

令和4年度 修士論文

ALOS シリーズの後方散乱係数を用いた東シベリア
永久凍土帯における水域・植生変化域の
時空間変動の検出

Detecting spatio-temporal variations in water and
vegetation change areas in the East Siberian permafrost
zone using backscatter coefficient of the ALOS series

共生環境学専攻地球環境学講座

フューチャー・アース学研究室

521M202

大森 直登

指導教員（主査）：飯島 慈裕 教授

副査：立花 義裕 教授

副査：大野 研 教授

要旨

連続的な永久凍土が広範囲に分布する東シベリアは、地球規模の気候変動の影響を強く受けている。2005年から2008年にかけて、東シベリアのレナ川中流域（中央ヤクーチア）では、夏季降水量・冬季降雪量の増加が確認された。夏季降水量の増加は、永久凍土表層の融解を伴って活動層を厚くするとともに、活動層内の土壌水分量の大幅な増加をもたらした。その結果、土壌の湿潤化によって湛水状態が続いた地表面上に生育する北方林（主にカラマツ）の生育環境を悪化させ、森林の荒廃が進行した。この水域の拡大・森林の荒廃を引き起こした永久凍土荒廃現象の最近までの時空間変動を明らかにするために、ALOS/ALOS-2搭載の合成開口レーダ PALSAR/PALSAR-2の後方散乱係数を用いて経年的な水域・植生変化域図の作成を行った。作成した水域・植生変化域図から、2007-2009年の湿潤年において森林の荒廃に分類されたエリアが最も高く、全体の43.3%を占めた。また、湿潤年以降、2017年までには森林の回復に分類されたエリアが最も高く、全体の29.2%を占め、回復傾向にあることが分かった。東シベリア・ヤクーツクにおける夏季降水量と冬季最大積雪深の経年変化から湿潤年以降、突出した降水量・積雪量の増加はないことが、近年の回復傾向に寄与していると考えられる。一方で、湿潤年以降も継続して森林荒廃が進行しているエリアが検出された。このエリアに関して、地形的特徴を明らかにするために、AW3DのDSMを用いて地形解析を行った。DSMの解析対象範囲図から北西方向に向かって標高が低くなっており、これは変化域図において継続的に森林荒廃している範囲と一致していた。解析対象範囲全体のDSM標高の頻度分布の中央値は122m、2007-2009年の森林荒廃エリアの頻度分布の中央値は113m、2009-2017年の森林荒廃エリアの頻度分布図の中央値は117mであった。このことから、森林荒廃が継続して進行しているエリアは地形的に低く、集水地形であることが分かった。そのため、降水や融雪水が流入し、湿潤年以降も地表面の湛水が続き、森林荒廃が継続して進行しているものと考えられた。以上の一連の結果から、ALOSシリーズの後方散乱係数を用いた水域・植生変化域の検出に関して、経年的な解析の有効性が示された。合成開口レーダ搭載のALOSシリーズは、今後ALOS-4が2023年度に打ち上げ予定であり、引き続き永久凍土荒廃のモニタリングとしてALOS・ALOS-2・ALOS-4三世代の衛星を用いた経年的な解析が必要不可欠となる。

キーワード：リモートセンシング、後方散乱係数、永久凍土、森林荒廃、DSM

目 次

1. はじめに	1
1.1 研究の背景	1
1.2 衛星リモートセンシングを用いた先行研究.....	2
1.3 本研究の目的	3
2. 研究対象地域	3
3. 使用データと解析手法.....	5
3.1 ALOS シリーズの後方散乱係数を用いた水域・植生変化域の検出.....	5
3.2 Landsat 可視画像による植生変化域モニタリング	6
3.3 Landsat・MODIS から算出した NDVI による植生変化域モニタリング	7
3.4 Landsat から算出した NDWI による水域変化域のモニタリング	7
3.5 DSM を用いた地形解析	8
4. 結果	9
4.1 水域・植生変化域の検出.....	9
4.2 Landsat 可視画像による森林枯死と回復のモニタリング	9
4.3 NDVI による森林枯死と回復のモニタリング	9
4.4 NDWI による水域変化モニタリング	10
4.5 DSM を用いた地形量の算出と変化域との関係	10
5. 考察	11
5.1 水域・植生変化域の検出結果と DSM による地形解析との関係について	11
5.2 水域・植生変化域と NDVI の比較.....	12
6. まとめ	13
謝辞	14
参考・引用文献	15
図表	18

1. はじめに

1.1 研究の背景

近年、地球規模の温暖化が進行しており、特に北半球の高緯度地域ではその影響が顕著に現れている。東シベリアは連続的な永久凍土が広がっており、気候変動の影響を強く受け、北方林の下に広がる連続的な永久凍土が表層から融解し、地表面状態を大きく変えている。このように、永久凍土環境の変化は、地球規模の気候条件の変化を敏感に反映する指標として注目されている (Park et al., 2022)。永久凍土とは、2年間以上に渡り継続して温度 0°C 以下をとる地盤のことを指し、全陸地の約 15%、北半球の大陸の約 20% に広がっている。地表面からの最上層 1-2m は、季節的な凍結-融解のサイクルを繰り返す活動層が存在している (Sugimoto et al., 2003)。この活動層の季節的な凍結-融解のプロセスは、気候変動に対する鋭敏な指標として注目されている (Park et al., 2022)。活動層の深化が永久凍土層中の凍土氷に達し、氷の融解・消失による体積減少にともなって地表面の沈降が進行すると、沈降の中心部では湖沼化が始まり、最終的に水が蒸発し、草原地形（現地の言葉でアラスという）が広がる。

また、2005 年から 2008 年にかけて、東シベリア・レナ川中流域（中央ヤクーチア）では夏季から秋季にかけての降水量の増加、冬季の降雪量の増加が確認された。東シベリア・ヤクーツク近郊の永久凍土帯では、2005-2006 年および 2006-2007 年の年降水量が、26 年間（1982-2008 年）の平均値 $222 \pm 68 \text{mm}$ をそれぞれ 185mm と 128mm 上回った (Iwasaki et al., 2010)。夏季降水量の増加に伴う土壌水分量の増加は大気の熱を地中に伝わりやすくする。また、冬季の降雪量の増加は、雪が断熱材の役割を果たし、冬の厳しい寒さが地中に伝わりにくくなる。以上の経緯から、湿潤年に熱が伝わりやすく、溜まりやすくなった地中では、永久凍土表層の融解を伴って活動層を厚くするとともに、活動層内の土壌水分量の大幅な増加をもたらした。その結果、土壌の湿潤化によって湛水状態が続いた地表面上に生育する北方林の生育環境を悪化させ、森林の荒廃が進行した (Iijima et al., 2014)。これは裏を返せば、水域の拡大・森林の枯死のような景観変化が進行している地域を特定することで永久凍土融解の状況を評価できるということになる。

1.2 衛星リモートセンシングを用いた先行研究

このように東シベリアは、気候変動に対して脆弱な地域として知られている一方で、アクセスの悪さや冬季の平均気温が -40°C となるような環境の厳しさや永久凍土が広範囲に分布している点から面的な知見は不足している。また、永久凍土活動層の土壌や生態系の変化は、多くの環境要因に左右され時間的・空間的に複雑なため、気候に起因する変化を把握することは容易ではない (Park et al., 2022; Nitze et al., 2018; Lara et al., 2020; Mishra et al., 2021)。一方で、永久凍土環境の変化を把握するために、衛星リモートセンシング技術を用いた検討が有効であると考えられており、森林や水域のモニタリング等に用いられている。特に近年は、合成開口レーダ (Synthetic Aperture Radar : SAR) を用いた研究が増加し、その有用性が証明されている (Tadono et al., 2019, Nagai et al., 2021)。SAR は大気中の粒子の大きさと比較して長い波長のマイクロ波を使用しているため、雲を通過して地表面の状態を観測することが可能である。また、太陽から放射された電磁波エネルギーを利用する受動型センサと異なり、衛星搭載レーダのアンテナからマイクロ波を観測対象物に照射して、対象物によって散乱された反射波を捉える能動型センサであるため昼夜問わず観測することが可能である。このような利点から森林モニタリングや台風等の後の浸水域の抽出などに利用されている。

光学データとポラリメトリック SAR データを組み合わせた永久凍土変化の監視 (Park et al., 2022) や干渉 SAR データ処理技術を用いて、永久凍土融解に伴う地表面の沈下等の研究もおこなわれている。(Abe et al., 2020, Abe et al., 2022, Iijima et al., 2021)。このように、東シベリアの永久凍土帯において、光学データによる土地被覆の分類や SAR データを用いた地表面変動の検出等についての研究は行われてきた一方で、SAR の後方散乱係数を用いた水域・植生モニタリングに関する研究はまだ少ない。水域・森林のモニタリングという点に関しては、これまでに SAR の時系列データを用いて、アマゾンの沖積平野における湛水域の時空間変動と植生の空間分布を明らかにしている (Martinez et al., 2006)。また、この手法を応用し、永久凍土並びに森林の荒廃をもたらす一連の現象を継続的・広域的に捉える手法として、異なる年代 (2007 年から 2009 年) の ALOS-PALSAR 画像の後方散乱係数を使用した解析が有効である可能性を示した (Iijima et al., 2013)。このように、湛水状態が引き起こした森林荒廃を検出するうえで、L バンド SAR は植生に加えて地表面の状態を同時に観測することができるという点で有用であることが示されている。しかし、東シベリアでは近年の温暖化傾向を踏まえた 2010 年以降の情報を加えた広域的かつ経年的な水域・植生変化域の検出はされていない。活動層の湛水による森林・水域変化をモニタリングすることで永久凍土・森林荒廃をもたらす一連の現象を経年的に捉えることが可能であると考えられる。

1.3 本研究の目的

本研究では、Iijima et al. (2013)の解析手法を用いて東シベリア・レナ川中流域の2007年から2017年までの時系列水域・植生変化域図を作成することを目的とし、経年的な解析の有効性について検討を行った。また、可視画像と変化域図との比較、高解像度の数値表層モデル (Digital Surface Model : DSM) を用いた地形解析、正規化植生指標 (Normalized Difference Vegetation Index : NDVI) のトレンド解析を行うことで水域・植生変化域の時空間変動特性を明らかにする。

2. 研究対象地域

本研究の対象地は、サハ共和国の首都ヤクーツクが位置するレナ川中流域 (中央ヤクーチア : central Yakutia) である。この地域は世界でも気温の年較差が極端な大陸性気候に属し、夏は40°Cを越すような猛暑となり、冬は-30°Cを下回る厳しい寒さとなる。ヤクーツクの年平均気温は-9.7°C (1930-2010) であり (Nitze et al., 2017)、年降水量は222±68mm (1982-2008年) である (Iwasaki et al., 2010)。中央ヤクーチアはカラマツを主とする北方林の下に連続的な永久凍土が広がっており、北方林生態系と永久凍土が共生している。また、カラマツは落葉針葉樹であり、カラマツ林の林床はコケ類、地衣類、低木類からなる下層植生で覆われている (Nagano et al., 2022)。

東シベリアにおける連続的な永久凍土の分布を決めているのは、氷期-間氷期サイクルとよばれる数万年のスケールでの形成環境と、現在の気候・環境条件との対応関係によるものである。東シベリア・レナ川中流域は最終氷期に氷床に覆われていなかったことが原因で連続的な永久凍土が形成された。また、この地域はエドマ層と呼ばれる凍土氷に富んだ永久凍土層が広く分布しており、このことが景観変化の重要な要因となっている。凍土氷の含有量とその分布については、GISを用いたサハ共和国全域 (ヤクーチア) における永久凍土景観地図に詳細に示されている。 (Shestakova et al., 2021)。エドマ層内の凍土氷の体積の全貌は未だにわかっていないが、40-60mに発達しているものも知られている

(Strauss et al., 2021)。活動層とエドマ層が関係して起こる永久凍土の荒廃過程が、サーモカルスト現象である。北方林の下に存在する永久凍土の活動層は1m程度しかないが、人為的な伐採や森林火災等で地表面が暴露すると太陽光の日射や夏季の高温が地中に伝わりやすくなる。その結果、活動層が深化し、それが永久凍土層内の凍土氷に達し、エドマ層の融解が始まると、氷が水に変わることで体積が減少し、地表面の沈降が生じる。そこに融雪水や降水が流入し、サーモカルスト湖を形成する。サーモカルスト湖の水が数千年スケールの長い年月をかけて蒸発し、最終的に現地の言葉でアラスと呼ばれる草原地形が広がり、特に、レナ川とアルダン川の流域間には最も多くのアラスが発達していることが確認されている。 (Bosikov, 1991)。更に、中央ヤクーチアでは、森林のない場所や攪乱された場所で非常に急速なサーモカルストの発生が確認されている (Shestakova et al., 2021)。また、Landsat衛星データをトレンド解析することにより、中央ヤクーチアにおいて、1999

年から 2014 年の間に 13254 個の湖沼が検出され、湖沼面積は、48.48%の割合で増加した。ここで、レナ川中流域の河岸段丘の段丘地形区分図を図 1 に示す。レナ川の東側は河岸段丘上に成立しており、ほかの地域と比較して湖沼面積が著しく増加している (Nitze et al., 2017)。これは段丘によって凍土氷の含有量が異なるため、凍土氷に富んだ堆積物をもつ段丘で顕著に湖沼拡大が生じていると考えられる。特に、最終氷期に形成された Abalakh 段丘と Tyungyulyu 段丘は永久凍土層内の凍土氷の割合が高く、最も深い 8m から 15m のアラスが現在は分布している (Bosikov, 1991)。

このように永久凍土層内の凍土氷の含有量が多い地域では水域の拡大が顕著に確認されており、SAR を用いた水域モニタリングは重要となってくる。特にレナ川の右岸地域では左岸と比較して際に、地下に凍土氷が多く含まれていることが分かっており、本研究では、レナ川右岸を中心に、ALOS データ 6 シーンと ALOS-2 データ 4 シーンの重複する範囲 (図 2) において解析を行った。

3. 使用データと解析手法

3.1 ALOS シリーズの後方散乱係数を用いた水域・植生変化域の検出

本研究では、水域・植生変化域の検出に宇宙航空研究開発機構（Japan Aerospace Exploration Agency : JAXA）の人工衛星 ALOS/ALOS-2（Advanced Land Observing Satellite）に搭載されている合成開口レーダ PALSAR/PALSAR-2（Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar）が取得した 2007 年から 2017 年のデータのうち、夏季（7 月から 9 月）に取得されたもの（表 1）を用いた。ALOS/PALSAR シリーズは波長の長い L バンドのマイクロ波を使用しているため、森林が広範囲に分布する東シベリアにおいて葉を透過し、地表面の状態を観測することが可能である。また、SAR は衛星からマイクロ波を照射して、反射して衛星に返ってきたマイクロ波（後方散乱）を捉えるセンサである。水面など滑らかな地表面ではマイクロ波が鏡面反射するため、衛星には返ってこず、地表面状態が複雑になればなるほど後方散乱は強くなり、森林などの粗い地表面では体積散乱し、照射波の多くが後方散乱として返ってくる。さらに湛水状態にある地表面上に生育する森林地域では葉を透過して地表面に到達したマイクロ波が湛水面で反射し、森林内での体積散乱を増加させるため後方散乱が最も強くなると考えられている。その後の、森林枯死・衰退によるバイオマスの減少、そして活動層の乾燥化は後方散乱を減少させる。この考え方（図 3）に基づいて Iijima et al. (2013) が作成した Look up Table（図 4）を閾値として用いた。

Look up Table は縦軸に変化を検出したい 2 時期の過去の後方散乱係数を割り当て、過去の時点においてそのエリアがどのような土地被覆をしているのかを決定する。横軸に 2 時期の差分の後方散乱係数を割り当て、後方散乱係数が正負のどちらかに変化したかを見ることで、2 時期の間の土地被覆の変化を決定する。

はじめに、ALOS/PALSAR および ALOS-2/PALSAR-2 が取得したデータから後方散乱強度画像（dB 値）を作成する。ソフトウェアとして ENVI の SARscape を用いて、SAR の生データ（Level 1.1 の CEOS フォーマット）から SLC（Single Look Complex）画像を作成する。SLC 画像は、画像として認識できる振幅の情報に加えて、位相の情報をあわせもつ複素データである。SLC 画像を作成した後、マルチルック処理を行った。マルチルック処理は、一般的に、強度画像の作成・SAR 画像に含まれるノイズの軽減・アジマスとレンジのピクセルサイズを正方形にし、地物を判読しやすくする、この 3 つの目的で行われる。次に、Coregistration 処理を行った。ここでは、強度画像の位置合わせを行う。SARscape が自動的に画像のタイポイントを検索し、画像のマッチングを行う。単一データを処理する場合、位置合わせは必要ない。次に、画像のフィルタリングを行う。SAR 画像には通常スペックルノイズが含まれており、このノイズを除去するため、フィルタリング処理を実施する。今回使用する「De Grandi Spatio-Temporal Filtering」は、複数の画像を使用してフィルタリングを行う機能である。単画像をフィルタリングする場合は、「Single Image Filtering」ツールを起動し、Parameters タブの Filter Method にて フィルタ手法を選択す

る。Filter Method では、「Lee」や「Refined Lee」フィルタの選択が一般的だが、所持している SAR データのノイズ状況や処理目的に応じて、他のフィルタを選択した方が良いケースも考えられる。最後に、地理情報を付与するためジオコーディング処理を行い、Output Type を dB へと変更することで、後方散乱係数（マイクロ波の反射強度）を dB（デシベル）単位で出力した。画像の出力セルサイズは、使用する ALOS/PALSAR および ALOS-2/PALSAR-2 画像の分解能である 10m とした。また、2007 年および 2009 年の ALOS/PALSAR データは処理レベルが Level1.5 であり、ENVI の SARscape 上で後方散乱強度画像の作成が不可能であった。また、そのため、ArcMAP の ArcToolbox から ALOS VRT 作成ツール (<https://blog.esri.com/2011/04/07/arcgis-desktop-724c/> からダウンロード可能) を使用して後方散乱係数の算出を行った。ALOS/PALSAR のデータセット内の LED ファイルは、データ取得時の時刻や衛星の位置と姿勢、画像の範囲のような様々な情報を含んでおり、このような情報を取り出し、VRT ファイルに正しく記述すれば ArcMAP 上に ALOS/PALSAR 画像を読み取ることが可能になる。以上のことから、ALOS VRT 作成ツールを用いて LED ファイルから地図座標付きの VRT ファイルを作成し、ArcMAP 上に読み取った。読み取った画像はデジタル (DN) 値であるため、式 1 を用い、後方散乱係数 (dB 値) の算出を行った。また、ALOS/PALSAR 画像の校正係数は 2009 年 1 月 8 日以前で -83.4、2009 年 1 月 8 日以降で -83.0 である。

$$\sigma^0 = 10 \log_{10} DN^2 + CF \cdot \cdot \cdot (1)$$

σ^0 : 後方散乱係数 (dB)、DN : デジタル値、CF : 校正係数

後方散乱強度画像を作成後、ArcMAP のフォーカル統計ツールを用いて、スペックルノイズを軽減するための平滑化処理を行った。平滑化処理は 5×5 ピクセルの平均値を求め、平均値を中心ピクセルに付与した。平滑化処理後、「Look up Table」の閾値をもとに、2007 年時点の画像と、2009 年と 2007 年の差分画像および 2009 年時点の画像と、2015 年・2017 年と 2009 年の差分画像を再分類した。そして再分類後の画像を掛け合わせ、水域・植生変化域の抽出を行った (図 5)。

3.2 Landsat 可視画像による植生変化域モニタリング

Landsat5/8 の可視画像 (表 2) を用いて森林荒廃エリアの植生モニタリングを行った。Landsat8 に関しては分解能向上のため、高解像度パナクロマティック画像と低解像度マルチスペクトル画像を合成するパンシャープン処理を ENVI にて行った。Landsat5 の分解能は 30m、Landsat8 の分解能は 15m である。

3.3 Landsat・MODIS から算出した NDVI による植生変化域モニタリング

2005 年から 2021 年の夏季（6 月から 8 月）の NDVI 平均値の時系列データを用いた植生変化域のモニタリングを行った。NDVI（式 2）は、植物の活性度を表す指標であり、植生変化のモニタリングをするのに有効である。植生の分光反射率は特異的であり、赤色光（600nm～700nm）において高い吸光度を示し、近赤外域（800nm～1300nm）において高い反射率を示す。このように、植生は可視・近赤外域において明確な吸収帯と反射帯を持っており、その反射率の差を利用して NDVI は計算される（Ito et al.,1996）。値の範囲は-1.0～1.0 までを取り、植生の活性度が高いほど 1 に近くなる。一般的に熱帯林などの森林、出穂期の水田などは活性度が高く、NDVI は 0.7 や 0.8 以上の値を示す。建物などの人口構造物において NDVI は 0 に近い値を示し、雲・水域・雪原地帯については、負の値を示すこともある。

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \cdot \cdot \cdot \cdot (2)$$

RED：赤色域の分光反射率、NIR：近赤外域の分光反射率

2005 年から 2021 年の夏季（6 月から 8 月）の期間において、Google Earth Engine を用いて Landsat5/7/8 ではマルチスペクトル画像（表 3-1、3-2、3-3）から、MODIS では 16 日ごとに算出される植生指数データ（MOD13Q1）（表 4）から NDVI の夏季平均値（6 月から 8 月）を計算し、森林荒廃エリアの NDVI の経年変化を明らかにした。MOD13Q1 は、高頻度に撮影された複数のデータから 16 日ごとの NDVI を算出している。地上分解能は Landsat で 30m、MODIS で 250m である。

3.4 Landsat から算出した NDWI による水域変化域のモニタリング

正規化水指数（Normalized Difference Water Index：NDWI）は地表面の水域の存在を示す指標であり、式(3)で定義される。本研究では、2009 年と 2015 年の 2 時期の Landsat の画像から算出した NDWI を用いて、NDWI>0(水域)の場所のうち、過去画像の NDWI において NDWI≤0（陸域）であった場所、すなわち陸域から水域に変化した場所を抽出した。

$$NDWI = \frac{RED - SWIR}{RED + SWIR} \cdot \cdot \cdot \cdot (3)$$

RED：赤色域の分光反射率、SWIR：短波長赤外域の分光反射率

3.5 DSM を用いた地形解析

DSM は、樹木や人口構造物等の地物の高さを含む地表面の高さを表した三次元データである。本研究では、分解能 5m の ALOS World 3D (AW3D) の DSM を用いた。AW3D は JAXA の陸域観測技術衛星「だいち (ALOS)」の 3D 立体視に特化したセンサ (PRISM) で撮影された衛星画像を使って、陸地の起伏を表現した 3D 地図である。平滑化処理として 5×5 ピクセルの平均値を中心ピクセルに付与した AW3D を用いて ArcMAP で地形量 (標高、傾斜角、傾斜方向、曲率) を計算し、水域・植生変化域図の森林荒廃エリアとの関係を明らかにした。

4. 結果

4.1 水域・植生変化域の検出

検出した 2007→2009 年、2009→2015 年、2009→2017 年の水域・植生変化域の結果を図 6 に示す。また、水域・植生変化域の凡例別の面積割合の算出結果を表 5 に示す。表 5 から、湿潤年（夏季の降水量・冬季の降雪量の増加）が続いた 2007→2009 年の変化においては森林（湛水弱＋衰退）の割合が最も高く、43.3%となったが、それ以降、森林（湛水弱＋衰退）の割合は低下し、2009→2017 年の変化においては森林（湛水なし＋回復）の割合が最も高く、29.2%となった。また、水域においても、2007→2009 年の変化においては開地湿潤域（水域拡大、水位増加）の割合が 11.6%、湿潤域（水域縮小、水位減）の割合が 5.7%と拡大傾向にあったが、2009→2017 年の変化においては、開地湿潤域（水域拡大、水位増）の割合が 5.0%、湿潤域（水域縮小、水位減）の割合が 13.2%となり、縮小傾向に変化していることが分かった。

一方、森林（湛水強＋枯死衰退）の割合は、2007→2009 年で 0.4%、2009→2017 年で 0.5%と変化がなく、図 5 から右岸の一部地域で森林の荒廃が継続していることが確認できたことから、変化が顕著に現れているエリアを選定し、比較検討を行った。2007→2009 年に森林（湛水強＋枯死衰退）に分類されたが、以降、回復したエリアをエリア I（図 7）、2007→2009 年の変化では、森林（湛水強＋枯死衰退）に分類されなかったが、2009 年以降、森林（湛水強＋枯死衰退）に分類されているエリアをエリア II（図 8）とした。

4.2 Landsat 可視画像による森林枯死と回復のモニタリング

エリア II における時系列の水域・植生変化域と Landsat5/8 の可視画像を図 9 に示す。2007→2009 年の変化域において、森林（湛水強＋枯死衰退）の赤い地域が特異的な形で検出されており、2007 年 8 月 2 日の Landsat5 の可視画像を見ると、同じ形で森林の色が赤黄色に変化し、立ち枯れの様相を呈しており、2009/8/30 の可視画像では、黒色に変化し、落葉し枯死していることが確認できる。2009 年以降、変化域には森林（湛水強＋枯死衰退）の地域はなくなり、2018 年 8 月 7 日の Landsat8 のパンシャープン画像をみると森林の色が緑色に戻り、回復傾向にあることが確認できた。しかし、Landsat シリーズは分解能が 30m、パンシャープン画像でも 15m とピンポイントで植生の枯死・回復を確認するには粗いため、可視画像のほかにマルチスペクトル画像から NDVI を算出し、森林変化のモニタリングを行った。

4.3 NDVI による森林枯死と回復のモニタリング

エリア I、エリア II における変化域図と Landsat・MODIS の NDVI の夏季平均（6 月から 8 月）の時系列変化を図 10、11 に示す。2009 年以降、回復傾向にあるエリア I においては、

Landsat の NDVI をみると、湿潤年の 2008 年に NDVI が 0.2 程度低下したが、それ以降、経年的に回復しており、湿潤年以前の NDVI 値付近まで上昇していることがわかる。2007→2009 年では森林荒廃がみられなかったが、2009 年以降、荒廃が進行しているエリアⅡにおいて Landsat の NDVI をみると、エリアⅠと同じく、湿潤年の 2008 年に急激に NDVI が低下し、それ以降も回復せず横ばいになっていることが確認できた。

4.4 NDWI による水域変化モニタリング

2009→2015 年の水域・植生変化域図に NDWI を用いた陸域から水域への変化域を重ね合わせた図を図 12 に示す。サーモカルスト湖周辺では、湖の拡大により岸付近では森林荒廃が進行する。そのため、水域・植生変化域図でも湖周辺は森林（湛水強＋枯死衰退）に分類されており、NDWI による水域への変化の抽出でも同様の結果を得ることができている。

4.5 DSM を用いた地形量の算出と変化域との関係

DSM による地形解析の対象範囲と、その範囲における標高と変化域図を図 13 に示す。図 13 から北西方向に標高が低くなっていることが確認でき、変化域図における森林（湛水強＋枯死衰退）の範囲と一致していることがわかる。また、サーモカルスト湖周辺も同様に標高が低く、森林（湛水強＋枯死衰退）に分類されていることがわかる。また、解析対象範囲全体の DSM の頻度分布図と 2007→2009 年、2009→2017 年において森林（湛水強＋枯死衰退）に分類されたエリアの DSM の頻度分布図を図 14 に示す。解析対象範囲全体の DSM の頻度分布図の中央値は 122m、2007→2009 年の森林荒廃エリアの頻度分布図の中央値は 113m、2009→2017 年の森林荒廃エリアの頻度分布図の中央値は 117m であった。

続いて、DSM から地形量（傾斜角・傾斜方向・曲率）を算出し、標高と同様、解析対象範囲全体の地形量に加え、水域・植生変化域において、森林（湛水強＋枯死衰退）に分類されたエリアの地形量との関係を示す。まず、傾斜角の頻度分布図と累積相対度数曲線図を図 15 に示す。図 15 の頻度分布図から解析対象範囲全体と森林荒廃エリアにおいて傾斜角の違いは確認できず、それは累積相対度数曲線からも明らかである。

次に、DSM から算出した傾斜方向の図を図 16 に示す。図 16 から、解析対象範囲全体と比較した際、森林荒廃エリアでは、南向き・南西向きの斜面の割合が高くなっていることがわかる。また、曲率に関しては、解析結果がうまく抽出できなかった。その要因に関しては考察の段階で述べる。

5. 考察

5.1 水域・植生変化域の検出結果と DSM による地形解析との関係について

東シベリア・ヤクーツクにおける夏季降水量（7月から9月）と年最大積雪深の推移を図17に示す。湿潤年が続いた2005年付近以降、夏季降水量・冬季最大積雪深ともに、突出して増加した年はない。このことから夏季降水量・冬季降雪量が減少したことで、活動層の深化が緩和され、地表面の湛水が軽減されたことで森林の枯死が減少したと考えられる。一方で、近年、湿潤な年がないにもかかわらず継続的に森林（湛水強+枯死衰退）に分類されているエリアがある。このエリアに関しては地形的な高さが要因として考えられる。立ち枯れしたカラマツは斜面の窪地に存在しており、夏季降水量が増加した2007年と2008年に立ち枯れにより黄化・褐変したカラマツと正常なカラマツを通る約400mの横断線に沿って10m間隔で深さ0.20mの土壌水分量を測定し、両湿潤年とも、平均飽和度は正常なカラマツよりも立ち枯れしたカラマツで有意に大きい結果となった。（Iwasaki et al., 2010）。また、Landsat 光学データから2006年から2007年にかけて中央ヤクーチア低地の植生被覆が大きく変化していることが確認され、湖沼面積の拡大も報告されている（Park et al., 2022）。図13をみると、標高が低い場所と継続して森林（湛水強+枯死衰退）に分類されている場所が一致している。図14からも、森林（湛水強+枯死衰退）に分類されているエリアにおいては、解析対象範囲全体と比較した際に中央値が低くなっていることから標高が低く、集水地形になっている場所で降水や融雪水が流れ込み、湿潤年が起こっていないにもかかわらず、地表面が湛水し、水分過多による森林の枯死が継続していると考えられる。高水分条件下では、土壌の通気性が悪いため根の呼吸が制限され、植物根への酸素供給が減少する（Bergman 1959）。加えて、カラマツは特に酸素欠乏に弱く（Nishimoto 1982）、永久凍土の凍結層は大部分が不透水性である（Iwahana et al., 2005）。そのため、地形的に低く、降水や融雪水が集める場所において土壌水分量が多くなると、不透水性から水分が地表面上層部にとどまり、根の呼吸が制限され酸素欠乏によりカラマツが枯死したものと考えられる。

DSMによる地形解析として傾斜角・傾斜方向・曲率の算出を行った。森林荒廃エリアの1つとして、サーモカルスト湖周辺の森林が挙げられる。湖の拡大に伴う岸付近の森林が枯死するためである。このサーモカルスト湖の拡大過程で日射の当たる北側の南向き斜面においては太陽放射の影響を強く受け、凍土の融解に伴う森林の枯死が進行しやすい。そのため、傾斜方向に関して、図16において、森林荒廃エリアでは南向き・南西向きの割合が高かったのだと推察される。傾斜角については変化域との関係性は明らかにならなかった。また、曲率は地表面の凹凸度を表すものであるが、うまく抽出できなかった。今回、地形解析に使用したDSMは地表面上の地物を含んだ値であるため、東シベリアにおいて森林とそうでないところが大きな凹地として分類されてしまったことが要因として考えられることから、建物や樹木等の高さを含まない数値標高モデル（Digital Elevation Model : DEM）を使用することで必要であることが示唆された。

5.2 水域・植生変化域と NDVI の比較

NDVI のトレンド解析から後方散乱係数の閾値を用いて作成した水域・植生変化域図と Landsat の NDVI のトレンドは概ね一致していることが分かった。一方、MODIS の NDVI のトレンドに関しては、大きな変化が見られず、常に一定であり、水域・植生変化域図との差異が生じた。要因としては、分解能の違いが考えられる。変化域図は分解能 10m と比較的高解像度で作成した。しかし、今回、NDVI のトレンド解析に用いた MODIS のデータは分解能が 250m と低解像度であり、分解能 10m の変化域図における森林荒廃エリアを抽出した際、分解能の差異により、荒廃していないエリアの NDVI も含まれたため、Landsat の NDVI のような湿潤年における低下が見られず、常に一定の NDVI トレンドになったと推察される。

また、NDVI が回復した地点において植生が枯死する前のものと同一であるか否かについては、NDVI や Landsat の可視画像からは判別できなかった。しかし、カラマツ林の林床にはコケ類や地衣類、低木類からなる下層植生で覆われており (Nagano et al., 2022)、NDVI の占める割合が林床部と林冠部で 50%ということも示されている (Suzuki et al., 2011)。加えて、先行研究において、湿潤年において地表面の湛水によってカラマツ林で構成される林冠部の植生が減少し、林床植生はコケモモから灌木や耐水性のある草本類や低木等が優占するようになったことが示されている (Ohta et al., 2014)。そのため、湿潤年後の NDVI の上昇は下層植生の成長が要因であることが考えられる。カラマツ枯死後の植生の種類については、高分解能可視画像や現地調査で判別していくことが必要であると考えられる。

また、水域・植生変化域図で2009年以降、森林（湛水強+枯死衰退）に分類されたエリア IIにおいて、図11のLandsatのNDVIのトレンドを見ると、2009年以前に既にNDVIの低下が確認でき、水域・植生変化域図との相違が生じた。東シベリアの森林はカラマツが主であり、湿潤年には、このカラマツが水分過多により立ち枯れを起こした。立ち枯れは葉の色が黄色に変化するが、森林の倒壊は起きていない状況である。NDVIは赤色域と近赤外域の分光反射率を使用した指標であるため、立ち枯れによる葉の色の変化に敏感に反応する。一方、後方散乱係数は地表面の複雑さに起因するため、立ち枯れを起こした森林でも落葉や倒壊が生じない限り、変化は起きない。このような原理の違いにより、NDVIのトレンドと後方散乱係数を用いた水域・植生変化域図に時間スケールで多少の誤差が生じたと考えられる。しかし、図10、11ともに森林の回復、衰退の継続がNDVIのトレンドに現れていることから、長期的な視点で考えると、NDVIと後方散乱係数の双方を用いた解析は有効であることが示唆される。さらには、今後のLバンドSARで森林伐採の検出でも用いられているフルパラメトリの偏波データの撮影が実施されれば、地上部バイオマスの減少として森林変化をより具体的に解析できると考えられる。

6. まとめ

衛星搭載の合成開口レーダの後方散乱係数を用いて、温暖化に伴う永久凍土融解によって生じる水域・植生変化域の時空間変動を検出した。本研究では、2005年から2008年にかけての湿潤年（夏季降水量の増加・冬季降雪量の増加）が引き起こした森林荒廃に焦点を当てて、湿潤年とそれ以降の水域・植生変化域を検出した。その結果、湿潤年に相当する2007→2009年の変化では、森林（湛水弱＋衰退）の割合が最も高かったが、それ以降、その割合は減少し、2009→2017年の変化では、森林（湛水なし＋回復）の割合が最も高くなった。ヤクーツクにおける夏季降水量と最大積雪深の経年変化をみると、湿潤年の2005年から2008年以降、夏季降水量・最大積雪深ともに突出して増加した年はなく、活動層の深化に伴う地表面の湛水の進行が止まったことが回復傾向にある要因として考えられる。また、水域・植生変化域図で、森林（湛水強＋枯死衰退）に分類されたエリアにおいて可視画像による比較とNDVIのトレンド解析を行ったところ、変化の傾向と概ね一致しており、解析の有効性が確認できた。

一方で、回復傾向にある湿潤年以降も、継続的に森林（湛水強＋枯死衰退）に分類されたエリアが存在していたことから、高解像度DSMを用いて解析を行い、そのエリアにおける地形的特徴を明らかにした。標高に関して、DSMの解析対象範囲図から北西方向に向かって標高が低くなっており、これは変化域図において継続的に森林（湛水強＋枯死衰退）に分類されている範囲と一致していることがわかる。解析対象範囲全体のDSM値の頻度分布図の中央値は122m、2007→2009年の森林荒廃エリアの頻度分布図の中央値は113m、2009→2017年の森林荒廃エリアの頻度分布図の中央値は117mであった。このことから、森林荒廃が継続して進行しているエリアは地形的に低く、集水地形であることが分かった。そのため、降水や融雪水が流入し、湿潤年以降も地表面の湛水が続き、森林荒廃が継続して進行したと推察できる。また、傾斜方向に関して、解析対象範囲全体と比較した際、森林荒廃エリアでは、南向き・南西向きの斜面の割合が高くなっていることが分かった。これは、サーモカルスト湖の拡大過程で日射の当たる北側の南向き斜面においては太陽放射の影響を強く受け、凍土の融解に伴う森林の枯死が進行しやすいことが要因であると考えられる。

以上のことから、ALOSシリーズの後方散乱係数を用いた水域・植生変化域の検出に関して、経年的な解析の有効性が示された。一方、本研究では、右岸の一部地域では2015年および2017年の9月下旬に観測された衛星データを用いた。東シベリアでは、カラマツなどの落葉針葉樹林が主に生育し、9月下旬では落葉が始まっている。そのため、7月・8月のデータと比較した際に、地表面の植生状態が異なり、植生の変化がうまく抽出できない結果となった。今後は撮影月の統一や広域化のためにALOSシリーズの画像の整備を行っていく必要があると考える。合成開口レーダ搭載のALOSシリーズは今後、ALOS-4が2023年度に打ち上げ予定であり、引き続き永久凍土荒廃のモニタリングとしてALOS・ALOS-2・ALOS-4の三世代の衛星を用いた経年的な解析が必要不可欠となる。

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方にご指導、ご協力を賜りました。この場をお借りして感謝を述べさせていただきます。はじめに、指導教官の飯島慈裕教授には大変お世話になりました。研究のアイデアの提供や論文の添削、学会等の発表練習と多岐にわたって指導していただき大変感謝しております。この2年間は外部で発表する機会をたくさんいただき、特に、PAWCsの国際シンポジウムとISAR7において、英語でポスター発表をしたことは貴重な経験となりました。今後、この修士論文を学術誌に投稿できるよう、引き続きよろしくお願ひ致します。加えて、巡検にも数多く連れて行っていただき、こちらも貴重な経験となりました。特に、北海道の陸別町をはじめとして、小笠原諸島やモンゴルとめったに行くことのできない場所に調査として学生時代に行くことができよかったです。シベリアと種子島に行くことができなかつたのだけが心残りですが、またの機会によろしくお願ひします。

また、研究員の阿部さんにはSARの専門家として、基礎から応用まで多岐にわたって教えていただきました。こちらから質問しても快く答えてくださり、とても頼りにしていました。ありがとうございました。加えて、フューチャー・アース学研究室の同期や後輩にも大変お世話になりました。研究を進めるにあたって様々な助言をいただきました。そして、同期の伊藤くんはお互いに分からないことを教えあい、励ましあいながら研究を進めることができました。ありがとうございます。

皆様のご指導により、無事に修士論文を書き終えることができました。修士では2年間、学部時代を合わせると4年間という短い間でしたが、充実した研究生生活を送ることができました。本当にありがとうございました。

参考・引用文献

- Abe, T., Iwahana, G., Efremov, P.V., Desyantkin, A.R., Kawamura, T., Fedorov, A., Zhegusov, Y., Yanagiya, K. and Tadono, T.: Surface displacement revealed by L-band InSAR analysis in the Mayya area, Central Yakutia, underlain by continuous permafrost, *Earth, Planets and Space*, 72, 1, 2020.
- Abe, T., Iwahana, G., Tadono, T. and Iijima, Y.: Ground Surface Displacement After a Forest Fire Near Mayya, Eastern Siberia, Using InSAR: Observation and Implication for Geophysical Modeling, *Earth and Space Science*, 9, 11, 2022.
- Bergman, F.: Oxygen deficiency as a cause of disease in plant, *Bot. Rev.*, 25, 417–485, 1959.
- Bosikov, N. P.: Evolution of alases in central Yakutia. Yakutsk Permafrost Institute SD USSR AS. (In Russian), 1991.
- Iwasaki, H., Saito, H., Kuwao, K., Maximov, T.C., and Hasegawa, S.: Forest decline caused by high soil water conditions in a permafrost region, *Hydrology and Earth System Sciences*, 14, 301-307, 2010.
- Iwahana, G., Machimura, T., Kobayashi, Y., Fedorov, A. N., Konstantinov, Y., and Fukuda, M.: Influence of forest clearcutting on the thermal and hydrological regime of the active layer near Yakutsk, eastern Siberia, *Journal of Geophysical Research Biogeosciences.*, 110, 2005.
- Iijima, Y., Fedorov, A., Abe, K., Ise, H., and Masuzawa, T.: Spatial characteristics in permafrost and forest degradation in Yakutsk, eastern Siberia, *Annual Meeting of the Association of Japanese Geographers*, Spring 2013.
- Iijima, Y., Ohta, T., Kotani, A., Fedorov, A., Kodama, Y. and Maximov, T.: Sap flow changes in relation to permafrost degradation under increasing precipitation in an eastern Siberian larch forest, *Ecohydrology*, 7, 177-187, 2014.
- Lara, M.J., McGuire, A.D., Euskirchen, E.S., Genet, H., Yi, S., Rutter, R., Iversen, C., Sloan, V. and Wullschleger, S.D.: Local-scale arctic tundra heterogeneity affects regional-scale carbon dynamics. *Nat Commun*, 11, 4925, 2020.

Mishra, U., Hugelius, G., Shelef, E., Yang, Y., Strauss, J., Lupachev, A., Harden, J.W., Jastrow, J.D., Ping, C.-L., Riley, W.J., Schuur, E.A.G., Matamala, R., Siewert, M., Nave, L.E., Koven, C.D., Fuchs, M., Palmtag, J., Kuhry, P., Treat, C.C., Zubrzycki, S., Hoffman, F.M., Elberling, B., Camill, P., Veremeeva, A., Orr, A.: Spatial heterogeneity and environmental predictors of permafrost region soil organic carbon stocks. *Sci. Adv.* 7 (9), eaaz52, 2021.

Nishimoto, T.: Influence of different soil oxygen-supply capacities and compactness levels on the growth of *Larix letolepis* GORD. and *Picea glehnii* MAST. Seedlings, *J. Jap. For. Soc.*, 64, 476–485, 1982.

Nitze, I., Grosse, G., Jones, B.M., Romanovsky, V.E. and Boike, J.: Remote sensing quantifies widespread abundance of permafrost region disturbances across the Arctic and Subarctic. *Nat. Commun.* 9, 5423, 2018.

Nitze, I., Grosse, G., Jones, B.M., Arp, C.D., Ulrich, M., Fedorov, A. and Veremeeva, A.: Landsat-Based Trend Analysis of Lake Dynamics across Northern Permafrost Regions, *Remote Sensing*, 9, 640, 2017.

Nagai, H., Abe, T., Ohki, M.: SAR-based flood monitoring for a flatland with frequently fluctuating water surfaces: proposal for the Normalized Backscatter Amplitude Difference Index (NoBADI), *Remote Sensing* 13(20) 4136, 2021

Nagano, H., Kotani, A., Mizuochi, H., Ichii, K., Kanamori, H. and Hiyama, T.: Contrasting 20-year trends in NDVI at two Siberian larch forests with and without multiyear waterlogging-induced disturbances, *Environmental Research, Letters*, 17, 2022.

Ohta T, Kotani A, Iijima Y, Maximov T C, Ito S, Hanamura M, Kononov A V and Maximov A P: Effects of waterlogging on water and carbon dioxide fluxes and environmental variables in a Siberian larch forest, 1998–2011 *Agric. For. Meteorol.* 188 64–75, 2014.

Park, S-E., Jung, Y.T. and Kim, H-C.: Monitoring permafrost changes in central Yakutia using optical and polarimetric SAR data, *Remote Sensing of Environment*, 274, 2022.

Sugimoto, A., Naito, D., Yanagisawa, N., Ichiyaanagi, K., Kurita, N., Kubota, J., Kotake, T., Ohata, T., Maximov, T. C., and Fedorov, A. N.: Characteristics of soil moisture in permafrost observed in East Siberian taiga with stable isotopes of water, *Hydrol. Processes*, 17, 1073–1092, 2003.

Suzuki, R., Kobayashi, H., Delbart, N., Asanuma, J. and Hiyama, T.: NDVI responses to the forest canopy and floor from spring to summer observed by airborne spectrometer in eastern Siberia, *Remote Sensing of Environment*, 115, 3615-24, 2011.

Shestakova, A., Fedorov, A., Torgovkin, Y., Konstantinov, P., Vasyliov, N., Kalinicheva, S., Samsonova, V., Hiyama, T., Iijima, Y., Park, H., Iwahana, G. and Gorokhov, A.: Mapping the Main Characteristics of Permafrost on the Basis of a Permafrost-Landscape Map of Yakutia Using GIS, 10, 462, 2021.

Shmelev, D., Cherbunina, M., Rogov, V., Opfergelt, S., Monhonval, A. and Strauss, J.: Reconstructing Permafrost Sedimentological Characteristics and Post-depositional Processes of the Yedoma Stratotype Duvanny Yar, Siberia, *Frontiers in Earth Science*, 9, 2021.

Tadono, T., Ohki, M. and Abe, T.: Summary of Natural Disaster Responses by the Advanced Land Observing Satellite-2 (ALOS-2), *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLII-3/W7* 69-72, 2019

图表

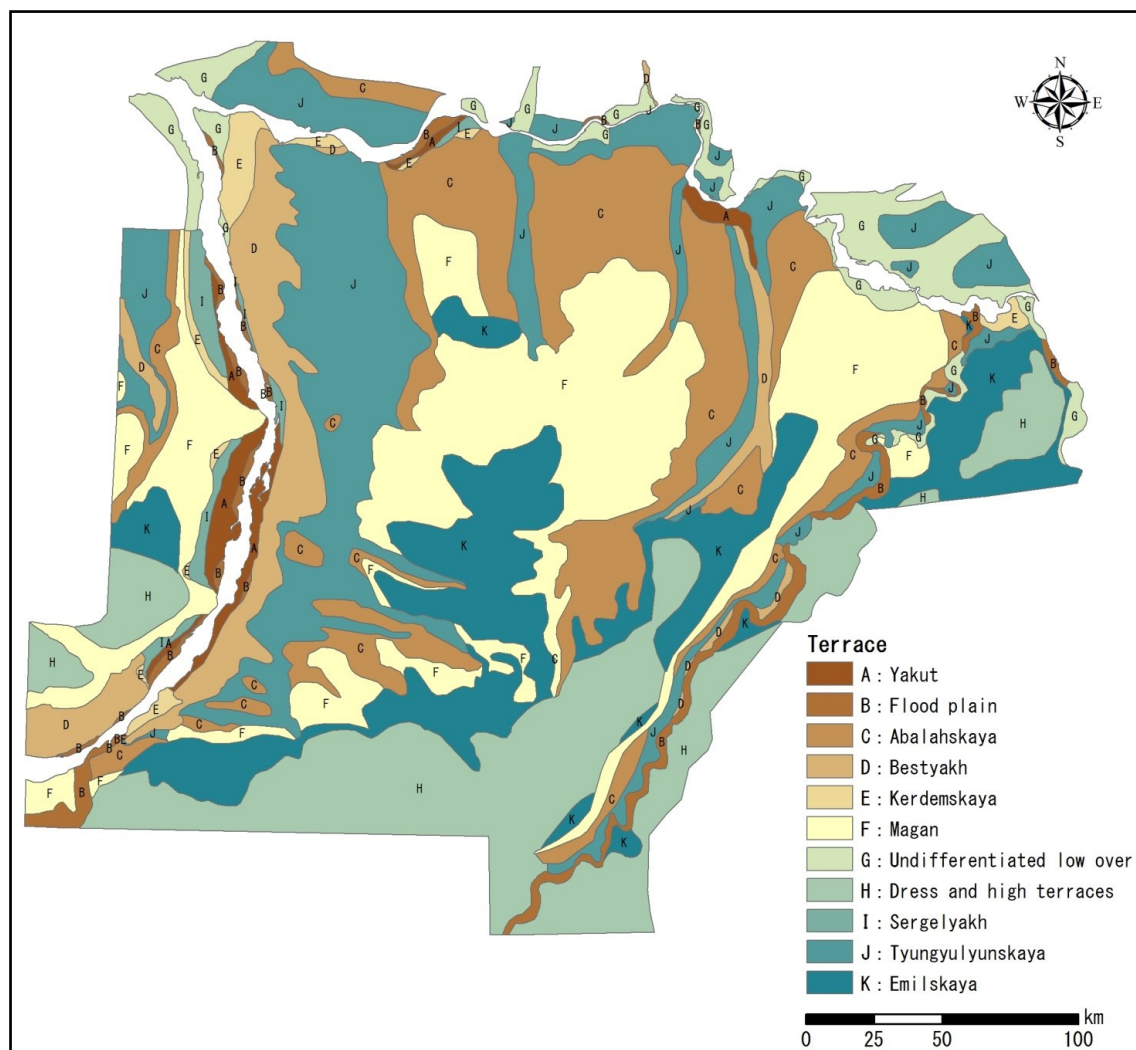


图1 河岸段丘地形区分图



図2 解析対象範囲

表 1 ALOS シリーズ画像シーン ID・諸元

撮影年代	撮影日	Scene ID	撮影モード	撮影方向	オフナディア角	地上分解能	処理レベル	衛星
2007年	2007/8/21	ALPSRP083801260	FBD(HH+HV)	Ascending	34.3	10m	Level1.5	ALOS
		ALPSRP083801250						
		ALPSRP083801240						
	2007/9/2	ALPSRP085551260	FBD(HH+HV)	Ascending	34.3	10m	Level1.5	ALOS
		ALPSRP085551250						
		ALPSRP085551240						
2009年	2009/8/26	ALPSRP191161260	FBD(HH+HV)	Ascending	34.3	10m	Level1.5	ALOS
		ALPSRP191161250						
		ALPSRP191161240						
	2009/9/7	ALPSRP192911260	FBD(HH+HV)	Ascending	34.3	10m	Level1.5	ALOS
		ALPSRP192911250						
		ALPSRP192911240						
2015年	2015/8/21	ALOS2067201260-150821	FBD(HH+HV)	Ascending	32.5	10m	Level1.1	ALOS-2
		ALOS2067201250-150821						
	2015/9/4	ALOS2069271260-150904	FBD(HH+HV)	Ascending	36.2	10m	Level1.1	ALOS-2
		ALOS2069271250-150904						
2017年	2017/9/1	ALOS2176911260-170901	FBD(HH+HV)	Ascending	36.2	10m	Level1.1	ALOS-2
		ALOS2176911250-170901						
	2017/9/29	ALOS2181051260-170929	FBD(HH+HV)	Ascending	32.5	10m	Level1.1	ALOS-2
		ALOS2181051250-170929						

※FBD (Fine Beam Dual) : 高分解能 2 偏波 (HH+HV or VV+VH)

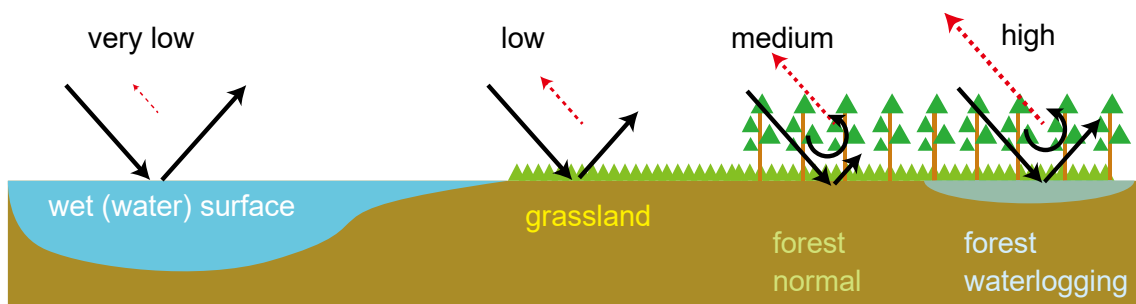


図3 湛水域における後方散乱強度の概念

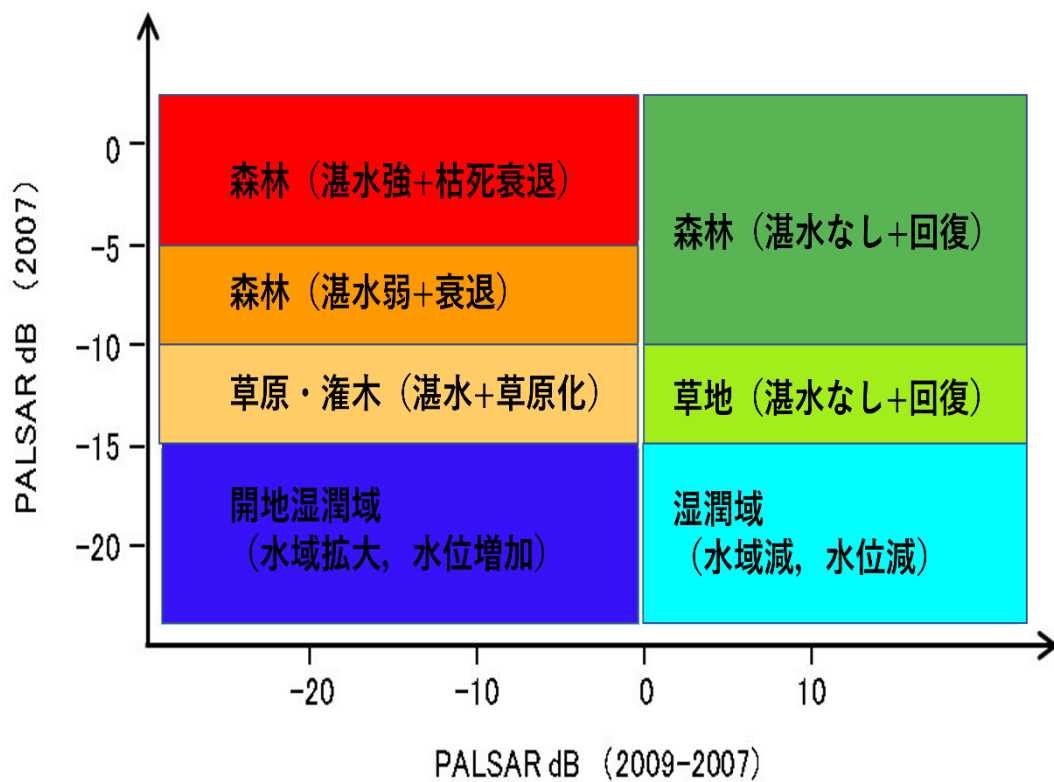


図4 水域・植生変化域の検出における後方散乱係数の閾値

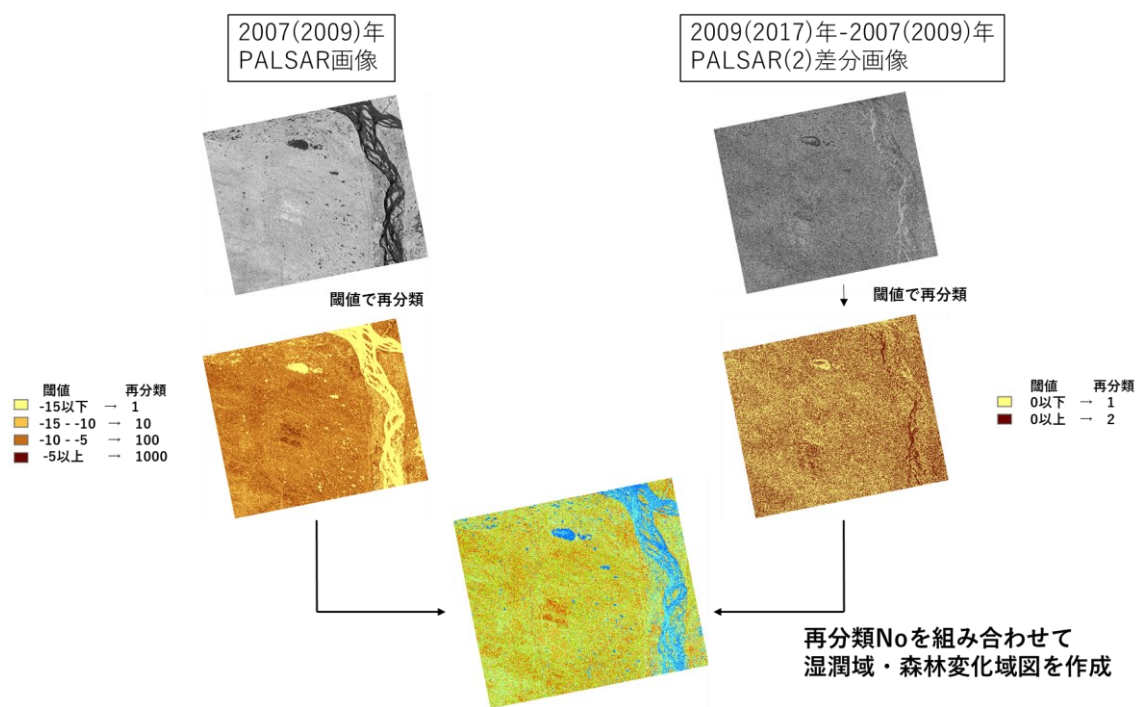


図5 水域・植生変化域検出のワークフロー

表 2 Landsat5/8 可視画像のシーン ID

Scene ID	date(dd/mm/yyyy)
LT05_L1TP_121016_20070802_20161111_01_T1	02/08/2007
LT05_L1TP_122016_20090830_20161021_01_T1	30/08/2009
LC08_L1TP_122016_20180807_20180815_01_T1	07/08/2018

表 3-1 Landsat5/NDVI のシーン ID

Scene ID	date(dd/mm/yyyy)
LT05_L1TP_122016_20110617_20200822_02_T1	17/06/2011
LT05_L1TP_121016_20110712_20200822_02_T1	12/07/2011
LT05_L1TP_121016_20110728_20161007_01_T1	28/07/2011
LT05_L1TP_122016_20110820_20200820_02_T1	20/08/2011

表 3-2 Landsat7/NDVI のシーン ID

Scene ID	date(dd/mm/yyyy)
LE07_L1TP_121016_20050804_20200914_02_T1	04/08/2005
LE07_L1TP_121016_20050820_20200914_02_T1	20/08/2005
LE07_L1TP_122016_20060611_20200914_02_T1	11/06/2006
LE07_L1TP_121016_20060807_20200914_02_T1	07/08/2006
LE07_L1TP_122016_20070817_20200913_02_T1	17/08/2007
LE07_L1TP_121016_20070826_20200913_02_T1	26/08/2007
LE07_L1TP_121016_20080609_20200912_02_T1	09/06/2008
LE07_L1TP_122016_20080718_20200912_02_T1	18/07/2008
LE07_L1TP_122016_20090603_20200912_02_T1	03/06/2009
LE07_L1TP_121016_20090628_20200912_02_T1	28/06/2009
LE07_L1TP_121016_20090714_20200911_02_T1	14/07/2009
LE07_L1TP_122016_20090721_20200911_02_T1	21/07/2009
LE07_L1TP_122016_20090806_20200911_02_T1	06/08/2009
LE07_L1TP_121016_20090815_20200911_02_T1	15/08/2009
LE07_L1TP_122016_20090822_20200911_02_T1	22/08/2009
LE07_L1TP_122016_20100606_20200911_02_T1	06/06/2010
LE07_L1TP_121016_20100701_20200911_02_T1	01/07/2010
LE07_L1TP_122016_20100724_20200911_02_T1	24/07/2010
LE07_L1TP_122016_20100825_20200910_02_T1	25/08/2010
LE07_L1TP_121016_20120706_20200908_02_T1	06/07/2012
LE07_L1TP_122016_20120713_20200908_02_T1	13/07/2012
LE07_L1TP_121016_20120807_20200908_02_T1	07/08/2012
LE07_L1TP_121016_20160701_20200902_02_T1	01/07/2016
LE07_L1TP_122016_20160708_20200902_02_T1	08/07/2016

表 3-3 Landsat8/NDVI のシーン ID

Scene ID	date(dd/mm/yyyy)
LC08_L1TP_122016_20130724_20200912_02_T1	24/07/2013
LC08_L1TP_121016_20130818_20200913_02_T1	18/08/2013
LC08_L1TP_122016_20140711_20200911_02_T1	11/07/2014
LC08_L1TP_122016_20140727_20200911_02_T1	27/07/2014
LC08_L1TP_122016_20140828_20200911_02_T1	28/08/2014
LC08_L1TP_121016_20150707_20200909_02_T1	07/07/2015
LC08_L1TP_121016_20150808_20200908_02_T1	08/08/2015
LC08_L1TP_121016_20150824_20200908_02_T1	24/08/2015
LC08_L1TP_122016_20150831_20200908_02_T1	31/08/2015
LC08_L1TP_121016_20160709_20200906_02_T1	09/07/2016
LC08_L1TP_122016_20160801_20200906_02_T1	01/08/2016
LC08_L1TP_121016_20170610_20200903_02_T1	10/06/2017
LC08_L1TP_122016_20170617_20200903_02_T1	17/06/2017
LC08_L1TP_121016_20170626_20200903_02_T1	26/06/2017
LC08_L1TP_122016_20170703_20200903_02_T1	03/07/2017
LC08_L1TP_122016_20170719_20200903_02_T1	19/07/2017
LC08_L1TP_121016_20170813_20200903_02_T1	13/08/2017
LC08_L1TP_121016_20180731_20200831_02_T1	31/07/2018
LC08_L1TP_122016_20180807_20200831_02_T1	07/08/2018
LC08_L1TP_122016_20190607_20200828_02_T1	07/06/2019
LC08_L1TP_121016_20190616_20200828_02_T1	16/06/2019
LC08_L1TP_122016_20190725_20200827_02_T1	25/07/2019
LC08_L1TP_122016_20190826_20200826_02_T1	26/08/2019
LC08_L1TP_121016_20200821_20200905_02_T1	21/08/2020
LC08_L1TP_122016_20200828_20200906_02_T1	28/08/2020
LC08_L1TP_121016_20210605_20210614_02_T1	05/06/2021
LC08_L1TP_121016_20210621_20210629_02_T1	21/06/2021
LC08_L1TP_121016_20210707_20210713_02_T1	07/07/2021
LC08_L1TP_122016_20210730_20210804_02_T1	30/07/2021

表4 MODIS/NDVI (MOD13Q1) データの撮影日

2005年、2006年、2007年、2009年、2010年、2011年、2013年 2014年、2015年、2017年、2018年、2019年、2021年	6/10
	6/26
	7/12
	7/28
	8/13
	8/29
	8/29
2008年、2012年、2016年、2020年	6/9
	6/25
	7/11
	7/27
	8/12
	8/28

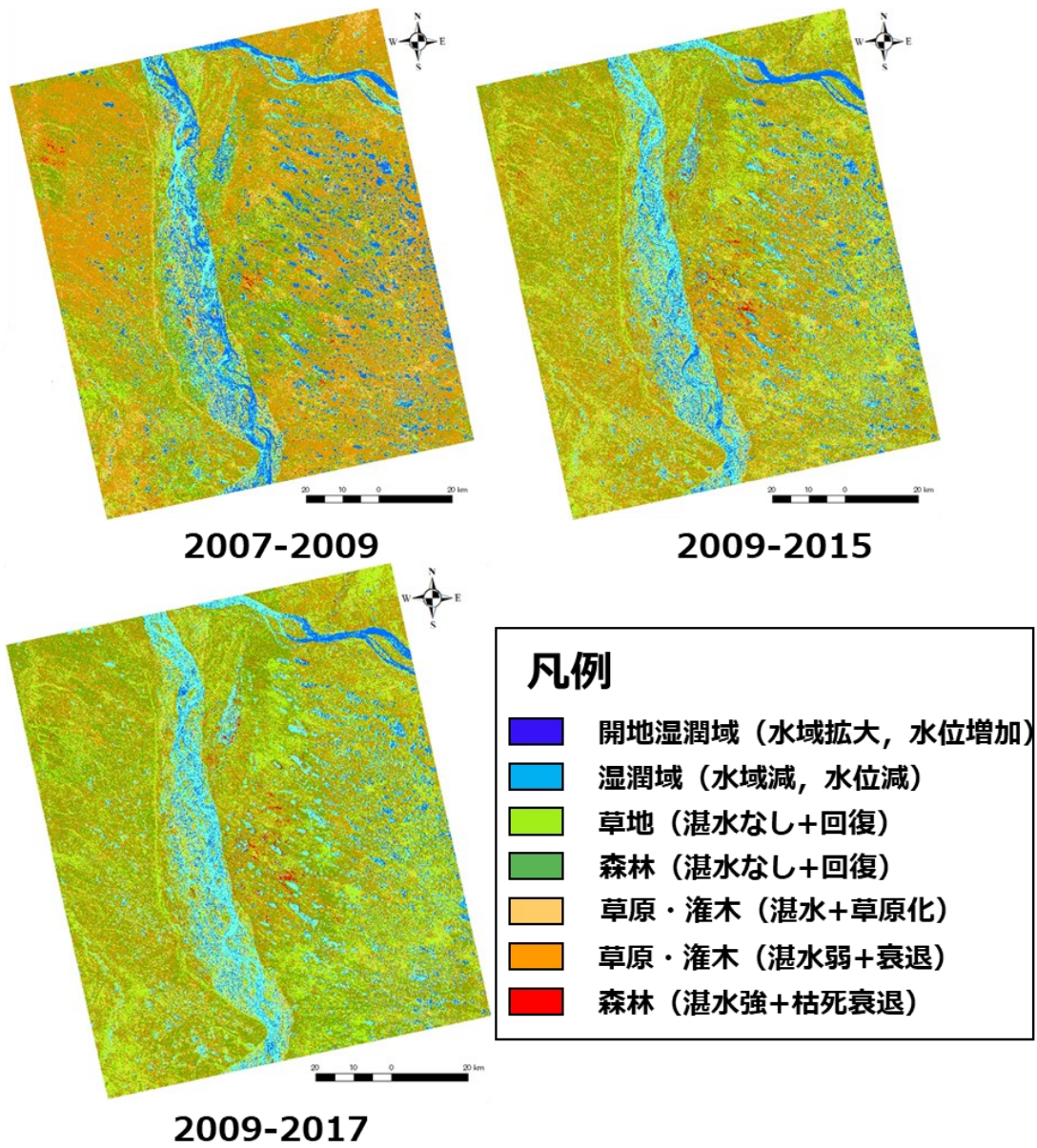


図6 水域・植生変化域図

表 5 水域・植生変化域の凡例別の面積割合

	2007-2009[%]	2009-2015[%]	2009-2017[%]
開地湿潤域(水域拡大, 水位増加)	11.6	7.2	5.0
湿潤域(水域減, 水位減)	5.7	10.9	13.2
草原・灌木(湛水+草原化)	10.4	11.1	7.7
草地(湛水なし+回復)	11.1	16.4	19.7
森林(湛水弱+衰退)	43.3	32.5	24.7
森林(湛水なし+回復)	17.5	21.4	29.2
森林(湛水強+枯死衰退)	0.4	0.6	0.5

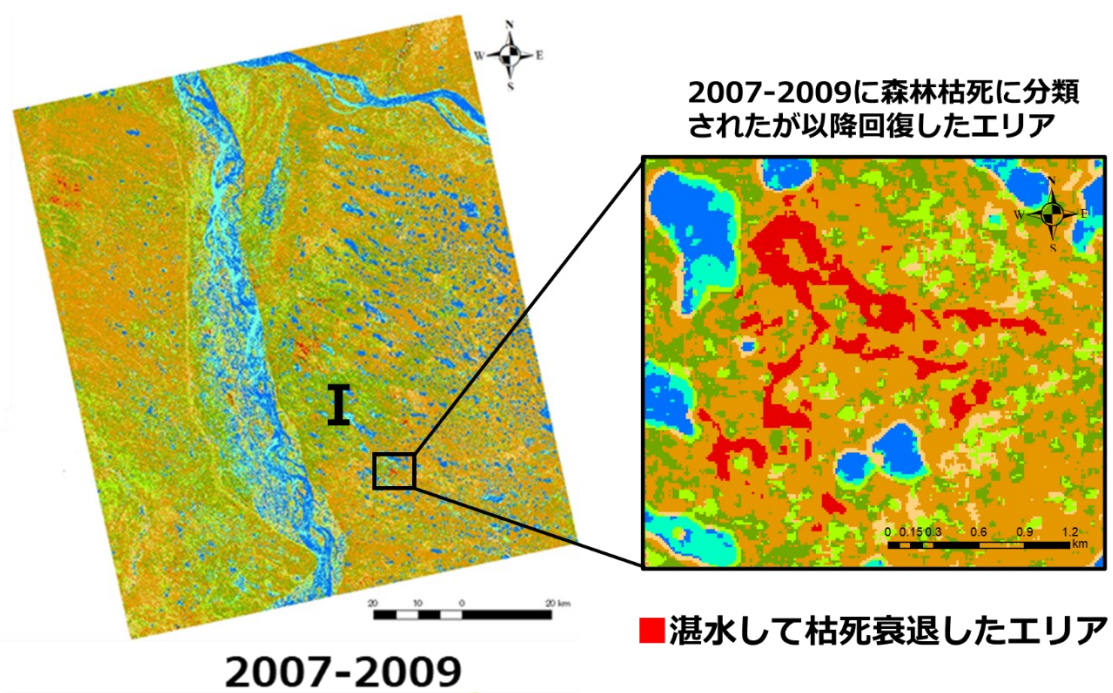


図7 回復傾向にあるエリアI

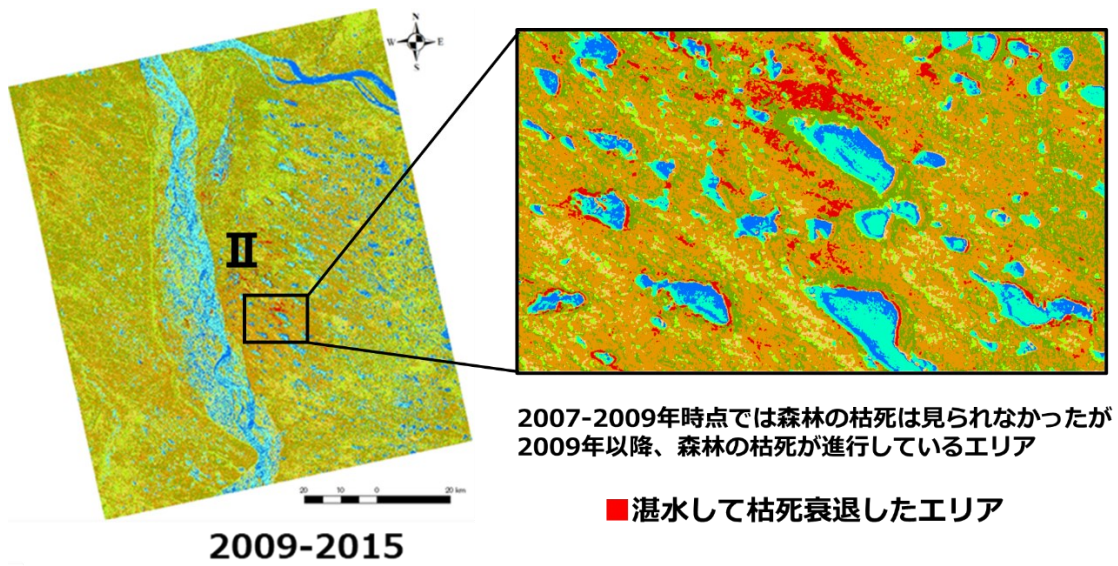


図8 衰退傾向にあるエリアII

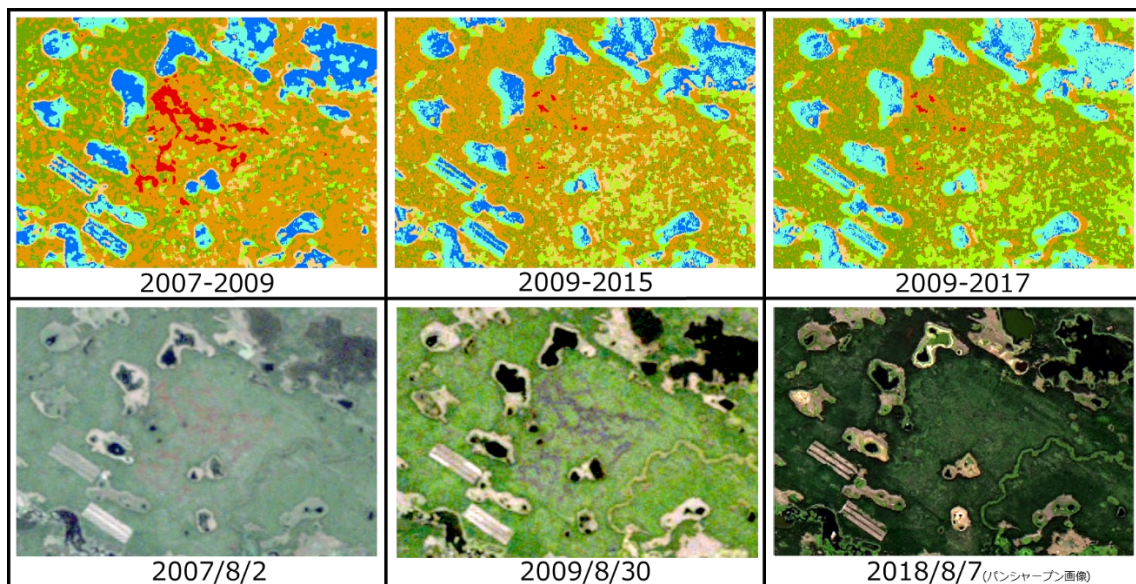


図9 エリアIにおける水域・植生変化域と Landsat 可視画像の経年変化
 (赤い範囲が森林荒廃に分類された場所)

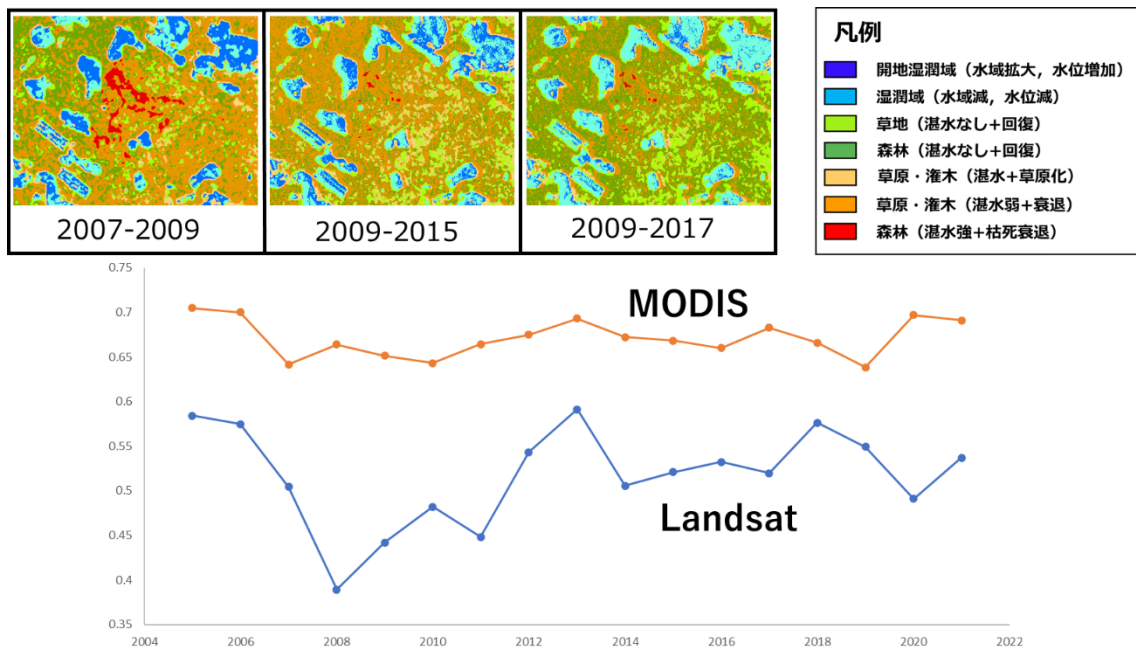


図 10 エリアIIにおける NDVI 夏季平均の時系列変化

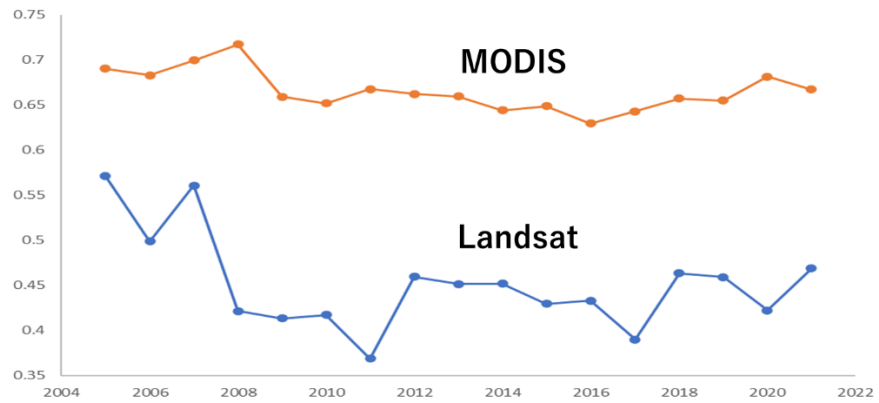
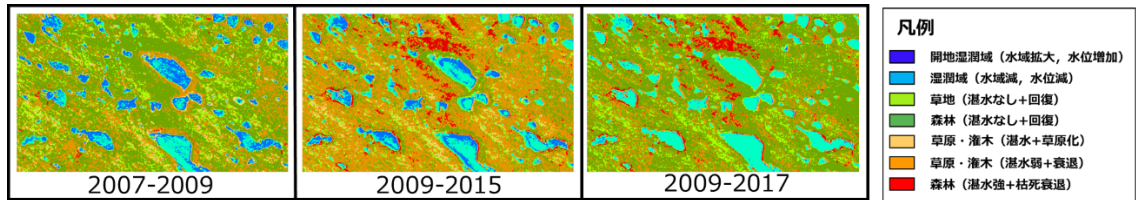


図 11 エリアIIにおける NDVI 夏季平均の時系列変化

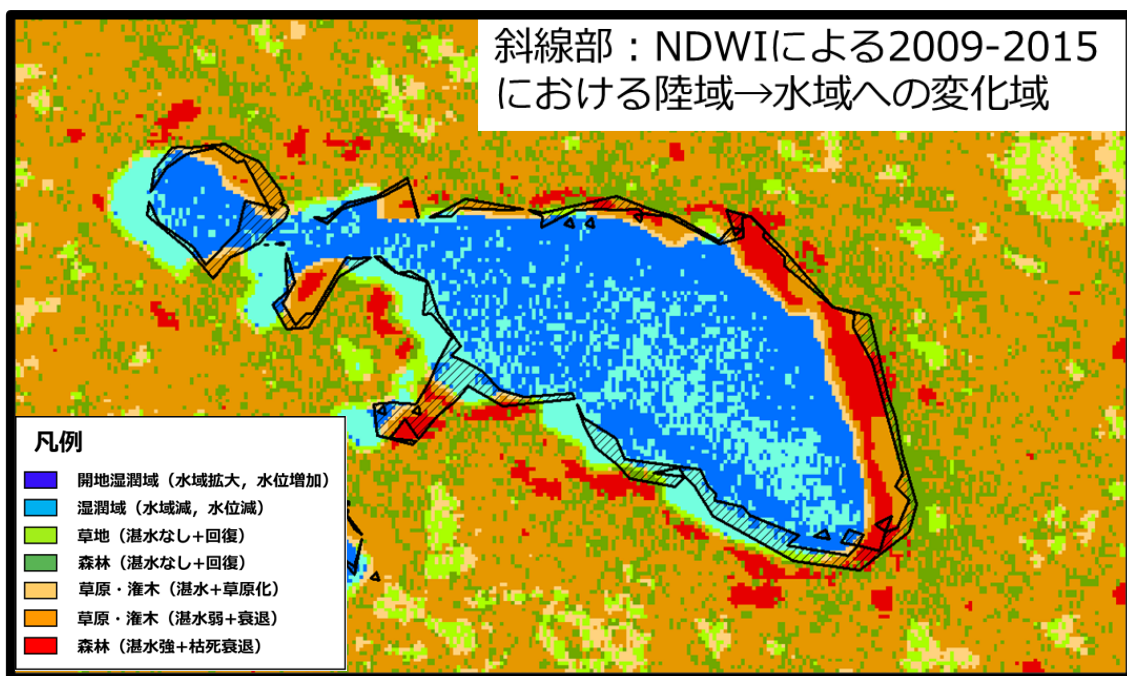


図 12 2009-2015 の水域・植生変化域図と NDWI を用いた陸域から水域への変化域図

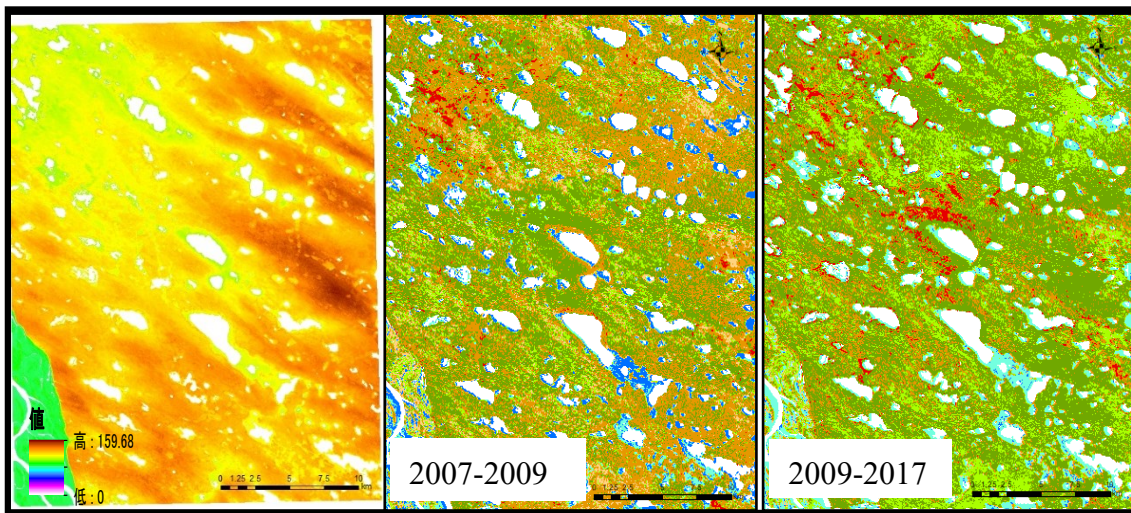


図 13 DSM と水域・植生変化域

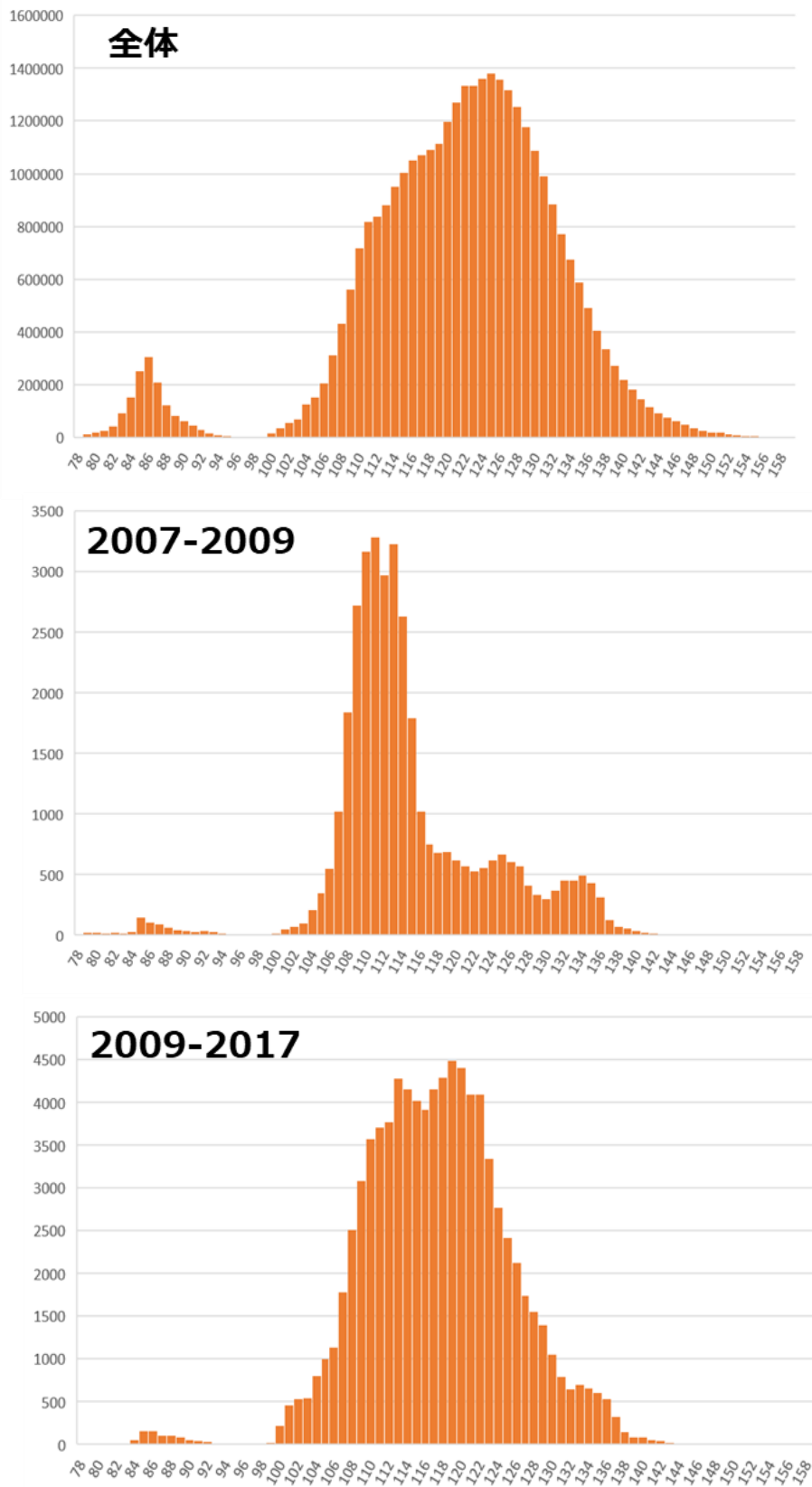


図 14 DSM の頻度分布図

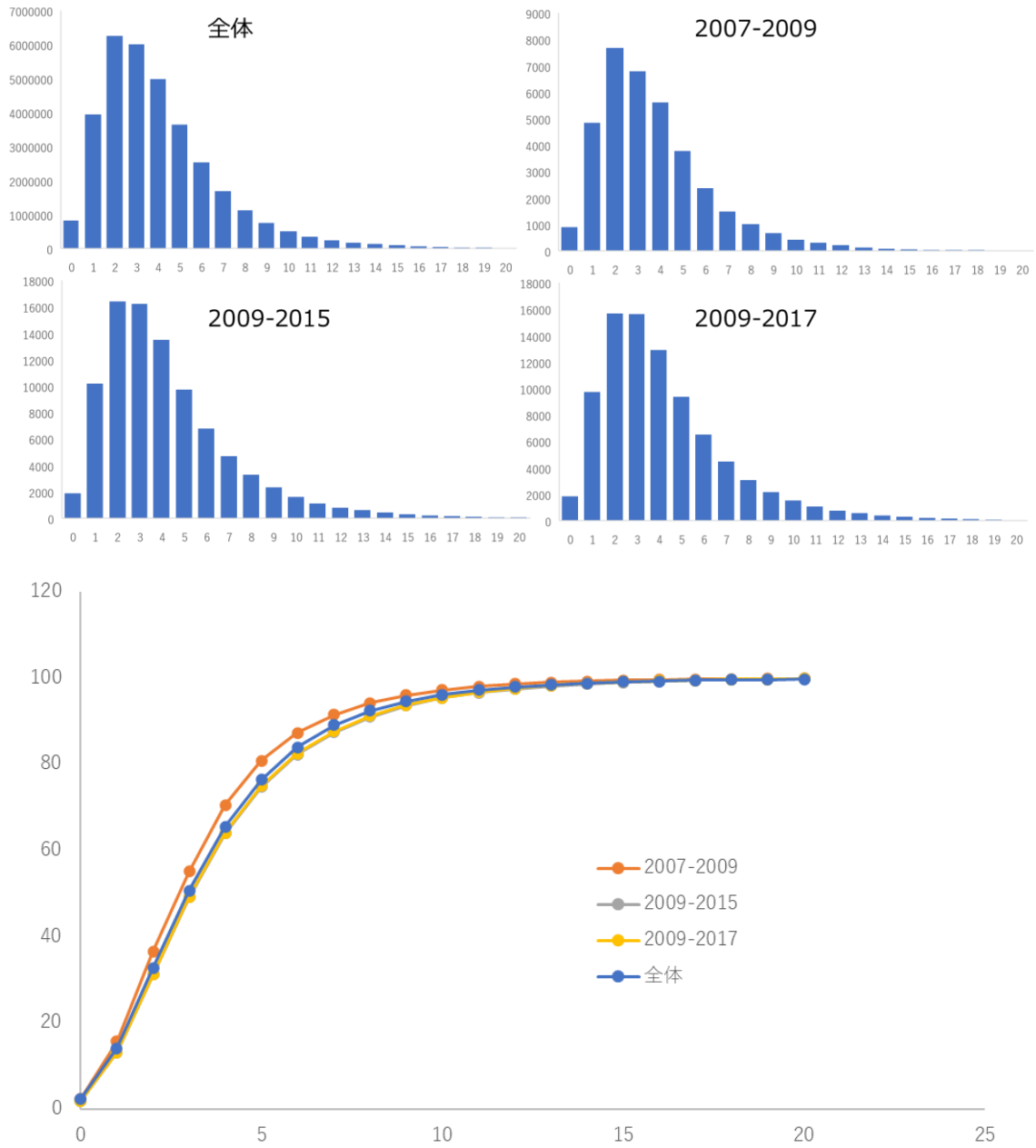


図 15 傾斜角の頻度分布図と累積相対度数曲線図

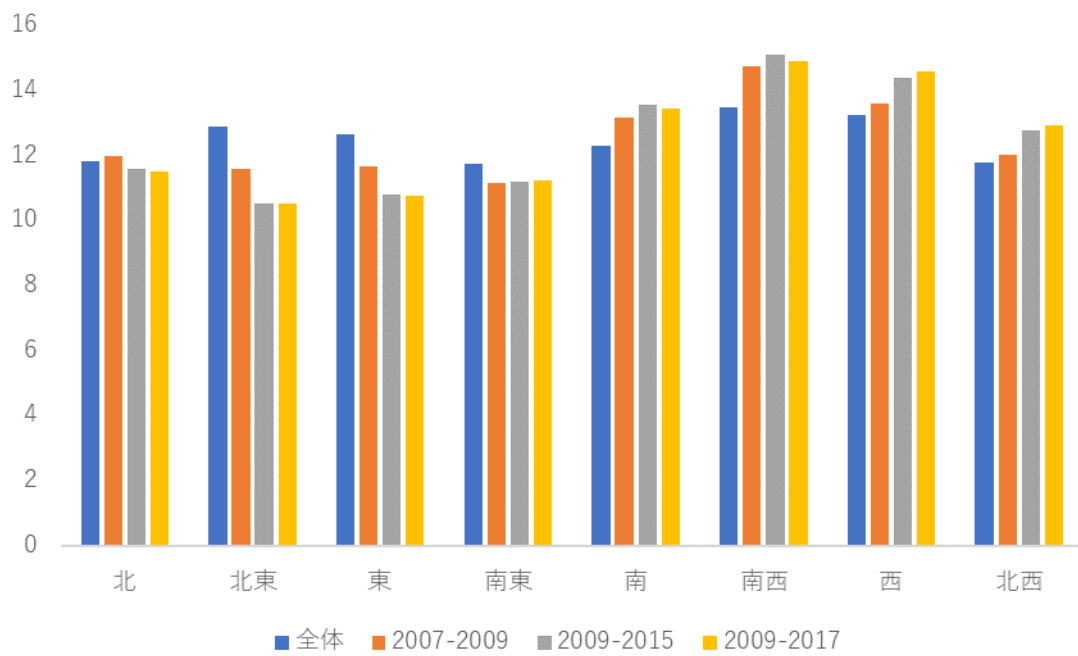


図 16 各期間における傾斜方向の割合

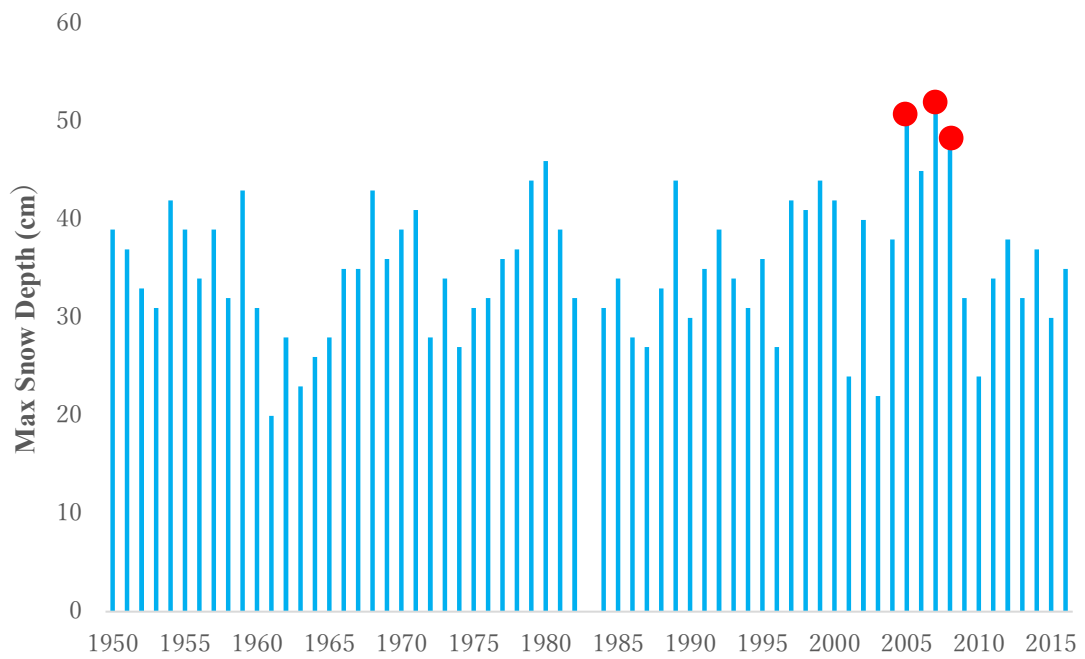
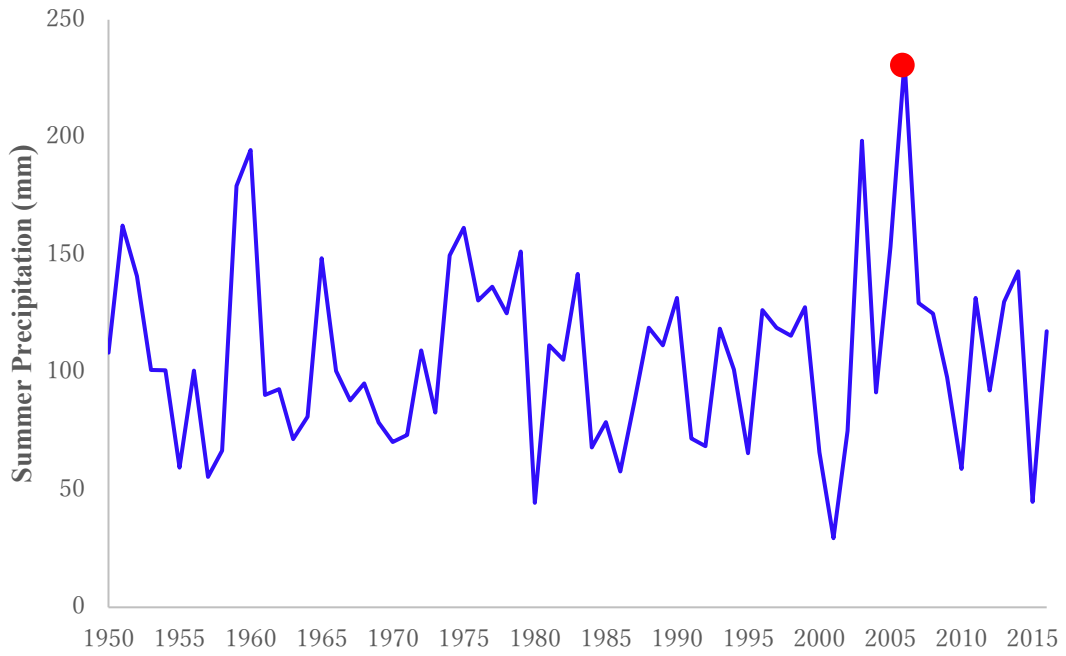


図 17 ヤクーツクにおける夏季降水量と最大積雪深の推移