

論文

## 航空機搭載 6 GHz マイクロ波放射計による 冬季アラスカの地表面状態の観測

Nuerasimuguli ALIMASI<sup>1,2\*</sup>, 榎本浩之<sup>1,3</sup>, Jessica CHERRY<sup>4</sup>,  
Larry HINZMAN<sup>4</sup>, 亀田貴雄<sup>2</sup>, 杉浦幸之助<sup>5,6</sup>, 堀 雅裕<sup>7</sup>

### 要 旨

近年、温暖化が進む北極圏では雪氷の融解や減少が顕著になっている。高緯度域の雪氷圏の観測では、日射を必要とせず天候の影響を受けないマイクロ波放射計による観測が有効である。衛星による積雪や海水観測は、重要な気候情報として観測されてきた。衛星の観測ピクセルの中には多様な地表面状態が入る。特に、北極域の観測では視野内に北方森林域やツンドラの湖沼群が入る。より正確な雪氷情報の取得には、変質の大きい積雪内部、凍土など積雪下の地表面状況、森林からのマイクロ波の放射の影響などを考慮する必要がある。従来のマイクロ波観測では 37 GHz, 19 GHz が積雪の観測に用いられたが、この研究では積雪深層や底部の情報を取得できる低周波の 6 GHz の利用を検討した。この研究では、可搬型マイクロ波放射計を用いて、冬季のアラスカの森林や湖沼域上空からの航空機観測を行なった。凍結している湖では、積雪に覆われていても 6 GHz の輝度温度は著しく低下することが確認された。また、森林が密集した場所では輝度温度は増加した。一方、植生の無い山岳斜面では、表面は低温であるが、内部から放射される低周波のマイクロ波の輝度は低下しなかった。これらの観測結果から高緯度の積雪で覆われた地域について、低周波のマイクロ波による観測可能性を検討する。

キーワード：マイクロ波、アラスカ、積雪、湖沼、森林

Key words: microwave, Alaska, snow cover, lake, forest

1 国立極地研究所

〒190-8518 東京都立川市緑町 10-3

2 北見工業大学

〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地

3 総合研究大学院大学

〒190-8518 東京都立川市緑町 10-3

4 アラスカ大学フェアバンクス校

909 Koyukuk Drive, Fairbanks, AK 99775-7270, USA

5 富山大学

〒930-8555 富山市五福 3190 富山大学極東地域研究センター (理学部)

6 海洋研究開発機構

〒236-0001 横浜市金沢区昭和町 3173-25

7 宇宙航空研究開発機構

〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1

\* 連絡先: alimasi.nipr@gmail.com

### 1. はじめに

#### 1.1 雪氷圏の気候指標

北極域では急速な温暖化が起きている。特に北緯 60 度以北では全球平均の 2 倍の速度での温暖化が起きているといわれている (例えば, IPCC, 2013, Figure 2.20, Bekryaev *et al.*, 2010)。Bekryaev *et al.* (2010) は、1875-2008 年のデータから北半球平均では 100 年につき 0.79°C の昇温をしたのに対し、北極域陸上では 1.36°C と約 2 倍の速度で昇温したことを報告した。北緯 60 度以北にはアラスカやシベリア、スカンディナ비아半島などの北極域の陸域と海水域があるが、陸域では様々な森林域や湖沼群の雪氷被覆の把握や変動の監視が重要

である。

また、温暖化により多降雪が報告されている一方で、春の雪解けが早まることが予想されている。これらは融雪期の水循環を活発化させる。融雪の進行は春の気候を決め、その後の夏季の土壤水分や植生にも影響する (Sturm *et al.*, 2005)。北極の気候変動として、永久凍土の融解が注目されている。永久凍土帯では水はけが悪く、融解水は池や湖 (Thermokarst ponds and lakes) を作る。その池の様子が長期的に変わってきていることも観測されている (Riordan *et al.*, 2006)。彼らはアラスカの 50 年間の温暖化との対応を調べ、フェアバンクスを通る経度帯での調査から、北極海沿岸から太平洋沿岸までの南北縦断地域において乾燥が進んでいることを見だしている。Plug *et al.* (2008) は、カナダのツンドラ域の湖の長期変化を調べ、湖の面積が減少していることを報告している。湖の変化はカナダでは多くの調査例があるが、湖は生活圏にも近い場合が多く、また景観にも入ってくるので、社会にとり関心が高いものである。

Yoshikawa and Hinzman (2003) は、永久凍土帯の湖沼 (Thermokarst Pond) と地下水や凍土の関係性を調べた。永久凍土帯の地下構造やどこに水体があるかなどの調査とともに、池の内部の凍結、融解の進み具合、底部までの凍結なども観察している。積雪下の状況、地中水、湖の結氷融解などの貴重な連続測定結果を示している。

Olsson *et al.* (2003) は北極の寒冷期を 5 つのステージに分けて、エコシステムへの影響を考えた。寒冷期を Early snow, Early cold, Deep cold, Late cold, Thaw の 5 つに分け、日射、融解への寄与、気温、積雪、地温、土壤水分、凍結開始と融解の冬期の連続記録を紹介し、北極の気候変動に対するそれぞれの時期の役割など示している。

これら多くの北極域の雪氷現象の観測手段として、アクセスの難しい広域観測という観点からはリモートセンシングが有効である。衛星リモートセンシングでは、積雪分布は可視近赤外によって観測されている (Hori *et al.*, 2015)。

### 1.2 マイクロ波による積雪観測

一方、マイクロ波放射計による積雪観測への努力は長年続けられている。可視や赤外が晴天でな

いと観測できないのに対し、マイクロ波は全天候性である。また日射のない夜間や極夜の時期でも観測可能である。しかし、マイクロ波による観測は、積雪の雪質や温度構造により影響を受けるために、精度向上に向けての努力が続けられている。マイクロ波による積雪域の観測は、Chang *et al.* (1976) 以来、主に 18 GHz や 36 GHz が用いられてきた。これは積雪により、地表から放射される 36 GHz は減少するものの、18 GHz は減少が少ないので、この差を観測することにより積雪水量を推定するものである。北アメリカの大平原など植生がなく平坦で、急な温度変化や積雪変質の起きていない積雪域では、この手法が多く使われてきた。

マイクロ波による積雪情報は、気候モデルの検証や、他の衛星観測と合わせて利用される。Muskett and Romanovsky (2011) は、GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) の重力測定から観測される地下水質量の変化とマイクロ波観測による積雪データを組み合わせて調査している。広域の積雪深データとしては衛星マイクロ波観測データが主要な情報源である。複数の衛星データを複合させて利用していく中で、マイクロ波による積雪深変化の観測精度が全体に影響する重要な要素になる。地域や時期に依らない精度の確認が必要である。

### 1.3 マイクロ波測定に影響する要因

小池ら (1999) は、北半球高緯度でのマイクロ波による積雪観測の適合性を評価している。適合性が悪い場合の原因として、粒子の大きなきもざらめ雪の影響をあげている。この状態では 37 GHz のマイクロ波放射は散乱により減少するため、18 GHz との差がさらに大きくなり、積雪が多めに推定され、過大評価となる。森林域では地表からの放射が樹冠で吸収される一方で、森林からの放射も影響する。粒径と森林の扱いへの注意が指摘された。

筒井ら (2010) は、マイクロ波による積雪観測の精度向上のために、計算に凍結土壌層の導入を行なった。乾雪・土壌は共に誘電媒体であるが、雪粒子の誘電率 (実部) は約 3.15、土粒子の誘電率 (実部) は約 4.70 とほぼ等しいため、乾燥した土壌は乾雪にはほぼ等しい誘電媒体として評価され

てしまい積雪下の凍結土壌層も積雪層と誤判断される。このため積雪深が過大評価されるとしている(筒井ら, 2009)。一方、森林域では、森林も水分を多く含む媒体であることから、周波数が高いほど大きいマイクロ波を射出する。積雪の存在による 18GHz と 37GHz の差を少なくしてしまうため、積雪が過小評価される。凍結前の土壌は水と空気が混在した背景のなかに土壌粒子が密に詰まっている。凍結後は、水でなく水と空気が混在した背景のなかに土壌粒子が密に詰まっている。シベリアのタイガでの観測から、土壌内の凍結は積雪被覆が開始すると同時に開始することを報告している。氷の割合が 20% に達すると、その後は大きく変動しない。このことから凍結土壌層における氷の占める割合を 20% としてモデル化して、推定精度を上げた。このモデルを世界各地で有効に使うためには、地表の凍結の判断が重要な条件となる(筒井ら, 2010)。

#### 1.4 マイクロ波観測の空間分解能

マイクロ波放射計観測の一つの問題は、観測の空間分解能が粗いことである。衛星観測では 10 km 以上の空間分解能になることがほとんどであり、その観測瞬時視野の中に、様々な地表面状態が入る。北極域では、積雪、森林、ツンドラ、湖沼地帯などがある。筒井ら(2009)や Ueno *et al.*, (2007) は、チベット高原の冬季観測において、積雪が数メートル規模の窪地にパッチ状に堆積していること、その場所では凍土が存在しているものの積雪のないところでは日射により地表面融解層が存在しており、衛星観測ではこれらの混在した状態を見てしまうことを述べている。表面的には均等に広がっているように見える凍土帯ではあるが、わずかな起伏により積雪分布がパッチ状になるという、空間的に不均一状態での問題を指摘しており、積雪だけでなく土壌の状態により誤差が生じていることを示している。

また、マイクロ波が持つ空間変化についても、実際の積雪の広域観測から Sturm and Benson (2004) が、アラスカ、グリーンランド、南極の解析を行なった。空間スケールとしては 10 m, 100 m, 1 km~100 km のスケールでの特徴をまとめている。

一方でマイクロ波観測の問題である低い空間分

解能でも気候情報として有効性であることが報告されている。Kim and England (2003) はアラスカ北部のツンドラ域で通年の地上マイクロ波放射観測を実施し、その結果と衛星観測との比較をしている。地上センサーの観測は 2×4 m の範囲であり、衛星搭載センサーの観測視野は 43×69 km と大変大きい。観測視野は異なるものの、年間を通じた比較から、時間変化の特徴は大変良い一致を示した。測定値の絶対値については、冬期間の低温期は地上センサーの方が低めの値を示しているが、その差はわずかであった。これらの結果から、ツンドラ域では植生や地形の変化は比較的少なく、観測視野の粗い衛星搭載センサーでも有効であり、地表分解能が悪い衛星マイクロ波観測であっても、北極域のツンドラや永久凍土域の変動の長期観測に有効であることを示している。

#### 1.5 マイクロ波の透過性

マイクロ波の利点には透過性がある。Surdyk (2002) は、6.6 GHz のマイクロ波は極地などの乾雪では 20 m ほどの浸透深さを持つ。寒冷域では積雪下の地面の凍結が起きているが、1~10 GHz のマイクロ波は凍結した地面に対し 10 cm までの浸透深さを持つことを示した(Rao *et al.*, 1988)。マイクロ波センサーにより積雪下の地表面温度を調べることが可能である。Taras *et al.* (2002) は、6 GHz のマイクロ波放射は積雪の下の地表面温度に影響を受けることを利用し、アラスカ北部のノーススロープにあるトゥーリック川(Toolik River)を境に北が低温、南が高温になっているという地域差を見出した。この温度分布は、海岸域と内陸域に区分されており、この境界付近では気温よりこの測定した地表面温度の地域差が大きい。これは雪や風、山岳近くの起伏など地形のせいとしている。

#### 1.6 森林の影響

マイクロ波による様々な地表面被覆観測において、森林は大きな問題である。森林域では樹木からの放射により、36 GHz と 19 GHz の差が少なくなってしまうこと、融雪期では高周波(36 GHz)の放射が大きくなるため、やはり差が小さくなってしまふことで誤差の原因になっていた。このように植生からの放射も受けることが報告されており、測定の誤差の原因ともなるが、これはマイク

ロ波による植生の指標としての機能も持っていることを示す。

Foster *et al.* (2005) は、マイクロ波による積雪観測の誤差について検討し、植生の影響と積雪の粒径とマイクロ波の測定精度の影響を比較している。Langlois *et al.* (2011) は森林の幹の水分量 (Stem volume) の影響が大きいことを指摘し、航空機観測との比較から 18 GHz, 37 GHz のデータの補正を行なって精度を上げる方法を提案した。

また、Santi *et al.* (2012) は、森林域の評価のために低周波 10 GHz を用いている。彼らは、夏期の森林の緑化により、10 GHz の PR (Polarization Ratio) が増加することを利用して指標にしている。対応させる森林を表す指標として、Vegetation Biomass (VB) を用いた。VB が大きい場所や季節においては、地表の観測が難しいと判別し、誤差の混入を避けた。森林自体がマイクロ波の放射を行うが、それは植生が持つ水分量 PWC (Plant Water Content) による。PWC が VB そして、低周波 (X band: 10 GHz) の V と H より求める Polarization Index PI<sub>x</sub> を指標として利用した。PR を用いた。また PWC が大きくなるとの V と H の差が小さくなり、PI<sub>x</sub> は小さくなる。密な森林域で垂直偏波と水平偏波の差が少なくなるのは、放射の方向依存性が少なくなることを示す。土壌水分は 6 GHz との線形関係を示し、土壌水分が増加するとマイクロ波放射が減少する。これらの特徴により植生の状況をマイクロ波で観測し、指標化して利用している。積雪や土壌水分の測定精度が落ちる時期や場所を避けることを提案し、森林からのマイクロ波放射をモデル計算で補正する試みもある (Langlois *et al.*, 2010)。

### 1.7 北極圏の湖沼観測

Sturm and Liston (2003) は、アラスカの北部の凍結した湖の上の積雪の研究の調査を行なった。アラスカの沿岸地域の平原の 25% が浅い湖で覆われていることを述べ、寒冷期間の 10 月~6 月まで凍結していることを報告した。湖の上の雪は薄く、締まっており、断熱性が陸上の雪の半分であることを示した。Derksen *et al.* (2005) はマイクロ波による積雪観測の誤差として、森林やツンドラで積雪量が過小評価になることを解析している。地上とヘリコプターによる広域観測を実施

し、衛星観測と 11 月は一致したものの 3 月は差が大きくなった。積雪構造の影響とともに、点化する湖沼群の影響を指摘している。原因はツンドラ域では多くの湖沼が存在し、冬季は凍結した湖沼の上に積雪がある。このような積雪域では高周波側のマイクロ波放射が大きくなる。これは陸上の積雪域からのマイクロ波放射とは逆である。このような湖沼は衛星観測のサブグリッドスケールで存在しているため、積雪観測の誤差の原因となる。

Lemmetyinen *et al.* (2009) はフィンランドとカナダにおいて航空機観測の結果を比較し、地形の複雑さの影響を検討した。両地域で共通の特徴が得られているが、6.9 GHz による湿地や凍結の上に積雪がある状態の観測を行なった。Derksen *et al.* (2009) はアラスカからカナダにかけての積雪の特徴を調査した。マイクロ波の観測との比較では、湖の影響についても報告している。ROS (Rain-On Snow) による積雪中の ice lens の検出に 37 GHz で行えることを紹介している。

### 1.8 マイクロ波の利用

低周波のマイクロ波観測では様々な観測の可能性が考えられる。本研究ではアラスカにおける航空機観測 6 GHz の測定結果と赤外線を合わせて、解析を行なった。そこでは森林域でのマイクロ波観測を行い、様々な地表の種類に対するマイクロ波放射の違いを測定した。本論文ではまず基本情報として寒冷期の観測結果について報告する。

観測対象の植生の多寡や種類は、モニターカメラにより記録し、解析の際に参照した。

## 2. 観測装置

航空機に搭載して観測したマイクロ波放射計 MMRS2: Microwave/Millimeter-wave Radiometer System2 (三菱電機特機システム(株)製)の外観を図 1 に、仕様を表 1 に示す。MMRS2 は可視のモニターカメラ、赤外放射温度計も搭載している。マイクロ波は 6.925 GHz を観測する。マイクロ波は 150 ms、赤外線は 400 ms の積算測定を行ない、1 秒間隔での記録が可能である。

本研究ではフェアバンクス周辺の地域において冬季の航空機観測を実施した。航空機観測で使用した航空機はセスナ 182 である (図 2a)。機体底

部の観測窓よりセンサーを取り付けて観測を行なった (図 2b). 航空機観測では, マイクロ波放射計は鉛直向きに設置した. 衛星センサーによる偏波観測として用いられる入射角 55 度の傾斜はつけていない. これは小型機への取り付けの制限のためであるが, 今回の観測では様々な物体からのマイクロ波放射の違いを見ることに目的があった. マイクロ波放射計の観測視野角内には機体が入らないように放射計を取り付けた. なお, 放射計の観測範囲はモニターカメラ画像で確認できる仕様になっている.

観測では, 積雪期の様々な地表面状態や, 森林の植生の種類や密度の目視判別も行っている. 航空機観測例 (Markus *et al.*, 2006, Tamura *et al.*, 2015) などもあるが, 海水域での観測例は多いものの, 陸域ではマイクロ波放射計観測例は少ない.



図 1 本研究で使用した可搬型マイクロ波放射計 (MMRS2). 写真はポーカーフラット観測サイトで積雪観測中の MMRS2 の様子.

### 3. 観測

観測地域はアラスカ内陸部のフェアバンクス周辺である (図 3a, b). 航空機により, 森林域や湖や湿地, 山岳地域を観測した. これまでの航空機観測 (Langlois *et al.* 2011) ではカナダの観測例はあるもののアラスカでの観測例は少ない. 観測を行なった 2015 年 3 月 10 日の観測条件を表 2 に示す. 観測対象とする森林帯や湖, 池などは, 現地で年間を通じてこの地域の飛行観測を行っている共著者 (Jessica Cherry) の観測活動域の情報と飛行中の目視観測により決定した. 天候は晴れで, 観測高度は 500 m であった. センサーの観測視野角が 33 度のため, 地表では直径約 300 m 観測視野になっている.

航空機観測は 2015 年 3 月 10 日の 11:40 から 14:40 (現地時間) まで約 3 時間の観測を行なった. 観測のインターバルは 1 秒で, 13 種類の地域

表 1 可搬型マイクロ波放射計の仕様.

Item	Function
Ferquancy (6 GHz - V/ 6 GHz - H)	6.925 GHz + 0.2 GHz
Observation tepmerature range	3 - 1200 K
Accuracy	1 K Typ.@300 K
Observation viewing angle	33 deg
Power input (Body)	Battery/ DC 10 V - 17 V
Power input (heater)	DC 0 V - 27 V
Battery	15 V, 8.8 Ah
Battery charging time	About 9 hours
External output	LAN
Inferared temperature	(Wireless/ wireline) 233 -773 K
Camera	Visible
Operating environment	Temperature: -20°C - +40°C Humidity: Less than 80%
Dimension (Body)	380 mm x 500 mm x 165 mm (Width x Depth x Height)
Weight	About 12 kg

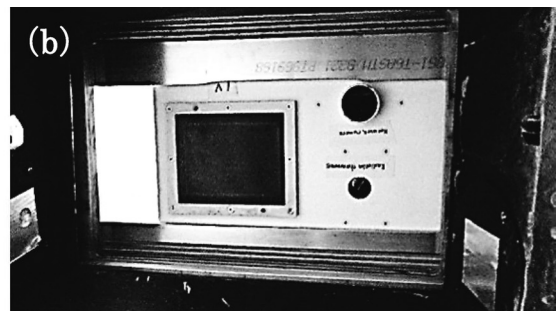


図 2 (a) 飛行観測に使用したセスナ 182. (b) 機内の床面に設置した MMRS2 の状況.

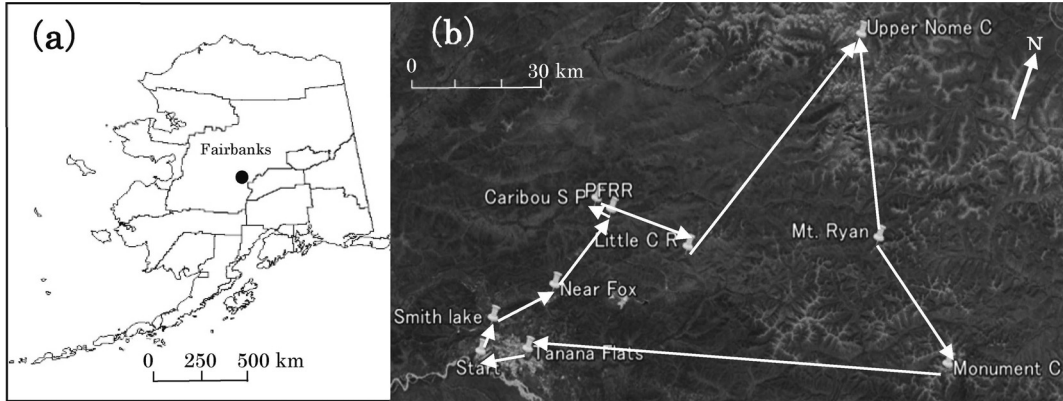


図 3 (a) 飛行観測を実施したアラスカ州, およびフェアバンクス周辺の (b) 飛行観測ルート.

表 2 航空機観測の条件.

Item	Condition
Measurement date and time	10 Mar 2015, 11:40-14:42
Observation area	Fairbanks, Alaska
Sampling interval (sec)	1
Air temperature (°C)	-19.5
Weather	Sunny
Flight height	500 m
Frequency	6.925 GHz
Observation angle	90 deg

に対してデータを集計した. 観測ルートを図 3 (b) に示す. 観測ルートは, フェアバンクス空港よりポーカーフラットリサーチレンジ (PFRR), ライアン山 (Mt. Ryan), チェナ川上流からフェアバンクスに戻るルートである. ルート上に, 湖 (スミスレイク), 湿地, PFRR の周辺, シラカバ, トウヒの森林域, 山岳域, チェナ川周辺域も含む. 森林域においては, 植生の密なところや疎なところでの観測を行なった. フェアバンクス周辺では, シラカバやシロトウヒ, クロトウヒが分布している. また湿地や草原なども存在している. 高山域では, 積雪は固く圧雪され, 高い植生は見られない.

なお, 航空機に搭載したマイクロ波放射計を用い, アラスカ大学構内でのセンサーキャリブレーションと積雪の観測, PFRR での参考データ取得も行なっている. 観測日である 2015 年 3 月 10 日の離陸時の気温は  $-19.5^{\circ}\text{C}$  であった. アラスカ大学フェアバンクス校内に設置した温度記録計によ

る気温データを図 4 に示す. フェアバンクス周辺では 2 月下旬から日最高気温が  $0^{\circ}\text{C}$  を越える日が現れていたが航空機観測の日は低温であった.

また, 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の地球観測衛星 GCOM-W に搭載されているマイクロ波放射計 AMSR2 のデータもアラスカの地域比較のために利用した.

## 4. 観測結果

### 4.1 観測結果概要

航空機観測より得られた 6GHz のマイクロ波放射輝度および赤外放射温度の値の分布を図 5 (a), (b) に示す. 図 5 (a) に観測データを時系列でならべたものを示す. 図 5 (b) には, 赤外放射温度  $IR$  (Infrared) とマイクロ波放射輝度温度  $TB$  (Brightness temperature) の散布図を示す. 観測は鉛直方向で行われているため, 垂直偏波 ( $V$ ) と水平偏波 ( $H$ ) の違いはない. 図 5 (a) には観測で得られた全データを示している. 観測されたデータの変動は大変大きい. 衛星マイクロ波観測では 20km 以上の粗い空間スケールでのデータを見ているが, 6GHz は空間的な変化は少ない. しかし, この航空機観測からは, 6GHz でも場所による差が大きく, 衛星観測ではわからない多様な状況を示していることがわかる.

この中から本観測で注目する地表面状態のデータを抽出して特徴をまとめた. 13 種類の地表面の観測をしている. マイクロ波放射の観測値は図 5 (a) の時系列データを見ると, 240~260 K に多

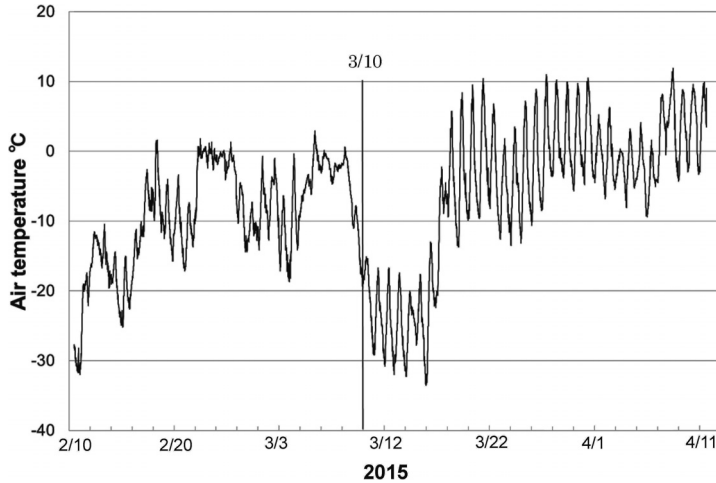


図 4 2015 年 2 月 10 日～4 月 10 日までの気温データ。中央の黒線は航空観測日 3 月 10 日を示す。

く分布するが、何度か 200 K まで顕著に降下していることがわかる。赤外放射温度による表面温度の観測からは、250～260 K (−23～−13℃) が多いことがわかった。マイクロ波が顕著に減少した箇所においても、表面温度は変化していないことがわかる。マイクロ波の値の方が赤外放射温度計の値よりも下回るが、観測中盤において、マイクロ波の値の方が赤外放射温度の値より大きくなり、大小が逆転する様子も見られている。

#### 4.2 データ分布概要

観測結果から、表面温度とマイクロ波放射の関係をまとめた。図 5 (b) の観測データ分布から、観測対象が観測面全域を占めるデータサンプルを抽出し図 6 に示す。マイクロ波の射出率  $\epsilon$  を式 (1) のように求めて図に書き込んでいる。

$$\epsilon = TB_6 / IR \quad (1)$$

ここで、 $TB_6$  は周波数 6 GHz の輝度温度 (K)、 $IR$  は赤外放射温度 (K) を示す。

$\epsilon$  ほとんどの地点は  $\epsilon = 1.0 \pm 0.1$  の範囲であるが 0.8 という小さな値を示すところもある。

ここで代表的な観測域として選んだ観測対象は 13 種類である。それらは、1. Dense black spruce (密集したクロトウヒ)、2. Dense white spruce (密集したシロトウヒ)、3. Dense birch (密集したシラカバ)、4. Black spruce (クロトウヒ)、5. Sparse white spruce (疎なシロトウヒ)、6.

Mixed spruce & birch (トウヒとシラカバの混合)、7. Scrub & willows (灌木などとヤナギ類)、8. Deep compacted snow (山地の深い圧雪)、9. Bare ground snow (野原の積雪)、10. Marsh (沼地、湿地)、11. Wet land (湿原、湿地)、12. River side (川沿い)、13. Lake (湖) である (表 3)。これら 13 種類の観測対象域のモニターカメラ画像を図 7 に示す。

以下に特徴的な地域について説明する。

- ・山地の深い圧雪：降った雪が、長時間同じ状態で保って、さらに風の影響で軽い積雪が飛ばされ、残る分は時間の経過により圧密され、また降雪になり、同じようなことが何回も繰り返されてからさらに固められた状況になったもの (図 7 の No. 8)。
- ・野原の積雪：野原の凹凸が降雪や風の影響で埋め込まれ、微量の積雪深で覆われている広域の状況 (図 7 の No. 9)。
- ・沼地、湿地：基本は雨の多い季節以外は水がないことが起こる湿気の低い微量の草が入っている地域を指す (図 7 の No. 10)。
- ・湿原、湿地：地形とさらに川や海の影響により定期的に低地が浸水する状況を指す (図 7 の No. 11)。

図 7 の中の円がマイクロ波の観測域を示している。赤外放射の観測域はその中心部付近である。対地高度が 500 m であるため、赤い丸の直径は 300

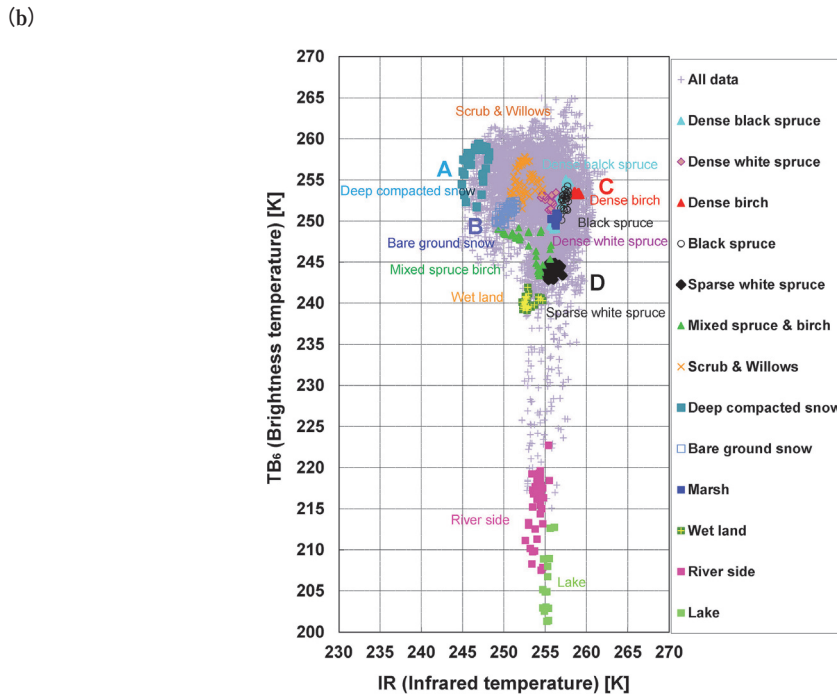
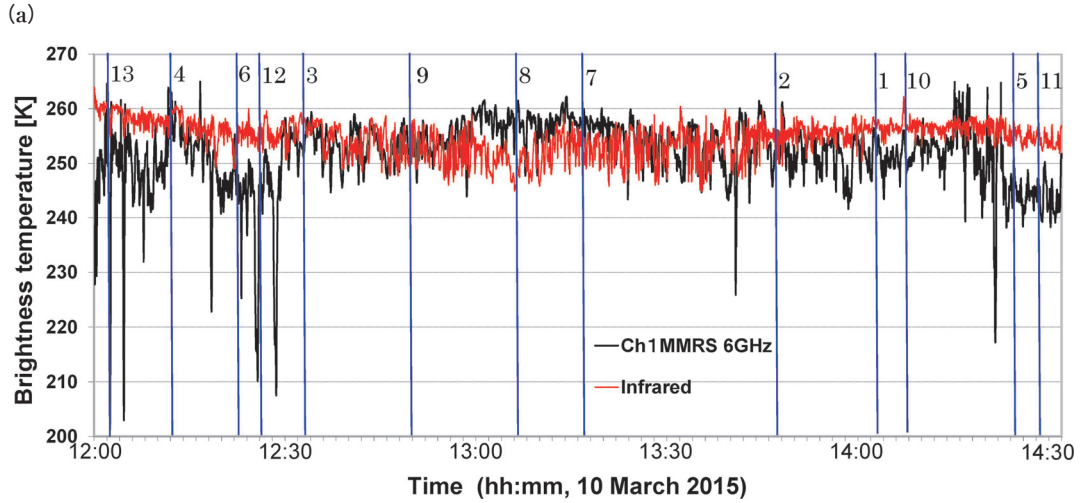


図 5 (a) 航空観測によるマイクロ波輝度温度と赤外温度の時系列データ (赤: 赤外温度, 黒: 輝度温度). 1 から 13 の数字は, 表 3 に示す観測対象の例である. (b) 航空観測によるマイクロ波輝度温度と赤外温度の散布図.

m である. マイクロ波の観測範囲が 200~260 K, 一方, 表面温度は 245~265 K であり, マイクロ波の変動幅の方が大きい. 表面温度に対してマイクロ波輝度温度の観測値の幅が大きいことから, 低周波のマイクロ波放射の情報より積雪特性や積雪

下の状況, 森林の影響の観測の可能性を示唆している.

観測結果から 200 K まで減少する地域があるが, これは湿地などに対応している. 詳細は 4.3 節で述べる. 表面温度が低い地域は, 高山域に対



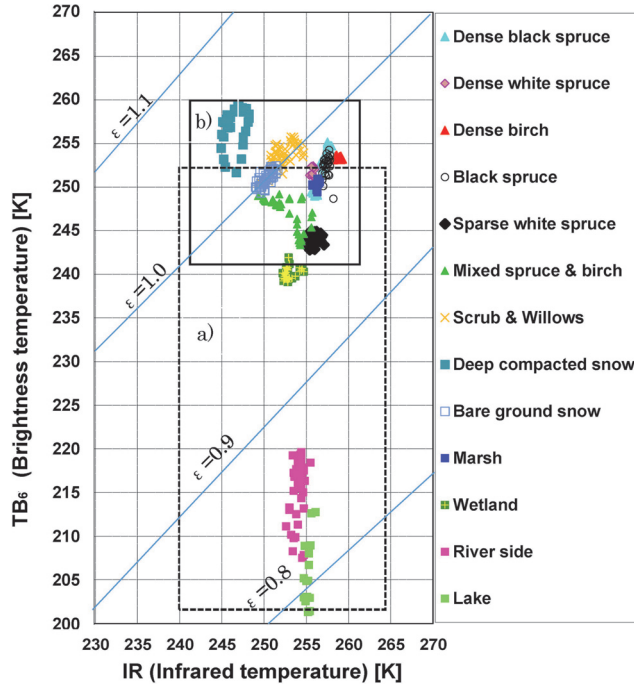


図 6 航空観測による各対象物のマイクロ波輝度温度と赤外温度データ (a) 湿地域, (b) 植生域.

応している。これについては 4.4 節で述べる。またマイクロ波輝度温度 245~255 K, 表面温度 250~255 K のデータグループは、森林域に対応している。これについても 4.5 節で紹介する。それぞれの観測データ範囲を四角で囲んでいる。

表 3 に、13 種類の対象地域でのマイクロ波輝度温度と表面温度の観測値およびそれらの比からまとめた射出率を求めた。最小値は湖の 202 K であった。観測時期において湖は凍結しており、表面は積雪で覆われている。可視画像の観察では、陸上の雪原と見分けがつかない。赤外放射温度計でも温度情報からは雪原との違いは見られないが、6 GHz のマイクロ波輝度には大きな差が現れた。密集した森林域ではマイクロ波は高くなっている。高山の積雪域でも散布から外れた分布が見られた。高山域では、気温や表面温度は低温である。積雪層内部の温度勾配は、底面の方が高温になっている。表面温度より 6 GHz の方が大きくなる結果を得た。積雪が少ないと積雪下の地面も冷却され、低温となる。IR と TB の差は小さくなり、射出率  $\epsilon=1$  となる。

### 4.3 解析：湿地の観測まとめ

図 8(a) に図 6 の四角で囲んだ地域を示す。200 K まで減少する地域があるが、これは湖である。射出率も小さく、0.8 となっている。図 8(a) の 250 K 付近には沼や湿地 (Marsh), 240 K 付近に湿原 (Wetland) が観測されている。205~220 K 付近はチェナ川の河岸域だが、この地域は水たまりなどが多いことが分かっている。赤外放射温度計による表面温度には違いが見られないが、積雪に覆われた結氷面の検出が可能であることが分かる。

### 4.4 山岳域の積雪観測

図 8(b) に図 6 の四角の点線で囲んだ地域を示す。グラフ上の A は山岳積雪域, B は平原, C は植生 (密), D は植生 (疎) を意味する。マイクロ波の射出率  $\epsilon$  を式 (1) で求めて、 $\epsilon=0.95, 1.0, 1.05$  となる場所を図に書き込んだ。 $\epsilon$  が 1.0 より大きくなっている地域がある。この地域は Mt. Ryan (標高: 3,481 ft/1,061 m) 周辺での高山の積雪域である (A)。航空機観測からは多量の積雪と風によって固く締まった様子が観察された。この地域では赤外放射温度計で観測される表面温度より、

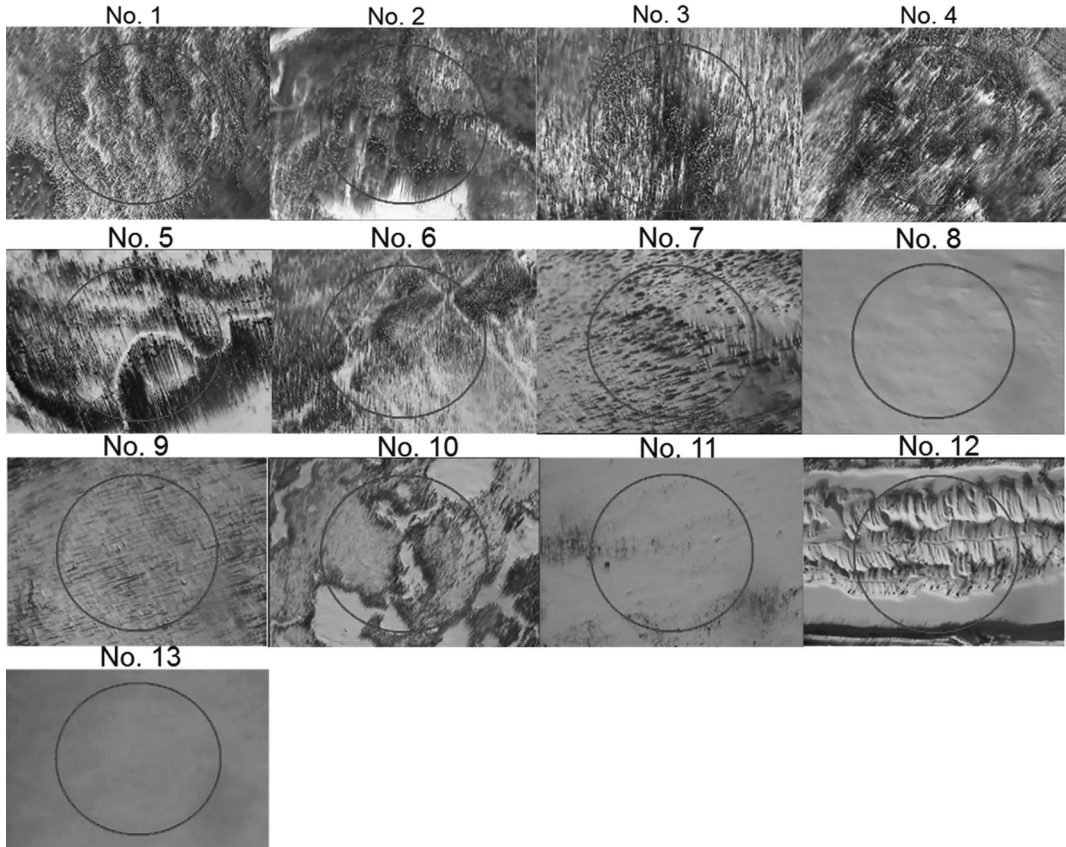


図 7 航空機に搭載した MMRS2 のモニターカメラより上空から撮影した各表面状況の様子. 画像の中心部の円はマイクロ波放射計の観測視野を示す (地上での直径約 300 m である).

表 3 地表面の違いと輝度の観測結果.

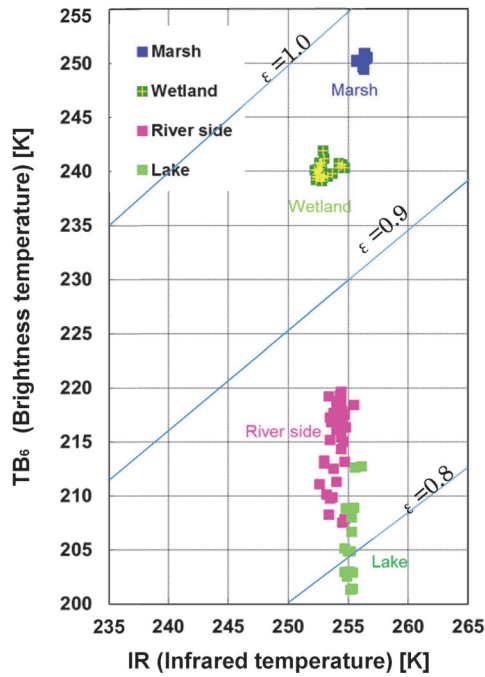
No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Type	Dense black spruce	Dense white spruce	Dense birch	Black spruce	Sparse white spruce	Mixed spruce & birch	Scrub & Willows	Deep compacted snow	Bare ground snow	Marsh	Wetland	River side	Lake
Brightness temperature TB <sub>6V</sub> [K]	248 - 255	250 - 253	253 - 256	250 - 254	243 - 245	244 - 248	250 - 259	252 - 259	249 - 251	249 - 251	239 - 243	206 - 224	202 - 213
Infrared temperature IR [K]	255 - 257	254 - 256	256 - 257	257 - 258	254 - 257	249 - 256	248 - 255	244 - 248	249 - 250	256 - 257	252 - 255	254	255
Emissivity ε	.97 - .99	.98 - .99	.99 - 1.00	.97 - .98	.96 - .95	.98 - .97	1.01 - 1.02	1.03 - 1.04	1.00 - 1.00	.97 - .98	0.95	.81 - .88	.79 - .83

6 GHz のマイクロ波放射計が観測する輝度温度の方が大きくなっている. 6 GHz は積雪内部や底部の温度を反映しているため内部の方高い温度分布になっているためと思われる. また, 植生の少ない低地での原野の積雪 (Bare ground snow) では表面温度は高く, マイクロ波は低くなっているため ε は, ほぼ 1 となった (B). 航空機からの観察

では, 積雪は少なく地表面が露出している部分が監視できる. このことから, 表面も内部も同じ温度状態にあることが予想される.

Markus *et al.* (2006) は海水上の積雪の観測を行なっている. 積雪観測には, その温度構造も重要な補正要素となるため表面と内部, そして底部の状態の探査が試みられている. 6 GHz の観測よ

(a)



(b)

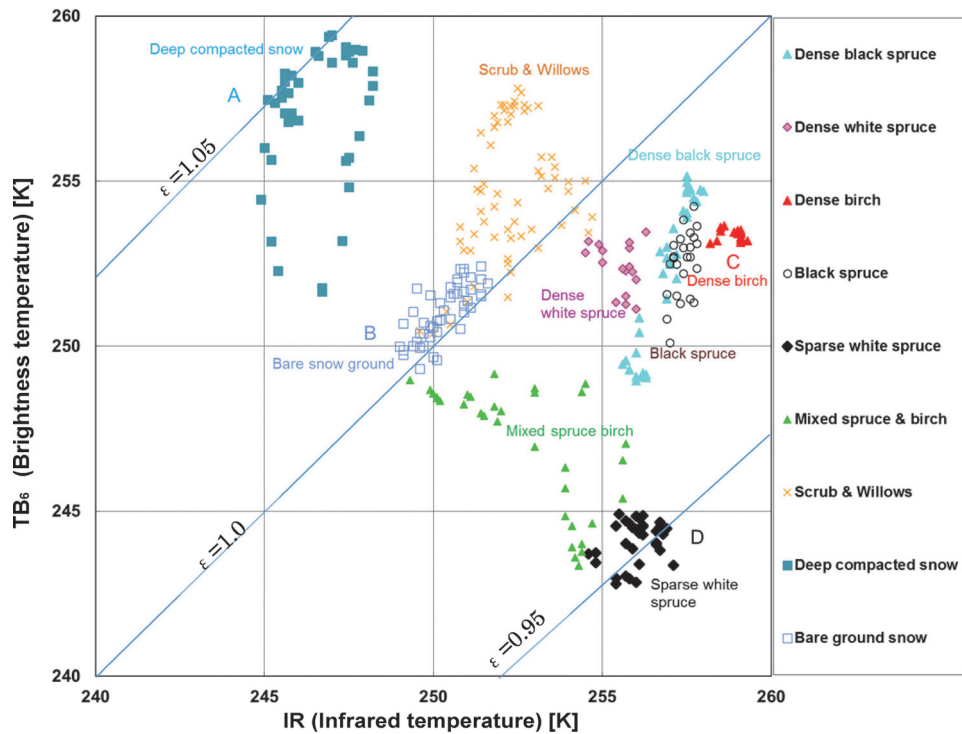


図 8 (a) ポーカーフラット周辺の上空から見た湿地域, (b) ポーカーフラット周辺の上空から見た (A) 山岳積雪域, (B) 平原, (C) 植生 (密), (D) 植生 (疎).

り、積雪の下の、海水との境界の温度を求めようとしている。航空機観測と衛星観測の比較からは、航空機による 6GHz 観測結果は衛星による 6GHz 観測結果より顕著に低かった。6GHz のマイクロ波放射率  $\epsilon$  を 0.98 に固定して温度を求めているが、地上観測との良い対応を示した。6GHz は積雪を透過し、その下にある塩分を持つ海水の上面の状態を示している。彼らは、従来の 19GHz、37GHz という高周波の観測から、低周波の利用により改良が可能であるとしている。

#### 4.5 森林域の観測

同じく図 8 (b) から森林域の観測についてまとめる。密なクロトウヒ (Dense black spruce)、密なシロトウヒ (Dense white spruce)、密なシラカバ (Dense birch) など (C) のマイクロ波輝度は大きく、植生が疎なシロトウヒ (Sparse white spruce) (D) ではマイクロ波輝度は小さくなっている。表面温度については顕著な差は出なかった。6GHz のマイクロ波放射は密な森林域では大きくなる Langlois *et al.* (2011) によって示されている。今回の結果もこれを反映したものと考えられる。植生の林床部は積雪で覆われている (B) が、この値よりも密な森林域では表面温度は高く、マイクロ波輝度も大きくなっていた。

一般的な可視光センサーの利用では、森林域は植生によるアルベド低下により判別されている。可視と近赤外の組み合わせによる NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) の観測も行われている。赤外センサーでは冬季は相対的に高輝度として検出できる。冬季は日射吸収、風の弱まりや、樹冠による貯熱があり温暖である。植生からの上向き長波放射により、上空からの赤外センサー観測による温度測定で森林域の判別が可能である。夏季は蒸発散により表面温度上昇が抑えられている。

可視や赤外に対して、マイクロ波でも森林域からの放射が大きくなることなどを利用して、植生指数が得られると考えられる。

#### 4.6 衛星による湖の結氷観測

宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の地球観測衛星 GCOM-W に搭載されているマイクロ波放射計 AMSR2 のデータを用いて、航空機観測と同時期の北アメリカのマイクロ波画像を比較した。

航空機観測を行った 2015 年 3 月 10 日の AMSR2 の衛星画像より、アラスカの広域における 6GHz と 36GHz (いずれも垂直偏波) のマイクロ波放射を比較したものを図 9 (a), (b) に示す。図 10 にアラスカ・カナダ周辺の南北トランセクトに沿ったデータサンプリング地点 (ツンドラ、湖、森林、山岳域等の陸域及び海洋) のマイクロ波分布を示す。湖単独のシグナルを確認するために、AMSR2 のピクセルサイズより十分大きな湖であるグレートベアレイク (Great Bear Lake) を観測対象 (P3) に選んだ。6GHz では、湖は顕著な低輝度域を示し、結氷期でも判別できる。一方で、36GHz では、陸域 (P2, P3-P5 の間) の輝度温度は積雪による減衰を反映しているため、複雑な空間分布になっている。

湖について観測した、1 年間の時系列データを図 11 (a), (b) に示す。6GHz では、夏季の未結氷期 A (水面) の輝度温度は約 170 K 前後、冬季の結氷 B (凍結状態) の輝度温度は約 200~210 K、春季の融解期 C の輝度温度は約 270 K 前後を表し、湖が区別できている (図 11 a) また季節毎のシグナルも安定している。36GHz では、未結氷期 A の輝度温度は約 210~220 K、冬季の結氷 B の輝度温度は約 255~260 K、融解期 C の輝度温度は約 270 K を示した (図 11 b)。湖は夏季には低輝度である。結氷期も値は低く安定している。融解期には湿雪の高い射出率のため高い輝度になる。融解終了後は低い値になる。これが衛星からのマイクロ波観測できる湖の一年のサイクルである。6GHz では、冬季の結氷期間中には、積雪の有無によるマイクロ波放射の変化は見られず安定した値を示している。これは 6GHz の観測では積雪下の結氷面での状態を見ているためである。

## 5. 考察

### 5.1 マイクロ波観測の利用

北極圏の典型的な風景の中で、低周波のマイクロ波を中心として赤外放射温度データの組み合わせとモニターカメラでの確認より、地表面を判別する方法を探った。多様な地表面に対し、マイクロ波観測の基礎情報を集めたが、北極圏の特徴としては、森やツンドラ、凍土、湖や湿地の存在がある。6GHz を用いた航空機や衛星による観測で

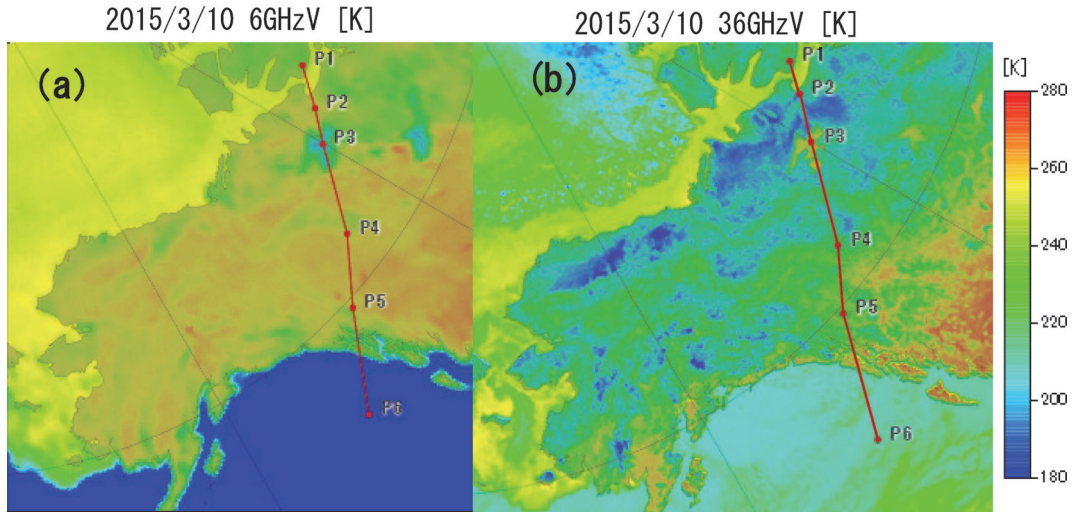


図 9 アラスカ周辺の GCOM-W/AMSR2 (a) 6GHz と (b) 36GHz の輝度温度分布 (垂直偏波: V, 2015 年 3 月 10 日).

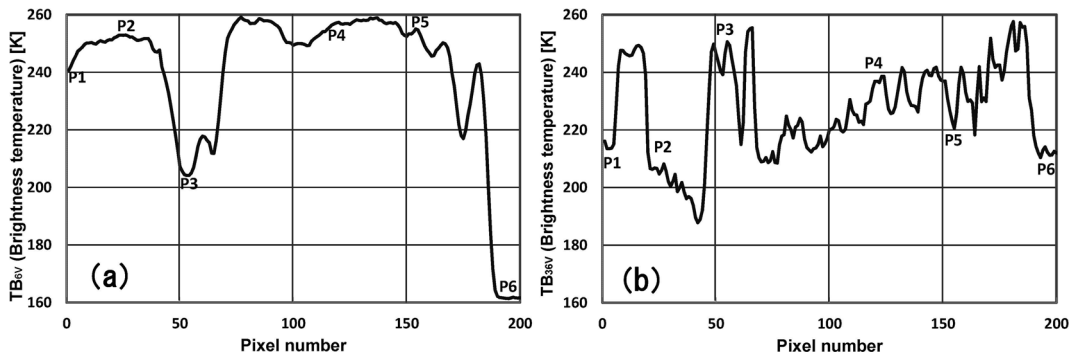


図 10 アラスカ・カナダ周辺の南北トランセクト (赤線) に沿った 6GHz と 36GHz の輝度温度データ サンプルング地点. P1, P2: ツンドラ, P3: 湖, P4: 森林, P5: 山岳, P6: 海洋. (GCOM-W/AMSR2 6GHz・36GHz 垂直偏波: V, 2015 年 3 月 10 日).

は地中までの観測はできていないが、積雪の下の状態の推定を行なうことが出来た。湿地や湖沼は、冬季は積雪に覆われ、雪原との差がつきにくい、6GHz など低周波のマイクロ波観測から積雪下の結水面の検出が可能である。

### 5.2 結氷表面の検出

図 12 に MMRS2 を用いた観測実験の成果を示す (渡邊ら, 2011)。これは冬季の低温度時に、地面の上に水をまいて凍結させ、結氷した表面を作り、その上に積雪を重ねて圧雪状態を作った実験である。湿潤状態から凍結に至る間、200K 以下の低い値から徐々に増加して 220K 程度に落ち着

くことが確認されている (渡邊ら, 2011)。この実験では、湿潤地面 (Wet ground) の表面温度は 270K 以上を示しながらも 6GHz のマイクロ波輝度温度は 150K から 250K まで大きく変化した。これは天空からのマイクロ波放射が水面で反射しているためである。しかし、水面が凍結すると表面温度は 273K 以下に下がり、マイクロ波輝度温度は 220~250K の範囲に入る。積雪 (圧雪) では表面温度は凍結状態の時と変わらず、6GHz の輝度温度が 10K ほど増加する。今回の航空機観測から得られた凍結した湖の観測結果は、図 12 の湿潤から凍結に変化させた例となっている。

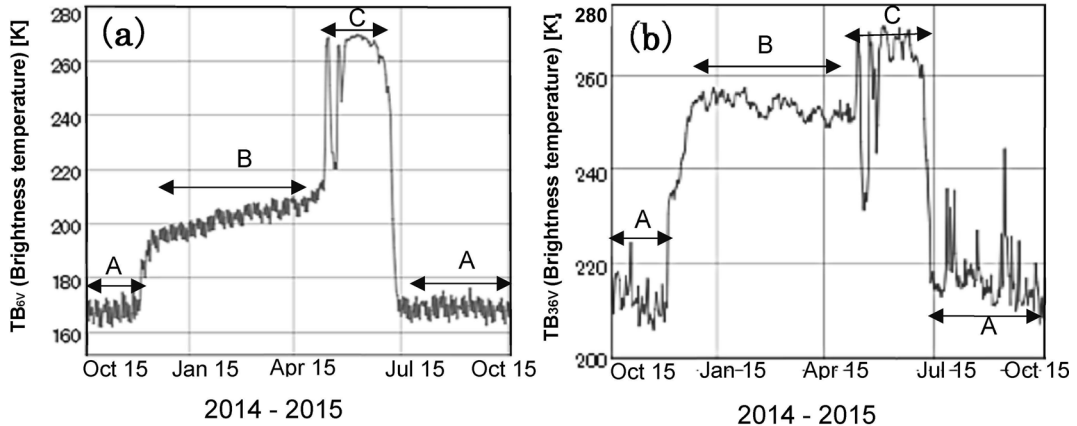


図 11 図 10 の P3 の湖における 2014 年 10 月 15 日～2015 年 10 月 15 日の 1 年間の (a) 6 GHz および (b) 36 GHz の時系列データ。グラフ中の A は未結水, B は結水, C は融解状況を示す。(データ: GCOM-W/AMSR2, いずれも垂直偏波, P3: グレードベアレイク (Great Bear Lake))。

北極域の地表面では様々な雪氷現象が観察される。Yoshikawa *et al.* (2007) はアラスカとシベリアのaufeis (Aufeis) の分布や季節的な生成を調べた。Aufeis は永久凍土域周辺の特徴的な要素であり, 地表面に現れる水体としては氷河や凍結した河川, 湖沼とも似ている。アラスカではその分布面積は大きい。Aufeis の成長はアラスカ北部では 12 月頃から始まり, 5 月後半から消耗していく。成長は積雪期間中に起きているため, フェアバンクス近郊の CPRCW (Caribou Poker Creek Research Watershed) のデータなど冬期間の連続したデータを取得している。積雪下でどこに氷があるか, 積雪を透過するマイクロ波センサーの観測が期待できる。

Semmens *et al.* (2013) は冬期間の降雨である Rain on snow (ROS) がアラスカで起きていることをマイクロ波の DAV (Diurnal Amplitude Variation) で観測しているが, 降水後に冷却, 降雪がある場合は積雪層内部に氷板を形成することになる。これは 6 GHz などのマイクロ波放射温度を低下させることが考えられる。ROS の形跡の検出にも 6 GHz の利用が期待される。Derksen *et al.* (2009) は, アラスカからカナダにかけての積雪の特徴を調査した。マイクロ波の観測との比較では, 湖の影響についても報告している。ROS による積雪中の ice lens の検出が 37 GHz で行えることを紹介している。

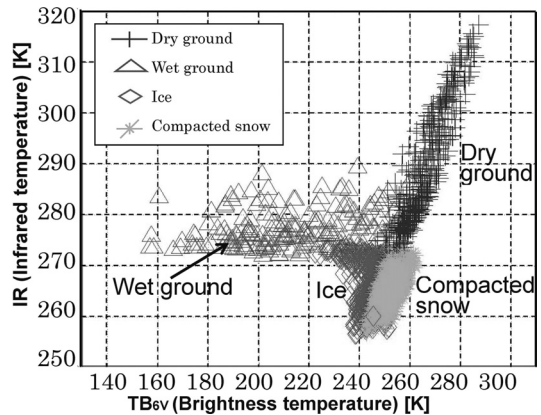


図 12 可搬型マイクロ波放射計 MMR2 を用いて取得した, 融解, 凍結, 積雪状態での 6 GHz と表面温度 (赤外放射温度) の観測実験結果 (渡邊ら (2011) に加筆)。

### 5.3 土壌の凍結検出

積雪下の地面の凍結の観測に対し, 筒井・小池 (2012) はマイクロ波放射計による積雪深観測において, 樹木 (biomass), 雪の粒径 (snow grain size), 凍結地面 (frozen ground) の影響が問題であると示した。特に寒冷地では積雪下の地面が凍結しているが, この時には, 凍結土壌とその下の未凍結層の境目を積雪底面としてしまう可能性があることを示した。その判定に 6 GHz と 19 GHz の比を取り, 6 GHz の方が大きくなる場合を土壌凍

結状態と判定している。6GHz は積雪の下にある、凍結地面の表層を透過し、その下の状態を探査できるとしている。式 (2) を指標とした。

$$TB_{6v}/TB_{19v} > 1 \quad (2)$$

ここで、 $TB_{6v}$  は周波数 6GHz の垂直偏波の輝度温度 (K)、 $TB_{19v}$  は周波数 19GHz の垂直偏波の輝度温度 (K) を示す。

6GHz は積雪内部や底部の状況、積雪下の地表面の状況などの影響も受ける。一方で、低周波の 6GHz は積雪による輝度温度減少が少ない。筒井・小池 (2008)、筒井ら (2005) は、積雪下の土壌の情報を、積雪をより透過する 6GHz を用いて取得して、評価を行なっている。高緯度域では凍土が存在しているため、積雪下の地表面は冷却されている。6GHz の観測で、積雪下の地面の影響を考えることが出来る。積雪域では、 $TB_{36v} < TB_{19v} < TB_{6v}$  と放射が大きくなる。それぞれの周波数における射出率  $\epsilon$  も  $\epsilon_{36} < \epsilon_{19} < \epsilon_6$  となる。今回の観測では、6GHz の  $\epsilon$  は 0.8~1.0 という結果が得られている。

#### 5.4 森林域の観測

森林に関しては、森林域では樹木からの放射により、その差が少なくなってしまうこと、融雪期では高周波 (36GHz) の放射が大きくなるため、やはり差が小さくなってしまふことで誤差の原因になっていた。また、高緯度の寒冷域では、積雪中のしもぎらめ雪など粒径の大きなものによる高周波の減少が起きて、差が大きくなりすぎてしまい、積雪が多く見積もられることが多かった (筒井ら, 2010)。このため森林の状況を別途押さえておくことが必要であり、正規化植生指数 (NDVI: Normalized Difference Vegetation Index) などを使った植生指数で森林の影響の補正が行われている (Derksen *et al.*, 2005)。Foster *et al.* (2005) はマイクロ波による積雪観測の誤差について検討した。植生の影響と粒径によりマイクロ波の観測地が影響を受けることを述べている。Langlois *et al.* (2011) は、樹木の幹 (Stem volume) の影響が大きいことを指摘している。彼らは植生の種類を分類し、航空機観測との比較から 18GHz, 37GHz のデータの補正を行なって精度を上げる方法を提案した。

植生の影響に対応するために、いろいろな方法が試みられている。Roy *et al.* (2014) は北方森林のマイクロ波放射の観測及び、補正の検討を行なった。彼らは、4つの植生状態に対し、冬と夏の違いを調べている。葉面積指数 (LAI: Leaf Area Index) を用いて分類した植生域に対して、マイクロ波放射の補正を行ない、森林域の土壤水分や積雪観測の精度を上げることを目指した。彼らは他のセンサーによる植生指数を別途求めておいて、その情報で植生の影響を取り除いて、土壤水分や積雪深を求めようとした。

一方、Santi *et al.* (2012) のように、目的は土壤水分や積雪深ではあるが、他のセンサーによる植生指数を用いず、マイクロ波放射データで植生指数を作成して土壤水分や積雪の観測精度の向上を行っている例もある。この場合は、夏季の密な森林域ではマイクロ波による土壤水分の観測が不能と判断してしまうが、単独のセンサーのデータですべての作業ができる優位性はある。

#### 5.5 寒冷域の空間不均一性

受動マイクロ波観測の一つの問題は空間分解能が低いことである。実際の積雪の広域横断観測から Sturm and Benson (2004) が、アラスカ、グリーンランド、南極の解析で、10m, 100m, 1km~100km のスケールでの特徴をまとめている。マイクロ波観測の有効性は広域の地表や海洋の表面状態を知る点にある。現在の気候モデルでも空間分解能は高くなく、計算の空間スケールに依存した問題の改善のために、サブグリッドスケールでの不均質性を表現するパラメータを導入したりしている。マイクロ波観測はそのスケールでの不均質パラメータを与えうるものである。しかし、実利用に関してはマイクロ波観測の空間スケール内部の不均質性や代表的な特徴を示す情報が必要となる。

衛星マイクロ波観測からみたアラスカのマイクロ波放射の変化幅は湖を除けば 15K ほどの中に入ってしまう。特に低周波では地域変化は少ない。しかし、今回の航空機観測では、低周波の 6GHz を用いたにもかかわらず、地点による変化が大変大きいことが分かった。この特徴は、衛星観測のサブピクセルの内部の解釈にとって参考になる。高緯度域アラスカのように森林と湖が混在し

ている地域の観測では、これらの混在の検討が必要になる。森林ではマイクロ波放射が増加し、湖沼では減少する。湖沼の低い値は、冬季、湖が結氷し、積雪で覆われても維持される。夏季は、土壌水分がマイクロ波放射に影響する。今回の観測は、土壌水分を考慮しなくてもよい寒冷期に行ったが、その場合は積雪下が凍土であるかどうかの問題になってくる。そこでも積雪下の状態を推定できる低周波の観測が期待できる。

### 5.6 気候研究利用

マイクロ波による気候情報取得として、基本的な情報である地表面温度測定がある。André *et al.* (2015) は、マイクロ波を用いた環北極域 (Circumpolar Arctic) の地表面温度の測定を行なっている。彼らは 37GHz の V と H を利用し、凍土域の観測キャンペーンである PAGE21 にも参加しているが、積雪域と判断された場所では温度測定をしないようにしている。積雪域の検出には  $TB_{19V}$  と  $TB_{37V}$  のそれぞれの垂直偏波の比である、 $TB_{19V}/TB_{37V}$  が積雪状態では増加することを用いている。Köhn and Royer (2012) も、過去 50 年間の間、冬の気温が上昇していることを示している。北半球の高緯度の夏より冬の気温上昇が大きい (ACIA, 2005) と言われているものの観測点が少ないため信頼性を改良するため観測データの増加が求められている。そこで彼らは、衛星マイクロ波観測の利用を考え、気温と大気の影響を受ける積雪の上面の温度を求めている。冬季は大きな気温逆転が起きる寒冷域では、大きな勾配を持つ気温の測定より表面温度の測定の方が信頼性が高くなる。このようなマイクロ波による雪氷圏情報の取得はこれからも期待される。今回用いた低周波は氷床観測では、年平均気温を示す 10m 雪温の予測に有効であることがわかっている。Köhn and Royer (2012) らのような高周波による観測が表面温度の測定を行なう一方で、低周波による地温や地表面の凍結・融解状態の推定は、高緯度の気候を考えるために有効である。

### 6. まとめ

本研究では、積雪内部深層や積雪下の地表面までの情報を取得できる低周波の 6GHz の利用を検討した。可搬型マイクロ波放射計による冬季のアラスカの森林や湖の航空機観測からは、凍結している湖では積雪に覆われていても 6GHz の輝度温度は著しく低下すること、森林が密集した場所では輝度温度は増加すること、植生の無い山岳斜面では表面は低温であるが、内部から放射される低周波のマイクロ波の輝度は低下しないことが観測された。

衛星マイクロ波観測では、6GHz は空間的な変化は少ない。しかし、この航空機観測からは、6GHz でも場所による差が大きく、衛星観測では検出できていない多様な状況を示していることがわかる。これらの観測結果から低周波のマイクロ波観測は、様々な北極域の地表面特性に対して反応しており、今後、高緯度の積雪域の観測についても新たな要素の観測が期待できる。

### 謝 辞

本研究は GRENE 北極研究プロジェクトおよび、アラスカ大学 (UAF)・国際北極圏研究センター (IARC) の研究者の支援を受けて行ったものです。IARC, UAF の Dr. Craig Kenmonth, 岩花 剛博士, Dr. Hajo Eicken, Dr. Andy Mahoney や北見工業大学の館山一孝先生のアドバイスいただきました。匿名査読者の方と編集担当の尾関俊浩さんからは大変貴重なコメントをいただきました。ここに記して心から感謝します。

また、北極環境研究コンソーシアムの若手派遣支援事業に大変お世話になりました。国立極地研究所北極域データアーカイブシステム (Arctic Data archive System: ADS) データおよび JAXA の GCOM-W/AMSR2 のデータを使用させていただきました。この場を借りてお礼を申し上げます。

### 文 献

- ACIA, 2005 : *Arctic Climate Impact Assessment*, Cambridge University press, NY, 1042 pp.  
André, C., C. Ottlé, A. Royer and F. Maignan, 2015 : Land



- Surface Temperature Retrieval over circumpolar Arctic using SSM/I-SSMIS and MODIS Data, *Rem. Sens. Environ.*, **162**, p. 1-10.
- Bekryaev, R.V., I.V. Polyakov and V.A. Alexeev, 2010 : Role of polar amplification in long-term surface air temperature variations and modern Arctic warming. *Journal of Climate*, **23**, 3888-3906.
- Chang, A. T. C., P. Gloersen, T. Schmugge, T. T. Wilheit and H. J. Zwally, 1976 : Microwave emission from snow and glacier ice, *J. Glaciol.*, **16**, 23-39.
- Derksen, C., A. Walker and B. Goodison, 2005 : Evaluation of passive microwave snow water equivalent retrievals across the boreal forest/tundra transition of western Canada, *Rem. Sens. Environ.*, **96** (3/4), 315-327.
- Derksen, C., M. Sturm, G. E. Liston, J. Holmgren, H. Huntington, A. Silis and D. Solie, 2009 : Northwest Territories and Nunavut Snow Characteristics from a Subarctic Traverse : Implications for Passive Microwave Remote Sensing, *Journal of Hydrometeorology*, **10**, 448-463.
- Foster, J. L., C. Sun, J. P. Walker, R. Kelly, A. Chang, J. Dong and H. Powell, 2005 : Quantifying the uncertainty in passive microwave snow water equivalent observations, *Rem. Sens. Environ.*, **94**, 187-203.
- Hori, M., K. Sugiura, T. Tanikawa, T. Aoki, K. Kuchiki, M. Niwano and H. Enomoto, 2015 : Long-Term Datasets of Satellite -Derived Northern Hemisphere Snow Cover Extent in 5 km Spatial Resolution Prepared for JAXA's GCOM-C Mission, Proc. of 30th International Symposium on Space Technology and Science (ISTS), DVD, Paper No. 2015-n-27, Kobe, July 4-11.
- IPCC, 2013: *Climate Change 2013, The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley, Cambridge University Press, NY, 1535 pp.
- Kim, E.J. and A.W. England, 2003 : A yearlong comparison of plot-scale and satellite footprint-scale 19 and 37 GHz brightness of the Alaskan North Slope. *Journal of Geophysical Research*, **108** (D13), 4388, DOI : 10.1029/2002JD002393.
- Köhn, J. and A. Royer, 2012 : Microwave brightness temperature as an indicator of near-surface air temperature over snow in Canadian northern regions, *International Journal of Remote Sensing*, **33** (4), 1126-1138. <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2010.550643>.
- 小池俊雄・吉本淳一・藤春兼久・柴田 彰, 1999 : グローバルな積雪量分布推定のための衛星アルゴリズムの開発と検証, *水工学論文集*, **43**, 211-215.
- Langlois, A., A. Royer, F. Dupont, A. Roy, K. Goita and G. Piccard, 2011 : Improved Corrections of Forest Effects on Passive Microwave Satellite Remote Sensing of Snow Over Boreal and Subarctic Regions, *IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing*, **49** (10), 3824-3837.
- Langlois, A., A. Royer and K. Goita, 2010 : Analysis of simulated and spaceborne passive microwave brightness temperatures using in situ measurements of snow and vegetation properties, *Can. J. Remote Sensing*, **36**, Suppl. 1, S135-S148.
- Lemmetyinen, J., C. Derksen, J. Pulliainen, W. Strapp, P. Toose, A. Walker, S. Tauriainen, J. Pihlflyckt, J. P. Kärnä and M. T. Hallikainen, 2009 : A comparison of airborne microwave brightness temperatures and snowpack properties across the boreal forests of Finland and western Canada, *IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing*, **47** (3), 965-978.
- Markus, T., M., D., J., Cavalieri, Albin, J., Gasiewski, F., Marian, K., J. A., Maslanik, D., Powell, C., Boba, Stankov, B., Stroeve, J. and Sturm, M., 2006 : Microwave Signatures of Snow on Sea Ice : Observations, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing*, **44**, 11, 3081-3090.
- Muskett, R. R., and V. E., Romanovsky, 2011 : Alaskan Permafrost Groundwater Storage Changes Derived from GRACE and Ground Measurements. *Remote Sensing*, **3**, 378-397.
- Olsson, P.Q., M. Sturm, H. CH. Racine, E.V. Romanovsky and G.E. Liston, 2003 : Five stages of the Alaskan Arctic cold season with Ecosystem implications, *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, **35**, 74-81.
- Plug, L. J., C. Walls and B. M. Scott, 2008 : Tundra lake changes from 1978 to 2001 on the Tuktoyaktuk Peninsula, western Canadian Arctic, *Geophysical Research Letters*, **35** (L03502), doi : 10.1029/2007GL032303.
- Rao, K.S., G. Chandra, and p. B. N. Rao, 1988 : Study on penetration depth and its dependence on frequency, soil moisture, texture and temperature in the context of microwave remote sensing, *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, **16** (2), 8-19.
- Riordan, B., D. Verbya and A. D. McGuire, 2006 : Shrinking ponds in subarctic Alaska based on 1950-2002 remotely sensed images. *Journal of Geophysical Research*, **111**, G04002.
- Roy, A., A. Royer and R. Hall, 2014 : Relationship between forest microwave transmissivity and structural

- parameters for the Canadian boreal forest, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, **11** (10), 1802-1806.
- Santi, E., S. Pettinato, S. Paloscia, P. Pampaloni, G. Macelloni and M. Brogioni, 2012 : An algorithm for generating soil moisture and snow depth maps from microwave spaceborne radiometers : *Hydrology and Earth System Science Discussions*, **9**, 3851-3900.
- Semmens, K. A., J. Ramage, A. Bartsch and G. E. Liston, 2013 : Early snowmelt events : detection, distribution, and significance in a major sub- arctic watershed. *Environmental Research Letters*, **8**, 1-11.
- Sturm, M. and G. E. Liston, 2003 : The snow cover on lakes of the Arctic coastal plain of Alaska, U.S.A., *J. Glaciology*, **49**, 370-380.
- Sturm, M. and C. Benson, 2004 : Scales of spatial heterogeneity for perennial and seasonal snow layers, Snow Layer Heterogeneity, *Annals of Glaciology*, **38** (1), 253-260 (8).
- Sturm, M., J. Schimel, G. Michaelson, J. M. Welker, S. F. Oberbauer, G. E. Liston, J. Fahnestock and V. E. Romanovsky, 2005 : Winter biological processes could help convert Arctic Tundra to Shrubland, *Bioscience*, **55**, 17-26.
- Surdyk, S., 2002 : Using microwave brightness temperature to detect short-term surface air temperature changes in Antarctica : An analytical approach, *Rem. Sens. Enviro.*, **80**, 256-271.
- Tamura, T., K. I. Ohshima, J. L. Lieser, T. Toyota, K. Tateyama, D. Nomura, K. Nakata, A. D. Fraser, P. W. Jansen, K. B. Newbery, R. A. Massom and S. Ushio, 2015 : Helicopter-borne observations with portable microwave radiometer in the Southern Ocean and the Sea of Okhotsk, *Annals of Glaciology*, **56**, 436-444.
- Taras, B., M. Sturm and G. E. Liston, 2002 : Snow-ground interface temperatures in the Kuparuk River Basin, Arctic Alaska : measurements and model, *Journal of Hydrometeorology*, **3**, 377-394.
- 筒井浩行, 小池俊雄, 2008 : SSM/I 衛星データに基づく長期的な積雪深の推定とその考察, 水工学論文集, **52**, 223-228.
- 筒井浩行・小池俊雄, 2012 : チベット高原低地の季節凍土の BJ 地上観測ステーションを対象とした AMSR-E 積雪アルゴリズムの開発, 日本気象学会誌気象集誌, **90C**, 99-112.
- 筒井浩行, 小池俊雄, 玉川勝徳, 藤井秀幸, Tobias Graf, 2005 : マイクロ波放射伝達理論に基づく積雪量・積雪粒径推定衛星アルゴリズム開発の基礎研究, 水工学論文集, **49**, 319-324.
- 筒井浩行・小池俊雄・Xin Li・Rui Jin・Hui Lu, 2009 : チベット高原凍土地帯における融解層の推定に関する基礎的研究, 水工学論文集, **53**, 433-438.
- 筒井浩行・小池俊雄・Xin Li・Rui Jin・Hui Lu, 2010 : マイクロ波放射伝達モデルへの凍結土壌層の導入と積雪衛星アルゴリズムの改良, 水工学論文集, **54**, 415-420.
- Ueno, K, K. Tanaka, H. Tsutsui, and M. Li, 2007 : Snow cover conditions in the Tibetan Plateau observed during the winter of 2003/2004, *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, **39** (1), 152-164.
- 渡邊直樹・榎本浩之・館山一孝・山本朗人・田中聖隆, 高橋修平・岩本明子・佐々木亮介・ヌアスムグリ アリマス, 2011 : マイクロ波放射計を用いた路面状態自動判別システムの開発, 雪氷, **73** (4), 213-224.
- Yoshikawa, K. and L. D. Hinzman, 2003 : Shrinking thermokarst ponds and groundwater dynamics in discontinuous permafrost near council, *Alaska, Permafrost Periglac. Process.* **14**, 151-160.
- Yoshikawa, K., L. D. Hinzman and D. L. Kane, 2007 : Spring and aufeis (icing) hydrology in Brooks Range, Alaska, *Journal of Geophysical Research*, **112**, G04S43.

## Airborne 6 GHz passive microwave observation of winter ground conditions in Alaska

Nuerasimuguli ALIMASI<sup>1,2\*</sup>, Hiroyuki ENOMOTO<sup>1,3</sup>, Jessica CHERRY<sup>4</sup>, Larry HINZMAN<sup>4</sup>,  
Takao KAMEDA<sup>2</sup>, Konosuke SUGIURA<sup>5,6</sup> and Masahiro HORI<sup>7</sup>

<sup>1</sup> *National Institute of Polar Research, 10-3, Midoricho, Tachikawa, Tokyo 190-8518*

<sup>2</sup> *Kitami Institute of Technology, 165, Koen-cho, Kitami, Hokkaido 090-8507*

<sup>3</sup> *Graduate University of Advanced Studies (SOKENDAI), 10-3, Midoricho, Tachikawa, Tokyo 190-8518*

<sup>4</sup> *University of Alaska Fairbanks, 909 Koyukuk Drive, Fairbanks, AK 99775-7270, USA*

<sup>5</sup> *Toyama University, 3190, Gofuku, Toyama-shi, Toyama 930-8555*

<sup>6</sup> *Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3173-25,  
Showa-machi, kazawa-ku, Yokohama 236-0001*

<sup>7</sup> *Japan Aerospace Exploration Agency, 2-1-1, Sengen, Tsukuba, Ibaraki 305-8505*

\* *Corresponding author: alimasi.nipr@gmail.com*

**Abstract:** The Arctic region has been experiencing rapid climate change and this has influenced the cryosphere. At high latitudes, observation of the cryosphere is possible using microwave observation, as microwave observation does not require solar radiation and is also possible under cloud cover conditions. Satellite-based microwave observation has been offering important climatological data. The wide microwave radiometer observation pixels contain various land types, such as snow and ice with forest, frozen lakes and wetland, and mountain slopes. It is necessary to study the freezing conditions of ground that lies under snow-cover, as well as snow properties and structures. Although many previous studies have used 37 GHz and 19 GHz for snow observation, this study evaluates the utilization of a lower microwave frequency (6 GHz), which has the advantage of greater depth of penetration into snow or snow-covered ground. Airborne microwave observation in Alaska was carried out in this study. The observed data shows significant drops of microwave emission at the frozen lake, and increases in the dense forest area. Although surface temperature was low on the mountain snow slope, microwave emission was not reduced. These observations are indicative of subsurface temperature conditions. This study discusses the possible use of microwave data, especially of lower frequency, for snow-covered high latitude regions.

(2015年12月7日受付, 2016年3月7日改稿受付, 2016年5月25日最終改稿受付,  
2016年6月2日受理, 討論期限2017年1月15日)