

合同シンポジウム

第一部 第42回 測量技術講演会

国土地理院近畿地方測量部

公益社団法人 日本測量協会関西支部

高度な地理空間情報を支える 「国家座標」の展望

国土交通省 国土地理院
測地部
山際 敦史

1. 地殻変動補正

近代測量の変遷

明治期からの近代測量は、
角度の計測から距離の計測、さらに衛星電波を用いた計測へと進化

経緯儀による三角測量

測距儀による三辺・多角測量

水準儀による水準測量

GNSS測量

4

高精度測位時代の到来

- CLASやPPPなど衛星測位の精度が向上し、
現在の絶対座標値が容易に得られるようになった
- これらの測位結果は自動運転などに応用されつつある

主な利用分野

自動運転 → 自動車、船舶、除雪車等
自動車用3次元地図で利用

ICT施工

ドローン

スマート農業
出典：地理空間情報活用推進協議会事務局G空間プロジェクトパンフレット

※CLAS:みちびきのセンチメートル級測位補強サービス PPP:精密単独測位

位置の基準を与えるための業務

地球の位置の基準は、国土地理院を含む世界各国の連携のもと、地球規模の測地観測によって構築・維持されています。

国土地理院は、国際的に決められた座標系ITRFに基づき日本の位置を決定し、さらに、各地の電子基準点・三角点の位置を決定しています。これらは、日本の位置の基準・共通ルール（国家座標）として、国土の明示・管理・保全及び各種測量に利用されており、私たちの生活を支えています。

位置の基準を与えるために
国土地理院で実施している業務

VLBI測量
国際的な座標系を決めるのに使われる国際観測の一つ。

電子基準点
測位衛星を使った測量で使用する基準点

地磁気測量
磁北と真北のずれを計測

水準測量
高さの基準を与えるための測量

重力測量
より正確な高さの基準を与えるための測量

GNSS
衛星測位システム

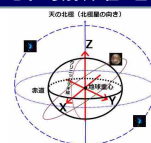
日本の位置を決定しプレート運動を捉える

VLBI

国土地理院石岡測地観測局（茨城県）のVLBI観測施設では、宇宙からの電波を世界の複数の観測局とともに観測することで、位置の基準と日本の位置を決定し、プレート運動をmm単位の精度で捉えています。

VLBI:超長基線電波干渉法 (Very Long Baseline Interferometry)

地球の姿勢、位置の基準を決める



日本の位置を決める

VLBI観測によって決まる地球における日本の位置は、全ての社会生活の基礎となっている。



プレート運動を捉える



衛星測位システムによる測位技術の普及

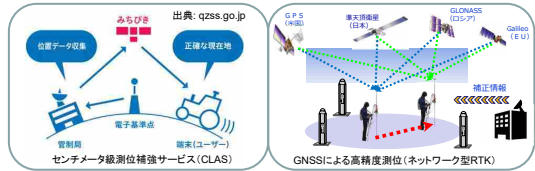
- GPSなどの衛星測位システムを用いた位置計測（測位）技術が普及し、現在では誰もが容易に位置情報を得ることができる
- 2018年11月、日本の準天頂衛星システム(QZSS)のサービスが開始され、より迅速かつ高精度な位置計測が可能となりつつある

衛星測位システム

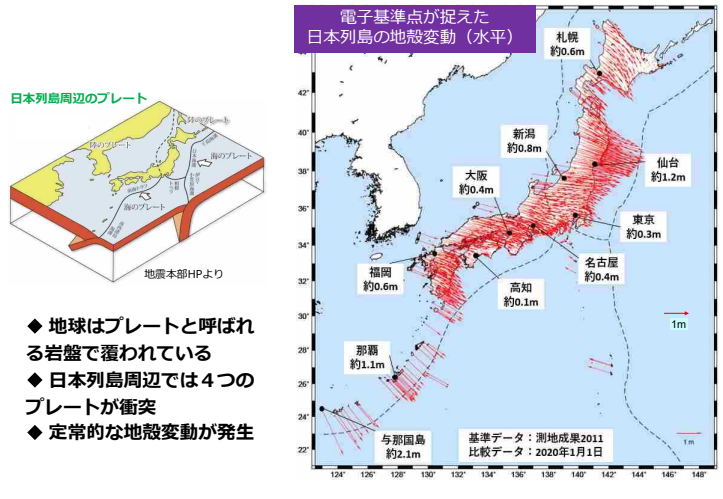
- ・ GPSに代表される人工衛星から発射される信号を用いて位置計測等を行うシステム
- ・ 現在、GPS(米)、QZSS(日)、GLONASS(露)、Galileo(欧)、等のシステムが整備されている
- ・ カーナビ、携帯電話、測量、地殻変動に加え、自動走行、ドローンによる物流、自動制御など様々な分野で利用



リアルタイム高精度測位技術

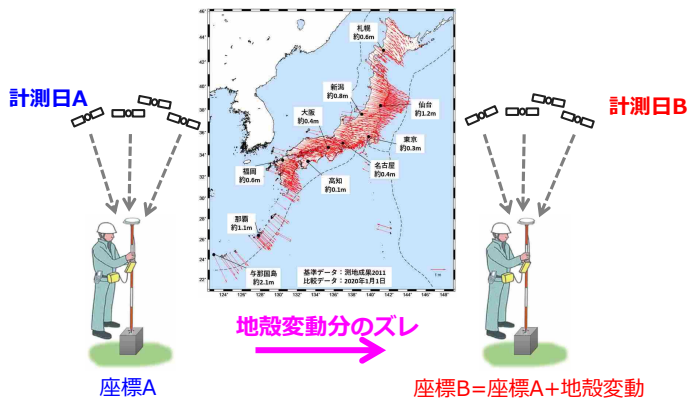


地殻変動の激しい日本列島



衛星測位で直接求められる位置

- ・ 地球重心を基準とした計測時点の絶対位置で表示
- 同じ場所でも測る時期によって座標値が変化(地殻変動の影響)



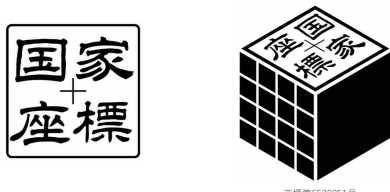
測量や地図(地理空間情報)の位置

- ・ 測地成果2011の位置(国家座標)で表示
- 測量では相対的な位置関係を計測し順次位置を決定
- 位置の表示が時々刻々変化すると、社会経済活動の混乱や過度な負担

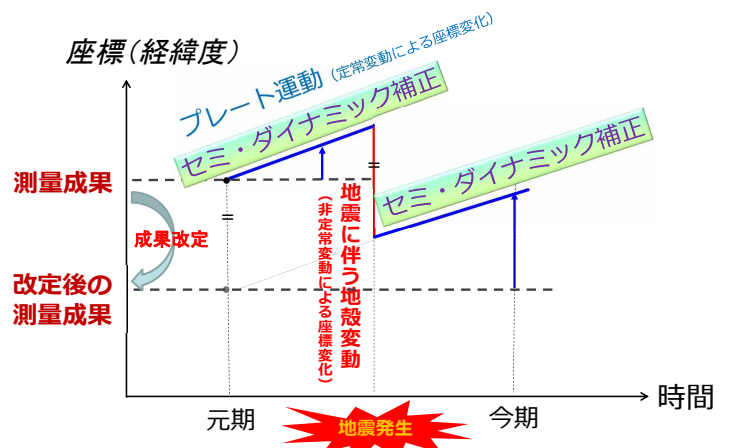


位置情報の共通ルール 国家座標

- 測量においては、共通ルール(国家座標)にしたがい、基準となる時期(元期)を定め、あらゆる地理空間情報を構築・維持・利活用
- さまざま時点での高精度な位置情報が利用できるようになった今、あらゆる情報をお互いに利活用するため、位置情報を共通の基準である国家座標に合わせる事が重要



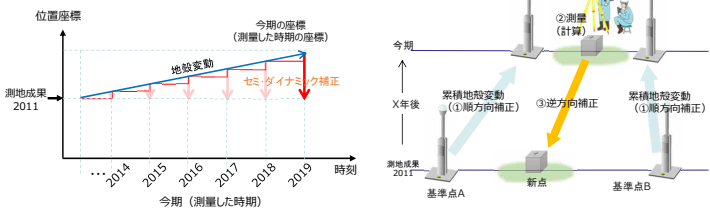
地殻変動に伴う測量成果補正の基本的考え方



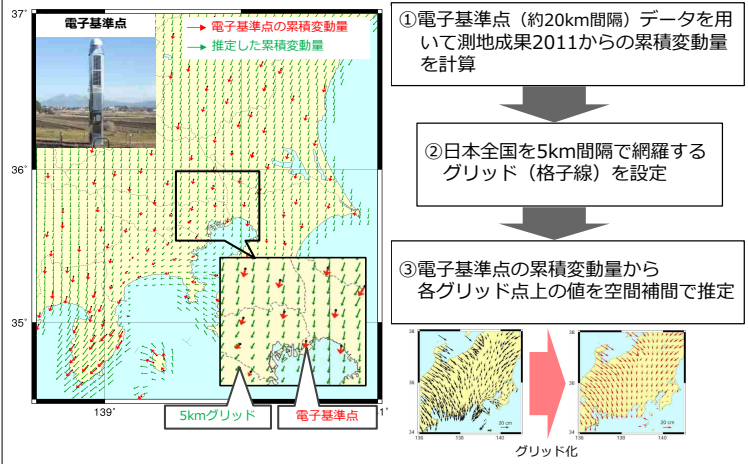
測量における地殻変動補正の仕組み

セミ・ダイナミック補正

- 基準点間の**相対位置の時間変化**（地殻変動によるひずみ）を補正
- **地殻変動補正パラメータ**を用いて観測日（今期）の座標から測地成果2011の座標を算出
- パラメータは全国の電子基準点の最終解を用いて作成
- 現在は**1年に1回**当該年の1月1日に**更新**、**1年間同じ**パラメータを使用
- 双方向補正 → **パラメータの相対精度が重要**



セミ・ダイナミック補正パラメータの構築方法



測量行政懇談会での検討

- **測量行政懇談会**：国土地理院長の諮問機関として、測量行政推進に資することを目的に学識経験者を委員として設置
- H29年度に行政懇談会の下に「**測位基盤検討部会**」を設置し、衛星測位時代の共通の位置の基盤のあり方について議論

【測位基盤検討部会委員名簿】

- ◎ 佐田 達典（日本大学 教授）
- 大坪 俊通（一橋大学 教授）
- 天野 肇（ITS Japan 専務理事）
- 稲垣 秀夫（地図調製技術協会 専務理事）
- 植木 隆央（日本建設機械施工協会）
- 久保 信明（東京海洋大学 准教授）
- 後藤 史一（国土省 地籍整備課 企画官）
- 齊藤 和也（日本測量調査技術協会 専務理事）



「位置の基準（測地基準座標系）のあり方について」 ～準天頂衛星システムが実現する高精度測位社会を支える～

- ① 現状では位置座標を国家座標に揃えて用いることが妥当
- ② 測量分野で実用化されているセミ・ダイナミック補正を活用
- ③ 測位結果を正しく利用するための一般の理解促進も必要

（関係部分抜粋）

正しい位置なのにズレる？（動画紹介）

「測量行政懇談会」の提言

- ③ 測位結果を正しく利用するための一般の理解促進も必要

測位分野における国家座標と地殻変動補正の重要性を分かりやすく解説した動画を作成

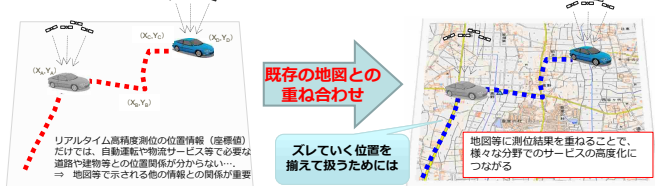
正しい位置なのにズレる？ ～ドラマで描く地図と位置情報の未来～
【国土地理院動画チャンネル】で公開中



- リアルタイム高精度測位を活用した新しいサービス・事業の例
……ICT施工、自動運転、スマート農業、物流（ドローン宅配）など
- 要求精度は5cm程度が多い

リアルタイム高精度測位を活用するために

- リアルタイム高精度測位を活用した新サービスでは、位置計測により得られた位置情報を既存の地図等と適切に重ね合わせる必要がある



方法1 測位の結果を国家座標に揃える

- 既存の地理空間情報（地図等）をそのまま活用
- △ 衛星測位の結果に対して地殻変動の補正が必要になる

「測量行政懇談会」の提言

方法2 測量や地図の座標を計測時点で管理

- 測位結果をそのまま使える
- × 膨大な地理空間情報を常時更新する必要がある

頻繁な更新作業が必要

社会への影響やコストから見てどちらがベストか？

課題の解決に向けた新たな仕組みの開発

セミ・ダイナミック補正を応用した測位利用のための新たな補正システムの開発に着手

地殻変動補正システムのイメージ

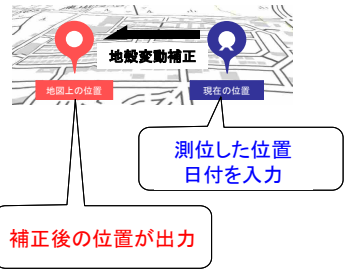


<開発に向けたスケジュール>

- 2018年度 関係者へのヒアリング
補正データ試作
- 2019年度 プロトタイプシステムの開発
試験運用
- 2020年度 試験運用
システム改良
システム整備後に運用開始
- 2021年度 本格システム正式運用開始
高度化対応

国家座標に基づき地殻変動を補正することで、誰もがさまざまな地理空間情報を共通に精度良く使える

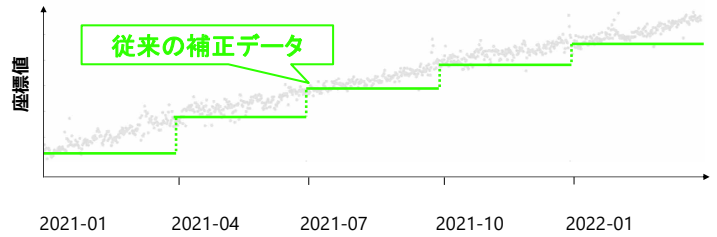
定常時地殻変動補正計算サイト



2020年3月より一般公開

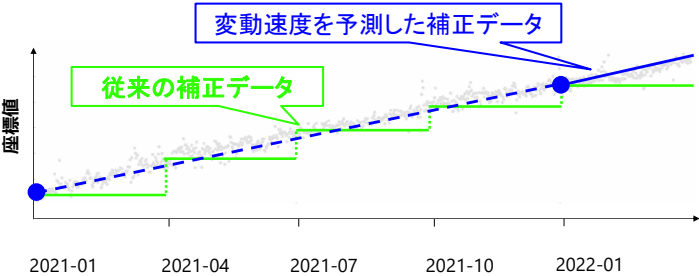
課題

従来の補正データは有効期間内では一定値としているため、有効期間の後半で正確度が劣化



課題

従来の補正データは有効期間内では一定値としているため、有効期間の後半で正確度が劣化

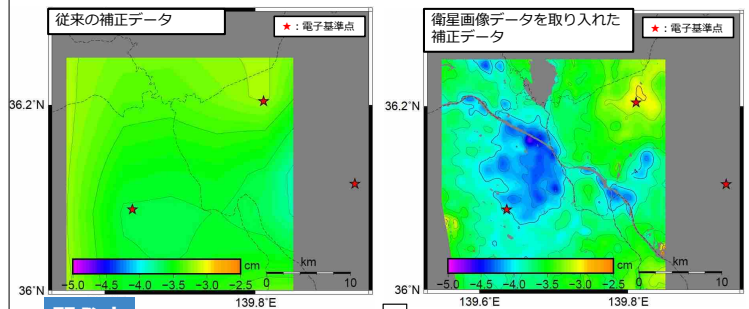


開発中

有効期間内の変動速度を予測し、さらに正確な補正を実現

課題

補正データは電子基準点のみに基づいて作成しているため、局所的で複雑な変動が補正できない



開発中

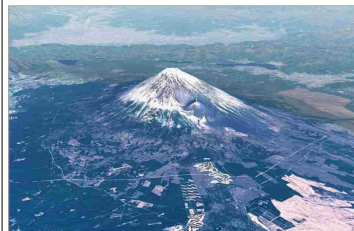
局所的な変動を衛星画像(SAR画像)でとらえ、その結果を取り入れることで、さらに正確な補正を実現

2. 航空重力測量とGNSS標高測量

Q1. どちらが「高い」場所?

(A) 富士山

(B) ツバル



(地理院地図Globe)



(出典: https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Tuvulu_Funafuti_Atoll.JPG)

Q2. 上り坂、それとも下り坂？



<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B1%8B%E5%B3%B6%E3%82%B9%E3%82%AB%E3%82%A4%E3%82%A6%E3%82%A7%E3%82%A4#/media/%E3%83%95%E3%82%A1%E3%82%A4%E3%83%AB.MysteryZoneInYashima.JPG> (public domain) 25

答え

Q1. どちらが「高い」場所？

Q2. 上り坂、それとも下り坂？

(A) 富士山

(B) ツバル



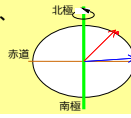
(地理院地図Globe)

(https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Tsuvalu_Funafuti_Atoll.JPG)



A1. 「高さ」の基準による

- ・地球中心からの高さ(距離)であれば、(B)「ツバル」の方が高い
- ・海面からの高さ(標高)であれば、(A)「富士山」の方が高い



A2. 上り坂

- ・周囲の景色から、下り坂のように見えている。ボールを転がすと、手前側に転がる

場所	緯度	標高 (m)	地球中心からの高さ (m)
A) 富士山	N 35° 21' 39"	3776	6,374,834
B) ツバル	N 08° 31' 31"	5	6,377,709

「標高」とは何か？

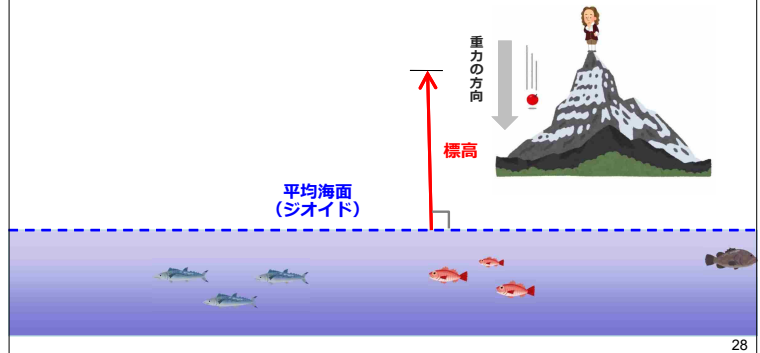
- ・物体は高い場所から低い場所へ落ちる ← 日常感覚
 - ※「落ちる」：重力による位置エネルギーの小さい場所に運動すること
- ・重力の方向に沿って物体が落ちる高さ = 標高
- ・水の流れを知るために必要。水が流れた先では水面ができる。
- ・最も広い水面(=海面)の平均を標高の基準(ジオイド)と定義
 - ※「標高の基準」=「平均海面」=「ジオイド (geoid)」



標高に対する重力の影響

もし重力が一樣だったら…

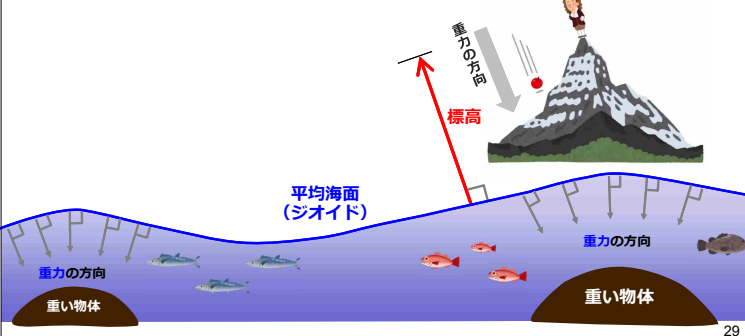
→平均海面(ジオイド)は一定



標高に対する重力の影響

しかし実際は重力は場所によって変化

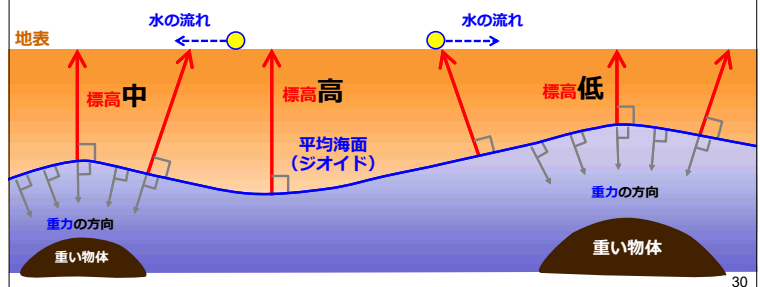
- 水は重力の強い方向に引かれる
- ジオイドも変化



標高に対する重力の影響

内陸におけるジオイド

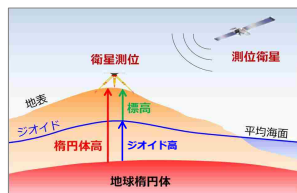
- 地下のどこかに平均海面の延長が存在 = ジオイド
- 地表が平らでも、重力の分布によっては標高が異なることがある



楕円体高

=地球楕円体*面から地表までの高さ
←衛星測位によって決定

※地球楕円体
回転する楕円としてモデル化した地球
幾何学的に定義（重力分布によらない）

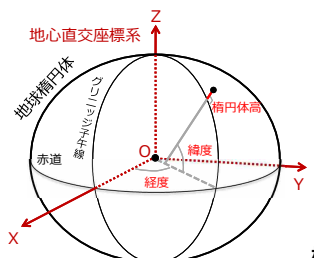


標高と楕円体高の関係

衛星測位結果の
地心直交座標 (X, Y, Z) を
(緯度, 経度, 楕円体高)へ換算

地球楕円体面を基準にすることで
ジオイドの凹凸も表現可能

楕円体面～ジオイドの高さ→ジオイド高



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

□ **標高**

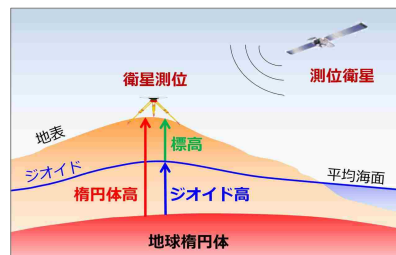
- ジオイドに対する地表の高さ
- 水の流れにつながる
- 水準測量で計測

□ **楕円体高**

- 地球楕円体面に対する地表の高さ
- モデルで表現可能
- 衛星測位で計測

□ **ジオイド高**

- 地球楕円体面～ジオイドの高さ
- 標高の基準の起伏を表現
- 重力データ等から計算



標高、楕円体高、ジオイド高の関係

測量法第十一条（測定の基準）

これが「標高」

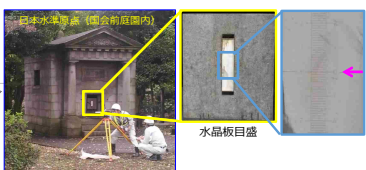
- 位置は、地理学的経緯度及び平均海面からの高さで表示
- 測定の原点は、日本経緯度原点及び日本水準原点

測量法施行令第二条2の二

- (水準)原点数値 東京湾平均海面*上 24.3900m

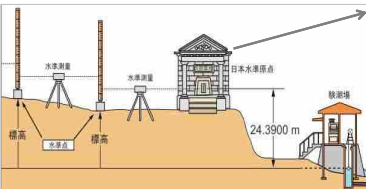
(ゼロ目盛高さ)

※東京湾（豊島）の潮位観測から決定
(現在は油壺験潮場（三浦市）からの測量で管理)



原点数値の変遷

- 明治24年：24.5000m
- 大正12年：24.4140m ←関東大震災
- 平成23年：24.3900m ←東日本大震災

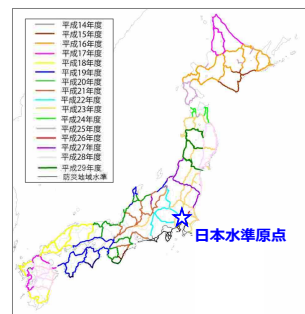
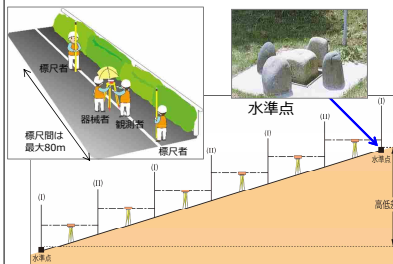


水準測量によって標高を決定

- 1883年から実施
- 約1.7万点の水準点を設置
- 全国の測量に10年以上かかる

経緯度と標高は別体系で管理

- 距離と角度では決まらない
- 重力の影響を考慮する必要



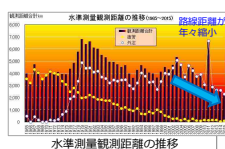
年度別の水準測量の実施状況

水準測量の流れ

- 2測点到物差し(標尺)を設置し、中央に水準儀を置いて高低差を観測
- 最大80m間隔で繰り返す
- 様々な補正を行い比高を算出
- 約2km毎の水準点標高を順次決定

時間/費用/利便性の問題

- 全国の測量に10年以上
- 予算減に伴う観測距離の縮小
- 利用者は水準点から追加で水準



東日本大震災後の水準改測路線



東日本大震災後の水準測量



相馬港における護岸工事

災害対応の問題

- 大地震直後の更新は困難
- 迅速な復旧・復興に支障
- ※H23東日本大震災：改定まで約7ヶ月
- H28熊本地震：改定まで約4ヶ月
- 南海トラフや首都直下地震の懸念

精度の問題

- 距離や海峡に伴う誤差の蓄積
- 地殻変動に伴う現況との乖離

より効率的に標高が決められないか？

→ 水準測量から衛星測位へ

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

衛星測位

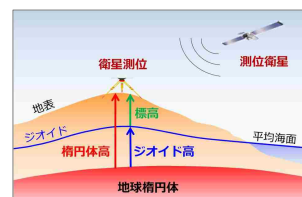
重力データ

標高の精度は、

①楕円体高

②ジオイド高

の精度で決まる！

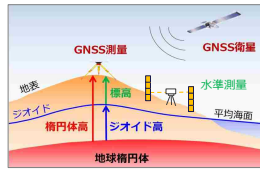


衛星測位で標高を決めるためのポイント
→精密なジオイド高の整備

① 実測ジオイド

衛星測位による楕円体高から
水準測量による標高を減じて直接算出

- 長所：短距離であれば精度が高い。
- 短所：時間と費用が多く要する。
限られた場所しか計測できない。
長距離になるほど精度が劣化する。

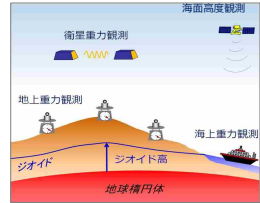


$$\text{ジオイド高} = \text{楕円体高} - \text{標高}$$

② 重カジオイド

衛星・地上・海上で計測した
重力データを全球空間積分して算出

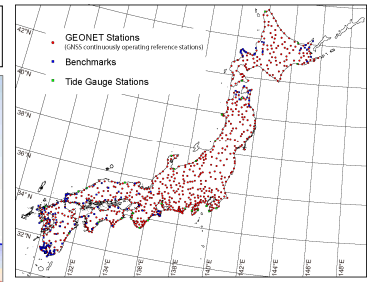
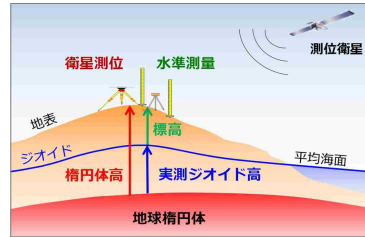
- 長所：広い領域を効率的に計測できる。
- 短所：精度は重力データの品質と量に依存する。
複雑な計算処理を要する。



標高が分かっている基準点等で衛星測位を実施
→ (楕円体高 - 標高) から実測ジオイド高を算出

※高精度だが算出には衛星測位と水準測量の両方が必要

実測ジオイド高
= 楕円体高(衛星測位) - 標高(水準)



実測ジオイド高の観測点

様々な重力データを利用して計算

陸地の局所的な重力分布

地上重力データ

広域の重力分布

衛星重力データ

重力ジオイド

JGEOID2008

実測ジオイドとの差

平均 : -20.2cm

標準偏差 : 8.4cm

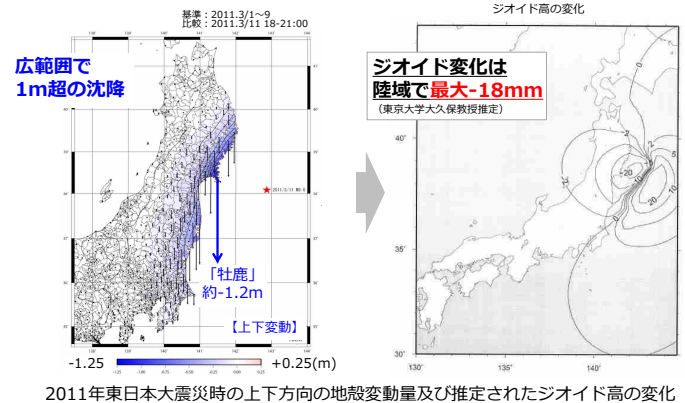
重力データのストークス積分により最も調和的な値を算出

$$N = \frac{R}{4\pi\gamma} \iint \Delta g S(\psi) d\sigma$$

海上重力データ (衛星海面高度計・験潮)

海域の局所的な重力分布

重カジオイドは地表の上下変動に対し非常に安定



重カジオイドと実測ジオイドを組み合わせる構築

- 重カジオイドに含まれる誤差の補正
- 既存の水準標高に衛星測位の結果を合わせる役割



地殻変動が起きると標高の値が変わり使えなくなる

- 標高の再整備には水準測量による膨大な時間と費用
- 地殻変動にも安定な重カジオイドをそのまま使いたい

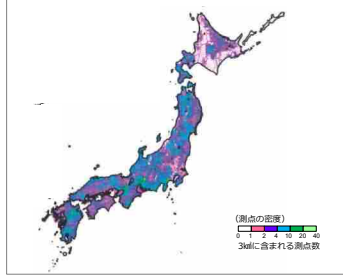


重カジオイドの精度

→重カデータの品質に依存

既存の地上重カデータの問題

- ・大部分が70~80年代に観測
- ・過去の基準 (JGSN1971)
- ・地震等の影響が未反映
- ・精度の悪い観測点位置情報
- ・山岳部/沿岸海域での空白域



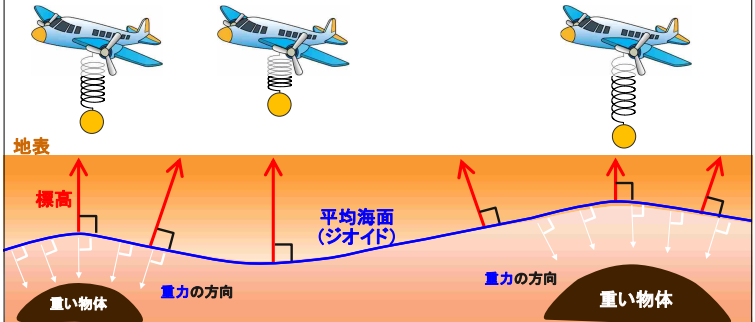
地上重カデータの状況

地上で再観測するのは時間的/費用的に非現実的

高品質な重カデータを効率的に整備するには…?

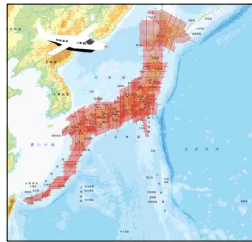
航空重力測量とは、

航空機に重力計を搭載して、上空から重力を測定するもの



【メリット】

- ・効率的に広域の重カデータを整備
- ・山岳部/沿岸海域も測定可能
- ・時間変化の影響を最小限に限定
- ・最新の基準 (JGSN2016) で重力値を取得
- ・衛星測位による正確な位置情報
- ・海外の先行事例の知見あり



実施計画

H30年度	R元年度	R2年度	R3年度	R4年度	R5年度	R6年度
重力計調達	全国で航空重力測量を実施				精密重カジオイドを整備	

約4年間かけて全国において観測を実施し、今年5月に完了

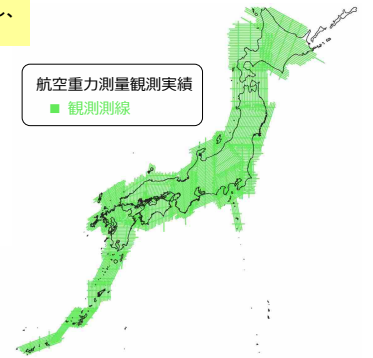
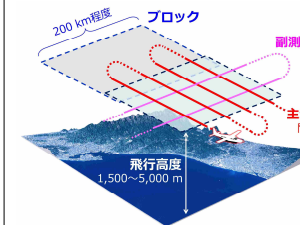


測量用航空機



航空重力計

航空重力測量観測実績
■観測測線



総飛行距離 | 13.9万km
総測線数 | 598本
総飛行時間 | 1,316時間

航空重カデータを加えた精密重カジオイド・モデルの構築

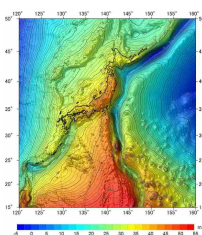
地上重カデータ (JGSN2016に基づく地上重力)

衛星重カデータ (広域の重力分布)

海上重カデータ (衛星海面高度計・験潮) (海域の局所的な重力分布)

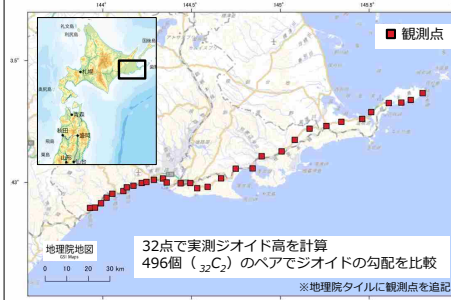
航空重カデータ (山岳部・沿岸海域含む重力分布)

精密重カジオイド・モデル (イメージ)



目標精度 ~3cm

衛星測位でどこでも信頼できる標高を取得

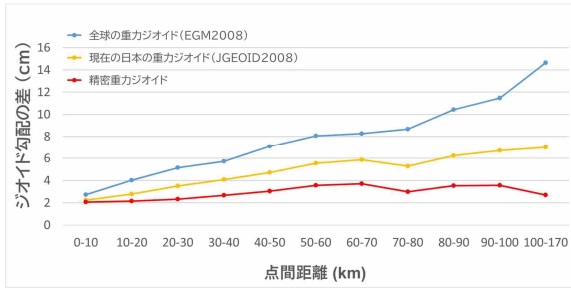


実測ジオイド高との比較で精度を評価

精密重カジオイドのジオイド勾配

実測ジオイド高の勾配 (楕円体高-標高)

精密重カジオイドの評価 | 評価結果



実測ジオイドによる誤差の補正なしに
目標精度3cmを達成 (RMS 2.8cm)

精密重カジオイドを用いた新たな測量

精密重カジオイドを基準面として衛星測位で迅速かつ精密な標高決定が可能に



そのために.....

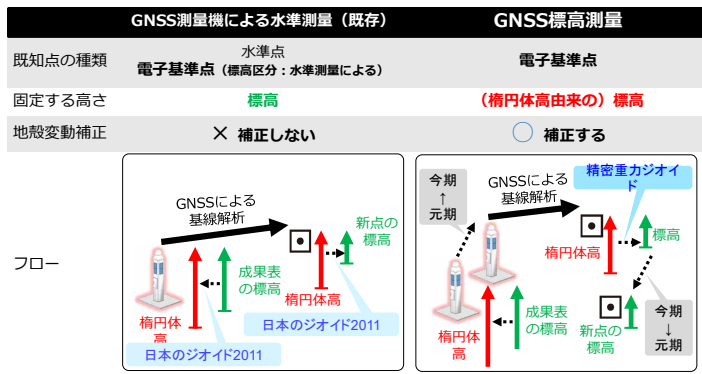
GNSS測量機による水準測量
(準則第2編第4章)

- ・水準点・水準測量に基づく標高が基準
- ・「日本のジオイド2011」を使用
- ・水準測量による既知点の標高を基に、新点と既知点のジオイド高の差及びGNSS測量で求めた楕円体高の差を加える

GNSS標高測量 (新たに導入)

- ・電子基準点による楕円体高と精密重カジオイドが基準
- ・精密重カジオイドを使用
- ・GNSS測量で求めた楕円体高からジオイド高を差し引く (だけ)

GNSS標高測量の特徴



GNSS標高測量の利点 | 利用範囲の拡大



<既知点とすることのできる電子基準点>

GNSS測量機による水準測量 ▲
約850点

GNSS標高測量 ▲▲
すべての電子基準点
(約1,300点)

GNSSを用いた効率的な
標高決定が可能範囲が拡大

GNSS標高測量の利点 | 迅速な成果改定

平成28年熊本地震における成果改定の例



<大規模地震後の電子基準点成果>

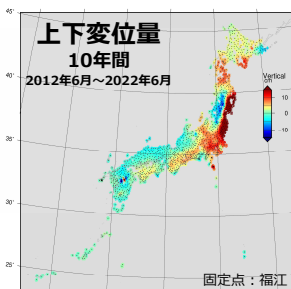
GNSS測量機による水準測量 (標高を固定)
水準測量が必要
→時間がかかる

GNSS標高測量 (楕円体高由来の標高を固定)
GNSSの観測のみ
→早期に使用可能

大規模地震後でも、GNSSを用いた
効率的な標高決定が早期に実現

- 地震発生 4/15, 16 測量成果停止
- 5/19 電子基準点成果改定
→楕円体高の利用可能
約1か月後
- 8/31 電子基準点 ▲ (9点) 標高改算
- 9/12 電子基準点 ▲ (29点) 標高改算
→標高の利用可能
約5か月後

GNSS標高測量の利点 | 不整合の解消



地殻変動補正のイメージ



- 東北地方を中心に、上下方向に大きな地殻変動
- GNSS測量機を用いた水準測量では、9%で電子基準点間の閉合差が許容範囲を超過しうる

標高にも地殻変動補正を適用することで、地殻変動や測量方法の違いによる不整合を解消

<導入に向けた取組計画> 令和6年度中

- GNSS標高測量マニュアルの公開
- 標高版の地殻変動補正パラメータの公開
- GNSS標高測量に関する説明会等での周知

<導入の効果>

- 衛星測位で迅速かつ高精度な標高決定が可能（特に復旧・復興時）
- 利用者の目的に応じた最適な測量方法を選択することができ、効率的・効果的な標高決定を実現

標高決定手法	得られる値	性質	特徴
GNSS標高測量	絶対標高値	グローバル	距離に依存しない 長距離なら圧倒的に有利 短距離での精度向上は頭打ち
水準測量	相対標高値	ローカル	長距離では誤差の累積が大きい 短距離なら精度もコストも有利