

氏 名 小 澤 拓

学位（専攻分野） 博士(理学)

学 位 記 番 号 総研大甲第462号

学位授与の日付 平成12年3月24日

学位授与の要件 数物科学研究科 極域科学専攻

学位規則第4条第1項該当

学 位 論 文 題 目 衛星干渉合成開口レーダ法の南極氷床域への適用

論 文 審 査 委 員 主 査 教 授 藤井 理行
教 授 森脇 喜一
教 授 澁谷 和雄
教 授 藤井 直之（名古屋大学）
大倉 博（防災科学技術研究所）

論文内容の要旨

The synthetic aperture radar (SAR) is an active remote sensing sensor which can create high resolution backscatter intensity images, and has been used for mapping of coastline and ice streams in the Antarctic ice sheet region for all seasons. Recently, SAR interferometry has been applied to generate a digital elevation model (DEM) and to detect the surface displacements associated with the earthquakes. However, application of the SAR interferometry technique to the ice sheet region in the Antarctic region has not been made enough, and has several problems to be solved.

We used the SAR data received by the Japanese Earth Resources Satellite 1 (JERS-1) from the onboard L-band SAR sensor (23.5 cm wavelength) and those by the European Remote Sensing Satellite 1 (ERS-1) from the onboard C-band SAR sensor (5.7 cm wavelength), to study the ice sheet dynamics in the two regions of the East Antarctic ice sheet.

The first region was the Casey Bay area, and two SAR data sets obtained on 7 December and 10 December of 1991 by ERS-1 were analyzed. The interferometric processing of the two SAR scenes produced clear interferogram on the Zubchaty Ice Shelf, which can be related to deformations by ocean tide. Although topographic fringes cannot be removed from the overall fringes, they can be considered as within 0.25 cycle (1.4 cm), since the surface undulation of the Zubchaty Ice Shelf is within 0~40 m height range. When we suppose that the obtained displacement fringes consist only of the vertical component, the vertical change of the Zubchaty Ice Shelf during 3 days interval is estimated as 41.5 cm at maximum; this change is consistent with the ocean tide change of 35.2 cm predicted from the ORI96 model by Matsumoto et al. (*J. Geophys. Res.*, 100, 25319-25330, 1996). At the transition zone between the ice sheet area and the ice shelf area, the grounding lines can clearly be identified by 1~3 km wide bands of dense displacement fringes in the interferogram. When appropriate values are adopted at the physical properties of ice, and when thickness of ice shelf is assumed as 300 m in the deformation equation by Holdsworth (*Ann. Geophys.*, 33, 133-146, 1977), the width of the transition zone results in around 70 m for the transient-creep model and around 400 m for the elastic deformation model, respectively. These values are smaller by a factor of 5~30 than the actually obtained values of about 2 km at the Zubchaty Ice Shelf in this study and at the Petermann Gletscher in Greenland by Rignot (*J. Glaciol.*, 42, 476-485, 1996).

The second region was the Sôya Coast area, and three time-serial SAR data sets were obtained on June 16, July 30 and September 12 of 1996 by JERS-1. The three-pass SAR interferometry method was applied to these SAR data, and we generated DEM and estimated the ice flow field around the Sôya Coast area. For simplicity, we assumed that the ice flow during 88 days (2 repeat periods of JERS-1) was constant. Interferometric fringes associated with ice flow/deformation were removed using the two SAR pairs, and the topographic fringes were extracted (three-pass SAR interferometry

method). The resultant topographic fringes were converted to the ellipsoidal height base on GRS-80 terrestrial reference frame. There are 23 suitable ground control points (GCPs) in the area concerned, covering the height range from 0 to 600 m. The most appropriate DEM was created in order that the model heights fitted the GCP heights in a least squares sense. The obtained DEM grids with a spatial resolution of 50 m by 50 m have a root-mean-square (rms) error of 15.3 m as compared with the GCP heights. As for the GTOPO30 model grids with a 30 arc-second resolution in the same area, similar comparison of the model heights with the GCP heights resulted in an rms error of 131.7 m, which is worse than the SAR derived DEM by one order of magnitude. It is also noted that 12 GCPs on the islands and coastal outcropped areas are incorrectly located outside of the land area when mapped in the GTOPO30 contours. Thus, SAR interferometry derived DEM has been proved most accurate in this study area.

The displacement fringes were extracted so that the synthetic topographic fringes were subtracted from the first interferogram. Although the obtained ice flow from SAR interferometry was limited only to the line-of-sight direction, the three dimensional ice flow vectors could be estimated by assuming the ice flow direction. We estimated the ice flow vector field on the assumption that the ice flow direction was consistent with the maximum gradient direction of the ice surface. Moreover, we calculated the maximum shear strain and the dilatation from the estimated ice flow vector field. The larger maximum shear strain values around the marginal areas of the ice stream indicate stronger deformation by stress at the transition zone from the slow ice flow area to the fast ice stream area. There is a good correlation between the negative dilatation area and the relatively positive magnetic anomaly area. Since relatively positive magnetic anomalies indicate relative highs of the subglacial bedrock relief, negative dilatation may mean compression of the ice sheet in the upstream side of the subglacial bedrock highs.

Although more refined analysis should be required with the combined interferograms taken by different wavelength and/or those taken from different look angle, SAR interferometry was shown to be a powerful tool for the studies of ocean tide, ice sheet dynamics and ice sheet mapping in the Antarctic marginal ice zone.

論文の審査結果の要旨

本学位論文は、衛星干渉合成開口レーダ（干渉 SAR）法を南極氷床域へ適用し、棚氷の変動、氷床域の地形標高モデル (DEM) の作成、氷床流動の検出を行ったものである。合成開口レーダは、高空間分解能の後方散乱波画像を作成可能なりモートセンシング技術であり、南極地域では氷床氷縁部や氷流域のマッピングに用いられてきた。近年、干渉合成開口レーダ法と呼ばれる測地的な SAR の応用技術が用いられるようになり、地形標高モデル (DEM) や地震に伴った地殻変動検出に威力を発揮しているが、南極地域においては干渉 SAR 法の適用はいまだ十分に行われていない。

本研究では、L-band の SAR が搭載された衛星 JERS-1 と、C-band の SAR が搭載された衛星 ERS-1 によって取得された SAR データに干渉 SAR 法を適用し、東南極大陸の 2 地域で棚氷と氷床の変動量の検出と DEM の作成を行った。

第一の適用地域は棚氷である。3 日間の間隔で取得された ERS-1 の 2 つの SAR データに干渉 SAR 法を適用し、海洋潮汐による海面変化に伴った棚氷の上下変動を示す干渉縞（変動縞）を明瞭に検出した。氷床と棚氷の境界域である transition zone では、棚氷のまげ変形を示す 1 ~ 3 km 程度の間隔に、間隔の狭い干渉縞があらわれており、氷床と棚氷の境界線である grounding line を明瞭に検出することができたことから、干渉 SAR 法は grounding line を検出する手法として有用であると考えた。また、干渉 SAR 画像から見積もったこの 3 日間の棚氷の変動量は、海洋潮汐モデルから推定した潮位差と良い一致を示した。

第二の適用地域は氷床沿岸域である。ここでは 44 日間隔で得られた JERS-1 の 3 つの SAR データを用いた。2 組の干渉 SAR 画像の位相差を計算して変動縞を除去し、地形縞のみを抽出、さらに、得られた地形縞から計算される地形高度が、Ground Control Point (GCP) における楕円体高を満たすように、最小二乗法的に地形縞を DEM に変換した。本研究で得られた DEM は、これまでこの地域でもっとも精度が良いとされてきた GTOPO30 モデルと比較した時、GCP において一桁程度良い一致（約 15m）が得られた。次に、得られた地形情報から地形縞をシミュレートし、first pair の干渉画像から除去することによって変動縞のみを抽出し、氷床流動方向は氷床表面の最大傾斜方向と一致するという仮定の上で、氷床流動ベクトル場を推定した。さらに、得られた氷床流動ベクトル場から氷床表面の変形を見るために、最大せん断ひずみと面積ひずみを計算した。ずり変形をしめす最大せん断ひずみは氷流両岸部で大きくなる傾向が得られたが、一般に氷流縁辺部ではずり変形が卓越すると言われており、得られた結果はこれと調和的である。

本論文は、衛星干渉 SAR 法を適用することにより、棚氷の変動、氷床域の DEM 作成、氷床流動の検出を見事に行い、地球規模の気候や海水準変動と密接に関連する氷床変動の今後の研究に重要な貢献をなす内容である。よって、本委員会は本論文が学位授与の対象として十分な内容を持っているものと認めた。