

ALOS/PALSAR を用いた Svalbard,
NovayaZemlya における氷河の流動
速度の検出

Estimation of glacier motions at Svalbard,
NovayaZemlya with ALOS/PALSAR

北海道大学 理学部 地球科学科

宇宙測地学研究室

22100070

小沼 義季

指導教官 古屋 正人

概要

本研究は、日本が打ち上げた人工衛星 ALOS「だいち」に搭載された合成開口レーダー PALSAR の観測データを用いて、氷河の流動速度を検出することを試みた研究である。

近年、合成開口レーダー SAR を用いた研究で、グリーンランドの氷河の流動速度が速くなっているということが報告されている (Moon et al., 2012)。これは地球温暖化に伴う、気温・海水温上昇が原因であると考えられている。それでは、同じく高緯度に位置する他の地域の氷河の、近年の流動はどうなっているのだろうか。

Svalbard, NovayaZemlya とは北緯 70° ~ 81° 付近に位置する北極圏の島で、氷河が多数存在している。この 2 つの地域で氷河を調べることで、グリーンランドで起こった氷河流動速度の上昇が、他の北極圏の氷河でも起こっているのかを調べた。この 2 つの地域は、1990 年代に SAR を用いて氷河流動が調べられている先行研究がある (Strozzi et al., 2008)。その先行研究ではいくつかの氷河を調べており、本研究ではその中の Duvebreen 氷河 (Svalbard)、Vize Glacier (NovayaZemlya) に注目して観測を行った。

今回、用いたデータは PALSAR が観測したものであり、Duvebreen 氷河は 2007 年 7 月から 2010 年 10 月までの 10 の時期の観測データを、Vize Glacier は 2007 年 2 月から 2010 年 12 月までの 13 の時期の観測データを用いた。

これらの観測データを解析して速度計算を行い、先行研究のデータを比べることで、近年の氷河流動速度の変化を調べた。

その結果、本研究で調べた Svalbard, NovayaZemlya の 2 つの氷河は、どちらも 1990 年代の速度よりも速くなっていることが確認された。これは、北極圏にある他の氷河の流動速度が増加していることを示唆しており、グリーンランドで観測された氷河流動速度の増加が、広域で起きている可能性を示した結果となった。

目次

| | |
|--|----|
| 1. はじめに | 1 |
| 1.1 宇宙測地学 | 1 |
| 1.2 合成開口レーダ (Synthetic Aperture Radar : SAR) | 1 |
| 1.3 SAR と GPS | 2 |
| 1.4 SAR を使った氷河の研究 | 2 |
| 1.5 ALOS/PALSAR | 3 |
| 2. SAR の仕組み・解析手法 | 4 |
| 2.1 合成開口とは? | 4 |
| 2.2 解析手法 | 5 |
| 2.2.1 データ取得 | 5 |
| 2.2.2 SLC 画像作成 | 7 |
| 2.2.3 位置合わせ | 8 |
| 2.2.4 InSAR | 8 |
| 2.2.5 Pixel Offset 法 | 9 |
| 3. 観測地域・結果 | 10 |
| 3.1 先行研究 | 10 |
| 3.2 Svalbard | 12 |
| 3.2.1 先行研究 | 13 |
| 3.2.2 使用データ | 14 |
| 3.2.3 観測結果 | 16 |
| 3.3 NovayaZemlya | 20 |
| 3.3.1 先行研究 | 20 |
| 3.3.2 使用データ | 22 |
| 3.3.3 観測結果 | 23 |
| 4. 考察 | 29 |
| 4.1 速度推定 | 29 |
| 4.1.1 Duvebreen | 30 |
| 4.1.2 Vize Glacier | 31 |
| 5. まとめ | 32 |
| 6. 謝辞 | 32 |
| 7. 参考文献・画像引用 | 33 |

1. はじめに

1.1 宇宙測地学

測地学は、正確な地図の作成と位置を知ることが目的として発展した学問であり、古くは古代エジプト時代から行われてきたと言われている。その中で、宇宙測地学は、宇宙空間に存在する恒星・惑星や、人工衛星を利用して、地殻変動、大気圏での現象などを観測する分野である。人類初の人工衛星が打ち上げられたのは1957年であるし、近年発展してきた、測地学の中では比較的新しい分野と言える。しかし、近代における正確な測地、さらには日常生活においても必要不可欠なものとなっており、まだまだ活用の可能性を秘めた学問である。現在使われている技術には、VLBI (Very Long Baseline Interferometry)、SLR (Satellite Laser Ranging)、GPS (Global Positioning System)等の衛星測位システム (Global Navigation Satellite System : GNSS)、合成開口レーダ (Synthetic Aperture Radar : SAR)などがあり、特にGPSは汎用性が高く、日常生活においてもよく耳にするものである。

1.2 合成開口レーダ (Synthetic Aperture Radar : SAR)

合成開口レーダ (SAR)とは、地表面などにマイクロ波を放射し、散乱・反射してかえってきた電磁波を分析して、地表面の状態を観測する能動的センサーである。SARの最大の特徴は、観測にマイクロ波を使っている点である。可視光を用いて観測を行う受動型の技術とは異なり、天候・昼夜に左右されず、常に観測が行えるのである。

地球観測を目的としたSARは、1978年に打ち上げられた海洋観測衛星SEASATに初めて搭載された。この時、観測された期間はわずかなものだったが、SEASAT-SARが提供した鮮明なデータ画像は、SARの実用性を証明した。SEASATの運用を機に、ERS-1 (ESA:European Space Agency)、JERS-1 (日本)、Radarsat (Canada)など、SARを搭載した観測衛星は各国で打ち上げられた。現在では運用が終了している衛星もあるが、各国とも後継機を打ち上げ、SARによる観測は続けられている。

1.3 SAR と GPS

上で述べた通り、SAR は近年研究が盛んになってきた分野であり、GPS も同じく近年研究に活用され始めた分野である。どちらもここ最近になって登場したものであるが、GPS の方が多くの方に馴染みのあるものである。それは、それぞれのデータ取得方法の違いからくるものだと考えられる。SAR は衛星に搭載されたセンサー自体がデータを取得し、膨大な量のデータを得ている。そのため、センサーで得られたデータを取得・解析するためには、機関への申請をしなければならないし、コンピュータなどの解析のための機材も必要である。一方、GPS は GPS 衛星が飛ばした信号を受信機で受け取り、受信機で計算を行って位置情報を得る。そのため、受信機さえあれば、GPS を利用することができる。受信機は、携帯などに搭載できるほど小さく、安価なものもある。また日本では国によって全国約 1,200 ヶ所に受信機（電子基準点）が設置され、広く一般に知られるようになったのである。この特徴から、GPS は研究の場でも多く使われている。GPS はある地点において連続してデータを取得出来るため、時間的分解能が高く、また日本ほど電子基準点があれば広い領域をカバー出来る。しかし、GPS 観測では、その特徴から点的なデータしか得られず、空間分解能が低い。さらには、受信機を設置しなければならないので、極域、山岳地帯など人が立ち入れない地域の観測をすることが出来ず、また受信機の無い地域での地震といった突発的なイベントを観測することが出来ない。その点、SAR は地球全域をカバーしているため、空間分解能が非常に高く、衛星が飛んでいる期間であればどの地域の地震でも観測可能である。このことから近年では SAR を用いた研究も盛んになってきている。

1.4 SAR を使った氷河の研究

氷河の研究と聞けば、現地まで足を運び、観測器を用いて観測し、長い年月をかけて同じ地点を観察するという手法が思い浮かぶであろう。もちろん、そういう研究は今も多く行われているし、氷河の主要な研究方法である。しかし、この方法には、時間的・金銭的に多くの手間がかかってしまい、観測が出

来る範囲も限定的であるという欠点がある。そこで、近年注目されてきたのが人工衛星を使った氷河の研究である。その中でも SAR は特に有効な手段として研究に用いられている。

1.5 ALOS/PALSAR

日本でも、SAR を搭載した衛星が打ち上げられている。1992 年、JERS-1「ふよう 1 号」が打ち上げられ、搭載された SAR によって約 6 年半にわたり観測データを取得した。

ALOS「だいち」は JERS-1 の後継機として 2006 年に打ち上げられ、地球全域を観測し、2011 年まで運用された。ALOS に搭載されたフェーズドアレイ方式 L バンド合成開口レーダ (PALSAR) は JERS-1 に搭載された合成開口レーダの機能・性能をさらに向上させたもので、L バンドと呼ばれる波長 23.5cm のマイクロ波を用いている。フェーズドアレイ方式とは、平面に小さなアンテナを多数備えることで、観測においてアンテナの首振りが必要としない方式である。

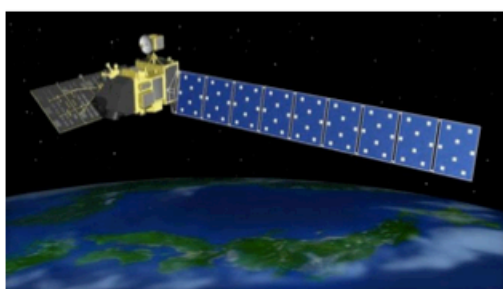


Fig.1.1 ALOS (C) JAXA

| | |
|----------|---|
| 国際標識番号 | 2006-002A |
| 打ち上げ日時 | 2006 (平成18) 年1月24日 10:33 |
| 打ち上げロケット | H-IIAロケット8号機 |
| 打ち上げ場所 | 種子島宇宙センター |
| 形状 | 一翼式太陽電池パドル、フェーズドアレイ方式Lバンド合成開口レーダ、データ中継衛星通信部アンテナを有する箱型 本体：約6.2m×3.5m×4.0m 太陽電池パドル：約3.1m×22.2m PALSARアンテナ：約8.9m×3.1m |
| 質量 | 約4,000kg |
| 軌道 | 太陽同期準回帰軌道 (回帰日数46日) |
| 軌道高度 | 約690km (軌道長半径7,070km) |
| 軌道傾斜角 | 約98度 |
| 軌道周期 | 約99分 |
| 姿勢制御方式 | 三軸姿勢制御方式 (高精度姿勢軌道決定機能) |

Table.1.1 ALOS の主な情報 (C) JAXA

2. SAR の仕組み・解析手法

2.1 合成開口とは？

望遠鏡や顕微鏡の空間分解能はレンズの開口が大きくなると向上する。レーダも同じように、開口であるアンテナが大きくなるにつれて空間分解能が向上する。しかし、実際に衛星に取り付けることが出来るアンテナのサイズには限界がある。JERS-1、ALOS のアンテナのアジマス方向(衛星進行方向)の長さは、それぞれ 12m、9m である。そこで開発されたのが、合成開口の技術である。衛星進行方向に、小さい実開口の小さなアンテナをいくつも合成し、仮想の大きなアンテナを合成するのである。アジマス方向の分解能は、アジマスビーム幅に依っていて、アンテナの開口が大きくなるほどビーム幅が狭くなるので、合成開口の技術を用いることによって、空間分解能が高くなる。

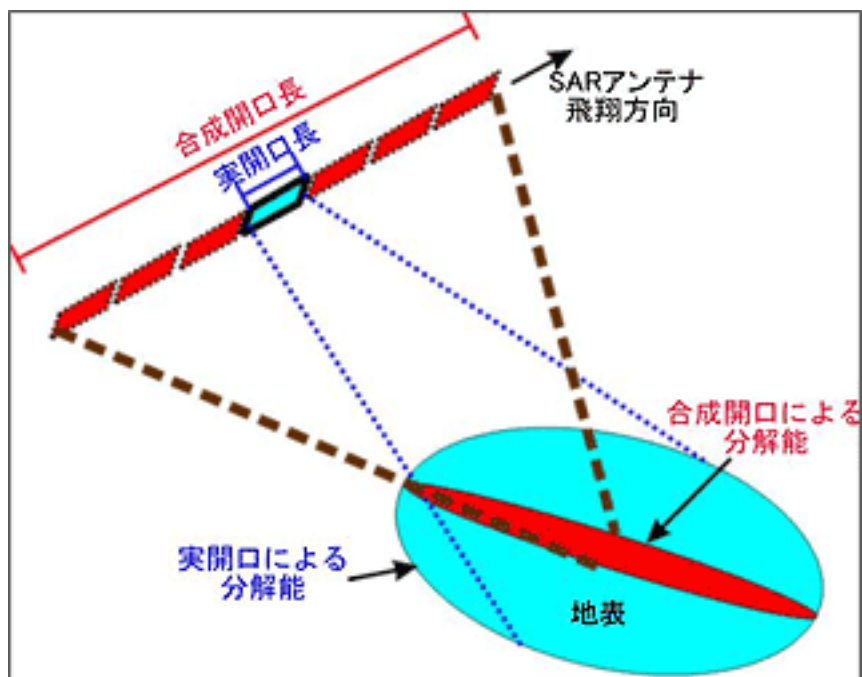


Fig.2.1 合成開口技術による分解能の向上
(国土地理院 HP より引用)

2.2 解析手法

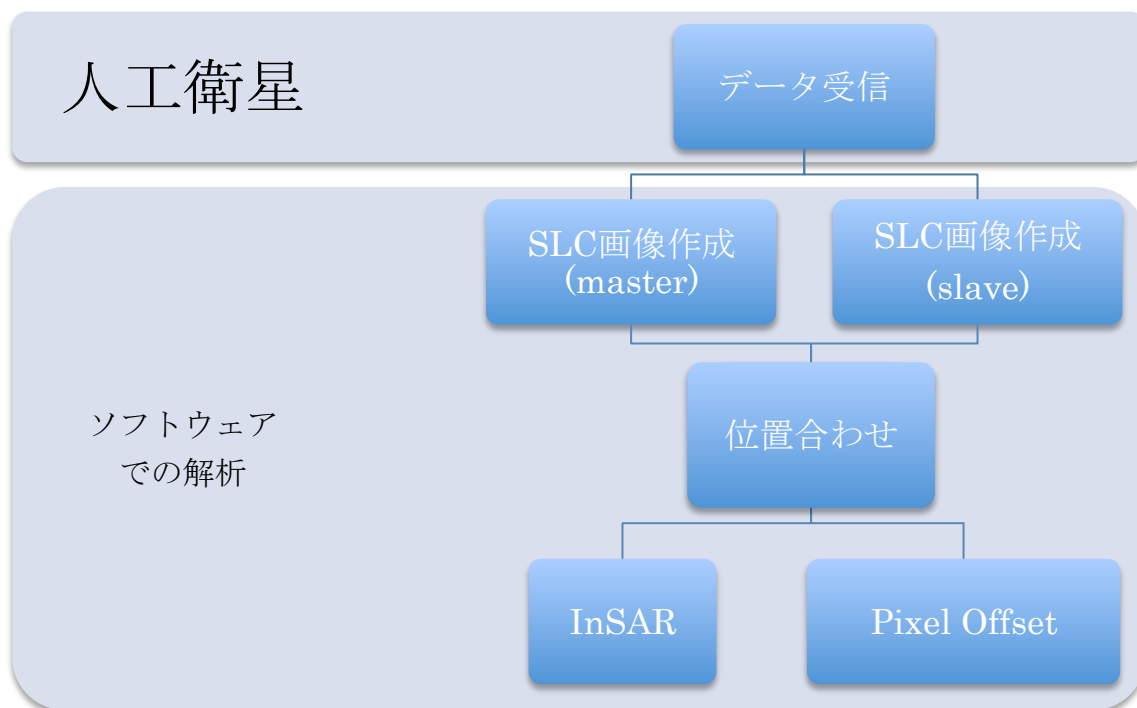


Fig.2.2 SARで観測したデータを解析するプロセス

2.2.1 データ受信

上で述べた通り、合成開口レーダ (SAR)は、合成した仮想の大きなアンテナを用いて、地表にマイクロ波を放射し、地表で散乱・反射した信号を受信している。Fig.2.2.1のように衛星進行方向に対して右下の方向を向いて観測している

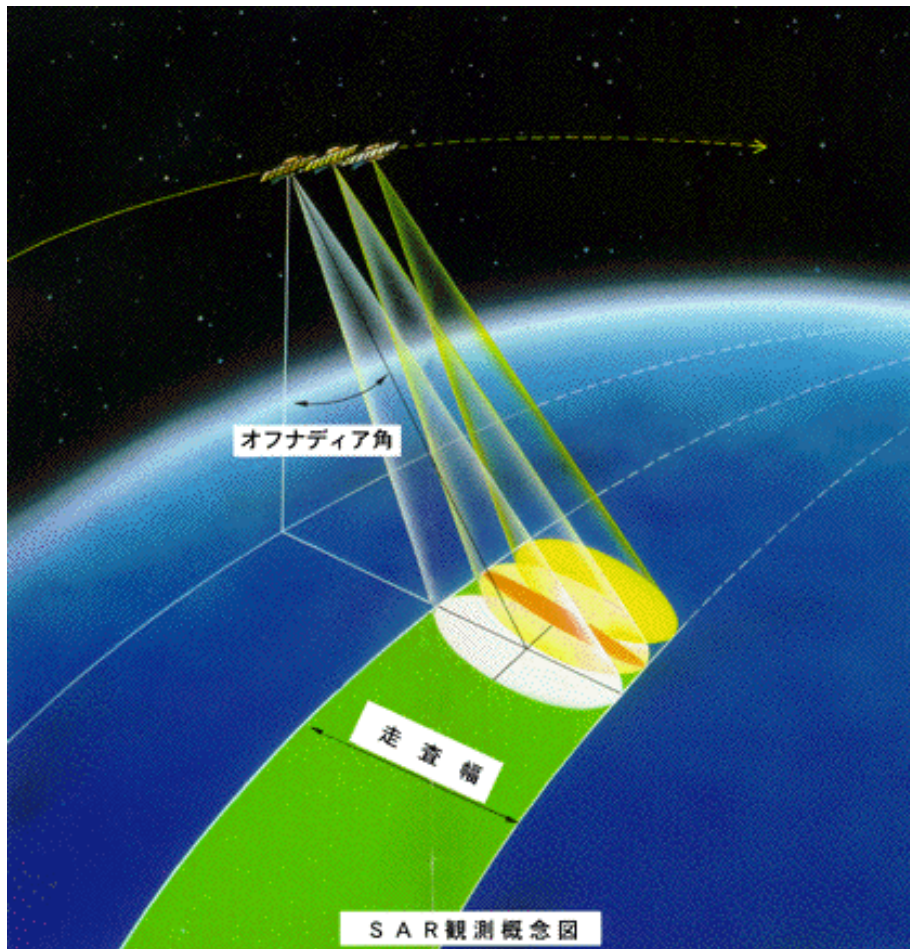


Fig.2.2.1 SAR 観測概念図

(一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構 HP

<http://www.jspacesystems.or.jp/project/past/sarops/index.html> より引用)

地球の周りを回っている人工衛星は、ある地域を北から南へ飛んでいけば、その地球の反対側では、南から北へ飛んでいる。この時の飛行の方向のことを、前者をディセンディング、後者をアセンディングという。

SAR を搭載した人工衛星は、1~2 kHz 程度(0.6 ミリ秒に一回)で 20~40 マイクロ秒程度のマイクロ波のパルスを放ち、散乱・反射した信号を観測している。

Radar から送られているパルス波形は以下の式で表せる。

$$v(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) \cos\{2\pi(f_c t + K_r t^2/2)\}$$

このパルス波形はチャープパルスとよばれるもので、 $\text{rect}(t/T_p)$ は長さ T_p の矩形関数を表す。 f_c はGHzのオーダーで、 K_r は $10^{11} \sim 10^{12} \text{Hz/s}$ である。

地表面のある1点でマイクロ波が反射してかえってくる間での時間を t_0 と仮定すると、反射波の波形は以下のようなになる。

$$v(t) \propto \text{rect}\left(\frac{t-t_0}{T_p}\right) \cos\{2\pi(f_c(t-t_0) + K_r(t-t_0)^2/2)\}$$

これが生の受信データであるが、このままでは周波数が高すぎて記録が大変であるので、実際には以下の式で記録される。

$$v(t) = \text{rect}\left(\frac{t-t_0}{T_p}\right) \exp\left\{-j\frac{4\pi R}{\lambda}\right\} \exp\{j\pi K_r(t-t_0)^2\}$$

2.2.2 SLC 画像作成

SAR が観測したデータは生データと呼ばれる。SAR は可視光ではなく、マイクロ波を用いて観測をしているので、生データは画像ではなく、生データそのものを見ても何も分からない。生データをソフトウェアを用いて解析する必要がある。まずは、生データから複素画像 (Single Look Complex Image : SLC 画像) を作成する。解析を行うためには、SLC 画像を2つ作成する必要がある。生データから SLC 画像を作成する過程は複雑なのだが、ここでは省略する。下の Fig.2.2.2 は、SLC 画像そのものではなく、反射強度を表す強度画像である。

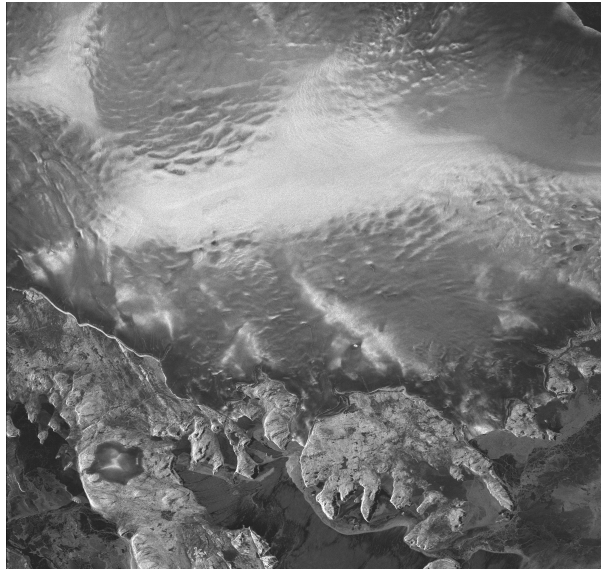


Fig.2.2.2 Svalbard の強度画像の例

2.2.3 位置合わせ

SAR を搭載した人工衛星が地表面を観測する際、一度観測した後、また同じ軌道を通して同じ地点を観測するが、全く同じ軌道から観測を行うことは出来ない。そのため、2つの時期の画像を干渉させるためには、位置合わせという作業が必要不可欠である。それぞれの画像の各ピクセルを比較し、同じ反射特性を持つもの同士を対応させて、地上の対象物同士を対応づける作業である。この作業が上手くいかないと、干渉させることが出来なくなり、干渉画像を得られなくなってしまうので、とても重要な作業である。

2.2.4 InSAR

この手法は干渉 SAR (Interferometric SAR) と呼ばれ、SAR の研究では最も使われている手法である。観測に用いているマイクロ波の位相の差を用いて変

動を捉えるのだが、氷河の動きなど数十～数百 m にも及ぶ変動は捉えることが出来ないなので、本研究ではこの手法は用いなかった。

2.2.5 Pixel Offset 法

氷河の動きを観測した本研究では、この手法を用いた。Pixel Offset 法とは、位相の情報などは使わず、2つの画像の各ピクセル間のずれを変動として観測する手法である。いわば、位置合わせ処理から生まれた副産物と言える。ピクセルのずれを使うので、氷河のような変動の大きな事象に対しても有効であり、InSAR では捉えられない大きな変動を捉えることが出来る。本研究では azimuth (衛星進行)方向の azimuth offset、range (視線)方向の range offset の2つを用いた。

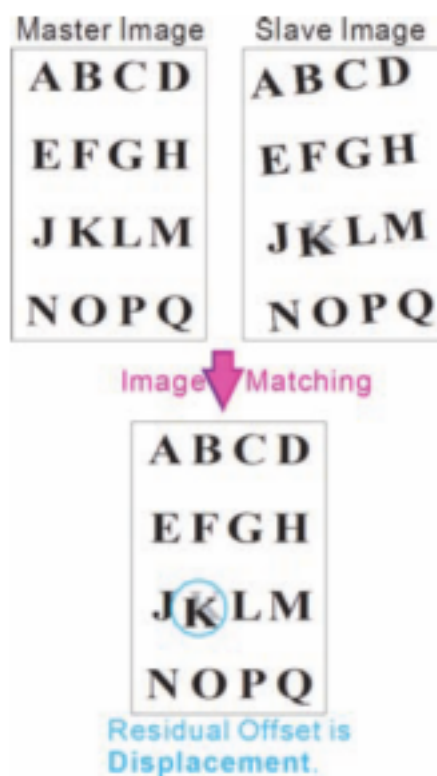


Fig.2.2.5 Pixel Offset 法の概念図
(Tobita et al., 2001 より引用)

3. 観測地域・観測結果

3.1 先行研究

近年、SAR を用いた氷河の研究は盛んになってきている。グリーンランド全域を SAR で調べた研究 (Moon et al, 2012) では、2000 から 2010 年にかけて氷河の流動速度があがっていることが報告されている。下図にも示されているが、特に北西部(NW)、南東部(SE)で速度増加が顕著である。

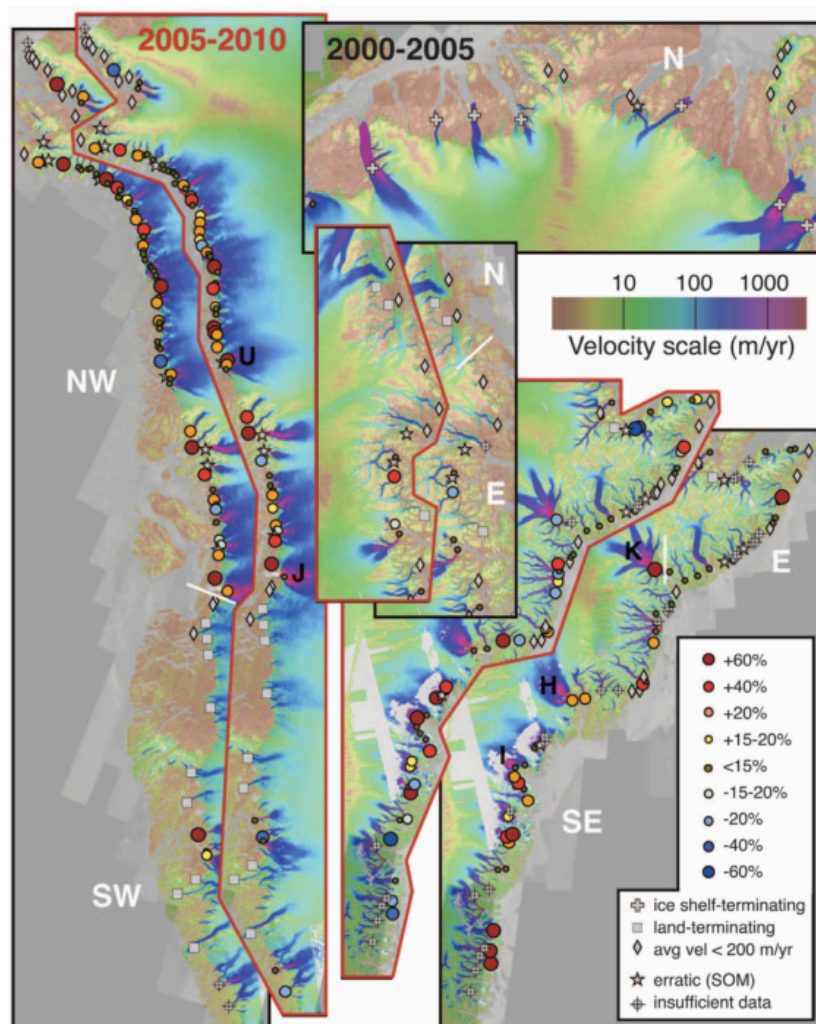


Fig.3.1.1 グリーンランド氷河の2000年から2010年までの流動速度変化率一覧 (Moon et al., 2012 より引用)

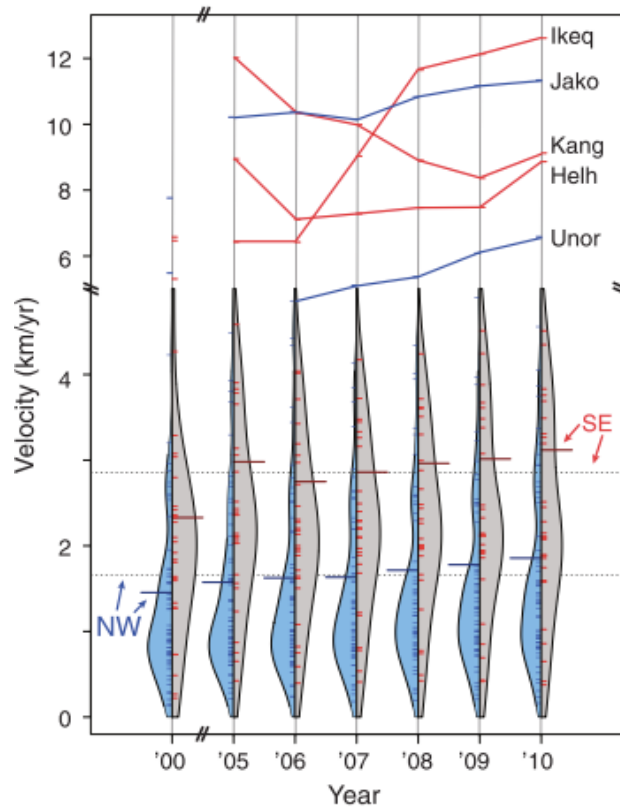


Table.3.1 北西部、南東部の地域一帯の氷河流動速度の平均値
折れ線グラフは、この地域の流動速度の早い主な氷河
(Moon et al., 2012 より引用)

この氷河流動速度の増加は、地球温暖化に伴う、気温、海水温の上昇によるものだと考えられている。特に、海に注ぎこんでいる氷河は海水温の影響を受けやすく、速度上昇が顕著である。この様に、地球温暖化がグリーンランドの氷河の流動速度増加の原因とすれば、当然、その他の地域の氷河の動きがどうなっているかの疑問が浮かんでくる。そこで本研究では、グリーンランド北部と同程度の緯度、北極圏に位置する2つの地域、Svalbard、NovayaZemlya について調べた。

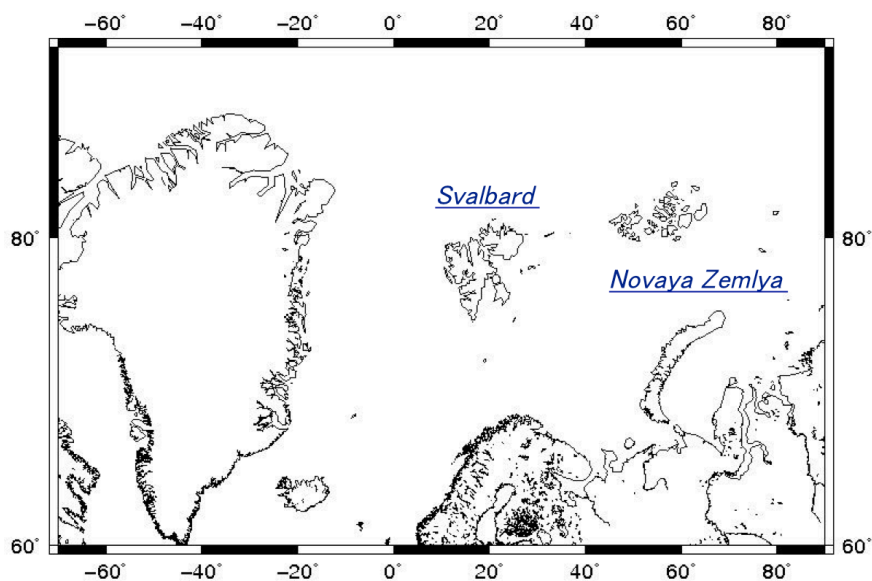


Fig.3.1.2 グリーンランドと Svalbard, Novaya Zemlya の位置関係

3.2 Svalbard

Svalbard は北緯 74° ~ 81° 、東経 10° ~ 35° に位置する、大小の島からなる諸島であり、総面積は $60,640\text{km}^2$ ほどで、北海道より少し小さいくらいである。1年を通して陸地のほとんどを雪や氷が覆っており、人口は 2,394 人(2011 年)と少ないが、極地研究の世界的な拠点となっており、スヴァールバル世界種子貯蔵庫という、核戦争にも耐えうる種子銀行もある。



Fig.3.2 Svalbard の航空写真

(<http://vickywallst.blog15.fc2.com/blog-entry-979.html> より引用)

3.2.1 先行研究

1990年代に Svalbard の氷河を調べた先行研究がある (Strozzi et al, 2008)。これも SAR を用いて氷河の流動速度を調べた研究で、日本が打ち上げた JERS-1 のデータを使っている。この研究では、Svalbard 全体を調べているが、その中でも北東部に位置する Duvebreen 氷河に注目して観測している。

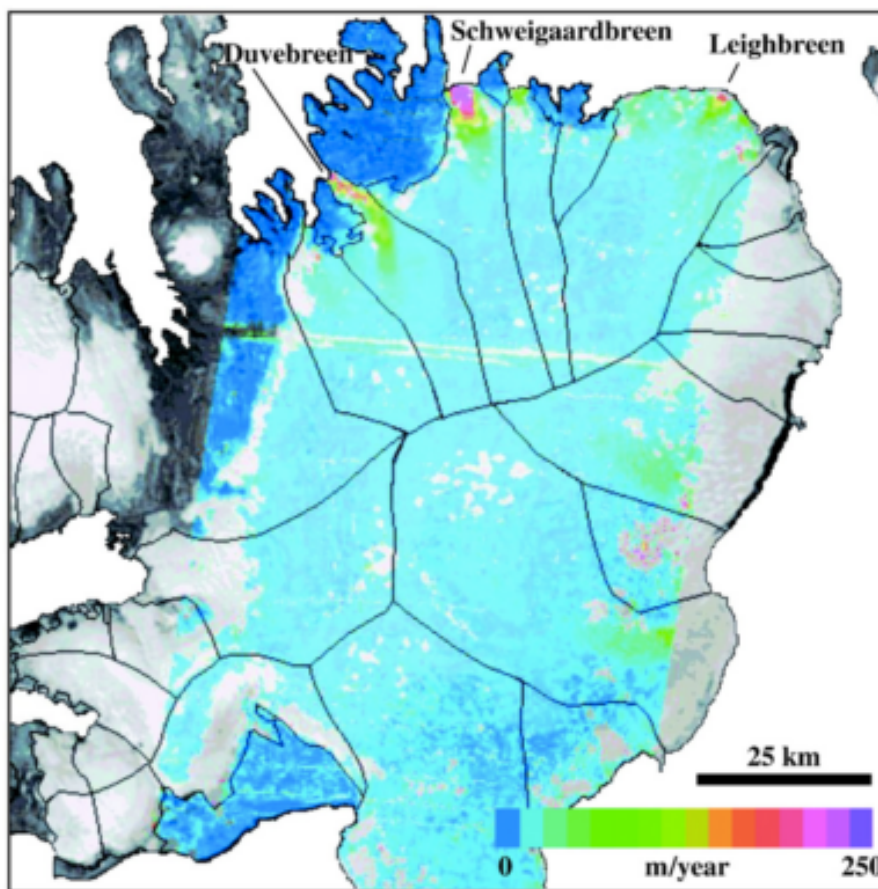


Fig.3.2.1 Svalbard 北東部の SAR 画像。いくつか名称が書いてあるのが氷河 (Strozzi et al., 2008 より引用)

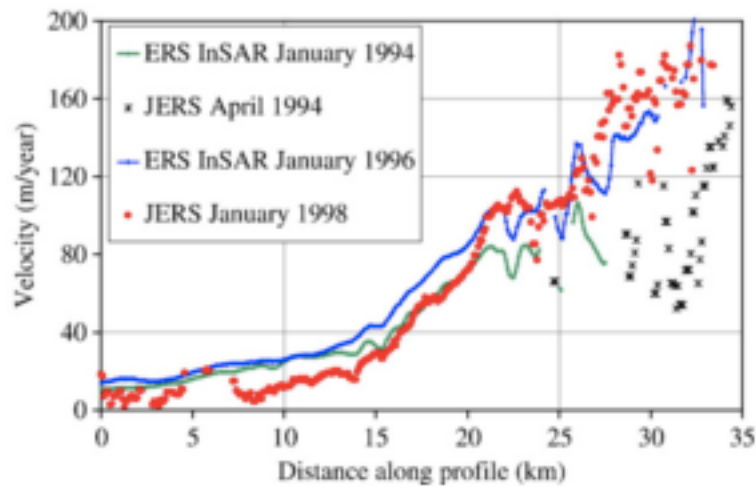


Table.3.2.1 Duvebreen 氷河の流動速度表。(横軸)0 から 35 に向かって下流になっている。(Strozzi et al., 2008 より引用)

本研究では、この先行研究のデータと比較するため、この Duvebreen 氷河を調べた。

3.2.2 使用データ

本研究では、日本が打ち上げた ALOS/PALSAR の観測データを使用した。使用したのは 2007 年 7 月から 2010 年 9 月までの 7 つの時期のデータと、異なる Path、Frame の。下図は観測日時と、基線長を示したものである。基線長とは、master と slave を観測したときの衛星間の距離を表したものである。基線長が短いほど、良いデータを得られやすくなり、長くなっていくにつれて干渉性が悪くなる。観測日時は、年月日 = YYYYMMDD とし、縦軸が master、横軸が slave とした。

| | 20070722 | 20080122 | 20080608 | 20080724 | 20090124 | 20091027 | 20100914 |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 20070722 | | 1887 | 2665 | -1317 | -3327 | -833 | 2304 |
| 20080122 | | | 1579 | -3204 | -5216 | -2721 | 417 |
| 20080608 | | | | -4785 | -6797 | -4301 | -1162 |
| 20080724 | | | | | -2010 | 483 | 3621 |
| 20090124 | | | | | | 2493 | 5630 |
| 20091027 | | | | | | | 3137 |
| 20100914 | | | | | | | |

Table.3.2.2 Path:577 Frame:1610 の観測データ一覧。緑のペアは氷河を観測出来たもの。

| | 20100302 | 20100902 | 20101018 |
|----------|----------|----------|----------|
| 20100302 | | 1227 | 1627 |
| 20100902 | | | 396 |
| 20101018 | | | |

Table.3.2.3 Path:579 Frame:1610 の観測データ一覧。

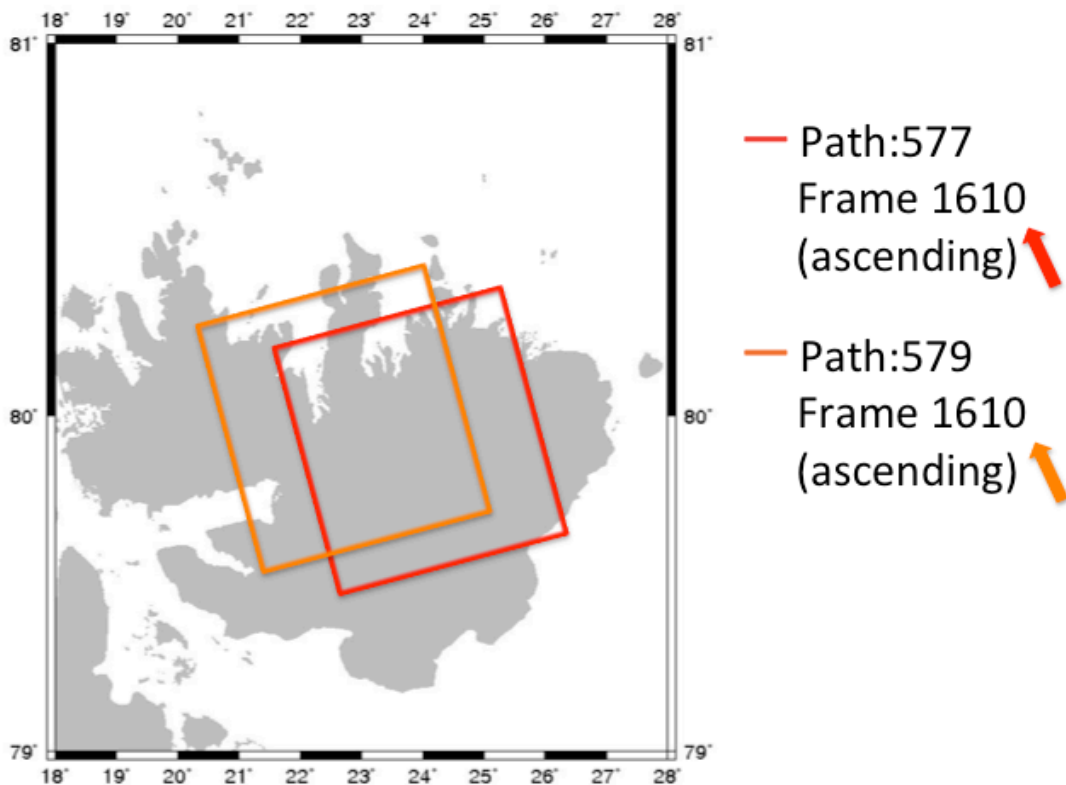


Fig.3.2.2 衛星が観測した Path, Frame の位置を表した図。

3.2.3 観測結果

データの解析は Pixel Offset 法を用いた。Path:577、Frame:1610 では、全てで 21 通りの組合せがあるのだが、氷河を確認することが出来たのは 3 通りのみであった。さらにそのうちの 2 つはわずかにしか確認することが出来ず、はっきりと氷河が確認出来るのは 20080122 - 20080608 の組合せのみであった。Path:579、Frame:1610 では、わずかに氷河を確認出来たが、20080122 - 20080608 ほどの画像を得ることは出来なかった。

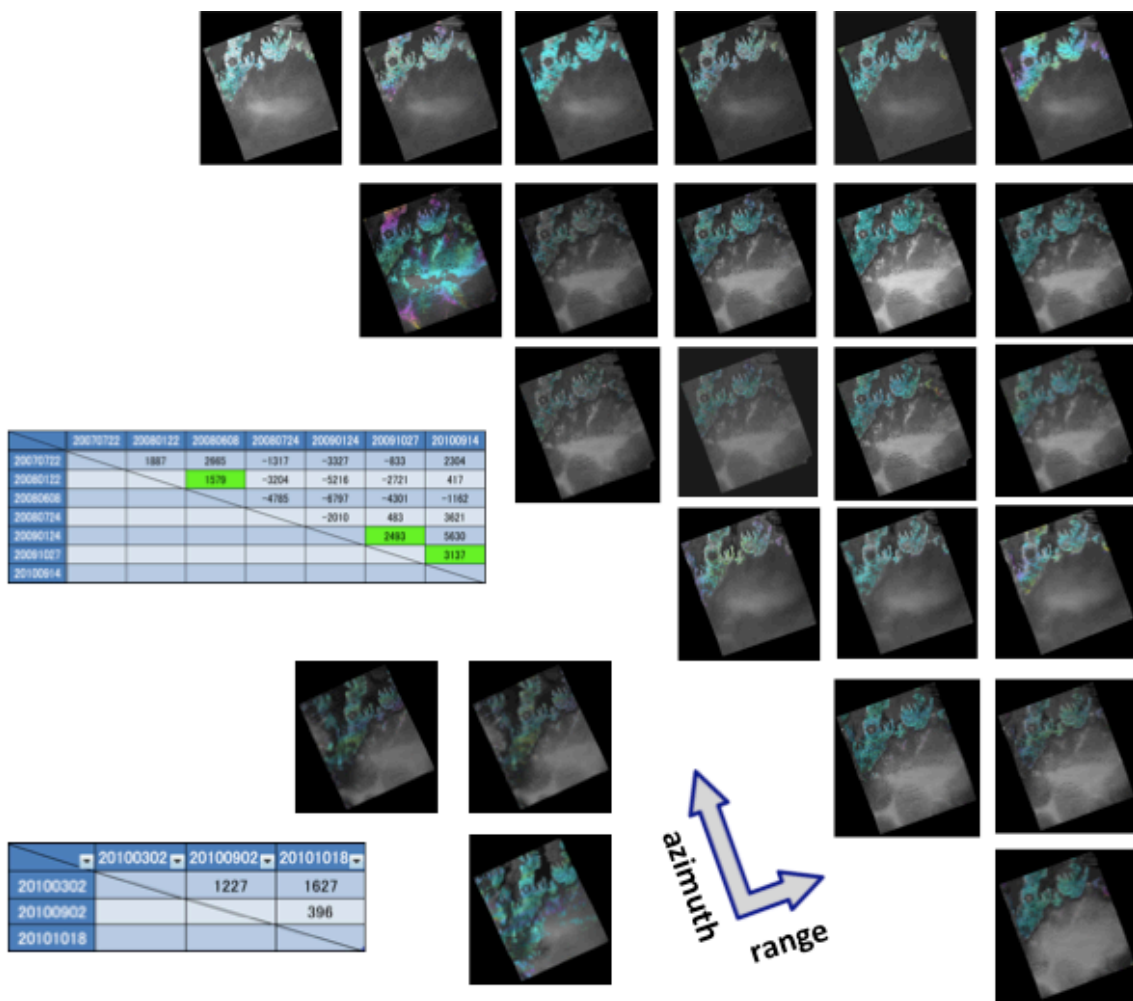


Fig.3.2.3 観測した画像一覧。図の位置は Table.3.2.2、Table.3.2.3 で表した位置に対応させている。画像は全て azimuth offset で作成したものである。

画像の北部は雪・氷に覆われていない部分なので、どのペアでもほとんどシグナルとして確認出来るが、中央の雪原部分はほとんどシグナルが確認出来ない。これは、master と slave の観測の時間間隔が空きすぎたことが原因の1つと考えられる。時が経てば地表面の状態はどんどん変化していくので、その分変動を捉えることが難しくなる。特に雪・氷は気温などの条件によって状態が変わりやすいので尚更である。もう1つ原因として考えられることは、基線長が長いということである。この基線長が長ければ長くなるほど、Pixel Offset 法を適用するのが難しくなってくる。

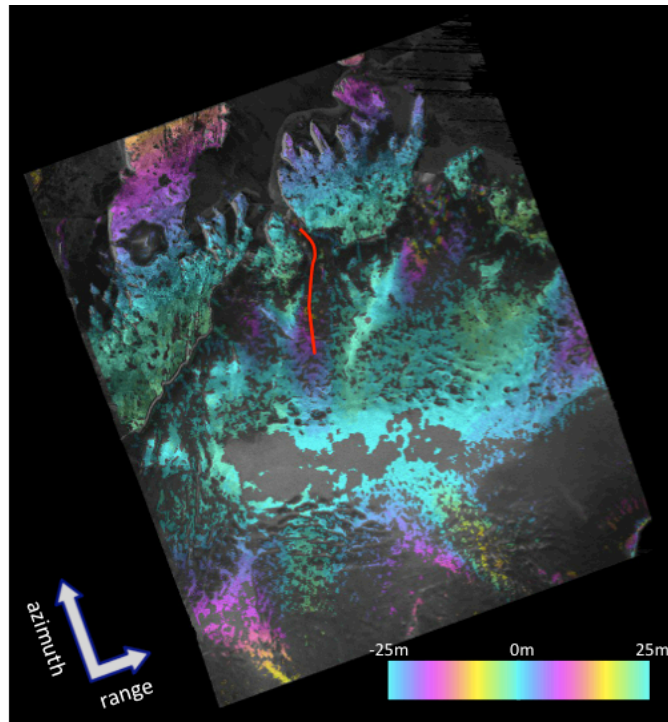


Fig.3.2.4 azimuth offset で作成した 20080122 – 20080608 の画像

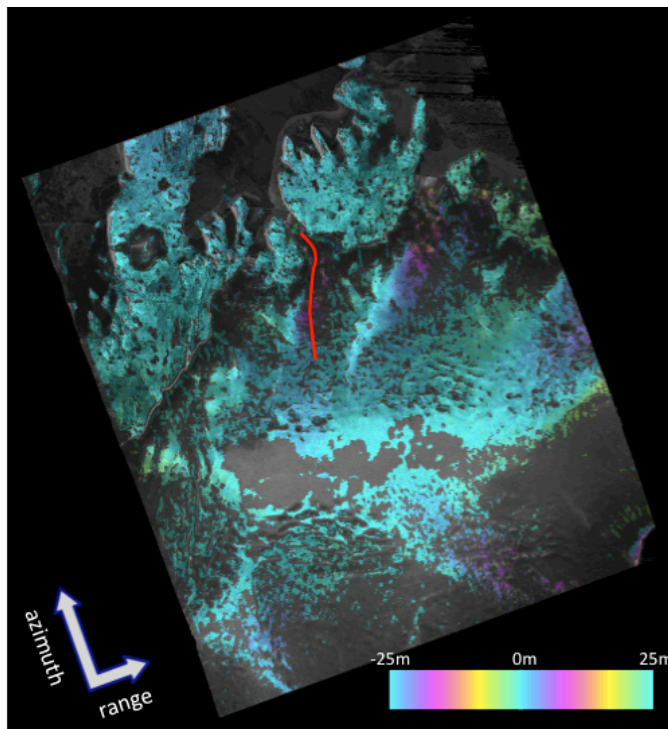


Fig.3.2.4 range offset で作成した 20080122 – 20080608 の画像

Fig.3.2.3、Fig.3.2.4 の画像では、氷河の変動が少し見づらかったので、Matlab を用いて変動を可視化した。

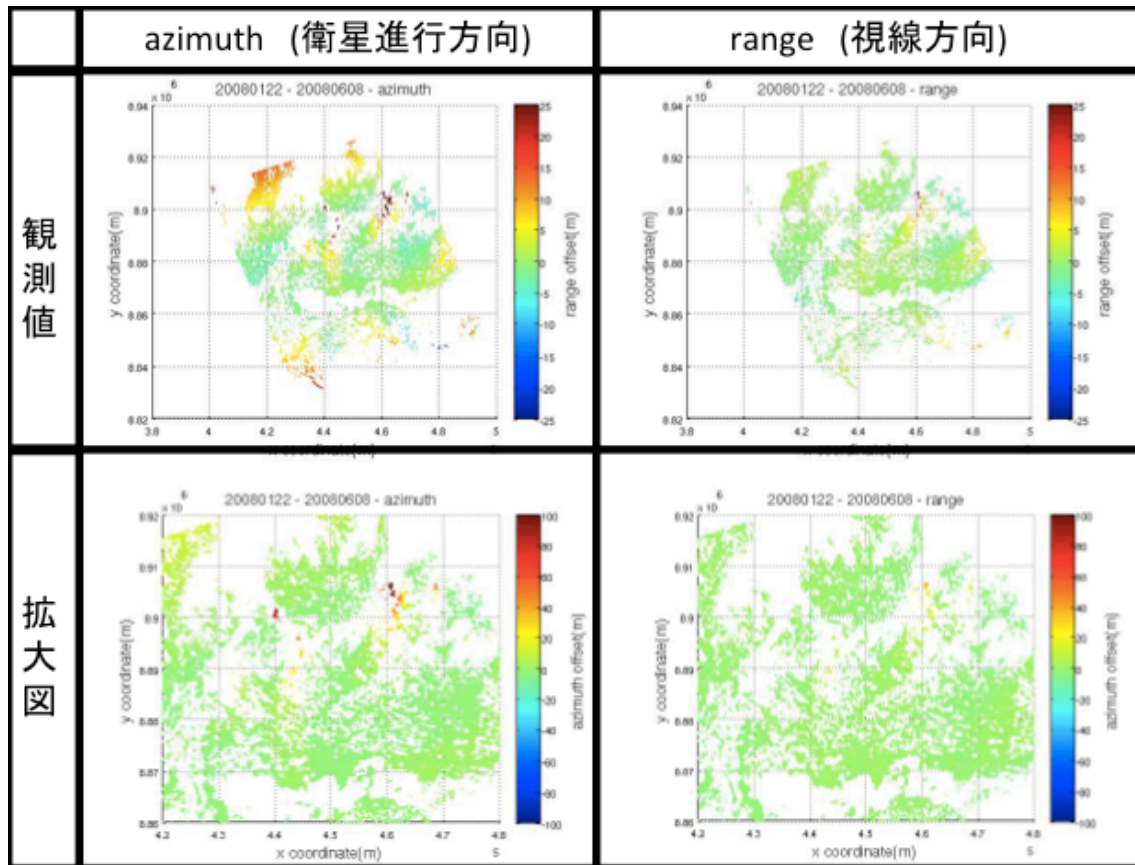


Fig3.2.5 Duvebreen 氷河の拡大図

3.3 NovayaZemlya

NovayaZemlya は北緯 70° ~ 76° 、東経 51° ~ 69° に位置する、総面積 $90,650\text{km}^2$ の島であり、ロシア領土である。人口は 2,716 人(2002 年)と少ない。ソビエト連邦時代、核実験場とされていた島で、1990 年まで核実験が行われていた。島の北部は年中氷で覆われており、氷河も多数存在する。



Fig.3.3 Google earth より引用

3.3.1 先行研究

この NovayaZemlya の氷河も、過去に SAR を用いて流動速度が調べられている(Strozzi et al, 2008)。島北部は、中央を境界として北側、南側それぞれに氷河が存在する。特に北側の氷河は流動速度が早く、年 200m 以上動く氷河もある。先行研究では、JERS-1 のデータを使って 1998 年 1 月から 3 月にかけての氷河流動を調べている。

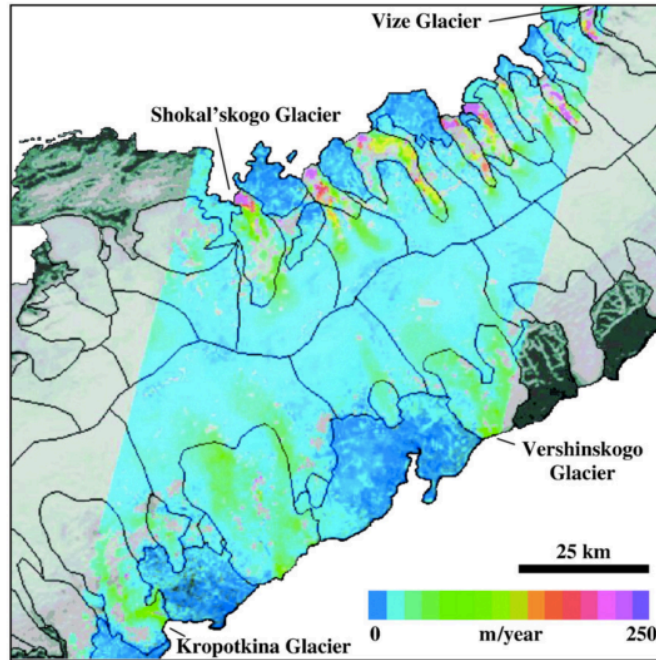


Fig.3.2.1 NovayaZemlya 北部の SAR 画像。名称が書いてあるのが氷河 (Strozzi et al., 2008 より引用)

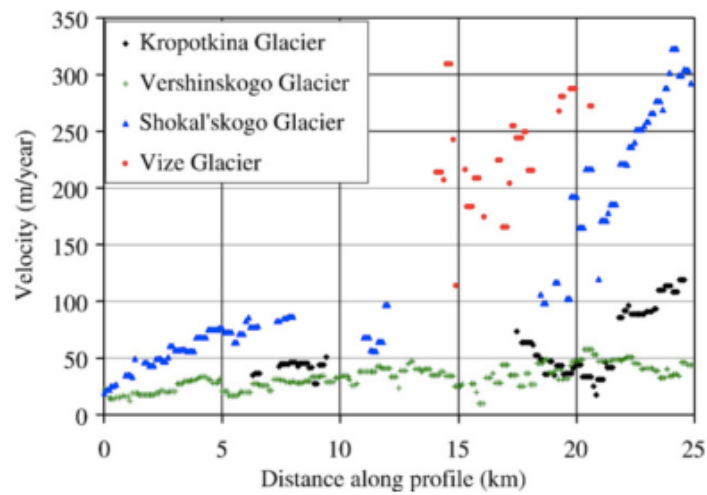


Table.3.2.1 NovayaZemlya 北部の 4 つの氷河の流動速度表。(横軸)0 から 25 に向かって下流になっている。(Strozzi et al., 2008 より引用)

この先行研究のなかでは 4 つの氷河が調べられているが、本研究ではその中の 1 つ、Vize Glacier について調べた。

3.3.2 使用データ

Svalbard と同様、こちらも ALOS/PALSAR のデータを利用した。使用したのは 2007 年 2 月から 2010 年 12 月までの 13 個の時期のデータである。下図は観測日時と、基線長を示したものである。観測日時は、年月日 = YYYYMMDD とし、縦軸が master、横軸が slave とした。

| | 20070204 | 20070807 | 20070922 | 20071223 | 20080207 | 20080809 | 20081225 | 20090209 | 20090627 | 20090812 | 20090927 | 20100330 | 20100630 | 20101231 |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 20070204 | | 1431 | 1712 | 2626 | 3570 | -3956 | -2436 | -1592 | -453 | -293 | 331 | 2671 | 2995 | 4708 |
| 20070807 | | | 281 | 1195 | 2139 | -5385 | -3866 | -3021 | -1883 | -1723 | -1099 | 1240 | 1564 | 3277 |
| 20070922 | | | | 914 | 1858 | -5667 | -4148 | -3303 | -2165 | -2004 | -1380 | 960 | 1282 | 2996 |
| 20071223 | | | | | 943 | -6580 | -5061 | -4217 | -3078 | -2918 | -2294 | 46 | 368 | 2081 |
| 20080207 | | | | | | -7523 | -6004 | -5160 | -4022 | -3861 | -3237 | -897 | -575 | 1138 |
| 20080809 | | | | | | | 1520 | 2366 | 3505 | 3666 | 4290 | 6632 | 6954 | 8669 |
| 20081225 | | | | | | | | 845 | 1984 | 2145 | 2769 | 5111 | 5433 | 7147 |
| 20090209 | | | | | | | | | 1139 | 1300 | 1923 | 4265 | 4587 | 6301 |
| 20090627 | | | | | | | | | | 161 | 785 | 3126 | 3448 | 5162 |
| 20090812 | | | | | | | | | | | 624 | 2965 | 3287 | 5001 |
| 20090927 | | | | | | | | | | | | 2341 | 2663 | 4377 |
| 20100330 | | | | | | | | | | | | | 324 | 2037 |
| 20100630 | | | | | | | | | | | | | | 1713 |
| 20101231 | | | | | | | | | | | | | | |

Table.3.3.2 Path:513 Frame:1530 の観測データ一覧。

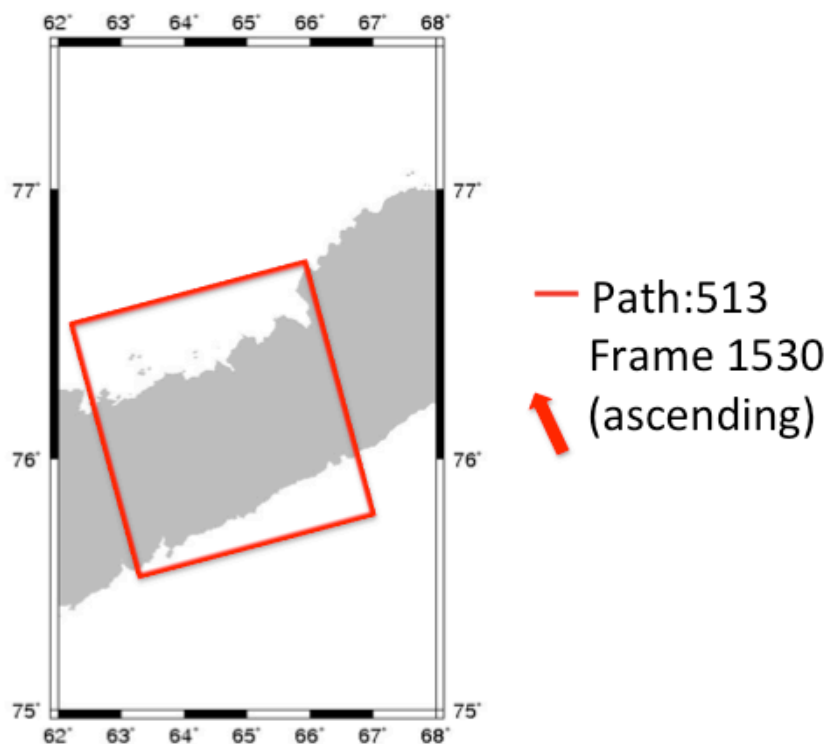


Fig.3.3.2 衛星が観測した Path, Frame の位置を表した図。

3.3.3 観測結果

Svalbard の解析結果から、良いデータを得るためには、観測期間が短く、基線長が短いという2つの条件が必要であるということが分かった。NovayaZemlya の解析では、最も近い観測日同士のペアを選び、Pixel Offset法を用いて行った。

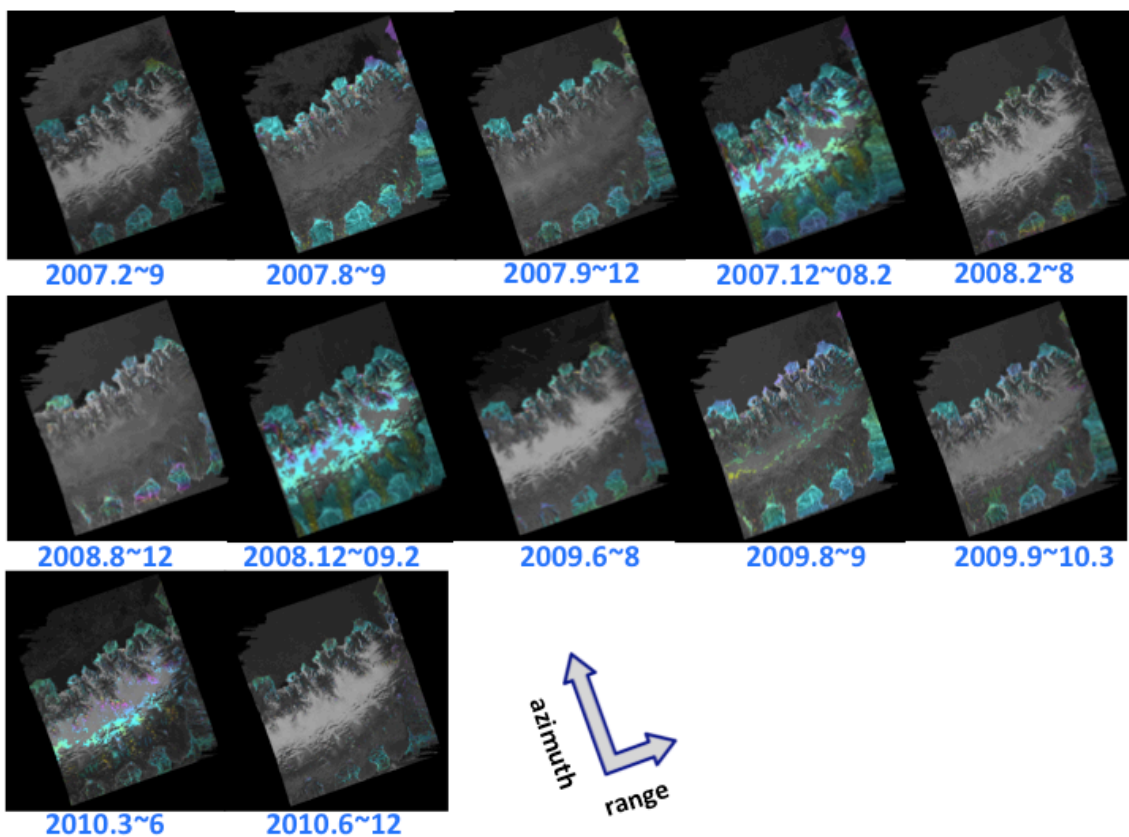


Fig.3.3.3 観測した画像一覧。画像は全て azimuth offset で作成したものである。

データから画像を作成したところ、どのペアも海岸近くの雪で覆われていない部分はシグナルが見えているが、氷河を含む中央部分の雪原で、はっきりとシグナルとして見えているのは 20071223 – 20080207、20081225 – 20090209

のみである。20070807–20070922などは、期間が46日、基線長が281mと、かなり良い条件が揃っているが、雪原でのシグナルはほとんど確認出来ない。なぜ、好条件で観測がうまくいかないのか？これは、観測した時期が夏であるためであると考えられる。この地域では夏の気温上昇で表面の雪が溶け、表面の状態が変わりやすくなっていたために、短期間でも Pixel Offset 法を用いた観測がうまくいかないのである。他のペアでも、どちらかが7~9月の期間で観測を行っているため、あまりシグナルをみることが出来なかったのである。

良い画像データが得られた20071223–20080207、20081225–20090209のペアを、MATLABを用いて数値を表した。

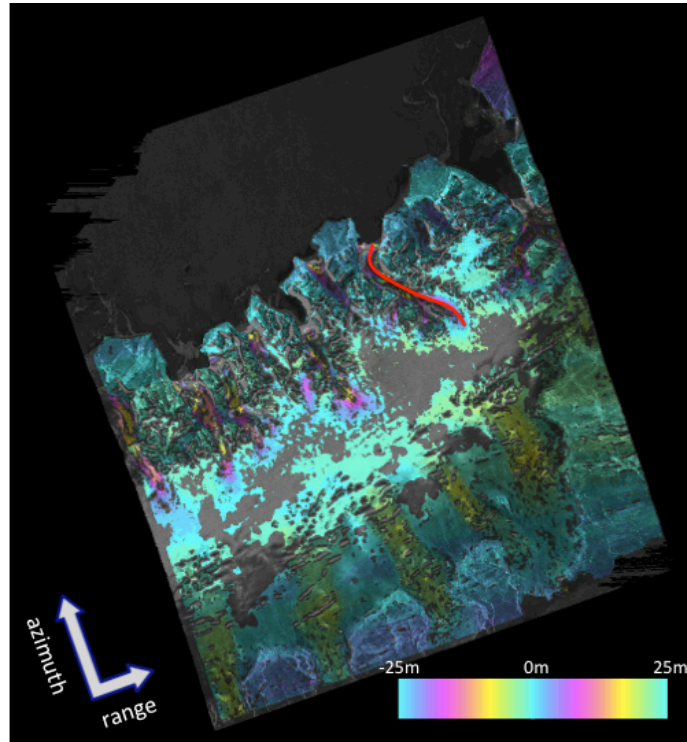


Fig.3.3.4 azimuth offset で作成した 20071223–20080207 の画像

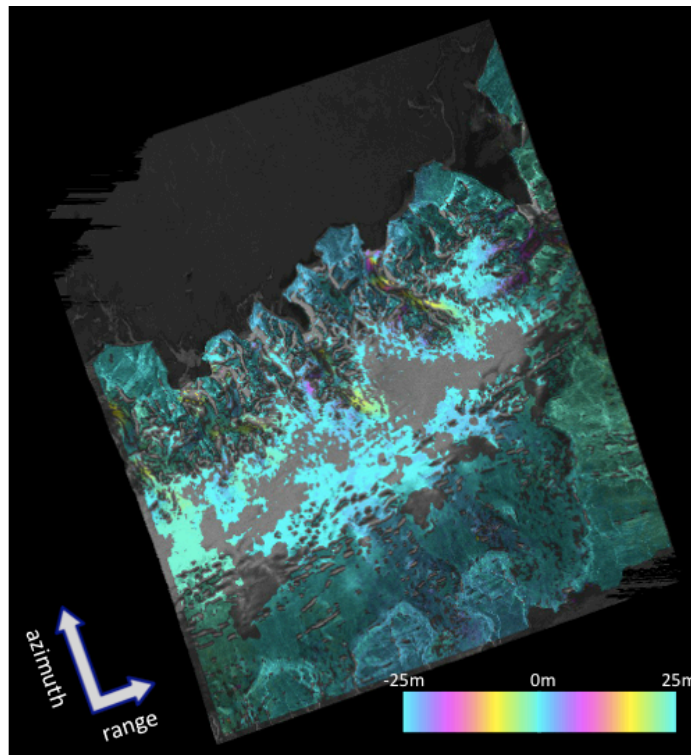


Fig.3.3.4 range offset で作成した 20071223 – 20080207 の画像

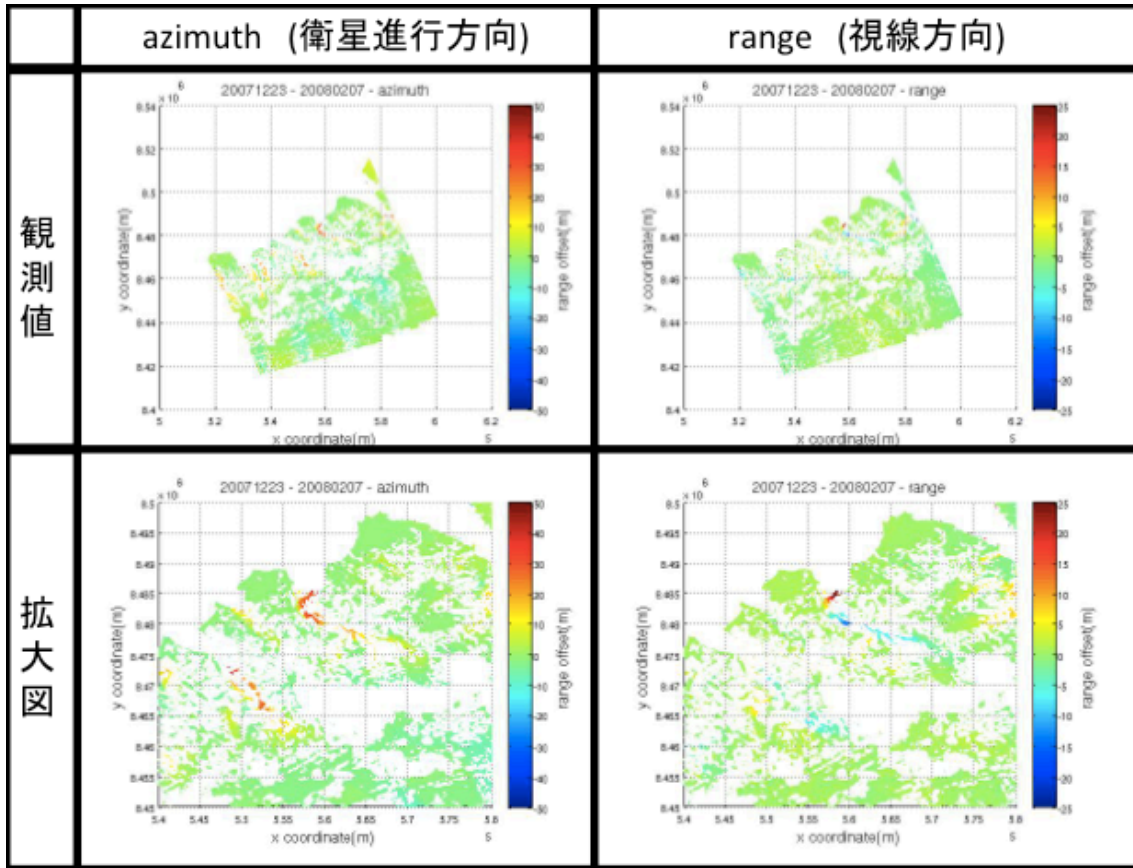


Fig.3.3.5 Vize Glacier の拡大図

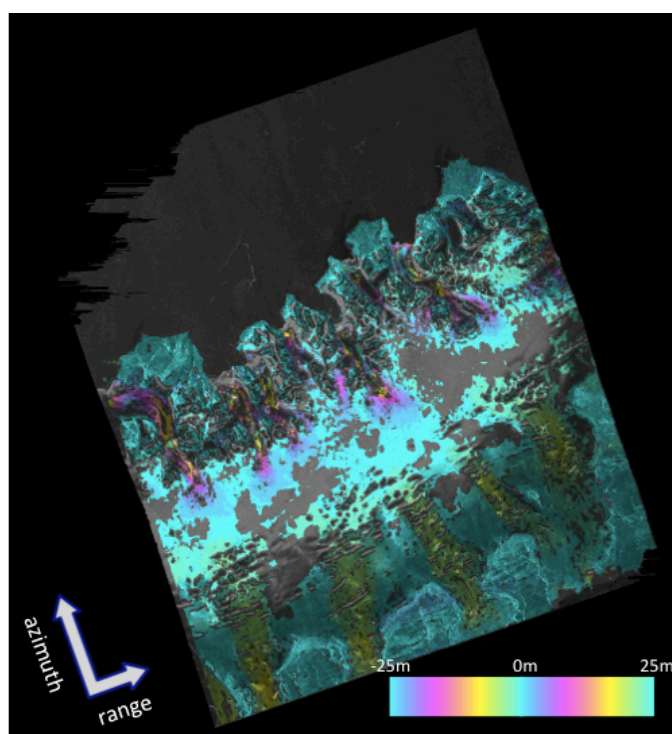


Fig.3.3.6 azimuth offset で作成した 20081225 – 20090209 の画像

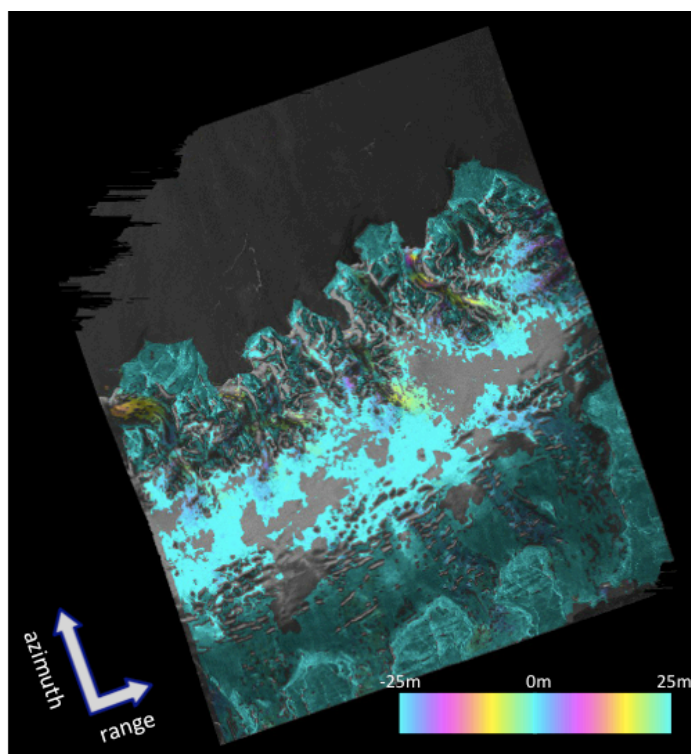


Fig.3.3.7 range offset で作成した 20081225 – 20090209 の画像

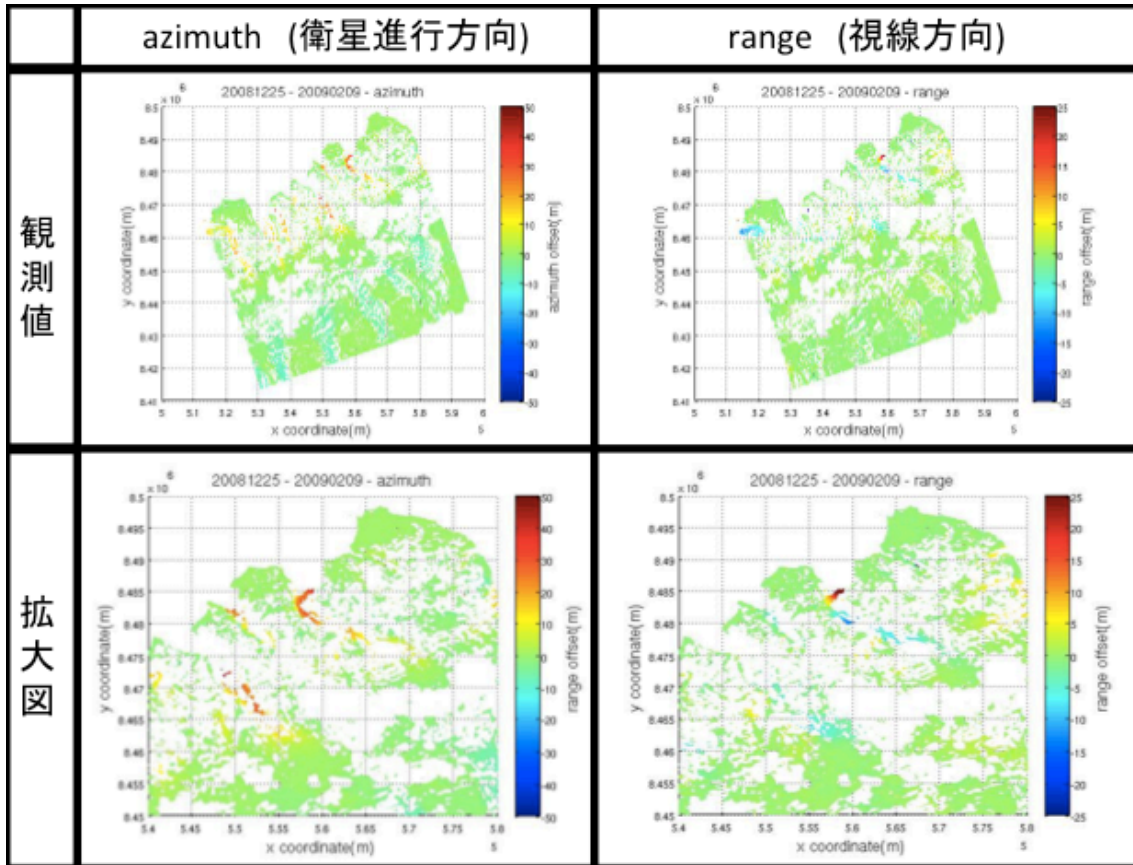


Fig.3.3.8 Vize Glacier の拡大図

4. 考察

4.1 速度推定

氷河の解析には Pixel Offset 法を用いた。この方法を用いれば氷河の azimuth (衛星進行方向)成分、range (視線方向)成分が分かるが、この成分の中には上下方向の変位も含まれてしまっている。下の式 4.1、式 4.2 のように、azimuth Offset = az、range Offset = ra の成分の中には 3 次元の変位が含まれている (Abe and Furuya., 2013)。

$$az = u_e \sin \Phi + u_n \cos \Phi \quad (4.1)$$

$$ra = u_e \cos \Phi \sin \theta - u_n \sin \Phi \sin \theta - u_z \cos \theta \quad (4.2)$$

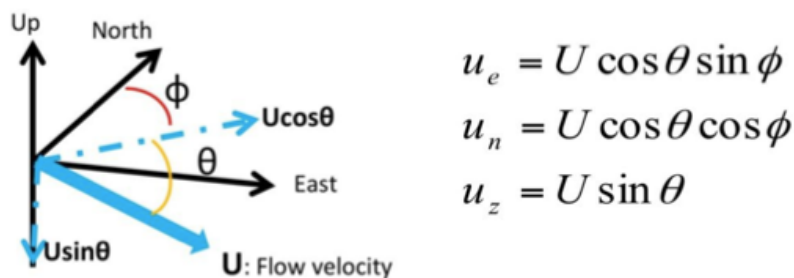


Fig.4.1 (Abe and Furuya., 2013 より引用)

東西成分(東が正) u_e 、南北成分(北が正) u_n 、上下成分(上が正) u_z

本研究では、この式を用いて氷河の流動速度を求めた。しかし、垂直成分 u_z は Pixel Offset で得られた結果からでは判断することが出来ない。そこで、他の先行研究から得られた値を用いることにした。 Φ は衛星が進む角度(北から時計回り)、 Θ はマイクロ波の入射角であり、パラメータファイルから値を計算した。 ϕ は流動の角度(北から時計回り)、 θ は流動の傾斜である。また、(365 日 / 観測間日数)を計算し、年間の速度を求めた。

4.1.1 Duvebreen

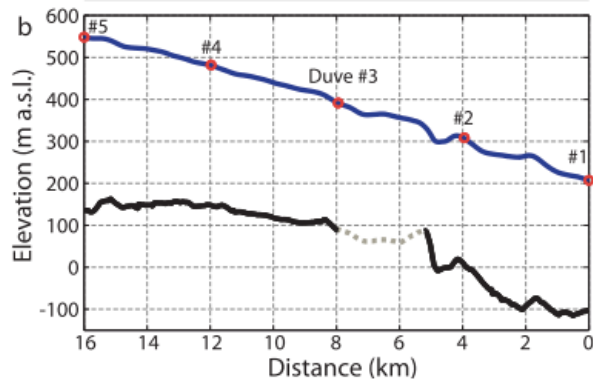


Fig4.1.1 Duvebreen 氷河の流れに沿った標高変化
(Dunse et al., 2012 より引用)

これは、GPS を使った Duvebreen 氷河の研究で行われた観測の図である。この図から計算すると、Duvebreen 氷河の平均斜度は 1° 以下であり、垂直成分の u_z はほぼ無視することが出来ると考えられる。

以上のことから、

$$\Theta = -38.1^\circ$$

$$\Phi = -19.9^\circ$$

$$\theta \doteq 0$$

$$\phi = -28.3^\circ$$

$$az = 88 \sim 90\text{m}$$

$$ra = 10 \sim 13\text{m}$$

として、式 4.1、式 4.2、Fig4.1 での式を用いて流動速度を計算すると、流動速度 U は、

$$U = 88.71 \sim 91.17\text{m}$$

$$\dots U = 234.63 \sim 241.13\text{m /year}$$

となった。

4. 1. 2 Vize Glacier

こちらは、Duvebreen 氷河とは異なり、標高を調べた研究を見つけることは出来なかった。そこで、Duvebreen 氷河と同じく、今回は垂直成分を考えず、水平方向の 2 成分のみを考えて流動速度推定を行った。この場合、正確な流動速度は出すことが出来ないが、算出した値は、実際の流動速度より速いことは無い。これを考慮に入れ、速度推定を行い、先行研究と比較する。

(20071223_20080207)

$$\Theta = -39.5^\circ$$

$$\Phi = -19.6^\circ$$

$$\theta \doteq 0$$

$$\phi = 83.1^\circ$$

$$az = 40 \sim 45\text{m}$$

$$ra = 28 \sim 32\text{m}$$

(20081225_20090209)

$$\Theta = -39.6^\circ$$

$$\Phi = -19.6^\circ$$

$$\theta \doteq 0$$

$$\phi = 81.8^\circ$$

$$az = 38 \sim 40\text{m}$$

$$ra = 25 \sim 30\text{m}$$

として、式 4.1、式 4.2、Fig4.1 での式を用いて流動速度を計算すると、流動速度 U は、

$$U = 49.75 \sim 56.29\text{m (20071223_20080207)}$$

$$U = 46.28 \sim 51.04\text{m (20081225_20090209)}$$

$$\dots U = 394.75 \sim 446.67 \text{ m /year (20071223_20080207)}$$

$$\dots U = 367.22 \sim 404.99 \text{ m /year (20081225_20090209)}$$

となった。

5. まとめ

本研究では、北極圏の Svalbard、NovayaZemlya の氷河の流動速度を検出することを目的とした。まだ不完全ではあるが、流動速度を検出することに成功した。この結果から、先行研究で観測した時よりも、流動速度が速くなっていることが分かった。この結果は、グリーンランド全域の氷河流動速度が速くなっているという近年の研究結果をふまえて、他の地域でも速くなっているということを証明した。

しかし、結果として、流動速度を求めることは出来たが、本研究で観測した 2カ所の地域では、今回速度を検出した観測データ以外は上手く画像データを作ることが出来なかった。特に Svalbard では、24 もの組合せの中から 1つのペアしか氷河の検出をすることが出来なかった。これは、時期や、基線長の長さの原因があることはほぼ間違いないが、解析方法を工夫することでもっと良いデータをとることが出来る可能性があると考えている。解析することが出来る元データは不変のものであるので、解析手法に手を加え、より良い結果を出していくことが今後の課題である。

6. 謝辞

本研究を始めるにあたり、指導教官の古屋先生には、大変お世話になりました。何も分からない状態から SAR の基本的なことから教えて頂き、研究を進めていくなかでも何度も助言をして頂きました。また、同じ研究室の方々、特に同じく氷河の研究をしている安田さん、同じ部屋の木下さんには非常にお世話になりました。安田さんは、僕の研究の内容を気にかけてくださり、困っている時にアドバイスをして頂きました。木下さんには、分からないことがあればいつも話しかけ、助言をして頂きました。鬱陶しく思うこともあったと思いますが、いつも答えて頂き、SAR の知識以外にも、研究に必要なことを知ること

が出来ました。ありがとうございました。その他にも固体系ゼミの先生方には、発表に対して意見を頂き、また研究のお手本となる発表を見させて頂きました。この場をかりて、感謝申し上げます。

なお、本研究で用いた PALSAR データは PIXEL (PALSAR Interferometry Consortium to Study our Evolving Land surface)において共有しているものであり、宇宙航空研究開発機構 (JAXA)と東京大学地震研究所との共同研究契約により JAXA から提供されたものです。PALSAR データの所有権は経済産業省および JAXA にあります。

7. 参考文献

Abe,T., and M. Furuya,(2013)Earth surface changes detected by synthetic aperture radar and their interpretations: the Iwate-Miyagi inland earthquake and glacier dynamics in Yukon, Canada

Tazio Strozzi, Alexei Kouraev, Andreas Wiesmann, Urs Wegmüller, Aleksey Sharov, Charles Werner(2008)Estimation of Arctic glacier motion with satellite L-band SAR data , Remote Sensing of Environment 112 (2008) 636–645

T.moon, I.Joughin, B.Smith, I.Howat(2012):21st-Century Evolution of Greenland Outlet Glacier Velocities DOI: 10.1126/science.1219985 Science 336, 576 (2012)

T.Douse, T.V.Schuler, J.O.Hagen, and C.H.Rejimer(2012):Seasonal speed-up of two outlet glaciers of Austfonna, Svalbard, inferred from continuous GPS measurements , The Cryosphere, 6, 453–466, 2012

Masato Furuya(2006):InSAR: A NEW Trend in Crustal Deformation Measurement , Journal of the Geodetic Society of Japan Vol52, No.4, pp225-243, 2006

大内和夫 (2004):リモートセンシングのための合成開口レーダの基礎 第2版
東京電機大学出版局

飛田幹男・藤原 智・村上 亮・中川弘之・矢来博司 (2001) :SAR画像のマッチングによる有珠山周辺の面的な三次元地殻変動, 変動速度, 体積変化, 国土地理院時報 No. 95

国土地理院 HP <http://www.gsi.go.jp/>

(C) JAXA http://www.jaxa.jp/index_j.html