

2017.06.09 金・1限
地球環境学・現代地球科学
第8回

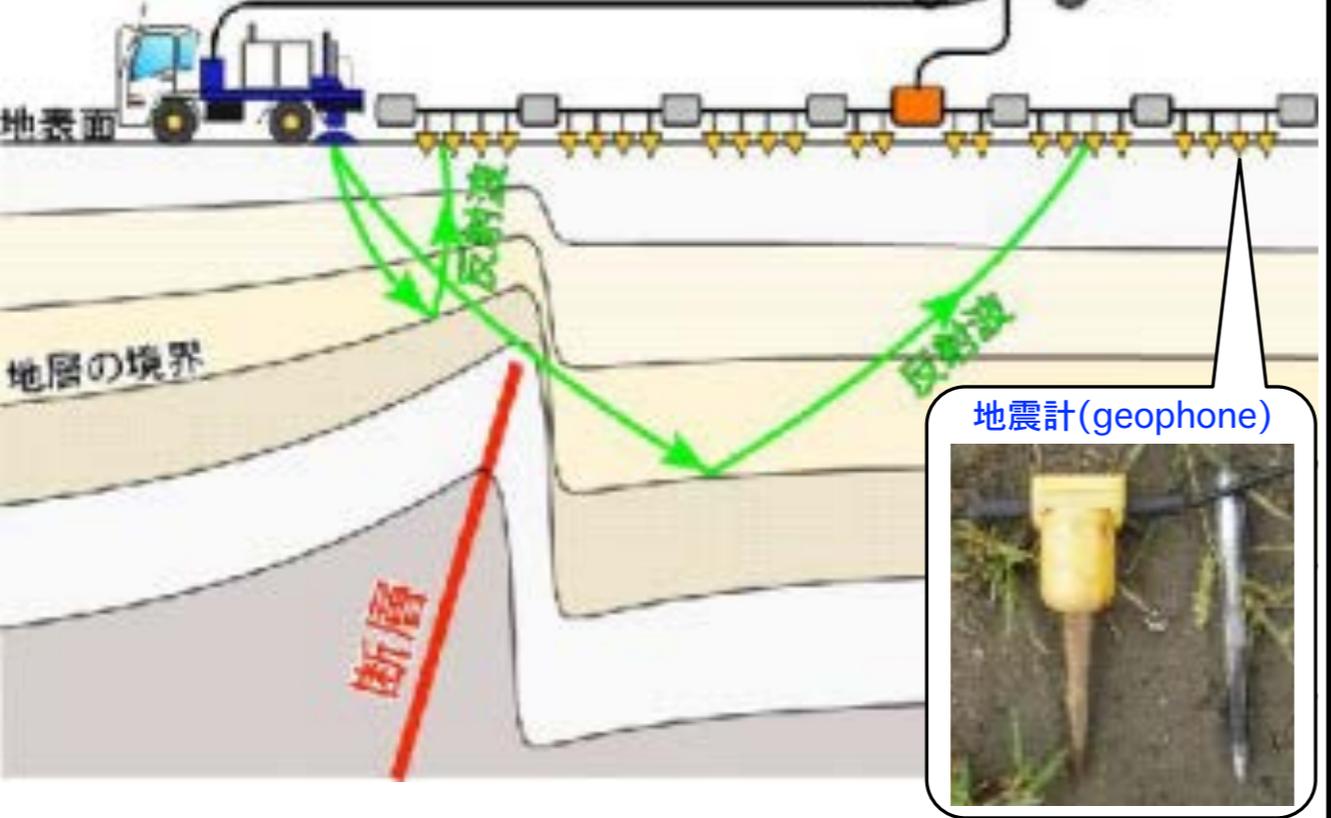
活断層の地下を探る



反射法地震探査

震源車 (振動を起こす車両)

観測車
(データ収録)



地震計 (geophone)



長野探査・犀川測線2005



振動させるためのエンジン

振動を伝える部分

重力探査

← GPS



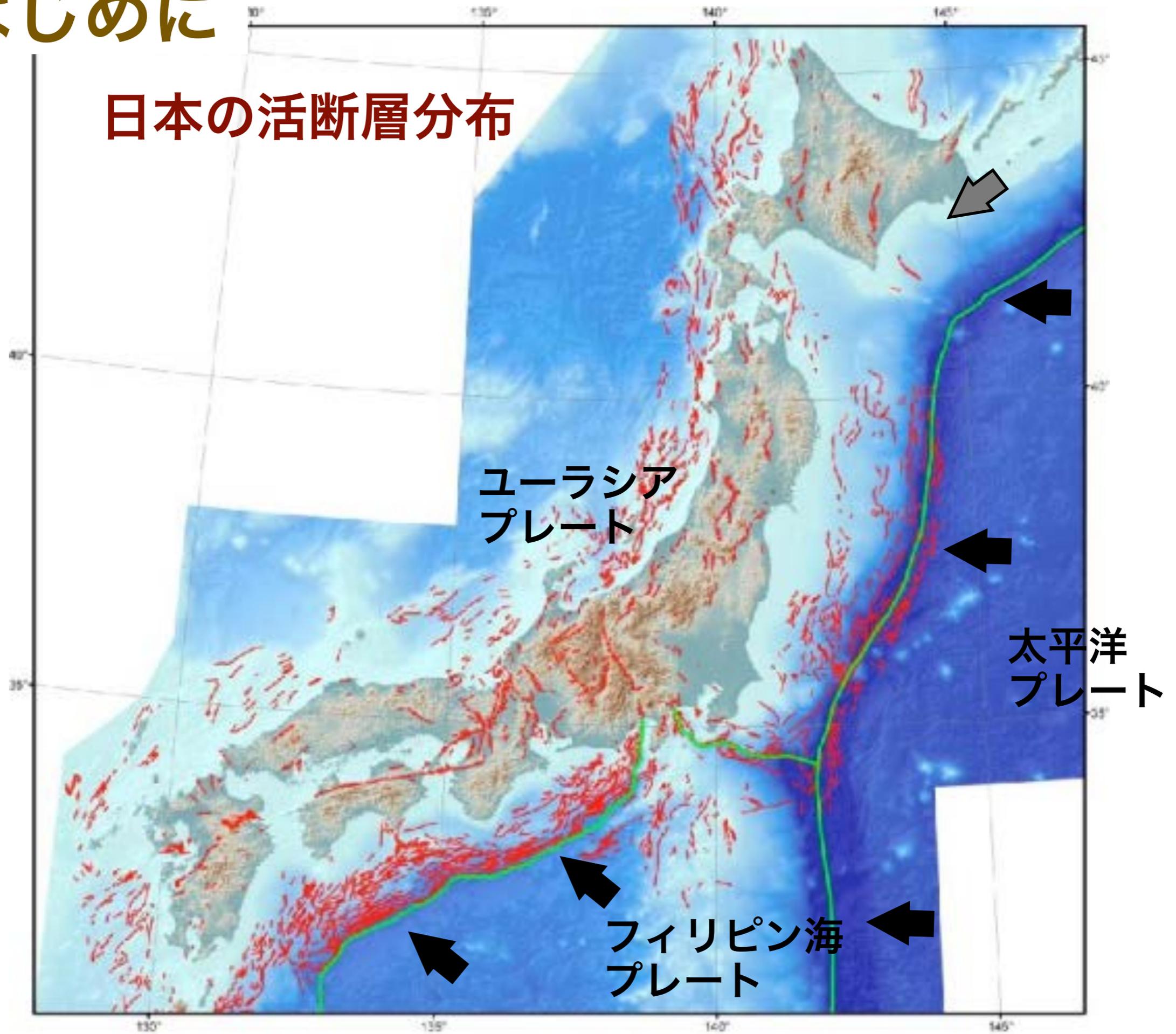
重力計



ラコスト&ロンバーグD型重力計

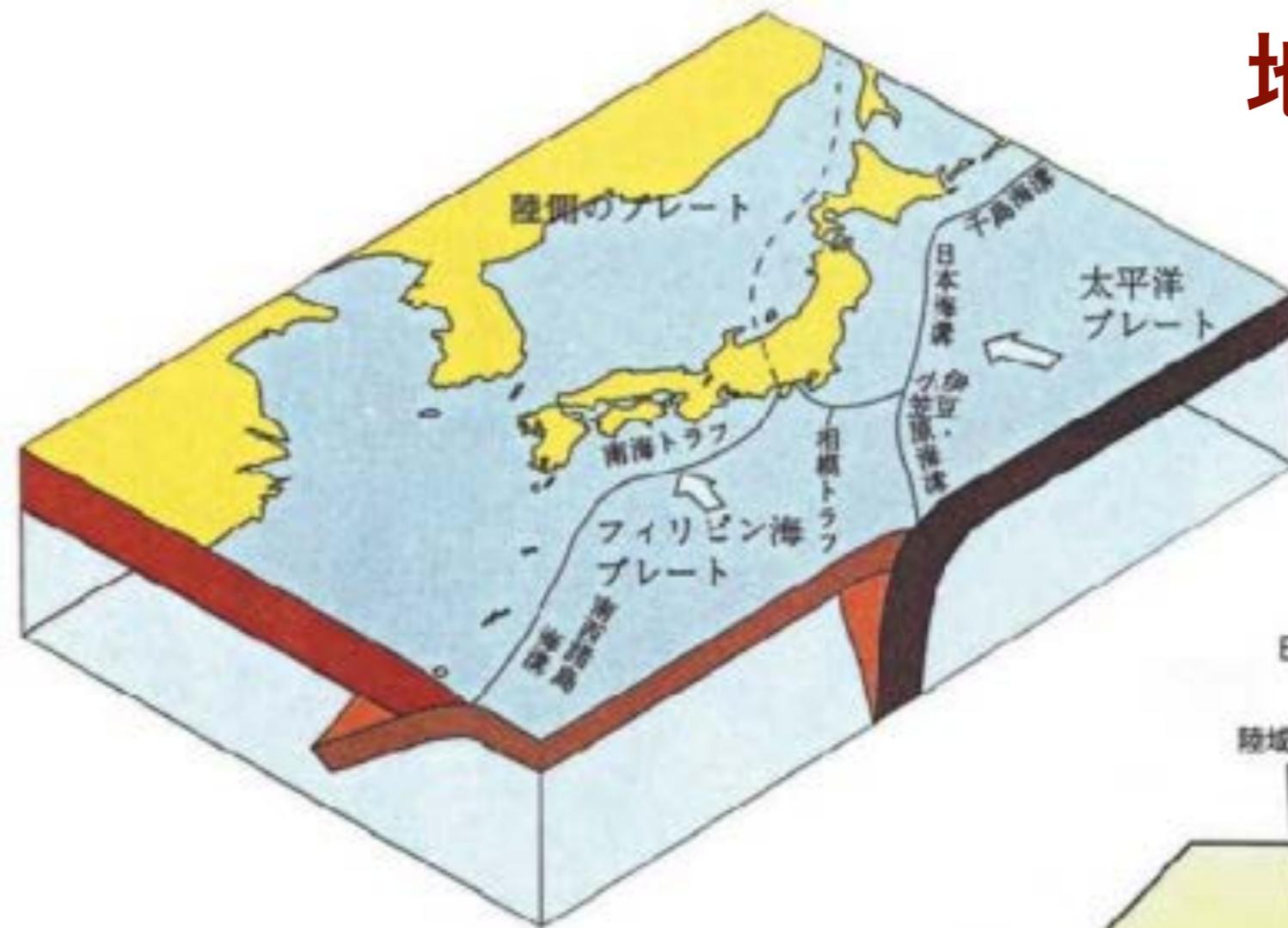
①はじめに

日本の活断層分布



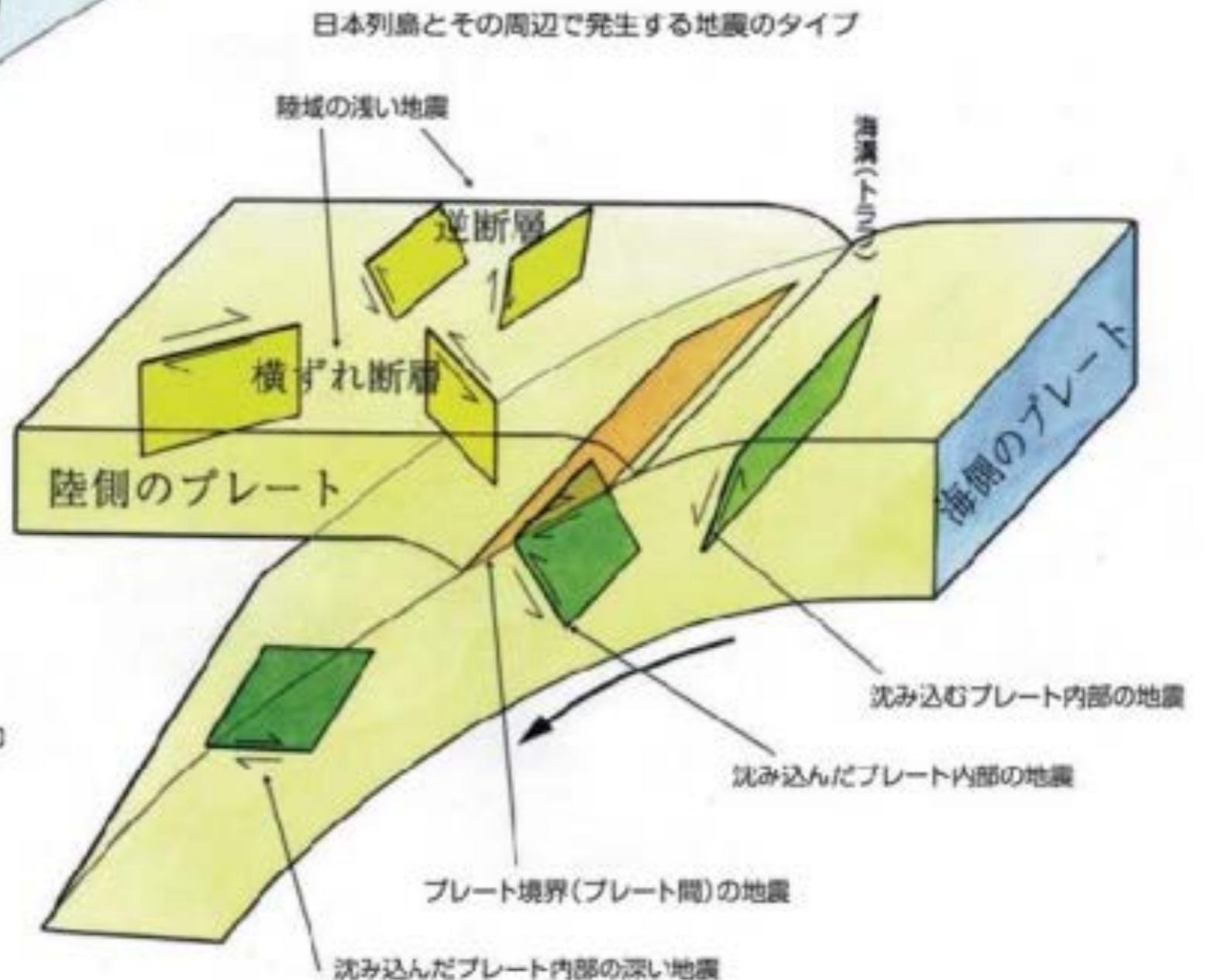
地震のタイプと活断層

プレート運動によって蓄積される弾性歪みを解放するプロセス。



図中の矢印は、陸側のプレートに対する各プレートの相対運動を示す

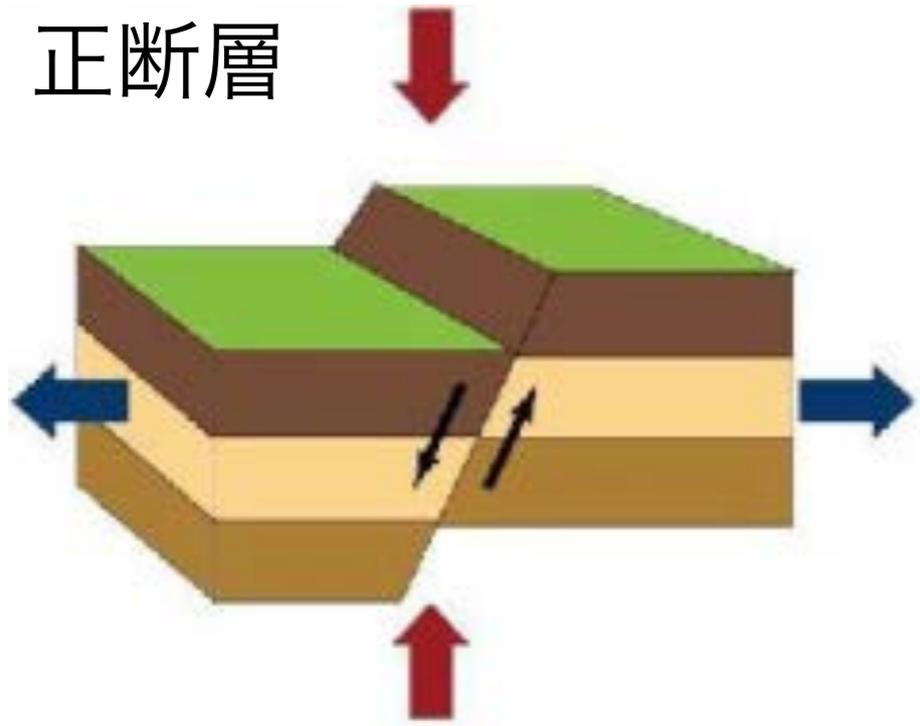
図は、「日本の地震活動」(訂補版)
(地震調査研究推進本部、地震調査委員会、1999年4月)より



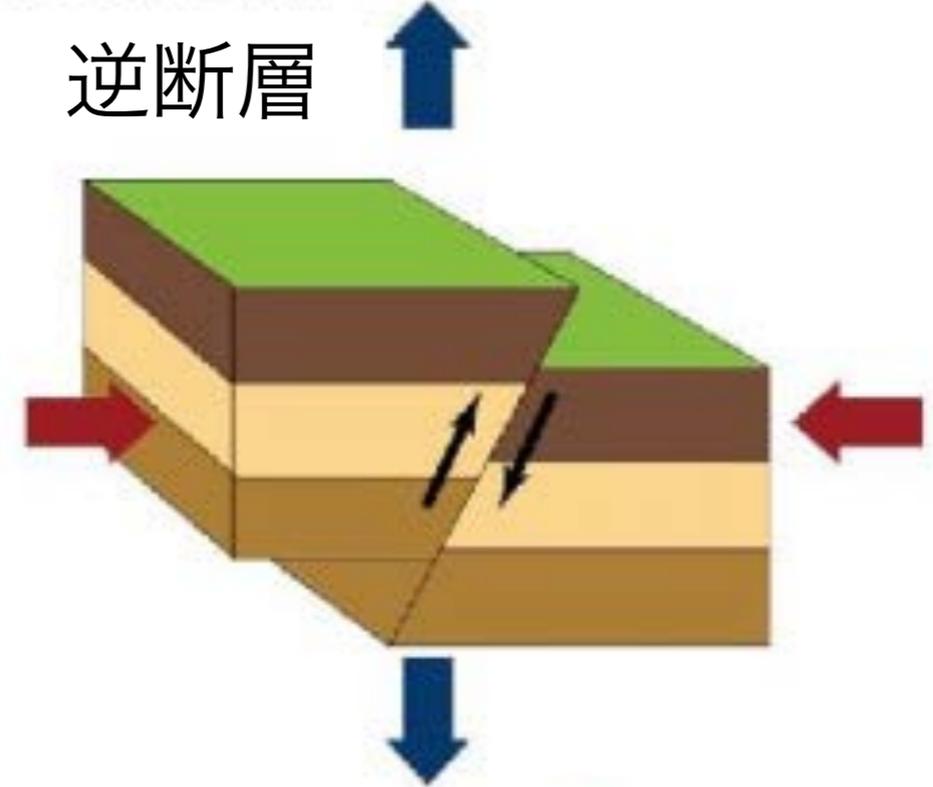
活断層のタイプ

← 圧縮の力
← 引っばりの力

正断層



逆断層



2016年熊本地震・西原村

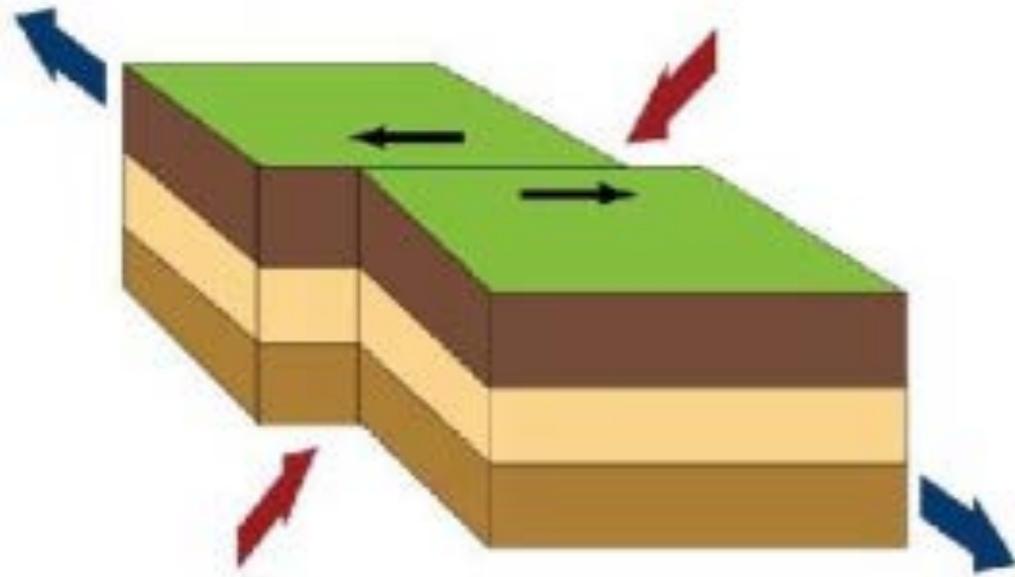


2014年長野県北部の地震・白馬村

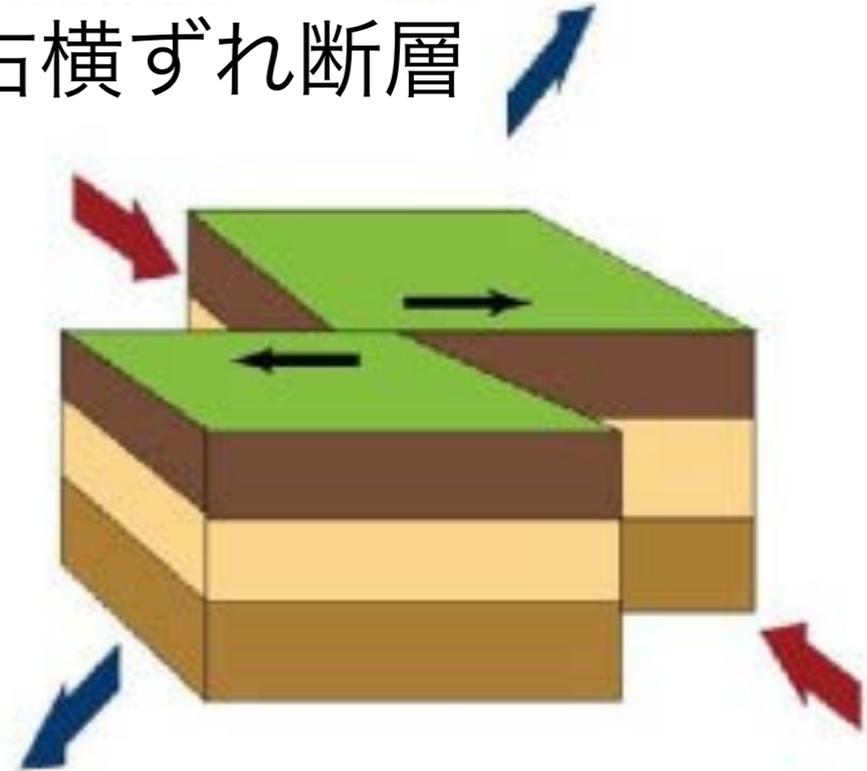


活断層のタイプ

左横ずれ断層



右横ずれ断層



← 圧縮の力
← 引っばりの力

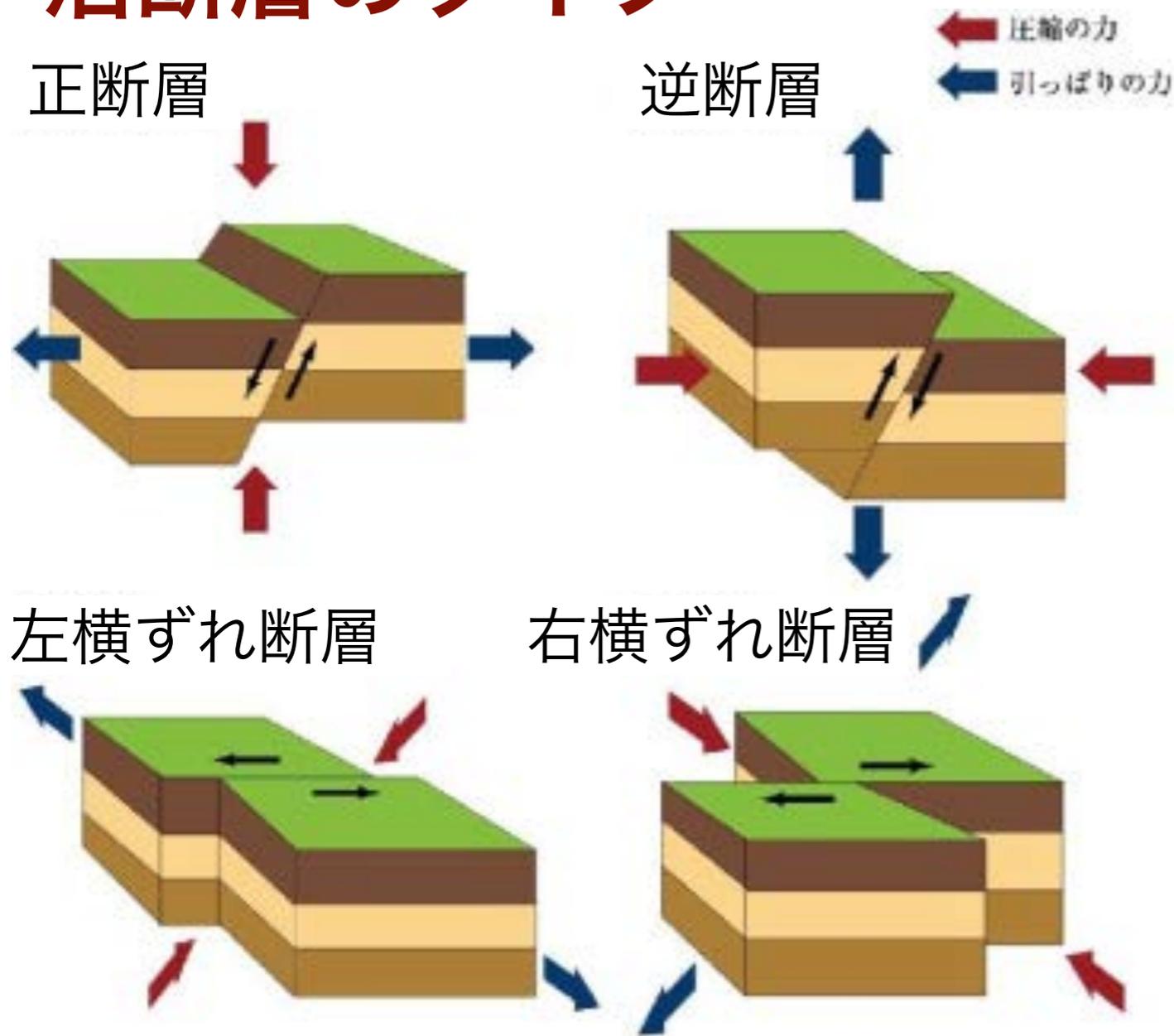


1927年北丹後地震
(中央気象台及び京都府測候所, 1927)



2016年熊本地震・南阿蘇村

活断層のタイプ



活断層の調査方法

- 空中写真判読（地形判読）
 - トレンチ調査
 - ジオスライサー調査
 - ボーリング調査
 - 反射法地震探査 ← 今回
 - 重力探査 ← 次回
- etc.

今泉先生から紹介済

活断層の地表位置は、空中写真・地表踏査・トレンチ調査 etc. で明らかになるが、活断層の地下はどのようなになっているだろうか？（左の絵の様に、地下へそのまま連続する？）

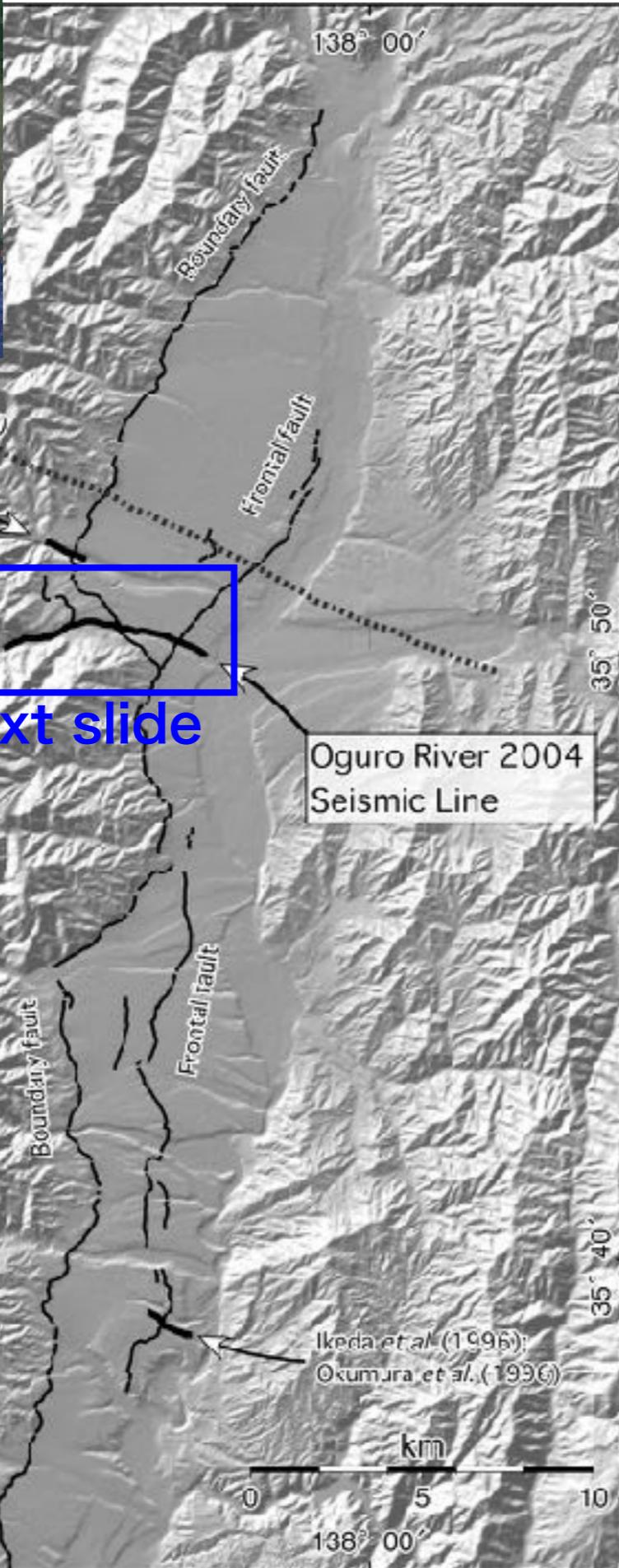
①はじめに

地下を見るための物理探査にはたくさんの種類がある

- **反射法地震探査 (seismic reflection)**
- **屈折法地震探査 (seismic refraction)**
- **電気探査 (electric exploration)**
- **磁気探査 (magnetic exploration)**
- **重力探査 (gravity survey)**
- **常時微動探査 (microtremor measurement)**

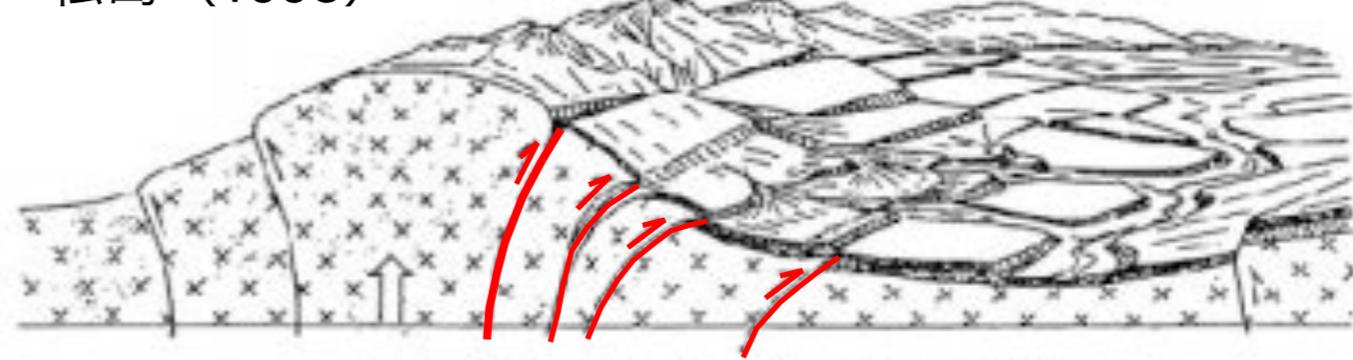
etc.

反射法地震探査の実際の断面, 伊那谷の例



松島 (1995)

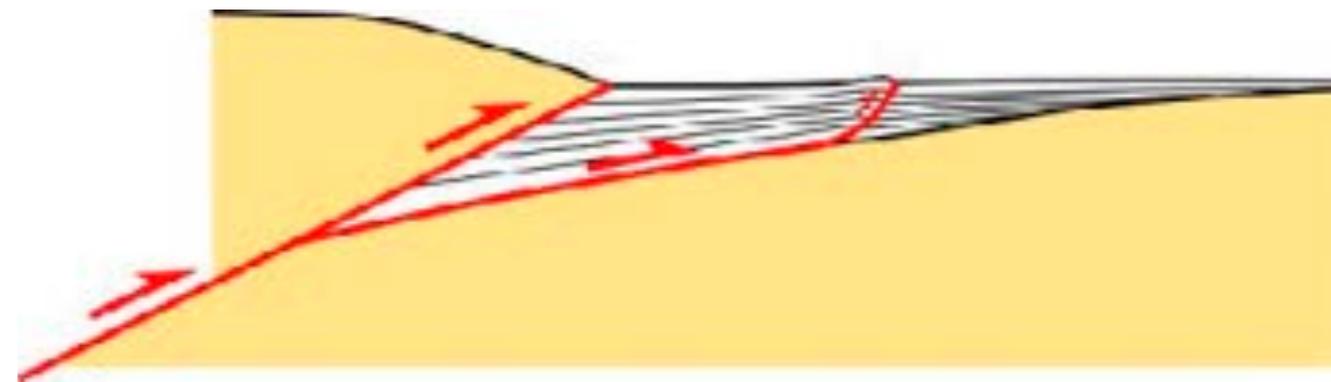
中央アルプス



しほり出し上昇ブロックのイメージ図

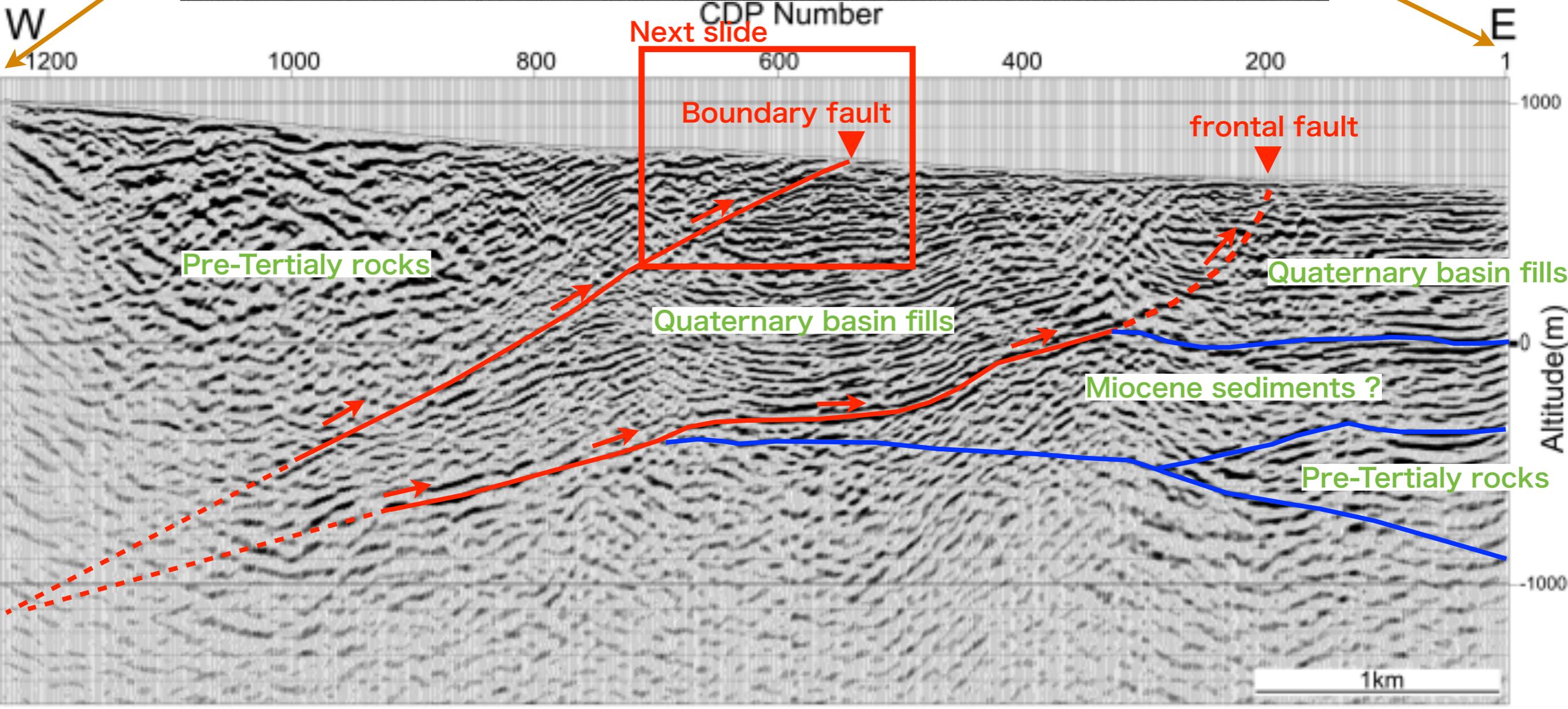
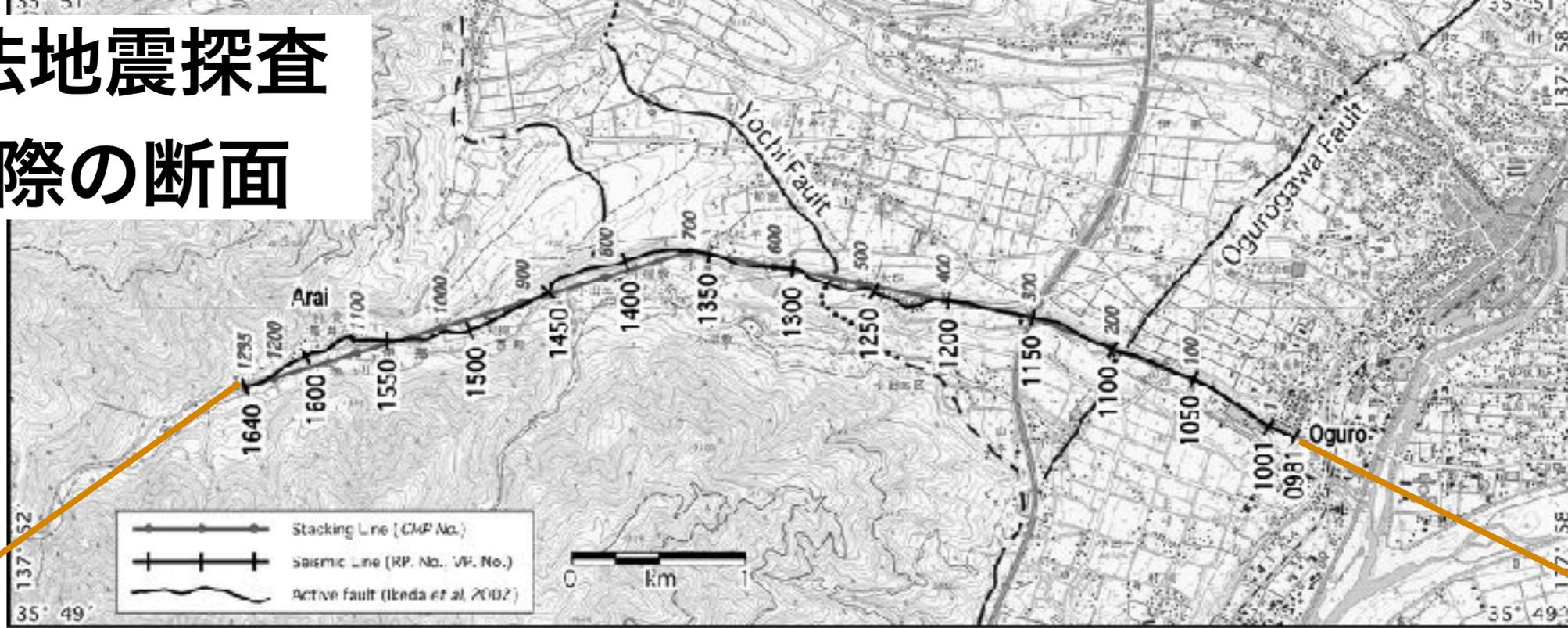
VI-13図 断層がつくる多様な地形

木曾山脈の隆起は、
↑ ↓ どちらのモデル？



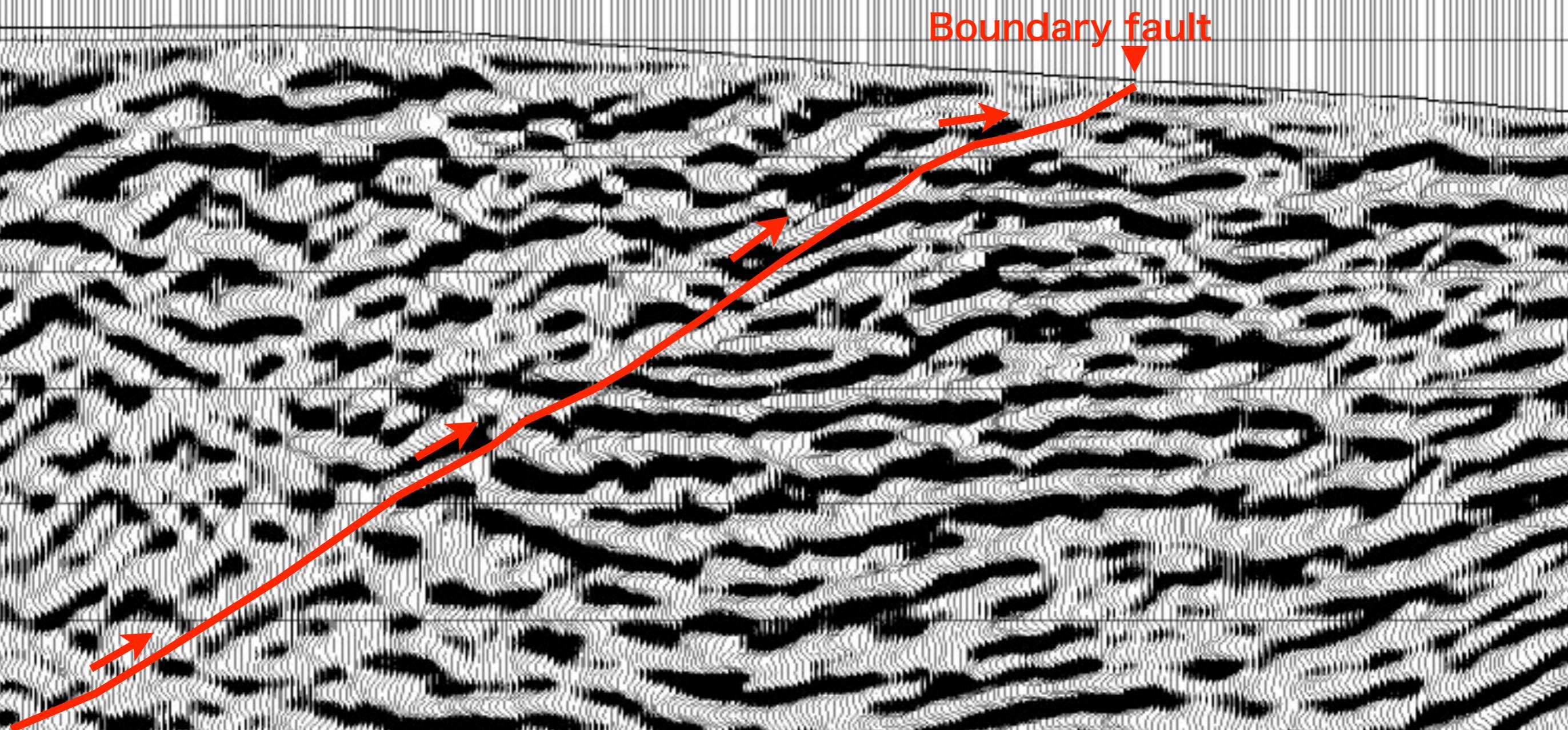
Modified from Ikeda (1983)

反射法地震探査 の実際の断面



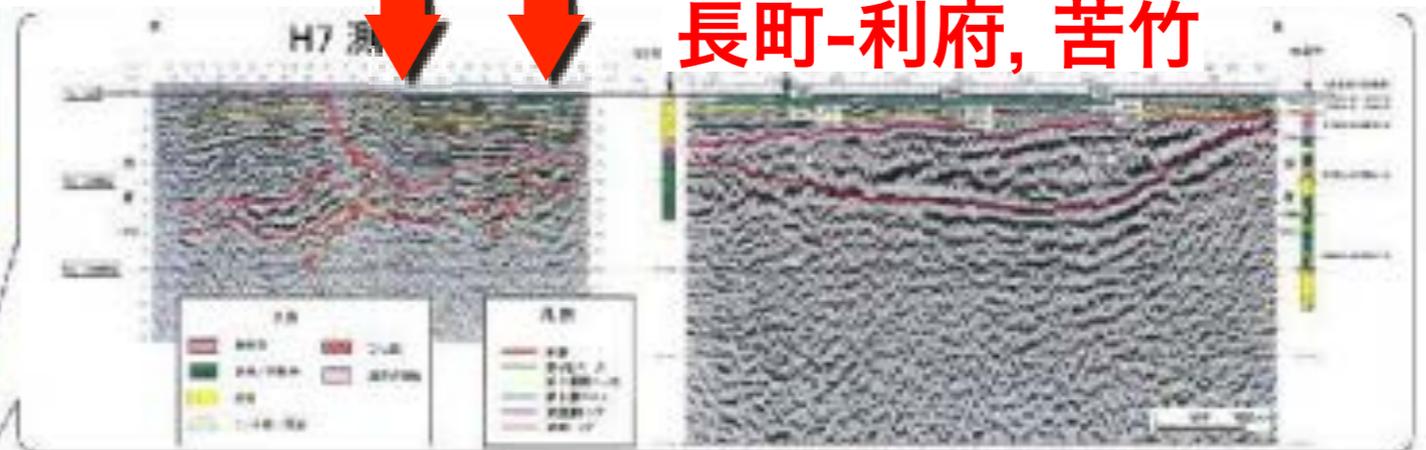
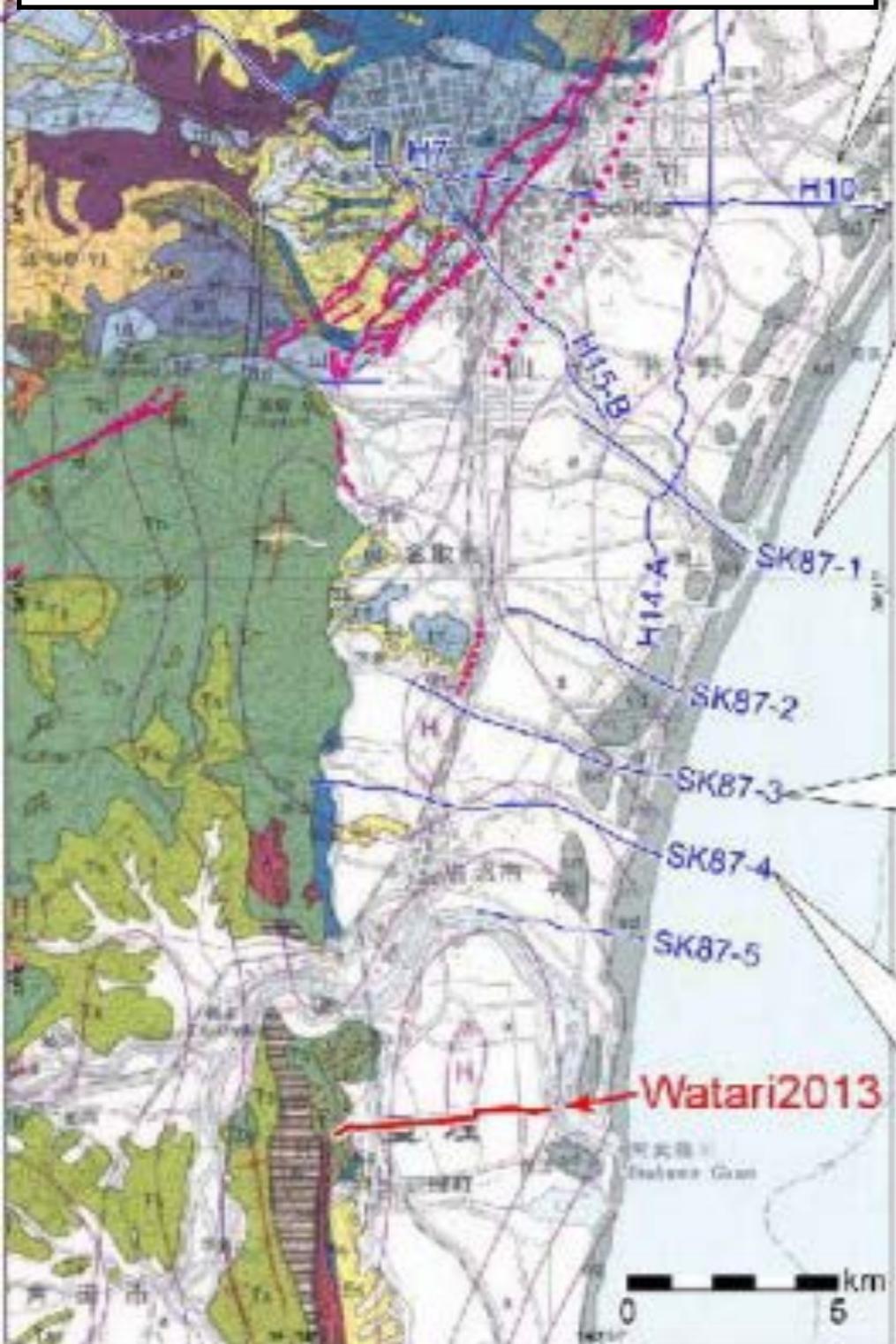
600

拡大してみると，反射波の集合



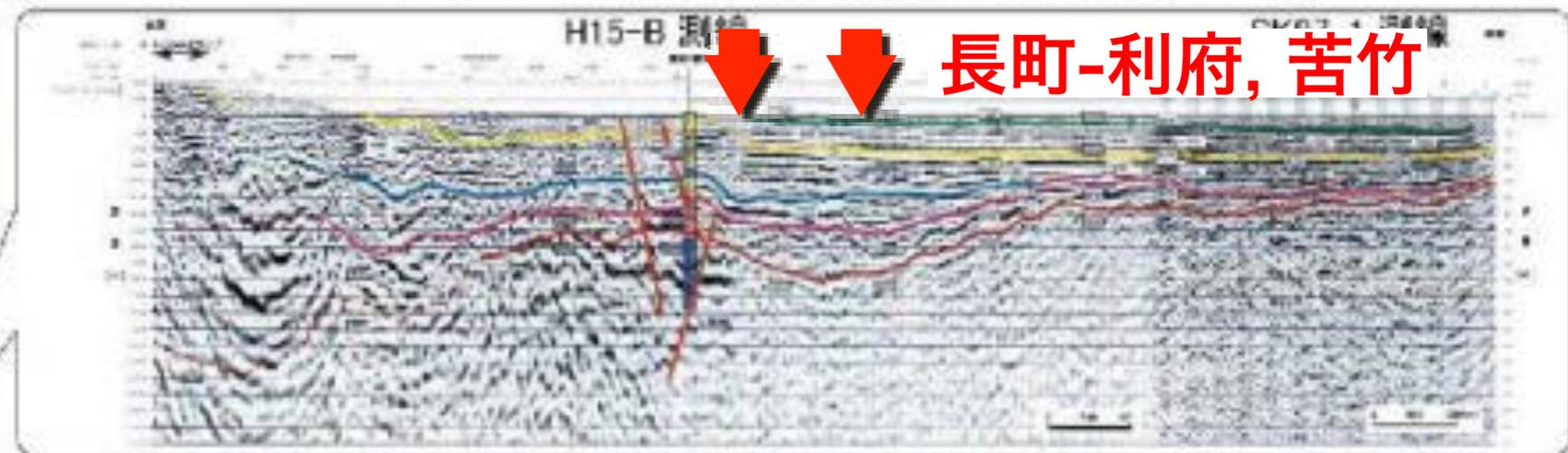
仙台周辺の既存の反射法地震探査断面

平野の下にも活断層は
隠れている。
(伏在している)

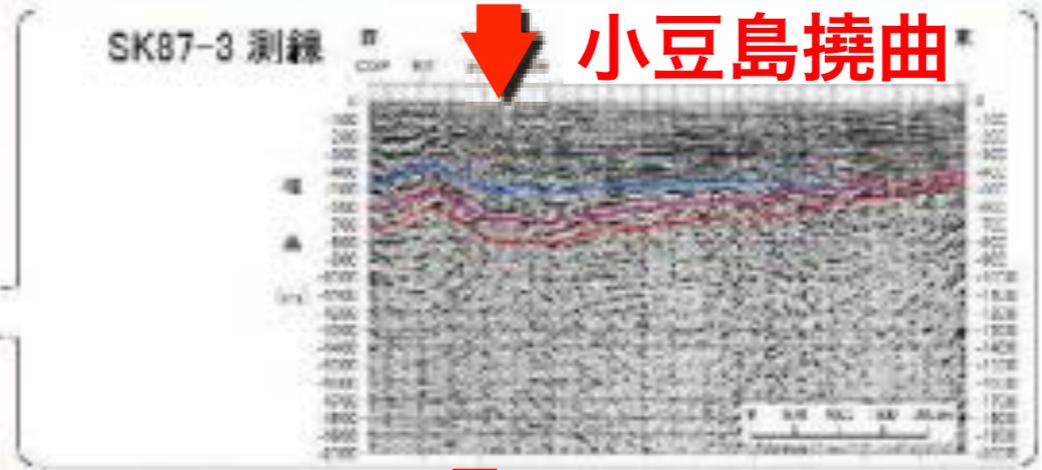


長町-利府, 苦竹

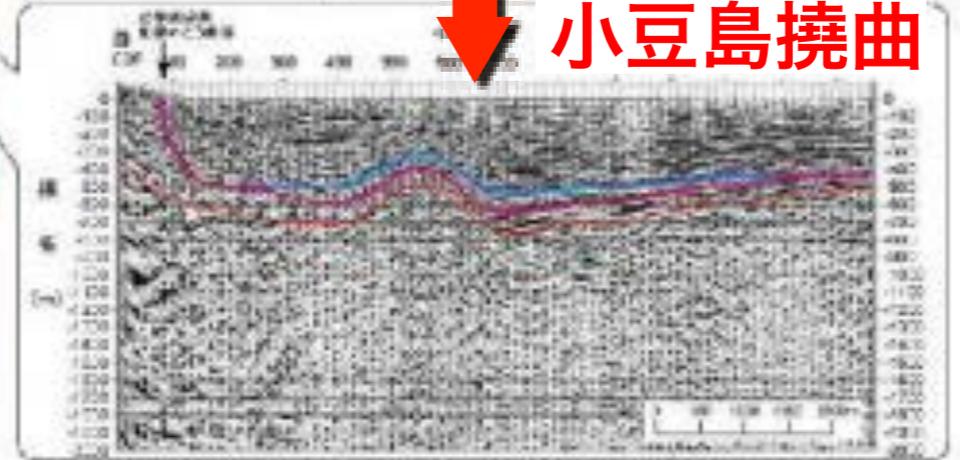
(宮城県,
2004)



長町-利府, 苦竹



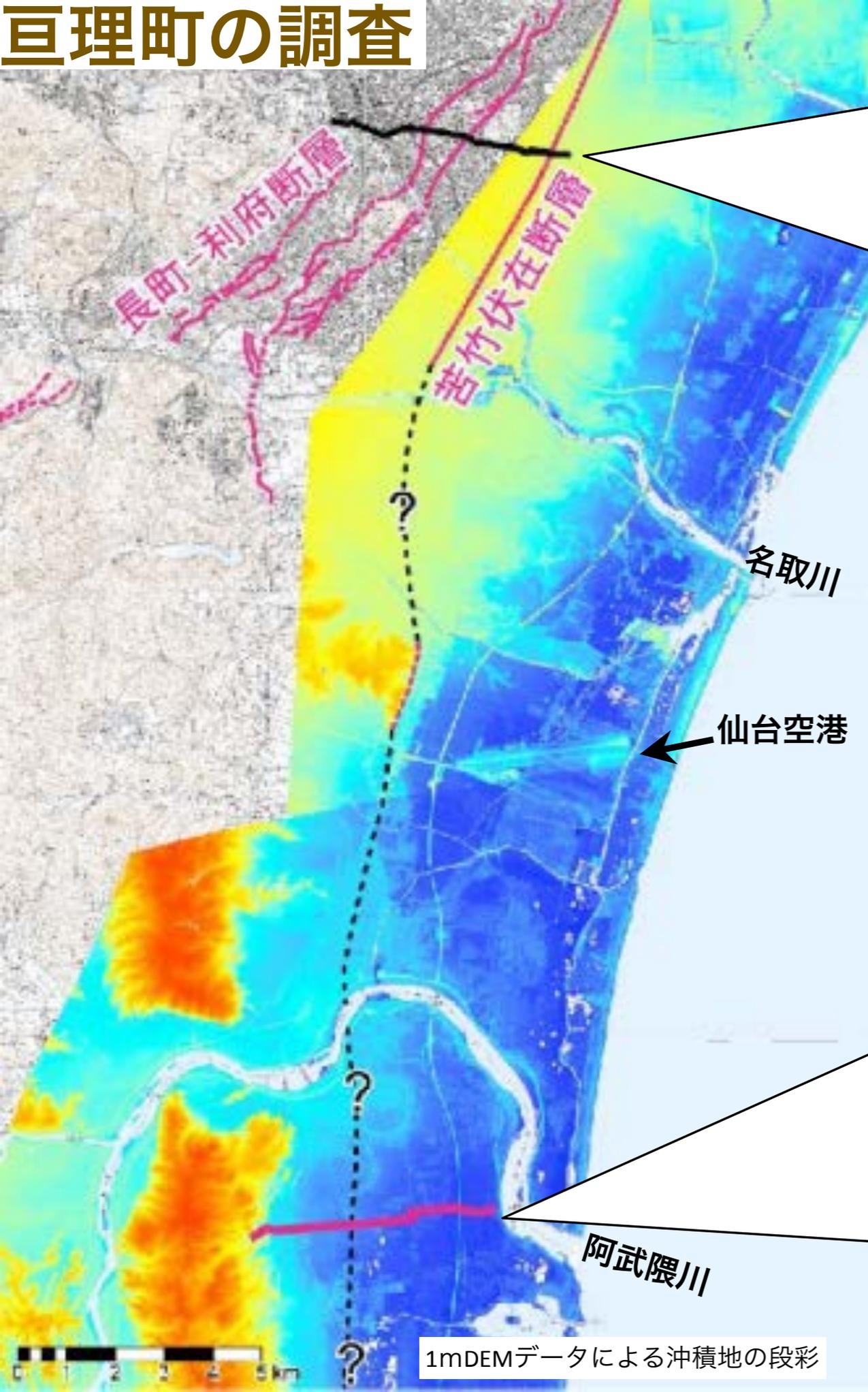
小豆島撓曲



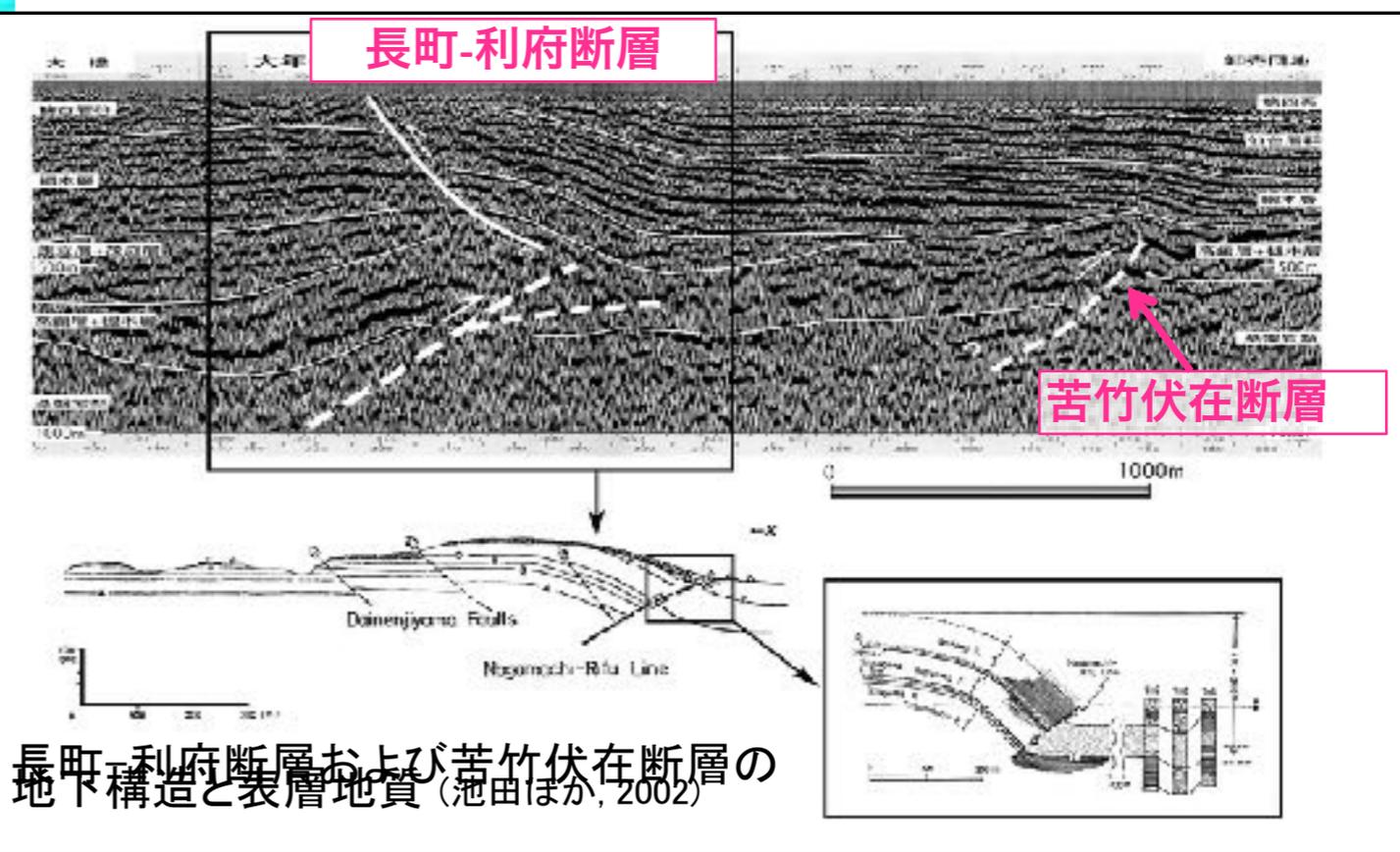
小豆島撓曲

沖積層	沖積層
更新世後丘地礫物	更新世後丘地礫物
更新世～完新世段丘堆積物	更新世～完新世段丘堆積物
三木木・向山・大年寺層	三木木・向山・大年寺層 砂岩・シルト・泥岩及び礫性凝灰岩
池田層・葦の口層 etc.	池田層・葦の口層 etc. シルト・砂・砂岩及び礫性凝灰岩
三浦層	三浦層 礫岩・砂岩・かんらん石を主成分とする砂岩
七北田層 etc.	七北田層 etc. 砂岩・泥岩及び礫性凝灰岩
湯原・梨野層 etc.	湯原・梨野層 etc. 砂岩・泥岩及び礫性凝灰岩
瀬木層	瀬木層 礫岩・砂岩・泥岩及び礫性凝灰岩
旗立・入香谷層 etc.	旗立・入香谷層 etc. 砂岩及び礫岩
高麗層	高麗層 泥岩・砂岩
高麗層	高麗層 礫岩・砂岩・かんらん石を主成分とする砂岩
堀木層	堀木層 砂岩・礫岩・泥岩及び礫性凝灰岩
庄内沖積層	庄内沖積層 砂岩・泥岩及び礫性凝灰岩
剱山層	剱山層 砂岩・泥岩及び礫性凝灰岩

亶理町の調査



1mDEMデータによる沖積地の段彩

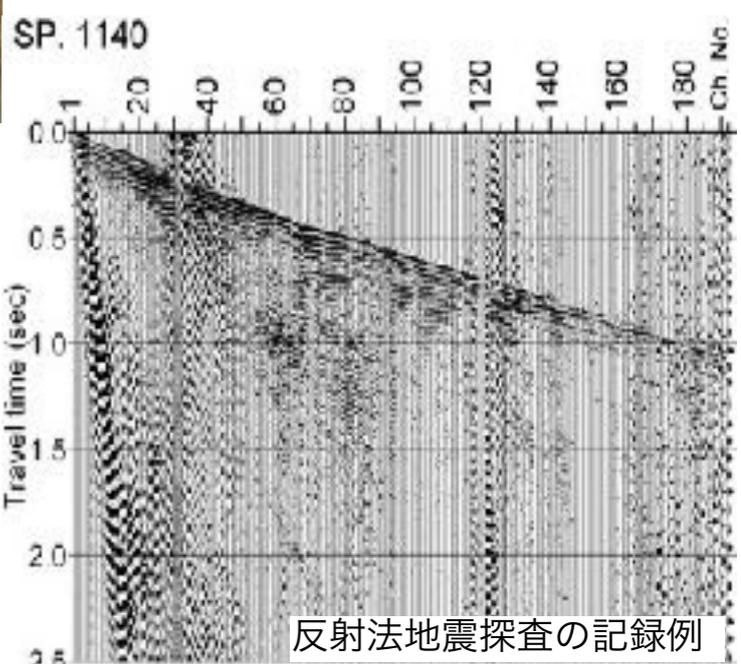
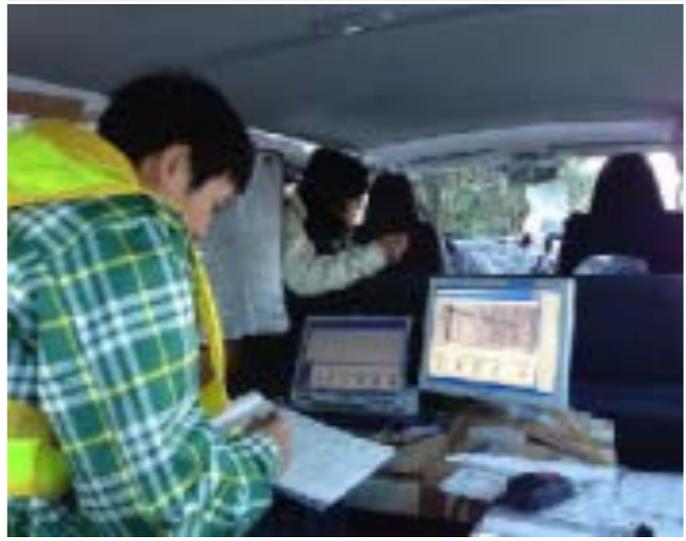


長町-利府断層および苦竹伏在断層の地下構造と表層地質 (池田ほか, 2002)



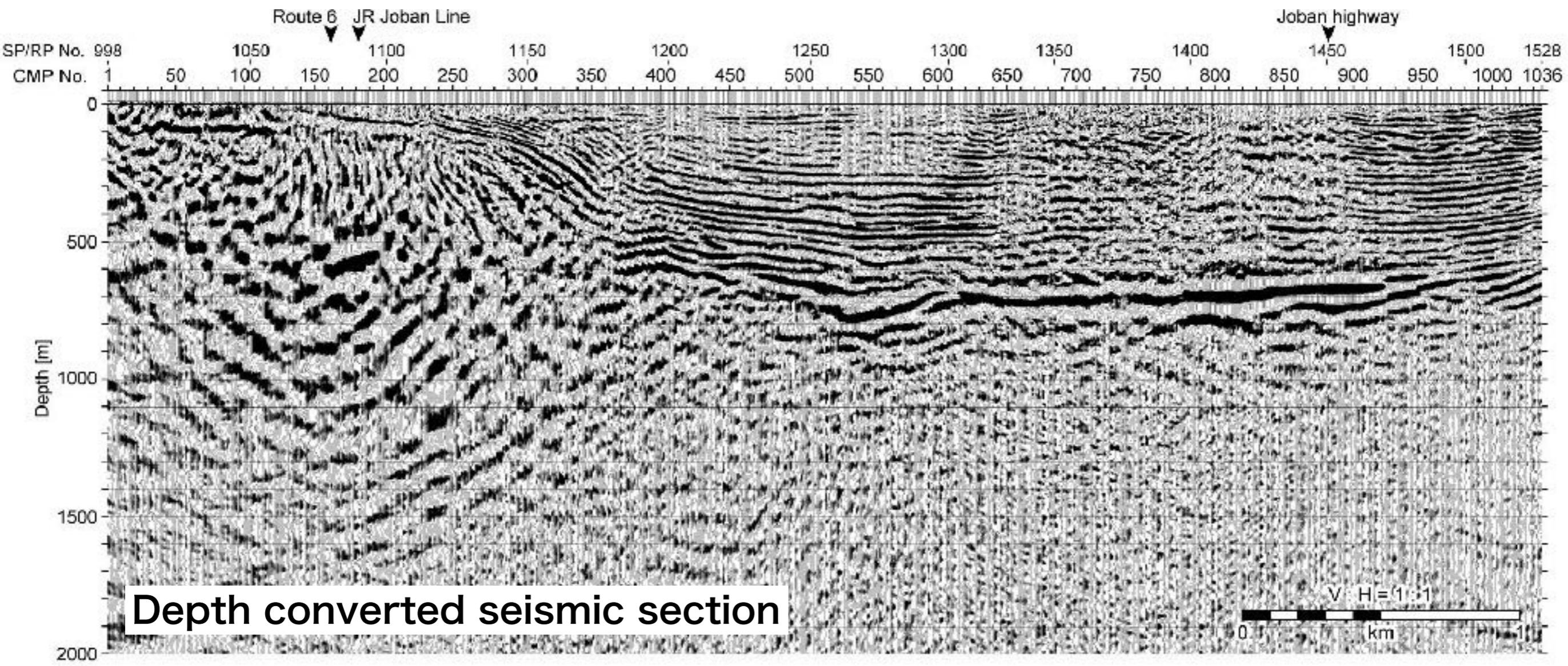
仙台平野南部 (亶理町) における地下構造探査

伏在断層を横切るように浅層反射法地震探査を実施 (2013年1~2月).

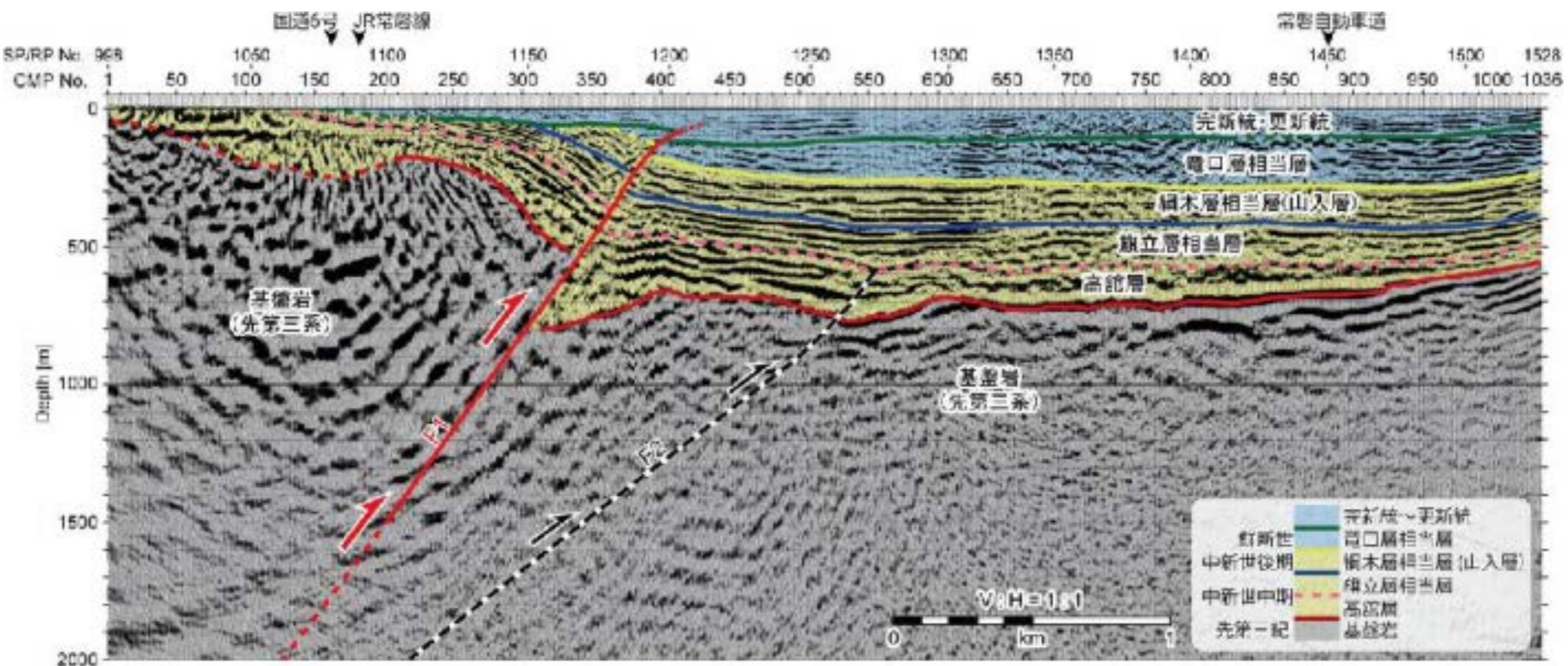


反射法地震探査の記録例

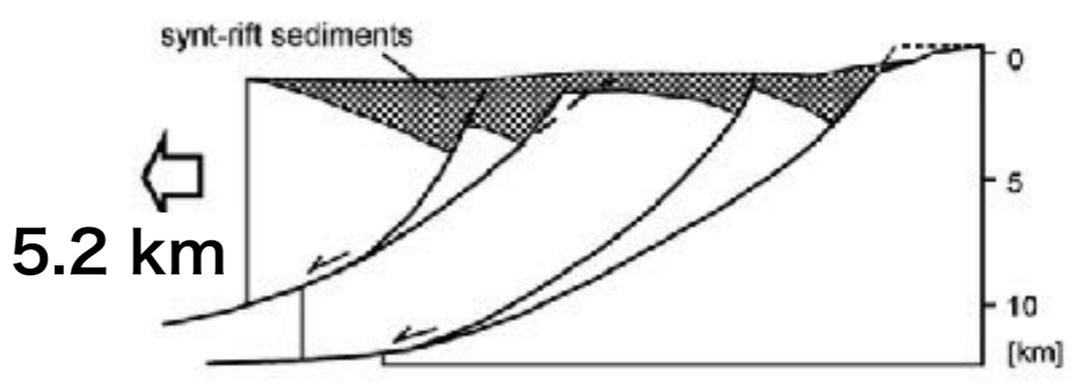
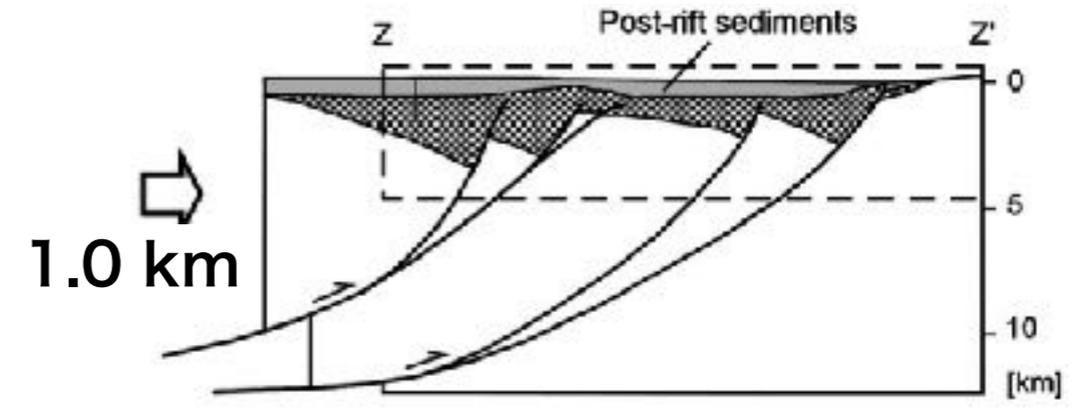
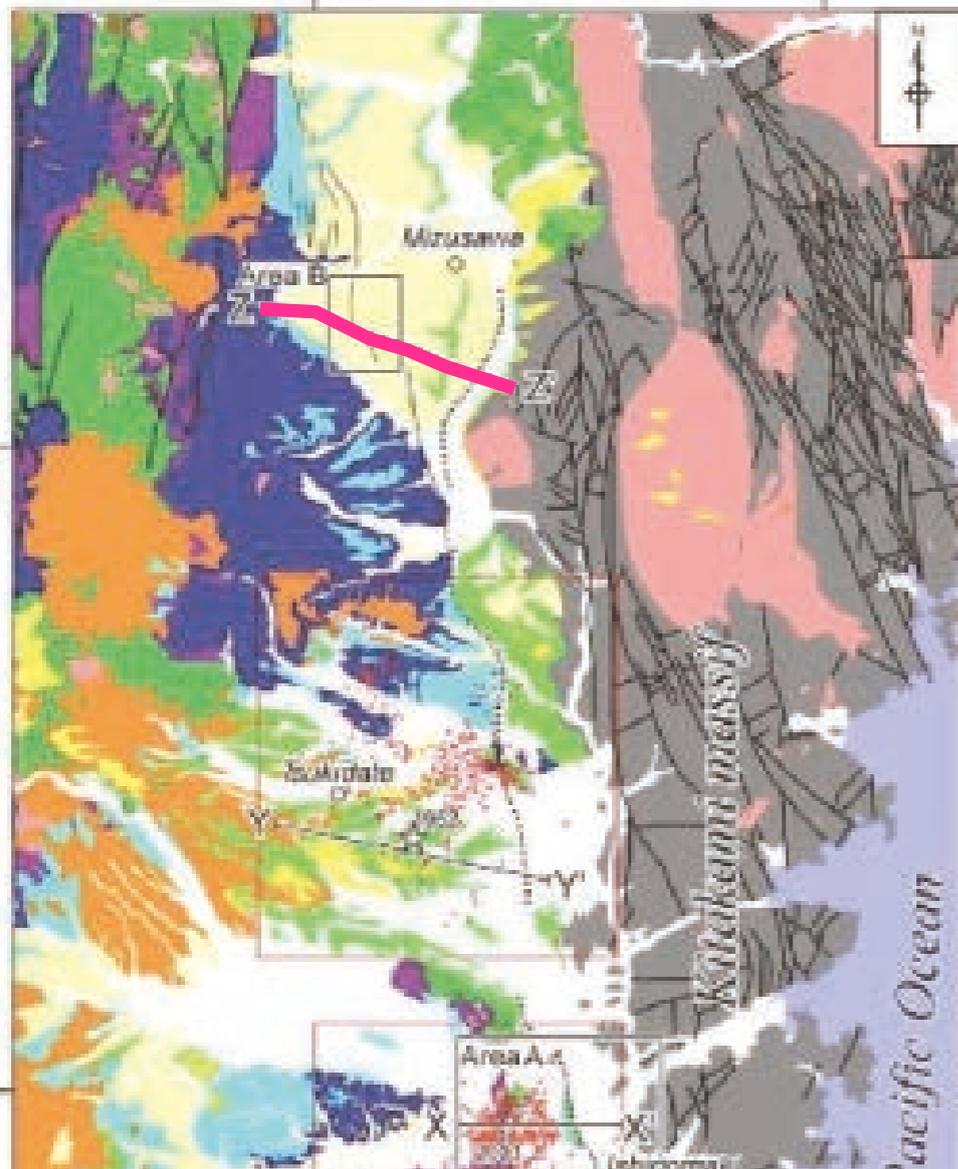
反射法地震探査 (深度変換断面)



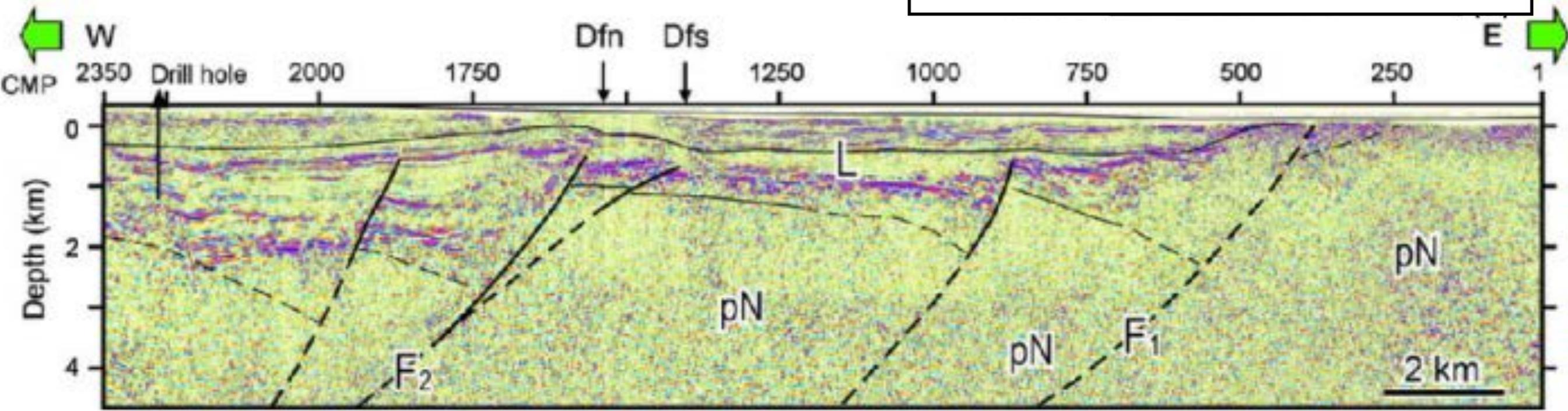
反射法地震探査の地下構造解釈



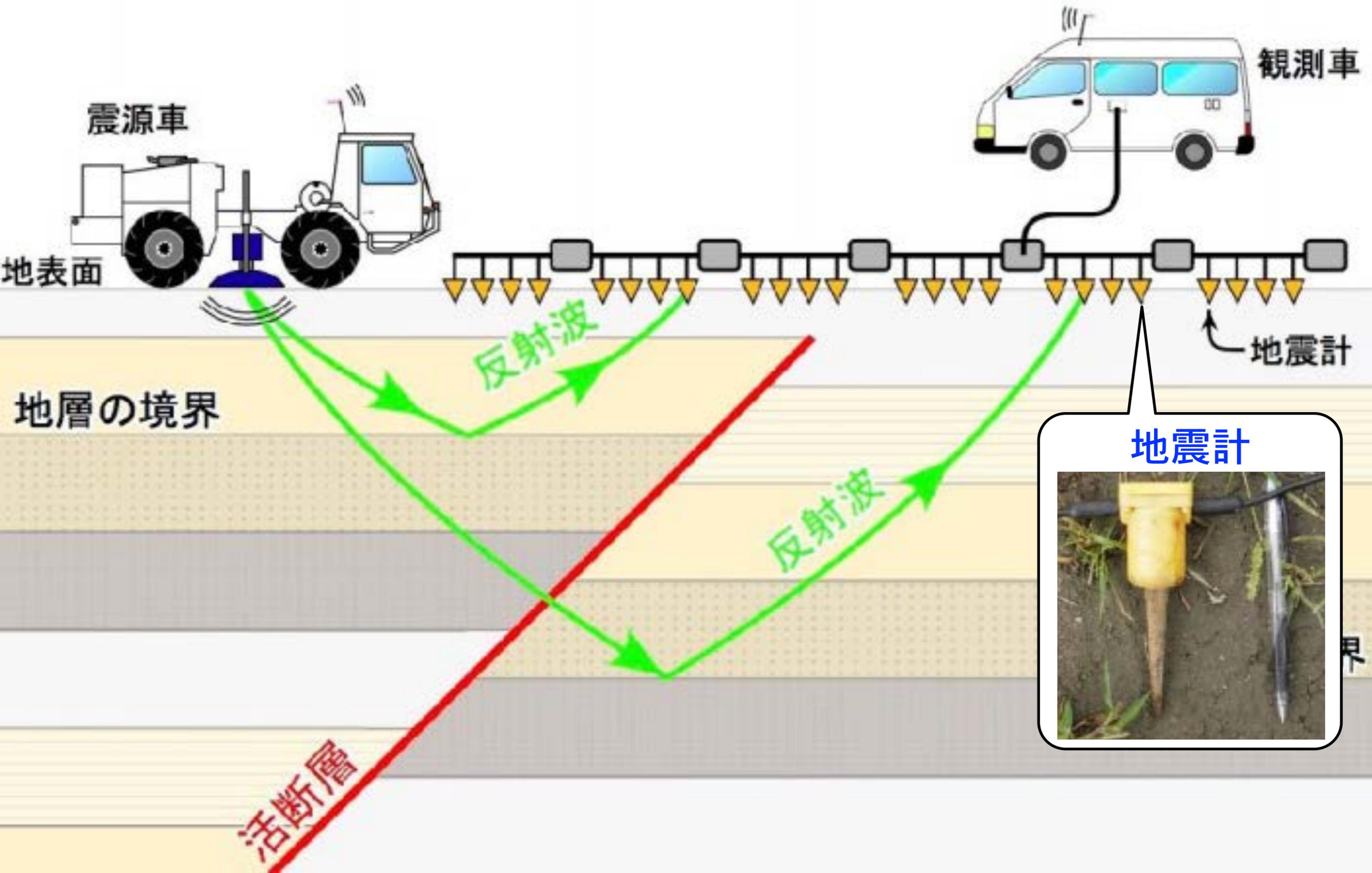
北上低地西縁断層帯における調査 (Kato et al, 2006)



**活断層には複雑な発達史をもっているものもある。
(正断層→逆断層)**



反射法地震探査とは



反射法地震探査とは、

人工制御震源から発した地震波は、地下の地質境界で反射し、地表に戻ってくる。この**反射波を観測**し、解析することによって、**地下の地質構造をイメージング**する手法。 (本来は、石油資源探査を目的に技術開発が進んできた)

【長所】

- ・ 地下深部まで連続的にイメージングできる。
- ・ 非破壊である。
- ・ 安価 (ボーリングを沢山やるよりかは)

【短所】

- ・ 速度の推定が弱い。
- ・ 急峻な地形では、観測困難 (解消されつつある)。
- ・ ノイズに弱い。

②反射法地震探査の原理

反射法地震探査のミソは、
ずばり、

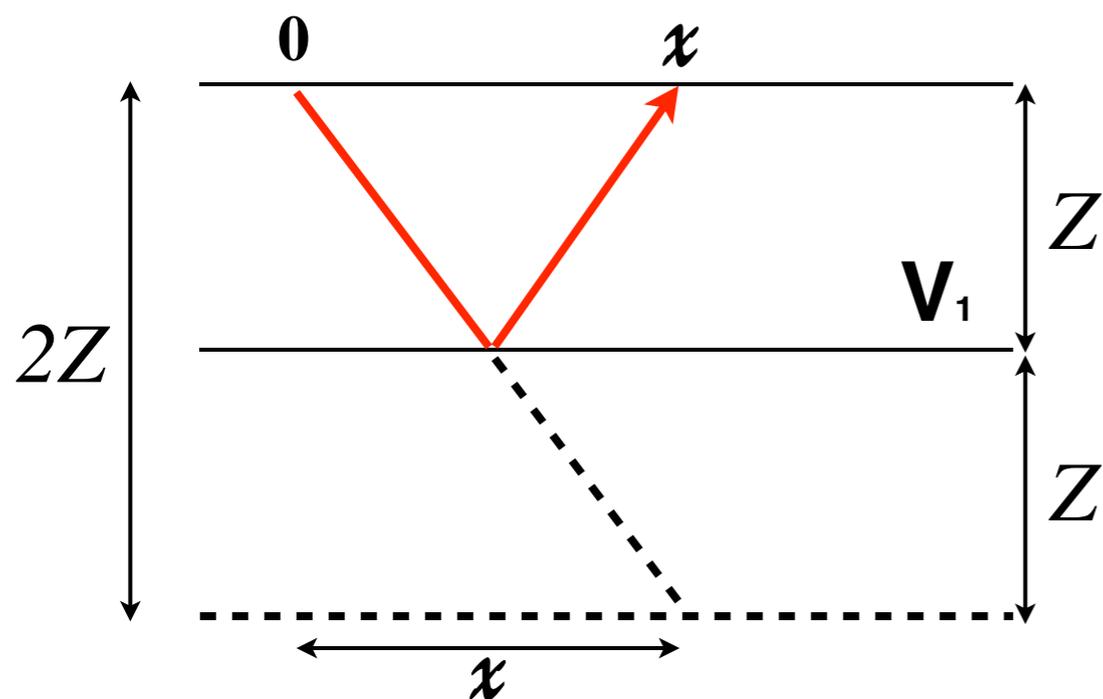
共通反射点重合法 (CMP法)

(Common **m**id-**p**oint stacking method)

である。

CMP = Common mid-point = 共通中央点

反射波の走時



深さZの地層の中をV1の速度で波が伝わり反射して，地点xに波が到達する時間を計算せよ。

$$t = \frac{\sqrt{(2Z)^2 + x^2}}{V_1}$$

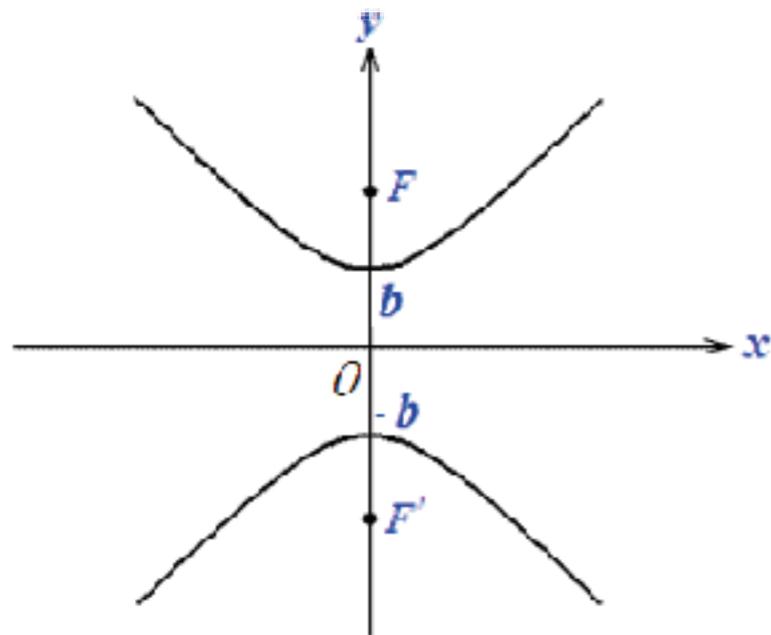
$$t^2 = \frac{(2Z)^2 + x^2}{V_1^2}$$

$$\frac{x^2}{V_1^2} - t^2 = -\frac{(2Z)^2}{V_1^2}$$

$$t_R = \frac{2Z}{V_1} \quad \text{と置くと,}$$

双曲線の方程式

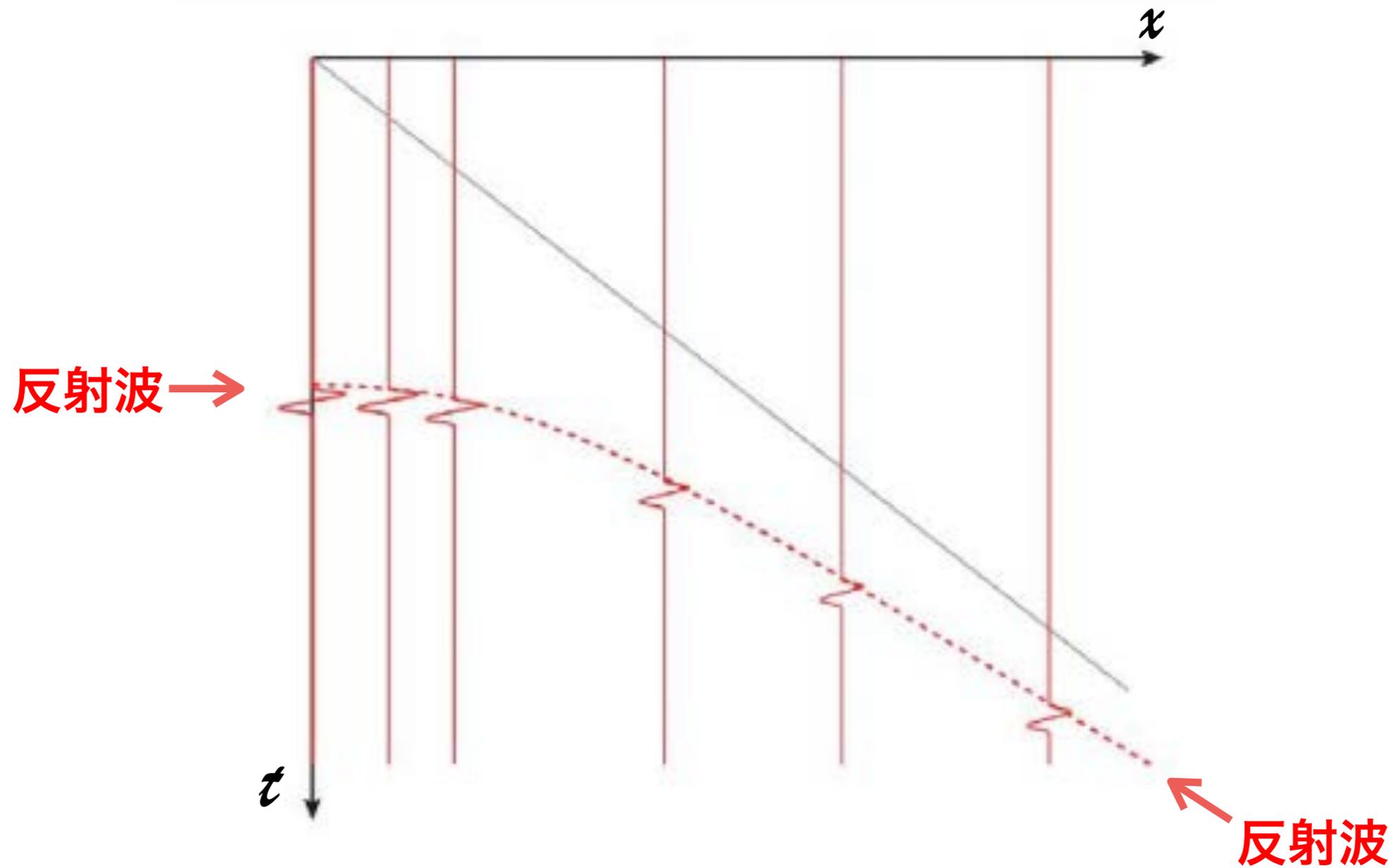
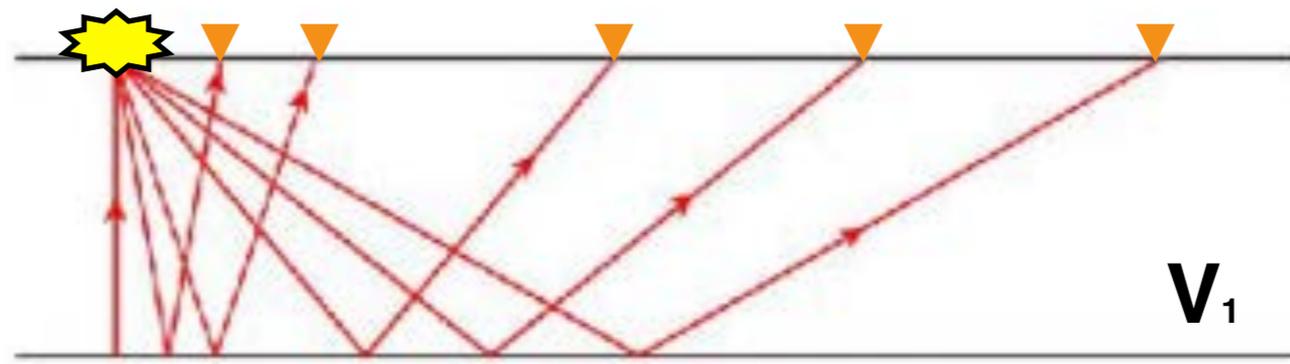
$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = -1, \quad y = \pm \frac{b}{a}x$$



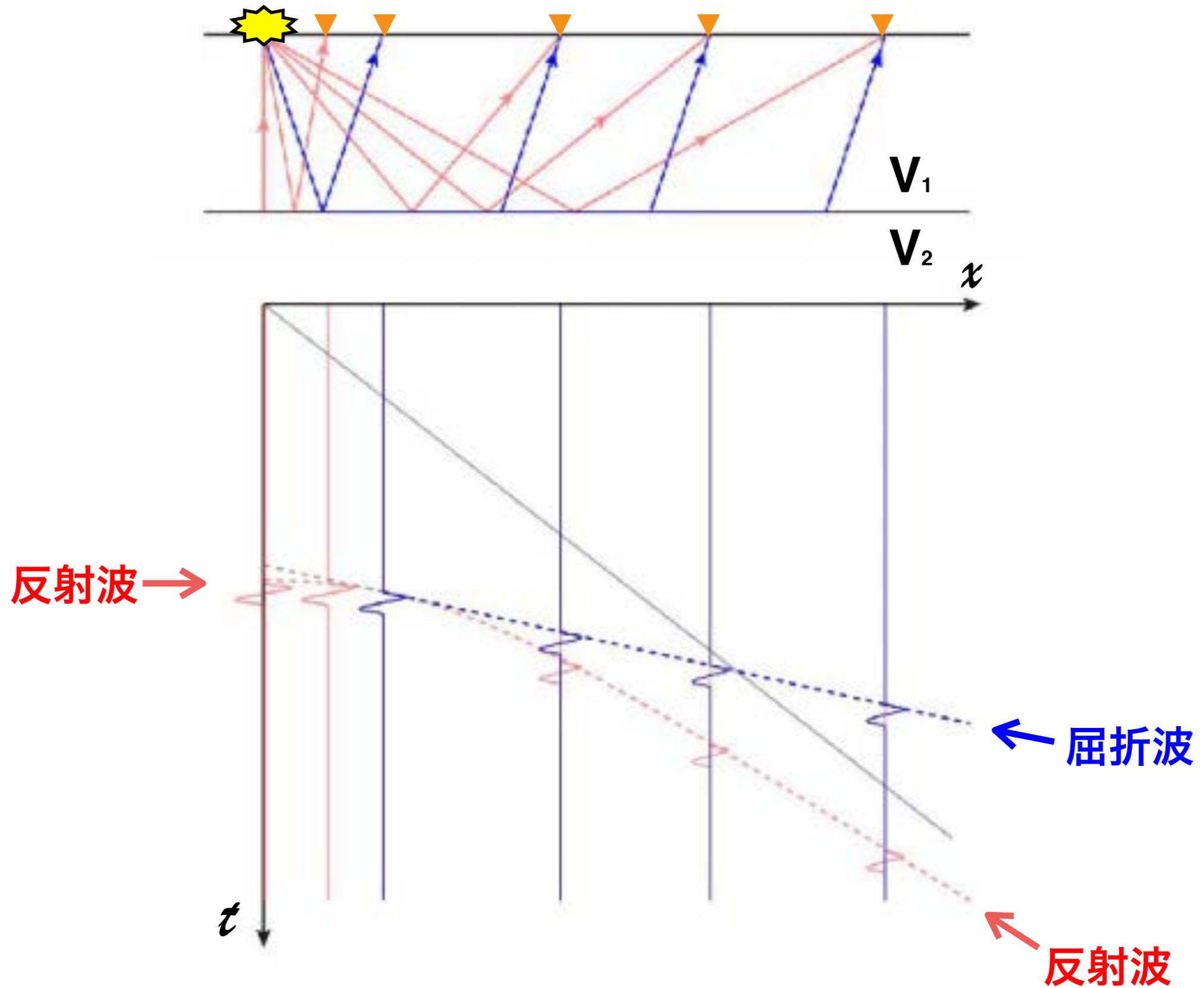
$$\left[\frac{x^2}{V_1^2 t_R^2} - \frac{t^2}{t_R^2} = -1 \right],$$

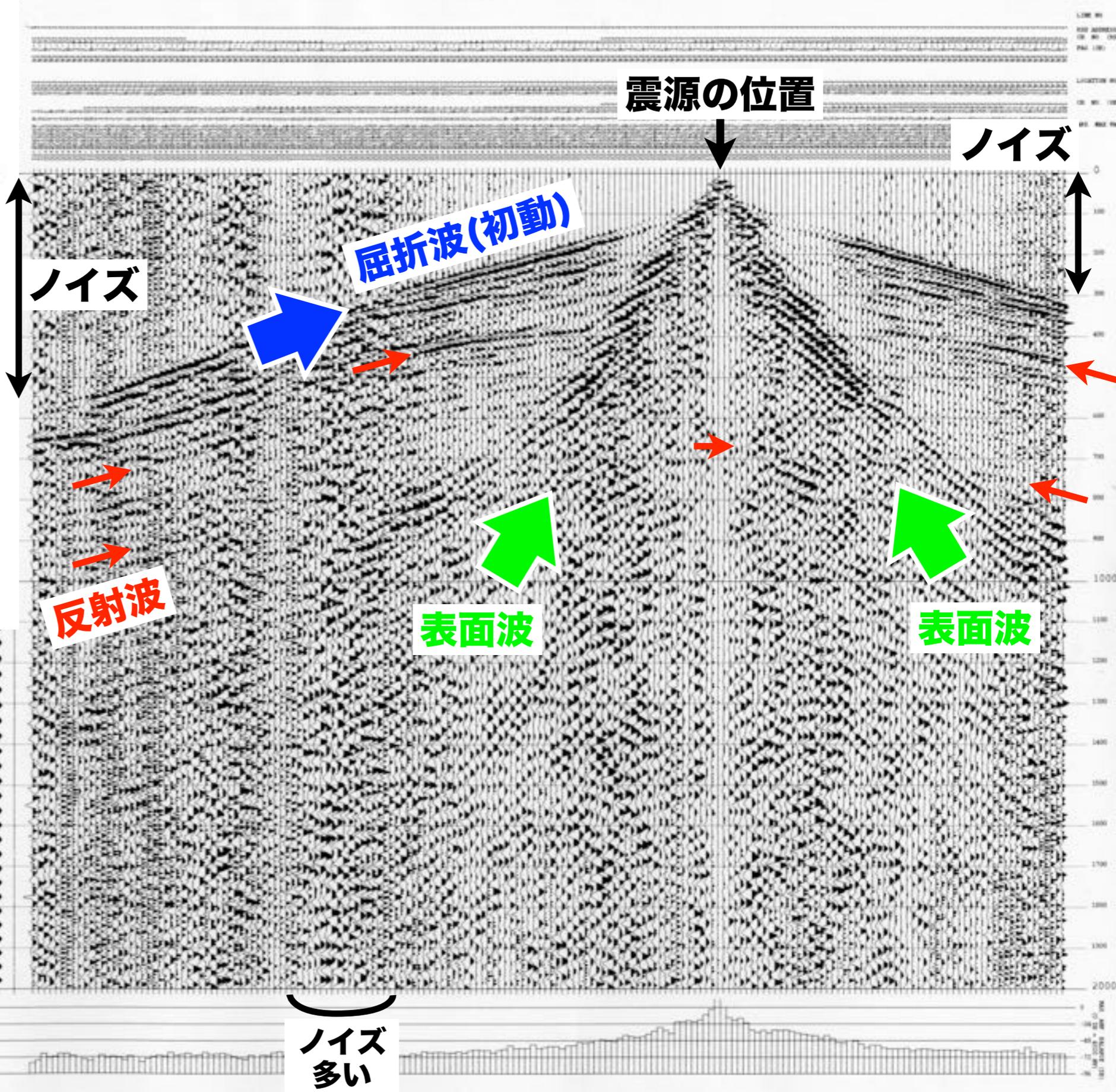
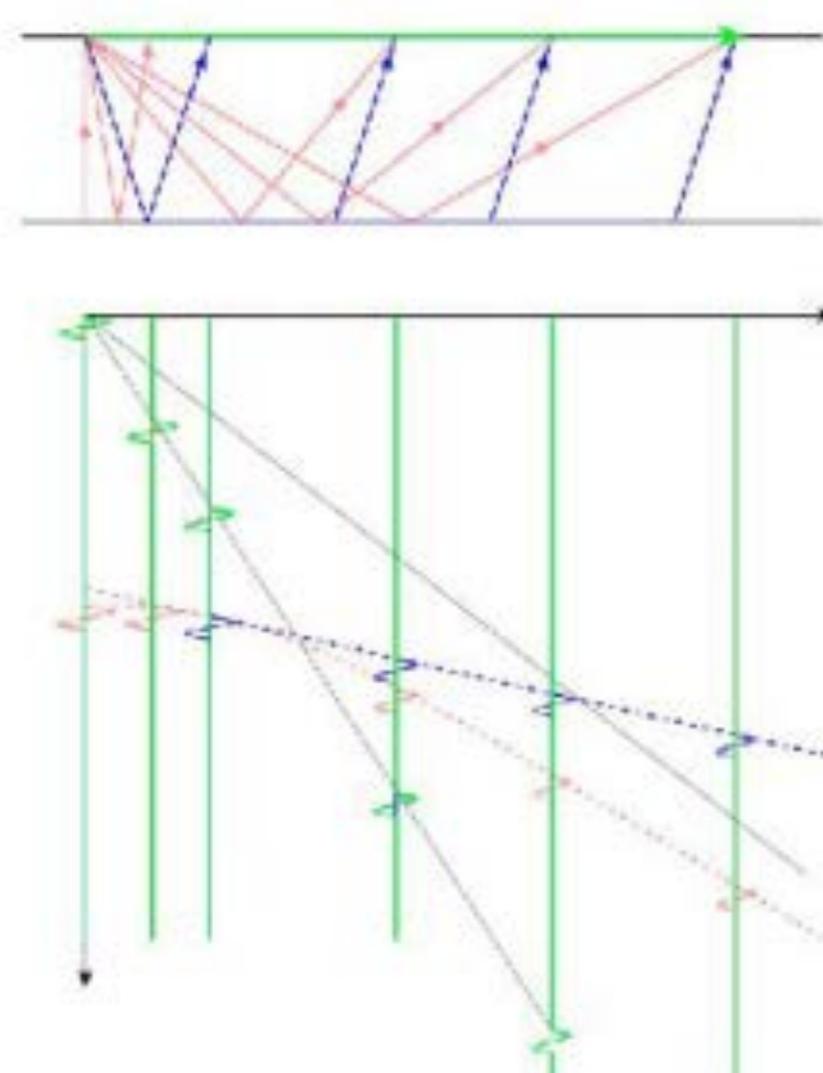
$$t = \frac{1}{V_1}x$$

水平2層構造を仮定した場合の反射波の走時



水平2層構造を仮定した場合の屈折波の走時





MODE : Shot Recording

Start Time : 0 ms
End Time : 2000 ms
Time scale : 100.0 ms/s

(PROCESS)

Low-cut Freq. : 20
High-cut Freq. :
Notch Freq. :
AGC Method :
AGC (SV TSI) :
Max. Value Plot : ON
Resample : OFF

(STACKING)

of Stacks : 7
Noise Edit : DIV. SIX
Window Length : 5000 ms
Overlap : 3
Suppress Fact. :
PBR-PROCESS : ON
DC Offset Remove : ON

(CORRELATION)

Wave Reference Ch # : AUX-2
Input Samples : 13000
Output Phase : Minimum

(WEATHER)

Time :
Wind :
Temp. : 20.0 deg.

(PLOT FORM)

Start Channel : 0001
End Channel : 0001
Display Inct. : 0001
Display Mode :
Scaling Type :
Scale Fc :
Gain Curve :
Trace Interval : 1.4
Trace Swing : 4.0 mm
Direction : LR RL

SEIS : 0001
AUX : 0001
AW : 0001
TMAX :
AW :
TMAX :

CONTRACTOR : Ishiyama

(STACKING)

of Stacks : 7
Noise Edit : DIV. SIX
Window Length : 5000 ms
Overlap : 3
Suppress Fact. :
PBR-PROCESS : ON
DC Offset Remove : ON

(CORRELATION)

Wave Reference Ch # : AUX-2
Input Samples : 13000
Output Phase : Minimum

(WEATHER)

Time :
Wind :
Temp. : 20.0 deg.

(PLOT FORM)

Start Channel : 0001
End Channel : 0001
Display Inct. : 0001
Display Mode :
Scaling Type :
Scale Fc :
Gain Curve :
Trace Interval : 1.4
Trace Swing : 4.0 mm
Direction : LR RL

SEIS : 0001
AUX : 0001
AW : 0001
TMAX :
AW :
TMAX :

CONTRACTOR : Ishiyama

(STACKING)

of Stacks : 7
Noise Edit : DIV. SIX
Window Length : 5000 ms
Overlap : 3
Suppress Fact. :
PBR-PROCESS : ON
DC Offset Remove : ON

(CORRELATION)

Wave Reference Ch # : AUX-2
Input Samples : 13000
Output Phase : Minimum

(WEATHER)

Time :
Wind :
Temp. : 20.0 deg.

(PLOT FORM)

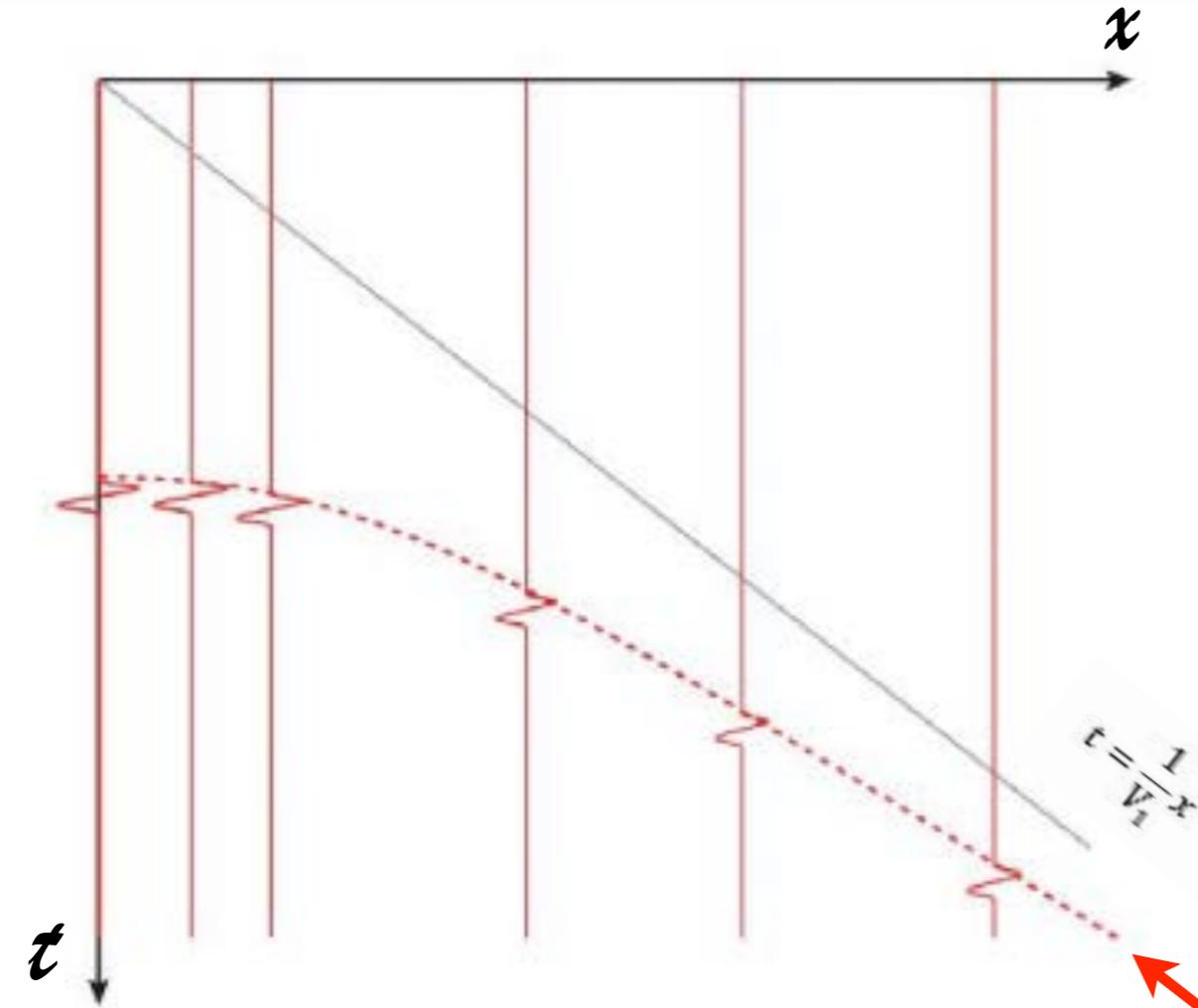
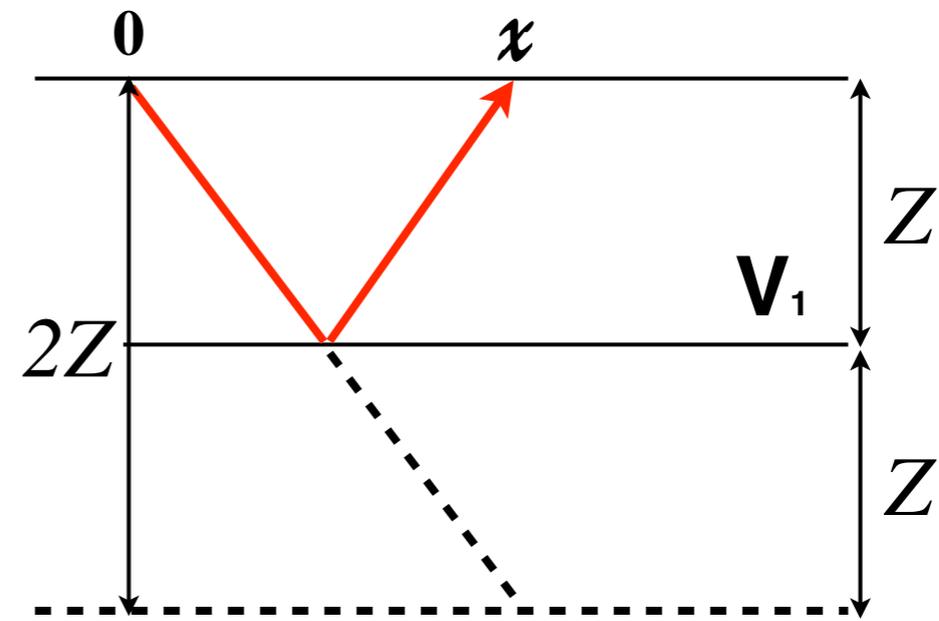
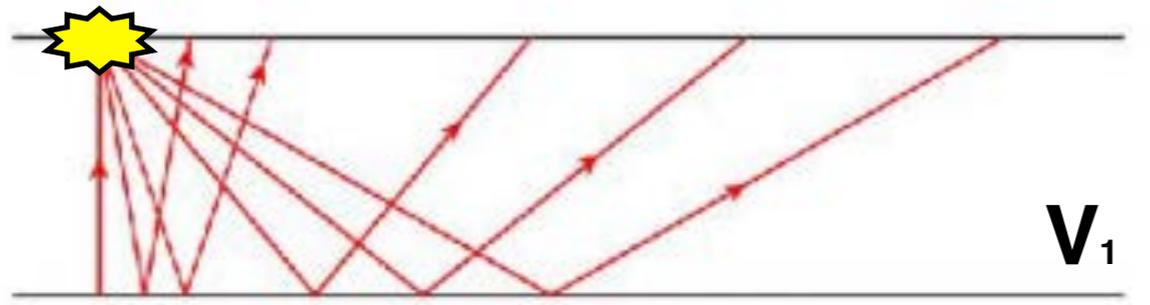
Start Channel : 0001
End Channel : 0001
Display Inct. : 0001
Display Mode :
Scaling Type :
Scale Fc :
Gain Curve :
Trace Interval : 1.4
Trace Swing : 4.0 mm
Direction : LR RL

SEIS : 0001
AUX : 0001
AW : 0001
TMAX :
AW :
TMAX :

CONTRACTOR : Ishiyama

実際の観測波形

反射波の走時



$$t = \frac{\sqrt{(2Z)^2 + x^2}}{V_1}$$

$$t^2 = \frac{(2Z)^2 + x^2}{V_1^2}$$

$$\frac{x^2}{V_1^2} - t^2 = -\frac{(2Z)^2}{V_1^2}$$

$$t_R = \frac{2Z}{V_1} \quad \text{と置くと,}$$

双曲線の方程式

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = -1, \quad y = \pm \frac{b}{a}x$$

双曲線の方程式と同じ！

$$\frac{x^2}{V_1^2 t_R^2} - \frac{t^2}{t_R^2} = -1,$$

$$t = \frac{1}{V_1}x$$

反射波の走時は、
双曲線になることを踏まえて、

本題、反射法地震探査の

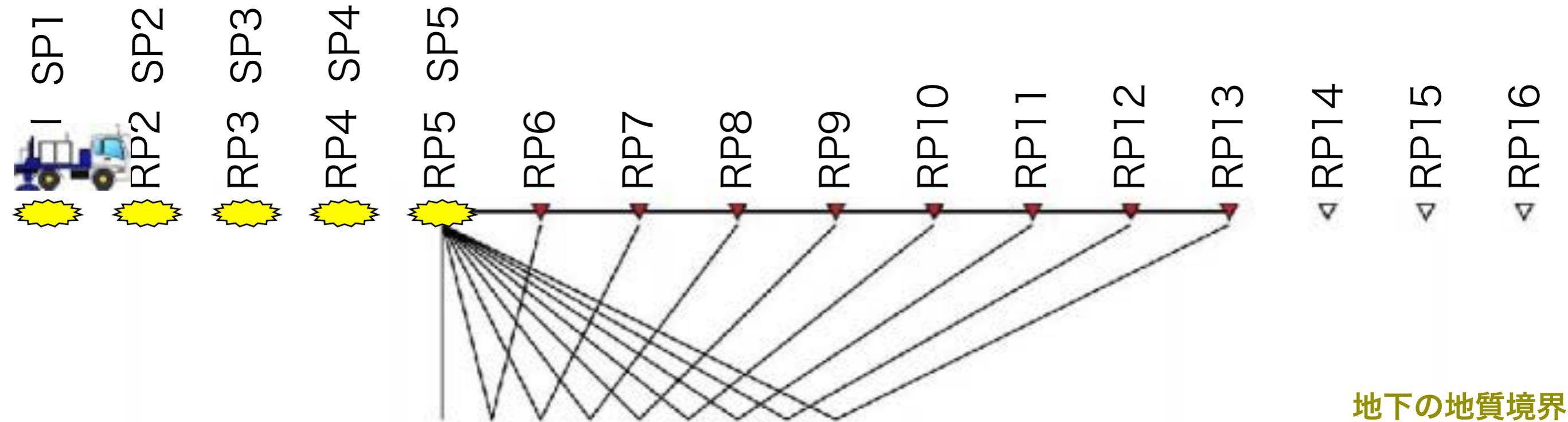
データ取得方法

→ CMP重合法

反射法地震探査の作業工程

(約1/20スケール)

実際の探査では180 chを同時観測
SP: 発振点位置
RP: 受振点位置



(0) 観測準備 展開 (ラインの作成)

(1) 発震 (約3-4分) → 反射波を観測 (記録)

(2) 震源車移動

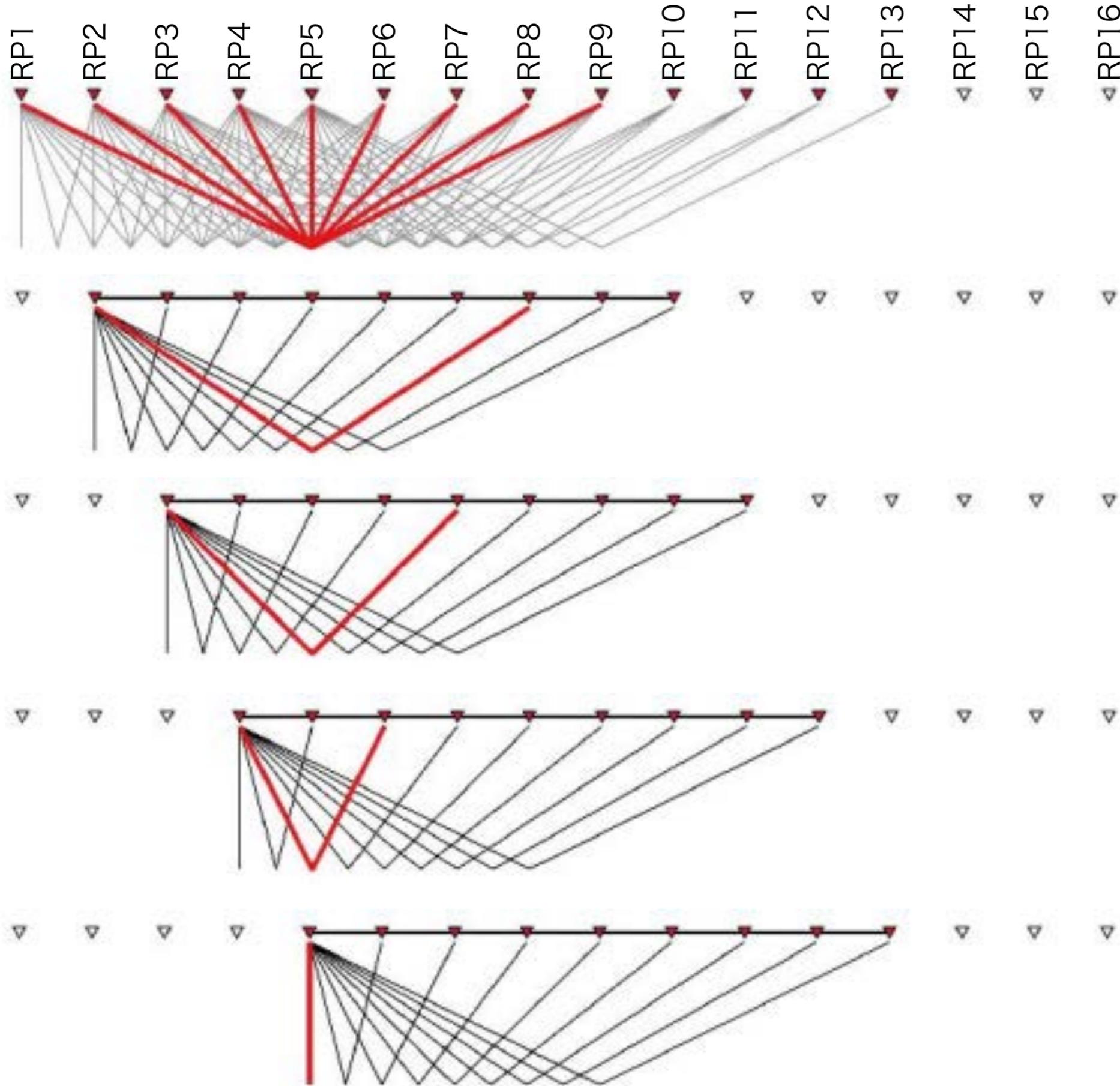
(3) ラインのアクティブな区間を前方に1chずらす。

(受振器そのものは移動しない! RP10をON, RP1をOFFにするだけ。)

1~3の
繰り返し

CMP重合法

CMP重合をやりたいたが
ためのデータ取得方法



SP1 → RP9

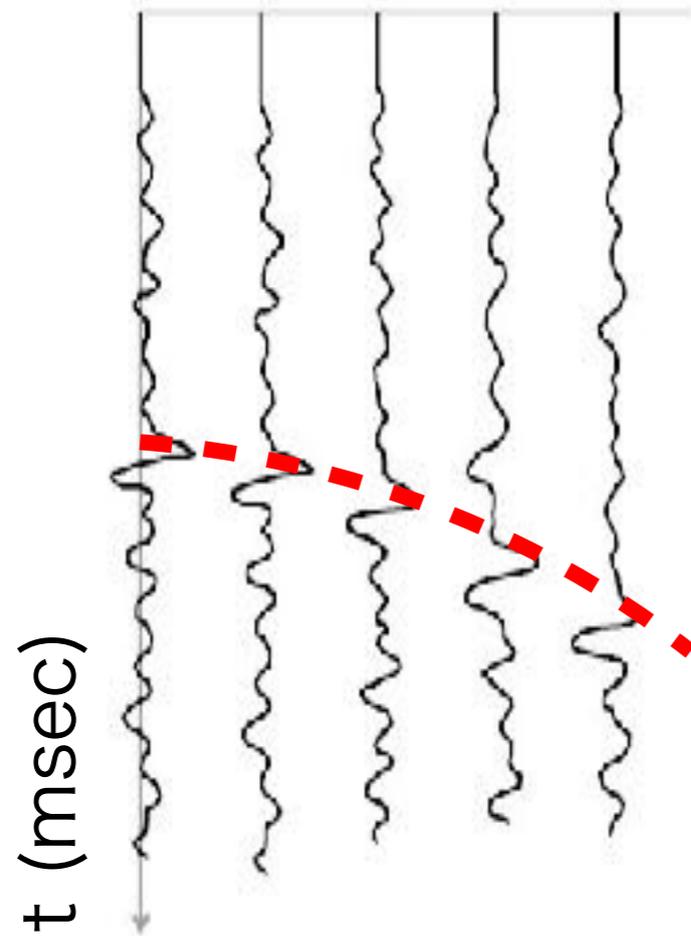
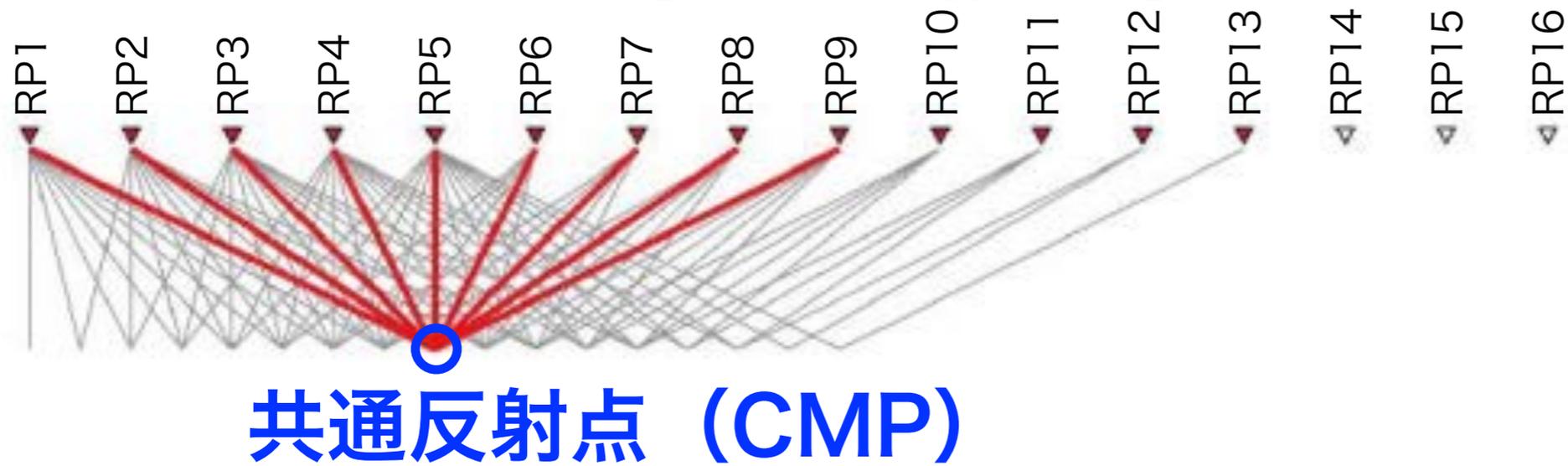
SP2 → RP8

SP3 → RP7

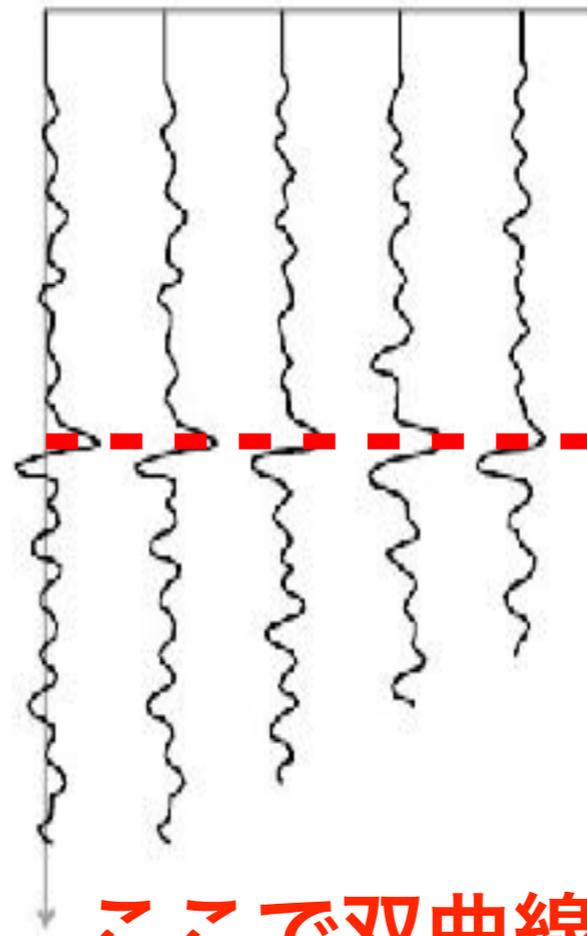
SP4 → RP6

SP5 → RP5

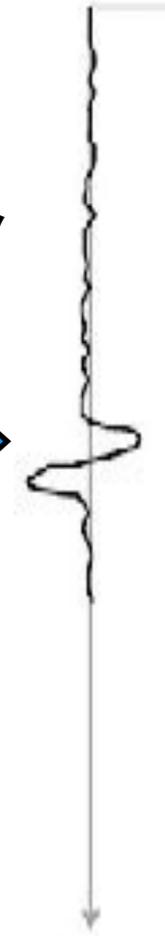
CMP重合法 (NMO補正)



NMO
補正



重合



ここで双曲線の
方程式を使う！

S/N比
向上

③反射法地震探査の現場作業 (データ取得)



10m

予備



1 chに9個のジオフォンを設置



杭



10m

杭



Geophone

Geophone

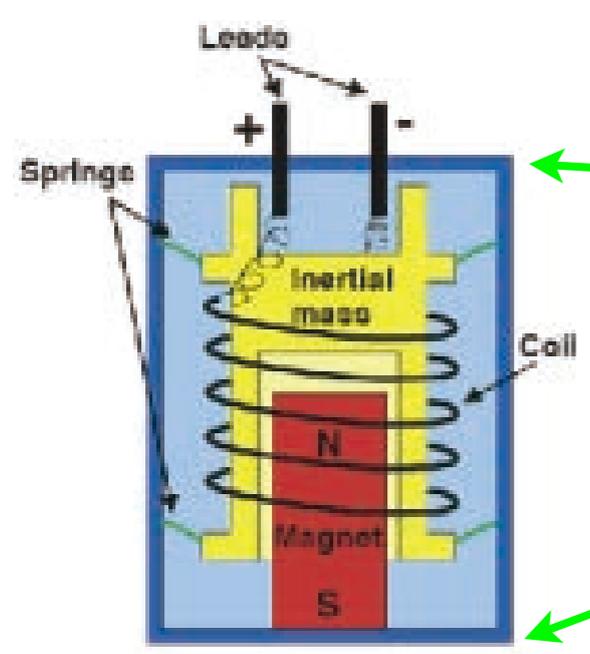
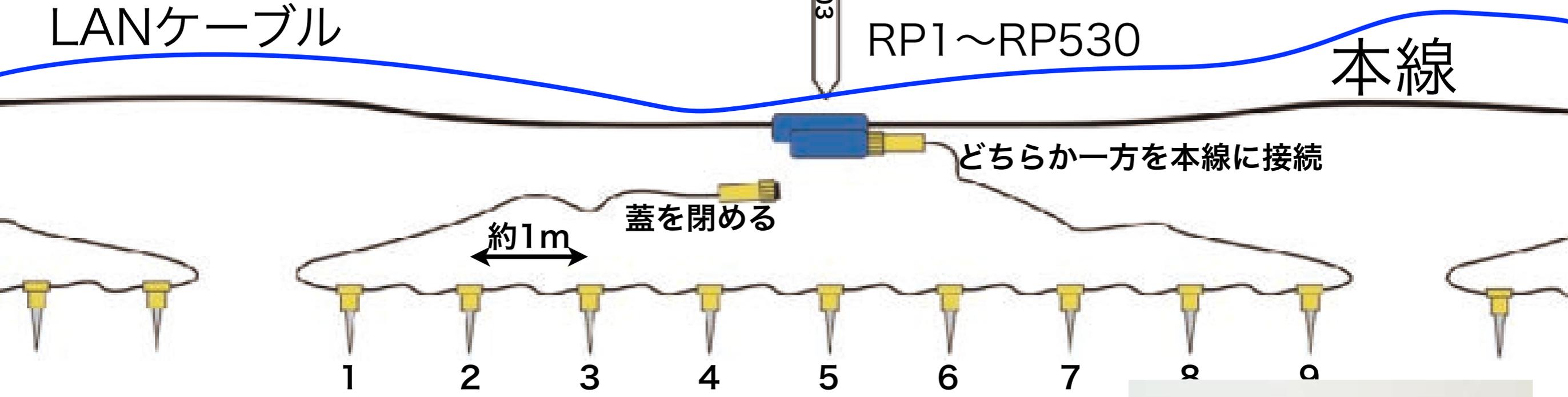
Geophone (地震計)

ジオフォンの設置

LANケーブル

杭 (釘リボン)
番号が書いてある.
RP1~RP530

本線



- 何で9個も設置するの？
- 何で1列に並べるの？

ジオフォン同士の間隔は、
約1m

杭



約1m



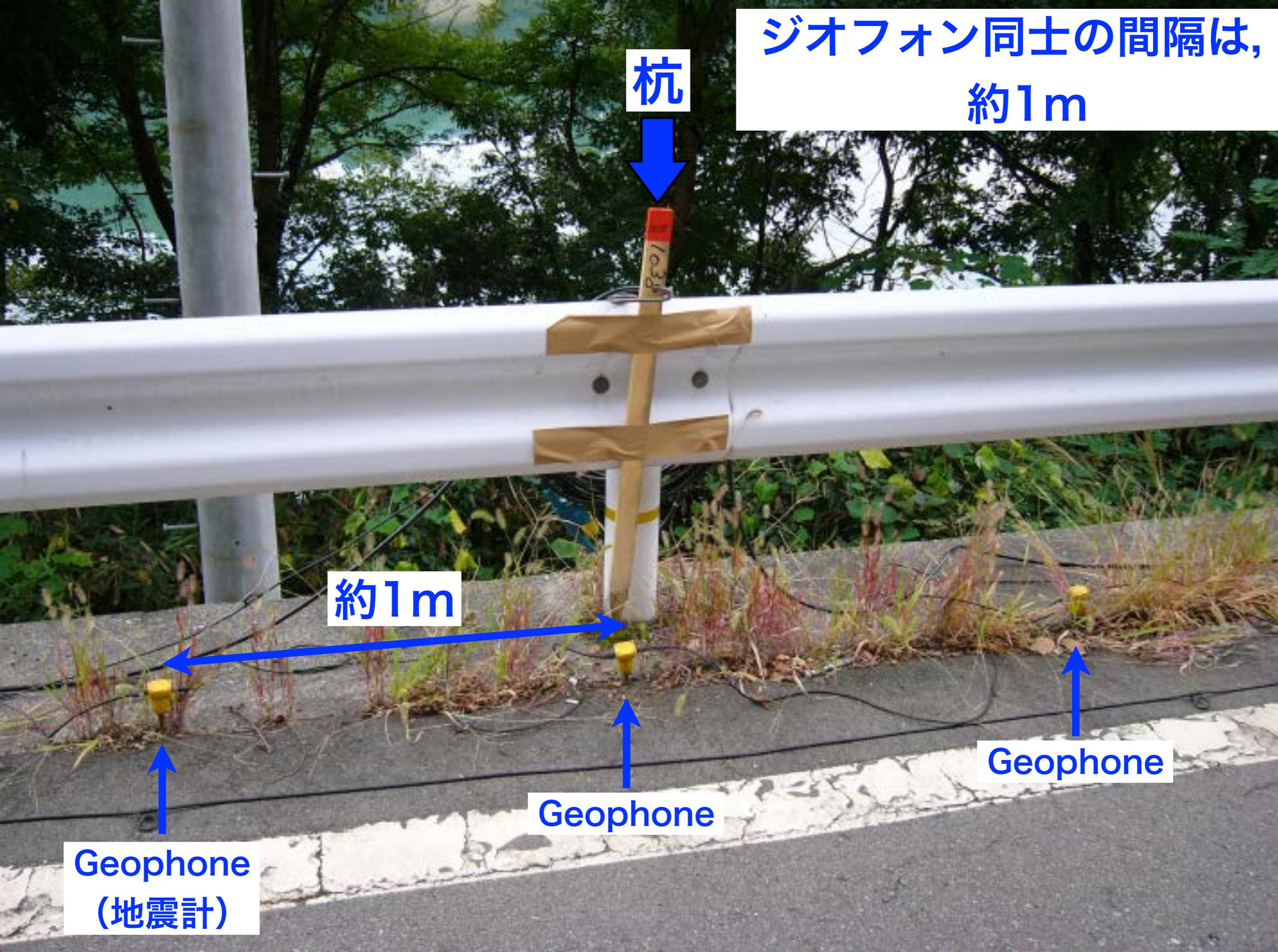
Geophone



Geophone



Geophone
(地震計)



スタンドの使用例





路面がアスファルト・コンクリートの場合、隙間に埋めることもある



Watari 2013



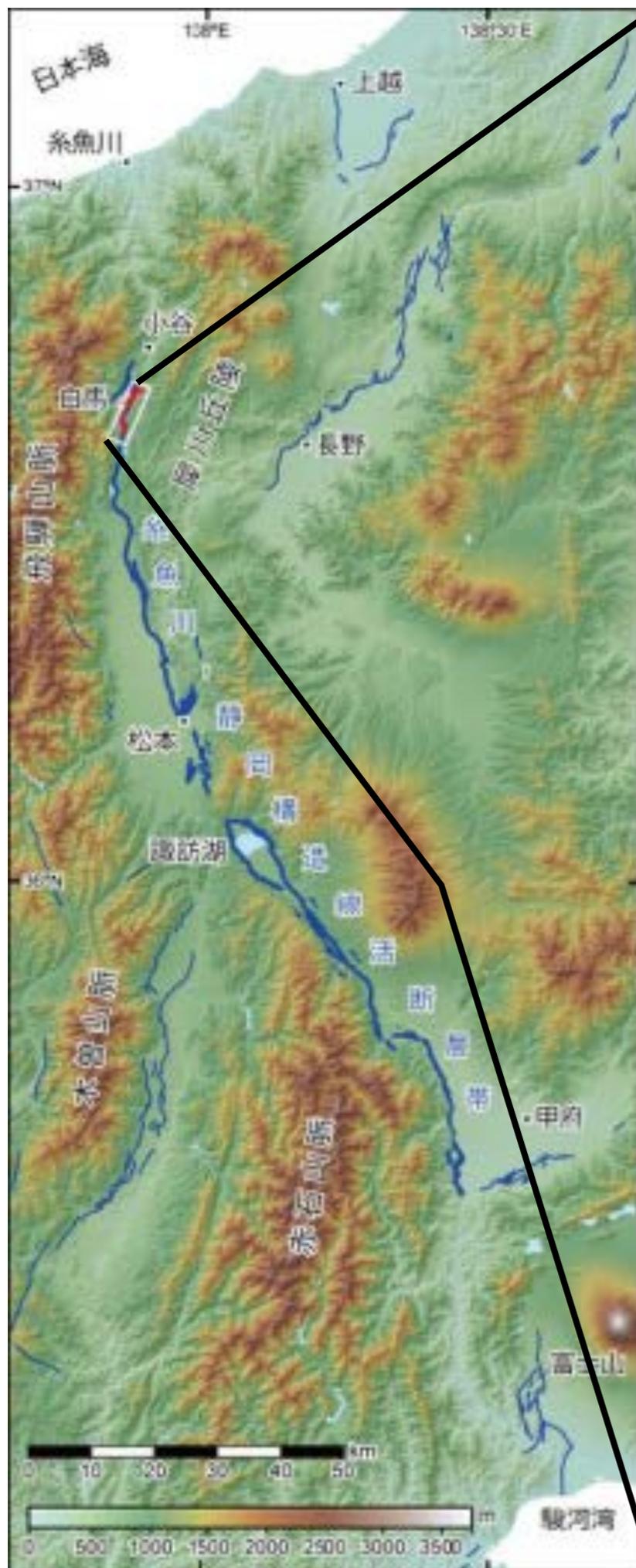
プロッター



無線



2014年11月長野県北部の地震

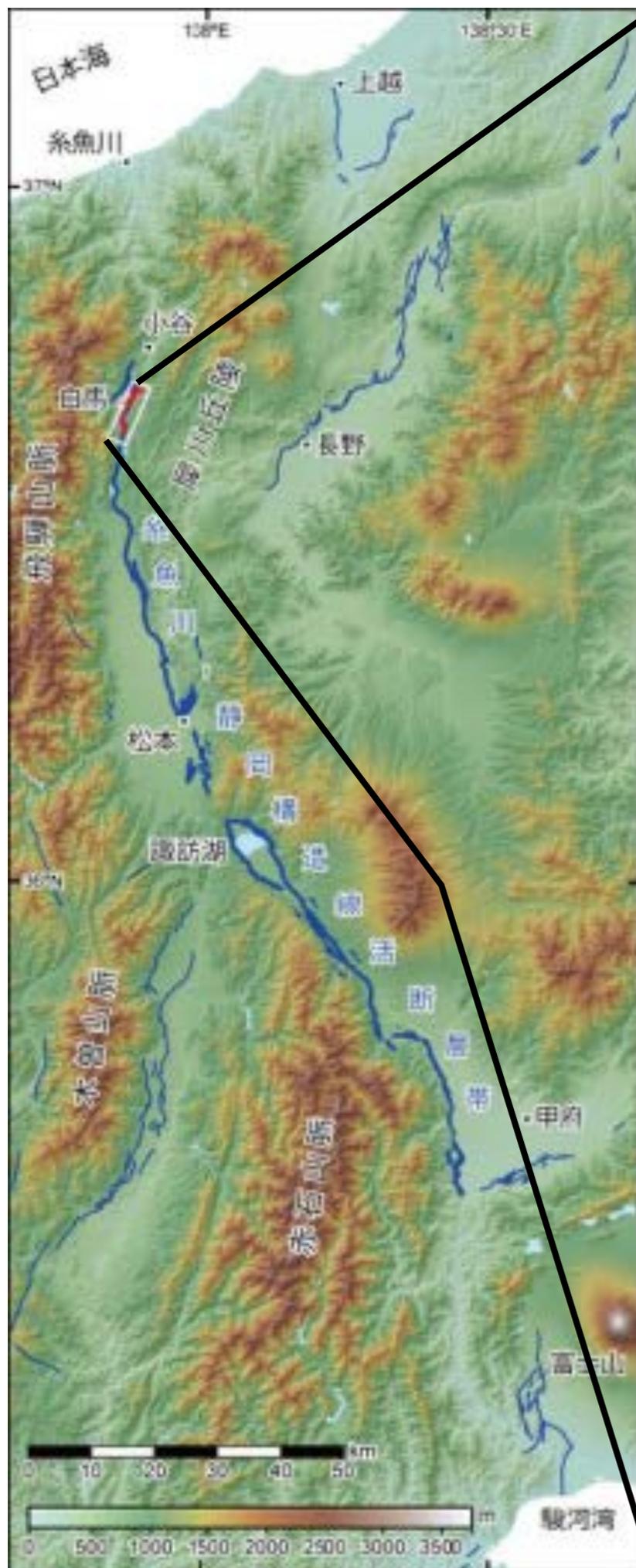


もともとほぼ水平だった道路が、80 cm隆起。



もともと活断層の崖だったが、50~60cm成長。

2014年11月長野県北部の地震



田んぼを横切って、断層による撓みがあった。



田んぼと農道を断層が横切った。

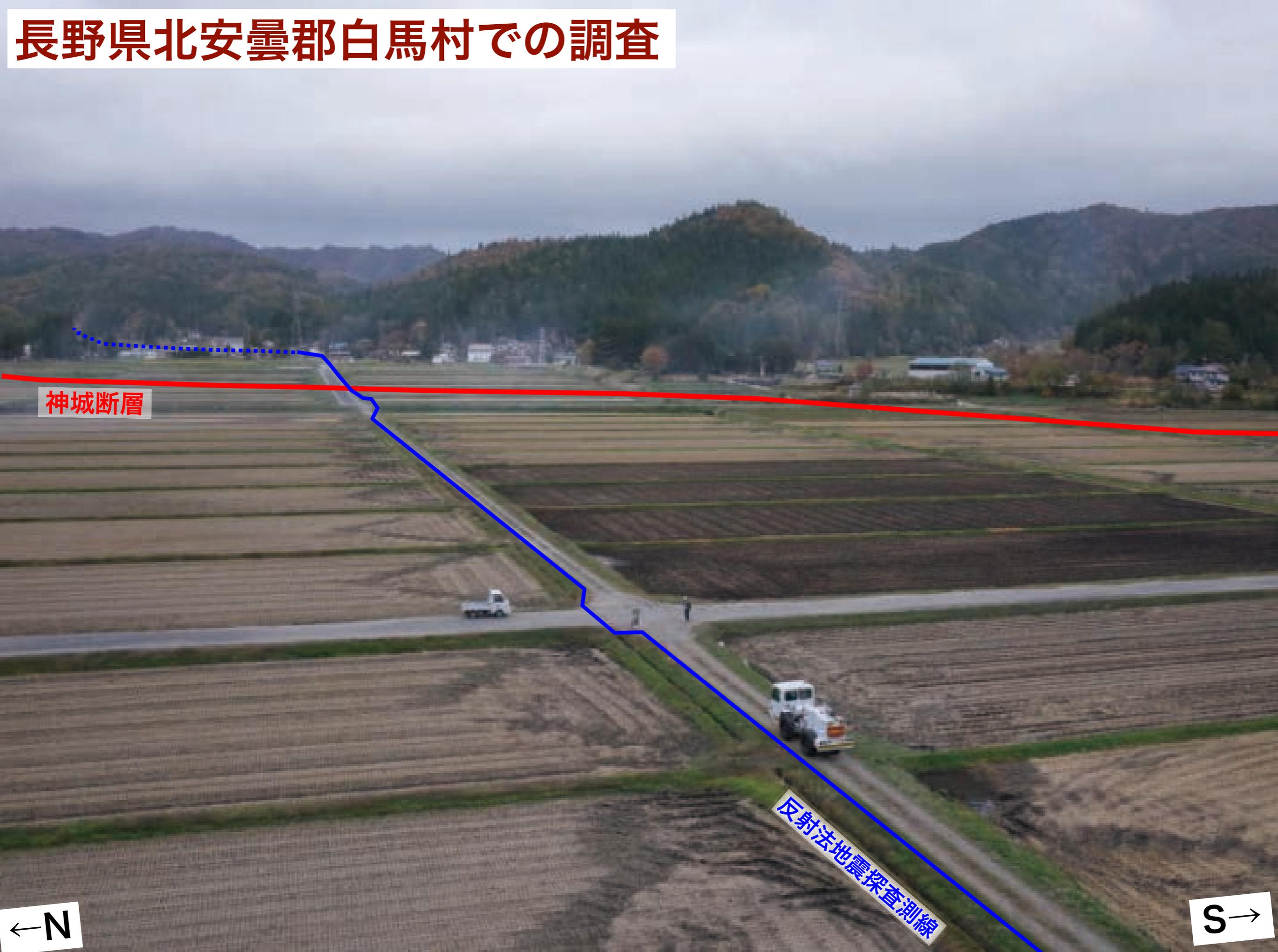
長野県北安曇郡白馬村での調査



← N

S →

長野県北安曇郡白馬村での調査



神城断層

反射法地震調査測線

← N

S →



At the survey site



Toolbox meeting



Materials are distributed along the survey line.



Geophone (9 modules) planting



Spreading the CDP cable



When crossing a road, cable is shown into a drainpipe



Cable protector is used near the parking lot



Shot interval is 10m or 20m



Measurement is carried out in a minivan

反射法地震探査に使われる震源

乗用車

重量：約1.4 t

全長：約4.6 m

全幅：約1.7 m

全高：約1.4 m

総重量：19.2 t

マス重量：2.6 t

ベースプレート重量：2.1 t

全長：約8.4 m

全幅：約2.5 m

全高：約3.2 m

周波数：6~200 Hz



HEMI-50

Enviro-vibe



総重量： 8.1 t
マス重量： 0.8 t
ベースプレート重量： 0.4 t
全長： 約6.1 m
全幅： 約1.8 m
全高： 約2.6 m
周波数： 10~250 Hz

マス重量：141 kg
マスストローク：4.78 cm
ベースプレート重量：168 kg
全長：約5.9 m
全幅：約2.2 m
周波数：10～550 Hz

エンジン



振動を伝える部分

SAI GAWA
国土交通省

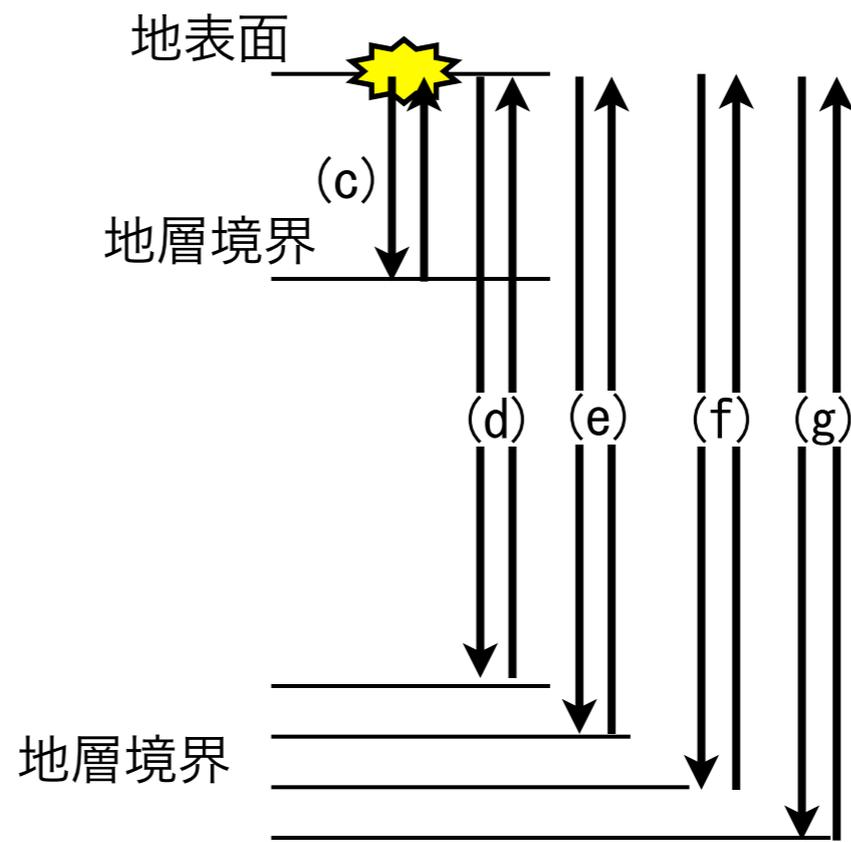
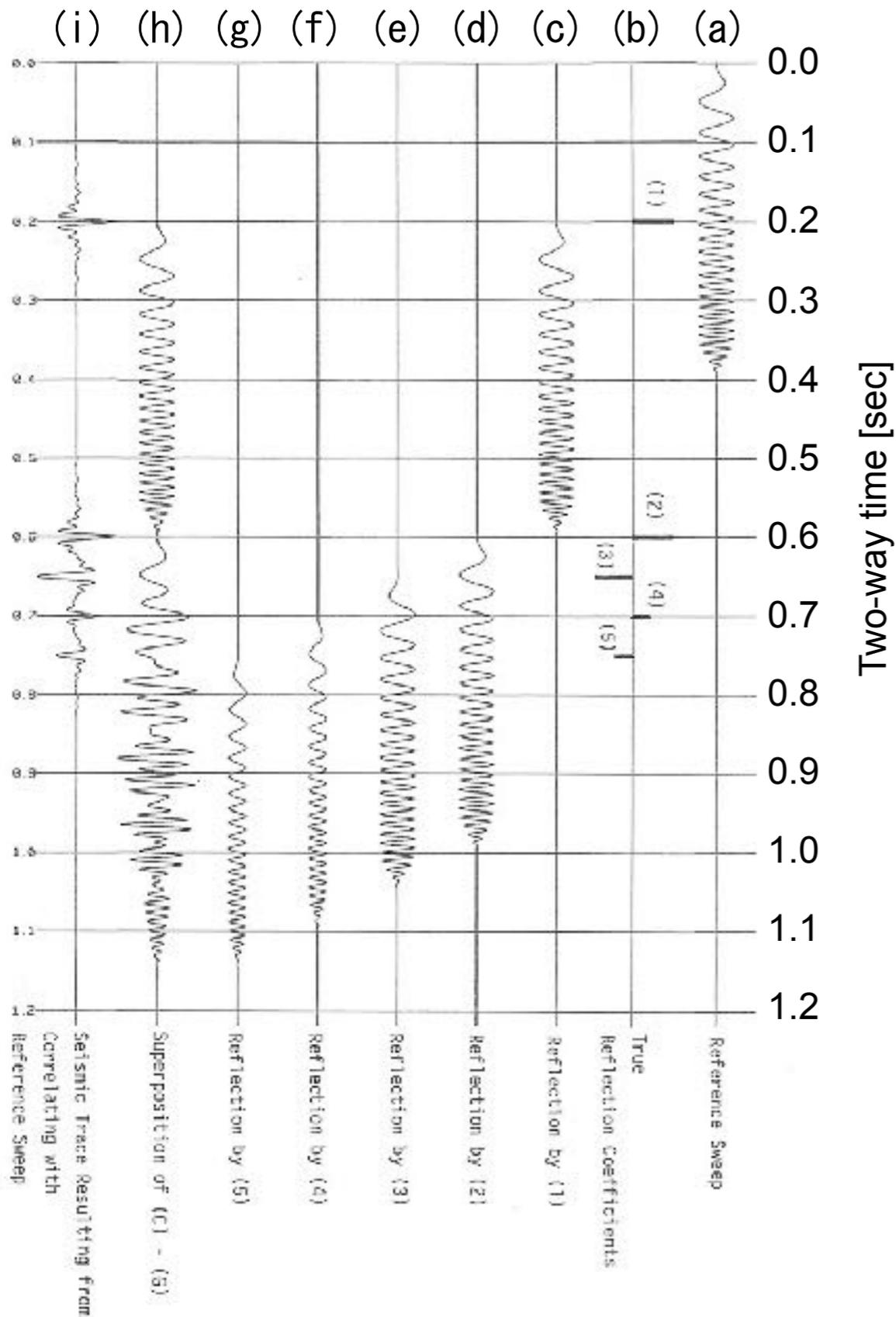
Mini-vibe
T-15000

総重量： 6.5 t
全長：約4.8 m
全幅：約1.9 m
全高：約2.8 m



JMI-200

バイブロサイスの原理



- (a) バイブロサイスで発震した波形
- (b) 反射係数時系列
- (c) 0.20秒で(地下の地質境界から)戻ってきた波形
- (d) 0.60秒で //
- (e) 0.65秒で //
- (f) 0.70秒で //
- (g) 0.75秒で //
- (h) (c) ~ (g) を合成した波形. 実際に得られるであろう波形.
- (i) (a) と (h) を相互相関処理した波形

本日の課題 (2017/06/09)

- ❖ 反射法地震探査とは、どのような調査方法か？**
- ❖ 今日の授業で分からなかったこと**