

追跡調査

# 高度な国土管理のための複数の衛星 測位システム(マルチGNSS)による 高精度測位技術の開発

国土交通省国土地理院  
測地観測センター

平成23～26年度

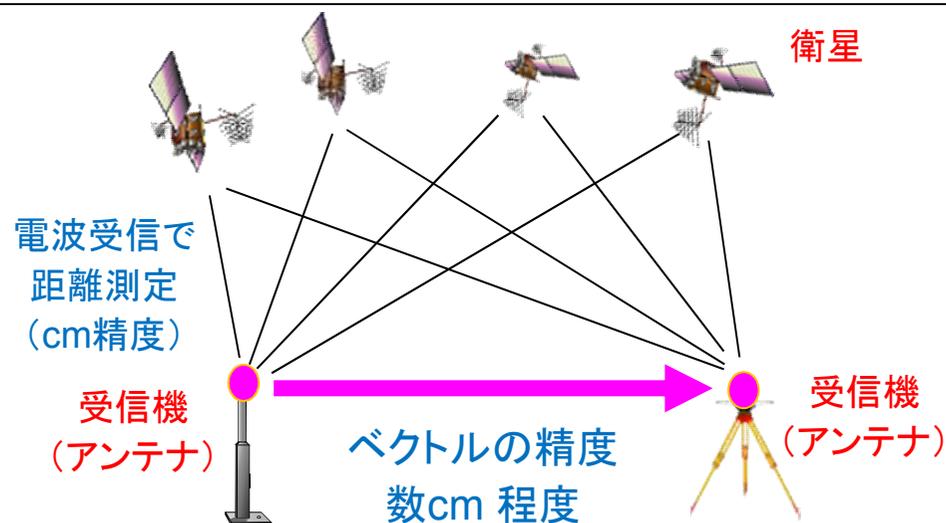
# 1.1 背景

国土管理の各工程で、**高精度測位** (cm級) ※は不可欠

- 公共工事の用地取得、測量・地図作成、地殻変動把握、情報化施工 等

近年、**GPS衛星**を用いた高精度測位技術が普及

- GPS測量は、地上測量(トータルステーションによる測量)より効率的で今では、基準点測量の3分の2がGPSを利用
- 全国に設置された GPSの連続観測局(**電子基準点**)は、地震・火山活動等に伴う地殻変動を把握し、防災に寄与



※ 高精度測位 (cm級)

同時に別々の場所に受信機を設置し、相対的な位置(ベクトル)を求める。

カーナビ方式とは異なる。

## 課題① 都市部・山間部でGPSが使えないことへの対応



ビル等の影響でGPSによる高精度測位が不可能



地上測量が必要

## 課題② 高精度測位の短時間化への対応

- GPS測量の観測・解析に要する時間の短縮化が必要
- 地震・火山噴火等の災害時の緊急対応では、災害の状況に応じた適切な避難活動を支援するため、地殻変動情報の迅速な提供が必要

地震・火山噴火時の地殻変動情報

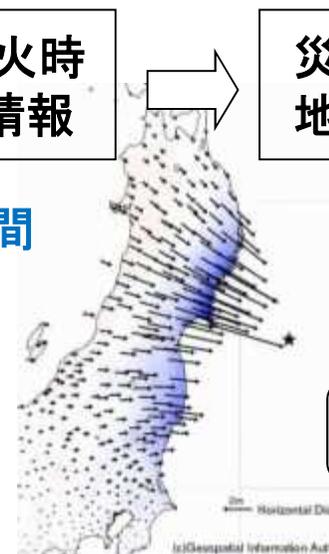
災害対策本部  
地方公共団体

提供まで5時間

- 観測 3時間
- 解析 1時間
- 評価 1時間

災害の予測、避難活動での活用

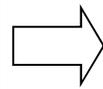
もっと早く



電子基準点が捉えた東日本大震災時の地殻変動

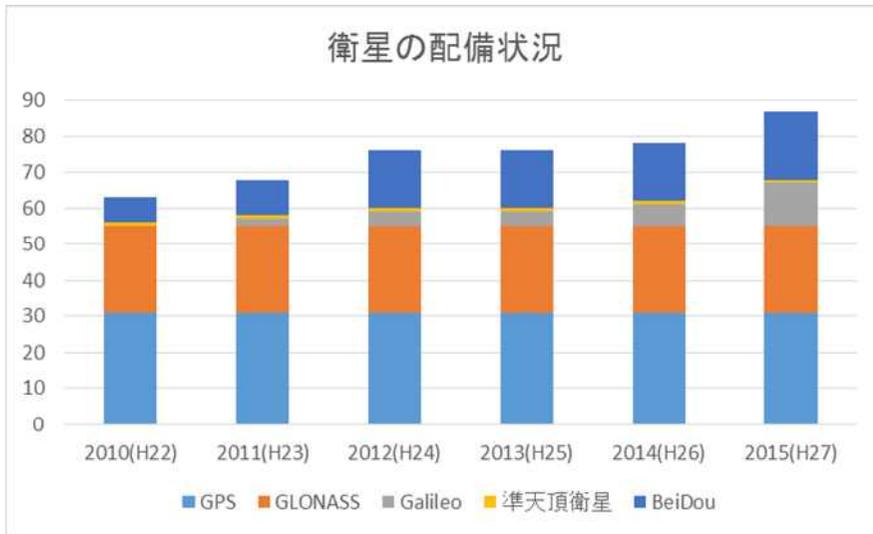
# 1.3 衛星測位の環境変化

GPSだけ



複数の衛星測位システム  
(マルチGNSS※)

※ GNSS: Global Navigation Satellite System(s)  
衛星測位システムの総称



各国のGNSSが本格稼働

利用可能な衛星数の増加 GPS 30機⇒GNSS 70機以上

衛星数増加による可視性の向上

利用できる周波数信号の増加 2周波⇒3周波

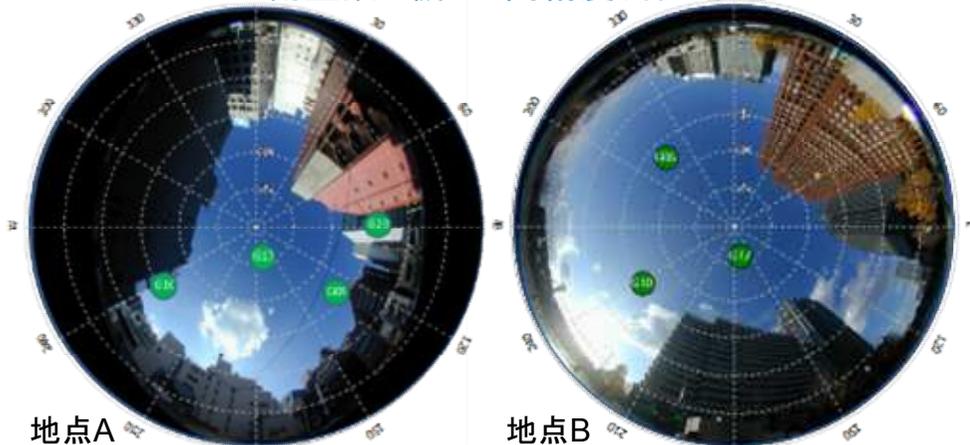
情報量の増加により解析速度が向上

# 1.4 マルチGNSSのメリット

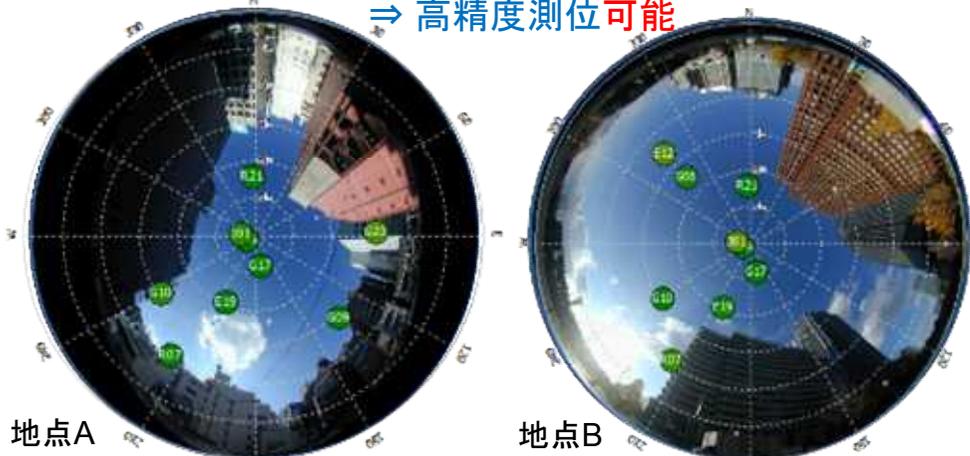
課題① 都市部等でGPSが使えないことへの対応

マルチGNSSが適用できれば可視性が向上、  
多くの衛星が利用可能

●GPSのみ 衛星数 3機 ⇒ 高精度測位 不可



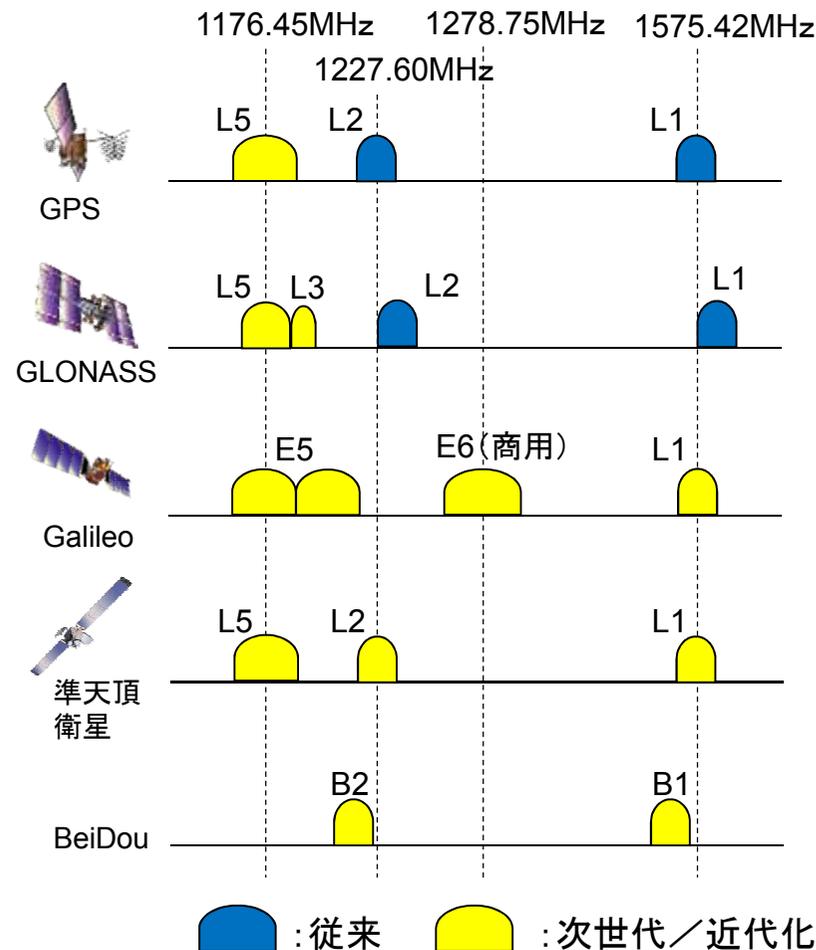
●GPS+準天頂衛星+GLONASS+Galileo 衛星数 8~9機  
⇒ 高精度測位可能



2014年12月14日の東京駅周辺の可視衛星

課題② GPS高精度測位の短時間化への対応

マルチGNSSが適用できれば情報量が増加し、  
解析速度の向上が可能



GNSSから送信される  
民生用測位信号の周波数帯(概要)

## 2. 研究開発の目的

マルチGNSSによる高精度測位技術の開発・標準化により  
衛星測位システムの利用を拡大する環境を構築し  
高度な国土管理を実現

(技術開発)

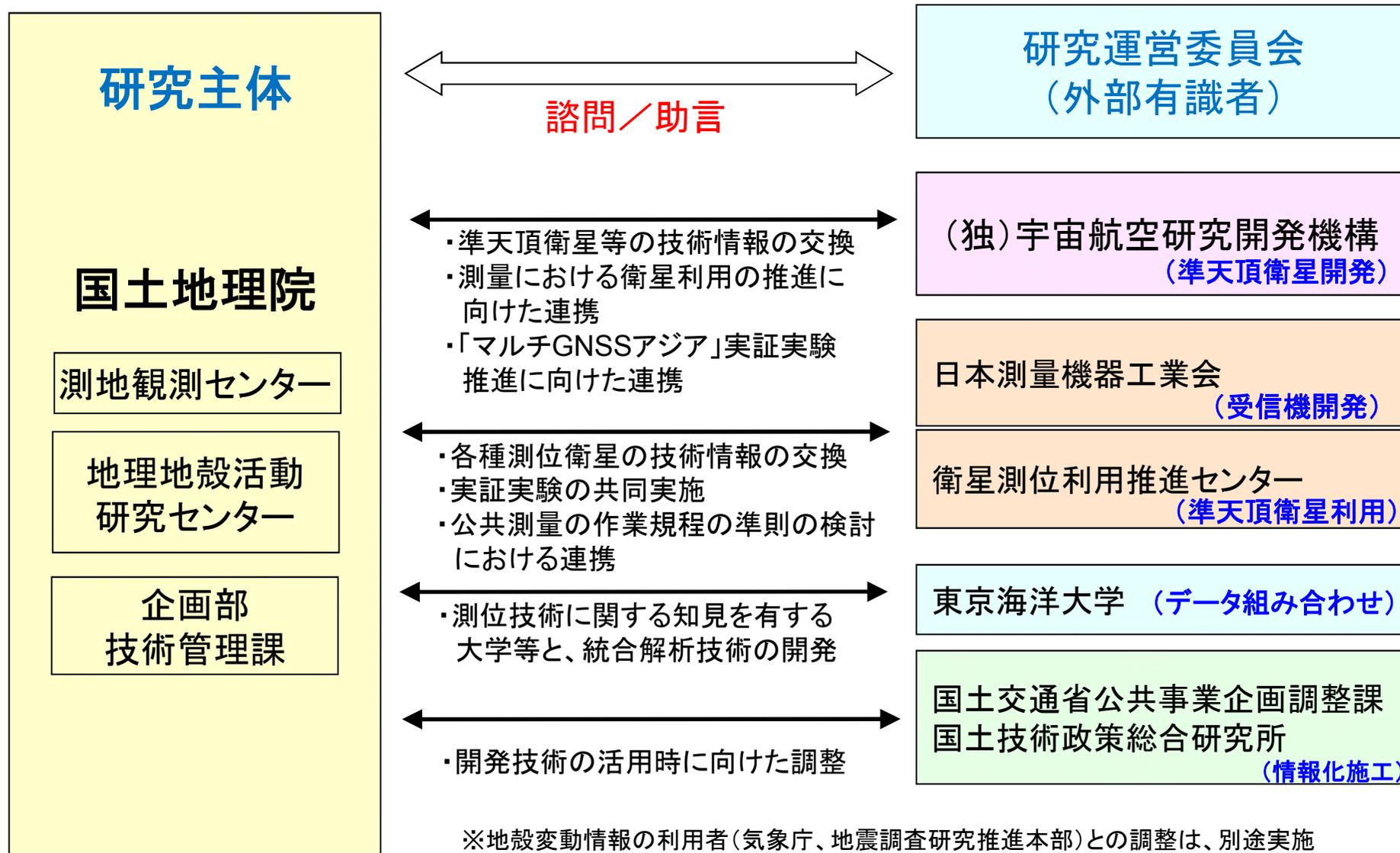
- GPSだけでは困難であったビル街等での測量を常時実現  
⇒ トータルステーションではなく、測位衛星を使えること  
によるコスト削減
- GPS測量に比べ現地での観測時間を約半分にして測量が可能  
⇒ 観測時間短縮によるコスト削減
- 地殻変動情報の提供に要する時間を約半分に短縮  
⇒ 災害時に、より効果的な応急対策が可能

(成果の普及)

- マルチGNSS解析・利用技術のアジア地域等への国際展開

# 3.1 研究開発の体制

- 国土地理院が主体となり、関係部局、大学・研究機関等と連携して実施

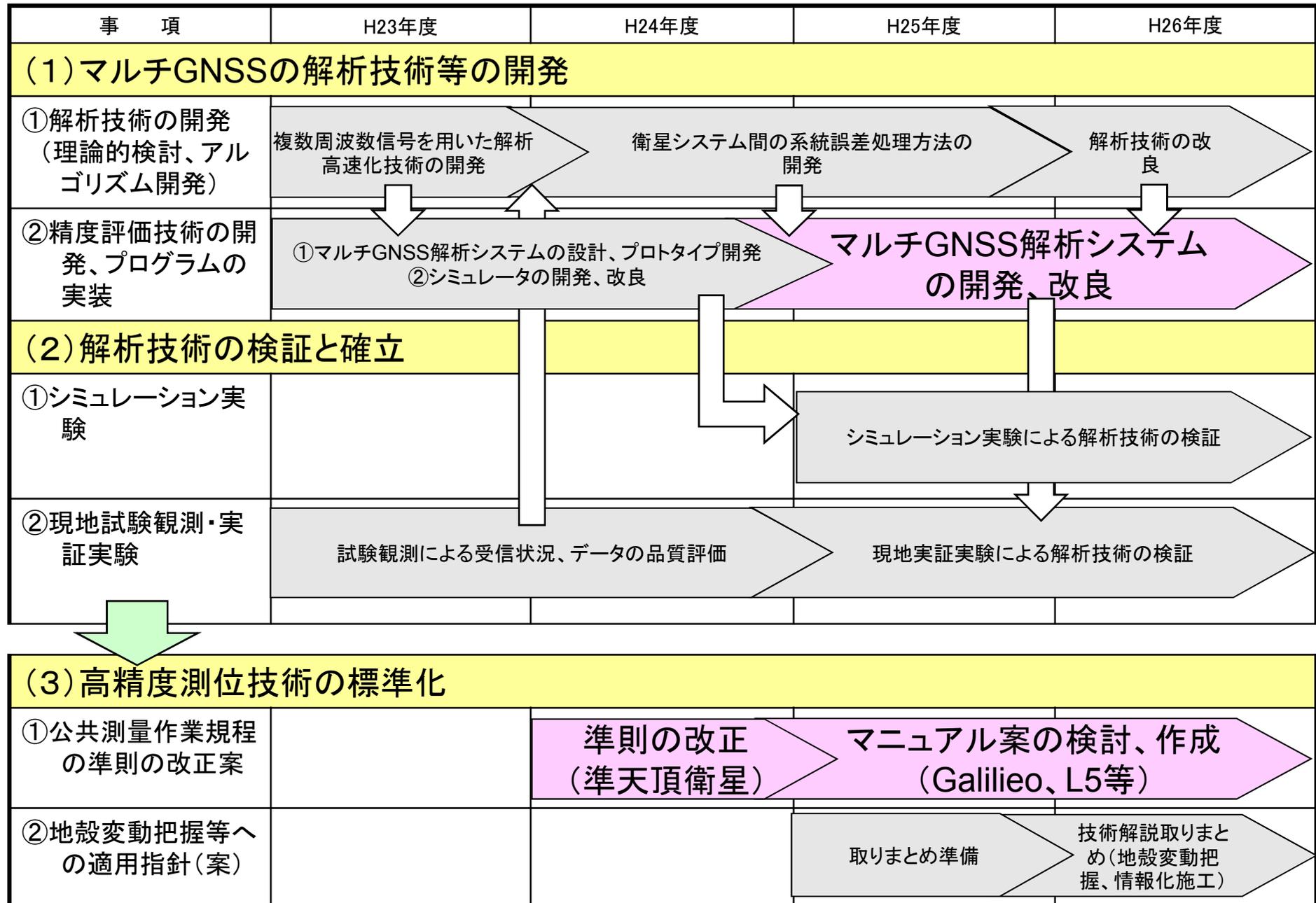


## 3.2 研究運営委員会（外部有識者）

- 測量・測位分野の学識経験者や関係者から各種アドバイスを頂くために設置
  - 各年度3回開催、資料はホームページで公開
- （敬称略）

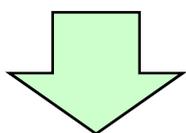
加藤 照之 （委員長）	東京大学地震研究所教授	固体地球物理学 （地殻変動）
大坪 俊通	一橋大学大学院社会学研究科教授	宇宙測地学
市川 隆一	情報通信研究機構電磁波計測研究所 時空標準研究室研究マネージャー	宇宙測地学
小暮 聡	宇宙航空研究開発機構第一利用ミッション本部 衛星測位システム技術室ミッションマネージャー	準天頂衛星初号機 の開発
坂井 丈泰	電子航法研究所航法システム領域主幹研究員	航空宇宙工学
竹下 順明	衛星測位利用推進センター第二事業部長	衛星測位の利用、 成果の普及
橋本 靖彦	日本測量機器工業会GPS測量機器部門会委員 （ライカジオシステムズ株式会社）	測量機器工業の進 歩発展
長谷川浩司	日本測量調査技術協会位置情報・応用計測部会 副部会長（国際航業株式会社）	測量調査技術に係 る研究調査と普及
日置 幸介	北海道大学大学院理学研究院教授	地球惑星科学
細谷 素之	電子基準点を利用したリアルタイム測位推進協議会 基盤技術WG座長（株式会社ジェノバ）	GNSSデータの利活 用と普及
安田 明生	東京海洋大学名誉教授	情報通信工学 （衛星測位）

# 3.3 技術開発の流れ



### (1) マルチGNSSの解析技術等の開発、(2) 解析技術の検証と確立

- ① 新しい周波数帯(L5)の信号を利用して、従来の手法と同等の精度をより短い観測時間で達成する解析手法を開発
- ② GLONASSの系統誤差を除去する方法を開発※
- ③ 近代化GPS、準天頂衛星の系統誤差を除去する方法を開発
- ④ 異なる衛星系間で発生する受信機の系統誤差を除去する方法を開発
- ⑤ BeiDouの系統誤差を除去する方法を開発
- ⑥ 地殻変動情報の提供に要する時間の短縮に向けた新しい解析手法を開発
- ⑦ マルチGNSSのデータを統合的に利用して、短時間に高精度の位置情報を取得し、測量等に適用することが可能なソフトウェアを開発



※ 対応済みの測量用ソフトウェアもあるが、本開発では補正係数の決定を含む補正方法を公知化

### (3) 高精度測位技術の標準化

- ⑧ 作業規程の準則を改正。作業規程の準則第17条(機器等及び作業方法に関する特例)第3項に規定されるマニュアル案を策定して公開

## 4.2 成果例：衛星系組合せ解析技術の開発

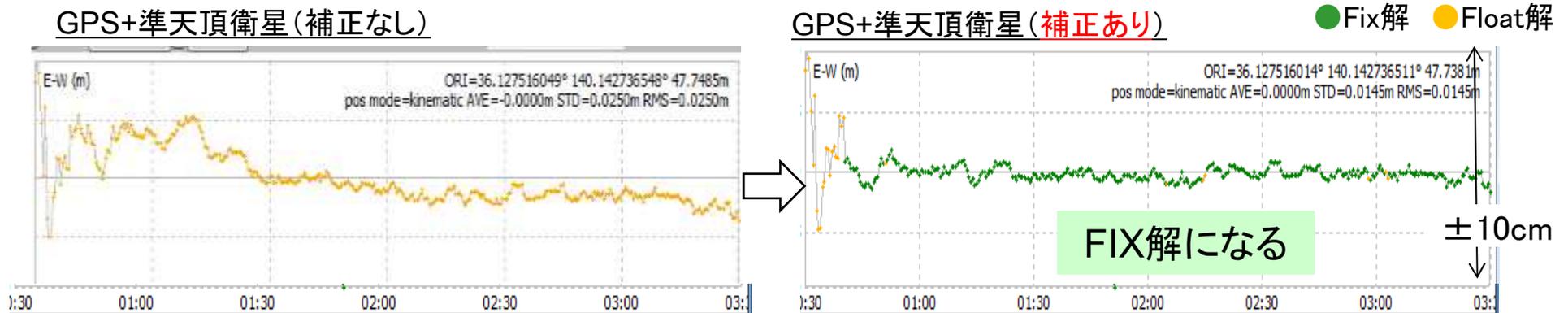
### ③ 近代化GPS、準天頂衛星の系統誤差を除去する方法を開発

新しい信号(L2C)を利用する場合、従来の信号(L2P(Y))との位相のずれが受信機種ごとに異なる(1/4サイクルシフト問題)

→ 異機種受信機間での近代化GPS、準天頂衛星を含む解析に影響あり



代表的な受信機種のL2CとL2P(Y)のずれを調べ、補正する方法を開発



- 異機種受信機間でも近代化GPS、準天頂衛星で安定した測位が可能に

## 4.2 成果例：衛星系組合せ解析技術の開発

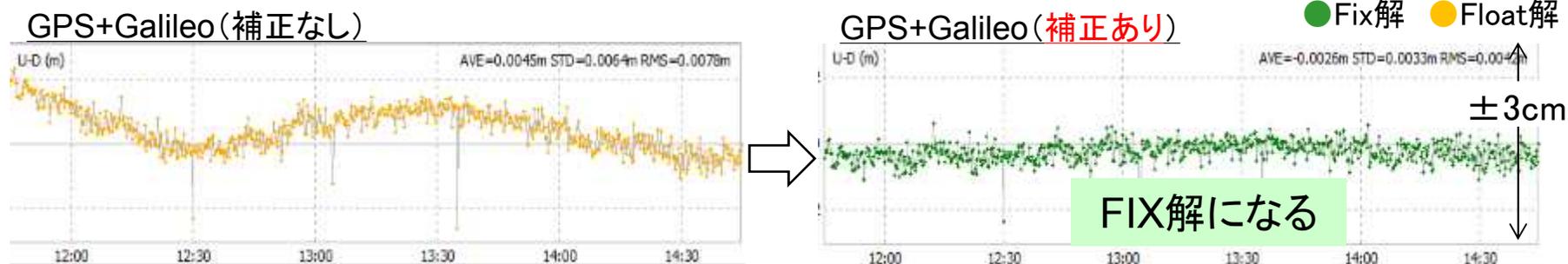
### ④ 異なる衛星系間で発生する受信機の系統誤差を除去する方法を開発

複数の衛星系を利用する場合、受信機の回路で、受信機種ごとに異なる系統誤差が発生（衛星系間の受信機ハードウェアバイアス: ISB）

→ 異機種受信機間で異なる衛星系間の位相差を取る解析※に影響あり

※ どの衛星系の組み合わせでも4衛星で測位可能  
→ ビル街や山間部で有効

#### 1) 準天頂衛星・Galileoでは、事前推定値で補正する方法を開発



測位方式:キネマティック 基線長:0m 観測時間:3時間

- 異機種受信機間でも準天頂衛星、Galileoで安定した測位が可能に

#### 2) GLONASSでは、ISBが受信機再起動や温度で変化することを確認

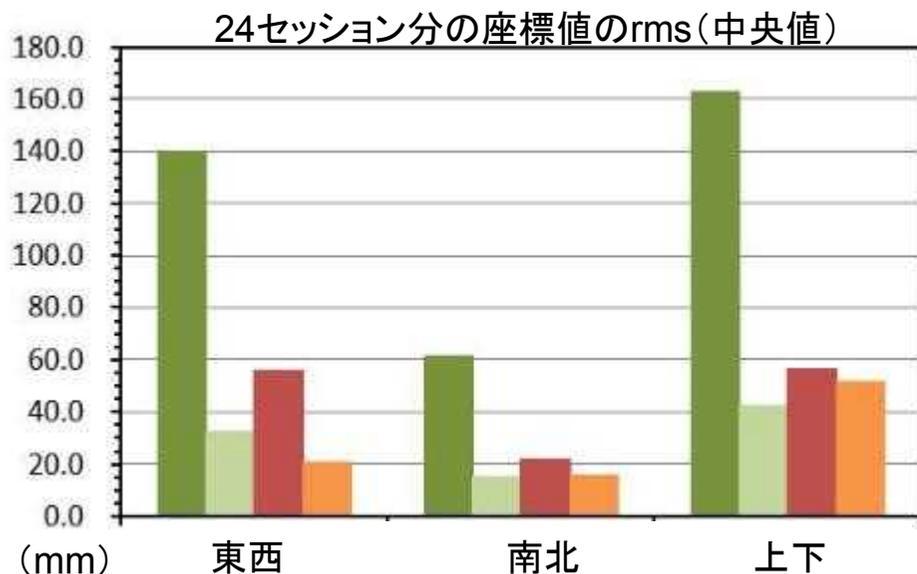
- 異機種受信機間でGLONASSを利用するには2衛星以上必要

## 4.2 成果例：地殻変動解析技術の開発

### ⑥ 地殻変動情報提供に要する時間の短縮に向けた新しい解析手法を開発

1時間データによる精度評価(GEONET)

- 基線解析(GPS) ← 従来手法
- 基線解析(GPS+GLO)
- PPP(GPS)
- PPP-AR(GPS)



解析手法	プロセス実行時間 (分)
■ 基線解析(GPS)	12
■ 基線解析(GPS+GLONASS)	15
■ PPP(GPS)	0.5
■ PPP-AR(GPS)	0.5

※PPPの補正情報は外部よりリアルタイムで取得

#### ① 基線解析

- GPSの1時間データでは精度が低いが、**GLONASS追加で精度向上**

#### ② PPP※ (精密単独測位)

- 従来手法にGLONASSを加えた解より精度は低いが、**実行時間が30分の1**
- PPPへのGLONASS追加も可能

#### ③ PPP-AR※ (高度な精密単独測位)

- ①の解と精度は同等で、**実行時間が30分の1**
- GLONASS追加には、外部の補正情報が必要

※ PPP、PPP-AR

1つの観測点による観測と補正情報を用いて高精度測位を行う(基準局による観測が不要)

- ⑦ マルチGNSSのデータを統合的に利用して、短時間に高精度の位置情報を取得し、測量等に適用することが可能なソフトウェアを開発

マルチGNSS解析システム

**GSILIB**

(GNSS Survey Implementation Library)

GPS、準天頂衛星、GLONASS、GalileoのL1、L2、L5信号を利用した測量計算が可能

- 研究用のオープンソースソフトウェアである  
RTKLIB v2.4.2 p4(東京海洋大、高須氏)をベースに開発
- H27年1月8日にオープンソースライセンスで公開  
→ 利用者はマルチGNSSの解析が自由に可能

## 4.2 成果例：準則の改正、マニュアル案の策定 国土交通省

- ⑧ 作業規程の準則※を改正。作業規程の準則第17条(機器等及び作業方法に関する特例)第3項に規定されるマニュアル案を策定して公開

※ 各測量計画機関が公共測量の作業規程を定め、または変更する場合の規範として、国土交通大臣が定めているもの

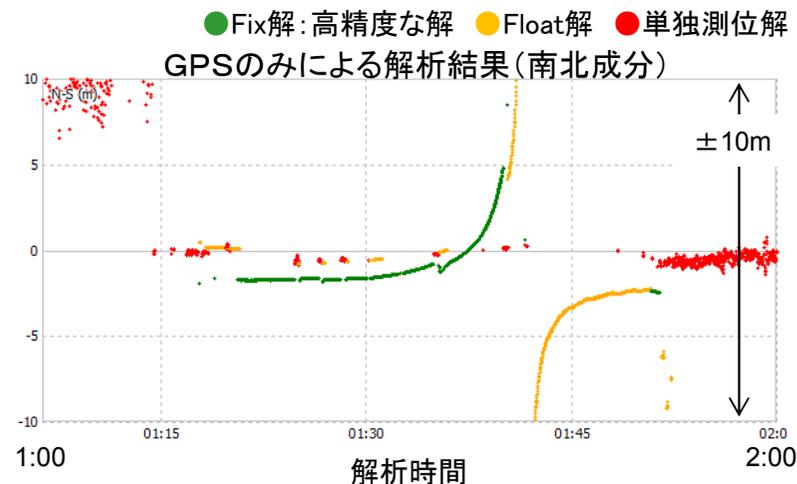
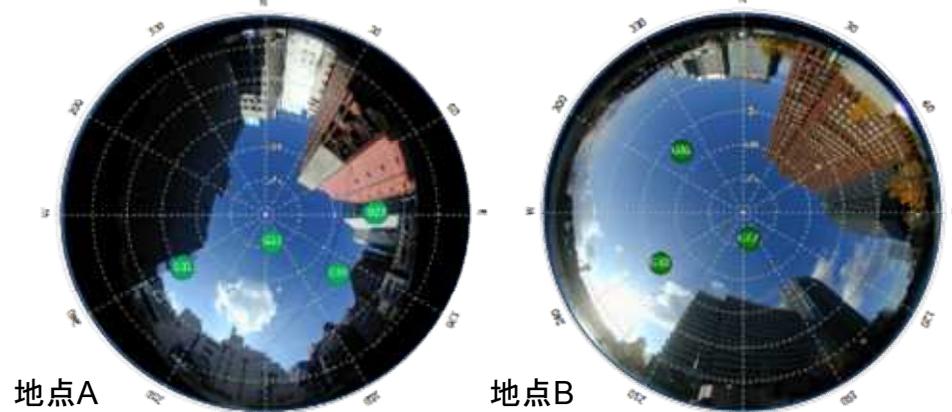
- GPSと準天頂衛星の併用による測量精度を検証し、公共測量の作業規程の準則に反映(H25年3月29日)  
→ 準天頂衛星を用いた公共測量が可能に
- 「マルチGNSS測量マニュアル(案)ー近代化GPS、Galileo等の活用ー」を施行し、公表(H27年5月29日)  
→ 作業規程の準則では規定されていないGalileoを含む観測やL5帯を利用した3周波解析等が可能に

# 4.3 目的の達成状況 (1)

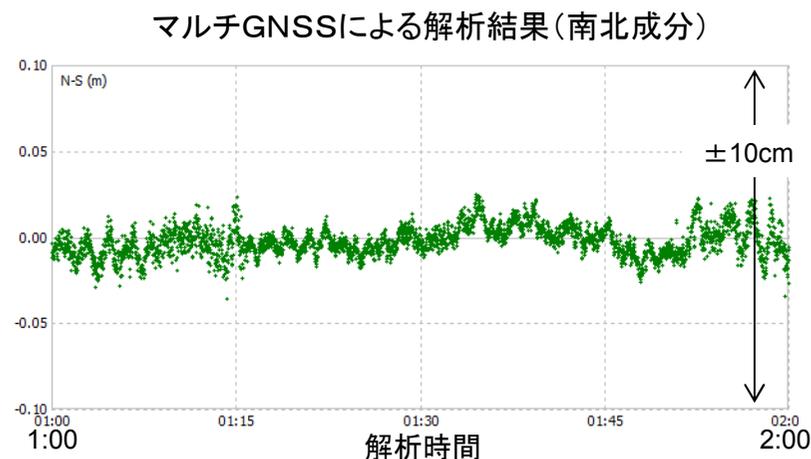
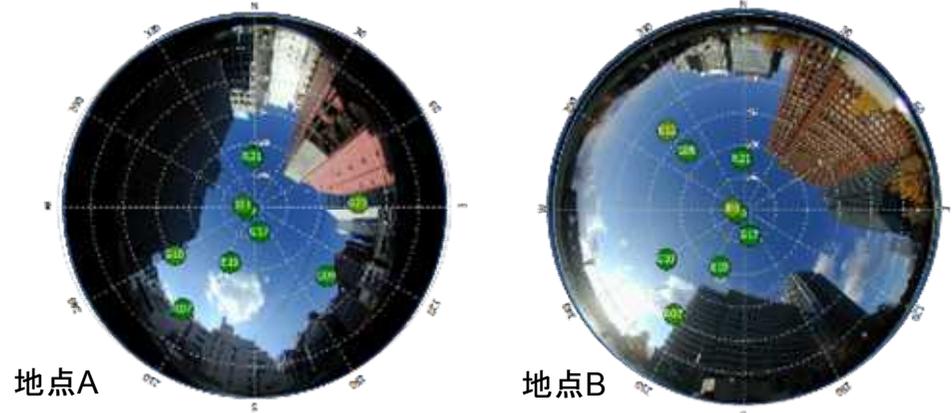
GPSだけでは困難であったビル街等での測量を常時実現→

**十分に達成!!**

●GPSのみ 衛星数 3機



●GPS+準天頂衛星+GLONASS+Galileo 衛星数 8~9機



GPS以外の衛星利用で測量可能エリアは拡大

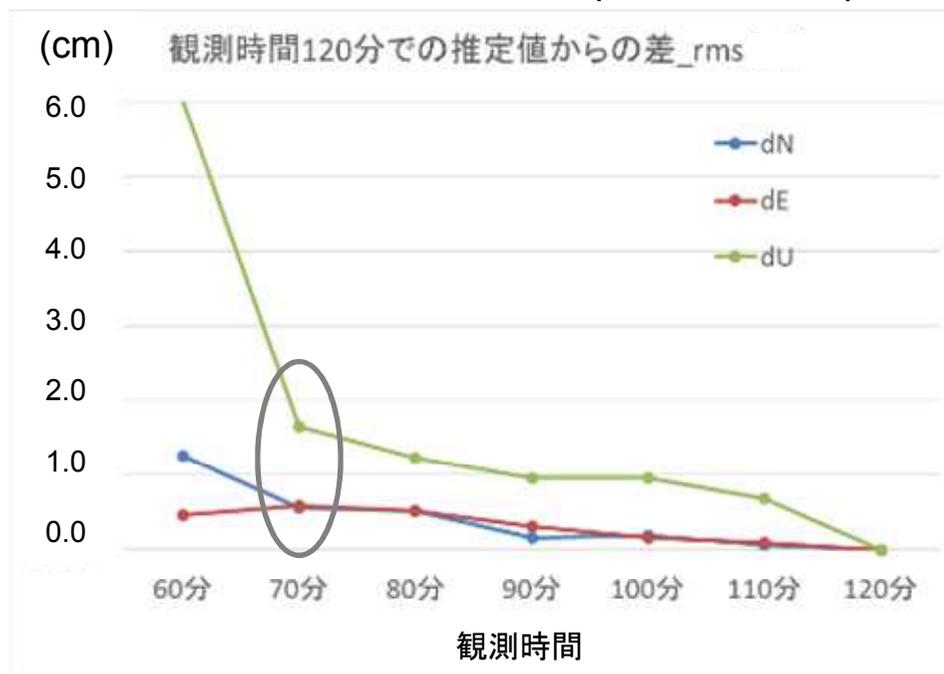
→ 準天頂衛星の利用を準則に反映、Galileoの利用をマニュアル化

## 4.3 目的の達成状況 (2)

GPS測量に比べ現地での観測時間を約半分にして測量→

**十分に達成!!**

基線長10km前後の基線における3周波解析(L1+L2+L5)による解の収束状況



- 観測時間120分で得られる座標値との差が観測時間70分以上であれば、水平2cm、高さ3cm未満※とすることを確認

※ 準則における重複する基線ベクトルの較差の許容範囲

L5の利用により短縮は可能

→ 安全率を見て、75%までの短縮をマニュアル化

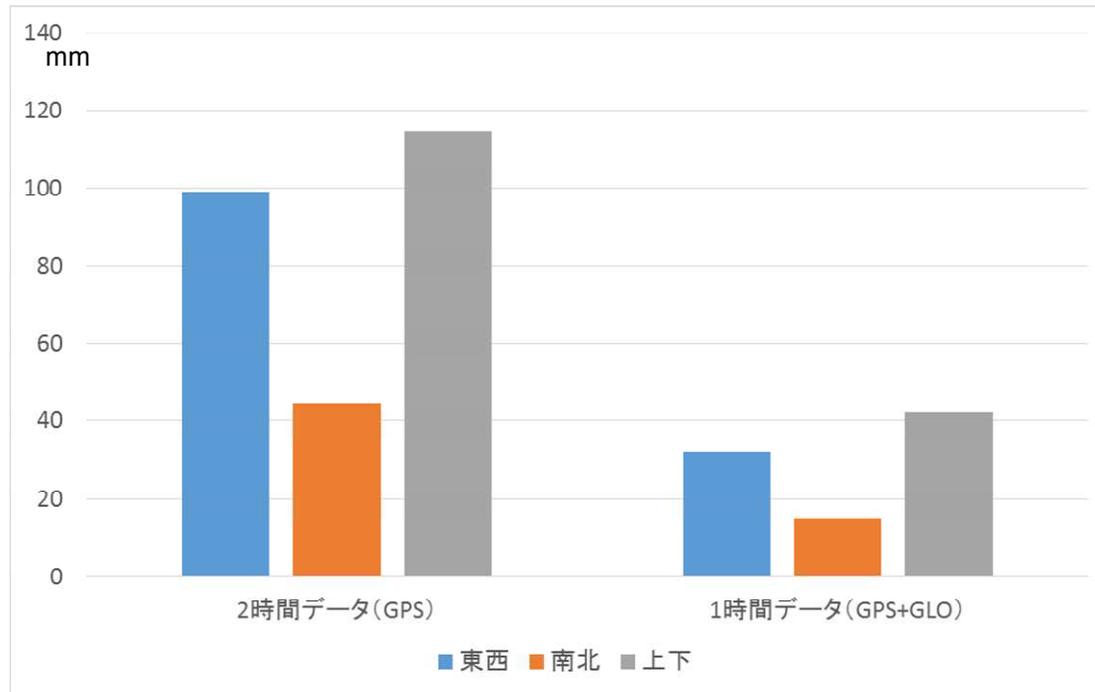
## 4.3 目的の達成状況 (3)

地殻変動量の提供時間を約半分に短縮→

十分に達成!!

GEONETによる検証

観測点の解の標準偏差(中央値)



※「2時間データ(GPS)」は、ノイズに時間相関がないことを仮定して推定

項目	内容
観測データ	2013年10月4日
観測点数	1220
衛星系	GPS GPS+GLONASS
解析	スタティック

- GPSによって2時間で得られる解が、GPSとGLONASSだと半分の1時間で得られ、さらに精度が改善することを確認

GLONASSを用いることで解析に必要な観測時間の短縮は可能

## 5. 事後評価における主な意見と対応状況

意見	GSILIBはオープンソースライセンスで公開され、 今後のアジアをはじめとする海外への展開についても期待される。
対応	<ul style="list-style-type: none"><li>・ 成果の公表（国土地理院ウェブ上でも） 英語での論文公表 国際シンポジウムでの講演 マルチGNSS解析ソフトウェアの公開     ダウンロード数（2017/03-2018/11集計）     海外からと見込まれるもの：<b>1055件（全体の34%）</b></li><li>・ ソフトウェア（GSILIB）の紹介・実習 国際セミナーでの紹介・実演 研修での講義・実習</li></ul>



- 作業規程の準則に反映(H25年3月29日)
  - 準天頂衛星を用いた公共測量が可能に
- 「マルチGNSS測量マニュアル(案)ー近代化GPS、Galileo等の活用ー」を施行(H27年5月29日)
  - Galileoを含む観測、L5帯を利用した3周波解析等が可能に
- マルチGNSS解析ソフトウェアGSILIBを公開(H27年1月8日)
  - マニュアル公開、論文・講演等成果公表で技術の普及
  - 2018年11月末までのダウンロード数:約8,000件
- 地殻変動情報把握の時間短縮に向けた解析手法
  - 知見を生かし、課題であるリアルタイム補正情報生成手法、電子基準点リアルタイム解析システムの研究開発へと発展し、超巨大地震に伴う津波の予測支援等に活用
- マルチGNSS解析・利用技術をアジア地域等に国際展開へ
  - GNSS地域ワークショップ・シンポジウム等で成果公表
  - 国際セミナー、受け入れ研修等でソフトウェアの紹介、実習
  - GSILIBダウンロードの内、海外からと思われるもの:約1/3

## (参考)論文、学会発表等(1)

- 論文
  - 写真測量とリモートセンシング, Vol.52, No.4, 2013
  - 日本航空宇宙学会誌, Vol.62, No.5, 2014
  - 国土地理院時報, Vol.125, 2014; Vol.127, 2015; Vol.128, 2016
  - 国土地理院欧文報告(Bulletin of the GSI), Vol.63, 2015
  - FIG(国際測量者連盟) working Week 2016, 2016
- 国際シンポジウム
  - アジアオセアニアGNSS地域ワークショップ(H24/12マレーシア、H25/12ベトナム、H26/10タイ)
  - マルチGNSSアジアカンファレンス(H27/12ブルネイ)
  - GNSS国際シンポジウム 2015(H25/11京都)
  - FIG/IAG(国際測地学協会)/UN-GGIM-AP(国連地球規模の地理空間情報管理に関するアジア太平洋地域委員会)ほかセミナー(H28/5 ニュージーランド、H29/7 神戸)
- 国内学会
  - 地球惑星科学連合大会(H24/5、H25/5、H26/4、H27/5)
  - GPS/GNSSシンポジウム(H24/10、H26/10)
  - 日本測地学会講演会(H24/11、H25/10、H26/11、H27/10)
  - 宇宙科学技術連合講演会(H25/10、H26/11)

## (参考)論文、学会発表等(2)

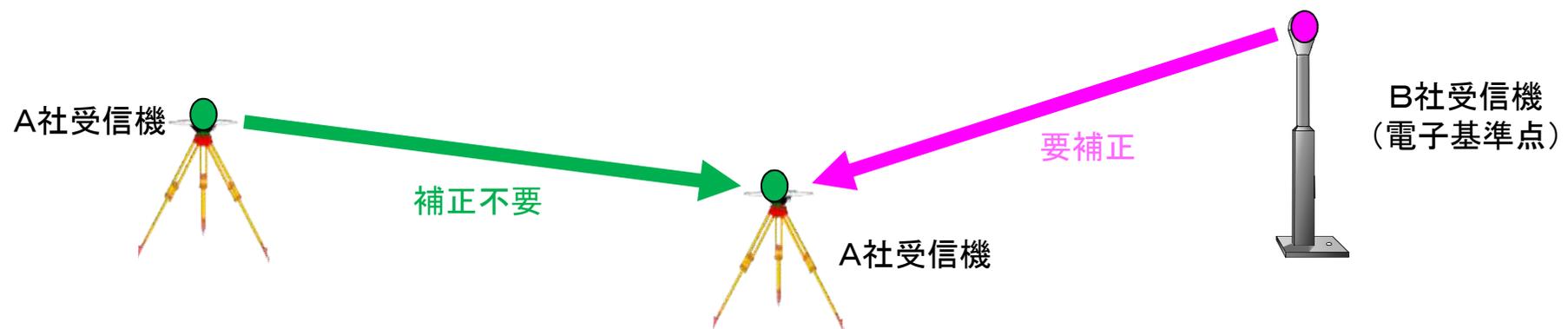
- 国内講演会・講習会
  - JAXA:QZSSユーザミーティング(H25/2、H26/4)
  - 国土地理院:国土地理院報告会(H25/6、H26/6、H27/6)
  - 電子基準点を利用したリアルタイム測位推進協議会:リアルタイム測位利用技術講習会(H26/10)
- 研修での講義/実習
  - タイ・王立測量局(H30/3)
  - ミャンマー・天然資源環境保全省測量局とヤンゴン都市開発委員会(H30/10)
  - インドネシア・地理空間情報庁(H30/11)

## 参考資料

## 4.1 マルチGNSS測定の系統誤差[バイアス]

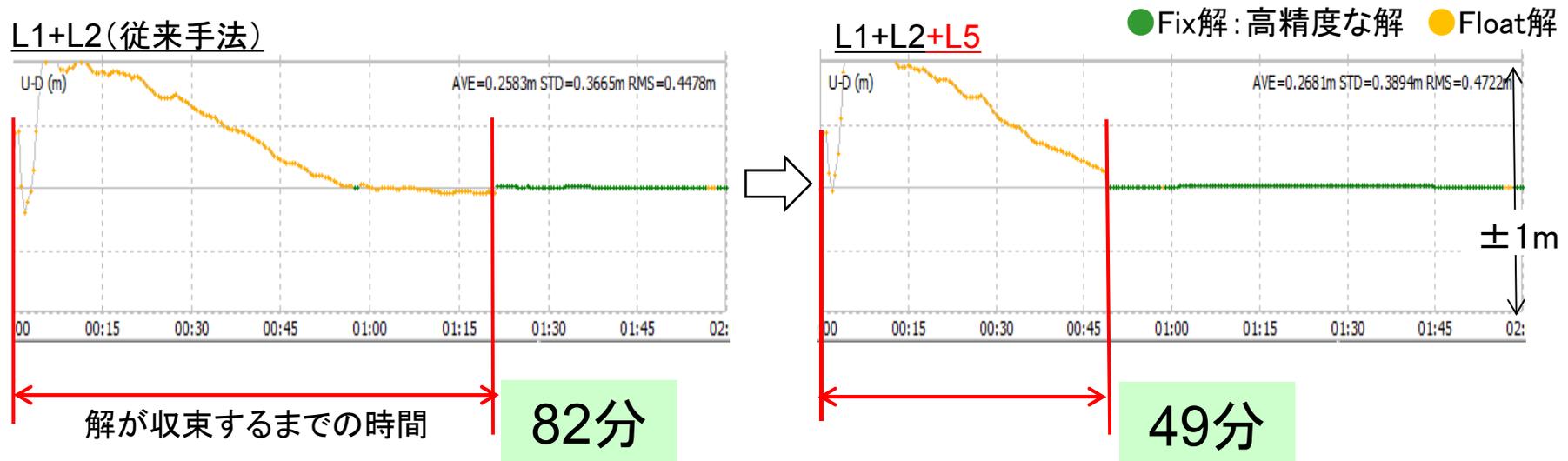
1. 衛星の種類や、周波数によって、信号が受信機内を通る際の遅延時間がわずかに異なり、観測データに、衛星系固有の系統誤差(バイアス)が発生
2. 同一機種の実験機間で高精度測位を行う場合、ほとんどの衛星系固有のバイアスは相殺される
3. しかし、電子基準点を利用する場合、同一機種ではなく異機種間の測位になることがあるため、衛星系固有のバイアスを明示的に扱う必要がある

⇒ 本開発で注力



## 4.2 成果例：L5信号を利用した解析技術の開発 国土交通省

- ① 新しい周波数帯(L5)の信号を利用して、従来の手法と同等の精度をより短い観測時間で達成する解析手法を開発



測位方式:スタティック 基線長:126km 観測時間:2時間

- 長基線でのシミュレーション例だが、60%に短縮

### ② GLONASSの系統誤差を除去する方法を開発

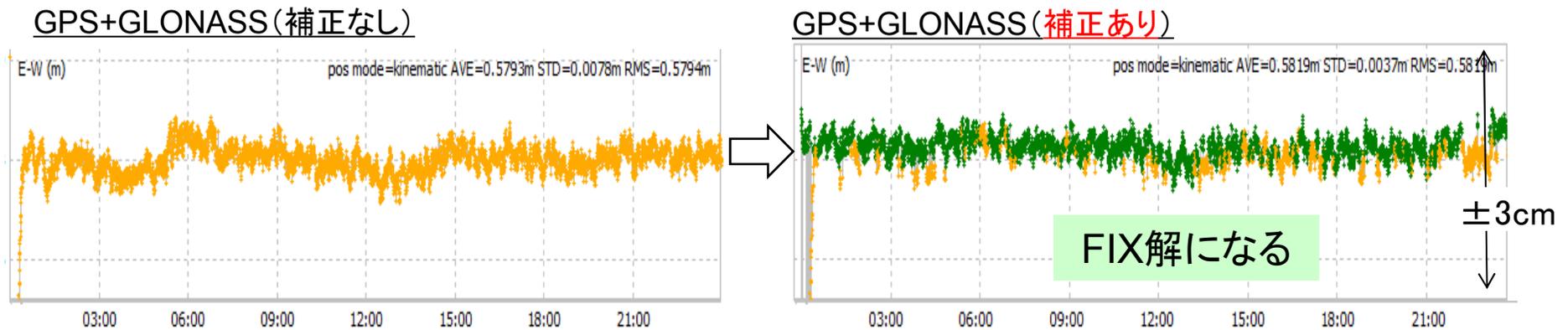
**GLONASS**では、受信機の回路で、受信機種ごとに異なる系統誤差が発生  
(GLONASS周波数間バイアス:IFB)

→ 異機種受信機間でのGLONASSを含む解析に影響あり



事前推定値で補正する方法を開発

● Fix解 ● Float解



測位方式:キネマティック 基線長:1m 観測時間:24時間

- 異機種受信機間でもGLONASSで安定した測位が可能に

### ⑤ BeiDouの系統誤差を除去する方法を開発

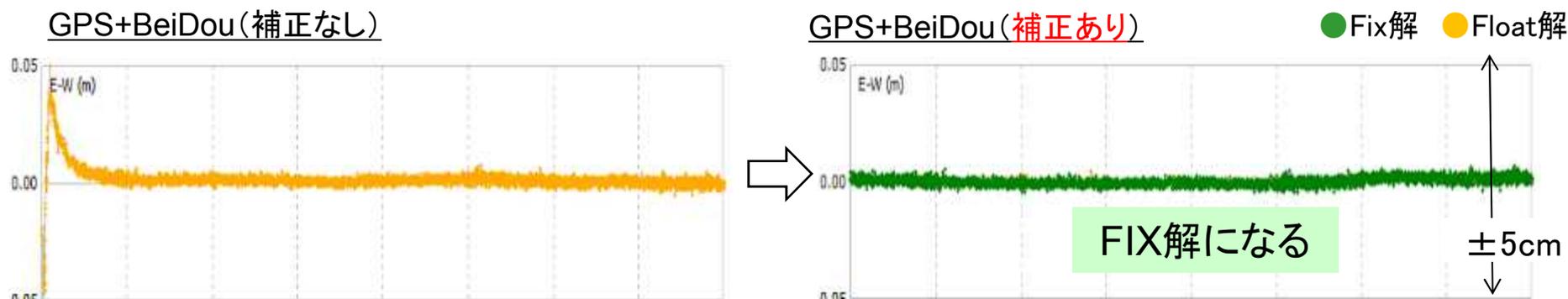
**BeiDou**を利用する場合、衛星の軌道のタイプ※による位相のずれが、受信機種ごとに異なる(1/2サイクルシフト問題)

※静止軌道、中軌道、傾斜対地同期軌道

→ 異機種受信機間でのBeiDouを含む解析に影響あり



2機種の受信機の衛星軌道毎のずれを調べ、補正する方法を開発



測位方式:キネマティック 基線長:0m 観測時間:24時間

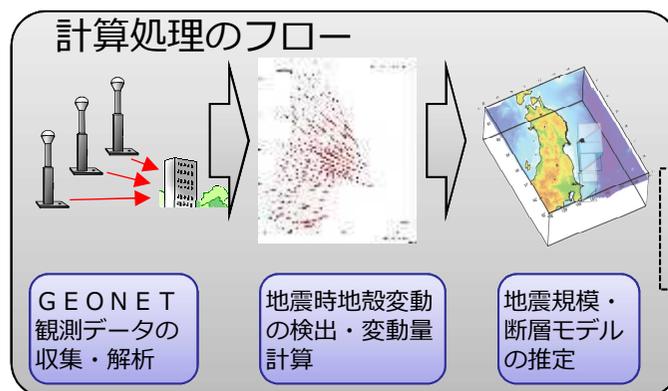
- 異機種受信機間でもBeiDouで安定した測位が可能に

→ さらに事例を集めて検証

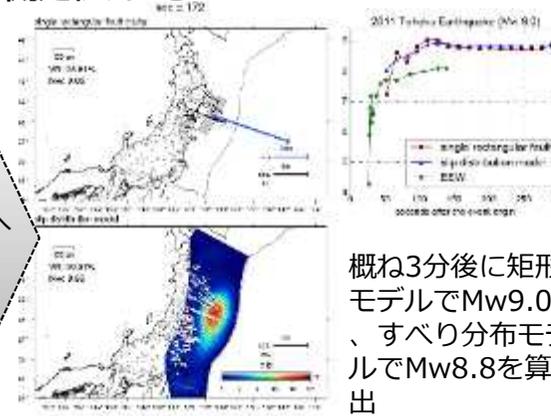
- プロジェクト Webサイトで公開  
([http://www.gsi.go.jp/eiseisokuchi/gnss\\_main.html](http://www.gsi.go.jp/eiseisokuchi/gnss_main.html))
  - 有識者委員会資料(第1～12回)
  - H23～26年度 成果品
    - 衛星系／複数周波数信号の組合せ 報告書
    - マルチGNSS解析システムの基本／詳細設計書
    - GSILIBプロトタイプ → H25/11/14公開
    - GSILIB ver1.0 → H27/1/8公開
    - マルチGNSS解析に関する技術指針検討資料 など
- 公共測量の作業規程の準則(国土交通大臣告示)
  - 一部改正 H25/3/29
- マルチGNSS測量マニュアル(案)を公開

## 電子基準点リアルタイム解析システム (REGARD)

電子基準点のデータを、リアルタイムで常時解析することで、巨大地震発生時の地殻変動量及び地震規模を即時に求め、関係機関に情報提供する。



これらの処理を即時に自動で実施



東北地方太平洋沖地震発生時のデータを用いて、後処理で検証した例

「即時性」を重視した解析システム。平成28年4月から運用を開始。

GPSとGLONASSを用いたシステムとして開発。

現在の**相対測位**方式を使用：参照点が停止すると、全点の解析が行われない。冗長性を向上するとともに解析の頑健性を高めるため、リアルタイムで精密単独測位解析を行うシステムの研究に取り組んでいる。

追跡調査結果

研究開発課題名	高度な国土管理のための複数の衛星測位システム（マルチ GNSS）による高精度測位技術の開発
研究開発の概要	<p>従来の GPS 衛星（米国）のほかに、準天頂衛星（日本）や、GLONASS（ロシア）、Galileo（EU）の打上げにより、衛星測位システムを用いた測量の環境が大きく変化している。そのため、複数の衛星測位システム（マルチ GNSS（Global Navigation Satellite System））を統合的に利用し、短時間に高精度測位が可能な技術を開発するとともに、測量の実施のための観測・解析手法の標準化を行う。</p> <p>【研究期間：平成23～26年度 研究費総額：約440百万円】</p>
研究開発の目的 （アウトプット 指標、アウトカム 指標）	<p>これまで GPS 測量が困難であった都市部等を含め、国土管理に必要な高精度測位の効率的な実施を実現するため、マルチ GNSS を統合的に利用して、短時間に高精度の位置情報を取得し、測量等に適用するための技術開発及び標準化を行う。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ GPS だけでは困難であったビル街等での高精度測位の実現</li> <li>・ 観測時間の短縮による測量の効率化及び災害時における地殻変動情報のより迅速な提供</li> <li>・ マルチ GNSS を用いる公共測量の作業規程等の策定</li> </ul>
波及効果や副次的 効果等	<p>【波及効果や副次的効果等】</p> <p>本技術開発により、従来 GPS だけでは困難であった都市部のビル陰等においてもマルチ GNSS による高精度測位を実現できる範囲が拡大した。「作業規程の準則」を改正して準天頂衛星の測量への利用を可能にするるとともに、同準則第17条に規定されるマニュアルを策定し、マルチ GNSS の信号を単独又は複数組み合わせることで測量を効率的に実施することを可能とした。また、開発したソフトウェアをホームページで公開して技術の普及を進めるとともに、国際学会等での成果公表や開発ソフトウェアを紹介するセミナーの開催などを行い、マルチ GNSS の解析・利用技術についてアジア地域等への国際展開を進めている。さらに、災害時における地殻変動情報の時間短縮に向けた解析手法に関する知見を生かし、課題とされたリアルタイム補正情報生成手法、電子基準点リアルタイム解析システムの研究開発へと発展し、超巨大地震に伴う津波の予測支援等に活用している。</p>
外部評価の結果	<p>本研究開発において開発された「マルチ GNSS 解析ソフトウェア」については、国内外で多く利用されており波及効果も確認できるが、利用者に対してアンケートを実施するなど、実装状況や不具合などの情報を収集し、反映・改善していくことが望まれる。</p> <p>&lt;外部評価委員会委員一覧&gt;（平成31年2月6日、建設技術研究開発評価委員会）</p> <p>委員長 道奥 康治 （法政大学 デザイン工学部 都市環境デザイン工学科 教授）</p> <p>副委員長 野城 智也 （東京大学 生産技術研究所 教授）</p> <p>委員 加藤 信介 （東京大学 名誉教授）</p> <p>” 古関 潤一 （東京大学 大学院 工学系研究科 教授）</p> <p>” 清水 英範 （東京大学 大学院 工学系研究科 教授）</p> <p>” 田中 哮義 （京都大学 名誉教授）</p> <p>” 二羽 淳一郎（東京工業大学 環境・社会理工学院 土木・環境工学系 教授）</p> <p>” 平田 京子 （日本女子大学 家政学部 住居学科 教授）</p> <p>” 本橋 健司 （芝浦工業大学 名誉教授）</p> <p>” 山口 栄輝 （九州工業大学 大学院 工学研究院 建設社会工学研究系 教授）</p>
新規課題に向けた改善等	波及効果の具体的活用事例やコスト縮減効果について、引き続き情報収集していくことが望まれる。