

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 18 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26340014

研究課題名(和文) レーダを用いた北極域ツンドラ湖の環境変動に関する研究

研究課題名(英文) Study on environmental monitoring of Arctic tundra lakes by using radar data

研究代表者

若林 裕之 (WAKABAYASHI, Hiroyuki)

日本大学・工学部・教授

研究者番号：30434070

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は気候変動が北極域陸域に及ぼす影響を評価することにある。CバンドおよびLバンド合成開口レーダ(SAR)データを使用して、北極域にあるツンドラ湖(サーモカルスト湖)の凍結および融解のモニタリング手法を検討し、気候変動が北極域の陸域におよぼす影響を評価した。過去20年以上アーカイブされているSARデータを使用して、アラスカ北部に散在するツンドラ湖のCバンドおよびLバンドの後方散乱係数の変化を解析して、凍結および融解時期の変化や成長速度を抽出し、長期間における気候変動の影響を評価した。また、今後継続して利用可能なSARデータについても、本研究の目的のために使用可能か否かを評価した。

研究成果の概要(英文)：The final goal of this research is to evaluate an effect of climate change into Arctic land area. In this research, we investigated a method to monitor freezing and thawing of tundra lakes (thermokarst lakes) in Arctic region by using C-band and L-band synthetic aperture radar (SAR) data. And then, we evaluated the effect of climate change into Arctic land area. We investigated the time series of C-band and L-band backscattering coefficients of tundra lakes located in northern Alaska by using the SAR data archived during more than 20 years. The effect of climate change was evaluated by extracting the ice growing speed and the freezing /thawing time changes. We also investigated the possibilities of currently available SAR data for the use of this research.

研究分野：マイクロ波リモートセンシング

キーワード：合成開口レーダ 北極域 環境計測

### 1. 研究開始当初の背景

アラスカやシベリア北部のツンドラ地帯では、陸地面積の数割程度が浅い淡水湖(サーモカルスト湖)で覆われている領域がある。例えば、図1に示すアラスカのノーススロップ地区では、陸地の約40%が湖で覆われている。湖水は9月末に凍結し始め、翌年の5月まで成長を続け、湖の氷厚は2メートル以上に達する。凍結期には湖底の堆積物で発生したメタンが、湖水下の水中に蓄積または湖水中に気泡として蓄えられていて、湖水が融解すると大気中へメタンが放出される[1]。

大部分の湖の水深は2メートルに満たず、冬期間には湖底まで完全に凍結するので、湖底堆積物からのメタン生成が減少するが、温暖化の影響で湖底まで完全に凍結しない湖が増加すると、融解期のメタン発生が増加する傾向となる。大気中のメタン濃度の増加で北極圏の気候が温暖化すると、湖水を薄くし、湖底の堆積物が融解している時間を長くし、結果としてさらにメタンの発生量を増やすという、北極圏の気候と温室効果ガスとの正のフィードバックが強調されることになる。このような湖は北極圏に広範囲に存在するため、湖水の成長・消滅やメタン発生量増大による広範囲な気候変化への影響が懸念される。以上より、気候変動が湖の凍結および融解に与える影響を調査することは、北極域における温暖化の陸域への影響を把握する上で極めて重要である。

リモートセンシングによるサーモカルスト湖の凍結や融解のモニタリングは、1970年代後半の航空機搭載サイドルッキングレーダ(SLAR)による観測で、後方散乱が大きい湖と小さい湖が存在するという興味深い現象を確認したことに始まる[2]。一連のSLARデータ解析および地上観測の結果、後方散乱の差は氷下に水が残っている(Floating ice)か、湖底に達している(Grounded ice)かの違いによるものと断定された[3]。入射したマイクロ波は氷底面まで到達し、氷底面で上方に反射されるため、氷下に水がある方がより強くマイクロ波を上方に反射することになる。さらに、湖水のコア試料解析から細い円柱状気泡の存在が後方散乱に寄与していることが推定された[3]。

1990年以降、合成開口レーダ(SAR)を搭載した人工衛星が打ち上げられ、人工衛星からの定常的な観測によって湖水の後方散乱係数の絶対値変化や後方散乱モデルによる散乱メカニズムが解明された[4][5]。さらに、地上気温が0°Cを超える6月以降の融解期において、湖水の後方散乱係数の反転現象が確認され、現地調査によってその散乱メカニズムの解明が実施された[6]。

以上より、人工衛星に搭載されたSARによる湖の凍結と融解をモニタリングする手法は確立されたが、陸域の気候変動と結びつけるような応用研究は進んでいなかった。

### 2. 研究の目的

本研究では、北極圏において広範囲に存在するサーモカルスト湖について、1990年代始めから20年以上にわたって取得されたSARデータを使用して、湖水の凍結および融解の年変化や湖水の成長速度に関する解析を行う。前章で述べた研究背景を踏まえ、気候変動が北極海沿岸の陸地にある湖の凍結および融解に与える影響を調査して解明することを目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究の期間中に、主に以下の2項目を実施する。

#### (1) SARデータ収集と詳細解析

過去20年以上にわたって取得されたSARデータを使用して、アラスカ北部からシベリアにかけて広範囲に存在する湖の後方散乱係数変化の詳細解析を実施する。解析に使用するデータは、宇宙航空研究開発機構(JAXA)やヨーロッパ宇宙機関(ESA)でアーカイブされている衛星観測SARデータ(ERS-1/2, JERS-1, ENVISAT/ASAR, ALOS/PALSAR)を入手する。

アラスカ北部については、アラスカ大学が運用しているアラスカサテライトファシリティ(ASF)があり、北極圏を観測したSARデータ(ERS-1/2, JERS-1, RADARSATおよびALOS)をアーカイブしている。シベリアについても一部はASFの観測範囲であり、ENVISAT、RADARSATおよびALOSデータ等を収集することによって、より広範囲の解析が可能である。

以上より、ERS-1が観測を開始した1991年以降を対象期間とし、アラスカおよびシベリアにおける湖を対象に解析を実施し、湖の凍結・融解開始時期、凍結最終時期のFloating iceとGrounded iceの湖の割合変化を抽出する。

#### (2) 気候変動の北極海沿岸に与える影響解析

(1)の解析を行うことによって、北極海沿岸に存在する湖の冬期間における後方散乱係数変化が明確となり、年内の凍結・融解開始時期、冬期間の湖水成長速度および凍結最終

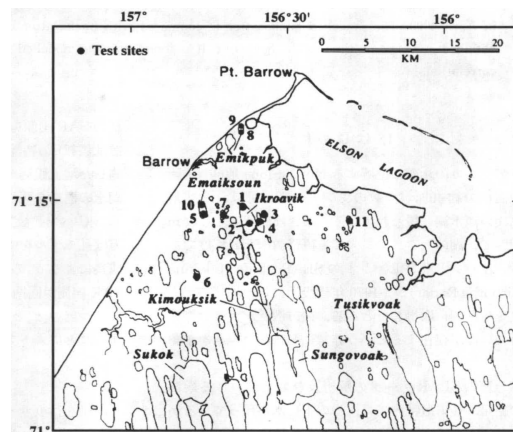


図1. ノーススロップ地区のサーモカルスト湖

期の Floating ice と Grounded ice の割合が判明する。以上より、20 年以上の期間の変化を抽出し、気候変動が北極海沿岸に散在する陸上の湖の凍結および融解に与えている影響を解明する。さらに、2014 年以降打ち上げられた ALOS-2/PALSAR-2 や Sentinel-1 等の SAR データについても継続して解析を実施することにより影響解析期間の延長を検討する。

#### 4. 研究成果

##### (1) SAR データ収集と詳細解析

###### ①アーカイブ SAR データの入手

SAR データについては、JAXA と ESA がアーカイブしているデータを調査し、それぞれの機関の研究公募を通じてデータを手に入れた。最終的には、ESA 関係のデータとして ERS-1/2 を 85 シーン、ENVISAT を 69 シーン入手することが可能であった。JAXA が保有しているデータについては時系列の变化解析が困難なものであったが、観測周波数の違いによる後方散乱係数の特性評価や、多偏波データの解析のためにデータ入手を行った。

###### ②湖氷のモニタリング手法

淡水氷のマイクロ波浸透深さは非常に大きいため、氷に入射したマイクロ波は氷底部まで達し、氷下面で上方に反射することになる。氷下面の反射は氷/水境界の方が氷/土境界よりも大きいため、氷下に水が残っている湖 (floating ice) の方が湖底まで凍結している湖 (grounded ice) よりもより多く上方にマイクロ波が反射する。水中には上面に近いところに球状気泡層、底面に近いところに円柱状の気泡層があり、この気泡がマイクロ波散乱に寄与することによって後方散乱を発生させる [4] [5]。以上より、氷下の水の有無や氷の成長は SAR で観測された後方散乱係数によってモニタリング可能であり、1990 年代初めに打ち上げられた ERS-1 に搭載された C バンド SAR データを使用した後方散乱係数の時系列変化を使用することによってモニタリング手法が確立された [4] [5]。さらに、floating ice と grounded ice の後方散乱係数が融解期においては逆転する現象が観測され、1997 年の 4 月と 5 月の 2 時期に実施された現地観測によって、融解期における湖氷の後方散乱メカニズムが解明された [6]。長期間の解析結果として、ERS-1/2 によって 1991 年～2011 年の湖氷成長がほぼ最大に達する 4 月後半に観測された C バンド SAR データから、バロー周辺の floating ice と grounded ice の湖の割合を算出した結果、grounded ice lake が全体に占める割合が、過去 20 年間で 60%から 20%に減少しているという結論が得られている [7]。

以上示したように、C バンド SAR データを使用した湖の凍結および融解をモニタリングする手法はすでに確立されている。従って、時系列に取得された C バンド SAR データから、

ツンドラ湖の凍結や融解のタイミングや凍結期の湖氷成長速度を抽出することが可能である。一方、L バンド SAR データについては、JERS-1/SAR データが 1992 年から 1998 年まで、ALOS/PALSAR データが 2006 年から 2011 年までアーカイブされている。しかし、これらの L バンド SAR データは、今までに湖の凍結や融解のモニタリングには使用された例は少なかった。

##### ③C バンド後方散乱特性

図 1 のノーススロープ地区にあるバロー周辺の地図において湖についている番号 (1～11) は、1992 年に現地調査を行ったサイトを示している。図 2 には、そのサイトの 1991 年 9 月 29 日から 1992 年 4 月 20 日にかけて ERS-1/SAR が観測したデータから抽出した後方散乱係数の時系列変化を示す [5]。図 2 から 1992 年の 2 月以降には後方散乱係数の大きいサイト (1, 2, 5, 8, 9, 10) と小さいサイト (3, 4, 6, 7, 11) に明確に分かれている。この後方散乱係数が大きい湖は floating ice であり、小さい湖が grounded ice に対応している。サイト 6 は 1 月には floating ice であったが、2 月には grounded ice に変化していることがわかる。

以上より、C バンド SAR データから抽出した後方散乱係数の時系列変化から、floating ice と grounded ice を分類できることがわかる。また、floating ice については、氷の成長に伴う後方散乱係数の上昇度合いから 11 月から 1 月にかけての氷の成長速度を推定することも可能である。さらに、融解期に発生する floating ice と grounded ice の後方散乱係数反転現象を観測することによって、融解開始時期を推定することが可能になると考えられる。

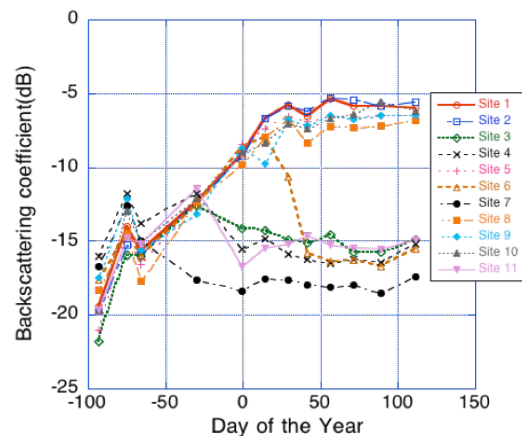


図 2. 1991 年から 1992 年にかけて ers-1 によって観測された C バンド後方散乱係数時系列変化.

過去 20 年以上にわたり取得された C-バンド SAR データを長期的に解析するために、ERS, ENVISAT および Sentinel の SAR データについて、偏波や入射角による後方散乱係数の違いについて解析を行った。

ERS と ENVISAT の SAR データについては、観測偏波(ERS:VV, ENVISAT:HH)が異なっている。偏波の違いによる後方散乱係数の差異を小さくするため、ENVISAT については入射角が小さいデータを選択して解析に使用している。ERS と ENVISAT の後方散乱係数の関係を図 3(a)に示す。図 6 から低入射角の SAR データについては偏波の違いによる後方散乱係数の違いは小さく、ERS と ENVISAT は継続した解析に使用できることがわかった。

ENVISAT と Sentinel は、運用期間が大きく異なるため、同一観測日のデータが存在しない。従って、ENVISAT は 2006 年度、Sentinel は 2015 年度のデータについて、Floating ice と Grounded ice の湖における後方散乱係数を比較した。結果を図 3(b)に示す。Sentinel の観測入射角は ENVISAT よりも約  $16^\circ$  大きいことによる後方散乱係数の差があり、長期的な解析において考慮する必要がある。

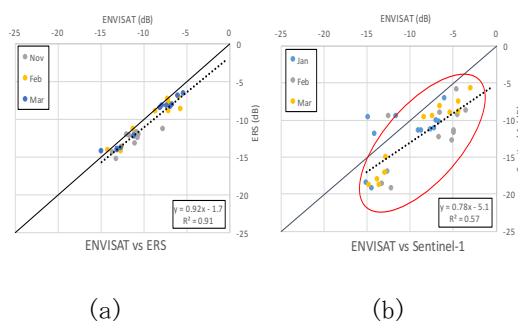
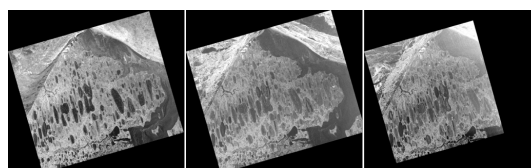


図 3 C バンド SAR の観測偏波や入射角による後方散乱係数の比較. (a) ERS と ENVISAT の比較 (b) ENVISAT と Sentinel の比較.

### ③L バンド後方散乱特性

図 4 に 2007 年から 2008 年にバローを観測した ALOS/PALSAR のデータ例を示す。凍結開始時期の 12 月のデータと氷の成長がほぼ終了する 4 月のデータを比較すると、L バンドのデータにおいても湖の後方散乱係数の変化を検出することが可能であることがわかる。PALSAR データから抽出した典型的な floating ice の湖(Ikroavik)と grounded ice の湖(Kimouksik)の後方散乱係数時系列変化を図 5 に示す。図 5 から floating ice と grounded ice の差は 3dB 程度であり、C バンド SAR で観測された差(10dB 程度)よりも小さいが、floating ice と grounded ice を区別することが可能であることがわかる。しかし、floating ice の氷厚変化に伴う後方散乱係数

の上昇が小さいため、氷厚変化を検出するのは困難であると考えられる。一方、PALSAR の観測モードには 4 偏波を同時に観測できるフルポラリメトリモードがあり、多偏波データを使用した散乱成分分解により散乱メカニズムを推定できる可能性がある。



(a) (b) (c)  
図 4. ALOS/PALSAR のバロー周辺の画像例. (a) 2007 年 12 月 22 日, (b) 2008 年 2 月 6 日 (c) 2008 年 4 月 6 日.

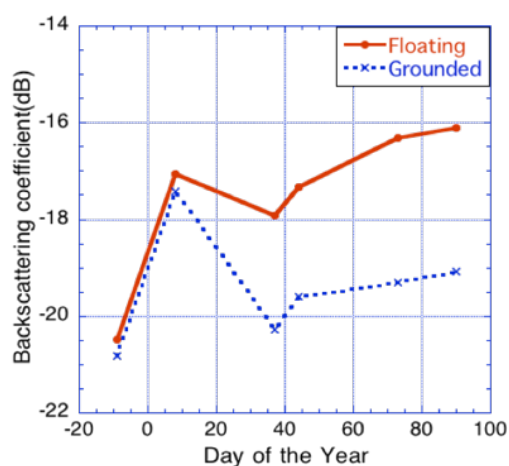
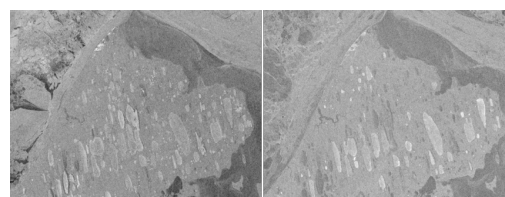


図 5. ALOS/PALSAR データから抽出した floating ice と grounded ice の後方散乱係数時系列変化.

### (2) 気候変動の北極海沿岸に与える影響解析 ① 詳細解析および考察

2007 年から 2008 年にかけて取得した ENVISAT の ASAR データについて、1991 年から 1992 年の ERS-1/SAR と同じサイトについて、後方散乱係数変化を抽出した。テストサイトの領域では、ENVISAT/ASAR の ScanSAR モードでデータを頻繁に取得している。



(a) (b)  
図 6. 2007 年から 2008 年にかけて ENVISAT/ASAR が観測したバロー周辺の画像例. (a) 2007 年 12 月 28 日, (b) 2008 年 4 月 26 日.

ScanSAR データは入射角範囲が広いため、ERS データと比較を行うために、入射角が 20 度から 30 度の範囲のものを検索してデータを入手した。図 6 に 1 月(凍結初期段階)と 4 月(湖水成長終了時期)の画像を示すが、ers-1 同様に floating ice と grounded ice の違いや湖水の成長に伴う後方散乱係数の変化が確認できる。

図 7(a) (b) (c) に、サイト 1, 3, 6 における 1991 から 1992 年と 2007 年から 2008 年の後方散乱係数の変化を示す。典型的な floating ice であるサイト 1 においては、湖水の成長に伴う後方散乱係数の上昇が、1992 年よりも 2008 年が遅れているのがわかる。典型的な grounded ice であるサイト 3 においては、1992 年と 2008 年の後方散乱係数の変化には大きな差がないことがわかる。また、1992 年には 2 月に floating から grounded ice に変化したサイト 6 については、2008 年には floating ice のままだったことがわかる。以上から、1992 年と 2008 年は湖水の成長に変化が見られることがわかった。図 7(d) には 1992 年と 2008 年の積算寒度を示すが、4 月時点での積算寒度に  $1000^{\circ}\text{C}\cdot\text{day}$  近い差があり、湖水の成長速度が鈍くなったと考えられる。

ALOS/PALSAR には 4 偏波観測モードがあり、それを使用して散乱成分分解を適用することによって、湖水の散乱メカニズムを推定することが可能である。図 8 にサイト 1 および 3 の NNED 法[8]による散乱成分分解結果を示す。PALSAR の多偏波データとしては、2009 年の 3 月 23 日、4 月 21 日および 5 月 25 日に観測されたデータを使用した。floating ice であるサイト 1 の散乱成分分解結果から、湖水の成長に伴う 2 回散乱成分と体積散乱成分の増加および融解期における表面散乱成分の増加が確認できる grounded ice であるサイト 3 の散乱成分分解結果からは湖水の成長や融解に伴う散乱成分の顕著な変化は見られなかった。

## ②まとめおよび今後の課題

北極域の陸地に広く存在するツンドラ湖の凍結および融解状態をモニタリングするため、バロー周辺の湖について C バンドおよび L バンドの後方散乱係数時系列変化を抽出し、floating ice と grounded ice の後方散乱特性を調査した。その結果、C バンド SAR データの floating ice と grounded ice の後方散乱係数の差は 10dB と大きいいため、L バンド SAR データよりも明確に floating ice と grounded ice を区別することが可能であることがわかった。しかし、L バンド SAR データも、C バンド SAR データが得られない場合は、補完データとして使用することが可能である。また、L バンドの多偏波観測データに散乱成分分解を適用することによって、氷の成長や融解に伴う湖水の散乱メカニズムの変化を抽出することができた。

今後は、将来取得できる SAR データを使用することによって、より長期間のツンドラ湖の凍結状態の変化を把握し、近年の気候変動が北極海沿岸の陸地に与える影響を評価する予定である。

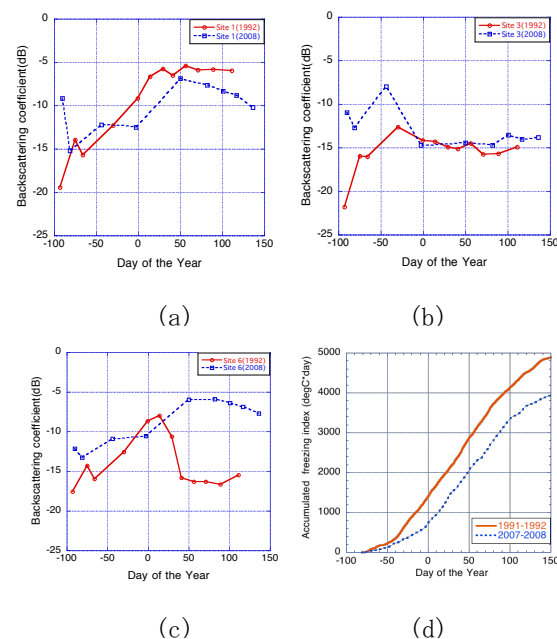


図 7. ERS-1 (1991-1992) と ENVISAT (2007-2008) の後方散乱係数時系列変化と積算寒度の比較。(a) サイト 1, (b) サイト 3, (c) サイト 6, (d) 積算寒度。

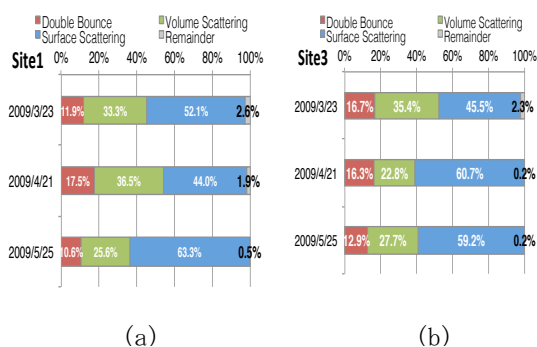


図 8. NNED 法による散乱成分分解結果。(a) サイト 1, (b) サイト 3。

## 参考文献

[1] S. A. Zimov, Y. V. Voropaev, I. P. Semiletov, S. P. Davidov, S. F. Prosiannikov, F. S. Chapin III, M. C. Chapin, S. F. Trumbore, and S. Tyler: North Siberian lakes: A methane source fueled by Pleistocene carbon. *Science*, Vol. 277, pp. 800-801, 1997.  
 [2] W. F. Weeks, A. G. Fountain, M. L. Bryan and C. Elachi: Differences in radar return from ice-covered North Slope lakes,

Journal of Geophysical Research, 83(C8), pp. 4069-4073, 1978.

[3] W. F. Weeks, A. J. Gow and R. J. Schertler : Ground-truth observations of ice-covered North Slope lakes imaged by radar, CRREL Research Report 81-19, 17 pp., Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, New Hampshire, 1981.

[4] M. O. Jeffries, K. Morris, W. F. Weeks and H. Wakabayashi : Structural and stratigraphic features and ERS-1 synthetic aperture radar backscatter characteristics of ice growing on shallow lakes in NW Alaska, winter 1991-92, Journal of Geophysical Research, Vol. 99, No. C11, pp. 22,459-22,471, 1994.

[5] 若林裕之, Martin O. Jeffries, Willy F. Weeks: アラスカ北部ツンドラ湖氷のCバンド後方散乱と散乱モデル, 日本リモートセンシング学会誌, Vol. 14, No. 3, 18-27, 1994.

[6] 若林裕之, 西尾文彦, Martin O. Jeffries: アラスカ北部ツンドラ湖氷の融解期のCバンド後方散乱特性, 日本リモートセンシング学会誌, Vol. 19, No. 4, 31-39, 1999.

[7] C. M. Surdu, C. R. Duguay, L. C. Brown, and D. F. Prieto : Response of ice cover on shallow lakes of the North Slope of Alaska to contemporary climate conditions (1950-2011): radar remote-sensing and numerical modeling data analysis, The Cryosphere, 8, 167-180, 2014.

[8] J. J. van Zyl, M. Arii, and Y. Kim : Model-based decomposition of Polarimetric SAR covariance matrices constrained for nonnegative eigenvalues, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, Vol. 49, No. 9, pp. 3452-3459, 2011.

## 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)

[雑誌論文] (計 1件)

① 若林裕之, 西戸義博, 池浦友亮: CバンドおよびLバンドSARによるツンドラ湖モニタリング, 東北の雪と生活, 日本雪氷学会東北支部, 査読無, Vol. 30, pp. 11-16 (2015.12)

[学会発表] (計 7件)

① 池浦友亮, 中村和樹, 若林裕之: Cバンド合成開口レーダを用いたツンドラ湖氷モニタリング, 日本リモートセンシング学会第61回学術講演会, 新潟県新潟市 新潟テルサ, pp. 153-154 (2016.11.01)

② 池浦友亮, 中村和樹, 若林裕之: Cバンド合成開口レーダを用いたツンドラ湖氷モニタリング, 日本リモートセンシング学会第

60回学術講演会, 千葉県習志野市 日本大学生産工学部, pp. 5-6 (2016.5.12)

③ 池浦友亮, 西戸義博, 中村和樹, 若林裕之: Cバンド合成開口レーダを用いたツンドラ湖氷モニタリング, 日本リモートセンシング学会第59回学術講演会, 長崎県長崎市 長崎大学, pp.237-238 (2015.11.27)

④ 西戸義博, 池浦友亮, 中村和樹, 若林裕之: 合成開口レーダを用いたツンドラ湖の環境変動モニタリング, 日本リモートセンシング学会第59回学術講演会, 長崎県長崎市 長崎大学, pp.31-32 (2015.11.26)

⑤ H. Wakabayashi and Y. Nishito: Monitoring tundra lakes with C-band and L-band SAR data, Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Milan Italy, pp.2076-2079, (2015.7.28)

⑥ 西戸義博, 中村和樹, 若林裕之: LバンドSARを用いたツンドラ湖の環境変動モニタリング, 平成27年日本リモートセンシング学会学術講演会, 千葉県千葉市 千葉大学, pp. 109-110 (2015.6.2)

⑦ 若林裕之, 西戸義博, 池浦友亮: CバンドおよびLバンドSARを用いたツンドラ湖モニタリング, 日本雪氷学会東北支部大会, 福島県郡山市 日本大学工学部 (2015.5.16)

[その他]

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

若林 裕之 (WAKABAYASHI Hiroyuki)

日本大学・工学部・教授

研究者番号: 30434070