

GEONET とDInSAR を組み合わせた SBAS による地盤変動の計測

2013/11/21

京都大学 工学研究科 社会基盤工学専攻
空間情報学講座

橋詰 和紀
田村 正行

1

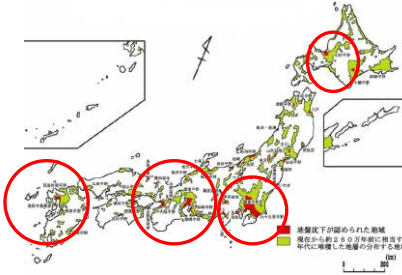
発表内容

- 背景
- 研究目的
- GEONETによる補正
- SBAS
- 使用データ
- 結果
- 結論

▶ 2

背景

- ▶ 全国で地盤沈下が深刻な問題になっている



赤く示された場所が
地盤沈下の認められた地域
(環境省、平成23年度
全国の地盤沈下地域の概況)

- ▶ 大阪では平成20～21年に1.02 cmの沈下が認められている
- ▶ 沈下量のデータは、測定した点以外では得られない

▶ 3

背景 (DInSAR)

- ▶ SAR画像間の位相のズレを利用することにより地形の変動量を計算することができる
- ▶ 2時期 t_1 、 t_2 で得られたSAR画像間の観測位相差を $\Delta\varphi$ は

$$\Delta\varphi = \varphi(t_2) - \varphi(t_1) \approx \frac{4\pi}{\lambda} (d_2 - d_1) \quad \text{変動量}$$

- ▶ 現実的には、観測位相差 $\Delta\varphi$ は地表面の変動に加えて、DEMの誤差、軌道誤差、大気、ノイズなどの影響も含まれる

$$\Delta\varphi \approx \frac{4\pi}{\lambda} (d_2 - d_1)$$

$$+ \Delta\varphi_{DEMerror} + \Delta\varphi_{orbit} + \Delta\varphi_{atm} + \Delta\varphi_{noise}$$

→ 計測される変動量の精度が低下

▶ 4

研究目的

時系列での沈下量を面的かつ高精度に推定

- ▶ DInSARによる複数の干渉画像を組み合わせるSBASを用いることで、経年的な地盤の変動を面的に測定することができる
- ▶ GEONETを併用することで、高精度に測定することを試みる

干渉画像作成
(SAR Scape)

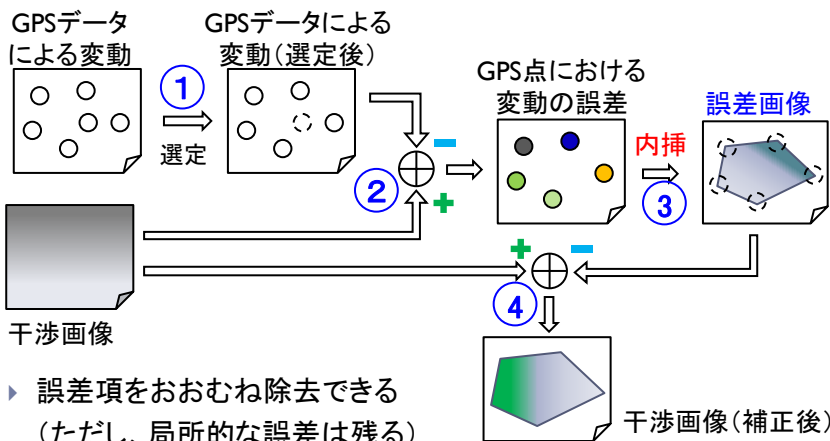
GEONETによる補正

SBAS

▶ 5

GEONETによる補正

- ▶ GPSから得られる変動は真値と仮定し、干渉画像を補正 (Fukushima, 2013)



▶ 6

SBAS (Small Baseline Subset method)

- ▶ 観測位相差 $\Delta\varphi$ と時刻 t_0 における位相を基準とした観測位相 φ の関係は

$$\Delta\varphi_j = \varphi(t_{master(j)}) - \varphi(t_{slave(j)})$$

(観測条件が近い画像同士のみで計算)

↓ ……行列で表す ($\varphi(t_0)=0$ (基準))

$$\begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & +1 & \dots \\ 0 & 0 & +1 & 0 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varphi(t_1) \\ \varphi(t_2) \\ \vdots \\ \varphi(t_M) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta\varphi_1 \\ \Delta\varphi_2 \\ \vdots \\ \Delta\varphi_N \end{pmatrix}$$

A **φ** **$\Delta\varphi$**

SBASは、**行列A**と**干渉画像 $\Delta\varphi$** を既知として **φ** を求め、
変動量を推定する手法 (Berardino, et. al.2002)

▶ 7

SBAS

- ①沈下速度 $v_k = \frac{\varphi_{k-\varphi_{k-1}}}{t_k - t_{k-1}}$ に関してSBASを適用

- ②未知数 **v** (or **φ**)の中に**DEMの誤差**を含める

DEMエラー Δz による位相誤差 $\Delta\varphi_{DEMerror}$ は $c_j\Delta z$ と表される
(c_j は観測条件のみで決まる定数)

- ▶ これらを合わせた以下の式をSVDを用いて **v** について解く

$$\begin{bmatrix} t_1 - t_0 & \dots & c_1 \\ t_1 - t_0 & t_2 - t_1 & \dots & c_2 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \end{bmatrix} \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ \Delta z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta\varphi_1 \\ \Delta\varphi_2 \\ \vdots \\ \Delta\varphi_N \end{pmatrix}$$

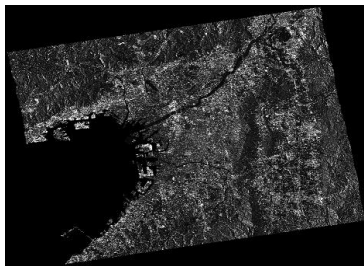
B **v** **$\Delta\varphi$**

→誤差が平均化されると同時に、局所的なDEMエラーも除去
(Berardino, et. al.2002)

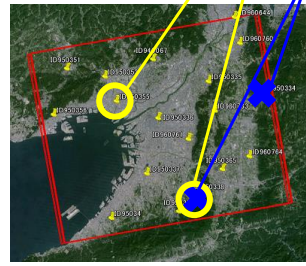
▶ 8

使用データ

- ▶ 2007年7月11日～2010年10月19日に大阪付近をALOS-PALSARが撮影したSAR画像計16枚(JAXA)
- ▶ GEONETによるデータ(GPS18点)(国土地理院)



SAR画像(2009年12月01日)

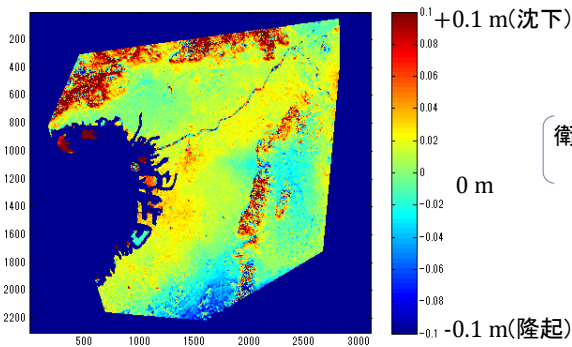


撮影範囲及びGPS点

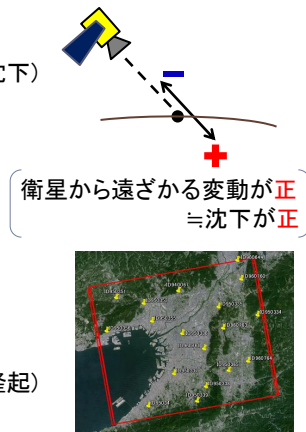
▶ 9

結果

- ▶ 16枚の画像から120枚(${}_{16}C_2$)の干渉画像を作成し、衛星間距離1000 m、時間間隔400日を閾値としてSBASを適用した結果



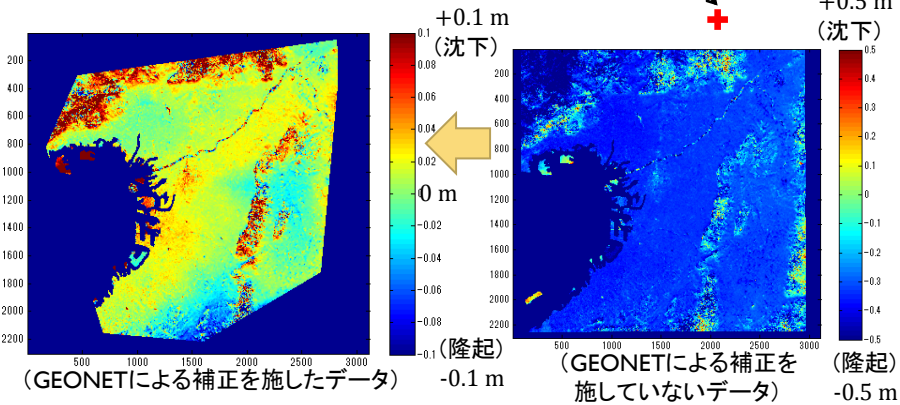
2007年7月11日～2010年9月3日の変動



▶ 10

結果（空間的な分布）

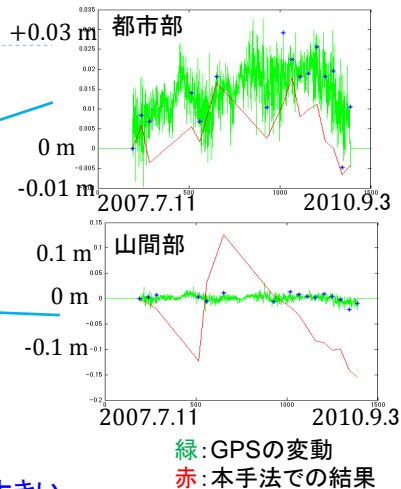
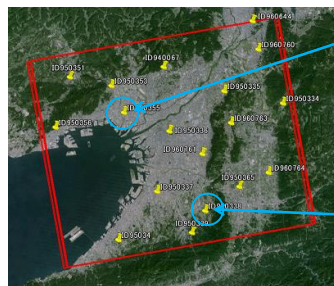
▶ 2007年7月11日～2010年9月3日の変動



- ▶ 変動を計測
 - ▶ 未補正の場合に比べ、地盤の変動として適切な値に近づく
- ▶ 11

結果（GPSとの比較）

▶ GPSとの比較

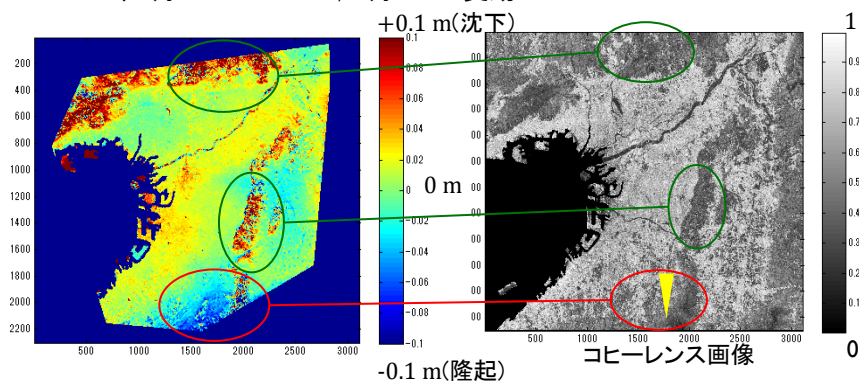


- ▶ 都市部ではGPSの変動パターンをある程度反映できている
 - ▶ 山間部に存在するGPS点では誤差が大きい
- コヒーレンスにより精度が大きく変化(コヒーレンスの高いところでは良好)

▶ 12

結果（精度の低下）

- ▶ 2007年7月11日～2010年9月3日の変動



- ▶ コヒーレンスの低いエリアで精度が顕著に低下
- ▶ コヒーレンスの低いピクセルにあるGPSが誤差の推定に悪影響
- ▶ その他、GEONETやSBASで除去できなかった誤差の影響もある

▶ 13

結論

- ▶ GEONETで補正した干渉画像に対して、SBASを適用した

時系列での沈下量を面的かつ高精度に推定

- ▶ ある程度の精度で変動を計測できた
- ✓ ただし、コヒーレンスの低いピクセルでは精度が下がる
- ✓ GEONETやSBASで除去できない誤差も存在
- ▶ コヒーレンスの高いピクセルでは良好に計測できる
- ▶ 今後は、今回の手法で除去できなかった誤差を除去し、さらなる精度の向上が期待される

▶ 14

出典

- ▶ 環境省 水・大気環境局:平成22年度 全国の地盤沈下地域の概況.
- ▶ R. Hanssen:Radar Interferometry, pp18, Kluwer Academic Publishers, 2001.
- ▶ P. Berardino et al.:A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol.40, no. 11, pp2375-2383,2002.
- ▶ Y. Fukushima:Correction of DInSAR Noise Using GNSS Measurements, 2013 Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, 2013.

▶ 15

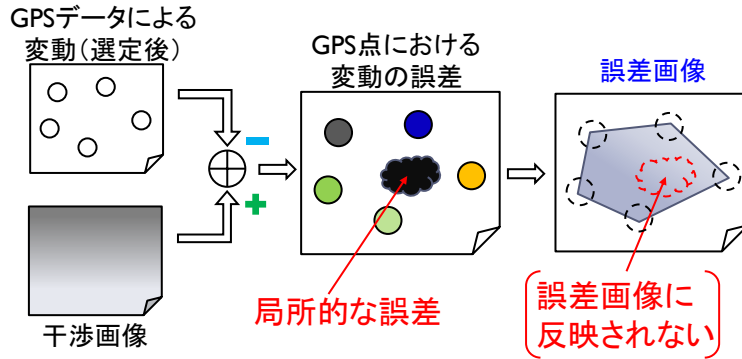
Appendix

▶ 16

Appendix

GEONETによる補正（補正できない誤差）

- ▶ 本研究の手法では、GPS点の間に存在するような局所的な誤差は補正できない



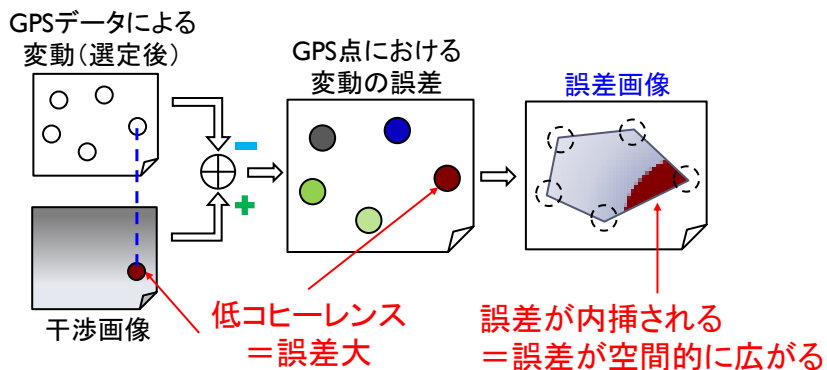
- ▶ 局所的な誤差の例として、(空間スケールの大きくない)大気の影響やノイズなど

▶ 17

Appendix

GEONETによる補正（内挿による悪影響）

- ▶ コヒーレンスはSARによる変動の計測精度を示す指標
- ▶ コヒーレンスが低いピクセルにあるGPSを補正に用いると、そのピクセルのみにしか存在しなかった誤差が内挿される

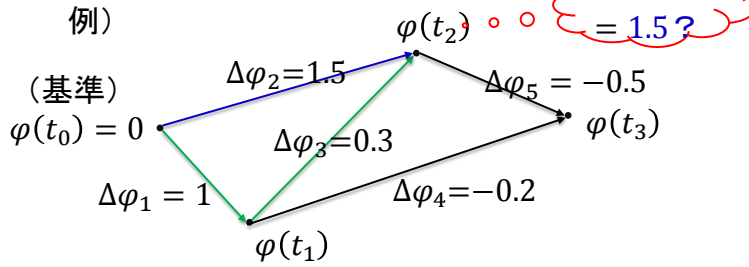


▶ 18

Appendix

SBAS (Small Baseline Subset method)

- ▶ InSARにより複数の干渉画像 $\Delta\phi$ が得られる
- ▶ $\Delta\phi$ には誤差が含まれるため、時刻 t_0 における位相を基準とした観測位相 ϕ を単純に求めることは不可能



→この例では優決定問題となる

→場合によっては劣決定問題にもなりうる

混合決定問題として解く

▶ 19

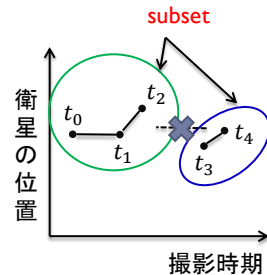
Appendix

SBAS (Subset)

- ▶ 衛星の位置や撮影時期といった画像ごとに撮影条件が異なるため、全ての画像ペアから有効な干渉画像が得られるとは限らない
- ▶ 撮影条件の差が少ない画像のセットを作るセット間につながりのないものをsubsetという

複数のsubsetの存在により、条件式が不足

→劣決定問題となり、最小ノルム解を求める



優決定問題と劣決定問題の混ざった、
 混合決定問題を解く

▶ 20

Appendix SVD (特異値分解)

- ▶ SVDとは、任意の(m, n)行列Aを次のように分解すること

$$A = USV^T$$

$$\left[\begin{array}{l} U \text{の行ベクトルは} AA^T \text{の固有ベクトル、(m, m)直行列} \\ V \text{の列ベクトルは} A^T A \text{の固有ベクトル、(n, n)直行列} \\ S = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_r, 0, 0, \dots) \\ S \text{は(m, n)行列、} \lambda \text{はAの特異値、} r \text{はAのランク} \end{array} \right]$$

- ▶ これを用いると、Aの一般逆行列A⁺は

$$A^+ = VS^+U^T$$

$$\left[\begin{array}{l} S^+ = \text{diag}(1/\lambda_1, 1/\lambda_2, \dots, 1/\lambda_r, 0, 0, \dots) \\ S^+ \text{は(n, m)行列} \end{array} \right]$$

▶ 21

Appendix DEM error

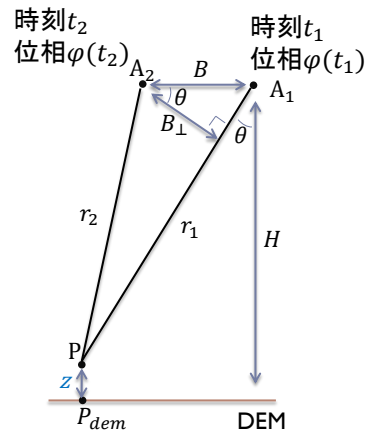
$\triangle PA_1 A_2$ について、余弦定理

$$\begin{aligned} \sin \theta &= \frac{r_1^2 - r_2^2 + B^2}{2r_1 B} \\ &= \frac{(r_1 - r_2)(r_1 + r_2) + B^2}{2r_1 B} + \frac{B}{2r_1} \quad \leftarrow r_1 + r_2 \sim 2r_1 \\ &\approx \frac{r_1 - r_2}{B} \\ &= \frac{\lambda \varphi}{4\pi B} \end{aligned}$$

これと $z = H - r_1 \sin \theta$
より、 $r_1 = r_2 = r$ (一定)として

$$\frac{\partial z}{\partial \varphi} = \frac{\partial z}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial \varphi} = \frac{r \lambda \sin \theta}{4\pi B_{\perp}}$$

$$\longrightarrow \Delta \varphi = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_{\perp}}{r \sin \theta} \Delta z$$



▶ 22

Appendix 使用データ (SAR画像)

2007年	7月	11日	FBD
2007年	8月	26日	FBD
2007年	10月	11日	FBD
2008年	5月	28日	FBD
2008年	7月	13日	FBD
2008年	10月	13日	FBD
2009年	7月	16日	FBD
2009年	10月	16日	FBD
2009年	12月	1日	FBS
2010年	1月	16日	FBS
2010年	3月	3日	FBS
2010年	4月	18日	FBS
2010年	6月	3日	FBS
2010年	7月	19日	FBS
2010年	10月	19日	FBD
2010年	9月	3日	FBD

- ▶ ALOS-PALSAR
- ▶ 計16枚、内FBSが6枚、FBDが10枚
(使用はHH偏波のみ)



▶ 23

Appendix 求める精度

- ▶ 本研究で求める精度→どこまでも高精度に
(理論上、DInSARのみでもmmやサブmmまで可能)
- ▶ 実利用の観点からは・・・
 - ▶ 地盤沈下の監視・水準測量の経路選定
→地盤沈下が発生しているか否かが有意に分かる程度まで
 - ▶ 地盤沈下の計測→mm
I級水準測量は較差 $\pm 2.5\sqrt{S}$ mm (S:片道観測距離(km))

▶ 24