

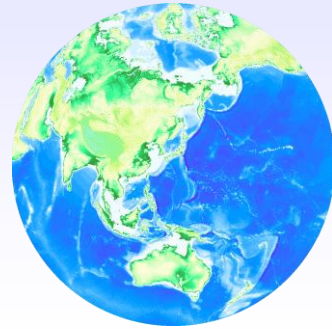
人工震源を用いた地下構造のイメージング



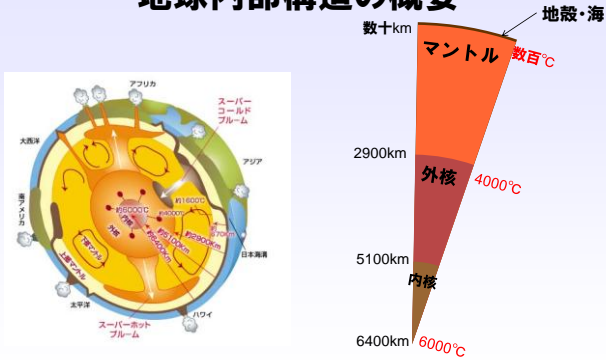
藤江 剛

海洋研究開発機構(JAMSTEC)
地球内部ダイナミクス領域(IFREE)

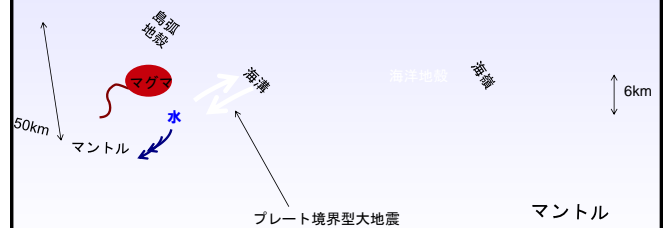
地球



地球内部構造の概要

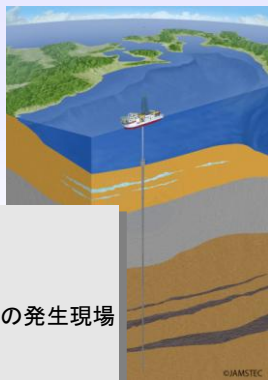


地殻



プレート境界型を含む多数の地震の発生
火山活動
日本列島のような島弧(大陸)の形成・発達

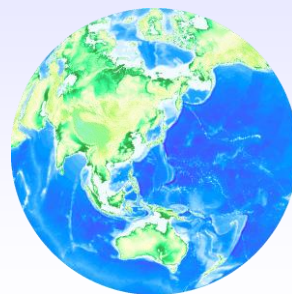
掘削船「ちきゅう」



まだ誰も

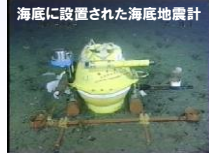
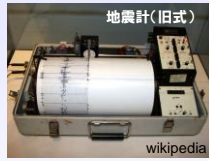
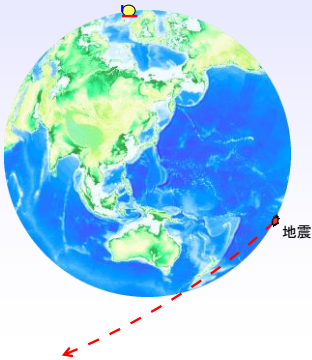
- 長さ 210m
- 高さ 130m
- 総トン数
- マントル
- プレート境界型地震の発生現場
- に到達できていない

リモートセンシングによる 地下構造解析・イメージング

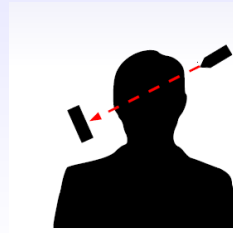


- 重力
- 熱
- 電磁気
- 地震波
- もっとも効果的

地震波を用いた地球内部構造の研究

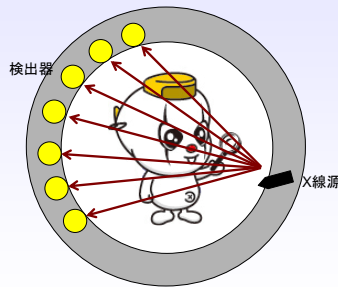
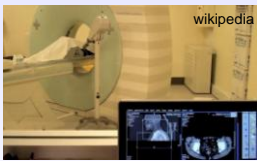


医療における身体内部の検査



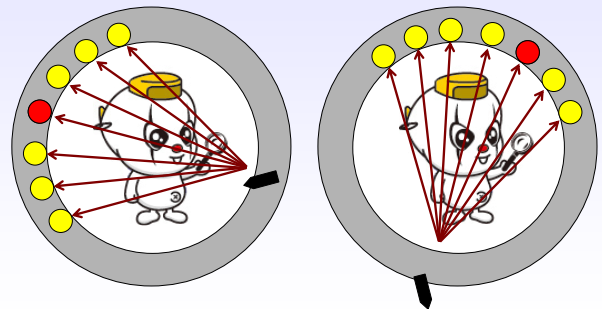
- CT
- X線
- エコー検査
- 超音波

CT (Computed Tomography)

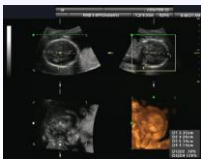


- X線、減衰(吸収)構造
 - 短波長(高解像度)
 - 全方位で調べられる
 - 真っ直ぐ伝播(波線)

トモグラフィ解析

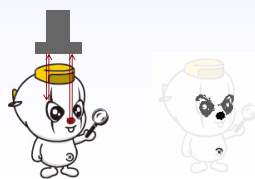


エコー(超音波)検査



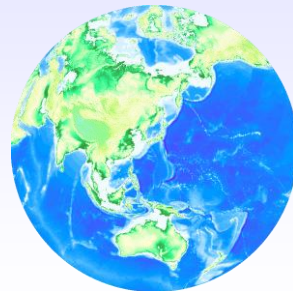
(wikipediaより)

- 超音波を出力し、その反射を測定
 - 反射強度、反射点のイメージング

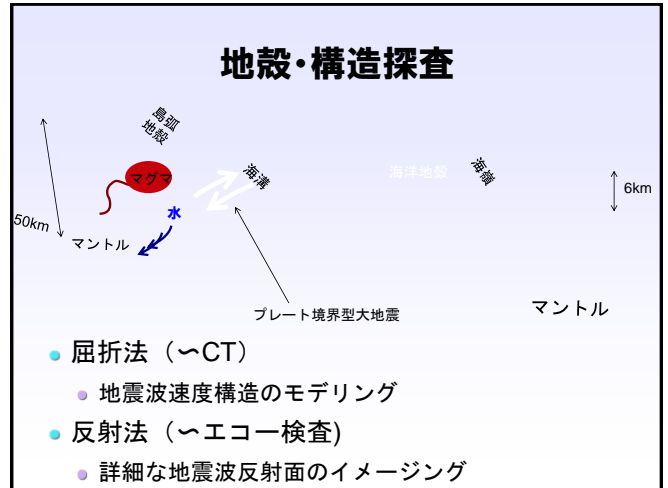
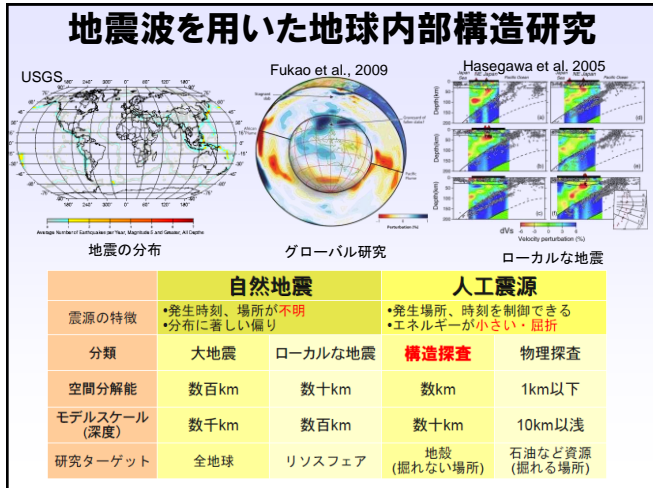


スケールの違い

← 12800km → ← 0.001km →



信号の減衰(短波長で顕著)



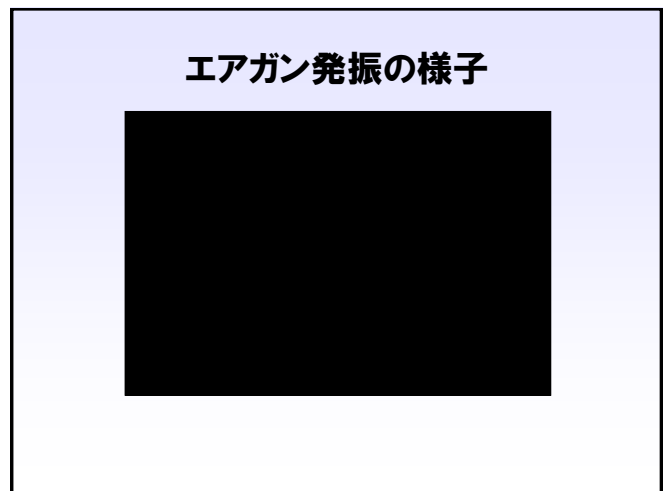
- ### Today's talk
- 1 構造探査の概要
 - 観測・データ
 - 2 屈折法 (〜CT)
 - 地震波(P波)速度構造モデリング
 - 3 反射法 (〜エコー検査)
 - 地震波反射面のイメージング
 - 4 より高度なモデリング・イメージング手法
 - 地震波干渉法の活用と深度イメージング
 - S波速度構造モデリング
 - 5 解析結果の解釈



観測機器

見えているのは「浮き」のみ

- 「かいれい」
 - 全長 106m
 - 総トン数 4517トン
 - 最大速力 16ノット
 - 行動日数 約1月
 - 定員 60名 (研究者22名)
- エアガン
 - 140気圧
 - 32基 (4x8)
 - 計7200cu.inch (約200L)
 - 100~600cu.in.の4種類
 - インパルスのな波形

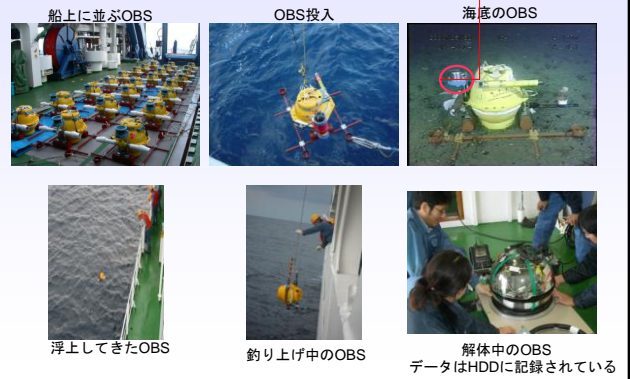


構造探査用 OBS (屈折法調査)



- センサ
 - 3成分 4.5Hz 加速度
 - ハイドロフォン
 - 100Hzサンプリング
 - ターゲット: 4Hz - 20Hz
- 設置間隔・期間
 - 1km ~ 10km
 - 最大3ヶ月
- 所有台数

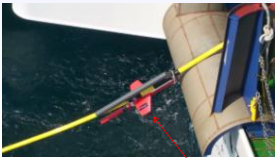
OBS観測



ハイドロフォン・ストリーマー (反射法調査)

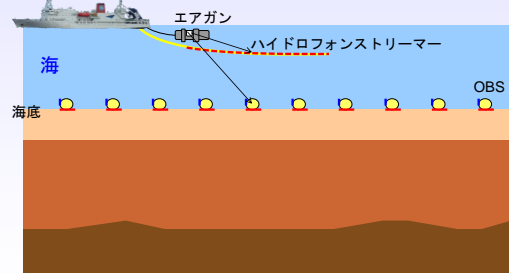


- 長さ 約6km
- センサ 444ch
- センサ間隔 12.5m
- 船尾から曳航
 - 深度8~20m
 - 深度一定となるように調整 (bird)



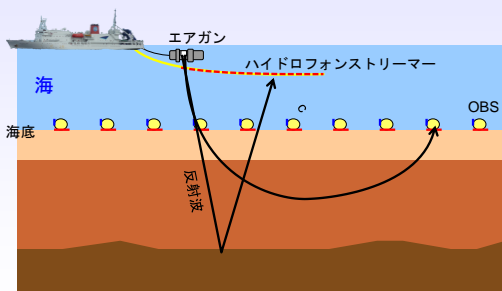
Bird (翼の角度により深度を調整)

構造探査



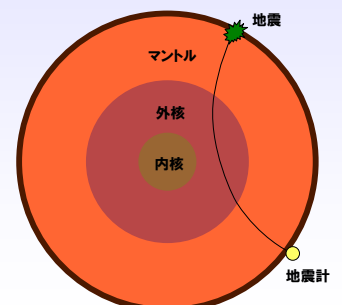
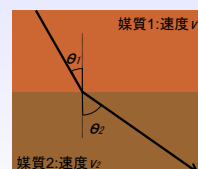
ダイレクトウェーブ (直達波) は水の中しか通らない!

反射波・屈折波



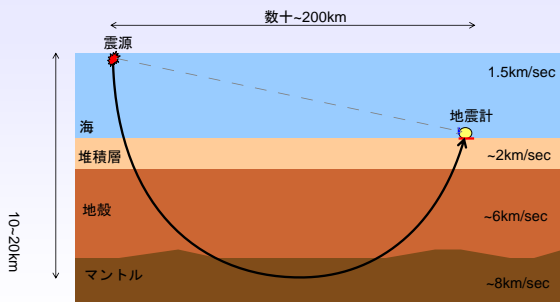
屈折 … 地震波の伝播経路 (波線) は構造に依存する

地震波(実体波)の屈折



- スネルの法則
- 地球内部
 - 基本的に、深部ほど高速度 → ダイビングウェーブ

地殻:強い速度不均質 = 顕著な屈折



非線形性

- ▶ 地下構造の解析に地震波を利用したい
- ▶ しかし地震波の伝播経路(波線)を知るには地下構造が必要

本講演の結論

地下構造イメージングは

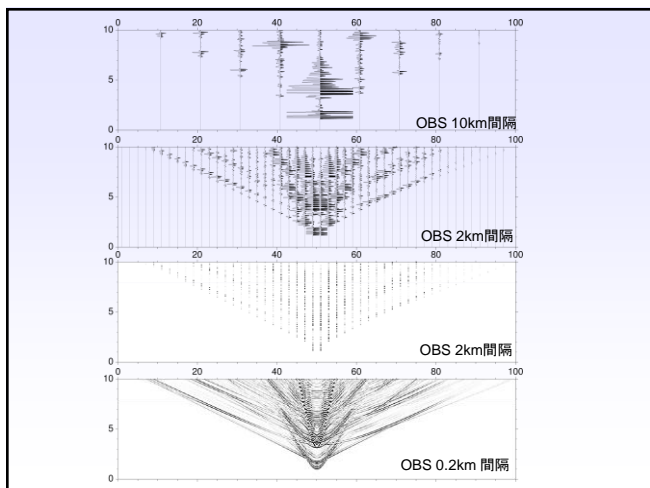
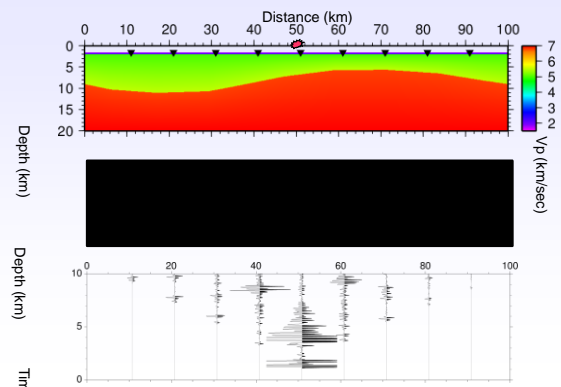
難しい!

そして泥臭い

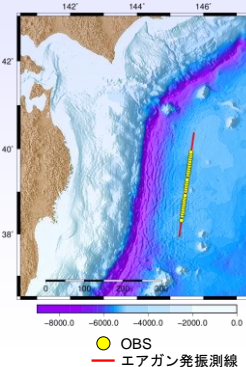
Today's talk

- 1 構造探査の概要
 - 観測・データ
- 2 屈折法 (〜CT)
 - 地震波(P波)速度構造モデリング
- 3 反射法 (〜エコー検査)
 - 地震波反射面のイメージング
- 4 より高度なモデリング・イメージング手法
 - 地震波干渉法の活用と深度イメージング
 - S波速度構造モデリング
- 5 解析結果の解釈

OBS-エアガン探査

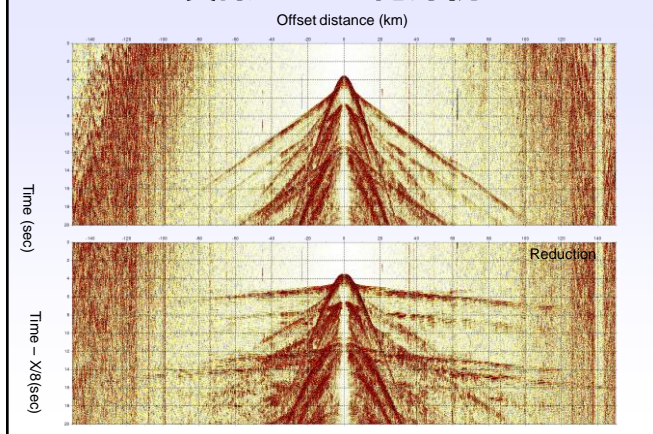


エアガン-OBS構造探査 日本海溝沖調査の例

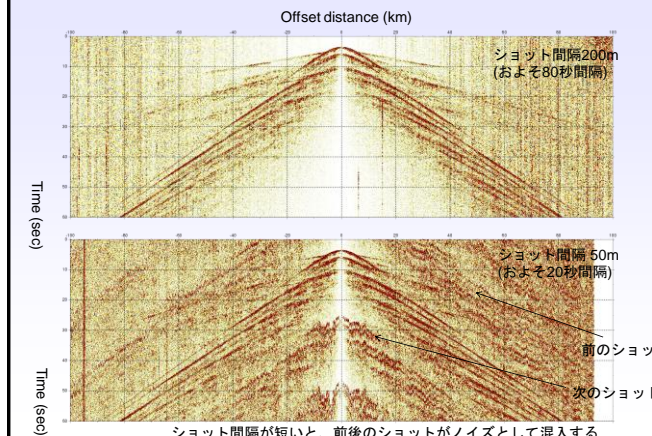


- 直線上にOBSを設置
 - 6km間隔、約33台
 - 2日程度
- 同測線上でエアガンを発振
 - 200m間隔
 - 2日程度
- OBSを回収
 - 4日程度
- データの取り出し・解析

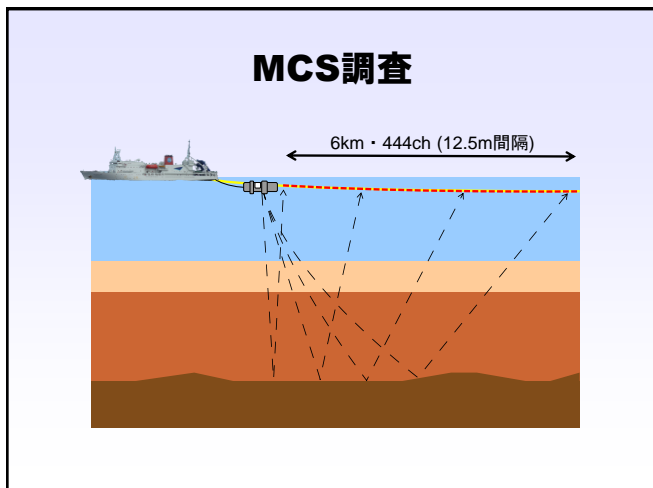
実際のOBS記録例



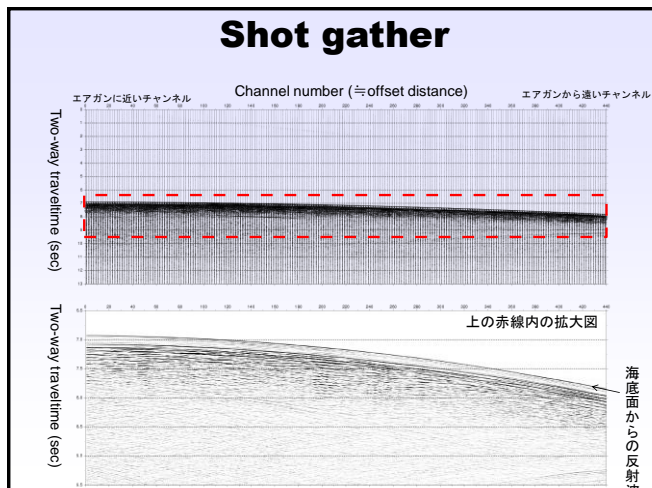
実際のOBS記録例



MCS調査



Shot gather

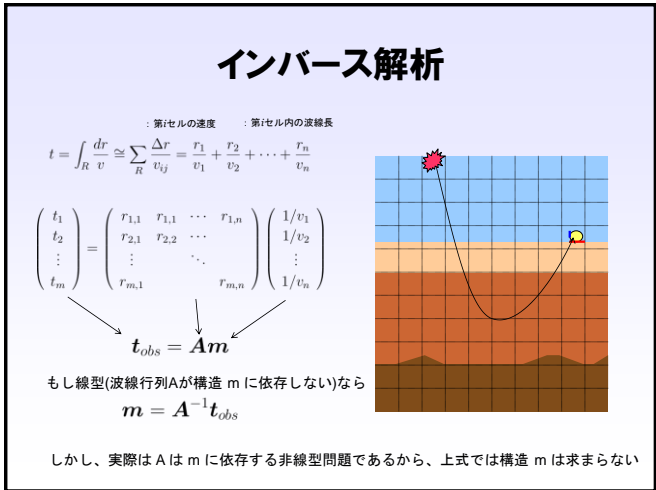
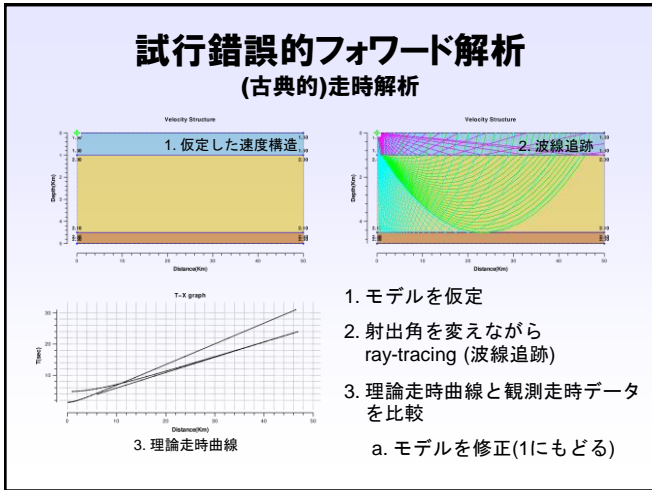
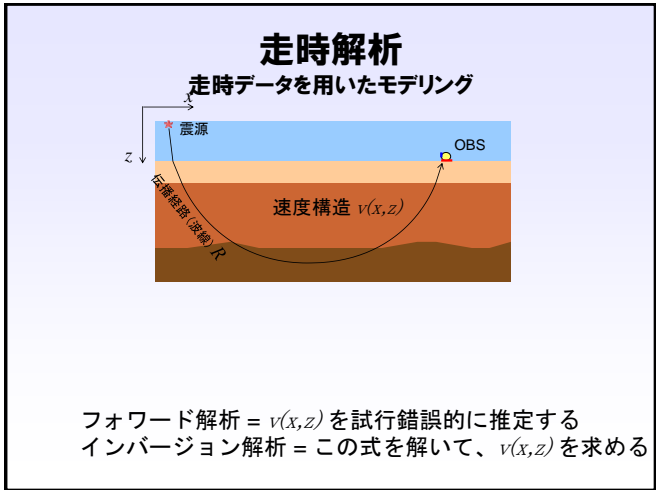
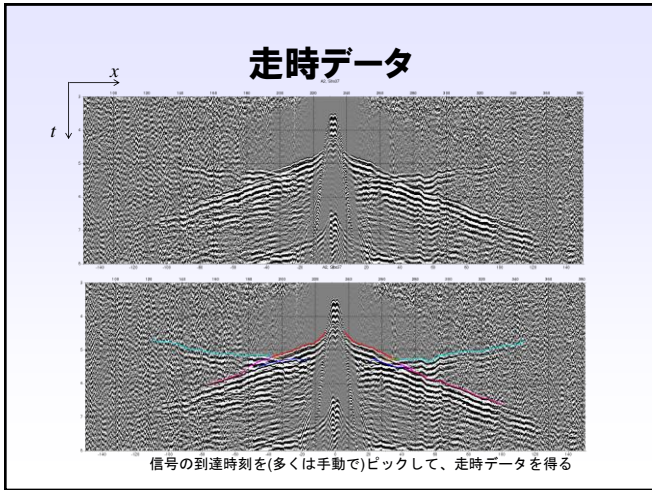


Today's talk

- 1 構造探査の概要
 - 観測・データ
- 2 屈折法 (〜CT)
 - 地震波(P波)速度構造モデリング
- 3 反射法 (〜エコー検査)
 - 地震波反射面のイメージング
- 4 より高度なモデリング・イメージング手法
 - 地震波干渉法の活用と深度イメージング
 - S波速度構造モデリング
- 5 解析結果の解釈

屈折法とは

- オフセット距離（震源-受信点間距離）が大きい
 - 屈折波が観測しやすい
 - 走時曲線(T-X断面) から地震波速度が推定しやすい
 - 広角（大オフセット）の反射波も顕著
 - 最近では 屈折法・広角反射法 と呼ばれる
 - 深部反射面のモデリングにも有効
 - 主に走時を用いた解析が適用される
 - データ密度が低い
- ※走時：震源から受信点に到達するまでの時間



非線型問題の線形化

走時 t は、モデル(速度構造) m と非線型な関数 f で関係付けられるとする。すなわち、

$$t = f(m)$$

観測走時 t_{obs} は、誤差を ϵ を含むため、真の構造 m_{true} とは下記のような関係にある。

$$t_{obs} = f(m_{true}) + \epsilon$$

真の構造 m_{true} に近い構造 m_0 の回りで Taylor 展開すると、

$$f(m_{true}) = f(m_0) + A(m_{true} - m_0) + \dots$$

となる。ここで、 A_{ij} はヤコビアン。

$$A_{ij} = \frac{\partial f_i(m_0)}{\partial m_j}$$

モデル m_0 で計算した数値記象を t_0 とすると、

$$t_{obs} = t_0 + A(m_{true} - m_0) + \epsilon$$

$\Delta t \equiv t_{obs} - t_0$ 、 $\Delta m \equiv m_{true} - m_0$ とすると、

$$\epsilon = \Delta t - A\Delta m$$

となる。

ϵ を最小にするために最小二乗法を用い、さらにモデルパラメータやデータの不定性の共分散行列を用いると、解くべき方程式は、

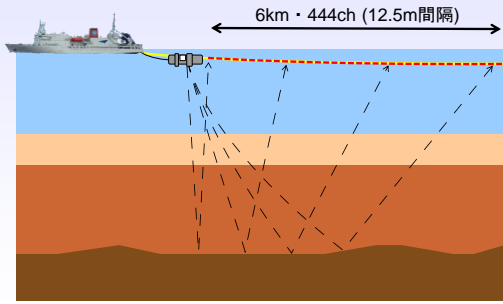
$$(A_k^T C_d A_k + C_m) \Delta m_k = A_k^T C_d (\Delta t_k) + C_m (m_0 - m_k)$$

のようになる。実際には、これに平滑化パラメータなども追加した式を解く。

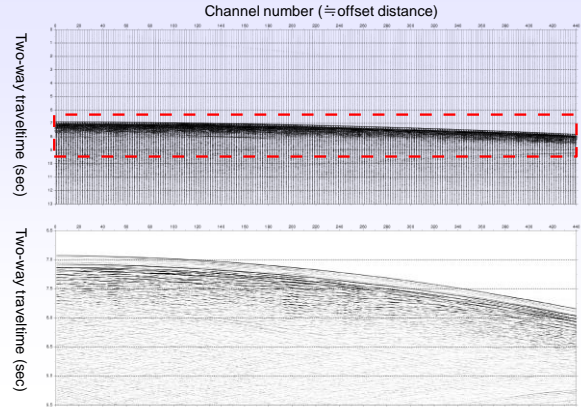
なお、非線型型であるため、モデルを修正しながら、収束するまで繰り返し解く。

- ### Today's talk
- 1 構造探査の概要
 - 観測・データ
 - 2 屈折法 (〜CT)
 - 地震波(P波)速度構造モデリング
 - 3 反射法 (〜エコー検査)
 - 地震波反射面のイメージング
 - 4 より高度なモデリング・イメージング手法
 - 地震波干渉法の活用と深度イメージング
 - S波速度構造モデリング
 - 5 解析結果の解釈

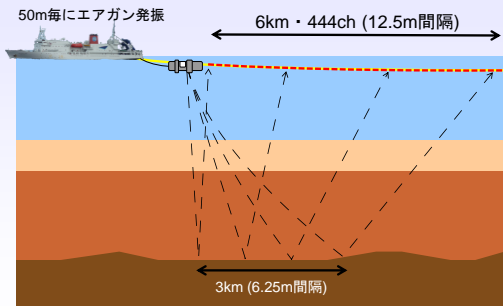
MCS調査



Shot gather

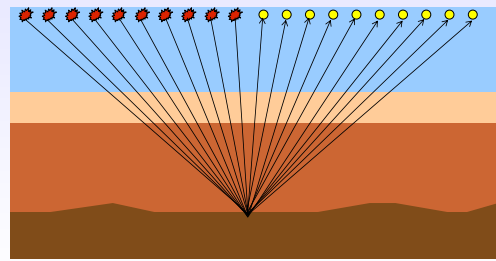


反射点の分布



水平成層構造(横方向に均質)ならば、
各ショット毎に反射点は3kmに6.25m間隔で分布する

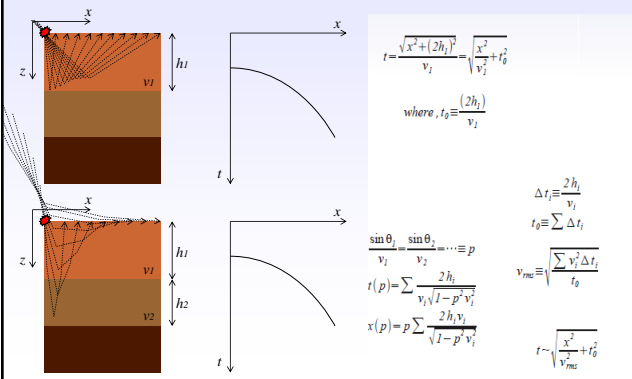
一つの場所に注目すると...



444ch, センサ12.5m, ショット50mの場合
55~56本の波線がある一つの場所で反射する

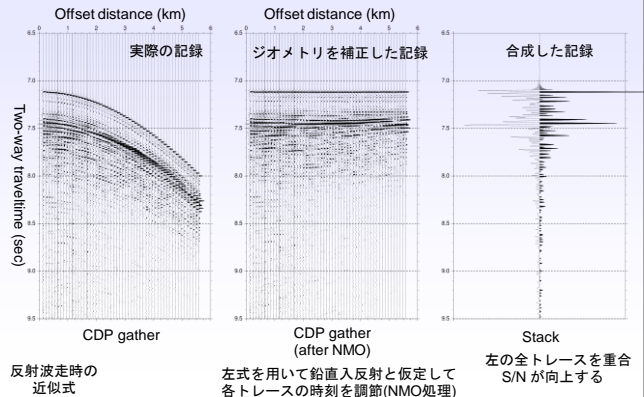
CDP(Common Depth Point) または CMP (Common Mid Point) と呼ぶ

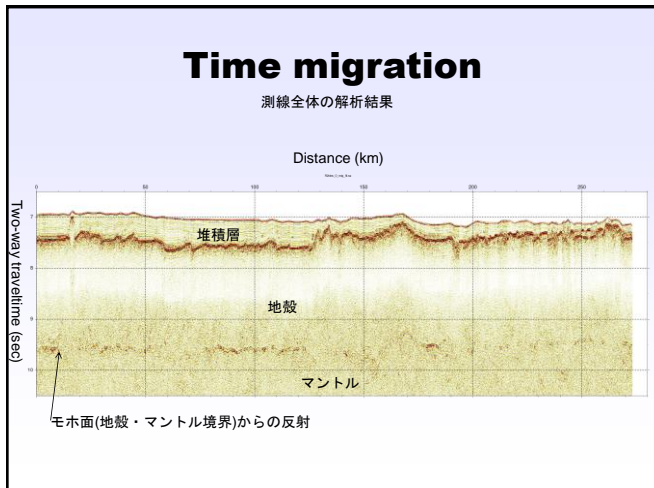
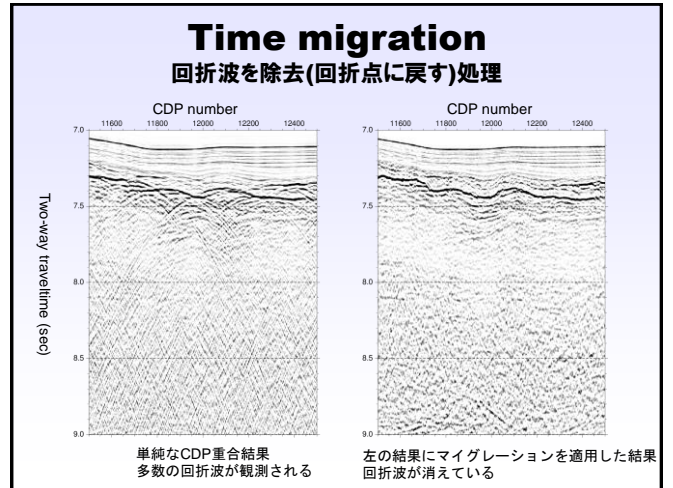
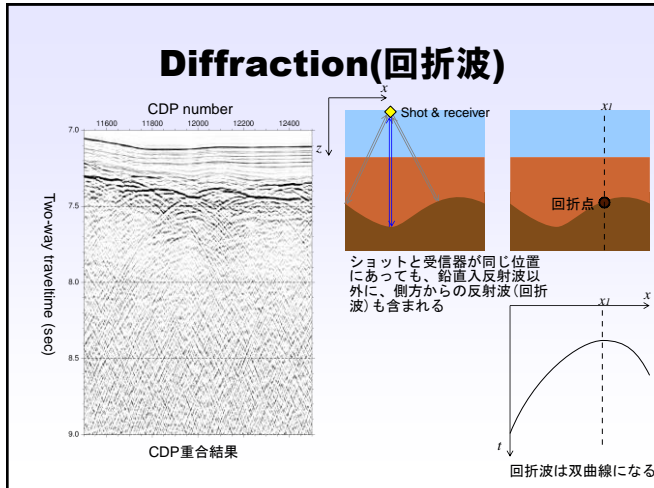
水平成層構造(横方向均質な構造)



CDP(CMP)重合

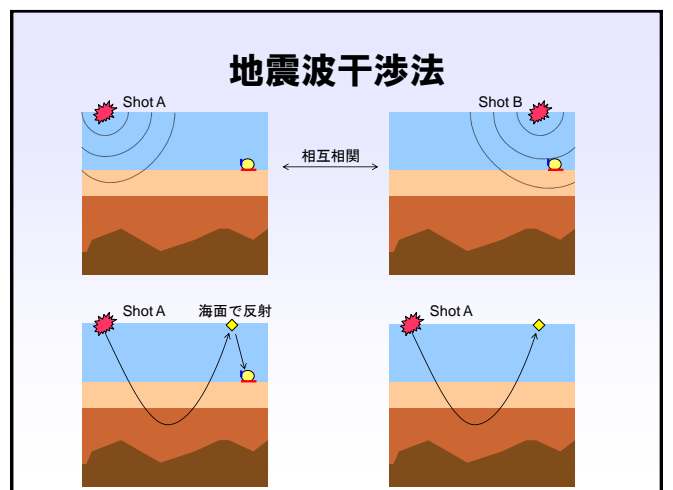
ショットと受信器が同じ場所にある場合の波形を合成





- ### 反射法イメージング技術
- Post Stack Time Migration
 - 水平成層構造を仮定
 - V_{rms} (二乗平均速度) で構造を近似的に表現
 - 比較的容易な処理
 - 速度構造が V_{rms} で推定できるため
 - Pre-Stack Depth Migration (PSDM)
 - 不均質な構造でのイメージング
 - 実際の速度構造を反映
 - かなりの労力が必要
 - 速度構造の構築が難しい

- ### Today's talk
- 1 構造探査の概要
 - 観測・データ
 - 2 屈折法 (〜CT)
 - 地震波(P波)速度構造モデリング
 - 3 反射法 (〜エコー検査)
 - 地震波反射面のイメージング
 - 4 より高度なモデリング・イメージング手法
 - 地震波干渉法の活用と深度イメージング
 - S波速度構造モデリング
 - 5 解析結果の解釈



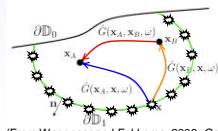
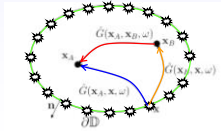
地震波干渉法

損失のない不均質音響媒体

$$2\Re \left[\hat{G}(x_A, x_B, \omega) \right] \approx \frac{2}{\rho c} \oint_{\partial D} \left[\hat{G}^*(x_A, x, \omega) \hat{G}(x_B, x, \omega) \right] d^2x$$

境界が自由表面を含む場合

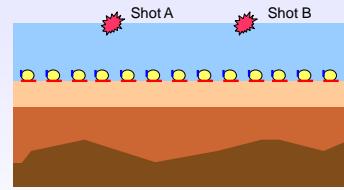
$$2\Re \left[\hat{G}(x_A, x_B, \omega) \right] \approx \frac{2}{\rho c} \int_{\partial D_1} \left[\hat{G}^*(x_A, x, \omega) \hat{G}(x_B, x, \omega) \right] d^2x$$



(From Wapenaar and Fokkema, 2006, Geophysics)

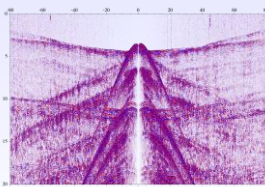
(白石, 2010)

地震波干渉法

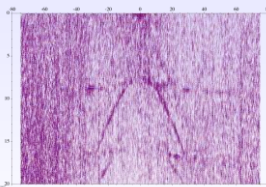


- 多くのOBSがあれば適切に合成可能
- 結果として、全てのショット点を受信点とする受信点記録が合成できる
 - 0.2km間隔の受信点 (元データは6km間隔)

合成例



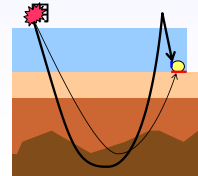
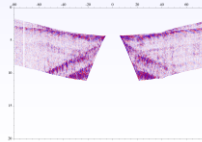
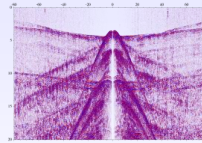
通常のOBS記録断面



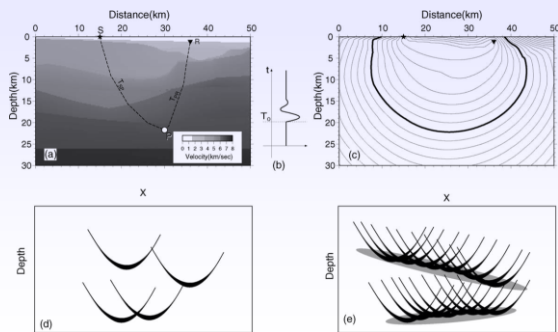
合成断面

地震波干渉法のメリット

- データ密度が向上
 - 波動場を用いた処理が可能になり、**スタック**によりS/Nの向上が期待される
 - 従来捨てていた多重反射より後のデータを活

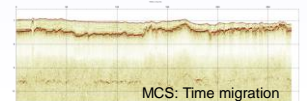
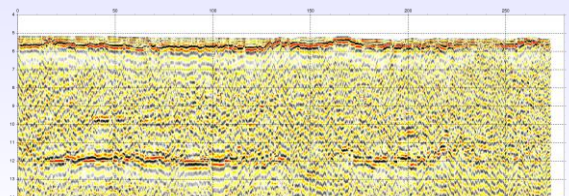


PSDM PreStack Depth Migration



Fujie et al. (2006)

OBSデータ+地震波干渉法+PSDM



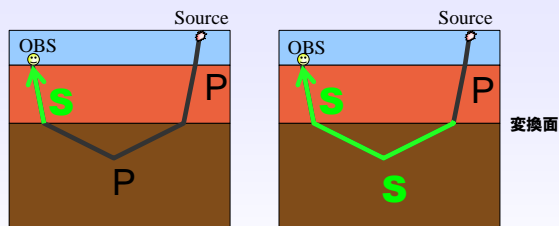
Today's talk

- 1 構造探査の概要
 - 観測・データ
- 2 屈折法 (〜CT)
 - 地震波(P波)速度構造モデリング
- 3 反射法 (〜エコー検査)
 - 地震波反射面のイメージング
- 4 より高度なモデリング・イメージング手法
 - 地震波干渉法の活用と深度イメージング
 - S波速度構造モデリング
- 5 解析結果の解釈

Vs構造のモデリング

- 海洋探査
 - 震源が水中にあり、震源からはS波が出ない
 - 観測される水平動は、PS変換波
- Vs構造のモデリングに必要な条件
 - PS変換波が観測できること
 - 変換する場所(変換面)が特定できること

二種類のPS変換波

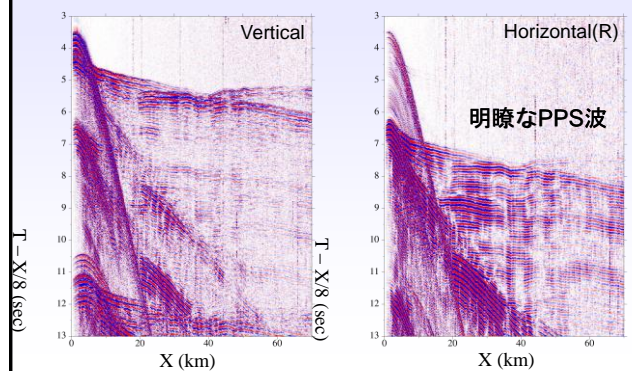


PPS

PSS

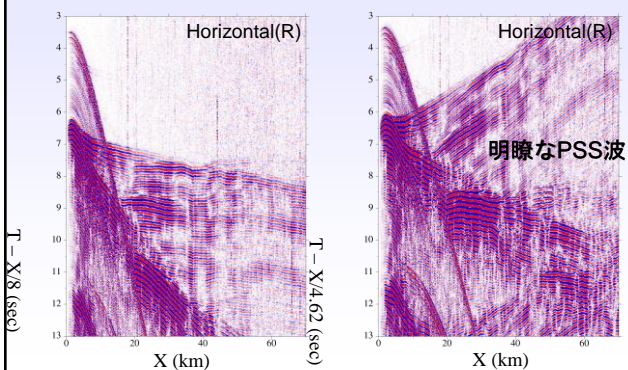
- 浅部のS波構造
 - 深部のS波構造
- 両フェーズとも必要

上下動成分と水平動成分(PPS)

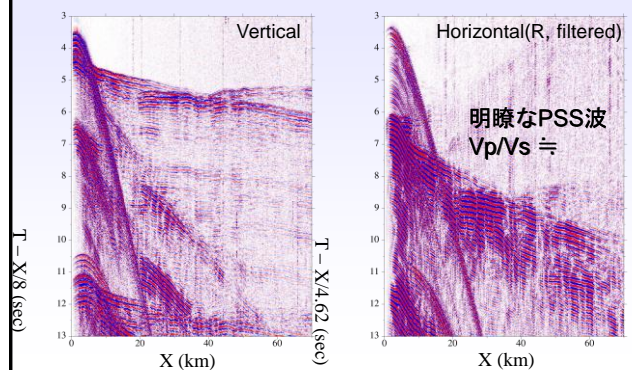


水平動成分(PPSとPSS)

($r_v=8\text{km/s}$, 4.62km/s)

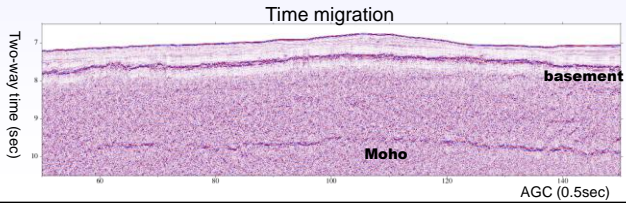


上下動($r_v=8$)、水平動($r_v=4.62$)



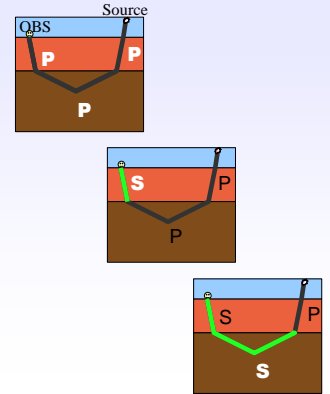
変換面

- もっとも acoustic impedance 比の大きい堆積層と地殻の境界面(堆積層基盤)と考えられる

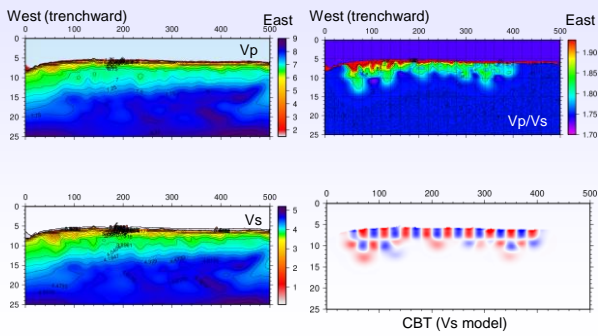


Vs構造:走時解析の手順

- 3ステップ
 1. Vp構造
 2. 変換面以浅Vs構造
 3. 変換面以深のVs構造



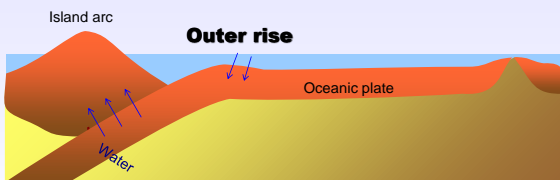
A3: Vs and Vp/Vs



Today's talk

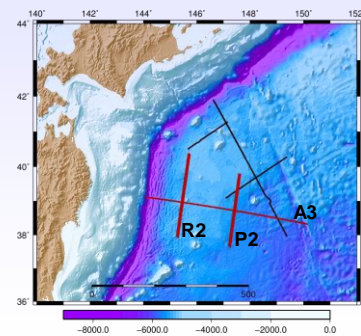
- 1 構造探査の概要
 - 観測・データ
- 2 屈折法 (〜CT)
 - 地震波(P波)速度構造モデリング
- 3 反射法 (〜エコー検査)
 - 地震波反射面のイメージング
- 4 より高度なモデリング・イメージング手法
 - 地震波干渉法の活用と深度イメージング
 - S波速度構造モデリング
- 5 解析結果の解釈

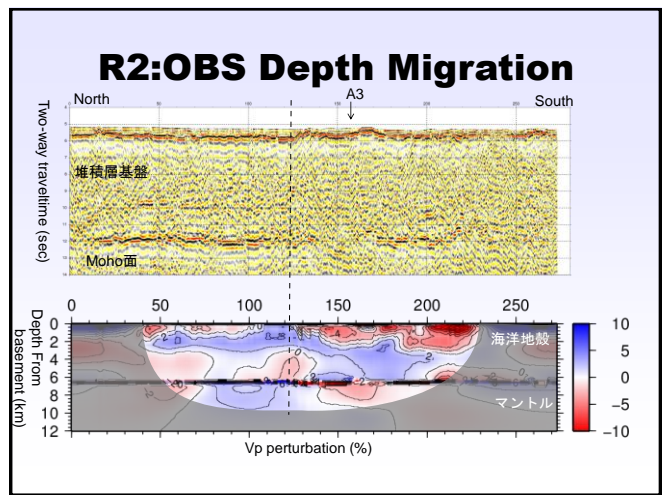
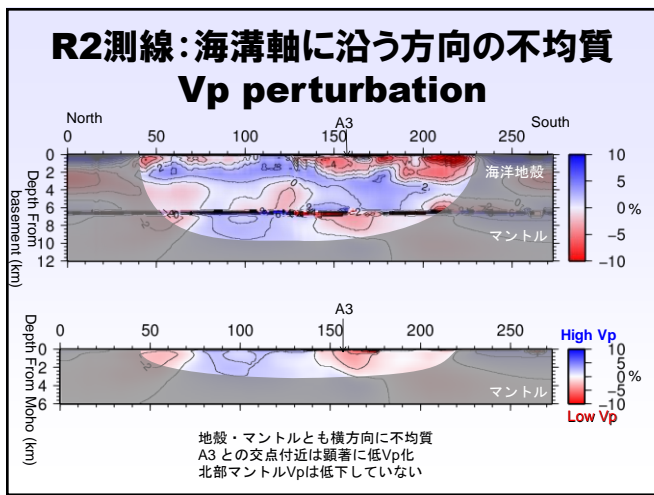
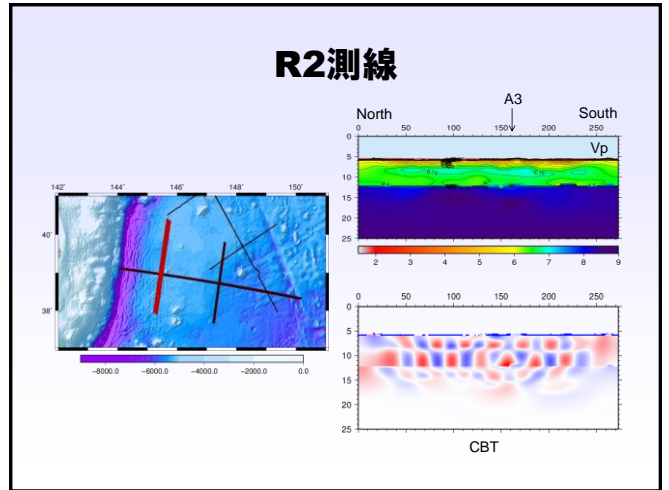
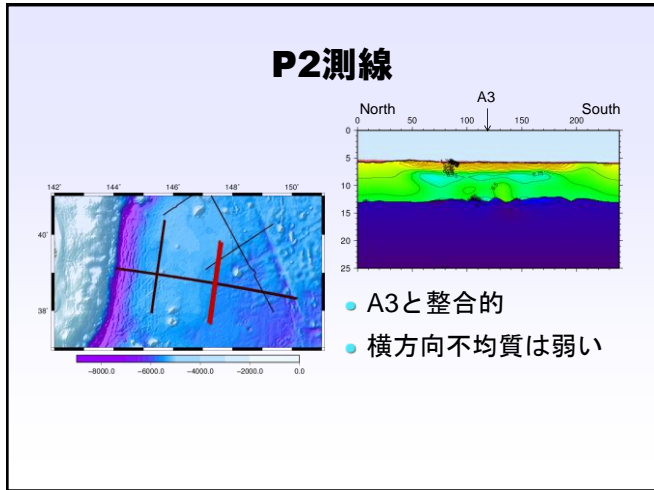
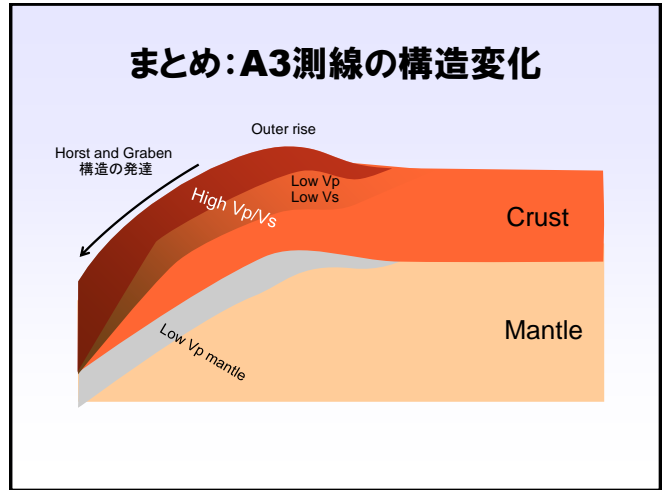
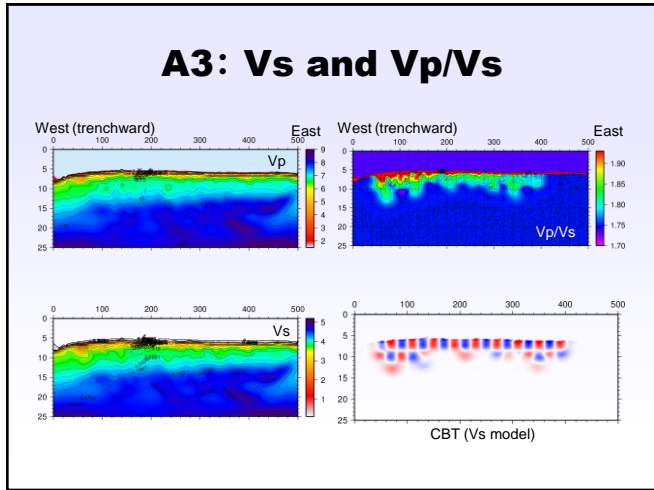
研究目的:海洋プレート

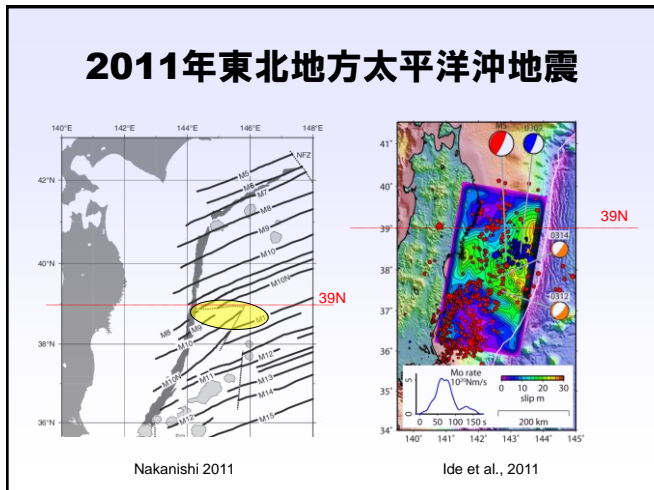
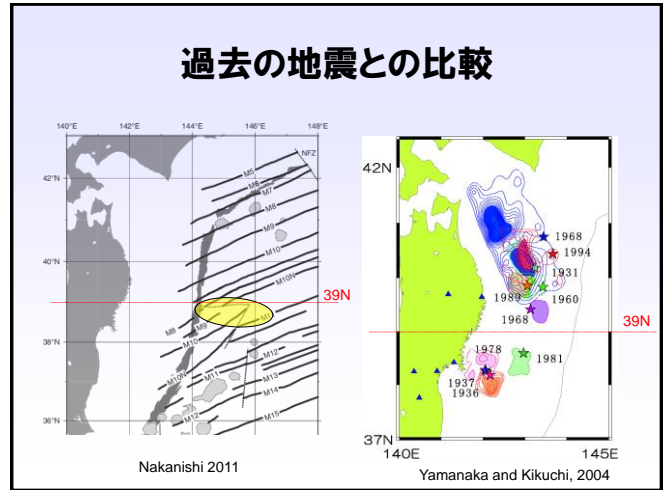
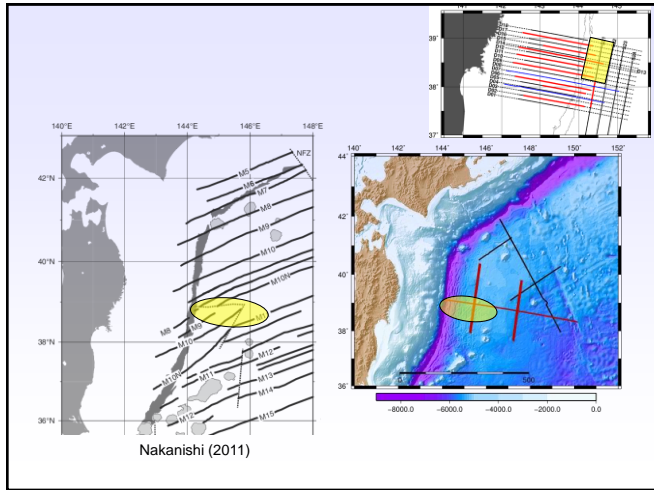


- 海洋プレートが持ち込む「水」は、沈み込み帯における地震・火山活動の発生に重要な役割を果たす
- アウターライズにおけるプレート折れ曲りは、海洋プレートに「水」が入るのを促す

探査概要







どうもありがとうございました

海洋研究開発機構
藤江 剛