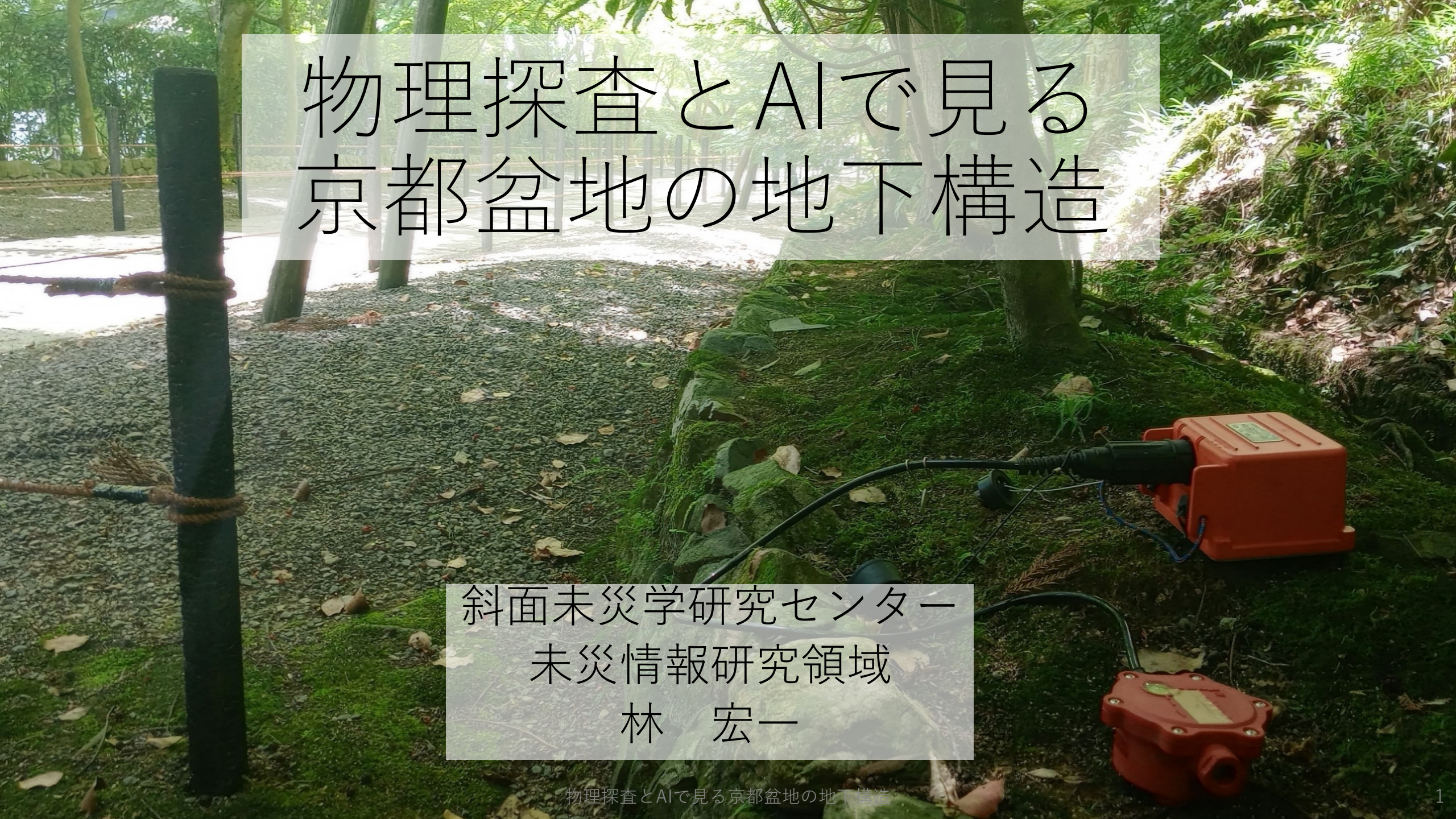


物理探査とAIで見る京都盆地の地下構造

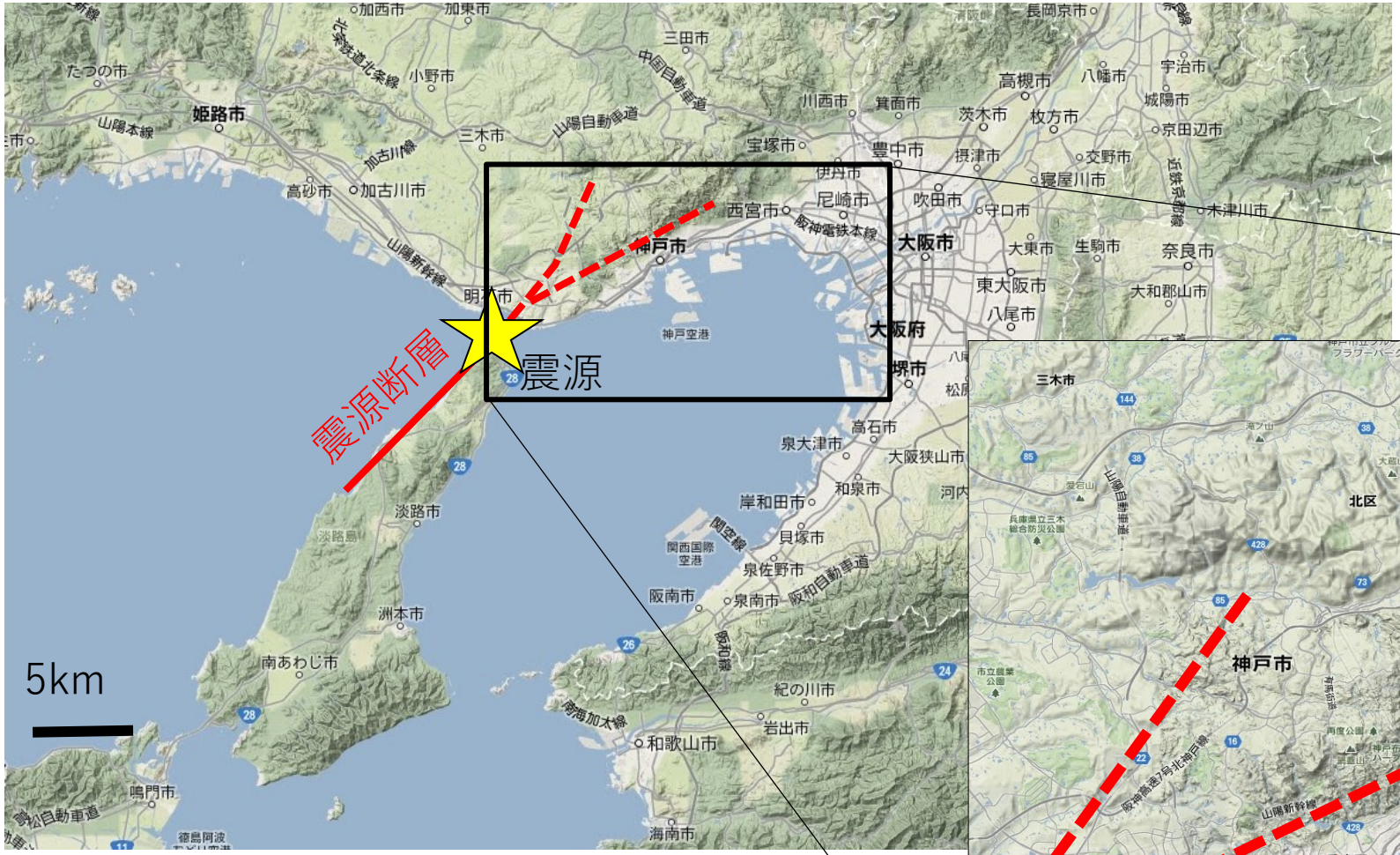
斜面未災学研究センター
未災情報研究領域
林　宏一

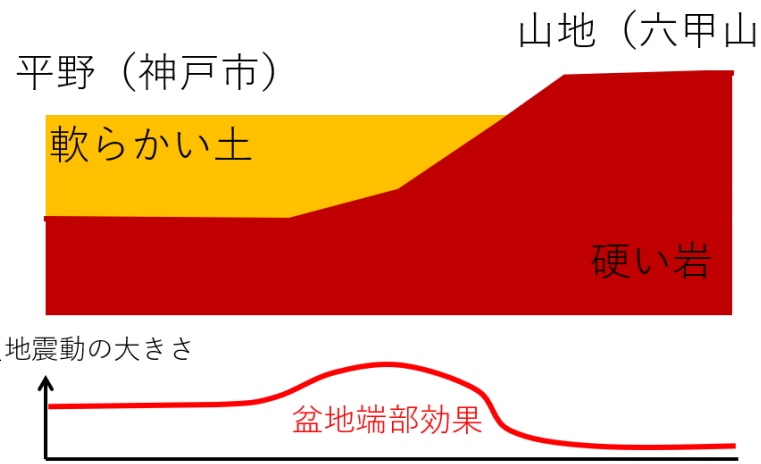
今日の話

- なぜ地下（地盤）を見る必要があるのか？
- 地下（地盤）の何を見るのか？
- どうやって地下（地盤）を見るのか？
- 京都盆地の地下構造は？
- 今日紹介する京都盆地の構造は現在研究中のもので誤差を含んでおり最終成果ではありません

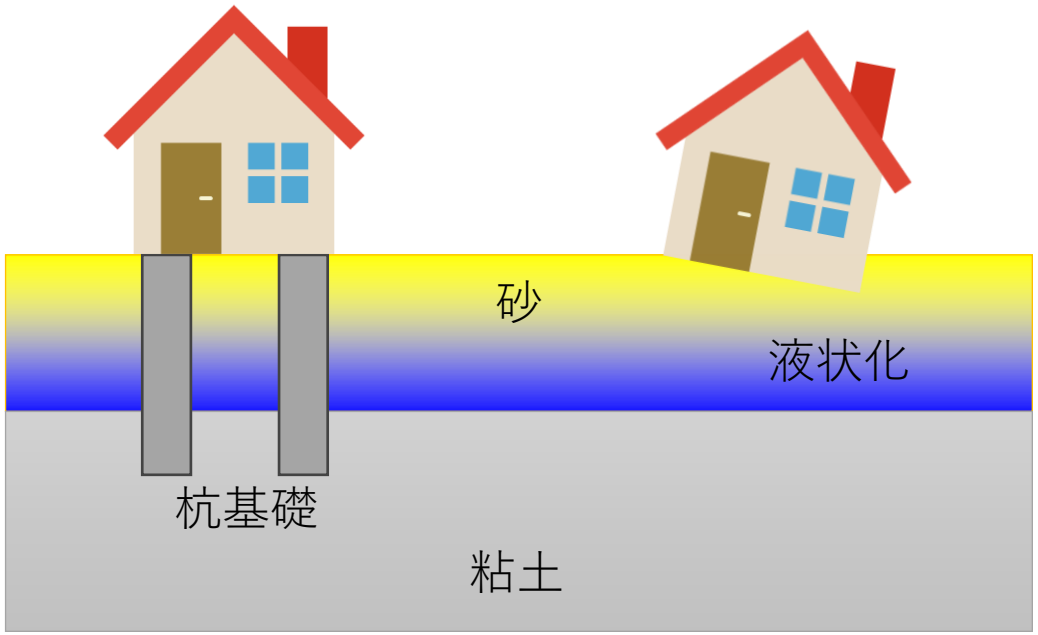
1995年：阪神・淡路大震災

1995年：阪神・淡路大震災

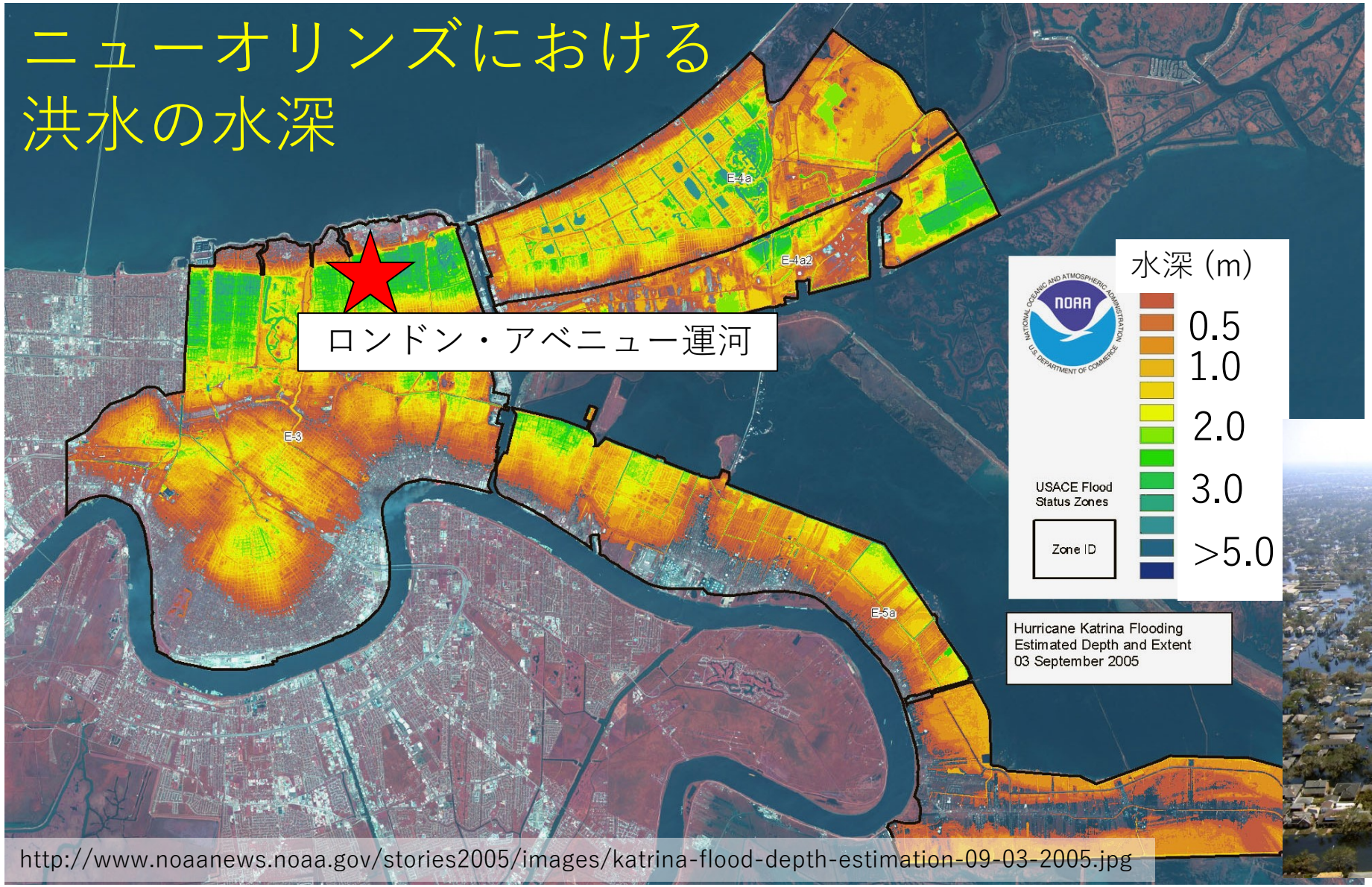




2024年：能登半島地震による液状化

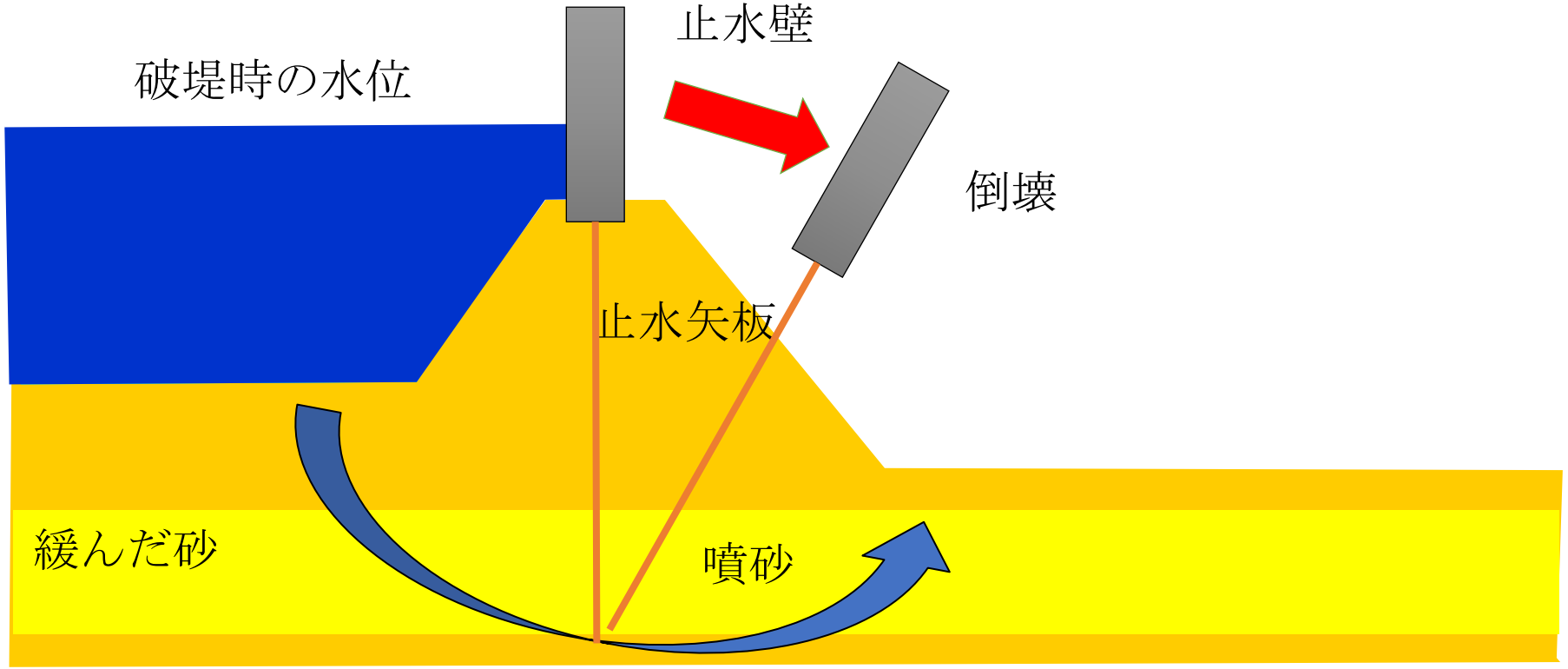


2005：ハリケーン・カトリーナ

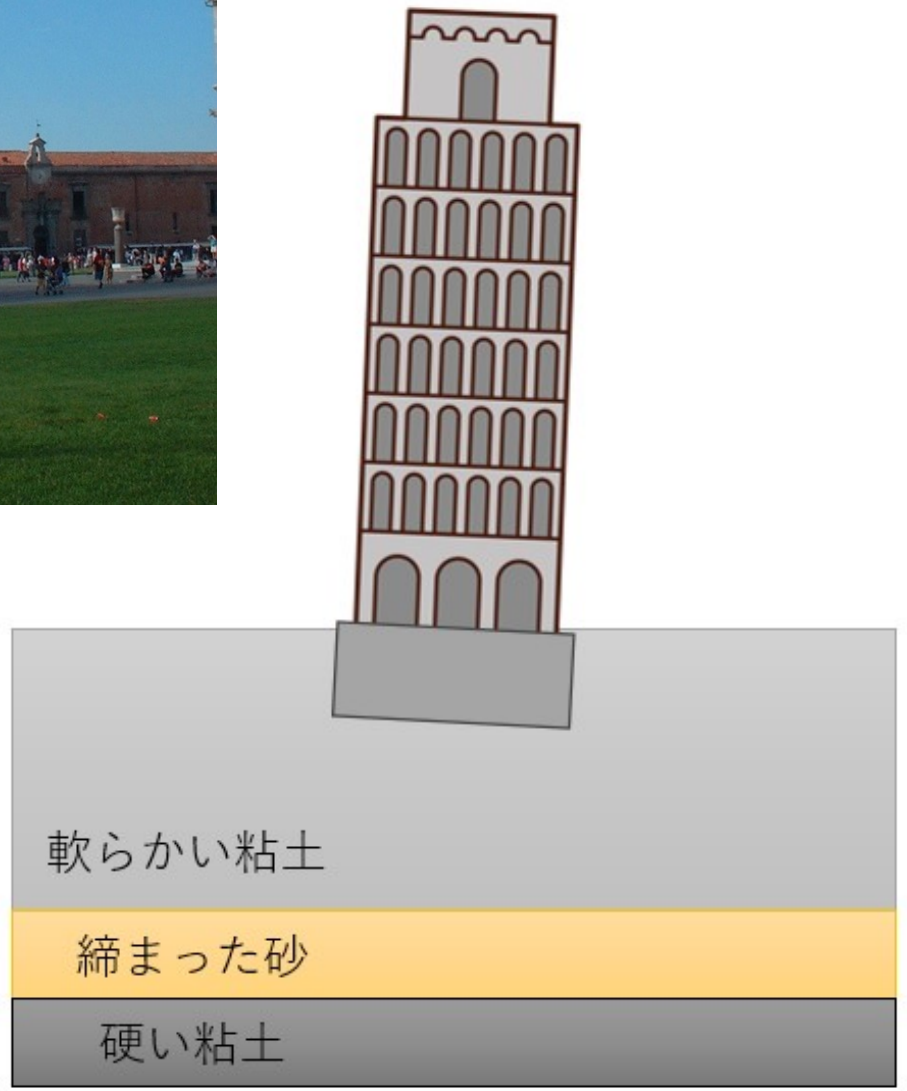


http://www.noaanews.noaa.gov/stories2005/images/katrina-flood-depth-estimation-09-03-2005.jpg

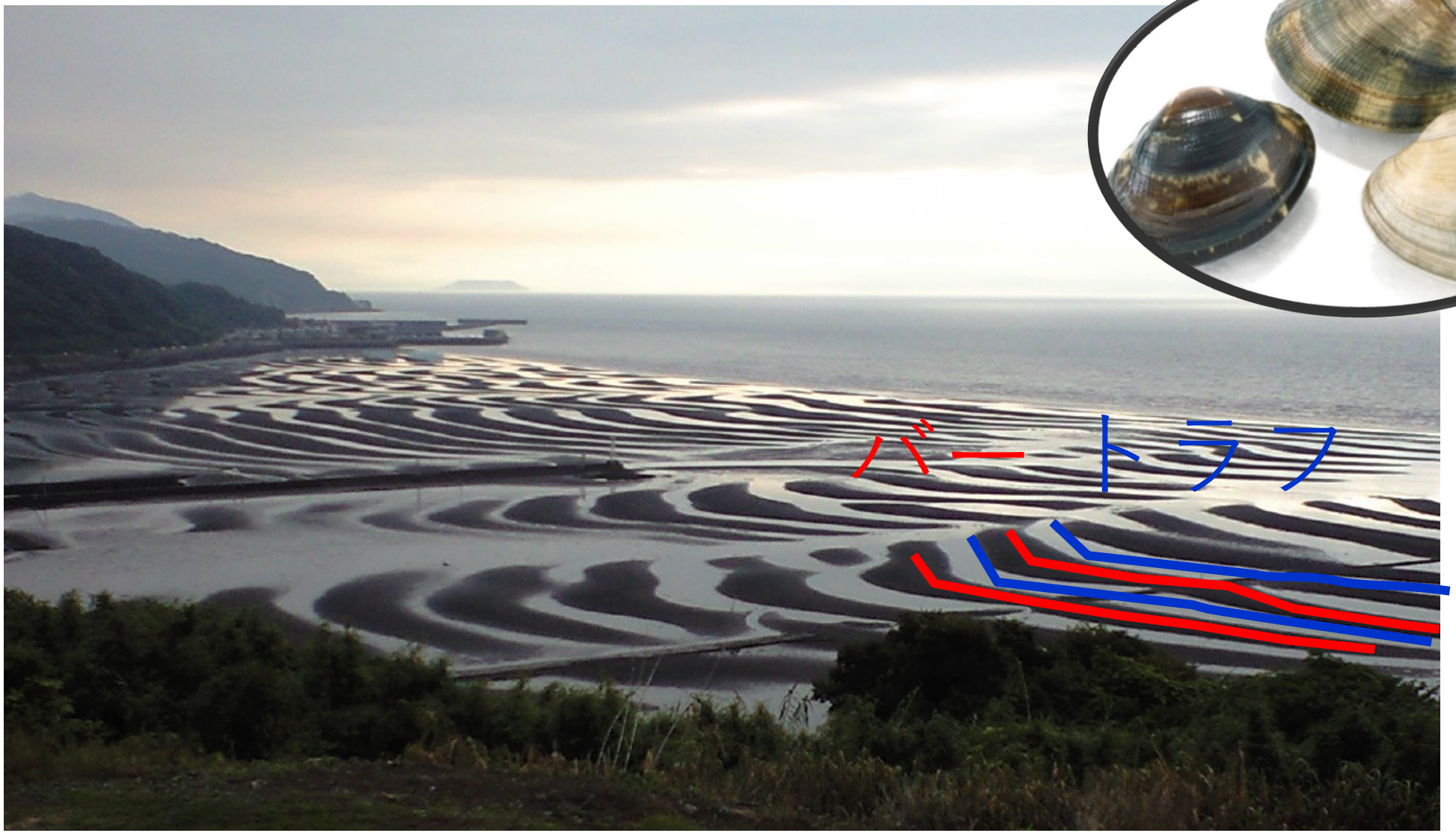
Levee break in New Orleans



ピサの斜塔



アサリは干潟のどこに住んでいるか？



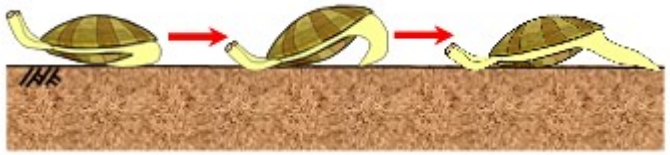
干潟の地盤構造調査

満潮時

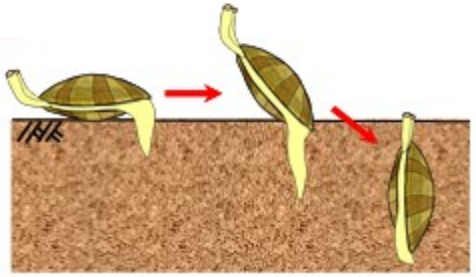
干潮時

干潟の地盤構造

アサリは砂に潜れない⇒住みにくい

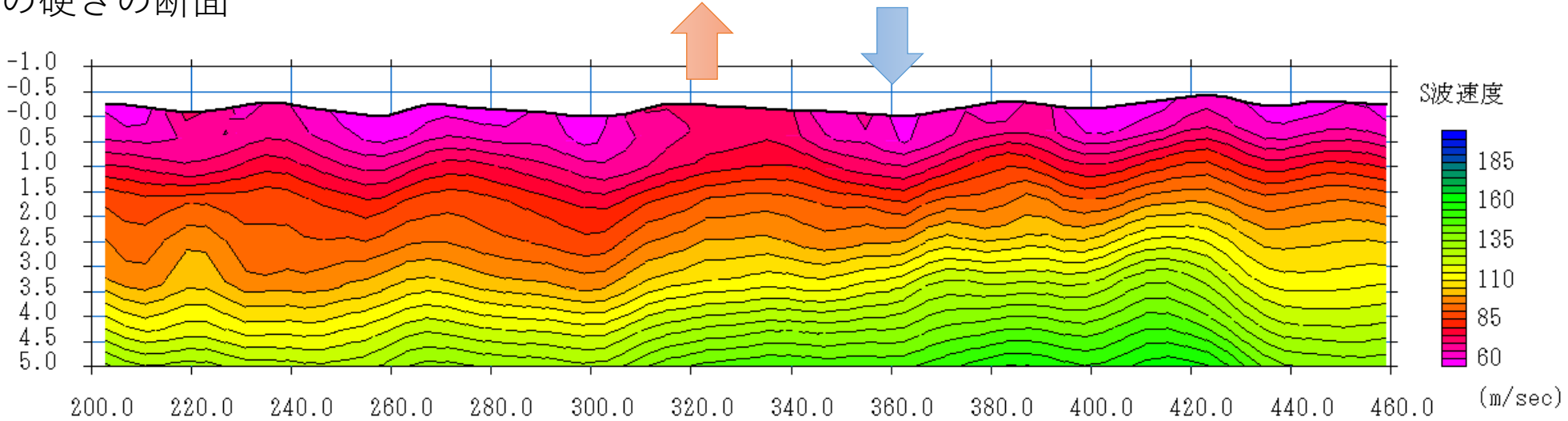


アサリは砂に潜れる⇒住みやすい



バー　トラフ
（高速度：硬い）　（低速度：軟らかい）

地盤の硬さの断面



アサリは干潟のどこに住んでいるか？

地盤の硬さを測って軟らかい場所を探しましょう！

地下の何を見るのか？

私はどんな人？

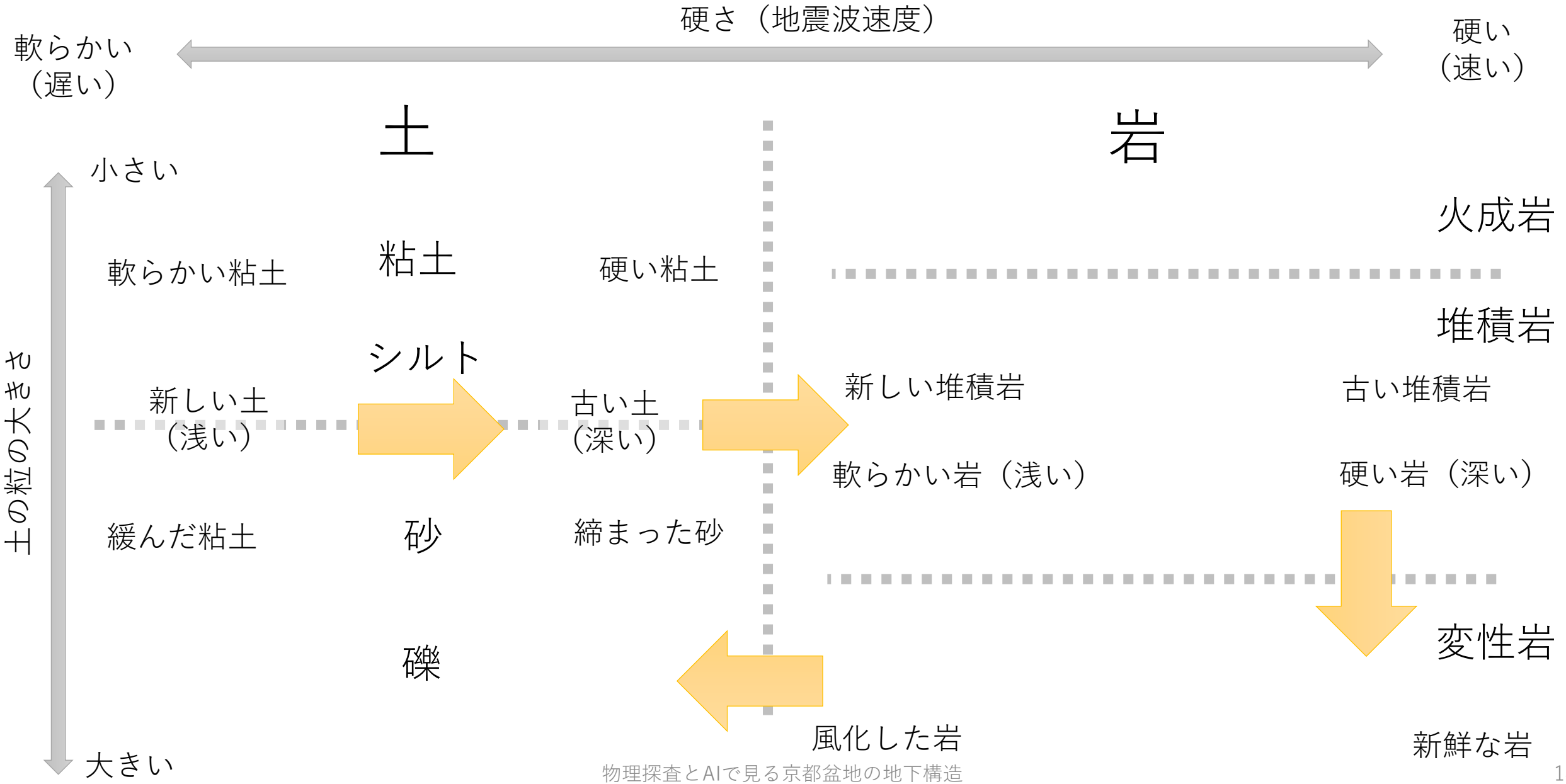
- 性別：男性
- 年齢：57
- 身長：170
- 体重：61
- 血液型：O
- 血圧：上130、下80
- 性格：真面目？
- 出身：神奈川県
- 国籍：日本
- 職業：教員
- 学歴：長岡京市立長法寺小学校
- 職歴：会社員、みなし公務員
- 趣味：料理、音楽、旅行

この地盤はどんな地盤？

- 標高
- 年齢（いつできたか？）
- 地形（平地、山地、丘陵・・・）
- 地質（土、岩・・・）
- 密度
- 硬さ
  - 圧縮試験（壊れやすさ）
  - 標準貫入試験（N値）
  - 地震波伝播速度
- 比抵抗（電気の流れやすさ）
- 歴史（昔は谷だった？山だった？）
- 基盤の深さ

地震波伝播速度は、
工学的に重要である
地表から地下の値を測定することができる
軟らかいものから硬いものまで評価できる
客観的な値である

地盤の硬さ（土と岩）


硬さ（地震波速度）
軟らかい
（遅い）
硬い
（速い）
土
岩
小さい
大きい
土の粒の大きさ
粘土
軟らかい粘土
硬い粘土
シルト
新しい土
（浅い）
古い土
（深い）
砂
緩んだ粘土
締まった砂
礫
風化した岩
火成岩
堆積岩
新しい堆積岩
古い堆積岩
軟らかい岩（浅い）
硬い岩（深い）
変性岩
新鮮な岩

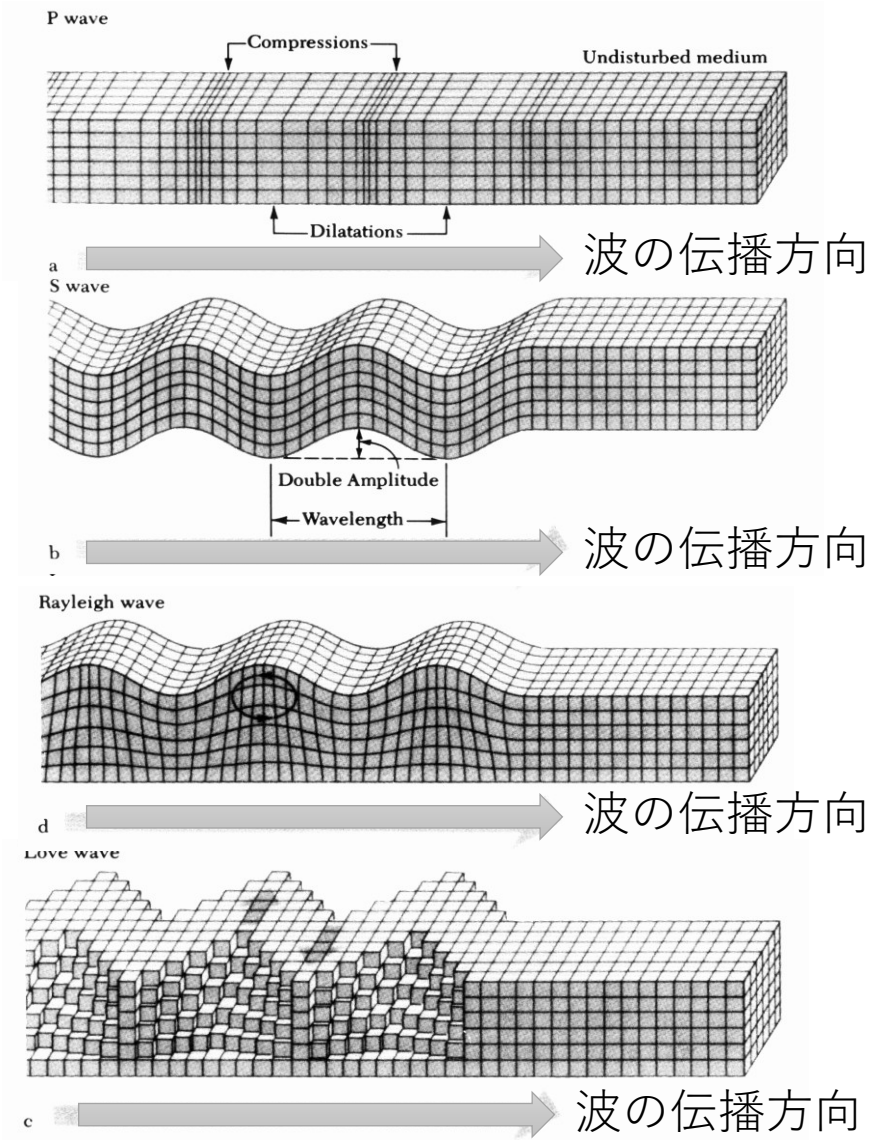
地震波（弾性波）の種類

- 実体波
  P波

  S波

- 表面波
  レイリー波

  ラブ波



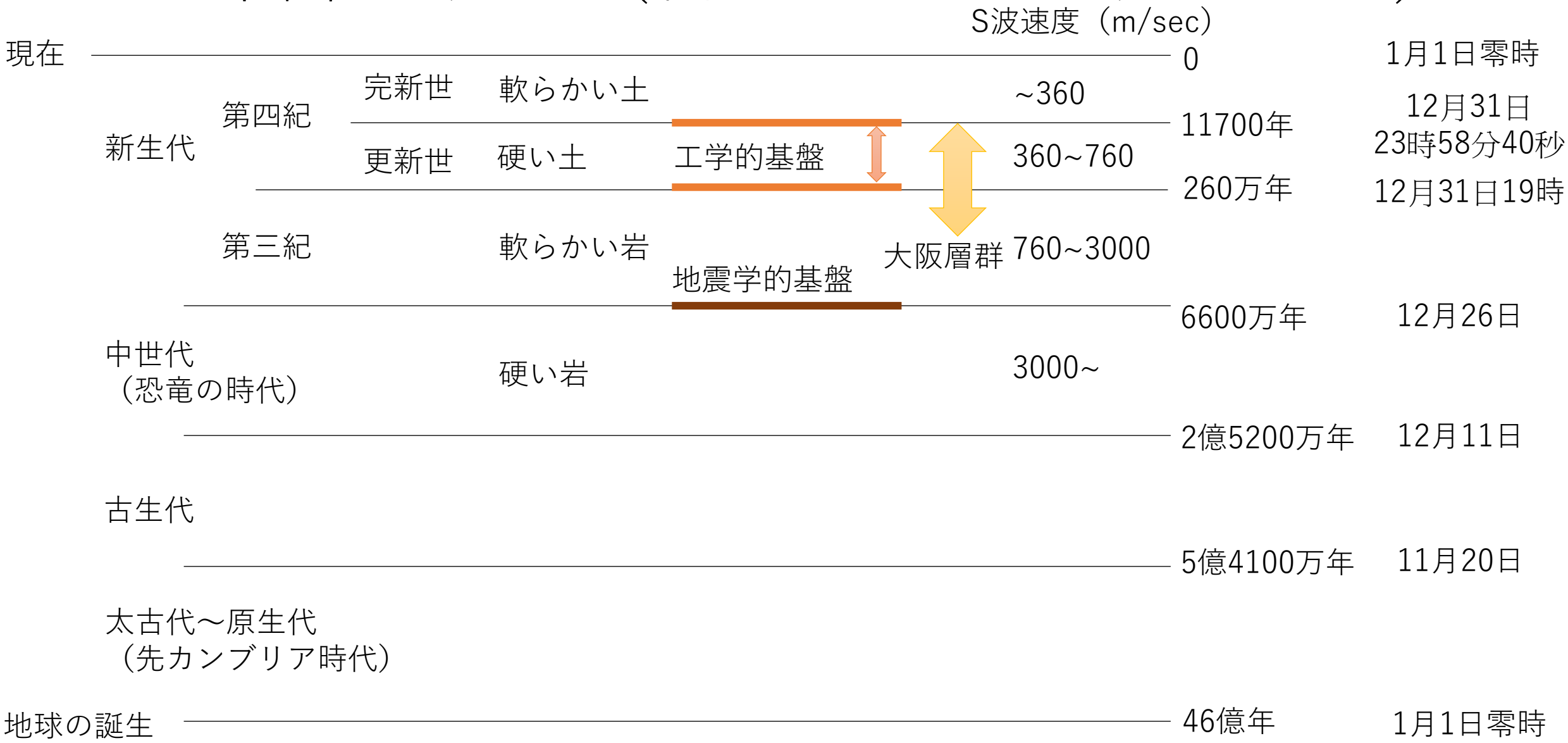
P波速度≒S波速度 x 2

地震波（音波）が伝わる速度

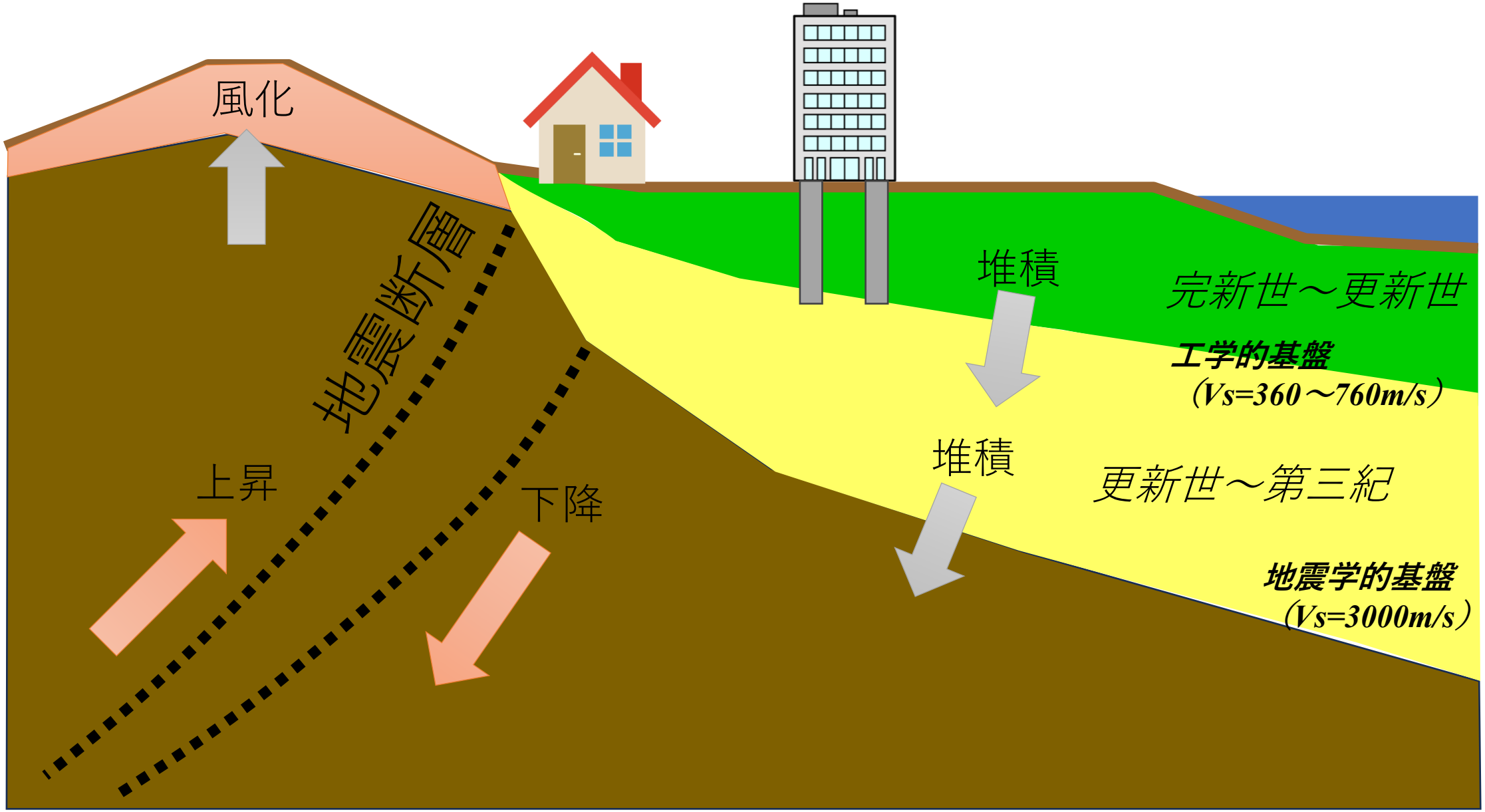
土と岩のタイプ	地下水面以浅のP波速度 (m/sec)	地下水面以深のP波速度 (m/sec)	S波速度 (m/sec)	S波速度 (km/hour)
空気	Vp = 330	-	-	
水	-	Vp = 1500	-	
とても軟らかい土	Vp < 330	Vp = 1500	Vs < 180	Vs < 648
軟らかい土	330 < Vp < 720~1500	Vp = 1500	180 < Vs < 360	648 < Vs < 1296
硬い土	720 < Vp < 1500	Vp = 1500	360 < Vs < 760	1296 < Vs < 2736
軟らかい岩	2000 < Vp < 5000	2000 < Vp < 5000	760 < Vs < 3000	2736 < Vs < 10800
硬い岩（上部地殻）	5000 < Vp	5000 < Vp	3000 < Vs	

S波は空気や水の中は伝わらない
P波は地下水面以深は水の速度以上で伝わる

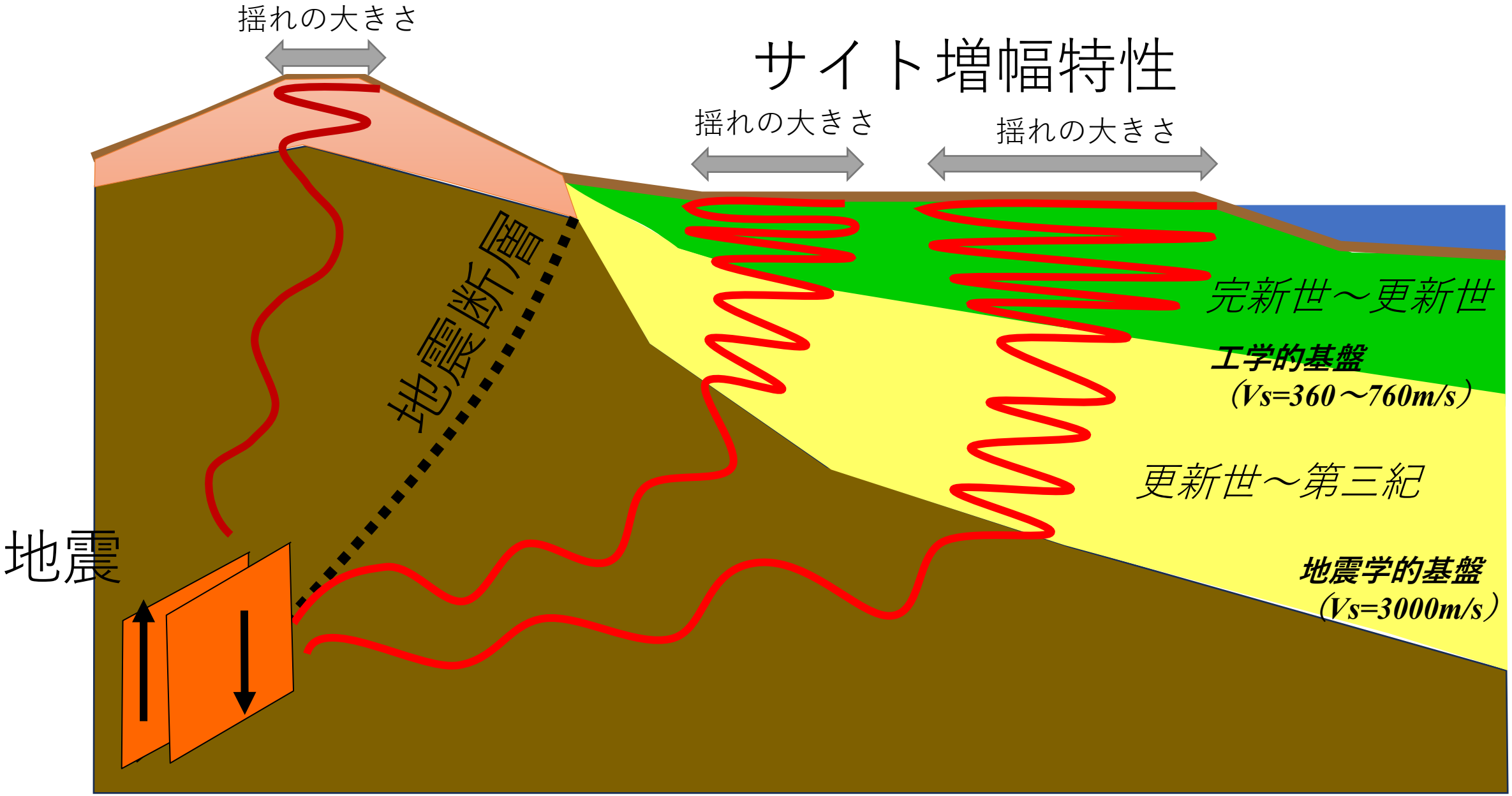
地盤の年齢と硬さ（古くなるほど硬くなる）



工学的基盤と地震学的基盤



基盤と地震動の増幅


揺れの大きさ
サイト増幅特性
揺れの大きさ
揺れの大きさ
地震断層
地震
完新世～更新世
工学的基盤
（Vs=360～760m/s）
更新世～第三紀
地震学的基盤
（Vs=3000m/s）

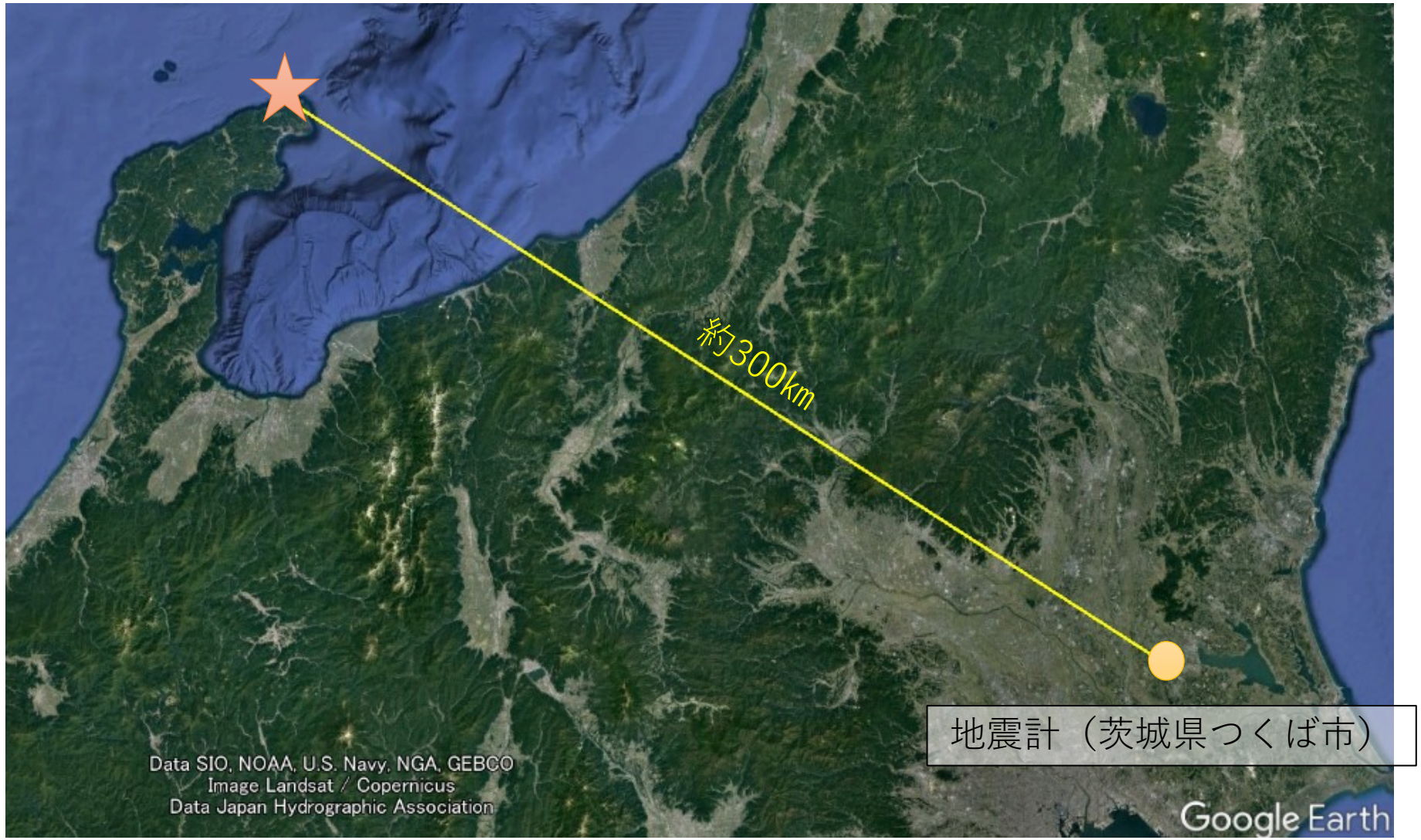
どうやって地下を見るのか？

- 掘ってみる
- ボーリング
- 貫入試験
- 物理探査
  - 電気探査
  - 重力探査
  - 地震探査

地震波で地下を見る（地震探査）

- 地震の観測
- 屈折法地震探査
- 反射法地震探査
- 常時微動測定

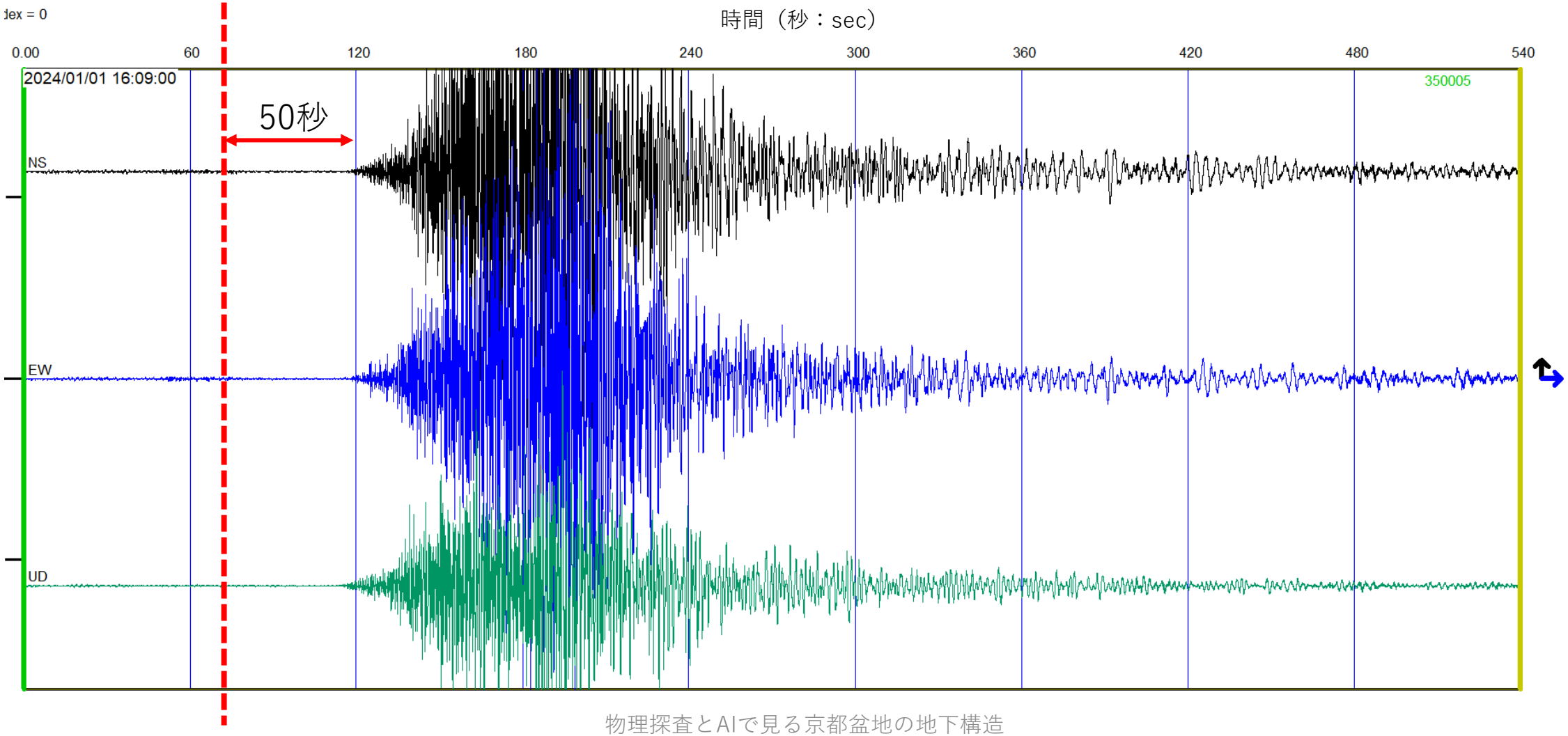
能登半島地震の記録


約300km
地震計（茨城県つくば市）
Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO
Image Landsat / Copernicus
Data Japan Hydrographic Association
Google Earth

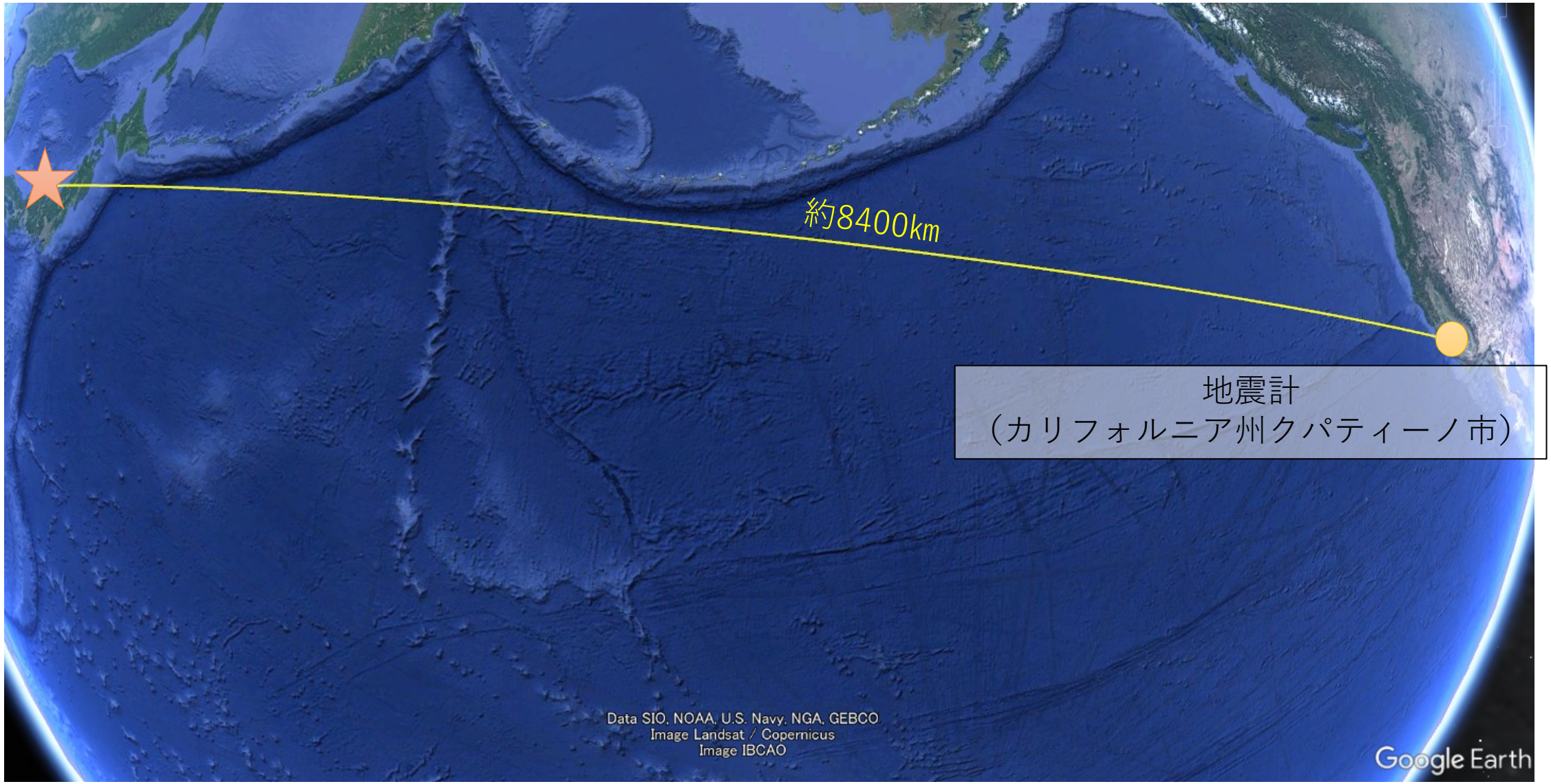
能登半島地震の記録（茨城県つくば市）

地震の発生
（16時10分09秒）

300 km/50 sec=6 km/sec = 6000 m/sec



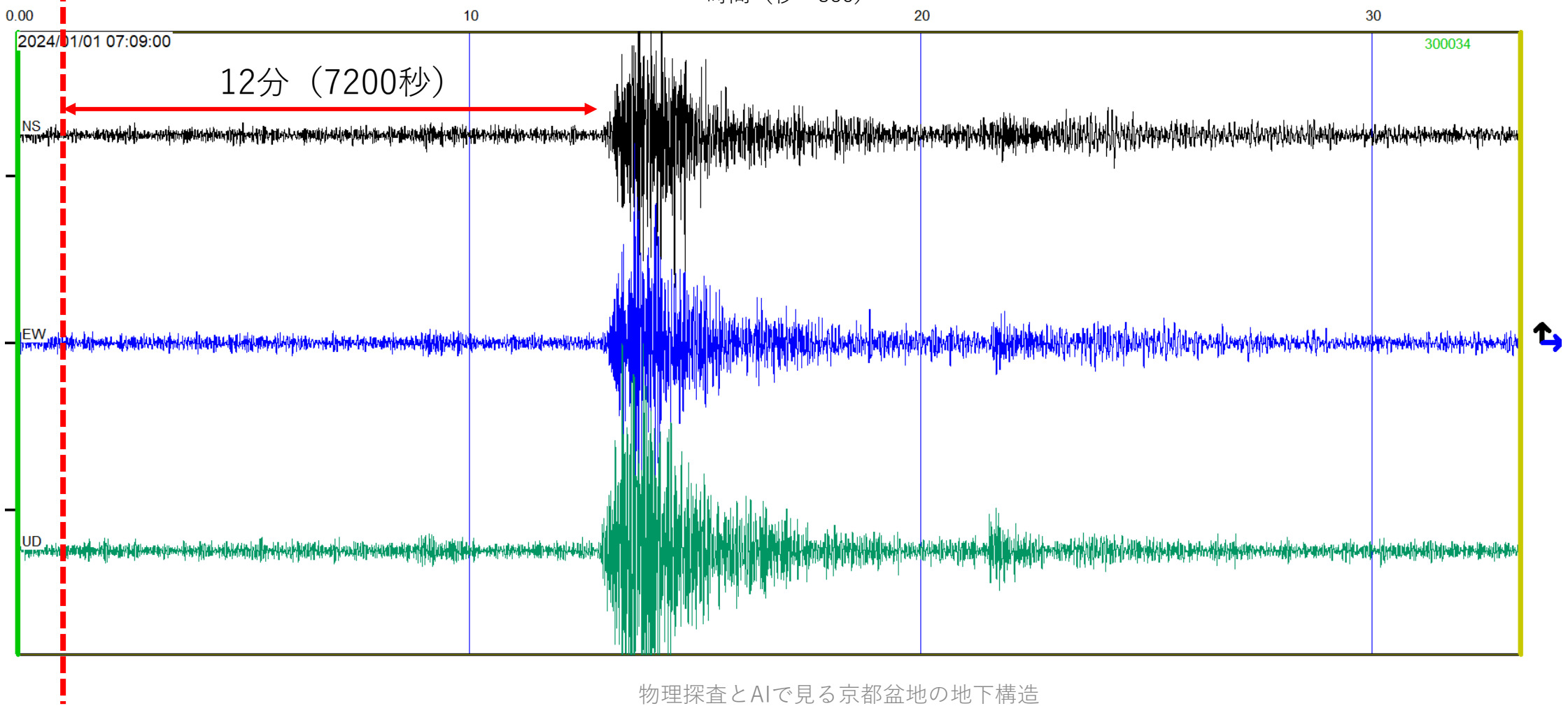
能登半島地震の記録


約8400km
地震計
（カリフォルニア州クパティーノ市）
Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO
Image Landsat / Copernicus
Image IBCAO
Google Earth

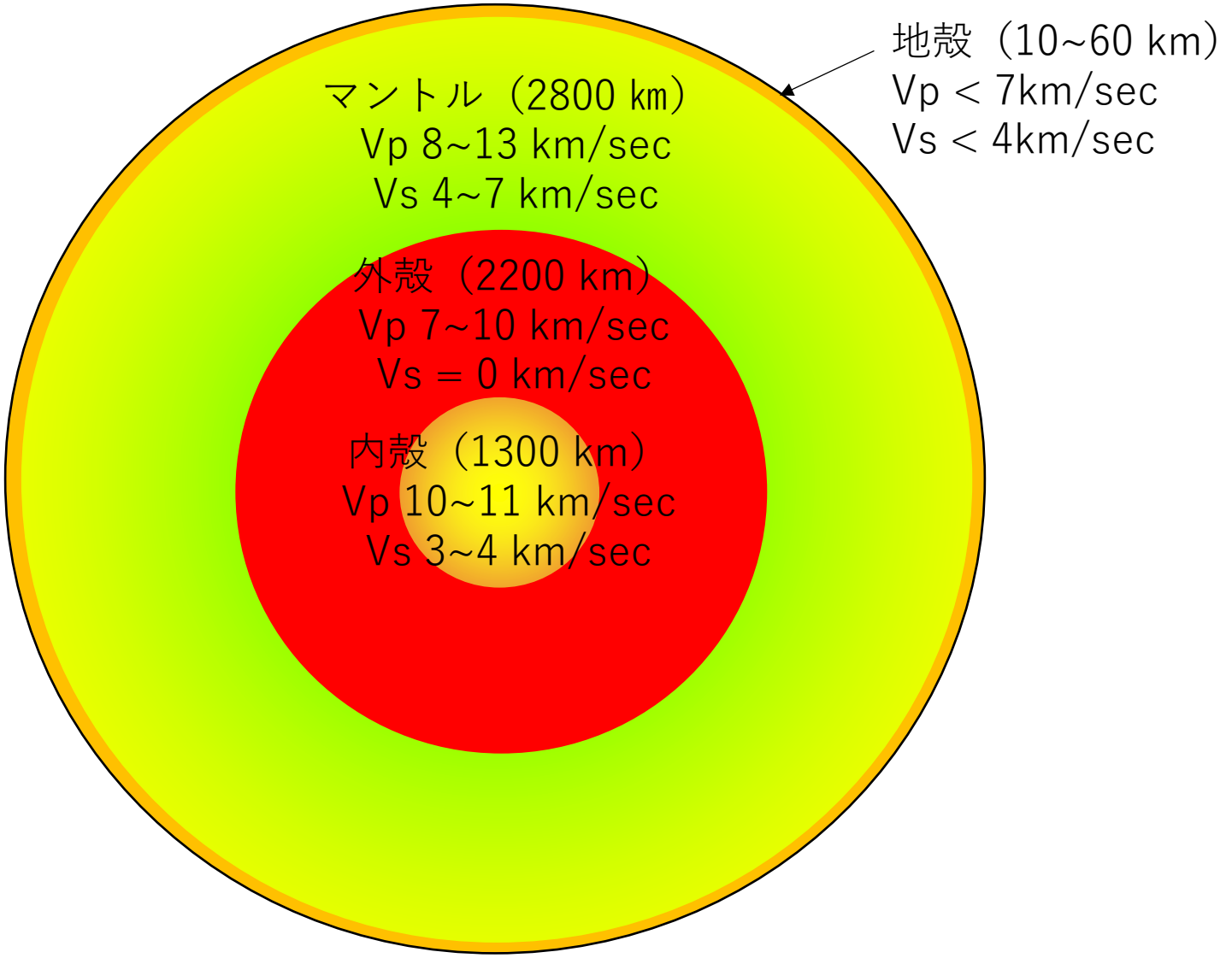
能登半島地震の記録
（カリフォルニア州クパティーノ市）

地震の発生
（16時10分09秒）

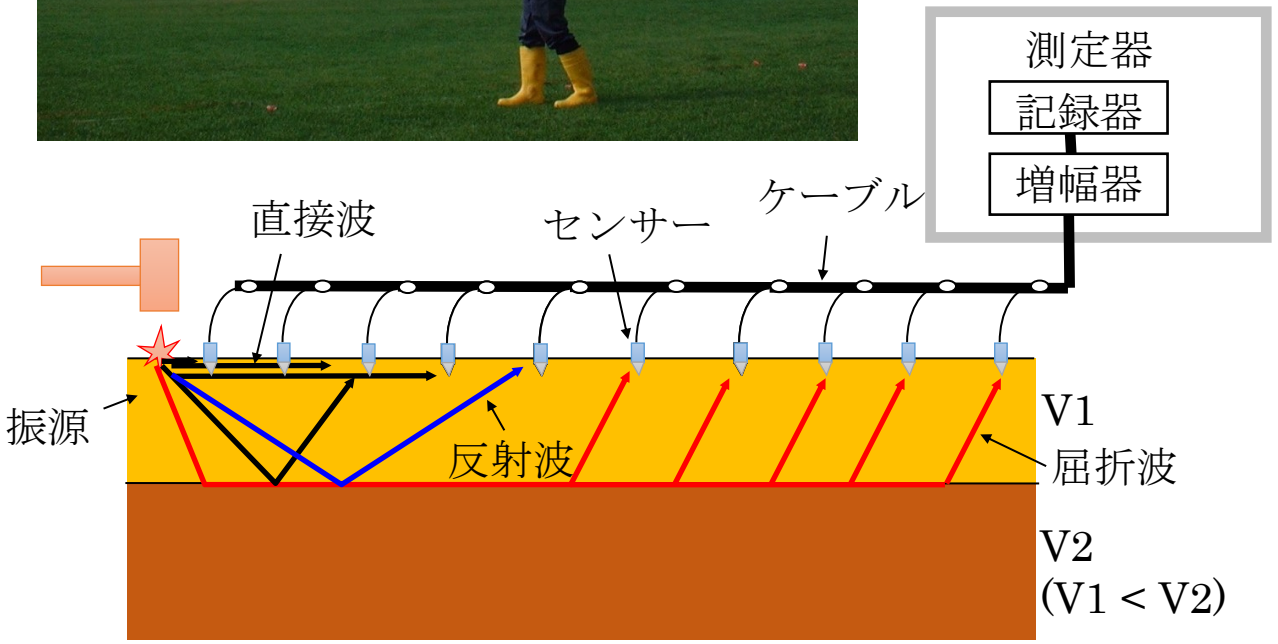
8400 km/7200 sec=11 km/sec = 11000 m/sec

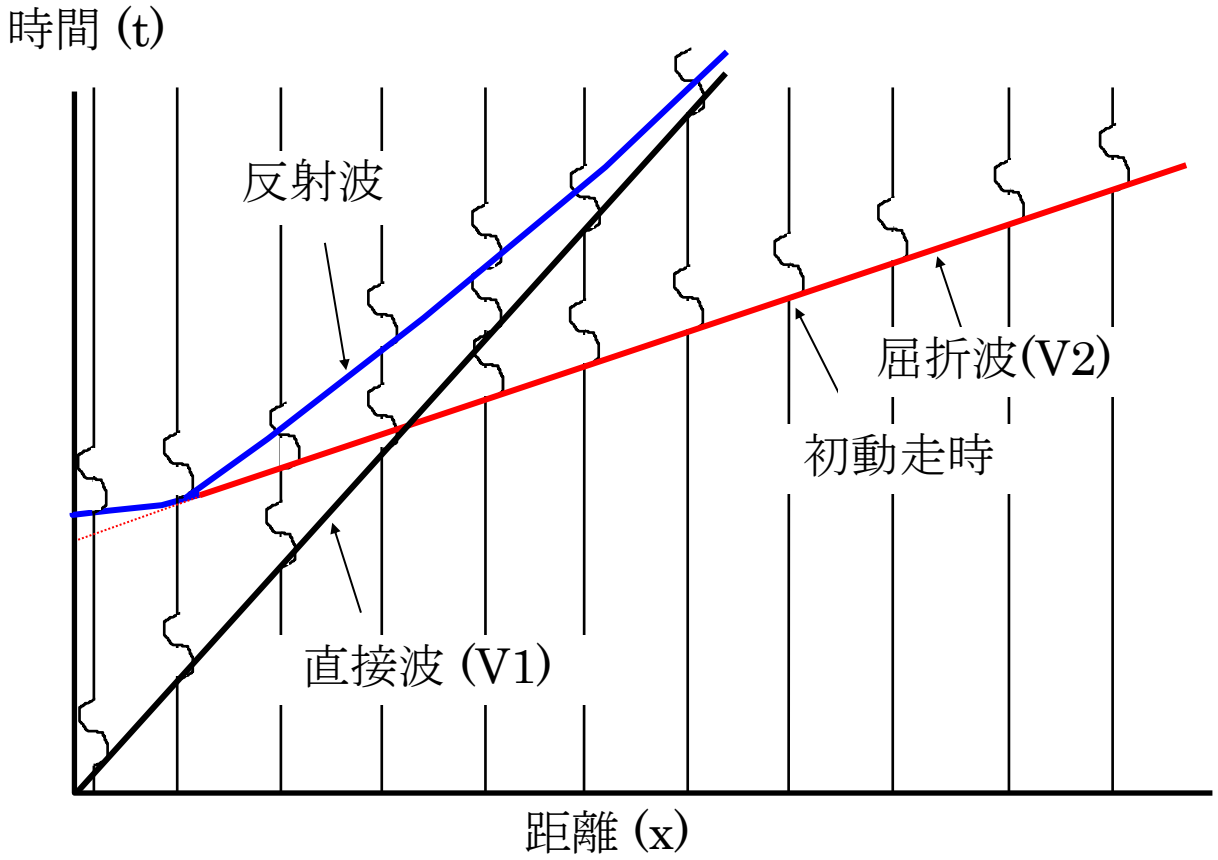


地球の構造

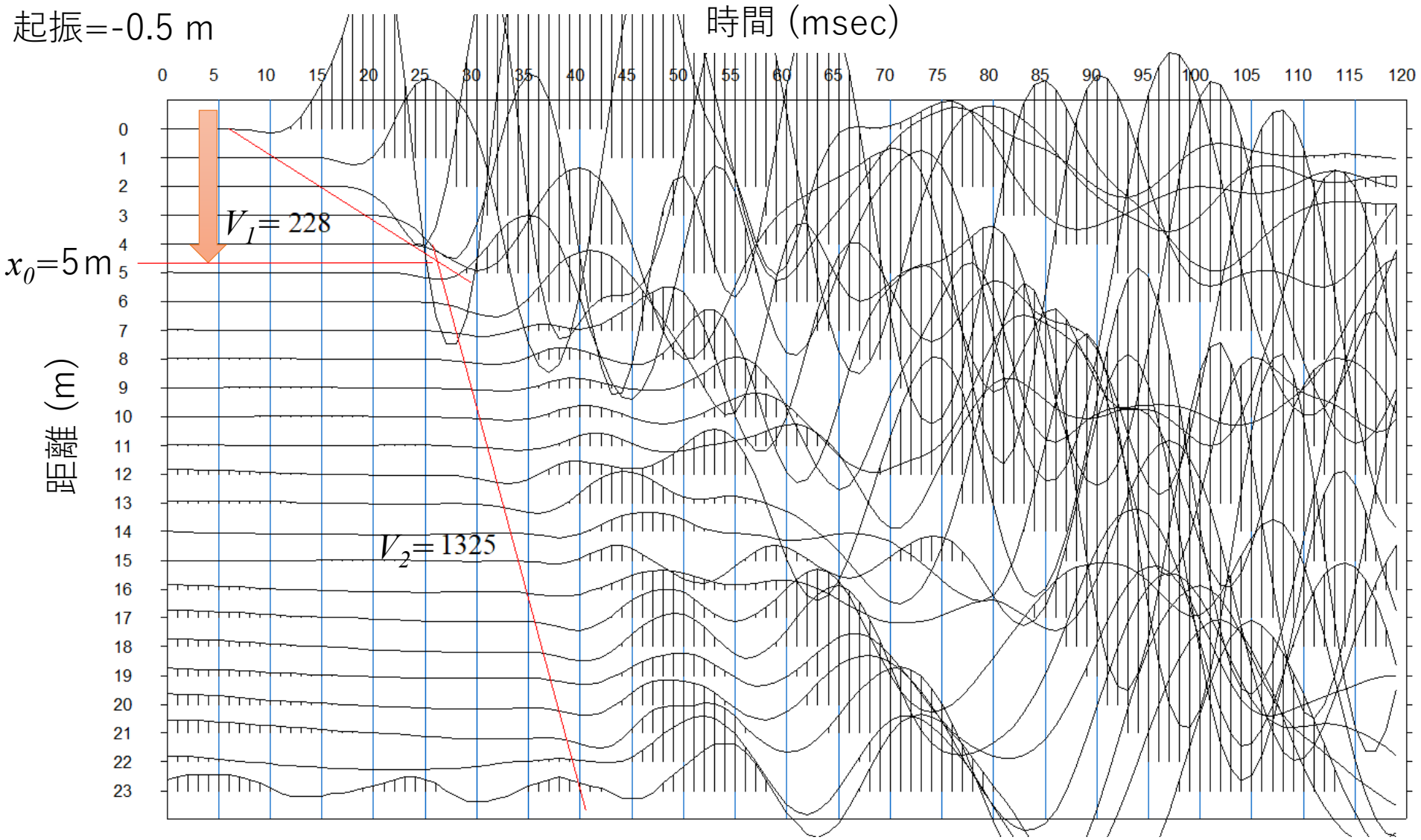

地殻（10~60 km）
Vp < 7km/sec
Vs < 4km/sec
マントル（2800 km）
Vp 8~13 km/sec
Vs 4~7 km/sec
外殻（2200 km）
Vp 7~10 km/sec
Vs = 0 km/sec
内殻（1300 km）
Vp 10~11 km/sec
Vs 3~4 km/sec

屈折法地震探査


測定器
記録器
増幅器
ケーブル
センサー
直接波
振源
反射波
V1
屈折波
V2
(V1 < V2)


時間 (t)
反射波
屈折波(V2)
初動走時
直接波 (V1)
距離 (x)

屈折法地震探査の例



$$深さ = \frac{x_0}{2}\sqrt{\frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}}$$

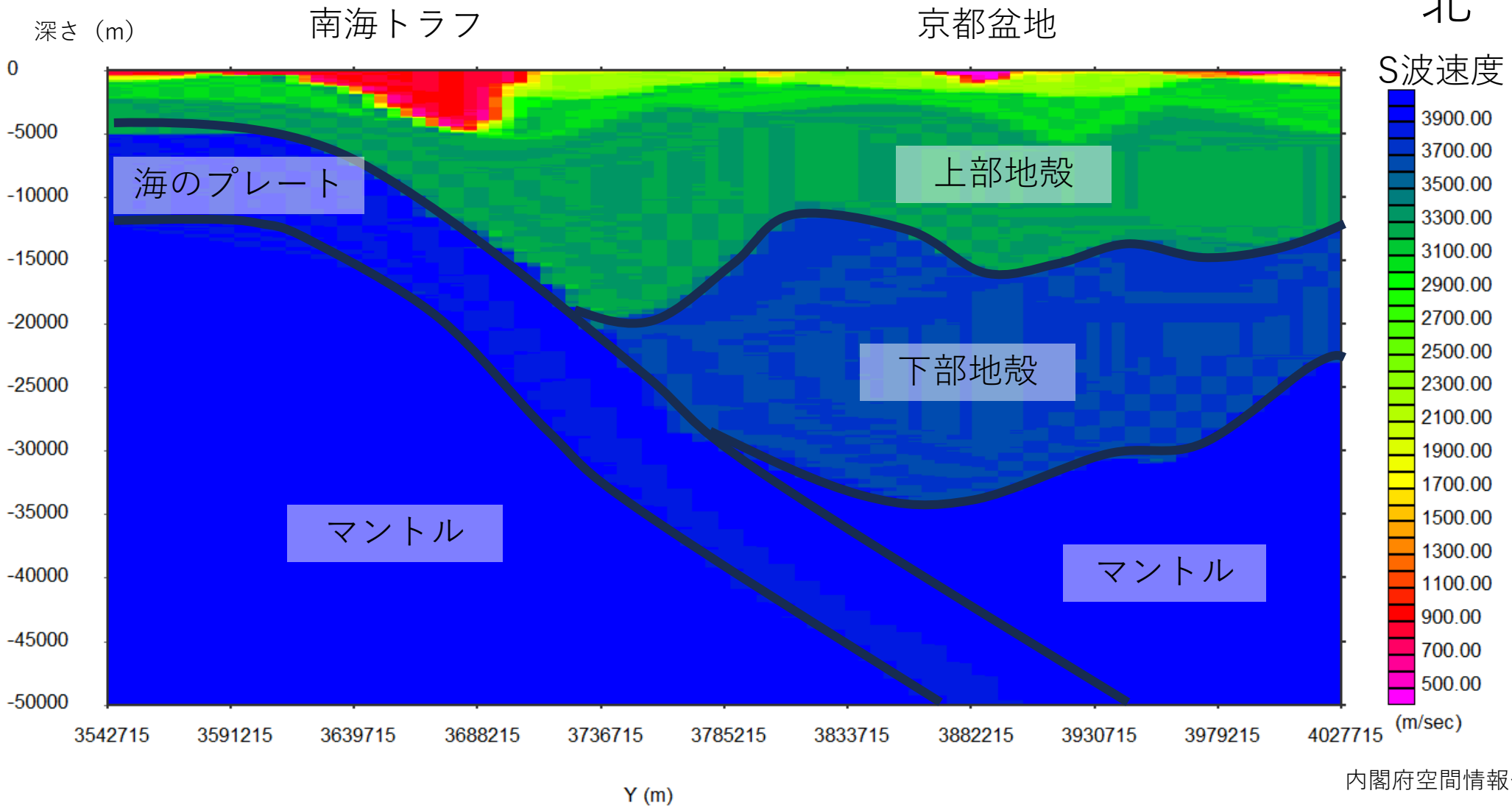
$$深さ = \frac{5}{2}\sqrt{\frac{1325 - 228}{1325 + 228}}$$

$$= 1.8\ \mathrm{m}$$

地球の構造（地殻とマントル）

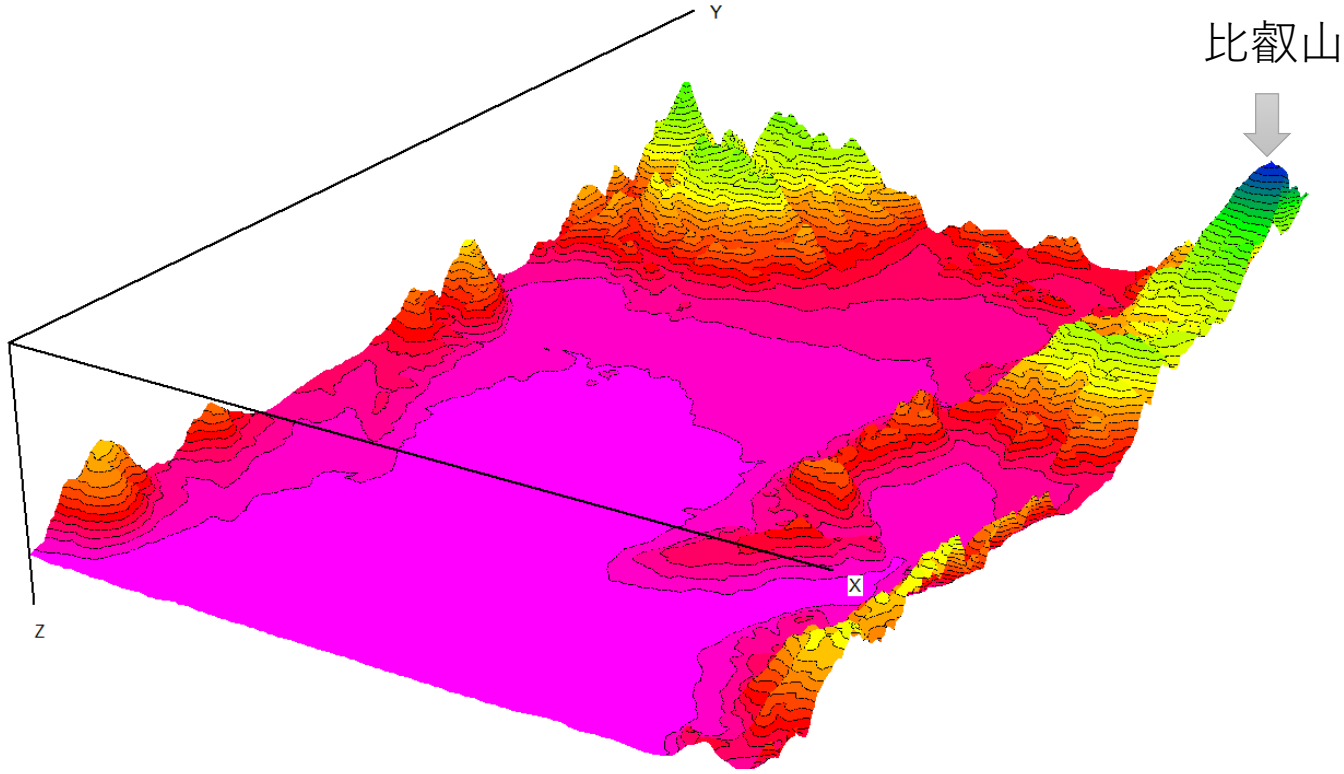
南

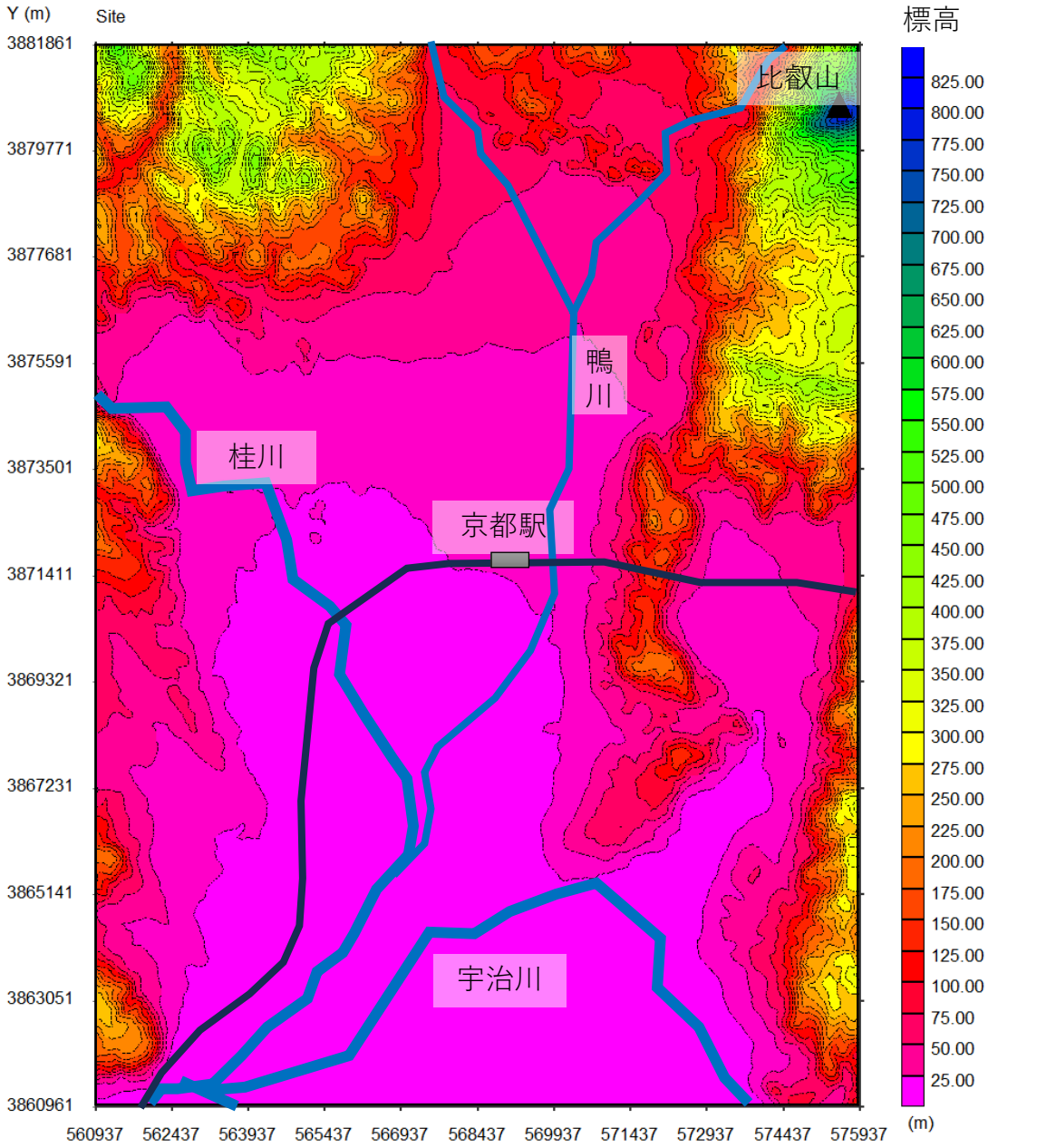
北



内閣府空間情報センター(2017)

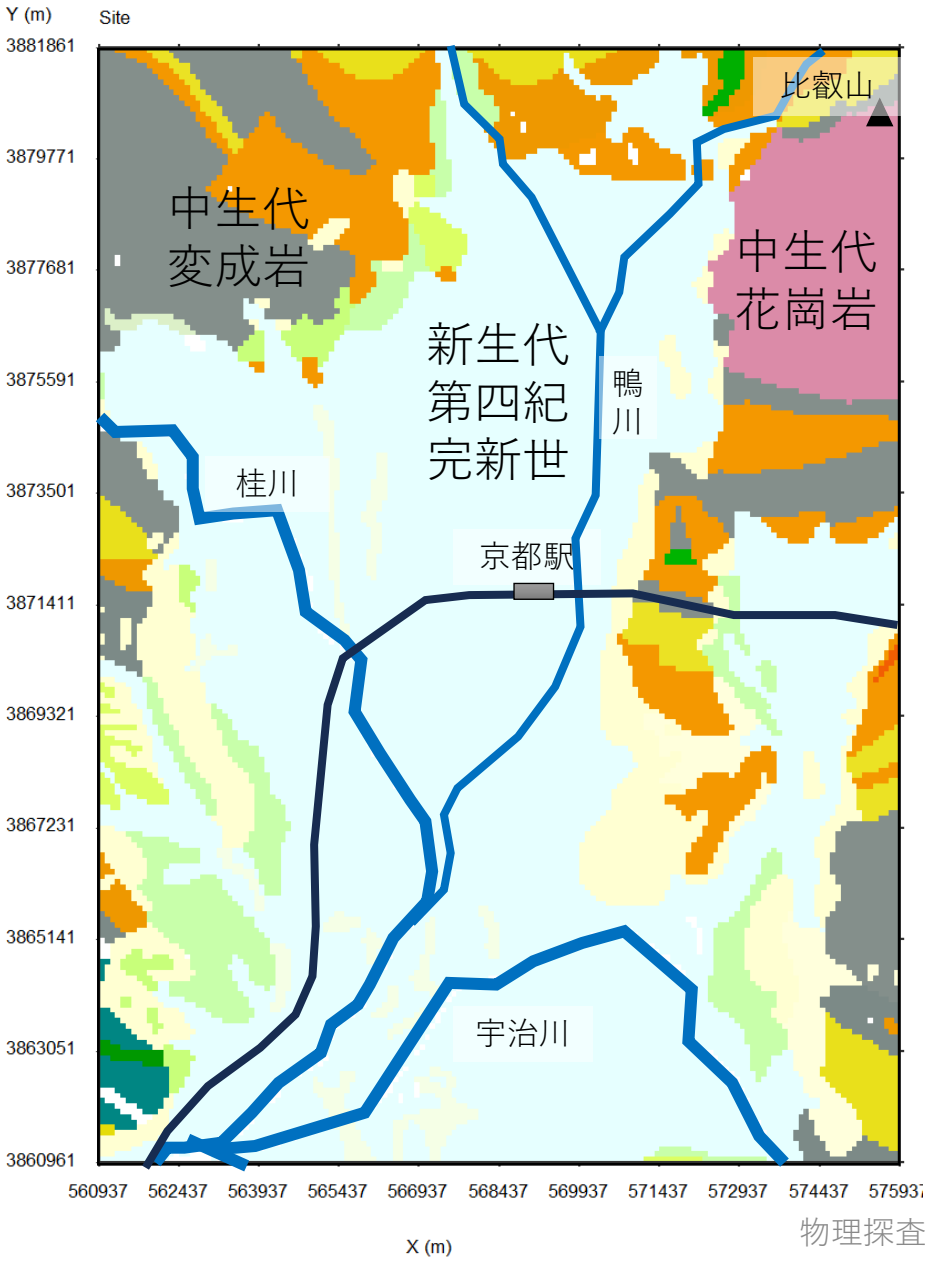
京都盆地の地形





国土地理院（2024）

地質図（いつできたか？）



国土地理院（2024）

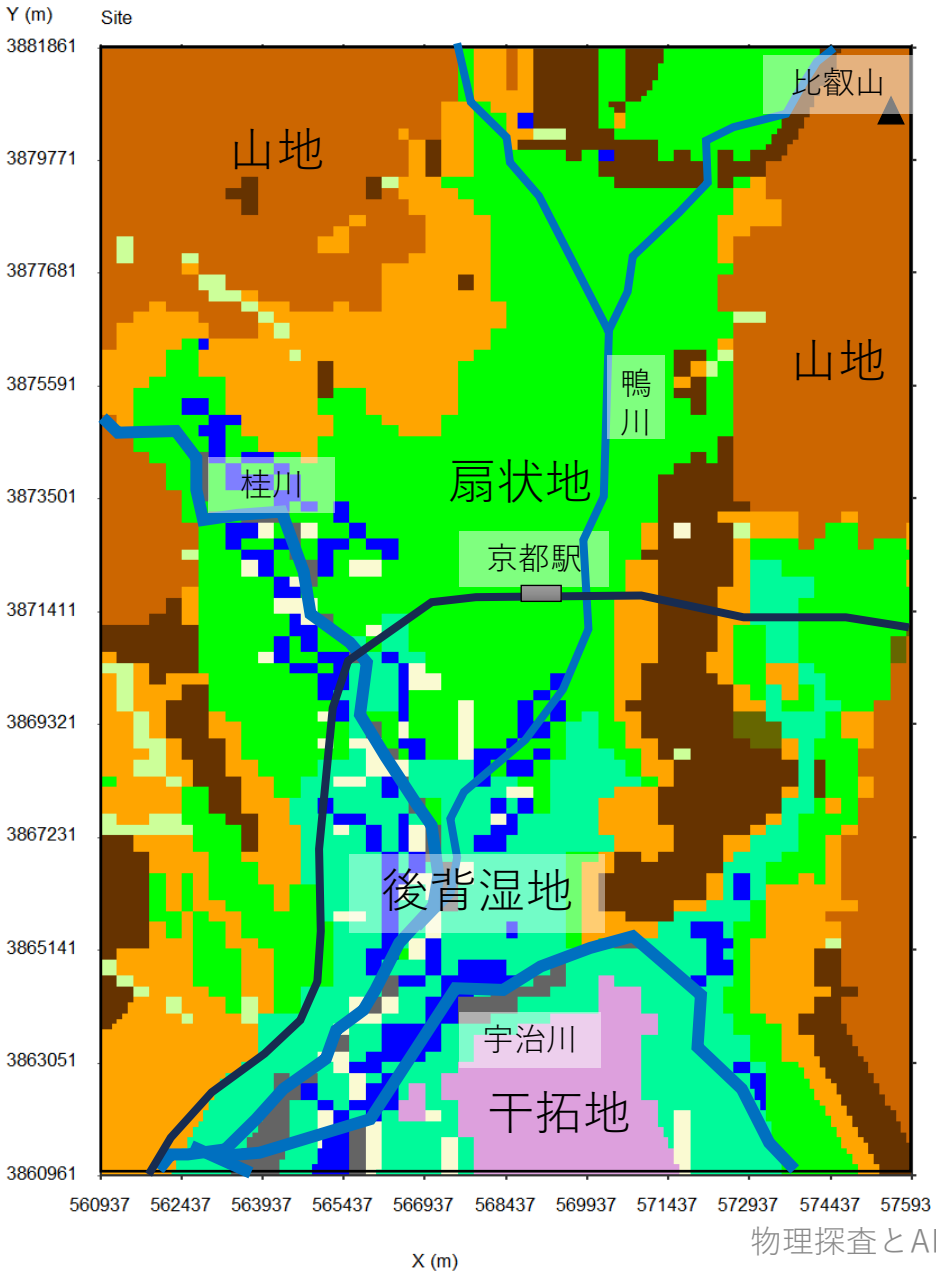
新生代第四紀
（～260万年）

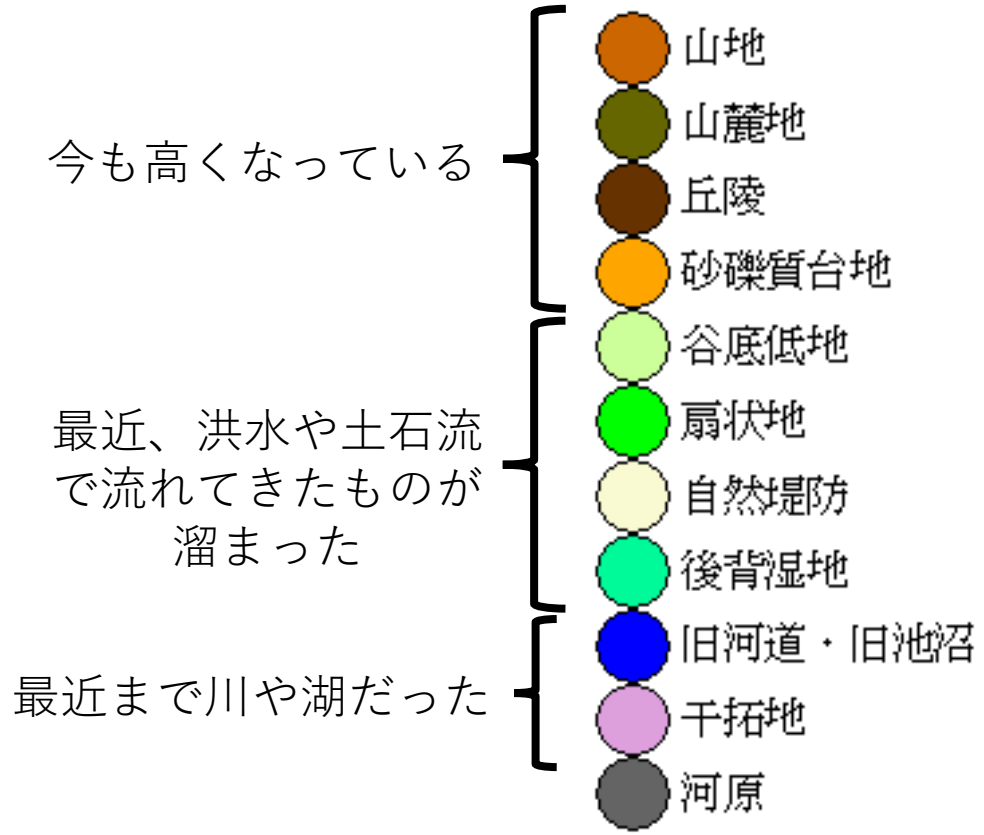
- 新生代 第四紀 後期更新世後期～完新世
  扇状地・崖錐堆積物
- 新生代 第四紀 完新世
  谷底平野・山間盆地・河川・海岸平野堆積物
- 新生代 第四紀 完新世
  自然堤防堆積物

完新世
（~11700年）

- 新生代 第四紀 後期更新世中期～後期更新世後期
  段丘堆積物
- 新生代 第四紀 後期更新世前期
  段丘堆積物
- 新生代 第四紀 更新世 後期チバニアン期
  段丘堆積物
- 新生代 第四紀 更新世 ジェラシアン期～前期チバニアン期
  非海成層
- 新生代 第四紀 更新世 ジェラシアン期～前期チバニアン期
  汽水成層ないし海成・非海成混合層
- 古生代 ペルム紀 グアダルピアン世～ローピンジアン世
  海成層 砂岩 中期-後期ペルム紀付加体
- 中生代 中期三畳紀～後期三畳紀
  混在岩 中期-後期三畳紀付加体
- 古生代 ペルム紀 グアダルピアン世～中生代 後期三畳紀 ノーリアン期
  チャート 中期-後期三畳紀付加体
- 中生代 前期ジュラ紀～中期ジュラ紀 バッジョシアン期
  海成層 砂岩 前期-中期ジュラ紀付加体
- 中生代 前期ジュラ紀～中期ジュラ紀 バッジョシアン期
  混在岩 前期-中期ジュラ紀付加体
- 古生代 石炭紀 後期ミシシッピアン亜紀～中生代 前期ジュラ紀
  チャート 前期-中期ジュラ紀付加体
- 古生代 石炭紀 後期ミシシッピアン亜紀～ペルム紀 シスウラリアン世
  玄武岩 海洋 前期-中期ジュラ紀付加体
- 中生代 中期ジュラ紀～後期ジュラ紀 オックスフォーディアン期
  海成層 砂岩 中期-後期ジュラ紀付加体
- 中生代 中期ジュラ紀～後期ジュラ紀 オックスフォーディアン期
  混在岩 中期-後期ジュラ紀付加体
- 古生代 石炭紀 後期ミシシッピアン亜紀～中生代 中期ジュラ紀 バッジョシアン期
  チャート 中期-後期ジュラ紀付加体
- 古生代 石炭紀 後期ミシシッピアン亜紀～中生代 後期三畳紀 ノーリアン期
  玄武岩 海洋 中期-後期ジュラ紀付加体
- 中生代 後期白亜紀 カンパニアン期～マーストリヒチアン期
  デイサイト・流紋岩 貫入岩
- 中生代 後期白亜紀 セノマニアン期～サントニアン期
  花崗岩 塊状 島弧・大陸

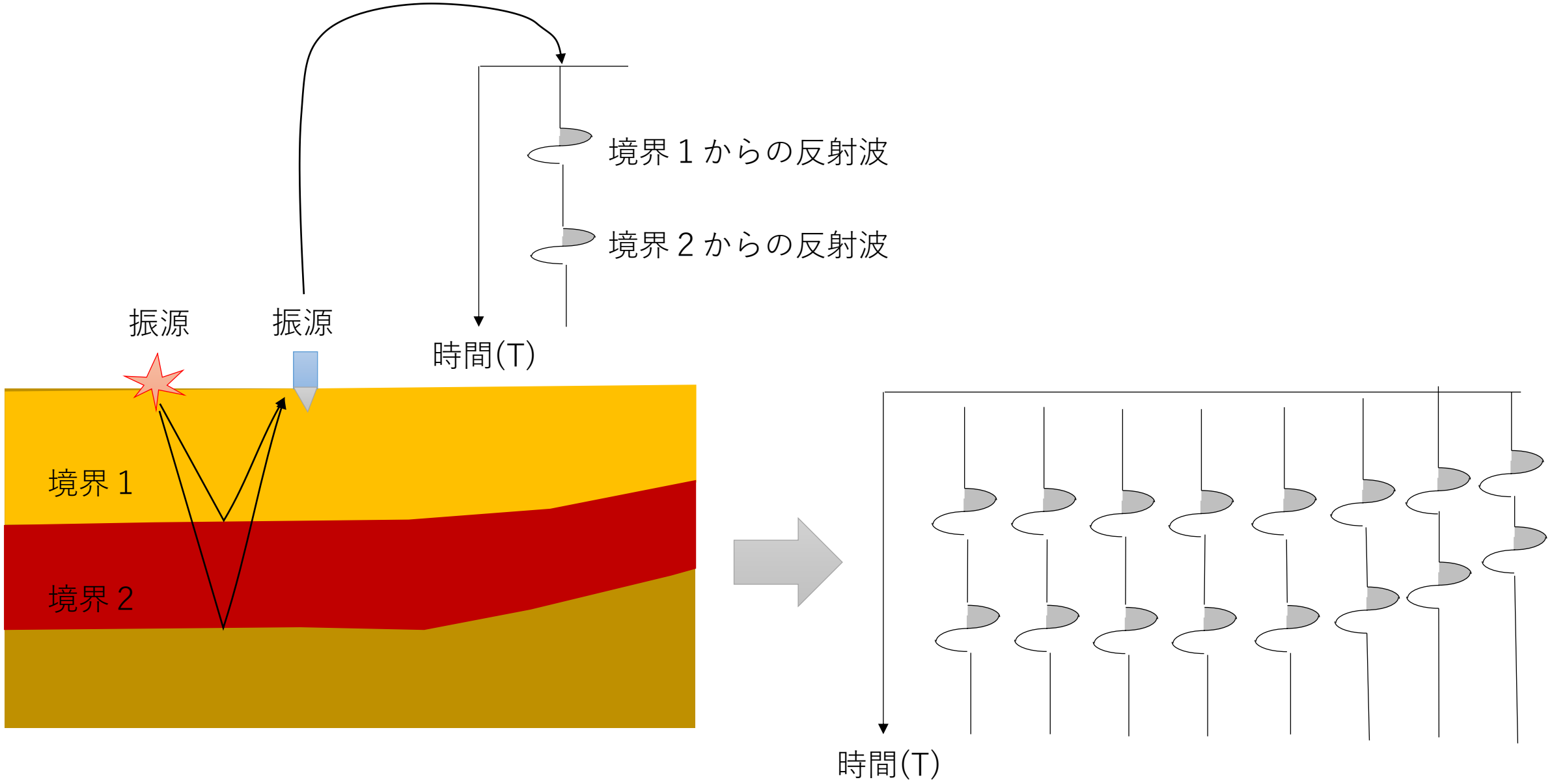
微地形区分（どうやってできたか？）



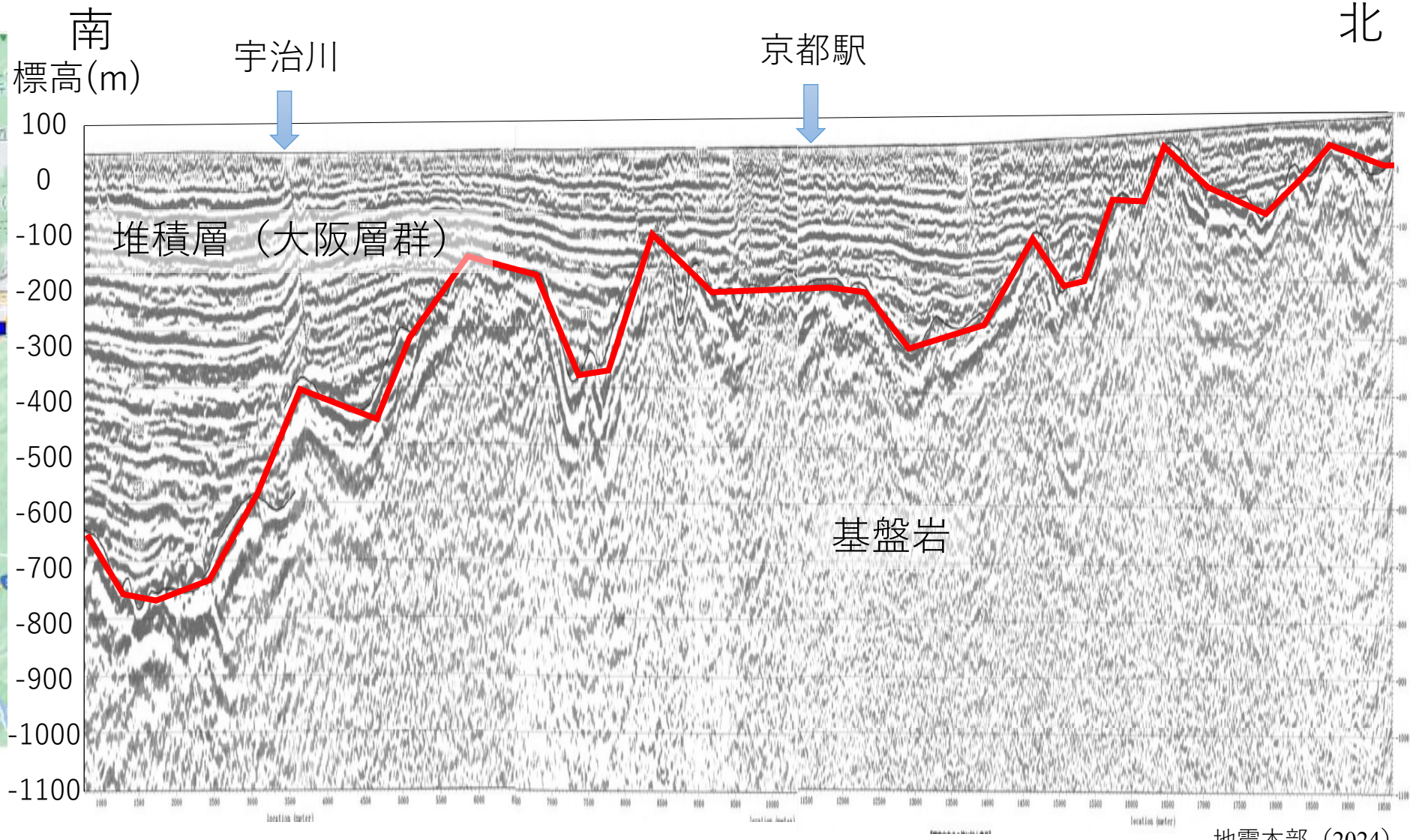


防災科学技術研究所（2024）

反射法地震探査



京都盆地の地下構造（反射法地震探査）

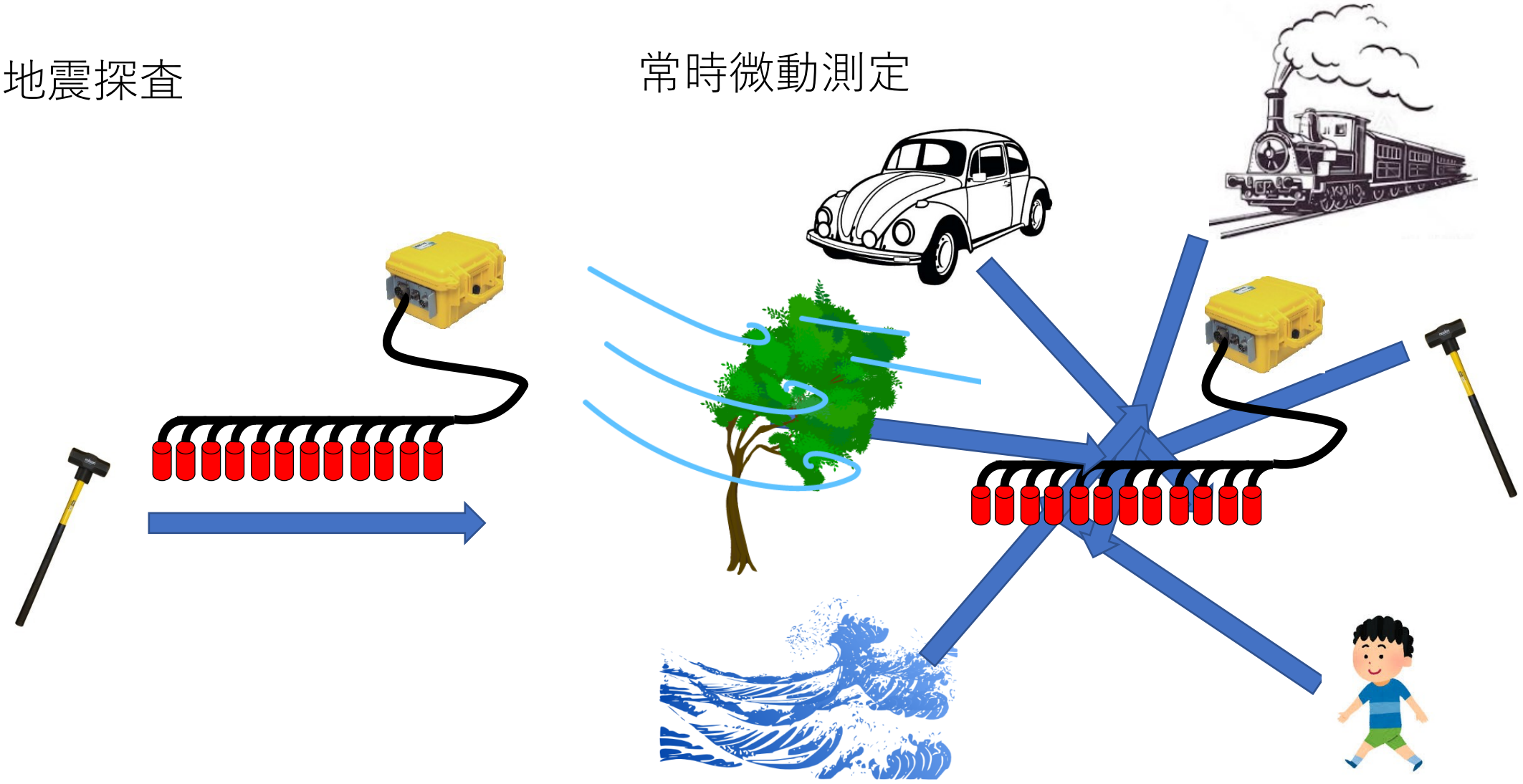


地震本部（2024）

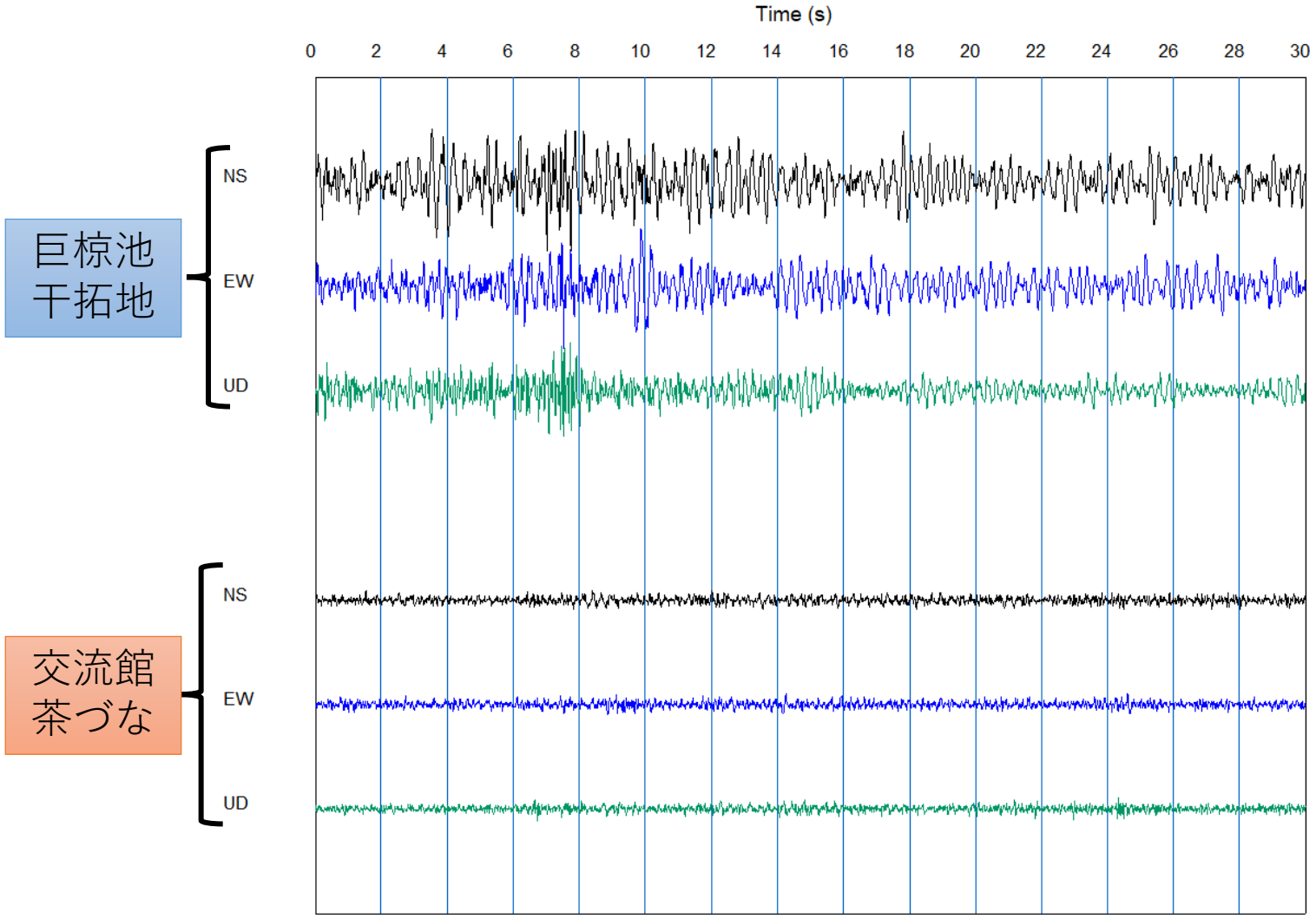
常時微動測定（地盤は常に揺れている）

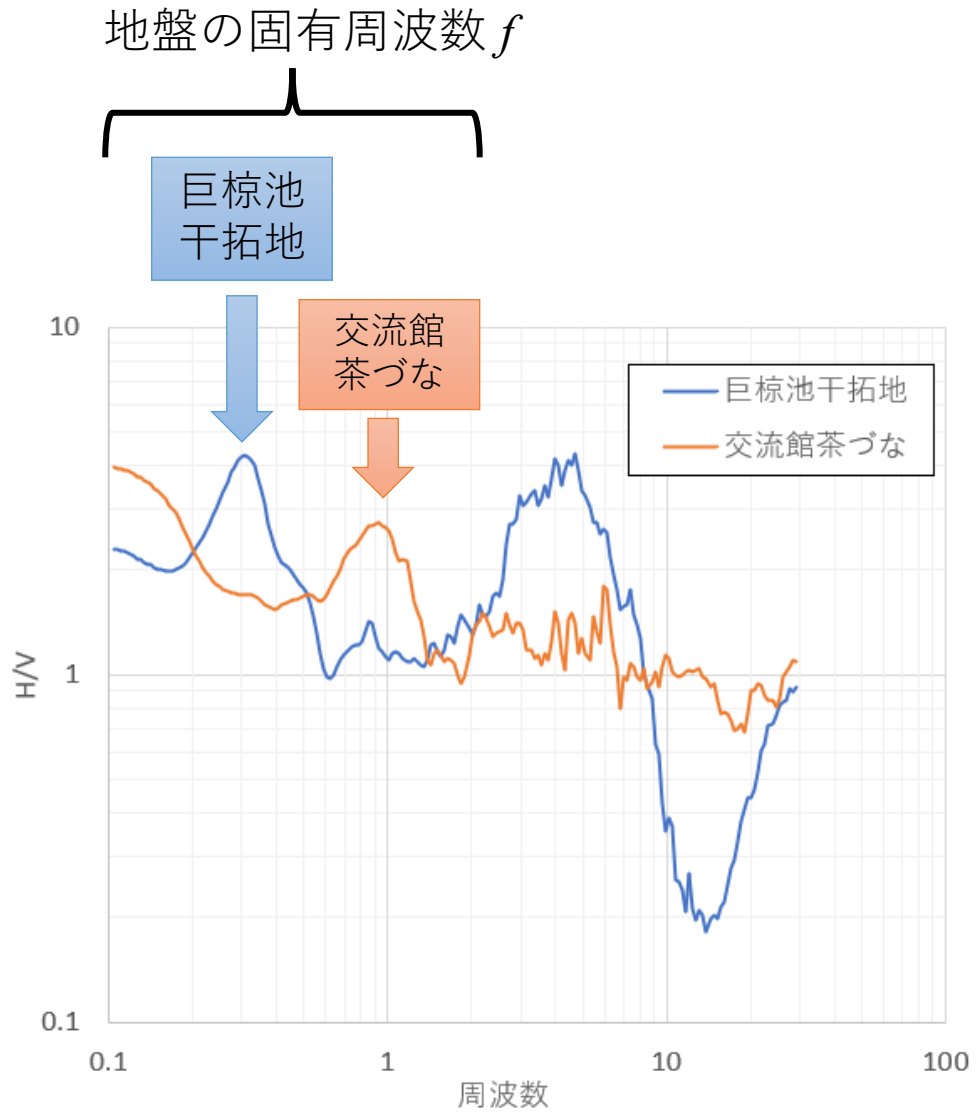
地震探査

常時微動測定



常時微動測定（地盤は常に揺れている）



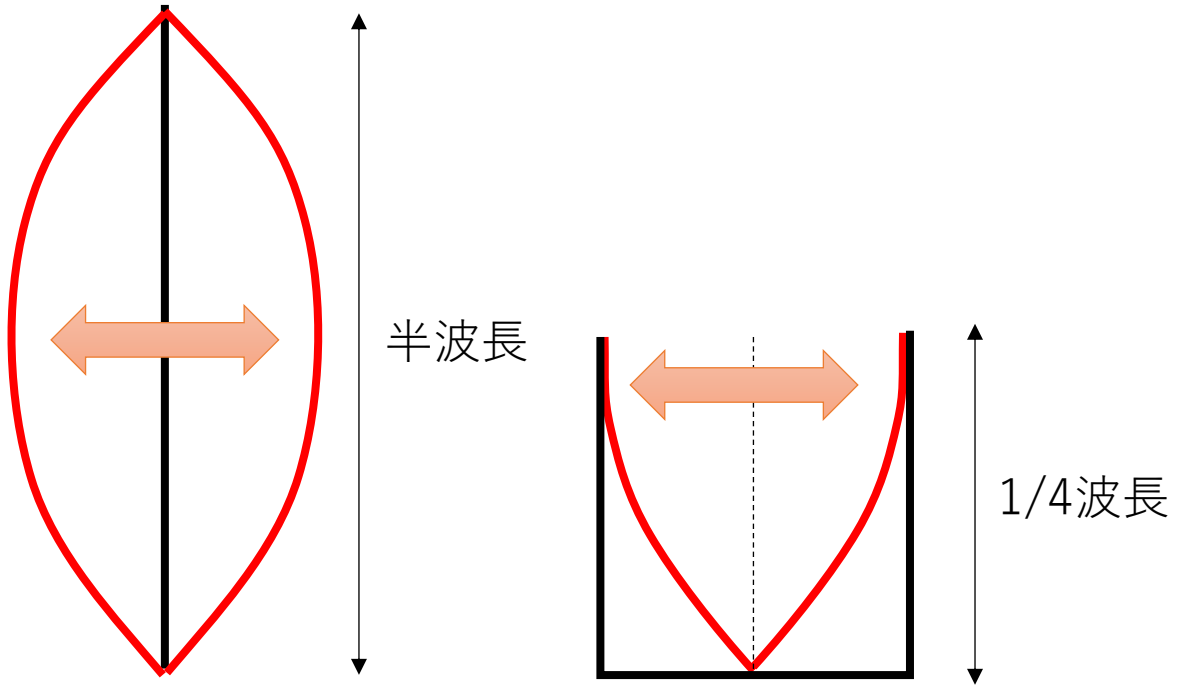


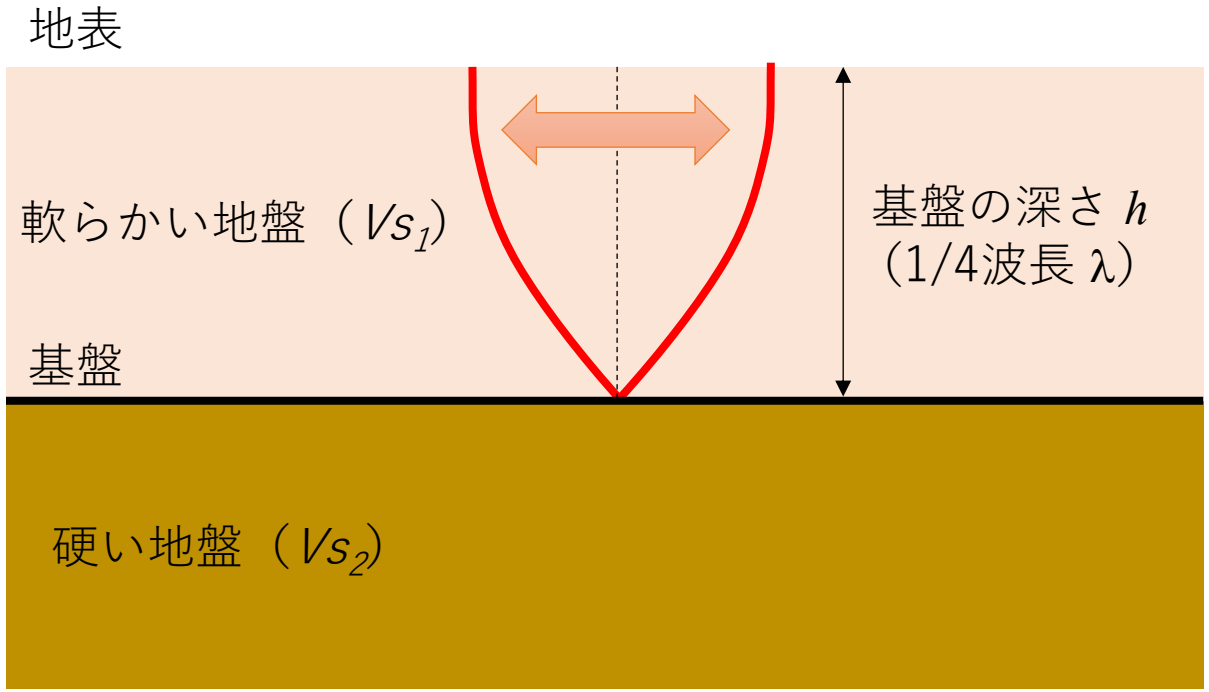
地盤の固有周期と常時微動の水平上下振幅比

弦の振動　　閉管楽器の振動　　地盤の振動

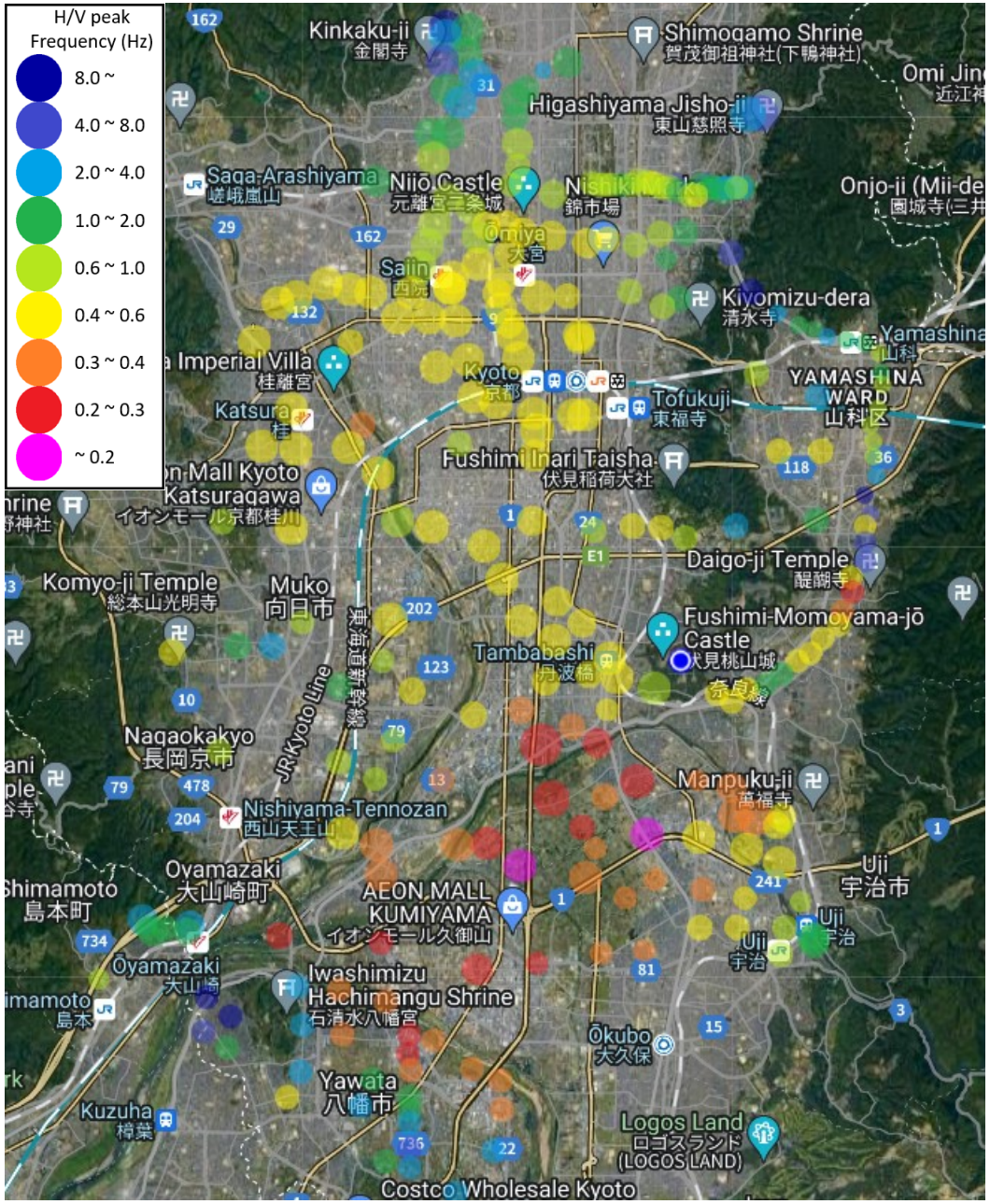
$\lambda = Vs_1/f$　　$h = Vs_1/4f$

基盤の深さ＝ 表層のS波速度 ／ 常時微動のピーク周波数(H/V)×4





ピーク周波数の分布

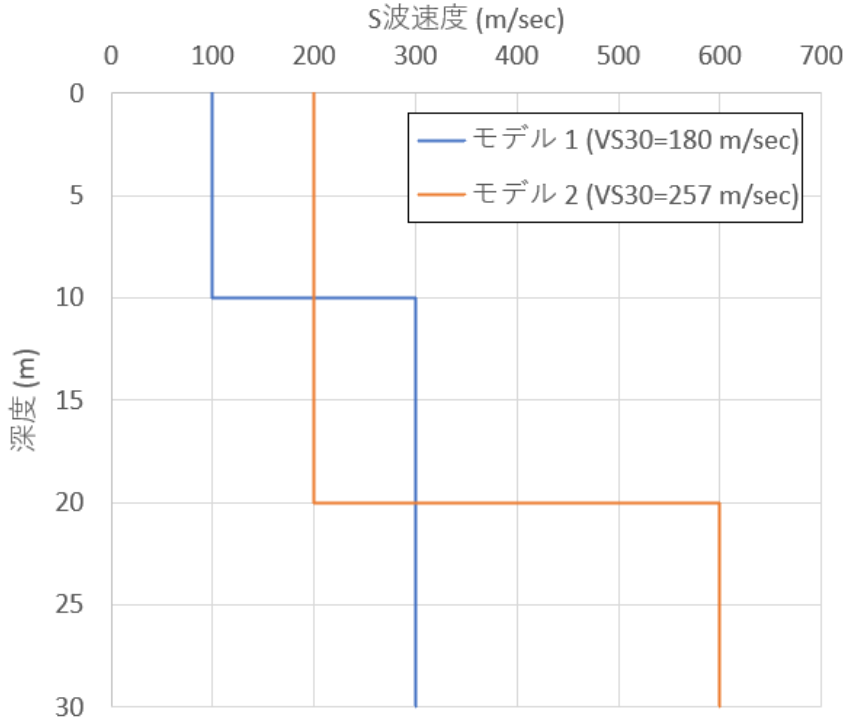

H/V peak
Frequency (Hz)
8.0 ~
4.0 ~ 8.0
2.0 ~ 4.0
1.0 ~ 2.0
0.6 ~ 1.0
0.4 ~ 0.6
0.3 ~ 0.4
0.2 ~ 0.3
~ 0.2
Kinkaku-ji
金閣寺
Shimogamo Shrine
賀茂御祖神社(下鴨神社)
Higashiyama Jisho-ji
東山慈照寺
Saga-Arashiyama
嵯峨嵐山
Nijō Castle
元離宮二条城
Nishiki Market
錦市場
Ōmiya
大宮
Onjo-ji (Mii-de
園城寺(三井
Kiyomizu-dera
清水寺
Imperial Villa
桂離宮
Kyoto
京都
Katsura
桂
Tofukuji
東福寺
YAMASHINA WARD
山科区
Fushimi Inari Taisha
伏見稲荷大社
Daigo-ji Temple
醍醐寺
Komyo-ji Temple
総本山光明寺
Muko
向日市
Fushimi-Momoyama-jō Castle
伏見桃山城
Tambabashi
丹波橋
JR Kyoto Line
東海道新幹線
Nagaokakyo
長岡京市
Manpuku-ji
萬福寺
Nishiyama-Tennozan
西山天王山
Oyamazaki
大山崎町
Shimamoto
島本町
AEON MALL KUMIYAMA
イオンモール久御山
Uji
宇治市
Iwashimizu Hachimangu Shrine
石清水八幡宮
Ōkubo
大久保
Yawata
八幡市
Kuzuha
樟葉
Logos Land
ロゴスランド
(LOGOS LAND)
Costco Wholesale Kyoto

なぜAIが必要か？

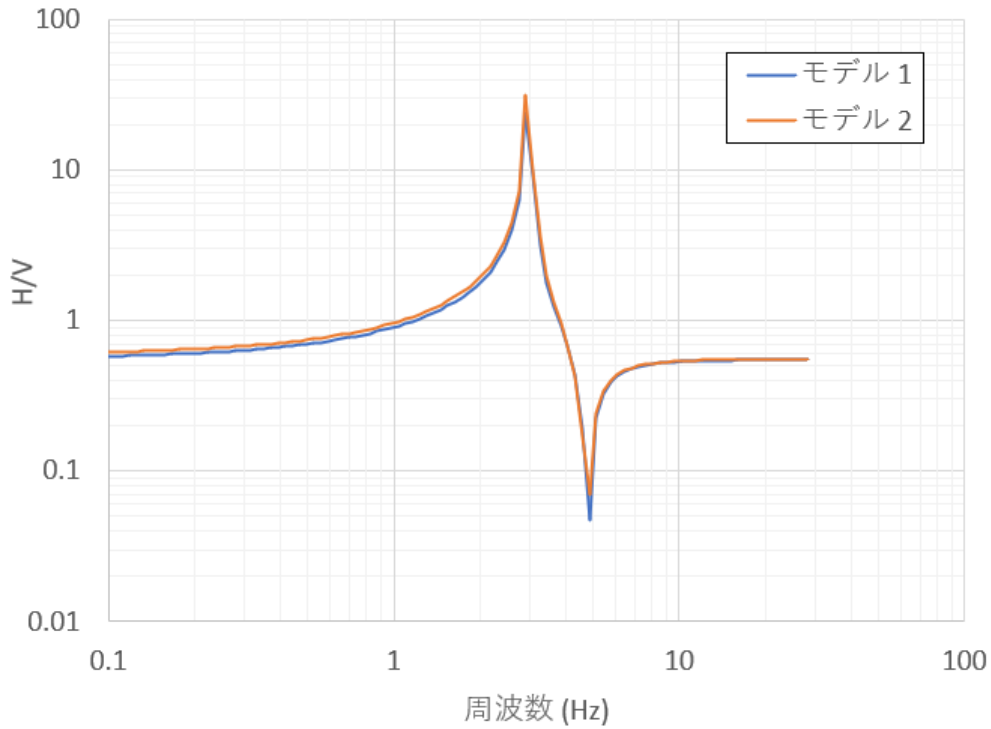
物理探査の非一意性

複数のモデルが
同じデータとなる

S波速度構造



理論的な固有周波数（H/Vスペクトル）



違う長さの弦が同じ音となる

6弦の5フレット → 440Hz

5弦の開放弦 → 440Hz

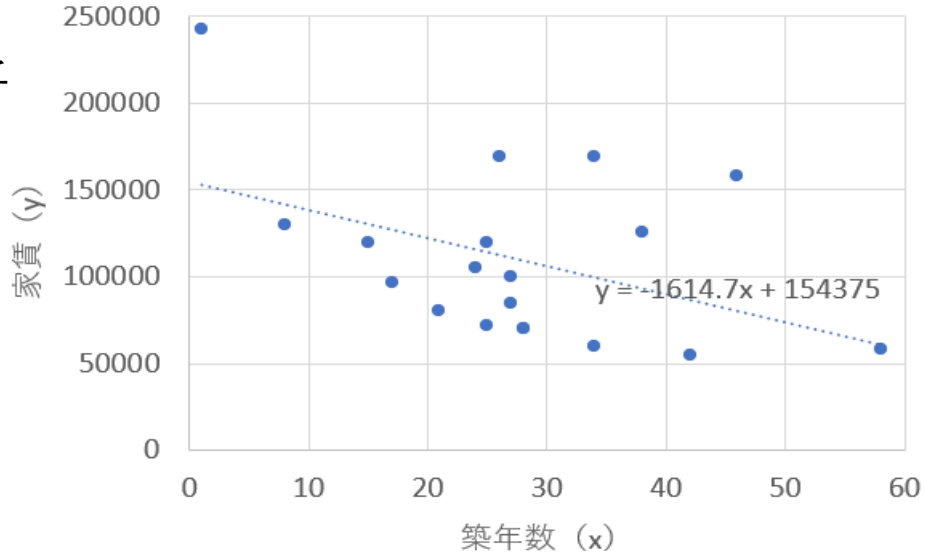
音程（周波数）は同じでも慣れれば（AI）聞き分けられる

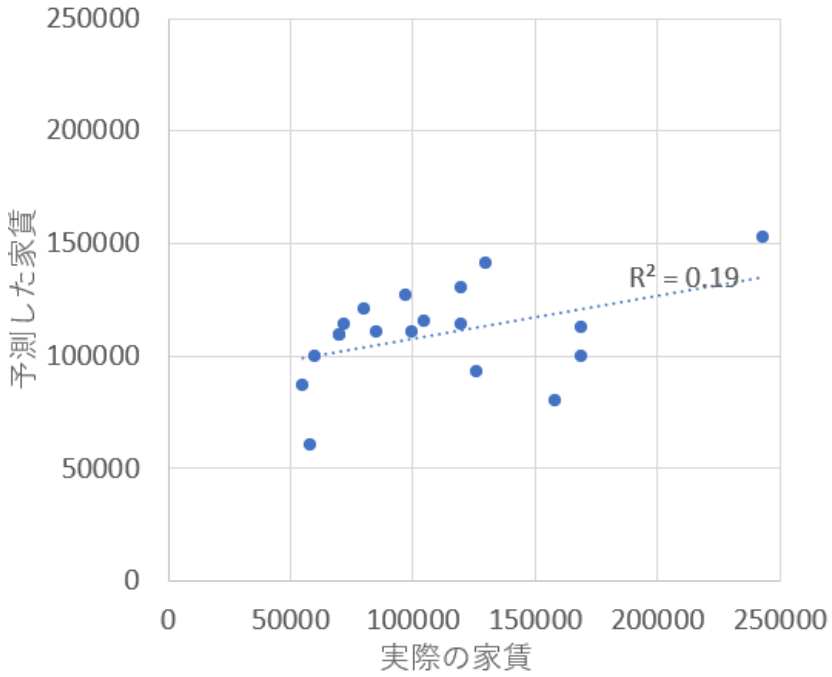
AI（深層学習）とは何か？

回帰分析

宇治周辺の３LDKの部屋の家賃は？

家賃	築年数	占有面積（m^2）	最寄りのJRの駅	駅から徒歩（分）
85000	27	63.51	JR小倉	7
100000	27	63.51	JR小倉	8
120000	15	75.62	JR小倉	8
80000	21	31.47	JR小倉	15
70000	28	61.1	宇治	18
70000	28	61.1	宇治	17
169000	26	67.93	黄檗	5
169000	34	67.93	黄檗	7
126000	38	65.86	黄檗	18
55000	42	65.92	木幡	14
105000	24	79.02	木幡	15
120000	25	73.71	木幡	23
158000	46	65.46	木幡	5
60000	34	60.44	木幡	14
243000	1	81.73	木幡	14
72000	25	67.66	新田	10
130000	8	73.32	新田	20
97000	17	60.2	新田	10
58000	58	43.88	新田	10





家賃＝a×築年数＋b

回帰分析と重回帰分析

回帰分析　　家賃＝a×築年数＋b

重回帰分析　家賃＝a×築年数＋b×占有面積＋c×徒歩＋d×JR小倉＋e×宇治+f×黄檗＋g×木幡＋h×新田+i

85000＝27a　＋63.51b　＋7c　＋d　＋i

70000＝28a　＋61.1b　＋18c　＋e　＋i

システム（J）　　モデル（M）　データ（D）

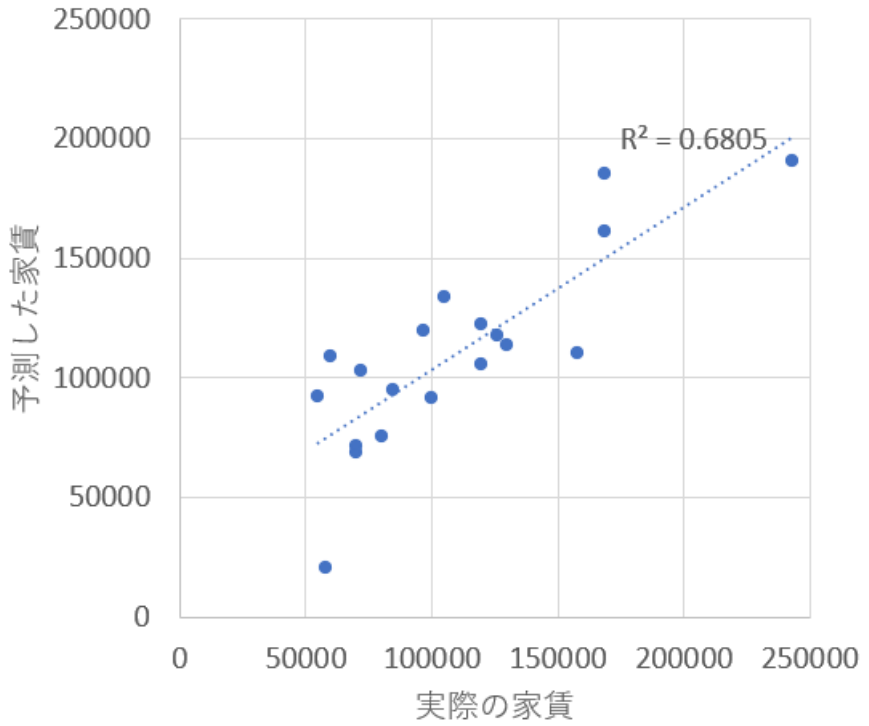
27	63.5	7	1	0	0	0	0	1
27	63.5	8	1	0	0	0	0	1
15	75.6	8	1	0	0	0	0	1
21	31.5	15	1	0	0	0	0	1
28	61.1	18	0	1	0	0	0	1
28	61.1	17	0	1	0	0	0	1
26	67.9	5	0	0	1	0	0	1
34	67.9	7	0	0	1	0	0	1
38	65.9	18	0	0	1	0	0	1
42	65.9	14	0	0	0	1	0	1
24	79	15	0	0	0	1	0	1
25	73.7	23	0	0	0	1	0	1
46	65.5	5	0	0	0	1	0	1
34	60.4	14	0	0	0	1	0	1
1	81.7	14	0	0	0	1	0	1
25	67.7	10	0	0	0	0	1	1
8	73.3	20	0	0	0	0	1	1
17	60.2	10	0	0	0	0	1	1
58	43.9	10	0	0	0	0	1	1

×

a
b
c
d
e
f
g
h
i

＝

85000
100000
120000
80000
70000
70000
169000
169000
126000
55000
105000
120000
158000
60000
243000
72000
130000
97000
58000



重回帰分析とAI（深層学習）

重回帰分析

システム（J）の逆行列（J^{-1}）を用いてデータ（D）からモデル（M）を求める

$J \times M = D$

$J^{-1} \times D = M$

AI（深層学習）

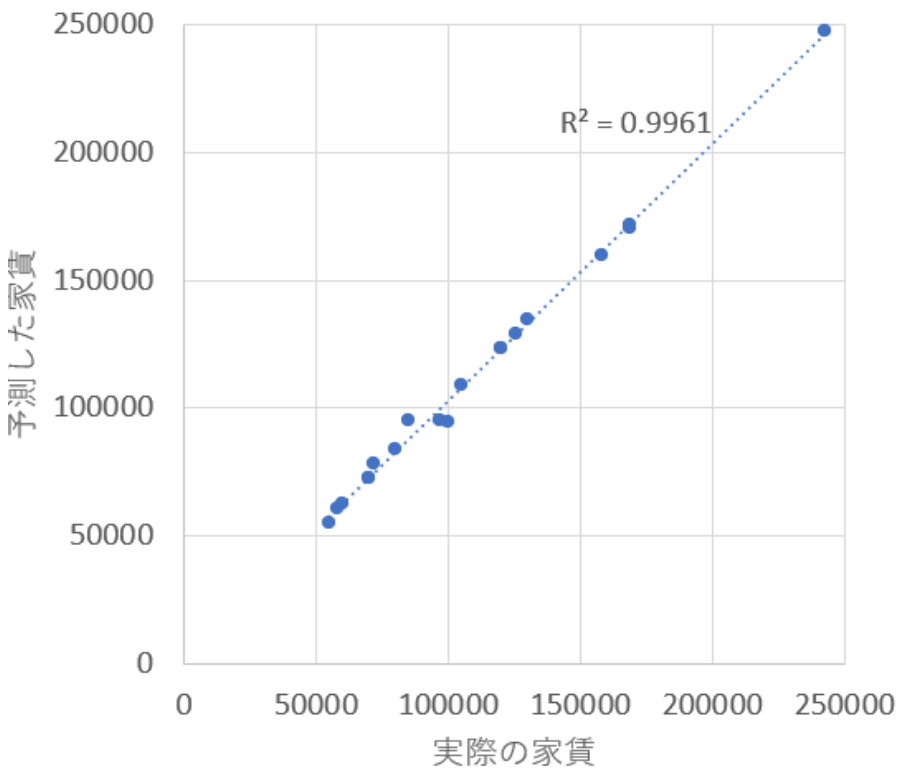
大量の既存のデータ（D_0）を用い、経験的（学習）に重み（W）を求め、新しいデータ（D）からモデル（M）を、隠れ層（H）をとおして求める

逆行列の代わりに多数の重み行列を用いる（深層学習）

$W_1 \times D = H_1$

$W_2 \times H_1 = H_2$

$W_3 \times H_2 = M$

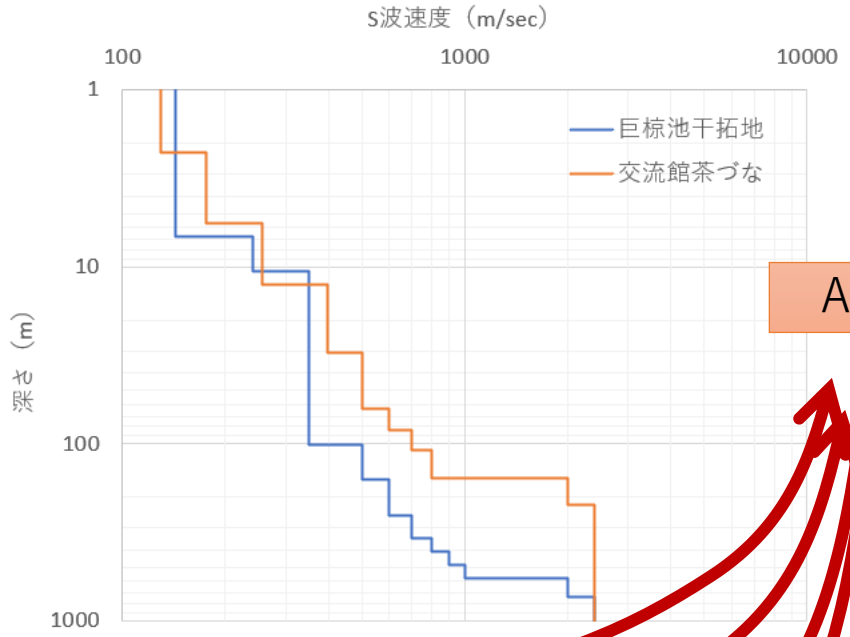


AIで三次元地盤モデルを作る

常時微動測定結果（H/Vスペクトル）

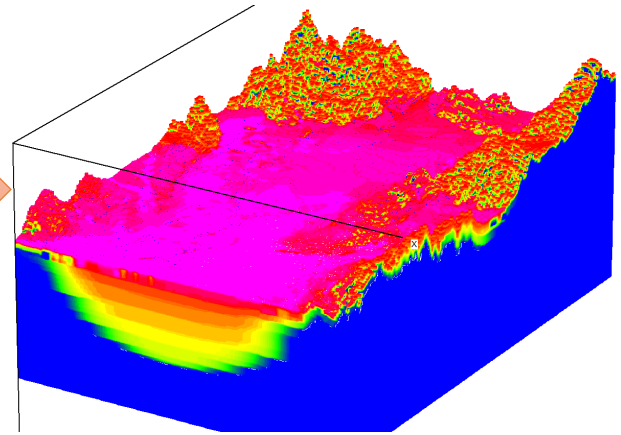
AI

一次元S波速度構造



AI

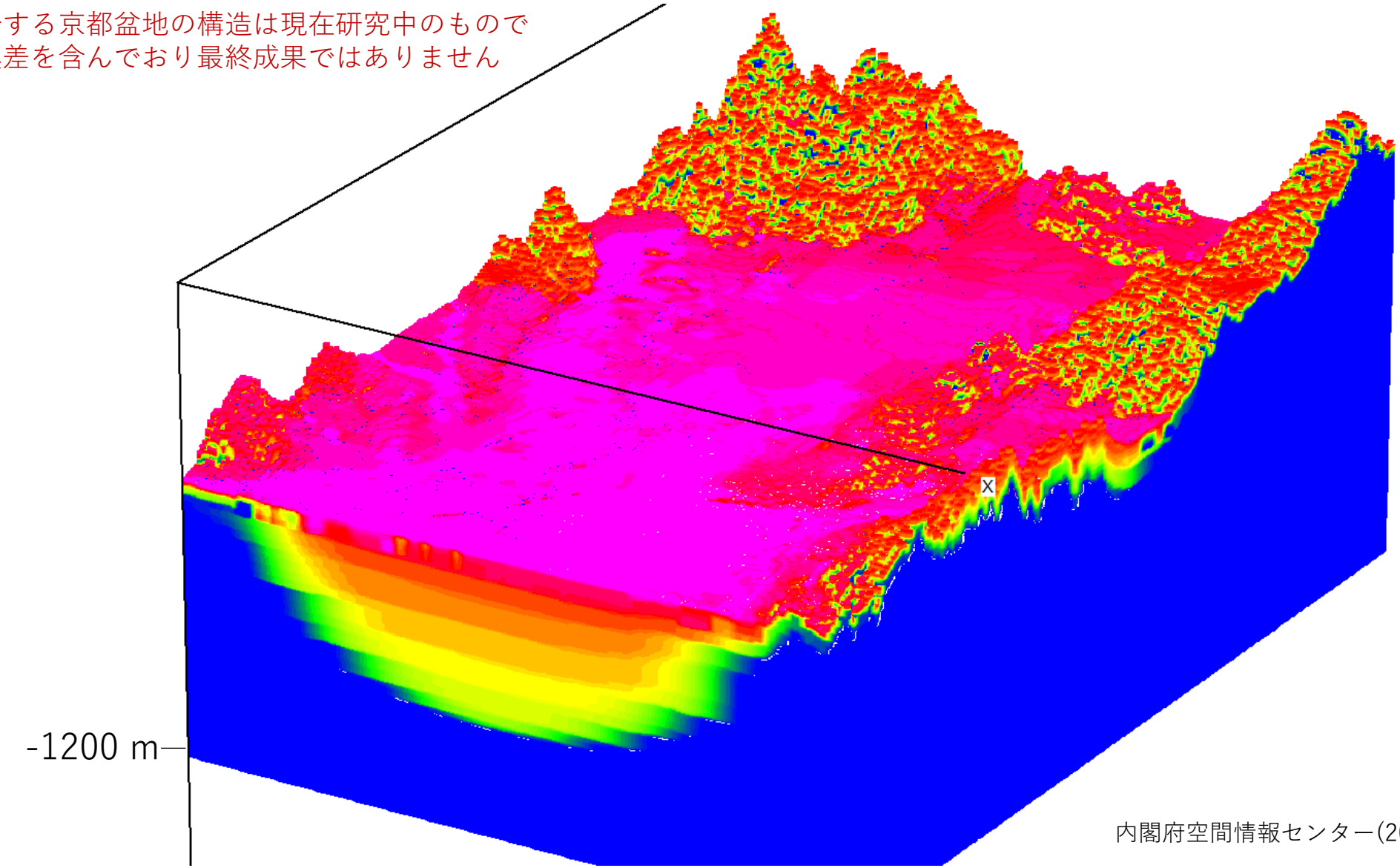
三次元S波速度構造

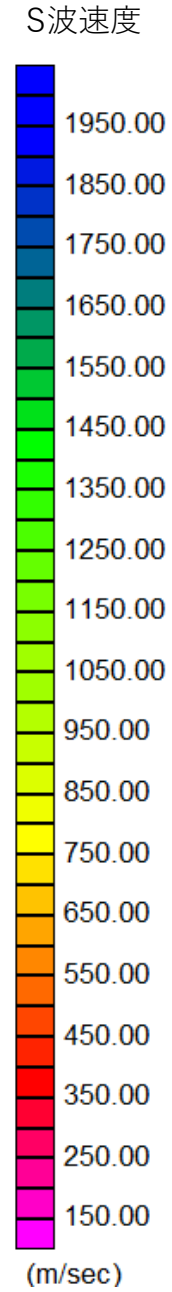


- 地質
- 微地形区分
- 反射法地震探査の結果
- 屈折法地震探査の結果

京都盆地の三次元S波速度構造

紹介する京都盆地の構造は現在研究中のもので
誤差を含んでおり最終成果ではありません

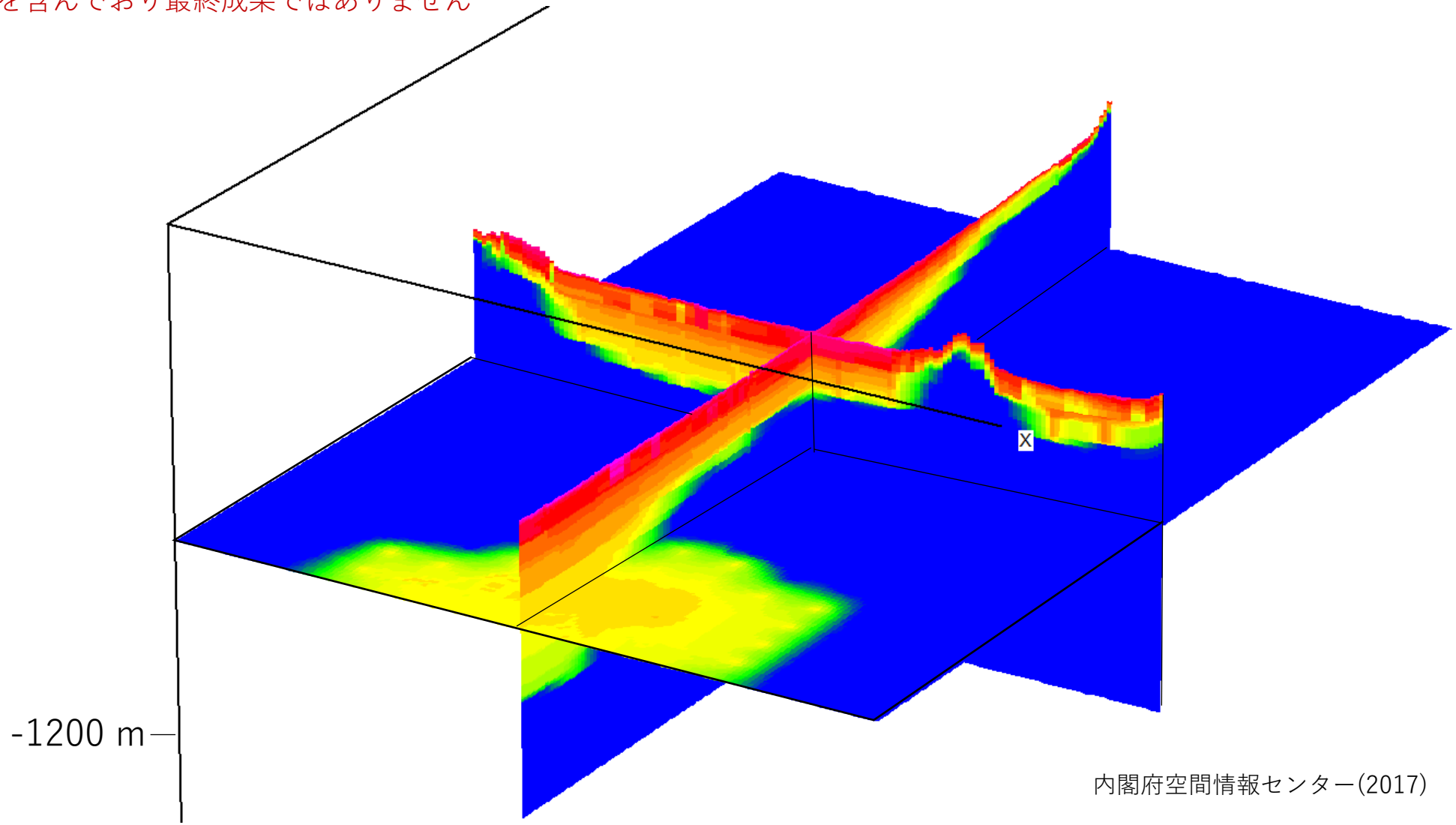


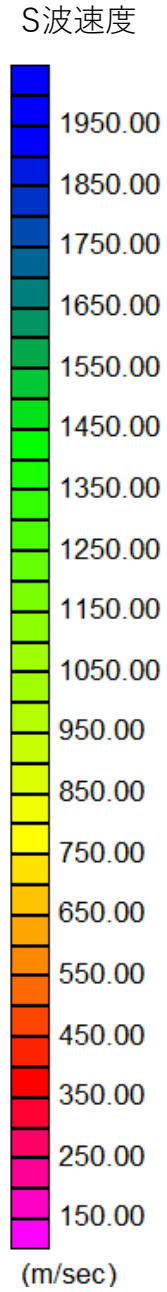


内閣府空間情報センター(2017)

京都盆地の三次元S波速度構造

紹介する京都盆地の構造は現在研究中のもので
誤差を含んでおり最終成果ではありません



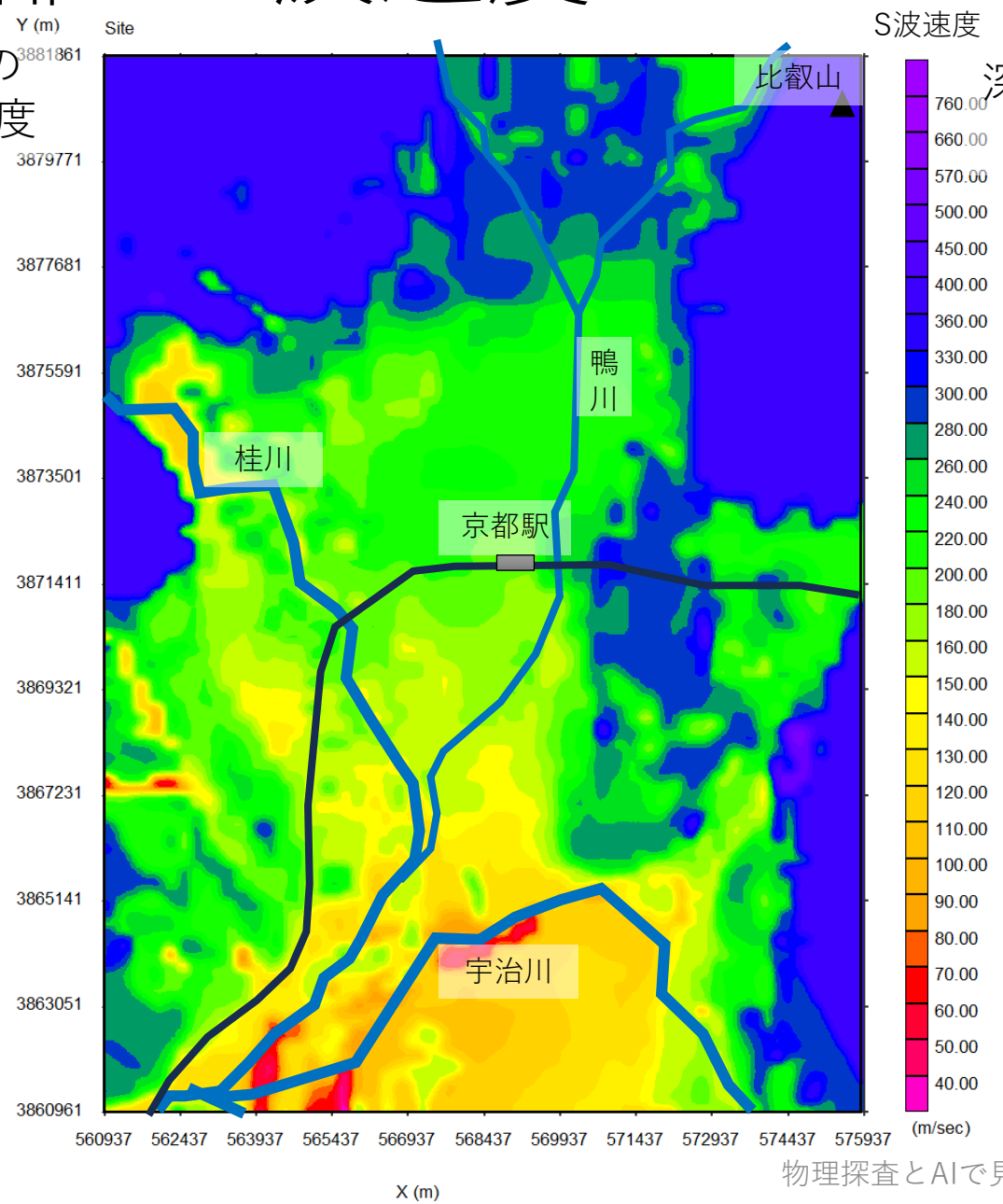


内閣府空間情報センター(2017)

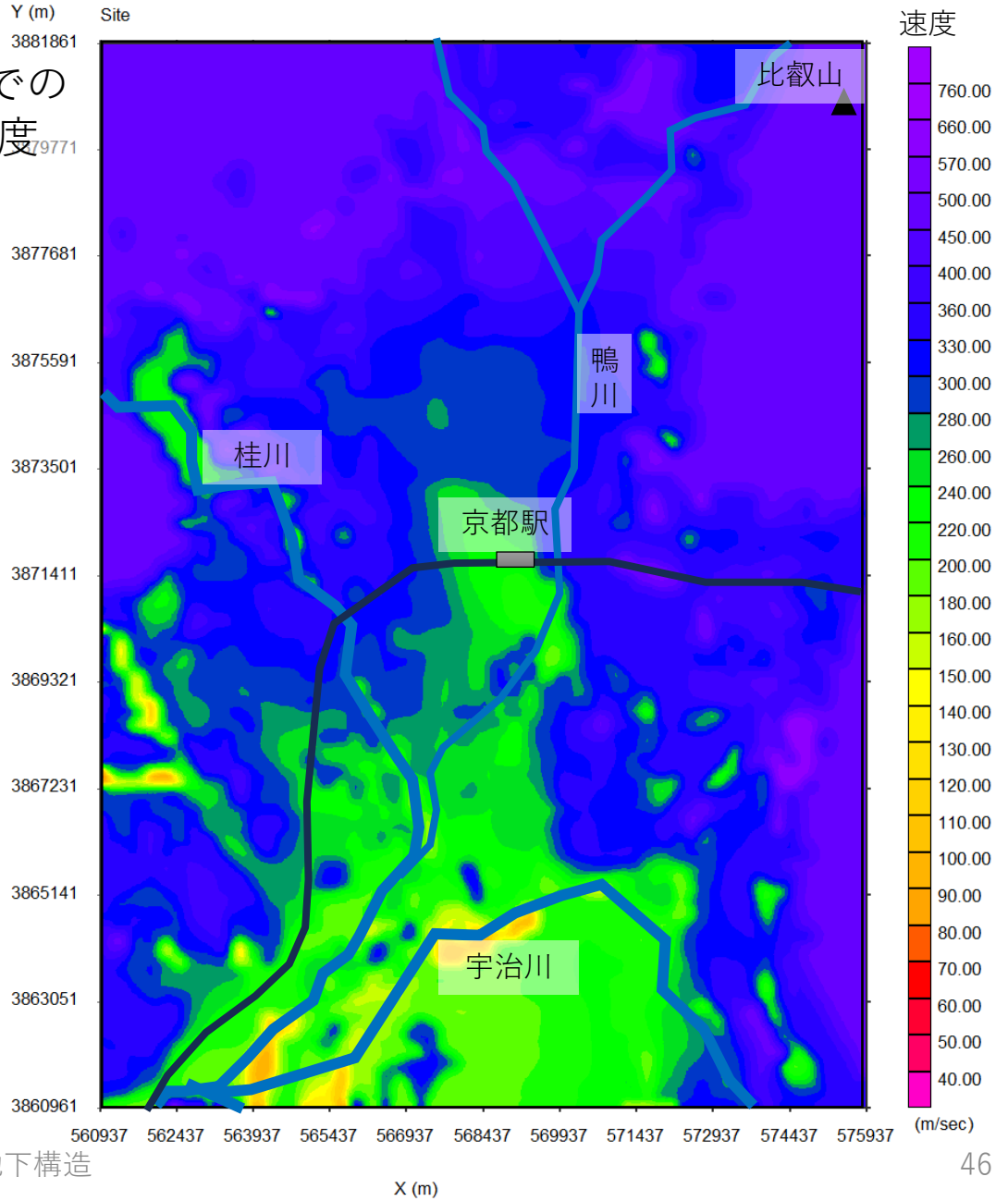
浅部のS波速度

紹介する京都盆地の構造は現在研究中のもので
誤差を含んでおり最終成果ではありません

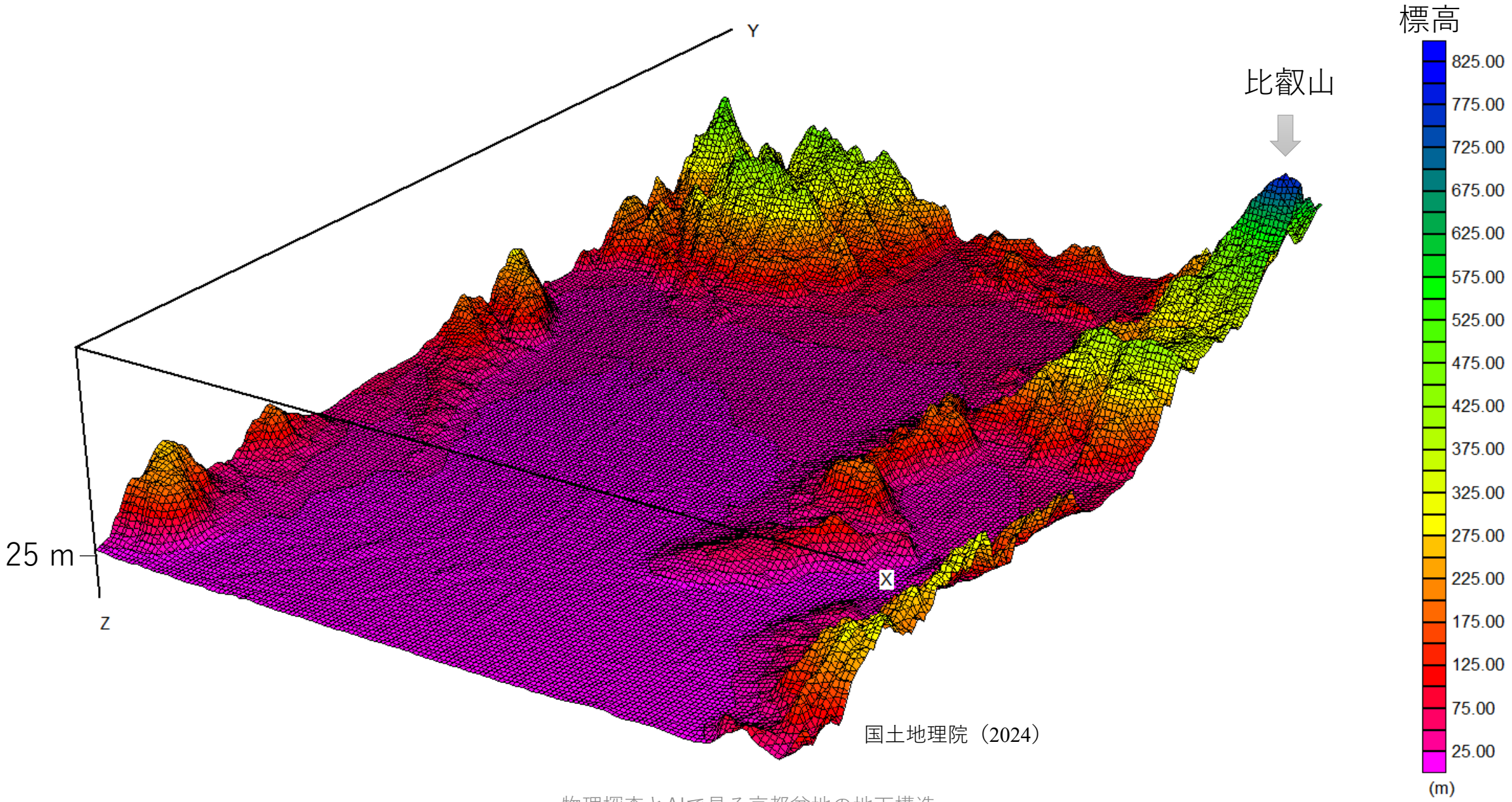
地表の
S波速度



深度30mまでの
平均S波速度



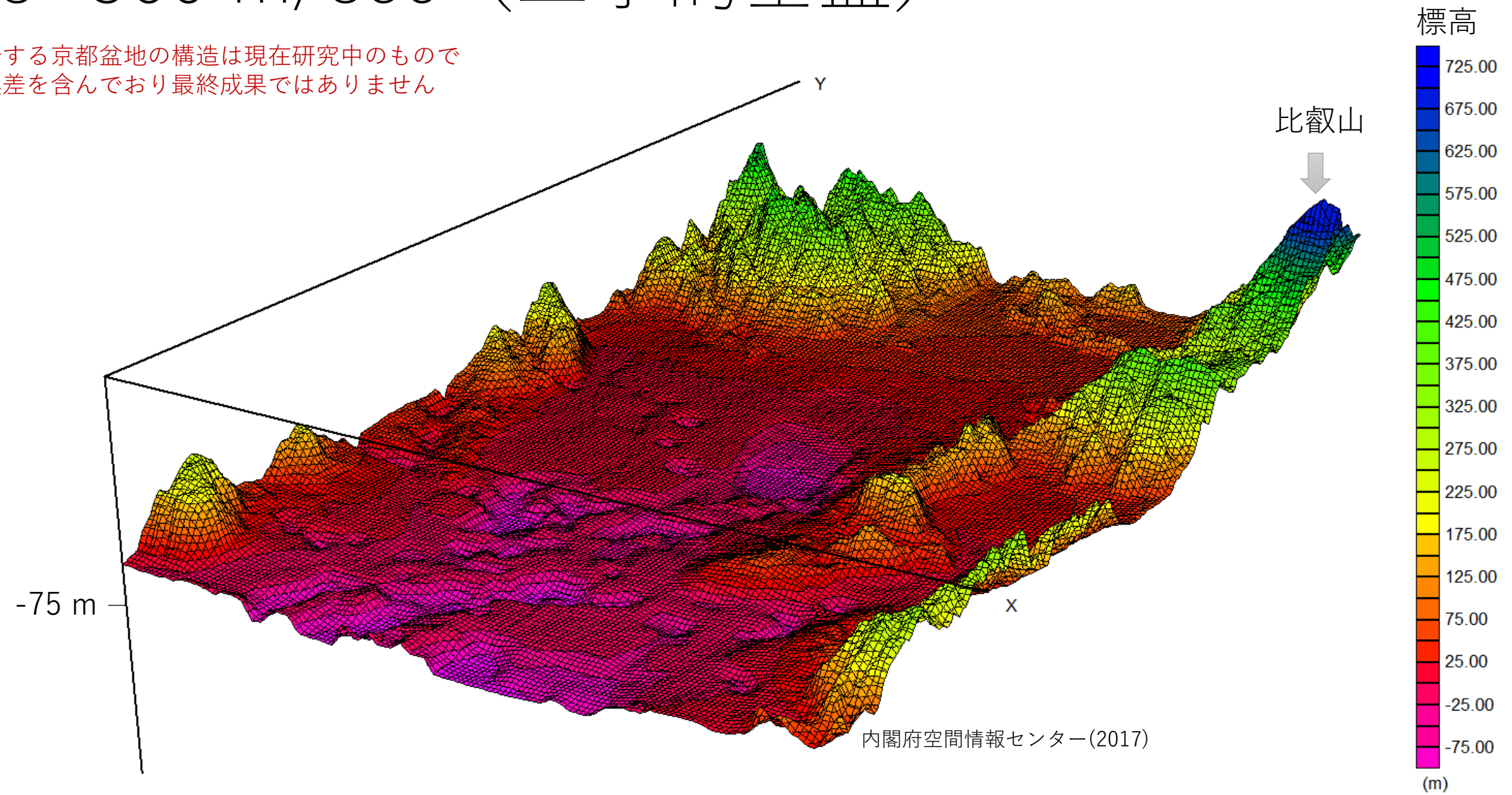
京都盆地の地形



国土地理院（2024）

Vs=360 m/sec（工学的基盤）

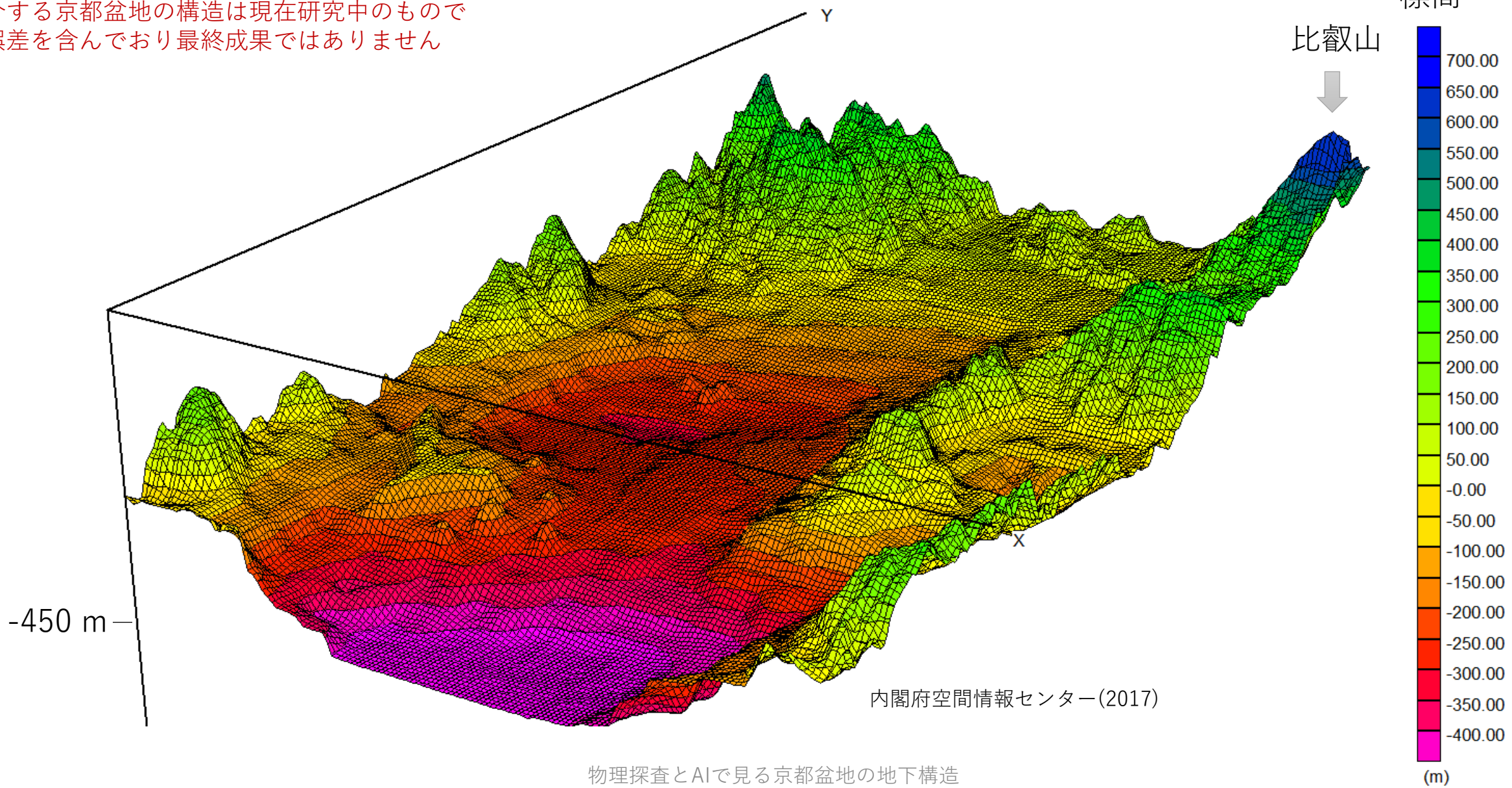
紹介する京都盆地の構造は現在研究中のもので
誤差を含んでおり最終成果ではありません



内閣府空間情報センター(2017)

Vs=760 m/sec（第三紀上面）

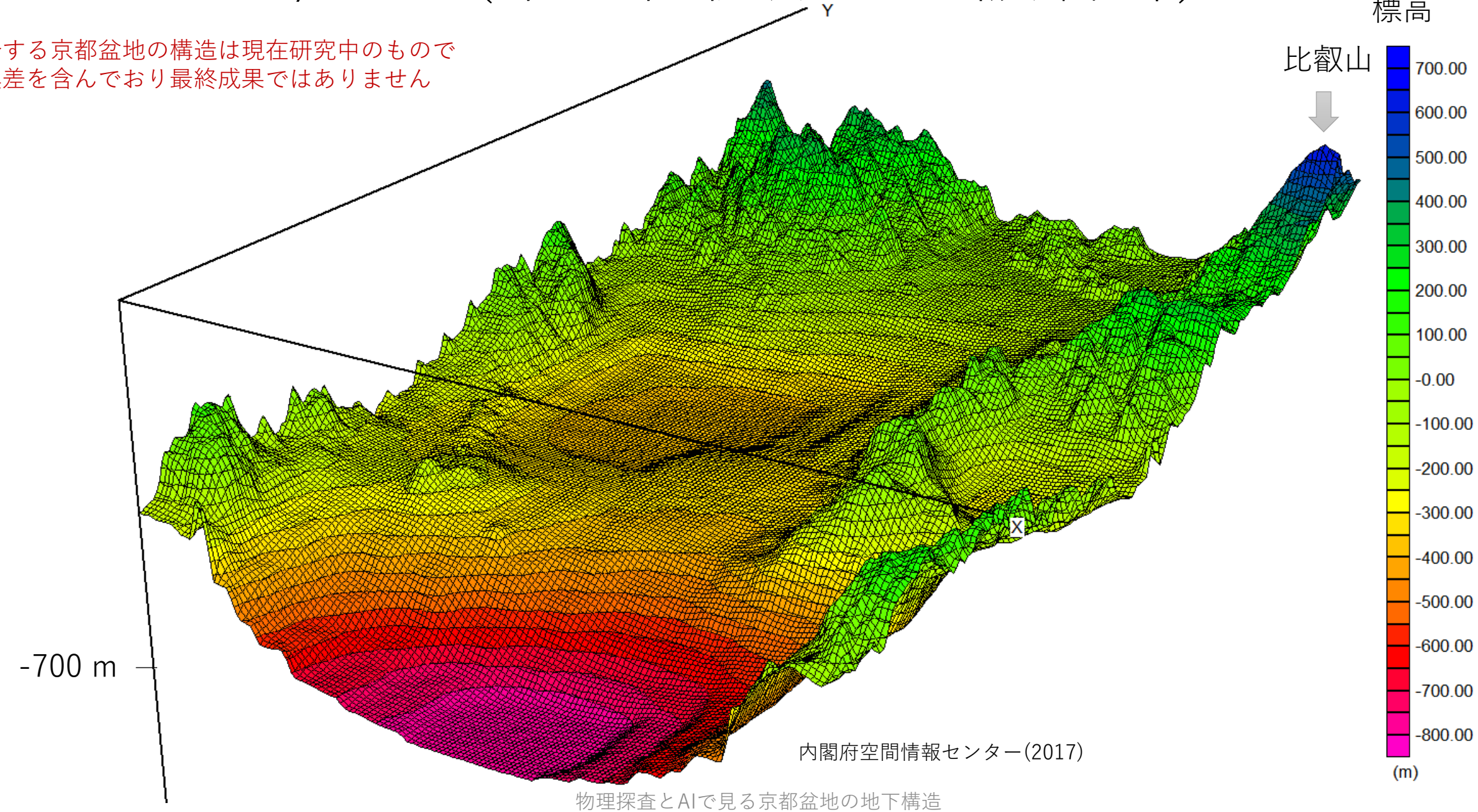
紹介する京都盆地の構造は現在研究中のもので
誤差を含んでおり最終成果ではありません



内閣府空間情報センター(2017)

Vs=2000 m/sec（第三紀後期：大阪層群）

紹介する京都盆地の構造は現在研究中のもので
誤差を含んでおり最終成果ではありません



内閣府空間情報センター(2017)

まとめ

- 地盤を知ることは色んな意味で重要である
- 地盤を見るには様々な視点や方法がある
- 地表で振動を測ることによりその下の地盤を知ることができる
- AIを用いることにより様々な情報を併せて詳細な地下構造を推知することができる
- 京都盆地の地下は地形よりも複雑である
- 京都盆地の南部（巨椋池干拓地）は基盤が深くなっている

謝辞

- 本講演で使用したデータの取得には以下の皆様のご協力を頂きました。記して感謝致します。
  - 鈴木　徹（モニー物探株式会社）
  - 横澤　航生（モニー物探株式会社）
  - 稲崎　富士
  - 渡部 要一（北海道大学）
  - 美馬　健二（有限会社太田ジオリサーチ）
  - 小西　千里, 鈴木　晴彦（応用地質株式会社）
- 本講演で紹介した地盤モデルの構築には以下の研究機関のデータを使用しました。記して感謝致します。
  - 防災科学技術研究所
  - 地震調査研究推進本部
  - 国土地理院
  - 内閣府

参考文献・資料

防災科学技術研究所, 2024,地震ハザードステーション(J-SHIS), https://www.j-shis.bosai.go.jp/.

地震本部, 2024,京都盆地の地下構造に関する調査, https://www.jishin.go.jp/main/kozo/99/kyotoCity.htm.

国土地理院, 2024,地理院地図(電子国土Web), https://maps.gsi.go.jp/.

内閣府空間情報センター, 2017,南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動に関する報告:地盤モデル, https://www.geospatial.jp/ckan/dataset/1213.