



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	The effects of disturbance legacies on the long-term forest recovery after natural disturbances : Field-based and simulation evaluations focusing on windthrow and shallow landslides [an abstract of entire text]
Author(s)	堀田, 亘
Description	この博士論文全文の閲覧方法については、以下のサイトをご参照ください。 https://www.lib.hokudai.ac.jp/dissertations/copy-guides/
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(農学)
Dissertation Number	甲第16102号
Issue Date	2024-09-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/93576
Type	doctoral thesis
File Information	HOTTA_Wataru_summary.pdf



学位論文内容の要約

博士の専攻分野の名称： 博士（農学）

氏名 堀田 亘

学位論文題名

The effects of disturbance legacies on the long-term forest recovery after natural disturbances: Field-based and simulation evaluations focusing on windthrow and shallow landslides

（自然撓乱後の長期的な森林回復に撓乱レガシーが与える影響の解明
—風倒と斜面崩壊に着目した実測およびシミュレーション評価—）

森林生態系における自然撓乱とは台風や火災などによる森林倒壊のことを指す。自然撓乱は森林の構造や構成、機能などの一時的な破壊を通じて、炭素貯留をはじめとした生態系サービスに大きな影響を与える。一方で、生物多様性や景観内の環境の多様性維持に貢献しており、森林動態における不可欠なプロセスである。日本列島は台風の通り道であり、暴風による風倒や集中豪雨による表層崩壊が森林における重要な自然撓乱要因である。近年、気候変動に伴う自然撓乱の頻度、強度、規模の急速な変化が観測されつつある。そのため、撓乱後に速やかに森林を回復させるための方策が必要である。

自然撓乱後には一部の前生稚樹や枯死木、土壌などが残される。これらは撓乱レガシーと呼ばれ、撓乱後の森林回復の起点となりうる。撓乱レガシーの量や種類に影響する要因として、撓乱タイプと撓乱後の人間の対応が挙げられる。例えば、風倒ではほとんどの土壌が撓乱後も残るが、一定量の生立木は枯死木となる。一方で、表層崩壊では生立木、枯死木、土壌のすべてが斜面下部へと流下するため、滑落斜面上では撓乱レガシーが乏しい状態、反対に斜面下部では撓乱レガシーが多く堆積した状態となる。また、撓乱後の人間の対応の代表例として倒木搬出が挙げられる。倒木搬出は虫害や火災の発生防止、経済的損失の補填を目的として、撓乱で発生した枯死木を搬出する施業である。その後に、更新を妨げる林床草本や低木、病原菌が多いO層を除去するために掻き起こしが行われる場合もある。しかし、同時に前生稚樹が破壊され、枯死木の大半が除去される。回復の起点となる撓乱レガシーを破壊、除去してしまうため、その後の森林回復や種組成に大きな影響を与える可能性がある。本研究では風倒と表層崩壊後の森林回復に果たす撓乱レガシーの役割を実測とシミュレーションにより評価した。さらに、得られた知見に基づいて撓乱レガシーを活用した森林管理の可能性について議論した。

2 章では風倒後の倒木搬出による攪乱レガシー除去が森林全体の炭素蓄積に及ぼす長期的影響の解明を目的とした。北海道東大雪地域において以下の攪乱履歴を持つ林分を対象に生立木、枯死木、堆積有機物層(O 層)、鉱質土層の調査を行った：1954 年洞爺丸台風で(1)風倒被害を受けなかった老齢林(4 プロット)、(2)風倒後倒木を残置した林分(5 プロット)、(3)風倒後倒木を搬出した林分(6 プロット)。生立木炭素蓄積への倒木搬出の影響は小さかったものの、倒木搬出林分では生立木炭素蓄積に占める広葉樹の比率が大きい傾向がみられた。倒木残置林分では風倒直後に針葉樹の前生稚樹が多く生き残ったことで、現在針葉樹主体の森林が形成されている。一方で、倒木搬出林分では前生稚樹の破壊によって空いたニッチにパイオニア種の広葉樹が侵入し、それらの急速な成長により前生稚樹の減少分が埋め合わされたと考えられる。最も腐朽の進行した段階である腐朽度 5 の枯死木炭素蓄積は倒木残置林分で搬出林分よりも有意に大きかった。洞爺丸台風で発生した風倒木は現在も腐朽の進んだ枯死木として残存していることが示唆された。調査地域の森林ではエゾマツやアカエゾマツなどの定着に腐朽の進んだ枯死木を必要とする樹種が優占している。倒木搬出による腐朽の進んだ枯死木の減少はこれらの樹種の長期的な減少を招く可能性がある。一方で、枯死木全体の炭素蓄積では大きな差はみられなかった。倒木残置林分と搬出林分ともに、森林の発達過程において自己間引きを経験し、新しい枯死木の供給によって枯死木全体の量の差が縮まりつつあることが示唆された。O 層炭素蓄積は倒木残置林分で搬出林分よりも有意に大きい傾向がみられた。一般的に針葉樹リターは難分解性であることが知られており、針葉樹主体の森林が現在形成されている倒木残置林分で O 層炭素蓄積が大きくなったと考えられる。また、残置された大量の風倒木が分解されることによる O 層への炭素供給も一因と考えられた。

倒木搬出による腐朽の進んだ枯死木の減少は、倒木上更新をする樹種の長期的な減少を招く可能性がある。そこで 3 章では、森林景観モデル LANDIS-II に倒木上更新のプロセスを実装し、LANDIS-II を用いたシミュレーションによる、(1)風倒後管理が北方林の地上部バイオマス回復と種組成に与える長期的影響の解明と(2)複数回風倒を受けた場合の風倒後管理の影響の解明を目的とした。北海道富良野市に位置する東京大学北海道演習林の東半分 12,169 ha を対象に、2015~2130 年の森林景観動態を LANDIS-II を用いてシミュレーションした。シミュレーション期間中の風倒については、文献値に基づいて現在の風倒頻度、規模、強度を設定した。風倒発生年はシミュレーション 15 年目と 65 年目とした。風倒後管理シナリオは倒木残置、倒木搬出、倒木搬出+掻き起こしの 3 種類とし、各シナリオについて 10 回反復計算を行った。風倒を 1 度受けた林分では、倒木残置シナリオと倒木搬出シナリオで回復に大きな違いはなかったが、掻き起こしシナリオでは他の 2 シナリオに比べて地上部バイオマス回復が鈍化したほか、カンバ類が優占する森林となった。風倒を 50 年間隔で 2 度受けた林分では、2 度目の風倒後に倒木残置シナリオに比べて倒木搬出シナリオで地上部バイオマス回復が鈍化したほか、エゾマツとアカエゾマツが激減した。1 度目の風倒後は倒木残置シナリオと倒木搬出シナリオともに一定量の前生稚樹が残っていたため回復に大きな違いはなかったと考えられる。し

かし、倒木残置シナリオでは枯死木が豊富に残っていたため稚樹が多く定着していた一方、倒木搬出シナリオでは枯死木が搬出されたため特に枯死木上に定着場所を依存するエゾマツとアカエゾマツの稚樹の定着量が少ない状態となった。結果として 2 度目の風倒が発生した際に森林回復の起点となる前生稚樹の量や種組成が両シナリオで異なったことで回復の違いが生まれたと考えられる。また、掻き起こしシナリオの場合には前生稚樹やササが破壊され、裸地からの回復となった。そのため、カンバ類のようなパイオニア種が優占する森林となったと考えられる。

日本におけるもう 1 つの重要な自然攪乱要因が表層崩壊である。表層崩壊によって移動・堆積した植生・枯死木・土壌は攪乱レガシーとして斜面上に不均質に分布し、森林回復に影響を与える可能性がある。そこで 4 章では、斜面上の位置による表層崩壊後の森林の各構成要素（生立木、下層植生、枯死木、土壌）の量と生立木、下層植生の種組成の長期的変化の違いの解明を目的とした。対象地域は北海道胆振・日高地方の冷温帯広葉樹林が優占する地域とした。表層崩壊後の経過年数が 3、18、40 年と 74 年以上の斜面を 5 か所ずつ選定した。また、74 年前の空中写真で森林であり近年攪乱を受けていないと考えられる斜面を **Reference** として 3 斜面選定した。各斜面を上部、中部、下部に区分し、その中で生立木、下層植生、枯死木、表層土壌の調査を行った。生立木地上部バイオマス量は特に表層崩壊後 40 年時点で上部において中部、下部に比べて有意に小さかった。そのため下部のゾーンほどバイオマス蓄積速度が速かった。表層崩壊後では斜面上部は斜度が大きく表面浸食の影響を受けやすいため、植物の定着が難しい。一方で攪乱レガシーが多く堆積する斜面下部ではレガシーからの直接的な植生回復が起こる。結果として斜面上部ほど地上部バイオマスの回復が遅くなったと考えられる。下層植生量は斜面上の位置によって異なる時系列変化を示した。上部では 40 年目、中部では 18 年目、下部では 3 年目でそれぞれピークを迎えた。攪乱レガシーが多く堆積し残存植生や埋土種子からの回復が可能だった下部では、崩壊直後から旺盛な回復を見せ、その後森林発達に伴い林床が暗くなったことで下層植生量が減少していったと考えられる。一方、攪乱レガシーが乏しく森林の回復が下部より遅かった斜面上部では下層植生量が緩やかに回復した後、林冠閉鎖に伴い減少していったと考えられる。枯死木量も斜面上の位置によって異なる時系列変化を示した。斜面上部では表層崩壊直後の枯死木がほとんどない状態から、森林の発達に伴う新たな枯死木の供給によって、時間経過に伴い単調増加するパターンを示した。一方で、斜面下部では崩壊前から存在した枯死木や崩壊によって生じた枯死木が大量に堆積した。これらは時間経過とともに分解され土壌へと移行していくが、同時に森林発達に伴う新たな枯死木供給も起こる。両者が組み合わさった結果、遷移系列の両端で枯死木量が大きくなる「U 字型時系列変化」を示した。表層土壌の炭素・窒素量は斜面下部ほど速い回復を示した。斜面上部は表面浸食の影響が大きく土壌が不安定であり、植生回復が遅いことによりリター供給も斜面下部に比べて小さい状態であったため、回復が遅くなったと考えられる。生立木種組成については斜面上部ほど耐乾性の高い樹種が優占したほか、表層崩壊からの年数経過に伴い耐陰性の高い樹種が

優占した。下層植生の種組成では、斜面下部ほど時間経過に伴う森林性草本の優占率の増加が速かった。全体を通じて、斜面下部ほど表層崩壊後の森林生態系の遷移や回復が速いことが示唆された。

森林動態の長期予測や気候変動下での応答予測には、表層崩壊後の森林回復のシミュレーションが求められる。そこで 5 章では、斜面上の位置による斜度や土壌水分条件の違いが表層崩壊後の森林遷移に及ぼす影響を表現できるように LANDIS-II を改良した。その後、4 章の実測データを用いて改良モデルを調整・検証した。また、2018 年北海道胆振東部地震により 3,236ha の表層崩壊が発生した北海道厚真町の森林景観を対象に、改良モデルを用いて表層崩壊後 100 年間の森林回復をシミュレーションした。シミュレーションの結果、攪乱レガシーが多い斜面では地上部バイオマス回復が速く、耐陰性の高い樹種が優占する森林が形成されやすいことが示唆された。平均斜度が大きい斜面では地上部バイオマスの回復が遅くなったが、攪乱レガシーが多い斜面では森林回復に果たす新規着個体の役割が相対的に小さいため、平均斜度の影響は小さかった。

攪乱レガシーが森林回復に果たす役割は風倒と表層崩壊で共通していた。前生稚樹は攪乱前の種組成情報を攪乱後の森林へと継承するとともに、地上部バイオマス回復の起点となっていた。枯死木は、特にエゾマツやアカエゾマツなど枯死木上に更新場所を依存する樹種の更新サイトとして機能していたほか、分解による土壌への栄養供給も担っていた。さらに森林土壌は樹木の成長を促進させる役割を担っていた。本研究で得られた知見から攪乱後の速やかな森林回復のために、攪乱地の位置、攪乱レガシーの状況、地域の森林タイプの 3 つを考慮して攪乱後の対応を決定することを推奨する。まず、攪乱地が人家や林業地から遠い奥地の場合に攪乱レガシーを残すことが可能である。その中でも、攪乱後に前生稚樹が多く残っている箇所は自然回復ポテンシャルが高いため、天然更新とすることで速やかな自然林回復が見込めるだろう。また表層崩壊地よりも風倒地の方が多くのレガシーが残るほか、表層崩壊地の斜面下部では多くのレガシーが堆積する。したがってこれらの箇所では、天然更新とすることで速やかな自然林回復が見込めると考えられる。さらに、エゾマツやアカエゾマツなどの更新に枯死木が不可欠な樹種が木材生産や保全上重要な地域においては、積極的に枯死木を残置することでそれらの樹種の持続的な更新が望めるだろう。しかし、森林所有者や林業従事者は、攪乱後には育成した樹木を木材として販売することや、林業上支障となる枯死木を撤去したいと考えるため、攪乱レガシーを残すという選択が難しい可能性がある。そのため、攪乱レガシーを活用した森林管理を社会に実装していくためには、速やかな森林回復の実現に必要な十分な攪乱レガシー量や、攪乱レガシー残置に伴う二次被害の定量化が必要である。