

博士論文

津波被災景観域における 連結性の定量的評価に関する研究

東京情報大学大学院総合情報学研究科

総合情報学専攻

平山英毅

2020年3月

目次

第1章 序論.....	1
1.1. 博士論文の背景	1
1.2. 博士論文の課題のまとめと目的	5
1.3. 本論の構成	6
第2章 高精度かつ孤立ピクセルを低減する土地被覆図の作成手法の開発.....	9
2.1. 本章の背景と目的	9
2.2. データと方法	10
2.2.1. 対象地.....	10
2.2.2. グラントゥルース.....	11
2.2.3. 衛星画像.....	11
2.2.4. 地形データ.....	12
2.2.5. MCS を用いた分類手法	12
2.2.6. 精度検証および分類器の比較.....	16
2.3. 結果	18
2.3.1. 土地被覆分類図.....	18
2.3.2. 孤立ピクセルの発生数.....	23
2.3.3. 精度検証の検証.....	23
2.3.4. 学習曲線によるモデルの検証.....	24
2.3.5. 分類精度と孤立ピクセルの発生数数の比較.....	25
2.4. 考察	26
2.5. 本章のまとめ	27
第3章 低頻度大規模攪乱下の被災景観域を対象とした連結性解析手法の確立	
28	
3.1. 本章の背景と目的	28
3.2. データと方法	29

3.2.1. 研究対象地.....	29
3.2.2. 複数年次ごとの森林パッチ分布図の作成.....	29
3.2.3. 森林パッチネットワークの構築.....	30
3.2.4. 連結性指数の算出.....	30
3.2.4.1. 連結性積算指数 (Integral index of connectivity)	30
3.2.4.2. クラス一致確率 (Class coincidence probability)	31
3.2.5. 連結距離の設定に向けた初期解析.....	31
3.3. 結果	31
3.3.1. 土地被覆図.....	31
3.3.2. 土地被覆図の検証.....	35
3.3.3. 森林パッチの分布.....	36
3.3.4. 連結性指数に特徴が見られた3つの連結距離.....	38
3.3.5. 森林パッチネットワークと連結性指数の応答.....	40
3.3.5.1. 震災直後 (2010年～2011年) の連結性変化	40
3.3.5.2. 震災直後以降 (2011年～2012年) の連結性変化	41
3.3.5.3. 震災から5年経過した時点 (2012年～2016年) の連結性変化	41
3.4. 考察	43
3.4.1. 津波発生以降の移動経路の変化.....	43
3.4.2. 複数の連結性指数を併用した定量評価の有効性.....	44
3.5. 本章のまとめ	45
第4章 連結性向上に効果的な森林パッチ創出領域を空間明示的に示す手法の 開発	46
4.1. 本章の背景と目的	46
4.2. データと方法	48
4.2.1. 連結性の向上量を示す空間分布図の作成手順の概要	48
4.2.2. 測定基準となる森林分布と除外地域	49
4.2.3. 森林パッチ創出による連結性向上効果の測定方法	51

4.2.4. 空間的内挿処理と階級区分による濃淡図の作成	51
4.3. 結果	53
4.3.1. 連結性の向上量を示す空間分布図	53
4.3.2. 濃淡図をもとにした森林パッチ創出のシミュレーション	57
4.4. 考察	58
4.5. 本章のまとめ	59
第5章 総合考察	60
5.1. 各章の新規性と有用性の概要	60
5.2. 新規性と有用性を踏まえた各章のまとめ	60
5.2.1. 第2章のまとめ	60
5.2.2. 第3章のまとめ	61
5.2.3. 第4章のまとめ	62
5.3. 研究分野への貢献と今後の展望	64
5.3.1. 多重分類器システムを用いた土地被覆分類	64
5.3.2. 連結性の定量的評価に係る研究と社会実装	64
第6章 結論	67
謝辞	68
引用文献	69
研究業績	79
業績一覧	79
本論文の各章と主な研究業績の対比表	84
論文内容の要旨	85

第1章 序論

1.1. 博士論文の背景

健全な生態系や生物多様性の保持には、生物、物質、エネルギーそして情報が景観内を移動することが不可欠である(Crooks and Sanjayan 2006). 生息地の分断は、個々の生息地を孤立させることで種の分散行動を阻害し(Forman 1995), 局所個体群の成長率の低下や絶滅の可能性を高める要因である(Fahrig and Merriam 1985). また、個々の生息地を孤立させることから、個体群内における近親交配の可能性の高まりや、個体群間との遺伝子の流れの欠如につながる要因でもある(Bakker et al. 1996; Lutz Eckstein et al. 2006; Ewers et al. 2007);(図 1.1-1). マクロ生態学的研究では、生物の移動範囲の変化は、個体群の存続のみならず、捕食者と被食者の相互作用、栄養循環や病気伝染などの生態系プロセスにも強く影響することが示唆されている(Tucker et al. 2018). したがって、生息地の分断は、健全な生態系や生物多様性の保持に対する主要な脅威のひとつだと認識されるとともに(Wilcove et al. 1998), 生物が生息地間を移動できるような景観管理が、生物多様性や生態系の保全には不可欠だと認識されてきている(Fagan and Calabrese 2006; Kindlmann and Burel 2008; Vos et al. 2008; Vasudev et al. 2015).

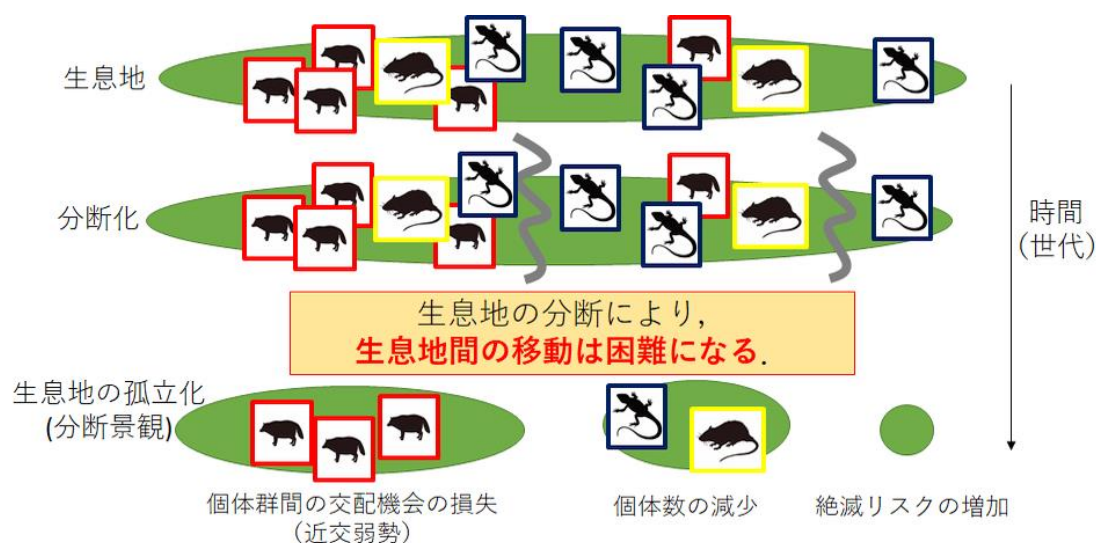


図 1.1-1 生息地分断に伴う生態系への負の影響

一方、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う巨大津波は、青森県から千葉県に亘る太平洋沿岸域に甚大な被害をもたらした。宮城県石巻市や仙台市の耕作地や森林域は広範囲で浸水し(国土地理院 2011a), 沿岸部に成

立していた海岸林の大部分は倒壊・流失した。さらに、2011年5月以降には、津波が到達しながらも倒壊を免れた立木であっても、塩害等により枯死する個体があった(林野庁 2012)。仙台湾沿岸域では、津波によって海岸林面積の82% (4.2 km² から 0.5 km²) が倒壊し (趙ほか 2013)、まとまった面積をもつ海岸林が細分化された。この巨大津波による攪乱は、数百年に一度の頻度で発生する大規模な攪乱であり、生態学的には低頻度大規模攪乱に位置づけられ(松本ほか 2013; 富田ほか 2014)、現地調査、航空測量、衛星リモートセンシング技術を活用した生態学的研究が進められてきている(原・樋口 2013; 富田ほか 2014; Hara et al. 2016; Tomita and Kanno 2019)。また、津波発生以降には、復旧・復興事業等の影響によって森林域の縮小が継続しており、生態系への負の影響が危惧されている(Hara 2014; Hara et al. 2016)。

本被災景観のような森林域の大規模かつ継続的な縮小は、森林を生息地とする生物にとっては、利用可能な生息地の総量が減少するだけでなく、生息地間の距離が増加することで、生息地間の移動が困難になることが危惧される (図 1.1-2)。したがって、本被災景観を対象とした生態系や生物多様性に関する研究や、当該景観の生態系管理を進める上では、生物の移動に与えた影響を理解することが不可欠である。

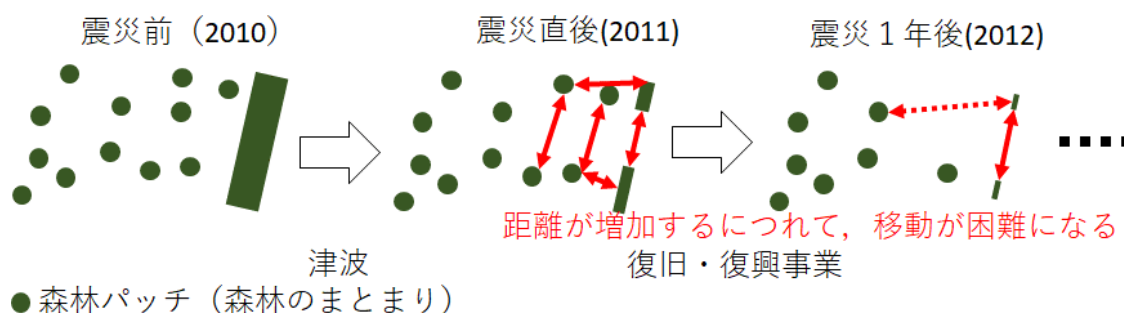


図 1.1-2 津波発生以降における森林域の分断状況の模式図

これまで、景観生態学では、生物による生息地間の移動のしやすさの度合いを連結性 (connectivity) と定義し(Taylor et al. 1993)、生息地分布の変化が連結性に与える影響の定量的評価手法の研究を進めてきた。東北地方太平洋沖地震に伴う巨大津波が、低頻度大規模攪乱に位置づけられる事象であることを踏まえると、当該被災景観域を研究対象とすることは、津波被災景観域に対する連結性の定量評価手法を確立させるためのまたとない機会だと考えられる。加えて、世界的に自然災害の発生頻度は年々増加しており、深刻な被害がもたらされている

(Ritchie and Roser 2019). 特に日本は、火山活動や地震活動が活発であるため、地震による災害の頻度が高く(Cabinet Office Government of Japan 2015)、今後も、自然災害に見舞われることが危惧されることから、生態系や生物多様性に大きな影響を与えるような災害発生時に迅速な対応ができるよう、連結性研究の成果を復興事業計画等に適用できるようにすることが重要である。

一方、本被災景観域を対象にした連結性の定量的評価に関わる研究を進め、さらには、連結性研究の成果を復興事業計画等に適用するためには 3 つの課題がある。

課題の 1 つ目は、災害発生時には、被災景観域の土地被覆の精確な状態を、迅速かつ同時・広域的に把握する必要がある点である。同時・広域的に地表面を捉える目的に対しては、衛星リモートセンシング (Remote Sensing) を用いることが非常に有効である。リモートセンシングとは、センサと対象物体とが直接接触せずに離れた状態で、対象物体の電磁波特性や放射特性、あるいは、形状に関する情報を観測する方法を指す言葉であり、狭義としては、人工衛星に搭載されたセンサを用いて、地球表面の特徴を観測する方法を指す言葉として用いられている(Rees 2005)。景観生態学において衛星リモートセンシングは、土地被覆の状態やその変化を定量的に表す情報源として利用されており、生態系を監視するための重要な役割を担っている(Turner et al. 2004)。本被災景観域に対しても、衛星リモートセンシングによって、土地被覆の変化が明らかにされてきた(Harada et al. 2015; Ishihara and Tadono 2017)。高分解能衛星画像を用いた研究では、津波によって仙台湾沿岸域の海岸林の大部分が倒壊したことが明らかになった(趙ほか 2013; Hara et al. 2016)。しかしながら、高分解能衛星画像から得られる地表面の情報は非常に複雑なため、従来の土地被覆の解析手法では、孤立ピクセルと呼ばれる微細な分類結果が無数に発生する問題が生じている。この問題は、ごま塩効果 (Salt-and-pepper effect) と呼ばれ、土地被覆図の精度や可視性への課題だと認識されている(Blaschke et al. 2000; Carleer et al. 2005; Zhai et al. 2017)。そして、孤立ピクセルを含む土地被覆図を連結性解析に用いることは、被災景観域の連結性の過大評価につながる危険が考えられることから、従来の土地被覆の解析手法によって得られる森林分布情報は連結性解析に用いるデータとしては精確さが不十分であるといえる。これまでの衛星画像の解析に関わる研究では、発生した孤立ピクセルを、フィルター処理により一律に削除する方法が取られてきた(Eastman 2003; Nixon and Aguado 2008; Zhu 2013; Zhai et al. 2017)。しかし、分類結果の正誤に係わらず孤立ピクセルを一律に削除することは、重要な情報の損失につながる危険性が指摘されている(Eastman 2003; Zhu 2013)。衛星リモートセンシング技術を用いた連結性解析に向けては孤立ピクセルを低減させた森林分

布情報を得る手法の開発が必須である。

課題の 2 つ目は、本被災景観域における連結性変化を追うためには、連結性の定量的評価手法を確立させる必要がある。本事象のように、低頻度大規模攪乱および、その後続く人為の影響により複雑な景観変化があった景観域の連結性変化を研究した例はなく、本事象に適切な連結性評価手法を明らかにする必要がある。これまでの連結性の定量的評価手法に関する研究では、地理情報システム（GIS：Geographic Information System）の発展とともに、生息地分布を主とする景観構造から生息地パッチ間の関係性を表現するために、生息地のネットワークを構築するグラフ理論を応用した手法が提案された(Urban and Keitt 2001)。この手法は、生物の移動経路やその範囲を推論するのに有効な手法であり(Minor and Urban 2008)、多くの連結性研究で取り入れられてきている(e.g., Urban et al. 2009; Saura and Rubio 2010; Guo et al. 2018)。さらに、構築した生息地のネットワークの状態をもとにした連結性の定量的評価に向けては、いくつもの指数が開発されてきた(Jaeger 2000; Pascual-Hortal and Saura 2006; Saura and Pascual-Hortal 2007)。近年では、生態系や生物多様性の管理に向けた連結性研究が進められてきている(Clauzel et al. 2015; Hernandez et al. 2015; Huang et al. 2018; Volk et al. 2018)。本被災景観域に向けても、連結性の定量的評価を行うことで、生態系や生物多様性の管理や監視に向けた有効な研究になることが期待できる。しかし、連結性の定量解析に用いる指数を客観的に選択する指針はこれまでに確立されておらず(Saura and Pascual-Hortal 2007; Bodin and Saura 2010)、被災景観域の連結性変化を適切に評価できる指数は不明である。このため、本被災景観域を研究対象に連結性の定量的評価を実施することは、連結性研究を発展させる上で有用である。

課題の 3 つ目は、連結性の研究成果を社会実装するためには、具体的な適用例の提示が不可欠な点である。科学的知見は政策決定者や実務担当者の意思決定に対して有用だと認識されているが、実際に、科学的知見を意思決定に用いるためには、どのように適用すれば課題を解決できるのかを具体的に提示する必要がある(Sutherland et al. 2013)。そして、提示のためには、研究成果を論文として公表することに加え、専門家以外が研究内容を理解できるようなアウトリーチ活動をすることや(Brewer 2002)、研究成果を保全計画等の実務に適用するための具体的方法を示す必要がある(Knight et al. 2008; 大澤・上野 2017)。これらのことから、本博士論文に関わる研究成果を社会実装するためには、連結性の定量評価手法を、復興事業計画に適用させるための具体例の提示が有用だと考えられる。生息地が分断化された景観域において、個体群を保全するためには、生物の移動経路の確保が不可欠である(Haddad 2000; Simberloff et al. 2002; Jordán et al. 2003)。加えて、生態系や生物多様性を保全する際には、保全対象を明確にし、

かつ、優先順位をつけることで、予算や時間を考慮した最善な保全計画の立案に結びつくことが示されてきた(Zetterberg et al. 2010; Foltête et al. 2014; Gurrutxaga and Saura 2014). 本被災景観域の生態系や生物多様性を維持・向上させるためには、森林パッチを創出した際に、効果的に連結性を向上できる配置計画を立案することが有効だと考えられる。しかしながら、従来の連結性研究では、生息地分布の縮小等に対する連結性への負の影響評価が盛んに進められ、例えば、連結性を維持するために重要となる生息地パッチを特定する方法が開発されてきた(Pascual-Hortal and Saura 2006; Urban et al. 2009; Bodin and Saura 2010; Saura and Rubio 2010; Ernst 2014). 言い換えれば、パッチ消失による負の影響が強いパッチの特定手法である。それに対して、本被災景観域のような分断化景観となった際に、連結性を向上や回復させるためには、パッチ創出による向上効果を空間明示的に評価する必要がある、そのための手法開発が必須である。

1.2. 博士論文の課題のまとめと目的

以上のことから、本博士論文全体の目的は、被災景観域に向けた連結性の定量評価手法を確立させるとともに、連結性向上に配慮した生態系管理に有用なパッチ創出領域の選定手法を開発することである。

以下に、研究を進める上での研究課題をまとめる。課題の詳細については、対応する各章で説明をする。

(1) 被災直後の同時・広域的データの取得手法の開発

従来の土地被覆分類手法では、孤立ピクセル(周囲の土地被覆クラスとは異なる微細な分類)が多量に発生するため、連結性研究に用いるデータとしては不十分である。

(2) 津波被災景観域を対象とした連結性変化の定量解析手法の確立

低頻度大規模攪乱と、その後の人為的影響下における連結性変化を明らかにするためには、連結性定量化手法の確立が必須である。

(3) 連結性の向上や回復に効果的な領域の選定手法の開発

連結性に関わる研究成果を社会実装するためには、復興事業計画に適用可能な具体例の提示が有用である。このためには、被災景観域において、連結性を効果的に高めるのに効果的な森林創出領域を空間明示的に特定する手法の開発が必要である。

1.3. 本論の構成

本博士論文では、3つの課題を解決するための研究を進めた。まず、機械学習を応用した土地被覆分類手法を検討し、高精度かつ孤立ピクセルを大幅に低減させた土地被覆図を作成した。次に、低頻度大規模攪乱による連結性への影響と、その後の人為的な影響による森林パッチ変化に伴う連結性への影響を定量的に明らかにするための連結性評価手法を検討した。最後に、連結性向上に効果的な森林パッチ創出領域を空間明示的に示す手法を開発した。以上のことを踏まえて、本論文は、序論と結論を含め、全6章で構成した。

第1章では、序論として、本論文の全体の背景と目的に加え、全体の構成を説明する。本章は、本研究の学術的・社会的な位置づけと、研究を進める意義について論述する。

第2章では、第3章以降に実施する連結性の定量解析を進める上で必要となる、高精度かつ孤立ピクセルを大きく低減させた土地被覆図の作成手法を明らかにした。東北地方太平洋沖地震に伴う津波により、甚大な被害を受けた宮城県の太平洋側の一部地域を対象に、高分解能衛星である RapidEye 衛星により観測された画像を用いて土地被覆分類を実施した。一般的な土地被覆解析には、単一の分類手法が用いられてきたが、本研究では、機械学習分野で発展してきた多重分類器システム (Multiple classifier system: MCS) を解析に用いた。研究成果として、従来の手法と比べ、分類精度を維持しつつ、大幅に孤立ピクセルを低減させる効果があることを明らかにできた。

第3章では、森林パッチ変化による連結性への影響を定量評価した。まず、2章で開発した手法を用いて、仙台市の被災地 (七北田川と名取川に挟まれた地区) を対象に、震災前 (2010年)、震災直後 (2011年)、震災直後以降 (2012年)、5年経過時点 (2016年) の年次ごとの土地被覆図を作成した。次に、土地被覆図を用いて年次ごとの森林パッチ分布図を作成した。森林パッチ分布図をもとに、パッチ間を接続する閾値 (連結距離) を複数設定し森林パッチネットワークの構築することで、生物の移動経路の推定および可視化した。森林パッチネットワークの連結性を定量解析する上で、頻繁に用いられてきた連結性積算指数 (Integral Index of Connectivity: IIC) に加え、クラス一致確率 (Class Coincidence Probability: CCP) を用いることで、津波による急激な連結性低下と、その後の、パッチ増減

による森林パッチネットワークの分断状態の変化による連結性の変化を景観スケールで明らかにした。

第 4 章では、連結性向上に効果的な森林パッチの創出領域を選定する手法を開発した。まず、対象地において、森林パッチ創出が現実的に困難な領域を選定する（除外地域）。その後、基準となる森林パッチ分布図（2016 年）に対し、除外地域を除く領域を対象に、森林パッチを無作為に発生させ、森林パッチ発生の前後で連結性がどの程度向上したのかを、3 章で明らかになった被災景観域の評価に有効な定量化指数である IIC と CCP を用いて解析した。この解析を反復し、それぞれの結果に空間的内挿処理を実施することで、連結性の向上度を示す空間分布図を作成した。分布図の作成により、対象とする連結距離ごとに、連結性向上の効果の高い領域と低い領域が空間明示的に示すことが可能となった。

第 5 章では、本論文の総合考察を述べる。本章は、4 章までの結果を総合的に考察し、1 章で述べた研究目的を達成したことを確認する。また、本研究における大規模災害時の復興に対する貢献を説明する。

第 6 章では、本論文の結論として、本研究を通して得られた新しい知見をあげ、研究に関連するリモートセンシングや生態学の分野にいかに関与できるかを述べることに加え、研究の展望を述べる。

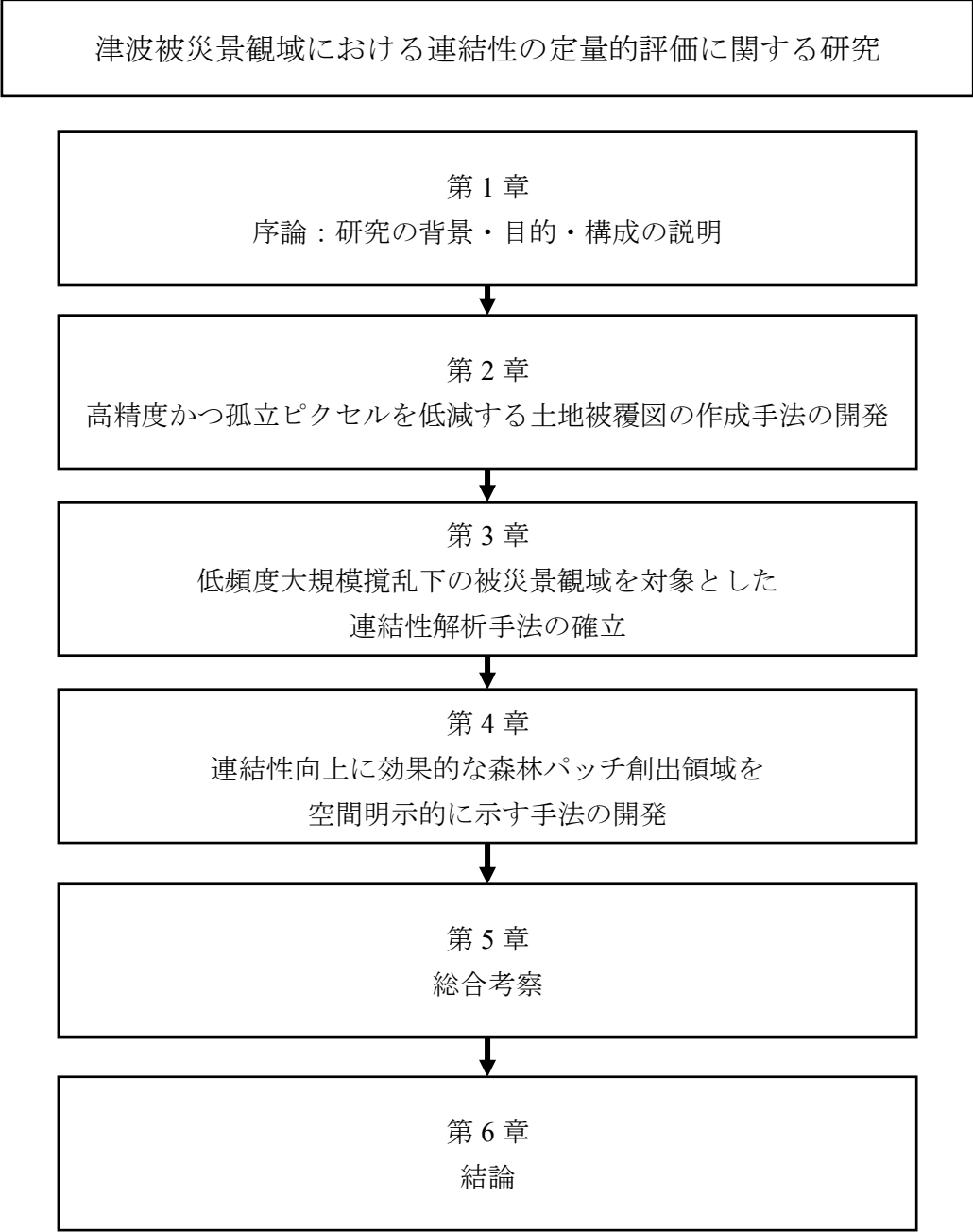


図 1.3-1 本論の構成

第2章 高精度かつ孤立ピクセルを低減する土地被覆図の作成手法の開発

本論以降に実施する連結性の定量解析を進めるためには、精確な土地被覆図が必要となる。本章では、高精度かつ孤立ピクセルを低減する土地被覆図の作成手法を開発する。

2.1. 本章の背景と目的

土地利用および土地被覆データは、気候変動、自然災害、人間活動等によって引き起こされる環境変化を監視するための重要な情報として認識されている (Sellers et al. 1995)。近年、衛星リモートセンシング技術の進歩により衛星データの空間分解能は高まり、地表面の情報を高精細に捉えられるようになってきた。しかし、高空間分解能衛星データから得られる地表面情報をもとに、精確な分類処理をする上では課題が残る。主な課題として、隣接する画素間の値として分散が大きい場合には、周囲に広がるクラスとは異なる微細な分類結果として孤立ピクセル (Isolated pixel) が発生する。この問題は、ごま塩効果 (Salt-and-pepper effect) と呼ばれ、分類結果の精度と可視性に負の影響がある (Blaschke et al. 2000; Carleer et al. 2005; Zhai et al. 2017)。孤立ピクセルの発生を低減させる方法として、処理前の衛星データあるいは処理結果の分類図に対して、平滑化フィルター等を実行することが行われてきている (Eastman 2003; Nixon and Aguado 2008; Zhu 2013; Zhai et al. 2017)。このような単純なフィルタリング処理では、正常な分類と誤分類が共に削除され、重要な情報が損失する可能性がある (Eastman 2003; Zhu 2013)。

孤立ピクセルの発生を低減させ、土地被覆図の可視性の向上させることを目的とした研究に、セグメントベースの分類手法が提案された (Blaschke et al. 2000; Stuckens et al. 2000)。しかし、このセグメントベースの分類手法を実施する上では、複雑なパラメータの選択が必要であることと、パラメータの選択が定性的であることから、微細な被覆物を抽出することは困難である (Neubert et al. 2006)。また、セグメントベースの分類手法は、画素単位の手法と比べ情報を要約するため、高空間分解能衛星データの最大の利点である、地表面情報の詳細な情報が得られることに対して、必ずしも効果的ではない。

近年、さまざまな機械学習アルゴリズムが衛星画像の分類処理に用いられるようになってきた。機械学習アルゴリズムによる分類処理では、従来に用いられてきた手法と比較して、同時に多くの特徴量を効果的に処理できる利点がある (Melgani and Bruzzone 2004)。この利点により、分光反射率から算出される植生指数を代表とした各指数に加え、土地の形状に関する標高や傾斜など、多様な情報

を同時に駆使することで、精度の高い分類処理をすることが可能となった(DeFries and Chan 2000; Li et al. 2016; Sharma et al. 2017). 加えて、信号処理や画像処理の研究分野においては、複数の個々の分類器からの結果を組み合わせることにより精度を向上させた最終的な結果を得る Multiple classifier systems (MCS)が提案されている(Kittler et al. 1998). これまでに、衛星リモートセンシングデータを用いた土地被覆分類にも応用されるようになり、MCS を用いることで分類精度が改善したことが報告されている(Benediktsson et al. 2007; Li et al. 2008; Du et al. 2012; Yang et al. 2014). しかし、分類精度が向上しても、孤立ピクセルの問題は残る. MCS は分類精度の向上を目的とした研究が進められているが、孤立ピクセルの発生という、衛星リモートセンシング技術の課題を焦点としていない.

本研究の目的は、孤立ピクセルの発生という問題に対し、高空間分解能衛星データを用いた複数の教師付き分類の結果を組み合わせることにより、MCS の有効性を評価することである. 本研究は、2011年3月11日の東日本大震災とそれに伴う巨大津波により土地利用と土地被覆が劇的に変化した本州北部の東北地方で実施した. 現在、地域経済と社会は徐々に回復しつつあるが、景観には依然として急速な変化が起きている. 健全な生態系や生物多様性の保持に向けた長期的な監視には、震災発生直後における即時性のある土地被覆の把握が必要である. これまでに、空間分解能が30 m ~ 250 m 程度の衛星画像を解析した土地利用や土地被覆の報告がなされてきた(Sekizawa et al. 2015; Ishihara and Tadono 2017). また、超高空間分解能(10 m 以下)を解析に用いることで、個々の樹木のレベルでの損傷や回復プロセスなどの生態系の変化を精確かつ詳細に監視できる可能性がある(Hara et al. 2016). 一方で、衛星画像の高空間分解能化に伴い、孤立ピクセルの発生が課題になる.

本研究では、個々の分類器から得られた結果と、MCS による結果を比較することで、MCS による孤立ピクセルの発生を低減させることへの有効性を評価した. まず、RapidEye 衛星画像(解像度: 6.5m)を用いて、複数の機械学習により土地被覆分類処理を行う. 次に、個々の分類器から出力された結果を、MCS によって集約した. 最後に、個々の分類器の結果と MCS の結果とを比較し、MCS による孤立ピクセルの発生を低減する効果を評価した.

2.2. データと方法

2.2.1. 対象地

東北地方の太平洋に面した宮城県仙台市付近の沿岸部、仙台平野、隣接する

山々を含む範囲を対象とした (図 2.2.1-1 (a)). 土地被覆分類は調査地全体で実施した (図 2.2.1-1 (b)). 結果の詳細な比較のためには, 図 2.2.1-1 (c)に示す2つの黄色の枠内をそれぞれ対象とした.

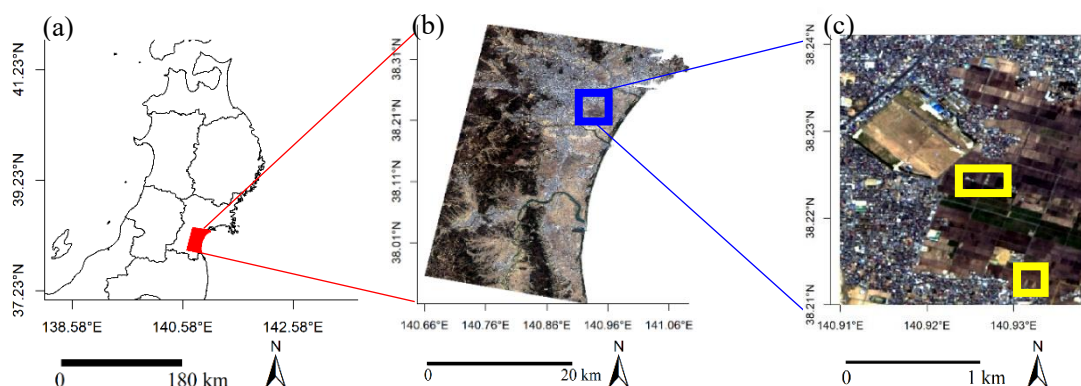


図 2.2.1-1 調査対象地 (a)東北地方. (b)解析対象全体 (RapidEye 衛星画像). (c)より詳細な確認をするための調査範囲

2.2.2. グランドトゥールース

グランドトゥールースは, 現地調査による情報, および, Google Earth を用いた目視判読の結果から作成した. また, 6つのクラス (森林, 低木/草地, 耕作地, 都市域, 水域, 裸地) を定義し, クラスごとに 2800 ポイント取得した.

2.2.3. 衛星画像

RapidEye 衛星画像を用いた. 用いたデータプロダクトは Level 1B であり, 観測日は 2010 年 4 月 4 日である. 空間分解能は 6.5 m である (Planet.com 2016).

RapidEye 衛星画像からは, 反射率 (Blue, Green, Red, Red edge, Near infrared) に加えて, 反射率をもとに正規化植生指数 (NDVI : Normalized Difference Vegetation Index), レッドエッジ正規化植生指数 (ReNDVI : Red edge NDVI), 正規化レッドエッジ指数 (NDVire : NDVI red edge), 拡張植生指数 (EVI : Enhanced Vegetation Index) および 正規化水指数 (NDWI : Normalized Difference Water Index) をそれぞれピクセルごとに計算した (表 2.2.3-1).

表 2.2.3-1 反射率から計算した指数

指数名	式	参考文献
NDVI	$\frac{\rho_{\text{nir}} - \rho_{\text{red}}}{\rho_{\text{nir}} + \rho_{\text{red}}}$	Rouse et al., 1974
ReNDVI	$\frac{\rho_{\text{rededge}} - \rho_{\text{red}}}{\rho_{\text{rededge}} + \rho_{\text{red}}}$	Sims and Gamon, 2002
NDVI _{re}	$\frac{\rho_{\text{nir}} - \rho_{\text{rededge}}}{\rho_{\text{nir}} + \rho_{\text{rededge}}}$	Gitelson and Merzlyak, 1994
EVI	$2.5 \frac{\rho_{\text{nir}} - \rho_{\text{red}}}{\rho_{\text{nir}} + 6.0\rho_{\text{red}} - 7.5\rho_{\text{blue}} + 1.0}$	Huete et al., 2002
NDWI	$\frac{\rho_{\text{green}} - \rho_{\text{nir}}}{\rho_{\text{green}} + \rho_{\text{nir}}}$	Mcfeters, 1996

2.2.4. 地形データ

地形情報は、国土地理院が提供する基盤地図情報 5m DEM を用いた。DEM データからは、傾斜度 (Slope) をそれぞれ計算した。地形データを解析に加えることで、合計 12 個の特徴量 (5 つのバンド情報, 5 つの指数, DEM および傾斜度) が機械学習による解析と検証に用いた。

2.2.5. MCS を用いた分類手法

6 つの機械学習手法 (表 2.2.5-1) を用いて個々の分類結果を出力した。それぞれの分類手法におけるパラメータは、分類器ごとに、それぞれのパラメータの組み合わせを試験し、最も分類精度としてのカッパ係数の値が高かった組み合わせを採用した (表 2.2.5-2)。

表 2.2.5-1 分類手法に用いた機械学習

名称	本論文で用いる略称	引用
Random Forests	RF	Breiman, 2001
Bagging	Bagging	Breiman, 1996
XGBoost	XGBoost	Chen & Guestrin, 2016
Support vector machine (radial basis function)	SVM	Mountrakis et al., 2011
Feed-forward neural networks	NNET	Lek & Guégan, 1999
<i>K</i> -nearest neighbor	KNN	Beckmann et al., 2015

表 2.2.5-2. 分類器の作成に用いたパラメータ

分類器	パラメータ
Random Forests	Number of trees = 1000 Number of variables randomly sampled as candidates at each split = 6
Bagging	Bootstrap replication = 25
eXtreme Gradient Boosting	The maximum number of iterations = 400 Maximum depth of the tree = 9 Control the learning rate = 0.4 Gamma = 0 Subsample ratio of columns when constructing each tree = 0.6 Minimum sum of instance weight needed in a child = 1
Support vector machine (radial basis function)	Sigma = 0.1880416 C = 128 Kernel = Radial basis function
Feed-forward neural networks	Size = 19 Decay = 0.001
K-nearest neighbor	Number of neighbors (K) = 5

個別の分類結果を用いて、MCSにより集計することで最終的な分類結果を作成した(図 2.2.5-2)。MCSによる最終出力は、2種類の組み合わせをそれぞれ計算した。1つ目は、それぞれ分類器の結果の最頻値とした MCS(mode)である(図 2.2.5-1 (a))。2つ目は、分類器ごとのカッパ係数の合計値により重み付けとした

MCS(κ)である (図 2.2.5-1 (b)).

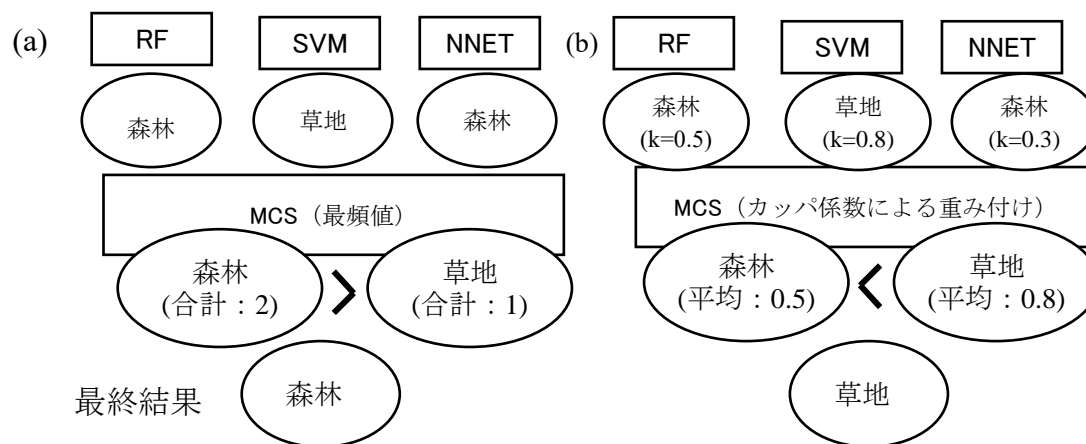


図 2.2.5-1 MCS の組み合わせ. (a)最頻値を用いた組み合わせ. (b) カッパ係数による重み付けを用いた組み合わせ

分類処理および精度検証では、グラントゥルースの 75 % (2100 ポイント) をトレーニングデータとして用いて分類処理を行った。残りの 25 % (700 ポイント) をテストデータとして用いた。MCS の精度検証でも、個別の分類処理の精度検証に用いた検証データを用いた。

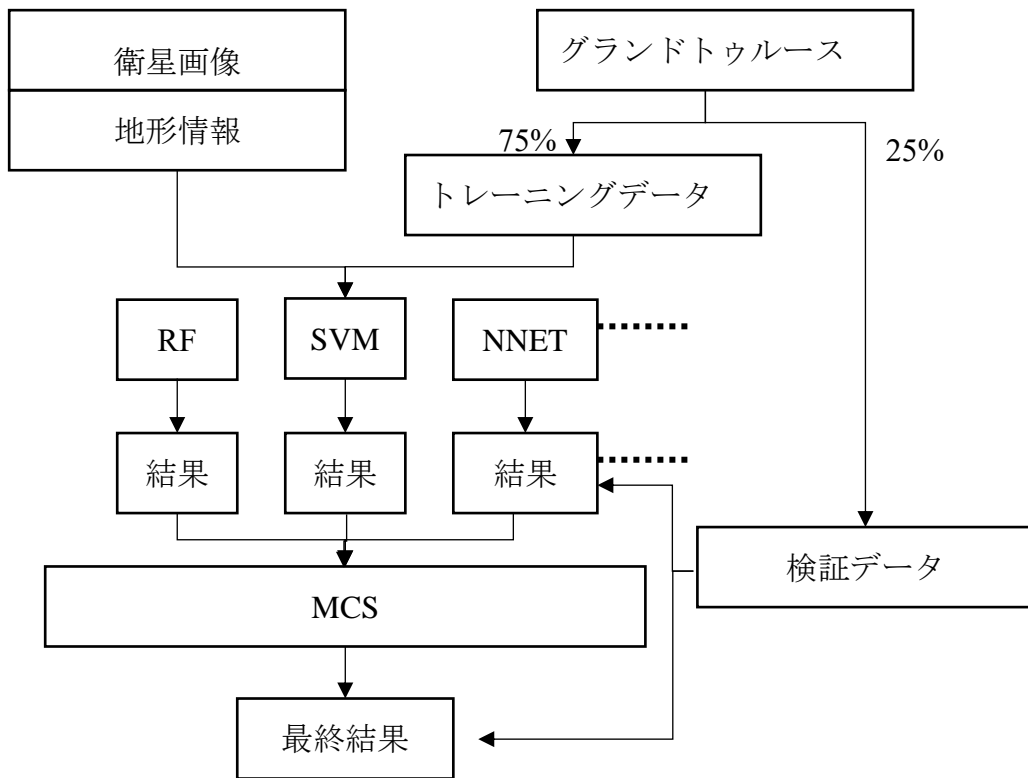


図 2.2.5-2 MCS を用いた分類手法の概念図

2.2.6. 精度検証および分類器の比較

分類精度の比較には、分類精度表から計算した全体精度と、カッパ係数(Cohen 1960)を用いた。また、分類器間の有意差の比較では、統計的な検定を実施した。検定手法には、複数の土地被覆分類結果の有意差を比較する際に適切な検定方法である(Hirayama et al. 2018)、マクネマー検定(McNemar 1947)を用いた。マクネマー検定は、対応のある 2 組の標本の比率の差を検定する手法である。本研究では、比較対象の分類器間における、テストデータに対する一致・不一致の結果をクロス集計表にまとめた (表 2.2.6-1, 表 2.2.6-2)。

表 2.2.6-1 クロス集計表のための一致・不一致データ

テストデータ	分類結果	
	分類器 A	分類器 B
森林	森林 (一致)	耕作地 (不一致)
森林	森林 (一致)	裸地 (不一致)
...		
都市域	裸地 (不一致)	都市域 (一致)

表 2.2.6-2 クロス集計表の例

分類器 A	分類器 B	
	一致	不一致
一致	650 (a)	34 (b)
不一致	9 (c)	23 (d)

マクネマー検定では、どちらも一致（表 2.2.6-2 (a)）・どちらも不一致（表 2.2.6-2 (d)）を除外し、分類器間の違い（（表 2.2.6-2 (b),(c)））について有意差があるかを式 1 によりカイ 2 乗値を求め、最後に、カイ 2 乗値から p 値を計算した。

$$x^2 = \frac{(b - c)^2}{b + c} \quad (1)$$

なお、検定に用いる有意水準は、全 3 回に渡り検定を繰り返すため、Bonferroni 法(林・新見 2005)により 0.016 (0.05 / 3) に設定した。

2.3. 結果

2.3.1. 土地被覆分類図

6つの個別の分類器で得られた土地被覆図と、2つのMCSの結果を図 2.3.1-1 に示す。さらに、孤立ピクセルの分布については、図 2.3.1-2 に拡大した範囲を示す。最も多くの孤立ピクセルが発生した分類器は、*K-nearest Neighbors* (KNN) であった (図 2.3.1-2 (d))。一方、孤立ピクセルの発生が一番少なかった分類器は、ニューラルネットワーク (NNET) であり (図 2.3.1-2 (g))、続いて、2つのMCS (図 2.3.1-2 (h) および (i)) の孤立ピクセルの発生が少なかった。

さらに、2つの領域 (図 2.2.1-1 (c)) を拡大し、孤立ピクセルの分布を詳細に確認した (図 2.3.1-3 と図 2.3.1-4)。孤立ピクセルおよび誤分類の分布が明確に確認できた。2つのMCSによる組み合わせはいずれも、孤立したピクセルの発生を減少させることができていた。

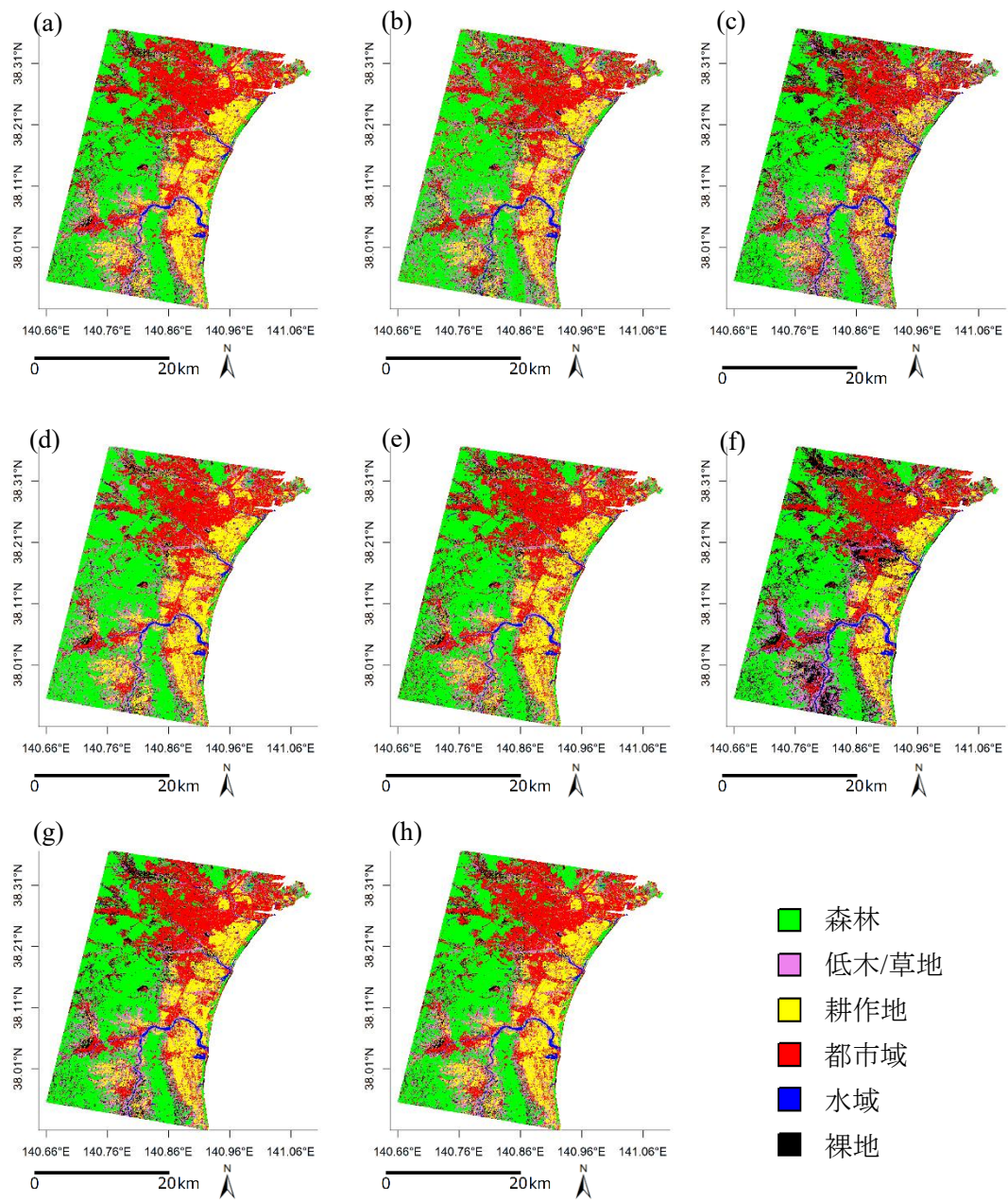


図 2.3.1-1 6つの個別の分類器と2つのMCSによる分類結果: (a) RF, (b) SVM, (c) KNN, (d) XGBoost, (e) Bagging, (f) NNET, (g) MCS (mode) and (h) MCS (kappa)

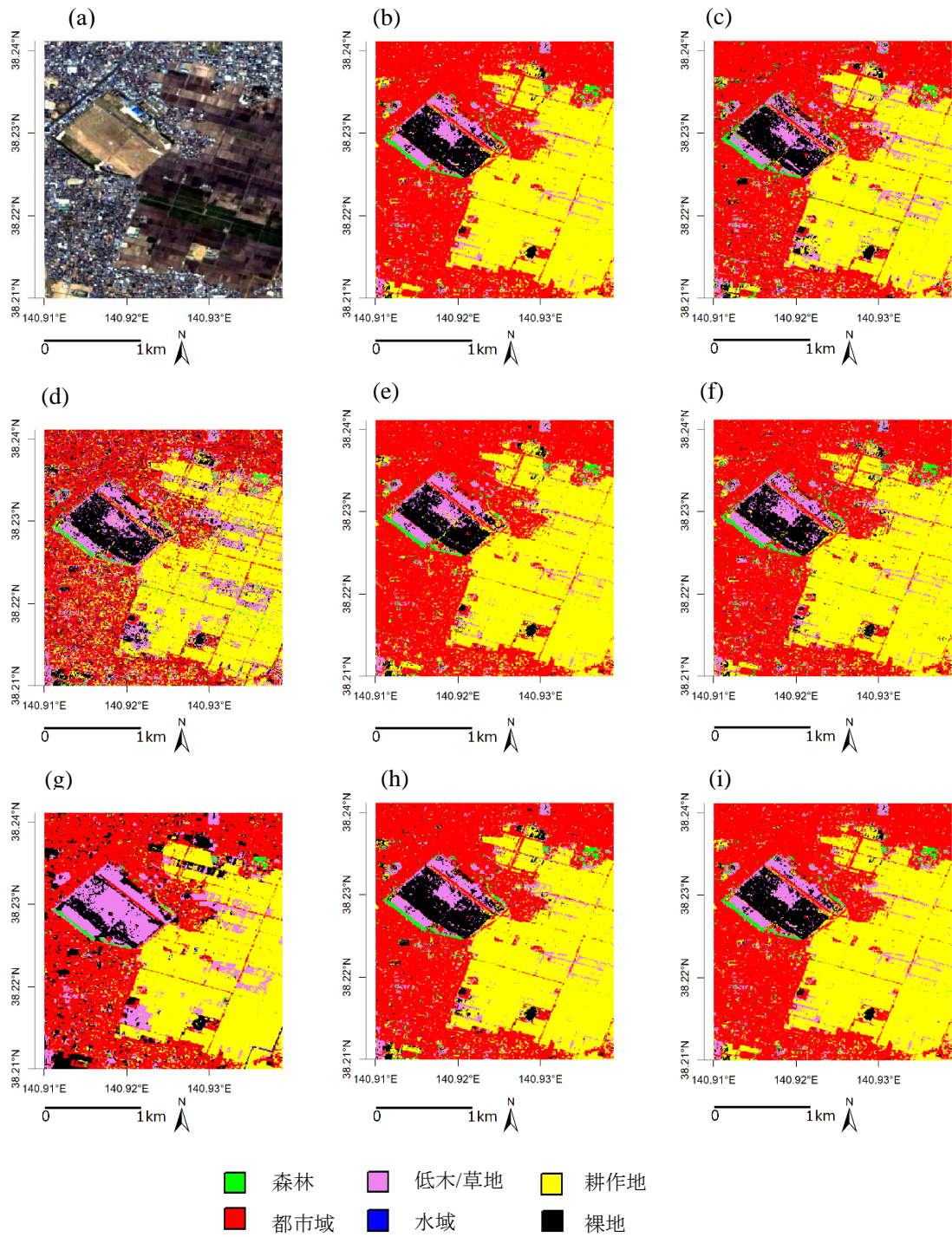


図 2.3.1-2 6つの個別の分類器と2つのMCSによる分類結果の拡大図: (a) RapidEye トゥルーカラー, (b) RF, (c) SVM, (d) KNN, (e) XGBoost, (f) Bagging, (g) NNET, (h) MCS (mode) and (i) MCS (kappa)

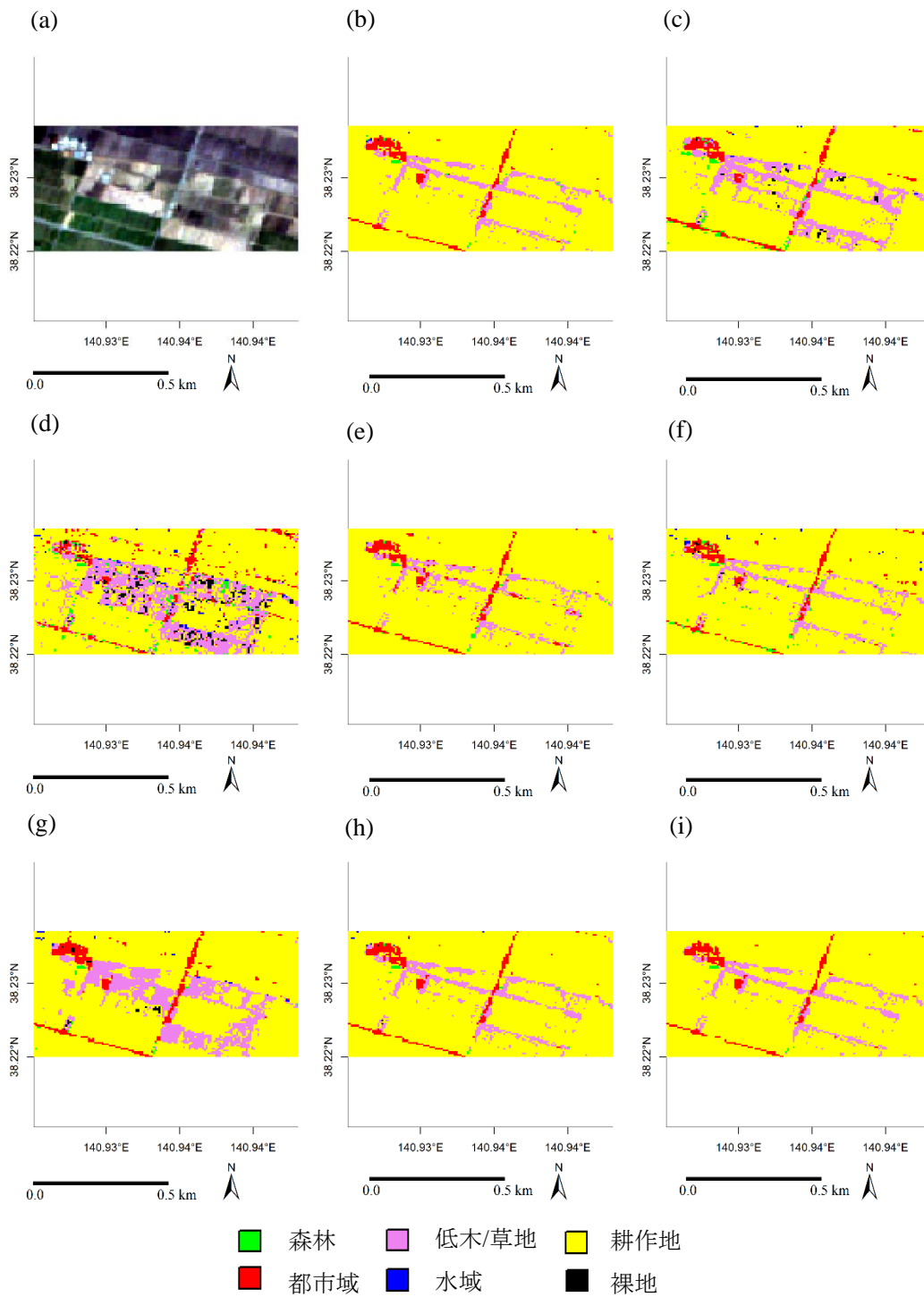


図 2.3.1-3 6つの個別の分類器と2つのMCSによる分類結果の詳細拡大図 1:
 (a) RapidEye トゥルーカラー, (b) RF, (c) SVM, (d) KNN, (e) XGBoost, (f)
 Bagging, (g) NNET, (h) MCS (mode) and (i) MCS (kappa)

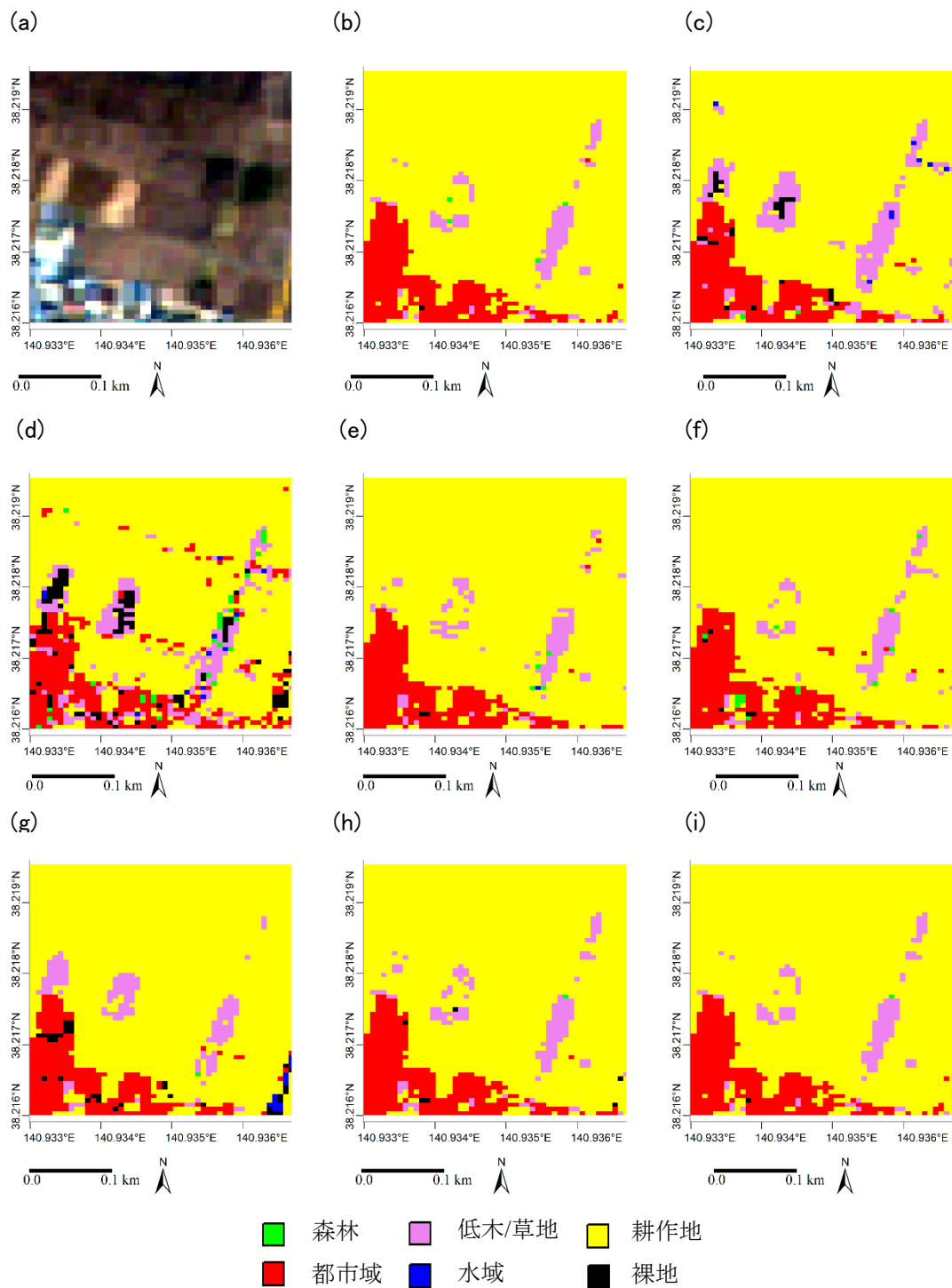


図 2.3.1-4 6つの個別の分類器と2つのMCSによる分類結果の詳細拡大図 2:
 (a) RapidEye ツールカラー, (b) RF, (c) SVM, (d) KNN, (e) XGBoost, (f)
 Bagging, (g) NNET, (h) MCS (mode) and (i) MCS (kappa).

2.3.2. 孤立ピクセルの発生数

分類手法ごとの孤立ピクセルの発生数を集計した(図 2.3.2-1). 孤立ピクセルの発生数は, KNN が最も多く, そして, NNET が最も少なかった. MCS を適応した結果は, NNET を除くすべての手法と比べて孤立ピクセルの発生数が減少していた. 分類精度が最も高かった XGBoost と, MCS(kappa)を比較すると, 森林クラスの孤立ピクセルの数は半分以下に減少し, 他のクラス(低木/草地, 耕作地, 都市域, 裸地, 水域)についても減少していた.

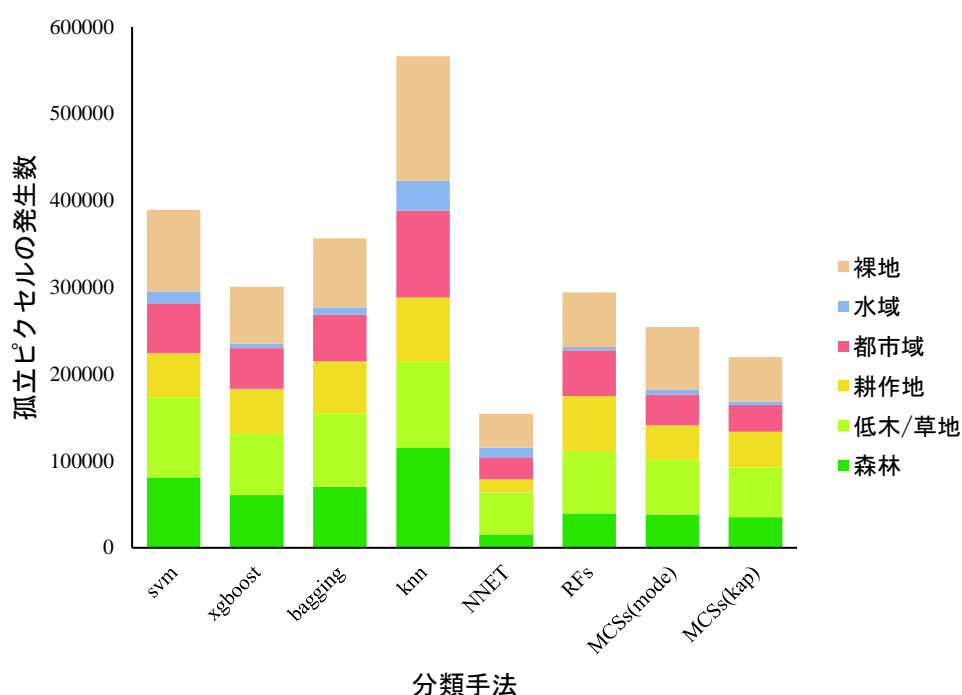


図 2.3.2-1 調査地全体における孤立ピクセルの発生数

2.3.3. 精度検証の検証

分類精度は, それぞれの分類器において高い精度であった(表 2.3.3-1). 特に, 機械学習の中でも弱学習機を用いた手法(XGBoost, Bagging, RF)の全体精度とカッパ係数は非常に高かった. 全体精度とカッパ係数はそれぞれ, XGBoost は 98.7 と 0.985 であり, Bagging は 97.9 と 0.975 であり, RF は 98.5 と 0.982 であった. XGBoost が最も精度が高かった. その他の手法についてはどれも全体精度は 80%以上, カッパ係数は 0.7 以上であった. MCS の精度は, 最頻値による結果

は、全体精度とカッパ係数が 98.4%と 0.981 であり、カッパ係数による重み付けをした場合は、98.9%と 0.987 であり、分類精度を保つことができていた。

表 2.3.3-1 分類器の精度

6つの分類器と2つのMCS								
	XGBoost	Bagging	RF	SVM	KNN	NNET	MCS (mode)	MCS (kappa)
全体精度	0.987	0.979	0.985	0.912	0.885	0.808	0.984	0.989
カッパ係数	0.985	0.975	0.982	0.894	0.862	0.770	0.981	0.987

個別の分類器で最も精度が高かった XGBoost と、2つの MCS による分類結果についてマクネマー検定を実施した（表 2.3.3-2）、XGBoost と比較すると、MCS(mode)と、MCS(kappa)の両方に有意差が見られた($p < 0.0166$)。MCS(mode と MCS(kappa)間の差については、有意差が見られなかった ($p \geq 0.0166$)。

表 2.3.3-2 個別の分類器で最も精度の高かった XGBoost と MCS による分類器のマクネマー検定による比較

	XGBoost	MCS(mode)	MCS(kappa)
XGBoost	-	0.0143	0.0082
MCS(mode)		-	0.5637
MCS(kappa)			-

2.3.4. 学習曲線によるモデルの検証

学習曲線により、ほとんどの分類器は、最終的な分類器作成に用いた約 2000 ポイントのトレーニングデータを用いれば、過剰適合は収束したことが示され

た（図 2.3.4-1）. 弱学習器を用いた手法では、グラントゥルースの数が少ない場合においては、トレーニングデータに基づく精度と、テストデータに基づく精度には大きく差があり、十分な数のグラントゥルースデータを用いない場合には過剰適合を起こしていた。SVM と NNET もポイントを増やすことで、過剰適合が収束した。しかし、KNN は、ポイントの数を増加させても過剰適合は収束しなかった。

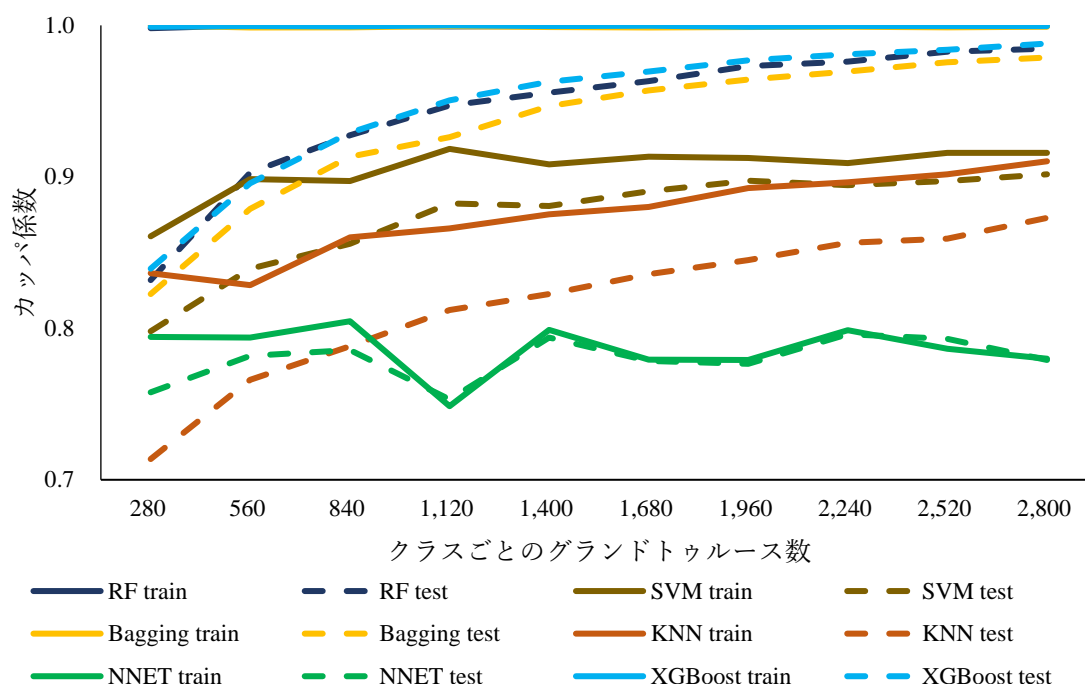


図 2.3.4-1 分類器ごとの学習曲線. 実線は、分類器を構築した際に用いたデータ（トレーニングデータ）を精度検証に再度用いた結果である。破線は、テストデータを用いて精度検証をした結果である

2.3.5. 分類精度と孤立ピクセルの発生数数の比較

散布図により分類精度（カッパ係数）と孤立ピクセルの関係を示した（図 2.3.5-1）。相関係数（ r ）は-0.03 であり、分類精度と孤立ピクセルの発生数には、ほとんど相関がないことが示された。一方で、孤立ピクセルの発生数が極端に少ない NNET および、極端に多い KNN を除いた場合の、相関係数（ R ）は-0.73 であり、精度が高い分類器では、孤立ピクセルの発生数が少なくなる関係が示された。

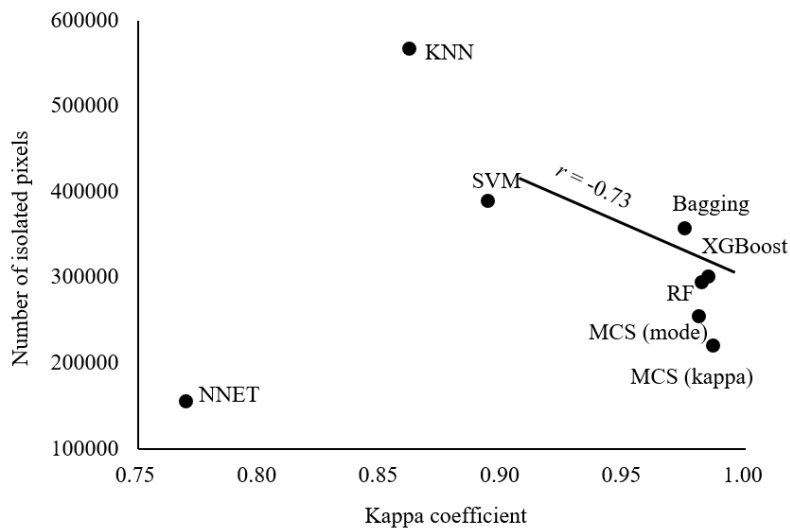


図 2.3.5-1 分類精度と孤立ピクセルの発生数. 図中の黒線は, NNET と KNN を除いた場合の近似曲線 ($r = -0.73, p < 0.026$)

2.4. 考察

衛星リモートセンシング技術を用いて作成された土地被覆図は, 地震, 津波, その他の自然災害による被害や, 復旧・復興による土地被覆を監視するために頻繁に利用されてきている(Sekizawa et al. 2015; Hara et al. 2016; Ishihara and Tadono 2017). また, 高空間分解能画像は, 詳細な情報を得ることを可能にするが, 通常, 孤立ピクセルが発生する課題が残る(Blaschke et al. 2000; Carleer et al. 2005; Zhai et al. 2017). 対して, 孤立ピクセルを除去するためにフィルター処理を行うことはあるが, 重要な情報が失われる可能性が指摘されている(Eastman 2003; Zhu 2013). 一方で, 土地被覆図の作成に MCS を用いることで, 分類精度の改善が報告されることが研究されてきた(Kuncheva and Whitaker 2003; Chandra and Yao 2006). 対して本研究は, 超高解像度の画像を用いた際の土地被覆分類で発生する孤立したピクセルの数を低減するための MCS の有効性を評価した.

分類の結果は, 個別の分類器のうち XGBoost が最も高い精度(全体精度=0.987, カップパ係数=0.985, 孤立したピクセル=300,970)を示し, NNET が最も少ない孤立ピクセル数(全体精度=0.808, カップパ係数=0.770, 孤立ピクセル=154,773)を示した. MCS の組み合わせのみが, 個別の分類器を比較し, 孤立ピクセルの発生を低減しつつ, 高い精度を維持していたことが明らかとなった(全体精度=0.989, カップパ係数=0.987, 孤立ピクセル=219,667). さらに, カップパ係数と孤立

ピクセルの発生数の間で、高い相関 ($r = -0.73$ 、 $p < 0.026$) が見られた。この結果からは、本質的には、孤立ピクセルが誤分類されたピクセルであることが考えられた。MCS に関する既存研究では、MCS を解析に用いることで、単一の分類器と比べ、分類結果を効果的かつ安定的に改善できることが示されてきた (Benediktsson et al. 2007; Li et al. 2008; Du et al. 2012; Yang et al. 2014)。

さらに、MCS に用いる分類器の集計方法が提案されており、集計方法の 1 つには、最頻値を集計する方法がある。この最頻値による集計方法には、分類器の性能に関係なく、すべての分類器が同じ権限を持っているという点が欠点であることが指摘されている (Moreno-Secco et al. 2006)。個々の分類発生した孤立ピクセルの空間的位置が重複している場合、最頻値による集計では、孤立したピクセルの削減ができないことが考えられる。本研究では、最頻値と、精度による重み付けの 2 つの方法を比較した。結果として、分類精度に若干の際はあったものの、最頻値による MCS と分類精度による MCS とでは、マクネマー検定の結果としては、差は認められなかった。この結果からは、用いる分類器の種類や解析対象となるデータによっては、どちらの方法でも大きな違いはなく、処理内容が明瞭な最頻値による集計を用いても良好な結果が得られることが明らかとなった。

2.5. 本章のまとめ

これまでの衛星リモートセンシング分野における MCS に関する研究は、土地被覆分類における分類精度の向上のみが注目され、孤立ピクセルの低減に関する研究はほとんどなかった。本研究では、個別の分類器と MCS による土地被覆分類の結果を比較することで、孤立ピクセルの発生を低減するための MCS の有効性を評価した。その結果、MCS を用いることで分類精度を損なうことなく孤立ピクセルの発生を低減できることを明らかにした。

第3章 低頻度大規模攪乱下の被災景観域を対象とした連結性解析手法の確立

数百年に一度の稀に見る大規模災害である東日本大震災に伴う津波と、その後の復旧・復興事業は被災景観域における生態系を大きく変えた。特に、津波による森林分布の変化は劇的であった。本章では、津波被災景観域における連結性変化を明らかにするための定量的評価手法を確立させる。

3.1. 本章の背景と目的

健全な生態系や生物多様性の保持には、生物、物質、エネルギーそして情報が景観内を移動することが不可欠である(Crooks and Sanjayan 2006)。生息地の分断は、個々の生息地を孤立させることで種の分散行動を阻害し(Forman 1995)、局所個体群の成長率の低下や絶滅の可能性を高める要因である(Fahrig and Merriam 1985)。また、個々の生息地を孤立させることから、個体群内における近親交配の可能性の高まりや、個体群間との遺伝子の流れの欠如につながる要因でもある(Bakker et al. 1996; Lutz Eckstein et al. 2006; Ewers et al. 2007)。したがって、生息地の分断は、健全な生態系や生物多様性の保持に対する主要な脅威のひとつだと認識されている(Wilcove et al. 1998)。景観生態学では、Taylor et al. (1993)が、生物による生息地間の移動のしやすさの度合いを連結性(connectivity)と定義し研究が進められ、生物が生息地間を移動できるような景観管理が、生物多様性や生態系の保全には不可欠であることが明らかにされてきた(Fagan and Calabrese 2006; Kindlmann and Burel 2008; Vos et al. 2008; Vasudev et al. 2015)。

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う巨大津波により、宮城県仙台湾沿岸域における森林域は劇的に縮小した。この巨大津波による攪乱は、数百年に一度の頻度で発生する大規模な攪乱であり、生態学的には低頻度大規模攪乱に位置づけられ(松本ほか 2013)、現地調査、航空測量、衛星リモートセンシング技術を活用した生態学的研究が進められてきている(原・樋口 2013; 富田ほか 2014; Hara et al. 2016; Tomita and Kanno 2019)。特に大きな森林域の変化としては、津波によって仙台湾沿岸域の海岸林の9割(4.2km²から0.5km²)が倒壊したことがあげられる(趙ほか 2013)。また、津波発生以降には、復旧・復興事業等の影響によって森林域の縮小が継続しており、生態系への負の影響が危惧されている(Hara 2014; Hara et al. 2016)。

この森林域の大規模な縮小は、森林を生息地とする生物が利用可能な生息地の総量が減少するだけでなく、生息地間の距離を増加させることで連結性の低下を引き起こす要因となる。被災景観の森林の連結性を明らかにすることは、低頻度大規模攪乱による生態系への影響を考える上で重要である。また、震災直

後以降の残存林は、種子の分散の中核として機能していることから(Tomita and Kanno 2019), 被災景観域における連結性の評価は、生態系回復の管理や監視に不可欠である。しかしながら、連結性の定量解析に用いる指数を客観的に選択する指針は確立されておらず(Saura and Pascual-Hortal 2007; Bodin and Saura 2010), 被災景観域の連結性変化を適切に評価できる指数は不明である。

本研究の目的は、大津波と復旧・復興事業の影響による森林パッチネットワークの変化に伴う連結性の経年変化を定量的に明らかにすることである。まず、震災直後から5年経過時点(2010年, 2011年, 2012年および2016年)に亘る森林パッチ分布図を作成した。次に、森林パッチネットワーク図を作成することで生物の移動経路の変化を可視化した。最後に、森林パッチネットワーク図の連結性を、Integral index of connectivity (IIC) と Class coincidence probability (CCP) の2つの連結性に係る指数を用いて解析することで、津波による攪乱および人為的影響が森林パッチネットワークの連結性に与えた変化を定量的に明らかにする。

3.2. データと方法

3.2.1. 研究対象地

研究対象地は、図 3.2.1-1 の赤枠で示す、本州北部の東北地方宮城県の太平洋側に位置する領域とした。この地域は、地震に伴う津波により甚大な被害を受けた(趙ほか 2013; Hara et al. 2016)。

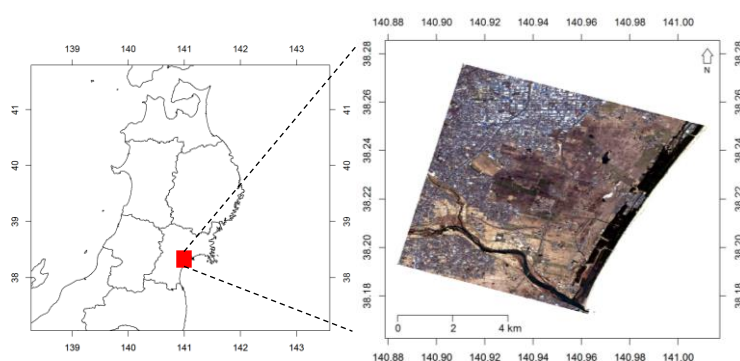


図 3.2.1-1. 研究対象地

3.2.2. 複数年次ごとの森林パッチ分布図の作成

土地被覆図化には、第2章で明らかとなった手法を用いた。対象時期は、震災前(2010年), 震災直後(2011年と2012年), 5年後(2016年)の4時期とし

た. 土地被覆分類処理に使用した RapidEye 衛星の観測時期は, 2010 年 4 月 4 日, 2011 年 4 月 13 日, 2012 年 4 月 10 日, 2016 年 4 月 5 日である. 加えて, 国土地理院が提供する基盤地図情報 5m DEM を用いた. 多重分類器システム (MCS) の組み合わせ方法は, 第 2 章の結果を踏まえ, 最頻値を採用した. MCS により作成した土地被覆図の森林クラスを年次ごとに抽出したものを, 本章で用いる森林パッチ分布図とした.

3.2.3. 森林パッチネットワークの構築

グラフベースのネットワークを構築することで, 森林パッチとそれらの接続状態をパッチとリンクとして概念化し, 当該景観におけるパッチ構成の構造的連結性を評価することができる(Urban and Keitt 2001). また, 特定のパッチ間を生物が行き来できるかを仮定したネットワークを構築することは, 生物の移動経路やその範囲の推論に有効な手法である(Minor and Urban 2008). 本研究では, 従来の連結性研究(e.g. Urban et al. 2009; Saura and Rubio 2010; Guo et al. 2018)において用いられてきたバイナリ接続モデルを踏襲し, パッチ間における特定のユークリッド距離を連結可能な距離(連結距離)として設定することで, そのリンク距離を下回る場合にパッチが接続されているとみなし, 連結距離を上回る場合にはパッチが接続されないと見なした.

3.2.4. 連結性指数の算出

3.2.4.1. 連結性積算指数 (Integral index of connectivity)

Pascual-Hortal and Saura (2006)により, パッチ面積の縮小や消失など, あらゆる負の影響に対して適切に応答できることが示されてきた連結積算指数 (Integral index of connectivity : IIC) を用いて, 森林パッチネットワークを解析し, 連結性を定量化した. IIC は, 調査地すべてのパッチについて, パッチ面積とそれぞれのパッチ間距離を統合的に計算することで, パッチ面積の減少や消失など, 連結性への負の影響を適切に評価できる指数である.

$$IIC = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{a_i a_j}{1 + nl_{ij}}}{A_L^2}$$

ここで, a =パッチの面積, A_L = 調査地全体の面積, nl_{ij} = 各パッチ (i,j) 間に

おける接続の状態であり，パッチ間がリンクで接続されている場合は 0 とし，接続されない場合は 1 とする．また， $i=j$ の場合には 0 とする．IIC は連結性を 0 ～ 1 の範囲で示し，値が高いほど連結の度合いが高いと評価する．

3.2.4.2. クラス一致確率 (Class coincidence probability)

クラス一致確率 (Class coincidence probability : CCP) ; (Pascual-Hortal and Saura 2006)は，生息地 (クラス) 内でランダムに選択された 2 つの地点が同じネットワークに属する確率として定義される．また，同じネットワーク (生息地パッチとリンクのセット) に属することからは，生息地内にランダムに配置された 2 匹の生物が，互いを見つけることができる確率とも定義されている (Jaeger 2000)．

$$CCP = \sum_{i=1}^{NC} \left(\frac{c_i}{A_c} \right)^2$$

ここで，NC=ネットワーク数， c_i = 各ネットワーク内におけるパッチの総面積， A_c = パッチの総面積である．CCP の値は，0 ～ 1 の範囲で示され，値が高いほど，同じネットワークに属する確率が高いと評価する．

3.2.5. 連結距離の設定に向けた初期解析

森林パッチネットワークによる分断状態の可視化および連結性指数による定量化に用いる連結距離を設定した．本研究では，森林パッチ分布状態において，連結性指数の変化が特徴的な連結距離を確認するため，年次ごとに 10 m – 3,000 m までの区間を 10 m 間隔で区切った連結距離を用いて IIC および CCP を算出し，距離ごとの指数の変化を確認し決定した．

3.3. 結果

3.3.1. 土地被覆図

土地被覆図により，震災前(2010 年)から 6 年経過時点 (2016 年) に亘る土地被覆の変化を示すことができた (図 3.3.1-1)．広域的には，2010 年から 2011 年にかけて，震災に伴う津波の影響により，南北に伸びる海岸林の大部分が縮小していた (図 3.3.1-1 (a, b))．また，耕作地の多くは，裸地に変化していた．2011 年

から 2012 年にかけては、耕作地の一部が復旧している状況が確認できた（図 3.3.1-1 (b, c)）。2012 年から 2016 年にかけては、耕作地の復旧に伴う分布の拡大が確認できた（図 3.3.1-1 (c, d)）。

湾岸域の一部を拡大し、孤立ピクセルの分布状態および、海岸林の分布状況を詳細に確認した（図 3.3.1-2）。MCS で作成した土地被覆図における各クラスの分布は、Google Earth で確認した分布を適確に表現できていた。特に、森林クラスの分布は、津波の影響による海岸林面積の急激かつ大きな縮小を適確に表現できており（図 3.3.1-2 (a, a', b, b'））、2011 年から 2016 年にかけての残存林面積の縮小も示していた（図 3.3.1-2 (b-d, b'-d'））。さらに、2016 年には海岸林の一部で、新たな森林のまとまりの出現が確認できた。また、耕作地の北部には、2010 年の時点で、小面積の森林クラスが点在していたが、2011 年からは消失が進み、2016 年の時点では、ほぼすべての森林クラスが消失していることが確認できた。

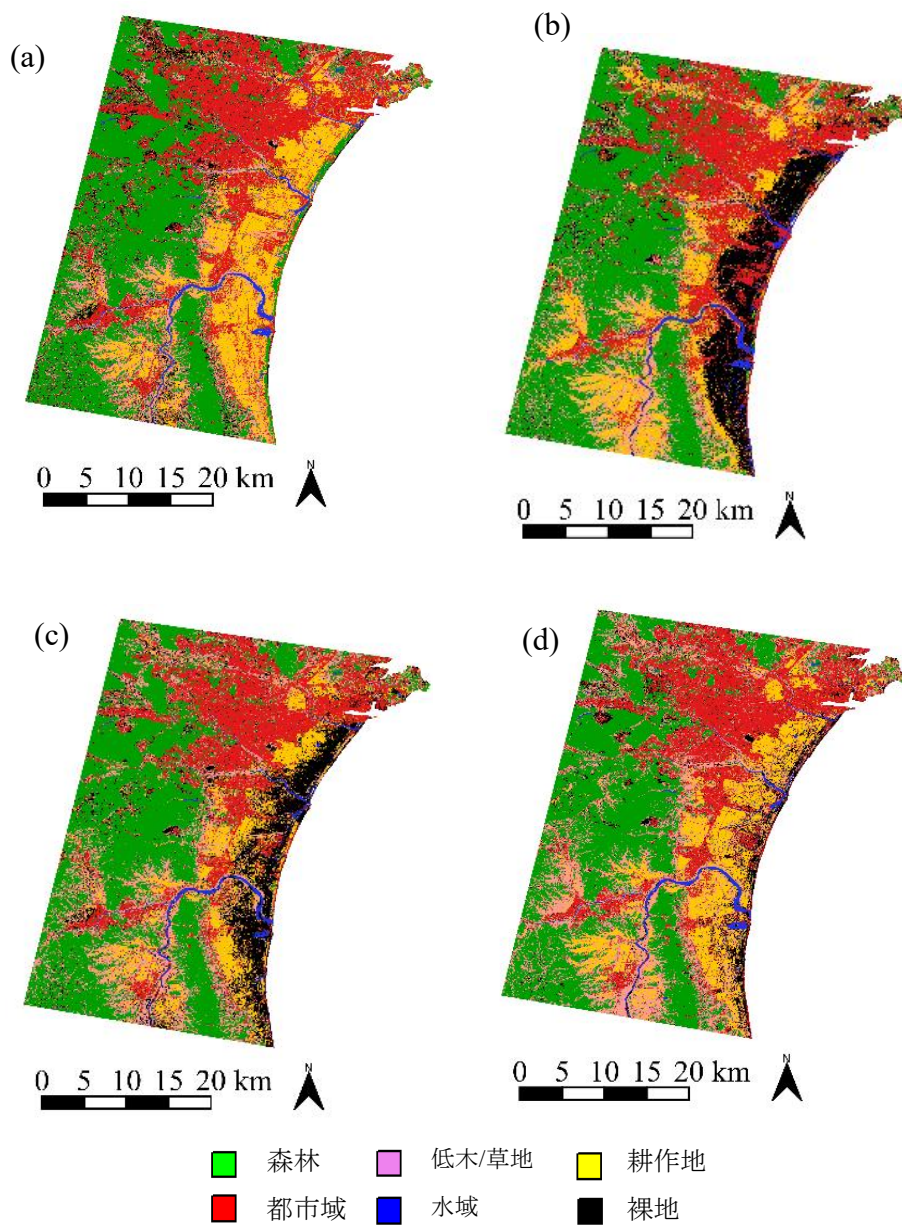


図 3.3.1-1 年次ごとの土地被覆分類図 (a) 2010, (b) 2011, (c) 2012, (d) 2016

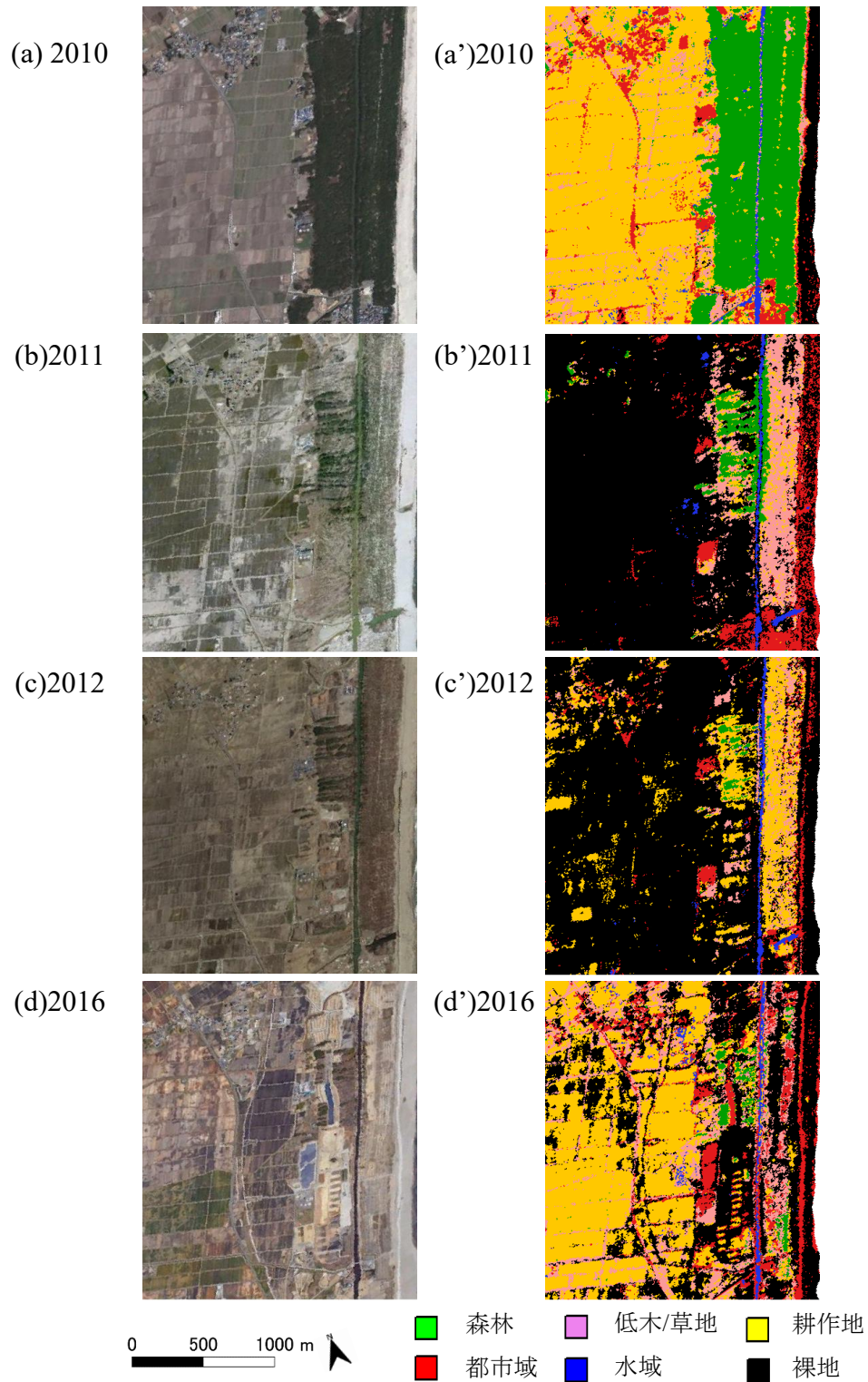


図 3.3.1-2 土地被覆の拡大図: (a)から(d)は Google Earth 画像. (a') to (d') は MCS を用いて出力した土地被覆図

3.3.2. 土地被覆図の検証

5つの分類器およびMCSの分類精度として、年次ごとのカッパ係数を示す(表2.3.3-1)。個別の分類結果においては、RF、BAG、XBGの精度は非常に高く、すべての年次で0.969~0.986の値を示した。続いて、SVM、KNNの精度も高く、どの年次も0.8以上の値を示した。MCSの精度はすべての年次で0.98~0.99と個別の分類結果の精度を保っていた。

表 3.3.2-1 分類器および年次ごとの分類精度

	年次ごとのカッパ係数			
	2010	2011	2012	2016
RF	0.982	0.979	0.970	0.977
BAG	0.976	0.977	0.965	0.969
孤立 XBG	0.986	0.984	0.975	0.980
SVM	0.895	0.912	0.872	0.860
KNN	0.863	0.890	0.840	0.834
MCS	0.986	0.984	0.976	0.984

5つの分類器およびMCSごとの孤立ピクセルの発生数を示す(図3.3.2-1)。個別の分類器としては、KNNが最も孤立ピクセルが発生し、次いで、SVM、BAG、XBG、RFの順に孤立ピクセルが発生していた。対して、MCSの孤立ピクセルの発生数は、年次ごとの個別の分類器の中央値と比べ、61% - 71%低減させることができていた。

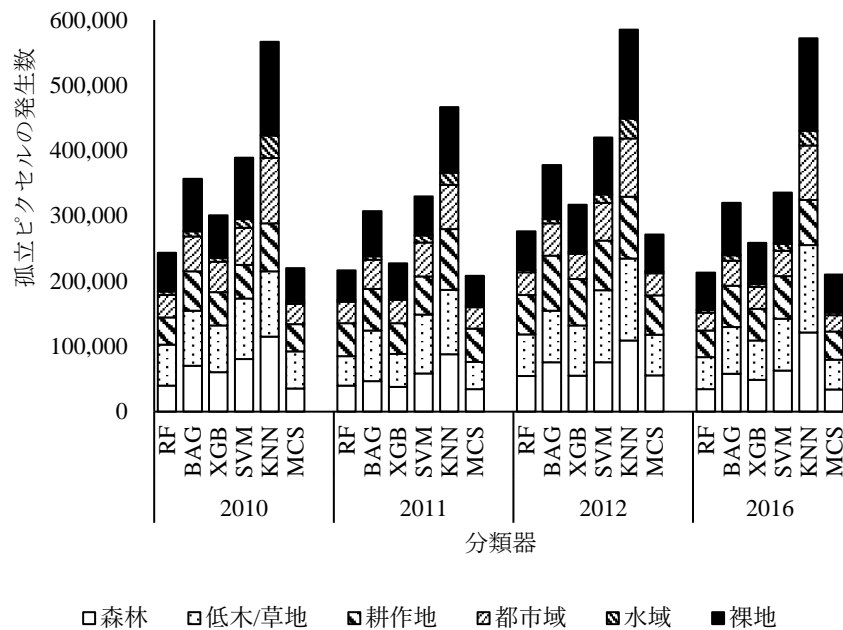


図 3.3.2-1 個別の分類器と MCS による孤立ピクセルの発生数

3.3.3. 森林パッチの分布

年次ごとの森林パッチ分布図からは、震災直後から5年後（2012～2016）に亘る、年次ごとの森林パッチ分布の変化が確認できた（図 3.3.3-1）。年次ごとの森林パッチ分布の特徴として、震災直後には、震災前に南北に広がっていた海岸林の分布は非常に大きく縮小し、耕作地内の小面積パッチも消失や縮小した（図 3.3.3-1 (b)）。震災直後以降では、海岸部北側の残存林はさらに分布が縮小し、さらに、耕作地内の小面積パッチの面積縮小や消失が進んだ（図 3.3.3-1 (c)）。震災5年後には、残存していた海岸林や、耕作地内の小面積パッチの分布縮小は進んでいた。一方、沿岸部や耕作地内では新たに出現した小面積のパッチを確認した（図 3.3.3-1 (d)）。

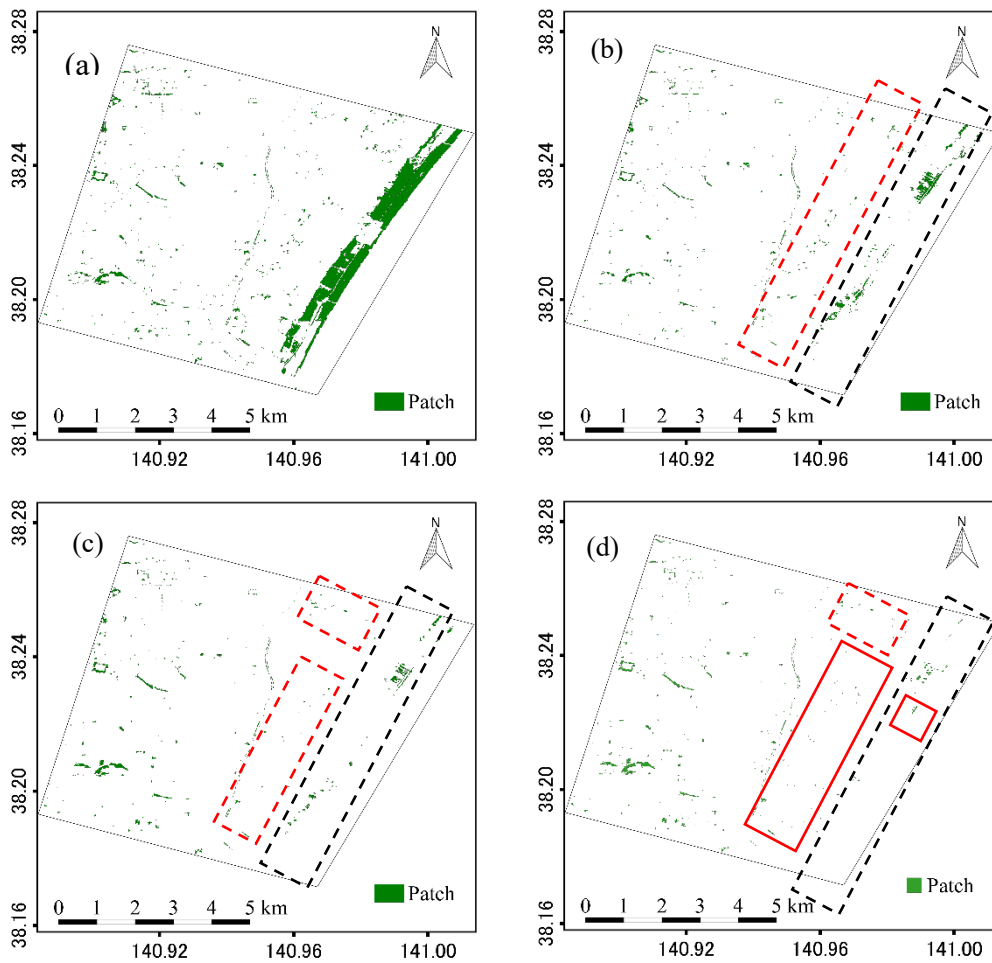


図 3.3.3-1 森林パッチ分布図; (a)2010, (b) 2011, (c)2012, (d)2016. 黒色破線の領域は、森林パッチの減少が進む沿岸域. 赤色破線は森林パッチの減少が進耕作地領域. 赤線は、新しいパッチが発生した領域である

年次ごとの森林パッチの数は、震災直後以降から毎年減少していたが、震災から5年経過した時点では、森林パッチの数は増加していた(表 3.3.3-1). さらに、パッチ面積の推移としては、最大パッチサイズの減少からは、大面積パッチは年々縮小が進み、全パッチの平均値や中央値が低下していることから、パッチの小面積化が進んでいることが確認できた. また、2016年に増加したパッチの多くは、 $1,500\text{ m}^2$ 未満の小面積パッチであり、縮小あるいは消失したパッチの多くは $1,500\text{ m}^2$ より大きい面積をもつパッチであった(図 3.3.3-2).

表 3.3.3-1 パッチの数や面積の集計結果

		年次			
		2010	2011	2012	2016
パッチ数		638	532	350	413
パッチ総面積 (m ²)		5854204.1	1209741.7	939477.1	775263.9
	最大	2,709,560.8	183,623.9	50,842.4	50,238.0
パッチ面積	最小	67.1	67.2	67.2	67.2
(m ²)	平均値	9,175.9	2,274.0	2,684.2	1,877.2
	中央値	738.8	738.8	806.0	671.6

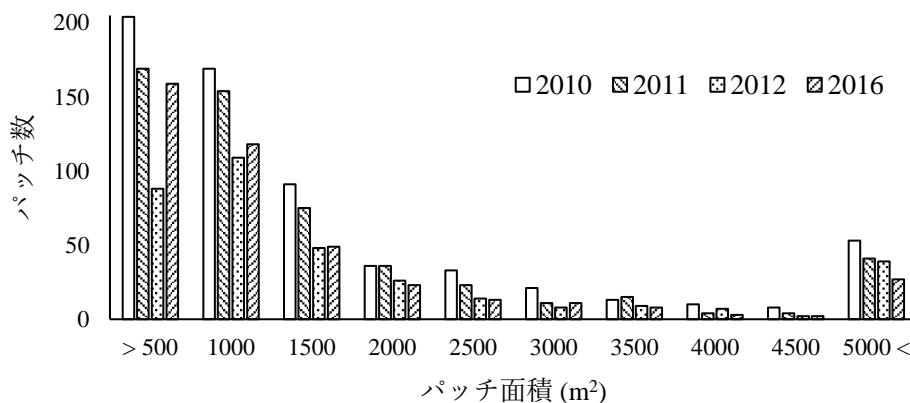


図 3.3.3-2 年次別パッチサイズ別の出現頻度

3.3.4. 連結性指数に特徴が見られた 3 つの連結距離

年次ごとに 10 m – 3,000 m までの区間を 10 m 間隔で区切った連結距離を用いて IIC および CCP を算出した (図 3.3.4-1). IIC と CCP の値の変化については, どの年次においても, 600 – 1,000 m に急激な上昇があり, 2000 – 3000 m の区間に値は横ばいになった.

一方, 値の変化には IIC と CCP で違いが見られた. IIC の値は (図 3.3.4-1 (a)),

震災前と震災直後を比べると、すべての連結距離で IIC の値は非常に大きく低下していた。震災直後以降や 5 年経過時点においても、すべての連結距離で IIC の値は低下していた。CCP の値は (図 3.3.4-1 (b))、震災前と震災直後を比べると、連結距離を 1,000~1,200 m に設定した場合は、CCP の値は維持されていた。800 m 以下では、急激に CCP の値は低下していた。また、震災直後以降、長距離は CCP の値は維持されていたが、中距離と短距離は値が低下していた。震災以降 5 年経過時点は、CCP の値は 800 m に設定した場合には向上していた。

以上のことから、連結性指数の変化に特徴が見られた連結距離を基準に、短距離 (100 m)、中距離 (800 m)、長距離 (2,500 m) の 3 つの連結距離を設定し、IIC と CCP の値を年次ごとに図化し、各連結距離別の連結性指数のを整理した (図 3.3.4-2 (a,b))。

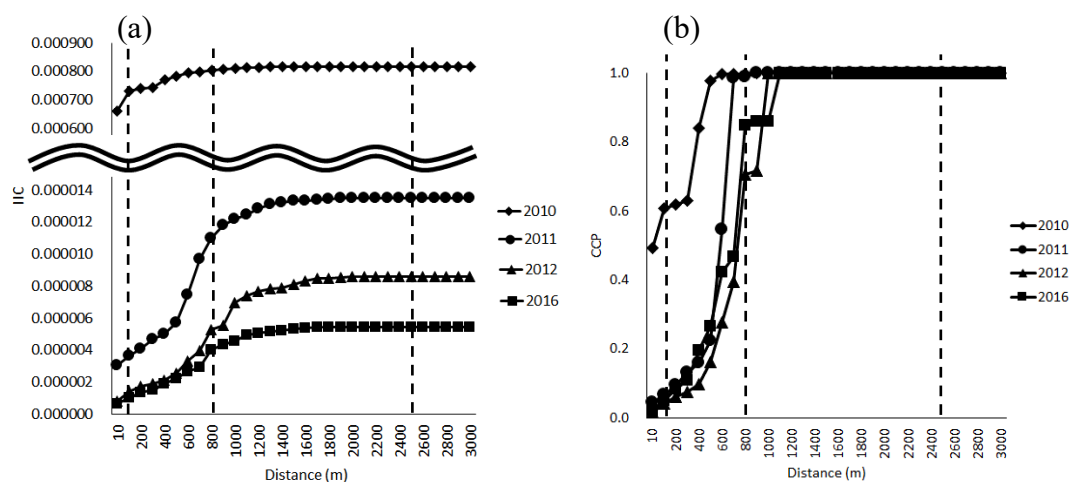


図 3.3.4-1 連結距離別の連結性指数の応答。連結性変化に特徴が見られた 100, 800 および 2,500 m の位置を破線で示す

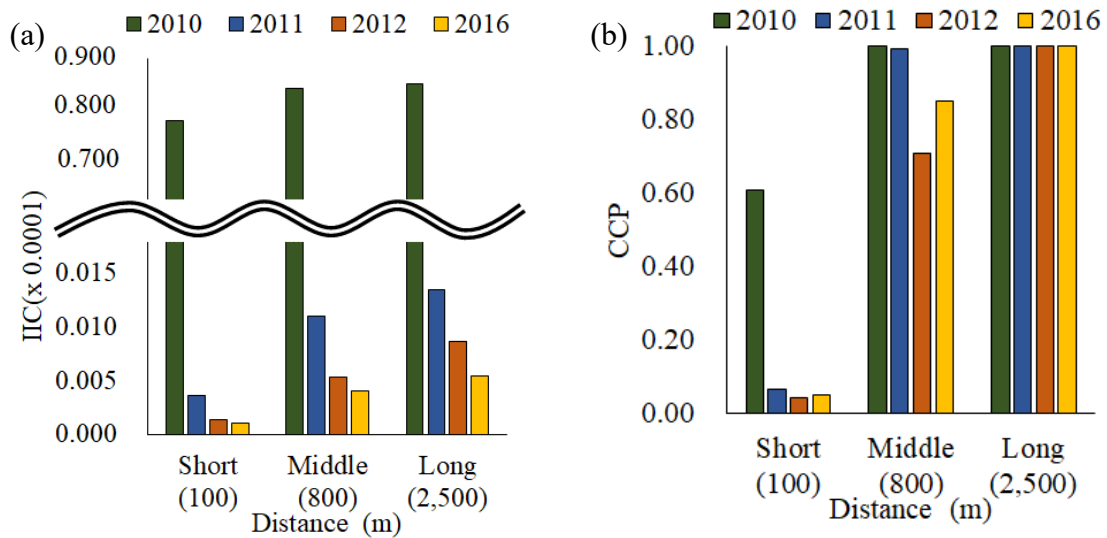


図 3.3.4-2 震災前後における連結性指数値の変化. (a) IIC, (b) CCP

3.3.5. 森林パッチネットワークと連結性指数の応答

設定した 3 つの連結距離を基準にした森林パッチネットワークを構築し (図 3.3.5-1 (a-l)), ネットワーク数とリンク数を集計した (表 3.3.5-1). 森林パッチネットワークの構築により, 年次ごとのネットワークの範囲や分断状態を可視化することができた. ネットワークの分断状況 (図 3.3.5-1) と, 連結性指数の変化 (図 3.3.4-2) から確認できた年次ごとの特徴をそれぞれ整理した.

3.3.5.1. 震災直後 (2010 年~2011 年) の連結性変化

短距離ネットワークでは, 南北に広がる森林パッチが縮小したことで, 景観内においてネットワークが非常に大きく縮小した (図 3.3.5-1 (b)). 中距離ネットワークでは, 南北を結ぶネットワークの一部が分離した. これにより, 海岸林の北部と南部がつながるためには, 内陸側に大きく迂回する経路に変化した (図 3.3.5-1 (f)). 長距離ネットワークでは, 大きなひとつのネットワークを維持していた (図 3.3.5-1 (i)).

連結性指数の応答は, CCP の中・長距離を除くと, IIC と CCP の値は, ともに非常に大きな低下が示されていた (図 3.3.4-2 (a), (b)). この指数値の低下は, 津波の影響に伴う連結性への負の影響を定量的に示した. CCP の中・長距離は, 震災前と後とで指数値に大きな変化はなかった. つまり, CCP は, 中・長距離のネットワークが大きなネットワークを維持していたことを表した.

3.3.5.2. 震災直後以降（2011年～2012年）の連結性変化

震災直後以降の小面積パッチ数の減少は特に中距離ネットワークに影響を与えた。中距離ネットワークは、点在する小面積パッチが消失したことで、北東部のネットワークと、内陸側のネットワークが分離した（図 3.3.5-1 (g)）。短距離ネットワークは、震災前から小さいネットワークが点在していたことから、震災直後と直後以降とで、ネットワークの形状には大きな変化はないことがわかった。長距離ネットワークは、1つの大きなネットワークが維持できていたが、パッチ数やリンク数が低下していることから、脆弱なネットワークになった（表 3.3.5-1）。

CCP の長距離を除く、IIC と CCP の値は低下していた（図 3.3.4-2 (a,b)）。IIC は、調査地全体のパッチ面積やパッチ数低下を指数値として表していた（図 3.3.4-2 (a)）。CCP は、短・中距離ネットワークの広がりには縮小し、長距離ネットワークの広がりには維持できていたことを表していた（図 3.3.4-2 (b)）。

3.3.5.3. 震災から5年経過した時点（2012年～2016年）の連結性変化

震災から5年経過した時点では、新たに発生したパッチによりネットワークの範囲が拡大された領域があった。特に、中距離ネットワークは、震災直後以降に大きなネットワークから分離した北東部のネットワークの一部が拡大されていた（図 3.3.5-1 (h)）。短・長距離ネットワークにおいては、ネットワーク全体の様子に大きな変化は見られないものの、ネットワークのリンクが増加した（表 3.3.5-1）。

IIC の値は、どの連結距離においても継続して低下していた（図 3.3.4-2 (a)）。一方、CCP は、中距離ネットワークの連結性指数が向上しており、新たに発生したパッチに伴うネットワーク範囲の拡大を定量的に示すことができていた（図 3.3.4-2 (b)）。

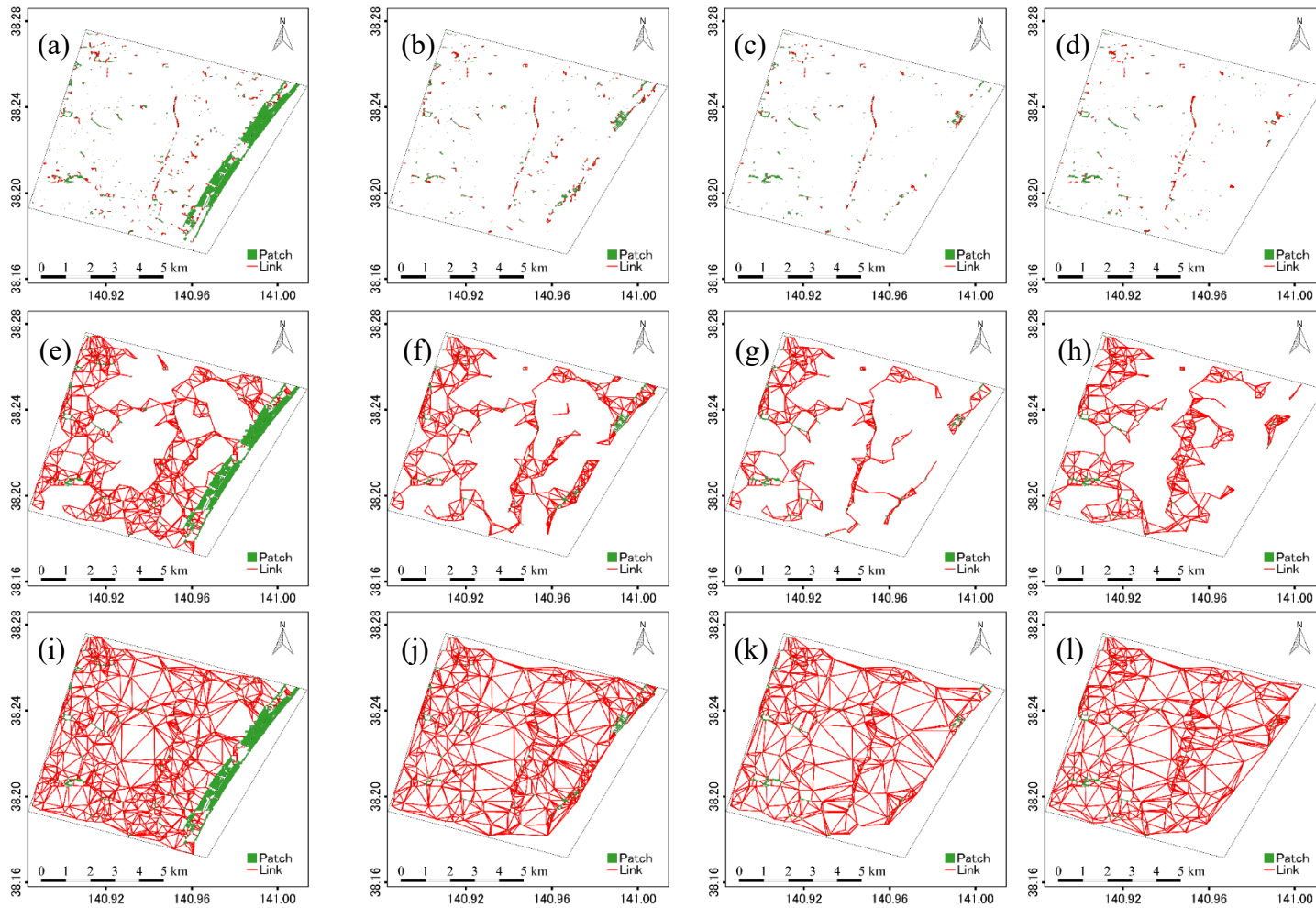


図 3.3.5-1 年次 2010(a,e,i), 2011(b,f,j), 2012(c,g,k), 2016(d,h,l)また連結距離別(100(a-d), 800(e-h), 2,500(i-l) m)の森林パッチネットワーク図

表 3.3.5-1 年次別ネットワークごとのネットワーク数とリンク数の集計結果。
カッコ外の数値はネットワーク数であり、カッコ内はリンク数である

	年次			
	2010	2011	2012	2016
短距離	274(510)	227(420)	180(241)	228(343)
中距離	2(1,677)	3(1,295)	4(775)	6(1,103)
長距離	1(1,847)	1(1,526)	1(993)	1(1,281)

3.4. 考察

3.4.1. 津波発生以降の移動経路の変化

ネットワークの構築は、生物の移動経路やその範囲の推論に有効な手法である(Minor and Urban 2008)。本研究では、森林パッチネットワークを構築することで、森林パッチを生息地や移動経路とする生物の行動範囲を推論した。

短距離のネットワークでは、震災前も震災後も小さいネットワークが点在していた(図 3.3.5-1 (a,b,c,d))。つまり、移動距離が短い生物にとっては震災前後も行動範囲に大きな変化はなく、残ったネットワークにおける個体群は維持していることが示唆された。

中距離のネットワークでは、震災直後以降にはネットワークの一部が分離され、分離されたネットワークに生息する個体群は、大きな集団から孤立したことが考えられた(図 3.3.5-1 (g))。震災発生から5年が経過した時点では、一部の領域では植樹等により、新たにパッチが出現した領域が認められた(図 3.3.3-1 (d))。このパッチの出現により、中距離を設定したネットワークの一部は、ネットワークの範囲が拡大した(図 3.3.5-1 (h))。

長距離のネットワークでは、震災直後以降においても、大きな1つのネットワークが維持されていたことから、パッチ間の移動能力が高い生物は大きな集団を維持できると考えられた(図 3.3.5-1 (j,k,l))。しかし、1つの大きなネットワークは維持されていたものの、パッチ数やリンク数が減少していたことから(表 3.3.5-1)、移動経路が減少した脆弱なネットワークになったことが考えられた(表 3.3.3-1, 図 3.3.5-1 (j,k,l))。今回の解析により、ネットワークの分断状態から、個体群の分断や孤立の状態を推論することができた。

一方で、感受性の高い小型哺乳類、あるいは一般に移動能力が高いと考えられる鳥類でさえ、森林面積や配置が変わるだけで移動が制限される場合がある(Haas 1995; Honorato et al. 2015)。さらに、鳥類の移動範囲が変わることは、植物

の種子散布範囲にも影響する可能性がある(Perez-Hernandez et al. 2014). 生物の移動能力や環境変化による感受性が異なることから、本研究のような広域的解析と、Tomita and Kanno (2019)による現地調査の結果等を組み合わせることで、被災景観域の生態系を回復させるための管理や監視に向けた研究に発展できると考える.

3.4.2. 複数の連結性指数を併用した定量評価の有効性

2つの連結性指数 (IIC と CCP) を用いて、大規模攪乱が生じた景観を解析したことで、津波発生直後とその後の連結性変化を定量的に明らかにできた. IIC は、連結性への負の影響を適切に指数値の低下として表せる指数である(Pascual-Hortal and Saura 2006). また、CCP は、景観内のネットワークの状態から生物同士の遭遇のしやすさ (同じネットワークに属する確率) を表せる指数である(Jaeger 2000). この2つの指数は、パッチの状態に着目した IIC と、空間の広がりに着目した CCP とで、特徴が違ふ指数として区分ができる(Clauzel et al. 2017). しかし、近年の連結性の定量化を行う研究の多くは、IIC のみが頻繁に用いられている(Clauzel et al. 2015; Hernandez et al. 2015; Huang et al. 2018; Volk et al. 2018).

一方、本研究のように、大規模攪乱を対象とした連結性研究は、1つの指数では表現が困難だった. 例えば、IIC のみでは、景観全体としては津波発生以降で森林パッチの連結性の低下が継続して起きていることは検出できるが、5年経過時点の一部地域で発生した連結性向上に寄与するような微細なパッチを検出することが困難であった. また、CCP のみでは、5年経過時点でもパッチ総面積は減少が続き、景観全体の連結性が低下し続けていることは表現できていなかった. つまり、特徴の違ふ複数の指数を併用した連結性の評価は有効だったと考えられる.

現在、連結性研究に用いる指数を選択するための指針は存在しないと考えられているが(Saura and Pascual-Hortal 2007), 最近では、連結性解析ソフトウェアはいくつも開発されており(Vogt et al. 2007; Saura and Torne 2009; McRae and Kavanagh 2011; Foltête et al. 2012), 複数の指数を容易に算出することが可能となってきた. 今後は、本研究のような実際の景観を解析した事例を含め、各指数を併用した評価をすることで各指数の持つ特性が整理でき、指針の整備につながると考える.

3.5. 本章のまとめ

本研究では、数百年に一度とされる低頻度大規模攪乱と、その後の復旧・復興事業などの人為的な影響がもたらした森林パッチ変化を対象に連結性解析を行った。森林パッチネットワークの構築により、生物の行動範囲の可視化とネットワークやリンクの増減を詳細に明らかにすることができた。加えて、IIC と CCP を併用し、連結性を評価したことで、単一の指数では表現が困難な経年変化を定量的に明らかにすることができた。本研究結果が、自然災害による大規模攪乱と、その後の回復状況を監視管理するための有用な情報として役立つことを期待する。

第4章 連結性向上に効果的な森林パッチ創出領域を空間明示的に示す手法の開発

大面積にわたる森林の倒壊や消失が起きた大規模災害時の復興事業において、景観スケールでの生物多様性の保持の観点から、野生生物の生息地となる森林パッチの連結性を高めることが肝要である。しかし、これまでの関連する研究においては、森林創出領域ごとの連結性の向上度の違いを空間明示的に示した研究例はなく、新たに手法を開発する必要がある。第4章では、第3章で確立した連結性解析手法をもとにし、被災地を対象とした連結性向上に効果的な森林パッチの創出領域を選定する手法を開発する。

4.1. 本章の背景と目的

津波により森林が大面積にわたって倒壊や消失が起きた大規模災害時の復興事業において、景観スケールでの生物多様性の保持の観点から、野生生物の生息地となる森林パッチの連結性(connectivity)を高めることが肝要である。特に、被災景観においては、生物の生息地間の移動に配慮した復旧・復興事業の実施が望ましい。2011年3月11日に発生した東日本大震災において、津波による甚大な被害のあった仙台市の沿岸部の区域の多くは、仙台市震災復興計画(仙台市2017)によって災害危険区域に指定された。さらに、非居住地域としても指定されたことで、住居、寮、共同住宅などの住居の用に供する建築物の新築や増築が禁止され、今後は、当該地域を利用した海岸防災林の整備や公園等の公共施設を配置することが計画されている。また、公共施設の配置に関しては、減災・防災の観点により土地区画整理事業が計画されるとともに、自然に配慮した海岸林や海岸公園の開発が計画されている。このような復興事業計画においては、森林域や公園を配置する領域を考慮することで、生態系や生物多様性に配慮した事業にすることが可能となる。特に、森林パッチの連結性を効果的に高められることが期待できる。

これまでの生態学に関する研究において、生息地が分断化された景観域において、個体群を保全するためには、生物の移動経路の確保が不可欠であることが示されてきた(Haddad 2000; Simberloff et al. 2002; Jordán et al. 2003)。生態系や生物多様性の保全や管理をする際には、管理すべき領域を明確にし、かつ、優先順位をつけることで、現実的な予算や時間を考慮した計画の立案につながる

(Zetterberg et al. 2010; Foltête et al. 2014; Gurrutxaga and Saura 2014). 一方で、これまでの連結性を応用した研究においては、現状の連結性を維持するために重要なパッチを特定する方法が開発されてきた(Pascual-Hortal and Saura 2006; Urban et al. 2009; Bodin and Saura 2010; Saura and Rubio 2010; Ernst 2014). 言い換えると、消失による負の影響が強いパッチの特定手法である。しかし、連結性に配慮した復旧・復興に向けては、消失による影響ではなく、パッチを新たに創出すべき領域を特定することが重要である。

また、生態系や生物多様性の保全や管理に向けた科学的知見は政策決定者や実務担当者の意思決定に対して有用だと認識されているが、実際に、科学的知見を意思決定に用いるためには、どのように適用すれば課題を解決できるのかを具体的に提示する必要がある(Sutherland et al. 2013). そして、研究成果を保全計画等の実務に適用するための具体的方法を示す必要がある(Knight et al. 2008; 大澤・上野 2017). このことから、連結性研究成果を社会実装するためには、事業計画の立案に向けた具体例の提示が有用である。本研究では、大規模災害時の復興事業において、連結性を効果的に高めることができる森林パッチ領域の選定方法の開発をした。

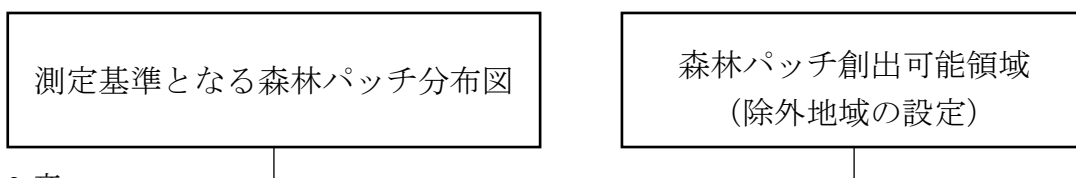
4.2. データと方法

4.2.1. 連結性の向上量を示す空間分布図の作成手順の概要

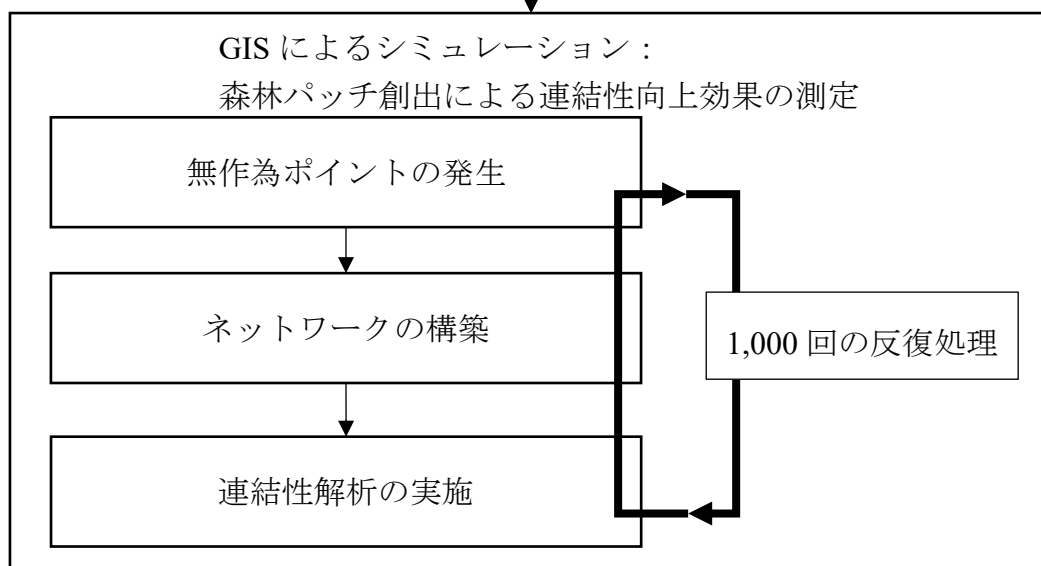
図 4.2-1 に作成手順の概要を示す。地理情報システム（GIS）を用いたシミュレーションにより、森林パッチ創出による連結性の向上量を、創出した森林パッチの位置ごとに測定した。そして、この測定を 1,000 回反復処理した後に、位置ごとの測定結果をもとに、空間的内挿処理と階級区分による濃淡図を作成することで、森林パッチ創出による連結性の向上量を示す空間分布図を作成した。

作成手順の詳細は、4.2.2 章から 4.2.4 章に示す通りである。

4.2.2 章



4.2.3 章



4.2.4 章

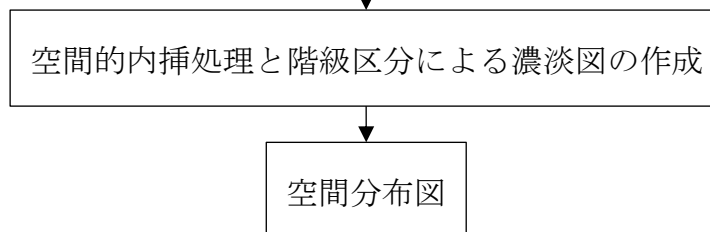


図 4.2-1 連結性の向上量を示す空間分布図の作成手順の概要

4.2.2. 測定基準となる森林分布と除外地域

測定基準となる森林分布図には、第3章の成果の一部である2016年の森林分布図を測定基準とした(図4.2-2)。

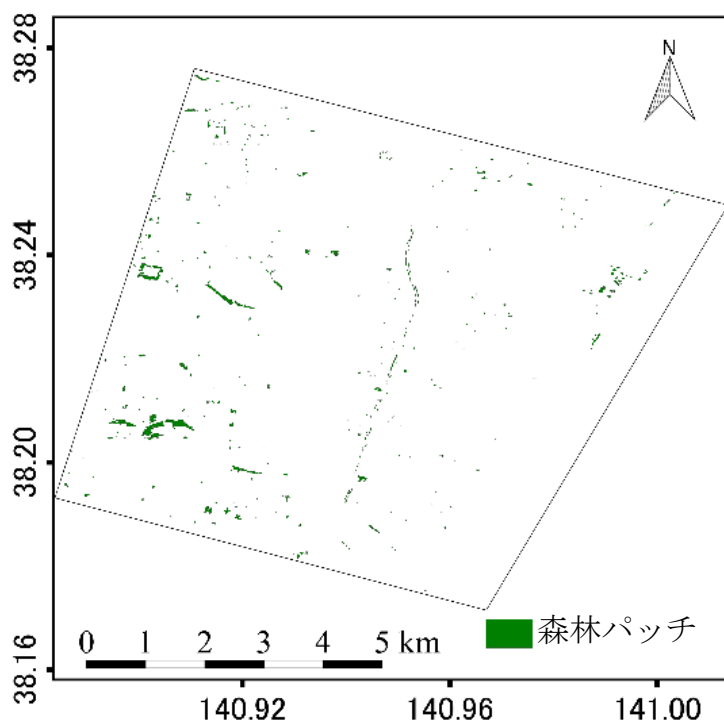


図 4.2-2 測定基準とする2016年の森林分布図

また、現地の状況をシミュレーション条件に反映させるため、森林パッチの創出が現実的に困難な領域を除外した。今回のシミュレーションでは、2章の成果の一部である2016年次の土地被覆図および、10万分の1浸水範囲概況図(国土地理院2011b, c); (図4.2-3)を参考に、対象地の西側に位置する都市域を除外し、津波による浸水範囲であり、非居住区域に指定された範囲を解析対象とした(図4.2-4)。

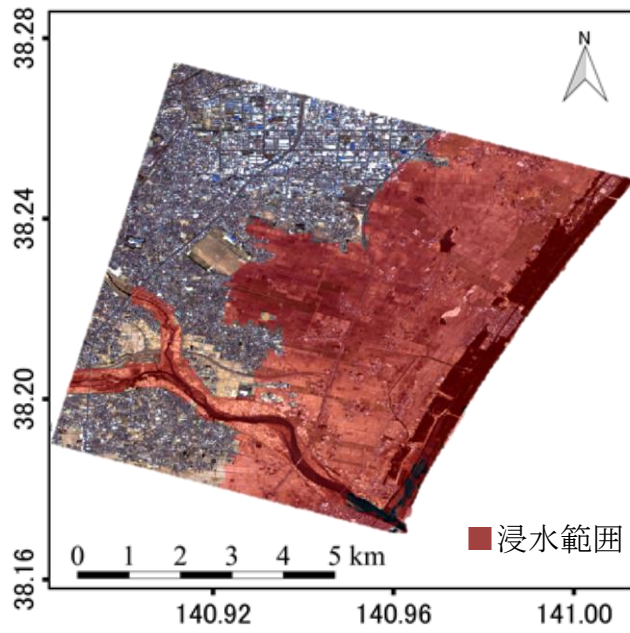


図 4.2-3 津波浸水範囲. 国土地理院による土地利用メッシュデータをもとに作成

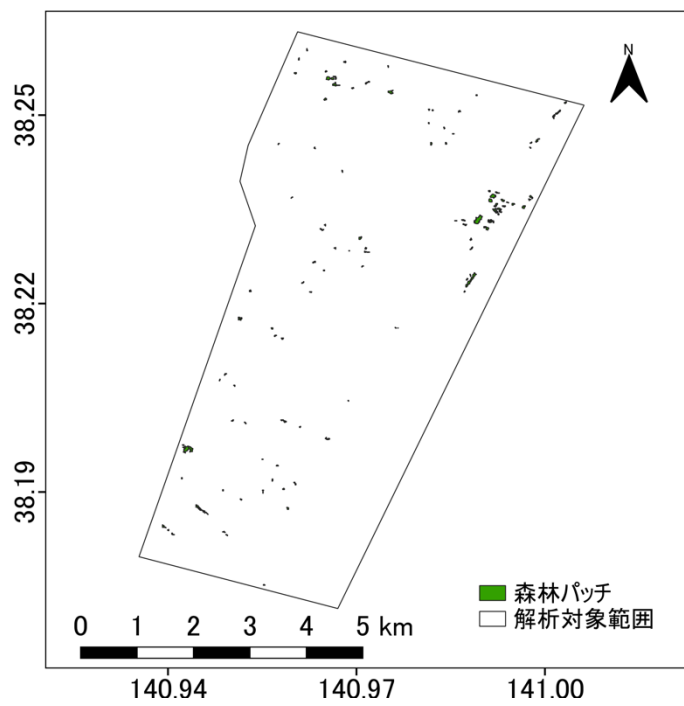


図 4.2-4 最終的に決定した解析対象地域

4.2.3. 森林パッチ創出による連結性向上効果の測定方法

GIS を用いたシミュレーションでは、森林パッチが創出可能な領域を対象に、半径 25 m の森林パッチを 1 つ無作為に発生させ、発生させた森林パッチを含む新たなネットワークを構築した。そして、構築したネットワークの連結性を定量解析することで、森林パッチ発生前後で連結性がどの程度向上したかを測定した (図 4.2-5)。また、連結性の定量化については、連結性積算指数 (IIC : Integral Index of Connectivity) と、クラス一致確率 (CCP : Class Coincidence Probability) を用いることで、パッチ増減による景観スケールでの生物の移動の容易さと、森林パッチの空間的広がりを評価した。また、その際には 3 つの距離クラス (短 : 100 m, 中 : 800 m, 長 : 2500 m) を設定した。

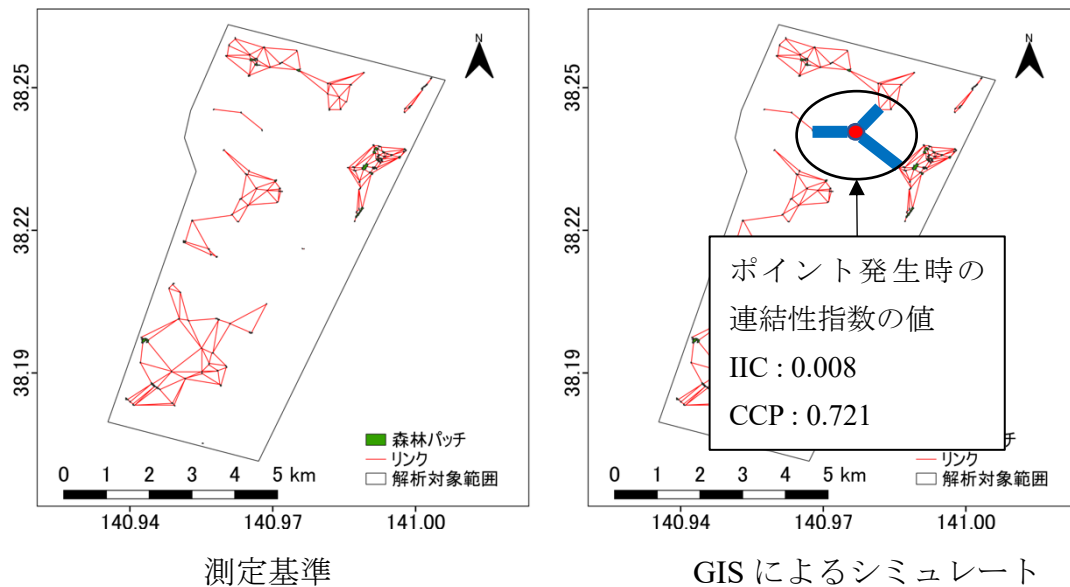


図 4.2-5 パッチ創出と連結性の定量化

4.2.4. 空間的内挿処理と階級区分による濃淡図の作成

連結性向上効果の測定を 1000 回反復し解析対象地域内に点群を作成し、点群すべてを対象に空間的内挿処理を実施することで、連結性の向上度を示す空間分布図を作成した (図 4.2-6)。空間的内挿処理には、逆距離加重 (Inverse Distance Weighted: IDW) を用いた。IDW は、線形的に加重された点群を組み合わせることによって、測定していなかった空間を補完する処理である (Philip and Watson

1982).

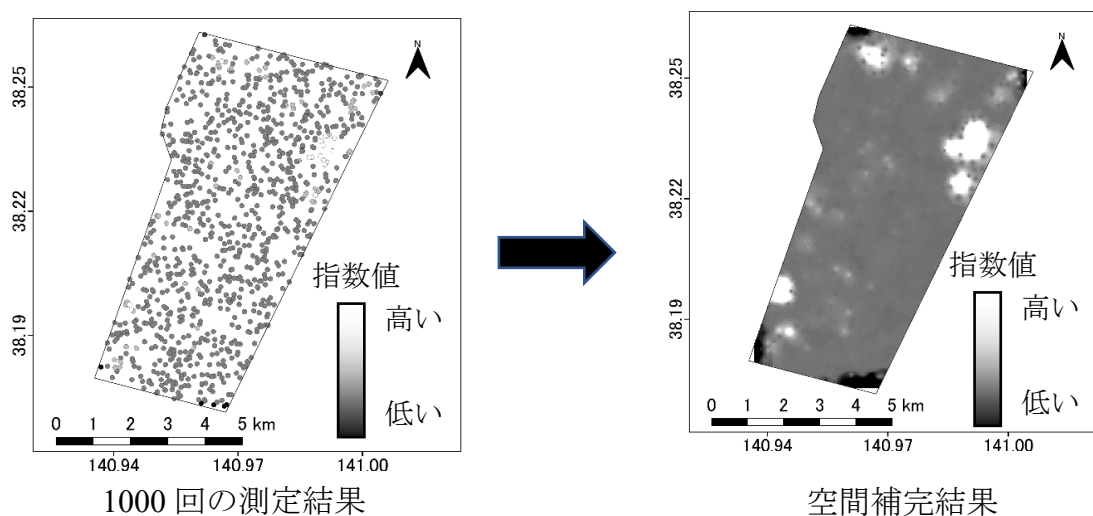


図 4.2-6 空間的内挿処理による点群の空間補完概念図

さらに、濃淡図は、一定の基準で階級区分を行うことで、効果の高い場所、低い場所を空間明示的に表現した。階級区分は、平均と標準偏差を基準にした(図 4.2-7)。この基準は、各領域の値が平均値からどれだけ離れているかを示すことに有効な区分方法である。

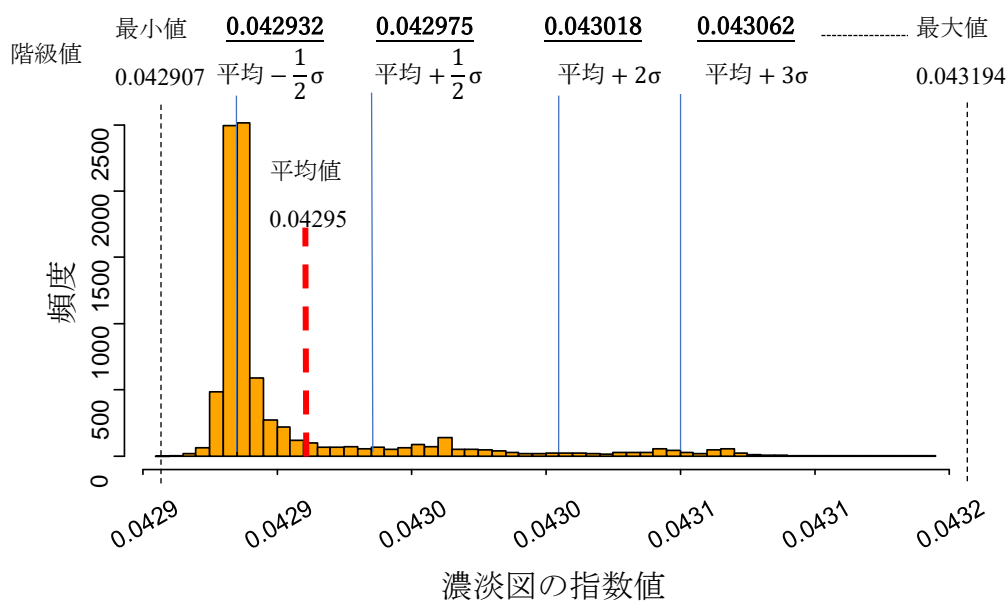


図 4.2-7 階級区分の概念図

4.3. 結果

4.3.1. 連結性の向上量を示す空間分布図

森林パッチ創出による連結性の向上効果を示す濃淡図を、連結距離別に作成した（図 4.3-1, 図 4.3-2, 図 4.3-3）。

短距離を設定した濃淡図（図 4.3-1）からは、IIC と CCP とで効果の高い領域に大きな違いはなかった。パッチ創出による連結性向上効果は、森林パッチの総面積が大きいネットワークに近い領域ほど効果が高かった。

中距離を設定した濃淡図（図 4.3-2）からは、IIC と CCP とで特に効果の高い領域は類似しており、一方で、IIC と比べ CCP は、ネットワークの広がりへの貢献が弱い領域は、連結性の向上効果が極端に低くなることがわかった。対象地内に分散して存在するパッチを繋げられるような領域にパッチを創出させることが効果的であることが濃淡図から確認できた。

長距離を設定した濃淡図（図 4.3-3）からは、IIC の結果として、調査地の東側に存在するパッチや、北側に存在するパッチをつなぐような領域に、パッチを創出させると効果が高いことがわかった。対して、CCP の結果は、CCP の計算上の特性のため、調査地全体が1つのネットワークで構成される場合は、指数値が1.0 となるため、パッチを増やしても指数値には変化が現れなかった。

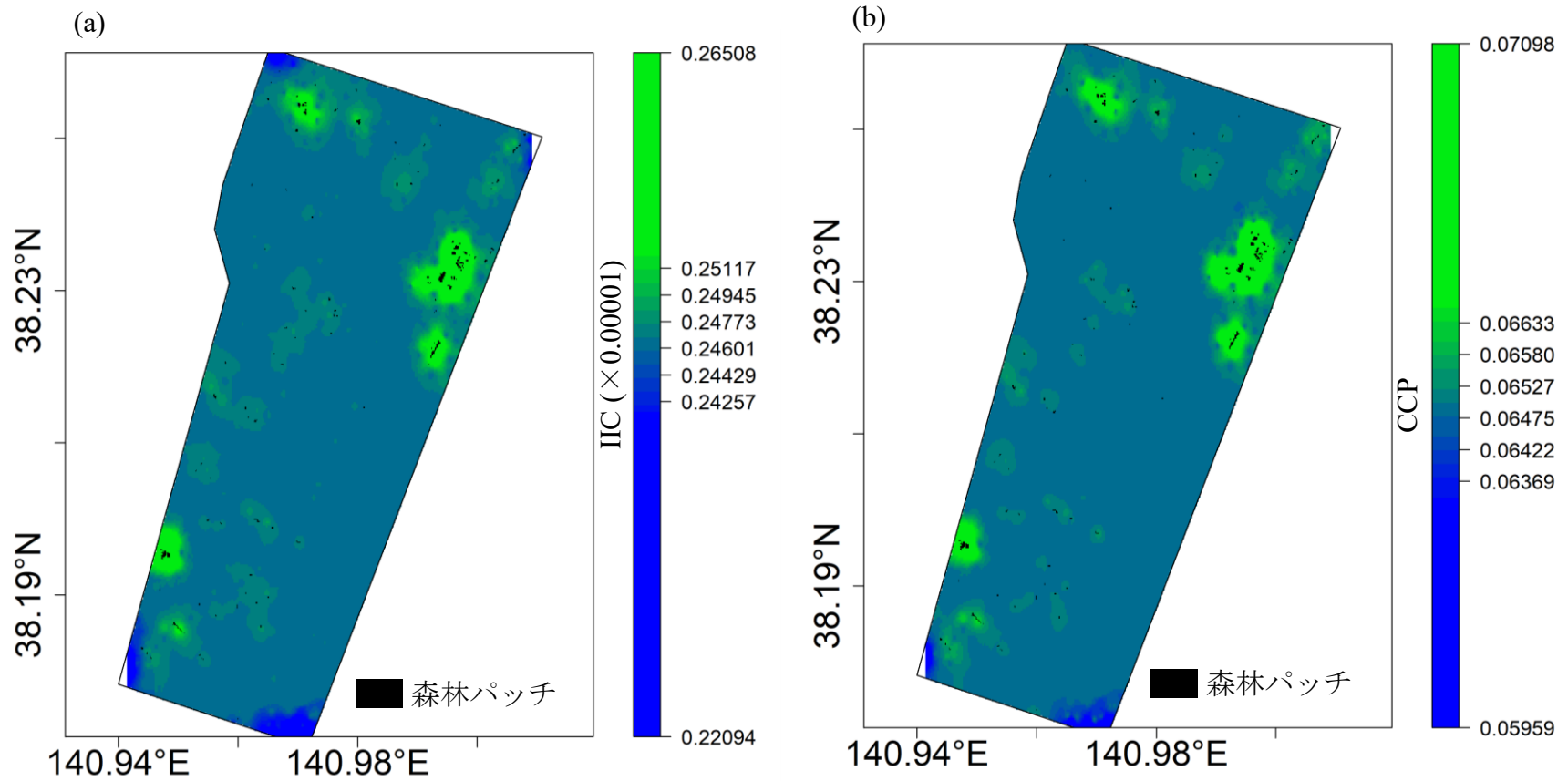


図 4.3-1 短距離を設定した濃淡図。(a)IIC による濃淡図、(b)CCP による濃淡図。森林パッチは測定基準の分布である

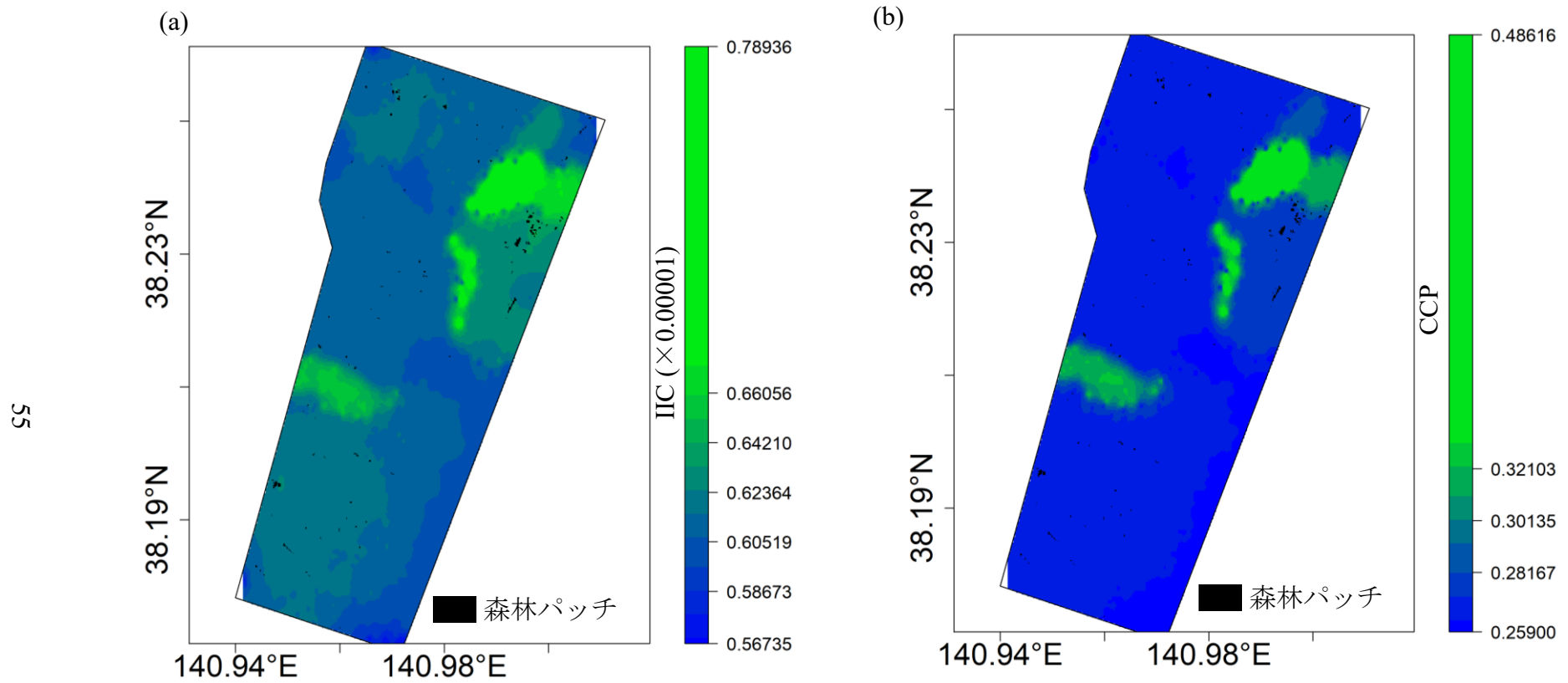


図 4.3-2 中距離を設定した濃淡図. (a)IIC による濃淡図, (b)CCP による濃淡図. 森林パッチは測定基準の分布である

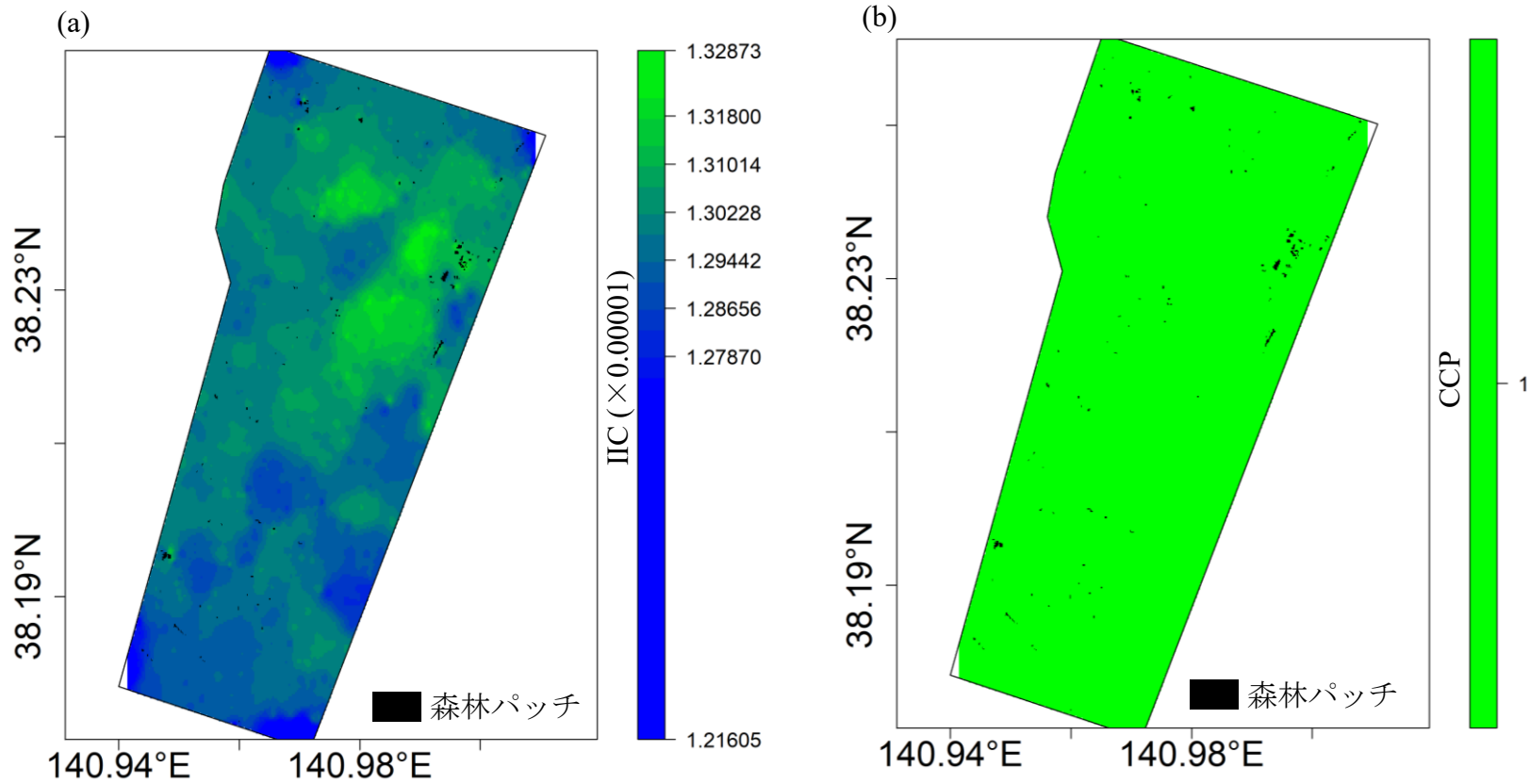


図 4.3-3 長距離を設定した濃淡図. (a)IIC による濃淡図, (b)CCP による濃淡図. 森林パッチは測定基準の分布である

4.3.2. 濃淡図をもとにした森林パッチ創出のシミュレーション

連結距離別の濃淡図（図 4.5-1～4.5-3）を参考に，連結性の向上効果が特に高い領域を設定し（図 4.5-4 (a)），パッチ創出後のネットワークの接続状態を確認するとともに（図 4.5-4 (b, c, d)），連結性指数値の変化を IIC と CCP をそれぞれ測定した（図 4.5-5 (a, b)）。

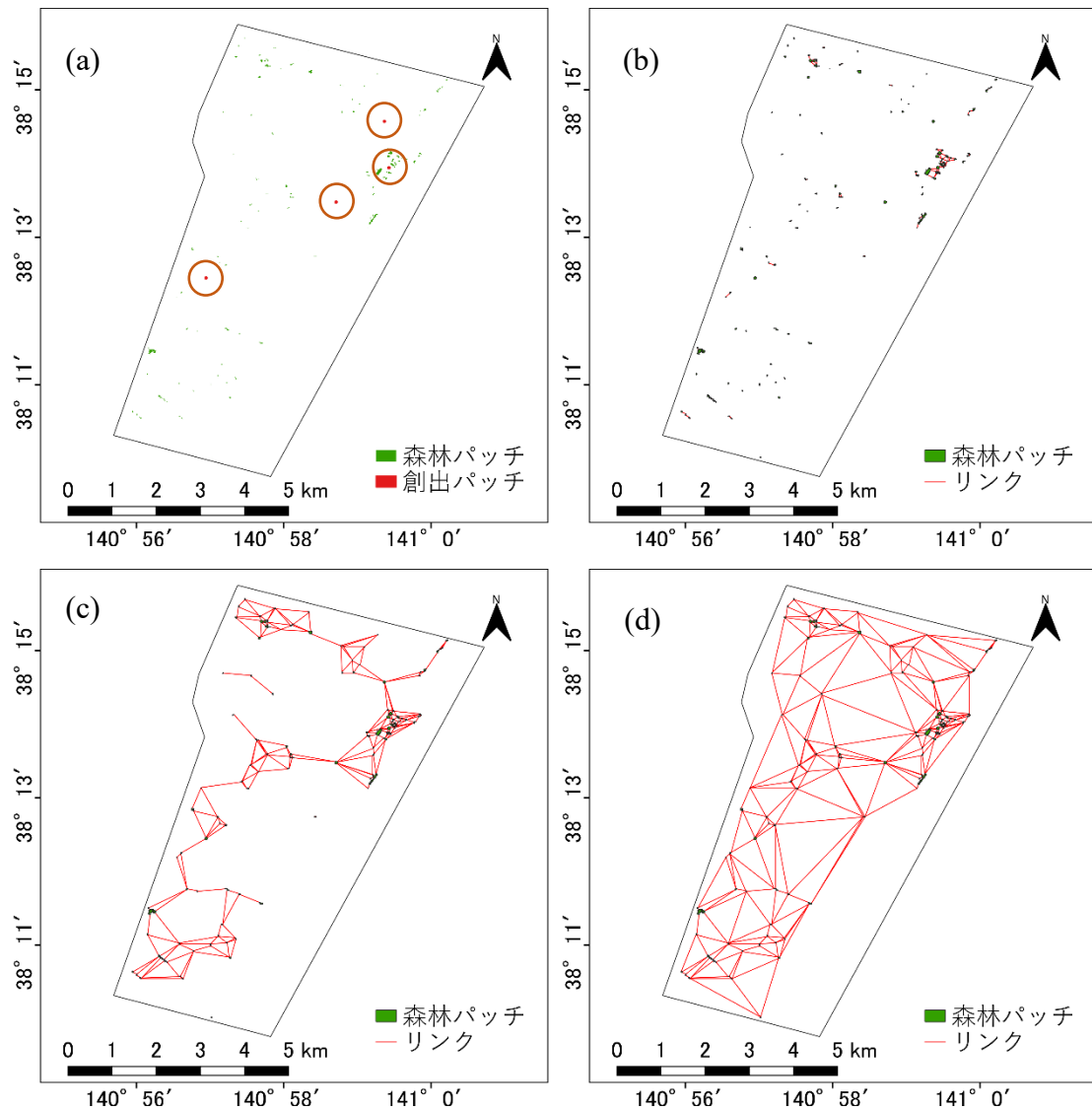


図 4.5-4 パッチ創出による森林パッチネットワークの状態。(a)の橙色の円で示す領域にパッチを創出した。(b),(c),(d)はそれぞれ，創出したパッチを含む連結距離別（100 m, 800 m, 2500 m）のネットワーク図である

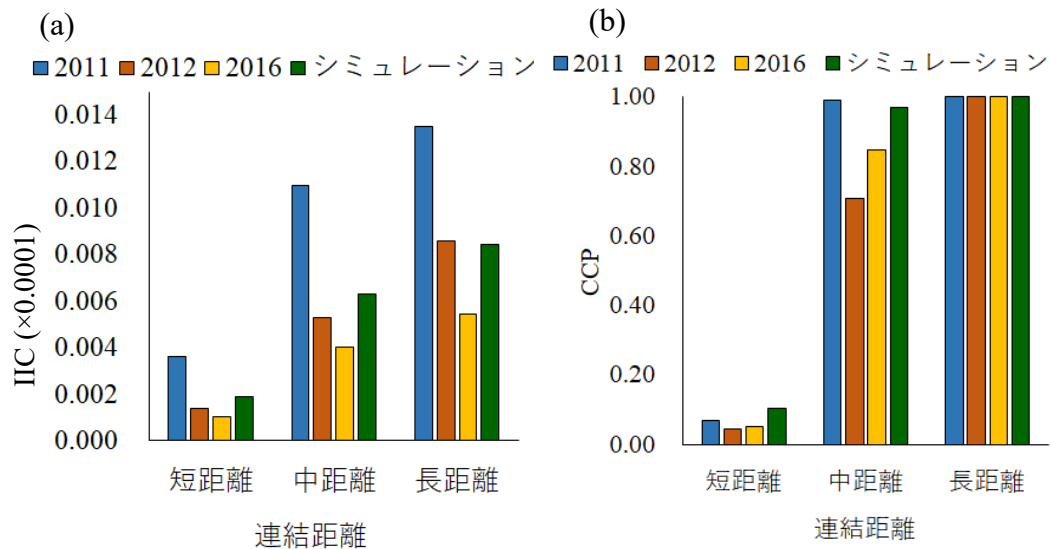


図 4.5-5 パッチ創出による連結性の向上量. (a)は IIC, (b)は CCP

連結性向上に効果的な領域にパッチを創出したことで、どの連結距離でも IIC と CCP の値は大きく向上した。短距離と長距離は、2012 年時点の指数値に近づき、中距離は 2012 年の値を超えた (図 4.5-5 (a))。CCP は、短距離と中距離においては、震災発生直後である 2011 年と同程度の値を示した (図 4.5-5 (b))。ネットワークの状態に関しては、特に、中距離ネットワークは、大きなネットワークに回復できることが分かった (図 4.5-4 (c))。

4.4. 考察

通常、健全な生態系や生物多様性の保持や管理を行う上で、予算や時間などの資源には限りがある。つまり、限りある資源を有効に活用するためには、より効果的に維持や管理を進めることが不可欠である。また、生息地の分断化により、生物多様性を減少させる影響は時間の経過とともに強くなることが報告されている (Haddad et al. 2015)。生態学の分野では、計画に向けた意思決定の段階では、相対的な保全効果によって保全する場所や内容に順位付けをすることは非常に有効な手段だと考えられてきた (Keitt et al. 1997; Urban and Keitt 2001)。しかし、連結性研究においては、保全するパッチの優先度を決定するため手法として、特定のパッチが消失した場合の連結性への影響度合いを評価する手法は提案されてきたが (Pascual-Hortal and Saura 2006)、連結性の向上効果が高い領域の選定手法は開発されていなかった。本研究で開発した連結性向上に効果的な領域を示

すことができる濃淡図は、連結性を観点にした復旧・復興事業を計画する上で、非常に有用だと考えられる。今回の解析結果からは、連結距離別の連結性向上効果の高いあるいは低い領域が空間明示的に可視化することができた。

そして、生息地が分断した景観にとっては、たとえ面積が僅かな孤立した樹林であっても、移動経路として利用する生物にとって適切な距離に分布していれば連結性を強化することができる(Boscolo et al. 2008)。また、人為的に創出した森林パッチは、必ずしも生物の生息地としては良質ではないかもしれない。しかし、休息地や避難地としての効果が期待できる(Haddad and Tewksbury 2005)。これらのことから、本被災景観域のような大規模災害時には、より迅速に森林パッチネットワークを回復させることで、健全な生態系や生物多様性の保持への効果が期待できる。

4.5. 本章のまとめ

本研究では、森林パッチ創出による連結性向上効果を定量的に表す手法を開発した。本手法によって、森林パッチの連結性向上が期待できる領域を空間明示的に特定できた。今後、生物の生息地間の移動に配慮した森林パッチの配置計画に有益な情報になると考えられた。

第5章 総合考察

5.1. 各章の新規性と有用性の概要

博士論文では、低頻度大規模攪乱に位置づけられる現象である東北地方太平洋沖地震に関する被災景観域に対して、津波被害とその後の復旧・復興事業に伴う森林パッチの連結性の変化を定量的に明らかにした。景観スケールでの生物多様性の保持の観点から、野生生物の生息地となる森林パッチの連結性(connectivity)を高める手法を開発した。本研究の新規性と有用性は次の通りである。

まず、第2章の衛星リモートセンシング画像を用いた土地被覆分類処理に多重分類器を用いた解析においては、信号処理分野等で用いられてきた機械学習の応用手法を、リモートセンシング分野で駆使することで、地表面情報を非常に正確に表現できることを明らかにした。加えて、分類精度検証の方法について見直し、Z検定を含む従来の単純な精度値の比較と比べ、マクネマー検定や孤立ピクセル数の比較によって分類結果の有意差を適切に検定できることを示した。景観構造(生態系に係る地表物の空間分布)を的確に把握することは、生態系の保全にとって重要であり、第2章の研究成果は、景観生態学を中心とした学問分野で非常に有用である。

連結性の定量評価に関わる研究対象は日本国外の事例が多い。さらに、本被災景観のような、生息地が非常に大きく変化した景観を扱った研究は他に類をみず、連結性を観点にした定量的評価手法は確立されていない。第3章では、この連結性研究の課題を解決するために、被災景観域を対象に、複数の指数を用いた評価手法を確立させた上で、津波発生とそれ以降の連結性の変遷を明らかにした。

今後、連結性研究を実社会に展開する上では、実際の利用方法を検討し提案する必要がある。第4章は、実際の利用方法の提案につながる研究である。連結性研究において新しい方法で、連結性の回復に向けた事業に実装できる手法を開発し、本被災景観を対象にその有効性を示した。

5.2. 新規性と有用性を踏まえた各章のまとめ

5.2.1. 第2章のまとめ

近年、土地利用/被覆に関する情報は、自然災害による被害の監視や自然資源の管理に大いに利用されてきている。さらに、高分解能衛星を用いたリモートセンシング技術により、これまでよりも詳細な地表面の情報を得ることができる

ことから、さらなる利用が期待される。一方、高分解能衛星画像から得られる地表面の情報は非常に詳細であり、従来の手法を用いた分類では孤立ピクセル (isolated pixel) と呼ばれる細かい分類結果が誤分類として発生するため、改善が必要である。孤立ピクセルは地図の可視性や分類精度への課題であり (Blaschke et al. 2000; Carleer et al. 2005; Zhai et al. 2017), これまでにも、分類結果のフィルタリング処理など、孤立ピクセルを低減する手法に関する研究が進められてきている (Eastman 2003; Nixon and Aguado 2008; Zhu 2013; Zhai et al. 2017). しかし、分類の正誤にかかわらず分類結果から孤立ピクセルを除去することは、正しい分類結果であっても微細な地物が欠落する危険がある (Eastman 2003; Zhu 2013). 本研究では、複数の機械学習を用いて高分解能衛星画像に対して土地被覆分類処理を行った。さらに、パターン認識の分野で開発された **Multiple classifier systems (MCS)** ; (Kittler et al. 1998) を応用することにより、それぞれの分類結果を統合し、最終的な分類結果を出力した。その結果、個別の機械学習による分類手法では、非常に高い分類精度が示されたが、どの分類結果においても孤立ピクセルは必ず発生していた。一方、MCS による分類結果は、高い精度を保ちつつ、個々の分類器と比較し孤立ピクセルの数を約 70% 程度減少させることを明らかにした。このことは、MCS は孤立ピクセルの低減に非常に有効であることを示した。従来の手法と本研究の手法を比較すると、従来の手法は、フィルタリング処理により、正誤を考慮せずに孤立ピクセルを低減させるが、本研究の結果は、個々の分類器による高い分類精度を維持しつつ、個別の分類器ごとに異なる位置に発生する誤分類を除去できることを示した。

5.2.2. 第3章のまとめ

2011年3月11日の東日本大震災に伴う大津波による攪乱と、その後の復旧・復興事業による人為的影響は、東日本の太平洋沿岸に広域かつ甚大な被害をもたらした。この攪乱による被災景観域の生態系は大きく変化した (Hara 2014)。特に、森林分布は急激かつ大きく変化した (趙ほか 2013; Hara et al. 2016), 森林を生息地や移動経路として利用する生物にとっては生息地間の移動が困難になることが予想される。被災景観の森林の連結性を明らかにすることは、大規模攪乱による生態系への影響を考える上で重要である。一方、連結性の定量解析に用いる指数を客観的に選択する指針は確立されておらず (Saura and Pascual-Hortal 2007), 被災景観域の連結性変化を適切に評価できる指数は不明である。本対象地を研究対象とすることは、連結性の定量評価手法に係る研究を進める上で有用である。本研究の目的は、大津波と復旧・復興事業の影響による森林パッチネットワークの変化に伴う連結性の経年変化を定量的に明らかにすることである。まず、

震災直後から 5 年経過時点（2010 年，2011 年，2012 年および 2016 年）に亘る森林パッチ分布図を作成した．次に，森林パッチネットワーク図を作成することで生物の移動経路の変化を可視化した．最後に，森林パッチネットワーク図の連結性を，Integral index of connectivity (IIC) と Class coincidence probability (CCP) の 2 つの連結性に係る指数を用いて解析することで，津波および人為の影響に伴う攪乱が森林パッチネットワークの連結性に与える変化を定量的に明らかにした．森林パッチネットワーク図の作成により，震災前と比べ，震災直後から震災後 5 年間までの間に，パッチの面積縮小や消失に伴いパッチ間の距離は広がり，生物による移動は困難になっていることが示唆された．震災後 5 年経過時点では，小面積パッチの出現により，ネットワークの一部が拡大した箇所は認められたが，震災前と比べると，全体のネットワークとしては生物の移動経路の冗長性が大きく低下していることが示唆された．また，連結性指数による定量評価では，IIC によって森林パッチの連結性は，津波の影響により大きく低下し，復旧・復興事業によって，その低下はさらに進んでいたことが明らかになった．CCP では，ネットワークの回復を指数の値に表現できていたことが考えられた．近年の連結性の定量化を行う研究の多くは，IIC のみが頻繁に用いられているが (Clauzel et al. 2015; Hernandez et al. 2015; Huang et al. 2018; Volk et al. 2018)，本研究では，IIC と CCP を併用し，連結性を評価したことによりすることで，単一の指数では表現が困難な経年変化を定量的に表せることを明らかにした．

5.2.3. 第 4 章のまとめ

津波により森林が大面積にわたって流出するなどした大規模災害時の復興事業において，景観スケールでの生物多様性の保持の観点から，野生生物の生息地となる森林パッチの連結性 (connectivity) を高めることが肝要である．特に仙台市の被災地の多くは非住居地域となり (仙台市 2017)，公園整備や公共施設の立地などに伴う森林パッチ創出が想定され，生物多様性保持における効果的な配置計画が求められる．このような復興事業において，森林域や公園を配置する領域を考慮することで，森林パッチの連結性を高めることが期待できる．これまでの生態学に関する研究において，パッチ創出の配置を考慮した景観再生が連結性の向上に効果的であることが示されてきた (Haddad 2000; Simberloff et al. 2002; Jordán et al. 2003)．また，生態系や生物多様性を保全する際には，保全対象を明確にし，かつ，優先順位をつけることで，予算や時間を考慮した最善な保全計画を考えることができることも指摘されている (Zetterberg et al. 2010; Foltête et al. 2014; Gurrutxaga and Saura 2014)．一方で，これまでの連結性を応用した研究においては，連結性への負の影響に関連して，人為的な生息地の改変等に対する研究

が進められてきた。例えば、開発などにより生息地が消失するなどの負の影響に対して、連結性を維持していくのに重要な生息地パッチを特定する方法が開発されてきた(Pascual-Hortal and Saura 2006; Urban et al. 2009; Bodin and Saura 2010; Saura and Rubio 2010; Ernst 2014)。つまりは、消失による影響が強いパッチの特定手法である。しかし、復旧・復興に向けては、消失による影響ではなく、パッチを新たに創出すべき配置を検討する必要がある。そこで、本研究では、大規模災害時の復興事業において、連結性を効果的に高めることができる森林パッチ領域の選定方法の開発を目的とした。

仙台市の七北田川と名取川に挟まれた被災地を対象とし、地理情報システム(GIS)を用いて、森林パッチ創出による連結性の向上度を示す空間分布図を作成した。具体的には、現状の森林パッチ分布図を作成するために、2016年4月5日に得られたRapidEye衛星画像を用いて、土地被覆分類処理を実施した。土地被覆分類結果のうち耕作地を森林パッチ創出が可能な領域として設定した上で、耕作地内に1つの森林パッチを無作為に発生させ、森林パッチ発生の前後で連結性がどの程度向上したかを解析した。この解析を1000回反復し、それぞれの結果に空間的内挿処理を実施することで、連結性の向上度を示す空間分布図を作成した。連結性については、連結性積算指数(IIC: Integral Index of Connectivity)と、クラス一致確率(CCP: Class Coincidence Probability)を用いることで、パッチ増減による景観スケールでの生物の移動の容易さと、森林パッチの空間的広がり进行评估した。また、その際には3つの距離クラス(短: 100 m, 中: 800 m, 長: 2500 m)を設定した。その結果、森林パッチ創出による連結性向上効果が高い、あるいは、低い森林パッチの創出領域の空間分布を可視化することができた。生息地が分断した景観にとっては、たとえ面積が僅かな孤立した樹林であっても、移動経路として利用する生物にとって適切な距離に分布していれば連結性を強化することができる(Boscolo et al. 2008)。また、人為的に創出した森林パッチは、必ずしも生物の生息地としては良質ではないかもしれないが、休憩地や避難場所として有効である(Haddad and Tewksbury 2005)。これらのことから、本被災景観域のような大規模災害時には、より迅速に森林パッチネットワークを回復させることが、健全な生態系や生物多様性の維持と管理が重要だと考えられた。本研究のような定量的解析は、大規模な攪乱後の生態系の連結性を改善する際に有用である。

5.3. 研究分野への貢献と今後の展望

5.3.1. 多重分類器システムを用いた土地被覆分類

衛星リモートセンシング画像を用いた土地被覆分類処理に、機械学習の応用的手法である多重分類器システムを取り入れることで、高い精度を保ちつつ、個々の分類器の性能に起因する微細な誤分類を除去できることが明らかになった。本手法の大きな利点として、分類処理を行う際、特定の1つの分類器を選択する必要がないことがあげられる。衛星画像を用いた分類処理を行う際には、画像に加えて、トレーニングデータの整備、さらには、クラス数を設定した上で、各データの特徴を考慮し似合った分類手法を選択する必要がある。対して、この利点により、特定の分類器を選択せずに、複数の分類器による結果を組み合わせることで最良な結果が得られる。このことから、災害時など、迅速な状況の把握が必要な際に役立つ研究であることが考えられる。

課題として、多重分類器システムを実施する上で、個々の分類器の集計方法を検討することは重要である。多重分類器システムに用いる集計方法はこれまでも研究が進められており、機械学習による個々の分類結果をさらに機械学習で処理する方法(Du et al. 2012)、集団の意思決定に利用されてきた分析手法を組み入れた方法(Yang et al. 2014)などが提案されている。今後の研究では、汎用的かつ最良な結果が得られる集計方法の開発が期待される。また、機械学習による分類器の精度が非常に高い水準になるにつれ、分類器の比較をする際には、全体精度やカッパ係数による単純な精度値を用いることは困難になってきた(Hirayama et al. 2018)。多重分類器の結果を比較する際にも同様で、実際の分類結果のクラスの分布に違いがあっても、リモートセンシング分野で頻繁に行われている精度値の比較では、差を見出すことが困難である。本研究では、マクネマー検定による検定と、孤立ピクセルの数による比較を行い、多重分類器による結果の優位性を示すことができた。今後の関連する研究では、本研究のように分類精度とは別に、目的に応じた比較基準を設けることが必要になるだろう。

5.3.2. 連結性の定量的評価に係る研究と社会実装

第3章では、被災景観域に向けた連結性変化の定量評価手法を確立させた上で、津波発生以降における森林パッチの連結性の変遷を定量的に明らかにした。

本手法で用いた手法は、パッチのネットワーク化による可視化に加えて、連結性指数による定量化である。これまでの連結性解析手法に関しては、3つの概念に大分され研究が進められてきた(Tischendorf and Fahrig 2000; Calabrese and Fagan 2004)。それぞれ、物理的な構造から推定する構造的連結性(Structural connectivity); (Dunning et al. 1992), パッチ間における生物の移入や移出について実際に観測する機能的連結性(Functional connectivity), 特定の生物の移動距離等の生態的前提条件と、パッチ面積や配置等の物理的条件を組み合わせる連結性を測定する方法である潜在的連結性(Potential connectivity); (Calabrese and Fagan 2004)である。本研究で用いた連結性解析手法は、景観構造(パッチ分布)に加えて、複数の生物の移動能力を設定するための連結距離を設定し、連結性を推定したことからは潜在的連結性の概念に近いと考えられる。一方で、機能的連結性以外の概念は実際の生物の連結性を表せていない可能性があることが指摘されている(With 1997; Winfree et al. 2005; Kadoya 2009)。このことから、本被災景観域における連結性研究の発展に向けては、Tomita and Kanno (2019)のような現地の植物種子分布の調査結果等と、本研究の解析結果を組み合わせることで、より実際の生物の応答を解析に反映させた連結性評価につながることを期待できる。

第4章は、連結性の応用研究を社会実装するに向けた研究である。連結性向上に効果的な森林パッチ創出領域の選定手法を開発したことで、連結性向上効果を定量的かつ空間明示的に表すことができた。これまでの連結性研究では、生態系や生物多様性の保全に係る計画の初期段階では、現実的で実行可能な提案が望まれるものの(Zetterberg et al. 2010; Foltête et al. 2014; Gurrutxaga and Saura 2014), 従来知見から対応できる現象は、パッチ消失によるリスクの検討がほとんどであった(Pascual-Hortal and Saura 2006; Urban et al. 2009; Bodin and Saura 2010; Saura and Rubio 2010; Ernst 2014)。一方で、生息地が分断した景観にとっては、たとえ面積が僅かな孤立した樹林であっても連結性を強化することができることや(Boscolo et al. 2008), 必ずしも生物の生息地としては良質とは言えない人為的に創出させたパッチでも、かえって生物の移動を促進する効果があることもあること(Haddad and Tewksbury 2005)を踏まえると、本研究で開発した手法は、パッチ消失後の復興事業に向けた検討に有効だと考えられる。本手法で実施したシミュレーションは、小面積パッチの創出であった。さらに、実際には様々な状況をシミュレートすることができる。たとえば、実際の事業計画において、

公園の設置場所を決める際、予定する公園の形状や大きさを反映させたシミュレーションを実施することも可能である。自然災害の規模や頻度が高まる中、本研究により連結性向上に効果的な選定手法が開発できたことは、今後の生態系を考慮した復興事業等の意思決定に向けた、迅速な情報提供に貢献できるものとする。

第6章 結論

本博士論文全体の目的は、被災景観域に向けた連結性の定量評価手法を確立させ、今後の連結性向上に配慮した生態系管理に向けた定量的解析手法の開発を行うことである。

このために、第1章では、次のように3つの研究課題をまとめた。1つ目の課題として、被災直後の広域データの取得手法の開発に関して、従来の土地被覆分類手法では、孤立ピクセルが多量に発生するため、連結性研究に用いるデータとしては不十分である点。2つ目の課題として、被災景観域を対象とした連結性変化の定量解析手法の確立に関して、低頻度大規模攪乱と、その後の人為的影響下における連結性変化を解明するためには、本現象の解明に向けた連結性定量化手法を確立させる必要がある点。最後に3つ目の課題として、連結性の向上や回復に効果的な領域の選定手法の開発に関して、被災景観域において、連結性を効果的に高めるためには、新たな森林創出による連結性への効果を空間明示的に示すことが肝要だが、森林創出領域ごとの連結性の向上度の違いを空間明示的に示す手法を開発する必要がある点があげられた。

これらの研究課題を解決するため、博士論文の第2章から第4章を通し、3つの課題を克服するための研究を進めた。まず、第2章では、機械学習を応用した土地被覆分類手法を検討し、高精度かつ孤立ピクセルを大幅に低減させた土地被覆図を作成した。次に、第3章では、低頻度大規模攪乱による連結性への影響と、その後の人為的な影響による森林パッチ変化に伴う連結性への影響を明らかにするための連結性の定量的評価手法を確立し、津波発生以降の連結性変化を定量的に明らかにした。最後に、第4章では、連結性向上に効果的な森林パッチ創出領域を空間明示的に示す手法を開発した。

本研究によって、被災景観における連結性解析・評価の有効性を明らかにしたことで、自然災害が多発する日本国内外へ向けた、生物の保全や回復に関する着眼点となることが考えられる。また、災害直後のデータ取得から連結性解析、そして、連結性の効果的な向上・回復に向けた適地予測までの一貫した流れを示したことからは、連結性研究の社会実装に向け、被災景観域の生態系や生物多様性に配慮した復旧・復興事業計画に向けた迅速な対応に向けたひとつの事例となることが期待できる。

謝辞

本研究を遂行し博士学位論文をまとめるにあたり、多くの御指導と御鞭撻を賜りました、東京情報大学総合情報学部 原慶太郎教授、東京情報大学総合情報学部 富田瑞樹准教授に謹んで深謝の意を表します。先生方には、研究生活において、研究活動の面のみならず多岐にわたる御支援を頂き、多大な御恩を賜りました。重ねて心より御礼申し上げます。ならびに、貴重な助言と御教示を頂きました、総合情報学部 花田真樹教授、名古屋大学環境学研究科 夏原由博教授に謹んで感謝の意を申し上げます。

研究生活に亘って、講義や個別の御指導を通じ、衛星リモートセンシング分野の研究面において、東京情報大学総合情報学部 浅沼一男教授および、同学部 朴鍾杰准教授より多くの御指導を頂きました。英文での論文投稿や国際学会の発表においては、東京情報大学総合情報学部 ケビンショート教授に多大なる御指導頂きました。東京情報大学総合情報学部 研究員 Ram C. Sharma 博士と、リモートセンシング技術の議論を重ねられたことは、貴重な経験となりました。深く感謝の意を申し上げます。

また、指導教授である原慶太郎先生が代表を務めた研究プロジェクトでは、「地域の自然と歴史に学ぶ里浜復興」研究会に所属する生態系や歴史に関わる研究分野の先生方と一緒に、事務局兼協力研究員として、研究会メンバーの一人に加えて頂きました。研究プロジェクトに係わった2年間には、何ものにも代え難い、貴重な経験をさせて頂きました。研究会メンバーである、東北学院大学教養学部 平吹喜彦教授、同学部 柳澤英明准教授、広島工業大学環境学部 岡浩平准教授、東北学院大学文学部 菊池慶子教授、東北学院大学 千葉一非常勤講師、宮城県立大学事業構想学部 佐々木秀之准教授に、深く感謝の意を申し上げます。

本研究は、以上の方々を始め、景観生態学会、写真測量学会に所属する先生方、他にも多くの御指導と御支援を頂きました。ここで関係の皆様へ感謝致します。私生活の面で多くの御支援くださいました家族には、深謝の意を表します。

最後に、東京情報大学では、2005年から2009年の間、総合情報学部環境情報学科で学部生生活を送り、2015年から2020年の間には、大学院総合情報学研究科の博士前期課程と博士後期課程の大学院生として、充実した大学生活を送ってきました。東京情報大学からは、未来を切り拓く奨学金による経済的援助をして頂いたことに、心より感謝しています。これから先も、東京情報大学への帰属意識を持ち続け、そして、日々進化する情報技術を利活用して未来を切り拓けるよう、大学生活で培った現代実学主義の理念を実践し、精進を重ね、邁進していきます。

引用文献

- Bakker JP, Poschlod P, Strykstra RJ, Bekker RM, Thompson K (1996) Seed banks and seed dispersal: important topics in restoration ecology. *Acta Bot Neerl* 45:461–490. doi: 10.1111/j.1438-8677.1996.tb00806.x
- Beckmann M, Ebecken NFF, Lima BSL, Lima P De (2015) A KNN Undersampling Approach for Data Balancing. *J Intell Learn Syst Appl* 7:104–116. doi: 10.4236/jilsa.2015.74010
- Benediktsson JA, Chanussot J, Fauvel M (2007) Multiple Classifier Systems in Remote Sensing: From Basics to Recent Developments. In: Haindl M, Kittler J, Roli F (eds) *Multiple Classifier Systems: 7th International Workshop, MCS 2007, Prague, Czech Republic, May 23-25, 2007. Proceedings.* Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp 501–512
- Blaschke T, Lang S, Lorup E, Strobl J, Zeil P (2000) Object-Oriented Image Processing in an Integrated GIS / Remote Sensing Environment and Perspectives for Environmental Applications. *Environ Inf Planning, Polit Public* 555–570
- Bodin Ö, Saura S (2010) Ranking individual habitat patches as connectivity providers: Integrating network analysis and patch removal experiments. *Ecol Modell* 221:2393–2405. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2010.06.017
- Boscolo D, Candia-Gallardo C, Awade M, Metzger JP (2008) Importance of interhabitat gaps and stepping-stones for lesser woodcreepers (*Xiphorhynchus fuscus*) in the Atlantic forest, Brazil. *Biotropica* 40:273–276. doi: 10.1111/j.1744-7429.2008.00409.x
- Breiman L (2001) Random forests. *Mach Learn* 45:5–32. doi: 10.1023/A:1010933404324
- Breiman L (1996) Bagging Predictors. *Mach Learn* 24:123–140. doi: 10.1023/A:1018054314350
- Brewer C (2002) Outreach and partnership programs for conservation education where endangered species conservation and research occur. *Conserv Biol* 16:4–6. doi: 10.1046/j.1523-1739.2002.01613.x
- Cabinet Office Government of Japan (2015) *Disaster Mngement in Japan*
- Calabrese JM, Fagan WF (2004) A comparison-shopper ' s guide to connectivity metrics. *Front Ecol Environ* 2:529–536. doi: 10.1890/1540-

9295(2004)002[0529:ACGTCM]2.0.CO;2

- Carleer AP, Debeir O, Wolff E (2005) Assessment of very high spatial resolution satellite image segmentations. *Photogramm Eng Remote Sensing* 71:1285–1294. doi: 10.1117/12.511027
- Chandra A, Yao X (2006) Evolving hybrid ensembles of learning machines for better generalisation. *Neurocomputing* 69:686–700
- Chen T, Guestrin C (2016) XGBoost: A Scalable Tree Boosting System. *Kdd* 1–10. doi: 10.1145/2939672.2939785
- Clauzel C, Foltête J-C, Girardet X, Vuidel G (2017) Graphab 2.2 software user manual. <https://sourcesup.renater.fr/graphab/download/manual-2.2-en.pdf>
- Clauzel C, Xiqing D, Gongsheng W, Giraudoux P, Li L (2015) Assessing the impact of road developments on connectivity across multiple scales: Application to Yunnan snub-nosed monkey conservation. *Biol Conserv* 192:207–217. doi: 10.1016/j.biocon.2015.09.029
- Cohen J (1960) A coefficient of agreement for nominal scales. *Educ Psychol Meas* 20:37–46
- Crooks KR, Sanjayan M (2006) Connectivity conservation: maintaining connections for nature. *Connect Conserv Cambridge, UK Cambridge Univ Press* 1–10. doi: 10.1017/cbo9780511754821.001
- DeFries R., Chan JC-W (2000) Multiple Criteria for Evaluating Machine Learning Algorithms for Land Cover Classification from Satellite Data. *Remote Sens Environ* 74:503–515. doi: 10.1016/S0034-4257(00)00142-5
- Du P, Xia J, Zhang W, Tan K, Liu Y, Liu S (2012) Multiple classifier system for remote sensing image classification: A review. *Sensors* 12:4764–4792. doi: 10.3390/s120404764
- Dunning JB, Danielson BJ, Pulliam HR (1992) Ecological processes that affect populations in complex landscapes. *Oikos* 169–175
- Eastman JR (2003) *IDRISI Kilimanjaro: guide to GIS and image processing*. Worcester, MA: Clark Labs, Clark University
- Ernst BW (2014) Quantifying landscape connectivity through the use of connectivity response curves. *Landsc Ecol* 29:963–978. doi: 10.1007/s10980-014-0046-7

- Ewers RM, Thorpe S, Didham RK (2007) Synergistic interactions between edge and area effects in a heavily fragmented landscape. *Ecology* 88:96–106. doi: 10.1890/0012-9658(2007)88[96:SIBEAA]2.0.CO;2
- Fagan WF, Calabrese JM (2006) Quantifying connectivity: balancing metric performance with data requirements. In: Crooks KR, Sanjayan M (eds) *Connectivity Conservation*. Cambridge University Press, Cambridge, pp 297–317
- Fahrig L, Merriam G (1985) Habitat patch connectivity and population survival. *Ecology* 66:1762–1768. doi: 10.2307/2937372
- Foltête J, Clauzel C, Vuidel G (2012) A software tool dedicated to the modelling of landscape networks. *Environ Model Softw* 38:316–327. doi: 10.1016/j.envsoft.2012.07.002
- Foltête JC, Girardet X, Clauzel C (2014) A methodological framework for the use of landscape graphs in land-use planning. *Landsc Urban Plan* 124:140–150. doi: 10.1016/j.landurbplan.2013.12.012
- Forman RTT (1995) *Land Mosaics: The Ecology of Landscapes and Regions*
- Gitelson A, Merzlyak MN (1994) Spectral Reflectance Changes Associated with Autumn Senescence of *Aesculus-hippocastanum* L. and *Acer-platanoides* L. Leaves - Spectral Features and Relation to Chlorophyll Estimation. *J Plant Physiol* 143:286–292. doi: 10.1016/S0176-1617(11)81633-0
- Guo X, Coops NC, Gergel SE, Bater CW, Nielsen SE, Stadt JJ, Drever M (2018) Integrating airborne lidar and satellite imagery to model habitat connectivity dynamics for spatial conservation prioritization. *Landsc Ecol* 33:1–21. doi: 10.1007/s10980-018-0609-0
- Gurrutxaga M, Saura S (2014) Prioritizing highway defragmentation locations for restoring landscape connectivity. *Environ Conserv* 41:157–164. doi: 10.1017/S0376892913000325
- Haas CA (1995) Dispersal and Use of Corridors by Birds in Wooded Patches on an Agricultural Landscape. *Conserv Biol* 9:845–854. doi: 10.1046/j.1523-1739.1995.09040845.x
- Haddad N (2000) Corridor Length and Patch Colonization by a Butterfly, *Junonia coenia*. *Conserv Biol* 14:738–745. doi: 10.1046/j.1523-1739.2000.99041.x
- Haddad NM, Brudvig LA, Clobert J, Davies KF, Gonzalez A, Holt RD, Lovejoy TE,

- Sexton JO, Austin MP, Collins CD, Cook WM, Damschen EI, Ewers RM, Foster BL, Jenkins CN, King AJ, Laurance WF, Levey DJ, Margules CR, et al (2015) Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth's ecosystems. *Sci Adv* 1:e1500052. doi: 10.1126/sciadv.1500052
- Haddad NM, Tewksbury JJ (2005) Low-quality habitat corridors as movement conduits for two butterfly species. *Ecol Appl* 15:250–257. doi: 10.1890/03-5327
- Hara K (2014) Damage to coastal vegetation due to the 2011 tsunami in northeast Japan and subsequent restoration process: analyses using remotely sensed data. *Glob Environ Res* 18:27–34
- Hara K, Zhao Y, Tomita M, Kamagata N, Li Y (2016) Impact of the Great East Japan Earthquake and Tsunami on Coastal Vegetation and Landscapes in Northeast Japan: Findings Based on Remotely Sensed Data Analysis. In: Urabe J, Nakashizuka T (eds) *Ecological Impacts of Tsunamis on Coastal Ecosystems*. Springer Japan, pp 253–269
- 原慶太郎・樋口広芳 (2013) 東日本大震災が生態系に及ぼした影響. *地球環境* 18:23-33
- Harada I, Hara K, Park J, Asanuma I, Tomita M, Hasegawa D, Short K, Fujihara M (2015) Monitoring of rapid land cover changes in eastern Japan using Terra/MODIS data. *ISPRS - Int Arch Photogramm Remote Sens Spat Inf Sci XL-7/W3*:403–408. doi: 10.5194/isprsarchives-XL-7-W3-403-2015
- 林智幸・新見直子 (2005) 厳格化の観点からの多重比較法の整理. *広島大学大学院教育学研究科紀要* 54:189-196
- Hernandez A, Miranda M, Arellano EC, Saura S, Ovalle C (2015) Landscape dynamics and their effect on the functional connectivity of a Mediterranean landscape in Chile. *Ecol Indic* 48:198–206. doi: 10.1016/j.ecolind.2014.08.010
- Hirayama H, Tomita M, Hara K (2018) An Examination of Evaluation Method for the Classifiers with A Very High Accuracy in Land Cover Classifiers. *Proceedings, Asian Conf Remote Sens* 5:3155–3159
- Honorato R, Crouzeilles R, Ferreira MS, Grelle CEV (2015) The effects of habitat availability and quality on small mammals abundance in the Brazilian Atlantic Forest. *Nat e Conserv* 13:133–138. doi: 10.1016/j.ncon.2015.11.010
- Huang Y, Xing A, Cao M, Zhang S, Li Z, Huang Y, Zhuo Z, Zhang L, Sun Z (2018)

- Prioritizing Abandoned Mine Lands Rehabilitation: Combining Landscape Connectivity and Pattern Indices with Scenario Analysis Using Land-Use Modeling. *ISPRS Int J Geo-Information* 7:305. doi: 10.3390/ijgi7080305
- Huete A, Didan K, Miura T, Rodriguez EP, Gao X, Ferreira LG (2002) Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sens Environ* 83:195–213
- Ishihara M, Tadono T (2017) Land cover changes induced by the great east Japan earthquake in 2011. *Sci Rep* 7:45769. doi: 10.1038/srep45769
- Jaeger JAG (2000) Landscape division, splitting index, and effective mesh size: new measures of landscape fragmentation. *Landsc Ecol* 15:115–130. doi: 10.1023/A:1008129329289
- Jordán F, Báldi A, Orci K-M, Rácz I, Varga Z (2003) Characterizing the importance of habitat patches and corridors in maintaining the landscape connectivity of a *Pholidoptera transsylvanica* (Orthoptera) metapopulation. *Landsc Ecol* 18:83–92. doi: 10.1023/A:1022958003528
- Kadoya T (2009) Assessing functional connectivity using empirical data. *Popul Ecol* 51:5–15. doi: 10.1007/s10144-008-0120-6
- Keitt TH, Urban DL, Milne BT (1997) Detecting Critical Scales in Fragmented Landscapes. *Conserv Ecol* 1:4
- Kindlmann P, Burel F (2008) Connectivity measures: A review. *Landsc Ecol* 23:879–890. doi: 10.1007/s10980-008-9245-4
- Kittler J, Hatef M, Duin RPW, Matas J (1998) On Combining Classifiers. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell* 20:226–239. doi: 10.1109/34.667881
- 国土地理院 (2011a) 津波浸水範囲の土地利用別面積について. In: 国立国会図書館デジタルコレクション. <http://dl.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/6008442>. Accessed 16 Dec 2019
- 国土地理院 (2011b) 10万分1浸水範囲概況図. <http://www.gsi.go.jp/common/000060133.pdf>. Accessed 7 Aug 2019
- 国土地理院 (2011c) 津波浸水範囲土地利用メッシュ中心経緯度データ. <http://www.gsi.go.jp/chirijoho/chirijoho40022.html>. Accessed 1 Jan 2017
- Knight AT, Cowling RM, Rouget M, Balmford A, Lombard AT, Campbell BM (2008) Knowing but not doing: Selecting priority conservation areas and the research-

- implementation gap. *Conserv Biol* 22:610–617. doi: 10.1111/j.1523-1739.2008.00914.x
- Kuncheva LI, Whitaker CJ (2003) Measures of diversity in classifier ensembles and their relationship with the ensemble accuracy. *Mach Learn* 51:181–207. doi: 10.1023/A:1022859003006
- Lek S, Guégan J-F (1999) Artificial neural networks as a tool in ecological modelling, an introduction. *Ecol Modell* 120:65–73
- Li H, Hu G, Li J (2008) Multi-Classifer Systems (MCSs) of Remote Sensing Imagery Classification Based on Texture Analysis. In: Intelligence A in C and (ed) *Advances in Computation and Intelligence: Third International Symposium, ISICA 2008 Wuhan, China, December 19-21, 2008 Proceedings*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp 740–749
- Li X, Chen W, Cheng X, Wang L (2016) A comparison of machine learning algorithms for mapping of complex surface-mined and agricultural landscapes using ZiYuan-3 stereo satellite imagery. *Remote Sens* 8:. doi: 10.3390/rs8060514
- Lutz Eckstein R, Hölzel N, Danihelka J (2006) Biological Flora of Central Europe: *Viola elatior*, *V. pumila* and *V. stagnina*. *Perspect Plant Ecol Evol Syst* 8:45–66. doi: 10.1016/j.ppees.2006.01.001
- 松本秀明・吉田真幸・熊谷真樹 (2013) 仙台平野中部にみられる弥生時代の津波堆積物. *人間情報学研究* 18:79–94
- Mcfeeters SK (1996) The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *Int J Remote Sens* 17:1425–1432. doi: 10.1080/01431169608948714
- McNemar Q (1947) Note on the sampling error of the difference between correlated proportions or percentages. *Psychometrika* 12:153–157. doi: 10.1007/BF02295996
- McRae BH, Kavanagh DM (2011) *Linkage Mapper Connectivity Analysis Software*. The Nature Conservancy, Seattle WA
- Melgani F, Bruzzone L (2004) Classification of hyperspectral remote sensing images with support vector machines. *Geosci Remote Sensing, IEEE Trans* 42:1778–1790. doi: 10.1109/TGRS.2004.831865
- Minor ES, Urban DL (2008) A graph-theory framework for evaluating landscape connectivity and conservation planning. *Conserv Biol* 22:297–307. doi:

10.1111/j.1523-1739.2007.00871.x

Moreno-Seco F, Iñesta J, León P De, Micó L (2006) Comparison of classifier fusion methods for classification in pattern recognition tasks. *Lect Notes Comput Sci* 4109:705–713. doi: 10.1007/11815921

Mountrakis G, Im J, Ogole C (2011) Support vector machines in remote sensing: A review. *ISPRS J Photogramm Remote Sens* 66:247–259

Neubert M, Herold H, Meinel G (2006) Evaluation of Remote Sensing Image Segmentation Quality – Further Results and Concepts. *1st Int Conf Objectbased Image Anal OBIA06* 1–6

Nixon MS, Aguado AS (2008) *Feature Extraction & Image Processing*. Academic Press, Oxford

大澤剛士・上野裕介 (2017) 生態学研究と実務の間に存在するギャップを考える. *日本生態学会誌* 67:257–265. doi: 10.18960/seitai.67.2_257

Pascual-Hortal L, Saura S (2006) Comparison and development of new graph-based landscape connectivity indices: Towards the prioritization of habitat patches and corridors for conservation. *Landsc Ecol* 21:959–967. doi: 10.1007/s10980-006-0013-z

Perez-Hernandez CG, Vergara PM, Saura S, Hernandez J (2014) Do corridors promote connectivity for bird-dispersed trees? The case of *Persea lingue* in Chilean fragmented landscapes. *Landsc Ecol* 77–90. doi: 10.1007/s10980-014-0111-2

Philip GM, Watson DF (1982) A precise method for determining contoured surfaces. *APPEA J* 22:205–212

Phillips E, Pugh DS (2010) *How to get a PhD*. (4th edition); 角谷 快彦 (翻訳). Shuppan Sapoto Daikisha

Phillips EM (1993) *The Concept of Quality in the PhD* in DJ Cullen. Qual PhD Educ

Planet.com (2016) *Rapideye Imagery Product Specifications*.

[https://www.planet.com/products/satellite-imagery/files/160625-RapidEye Image-Product-Specifications.pdf](https://www.planet.com/products/satellite-imagery/files/160625-RapidEye%20Image-Product-Specifications.pdf). Accessed 1 Jan 2017

Rees (2005) *リモートセンシングの基礎【第2版】*, 2nd edn. 森北出版株式会社. (久世宏明・飯倉善和・竹内章司・吉森久 訳)

Ritchie H, Roser M (2019) *Natural Disasters*. In: OurWorldInData.org.

- <https://ourworldindata.org/natural-disasters>. Accessed 4 Jun 2019
- 林野庁 (2012) 平成24年度 森林・林業白書.
https://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/24hakusyo/190411_7.html.
Accessed 16 Dec 2019
- Rouse Jr J, Haas RH, Schell JA, Deering DW (1974) Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *NASA Spec Publ* 351:309
- Saura S, Pascual-Hortal L (2007) A new habitat availability index to integrate connectivity in landscape conservation planning: Comparison with existing indices and application to a case study. *Landsc Urban Plan* 83:91–103. doi: 10.1016/j.landurbplan.2007.03.005
- Saura S, Rubio L (2010) A common currency for the different ways in which patches and links can contribute to habitat availability and connectivity in the landscape. *Ecography (Cop)* 33:523–537. doi: 10.1111/j.1600-0587.2009.05760.x
- Saura S, Torne J (2009) Conefor Sensinode 2 . 2 : A software package for quantifying the importance of habitat patches for landscape connectivity. 24:135–139. doi: 10.1016/j.envsoft.2008.05.005
- Sekizawa R, Ichii K, Kondo M (2015) Satellite-based detection of evacuation-induced land cover changes following the Fukushima Daiichi nuclear disaster. *Remote Sens Lett* 6:824–833. doi: 10.1080/2150704X.2015.1076207
- Sellers PJ, Meeson BW, Hall FG, Asrar G, Murphy RE, Schiffer R a., Bretherton FP, Dickinson RE, Ellingson RG, Field CB, Huemmrich KF, Justice CO, Melack JM, Roulet NT, Schimel DS, Try PD (1995) Remote sensing of the land surface for studies of global change: Models — algorithms — experiments. *Remote Sens Environ* 51:3–26. doi: 10.1016/0034-4257(94)00061-Q
- 仙台市 (2017) 仙台市震災復興計画.
<http://www.city.sendai.jp/shinsaifukko/shise/daishinsai/fukko/kanren/kekaku.html>.
Accessed 20 Jan 2019
- Sharma RC, Hara K, Hirayama H, Harada I, Hasegawa D, Tomita M, Geol Park J, Asanuma I, M. Short K, Hara M, Hirabuki Y, Fujihara M, Tateishi R (2017) Production of Multi-Features Driven Nationwide Vegetation Physiognomic Map and Comparison to MODIS Land Cover Type Product. *Adv Remote Sens* 06:54–65. doi: 10.4236/ars.2017.61004

- Simberloff D, A. Farr J, Cox J, Mehlman D (2002) Movement Corridors: Conservation Bargains or Poor Investments?
- Sims DA, Gamon JA (2002) Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Remote Sens Environ* 81:337–354. doi: 10.1016/S0034-4257(02)00010-X
- Stuckens J, Coppin PR, Bauer ME (2000) Integrating contextual information with per-pixel classification for improved land cover classification. *Remote Sens Environ* 71:282–296. doi: 10.1016/S0034-4257(99)00083-8
- Sutherland WJ, Spiegelhalter D, Burgman MA (2013) Twenty tips for interpreting scientific claims. *Nature* 503:335–337. doi: 10.1038/503335a
- Taylor PD, Fahrig L, Henein K, Merriam G (1993) Connectivity is a vital element of landscape structure. *Oikos* 68:571–573. doi: 10.2307/3544927
- Tischendorf L, Fahrig L (2000) On the usage and measurement of landscape connectivity. *Oikos* 90:7–19. doi: 10.1034/j.1600-0706.2000.900102.x
- 趙憶・富田瑞樹・原慶太郎 (2013) SPOT衛星データを用いた仙台沿岸域における震災前後の景観変化の解析. *自然環境復元研究* 6:43–49
- Tomita M, Kanno H (2019) Regional landscape-scale comparison of species composition and recruitment in remnant tree patches 3 years after the 2011 Great East Japan Earthquake and tsunami. *Landsc Ecol Eng* 15:185–197. doi: 10.1007/s11355-018-0364-z
- 富田瑞樹・平吹喜彦・菅野洋・原慶太郎 (2014) 低頻度大規模攪乱としての巨大津波が海岸林の樹木群集に与えた影響. *保全生態学研究* 19:163–176. doi: 10.1007/978-4-431-56448-5_22
- Tucker MA, Böhning-Gaese K, Fagan WF, Fryxell JM, Van Moorter B, Alberts SC, Ali AH, Allen AM, Attias N, Avgar T, Bartlam-Brooks H, Bayarbaatar B, Belant JL, Bertassoni A, Beyer D, Bidner L, van Beest FM, Blake S, Blaum N, et al (2018) Moving in the Anthropocene: Global reductions in terrestrial mammalian movements. *Science* (80-) 359:466–469. doi: 10.1126/science.aam9712
- Turner MG, Gardner RH, O'Neill R V (2004) 景観生態学：生態学からの新しい景観理論とその応用. 文一総合出版. (中越信和・原慶太郎 監訳)
- Urban D, Keitt T (2001) Landscape connectivity: a graph-theoretic perspective. *Ecology* 82:1205–1218

- Urban DL, Minor ES, Treml EA, Schick RS (2009) Graph models of habitat mosaics. *Ecol. Lett.* 12:260–273
- Vasudev D, Fletcher RJ, Goswami VR, Krishnadas M (2015) From dispersal constraints to landscape connectivity: Lessons from species distribution modeling. *Ecography (Cop)* 38:967–978. doi: 10.1111/ecog.01306
- Vogt P, Riitters KH, Iwanowski M, Estreguil C, Kozak J, Soille P (2007) Mapping landscape corridors. *Ecol Indic* 7:481–488. doi: 10.1016/j.ecolind.2006.11.001
- Volk XK, Gattringer JP, Otte A, Harvolk-Schöning S (2018) Connectivity analysis as a tool for assessing restoration success. *Landsc Ecol* 1–17. doi: 10.1007/s10980-018-0611-6
- Vos CC, Berry P, Opdam P, Baveco H, Nijhof B, O’Hanley J, Bell C, Kuipers H (2008) Adapting landscapes to climate change: examples of climate-proof ecosystem networks and priority adaptation zones. *J Appl Ecol* 45:1722–1731
- Wilcove DS, Rothstein D, Dubow J, Phillips A, Losos E (1998) Quantifying Threats to Imperiled Species in the United States. *Bioscience* 48:607–615. doi: 10.2307/1313420
- Winfree R, Dushoff J, Crone EE, Schultz CB, Budny R V, Williams NM, Kremen C (2005) Testing simple indices of habitat proximity. *Am Nat* 165:707–717. doi: 10.1086/430009
- With KA (1997) The application of neutral landscape models in conservation biology. *Conserv Biol* 11:1069–1080. doi: 10.1046/j.1523-1739.1997.96210.x
- Yang B, Cao C, Xing Y, Li X (2014) Automatic Classification of Remote Sensing Images Using Multiple Classifier Systems. *Math Probl Eng* 2015:
- Zetterberg A, Mörtberg UM, Balfors B (2010) Making graph theory operational for landscape ecological assessments, planning, and design. *Landsc Urban Plan* 95:181–191. doi: 10.1016/j.landurbplan.2010.01.002
- Zhai H, Zhang H, Zhang L, Li P, Plaza A (2017) A New Sparse Subspace Clustering Algorithm for Hyperspectral Remote Sensing Imagery. *IEEE Geosci Remote Sens Lett* 14:43–47

研究業績

業績一覧

第 2 章

[原著論文（筆頭著者）]

- 2-1 **Hidetake Hirayama**, Ram C. Sharma, Mizuki Tomita and Keitarou Hara. 2018. Evaluating Multiple Classifier System for the Reduction of Salt-and-pepper Noise in Classification of Very-high-resolution Satellite Images. International Journal of Remote Sensing: 1-16. doi: 10.1080/01431161.2018.1528400. [SCI-IF:1.782]
- 2-2 **Hidetake Hirayama**, Mizuki Tomita and Keitarou Hara. 2018. An Examination of Evaluation Method for the Classifiers with A Very High Accuracy in Land Cover Classifiers. Proceedings of the 39th ACRS (Asian Conference on Remote Sensing) Vol.5: 3155-3159.

[国際学会発表]

- 2-3 **Hidetake Hirayama**, Mizuki Tomita, and Keitarou Hara. 2018. An Examination of Evaluation Method for the Classifiers with A Very High Accuracy in Land Cover Classifiers. The 39th ACRS (Asian Conference on Remote Sensing), Kuala Lumpur, Malaysia.

[国内学会発表]

- 2-4 **平山英毅**・富田瑞樹・原慶太郎. 2017. 多重分類器システムを応用したごま塩状の誤分類を低減させる分類手法の検討, 平成 29 年度 写真測量学会, 宇部市文化会館.
- 2-5 **平山英毅**・富田瑞樹・原慶太郎. 2018. 機械学習を用いた高精度な分類器により作成した土地被覆分類図の評価方法の検討, 平成 30 年度 写真測量学会, アオーレ長岡.

第 3 章

[原著論文（筆頭著者）]

- 3-1 **Hidetake Hirayama**, Mizuki Tomita and Keitarou Hara. Examination of quantitative evaluation method for changes in forest habitat connectivity in the

disaster damaged landscape area of northeast Japan. (投稿済み：2019年11月15日)

- 3-2 **Hidetake Hirayama**, Mizuki Tomita, Ram C. Sharma and Keitarou Hara. 2019. Land-cover Maps using Multiple Classifier System for Post-disaster Landscape Monitoring. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XLII-3/W8:139–142.

[アブストラクト査読有]

- 3-3 **Hidetake Hirayama**, Mizuki Tomita and Keitarou Hara. 2019. Analysis of changes in forest habitat connectivity in the disaster damaged Sendai Bay area of northeast Japan. 10th IALE World Congress. Abstract Book Online.

[国際学会発表]

- 3-4 **Hidetake Hirayama**, Mizuki Tomita and Keitarou Hara. 2019. Analysis of changes in forest habitat connectivity in the disaster damaged Sendai Bay area of northeast Japan. 10th IALE World Congress, University of Milano-Bicocca.
- 3-5 **Hidetake Hirayama**, Mizuki Tomita, Ram C. Sharma and Keitarou Hara. 2019. Land-cover Maps using Multiple Classifier System for Post-disaster Landscape Monitoring. GeoInformation For Disaster Management (Gi4DM 2019), The Czech National Library of Technology.

[国内学会発表]

- 3-6 **平山英毅**・富田瑞樹・原慶太郎. 2016. 仙台湾沿岸域における震災に伴う森林パッチの連結性変化の定量的評価, 平成28年度写真測量学会, 都久志会館.
- 3-7 **平山英毅**・富田瑞樹・原慶太郎. 2016. 仙台湾沿岸域における震災前後の森林の連結性の解析. 第13回ネットワーク生態学シンポジウム, オークラアカデミアパークホテル.
- 3-8 **平山英毅**・富田瑞樹・原慶太郎. 2016. 東日本大震災前後の仙台湾沿岸域における連結性を用いた森林パッチの空間的分布の重要度評価. 第26回日本景観生態学会, 酪農学園大学.
- 3-9 **平山英毅**・富田瑞樹・原慶太郎. 2016. 仙台湾沿岸域における東日本大震災前後の森林パッチの抽出と連結性. 第16回自然環境復元学会 全国大会, 東京農工大学.
- 3-10 **平山英毅**・富田瑞樹・原慶太郎. 2017. 被災景観域における森林パッチ消

失が連結性に与える影響度の定量的解析. ELR2017 日本緑化工学会・日本景観生態学会・応用生態工学会合同大会, 名古屋大学.

- 3-11 平山英毅・富田瑞樹・原慶太郎. 2018. 被災景観域における復旧・復興事業に伴う森林パッチネットワークの連結性変化. 第28回 日本景観生態学会, ホテルメリージュ (宮崎).

第4章

[国内学会発表]

- 4-1 平山英毅・富田瑞樹・原慶太郎. 2019. 連結性向上に効果的な森林パッチ創出領域の選定方法の開発. 第29回 日本景観生態学会, 京都学園大学 京都太秦キャンパス (京都).

参考業績

[原著論文 (筆頭著者)]

1. Hidetake Hirayama, Mizuki Tomita, and Keitarou Hara. 2016. Prediction of Changes in Vegetation Distribution Under Climate Change Scenarios Using MODIS Dataset. ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLI-B8: 883–887. doi:10.5194/isprs-archives-XLI-B8-883-2016.
2. 平山英毅・富田瑞樹・原慶太郎. 2018. 衛星リモートセンシングによる尾瀬植生図作成手法の検討, 東京情報大学研究論集. Vol.22 (1): 75-84.

[原著論文 (共著)]

1. Sharma, Ram C., Keitarou Hara, Hidetake Hirayama, Ippei Harada, Daisuke Hasegawa, Mizuki Tomita, Jong Geol Park, et al. 2017. Production of Multi-Features Driven Nationwide Vegetation Physiognomic Map and Comparison to MODIS Land Cover Type Product. Advances in Remote Sensing Vol.6 (1): 54–65. doi:10.4236/ars.2017.61004.
2. Sharma, Ram C, Keitarou Hara, and Hidetake Hirayama. 2017. A Machine Learning and Cross-Validation Approach for the Discrimination of Vegetation Physiognomic Types Using Satellite Based Multispectral and Multitemporal Data. Scientifica 2017: 1–8. doi:10.1155/2017/9806479.

3. Ram C. Sharma, Keitarou Hara and **Hidetake Hirayama**. 2018. Improvement of Countrywide Vegetation Mapping over Japan and Comparison to Existing Maps. *Advances in Remote Sensing* Vol.7: 163-170.
4. Sharma, Ram C, **Hidetake Hirayama** and Keitarou Hara. 2018. Landsat 8 satellite data based high-resolution vegetation mapping in the island of Hokkaido, Japan. *Proceedings of the 39th ACRS (Asian Conference on Remote Sensing)* Vol.5: 2859-2865.
5. Sharma, Ram C, **Hidetake Hirayama**, Mizuki Tomita and Keitarou Hara. 2019. Mapping of The Altitudinal and Topographical Patterns of Mountainous Vegetation in Northeast Japan. *Proceedings of the 40th ACRS (Asian Conference on Remote Sensing)*.

[国内外学会発表]

1. **Hidetake Hirayama**, Mizuki Tomita, and Keitarou Hara. 2016. Prediction of changes in vegetation distribution under climate change scenarios using MODIS dataset. XXIII ISPRS Congress - WG VIII/8, Prague Congress Centre.
2. 原慶太郎・平吹喜彦・菊池慶子・柳澤英明・岡浩平・千葉一・佐々木秀之・富田瑞樹・**平山英毅**. 2018. 生態系と歴史記憶を活かした防災・減災による景観再生 1. 持続可能性とレジリエンスを高める震災復興とは, 自然環境復元学会第 18 回全国大会, 日本大学理工学部駿河台キャンパス.
3. Sharma, Ram C, **Hidetake Hirayama** and Keitarou Hara. 2018. Landsat 8 satellite data based high-resolution vegetation mapping in the island of Hokkaido, Japan. *The 39th ACRS (Asian Conference on Remote Sensing)*, Kuala Lumpur, Malaysia.
4. **平山英毅**・富田瑞樹・原慶太郎. 2018. 衛星リモートセンシングによる尾瀬植生図作成手法の検討, 自然環境復元学会第 18 回全国大会, 日本大学理工学部駿河台キャンパス.
5. Yujiro Sato, Yoshihiko Hirabuki, Mizuki Tomita, **Hidetake Hirayama** and Keitarou Hara. 2018. Detection of fine-scale landform and vegetation changes along a huge-tsunami disturbed coastal sand-dune ecotone, Shinhama, Sendai. 6th Taiwan-Japan Ecology Workshop, National Cheng Kung University, Taiwan) .
6. Yoshihiko Hirabuki, Megumi Sato, Atsushi Sugawara, Kaede Takahashi, Daishun Suzuki, Kenjiro Suzuki, Yujiro Sato, Hiroshi Kanno, Kohei Oka, Mizuki Tomita, **Hidetake Hirayama**, Keitarou Hara, Takiko Sugiyama, Jun Nishihiro. 2018. Micro-site coupled ‘surprising’ vegetation recovery along a huge-tsunami disturbed coastal sand-dune ecotone, Shinhama, Sendai. 6th Taiwan-Japan Ecology

- Workshop, (National Cheng Kung University, Taiwan).
7. 平吹喜彦・佐藤祐二郎・佐藤愛実・菅野洋・富田瑞樹・**平山英毅**・原慶太郎・岡浩平. 2019. 巨大地震・津波で攪乱された砂浜海岸エコトーンの微地形と砂丘植物の初期応答, 自然環境復元学会第 19 回全国大会, 日本大学理工学部駿河台キャンパス.
 8. Yoshihiko Hirabuki, Megumi Sato, Atsushi Sugawara, Yujiro Sato, Kaede Takahashi, Daishun Suzuki, Kenjiro Suzuki, Hiroshi Kanno, Kohei Oka, Takiko Sugiyama, Mizuki Tomita, **Hidetake Hirayama**, Keitarou Hara, Jun Nishihiro. 2019. Rapid and Diversified Vegetation Recovery Along a Huge-Tsunami Disturbed Coastal Sand-Dune Ecotone, Sendai-Bay Fringe, Japan. 18th International Symposium on Problems of Landscape Ecological Research, (Congress Centre Smolenice SAS, Slovakia).
 9. 平吹喜彦・佐藤祐二郎・**平山英毅**・富田瑞樹・原慶太郎・岡浩平. 2019. 砂浜海岸エコトーンスケールにおける巨大地震・津波前後の微細地形比較と Eco-DRR 推進にかかわる新知見. 第 29 回 日本景観生態学会, 京都学園大学 京都太秦キャンパス (京都) .
 10. Keitarou Hara, Mizuki Tomita, **Hidetake Hirayama** and Yoshihiko Hirabuki. 2019. Landscape restoration based on ecosystem services and historical recollections after the Great East Japan Earthquake. 10th IALE World Congress, (University of Milano-Bicocca).
 11. Yoshihiko Hirabuki, Yujiro Sato, **Hidetake Hirayama**, Mizuki Tomita, Keitarou Hara, Kohei Oka and Hajime Matsushima. 2019. Heterogeneity in Fine-scale Landform Change After the 2011 Huge Earthquake/Tsunami and Its Implications Toward Integrated ECO-DRR Management of Coastal Sand-dune Ecotone. 10th ICLEE 2019, (Dankook Univ. & Seoul National Univ., Republic of Korea).
 12. 原慶太郎・Ram Sharma・**平山英毅**・富田瑞樹. 衛星リモートセンシングデータを用いた機械学習による植生図化手法の検討. 植生学会第 24 回大会 弘前大会 (弘前大学創立 50 周年記念会館) .
 13. 平吹喜彦・佐藤祐二郎・菅野洋・**平山英毅**・富田瑞樹・原慶太郎・岡浩平. 巨大地震・津波直後の砂浜海岸エコトーンにおける微地形・植生の応答と:攪乱抵抗. 植生学会第 24 回大会 弘前大会 (弘前大学創立 50 周年記念会館) .
 14. Sharma, Ram C, **Hidetake Hirayama**, Mizuki Tomita and Keitarou Hara. 2019. Mapping of The Altitudinal and Topographical Patterns of Mountainous Vegetation in Northeast Japan. 40th ACRS Congress, (Daejeon Convention Center, Korea).
 15. Sharma, Ram C, **Hidetake Hirayama** and Keitarou Hara. 2019. Deep Learning of Sentinel-1,2 Data and Mapping of Plant Communities at Country Scale. 令和元年

度 写真測量学会 (JMS アステールプラザ, 広島) .

16. 平山英毅・富田瑞樹・原慶太郎. 2020. 高時空間分解能衛星画像を用いた尾瀬植生図作成手法の検討, 自然環境復元学会第 20 回全国大会, 日本大学理工学部駿河台キャンパス. 若手優秀発表賞.

[その他の発表活動など]

1. 原慶太郎・富田瑞樹・平山英毅. 尾瀬地域における衛星リモートセンシングによる植生モニタリング手法の検討. 第 4 次尾瀬総合学術調査団平成 30 年度調査報告会. 2019 年 1 月 11 日. 東京 (都道府県会館) .
2. 原慶太郎・富田瑞樹・平山英毅. 尾瀬地域における衛星リモートセンシングによる植生モニタリング. 第 4 次尾瀬総合学術調査団令和元年度調査報告会. 2020 年 12 月 1 日. 東京 (都道府県会館) .
3. 原慶太郎・Ram C. Sharma・平山英毅. 2020. 全国規模の植生図化における先進光学衛星の適用. JAXA EORC 第 3 回 先進光学衛星利用ワークショップ. 2020 年 2 月 19 日. 東京 (AP 東京八重洲) .

[書籍]

1. 2020 年 3 月末発刊予定 : 共著, 津波が来た海辺. 116 pp.

本論文の各章と主な研究業績の対比表

章番号	論文	国際学会	国内学会
1(序論)			
2	2-1, 2-2,	2-3,	2-4, 2-5
3	3-1, 3-2, 3-3	3-4,3-5	3-6 ~ 3-11
4			4-1
5(総合考察)			
6(結論)			

論文内容の要旨

健全な生態系の保持は、景観を横断する生物や、物質、エネルギー、情報が流動することで可能となる。生物の移動が阻害されることは、生物の個体数減少や局所的な個体群の絶滅確率の増加に加え、生物多様性の衰退につながり、生物を媒介することで成立していた物質やエネルギーの流動の妨げになる。したがって、生息地の分断・孤立化により生物の移動が阻害されることは、生態系や生物多様性の保持にとって大きな脅威となる。景観生態学では、生物による生息地間の移動のしやすさの度合いを連結性（connectivity）と定義し、生息地の分断が連結性に与える影響の定量化手法に関する研究が進められてきた。近年の研究では、健全な生態系や生物多様性を保持するための管理には、景観域における連結性の定量的評価が不可欠であることが示されてきた。このようななかで、2011年3月11日に、東北地方太平洋沖地震に伴う巨大津波が発生し東日本の太平洋沿岸に甚大な被害をもたらした。この津波は、生態学的には数百年に一度の頻度で発生する低頻度大規模攪乱と位置づけられる事象であり、被災した沿岸域の森林分布は急激かつ大きく縮小した。さらに、復旧・復興事業などの人為的攪乱により森林分布が変化している。生物の生息地としての森林分布が縮小することは、生息地の総量が減少するだけでなく、生息地間の物理的距離が増加し、連結性を低下させる要因となる。このため、東北地方太平洋沖地震に伴う津波による生態系への影響や回復に向けた議論をする上で、被災景観域の連結性変化を定量的に明らかにすることは重要である。一方、連結性研究や、森林分布を抽出するための衛星リモートセンシング技術を用いた先行研究は存在するがいくつかの課題がある。(1) 従来のピクセルベースの土地被覆分類手法では、孤立ピクセル（周囲の土地被覆クラスとは異なる微細な誤分類）が多量に発生するため、連結性研究に用いるデータとしては不十分である。(2) 低頻度大規模攪乱と、その後の人為的影響下における連結性変化を研究した例はなく、本事象の解明に向けた連結性定量化手法の開発が必要である。(3) 被災景観域において、連結性を効果的に高めるためには、新たな森林創出による連結性への効果を空間明示的に表すことが有効であるが、森林創出領域ごとの連結性の向上度の違いを空間明示的に表した研究例はなく、新たに手法を開発する必要がある。

そこで本研究では、上記の3つの課題を解決するため、まず、機械学習を応用した土地被覆分類手法を検討し、高精度かつ孤立ピクセルを大幅に低減させた土地被覆図を作成した。次に、低頻度大規模攪乱による連結性への影響と、その後の人為的な影響による森林パッチ変化に伴う連結性への影響を定量的に明らかにするための連結性評価手法を検討した。最後に、連結性向上に効果的な森林パッチ創出領域を空間明示的に示す手法を開発した。以上のことを踏まえて、本論文は、序論と結論を含め、全6章で構成される。

第1章では、序論として、本論文の全体の背景と目的に加え、全体の構成を説明した。本研究の学術的・社会的な位置づけと、研究を進める意義について論述した。

第2章では、本章以降に実施する連結性の定量解析を進める上で必要となる、高精度かつ孤立ピクセルを大きく低減させた土地被覆図の作成手法を明らかにした。東北地方太平洋沖地震に伴う津波により、甚大な被害を受けた宮城県の太平洋側の一部地域を対象に、高分解能衛星である RapidEye 衛星により観測された画像を用いて土地被覆分類を実施した。一般的な土地被覆解析には、単一の分類手法が用いられてきたが、本研究では、機械学習分野で発展してきた多重分類器システム (Multiple classifier system: MCS) を解析に用いた。研究成果として、従来の手法と比べ、分類精度を維持しつつ、大幅に孤立ピクセルを低減させる効果があることを明らかにできた。

第3章では、森林パッチ変化による連結性への影響を定量評価した。まず、2章で開発した手法を用いて、仙台市の被災地 (七北田川と名取川に挟まれた地区) を対象に、震災前 (2010年)、震災直後 (2011年)、震災直後以降 (2012年)、5年経過時点 (2016年) の年次ごとの土地被覆図を作成した。さらに、土地被覆図の森林クラスを抽出することで、森林パッチ分布図を作成した。次に、森林パッチ分布図をもとに、パッチ間を接続する閾値 (連結距離) を複数設定し森林パッチネットワークの構築することで、生物の移動経路の推定および可視化した。最後に、森林パッチネットワークの連結性解析に頻繁に用いられてきた連結性積算指数 (Integral Index of Connectivity: IIC) に加え、クラス一致確率 (Class Coincidence Probability: CCP) を用いることで、津波による急激な連結性低下と、その後の、パッチ増減による森林パッチネットワークの連結性の変化を景観スケールで定量的に明らかにした。

第4章では、連結性向上に効果的な森林パッチの創出領域を選定する手法を開発した。まず、対象地において、森林パッチ創出が現実的に困難な領域 (除外地域) を抽出した。その後、基準となる森林パッチ分布図 (2016年) に対し、除外地域を除く領域を対象に、森林パッチを無作為に発生させ、森林パッチ発生の前後で連結性がどの程度向上したのかを、IIC と CCP を用いて解析した。この解析を反復し、それぞれの結果に空間的内挿処理を実施することで、連結性の向上度を示す空間分布図を作成した。分布図の作成により、対象とする連結距離ごとに、連結性向上の効果の高低の領域を空間明示的に示すことが可能となった。

第5章では、本論文の総合考察を述べた。本章は、4章までの結果を総合的に考察し、1章で述べた研究目的を達成したことを確認した。また、本研究を通して得られた新しい知見を挙げ、研究に関連するリモートセンシングや景観生態学の分野にいかに関与できるかを述べることに加え、研究の展望を述べた。

第6章では、本論文の結論として、本研究の意義と、大規模災害時の復興に対する貢献を説明した。

Ph.D. Dissertation

**Studies on Quantitative Evaluation of Changes in Connectivity in a Tsunami Disaster
Landscape**

Hidetake HIRAYAMA

In March of 2011 a huge tsunami devastated forest habitats along the coast of Sendai Bay in northeastern Japan. Evaluation and monitoring of the changes in habitat connectivity caused by this disaster are essential for managing the recovery of ecosystems and biodiversity. This study develops an accurate and practical method for analyzing connectivity changes, which can be used for designing ecosystem-based reconstruction projects. Three major issues were addressed in the research. 1) The need to reduce the number of isolated pixels generated current and previous land cover classification methods, which render the classification results unsuitable for analyzing connectivity. 2) The need for a method that can assess changes in connectivity due to a large-scale disturbance such as a tsunami, as well as efficiently monitor changes during the subsequent period of recovery and reconstruction. 3) The need for a practical system that can integrate the results of the connectivity research into actual reconstruction projects.

In this dissertation, the overall background, objective and framework of the study are introduced in Chapter 1, and a multiple classifier system, which responds to the first issue noted above by reducing isolated pixels while maintaining classification accuracy, is introduced in Chapter 2. Chapter 3 discusses the binary connection model which was employed to generate forest patch network maps for 2010, just before the tsunami, 2011, immediately after the tsunami, and 2012 and 2016. In addition, two quantitative connectivity indices, the Integral Index of Connectivity and the Class Coincidence Probability were used to assess the changes in continuity. The network maps allowed clear visualization of changes in connectivity both for the original large-scale disturbance and subsequent process of recovery and restoration, and were supported by quantitative results from the indices. Chapter 4 responds to the third issue noted above, introducing a method for identifying the areas where forest patch creation would be most effective for improving connectivity. Shade maps show the quantitative and spatial effects of patch creation for improving connectivity, and thus can serve as blueprints for design of ecosystem-based reconstruction projects.

The research results are summarized and discussed in Chapter 5, focusing on new insights and contributions in the fields of landscape ecology and remote sensing. The conclusions and future directions for study are presented in Chapter 6.