

II 基準地震動 S_s の策定

1. 基準地震動 S_s の策定方針
2. 敷地周辺の地震に関する調査
3. 敷地地盤の振動特性
4. 検討用地震の選定
5. 地震動評価
6. 基準地震動 S_s の策定
7. 地震動の超過確率の参照
8. 参考資料



目次

1. 基準地震動Ssの策定方針	1
2. 敷地周辺の地震に関する調査	3
2.1 敷地周辺で過去に発生した被害地震の震央分布	4
2.2 中小微小地震の震央分布	5
2.3 地震発生層の厚さ	10
2.4 敷地周辺の活断層	28
3. 敷地地盤の振動特性	29
3.1 敷地地盤の振動特性	30
3.2 新潟県中越沖地震の知見反映 地下構造特性による影響	39
4. 検討用地震の選定	45
4.1 内陸地殻内地震	48
4.2 海洋プレート内地震	50
4.3 プレート間地震	52
4.4 地震カタログ間の比較	54
4.5 検討用地震の選定結果	58
5. 地震動評価	59
5.1 敷地ごとに震源を特定して策定する地震動	61
5.1.1 基本方針	61
5.1.2 不確かさ考慮の考え方	69
(1)基本方針	69
(2)中央構造線に関する知見・調査結果の整理	71
(3)基本震源モデルの設定	80
(4)不確かさ考慮の考え方	91
a.内陸地殻内地震	91
b.海洋プレート内地震・プレート間地震	109

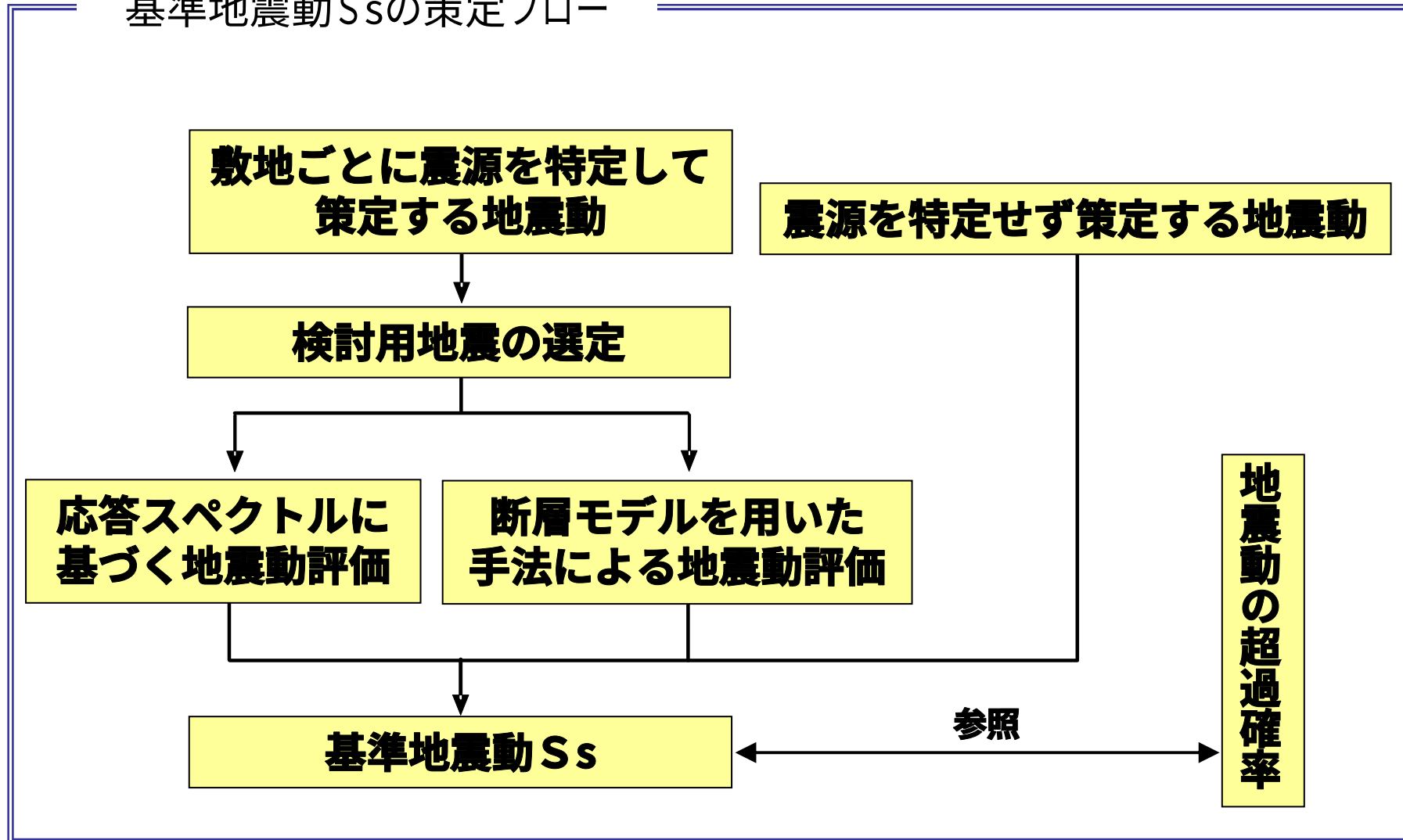
目次

5.1.3 内陸地殻内地震（中央構造線断層帯）の地震動評価	113
(1) 応答スペクトルに基づく手法	113
a. 評価方針	115
b. 適用性の検証	129
c. 地震動評価	147
(2) 断層モデルを用いた手法	149
a. 評価方針	152
b. 適用性の検証	154
c. 地震動評価	156
① 統計的グリーン関数法による地震動評価	170
・ 統計的グリーン関数（要素地震波）の作成	170
・ 統計的グリーン関数法による評価結果	175
② 経験的グリーン関数法による地震動評価	181
・ 要素地震の選定および補正	181
・ 経験的グリーン関数法による評価結果	185
③ 統計的グリーン関数法による結果と経験的グリーン関数法による結果の比較	199
5.1.4 海洋プレート内地震の地震動評価	204
5.1.5 プレート間地震の地震動評価	211
5.1.6 要素地震に関する検討	222
5.2 震源を特定せず策定する地震動	248
6. 基準地震動Ssの策定	265
6.1 応答スペクトルに基づく手法による基準地震動Ss	267
6.1.1 基準地震動Ssの策定	267
6.1.2 模擬地震波の作成	271
6.2 断層モデルを用いた手法による基準地震動Ss	275
6.2.1 基準地震動Ssの策定	275
(1) ハイブリッド合成	277
a. 統計的グリーン関数法	277
b. 経験的グリーン関数法	285
(2) 基準地震動Ssの選定	290

目次

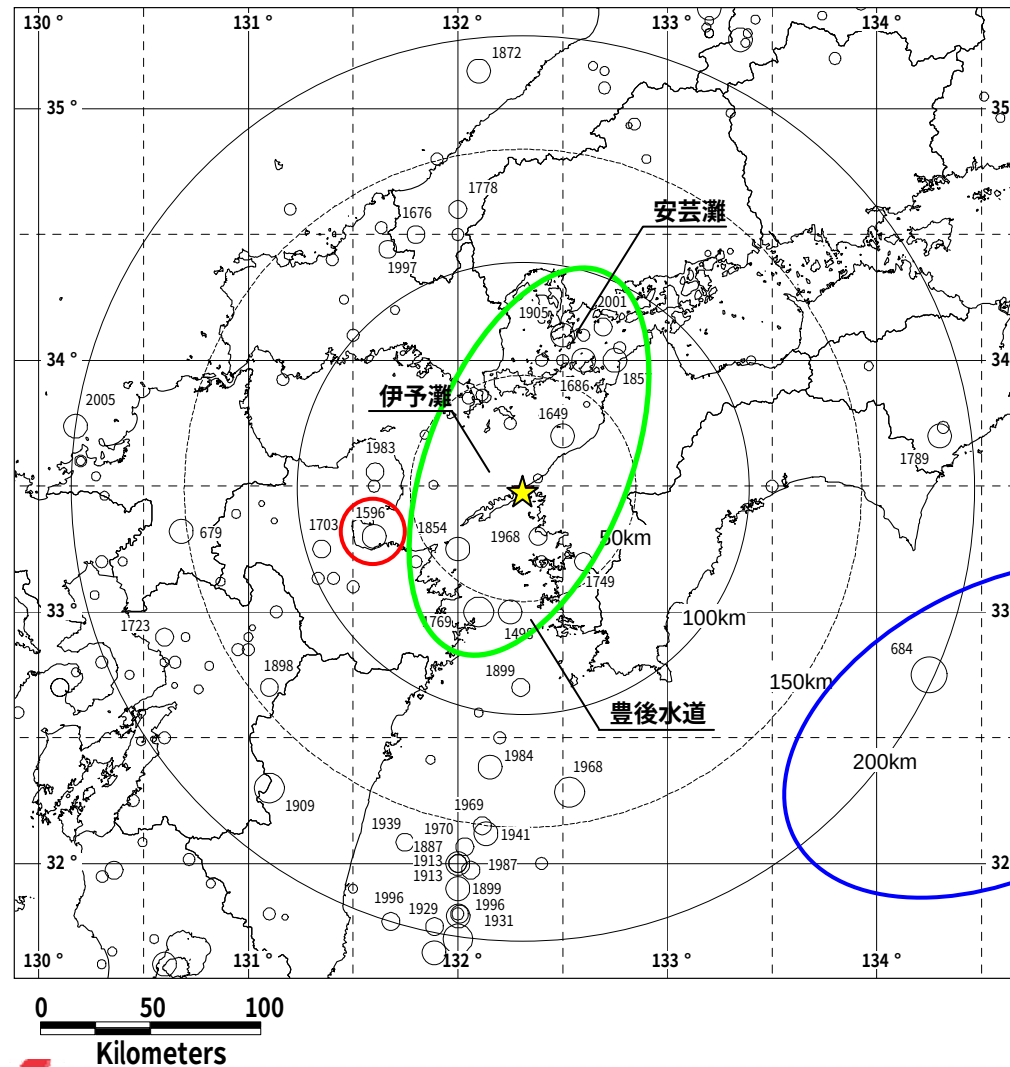
6.3	基準地震動 S_s の妥当性確認	299
6.3.1	妥当性確認	299
6.3.2	地震本部(2009)強震動予測モデルとの比較	303
7.	地震動の超過確率の参照	317
8.	参考資料	325
8.1	密度の定義	326
8.2	地盤構造モデル(密度)	328
8.3	地盤構造モデル(Q値)	334
8.4	中央構造線断層帯における松田式の適用性について	346
8.5	$M_0 \sim M_j$ 関係式の適用性に関する考え方について	356
8.6	要素地震の特性と異方性の関係	368
8.7	異なる要素地震を用いた地震動評価	371
8.8	楕円クラック	380
8.9	統計的グリーン関数と実地震との比較	391
8.10	海洋プレート内地震のディレクティビティ	396
8.11	模擬地震波作成に用いる位相	405
8.12	基準地震動 S_s の振幅包絡線の経時変化	412
8.13	鉛直方向の振幅包絡線の経時変化	414
8.14	距離減衰式のばらつきについて	419
8.15	中央構造線断層帯の地震動評価 大分県陸域への連動モデル	421
8.16	想定五反田断層の地震動評価	445
【参考】	応力降下量に関する知見①	449
【参考】	応力降下量に関する知見②	450
【参考】	応力降下量に関する知見③	451
【参考】	中村・植竹(2002)のQ値	452
【参考】	f_{max} の地域性について	453
【参考】	伊予断層の地表変位量	454
【参考】	伊方3号機 基準地震動 S_s に対する主要施設の検討状況	455
引用文献		457

1. 基準地震動 S_s の策定方針

1. 基準地震動 S_s の策定方針基準地震動 S_s の策定フロー

2. 敷地周辺の地震に関する調査

2.1 敷地周辺で過去に発生した被害地震の震央分布



■ プレート間で発生する地震としては、南海トラフ沿いでM8程度の大地震が約100年から150年の間隔で発生

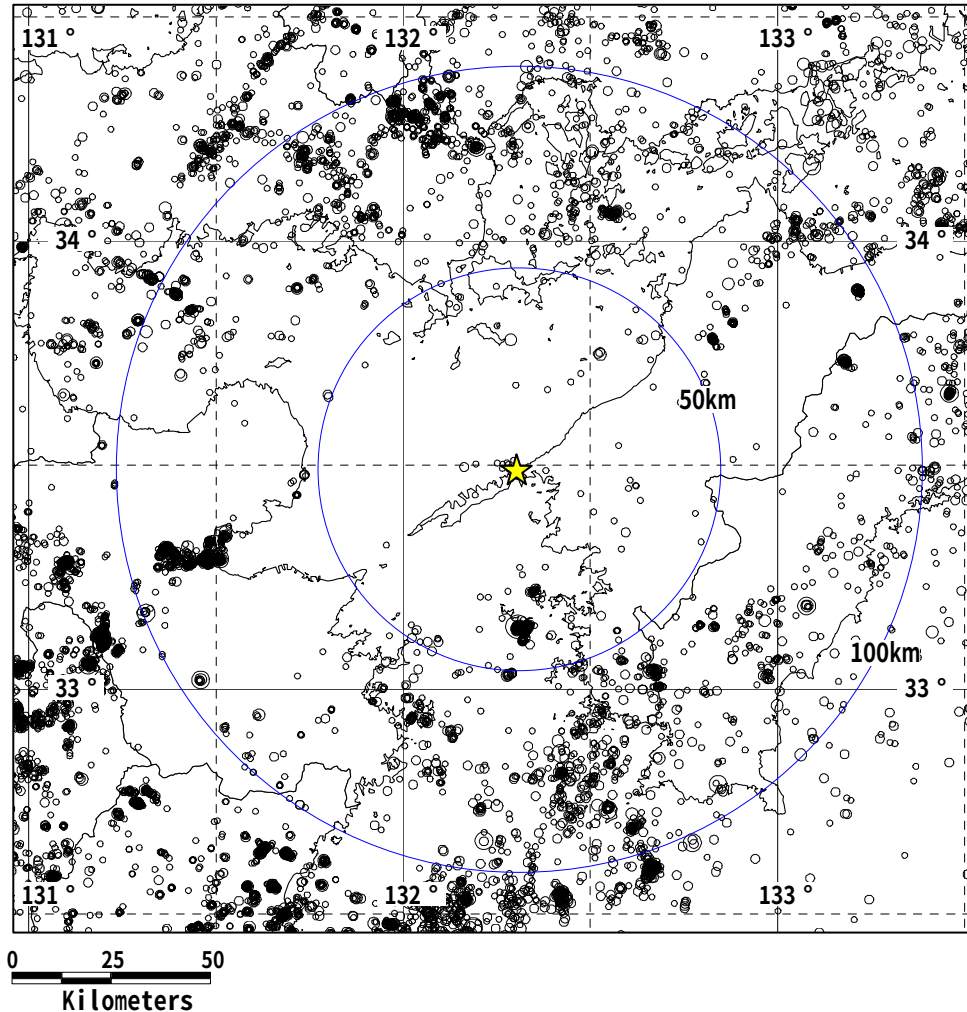
■ 海洋プレート内で発生する地震としては、安芸灘や伊予灘など瀬戸内海の西部から豊後水道付近のやや深いところでM7程度の地震が発生

■ 内陸地殻内地震については、大分県別府周辺でM7程度の地震が発生

- $8.0 \leq M$
- $7.5 \leq M < 8.0$
- $7.0 \leq M < 7.5$
- $6.5 \leq M < 7.0$
- $6.0 \leq M < 6.5$
- $5.0 \leq M < 6.0$
- $5.0 > M$

2.2 中小微小地震の震央分布①

【震源深さ 0 ～ 30km】



【諸元】

- ・ 気象庁一元化震源(2005)
- ・ 対象期間：2002年～2004年
- ・ 敷地周辺で発生したM 5 未満の地震

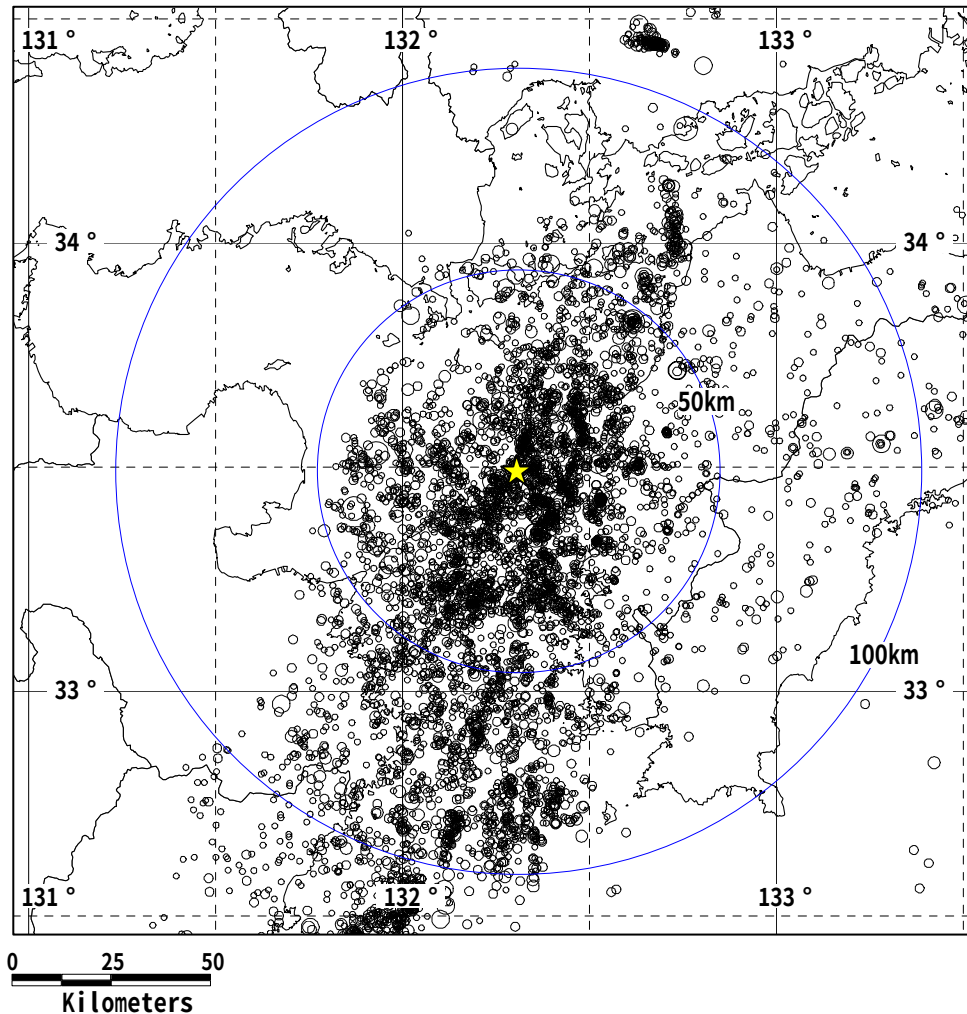
特徴

- 敷地近傍では内陸地殻内地震はあまり発生していない
- 敷地近傍で若干発生している地震の規模はM2未満

- $4.0 \leq M < 5.0$
- $3.0 \leq M < 4.0$
- $2.0 \leq M < 3.0$
- $1.0 \leq M < 2.0$
- $0.0 \leq M < 1.0$

中小微小地震の震央分布②

【震源深さ 30 ~ 70km】



【諸元】

- ・ 気象庁一元化震源(2005)
- ・ 対象期間：2002年～2004年
- ・ 敷地周辺で発生したM 5 未満の地震

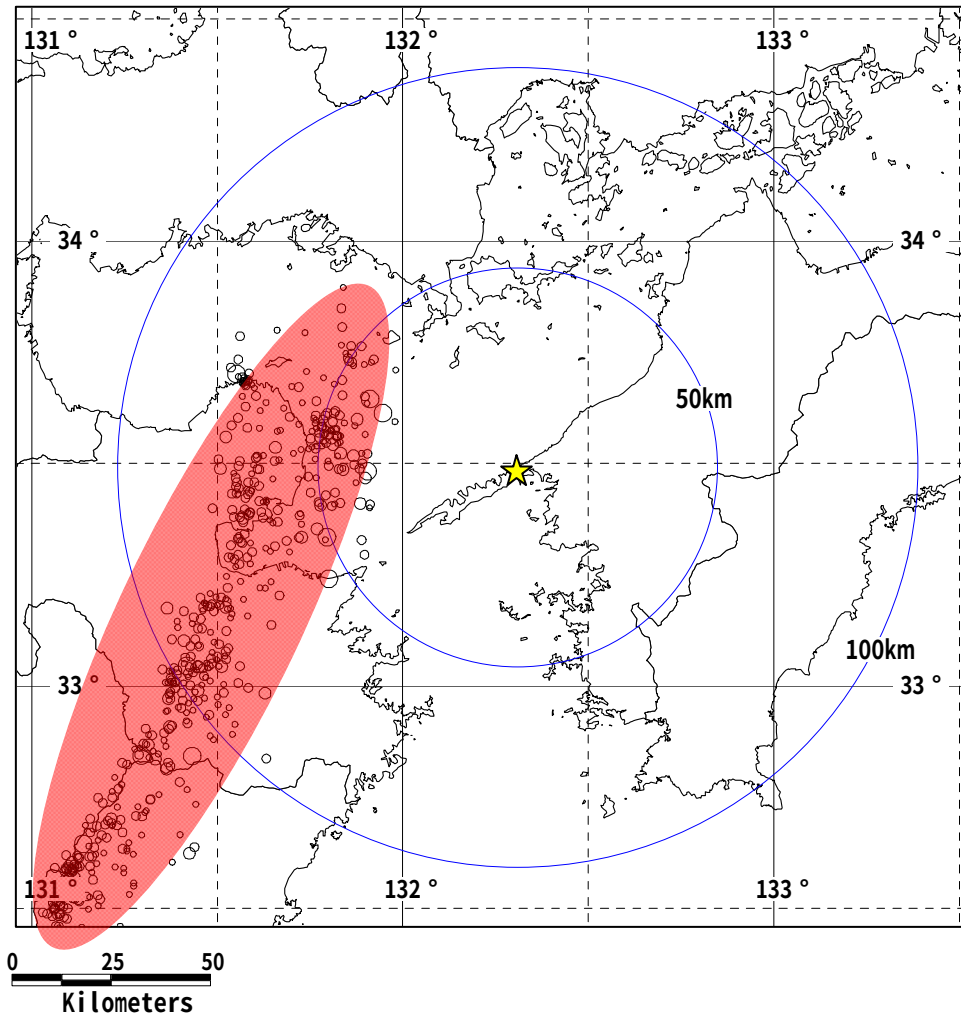
特徴

- 深さ30～70kmにおいては顕著な地震活動が認められる
- フィリピン海プレートに沿って発生している

- $4.0 \leq M < 5.0$
- $3.0 \leq M < 4.0$
- $2.0 \leq M < 3.0$
- $1.0 \leq M < 2.0$
- $0.0 \leq M < 1.0$

中小微小地震の震央分布③

【震源深さ 70 ~150km】



【諸元】

- ・ 気象庁一元化震源(2005)
- ・ 対象期間：2002年～2004年
- ・ 敷地周辺で発生したM 5 未満の地震

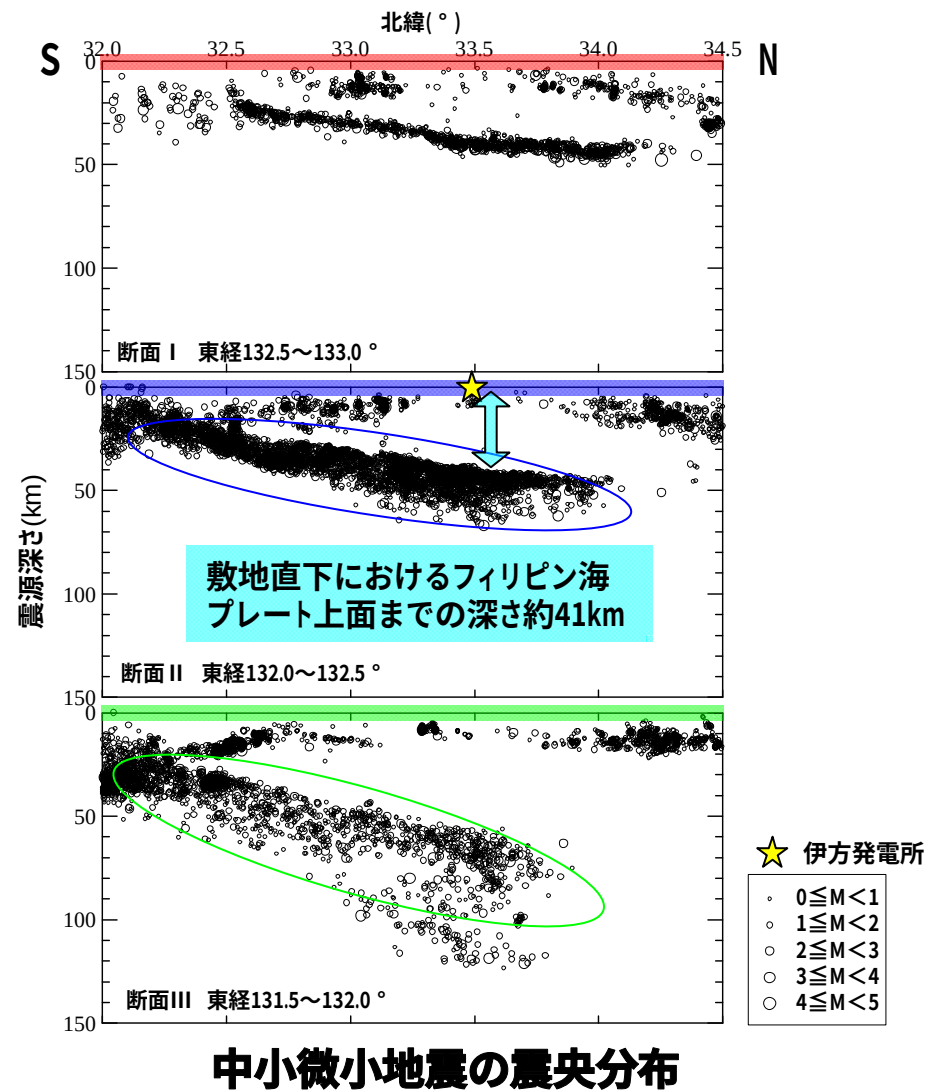
特徴

- 東経132度付近より東においては、深さ70km以深の深い場所での地震活動は認められない
- 東経132度付近より西においては、くにさきフィリピン海プレートに沿って国東半島付近から南西方向にかけて帯状に多くの地震が発生

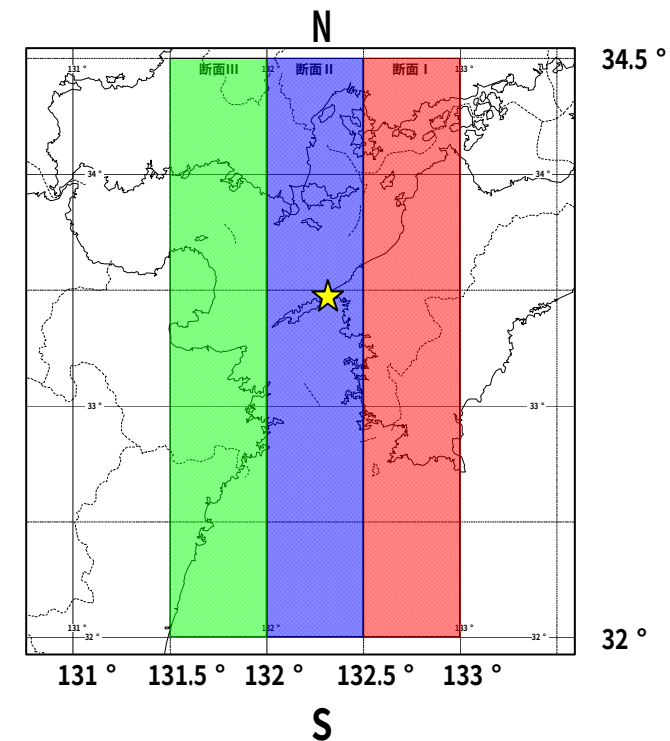
- $4.0 \leq M < 5.0$
- $3.0 \leq M < 4.0$
- $2.0 \leq M < 3.0$
- $1.0 \leq M < 2.0$
- $0.0 \leq M < 1.0$

中小微小地震の震央分布④

【鉛直分布 (NS方向断面)】

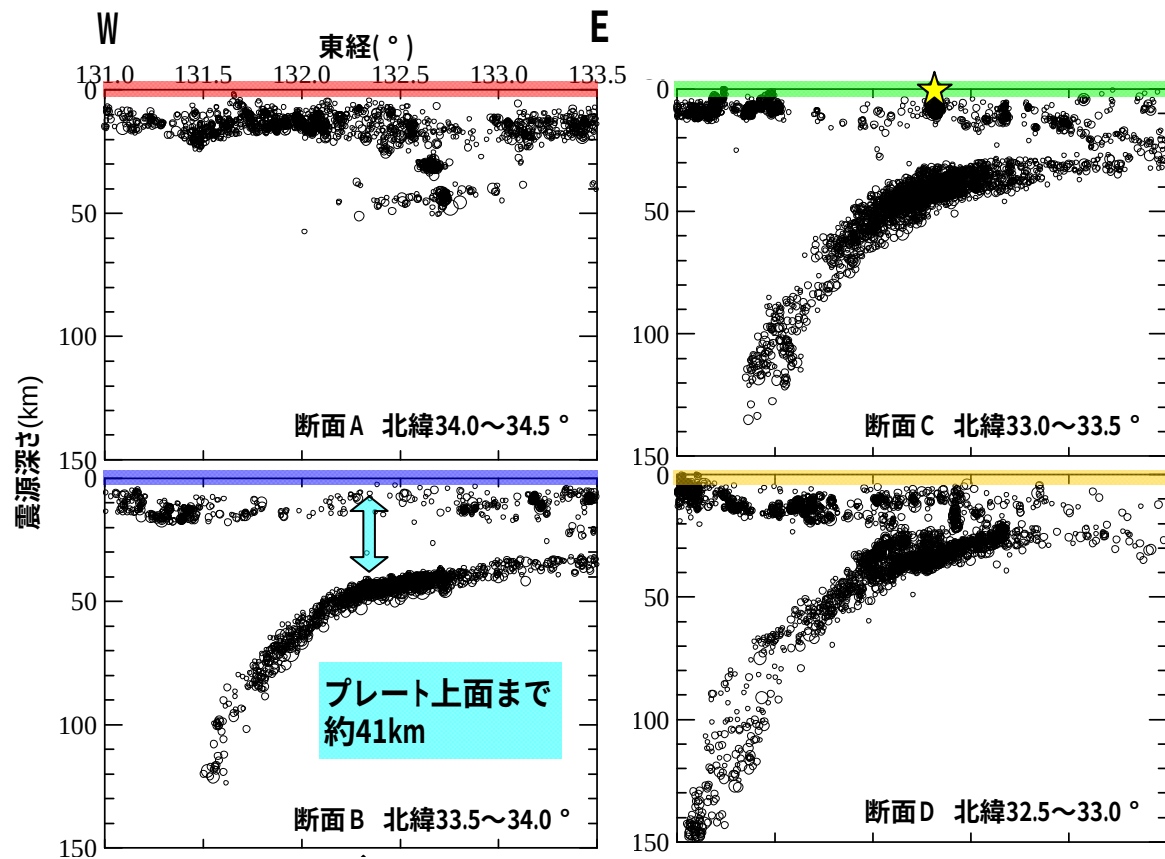


- フィリピン海プレートに沿って発生
- 敷地直下におけるフィリピン海プレート上面までの深さは約41km
- 九州側の領域では深い場所での地震活動が目立つ

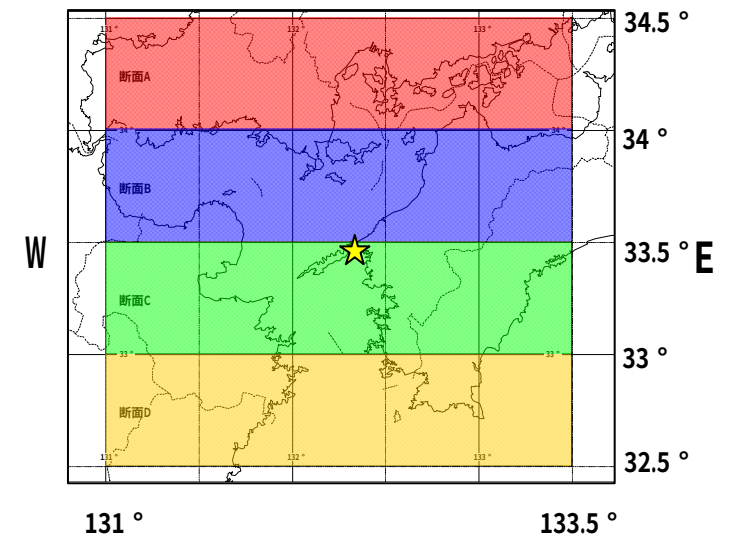


中小微小地震の震央分布⑤

【鉛直分布 (EW方向断面)】



- フィリピン海プレートに沿って発生
- 九州側に向けて沈み込むプレート形状が確認できる



中小微小地震の震央分布

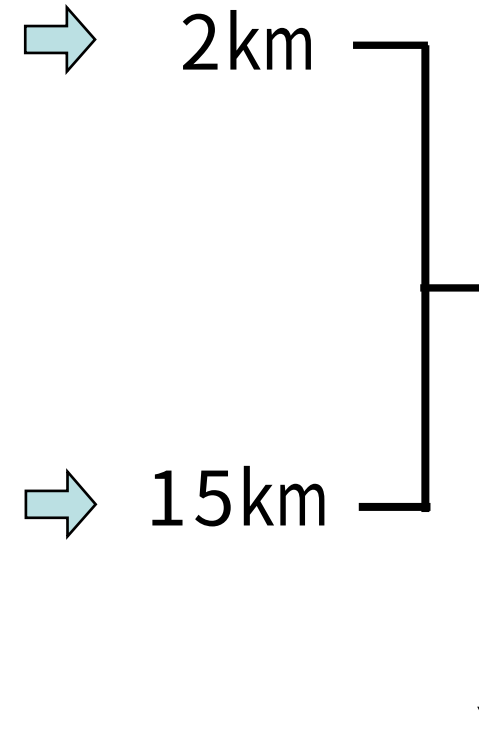
2.3 地震発生層の厚さ

○地震発生層上限深さ

- ・微小地震の発生状況
(2～12kmで発生, D10%は5～6km)
- ・敷地周辺の $V_p=6\text{km/s}$ 相当の深さは5km程度
- ・中央構造線断層帯における断層上端深さ(2km)
(三波川変成岩類と領家花崗岩類の会合部深さ:
屈折法調査結果より)

○地震発生層下限深さ

- ・微小地震の発生状況(2～12kmで発生)
- ・D90%(12～14km程度)
- ・地震波トモグラフィー(高 V_p/V_s 領域上端:13km)
- ・キュリー点深度(10～11km)
- ・地震本部(15km)



地震発生層の厚さを13kmと設定

地震発生層上限深さの設定方法

敷地周辺の地震発生状況に関する知見

○敷地周辺における微小地震の発生状況 (発生深さやD10%)

敷地周辺の速度構造に関する知見

○ $V_p=6\text{km/s}$ 相当の深さ

中央構造線断層帯の断層上端深さに関する知見

○微小地震の発生状況

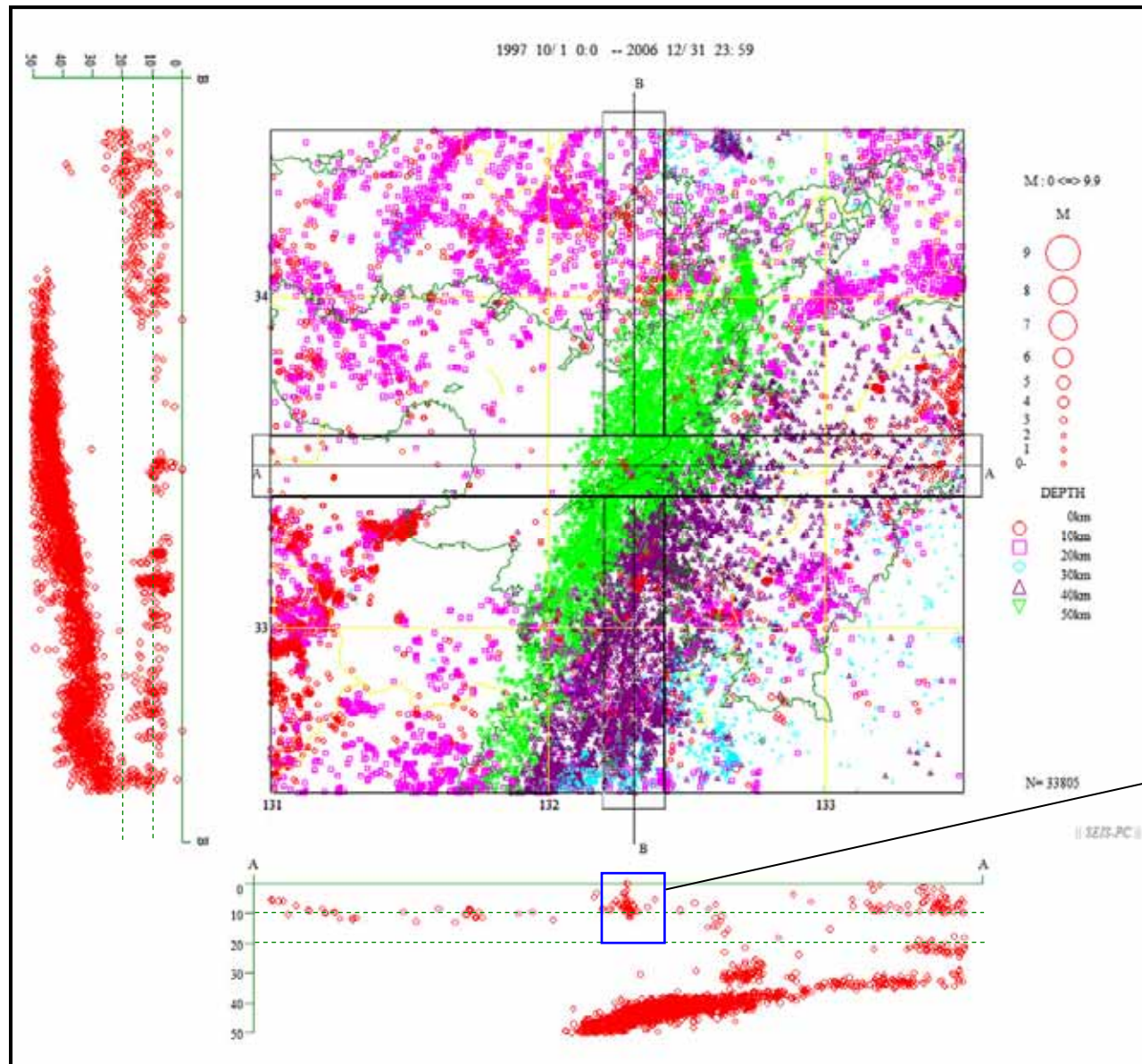
○中央構造線断層帯における断層上端深さ
(三波川変成岩類と領家花崗岩類の会合部深さ)

参考

地震発生層上限深さを設定

微小地震の発生状況

2. 敷地周辺の地震に関する調査



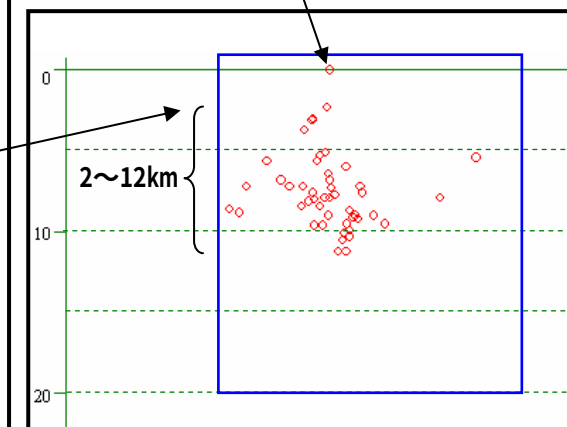
敷地周辺における地殻内地震は、1997年10月～2006年12月の間の気象庁一元化震源によると、深さ2～12kmで発生している

● 深さ0kmの地震について

1997年10月11日 6:57 深さ0km M1.9

1997年10月11日 10:30 深さ0km M2.0

※: この2つの地震は、深さフリーではなく、深さ刻み条件で求めた震源情報のため深さの精度は低い。この他の震源は深さフリーで震源決定を行っている。



D10%の検討①

敷地周辺および敷地近傍について検討を行った

検討に用いたデータの諸元

- ・気象庁一元化震源
- ・期間: 1997年10月1日～2007年7月31日
- ・範囲: 敷地周辺 (敷地を中心に約55km×65km), 敷地近傍 (敷地を中心に約18km×22km)
- ・深さ: 25km以浅

①敷地周辺

・128地震

(深さの決定精度が低いものを除いた)

・地震規模: M0～2.2

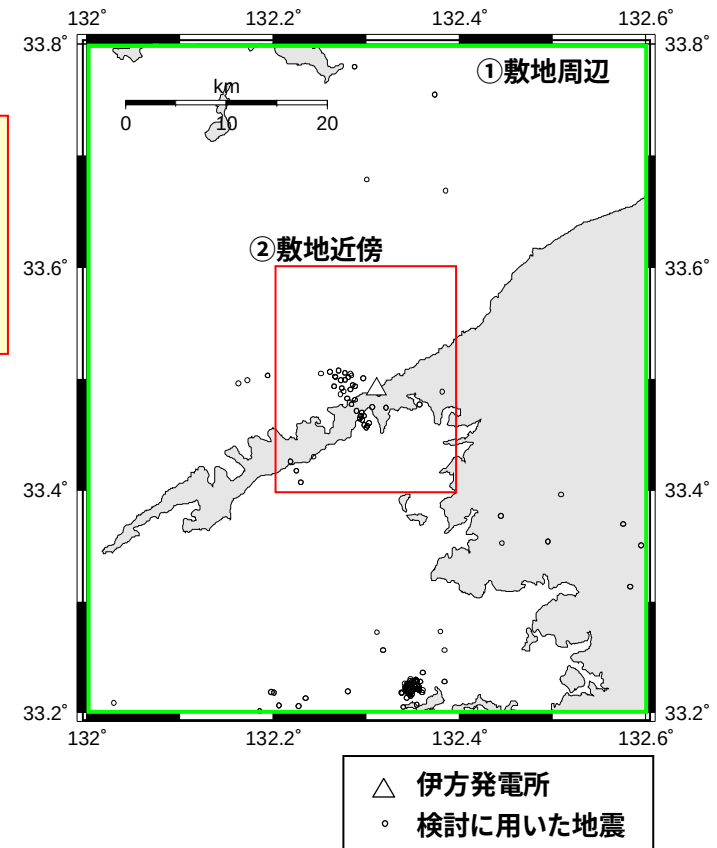
②敷地近傍

・41地震

(深さの決定精度が低いものを除いた)

・地震規模: M0～2.2

D10%を検討



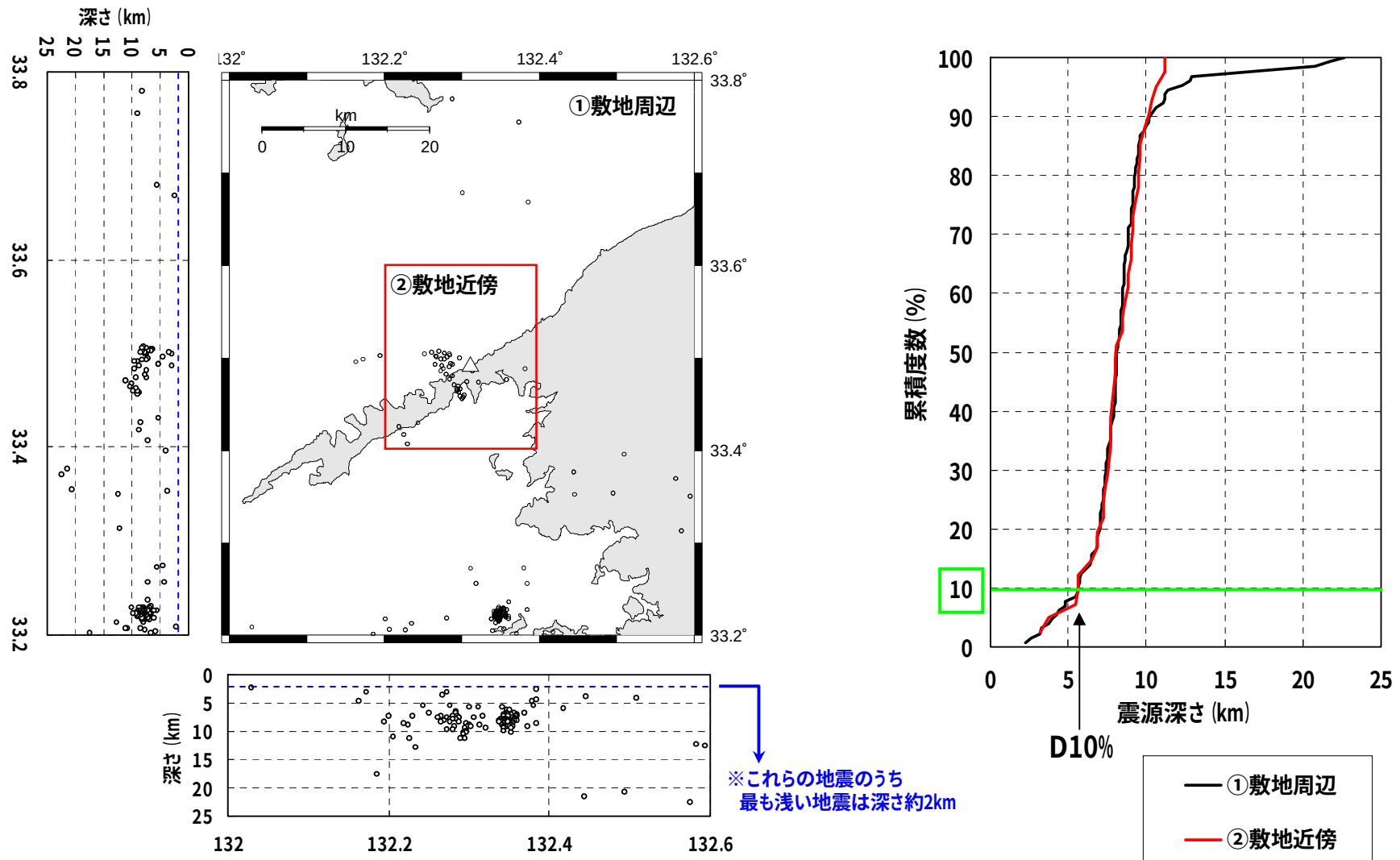
D10%の検討②

検討の結果,

①敷地周辺 D10% 5.6km

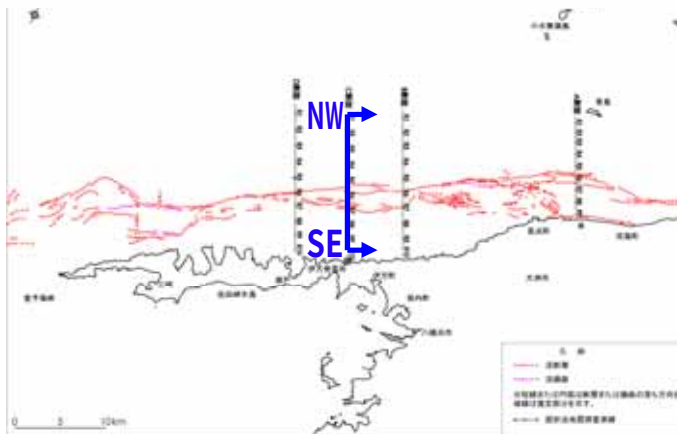
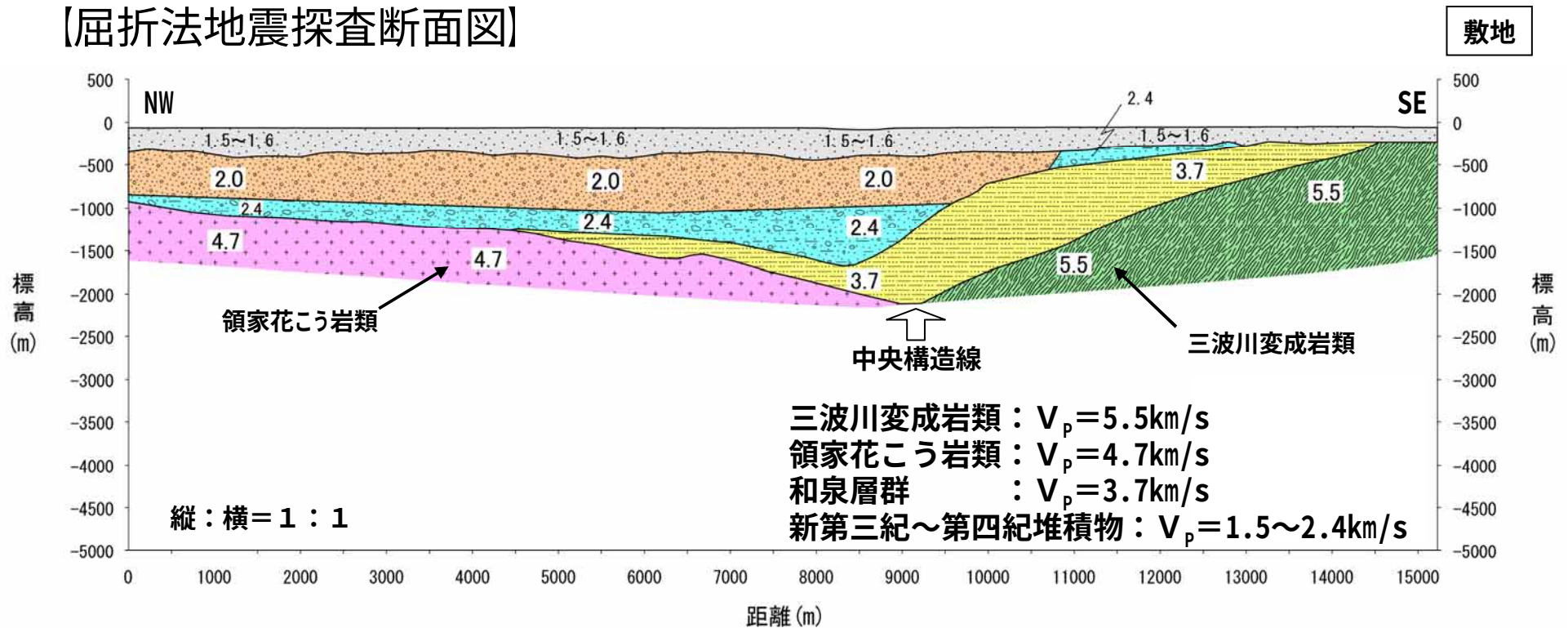
②敷地近傍 D10% 5.6km

D10%は 5.6kmと評価された



Vpに関する知見 (敷地近傍)

【屈折法地震探査断面図】



■ 敷地下方にも三波川変成岩類が広く分布する。

■ 三波川変成岩類上面の V_p は 5.5 km/s と求まっているが、 $V_p = 6 \text{ km/s}$ 相当の深さは求まっていない。

Vpに関する知見 (四国東部)

Ito(2009)によれば、四国東部の知見ではあるが、
中央構造線断層帯周辺のVp=6km/s相当の深さは5km程度

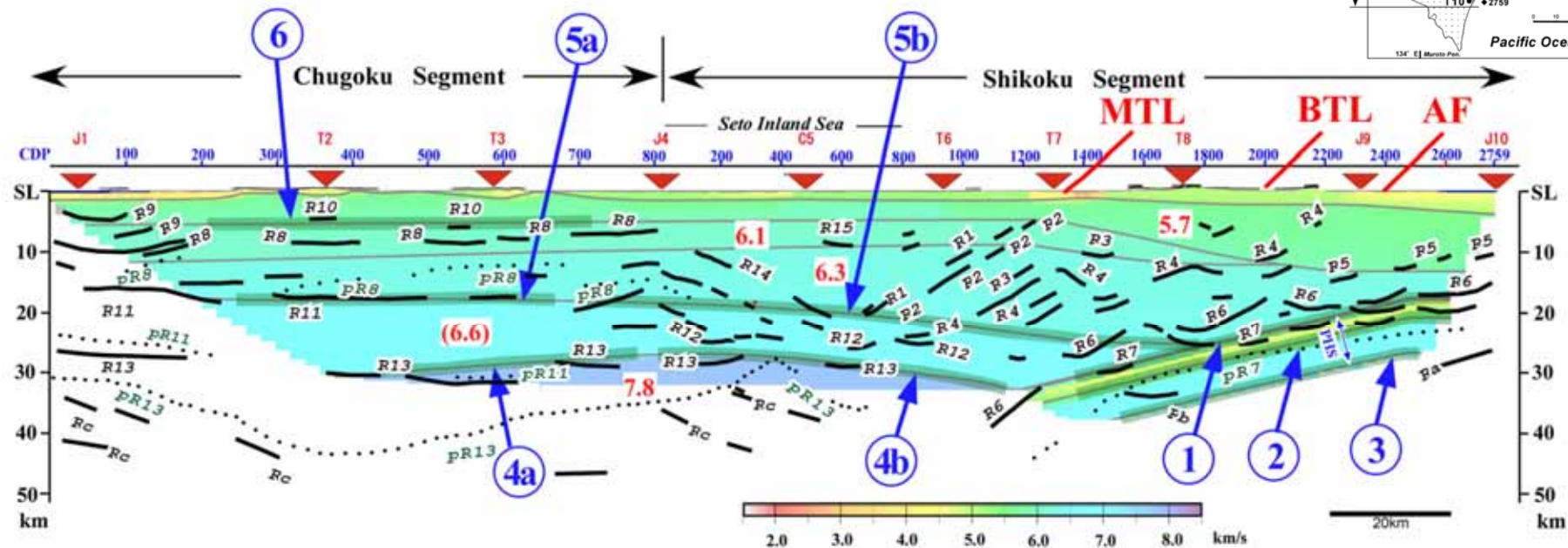
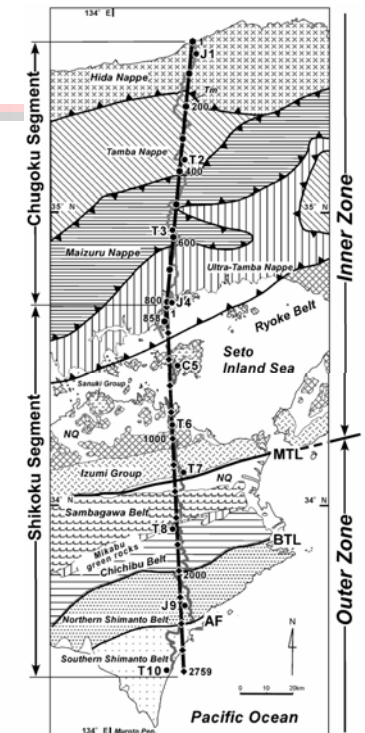
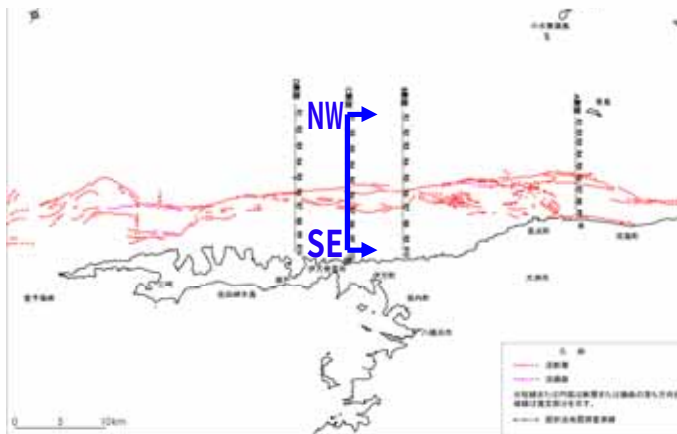
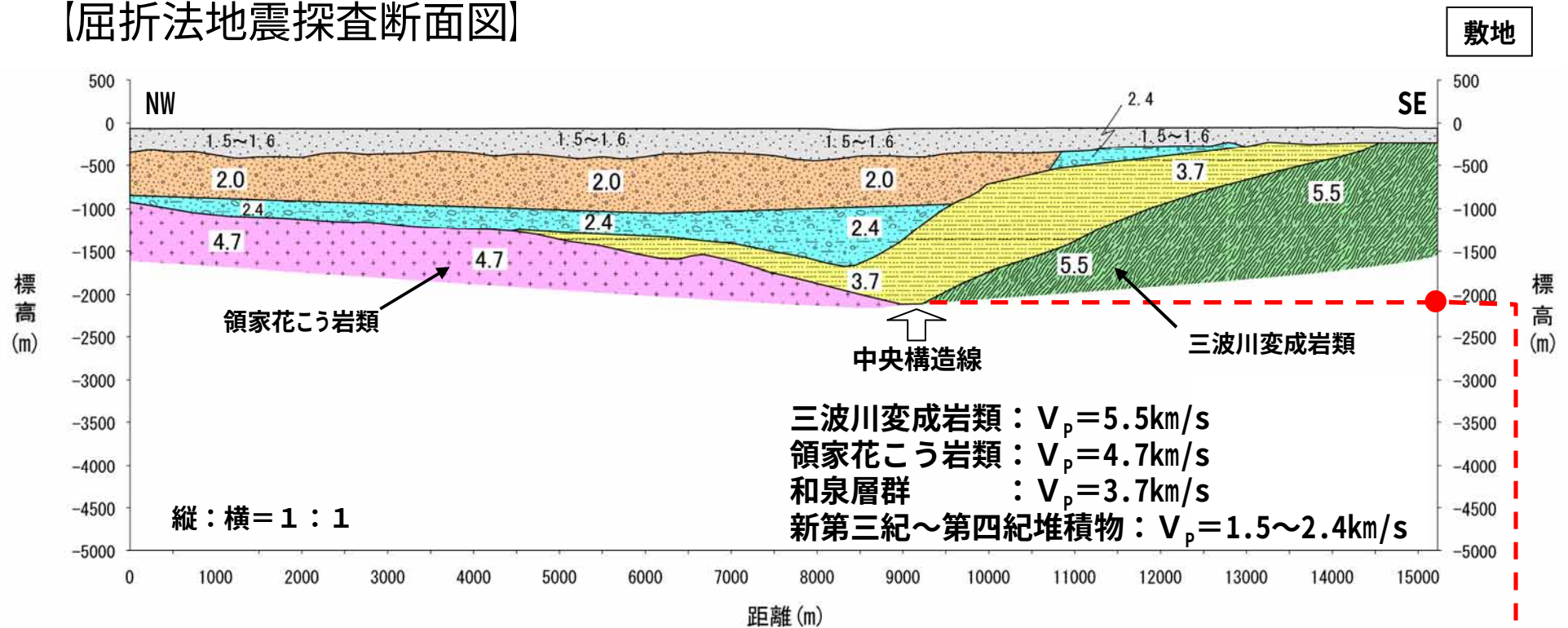


Fig. 7. P-wave structure (in km/s) estimated by Kurashimo et al. (2003) and upper and lower boundaries of predominant reflective domains from Fig. 6. PHS, oceanic crust of the PHS plate estimated by Kurashimo et al. (2003). 1 to 6 are boundaries for the interpretational work. 1 is very well constrained by wide-angle reflections from several shots. 2 is fairly well constrained by wide-angle reflections from a single shot. 3 is not so well constrained, because it is only drawn extrapolating from Kodaira et al. (2002). 4a is well constrained by reflected (PmP) waves. 4b is very well constrained by both refracted (Pn) and reflected (PmP) waves. 5a is well constrained by strong wide-angle reflections from a single shot, but 5b is fairly well by weak ones. 6 is very well constrained by both refractions and wide-angle reflections.



中央構造線断層帯の断層上端深さ

【屈折法地震探査断面図】



■ 敷地下方にも三波川変成岩類が広く分布する。

■ 断層上端深さは2kmに設定

地震発生層上限深さ (まとめ)

敷地周辺の地震発生状況より

○敷地周辺における微小地震の発生状況

発生深さ → 2~12km

D10% → 5~6km

敷地周辺の速度構造より

○ $V_p=6\text{km/s}$ 相当の深さ → 5km程度

地震発生状況等からは
発生層上限深さは5km
程度と評価される

中央構造線断層帯の断層上端深さより

○微小地震の発生状況

発生深さ → 2~12km

○中央構造線断層帯における断層上端深さ
(三波川変成岩類と領家花崗岩類の会合部深さ)
→ 2~3km

安全側に断層上端深さを
2kmに設定

参考

地震発生層上限深さは、安全側に2kmと評価

敷地周辺の地震発生状況に関する知見

○敷地周辺における微小地震の発生状況 (発生深さやD90%)

その他の知見

○地震波トモグラフィー (高Vp/Vs領域)

○キュリー点深度

○地殻熱流量 ほか

総合的に判断して

地震発生層下限深さを設定

地震発生層下限深さ①

地震波トモグラフィー

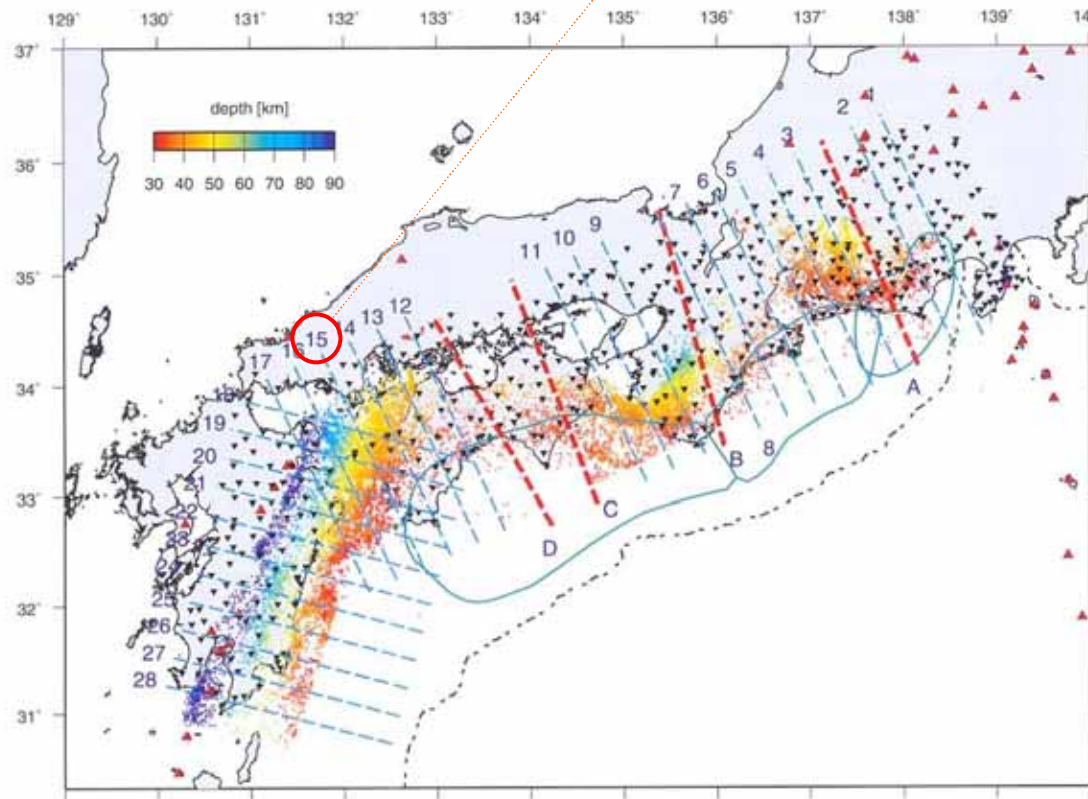
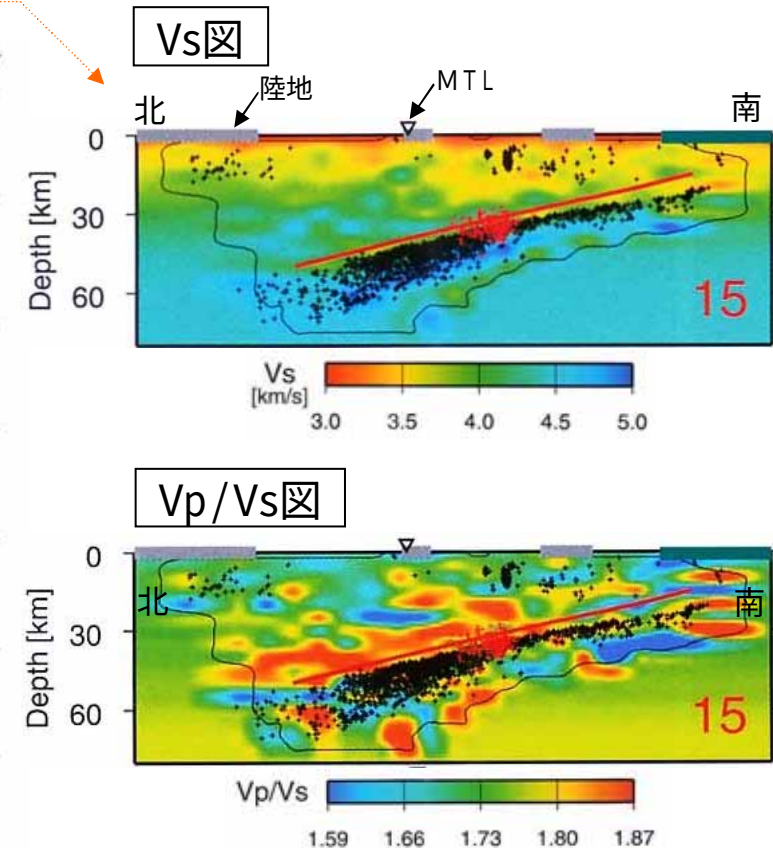


Fig. 2. Epicenter distribution of earthquakes (color dots) and seismograph stations (solid inverted triangles) used for double-difference tomography. Colors indicate the depth of hypocenters according to the color scale on the top left. Blue broken lines show the locations of vertical cross sections 1 through 28 shown in Figs. 3, 4 and 5. Red broken lines denote the locations of seismic refraction survey lines A through D. Other symbols are the same as those in Fig. 1.

出典: 弘瀬ほか(2007)

敷地付近を通る測線15の断面図

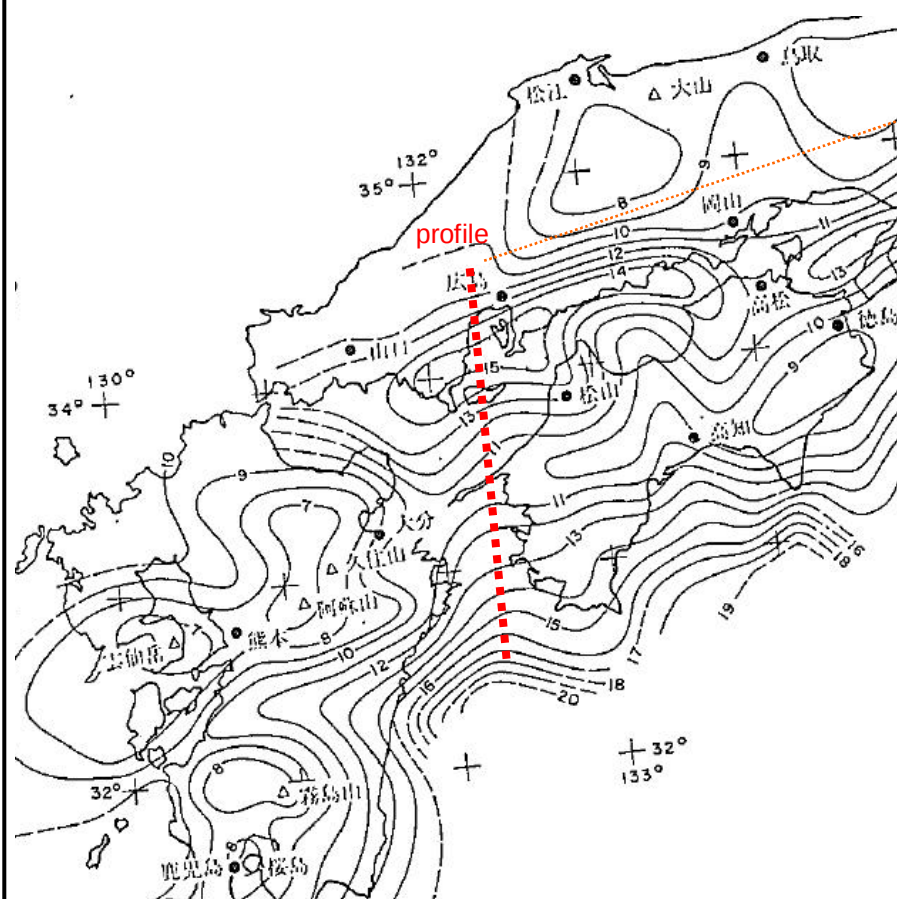


敷地下方15～25kmに高Vp/Vs領域が存在する

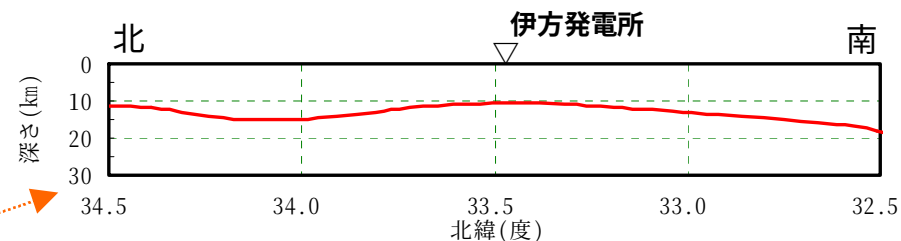
→高Vp/Vs領域は、沈み込んだプレートの脱水による影響が考えられる (例えば、流体の存在やマントル・ウエッジの蛇紋岩化)

地震発生層下限深さ②

キュリー点深度



出典: 大久保(1984)

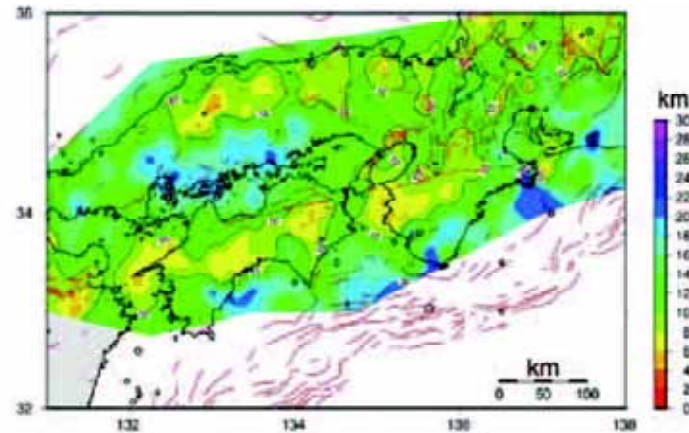


キュリー点深度の南北方向の変化

これより敷地周辺のキュリー点深度は
10～11km

地震発生層下限深さ③

D50%



D90%

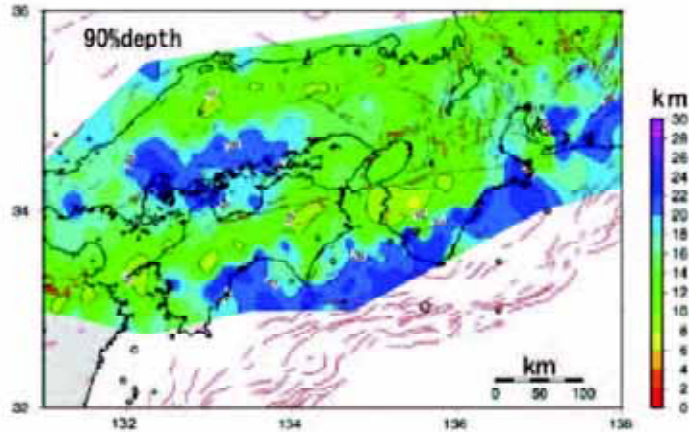
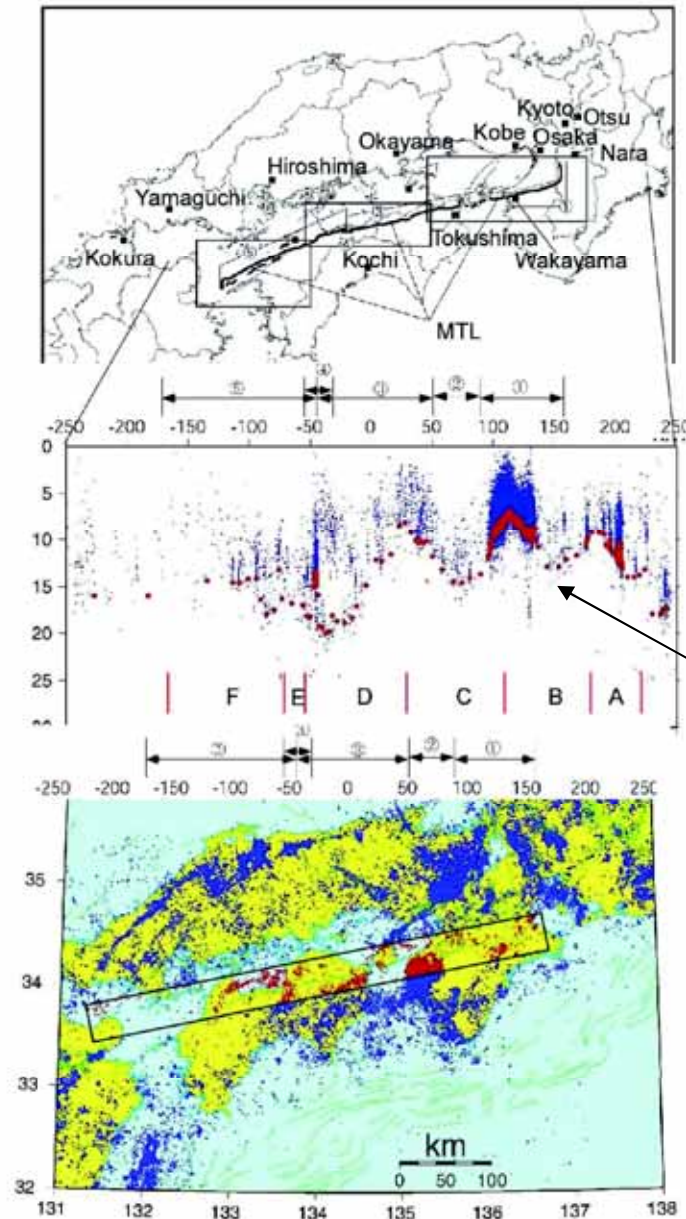


Fig.9 Depth distribution of 50% (upper figure) and 90% (lower figure) depths of earthquakes in Southwest Japan. Lines show active faults. The 50% and 90% depths are the depths above which 50% and 90% earthquakes occur, respectively. The value is calculated in every area of 0.2 degree in latitude and longitude.

敷地周辺は、
D50%, D90%
ともに浅い地
域である

約20km格子で算出されたD50%, D90%
[伊藤(2006)]



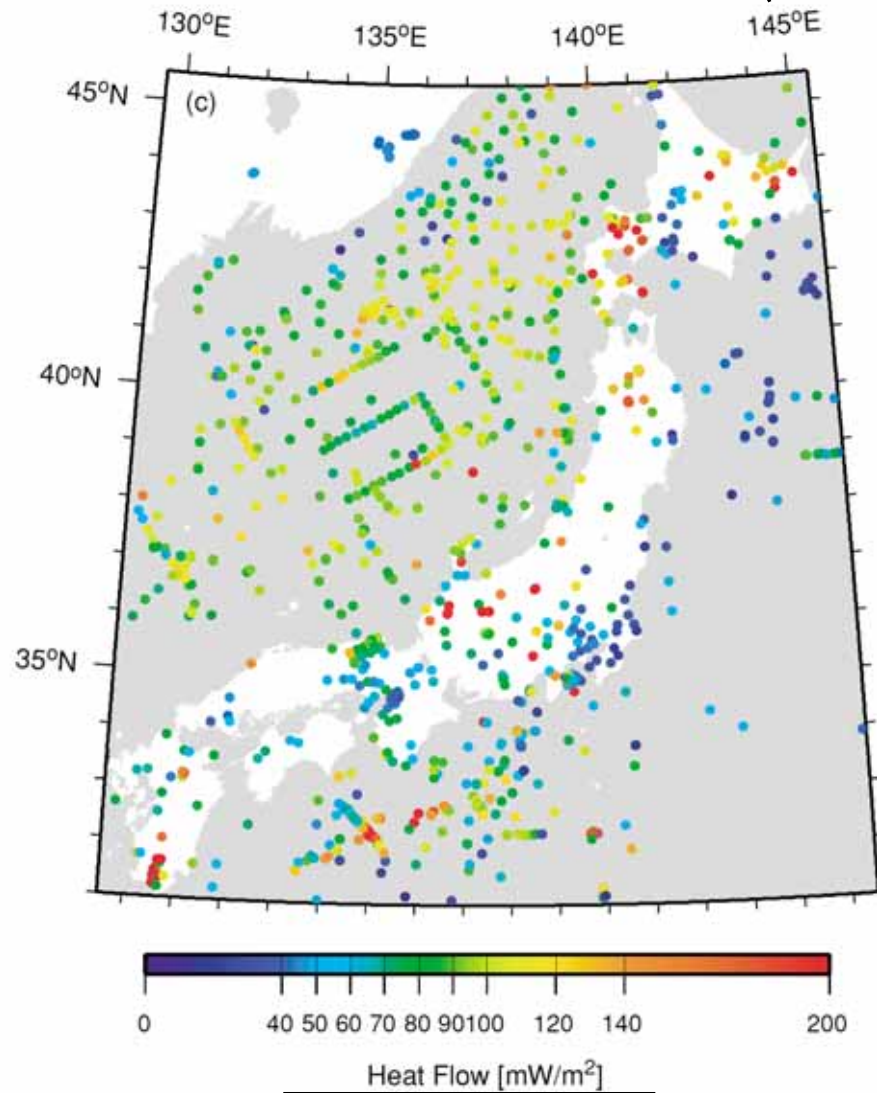
●: 断層沿いに地震を50個ずつとり、解析する区間を移動させながら求めたD90%

Fig.10 Segmentation of MTL by the Headquarters of the Earthquake Research Promotion (2005) (upper figure), focal depth distributions of earthquakes along MTL shown in the strip in the lower figure and 90% depth of earthquakes in every 5km along the section (red dots in middle figure). An attempt of segmentation of MTL by the depth change presented in the study is also indicated in the middle figure. Epicenter distribution of earthquakes for the unified hypocenters of earthquakes by Japan Meteorological Agency (JMA) (lower figure).

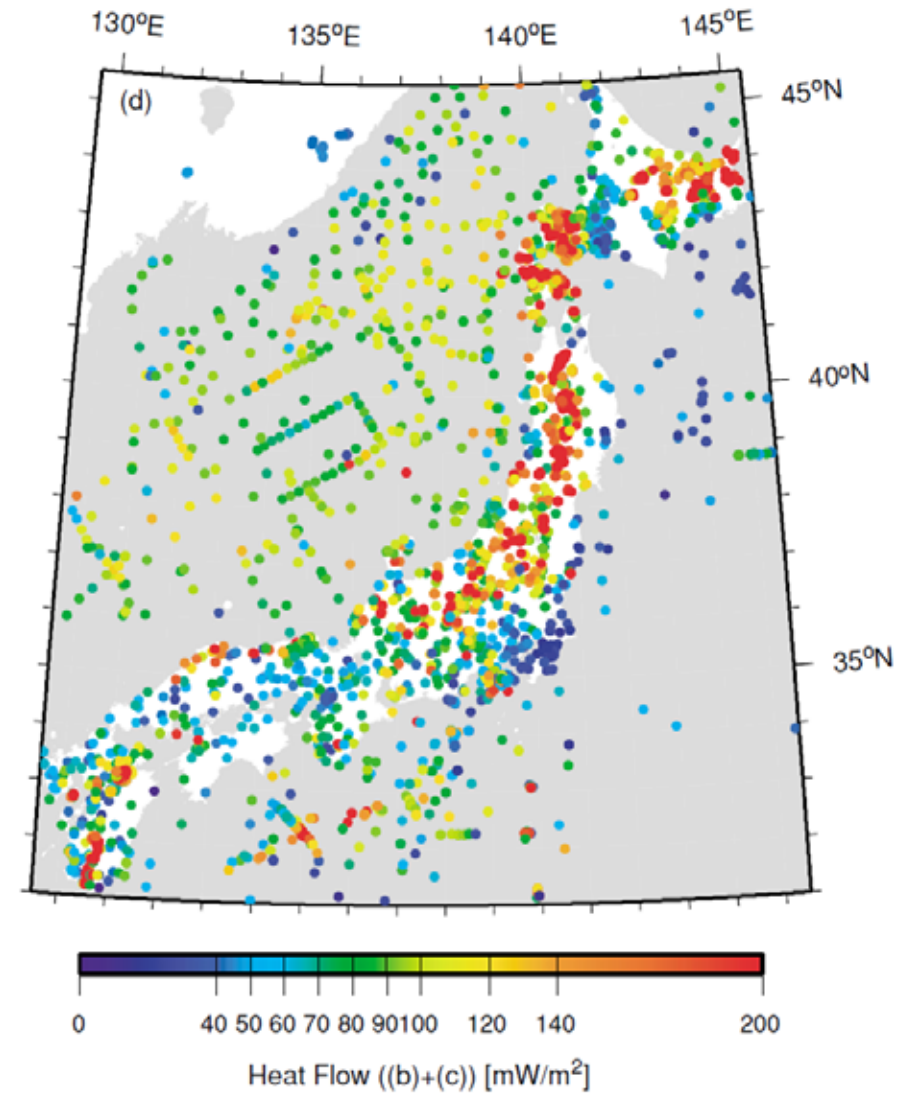
中央構造線断層帯に沿うD90% [伊藤(2006)]

地震発生層下限深さ④

地殻熱流量分布 [Tanaka et al.(2004)]



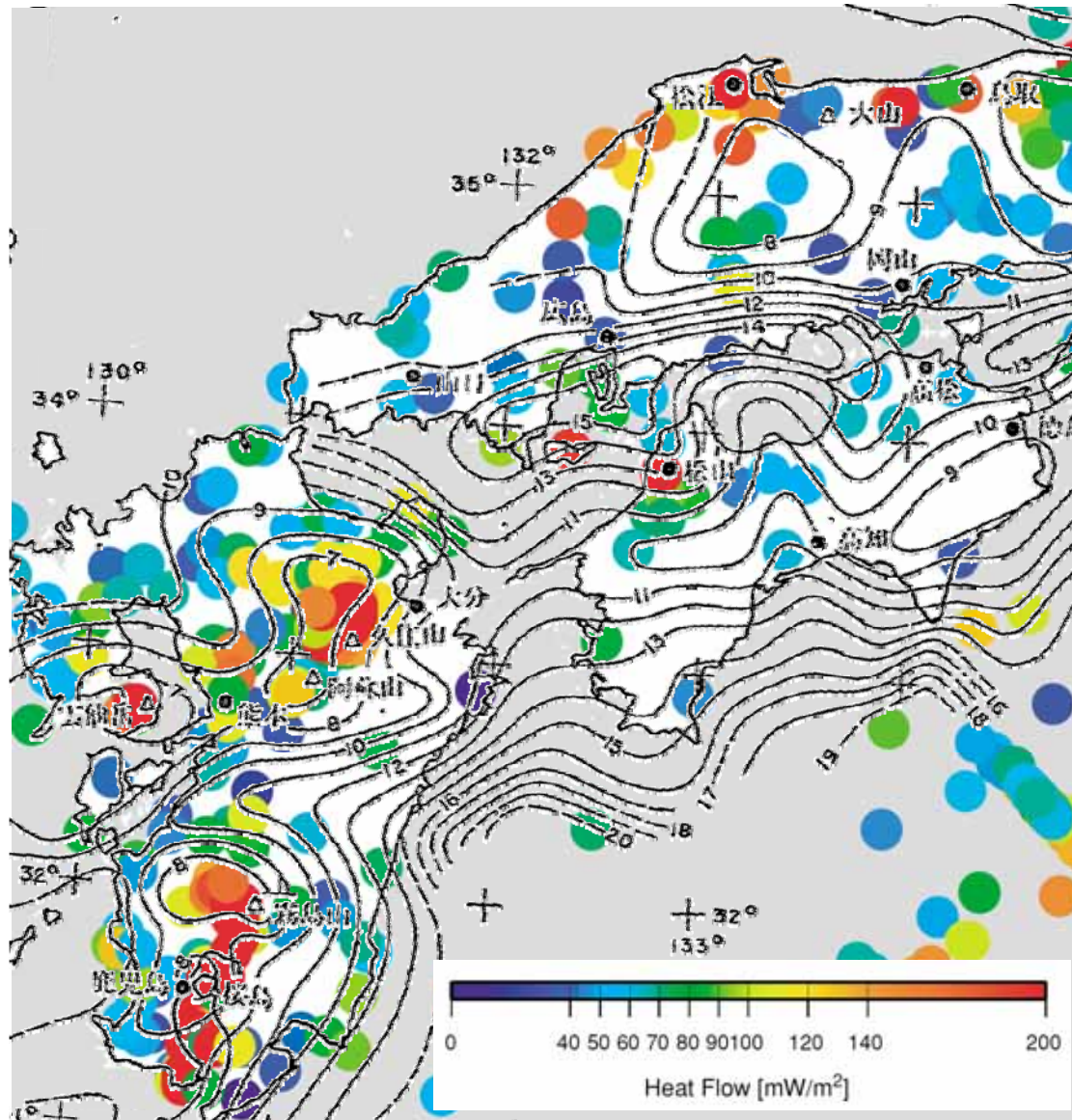
地殻熱流量データ



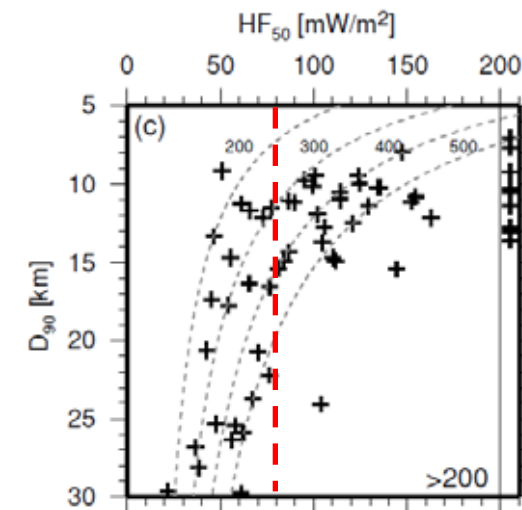
温度勾配データから推定した地殻熱流量を追加

地震発生層下限深さ⑤

地殻熱流量とキュリー点深度の対比



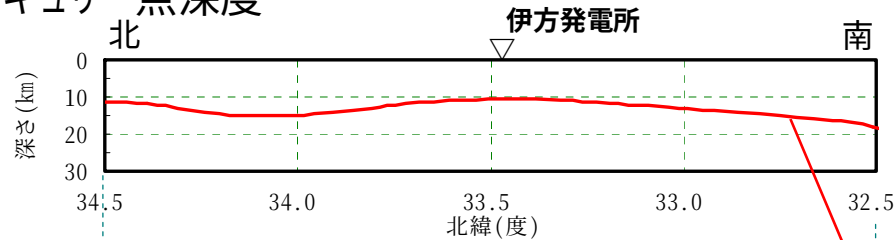
- 敷地周辺の熱流量データは少ない。
- 九州や山陰では、熱流量の大きい地域とキュリー点深度の浅い地域がほぼ対応する。
- 国東半島から松山市南方を通るキュリー点深度11kmのコンター線付近には、熱流量80mW/m²のデータが分布する。
- そこで敷地周辺の熱流量を80mW/m²と仮定し、「D90%が対応する温度は250～450度である」と指摘するTanaka(2004)の知見に照らし合わせると、敷地周辺のD90%は15km程度と推定される。



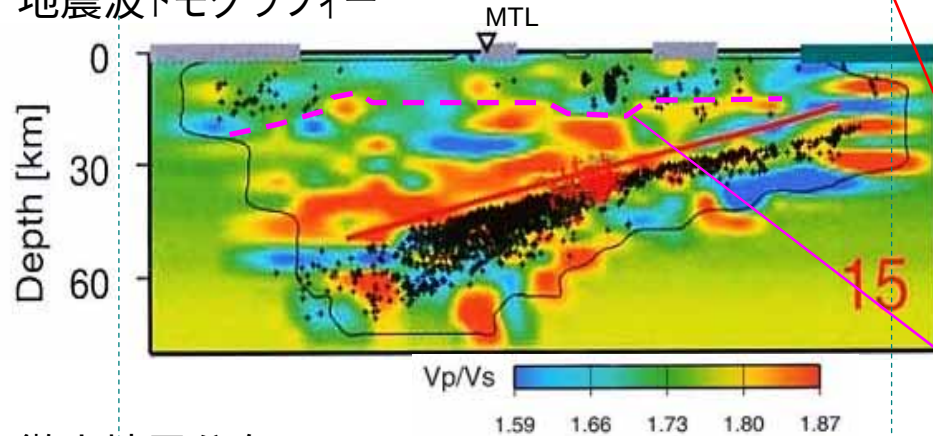
熱流量とD90%の関係 [Tanaka(2004)]

地震発生層下限深さ⑥ データ間の比較

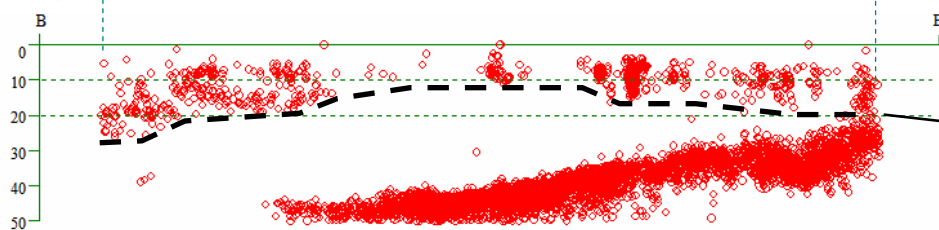
キュリー点深度



地震波トモグラフィー



微小地震分布



D90%

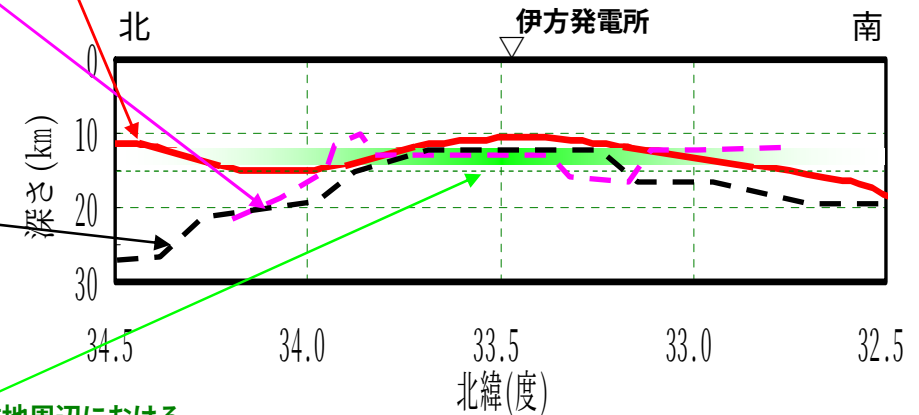
伊藤(2006)から敷地周辺では12~14km程度
敷地より北方・南方ではやや深くなる

敷地周辺においては,

- D90% → 12~14km
- 高Vp/Vs領域の上端深さ → 13km
- キュリー点深度 → 10~11km

これらを比較すると,

- 微小地震分布 (地殻内地震の下限深さ),
地震波トモグラフィー (高Vp/Vs領域の上端
深さ), D90%は整合的
- キュリー点深度はやや浅め
- 南北方向の変化も整合的



敷地周辺における
深さ (12~14km)
を図示

地震発生層下限深さ⑦

その他の知見

地震調査委員会(2003)は、中央構造線断層帯の長期評価報告書において、地震観測結果より、『本断層帯付近の地震発生層の下限深さは、断層帯全域にわたって概ね15km程度である』としている。

(当該報告書においては、「地震観測結果」とのみ示されており、詳細な根拠は明記されていない。)

地震発生層下限深さ (まとめ)

○地震発生層に関する知見の整理

敷地周辺は、微小地震の発生状況や地震波トモグラフィーの結果から、地震発生層の下限深さが浅い地域であると推定される。

具体的には、D90%は12～14km、高Vp/Vs領域の上端深さは13km、キュリー点深度は10～11kmである。

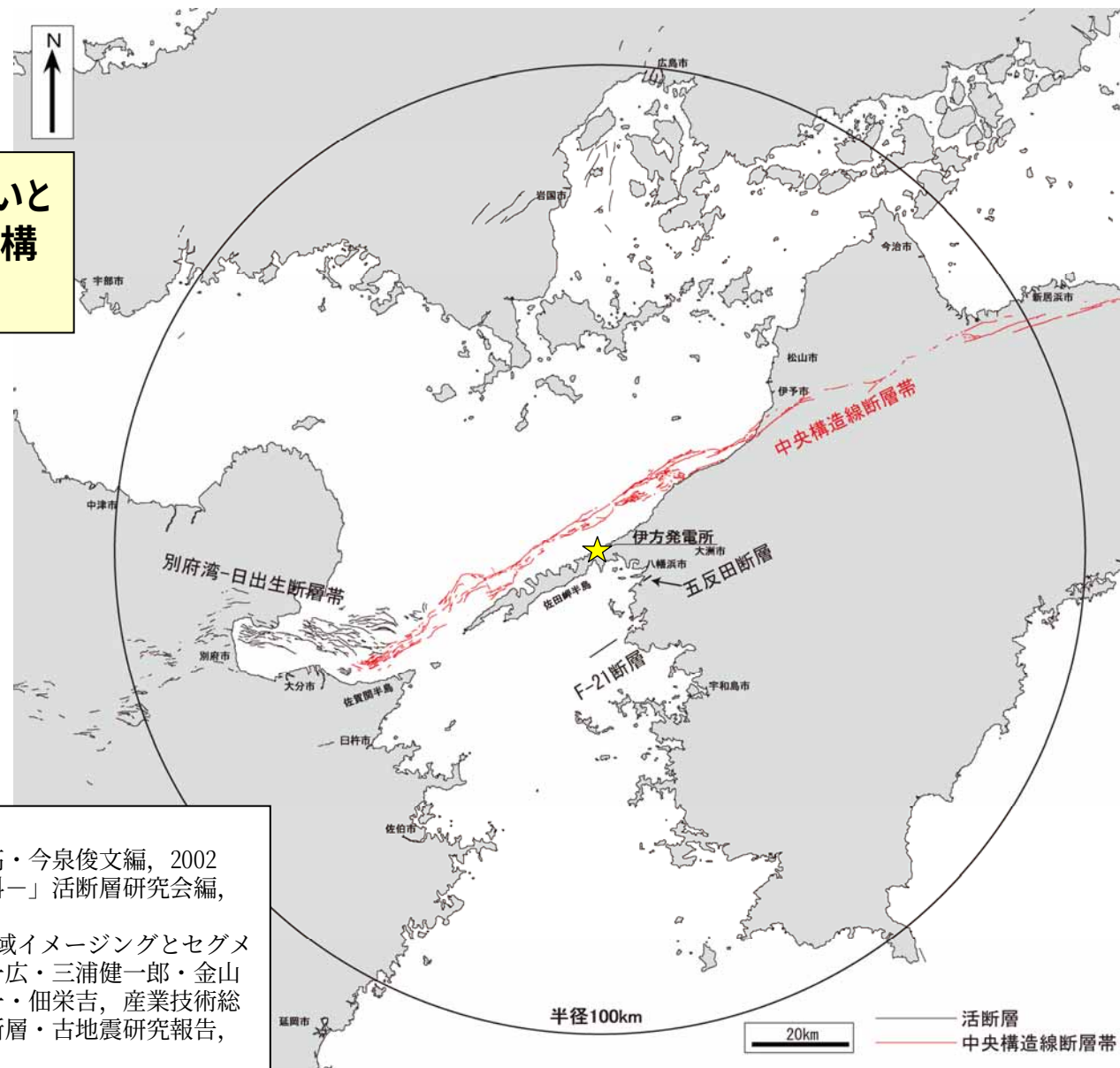
また、地震本部においては地震発生層下限深さを概ね15kmと評価している。

地殻熱流量から推定されるD90%も15km程度である。

以上の情報から、地震発生層下限深さがD90%やキュリー点深度よりもやや深い可能性や地震波トモグラフィーの精度を勘案すると、敷地周辺の地震発生層の下限深さは15kmと想定される。

2.4 敷地周辺の活断層

■ 敷地に最も影響の大きいと思われる活断層は中央構造線断層帯



【活断層分布図の出典】

- 陸域：○「活断層詳細デジタルマップ」中田高・今泉俊文編，2002
- 海域：○「[新編]日本の活断層—分布図と資料—」活断層研究会編，1991
- 「伊予灘～佐賀関沖MTL活断層系の広域イメージングとセグメント区分」七山太・池田倫治・大塚一広・三浦健一郎・金山清一・小林修二・長谷川正・杉山雄一・佃栄吉，産業技術総合研究所地質調査総合センター，活断層・古地震研究報告，2，141-152，2002
- 「別府湾の海底活断層分布」島崎邦彦・松岡裕美・岡村眞・千田昇・中田高，月刊地球／号外，28，79-84，2000