

地震波で地下を見る

地震と火山を地震波で捉える

山岡耕春

名古屋大学大学院環境学研究科

地震火山研究センター

科学の夢

SFが与える大きな影響

哲学的背景

- ・科学・技術に関する考え方
- ・正義
- ・人類の幸福

鉄腕アトム（手塚治虫）

→ ロボット研究

ドラえもん（藤子不二雄）

→ ロボット + A I

ブラックジャック（手塚治虫）

→ 医学・医療

日本沈没（小松左京）

→ 地球科学・地震・火山

この画像は著作権の都合により削除しました。

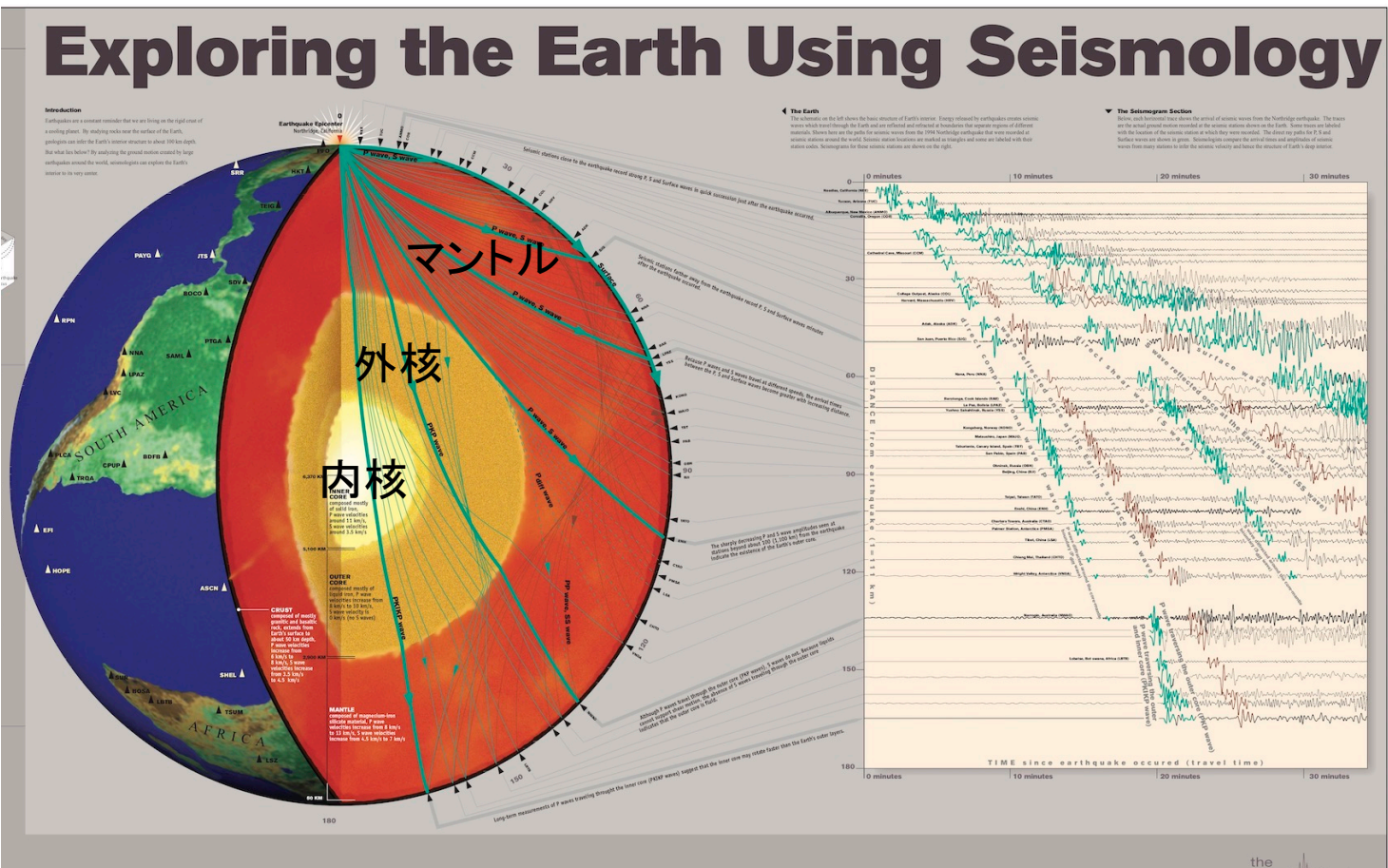
地震波をつかって何が解明されてきたか

地球の内部構造

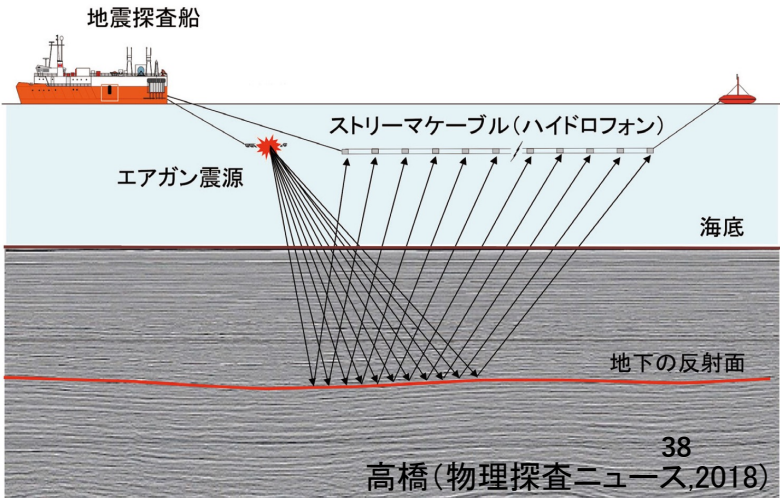
大きな地震が起きると、地震波が世界中の地震計で観測される。

地震計に波が到着する時刻から、地球内部の地震波の伝わる速さを推定できる。

マントルと内核は固体、外核は液体であることもわかっている。



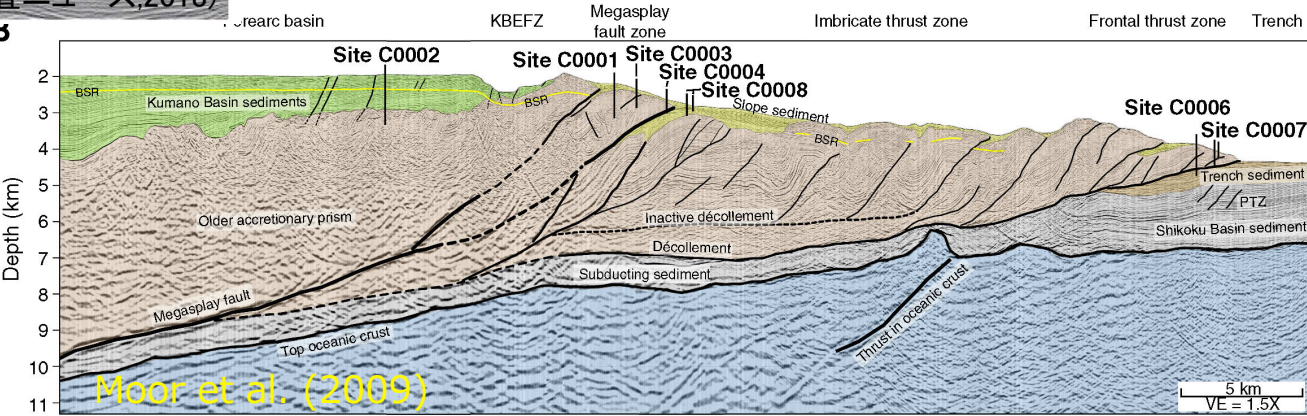
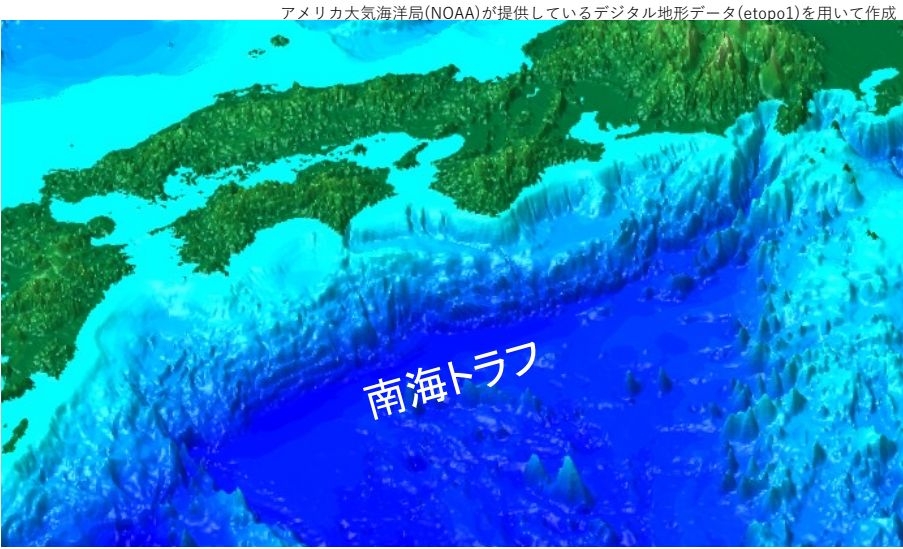
地震波をつかって何が解明されてきたか



<http://www.seg.org/letter/88fda090ca8de2dba3e308edba8e8c9f9c8fa399.pdf> 2023.6.14

地殻の浅い部分の構造

エアガン (海) やバイブレータ (陸) を用いてデータ処理により、構造を画像化する。



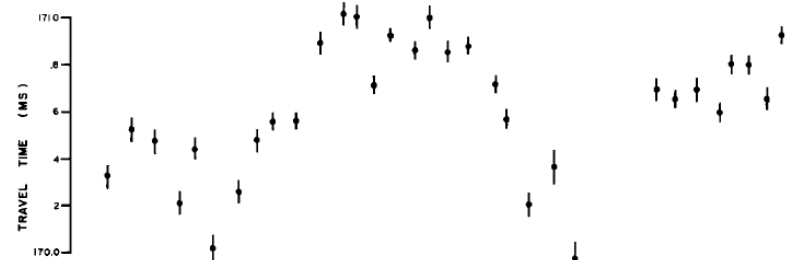
- 地下の構造を調査する手法は成熟している。
- その手法を繰り返し実施する方法での例はあるが、ごく少ない。
- 連続的に地下構造の時間変化を知る方法を実証的に研究しよう。

例1) 池にエアガンを入れて発震し、地震は速度の変化を観測した。(Reasenberg & Aki, 1974)

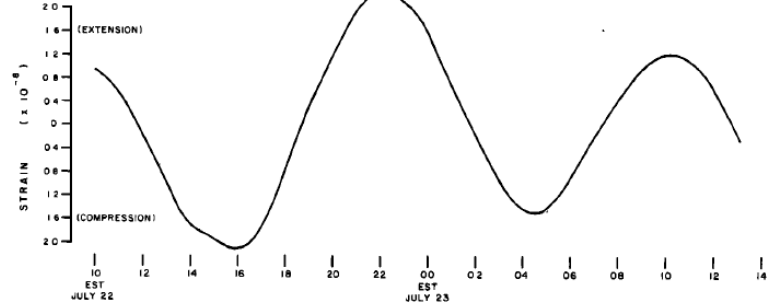
潮汐と同期した？

→ 1日周期の変化かもしれない

地震波の伝わる時間の変化



潮汐によるひずみ



穴を掘って水をため、エアガンで発震。10-20mの距離で測定した。
Reasenberg & Aki (1974)

構造 から 構造の変化へ

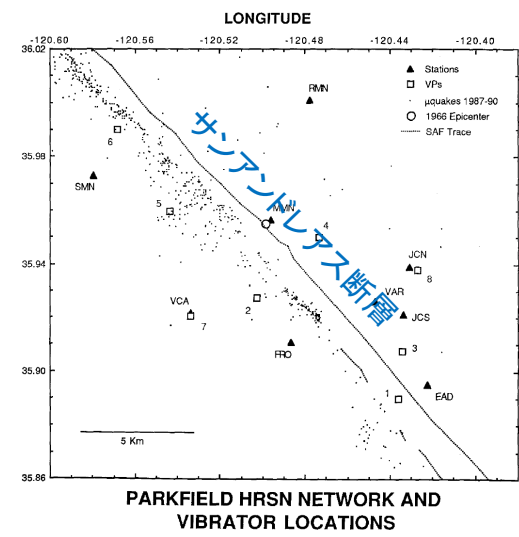
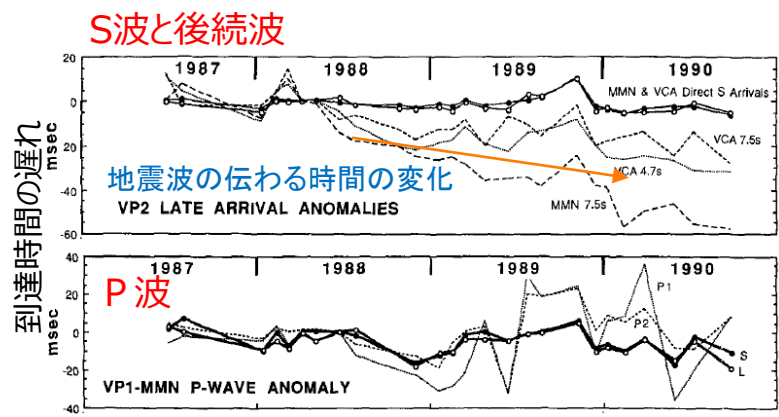
例2) バイブロサイス (右写真) を用いて、米国カリフォルニア州のサンアンドレアス断層沿いのパークフィールドで、3年間にわたる繰り返し測定 (2ヶ月に1回程度) Karageorge et al. (1992)



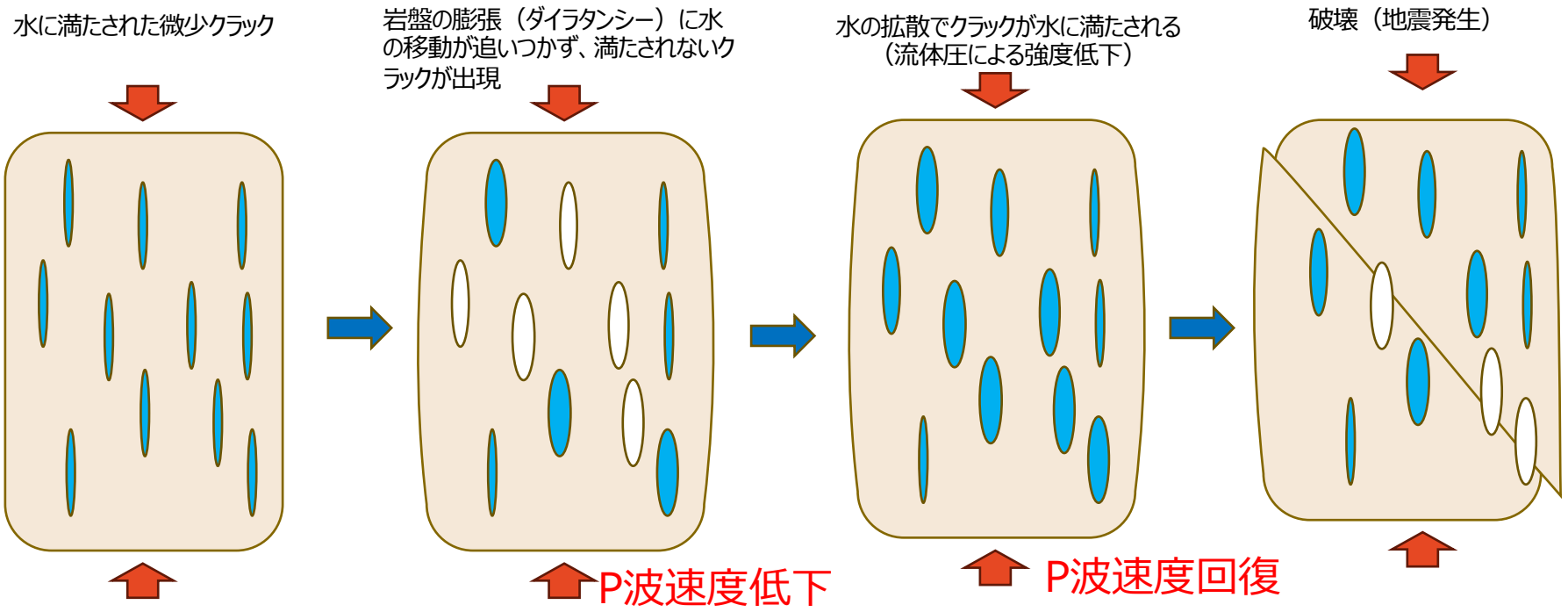
バイブロサイス (地下構造調査に用いられる)

パークフィールドの地震 1857, 1881, 1901, 1922, 1934, 1966
次は1988年頃? という予想に基づいて、待ち構えて観測を行っていた。

地震発生前に地震波速度が低下するという仮説の検証を目的
10-20ミリ秒程度のばらつきがある。
長期的な地震波速度の増加
地震は発生せず、検証はできないまま終わった。



ダイラタンシー水拡散モデル (Nur 1972, Scholz et al. 1973)



構造 から 構造の変化へ

二人の先生との出会い

熊澤峰男

地震学に「革新的な」手法の導入に熱意

ACROSSを始める

(Accurately Controlled Routinely Operated Signal System)

名大助手→助教授→東大教授→名大教授(1993-1997)

藤井直之

熊澤のアイデアを強力にサポート

東大助手→神戸大学→名古屋大学教授 (1991-2006)

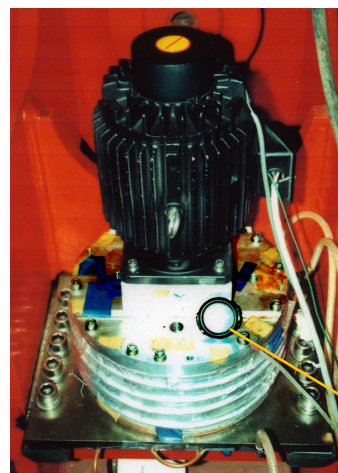
地震予知を目指すにしても震源を見えるようにする（モニタリングする）こと無しには始まらない。どのように見るかを検討。
変化を高精度に捉えることが本質的に重要である！

高度に制御された正弦波を信号源に用いる



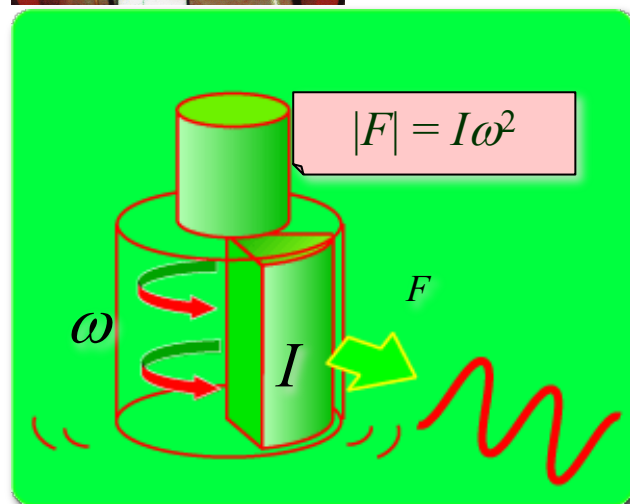
熊澤峰男

藤井直之



ACROSS
Proto-type
(1993)

腕時計



時間領域 と 周波数領域

時間 T で繰り返す信号 $f(t)$ ($T/2 < t < T/2$) は、
フーリエ変換によって

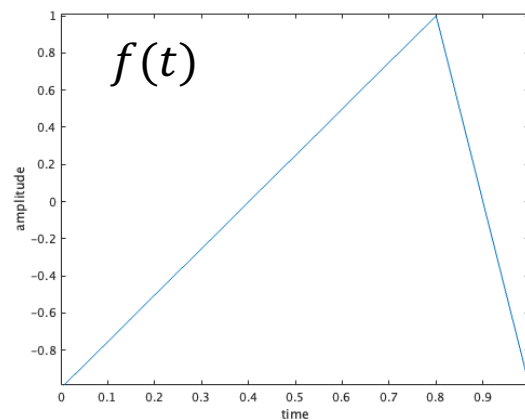
$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n e^{\frac{2\pi n t}{T} i} \quad (1)$$

$$A_n = \int_{-T/2}^{T/2} f(t) e^{-\frac{2\pi n t}{T} i} dt \quad (2)$$

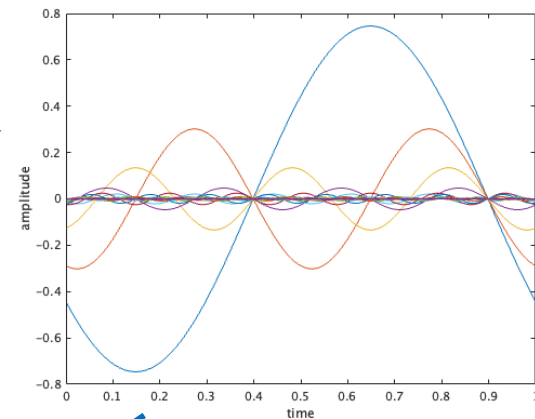
となり、相互に変換可能である。
つまり、時間領域の信号 $f(t)$ と周波数領域の
信号 A_n は同値の関係にある。

なお

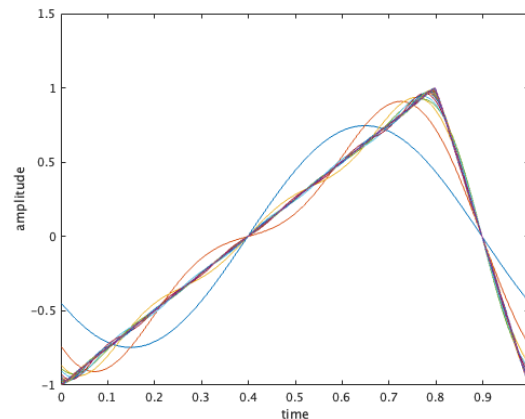
$$e^{i2\pi f t} = \cos(2\pi f t) + i \sin(2\pi f t)$$



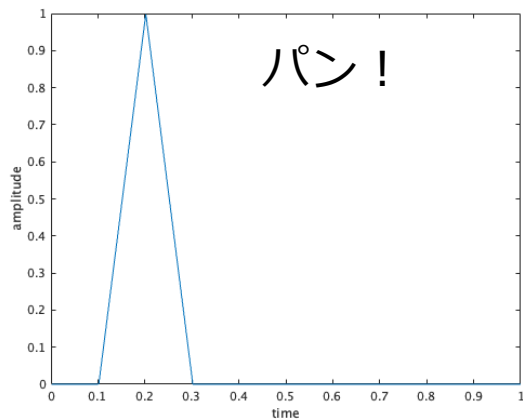
(2)式



(1)式

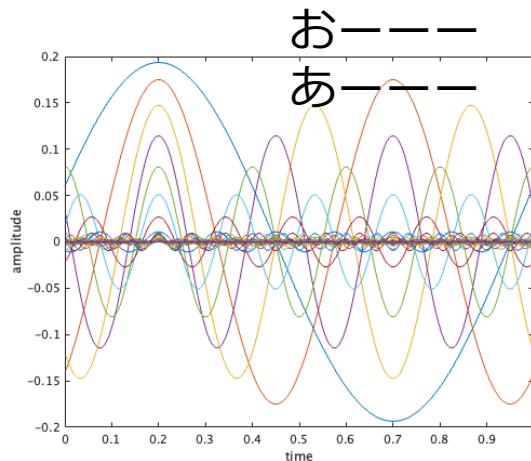


正弦波を使う利点



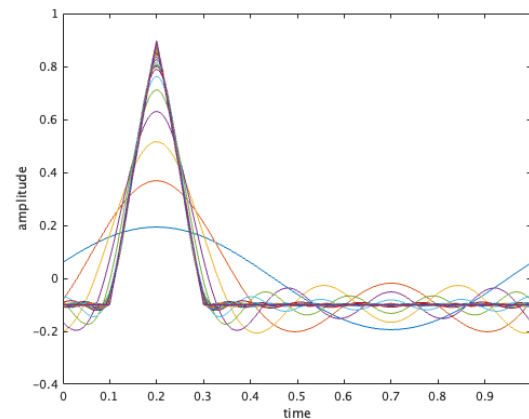
パルス波を使う

- 強い信号を短時間に発生させるため
岩盤を破壊する（再現性に課題）
- 信号の精度に限界



正弦波を使う

- 弱い信号を連続的に発生させるため
岩盤を破壊せず（再現性に優れる）
- 信号の制御が容易で精度が高い

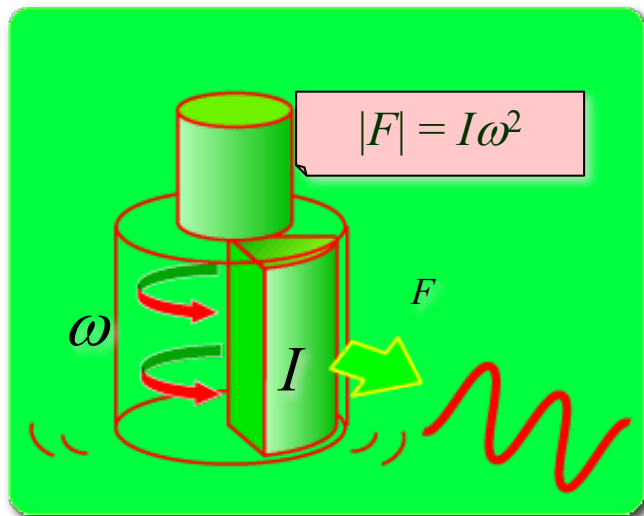


フーリエ変換で合成する

このような震源を作った

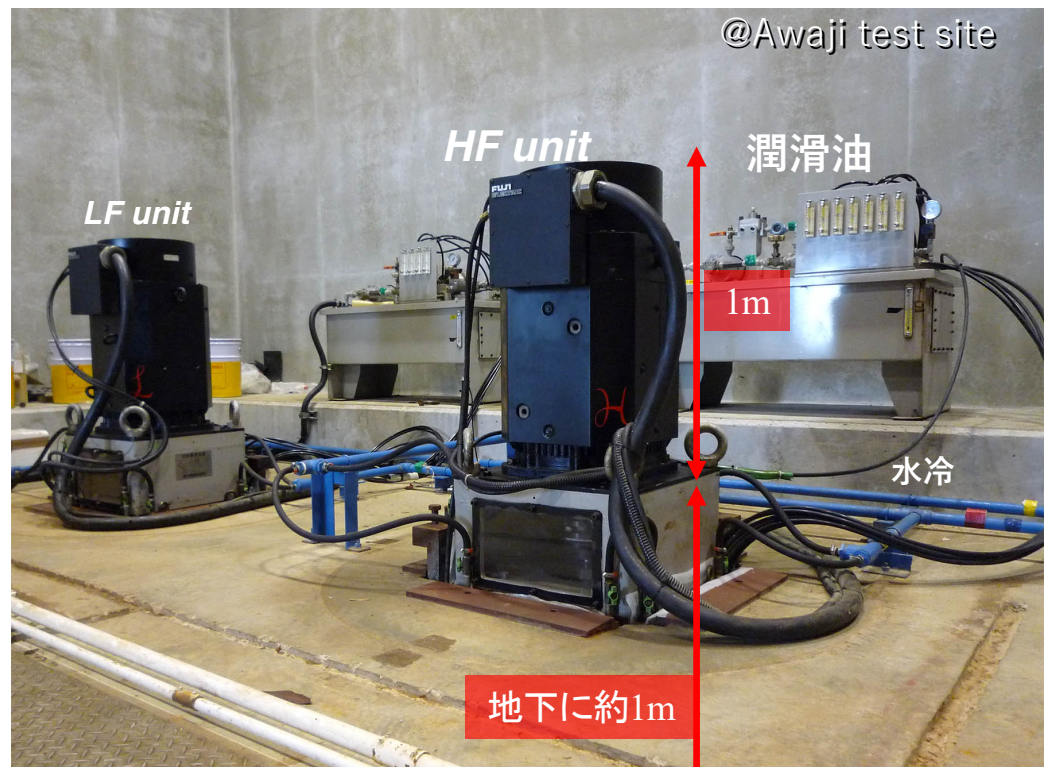
1996年3月 淡路島の野島断層近傍に設置した

偏心したおもりをサーボモータで回転させる



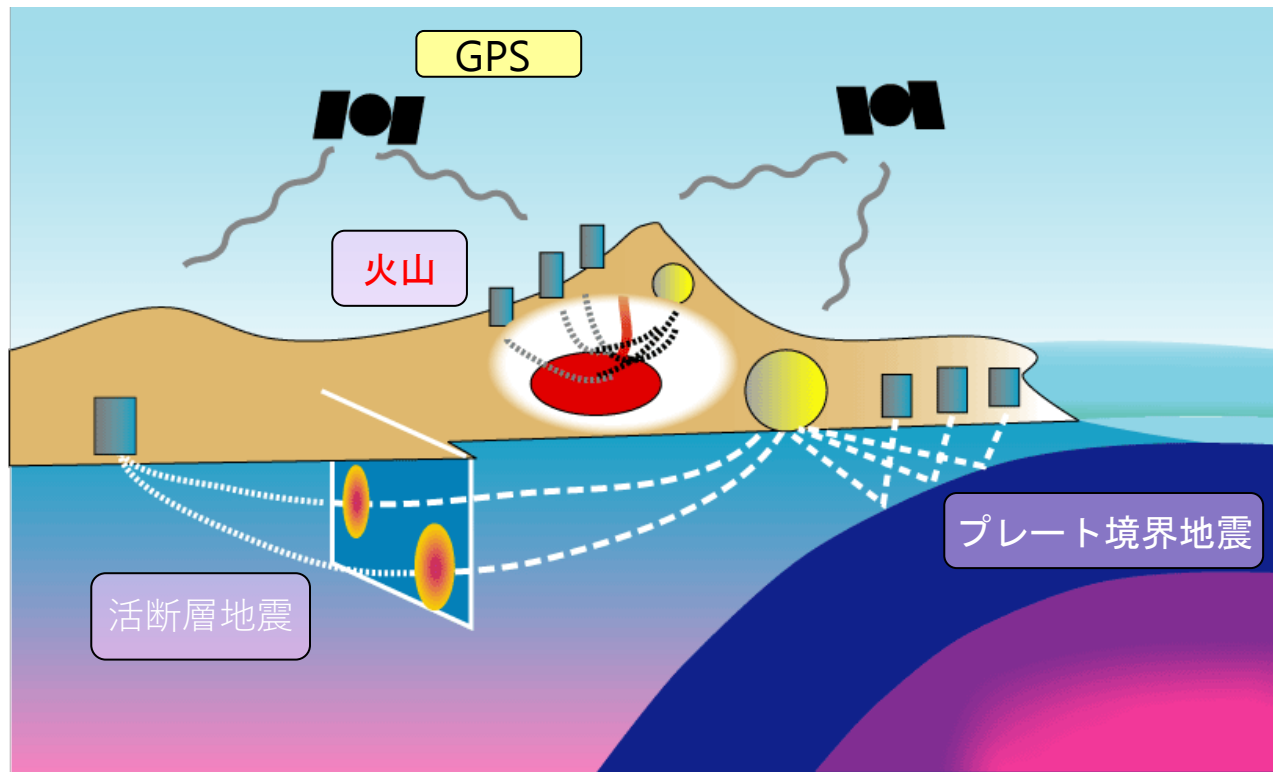
LF unit : $2 \times 10^5 \text{N}$ @25Hz

HF unit : $2 \times 10^5 \text{N}$ @35Hz



目指したもの

地震の震源の固着変化や、火山のマグマ上昇による変化を捉えよう！



火山

マグマ上昇による地下構造変化

プレート境界

固着変化による地震波反射特性の変化

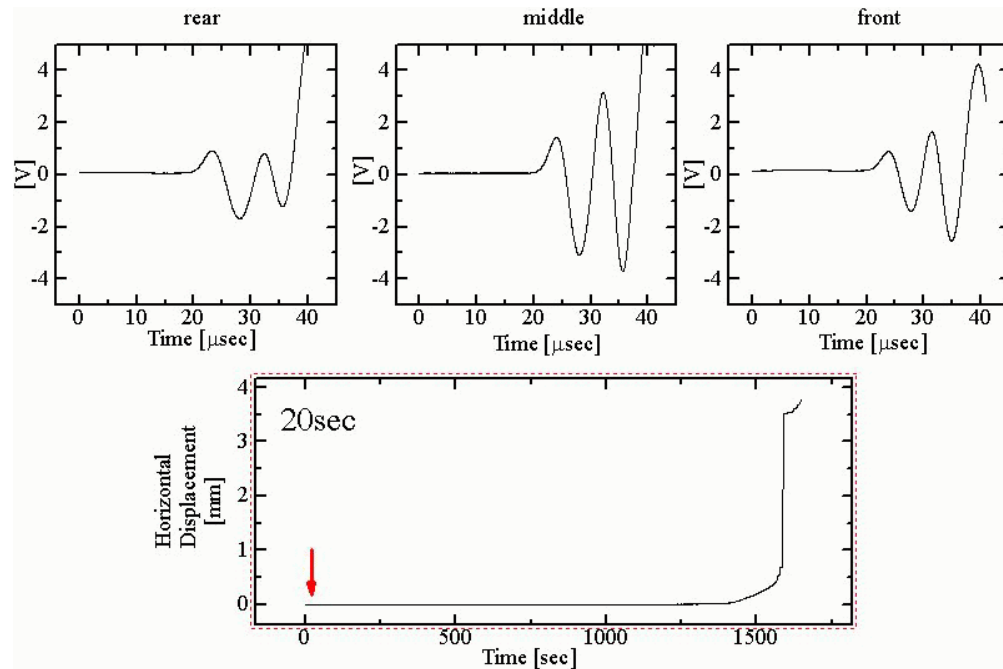
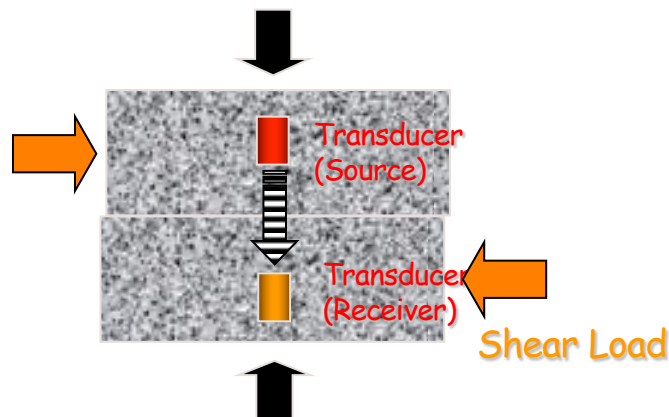
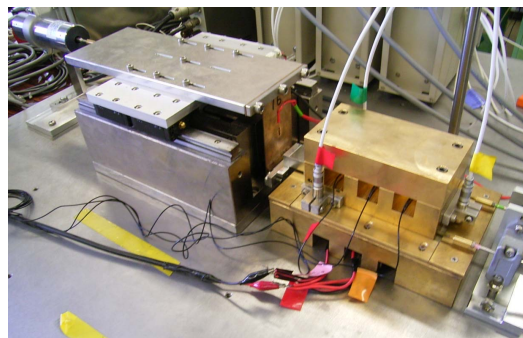
活断層

断層面を通過する波の変化

目指したもの

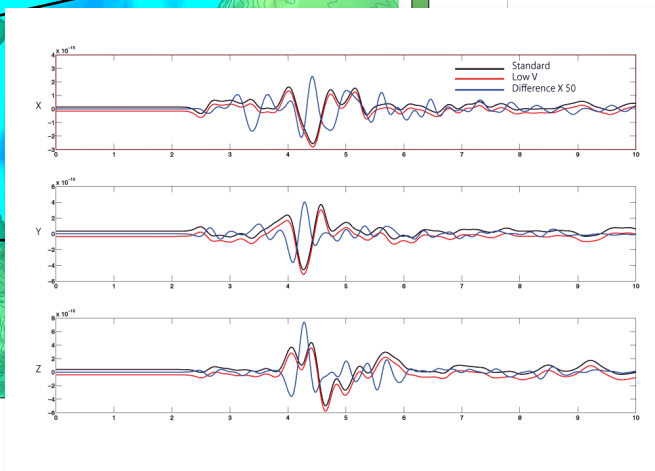
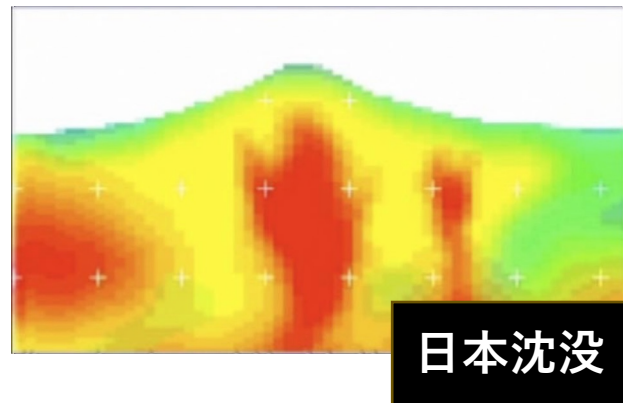
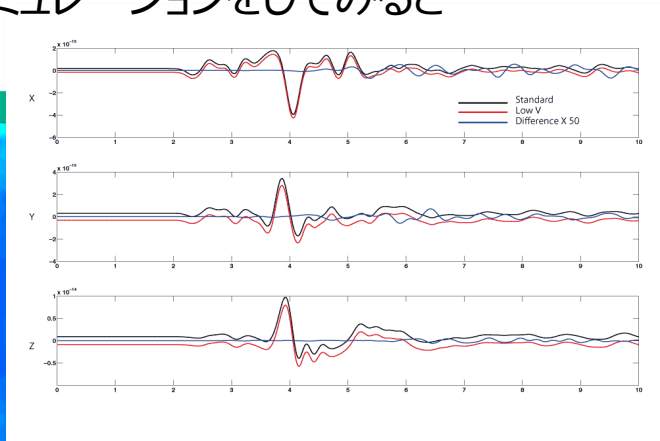
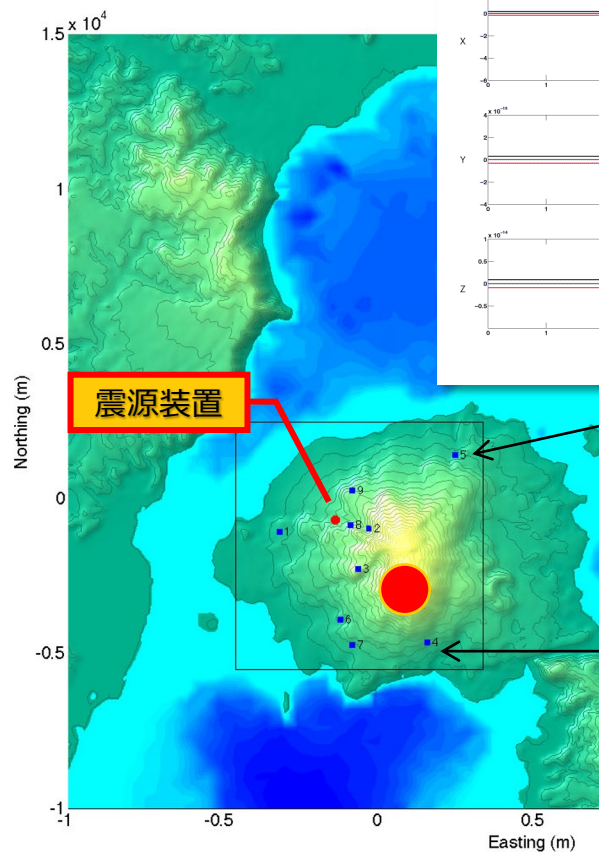
断層面を地震波が通過すると、固着の状態により、通過する波の振幅が変化する
(Yoshioka et al. 2004)

→ 地震が発生が近づくと、固着が変化し、透過波が弱まる



目指したもの

シミュレーションをしてみると



マグマの上昇を地震波で
捉え、イメージを得たい！

震源装置(送信)と地震計(受信)

1. 送信と受信のタイミングを合わせる
2. 送信信号の開発
3. 受信信号の処理法の開発
4. 受信信号処理装置の開発
5. 震源制御装置の開発

開発に係わった人たち（主なメンバー）

熊澤峰男（名大名誉教授）
國友孝洋（御嶽山科学研究所）
羽佐田葉子（大和探査）
鶴我佳代子（東京海洋大学）
長尾大道（東京大学地震研究所）
生田領野（静岡大学）
雑賀 敦（JAEA）
辻 修平（JAMSTEC）
渡辺俊樹（名大）
藤井直之（名大名誉教授）
笠原順三（東大名誉教授）

Observation system

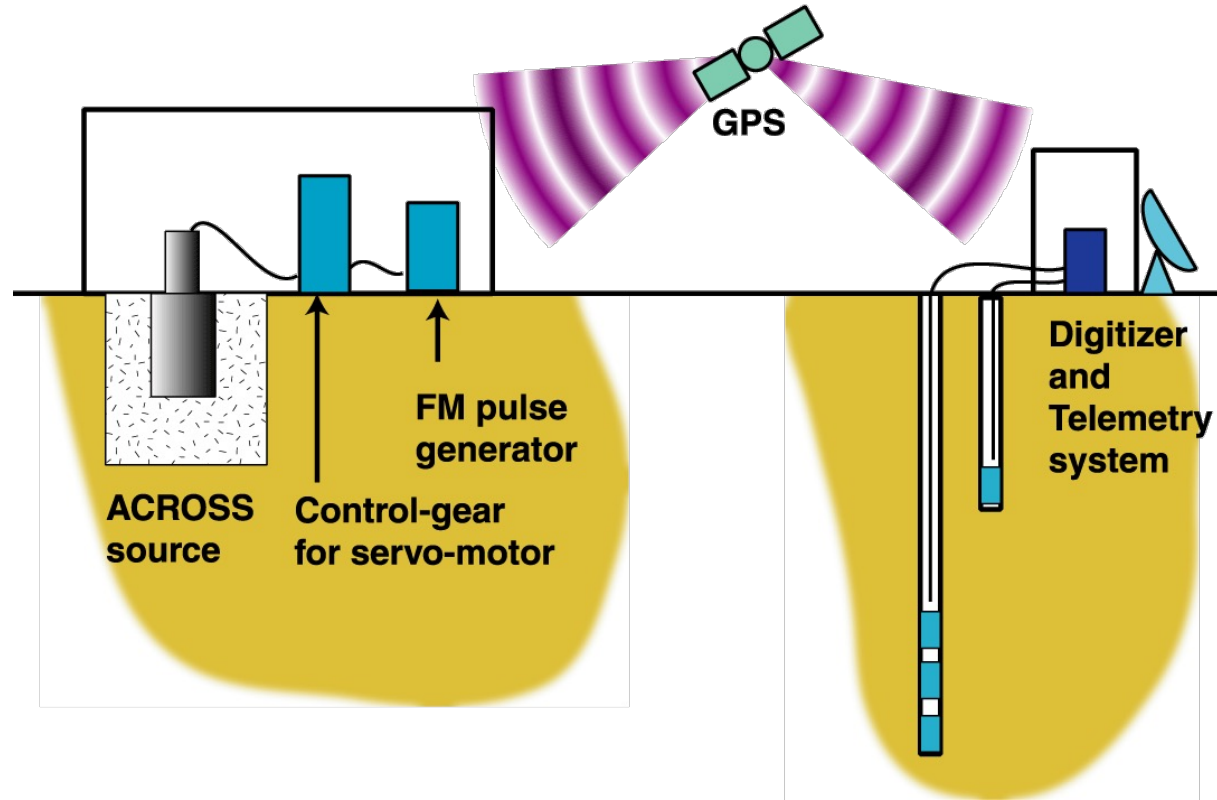
- Both sources and receivers are synchronized to GPS clock.

1. 送信と受信のタイミングを合わせる

それまでは、
震源から無線信号を送って時刻同期を
するのが主流

当時
地震計はGPSの時計に同期する仕様が
主流になりつつあった。

震源の振動もGPSに同期させることで
タイミングを合わせることにした。



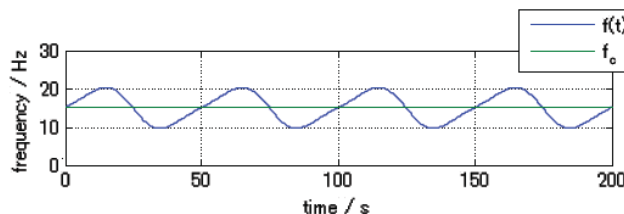
2. 送信信号の開発

1台の震源でできるだけたくさんの正弦波を出したい。

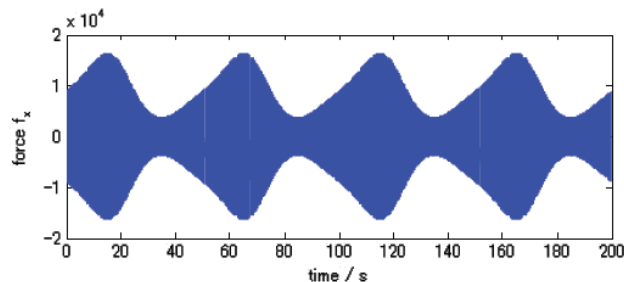
一定時間で全く同一のパターンで回転の加減速を行えば良い

→ 周波数変調

Frequency Modulation = FM



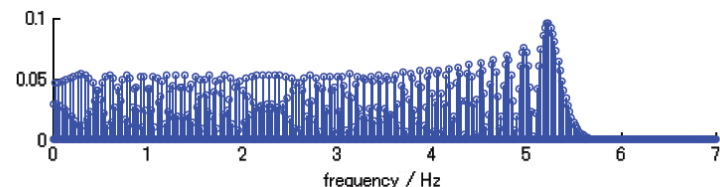
FM（周波数で表示）



FM（波形で表示）

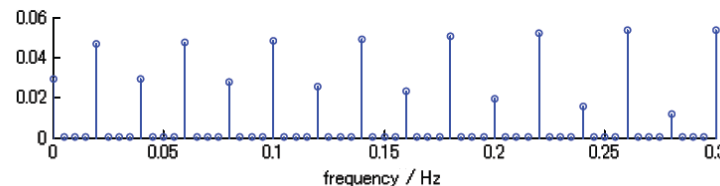
遠心力も同時に変化するので振幅も変化する

Fourier 変換



Discreteな周波数系列となる。

信号を出しながらノイズを測ることができる
さらに…

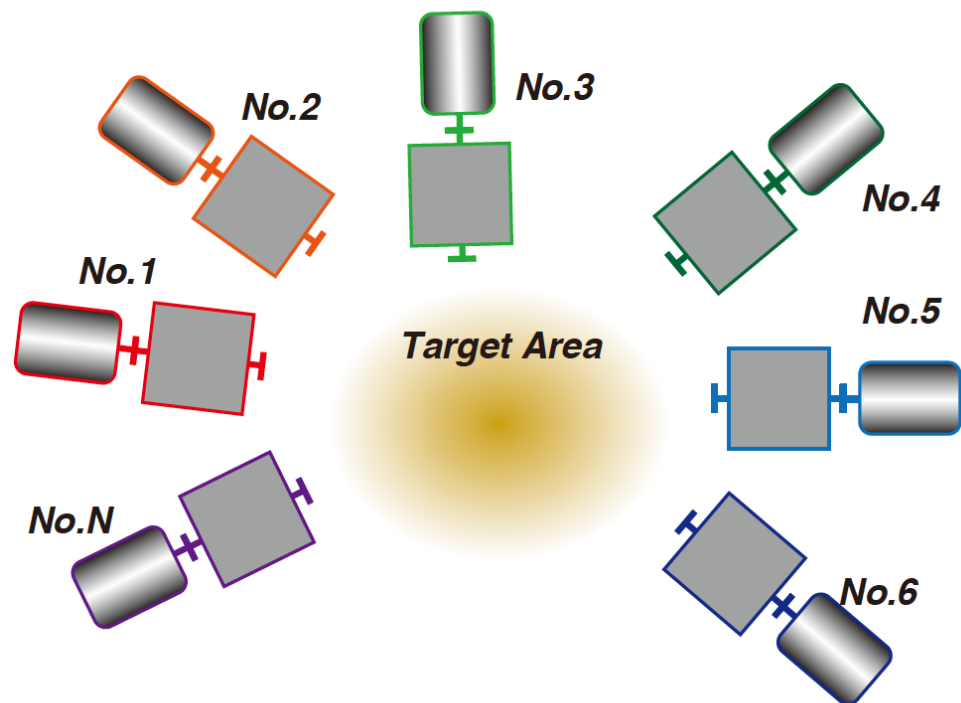


たくさんの震源を同時に動かしても、受信
信号で簡単に識別することが可能

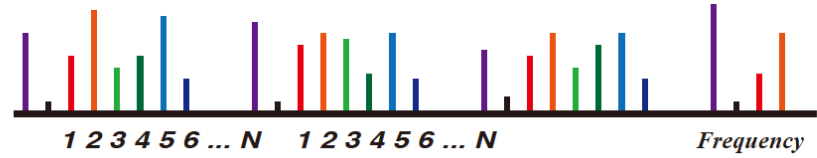
→ リアルタイムトモグラフィができる

(これは未だ実現せず)

③ 多震源による分布（同時・同帯域）加振



同一周波数帯であっても、どの震源を分離できる ACROSS の特長を用いる



手法と装置の開発から始める

3. 受信信号の処理法の開発

4. 受信信号処理装置の開発

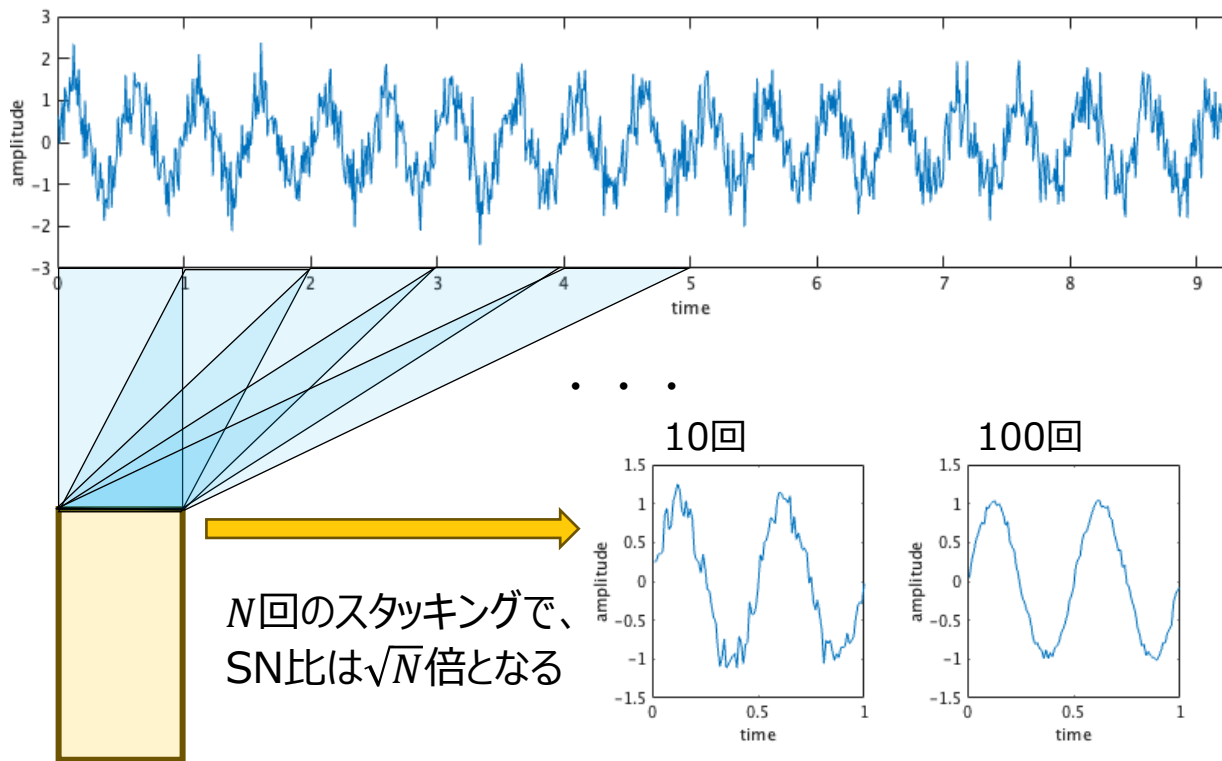
基本処理として、スタッキング(Stacking)
でノイズを減らす

当時は、通信やメモリ容量に限界があり、
リアルタイムにスタッキングをしてデータ保存をする
装置を作成した

but 今は
通信速度とメモリ容量が爆発的に大きくなり、全
データを保存することが普通になり、装置は不要
となった。



対象ごとに個別に処理方法を考案



5. 震源制御装置の開発

モータの回転角が外部から与えたパルス数に比例する制御 = 既製

GPS時計に合わせてパルスを発生させる。
位相（おもりの初期位置も合わせる）



I
N
V
E
R
T
E
R



旧装置

GPS時計

パルス列発生装置

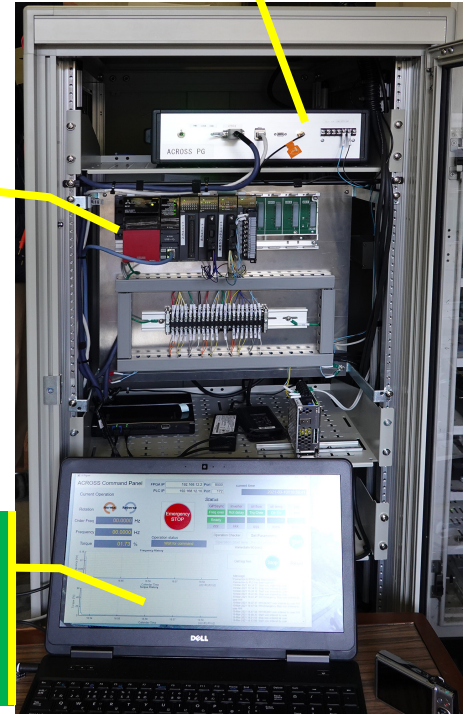
PC+計測制御ボード
制御+動作ログ

PLC
制御+
動作ログ

Matlab GUI
on Note PC
必要なときだけ
ネットワークケー
ブルでつなぐ

GPS時計
+パルス列
発生装置

新装置

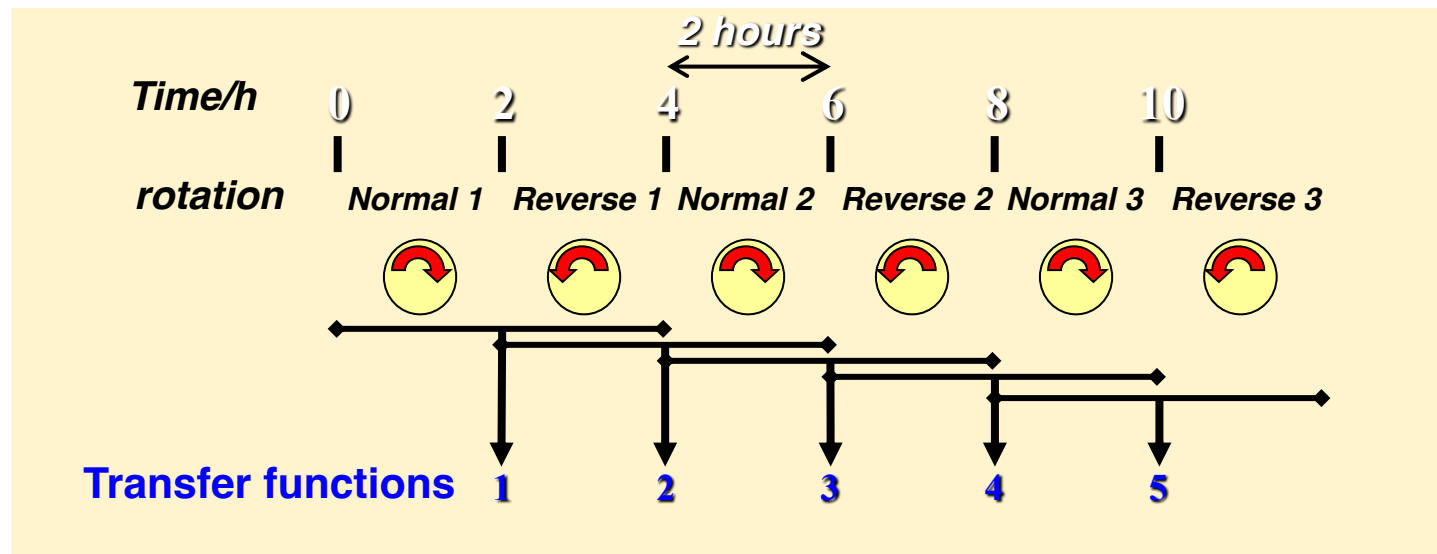


手法と装置の開発から始める



5. 震源制御装置の開発

一定時間毎に回転を自動的に反転させる
おもりの初期位置合わせも自動で行う



任意の方向の直線加振に変換する。一定時間分解ので時間変化を測定する。

まずは長期間運転してみよう

(Ikuta et al., 2002; Ikuta and Yamaoka, 2004)

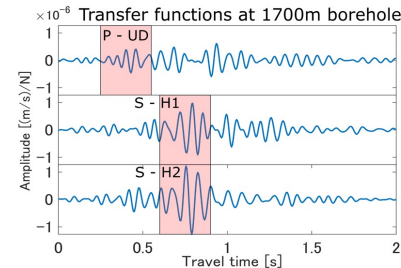
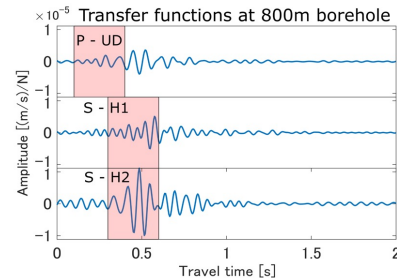
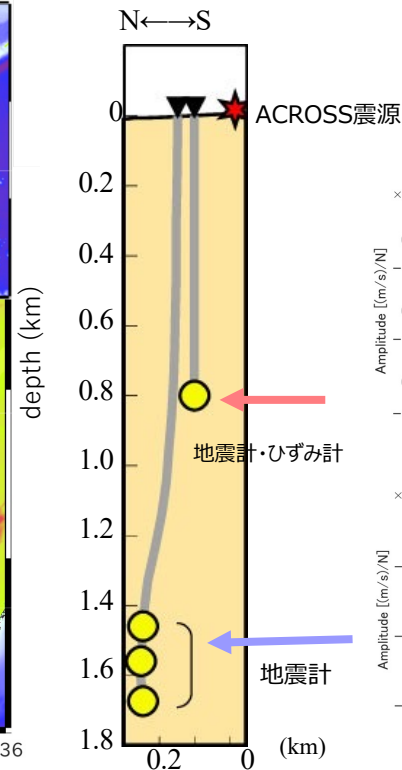
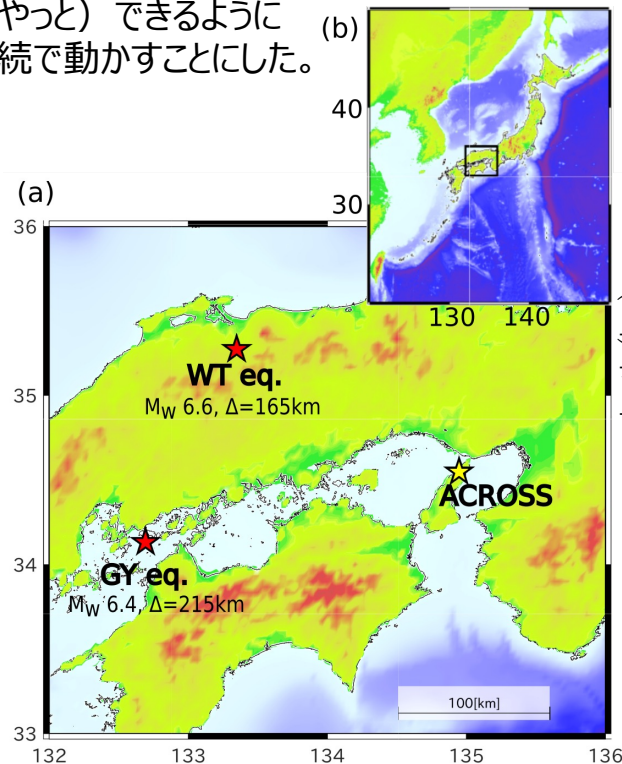
2000.1 - 2001.4 15ヶ月連続運転 @淡路島

GPSに合わせて動かすことが（やっと）できるようになったので、とにかく、長時間連続で動かすことにした。



生田領野 (静大)

遠隔操作ができなかったため、震源が停止したら現地に行って再起動



まずは長期間運転してみよう

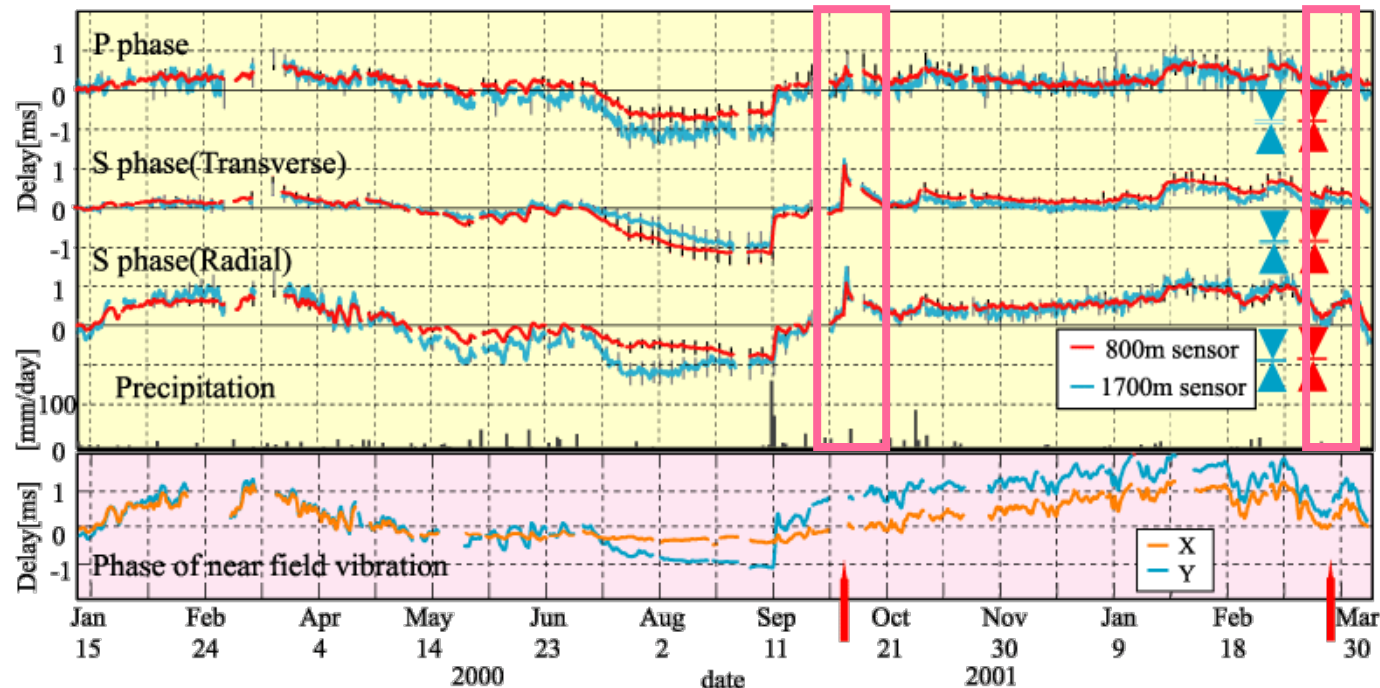
(Ikuta et al., 2002; Ikuta and Yamaoka, 2004)

P波とS波の到達時間
(走時) の変化を検出

0.1ミリ秒程度の分解能
(Karageorgi, 1992より
も2桁更新)

いろいろな変化が捉えられ
た。

- ・降雨による短期的変化
- ・季節変化
- ・気温による変化
- ・地震の揺れによる変化



鳥取県西部地震

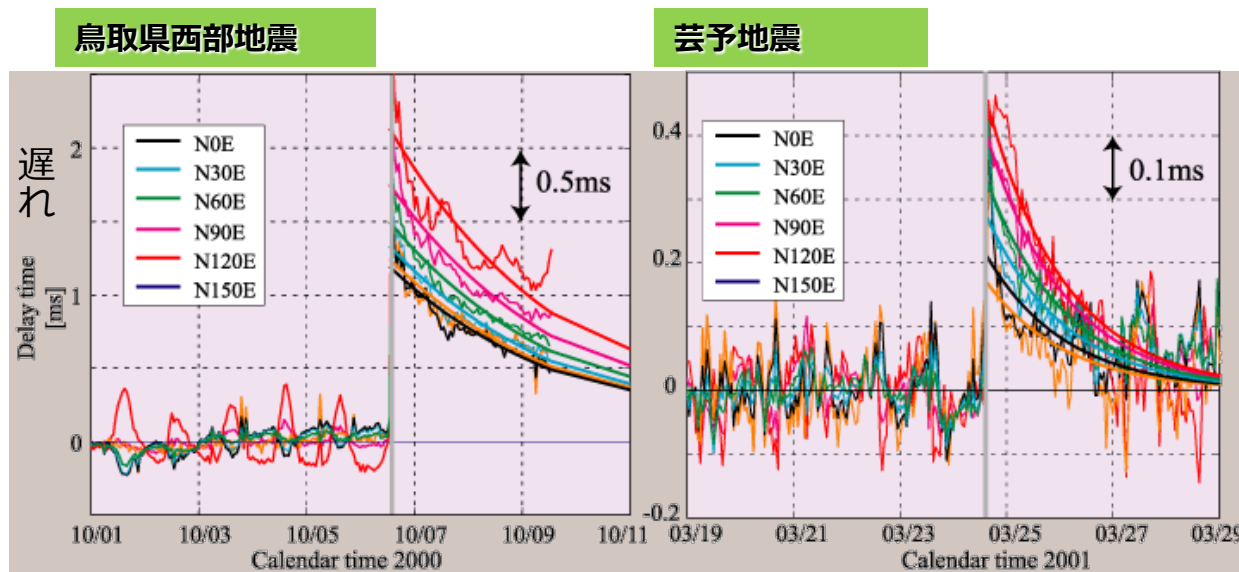
芸予地震

まずは長期間運転してみよう

(Ikuta et al., 2002; Ikuta and Yamaoka, 2004)

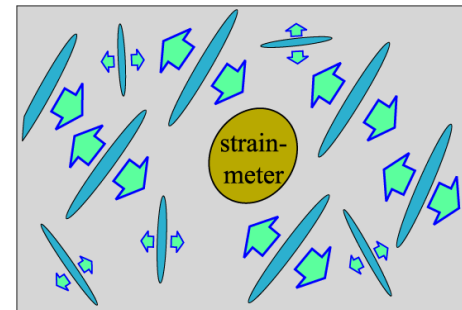
変化の異方性を検出！

地震の揺れによる変化を詳細に見ると振動方向によって変化の大きさが異なることがわかった。



振動

- 地下水圧の増加
- 特定方向の割れ目増
- 拡散による圧力減少
- 元に戻る

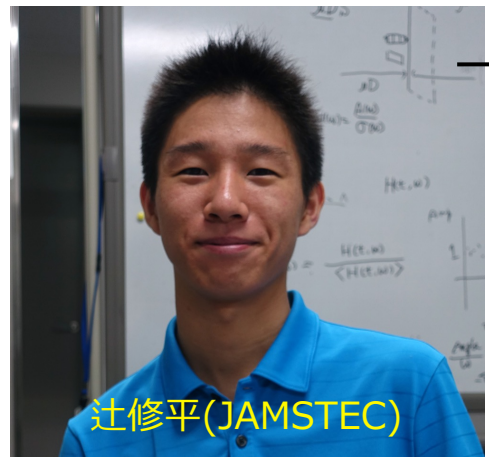
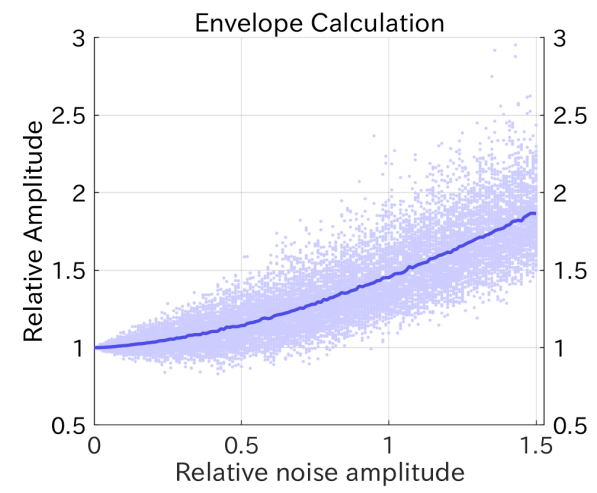
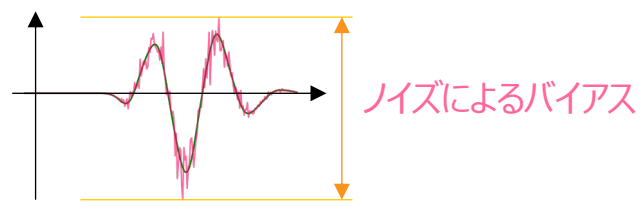


Ikuta and Yamaoka (2004) Fig. 12

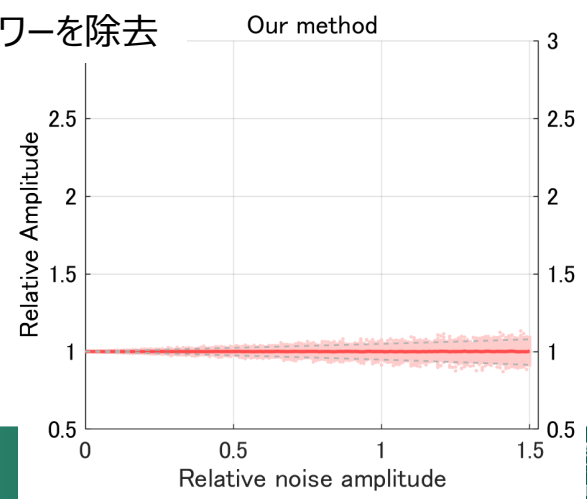
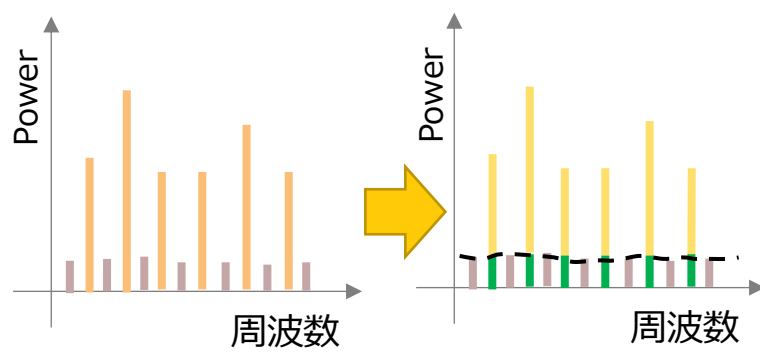
このデータは20年後にもつかわれた

振幅の時間変化を検出する手法の探索

従来法 = 波の包絡線を用いる方法

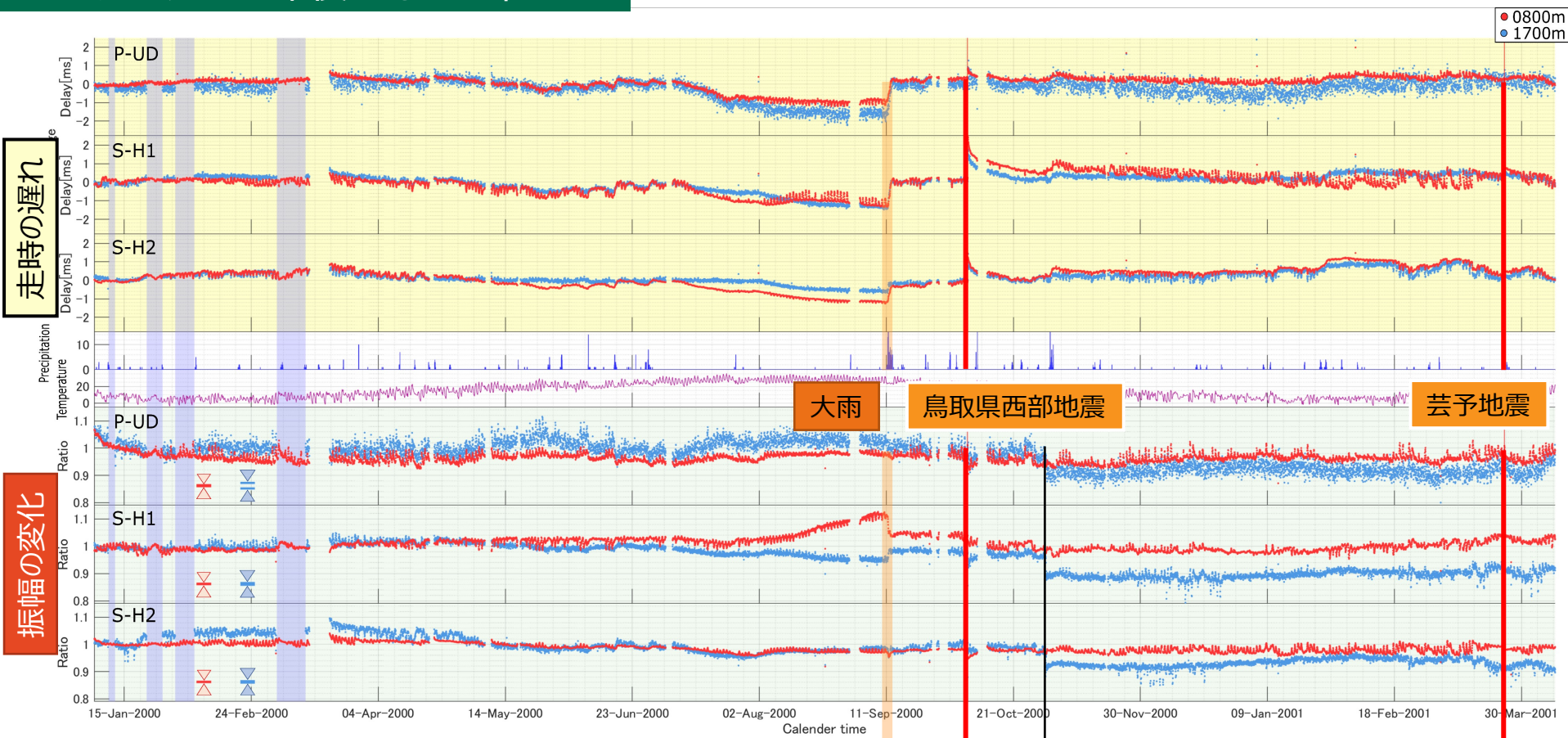


ACROSS法 = 周波数領域のパワーからノイズのパワーを除去



このデータは20年後にもつかわれた

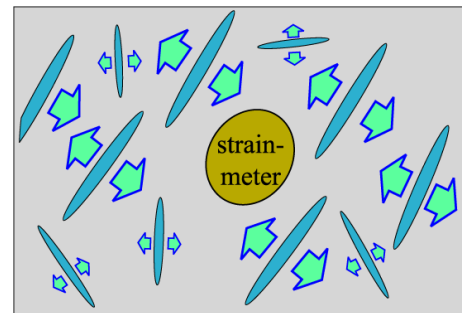
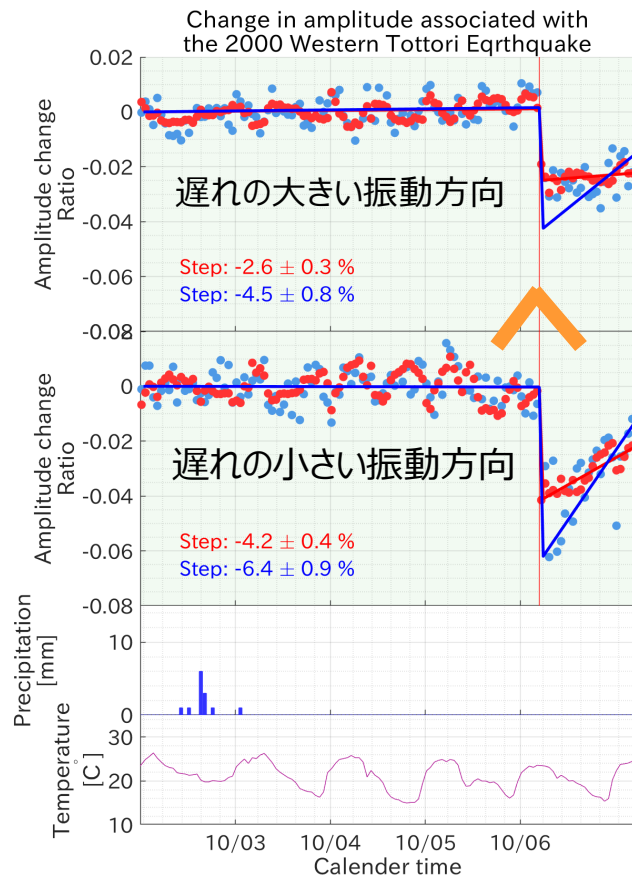
(Tsuji et al. 2022)



地震波速度が小さくなると
減衰が大きくなる

異方性の場合？

遅れの大きい振動方向の
ほうが減衰が大きい



Ikuta and Yamaoka (2004)

ACROSS震源装置の系譜

直線加振型

HIT型 1996



震動試験器

電磁アクチュエータ
電力効率が悪い

制震装置



回転型モータ
低周波の効率が悪い

評価
・低周波を出す場合は利用価値がある。
・制御性-ひずみ率5%程度
・同期機構は容易

落下型



・震源関数計測
・DC駆動
・機動性

名大に保管

プロトタイプ 1994



水冷却
大型ベアリング

淡路・土岐型 1996

20ton @25,35,50Hz
循環潤滑油・水冷却
大型ベアリング
GPS同期
縦置き・横置き
最初の実用試験器



三河・桜島型 1999



10ton @25Hz / unit
循環潤滑油による冷却
大型ベアリング
GPS同期
縦置き
ユニット化

三河で稼働中

Type-2014



10ton @25Hz / unit
循環潤滑油による冷却
小型ベアリング
GPS同期
横置き・基礎の簡素化
標準化・ユニット化

三河で稼働中

九大型-2016



九重で稼働中

森町型 2004

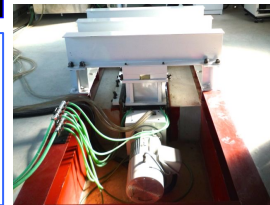
20ton @7.5Hz
循環潤滑油・水冷却
大型ベアリング
GPS同期
横置き
低周波化



稼働中

JOGMEC型 2011

40ton @50Hz
循環潤滑油・水冷却
大型ベアリング
GPS同期
横置き標準化
高速化



稼働中

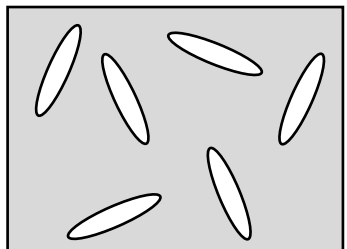


Conventional ACROSS (Typical)

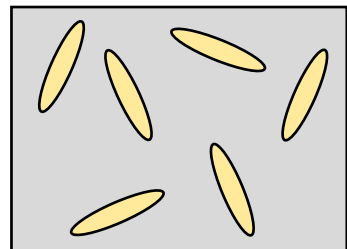


New Type ACROSS Type-2014

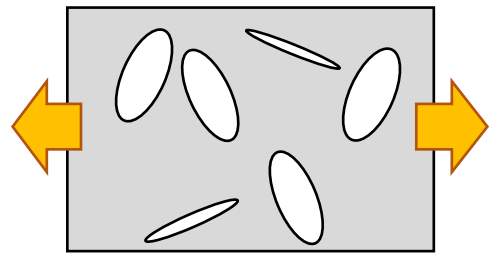
ところで地震波速度はなぜ変化するのか



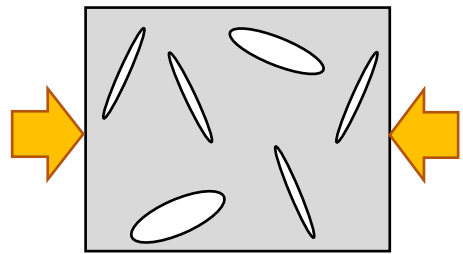
割れ目を満たす流体の存在



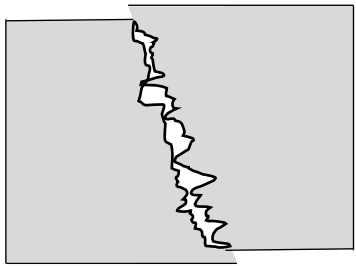
割れ目が流体に満たされると
P波速度が増加する



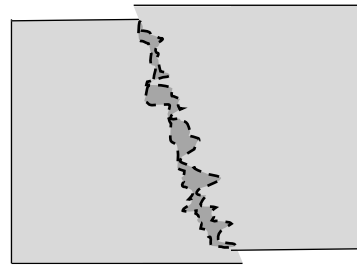
割れ目の開閉



割れ目が閉じると、P、S波速度ともに増加する



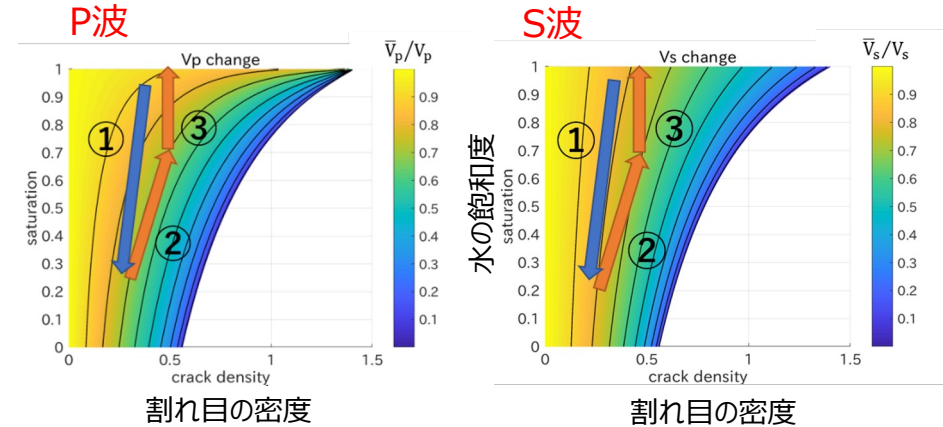
破壊と修復



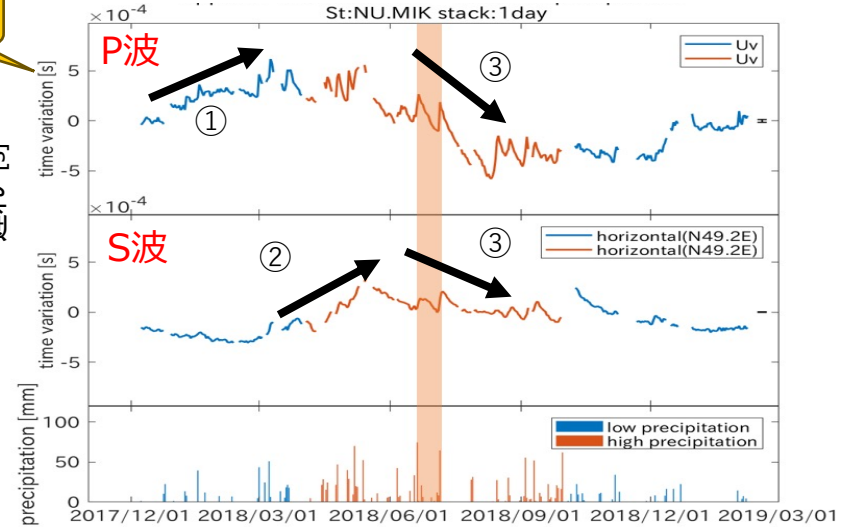
岩盤が破壊するとP、S共に減少、
修復するとP、S波ともに増加する

PとSの変化を一緒に評価すると

0.5ミリ秒



遅れ [s]

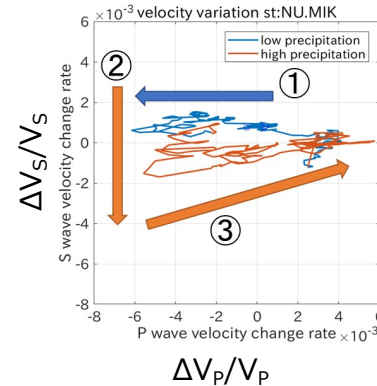


割れ目の密度や水の飽和度が変化した場合、P波とS波の変化は異なる。
その関係をグラフにして示すことができる。

(graph created from O'Connel & Budiansky, 1974)

実際に観測してみると、夏と冬で傾向が異なる。

Carageorge et al.(1992) はPとSの変化を見いだす事ができなかったが、ACROSSを用いるとPとSの変化を信頼性を持って測ることができる。



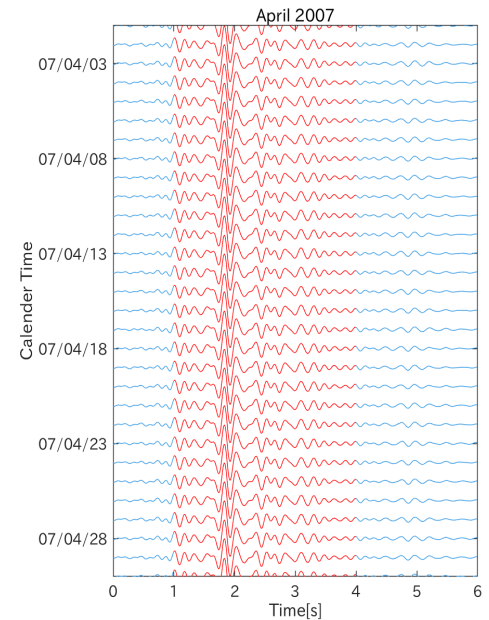
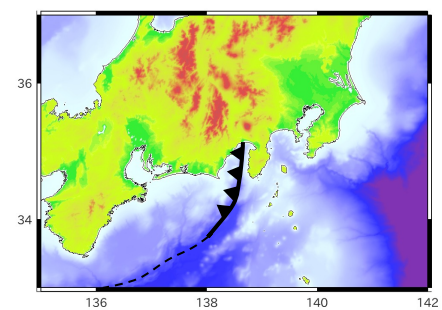
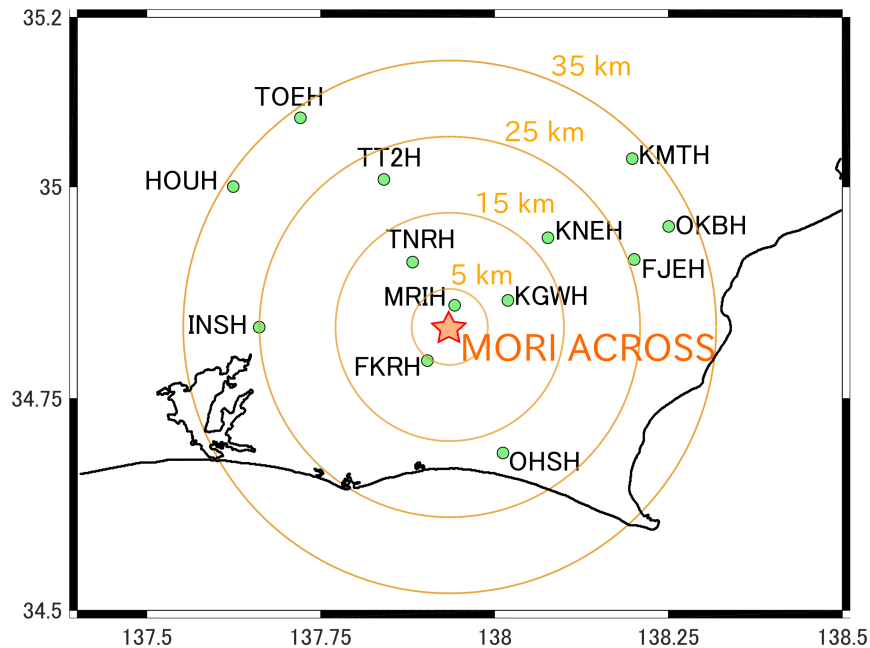
Suzuki et al. (2021)



もう少し深いところはわからないのか？



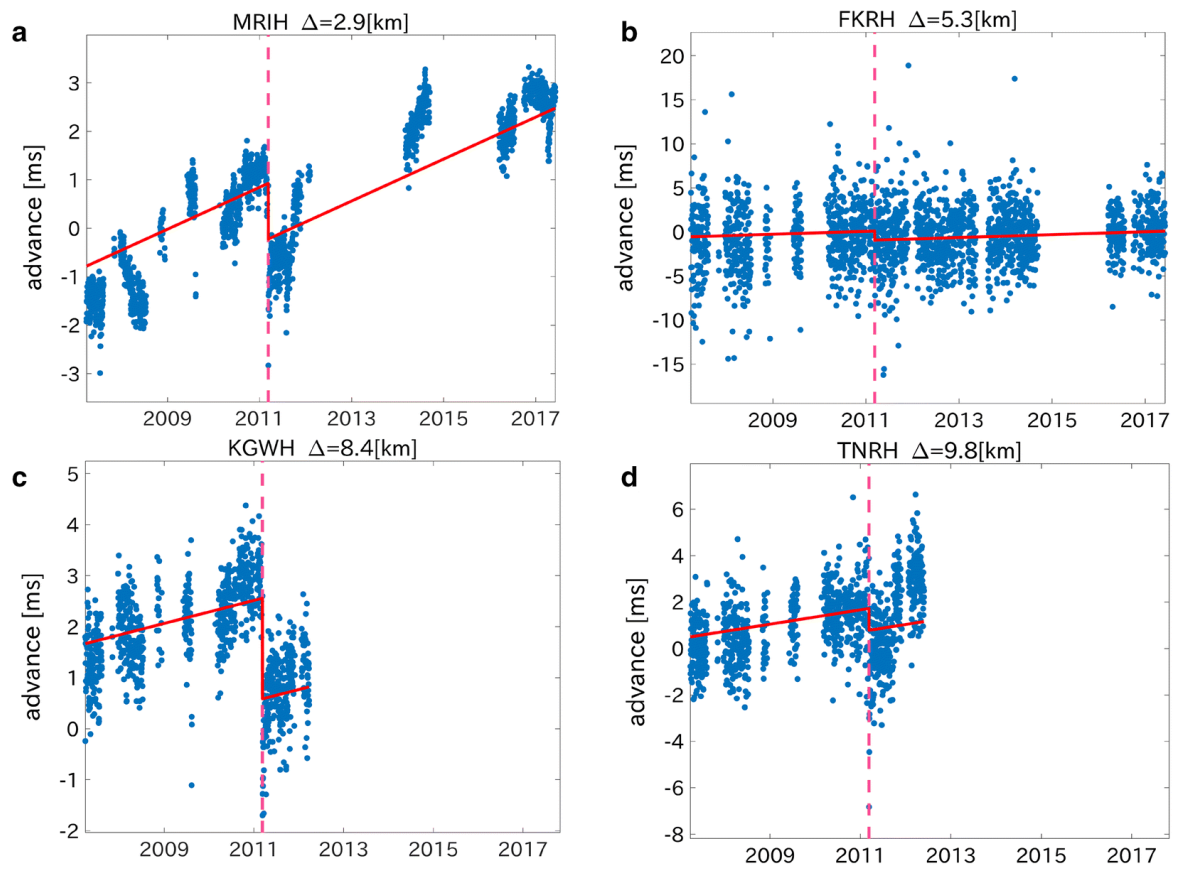
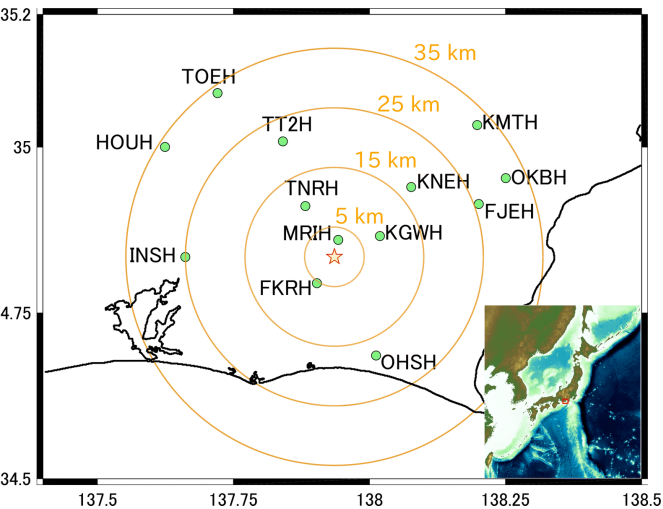
低周波で力を出せる震源で長期の観測を行った結果を解析した。 Tsuji et al. (2018)



経年変化と地震時の変化がある

(0-15km)
震源に近いところでは明瞭に
変化が見られる

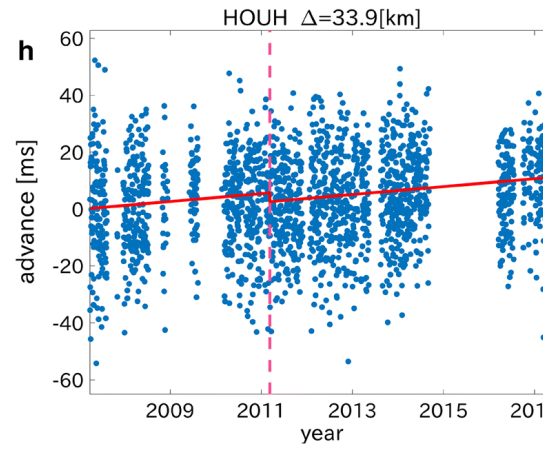
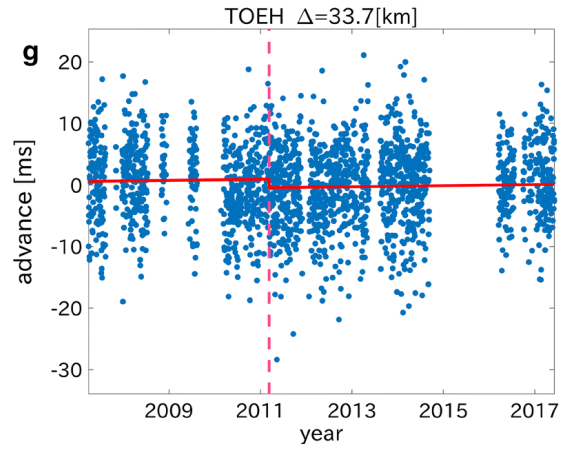
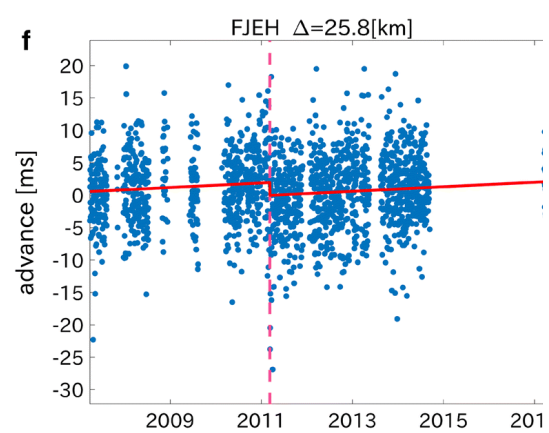
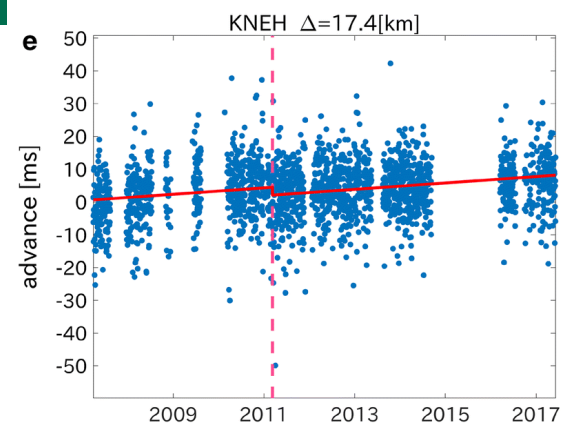
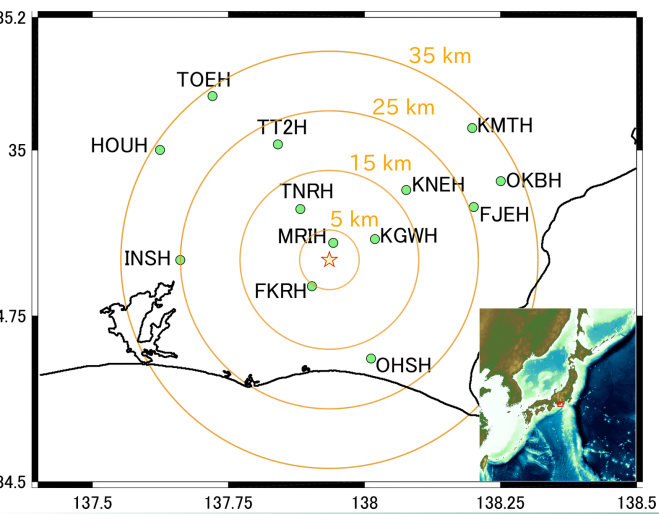
徐々に地震波速度が速まり、地震時に
減少する



1日ごとのS波伝播時間変化

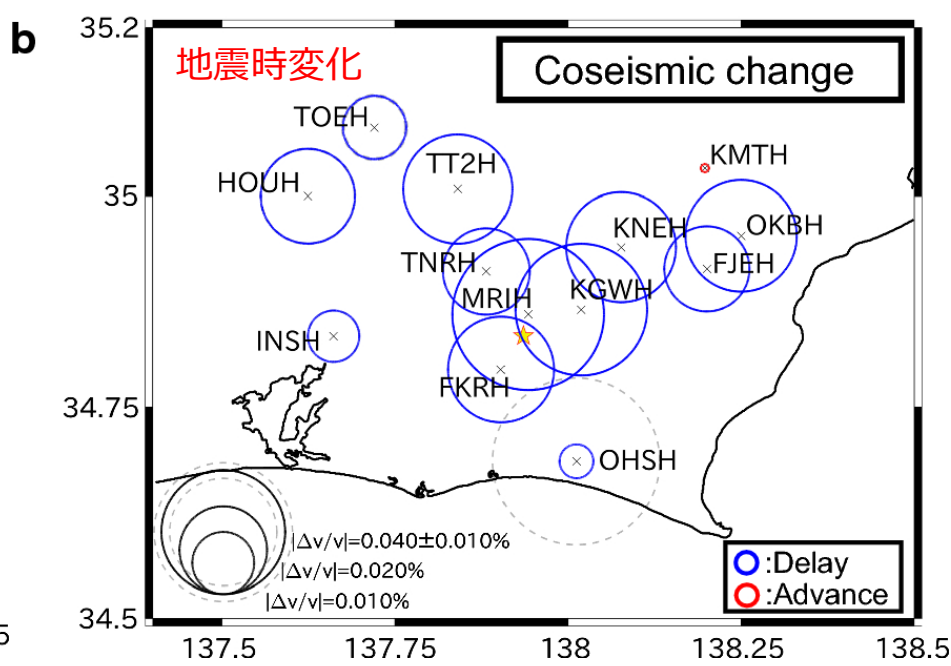
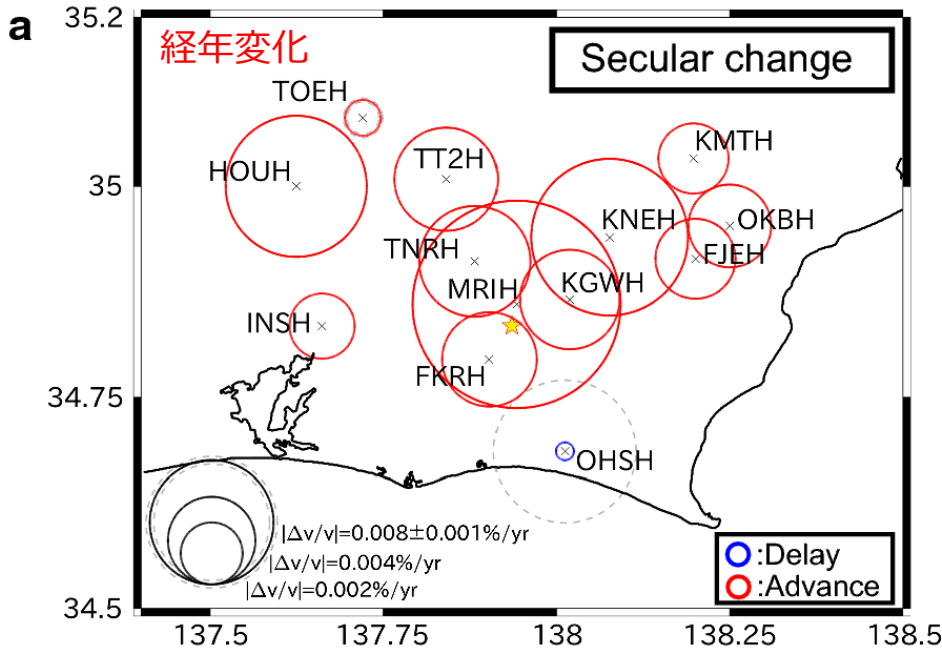
経年変化と地震時の変化がある

(15-30km)
震源から遠いところでも、統計的に有意な変化が見られる



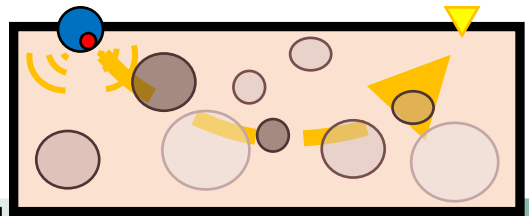
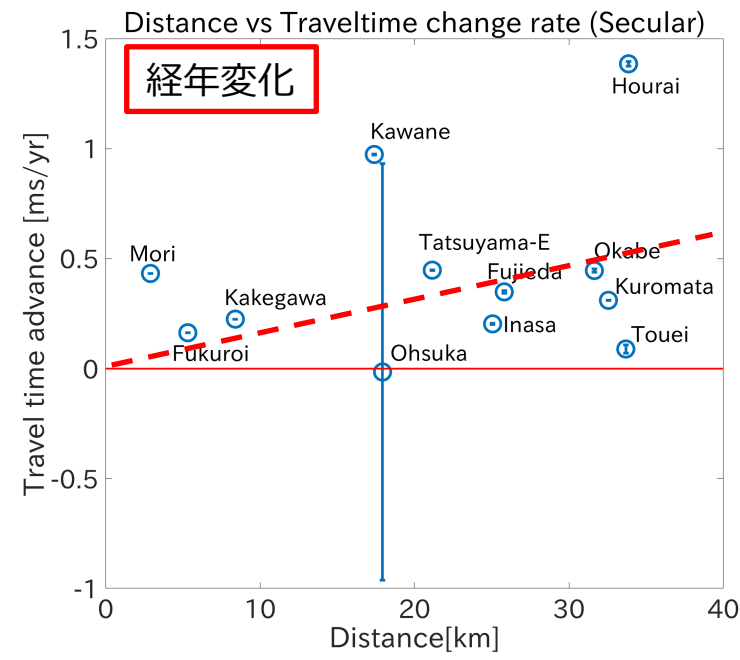
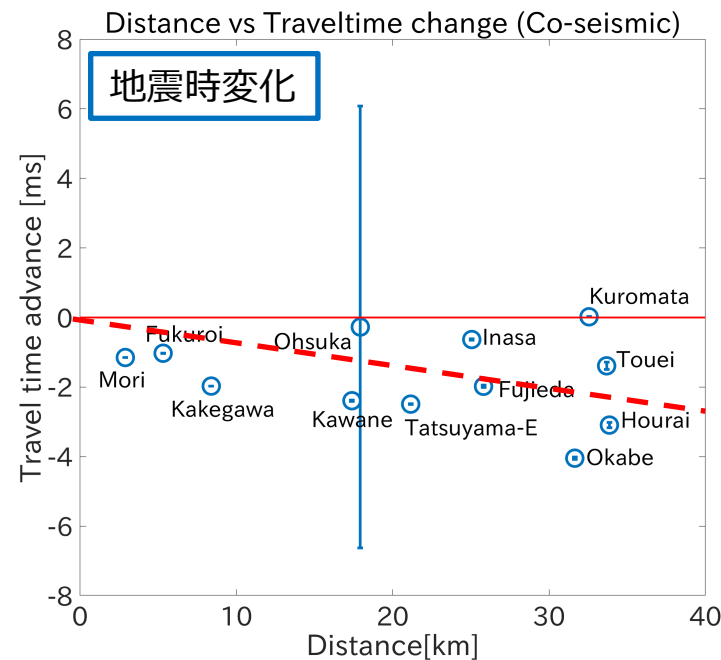
1日ごとのS波伝播時間変化

経年変化と地震時の変化がある



- ✓ 2011年東北地方太平洋沖地震の時に広い範囲で地震波速度が低下した.
- ✓ 普段は少しずつ地震波速度が増加している.

経年変化と地震時の変化がある



- 地震時の大きな振動により、地下の岩盤の破壊（ゆるみなど）が起きる。
- 普段は、割れ目の修復が継続的に行われている。
- 次の南海トラフ地震の際には、岩盤の破壊によりより大きな地震波速度の低下が予想される。

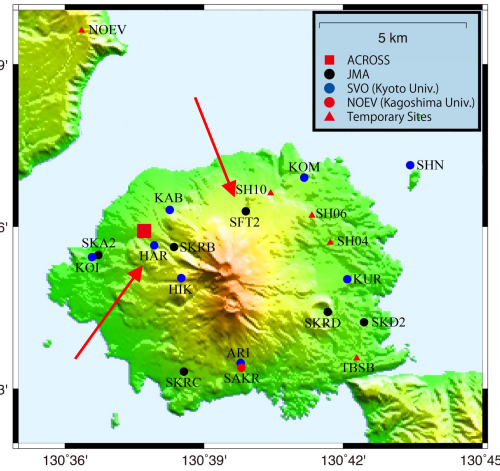
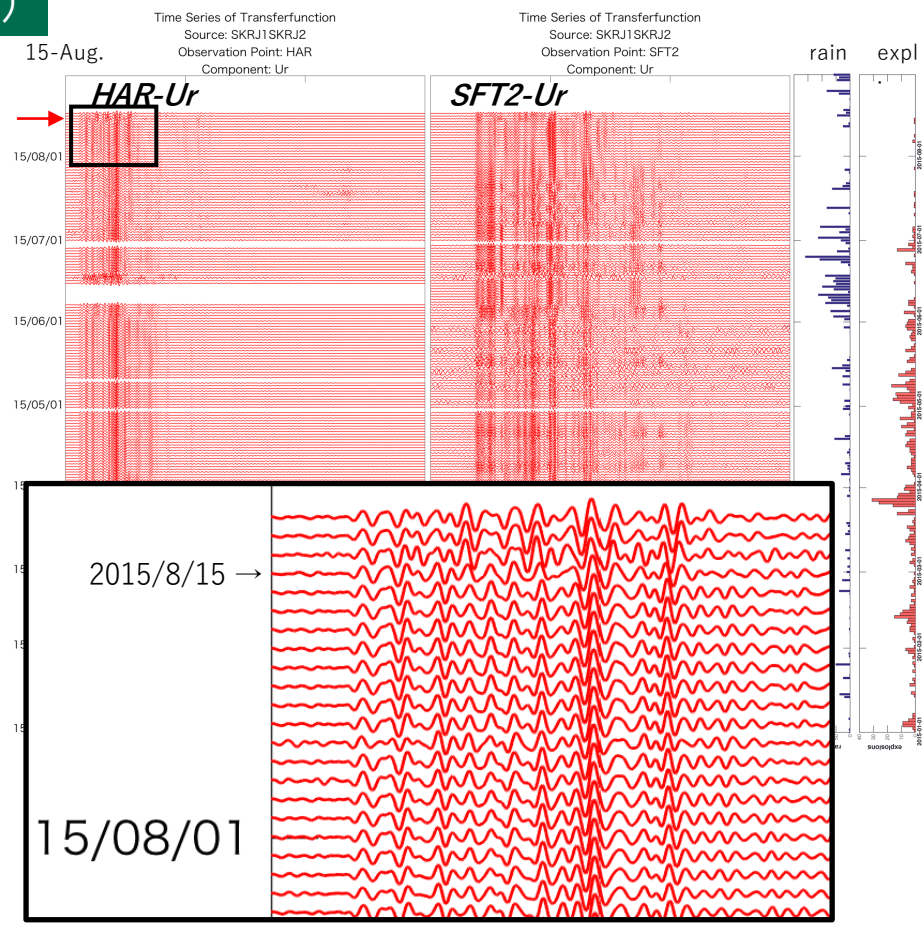
震源断層やマグマだまりのモニタリングという「野望」を抱きつつ、浅い地盤や30kmの範囲以内程度の速度変化や振幅変化を捉えるところまで来た。

様々な領域に応用されつつある

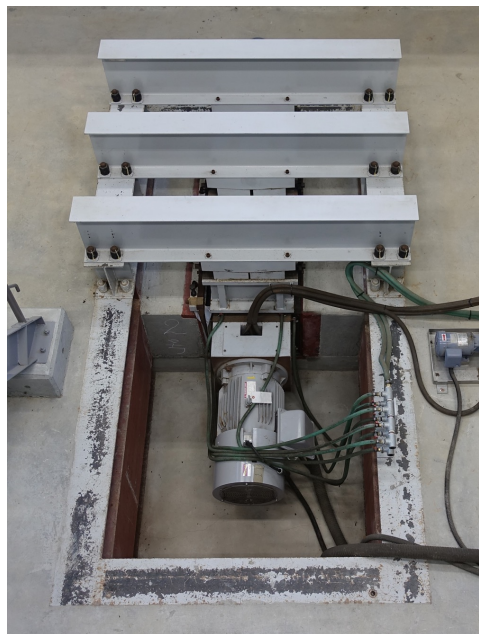
1. 火山へ（鹿児島大 など）
桜島などの活火山への適用
2. DAS（光ファイバーを地震計として用いる手法）と組み合わせて応用
（東京大学など）
3. CCUS（二酸化炭素地下貯留）のモニタリング
（東京大学、JOGMECなど）
4. 土砂移動（地滑りなど）のモニタリング
（静岡大学など）

火山への応用（桜島）

2015年8月
桜島マグマ貫入に伴う変動があった。



JOGMEC（エネルギー金属鉱物資源機構）が導入し、カナダのCCUSサイトで実験を行っている。

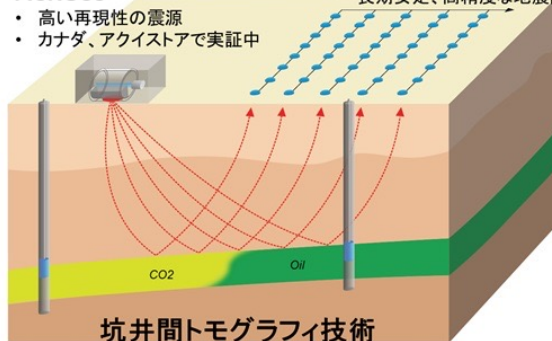


ACROSS

- 高い再現性の震源
- カナダ、アクイストアで実証中

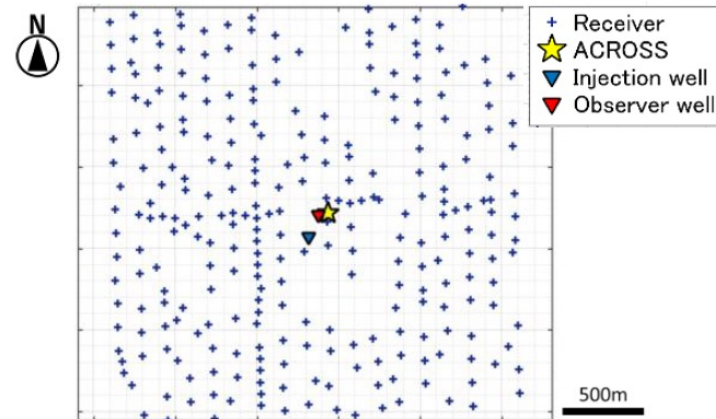
受振器システム

- 光干渉、光通信技術
- 長期安定、高精度な地震計



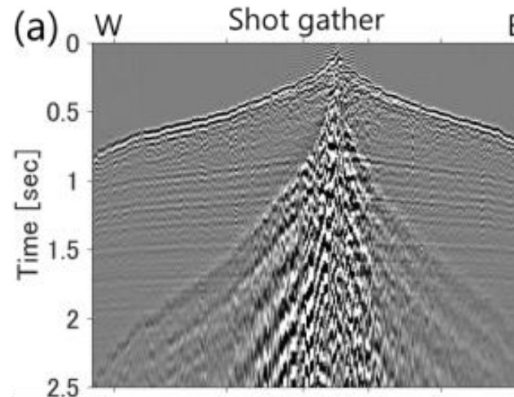
坑井間トモグラフィ技術

- 最先端の解析技術 (FWI: Full waveform inversion)
- 疑似ランダム波の同時発震技術
- 高感度な磁場センサー (SQUID) による電磁探査システム

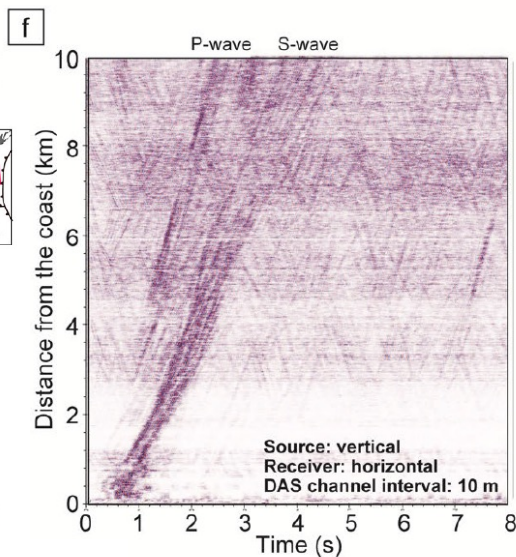
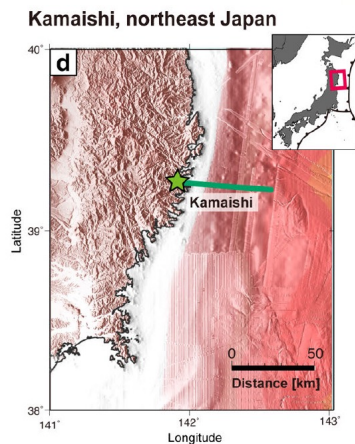


観測網配置

観測記録の例

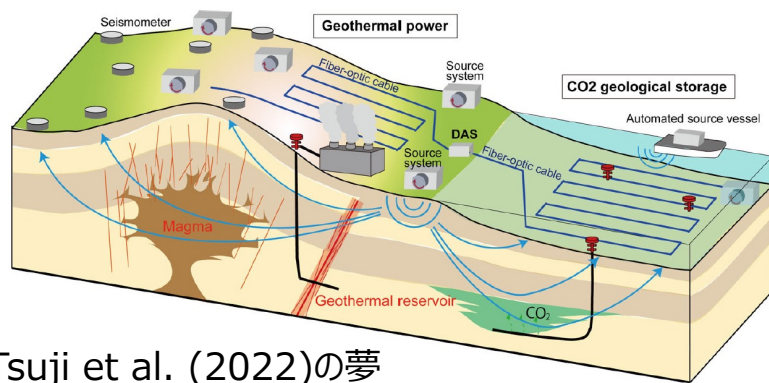
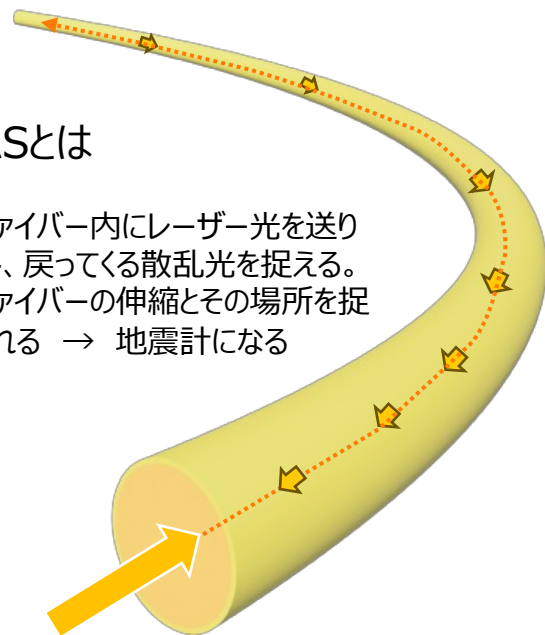


釜石沖に設置されている
DAS（東大地震研）
のケーブルを利用して実
験を行った。（Tsuji et
al. 2022）



DASとは

光ファイバー内にレーザー光を送り
込み、戻ってくる散乱光を捉える。
光ファイバーの伸縮とその場所を捉
えられる → 地震計になる



Tsuji et al. (2022)の夢

新しい技術と新しい研究者の参入によって夢がつながってい
く。