



重力データの高度解析のためのデータ ベース整備と解析ツールの標準化

村田 泰章（産総研）

2020年1月28日

研究集会「固体地球科学データの相互利用・統合解析に関する諸問題」



重力データの高度解析のための

- データベースの構築
- 補正プログラムの標準化
- 平滑化ソフトウェアの高度化
- 解析例
- 今後の課題



地表重力測定



1点1点，車か徒歩で移動して測定する。
雨の日も，雪の日も。



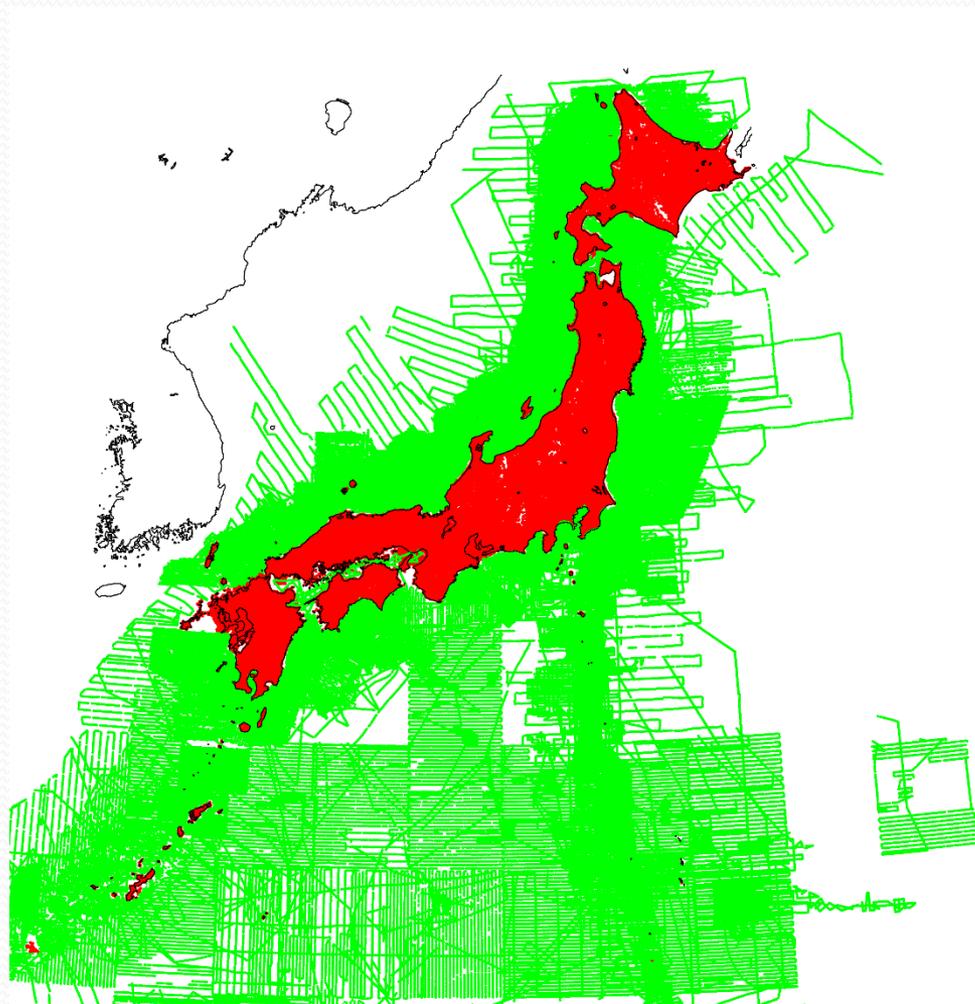
- 1日あたり数点～50点
- かつては，重力の測点の測量が大変だった。
- 今は，GPS測量により，高速・短時間で測量が可能になった。



重力データベース



これまでに日本で測定された重力データ
陸域:約52万点, 海域:約124万点



日本3大重力データベース

GSJ
データ
ベース

2000年にCD
で公開(民間企業分を除く)

名古屋大
データ
ベース

2001年にCD
で公開

金沢大
データ
ベース

2012年にウェブ
で公開

国土地理院:2002年
にウェブ公開

先人たちの努力により、貴重なデータが散逸せずに、DBとして残された。

重力データの標準フォーマット



| | 項目記号 | 項目名 | 型 | 桁 | FORMAT | 開始バイト | 終了バイト | 備考 | | |
|------|---------------------------------------|---------------|----|-------|---|-------|-------------------------|-----|--------------------------------|-----------------------|
| 必須項目 | ORG | 測定機関記号 | 文字 | 4 | A4 | ポイント | | | | |
| | NUL | 区切りスペース | 文字 | 1 | A1 | | | | | |
| | PRJ | 測定プロジェクト名 | 文字 | 20 | A20 | | | | | |
| | SID | 測点番号 | 文字 | 7 | A7 | | | | | |
| | NUL | 区切りスペース | 文字 | 1 | A1 | | | | | |
| | YEA | 測定年 | 整数 | 4 | I4 | | | | | |
| | MON | 測定月 | 整数 | 2 | I2 | | | | | |
| | DAY | 測定日 | 整数 | 2 | I2 | | | | | |
| | TIM | 測定時分秒または旧測点番号 | 整数 | 6 | I6 | | | | | |
| | LAT | 緯度(度分秒) | 実数 | 12 | F12.4 | | | | | |
| | LON | 経度(度分秒) | 実数 | 13 | F13.4 | | | | | |
| | HOB | 測点標高(m) | 実数 | 10 | F10.3 | | | | | |
| | STY | 測定種別 | 文字 | 1 | A1 | | | | | |
| | HTY | 測量種別 | 文字 | 3 | A3 | | | | ・測定種別を新設(地表、海面など) 地形補正の精度向上 | |
| GOB | 絶対重力値(mGal) | 実数 | 11 | F11.3 | ・地形補正值などを分離 計算プログラムを提供。 バージョンアップに対応 詳細DEMでの補正に対応 | | | | | |
| ERR | 誤差調整項 | 実数 | 8 | F8.2 | | | | | | |
| NUL | 区切りスペース | 文字 | 1 | A1 | | | | | | |
| GTY | 重力計タイプ及び番号 | 文字 | 6 | A6 | | | | | | |
| NTS | 備考(調査件名等) | 文字 | 24 | A24 | | | | | | |
| GNR | 正規重力値(mGal) | 実数 | 12 | F12.4 | | | | | | |
| FAC | フリーエア補正值(mGal) | 実数 | 10 | F10.4 | | | | | | |
| BGC | ブーゲー補正值(mGal/(g*cm ⁻³)) | 実数 | 9 | F9.4 | | | | | | |
| TL2 | 周辺地形補正值(mGal/(g*cm ⁻³)) | 実数 | 9 | F9.4 | | | | 168 | 176 | 半径0~20mの範囲の地形による補正值 |
| TL5 | 近傍地形補正值(mGal/(g*cm ⁻³)) | 実数 | 9 | F9.4 | | | | 177 | 185 | 半径20~500mの範囲の地形による補正值 |
| TLF | 遠方地形補正值(mGal/(g*cm ⁻³)) | 実数 | 9 | F9.4 | 186 | 194 | 半径500m~60kmの範囲の地形による補正值 | | | |
| TW5 | 海水近傍補正值(mGal/(g*cm ⁻³)) | 実数 | 9 | F9.4 | 195 | 203 | 半径0~500mの範囲の海水の補正值 | | | |
| TWF | 海水遠方補正值(mGal/(g*cm ⁻³)) | 実数 | 9 | F9.4 | 204 | 212 | 半径500m~60kmの範囲の海水の補正值 | | | |
| TRC | 陸水補正值(mGal/(g*cm ⁻³)) | 実数 | 9 | F9.4 | 213 | 221 | 半径0m~60kmの範囲の陸水の補正值 | | | |
| B20 | ブーゲー異常値 2.00 g/cm ³ (mGal) | 実数 | 9 | F9.4 | 222 | 230 | | | | |
| BGA | ブーゲー異常値 2.67 g/cm ³ (mGal) | 実数 | 9 | F9.4 | 231 | 239 | | | | |

駒澤データでのブーゲー異常
新フォーマットでのブーゲー異常

$$BGA = GOB - GNR + FAC + (BGC + TL) / 2.0 * RHO + TW * (RHO - 1.03)$$

$$BGA = GOB - GNR + FAC + (BGC + TL2+TL5+TLF) * RHO + (TW5+TWF) * 1.03 + TRC * 1.00$$

S:海
面、

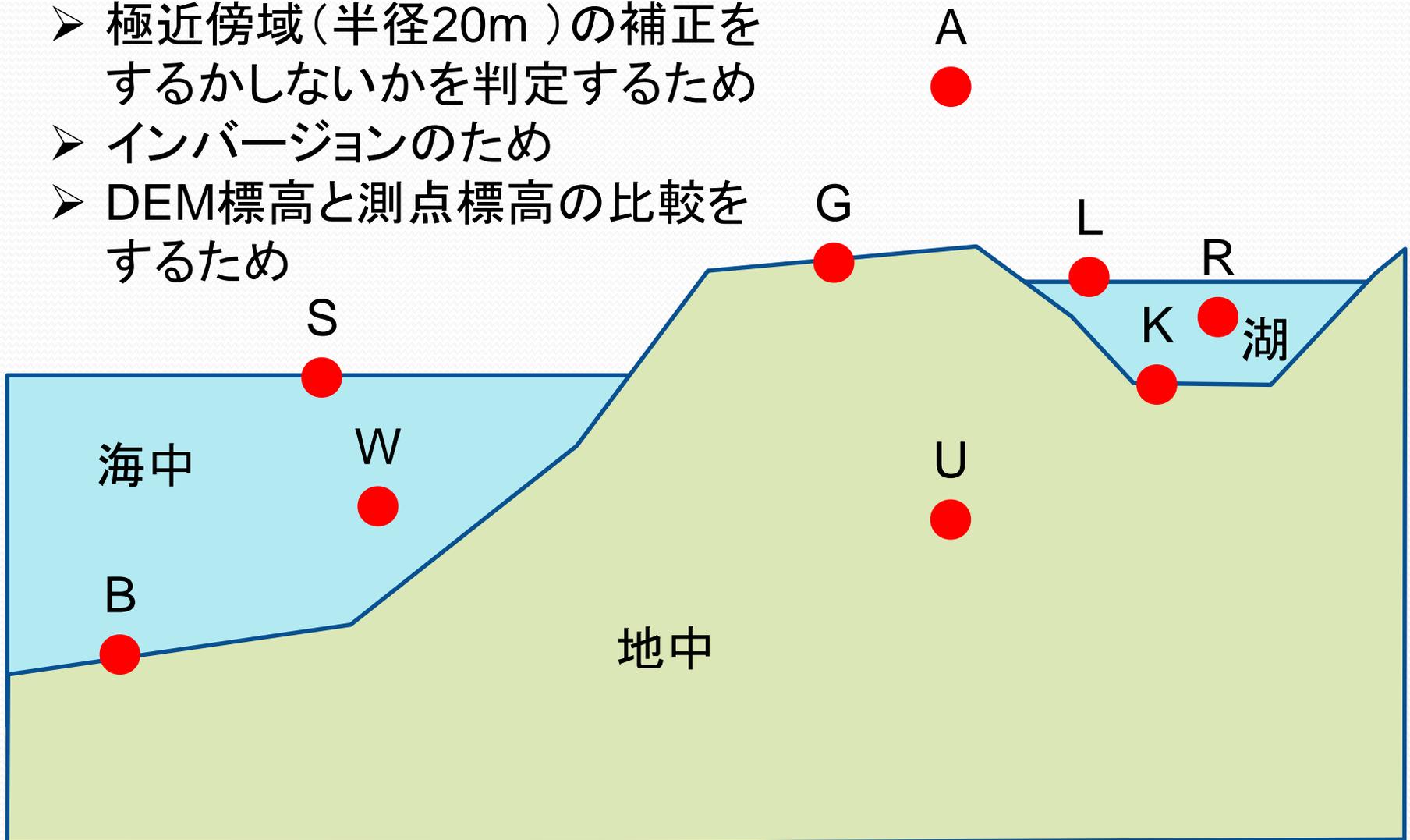


測定種別定義



目的:

- 極近傍域(半径20m)の補正をするかしないかを判定するため
- インバージョンのため
- DEM標高と測点標高の比較をするため



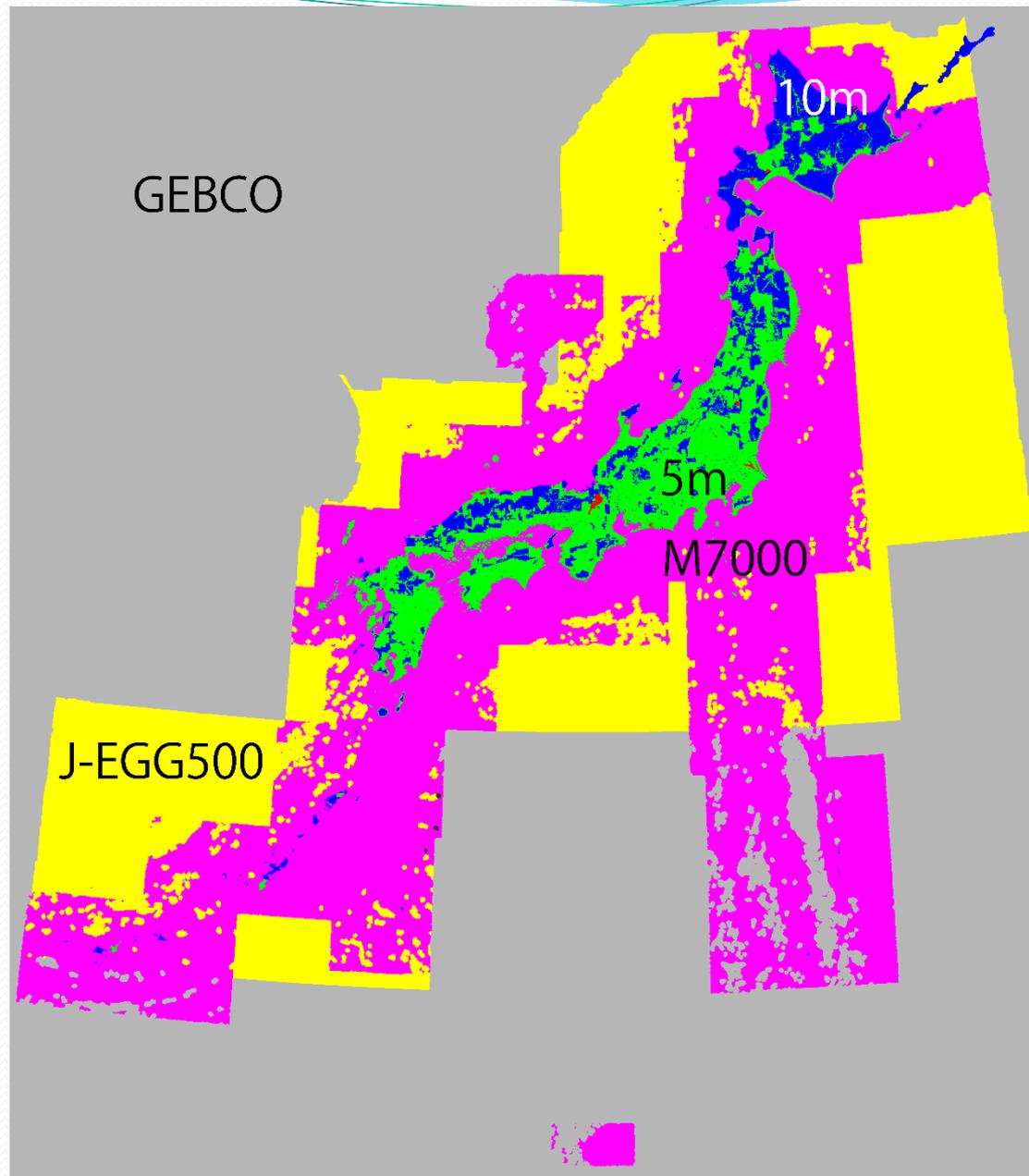


地形データ(DEM)の作成



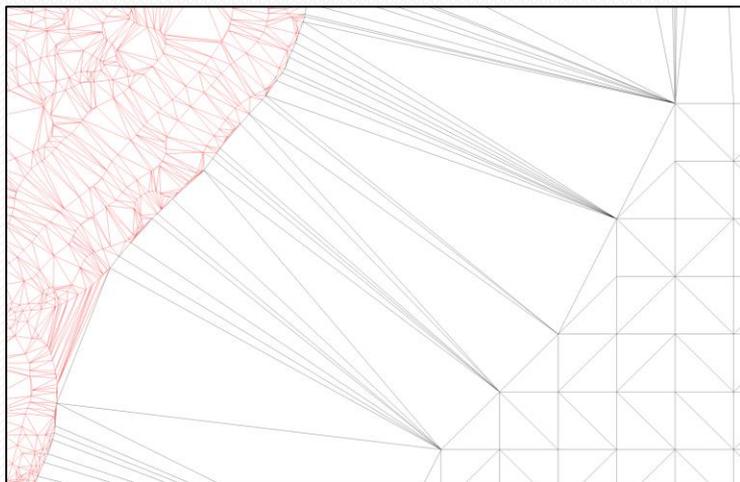
重力解析には高精度な地形データが必須

- 日本を中心として、東西3660km、南北3480kmの範囲のDEMを作成した。
- データソースは、優先順に、
 - 湖底面データ
 - 5mメッシュデータ
 - 10mメッシュデータ
 - M7000水深データ
 - J-EGG500データ
 - GEBCO水深データ
- メッシュ間隔:
 - 30m+150mセット
 - 5m+50mセット
- 投影法:
ランベルト正積図法(投影中心:北緯36度、東経136度)





作成した地形データ(DEM)

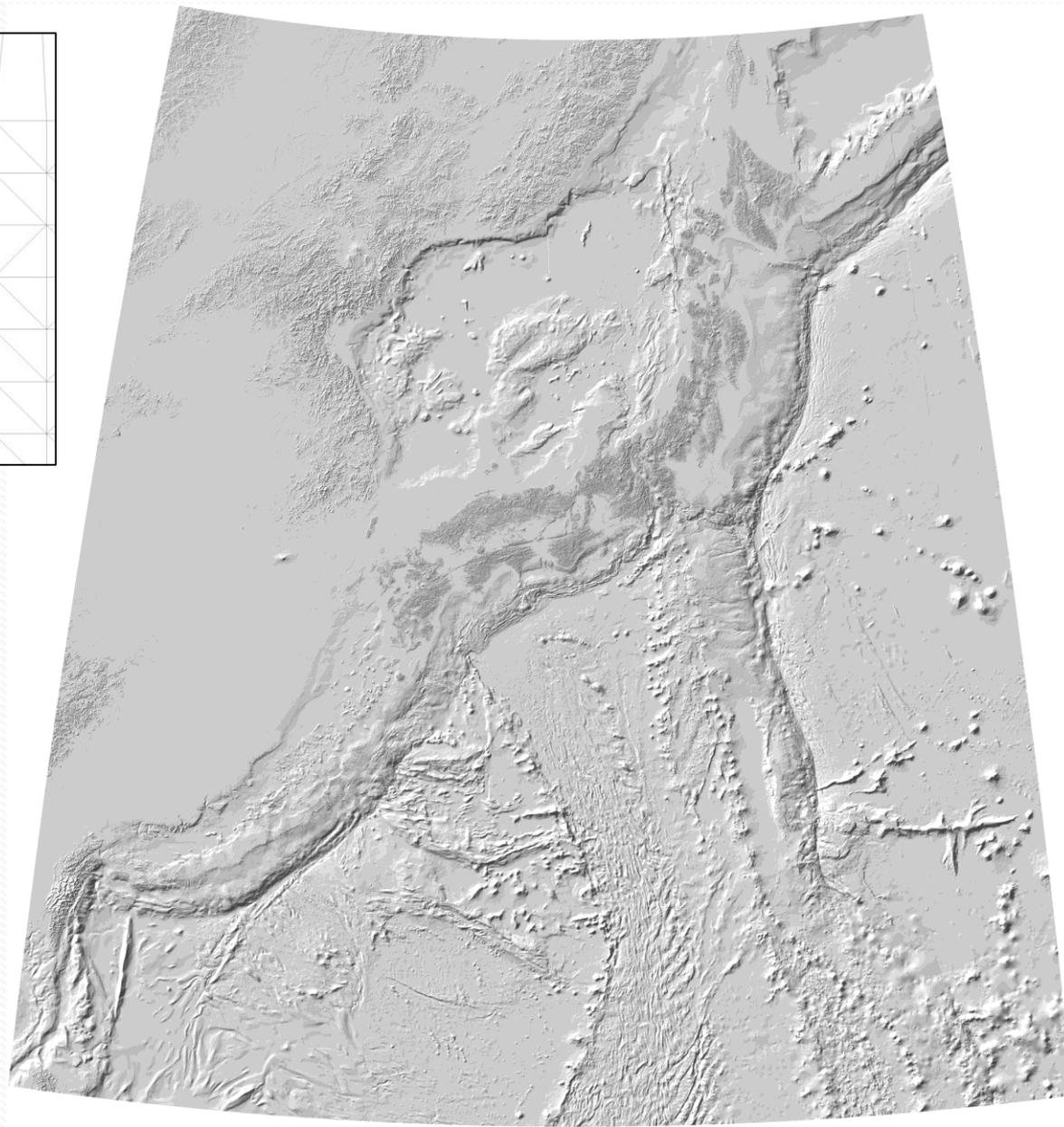


5,500万点の等深線、メッシュデータからデロネ三角形網を構築(プログラム自主開発)

海域については、日本水路協会の海底地形デジタルデータ(M7000シリーズ)が最も精度が高い。**ベクトルデータのバグ取り後、ドローネ分割による補間**でメッシュ化。

湖底については、**地形図から等深線をデジタイズ**して使用した。

これらを統合して、**日本周辺地域の5m、30mDEMを作成した。**



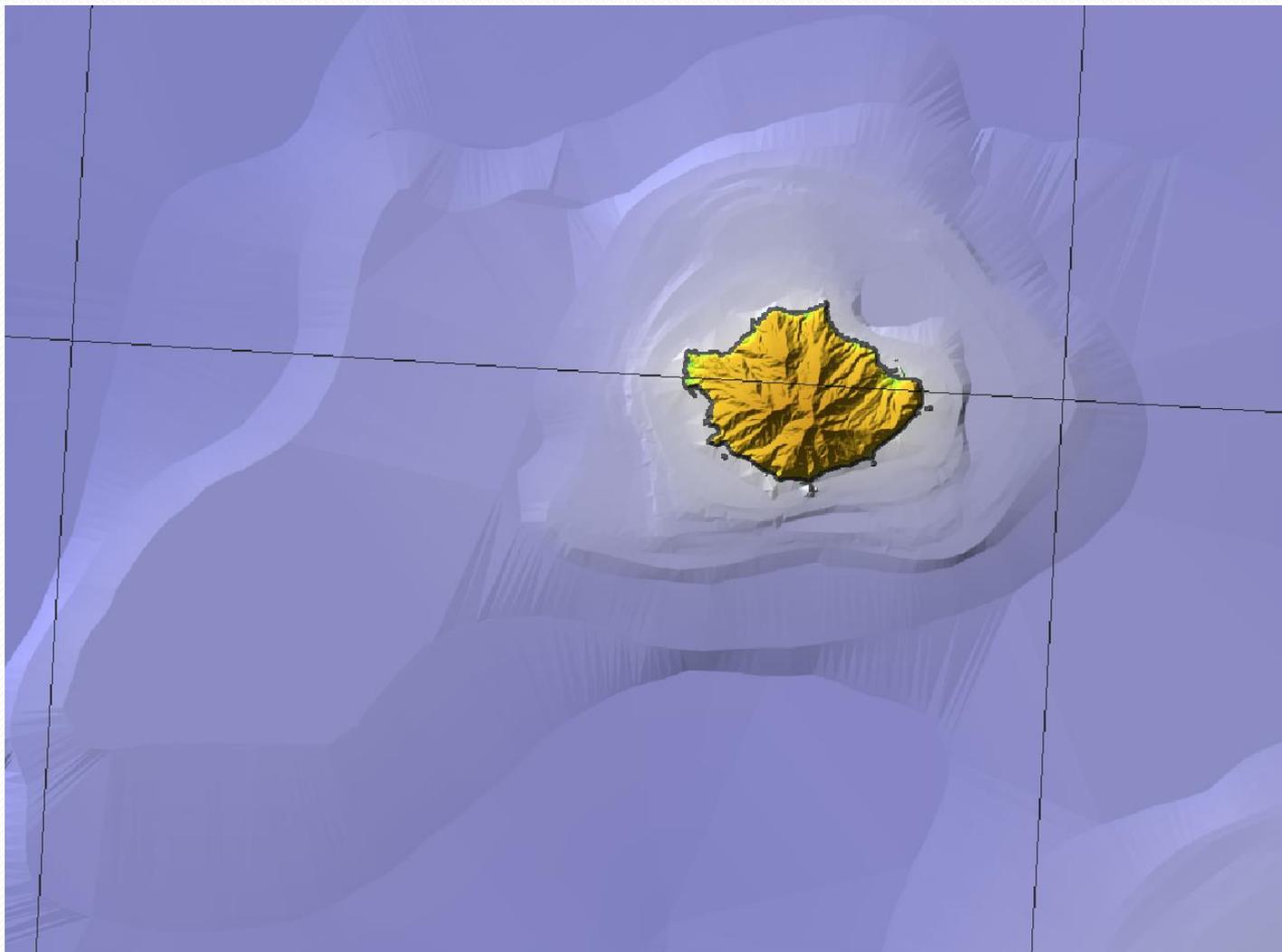


薩摩諸島黒島の周
辺域

- 陸域は10mメッシュ
- 海域はM7000

M7000の水深線から
デロネ三角形を構築
し、メッシュ化した。

水深線間隔を超える
オーバーシュートを
防いでいる。





- 日本においては、GSJ、名古屋大、金沢大、国土地理院等により、1950年代からの重力データが蓄積されている。
- 利用できる重力データを統合して、統一の補正手順で補正した。
- 陸域、海域、湖水域を統合した、高精度な地形データも利用できるようになった。



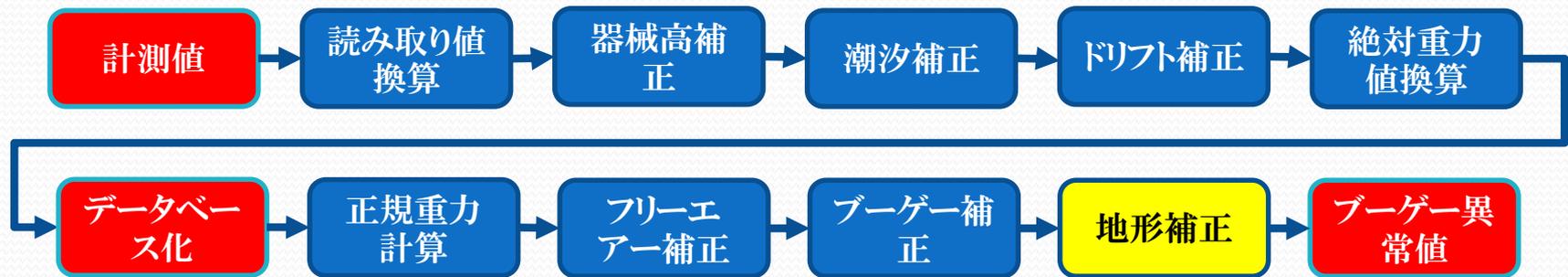
重力データの高度解析のための

- データベースの構築
- 補正プログラムの標準化
- 平滑化ソフトウェアの高度化
- 解析例
- 今後の課題

重力データ標準補正手順



重力データの標準補正手順は、GSJが整備してきた。今後の改訂が必要。



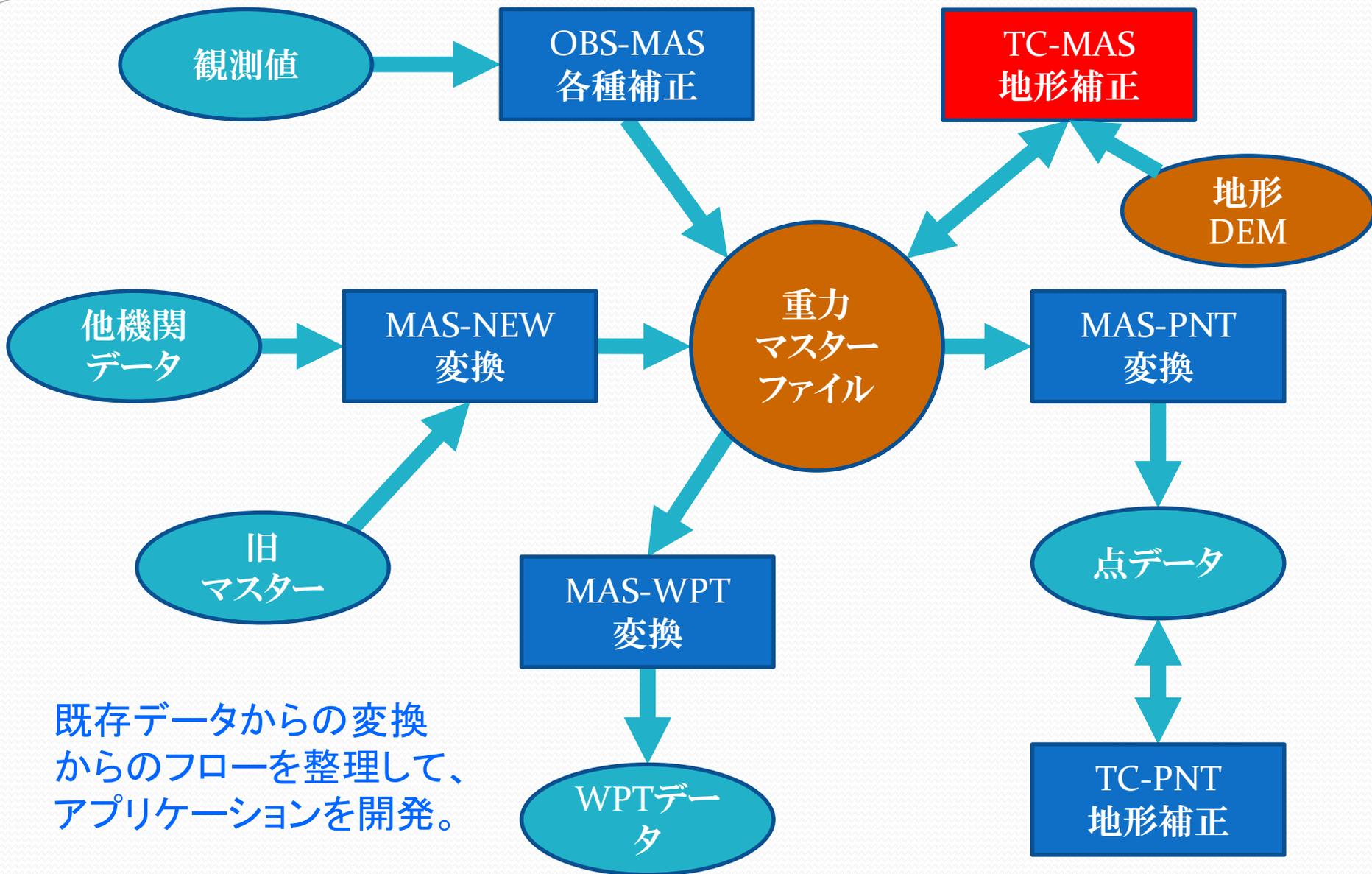
➤ 標準補正手順

地質調査所重力補正標準手順 SPEC-G1988 を1988年に公表したまま。

- 日本測地系から世界測地系への切り替え
 - GNSS測量による位置測量の高精度化
 - 地形DEMの高精度化(250mDEMから30m、あるいは1mDEM)
- 等の問題について、その場しのぎで対応してきた。



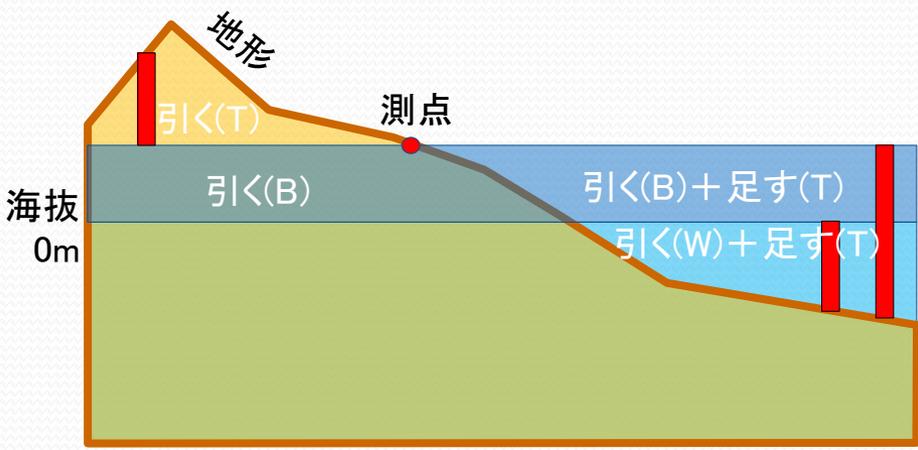
重力データ処理アプリケーション群



既存データからの変換
からのフローを整理して、
アプリケーションを開発。

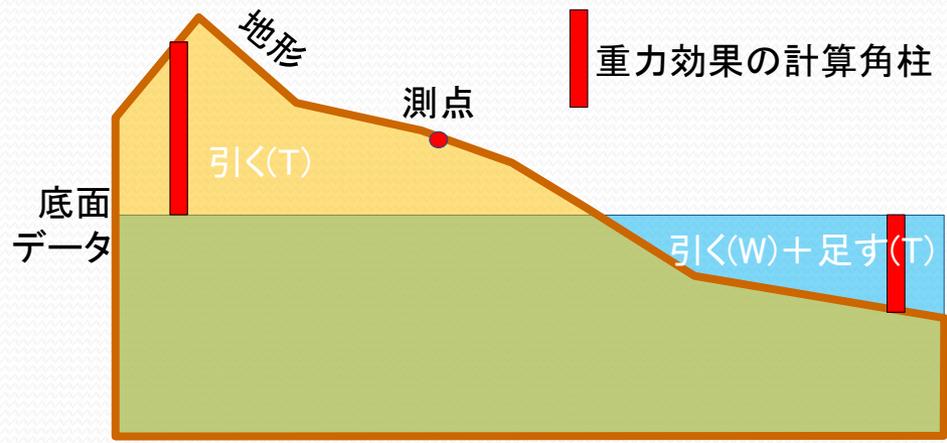


TC-MASとTC-PNT



TC-MAS

地形の影響を
 ・ブーゲー補正(B)
 ・地形補正(T)
 ・海水補正(W)
 で取り除く。



TC-PNT

地形の影響を
 ・地形補正(T)
 ・海水補正(W)
 で取り除く。

なぜ、2つの地形補正プログラムを作成したか？

過去の補正法との整合性のため

地形補正を密度構造のインバージョンの一部とする、これからの解析のため

重力データ補正のウェブ化



GSJ 重力データ標準補正

保護されていない通信 | pc020181.kry.aist.go.jp/gravity2/index.cgi

GSJ 重力データ標準補正

[観測データ入力フォーム](#) [マスターデータ入力フォーム](#) [ポイントデータ入力フォーム](#)

観測データを入力して、処理を選択して下さい。

```
GSJ /----- Organization (A4)
Fukui Imajyo 2014 /--- Project (A20)
A.Miyakawa /----- Surveyer (A10)
BT /----- Leap seconds
0 /----- ID shift
LG304 /----- Meter (A6)
1.0000000000 /----- Correction Factor
2900. 3052.060 1.05245 /-- Conversion Tables
3000. 3157.300 1.05247 /-- Conversion Tables
3100. 3262.550 1.05248 /-- Conversion Tables
処理： 
```

観測データメッセージ

```
Drift = 2014 8 22 ( 9940) -> 2014 8 23 ( 9921) 0.074 mGal ( 0.080 mGal/d, 22.4h)
2014 8 22 -9950 978757.024
2014 8 23 -9950 978756.955
Drift = 2014 8 23 ( 9921) -> 2014 8 23 ( 9909) -0.010 mGal ( -0.027 mGal/d, 9.3h)
Drift = 2014 8 23 ( 9909) -> 2014 8 24 ( 9909) 0.008 mGal ( 0.015 mGal/d, 12.3h)
```

標準的な重力補正は、ウェブで簡便にできることが望ましい。重力DBの一機能として、一般に公開予定。

マスターデータを入力して、処理を選択して下さい。

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|-------|--------|------|-----|----------------|-------------|--------------|--------------|------------|------|-------|---------------|-------------|----------|----------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|---------|----------|
| GSJ | Fukui | Imajyo | 2014 | 848 | 20140823105200 | 355017.8098 | 1363727.7254 | 752.486GDP | 979629.535 | 0.00 | LG304 | A.Miyakawa | 979805.3085 | 232.9734 | -31.4970 | 0.0000 | 1.1042 | 1.7592 | 0.0000 | -0.0002 | 0.0000 | -0.0675 | -19.2520 |
| GSJ | Fukui | Imajyo | 2014 | 849 | 20140823123800 | 355035.9142 | 1363251.4788 | 530.840GFS4 | 979678.200 | 0.00 | LG304 | A.Miyakawa | 979805.7400 | 164.6155 | -22.2614 | 0.0000 | 0.6741 | 1.4371 | 0.0000 | -0.0002 | 0.0000 | -3.2251 | -16.7257 |
| GSJ | Fukui | Imajyo | 2014 | 850 | 20140823134400 | 354927.1236 | 1363150.3202 | 569.837GFS4 | 979673.649 | 0.00 | LG304 | A.Miyakawa | 979804.1005 | 176.6431 | -23.8889 | 0.0000 | 0.2757 | 1.4369 | 0.0000 | -0.0003 | 0.0000 | 1.8387 | -13.0194 |
| GSJ | Fukui | Imajyo | 2014 | 851 | 20140823141300 | 354922.9914 | 1363233.2112 | 539.354GFS4 | 979678.071 | 0.00 | LG304 | A.Miyakawa | 979804.0020 | 167.2415 | -22.6168 | 0.0000 | 0.3940 | 1.2220 | 0.0000 | -0.0003 | 0.0000 | -0.6914 | -14.7819 |
| GSJ | Fukui | Imajyo | 2014 | 852 | 20140823143900 | 354845.8652 | 1363234.6104 | 553.869GFS4 | 979673.553 | 0.00 | LG304 | A.Miyakawa | 979803.1174 | 171.7182 | -23.2226 | 0.0000 | 0.5797 | 1.5290 | 0.0000 | -0.0003 | 0.0000 | -0.0743 | -14.2206 |
| GSJ | Fukui | Imajyo | 2014 | 853 | 20140823151400 | 354817.4624 | 1363258.3728 | 579.839GFS4 | 979666.605 | 0.00 | LG304 | A.Miyakawa | 979802.4406 | 179.7279 | -24.3061 | 0.0000 | 0.7595 | 1.7000 | 0.0000 | -0.0003 | 0.0000 | 0.1988 | -14.4384 |
| GSJ | Fukui | Imajyo | 2014 | 854 | 20140824 84500 | 354730.7728 | 1362320.3214 | 1046.550GTP3 | 979573.616 | 0.00 | LG304 | A.Miyakawa布滝 | 979801.3284 | 323.6548 | -43.6962 | 0.0000 | 1.5535 | 3.3812 | 0.0000 | -0.0013 | 0.0000 | 18.4161 | -7.5521 |
| GSJ | Fukui | Imajyo | 2014 | 855 | 20140824 84000 | 354742.0486 | 1362234.1892 | 993.900GFS4 | 979565.485 | 0.00 | LG304 | A.Miyakawa | 979801.5970 | 307.4199 | -41.5166 | 0.0000 | 1.6624 | 3.0382 | 0.0000 | -0.0013 | 0.0000 | 17.6746 | -6.9922 |
| GSJ | Fukui | Imajyo | 2014 | 856 | 20140824104700 | 354719.7982 | 1362154.7494 | 1199.003GFS4 | 979534.236 | 0.00 | LG304 | A.Miyakawa | 979801.0689 | 370.6622 | -49.9365 | 0.0000 | 1.7928 | 6.4487 | 0.0000 | -0.0017 | 0.0000 | 20.3195 | -7.6563 |
| GSJ | Fukui | Imajyo | 2014 | 857 | 20140824112400 | 354713.0914 | 1362136.4554 | 1226.813GFS4 | 979526.280 | 0.00 | LG304 | A.Miyakawa金草岳 | 979800.9072 | 379.2368 | -51.1440 | 0.0000 | 2.0561 | 7.0932 | 0.0000 | -0.0019 | 0.0000 | 20.6182 | -7.5182 |

処理：

ポイントデータを入力して、処理を選択して下さい。(投影法:LONLAT)

```
849 491847.7254 129017.8098 752.486 -8.658
849 491571.4788 129035.9142 530.840 -9.270
850 491510.3202 128967.1236 569.837 -4.814
851 491553.2112 128962.9914 539.354 -6.992
852 491554.6104 128925.8652 553.869 -6.408
853 491578.3728 128897.4624 579.839 -6.355
854 491000.3214 128850.7728 1046.550 6.790
855 490954.1892 128862.0486 993.900 6.630
856 490914.7494 128839.7982 1199.003 7.793
857 490896.4554 128833.0914 1226.813 8.020
```

処理： (座標変換を繰り返すと精度が悪化します.)



- 従来の方法に準拠した補正プログラムを整備した。
- 従来 of 地形補正、ブーゲー補正は、地下構造インバージョンと一緒に考えていくべき
- 標準的な補正はインターネット上でできるように準備中



重力データの高度解析のための

- データベースの構築
- 補正プログラムの標準化
- 平滑化ソフトウェアの高度化
- 解析例
- 今後の課題



Cubic B-Spline 関数

解析領域を M に分け、区間 i を次式で定義し、データに当てはまるようにスプライン係数ベクトル s を求める。

$$f_i(r_t | \bar{s}) = \sum_{j=0}^3 s_{i+j} B_{4-j}(r_t)$$

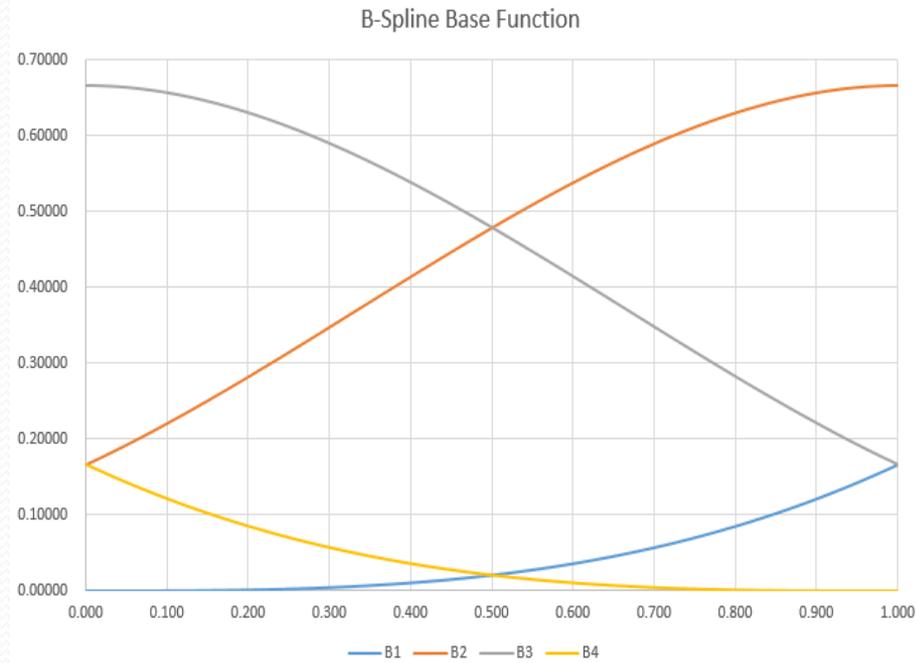
基底関数

$$B_1 = r^3 / 6$$

$$B_2 = (-3r^3 + 3r^2 + 3r + 1) / 6$$

$$B_3 = (3r^3 - 6r^2 + 4) / 6$$

$$B_4 = (-r^3 + 3r^2 - 3r + 1) / 6$$



さらに、曲線(面)の1階微分、2階微分の2乗和を評価するトレードオフパラメータを導入する。最適なトレードオフパラメータは、ABICで決定する。

$$\omega_1 \int \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)^2 dt + \omega_2 \int \left(\frac{\partial^2 f}{\partial t^2} \right)^2 dt$$

滑らかなスプラインを当てはめ、トレードオフをABICで決定する。



最小二乗法の解法



スプライン曲面を当てはめ、トレードオフパラメータで曲面の滑らかさを制御する問題は、以下の最小二乗問題を解くことに帰結する。

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ \vdots \\ F_N \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{11} & \cdots & E_{1M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ E_{N1} & \cdots & E_{NM} \\ D_{\omega 11} & \cdots & D_{\omega 1M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ D_{\omega M1} & \cdots & D_{\omega MM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ \vdots \\ s_M \end{bmatrix}$$

- F : 観測データ
- N : データ数
- s : スプライン係数(未知)
- E : スプライン係数の係数行列
- M : スプラインのknot数 $= (M_x+3) \times (M_y+3)$
- D : ω_1, ω_2 から計算される s の制約行列

| 解法 | 長所 | 短所 |
|------------------------|----------------|-------------|
| ハウスホルダー法 | 安定。メモリー配置が単純 | メモリー、計算量共に大 |
| 修正コレスキー分解法(フル行列) | やや安定、メモリー配置が単純 | メモリー、計算量共に大 |
| 修正コレスキー分解法(帯行列) | やや安定、メモリー節約 | メモリー節約に限界 |
| スカイライン法 | 汎用で自由度が大きい | メモリー節約に限界 |
| ICCG法 | メモリー節約、計算量小 | ABICが近似値 |

多様な最小二乗法の解法を使い、用途に応じて使い分ける。



スプライン曲線の当てはめ問題を拡張して、複数のデータ説明変数を求める。

最小化関数に説明変数部を追加する。

$$\sum_{i=1}^N \left[G_i - f(t_i | \mathbf{s}) - \sum_{j=1}^M \{h_j(t_i | \mathbf{b}_j)\} \right]^2 + \omega_1 \int \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)^2 dt + \omega_2 \int \left(\frac{\partial^2 f}{\partial t^2} \right)^2 dt + \sum_{j=1}^M \alpha_j \{p_j(\mathbf{b}_j)\}^2$$

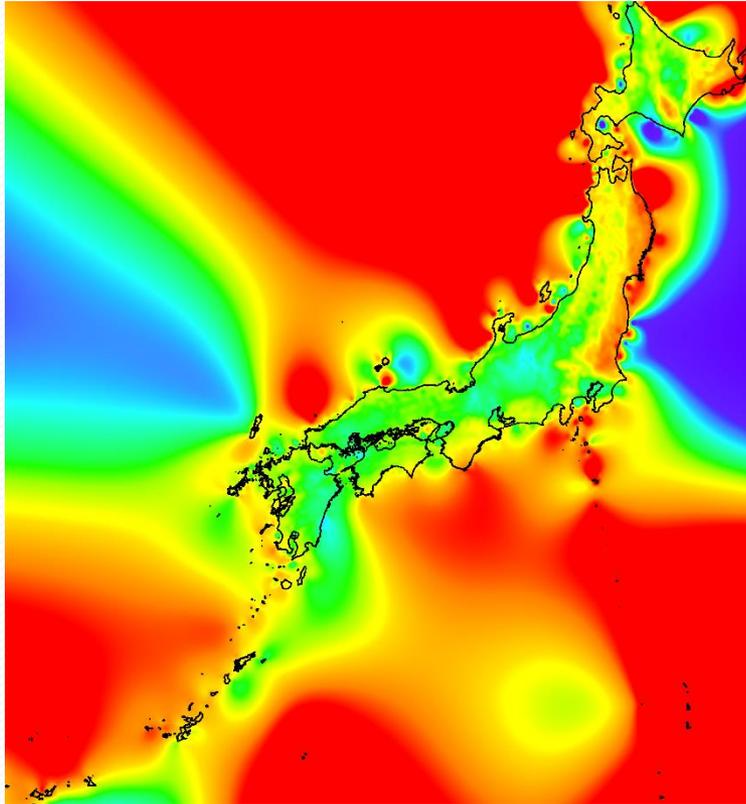
| | |
|-------------------------|--|
| \mathbf{b}_j | 説明変数(密度、ジャンプ補正、潮汐補正、気圧など) |
| $h_j(t_i \mathbf{b})$ | j 番目のデータ説明関数 |
| $p_j(\mathbf{b}_j)$ | \mathbf{b}_j のペナルティ関数 |
| α_j | 説明変数ベクトルに与えるペナルティのトレードオフパラメータ(ABICは利用できないので、“適切な値”を与える。) |



計算領域の限定

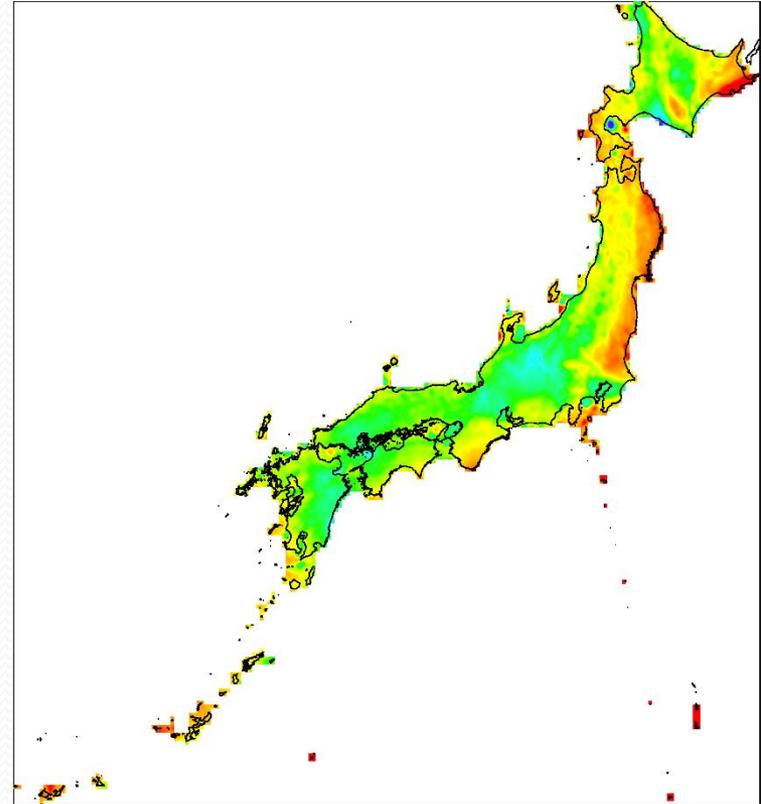


すべての領域を計算した場合



データ数: 52万点
スプラインノット数: 200×200
パラメータ数: 41,209
計算時間: 44秒

データがある領域だけを計算した場合



データ数: 52万点
スプラインノット数: 200×200
パラメータ数: 5,843 (14%)
計算時間: 13秒 (30%)

計算領域を節約することで、メモリーの節約、計算時間の短縮、ABIC評価の正確化、収束の高速化が可能になった。(メモリーマッピングが非常に面倒)



Deloune (ドロローネ) 平滑化



N個のデータ(必要に応じて補間点を追加)からドロローネ三角を構築し、ドロローネの頂点の値を平滑化する。

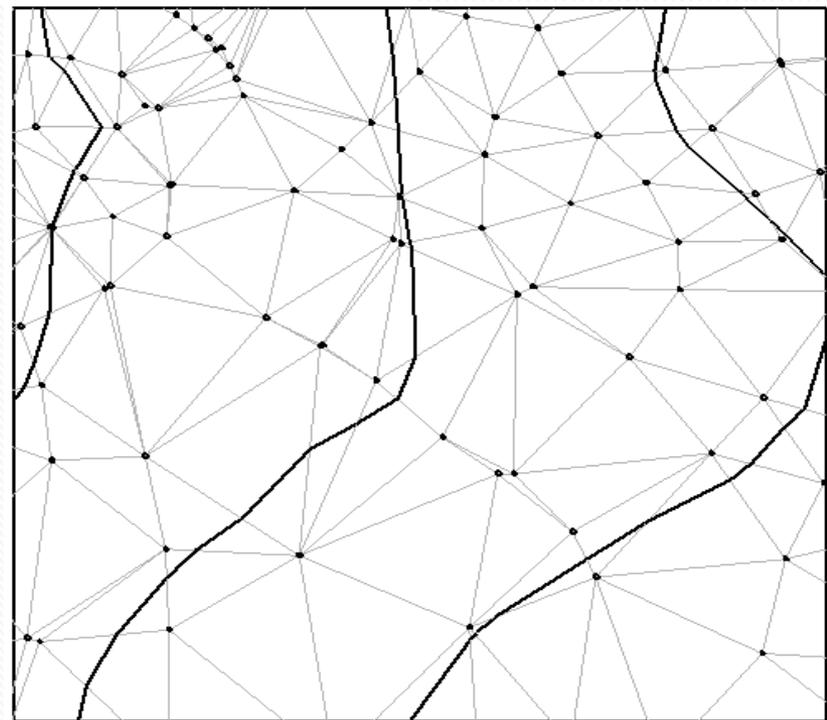
$$\sum_{i=1}^N [F_i - \rho H_i - T_i]^2 + w_1 \iint_{\nu} \|\text{ドロローネ三角形の傾き}\|^2 dx dy + w_2 \iint_{\nu} \|\text{隣り合うドロローネ三角形間の傾きの差}\|^2 dx dy$$

この最小化によって、パラメータ: **測点位置** における平滑値 T_i を推定する。

データの当てはまりの良さと、当てはめた曲面の滑らかさのトレードオフ w_1 , w_2 は、**ABIC** によって決定する。

解法として、ハウスホルダー法、**ICCG** を使用。

データの粗密の差が大きい場合、**スプライン平滑化** よりも有効





スプラインとデローネ三角形の2つを開発

平滑化プログラムが**実用的**となった重要な**3要素**

- ◆ハイパーパラメータの**ABIC**による**自動決定**
- ◆自由な**説明変数の設定**
- ◆帯行列化、ICCG法の適用と、計算領域の限定、
OpenMP並列化による、**メモリー・計算時間の節約**



重力データの高度解析のための

- データベースの構築
- 補正プログラムの標準化
- 平滑化ソフトウェアの高度化
- **解析例**
- 今後の課題



解析例1: 地殻表層密度の推定



2Dスプライン平滑化プログラムを用いて、重力データと地形データから地殻表層部の岩石密度を推定した例。

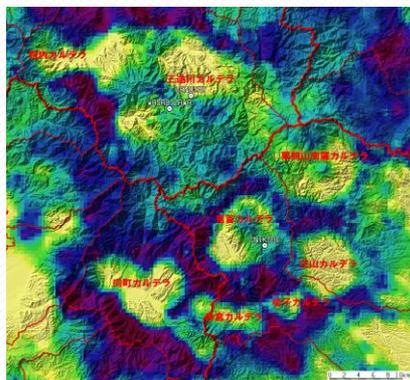
(地殻表層部→主に重力測定の標高分布範囲)

岩相の違いやカルデラ、構造線、火砕流堆積物の分布等を反映していて面白い。

解析の隠れたポイント

2次元密度解析はノイズの影響が大きい

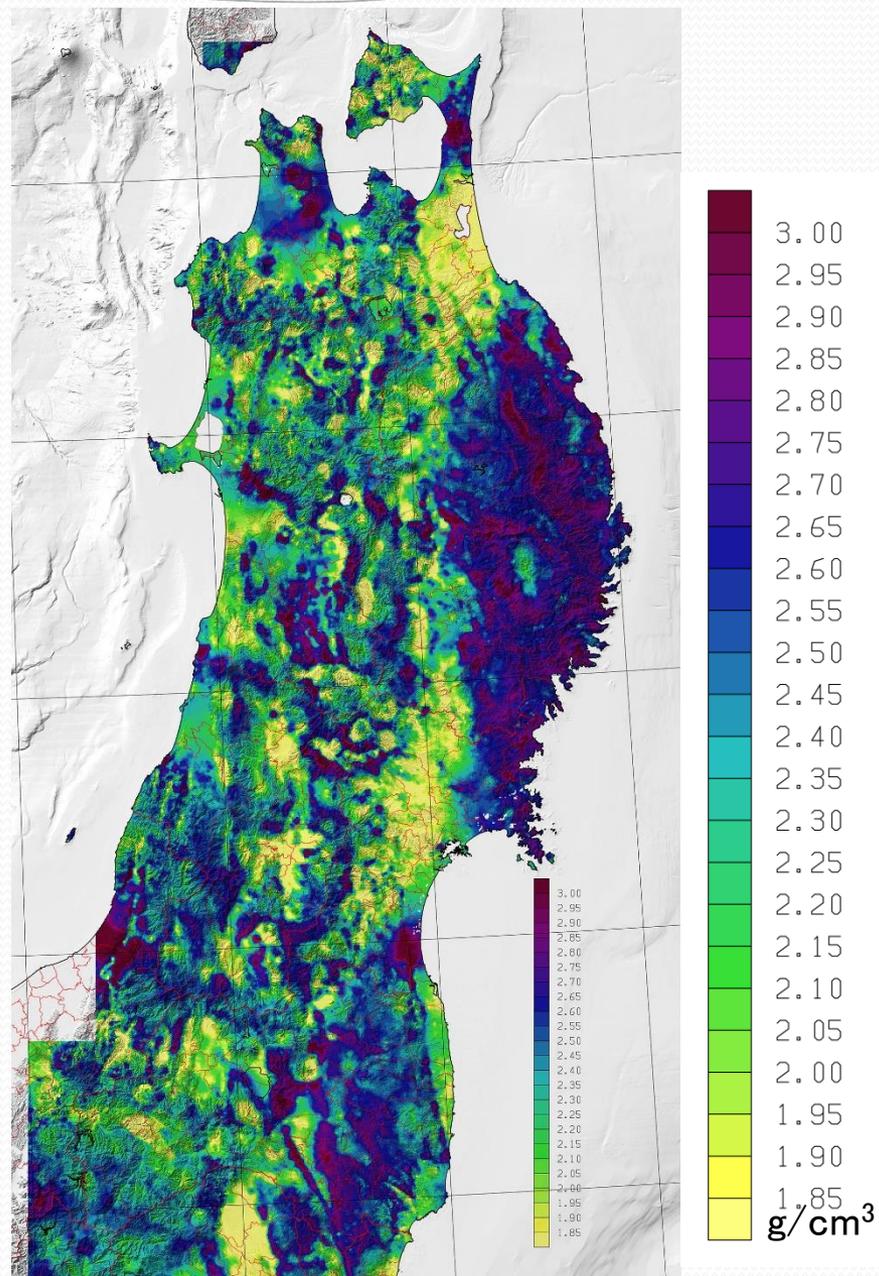
データ数の最大5%までの異常値データを自動除去



栗駒周辺の拡大図

メッシュ間隔
480 m ×
480 m

村田(2018)
地熱学会



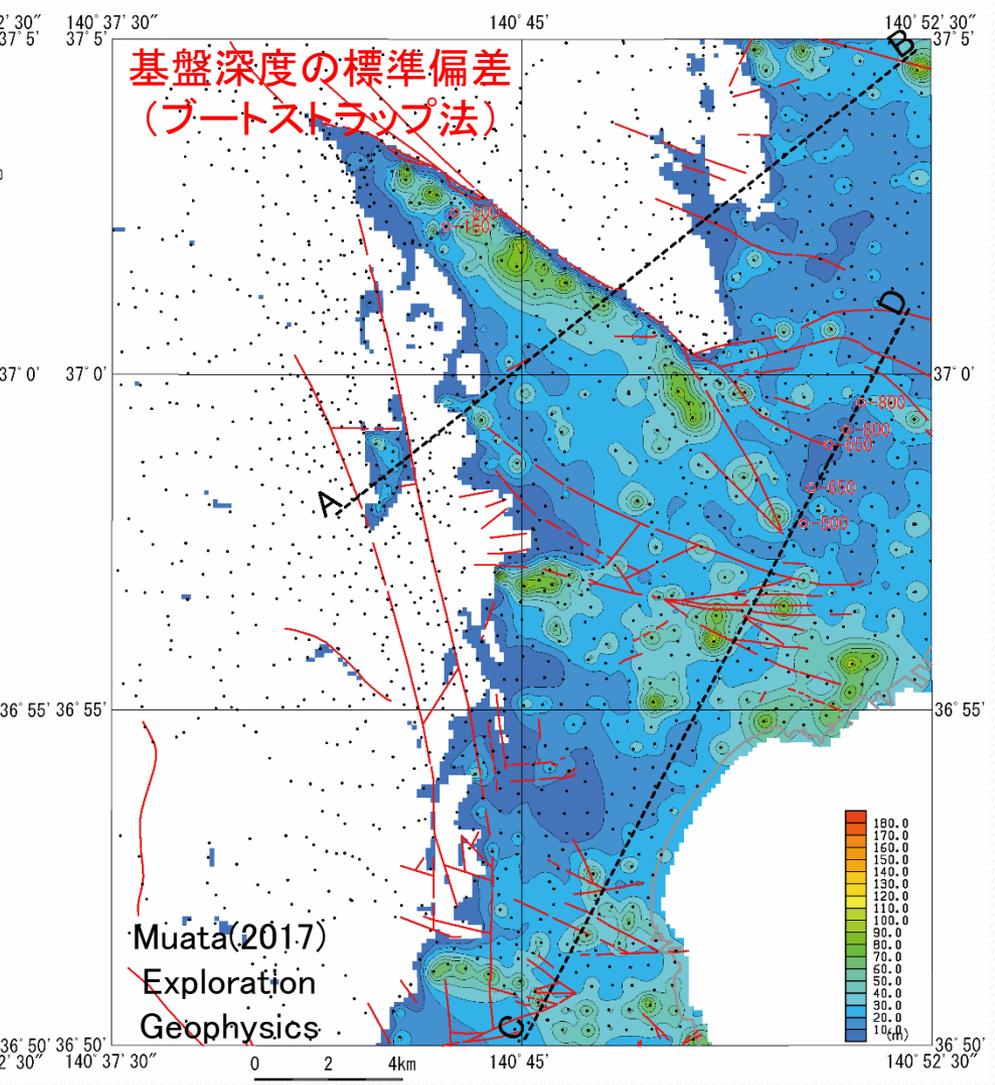
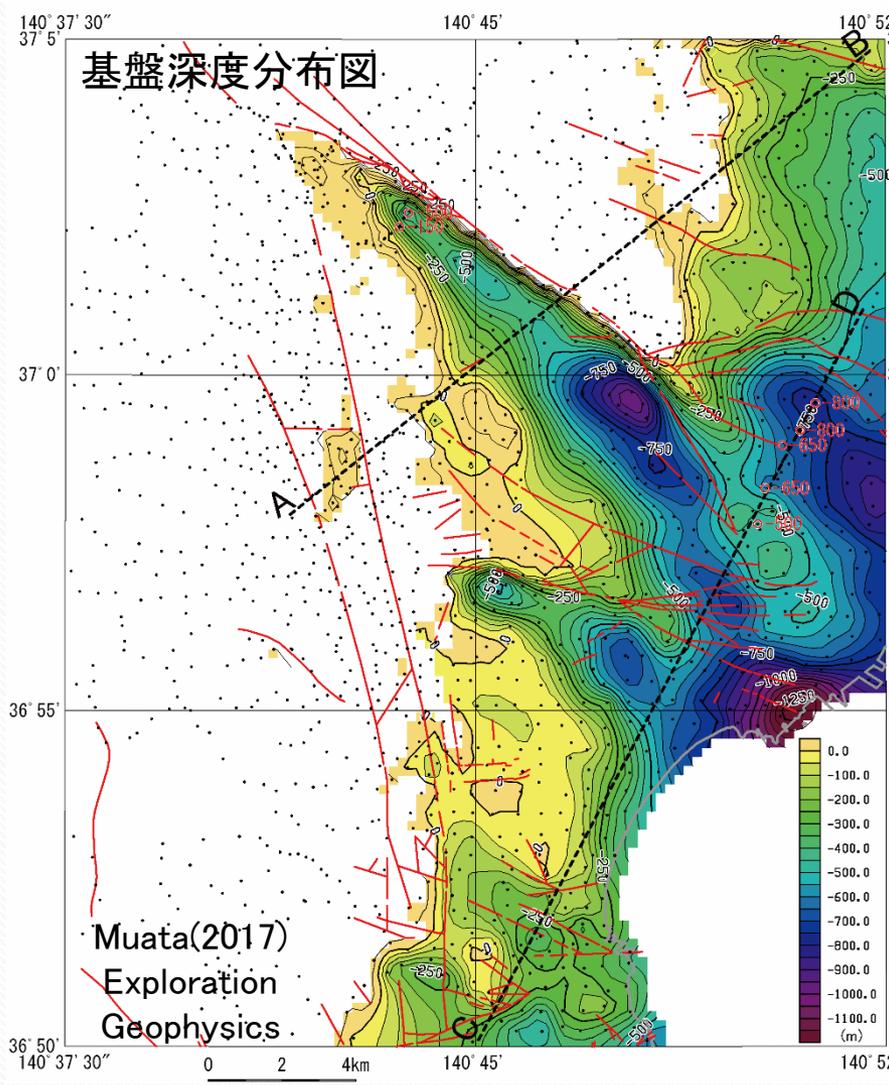


解析例2: 基盤構造解析



2Dスプライン平滑化プログラムを用いて、いわき地域の基盤(第三紀層)の上面深度を推定した例。

3次元解析はノイズの影響が非常に大きい



解析例3:時系列解析



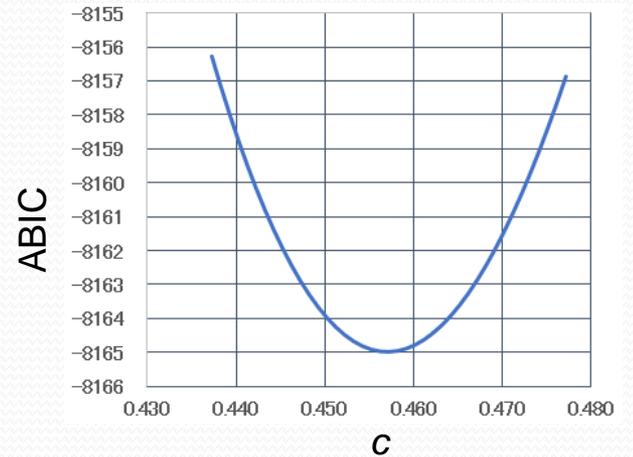
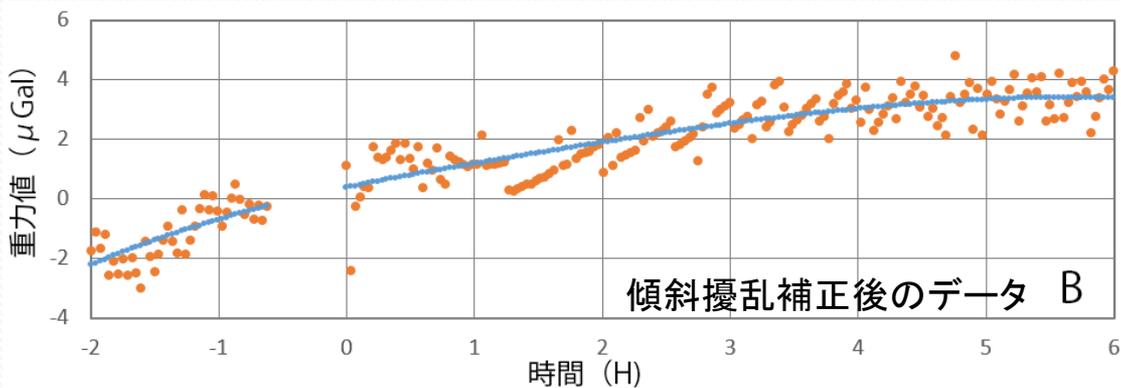
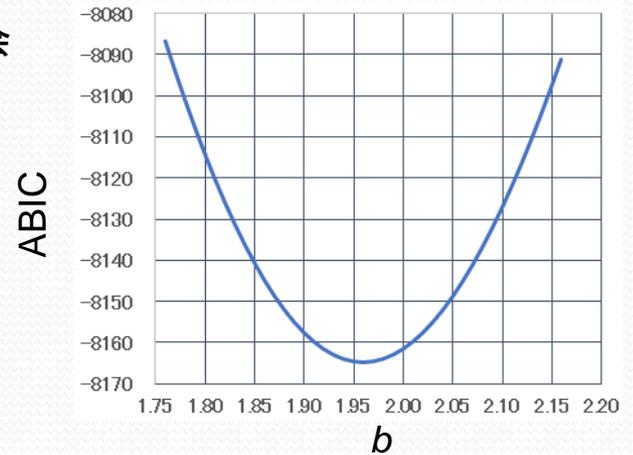
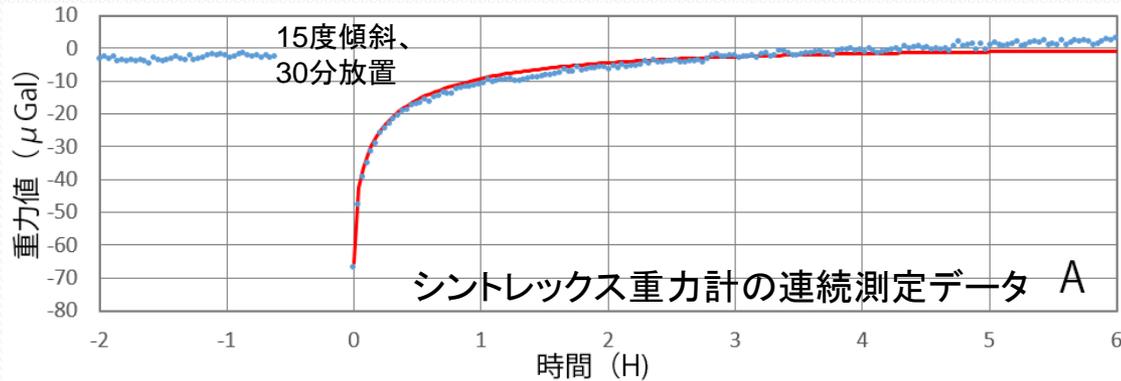
1Dスプライン平滑化プログラムを用いて、重力計の傾斜擾乱を推定した例。
平滑化プログラムは説明変数を自由に設定することで、多くの問題を解析できる。

説明変数として傾斜擾乱関数を定義して、説明関数の未知のパラメータ a 、 b 、 c をABICが最小となるように決定した。

$$f(t) = -a \exp(-b t^c)$$

t : 測定再開時からの経過時間(時)

村田(2019)
物理探査学会





高度な解析に重要なこと

- 基礎データの高精度化
- 解析プログラムの徹底した高速化、省メモリー化
- 推定誤差の提示

データと解析プログラムが揃ってきたので、今後は、

- 生データ・プログラムの公開 → 公開方法の検討が必要
- 補正プログラムのウェブ提供 → 同分野研究者のため
- 二次元密度分布の公開 → 他分野研究者のため
- 三次元密度構造の解析