

大規模 IoT 観測に立脚した自然と都市を繋ぐ木質資源 D X マネジメントシステムの構築

代表研究者	中島 徹	東京大学 大学院農学生命科学研究科 助教
共同研究者	大島 佳季雄	一般社団法人食農健 代表理事
	Yukio Koibuchi	National Institute of Standards and Technology

1.1 はじめに

主に化石燃料の使用によって、大気中の二酸化炭素濃度は上昇し続けている (Dhakal et al., 2022; IPCC, 2022)。その中で、森林は炭素の吸収源として機能する (Valentini et al., 2000)。しかしそれと同時に、伐採を行うことによって森林は炭素放出源にもなり得る。しかし、伐採によって森林バイオマスから失われた炭素は、木材製品として固定されたり、林地残材として林内にとどまったりと、即座にすべてが大気中に放出されるわけではない。すなわち、伐採は炭素放出ではなく、森林バイオマスという炭素プールから、伐採木材製品 (HWP) や林地残材といった異なる炭素プールへと炭素を移動させる力として捉えることができる。伐採木材製品の炭素蓄積は、パリ協定下で森林の二酸化炭素排出・吸収量の算定に計上できるものである。日本では、2020 年度の森林の二酸化炭素吸収量約 4050 万 t-CO₂ のうち、約 285 万 t-CO₂ が伐採木材製品による炭素貯蔵量であり、この値は農地・牧草地の吸収量 (約 270 万 t-CO₂) や都市緑化等による吸収量 (約 130 万 t-CO₂) よりも大きな値となっている (林野庁, 2022)。このように森林の炭素吸収・排出を考える上では伐採木材製品の考慮も欠かせないものであると言える。また、伐採木材製品は炭素固定による炭素貯留効果だけでなく、エネルギーとして木材を利用することで化石燃料の使用を代替して炭素放出量を削減する効果や、生産・利用過程でエネルギーを大量に消費する素材を代替することによって炭素放出量を削減する効果を持っている (佐藤, 2021)。そのため、森林バイオマスの成長に伴う炭素吸収量、伐採木材製品の利用によって生じる炭素貯留効果に加えて、これらの代替効果も森林から生じる炭素放出量削減効果として捉えることができると考えた。

日本は国土の約 3 分の 2 が森林であるが、そのうちおよそ 4 割は人工林である。現在、日本の人工林はその半数が 50 年生を超えており、本格的な利用期を迎えている (林野庁, 2022)。カーボンニュートラルの実現のためには、森林を伐採せずに森林バイオマスの蓄積を増やすよりも、伐採を行って木材利用を進めていくことが重要である。「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」(令和 3 年 10 月 22 日閣議決定) では、「利用期を迎えた人工林について「伐って、使って、植える」循環利用を確立し、木材利用を拡大しつつ、成長の旺盛な若い森林を確実に造成していくことが重要である」と述べられている通り、伐採・再造林の推進と木材利用の拡大が国の重要課題となっている。

本研究では、このような社会的、政策的背景を踏まえて、伐採を行って木材を利用することの公益的意義を明らかにしようとした。山形県鶴岡市旧温海町民有林のスギ人工林を対象にした。持続的に森林を経営し、公益的機能を発揮させるためには、木材生産を行って収益を得る必要があるため、木材生産を前提とした森林経営を評価対象にした。大気中の炭素が樹木によって固定され、HWP を経て、再び大気中に放出されるまでを 1 つのライフサイクルとして捉え、その過程で生じる炭素放出量削減効果を統合的に評価し、主伐を行うことの利点を炭素放出量削減の観点から明らかにした。ライフサイクルアセスメント (LCA) の先行研究をもとに、森林経営の炭素放出量削減効果について全体的な傾向を明らかにした。炭素放出量削減効果は木材のライフサイクルを通した総合的な効果であり、大きく 3 つの炭素プールに分けることができる。1 つ目は林内の炭素蓄積であり、これは立木蓄積に加え、伐採によって生じる根株と枝条リターも含んでいる。2 つ目は HWP の炭素蓄積であり、本研究で考慮した HWP は建築資材 (製材)、パーティクルボード (PB)、紙である。3 つ目が非木材製品を木材製品で代替することによる潜在的な炭素放出量削減効果である。本研究では非木造住宅を木造住宅で代替する効果と、化石燃料を木質バイオマス燃料で代替する効果の 2 種類の代替効果を考慮した。

日本では、都道府県ごとの伐採木材製品の炭素固定量についての先行研究 (松本・加用, 2021) や、各木材製品についての LCA 研究 (Nakano et al., 2018; 桂, 2001 ; 林野庁木材利用課, 2016) は存在する。ま

た、近年はCLTに関するLCA研究も進みつつある(Nakano et al., 2020a; Nakano et al., 2020b)。しかし、森林から生じる他の効果との関連を分析した研究はない。海外でも木材製品に関するLCA研究は多く行われている。特に、木造建築物は、その大きな炭素貯留効果から気候変動対策として注目されている。Fauzi et al. (2021)はハイブリッド木造高層ビルに対するLCAを行い、Carcassi et al. (2022)はバイオベースの断熱材の使用による温室効果ガス排出の減少を評価した。Cordier et al. (2022)はLCAと動的モデリングの組み合わせを試みた。Resch et al. (2021)は、建築物の耐用年数が結果に大きく影響を与えることを示した。Himes and Busby (2020)は中層ビルのLCAに関する18の事例を比較した。木造建築物に関する各国の研究事例としては、カナダの事例(Head et al., 2021)や中国の事例(Chen et al., 2022)、バングラデシュの事例(Islam et al., 2022)、マレーシアの事例(Balasbaneh and Bin Marsono, 2018)などがある。Sahoo et al. (2019)は木材製品のLCAに関するレビューを行い、ライフサイクルの中で製品製造の段階が最も大きな環境影響を与える傾向があることを示した。Nabuurs and Mohren(1995)は森林蓄積とHWP蓄積を合わせて森林の炭素吸収を分析した。加えて、ライフサイクルアセスメントを用いることで代替効果も考慮して、森林の炭素放出量削減効果を評価した研究では、アメリカ太平洋岸北西部を対象としたもの(Perez-Garcia J et al, 2005)やスウェーデンを対象としたもの(Eriksson et al., 2007)があるが、いずれも林分レベルでの評価である。また、地位については考慮されていない。林分レベルの評価を通して、主伐の炭素放出量削減効果への影響や炭素放出量削減効果の時間的変動の特徴が理解できる。その一方で、森林経営計画全体の炭素放出量削減効果を評価するためには地域レベルでの評価が必要となる。また、地位の良いところを積極的に管理することは木材生産量の増大につながるので、森林経営計画において地位の考慮は重要である。そこで本研究では、林分レベルと地域レベルという2つの地理的スケールと、3つの地位を考慮した。

2. 方法

2.1 対象地の説明

対象地は山形県鶴岡市旧温海町のスギ人工林である。この森林は温海町森林組合によって管轄されている。Suzuki et al. (2018)はこの森林を森林管理ユニットに分け、収益の最大化を目的として、それぞれのユニットに最適な育林体系を割り当て、収穫計画を策定した。このとき、収益が得られない林分は計画に含まれていない。本研究では Suzuki et al. (2018)が設定したユニットおよび収穫計画に基づいて計算を行う。収穫計画の対象となったユニット数は657であり、地位級は3、4、5の3つに分かれている。地位級別の面積はそれぞれ、763.39ha、2384.08ha、485.23haである。育林体系は伐期齢および主伐と間伐の有無にかかわる。16通りの育林体系が存在し、伐期齢を50年から120年まで5年刻みに設定した15通りと、主伐を行わない1通りを含んでいる。いずれの育林体系でも20年、40年で30%の切捨間伐を行い、伐期齢が75年以上または主伐なしの場合は、さらに70年で25%の搬出間伐を行う。搬出間伐および主伐では全幹集材を行い、枝条は林地に残される。また、作業システムはチェーンソー、グラップル、プロセッサ、フォワーダから構成される車両系作業システムが想定されている。地位が良いほど、伐期齢の短い林分の面積が多くなった。

2.2 計算方法

材積の成長予測は、収穫表(山形県、1980)から推定した樹高成長曲線と林分密度管理図(林野庁、1979)を用いている。収穫材積の算定には、鈴木・龍原(2016)の採材プログラムを用いた。このプログラムでは収穫材はA材、B材、C材に区別される。A材、B材、C材は正確な定義があるものではないが、本研究ではA材は曲がりや極めて小さく材質に欠点が無い優良材、B材は採材されたA材以外の材、C材は丸太の採材できない部分、とした。各種材の収穫材積は、木材製品の炭素蓄積量および代替効果の算出に用いられる。森林バイオマスへの炭素蓄積量は、材積に、容積密度、バイオマス拡大係数、地上部に対する地下部比率、乾重量あたりの炭素含有率を乗じることで算定される。炭素含有率以外のパラメータは樹種によって異なるが、本研究ではスギ林を対象としている。各種パラメータの値は、日本国温室効果ガスインベントリ報告書(国立環境研究所、2020)の値を用いた。すなわち、容積密度0.314 t/m³、バイオマス拡大係数1.23、地下部比率0.25、炭素含有率0.51 tC/tである。

伐採によって、樹木の幹部分は林地から搬出され、木材利用段階に移行し、伐採後には樹木の枝条と根株が林地に残る。林地に残されたこれらのバイオマスは、一定期間炭素をストックするが、徐々に分解されて大気中に炭素を放出することになる。枝条および伐採根株の分解は、Olson(1963)の指数分解モデルによってモデル化した(式1)。また、枝条リターの分解定数(k)の値は0.10とし(森貞・中岡、2008)、伐採根株の分解定数は酒井ら(2008)の結果から0.035を妥当な値として採用した。

ただし、 Y_t はt年における残存量、 Y_0 は初期量、kは分解定数を表す。

木材利用段階では、木材利用方法は材の質(A材、B材またはC材)に応じて異なる。本研究では、木材流通経路の正確な再現よりも、炭素放出量削減効果の統合的な分析を目的としているため、A材は建築資材、B材はパーティクルボード(PB)、C材はバイオマス燃料または紙に利用されると仮定した。木材利用段階における炭素放出量削減効果は大きく2つに分けることができる。1つ目が、木材製品の炭素蓄積である。伐採によって森林バイオマスから取り除かれた炭素は、伐採後すぐに大気中に放出されるわけではなく、一定期間は木材製品中に固定され、木材製品の廃棄によって大気中に放出される。この固定期間は木材利用方法によって異なる。2つ目は、非木材製品を木材製品で代替することによる、潜在的な炭素放出量の削減である。一般的に、非木材製品はその製造・加工段階において、木材製品よりも多量のエネルギーを消費し、多量の炭素を放出する。したがって木材製品を利用することで炭素放出量を減らすことができる。

木材製品の炭素蓄積の変化は、Schelhaas(2004)の減衰関数を用いてモデル化した(式2)。この減衰関数では製品ごとに半減期を設定する必要がある。建築用木材、パーティクルボード、紙の半減期はIPCC(2014)の値を用い、それぞれ35年、25年、2年とした。また、C材のバイオマス燃料利用の場合は、炭素の固定期間は非常に短いと考えられるため、木材製品の炭素蓄積は考慮せず、代替効果のみを考慮することとした。

$$P_{t+1} = P_t * \left(1 - \frac{\ln(2)}{L}\right) \quad (\text{式2})$$

ただし、 P_t はt年後の木材製品の炭素蓄積量、Lは木材製品の半減期を表す。

代替効果については、燃料代替効果と建築資材代替効果の2種類を考慮した。燃料代替効果は、化石燃料をバイオマス燃料で代替した場合に回避できる炭素放出量として計算された。このとき、日本で特に使用量の多い化石燃料である石炭と天然ガス(LNG)を、半分ずつバイオマス燃料で代替することを想定した。

Yoshioka et al. (2005)は林地残材を燃料としたエネルギー供給システムによって排出される二酸化炭素量を61.8 kg-CO₂/MWhと示した。これは林地残材のチップ化、林内の運搬、輸送および発電プラントでの乾燥、発電による二酸化炭素排出量が含まれている。各工程において必要な林業機械および発電プラントを用意するための設備エネルギーと、林業機械の運用による燃料消費、発電プラントの修理とメンテナンスに必要なエネルギーが考慮された。また、今村ら(2016)は石炭火力発電プラントによる二酸化炭素排出量が943 kg-CO₂/MWh、LNG火力発電プラントによる二酸化炭素排出量が599 kg-CO₂/MWhと算出した。これはプラントの建設と運用、燃料の採掘、加工、輸送、発電の各工程における二酸化炭素排出量が含まれている。したがって、石炭とLNGを半分ずつ使用したとき、化石燃料による二酸化炭素排出量は771 kg-CO₂/MWh (= (943+599)/2)である。よってライフサイクルを通したバイオマス材の代替効果は、火力発電による二酸化炭素排出量とバイオマス発電による二酸化炭素排出量の差をとることで709.2 kg-CO₂/MWh (=0.0537 tC/GJ)と計算された。さらにバイオマス燃料の単位発熱量はJクレジット方法論より18.4 GJ/dry-tである。

$$0.0537 \text{ (tC/GJ)} \times 18.4 \text{ (GJ/dry-t)} / 0.51 \text{ (tC/dry-t)} = 1.94 \text{ (tC/tC-bio)}$$

より、燃料代替効果は1.94 tC/tC-bioと計算された。

建築資材代替効果は、非木造住宅を木造住宅に置き換えた場合に追加的に必要な単位木材量あたりに、回避される炭素放出量として計算される。非木造住宅としては特に着工数の多い鉄骨造と鉄筋コンクリート造の2種類を考慮した。林野庁(2021)および林野庁木材利用課(2016)より構造別の住宅一戸(床面積125.86 m²)当たりの炭素貯蔵量と住宅のライフサイクル(資材製造、建設、運用、改修および廃棄)を通した炭素排出量は表1の通りである。したがって鉄骨プレハブ造住宅および鉄筋コンクリート造住宅を木造住宅に置き換えた際の炭素放出量削減量は、追加木材炭素1tC当たりそれぞれ2.16 tC、2.91 tCである。2021年次建築着工統計調査によると、一戸建て非木造住宅床面積の割合は、鉄骨造が90%、鉄筋コンクリート造が8%、その他が2%である。この割合に応じて加重平均をとることで、建築資材代替効果は木材炭素1tC当たり2.22 tCと計算された。

ここまで述べた炭素放出量削減効果のほかに、炭素放出要因としてパーティクルボード(PB)と紙のライフサイクルを通した炭素放出量を考慮した。建築資材とバイオマス燃料のライフサイクルを通した炭素放出量はそれぞれ建築資材代替効果と燃料代替効果の計算の際に考慮されている。Nakano et al. (2018)よりパーティクルボードの炭素放出量は444 kg-CO₂eq/m³ (=0.121 tC/m³)である。これは、木材生産、輸送、加工、加工に必要な接着剤の生産、製造による放出が含まれている。また、2022年日本国温室効果ガスインベントリ報告書よりパーティクルボードの炭素含有率と容積密度はそれぞれ0.451 tC/t-d.m、0.596 t-d.m/m³であるので、

$$0.121 \text{ (tC/m}^3\text{)} / (0.596 \text{ (t-d.m/m}^3\text{)} \times 0.451 \text{ (tC/t-d.m)}) = 0.450 \text{ (tC/tC)}$$

より、B材の含有炭素1tC当たり0.450 tCの炭素放出である。また、紙の生産による炭素放出量は紙の種類によって異なるが、日本製紙連合会(2011)および桂(2001)より、本研究では1300 kg-CO₂/t (=0.355 tC/t)を妥当な値として設定した。また、紙の含水率および炭素含有率はそれぞれ0.9 t-d.m/t、0.386 tC/t-d.mを用いた(IPCC、2014)。よって

$$0.355 \text{ (tC/t)} / (0.9 \text{ (t-d.m/t)} \times 0.386 \text{ (tC/t-d.m)}) = 1.02 \text{ (tC/tC)}$$

より、C材の含有炭素1tC当たり1.02 tCの炭素放出である。パーティクルボードおよび紙のライフサイクルを通した炭素放出量はマイナスの効果として加えられた。

2.3 条件設定

以上に述べた各効果を、林分レベルと地域レベルの2つのスケールで、地位ごとに統合的に分析する。林分レベルでは、地位による比較が行いやすいように、3種類の地位それぞれについて、伐期50年、初期林齢1年の仮想林分を用いている。地域レベルでの分析の際は、Suzuki et al. (2018)によって策定された、収

益を最大化し、各分期の収穫量が一定の範囲に収まるような収穫計画を用いている。林分レベルの計画期間は1分期5年として、30分期(150年)であり、これは3伐期に相当する。地域レベルの計画期間はSuzuki et al. (2018)の収穫計画に合わせて24分期(120年)とした。

炭素放出量削減効果を統合的に分析するためには、いくつかの条件設定が必要になる。本研究では、主伐の有無、C材の利用方法(バイオマス燃料または紙)、枝打ちの有無、廃棄材の再利用の有無によって6種類の条件設定を行った(表2)。条件1は主伐を行わないシナリオである。ただし、主伐による影響を調べるために、間伐は他の条件と同様に実施するものとした。対象地では丸太として採材できない部分(C材)はバイオマス材として利用されている(Suzuki et al., 2018)が、C材の利用方法が炭素放出量削減効果へ与える影響を調べるために、条件2から4を設定した。また、条件5と6は条件2にそれぞれ枝打ちの実施、廃棄材の燃料としての再利用という要素を加えた条件設定である。炭素放出量削減効果をより大きくするための方法の検討のために、これらの要素を追加した。枝打ちは木材利用のライフサイクル上での川上である森林経営の観点からのアプローチである。枝打ちを行うことによって、材の節とトビ腐れを減らすことができるが、これらはいずれもA材とB材を区別する要因となっているので、枝打ちを適切に行うことで材の価値が高くなることが期待される。材の価値が高いほど、より炭素固定期間の長い製品に利用されるため、枝打ちの結果として炭素放出量削減効果は高くなることが期待される。ここでは鈴木・龍原(2016)を参考に、枝打ちを林齢15年と25年の2回行うことでA材とB材の割合が6:4に誘導されると仮定した。なお、条件5では全体の収穫量およびC材の収穫量は、これまで使用したSuzuki et al. (2018)と同じ値を用い、A材とB材の割合のみを変化させて計算を行った。例えば、伐期50年の仮想林分において、枝打ち導入前後のA材、B材、C材の割合は表3の通りである。次に、廃棄材の燃料としての再利用は木材のライフサイクルにおける川下である、木材製品の利用及び廃棄の段階に関連したアプローチである。ここでの廃棄材の再利用とは、建築資材およびパーティクルボードとしての炭素固定期間を終えた廃棄材について、バイオマス燃料として再利用することである。これによって、廃棄材から追加的な燃料代替効果が生じることになる。本研究では、Eriksson et al. (2007)と同様に廃棄材の再利用率は100%とした。条件2から6までの各条件における炭素放出量削減効果を、主伐を行わない条件1の炭素放出量削減効果と比較して、主伐を行うことの利点を調べた。

さらに、GISを用いてユニット単位での炭素放出量削減効果を空間情報と組み合わせて示し、その特徴を調べた。

まずは各地位について、林分レベルで条件1と条件2の炭素放出量削減効果を比較した。収穫したすべてのC材をバイオマス燃料として利用した場合、地位3の林分では主伐を行う場合と主伐を行わない場合の炭素放出量削減効果はほとんどの期間で同程度であり、最終的にはやや主伐ありの方が優位という結果になった。主伐を行う場合の地位3、4、5の林分の150年後の炭素放出量削減効果はそれぞれ248.1 tC/ha、205.4 tC/ha、148.0 tC/haであり、地位が良いほど炭素放出量削減効果はより大きくなった。また、いずれの地位でも分期が進むにつれて削減効果は増加していく傾向があった。

条件3の150年後の炭素放出量削減効果は地位の良いほうから順に、200.9 tC/ha、160.5 tC/ha、107.5 tC/haであり、条件2と比較してそれぞれ19.0%、21.9%、27.4%減少した。地位が良いほど炭素放出量削減効果が大きく、分期が進むにつれて削減効果が増えていく点は条件2と共通している。

条件4の地位3、4、5の林分の150年後の炭素放出量削減効果はそれぞれ153.8 tC/ha、115.6 tC/ha、67.0 tC/haであり、C材の100%をバイオマス燃料として利用する条件2と比較して削減効果がそれぞれ38.0%、43.7%、54.7%減少した。地位が良いほど削減効果がより大きいという点は、バイオマス利用の場合と同様である。しかし、分期が進むにつれて炭素放出量削減効果が増大していくとは言えない結果となった。

また、C材の利用方法によって区別される条件2、3、4を比較すると、バイオマス燃料としての利用割合が大きいほど炭素放出量削減効果は大きくなり、反対に紙利用の割合が大きいほど炭素放出量削減効果は小さくなるのが分かる。また、この影響は地位が悪い林分ほど大きくなる。

図枝打ち導入前の条件2と比較して削減効果がそれぞれ39.4%、22.1%、12.0%増加した(導入前はそれぞれ248.1 tC/ha、205.4 tC/ha、148.0 tC/ha)。

次に、収益の最大化をもたらす育林体系設定を行った場合の炭素放出量削減効果を地域レベルで計算した。またいずれの地位においても、分期が進むにつれて炭素放出

量削減効果は増加していくと言える。地域レベルでの各地位の計画期間終了後の炭素放出量削減効果は、地位 3 で 248951 tC、地位 4 で 580790 tC、地位 5 で 77371 tC であるので、最も削減効果が高いのは地位 4 であったが、これは地位 4 の林分面積が他の地位よりも際立って大きいことが影響していると考えられる。各地位について、上記の結果をヘクタール当たりの値で表すと、地位 3 は 326.1 tC/ha、地位 4 は 243.0 tC/ha、地位 5 は 158.0 tC/ha となり、地位が良いほうが面積当たりの削減効果は高かった。また、このとき主伐を行わない条件 1 との最終的な炭素放出量削減効果の差は、地位 3 で 83.0 tC/ha、地位 4 で 65.2 tC/ha、地位 5 で 39.9 tC/ha であり、地位が良いほど主伐を行うことによる削減効果の増加量がより大きくなった。それぞれの効果に注目すると、森林バイオマスの炭素蓄積と燃料代替効果および建築資材代替効果の寄与が特に大きいと言える。バイオマス蓄積量は、森林の齢級構成の偏りやユニットの伐採時期の偏りの影響で、ある程度の時間的変動はあるが、常に一定以上の値を示した。一方で、2 種類の代替効果は計画期間の開始時点は値が 0 であり、分期が進むにつれてその値は単調増加していくという点で、バイオマス蓄積とは異なる時間的推移の傾向を示した。また、枝条リターと伐採根株という林地残材に含まれる炭素量や A 材の建築資材としての炭素固定量は比較的小さい。マイナスの効果であるパーティクルボード (PB) の生産に伴う炭素放出量は、代替効果と同様に時間を経るごとに大きくなる効果であり、全体的な効果に与える影響は無視できない。

条件 5 の地域レベルでの 120 年後の炭素放出量削減効果の計算結果は地位の良いほうから順に、369845 tC、735416 tC、88120 tC となり、条件 2 と条件 5 を比較すると、枝打ちを行うことによって地域全体の炭素放出量削減効果が 31.6%増加し、主伐の有無による炭素放出量削減効果の差が約 2.20 倍に広がった。

また、条件 6 の地域レベルでの最終的な削減効果は地位 3 で 373008 tC、地位 4 で 821588 tC、地位 5 で 101737 tC となり、条件 2 と条件 6 を比較すると、廃棄材の燃料再利用を行うことで地域全体の最終的な炭素放出量削減効果は 42.9%増加し、主伐の有無による炭素放出量削減効果の差は約 2.63 倍になった

3. 考察

4.1 結果の解釈

いずれの条件設定においても見られた特徴が、同じ条件であれば地位が良いほど面積当たりの炭素放出量削減効果が大きくなるという点である。これは、地位の良いところは面積当たりの成長量が大きく、地位の悪いところよりも収穫材積の絶対量が大きくなるためであると考えられる。収穫材積が大きくなると炭素放出にかかわる各効果の絶対値が大きくなるが、マイナスの効果の増加量よりもプラスの効果の増加量の方が大きいため、収穫材積が多くなるほど炭素放出量削減効果は大きくなっていく。すなわち、より地位が良い林分を積極的に管理することが、収益の面だけでなく炭素放出量削減の面からも効果的であると言える。

また、条件4以外の条件設定について当てはまる特徴が、炭素放出量削減効果は時間がたつにつれて、単調増加ではないにしろ、徐々に増加していくという点である。主伐を行わない場合は、炭素放出量削減効果は森林バイオマス蓄積量と言い換えることができ、森林バイオマスは伐採が行われなければ時間に伴って増加していく。主伐を行う場合は、主伐によって森林バイオマス量は大幅に減少するが、同時にその他の効果が增加する。主伐が行われることで増加する効果のうち、2種類の代替効果（燃料代替効果と建築資材代替効果）は永続的かつ累積的な効果であり、主伐が行われるごとにその量は増加し、減少しない。つまり主伐を行う場合、炭素放出量削減効果の増加傾向は、時間に伴って単調増加する代替効果の影響によるところが大きい。

地域レベルでの計算で用いた収穫計画は収益の最大化を前提としているので、収益を最大化する経営が、同時に炭素放出量を削減するという公益的な要求をも満たすということが示唆された。

主伐を行わない条件1と、条件3を林分レベルで比較したとき、いずれの地位でも計画期間を通して主伐を行うことが不利になった。

さらに、地位3から5までを全て合計した地域全体の炭素放出量削減効果では、計画期間終了後に主伐を行うことの優位性が認められた。このように、地理的スケールによって結果が逆転した理由を考察する。まず、森林バイオマスの成長量は林齢が高くなるにつれて減少することや、森林バイオマスへの炭素蓄積量には限界があることから、主伐を行わない場合は、分期が進んで林齢が高くなるにつれて炭素放出量削減効果の増加は鈍化する。一方で、先に述べたように、主伐を行う場合の炭素放出量削減効果は、主に代替効果の影響によって、時間に伴い増加傾向を示す。すなわち主伐を行って木材を利用する場合は、継続的に炭素放出量削減効果を得ることができる。また、林分レベルと地域レベルでは前提となる林分状態が異なる。条件3では、初期林齢を1年とすると、選択した育林体系にかかわらず120年間を通して条件1の効果を下回る。しかし、120年を過ぎると、徐々に条件3と条件1の差が小さくなり、いずれは条件3が上回る。地域レベルの計算の際は各ユニットの初期林齢を考慮しているので、初期林齢が1年と仮定した林分レベルの計算よりも、条件3が条件1と比べて優位になる。したがって、これらの林分が地域全体の炭素放出量削減効果に与える影響は大きいと考えられる。そのため、地域レベルでは最終的に条件3の炭素放出量削減効果が条件1を上回ったと考えられる。このように、地域レベルでの計算ではユニットごとに異なる伐期齢や初期林齢を考慮しているので、林分レベルとは結果が異なることがある。すなわち、林分レベルでは主伐を行わないことが推奨される条件設定であっても、地域レベルかつ長期的に見れば、主伐を行う方が好ましいと言える可能性がある。

条件2、条件3および条件4の比較から、C材はバイオマス燃料として利用する方が紙として利用するよりも炭素放出量削減効果が高くなるので、C材は紙よりもバイオマス燃料として利用することが脱炭素の観点からは好ましいと言える。紙は製品としての寿命がきわめて短く、炭素固定機能がほとんどない上に、紙の生産に伴う炭素放出が永続的に負の効果を与えているが、バイオマス燃料は炭素放出量削減への寄与が大きい燃料代替効果によって永続的な正の効果が得られるという違いが原因である。

条件2と条件5の比較によって、枝打ちの導入は炭素放出量削減効果を高める上で効果的であることが分かった。つまり森林経営者は、枝打ちを行うことで材の価値を高めて収益を増やすだけでなく、結果的に炭素放出量を削減できる。さらに、地位の良い林分ほど枝打ちによる炭素放出量削減効果の増加量が大きいため、枝打ちを行う際は地位の良いところから行うべきだという森林経営上の指針を示した。枝打ちの導入によって炭素放出量削減効果が増加するのは、収穫された丸太のうちの優良材（A材）の割合が増えること

で建築資材に用いられる木材量が増え、製品への平均炭素固定期間が長くなるとともに、建築資材代替効果が大きくなるためである。しかし、これは増加した A 材がすべて建築資材として利用されることを前提としている。たとえ価値の高い材が供給可能であっても、その受取先が無ければこれは実現しないので、価値の高い材の需要を高めて利用を拡大していくことが重要であると言える。令和 3 年度森林・林業白書(2022)で、社会経済生活の向上とカーボンニュートラルに寄与する「グリーン成長」を実現するためには「特に建築物等に用いられ、比較的価格の高い製材用材の利用拡大を進めていくことが重要となっている」と述べられているように、本研究の結果は政策的、社会的な要求にも合致するものである。

また、条件 2 と条件 6 の比較から廃棄材の再利用も炭素放出量を効果的に削減することが分かった。また、その効果は森林経営者のオプション（枝打ちの導入）によるものよりも大きいことが示された。本研究では、建築資材とパーティクルボードの廃棄材の 100%をバイオマス燃料として再利用するという理想的な仮定に基づいて計算を行ったが、この実現可能性については本研究では扱わない。しかし、廃棄材の再利用を進めていくことが炭素放出量削減につながるということは示された。

本研究の対象地の森林の齢級構成は日本全体の森林の齢級構成と似通っており、50 年生を超えた林分が多い。そこで本研究の結果をもとにして、日本の炭素放出量削減目標の達成に向けた提言を検討したい。日本では 2021 年に「地球温暖化対策の推進に関する法律の一部を改正する法律案」が閣議決定され、2050 年までのカーボンニュートラルの実現が法律に明記された。また、そのために 2030 年度に温室効果ガスを 2013 年度から 46%削減することが目標として掲げられている。これらの達成のために 2 兆円の「グリーンイノベーション基金」が造成され、企業への支援体制もできている。そのため、施策・技術開発の重点をどこに置くかが重要となっている。2050 年目標までは 30 年を切り、2030 年度目標まではすでに 10 年を切っている。そのため、日本では短期的な炭素放出量の削減が強く求められている。本研究の計画期間は 120 年であるが、そのはじめの 30 年（6 分期）での炭素放出量削減効果を短期的な効果と見なした。3 つの地位級を合計した対象地全体での 30 年間の平均年間炭素放出削減量は、条件 1 から 6 までそれぞれ、3353.5 tC/年、5602.6 tC/年、2984.0 tC/年、365.4 tC/年、8035.2 tC/年、6916.5 tC/年であった。最も短期的な炭素放出削減量が多いのは枝打ちによって優良材の生産を行う条件 5 であった。しかし、本研究では枝打ちによる優良材の誘導に必要な移行期間が考慮されておらず、短期的な効果は過大評価されていると考えられる。次に年間炭素放出削減量が多いのは、廃棄材の燃料再利用を行う条件 6 であった。本研究では、計画開始時点よりも前に生産された木材製品の廃棄材は考慮していないので、短期的な効果は過小評価されていると考えられる。また、再利用率は 100%を仮定しているが、全国木材組合連合会のホームページによると木造住宅の解体材のうち燃料として再利用されるものは約 16%である。これは、廃棄材の燃料再利用を拡大することで炭素放出削減量を増やす余地が多く残っていることを意味している。したがって、廃棄材の燃料再利用は、脱炭素を進めるうえで積極的に推奨すべき事項の一つであると言える。

つまり、森林の炭素放出量削減効果を評価する際に、林内の炭素プールのみを考慮すると、森林経営者がなし得る環境への貢献を過小評価することになり、木材利用によって生じる効果も考慮することによって、より正当な評価が行える。本研究は、森林経営が環境に与える影響に関して、包括的な評価方法を提示した。つまり、伐採対象の森林の中で、特に初期状態において既設路網と隣接している森林かどうか、主な伐採の対象となり得るか、またその結果としてより炭素放出削減効果を発揮し得るかを左右する一つの要因になっているとすることができる。そのため、森林の炭素放出削減効果を高める施策としては、路網密度を高めることによって、経済性が高く立地条件の良い森林で、路網と隣接している区画において、積極的に伐採と植栽の循環的利用をすすめていくことが重要であると言える。

4.2 先行研究との比較

森林バイオマス、HWP への炭素蓄積および木材製品の使用による代替効果を統合的に分析した先行研究として、日本を対象とした先行研究はほとんどない。ドイツで行われた Martes and Kohl(2022)では地域レベルでの評価によって森林を完全に保護するよりも伐採を行う方が炭素放出量削減効果は高くなるという結果が得られており、これは本研究の結果と一致する。また、スウェーデンを対象とした Eriksson et al. (2007)、アメリカを対象とした Perez-Garcia et al. (2005)では林分レベルでの分析が行われ、時間経過に伴って炭素放出量削減効果が増加していく傾向や、特に代替効果の寄与が大きいという結果など、本研究との一致が見られた。

しかし林分レベルと地域レベルを組み合わせ分析した先行研究はほとんどなく、本研究で得られた、

林分レベルでは有利と言えない条件でも地域レベルでは脱炭素に寄与し得るという結果は新しい知見であると言える。また、地域レベルでの評価を行った Martes and Kohl (2022) は、森林の保全強度を変化させたシナリオ間での比較を行っており、森林経営に注目し収益の最大化を前提としている本研究とは焦点が異なる。また、本研究は先行研究では扱われていない地位を考慮するなど、森林経営において先行研究よりも実践的な示唆を与えた。

4.3 本研究の意義

「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」(令和3年10月22日閣議決定)では、「利用期を迎えた人工林について「伐って、使って、植える」循環利用を確立し、木材利用を拡大しつつ、成長の旺盛な若い森林を確実に造成していくことが重要である」、「住宅・建築物分野は家庭・業務部門のカーボンニュートラルに向けて鍵となる分野であり、一度建築されると長期ストックとなる性質上、早急に取り組むべき分野である」、「リニューアブル(バイオマス化・再生材利用等)については、更なる再生利用拡大に向け、バイオマス素材の高機能化や用途の拡大・低コスト化のための技術開発・実証、リサイクル技術の開発・高度化、設備の整備、需要創出を進める」と述べられている。これをもとに策定された「革新的環境イノベーション戦略」(令和2年1月21日統合イノベーション戦略推進会議決定)では、温室効果ガス削減量が大きく日本の技術力による大きな貢献が可能な39のテーマがイノベーション・アクションプランとして定められた。その中の1つに「高層建築物等の木造化やバイオマス由来素材の利用による炭素貯留」が位置づけられている。また、「第五次環境基本計画」(平成30年4月17日閣議決定)で環境政策の具体的な展開として掲げられた6つの重点戦略には、森林整備および木材利用の推進が大きくかかわっている。さらに、令和3年10月1日には「脱炭素社会の実現に資する等のための建築物等における木材の利用の促進に関する法律」が施行され、建築物の木材利用を一層進めるとともに、農林水産省に木材利用促進本部が設置された。主伐を行わず森林を保全するよりも、主伐を行って木材を利用する方が炭素放出量削減効果は大きくなるという本研究の結果は、これらの木材利用の推進政策に根拠を与えるものであり、重要な政策的意義をもつ。

4.4 本研究の限界

本研究では、炭素放出量削減に寄与するライフサイクル上の各モジュールについて、比較的単純なモデルを用いた。そのため、分析の正確性には限界がある。しかし、本研究の方法では、各モジュールのモデルの複雑化が必要となったとき、それを全体としての炭素放出量削減効果の評価に反映させることが比較的容易にできると考えられる。

本研究では、建築資材、PB、紙およびバイオマス燃料のLCAについて、計算を容易にするために既往の研究結果を用いているが、これらの研究はそれぞれインベントリ分析の際に用いたデータやシステム境界、生産・流通プロセスに違いがある。1つの森林から生産される木材を用いた複数の製品についてのLCAをデータの整合性をとりつつ行うことは、非常に困難であると言え、森林経営から生じる炭素放出量削減効果の全体的な傾向を調べて比較するという本研究の目的を超える。このように、本研究では参照した文献のデータの整合性については許容したので、LCAの考え方を用いた炭素放出量削減効果の相対的な検討にとどまった。またPBに関する日本でのLCAの事例はNakano et al. (2018)の他には無く、各製品を対象としたLCA研究がまだ十分な状況ではないともいえる。各製品のLCA研究が進むことで、炭素放出量削減効果の計算においてより適切なパラメータの設定が可能になると考えられる。

参照したLCAの先行研究について、異なる研究を参照した際の結果の違いについて検討を加える。一宮ら(2021)は2階建て鉄筋コンクリート造特別養護老人ホームと、それと同等の木造建築を対象にして、LCAによって温室効果ガス排出量を比較した。この研究を用いて建築資材代替効果を算出すると、本研究よりも建築資材代替効果が約8.2%大きくなるが、これは結果に大きな影響を与えない。

本研究では、伐採が行われた林地は100%再造林が行われることが前提となっている。再造林率を設定することで全体的な炭素放出量削減効果は減少すると考えられる。また、PBと紙から生じ得る代替効果や、建築資材の廃棄材のPBとしての再利用、他の木材利用方法なども考慮されていない。このように、考慮する要素を増やすことで本研究と異なる結果が得られることも考えられる。本研究では森林経営による炭素放出量削減効果の全体的な傾向を見ることができた。

1. まとめ

本研究では、主伐を伴う適切な森林経営によって、収益を上げて持続的に経営を行いながら、炭素放出量を削減できることが示された。この結果は、木材利用の推進政策に根拠を与えるものであり、重要な政策的意義を持つ。また、枝打ちを実施することによってA材割合が増加するため、枝打ちを行う集約的な施業が炭素放出量削減効果を持っていることも示された。さらに廃棄材のバイオマス燃料としての再利用によって、短期的により大きな炭素放出量削減効果が得られることが示された。

本研究の評価では、樹木の成長が全体的な炭素放出量削減効果を左右する重要な要素であった。例えば、成長が良い林分（地位が良い林分）ほど炭素放出量削減効果が大きくなった。本研究は山形県内のスギ人工林を対象として行った。日本国内でも地域によってスギ人工林の成長過程は異なるため、地域による違いがあるかもしれない。立木の成長過程が異なる地域間で比較を行うことによって、より普遍的な結論を得ることが、今後の検討課題である。

【参考文献】

- Balasbaneh, A. T., & Bin Marsono, A. K. (2018). New residential construction building and composite post and beam structure toward global warming mitigation. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 37(4), 1394–1402.
- Carcassi, O. B., Habert, G., Malighetti, L. E., & Pittau, F. (2022). Material Diets for Climate-Neutral Construction. *Environmental Science & Technology*, 56(8), 5213–5223.
- Chen CX, Pierobon F, Jones S, Maples I, Gong Y, & Ganguly I. (2022) Comparative Life Cycle Assessment of Mass Timber and Concrete Residential Buildings: A Case Study in China. *Sustainability*, 14(1):144.
- Cordier, S., Blanchet, P., Robichaud, F., & Amor, B. (2022). Dynamic LCA of the increased use of wood in buildings and its consequences: Integration of CO₂ sequestration and material substitutions. *Building and Environment*, 226, 109695.
- Dhakal, S., Minx, J.C., Toth, F.L., Abdel-Aziz, A., Figueroa Meza, M.J., Hubacek, K., Jonckheere, I.G.C., Kim Yong-Gun, Nemet, G.F., Pachauri, S., Tan, X.C., & Wiedmann, T. (2022). Emissions Trends and Drivers. In IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926.004
- Eriksson, E., Gillespie, A. R., Gustavsson, L., Langvall, O., Olsson, M., Sathre, R., & Stendahl, J. (2007). Integrated carbon analysis of forest management practices and wood substitution. *Canadian Journal of Forest Research*, 37(3), 671–681.
- Fauzi, R. T., Lavoie, P., Tanguy, A., & Amor, B. (2021). Life cycle assessment and life cycle costing of multistorey building: Attributional and consequential perspectives. *Building and Environment*, 197, 107836.
- Head, M., Magnan, M., Kurz, W. A., Levasseur, A., Beauregard, R., & Margni, M. (2021). Temporally-differentiated biogenic carbon accounting of wood building product life cycles. *SN Applied Sciences*, 3, 1–17.
- Himes, A., & Busby, G. (2020). Wood buildings as a climate solution. *Developments in the Built Environment*, 4, 100030.
- 一宮孝至, 大住政寛, 小林靖尚, 長坂健司, & 井上雅文 (2021). 木造および RC 造非住宅建築の環境経済評価 (第 1 報) 積上法 LCA による GHG 排出量の比較. 木材学会誌, 67(1), 14–19.
- 今村栄一, 井内正直, & 坂東茂(2016). 日本における発電技術のライフサイクル CO₂ 排出量総合評価. 電力中央研究所報告.
- IPCC (2014). 2013 Revised Supplementary Methods and Good Practice Guidance Arising from the Kyoto Protocol, Hiraishi, T., Krug, T., Tanabe, K., Srivastava, N., Baasansuren, J., Fukuda, M. and Troxler, T.G. (eds). Published: IPCC, Switzerland.
- IPCC (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844.
- Islam, R., Chowdhury, S., Jannat, N. and Paul, P. (2022), Carbon footprint evaluation of local dwellings in Bangladesh towards low carbon society. *Built Environment Project and Asset Management*, 12(3):433–446.
- J-クレジット制度(2022). 方法論 EN-R-001(Ver.1.8) バイオマス固形燃料(木質バイオマス)による化石燃料又は系統電力の代替. <https://japancredit.go.jp/about/methodology/> より入手. 最終アクセス日

2023 年 1 月 29 日.

- 桂徹. (2001). 紙パルプ産業における LCA の在り方. 紙パ技協誌, 55(10), 1366-1373.
- 国土交通省(2022). 2021 年次建築着工統計調査.
- 国立環境研究所 (2020). 日本国温室効果ガスインベントリ報告書.
- 国立環境研究所(2022). 日本国温室効果ガスインベントリ報告書.
- Martes, L. & Kohl, M. (2022). Improving the Contribution of Forests to Carbon Neutrality under Different Policies-A Case Study from the Hamburg Metropolitan Area. SUSTAINABILITY, 14(4).
- 松本遼斗 & 加用千裕 (2021). 都道府県ごとの建築物に使用される伐採木材製品の炭素貯蔵量. 木材学会誌, 67(3), 138-148.
- 森貞和仁 & 中岡圭一 (2008). 林地残材の分解速度について. 関東森林研究, 59:319-320.
- Nabuurs, G. J., and Mohren, G. M. J. (1995). Modelling analysis of potential carbon sequestration in selected forest types. Canadian Journal of Forest Research, 25:1157-1172.
- Nakano, K., Ando, K., Takigawa, M., & Hattori, N. (2018). Life cycle assessment of wood-based boards produced in Japan and impact of formaldehyde emissions during the use stage. The International Journal of Life Cycle Assessment, 23(4), 957-969.
- Nakano, K., Karube, M., & Hattori, N. (2020). Environmental impacts of building construction using cross-laminated timber panel construction method: A case of the research building in Kyushu, Japan. *Sustainability*, 12(6), 2220.
- Nakano, K., Koike, W., Yamagishi, K., & Hattori, N. (2020). Environmental impacts of cross-laminated timber production in Japan. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 22, 2193-2205.
- 日本製紙連合会(2011). 紙・板紙のライフサイクルにおける CO2 排出量.
- Olson, J. S. (1963). Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. *Ecology*, 44:322-331.
- Perez-Garcia, J., Lippke, B., Connick, J., & Manriquez, C. (2005). An assessment of carbon pools, storage, and wood products market substitution using life-cycle analysis results. *Wood and fiber science*, 140-148.
- Resch, E., Andresen, I., Cherubini, F., & Brattebø, H. (2021). Estimating dynamic climate change effects of material use in buildings- Timing, uncertainty, and emission sources. *Building and Environment*, 187, 107399.
- 林野庁 (1979). 裏東北・北陸地方スギ林分密度管理図. 日本林業技術協会.
- 林野庁(2021). 令和 2 年度 森林・林業白書.
- 林野庁(2022). 令和 3 年度 森林・林業白書.
- 林野庁木材利用課(2016). 平成 27 年度木材利用推進・省エネ省 CO2 実証業務報告書.
- Sahoo, K., Bergman, R., Alanya-Rosenbaum, S., Gu, H., & Liang, S. (2019). Life cycle assessment of forest-based products: A review. *Sustainability*, 11(17), 4722.
- 酒井佳美, 高橋正通, 石塚成宏, 稲垣善之, 松浦陽次郎, 雲野明, 中田圭亮, 長坂晶子, 丹羽花恵, 澤田智志, 北条良敬, 玉木泰彦, 総谷珠美, 武田宏, 相浦英春, 山内仁人, 島田博匡, 岩月鉄平, 山場淳史, 山田隆信, 前田一, & 室 雅道 (2008). 材密度変化による主要な針葉樹人工林における枯死木の分解速度推定. 森林立地, 50(2), 153-165.
- 佐藤淳 (2021). パリ協定下の伐採木材製品 (HWP): 気候変動対策としての取り扱いの変遷と排出削減ポテンシャル. 木材保存, 47(5), 217-228.
- Schelhaas, M. J., Van Esch, P. W., Groen, T. A., De Jong, B. H. J., Kanninen, M., Liski, J., Masera, O., Mohren, G. M. J., Nabuurs, G. J., Palosuo, T., Pedroni, L., Vallejo, A. & Vilen, T. (2004). CO2FIX V 3.1 A modelling framework for quantifying carbon sequestration in forest ecosystems. Alterra-Centrum Ecosystemen.
- 鈴木亮明・龍原哲 (2016). 採材方針と管理状態がスギ人工林の収益に与える影響-新潟県村上市山北地区民有林の事例. 森林計画学会誌, 50(1), 27-39.
- Suzuki K, Tatsuhara S, Nakajima T, Kanomata H, Oka M (2018). Predicting effects of logging systems and bucking strategies for privately owned sugi (*Cryptomeria japonica*) plantations in

Atsumi District, Tsuruoka City, Yamagata Prefecture. Journal of Forest Planning, 24: 15- 27

Valentini, R., Matteucci, G., Dolman, A.J., Schulze, E.-D., Rebmann, C., Moors, E.J., Granier, A., Gross, P., Jensen, N.O., Pilegaard, K., Lindroth, A., Grelle, A., Bernhofer, C., Grünwald, T., Aubinet, M., Ceulemans, R., Kowalski, A.S., Vesala, T., Rannik, Ü., Berbigier, P., Loustau, D., Gudmundsson, J., Thorgeirsson, H., Ibrom, A., Morgenstern, K., Clement, R., Moncreiff, J., Montagnani, L., Minerbi, S., and Jarvis, P.G. (2000). Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests. Nature (London), 404: 861- 865.

山形県農林水産部森林課 (1980). 山形県スギ林分収穫予想表. 山形県.

Yoshioka, T., Aruga, K., Nitami, T., Kobayashi, H., & Sakai, H. (2005). Energy and carbon dioxide (CO₂) balance of logging residues as alternative energy resources: system analysis based on the method of a life cycle inventory (LCI) analysis. Journal of Forest Research, 10(2), 125-134.

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月

大規模IoT 観測に立脚した自然と都市を繋ぐ木質資源DXマネジメントシステムの構築タイトル

代表研究者	中島 徹	東京大学 大学院農学生命科学研究科 助教
共同研究者	大島 佳季雄	一般社団法人食農健 代表理事
	Yukio Koibuchi	National Institute of Standards and Technology

4.1 はじめに

主に化石燃料の使用によって、大気中の二酸化炭素濃度は上昇し続けている(Dhakal et al., 2022; IPCC, 2022)。その中で、森林は炭素の吸収源として機能する(Valentini et al., 2000)。しかしそれと同時に、伐採を行うことによって森林は炭素放出源にもなり得る。しかし、伐採によって森林バイオマスから失われた炭素は、木材製品として固定されたり、林地残材として林内にとどまったりと、即座にすべてが大気中に放出されるわけではない。すなわち、伐採は炭素放出ではなく、森林バイオマスという炭素プールから、伐採木材製品(HWP)や林地残材といった異なる炭素プールへと炭素を移動させる力として捉えることができる。伐採木材製品の炭素蓄積は、パリ協定下で森林の二酸化炭素排出・吸収量の算定に計上できるものである。日本では、2020年度の森林の二酸化炭素吸収量約4050万t-CO₂のうち、約285万t-CO₂が伐採木材製品による炭素貯蔵量であり、この値は農地・牧草地の吸収量(約270万t-CO₂)や都市緑化等による吸収量(約130万t-CO₂)よりも大きな値となっている(林野庁、2022)。このように森林の炭素吸収・排出を考える上では伐採木材製品の考慮も欠かせないものであると言える。また、伐採木材製品は炭素固定による炭素貯留効果だけでなく、エネルギーとして木材を利用することで化石燃料の使用を代替して炭素放出量を削減する効果や、生産・利用過程でエネルギーを大量に消費する素材を代替することによって炭素放出量を削減する効果を持っている(佐藤、2021)。そのため、森林バイオマスの成長に伴う炭素吸収量、伐採木材製品の利用によって生じる炭素貯留効果に加えて、これらの代替効果も森林から生じる炭素放出量削減効果として捉えることができると考えた。

日本は国土の約3分の2が森林であるが、そのうちおよそ4割は人工林である。現在、日本の人工林はその半数が50年生を超えており、本格的な利用期を迎えている(林野庁、2022)。カーボンニュートラルの実現のためには、森林を伐採せずに森林バイオマスの蓄積を増やすよりも、伐採を行って木材利用を進めていくことが重要である。「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」(令和3年10月22日閣議決定)では、「利用期を迎えた人工林について「伐って、使って、植える」循環利用を確立し、木材利用を拡大しつつ、成長の旺盛な若い森林を確実に造成していくことが重要である」と述べられている通り、伐採・再生林の推進と木材利用の拡大が国の重要課題となっている。

本研究では、このような社会的、政策的背景を踏まえて、伐採を行って木材を利用することの公益的意義を明らかにしようとした。山形県鶴岡市旧温海町民有林のスギ人工林を対象にした。持続的に森林を経営し、公益的機能を発揮させるためには、木材生産を行って収益を得る必要があるため、木材生産を前提とした森林経営を評価対象にした。大気中の炭素が樹木によって固定され、HWPを経て、再び大気中に放出されるまでを1つのライフサイクルとして捉え、その過程で生じる炭素放出量削減効果を統合的に評価し、主伐

を行うことの利点を炭素放出量削減の観点から明らかにした。ライフサイクルアセスメント（LCA）の先行研究をもとに、森林経営の炭素放出量削減効果について全体的な傾向を明らかにした。炭素放出量削減効果は木材のライフサイクルを通した総合的な効果であり、大きく3つの炭素プールに分けることができる。1つ目は林内の炭素蓄積であり、これは立木蓄積に加え、伐採によって生じる根株と枝条リターも含んでいる。2つ目はHWPの炭素蓄積であり、本研究で考慮したHWPは建築資材（製材）、パーティクルボード（PB）、紙である。3つ目が非木材製品を木材製品で代替することによる潜在的な炭素放出量削減効果である。本研究では非木造住宅を木造住宅で代替する効果と、化石燃料を木質バイオマス燃料で代替する効果の2種類の代替効果を考慮した。以上を踏まえた、本研究での炭素フローを図1に示した。

日本では、都道府県ごとの伐採木材製品の炭素固定量についての先行研究（松本・加用、2021）や、各木材製品についてのLCA研究（Nakano et al., 2018; 桂, 2001; 林野庁木材利用課, 2016）は存在する。また、近年はCLTに関するLCA研究も進みつつある（Nakano et al., 2020a; Nakano et al., 2020b）。しかし、森林から生じる他の効果との関連を分析した研究はない。海外でも木材製品に関するLCA研究は多く行われている。特に、木造建築物は、その大きな炭素貯留効果から気候変動対策として注目されている。Fauzi et al. (2021)はハイブリッド木造高層ビルに対するLCAを行い、Carcassi et al. (2022)はバイオベースの断熱材の使用による温室効果ガス排出の減少を評価した。Cordier et al. (2022)はLCAと動的モデリングの組み合わせを試みた。Resch et al. (2021)は、建築物の耐用年数が結果に大きく影響を与えることを示した。Himes and Busby (2020)は中層ビルのLCAに関する18の事例を比較した。木造建築物に関する各国の研究事例としては、カナダの事例（Head et al., 2021）や中国の事例（Chen et al., 2022）、バングラデシュの事例（Islam et al., 2022）、マレーシアの事例（Balasbaneh and Bin Marsono, 2018）などがある。Sahoo et al. (2019)は木材製品のLCAに関するレビューを行い、ライフサイクルの中で製品製造の段階が最も大きな環境影響を与える傾向があることを示した。Nabuurs and Mohren (1995)は森林蓄積とHWP蓄積を合わせて森林の炭素吸収を分析した。加えて、ライフサイクルアセスメントを用いることで代替効果も考慮して、森林の炭素放出量削減効果を評価した研究では、アメリカ太平洋岸北西部を対象としたもの（Perez-Garcia J et al, 2005）やスウェーデンを対象としたもの（Eriksson et al., 2007）があるが、いずれも林分レベルでの評価である。また、地位については考慮されていない。林分レベルの評価を通して、主伐の炭素放出量削減効果への影響や炭素放出量削減効果の時間的変動の特徴が理解できる。その一方で、森林経営計画全体の炭素放出量削減効果を評価するためには地域レベルでの評価が必要となる。また、地位の良いところを積極的に管理すること

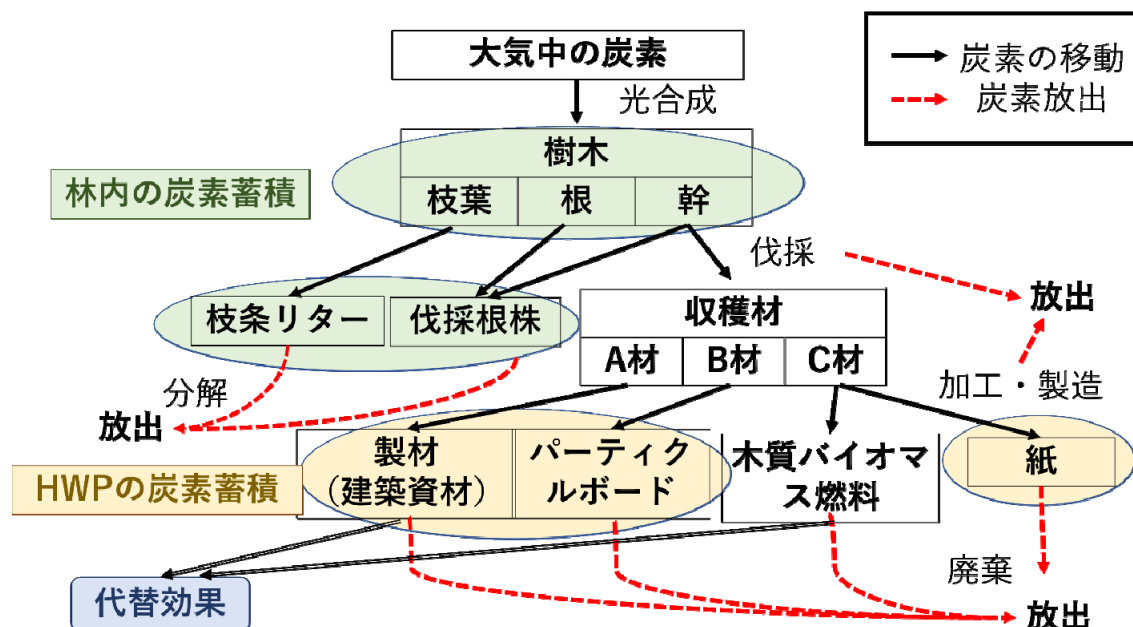


図1. 炭素フロー

は木材生産量の増大につながるもので、森林経営計画において地位の考慮は重要である。そこで本研究では、林分レベルと地域レベルという2つの地理的スケールと、3つの地位を考慮した。

5. 方法

2.1 対象地の説明

対象地は山形県鶴岡市旧温海町のスギ人工林である。この森林は温海町森林組合によって管轄されている。Suzuki et al. (2018)はこの森林を森林管理ユニットに分け、収益の最大化を目的として、それぞれのユニットに最適な育林体系を割り当て、収穫計画を策定した。このとき、収益が得られない林分は計画に含まれていない。本研究では Suzuki et al. (2018)が設定したユニットおよび収穫計画に基づいて計算を行う。収穫計画の対象となったユニット数は657であり、地位級は3、4、5の3つに分かれている。地位級別の面積はそれぞれ、763.39ha、2384.08ha、485.23haである。育林体系は伐期齢および主伐と間伐の有無にかかわる。16通りの育林体系が存在し、伐期齢を50年から120年まで5年刻みに設定した15通りと、主伐を行わない1通りを含んでいる。いずれの育林体系でも20年、40年で30%の切捨間伐を行い、伐期齢が75年以上または主伐なしの場合は、さらに70年で25%の搬出間伐を行う。搬出間伐および主伐では全幹集材を行い、枝条は林地に残される。また、作業システムはチェーンソー、グラップル、プロセッサ、フォワーダから構成される車両系作業システムが想定されている。各地位における選択された伐期齢の面積割合は図2の通りである。地位が良いほど、伐期齢の短い林分の面積が多くなった。

2.2 計算方法

材積の成長予測は、収穫表(山形県、1980)から推定した樹高成長曲線と林分密度管理図(林野庁、1979)を用いている。収穫材積の算定には、鈴木・龍原(2016)の採材プログラムを用いた。このプログラムでは収穫材はA材、B材、C材に区別される。A材、B材、C材は正確な定義があるものではないが、本研究ではA材は曲がりや極めて小さく材質に欠点が無い優良材、B材は採材されたA材以外の材、C材は丸太の採材できない部分、とした。各種材の収穫材積は、木材製品の炭素蓄積量および代替効果の算出に用いられる。森林バイオマスへの炭素蓄積量は、材積に、容積密度、バイオマス拡大係数、地上部に対する地下部比率、乾重量あたりの炭素含有率を乗じることで算定される。炭素含有率以外のパラメータは樹種によって異なるが、本研究ではスギ林を対象としている。各種パラメータの値は、日本国温室効果ガスインベントリ報告書(国立環境研究所、2020)の値を用いた。すなわち、容積密度 0.314 t/m³、バイオマス拡大係数 1.23、地下部比率 0.25、炭素含有率 0.51 tC/t である。

伐採によって、樹木の幹部分は林地から搬出され、木材利用段階に移行し、伐採後には樹木の枝条と根株が林地に残る。林地に残されたこれらのバイオマスは、一定期間炭素をストックするが、徐々に分解されて大気中に炭素を放出することになる。枝条および伐採根株の分解は、Olson(1963)の指数分解モデルによってモデル化した(式1)。また、枝条リターの分解定数(k)の値は0.10とし(森貞・中岡、2008)、伐採根株の分解定数は酒井ら(2008)の結果から0.035を妥当な値として採用した。

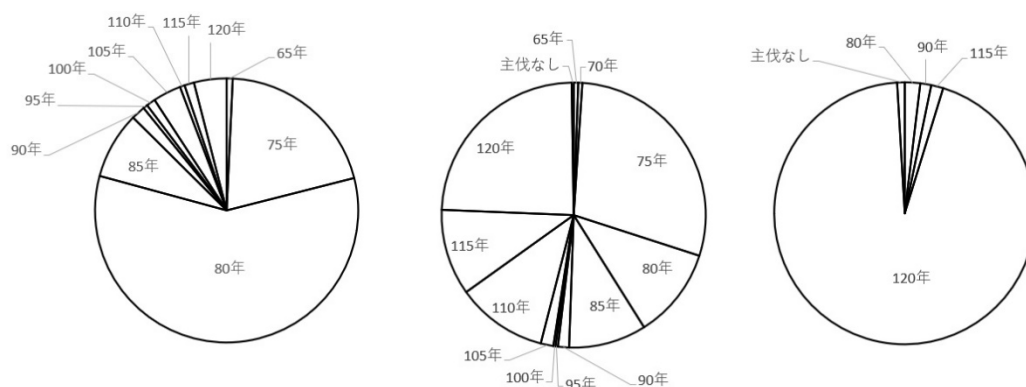


図2. 伐期齢別面積割合
左から地位3、4、5

$$Y_t = Y_0 e^{-kt} \quad (\text{式 1})$$

ただし、 Y_t は t 年における残存量、 Y_0 は初期量、 k は分解定数を表す。

木材利用段階では、木材利用方法は材の質（A 材、B 材または C 材）に応じて異なる。本研究では、木材流通経路の正確な再現よりも、炭素放出量削減効果の統合的な分析を目的としているため、A 材は建築資材、B 材はパーティクルボード（PB）、C 材はバイオマス燃料または紙に利用されると仮定した。木材利用段階における炭素放出量削減効果は大きく 2 つに分けることができる。1 つ目が、木材製品の炭素蓄積である。伐採によって森林バイオマスから取り除かれた炭素は、伐採後すぐに大気中に放出されるわけではなく、一定期間は木材製品中に固定され、木材製品の廃棄によって大気中に放出される。この固定期間は木材利用方法によって異なる。2 つ目は、非木材製品を木材製品で代替することによる、潜在的な炭素放出量の削減である。一般的に、非木材製品はその製造・加工段階において、木材製品よりも多量のエネルギーを消費し、多量の炭素を放出する。したがって木材製品を利用することで炭素放出量を減らすことができる。

木材製品の炭素蓄積の変化は、Schelhaas (2004) の減衰関数を用いてモデル化した（式 2）。この減衰関数では製品ごとに半減期を設定する必要がある。建築用木材、パーティクルボード、紙の半減期は IPCC (2014) の値を用い、それぞれ 35 年、25 年、2 年とした。また、C 材のバイオマス燃料利用の場合は、炭素の固定期間は非常に短いと考えられるため、木材製品の炭素蓄積は考慮せず、代替効果のみを考慮することとした。

$$P_{t+1} = P_t * \left(1 - \frac{\ln(2)}{L}\right) \quad (\text{式 2})$$

ただし、 P_t は t 年後の木材製品の炭素蓄積量、 L は木材製品の半減期を表す。各製品の減衰の様子は図 3 に示した。

代替効果については、燃料代替効果と建築資材代替効果の 2 種類を考慮した。燃料代替効果は、化石燃料をバイオマス燃料で代替した場合に回避できる炭素放出量として計算された。このとき、日本で特に使用量の多い化石燃料である石炭と天然ガス (LNG) を、半分ずつバイオマス燃料で代替することを想定した。

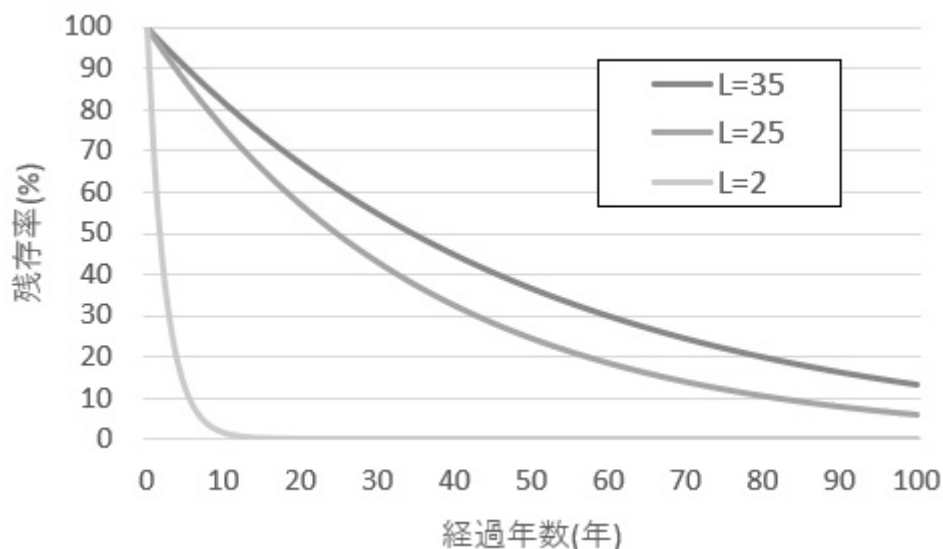


図 3. 伐採木材製品の貯留炭素の減衰曲線

Yoshioka et al. (2005)は林地残材を燃料としたエネルギー供給システムによって排出される二酸化炭素量を 61.8 kg-CO₂/MWh と示した。これは林地残材のチップ化、林内の運搬、輸送および発電プラントでの乾燥、発電による二酸化炭素排出量が含まれている。各工程において必要な林業機械および発電プラントを用意するための設備エネルギーと、林業機械の運用による燃料消費、発電プラントの修理とメンテナンスに必要なエネルギーが考慮された。また、今村ら(2016)は石炭火力発電プラントによる二酸化炭素排出量が 943 kg-CO₂/MWh、LNG 火力発電プラントによる二酸化炭素排出量が 599 kg-CO₂/MWh と算出した。これはプラントの建設と運用、燃料の採掘、加工、輸送、発電の各工程における二酸化炭素排出量が含まれている。したがって、石炭と LNG を半分ずつ使用したとき、化石燃料による二酸化炭素排出量は 771 kg-CO₂/MWh (= (943+599)/2) である。よってライフサイクルを通したバイオマス材の代替効果は、火力発電による二酸化炭素排出量とバイオマス発電による二酸化炭素排出量の差をとることで 709.2 kg-CO₂/MWh (=0.0537 tC/GJ) と計算された。さらにバイオマス燃料の単位発熱量は J クレジット方法論より 18.4 GJ/dry-t である。

$$0.0537 \text{ (tC/GJ)} \times 18.4 \text{ (GJ/dry-t)} / 0.51 \text{ (tC/dry-t)} = 1.94 \text{ (tC/tC-bio)}$$

より、燃料代替効果は 1.94 tC/tC-bio と計算された。

表 1. 住宅一戸当たりの炭素貯蔵量とライフサイクルを通した炭素放出量

	木造	鉄骨造	鉄筋コンクリート造
炭素貯蔵量(tC)	5.55	1.39	1.48
ライフサイクルを通した炭素放出量 (tC)	92.0	101.0	103.8

建築資材代替効果は、非木造住宅を木造住宅に置き換えた場合に追加的に必要な単位木材量あたりに、回避される炭素放出量として計算される。非木造住宅としては特に着工数の多い鉄骨造と鉄筋コンクリート造の2種類を考慮した。林野庁(2021)および林野庁木材利用課(2016)より構造別の住宅一戸(床面積 125.86 m²)当たりの炭素貯蔵量と住宅のライフサイクル(資材製造、建設、運用、改修および廃棄)を通した炭素排出量は表1の通りである。したがって鉄骨プレハブ造住宅および鉄筋コンクリート造住宅を木造住宅に置き換えた際の炭素放出量削減量は、追加木材炭素 1tC 当たりそれぞれ 2.16 tC、2.91 tC である。2021 年次建築着工統計調査によると、一戸建て非木造住宅床面積の割合は、鉄骨造が 90%、鉄筋コンクリート造が 8%、その他が 2%である。この割合に応じて加重平均をとることで、建築資材代替効果は木材炭素 1tC 当たり 2.22 tC と計算された。

ここまで述べた炭素放出量削減効果のほかに、炭素放出要因としてパーティクルボード(PB)と紙のライフサイクルを通した炭素放出量を考慮した。建築資材とバイオマス燃料のライフサイクルを通した炭素放出量はそれぞれ建築資材代替効果と燃料代替効果の計算の際に考慮されている。Nakano et al. (2018)よりパーティクルボードの炭素放出量は 444 kg-CO₂eq/m³(=0.121 tC/m³)である。これは、木材生産、輸送、加工、加工に必要な接着剤の生産、製造による放出が含まれている。また、2022 年日本国温室効果ガスインベントリ報告書よりパーティクルボードの炭素含有率と容積密度はそれぞれ 0.451 tC/t-d.m、0.596 t-d.m/m³であるので、

$$0.121 \text{ (tC/m}^3\text{)} / (0.596 \text{ (t-d.m/m}^3\text{)} \times 0.451 \text{ (tC/t-d.m)}) = 0.450 \text{ (tC/tC)}$$

より、B材の含有炭素 1tC 当たり 0.450 tC の炭素放出である。また、紙の生産による炭素放出量は紙の種類によって異なるが、日本製紙連合会(2011)および桂(2001)より、本研究では 1300 kg-CO₂/t(=0.355 tC/t)を妥当な値として設定した。また、紙の含水率および炭素含有率はそれぞれ 0.9 t-d.m/t、0.386 tC/t-d.mを用いた(IPCC、2014)。よって

$$0.355 \text{ (tC/t)} / (0.9 \text{ (t-d.m/t)} \times 0.386 \text{ (tC/t-d.m)}) = 1.02 \text{ (tC/tC)}$$

より、C材の含有炭素 1tC 当たり 1.02 tC の炭素放出である。パーティクルボードおよび紙のライフサイクルを通した炭素放出量はマイナスの効果として加えられた。

2.3 条件設定

以上に述べた各効果を、林分レベルと地域レベルの2つのスケールで、地位ごとに統合的に分析する。林分レベルでは、地位による比較が行いやすいように、3種類の地位それぞれについて、伐期 50 年、初期林齢 1 年の仮想林分を用いている。地域レベルでの分析の際は、Suzuki et al. (2018)によって策定された、収益を最大化し、各分期の収穫量が一定の範囲に収まるような収穫計画を用いている。林分レベルの計画期間は 1 分期 5 年として、30 分期(150 年)であり、これは 3 伐期に相当する。地域レベルの計画期間は Suzuki et al. (2018)の収穫計画に合わせて 24 分期(120 年)とした。

表 2. 条件設定

条件	主伐	利用方法			枝打ち	再利用
		A 材	B 材	C 材		
1	なし	-	-	-	-	-
2	あり	建築資材	PB	バイオマス燃料	なし	なし
3	あり	建築資材	PB	バイオマス燃料 と紙(50%ずつ)	なし	なし
4	あり	建築資材	PB	紙	なし	なし
5	あり	建築資材	PB	バイオマス燃料	あり	なし
6	あり	建築資材	PB	バイオマス燃料	なし	あり

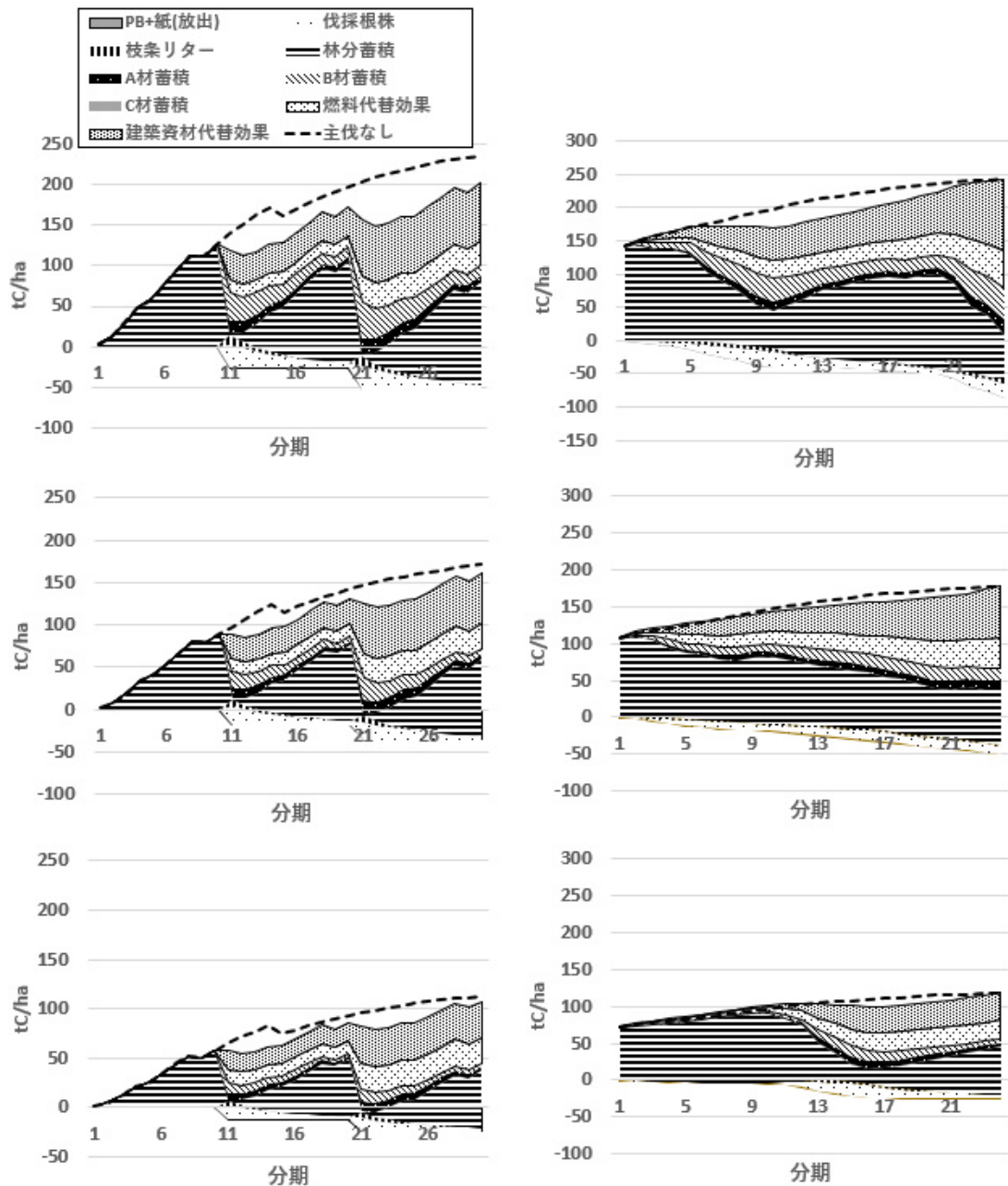
表 3. 枝打ちの実施の有無による A 材と B 材の材積割合の設定

地位	枝打ちの有無	全収穫材のうちの材積割合		
		A 材(%)	B 材(%)	C 材(%)
3	無	22	56	22
	有	47	31	22
4	無	26	44	30
	有	42	28	30
5	無	25	33	42
	有	35	23	42

炭素放出量削減効果を統合的に分析するためには、いくつかの条件設定が必要になる。本研究では、主伐の有無、C材の利用方法（バイオマス燃料または紙）、枝打ちの有無、廃棄材の再利用の有無によって6種類の条件設定を行った（表2）。条件1は主伐を行わないシナリオである。ただし、主伐による影響を調べるために、間伐は他の条件と同様に実施するものとした。対象地では丸太として採材できない部分（C材）はバイオマス材として利用されている（Suzuki et al., 2018）が、C材の利用方法が炭素放出量削減効果へ与える影響を調べるために、条件2から4を設定した。また、条件5と6は条件2にそれぞれ枝打ちの実施、廃棄材の燃料としての再利用という要素を加えた条件設定である。炭素放出量削減効果をより大きくするための方法の検討のために、これらの要素を追加した。枝打ちは木材利用のライフサイクル上での川上である森林経営の観点からのアプローチである。枝打ちを行うことによって、材の節とトビ腐れを減らすことができるが、これらはいずれもA材とB材を区別する要因となっているので、枝打ちを適切に行うことで材の価値が高くなることが期待される。材の価値が高いほど、より炭素固定期間の長い製品に利用されるため、枝打ちの結果として炭素放出量削減効果は高くなることが期待される。ここでは鈴木・龍原(2016)を参考に、枝打ちを林齢15年と25年の2回行うことでA材とB材の割合が6：4に誘導されると仮定した。なお、条件5では全体の収穫量およびC材の収穫量は、これまで使用した Suzuki et al. (2018)と同じ値を用い、A材とB材の割合のみを変化させて計算を行った。例えば、伐期50年の仮想林分において、枝打ち導入前後のA材、B材、C材の割合は表3の通りである。次に、廃棄材の燃料としての再利用は木材のライフサイクルにおける川下である、木材製品の利用及び廃棄の段階に関連したアプローチである。ここでの廃棄材の再利用とは、建築資材およびパーティクルボードとしての炭素固定期間を終えた廃棄材について、バイオマス燃料として再利用することである。これによって、廃棄材から追加的な燃料代替効果が生じることになる。本研究では、Eriksson et al. (2007)と同様に廃棄材の再利用率は100%とした。条件2から6までの各条件における炭素放出量削減効果を、主伐を行わない条件1の炭素放出量削減効果と比較して、主伐を行うことの利点を調べた。

さらに、GISを用いてユニット単位での炭素放出量削減効果を空間情報と組み合わせて示し、その特徴を調べた。

6. 結果



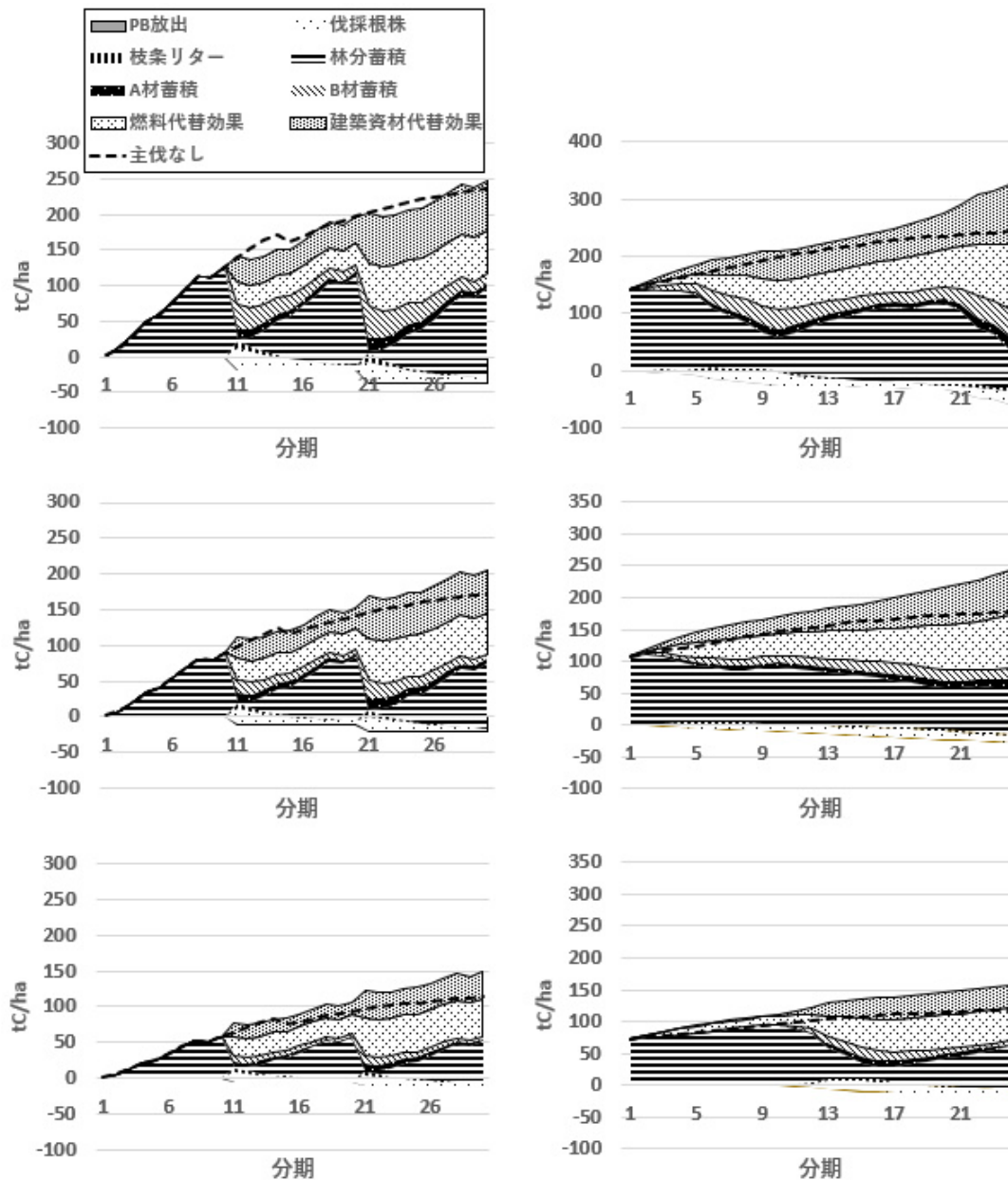
まずは各地位について、林分レベルで条件1と条件2の炭素放出量削減効果を比較した。収穫したすべてのC材をバイオマス燃料として利用した場合、地位3の林分では主伐を行う場合と主伐を行わない場合の炭素放出量削減効果はほとんどの期間で同程度であり、最終的にはやや主伐ありの方が優位という結果になった。また、地位4および地位5の林分では計画期間を通して主伐を行うほうが優位となった（図4、左）。主伐を行う場合の地位3、4、5の林分の150年後の炭素放出量削減効果はそれぞれ248.1 tC/ha、205.4 tC/ha、148.0 tC/haであり、地位が良いほど炭素放出量削減効果はより大きくなった。また、いずれの地位でも分期が進むにつれて削減効果は増加していく傾向があった。

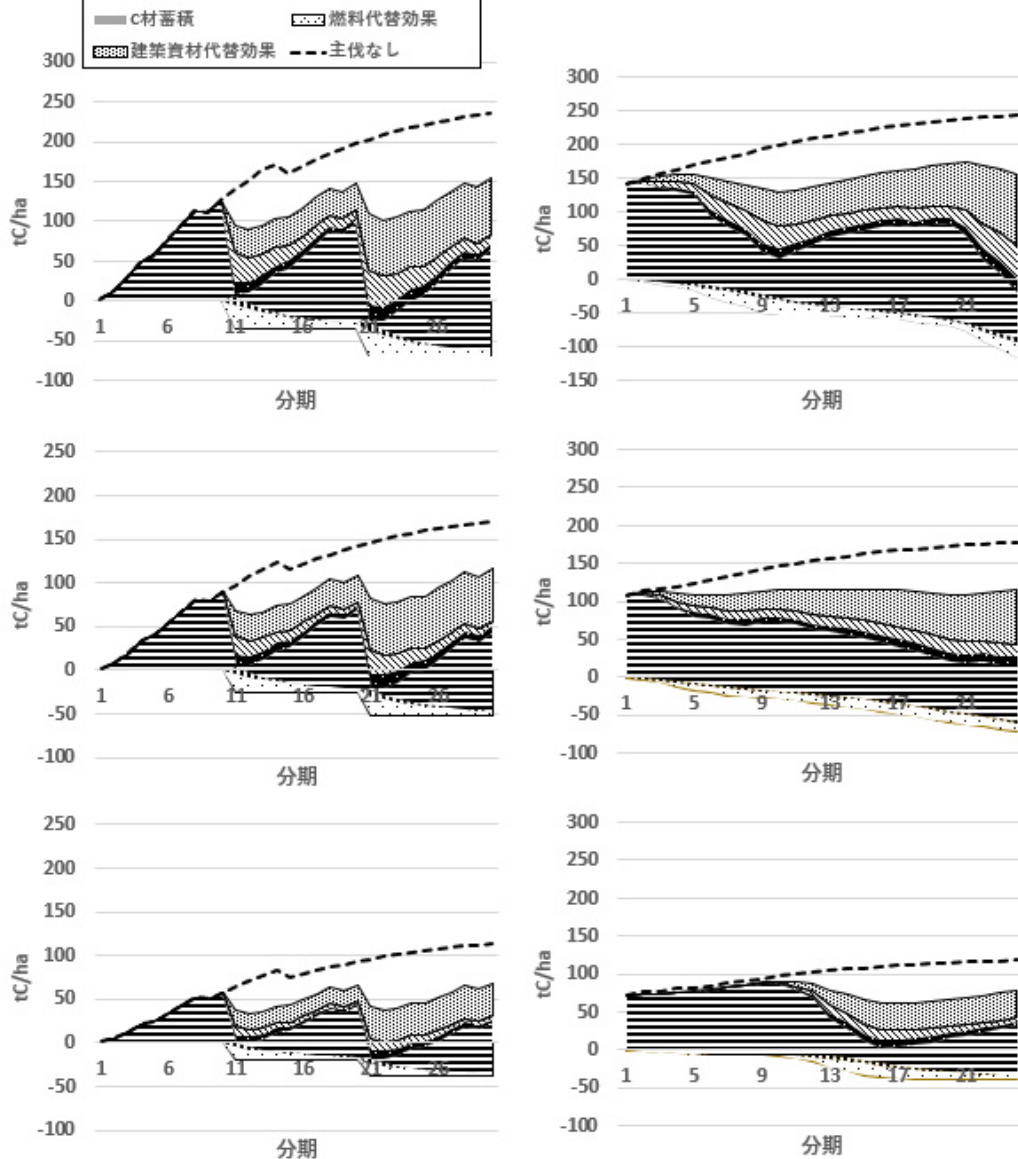
林分レベルで条件1と条件3を比較すると、いずれの地位でも主伐を行うことの優位性は認められなかった（図5、左）。条件3の150年後の炭素放出量削減効果は地位の良いほうから順に、200.9 tC/ha、160.5 tC/ha、107.5 tC/haであり、条件2と比較してそれぞれ19.0%、21.9%、27.4%減少した。地位が良いほど炭素放出量削減効果が大きく、分期が進むにつれて削減効果が増えていく点は条件2と共通している。

同様に、林分レベルで条件1と条件4を比較すると、収穫したすべてのC材を紙として利用した場合は、

いずれの地位でも計画期間を通して主伐を行わない方が有利となった（図6、左）。条件4の地位3、4、5の林分の150年後の炭素放出量削減効果はそれぞれ153.8 tC/ha、115.6 tC/ha、67.0 tC/haであり、C材の100%をバイオマス燃料として利用する条件2と比較して削減効果がそれぞれ38.0%、43.7%、54.7%減少した。地位が良いほど削減効果がより大きいという点は、バイオマス利用の場合と同様である。しかし、分期が進むにつれて炭素放出量削減効果が増大していくとは言えない結果となった。

また、C材の利用方法によって区別される条件2、3、4を比較すると、バイオマス燃料としての利用割合が大きいほど炭素放出量削減効果は大きくなり、反対に紙利用の割合が大きいほど炭素放出量削減効果は小さくなることから分かる。また、この影響は地位が悪い林分ほど大きくなる。





条件5の林分レベルでの150年後の炭素放出量削減効果は地位3で346.0 tC/ha、地位4で250.7 tC/ha、地位5で165.8 tC/haとなり(図7、左)、枝打ち導入前の条件2と比較して削減効果がそれぞれ39.4%、22.1%、12.0%増加した(導入前はそれぞれ248.1 tC/ha、205.4 tC/ha、148.0 tC/ha)。

条件6の林分レベルでの150年後の炭素放出量削減効果は、地位の良いほうから順に、399.1 tC/ha、301.8 tC/ha、198.9 tC/haとなり、廃棄材を燃料として再利用することで、最終的な効果が条件2と比較してそれぞれ60.9%、46.9%、34.4%増加した(図8、左)。

次に、収益の最大化をもたらす育林体系設定を行った場合の炭素放出量削減効果を地域レベルで計算した。すべてのC材をバイオマス燃料として利用する条件2の結果を見ると、いずれの地位でも計画期間を通して、常に主伐がない条件1よりも主伐がある条件2の方が有利となった(図4、右)。またいずれの地位においても、分期が進むにつれて炭素放出

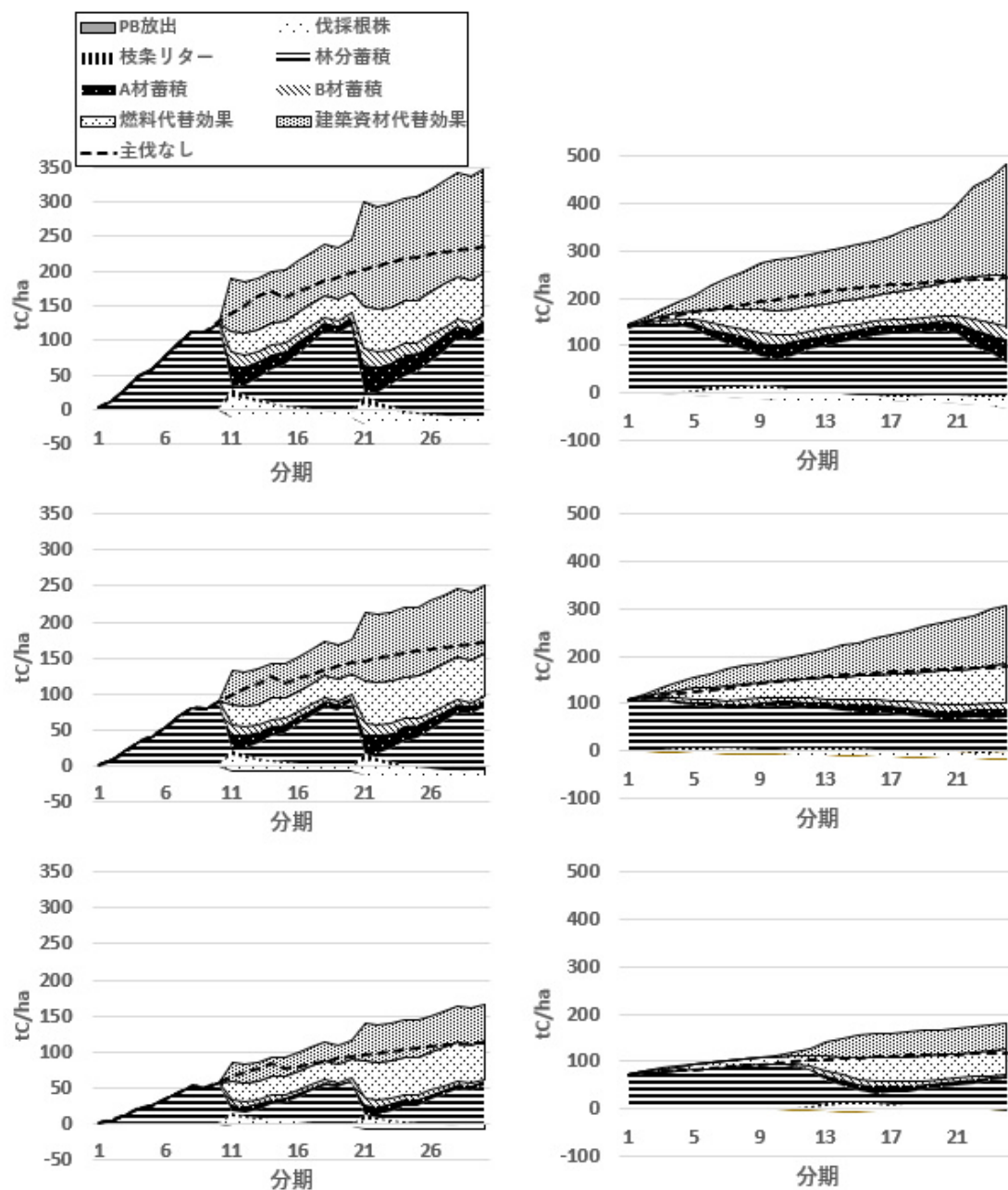


図7. 炭素放出量削減効果の推移（条件1、5）
 上段：地位3 中段：地位4 下段：地位5
 左：林分レベル 右：地域レベル

グラフの説明：凡例は図4と共通している。

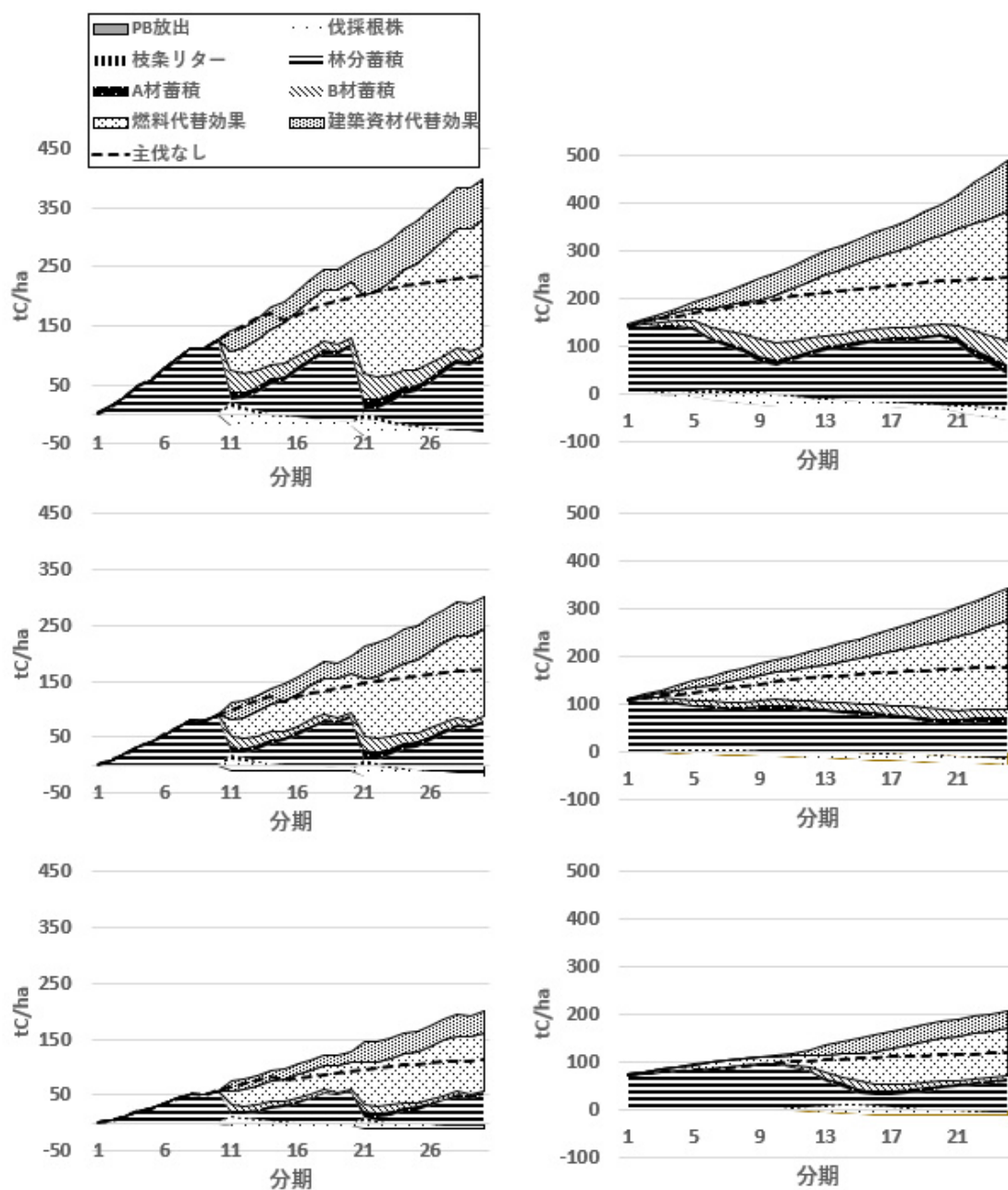


図 8. 炭素放出量削減効果の推移 (条件 1、6)

上段：地位 3 中段：地位 4 下段：地位 5

左：林分レベル 右：地域レベル

グラフの説明：凡例は図 4 と共通している。

量削減効果は増加していくと言える。地域レベルでの各地位の計画期間終了後の炭素放出量削減効果は、地位 3 で 248951 tC、地位 4 で 580790 tC、地位 5 で 77371 tC であるので、最も削減効果が高いのは地位 4

であったが、これは地位4の林分面積が他の地位よりも際立って大きいことが影響していると考えられる。各地位について、上記の結果をヘクタール当たりの値で表すと、地位3は326.1 tC/ha、地位4は243.0 tC/ha、地位5は158.0 tC/haとなり、地位が良いほうが面積当たりの削減効果は高かった。また、このとき主伐を行わない条件1との最終的な炭素放出量削減効果の差は、地位3で83.0 tC/ha、地位4で65.2 tC/ha、地位5で39.9 tC/haであり、地位が良いほど主伐を行うことによる削減効果の増加量がより大きくなった。それぞれの効果に注目すると、森林バイオマスの炭素蓄積と燃料代替効果および建築資材代替効果の寄与が特に大きいと言える。バイオマス蓄積量は、森林の齢級構成の偏りやユニットの伐採時期の偏りの影響で、ある程度の時間的変動はあるが、常に一定以上の値を示した。一方で、2種類の代替効果は計画期間の開始時点は値が0であり、分期が進むにつれてその値は単調増加していくという点で、バイオマス蓄積とは異なる時間的推移の傾向を示した。また、枝条リターと伐採根株という林地残材に含まれる炭素量やA材の建築資材としての炭素固定量は比較的小さい。マイナスの効果であるパーティクルボード(PB)の生産に伴う炭素放出量は、代替効果と同様に時間を経るごとに大きくなる効果であり、全体的な効果に与える影響は無視できない。

C材をバイオマス燃料と紙に半分ずつ利用する条件3は、林分レベルでは不利な条件であった(図5、左)。しかし地域レベルで見ると、短期的には主伐を行うことによって炭素放出量が増加する期間が存在するが、長期的には主伐を行うことが不利とはならない結果となった(図5、右)。

すべてのC材を紙として利用する条件4は、林分レベルでは地位にかかわらず炭素放出量削減の観点から不利な利用方法であった(図6、左)。地域レベルで見ても、林分レベルと同様に主伐を行うことで炭素放出量削減効果は減少した(図6、右)。

条件5の地域レベルでの120年後の炭素放出量削減効果の計算結果は地位の良いほうから順に、369845 tC、735416 tC、88120 tCとなり、条件2と条件5を比較すると、枝打ちを行うことによって地域全体の炭素放出量削減効果が31.6%増加し、主伐の有無による炭素放出量削減効果の差が約2.20倍に広がった。さらに、地位にかかわらず計画期間を通して常に主伐を行う条件5が主伐を行わない条件1よりも炭素放出量削減効果が高くなった(図7、右)。

また、条件6の地域レベルでの最終的な削減効果は地位3で373008 tC、地位4で821588 tC、地位5で101737 tCとなり、条件2と条件6を比較すると、廃棄材の燃料再利用を行うことで地域全体の最終的な炭素放出量削減効果は42.9%増加し、主伐の有無による炭素放出量削減効果の差は約2.63倍になった。さらに、地位にかかわらず計画期間を通して常に主伐を行う条件6が主伐を行わない条件1よりも炭素放出量削減効果が高くなった(図8、右)。

GISを用いて、条件2での炭素放出量削減効果の推移を空間情報と組み合わせて表現した(図9)。また、ユニットレベルの炭素放出削減効果について、林内蓄積(林分蓄積、伐採根株、枝条リター)のみを考慮した場合と木材利用に伴う炭素放出削減量も考慮した場合を比較した(図10)。さらに、対象地の路網情報をもとに、ユニットの路網からの距離と炭素放出量削減効果の関係(図11)と、路網からの距離に応じた林分面積(図12)を示した。

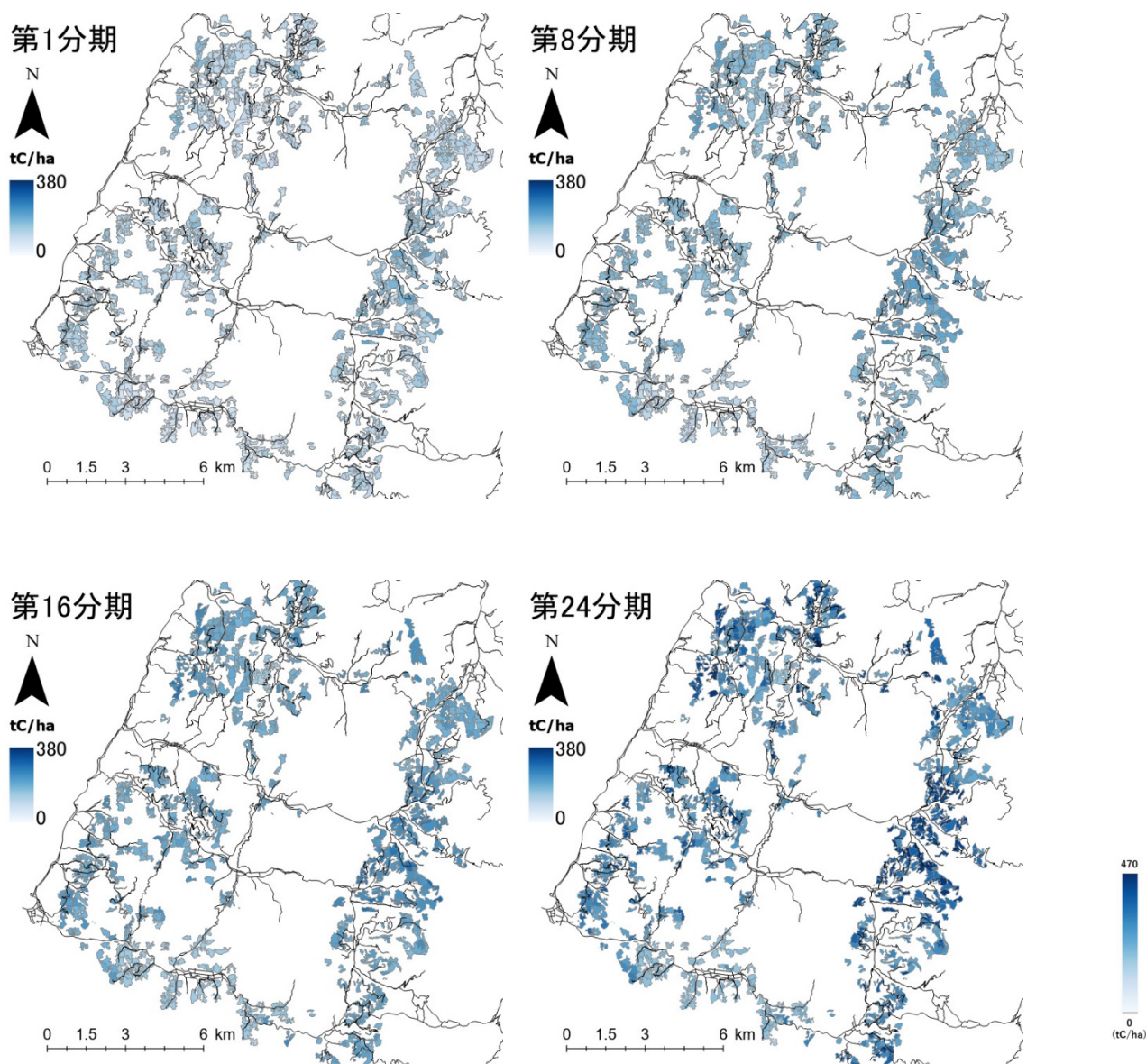
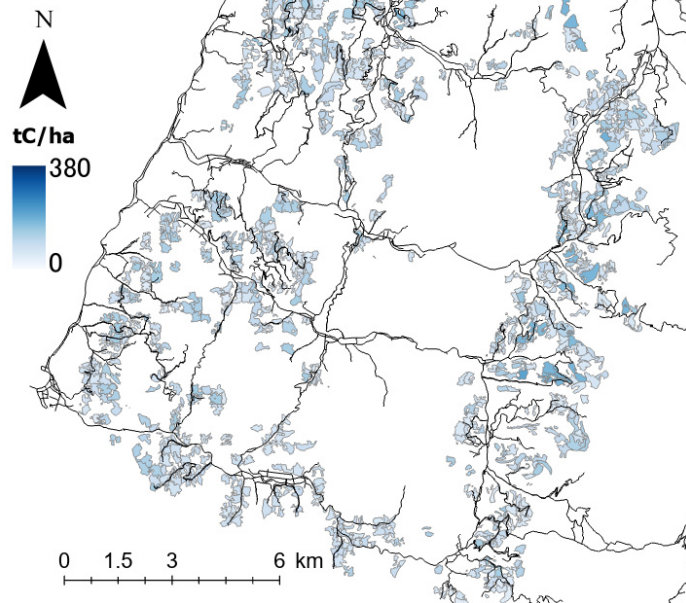
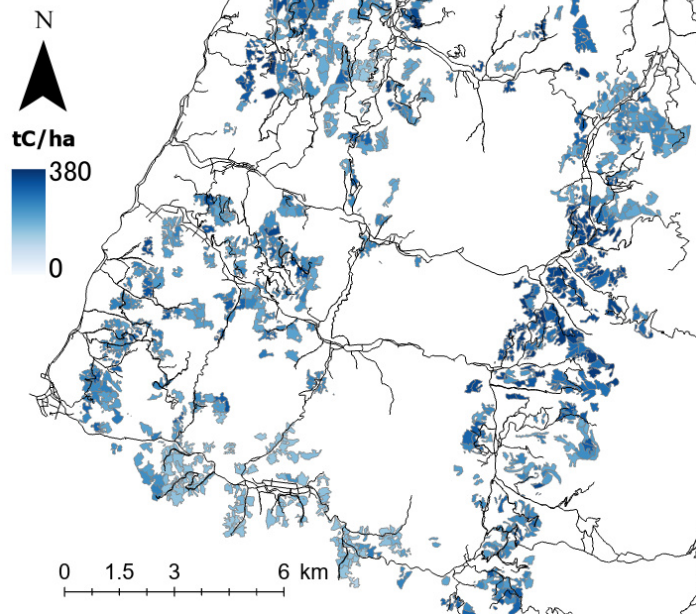


図9. ユニットごとの炭素放出量削減効果の推移（条件2）
図中の黒線は路網（国県道、林道、作業道）を表す

第24分期



第24分期



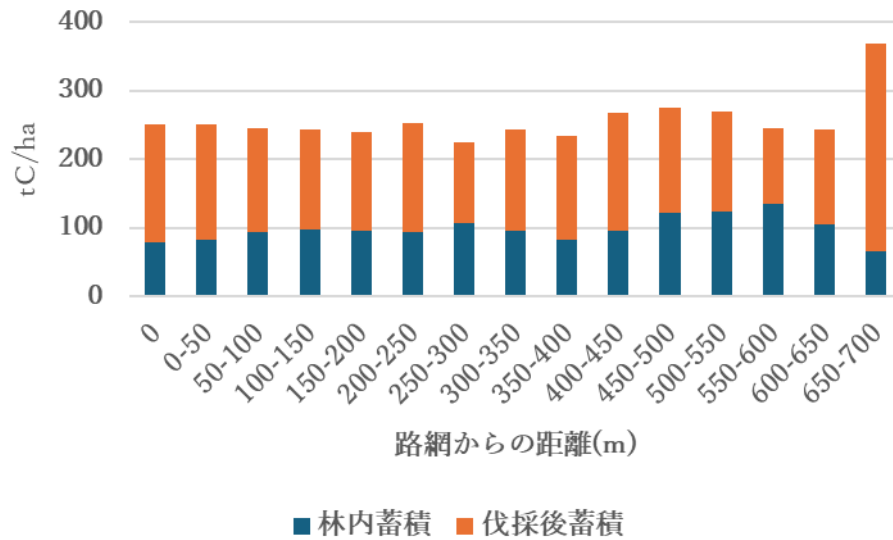


図 11. 路網からの距離と炭素放出量削減効果の関係（条件 2）
 林内蓄積：森林と伐採根株、枝条リターの炭素蓄積
 伐採後蓄積：木材利用に伴う炭素放出削減量（HWP 蓄積と代替効果から PB の生産に伴う炭素放出量を引いたもの）

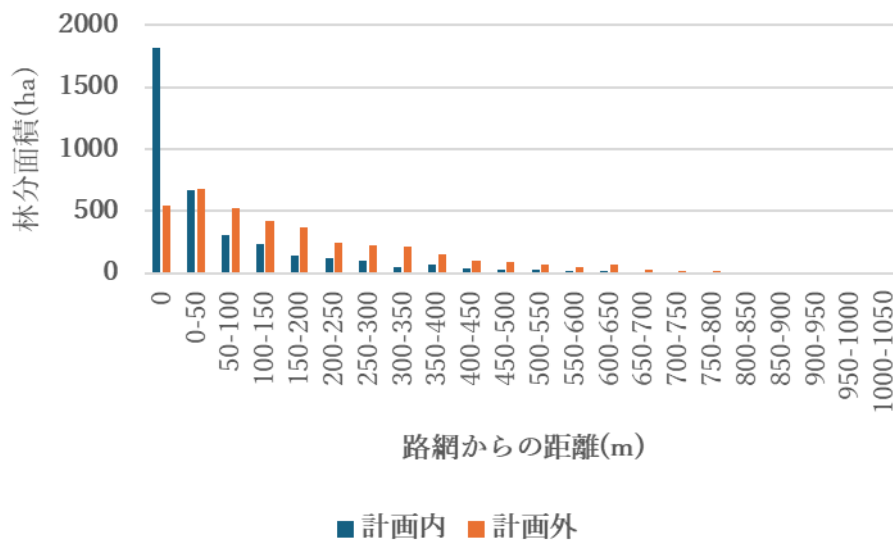


図 12. 路網からの距離と林分面積の関係
 計画内：対象地の中で本研究の収穫計画の対象となった林分
 計画外：対象地の中で本研究の収穫計画の対象外となった林分

7. 考察

4.1 結果の解釈

いずれの条件設定においても見られた特徴が、同じ条件であれば地位が良いほど面積当たりの炭素放出量削減効果が大きくなるという点である。これは、地位の良いところは面積当たりの成長量が大きく、地位の悪いところよりも収穫材積の絶対量が大きくなるためであると考えられる。収穫材積が大きくなると炭素放出にかかわる各効果の絶対値が大きくなるが、マイナスの効果の増加量よりもプラスの効果の増加量の方が大きいため、収穫材積が多くなるほど炭素放出量削減効果は大きくなっていく。すなわち、より地位が良い林分を積極的に管理することが、収益の面だけでなく炭素放出量削減の面からも効果的であると言える。

また、条件4以外の条件設定について当てはまる特徴が、炭素放出量削減効果は時間がたつにつれて、単調増加ではないにしろ、徐々に増加していくという点である。主伐を行わない場合は、炭素放出量削減効果は森林バイオマス蓄積量と言い換えることができ、森林バイオマスは伐採が行われなければ時間に伴って増加していく。主伐を行う場合は、主伐によって森林バイオマス量は大幅に減少するが、同時にその他の効果が増加する。主伐が行われることで増加する効果のうち、2種類の代替効果（燃料代替効果と建築資材代替効果）は永続的かつ累積的な効果であり、主伐が行われるごとにその量は増加し、減少しない。つまり主伐を行う場合、炭素放出量削減効果の増加傾向は、時間に伴って単調増加する代替効果の影響によるところが大きい。さらに、条件2のユニットごとの炭素放出量削減効果を表した図9より、炭素放出量削減効果の時間に伴う増加傾向は対象地全体で見られることが分かった。

条件1と条件2の地域レベルでの比較より、主伐を伴う森林経営が森林から生じる炭素放出量削減効果を高めることが示された（図4、右）。地域レベルでの計算で用いた収穫計画は収益の最大化を前提としているので、収益を最大化する経営が、同時に炭素放出量を削減するという公益的な要求をも満たすということが示唆された。

主伐を行わない条件1と、条件3を林分レベルで比較したとき、いずれの地位でも計画期間を通して主伐を行うことが不利になった。しかし、地域レベルで地位ごとに比較すると、長期的には主伐を行う方が炭素放出量削減の観点から不利にはならないという結果が得られた（図5）。さらに、地位3から5までを全て合計した地域全体の炭素放出量削減効果では、計画期間終了後に主伐を行うことの優位性が認められた。このように、地理的スケールによって結果が逆転した理由を考察する。まず、森林バイオマスの成長量は林齢が高くなるにつれて減少することや、森林バイオマスへの炭素蓄積量には限界があることから、主伐を行わない場合は、分期が進んで林齢が高くなるにつれて炭素放出量削減効果の増加は鈍化する。一方で、先に述べたように、主伐を行う場合の炭素放出量削減効果は、主に代替効果の影響によって、時間に伴い増加傾向を示す。すなわち主伐を行って木材を利用する場合は、継続的に炭素放出量削減効果を得ることができる。また、林分レベルと地域レベルでは前提となる林分状態が異なる。条件3では、初期林齢を1年とすると、選択した育林体系にかかわらず120年間を通して条件1の効果を下回る。しかし、120年を過ぎると、徐々に条件3と条件1の差が小さくなり、いずれは条件3が上回る。地域レベルの計算の際は各ユニットの初期林齢を考慮しているので、初期林齢が1年と仮定した林分レベルの計算よりも、条件3が条件1と比べて優位になる。さらに、比較的短伐期な林分の方が、長伐期林分よりも条件3が条件1を上回るまでに必要な期間が短い傾向があるが、図2に示されているように、収穫計画において地位3の全林分面積のうち、伐期齢が75年と80年という比較的短伐期な林分の面積が4分の3以上を占めている。したがって、これらの林分が地域全体の炭素放出量削減効果に与える影響は大きいと考えられる。そのため、地域レベルでは最終的に条件3の炭素放出量削減効果が条件1を上回ったと考えられる。このように、地域レベルでの計算ではユニットごとに異なる伐期齢や初期林齢を考慮しているので、林分レベルとは結果が異なることがある。すなわち、林分レベルでは主伐を行わないことが推奨される条件設定であっても、地域レベルかつ長期的に見れば、主伐を行う方が好ましいと言える可能性がある。

条件2、条件3および条件4の比較から、C材はバイオマス燃料として利用する方が紙として利用するよりも炭素放出量削減効果が高くなるので、C材は紙よりもバイオマス燃料として利用することが脱炭素の観点からは好ましいと言える。紙は製品としての寿命がきわめて短く、炭素固定機能がほとんどない上に、紙の生産に伴う炭素放出が永続的に負の効果を与えているが、バイオマス燃料は炭素放出量削減への寄与が大きい燃料代替効果によって永続的な正の効果を得られるという違いが原因である。

条件2と条件5の比較によって、枝打ちの導入は炭素放出量削減効果を高める上で効果的であることが

分かった。つまり森林経営者は、枝打ちを行うことで材の価値を高めて収益を増やすだけでなく、結果的に炭素放出量を削減できる。さらに、地位の良い林分ほど枝打ちによる炭素放出量削減効果の増加量が大きいため、枝打ちを行う際は地位の良いところから行うべきだという森林経営上の指針を示した。枝打ちの導入によって炭素放出量削減効果が増加するのは、収穫された丸太のうちの優良材（A 材）の割合が増えることで建築資材に用いられる木材量が増え、製品への平均炭素固定期間が長くなるとともに、建築資材代替効果が大きくなるためである。しかし、これは増加した A 材がすべて建築資材として利用されることを前提としている。たとえ価値の高い材が供給可能であっても、その受取先が無ければこれは実現しないので、価値の高い材の需要を高めて利用を拡大していくことが重要であると言える。令和 3 年度森林・林業白書(2022)で、社会経済生活の向上とカーボンニュートラルに寄与する「グリーン成長」を実現するためには「特に建築物等に用いられ、比較的価格の高い製材用材の利用拡大を進めていくことが重要となっている」と述べられているように、本研究の結果は政策的、社会的な要求にも合致するものである。

また、条件 2 と条件 6 の比較から廃棄材の再利用も炭素放出量を効果的に削減することが分かった。また、その効果は森林経営者のオプション（枝打ちの導入）によるものよりも大きいことが示された。本研究では、建築資材とパーティクルボードの廃棄材の 100%をバイオマス燃料として再利用するという理想的な仮定に基づいて計算を行ったが、この実現可能性については本研究では扱わない。しかし、廃棄材の再利用を進めていくことが炭素放出量削減につながるということは示された。

本研究の対象地の森林の齢級構成は日本全体の森林の齢級構成と似通っており、50 年生を超えた林分が多い。そこで本研究の結果をもとにして、日本の炭素放出量削減目標の達成に向けた提言を検討したい。日本では 2021 年に「地球温暖化対策の推進に関する法律の一部を改正する法律案」が閣議決定され、2050 年までのカーボンニュートラルの実現が法律に明記された。また、そのために 2030 年度に温室効果ガスを 2013 年度から 46%削減することが目標として掲げられている。これらの達成のために 2 兆円の「グリーンイノベーション基金」が造成され、企業への支援体制もできている。そのため、施策・技術開発の重点をどこに置くかが重要となっている。2050 年目標までは 30 年を切り、2030 年度目標まではすでに 10 年を切っている。そのため、日本では短期的な炭素放出量の削減が強く求められている。本研究の計画期間は 120 年であるが、そのはじめの 30 年（6 分期）での炭素放出量削減効果を短期的な効果と見なした。3 つの地位級を合計した対象地全体での 30 年間の平均年間炭素放出削減量は、条件 1 から 6 までそれぞれ、3353.5 tC/年、5602.6 tC/年、2984.0 tC/年、365.4 tC/年、8035.2 tC/年、6916.5 tC/年であった。最も短期的な炭素放出削減量が大きいののは枝打ちによって優良材の生産を行う条件 5 であった。しかし、本研究では枝打ちによる優良材の誘導に必要な移行期間が考慮されておらず、短期的な効果は過大評価されていると考えられる。次に年間炭素放出削減量が大きいののは、廃棄材の燃料再利用を行う条件 6 であった。本研究では、計画開始時点よりも前に生産された木材製品の廃棄材は考慮していないので、短期的な効果は過小評価されていると考えられる。また、再利用率は 100%を仮定しているが、全国木材組合連合会のホームページによると木造住宅の解体材のうち燃料として再利用されるものは約 16%である。これは、廃棄材の燃料再利用を拡大することで炭素放出削減量を増やす余地が多く残っていることを意味している。したがって、廃棄材の燃料再利用は、脱炭素を進めるうえで積極的に推奨すべき事項の一つであると言える。

また、林内の炭素プールだけでなく木材利用によって生じる炭素放出削減量も評価することで、対象地全体で炭素放出量削減効果は大きくなった（図 10）。つまり、森林の炭素放出量削減効果を評価する際に、林内の炭素プールのみを考慮すると、森林経営者がなし得る環境への貢献を過小評価することになり、木材利用によって生じる効果も考慮することによって、より正当な評価が行える。本研究は、森林経営が環境に与える影響に関して、包括的な評価方法を提示した。また、本研究の収穫方針では路網からの距離によらず、一定の炭素放出量削減効果を得ることができた（図 11）。図 12 のように、Suzuki et al. (2018) の示した路網から近い森林が集中的に伐採の対象となるという結論を、より具体的な数値で確認することができた。すなわち、図 12 では、青い棒グラフと、赤い棒グラフが、横軸 0 m を境に逆転している。つまり、伐採対象の森林の中で、特に初期状態において既設路網と隣接している森林かどうか、主な伐採の対象となり得るか、またその結果としてより炭素放出削減効果を発揮し得るかを左右する一つの要因になっていると言える。そのため、森林の炭素放出削減効果を高める施策としては、路網密度を高めることによって、経済性が高く立地条件の良い森林で、路網と隣接している区画において、積極的に伐採と植栽の循環的利用をすすめていくことが重要であると言える。

4.2 先行研究との比較

森林バイオマス、HWP への炭素蓄積および木材製品の使用による代替効果を統合的に分析した先行研究として、日本を対象とした先行研究はほとんどない。ドイツで行われた Martes and Kohl(2022)では地域レベルでの評価によって森林を完全に保護するよりも伐採を行う方が炭素放出量削減効果は高くなるという結果が得られており、これは本研究の結果と一致する。また、スウェーデンを対象とした Eriksson et al. (2007)、アメリカを対象とした Perez-Garcia et al. (2005)では林分レベルでの分析が行われ、時間経過に伴って炭素放出量削減効果が増加していく傾向や、特に代替効果の寄与が大きいという結果など、本研究との一致が見られた。

しかし林分レベルと地域レベルを組み合わせで分析した先行研究はほとんどなく、本研究で得られた、林分レベルでは有利と言えない条件でも地域レベルでは脱炭素に寄与し得るという結果は新しい知見であると言える。また、地域レベルでの評価を行った Martes and Kohl(2022)は、森林の保全強度を変化させたシナリオ間での比較を行っており、森林経営に注目し収益の最大化を前提としている本研究とは焦点が異なる。また、本研究は先行研究では扱われていない地位を考慮するなど、森林経営において先行研究よりも実践的な示唆を与えた。

4.3 本研究の意義

「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」(令和3年10月22日閣議決定)では、「利用期を迎えた人工林について「伐って、使って、植える」循環利用を確立し、木材利用を拡大しつつ、成長の旺盛な若い森林を確実に造成していくことが重要である」、「住宅・建築物分野は家庭・業務部門のカーボンニュートラルに向けて鍵となる分野であり、一度建築されると長期ストックとなる性質上、早急に取り組むべき分野である」、「リニューアブル(バイオマス化・再生材利用等)については、更なる再生利用拡大に向け、バイオマス素材の高機能化や用途の拡大・低コスト化のための技術開発・実証、リサイクル技術の開発・高度化、設備の整備、需要創出を進める」と述べられている。これをもとに策定された「革新的環境イノベーション戦略」(令和2年1月21日統合イノベーション戦略推進会議決定)では、温室効果ガス削減量が大きく日本の技術力による大きな貢献が可能な39のテーマがイノベーション・アクションプランとして定められた。その中の1つに「高層建築物等の木造化やバイオマス由来素材の利用による炭素貯留」が位置づけられている。また、「第五次環境基本計画」(平成30年4月17日閣議決定)で環境政策の具体的な展開として掲げられた6つの重点戦略には、森林整備および木材利用の推進が大きくかかわっている。さらに、令和3年10月1日には「脱炭素社会の実現に資する等のための建築物等における木材の利用の促進に関する法律」が施行され、建築物の木材利用を一層進めるとともに、農林水産省に木材利用促進本部が設置された。主伐を行わず森林を保全するよりも、主伐を行って木材を利用する方が炭素放出量削減効果は高くなるという本研究の結果は、これらの木材利用の推進政策に根拠を与えるものであり、重要な政策的意義をもつ。

4.4 本研究の限界

本研究では、炭素放出量削減に寄与するライフサイクル上の各モジュールについて、比較的単純なモデルを用いた。そのため、分析の正確性には限界がある。しかし、本研究の方法では、各モジュールのモデルの複雑化が必要となったとき、それを全体としての炭素放出量削減効果の評価に反映させることが比較的容易にできると考えられる。

本研究では、建築資材、PB、紙およびバイオマス燃料のLCAについて、計算を容易にするために既往の研究結果を用いているが、これらの研究はそれぞれインベントリ分析の際に用いたデータやシステム境界、生産・流通プロセスに違いがある。1つの森林から生産される木材を用いた複数の製品についてのLCAをデータの整合性をとりつつ行うことは、非常に困難であると言え、森林経営から生じる炭素放出量削減効果の全体的な傾向を調べて比較するという本研究の目的を超える。このように、本研究では参照した文献のデータの整合性については許容したので、LCAの考え方をを用いた炭素放出量削減効果の相対的な検討にとどまった。またPBに関する日本でのLCAの事例はNakano et al. (2018)の他には無く、各製品を対象としたLCA研究がまだ十分な状況ではないともいえる。各製品のLCA研究が進むことで、炭素放出量削減効果の計算においてより適切なパラメータの設定が可能になると考えられる。

参照したLCAの先行研究について、異なる研究を参照した際の結果の違いについて検討を加える。一宮ら(2021)は2階建て鉄筋コンクリート造特別養護老人ホームと、それと同等の木造建築を対象にして、LCA

によって温室効果ガス排出量を比較した。この研究を用いて建築資材代替効果を算出すると、本研究よりも建築資材代替効果が約 8.2%大きくなるが、これは結果に大きな影響を与えない。

本研究では、伐採が行われた林地は 100%再造林が行われることが前提となっている。再造林率を設定することで全体的な炭素放出量削減効果は減少すると考えられる。また、PB と紙から生じ得る代替効果や、建築資材の廃棄材の PB としての再利用、他の木材利用方法なども考慮されていない。このように、考慮する要素を増やすことで本研究と異なる結果が得られることも考えられる。本研究では森林経営による炭素放出量削減効果の全体的な傾向を見ることができた。

2. まとめ

本研究では、主伐を伴う適切な森林経営によって、収益を上げて持続的に経営を行いながら、炭素放出量を削減できることが示された。この結果は、木材利用の推進政策に根拠を与えるものであり、重要な政策的意義を持つ。また、枝打ちを実施することによってA材割合が増加するため、枝打ちを行う集約的な施業が炭素放出量削減効果を持っていることも示された。さらに廃棄材のバイオマス燃料としての再利用によって、短期的により大きな炭素放出量削減効果が得られることが示された。

本研究の評価では、樹木の成長が全体的な炭素放出量削減効果を左右する重要な要素であった。例えば、成長が良い林分（地位が良い林分）ほど炭素放出量削減効果が大きくなった。本研究は山形県内のスギ人工林を対象として行った。日本国内でも地域によってスギ人工林の成長過程は異なるため、地域による違いがあるかもしれない。立木の成長過程が異なる地域間で比較を行うことによって、より普遍的な結論を得ることが、今後の検討課題である。

【参考文献】

- Balasbaneh, A. T., & Bin Marsono, A. K. (2018). New residential construction building and composite post and beam structure toward global warming mitigation. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 37(4), 1394–1402.
- Carcassi, O. B., Habert, G., Malighetti, L. E., & Pittau, F. (2022). Material Diets for Climate-Neutral Construction. *Environmental Science & Technology*, 56(8), 5213–5223.
- Chen CX, Pierobon F, Jones S, Maples I, Gong Y, & Ganguly I. (2022) Comparative Life Cycle Assessment of Mass Timber and Concrete Residential Buildings: A Case Study in China. *Sustainability*, 14(1):144.
- Cordier, S., Blanchet, P., Robichaud, F., & Amor, B. (2022). Dynamic LCA of the increased use of wood in buildings and its consequences: Integration of CO₂ sequestration and material substitutions. *Building and Environment*, 226, 109695.
- Dhakal, S., Minx, J.C., Toth, F.L., Abdel-Aziz, A., Figueroa Meza, M.J., Hubacek, K., Jonckheere, I.G.C., Kim Yong-Gun, Nemet, G.F., Pachauri, S., Tan, X.C., & Wiedmann, T. (2022). Emissions Trends and Drivers. In IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926.004
- Eriksson, E., Gillespie, A. R., Gustavsson, L., Langvall, O., Olsson, M., Sathre, R., & Stendahl, J. (2007). Integrated carbon analysis of forest management practices and wood substitution. *Canadian Journal of Forest Research*, 37(3), 671–681.
- Fauzi, R. T., Lavoie, P., Tanguy, A., & Amor, B. (2021). Life cycle assessment and life cycle costing of multistorey building: Attributional and consequential perspectives. *Building and Environment*, 197, 107836.
- Head, M., Magnan, M., Kurz, W. A., Levasseur, A., Beauregard, R., & Margni, M. (2021). Temporally-differentiated biogenic carbon accounting of wood building product life cycles. *SV Applied Sciences*, 3, 1–17.
- Himes, A., & Busby, G. (2020). Wood buildings as a climate solution. *Developments in the Built Environment*, 4, 100030.
- 一宮孝至, 大住政寛, 小林靖尚, 長坂健司, & 井上雅文 (2021). 木造および RC 造非住宅建築の環境経済評価 (第 1 報) 積上法 LCA による GHG 排出量の比較. 木材学会誌, 67(1), 14–19.
- 今村栄一, 井内正直, & 坂東茂(2016). 日本における発電技術のライフサイクル CO₂ 排出量総合評価. 電力中央研究所報告.
- IPCC (2014). 2013 Revised Supplementary Methods and Good Practice Guidance Arising from the Kyoto Protocol, Hiraishi, T., Krug, T., Tanabe, K., Srivastava, N., Baasansuren, J., Fukuda, M. and Troxler, T.G. (eds). Published: IPCC, Switzerland.
- IPCC (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844.
- Islam, R., Chowdhury, S., Jannat, N. and Paul, P. (2022), Carbon footprint evaluation of local dwellings in Bangladesh towards low carbon society. *Built Environment Project and Asset Management*, 12(3):433–446.
- J-クレジット制度(2022). 方法論 EN-R-001(Ver.1.8) バイオマス固形燃料(木質バイオマス)による化石燃料又は系統電力の代替. <https://japancredit.go.jp/about/methodology/> より入手. 最終アクセス日

2023年1月29日。

- 桂徹. (2001). 紙パルプ産業における LCA の在り方. 紙パ技協誌, 55(10), 1366-1373.
- 国土交通省(2022). 2021 年次建築着工統計調査.
- 国立環境研究所 (2020). 日本国温室効果ガスインベントリ報告書.
- 国立環境研究所(2022). 日本国温室効果ガスインベントリ報告書.
- Martes, L. & Kohl, M. (2022). Improving the Contribution of Forests to Carbon Neutrality under Different Policies-A Case Study from the Hamburg Metropolitan Area. SUSTAINABILITY, 14(4).
- 松本遼斗 & 加用千裕 (2021). 都道府県ごとの建築物に使用される伐採木材製品の炭素貯蔵量. 木材学会誌, 67(3), 138-148.
- 森貞和仁 & 中岡圭一 (2008). 林地残材の分解速度について. 関東森林研究, 59:319-320.
- Nabuurs, G. J., and Mohren, G. M. J. (1995). Modelling analysis of potential carbon sequestration in selected forest types. Canadian Journal of Forest Research, 25:1157-1172.
- Nakano, K., Ando, K., Takigawa, M., & Hattori, N. (2018). Life cycle assessment of wood-based boards produced in Japan and impact of formaldehyde emissions during the use stage. The International Journal of Life Cycle Assessment, 23(4), 957-969.
- Nakano, K., Karube, M., & Hattori, N. (2020). Environmental impacts of building construction using cross-laminated timber panel construction method: A case of the research building in Kyushu, Japan. *Sustainability*, 12(6), 2220.
- Nakano, K., Koike, W., Yamagishi, K., & Hattori, N. (2020). Environmental impacts of cross-laminated timber production in Japan. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 22, 2193-2205.
- 日本製紙連合会(2011). 紙・板紙のライフサイクルにおける CO2 排出量.
- Olson, J. S. (1963). Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. *Ecology*, 44:322-331.
- Perez-Garcia, J., Lippke, B., Connick, J., & Manriquez, C. (2005). An assessment of carbon pools, storage, and wood products market substitution using life-cycle analysis results. *Wood and fiber science*, 140-148.
- Resch, E., Andresen, I., Cherubini, F., & Brattebø, H. (2021). Estimating dynamic climate change effects of material use in buildings- Timing, uncertainty, and emission sources. *Building and Environment*, 187, 107399.
- 林野庁 (1979). 裏東北・北陸地方スギ林分密度管理図. 日本林業技術協会.
- 林野庁(2021). 令和2年度 森林・林業白書.
- 林野庁(2022). 令和3年度 森林・林業白書.
- 林野庁木材利用課(2016). 平成27年度木材利用推進・省エネ省 CO2 実証業務報告書.
- Sahoo, K., Bergman, R., Alanya-Rosenbaum, S., Gu, H., & Liang, S. (2019). Life cycle assessment of forest-based products: A review. *Sustainability*, 11(17), 4722.
- 酒井佳美, 高橋正通, 石塚成宏, 稲垣善之, 松浦陽次郎, 雲野明, 中田圭亮, 長坂晶子, 丹羽花恵, 澤田智志, 北条良敬, 玉木泰彦, 総谷珠美, 武田宏, 相浦英春, 山内仁人, 島田博匡, 岩月鉄平, 山場淳史, 山田隆信, 前田一, & 室 雅道 (2008). 材密度変化による主要な針葉樹人工林における枯死木の分解速度推定. 森林立地, 50(2), 153-165.
- 佐藤淳 (2021). パリ協定下の伐採木材製品 (HWP): 気候変動対策としての取り扱いの変遷と排出削減ポテンシャル. 木材保存, 47(5), 217-228.
- Schelhaas, M. J., Van Esch, P. W., Groen, T. A., De Jong, B. H. J., Kanninen, M., Liski, J., Masera, O., Mohren, G. M. J., Nabuurs, G. J., Palosuo, T., Pedroni, L., Vallejo, A. & Vilen, T. (2004). CO2FIX V 3.1 A modelling framework for quantifying carbon sequestration in forest ecosystems. Alterra-Centrum Ecosystemen.
- 鈴木光明・龍原哲 (2016). 採材方針と管理状態がスギ人工林の収益に与える影響-新潟県村上市山北地区民有林の事例. 森林計画学会誌, 50(1), 27-39.
- Suzuki K, Tatsuhara S, Nakajima T, Kanomata H, Oka M (2018). Predicting effects of logging systems and bucking strategies for privately owned sugi (*Cryptomeria japonica*) plantations in

Atsumi District, Tsuruoka City, Yamagata Prefecture. Journal of Forest Planning, 24: 15- 27

Valentini, R., Matteucci, G., Dolman, A.J., Schulze, E.-D., Rebmann, C., Moors, E.J., Granier, A., Gross, P., Jensen, N.O., Pilegaard, K., Lindroth, A., Grelle, A., Bernhofer, C., Grünwald, T., Aubinet, M., Ceulemans, R., Kowalski, A.S., Vesala, T., Rannik, Ü., Berbigier, P., Loustau, D., Gudmundsson, J., Thorgeirsson, H., Ibrom, A., Morgenstern, K., Clement, R., Moncreiff, J., Montagnani, L., Minerbi, S., and Jarvis, P.G. (2000). Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests. Nature (London), 404: 861- 865.

山形県農林水産部森林課 (1980). 山形県スギ林分収穫予想表. 山形県.

Yoshioka, T., Aruga, K., Nitami, T., Kobayashi, H., & Sakai, H. (2005). Energy and carbon dioxide (CO₂) balance of logging residues as alternative energy resources: system analysis based on the method of a life cycle inventory (LCI) analysis. Journal of Forest Research, 10(2), 125-134.

(注書き)□□□□□□□□□□□□□□□□

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月

— — — — — 【文字のフォントとサイズについて】 — — — — —

■タイトル

左揃え (日) MSゴシック (英) Arial 14pt

■研究者

左揃え (日) MS明朝 (英) Century 10pt (タブ設定されています)

■見出し1

左揃え (日) MSゴシック (英) Arial 11pt

■見出し2

左揃え (日) MSゴシック (英) Arial 10pt

■見出し3

左揃え (日) MSゴシック (英) Arial 10pt

■本文

左揃え (日) MS明朝 (英) MS明朝 10pt

■参考文献

左揃え (日) MS明朝 (英) Century 10pt

■発表資料

左揃え (日) MS明朝 (英) Century 9pt

■注書き

左揃え

(日) MS明朝

(英) MS明朝

10pt
