

ALOS/PALSAR を用いた 西クンルン山脈とテンシャン山脈の 山岳氷河流動の検出

北海道大学理学部地球科学科 4 年

宇宙測地学研究室

22090081

白幡 雄大

指導教官 古屋正人

仮提出日：2013 年 1 月 31 日

本提出日：2013 年 2 月 26 日

概要

昨今,合成開口レーダー(SAR:Synthetic Aperture Radar)のデータ解析によって,山岳氷河の流動速度に関して時空間的な多様性が報告されている.西クンルン山脈の山岳氷河については,Yasuda and Furuya (2013)によって,氷河の流動速度の季節・経年変化や,氷河の流動速度が短期間に数倍から数十倍に上昇し,末端が大きく前進する氷河サージと呼ばれる現象が報告されている.そこで,本研究では Yasuda and Furuya (2013)で調査された地域とは別の西クンルン山脈の地域やテンシャン山脈における,氷河の流動速度の季節・経年変化や氷河サージの有無を調査することを目的とし,ALOS(Advanced Land Observing Satellite)に搭載された合成開口レーダー-PALSAR が取得したデータを用いた氷河流動速度の検出を行った.なお,データの解析には Pixel Offset 法を用いた.

一つ目の研究地域である西クンルン山脈では,冬季の氷河流動を検出することが出来た.2008年から2010年にかけて冬季の流動速度に経年変化は見られなかった.また,夏季の氷河流動はノイズや欠損が多かったため,流動速度の比較を行うことはできなかった.

二つ目の研究地域であるテンシャン山脈では,夏季のペアの解析結果にノイズが多く見られるものの,全ての時期について流動速度の比較をすることが出来た.詳しく流動速度の比較を行った4つの氷河のうち3つの氷河について顕著な季節変動が見られ,いずれの氷河についても夏季に流動速度が上昇していた.また,これら4つの氷河には顕著な経年変化も見られた.季節変化は,気温の変化による氷河底面への融解水の流入量の変化が原因である可能性が高い.しかし,経年変化については氷河ごとの経年変化の傾向が多様であるため,その原因の推定には至らなかった.

目次

| | |
|-----------------------------------|----|
| 1 はじめに | 1 |
| 1.1 本研究の目的..... | 1 |
| 1.2 衛星による測地..... | 2 |
| 1.3 合成開口レーダー | 3 |
| 1.3.1 SAR の画像再生 | 4 |
| 1.4 Pixel Offset 法..... | 6 |
| 1.5 Offset 値から流動速度への変換 | 7 |
| 1.6 ALOS/PALSAR | 9 |
| 2 西クンルン山脈の山岳氷河..... | 11 |
| 2.1 観測地域..... | 11 |
| 2.2 使用したデータと解析方法 | 11 |
| 2.3 結果..... | 12 |
| 2.4 考察..... | 17 |
| 2.4.1 地形に見られる変動量について | 17 |
| 2.4.2 流動速度とその経年変化について..... | 17 |
| 3 テンシャン山脈の山岳氷河..... | 18 |
| 3.1 観測地域..... | 18 |
| 3.2 使用したデータ | 18 |
| 3.3 結果..... | 19 |
| 3.3.1 表面速度の季節変化および経年変化のある氷河 | 22 |
| 3.3.1.1 Tugebieliqi 氷河..... | 22 |
| 3.3.1.2 Qiongtelian 氷河..... | 24 |
| 3.3.1.3 Yuzhny Inylchek 氷河 | 26 |

| | |
|----------------------------|----|
| 3.2.1.4 Tuomuer 氷河 | 28 |
| 3.4 考察..... | 31 |
| 3.4.1 夏季の流動速度の増加について | 32 |
| 3.4.2 経年変化の多様性について | 32 |
| 4 まとめ..... | 33 |
| 5 謝辞 | 34 |
| 6 参考文献..... | 35 |

1 はじめに

1.1 本研究の目的

本研究は,ALOS/PALSAR が 2007 年 1 月から 2011 年 2 月までに取得したデータを使用して,西クンルン山脈とテンシャン山脈の二つの地域の山岳氷河の流動を調査することを目的としている.

本研究の背景には,昨今の山岳氷河の流動速度の時空間的多様性の報告がある.西クンルン山脈とテンシャン山脈では,氷河の流動速度の季節変化や経年変化に加え,氷河サージと呼ばれる現象が報告されている.氷河サージとは,氷河が短期間に通常の数倍から数十倍の速度で流動を起こし,時には氷河末端が数 km も前進する現象である.現在では,世界中のほとんど全ての氷河地域でサージが起こったことが報告されており(基礎雪氷学講座IV 氷河,1997,古今書院),西クンルン山脈でも,Yasuda and Furuya (2013)によって氷河サージが起こったことが報告されている. 本研究では,ALOS/PALSAR によって得られたデータに Pixel Offset 法を適用することで解析を行い,二つの地域の氷河の流動速度の分布を作成する.また,氷河の流動速度の季節変化や経年変化についての考察を行う.なお,2012 年 12 月に Li et al. (2012)によって,本研究と同じテンシャン山脈の地域で同様の研究が発表されているが,今回は Li et al. (2012)によって明らかにされた現象以外の新たな知見を発見した.

1.2 衛星による測地

1970年代以降、測地技術の発展に伴い VLBI(Very Long Baseline Interferometry),SLR(Satellite Laser Ranging),GPS(Global Positioning System)などの宇宙測地技術が実用化されてきた。このことにより、宇宙からの観測による高い時間分解能での位置情報の獲得が可能となった。特に、GPS は時間分解能が非常に高く地表変動の観測によく用いられている。しかし、これらの測地技術には「地上に電力供給が必要となる観測点が必要である」という短所が存在する。そのため、事前に発生場所が分からない地震や観測点の設置が困難な環境にある氷河の流動の観測には適用が難しい。

そうした中、1990年代から地表変動の観測技術の一つとして合成開口レーダー(SAR : Synthetic Aperture Rader)が注目を浴びてきた。SARは、マイクロ波を地表に向けて照射し、地表からの反射波を受信することにより、昼夜や天候にかかわらず地表を観測することができる。そのため、地表に観測点を設置する必要が無く、GPS などの技術では観測が困難だった事象や地域を高い空間分解能で観測することが出来る。また、SAR ではマイクロ波が照射される面全体を観測することが出来るので、広範囲の観測を行うことが出来る。これらの利点により、現在までの SAR の応用範囲は多岐にわたる。地殻変動や氷河流動の観測、湿原調査など多くの分野で用いられており、このことは地表変動の検出における SAR の有用性を示している。

1.3 合成開口レーダー

合成開口レーダー(SAR : Synthetic Aperture Radar)は,衛星や航空機などに搭載されたアンテナを用いて,地表に対しマイクロ波の照射と反射波の受信を連続的に行うことで仮想的に大きなアンテナを合成し,高い分解能のレーダー画像を生成する能動型のレーダーである(Fig 1.1).

合成開口技術を用いない実開口レーダー(RAR : Real Aperture Rader)によって得られるデータのアジマス方向 (プラットフォームの進行方向) の分解能は,照射面のビーム幅によって決まり,アジマスビーム幅は以下のような式で表される.

$$\lambda R/D_A \quad (1.1)$$

(λ : 波長, R : レンジ距離, D_A : アンテナの長さ)

この式から分かるように,アジマス方向の分解能はアンテナが大きいくほど向上する.しかし,衛星などのプラットフォームに搭載することが出来るアンテナのサイズには限界がある.そこで,合成開口技術を用いて仮想的に大きなアンテナを合成することで,アジマス方向の高分解能を達成している(Fig 1.2).

また,レンジ方向 (プラットフォームの視線方向) に高分解能を得ようとする場合,非常に短い高圧パルスを連続して放射する必要があるが,衛星などのプラットフォームに搭載されているレーダーでは電源供給に限界がある.そこで,チャープパルスを使った信号処理をほどこし高分解能を得るパルス圧縮技術が用いられている.このようにして,レンジ方向についても高分解能を達成している.

以下,SAR の画像再生を行う過程と,その中で用いられるパルス圧縮処理と合成開口処理について説明する.

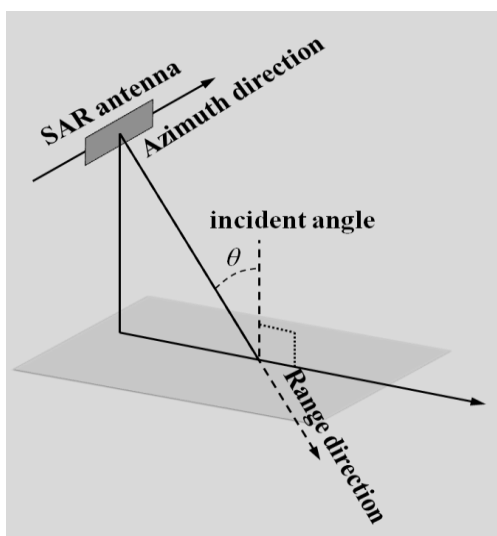


Fig 1.1 SAR のジオメトリ

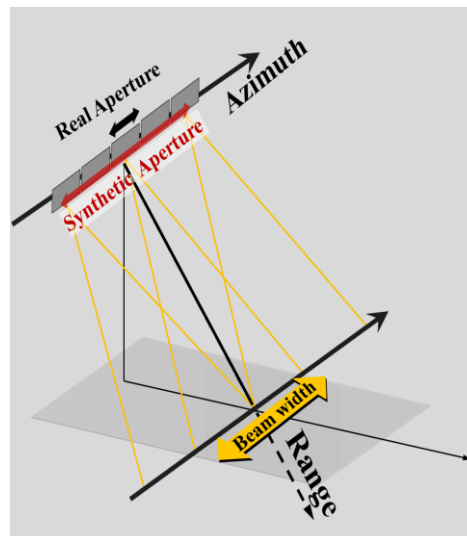


Fig 1.2 合成開口技術の原理

1.3.1 SAR の画像再生

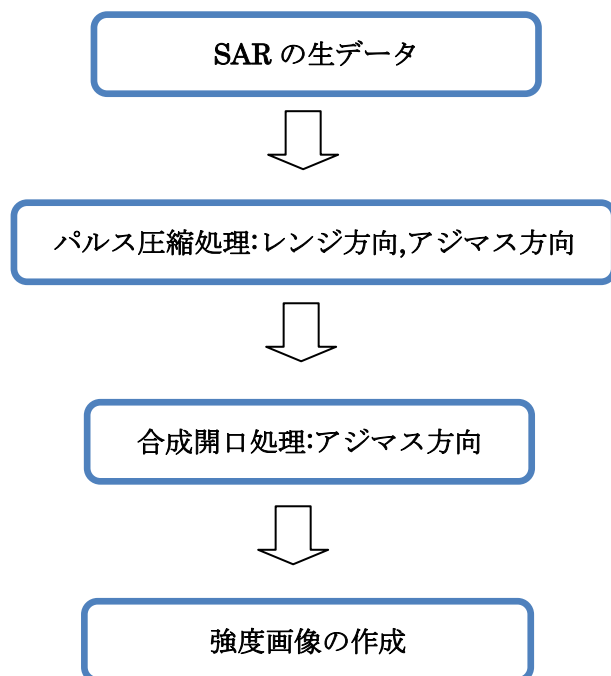


Fig 1.3 SAR の画像再生の流れ

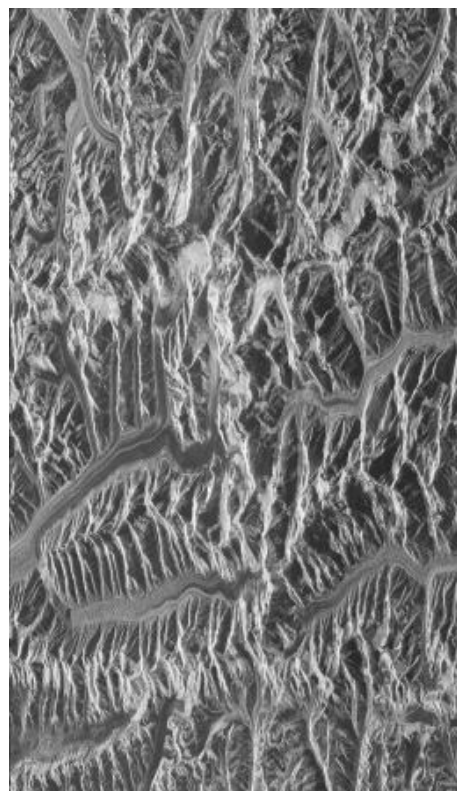


Fig 1.4 強度画像

SAR の生データ画像は,そのまま見ただけでは何も分からない.そこで,この生データにパルス圧縮処理と合成開口処理を施し,SLC 画像を生成する.SLC 画像は複素数のデータであり,この画像から反射強度を画像にした強度画像を生成する.以下,その過程を詳しく説明する.

①パルス圧縮処理

SAR では,チャープパルスをレンジ方向に放射し,対象物体で後方散乱した電磁波を受信した後,位相検波器を介して複素信号として記録する.チャープパルスとは,周波数が時間とともに線形に変化する線形 FM パルス(Linear Frequency Modulation Pulse)のことであり, $\text{Rect}(t/T_p)$ を長さ T_p の矩形関数とすると次の式で表される.

$$v(t) = \text{rect}(t/T_p) \cos\{\psi(t)\} \quad (1.2)$$

$$\text{ただし, } \psi(t) \equiv 2\pi(f_c t + K_r t^2 / 2) \quad (1.3)$$

パルス持続時間 T_p は決まっているため,周波数が変化する幅が決まり,その幅はバンド幅 B_w^r として定義される.

$$B_w^r \equiv K_r T_p \quad (1.4)$$

散乱体の情報はこの帯域に保存されており,レンジ距離を R_0 で散乱し, $t_0 = 2R_0/c$ とすると,受信するデータは,

$$u_r = \text{rect}\left\{\frac{t-t_0}{T_p}\right\} \exp\{i\psi(t-t_0)\} \quad (1.5)$$

となる.

記録時に高周波の成分 $f_c t$ は,フィルタによって落とされ,低周波のみ複素数データとして保存される.

$$v_r^* = \text{rect}\left\{\frac{t-t_0}{T_p}\right\} \exp\{i\psi(t-t_0)\} \quad (1.6)$$

$$\Psi(t-t_0) \equiv 2\pi\left\{K_r \frac{(t-t_0)^2}{2} - f_c t_0\right\} \quad (1.7)$$

この式で表されているのが,記録されるレンジ成分の生データであるが,整合フィルタにかけられることによって,次の式が抽出される.

$$T_{\text{out}}(t) = T_p \text{sinc}\{K_r T_p (t-t_0)\} \quad (1.8)$$

レーリー分解能を基準として使用すると,このパルスの継続時間 T_{out} は,

$$T_{\text{out}} = \frac{1}{K_r T_p} \quad (1.9)$$

となる.

チャープパルスを用いない場合のレンジ分解能は,

$$\Delta r = \frac{c T_p}{2} \quad (1.10)$$

であるから,チャープパルスを用いた場合のレンジ分解能は,

$$\Delta r_{\text{out}} = \frac{c T_{\text{out}}}{2} = \frac{c}{2 K_r T_p} \quad (1.11)$$

となる.

式(1.10)と式(1.11)より,チャープパルスを用いることによって,レンジ分解能は, $1/K_r T_p^2$ 倍になり,圧縮されていることが分かる.以上のようにして,レンジ方向の分解能を向上させている.

②合成開口処理

ここでは、受信信号をアレー状に並べ、仮想的に大きなアンテナを合成し、この大きなアンテナから鋭いビームを照射しているような信号処理を行う。これに加えて、アンテナと観測対象の相対的なレンジ距離の時間変化によって生じるドップラー効果を用いて、パルス圧縮処理をアジマス方向にも適用する。これによって、アジマス方向について高い分解能を得ることができ、アジマス分解能は次の式のように表される。

$$\Delta a = \frac{D_A}{2} \quad (1.12)$$

ここで注目すべきなのは、アジマス分解能がアンテナの長さにもみ比例し、波長やレンジ距離によらない点である。したがって、アジマス分解能を向上させるためには、アンテナの長さを小さくすればよい。

③強度画像の作成

パルス圧縮処理と合成開口処理が完了すると得られる画像が SLC 画像である。SLC 画像は、複素数のデータである。この複素数のデータの実部と虚部の二乗和の平方根を取ることによって反射強度を画像にした強度画像を生成することが出来る。

以上が、生データから強度画像を生成するまでの工程である。このような工程を経て、Fig1.4 のような強度画像が作成される。

1.4 Pixel Offset 法

Pixel Offset 法は、二時期に取得した SAR 画像の全体的なずれを除去した後に残る局所的なずれを地表変位量として解釈し、地表の変動を捉える技術である。

二時期に取得した SAR 画像には主に二つのずれが存在する。(1)データを取得した時のセンサーの位置や姿勢の違いから生じる画像全体のずれと(2)地表にある物体の位置が変化するために生じる局所的なずれである。(1)のずれは、最小二乗的に求めた多項式によって補正され、除去される。画像全体のマッチングが完了した後に(2)の量が残るが、この量を地表変位量と解釈する。複数のピクセルで構成される領域を設定し、二時期の画像間で対応する領域の面積相関を、位置を変えながら求め、相関係数が最大となる位置を同じものと考え、その変位量を算出する。変位量は、式(1.13)に示される Range Offset(ra)と Azimuth Offset(az)という値で求められる。

$$\begin{aligned} ra &= u_e \cos H \sin \theta - u_n \sin H \sin \theta - u_z \cos \theta \\ az &= u_e \cos H + u_n \sin H \end{aligned} \quad (1.13)$$

ただし,H は衛星進行方向を真北から時計回りに測った **Heading** 角であり, θ は地表への入射角である。Ascending 軌道の ALOS/PALSAR の場合, $H=-8^\circ$, $\theta=39^\circ$ であるので,これらの値を代入すると,

$$\begin{aligned} ra &= 0.62 \times u_e + 0.11 \times u_n - 0.78 \times u_z \\ az &= -0.17 \times u_e + 0.98 \times u_n \end{aligned} \quad (1.14)$$

Pixel Offset 法の長所は,InSAR では捉えることが出来ない局所的な大変位を捉えることが出来る点と,レンジ方向の変位に加え,アジマス方向の変位も検出することが出来る点である。ただし,InSAR に比べ,精度が低いという短所も存在する。

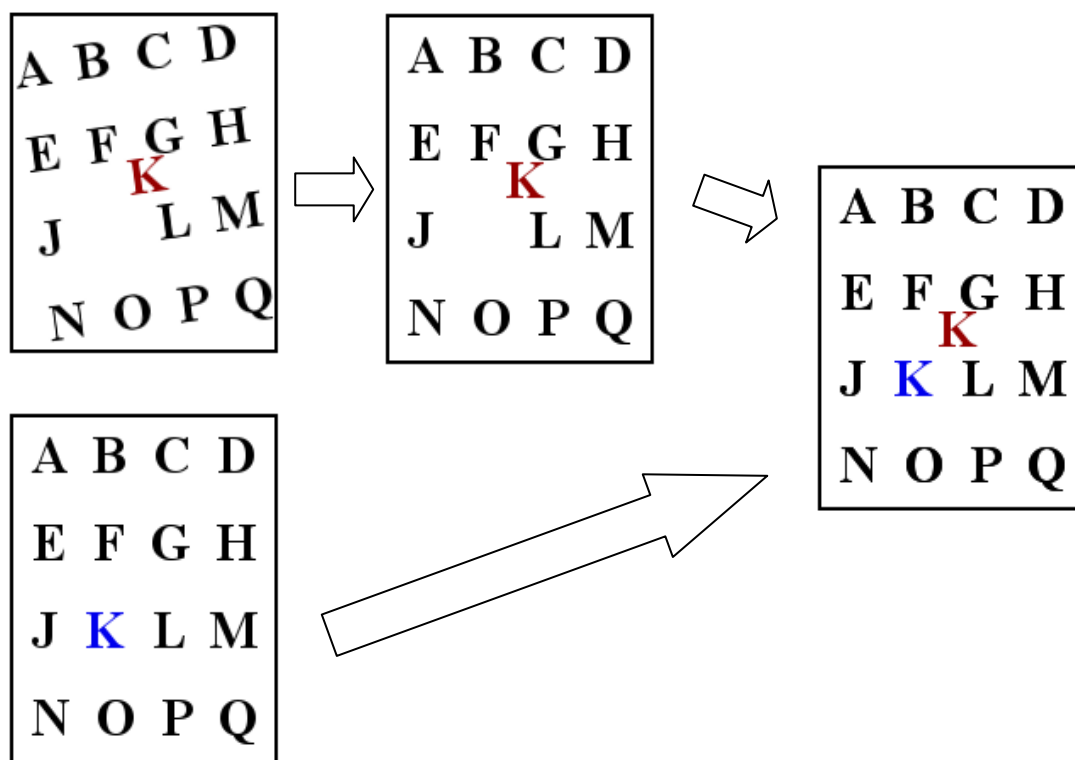


Fig 1.5 Pixel Offset 法のイメージ(Tobita et al. 2001)

1.5 Offset 値から流動速度への変換

Pixel Offset 法で求められた値(Range Offset, Azimuth Offset)は,東西,南北,鉛直方向の変動量にそれぞれ重み付けがされたものの和である。これらの値から,氷河の流動速度を近似的に求める。式(1.15)は,Range Offset と Azimuth Offset の式を行列の形にまとめたものである。

$$\begin{pmatrix} ra \\ az \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0.62 & 0.11 & -0.78 \\ -0.17 & 0.98 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_e \\ u_n \\ u_z \end{pmatrix} \quad (1.15)$$

この式に(1.15)式を使って座標変換を施すと,(1.16)式のようにになる.

$$\begin{aligned} u_e &= U \cos \theta \sin \varphi \\ u_n &= U \cos \theta \cos \varphi \\ u_z &= U \sin \theta \end{aligned} \quad (1.15)$$

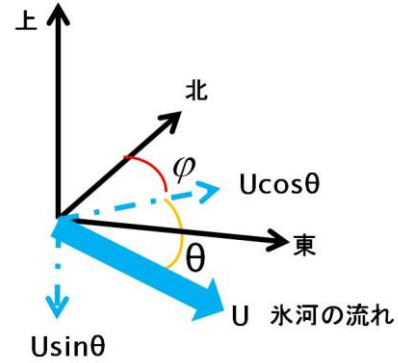


Fig 1.6 座標変換

$$\begin{pmatrix} ra \\ az \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0.62 * \sin \varphi - 0.11 * \cos \varphi & -0.78 \\ -0.17 * \sin \varphi + 0.98 \cos \varphi & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} U \cos \theta \\ U \sin \theta \end{pmatrix} \quad (1.17)$$

この式を変形すると,式(1.17)のようにになる.

$$\begin{bmatrix} U \cos \theta \\ U \sin \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.62 * \sin \varphi - 0.11 * \cos \varphi & -0.78 \\ -0.17 * \sin \varphi + 0.98 * \cos \varphi & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} ra \\ az \end{bmatrix} \quad (1.18)$$

ここで,水平方向の流動方向 φ を求める.Range Offset と Azimuth Offset の値は,式(1.17)で表されるが,氷河の鉛直方向の変動は,東西,南北方向の変動に比べて小さいので,一旦, u_z を無視して,式(1.17)を考える.未知量二つに対して,既知量も二つあるので,連立方程式を解くと, u_e と u_n を求めることができる.

$$\begin{aligned} ra &= 0.62 \times u_e + 0.11 \times u_n - 0.78 \times u_z \\ az &= -0.17 \times u_e + 0.98 \times u_n \end{aligned} \quad (1.19)$$

$$\begin{aligned} ra &= 0.62 \times u_e + 0.11 \times u_n \\ az &= -0.17 \times u_e + 0.98 \times u_n \end{aligned} \quad (1.20)$$

Fig 1.7 を考えると,氷河の水平方向の流動方向は,式(1.21)によって求めることができる.

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{u_e}{u_n} \right) \quad (1.21)$$

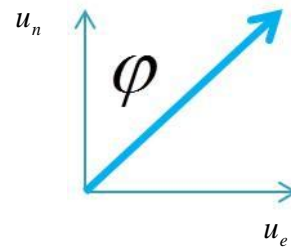


Fig 1.7 氷河の水平方向の流動方向

式(1.17)の右辺は全て既知量となったので,その値を実数 a, b を用いて以下のように表す.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} U \cos \theta \\ U \sin \theta \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0.62 * \sin \varphi - 0.11 * \cos \varphi & -0.78 \\ -0.17 * \sin \varphi + 0.98 * \cos \varphi & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} ra \\ az \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1.22)$$

2行目の式を1行目の式で割って整理すると,以下ようになる.

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{b}{a} \right) \quad (1.23)$$

以上より,式(1.23)について,氷河の流れの向きへの変動量 U 以外の値が求められたので, U を計算することができる. U を期間で割れば,1日あたりの氷河の流れの向きへの速度を導出することができる.

1.6 ALOS/PALSAR

ALOS(Advanced Land Observing Satellite)は,宇宙航空研究開発機構(JAXA)により,2006年1月24日に打ち上げられた陸域観測技術衛星である.2011年5月に運用を停止したが,ALOSによって得られた観測データは,様々な分野で活用されており,地域観測や災害時の状況把握,資源の探査などに貢献してきた.

ALOSには,PRISM(パンクロマチック立体視センサー),AVNIR-2(高性能可視赤外放射計2型),PALSAR(フェーズドアレイ方式Lバンド合成開口レーダー)の三つの観測機器が搭載されているが,本研究では,PALSARによって得られたデータを使用した.PALSARは,能動型のマイクロ波センサーであり,高分解能モード(FBS,FBD)や広観測域モードなどを持っている.高分解能モードには,FBSとFBDというモードがあり,受信する偏波が異なる.FBDは,バンド幅が14MHzであるのに対し,FBSは28MHzである

め,FBDでの分解能はFBSでの分解能の半分に低下する.また,PALSARは,Lバンドという波長23.5cmのマイクロ波を使用している.Lバンドは,CバンドやXバンドのような波長の短いものよりも透過性が高いため,植生の影響を受けにくい特徴がある.Table1.1にALOS/PALSARの主な性能を示す.

| | | |
|---------|---------------|----------------|
| 軌道高度 | 約 690km | |
| 回帰日数 | 46 日 | |
| 軌道傾斜角 | 約 98° | |
| 波長 | 23.6cm (Lバンド) | |
| 入射角 | 8~60° | |
| オフナディア角 | 34.3° | |
| Mode | FBS | FBD |
| バンド幅 | 28MHz | 14MHz |
| 偏波 | HH VV | HH+HV VV+HH |
| 地上分解能 | 7~44m | 14~88m |

Table1.1 ALOS/PALSARの主な性能



Fig 1.8 ALOS/PALSARのイメージ

2 西クンルン山脈の山岳氷河

2.1 観測地域

本研究の一つ目の観測地域である西クンルン山脈は,タリム盆地南部,中国チベット自治区と新疆ウイグル自治区の境界付近に位置する.標高 6000m 以上の高山が数百峰連なっており,Yasuda and Furuya (2013)の中で,氷河の流動の時間的,空間的多様性が報告されている.

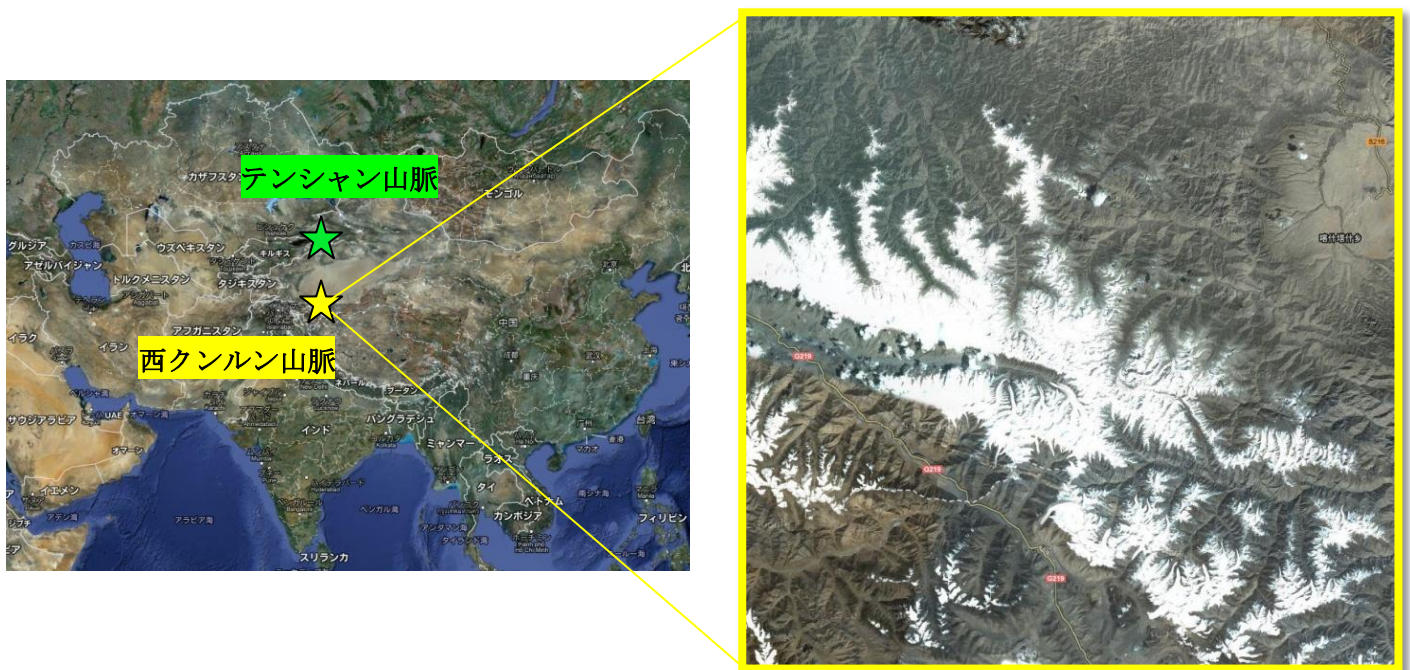


Fig 2.1 西クンルン山脈の位置

2.2 使用したデータと解析方法

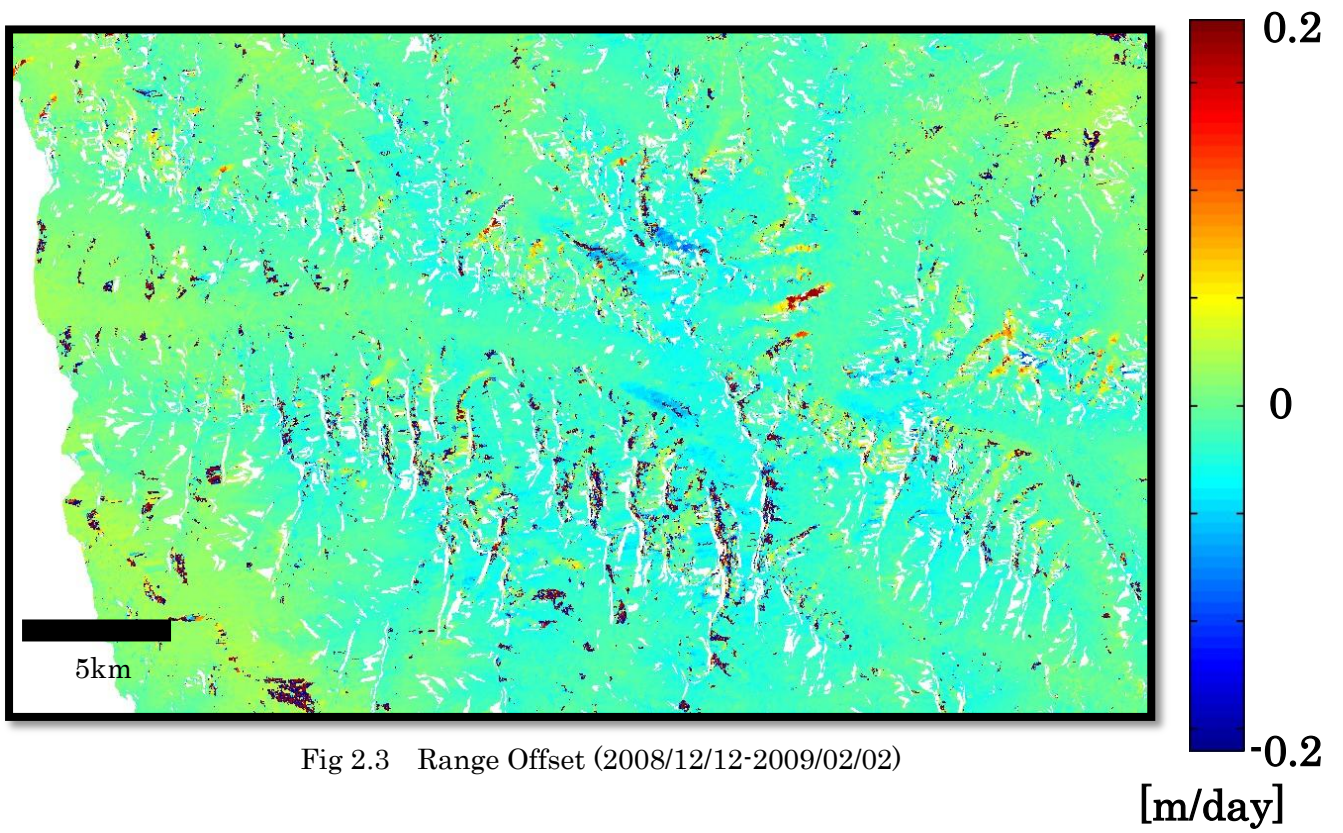
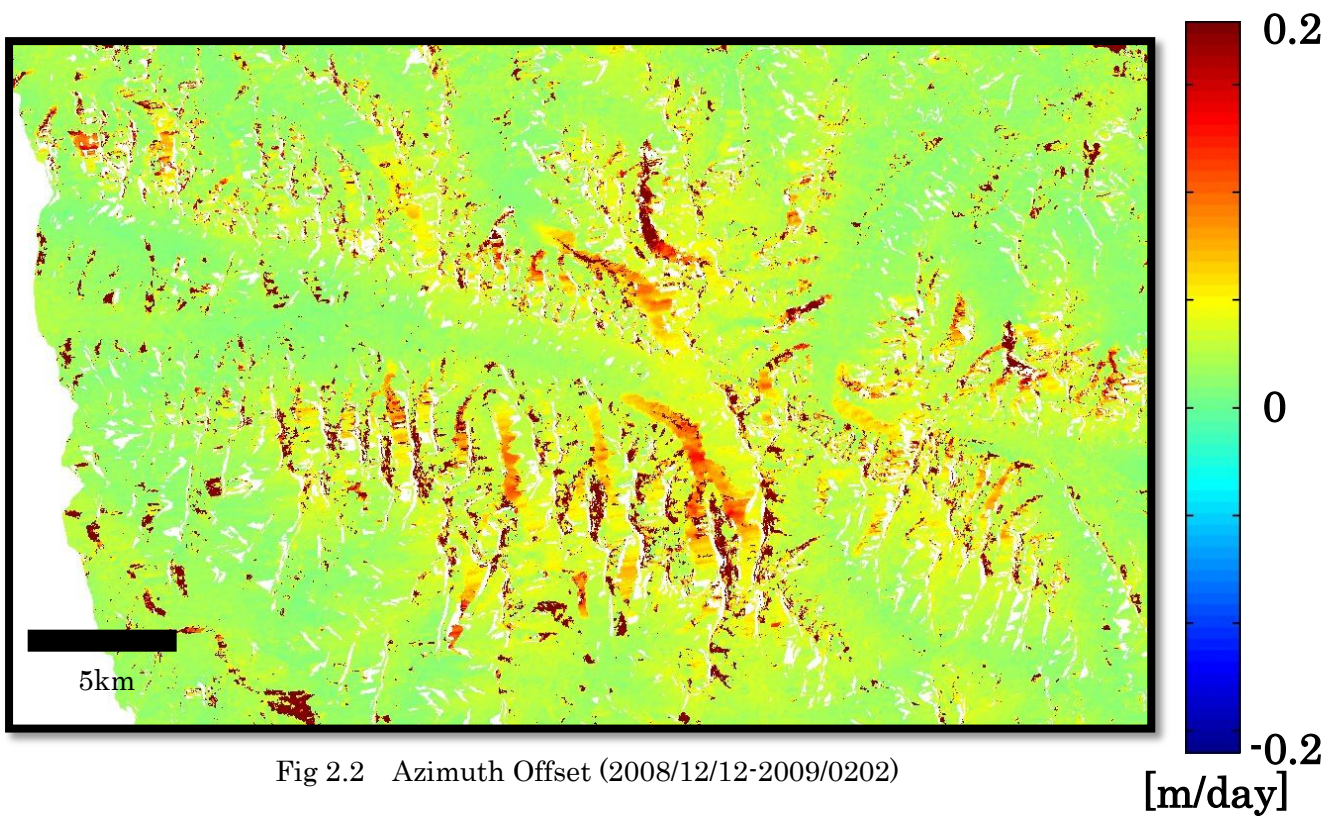
本研究では,2007年1月から2011年2月までの間にALOS/PALSARが取得したデータを用いた.観測データはいずれもAscendingのものである.Pathは518であり,Frame700とFrame710を結合して使用した.以下の表に示す計 ペアのデータに対してPixel Offset法を適用することで解析を行った.また,Pixel Offset法により得られたAzimuth OffsetとRange Offsetから氷河の流れに沿った速度を近似的に求めた.

| Master data (YYYYMMDD) | Slave data (YYYYMMDD) | Mode | Span (days) | Bperp (m) |
|---------------------------|--------------------------|---------|----------------|--------------|
| 20070915 | 20071216 | FBD_FBS | 92 | 815.63 |
| 20071216 | 20080317 | FBS_FBS | 92 | 415.18 |
| 20080317 | 20080502 | FBS_FBD | 46 | 701.28 |
| 20080917 | 20081218 | FBD_FBS | 92 | 259.74 |
| 20081218 | 20090202 | FBS_FBS | 46 | 606.48 |
| 20090202 | 20090620 | SBS_FBD | 138 | 752.18 |
| 20090805 | 20090920 | FBD_FBD | 46 | 603.37 |
| 20090920 | 20091221 | FBD_FBS | 92 | 744.93 |
| 20091221 | 20100205 | FBS_FBS | 46 | 455.41 |
| 20100205 | 20100623 | FBS_FBD | 138 | 999.39 |
| 20100623 | 20100808 | FBD_FBD | 46 | 284.78 |
| 20100808 | 20100923 | FBD_FBD | 46 | 243.98 |
| 20100923 | 20101108 | FBD_FBS | 46 | -452.41 |
| 20101108 | 20101224 | FBS_FBS | 46 | 768.11 |
| 20101224 | 20110208 | FBS_FBS | 46 | 560.33 |

Table 2.1 Pixel Offset 法を適用したデータのペア

2.3 結果

Fig 2.2 は, Azimuth Offset の一例であり, Fig 2.3 は, Range Offset の一例である. この二つの Offset 値から氷河の流動方向に沿った速度を近似的に計算したのが Fig 2.4 ~ Fig 2.6 である. このように, 西クンルン山脈の山岳氷河の表面速度場を検出することが出来た. 基線長 (軌道間距離の垂直成分) や観測時期の間隔が短いペアや, 散乱強度の変化が少なくピクセル間の相関が高い冬季のペアについては, 欠損の少ない表面速度を検出することが出来た. 一方で, 基線長や観測時期の間隔が長いペアや, 散乱強度の変化が大きい夏季のペアについては, 全体的にノイズが発生した. また, 標高の高い部分とその周辺に変動量が見られた.



YYMM_YYMM

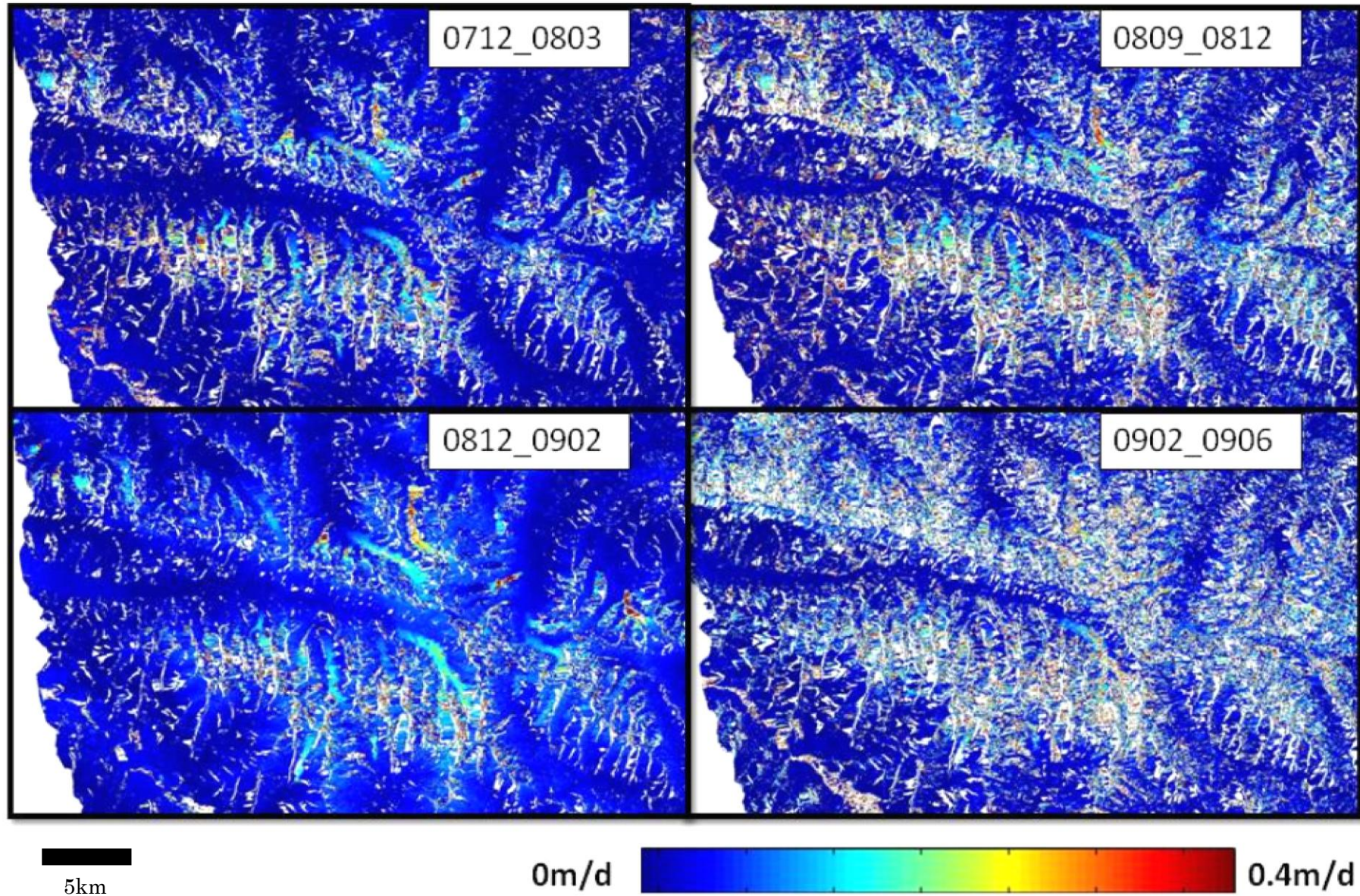


Fig 2.4 氷河の表面速度分布

YYMM_YYMM

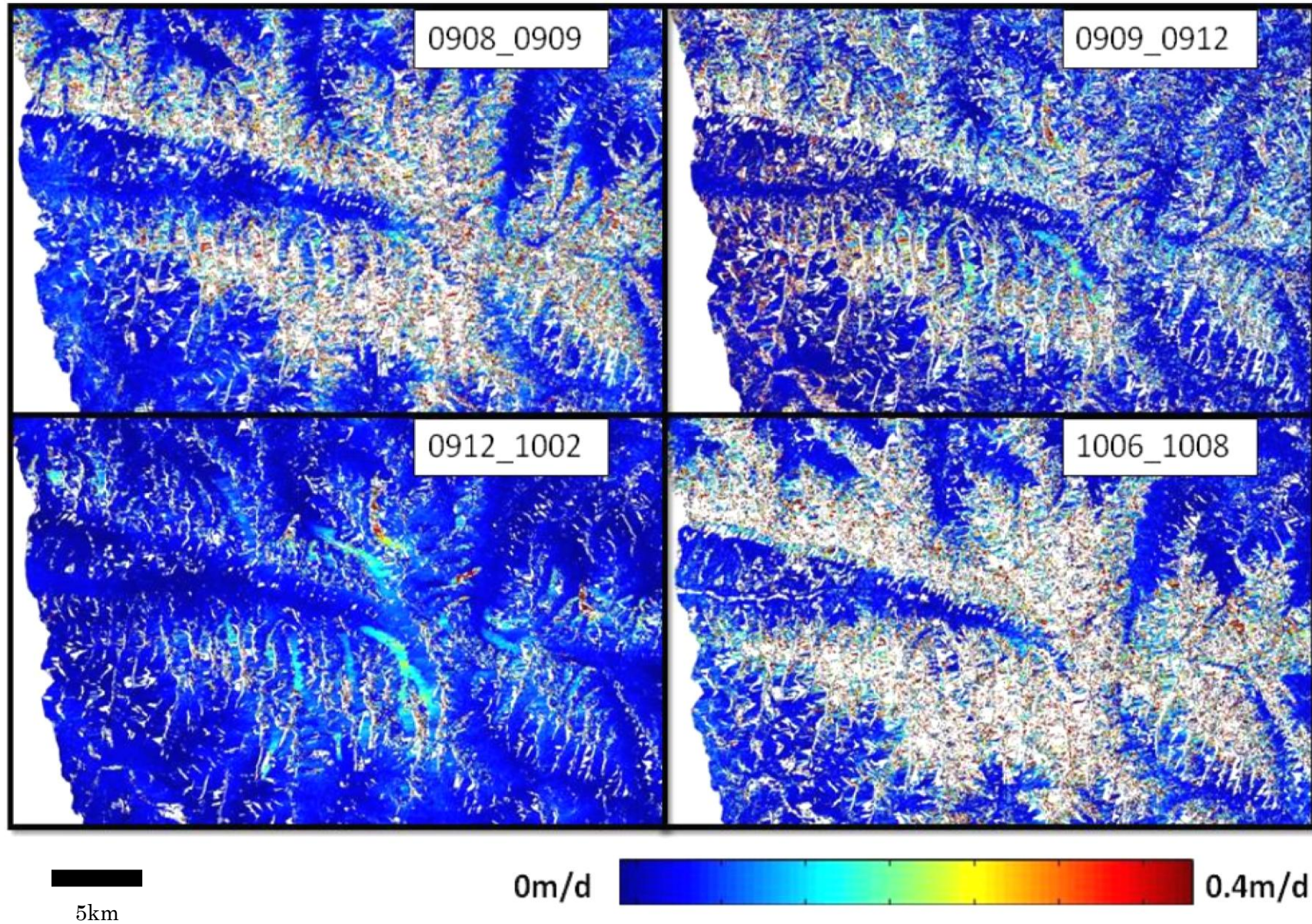


Fig 2.5 氷河の表面速度分布

YYMM_YYMM

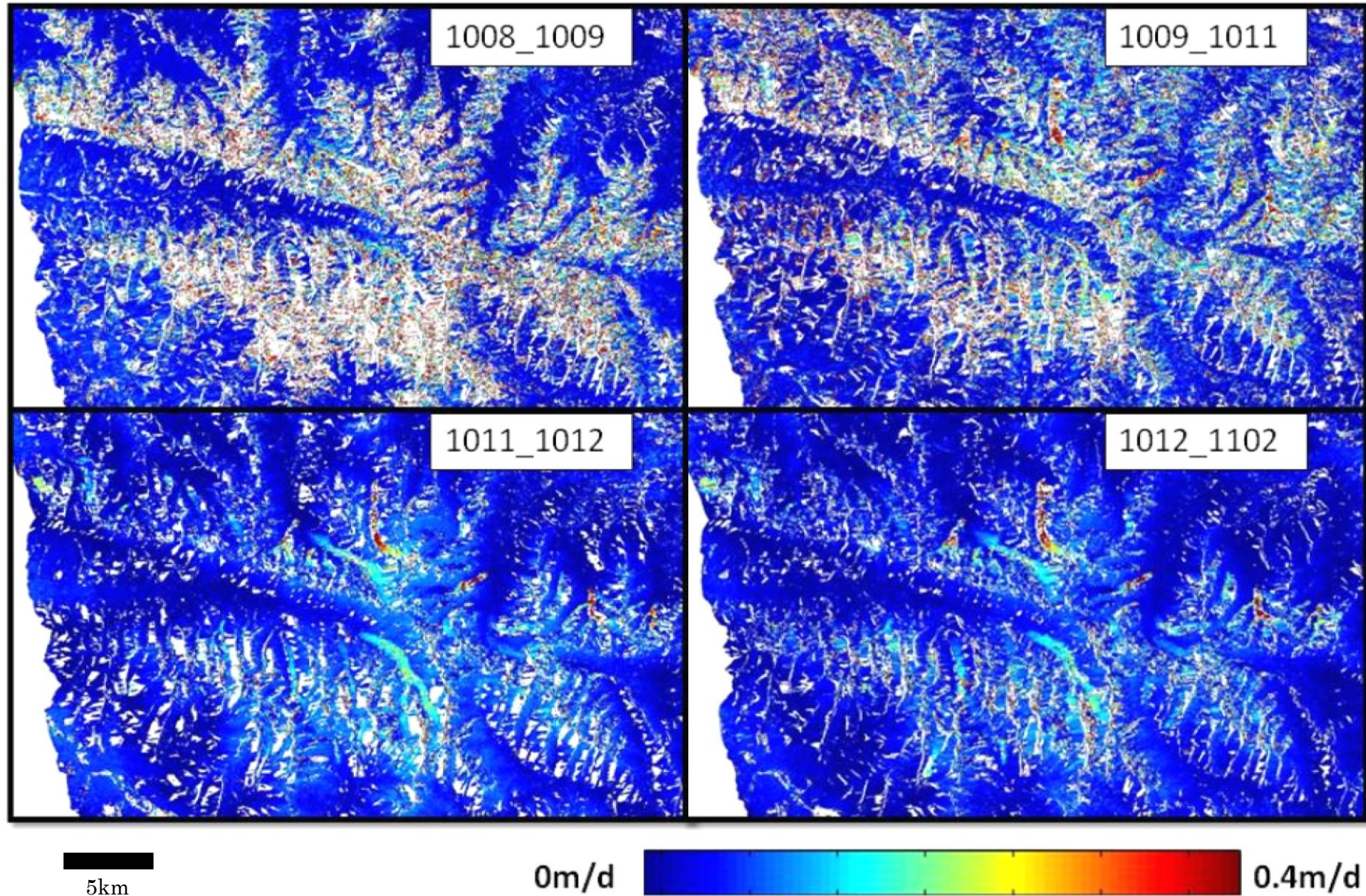


Fig 2.6 氷河の表面速度分布

2.4 考察

2.4.1 地形に見られる変動量について

Pixel Offset の結果を見ると、氷河の流動以外に地形の変動量を検出している。しかし、これはフォアショートニングの影響であり、実際の変動を捉えたものではないと考えられる。フォアショートニングとは、地表面に起伏がある場合に生じる SAR 画像の幾何学的な歪である。この地域は急峻な山々が多いため、このような歪が生じやすく、SAR 画像には標高の高い山々がニアレンジ側に移動して記録されている。Pixel Offset 法は異なる二時期に取得した SAR 画像のペアに対して適用するが、二時期の衛星の位置の違いから、フォアショートニングによってニアレンジに移動する長さが異なる。そのため、ニアレンジに移動する差の分が変動量として検出されることがある。今回検出された地形の変動量は、標高の高い山とその周辺に見られることから、以上のような原因で生じたものであり、実際の変動ではないと考えられる。

2.4.2 流動速度とその経年変化について

前節で地形の変動量は実際の変動ではないことを述べた。偽の地形変動量が出ている部分に氷河があるため、氷河流動による変動量に見える値には、その地形変動量が加算されている。そのため、氷河の正確な流動速度が算出できていない。しかし、氷河周辺の地形変動量が 12 月と 2 月の全てのペアに関して同程度なので、各年の相対的な変化については考えることが出来る。

今回解析を行ったシーンの氷河について、冬季（12月～2月）の目立った経年変化は見られなかった(Fig 2.7)。また、シーン中央部やや南側にある氷河についてプロファイルを取ったところ、冬季のどのペアでも、氷河の全体的に流動速度が 0.05~0.08m/day 程度であった。地形の傾斜や氷河の規模の違いもあるので一概に比較はできないが、今回解析したシーンに含まれる氷河は、Yasuda and Furuya (2013)で報告されている西クンルン山脈の他の地域の氷河と比べるとやや遅い部類に入る。

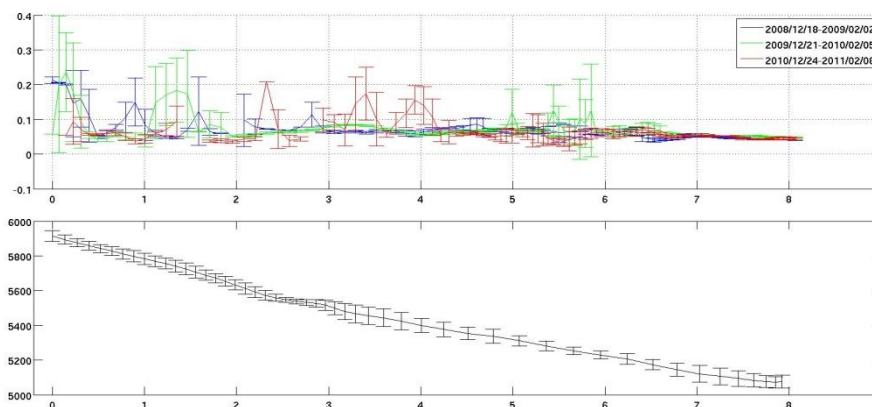


Fig 2.7 氷河の流動速度（上）と対応する標高（下）

3 テンジャン山脈の山岳氷河

3.1 観測地域

本研究の二つ目の観測地域であるテンジャン山脈は,中央アジア,タクラマカン砂漠の北西に位置し,カザフスタン,キルギス,中国の国境地帯にある山脈である.最高峰は 7439m を誇るポペーダ山であり,その他にも 4000~5000m 級の高山が連なっている.

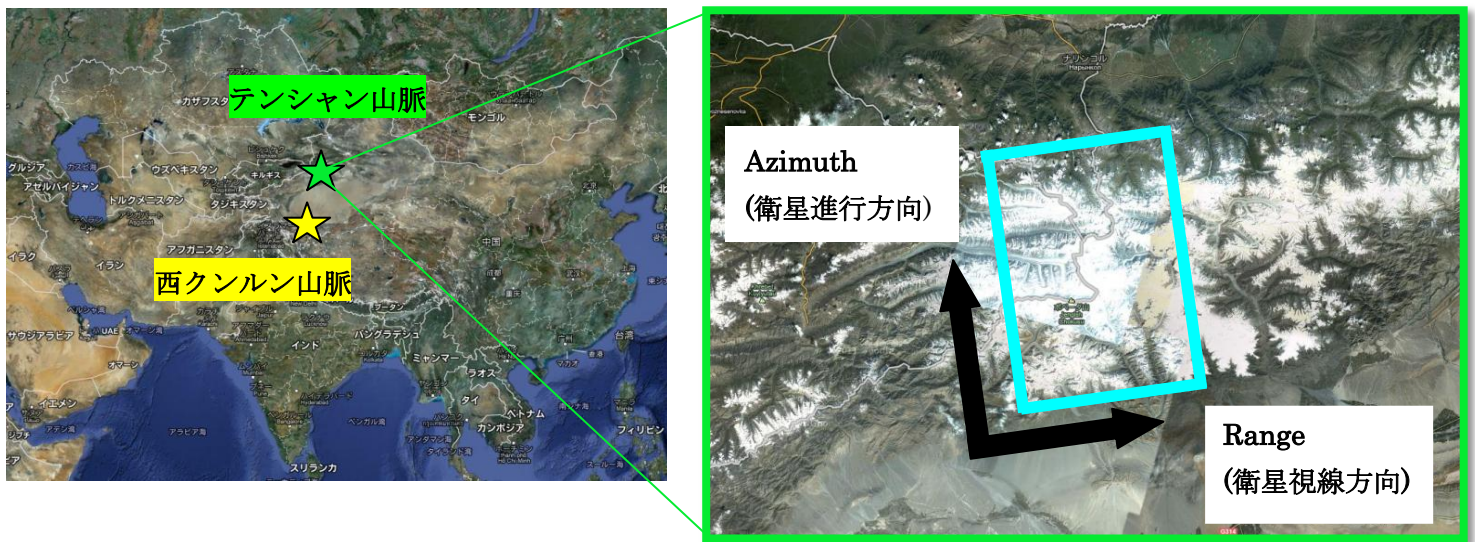


Fig 3.1 テンジャン山脈の位置

3.2 使用したデータ

本研究では,2007年1月から2010年10月までの間にALOS/PALSARが取得した計17個のデータを用いた. Li et al. (2012) では2007年7月9日から2010年3月1日までにALOS/PALSARが取得した計8個のデータを用いているので,本研究の方が夏季・冬季ともにデータ数が多い.観測データはいずれもAscendingの軌道番号514,Frame830のものである.以下の表(table 3.1)に示す計ペアのデータに対して,西クンルン山脈の解析と同様にPixel Offset法を適用し,得られたOffset値から氷河の流動速度を近似的に求めた.

| Master data (YYYYMMDD) | Slave data (YYYYMMDD) | Mode | Span (days) | Bperp (m) |
|---------------------------|--------------------------|---------|----------------|--------------|
| 20070106 | 20070221 | FBS_FBS | 46 | 2076.1 |
| 20070709 | 20070824 | FBD_FBD | 46 | 126.7 |
| 20070824 | 20071009 | FBD_FBD | 46 | 327.62 |
| 20080109 | 20080224 | FBS_FBS | 46 | 645.13 |
| 20080224 | 20080410 | FBS_FBS | 46 | 481.27 |
| 20080410 | 20080526 | FBS_FBD | 46 | -138.45 |
| 20080526 | 20080711 | FBD_FBD | 46 | -3329.77 |
| 20080711 | 20080826 | FBD_FBD | 46 | -2822.33 |
| 20090111 | 20090226 | FBS_FBS | 46 | 292.83 |
| 20100114 | 20100301 | FBS_FBS | 46 | 697.85 |
| 20100717 | 20101017 | FBD_FBD | 92 | 634.22 |

Table3.1 ALOS/PALSAR のデータのペア

3.3 結果

Fig 3.2 が Azimuth Offset の一例であり, Fig 3.3 が Range Offset である. この二つの Offset 値から氷河の流動方向に沿った速度を近似的に計算したものの例が Fig 3.4 である. このように, テンシャン山脈の山岳氷河の表面速度場を検出することが出来た. 基線長 (軌道間距離の垂直成分) や観測時期の間隔が短いペアや, 散乱強度の変化が少なくピクセル間の相関が高い冬季のペアについては, ほぼ欠損の無い表面速度を検出した. 一方で, 西クンルン山脈の解析結果と同様に, 基線長や観測時期の間隔が長いペアや, 散乱強度の変化が大きい夏季のペアについては, 全体的にノイズが発生している. しかし, 西クンルン山脈の結果と比べノイズの量が少なかったため, 夏季の流動速度の比較も行うことが可能だった.

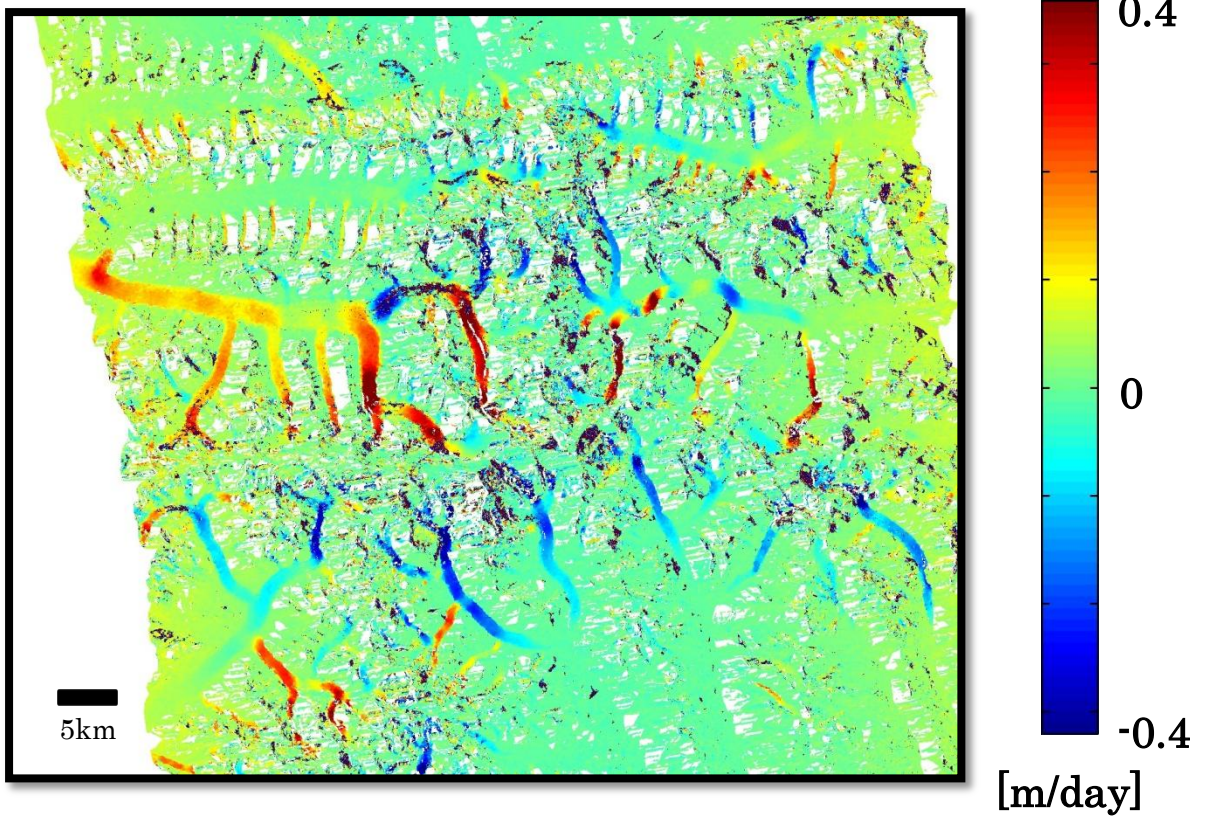


Fig 3.2 Azimuth Offset (2007/01/06-2007/02/21)

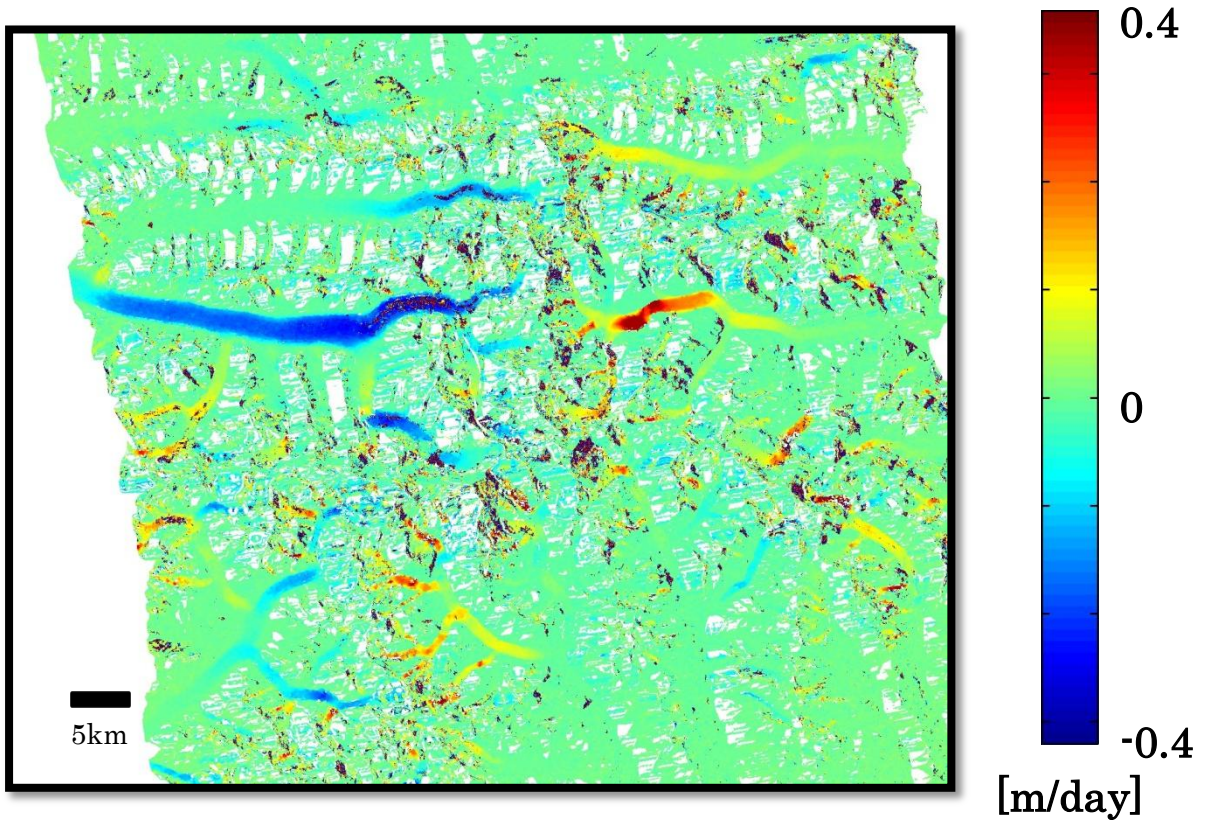


Fig3.3 Range Offset (2007/01/06-2007/02/21)

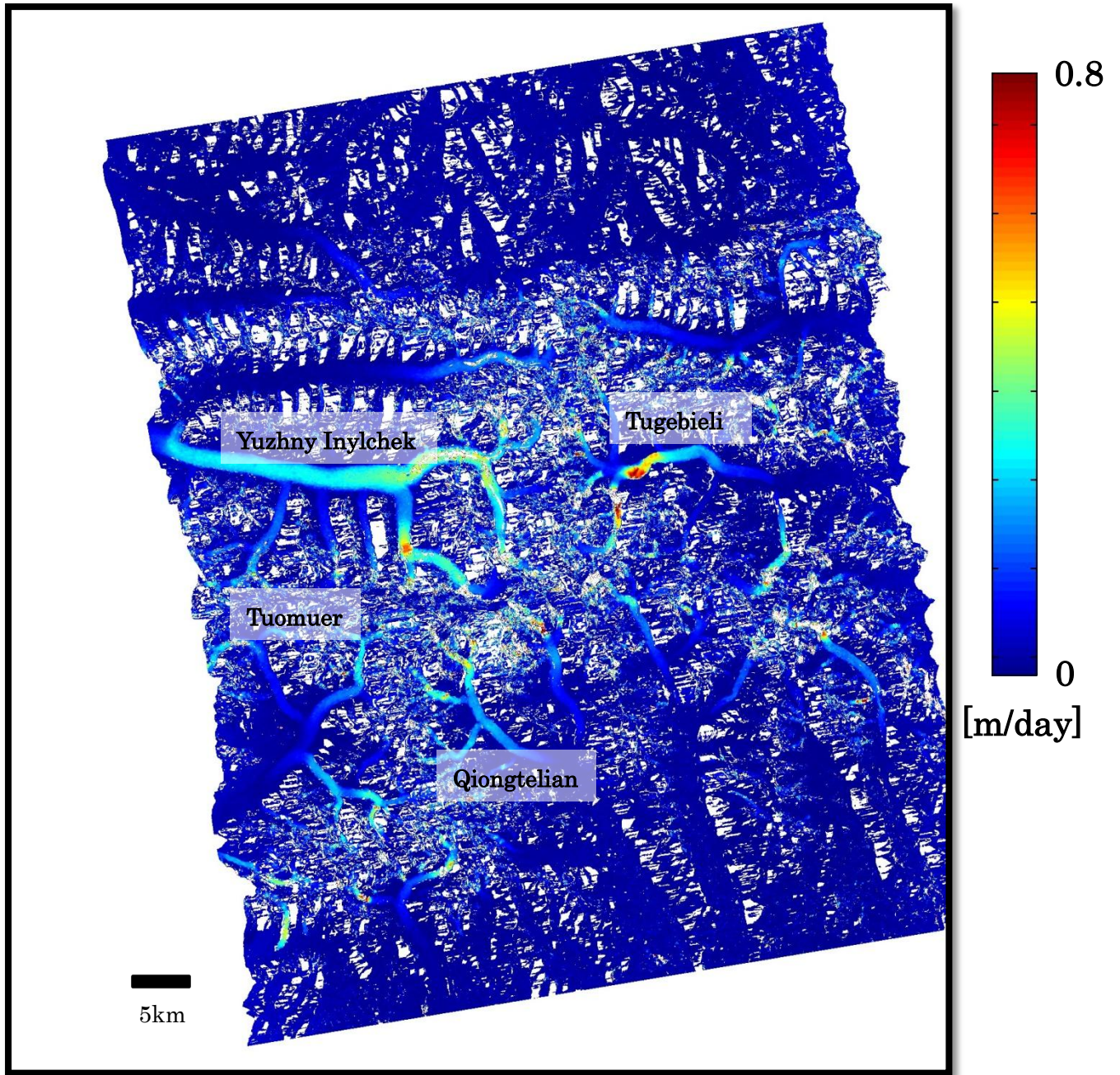


Fig 3.4 氷河の表面速度分布 (2007/01/06-2007/02/21)

3.3.1 表面速度の季節変化および経年変化のある氷河

今回解析したシーンに含まれる全ての氷河の表面速度について、季節変化および経年変化の有無を調べた。すると、Tugebieliqi 氷河、Qiongtelian 氷河、Yuzhny Inylchek 氷河、Tuomuier 氷河の表面速度が変化していることが分かった。これらの氷河については Li et al.(2012)の中でも論じられているが、2007 年の冬季や 2008~2010 年の夏季の流動速度については論じられていないため、新しい発見であった。以下、それぞれの氷河に拡大した表面速度の解析結果を示す。

3.3.1.1 Tugebieliqi 氷河

Tugebieliqi 氷河は、同じ年の流速を比べると、4 月から 8 月ごろまで、中流から下流にかけて流動速度が上昇している。データ数の多い 2008 年の冬季（1 月～4 月）平均と夏季（4 月～8 月）平均を比較すると、夏季は冬季に比べ流動速度が 0.1~0.2m/day 上昇している。中流では夏季の流動速度が冬季の約 2 倍になっている。最も速度が上昇しているのは、地形の傾斜が最も急になっている地点で、約 0.3m/day の上昇が見られる。

また、全ての年でデータがそろっている冬季（1 月～3 月）の流速を比べると、2007 年から 2008 年にかけて流動速度が低下しており、中流では流動速度が 50%にまで落ち込んでいる。2009 年は 2008 年と同程度の流動速度を示し、2010 年になると、再び 2007 年と同程度の速度まで上昇している。中流では 70%程度の上昇が見られた。このように、Tugebieliqi 氷河には、流動速度の季節変化および経年変化があることが分かる。特に、冬季について 2007 年から 2008 年にかけての流動速度の低下は新しい発見である。

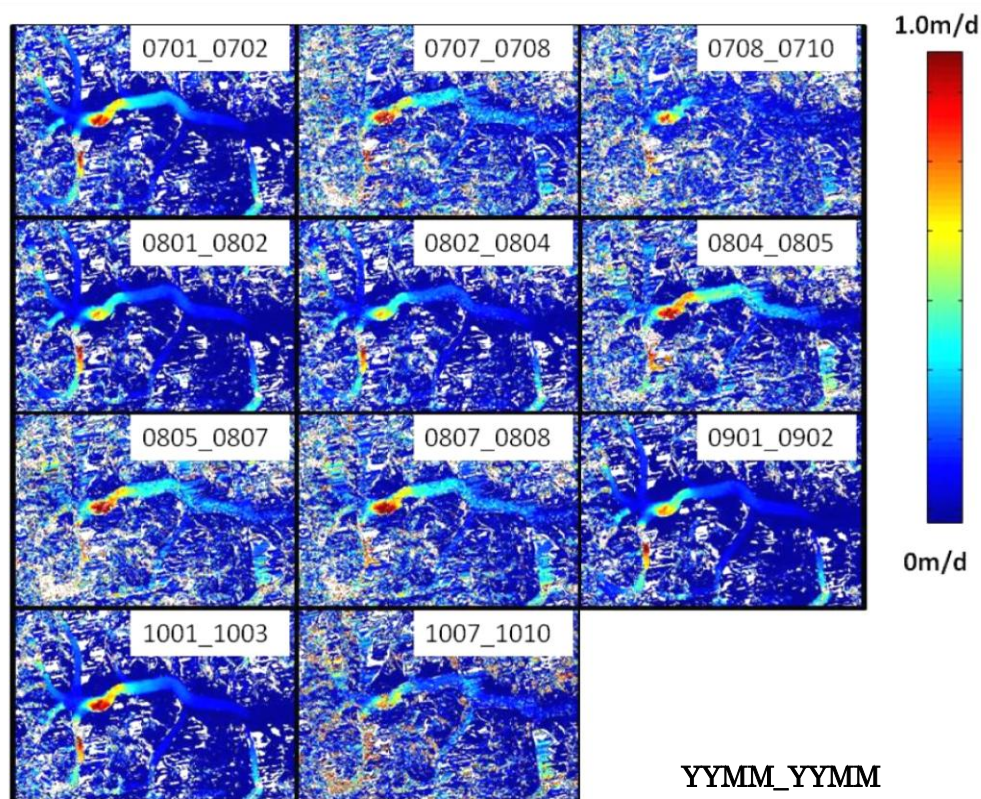


Fig 3.5 Tugebieliqi 氷河の表面速度分布

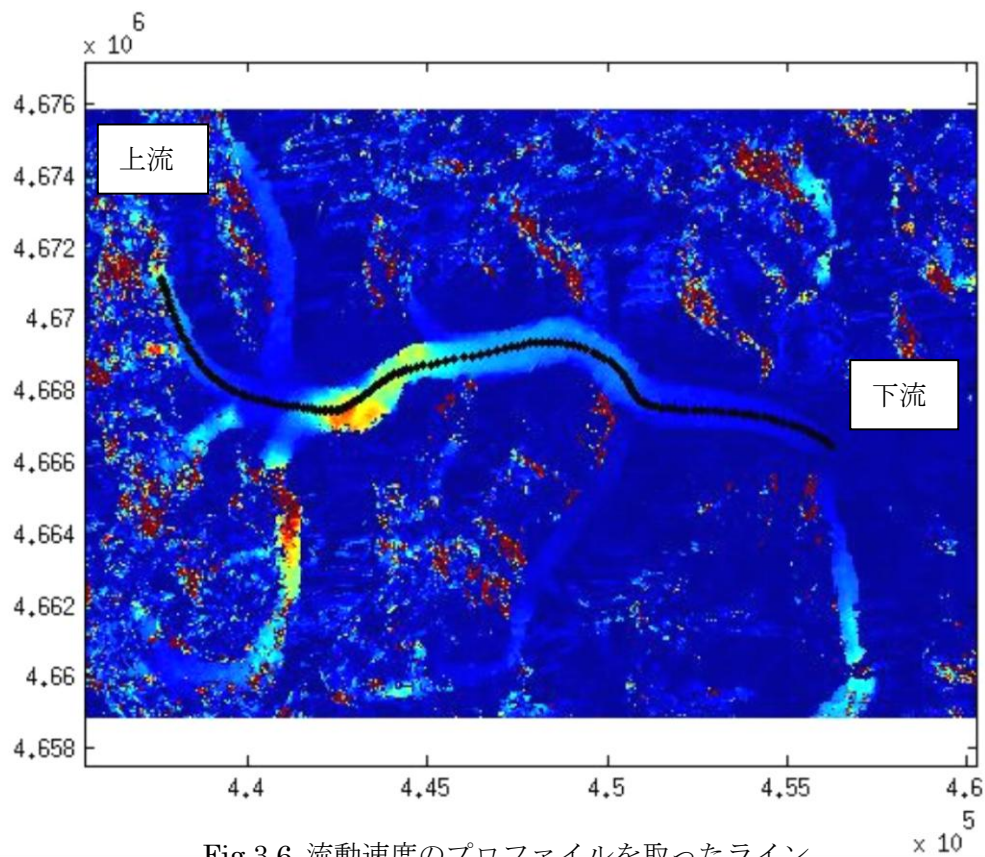


Fig 3.6 流動速度のプロファイルを取ったライン

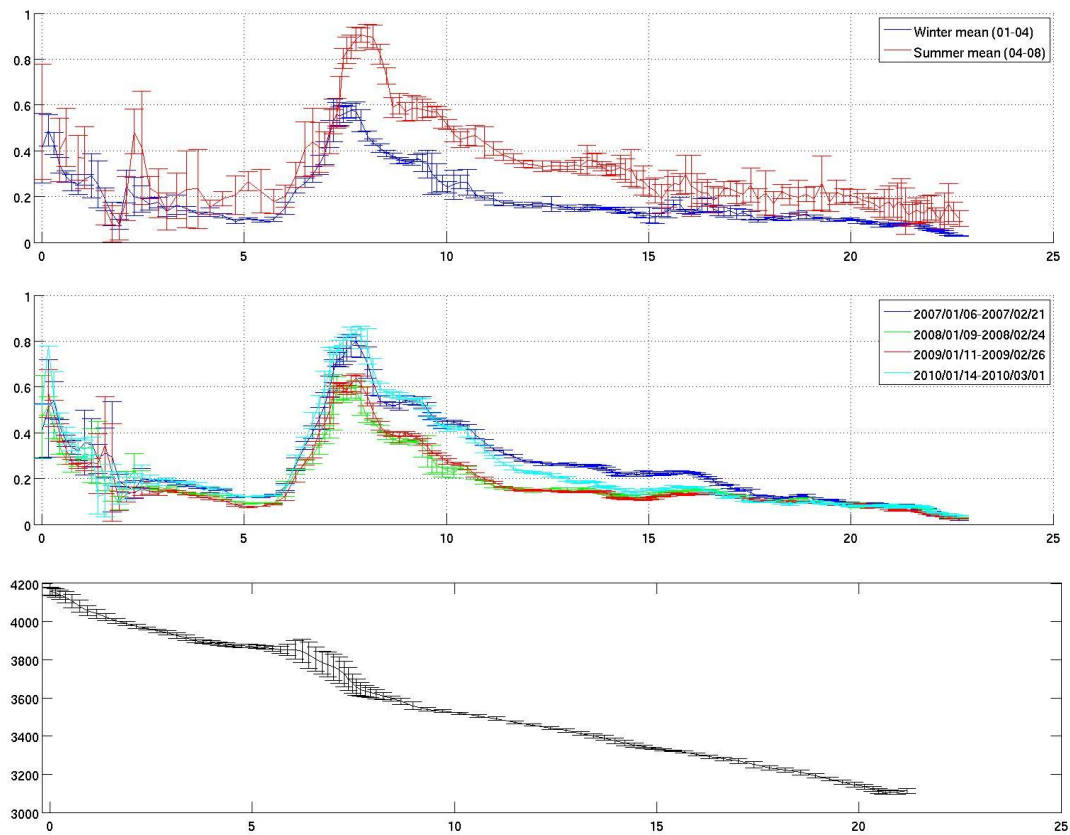


Fig 3.7 流動速度の夏季平均と冬季平均(上),冬季の流動速度(中),対応する標高(下)

3.2.1.2 Qiongtelian 氷河

Qiongtelian 氷河は,Tegebieliqi 氷河同様,4 月から 8 月ごろまで,流域全体で流動速度が上昇している.この氷河についても,データ数の多い 2008 年の冬季(1 月~4 月)平均と夏季(4 月~8 月)平均の比較を行ったところ,夏季平均の流動速度の方が冬季平均の流動速度より 0.05~0.15m/day 速いことが分かった.中流から下流にかけては,夏季の流動速度が冬季の 2 倍にまで上昇していた.

また,冬季(1 月~3 月)についてそれぞれの年の流動速度を比べてみると,2007 年から 2009 年にかけて毎年,流動速度が低下していき,中流では 60%程度の低下があった.2010 年になると速度の低下が止まり,前年と同程度の流動速度を示した.Qiongtelian 氷河についても,流動速度の季節変化および経年変化が見られた.冬季について,2007 年から 2008 年にかけての流動速度の低下は非常に大きなものであり,Li et al.(2012)でも論じられていない発見である.

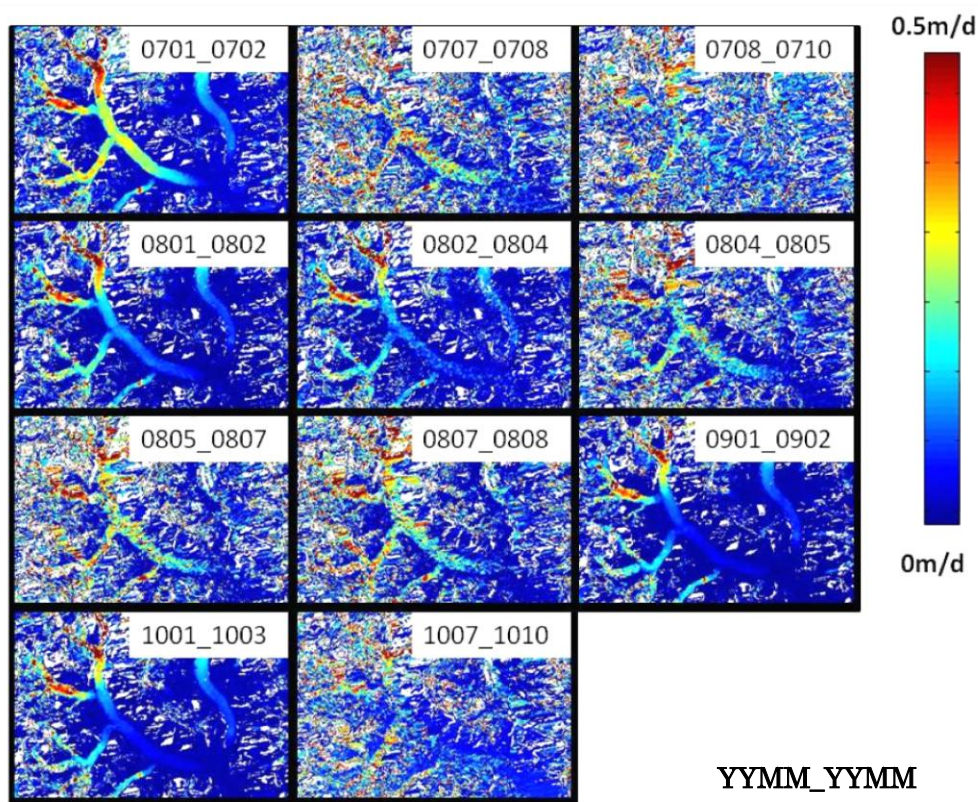


Fig 3.8 Qiongtelian 氷河の表面速度分布

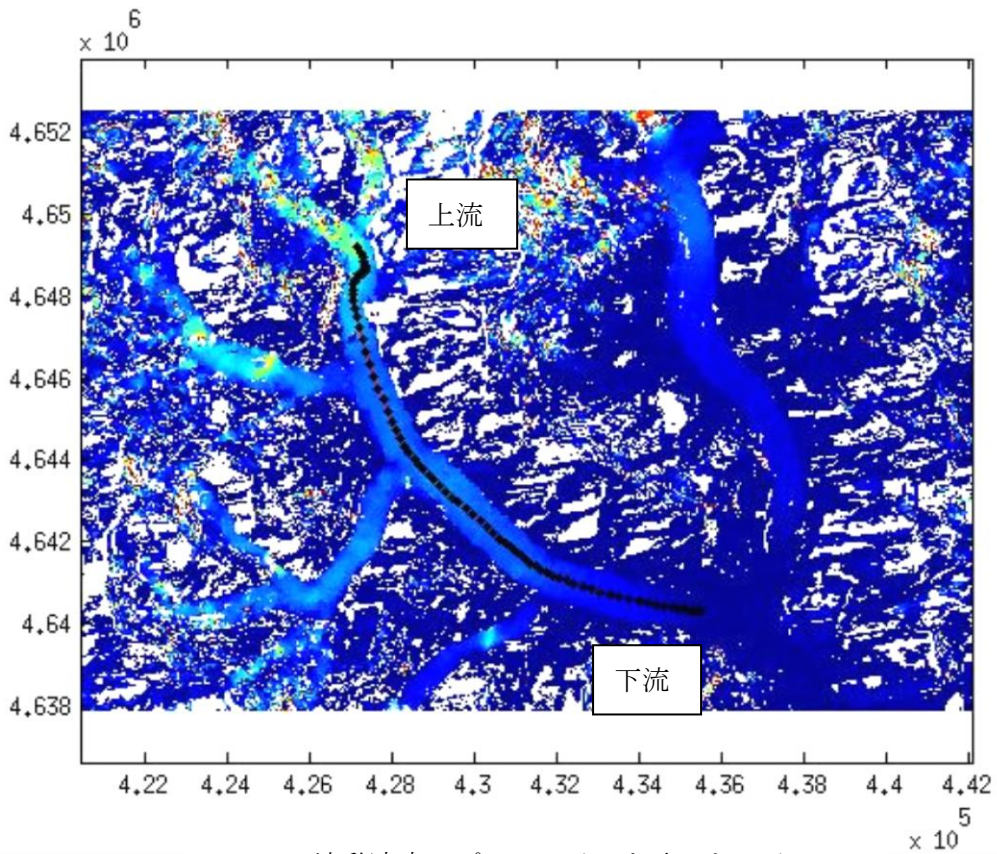


Fig 3.9 流動速度のプロファイルを取ったライン

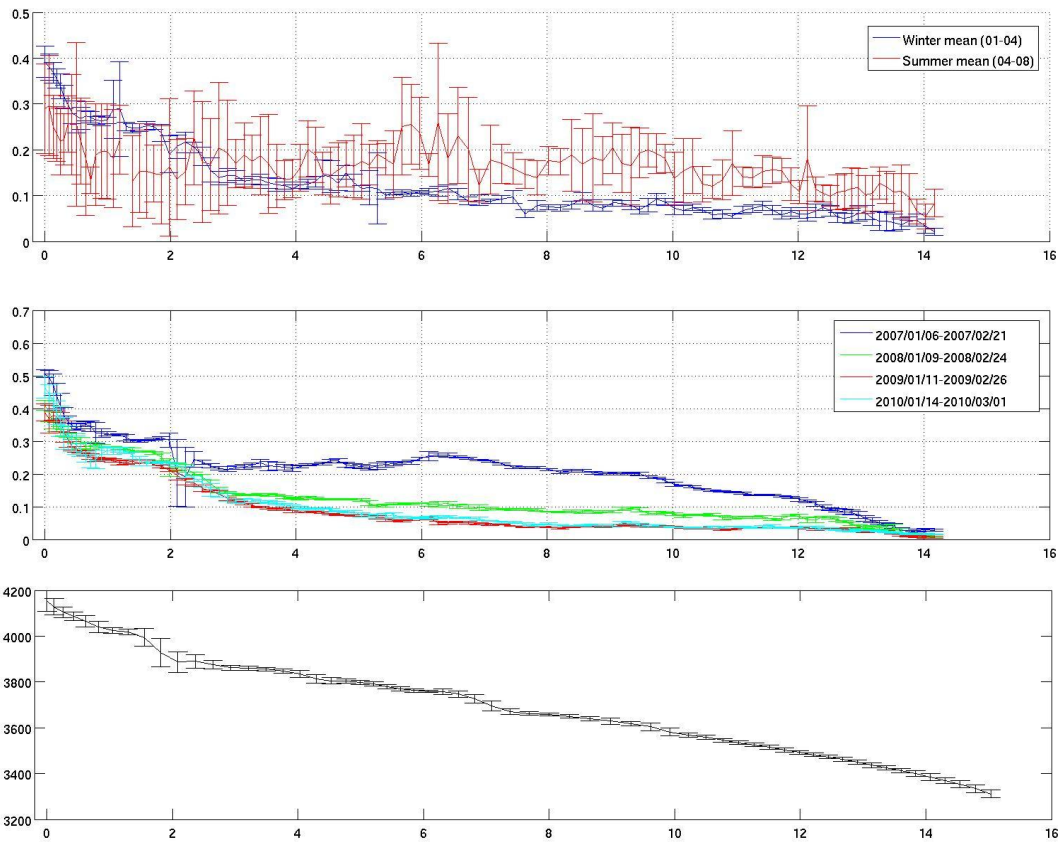


Fig 3.10 流動速度の夏季平均と冬季平均(上),冬季の流動速度(中),対応する標高(下)

3.2.1.3 Yuzhny Inylchek 氷河

Yuzhny Inylchek 氷河は,今回解析したシーンで最大の氷河である.どの時期も上流でデータにノイズが多かったため,上流の正確な流動速度や季節・経年変化の有無は分からなかった.下流については,冬季(1月~3月)と夏季(4月~10月)では,流動速度の差はほとんど無い.下流については,冬季(1月~3月)の経年変化がわずかに見られる.2007年から2008年にかけて上昇し,2009年は前年の同程度の流動速度であり,2010年にはさらに上昇する.2007年と2010年の差が0.05m/day程度であり,2007年から15%程度の速度上昇があったことが分かる.

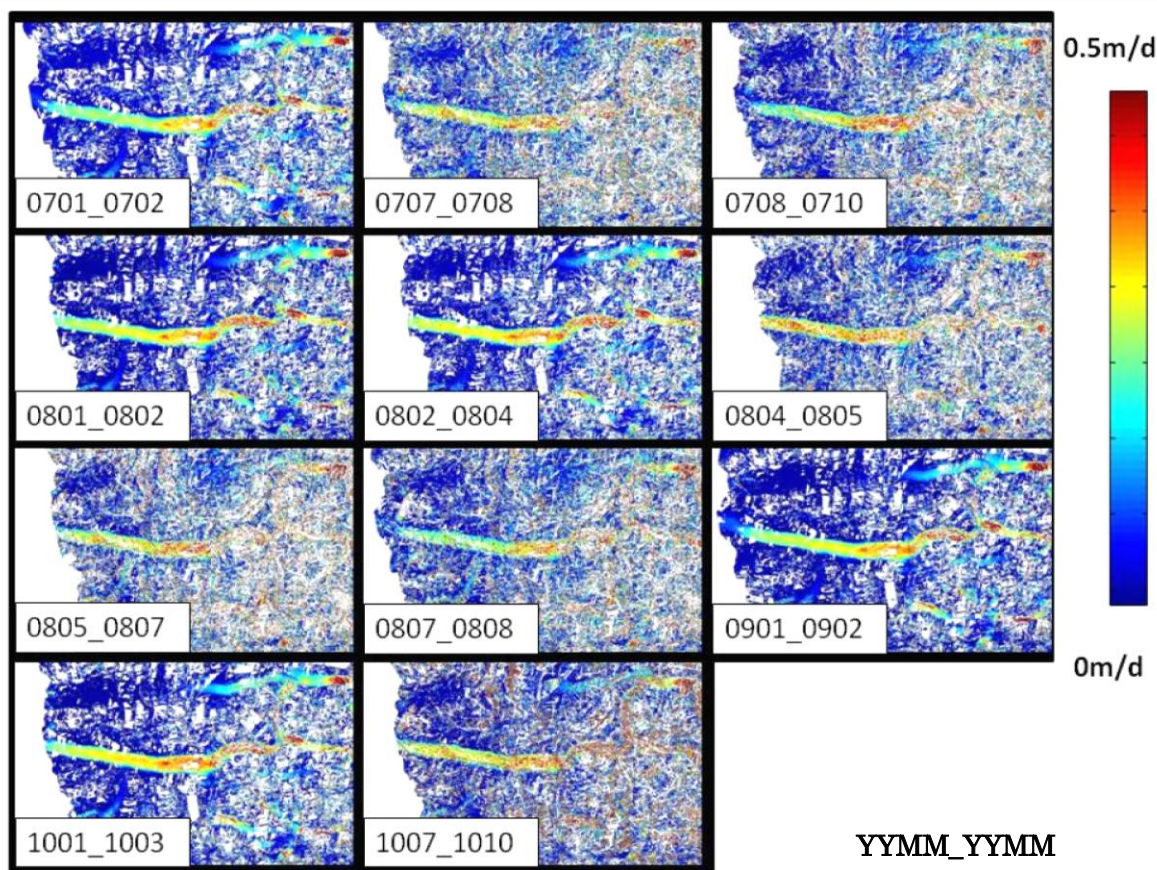


Fig 3.11 Yuzhny Inylchek 氷河の表面速度分布

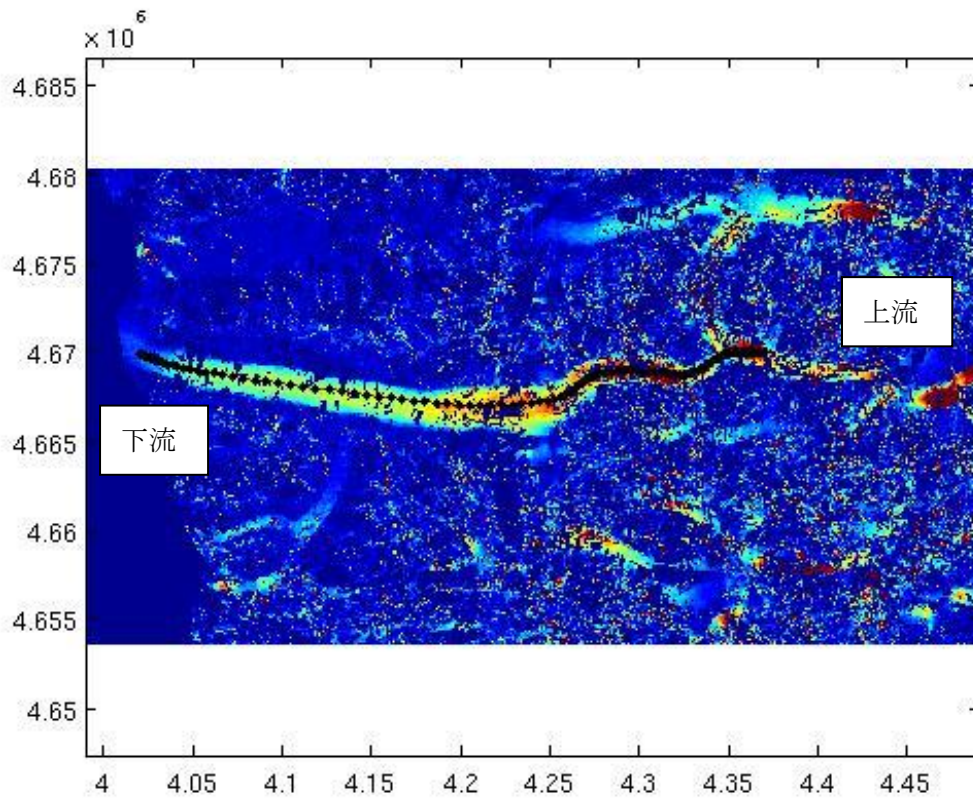


Fig 3.12 流動速度のプロファイルを取ったライン $\times 10^5$

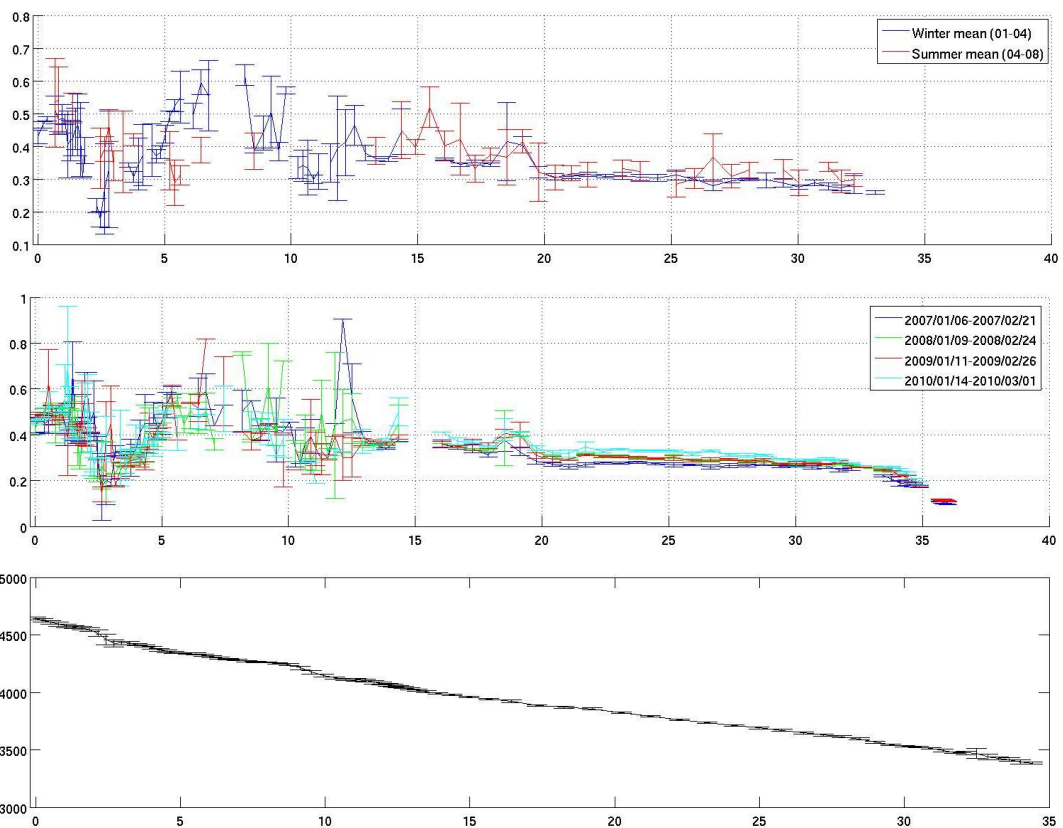


Fig 3.13 流動速度の夏季平均と冬季平均(上),冬季の流動速度(中),対応する標高(下)

3.2.1.4 Tuomuer 氷河

Tuomuer 氷河については、本流だけでなく支流についても季節変化および経年変化が見られた。また、本流と二つの支流ではそれぞれの経年変化の傾向が異なっていた。Li et al. (2012) では本流のみについて論じられているので、これについても新たな発見と言える。

本流 (Fig 3.15, Fig 3.16) では、流動速度の冬季 (1月～4月) 平均よりも夏季 (4月～8月) 平均の方が大きかった。特に中流では流動速度の上昇が顕著に見られ、最大で冬季 (1月～4月) 平均に比べ、 0.15m/day の上昇が見られた。中流では夏季が冬季の2倍の速度まで上昇していた。一方で、冬季 (1月～3月) の経年変化はほとんど見られなかった。

北西から本流に合流してくる支流 (Fig 3.17, Fig 3.18) についても、流動速度の冬季 (1月～4月) 平均より夏季 (4月～8月) 平均の方が大きかった。夏季の方が全体的に約 0.1m/day 流動速度が大きく、上流では最大で約 0.2m/day 大きかった。最も速度が上昇した個所では、冬季の3倍の速度にまで上昇していた。また、冬季 (1月～3月) についての経年変化もわずかに見られた。2007年から2009年にかけて流動速度の低下が見られ、2007年の速度の50%にまで低下する個所もあった。その後、2010年にはわずかに流動速度が上昇した。

南東から本流に合流する支流 (Fig 3.19, Fig 3.20) についても、夏季 (4月～8月) に流動速度の上昇が見られた。特に、下流では最大 0.1m/day 程度の上昇 (最大で1.5倍の速度にまで上昇) が見られた。また、冬季 (1月～3月) のデータを比較すると、2007年から2010年にかけて 0.05m/day 低下していることが分かる。これは、2007年から比較して20%程度の低下である。

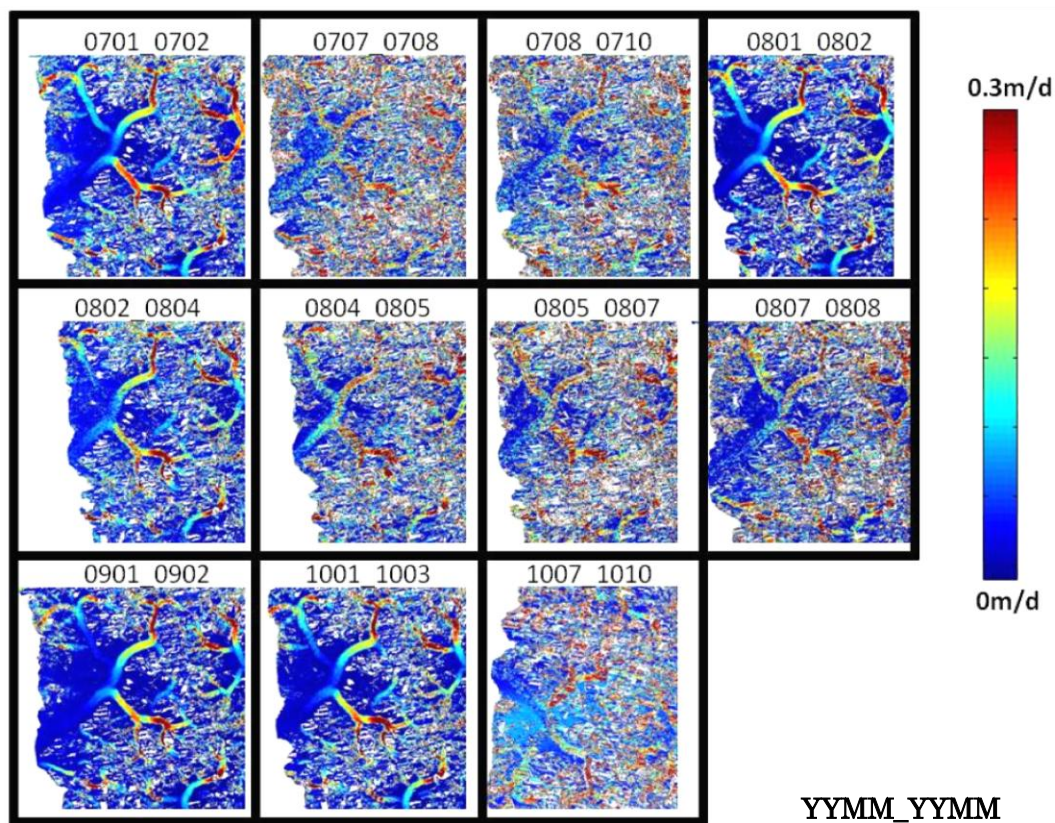


Fig 3.14 Tuomuer 氷河の表面速度分布

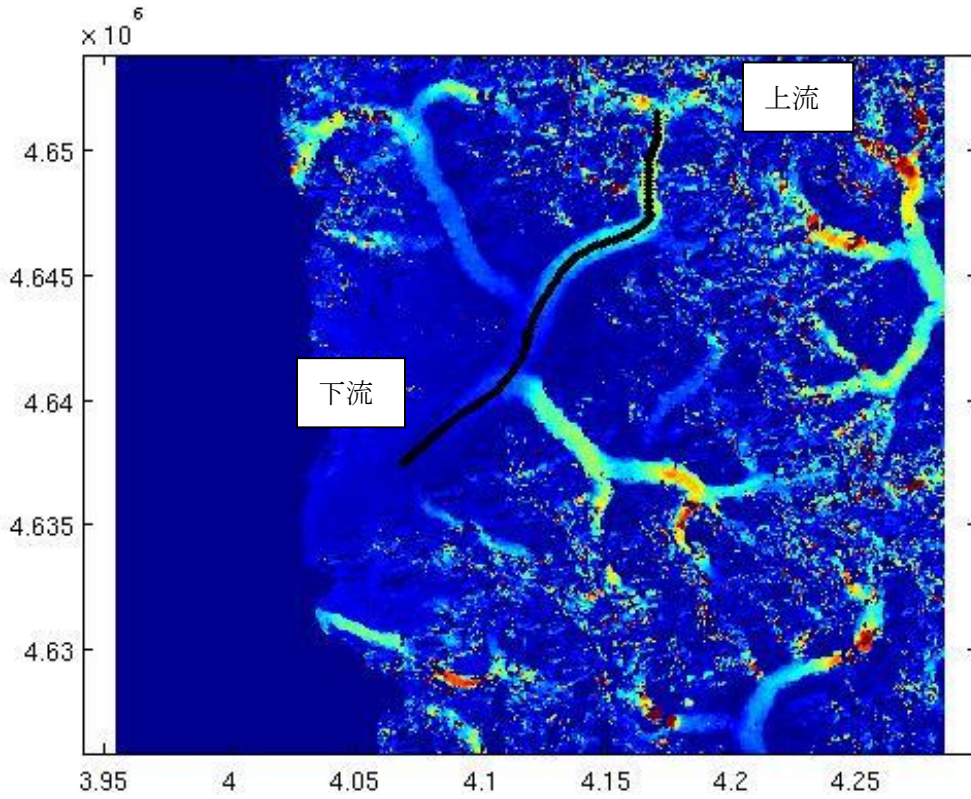


Fig 3.15 流動速度のプロファイルを取ったライン(本流) $\times 10^5$

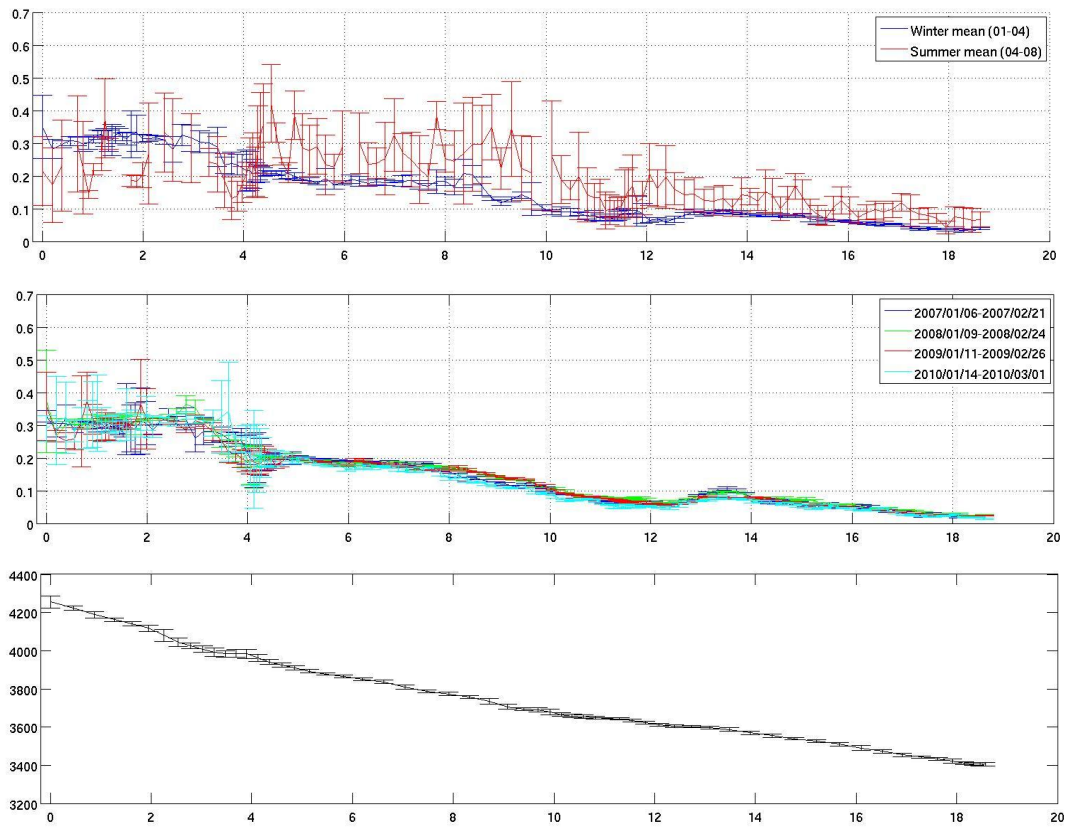


Fig 3.16 流動速度の夏季平均と冬季平均(上),冬季の流動速度(中),対応する標高(下)

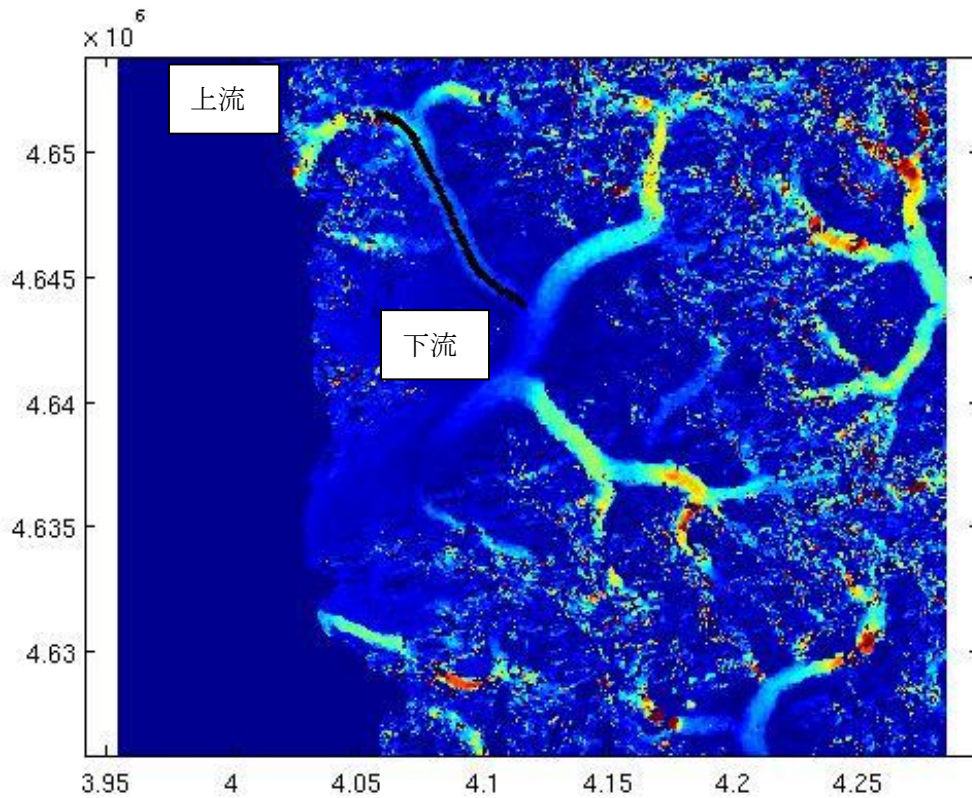


Fig 3.17 流動速度のプロファイルを取ったライン(支流①) $\times 10^5$

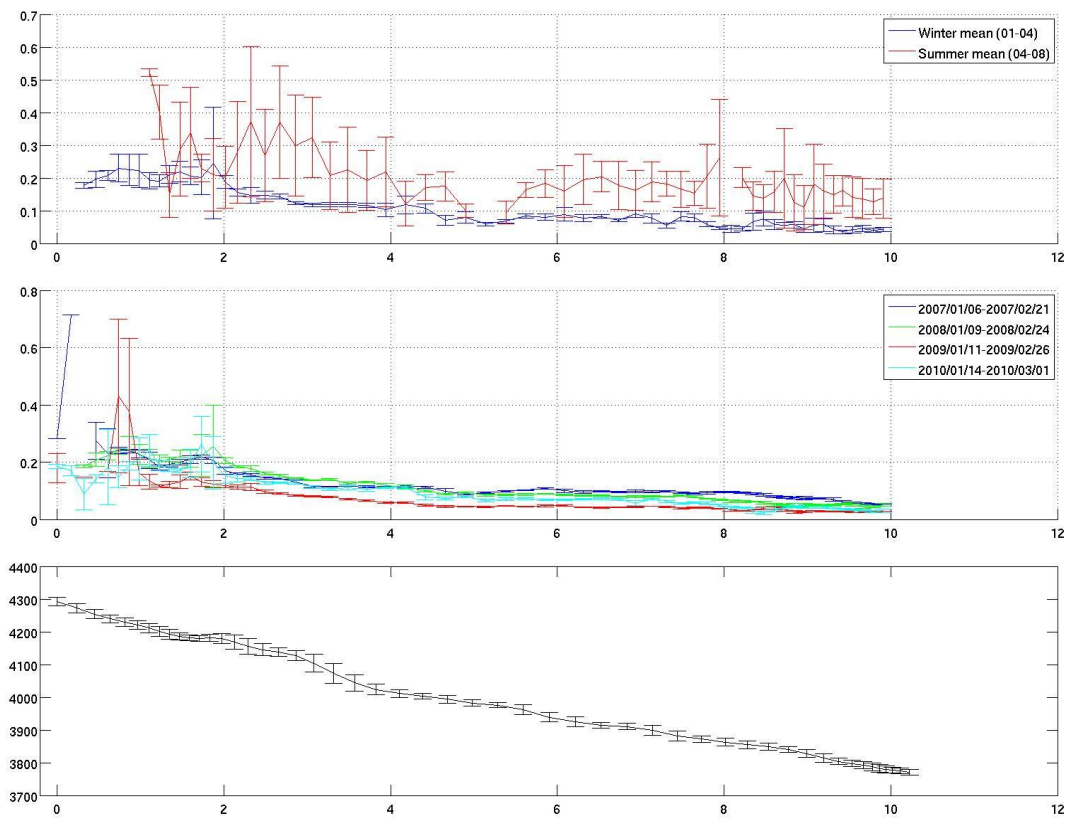


Fig 3.18 流動速度の夏季平均と冬季平均(上),冬季の流動速度(中),対応する標高(下)

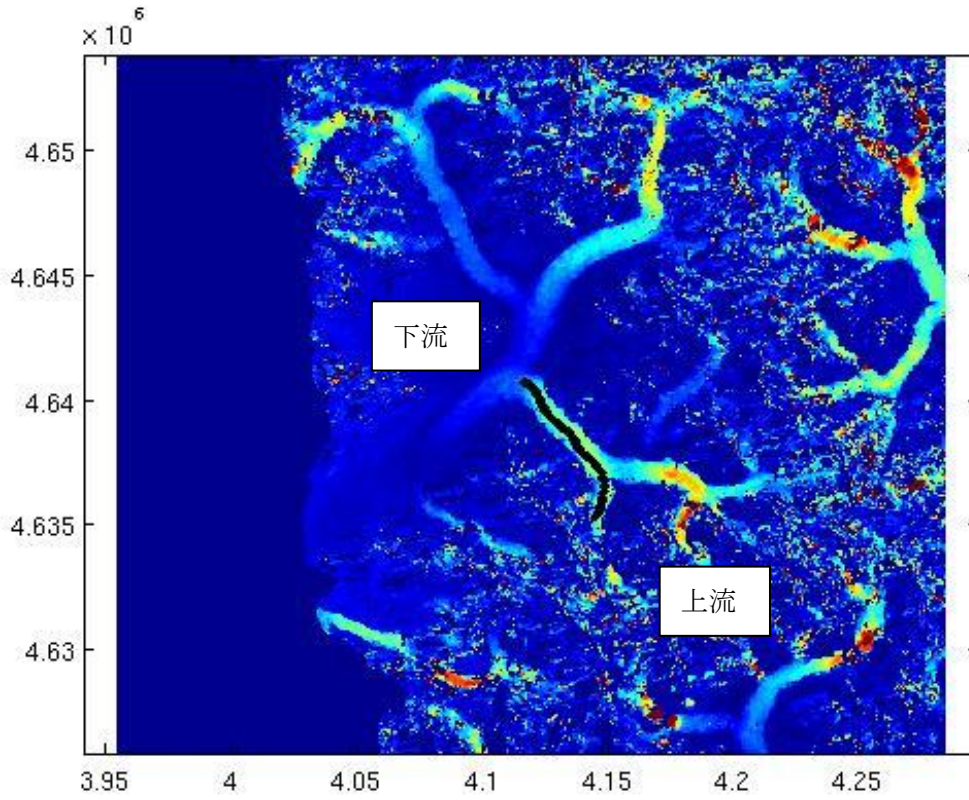


Fig 3.19 流動速度のプロファイルを取ったライン(支流②) $\times 10^5$

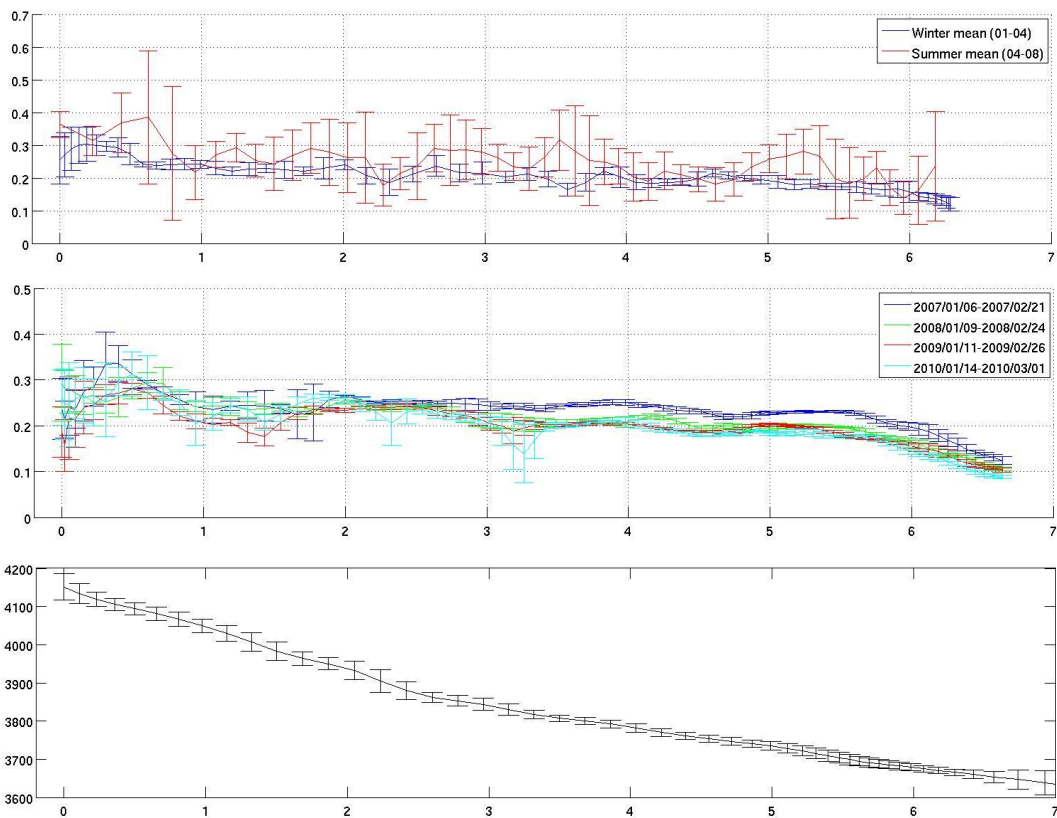


Fig 3.20 流動速度の夏季平均と冬季平均(上),冬季の流動速度(中),対応する標高(下)

3.4.1 夏季の流動速度の増加について

今回流動速度のプロファイルを取った4つの氷河のうち3つの氷河について、夏季の顕著な流動速度の上昇が見られた。この速度の上昇は、融解水が原因であると考えられる。氷河底面に流入する融解水が増加することで、氷河底面の水圧を上昇させる。そのため、底面での摩擦力が低下し、氷河の流動速度が上昇した可能性がある。

テンシャン山脈の地上観測点(標高 3635m)気温データ(Fig 3.21)によると、4月～5月に0度を超え、8月ごろに気温は最高となり15度前後を記録するようになる。今回の研究対象となっている地域の氷河は、標高 3000m～4300m に位置しているため、このデータを参考にすることができる。気温が高い時期と流動速度高い時期が一致するので、この地域の氷河の流動速度が融解水の量に影響を受けている可能性は高いと考えられる。

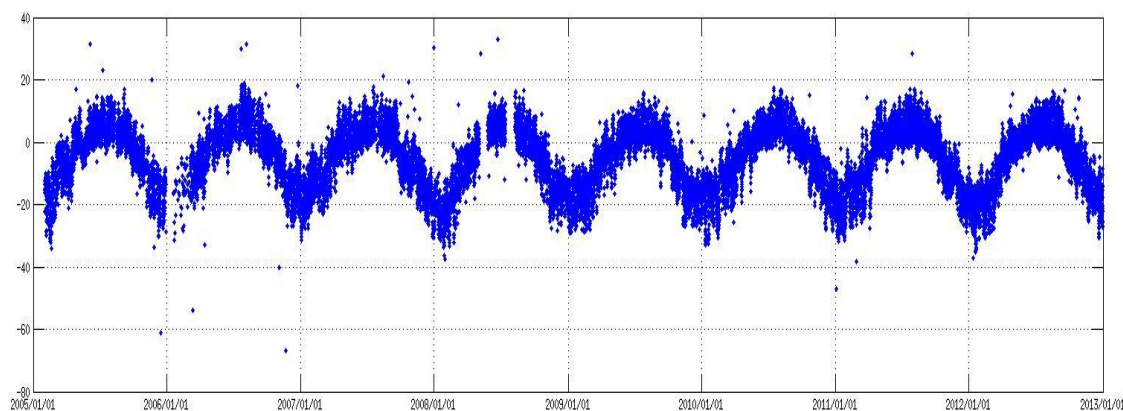


Fig 3.21 テンシャン山脈の地上観測点で得られた気温データ

3.4.2 経年変化の多様性について

流動速度のプロファイルを取った氷河を見ると、経年変化の有無や経年変化の傾向が多様であった。特に大きな変化を見せている Tugebieliqi 氷河と Qiongtelian 氷河の冬季(1月～4月)を比較してみると、Qiongtelian 氷河の速度が2008年から2009年にかけて0.05m/day 低下しているのに対し、Tugebieliqi 氷河は速度の変化が見られない。また、2009年から2010年にかけて Qiongtelian 氷河の速度の変化が見られないが、Tugebieliqi 氷河では0.2m/day もの速度上昇があった。このように、地域全体として一様な経年変化を見せているわけではない。今回は個々の氷河に関する情報が少なかったため、この経年変化の多様性の原因の推定には至らなかった。

4 まとめ

ALOS/PALSAR が取得したデータに Pixel Offset 法を適用することで、西クンルン山脈とテンシャン山脈の山岳氷河流動を検出することが出来た。

西クンルン山脈については、2007年9月15日から2011年2月8日までの計17個のデータを用い、13ペアに対し Pixel Offset 法を適用することで解析を行った。冬季に関して、経年変化はなかった。夏季に関しては、Pixel Offset の結果にノイズが多かったため、季節変化や夏季の経年変化を見ることは出来なかった。また、急峻な地形であるため、フォアショートニングによる影響が見られ、実際には起こっていないと考えられる地形の変動が検出されていた。そのため、氷河の流動速度の正確な値を得ることはできなかった。

テンシャン山脈については、2007年1月6日から2010年10月17日までの計17個のデータを用い、11ペアに対し Pixel Offset 法を適用することで解析を行った。その結果、Tugebieliqi 氷河、Qiongtelian 氷河、Yuzhy Inylchek 氷河、Tuomuer 氷河について顕著な季節変化あるいは経年変化が見られた。Tugebieliqi 氷河、Qiongtelian 氷河、Tuomuer 氷河については季節変化が見られ、いずれも夏季に流動速度の上昇が見られた。Li et al. (2012)では2007年の夏季と他年の冬季を比べるにとどまっているため、この事実は新しい知見である。この現象は、夏季の温度上昇により、氷河底面に流入する融解水の量が増加したため、氷河底面での水圧が増し、摩擦力が低下したことが原因である可能性が高い。一方、経年変化については4つの氷河全てに見られたが、2007年から2010年の変化に全く同じ傾向を示すものはなく、多様性があることが分かった。特に Qiongtelian 氷河の2007年から2008年にかけての大きな流動速度の変化は、Li et al. (2012)で報告されていない発見である。この各氷河の経年変化の多様性については、個々の氷河に関する情報が少なかつたため原因の推定には至らなかった。

5 謝辞

本研究を行うにあたり,多くの方々のご指導・ご協力を頂きました.この場をお借りして感謝の意を述べさせていただきます.

指導教官である古屋正人教授には,大変お世話になりました.学部3年生の時には,授業を通して宇宙測地技術の魅力を教えて頂き,私が宇宙測地学研究室に来るきっかけを作ってくださいました.研究室配属後も,初歩的なパソコンの知識や研究の方向性,発表の方法など,きめの細かい指導をして頂きました.また,難しい物事に取り組んでいく姿勢や自分の頭で考えることの大切さなど,社会に出てからも重要であることを教えて頂きました.今後も,教えて頂いたことを大事にしていきたいと思えます.

また,同研究室の日置幸介教授をはじめとする固体系ゼミの先生方には,ゼミでの発表を通してたくさんのアドバイスを頂きました.研究を進めて行く上で非常に有用な言葉を頂いたとともに,発表で人を納得させる上で大切なことも教えて頂きました.本当にありがとうございました.

同研究室の先輩方には,多くの場面で助言やご協力を頂きました.特に安田さんには大変お世話になりました.研究室配属当初から,何も分からなかった私に一から丁寧に教えて下さいました.安田さんがいなかったら,私の卒業論文は完成しなかったと思います.本当に感謝しています.

そして,私と同学年の齊藤君,中島さん,橋本さんとは,研究を進める中で様々な経験を共にしてきました.特に,初めてのゼミ発表の前に練習会を開いたのは良い思い出になっています.それぞれ進路は違いますが,これからもお互い頑張っていきましょう.

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.データの所有権は経済産業省および JAXA にあります.

6 参考文献

Yasuda and Furuya (2013):Short-term glacier velocity changes at West Kunlun Shan, Northwest Tibet, detected by Synthetic Aperture Radar data, Remote Sensing of Environment, 128, 87-106

Jia Li et al.(2013):Deriving surface motion of mountain glaciers in the Tuomuer-Khan Tengri Mountain Ranges from PALSAR images, Global and Planetary Change, 101, 61-71

Aizen et al.(1997):Glacial regime of the highest Tien Shan mountain,Pobeda-Khan Tengry massif,Journal of Glaciology, V43, No14

小林知勝・飛田幹男・村上亮(2011):局所的大変位を伴う地殻変動計測のためのピクセルオフセット解析,測地学会誌, 第 57 巻, 第 2 号, 71-81

日本リモートセンシング学会(2011):基礎からわかるリモートセンシング 理工図書

藤井理行, 上田豊, 成瀬廉二, 小野有五, 伏見碩二, 白石孝行(1997):基礎雪氷学講座IV 氷河 古今書院

JAXA (<http://www.jaxa.jp/>)

Google earth (<http://earth.google.com>)