

活断層の地下を探る



地球環境学・現代地球科学 第9回 (2017/06/16) 課題

❖ 重力探査（もしくはその解析）の特徴を述べよ。

例えば,

- 調査の規模は？（機材の大きさや必要な人数）
- 調査方法は？（複雑？／簡単？）
- 観測地点の制約は？
- 補正（データ処理）は複雑か？
- 解析における注意点は？

地球の重力とは

万有引力の法則

$$g = \frac{G \times M}{R^2}$$

G: 万有引力定数

$6.67259 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$

M: 地球の質量

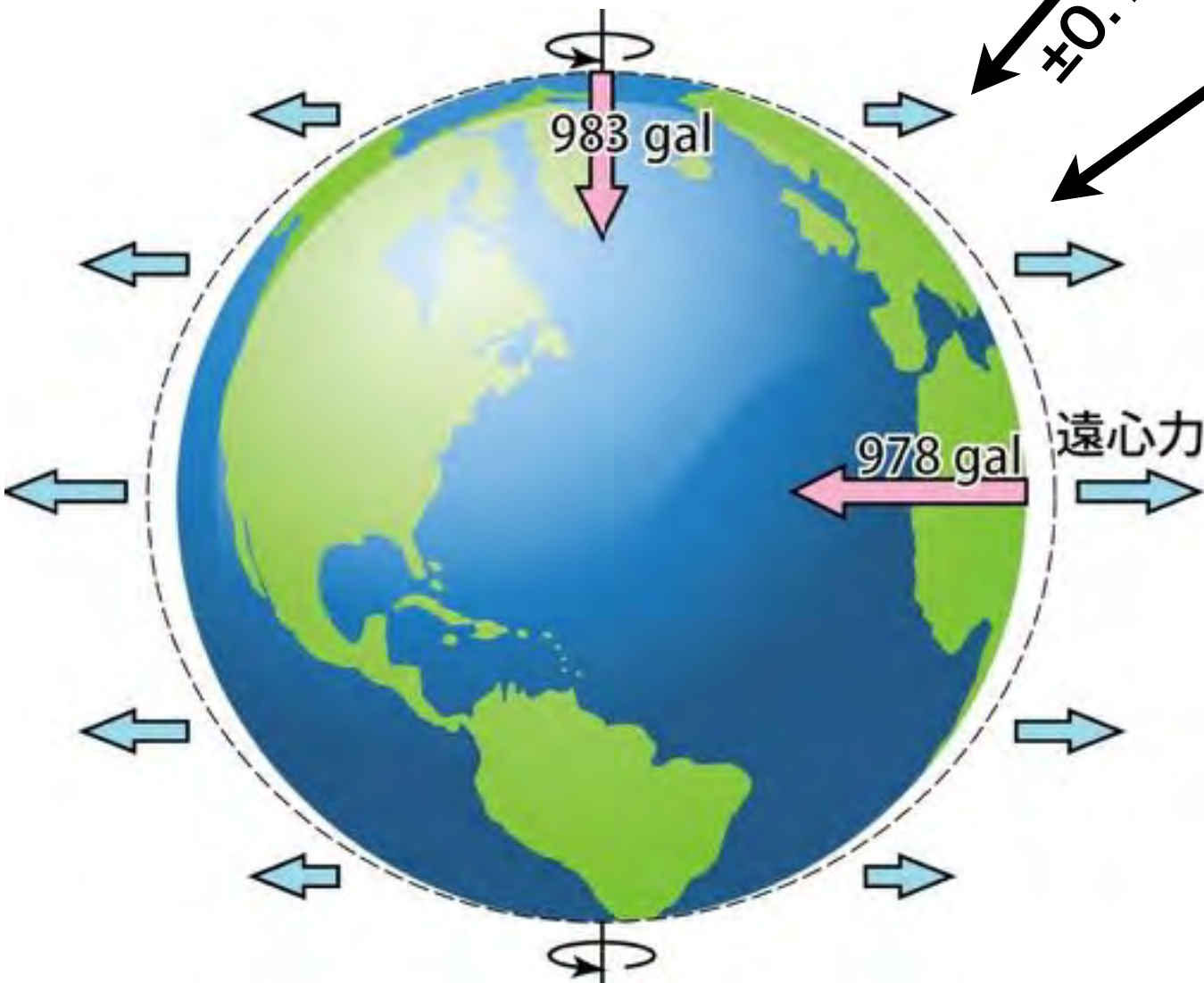
$5.974 \times 10^{24} \text{ kg}$

R: 地球の(平均)半径

6370.28 km

$$g = 9.8 \text{ m/s}^2 = 980 \text{ gal}$$

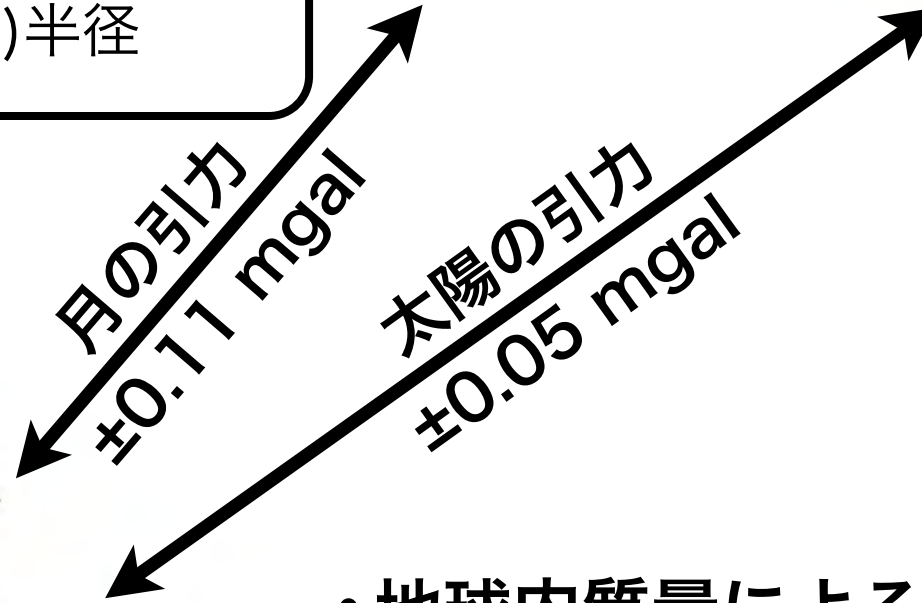
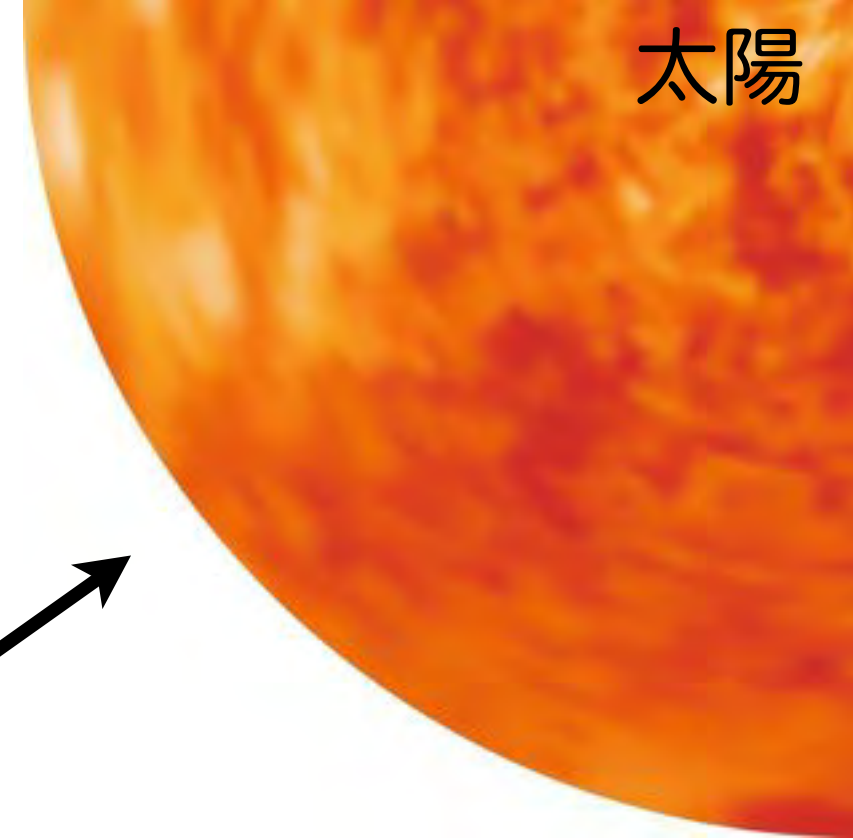
$$(1 \text{ gal} = 0.01 \text{ m/s}^2 = 1 \text{ cm/s}^2)$$



月



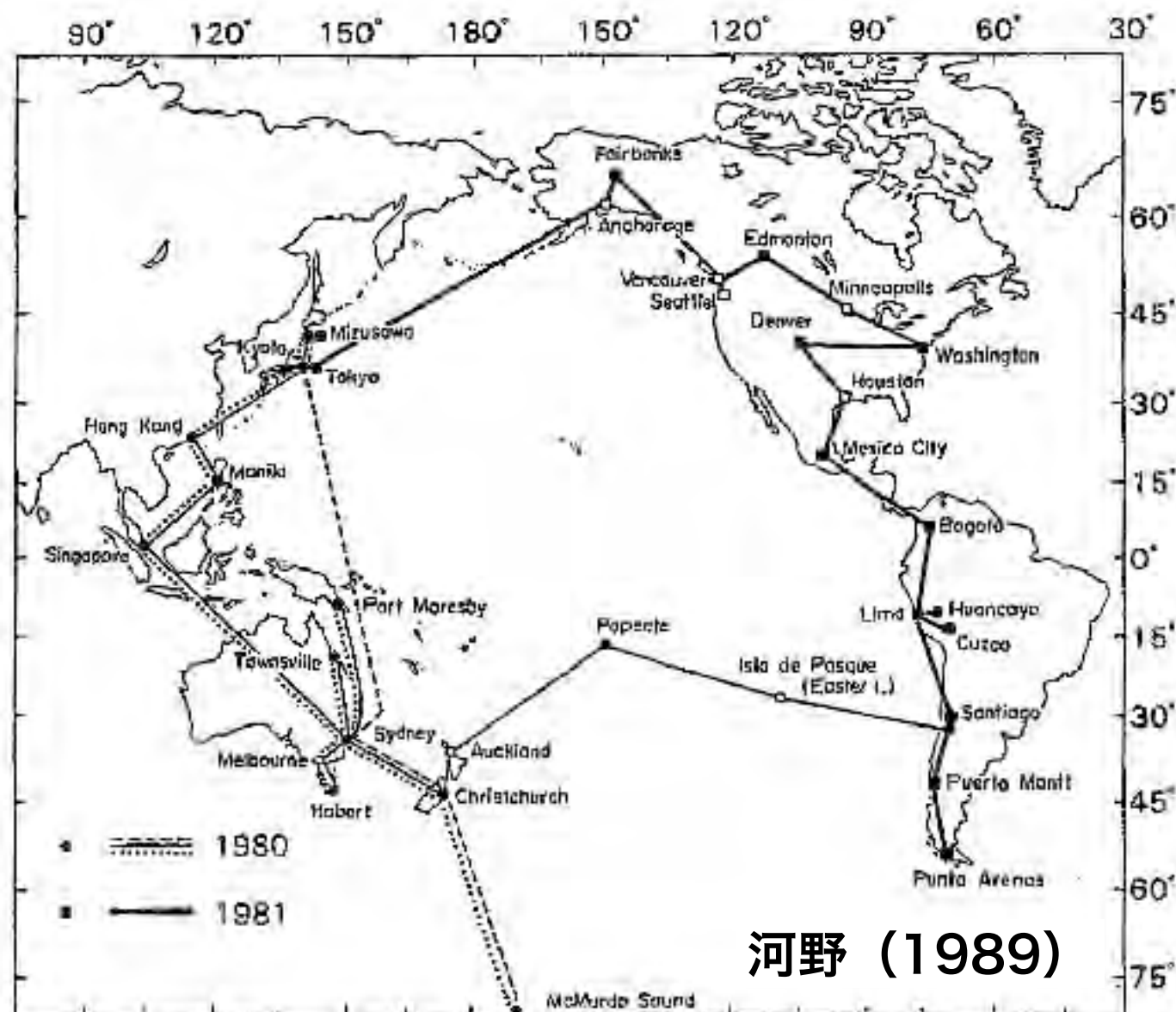
太陽



- 地球内質量による万有引力(+遠心力+潮汐力)のことを重力(重力加速度)と呼ぶ.
- 地球上の重力は, 約980 gal (9.8 m/s^2). 遠心力とそれによる地球の膨張により, 赤道と極とでの重力は, 約5 gal違う.
- 月と太陽の引力(潮汐)によっても重力は変化するが, その大きさは最大でも0.2 mgal程度.

緯度による重力の変化

河野 (1989)



河野 (1989)

図 1-2 環太平洋地域において図 1-3 に示す重力測定を行った都市 (中川ほか, 1983 より)。

地球上の重力は、約980 gal (9.8 m/s^2)。遠心力とそれによる地球の膨張により、赤道と極とでの重力は、約5 gal違う。

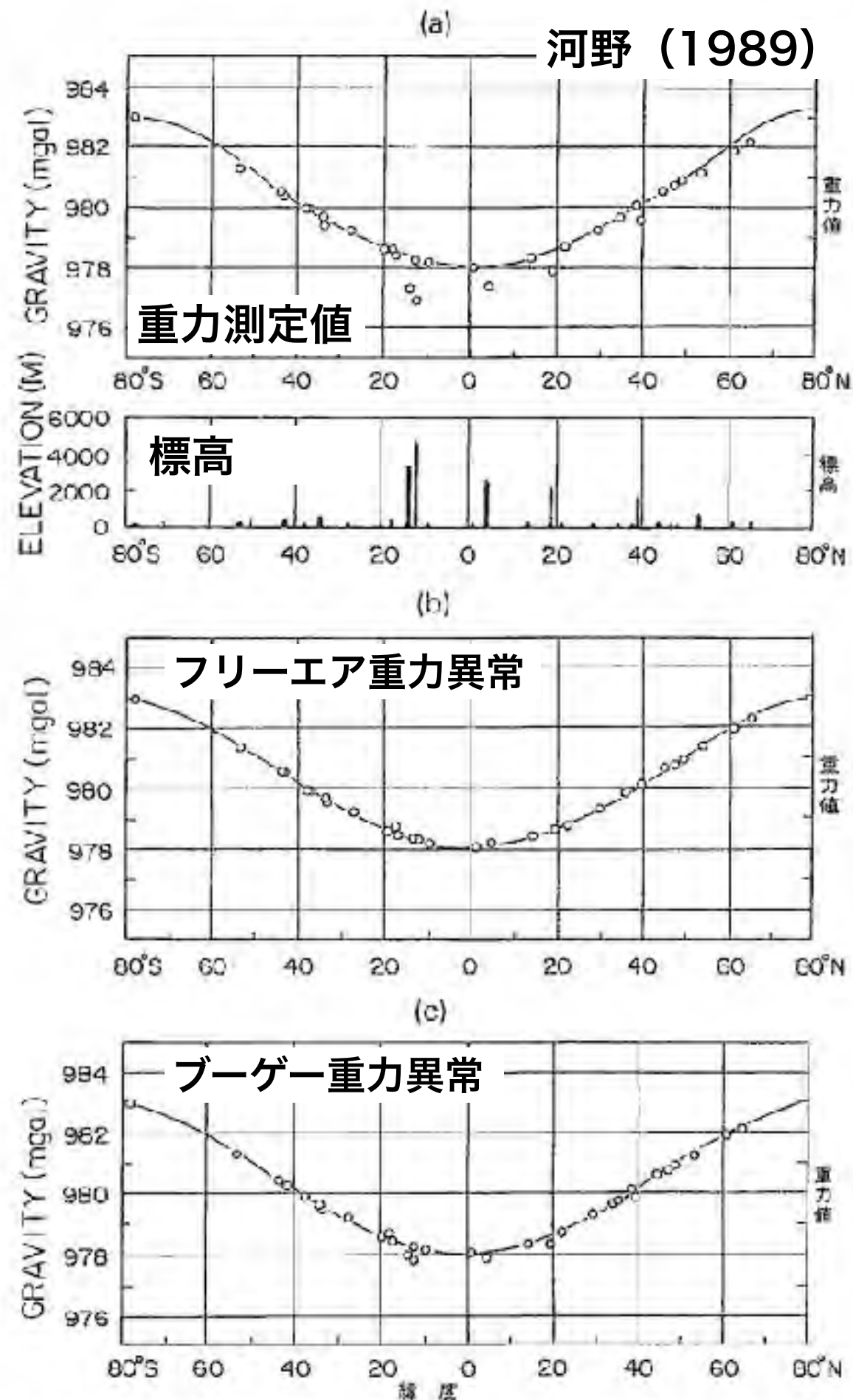


図 1-3 緯度による重力値の変化。測定点は図 1-2 に示した。(a) 重力測定値、下側の図は測定点の標高、(b) 測定値にフリーエア補正を加えたもの、(c) (b) の値にブーゲー補正を加えたもの。曲線は正規重力。

月・太陽の引力による重力変化

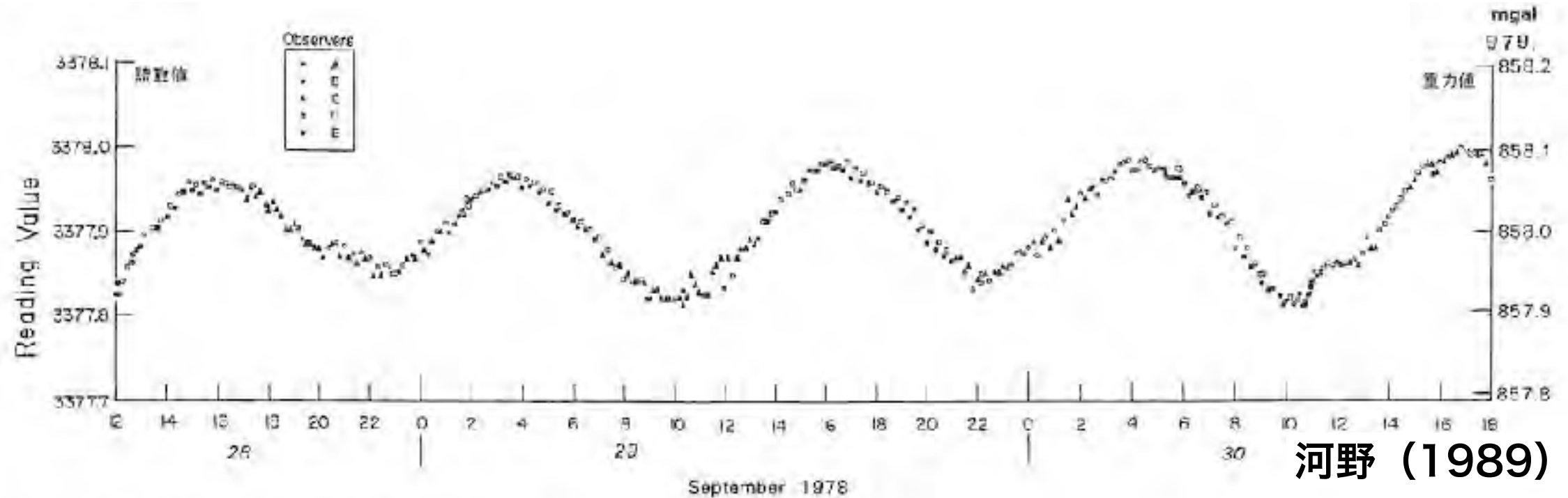
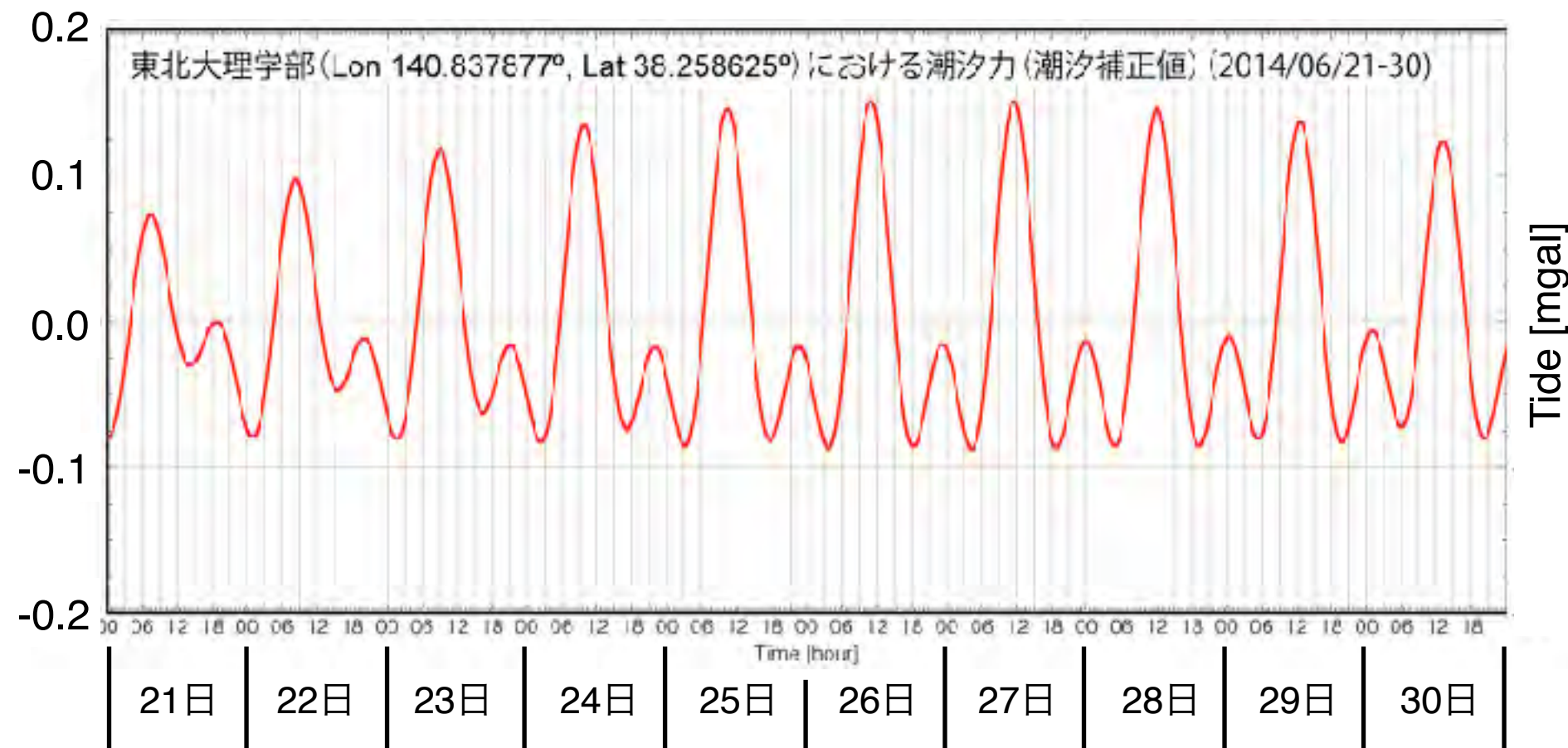


図 1-5 金沢大学における3日間における重力値の日変化の観測値 (地球潮汐)。観測値のばらつきは、測定者による記録読取りの個人差を表している。ここに示したように、天体の影響による重力変化は最大でも 0.2mgal である。

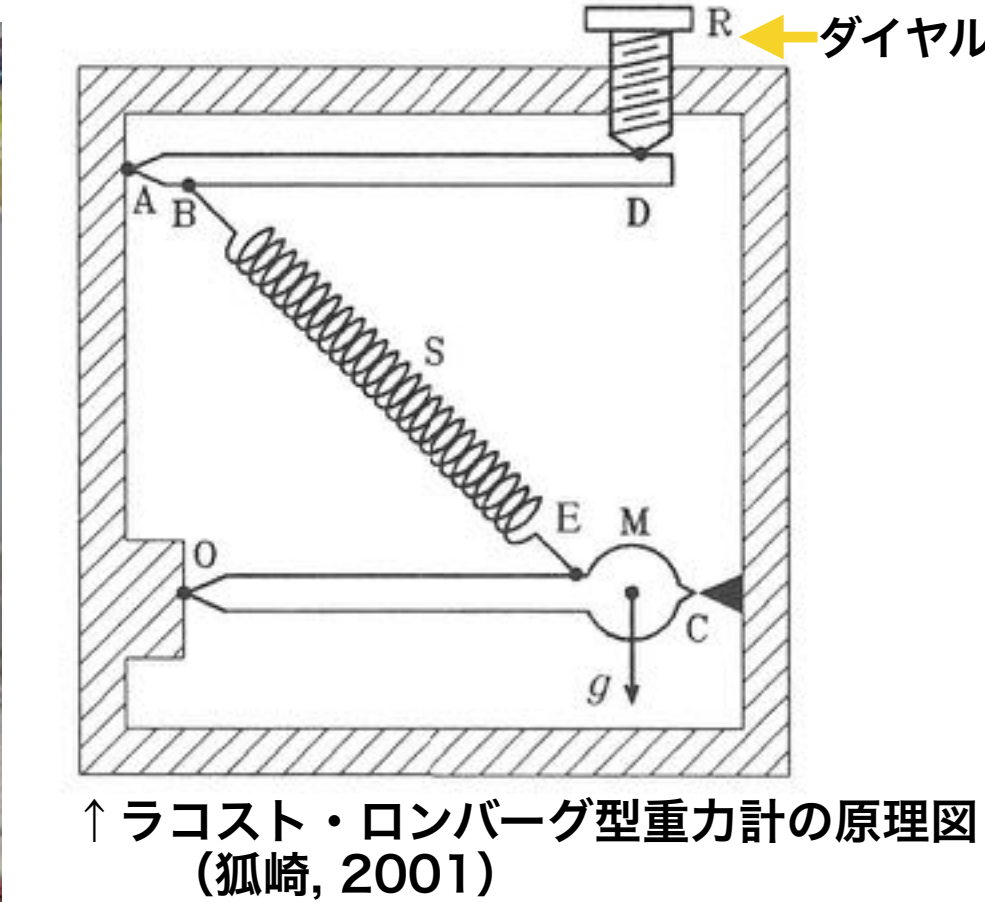


月と太陽の引力(潮汐)によっても重力は変化するが、その大きさは最大でも0.2 mgal程度。

測定日時・測定点の位置座標と標高が分かっているならば、計算によって求められる。

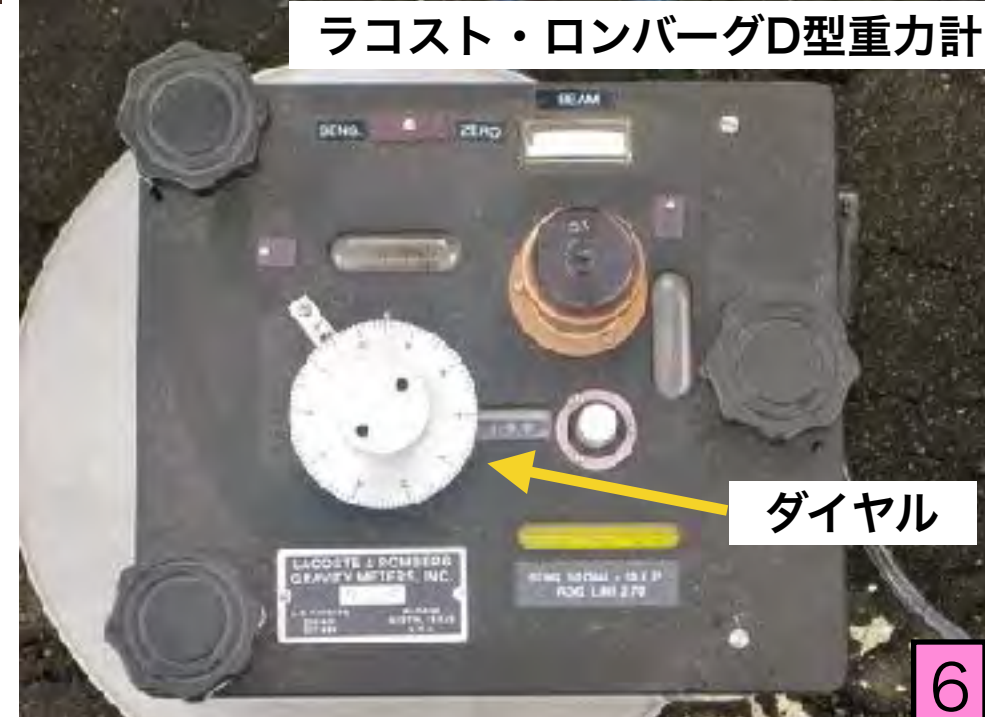
相対重力の測定の様子

D型の場合，最低目盛りが $1\text{ }\mu\text{gal}$
1Gの約 10^{-9} の精度で測定($g = 9.8\text{ m/s}^2 = 980\text{ gal}$)

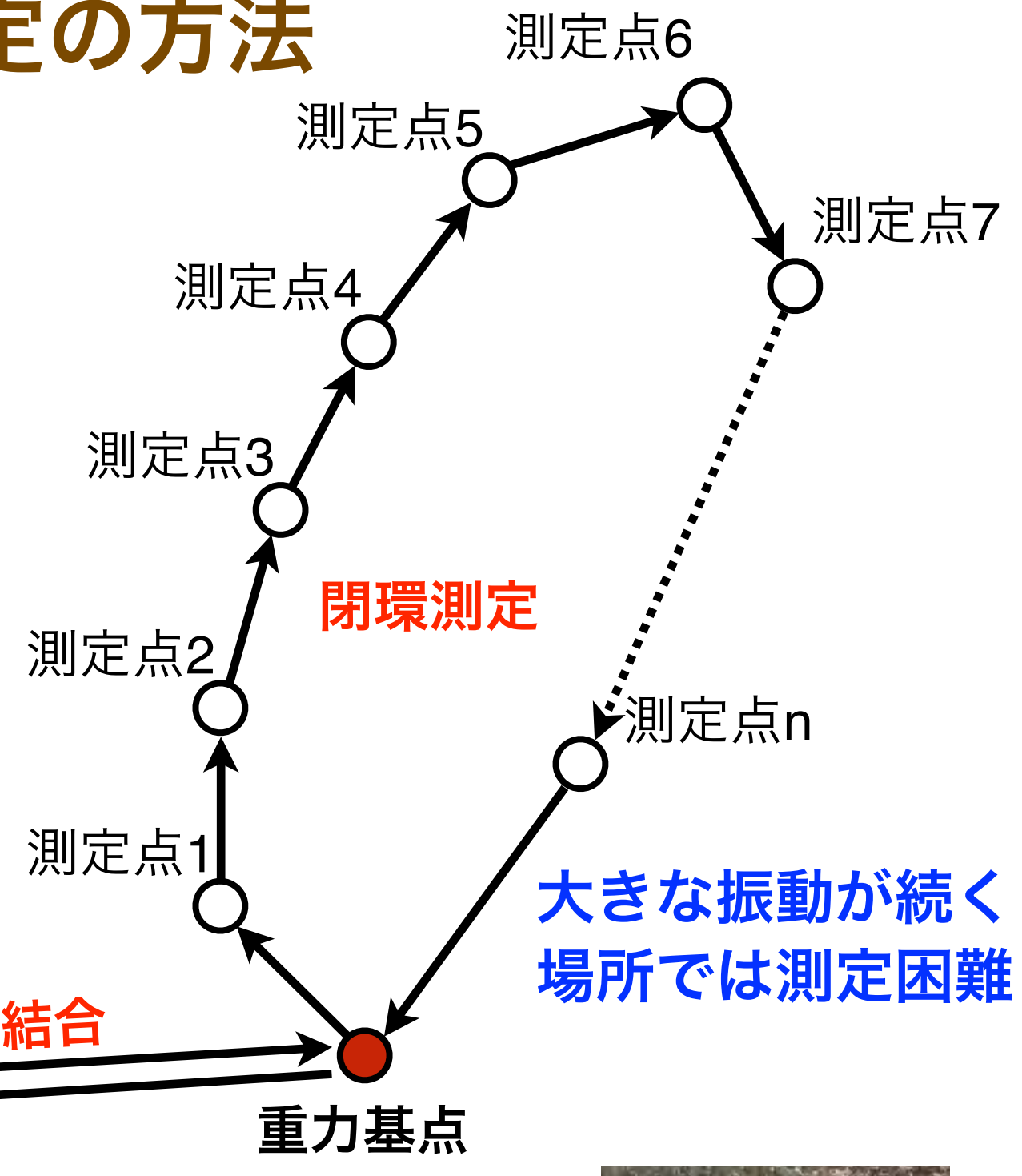


装置内部は約 $50\sim 60^{\circ}\text{C}$ に保たれている。
調査は1人でも可能だが，安全のため2人以上で行うことが多い。

重力計を水平に設置し，測定を行う。
重力測定時は，**測定点の位置座標・標高**も同時に
測量する（写真ではGPSを使用）。
潮汐補正・ドリフト補正を行うために，それぞれの
測定点で**測定日時を記録**しておく。



相対重力測定の方法

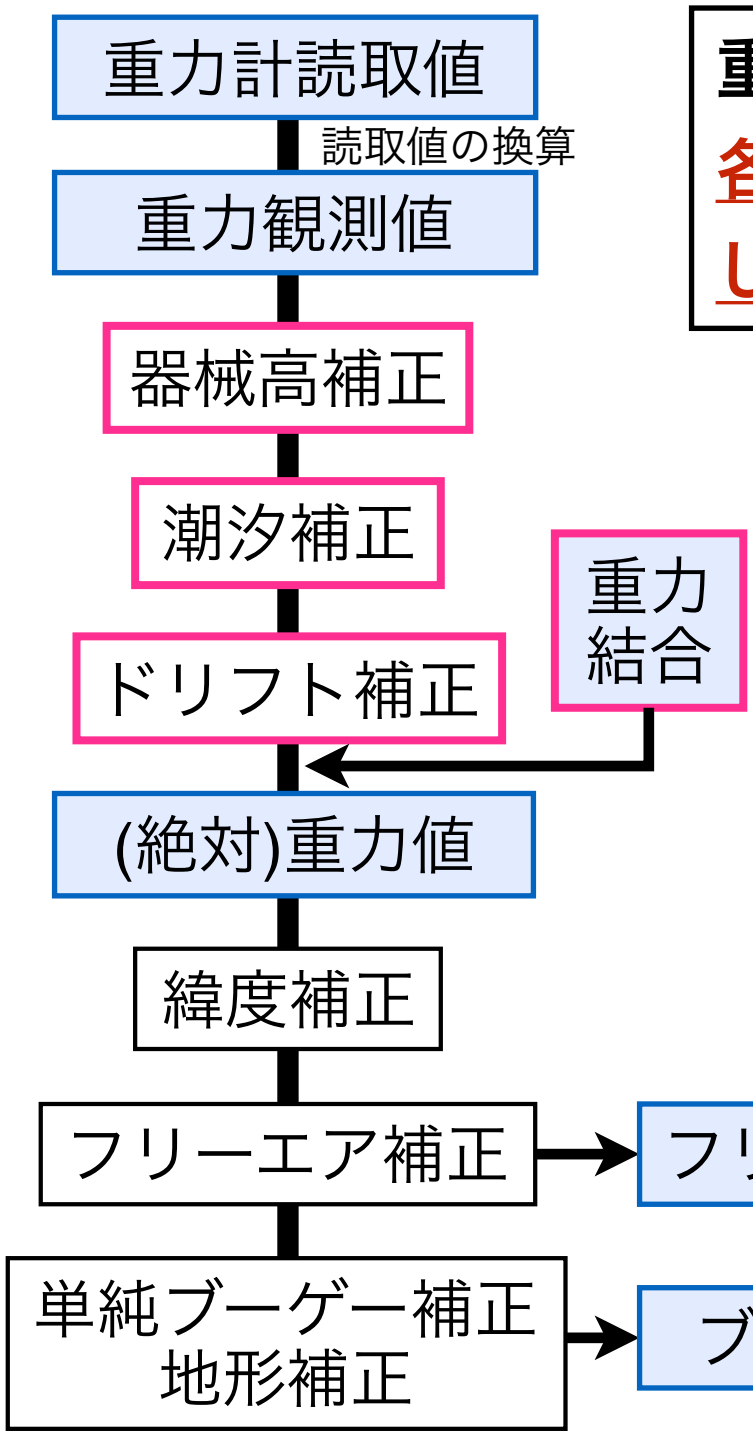


- ①毎日の測定においては、**最初と最後の測定は必ず同じ点**で測定を行う (**閉環測定**)。これによりドリフトを補正。
- ②絶対重力値が既知の点と重力基点で往復測定を行い、重力基点の絶対重力値を決定する (**重力結合**)。
→各測定点の絶対重力値も決定できる。



各種の重力補正

重力を測定することにより，地下構造を推定するためには，各測定点での特有の重力効果（高さ，潮汐，地形など）を除去して，同一条件で比較を行う必要がある。



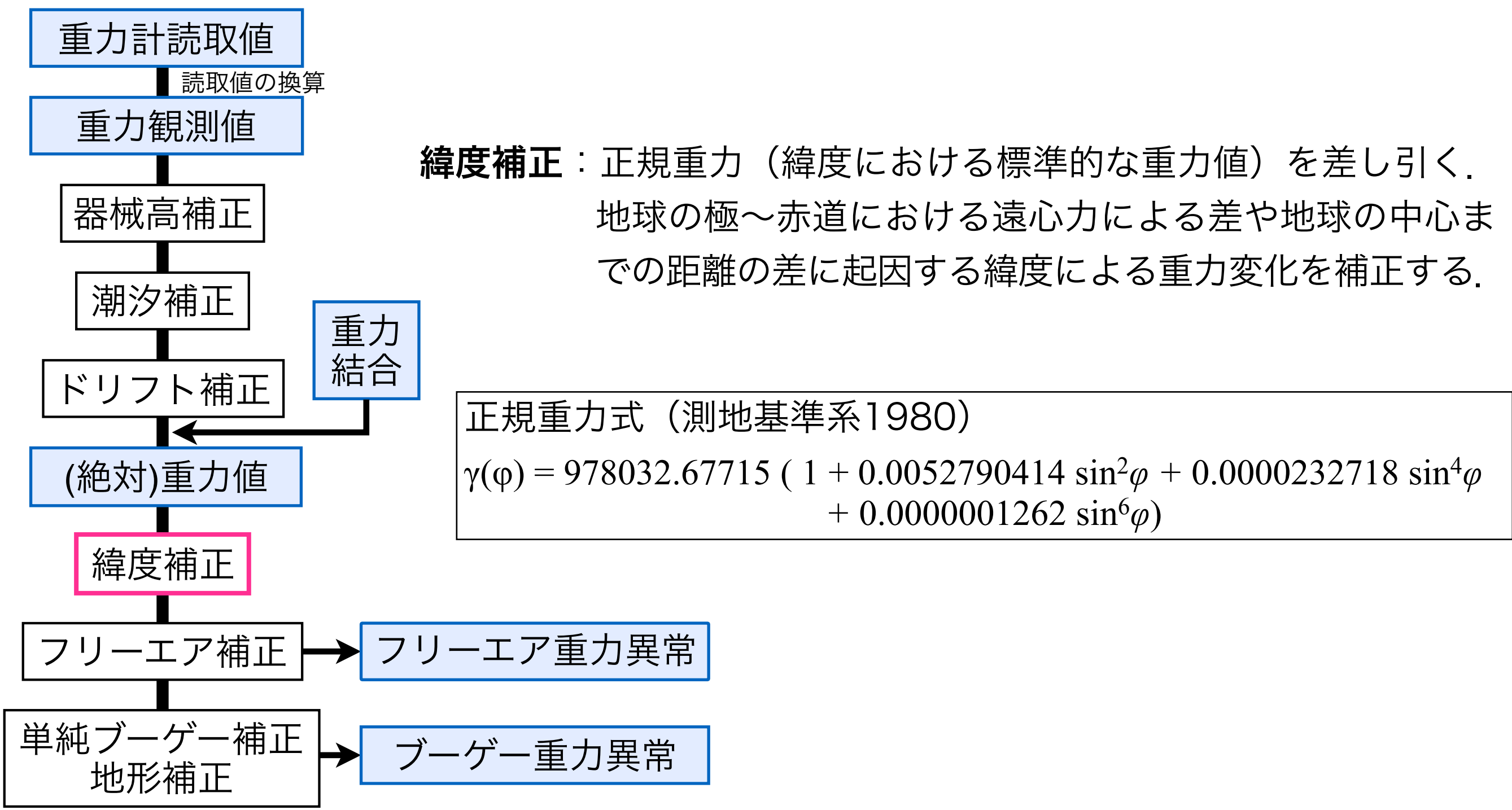
器械高補正：各測定地点において，重力計の高さ（重力計と地面との高さ）を補正する.

潮汐補正：月と太陽の引力を補正する．測定日時，測定位置により理論的に計算し補正する.

ドリフト補正：重力計は，同じ観測点を観測しても，同じ値にはならない（潮汐や器械高を補正しても）．バネの経年変化によると思われる読取値の長期的な変化を補正する.

重力結合：絶対重力値が既知である点との往復測定（相対重力測定）を行うことにより，基点の絶対重力値を決定する．これにより，相対重力測定を行った各測定点の絶対重力値を求めることができる.

各種の重力補正



ブーゲー重力異常

G : 万有引力定数, ρ : 仮定密度, h : 観測点標高, φ : 観測点の緯度

$$\Delta g'' = g - \gamma(\varphi) + \text{Atm} + 0.3086h - 2\pi G\rho h + Tr$$

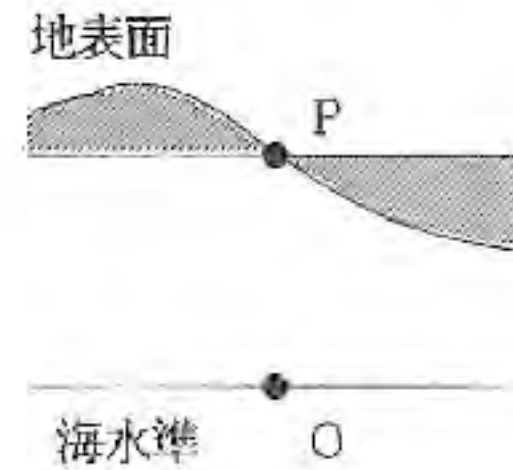
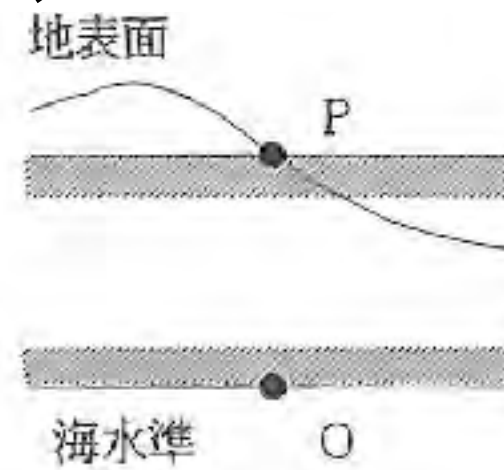
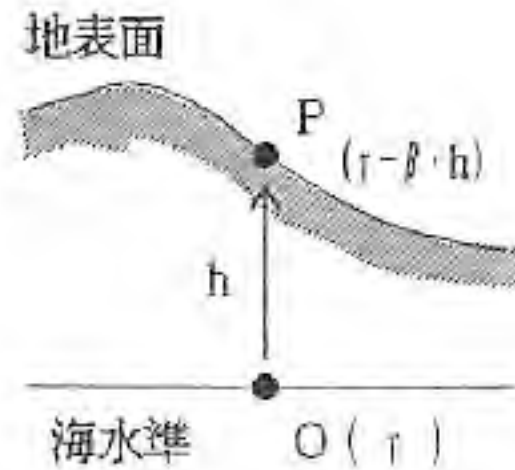
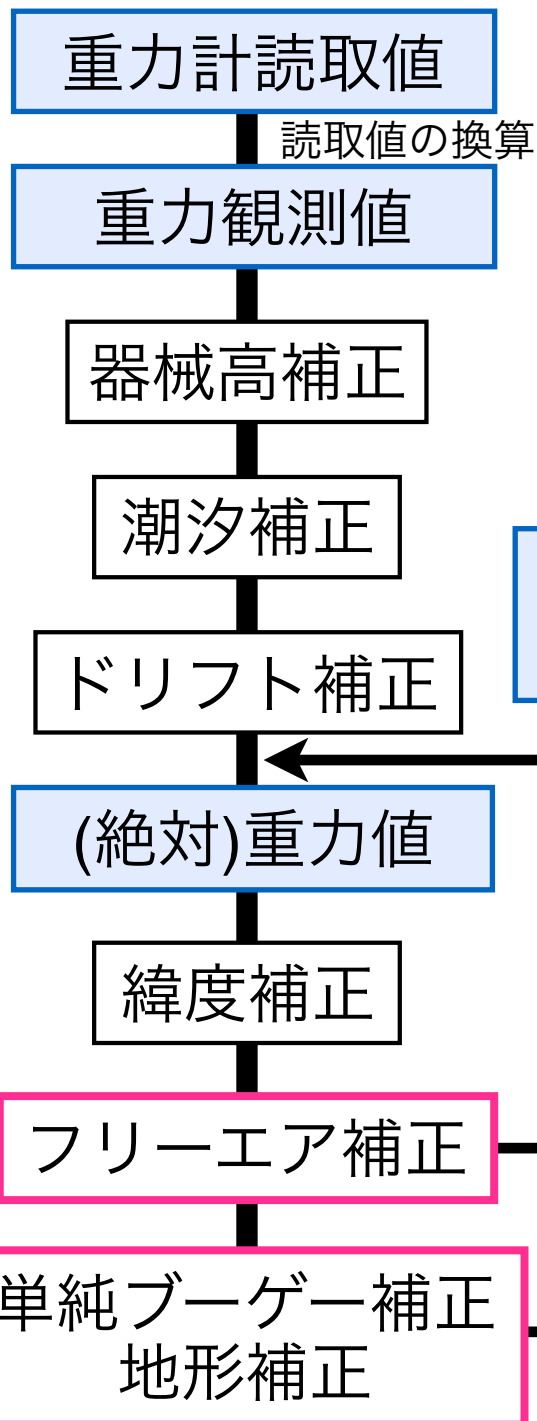
正規重力 大気補正 フリーエア補正 (単純)ブーゲー補正 地形補正

各種の重力補正

フリーエア補正

単純ブーゲ補正 (無限平板による補正)

地形補正



フリーエア補正：海水準から測定点までの高さによる影響を補正する。フリーエア勾配 = 0.3086 [mgal/m] 。

単純ブーゲ補正：測定点から海水準までに存在する平板状の地殻物質による重力効果を補正する。 $-2\pi G\rho h$ で計算可能。 **仮定密度 ρ が必要**，地形（標高）と最も相関のない密度を使うことが多い。

地形補正：測定点周辺の地形による重力効果を補正する。（次ページ以降でもう少し詳しく説明します。）

G : 万有引力定数, ρ : 仮定密度, h : 観測点標高, φ : 観測点の緯度

ブーゲー重力異常

$$\Delta g'' = g - \underbrace{\gamma(\varphi)}_{\text{正規重力}} + \underbrace{Atm}_{\text{大気補正}} + \underbrace{0.3086h}_{\text{フリーエア補正}} - \underbrace{2\pi G\rho h}_{\text{(単純)ブーゲー補正}} + \underbrace{Tr}_{\text{地形補正}}$$

ブーゲー重力異常と地形補正

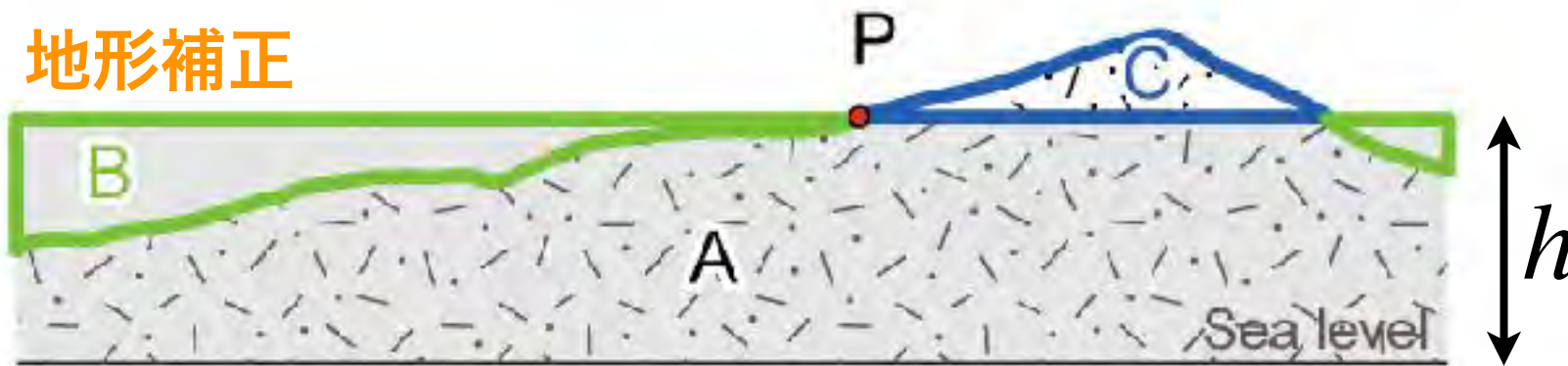
G : 万有引力定数, ρ : 仮定密度, h : 観測点標高, φ : 観測点の緯度

ブーゲー重力異常

$$\Delta g'' = g - \underbrace{\gamma(\varphi)}_{\text{正規重力}} + \underbrace{Atm}_{\text{大気補正}} + \underbrace{0.3086h}_{\text{フリーエア補正}} - \underbrace{2\pi G\rho h}_{\text{(単純)ブーゲー補正}} + \underbrace{Tr}_{\text{地形補正}}$$

重力は高さに非常に敏感（1mで0.3086 mgal違う）なので、
測定点の標高を正確に測量しておく必要がある。

地形補正



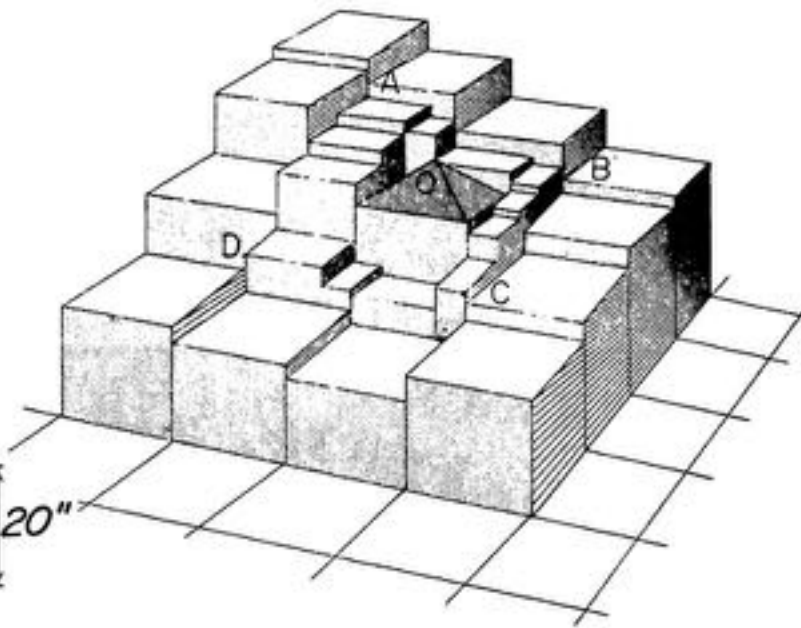
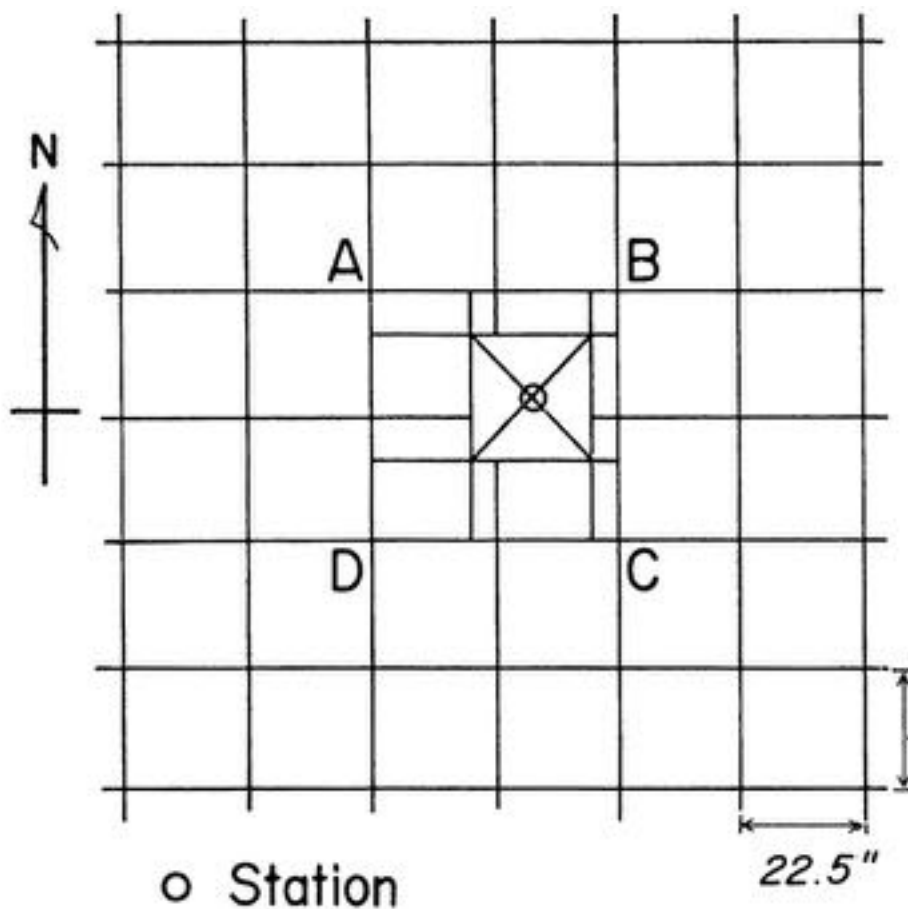
ブーゲー重力異常は、
地下地質の密度差のみ
を反映している。

A: もともと地質がある。密度 ρ で正しく補正できている。

B: 密度 ρ で無限平板の補正をしてしまった。過剰補正。

C: 無限平板の補正で補正できていない部分。未補正。

ブーゲー重力異常と地形補正

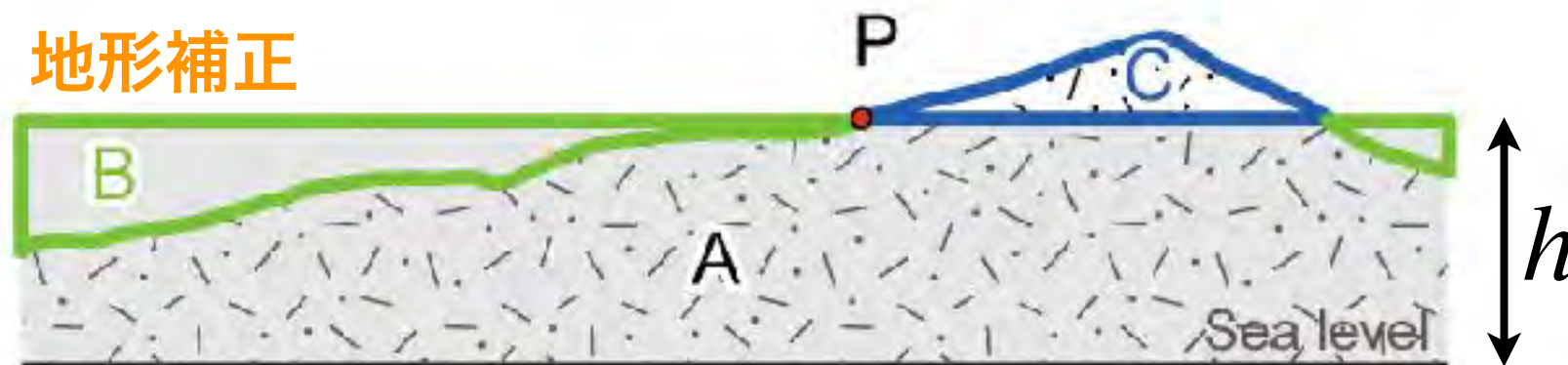


河野・久保(1983)

地形補正量の計算は、
250mDEM, 50mDEM
などを用いて計算される。

Fig. 3. Schematic view of topography around the measurement station (0) modeled by pentahedrons and rectangular prisms. A region surrounded by A to D corresponds to the "near" sub-region.

地形補正



ブーゲー重力異常は、
地下地質の密度差のみ
を反映している。

A: もともと地質がある。密度 ρ で正しく補正できている。

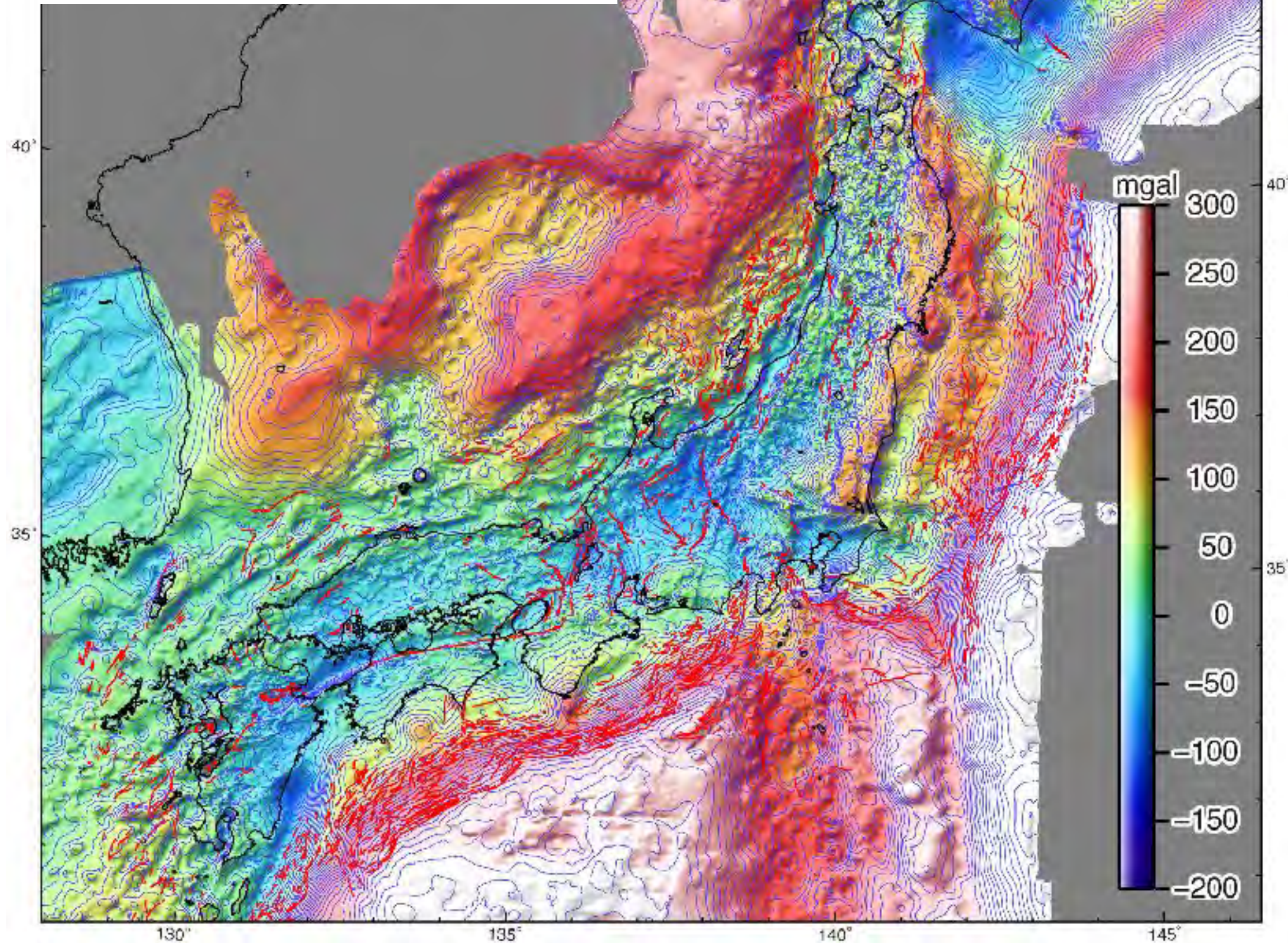
B: 密度 ρ で無限平板の補正をしてしまった。過剰補正。

C: 無限平板の補正で補正できていない部分。未補正。

日本およびその周辺の ブーゲー重力異常

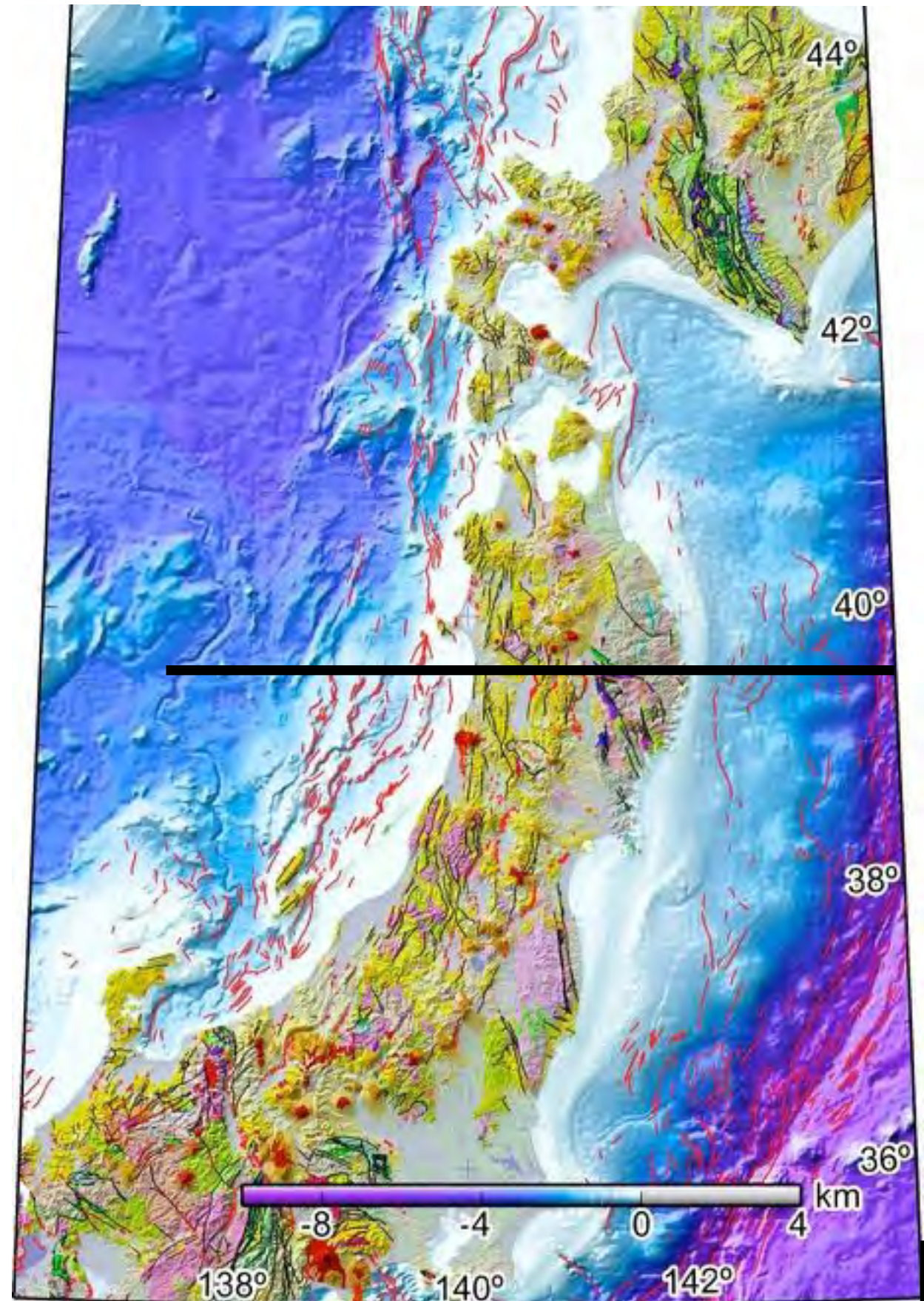
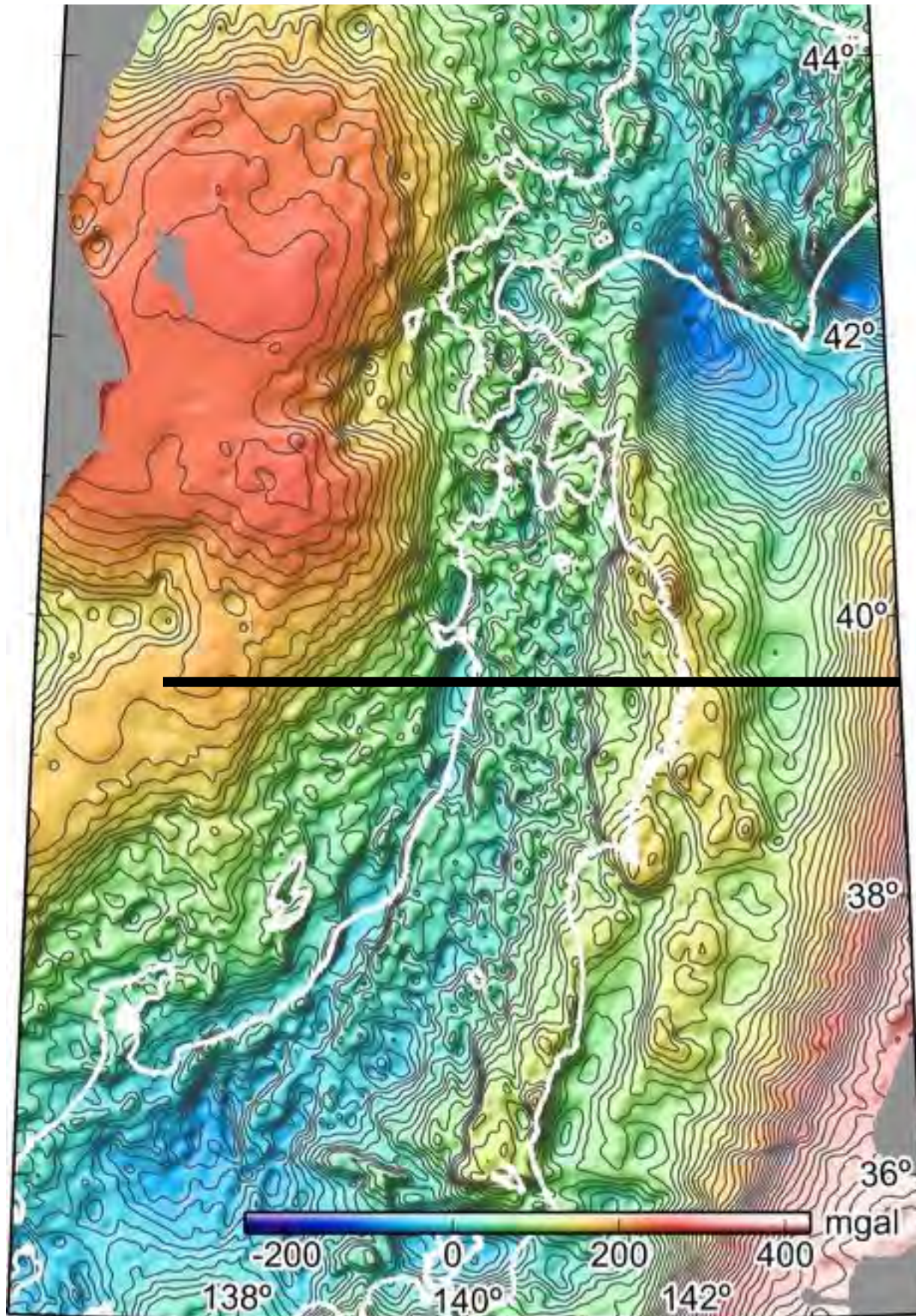
データ；駒澤ほか（2004）

中田・今泉（2002）

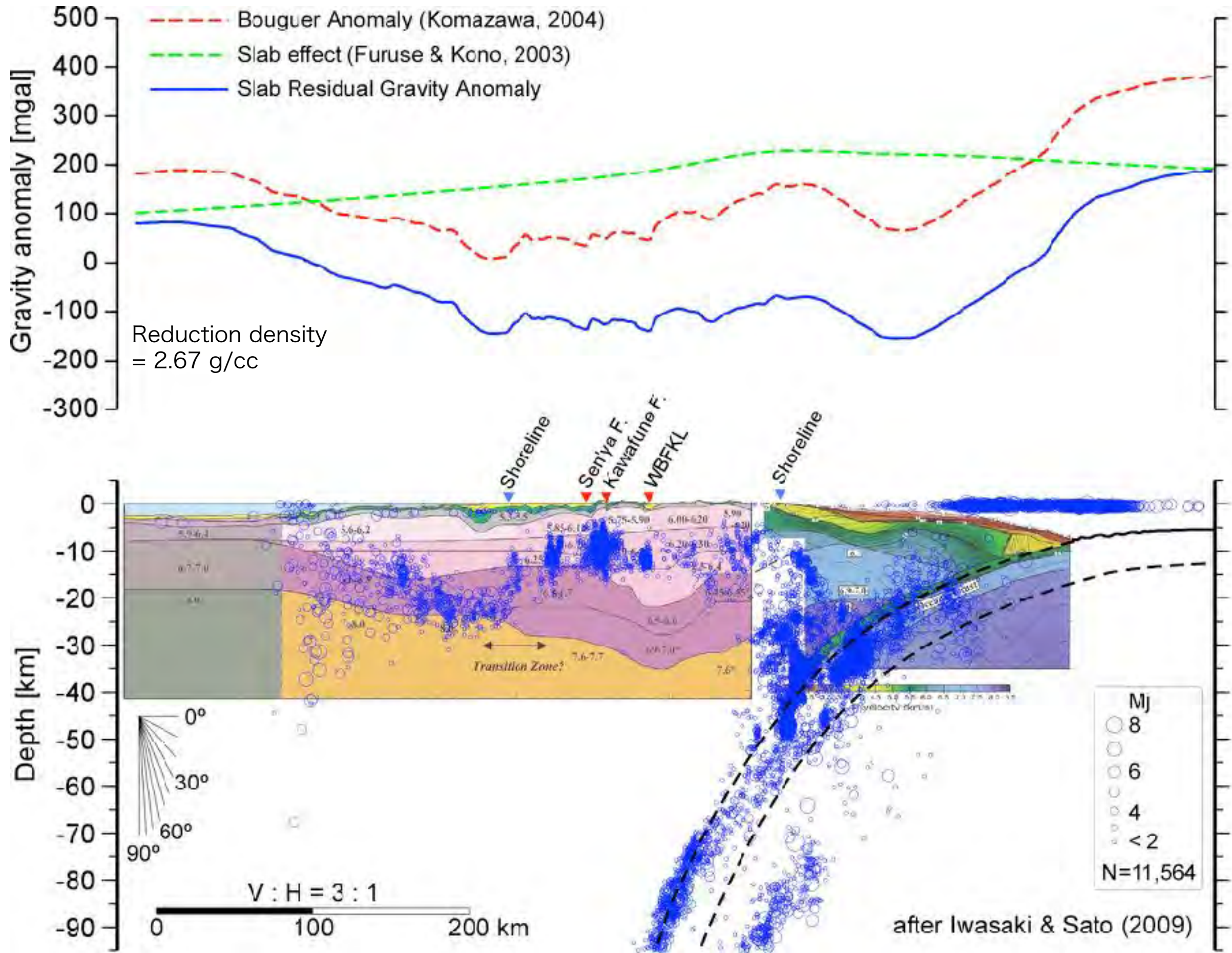


東北日本弧のブーゲー重力異常と 地形・地質との比較

重力データ；駒澤ほか（2004）
地質データ；GSJ, AIST (ed.) (2015)
地形データ；海域, J-EGG 500 m DEM
陸域, 国土地理院 250 m DEM

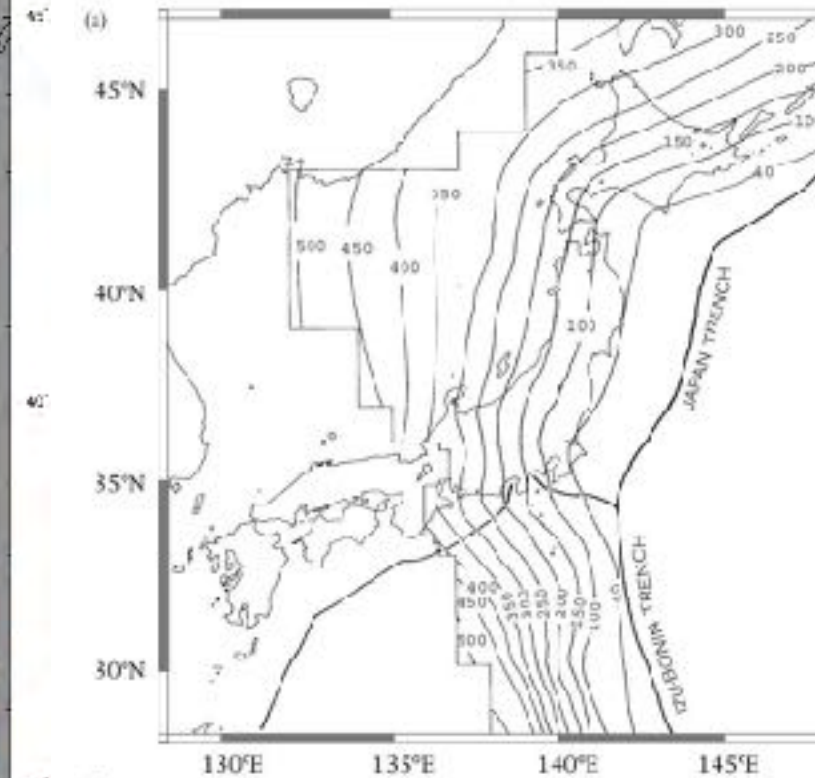
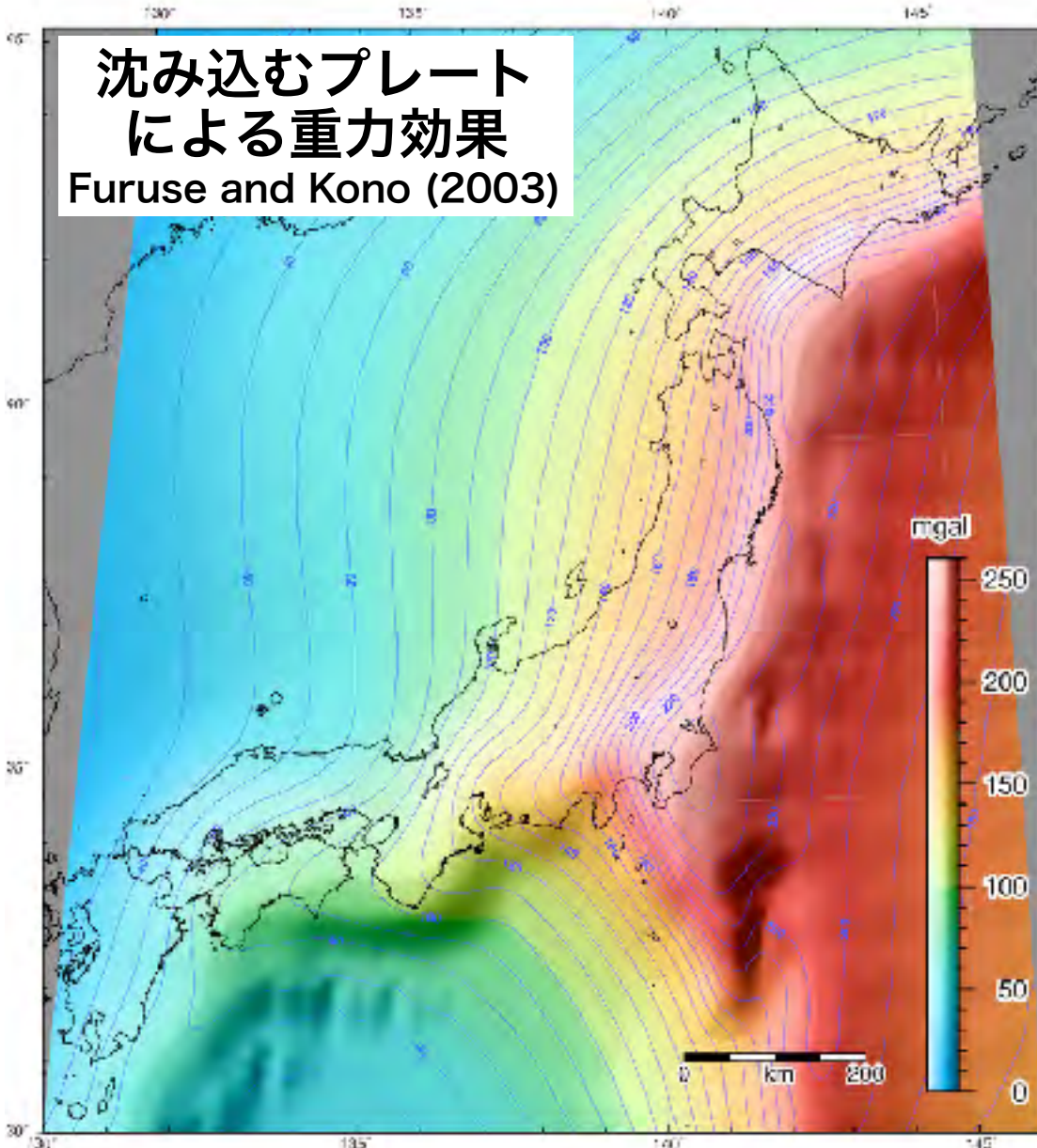


東北日本弧を横断するブーゲー重力異常と地殻構造

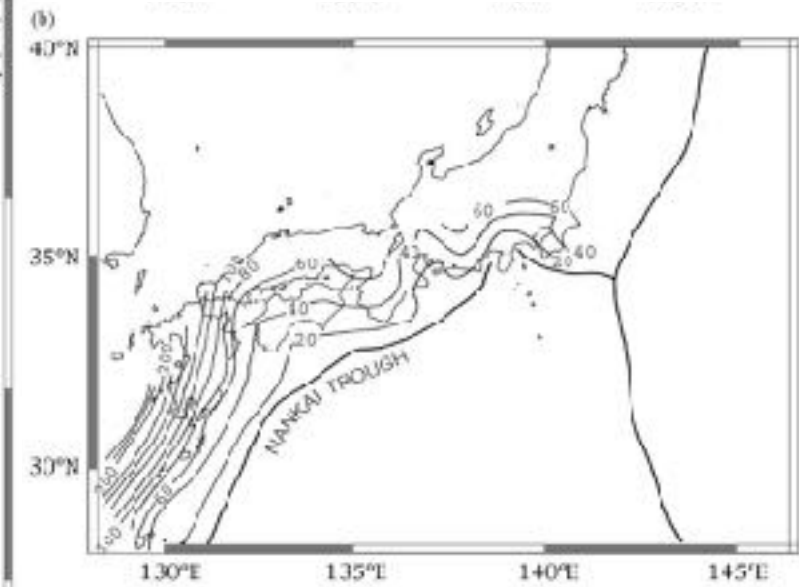


沈み込むプレートによる重力効果

沈み込むプレート
による重力効果
Furuse and Kono (2003)

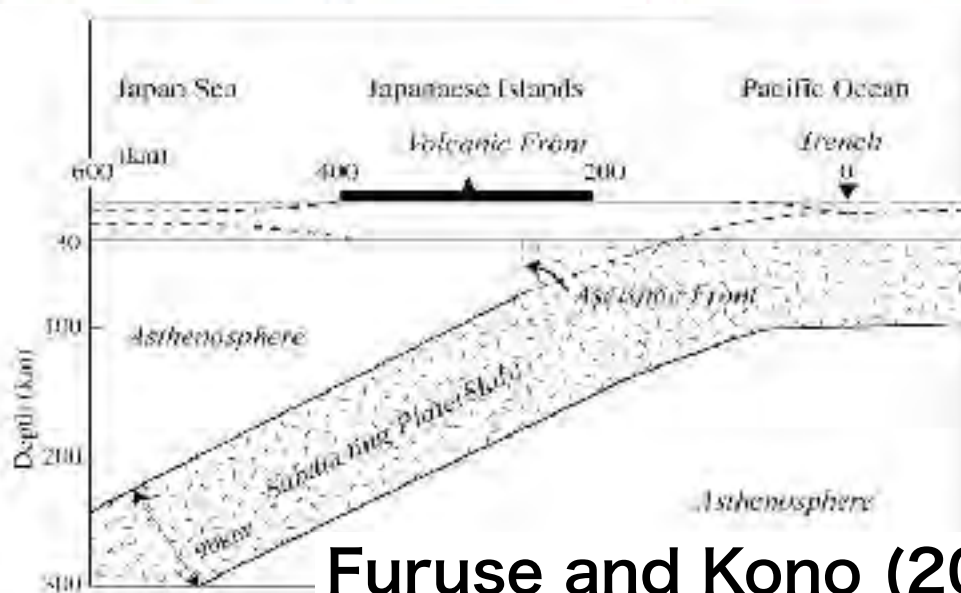


Furuse and Kono (2003)



↑ 太平洋プレートとフィリピン海プレートの形状

沈み込むプレートによる重力効果も地殻
浅部の構造を解析したい場合には，取り
除く必要がある． 理論的な計算値を基に
取り除くか， 長波長成分として取り除く．



Furuse and Kono (2003)

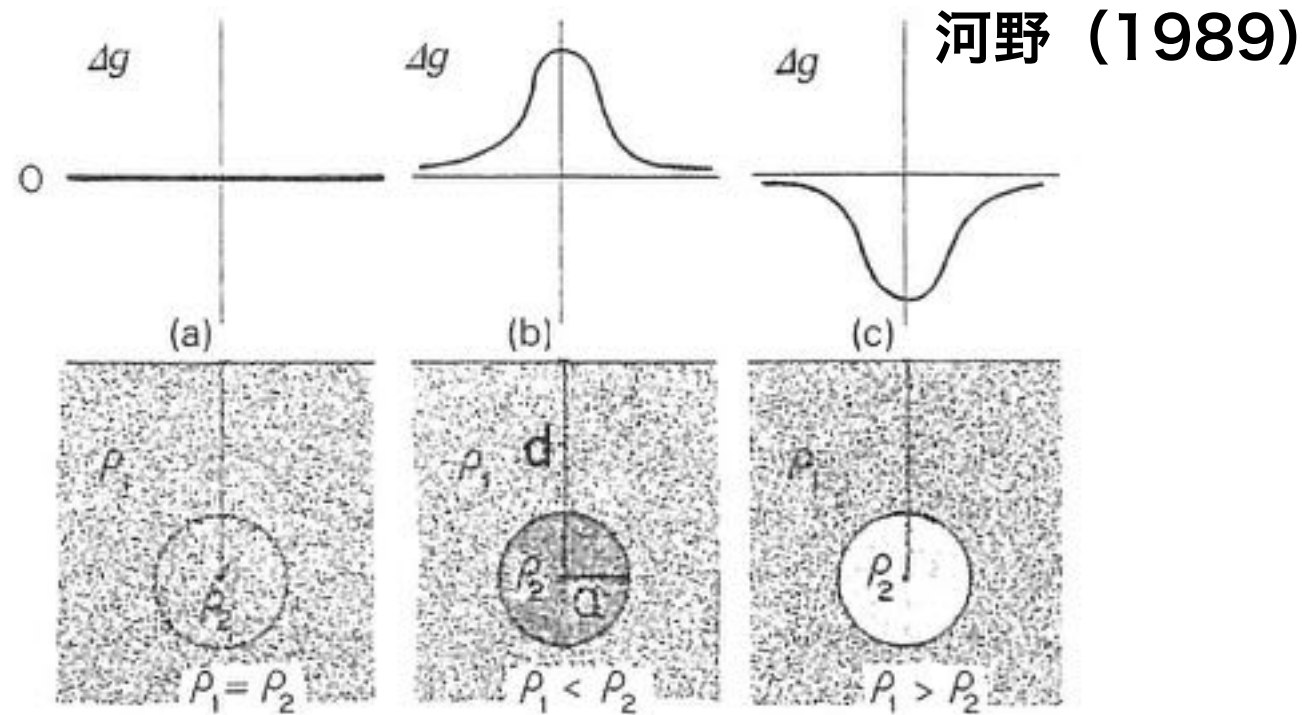


図 2-1 (a) 密度一様な構造による重力異常. (b) その中に球形の物体がある場合の重力異常 ($\rho_1 < \rho_2$). (c) ($\rho_1 > \rho_2$).

ブーゲー重力異常の密度構造解析①

- 地下に密度の高い物質があれば, 正の異常
- 地下に密度の低い物質があれば, 負の異常

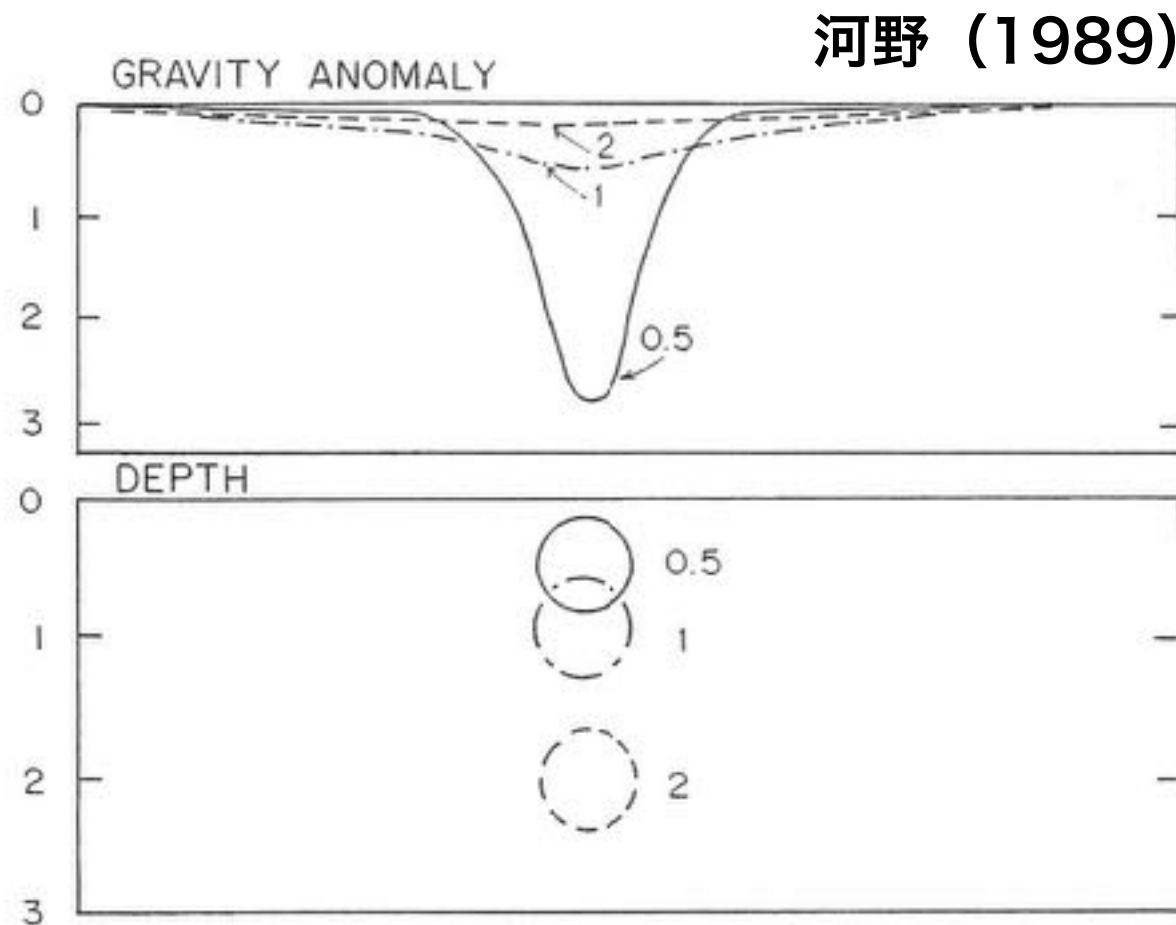
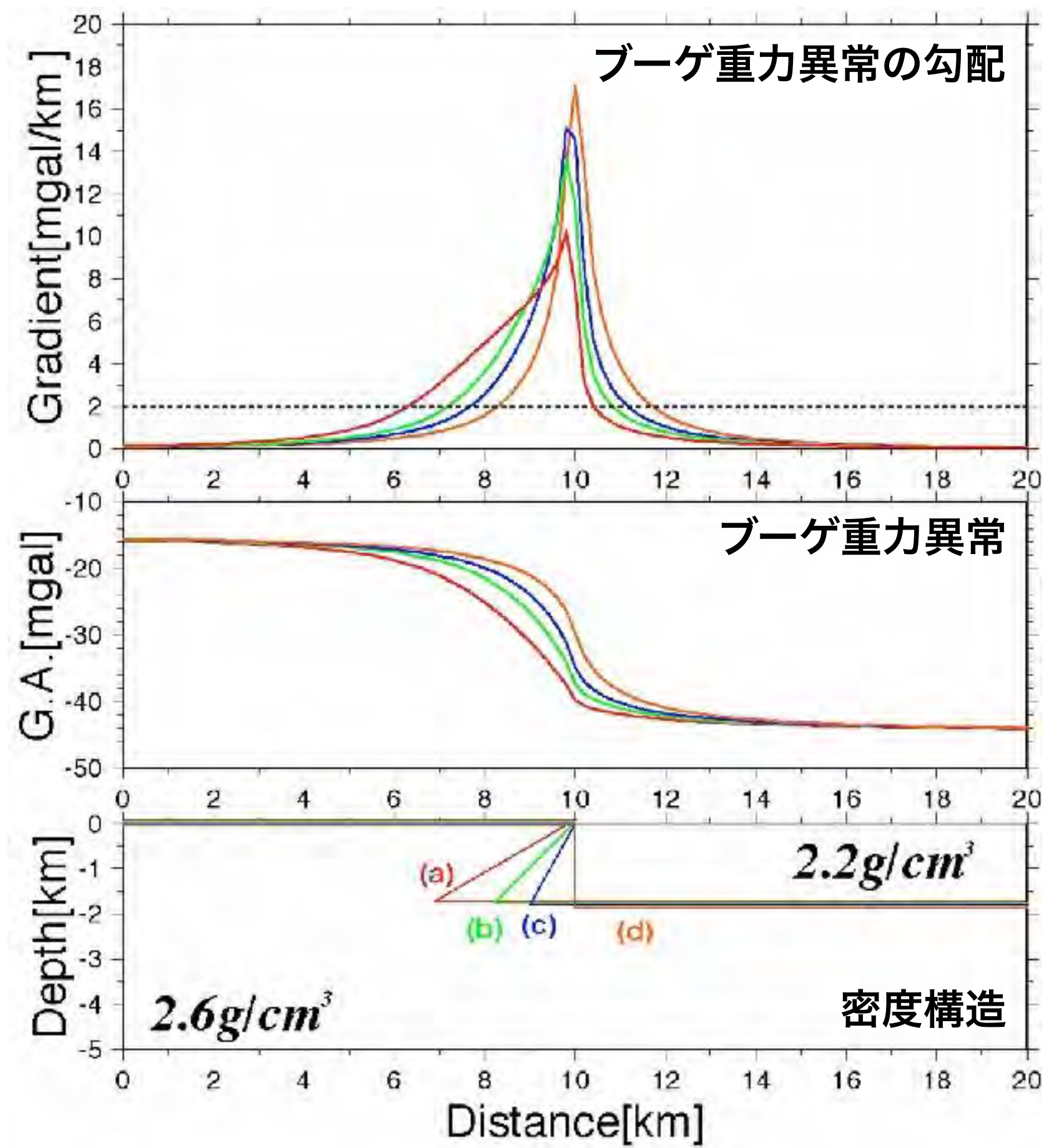


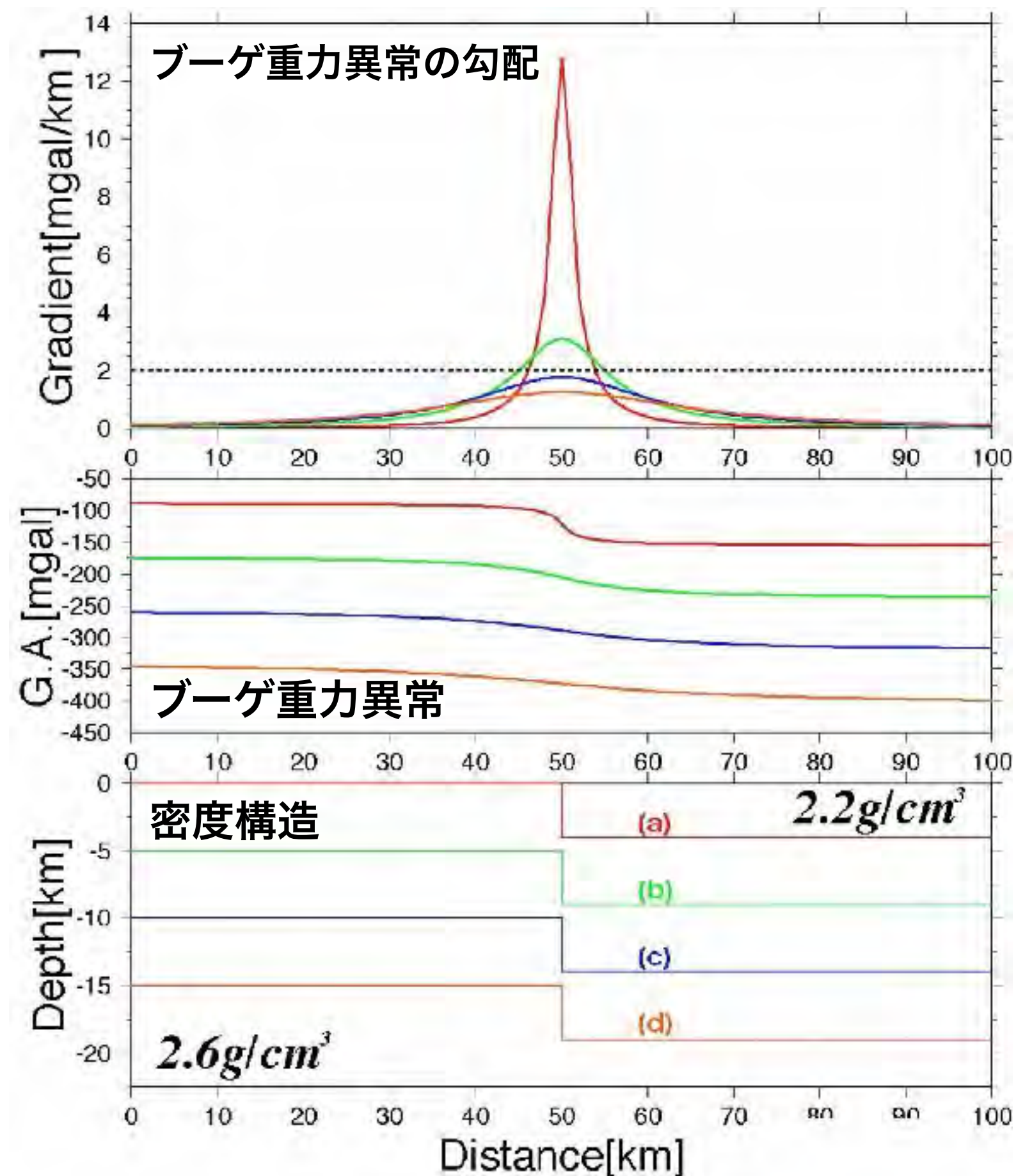
図 2-2 球の半径および周囲の岩石との密度差を一定として深さを変えた時, 地表で観測されるべき重力異常の強さとその分布. 密度差 0.4gr.cm^{-3} , 球の半径 0.4km の場合.

- 密度差のある物質までの距離が近ければ, 短波長で振幅の大きい重力変化
- 遠ければ, 長波長, 振幅も小さくなる

ブーゲー重力異常の密度構造解析②



ブーゲー重力異常の密度構造解析③



重力異常は唯一の密度構造解を持たない

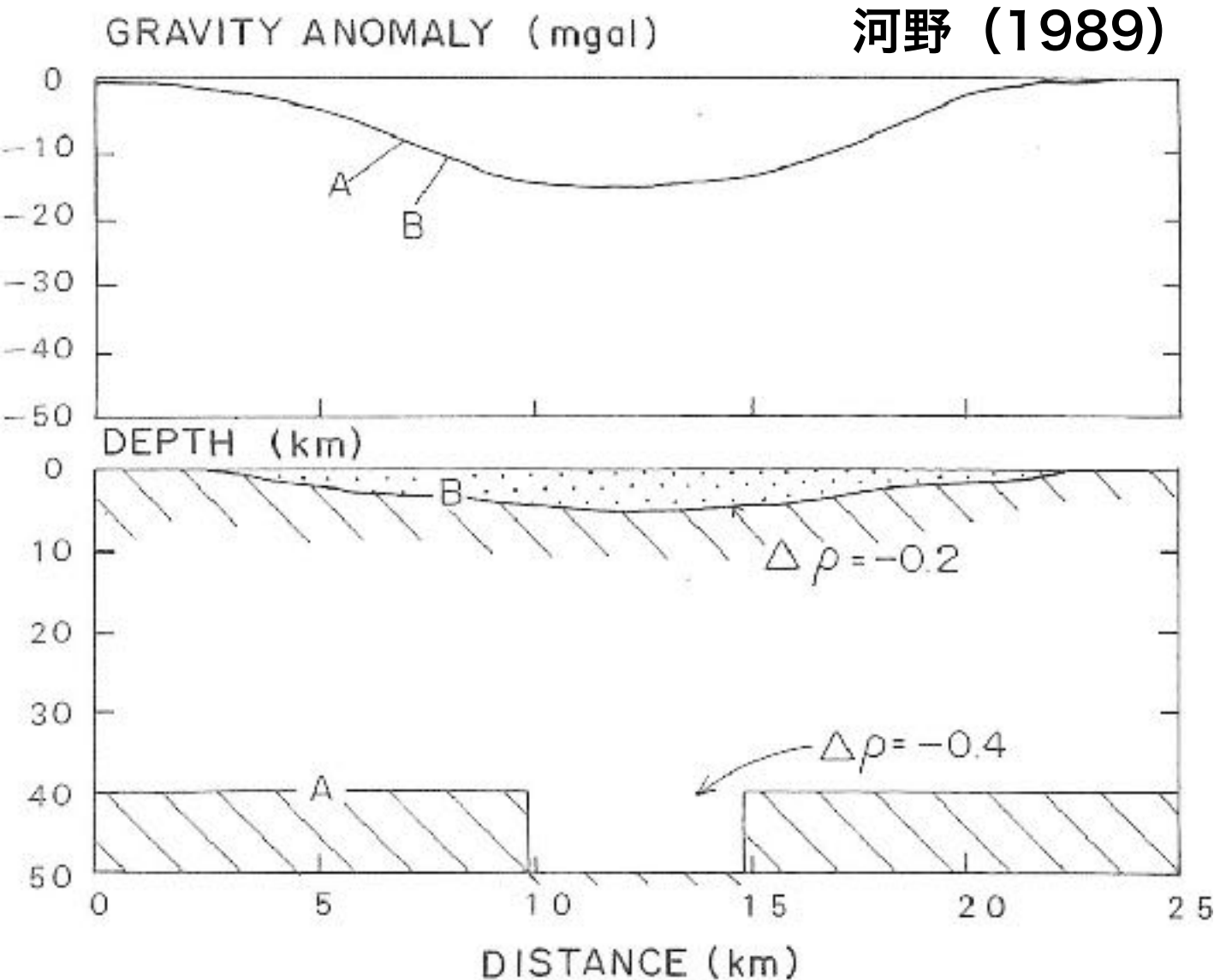
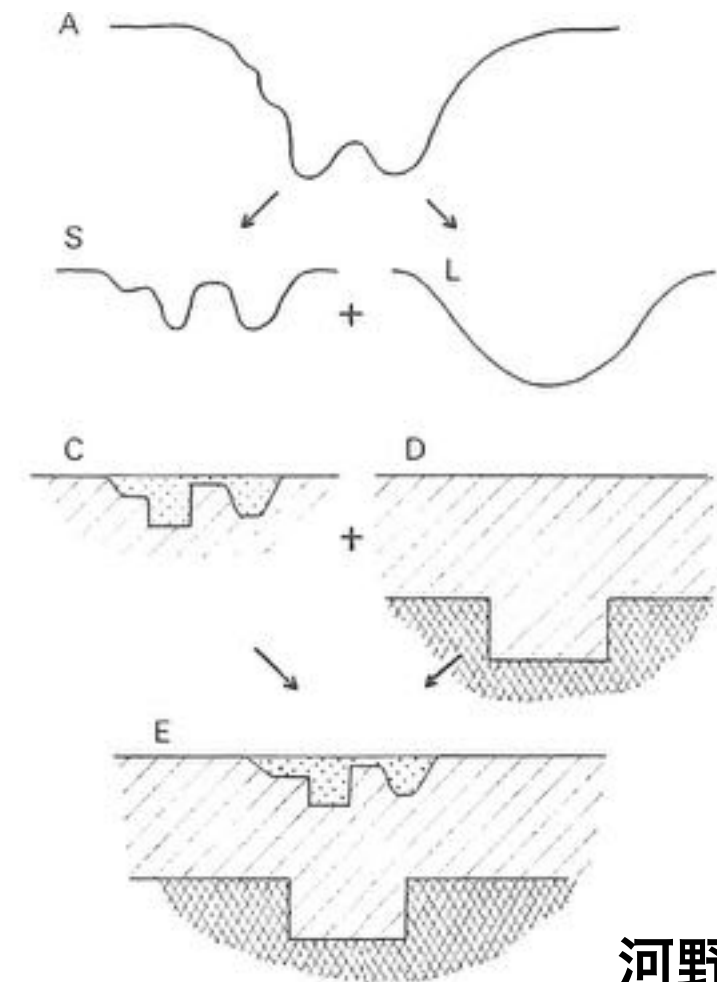


図2-14 長波長の重力異常分布を説明するいくつかのモデル。A: 深部に原因があるとした場合の一つの解。B: 浅い所に原因があるとした時の一つの解。どちらのモデルも、観測値を十分説明できる。



河野 (1989)

図2-16 重力異常の加算性。観測された重力異常はさまざまな地下構造による重力異常を加え合せたものとなる。A: 観測された重力異常分布。B: 観測値を短波長成分Sと長波長成分Lとに分離できたとする。C: 短波長成分を説明する一つの地下構造。D: 長波長成分を説明する一つの地下構造。E: 観測値Aを説明できる一つの地下構造。

**ブーゲー重力異常の密度構造解析のみからでは、
唯一の構造解を導き出すことはできない。**
**他のデータ（地質や反射法地震探査データなど）と
組み合わせる（拘束条件を与える）必要がある。**

伊那谷の重力プロファイル

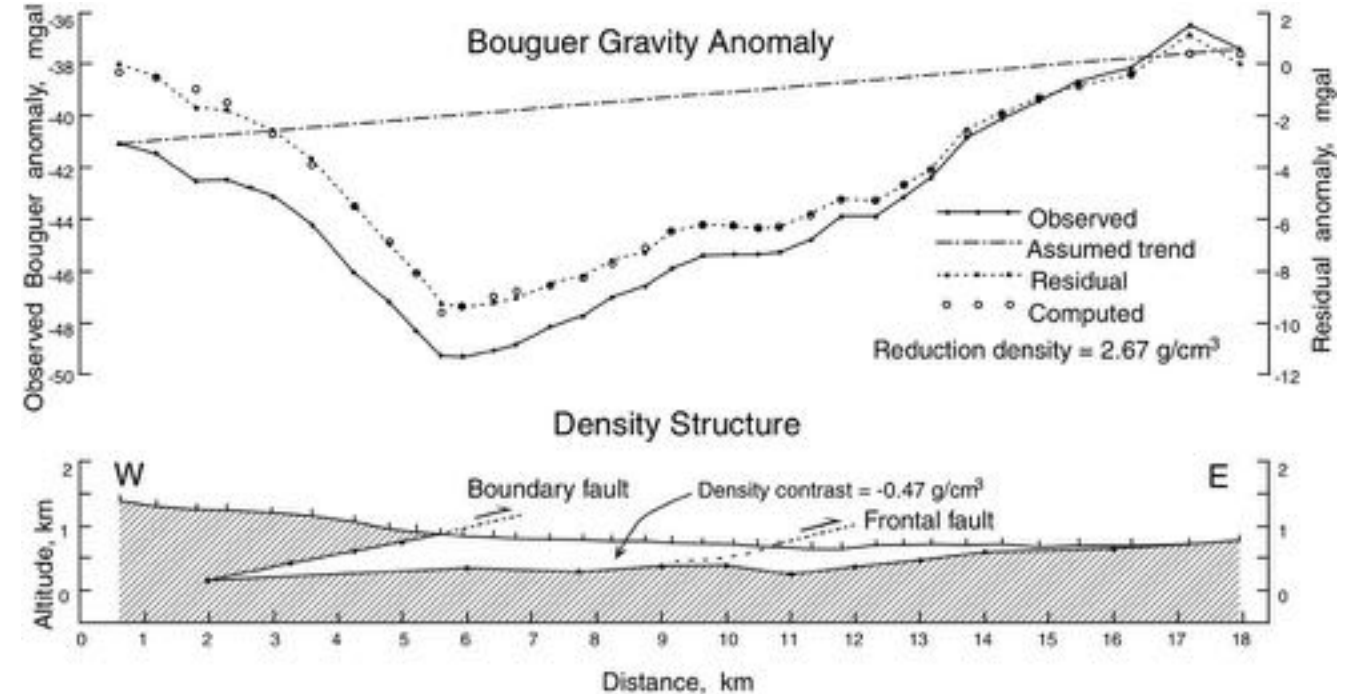
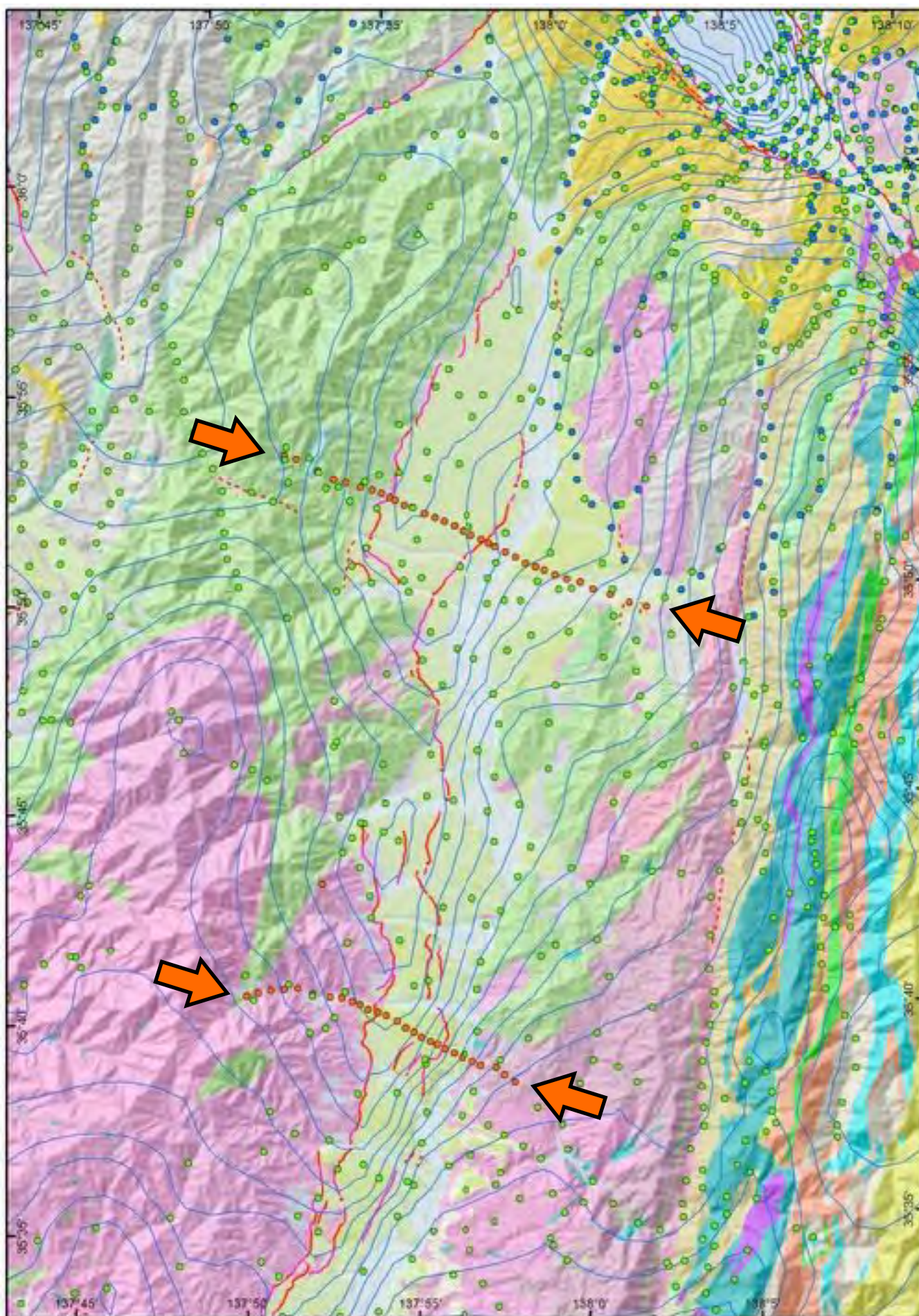
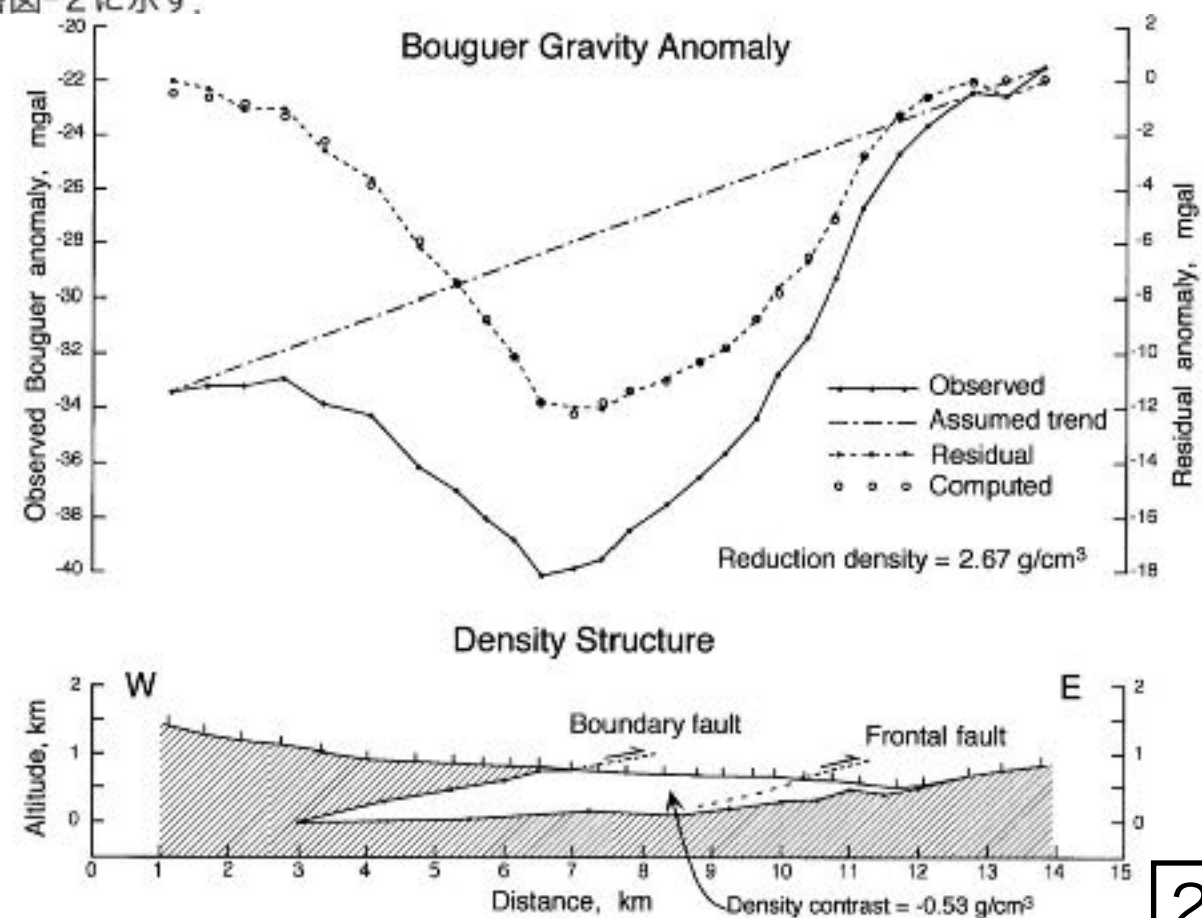


図 3.4.12 伊那谷北部・伊那市付近を東西に横切るブーゲ異常プロファイルとそれにもとづく推定地下構造 [池田, 1988, 1992] 伊那谷を埋める盆地堆積物が、西方の木曾山脈の基盤岩類と低角（約 12 度）のスラスト（境界断層）で接している。境界断層の総すべり量は 4km に達する。ただし、山体の荷重による盆地堆積物の圧密の効果を考えていないので、総すべり量はもっと大きくなる可能性がある。前縁断層は、盆地堆積物の基底面を変位させていないらしいので、盆地堆積物内、あるいは盆地堆積物と基盤との境界に沿って発達したデコルマンであると考えられる。測線は断層図-2 に示す。



伊那谷の重力プロファイル

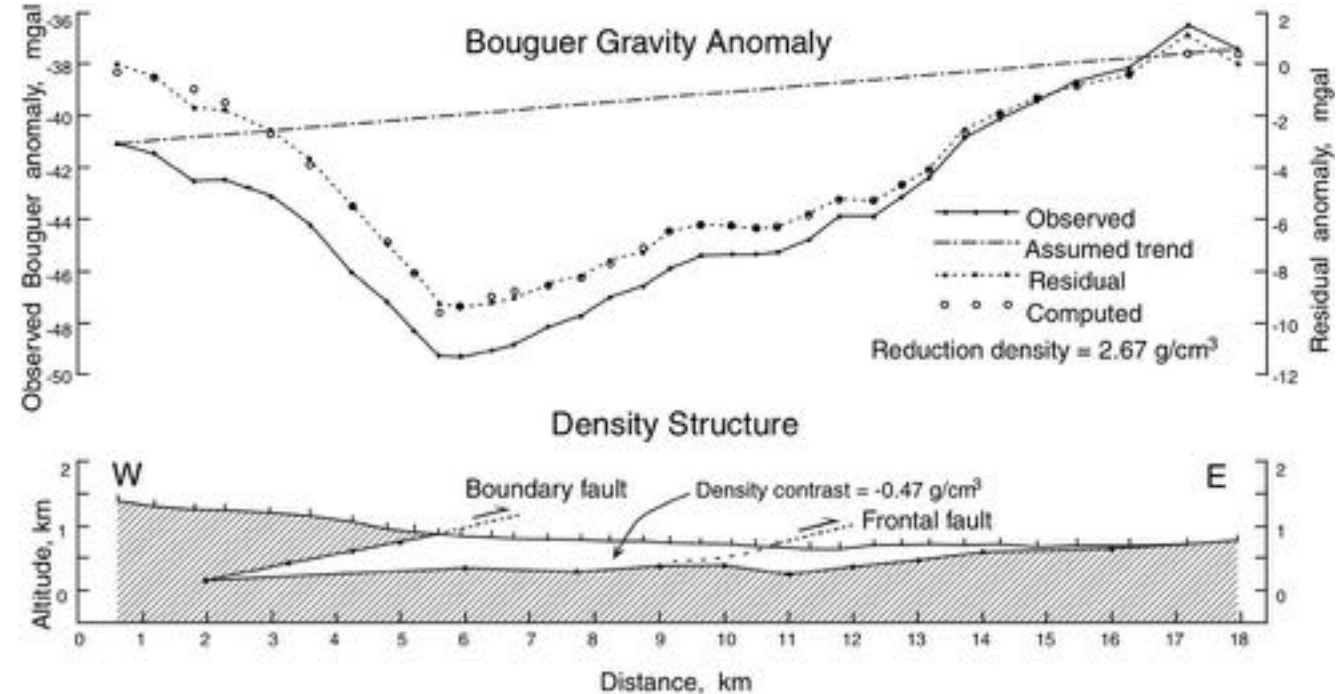
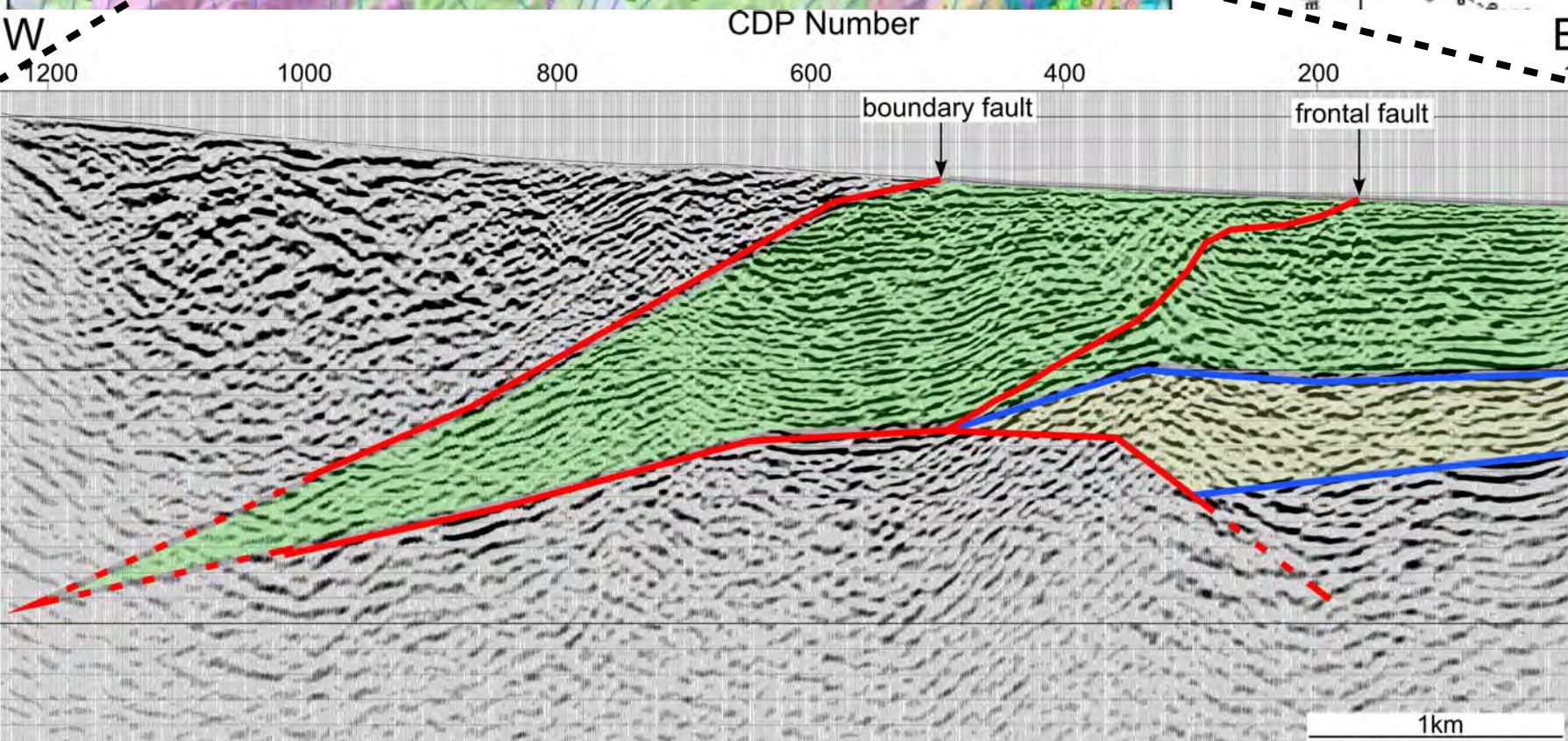
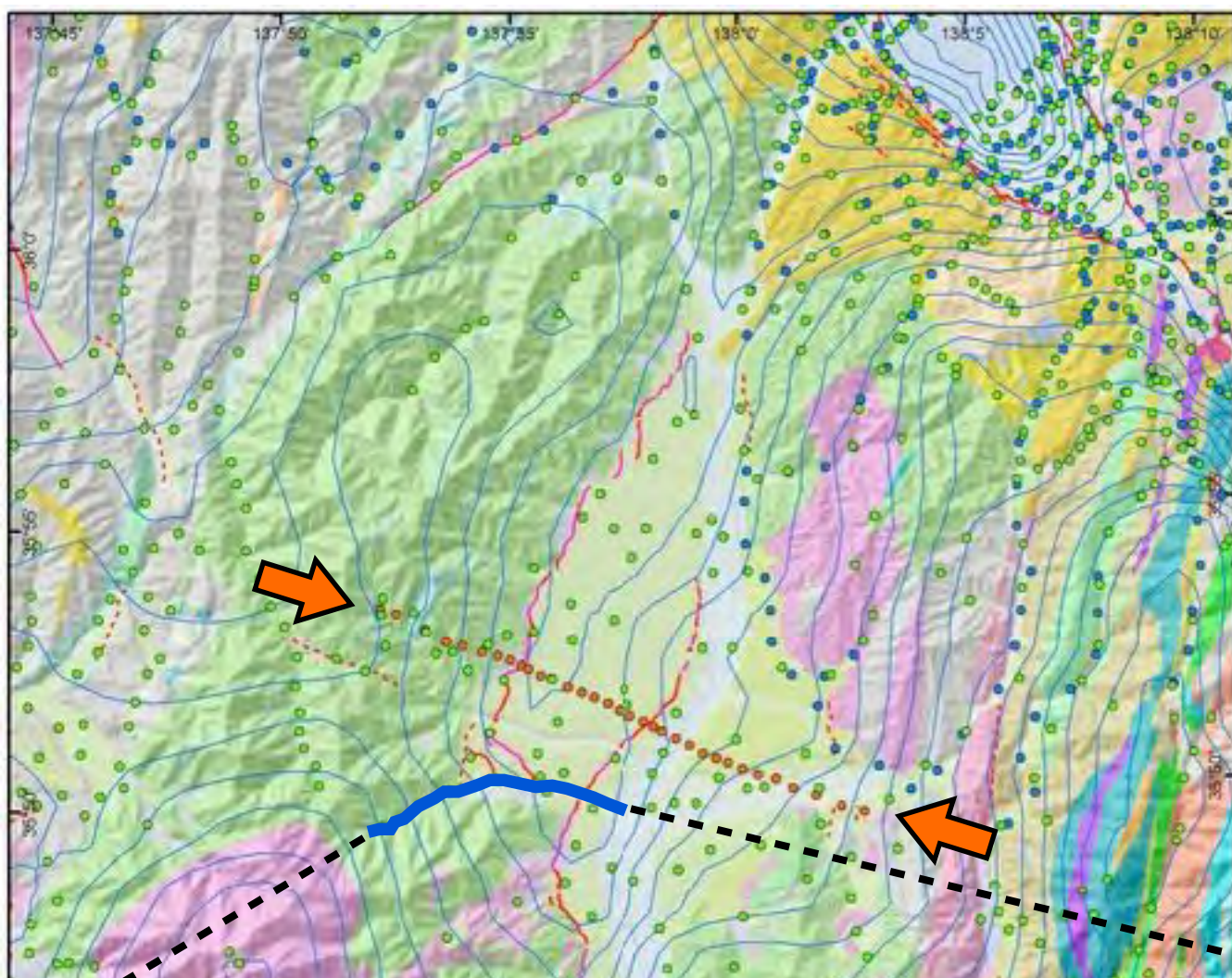
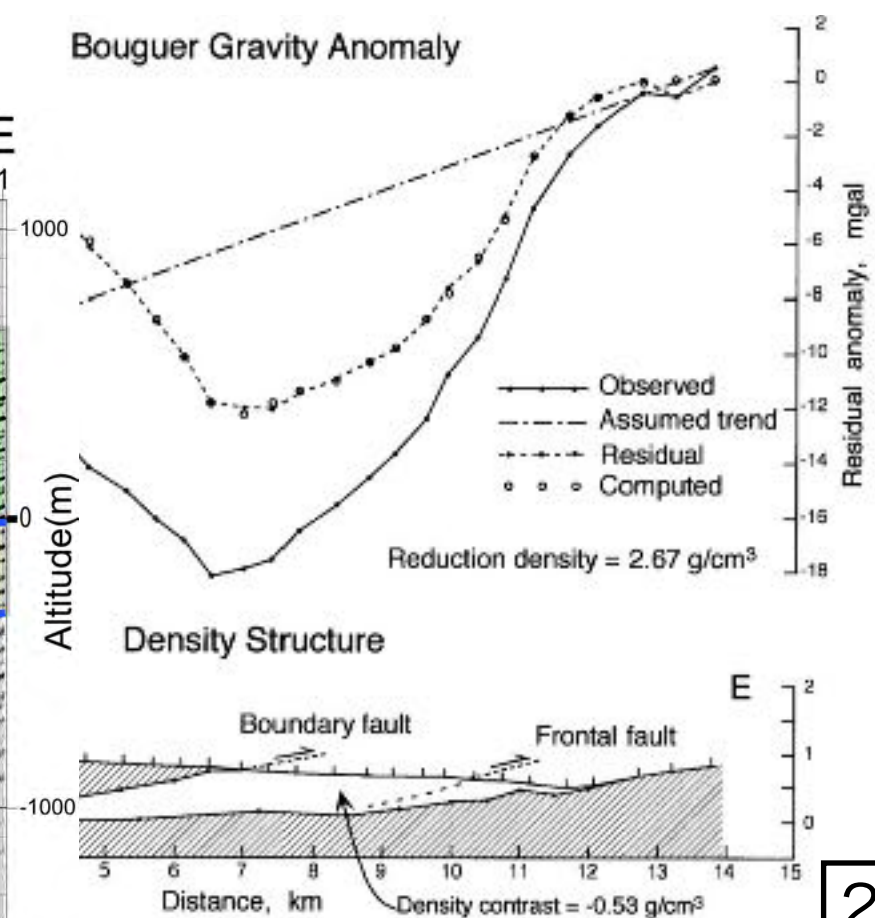
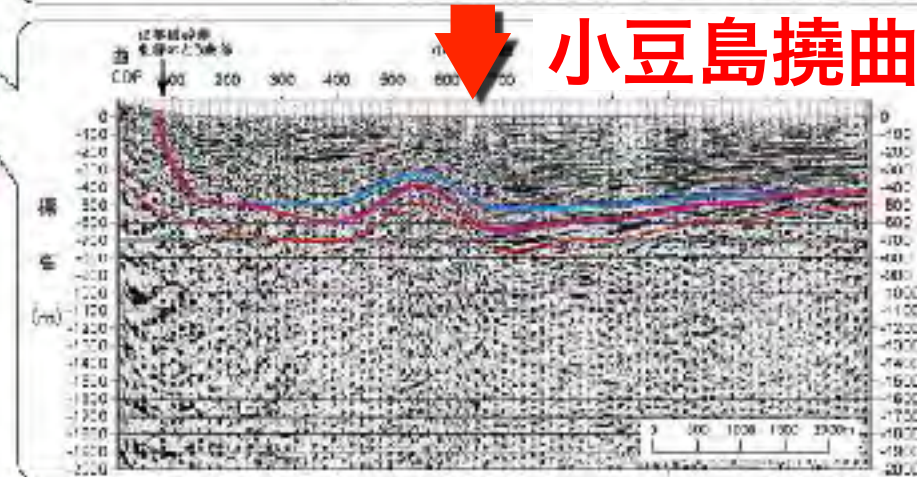
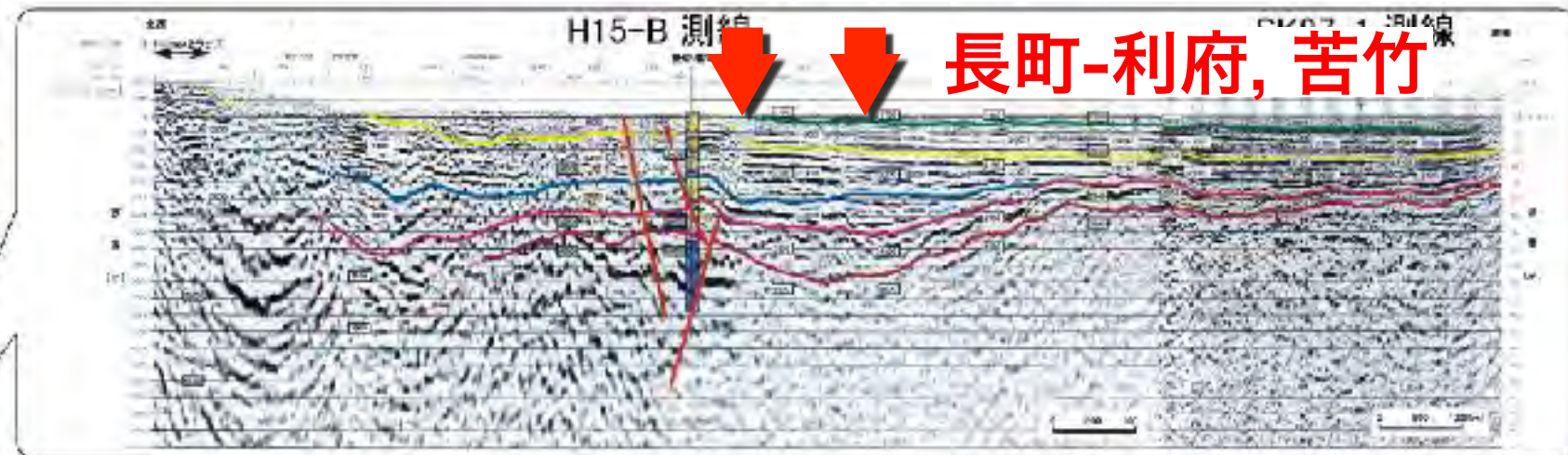
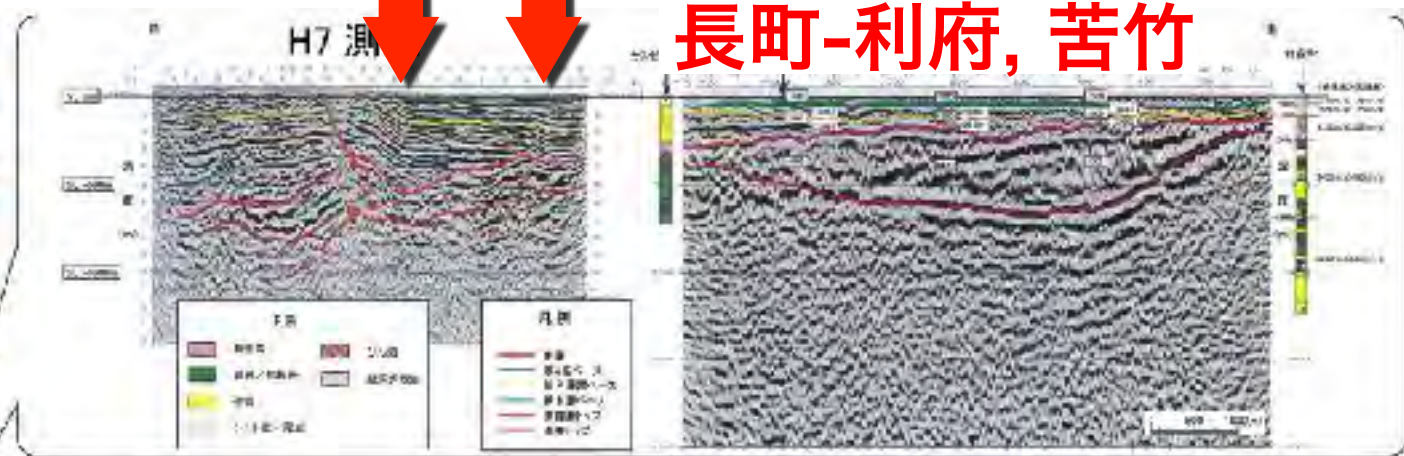
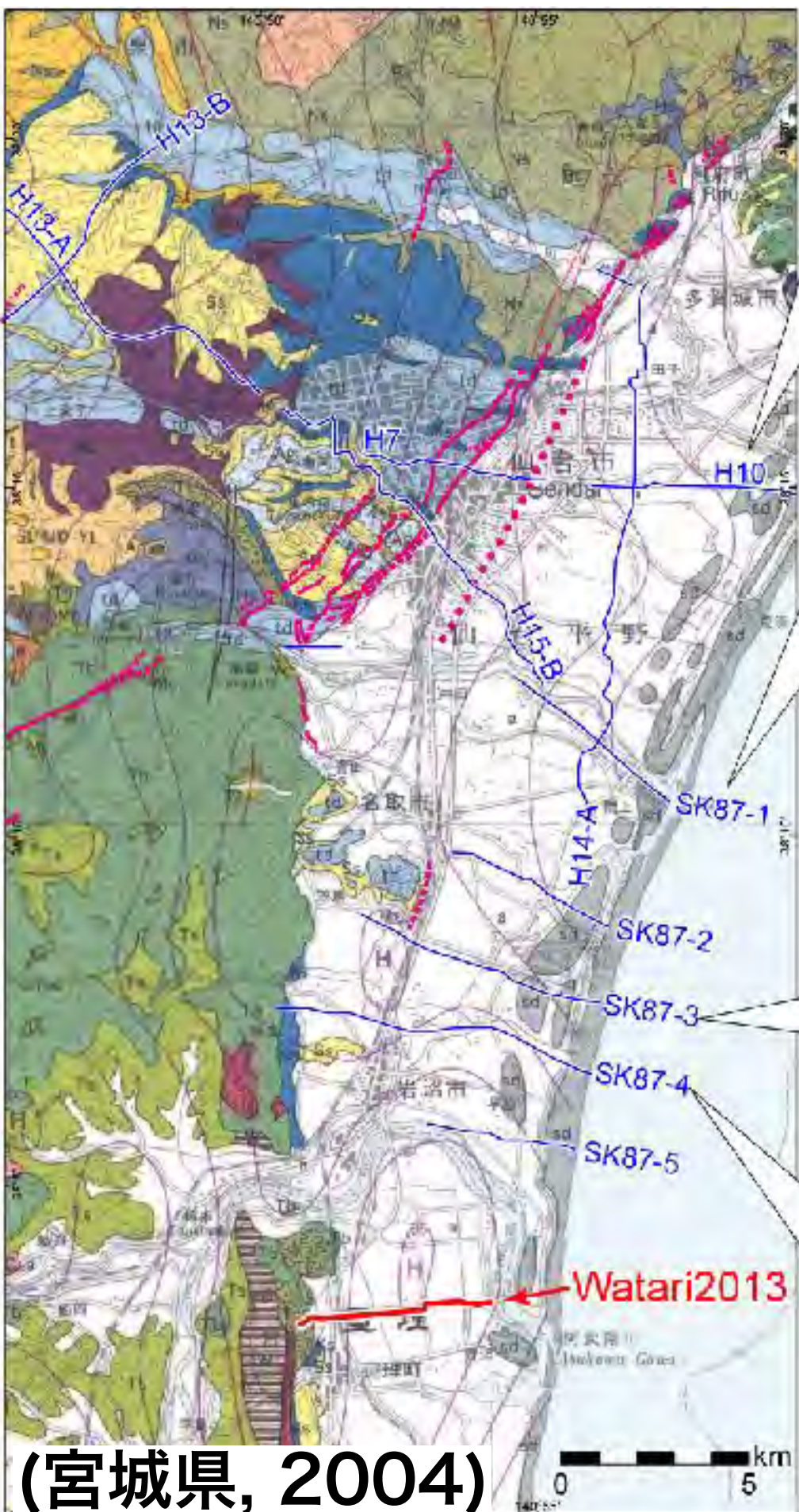


図 3.4.12 伊那谷北部・伊那市付近を東西に横切るブーゲ異常プロファイルとそれにもとづく推定地下構造 [池田, 1988, 1992] 伊那谷を埋める盆地堆積物が、西方の木曾山脈の基盤岩類と低角(約12度)のスラスト(境界断層)で接している。境界断層の総すべり量は4kmに達する。ただし、山体の荷重による盆地堆積物の圧密の効果を考えていないので、総すべり量はもっと大きくなる可能性がある。前縁断層は、盆地堆積物の基底面を変位させていないらしいので、盆地堆積物内、あるいは盆地堆積物と基盤との境界に沿って発達したデコルマンであると考えられる。測線は断層図-2に示す。

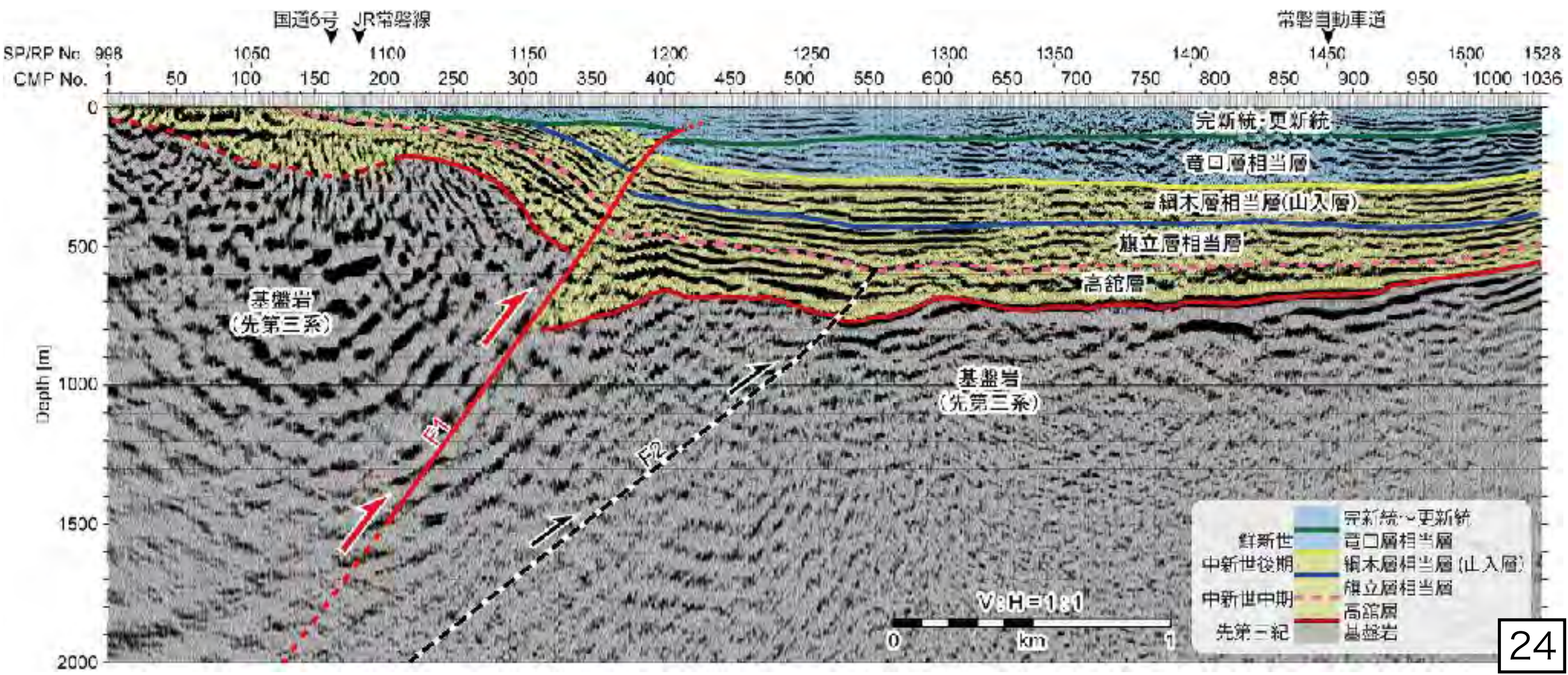


仙台平野における既存反射法地震探査断面

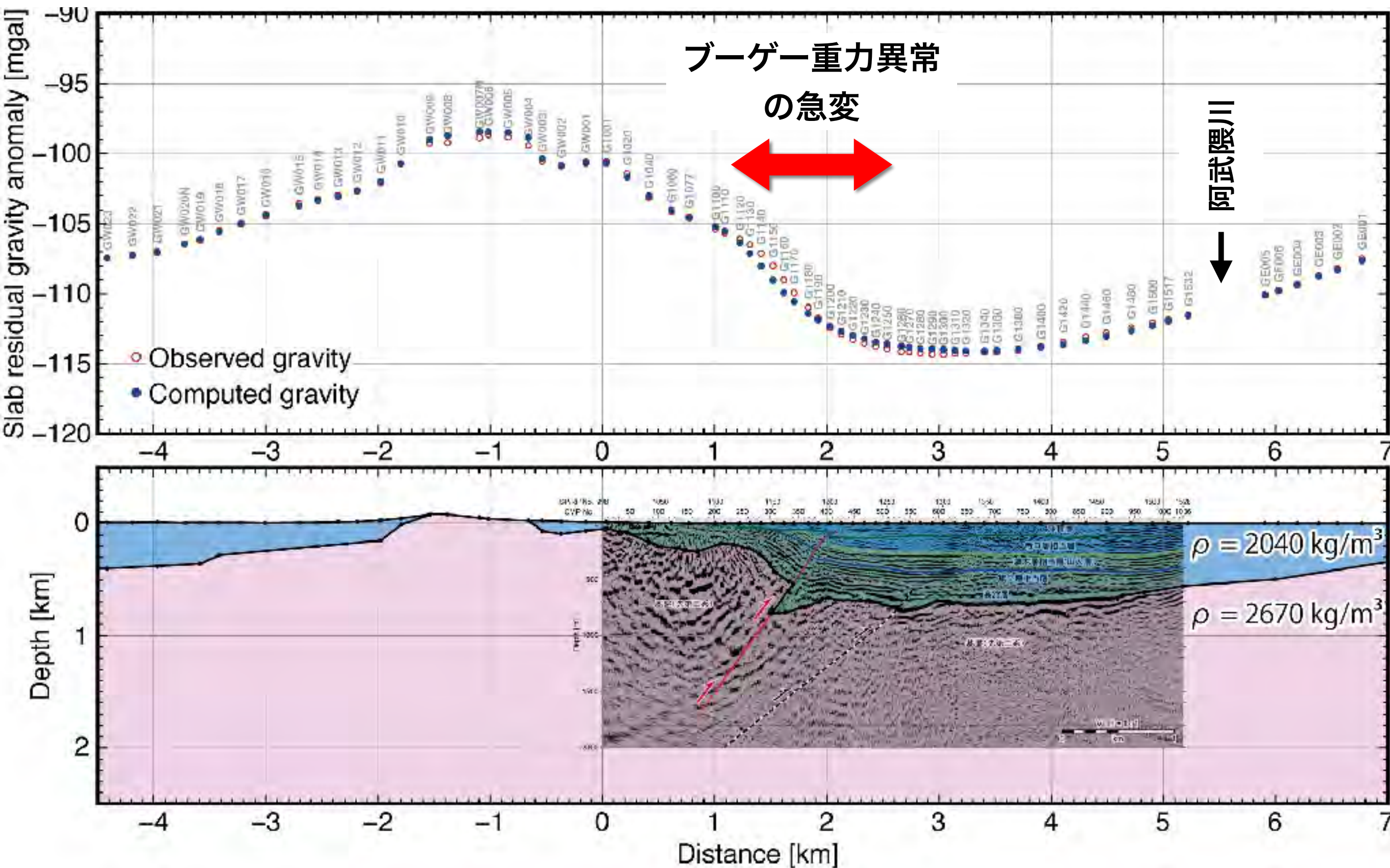


Pleistocene	沖積層
更新世～完新世	完新世段丘堆積物
更新世～完新世	更新世～完新世段丘堆積物
Pliocene	三木木・向山・大年寺層 砂岩・シルト岩および微性凝灰岩
	亀岡層・竜の口層 etc. シルト岩・砂岩および微性凝灰岩
	三滝層 礫石・火山岩・かんらん石を含む砂岩および火砕岩
L. Miocene	七北田層 etc. 砂岩・泥岩及び微性凝灰岩を伴う
Pliocene	湯層・梨野層 etc. 微性凝灰岩・砂岩を伴う
	網木層 微性火砕岩・砂岩及び礫岩
	旗立・入替谷層 etc. 砂岩及び泥岩（微性凝灰岩を伴う）
L.-M. Miocene	高館層 流紋岩層
	高館層 礫石・火山岩・かんらん石を含む砂岩および火砕岩
	網木層 砂岩・礫岩・泥岩及び微性凝灰岩
～Cretaceous	庄内沖積層 礫岩・砂岩・泥岩及び微性凝灰岩
	割山層 礫岩・砂岩・泥岩及び微性凝灰岩

巨理2013反射法地震探査の地下構造解釈

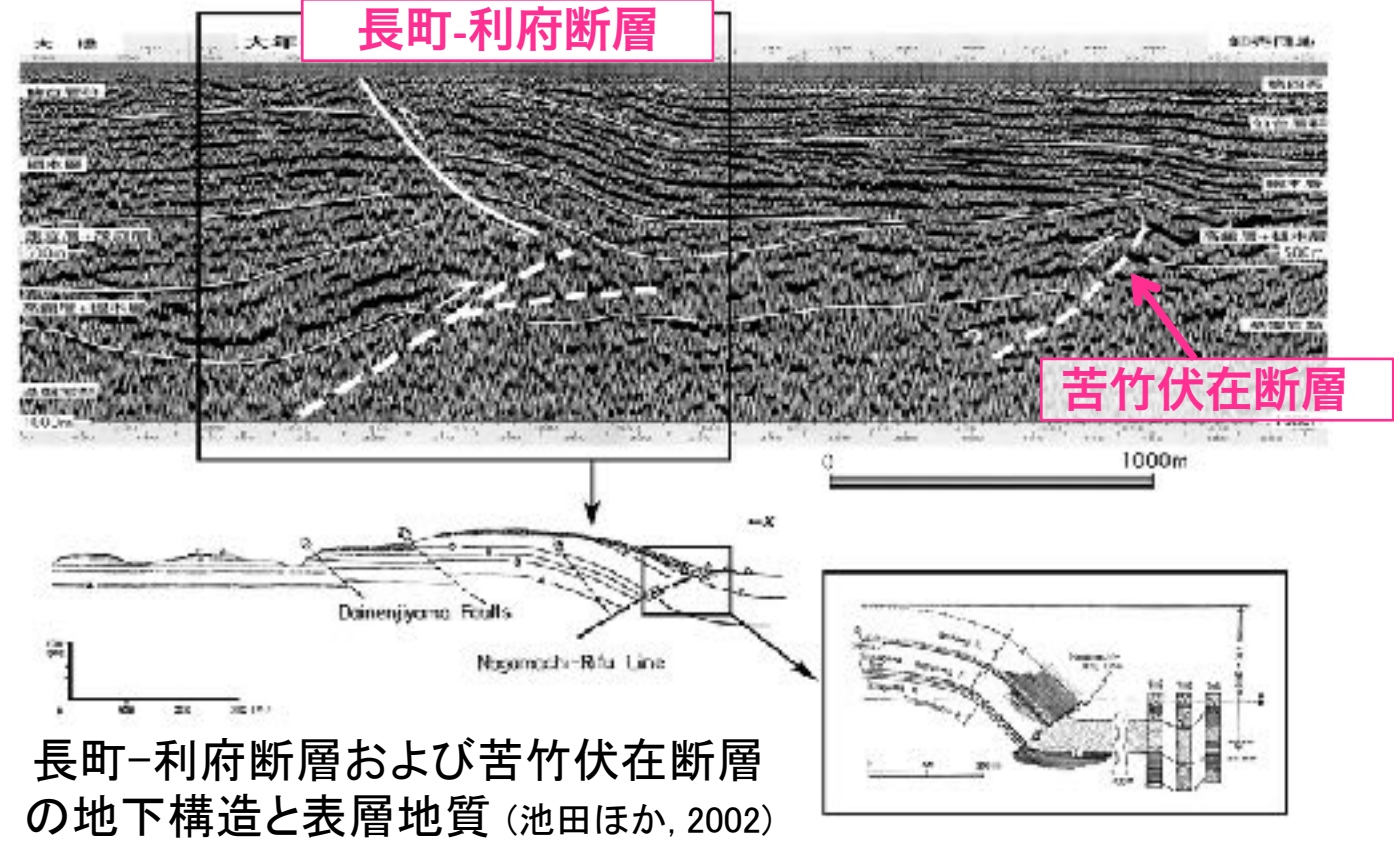
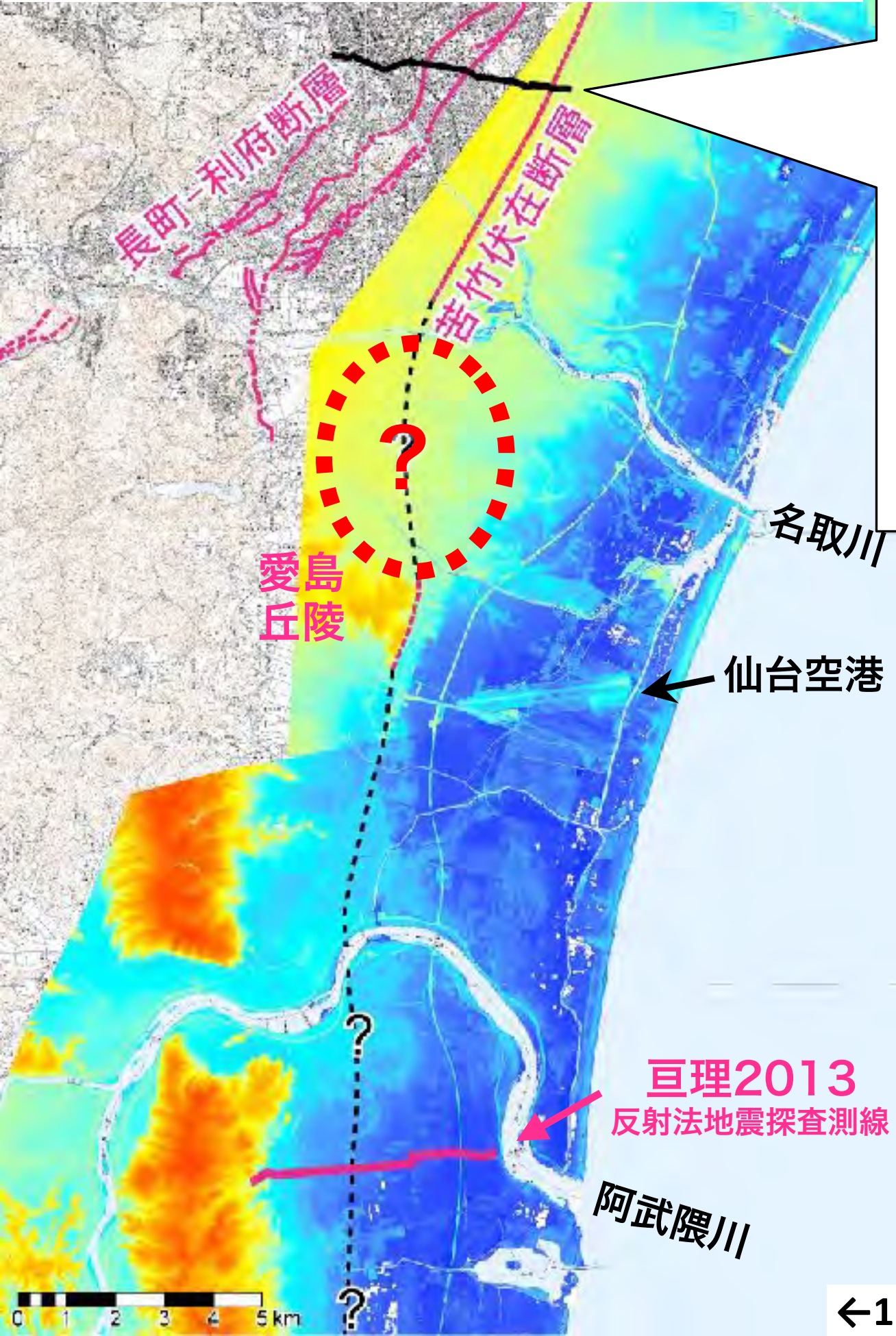


伏在活断層を横断する重力測定と密度構造解析



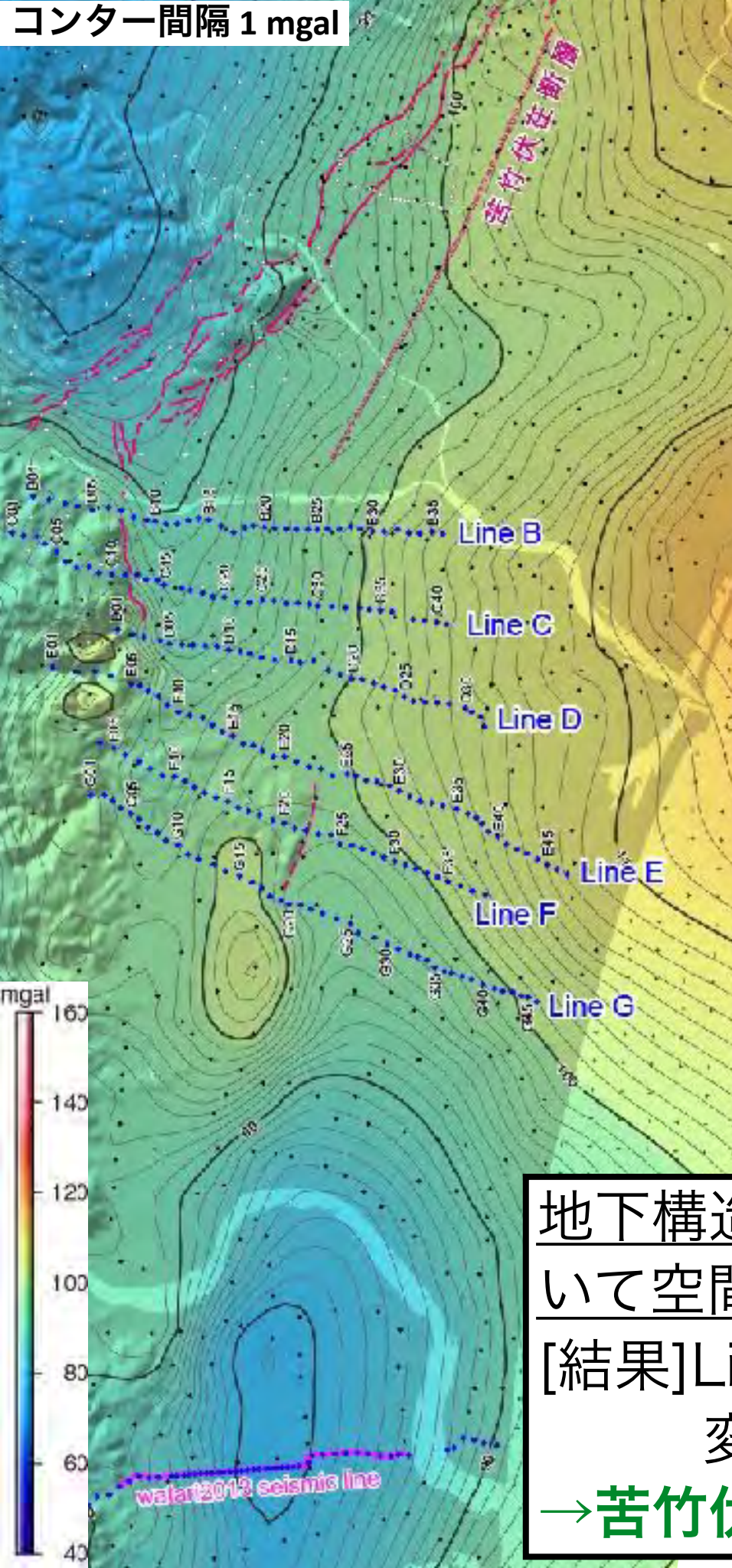
反射法地震探査と組み合わせることにより、
活断層運動に伴ったブーゲー重力異常の急変が明らかになった。

仙台平野南部における調査(2012年度)

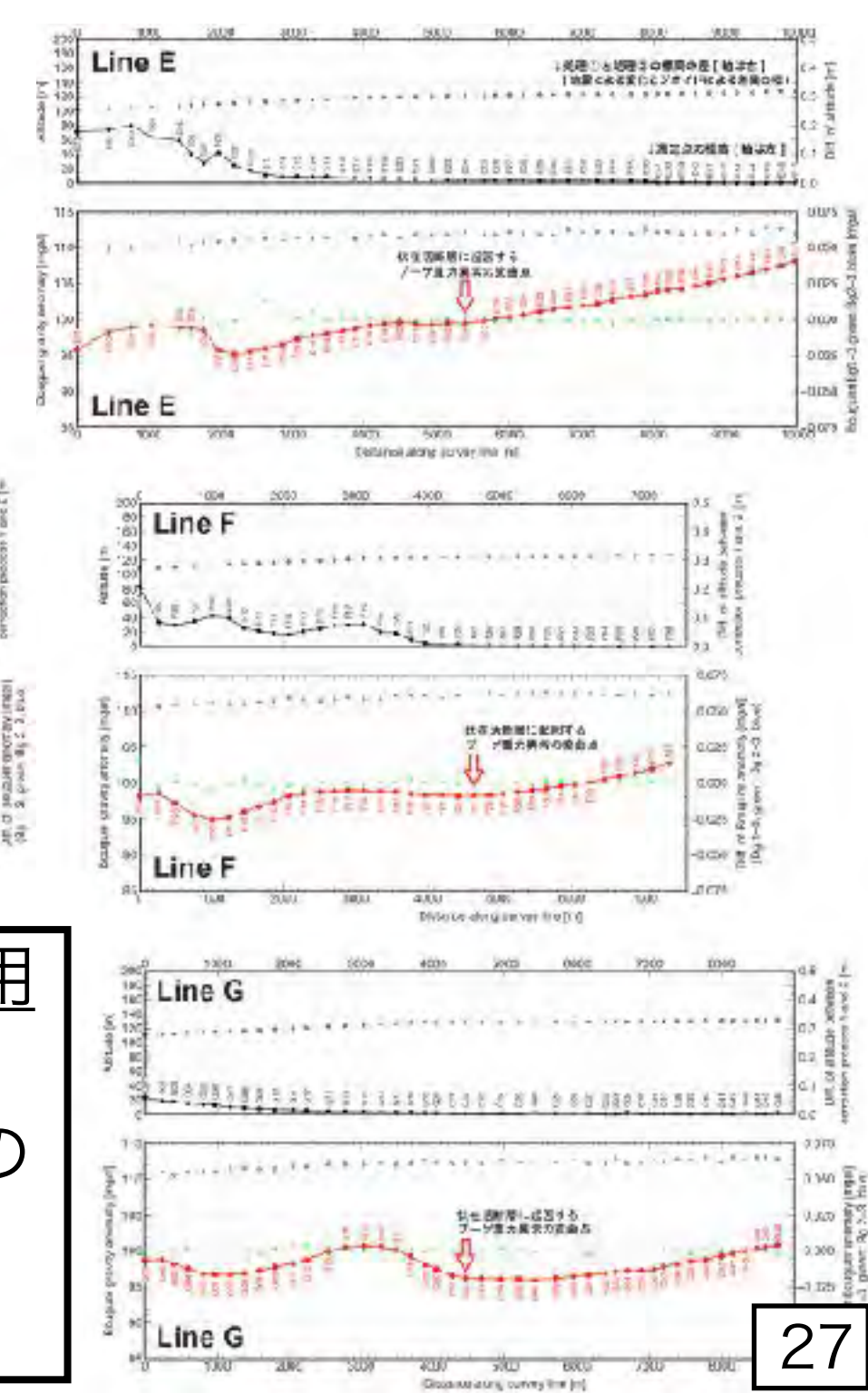
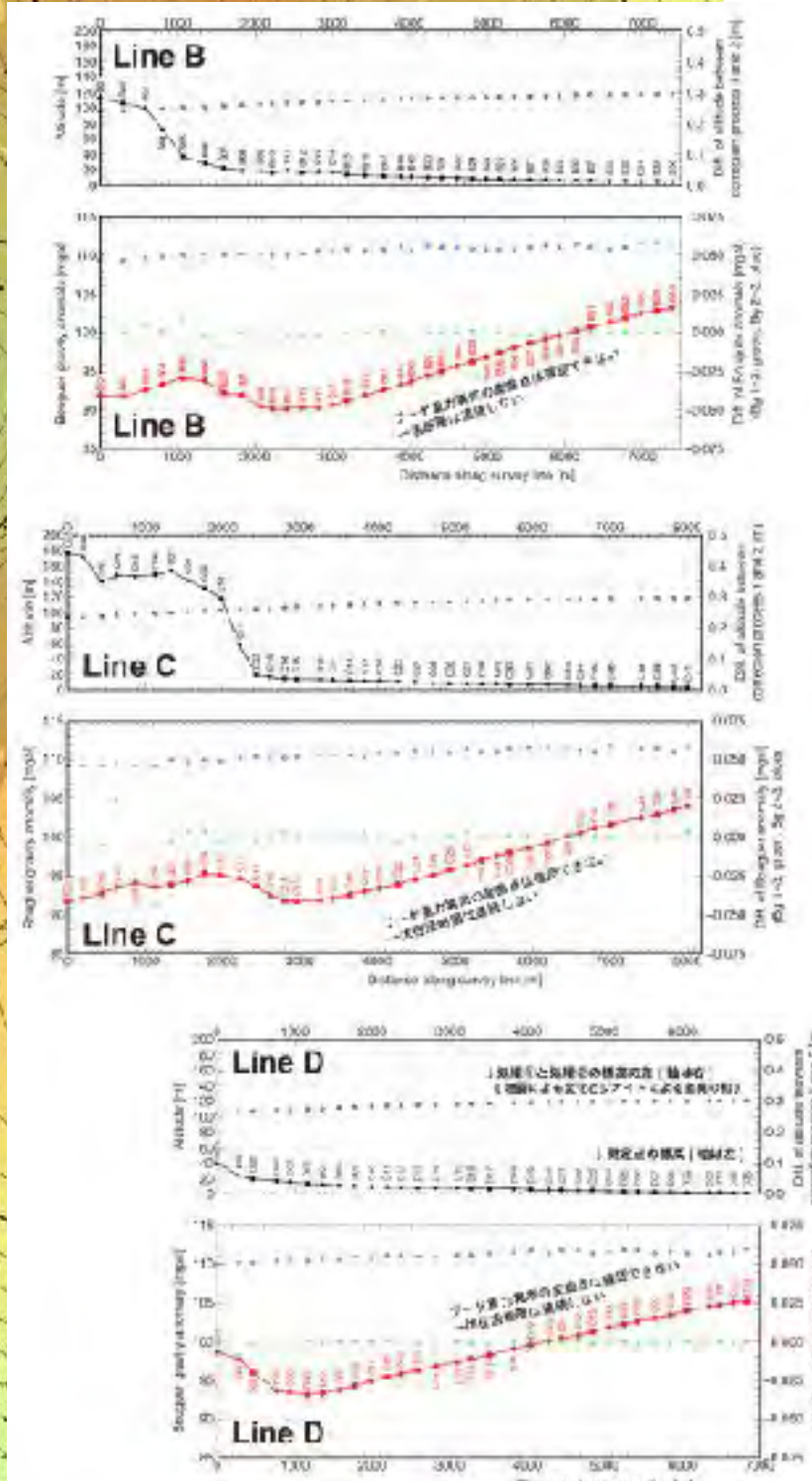


仙台平野南部から愛島丘陵付近まで延びる伏在活断層の北部延長の地下構造の連続性を確かめるために、伏在断層を横断する6測線を設定し、相対重力探査を実施した。

→地下構造を空間方向（水平方向）に追跡し、伏在活断層の連続性を明らかにした。



愛島丘陵周辺の 重力探査結果



地下構造をブーゲー重力異常を用いて空間方向に追跡
[結果]Line D以北には重力異常の変曲点が見られない。
→苦竹伏在断層には連続しない。

地球環境学・現代地球科学 第9回 (2017/06/16) 課題

❖ 重力探査（もしくはその解析）の特徴を述べよ。

例えば,

- 調査の規模は？（機材の大きさや必要な人数）
- 調査方法は複雑？／簡単？
- 観測地点の制約は？
- 補正（データ処理）は複雑か？
- 解析における注意点は？