

平成 30 年 6 月 5 日現在

機関番号：12201

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04508

研究課題名(和文) 長期的な森林バイオマス利用可能量算定モデルの構築とエネルギー収支分析

研究課題名(英文) Development of a model to estimate the long-term availability of forest biomass resources and energy balance analyses

研究代表者

有賀 一広 (Aruga, Kazuhiro)

宇都宮大学・農学部・准教授

研究者番号：60313079

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、栃木県、高知県、長野県において未利用木材の収穫作業を調査し、利用率、生産性・コストを分析した。また、皆伐作業地においては再造林作業についても調査を行い、生産性・コストを分析した。そして、木質バイオマス発電のための未利用材供給ポテンシャルと利用可能量を推計し、既存の発電施設への長期的な燃料供給の可能性について検証するとともに、新規発電施設の適地を検討した。さらに、経済性のみならず、エネルギー収支や温室効果ガス排出量など環境影響を評価した。

研究成果の概要(英文)：This study conducted time study of harvesting unused materials for woody biomass power generation and analyzed utility ratio, productivity, and costs in Tochigi, Kochi, and Nagano prefectures. Regeneration operations after clear cutting operations were also investigated, and those productivity and costs were also analyzed. The supply potential and availability of unused materials were estimated. Then, the long-term possibility of supplying fuel woods to the existing power generation plant and the locations of the newly established power generation plants were examined. In addition to economic balances, environmental impacts on energy balances and GHG emissions were evaluated.

研究分野：森林工学

キーワード：未利用木材 皆伐再造林 生産性・コスト 最適施業体系 エネルギー収支

1. 研究開始当初の背景

2012年7月に再生可能エネルギーの固定価格買取制度が開始され、木質バイオマス発電、特に固定価格が税込33.6円/kWhと高値となった未利用木材を燃料とする発電施設が全国で、多数、計画されている。未利用木材を燃料として利用することは、林業振興や山村の雇用創出などに貢献すると期待されているが、一方で出力5MWで年間6万トン程度が必要とされる未利用木材を買取期間20年間、安定して調達できるかが懸念されている。

そこで研究代表者の有賀(宇都宮大学)はこれまでに森林バイオマスの低コスト収穫手法を栃木県作成の森林GISに適用して、栃木県鹿沼地域における森林バイオマスの長期的な利用可能性についてコスト・エネルギー分析を通して検証し、各林地における最適な収穫作業システムや鹿沼地域における最適なエネルギープラントの規模を明らかにしていた。

2. 研究の目的

本研究では栃木県に加えて、地況、林況などが異なる高知県と長野県も対象として大中小規模の利用間伐、皆伐作業現場において詳細な時間観測調査を行い、木材利用率、生産性・コストを分析するとともに、皆伐作業地においては、地拵え、植林、下刈作業についても調査を行い、生産性・コストを分析することにより、長期的な利用可能性を試算するための基礎資料を取得する。

これらの基礎資料を森林GISデータに適用して小班ごとに利益が最大となる木材利用率・森林バイオマス率及び森林バイオマス発生量を推定するとともに、収穫費用算出式を用いて森林バイオマスの収穫費用を算定し、想定した買取価格と比較し、利益が最大となる収穫システムを各林地について明らかにする。また、設定した育林費用も考慮して、長期的な森林バイオマス利用可能性を算定し、各地域に適した発電所の規模を明らかにする。さらに経済性のみならずエネルギー収支や温室効果ガス排出量など環境影響を評価する。

3. 研究の方法

栃木県においては、平成26年7月から稼働している製材所に設置された2,500kWの発電所に、未利用木材を燃料として供給する素材生産業者と森林組合による利用間伐、皆伐作業を調査し、木材利用率と生産性・コス

トを分析するとともに、コンテナ苗を用いた皆伐再造林一貫作業を行っている森林組合では、地拵え、植林作業についても調査を行い、生産性・コストを分析した。上記で分析した木材利用率と生産性・コストを用いて、森林資源のエネルギー用途の利用が確立した場合にそれが森林所有者にとっての最適施業体系に及ぼす影響を分析した。さらにこの最適施業体系を参考に、栃木県スギ・ヒノキ林分において、木質バイオマス発電のための未利用材供給ポテンシャルと利用可能量を推計し、既存の発電施設への長期的な燃料供給の可能性について検証するとともに、新規発電施設の適地を検討した。

高知県においては木質バイオマス発電が2箇所で開催されており、この2箇所の発電施設の関連資料と関係団体への聞き取り等により、これら発電施設への燃料材供給と稼働の安定を主な問題意識として、現状と課題の整理を行った。この2箇所の発電施設では人工林に加えて未利用広葉樹林の利用も検討対象となっている。広葉樹も含めた未利用木材を燃料として供給する素材生産業者による皆伐作業を調査し、木材利用率と生産性・コストを分析した。また、林地残材をトラック輸送した場合の容積密度についての実用的データを得ることを目的として実験を行った。さらに伐出現場から木質バイオマス発電プラント等の最終利用場所へ林地残材を収集運搬する方法を類型化および定式化し、類型別に経費と負荷を算出する一般式を示した。そして、山土場からのトラック運搬の類型について、フォアグラウンドデータは既報の値を用い、バックグラウンドデータはLCA計算支援ソフトMiLCA付属のインベントリデータベースを用いて、単位量当たり経費・CO₂排出量・使用エネルギーを試算した。

長野県においては、ヒノキ林の漸伐作業における終伐やカラマツ天然更新林分の搬出間伐における木材利用率や生産性・コストを分析した。また、平成27年度から稼働予定の年間30万m³を使う中央加工施設とバイオマス発電所を対象として、数理計画モデルを利用したシミュレーションモデルを構築し、原料の安定的な調達が可能であるか、ひいては森林資源の持続可能性が保たれているのかを検証した。さらに、薪の小売および生産については研究の蓄積が乏しく、ある地域内での小売・生産者を面的に調査したデータは少ない。そこで薪ストーブの普及率が高く薪生産量が最も多い長野県を調査地として選定し、小売と生産の実態を調査した。

4. 研究成果

1) 栃木県

2006 年度従来型間伐では出材量は $75\text{m}^3/\text{ha}$ で、そのうち一般用材が 93% の $70\text{m}^3/\text{ha}$ 、杭木用材が 7% の $5\text{m}^3/\text{ha}$ であった。2010 年度機械化間伐では出材量が $94\text{m}^3/\text{ha}$ に増加し、そのうち一般用材が 72% の $68\text{m}^3/\text{ha}$ 、杭木用材が 3% の $3\text{m}^3/\text{ha}$ 、短材が 13% の $12\text{m}^3/\text{ha}$ 、チップ用材が 12% の $11\text{m}^3/\text{ha}$ であった。一方、皆伐作業では $430\text{m}^3/\text{ha}$ が搬出され、そのうち一般用材が 13% の $57\text{m}^3/\text{ha}$ 、直送材が 55% の $236\text{m}^3/\text{ha}$ 、杭木用材が 0.3% の $1\text{m}^3/\text{ha}$ 、短材が 13% の $58\text{m}^3/\text{ha}$ 、チップ用材が 18% の $78\text{m}^3/\text{ha}$ であった。労働生産性は従来型間伐は $3.09\text{m}^3/\text{人日}$ 、機械化間伐は $5.14\text{m}^3/\text{人日}$ 、皆伐は $8.94\text{m}^3/\text{人日}$ と増加し、コストは従来型間伐は $10,682\text{円}/\text{m}^3$ 、機械化間伐は $7,529\text{円}/\text{m}^3$ 、皆伐は $5,025\text{円}/\text{m}^3$ と減少した。再造林費用は $3,000\text{円}/\text{ha}$ 、植え苗木費 $132\text{円}/\text{本}$ で $395,500\text{円}/\text{ha}$ 、植付費用は $147,225\text{円}/\text{ha}$ 、地拵え費用は $115,220\text{円}/\text{ha}$ で合計 $657,945\text{円}/\text{ha}$ であった。コンテナ苗は $179\text{円}/\text{本}$ で $3,000\text{本}/\text{ha}$ を植え付けたため、苗木代は $537,000\text{円}/\text{ha}$ 、植付費用は $226,800\text{円}/\text{ha}$ 、地拵え費用は $198,000\text{円}/\text{ha}$ で合計 $961,800\text{円}/\text{ha}$ であった。

次に林業収益性に関わる材価等の多数の条件因子を柔軟に扱える単一林分経営シミュレーターによって土地期望価が最大となる間伐体系・伐期を探索し、発電用途等の木質バイオマス需要の登場がそれらに与える影響について検討した。対象として車両系作業システムが主流の栃木県北地域のスギ人工林を想定した。土地期望価が負となり皆伐再造林をなるべく延期するため長伐期を最善とする条件も多かったが、比較的低コストな伐出が可能で製材用材需要が堅実と想定する本研究の条件下では、設定上限である 3 回の利用間伐を実施して 65 年といった中程度の伐期齢を最適とする場合も多かった。バイオマス需要の登場による燃料材価格の上昇を見込んで試算すると、最適な利用間伐回数はほぼ変わらず、最適伐期齢は主として不変もしくは 5~10 年程度短くなるという結果であった。バイオマス需要の登場による最適な伐期と間伐回数への影響は限定的ではあるが、最適伐期の短縮は対象地域における近年の皆伐推進の経済合理性を裏付ける材料となりうる。

最後に栃木県スギ・ヒノキ林分において、木質バイオマス発電のための未利用材供給ポテンシャルと利用可能量を推計し、既存の発電施設への長期的な燃料供給の可能性について検証するとともに、新規発電施設の適地を検討した。その結果、供給ポテンシャルは用材 $1,003,745\text{m}^3/\text{年}$ 、未利用材 $394,042\text{t}$

年と推計され、利用可能量は用材 $430,561\text{m}^3/\text{年}$ 、未利用材 $169,125\text{t}/\text{年}$ と推計された。森林所有者への返却金を考慮した利用可能量を試算した結果、用材 $102,835\text{m}^3/\text{年}$ 、未利用材 $40,110\text{t}/\text{年}$ と減少したが、既存の発電施設が消費する未利用材は $35,000\text{t}/\text{年}$ であるため、返却金を考慮した場合でも既存の発電施設における長期的な燃料材需要は賄えることが示唆された。さらに、返却金を考慮した余剰の未利用材利用可能量から、栃木県内の 2 市で小規模ガス化発電施設の導入可能性が示唆された。

2) 高知県

高知県の木質バイオマス発電施設は、県中部 (T) と県西部 (G) の 2 カ所で 2015 年から稼働している。いずれも 6MW 級で年間 7~9 万 m^3 程度の木質燃料を必要とする。関連資料と関係団体への聞き取り等により、これら発電施設への燃料材供給と稼働の安定を主な問題意識として、現状と課題の整理を行った。燃料の供給状況は、大手素材生産業者も多い県中部に立地し県連が主要株主である T では、県の素材増産施策に伴う C、D 材の生産増加もあり、森林施業に伴い発生した未利用材のみで一定量の確保が可能となっている。一方、拡大造林期が県中部より 10 年ほど遅れヒノキが主体の県西部に位置する G では、人工林からの燃料材供給は多くはなく、現状では製材端材などの一般材が主な供給源である。ただし地域には放置薪炭林など広葉樹林が多く存在するため、輪伐期を設定した森林経営計画下での皆伐による広葉樹材供給など新しい試みが行われている。

木質バイオマス発電施設への材供給の手段として、高知県西部では放置薪炭林などの未利用広葉樹林を皆伐し回帰年を設定して天然更新により循環利用する方式が検討されている。その試験事業として約 10ha の海岸性広葉樹林を試験地として設定し、皆伐後架線により集材して材を木質バイオマス発電施設に供給する作業が行われた。試験地の平均蓄積は標準地法により約 $300\text{m}^3/\text{ha}$ と推定された。事業では 4 か月間で試験地のうち約 3ha から 572t の材が搬出されたが、土場までの平均搬出経費は架設と伐出で 12.0 千円/t であったのに対し、枝条を含めた材からの収入は丸太形状のみで 4.8 千円/t、枝条も含めた総平均で 3.7 千円/t と、大幅な赤字となった。平均功程は伐出のみで 2.6t/人日、架設を含めて 2.1t/人日で、収支が均衡するためには生産性を 2~3 倍とする必要がある。集材作業では特に散在する全木材の横取りに時間を要したことが生産性が低くなった原因と考えられた。一定の径級以上の材のみを集材対象とすることで数割の生産性向上の可能性が推察された。

木質バイオマス発電に適用することを想

定し、林地残材をトラック輸送した場合の容積密度についての実用的データを得ることを目的として実験を行った。積載重量 11.5 t のパネルトラックを用いて積み込みと輸送の試験作業を、丸太、枝条、およびそれらの混合（混載）の 3 形態の林地残材に対して実施した。容積密度は残材の層積と積荷の質量から計測したところ、積載率は 0.50 から 0.95 であった。得られたデータから、積載率 1.00 とした場合の積荷重量は丸太、枝条、混載について、それぞれ 15.25t, 5.78 t, 11.46 t であった。積荷の制限重量ちょうどの 11.5t を満たし積載率 1.00 とするためには、丸太と枝条を枝条の層積割合がおよそ 0.4 から 0.5 となるように混載する方式が最も効率が良いと推算された。

3) 長野県

天然更新を利用する森林作業法のなかでも、漸伐作業は比較的容易に誘導できるとされている。世代交代を図る後伐の段階では、下層木に損傷が発生するが、複層林施業を対象として、損傷を軽減する作業方法の検討など、収穫技術に関する知見の集積がみられる。しかしながら、経営において大きな問題となる作業コストを取り上げた報告は少なく、複層林施業では通常の皆伐施業と比べてどの程度山林所有者の負担が増加するか明らかでない。そこで、本研究では、今日普及している車両系作業システムによる終伐作業を取り上げ、時間観測から労働生産性を算出し、主伐事例との比較を行うことで、下層木による作業性の低下を明らかにした。その結果、終伐作業の労働生産性は $6.26\text{m}^3/\text{人日}$ と低い値となり、伐出コストも $9,771 \text{円}/\text{m}^3$ と高額になった。一方で、下層木は終伐を通して林地面積のおよそ 30% で保残され、再造林にかかる費用の軽減が期待された。木材販売価格と造林費の省力化を加味して経営費用を試算した結果、漸伐作業のそれは皆伐施業と比較しても著しく大きいものではないことが示唆された。

天然更新施業は、再造林コストの低減や再造林放棄の拡大防止に寄与する可能性を持っている。カラマツ (*Larix kaempferi* (Lamb.) Carriere) 天然更新施業に関しては、更新誘導に関する研究は行われているが、育林過程における報告は少ない。天然更新した林分では、立木配置や径級のバラつき等が予測できず、伐採等作業を行う上で、生産性や収益性にどのような影響があるかも明らかでない。本研究ではカラマツ天然更新林分の構造が搬出間伐に及ぼす影響を調査し、その収益性を検討することを目的とした。調査の結果、人工植栽区に比べて天然更新区では立木配置がランダムである一方、立木の直径階のバラつきと平均直径の差には、天然・人工の両プロットにおいて有意差は認められなかった。列状間伐作業時の生産性は全体的に

人工植栽区で高く、システム労働生産性は、天然更新区で $4.58\text{m}^3/\text{人日}$ 、人工植栽区で $5.20\text{m}^3/\text{人日}$ となった。伐倒工程では、要素作業「選木・列の確認」において、天然更新区で時間を費やしていた。一方、出材量および選木結果、径級ごとの価格を考慮すると、主作業費に対する収益の割合は、天然・人工で同程度であった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

(雑誌論文)(計 25 件)

1) 赤熊恵理・有賀一広・奥山智洋 (2017) 栃木県東北地域における皆伐再造林の収支分析. 宇都宮大学演習林報告 53: 69-77 査読無

<https://uuair.lib.utsunomiya-u.ac.jp/dspace/bitstream/10241/10663/1/53-7-Analysis.pdf>

2) 郡司峻・山本嵩久・有賀一広・仲畑力・齋藤仁志 (2017) 栃木県宇都宮市における皆伐再造林の生産性とコスト. 宇都宮大学演習林報告 53: 15-26 査読有

<https://uuair.lib.utsunomiya-u.ac.jp/dspace/bitstream/10241/10658/1/53-2-Productivities.pdf>

3) 當山啓介・有賀一広・鈴木保志 (2017) 木質バイオマス需要と最適伐期、最適間伐体系の関係 - 栃木県北地域をモデルとして - . 日本森林学会誌 99(6):251-258 査読有 10.4005/jjfs.99.251

4) 山本嵩久・有賀一広・古澤毅・當山啓介・鈴木保志・白澤紘明 (2017) 栃木県における木質バイオマス発電のための長期的な未利用材利用可能量推計. 日本森林学会誌 99(6): 266-271 査読有 10.4005/jjfs.99.266

5) 鈴木保志・有賀一広・吉岡拓如・當山啓介・齋藤仁志・白澤紘明・山崎真 (2017) 高知県における木質バイオマス発電の現状と課題. 日本森林学会誌 99(6): 272-277 査読有 10.4005/jjfs.99.272

6) 鈴木保志・福田雄治・山岡雄一郎・稲井康秀 (2017) 発電利用を想定した林地残材のトラック輸送における形態別容積比重と混載による充填効率向上の可能性の検討. 日本エネルギー学会誌 96(10): 436-440 査読有 10.3775/jie.96.436

7) 松永宙樹・齋藤仁志・大塚大・植木達人 (2017) カラマツ天然更新林分の構造が搬出間伐に及ぼす影響. 森林利用学会誌 32(4): 203-210 査読有 10.18945/jjfes.32.203

8) Kazuhiro Aruga (2017) Economic balance and GHG emissions of forest biomass utilization in Kanuma area of Tochigi prefecture, Japan. Revista Padurilor 132: 5-14 査読有

9) 鈴木保志・山崎真・渡辺直史・福田雄治 (2016)木質バイオマス事業への供給を想定した架線集材による広葉樹皆伐作業の生産性と収支。森林利用学会誌 31(2) : 85-91 査読有 10.18945/jjfes.31.85

10) 大塚大・齋藤仁志・守口海・植木達人 (2016)車両系作業システムによる漸伐作業における終伐時の労働生産性 - 長野県におけるヒノキ林の事例 - 。森林利用学会誌 31(2) : 79-83 査読有 10.18945/jjfes.31.79

〔学会発表〕(計68件)

第129回日本森林学会 : 山本嵩久・有賀一広・林宇一・白澤紘明 北関東地域の木質バイオマス発電所のための長期的な未利用材利用可能量推計 2018

第129回日本森林学会 : 有賀一広・山田敬昌・山本嵩久 宇都宮大学演習林の長伐期林における皆伐作業の収支分析 2018

第129回日本森林学会 : 守口海・齋藤仁志・白澤紘明・有賀一広 年造林補助費用の最小化による木材生産林の選定-地利条件を考慮した場合- 2018

第129回日本森林学会 : 當山啓介 森林経営計画制度における主伐量上限制約の厳格性の試算 2018

第129回日本森林学会 : 白澤紘明・有賀一広・山本嵩久・當山啓介・広嶋卓也 地形・道路情報を用いた木質バイオマス資源の全国的な利用可能量推定 2018

第13回バイオマス科学会議 : 山本嵩久・有賀一広・白澤紘明 栃木県の新規木質バイオマス発電所における未利用材調達の可能性 2018

第13回バイオマス科学会議 : 鈴木保志 林地残材収集運搬の単位量あたり経費と環境負荷算定の定式化と優位性比較の試算 2018

第13回バイオマス科学会議 : 齋藤仁志・三木敦朗・飯島みく・松澤義明 産業的薪生産における機械利用について 2018

第24回森林利用学会 : 鈴木保志・福田雄治・大崎優・飯國芳明 木質バイオマス発電における広葉樹利用の検討 - 針葉樹との同

時伐採方式の導入 - 2017

第128回日本森林学会 : 白澤紘明・齋藤仁志・有賀一広・鈴木保志 木質バイオマス資源における賦存量と利用可能量の比較 2017

第128回日本森林学会 : 齋藤仁志・白澤紘明・三木敦朗・宮崎隆幸 長野県における木質バイオマス利用状況と利用可能量の推計 2017

第11回バイオマス科学会議 : 白澤紘明・齋藤仁志・松澤義明 製材工場と木質バイオマス発電施設の安定的な原料調達計画 2016

6. 研究組織

(1)研究代表者

有賀一広 (Kazuhiro Aruga)
宇都宮大学・農学部・准教授
研究者番号 : 60313079

(2)研究分担者

鈴木保志 (Yasushi Suzuki)
高知大学・自然科学系・准教授
研究者番号 : 20216451

齋藤仁志 (Masashi Saito)
信州大学・農学部・助教
研究者番号 : 60637130

當山啓介 (Keisuke Toyama)
東京大学・大学院農学生命科学研究科・助教
研究者番号 : 00613001

白澤紘明 (Hiroaki Shirasawa)
信州大学・農学部・助手(特定雇用)
研究者番号 : 50629186

(3)連携研究者

吉岡拓如 (Takuyuki Yoshioka)
日本大学・生物資源科学部・准教授
研究者番号 : 00409070

守口海 (Kai Moriguchi)
静岡大学・農学部・特任助教
研究者番号 : 70814979