

## 現在のGPS-A海底地殻変動観測の検出能力

1. 南海トラフのすべり欠損速度の推定結果についての補足
2. GPS-A観測の測位の不確かさについて

石川直史(海上保安庁海洋情報部)

2017年2月22日

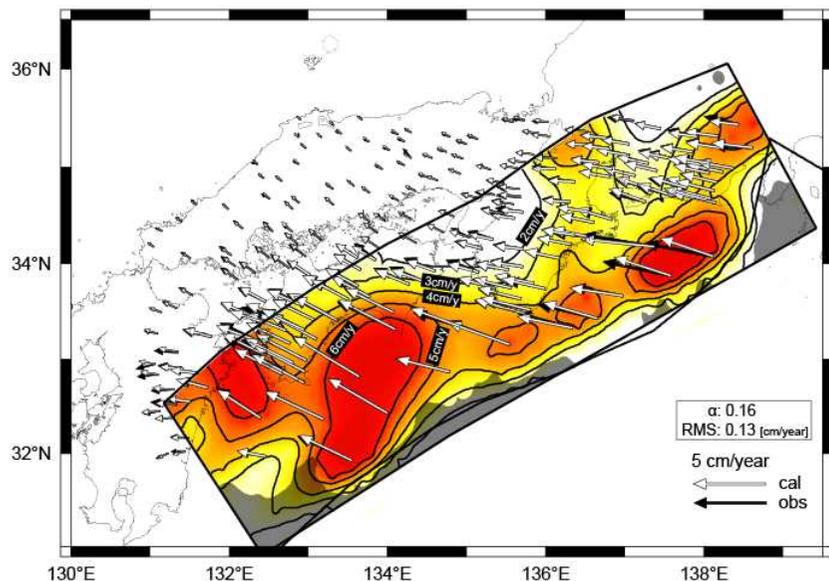
地震調査研究推進本部 政策委員会  
調査観測計画部会 海域観測に関する検討ワーキンググループ



# 南海トラフのすべり欠損速度分布：推定の条件

Yokota et al., 2016, Nature

大まかな傾向は変わらないものの  
モデルの設定によって分布の詳細は異なりうる



インバージョン手法		東北地震の影響
Yabuki & Matsu'ura [1992] ※すべりは3次のB-spline関数を基底関数として表現 ※すべり分布の滑らかさを拘束 (ABICでスムージングパラメータを決定) ※プレート沈み込み方向・速度によるすべりの拘束なし		Sun & Wang [2015], linuma et al. [2012] のモデルを使って除去
使用データ		プレート境界モデル
陸上GPS(2006-2009) + 海底GPS-A(2006/2012-2015)  ※水平のみ使用 ※海陸の重みは同一 ※陸上GPS(GEONET)は観測点数を間引いて使用		CAMP Standard [Hashimoto et al., 2004]
グリーン関数の計算	ブロック運動	分岐断層
半無限均質弾性体  ※全ての観測点は平な地 表面上	考慮せず  ※地表の地殻変動を全て プレート境界のすべりによ る弾性変形としている	考慮せず

## 1. 南海トラフの結果について

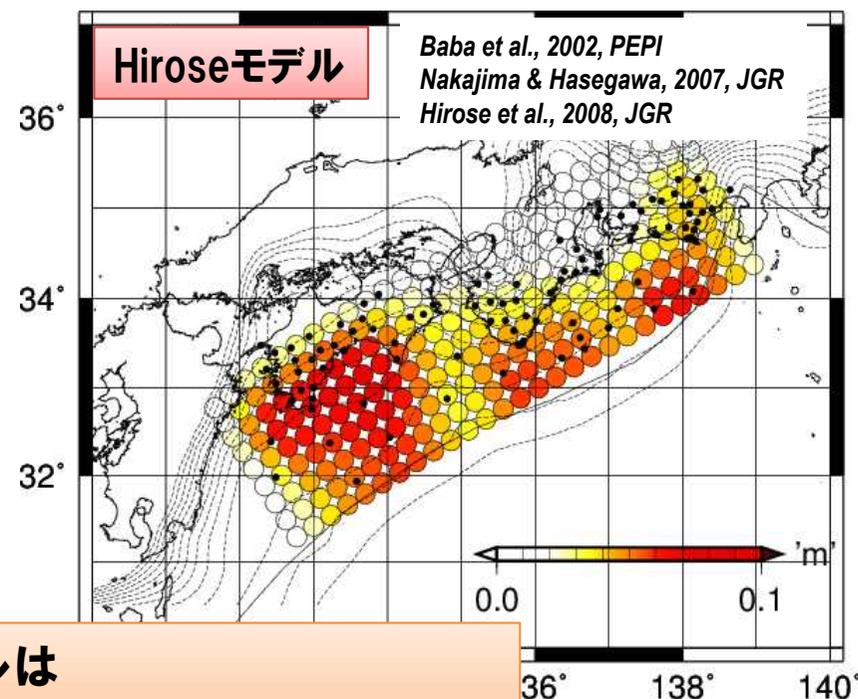
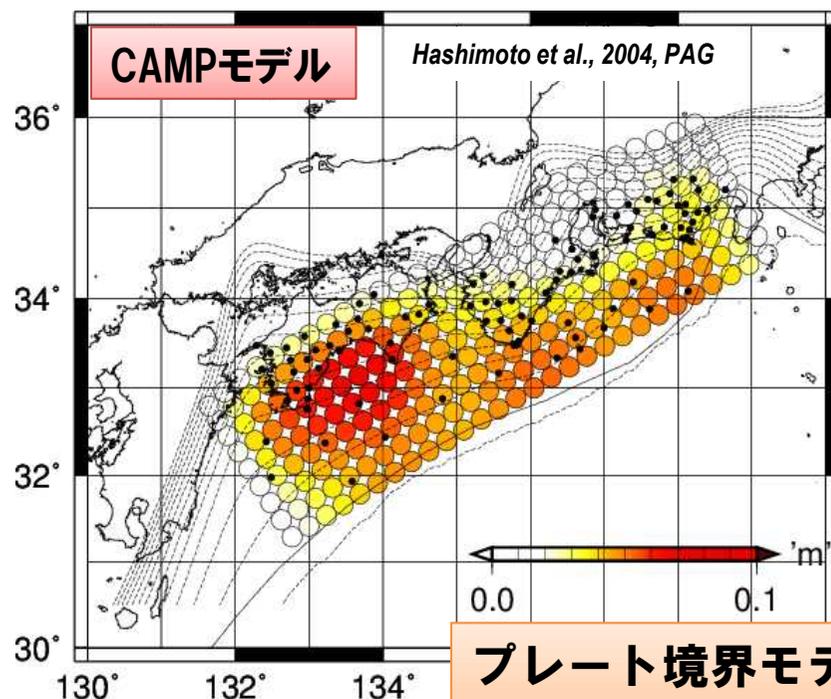
# ブロック運動とプレート境界モデルの影響

Watanabe, Bock, & Melgar, 2016, AGU

変動ベクトルからブロック運動 (Loveless & Meade, 2010) 分を差し引いて推定  
※名古屋大学の観測結果 (Tadokoro et al., 2012) も使用

推定手法 :

Melgar & Bock, 2013, JGR

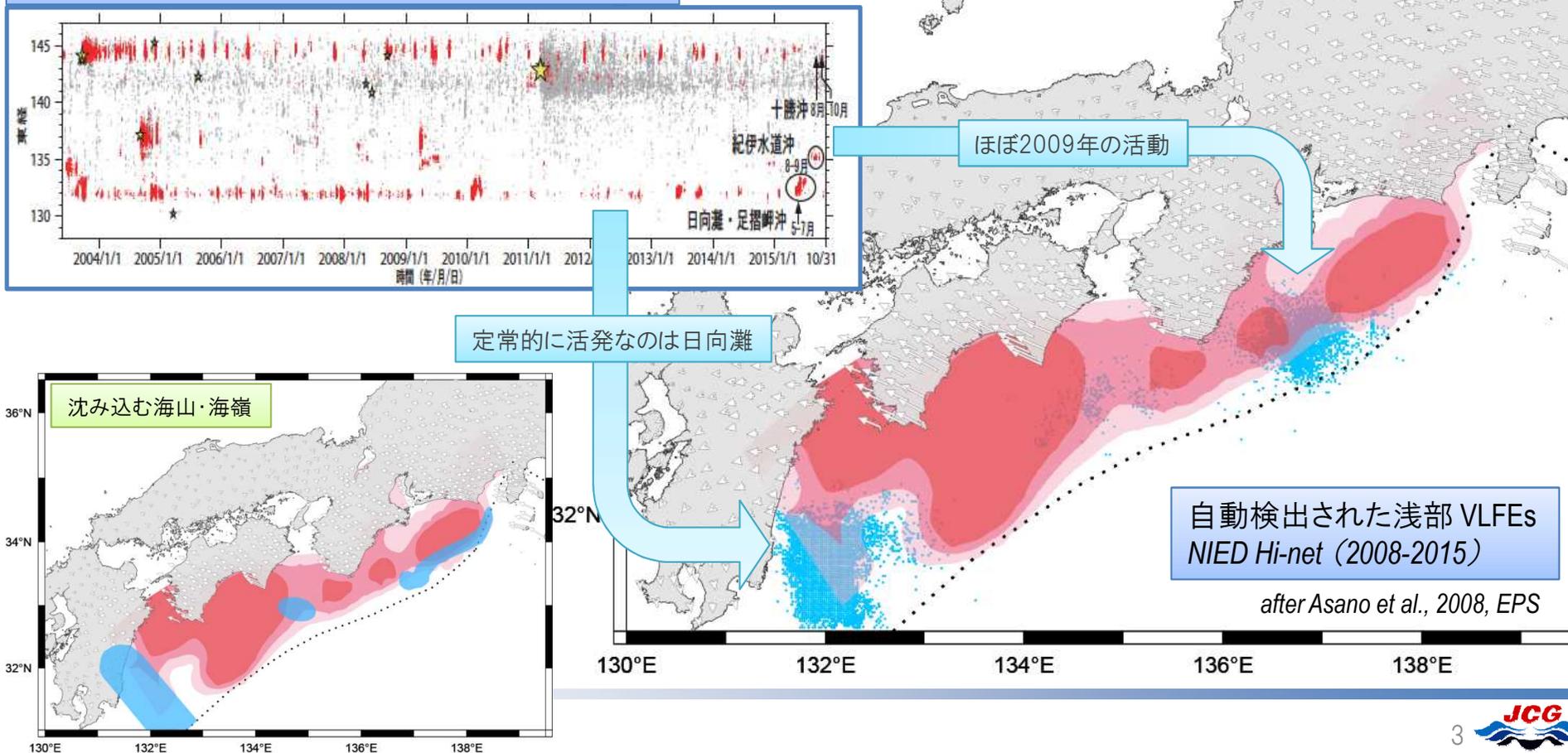


プレート境界モデルは  
すべり欠損速度分布に一定の影響を与える

1. 南海トラフの結果について

# VLFE活動との相補性

日本周辺における浅部超低周波地震活動 地震予知連絡会会報第95巻  
防災科学技術研究所資料より



## まとめ：南海トラフのすべり欠損速度分布について

### Yokota et al. 2016の結果について

- ・ 陸上データのみでの推定と海底データを加えたときの推定の違いを見るため、シンプルなモデルで推定。
- ・ 2011年東北地震の影響を除去した数年間のスナップショット。
- ・ 弱固着域・VLFEs・海山の分布は、おおまかには重なるが詳細は地域毎に異なる。

### 今後の課題

- ・ より現実に近い推定のためには、ブロック運動モデルやプレート境界モデル、グリーン関数等を適切に設定することが必要。
- ・ 観測点密度の薄さから、分布の詳細はスムージングに依存しており、分布の詳細を議論するためには観測点の増加が必要。(トラフ軸近傍の10km以浅は現在も解像度はない)
- ・ 時間変化を捉えるには、短期間で信頼性の高い推定を可能にすることが必要。

## GPS-A観測の現在の状況

### ➤ 観測点数

- **約60点** (海上保安庁: 24点) 【GNSS: 1300点以上】

### ➤ 観測頻度

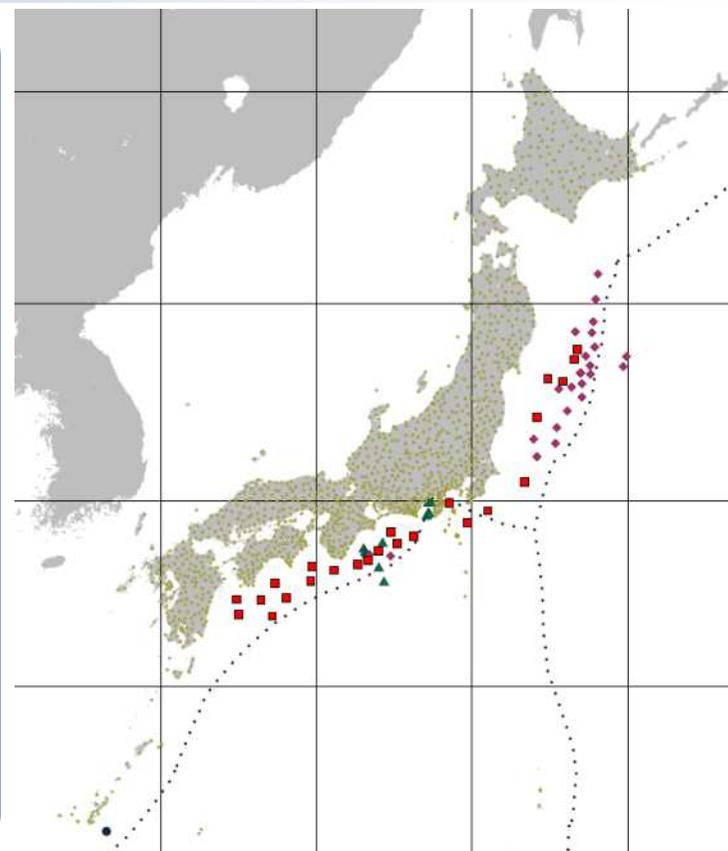
- **年に2-3回** 【GNSS: 連続観測】

➡ **最大年10回へ**

### ➤ 観測精度 (水平)

- 位置の推定 (回帰直線のまわりのばらつき) : **1-3 cm** ( $1\sigma$ )  
※上下は系統的な誤差要因の影響が大きく2~3倍以上悪い  
【GNSS: 1cm以下】
- 変動速度の推定 (回帰直線の傾き) : **1cm/year** (95%CL)

目標値

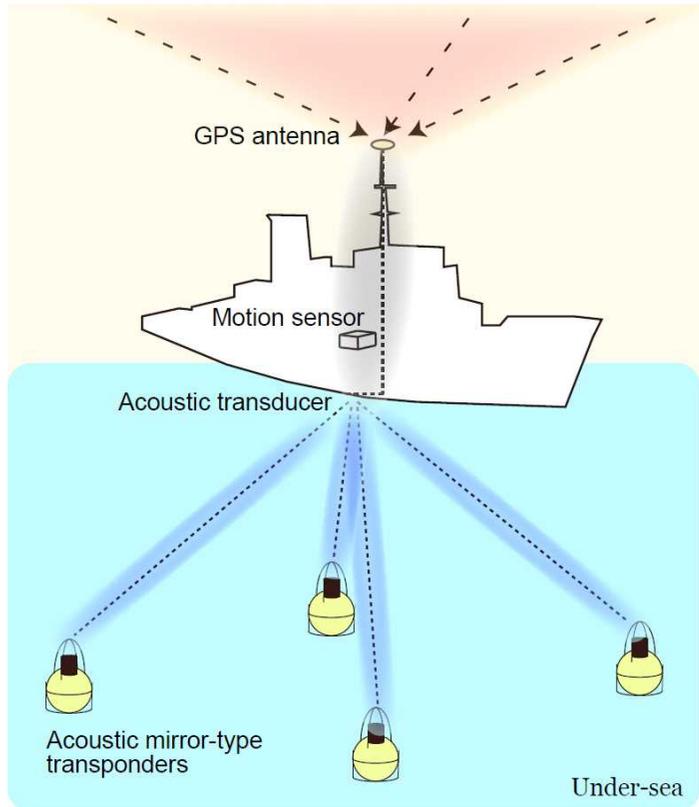


地震調査研究推進本部のデータを用いて作図

## 2. GPS-A測位の不確かさについて

## GPS-音響測距結合方式(GPS-A)観測の誤差要因

### 観測システム



#### GPS測位の誤差

- 刻々と位置が変化するため、不確かさの定量的評価は困難
- 経験的に、数cmのオーダー

#### GPS-トランスデューサ間の位置関係の誤差

- 水平方向は船の向きを変えることで軽減可能
- 上下方向は測位解にそのまま影響

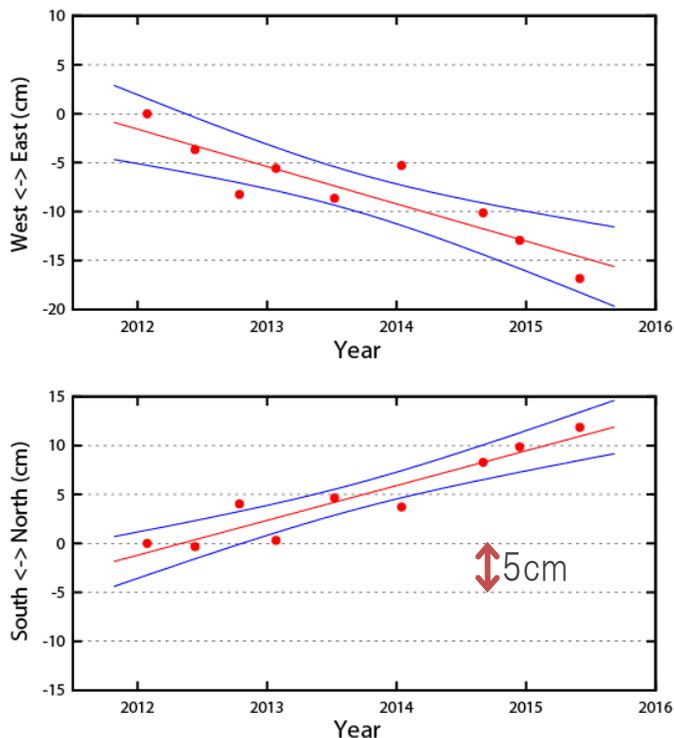
#### 海中音速度の誤差

- 時間・空間で複雑に変化するため、不確かさの定量的評価は困難
- 経験的に、数cm～数十cmのオーダー(上下方向に大きく影響)
- 時間・空間変化の全ての把握は不可能だが、解析手法を工夫し、変化を推定することである程度軽減可能

### 2. GPS-A測位の不確かさについて

# 測位結果の不確かさの評価について

ある観測点の結果の例



	【位置の推定】 回帰直線まわりのばらつき(1σ)	【速度の推定】 回帰直線の傾きの推定の幅(95%CL)
東西	2.5 cm	1.8 cm/year
南北	1.7 cm	1.2 cm/year

• 位置の推定については、評価できない系統的誤差(音速度不均質等)の影響が大きく、1回1回の測定の不確かさを評価できない。

※最小二乗法で推定した座標値の分散は水平で0.5cm、上下で0.3cm程度

• そのため、複数回の観測から推定される回帰直線をもっとも確からしい値として、そのまわりのばらつきを不確かさの指標としている。

• 回帰直線の傾きの分散とt分布の係数から信頼区間を計算(データ数が少ないので正規分布ではなくt分布を用いる)

• 例として、RMS=2.0cmの場合、  
年3回の観測を  
3年続けると1.2cm/year(95%CL)  
4年続けると0.8cm/year(95%CL)

※1次元の場合

## 2. GPS-A測位の不確かさについて

## 回帰直線の傾きの推定:変動速度の検出能力

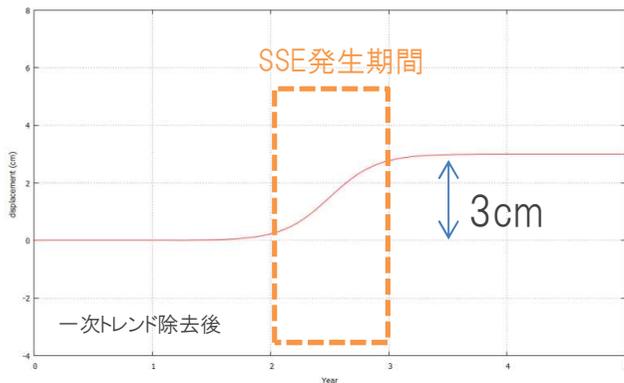
位置推定の幅 (1 $\sigma$ ) [cm]	回帰直線の傾きの推定の幅 (95%CL) の見積もり [cm/year]											観測頻度	
	3回/年				10回/年			24回/年		365回/年			観測期間
	1年	2年	3年	4年	1年	2年	3年	1年	2年	0.5年	1年		
<b>1.0</b>	2.7	1.1	0.6	0.4	1.8	0.7	0.4	1.3	0.5	1.0	0.4		
<b>1.5</b>	4.0	1.7	1.0	0.7	2.8	1.0	0.6	1.9	0.7	1.5	0.5		
<b>2.0</b>	5.2	2.2	1.3	0.9	3.8	1.4	0.8	2.6	1.0	2.0	0.7		
<b>2.5</b>	6.5	2.8	1.6	1.1	4.7	1.8	1.0	3.3	1.2	2.5	0.9		
1cm/yrを目安とした場合	これまで: ・成果を出すのに3~4年以上				今後(最大回数): ・2年程度で一定の成果 ・1年で3cm/yr以上の変化があれば、捉えられる可能性			参考: ・1年以下に縮めるには、測位精度の向上が必要		参考: 連続観測を想定			

### 2. GPS-A測位の不確さについて

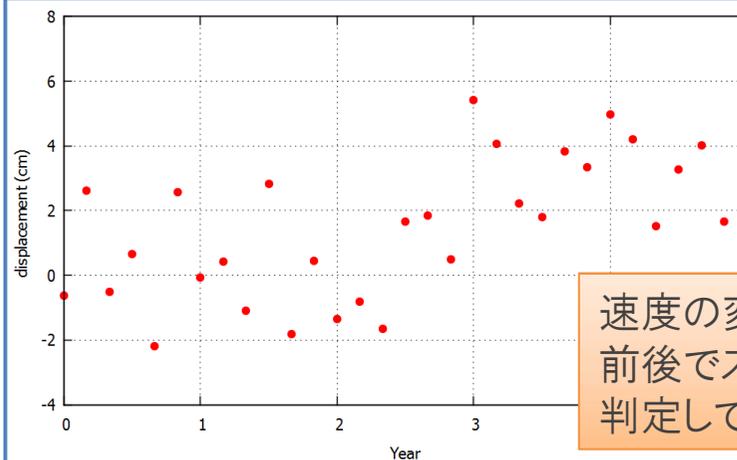
※モンテカルロ法で計算

# 短期の非定常変動の検出可能性

例えば、こうした変動があった場合

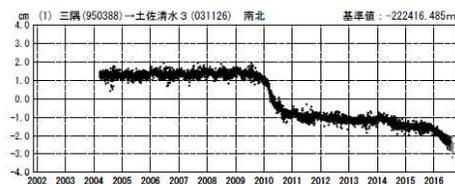


1 $\sigma$ =1.5cmとしたとき、  
年6回の頻度でランダムにデータを発生させると・・・

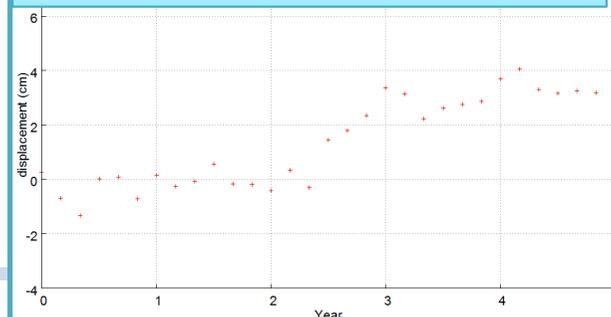


速度の変化を見るのは難しいので、  
前後でステップがあるかどうかを  
判定してみる

GNSSの例(国土地理院資料より)

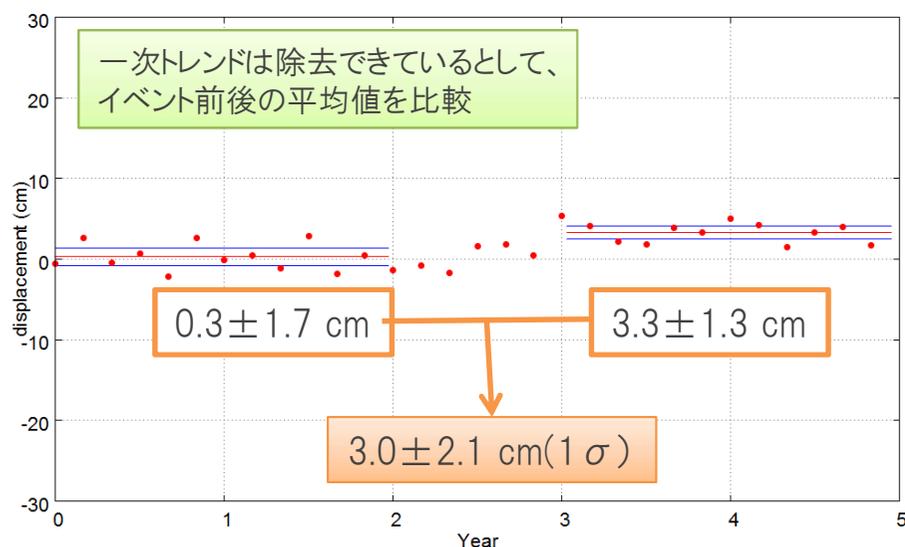


参考: 1 $\sigma$ =0.5cmの精度があると、変化が追える



2. GPS-A測位の不確さについて

## ステップ状の変化の検出能力



ただし、イベントの期間は陸上GNSS観測から推定。  
海底GPS-Aデータのみからイベントの開始・終了時期  
を判定することは現状では困難。

一次トレンドの推定自体に不確実性があるため、  
現実的には変動が無視できる短期間の結果の平均  
値で比較することになる

### t検定によるステップ状の変化の検出能力

イベント前 データ数	イベント後 データ数	ばらつきの RMS	5%有意水 準を超える 変動量
2	2	2.0 cm	9 cm
		1.5 cm	7 cm
		1.0 cm	5 cm
3	3	2.0 cm	5 cm
		1.5 cm	4 cm
		1.0 cm	3 cm

## まとめ:GPS-A観測の検出能力

- 今後、年10回の観測の実現により:
  - － 約2年の観測で、1cm/yr (95%CL)程度の精度が見込める。
  - － 1年で 3cm/yr以上の速度変化があれば、捉えられる可能性がある。
- 時間分解能をさらに上げるには測位精度そのものの向上が必須
  - － 現在、一番良い海域でRMS $\approx$ 1cm。
  - － 音速度勾配の推定などより高度な解析手法の開発が必要。
- Co-seismic slipやSSE前後のステップ状の変化について:
  - － 前後3回の平均値の比較により、4cm程度の変化を検出可能。
  - － 前後2回の平均値の比較により、7cm程度の変化を検出可能。