

PSInSARとSBASの組み合わせによる 地盤変動の計測

2014/11/07

京都大学 工学研究科 社会基盤工学専攻
空間情報学講座 M2橋詰 和紀
田村 正行

1

リモートセンシング学会 第57回学術講演会

目次

背景

目的

方法

→ { PSInSAR
二重位相差によるアンラップエラーの回避
SBAS

使用データ

→ { SAR画像
精度検証用データ

結果

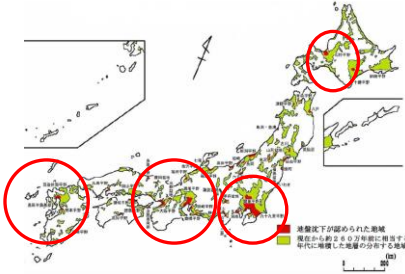
→ { 兵庫県南部
関西空港

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画像にした、干渉画像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 $\Delta\varphi$ 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

背景（DInSARと水準測量の比較）

| | DInSAR | 水準測量 |
|----------|---------------------------|------|
| 計測精度 | ～ mm (理論上) ～ 数 cm (実際) | ～ mm |
| 計測点の空間分布 | 面的 | 離散的 |
| 観測周期 | 46日 (ALOS PALSAR) | 約1年 |
| 労力 | 小 | 大 |

- ▶ 1枚の干渉画像のみでは、mm単位の精度での計測は困難
- ▶ 近年では、計測精度向上のために、多数の干渉画像を組み合わせて変動を計測する、PSInSARやSBASといった技術が開発されている

▶ 5

目的

- ▶ PSInSAR及びSBASは独立な手法ではなく、併用可能

| | PSInSAR | SBAS |
|---------|---------|---------------------------|
| 計測できる変動 | 線形 | 非線形 |
| 精度 | 高 | 低下するおそれ有 (アンラップエラーの影響) |



PSInSARとSBASを併用し、
経年的な地盤の変動を面的かつ高精度に計測する

干渉画像作成
(SAR Scape)



PS間での差分
(二重位相差)



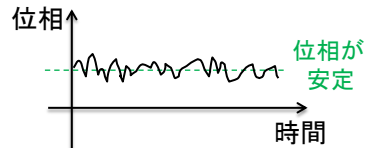
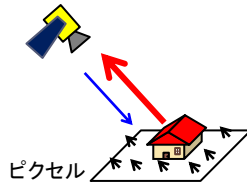
SBAS

▶ 6

方法：

PSInSAR (Permanent Scatterers InSAR)

- ▶ PS: 長期にわたってコヒーレンスが低下せず、安定した信号を反射する散乱体



$$\Delta\varphi_{ps} \approx \frac{4\pi}{\lambda}(d_2 - d_1) + \Delta\varphi_{DEMError} + \Delta\varphi_{orbit} + \Delta\varphi_{atm} + \Delta\varphi_{noise}$$

- ▶ 隣接するPS間での位相差の差(二重位相差)を用い、軌道誤差及び大気遅延の影響を小さくすると同時に、位相アンラップを回避

$$\partial\Delta\varphi_{ps} \approx \partial\frac{4\pi}{\lambda}(d_2 - d_1) + \partial\Delta\varphi_{DEMError} + \partial\Delta\varphi_{orbit} + \partial\Delta\varphi_{atm}$$

▶ 7

方法：

二重位相差によるアンラップエラーの回避

- ▶ 干渉画像の位相差には 2π の整数倍の不確かさがある

$$\Delta\varphi \approx \frac{4\pi}{\lambda}(d_2 - d_1) + \Delta\varphi_{DEMError} + \Delta\varphi_{orbit} + \Delta\varphi_{atm} + \Delta\varphi_{noise} + \frac{\Delta\varphi_{unwrap}}{2\pi \times \text{整数}}$$

- ▶ 隣接するピクセル間の位相差は 2π 以下と仮定
(\approx ピクセル間の相対的な変動が、半波長以下と仮定)

$$\begin{aligned} \partial\Delta\varphi &\equiv \text{Wrap}(\Delta\varphi_2 - \Delta\varphi_1) \\ &\approx \text{Wrap}\left(\partial\frac{4\pi}{\lambda}(d_2 - d_1) + \partial\Delta\varphi_{DEMError} + \partial\Delta\varphi_{orbit} + \partial\Delta\varphi_{atm} + \partial\Delta\varphi_{noise}\right) \\ &< 2\pi \end{aligned}$$

- ▶ 二重位相差 $\partial\Delta\varphi$ で議論することで、位相アンラップが不要となる

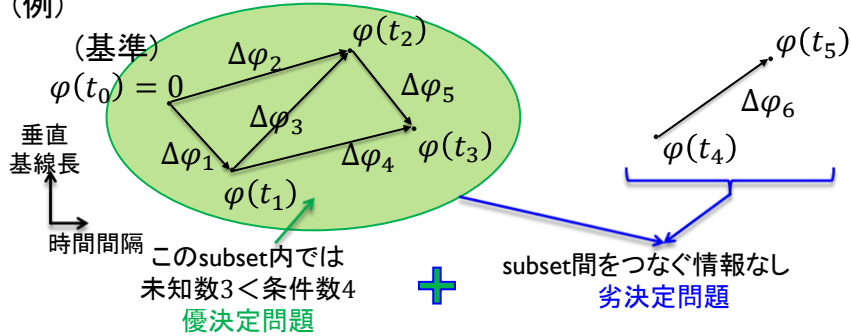
▶ 8

方法：

SBAS (Small BAseLine Subset method)

- ▶ SBAS: 基線長が短い干渉画像のみを、組み合わせる手法

(例)



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

▶ 9

方法：

SBAS (定式化)

- ▶ 観測位相差 $\Delta\varphi$ と位相 φ (時刻 t_0 基準)の関係を行列で表すと

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

時刻 t_0 における位相を基準: $\varphi(t_0) = 0$

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

A φ $\Delta\varphi$

行列 A と観測位相差 $\Delta\varphi$ を既知として
逆解析的に位相 φ を求め、変動量を推定する

▶ 10

方法：

SBAS（沈下速度とDEMエラー）

①沈下速度 $v_k = \frac{\varphi_{k-1} - \varphi_k}{t_k - t_{k-1}}$ 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

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

→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)

▶ 11

方法：

SBAS（Small Baseline Subset method）

▶ アンラップエラーを回避するため、二重位相差 $\partial\Delta\varphi_{ps}$ にSBASを適用

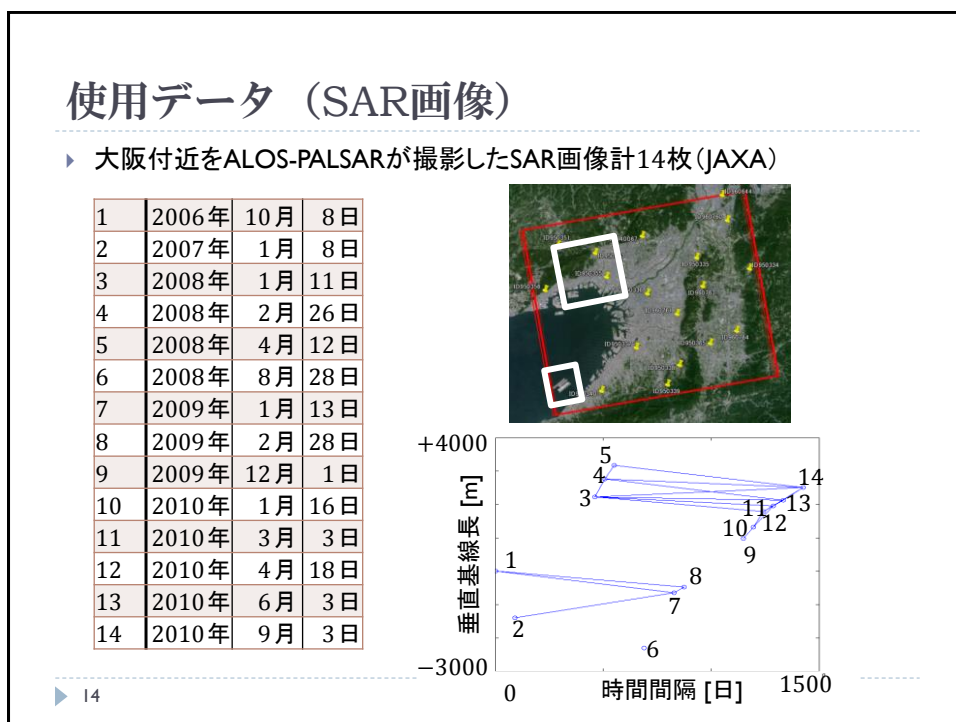
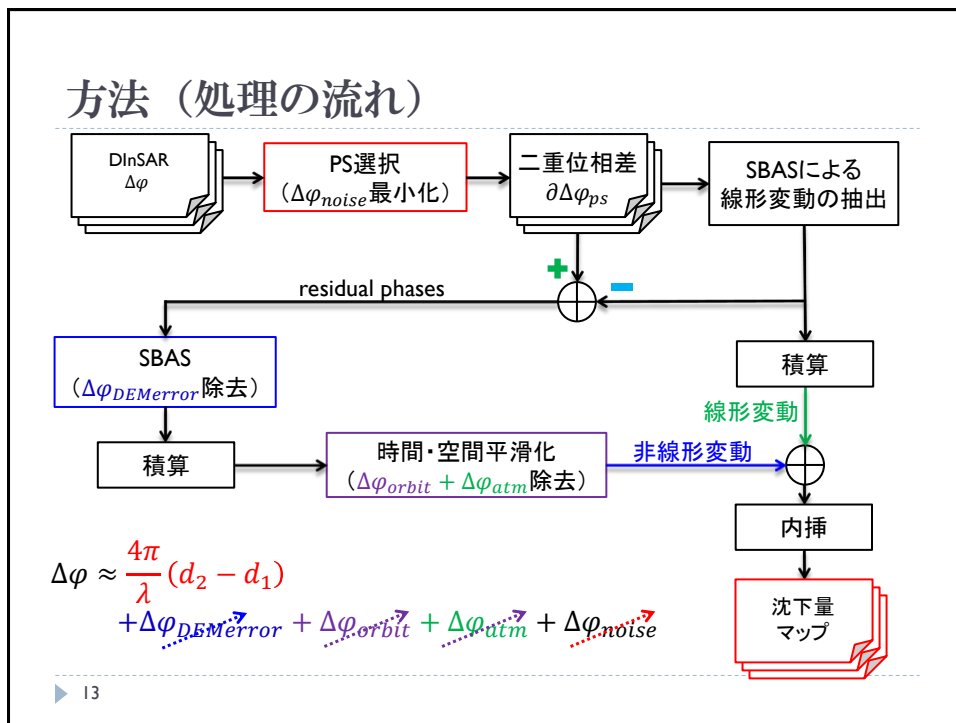
$$\underbrace{\begin{bmatrix} t_1 - t_0 & \dots & c_1 \\ t_1 - t_0 & t_2 - t_1 & c_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}}_B \underbrace{\begin{pmatrix} \partial v_1 \\ \partial v_2 \\ \vdots \\ \partial\Delta z \end{pmatrix}}_{\partial v} = \underbrace{\begin{pmatrix} \partial\Delta\varphi_{ps_1} \\ \partial\Delta\varphi_{ps_2} \\ \vdots \\ \partial\Delta\varphi_{ps_N} \end{pmatrix}}_{\partial\Delta\varphi_{ps}}$$

隣接するPS間での相対的な沈下速度 ∂v

▶ ∂v を空間的に積算することで、画像中の1つの参照点からの変動となる

(参照点として、GPSが存在するピクセルなど、変動が既知の点を選ぶと、絶対的な変動に変換できる)

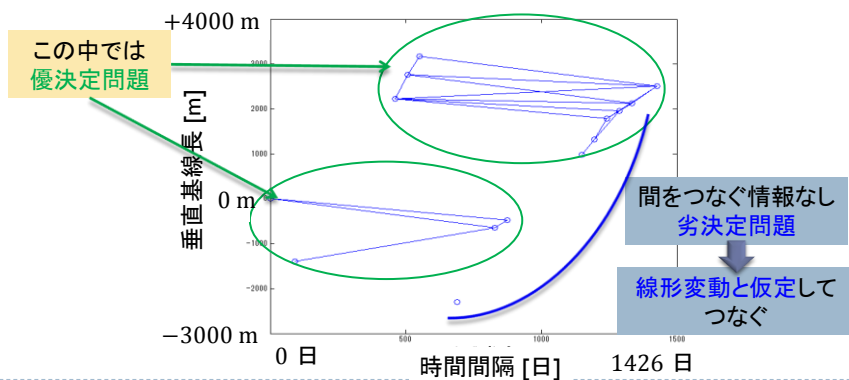
▶ 12



使用データ（干渉画像）

- ▶ SAR画像計14枚から最大91枚の干渉画像が作成可能

→ 垂直基線長800 m以下かつ時間間隔1000日以下の23枚の干渉画像のみを使用

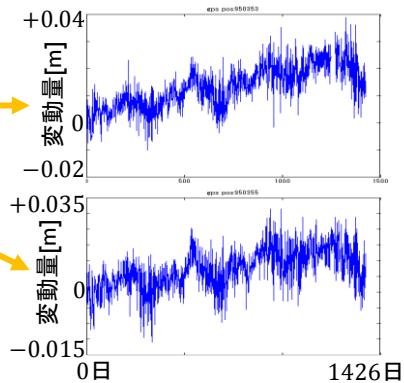


▶ 15

使用データ（精度検証用データ）

- ▶ GEONETによるデータ(GPS18点) (国土地理院)

→ 衛星の視線方向の変動に変換したものを、
兵庫県南部での結果の精度検証に使用



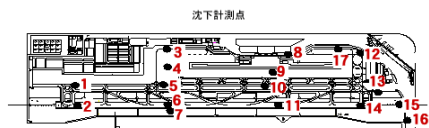
▶ 16

使用データ（精度検証用データ）

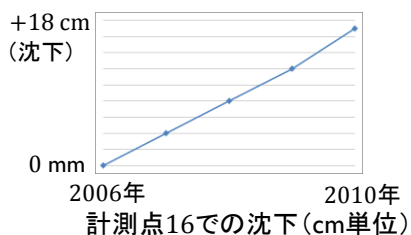
- ▶ 関西空港1期島水準測量データ(関西国際空港株式会社)



関西国際空港
(画像下部の島が1期島)
(Google Earth)



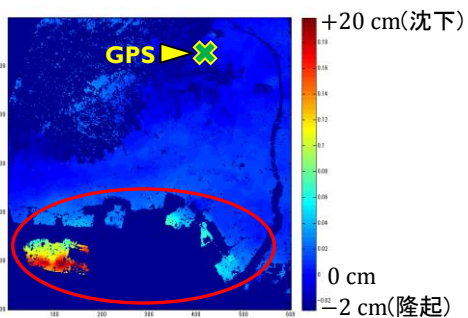
関西空港1期島の沈下計測点



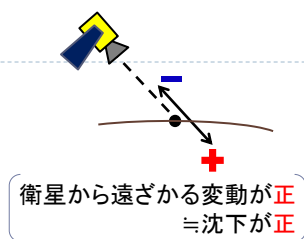
▶ 17

結果（兵庫県南部）

- ▶ 兵庫県南部の結果



2006年10月18日～2010年9月3日における
参照点からの相対的な変動

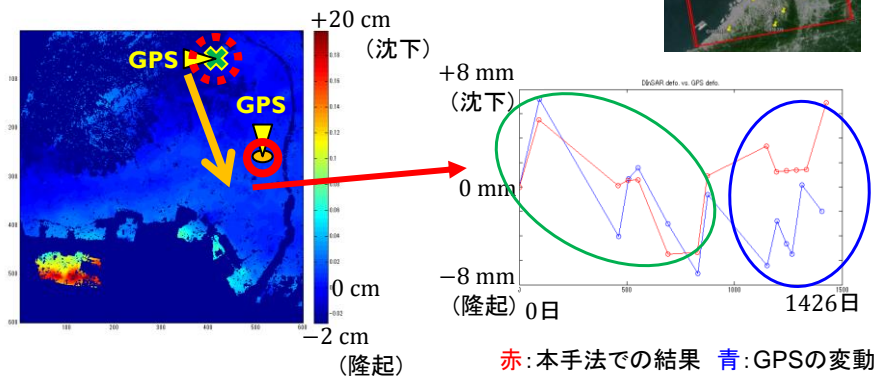


- ▶ 埋立地を中心に、沈下が計測されている

▶ 18

結果（GPSとの比較）

- ▶ 2つのGPS間の、相対的な変動と比較

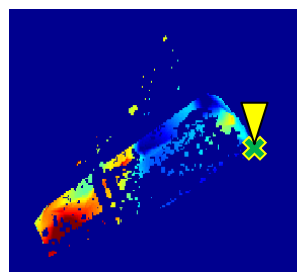


- ▶ GPSの変動パターンをある程度反映できている
- ▶ 誤差が大きい→劣決定となる部分が存在するため

▶ 19

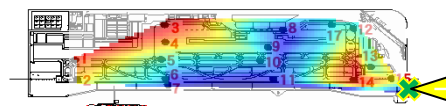
結果（関西空港1期島）

- ▶ 関西空港1期島での結果



SARによる結果

(いずれも2006年～2010年における参照点からの相対的な変動)



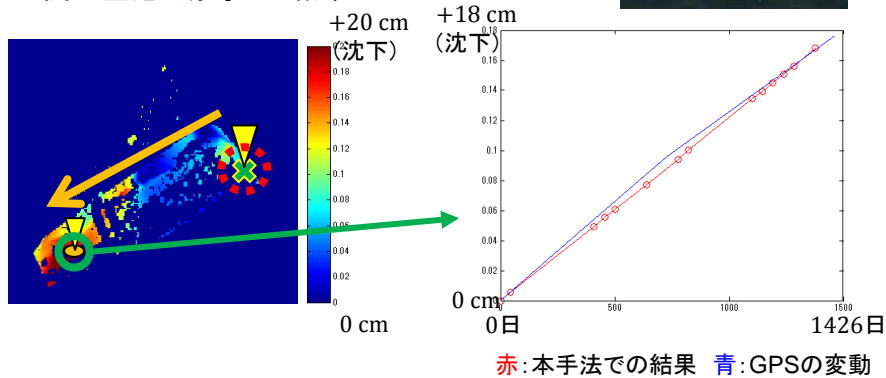
水準測量の結果の内挿

- ▶ 水準測量の変動パターンをある程度反映できている
- ▶ 反映できていない箇所→PSの数が少ない

▶ 20

結果（水準測量との比較）

▶ 関西空港1期島での結果



- ▶ 水準測量の結果と同じ、**直線の変動パターン**を示している
- ▶ cm程度の精度→PSの数が**少ない**

▶ 21

結論

- ▶ **PSInSAR**と**SBAS**を併用する手法を提案し、実際のデータに適用した

時系列での変動量を面的かつ高精度に計測

- ▶ ある程度の精度で**変動を計測**できた
- ▶ 今後は、他の地域での検証の他、
 - **GEONET**の併用による精度向上
 - **PS点以外**での位相情報の利用 (SqueeSAR等)
 を試みる

▶ 22

Appendix

▶ 23

閾値 (PS、SBAS)

▶ PS選定

SBASの閾値を満たす全ペアでコヒーレンス >0.25

かつ

振幅の標準偏差/振幅の平均 <0.3

となるピクセル

▶ SBAS

時間間隔 <1000 日 → 十分長く(PS間のみに適用するので影響は少ない)

垂直基線長 <800 m → 10 mのDEMエラーの影響が0.1 rad以下

▶ 24

閾値（積算）

- ▶ Residual phaseにSBASの結果を適用した後の位相において

時間コヒーレンス > 0.8

かつ

相対的なDEMエラー < 10 m

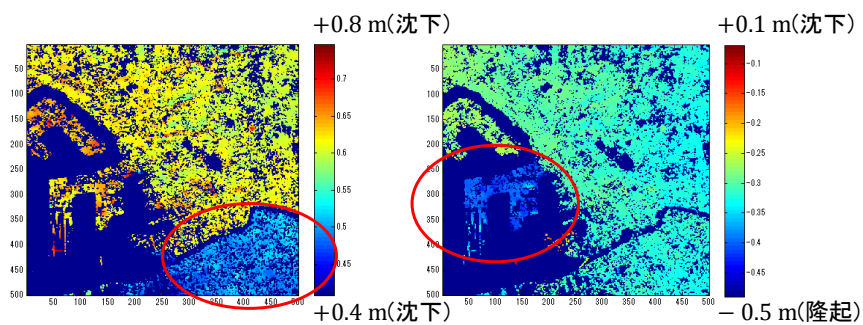
であり、かつ

PS間の距離 < 1 km

なる経路のみを使用

▶ 25

アンラップエラーの例



- ▶ アンラップエラーが存在すると、ALOS PALSARの場合10 cm以上の誤差が生まれる

▶ 26

DEMの誤差による影響

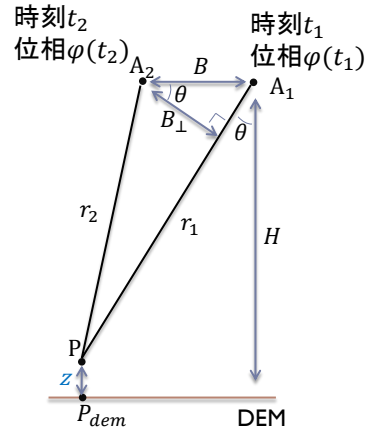
$\triangle PA_1 A_2$ について、余弦定理

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

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

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

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



▶ 27

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))
 - ▶ 地下水の監視→(mmでも不十分。少なくともサブmmまで?)

▶ 28