

精密重力ジオイドに基づく 高さ基準系の構築に関する研究

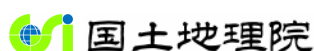
【研究期間】

平成28年4月～平成31年3月（3年間）

【予算】

特別研究経費24,737千円（3年間の総額）

国土地理院 地理地殻活動研究センター
宇宙測地研究室
松尾 功二



Geospatial Information Authority of Japan

本研究の背景・必要性

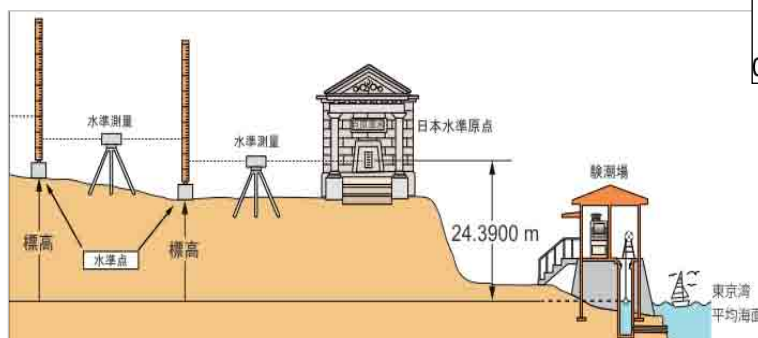
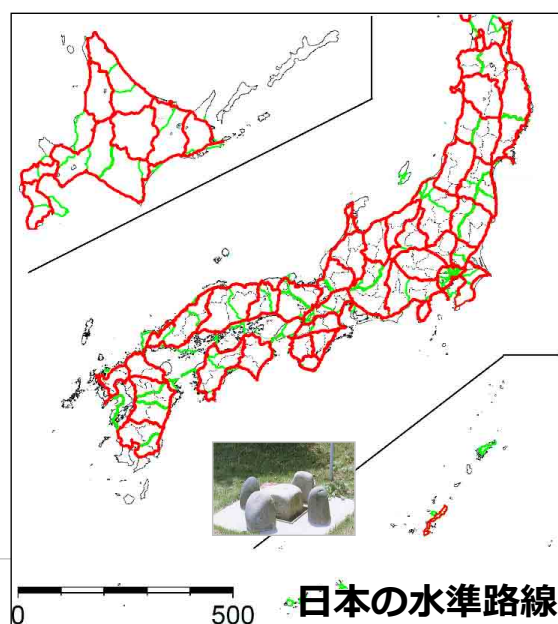


日本の標高体系

東京湾平均海面を基準面とし、
全国の路線の水準測量で標高を
測定・維持管理している

水準点は全国に約17,000点

10年以上の時間をかけ、
全路線を繰り返し測定している



水準測量に基づく標高体系の課題

労力がかかる

- ・ 水準測量には4人以上が必要

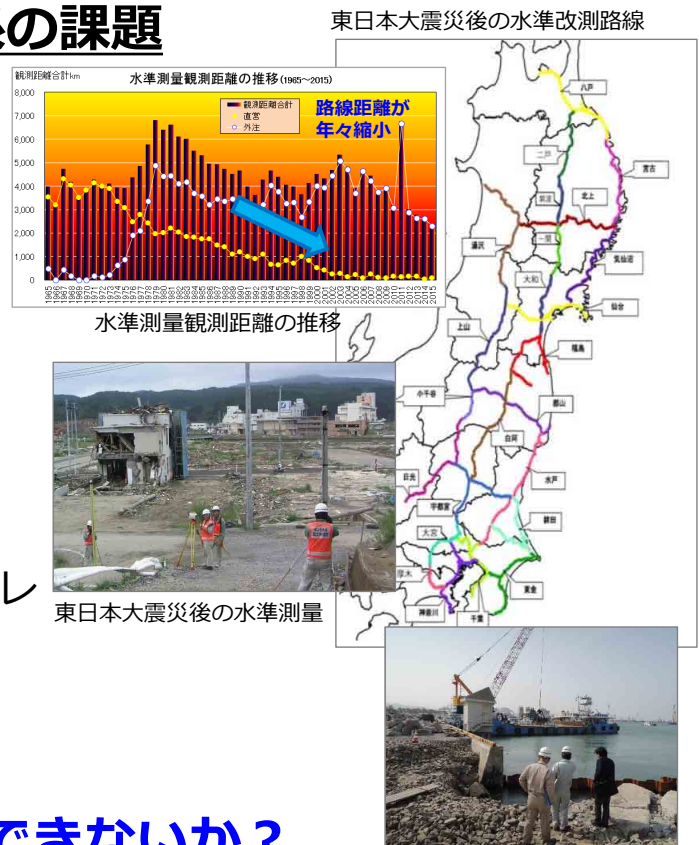
時間がかかる

- ・ 10年で全国一周する計画
- ・ 地震後の迅速な更新が困難
→ 迅速な復旧・復興に支障
※ H23 東日本大地震：改定まで約7ヶ月
H28 熊本地震：改定まで約4ヶ月
- ・ プレート運動や
地震後の余効変動等で現実とズレ

費用がかかる

- ・ $(4人以上) \times (期間) = (費用)$

より効率的な維持管理ができないか？



相馬港における護岸工事 Slide 3

新しい標高体系の構想

□ 電子基準点を基準にしたGNSSによる標高決定

GNSS

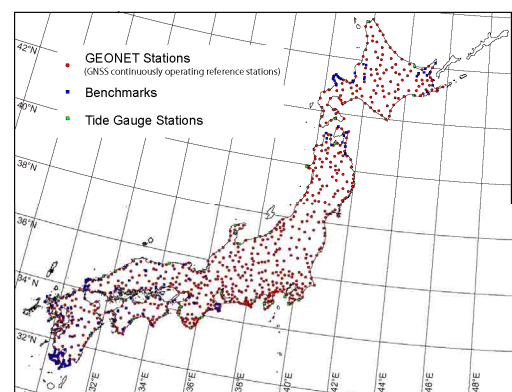
アメリカのGPSや日本のQZSS(みちびき)など測位のための人工衛星システム

電子基準点

国土地理院が全国に展開するGNSS連続観測局

<利点>

- ・ 既に全国に整備
⇒ 既存の施設（電子基準点）を活用
- ・ 常時観測している
⇒ 地殻変動に対し迅速に対応が可能
- ・ 系統誤差が少ない
⇒ 測定精度が距離に依存しない
- ・ 利便性が高い
⇒ 誰でもデータが使える



約1300点の観測網を全国に展開

➡ 現在の標高体系の弱点を克服

新しい標高体系に向けた課題

□ 高精度な重力ジオイド・モデルの開発



$$\text{標高} = \text{楕円体高} - \text{ジオイド高}$$

GNSSで得られる高さは**楕円体高**

標高を求めるためには、GNSSの**楕円体高**から**ジオイド高**を差し引く必要がある。

※ 標高：平均海面（ジオイド面）から重力の方向に沿って測った高さ

※ 楕円体高：仮想的な地球である地球楕円体からの幾何的な高さ

※ ジオイド高：地球楕円体から平均海面までの高さ

- GNSSによる楕円体高の精度（電子基準点を用いた測量の場合）⇒ 約1cm
- 重力ジオイド・モデルによるジオイド高の精度 ⇒ 約8.2cm
（水準測量の結果を使わず重力データのみでモデル構築した場合）

現在の標高体系（水準測量）の全国平均精度は **約 2.5 cm**

➡ **重力ジオイド・モデルの高精度化（2-3cm精度）が課題**

Slide 5

更なる高精度化に向けた課題

- 重力ジオイド・モデルの更なる高精度化には、
① **データ改良、拡充**、② **モデル計算手法**の改良が必要
そこで、以下を実施した

① データの改良・拡充

- 衛星重力データの改良
- 海上重力データ（重力場モデル）の改良 ⇒ **本研究**
- 数値標高モデルの改良
- 航空重力データの導入 → 2019年から実施

② モデル計算手法の改良

- 異なる重力データの結合手法の改良
- 積分手法の改良 ⇒ **本研究**
- 残差地形モデルの導入
- 重力化成手法の改良/地形密度モデルの導入/大気重力効果の補正手法の改良
→ 引き続き研究開発を実施

Slide 6

高精度で効率的な維持管理が可能な標高体系の実現に向けた、

- ・ 精密重力ジオイド・モデルの構築手法の開発
- ・ 精密重力ジオイド・モデルに基づく標高体系の試作/評価

(1) 精密重力ジオイド・モデルの構築手法の開発

① 重力データの改良及び高分解能な数値標高モデルの導入

- ・ 最新の衛星重力データおよび海上重力モデルの導入
- ・ 高分解能な数値標高モデル (DEM) データの活用

② 重力ジオイド・モデルの計算手法の高度化

- ・ 各種重力データの結合手法および数値積分手法の改良
- ・ 残差地形モデルによる計算手法の導入

③ 重力ジオイド・モデル算出ソフトウェアの構築

- ・ 重力データの拡充の際に、上記の手法によるモデルの迅速な更新を可能とする GUI操作型の重力ジオイド算出ソフトウェアを開発

(2) 精密重力ジオイド・モデルに基づく新たな標高体系の試作/評価

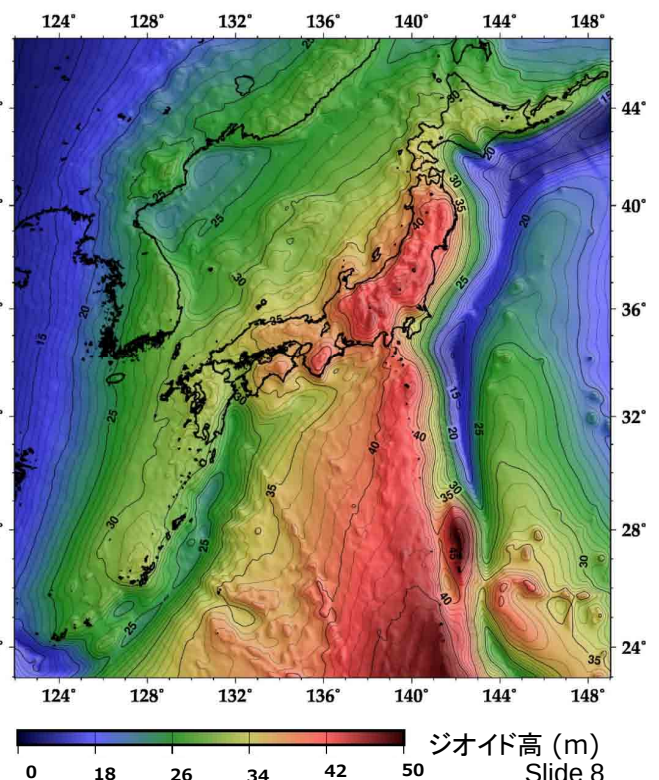
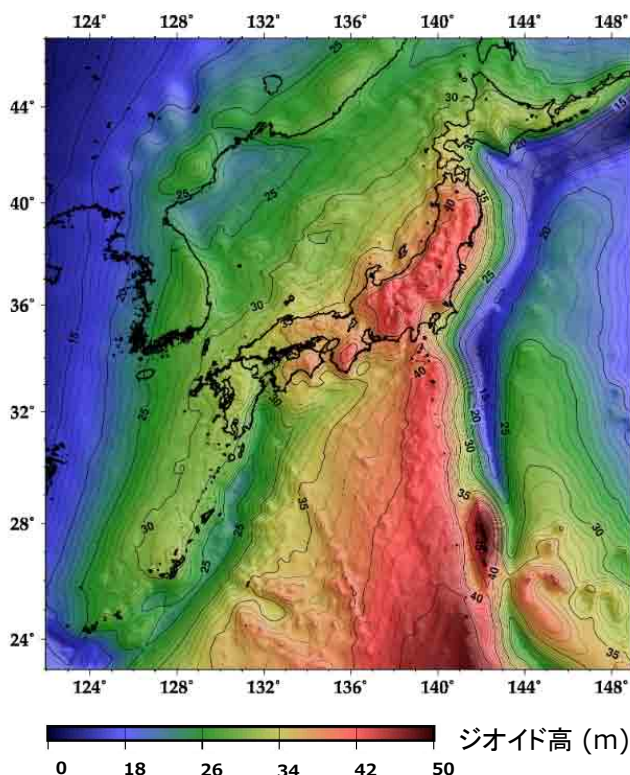
新たに開発した重力ジオイド・モデルと電子基準点のGNSSデータから標高値を算出し、現行の標高値と比較してその差を評価

Slide 7

(1) 精密重力ジオイドの構築手法の開発

JGEOID2008 (従来)

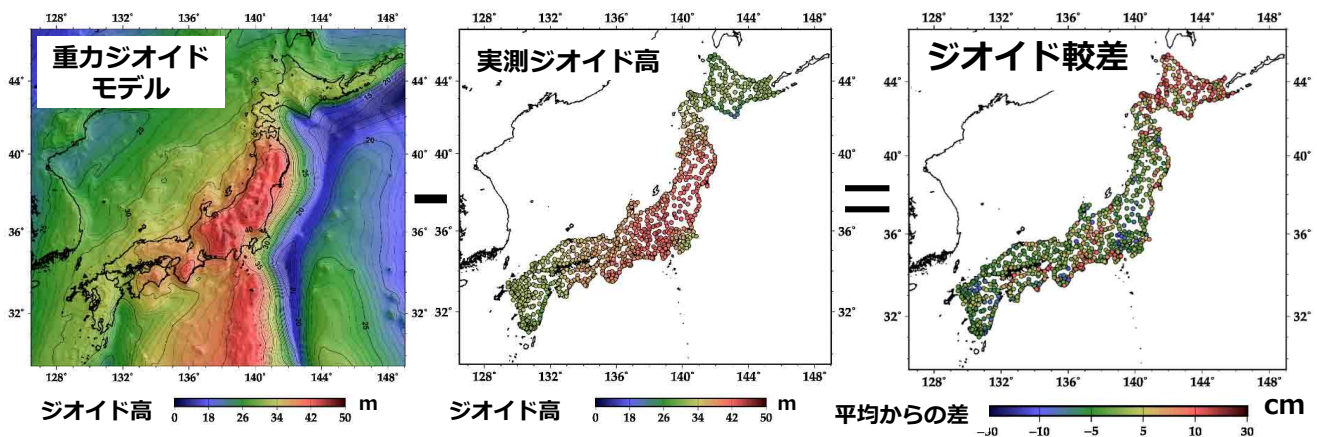
本研究



Slide 8

(1)精密重カジオイドの構築手法の開発

本研究の新たな重カジオイド・モデルの精度評価



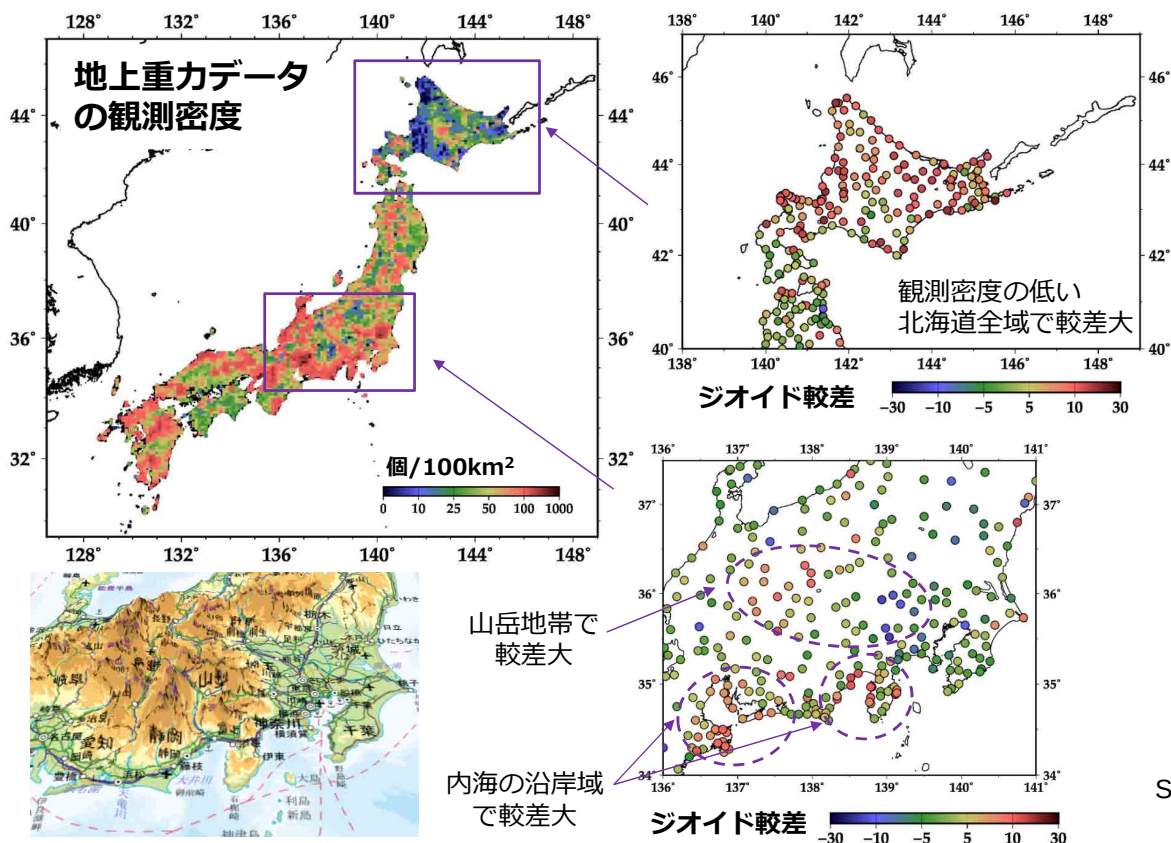
重カジオイド・モデル	平均較差 (cm)	標準偏差 (cm)
JGEOID2008	- 20.2	8.23
本研究	2.11	5.86

➡ 現行モデルと比べ、約2.4cmの精度向上
ただし、目的達成のためには更なる高精度化が必要

Slide 9

(1)精密重カジオイドの構築手法の開発

重力データの密度と残差の関係



Slide 10

(1)精密重カジオイドの構築手法の開発

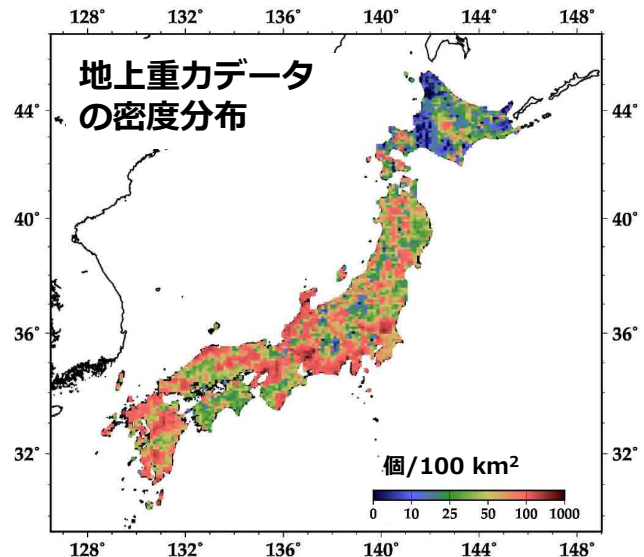
更なる高精度化に向けた課題

重カジオイド・モデルの精度

→**重カデータの品質と量**に依存

現在の重カデータの課題

- ・ 山岳部/沿岸海域で空白域
- ・ 都市部での低い観測精度
- ・ 古い観測データ
- ・ 精度の悪い観測点位置



地上重カデータの観測密度

精度向上には**高品質な重カデータ**が必須

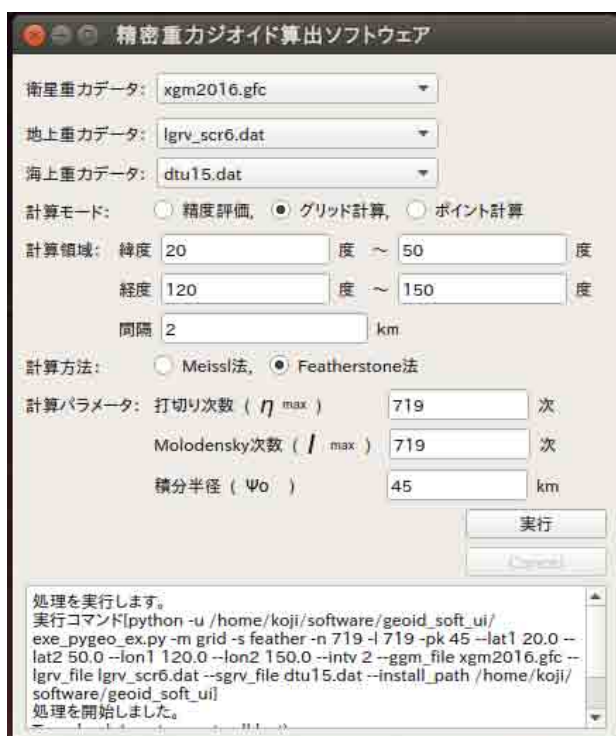
しかし**地上の重力測定**を拡充するのは**時間・費用的に非現実的**

→ **2019～2022年度に実施する航空重力測量のデータを活用し重カジオイド・モデルの更なる高精度化を行う**

Slide 11

(1)精密重カジオイドの構築手法の開発

本研究の手法を用いて、簡便な操作で**重カジオイドの算出を可能とするGUI型ソフトウェアを開発**



計算に用いる衛星・地上・海上重カデータを選択し、パラメータを設定して任意の計算範囲と格子点間隔で計算が可能

今後のデータ追加や更新の際迅速かつ容易に重カジオイド・モデルが計算可能

航空重力測量でデータが追加された際に、ジオイド・モデルを改善できる環境が整った

Slide 12

新たな試作標高と現標高の比較

電子基準点103点で試作標高から現標高を引き算して比較

従来の標高

基準面： 東京湾平均海面

測定方法： 水準測量で決定

新たな試作標高

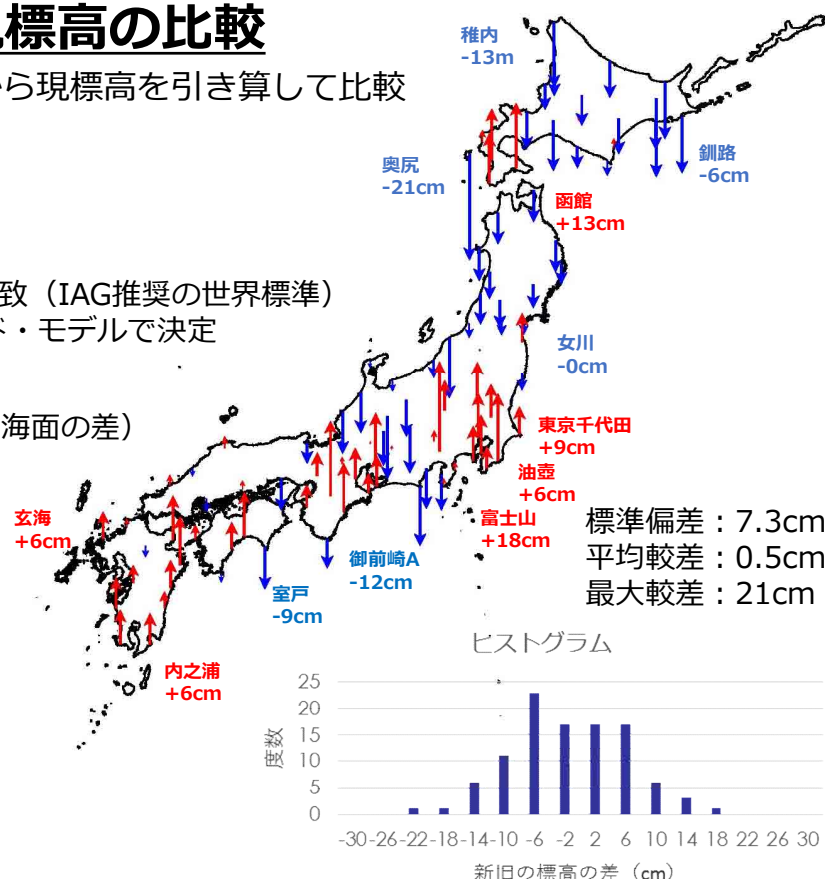
基準面： 全球平均海面 W_0 と一致（IAG推奨の世界標準）

測定方法： GNSSと重力ジオイド・モデルで決定

基準面の差は約6cm

（油壺で比較した W_0 と東京湾平均海面の差）

差の度数分布は、ほぼ正規分布重力ジオイド・モデルの誤差6cmの3 σ 内にほぼ収まるため統計的に妥当な範囲内で整合といえる



当初目標の達成度・成果活用の見込み

(達成度)

(1) 日本の重力ジオイド・モデルの更なる高精度化

データの品質・密度を大きく改善する航空重力データの整備計画を受け、従来より高精度な重力ジオイドを算出する手法、本手法により計算を行うGUI操作型ソフトウェアを開発した。航空重力データが追加された際に、精密重力ジオイド・モデルが構築できる環境を整備した。

(2) 精密重力ジオイドに基づく新たな標高体系の試作

本研究で開発したジオイド・モデルを用いて、水準測量に依らない初の標高体系を試作した。現標高と比較したところ、完全に独立したデータと手法にも関わらず、両者はジオイド・モデルの誤差から予想される範囲内で整合し、本手法の妥当性が示された。

(成果活用の見込み)

- 本研究の計算手法とソフトウェアにより、精密重力ジオイドの構築が可能となった。全国の航空重力データが整備された際には、目標精度でGNSSによる精密標高決定を可能とする精密重力ジオイドの整備に活用される見込みである。

2018

2019

2020

2021

2022

2023

2024

□ 精密重力ジオイドの高精度化に向け、航空重力測量を進める

2018年度：航空重力測量の準備

－ 重力計の購入、測定線の計画策定、検定線の測量

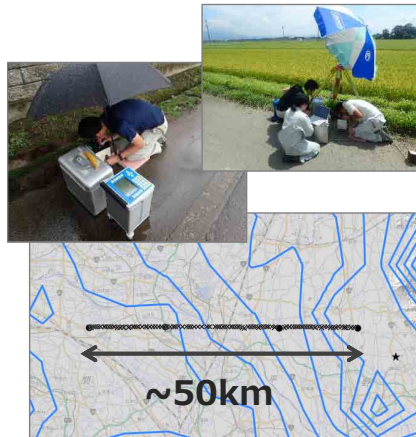
2019～2022年度：航空重力測量の実施



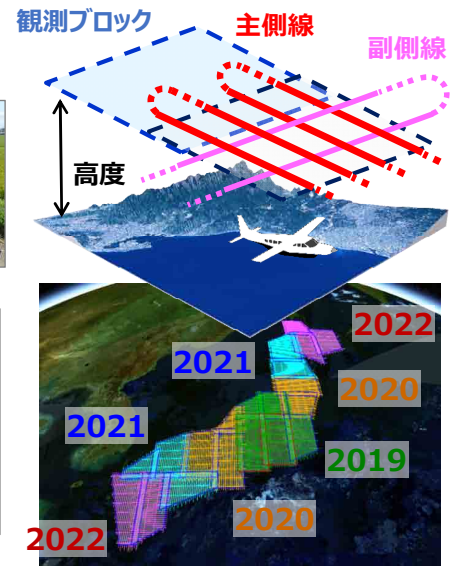
航空重力計TAGS-7
(Micro-g LaCoste Inc.)

2018年12月に納入

*TAGS : Turnkey Airborne Gravity System



航空重力データの
検定のための重力測量



各年の測定線 Slide 15

2018

2019

2020

2021

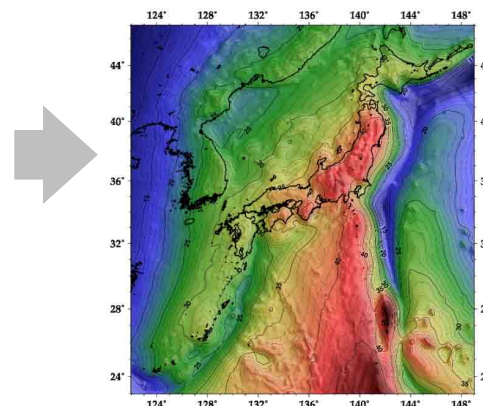
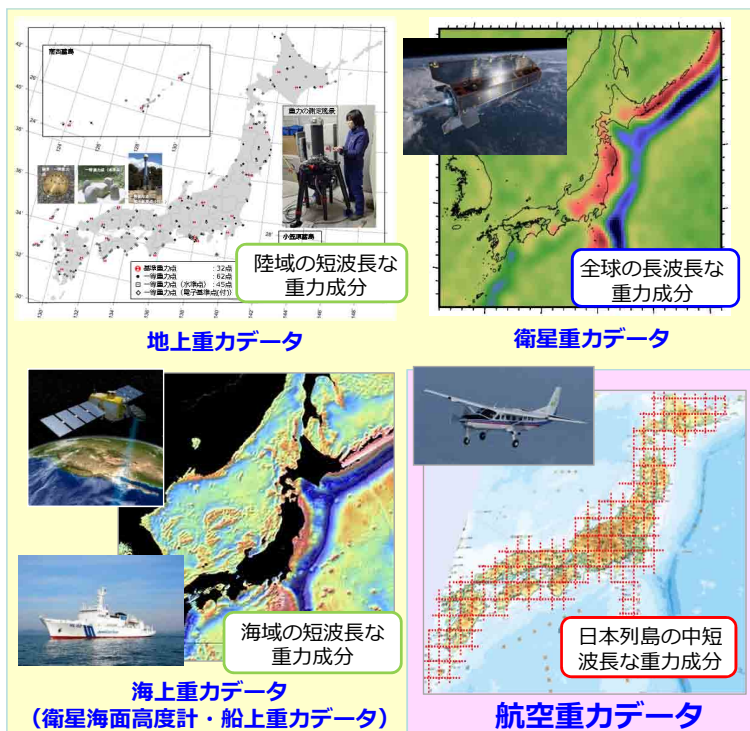
2022

2023

2024

2023年度：全国の精密重力ジオイドの計算

精密重力ジオイド

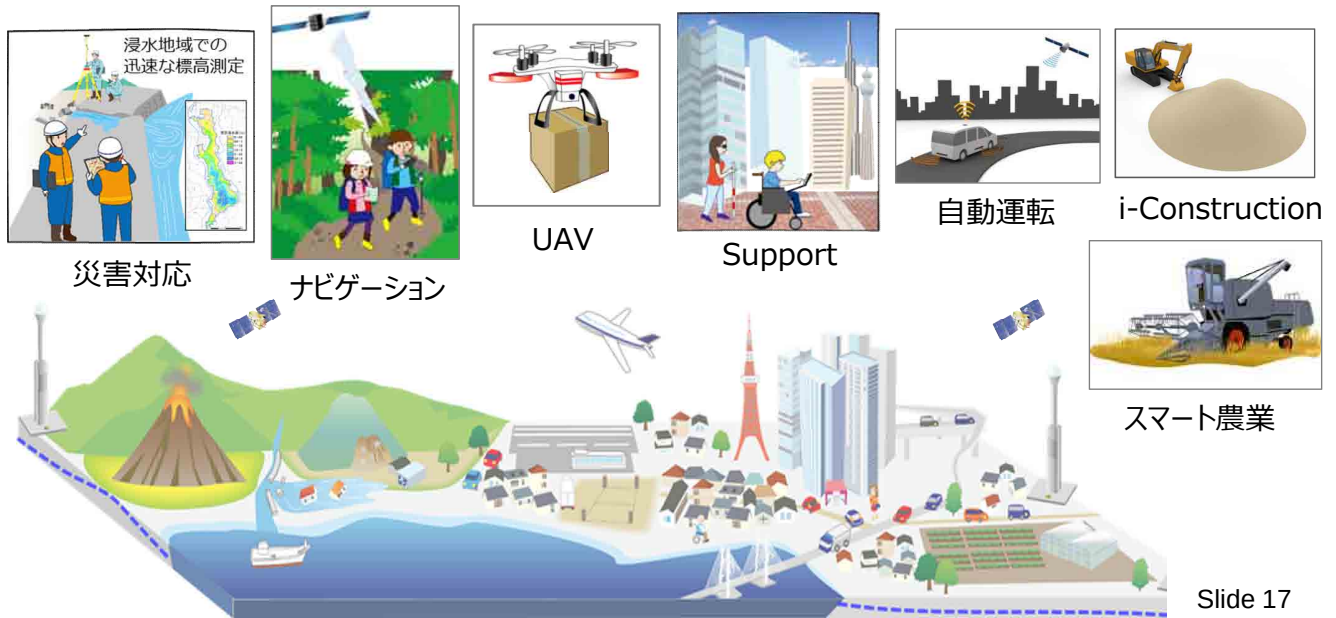


航空重力測量でデータ
が追加されたのち、
本研究で開発した手法
ソフトウェアを用いて
目標精度3cmのジオイド
・モデルを開発する。



2024年度：新たな標高体系への移行

- 標高体系の維持管理の効率化、災害時の迅速な標高値の提供
- リアルタイム3次元測位データの提供と新たなサービス創出への期待



Slide 17

以下、参考資料

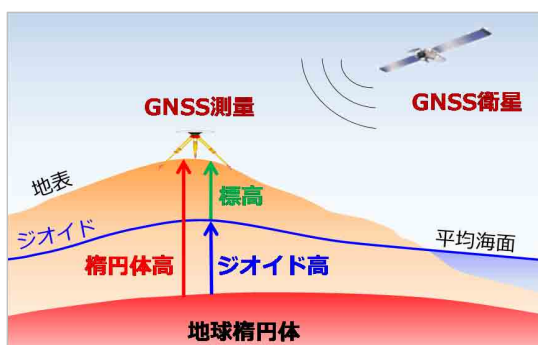
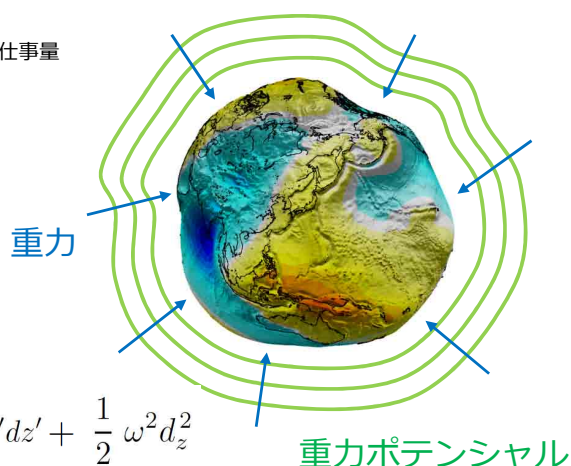
ジオイド

※ 重力ポテンシャル：
地球中心から任意の高さまで移動させるのに必要な仕事量

地球が持つ重力ポテンシャルのうち、
全球の平均海面と最も一致する
等ポテンシャル面

国際的な定義（IAG2015）では、当ポ
テンシャル値は、
 $W = 62\,636\,853.4 \text{ m}^2/\text{s}^2$

$$W = G \iiint_v \frac{\rho(x', y', z')}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}} dx' dy' dz' + \frac{1}{2} \omega^2 d_z^2$$



ジオイド高

地球楕円体（GRS80やWGS84）から
ジオイドまでの高さ

$$N_1(\lambda, \phi) = \frac{1}{\gamma(0, \phi)} [W(0, \lambda, \phi) - U_0]$$

地球楕円体の重力値
(正規重力)

地球楕円体の重力ポテンシャル
(正規重力ポテンシャル)

Slide 19

重力的手法によるジオイド決定

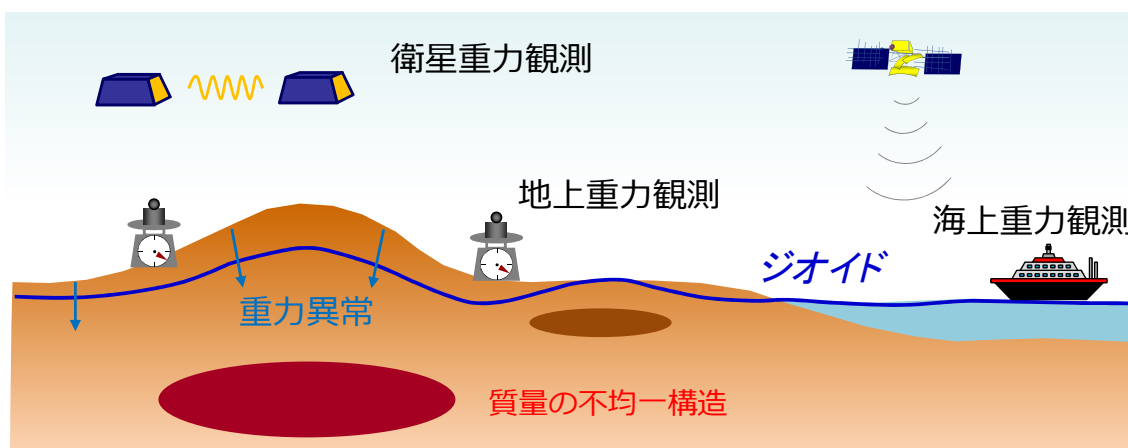
重力は、地球の質量分布に依存 → ジオイド面は重力の分布に依存
重力の分布がわかれば、ジオイド高もわかる！

- ・ ジオイド高は、重力の分布を全球空間積分して算出が可能
- ・ 重力の分布は、衛星と地上観測から比較的容易に計測が可能

ただし、重力の分布を積分してジオイド高を正しく算出するためには、

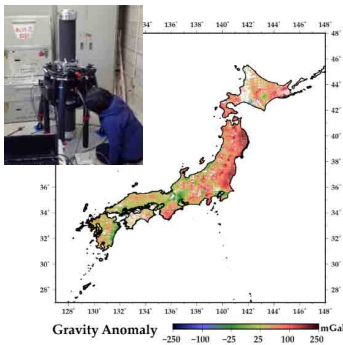
1. 地球上の全ての領域の重力データが必要
2. ジオイド面上の重力の分布が必要（そのための処理：重力化成が必要）

➡ 海陸の重力データと衛星重力データ、そして数値標高モデルを活用し
必要なデータ及び処理を実施（除去復元法+ヘルマート第二凝縮化成）



Slide 20

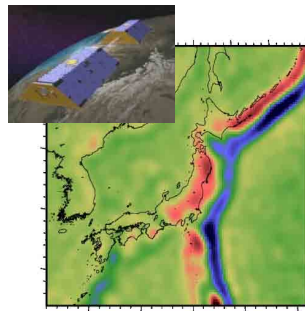
地上重力



陸域の中短波長帯域を網羅
(~80km)

- ◎ 計測精度が高い
- × 陸域のアクセスしやすい領域のみ利用可能

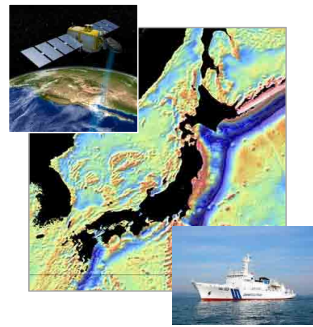
衛星重力



全球の長波長帯域を網羅
(80~2,000km)

- 地球上の全領域で利用可能
- × 空間分解能が低い

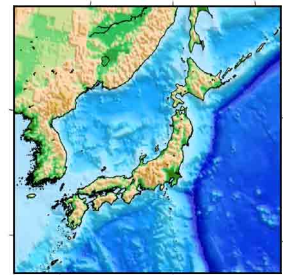
海上重力



海域の中短波長帯域を網羅
(~80km)

- 計測精度が高い
- × 海域のみ利用可能
- × 沿岸域の計測精度が低い

数値標高モデル



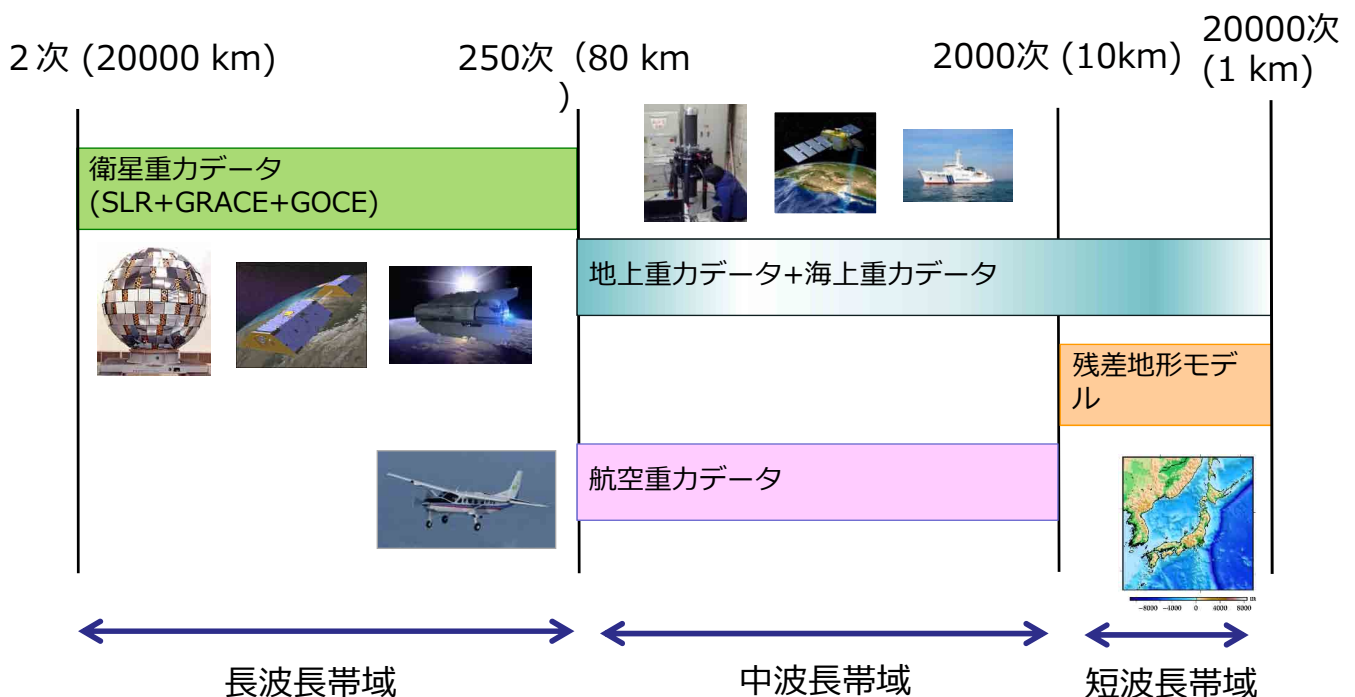
陸域の短波長帯域を網羅
(1~10km)
重力データの化成処理 (ジオイド面上での重力分布の算出) に必要

➡ **それぞれの重力データの特長を考慮し、データを最適に結合する必要がある**

Slide 21

各重力観測で対象とする空間領域

球面調和関数の次数 (空間波長)



① データの改良

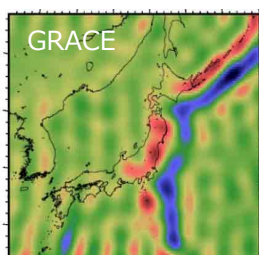
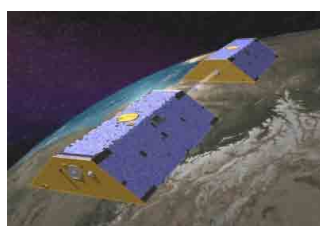
➤ 衛星重力データの改良

- 重力衛星GRACEの初期データ（先行研究：JGEOID2008）
⇒ 最新の重力衛星GOCEの全期間データ（本研究）

➡ 重カジオイド・モデルの長波長成分の改善

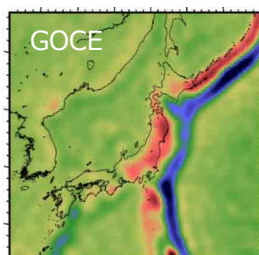
重力衛星GRACE

- 2002年から運用
- 現行ジオイドに導入済み
- 空間分解能：約100km
- 計測精度：100cm（ジオイド高）



重力偏差衛星GOCE

- 2009年～2013年まで運用
- 現行ジオイドに未導入
- 空間分解能：約70km
- 計測精度：45cm（ジオイド高）



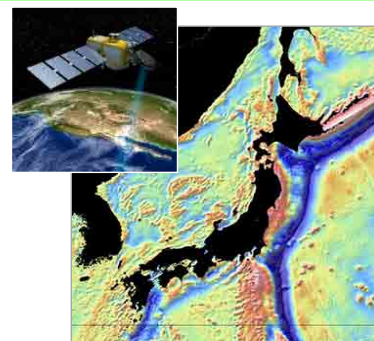
重力異常 -200 -100 0 100 200 mGal

Slide 10

➤ 海上重力場モデルの改良

- 古い衛星高度データに基づくKMS02モデル
⇒ 最新の衛星高度データに基づくDTU15モデル

KMS02の精度	5.20 mGal
DTU15の精度	3.14 mGal



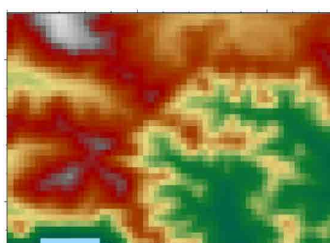
➡ 海域における重カジオイド・モデルの改善

➤ 高分解能な数値標高モデルの導入

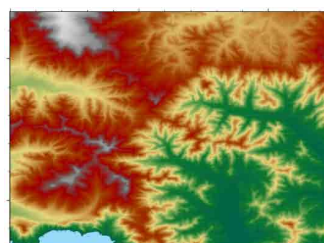
- 国土地理院発行の 250mメッシュDEM ⇒ 10mメッシュDEM
⇒ 厳密な重力化成処理が可能になる

➡ 重カジオイド・モデルの短波長成分の改善

250m
メッシュ



10m
メッシュ



Slide 24

② 計算手法の高度化

基本的な計算手法は先行研究（JGEOID2008）と同じく、ヘルマート第二凝縮化を用いた除去復元法。新たに、以下の点を改良した。

➤ 異なる重力データを結合する処理の高度化

- Meissl法 (Meissl, 1971)からFEO法 (Featherstone et al., 1998)へ
⇒ 衛星および地上重力データに含まれる長波長誤差の影響の低減

➡ 重力ジオイド・モデルの長波長成分の改善

➤ 積分処理の高度化

- 1次元FFT積分から直接積分へ（並列計算処理を実装し効率化）
→ FFTで生じる位相ずれや振幅減衰の影響を解消

➡ 重力ジオイド・モデルの短波長成分の改善

➤ 残差地形モデルの導入

- 地形由来の重力成分を10mDEMを用いたモデル計算で推定して追加
→ 内挿処理の高度化、ジオイド起伏の短波長成分の補強

➡ 重力ジオイド・モデルの短波長成分の改善

Slide 12

改良によるモデルの改善効果

重力ジオイド・モデルの高精度化

① 重力データの改良及び高分解能な数値標高モデルの導入

→ 約1.4cm

② 重力ジオイドの計算手法の高度化

→ 約1.0cm

各種重力データの結合手法の改良

→ 約3mm

数値積分手法の改良

→ 約3mm

残差地形モデルによる計算手法の導入

→ 約4mm

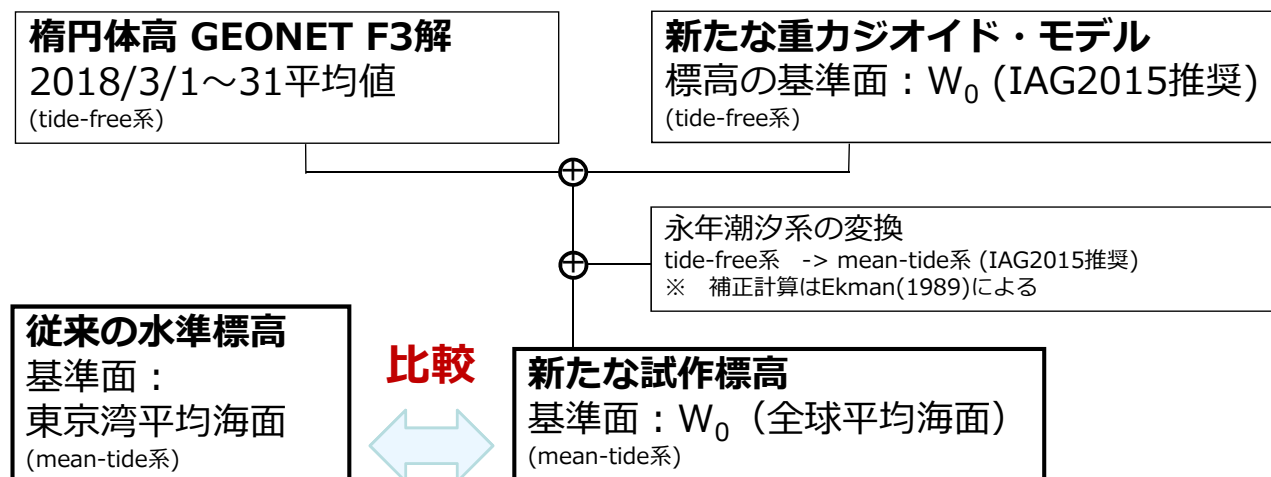
全体： 約2.4cm

- 各項目の改善効果は、パラメータ設定により大きく変わる
例えば、全球重力場モデルの次数（ $n_{\max}$ ）を低くすると、
データ改良の効果が下がる一方、結合手法の改良の効果が上がる。

(2)新たな標高体系の試作及び評価

従来の標高（水準測量）とは完全に独立のデータ、手法で標高を計算

- 楕円体高（電子基準点）とジオイド高（重力ジオイド・モデル）の差から標高を計算
- 国際標準（IAG2015決議）にそって、全球平均海面 W_0 を基準（mean-tide系）



➡ 両者を比較し標高体系の構築手法の妥当性を評価

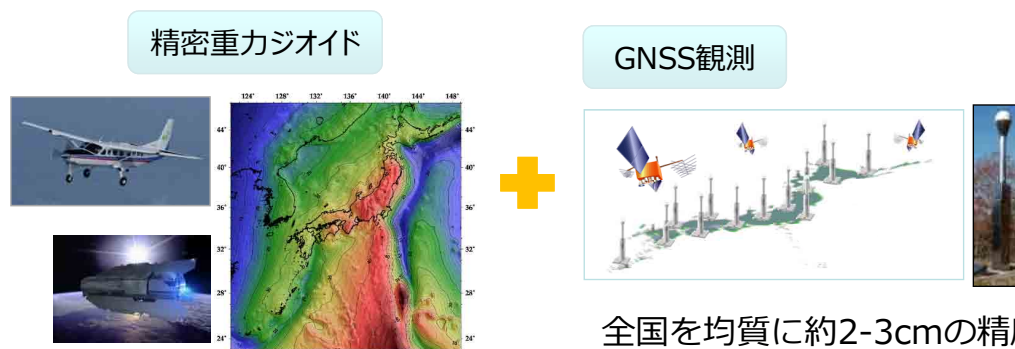
Slide 27

混合ジオイドによる標高体系と精密重力ジオイドの標高体系

混合ジオイド（従来）による標高体系



精密重力ジオイド（本研究）による標高体系



Slide 28

$$N = N_{CGGM} + N_{ind} + \frac{R}{4\pi\gamma_Q} \iint_0^{\psi_0} (\Delta g_{faye}^{grid} - \Delta g_{GGM}^{grid}) \tilde{S}(\cos \psi) d\sigma$$

■ N_{CGGM} (GGM-derived cogeoid height)

$$N_{GGM}^c = \frac{GM_1 - GM_2}{r\gamma_Q} - \frac{W_0 - U_0}{\gamma_Q} - \frac{GM_1}{a_1\gamma_Q} \sum_{n=2}^{n_{max}} \left(\frac{a_1}{r}\right)^{n+1} \sum_{m=0}^n \left[\left(\bar{C}_{nm} - \left(\frac{GM_2}{GM_1}\right) \left(\frac{a_2}{a_1}\right)^n \bar{C}'_{2n} \right) \cos(m\varphi) + \bar{S}_{nm} \sin(m\varphi) \right] \bar{P}_{nm}(\cos \theta)$$

■ N_{ind} (Indirect effect)

$$N_{ind} = -\frac{\pi G \rho_0}{\gamma_Q} H_p^2 - \frac{G \rho_0 R^2}{6\gamma_Q} \iint \frac{H^3 - H_p^3}{l^3} d\sigma$$

Slide 29

$$N = N_{CGGM} + N_{ind} + \frac{R}{4\pi\gamma_Q} \iint_0^{\psi_0} (\Delta g_{faye}^{grid} - \Delta g_{GGM}^{grid}) \tilde{S}(\cos \psi) d\sigma$$

■ Δg_{faye}^{grid} (faye gravity anomaly)

$$\Delta g_{res-bouguer} = g_{obs} - \gamma(H_p) + AC + TC - RTM$$

$$\gamma(H_p) = \gamma_\varphi - \frac{2\gamma_a}{a} \left\{ 1 + f + m - \left(3f - \frac{5m}{2} \right) \sin^2 \varphi \right\} H_p + \frac{3\gamma_a}{a^2} H_p^2$$

$$AC = 0.8656 - 9.727 \times 10^{-5} H_p + 3.482 \times 10^{-9} H_p^2$$

$$m = \omega^2 a^2 b / GM$$

$$TC = \frac{G \rho_0 R^2}{2} \iint \frac{(H - H_p)^2}{l^3} d\sigma$$

$$RTM = 2\pi G \rho_0 (H_p - H_{p,nmax})$$

$$\Delta g_{res-bouguer} \rightarrow \Delta g_{res-bouguer}^{grid} \quad \leftarrow \text{Gridding by least squares collocation with the Gauss-Markov covariance function}$$

$$\Delta g_{faye}^{grid} = \Delta g_{res-bouguer}^{grid} + RTM^{grid}$$

Slide 30

$$N = N_{CGGM} + N_{ind} + \frac{R}{4\pi\gamma_Q} \iint_0^{\psi_0} (\Delta g_{faye}^{grid} - \Delta g_{GGM}^{grid}) \tilde{S}(\cos \psi) d\sigma$$

■ Δg_{GGM}^{grid} (GGM-derived gravity anomaly)

$$\Delta g_{GGM}^{grid} = -\frac{GM_1 - GM_2}{r^2} + \frac{2(W_0 - U_0)}{r^2} + \frac{GM_1}{a_1^2} \sum_{n=2}^{n_{max}} (n-1) \left(\frac{a_1}{r}\right)^{n+2} \sum_{m=0}^n \left[\left(\bar{C}_{nm} - \left(\frac{GM_2}{GM_1}\right) \left(\frac{a_2}{a_1}\right)^n \bar{C}'_{2n} \right) \cos(m\varphi) + \bar{S}_{nm} \sin(m\varphi) \right] \bar{P}_{nm}(\cos \theta)$$

■ $\tilde{S}(\cos \psi)$ (modified Stokes-kernel)

$$\tilde{S}(\cos \psi) = S_{n_{max}}^{l_{max}}(\cos \psi) - S_{n_{max}}^{l_{max}}(\cos \psi_0)$$

$$S_{n_{max}}^{l_{max}}(\cos \psi) = S_{n_{max}}(\cos \psi) - \sum_{k=2}^{l_{max}} \frac{2k+1}{2} t_k(\cos \psi_0) P_k(\cos \psi)$$

$$S_{n_{max}}(\cos \psi) = S(\cos \psi) - \sum_{n=2}^{n_{max}} \frac{2n+1}{n-1} P_n(\cos \psi)$$

$$S(\cos \psi) = \csc\left(\frac{\psi}{2}\right) - 6 \sin\left(\frac{\psi}{2}\right) + 1 - \cos \psi \left(5 + 3 \ln \left[\sin\left(\frac{\psi}{2}\right) + \sin^2\left(\frac{\psi}{2}\right) \right] \right)$$

Modification parameters

$n_{max} = 719$
(degree of spheroidal kernel)

$l_{max} = 719$
(Molodensky type modification)

$\psi_0 = 25 \text{ km}$
(spherical cap size of integration)

Slide 31