

平成21年6月22日現在

研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19710017
 研究課題名（和文）衛星搭載合成開口レーダによる氷河・氷床の季節変動と年々変動の研究
 研究課題名（英文）Study on seasonal and annual changes of glacier using synthetic aperture radar data onboard satellite
 研究代表者
 中村 和樹（NAKAMURA KAZUKI）
 独立行政法人産業技術総合研究所・情報技術研究部門・産総研特別研究員
 研究者番号：60435500

研究成果の概要：Lバンド合成開口レーダ（SAR）を搭載した、JERS-1（ふよう）とALOS（だいち）衛星のSARデータに画像相関法を適用し、11年の白瀬氷河の変動の知見を得た。この結果、白瀬氷河の設置線（Grounding line）付近においては、観測時期によらずほぼ一定の流速であった。一方、Grounding lineよりも上流および下流域では、季節変動と年々変動が見られた。

交付額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2007年度 | 1,600,000 | 0 | 1,600,000 |
| 2008年度 | 700,000 | 210,000 | 910,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 2,300,000 | 210,000 | 2,510,000 |

研究分野：雪氷物理学

科研費の分科・細目：環境学・環境動態解析

キーワード：合成開口レーダ・白瀬氷河・画像相関法・流速・季節変動・grounding line

1. 研究開始当初の背景

氷河による氷質量の流出は、南極氷床の質量収支において重要な役割を果たしている。白瀬氷河は流動の速い氷河として知られており、航空写真や衛星データから氷河の流速推定がなされてきた。接地している氷河が海に浮き始める末縁部はGrounding line（GL）と呼ばれ、この付近においては、2.3 km/aと求められており、白瀬氷河は南極の他の氷河と比較しても、全体的に流動の速い氷河の1つであることが示されている。

白瀬氷河を対象とした従来の研究では、年平均の流速を求めることが主で、季節変動を考慮した議論はほとんどなされていない。近

年、氷河末端部が崩れ、冰山群となって突然、流失することが注目されており、その前兆を把握するためにも、氷河の年々変動だけでなく季節変動についても調べる必要不可欠である。

白瀬氷河流域には無数のクレバスが存在し、危険なため現地観測は困難である。このような観測対象には、リモートセンシングが有効である。光学センサは天候や太陽高度の影響を受けるため、極域観測において十分な観測機会を得ることが難しい。一方、マイクロ波を用いる合成開口レーダ（Synthetic Aperture Radar: SAR）は雲を透過し、極夜でも観測が可能な全天候型の能動型のセン

サであり、光学センサに匹敵する空間分解能を持つことから極めて有効な観測手段である。

氷河の流出速度を求めるに当たり、SAR 干渉法（インターフェロメトリ）が一般的に用いられるが、白瀬氷河のように流動の速い対象では、位相の干渉性が悪くなるため、SAR インターフェロメトリが適用できるのは、European Remote Sensing Satellite (ERS) のタンデムミッションや ice mode のように回帰日数が 1 日から 3 日と短いものに限定される。さらに、ERS のタンデムミッションは観測期間が二ヶ月間に限定されたため、詳しい季節変動を調べることができなかった。

2. 研究の目的

本研究は、上述する経緯の SAR データの解析研究を通して、地球観測衛星に搭載された SAR の運用による 1990 年代から今日までの白瀬氷河の時間的空間的な変動を明らかにする。東南極地域において氷河の流速の速い白瀬氷河に着目した研究は、SAR インターフェロメトリによる観測が困難なことから、研究事例はほとんど見られない。ここで、SAR の振幅画像のペアに画像相関法を適用することにより、氷流の流速ベクトルを求め、これまで解釈が困難であった季節変動と年々変動を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 使用データ

本研究では、JERS-1 衛星と ALOS 衛星に搭載された SAR データを使用した。JERS-1 は、1992 年に通商産業省（現、経済産業省）および宇宙開発事業団（現、宇宙航空研究開発機構）が H-I ロケットにより打ち上げた衛星である。JERS-1 衛星は回帰日数が 44 日であり、L バンド SAR (1.275 GHz) を搭載している。1996 年から 1998 年の運用停止に至るまで、JERS-1 に搭載された SAR により白瀬氷河周辺域が集中的に観測され、これらのデータは国立極地研究所によってアーカイブされており、解析に使用した。ALOS は、JAXA によって 2006 年 1 月 24 日に H-IIA ロケットで打ち上げられた。ALOS 衛星は回帰日数が 46 日であり、JERS-1 SAR の後継機として L バンド SAR (1.270 GHz) である PALSAR を搭載している。本研究においては、2007 年から 2008 年の白瀬氷河を含む取得シーンについて、資源・環境観測解析センターから提供を受け、解析に使用した。

SAR 画像を取得する回帰間隔が長くなると、氷河および氷床の表面における散乱特性が経時変化して相関性が低下するため、取得データ間隔は短い方が望ましい。本研究では JERS-1 SAR について、1996 年から 1998 年の画像間隔が 1 回帰である全 12 ペア 15 シーン

表 1 SAR データの取得日

(a) JERS-1 SAR

| | | |
|-----------------|------------------|------------------|
| (1) 30 Apr 1996 | (6) 06 Dec 1996 | (11) 06 Jan 1998 |
| (2) 13 Jun 1996 | (7) 19 Jan 1997 | (12) 19 Feb 1998 |
| (3) 27 Jul 1996 | (8) 14 Jul 1997 | (13) 04 Apr 1998 |
| (4) 09 Sep 1996 | (9) 27 Aug 1997 | (14) 18 May 1998 |
| (5) 23 Oct 1996 | (10) 10 Oct 1997 | (15) 01 Jul 1998 |

(b) ALOS PALSAR

| | | |
|-----------------|-----------------|-----------------|
| (1) 26 Sep 2007 | (4) 11 Feb 2008 | (7) 28 Jun 2008 |
| (2) 11 Nov 2007 | (5) 11 Mar 2008 | (8) 13 Aug 2008 |
| (3) 27 Dec 2007 | (6) 26 Apr 2008 | (9) 28 Sep 2008 |

のデータを使用した。ALOS PALSAR については 2007 年から 2008 年の画像間隔が 1 回帰である全 6 ペア 9 シーンのデータを使用した。表 1 に本研究で使用した SAR データの取得日をまとめた。

(2) データ処理

白瀬氷河の流速ベクトルを求めるための画像相関法の適用に当たり、画像ペア同士のピクセルを正確に位置合わせする必要がある。SLC (single-look complex) データを用いて位置合わせを行うことが必要である。流速ベクトルを計算する時には SLC からマルチルック処理した振幅画像を作成して、スペックルノイズの低減化を施して使用した。振幅画像の作成までは、スイスの GAMMA REMOTE SENSING 社の SAR Processor (GAMMA SAR Processor) を使用した。

GAMMA SAR Processor による通常のルーチンにしたがって、raw データから画像再生処理を行い、SLC データを作成した。つぎに、SLC 画像ペアの位置合わせを行った後、スペックルノイズの平滑化のために JERS-1 SAR では 2×6 (レンジおよびアジマス)、ALOS PALSAR では 2×5 のマルチルック処理を施した。処理後のレンジおよびアジマス方向の 1 ピクセル当たりの地表分解能は、それぞれ JERS-1 SAR では 28.0 m と 27.8 m、ALOS PALSAR では 16.4 m と 15.0 m である。

(3) データ解析

位置合わせを行った画像ペアについて、画像相関法を適用することにより流速ベクトルを求めた。画像相関法とは、画像ペアにおける同一地点の検出を、両画像から取り出した小領域の一致を調べることにより行う方法である。小領域としては $m \times n$ の相関窓が用いられ、小領域の一致は画像間の相関係数 ρ が最大になる位置として検出する。 ρ は以下の式によって求められる。

$$\rho(u,v) = \frac{\sum_i \sum_j [X(i',j') - \bar{X}][Y(i'+u, j'+v) - \bar{Y}]}{\sqrt{\sum_i \sum_j [X(i',j') - \bar{X}]^2 \sum_i \sum_j [Y(i'+u, j'+v) - \bar{Y}]^2}}$$

ここで、 $X(i,j)$ は参照画像（マスター画像） X の座標がレンジ= i 、アジマス= j における画素値、 $Y(i+u,j+v)$ は (i,j) から (u,v) だけ移動した探索画像（スレーブ画像） Y における画素値、 X および Y はそれぞれマスターおよびスレーブ画像のアジマス m 、レンジ n の画素を包含する小領域画像における平均画素値を示す。流速ベクトルを求めるに当たり、相関窓の設定は、氷山になる段階の浮氷舌片の大きさ（およそ 1 km^2 ）を参考にして JERS-1 SAR では 32×32 ピクセル、ALOS PALSAR では 64×64 ピクセルとした。流速ベクトルの速度 V はつぎの式により求められる。

$$V = \sqrt{[A_x \times u]^2 + [R_x \times v]^2}$$

(m/44-days for JERS-1 SAR; m/46-days for ALOS PALSAR)

ここで、 A_x 、 R_x はそれぞれアジマス、レンジ方向の1ピクセル当たりの地表分解能を示す。流速絶対値の推定誤差を ± 1 ピクセルとみなした場合、JERS-1 SAR で $\pm 33.6\text{ m}/44\text{-days}$ ($\pm 0.28\text{ km}/\text{a}$)、ALOS PALSAR で $\pm 22.2\text{ m}/46\text{-days}$ ($\pm 0.18\text{ km}/\text{a}$)と求められる。氷河の場合、画像相関法を適用する小領域は連続体とみなせるから、流速の相対精度は絶対精度より1桁は良いと考えられ、JERS-1の場合 $\pm 0.03\text{ km}/\text{a}$ 、ALOS PALSAR の場合 $\pm 0.02\text{ km}/\text{a}$ として扱える。

(4) 解析結果

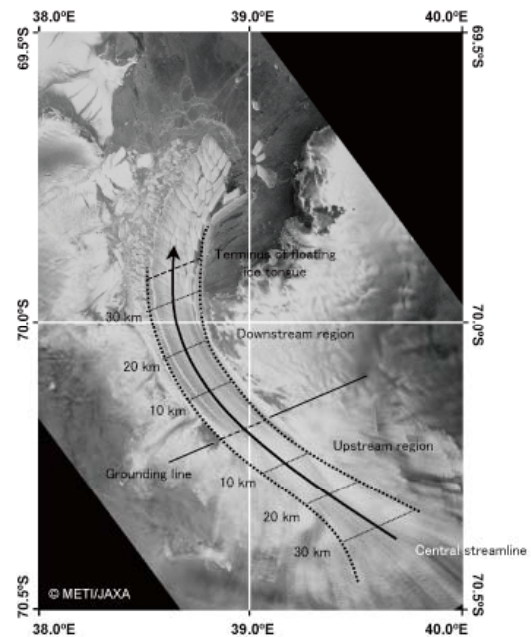
① 季節変動と年々変動

使用した SAR 画像と解析結果を図化した例を図1に示す。図1 (a)は、ALOS PALSAR の2007年9月に取得された画像に、流線などをオーバーレイし、(b)は2007年9月と11月の画像ペアについて画像相関法により計算した流速ベクトルを示したものである。

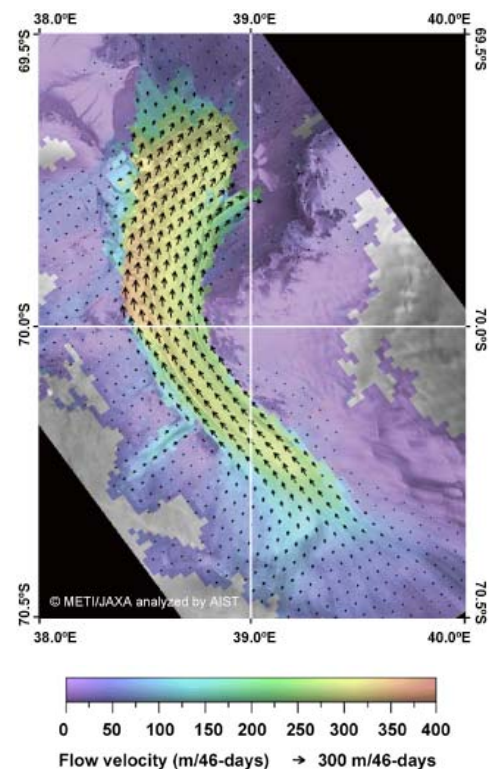
表2には1996年から1998年、2007年、2008年の各年度について、図1 (a)に示す3つの流線 (west streamline, central streamline, east streamline) における、上流域、GL付近、下流域での年平均流速を画像相関法により求めた結果をまとめた。各回帰周期間での移動量という形で求められる流速を km/a に換算して示している。表3には3つの流線について、上流域、下流域に見られる流速の季節変動をまとめた。

② 季節変動と年々変動

白瀬氷河の水流中心 (図1 (a)の太実線) における流速のプロファイルを図2に示す。1996年から1998年に取得された JERS-1 SAR 画像から求めた結果を図2 (a)、2007年から2008年に取得された ALOS PALSAR 画像から求めた結果を図2 (b)に示す。



(a) 2007年9月26日に取得された ALOS PALSAR 画像に流線、GL位置とGLからの距離を重ね描きした。



(b) ALOS PALSAR による2007年9月26日と11月11日の画像ペアに画像相関法を適用して流速ベクトルを求めた結果を、矢印で向きをカラーバーで流速の速さ（暖色系ほど速い）を示した。

図1 使用した SAR 画像と解析結果の図化例

表2 流速の年々変動
(a) 上流域

| | Western streamline | Central streamline | Eastern streamline |
|------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 1996 | 1.18 km/a | 1.09 km/a | 1.08 km/a |
| 1997 | 1.18 km/a | 1.08 km/a | 1.08 km/a |
| 1998 | 1.19 km/a | 1.11 km/a | 1.12 km/a |
| 2007 | 1.40 km/a | 1.27 km/a | 1.13 km/a |
| 2008 | 1.28 km/a | 1.14 km/a | 1.03 km/a |

(b) GL 付近

| | Western streamline | Central streamline | Eastern streamline |
|------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 1996 | 2.36 km/a | 2.32 km/a | 2.18 km/a |
| 1997 | 2.38 km/a | 2.32 km/a | 2.18 km/a |
| 1998 | 2.40 km/a | 2.33 km/a | 2.23 km/a |
| 2007 | 2.35 km/a | 2.29 km/a | 2.14 km/a |
| 2008 | 2.31 km/a | 2.26 km/a | 2.12 km/a |

(c) 下流域

| | Western streamline | Central streamline | Eastern streamline |
|------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 1996 | 2.55 km/a | 2.42 km/a | 2.31 km/a |
| 1997 | 2.60 km/a | 2.48 km/a | 2.35 km/a |
| 1998 | 2.75 km/a | 2.57 km/a | 2.43 km/a |
| 2007 | 2.65 km/a | 2.50 km/a | 2.37 km/a |
| 2008 | 2.56 km/a | 2.43 km/a | 2.31 km/a |

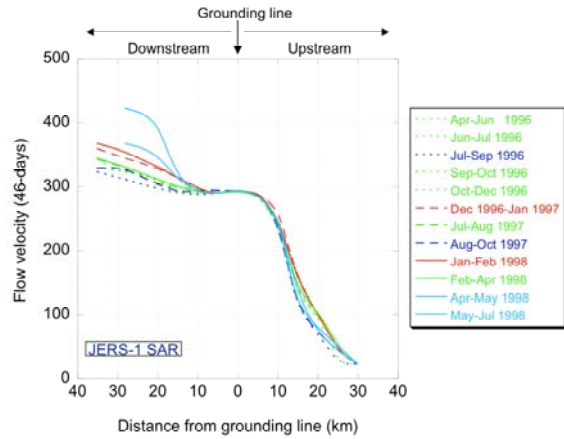
表3 流速の季節変動
(a) 上流域

| | Western streamline | Central streamline | Eastern streamline |
|------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 1996 | 0.15 km/a | 0.19 km/a | 0.13 km/a |
| 1997 | 0.11 km/a | 0.17 km/a | 0.13 km/a |
| 2008 | 0.23 km/a | 0.22 km/a | 0.20 km/a |

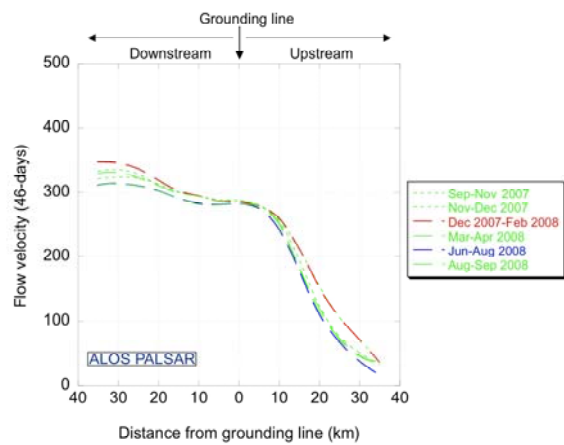
(b) 下流域

| | Western streamline | Central streamline | Eastern streamline |
|------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 1996 | 0.16 km/a | 0.16 km/a | 0.16 km/a |
| 1997 | 0.11 km/a | 0.10 km/a | 0.12 km/a |
| 2008 | 0.20 km/a | 0.16 km/a | 0.14 km/a |

図2において、夏季（JERS-1 SAR: 1996年12月と1997年1月および1998年1月と2月のペア、ALOS PALSAR: 2007年12月と2008年2月のペア）は赤色の実線、冬季（JERS-1 SAR: 1996年7月9月および1997年8月と10月のペア、ALOS PALSAR: 2008年6月と8月のペア）は青色の点線、他を緑色の破線で示している。白瀬氷河の上流からGL位置にかけては、ほぼ流下距離に比例して流速が速くなり、GLにおける流速はGLから30km上流における流速よりも1桁速い。この傾向は10年以上変わらず継続しているが、値そのも



(a) 1996年から1998年に取得されたJERS-1 SAR画像から求めた結果



(b) 2007年から2008年に取得されたALOS PALSAR画像から求めた結果

図2 氷流中心における流速プロファイル（赤色線は夏季、青色線は冬季、水色線は浮氷舌崩壊後、緑色線は他の時期を示す）

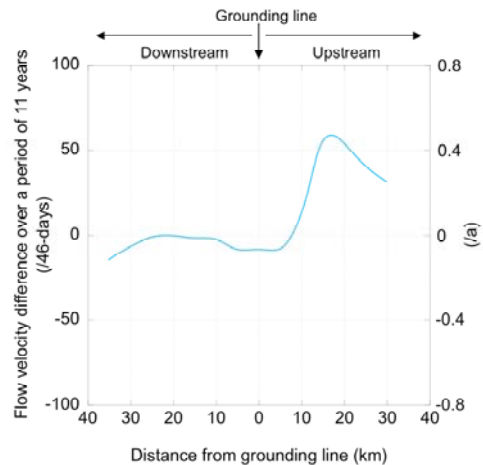


図3 11年における流速の経年変化（ALOS PALSARとJERS-1 SARからそれぞれ求めた平均流速の差）

のは経年変化が見られ、定性的には GL より上流域において顕著な加速、GL より下流域ではわずかに減速していることが分かった。

③ 11 年における流速変化

ALOS PALSAR と JERS-1 SAR からそれぞれ求めた平均流速の差を求め、流速の経年変化を図 3 に示す。この図から、GL から上流 18 km 付近で有意な差が見られる。11 年の経過による白瀬氷河の流速増加は GL から 5 km 上流から始まり、およそ 18 km 上流で最大 (0.54 km/a) に達し、30 km 上流で (0.25 km/a) となり、この増速傾向はさらに上流まで続いている。

氷流中心における GL の平均流速は、JERS-1 SAR 画像から求めた結果が 2.33 km/a であり、季節によらずほぼ一定であった。ALOS PALSAR 画像から求めた結果は 2.27 km/a であり、0.06 km/a 減少しているが、推定誤差を考慮すると、有意な変化は起きていないと考えられる。

4. 研究成果

白瀬氷河のように流動が速い氷河を対象として流速を求める場合には、SAR の振幅画像のペアに画像相関法を適用することが有効である。本研究では 11 年間の白瀬氷河の流速変動について知見を得るため、JERS-1 と ALOS 衛星搭載の L バンド SAR で観測したデータについて、1 回帰周期だけ離れたペアに画像相関法を適用して流速ベクトルを求めた。

2007 年から 2008 年に取得された ALOS PALSAR 画像により求められた白瀬氷河の流速プロファイルから、上流から GL へと向かって流速が急激に速くなり、GL を挟む幅 20 km の領域において一定となり、GL から下流、浮氷舌へと再び流速がなだらかに速くなる傾向が見られた。この傾向は、11 年前の 1996 年から 1997 年に取得された JERS-1 SAR 画像により求められた流速プロファイルと比較した結果、ほぼ変化はなく、氷流中心における GL での流速は 2.3 ± 0.3 km/a であった。この結果は、Rignot (2002) により ERS のタンデムミッションにより SAR インターフェロメトリを適用して流速を求めた結果である 2.3 km/a と調和的である。

一方、詳細な年々変動を調べた結果、氷流中心においてこの 11 年間で上流域が 1.09 km/a から 1.21 km/a へと有意に速くなり、下流域が 2.49 km/a から 2.47 km/a へとわずかに減速していることが分かった。今後、この変動の詳細と原因について、さらに研究を進める必要がある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 7 件)

- ① 中村和樹, 土井浩一郎, 澁谷和雄: 1996 年から現在までの L バンド SAR による白瀬氷河の流速推定, 日本リモートセンシング学会第 45 回学術講演会, 北海道江別市, pp. 165-166, 2008 年 12 月.
- ② 中村和樹, 土井浩一郎, 澁谷和雄: JERS-1/SAR と ALOS/PALSAR を用いた白瀬氷河の流速推定結果の比較, 雪氷研究大会 (2008・東京) (日本雪氷学会・日本雪工学会合同大会), 東京都文京区, pp. 209, 2008 年 9 月.
- ③ 中村和樹, 土井浩一郎, 澁谷和雄: ALOS/PALSAR による白瀬氷河の流速推定, 日本リモートセンシング学会第 44 回学術講演会, 神奈川県横浜市, pp. 261-262, 2008 年 5 月.
- ④ 中村和樹, 土井浩一郎, 澁谷和雄: JERS-1/SAR による白瀬氷河の grounding line の検出, 日本リモートセンシング学会第 43 回学術講演会, 大阪府堺市, pp. 193-194, 2007 年 12 月.
- ⑤ 中村和樹, 土井浩一郎, 澁谷和雄: 合成開口レーダ (SAR) による白瀬氷河の接地線検出, 2007 年度日本雪氷学会全国大会, 富山県富山市, pp. 147, 2007 年 10 月.
- ⑥ Kazuo Shibuya, Koichiro Doi, Tsutomu Yamanokuchi, Kazuki Nakamura: Determination of the Antarctic coastline by InSAR, and variation estimate of Shirase Glacier flow by a SAR image correlation method, The 10th International Symposium on Antarctic Earth Sciences, Santa Barbara, U. S. A., August 2007.
- ⑦ Kazuki Nakamura, Hiroyuki Wakabayashi, Koichiro Doi and Kazuo Shibuya: Ice flow estimation of Shirase Glacier by using JERS-1/SAR image correlation, IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2007 (IGARSS 2007), Barcelona, Spain, pp. 4213-4216, July 2007.

[その他]

ウェブページ

- ① <http://staff.aist.go.jp/nakamura-kazuki/study/shirase.html>
- ② http://staff.aist.go.jp/nakamura-kazuki/study/shirase_new/

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中村 和樹 (NAKAMURA KAZUKI)

独立行政法人産業技術総合研究所

情報技術研究部門・産総研特別研究員

研究者番号: 60435500