

2-5

SAR の氷床域への適用と課題

Application of SAR to ice sheet area and its problems

土井浩一郎(極地研)・山之口勤(リモートセンシング技術センター)・中村和樹(日本大学)

Koichiro Doi (NIPR), Tsutomu Yamanokuchi (RESTEC), Kazuki Nakamura (Nihon University)

要旨.

これまで氷床域で生じる現象の観測に合成開口レーダー (SAR) が適用された例として最も多いのは氷流(氷河)の流速測定であろう. 比較的流動速度の遅い氷流には干渉 SAR 手法を適用して, 変動縞から変動量を計算して流動速度が求められる. 干渉させることができない流動速度の速い氷流には画像マッチングの手法を用いて, 対応する画素位置の差から変動量を求め, 流速が推定されている.

その他の適用例としては, 氷床や氷河が海洋上にせり出してできる棚氷の上下変位を利用して, 干渉 SAR により陸地と海洋の境界である Grounding Line (GL) の位置が推定されている. また, 棚氷の上下変位が海洋潮汐に起因することを利用して, 得られた上下変位から海洋潮汐モデルの検証も可能である.

氷流の流動速度の変化や GL の位置変化は氷床変動の指標と重要であり, グリーンランド氷床や南極氷床の急速な変動を監視するために, 今後ますます適用例が増えると思われる.

氷床や氷河観測に干渉 SAR を適用する際に問題となることがいくつかある. 主なものとしては, 氷床の流動や気象条件の変化等により散乱特性が変化し, 少し時間が経つとすぐに干渉性が悪くなることや位相の連続性が途切れることによる位相アンラッピングの困難さである. こうした不利な条件は観測間隔を短くすることにより, かなり緩和されると考えられる. また, 極域では気象観測点が少ないために大気遅延の影響がほとんど調べられておらず, 今後取り組む必要がある.

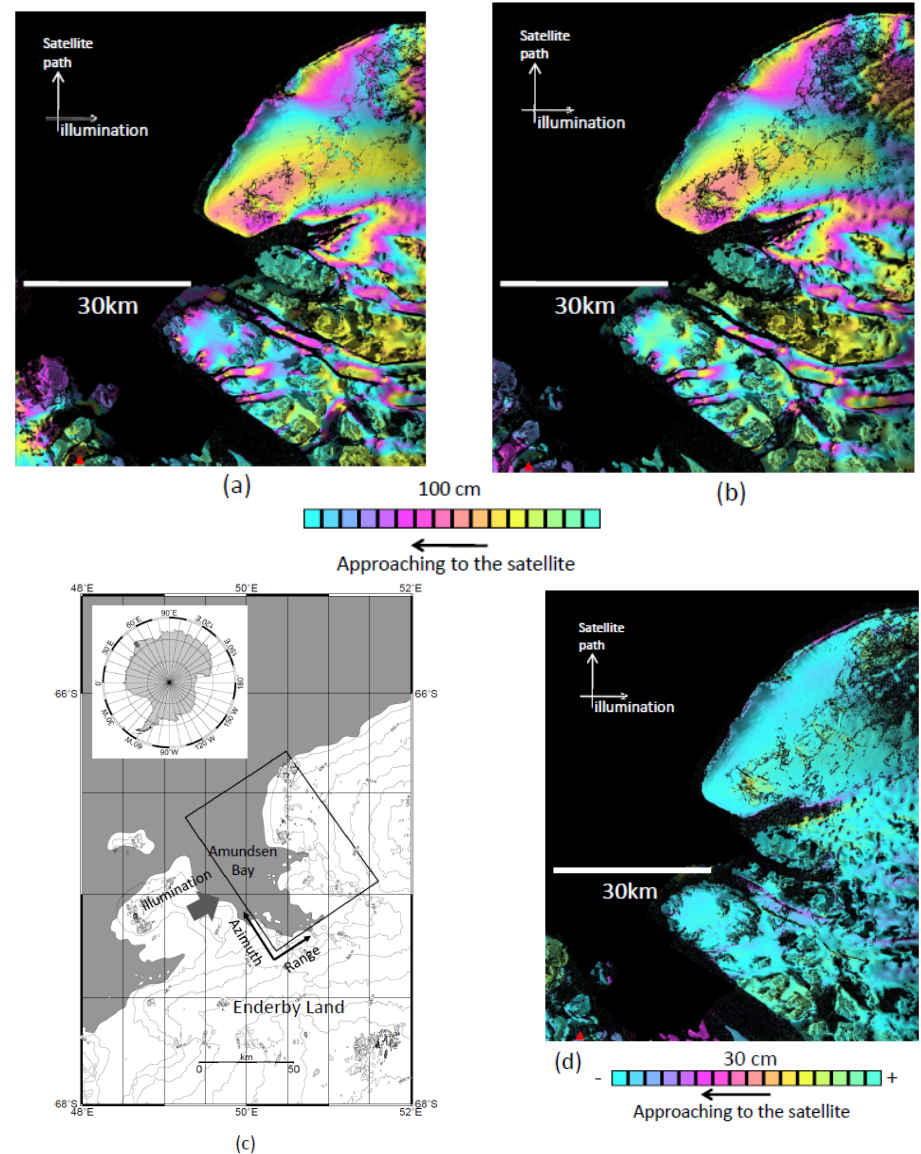
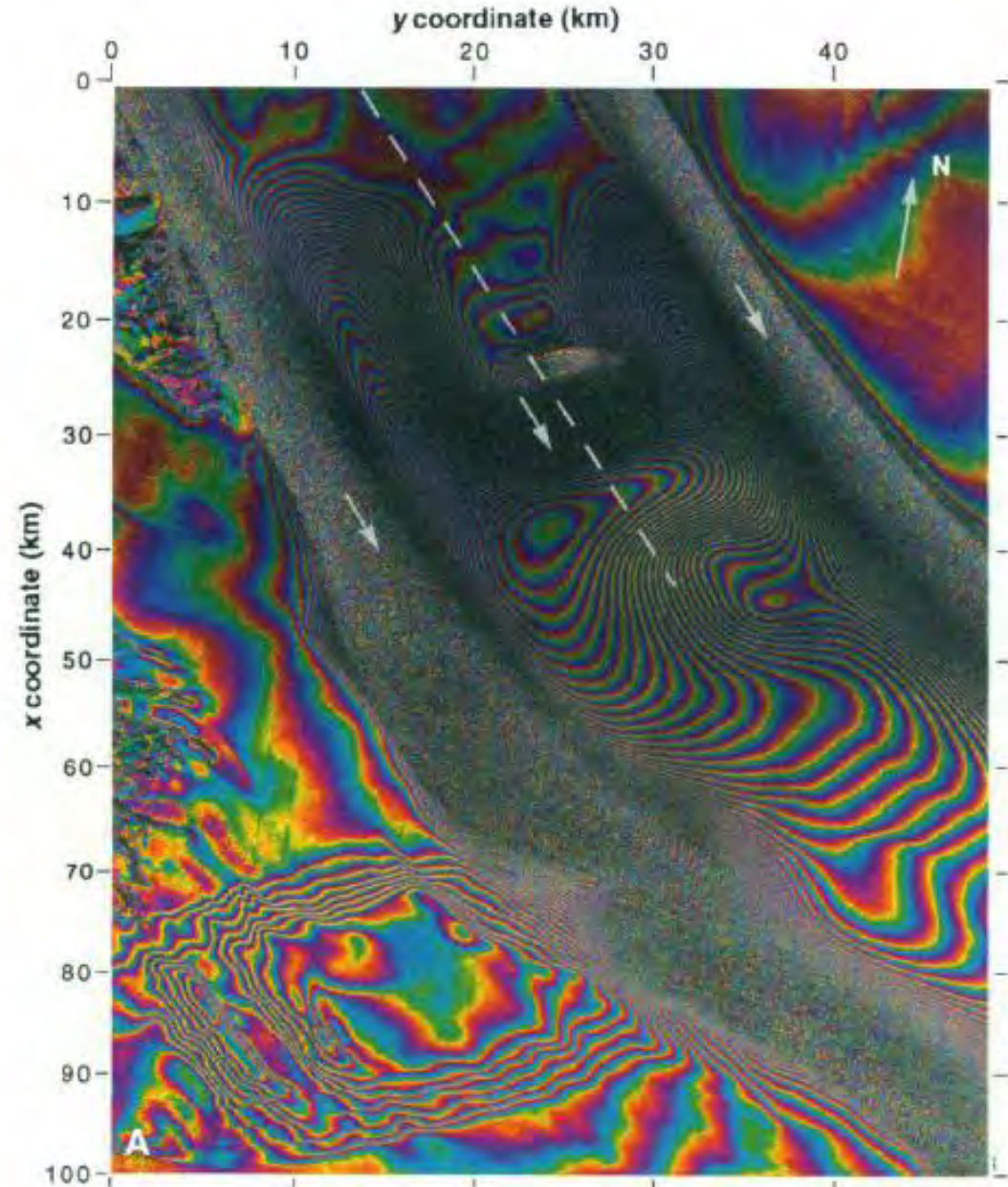


図 南極エンダビーランド東部の(a),(b)差分干渉 SAR 画像, (c)シーン位置, (d)差分干渉 SAR 画像(a),(b)の差

SARの氷床域への適用と課題

土井浩一郎(国立極地研究所)
山之口勤(RESTEC)
中村和樹(日本大学)

Goldstein et al. (1993)より



SARの氷床域への応用例

(1)氷床や氷河の流動量(速度)計測

→氷床流出量の推定

(2)グランディングライン(接地線)の位置推定

→流動速度変化や氷厚変化の指標

(3)棚氷や浮氷舌の潮位変化の計測

→海洋潮汐モデルの改良

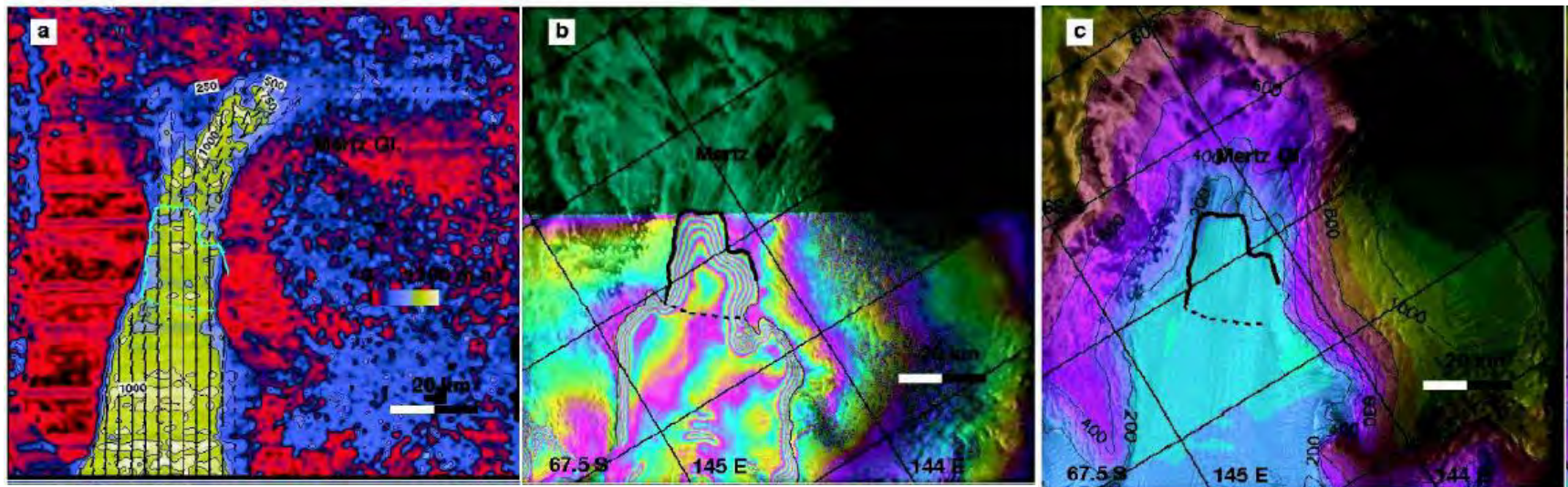
(4)地形モデルの作成

(5)その他(氷床下湖水位面の変位)

(1)氷床や氷河の流動量(速度)計測

- 干渉SARによる方法 (Goldstein et al. 1993, Rignot, 2002, Joughin, 2002など多数)

氷床上では地形縞と変動縞が同時に現れるので、地形縞をDEMなどを用いて除去した後に、変動縞から変動量(流速)を求める。ただし、検出できるのは視線方向の変動量で、視線方向と直交する向きの変位は求められない。昇交パスと降交パス、強度画像との組み合わせで3次元変位を求めることも可能(Joughin et al. 1996).



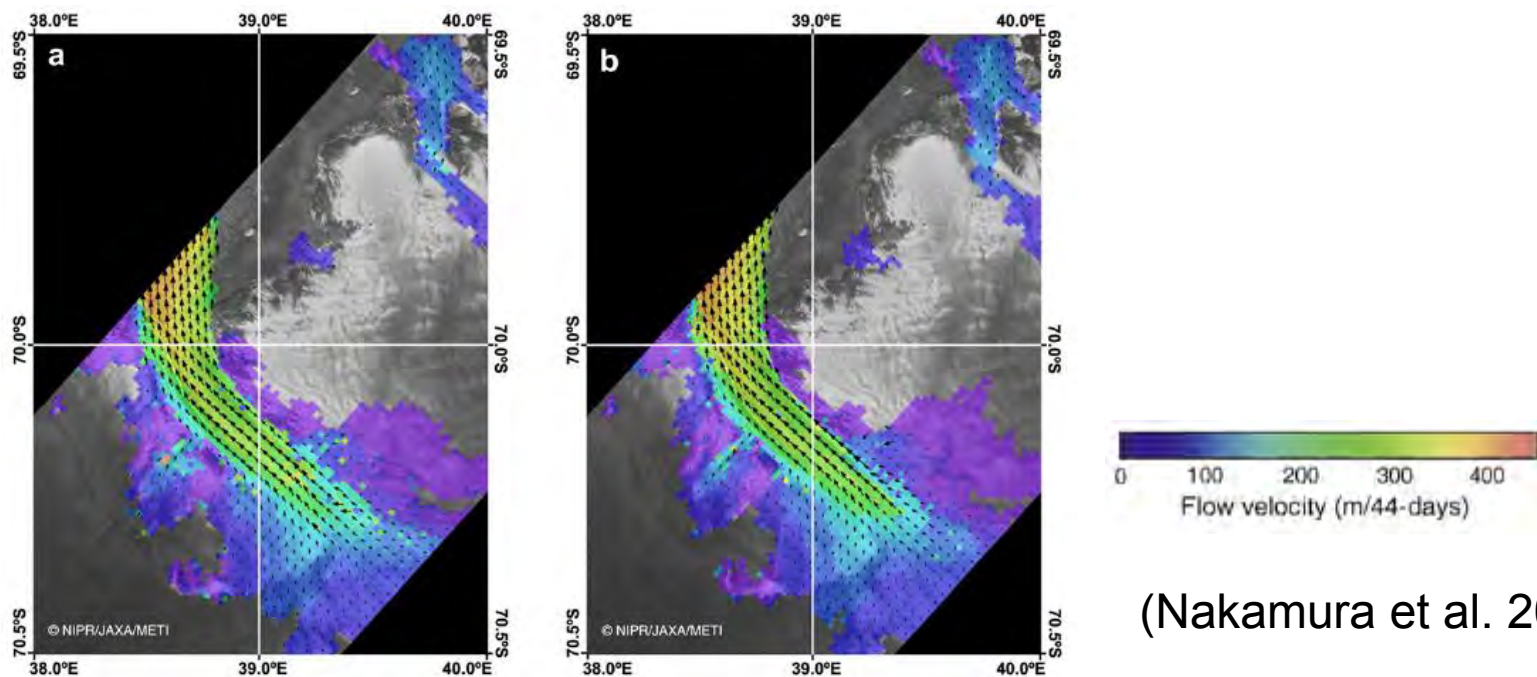
Mertz氷河(a)速度, (b)接地線, (c)地形

(Rignot, 2002)

(1)氷床や氷河の流動量(速度)計測

- SAR強度画像による方法(Michel and Rignot, 1999, Nakamura et al., 2007など)

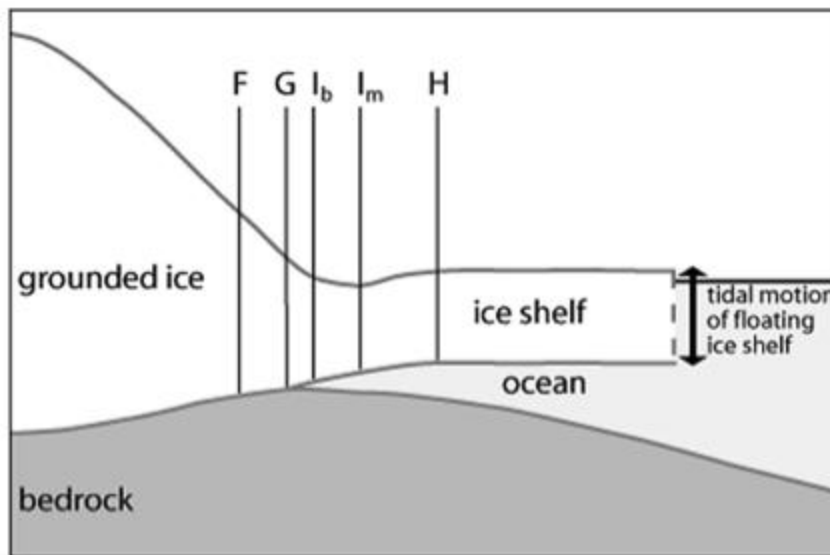
ピクセルオフセット手法を用いて対応する画素の移動量を求める。
干渉SARで求めることができない速い流動も推定できるが、精度としては1画素の大きさにより制限される。



(Nakamura et al. 2007)

(2) グランディングライン(接地線)の位置推定

- 氷床が海洋にせり出してできる棚氷は、海洋の潮汐変位に伴い上下する。氷床が陸上にある部分はほとんど変位しないが、海上にせり出している部分は変位するため、干渉SARで見た場合、その境界部分に密な変動縞が現れる。密な変動縞の陸側の端が陸と海の境界(グランディングライン)と考えられる。氷床の厚さが変化するとグランディングラインの位置が変化すると考えられ、氷床変動の指標の一つとされている。
- Yamanokuchi et al. (2005), Rignot et al. (2011)など



F - limit of ice flexure

G - true, instantaneous grounding line

I_b - 'break in slope'

I_m - local minimum in elevation

H - hydrostatic limit

(http://nsidc.org/data/docs/agdc/nsidc0469_brunt/index.html)

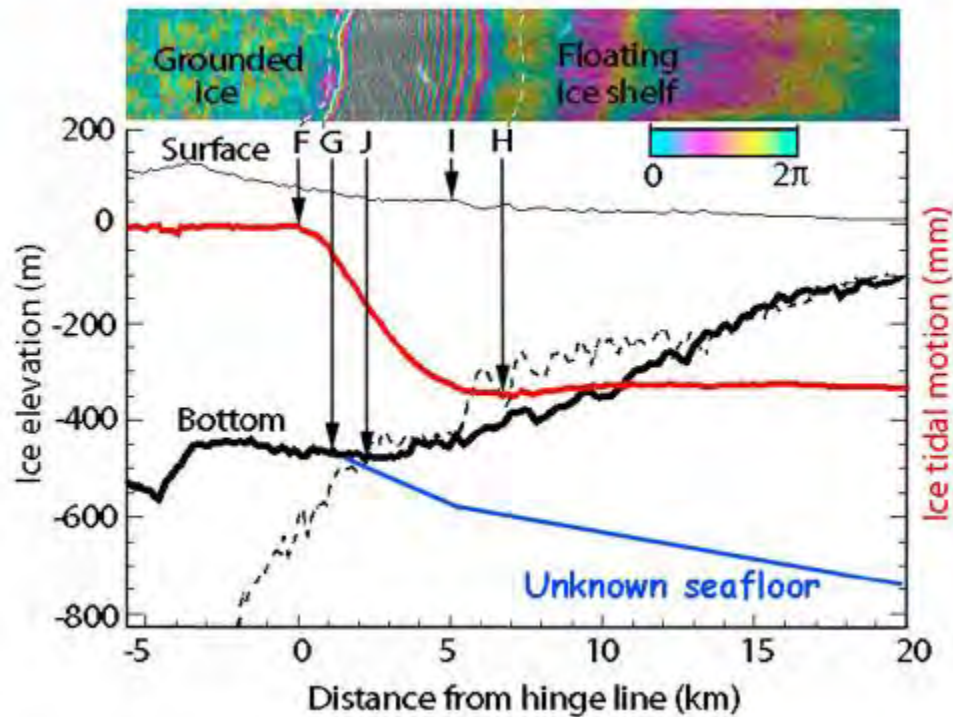


Figure 1. Grounding zone of Petermann Glacier, Greenland, with the limit of tidal flexing (F), the grounding line (G), the line of first hydrostatic equilibrium (J), the break in surface slope (I), the maximum extent of the flexure zone (H), ice surface elevation above mean sea level from laser altimetry (thin black line), bed topography from radio echo sounding (thick black line), bed depth calculated from hydrostatic equilibrium (dashed black line), the unknown seafloor (over-deepening likely exceeds 800 m) and tidal flexing measured with ERS-1 DInSAR in millimeter of vertical motion (red thick line). The color inset on top shows the DInSAR interferometric fringes, color coded from 0 and 2π , from blue to yellow, red and blue, and delineates F (dotted white line near G), G (white line), and H (dotted white on floating ice). Ice flows from left (grounded ice) to right (floating ice).

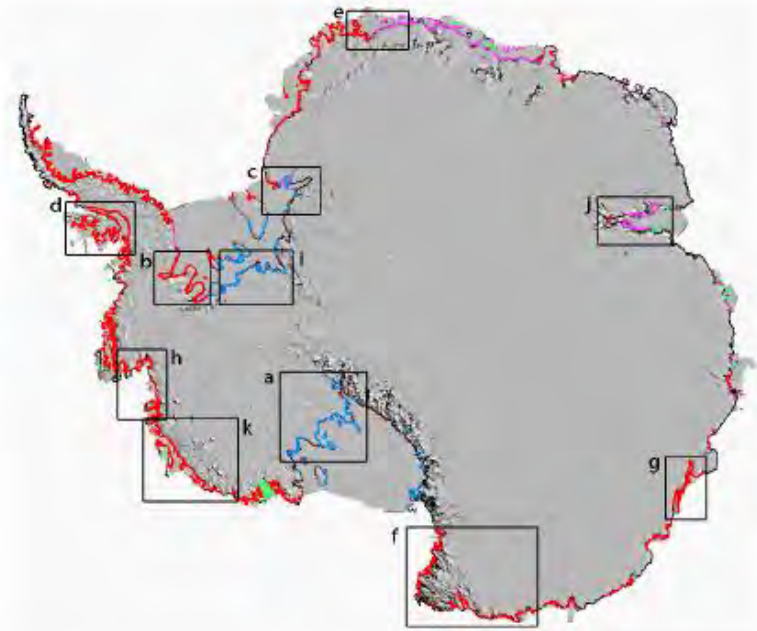
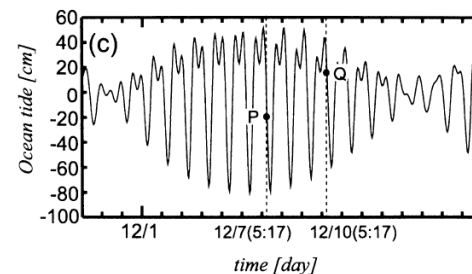
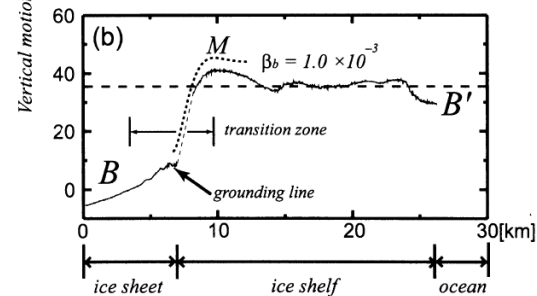
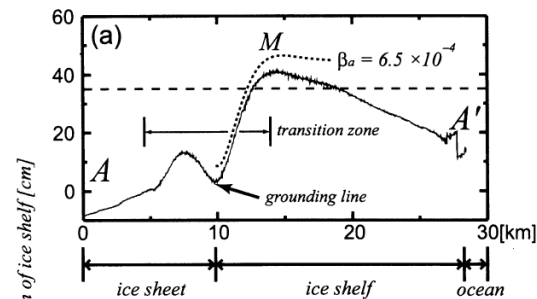
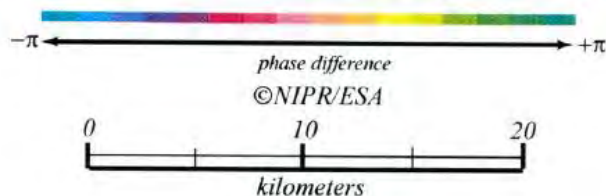
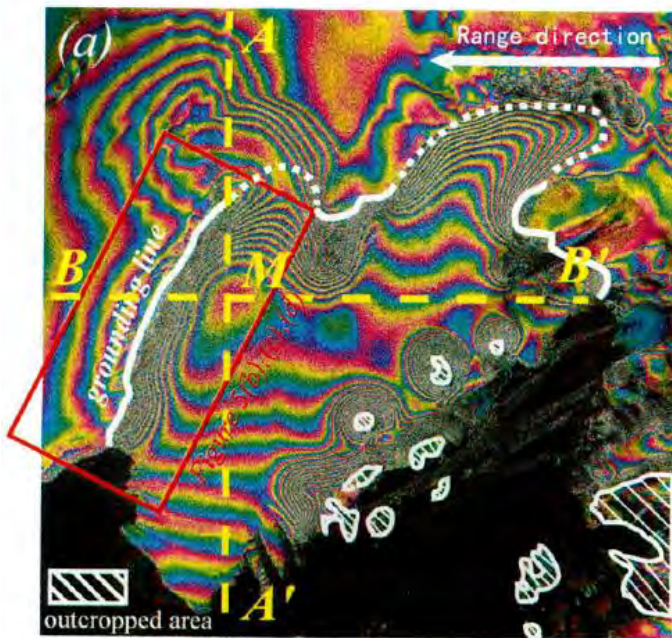


Figure 2. Delineation of Antarctic grounding lines with differential satellite radar interferometry (DInSAR) using ERS-1/2 (red), RADARSAT-1 (purple), RADARSAT-2 (blue), ALOS PALSAR (green) and MOA (brown) overlaid on a MODIS mosaic [Haran et al., 2006]. Rectangles correspond to areas in Figure 3.

(Rignot et al. 2011)

(3) 棚氷や浮氷舌の潮位変化の計測

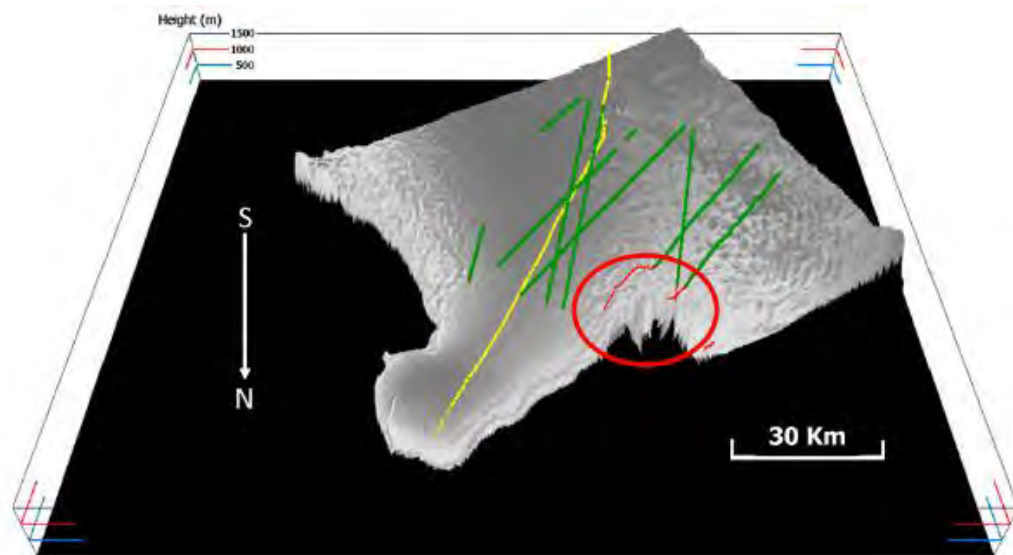
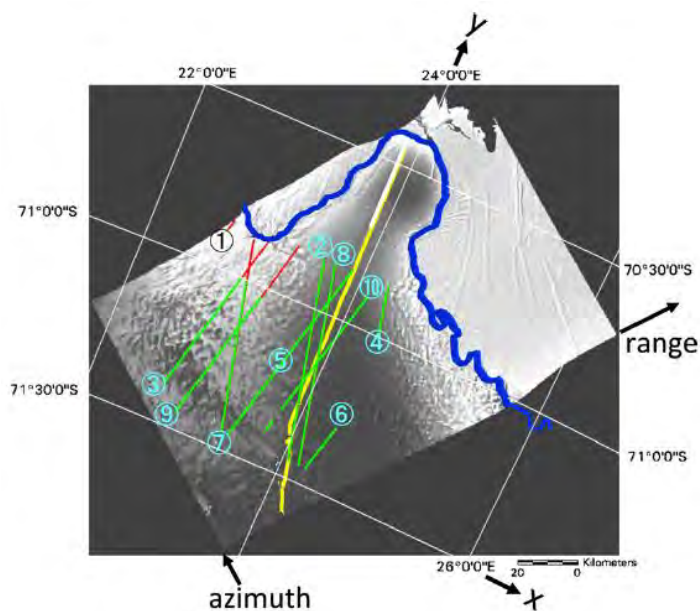
- グランディングラインに現れる変動縞から変位量を推定し、潮位変化量を求める。棚氷の流動が無視できない場合は水平移動量を推定して上下変位と分離する必要がある。
- Rignot(1996), 小澤ら(1999), McMillan et al. (2011)など



(小澤ら, 1999)

(4)地形モデルの作成

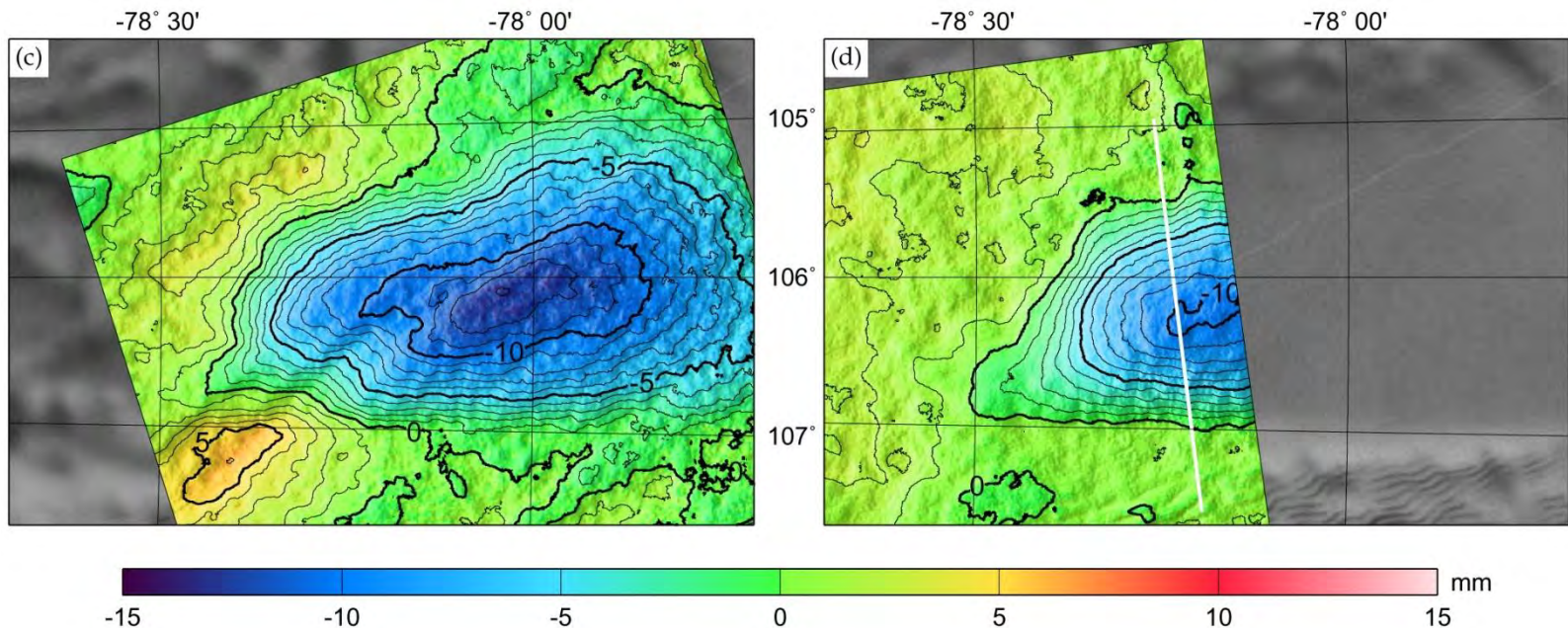
- 最近まで極域には高分解能の地形モデルがなかった。このため、3パスInSARや4パスInSARにより変動縞を除去して残った地形縞から氷床域も含めた地形モデルが作成された。ただ、この方法では氷床や氷流の流動が定常的であるという仮定が必要なため、そうでない部分では誤差の増大を避けられない。また、正確なGCPが必要である。
- Kwok and Fehnestock (1996), Yamanokuchi et al. (2010)など



(Yamanaokuchi et al. 2010)

(5) その他(氷床下湖の表面変位)

- 氷床の下には凍結していない湖があり、氷床下の水の移動を氷床表面の変位から観測(Gray et al. 2005)
- Vostok湖の内部流動の観測(Wendt et al. 2005)



(Wendt et al. 2005)

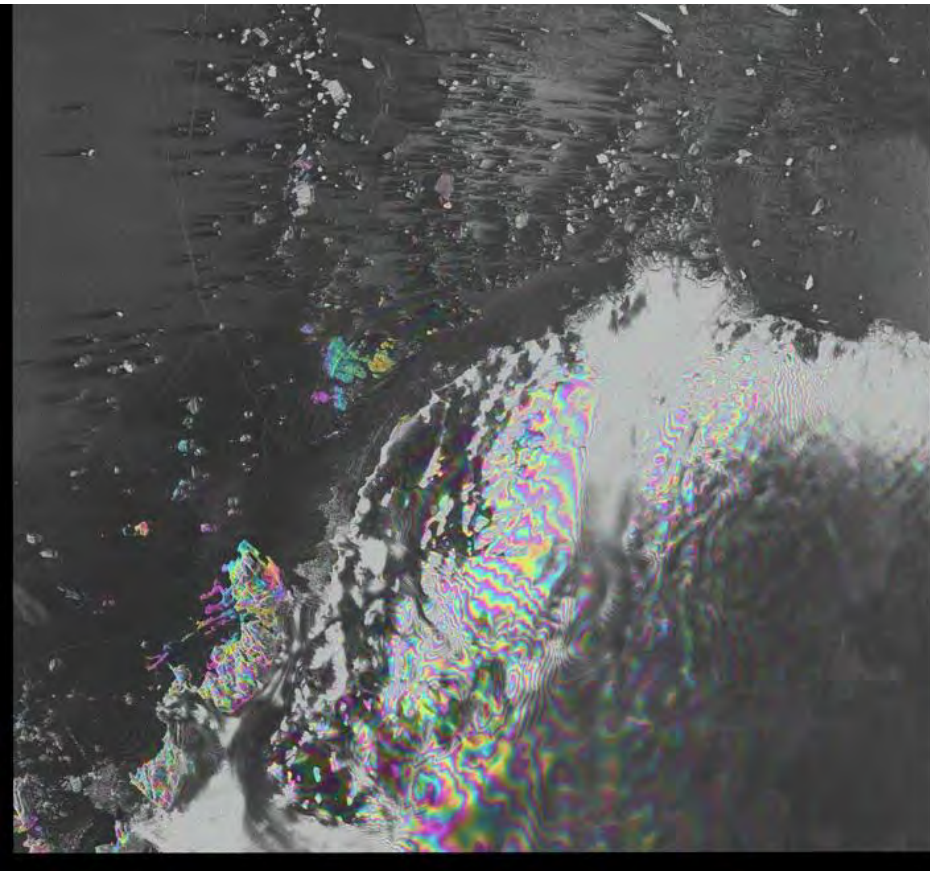
氷床域での干渉SAR適用における問題点

干渉性に関して

- 干渉性が失われやすい。
- 氷河などの凹凸の激しい場所では干渉しない。
- 海氷を含む画像では、海氷と氷床でだいぶ動きに大きな違いがある場合、coregistrationの際に海氷の動きに引っぱられ、氷床での干渉性が悪くなることがある。
- 内陸氷床では体積散乱しているためか、干渉性が悪い。

干渉性に関して: 短期間に干渉性が変化する。 内陸では干渉性が悪い。

基線長に関してはどちらも好条件だが、後のほうが干渉性が悪くなっている。前のペアは極夜期であるが、後のペアは春時期のものであり、氷床表面の散乱特性の変化が影響している可能性がある。また、両干渉画像とも内陸部は散乱強度が弱く、干渉性も悪い。



629_574 2008.6.18—2008.8.03

$B \perp = 594.3\text{m}$

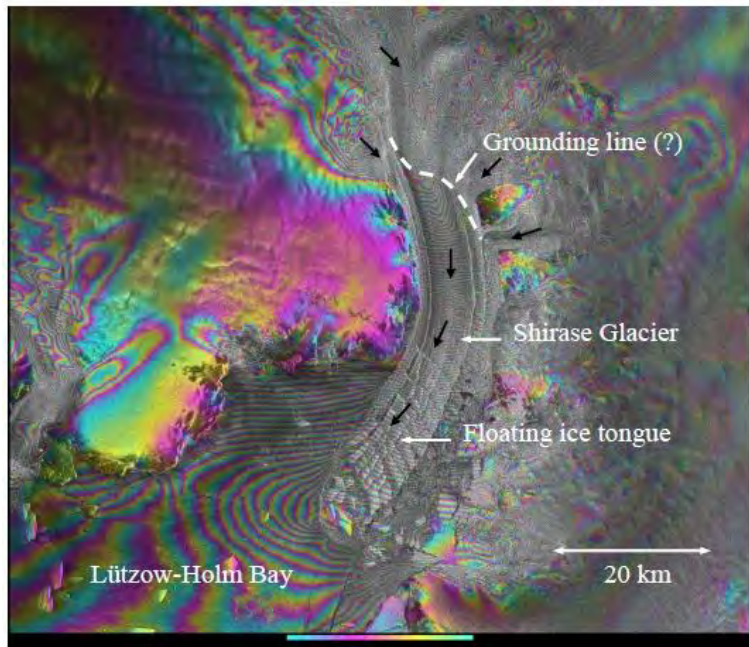


629_574 2008.9.18—2008.11.3

$B \perp = 459.2\text{m}$

干渉性に関して：氷河などの凹凸の激しい場所 では干渉しない。

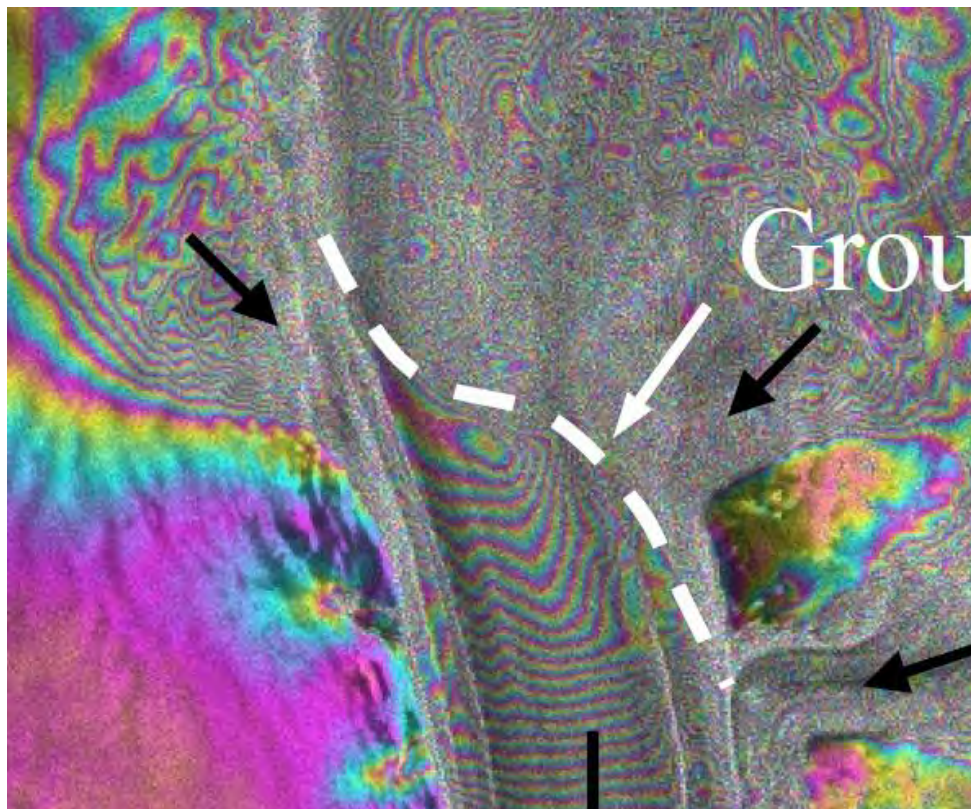
ERS-1/2のタンデムミッション時(観測間隔1日)に得られた白瀬氷河を含む画像。
グランディングライン付近や横からの氷流の流れ込み部分では凹凸が激しすぎて
干渉していない。



©NIPR/ESA (1996)

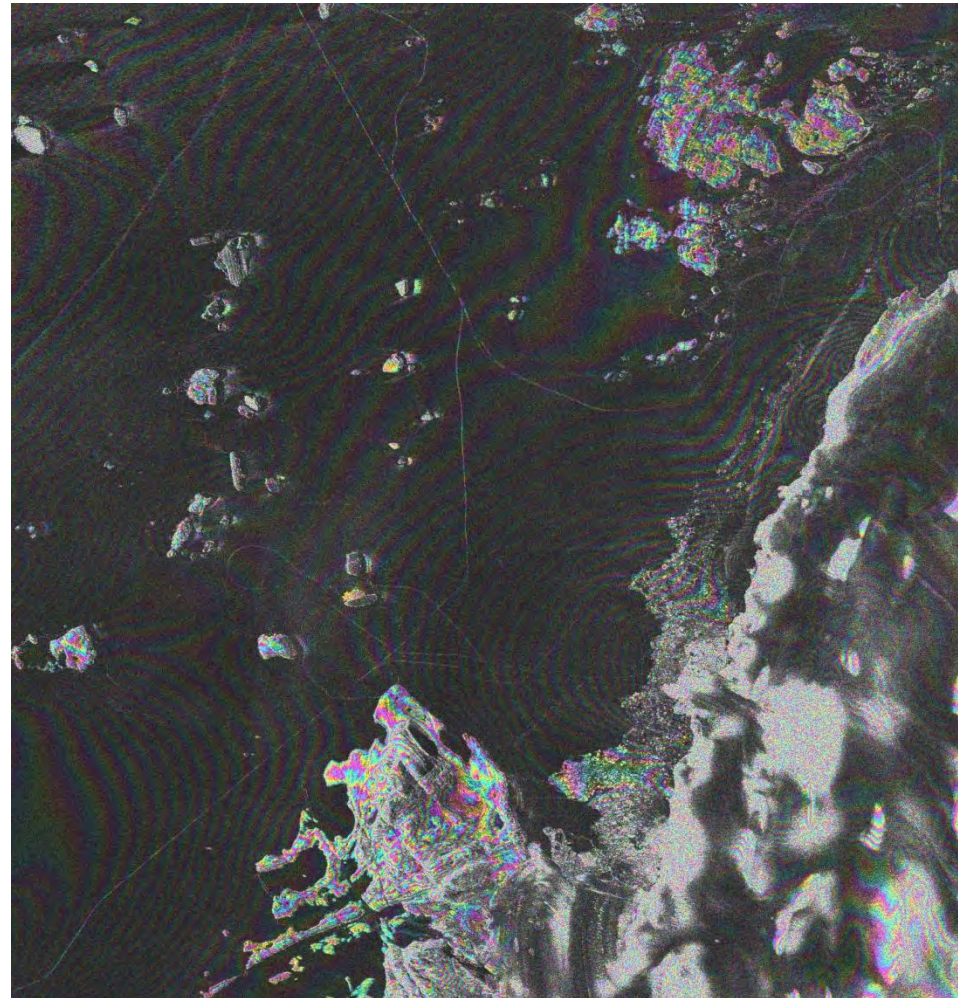
$-\pi$ ← $+\pi$
780 m (in topographic height)
2.83 cm (in displacement)

$B_{\perp} = 13\text{m}$



干渉性に関して：海氷部分で干渉し、陸上部分の干渉性が悪くなっている。

海氷部分がよく干渉している一方で、陸上部分の干渉性が悪くなっている。海上部分をマスクすることで陸上部分の干渉性が良くなる場合がある。



629_574 2008.8.3-2008.9.18
B.L = 2408.9m

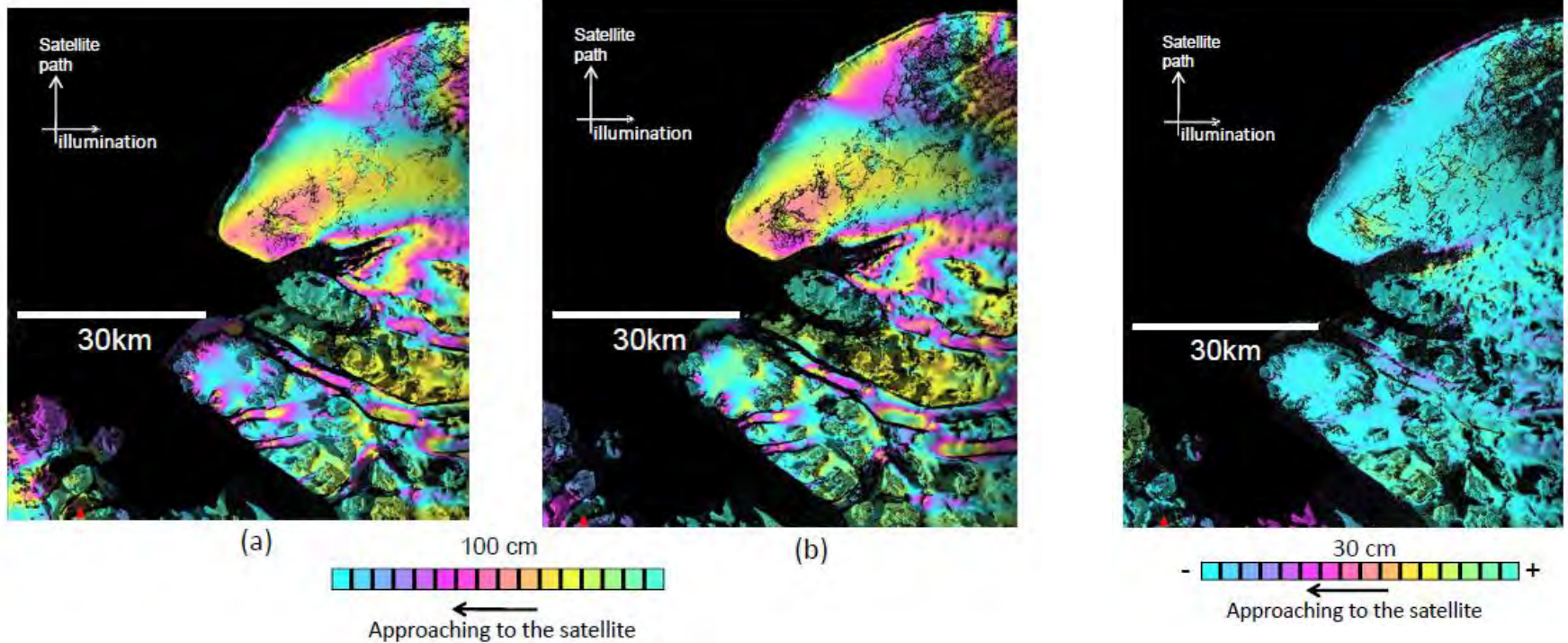
氷床域での干渉SAR適用における問題点

その他

- 最近まで地形縞の分離に使用可能なDEMがなかった。
- マイクロ波の波長の違いによる侵入深度の違い(C-band: 1-15m, L-band: 3-120m)
- 対流圏や電離層で引き起こされる位相変化の影響が調べられていない。

大気遅延の影響は少ない？

南極域では精度のよい気象モデルがなく、大気遅延の影響はほとんど調べられていない。ただ、ここに示したDInSAR画像の差を見る限りではほとんど位相変化が見られない。

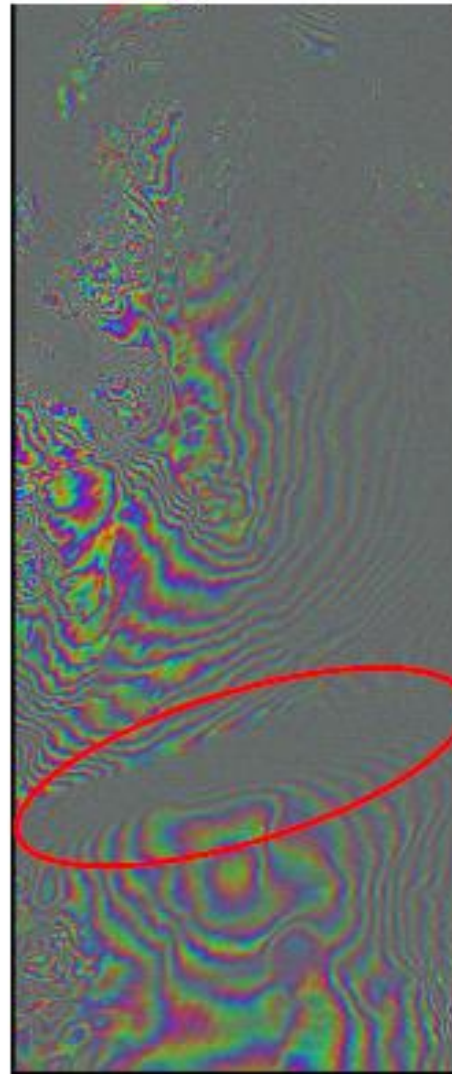
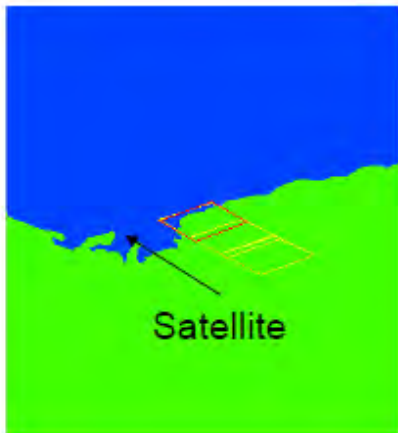
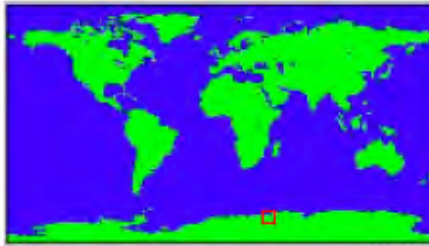


DInSAR画像 (a)2007.10.16-2007.12.1
(b)2008.10.18-2008.12.3

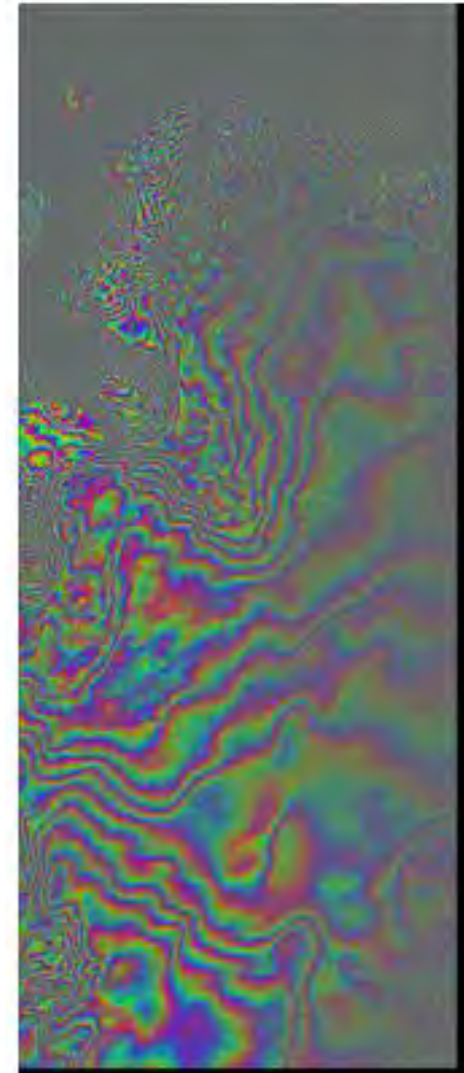
DInSAR画像の差

その他：電離層擾乱の影響？

ALOS/PALSARの干渉画像に見られた干渉縞の乱れ



2006.10.12—2006.11.27



2006.11.27-2007.1.12

氷床域におけるSARを利用した今後の研究テーマ

- 南極氷床の増減の推定
 - 1) 氷流からの氷流出量の推定
 - 2) 棚氷や沿岸氷床からの氷床剥離量の推定
 - 3) 氷床涵養量の推定
- 氷床や氷流の流動速度変化の推定
- マイクロ波波長の違いによる氷床への侵入深度の違いを利用した内部流動の推定
- 偏波観測を利用したクレバスの検出
- 海氷の流動および潮汐変位の推定
- 大気や電離層擾乱の影響の解明