事例論文(Case Study Research Article)

アカマツ林施業を考慮した木質系バイオマス発電システムの環境影響評価

野田 英樹^{1,*}・高橋 玲子²・高畑 和夫³The Estimated Impact of a Woody Biomass Power Generation System
on the Management of Japanese Red Pine ForestNoda HIDEKI^{1,*}, Reiko TAKAHASHI² and Kazuo TAKAHATA³

Synopsis:

Objective. Woody biomass has attracted considerable attention as a power generation system that utilizes wood resources. The woody biomass power generation system is expected to reduce carbon emissions and, by necessitating forest management for the purpose of wood chip supply, to increase primary production of forests. This paper describes the development of evaluation models for forest management and shows the environmental impact of introducing the woody biomass power generation system in terms of Japanese red pine forest management. In this study, influence of primary production, CO₂ emissions and land use are calculated based on the “Life cycle Impact assessment Method based on Endpoint modeling 2 (LIME2)” methodology. The targeted forest comprises Japanese red pines, 30, 40, 50 and 65 years old. Management plans catering to each forest age bracket are set according to the logging area in accordance with the forest management guidelines. The management period of these plans is 20 years with two management methods, forest-thinning and final cutting.

Results and Discussion. The evaluation results made it clear that forest management had a much greater effect in terms of CO₂ emission and land use. Comparison of the environmental improvement rate per unit area in each plan shows that forest-thinning and final cutting have a similar effect when a forest is 30 and 40 years old, but that just final cutting is more effective for a forest aged 50 and 65 years.

Conclusions. This study indicates that the forest management effect is greater than the CO₂ emissions reduction effect. The process of supplying wood chips for the power generation system is judiciously planned considering forest age and characteristics, and is an important part of reducing environmental impacts.

Keywords: Global warming; Japanese red pine (*pinus densiflora*); land use; primary production; woody biomass power generation system

1. まえがき

木質系バイオマス発電は再生可能エネルギー固定価格買取制度の対象となり、森林資源が豊富なわが国では地産地消の発電方式として期待されている¹⁾。特に、東日本大震災の被害を受けた東北地方の太平洋側地域では森林資源を活かしたバイオマス発電の導入可能性が検討されている²⁾。バイオマス発電の導入によって長期の安定した森林資源の活用が計画されれば、林家の林業への意欲は一層高まり、間伐・主伐などを伴う丸太生産、保育・再造林と

いう森林施業の継続が期待される。更に、未利用材を主とした森林資源の活用は森林施業の範囲を広げ、樹木の成長促進という環境側面の改善が見込まれる。しかし、発電コストなどの経済性評価ではそれらの効果を定量化することはできない。

Life Cycle Assessment (LCA) は多様な環境側面を統合評価する手法として有効である。木質系バイオマス発電設備のLCA事例としては、わが国の代表的なLife Cycle Impact Assessment (LCIA) 手法であるLife-cycle

1 株式会社 東芝／〒 212-8585 神奈川県川崎市幸区堀川町 72-34

2 株式会社 東芝／〒 183-8511 東京都府中市東芝町 1

3 株式会社 東芝／〒 230-0045 横浜市鶴見区末広町 2-4

1 Toshiba Corporation / 72-34 Horikawa-cho, Saiwai-ku, Kawasaki, Kanagawa 212-8585

2 Toshiba Corporation / 1 Toshiba-cho, Fuchu, Tokyo 183-8511

3 Toshiba Corporation / 2-4 Suehiro-cho, Tsurumi-ku, Yokohama, Kanagawa 230-0045

*連絡先(Corresponding author), hideki1.noda@toshiba.co.jp

Impact assessment Method based on Endpoint modeling 2 (LIME2)³⁾を用いて、資源消費、地球温暖化、酸性化など複数の影響領域の統合評価や温室効果ガス (GHG) 排出量の比較が行われているが⁴⁾、森林施業を推進することによる環境面の効果を定量化した事例はない。

そこで、本論文では東北太平洋側地域の主要な人工林を構成するアカマツ (*Pinus densiflora*) 人工林の施業が木質系バイオマス発電設備への燃料供給により維持されることによる環境面の効果を、LIME2を用いて一次生産性の改善効果として定量化する。加えて、バイオマス発電設計時の環境配慮点を明らかにする。また、一次生産性の改善効果は人工林の林齢や施業方法により異なるため、林齢と施業方法の違いによる影響を示し、施業の継続性を考察する。

東北太平洋側地域では東日本大震災による放射性物質が林業に影響を与えている場合がある。この影響は長期にわたるため、モニタリング結果に基づく林業への課題整理と方針策定の必要性が指摘されている⁵⁾。本研究では放射性物質の林業への影響は考慮できていないため、森林施業の計画には最新情報に基づく地域毎の配慮が望まれる。

2. 評価方法

LIME2の統合指標 (Single Index; SI) はインベントリ毎の分析結果に統合化係数を乗算し、その結果を集計して求める。ここで、統合化係数は当該インベントリの被害係数 (Damage Factor; DF) に保護領域毎の重み付け係数 (Weighting Factor; WF) を乗算した値である。対象となる保護領域は人間健康、社会資産、一次生産、生物多様性である。人間健康は疾病により失われた余命と障害を持って過ごす時間の和 (Disability-Adjusted Life Year; DALY)、社会資産は農作物、水産、森林資源の価格、鉱物資源、化

石燃料のユーザコスト、一次生産は陸上植物、海洋プランクトンの純一次生産力 (Net Primary Production; NPP)、生物多様性は織管束植物の絶滅種数の増分期待値 (Expected Increase Numbers of Extinct Species; EINES) でそれぞれ表現する³⁾。

本研究で評価するチップはバイオマス発電導入効果の定量化が目的であるため燃料用チップとし、人工林の施業は一次生産性への影響が大きい間伐と主伐、およびその後の保育と再造林を対象とする。アカマツの標準伐期齢は40年、長伐期施業の主伐林齢は80年であるが^{6, 7)}、公益的機能の発揮と調和⁶⁾、または松くい虫対策⁸⁾のために、施業時期を弾力的に運用することがある。そこで、本研究では施業対象を林齢30年から65年とし、間伐と主伐を並列に扱う。主伐には皆伐と択伐があるが、主伐後に再造林したアカマツ稚樹の成長量には皆伐と択伐の違いを考慮していないため、両者の区別は行わない。GHG排出は二酸化炭素 (CO₂)、メタン (CH₄)、および亜酸化窒素 (N₂O) を対象とし、各排出量に地球温暖化係数 (Global Warming Potential; GWP) を乗算して算出する。

3. 評価条件

3.1 調査対象発電設備

本調査の対象とする木質系バイオマス発電設備の仕様を表1に示す。本評価は標準的な木質系バイオマス発電設備を対象としているため、評価データは全て2次データとした。出力は1MWとし、各条件は以下のとおり設定した。

- (1) 設備利用率はコスト等検証委員会報告書⁹⁾から80%と設定した。
- (2) 発電端の熱効率は木質バイオマス発電の容量と熱効率の関係¹⁰⁾から、1MW級の設備として10%と設定した。

表1 木質系バイオマス発電設備仕様

項目		設定値	備考
出力	A	1 MW	設定値
設備利用率	B	80 %	参考文献9)
熱効率 (発電端)	C	10 %	参考文献10)
燃料発熱量 (低位発熱量)	D	13.9 MJ/kg	図1参照
使用年	E	20 年	設定値
発電量	F	7,008,000 kWh/年	$A \times 24h \times 365日 \times B/100$
総発熱量	G	252,315 GJ/年	$F \times 860/(C/100)/1,000,000 \times 4.1865$
チップ使用量	H	18,139 t/年	G/D
伐採量	I	18,145 t/年	$H/(1-0.0003)$ 、0.03%:チップ製造時残渣 (注1)
設備面積 (注2)	J	10,000 m ²	設備設置面積 (5,000m ²) + チップ置き場 (5,000m ²)
コンクリート (注2)	K	8,050 t	$J \times 0.7m$ (基礎深さ)、比重2.3t/m ³ 、チップ置き場は除外

(注1) $0.03\% = 2.90 \times 10^{-5} (t/GJ) / 9.60 \times 10^{-2} (t/GJ)$ 、出典: 参考文献4)

(注2) 基礎は設備の倍の40年利用すると仮定し、コンクリートの資源影響と設備面積に基づく土地改変影響の算定には設定値の1/2を計上

- (3) 燃料発熱量は含水率で変わるため、湿量基準含水率に対する針葉樹の低位発熱量の関係を図1のとおり調べた¹¹⁾。ここではアカマツの情報が得られなかったため針葉樹木部のデータを用いた。バイオマス発電用のアカマツのチップの湿量基準含水率は実測値が22%-24%¹²⁾であるため本研究では25%と設定し、図1からアカマツの低位発熱量を13.9MJ/kgと決めた。
- (4) 伐採量はチップ使用量にチップ製造時残渣を考慮して求めた。チップ使用量は(2)で求めた熱効率と年間の発電量から算出した総発熱量を燃料発熱量で除して18,139t/年とした。伐採量はチップ使用量にチップ製造時の残渣0.03%を考慮して18,145t/年とした。チップ製造時の残渣は、1GJのチップを製造する場合にチップ 9.59×10^{-2} トンに対して残渣が 2.90×10^{-5} トンとなるという調査値⁴⁾から0.03%とした。ここではアカマツを製造している設備の情報が得られず、スギやヒノキを製造している設備の情報をを用いた。チップの製造過程における樹種による違いについては、全国木材チップ工業連合会において実績データを比較した事例¹³⁾があるが、同一の製造設備で樹種を変えたデータではないため、残渣に関してアカマツを想定した補

図1 湿量基準含水率と針葉樹の低位発熱量の関係(出典：参照資料11))

正は行わなかった。

- (5) 使用年は20年とした。
- (6) 設備面積はヒアリングから設備設置面積5,000m²とチップ置き場5,000m²の合計値とし、基礎深さ0.7mとした。基礎は設備の倍の40年利用すると仮定し、コンクリートの資源影響と設備面積に基づく土地改変影響の算定には設定値の1/2を計上する。
- (7) 発電時のGHG排出量は表1に示した発電量、チップ使用量とわが国の公開データ¹⁴⁾を用いて表2のとおり算出した。排出原単位はCH₄とN₂Oを合計して0.075 (t-CO₂eq/MWh)である。ここで、CH₄の排出係数は「ボイラー (木材)」を、N₂Oの排出係数は「ボイラー (流動床以外、固体燃料)」をそれぞれ使用した。また、CH₄とN₂OのGWPはIPCC第4次報告書の100年値である25と298を用いた¹⁵⁾。

3.2 システム境界

本評価のシステム境界を図2に、対象インベントリおよび保護領域を表3に示す。評価対象は、保育・再造林、丸太生産、丸太輸送、チップ製造設備のための土地造成、チップ製造、チップ輸送、発電設備のための土地造成、発電とし、造林、チップ製造設備と発電設備の設備製造、木屑廃棄、廃棄物輸送と廃棄については境界外とした。土地造成前の土地利用形態は畑地とした。図中の二重四角枠が新規研究範囲である。対象インベントリは表3のとおり、GHG排出、畑地の利用面積およびアカマツ林の施業面積である。畑地とアカマツ人工林では維管束植物の絶滅危惧種は存在しないと仮定し、生物多様性影響は除外した。

本評価の機能単位は、1kWhの発電量とした。造林工程の環境影響は既存研究によりその他のプロセスより小さいことが報告⁴⁾されていることからシステム境界外とした。保育・再造林工程では一次生産性影響のみを評価対象とする。発電設備とチップ製造設備の建設に伴う環境影響は環境省ガイドライン¹⁵⁾に基づきシステム境界外とした。

表2 発電時GHG排出量

		CH ₄	N ₂ O	備考
燃料発熱量	D	13.9 GJ/t		表1
発電量	F	7,008 MWh/年		
チップ使用量	H	18,139 t/年		
排出係数	EF	0.000074 t-CH ₄ /GJ ^(注1)	0.00000058 t-N ₂ O/GJ ^(注2)	参照文献14)
年間排出量	EM	18.7 t-CH ₄ /年	0.1 t-N ₂ O/年	H × D × EF
GWP	G	25	298	参照文献15)
CO ₂ 排出係数		0.067 t-CO ₂ eq/MWh	0.006 t-CO ₂ eq/MWh	EM / F × G

(注1) 排出係数は「ボイラー (木材)」を使用

(注2) 排出係数は「ボイラー (流動床以外、固体燃料)」を使用

図2 システム境界

表3 評価対象インベントリと重み付け係数

インベントリ	保護領域	影響領域	重み付け係数 (WF)
GHG排出	温暖化	人間健康	1.47×10^7 円/DALY
		社会資産	1.0 円/円
利用面積 (畑地)	土地占有	一次生産	46.2 円/kg
	土地改変		
施業面積 (アカマツ林)	土地改変		

3.3 発電設備以外の条件設定

3.3.1 保育・再造林

アカマツ人工林の保育・再造林時の一次生産性は施業シナリオの影響を受ける。そこで、本研究では間伐と主伐のシナリオを岩手県の太平洋側地域の森林整備計画^{6,7)}を参考に設定した。間伐はおおむね10年毎で林齢60年を超えた高齢級では15年毎とされ、岩手県で最も多い林齢は45年である¹⁶⁾。これらの現状を踏まえ、前述した林齢30年から65年の人工林を対象に標準伐期施業と長伐期施業を想定したシナリオを設定した。各シナリオは森林整備計画に準ずるが、前述した弾力的運用を想定し林齢30年の主伐も設定した。各シナリオを表4に示す。間伐と主伐の区別はaとbをシナリオ番号に追加して表現した。表4において本評価が対象とする20年間に含まれる施業は下線部斜体とした。

本研究では施業計画の違いを明確化するため、各シナリオが対象とする森林の林齢はすべて同一年代とした。例えば、シナリオ1であれば林齢30年の森林を20年分計画的

に対象林として確保しておき、対象林の施業を毎年進めていくという考え方である。

3.3.2 丸太生産、丸太輸送

丸太生産は、間伐および主伐における作業路開設、伐倒・造材、搬出を含むものとし、エネルギーと消耗品の投入量は既存研究成果⁴⁾を引用した。引用したデータは間伐と主伐の区別はせず4事業者の調査値の平均をとっている。集材方法は路網集材、間伐方式は列状間伐と定性間伐、各作業はグラップル、パワーショベル、チェーンソー、プロセッサ、ハーベスター、フォワーダなどを想定している。また、既存研究⁴⁾はスギ・ヒノキを対象としているため、伐倒・造材および搬出の環境負荷は収量比数に比例するとして補正した。林野庁東北森管理局による森林計画⁶⁾によると、収量比数はスギが0.60以上、アカマツが0.70以上であるため、1.17倍の補正を行った。丸太輸送距離は平均100kmとし、トラック輸送とした。丸太の輸送には、枕木、木枝・抜根を含むものとした。

表4 アカマツ人工林施策シナリオ

樹齢	30年	40年	50年	65年	80年
シナリオ 1a1 標準伐期施業	間伐	主伐 (再造林)			
シナリオ 1a2 長伐期施業	間伐	間伐	[間伐]	[間伐]	[主伐]
シナリオ 1b 臨時施業	主伐 (再造林)				
シナリオ 2a 長伐期施業	対象 林齢 : 40年	間伐	間伐	[間伐]	[主伐]
シナリオ 2b 標準伐期施業		主伐 (再造林)			
シナリオ 3a 長伐期施業	対象林齢：50年		間伐	間伐	[主伐]
シナリオ 3b 長伐期施業			主伐 (再造林)		
シナリオ 4a 長伐期施業	対象林齢：65年			間伐	主伐 (再造林)
シナリオ 4b 長伐期施業				主伐 (再造林)	

表5 チップ製造設備の土地造成条件

項目		設定値	備考
設備面積 (注1)	L	13,954 m ²	18,139(t) × 0.769(m ² /t) (注2)
コンクリート (注1)	M	22,466 t	L × 0.7m(基礎深さ)、比重2.3t/m ³
(注1) 基礎は設備の倍の40年利用すると仮定し、コンクリートの資源影響と設備面積に基づく土地改変影響の算定には設定値の1/2を計上 (注2) 18,139(t) は年間チップ使用量 (表1参照) 0.769(m ² /t) は以下調査値の平均 1.21(m ² /t) = 4,000(m ²)/3,300(t) 参照文献17) 0.463(m ² /t) = 25,000(m ²)/54,000(t) 参照文献18) 0.633(m ² /t) = 8,442(m ²)/13,340(t) 参照文献19)			

3.3.3 チップ製造設備の土地造成

チップ製造設備に必要な設備面積、コンクリート量は、表5のとおり設定した。設備面積は調査値¹⁷⁻¹⁹⁾ から年間にチップ1tを製造するために必要な平均的な面積を0.769m²/tと求め、表1から引用した年間のチップ使用量18,139tを乗算して求めた。コンクリート量は設備面積に基礎深さ0.7mと比重2.3t/m³を乗算して求めた。コンクリートの耐用年数は発電設備の場合と同様に40年とし、次の世代の設備も利用するとした。一方で、ライフサイクルの評価範囲は20年であるためコンクリートと造成基礎の環境負荷も20年分として設定値の1/2を計上した。

3.3.4 チップ製造、チップ輸送

チップ製造におけるエネルギーと消耗品の投入量は既存研究成果⁴⁾ を引用した。木材種による差は無いと考え、補正は行わない。チップは10kmをトラック輸送するものとした。

3.4 GHG排出原単位

本評価に用いたGHG排出原単位を表6に示す。各原単位は公開データ^{4, 20-22)} を用いた。丸太生産の伐倒・造材、搬出については上述のとおりアカマツへの補正を行っている。コンクリートにはセメントの製造原単位²⁰⁾ を適用した。丸太生産とチップ製造のGHG排出は、既存研究⁴⁾ から、CO₂に加えCH₄とN₂Oを考慮している。トラック輸送は、国土交通省と経済産業省が提示する標準値^{21, 22)} を用いた。

4. 評価モデルの構築

4.1 土地造成影响評価の被害係数

土地造成影响の算出には、土地を畑からコンクリートに改変した時の被害係数であるDF_PPI(trans) (kg/m²) と、コンクリートで土地を占有した時の被害係数であるDF_PPI(occ) (kg/m²/年) を用いた。land(occ) はland occupation、land(trans) はland transformation、PPIはPrimary Production Influenceの略称である。本研究で用いたDF_PPI(trans) とDF_PPI(occ) はそれぞれLIME2代表値³⁾ の90.7kg/m²と1.28kg/m²/年である。

表6 GHG排出原単位

項目	GHG排出原単位	備考
コンクリート	502 kg-CO ₂ eq/t	参照文献20) セメント製造原単位
丸太生産	26.4 kg-CO ₂ eq/t	参照文献4) 内訳 (kg-CO ₂ eq/t) 7.9(作業路開設)+11.6(伐倒・造材)×1.17* +3.3(搬出)×1.17*+0.1(その他)+1.0(通勤) *) アカマツ補正係数
チップ製造	66.9 kg-CO ₂ eq/t	参照文献4) 6.42(kg-CO ₂ eq/GJ)/9.59×10 ⁻² (t/GJ)
トラック輸送	0.163 kg-CO ₂ eq/(t・km)	参照文献21, 22) 2,376(kJ/(t・km))×0.0187(t-C/GJ)×44/12/1000 2,376(kJ/(t・km))：営業用トラックの消費エネルギー ²¹⁾ 0.0187(t-C/GJ)：軽油の排出係数 ²²⁾

4.2 アカマツ人工林施業時の被害係数算定モデル

アカマツ人工林の施業は土地を占有するものではないため、土地改変時の被害係数であるDF_PPI(trans)のみを用いた。また、DF_PPI(trans)の値を決める現況NPP(Present NPP; NPPp)は、アカマツの成長段階により変わることから、DF_PPI(trans)は式(1)を用いてアカマツ施業後の経過年数毎に設定することとした。

$$\text{DF_PPI(trans)} = ((\text{NPPp} - \text{NPPa}) \times \text{RTap} \times 0.5 - (\text{NPPp} - \text{NPPb}) \times \text{RTbp} \times 0.5) \times 0.1 \quad (1)$$

ここで、

NPPp：潜在NPP(t/ha/年)

NPPa：土地改変後のNPPp(t/ha/年)

NPPb：土地改変前のNPPp(t/ha/年)

RTap：NPPaからNPPpへの移行時間(年)

RTbp：NPPbからNPPpへの移行時間(年)

評価モデルの策定にあたり、まず、アカマツの林齢と現存量、NPP、および生長量の関係を数式化するとともに、間伐および主伐後にバイオマス燃料として使えるチップ化率を設定した。

アカマツの林齢と現存量の関係については、関東地方収穫表ではほぼI等地下とE等地上にあたる土地条件の調査データ²³⁾および岩手県岩手営林署管内のデータ²⁴⁾を用いた。引用したデータを表7に示す。数式化にあたっては既存調査²⁵⁾でアカマツ上木の主林木構成数値に比較的合うとされたKorun式を適用し最小自乗法を用いて式(2)のとおり設定した。

$$\log Y_1 = -0.250 \times (\log X_1)^2 + 1.586 \times (\log X_1) + 0.299 \quad (2)$$

ここで、

Y₁：現存量(t/ha)

X₁：林齢(年)

アカマツの林齢とNPPの関係については公知の情報として、関東地方収穫表ではほぼI等地下とE等地上の土地条件にあたるデータ²³⁾を用いた。東北地方の公知データは

表7 林齢と現存量の関係

林齢 (年)	現存量(t/ha)			備考
	幹	枝	合計	
10	38.1	9.0	47.1	参照資料23)
12	42.7	9.4	52.1	
15	45.3	9.7	55.0	
20	75.9	12.5	88.4	
23	85.1	12.3	97.4	
25	93.8	13.7	107.5	
33	163.4	14.6	178.0	
48	198.5	16.6	215.1	
55	225.9	21.1	247.0	参照資料24)
120	290.4	29.6	320.0	
46	83.9	14.1	98.0	
44	126.0	13.4	139.4	
43	153.6	15.6	169.2	
46	198.5	16.6	215.1	

得られなかったが、表7の現存量のデータでは東北地方と上記関東地方の値に大きな差がみられなかったことから適用した。また、林齢10年以前のデータがなく、林齢20年前後のデータにはバラツキがみられることから、調査データに基づく数式化は行わず、筆者にてデータを補完した。図3にアカマツの林齢とNPPの関係における調査データと筆者が補完したデータをプロットした図を示す。この特性を使う場合は、既存研究²³⁾で示されたアカマツのNPPの特性が得られている森林であることが前提になる。そこで、アカマツが主要な樹種を占める久慈市の森林施業の実績を調査した。その結果、造林面積では計画を下回っているが、伐採立木材積は主伐と間伐で増減があるが計画を上回る施業がなされているため⁶⁾、図3の特性に対して施業不足による成長鈍化などの補正は実施しなかった。

アカマツの林齢と生長量の関係については、表8に示す既存のデータ²³⁾を用いた。ここで生長量とはNPPから枯死した質量を除いた値である。表から式(3)のとおり直線近似式を設定した。

図3 アカマツの林齢とNPPの関係

表8 NPPと成長量の関係

林齢 (年)	NPP (t/ha/年)	成長量 (t/ha/年)
10	21	7.5
20	21	6.5
30	17	5.0
40	15	3.5
50	14	2.5
60	13	2.0
80	12	1.0
100	12	1.0
120	11	0.5

出典：参考文献23)

$$Y_2 = 0.663 \times X_2 - 6.748 \quad (3)$$

ここで、

 Y_2 ：生長量 (t/ha/年) X_2 ：NPP(t/ha/年)

チップ化率に関しては、製材所において用材にならない未利用材がチップに利用されると想定した。東北太平洋側地域の調査結果²⁶⁾から、素材生産全体平均の歩止りはおおよそ素材生産量の3割程度と予測されており、未利用材がすべてチップに活用できると想定し、チップ化率を3割と設定した。本調査は樹種ごとには調べられていないが、宮古地区など比較的にアカマツが多い地域を含む調査であるため引用した。

4.2.1 間伐評価モデル

(1) 年間施業面積の設定

年間施業面積は表1に示した年間伐採量を供給できる面積で、式(4)により求めた。

$$\text{年間施業面積}_{X1} = \frac{\text{伐採量}}{\text{現存量}_{X1}} \times \frac{1}{(\text{間伐率} \times \text{チップ化率})} \quad (4)$$

ここで、

 $X1$ ：林齢 $X1$ の森林を間伐する場合の年間

面積 (h/年)

伐採量：18,145t/年 (表1)

現存量 $X1$ ：林齢 $X1$ の森林の現存量 (式(2)から算出)間伐率：30%(森林計画書指定率35%⁶⁾以下)

チップ化率：30%(上述のとおり未利用材の率を設定)

実施率は施業開始時に計画する将来20年分の同林齢の総施業面積に対する実施年の年間施業面積の比であり、式(5)のとおり算出する。

$$\text{実施率}_n = \frac{\text{年間施業面積}_n}{\text{総施業面積}} \times 100 \quad (5)$$

ここで、

実施率 n ：施業開始後の n 年目の実施率 (%)年間施業面積 n ：施業開始後の n 年目の年間面積 (ha)

(2) NPPの設定

NPPは放置部のNPP、施業部のNPP、施業部と放置部全体のNPP、およびNPPpからなる。

放置部のNPPは式(1)のNPPbに該当し、対象林すべてが放置された場合の対象林全体のNPPを表す。放置部のNPPを求めるには人工林の放置がNPPに与える影響を定量化する必要がある。そこで、間伐によりアカマツの幹の直径成長が1.5倍程になるとの調査報告²⁷⁾を用いて、間伐がされない場合の影響を定量化した。ここでは、幹の直径成長はNPPから枯死した質量を除いた生長量に相当するとして式(3)を用い、生長量が1.5倍になった場合のNPPの向上倍率を1.11倍と算出した。そして、図3の特性データから1.11を除すことでアカマツ林を放置した場合のNPPの特性を図4のとおり設定した。図4では本評価で用いる林齢30から80年の範囲を記載している。放置部のNPPは図4のデータを用いて林齢毎に行う。ここで、放置林のNPPの低下は経年に関係なく一定とした。

施業部のNPPの算出では間伐効果をNPPに反映する。そこで、上述した間伐によるNPPの向上倍率1.11倍を用いて間伐によるNPPの効果を式(6)により算出した。

$$\text{NPP}_{\text{間伐}_n} = \text{NPP} \times 1.11^n \quad (6)$$

ここで、

$\text{NPP}_{\text{間伐}_n}$ ：間伐 n 回実施後のNPP(t/ha/年) (本研究では $n=1,2$)

施業後のNPPである施業部と放置部全体のNPPは式(1)のNPPaに該当し、計画どおりに20年間対象林の施業が行われた場合の対象林全体のNPPとして式(7)を用いて算出する。第1項はNPPbに総施業面積に対する放置部の比率を乗算したもので、第2項はNPPsに対象林全体に対する施業部の比率を乗算したものである。第2項では施業場所の毎年の増加と施業済み箇所の毎年のNPP変化を計算に反映している。

図4 放置時におけるNPPと林齢の関係

$$NPP_{a_n} = NPP_{b_n} \times \frac{100 - \sum_{i=1 \sim n} RP_i}{100} + \sum_{i=1 \sim n} (NPP_{s_{(n+1-i)}} \times \frac{RP_i}{100}) \quad (7)$$

ここで、

NPP_{a_n} ：施業開始後n年目のNPP(t/ha/年)

NPP_{b_n} ：施業開始後n年目の放置部のNPP(t/ha/年)

NPP_{s_n} ：施業開始後n年目の施業部のNPP(t/ha/年)

RP_i ：i年目の実施率(%)

NPP_p はアカマツ人工林が適切に施業されている状態のNPPであり、標準伐期齢である林齢40年のNPPを参照することとし、図3から15.7t/ha/年と設定した。

また、式(1)の NPP_a と NPP_b はそれぞれ施業年毎に求めた NPP_{a_n} と NPP_{b_n} の平均とした。

(3) $RTap$ と $RTbp$ の設定

まず $RTbp$ から設定する。 $RTbp$ は NPP_b から NPP_p への移行時間であり、標準伐期の40年とした。 $RTap$ は NPP_a から NPP_p への移行時間であり、表4の施業によるNPPの改善が回復時間の短縮に寄与すると考え、式(8)により算出した。

$$RTap = RTbp \times (1 - \frac{NPP \text{ 向上率}}{100}) \quad (8)$$

ここで、

NPP向上率： NPP_a の NPP_b に対する向上率(%)であり、施業期間の20年間の平均値の比

4.2.2 主伐評価モデル

(1) 年間施業面積の設定

間伐の場合と同様に年間施業面積と実施率を求める。年間施業面積は式(9)により求める。間伐モデルとの違いは間伐率を考慮していないことである。実施率は間伐評価モデルと同様、式(5)により算出する。

$$\text{年間施業面積}_{X1} = \frac{\text{伐採量}}{\text{現存量}_{X1}} \times \frac{1}{(\text{チップ化率})} \quad (9)$$

ここで、

年間施業面積 $X1$ ：林齢 $X1$ の森林を主伐する場合の年間面積(h/年)

伐採量：18,145t/年(表1)

現存量 $X1$ ：林齢 $X1$ の森林の現存量(式(2)から算出)

チップ化率：30%(上述のとおり未利用材の率を設定)

(2) NPPの設定

間伐の場合と同様、放置部のNPP、施業部のNPP、および NPP_p は図3を用い、施業部と放置部全体のNPPは式(7)を用いて算出する。ここで、主伐後の再造林した林分のNPP変化は図3の林齢1年目からの特性を用いた。

(3) $RTap$ と $RTbp$ の設定

間伐の場合と同様、 $RTbp$ は40年とし、 $RTap$ は式(8)により算出した。

5. 結果および考察

5.1 被害係数の算出

上述した被害係数算定モデルを用いて表4のシナリオ毎にアカマツ人工林施業時の $DF_PPI(trans)$ を表9のとおり算出した。 $DF_PPI(trans)$ の算出に用いた NPP_a はアカマツの成長段階で変わる。そこで、対象林齢が同じシナリオ毎の NPP_a を図5に示す。横軸は施業実施後の林齢とし、放置時のNPPも比較用に示した。NPPは式(7)により求めている。施業開始時に主伐を行う場合のNPPは最初の数年間は放置時より低下するが、再造林したアカマツの生長が早いため、数年で増加に転じている。その低下度合いはシナリオ1からシナリオ4の順に少なくなっており、高齢な林齢ほど主伐が効果を発揮することが分かる。間伐は主伐ほどのNPP変化はないが、NPPの低下を抑制する効果をシナリオ1～3で確認できる。また、シナリオ1a1と同1a2の林齢30年から39年までの施業は共に間伐のみであるが、 NPP_a はシナリオ1a1の方がわずかに大きい。この理由はシナリオ1a1が40年目以降に主伐を行うため総施業面積が同1a2より小さくなり、林齢31年から39年までの実施率が同1a2より大きくなるためである。各シナリオの NPP_a 計算プロセスは付録に記載する。

表9 各シナリオの被害係数算出結果

	$DF_PPI(trans)$ (kg/m ²)
シナリオ 1a1	-1.9
シナリオ 1a2	-3.9
シナリオ 1b	-1.9
シナリオ 2a	-3.7
シナリオ 2b	-4.0
シナリオ 3a	-3.1
シナリオ 3b	-6.1
シナリオ 4a	-2.2
シナリオ 4b	-8.0

図5 シナリオ毎に算出したNPPa

図6 GHG排出量評価結果(土地造成影響を含む場合)

図7 LIME2評価結果(土地造成影響を含む場合)

5.2 土地造成の影響

図2における丸太生産から発電までの土地造成を含むプロセスのGHG排出量評価結果を図6に示す。バイオマス発電のGHG排出量は437 (g-CO₂eq/kWh) となった。システム境界が異なるため参考ではあるが、東北電力のGridの実排出係数²⁸⁾の81%に相当する。内訳はチップ製造が39%、丸太生産、丸太輸送、チップ設備と発電設備の基礎、および発電段階は比較的同レベルで9～16%である。基礎の影響を合計すると全体の18%になる。基礎の影響はコンクリート製造負荷であるが、使用期間を40年として1/2の影響を計上しているにもかかわらず大きいことから、発電設備やチップ製造工場の建設ではコンクリート量を減らす設計が望まれる。

土地利用影響を加えたLIME2のSI値は図7のとおり1.39 (円/kWh) となった。内訳はチップ製造が28%と多く、土地利用影響はチップ設備が19%、発電設備が14%となる。土地利用影響は上述のとおり1/2の影響を計上していることを考えると、設置面積の低減が重要である。

5.3 アカマツ林施業の効果

(1) LIME2評価結果

図8は図7の結果にアカマツ林施業効果を追加したLIME2評価結果である。森林施業による環境影響低減量はGridの環境負荷の1.23円/kWhに対し-48.6円/kWhから-180円/kWhであり、森林施業効果が極めて大きいことを確認した。図9は各シナリオの総施業面積である。

図8 LIME2評価結果(土地造成影響とアカマツ林施業を含む場合)

図9 アカマツ林の総施業面積

図8で効果が大きいシナリオ1a2、同2a、同3aは総施業面積に比例していることが分かる。一方で、次に効果が大きいシナリオ4bは総施業面積が多い間伐よりも主伐の方が効果がある。この理由は林齢が65年であり間伐によるNPPの向上効果が減っているためである。また、図9の実線矢印は間伐を10年毎に2回実施するケースを結んだ線であり、点線矢印は主伐のケースを結んだ線である。両ケースとも林齢が増すことによる現存量の増加にともなう総施業面積の減少傾向が確認された。

(2) SI値の改善度

面積あたりのSI値改善度をシナリオ毎に比較した結果を図10に示す。ここで面積とは総施業面積と必要森林面積である。両者は主伐の場合は一致するが、間伐の場合は異なる。そこで間伐の場合は両方の面積で除した結果を併記した。実線矢印は間伐の場合の除する面積による違いを比較し、点線矢印は主伐の場合のシナリオ毎の比較である。

まず全体の傾向を考察する。実線矢印は、間伐の場合はすべての林齢において森林面積で除した方がSI値の改善度が高いことを示している。この理由は、間伐は同じ現場で2回の施業をするため必要な森林面積が抑制されるため

である。一方、点線矢印は、主伐の場合は林齢が増すほど現存量が増え必要な面積が少なくなりSI値の改善度が増加することを示している。主伐の効果は林齢40年以降で顕著となり林齢40年を標準伐期としている森林整備計画^{6,7)}は環境改善効果の効率性という点で妥当な時期であるといえる。

つづいて細部の考察を行う。間伐の対象が林齢30年のシナリオ1a1と同1a2のSI値改善度の比較では、除する面積に関係なくシナリオ1a1の標準施業よりも同1a2の長伐期施業の方が良い。すなわち30年目に間伐を行った後は、主伐より間伐の方が効果が高い。この理由は、図5(a)にみられるように40年目の主伐後の10年間にNPPが低下することにより相対的に間伐の効果が高くなったと考えられる。図5では高齢林になるほど主伐による低下影響は少なくなることが示されており、林齢30年の人工林の10年後の施業は間伐も選択肢に入れても良いと考えられる。また、図10のシナリオ2a森林面積と同2bの比較ではSI値の改善度はほぼ同程度である。この理由は林齢40年の人工林の場合に50年目に間伐を行うことの利用森林面積あたりのNPP向上効果が主伐とほぼ同等であることを意味する。

図10 SI値の改善度比較

表10 設定シナリオの継続性検討

林齢	シナリオ No.	必要森林面積		年間施業面積 (平均値)			年間伐採量	
		(ha)	占有率 ^{*1)} (%)	(ha/年)	実績比 ^{*2)} (%)	施業	(t/年)	対生長量比 ^{*3)} (%)
30年 (6,7 齢級)	1a1	14,151	50.9	882	80.0	間伐+主伐 (再造林)	18,145	13.1
	1a2	14,151	50.9	1,289	116.9	間伐+間伐		
	1b	7,732	27.8	387	105.2	主伐 (再造林)		
40年 (8,9 齢級)	2a	11,622	21.2	1,083	95.4	間伐+間伐		6.6
	2b	6,497	11.9	325	85.9	主伐 (再造林)		
50年 (10,11 齢級)	3a	13,719	47.0	948	154.2	間伐+間伐		12.4
	3b	5,691	19.5	285	138.8	主伐 (再造林)		
65年 (12 齢級以上)	4a	11,701	366.1	654	データ無	間伐+主伐 (再造林)		114
	4b	4,893	153.1	245	データ無	主伐 (再造林)		

*1) アカマツ人工林面積 118,166ha¹⁶⁾ に当該齢級別分布 (6,7級=24%、8,9級=45%、10,11級=25%、12級以上=3%) を乗算した値に対する比率

*2) 齢級別間伐実績値¹⁶⁾ (6,7級=1,102ha、8,9級=1,135ha、10,11級以上=615ha) と、間伐の1/3⁴⁾ と推定した主伐実績面積に対する比率

*3) アカマツ成長量を 5t/ha/年²⁴⁾ として求めた当該齢級別森林の年間成長量に対する比率

以上から、現状の林齢をパラメータとした今後20年のバイオマス発電へのチップ供給を想定した施業計画においては、林齢50年以上の場合は主伐を優先すべきで、林齢30年では主伐と間伐の両者を選択でき、林齢40年では総施業面積あたりの効果は主伐が大きいが必要森林面積あたりの効果は主伐と間伐が同等となることが分かった。

5.4 設定シナリオの継続性

岩手県の民有アカマツ人工林を想定した各シナリオの継続性を、必要森林面積の人工林面積に対する比である占有率、年間施業面積平均値の実績値に対する比である実績値比、年間生長量の岩手県のアカマツ成長量 5t/ha/年²⁴⁾ に対する比である対生長量比、から考察する。必要森林面積の算出では、2回目の施業は1回目と同じエリア内で行われるため1回目の施業面積を対象とした。一方、年間施業面積は2回目の施業も含むシナリオ全体の平均値であり、再造林を含む2回目の施業効果を反映している。

まず、岩手県の民有アカマツ人工林面積に齢級分布率を乗算してシナリオ毎のアカマツ人工林面積を求めた。林齢30年のシナリオ1を齢級6,7級、林齢40年のシナリオ2を

齢級8,9級、林齢50年のシナリオ3を齢級10,11級、林齢65年のシナリオ4を林齢12級以上とする。アカマツの齢級分布率は、筆者が関係者にヒアリングした結果、6,7級が計24%、8,9級が計45%、10,11級が計25%、12級以上が3%と設定した。岩手県の民有アカマツ人工林面積は 118,166ha¹⁶⁾ を用いた。つぎに、齢級別間伐実績値¹⁶⁾ から間伐面積を6,7級が計1,102ha、8,9級が計1,135ha、10,11級以上が615haと求めた。主伐面積は実績値が得られなかったため、同じ岩手県内の久慈地域の主伐と間伐の伐採立木材積⁴⁾ の実績値比較から主伐面積は間伐面積の1/3と想定した。表10に占有率、実績値比、対生長量比の算出結果を示す。

必要森林面積の占有率から林齢65年のシナリオ4は成立せず、他のシナリオとの組み合わせが必要となる。一方、他のシナリオの占有率は最大でも50.9%で、岩手県の民間アカマツ人工林が1MW級のバイオマス発電のチップを供給するポテンシャルを有することが分かる。年間施業面積の実績比は、標準伐期施業であるシナリオ1a1、同2b以外のケースの多くが100%を超える結果となり、現在の間伐や主伐のペースでは木材供給が不足することが判明した。

特に、林齢50年を主伐していくシナリオ3bは占有率が小さく対象となる林齢の森林が多くあるにもかかわらず主伐実績が少ない状況である。図10から同シナリオはSI値の改善度が高いことが分かっており、今回検討したバイオマス発電に組み合わせる施業としては、林齢50年にフォーカスした主伐を計画的に実行できるような検討が重要であることが分かる。なお、本研究では間伐率を30%、未利用材を想定しチップ化率を30%と設定しており、必要森林面積や年間施業面積を削減するにはこの率を可能な限り多くすることも対策になる。また、本考察では評価対象林以外の岩手県内の民有アカマツ人工林施業による継続性への影響は考慮されていない。

5.5 評価の限界

本研究で策定した評価モデルの限界として、土地造成影響と森林施業効果の評価対象が一次生産性のみであり、水源涵養、土砂流出などの他の評価項目は網羅できていないことが挙げられる。今後のLCAにおける評価範囲の拡大が望まれる。

また、今回用いた評価データとして、以下の課題が考えられる。

- ・土地造成影響の算定に用いた被害係数は、LIME2の代表値を用いており、東北地方の特性が考慮されていない。
- ・放置林におけるNPP低下率は一定としており、経年による変化は考慮されていない。
- ・対象とした民有アカマツ人工林はシナリオにて設定した林齢において図3に示したアカマツの特性²³⁾が得られていることを前提としており、森林施業が滞っているなどの個別の状況は考慮されていない。
- ・チップ製造設備から発生する残渣はスギやヒノキのデータであり、アカマツのデータになっていない。

6. まとめ

木質系バイオマス発電のチップを供給する東北太平洋側地域のアカマツ林を対象に森林施業による一次生産性の向上効果を、LIME2を用いてGHG排出影響、土地利用影響と統合評価し、以下4点を明らかにした。

第1点目として、アカマツ人工林の施業が維持されることによる環境改善効果は、土地利用やGHG排出の影響に比べ大きく、発電のための燃料チップの供給プロセスが環境面から重要である。

第2点目として、アカマツ林の施業を除いた環境影響の内訳から、チップ製造段階が28%、チップ製造設備と発電設備の土地利用影響が33%となり、チップ製造と土地利用が設計時に環境配慮すべき項目である。

第3点目として、標準伐期施業と長伐期施業を想定し、林齢30年から65年の範囲で間伐と主伐を行う20年分のシナリオに対して、施業方法の違いと林齢が環境改善効果に与える影響を分析した。その結果、環境影響の改善効果を高めるためには、林齢50年以上の場合は主伐を優先する計画が有効であることが分かった。一方、林齢30年と40年の場合は主伐と間伐の効果はほぼ同等である。

第4点目として、設定したシナリオの継続性を岩手県の民間アカマツ人工林を事例に分析した結果、林齢65年を対象とする場合を除いて、1MW級の発電のために20年間チップを供給するポテンシャルを有することを確認した。一方、実際の年間施業量との比較では、標準伐期施業以外のケースの多くで現在の間伐や主伐のペースでは木材供給が不足する。特に、環境改善効果が高い林齢50年の主伐を計画するシナリオでは対象森林が豊富であるにもかかわらず主伐実績が不足しており、林齢50年の主伐を優先する継続可能な施業計画の立案が課題である。

今後は、本手法を代表的な人工林の樹種であるスギやヒノキなどへ展開していきたい。

謝辞

LIME2の評価にあたり、東京都市大学の伊坪徳宏教授に助言を頂きました。ここに感謝の意を表します。

(平成26年2月12日受付、平成26年12月23日採択)

参考文献

- 1) 林野庁, 木質バイオマスと固定価格買取制度について 林野No.63, 林野庁ホームページ, 入手先 <http://www.rinya.maff.go.jp/j/kouhou/kouhousitu/jouhoushi/pdf/rinya_no63_p04-07.pdf>, (参照 2014-8-22)
- 2) 株式会社 三菱総合研究所, 平成23年度農林水産省委託事業 岩手県、宮城県及び福島県の農山漁村における再生可能エネルギー導入可能性等調査報告書, 農林水産省ホームページ, 入手先 <http://www.maff.go.jp/j/shokusan/renewable/energy/pdf/report_all.pdf>, (参照 2014-8-8)
- 3) 伊坪徳宏, 稲葉敦 (2010): LIME2-意思決定を支援する環境影響評価手法, 社団法人 産業環境管理協会, 666pp.
- 4) 株式会社 森のエネルギー研究所, 平成23年度 林野庁補助事業 地域材供給倍増事業 木質バイオマスLCA評価事業報告書, 株式会社 森のエネルギー研究所ホームページ, 入手先 <http://www.mori-energy.jp/pdf/lca_hokokusho.pdf>, (参照 2014-8-22)
- 5) 日本学術会議 農学委員会 林学分科会, 報告 福島原発事故による放射能汚染と森林、林業、木材関連産業への影響－現状及び問題点－ 平成26年9月1日, 日本学

- 術会議ホームページ, 入手先 <<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-22-h140901.pdf>>, (参照 2014-12-3)
- 6) 林野庁東北森林管理局, 久慈・閉伊川国有林の地域別の森林計画書(案)(久慈・閉伊川森林計画区), 林野庁ホームページ, 入手先 <<http://www.rinya.maff.go.jp/tohoku/apply/publicsale/pdf/kujiheikawa.pdf>>, (参照 2014-8-9)
- 7) 岩手県花巻市, 花巻市 森林整備計画書, 花巻市ホームページ, 入手先 <http://www.city.hanamaki.iwate.jp/jigyousya/305/306/p004287_d/fil/1377651922769.pdf>, (参照 2014-8-9)
- 8) 岩手県盛岡市, 松くい虫対策としてのアカマツ伐採施設業指針, 盛岡市ホームページ, 入手先 <http://www.city.morioka.iwate.jp/dbps_data/_material/_files/000/000/004/149/h26bassaishishin.pdf>, (参照 2014-8-9)
- 9) 国家戦略室 エネルギー・環境会議コスト等検証委員会, コスト等検証委員会報告書, 内閣官房ホームページ, 入手先 <<http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/npu/policy09/pdf/20111221/hokoku.pdf>>, (参照 2014-8-9)
- 10) 一般財団法人 電力中央研究所, バイオマスエネルギー高度利用技術の開発, 電力中央研究所エネルギー技術研究所ホームページ, 入手先 <http://criepi.denken.or.jp/jp/energy/research/img/research2_leaflet.pdf>, (参照 2014-8-9)
- 11) 株式会社 森のエネルギー研究所, 木質バイオマスボイラー導入指針, 株式会社 森のエネルギー研究所ホームページ, 入手先 <http://www.mori-energy.jp/pdf/lca_boilershishin.pdf>, (参照 2014-8-9)
- 12) 全国木材チップ工業連合会, 木材チップ等原料転換型事業 調査・分析事業報告書 第2章 木材チップの含水率, 花巻市ホームページ, 入手先 <<http://zmchip.com/houkoku232.pdf>>, (参照 2014-8-9)
- 13) 全国木材チップ工業連合会, 木材産業等活性化総合対策事業のうち木材チップ等原料転換型事業調査・分析報告書, 全国木材チップ工業連合会ホームページ, 入手先 <<http://zmchip.com/houkoku231.pdf>>, (参照 2014-8-9)
- 14) 環境省・経済産業省, 温室効果ガス排出量算定・報告マニュアルv3.5 算定・報告・公表制度における算定方法・排出係数一覧, 温室効果ガス排出量算定・報告・公表制度ホームページ, 入手先 <<http://ghg-santeikohyo.env.go.jp/files/calc/itiran.pdf>>, (参照 2014-8-21)
- 15) 環境省, バイオ燃料の温室効果ガス削減効果に関するLCAガイドラインVer.1.0, 環境省ホームページ, 入手先 <<https://www.env.go.jp/earth/ondanka/lca/lcaguideline/guideline01.pdf>>, (参照 2014-8-23)
- 16) 林野庁委託事業, 平成23年度木質系震災廃棄物等の活用可能性調査(岩手県域調査(2号契約)) 最終報告書, 調査結果, 森林資源量調査, 林野庁ホームページ, 入手先 <<http://www.rinya.maff.go.jp/j/riyou/biomass/pdf/biomass2-3.pdf>>, (参照 2014-8-21)
- 17) いび森林資源活用センター協同組合, 木質ペレット・チップ製造工場を訪ねて, WOODFASTホームページ, 入手先 <<http://www.woodfast.net/23-IIBI.html>>, (参照 2014-1-26)
- 18) 畑陽一郎, 木質バイオマスの半分を吸収、兵庫県の官民連携でチップ加工から発電まで, スマートジャパンホームページ, 入手先 <<http://www.itmedia.co.jp/smartjapan/articles/1312/11/news028.html>>, (参照 2014-1-26)
- 19) タマタイ産業株式会社, 環境活動レポート, タマタイ産業株式会社ホームページ, 入手先 <<http://tamatai.com/pdf/new-report.pdf>>, (参照 2014-1-26)
- 20) 今村栄一, 長野浩司 (2009): 日本の発電技術のライフサイクルCO₂排出量評価 - 2009年に得られたデータを用いた再推計 -, 一般財団法人 電力中央研究所, 研究報告: Y09027
- 21) 国土交通省, 交通関係エネルギー要覧 平成18年版, 国土交通省ホームページ, 入手先 <http://www.mlit.go.jp/toukeijouhou/energy/h18_energy.pdf>, (参照 2014-8-21)
- 22) 経済産業省・国土交通省, 物流分野のCO₂排出量に関する算定方法ガイドライン, グリーン物流パートナーシップ会議ホームページ, 入手先 <<http://www.greenpartnership.jp/pdf/co2/co2brochure.pdf>>, (参照 2014-8-21)
- 23) 蜂屋欣二, 竹内郁雄, 柑秋一延 (1989): 高密度のアカマツ林の一次生産の解析, 林業試験場報告第354号, 林試研報, 39-97
- 24) 蜂屋欣二, 土井恭次, 小林玲爾 (1965): アカマツ林の林分成長の解析, 林業試験場報告第176号, 林試研報, 75-88
- 25) 井上由扶 (1960): アカマツ林の中林作業法に関する研究, 九州大学農学部演習林報告32, 1-26
- 26) 林野庁, 平成23年度木質系震災廃棄物等の活用可能性調査(岩手県域調査(2号契約)) 最終報告書, 地域林業事業体把握, 林野庁ホームページ, 入手先 <<http://www.rinya.maff.go.jp/j/riyou/biomass/pdf/biomass2-4.pdf>>, (参照 2014-8-21)

- 27) 正木隆ほか (2011): 高齢・高密度のアカマツ林の間伐は固体の成長を改善するか, 日林誌, 93:48-57
- 28) 環境省・経済産業省, 温室効果ガス排出量算定・報告マニュアルv3.5 電気事業者別排出係数一覧, 温室効果

ガス排出量算定・報告・公表制度ホームページ, 入手先 <http://ghg-santeikohyo.env.go.jp/files/calc/list_ef_eps.pdf>, (参照 2013-8-21)

付録

付表1 NPPa算定プロセス(シナリオ 1a1)

アカマツ林のNPP

経過 (年)	施業面積 (間伐)				NPP					
	現存量 (t/ha)		面積 (ha/年)	実施率 (%)	放置部 (t/ha/年)		施業部 (t/ha/年)	施業部+放置部 (t/ha/年)	潜在NPP (t/ha/年)	
	式 (2)		式 (4)	式 (5)	図4		式 (6)	式 (7)	図3	
	林齢 (年)				林齢 (年)	NPPb	間伐部 主伐	NPPa	NPPp	
1	31	128	1,574	8.9	31	16.5	18.4	16.7	15.7	
2	32	132	1,532	8.7	32	16.2	18.1	16.6		
3	33	135	1,494	8.5	33	15.9	17.7	16.5		
4	34	138	1,458	8.3	34	15.6	17.4	16.4		
5	35	142	1,424	8.1	35	15.3	17.1	16.3		
6	36	145	1,391	7.9	36	15.1	16.8	16.3		
7	37	148	1,361	7.7	37	14.8	16.5	16.3		
8	38	151	1,332	7.6	38	14.5	16.2	16.3		
9	39	154	1,305	7.4	39	14.3	15.9	16.3		
10	40	158	1,280	7.3	40	14.1	15.7	16.4		
11	41	161	377	2.1	41	13.8	3.2	15.1		
12	42	164	370	2.1	42	13.6	6.1	14.1		
13	43	167	363	2.1	43	13.4	8.7	13.5		
14	44	170	357	2.0	44	13.2	11.0	13.0		
15	45	173	351	2.0	45	13.0	13.1	12.8		
16	46	175	345	2.0	46	12.8	14.9	12.8		
17	47	178	339	1.9	47	12.6	16.5	12.9		
18	48	181	334	1.9	48	12.4	17.9	13.2		
19	49	184	329	1.9	49	12.3	19.1	13.6		
20	50	187	324	1.8	50	12.1	20.1	14.1		
平均	882				14.1		15.0	15.0	15.7	
合計	17,637				100					
NPP向上率					6.3%					

土地改変時の被害係数

NPPp-NPPb (t/ha/年)	NPPp-NPPa (t/ha/年)	RTbp 図3(年)	RTap 式 (8) (年)	DF_PPI(trans) 式 (1) (kg/m ²)
1.6	0.7	40	37	-1.9

付表2 NPPa算定プロセス(シナリオ1a2)

アカマツ林のNPP

経過 (年)	施業面積 (間伐)				NPP					
	現存量 (t/ha)		面積 (ha/年)	実施率 (%)	放置部 (t/ha/年)		間伐部 (t/ha/年)		間伐部+放置部 (t/ha/年)	潜在NPP (t/ha/年)
	式 (2)		式 (4)	式 (5)	図4		式 (6)		式 (7)	図3
	林齢 (年)				林齢 (年)	NPPb	1回目	2回目	NPPa	NPPp
1	31	128	1,574	6.1	31	16.5	18.4		16.6	15.7
2	32	132	1,532	5.9	32	16.2	18.1		16.5	
3	33	135	1,494	5.8	33	15.9	17.7		16.3	
4	34	138	1,458	5.7	34	15.6	17.4		16.2	
5	35	142	1,424	5.5	35	15.3	17.1		16.0	
6	36	145	1,391	5.4	36	15.1	16.8		15.9	
7	37	148	1,361	5.3	37	14.8	16.5		15.8	
8	38	151	1,332	5.2	38	14.5	16.2		15.8	
9	39	154	1,305	5.1	39	14.3	15.9		15.7	
10	40	158	1,280	5.0	40	14.1	15.7		15.6	
11	41	161	1,255	4.9	41	13.8		17.2	15.7	
12	42	164	1,232	4.8	42	13.6		16.9	15.8	
13	43	167	1,210	4.7	43	13.4		16.6	15.8	
14	44	170	1,189	4.6	44	13.2		16.4	15.9	
15	45	173	1,168	4.5	45	13.0		16.1	16.0	
16	46	175	1,149	4.5	46	12.8		15.9	16.1	
17	47	178	1,131	4.4	47	12.6		15.7	16.2	
18	48	181	1,113	4.3	48	12.4		15.4	16.2	
19	49	184	1,096	4.3	49	12.3		15.2	16.3	
20	50	187	1,080	4.2	50	12.1		15.0	16.4	
平均	1,289				14.1		16.5		16.0	15.7
合計	25,773				100					
NPP向上率					13.9%					

土地改変時の被害係数

NPPp-NPPb (t/ha/年)	NPPp-NPPa (t/ha/年)	RTbp 図3(年)	RTap 式 (8) (年)	DF_PPI(trans) 式 (1) (kg/m ²)
1.6	-0.4	40	34	-3.9

付表3 NPPa算定プロセス(シナリオ1b)

アカマツ林のNPP

経過（年）	施業面積（主伐）				NPP					
	現存量 （t/ha）		面積 （ha/年）	実施率 （%）	放置部 （t/ha/年）		主伐部 （t/ha/年）		主伐部+放置部 （t/ha/年）	潜在NPP （t/ha/年）
	式（2）		式（9）	式（5）	図3		図3		式（7）	図3
	林齢（年）				林齢（年）	NPPb	林齢（年）		NPPa	NPPp
1	31	128	472	6.1	31	16.5	1	3.2	15.7	15.7
2	32	132	460	5.9	32	16.2	2	6.1	14.8	
3	33	135	448	5.8	33	15.9	3	8.7	14.2	
4	34	138	437	5.7	34	15.6	4	11.0	13.7	
5	35	142	427	5.5	35	15.3	5	13.1	13.4	
6	36	145	417	5.4	36	15.1	6	14.9	13.2	
7	37	148	408	5.3	37	14.8	7	16.5	13.2	
8	38	151	400	5.2	38	14.5	8	17.9	13.3	
9	39	154	392	5.1	39	14.3	9	19.1	13.5	
10	40	158	384	5.0	40	14.1	10	20.1	13.7	
11	41	161	377	4.9	41	13.8	11	20.9	14.0	
12	42	164	370	4.8	42	13.6	12	21.6	14.4	
13	43	167	363	4.7	43	13.4	13	22.1	14.8	
14	44	170	357	4.6	44	13.2	14	22.5	15.3	
15	45	173	351	4.5	45	13.0	15	22.8	15.8	
16	46	175	345	4.5	46	12.8	16	22.9	16.3	
17	47	178	339	4.4	47	12.6	17	23.0	16.8	
18	48	181	334	4.3	48	12.4	18	23.0	17.3	
19	49	184	329	4.3	49	12.3	19	22.8	17.8	
20	50	187	324	4.2	50	12.1	20	22.7	18.3	
平均	387				14.1		17.8		15.0	15.7
合計	7,732				100					
NPP向上率					6.4%					

土地改変時の被害係数

NPPp-NPPb (t/ha/年)	NPPp-NPPa (t/ha/年)	RTbp 図3(年)	RTap 式 (8) (年)	DF_PPI(trans) 式 (1) (kg/m ²)
1.6	0.7	40	37	-1.9

付表4 NPPa算定プロセス(シナリオ2a)

アカマツ林のNPP

経過 (年)	施業面積 (間伐)				NPP					
	現存量 (t/ha)		面積 (ha/年)	実施率 (%)	放置部 (t/ha/年)		間伐部 (t/ha/年)		間伐部+放置部 (t/ha/年)	潜在NPP (t/ha/年)
	式 (2)		式 (4)	式 (5)	図4		式 (6)		式 (7)	図3
	林齢 (年)				林齢 (年)	NPPb	1回目	2回目	NPPa	NPPp
1	41	161	1,255	5.8	41	14.1	15.7		14.2	15.7
2	42	164	1,232	5.7	42	13.8	15.4		14.0	
3	43	167	1,210	5.6	43	13.6	15.2		13.9	
4	44	170	1,189	5.5	44	13.4	14.9		13.8	
5	45	173	1,168	5.4	45	13.2	14.7		13.7	
6	46	175	1,149	5.3	46	13.0	14.5		13.7	
7	47	178	1,131	5.2	47	12.8	14.3		13.6	
8	48	181	1,113	5.1	48	12.6	14.1		13.6	
9	49	184	1,096	5.1	49	12.4	13.8		13.5	
10	50	187	1,080	5.0	50	12.3	13.7		13.5	
11	51	189	1,064	4.9	51	12.1		15.0	13.6	
12	52	192	1,049	4.8	52	11.9		14.8	13.7	
13	53	195	1,035	4.8	53	11.8		14.6	13.7	
14	54	197	1,021	4.7	54	11.6		14.4	13.8	
15	55	200	1,008	4.7	55	11.5		14.3	13.9	
16	56	203	995	4.6	56	11.3		14.1	14.0	
17	57	205	983	4.5	57	11.2		13.9	14.1	
18	58	208	971	4.5	58	11.1		13.8	14.2	
19	59	210	959	4.4	59	11.0		13.6	14.3	
20	60	213	948	4.4	60	10.8		13.5	14.4	
平均	1,083				12.3		14.4		13.9	15.7
合計	21,655				100					
NPP向上率					12.9%					

土地改変時の被害係数

NPPp-NPPb (t/ha/年)	NPPp-NPPa (t/ha/年)	RTbp 図3(年)	RTap 式 (8) (年)	DF_PPI(trans) 式 (1) (kg/m ²)
3.4	1.8	40	35	-3.7

付表5 NPPa算定プロセス(シナリオ2b)

アカマツ林のNPP

経過（年）	施業面積（主伐）				NPP					
	現存量 （t/ha）		面積 （ha/年）	実施率 （%）	放置部 （t/ha/年）		主伐部 （t/ha/年）		主伐部+放置部 （t/ha/年）	潜在NPP （t/ha/年）
	式（2）		式（9）	式（5）	図4		図3		式（7）	図3
	林齢（年）				林齢（年）	NPPb	林齢（年）		NPPa	NPPp
1	41	161	377	5.8	41	14.1	1	3.2	13.4	15.7
2	42	164	370	5.7	42	13.8	2	6.1	12.8	
3	43	167	363	5.6	43	13.6	3	8.7	12.3	
4	44	170	357	5.5	44	13.4	4	11.0	12.0	
5	45	173	351	5.4	45	13.2	5	13.1	11.9	
6	46	175	345	5.3	46	13.0	6	14.9	11.9	
7	47	178	339	5.2	47	12.8	7	16.5	12.0	
8	48	181	334	5.1	48	12.6	8	17.9	12.2	
9	49	184	329	5.1	49	12.4	9	19.1	12.5	
10	50	187	324	5.0	50	12.3	10	20.1	12.8	
11	51	189	319	4.9	51	12.1	11	20.9	13.3	
12	52	192	315	4.8	52	11.9	12	21.6	13.7	
13	53	195	311	4.8	53	11.8	13	22.1	14.2	
14	54	197	306	4.7	54	11.6	14	22.5	14.8	
15	55	200	302	4.7	55	11.5	15	22.8	15.3	
16	56	203	298	4.6	56	11.3	16	22.9	15.9	
17	57	205	295	4.5	57	11.2	17	23.0	16.5	
18	58	208	291	4.5	58	11.1	18	23.0	17.1	
19	59	210	288	4.4	59	11.0	19	22.8	17.6	
20	60	213	284	4.4	60	10.8	20	22.7	18.2	
平均	325				12.3		17.8		14.0	15.7
合計	6,497				100					
NPP向上率					14.2%					

土地改変時の被害係数

NPPp-NPPb (t/ha/年)	NPPp-NPPa (t/ha/年)	RTbp 図3(年)	RTap 式 (8) (年)	DF_PPI(trans) 式 (1) (kg/m ²)
3.4	1.7	40	34	-4.0

付表6 NPPa算定プロセス(シナリオ3a)

アカマツ林のNPP

経過 (年)	施業面積 (間伐)				NPP					
	現存量 (t/ha)		面積 (ha/年)	実施率 (%)	放置部 (t/ha/年)		間伐部 (t/ha/年)		間伐部+放置部 (t/ha/年)	潜在NPP (t/ha/年)
	式 (2)		式 (4)	式 (5)	図4		式 (6)		式 (7)	図3
	林齢 (年)				林齢 (年)	NPPb	1回目	2回目	NPPa	NPPp
1	51	189	1,064	5.6	51	11.9	13.3		12.0	15.7
2	52	192	1,049	5.5	52	11.8	13.1		11.9	
3	53	195	1,035	5.5	53	11.6	13.0		11.9	
4	54	197	1,021	5.4	54	11.5	12.8		11.8	
5	55	200	1,008	5.3	55	11.3	12.6		11.8	
6	56	203	995	5.2	56	11.2	12.5		11.8	
7	57	205	983	5.2	57	11.1	12.3		11.7	
8	58	208	971	5.1	58	11.0	12.2		11.7	
9	59	210	959	5.1	59	10.8	12.1		11.7	
10	60	213	948	5.0	60	10.7	12.0		11.7	
11	61	215	937	4.9	61	10.6	11.8		11.7	
12	62	218	927	4.9	62	10.5	11.7		11.7	
13	63	220	916	4.8	63	10.4	11.6		11.7	
14	64	222	907	4.8	64	10.3	11.5		11.7	
15	65	225	897	4.7	65	10.2		12.7	11.8	
16	66	227	888	4.7	66	10.1		12.6	11.9	
17	67	229	879	4.6	67	10.0		12.5	12.0	
18	68	232	870	4.6	68	10.0		12.4	12.1	
19	69	234	862	4.5	69	9.9		12.3	12.2	
20	70	236	854	4.5	70	9.8		12.2	12.3	
平均	948				10.7		12.4		11.9	15.7
合計	18,968				100					
NPP向上率					10.5%					

土地改変時の被害係数

NPPp-NPPb (t/ha/年)	NPPp-NPPa (t/ha/年)	RTbp 図3(年)	RTap 式 (8) (年)	DF_PPI(trans) 式 (1) (kg/m ²)
4.9	3.8	40	36	-3.1

付表7 NPPa算定プロセス(シナリオ3b)

アカマツ林のNPP

経過 (年)	施業面積 (主伐)				NPP					
	現存量 (t/ha)		面積 (ha/年)	実施率 (%)	放置部 (t/ha/年)		主伐部 (t/ha/年)		主伐部+放置部 (t/ha/年)	潜在NPP (t/ha/年)
	式 (2)		式 (9)	式 (5)	図4		図3		式 (7)	図3
	林齢 (年)				林齢 (年)	NPPb	林齢 (年)		NPPa	NPPp
1	51	189	319	5.6	51	11.9	1	3.2	11.4	15.7
2	52	192	315	5.5	52	11.8	2	6.1	11.0	
3	53	195	311	5.5	53	11.6	3	8.7	10.7	
4	54	197	306	5.4	54	11.5	4	11.0	10.6	
5	55	200	302	5.3	55	11.3	5	13.1	10.6	
6	56	203	298	5.2	56	11.2	6	14.9	10.7	
7	57	205	295	5.2	57	11.1	7	16.5	10.9	
8	58	208	291	5.1	58	11.0	8	17.9	11.2	
9	59	210	288	5.1	59	10.8	9	19.1	11.6	
10	60	213	284	5.0	60	10.7	10	20.1	12.1	
11	61	215	281	4.9	61	10.6	11	20.9	12.6	
12	62	218	278	4.9	62	10.5	12	21.6	13.1	
13	63	220	275	4.8	63	10.4	13	22.1	13.7	
14	64	222	272	4.8	64	10.3	14	22.5	14.3	
15	65	225	269	4.7	65	10.2	15	22.8	14.9	
16	66	227	266	4.7	66	10.1	16	22.9	15.6	
17	67	229	264	4.6	67	10.0	17	23.0	16.2	
18	68	232	261	4.6	68	10.0	18	23.0	16.9	
19	69	234	259	4.5	69	9.9	19	22.8	17.5	
20	70	236	256	4.5	70	9.8	20	22.7	18.1	
平均	285				10.7		17.8		13.2	15.7
合計	5,691				100					
NPP向上率					22.7%					

土地改変時の被害係数

NPPp-NPPb (t/ha/年)	NPPp-NPPa (t/ha/年)	RTbp 図3(年)	RTap 式 (8) (年)	DF_PPI(trans) 式 (1) (kg/m ²)
4.9	2.5	40	31	-6.1

付表8 NPPa算定プロセス(シナリオ4a)

アカマツ林のNPP

経過 (年)	施業面積 (間伐)				NPP				
	現存量 (t/ha)		面積 (ha/年)	実施率 (%)	放置部 (t/ha/年)		施業部 (t/ha/年)	間伐 & 主伐 + 放置部 (t/ha/年)	潜在NPP (t/ha/年)
	式 (2)		式 (4)	式 (5)	図4		式 (6)	式 (7)	図3
	林齢 (年)				林齢 (年)	NPPb	間伐 主伐	NPPa	NPPp
1	66	227	888	6.8	66	10.1	11.3	10.2	15.7
2	67	229	879	6.7	67	10.0	11.2	10.2	
3	68	232	870	6.7	68	10.0	11.1	10.2	
4	69	234	862	6.6	69	9.9	11.0	10.2	
5	70	236	854	6.5	70	9.8	10.9	10.2	
6	71	238	846	6.5	71	9.7	10.9	10.3	
7	72	241	838	6.4	72	9.7	10.8	10.3	
8	73	243	830	6.3	73	9.6	10.7	10.3	
9	74	245	823	6.3	74	9.5	10.6	10.4	
10	75	247	816	6.2	75	9.5	10.6	10.4	
11	76	249	809	6.2	76	9.4	10.5	10.5	
12	77	251	802	6.1	77	9.4	10.5	10.5	
13	78	253	796	6.1	78	9.3	10.4	10.6	
14	79	255	789	6.0	79	9.3	10.3	10.6	
15	80	258	235	1.8	80	9.2	3.2	10.1	
16	81	260	233	1.8	81	9.2	6.1	9.8	
17	82	262	231	1.8	82	9.2	8.7	9.7	
18	83	264	229	1.8	83	9.1	11.0	9.7	
19	84	266	228	1.7	84	9.1	13.1	9.9	
20	85	268	226	1.7	85	9.0	14.9	10.2	
平均	654				9.5		10.4	10.2	15.7
合計	13,083				100				
NPP向上率					7.4%				

土地改変時の被害係数

NPPp-NPPb (t/ha/年)	NPPp-NPPa (t/ha/年)	RTbp 図3(年)	RTap 式 (8) (年)	DF_PPI(trans) 式 (1) (kg/m ²)
6.2	5.5	40	37	-2.2

付表9 NPPa算定プロセス(シナリオ4b)

アカマツ林のNPP

経過 (年)	施業面積 (主伐)				NPP					
	現存量 (t/ha)		面積 (ha/年)	実施率 (%)	放置部 (t/ha/年)		主伐部 (t/ha/年)		主伐部+放置部 (t/ha/年)	潜在NPP (t/ha/年)
	式 (2)		式 (9)	式 (5)	図4		図3		式 (7)	図3
	林齢 (年)				林齢 (年)	NPPb	林齢 (年)		NPPa	NPPp
1	66	227	266	5.4	66	10.1	1	3.2	9.8	15.7
2	67	229	264	5.4	67	10.0	2	6.1	9.5	
3	68	232	261	5.3	68	10.0	3	8.7	9.3	
4	69	234	259	5.3	69	9.9	4	11.0	9.3	
5	70	236	256	5.2	70	9.8	5	13.1	9.5	
6	71	238	254	5.2	71	9.7	6	14.9	9.7	
7	72	241	251	5.1	72	9.7	7	16.5	10.0	
8	73	243	249	5.1	73	9.6	8	17.9	10.4	
9	74	245	247	5.0	74	9.5	9	19.1	10.9	
10	75	247	245	5.0	75	9.5	10	20.1	11.4	
11	76	249	243	5.0	76	9.4	11	20.9	12.0	
12	77	251	241	4.9	77	9.4	12	21.6	12.6	
13	78	253	239	4.9	78	9.3	13	22.1	13.3	
14	79	255	237	4.8	79	9.3	14	22.5	13.9	
15	80	258	235	4.8	80	9.2	15	22.8	14.6	
16	81	260	233	4.8	81	9.2	16	22.9	15.3	
17	82	262	231	4.7	82	9.2	17	23.0	16.0	
18	83	264	229	4.7	83	9.1	18	23.0	16.7	
19	84	266	228	4.7	84	9.1	19	22.8	17.4	
20	85	268	226	4.6	85	9.0	20	22.7	18.0	
平均	245				9.5		17.8		12.5	15.7
合計	4,893				100					
NPP向上率					31.3%					

土地改変時の被害係数

NPPp-NPPb (t/ha/年)	NPPp-NPPa (t/ha/年)	RTbp 図3(年)	RTap 式 (8) (年)	DF_PPI(trans) 式 (1) (kg/m ²)
6.2	3.2	40	27	-8.0