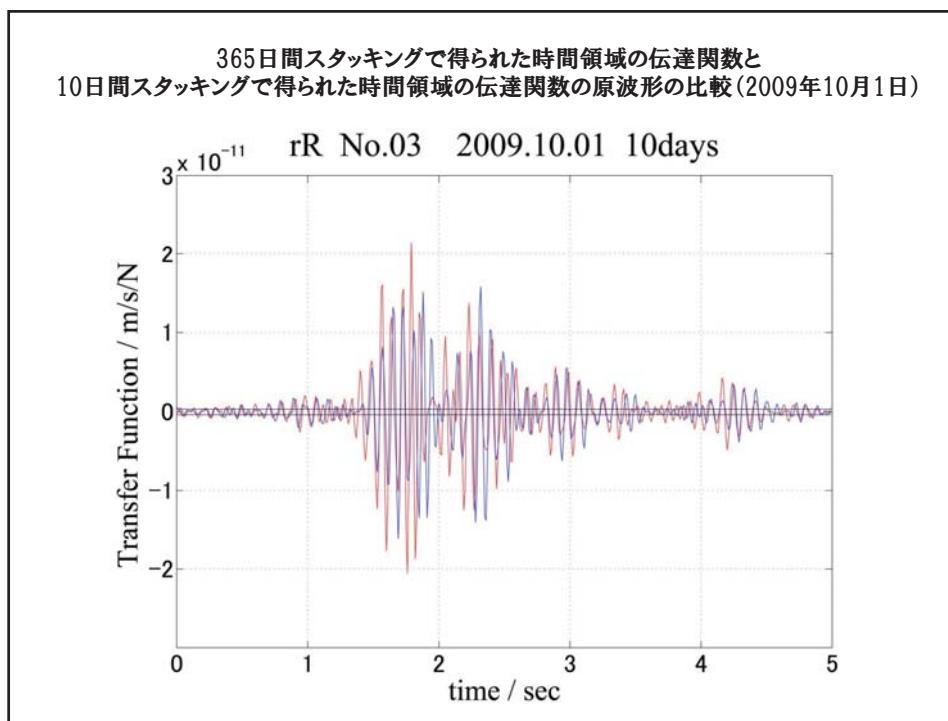
地下壕内地震計No.03と研究所用地内地震計No.M3の時間領域伝達関数の波形の比較

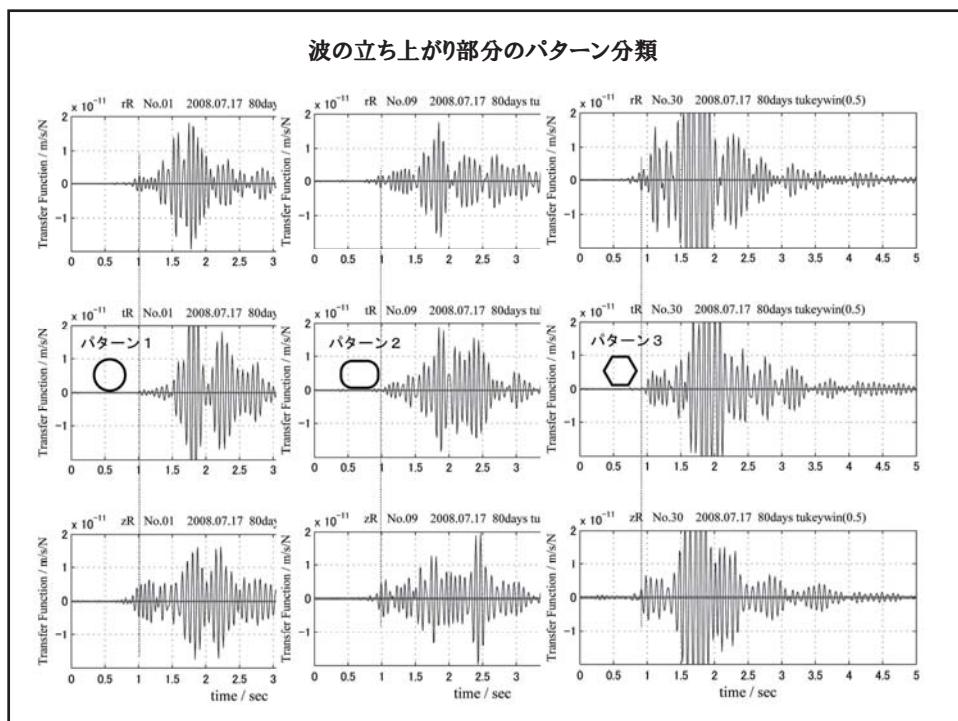
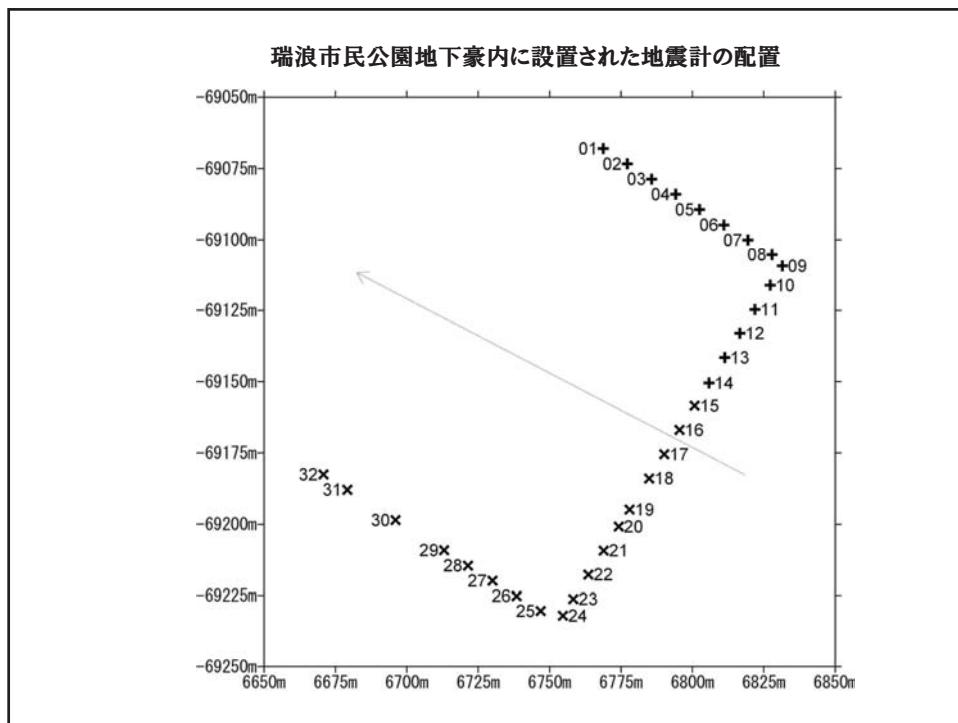


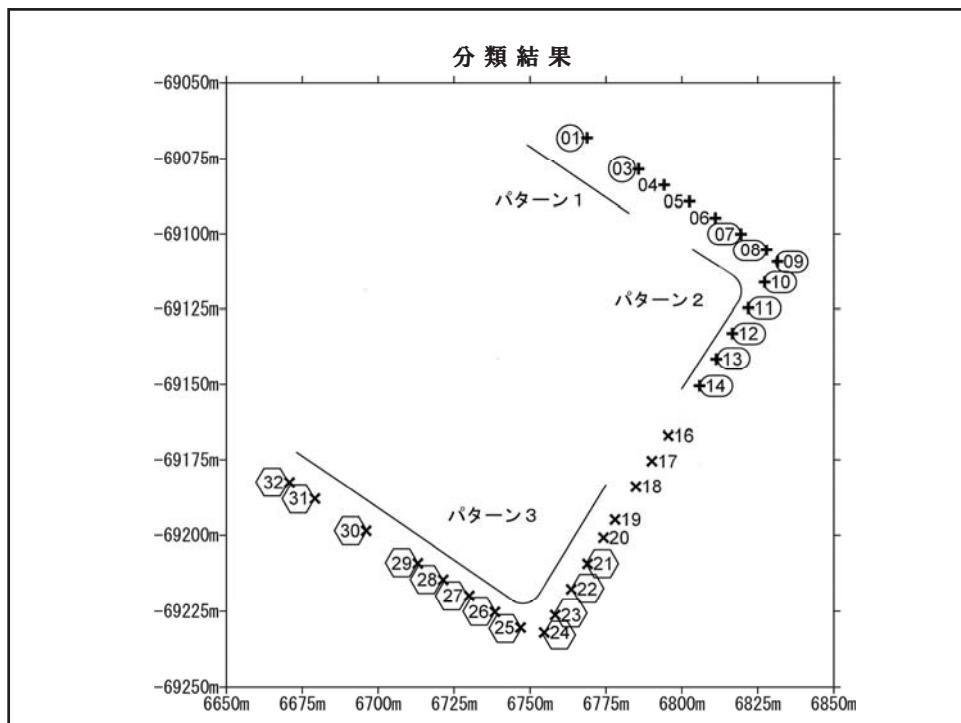
データ処理の考え方：時間変化を追う and/or 空間的な変化を追う



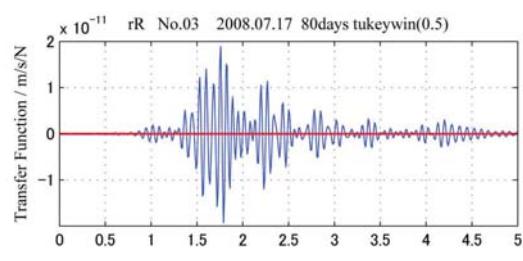








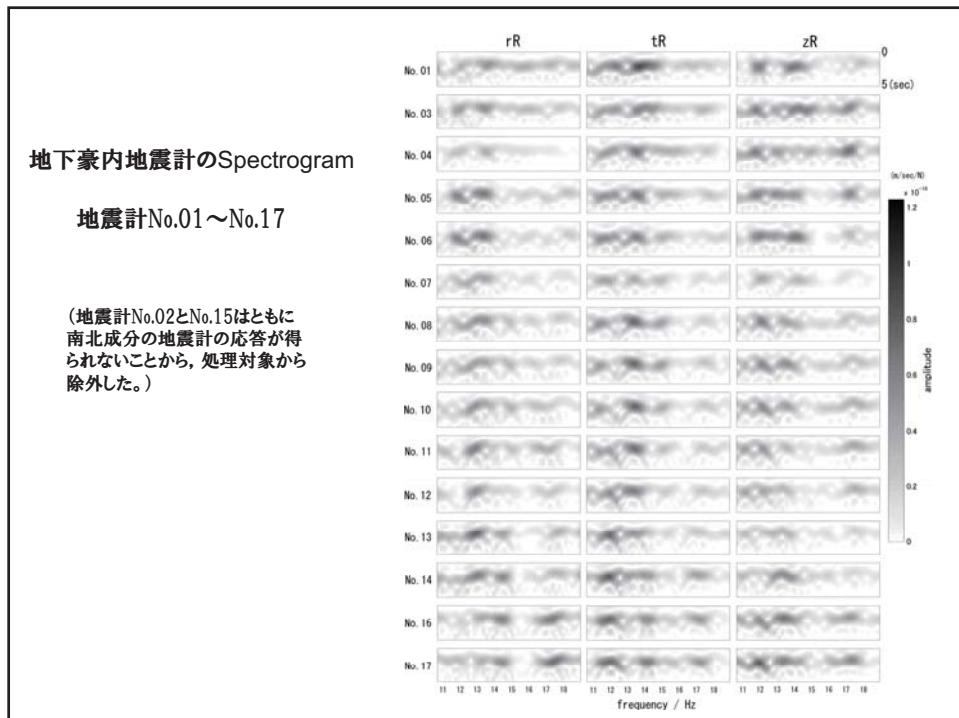
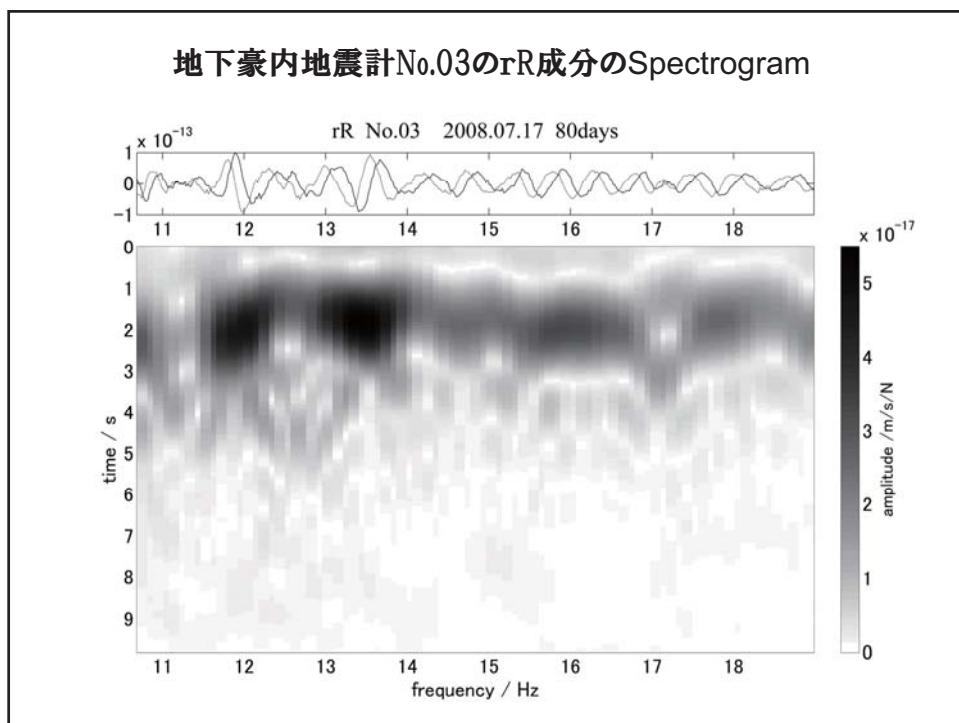
伝達関数の振幅、周波数特性、伝搬時間を見るためには...。

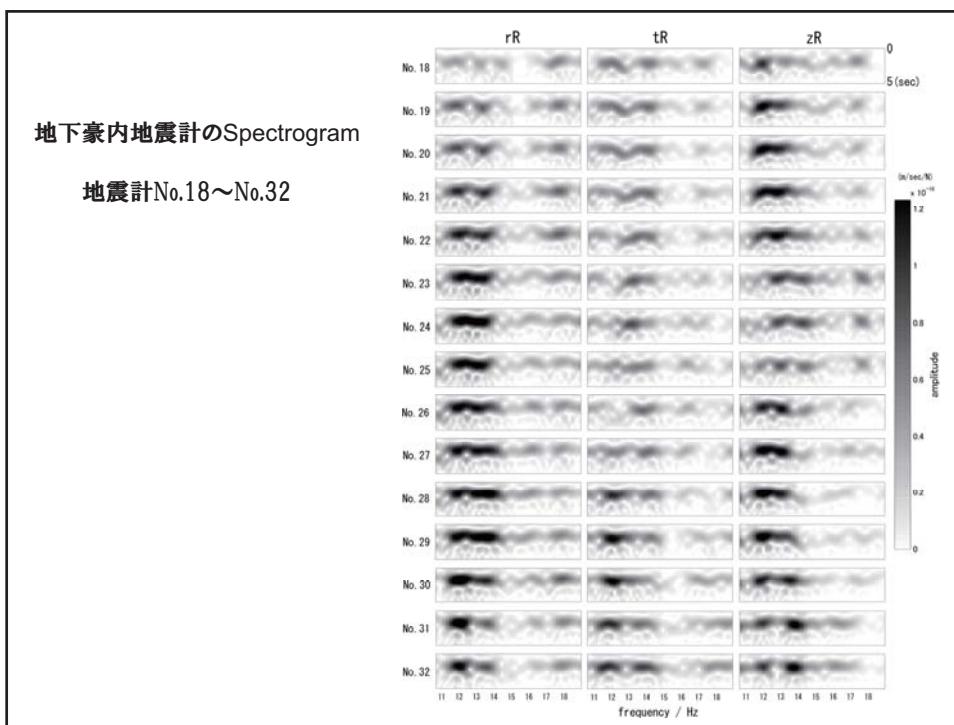


Spectrogramの作成

- ・縦軸: 時間
 - ・横軸: 周波数
 - ・振幅: 濃淡
- で表示







2.12

電磁アクロスによる 連続送受信信号観測

中島崇裕
(原子力研究開発機構／静岡大学)

2010/2/25 ACROSSワークショップ(東濃)

1

[研究の目的]

弾性波伝播の場合と独立な物性量に関わる電磁波伝播を用いた、能動的に地下の状態を把握・モニタリングするツールを開発する。

能動的地下比抵抗モニタリングツール開発にむけて

- ・電流ダイポールからの長期電磁場連続送受信による送受信システムの課題洗い出し。
- ・周辺観測による比抵抗変化モニタリング。
- ・伝達関数の変化、ノイズ環境、の確認。

[報告内容]

1. 電磁アクロスの概要
 2. 東濃送受信システム
 3. 幌延送受信システム
 4. 静岡送受信システム
 5. まとめ
-
- ・送信システムの特徴
 - ・観測結果
 - ・伝達関数の時間変動

2

1. 電磁アクロスの測定原理

Maxwell 方程式より

$$\{\nabla^2 - i\omega\mu(\sigma + i\omega\epsilon)\} \begin{pmatrix} \mathbf{E} \\ \mathbf{H} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i\omega\mu\mathbf{J}_0 \\ -\nabla \times \mathbf{J}_0 \end{pmatrix}$$

媒質依存量

観測量

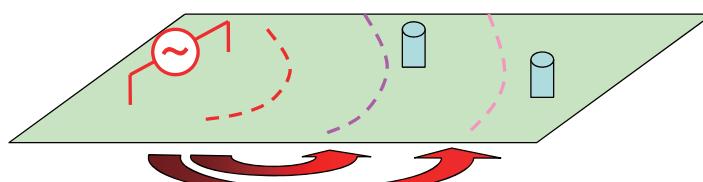
励起

S/Nの高い信号として
観測できる信号の作成

既知の信号で常時励起

水の存在に敏感な電気伝導度 σ , (誘電率 ϵ)を観測量から推定.

電流によって電磁場励起 電磁場観測

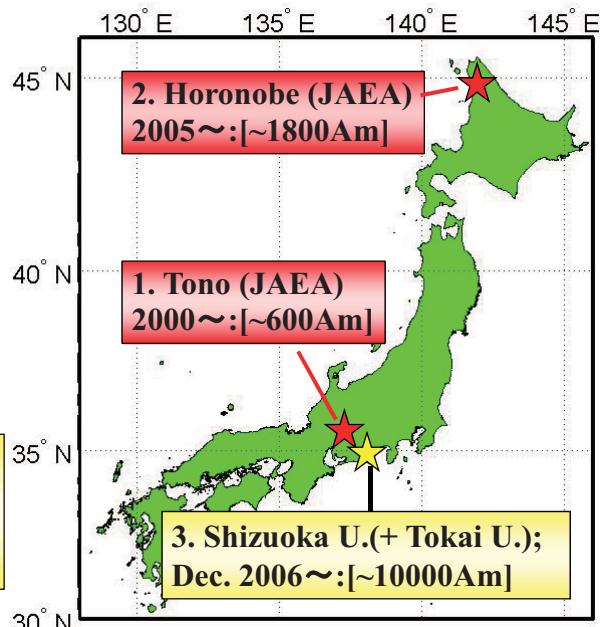


媒質の物性および構造に依存し伝播

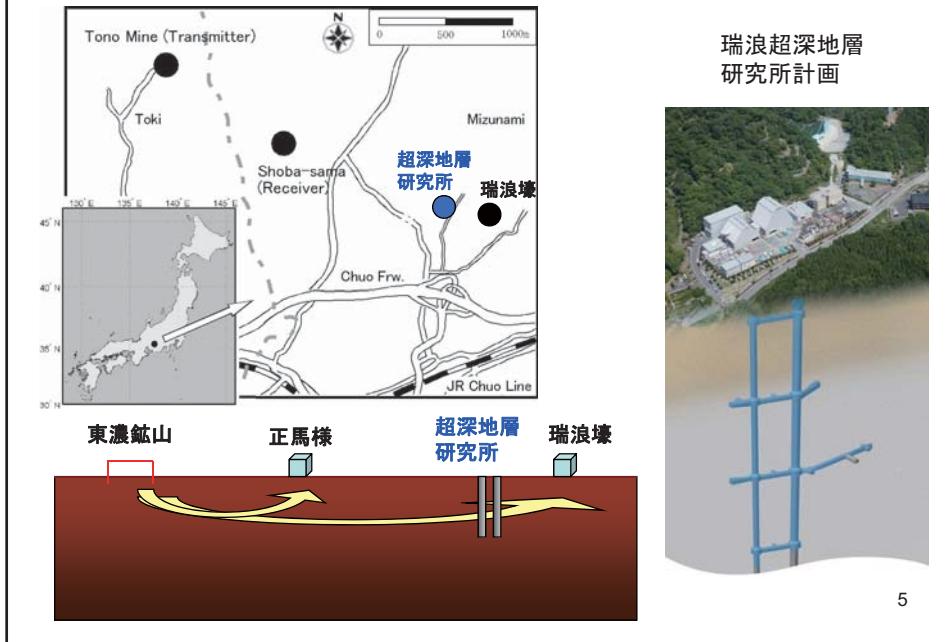
3

電磁アクロス送受信サイト

Tono, Horonobeでは,
地下施設建設に伴う地質
環境の変動等を調べるため
に使われている。また、水
平方向の不均質を考慮し,
ベクトル送信を行っている。
探査深度は～数百m。



2. 東濃地下施設の建設と、ACROSS信号伝播変化の観測



2-1. 東濃電磁アクロス送信装置

NW/SWの送信電極は、組合せを1時間ごとに切り替えて、送信電流の水平任意方向の励起を求められるようにした。

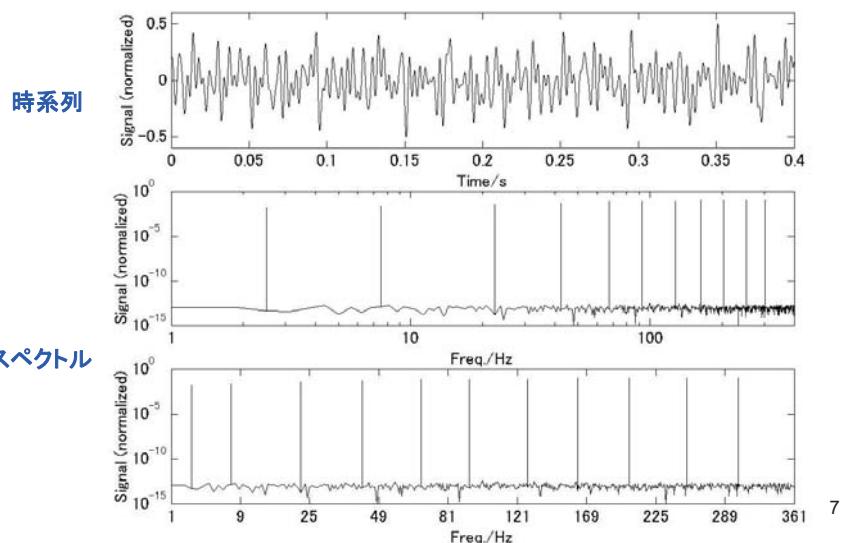


2-2. 東濃電磁アクロス送信信号

1.25～300Hzの範囲で異なる周波数(周波数2乗軸でほぼ均等に並ぶ)

・振幅・位相の11成分の信号から時系列を作成した。

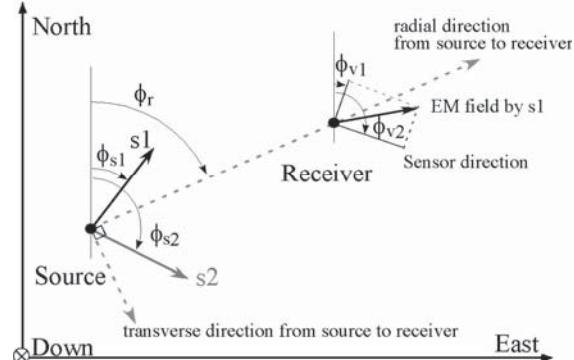
この時系列信号をパワー・アンプで増幅し、接地電極間に電流を流す。



テンソル伝達関数の表現の方法について

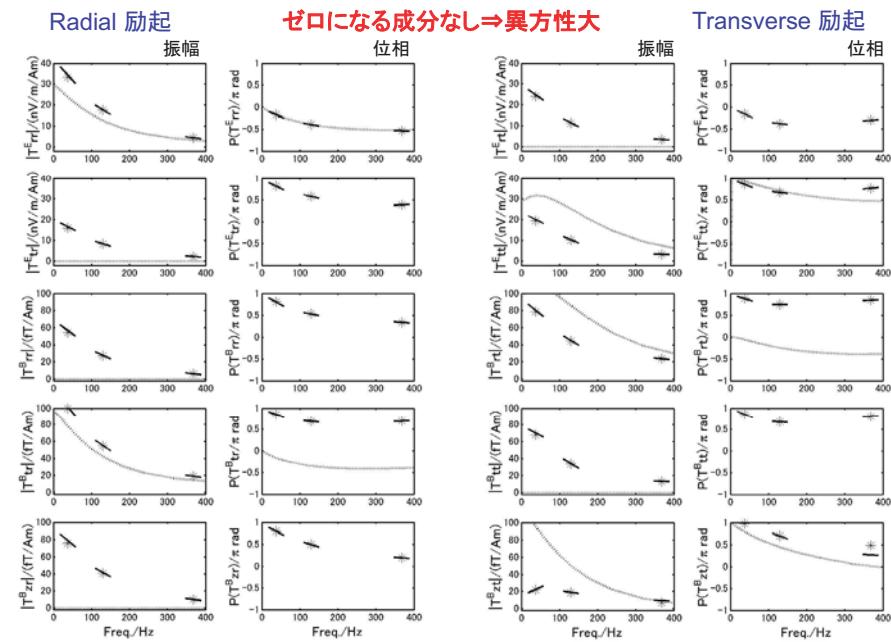
Radial, Transverse
方向で表す

地下の不均質に起因する
成分がより分かりやすくなる。



$$\begin{pmatrix} E_r \\ E_t \\ E_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_{rr}^E & T_{rt}^E & T_{rz}^E \\ T_{tr}^E & T_{tt}^E & T_{tz}^E \\ T_{zr}^E & T_{zt}^E & T_{zz}^E \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m_r \\ m_t \\ m_z \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} B_r \\ B_t \\ B_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_{rr}^B & T_{rt}^B & T_{rz}^B \\ T_{tr}^B & T_{tt}^B & T_{tz}^B \\ T_{zr}^B & T_{zt}^B & T_{zz}^B \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m_r \\ m_t \\ m_z \end{pmatrix}$$

2-3. 東濃(正馬様:950m)での平均的なテンソル伝達関数 Nakajima et al.(2010)

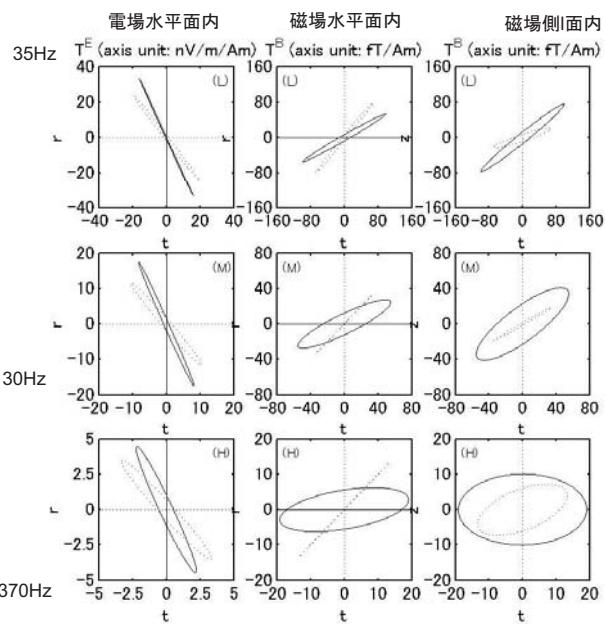


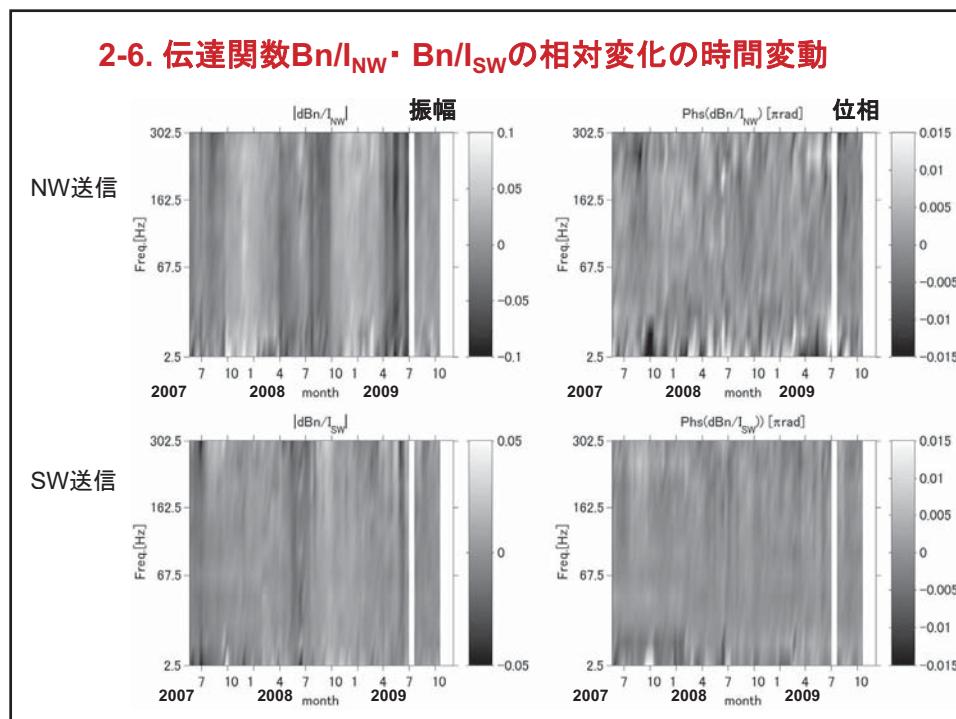
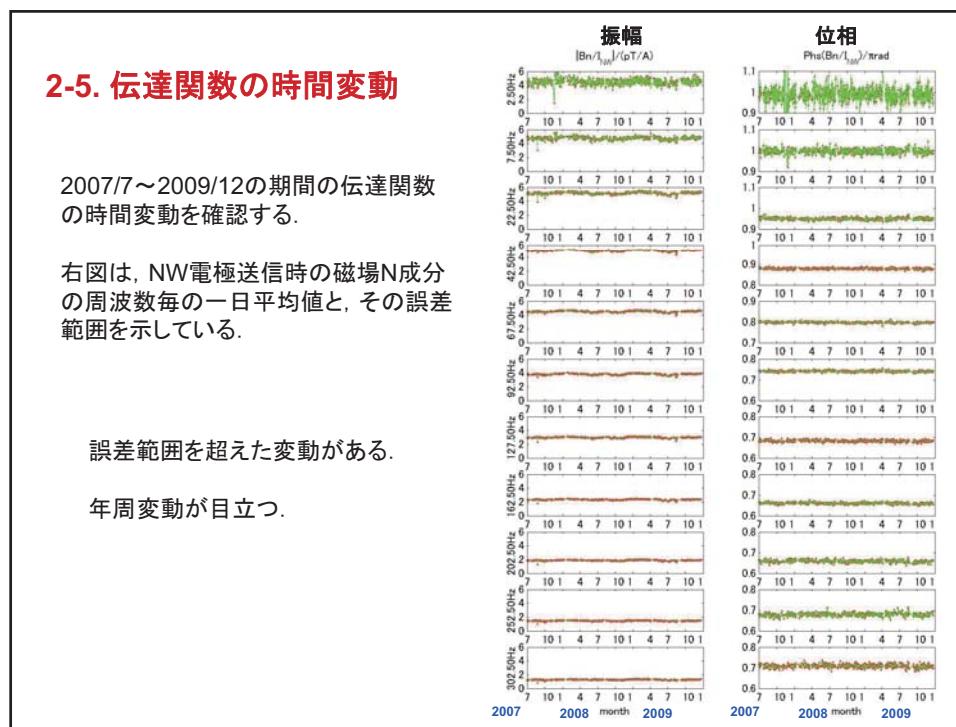
**2-4. 周波数別の平面内の軌跡
(東濃の結果)**

実線が radial 励起
点線が transverse 励起

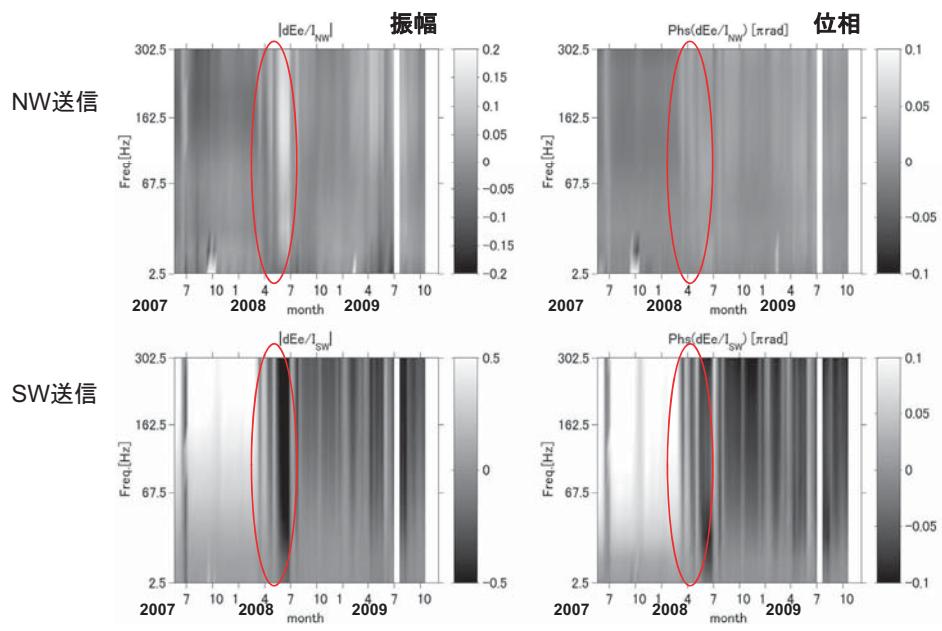
水平方向の異方性が
大きく、励起方向に関わ
らずN30Wくらいの方向
に信号が誘導される。

軌跡の方向の周波数
依存性は少ない。

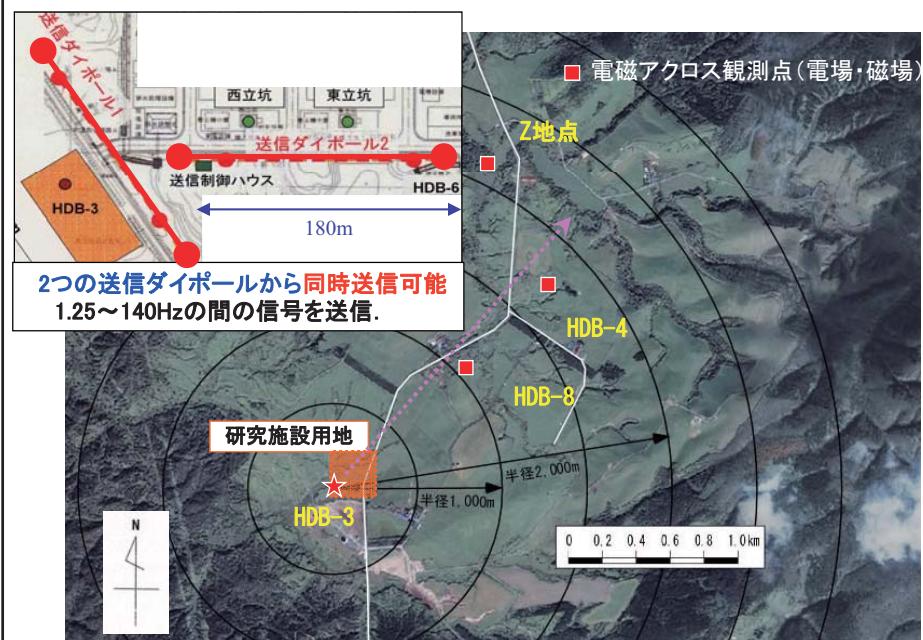




2-7. 伝達関数Ee/I_{NW}・Ee/I_{SW}の相対変化の時間変動



3. 幌延深地層研究所での電磁アクロス



3-3. 周波数別の平面内の軌跡

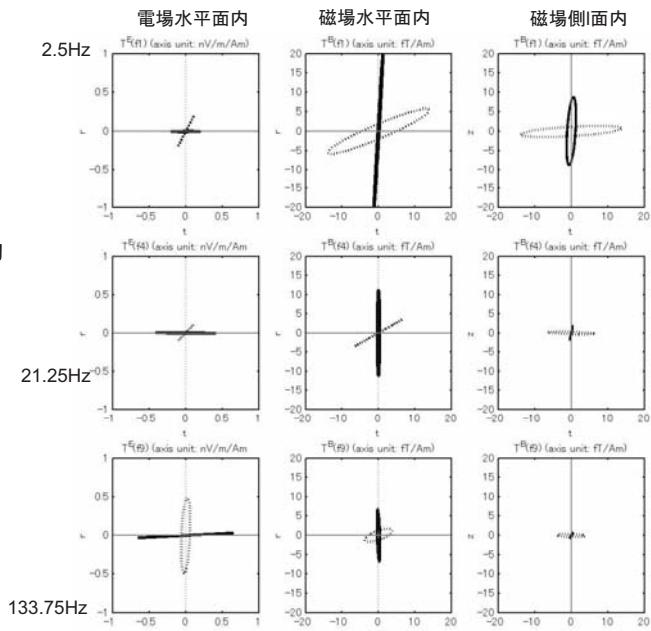
HDB4の伝達関数

実線: transverse 励起
点線: radial 励起

transverse 励起の振動
方向が水平成層構造のときとほぼ同じである。

(**transverse励起**≡
dipole1の励起方向)

時間変動に関しては、
次の発表で、。



4. 静岡市内の電磁ACROSS

1. 清水北部

東海大の専用回線を用いた長基線電場観測に、GPS同期した記録計を用いることにより、電磁ACROSS用の電場観測点とした。(2007/6～)

2. 傑峰

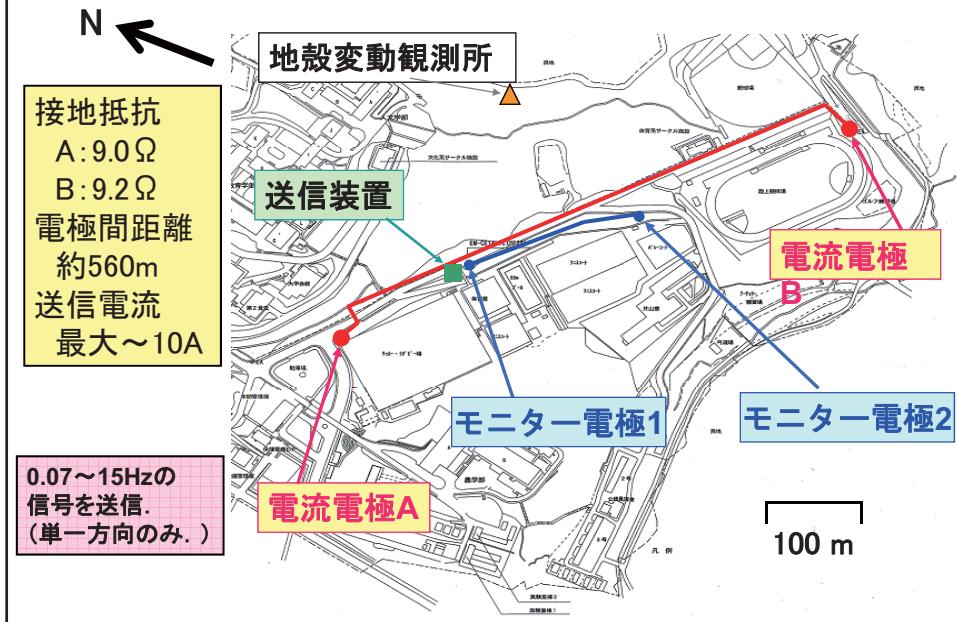
東大地震研のFluxgate磁力計の出力を分岐してもらいGPS同期した記録計をつなぎ、磁場観測点とした。(2007/10～)

3. 麻機

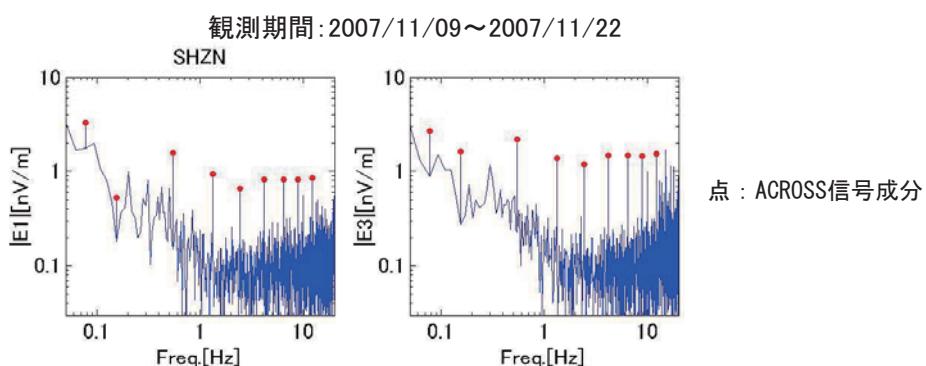
傑峰との中間点の麻機に新規に磁場観測点を設置した。(2009/8～)



4-1. 静大電流ダイポール

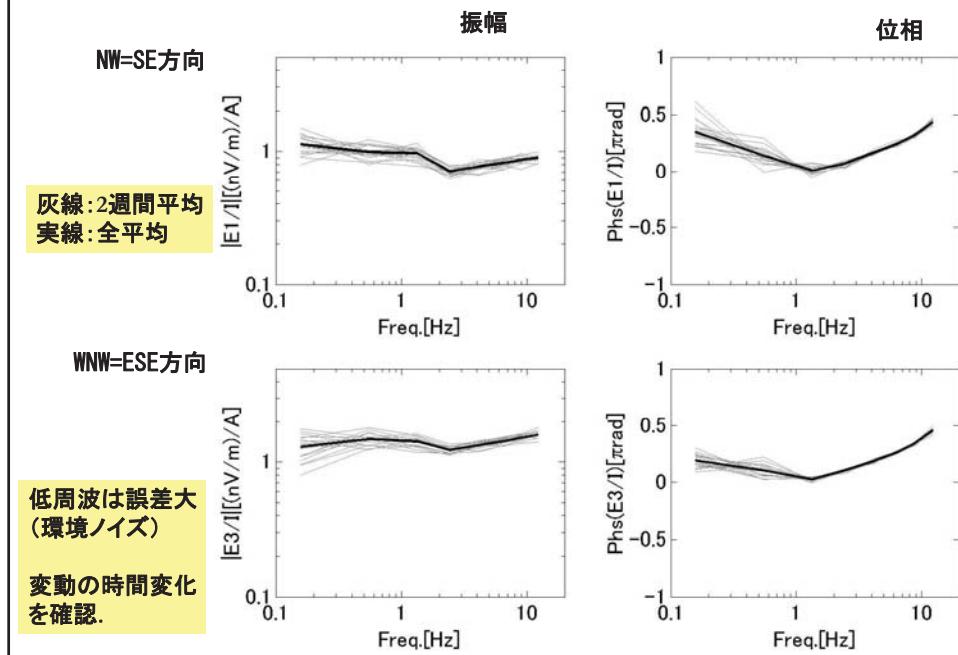


4-2. 清水北観測点でのスタッキング後の観測電場スペクトル

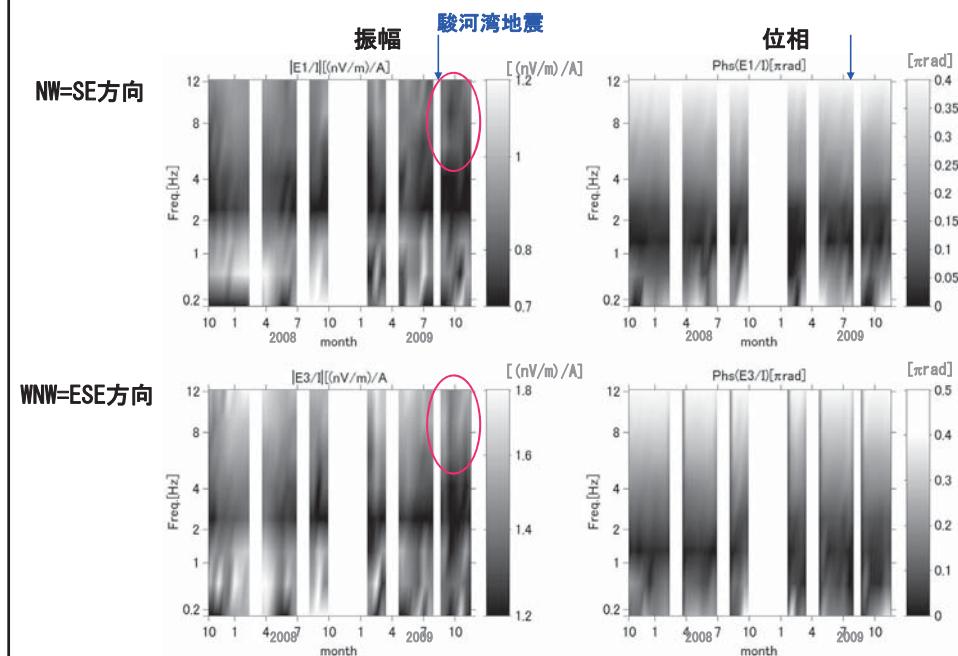


- ・低周波数領域では、地磁気の変動成分によるスペクトルの増加によりS/Nが低下している。
- ・0.5Hz以上の領域では、2週間程度のスタッキング時間で、S/N1桁程度の信号が受信できている。

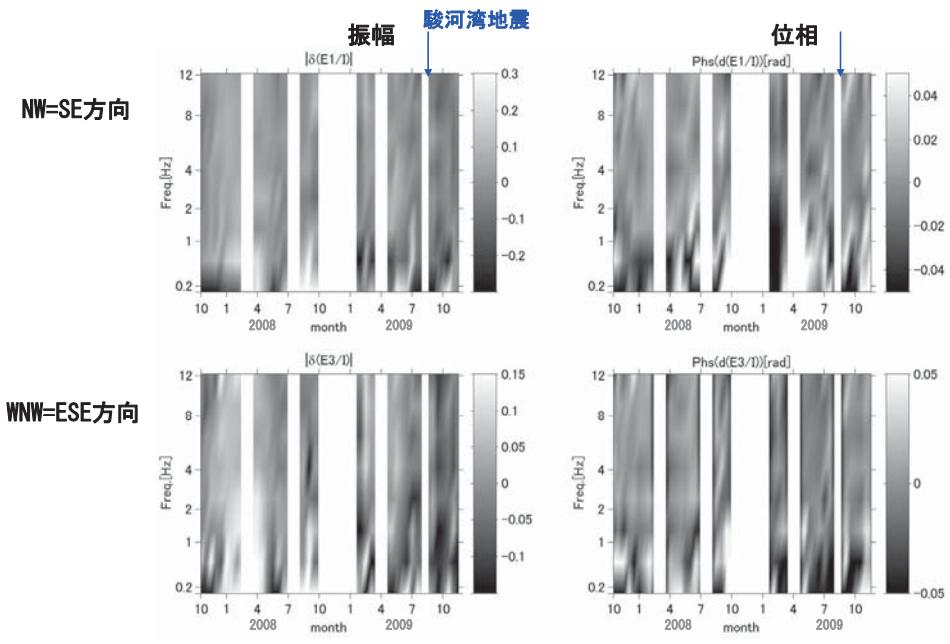
4-4. 清水北観測点への伝達関数(電場)の平均値と変動



4-5. 清水北観測点への伝達関数(電場)の時間変動



4-6. 清水北観測点への伝達関数相対変化の時間変動



まとめ

- ・能動的比抵抗モニタリング実現にむけて、東濃・幌延では、地下施設建設に伴う地質環境変化のモニタリングのために、静岡では地殻内の比抵抗変化をみるために、観測を行ってきた。
- ・各サイトにおいて定常的に伝達関数を取得し、時間変動を確認できるようになってきた。（年周変動、その他の検出。）

今後の課題

- ・より精密な地下モデルの構築（臨時観測・観測点網の拡充）
- ・（特に遠方での観測では、）低周波数S/N改善（信号変更・ISTFによるノイズ除去など）

謝辞

静岡での観測では東大地震研特定研究Bにより資金補助を受けた。 22

2.13

電磁アクロスによるMIU研究坑道掘削モニタリングの試み

瑞浪超深地層研究所

(Mizunami Underground Research Laboratory)



長谷川 健
中島 崇裕

研究の目的

何をモニタリングしたいのか？

研究坑道の掘削が周囲の地質環境に与える影響

どの様な影響が考えられるのか？

研究坑道の掘削により、周囲の地下水の水位が低下する

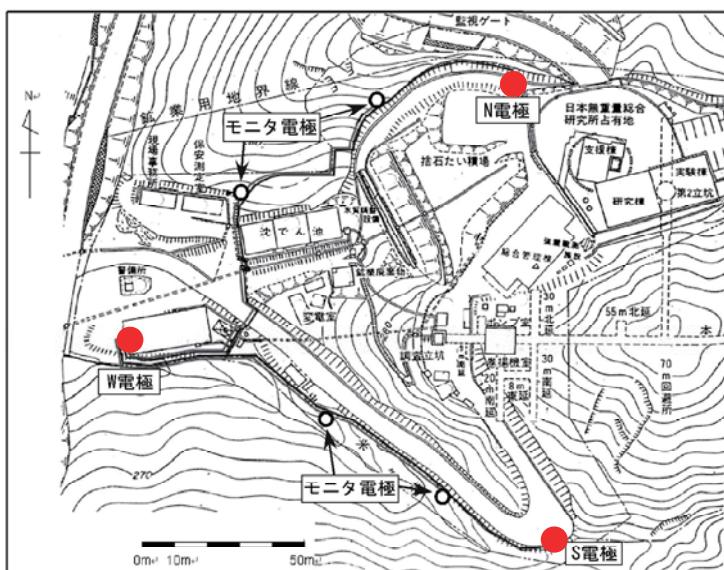


坑道周辺の速度構造や比抵抗構造が変化する(?)

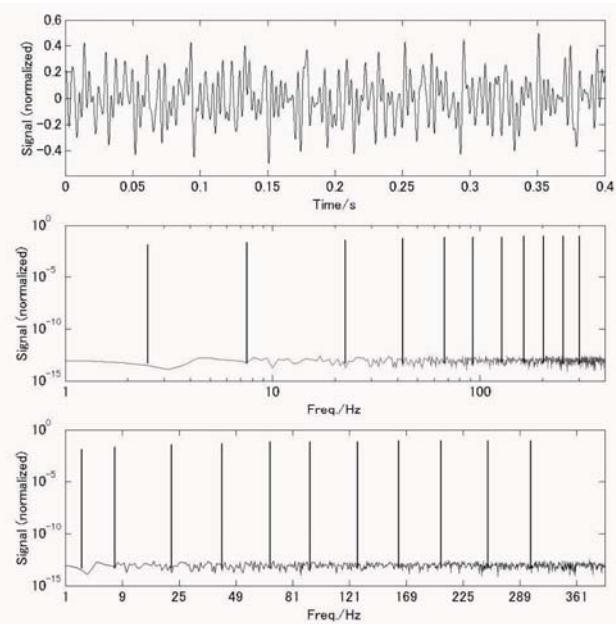
2007年度から3ヵ年計画でアクロスの適用性について検討

電磁アクロス 送信源(東濃鉱山)

N電極とW電極を用いたNW送信とS電極とW電極を用いたSW送信を1時間毎に切り替えて送信を実施



電磁アクロス 送信電流波形とそのスペクトル





研究所用地内電位差計測用データ収録装置(車庫棟作業員控室内)

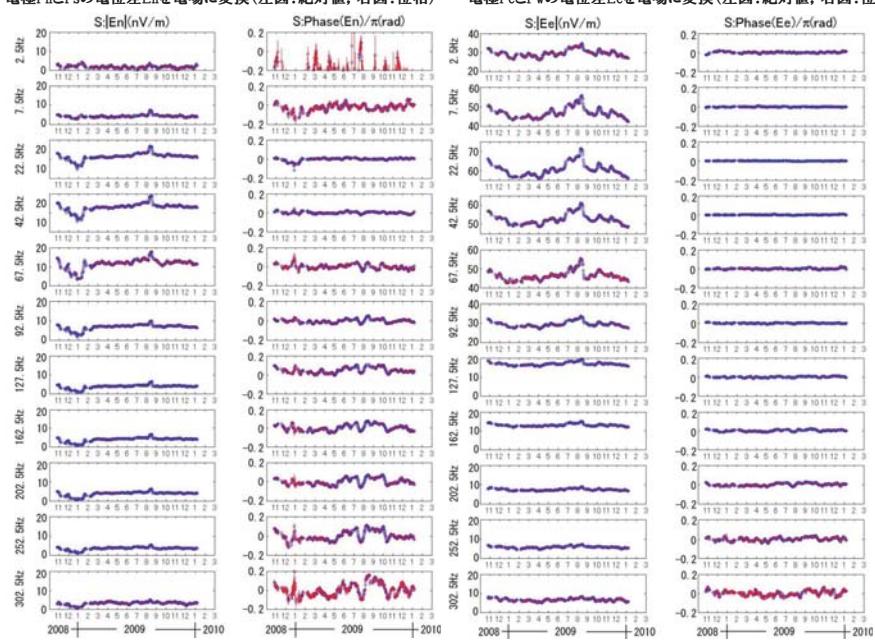


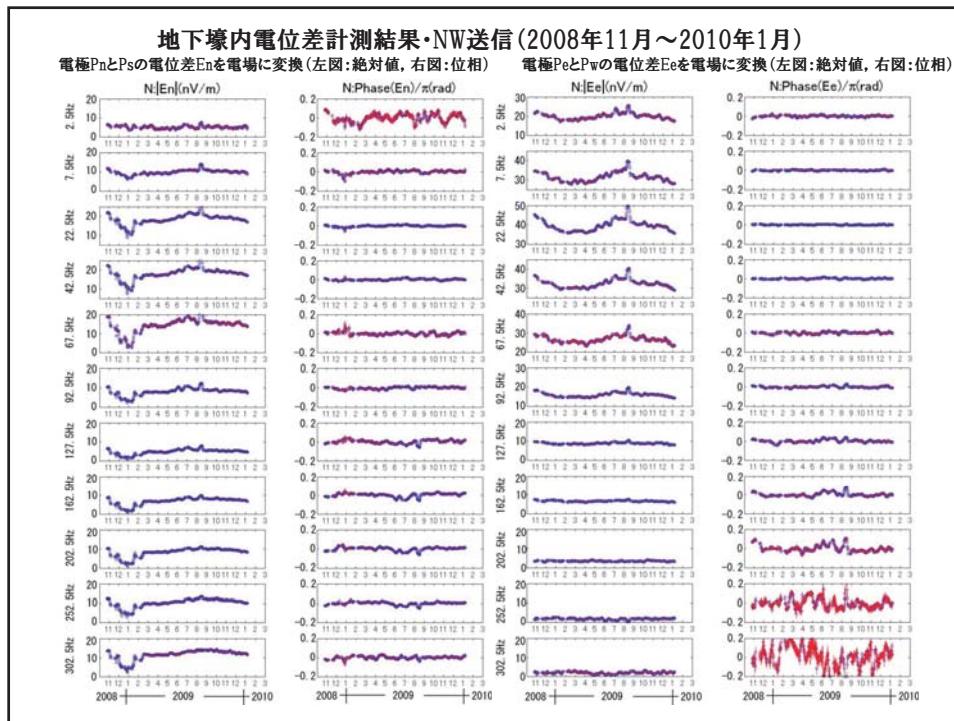
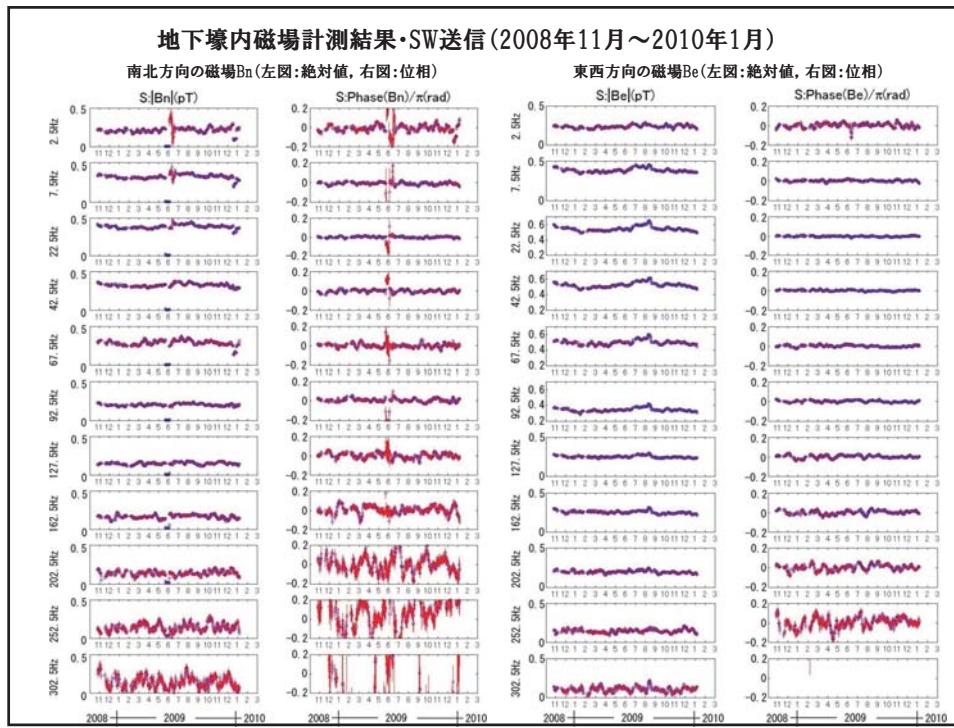
KISS:Kunitomo Interface Stacking Systemの略

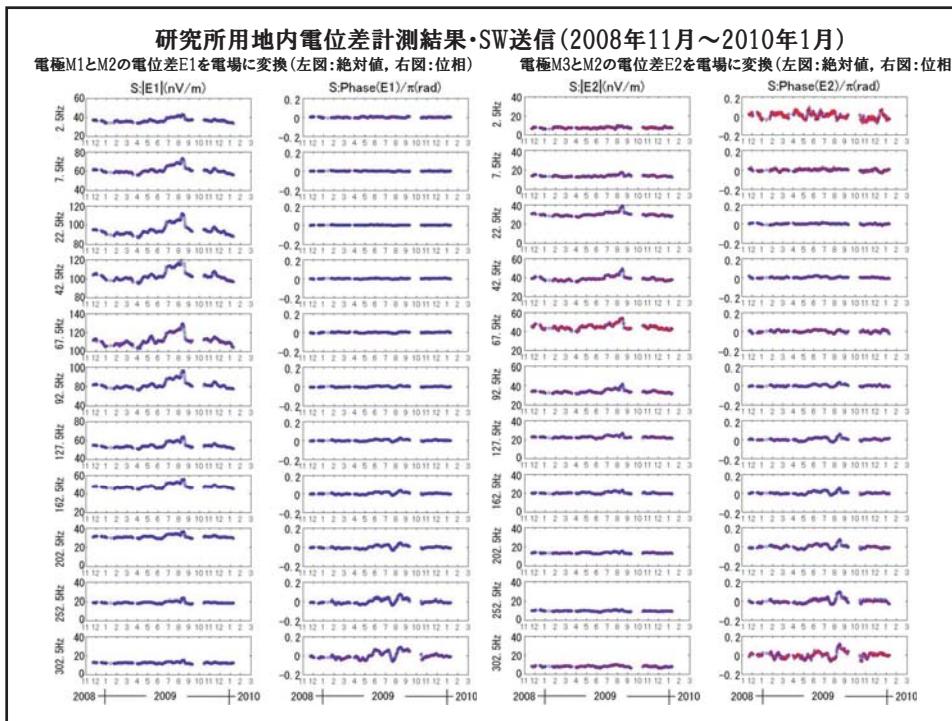
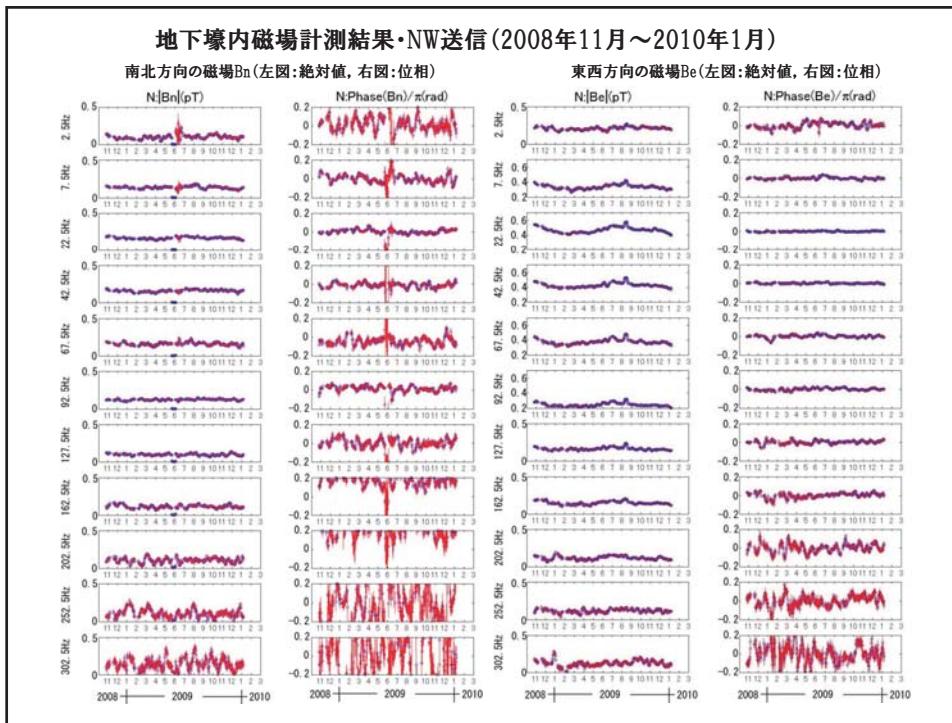
パソコンとAD変換ボードをベースとした
時間区間蓄積型記録計(16bit,16ch)16チャンネル中の2チャンネルを
電位差の記録用に使用

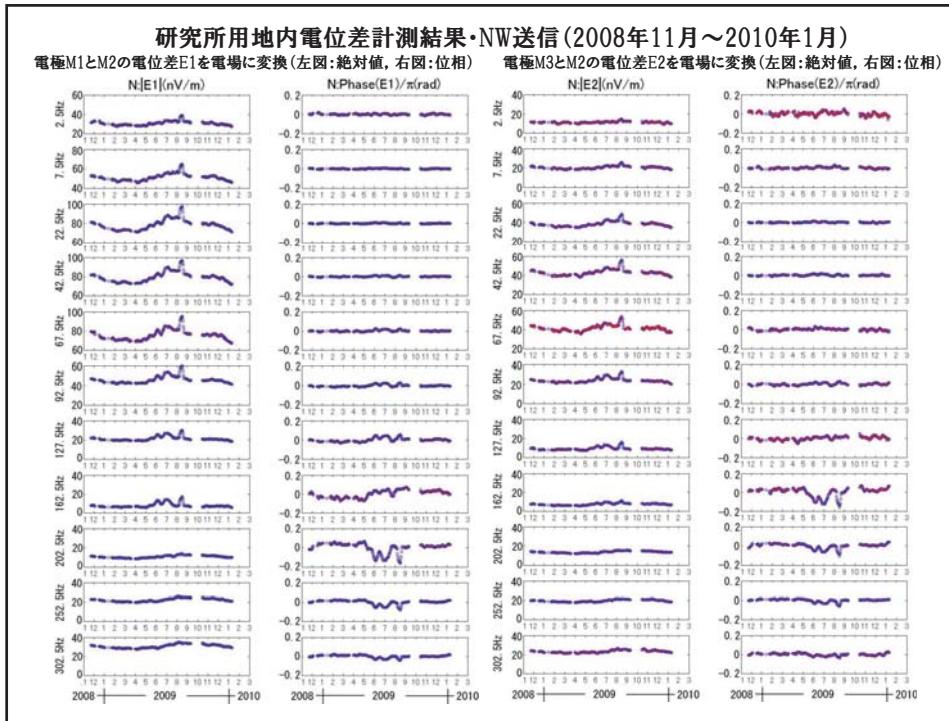
地下壕内電位差計測結果・SW送信(2008年11月～2010年1月)

電極PnとPsの電位差Enを電場に変換(左図:絶対値,右図:位相) 電極PeとPwの電位差Eeを電場に変換(左図:絶対値,右図:位相)









2.14

電磁アクロステータの 新しい解析法

中島崇裕

(原子力研究開発機構／静岡大学)

2010/2/25 ACROSS ワークショップ(東濃)

1

[研究の目的]

拡散場領域の電磁場探査の周波数領域データから、地下境界面での反射に対応するイベント系列に分離する手法を開拓する。

[イベント系列にすることの利点]

- ・比抵抗分布ではなくインピーダンスコントラストがある面を求める。
- ・弾性波で確立しているマイグレーションなどの手法を活用でき、反射点に対する精度のよい描像を得られる可能性がある。

[報告内容]

1. 電磁波伝播の基本特性の復習
2. 拡散場における反射イベントの表現
3. 合成データによる平面波の伝播遅延解析
4. 実MTデータによる平面波の伝播遅延解析
5. 実電磁ACROSSデータによる伝播遅延解析
6. まとめ

2

1. 電磁波伝播の基本特性

(励起源のない) Maxwell方程式より、 $e^{i\omega t}$ の依存性を持つ場は

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{H} = (\sigma + i\omega\epsilon)\mathbf{E} \\ \nabla \times \mathbf{E} = -i\omega\mu\mathbf{H} \end{cases} \quad \omega_c = \sigma / \epsilon \quad (\text{波動場領域と拡散場領域の境界周波数})$$

$$\omega \ll \omega_c \quad -i\omega\mu\sigma \left(\frac{\mathbf{E}}{\mathbf{H}} \right) + \nabla \times (\nabla \times \left(\frac{\mathbf{E}}{\mathbf{H}} \right)) = 0 \quad \text{拡散場: 時間にについて1回微分 } (i\omega)^1$$

$$\omega_c \ll \omega \quad \omega^2\mu\epsilon \left(\frac{\mathbf{E}}{\mathbf{H}} \right) + \nabla \times (\nabla \times \left(\frac{\mathbf{E}}{\mathbf{H}} \right)) = 0 \quad \text{波動場: 時間にについて2回微分 } (i\omega)^2$$

電磁物性パラメータと周波数依存性

$$\text{Wave number} \quad k = \sqrt{-i\omega\mu(\sigma + i\omega\epsilon)}$$

$$\text{Slowness} \quad s = k / \omega$$

$$\text{Phase velocity} \quad V_p = \omega / k = 1 / s$$

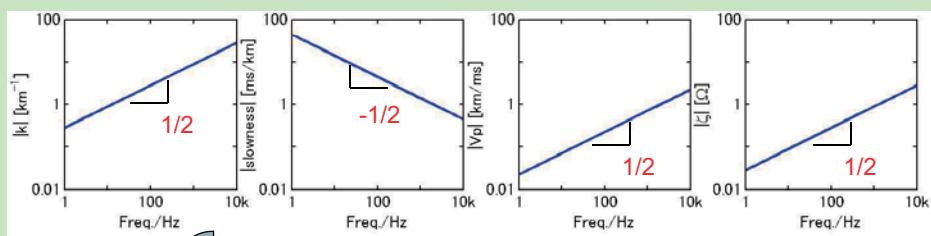
$$\text{Impedance (intrinsic)} \quad \zeta = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon + \sigma / i\omega}}$$

3

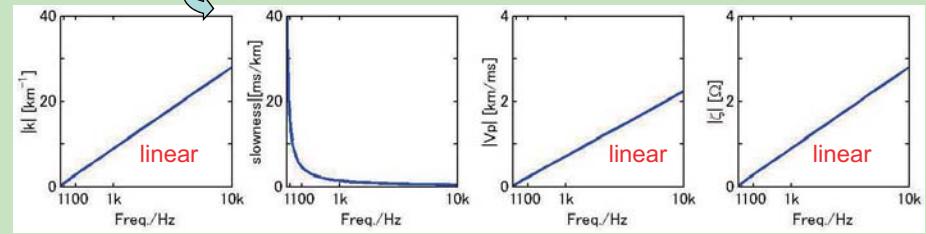
周波数依存性表現方法の変更(拡散場での新しい座標軸の導入)

ある走時をもつ波に対するスペクトル上での応答:

- ・波動場: 周波数軸に対して正弦波的に変化
 - ・拡散場: 周波数の平方根の軸に対して減衰する正弦波のように変化
- ⇒拡散場に注目する場合には、周波数平方根を新たな軸として導入する。



周波数軸の平方根を取ったもので表現



2. 反射イベントの表現 水平構造がある場合の電磁波伝播

簡単のため、3層構造での平面波の例で示す。

$$E_n = E_n^D \exp(-ik_n z) + E_n^U \exp(+ik_n z)$$

$$H_n = [E_n^D \exp(-ik_n z) - E_n^U \exp(+ik_n z)] / \zeta_n$$

境界条件より各層の上下向き成分の比は、

$$\frac{E_0^U}{E_0^D} = \frac{\zeta_0 - \zeta_1}{\zeta_0 + \zeta_1}, \quad \frac{E_1^D}{E_0^D} = \frac{2\zeta_0}{\zeta_0 + \zeta_1}$$

$$\frac{E_1^U}{E_0^D} = \frac{2\zeta_0}{\zeta_0 + \zeta_1} - \frac{\zeta_1 + \zeta_2}{1 + \frac{\zeta_0 - \zeta_1}{\zeta_0 + \zeta_1} \frac{\zeta_1 - \zeta_2}{\zeta_1 + \zeta_2} \exp(-2ik_1 z_1)} = \frac{2\zeta_0}{\zeta_0 + \zeta_1} R(\omega), \quad \frac{E_1^U}{E_1^D} = R(\omega)$$

$$R(\omega) = \frac{r_1 u}{1 + r_0 r_1 u} \approx r_1 u - r_0 r_1^2 u^2 + r_0^2 r_1^3 u^3 - \dots$$

Reflectivity

$$r_n = \frac{\zeta_n - \zeta_{n+1}}{\zeta_n + \zeta_{n+1}} \quad u = \exp(-2ik_1 z_1)$$

電場の比 $R(\omega)$ は、第1層内を一往復、二往復、…の成分の和で表せる。

表現上、拡散場/波動場の制限はない。(波数 k に依存した伝播特性)

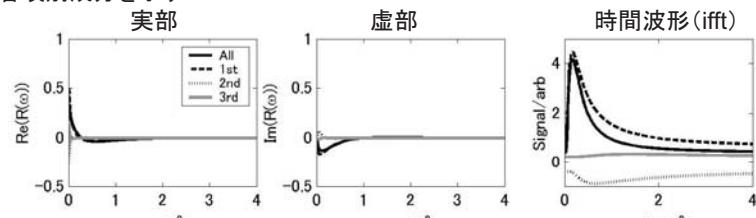
実際の伝達関数で確かめる。

5

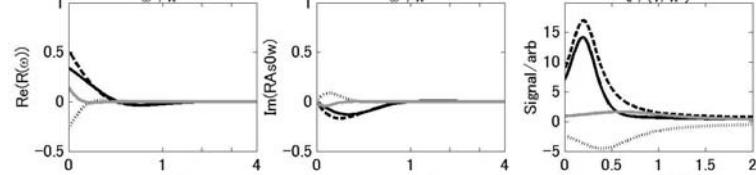
各反射成分の周波数依存性から時間波形への変換の例(拡散場)

全成分の和と各項別成分を示す。

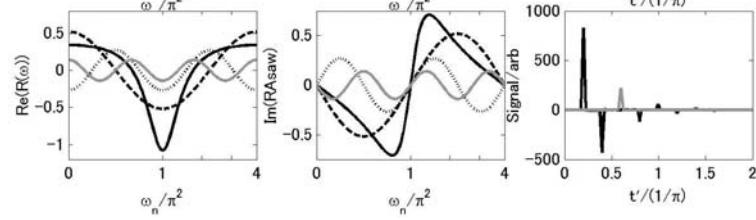
Original
周波数特性



周波数平方根
軸で表す

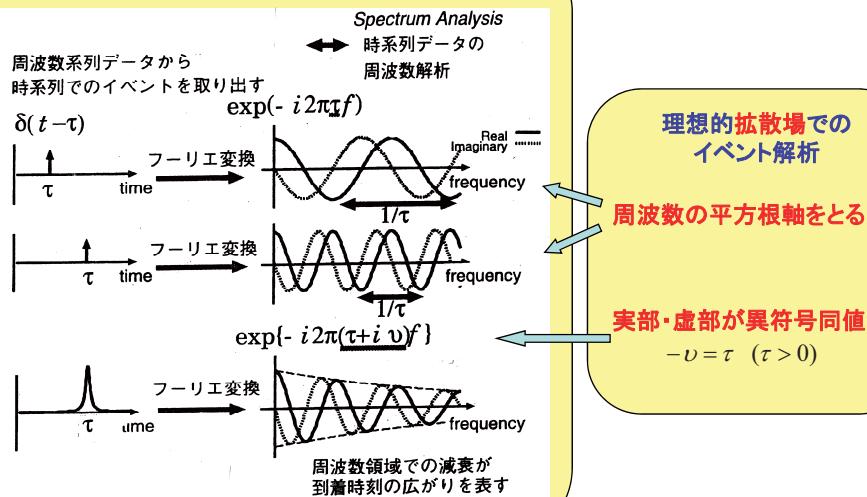


振幅の周波数
依存性を補正



周波数依存性から時間波形への変換(イベント解析)

一般のイベント解析の考え方



7

存否イベント解析での波素と物理的意味

存否イベント解析(SEA: Hasada et al.,2000)

周波数応答を増加・減衰する正弦波の和としてモデル化し、時間領域での波素 m を求める。

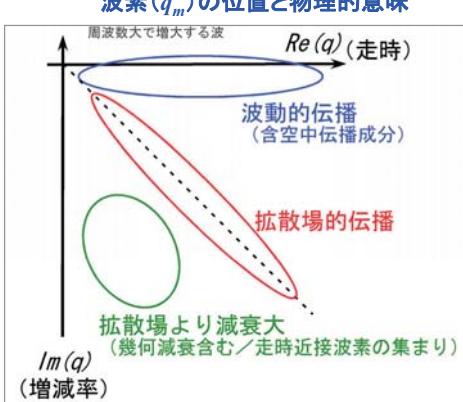
$$H(\omega') = \sum_m \alpha_m e^{-iq_m \omega'}$$

q_m の実部: τ , 遅延を表す。
 q_m の虚部: u , 増加減衰を表す。

各波素 q_m は、存否イベント解析では複素数空間上の点として求められる。

存否イベント解析では、拡散場だけでなく、波動的伝播した信号等も、解として求まりうる。(解を後で仕分け)

波素(q_m)の位置と物理的意味



8

3. 合成データによる成分分離の確認

右図のような、地下2層モデルにおいて理論周波数応答を求め、そこからReflectivity(=入射信号に対する地下応答)と反射成分の遅延を求める。

地下2層モデル

Air	
$\rho_1 = 100 [\Omega\text{m}]$	$h_1 = 500\text{m}$
$\rho_2 = 10/1000 [\Omega\text{m}]$	

手順

- 1) 理論周波数応答(MTインピーダンス)の式を用いる。
- 2) MTインピーダンスからReflectivityを求める。
- 3) 上記の応答を、周波数平方根に比例した点にデータをリサンプリング。
- 4) Reflectivityに対して、存否イベント解析を行い、異なる遅延の成分に分離する。

1) 理論周波数応答:c.f. Ward & Hohmann(1987)

$$Z_j = \zeta_j \frac{Z_{j+1} + \zeta_j \tanh(u_j h_j)}{\zeta_j + Z_{j+1} \tanh(u_j h_j)}, \quad (j = 1, \dots, n-1)$$

$$Z_n = \zeta_n, \quad u_j = (\hat{z}_j \hat{y}_j)^{1/2} = i \omega s_j$$

Z_j : 表面インピーダンス, ζ_j : intrinsic impedance, h_j : 層の厚さ

9

3層モデルの理論MT応答とReflectivityの応答

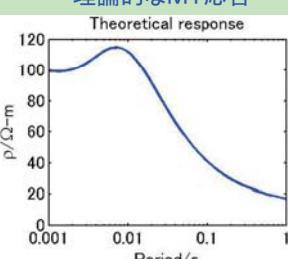
10周波数のMT応答からのreflectivityのSEAを行った。

Air

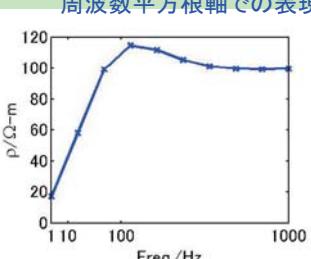
$$\rho_1 = 100 [\Omega\text{m}] \quad h_1 = 500\text{m}$$

$$\rho_2 = 10 [\Omega\text{m}]$$

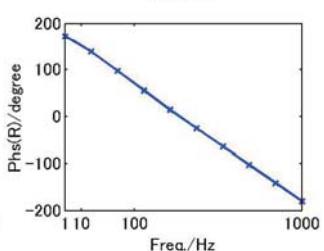
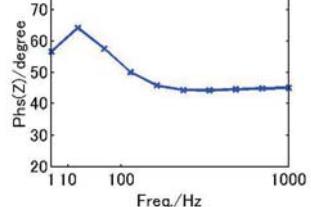
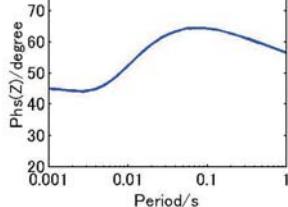
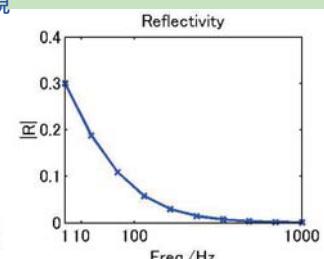
理論的なMT応答

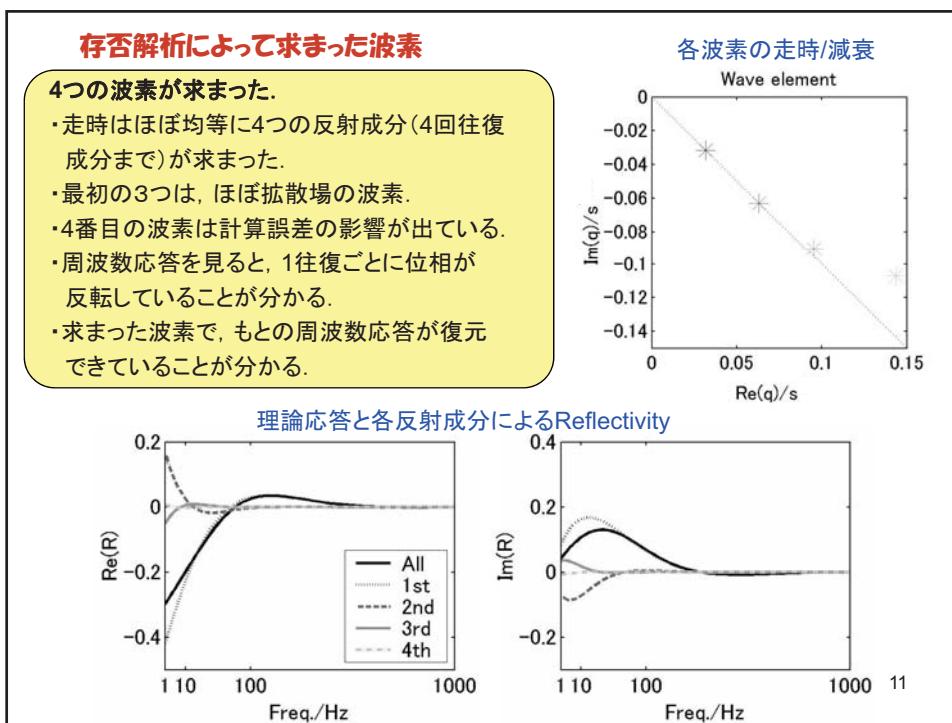


周波数平方根軸での表現



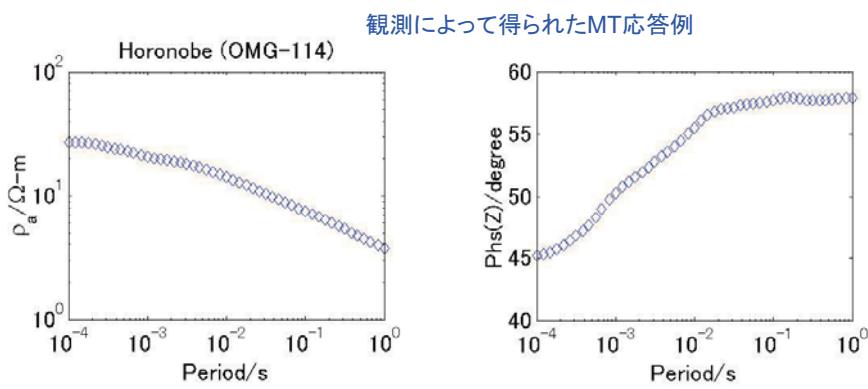
Reflectivity

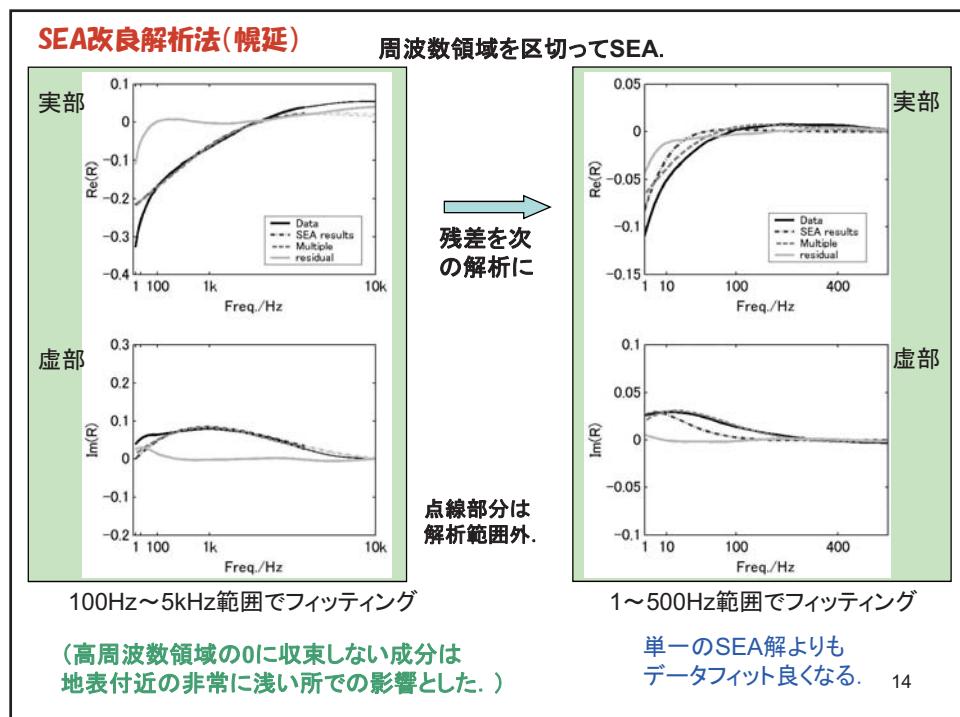
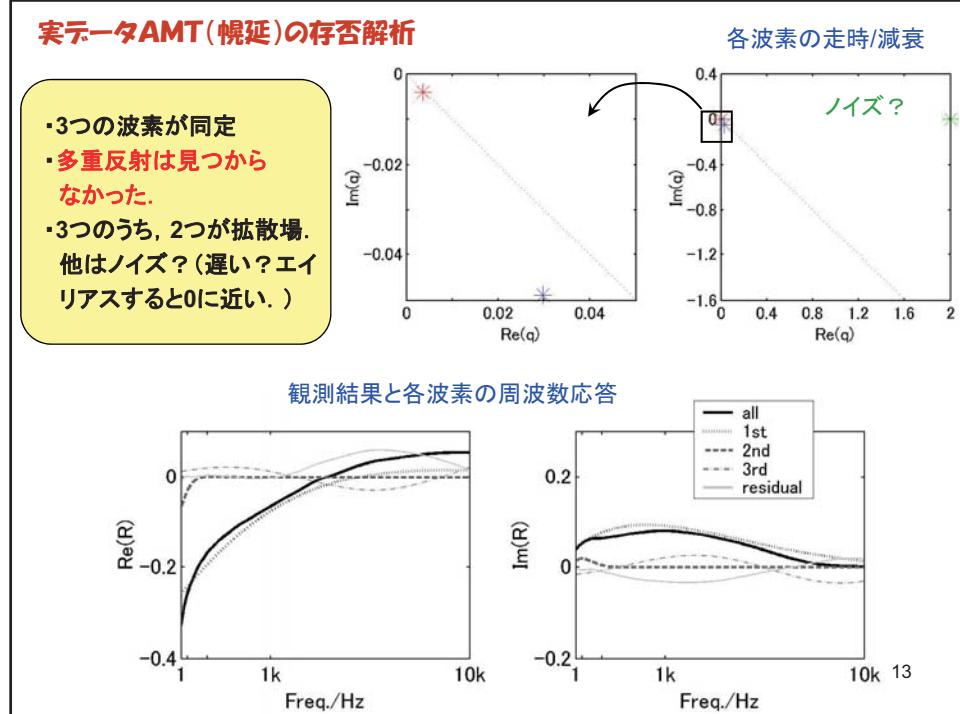


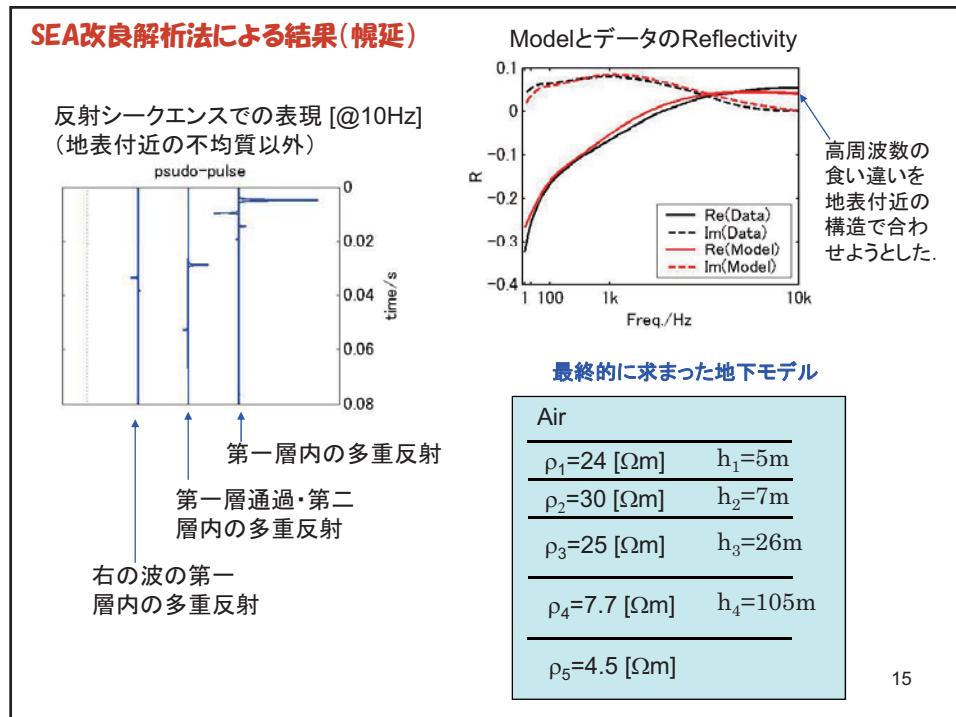


4. 実MTデータによる平面波の伝播遅延解析

実データへの適用として、日本原子力研究開発機構(旧核燃料サイクル開発機構)幌延深地層研究センターで行われたAMT観測(周波数範囲:1~10kHz)(松尾他, 2004)で得られたデータに本解析方法を適用した。







実MTデータ適用のための改良点のまとめ.

单一のSEAを用いた時の問題点

1. 多重反射が判別できなかった。
2. 比抵抗の変化が小さめに出た。
3. 低周波数領域の解析範囲が狭い。(SEAでの手法上の問題)

問題が起きた理由

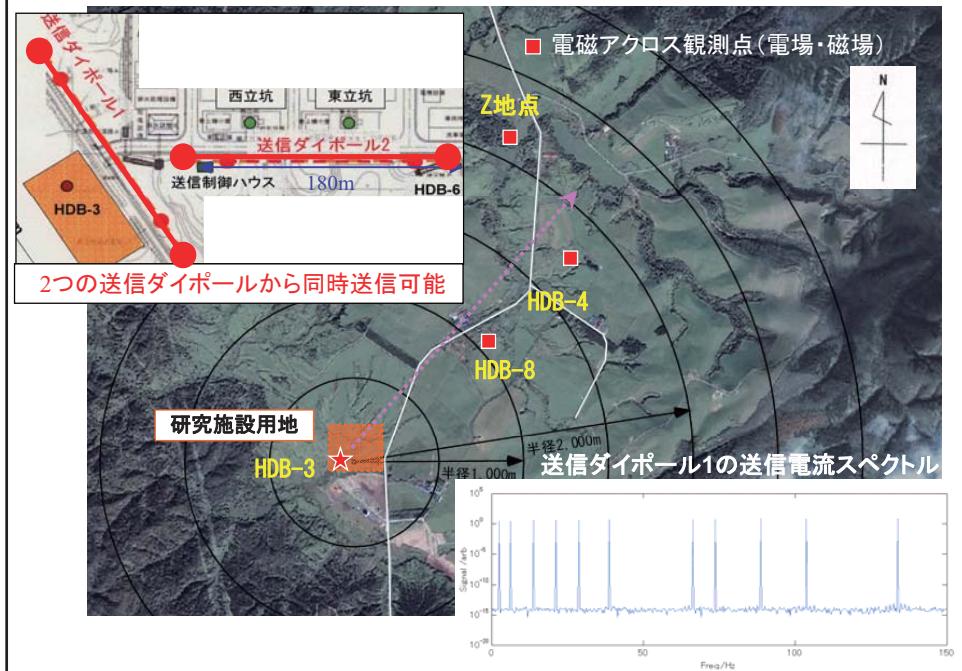
1. 拡散場での応答は減衰が大きいため、もともと区別がつきにくかった上に、実データはノイズフリーではないので、複数波素をひとつと認識した。
2. 多重反射を考慮していなかったので、反射係数が小さめになった。

解決策

- ・表面に近い反射イベントから周波数範囲を限定してSEAで同定していく。
- それを元に多重反射も考慮して、地下パラメータを推定。(表層剥ぎ取り)
- ・周波数範囲を低周波数に変えていき解析。(低周波数領域が狭くなることも改善)

16

4. 実電磁ACROSS信号への適用(時間変化の表現)



伝達関数と遅延解析による地下パラメータとの対応

伝達関数の時間変動と地下パラメータの対応を見る際に、

1. 水平成層構造的に見做しやすい、北西・南東方向の励起の観測結果を扱う。
2. テンソル伝達関数のうち、単一の反射モードのBz成分について解析を行う。
3. 観測事例が最も長期間連続していたHDB4のデータについて解析を行う。

(2. の説明)

水平成層構造の地表で観測される電磁場は、

$$E_x = Idx \left[-P(r) + \frac{\partial^2}{\partial x^2} Q(r) \right] \quad \text{ただし,}$$

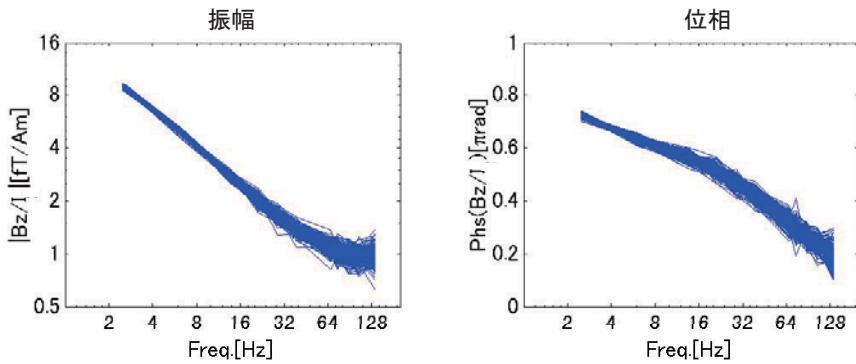
$$E_y = Idx \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} Q(r) \quad P(r) = \frac{\hat{z}}{4\pi} \int_0^\infty \frac{\lambda}{u_0} (1 + R_{TE}) J_0(\lambda r) d\lambda$$

$$H_z = \frac{Idx}{\hat{z}} \frac{\partial}{\partial y} P(r) \quad Q(r) = \frac{1}{4\pi \hat{y}} \int_0^\infty \left[\frac{\lambda}{u_0} (1 + R_{TE}) - \frac{u_0}{\lambda} (R_{TE} + R_{TM}) \right] J_0(\lambda r) d\lambda$$

...

HDB4で観測された伝達関数の時間変動

2007/3/1～2007/11/31までの9ヶ月間の、送信電流から
HDB4観測点Bz成分への伝達関数の1日平均値を重ねて示した。



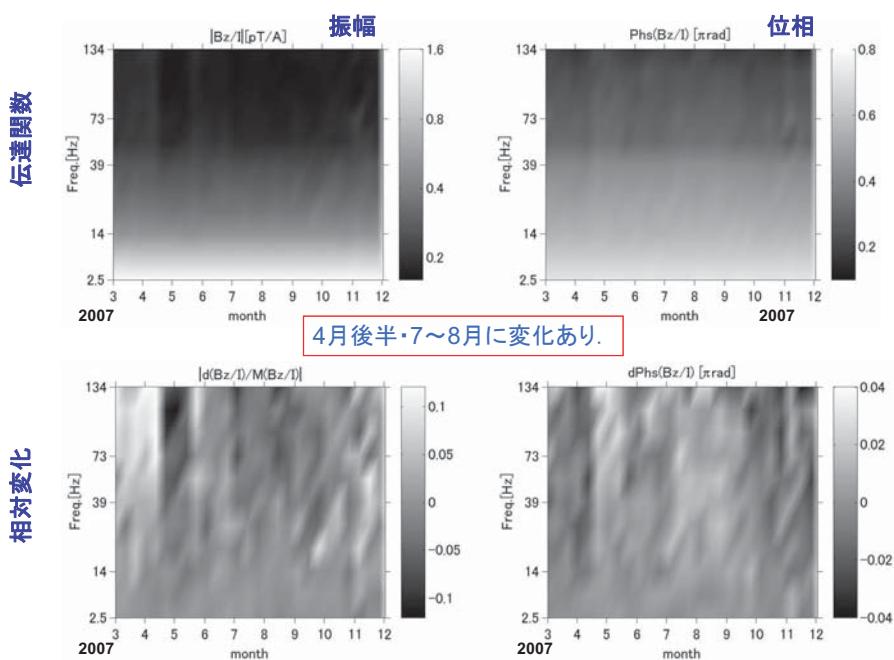
平均的な傾向は変わらないが、幅を持っていて時間変動がある。

高周波数側で幅が大きいのは、

- ・振幅が小さくS/Nが悪い。
- ・高周波数領域が表す地下状態の変化が大きいことを示す。

19

HDB4で観測された伝達関数の時間変動(カラーマップ表示)

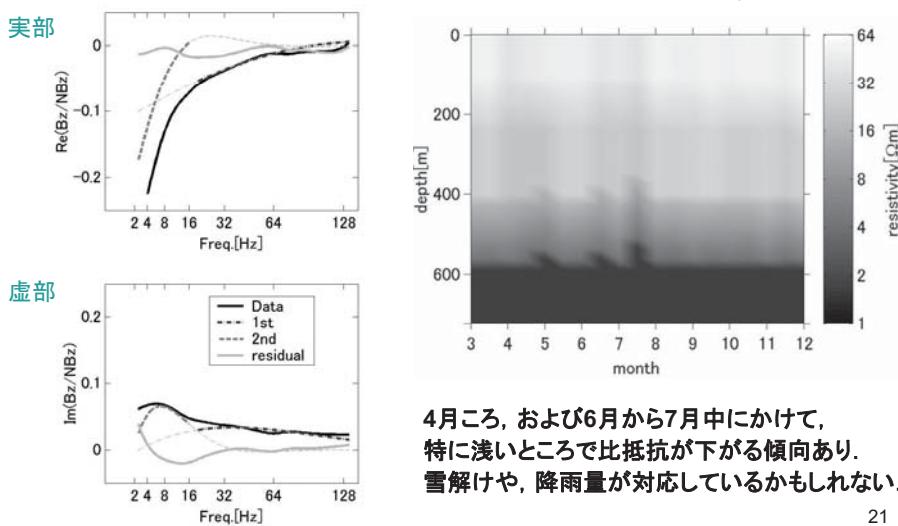


存否イベント解析を用いた遅延解析

周波数帯を分けて遅延解析.

2つの成分でほぼ表せる.

地下パラメータの時間変化



21

実電磁アクロスデータの伝播遅延解析まとめ

幌延深地層研究所で行われている電磁アクロスの1成分のデータに対し、存否イベント解析を利用した遅延解析を行った。

- 観測データに見られる、春先および夏季に見られる変動と、地下の物性パラメータの対応が認められた。

課題

- より細かい構造に対する応答への対応。
- 今回は簡単のため、1成分のみについての解析を行った
テンソル観測量が得られている、全成分について解析を行う。

⇒電流ダイポールからの全ての成分に対する応答の整理が必要であるが、より詳細な地下構造とその時間変動を求められる可能性がある。

22

まとめ

- 1) 拡散場領域の電磁波データから、伝播遅延を求め、地下構造に相当する反射成分に分離する方法を示した。
 - ・周波数平方根を新たな軸として導入。
 - ・成分分解は、存否イベント解析(Hasada et al.,2000)を用いる。
 - ・完全に拡散場にならないものも解として得られる。
- 2) 合成データ、および実MTデータに対してSEA解析法を適用した。
 - ・合成データへの適用は、よい結果が得られた。
 - ・実MTデータへは、多重反射を考慮する、および適用範囲を変えて適用。
- 3) 実電磁アクロスデータに対してSEA解析法を適用した。
 - ・雪解け時や下記に、地表の電気伝導度が大きくなる傾向がみられた。

課題

- a) 実データへの適用において出る問題(特に近接イベントに対して)の対処。
- b) 拡散より減衰の大きい波と、パルスのなまりの関係とその解釈。
- c) 弹性波の反射法で用いられているマイグレーションなどへの拡張。
- d) テンソル伝達関数全成分を用いた解析。

23

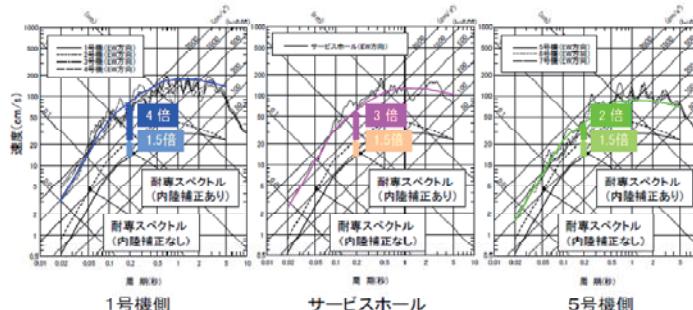
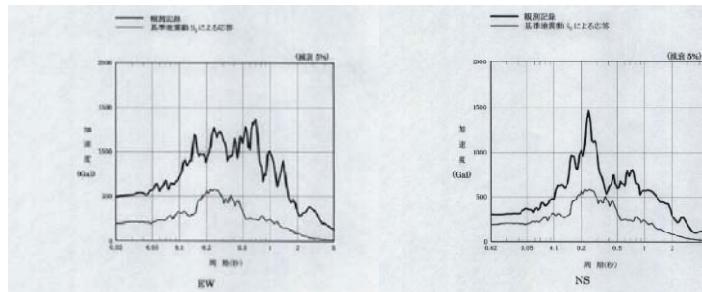
2.15

アクロスワークショップ ～アクロス技術の現状と今後の展望～

日本の原発の地震安全性向上の技術的方向

平成22年2月25日 東原 純道

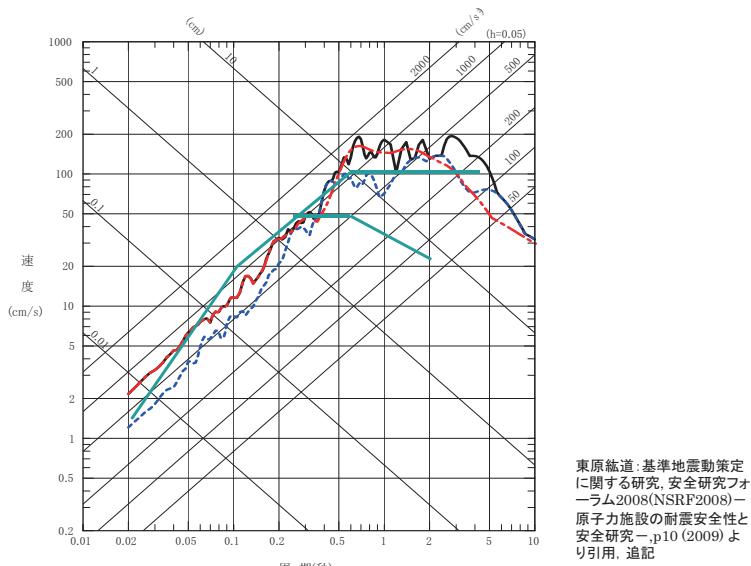
柏崎刈羽：観測値vs.入力地震動



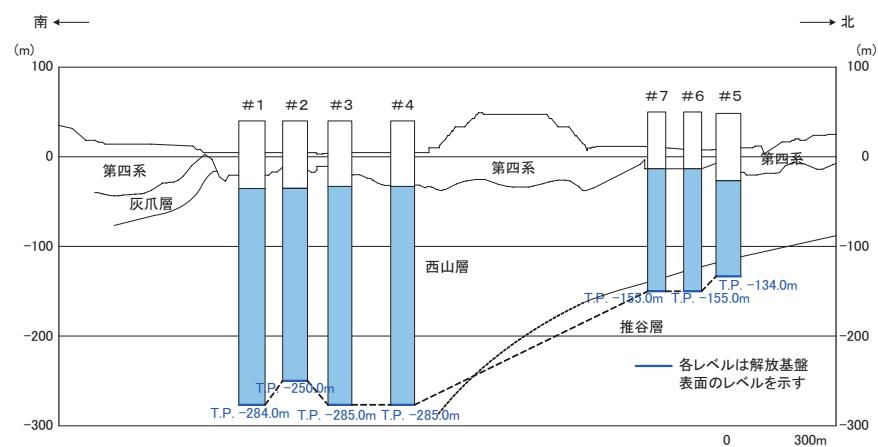
2007年第54回原子力安全委員会(2007年8月2日) 資料第2号『東京電力株式会社 柏崎刈羽原子力発電所における平成19年新潟県中越沖地震時に取得された地震観測データの分析結果について』内添付資料『柏崎刈羽原子力発電所における平成19年新潟県中越沖地震時に取得された地震観測データの分析結果に関する報告(第1報)』東京電力株式会社、16ページ、図12「4号機原子炉建屋地下5階(基礎版上)の加速度応答スペクトル」より引用

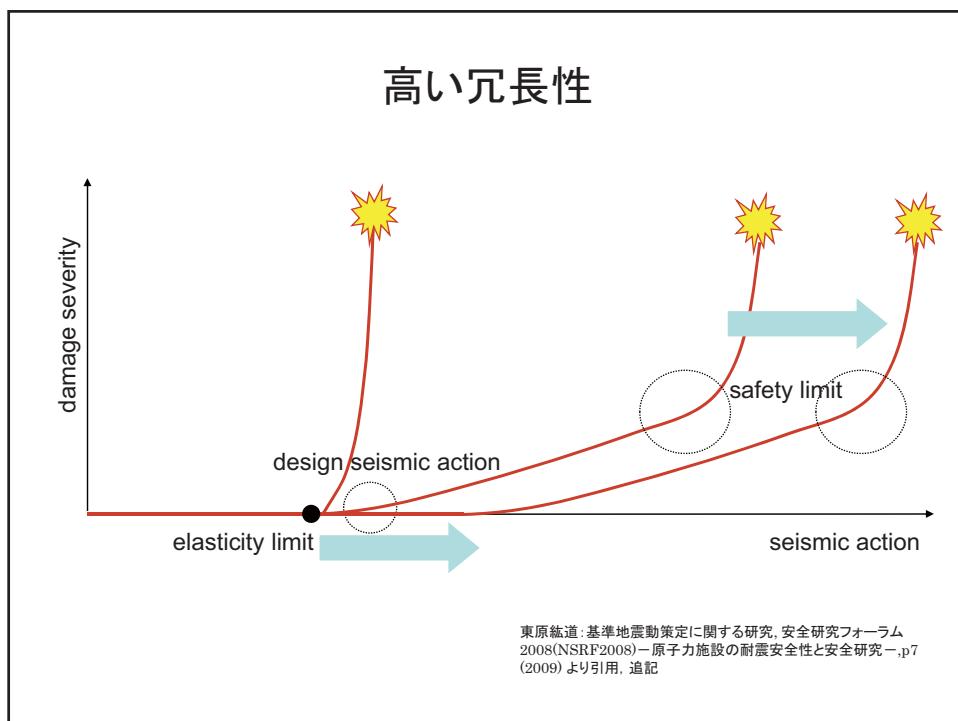
原子力安全委員会耐震安全性評価特別委員会 第5回地震・地震動評価委員会(2008年7月3日) 地震動評価委員会 第5-1-1号『柏崎刈羽原子力発電所における平成19年新潟県中越沖地震時に取得された地震観測データの分析に関する補足説明』東京電力株式会社、11ページ、「推定波の応答スペクトル(EW方向)」より引用

柏崎刈羽：観測値vs.基準地震動



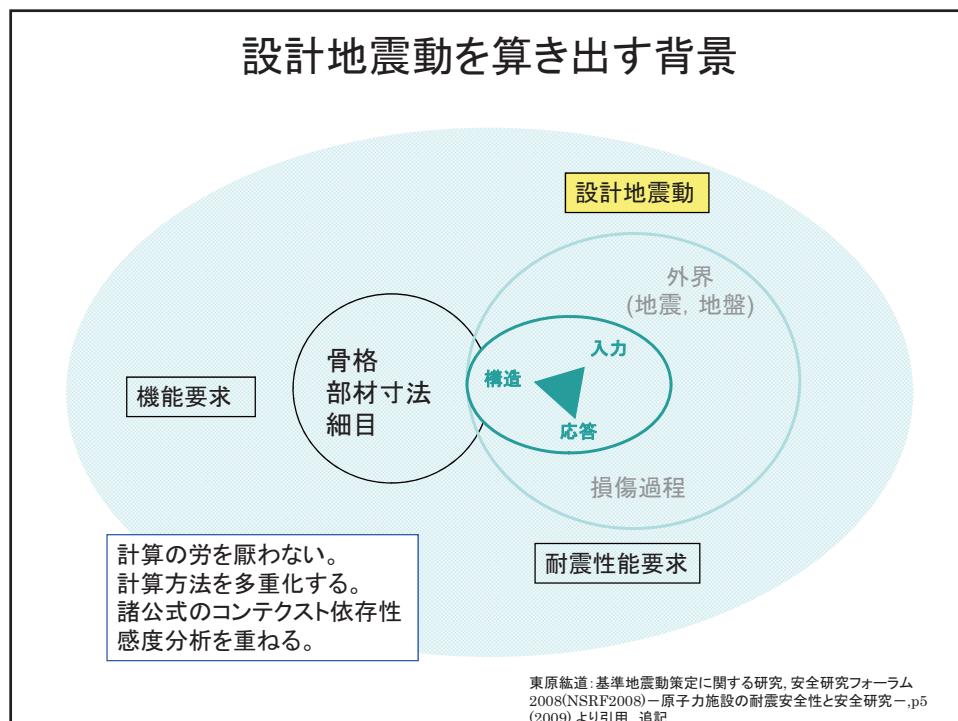
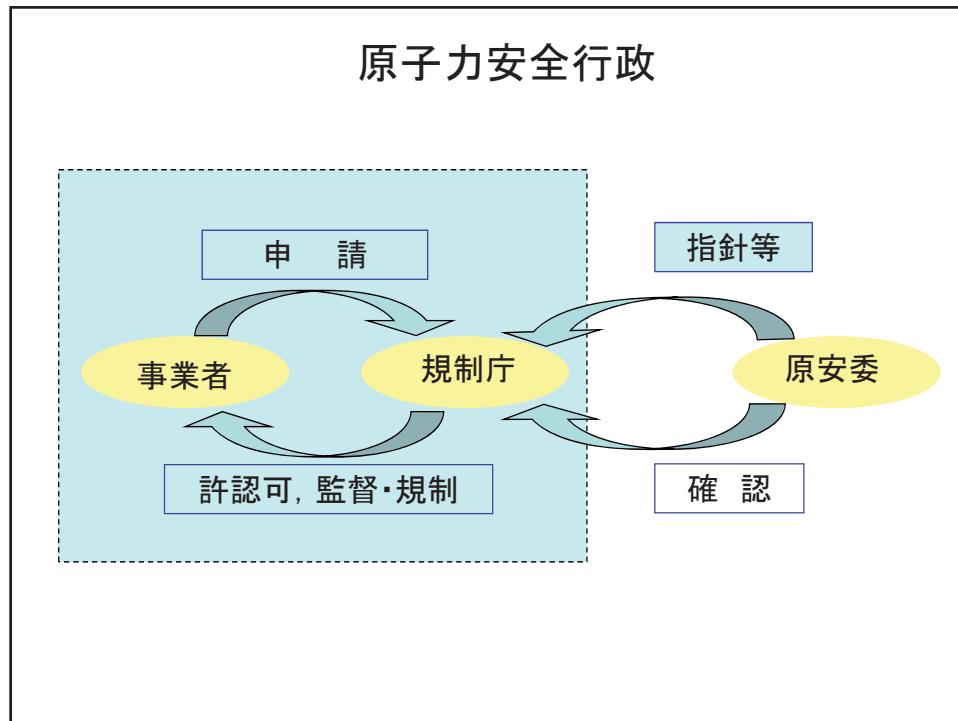
表層地盤には魑魅魍魎が住みついている

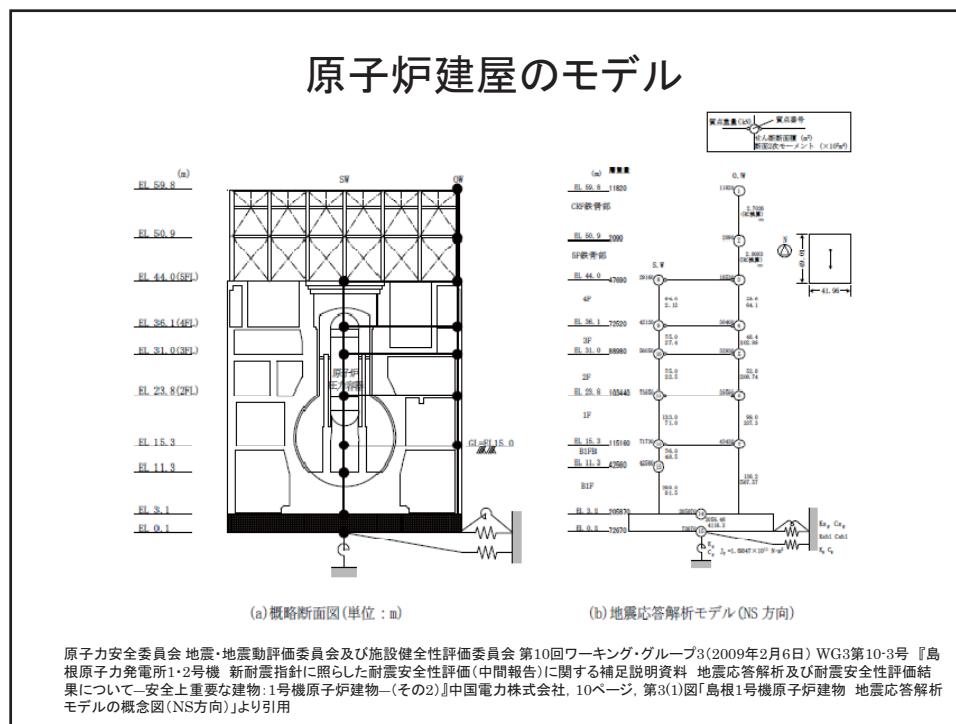
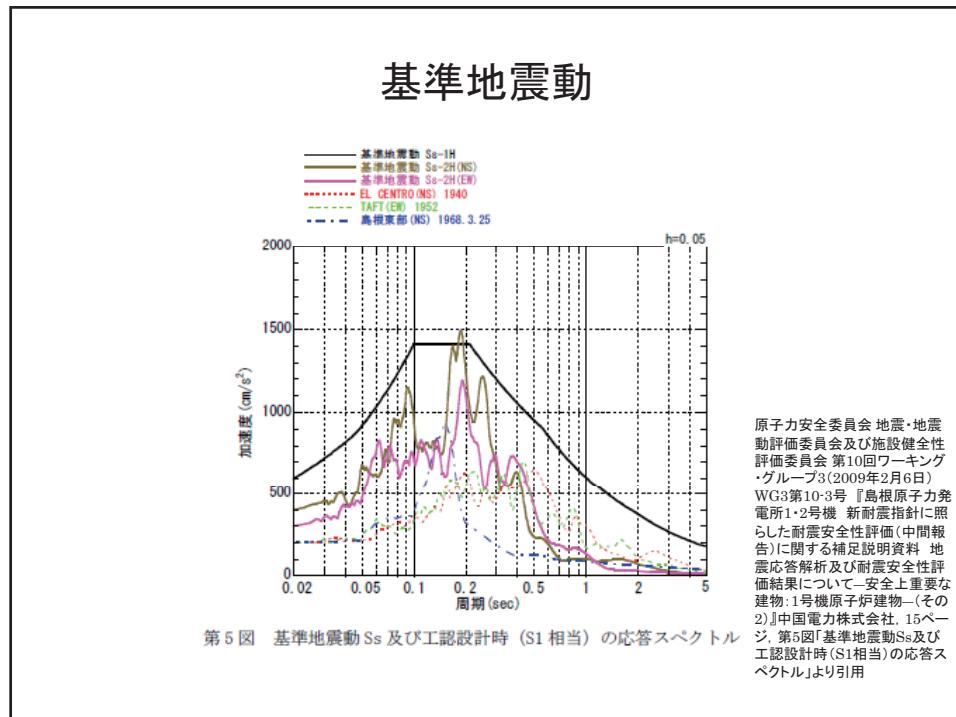




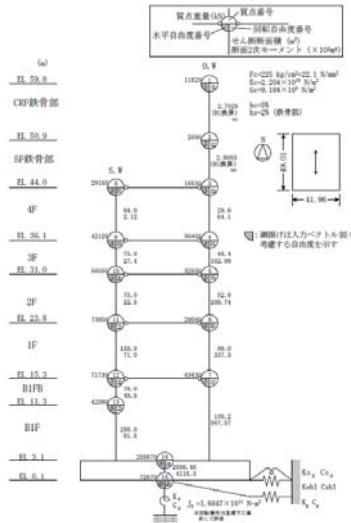
経 緯

1981/06	耐震設計審査指針		
1995/01			兵庫県南部地震
2005/07		炉安審109部会審査開始	
2006/09	新耐震設計審査指針		
2007/07			新潟県中越沖地震
2008/03		炉安審109部会審査終了	



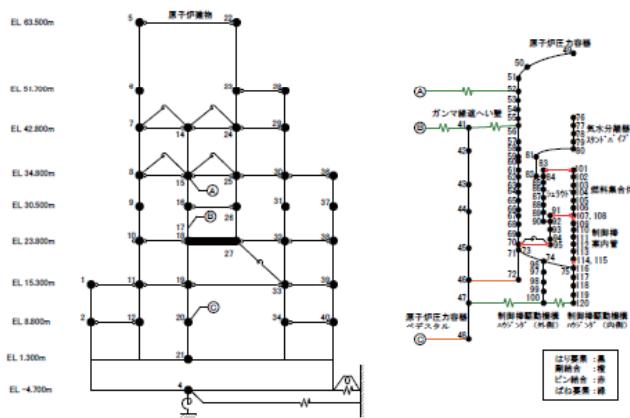


モデルの骨格



原子力安全委員会 地震・地
震動評価委員会及び施設健
全性評価委員会 第21回ワ
ーキング・グループ3(2009
年6月17日) WG3第21-8号
『原子炉建物の地震応答解
析について』、参1-2ページ、
参1-1(1)図「1号機原子炉
建物の地震応答解析モデル
の質点番号と自由度番号の
対応(NS方向)」より引用

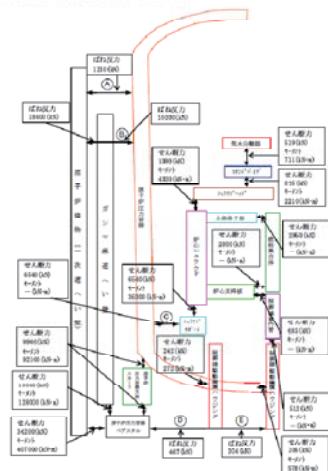
建物・原子炉連成モデル



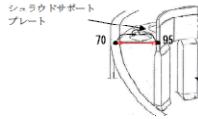
原子力安全委員会 地震・地震動評価委員会及び施設健全性評
価委員会 第15回ワーキング・グループ3(2009年2月6日) WG3
第15-15号『機器・配管系の評価について(その3)』、3ページ、第
3-1図「2号機炉内構造物解析モデル(水平方向)」より引用

部材要素の解析

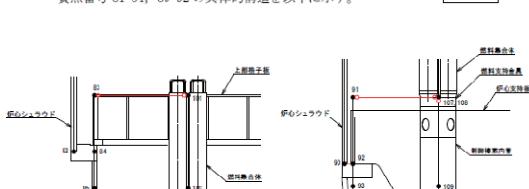
伊内構造物の水平支持力を第 6-1 図に示す。



(2) シュラウドサポートの構造細目
シュラウドサポートの構造を以下に示す。



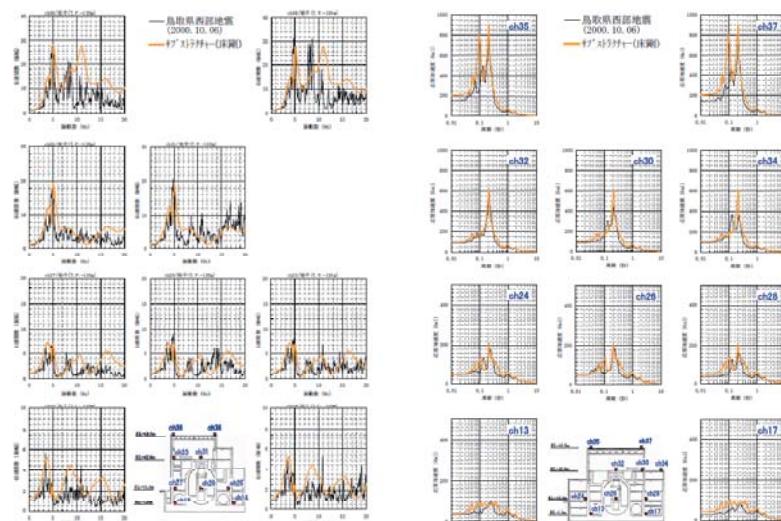
(3) 複雑な取り合い位置の具体的構造
質点番号 81-84, 89-92 の具体的構造を以下に示す。



原子力安全委員会 地震・地震動評価委員会及び施設健全性評価委員会 第15回ワーキング・グループ3(2009年2月6日)
WG3第15-15号『機器・配管系の評価について(その3)』、6
ページ、第6-1図「炉内構造物の荷重伝達(水平方向)」より
引用

原子力安全委員会 地震・地震動評価委員会及び施設健全性評価委員会 第15回ワーキング・グループ3(2009年2月6日) WG3第15-15号『機器・配管系の評価について(その3)』, 8ページより引用

実測との適合の程度



原子力安全委員会 地震・地震動評価委員会及び施設健全性評価委員会 第15回ワーキング・グループ3(2009年2月6日) WG3第15-11号「原発建物のシミュレーション解析について(その2)」、10ページ、第6(2)図「伝播関数(地盤および建物モデル・EW 方向)」及び 同17ページ、第10(1)図「加速度応答スペクトラル(h=0.05) 地盤および建物モデル・NS 方向」により引用

2.16



アクロスによる原子力施設の 振動特性精密評価に向けた試み その1

日本原子力研究開発機構 システム計算科学センター

西田明美、鈴木 喜雄、林 幸子

日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門 長谷川 健

静岡大学 國友 孝洋

名古屋大学 熊澤 峰夫

大和探査技術(株) 羽佐田 葉子

0



本日の発表内容

- 1 . 全体概要
- 2 . ACROSSのデータ解析手法“存否法”
- 3 . ACROSSによる構造物の応答計測と
計測結果への存否法の適用
- 4 . まとめ

1



1. 全体概要

2

背景(現状と課題)

原子力施設の運用維持の更なる安全化・効率化の重要課題
⇒高経年化対策や耐震対策

構造物に変化が生じる位置と時期を可能な限り早期にかつ見落としなく発見することが重要

断続的な監視ではなく継続的な監視「常時監視」が必要

現状：常時微動観測や自然地震観測（いずれも受動監視）

課題：

- a) 受動監視では、入力信号の振動数や振幅が非定常 ⇒ 精度の面で問題有
- b) 状態変化を監視するためには、比較的マクロな量である固有振動数や固有振動モードに加え、部材接合部の剛性の変化等局所的な特性評価も必要

解決のためのアプローチ

- a) 対して → ACROSS を構造物の振動特性評価に転用。
- b) について → 構造物内の弾性波伝播を記述できるスペクトル要素法を採用

3

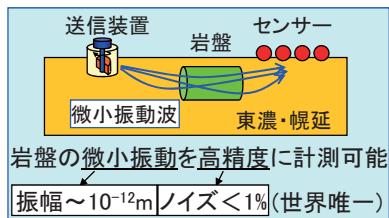
ACROSSを構造物の振動特性評価に転用

岩盤変化の監視技術を施設の状態変化の監視に転用し、構造物の変化状態を振動特性から推定する技術の模索

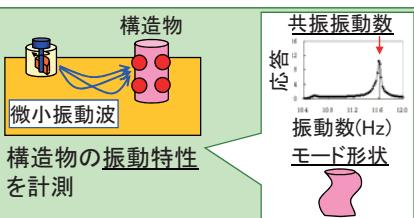


将来的に原子力施設の岩盤変化監視と施設(建屋・機器)状態監視を同時にを行い、健全性予測を計測科学および計算科学により確立

岩盤変化の監視技術 = ACROSS



施設の状態変化の監視



4

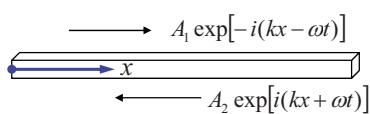
波動伝播を記述できるスペクトル要素法を採用

スペクトル要素解析における変位の仮定： $u(x,t) = \sum \hat{u}(x,\omega) \exp[i\omega t]$

$\hat{u}(x,\omega)$ は波動方程式を満たすように仮定される。例えば、

$$\hat{u}(x,\omega) = A_1 \exp[-ikx] + A_2 \exp[ikx]$$

※右辺の第1項は x の正方向に進む波を、第2項は x の負方向に進む波を表している。

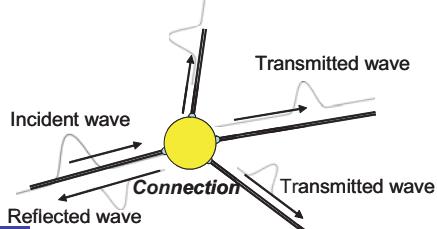


ACROSS技術により計測データから波数を推定

現状の材料特性の同定や、さらに計測を継続することで材料特性の経年変化を監視。

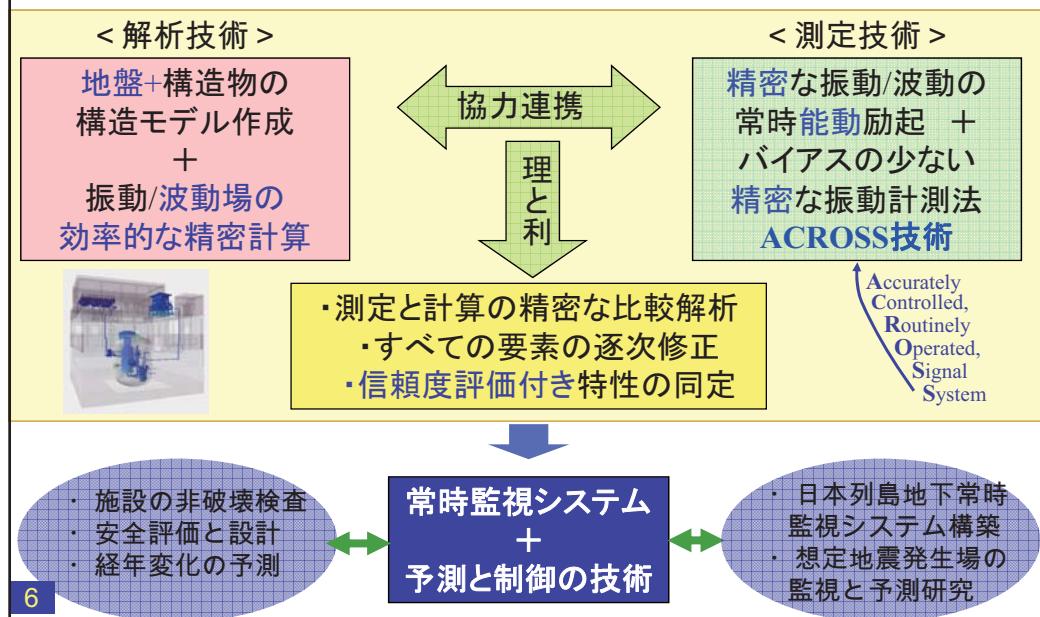
さらに、

必要な計測点数を確保し、未知数 A_1 , A_2 を求めることで、接合部における反射波や透過波の振幅を求めることができ、最終的には、接合部におけるエネルギー吸収や接続部材との境界部の剛性等を評価。



5

システム同定のための常時精密能動監視システムの提案



ACROSSによる初の構造物試験計測およびデータ解析



計測対象: ACROSS送信所(実構造物)

(1)ACROSSにより構造物の状態変化を監視できることを確認

共振振動数(Hz) カッコ内は推定誤差	振動数1	振動数2
①	10.5339(±0.0035) ($h=0.225\%$)	11.6004(±0.0008) ($h=0.211\%$)
②	10.4960(±0.0015) ($h=0.155\%$)	11.6064(±0.0045) ($h=0.278\%$)
①-②	0.0379(±0.0038)	0.0060(±0.0046)

(2)ACROSSにより構造物内の波動伝播速度を推定できることを確認

フレームの柱の伝播速度を計測データより推定

7

構造物の状態変化を監視し、かつ、推定可能とする見通しを得た



2 . ACROSSのデータ解析手法“存否法”

8

はじめに

- 
- ACROSSにより得られた伝達関数から構造物の振動特性を求める
 - 伝達関数を構造物上の多数の点で計測
 - 構造物全体の振動モードに着目し、構造物の大局部的な振動特性（固有振動数・減衰・固有モード）を求める...時間スペクトル解析
 - 各部材での波動伝播に着目し、局所的波動伝播特性（伝播速度、波長など）を取得する...空間スペクトル解析
 - スペクトル解析に存否法を利用する

9

存否法とは

● 存否法...システムの振動特性を解析する手法

- 時系列データを一種の自己回帰(AR)モデルに当てはめることにより正規モードに分解
- 線形力学系の運動方程式における外力が無い場合の系の応答
→ 時のAR方程式 (減衰振動の重ね合わせ)
- 特性根を求める

複素周波数 (実数部分: 固有振動数、虚数部分: 減衰)

- 存否法の利点: 単なる数学的モデルではなく力学系の物理モデルに準拠しており、振動数と同時に減衰も精度良く求められる。

● 様々な応用

- 時間スペクトル解析...時系列データ(地球の自由振動など)
- 空間スペクトル解析...空間系列データ
- イベント解析...周波数系列データ(ACROSS伝達関数の遅延解析)

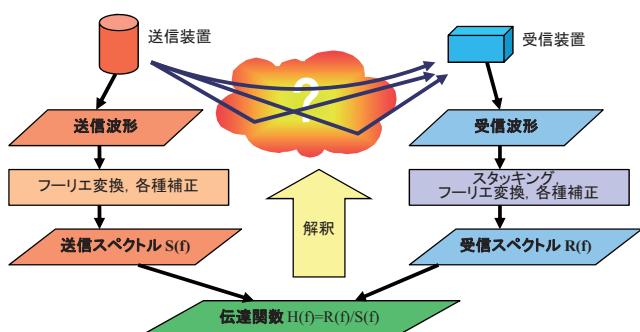
← 本研究

10

存否法による振動モード解析(時間スペクトル解析)

● ACROSSによる計測

- 伝達関数を有限離散の周波数で取得



● 多点で測定した伝達関数を固有モードに分解し、以下のパラメータを推定

- 複素周波数
 - ・ 固有振動数と減衰を表す 全点・全テンソル要素で共通
- 複素振幅
 - ・ 振幅と位相 各点・各テンソル要素で個別

11

存否法による振動モード解析(時間スペクトル解析)

- 伝達関数データ H_{jkl} (j :周波数、 k :測定位置、 l :テンソル要素)

↓ フーリエ逆変換

- 時間波形(帯域制限したインパルス応答) h_{nkl}
- 近似的に自由振動と見なせる時間範囲を切り出す
- 存否法によるスペクトル解析⇒構造物全体の振動特性

■ モデル

$$h_{nkl} = \sum_{m=1}^M \alpha_{mkl} e^{2\pi i (q_m - f_1)(n-n_1)/(N\Delta f)} + e_{nkl}, (n = n_1 \cdots n_2)$$

信号成分 雑音成分

■ $\{q_m\}$:全点全テンソル要素に共通な複素周波数

・ 実数部分⇒固有振動数、虚数部分⇒減衰

・ Q値 $Q = \operatorname{Re} q_m / (2 \operatorname{Im} q_m)$ 、減衰定数 $h = Q^{-1} / 2 = \operatorname{Im} q_m / \operatorname{Re} q_m$

■ $\{\alpha_{mkl}\}$:測定点、テンソル要素によって異なる複素振幅

・ 絶対値⇒初期振幅 偏角⇒初期位相

- 各モードについて、各測定点での複素振幅から構造物の変形形状を推定

12

存否法による空間波数解析(空間スペクトル解析)

- 構造物の各部材について空間スペクトル解析を行う

■ その部材の波動伝播特性を求める

■ 波の伝播そのものを扱うため、固有振動モードの存在に関わらず解析できる

- ある部材上に等間隔に測定点 $x_k = (k-1)\Delta x$, $k=1 \dots K$ がある場合の伝達関数 H_{jkl}

■ モデル: M 個の波数を持つ波の重ね合わせと雑音成分

$$H_{jkl} = \sum_{m=1}^M \beta_{mjl} e^{2\pi i \kappa_{mj} x_k} + E_{jkl}$$

信号成分 雑音成分

■ ここで、 κ_{mj} は m 番目の波の周波数 f_j における複素波数
実数部分⇒波数、虚数部分⇒減衰

■ 位相速度 ⇒ $f_j/\operatorname{Re}[\kappa_{mj}]$

■ β_{mjl} :各周波数、各テンソル要素の複素振幅

- 伝達関数の空間系列について存否法を適用し、複素波数を求める

- 複数の周波数のデータで解析⇒位相速度の分散を推定できる

13

- 184 -

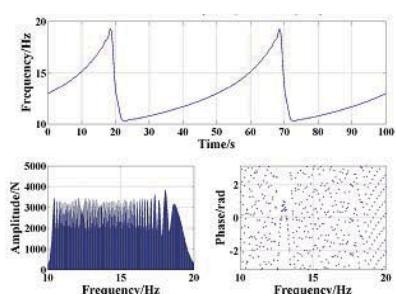


3 . ACROSSによる構造物の試験計測と 計測結果への存否法の適用

14

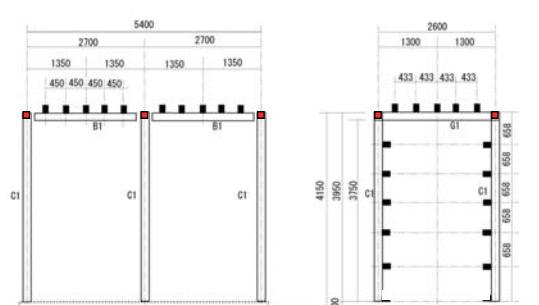
鉄骨フレーム構造物での試験計測

ACROSS送信機周囲の鉄骨フレーム構造物に3成分加速度計を取り付け、応答計測



ACROSSによる送信信号の周波数の時間関数（上図）と、発生力のスペクトル（下図）

- ・ 搬送波13.005Hz、変調周期50sのFM（周波数変調）による繰り返し信号
- ・ 10.245Hz ~ 19.445Hz間に0.02Hz間隔で461個のラインスペクトル群

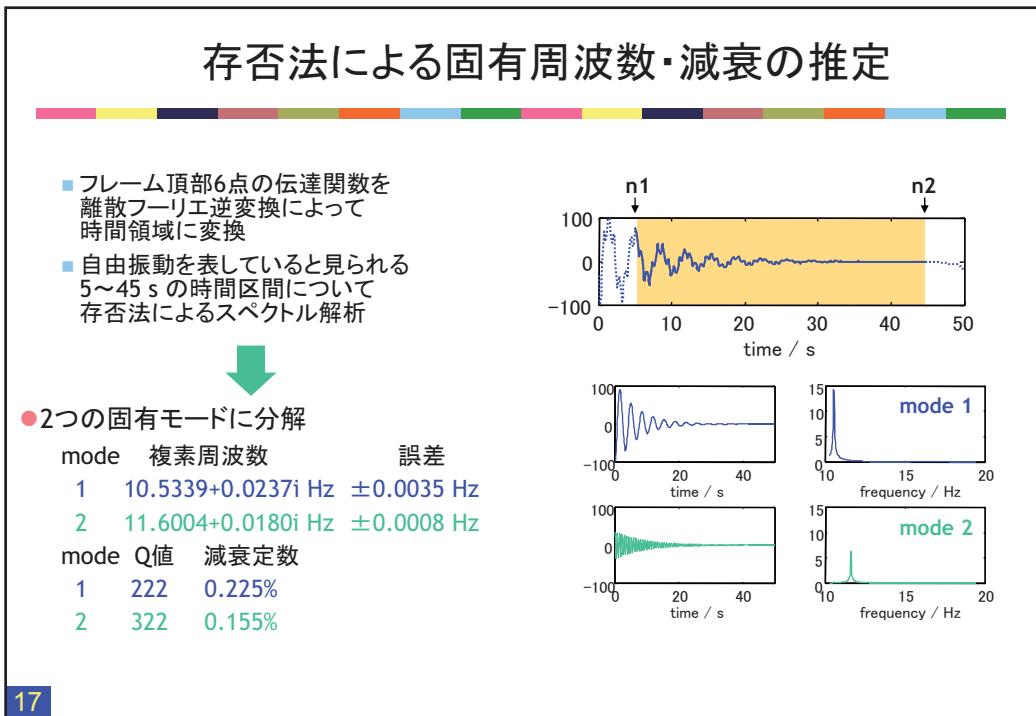
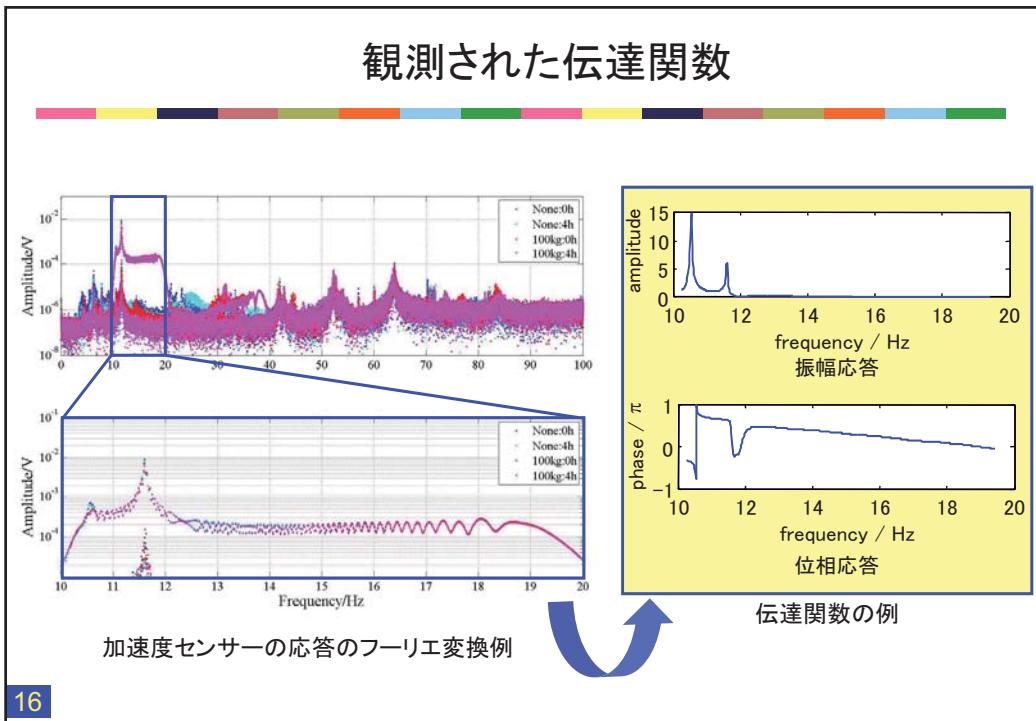


鉄骨フレーム構造物の計測位置



- ・ 14本のH型鋼から構成
- ・ 81点で計測
 - 固定計測点 6
(測定時間は200s×14)
 - 非固定計測点 75
(測定時間は200s)
- ・ 100kgの錘の有無

15



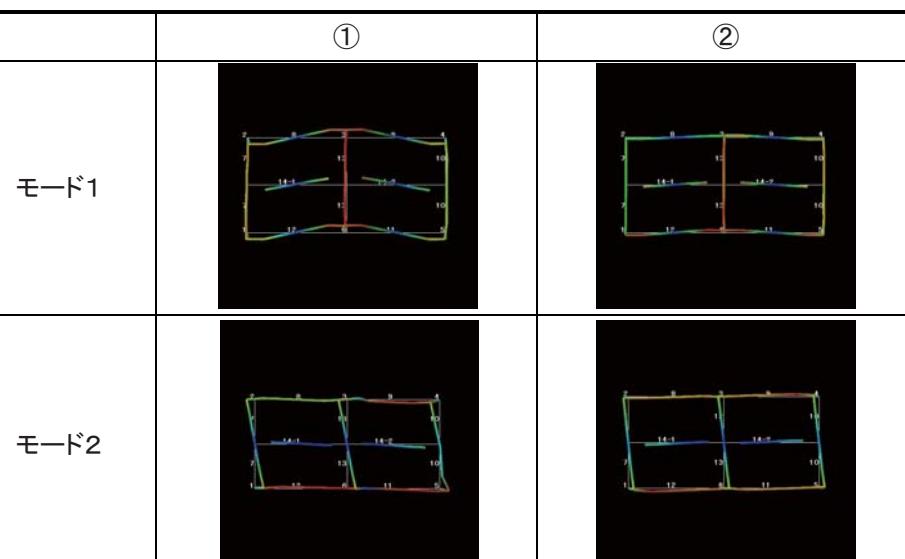
固有モードの変形形状の推定

2つの複素周波数について、全点全テンソル要素の複素振幅を推定し、2つのモードのフレームの変形形状を決定



共振振動数(Hz) カッコ内は推定誤差	①	②
モード1	10.5339(± 0.0035) ($h=0.225\%$)	10.4943(± 0.0015) ($h=0.211\%$)
モード2	11.6004(± 0.0008) ($h=0.155\%$)	11.6064(± 0.0045) ($h=0.278\%$)

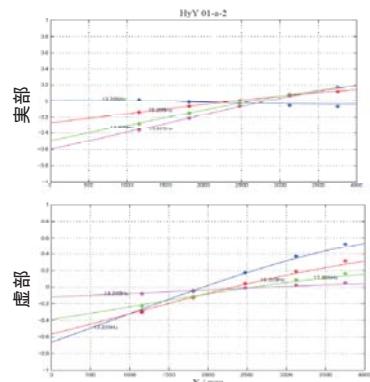
18



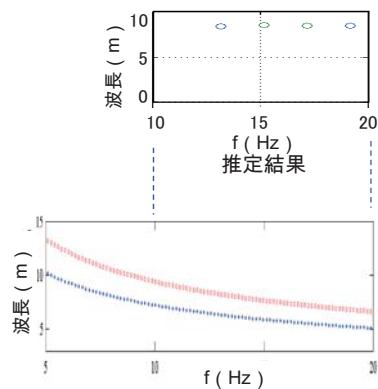
19

波数(波長)の推定

- 同一部材上5点の伝達関数を離散フーリエ逆変換によって空間領域に変換
- 存否法による空間スペクトル解析により、波数(波長)を推定
→オーダーは合致



同一部材上 5 点における振動数ごとの応答空間分布例



推定結果

理論値 (赤 : 強軸、青 : 弱軸)

20



4 . まとめ

21

まとめ

[成果]

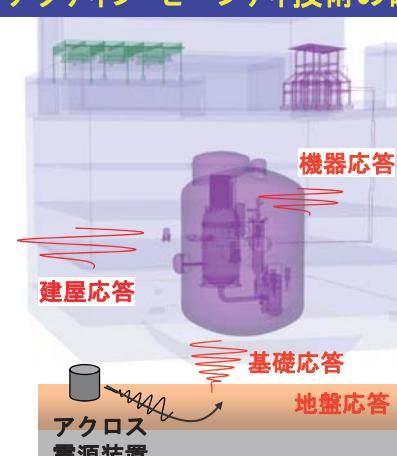
- 構造物の振動特性解析にACROSSを転用し、フレーム構造物の固有振動数等を試験評価した。その結果、構造物の状態変化監視に利用できる可能性を見出した。
- 線形力学系の解析手法(存否法)を使うことで、信頼度の高い固有振動数と固有モード減衰を得る方法論を確立。試験計測データの解析により、本手法の有効性を確認。
- 存否法とスペクトル要素法を連携させることで、フレーム構造物の部材内を伝播する弾性波の波数を推定するための方法論を提案した。得られた波数は物性定数から予測されるものとオーダーは一致。詳細な解析にはより多点での測定が必要。

[今後の展開]

- 実用的な計測・解析のデザイン+システム同定
⇒原子力施設の振動特性評価およびその時間変化の検出
- 今回の試験計測は周波数範囲が10から20Hz。⇒異なる周波数範囲での実験を計画。
- ACROSSによる常時監視の実用化に向けた検討を目的とし、JAEA内研究施設と協力して試験計測を計画。

22

アクティブ・セーフティ技術の確立



ACROSSによる アクティブモニタリング

- 建物および内部機器等構造物の伝達特性
- 地盤と建物との動的相互作用特性
- 表層地盤特性

予測保全による安全保障と予防

地盤	基礎・建屋	内部機器	配管等
0.1Hz	~10Hz	~25Hz	~数kHz

アクロスによる原子力施設の振動特性 精密評価に向けた試み(その2)

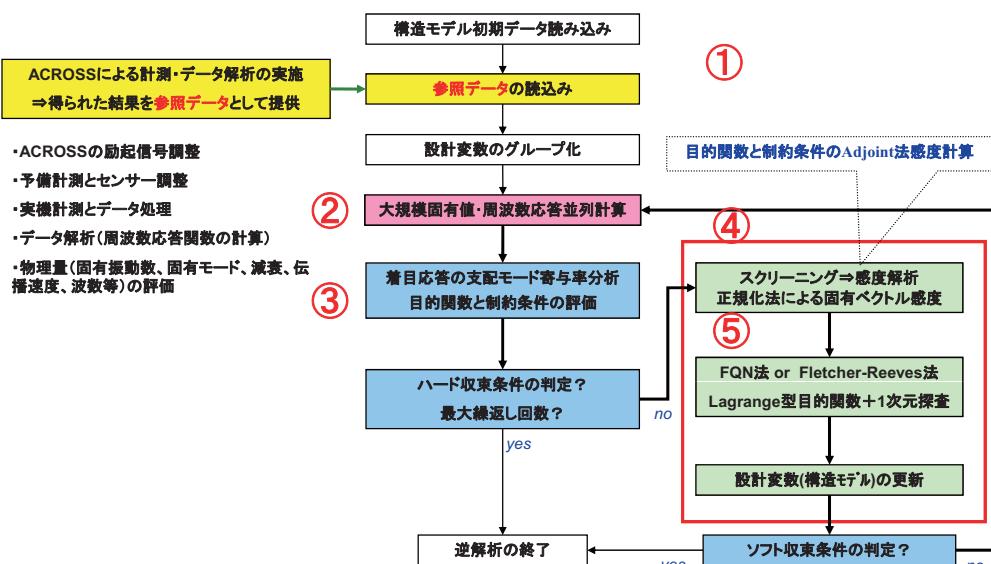
高精度地震応答解析法の開発 技術要素のご紹介

2010年2月

VDOC株式会社

1

高精度地震応答ソルバーの逆解析フロー



高精度地震応答ソルバーの技術要素

①大規模並列プログラムとマシン構成

Master-Slave制御 + Hybrid並列化(MPI+OpenMP)

並列度大規模化スケーラビリティ性能の確保

②超大規模固有値ソルバーの開発

多段階モード合成法★、二分岐型部分構造の自動生成

③モーダル周波数・時刻歴応答ソルバーの開発

④周波数特性感度解析ソルバーの開発

正規化法による固有ベクトル感度計算、Adjoint法

⑤周波数特性逆解析ソルバーの開発

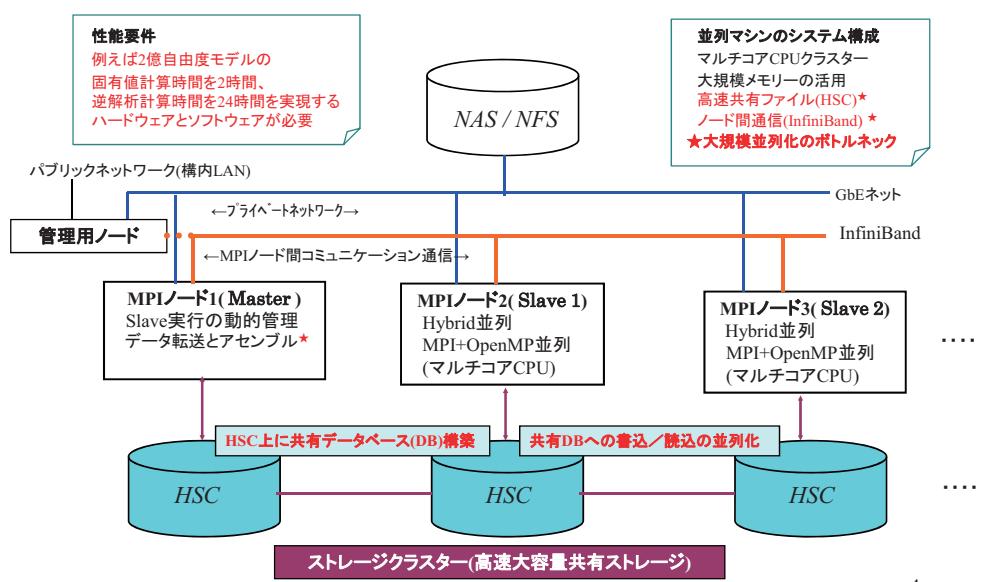
Feasible Quasi-Newton(FQN)法、Fletcher-Reeves法

Lagrange型目的関数 + 一次元探査

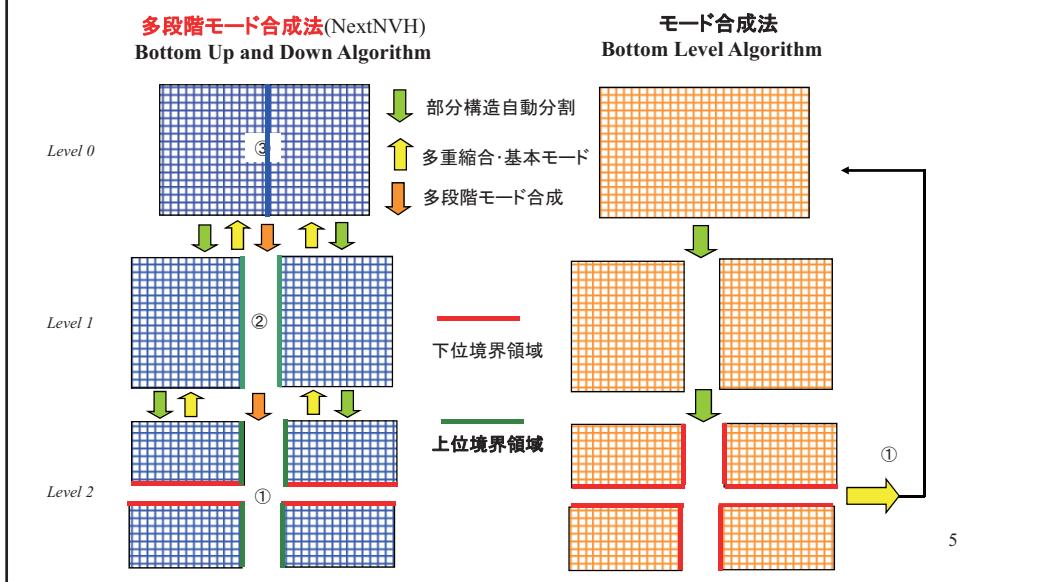
3

★多段階モード合成法とNextNVHソフトはVDOCが開発した著作物です

①大規模並列プログラムとマシン構成

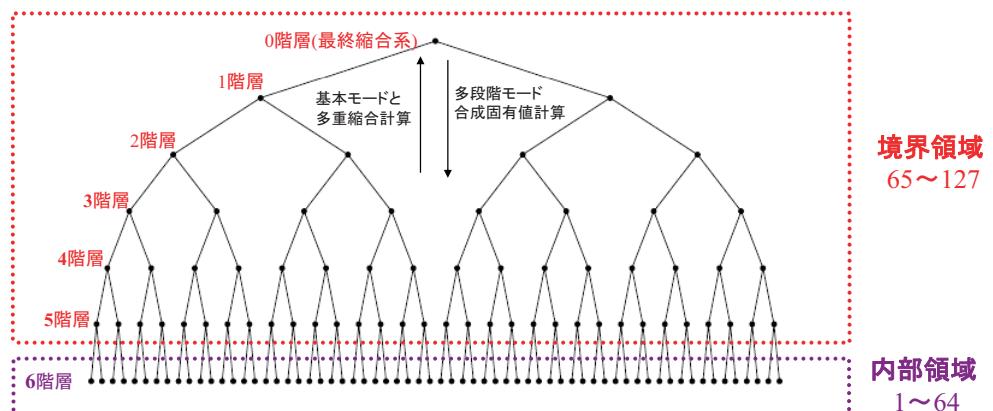


②超大規模固有値ソルバーの開発



多段階モード合成法と二分岐型部分構造

例: 64分割の二分岐型部分構造



参考資料: 160万自由度車両モデルのNextNVH実行ログリスト

多段階モード合成法の固有方程式

実空間と多段階モード合成空間(3階層目)の固有方程式

$$([K] - \lambda[M])\{\phi\} = 0 \quad \text{行列サイズは数億元}$$

モード合成系への変換

$$\begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{B10} \end{bmatrix} - \lambda \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{K1}^T(M_1G_{1B10} + M_{1B10})\phi_{B10} \\ \phi_{K2}^T(M_2G_{2B10} + M_{2B10})\phi_{B10} \\ \phi_{K3}^T(M_3G_{3B10} + M_{3B10})\phi_{B10} \\ \phi_{K4}^T(M_4G_{4B10} + M_{4B10})\phi_{B10} \\ \phi_{K5}^T(M_5G_{5B10} + M_{5B10})\phi_{B10} \\ \phi_{K6}^T(M_6G_{6B10} + M_{6B10})\phi_{B10} \\ \phi_{K7}^T(M_7G_{7B10} + M_{7B10})\phi_{B10} \\ \phi_{K8}^T(M_8G_{8B10} + M_{8B10})\phi_{B10} \\ 1 \end{bmatrix} = 0$$

sym

行列サイズは数千元程度
(固有値数の3倍程度)

モード合成系の固有ベクトルの実空間への変換

$$[\phi] = [T][\eta]$$

7

③モーダル周波数・時刻歴応答ソルバー開発

モーダル周波数・時刻歴応答計算

強制加振: Large Mass法、Clough法、Lagrange乗数法など

着目応答の支配的モード次数の算出

モーダル周波数応答計算の基礎式

$$\{u(\omega)\} = \{\bar{u}(\omega)\}e^{j\omega t}, \{\dot{u}\} = j\omega\{\bar{u}\}e^{j\omega t}, \{\ddot{u}\} = -\omega^2\{\bar{u}\}e^{j\omega t}, \{F\} = \{\bar{F}\}e^{j\omega t}$$

$$\{\bar{u}(\omega)\} = [\phi]\{X(\omega)\} = [T]\{\eta\}\{X(\omega)\}$$

$$(-\omega^2[M] + j\omega[C] + [K])\{\bar{u}(\omega)\}e^{j\omega t} = \{\bar{F}\}e^{j\omega t}$$

$$(-\omega^2[1] + j\omega[\eta]^T[T]^T[C][T]\{\eta\} + [\lambda])\{X(\omega)\} = [\eta]^T[T]^T\{\bar{F}\}$$

8

④周波数特性感度解析ソルバーの開発

設計変数 x 、制約条件 $g(x)$ 、目的関数 $f(x)$ の設定
固有値感度の計算式

$$\frac{d\lambda_i}{dx} = \{\phi_i\}^T \left(\left[\frac{\partial K}{\partial x} \right] - \lambda_i \left[\frac{\partial M}{\partial x} \right] \right) \{\phi_i\}$$

固有ベクトル感度のロバストな新しい計算方法の開発

$$\underbrace{([K] - \lambda_i [M])}_{\text{Singular}} \left\{ \frac{d\phi_i}{dx} \right\} = - \left(\left[\frac{\partial K}{\partial x} \right] - \frac{\partial \lambda_i}{\partial x} [M] - \lambda_i \left[\frac{\partial M}{\partial x} \right] \right) \{\phi_i\}$$

固有ベクトルの質量での正規化式による拘束を導入

$$\{\phi_i\}^T [M] \{\phi_i\} = 1 \rightarrow 2 \{\phi_i\}^T [M] \left\{ \frac{d\phi_i}{dx} \right\} = - \{\phi_i\}^T \left[\frac{\partial M}{\partial x} \right] \{\phi_i\}$$

9

固有ベクトルの質量マトリックス正規化と微分

$$\{\phi_i\}^T [M] \{\phi_i\} = 1 \rightarrow 2 \{\phi_i\}^T [M] \left\{ \frac{d\phi_i}{dx} \right\} = - \{\phi_i\}^T \left[\frac{\partial M}{\partial x} \right] \{\phi_i\}$$

固有ベクトルの剛性マトリックス合同変換と微分

$$\{\phi_i\}^T [K] \{\phi_i\} = \lambda_i \rightarrow 2 \{\phi_i\}^T [K] \left\{ \frac{d\phi_i}{dx} \right\} = - \{\phi_i\}^T \left[\frac{\partial K}{\partial x} \right] \{\phi_i\} + \frac{\partial \lambda_i}{\partial x}$$

MK合同変換微分と固有ベクトル感度の拘束式

$$2 \{\phi_i\}^T ([M] + [K]) \left\{ \frac{d\phi_i}{dx} \right\} = - \{\phi_i\}^T \left(\left[\frac{\partial M}{\partial x} \right] + \left[\frac{\partial K}{\partial x} \right] \right) \{\phi_i\} + \frac{\partial \lambda_i}{\partial x}$$

10

固有ベクトル感度計算のための基礎微分式

$$([K] - \lambda_i [M]) \left\{ \frac{d\phi_i}{dx} \right\} = - \left(\left[\frac{\partial K}{\partial x} \right] - \frac{\partial \lambda_i}{\partial x} [M] - \lambda_i \left[\frac{\partial M}{\partial x} \right] \right) \{\phi_i\}$$

$\rightarrow [A_i(n, n)] \left\{ \frac{d\phi_i}{dx} \right\} = \{p_i(n)\}$
Singular

$$2\{\phi_i\}^T ([M] + [K]) \left\{ \frac{d\phi_i}{dx} \right\} = -\{\phi_i\}^T \left(\left[\frac{\partial M}{\partial x} \right] + \left[\frac{\partial K}{\partial x} \right] \right) \{\phi_i\} + \frac{\partial \lambda_i}{\partial x}$$

$\rightarrow [B_i(1, n)] \left\{ \frac{d\phi_i}{dx} \right\} = q_i$

Togo Method

Constrain equation

「Gradient拘束法」による固有ベクトル感度の計算式

$$\begin{bmatrix} A_i(n-1, n) \\ B_i(1, n) \end{bmatrix} \left\{ \frac{d\phi_i}{dx} \right\} = \begin{bmatrix} p_i(n-1) \\ q_i \end{bmatrix} \rightarrow \text{[対称+非対称]行列の連立1次方程式}$$

11

静的問題の制約条件と制約条件感度

$$g(x_j, u) \leq 0 \rightarrow \frac{dg}{dx_j} = \frac{\partial g}{\partial x_j} + \left\{ \frac{\partial g}{\partial u} \right\}^T \left\{ \frac{\partial u}{\partial x_j} \right\}$$

直接法による制約条件感度計算

$$\left\{ \frac{du}{dx_j} \right\} = [K]^{-1} \left(\left\{ \frac{\partial F}{\partial x_j} \right\} - \left[\frac{\partial K}{\partial x_j} \right] \{u\} \right) \rightarrow \frac{dg}{dx_j} = \frac{\partial g}{\partial x_j} + \left\{ \frac{\partial g}{\partial u} \right\}^T \left\{ \frac{\partial u}{\partial x_j} \right\}$$

Adjoint法による制約条件感度計算

$$\frac{dg}{dx_j} = \frac{\partial g}{\partial x_j} + \left\{ \frac{\partial g}{\partial u} \right\}^T \left\{ \frac{\partial u}{\partial x_j} \right\} = \frac{\partial g}{\partial x_j} + \left\{ \frac{\partial g}{\partial u} \right\}^T [K]^{-1} \left(\left\{ \frac{\partial F}{\partial x_j} \right\} - \left[\frac{\partial K}{\partial x_j} \right] \{u\} \right)$$

$$[K]\{\eta\} = \left\{ \frac{\partial g}{\partial u} \right\} \rightarrow \frac{dg}{dx_j} = \frac{\partial g}{\partial x_j} + \{\eta\}^T \left(\left\{ \frac{\partial F}{\partial x_j} \right\} - \left[\frac{\partial K}{\partial x_j} \right] \{u\} \right)$$

12

⑤周波数特性逆解析ソルバーの開発

数理計画法によるシステム同定探査→局所的最適化

大規模探査アルゴリズムの開発

スクリーニングとAdjoint法による制約条件感度の計算

Lagrange型目的関数と準ニュートン探査法(BFGS)

設計変数のMove Limitと1次元探査

大規模な出力結果に対するポスト処理対策

確率論的方法によるシステム同定探査→大局的最適化

PSO(Particle Swarm Optimization)、

GA(Genetic Algorithm)など

13

アクロス測定結果とのシステム同定(逆解析)

目的関数 $f(x) \rightarrow \text{Minimize}$

$$\text{アクロス測定値と解析値の同定用重付き目的関数} \quad f(x) = \sum_{i=1}^{NR} \left| W_i \frac{\text{Across}_i(\omega) - R_i(\omega, x)}{\text{Across}_i(\omega)} \right|$$

制約条件 $g_i(x) \leq 0 \quad i=1 \sim NDC$

設計変数 $0.0 \leq x_j \leq 1.0 \quad j=1 \sim NDV$ (Topometry設計変数)

例: シェル板厚 $t_j = thick * x_j$

$$\sum_{j=1}^{NDV} (x_j) / NDV \leq Ratio_{retain} \quad \sum_{j=1}^{NDV} (x_j)^3 / NDV \geq Ratio_{retain}$$

剛性付加20%、削減80%の場合、 $Ratio_{retain}=0.2$

14

NVH最適化の解析事例

トランスマッ션の振動・音響周波数応答の最適化

最適化手法: Topometry最適化法(全外表面に補強用の0/1設計変数)

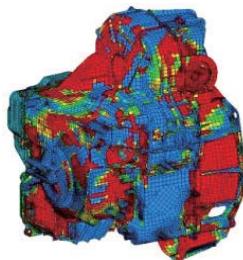
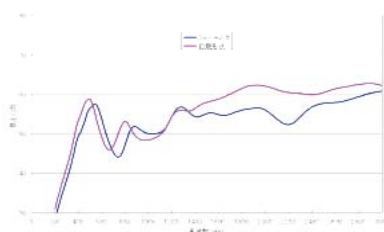
設計変数: 構造外表面に配置した補強用の設計要素(約6万)分布

目的関数: 加振点変形の最小化(最大音圧最小化の近似)

+共振モード固有振動数差の最大化 ← 事前にモード分析を実施

最適化前後(赤と青)の音圧応答分布比較、最適化で約7dBのピーク音圧軽減

音圧はMATV/Sysnoise(モード座標伝達関数)で評価



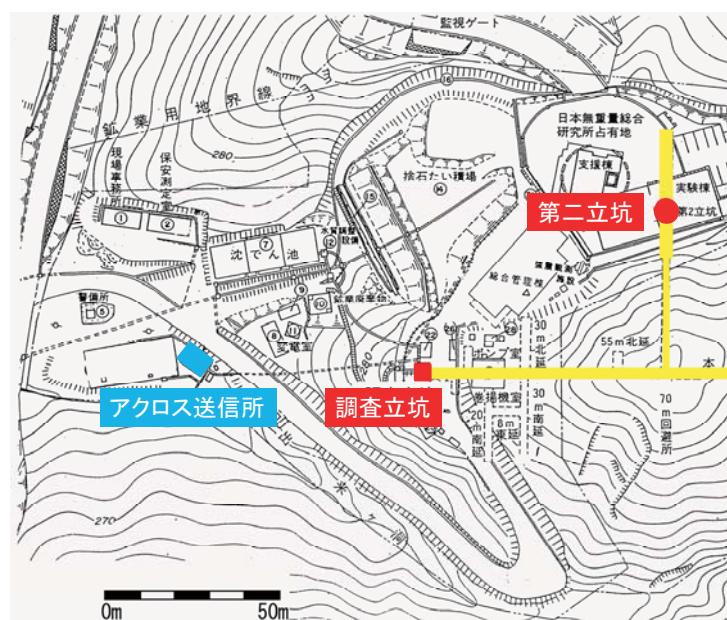
Topometry最適化結果(赤色が補強部分、青色が非補強部分) 15

2.18

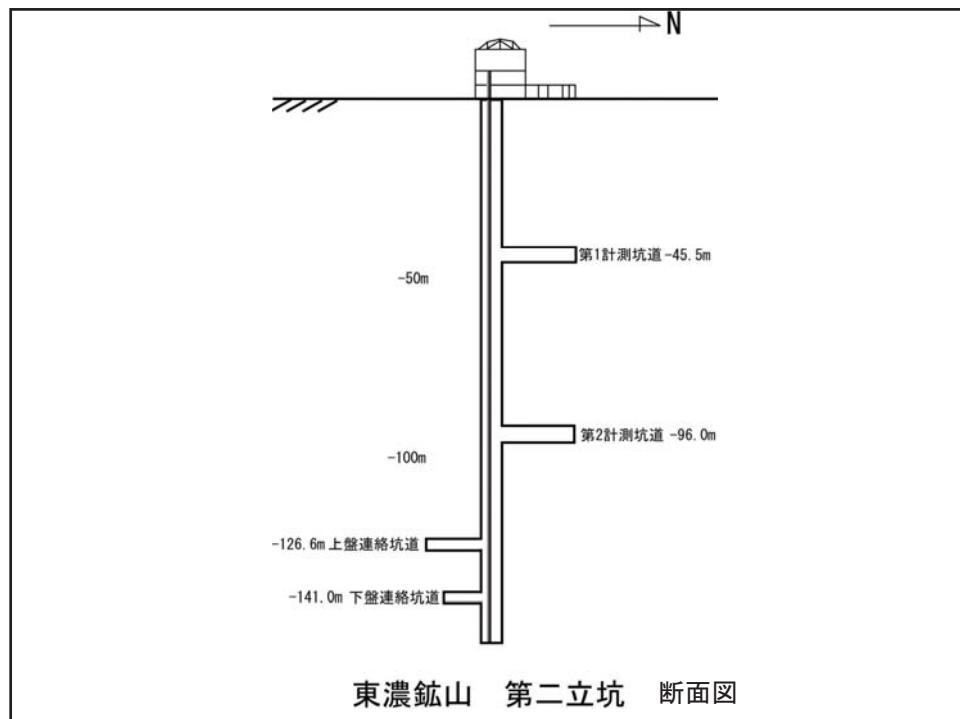
アクロスによる構造物の振動特性計測の試み



長谷川 健
國友 孝洋



東濃鉱山の坑道 見取り図

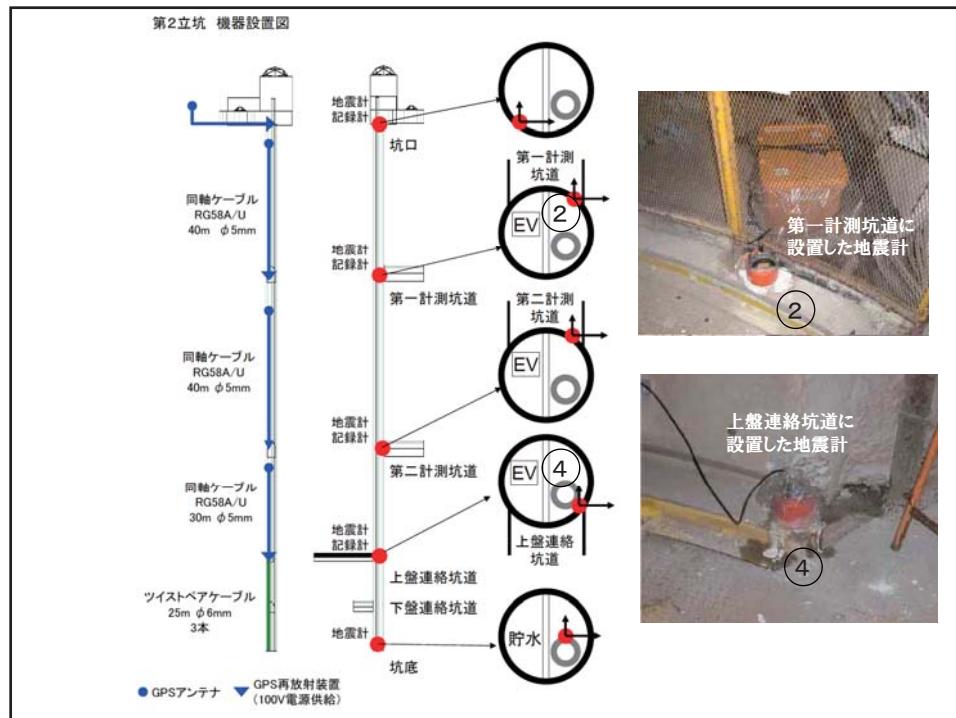
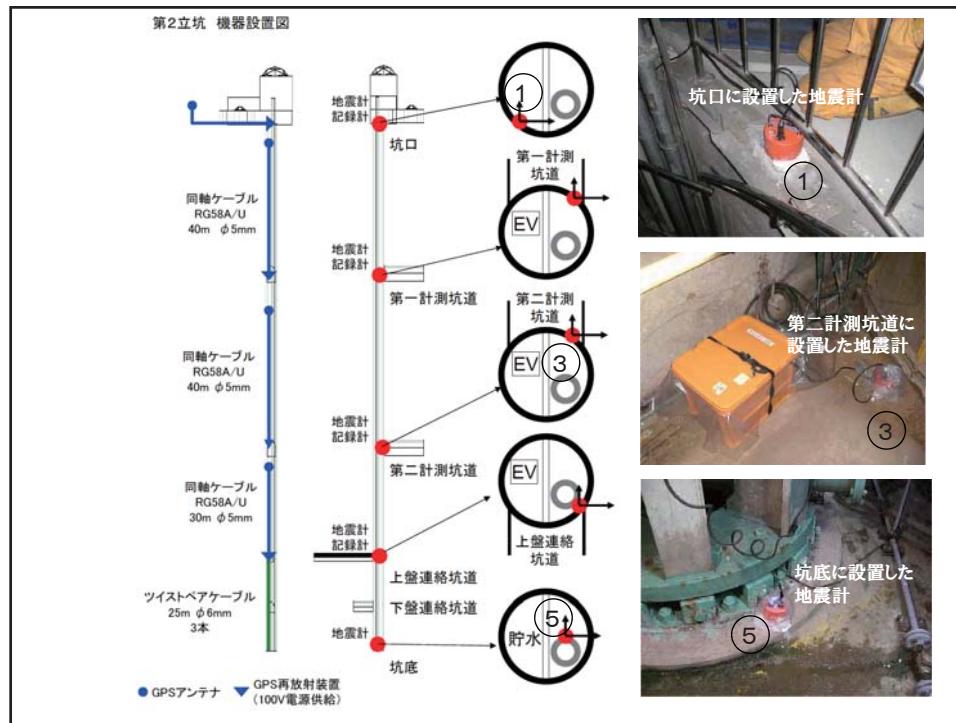


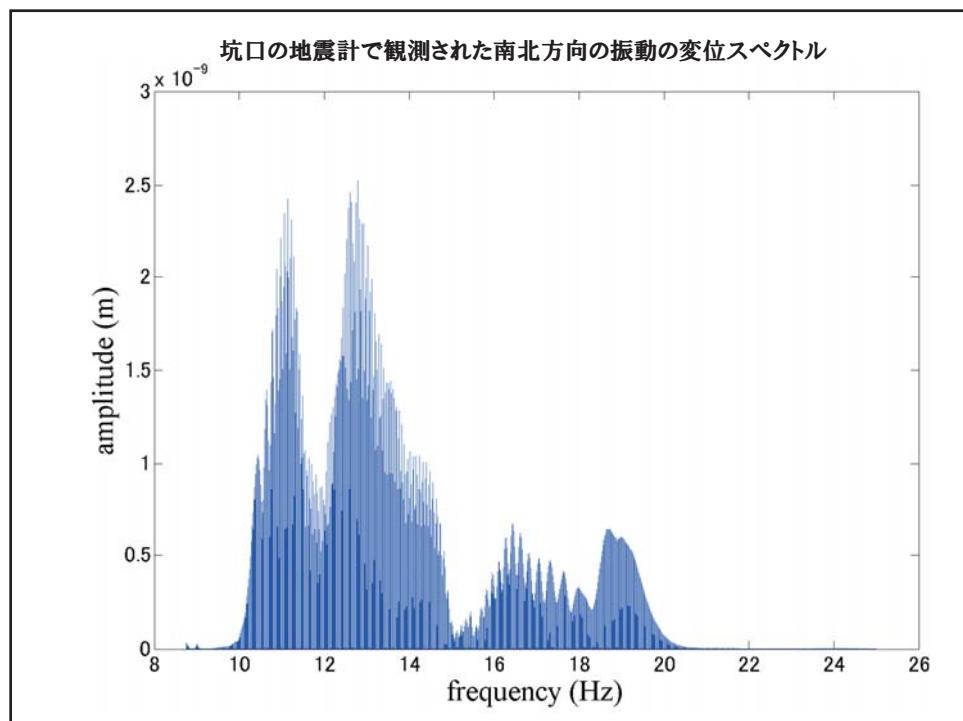
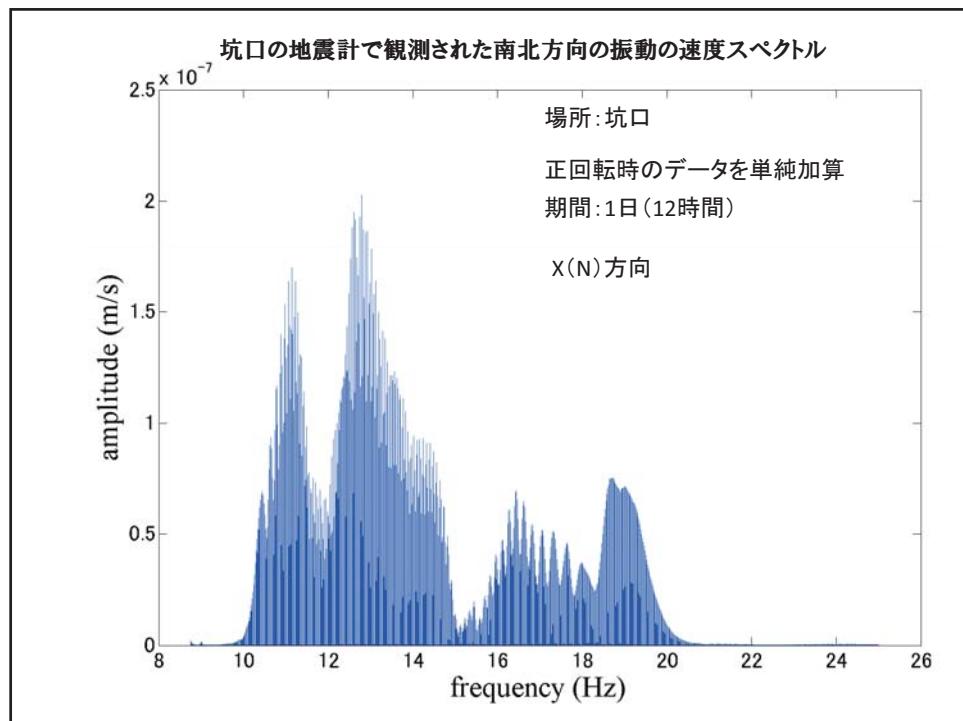
計測に使用した地震計と記録計

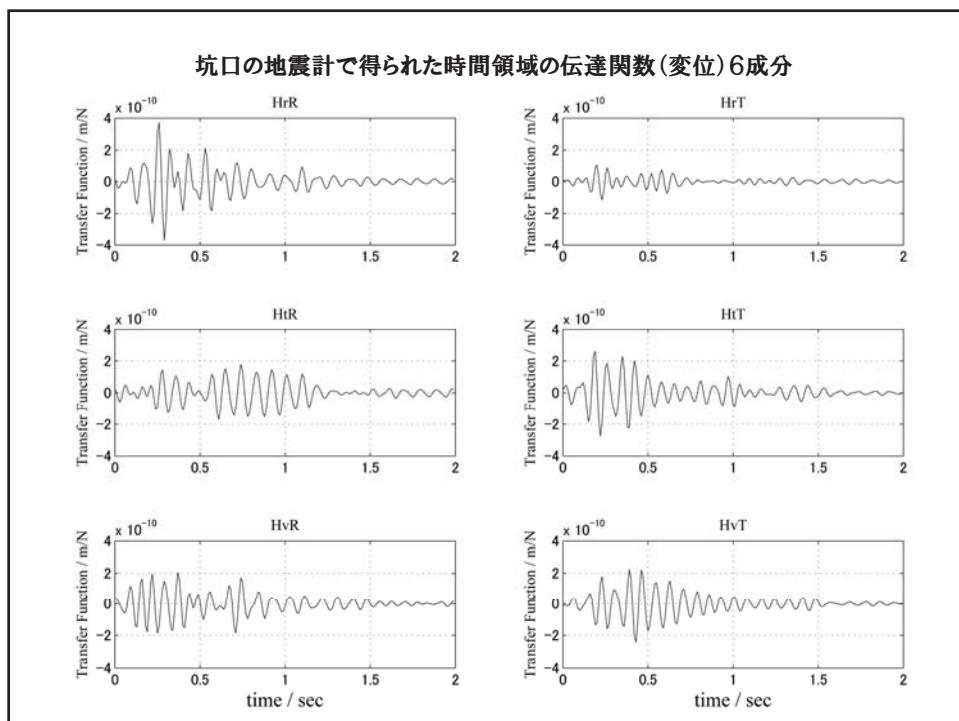
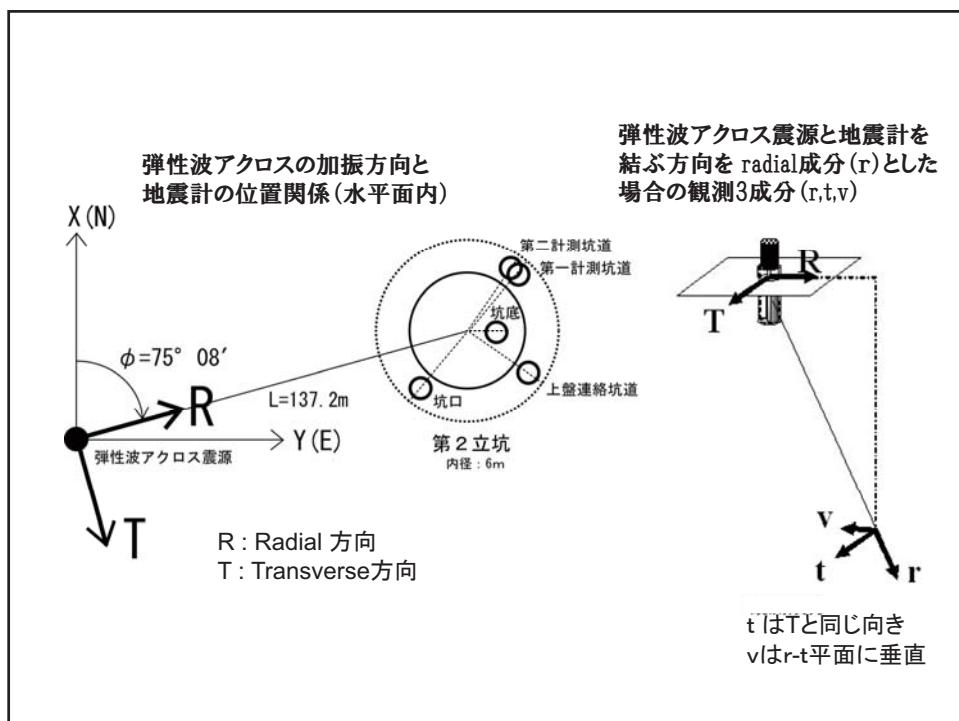
地震計：固有周波数2Hzの速度型地震計

記録計：HKS-9550(坑口, 第一計測坑道, 第2計測坑道)

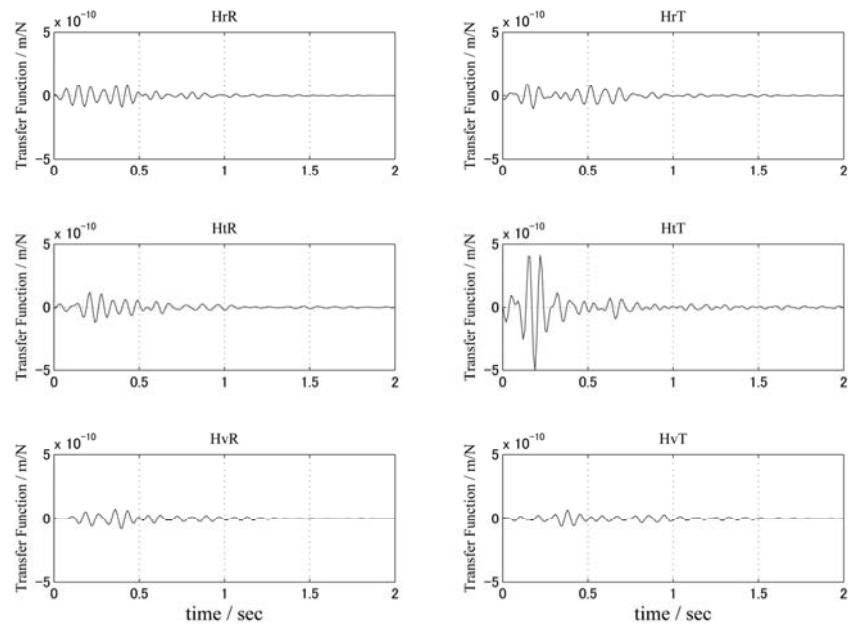
LS-7000(上盤連絡坑道, 坑底)



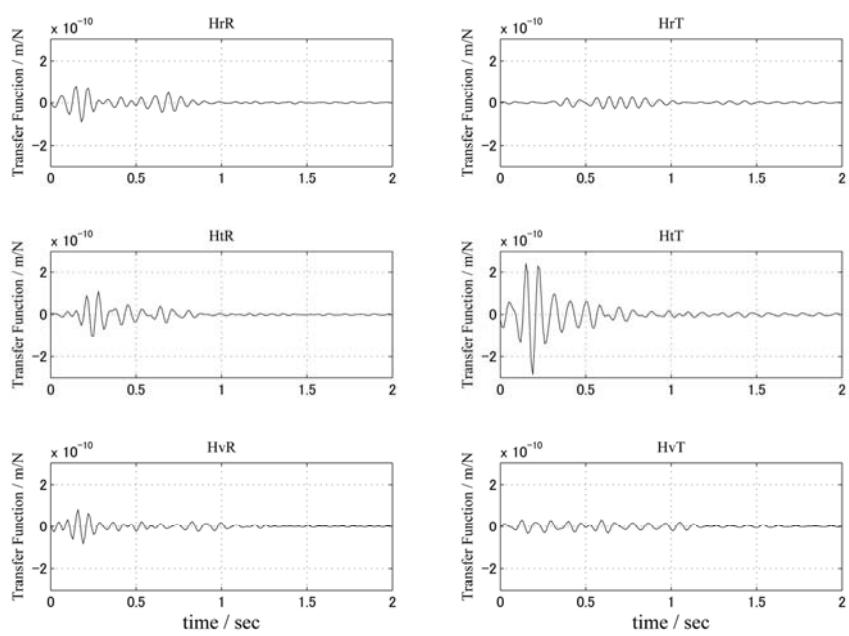




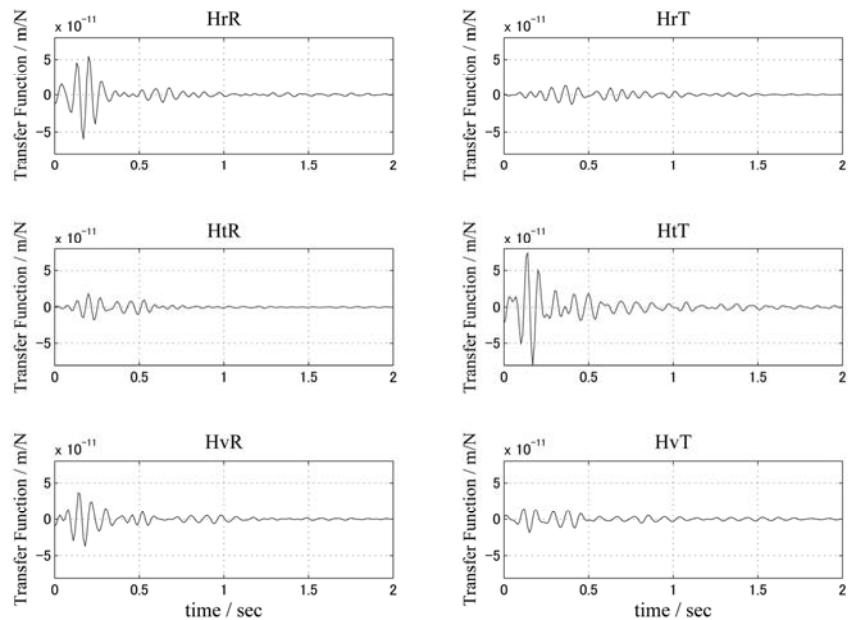
第一計測坑道(-45.5m)の地震計で得られた時間領域の伝達関数(変位)6成分



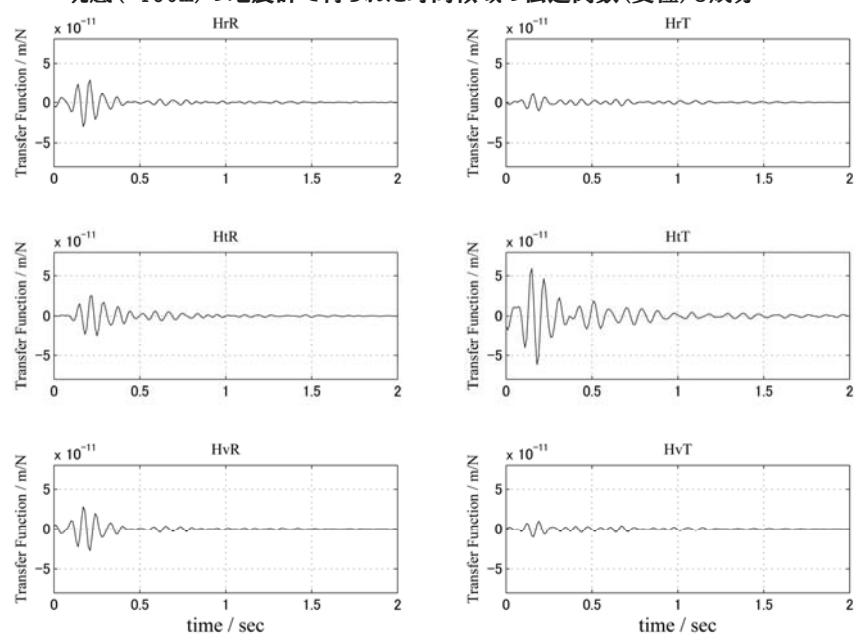
第二計測坑道(-96.0m)の地震計で得られた時間領域の伝達関数(変位)6成分



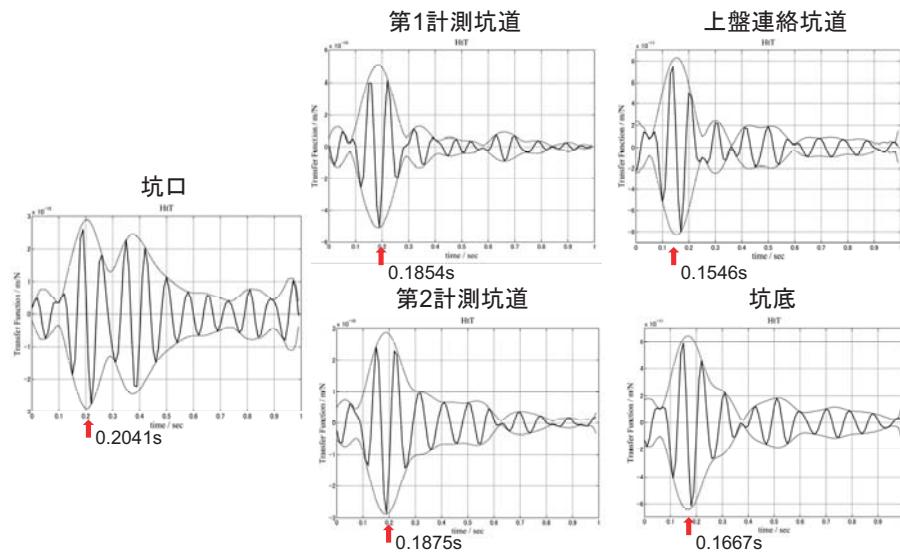
上盤連絡坑道(-126.6m)の地震計で得られた時間領域の伝達関数(変位)6成分



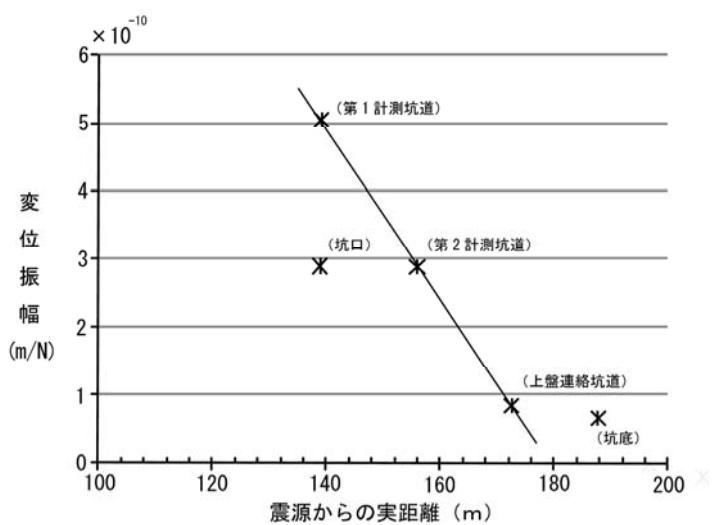
坑底(-150m)の地震計で得られた時間領域の伝達関数(変位)6成分

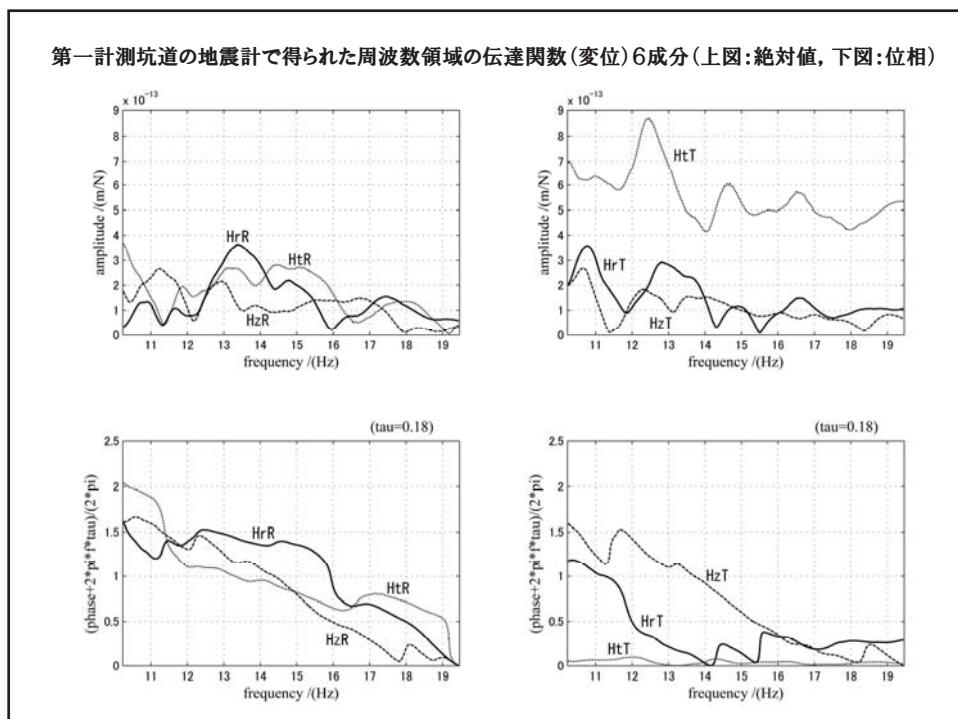
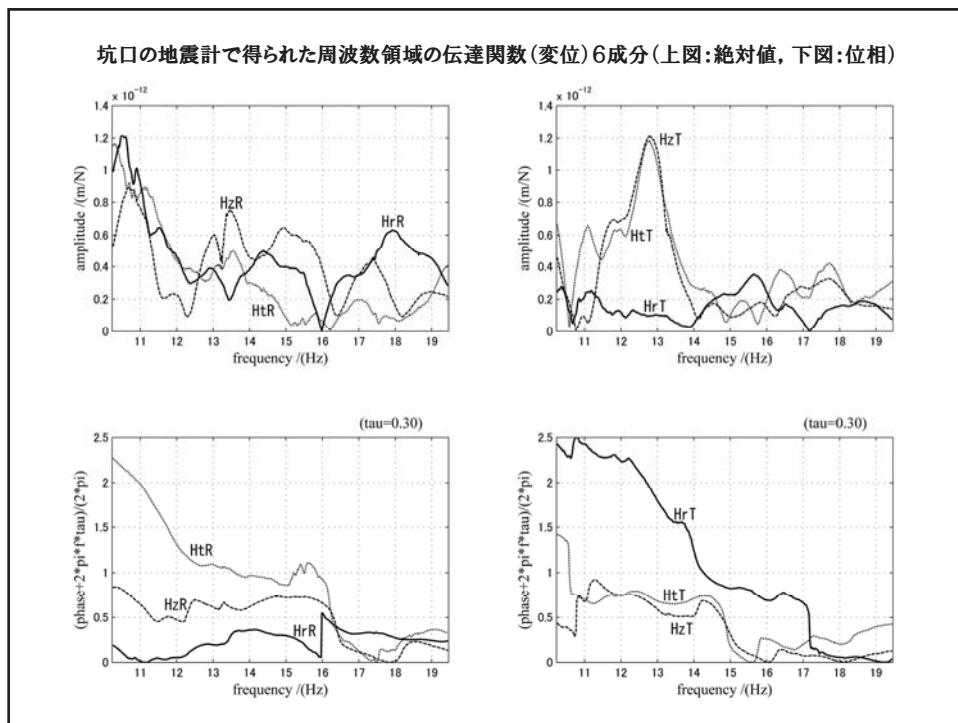


HtT成分の群速度と最大振幅

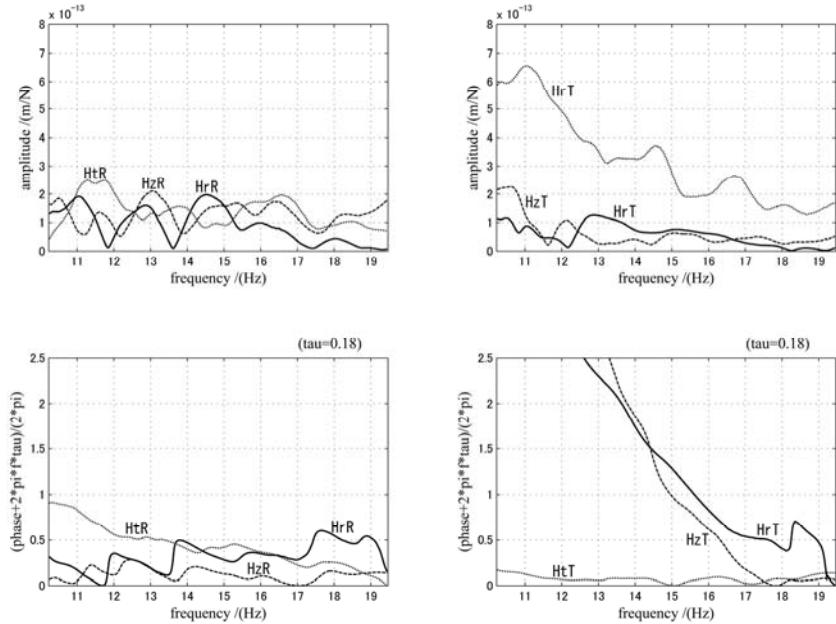


HtTの最大振幅と震源からの距離の関係

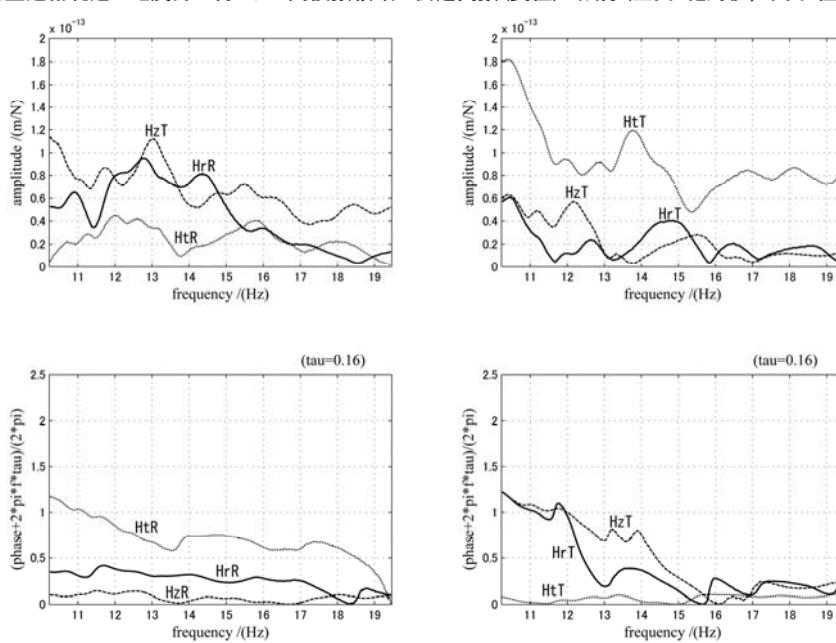




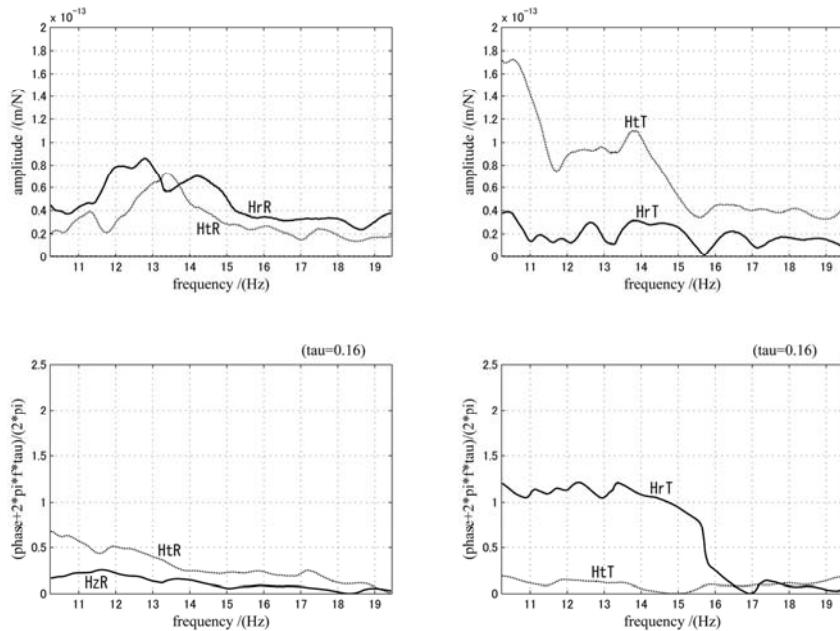
第二計測坑道の地震計で得られた周波数領域の伝達関数(変位)6成分(上図:絶対値, 下図:位相)



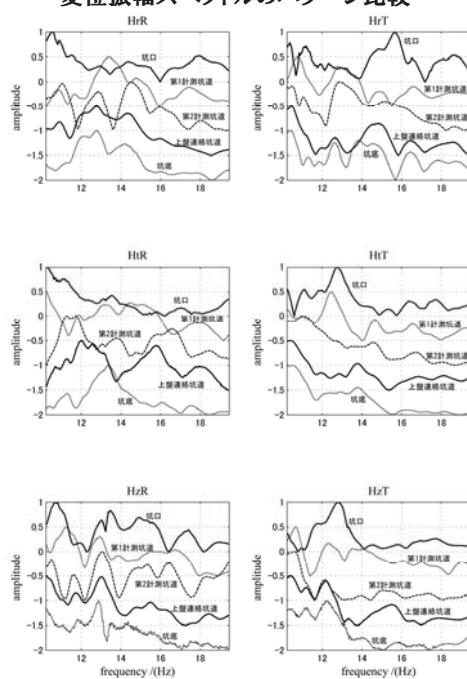
上盤連絡坑道の地震計で得られた周波数領域の伝達関数(変位)6成分(上図:絶対値, 下図:位相)



坑底の地震計で得られた周波数領域の伝達関数(変位)6成分(上図:絶対値, 下図:位相)



変位振幅スペクトルのパターン比較



2.19

アクロステータの順逆問題解析の ための波動方程式と逆波動方程式の 代数的変換

名古屋大学情報基盤センター
永井 亨

Wave governing equation of
1C1D elastic body

$$\mathcal{L} u(t, x) = e(t, x)$$

$$\begin{aligned}\mathcal{L} &= \rho(x) \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{\partial}{\partial x} \left[c(x) \frac{\partial}{\partial x} \right] \\ &= \rho(x) \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{\partial c(x)}{\partial x} \frac{\partial}{\partial x} - c(x) \frac{\partial^2}{\partial x^2}\end{aligned}$$

Wave equation in frequency domain

$$u(t, x) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} u(\omega, \kappa) \exp(i\omega t + i\kappa x) d\omega d\kappa$$

$$e(t, x) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e(\omega, \kappa) \exp(i\omega t + i\kappa x) d\omega d\kappa$$



$$\partial / \partial t = i\omega, \quad \partial / \partial x = i\kappa$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} L u(\omega, \kappa) \exp(i\kappa x) d\kappa = e(\omega, x)$$

$$L(\omega, \kappa, x) = (i\omega)^2 \rho(x) - \frac{\partial c(x)}{\partial x} (i\kappa) - c(x)(i\kappa)^2$$

$$e(\omega, x) = \int_{-\infty}^{\infty} e(\omega, \kappa) \exp(i\kappa x) d\kappa$$

Discretization

$$x_j = j\Delta x \quad (\Delta x = L/n; j = 0, 1, \dots, n-1)$$

$$\kappa_k = k\Delta\kappa \quad (-\kappa_N \leq k\Delta\kappa < \kappa_N; \Delta\kappa = \frac{2\pi}{L}; k = -\frac{n}{2}, -\frac{n}{2}+1, \dots, \frac{n}{2}-1)$$

$$\omega_w = w\Delta\omega \quad (-\omega_N \leq w\Delta\omega < \omega_N; \Delta\omega = \text{arbitrary}, w = -\frac{n_\omega}{2}, -\frac{n_\omega}{2}+1, \dots, \frac{n_\omega}{2}-1)$$

$$\sum_{k=-n/2}^{n/2-1} L(\omega_w, \kappa_k, x_j) u(\omega_w, \kappa_k) \exp\left(\frac{2\pi i}{n} jk\right) = e(\omega_w, x_j)$$

$$L(\omega_w, \kappa_k, x_j) = (i\omega_w)^2 \rho(x_j) - \frac{\partial c(x_j)}{\partial x} (i\kappa_k) - c(x_j)(i\kappa_k)^2$$

$$e(\omega_w, x_j) = \sum_{k=-n/2}^{n/2-1} e(\omega_w, \kappa_k) \exp\left(\frac{2\pi i}{n} jk\right)$$

Expressions in matrix form

$$[\mathbf{L}(\omega_w, x_j, \kappa_k) \otimes \mathbf{I}(j, k)] \mathbf{u}(\omega_w, \kappa_k) = \mathbf{e}(\omega_w, x_j)$$

$$\{\mathbf{L}(\omega_w, x_j, \kappa_k)\}_{j,k+n/2} = (i\omega_w)^2 \rho(x_j) - \frac{\partial c(x_j)}{\partial x} (i\kappa_k) - c(x_j)(i\kappa_k)^2$$

$$\{\mathbf{I}(j, k)\}_{j,k+n/2} = \exp\left(\frac{2\pi i}{n} jk\right)$$

$$\{\mathbf{L}(\omega_w, x_j, \kappa_k) \otimes \mathbf{I}(j, k)\}_{j,k+n/2} = \{\mathbf{L}(\omega_w, x_j, \kappa_k)\}_{j,k+n/2} \cdot \exp\left(\frac{2\pi i}{n} jk\right)$$

$$\mathbf{F}(k', j)[\mathbf{L}(\omega_w, x_j, \kappa_k) \otimes \mathbf{I}(j, k)] \mathbf{u}(\omega_w, \kappa_k) = \mathbf{F}(k', j) \mathbf{e}(\omega_w, x_j)$$

$$\mathbf{P}(\omega_w, \kappa_{k'}, \kappa_k) \mathbf{u}(\omega_w, \kappa_k) = \mathbf{e}(\omega_w, \kappa_{k'})$$

波動方程式

$$\mathbf{u}(\omega_w, \kappa_k) = \mathbf{R}(\omega_w, \kappa_k, \kappa_{k'}) \mathbf{e}(\omega_w, \kappa_{k'})$$

逆波動方程式

Expressions at and around discontinuity

$$y^{(j)+}(x_d) = \lim_{x \rightarrow +x_d} \frac{d^j y(x)}{dx^j} \quad (x > x_d)$$

$$y^{(j)-}(x_d) = \lim_{x \rightarrow -x_d} \frac{d^j y(x)}{dx^j} \quad (x < x_d) \quad (j = 0, 1, \dots)$$

$$y^{(j)}(x_d) = \{y^{(j)+}(x_d) + y^{(j)-}(x_d)\}/2$$

$$\Delta y^{(j)}(x_d) = y^{(j)+}(x_d) - y^{(j)-}(x_d)$$

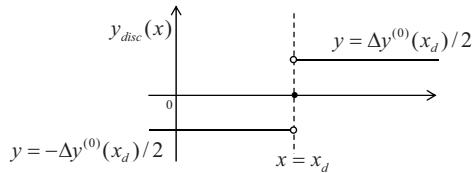
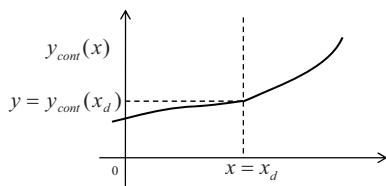
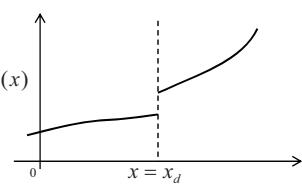
$$\Delta x = x - x_d$$

$$y_{cont}(x) = \sum_{j=0}^{\infty} y^{(j)}(x_d) \frac{\Delta x^j}{j!}$$

$$y_{disc}(x) = \sum_{j=0}^{\infty} \Delta y^{(j)}(x_d) \frac{\Delta x^j}{j!} H(x - x_d)$$

$$H(x - x_d) = \begin{cases} -1/2 & (x < x_d) \\ 0 & (x = x_d) \\ 1/2 & (x > x_d) \end{cases}$$

$$y(x) = y_{cont}(x) + y_{disc}(x)$$



Generalized polynomial expansions (GPE)

$$C^{(j)}(\Delta x) = \Delta x^j / n!$$

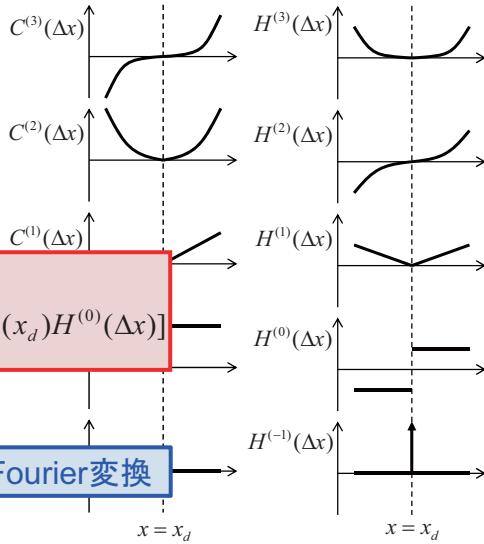
$$H^{(j)}(\Delta x) = C^{(j)}(\Delta x) H(\Delta x)$$

$$H^{(-1)}(\Delta x) = \delta(\Delta x)$$

$$y_{cont}(x) = y^{(0)}(x) - y_{disc}(x)$$

$$y_{disc}(x) = \sum_d [a_{-1}(x_d) H^{(-1)}(\Delta x) + a_0(x_d) H^{(0)}(\Delta x)]$$

通常の関数と超関数と個別にFourier変換



GPE of the pseudo-differential operator

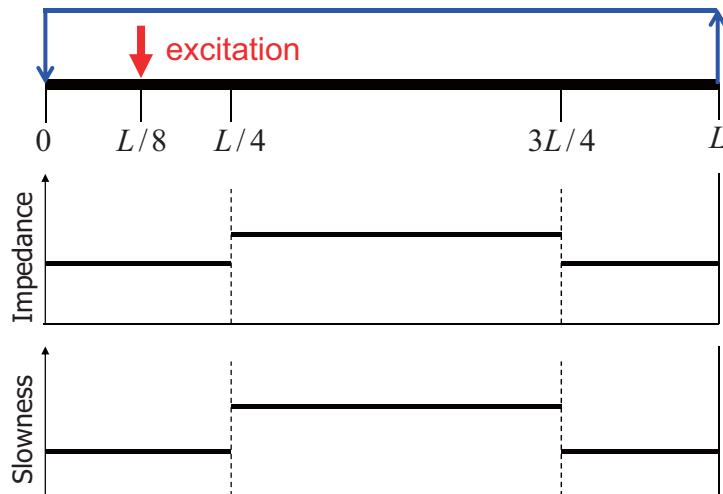
$$L(\omega_w, \kappa_k, x_j) = L_C(\omega_w, \kappa_k, x_j) + L_H(\omega_w, \kappa_k, x_j) + L_S(\omega_w, \kappa_k, x_j)$$

$$L_C(\omega_w, \kappa_k, x_j) = -\omega_w^2 \rho^{(0)}(x_j) - i \kappa_k c^{(1)}(x_j) + \kappa_k^2 c^{(0)}(x_j)$$

$$L_H(\omega_w, \kappa_k, x_j) = -\sum_{d=1}^{n_d} \{ \omega_w^2 \Delta \rho^{(0)}(x_{j_d}) + i \kappa_k \Delta c^{(1)}(x_{j_d}) - \kappa_k^2 \Delta c^{(0)}(x_{j_d}) \} \\ \times H(x_j - x_{j_d})$$

$$L_S(\omega_w, \kappa_k, x_j) = -i \kappa_k \sum_{d=1}^{n_d} c^{(0)}(x_{j_d}) \delta(x_j - x_{j_d})$$

Simple case



Analytic solutions

- モード解析：固有関数 $X_n(x)$ の線形結合であらわす

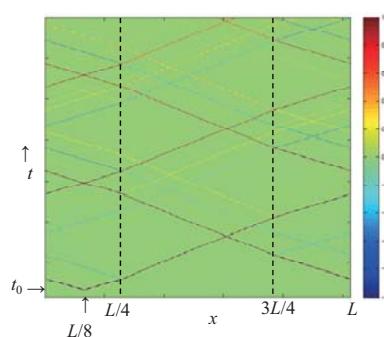
$$u(t, x) = \sum_{n=1}^{\infty} T_n(t) X_n(x)$$

- 周波数空間での求解

$$u(\omega, x) = \sum_{n=0}^3 u_n^r(\omega) \exp(-i\omega s_n x) + u_n^l(\omega) \exp(i\omega s_n x)$$

1. ω 平面の実軸上で積分

2. determinant=0をみたす固有角周波数 ω_n について留数定理により計算



2.20

サウジアラビアにおける 石油貯留層の変動と誘発地震解析

(H21年度～／4年計画?)

静岡大学・理

増田俊明（代表）

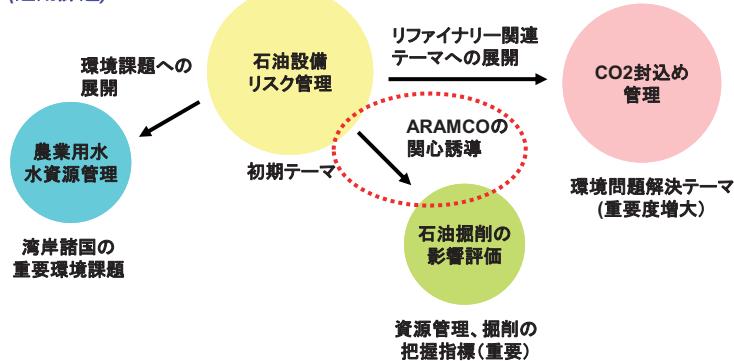
（静大・誘発地震解析チーム）

生田領野・（客員）笠原順三・藤井直之・國友孝洋・

（研究顧問）伊藤 潔・（研究員）高木由里子

JCCP事業 衛星データによる地盤変動把握

目的(適用課題)



手段(適用技術)

顕在化した地表面変動の把握

InSAR

● 地下構造の変動把握

Passive seismicity analysis

Double Difference等

Microseismic continuous monitoring

ACROSS

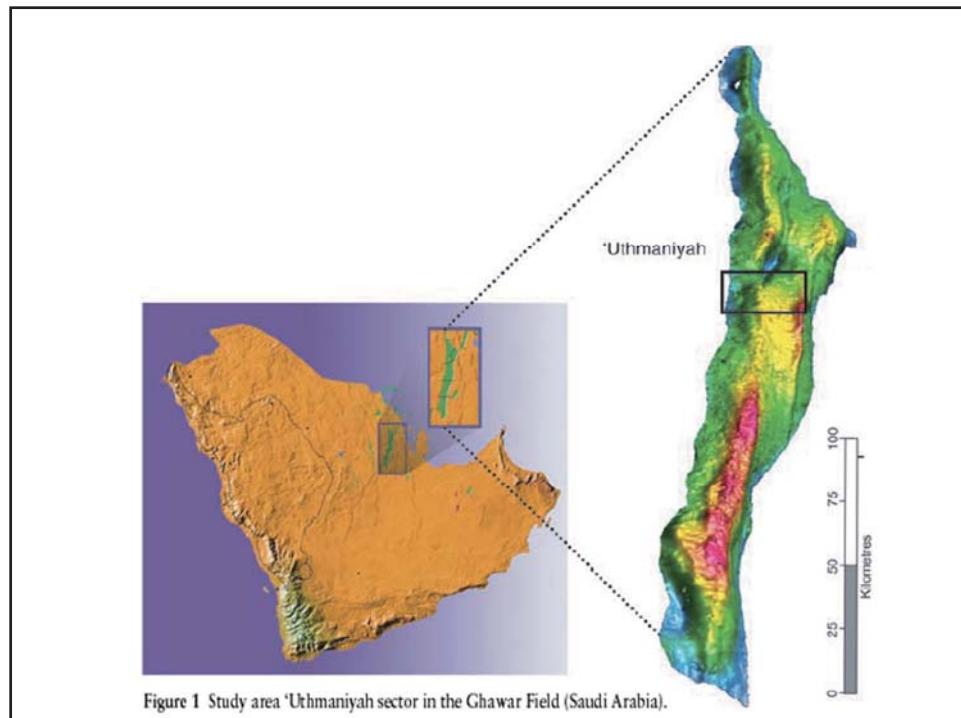
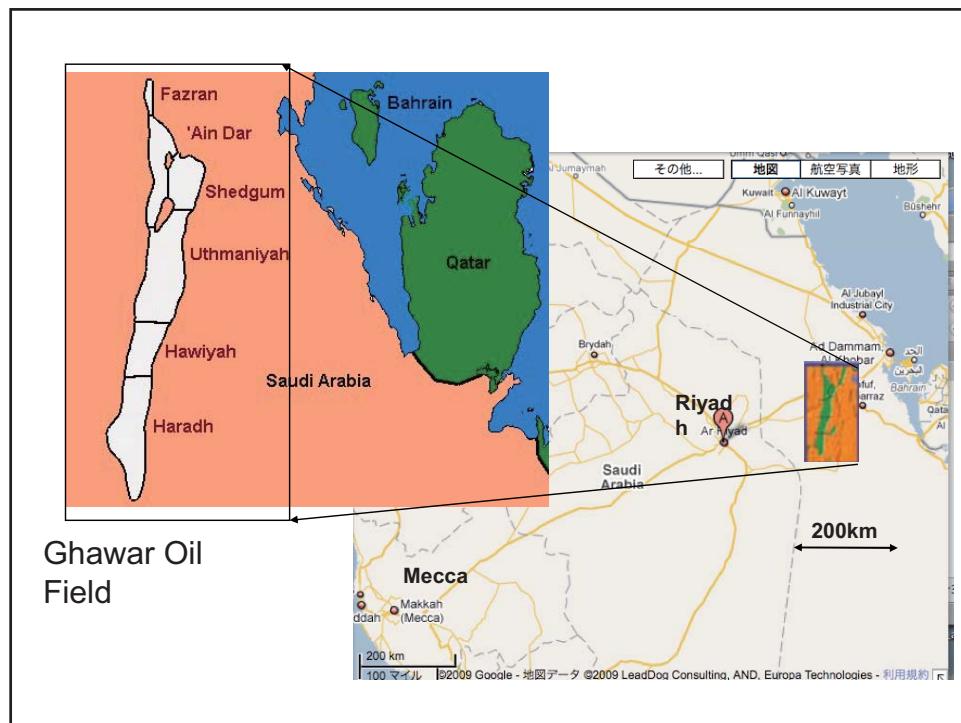
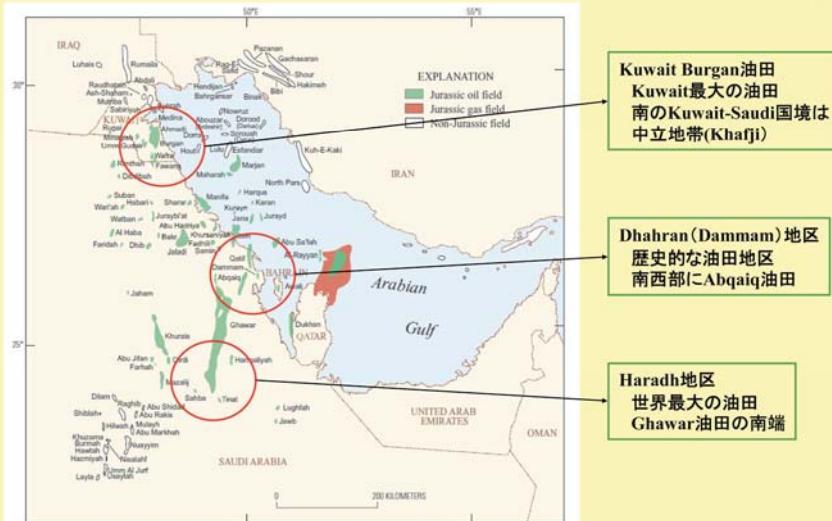


Figure 1 Study area 'Uthmaniyyah sector in the Ghawar Field (Saudi Arabia).

ご紹介する対象油田地域(アラビア湾西岸)



出展:U.S.Geological Survey Bulletin 2202-E

CENTRAL COMPUTER SERVICES CO.,LTD.

28

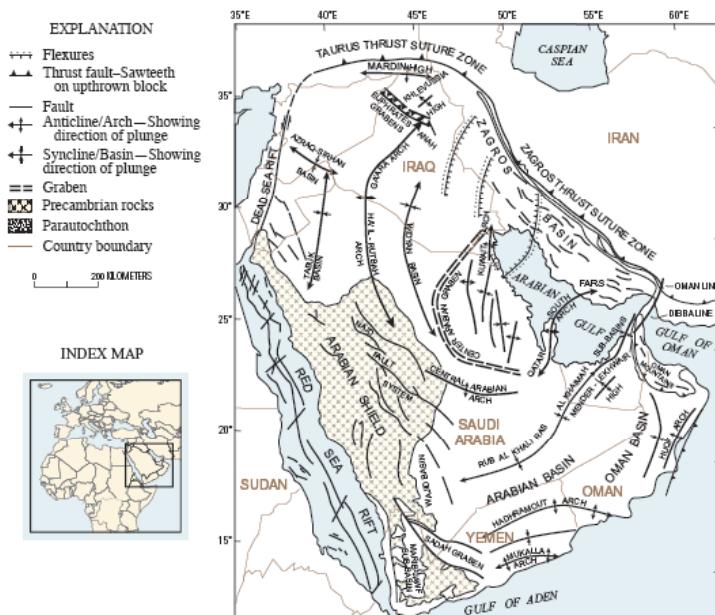
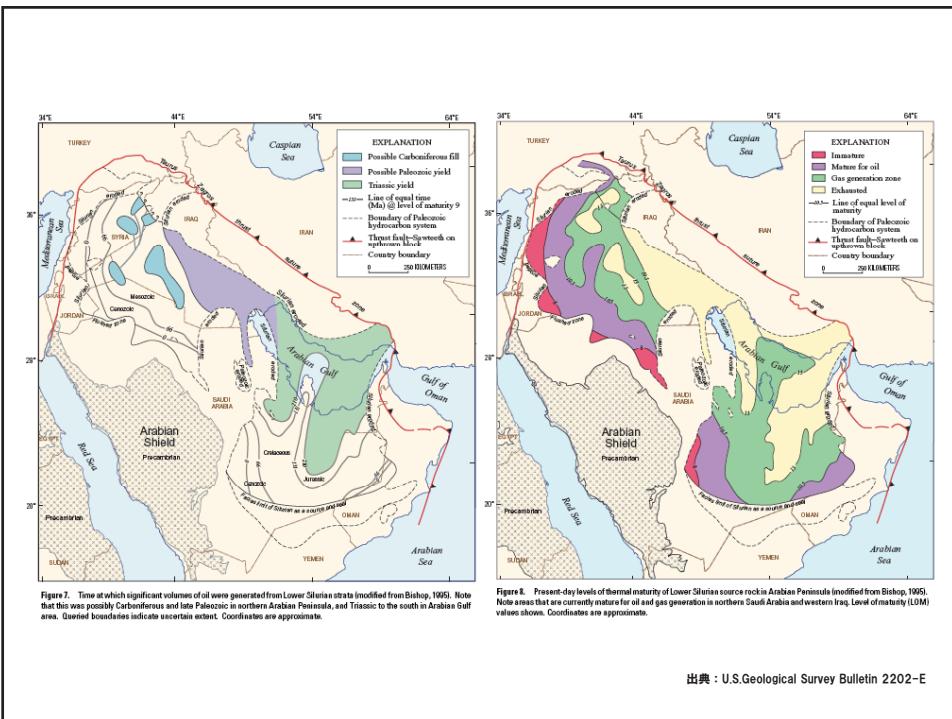


Figure 1. Structural provinces of Arabian Peninsula (modified from Al-Laboun, 1986). Coordinates are approximate.

出典: U.S.Geological Survey Bulletin 2202-E



3. プログラム

アクロスワークショップ「アクロス技術の現状と今後の展望」 プログラム

2010年2月24日（水）

■13時35分～15時45分

- 101 開会挨拶／杉原弘造（JAEA）
- 102 アクロス 来し方、行く末／熊澤峰夫（名古屋大学）
- 103 弹性波アクロスの送信と観測～土岐送信を中心に～／國友孝洋（JAEA）
- 104 森町弹性波アクロスの信号解析／吉田康宏（気象研究所）
- 105 アクロス信号の走時とプレート境界反射点の推定／勝間田明男（気象研究所）
- 106 Hi-net 下山周辺における地震計アレイを用いた森町弹性波アクロスの信号解析／岩切一宏（気象研究所）

（休憩）

■16時00分～17時40分

- 107 野島断層近傍における断層強度回復過程の長期モニタリング／生田領野（静岡大学）
- 108 モニタリングのための直進加振機の性能評価／山岡耕春（名古屋大学）
- 109 凰来アレイ連続観測記録のアクロス解析／渡辺俊樹（名古屋大学）
- 110 気体圧力と低摩擦材料を併用した省エネ型弹性波 ACROSS 送信装置開発の現状／伊勢智彦・宮武拓（兵庫県立大学）

2010年2月25日（木）

■8時50分～10時55分

- 201 弹性波アクロス送信技術のまとめ／國友孝洋（JAEA）
- 202 弹性波アクロスによる MIU 研究坑道掘削のモニタリングの試み／長谷川健（JAEA）
- 203 電磁アクロスによる連続送受信観測／中島崇裕（JAEA）
- 204 電磁アクロスによる MIU 研究坑道掘削モニタリングの試み／長谷川健（JAEA）
- 205 電磁アクロスデータの新しい解析法／中島崇裕（JAEA）

（休憩）

■11時10分～12時50分

- 206 日本の原発の地震安全性向上の技術的方向／東原紘道（防災科技研）
- 207 アクロスによる原子力施設の振動特性精密評価に向けた試み（その1）／熊澤峰夫（名古屋大学）
- 208 アクロスによる原子力施設の振動特性精密評価に向けた試み（その2）／久保文男（VDOC(株)）
- 209 アクロスによる構造物の振動特性計測の試み／長谷川健（JAEA）

（昼食）

■13時20分～15時00分

- 210 波動方程式と逆波動方程式の代数的変換による順問題計算／永井亨（名古屋大学）
- 211 遺伝的アルゴリズムをもちいた弹性波動場の物性パラメータ推定／上田一康（名古屋大学）

212 アクロスに期待するもの＋自由討論／藤井直之（静岡大学）

213 閉会挨拶／長谷川健（JAEA）

司 会：長谷川健（JAEA）

事務局：浅井秀明（JAEA）

4. おわりに

今回のアクロスワークショップでは、各人の講演に対する質疑応答、また最後に設けられた自由討論において、活発な議論が交わされた。また ACROSS についての将来性、今後の展望、他技術への転用などについても様々な意見が飛び交った。今回のワークショップで行われた議論については、いずれ各人の研究成果として論文、学会等様々な場で成果が発信されるものと思われる。

本報告書は今回のワークショップでご発表頂いた各人の資料を収録したものであるが、一部については発表後の成果等も付け加えた資料があることをここに付記しておく。また各人の資料における著作権はいずれも各人の基に帰すことを付記する（日本原子力研究開発機構所属を除く）。

謝辞

アクロスワークショップ「アクロス技術の現状と今後の展望」では国内の ACROSS 研究者に多数ご参加、ご講演をして頂き、ACROSS 研究における様々なご意見、ご助言を頂くと共に、今後の展望について様々な議論がなされた。改めてこの場で、感謝の意を表したい。また、今回の会議報告書作成にあたり、ご講演に使用された資料の収録、印刷、配布についても快くご承諾頂いたことについても感謝する。

参考文献

- 1) 熊澤峰夫, 國友孝洋, 横山由紀子, 中島崇裕, 鶴我佳代子 : アクロス : 理論と技術開発, 将来展望, サイクル機構技報, 9, pp.115-129 (2000).
- 2) Kumazawa, M., T. Kunitomo, T. Nakajima, K. Tsuruga, Y. Hasada, H. Nagao, H. Matsumoto, J. Kasahara, N. Fujii, and N. Shigeta : Development of ACROSS (Accurately Controlled, Routinely Operated, Signal System) to realize constant monitoring the invisible Earth's interiors by means of stationary coherent elastic and electromagnetic waves, JAEA-Research 2007-033, 150p. (2007).
- 3) 長谷川健, 國友孝洋, 中島崇裕, 熊澤峰夫, 黒田英高, 弥富洋介, 浅井秀明, 松井裕哉 : 超深地層研究所研究の工学技術への ACROSS の応用に関する検討—2007 年度年報—, JAEA-Evaluation 2008-002, 60p. (2009).
- 4) 長谷川健, 國友孝洋, 中島崇裕, 浅井秀明, 弥富洋介, 松井裕哉 : 超深地層研究所研究の工学技術への ACROSS の応用に関する検討—2008 年度年報—, JAEA-Evaluation 2009-006, 119p. (2009).
- 5) 長谷川健, 國友孝洋, 中島崇裕, 浅井秀明, 弥富洋介, 松井裕哉 : 超深地層研究所研究の工学技術への ACROSS の応用に関する検討—2009 年度年報—, JAEA-Evaluation 執筆中.
- 6) 例えば Anatoly S. Alekseev, Boris M. Glinsky, Valery V. Kovalevsky : Active Monitoring of the Medium with the Use of Seismic Vibrators: Experimental Systems and the Results of Works., Proceedings of 1st International Workshop on Active Monitoring in the Solid Earth Geophysics, June 30 - July 2, 73-77, 2004.
- 7) 例えば Liao Chengwanga : Singular Value Decomposition in Active Monitoring Data Analysis, in J.Kasahara, V. Korneev, and M. Zhdanov editors:Active Geophysical Monitoring, Vol.40, Handbook of Geophysical Exploration, pp.421-430, 2010, Elsevier.

各発表資料内の参考文献

【2.2 弹性波アクロスの送信と観測～土岐送信を中心として～】

- ・國友孝洋 : 弹性波アクロス送信規約試案---中部地域における送信周波数の割り当て---, 日本地震学会講演予稿集 2006 年度秋季大会, C027, p.92 (2006).
- ・鶴我佳代子・笠原順三・三ヶ田均・山岡耕春・藤井直之 : 非アスペリティのマッピングから地殻内部の常時監視へ, 地学雑誌, 115, pp.51-71, (2006).

【2.3 森町弾性波アクロスの信号解析】

- ・勝間田明男, 吉田康宏, 岩切一宏 : 弹性波アクロス送信波のフィリピン海プレート境界反射点, 日本地球惑星連合 2008 年大会予稿集, O135-003 (2008).
- ・Iidaka, T., T. Iwasaki, T. Takeda, T. Moriya, I. Kumakawa, E. Kurashimo, T. Kawamura, F. Yamazaki, K. Koike, and G. Aoki, : Configuration of subduction Philippine Sea plate and crustal structure in the central Japan region, Geophys. Res. Lett., 30(5), 1219, doi: 10.1029/2002GL016517 (2003).

【2.4 アクロス信号の走時とプレート境界反射点の推定】

- 弘瀬冬樹, 中島淳一, 長谷川昭 : Double-Difference Tomography 法による西南日本の 3 次元地震波速度構造およびフィリピン海プレートの形状の推定, 地震, 第 2 輯, 60, pp.1-20 (2007).
- Kodaira, S., Hidaka, T., Kato, A., Park, J.-d., Iwasaki, T. and Kaneda, Y., : High pore fluid pressure may cause silent slip in the Nankai trough. Science, 28, May, 1295-1298 (2004).
- Katsumata, A., : Depth of the Moho discontinuity beneath the Japanese islands estimated by travelttime analysis, J. Geophys. Res., 115, B04303, doi:10.1029/2008JB005864 (2010).
- Iidaka, T., T. Iwasaki, T. Takeda, T. Moriya, I. Kumakawa, E. Kurashimo, T. Kawamura, F. Yamazaki, K. Koike, and G. Aoki, : Configuration of subduction Philippine Sea plate and crustal structure in the central Japan region, Geophys. Res. Lett., 30(5), 1219, doi: 10.1029/2002GL016517 (2003).

【2.6 野島断層近傍における断層強度回復過程の長期モニタリング】

- Tadokoro, K., and M. Ando, Evidence for rapid fault healing derived from temporal changes in S wave splitting, Geophys. Res. Lett., 29, 10.1029/2001GL013644 (2002).

【2.8 凤来アレイ連続観測記録のアクロス解析】

- 國友孝洋 : 弹性波アクロス送信規約試案---中部地域における送信周波数の割り当て---, 日本地震学会講演予稿集 2006 年度秋季大会, C027, (2006).

【2.12 電磁アクロスによる連続送受信信号観測】

- Nakajima, T., Kunitomo, T., Nagao, H., Kumazawa, M., and Shigeta N., : EM-ACROSS system and corresponding tensor transfer functions in diffusion field region, in J.Kasahara, V. Korneev, and M. Zhdanov editors:Active Geophysical Monitoring, Vol.40, Handbook of Geophysical Exploration, pp.177-191, 2010, Elsevier.

【2.14 電磁アクロスデータの新しい解析法】

- Hasada, Y., Kumagai, H., and Kumazawa, M., : Autoregressive modeling of transfer functions in frequency domain to determine complex travel times, Earth Planets Space, V.53, pp.3-11 (2000).
- Ward, S. H. and Hohmann, G. W., : Electromagnetic theory for geophysocal application, in applied geophysics Vol.1, edited by M. N. Nabighian, pp.131-312 (1987), Society of Exploration Geophysicists, Oklahoma.
- 松尾公一, 根木健之, 横井浩一, 高橋武春, 手島稔 : 幌延深地層研究計画における電磁法による大曲断層調査, 核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書, JNC TJ5410 2004-002, 161p. (2004).

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度、質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比體積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) 、濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の) 1	1
比透磁率 ^(b)	(数字の) 1	1

(a) 量濃度(amount concentration)は臨床化学の分野では物質濃度(substance concentration)ともよばれる。

(b) これらは無次元あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	他のSI単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b) m/m m ² m ² s ⁻¹
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b) Hz
周波数	ヘルツ ^(d)	N	m kg s ⁻²
力	ニュートン	Pa	N/m ² m ⁻¹ kg s ⁻²
圧力、応力	パスカル	J	N m m ² kg s ⁻²
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	W	J/s m ² kg s ⁻³
仕事率、工率、放射束	ワット	C	s A
電荷、電気量	クーロン	V	W/A m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
電位差(電圧)、起電力	ボルト	F	C/V m ² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
静電容量	ファラード	Ω	V/A m ² kg s ⁻³ A ⁻²
電気抵抗	オーム	S	A/V m ² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
コンダクタンス	ジーメンス	Wb	Vs m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	エーベル	T	Wb/m ² kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	テスラ	H	Wb/A m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	度	℃	K
光度	ルーメン	lm	cd sr ^(e) lm/m ² m ² cd s ⁻¹
放射性核種の放射能 ^(f)	ルクス	Ix	lm
吸収線量、比エネルギー分与、カーマ	ベクレル ^(d)	Bq	J/kg m ² s ⁻²
線量当量、周辺線量当量、方向性線量当量、個人線量当量	グレイ	Sv	J/kg m ² s ⁻²
酸素活性	シーベルト ^(g)	kat	s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。

(b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。

(c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを表し方の中に、そのまま維持している。

(d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。

(e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同じである。したがって、温度差や温度間隔を表す數値はどちらの単位で表しても同じである。

(f) 放射性核種の放射能(activity referred to a radionuclide)は、しばしば誤った用語で“radioactivity”と記される。

(g) 単位シーベルト(PV,2002,70,205)についてはCIPM勧告2(CI-2002)を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	m ¹ kg s ⁻¹
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ²
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱流密度、放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
熱容量、エンタルピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比熱容量、比エンタルピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ³ sA
表面電荷密度	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ² sA
電束密度、電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ² sA
誘電率	ファラード毎メートル	F/m	m ³ kg s ⁻⁴ A ²
透過率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ¹
モルエンタルピー、モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ¹
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ sA
吸収線量	グレイ毎秒	Gy/s	m ⁻³ s ⁻²
放射強度	ワット毎メートル	W/sr	m ¹ m ² kg s ⁻³ =m ² kg s ⁻³
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ⁻³ s ⁻¹ mol

表5. SI接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨ	タ	Y	10 ⁻¹	デシ
10 ²¹	ゼ	タ	Z	10 ⁻²	センチ
10 ¹⁸	エ	ク	E	10 ⁻³	ミリ
10 ¹⁵	ペ	タ	P	10 ⁻⁶	マイクロ
10 ¹²	テ	ラ	T	10 ⁻⁹	ナノ
10 ⁹	ギ	ガ	G	10 ⁻¹²	ピコ
10 ⁶	メ	ガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト
10 ³	キ	ロ	k	10 ⁻¹⁸	アト
10 ²	ヘ	ク	h	10 ⁻²¹	ゼット
10 ¹	デ	カ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=1(60)'=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)"=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L	1L=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1t=10 ³ kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852m
ノット	b	1 b=100fm ² =(10 ⁻¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネバール	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイーン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ボアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フォート	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² 10 ⁴ x
ガル	Gal	1 Gal=1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1G cm ² =10 ⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド	Oe	1 Oe△(10 ³ /4n)A m ⁻¹

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「△」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1cal=4.1858J (15°Cカロリー), 4.1868J (ITカロリー) 4.184J (熱化学カロリー)
ミクロシン	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

