

■論文

二酸化炭素吸収促進に寄与する森林施業の評価

小澤 史弘¹，高尾 克樹^{2*}

【要旨】本研究では、森林施業種とCO₂吸収速度、またその施業に要する費用を算定し、どのような森林施業が温室効果ガス吸収に適しているのかを明らかにする。CO₂吸収速度および費用の算定方法としては5種類の施業法を評価対象として設定し、それぞれについて吸収手段を2通り定めて計10通りのシナリオについて算定した。算定の結果、2種類の複層林施業で良好な結果が得られた。反対に、従来の森林施業で主流を占めていた短伐期大面積皆伐—斉造林を象徴して設定した50年伐期皆伐施業は、複層林施業よりも大きく劣る結果となり、温室効果ガス吸収には適さない施業であると言えた。他に、伝統的な森林利用法である薪炭林を想定した施業、さらに、施業を放棄した人工林を想定した森林についても同様に算定したが、吸収源としては適当でないという結果となった。

キーワード 森林施業，二酸化炭素削減，森林経済

I 研究の背景と目的

I.1 背景と目的

気候変動に関する政府間パネル（IPCC）は、2014年11月に第5次評価報告書（AR5）の作成を行い、統合報告書を公表した。報告書には、気候システムの温暖化には疑う余地がなく、大気と海洋は温暖化し、海面水位を上昇させ、人為起源の温室効果ガスの排出は地球温暖化の原因である可能性が極めて高いと記されている。その後、2015年に開催された第21回気候変動枠組条約締約国会議（COP21）において調印されたパリ協定には、世界共通の長期の平均気温上昇を工業化以前に比べ1.5°C以内に抑えること、森林など炭素貯蔵源の保全に関する取り決めについて定められている。

日本における温室効果ガス削減・吸収源対策を担うJ-クレジット制度には、ボイラーやコージェネレーション、森林などいくつかの削減・吸収対象が設けられているが、本研究では、国土の保全や水源涵養など、人間にとって重要な役割を担う森林に着目し、森林の気候変動緩和効果について取り上げることとする。

木本植物は温室効果ガスである二酸化炭素（CO₂）を体内に摂り込んで光合成を行い、有機物の形で体内に大量に蓄積することができるため、世界各国の森林におけるCO₂吸収量（以降、吸収とはCO₂の吸収を指す）を推定し、さらにその吸収能力を高めるための様々な方策が、締約国会議（COP）をはじめとする国際的な体制のなかで検討されている。

このような国際的流れを受け、日本では2016年5月に「地球温暖化対策計画」が閣議決定された。この中には気候変動緩和対策の一つとして、森林吸収源対策が掲げられ、「必要な間伐の実施」、「育成複層林施業」、「長伐期施業等による多様な森林整備の推進」、「路網の整備」等を推進していくこととなった。

しかし日本は、国土面積の約66%を森林が占める世界有数の森林国であるものの、その森林の

*1 一般社団法人日本クルベジ協会

2 立命館大学政策科学部 特任教授

荒廃・林業の衰退が社会問題として叫ばれて久しい。この問題の原因は様々あるが、森林の約4割を占める人工林における山元立木価格の低迷が、人々の林業に対する興味を失わせ、人工林の荒廃、後継者不足、境界の不明確化、地主不在・所在不明など、森林に関わる種々の課題を招いているのではなからうか。

日本の林業を取り巻く状況を踏まえると、林業による気候変動緩和政策を打ち出す場合、その政策が真に気候変動緩和に寄与し、持続可能なものか否か、つまり、その政策により実施された施業が、真に吸収を促進するものであり、かつ、経済的なものであるかが、重要である。

本研究ではまず森林施業の内容について整理した後、既往文献のデータを基に、吸収速度を算定することで、施業種ごとの吸収速度の違いを明らかにする。さらに、施業種ごとに単位面積当たり要する費用を算定し、吸収速度、費用の両面から、吸収に最も適当な施業種を明らかにする。

I. 2 森林施業の内容

筆者がかつて勤務した鹿児島県曾於郡（2005年より曾於市）内の国有林（林野庁九州森林管理局管内）で行われていた造林・保育に関する施業内容を表1に示す。表中の「対象林齢」は、その林分の立地する自然条件により成長状態が異なることから、バラツキがあるのが普通である。

日本における人工林の森林施業は、実施時期の差こそあれ、表1に示した内容でほぼ共通と考えて良いだろう。本研究において森林作業のコストを算定する場合は、表1の内容に基づく。

表1. 人工林施業のサイクル(南九州での例)

作業種	対象林齢
地拵え・植栽	—
下刈り	1～5
除伐	5～15
保育間伐	10～20
間伐	20～60
主伐	40年～
地拵え・植林	—

II 吸収量と費用の算定

II. 1 分析の枠組み

地球温暖化に関与する温室効果ガスは二酸化炭素(CO₂)、メタン(CH₄)、亜酸化窒素(N₂O)など数種あるが、本研究ではCO₂の吸収と排出を対象とする。算定を行う分野は、林業とする。CO₂の吸収は、木材生産を目的とした林業にとって、あくまで付加的な機能であり、本研究では、林業の持つ付加的な機能である吸収量と費用に注目して分析を行う。

分析にあたっては、植林・伐採などのタイミングや周期が異なる森林管理方法を統一的に比較するため、永久サイクルベースでCO₂吸収や費用の評価を行った。永久サイクルとは、すべての管理方法を、タイミングや周期にかかわらず、それらが永久に繰り返し実施されると仮定して評価する方法である。森林管理の過程では、CO₂排出・吸収や費用・収益は異なった時期に発生するが、永久サイクルベースでは、それらはすべて時間的に平均化した、一年あたりの平均で評価する。言い換えると、十分に大規模な経営規模の下で、林齢の異なる多数の林を同時並行的に経

営した場合の、一年ごとのCO₂吸収や費用の状態を表すと考えられる。したがって、永久サイクルベースでは、割引率は考慮しない。

研究の対象となる森林は、関東以西の低標高の私有林を想定する。

造林から保育、収穫、更新へと連なるプロセスである森林施業には森林経営の形態ごとに種類がある。本研究では、施業種ごとの吸収と費用の違いを明らかにするが、収穫後の利用も木質バイオマスの炭素固定効果を大きく左右することとなるため、施業種ごとの立木成長とともに、建築材利用、木質バイオマス利用、炭化の3つの利用法も、吸収と費用を算定するためのシナリオ作りに用いる。

施業による林分成長量は、伐採後の裸地を放置し成立した放置樹林の成長量を基準として算定する。比較する各施業は、伐採後に植林した年より起算して100年間を算定の対象期間とする。したがって、例えば本研究の対象施業種である50年伐期の単層林施業においては、植林後50年を経て林木は全て収穫するが、続く再植林後の50年間の育成期間も算定の対象となる。

また、本研究では、算定の単位面積を1haとした。日本の私有林所有者は、その大半が5ha以下の小規模所有者であることを考慮すると、単位面積を1haとするのは、やや大きい。したがって、算定の前提として、集約化(団地化)が進んだ後の状況を想定し、5~10haといった大面積での施業結果を平均化した1haを単位面積として算定に用いる。

以上の枠組みのもと、施業種ごとの吸収速度、費用を算定する。

II. 2 吸収量の算定

II. 2. 1 対象施業種の設定

京都議定書第3条4に規定する「吸収源による吸収量の変化に関連する追加的人為活動」として、日本では植生回復と共に森林経営を選択している。森林経営とは、人工造林を行う場合、植林、保育、収穫という一連の林業活動を意味することとなるが、本研究では仕立てた森林が複層林か、単層林かで大別することとし、対象施業種を複層林施業、単層林施業とする。藤森

(1992)は複層林施業をタイプ別に分け、それぞれの長所と短所を示し、欠点のない施業種は、短期二段林施業、郡状複層林施業、帯状複層林施業であるとした上で、短期二段林施業については、複層林施業の長所のほとんどを有すると述べている。帯状複層林施業に関しては、作業の効率性・生物多様性に長じた施業種であるという既往研究等も多いため、本研究では、短期二段林施業(以下、二段林)、帯状複層林施業(以下、帯状伐)を複層林施業として評価する。ただし、本研究を行うに際して行った鳥取県智頭林業地での聞き取り調査^{註1}により、二段林は技術的あるいは気候条件等により、成立させることが困難な場合が多く、その代りに近年では、スギ林の林床で天然更新した有用樹を積極的に保残する上層スギ・下層広葉樹の複層林が見られるようになっている。そこで本研究では「上層スギ林・下層天然広葉樹林施業」を二段林として評価することとしたい。単層林施業は、これまでの人工林施業において主流を占めていた伐期50年程度で皆伐を行う単層林(以下、50年皆伐)について評価する。また、両者の対極である施業放棄人工林(以下、放棄林)、さらに薪炭材採取等、伝統的利用形態の森林(以下、生活林)の5タイプについて施業法と吸収能力との関係を調べる。

なお、森林土壌中に含まれる有機炭素や枯損木は、施業期間中量的変化が無いものと仮定し、本論文では算定対象から除外した。

II. 2. 2 算定方法

以上挙げた施業等を行うことにより、どれだけの吸収量があるのかを算定する方法として、J-クレジットにおける森林関係の方法論F0-001(ver. 2. 3, 森林経営活動)を用いる。J-クレジットとは、例えば温室効果ガス吸収源対策を行う場合の吸収量から、行わない場合の吸収量を差し引き、その差を「クレジット」として国が認証する仕組みを有する制度のことであり、2016年に閣議決定された地球温暖化対策計画の中において、我が国が掲げる温室効果ガス目標達成のための分野横断的な施策の一つとして位置づけられている。本研究では、J-クレジット制度の方法論F0-001(ver. 2. 3)を基に、森林経営活動による二酸化炭素吸収量を次式により算定する。

$$C_{total} = C_{PJ} - C_{cut} - C_{BL} \quad (\text{式1})$$

表2. 式1の記号説明

記号	定義	単位
C_{total}	総吸収量	t-CO ₂ /年
C_{PJ}	吸収量	t-CO ₂ /年
C_{cut}	排出量	t-CO ₂ /年
C_{BL}	ベースライン吸収量	t-CO ₂ /年

II. 2. 3 各パラメータについて

吸収量 C_{PJ} は、施業を行っている森林の吸収量として次式により算定する。

$$C_{PJ} = \sum_{t=1}^{100} C_{PJ,t} = \sum_{t=1}^{100} (\Delta Trunk_{SC,t} \times WD \times BEF \times (1 + R_{ratio}) \times CF \times 44/12) \quad (\text{式2})$$

表3. 式2の記号、数値の説明

記号	定義	単位
$C_{PJ,t}$	森林施業（植栽、保育、間伐）に伴う、林齢 t の森林の年間 CO ₂ 吸収量	t-CO ₂ /年
$\Delta Trunk_{SC,t}$	林齢 t における単位面積当たりの年間幹材積成長量	m ³ /ha
WD	幹材積（成長）量をバイオマス量（乾燥重量）に換算するための係数（容積密度）	t/m ³
BEF	幹のバイオマス量に枝葉のバイオマス量を加算補正するための係数（拡大係数）	—
R_{ratio}	地上部バイオマスのCO ₂ 吸収量に、地下部（根）のCO ₂ 吸収量を加算補正するための係数（地下部率）	—
CF	バイオマス量（乾燥重量）を炭素量に換算するための炭素比率（乾燥重量から炭素量への換算に使用）（炭素含有率）	—
44/12	二酸化炭素重量への換算比	—

入手できたスギ林分収穫表（鹿児島県、地位上）の樹高成長量に基づき、haあたりの成立本数から同県スギ人工林林分密度管理図を用いて収量比数が伐採後0.65～0.70になるようにha当り残存本数を求め、成立本数と残存本数の差を伐採量（材積ベース）とした。吸収量(CPJ, t)は、10年ごとの材積成長量を基に式2を用いて1ha当りの植栽木の地上部および地下部の吸収量として求められる。本研究における式2のパラメータは国立環境研究所(2008)より次表のとおりとする。

表4. 式2のパラメータ

名称	帯状伐	二段林	50年皆伐	放棄林	生活林
<i>WD</i>	0.314	上木：0.314 下木：0.473	0.314	0.473	0.473
<i>BEF</i>	林齢<20年： 1.57 林齢≥20年： 1.23	上木 林齢<20年： 1.57 林齢≥20年： 1.23 下木 1.37	林齢<20年： 1.57 林齢≥20年： 1.23	1.37	1.37
<i>R ratio</i>	0.25				
<i>CF</i>	0.5				

また、本研究においては、森林施業により促される植物体内の吸収量増加のほか、伐採後に木材を建築向けに利用した場合、及び木炭にして林地に埋設した場合、またバイオマス発電所にてCO₂削減に寄与した場合の削減量も吸収量として計上する。建築向けに用いた木材が分解するまでの時間は、IPCC(2013)が提案する41年を用いる。木炭は、ほぼ分解されることなく500年～1000年と安定していることから、CO₂を長期に固定できる。製炭は伐採現場にて小型重機により掘削して出来た簡易炭化炉に枝条を投入し、トタン等で被覆するのみの伏せ焼き法により行うこととする。出来た木炭は土をかけて消火し、木炭の推計量をそのまま炭素貯留量として計上する。炭化物中の炭素量の算定方法を次に示す。

$$C_{CH} = \sum_{t=1}^{100} C_{CH,t} = \sum_{t=1}^{100} (\Delta Trunk_{SC,t} \times WD \times BEF \times 0.2 \times 0.8) \quad (式3)$$

表 5. 式 3 の記号、数値の説明

記号	定義	単位
$C_{CH,t}$	森林施業（植栽、保育、間伐）に伴う、林齢 t における炭化物の年間生産量	t-C/年
$\Delta Trunk_{SC}$	単位面積当たりの幹材積成長量	m ³ /ha
WD	幹材積（成長）量をバイオマス量（乾燥重量）に換算するための係数（容積密度）	t/m ³
BEF	幹のバイオマス量に枝葉のバイオマス量を加算補正するための係数（拡大係数）	—
0.2	炭化歩留まり	—
0.8	固定炭素率	—

バイオマス発電所における木質バイオマス 1 t あたりの発電量およびCO₂削減量は、Perilhon ら (2012) の数値を用いると発電量は1,468MJ、比較する石油火力発電所において、同じく1,468MJ を発電すると、0.307tのCO₂が排出されることとなっているため、本研究においては、木質バイオマス 1 t あたり石油由来のCO₂0.307tを削減できるものとする。

表 6. 発電の種類別投入燃料量と CO₂ 排出量

発電の種類	投入燃料 (t)	発電量 (MJ)	CO ₂ 排出量 (t)
木質バイオマス(2MW)	1	1,468	0.989
石油火力(2MW)	0.098	1,468	0.307

Perilhon ら(2012)を基に計算

排出量 C_{cut} は、次式により算定する。

$$C_{cut} = \sum_{t=1}^{100} C_{cut,t} = \sum_{t=1}^{100} (Root_t \times CW_t \times BP_t \times 44/12) \quad (式 4)$$

表 7. 式 4 の記号、数値の説明

記号	定義	単位
$C_{cut,t}$	森林施業に伴い発生する、林齢 t における伐根および建築廃材およびバイオマス発電仕向材中の年間二酸化炭素量	t-CO ₂ /年
$Root_t$	林齢 t において年間に発生する伐根中の炭素量	t-C/年
CW_t	林齢 t において年間に発生する当該林分由来の廃建築材中の炭素量	t-C/年
BP_t	林齢 t において年間に発生するバイオマス発電仕向材中の炭素量	t-C/年
44/12	二酸化炭素重量への換算係数	—

本研究では、萌芽更新を期待する伐採以外の伐採では必ず排出される伐根や、利用されない枝条は排出量として計上することとした。また、バイオマス発電に仕向ける材も排出量に加えた。

ここで、本研究におけるバイオマスの利用法、排出までの時間をまとめると表 8 の通りとなる。

表8. バイオマスの用途と排出までの時間

バイオマスの部位	用途	排出までの時間
樹幹	建築材	41年
	バイオマス発電	使用直後*
枝条	木炭原料（炭材）	500年以上
	バイオマス発電	使用直後*
	用途無し	伐採直後
伐根	—	伐採直後

※ ただし発電により削減した CO₂は吸収量に加算する。

次にベースライン吸収量について述べる。J-クレジット方法論FO-001(ver. 2.3)におけるベースライン吸収量は、「認証対象期間の開始日以降、当該年度までに森林経営計画に基づき適切な森林施業又は森林の保護が実施されなかった場合の吸収量とする」とされており、その算定式は、 $CBL=0$ とされている。本研究においては、より実状に沿う評価を試みるため、既往文献等を参考に変更を加えたい。

森林経営計画に基づく適切な森林施業又は森林保護とは、多くの場合、間伐を指すものと考えられる。何故なら、現在の高齢化した日本の人工林においては、植栽後10年程度までに行われる下刈りや除伐実施の有無が問題になることは考えにくいからである。実際に J-クレジット制度に登録された森林経営活動プロジェクトの計画書22案件を見ると、その対象森林の全てが林齢30年～60年を主とする森林で、クレジット創出のため間伐が実施されることとなっており、下刈り、除伐ではない。

正木ら(2015)は、秋田県内のスギ高齢林において、間伐によるスギ林の成長量を調査し、間伐が行われていない林分においても、スギ材積の増大を明らかにしている。無間伐林の間伐林に勝る材積増加に関する知見は他にも報告されており、J-クレジットの方法論 FO-001(ver.2.3)において施業を行っていない森林の成長量をゼロと見なし、これをベースラインとする方法は、スギ人工林の蓄積推移の実状を反映していない。

そこで、本研究では森林を収穫（皆伐）した跡に、植栽を行わず、前生樹実生・稚樹・埋土種子により成立する広葉樹林の成長量をベースラインとしたい。温暖湿潤な日本の森林は、一般的に天然更新し易いと言われる。皆伐跡地を放置しておく、更新を阻害するササの繁茂やシカ等による食害の激しい地域を除き、10年程度で広葉樹を主体とする広葉樹林が成立する。本研究においても、皆伐跡地の更新作業を放棄した場合、広葉樹林が成立するものと想定する。吉田ら(1999)を参考に、リチャーズ成長関数（式5）を用いて成長量の推移を算定する。与えられる各パラメータは表9に示す。

$$W = A (1 - b \cdot e^{(-kt)})^{1/(1-m)} \quad (\text{式5})$$

ここで、 W : 時間 t における樹幹材積 (m^3/ha)
 A : W の最終到達量を示すパラメータ
 b : W の初期値に関するパラメータ
 k : 成長速度に関するパラメータ
 m : 成長曲線の方を示すパラメータ

表 9. 成長曲線に用いるパラメータ

最終到達	成長速度	曲線型	初期値
<i>A</i>	<i>k</i>	<i>m</i>	<i>b</i>
172.7	0.053	0.54	1

※ 吉田ら(1999)³⁸⁾を基に作成

次に、式 2 を用いて広葉樹林 1 ha における林分炭素増加量を求める。式 2 のパラメータは、表 4 の放棄林、生活林に準じ、*WD*: 0.473、*BEF*: 1.37、*R ratio*: 0.25、*CF*: 0.5 とする (式 6)。計算結果を表 10 中の「林分炭素増加量(全植物体)」に示す。算定の結果、ベースラインは、*CBL*=339.2(t-CO₂)となる。

$$C_{BL} = \sum_{t=1}^{100} C_{BL,t} = \sum_{t=1}^{100} (\Delta Trunk_{SC,t} \times WD \times BEF \times (1 + R_{ratio}) \times CF \times 44 / 12) = 339.2 \quad (\text{式 6})$$

(t-CO₂/ha・100年)

ただし、

WD: 0.473

BEF: 1.37

R ratio: 0.25

CF: 0.5

44/12: 二酸化炭素量への換算係数

表 10. ベースラインの算定

林齢 (年)	林分幹材積 (m ³ /ha)	林分炭素増加 量(全植物体) (t-C/ha)
11	29.2	18.1
21	72.6	21.2
31	108.2	19.3
41	132.8	13.3
51	148.5	8.5
61	158.2	5.3
71	164.1	3.2
81	167.6	1.9
91	169.7	1.1
100	170.8	0.6
計		92.5
年平均 (t-CO ₂ /ha・年)		3.4

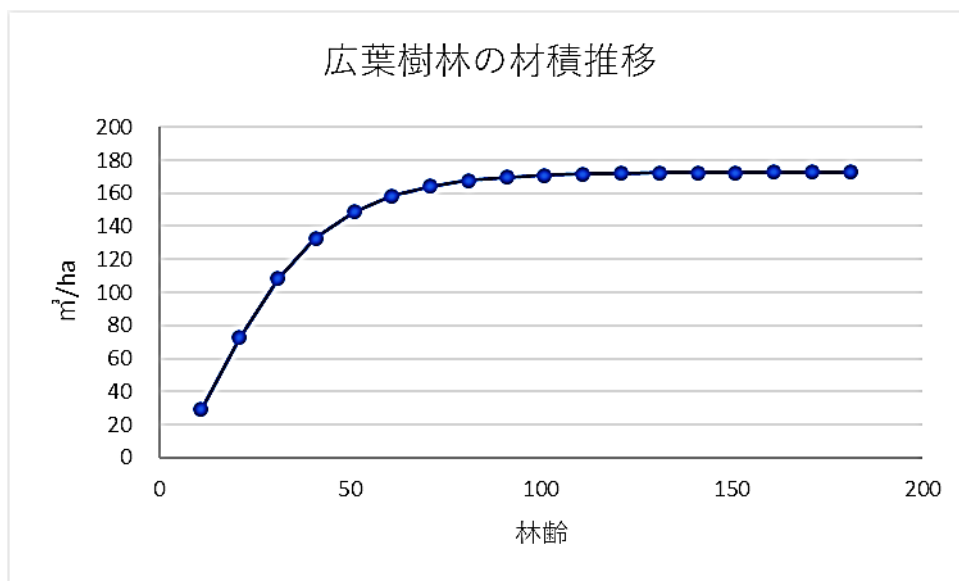


図 1. 広葉樹林の成長 (ha 当り)

II. 2. 4 総吸収速度の算定

式 1 に従い、吸収量から排出量、ベースライン吸収量を引いたものが当該林分の吸収量である。本研究ではそれぞれのパラメータを100(年)で除してhaあたりの速度(t-CO₂/ha・年) (総吸収速度) として表し、算定する。

$$C_{total,v} = C_{PJ,v} - C_{cut,v} - C_{BL,v} \quad (式 7)$$

式 1 ~ 式 6 及び式 7 を用いて帯状伐、二段林、50年皆伐、放棄林、生活林の吸収速度を算定する。

II. 2. 5 算定結果

算定結果を表11に示す。総吸収速度の最も高かった施業種は二段林であり、次いで高かった帯状伐と共に、総吸収速度は50年皆伐よりも顕著に高かった。生活林、放棄林は総吸収速度が両シナリオともにマイナス、すなわち、排出が上回る結果となった。

表 11. 吸収速度算定結果

施業種	組合せ	吸収速度	排出速度	t-CO ₂ /年・ha	
				ベースライン	総吸収速度
帯状伐	立木成長+建築材利用	20.6	9.9	3.4	7.2
	立木成長+建築材利用+炭化	21.7	6.2	3.4	12.1
二段林	立木成長+建築材利用	25.7	4.1	3.4	18.1
	立木成長+建築材利用+炭化	25.9	3.3	3.4	19.2
皆伐50	立木成長+建築材利用	12.4	9.1	3.4	-0.1
	立木成長+建築材利用+炭化	12.9	7.6	3.4	2.0
放棄林	立木成長+パナソニックイマズ発電	2.9	4.6	3.4	-5.1
	立木成長+パナソニックイマズ発電+炭化	3.0	2.0	3.4	-2.4
生活林	立木成長+パナソニックイマズ発電	5.8	3.7	3.4	-1.3
	立木成長+パナソニックイマズ発電+炭化	5.9	2.9	3.4	-0.4

II. 3 費用の算定

II. 3. 1 前提

前節では、森林施業の違いによる吸収速度の違いを算定により明らかにした。算定の結果、二段林、帯状伐、50年皆伐、生活林、放棄林の順で吸収速度が高く、特に、二段林、帯状伐において顕著に速度が高かった。第3節では、森林施業を持続するために必要なコスト面について、前節で吸収速度を評価した施業種につき算定を行いたい。

各施業種ごとの整備費用は、日本の標準的な施工歩掛及び積算資料及び都道府県が公表している業務資料に基づき算定した。輸送費、炭化費、建築用素材販売収入、バイオマス発電用素材販売収入は、聴き取り調査や、文献を参考に算定した。本研究では100年と長期にわたり要する費用を算定するので、物価の変動について考慮しなければならない。第1節で述べたことの繰り返しになるが、本節では同様な生産性を持つ複数の土地で、100年間で行う全ての施業工程が並行して行われているという仮定のもとで、算定するものとする。

II. 3. 2 算定方法

施業種それぞれの吸収、固定にかかる費用は、植栽から100年生までの育成過程で実施した保育作業等にかかる整備費用の積算額と伐採現場から原木市場までの搬出費用、搬出時に除去した枝条の炭化費用の和から木材販売額またはバイオマス燃料販売額を引いて求める。次式により費用の算定を行う。

$$TC = \frac{C_{af} + C_{tr} + C_{cb} - Y}{100} \quad (\text{式8})$$

TC : 総費用

C_{af} : 整備費用

C_{tr} : 輸送費用

C_{cb} : 炭化費用

ただし、 Y : 収穫材販売収入

II. 3. 2. 1 C_{af} (整備費用)

各施業の開始後100年間の作業の流れを表12に示す。各施業を通じて植栽前に地拵えを行い、植栽はスギ苗をha当り2,500本とする。植栽後10年までに下刈りを2回、除伐を1回行う。植栽後20年までに初回間伐を行い、30年までに枝打ちを1回行う。放棄林、生活林を除き、10年間隔の間伐を行う。

施業種それぞれの内容を見ると、帯状伐では、林分内で伐区を3箇所設けるので、皆伐から除伐までにかかる費用が、40年生以降3セット生じる。二段林では、林齢40年を経て生じる下層木群を既述のとおり収穫材積に到達していないものとして扱うので、伐採に係る費用は計上しない。50年皆伐では51年目に林木を全て収穫し、再造林するので地拵えから枝打ちまでにかかる費用を2回計上する。放棄林では、地拵え・植栽は行うが、その後の保育にかかる作業は行わない

ため、収穫まで費用は発生しない。生活林は、31年生以降、100年生までに収穫にかかる費用を7回計上するが、保育にかかる費用は計上しない。生活林における30年生までの人の関与は、山菜採りなど生活にかかる軽度の採集活動を想定するので、費用は生じないものとする。なお、放棄林を除き、200mの林内作業道の作設費用を含める。

表 12. 作業の流れ

林齢	帯状伐			二段林	50年皆伐	放棄林	生活林
	伐区①	伐区②	伐区③				
1~10	地拵え、植栽、下刈り2回、除伐			地拵え、植栽、 下刈り2回、除伐	地拵え、植栽、下刈り 2回、除伐	植栽	
11~20	間伐			間伐	間伐		
21~30	間伐、枝打ち			間伐、枝打ち	間伐、枝打ち		
31~40	間伐			間伐	間伐		刈り取り
41~50	皆伐、地拵え、植栽、 下刈り2回、除伐	間伐		間伐	間伐		刈り取り
51~60	間伐	間伐		間伐	皆伐、地拵え、植栽、 下刈り2回、除伐		刈り取り
61~70	間伐、枝打ち	皆伐、地拵え、植栽、 下刈り2回、除伐	間伐	間伐	間伐		刈り取り
71~80	間伐	間伐	間伐	間伐	間伐、枝打ち		刈り取り
81~90	間伐	間伐、枝打ち	間伐	間伐	間伐		刈り取り
91~100	間伐	間伐	皆伐、地拵え、植栽、 下刈り2回、除伐	間伐	間伐	皆伐	刈り取り

個々の営林作業の単価を表 13、14 に示す。地拵え・植栽には、地拵え、植付費用のほか、苗木代、植穴掘付、施肥、苗木運搬費用を含む。地拵えは、標準単価が公開されている 2 県（島根、滋賀）の ha あたり平均単価を用いた。下刈り・除伐には、草刈機の燃料及び損料が含まれている。枝打ちは、標準単価が公開されている 11 県（高知、岐阜、兵庫、埼玉、長野、和歌山、三重、島根、新潟、滋賀、鳥取）の ha あたり平均単価を用いた。間伐、皆伐と記されている伐採には、伐倒のほか枝払い、玉切り、集材を含み、伐倒、枝払い、玉切りにはそれぞれチェーンソーの燃料及び損料が含まれている。集材には、林内作業車の燃料及び損料が含まれている。作業道作設は、標準単価が公開されている 6 県（鹿児島、高知、岡山、富山、岩手、長野）の平均単価を用いた。単価には重機の燃料及び損料が含まれている。

表 13. 苗木・作業単価

名 称 (単位)	単価
スギ苗木 (円/本)	490
地拵え(円/ha)	294,450
植穴掘付(円/100 本)	16,170
植付(円/100 本)	9,240
施肥(円/100 本)	2,275
苗木運搬(円/100 本)	1,449
下刈り(円/ha)	144,136
除伐(円/ha)	132,447
枝打ち(円/ha)	163,035
作業道作設(円/m)	1,002

表 14. 伐採単価

名 称 (単位)	平均胸高直径			
	10cm以上 16cm未満	16cm以上 22cm未満	22cm以上 28cm未満	28cm以上
伐倒(円/100本)	12,584	16,517	20,450	24,775
枝払い(円/100本)	9,616	11,219	12,421	14,024
玉切り(円/100本)	8,088	9,301	10,514	11,727
集材(円/10m ³)	29,762	26,278	22,988	19,909

整備費用の試算結果を表 15 に示す。100 年間の整備費合計は、帯状伐で最も高く 9,344,598 円となった。続いて 50 年皆伐、二段林、放棄林、生活林という順で高かった。

表 15. 整備費用算定結果

単位：円/100 年

作業種	帯状伐	二段林	50年皆伐	放棄林	生活林
地拵え・植栽	4,438,725	2,247,800	4,495,600	2,247,800	0
下刈・除伐	841,438	420,719	841,439	0	0
枝打ち	260,856	163,035	326,070	0	0
伐採	3,603,159	1,640,209	3,057,281	397,351	1,538,966
作業道作設	200,420	200,420	200,420	0	200,420
計(C_{af})	9,344,598	4,672,183	8,920,810	2,645,151	1,739,386

Ⅱ. 3. 2. 2 C_{tr} (輸送費用)

輸送費は、伐採現場より 50km 圏内の原木市場または、木質バイオマス発電所までのトラック運搬費用とした。智頭町森林組合への聞き取り調査の結果より 1 m³あたり 1,700 円とした。

表 16. 輸送費用算定結果

単位：円/100年

施業種	C_{tr}
带状伐	3,230,340
二段林	1,065,900
50年皆伐	1,968,430
放棄林	枝条含む：397,460 樹幹のみ：290,360
生活林	枝条含む：580,085 樹幹のみ：423,383

Ⅱ. 3. 2. 3 C_{cb} (炭化費用)

伐採現場に近い地面にバックホウを使用し、容積 1 m³の矩形の窯を掘る。掘削・炭材の集積および窯への充填までの作業を 1 日あたり窯 24 基分を行い、1 人工(普通作業員)あたり 10 基の製炭を担うこととする。製炭に用いる煙突は竹材、焚口は石を用いるなど、林地内やその周辺で調達できる自然物を用いる前提で費用を計上しない。

表 17. 炭化費用算定結果

単位：円/100年

施業種	C_{cb}
带状伐	1,206,975
二段林	398,260
50年皆伐	735,479
放棄林	155,659
生活林	167,804

Ⅱ. 3. 2. 4 Y (収穫材販売収入)

建築材向けの販売収入の算定においては、文献値(平成 28 年林野庁木材需給報告書)では製材用素材スギ中丸太の工場渡し価格が 12,817 円/m³となっているものの、智頭町森林組合への聞き取り調査では、m³当り単価は 5,000~13,000 円であり文献値は現実の平均単価から乖離しているおそれがある。そこで、木材市況の変動を考慮した買取単価の上下 20%幅を示す際に、上方への変動が文献値に近い値になるように設定する。10,000 円/m³を基準価格として上下 20%の変動幅で、

8,000～12,000 円/m³として示す。バイオマス発電向けの販売収入計算においては、文献値(農林水産省木材価格統計調査(平成 29 年 1 月))でチップ素材広葉樹価格として集計されていた 13 道県の平均単価が 8,854 円/m³であった。この価格は、鹿児島県環境林務部への聞き取り調査(2017 年 12 月 24 日)にて得たバイオマス発電向け木材の 1 m³あたり単価 7,000 円～8,000 円に概ね沿った金額であるため、文献値は現実の平均単価を反映しているものと考え 8,854 円/m³を基準価格として算定に用いる。バイオマス発電向けにおいても、基準価格の上下 20%である 7,083～10,625 円/m³を市況変動の幅として試算結果に反映させる。各施業種における収穫材販売収入の算定結果を表 18 に示す。ここでは基準価格での販売収入のみ記す。

表 18. 収穫材販売収入算定結果

単位：円/100 年

施業種	Y
带状伐	19,002,000
二段林	6,270,000
50 年皆伐	11,579,000
放棄林	枝条含む：2,070,065 樹幹のみ：1,512,263
生活林	枝条含む：3,021,217 樹幹のみ：2,205,077

II. 3. 3 算定結果

総費用 (TC) を、表19に示す。また、各施業種の総吸収速度と総費用との関係を図 2 に示す。総費用が最も小さかった施業種は带状伐であった。带状伐のみ、材価を基準価格より20%低いと仮定しても、両シナリオにおいて総費用はマイナス、つまり利益が生ずるという結果となった。その他は、50年皆伐、二段林、生活林、放棄林の順で総費用は増加する傾向となった。特に放棄林においては、材価の上下によらず総費用はプラス、つまり利益は生じないという結果となった。

表19. 総費用算定結果

単位：円／年

施業種、吸収方法組合せ	TC	TC (収穫材価格20%高)	TC (収穫材価格20%低)
帯状伐(立木成長・建築材)	-64,271	-102,275	-26,267
帯状伐(立木成長・建築材・炭化)	-52,201	-90,205	-14,197
二段林(立木成長・建築材)	-5,319	-17,859	7,221
二段林(立木成長・建築材・炭化)	-1,337	-13,877	11,203
50年皆伐(立木成長・建築材)	-6,898	-30,056	16,260
50年皆伐(立木成長・建築材・炭化)	457	-22,701	23,615
放棄林(立木成長・バイオマス発電)	9,725	5,585	13,866
放棄林(立木成長+バイオマス発電+炭化)	15,789	12,765	18,814
生活林(立木成長+バイオマス発電)	-7,017	-13,060	-975
生活林(立木成長+バイオマス発電+炭化)	1,255	-3,155	5,665

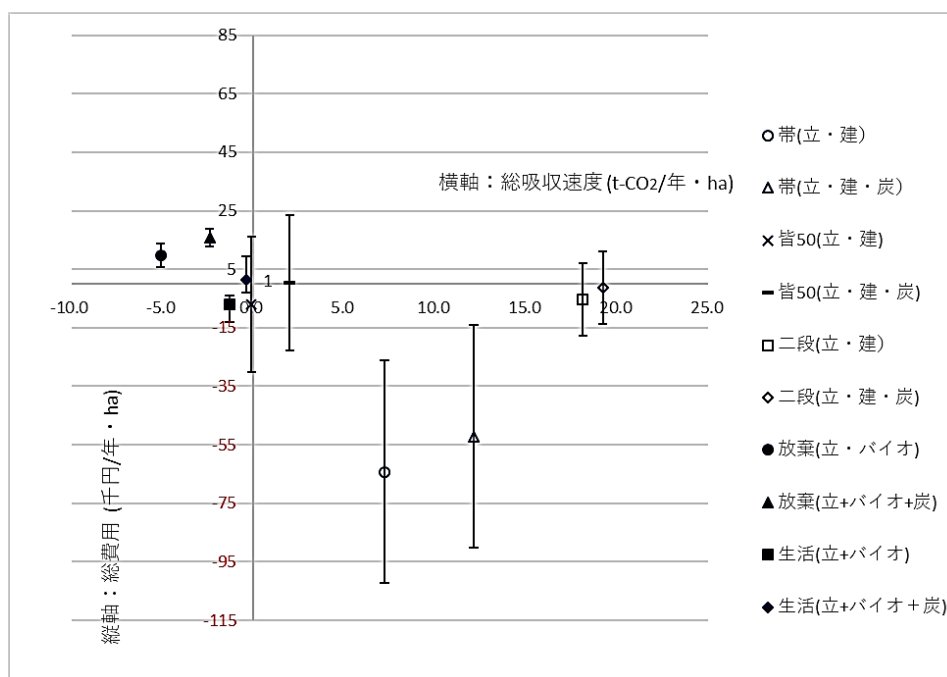


図2. 各シナリオの総吸収速度と総費用との関係

帯：帯状伐 皆50：50年皆伐 二段：二段林 放棄：放棄林 生活：生活林
 立：立木成長 建：建築材利用 炭：炭材利用 バイオ：バイオマス発電利用

II. 3. 4 考察

帯状伐は、費用面において全ての施業種の中で最も優れていた。これは、整備費用、輸送費用は全ての施業種の中で最も大きかったものの、顕著に大きかった収穫材販売収入により、結果として総費用が低下したためである。収穫材販売収入が大きかったのは、100年という長期間に渡

り、間伐しながら帯状の皆伐・植栽を繰り返すことが、収穫量の確保に寄与したためである。帯状伐は、吸収面においては、二段林に次いで優れていた。

二段林は、総吸収速度が全ての施業種の中で最も高かった。上層木と同時に林床植生の育成を図る二段林施業は、植物体の蓄積を促進させるため、吸収速度が高まる結果となった。一方で、費用面においては、収穫材販売収入が帯状伐の3分の1程度と低いため、総費用は帯状伐に比べ高くなった。二段林の高い吸収力が明らかとなったが、費用面を改善し、低コスト化を図る場合は、帯状伐の要素を取り入れるべきであろう。林地と道路の位置にも影響されるが、下層木が収穫期に達した時に帯状の小面積皆伐・更新を行うのも一つの方法と考えられる。

本研究において、費用面、吸収面において優れる施業法がそれぞれ帯状伐、二段林であることが分かったが、両者の長所を取り入れた施業法を想定した場合、その施業法によるCO₂限界削減費用は、図8中の帯状伐建築シナリオと二段林建築・炭化シナリオを結ぶ線の傾きとして表すことができよう。傾きを計算すると、CO₂限界削減費用は、5,245 (円/t-CO₂) となる。

前記2種類の施業法とは反対に、50年皆伐は、吸収および費用の面で良好な値は得られなかった。設定した建築シナリオ、建築・炭化シナリオともに総吸収速度はゼロに近い値であり、総費用も木材市況が好転した場合に利益が得られる結果となった。これまで森林施業の主流であった短伐期皆伐施業の実施面積は、2015年度の人工造林面積が1995年度比で45%にまで減少していることから明らかなように、確実に減少している。この背景として、木材価格の低迷とともによく耳にするのは、造林経費負担の重さについてである。伐採して丸太を売った利益のなかで、造林経費まで賄えないということである。伐採後の植栽が森林法により義務付けられている保安林での伐採を除き、植栽を見据えた伐採を行う森林所有者が少ないことは当然であろう。今回の50年皆伐の費用算定においても、森林整備費用の30%が造林経費(植栽から除伐まで)であり、負担が軽くないことが分かる。例えば50年生で皆伐し、更新せず放置するとした場合、当然ながらその後の間伐・搬出にかかる経費もかからないので、総費用としては建築シナリオで約4倍低く、建築・炭化シナリオでは約44倍低くなった。費用の面で今回の算定結果は、実際の短伐期皆伐施業を概ね反映しているように思う。

ただし、短伐期による皆伐をすでに実施し、現状が若い一斉林であっても、総吸収速度をより高め、かつ低コストの施業に移行するためには、帯状伐の手法を取り入れて将来は小面積皆伐を行うか、二段林の手法を取り入れ間伐を繰り返しながら林床植生を活かし針広二段林とするか混交林化するのも方法の一つであろう。後者の場合、皆伐跡地に成立させる人工林を針広二段林か混交林へ円滑に誘導させられるよう、有用広葉樹の稚樹や種子が残るような手段を講ずるのが望ましい。

放棄林は、本研究で取り上げた施業種の中で最も粗放的な施業であり、最も集約的といえる帯状伐とは対照的な位置にある。総吸収量はマイナス、総費用はコスト超過しており、本研究における評価基準となった吸収と費用の観点から見ると、放棄林に価値を見出すことは出来ず、吸収源となる施業ではない。

また、生活林においては、シナリオとしてバイオマス発電燃料への利用を想定してみたが、総吸収量増加と費用低減への寄与は見られなかった。既述のとおり、生活林は日本の薪炭林を想定したもので、強度の利用圧により蓄積が100年間一定であるように設定した。放棄林を除く他の施業種との大きな違いは、収穫される材積が小さいことである。生活林と同じく皆伐を伴わない二段林と比較しても、100年間で二段林の6分の1ほどの材しか得られない。仮に成長速度の速い樹種(早生樹)を植栽したらシナリオの結果は改善するのであろうか。試みに、試算に用いた成長

速度を倍にすると、総吸収速度、総費用ともにわずかではあるが改善した。このことは、早生樹利用によるCO₂収支を試算した既往研究の結果に沿うものである。しかし、生活林のような強度な利用の仕方では、早生樹を用いても帯状伐や二段林のような結果は得られないだろう。したがって、生活林も吸収源となる施業とはいえない。

Ⅲ. 結論

以上の算定結果から、以下のとおり結論する。

- ① 二段林、帯状伐と比較し、50年皆伐や、生活林、放棄林は、吸収速度が明らかに低い。つまり、森林の吸収性能は、管理手法によって大きく違ってくる。管理手法によって生じる-5.1~19.2 t-CO₂/年・haという総吸収速度の差に、仮に日本の森林面積約2,500万haを掛けると、-1億3000万~4億8000万t-CO₂/年となり、これは日本のCO₂総排出量12億600万t（2016年）の4割に相当する。
- ② 今回評価した管理手法の中で、総吸収速度の最も高い施業種は二段林である。そのシナリオは、立木成長・収穫材の建築材利用・枝条の炭化であり、次いで高いのが同じく二段林の立木成長・収穫材の建築材利用シナリオである。
- ③ 総費用の最も小さい施業種は帯状伐である。そのシナリオは、立木成長・収穫材の建築材利用であり、次いで小さいのが同じく帯状伐の立木成長・収穫材の建築材利用・枝条の炭化シナリオである。
- ④ 吸収、費用ともにバランス良く優れている施業種は、帯状伐である。
- ⑤ 吸収、費用の面から評価すると、50年皆伐や、生活林、放棄林は、森林の管理手法として適当とはいえないものの、施業法を変え、望ましい森林へ誘導することは条件によっては可能であろう。吸収と木材利用のバランスを考慮する工夫やイノベーションは必要である。

本研究のシナリオの設定に際して、枝条等の炭化・林地埋設という行為を加えたところ、全てのシナリオにおいて費用面でマイナスの要因となったが、IPCC（2018）は、バイオマス炭化物の土壌埋設が二酸化炭素除去の手法となる旨明記した報告書を出した。今後、炭化物の土壌埋設が仮にクレジット化されることとなれば、費用の算定結果が変わることもあり得る。また、本研究では、森林土壌自体が保持する炭素を評価していない。土壌炭素と施業法を関連付けた評価が加われば、大きく算定結果が変わる可能性があることを付言する。

[注]

- 1) 智頭町内では、以前複層林施業に取り組んだが、下層木は育たず、残存木は風に揺すられ、材質が落ちたため、施業法として適当でないと判断された。ただし、新しい世代の所有者の中には、間伐をしながら林床に自然に育った有用樹を伐らずに育て、上層が高齢のスギで下層が種々の広葉樹という2段林を仕立てている人もいる。この施業は、スギを更新させるものではないが、皆伐せず徐々に林を更新させる方法ではある。

[参考文献]

- 加藤徹, 森 充「スギ・ヒノキ人工林を皆伐して長期間放置された未植栽地の植生」, 静岡県林業技術センター研究報告33号, pp23-28, 2005.
- 加用千裕, 荒巻俊也, 花木啓祐「炭素ストック変化を考慮した森林資源のエネルギー活用による実質 CO₂削減効果の長期予測」, 土木学会論文集 G, Vol. 64, No. 4, pp. 336-346, 2008.
- 作田耕太郎, 谷口 奨, 井上昭夫, 溝上展也「ヒノキ人工林における帯状伐採が林床の微気象と樹木種の多様性に与える影響」, 日林誌No. 91, pp. 86-93, 2009.
- 谷口慎吾「帯状複層林における下木の成長と林床植生の多様性」, 兵庫県立農林水産技術総合センター研究報告. 森林林業編, pp. 10-16, 2006.
- 千葉幸弘「地球温暖化問題における森林の機能と今後の課題」, 表面科学Vol. 36, No. 5, pp. 263-264, 2015.
- 塚原雅美, 武田, 宏「東西方向のスギ帯状伐採地の保残木の成長と伐採帯に植栽されたケヤキの生育状況」, 新潟県森林研究所研究報告 52 号, pp. 7-12, 2011
- 中森由美子, 栗生剛「和歌山県南部の人工林伐採跡地に成立した林分の構造」, 森林立地56 (2), pp97~106, 2014.
- 藤森隆郎「複層林マニュアル 施業と経営」, (社)全国林業改良普及協会, 1992.
- 細田和男, 西園朋, 佐野真琴, 肅藤英樹, 家原敏郎「スギ, ヒノキおよびカラマツ固定試験地における間伐区と対照区の炭素固定量の比較」, 森林計画学会誌, 45巻2号, pp. 55-64, 2012
- 正木隆ほか「添畑沢スギ間伐試験地における45年生から104年生までの長期成長データ」, 森林総合研究所研究報告14, pp65-72, 2015.
- 吉田茂二郎, 松下幸司「民有林の林分収獲表の特性について」, 森林計画誌33, 1999.
- 鹿児島県林務水産部, 鹿児島県業務資料, 平成20年4月.
- 環境省「森林の定義と京都議定書3条4活動の選択について」, 平成18年度 温室効果ガス排出量算定方法検討会 (第2回) 資料, 2007.
- 建設物価調査会「建設物価 平成28年12月」
- 「国際炭やき協力会「伏せ焼き」, <http://www.sumiyaki.jp/>, (2018年1月14日).
- 国立環境研究所「日本国温室効果ガスインベントリ報告書」, CGER REPORT, 2008.
- 「森林吸収源対策」, 地球温暖化対策計画, 第2節1(2), 平成28年5月閣議決定.
- 日本林道協会「治山林道必携一積算・施工編一平成28年版」
- 林野庁「国民経済及び森林資源」, http://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/27hakusyo_h/material/m01.html, 2018年1月17日.
- C. Perilhon, D. Alkadee, G. Descombes, S. Lacour. Life cycle assessment applied to electricity generation from renewable biomass. *Energy Procedia* 18, pp.165 - 176, 2012.
- IPCC, Global warming of 1.5°C, p. 342, 2018.
- IPCC. Methods for estimation, measurement, monitoring and reporting, Revised Supplementary Methods and Good Practice Guidance Arising from the Kyoto Protocol, Chapter 2, 2013.
- Major J, Lehmann J, Rondon M, Goodale C. Fate of soil-applied black carbon: downward migration, leaching and soil respiration. *Global Change Biology* 16, 1366-1379, 2010.

Evaluation of forestry operations contributing to promotion of carbon dioxide absorption

Fumihiko Ozawa, Katsuki Takao

Abstract: Japan has abundant forest resources, and about two-thirds of the land area is forest. However, forestry has been sluggish for a long time, especially abandoned artificial forests are becoming big issue. Due to the declining deforestation caused by the stagnation of forestry, forest stand volumes continue to increase, and the amount of fixed CO₂ by forests seems to be increasing. Abandonment of forest operation is considered a major cause of reducing the absorption of CO₂ in the forest, compared to the forest which carried out forest management. In this study, we calculate carbon dioxide absorption rate and cost for each type of forest management. This will clarify whether the forest management is suitable for absorbing CO₂.

Five kinds of forest operations are set in this study. The method of estimating the absorption rate and cost of CO₂ is there for each of them. In addition to that, two calculation methods of absorption are set for each of five operations. Therefore 10 different scenarios are set in this study.

As a result of a trial calculation, good results were obtained with two kinds of multi-storied forest operation.

Keywords: Forest operation, CO₂ reduction, Environmental economy