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

酒井明香^{*・1}・津田高明²・八坂通泰³

本稿では、北海道にて稼働した3基の木質バイオマス発電所へ向けた未利用材の供給ポテンシャルを針葉樹人工林の未利用材について試算した。試算にあたり北海道内での原木輸送費や林業事業者によるチップ化費、発電所が内部収益率8%を維持できる未利用材への最大支払額等を考慮した。未利用材への支払額上限の推計には木質バイオマス発電・熱電併給事業評価シミュレーターを使用した。その結果、各発電所の未利用材への最大支払額は約6,200~12,500円/m³と推定された。結論として、各発電所はおおむね50kmを超える輸送で未利用材集荷を実施してもIRR8%は維持できたが、未利用材供給ポテンシャルは1.2~8.8万m³/年と、各発電所の計画認可時の未利用材需要量には達しなかった。

キーワード：木質バイオマス発電、未利用材供給ポテンシャル、内部収益率、未利用材

Sayaka Sakai,^{*・1} Takaaki Tsuda,² Michiyasu Yasaka³ (2017) Calculating the Supply Potential of Unused Wood for Woody Biomass Power Generation Plants in Hokkaido, Japan. J Jpn For Soc 99: 233-240 This paper examines potential for three wood biomass power generation plants operating in Hokkaido, especially in terms of unused wood, which is called D rank wood, in an artificial conifer forest. We considered transportation cost and chipping cost by a forestry organization in Hokkaido, and the maximum purchase price of unused wood that would maintain the power generation plant's 8% internal rate of return. We used the business simulator for woody biomass power generation and cogeneration to estimate the maximum purchase price. In conclusion, the price was estimated to be about ¥6,200-¥12,500/m³. We conclude that even though every power generation plant could maintain their 8% IRR with D rank wood sourced from nearly 50 km away, thus giving an annual supply potential of 12,000-88,000 m³, this which would fall short of the required demand volume when the plants were approved.

Key words: wood biomass power generation, supply potential of unused wood, internal rate of return, unused wood

I. はじめに

再生可能エネルギー固定価格買取制度（以下「FIT 制度」）のもと認可された木質バイオマス発電所（以下「発電所」）の多くは、平成28年度中に稼働を迎える。地域で複数の発電所が同時に稼働することで燃料用の林地未利用材（以下「未利用材」と表記）の供給が間に合わず、製紙向け原料材等小径木の木材市況や森林資源への影響が懸念される（久保山 2014）。

一方、地域資源を利用した安定的なエネルギー供給のためには発電所が安定した収益性を維持することが必要であり、発電規模別の損益分岐点にある原料費の試算（柳田ら 2015）や、任意の内部収益率を達成するための原料購入価格を推計するシミュレーターの開発がされている（古俣ら 2015）。今後は発電所の収益性も考慮に入れた未利用材供給ポテンシャル試算が必要と考えられる。

本稿では、北海道で平成27~28年度中に稼働した発電所3基を対象に、その発電所の内部収益率を考慮した“未利用材への最大支払額”に対する供給ポテンシャルの導出を試みる。さらに試算結果と発電所のFIT認可時の未利用材需要量を比較し、市況への影響についても若干の考察を加える。

II. 対象地域の概要

1. 北海道の発電所の動向と原木生産・流通

前述の3発電所は紋別市（A 発電所）・江別市（B 発電所）・苫小牧市（C 発電所）の各市町村でFIT認可を受けており、現在稼働中である。3発電所向け未利用材需要の合計は約61万m³/年となっており（北海道水産林務部 2014）、平成26年の北海道の木質バイオマス消費量60万m³（うち林地未利用材約12.3万m³）に匹敵する需要である（北海道水産林務部林務局林業木材課 2016b）。

北海道における過去5年の平均年間木材生産量は、立木材積で針葉樹が約400万m³/年、広葉樹が60万m³/年である（北海道水産林務部 2016b）。生産量の約6割は一般民有林（以下「民有林」）、約3割が国有林、残り約1割が北海道有林（以下「道有林」）である。

北海道水産林務部（2015）によれば、北海道内の事業者における針葉樹人工林の集材方法（侵入木としての広葉樹も含む）は全幹：全木：短幹＝6：3：1と全幹・全木集材の割合が大きいため、多くの未利用材は山土場に集積されている。一方、平成23年に国有林の請負販売での地曳集材が制限されて以来、林業事業者のフォワーダ保有台数が41台（平成23年度）から87台（平成26年度）と倍増し国有林における短幹集材が増加中と推察される。道内ではバイオマスフォワーダのような未利用材専用の集荷用機械は導入が進んでいないため（北海道水産林務部 2016a）、

*連絡先著者（Corresponding author）E-mail: sakai-sayaka@hro.or.jp

¹ 北海道立総合研究機構森林研究本部 〒079-0198 北海道美瑛市光珠内町東山（Forest Research Department, Hokkaido Research Organization, Higashiyama, Bibai, Hokkaido 079-0198, Japan）

² 北海道立総合研究機構林業試験場道南支場 〒041-0801 北海道函館市桔梗町372-2（Forestry Research Institute, Donan Station, Hokkaido Research Organization, 372-2 Kikyochō, Hakodate 041-0801, Japan）

³ 北海道立総合研究機構林業試験場 〒079-0198 北海道美瑛市光珠内町東山（Forestry Research Institute, Hokkaido Research Organization, Higashiyama, Bibai, Hokkaido 079-0198, Japan）
（2017年2月7日受付、2017年9月14日受理）

未だ短幹集材では多くの未利用材は山土場まで集積されていない。また林業事業体の保有する自走式木材破砕機（以下「破砕機」）は150～350 kW級を中心に統計を取り始めた平成13年度の1台から平成26年には50台に増加し（北海道水産林務部 2016a），中間集積地や発電所ストックヤード等で稼働中である。

流通に関しては，道内では原木市場が極めて少なく相対取引での工場への直送が一般的で（須本・遠藤 2006），長距離の原木輸送が行われている。特にトドマツは顕著で，全国の原木平均輸送距離43 km（林野庁企画課 2015）に対し，北海道内のトドマツ原木の平均輸送距離は製材向けで61 km，合板向けで116 km，製紙用原料向けで117 kmとなっている（津田・渡辺 2017）。

2. 北海道における未利用材

北海道では，採材にあたり欠点部を除きつつ検尺して玉切りする，単木当たりの利益最大化を図る方法が一般的で，根元未利用部，曲がり，腐朽材など長さ1 mに満たない不定形短尺材が山土場に多く残置される（図-1）。また末口6～14 cmの小径材はC材として出荷され，2012年の時点で各事業体の限界径級は末口6 cmであることが多かった（酒井ら 2015）。よって本稿では全木・全幹集材後に採材され，未利用部として土場に集積した人工林針葉樹のD材（元口6 cm以下の梢端を含む）を未利用材と定義し供給ポテンシャルの試算対象とする。

なお，著者らの調査（酒井ら 2015）では全幹集材時に，採材後の山土場に集積するこれら未利用の部位（引用文献中では「林地残材」）の立木幹材積に占める割合は約17%であった。これは中澤ら（2006）など他府県の知見と比べ同程度かやや低めの数値である。著者らはこの割合と北海道地域森林計画の森林経営計画（平成19～24年）等を元に全幹集材時の林地残材（本稿での未利用材と同義）の潜在的利用可能量を，約42.8万m³/年と試算した（酒井ら 2015）。北海道では平成20年頃から未利用材の利用が進んだが（北海道水産林務部林務局林業木材課 2016b），多くの実証事業（北海道 2008，2009；北海道上川総合振興局 2016）を経て，枝条に比較し集荷効率の良い図-1のような不定形短尺材等が優先的に集荷されている。北海道では現在，発電所の燃料需要だけでなく敷料・パーク堆肥原料などへの需要に対応できる未利用材の集積地として1市町

図-1. 本稿の対象とする未利用材（不定形短尺材）

村あるいは数市町村単位で，「中間集積地」（中間土場・里土場・サテライトなど様々な名称で呼ばれる）を設置するエリアが増加している。北海道庁でも中間集積地の設置による林地未利用材の流通効率化のモデル事業を実施中である（北海道 2017）。

本稿では供給ポテンシャル試算の対象である「未利用材」をあらためて以下のように限定する。まず①全幹集材後に採材され，未利用部として山土場に集積した人工林針葉樹の不定形短尺材（元口6 cm以下の梢端を含む），同様に②全木集材後に山土場に集積した未利用部のうち枝条を除く人工林針葉樹の不定形短尺材とする。すなわち，山土場に集積しない「短幹集材」後の未利用部は対象としない。この定義は著者らの前稿（酒井ら 2015）で扱った「全幹集材時の林地残材」と同義であり，そこで導出した林地残材率を“未利用材発生率”として試算に用いることとする。

III. 研究方法および資料

次に示すIII. 1.～III. 5.の手順で未利用材供給ポテンシャルの推計を行う。本稿で用いる未利用材の単位は，原木・チップいずれの状態であっても全て層積ではなく実材積m³とする。なお未利用材の流れとしては，II. 1.の流通実態を考慮し図-2に示す発電所と素材生産事業体の相対取引に基づく輸送を仮定し市場は経由しない。また本稿では山土場の未利用材を，各市町村が管理する中間集積地を経由し，そこから発電所まで再輸送するモデルを想定した。なお，未利用材の納品形態（原木あるいはチップ）は各発電所で異なる。未利用材の供給側からみた場合，納品の方法として①原木で納入，②山土場でチップ化して納入，③山土場から発電所の中間地点でチップ化し納入，④発電所敷地内のストックヤードでチップ化し納入，⑤その他（チップ化の委託等）が考えられる。①の場合は発電所側が有する破砕機でチップ化することとなる。実際の納品の実態は複雑であり，①～⑤の割合等は不明であるが，ここでは各発電所に出荷している森林組合や素材生産事業体への事前聞き取りを参考に，年間需要量が20万m³を超えるA・B発電所は④のチップ納入（ストックヤードでチップ化後の納入）を想定し，年間需要量が約10万m³のC発電所は原木納入100%（①のパターン）を想定した。

1. 市町村別未利用材潜在的利用可能量の推定

最初に全道の山土場（以下「山土場」）に発生する未利用材潜在的利用可能量を推定する。北海道の森林経営計画認定率は約70%（平成22年度）であり，著者らは前稿（酒井ら 2015）で森林経営計画（平成19～24年）を元に伐採“予定”の小班から「林地残材集荷可能量」の試算を行ったが，今回は計画認定外の30%を含む伐採“実績”を用い，短幹集材の拡大も考慮した市町村別未利用材潜在的利用可能量の推定を行う。

各市町村の未利用材潜在的利用可能量を，以下の式で定義する。

$$B = \sum_{n=1}^3 \{V_n \cdot Li(1 - F_n)\} \quad (1)$$

B , 対象市町村の未利用材潜在的利用可能量 ($\text{m}^3/\text{年}$); V_n , 市町村内の所管別年間伐採量 ($\text{m}^3/\text{年}$); L_i , 未利用材発生率; F_n , 所管別伐採事業における短幹システム割合。なお, $n=1$, 民有林; $n=2$, 道有林; $n=3$, 国有林。

$V_1 \cdot V_2$ は平成 24~26 年度伐採実績を用い (北海道水産林務部 2016b), V_3 は北海道森林管理局 HP (北海道森林管理局 2016a) より今後 10 年間の市町村別平均伐採量を実績に代えて用いる。 L_i は著者ら (酒井ら 2015) において実測した「林地残材率」(本稿における未利用材発生率と同義) を用い, 0.17 を使用する。 F_1 と F_2 は, 現在の短幹集材の割合を踏まえ 0.1 とし, F_3 は短幹集材が国有林の請負販売の施業要件とされた平成 23 年以來, 請負販売が伐採量全体に占める割合が 48~52% である (北海道水産林務部 2016b) ことから, 短幹集材は全体の約 50% を占めるとみなし 0.5 とする。

2. 未利用材輸送費の設定

10 t 級運搬車 (以下「10 t 車」) に積載された未利用材が図-2 のルートで納品されるまでの輸送費 T を以下のよう

$$T = T_{c1} + T_{c2} \quad (2)$$

T , 未利用材 1 m^3 当たり輸送費 ($\text{円}/\text{m}^3$); T_{c1} , 輸送費 (山土場→中間集積地) ($\text{円}/\text{m}^3$); T_{c2} , 輸送費 (中間集積地→発電所) ($\text{円}/\text{m}^3$)。

また中間集積地は伐採現地を含む市町村の市街地 (ここでは役場周辺とする) にあることを想定する。 T_{c1} の区間は林内路網の走行を含むため平均速度が抑えられ, 曲線半径や公道までの距離で費用のばらつきが大きいと予想される。北海道庁の委託事業による実証調査 (北海道 2008, 2009; 北海道上川総合振興局 2016) は 10 t 車とグラップル 1 台の組み合わせで積み込み運搬を行っている。結果をみると林内の走行速度は時速 5~10 km 程度であった。また T_{c1} の区間の距離や費用について, 山土場と中間集積地との位置関係により異なるものの, 平均道程距離は 18.5 km で, 平均費用は 1 m^3 当たり 1,240 円となった (ダンプ

アップによる荷下ろしを含む)。本稿では, これを参考に $1,200 \text{ 円}/\text{m}^3$ で固定とした。

一方, T_{c2} の区間は舗装道路となるため巡航速度に近い走行が可能で費用はおおむね距離に比例すると予想される。 T_{c1} の区間と同様, 10 t 車とグラップル各 1 台の積込とダンプアップによる荷下ろし, 輸送を仮定したときの T_{c2} について以下の式で定める。

$$T_{c2} = \sum_{n=1}^2 (Mc_n + L_n + O_n) \div Cp(1-Q)Cy \quad (3)$$

Mc_n , 機械費 ($\text{円}/\text{日}$); L_n , 機械の運転労務費 (間接費込み) ($\text{円}/\text{日}$); O_n , 軽油費 ($\text{円}/\text{日}$) ($n=1$ は 10 t 車, $n=2$ はグラップルとする); Cp , 10 t 車荷台容積 ($\text{m}^3/\text{回}$); Q , 空隙率; Cy , 1 日当たり運搬サイクル数 ($\text{回}/\text{日}$)。

(3)式第 1 項は「1 日当たり輸送費の合計」である。 Mc_n は日本建設機械施工協会 (2016) の供用 1 日当たり換算値 (減価償却費+維持修理費+管理費) を用いる。 L_n は国土交通省 (2016b) の定める北海道地域の労務単価および間接費率 41% 用い, 労務歩掛を適用し運転時間に応じた積算を行う (後述)。軽油単価は北海道経済産業局 (2016) の 2016 年 12 月北海道地区単価による。機械費・労務単価・軽油費の内訳は表-1 に示す。

(3)式第 2 項は「1 日当たり輸送量」であり, Cp は 24 m^3 (幅 $2.4 \times$ 長さ $5.0 \times$ 高さ 2.0) とし, Q は T_{c1} と同様の実証試験の平均値から 0.45 とした (輸送 1 回当たり実材積は 13.2 m^3)。北海道 (2008) における未利用材の実走行試験の速度や輸送可能回数を参考に, グラップル 1 台による未利用材整理と 10 t 車への荷積に 1 回 1 時間を見込み, 平均時速 40 km で 1 日の運転時間が 9 時間を超えない範囲で最低 1 往復以上の輸送を行うと仮定した。以上から輸送距離と 1 日当たり運搬サイクル数・輸送量などを表-2 のように設定した。

なお L_n はさらに土木工事標準歩掛 (国土交通省 2016a) より次式のように定義される。

$$L_n = Up_n \times 1/T_m \times T_d \quad (4)$$

Up_n , 労務単価 ($\text{円}/\text{日}$); T_m , 運転日当たり運転時間 ($\text{時}/\text{日}$); T_d , 1 日当たり実際の運転時間 ($\text{時}/\text{日}$)。

ここで T_m は建設省 (1974) が機械経費積算要領第 4 項

表-1. 機械費・労務単価・軽油費の内訳

車 種	名 称	単 位	数 量	単 価
10 t 車	Up_1 労務単価: 運転手 (特殊) ¹⁾	円/日	1	25,240
	Mc_1 機械費 ²⁾	円/日	1	20,800
	F_1 軽油費 ³⁾	リットル/時	10	110
グラップル	Up_2 労務単価: 運転手 (特殊) ¹⁾	円/日	1	25,240
	Mc_2 機械費 ⁴⁾	円/日	1	14,210
	F_2 軽油費 ³⁾	リットル/時	11	110

¹⁾国土交通省 (2016b) の定める運転手 (特殊) の北海道単価 17,900 円に同省の定める間接費 41% (福利厚生費 23%・安全管理費や宿泊費など 18%) を加算し 10 円以下切り上げ。²⁾日本建設機械施工協会 (2016) の定める普通型ダンプトラック 10 t 級の単価。³⁾燃料消費率は日本建設機械施工協会 (2016) による。単価は北海道経済産業局 (2016) の 2016 年 12 月北海道地区軽油価格による。⁴⁾日本建設機械施工協会 (2016) のバックホウ排出ガス対策型バケットサイズ 0.5 級 11,900 円に組みアタッチメント「供用 1 日当たり換算損料」2,310 円を加算。

図-2. 山土場から発電所までの未利用材の流れ (本稿でのモデルケース)

表-2. 輸送距離と1日当たり運搬サイクル数・輸送量など

中間集積地 ～発電所 片道距離 (km)	輸送時間 ¹⁾ (時/1往復)	積込時間 ²⁾ (時/1往復)	運搬 サイクル ³⁾ C_y (回/日)	輸送量 ⁴⁾ (m^3 /日)	所要時間 ⁵⁾ (時)
25	1.25	1	4	52.8	9
50	2.5	1	2	26.4	7
75	3.75	1	1	13.2	4.75
100	5	1	1	13.2	6
125	6.25	1	1	13.2	7.25

¹⁾平均時速 40 km/h とする。²⁾グラップルによる未利用材整理+10 t 車積込 (1 往復当たり 1 時間) を加算。³⁾輸送時間+積込時間を 1 往復に要する時間とし、1 日の運転時間 (= 所要時間) が 9 時間を超えない範囲で設定。⁴⁾運搬サイクル $C_y \times 13.2 m^3$ (1 台当たり積載量) で計算。⁵⁾ (輸送時間+積込時間) × 運搬サイクル C_y で計算。

で定めており “1 日当たりの規定運転時間” の意味で $4 \leq T_m \leq 7$ の範囲で適用される。 $1/T_m$ は「労務歩掛」と呼ばれる (日本建設機械化協会 2003)。 Up_n には既に間接比率 41% を含む (表-1 解説参照)。

T_d は所定の労働時間 8 時間を基本に実際の運転時間を用い、ここでは前述の通り 9 時間を超えない範囲とした。 T_m と T_d は数値が異なることに注意が必要である。機械労務費の積算結果は表-3 に示す。表-2 および表-3 から、 T_{c2} (中間集積地→発電所の輸送費) を導き、これと T_{c1} を合わせた輸送費 T (表-4) を後述する集荷圏域の推定に用いた。なお T_{c2} の区間におけるルート決定と距離計算は北海道道路距離時間検索システム (土木研究所寒地土木研究所 2015) を用いた。

3. チップ化費の推定

チップ化費について全国林業改良普及協会 (2000) を参考に以下のように定める。

$$C_c = \frac{I}{N} + \left(\frac{L}{6} \right) X_n + F \cdot X_n + I \cdot \frac{\varepsilon}{100 N} + I \cdot \frac{m}{100} \quad (5)$$

$$Sp \cdot X_n$$

C_c , チップ化費 ($\text{円}/m^3$) ; I , 機械基礎価格 (円) ; N , 標準使用年数 (年) ; Sp , システム生産性 ($m^3/\text{時}$) ; X_n , 年間標準稼働時間 (時) ; L , 労務費 (円/日) ; F , 燃料油脂費 (円/時) ; ε , 維持修理費率 (%) ; m , 年間管理費率 (%)。

右辺の分母は年間チップ生産量, 分子第一項は減価償却費, 第二項は年間労務費 (1 日の生産時間=6 時間), 第三項は年間燃料油脂費, 第四項は年間維持修理費, 第五項は年間管理費となる。 I , N , X_n , F , ε , m は日本建設機械施工協会 (2016) の「自走式木材破砕機」の数値, L は (3) 式における L_n と同様に国土交通省 (2016b) の労務単価をもとに積算する。 Sp は林業事業体保有の破砕機によるチップ化を想定し, 道内の汎用機 (150~350 kW 級) を中心に著者らが 2010~2013 年に北海道内で供試した 4 機種 of システム生産性を用いる (表-5)。チップ化は破砕機+グラップル各 1 台に作業員 1 名のシステムで, 破砕機およびグラップルは発電所ストックヤードに設置し重機運搬費は不要とした。

4. 各発電所の未利用材への最大支払額の推定

発電所が一定の利益率を確保しつつ未利用材に支払える単価の上限, 最大支払額 P (以下「最大支払額」) を発電

表-3. 10 t 車およびグラップルの運転労務費 (10 t 車)

運搬距離 片道 (km)	1 日当たり実際の運 転時間 T_d (時/日)	労務歩掛 ¹⁾ $1/T_m$	運転労務費 ³⁾ L_1 (円/日)
25	9	0.143	32,450
50	7	0.143	25,240
75	4.75	0.143	17,120
100	6	0.143	21,630
125	7.25	0.143	26,140

(グラップル)

運搬距離 片道 (km)	1 日当たり実際の運 転時間 T_d (時/日)	労務歩掛 ²⁾ $1/T_m$	運転労務費 ³⁾ L_2 (円/日)
25	4	0.25	25,240
50	2	0.25	12,620
75	1	0.25	6,340
100	1	0.25	6,340
125	1	0.25	6,340

¹⁾10 t 車はいずれの運転時間も $T_m=7$ で計算。²⁾グラップルはいずれの運転時間も $T_m=4$ で計算。³⁾1 日当たり実際の運転時間 × 労務歩掛 × 労務単価 (25,240 円/日)。10 円以下切り捨て。

表-4. 未利用材 1 m^3 当たり輸送費

運搬 距離 片道 (km)	中間集積地～発電 所の 1 日当たり輸 送費合計 (円/日) $\sum_{n=1}^2 (Mc_n + L_n + O_n)$	同左 1 m^3 当たり 輸送費 (円/ m^3) T_{c2}	山土場～ 中間集積地の 1 m^3 当たり 輸送費 (円/ m^3) T_{c1}	未利用材 1 m^3 当たり $T = T_{c1} + T_{c2}$
25	107,440	2,040	1,200	3,240
50	82,990	3,150	1,200	4,350
75	64,905	4,920	1,200	6,120
100	70,790	5,370	1,200	6,570
125	76,675	5,810	1,200	7,010

所ごとに推定する。本稿では, 古俣 (2016) が公表中の木質バイオマス発電・熱電併給事業評価シミュレーター Ver. 2 (以下「シミュレーター」) を用い利益率を算出した。経済産業省「調達価格等算定委員会」(2012) は, 未利用木材区分の発電事業者の適正な利潤確保のための利益率として税引前内部利益率 (Internal Rate of Return : IRR) 8% を提示している。よって本稿も IRR 8% を利益率の基準に設定し, 評価期間は FIT 調達期間と同じ 20 年とした。

利益率の算出に用いた未利用材の品質条件を表-6 に示す。シミュレーターへ入力する各発電所の発電出力, 事業費, 原料消費量は, 北海道留萌振興局 (2013), 紋別市 (2013), 王子ホールディングス (2013), 住友林業 (2014) の公開データから収集した (表-7)。C 発電所のみ事業費が未公表なため, 同時期に操業開始した同規模の事例と同額の設定とした (にいがた経済新聞 2016)。また, 吉岡ら (1994) を参考に, 事業費の 9% は建物に, それ以外は設備に按分した。プラント建設地は借地とし, 敷地面積は発電出力からの自動推計値を用いた。いずれも補助金や助成金の交付は受けないものとした。年間稼働日数は年 330 日, 設備稼働率は 80% とした。

シミュレーターでは原料の低位発熱量と年間稼働日数を基にボイラーの蒸気条件を推定し, 熱収支計算から発電出力を算出する。ここで発電出力の推計値と公表値に発生する誤差に対処するため, 年間売上高算出の理論式を (6) ~ (8) 式のように変更し損益計算に反映させた。

表-5. 破砕機・グラブの仕様と稼働に関わるデータおよび実測したチップ化生産性と生産量

試 験 地	美 唄 市	栗 山 町	津 別 町	別 海 町	
破砕機械	国産 A 社	海外産 B 社	海外産 C 社	国産 D 社	
機械価格 (万円)	3,000 (1,810)	1,650 (1,810)	4,200 (1,810)	2,390 (1,810)	木質破砕機：日本建設機械施工協会 (2016) と聞き取りを 参考に設定 グラブ：全国林業改良普及協会 (2000)
出力 (kW)	239	132.4	247.5	354.5	メーカカタログより
破砕方式	タブ式ハンマーミル	横入れ式ドラムカッタ	タブ式ハンマーミル	タブ式ハンマーミル	同上
燃料消費量 (リットル/時)	42 (11)	24 (11)	42 (11)	72 (11)	木質破砕機：日本建設機械施工協会 (2016) グラブ：全国林業改良普及協会 (2000)
耐用年数 (年)	8 (7.9)	8 (7.9)	8 (7.9)	8 (7.9)	同上
年間稼働日数 (日)	70 (100)	70 (100)	70 (100)	70 (100)	同上
1日当たり稼働時間 (時間/日)	5.4 (6)	5.4 (6)	5.4 (6)	5.4 (6)	同上
年間標準稼働時間 (時間/年)	380 (600)	380 (600)	380 (600)	380 (600)	同上
年間管理費率 (%)	9 (5.1)	9 (5.1)	9 (5.1)	9 (5.1)	同上
維持修理費率 (%)	50 (26)	50 (26)	50 (26)	50 (26)	同上
労務単価 (人/日)	25,240	25,240	25,240	25,240	国土交通省 (2016b) 公共工事設計 労務単価 (表-1 参照)
運転労務費 (人/日)	21,640	21,640	21,640	21,640	(4)式参照：運転労務費＝労務単価 ×1/7×1日当たり稼働時間6
チップ化生産性 (m ³ /人・時)	20.35	9.41	11.26	17.82	システム生産性の実測値
チップ化生産性 (m ³ /人・日)	109.89	50.81	60.80	96.23	上段に1日稼働時間5.4hを乗ずる
年間チップ生産量 (m ³ /年)	7,692	3,557	4,256	6,736	上段に年間稼働日数70日を乗ずる

*実数は破砕機の数値 (括弧内はグラブの数値)。

表-6. 未利用材の品質条件

容積密度 (kg/m ³)	350
A・B 発電所の購入時の含水率 ¹⁾ (%)	50
C 発電所の購入時の含水率 ¹⁾ (%)	40
燃焼時の含水率 ¹⁾ (%)	40
燃焼時の低位発熱量 (MJ/kg)	10.2
灰の発生率 ²⁾ (%)	2

¹⁾全て湿量基準。²⁾燃焼時の質量に対する百分率。

表-7. 未利用材への最大支払額の推定に用いた各発電所の基本データ

	A 発電所	B 発電所	C 発電所
プラント			
発電出力 (kW)	50,000	25,000	5,800
事業費 (億円)	150	85	33
未利用材 万 t/年	21.8	21.0	6.0
原料消費量 万 m ³ /年 ¹⁾	31.4	30.0	10.2
石炭 (万 t/年)	5.0	—	—
PKS (パーム椰子殻) (万 t/年)	5.0	2.1	—

¹⁾未利用材の材積は表-6 の容積密度および含水率から換算。

$$St = \sum_{n=1}^3 S_n \quad (6)$$

St , 売上高 (円/年) ; S_n , 原料 n の売電額 (円/年)。
 なお, $n=1$, 未利用木材 ; $n=2$, PKS ; $n=3$, 石炭。
 ここで,

$$S_n = P_o \cdot Nd \cdot 24(\text{h/d}) \cdot W/100 \cdot C_n \cdot U_n \quad (7)$$

P_o , 発電出力 (kW) ; Nd , 年間稼働日数 (日/年) ; W ,
 設備利用率 (%) ; C_n , 原料 n の発熱量比 ; U_n , 原料 n の
 売電単価 (円/kWh)。

なお, 原料 n の発熱量比 C_n は

表-8. その他の主要な共通条件

燃焼時の低位発熱量	PKS (MJ/kg)	15.0
	石炭 (MJ/kg)	24.7
灰の発生率 ¹⁾	PKS (%)	3.0
	石炭 (%)	11.6
必要経費 ²⁾	年間保守点検費率 (%)	2.4
	年間ユーティリティ費率 (%)	1.8
	年間保険費率 (%)	0.4
	撤去費率 (%)	5.0

¹⁾燃焼時の質量に対する百分率。²⁾減価償却費・固定資産・償却資産税・
 労務費以外に必要な固定費。すべて事業費に対する百分率。

$$C_n = \frac{LHV_n}{\sum_{n=1}^3 LHV_n} \quad (8)$$

LHV_n , 原料 n の低位発熱量 (MJ/kg)。

設備利用率は経済産業省「総合資源エネルギー調査会」
 (2015) を基に 87% とした。売電単価は, バイオマスは
 FIT の調達価格 (未利用木材 32 円/kWh, PKS 24 円/kWh)
 を適用し, 石炭は 2015 年度の北海道エリアの平均値 (日
 本卸電力取引所 2016) から 11.5 円/kWh と設定した。な
 おチップの購入単位は湿量 (トン) 当たりとした。購入時
 の含水率は各発電所で未公表であるが, 発電効率・発電出
 力に合うように仮定を置き, A および B 発電所では湿量
 基準で 50%, C 発電所では 40% とし, 燃焼時はすべて
 40% に揃えた。チップ以外の購入単価は, 経済産業省資
 源エネルギー庁 (2015) を参考に PKS を 14,000 円/t, 石
 炭を 10,000 円/t とした。その他の主要な共通条件は表-8
 に示した。

5. 各発電所の未利用材供給ポテンシャルの推定

III. 1. ～III. 4. の市町村別未利用材潜在的利用可能量
 (B), 未利用材の輸送費 (T), チップ化費 (C_c), 未利用
 材への最大支払額 (P) に基づき各発電所が P に収まる範

囲で未利用材を集荷できる圏域(以下「集荷圏域」)を推定する。具体的な手順としては、北海道内 179 市町村のうち、

$$P - (T + Cc)_n > 0 \quad (n = 1, 2, 3, \dots, 179) \quad (9)$$

を満たす市町村を発電所 3 基の周辺地域で推定し、そのエリアを集荷圏域とする。その後、各発電所の集荷圏域内の未利用材潜在的利用可能量を積算する。

IV. 分 析 結 果

1. 市町村別未利用材潜在的利用可能量の推定結果

分析の結果、全道で約 56.2 万 m³/年の未利用材が潜在的に利用可能であると推定された。内訳は民有林 39.2 万 m³/年 (70%)、道有林 6.4 万 m³/年 (11%)、国有林 10.6 万 m³/年 (19%) であった。発電所の集荷圏域や既存の利用量を考えずに全量集荷しても 3 発電所の需要 61 万 m³/年には若干届かない数値となった。なお、「対象地域の概要」で前述したとおり、本稿で推定した未利用材量の一部は既に利用されていると考えられ、推定結果の全てが未利用とはいえないことに留意する必要がある。

2. 未利用材チップ化費の推定結果

4 種の破砕機のチップ化費は 2,180~4,723 円/m³ となり平均チップ化費は、約 3,200 円/m³ となった(表-9)。これには間接費の一部として燃料油脂費、付帯人件費、減価償却費、維持修理費、管理費を見込んでいるが(表-1 および表-9)、機材消耗費、運転手以外の付帯人件費、現場監督費、倉庫など施設管理費などの「間接諸経費」は含まれていない。そこで、3,200 円/m³ に北海道(2008)の積算方法に準じ間接費率 20% を乗じ、未利用材の供給側が負担するチップ化費として間接諸経費 20% 込みで 3,840 円/m³ を未利用材供給ポテンシャルの推定に採用する。

3. 発電所の未利用材への最大支払額の推定結果

発電所 3 基の未利用材への最大支払額 P の推定結果(10 円以下切り捨て)は、5 万 kW 級の大型混燃 A 発電所で 12,530 円/m³ となった。同様に、2 万 5 千 kW 級の混焼 B 発電所では 9,270 円/m³、5 千 kW 級の専焼 C 発電所は 6,160 円/m³ となった。発電所までの輸送距離と積算費用の関係を示す(図-3)。これを最大支払額の推定結果と比較すると、A 発電所は 1 日往復の限界距離である 125 km を輸送しても最大支払額まで約 1,600 円/m³ の余裕があり、B 発電所は約 75 km の手前、C 発電所は約 75 km の直後で最大支払額を超えた。なお、ここでの積算費用には供

給する林業事業体の利潤は含まれないため、輸送距離の限界(最大の集荷圏域)と解釈できる。

4. 各発電所の未利用材供給ポテンシャルの推定結果

前節の結果を受け、A 発電所は片道 125 km、B 発電所はおおむね 50 km、C 発電所は 75 km として発電所ごとの集荷圏域を推定すると、図-4 に示すエリアとなった。

(1)式で導出した各市町村別未利用材潜在的利用可能量(B)のうち、伐採量の少ない伐区の未利用材や 10 t 車荷台に満たない未利用材を全て輸送することは現実的ではないため、B の約 8 割が輸送可能と仮定し、発電所ごとに未利用材供給ポテンシャルを推定した(図-4)。

その結果、A 発電所で 8.8 万 m³/年(計画認可時の未利用材必要量の 28%)、B 発電所で 1.2 万 m³/年(同 4%)、C 発電所で 3.9 万 m³/年(同 38%)の未利用材供給ポテンシャルとなりそれぞれの発電所の必要量に大幅に不足した。北海道有数の林業地域であるオホーツク地域が集荷圏域に入る A 発電所でも未利用材が不足した。また札幌に近い都市近郊に位置する B 発電所はもっとも不足割合が大きかった。

V. 考 察

今回の試算条件では、FIT で認可された北海道の発電所 3 基が IRR 8% を維持しながら山からの輸送費やチップ化費を考慮して未利用材の集荷を行うと、それぞれ 125 km、50 km および 75 km 圏域からの広域集荷が可能であった。一方で林業事業体が破砕機を購入し、採材時の未利用部である不定形短尺材を集荷・輸送・販売することを想定した本稿の仮定では、広域集荷は可能でも未利用材のみでは各発電所の需要量(計画認可時)には大きく不足する結果となった。

FIT 制度の下ではバイオマスを燃料として用いることについて、既存用途との競合を回避することが方針とされ、特にリサイクル木材と一般木材については既存用途の市場への影響が懸念されている(経済産業省「調達価格等算定委員会」2012)。平成 28 年現在、北海道木材市況調査におけるカラマツチップ原料材の工場着価格は 4,000~5,300 円/m³、トドマツパルプ原料材の山土場渡し価格は 4,200~5,300 円/m³ で推移している(北海道水産林務部林務局林業木材課 2016a)。参考値として、トドマツパルプ原料材より材単価の安いカラマツチップ原料材の工場着価格を、発電所の立地に最も近いエリアの地方価格について図-3

表-9. チップ化費の推定結果

試 験 地	美 唄 市	栗 山 町	津 別 町	別 海 町	備 考
①減価償却費(円/年)	3,750,000 (2,291,140)	2,062,500 (2,291,140)	5,250,000 (2,291,140)	2,987,500 (2,291,140)	作業員 1 名はグラップルに計上
②年間労務費(円/年)	(2,164,000)	(2,164,000)	(2,164,000)	(2,164,000)	
③年間燃料油脂費(円/年)	1,746,360 (726,000)	997,920 (726,000)	1,746,360 (726,000)	2,993,760 (726,000)	
④年間維持修理費(円/年)	1,875,000 (595,700)	1,031,250 (595,700)	2,625,000 (595,700)	1,493,750 (595,700)	
⑤年間管理費(円/年)	2,700,000 (923,100)	1,485,000 (923,100)	3,780,000 (923,100)	2,151,000 (923,100)	
①~⑤合計	10,071,360 (6,820,935)	5,576,670 (6,820,935)	13,401,360 (6,820,935)	9,626,010 (6,820,935)	4 事例平均 3,195 円/m ³
各機械のチップ化費(円/m ³)	1,309 (887)	1,568 (1,918)	3,149 (1,603)	1,429 (1,013)	
合計(円/m ³)	2,180	3,451	4,723	2,424	

*実数は破砕機の数値(括弧内はグラップルの数値)。

図-3. 各発電所までの輸送距離と積算費用・未利用材への最大支払額およびカラマツチップ原料材工場着価格¹⁾の比較

¹⁾北海道木材市況調査月報 (北海道水産林務部林務局林業木材課 2016a) の平成 28 年 10 月における地方別価格。²⁾石狩地方の価格調査がないため隣接する 2 地方の平均価格を提示。

に点線で図示した。市況調査は工場と山土場の距離別のデータとはなっていないため参考値であるが、A・B 発電所におけるチップ化費を含めた未利用材の工場着価格とカラマツチップ原料材の工場着価格を比較すると、25 km という短距離の輸送であっても後者の方が安価になる。FIT 制度に基づき“既存の用途との競合を回避する”ためには、未利用材はカラマツチップ原料材より安く入手できることが必要である。そこで仮に、チップ化費 C_c を含めずに山土場の未利用材の工場への輸送費 ($T = T_{c1} + T_{c2}$) のみを考える原木納入の C 発電所と同様のシステムを A・B 発電所でも想定し、カラマツチップ原料材の工場着地域価格 4,500 円～5,400 円/m³ を上回らないように輸送距離を設

図-4. 各発電所の経済的集荷圏域の推定結果

図-5. カラマツチップ材の地域別工場着価格以下での未利用材集荷圏域と集荷量

定すると、それぞれ 50 km 圏内 ($T=4,350$ 円/m³) までなら可能となった。これを元に集荷域を再考すると図-5 に示すようになり、発電所の需要に対する供給ポテンシャルはさらに減少した。

実際の市況として、前述の北海道木材市況調査 (工場への電話聞き取り調査) では、3 発電所のうち最初に B 発電所が試運転を開始した平成 27 年 10 月より平成 28 年の 10 月までの 1 年で、カラマツ小径材 (径 9～13 cm 長さ 3.65 m)、中径材 (径 14～18 cm 長さ 3.65 m) の素材工場着価格はそれぞれ 100 円/m³ 上昇し、カラマツチップ原料材の単価も 1 m³ 当たり 4,700 円から 5,100 円と、400 円/m³ 上昇している (北海道水産林務部林務局林業木材課 2016a)。一方で、北海道森林管理局の国有林公売「土場活用型」のカラマツ原料材 N (北海道木材市況調査のカラマツチップ原料材にほぼ相当) の落札価格は、道南地方を除く北海道全域の平均落札価格で平成 27 年 10 月の 5,250 円/m³ から平成 28 年 10 月には 6,320 円/m³ と 1,000 円以上アップし、価格上昇率が高くなっている (北海道森林管理局 2016b)。これらの動きが発電所向け未利用材の需要拡大の影響かどうかは別途解析する必要がある。いずれにしろ今後の動向を予測するためには、本稿で扱った未利用材 (不

定形短尺材)に加えていわゆるC材に該当するチップ原料材やパルプ原料材の出材予測と現況での出荷量の差(C材の余剰分)を地域別に分析し、C材も含めたポテンシャルを示す必要があるため、それを次のステップとしたい。

VI. お わ り に

本稿では、未利用材の径級や長さ、形状、林地残材率は地域差が大きいことを考慮し北海道に特化した条件設定で試算を行った。北海道の現状では、大型トレーラーによる未利用材運搬は汎用的なシステムとはいえないため、今回の試算条件には中間集積地からの再輸送時の大型トレーラー積替えは考慮していない。一方で、C発電所に未利用材を原木納入している市町村の一部では、中間集積地から25tトレーラーによる運搬を行い10t運材車2.5台分の集約輸送を実践している事例もある(北海道2016)ため、今後そのようなシステムの普及がすすめば輸送の効率化が期待される。なお、本試算は限定的な条件設定に基づいて実施したものであり、実際の発電所向け未利用材集荷は、発電所の関連企業社有林からの集荷や、発電所と素材生産事業体等との連携協定・契約に基づく集荷など、本稿での仮定を超えた複雑な条件下で実施されていることを付記する。今回の結果を踏まえ、次稿ではC材を加え、発電所稼働期間20年の長期予測を行う予定である。

本稿の執筆にあたり、(独)北海道立総合研究機構森林研究本部林産試験場の古俣寛隆研究員に木質バイオマス発電・熱電併給事業評価シミュレーターの使用に当たって数多くの有益な助言をいただき、道内の輸送機械の現状や輸送費の積算方法については(一社)北海道林業機械化協会の藤八事務局長に助言をいただきました。ここに心より感謝の意を記します。

引用文献

- 土木研究所寒地土木研究所(2015) 北海道の道路情報総合サイト北の道ナビ. <http://time-n-rd.jp/> (2016年8月1日参照)
- 北海道(2008) 平成20年度林地残材の効率的な集荷システムづくりモデル事業報告書
- 北海道(2009) 平成21年度林地残材の効率的な集荷システムづくりモデル事業報告書
- 北海道(2016) 平成27年度北海道森林づくり白書. 32-36, 65-68
- 北海道(2017) 北海道水産林務部HP. 平成29年度北海道森林づくり施策概要. http://www.pref.hokkaido.lg.jp/sr/sum/grp/rinki/H29_sesaku_1.pdf (2017年1月20日参照)
- 北海道上川総合振興局(2016) 木質バイオマス推進室HP. http://www.kamikawa.pref.hokkaido.lg.jp/ss/mmm/bio_kamikawa.htm (2016年7月31日参照)
- 北海道経済産業局(2016) 北海道における石油製品(ガソリン・軽油・灯油)の価格推移. <http://www.hkd.meti.go.jp/hokno/touyu/index.htm?date=20120328> (2016年12月17日参照)
- 北海道留萌振興局(2013) 留萌振興局森林室HP. <http://www.rumoi.pref.hokkaido.lg.jp/sr/srs/fukuyuu/hanrokakudai/bunkakaisiryou3.pdf> (2016年9月15日参照)
- 北海道森林管理局(2016a) 北海道森林管理局HP. 森林計画区人工林の伐採計画量(年平均). http://www.rinya.maff.go.jp/hokkaido/keikaku/other/sinrinkeikaku_keikakuryo.html (2016年7月15日参照)
- 北海道森林管理局(2016b) 北海道森林管理局HP. 平成27年度国有林野産物の公売公告および結果「山土場活用型」. http://www.rinya.maff.go.jp/hokkaido/apply/publicsale/koubai/wood_soza/2016.html (2016年3月17日参照)
- 北海道水産林務部(2014) 道内における木質バイオマスエネルギーの利用状況. 山づくり: 空知・石狩・後志地域版. 18-19.
- 北海道水産林務部(2015) 北海道の路網・作業システム: 低コスト森林施業に対応した路網・作業システム報告書. 105-108.

- 北海道水産林務部(2016a) 高性能林業機械等保有状況調査集計表
- 北海道水産林務部(2016b) 平成26年度北海道林業統計
- 北海道水産林務部林務局林業木材課(2016a) 木材市況調査月報(平成28年10月)
- 北海道水産林務部林務局林業木材課(2016b) 北海道の木質バイオマスエネルギーの利用状況. <http://www.hro.or.jp/list/forest/research/fpri/dayori/1611/1611-5.pdf> (2016年12月3日参照)
- 経済産業省「調達価格等算定委員会」(2012) 平成24年度調達価格および調達期間に関する意見. 17-20
- 経済産業省資源エネルギー庁(2015) 平成25年度エネルギーに関する年次報告. HTML版. <http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2015html/1-3-1.html> (2016年10月8日参照)
- 経済産業省「総合資源エネルギー調査会」(2015) 発電コストワーキンググループ(第6回会合)資料1 長期エネルギー需給見通し小委員会に対する発電コスト等の検証に関する報告書(案). http://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/mitoshi/cost_wg/006/pdf/006_05.pdf (2016年10月10日参照)
- 建設省(1974) 請負工事機械経費積算要領
- 国土交通省(2016a) 平成28年度土木工事標準歩掛. http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/constplan/sosai_constplan_tk_000024.html (2016年10月24日参照)
- 国土交通省(2016b) 平成28年2月から適用する公共工事設計労務単価について. http://www.mlit.go.jp/report/press/totikensangyo14_hh_000552.html (2016年10月24日参照)
- 古俣寛隆・前田典昭・石川佳生・本藤祐樹(2015) 木質バイオマス発電シミュレーターの構築と利用. 日本エネルギー学会大会講演要旨集 24: 262-263.
- 古俣寛隆(2016) 木質バイオマス発電・熱電併給事業評価シミュレーターVer. 2. 利用の手引き. <https://www.hro.or.jp/list/forest/research/fpri/manual/biomass10/biomass.htm> (2016年11月30日参照)
- 久保山裕史(2014) 木質バイオマス発電事業の動向と燃料集荷の課題. 第125回日本森林学会学術講演集.
- 紋別市(2013) 木質バイオマス火力発電所推進室HP http://mombetsu.jp/soshiki/baio_soshiki/news/2013-1023-1304-175.html (2014年11月19日参照)
- 中澤昌彦・岩岡正博・峰松浩彦・小澤雅之(2006) 全木・全幹・短幹の集材方式の違いによる土場残材発生量の変化. 森林学誌 21(3): 205-210.
- 日本建設機械化協会(2003) 建設機械損料の解説と機械一覧. 33-40
- 日本建設機械施工協会(2016) 建設機械等損料表北海道補正版. 174-191
- 日本卸電力取引所(2016) 日本卸電力取引所HP. 取引状況・2015年北海道エリアスポット市場価格. <http://www.jepx.org/market/index.html> (2016年9月9日参照)
- にいがた経済新聞(2016) 新潟東港工業団地のバイオマス発電所で完成見学会. <https://www.niikei.jp/2016/06/01/新潟東港工業団地のバイオマス発電所で完成見学会/> (2016年9月10日参照)
- 王子ホールディングス(2013) 北海道におけるバイオマス発電事業に関するお知らせ. 王子ホールディングス株式会社HP. <http://www.ojiholdings.co.jp/news/2013/2851.html> (2014年11月20日参照)
- 林野庁企画課(2015) 平成25年次 素材生産費等調査報告書
- 酒井明香・寺田文子・佐々木尚三・渡辺一郎(2015) 北海道における機械作業システムと林地残材率を考慮した林地残材集荷可能量の推定. 森林学誌 30(2): 71-78
- 住友林業(2014) 北海道苫小牧市での木質バイオマス発電事業会社へ出資計画. 住友林業HP. <http://sfc.jp/information/news/2014/2014-10-24-01.html> (2014年11月20日参照)
- 須本孝幸・遠藤日雄(2006) 90年代における素材生産流通構造の変化に関する研究—平成13年木材流通構造調査報告書の分析を中心にして—. 九州森林研究 No. 59: 6-9
- 津田高明・渡辺一郎(2017) 直送方式下における素材の用途別出荷距離と林業経営への影響—北海道での事例分析—. 第128回日本森林学会学術講演集
- 柳田高志・吉田貴紘・久保山裕史・陣川雅樹(2015) 再生可能エネルギー固定価格買い取り制度を利用した木質バイオマス発電事業における原料調達価格と損益分岐点の関係. 日エネ誌 94(3): 311-320
- 吉岡完治・内山洋司・菅 幹雄・本藤祐樹(1994) 環境分析用産業連関表の応用(5)—火力・原子力発電のCO₂排出量の計算—. 産業連関イノベーション&I-Oテクニク 5: 31-56
- 全国林業改良普及協会(2000) 機械化のマネジメント—地域の経営力アップのために高性能林業機械をどう活かすか. 124-155