

森林 GIS を用いた木質バイオマス発電のための未利用材利用可能量推計

松岡 佑典¹・林 宇一¹・有賀 一広^{*1}・白澤 紘明²・當山 啓介³・守口 海⁴

本研究では、まず都道府県が管理する民有林の森林 GIS と林野庁が管理する国有林の森林 GIS を取得し、地域森林計画を基に施業条件を設定、傾斜や起伏量といった地形量から作業システムを設定した。次に、GIS を用いて収穫コストの算出、スギ・ヒノキ・マツ・カラマツの木材売上、山元立木価格、造林費を用いて収支を算出した。最後に、FIT で未利用木質バイオマス発電設備に認定され、2020 年 6 月時点で稼働している日本全国の発電所を対象に、経済的に利益が得られる小班からの供給ポテンシャルを利用可能量として推計した。その結果、供給ポテンシャルは用材 65,490,336 m³/年、未利用材 13,098,067 m³/年と推計された。利用可能量は用材 31,080,672 m³/年、未利用材 6,216,134 m³/年と推計され、供給ポテンシャルの 47.5% との結果を得た。また、未利用材利用可能量と需要量を比較した結果、需要量に対する利用可能量の割合は 71.6% であった。ただし、再造林を担保するために造林補助率を 100% として推計したところ、全国での需要量を満たす未利用材供給が可能になると推計された。

キーワード：森林 GIS、木質バイオマス発電、未利用材、供給ポテンシャル、利用可能量

Yusuke Matsuoka,¹ Uichi Hayashi,¹ Kazuhiro Aruga,^{*1} Hiroaki Shirasawa,² Keisuke Toyama,³ Kai Moriguchi⁴ (2021) Estimating the Availability of Unused Materials for Woody Biomass Power Generation Using the Forest GIS. *J Jpn For Soc* 103: 416-423

These researchers acquired the forest GIS for private and public forests from prefectures and national forests from the Forestry Agency of Japan. We then calculated incomes and expenditures such as silvicultural and harvesting as well as stumpage prices on the Japanese cedar, cypress, pine, and larch forests using the silvicultural prescription set based on the regional forest plans and operation system set based on topographic conditions such as slope angles and height differences with GIS. Finally, this study estimated the availability of unused materials for woody biomass power generation plants under operation with FIT at the end of June 2020 as the supply potential from the profitable subcompartments. As a result, supply potentials of used and unused materials were estimated at 65,490,336 m³/year and 13,098,067 m³/year, respectively whereas those availabilities were estimated at 31,080,672 m³/year and 6,216,134 m³/year respectively. Therefore, the rate of the availabilities to the supply potentials was 47.5%. Furthermore, the rate of the availabilities to the demands was 71.6%. Considering the subsidy rate of 100% to secure the reforestations, the availabilities met the demands in Japan as a whole.

Key words: Forest GIS, woody biomass power generation, unused material, supply potential, availability

I. はじめに

2012 年 7 月に再生可能エネルギー固定価格買取制度 FIT (Feed-in Tariff) が開始され、木質バイオマス発電、特に買取価格が高値に設定された未利用材を燃料とする発電施設が、2020 年 6 月時点で、全国 148 カ所で新規認定され、すでに 74 カ所で稼働している (資源エネルギー庁 2021)。しかしながら、未利用材を FIT の買取期間 20 年間安定して調達できるか、さらには FIT 終了後の木質バイオマス発電の採算性が懸念されている。また、大規模な木質バイオマス発電施設の増加に伴い、燃料材の利用が拡大し、燃料の輸入が増加するとともに、間伐材・林地残材を利用する場合でも、流通・製造コストが嵩むなどの課題が見られるようになった。このため、森林資源をエネルギーとして地域内で持続的に活用するための担い手確保から発電・熱利用に至るまでの「地域内エコシステム」(地域の関係者の連携の下、熱利用又は熱電併給により、森林資源を地域内で持続的に活用する仕組み) の構築に向けた取組も進めら

れている (林野庁 2020)。

地域で未利用材をエネルギーとして利用するために、井内 (2004) や Kamimura *et al.* (2012) は市町村を単位として日本全国の未利用材を含めた木質バイオマスなどの賦存量や供給可能量を、また、Yoshioka and Sakai (2005) や Yamaguchi *et al.* (2014) は森林施業の単位となる小班を単位として、中山間地域や栃木県における未利用材の収穫量や収穫費用を試算したが、これらの研究は現状の齢級構成や素材生産量から賦存量や利用可能量が推計されており、長期的な賦存量や利用可能量は推計されていない。

一方、Kinoshita *et al.* (2010) は 40 年伐期を想定し、Yamamoto *et al.* (2019) は 60 年伐期を想定し、さらに、Yamamoto *et al.* (2019) は森林の更新費用も考慮して長期的な供給ポテンシャルや利用可能量を推計した。Kinoshita *et al.* (2010) は 1 km メッシュを単位として日本全国を、Yamamoto *et al.* (2019) は小班を単位として栃木県を対象として推計した。近年、大型製材工場や木質バイオマス発電施設の設置進展に伴い、木材の流通は都道府県域を超え

* 連絡先著者 (Corresponding author) E-mail: aruga@cc.utsunomiya-u.ac.jp  <https://orcid.org/0000-0002-6947-1033>

¹ 宇都宮大学農学部 〒321-8505 栃木県宇都宮市峰町 350 (Faculty of Agriculture, Utsunomiya University, 350 Mine-machi, Utsunomiya, Tochigi 321-8505, Japan)

² 国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所林業工学研究領域 〒305-8687 茨城県つくば市松の里 1 (Department of Forest Engineering, Forestry and Forest Products Research Institute, Forest Research and Management Organization, 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki 305-8687, Japan)

³ 東京大学大学院農学生命科学研究科附属演習林千葉演習林 〒299-5503 千葉県鴨川市天津 770 (The University of Tokyo Chiba Forest, Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo, 770 Amatsu, Kamogawa, Chiba 299-5503, Japan)

⁴ 高知大学教育研究部自然科学系農学部 〒783-8502 高知県南国市物部乙 200 (Faculty of Agriculture and Marine Science, Kochi University, B200 Monobe, Nankoku, Kochi 783-8502, Japan) (2021 年 3 月 2 日受付; 2021 年 4 月 25 日受理)

て広域化しており、より現実的な未利用材の利用可能量を推計するためには、木材の交流を考慮して試算する必要がある。そこで Battuvshin *et al.* (2020) は栃木県と木材交流がある福島県、茨城県、群馬県を対象に加えて小班を単位として試算を行った。また、Yamamoto *et al.* (2019) は栃木県内の森林組合から聞き取り調査を行い、施業条件や作業システムを設定して利用可能量を推計したのに対して、Battuvshin *et al.* (2020) は地域森林計画から施業条件を、後藤 (2016) が提案した方法を用いて傾斜や起伏量といった地形量から作業システムを設定し、利用可能量を推計した。

海外においてはデンマークやフィンランドにおいて全国規模の推計が行われているが、Nord-Larsen and Talbot (2004) は長期的な供給量のみ、Ranta (2005) と Nivala *et al.* (2016) は需要と供給を考慮して経済的な利用可能量を推計しているが、長期的な推計を行っておらず、推計単位は市町村や 1 km メッシュである。このように、全国規模で小班を単位として、施業条件や作業システムを設定して、未利用材利用可能量を推計した研究は筆者らが知る限りは世界的にも見当たらない。本研究では都道府県が管理する民有林の森林 GIS と林野庁が管理する国有林の森林 GIS を取得し、地域森林計画を基に施業条件を設定、傾斜や起伏量といった地形量から作業システムを設定し、GIS を用いて収穫コストの算出、樹種別の木材売上、山元立木価格、造林費を用いて収支を算出することで、経済的に利益が得られる小班からの供給ポテンシャルを利用可能量として推計した。なお、本研究では Yamamoto *et al.* (2019) や Battuvshin *et al.* (2020) が開発した数値解析ソフトウェアの MATLAB を用いた高速演算可能な手法を用いることにより、FIT で未利用木質バイオマス発電設備に認定され、すでに稼働している日本全国の発電所を対象に、小班単位で未利用材の利用可能量を推計することが可能となった。また、一般的に未利用材とは間伐材等由来の木質バイオマスと定義され、間伐材と森林経営計画・国有林野施業実施計画対象森林、保安林より間伐以外の方法で伐採された木材のことであるが (林野庁 2012)、本研究では間伐・主伐の幹部の林地残材を未利用材として推計した。

II. 対象地とデータ

オープンデータである北海道と静岡県を除いて、日本全国の都府県にデータ取得を依頼したが、本解析開始時に香

川県と沖縄県からはデータが取得できず、千葉県と福井県は準林班までのデータであったため、これら 4 県を除いた 43 都道府県で本解析を行った (J-Stage 電子付録付表-1)。したがって、地方で取りまとめた結果は過小推計になっていることに注意を要する。なお、本論文投稿時点においては香川県、沖縄県からもデータが取得できたため、今後は準林班を単位として全都道府県を対象に推計を行う予定である。

全国の都道府県庁より取得した森林簿、小班界 (森林計画図) の shape データ、林野庁より取得した国有林小班界の shape データ、国土地理院発行の数値地図より 10 m メッシュの数値標高モデル (DEM) と道路データを使用した。解析の対象は民有林・国有林のスギ、ヒノキ、アカマツ、クロマツ、カラマツ林分とした。令和元年木材需給報告書 (林野庁 2021a) から推計している木材の売上額や、平成 30 年山元立木価格 (日本不動産研究所 2018) 等本研究で使用している統計データがアカマツ、クロマツをマツとして集計しているため、アカマツ、クロマツ林分はマツとして集計している。

本研究では小班の位置や形の情報に加え、森林簿情報 (樹種) を用いて解析を行った。Battuvshin *et al.* (2020) は森林簿情報 (地位) も用いて試算したが、地位の記載が無い都道府県もあったことから、本研究では地位は 2 で統一して試算した。小班界 shape ファイルと森林簿には地形量や後述の解析に使用する小班面積、樹種の情報以外に、MapKeycode、Keycode が存在する。いずれも地番を並べたコードであり、その構成は、市町村コード、旧市町村コード、林班、準林班、小班、枝番である。Keycode がこれらをそのまま並べたコードであるのに対し、Mapkeycode はカタカナ表記である準林班を番号に変換し作成されたコードで、小班界の shape データと森林簿をリンク付けする際に使用できる。これらのコードが存在しない都道府県においては森林簿、小班界の shape ファイルの市町村、林班、準林班、小班、枝番のコードを合わせることで、Keycode、MapKeycode と同様のものを作成し、小班界 shape ファイルと森林簿の結合を行った。結合ができた全小班数と面積を表-1 に示す。全国人工林 10,203,842 ha とほぼ同様の 10,080,046 ha が解析対象となった。

III. 方 法

解析方法は 1) 供給ポテンシャルと収入の算出、2) 各

表-1. 地方別小班数、面積

地方	利用可能 小班数	全小班数	小班数割合 (%)	利用可能面積 (ha)	全面積 (ha)	面積割合 (%)	平均小班面積 (ha)	最小面積 (ha)	最大面積 (ha)
北海道	100,562	594,425	16.9	725,335	1,362,930	53.2	2.3	2.90E-07	551
東北	1,357,022	3,004,670	45.2	797,652	1,997,207	39.9	0.7	3.90E-14	197
関東	485,086	990,829	49.0	205,560	610,967	33.6	0.6	1.80E-16	158
中部	1,926,732	3,274,203	58.8	771,146	1,593,740	48.4	0.5	2.50E-15	384
近畿	819,785	1,475,848	55.5	551,916	1,312,728	42.0	0.9	8.60E-14	342
中国	1,176,109	2,058,528	57.1	562,212	1,167,240	48.2	0.6	7.60E-08	5,179
四国	655,221	1,130,556	58.0	260,779	688,456	37.9	0.6	2.00E-11	188
九州	2,265,674	2,847,849	79.6	901,967	1,346,778	67.0	0.5	1.90E-10	291
全国	8,786,191	15,376,908	57.1	4,776,567	10,080,046	47.4	0.7	1.80E-16	5,179

小班因子（土場の位置，搬出距離，運搬距離）の算出，3）支出の算出，4）利用可能量の推計からなる。

1. 供給ポテンシャルと収入の算出

各都道府県の地域森林計画を参考に伐期，間伐回数および間伐林齢，伐採率，間伐方法等の必要な条件を設定した。これらの条件を基に，樹種ごとに収穫表作成システム LYCS3.3（松本 2021）を用いて間伐，主伐時に発生する材積（ m^3/ha ）を推定し，各小班的面積を乗じて伐期全体の総材積を算出した。発生した総材積を伐期で除し，その値に後述の ABC 材（用材）率，D 材（未利用材）率を乗じることで，1 年間当たりの用材，未利用材の供給ポテンシャル（ $m^3/年$ ）を推定した。このため，齢級別面積が一定，前林分の成長傾向が一定，主伐後は必ず植栽されるという法正林を想定して本研究の推計は行われており，単年度ごとの需要を賄うことを担保するものではないことに注意を要する。なお，本研究では法正林を想定して年利率による利子を考慮していない（田中 2020）。また，対象樹種の中では LYCS3.3 で推定できる樹種はスギ，ヒノキ，カラマツのみとなっているため，マツ林分に関してはカラマツの値で代用している。また，歩留まりは 90%（用材率 75%，未利用材率 15%）とした。

収入は 1 伐期当たりで小班から収穫された用材，未利用材の木材売上合計とした。木材売上算出のため，令和元年木材需給報告書（林野庁 2021a）より製材用材（A 材）は中丸太価格，合板用材（B 材）は合板用丸太価格，チップ用材（C 材）はチップ向け針葉樹丸太価格を各都道府県の対象樹種ごとに設定し，それらに素材生産量の比を乗じた値を用材の平均素材価格と設定した。また，未利用材（D 材）の価格は現状，枝葉ではなく，チップ用材（C 材）と競合する丸太を利用することが多いことから，本研究ではチップ用材（C 材）の価格と同様とした。なお，対象樹種の価格が記載されていない都道府県では地方の平均価格を採用した。木材売上額は歩留まりを考慮した用材，未利用材の材積に価格を乗じることで算出した。

2. 各小班因子の算出

収穫コストを算出するために使用する各小班的土場の位置，搬出距離，運搬距離といった各小班的因子の算出方法について記す。土場は小班的の重心とした。搬出距離は，設定した土場から道路データの最近傍点までの直線距離に，森林作業道迂回率 η' を乗じて算出した距離とした。森林作業道迂回率 η' は，地形区分によって値が異なる。小林（1997）の推定式（1）に各小班的の平均林地傾斜 X （%）を代入し，森林利用学的地形指数 Y を求めた。

$$Y = 1.287X - 2.844 \quad (1)$$

これに基づいて小班ごとに地形区分を行い，森林作業道迂回率 η' を設定した。なお，本研究では森林作業道迂回率 η' として小林（1997）の作業道迂回率を援用した。

用材，未利用材の集荷先をそれぞれ設定し，小班的の重心座標，道路データ，集荷先の座標をもとに Dijkstra 法を用いて，各小班からすべての集荷先までの最短経路を運搬距離として計算した。J-Stage 電子付録付図-1，2 は各小班か

ら最短経路の用材，未利用材の集荷先までの運搬距離を示す。用材の集荷先は各都道府県の共販所とし（岡田 2015），未利用材においては FIT の認定を受け，2020 年 6 月時点で稼働している未利用木質を燃料とする発電所とした（資源エネルギー庁 2021）。なお，各小班からの集荷先は，後述の収支を計算した後に，利益が最大となる集荷先を，各小班からの集荷先とした。

3. 支出の算出

作業システムは後藤（2016）を参考に，各小班的の傾斜（J-Stage 電子付録付図-3）と起伏量（J-Stage 電子付録付図-4）により，9 種類の作業システム（CTL，9-13t グラップル，9-13t ウィンチ，9-13t スイングヤード，6-8t ウィンチ，6-8t スイングヤード，3-4t ウィンチ，タワーヤード，本格架線）を設定した（表-2，J-Stage 電子付録付図-5）。収穫コストは伐倒造材，集材，搬出，運搬，路網作設の各コストの合計とした（Battuvshin *et al.* 2020）。また，間伐と森林作業道作設には補助金を計上した（Matsuoka *et al.* 2021）。補助金は面積 5 ha 以上かつ搬出材積が $10 m^3/ha$ 以上の小班のみとした。間伐補助金は，平成 28 年度造林補助事業単価表（栃木県 2016a）を基に，伐採率，造材，集材方法，搬出材積ごとに標準単価を決定し，査定係数 1.7 と補助率 0.4 を乗じた値を補助額とした。森林作業道作設に関しては林地傾斜と幅員ごとに作設単価を決定し，査定係数 1.7 と補助率 0.4 を乗じた値を補助額とした。傾斜は緩傾斜 15° 未満，中傾斜 15° 以上 30° 未満，急傾斜が 30° 以上とした（栃木県 2016b）。

造林費は各都道府県の造林補助事業単価表を参考に各作業の単価を樹種，森林計画区ごとに設定し，地域森林計画から読み取った作業の回数を乗じることで一伐期当たりの造林費を計上した。なお，単価表が公表されていない都道府県は周辺の県の値を用いた。また，造林補助金は造林費の標準単価に査定係数 1.7 と補助率 0.4 を乗じた値を計上した。

4. 利用可能量の推計

収支は算出された木材売上を収入とし，支出を収穫コストと造林費の合計から間伐補助金，森林作業道作設補助金，造林補助金を差し引いたものとした。また，算出された伐期全体の収入と支出を比較し，森林所有者への返却金とし

表-2. 傾斜と起伏量による作業システム区分

		起伏量				
		100 m 未満	100~200 m	200~300 m	300~400 m	400 m 以上
傾斜	15° 未満	CTL	CTL	CTL		
	15~20°	9-13 t	9-13 t	9-13 t	9-13 t	
		グラップル	グラップル	ウィンチ	スイングヤード	
	20~25°	9-13 t	9-13 t	9-13 t	9-13 t	9-13 t
		グラップル	ウィンチ	ウィンチ	スイングヤード	スイングヤード
	25~30°		6-8 t	6-8 t	6-8 t	
		ウィンチ	スイングヤード	スイングヤード	本格架線	
30~35°		3-4 t	スイングヤード	本格架線	本格架線	
		ウィンチ				
35° 以上			本格架線	本格架線	本格架線	

資料：後藤（2016）。

て平成 30 年山元立木価格（日本不動産研究所 2018）を設定し、収支が返却金を上回る小班の供給ポテンシャルを利用可能量として推計した。なお、山元立木価格はスギ、ヒノキ、マツのみの記載のため、カラマツはマツの値を用いた。

本研究の利用可能量は法正林を想定して推計された値で、現実の単年度の値を示すものではないが、その値の大きさを解釈するため、用材は平成 30 年木材需給報告書（林野庁 2021a）の素材生産量と、未利用材は平成 30 年木質バイオマスエネルギー利用動向調査（林野庁 2021b）の間伐材等由来木材チップ利用量（絶乾トン を 2.2 倍して m^3 換算）と比較した。また、発電所の未利用材需要量を 5 MW 当たり $100,000 m^3$ （農林水産省 2015）として、本研究の未利用材利用可能量と比較した。

IV. 結果と考察

1. 供給ポテンシャル・利用可能量推計

全国における用材の供給ポテンシャルは $65,490,336 m^3$ /年、未利用材の供給ポテンシャルは $13,098,067 m^3$ /年と推計された。利用可能量においては用材で $31,080,672 m^3$ /年、未利用材で $6,216,134 m^3$ /年と推計され、供給ポテンシャルの 47.5% となった（表-3）。九州の供給ポテンシャルに対する利用可能割合が 67.3% と高い値を示した。これは九州が東北や関東同様に推計された収穫コストが平均的に低く（図-1）、さらに木材価格が高いヒノキも多いことなどが要因だと考えられる。北海道は運搬距離が長い（J-Stage 電子付録図-1, 2）、収穫コストが高くなっているが、実際には大型機械により低コストで作業が行われているところも多いと考えられる。本試算では全国一律で地形量によって作業システムと機械サイズを決定しているため（Battuvshin *et al.* 2020）、今後は地域に適した作業システム

や機械サイズを設定する必要がある。また、利用可能と判断された面積割合は（表-1）、どの地方においても供給ポテンシャルに対する利用可能量の割合（表-3）と同程度であった。一方、利用可能と判断された小班数割合は、北海道で面積割合より小さく、他の地方では大きかったことから、北海道では大きな面積の小班を中心に、一方、他の地方では面積が小さな小班においても利用可能になったと推察される。北海道では運搬距離が長く、今回の試算においては収穫コストが高くなっている場所があることから（図-1）、補助金の適用外である 5 ha 未満の小班で利用不可となり、5 ha 以上の大きな小班が比較的多く利用可能になったものと考えられる。一方、他の地方は運搬距離が短く、集荷先に近い小面積の都市近郊林や里山のような小班においても比較的多く利用可能になったものと考えられる。

Battuvshin *et al.* (2020) では福島県、茨城県、栃木県、群馬県の供給ポテンシャルに対する利用可能量の割合を 38, 97, 72, 95% と推計している。本研究では 25.4, 26.9,

表-3. 地方別用材・未利用材の供給ポテンシャル・利用可能量と供給ポテンシャルに対する利用可能量の割合

地方	用材		未利用材		割合 (%)
	利用可能量 (m^3)	供給ポテンシャル (m^3)	利用可能量 (m^3)	供給ポテンシャル (m^3)	
北海道	5,338,418	9,995,649	1,067,684	1,999,130	53.4
東北	5,296,613	13,271,560	1,059,323	2,654,312	39.9
関東	1,297,316	3,852,232	259,463	770,446	33.7
中部	5,072,960	10,267,833	1,014,592	2,053,567	49.4
近畿	3,546,555	8,254,251	709,311	1,650,850	43.0
中国	3,476,096	7,528,963	695,219	1,505,793	46.2
四国	1,540,131	4,130,855	308,026	826,171	37.3
九州	5,512,582	8,188,992	1,102,516	1,637,798	67.3
全国	31,080,672	65,490,336	6,216,134	13,098,067	47.5

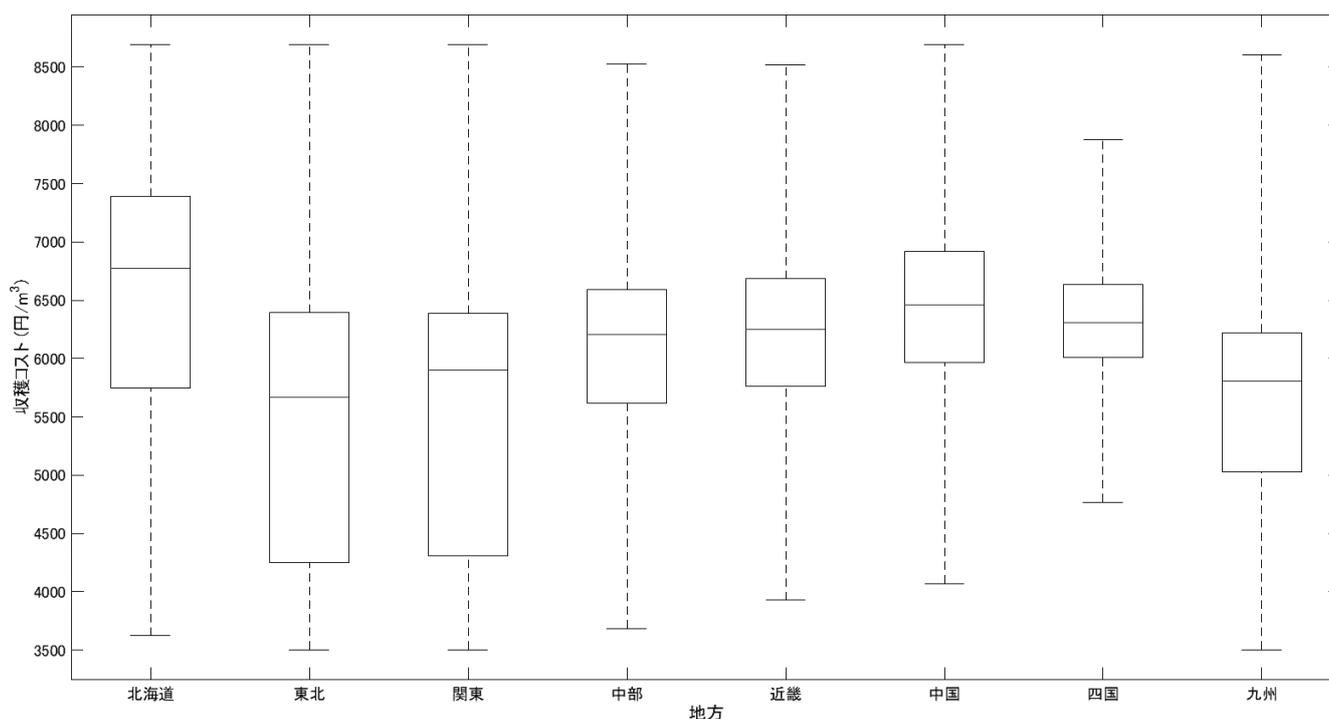


図-1. 地方別収穫コスト

中央値、上位四分位数、下位四分位数、外れ値でない最小値と最大値を示す。

35.2, 40.7%と小さい値となっているが、これは Battuvshin *et al.* (2020) は間伐補助金を5 ha 未満の小班にも適用しているためである。一方、Matsuoka *et al.* (2021) は青森県、岩手県、宮城県、秋田県、山形県において、本研究と同様、間伐補助金を5 ha 以上の小班に適用しているが、供給ポテンシャルに対する利用可能量の割合は48.8, 40.0, 41.5, 32.0, 28.6%で、本研究の45.6, 41.5, 53.9, 48.5, 22.0%と近い値であった。ただし、結果が異なる理由は、Matsuoka *et al.* (2021) は平成30年木材需給報告書(林野庁 2021a)を使っているのに対して、本研究では令和元年木材需給報告書(林野庁 2021a)を使っていることが主原因である。木材価格により結果が異なるため、木材価格の設定、また結果の解釈には注意を要する。また、本研究においても間伐補助金を5 ha 以上の全ての小班に適用しているが、実際には補助金には限りがあるため、適正な補助金の利用を考慮した推計を行う必要がある(守口ら 2016)。さらに、この利用可能量を実際に利用する際には、作業を行う人・機械の確保や、伐採後の更新作業の労力が供給できるのかも検討する必要がある。

2. 素材生産量・利用可能量・需要量との比較

利用可能量は用材では素材生産量の144.9%、未利用材は木材チップ利用量の106.9%となった(表-4, 5)。用材の利用可能量は東北と関東で100%を若干下回るが、ほぼ現状の素材生産量を上回る値として推計された。未利用材の利用可能量は東北や九州などの木材チップ利用量が多い地方や、関東や四国などの資源量が少ない地方で現在の木材チップ利用量を下回る値として推計された。これらの地方では他の地方から未利用材が移入しているものと考えられる。

また、利用可能量は全国では需要量の71.6%となった

表-4. 地方別用材利用可能量・素材生産量と素材生産量に対する利用可能量の割合

地方	利用可能量 (m ³)	素材生産量 (m ³)	割合 (%)
北海道	5,338,418	3,335,000	160.1
東北	5,296,613	5,526,000	95.8
関東	1,297,316	1,336,000	97.1
中部	5,072,960	1,901,000	266.9
近畿	3,546,555	1,155,000	307.1
中国	3,476,096	1,707,000	203.6
四国	1,540,131	1,337,000	115.2
九州	5,512,582	5,148,000	107.1
全国	31,080,672	21,445,000	144.9

資料：林野庁(2021a)。

表-6. 地方別未利用材利用可能量・需要量*と需要量に対する利用可能量の割合

地方	利用可能量 (m ³)	需要量 (m ³)	割合 (%)
北海道	1,067,684	1,770,810	60.3
東北	1,059,323	1,037,980	102.1
関東	259,463	198,512	130.7
中部	1,014,592	1,548,730	65.5
近畿	709,311	824,600	86.0
中国	695,219	542,199	128.2
四国	308,026	407,700	75.6
九州	1,102,516	2,355,253	46.8
合計	6,216,134	8,685,784	71.6

*5 MW 当たり 100,000 m³ (農林水産省 2015) として試算。

(表-6)。現状の木材チップ利用量に対して不足していた四国と九州に加えて、北海道・中部・近畿で不足するという結果であった。本研究では規模の効果による単位発電出力当たりの需要量の変化や、直接燃焼発電と比較して効率の良いガス化発電などを考慮に入れていない。また、FITの認定を受け、未利用木質を燃料として稼働している発電所は未利用材を100%利用する想定で推計しているが、実際には未利用木質の発電所においても他の燃料種別の木質を受け入れる場合もある。逆に一般木質等の発電所においても未利用材を利用、さらに、FIT認定外の発電所や熱利用施設を考慮に入れていないことから、本推計が実情をすべて表しているものではないが、地域における利用可能量に関する参考情報は提供しているものと考えられる。

現在、戦後の拡大造林による人工林が主伐期を迎えているが、再造林や持続可能な森林経営を担保するために一部の都道府県や市町村による追加の造林補助金により造林費用の100%補助が行われる場合がある。そこで造林補助率100%として推計したところ、需要量8,685,784 m³/年に対して利用可能量は9,221,428 m³/年と、全国割合は71.6%から106.2%となり、全国的には需要量を満たす未利用材の供給が可能となると推計された。地方においても北海道や九州において大幅に不足するものの、中部が100%を若干下回る以外は他の地方は需要を満たす利用可能量が推計された(表-7)。

北海道では用材の運搬において共販所が少なく、製材所への直送が一般的である(酒井ら 2017)。そこで、用材の集荷先を道内の代表的な製材工場(北海道地区広域原木流通協議会 2017, J-Stage 電子付録付図-6)に設定して利用可能量を推計した。需要量に対する利用可能量の割合は

表-5. 地方別未利用材利用可能量・間伐材等由来木材チップ利用量と木材チップ利用量に対する利用可能量の割合

地方	利用可能量 (m ³)	木材チップ利用量 (m ³)	割合 (%)
北海道	1,067,684	746,788	143.0
東北	1,059,323	1,119,578	94.6
関東	259,463	315,808	82.2
中部	1,014,592	526,469	192.7
近畿	709,311	443,073	160.1
中国	695,219	592,887	117.3
四国	308,026	413,450	74.5
九州	1,102,516	1,655,082	66.6
全国	6,216,134	5,813,135	106.9

資料：林野庁(2021b)。

表-7. 地方別未利用材利用可能量(造林補助率100%)・需要量*と需要量に対する利用可能量の割合

地方	利用可能量 (m ³)	需要量 (m ³)	割合 (%)
北海道	1,226,481	1,770,810	69.3
東北	1,711,279	1,037,980	164.9
関東	355,895	198,512	179.3
中部	1,481,938	1,548,730	95.7
近畿	837,650	824,600	101.6
中国	1,602,461	542,199	295.5
四国	570,472	407,700	139.9
九州	1,435,251	2,355,253	60.9
合計	9,221,428	8,685,784	106.2

*5 MW 当たり 100,000 m³ (農林水産省 2015) として試算。

60.3% (表-6) から 64.7%へ増加したが、集荷先が共販所の場合と大きくは変わらない結果となった。これは用材の集荷先に加えて未利用材の集荷先も少なく、運搬コストが高くなりやすいことが原因と考えられる。発電所の燃料需要に加え、敷料・パーク堆肥原料などへの需要に対応できるように市町村、数市町村単位で中間集積を設置するエリアが増えている (酒井ら 2017)。このことから、中間集積を集荷先に加えることで運搬コストを低減し、利用可能割合の増加が期待できる。なお、北海道以外でも直送や中間集積で大型トラックに載せ替えて長距離運搬を行う地方も増えてきたことから、地域に適したサプライチェーンを調査し、より現実に即した利用可能量推計を行う必要がある。

中国地方においては、利用可能量の多くが島根県に集荷されていた。これは島根県が周辺県よりも未利用材価格が高く、未利用材の集荷先として選ばれやすかったためだと考えられる。岩岡ら (2017) は発電出力 1 MW 以上になると県外から燃料調達する事例が増えることから、発電効率を確保するための最低規模である 5 MW 以上の木質バ

イオマス発電所が各県で稼働すると、隣接県間で燃料調達が競合し調達困難になることを指摘している。木質バイオマス発電所の規模や未利用材の価格差によって、中国地方では未利用材調達の競合が起きていることが考えられる。また、九州においては需要量の合計が供給ポテンシャルを超えているため、需要量を満たせないという結果だった。したがって、供給ポテンシャルや利用可能量に見合った適切な発電施設の設置計画が望まれる。

3. 作業システム別利用可能量

本研究で推計した収穫コストが最も高い作業システムとなったのは 3-4t ウィンチであり (図-2)、供給ポテンシャルに対する利用可能量の割合が最も低くなっているのも 3-4t ウィンチであった (表-8)。これは 30° 以上の急傾斜地での使用を想定し (表-2)、また、生産性が低く想定されているためである (Battuvshin *et al.* 2020)。最も利用可能割合が大きい作業システムは CTL (ハーベスタ・フォワード) で、利用可能割合は 57.5%であった。地形的には CTL も導入可能な地域があるが (J-Stage 電子付録付図-5)、

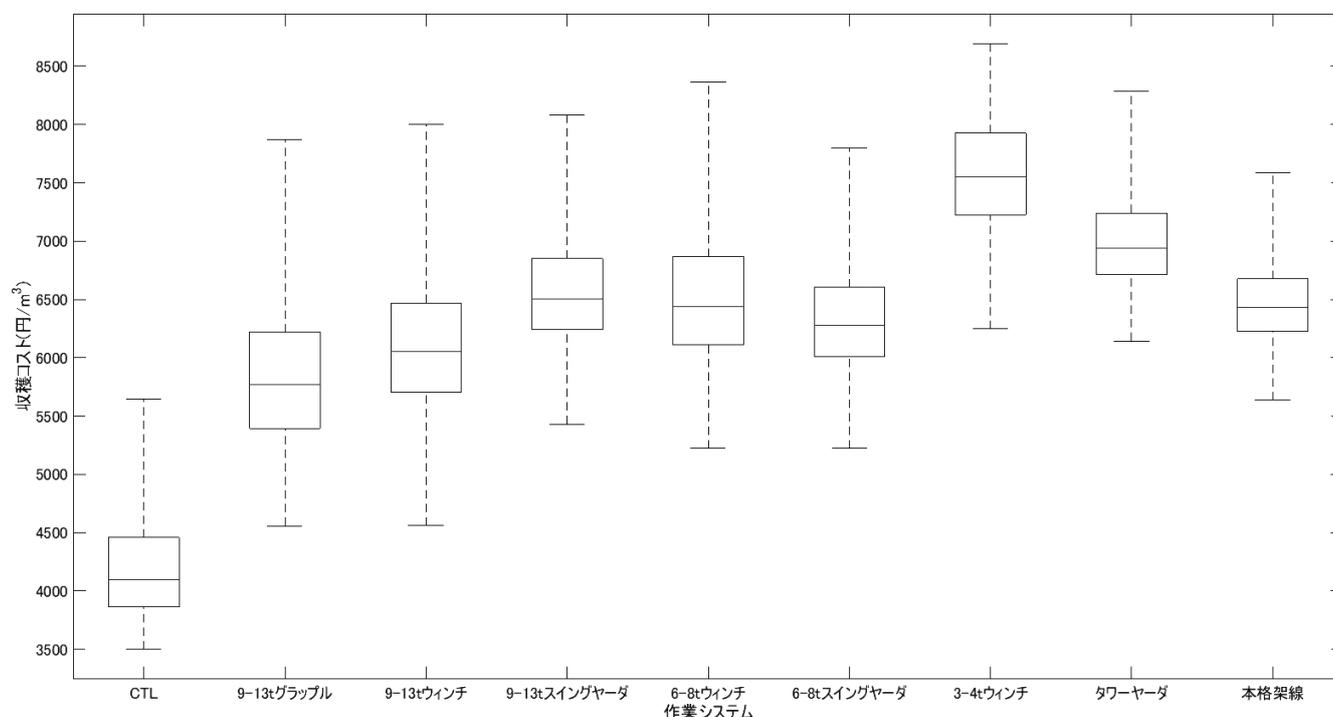


図-2. 作業システム別収穫コスト

中央値, 上位四分位数, 下位四分位数, 外れ値でない最小値と最大値を示す。

表-8. 作業システム別用材・未利用材の供給ポテンシャル・利用可能量と供給ポテンシャルに対する利用可能量

作業システム	用材		未利用材		割合 (%)
	利用可能量 (m³)	供給ポテンシャル (m³)	利用可能量 (m³)	供給ポテンシャル (m³)	
CTL	5,755,643	10,009,154	1,151,129	2,001,831	57.5
9-13t グラップル	5,061,989	9,097,230	1,012,398	1,819,446	55.6
9-13t ウィンチ	4,596,522	9,278,091	919,304	1,855,618	49.5
9-13t スイングヤーダ	3,172,324	7,759,032	634,465	1,551,806	40.9
6-8t ウィンチ	1,028,301	2,486,812	205,660	497,362	41.4
6-8t スイングヤーダ	4,147,712	12,490,821	829,542	2,498,164	33.2
3-4t ウィンチ	53,881	182,881	10,776	36,576	29.5
タワーヤーダ	1,283,427	3,624,022	256,685	724,804	35.4
本格架線	5,877,182	11,903,910	1,175,436	2,380,782	49.4
車両系	16,465,401	31,054,168	3,269,807	6,210,834	53.0
架線系	14,480,647	35,777,785	2,854,408	7,155,557	40.5

表-9. 作業システム別補助金適用小班数と面積の割合

作業システム	補助金適用有		補助金適用無	
	小班数(%)	面積 (%)	小班数(%)	面積 (%)
CTL	2.3	47.4	97.7	52.6
9-13t グラップル	3.0	50.8	97.0	49.2
9-13t ウィンチ	4.3	60.3	95.7	39.7
9-13t スイングヤーダ	5.3	69.2	94.7	30.8
6-8t ウィンチ	6.5	71.8	93.5	28.2
6-8t スイングヤーダ	7.2	76.5	92.8	23.5
3-4t ウィンチ	7.2	72.7	92.8	27.3
タワーヤーダ	9.6	80.6	90.4	19.4
本格架線	9.9	79.5	90.1	20.5
車両系	3.3	55.5	96.7	44.5
架線系	7.6	76.8	92.4	23.2

実際には北海道や東北、長野の一部でしか利用されていない。海外では生産性や労働安全向上のために、ケーブルアシストで林地攪乱を抑えながら駆動力を補って傾斜地でもCTLが使われていることから、今後、日本でもCTLの導入・普及が期待される。また、作業システムを車両系(CTL、9-13t グラップル、9-13t ウィンチ、6-8t ウィンチ、3-4t ウィンチ)と架線系(9-13t スイングヤーダ、6-8t スイングヤーダ、タワーヤーダ、本格架線)で集計すると、未利用材供給ポテンシャルは車両系で6,210,834 m³/年、架線系は7,155,557 m³/年、利用可能量は車両系で3,269,807 m³/年、架線系では2,854,408 m³/年と、利用可能割合は車両系53.0%、架線系40.5%と推計された。収穫コスト的には車両系、特にCTL、9-13t グラップル、9-13t ウィンチが低いが(図-2)、架線系は間伐補助金の適用条件(小班面積5 ha以上、搬出材積10 m³/ha以上)を満たす小班が面積割合で76.8%、車両系では55.5%となっており、タワーヤーダや本格架線は奥山急傾斜地で収穫コスト的には不利だが、大面積であるため補助金の適用を受けやすく、利用可能割合は車両系と比較して、大きくは下回らない結果となった(表-9)。ただし、実際の作業においては集約化により団地を形成して、路網整備、大型機械を効率的に使いながら作業を行っており、Matsuoka *et al.* (2021)は東北地方において集水域で団地形成を試み、利用可能量が2倍程度増加することを示している。今後、全国においても団地形成を考慮した利用可能量推計を行う予定である。

V. おわりに

本研究では、まず都道府県が管理する民有林の森林GISと林野庁が管理する国有林の森林GISを取得し、地域森林計画を基に施業条件を設定、傾斜や起伏量といった地形量から作業システムを設定した。次に、GISを用いて収穫コストの算出、樹種別の木材売上、山元立木価格、造林費を用いて収支を算出することで、経済的に利益が得られる小班からの供給ポテンシャルを利用可能量として推計した。その結果、供給ポテンシャルは用材65,490,336 m³/年、未利用材13,098,067 m³/年と推計された。利用可能量は用材31,080,672 m³/年、未利用材6,216,134 m³/年と推計され、供給ポテンシャルの47.5%との結果を得た。また、未利用材利用可能量と需要量を比較した結果、需要量に対する利用可能量の割合は71.6%となり、未利用材の安定供給は困

難であることが示唆された。ただし、再造林を担保するために造林補助率を100%として推計したところ、全国での需要量を満たす未利用材供給が可能になると推計された。森林・林業基本計画(林野庁2016)における令和7年の国産材供給量の目標は40,000,000 m³/年、その内の燃料材は8,000,000 m³/年とされており、持続的な森林経営を行う上で重要となる再造林を担保することで目標を満たす供給が期待される。

本研究ではYamamoto *et al.* (2019)やBattuvshin *et al.* (2020)が開発したMATLABを用いた高速演算可能な手法を用いることにより、FITで未利用木質バイオマス発電設備に認定され、すでに稼働している日本全国の発電所を対象に、小班単位で未利用材の利用可能量を推計することが可能となった。しかしながら、本研究の利用可能量推計においては様々な因子を仮定して設定しており、本文で記載した注意点以外にも下記の点について、今後、検討を要する。現状、間伐・主伐材は全量利用する想定で、15年、20年、25年といった保育間伐期の副林木も収穫量に含まれている(Battuvshin *et al.* 2020)。これらの用材率75%は現実的ではなく、當山ら(2012)のように林齢に応じて用材率を設定するなど、用材率の設定は今後の課題である。ただし、このような保育間伐期の副林木を収穫しても伐期全体で採算がとれるところからの供給ポテンシャルを利用可能量と推計している本研究の試算は、地域の資源を無駄なく利用した場合の利用可能量と捉えられる。保育間伐期の副林木は含めない、また、逆に、一部地域で使われ始めている枝葉も含めて試算するなど今後の課題である。また、歩留まり90%(用材75%、未利用材15%)も林齢、間伐・主伐、地域に応じた設定を検討する必要がある。久保山(2014)は皆伐の歩留まりを統計値75%から低コスト化による全量利用で90%に、間伐で65%から85%に向上するとしている。また、日本木質バイオマスエネルギー協会(2018)では皆伐の歩留まり90%、間伐60%で、うち未利用材20%を初期値として、すでにバイオマス利用が始まっている地域においては、実際の採材状況に基づき、設定することとしている。さらに、現状は未利用材としてチップ用材(C材)と競合する丸太を利用することが多いことから、今回の試算では枝葉ではなく、丸太を未利用材とし、競合するC材価格を用いて試算したが、まだデータ数が少ないものの、枝葉も含めて、FITの調達価格等算定委員会(経済産業省2021)で公表されている価格の利用も今後の検討課題である。

謝辞

本研究はJSPS科研費16KK0168と17K12849の助成を受けて行われた。また、森林簿、森林計画図のデータを交付いただいた各都道府県庁の方々に深く感謝いたします。

引用文献

- Battuvshin B, Matsuoka Y, Shirasawa H, Toyama K, Hayashi U, Aruga K (2020) Supply potential and annual availability of timber and forest biomass resources for energy considering inter-prefectural trade in Japan. *Land Use Policy* 97: 104780

- 後藤純一 (2016) 平成 27 年度林業機械化推進シンポジウム 林業の成長産業化と求められる作業システム. 機械化林業 752: 1-8
- 北海道地区広域原木流通協議会 (2017) 北海道地区広域流通構想. 地域材の安定的・効率的な供給体制の構築: 137-149
- 井内正直 (2004) バイオマスエネルギー利用計画支援システムの開発—賦存量データベース及び収集コスト評価モデル. 電中研報 Y03023: 1-26
- 岩岡正博・小野 梓・松本 武 (2017) 木質バイオマス発電の燃料はどのような形でどこから集められ足りているのか?. 日林誌 99: 220-225
- Kamimura K, Kuboyama H, Yamamoto Y (2012) Wood biomass supply costs and potential for biomass energy plants in Japan. *Biomass Bioenergy* 36: 107-115
- 経済産業省 (2021) 調達価格等算定委員会. <https://www.meti.go.jp/shingikai/santecii/> (2021 年 2 月 27 日参照)
- Kinoshita T, Ohki T, Yamagata Y (2010) Woody biomass supply potential for thermal power plants in Japan. *Applied Energy* 87: 2923-2927
- 久保山裕史 (2014) 低質材の供給拡大の可能性について. <https://www.npobin.net/research/data/143thKuboyama.pdf> (2021 年 2 月 27 日参照)
- 小林洋司 (1997) 森林基盤整備計画論—林道網計画の実際—. 日本林道協会
- Matsuoka Y, Shirasawa H, Hayashi U, Aruga K (2021) Annual availability of forest biomass resources for woody biomass power generation plants from subcompartments and aggregated forests in Tohoku region of Japan. *Forests* 12: 71
- 松本光朗 (2021) 収穫表作成システム LYCS3.3. <http://www2.fpri.affrc.go.jp/labs/LYCS/> (2021 年 2 月 27 日参照)
- 守口 海・植木達人・大塚 大・斎藤仁志 (2016) 造林・育林費用の許容上限の簡易な計算方法. 日林誌 98: 31-38
- 日本不動産研究所 (2018) 田畑価格・山林価格調査 (2018 年 3 月末現在). <https://www.reinet.or.jp/?p=21237> (2021 年 2 月 27 日参照)
- 日本木質バイオマスエネルギー協会 (2018) 燃料の供給可能量推計ツールの実用化に向けた改良・普及調査成果報告書. <https://www.jwba.or.jp/activity/fuelwood-survey/> (2021 年 2 月 27 日参照)
- Nivala M, Anttila P, Laitila J, Salminen O, Flyktman M (2016) A GIS-based methodology to estimate the regional balance of potential and demand of forest chips. *J GIS* 8: 633-662
- Nord-Larsen T, Talbot B (2004) Assessment of forest-fuel resources in Denmark: Technical and economic availability. *Biomass Bioenergy* 27: 97-109
- 農林水産省 (2015) 小規模な木質バイオマス発電の推進について. https://www.meti.go.jp/shingikai/santecii/pdf/018_02_00.pdf (2021 年 2 月 27 日参照)
- 岡田直次 (2015) 国産材名鑑. 日刊木材新聞社, 329-398
- Ranta T (2005) Logging residues from regeneration fellings for biofuel production - A GIS - based availability analysis in Finland. *Biomass Bioenergy* 28: 171-182
- 林野庁 (2012) 発電利用に供する木質バイオマスの証明のためのガイドライン. http://www.rinya.maff.go.jp/j/riyou/biomass/hatudenriyou_guideline.html (2021 年 2 月 27 日参照)
- 林野庁 (2016) 森林・林業基本計画. <https://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/plan/> (2021 年 2 月 27 日参照)
- 林野庁 (2020) 木材需要の創出・輸出力強化対策のうち地域内エコシステム「構築事業のうち地域内エコシステム」技術開発・実証事業. https://www.rinya.maff.go.jp/j/supply/hojyo/02koubo_2/02mhk0201.html (2021 年 2 月 27 日参照)
- 林野庁 (2021a) 木材需給報告書. <http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/mokuzai/index.html#y> (2021 年 2 月 27 日参照)
- 林野庁 (2021b) 木質バイオマスエネルギー利用動向調査. https://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/mokusitu_biomass/index.html (2021 年 2 月 27 日参照)
- 酒井明香・津田高明・八坂通泰 (2017) 北海道における木質バイオマス発電所向け未利用材の供給ポテンシャルの試算. 日林誌 99: 233-240
- 資源エネルギー庁 (2021) なっとく! 再生可能エネルギー. http://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/kaitori/index.html (2021 年 2 月 27 日参照)
- 田中和博 (2020) 森林計画学入門. 朝倉書店, 134
- 栃木県 (2016a) 平成 28 年度造林補助事業標準単価表. 栃木県
- 栃木県 (2016b) 平成 28 年度森林作業道標準単価表. 栃木県
- 當山啓介・龍原 哲・白石則彦 (2012) 多様な条件下でのシミュレーションによるスギ人工林の伐期と間伐体系の検討. 日林誌 94: 269-279
- Yamaguchi R, Aruga K, Nagasaki M (2014) Estimating the annual supply potential and availability of timber and logging residue using the forest management records of the Tochigi prefecture, Japan. *J For Res* 19: 22-33
- Yamamoto T, Aruga K, Shirasawa H (2019) Availability for small-scale woody biomass power generation from the view of forest resources in Tochigi Prefecture, Japan. *Int J For Eng* 30: 210-217
- Yoshioka T, Sakai H (2005) Amount and availability of forest biomass as an energy resource in a mountainous region in Japan: a GIS-based analysis. *Croat J For Eng* 26: 59-70