

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2023

課題番号：20K06143

研究課題名(和文)強度間伐による生物多様性と生態系機能の向上はいつまで持続するのか

研究課題名(英文)Until when will the enhancement of biodiversity and ecosystem function through intensive thinning be sustained?

研究代表者

城田 徹央 (Shirota, Tetsuo)

信州大学・学術研究院農学系・助教

研究者番号：10374711

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：強度間伐から20年が経過したヒノキ人工林の生物多様性について調査し、それまでのモニタリングデータと併せて解析した。林床の光環境は14年目から急速に悪化し、これを境に種多様性、個体数、樹形形成過程、生産性が低下した。一方、残存個体は緩慢に成長を続けており、これ以上急速な枯死は進まないが見込まれた。ただし、残存した種群は低木種であり、針広混交林化やそれに伴う生物多様性の向上は見込まれない。また、光合成産物の多くは上木であるヒノキの幹の生産に使われていた。つまり、低木層の広葉樹による生態系機能の発揮は困難であった。このことから15～20年間が強度間伐の効果が持続する“有効期間”である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

強度間伐の生物多様性向上に対する顕著な効果は最初の5年間に留まった。その後、15年までは低木層としての発達および多くの葉量を蓄えつつ土壌へ供給することで、土壌の改善を通じた生態系機能の向上に寄与すると考えられた。しかし、林冠が閉鎖すると低木層の機能が大きく損なわれる。そのため、強度間伐による生態系機能の改善には15～20年間という効果の“持続期限”が存在する。今回明らかにされた“有効期限”を念頭に置いた森林施業計画を策定することで、引き続き生物多様性と生態系機能を向上させることが可能となる。

研究成果の概要(英文)：A study was conducted on the biodiversity of a Hinoki cypress plantation 20 years after intensive thinning, analyzing the data along with previous monitoring data. The light environment on the forest floor deteriorated rapidly from the 14th year, leading to a decline in species diversity, population numbers, tree form development, and productivity. Most of the remaining species were understory species, and the conversion to a mixed forest of conifers and broadleaf trees, along with the associated increase in biodiversity, seems not to be possible. Additionally, a large portion of the photosynthetic assimilation was allocated to stem production of the Hinoki cypress. In other words, it took more work for the ecosystem functions to be expressed by the broadleaf trees in the understory. From this, the effects of intensive thinning last for about 15 to 20 years.

研究分野：森林科学

キーワード：強度間伐 生物多様性 生態系機能 有効期間

### 1. 研究開始当初の背景

近年、林野庁は人工林の高齢化や管理不足を背景に、施業効率向上の改善策として強度間伐を推奨している(林野庁 2011)。強度間伐により林床の光環境が改善され、下層植生の定着促進を通じて生物多様性が向上するので(豊田ら 2001, 村本ら 2005, 矢田 2011)、水質浄化機能など森林の持つ生態系サービス(Millennium Ecosystem Assessment 2015)の質的向上が期待されている(Gomi 2008, 平岡ら 2010, Teramageら 2013, 根岸・清和 2017)。

信州大学農学部では1995年、60年生ヒノキ林分に強度間伐を実施し、以後、5年おきにモニタリングを継続してきた。当初、草本植物が卓越したが(辻野・川崎 2000)、10年目には木本植物が発達し、15年目には低木層を形成するに至った(城田ら 2012)。ところが14年目から21年目にかけて、林冠の急速な再閉鎖が進行したため(川村・城田ら 2013)、19年目には低木層でサイズ依存的な枯死が発生した。この結果、低木層の種数も27種から12種へと大幅に低下した(城田ら 未発表データ)。一方で24年目の現在、枯死する個体、消失する種は限定され、それぞれの個体は成長を持続している(城田ら 未発表データ)。これらの事実は、強度間伐の効果が一時的なものにとどまる可能性を示唆している。

下層植生の多様性の研究が進展する一方で、その炭素固定機能に関する研究は限定されており、同じ調査地でのモニタリングの事例はさらに少ない(清野 1990, 宇都木ら 2007)。強度間伐後15年目においては、下層植生の現存量(Y)は林分全体のわずか4%に過ぎなかったが、その純一次生産(NPP, 炭素固定機能)は林分全体の15%にも達していた(城田ら 2013)。さらに、その多くが蓄積ではなくリター生産(L)に配分されていたことから、下層植生の発達によって、物質循環が加速化されていると考えられた(城田ら 2013)。しかし、この特性が25年目の林冠閉鎖後、つまり種数が減少し個体サイズが増加した状態でも維持され続けているのか、急激に減少したのか予測がつかない。

### 2. 研究の目的

本研究課題の問いは次の2点に集約される。

私たちは強度間伐の生物多様性に及ぼす効果を過大評価しているのではないだろうか？

強度間伐は25年を経過しても、なお、バイオマス量や炭素固定の視点から生態系機能を向上させているのだろうか？

本研究の目的は、これらの問いを解明し、森林施業における強度間伐の持続可能性、あるいはその上限である“有効期限”を明確にすることである。下層植生の構造的・機能的長期モニタリング・データを最大限に活用し、林冠解放と林冠閉鎖にともなうダイナミックな応答を解明する。下層植生を対象とした長期的な研究が少ないため、20年間のモニタリングを基盤にする本研究は学術的な優位性を持つ。特に、このなかで種の減少をもたらす適応能力の相違の検出、残存種の樹冠可塑性による生存戦略・成長戦略について、長期的視野からの解釈が初めて可能になる。

### 3. 研究の方法

調査地は信州大学農学部附属アルプス圏フィールド科学教育研究センター手良沢山演習林4林班に位置する強度間伐モニタリング試験地であり、林冠層は84年生ヒノキから構成される。この試験地では65年生にあたる1994年に本数間伐率50%の強度間伐が施された。20m四方の固定プロットが12個設置され(うち1プロットは無間伐)、1999年から5年おきにモニタリング調査が実施されてきた。光環境が14年目を境に急激に減少しており(図1)、この前後で下層植生の構造や多様性が変化することが予測される。

### 4. 研究成果

#### (1) 林分構造

毎木調査により林冠層のヒノキおよび低木層・草本層のサイズ等の平均値を求めた(図2, 3)。林冠層のヒノキは枝下高が変化しない状態で樹高を大きくしており、樹冠長の増加が見込まれる(図2)。胸高直径も間伐後、一定ペースで増加していた(図2)。これに対し樹冠投影面積は、2014年まで増加したもののそれ以降一定となった(図2)。すなわち2014年に林冠が閉鎖しており、急激な光環境の変化(図1)はこの樹冠ならびに林冠の閉鎖状態の影響を強く受けていると推察される。

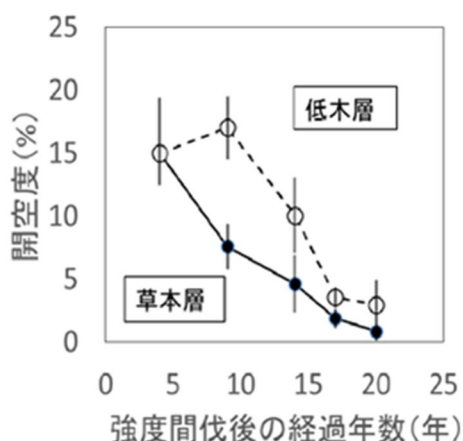
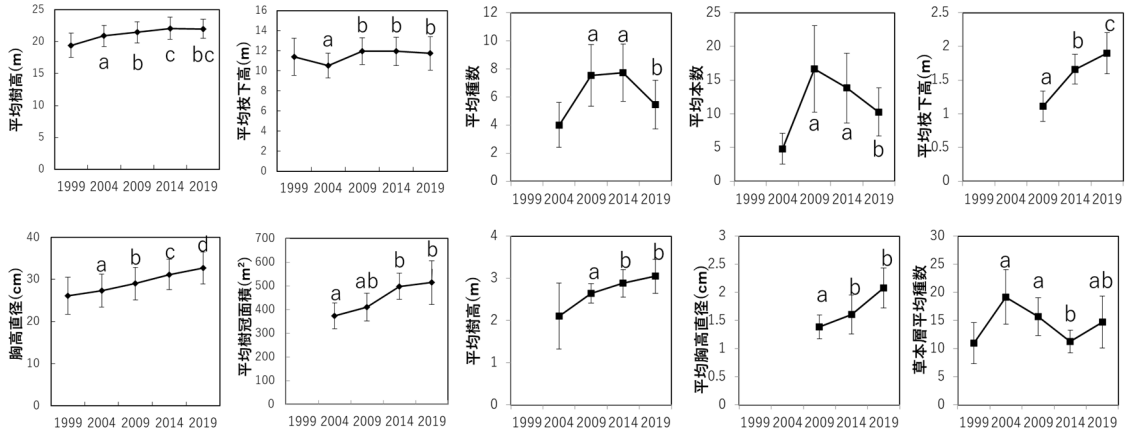


図1. 低木層上部と草本層上部の光環境の推移

林冠再閉鎖による低木層の光環境の悪化が9年目から14年目にかけて始まり、17年目から20年目にかけて下げ止まった。草本層の光環境は、それ以前に悪化したが、これは低木層による被圧の影響も受けている。



**図2 . 林冠層ヒノキのサイズの推移**

2004年および2014年がそれぞれ10年目および20年目に相当する。異なるアルファベットが付された値は有意に異なる(補正 Turkey 法, 5%水準)。

**図3 . 低木層および草本層のサイズ等の推移**

2004年および2014年がそれぞれ10年目および20年目に相当する。異なるアルファベットが付された値は有意に異なる(補正 Turkey 法, 5%水準)。

低木層においても2014年には大きな変化があった。すなわち個体数と種数の激減である(図3)。被圧条件下での枯死はサイズ依存性が表れやすく、小さな個体がなくなり大きな個体が残存する。このため残存個体の樹高や胸高直径の平均値の変化には、実際の成長のほかに、小さな個体がなくなったことによる平均値の増加が含まれる。現在のところ分離できていないが、個体が少なくなったことで競争が緩和され成長が促進されたと考察することは早計である。一方、草本層における種数の変化が僅かであることは、それ以前から林冠層と低木層の両方に被圧されていたため、林冠層の閉鎖が進み低木層の被圧が弱まったことの複合的な効果として表面化していない可能性が考えられる。

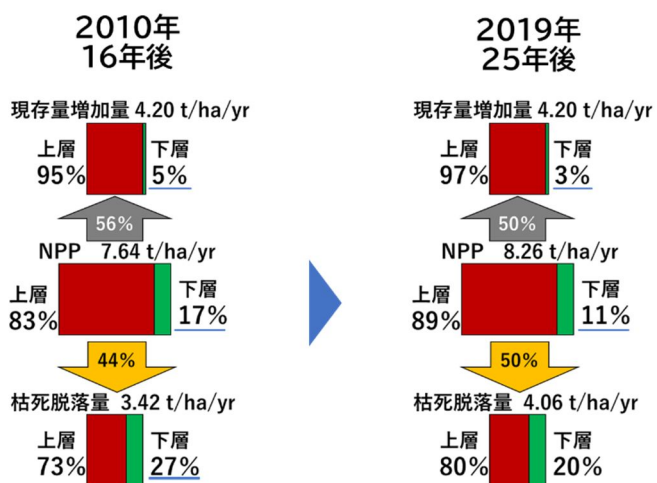
以上を総括すると、20年目に相当する2014年時点で、1)林冠が閉鎖し、2)林冠層による光遮断が強まり、低木層の光環境は悪化した。3)低木層では個体数と種数が減少したが、相対的にサイズが大きな個体が残存していることが考えられる。4)草本層の応答は複合的で中立性を示す。

(2) 2010年度と2019年度における純一次生産、現存量増加量およびリター生産量

図4に2010年度と2019年度における炭素固定・炭素分配の状況を示した。いずれの年度においても純一次生産量の約半分が現存量増加に、約半分がリター生産に分配されている。

林冠層(上層)のヒノキの純一次生産量は、2010年度に6.34 ton/ha/yr、2019年度に7.35 tpn/ha/yrと増加したが、これは2010年度には林冠が未閉鎖であり利用可能な光量を細くできていなかったことが原因であると考えられる。一方、低木層(下層)の純一次生産は2010年度の1.30 ton/ha/yrから、2019年度の0.90 ton/ha/yrと大きく減少した。林冠が閉鎖し、個体数が減少したこと(図3)、光環境が劣化したこと(図1)が低木層を構成する樹木の炭素固定を著しく低下させたと考えられる。

地上部の現存量増加量は2010年度と2019年度のいずれも4.20 ton/ha/yrと変わりなく、同時に林冠層と低木層の占める割合も大きく変化していなかった。すなわち地上



**図4 .2004年および2019年における炭素固定と炭素配分の内訳**

NPPは現存量増加量とリター生産量(枯死脱落量)に分配される。これら3項目のなかでのそれぞれの上層と下層の割合をパーセントで示した。

部現存量の大半は上層のヒノキによって占められており、炭素蓄積の機能に対して低木層はほとんど寄与しないことが推察される。

低木層樹木のリター供給量は、2010年では0.92、2019年では0.81と大きく変化しなかった。生産しては全ての葉を落葉して地上に炭素を供給するという物質循環への寄与は、林床の光環境に関わらず安定した形質であるといえるだろう。しかし、下層個体の純一次生産が低下すると、これらの柔らかいリター層の供給が低下して、団粒構造の形成を低減させ、ひいては貯水や浄化といった機能を低下させるおそれがある。

総括すると、林冠閉鎖の前後では林冠層と低木層の純一次生産の量と割合が異なってきており、炭素循環型の生態系から炭素貯留型の生態系へとシフトしつつあるといえる。

### (3) 林冠が再開鎖した壮齢ヒノキ人工林における低木層の種組成と光環境

調査地に幅10m、長さ130mのベルトプロットを尾根から谷に向けて6本設置した。その中で全天球カメラを用いた低木層上部の開空度を計測と曇天日の相対光環境の計算、樹高2m以上の全ての個体の樹高とDBHの毎木調査を行った。

計測した樹種は42種、1408個体であった(図)。このうち出現頻度と個体数が十分であった14種を見ると、明るい環境に出現するグループAと光環境に関わらず出現するグループBに分けられた(図5、6)。これは応答性が異なる種が共存することを示しており(図7)、ニッチ分割によって種多様性が向上していることを示している。

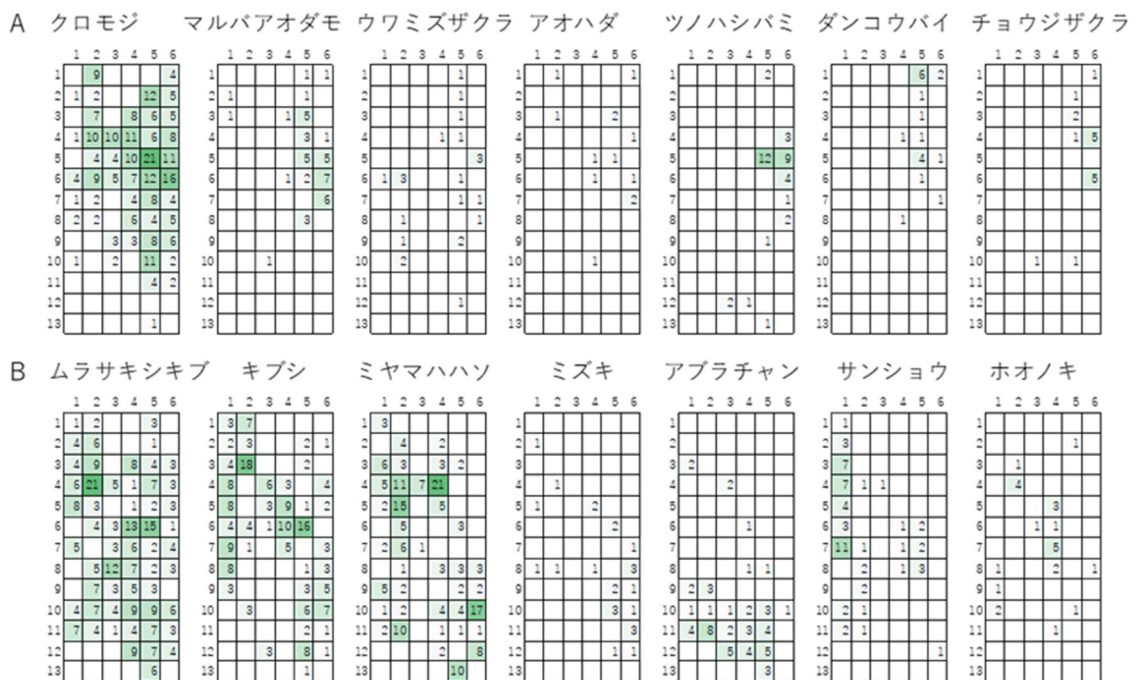


図5 2タイプ(上段:A, 下段:B)に属する各樹種のプロットごとの個体数

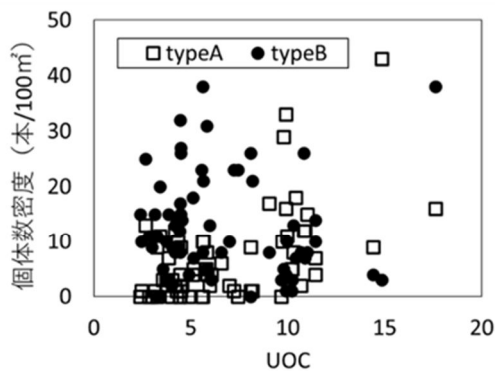


図6 2タイプの個体数密度と光環境の関係  
タイプA:  $r=0.548$ ,  $p<0.001$ ; タイプB:  $r=0.079$ ,  $p=0.525$

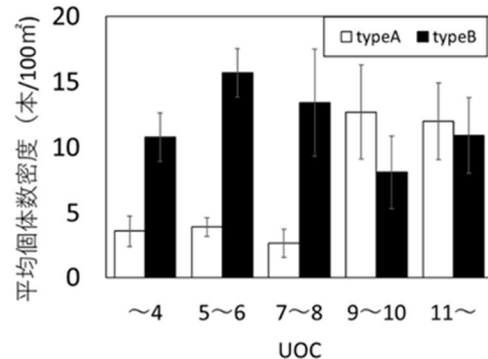


図7 光環境クラス別の2タイプの個体数密度

#### (4) 林冠が再閉鎖した壮齢ヒノキ人工林におけるムラサキシキブの樹形の構造特性

ムラサキシキブは強度間伐試験の林床に広く分布しており、その出現確率は光環境と相関を示さなかった(図5~7)。そこで林冠が閉鎖して光環境が悪化し始めた2019年と2023年の樹冠形状を比較したところ大きく変化しており、高さや厚みよりも広い樹冠を形成し、かつ葉のオーバーラップを軽減し、暗い環境へ適応的な形状を示していた(図8)。

同時に樹形形成過程を調査したところ、ムラサキシキブがChampagnatモデルに従って樹形を構築しており、そのアーキテクチャユニット同士の空間的な重複が避けられていることが明らかにされた(図9)。

タイプAのクロモジに関しては2019年時点で樹形を変化させていたが、ムラサキシキブはさらに暗くなってから樹形を変化させていた。これはムラサキシキブが2019年の段階では樹形を変化させる必要はなかったが、より暗くなってから樹形形成様式を変えることによって適応を始めていることを示唆している。

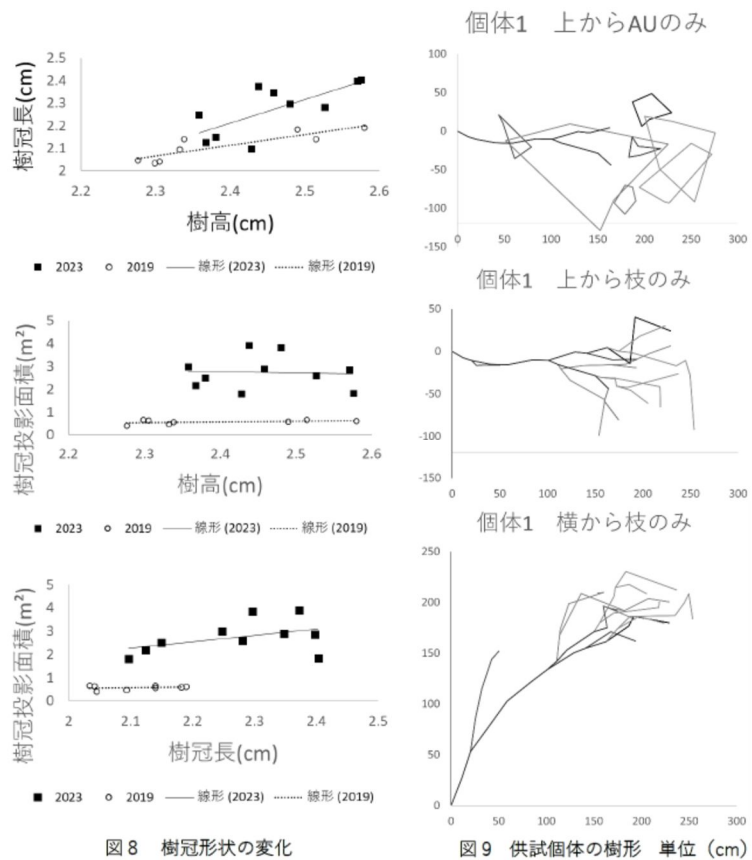


図8 樹冠形状の変化

図9 供試個体の樹形 単位 (cm)

#### (5) 結論

光環境や種多様性、個体数の変化は、強度間伐の“有効期限”が長くても20年であることを示している。この間にチョウジザクラやヤマグワなど一定の明るさを必要とする樹種は大幅に個体数を減らしていたか、あるいは見られなくなった。より高い植物種多様性を持続させるのであれば、“有効期限”は、さらに短く、15年程度と設定するべきであろう。いずれにしても林冠の再閉鎖と低木層の挙動が連動していることから、間伐の間隔だけでなく、間伐の空間的な特性にも配慮すべきかもしれない。つまり、間伐により除去する個体を空間的に分散させるよりも集中させるほうが、林冠閉鎖が遅れる。どの程度の広さの林分に対し、このような空間的不均一性を形成させるのがよいのか、まだ研究は十分ではないが、生物種多様性の創出と維持、ひいては生態系サービスの向上を目的とする場合、研究はまだ途上にあるといえる。空間統計学にもとづくシミュレーターを制作できる数理研究者との共同作業も視野に入れたフィールドデータの蓄積が求められる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Shirota T., Iwasaki C., Okano T., Oya S.	4. 巻 20
2. 論文標題 Natural regeneration and artificial thinning for early forest restoration on permanently closed ski slope	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of GEOMATE	6. 最初と最後の頁 115-120
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.21660/2021.82.GX262	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20件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 大野田直弥, 城田徹央, 大塚大, 齋藤仁志, 岡野哲郎
2. 発表標題 急傾斜地で萌芽更新した広葉樹の幹傾斜と樹冠可塑性
3. 学会等名 第8回山岳学術集会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山崎 千種, 城田 徹央, 齋藤 仁志, 岡野 哲郎
2. 発表標題 伐採による攪乱強度の違いが更新木の種組成に与える影響
3. 学会等名 第8回山岳学術集会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大野田直弥, 城田徹央, 岡野哲郎
2. 発表標題 UAVオルソ画像を用いた広葉樹の樹冠の広がりや幹傾斜の評価
3. 学会等名 第134回日本森林学会大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山崎 千種, 城田 徹央, 齋藤 仁志, 岡野 哲郎
2. 発表標題 アカマツ - ヒノキ二段林におけるアカマツ択伐 2 年後の更新木の種組成
3. 学会等名 第134回日本森林学会大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 一柳 きくの, 城田 徹央, 岡野 哲郎
2. 発表標題 ヒノキ人工林における間伐後経過年数に対するスズタケと広葉樹の応答
3. 学会等名 第11回中部森林学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中来実, 城田徹央, 岡野哲郎
2. 発表標題 下刈り完了後5年が経過したスギの成長と競合状態に及ぼす省力化の影響
3. 学会等名 第11回中部森林学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 城田徹央, 小柳津有香, 安江恒, 岡野哲郎
2. 発表標題 トドマツ枝条の辺材体積と形成層面積に関する相対成長関係
3. 学会等名 第11回中部森林学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 城田徹央, 田中来実, 飯島健史, 岡野哲郎
2. 発表標題 下刈省力化完了から 5 年経過したスギの成長と競合状態は良好に保たれた
3. 学会等名 第133回日本森林学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大野田直弥, 城田徹央, 大塚大, 齋藤仁志, 岡野哲郎
2. 発表標題 株立ち下広葉樹の樹冠可塑性と幹傾斜
3. 学会等名 第133回日本森林学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山崎千種, 城田徹央, 齋藤仁志, 岡野哲郎
2. 発表標題 アカマツ上木の択伐跡地における 2 年目の広葉樹の更新
3. 学会等名 第133回日本森林学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 城田徹央, 水谷天哉, 藤岡薫子, 林亮臣, 岡野哲郎
2. 発表標題 強度間伐後の林冠再開鎖が下層植生の構造と機能に及ぼす影響 (1) 低木の樹形
3. 学会等名 第10回中部森林学会大会
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 藤岡薫子, 城田徹央, 林亮臣, 岡野哲郎
2. 発表標題 強度間伐後の林冠再開鎖が下層植生の構造と機能に及ぼす影響 ( 2 ) クロモジの樹形形成過程の復元
3. 学会等名 第10回中部森林学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 林亮臣, 藤岡薫子, 城田徹央, 岡野哲郎
2. 発表標題 強度間伐後の林冠再開鎖が下層植生の構造と機能に及ぼす影響 ( 3 ) 下層植生のNPPに対する寄与
3. 学会等名 第10回中部森林学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宮城昂, 城田徹央, 岡野哲郎
2. 発表標題 南アルプス大規模雪崩跡地における高木性樹木の更新初期過程
3. 学会等名 第10回中部森林学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 城田徹央, 齋藤大, 安江恒, 小田 ( 田中 ) あゆみ, 松浦陽次郎, Bayarbaatar S, Baatarbileg N, Gerelbaatar S.
2. 発表標題 モンゴル北東部における75年生Larix sibirica林の地上部バイオマスと純一次生産
3. 学会等名 第68回日本生態学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大野田 直弥, Yannik Wardius, 城田 徹央, 岡野 哲郎, Sebastian Hein
2. 発表標題 コナラの幹傾斜に対する樹冠可塑性および斜面傾斜の影響
3. 学会等名 第13回中部森林学会大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 伊藤 太陽, 城田 徹央, 岡野 哲郎
2. 発表標題 89年生ヒノキ林縁個体の大枝の1次枝と2次枝における心材分布パターン
3. 学会等名 第13回中部森林学会大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 城田 徹央, 一柳 きくの, 岡野 哲郎
2. 発表標題 ササ型林床ヒノキ人工林における間伐後の下層植生の発達様式
3. 学会等名 第135回日本森林学会大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 伊藤 太陽, 安部 有佳子, 城田 徹央, 岡野 哲郎
2. 発表標題 ヒノキ林縁個体の1次枝と2次枝における心材と辺材の軸方向分布
3. 学会等名 第135回日本森林学会大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 牧崎 遼詩, 城田 徹央, 岡野 哲郎
2. 発表標題 林冠が再閉鎖した壮齡ヒノキ人工林におけるムラサキシキブの樹形の構造特性
3. 学会等名 第135回日本森林学会大会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 小池 孝良, 北尾 光俊, 市栄 智明, 渡辺 誠	4. 発行年 2020年
2. 出版社 共立出版	5. 総ページ数 264
3. 書名 木本植物の生理生態	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>森林・環境共生学コース4年の田中来実さんが第11回中部森林学会大会において学生発表奨励賞を受賞  <a href="https://www.shinshu-u.ac.jp/faculty/agriculture/news/2021/12/-411.php">https://www.shinshu-u.ac.jp/faculty/agriculture/news/2021/12/-411.php</a>          総合理工学研究科農学専攻2年の大野田直弥さんが第9回山岳科学学術集会において優秀賞を受賞  <a href="https://www.shinshu-u.ac.jp/faculty/agriculture/news/2023/12/no9.php">https://www.shinshu-u.ac.jp/faculty/agriculture/news/2023/12/no9.php</a></p>
--

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	岡野 哲郎  (Okano Tetsuo)  (00194374)	信州大学・学術研究院農学系・教授   (13601)	

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
---------	---------