

令和 3 年 6 月 16 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2017～2020

課題番号：17H01516

研究課題名（和文）北方林における気候変動への適応：生態系レジリエンスの保全をめざした生態系管理

研究課題名（英文）Adaptation to the Climate Change on Boreal Forest - Ecosystem Management for the Conservation of Ecosystem Resilience

研究代表者

森本 淳子（Morimoto, Junko）

北海道大学・農学研究院・准教授

研究者番号：50338208

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 25,700,000円

研究成果の概要（和文）：気候変動は災害リスクを増大し、生態系の劣化を助長する。陸上生態系において最も甚大な影響を受けうる北方林を対象として、気候変動の緩和策と適応策に関する総合的な研究を行った。具体的には、気候変動による頻度と強度の増大が予想される、台風による森林倒壊（風倒）を題材として、(1)気象・地形・森林の多変量を含む風倒リスクモデルの開発により、倒壊する材積を最小化する人工林配置計画の立案、(2)風倒後の中・長期観測から風倒後の森林再生を促進する森林管理方法を解明、(3)風倒ならびに多様な施業管理後の森林構造を長期予測するモデルの開発と最適な森林管理方法の提案、を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的意義：IPCCで提案された気候変動リスク構造の概念を、実際の風倒リスクモデルの構築に応用したことで、これまで知られていなかった大雨を伴う台風による森林倒壊プロセスの解明や、倒壊後の再生を促進する具体的な森林管理の提案に活かすことができた。

社会的意義：気候変動の緩和と適応に貢献する政策が求められるなか、日本における主要な森林災害である風倒後の森林管理の在り方、風倒前にできる森林管理の在り方について、一定の科学的根拠を提供できた。

研究成果の概要（英文）：Climate change increases disaster risk and accelerates the degradation of ecosystems. We conducted a comprehensive study on climate change mitigation and adaptation measures for boreal forests, which can be the most severely affected terrestrial ecosystems. Specifically, we focused on typhoon-induced forest collapse (windthrow), which is expected to increase in frequency and intensity due to climate change. We accomplished (1) Development of a windfall risk model with multivariate explanatory variables of weather, topography, and forest to plan artificial forest arrangement to minimize the amount of collapsed timber; (2) Identification of forest management methods to promote forest recovery after windfall based on medium- and long-term observations after windfall; and (3) Development of a model for long-term prediction of forest structure after windfall and various management practices, and proposal of optimal forest management practices.

研究分野：生態系管理学

キーワード：気候変動 生態系管理 適応策 レジリエンス リスクモデル 森林計画 長期予測 シミュレーションモデル

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

気候変動・温暖化は気候に関連した災害の頻度や強度を増大させ、災害リスクの増大につながる(図1)。また、気候変動は生態系の劣化を助長する。生態系の劣化はさらなる災害の引き金となり、翻って生態系や社会のレジリエンスを弱体化する。劣化した生態系は、二酸化炭素のシンクからソースに変化する可能性を秘めており、温室効果ガスの増大は、気候変動をさらに加速させる恐れがある(Mnang et al. 2013)。この気候変動に伴う負の連鎖を断ち切るために我々人類ができることは「災害を受けにくい土地利用計画」で事前にリスクを最小限に抑え、「生態系レジリエンスの解明」をした上で「生態系レジリエンスの保全をめざした生態系管理」を実行することである。

日本の森林が受ける主要な自然かく乱は、台風による倒壊(風倒)である。風倒かく乱は、天然林の更新維持には必要不可欠なイベントだが、人工林にとっては災害である。風倒の発生に関わる要因の解明は多くの国で行われてきたが、天然林より倒れにくい人工林を創ることはできるのか、という疑問には応えられていない。台風の進路を変えることはできないが、天然林の倒壊リスクを基準として、より風倒リスクの低い立地に人工林を配置することはできる。これが、災害を受けにくい土地利用計画につながるだろう。

陸上生態系に蓄積されている炭素のうち、約8割が森林生態系に蓄積している。とくに北方林はこれまで炭素の貯留庫と考えられてきた。しかし、長年にわたる人為かく乱の履歴が、すでに森林生態系の種組成と炭素蓄積に影響を及ぼしている可能性が指摘されている(Powers et al. 2011; Kishchuk et al. 2016)。また、自然かく乱後の風倒木伐出作業が、再生初期の種組成(Morimoto et al. 2013)や炭素蓄積(Serrano-Ortiz et al. 2011)を大きく変えることが知られているが、数十年にわたる長期的な動態については、実測・予測の両面で明らかにされていない。天然林への自然かく乱は次世代への活力と多様性の源であり、生態系レジリエンスの保全には不可欠なイベントである。天然林における自然かく乱後の種組成・炭素蓄積の回復力を目標に、森林生態系に負荷を与えない保全管理を考えていく必要がある。

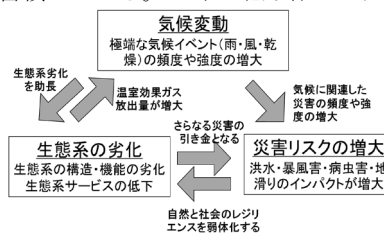


図1- 気候変動に伴う負の連鎖

2. 研究の目的

気候変動に伴う負の連鎖を断ち切るために、もっとも甚大な影響を受けうる北方林を対象として、温暖化適応策に関する総合的な研究を行う。具体的には、気候変動による頻度と強度の増大が予想されている、台風による森林倒壊(風倒)を題材として、以下の3つの目的を設定した。

- (1) テーマ1: 風倒リスクを低減する人工林配置計画の立案。風倒リスクモデルを開発し、倒壊する材積を最小化する人工林配置計画を立てる。
- (2) テーマ2: 生態系レジリエンスの解明。森林再生を促進できる森林管理を明らかにする。
- (3) テーマ3: 生態系レジリエンスの保全をめざした生態系管理。風倒後の森林構造を長期予測するモデルを開発し、風倒後の最適森林管理を提案する。

3. 研究の方法

- (1) テーマ1: 風倒リスクを低減する人工林配置計画の立案

① 風倒リスクモデルの構築

北海道道南のせたな町、今金町を含む、約400平方キロの地域を対象とした。この地域には、2016年8月17日(台風7号)、21日(台風11号)、30日(台風10号)が連続して通過し、森林の風倒が発生している。3つの台風前後(6/28と8/30)に撮影された高解像度の衛星画像データ(World View, PlanetScope)を用いて、NDVI値の演算、NDVIを含む10種のレイヤースタッキング、教師(風倒地)のレイヤー情報抽出、Spectral Angle Mapperを用いた風倒地の抽出(10m解像度)を行った。3つの台風のダウンスケーリング結果(100m解像度)を用いて、各台風の最大風速(m/s)と強風($\geq 15\text{m/s}$)の持続時間(合計値, hr)を計算した。気象庁の解析雨量(1km解像度)より、2016/8/17-8/30の1時間雨量の最大値、 $1 \cdot 3 \cdot 6 \cdot 12 \cdot 24$ 時間雨量の最大値、20mm以上の降雨の持続時間(合計値, hr)、総雨量(mm)を計算し、地形と土地被覆を考慮したダウンスケーリング(100m解像度)を行った。北海道森林管理局より森林簿PDFを入手し、GISデータベース化を行った。林種(人工林/天然林)、林齢(年)、優占種の平均胸高直径(cm)、優占種、 100m^2 当たりの材積($\text{m}^3/100\text{m}^2$)、優占樹種の小班内立木総材積に占める割合(%),の合計6変数を森林要因として用意した。10mDEMから標高、大地形・小地形を考慮した7種類のTOPEX(地形露出度)、傾斜を算出した。20万分の1日本シームレス地質図V2を用いて、12種類に再分類した。風倒地ならびに気象要因・森林要因・地形要因、すべてを10mピッチのグリッドに統合(合計3,252,551グリッド・セル)し、続くモデル解析に用いた。

計算コストの都合上、合計3,252,551グリッド・セルから抽出した65,892グリッド・セル(風倒が発生した全16473グリッドとランダムに抽出した風倒の発生しなかった49419グリッド[風倒発生地点の3倍])を対象に解析を行った。先にあげた気象要因6種、すなわち3つの台風の最大風速と強風持続時間、台風期間中の降雨に関するパラメータ、森林要因5種、すなわち森林タイプ、林齢、面積あたり材積、平均胸高直径、優占樹種、地形要因7種、すなわちTOPEX4種、最大風速を記録した風の風向に対する相対斜面方位、傾斜、母岩の地質、ならびに、空間変数(緯度・経度)を説明変数として勾配ブースティング法(GBDT)により解析を行った。説明変数の相対重要度は各変数の無作為化が予測精度に与える影響の強さにより評価した。各説明変数と風倒発生確率の関係はIndividual conditional expectation plotないしPartial plotにより評価した。また、Friedman's Hを用いて変数間の相互作用の相対的重要性を評価した。

② 風倒リスクを低減する人工林配置

①で作成した風倒リスクモデルを使用して、現況および人工林配置や面積を変更したシナリオのリスク評価を行った。対象地は、①と同じ対象地とした。

現況のリスク評価には2種類の風倒リスクを計算した。1つは、立地を評価するために、気象条件(対象地の風倒確率が最大グリッドの実測値)と林分状況(林齢50年のトドマツ人工林)を固定した暴露ベースリスクである。もう1つは、林分状況を考慮したトータルリスクであり、気象条件を暴露ベースリスクと同様に固定し、林分状況を実況として計算した。トータルリスクから倒壊材積の期待値として、リスク材積を計算した。分析は、 $10\text{m} \times 10\text{m}$ のグリッド単位で行ったため、リスク材積は 100m^2 あたりで計算した。

作成したシナリオは、高リスクの人工林を低リスクの天然林と入れ替える①人工林再配置シナリオ、高

リスクの人工林を自然林化する②自然林化シナリオ、高リスクの人工林の施業方法を短伐期にする③短伐期シナリオの3つである。高リスクの人工林は、上述のリスク材積で判断し、各シナリオについて、リスク材積の上位5~100%まで5%刻みで閾値を設定し、林分状況を変化させた。①のシナリオで、人工林を再配置する場所は、暴露ベースリスクの低い天然林とした。各シナリオについて、シナリオに基づく林分状況を用いてトータルリスクおよびリスク材積を計算した。シナリオの評価はリスク材積を用いて行った。

(2) テーマ2：生態系レジリエンスの解明

① 無人航空機 (UAV) を用いたデジタル空中写真測量 (DAP) の技術的検討

北方林の管理において重要な役割を持つ高価値樹種 (high-value timber species) を対象として、UAV-DAP を用いた単木レベル資源把握の可能性に関する技術的検討を行った。調査地は東京大学北海道演習林の2つの小班 (36B、59A) とした。2019年7月に回転翼 UAV (DJI Inspire 2) により調査地の空撮を行った。撮影高度 120 m、オーバーラップ 80%、サイドラップ 80%とし、空中写真の空間分解能は 2.3 cm/pix であった。36B 小班で計 3,292 枚、59A 小班で計 2,231 枚の単写真 (5,280×3,956 pix) をそれぞれ取得した。また、36B 小班に 10 箇所、59A 小班に 9 箇所の地上基準点 (GCP) を設置し、高精度 GNSS 受信機 (Trimble R2) を用いて測位を行った。同年7~8月に現地調査を行い、高価値広葉樹3種 (ウダイカンバ、ハリギリ、ミズナラ) の計 213 本を対象として、胸高直径 (DBH)、樹高、樹冠幅 (4方向)、立木位置座標を測定した。

UAV 空中写真と GCP の位置座標から、写真測量ソフトウェア (Agisoft Metashape Pro) を用いてオルソ画像 (空間分解能 3 cm) と林冠表層の点群データ (547 点/m²) を生成し、後者と航空機レーザー測量 (LiDAR) による地盤高モデル (DTM) との差分から林冠高モデル (CHM) を生成した。次に、オルソ画像の RGB 値と CHM にオブジェクトベース画像解析ソフトウェア (Trimble eCognition Developer) の多解像度分割アルゴリズムを適用して単木樹冠区分を行った。個々の樹冠区画のスペクトルおよびテクスチャ属性を抽出し、ランダムフォレスト法を用いて樹種分類を行うとともに、UAV-DAP による樹高とオルソ画像による樹冠面積を変数とする単木 DBH 推定モデルを構築した。

② 風倒後の施業が風倒後の森林回復に与える影響 (中期的影響)

東京大学北海道演習林を対象に、施業 (倒木搬出、地がき、植栽) が風倒後の森林回復に与える影響を検証するための資料調査、データ処理を行った。まず、風害直後の空中写真をもとに紙図面で作成された風害の位置を示した図面を GIS 化した。また、その後の地がき、播種、植栽の位置を示した図面も GIS 化した。次に、1981 年台風の風害を受けた場所に設置された毎木調査区の 2013-2014 年の測定データを解析し、風害後の施業が林分蓄積回復や針広混交率に与える影響を明らかにした。

③ 風倒後の施業が風倒後の森林回復に与える影響 (長期的影響)

1954 年洞爺丸台風による風倒被害が発生した北海道上川町、足寄町、土士幌町の国有林を対象に、2018 年~2019 年に植生回復の状況を調査した。調査地は、国有林から提供された施業履歴や風害実況図 (玉手ら 1977) などから森林の来歴が明確な場所に設定した。50 年以上大規模かく乱が生じていない大雪原生林生物群集保護林、風倒直後に森林管理局などにより設定された試験地 (三股風害跡試験地、置戸風害跡試験地) を含む。風倒かく乱と施業の履歴が異なる林分として、風倒被害をうけていない老齢林 (OG)、風倒後倒木残置 (WT)、風倒後倒木除去 (SL) の 3 処理に対して、25m×25m 方形区を、それぞれ 4 箇所 (OG)、5 箇所 (WT)、6 箇所 (WT+SL) を設置した。

(3) テーマ3：生態系レジリエンスの保全をめざした生態系管理

テーマ3では、風倒後の森林構造を長期予測するモデルを開発し、風倒後の最適森林管理を提案する。このため、森林生態系モデルの較正・改良と、風倒後管理方法の違いによる森林回復過程の比較のためのシミュレーションを行った。

① 基礎となる森林生態系モデルの較正

風倒後の施業・気候別の森林構造を長期シミュレーションするために、代表的な Forest Landscape model の LANDIS-II を応用した。LANDIS-II は、中長期の広域の森林ゾーニングや伐採計画などの検討に資するために、複数の林分を含む広域の森林動態を空間明示的にシミュレーションする。森林管理や様々な自然攪乱に伴う、低木や木本の植物種別の成長・競争・枯死や新規加入の森林動態や、それにとまう物質循環を計算できる。本研究では、気候変動下の実生の定着や成長量の変化を表現可能であり、山火事や風倒後の植生回復シミュレーションへの応用事例が多い LANDIS-II NECN-succession extension v6.3 (以下、NECN) を選択した。

まず、NECN が必要とする樹種別の生活史、形質、調整パラメータを収集した。実生の定着に関する樹種別の耐陰性と耐乾燥性、最寒月最低気温、定着可能な GDD の範囲は、文献調査や環境省植生図・森林生態系多様性基礎調査・モニタリングサイト 1000 の観測値から設定した。次に、各樹種のバイオマス成長が収穫表を再現できるような調整パラメータを、10,000 回のモンテカルロシミュレーションで特定した。

② 日本の北方林に合わせた森林生態系モデルの改良

林床を覆うササによって照度が低下し天然更新が阻害される現象は、日本の森林動態予測で重要な現象の一つであるが、既存の森林動態モデルには実装されてこなかった。そこで、NECN に木本と草本の光競争を実装することで、ササの被陰に伴って木本の実生の定着確率と稚樹の成長量が低下する現象を実装した。具体的には、木本と草本を区別して分離することで、ササよりも地上部バイオマス量が小さい稚樹は、ササよりも現存量が大きくなるまで NPP が抑制されることを表現した。この改良により、サイト内にササが存在する場合、1. まず LAI が高ければ定着に失敗し、2. 木本の実生が定着できてもササのバイオマス量を超えるまでは被陰され、3. 森林の再生が遅れることを再現できる。

③ 気候変動下でも森林再生できる風倒後の生態系管理方法の検討

①および②で較正・改良した NECN を用いて、テーマ1で特定された風倒地での 2100 年にかけての森林構成の変化をシミュレーションし、気候変動の影響を受けても森林再生できる風倒後施業方法を検討した。北海道渡島檜山森林計画区の国有林全域 (北緯 42 度 27 分、東経 139 度 51 分、標高 0-1300 m、総面積 348 km²) を対象に、2016 年 8 月下旬に上陸した台風 7 号、11 号、10 号で風倒が発生した林分で、2100 年までの地上部バイオマスの回復過程をシミュレーションした。風倒前の樹種、樹齢、材積の空間分布は森林簿から設定した。木本の更新を阻害するチシマザサ (*Sasa kurilensis*) の空間分布は森林簿の立木密度から推定した。1) 倒木の処理方法と 2) 植栽する樹種の組み合わせで風倒後施業ケースを設計した。将来気候シナリオは、農研機構

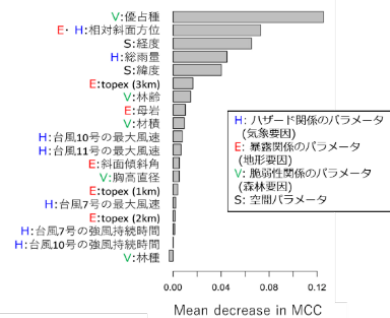


図2 風倒リスクモデルを構成する変数の重要度

が統計的ダウンスケーリングを施した RCP2.6 と 8.5 シナリオ、現在気候が継続する場合を想定した。風倒後施業ケース別の植物種別の地上部バイオマスと種組成の変化は、森林景観モデルの LANDIS-II で月別かつ 10m 解像度のグリッド別にシミュレーションした。風倒前と 2055・2100 年の樹種別の地上部バイオマスと組成を比較した。

4. 研究成果

(1) テーマ 1

① 風倒リスクモデルの構築

交差検証によるマッシュアップ相関係数 0.70 と高い予測性能を持つ機械学習モデルが構築できた。風倒リスクを説明する変数としては、優占種の重要度が最も高く、続いて、最大風速時の風向に対する相対斜面方位、総雨量、topex などの重要度が高くなった (図 2)。風倒の発生確率はトドマツ優占林分において著しく高く、最大風速時の風向きに対して正面側の斜面、topex が小さい(地形露出度が高い)地形、総雨量の多い地点で増加する傾向が見られた (図 3)。また、多くの変数と比較して少ない雨量(総雨量 60mm 程度)から、雨量に伴う風倒確率の著しい増加が見られた (図 4)。このような種間差は、根系の形状とそれに伴う揺動時の地中への雨水の侵入の違いを反映している可能性がある。

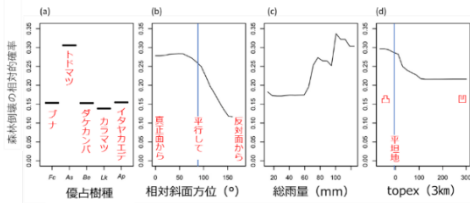


図 3 主要な説明変数に対する倒壊確率のパーシャルプロット

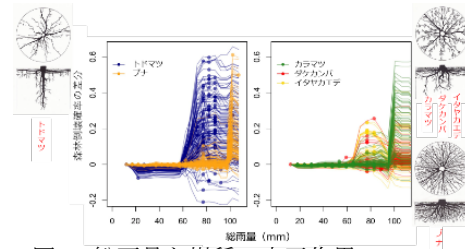


図 4 総雨量と樹種の交互作用

② 風倒リスクを低減する人工林配置

現況の評価 (図 5) として、人工林はトータルリスクの平均が天然林より高く、リスク材積も大きかった。また、人工林が暴露ベースリスクの低い場所に立地しているというわけではなかったことから、対象地の人工林配置は、風害に十分に対応できているとは言えないということがわかった。シナリオの評価では、すべてのシナリオで効果があった。効果は自然林化、人工林再配置、短伐期化の順であった (図 6)。また、上位 20~30 パーセントの林分を変更することでシナリオの効果の大部分が得られたことから、現状をすべて変更しなくても、リスク材積の高い林分から手を加えていくことで、シナリオによるリスク材積の削減効果が見込まれることがわかった。

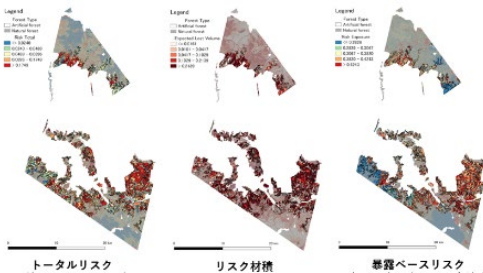


図 5 現況のリスク (色が鮮明な場所が人工林)

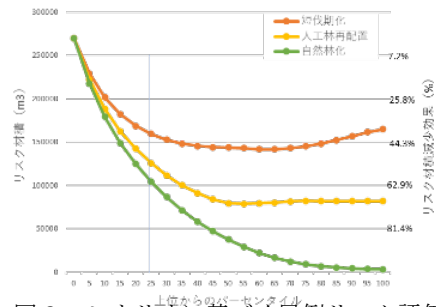


図 6 シナリオに基づく風倒リスク評価

(2) テーマ 2

① 無人航空機を用いたデジタル空中写真測量 (UAV-DAP) の技術的検討

UAV オルソ画像と CHM をもとに多解像度分割アルゴリズムを適用して樹冠区分を行った結果の例を図 7 に青線で示す。樹冠区分の面積は、3 樹種ともにオルソ画像から目視により分類した樹冠 (赤線) との間に有意な正の相関 ($r = 0.45 \sim 0.57$) が認められた。一方、多解像度区分は目視区分に比べて、樹冠区分面積の値が過小推定となる傾向が見られた。

個々の樹冠区分から抽出されたスペクトルおよびテクスチャ属性をもとに、ランダムフォレスト法を用いて樹種分類を行った結果を図 8 に示す。精度分析の結果、約 73%の精度で 3 種の高価値広葉樹、その他広葉樹、針葉樹の 5 つのクラスに分類することができた。

UAV-DAP による樹高とオルソ画像による樹冠面積を変数とした推定モデルによる DBH 値の平均平方二乗誤差 (RMSE) は 7.30~13.29 cm であった。一方、LiDAR と地上調査による樹高・樹冠面積を変数とした DBH

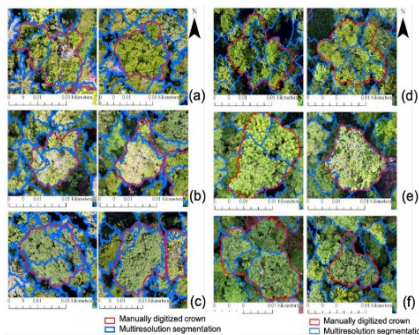


図 7 高価値広葉樹 3 種を対象とした立木樹冠の多解像度分類結果の例。(a)~(c): 36B 小班、(d)~(f): 59 林班。(a) (d): ウダイカンバ、(b) (e): ハリギリ、(c)~(f): ミズナラ。

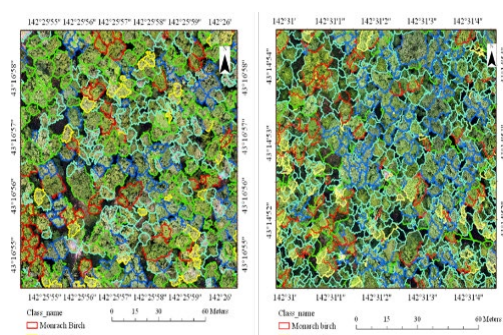


図 8 ランダムフォレスト法による樹種分類結果の例 (左: 36B 小班、右: 59A 小班)。区画された各樹冠が立木の位置を表

推定モデルのRMSEは、それぞれ7.05~11.87 cmと8.90~14.01 cmであった。UAV-DAPによってLiDARや地上調査とほぼ同等の精度で単木のDBHを推定できることが示された。

② 風倒後の施業が風倒後の森林回復に与える影響（中期的影響）

1981年の大規模風倒があった場所の約30年後の林分材積は、針葉樹を植栽した場所と比べ、地がきのみ、地がきご播種、広葉樹植栽を行った場所で低く、とくに地がきみの場所では、100 m³/haに満たない場所も多かった（図9）。一方で、風倒後無処理の場所や倒木搬出のみの場所は、針葉樹植栽と同等の林分材積が見られた。また、風倒後無処理や倒木搬出のみの場所では、材積の一定程度の割合で針葉樹が占めていたのに対し、地がきや播種のみでは、針葉樹の割合は極めて低かった。これらの結果は、風倒時の前生稚樹が、林分材積の回復や針広混交林の再生に大きな役割を果たすことを示している。

③ 風倒後の施業が風倒後の森林回復に与える影響（長期的影響）

図10に各林分での毎木調査結果を示した。老齢林（OG）でDBH83 cm以上の大径木針葉樹が生育する一方、倒木残置（WT）、倒木搬出（SL）の林分ではDBH73 cm未満のトドマツ・エゾマツなどの針葉樹が優占し、*Betula* spp. や *Acer* spp. を交えた森林に発達していた。いずれも針葉樹種は逆J字型を示すことから更新は順調とみられた。倒木搬出（SL）の方で広葉樹種の侵入がより多くみられた。当時は重機ではなく馬による倒木処理が主流だったことから、前生稚樹であった針葉樹に壊滅的な損傷を免れ、WTとSLの林冠構成に大きな差が生じなかったと考えられる。

一方で、林床調査の結果からは、倒木搬出（SL）すると、更新してくる実生・稚樹が広葉樹主体となり、針葉樹、特にエゾマツが更新しない傾向がみられた。将来、林冠層を破壊する風倒が発生した後、形成される林相はWTとSLで異なり、WTは針葉樹主体、SLは広葉樹主体になると予想される。

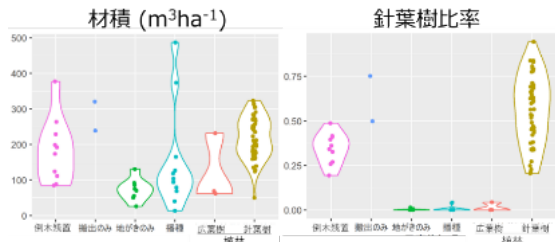


図9 1981年台風15号風倒後の各種施業林分における材積と針葉樹率

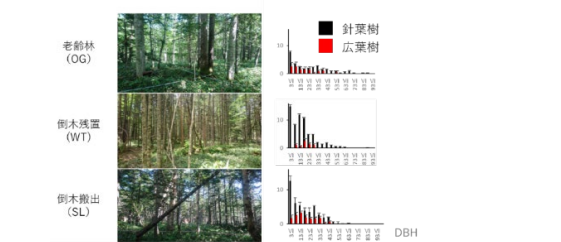


図10 洞爺丸台風から64年後の林相調査結果

(3) テーマ3

① シミュレーションモデルの整備と改良

LANDIS-II NECN succession v6.3を較正したことで、北海道の地位別蓄積管理表とシステム収穫表の地上部バイオマス成長を再現できた。さらに、モデルの改良により、ササ地ではまた、このモデルを用いて風倒後に倒木を残置したケースでの天然更新に伴う植生動態を計算したところ、地上部バイオマスの回復量は将来の気候条件に依存することが示された（図11）。これは、積雪深が将来にかけてあまり変化しないRCP2.6-MIROC5（緑）と気候変動が起こらない社会（茶）では、林床のチシマザサの現存量が維持され、木本の更新を阻害したためである。一方で、気温が大きく上昇して積雪深が大きく低下する気候条件では、ササの現存量が低下することで実生の定着や稚樹の成長が促進され、地上部バイオマスが風倒前と同程度まで回復できる可能性が示された。このように、日本の森林の更新動態をシミュレーションする上で課題だった、気候変動下での草本・木本の競争関係を表現できるモデルを構築できた。この改良版のNECNは、GitHub上でシミュレーションのモデル開発者と共同で公式リリースされている。

② 気候変動下でも森林を回復できる風倒後の適応策の検討

風倒地での優占植生の長期的な変化をシミュレーションした結果を図12に示す。風倒地が天然更新で森林に再生できるかどうかは、気候条件によって大きく異なることが示された。風倒後に倒木を残置した場合、9割の風倒地で風倒後にチシマザサが優占した。その後、1. 積雪深が低下するにつれてダケカンバが優占したあと、より温暖な地域に生育可能なブナ林へと長期的に遷移する場合や（図12左）、2. 2060年代まで積雪深の低下が起こらず、2100年時点でも先駆種であるダケカンバが優占する場合（図12中央）、さらに、3. 気温が上昇しないために長期的にササが優先する場合（図12右）など、気候条件によって中長期の優占植生の変化にも違いが見られた。気候変動に伴う気温上昇とそれに伴う積雪深の低下のパターンの変化によって、風倒被害の後に林地化できるかどうかや、再生した森林の優占種に大きく影響を及ぼすことが示唆された。

一方で、前生樹が豊富でチシマザサの現存量が小さい風倒地では、どの気候条件でも木本の現存量が回復した。このため、大規模な台風被害を受けた森林を対象とした広域の森林再生事業で生物多様性保全に向けた倒木残置を検討する際には、これらの林床の植生のモニタリングに基づき、倒木残置に適した風害地をスクリーニングすることが求められる。気候変動下でも森林の再生が期待できる倒木残置や人工林での再植林の空間配置の検討が有効な気候変動適応策となると考えられる。

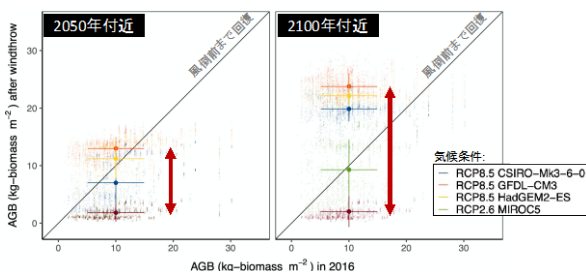


図11 風倒後に倒木を残置したケースの、風倒前と2050、2100年の地上部バイオマス (Aboveground Biomass, AGB) の比較

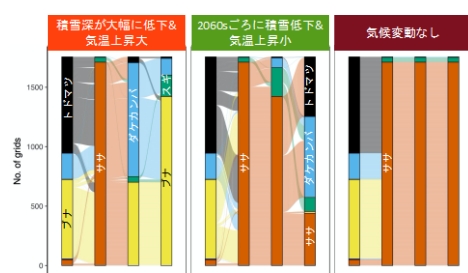


図12 倒木を残置する場合の気候シナリオ別の2016年の風倒後から2100年までの優占植生の推移

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 5件 / うちオープンアクセス 9件）

1. 著者名 Jayathunga Sadeepa, Owari Toshiaki, Tsuyuki Satoshi	4. 巻 11
2. 論文標題 Digital Aerial Photogrammetry for Uneven-Aged Forest Management: Assessing the Potential to Reconstruct Canopy Structure and Estimate Living Biomass	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Remote Sensing	6. 最初と最後の頁 338 ~ 338
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/rs11030338	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Jayathunga Sadeepa, Owari Toshiaki, Tsuyuki Satoshi	4. 巻 73
2. 論文標題 The use of fixed-wing UAV photogrammetry with LiDAR DTM to estimate merchantable volume and carbon stock in living biomass over a mixed conifer-broadleaf forest	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation	6. 最初と最後の頁 767 ~ 777
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jag.2018.08.017	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 井上華央・柴田英昭*・吉田俊也・中路達郎・小花和宏之・加藤顕	4. 巻 -
2. 論文標題 無人航空機による3次元データを用いた天然生針広混交林における葉の窒素含量の空間分布	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 森林立地	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Suzuki Satoshi N., Tsunoda Tomonori, Nishimura Naoyuki, Morimoto Junko, Suzuki Jun-ichirou	4. 巻 432
2. 論文標題 Dead wood offsets the reduced live wood carbon stock in forests over 50 years after a stand-replacing wind disturbance	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Forest Ecology and Management	6. 最初と最後の頁 94 ~ 101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.foreco.2018.08.054	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Haga Chihiro, Inoue Takahiro, Hotta Wataru, Shibata Rei, Hashimoto Shizuka, Kurokawa Hiroko, Machimura Takashi, Matsui Takanori, Morimoto Junko, Shibata Hideaki	4. 巻 14
2. 論文標題 Simulation of natural capital and ecosystem services in a watershed in Northern Japan focusing on the future underuse of nature: by linking forest landscape model and social scenarios	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Sustainability Science	6. 最初と最後の頁 89 ~ 106
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11625-018-0623-9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Morimoto Junko, Nakagawa Kosuke, Takano Kohei T, Aiba Masahiro, Oguro Michio, Furukawa Yasuto, Mishima Yoshio, Ogawa Kenta, Ito Rui, Takemi Tetsuya, Nakamura Futoshi, Peterson Chris J	4. 巻 92
2. 論文標題 Comparison of vulnerability to catastrophic wind between Abies plantation forests and natural mixed forests in northern Japan	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Forestry: An International Journal of Forest Research	6. 最初と最後の頁 436 ~ 443
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/forestry/cpy045	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Morimoto Junko, Umebayashi Toshihiro, Suzuki Satoshi N., Owari Toshiaki, Nishimura Naoyuki, Ishibashi Satoshi, Shibuya Masato, Hara Toshihiko	4. 巻 15
2. 論文標題 Long-term effects of salvage logging after a catastrophic wind disturbance on forest structure in northern Japan	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Landscape and Ecological Engineering	6. 最初と最後の頁 133 ~ 141
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11355-019-00375-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Morimoto Junko, Negishi Junjiro	4. 巻 15
2. 論文標題 Ecological resilience of ecosystems to human impacts: resilience of plants and animals	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Landscape and Ecological Engineering	6. 最初と最後の頁 131 ~ 132
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11355-019-00376-9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Jayathunga, S., Owari, T., Tsuyuki, S.	4. 巻 29(2)
2. 論文標題 Analysis of forest structural complexity using airborne LiDAR data and aerial photography in a mixed conifer-broadleaved forest in northern Japan.	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Forestry Research	6. 最初と最後の頁 479-493
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11676-017-0441-4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Jayathunga, S., Owari, T., Tsuyuki, S.	4. 巻 10
2. 論文標題 Evaluating the performance of photogrammetric products using fixed-wing UAV imagery over a mixed conifer-broadleaf forest: Comparison with airborne laser scanning.	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Remote Sensing	6. 最初と最後の頁 187
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/rs10020187	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する

[学会発表] 計15件(うち招待講演 2件/うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Owari, T., Jayathunga, S., Kyaw Thu Moe, Hirata, Y., Suzuki, S. N., Morimoto, J.
2. 発表標題 Using historical aerial photography to reconstruct canopy structural changes of a mixed conifer-broadleaf forest after typhoon damage.
3. 学会等名 XI International Workshop on Uneven-aged Silviculture (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 尾張敏章・Sadeepa Jayathunga・鈴木智之・森本淳子・平田泰雅
2. 発表標題 台風被害に伴う針広混交林の長期的変化: 旧空中写真を用いた分析
3. 学会等名 第130回日本森林学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takahiro Inoue, Hideaki Shibata, Naoki Nakazumi, Chihiro Haga, Takanori Matsui
2. 発表標題 Combined effects of future changes of land use/land cover and climate on nitrogen leaching to stream water in a forest, farmland, and wetland dominated landscape, northern Japan
3. 学会等名 Global Land Programme 2018 Asia Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 C. Haga, T. Inoue, T. Matsui, J. Morimoto, H. Shibata, T. Machimura
2. 発表標題 Scenario analysis of landscape change and evaluation of terrestrial ecosystem services and landscape diversity using Forest Landscape Model
3. 学会等名 Global Land Programme 2018 Aisa conference proceedings (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 前田真理美、芳賀智宏、松井孝典、町村尚
2. 発表標題 人間社会および土地管理シナリオと森林景観モデルを用いた動物種の生息適地の将来予測
3. 学会等名 第66回日本生態学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 堀田亘、森本淳子、井上貴央、鈴木智之、梅林利弘、尾張敏章、柴田英昭、石橋聡、原登志彦、中村太士
2. 発表標題 大規模風倒攪乱とその後の施業が北方林の炭素蓄積に及ぼす長期的影響
3. 学会等名 第130回日本森林学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森本淳子・高野宏平・中川考介・Flavio Furukawa・饗庭正寛・小黒芳生・吉村暢彦・古川泰人・三島啓雄・小川健太・伊東 瑠衣・Sridhara Nayak・佐々井崇博・竹見哲也・柴田英昭
2. 発表標題 人工林の風倒リスク推定に基づく森林計画 現在気候下での風倒モデリング
3. 学会等名 第130回日本森林学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Junko Morimoto, Toshihiro Umebayashi, Satoshi Suzuki, Toshiaki Owari, Tohru Suzuki, Hideaki Shibata
2. 発表標題 The effects of salvage logging after a catastrophic wind disturbance on the wood carbon stock in northern Japan
3. 学会等名 18th International Boreal Forest Research Association Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 森本淳子
2. 発表標題 気候変動・人口減少と北海道の生態系の保全
3. 学会等名 地方学術会議「日本学術会議in 北海道」：多様性・共生の地域社会を目指して（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Jayathunga, S., Owari, T., Tsuyuki, S.
2. 発表標題 Estimation of volume and carbon stock using fixed-wing UAV-imagery: A study in a mixed conifer-broadleaf forest.
3. 学会等名 森林GISフォーラム 平成29年度学生研究コンテスト
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Chihiro HAGA, Takahiro INOUE, Wataru HOTTA, Rei SHIBATA, Hiroko KUROKAWA, Shizuka HASHIMOTO, Takashi MACHIMURA, Takanori MATSUI, Junko MORIMOTO, Hideaki SHIBATA
2. 発表標題 A Development of Future Scenario Simulation System of Natural Capital and Ecosystem Services on LANDIS-II Linking Qualitative Scenarios and Landscape Change Model in Japan
3. 学会等名 The 9th Ecosystem Services Partnership World conference proceedings (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 芳賀智宏, 井上貴央, 堀田亘, 町村尚, 松井孝典, 森本淳子, 柴田英昭
2. 発表標題 自然資本・生態系サービス評価のための森林景観シミュレーションモデルを用いたシナリオ分析手法の開発と課題
3. 学会等名 第65回日本生態学会大会講演要旨集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 森本淳子, 梅林利弘, 堀田亘, 鈴木智之, 尾張敏章, 井上 貴央, 柴田英昭, 渋谷正人, 石橋聡
2. 発表標題 大規模風倒かく乱後の風倒木搬出が森林の種組成と炭素蓄積に与える長期的影響
3. 学会等名 日本生態学会第65回全国大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 杉浦澗, 森本淳子, 中村太士
2. 発表標題 風倒木搬出や地ごしらえに伴うシカの採食が森林の回復に与える影響
3. 学会等名 日本生態学会第65回全国大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 森本淳子
2. 発表標題 森林生態系のレジリエンス 台風と森林植生
3. 学会等名 ELR 2017名古屋(招待講演)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	尾張 敏章 (Owari Toshiaki) (00292003)	東京大学・大学院農学生命科学研究科(農学部)・准教授 (12601)	
研究分担者	鈴木 智之 (Suzuki Satoshi) (20633001)	東京大学・大学院農学生命科学研究科(農学部)・助教 (12601)	
研究分担者	松井 孝典 (Matsui Takanori) (30423205)	大阪大学・工学研究科・助教 (14401)	
研究分担者	三島 啓雄 (Mishima Yoshio) (60534352)	立正大学・地球環境科学部・特任講師 (32687)	
研究分担者	柴田 英昭 (Shibata Hideaki) (70281798)	北海道大学・北方生物圏フィールド科学センター・教授 (10101)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	饗庭 正寛 (Aiba Masahiro) (80751990)	総合地球環境学研究所・研究部・特任助教 (64303)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関