

論文 (Original article)

木材のチップ化エネルギーおよびコストに及ぼす原料寸法および樹種の影響

藤本 清彦^{1)*}、佐々木 達也²⁾、伊神 裕司¹⁾、吉田 貴紘¹⁾、高野 勉³⁾

要旨

本研究は、木材チップ製造に係るエネルギーおよびコストに及ぼす樹種および原料寸法の影響を明らかにすることを目的とした。幅および厚さの異なるヒノキ、カラマツ、クヌギの板材を原料として、ディスクチップパーでチップ化したときの消費電力を測定し、チップ化に要するエネルギーを求めた。また、チップ化の生産性を明らかにし、チップ化に係るコストを算出した。その結果、消費電力は6.5～46.9 kWであり、原料寸法が大きくなるにつれて、また、原料密度が大きくなるにつれて増大していた。一方、全乾質量あたりの消費エネルギーは45.3～96.4 MJ/tであり、原料寸法が大きいほど、また、原料の密度が大きいほど減少する傾向があった。また、チップ化コストは632～7,611円/tであり、原料の寸法および密度が大きいくいほど減少した。経費のうち電気料金の占める割合が大きかったが、全乾質量あたりのコストでは生産性の影響が強く反映され、生産性の高い条件においてコストが低くなった。これらのことは、質量の大きな原料を投入し、生産性を高めることで、消費エネルギーおよびコストを抑えたチップ化ができることを示している。

キーワード：ディスクチップパー、チップ加工、消費電力、消費エネルギー、チップ化コスト

1. はじめに

わが国では化石燃料の消費量削減政策の一環として、木質バイオマスのエネルギー利用が進められている。林野庁(2018)の実施した木質バイオマスエネルギー利用動向調査によれば、2017年に日本において木質バイオマスエネルギーを利用している事業所は総数で1,398か所であり、その利用量は1千万tに及ぶ。

木質バイオマスをエネルギーとして利用する場合、木質バイオマスが燃料に加工されるまでに投入されたエネルギーと木質バイオマスから得られるエネルギーの収支の検討を忘れてはならない。また、一般的に木質バイオマスをエネルギーとするときは採算性が低い場合が多く、コストに関する検討も欠かせない。そのため、木質バイオマスからエネルギー源となるチップなどを生産するための原料化工程、つまり樹木の伐採、運搬、チップ化などの各工程における消費エネルギーやコストについて、これまでにもいくつかの報告がされてきた。吹野ら(2008)は、聞き取り調査から建築廃材の輸送および破碎に係るコストを試算し、中間処理工場の規模別に示した。Yoshioka et al. (2002)は森林内の木質バイオマスの伐採および運搬に係るコストやエネルギーを明らかにした。森口ら(2004)は、林地残材を利用する場合の運搬およびチップ化コストを明らかにした。

チップパーは一般に切削式のディスクチップパー、クラッシュャーやシュレッダーと呼ばれるせん断式破碎機、高速で回転するハンマーで破碎する衝撃式破碎機に大別される。中でも、ディスクチップパーは、大きさの揃ったチップが得られ、また、生産性が高いため、無垢の木材のチップ化にはよく用いられている。ディスクチップパーは、刃物を取り付けたディスクを高速回転させ、そこに木材を送りこみ、長さ方向に順次切削しながらチップを製造する。そのため、原料となる木材の幅や長さ、樹種などがチップ化に要するエネルギーやコストに影響を及ぼすと考えられるが、検討された例はない。しかし、原料の寸法や樹種の影響を明らかにすることは、省エネルギーかつ低コストのチップ化条件を明らかにすることにつながる。

そこで、本研究では、異なる寸法のヒノキ、カラマツ、クヌギをディスクチップパーによってチップ化した時の消費電力を測定し、消費エネルギー、生産性、チップ化コストを算出した。

2. 実験

2.1 試験体

チップ化原料としてヒノキ(*Chamaecyparis obtusa*)、カラマツ(*Larix kaempferi*)、クヌギ(*Quercus acutissima*)の生材を用いた。各樹種について、厚さ15、30、60 mm、

原稿受付：令和元年12月12日 原稿受理：令和2年2月20日

1) 森林総合研究所 木材加工・特性研究領域

2) 森林総合研究所 林業工学研究領域

3) 森林総合研究所 震災復興・放射性物質研究拠点

* 森林総合研究所 木材加工・特性研究領域 〒305-8687 茨城県つくば市松の里1

Table 1. 各条件の試験体数

樹種	試験体の厚さ	試験体の幅		
		60	120	160
ヒノキ	15	10	9	6
	30	8	4	2
	60	4	4	3
カラマツ	15	11	4	6
	30	7	4	4
	60	4	4	3
クヌギ	15	7	9	3
	30	5	8	3
	60	5	5	5

幅 60、120、160 mm を組み合わせた計 9 種類の断面寸法の試験体を用意した。長さはすべて 800 mm であった。各条件における試験体数を Table 1 に示す。同じ個体から得られた丸太を用いたため、製材時の木取りにより試験体の本数が異なっている。試験体の含水率（乾量基準）および気乾密度は、ヒノキ、カラマツ、クヌギでそれぞれ、80.9、73.2、67.8% および 498、521、812 kg/m³ であった。

2.2 実験方法

チップ化にはディスクチップパー（CKS チューキ株式会社製、800DK）を用いた。試験体はベルトコンベアによって送り速度 38.0 m/min で 1 体ずつチップパーに投入した。ディスクの回転数は 720 rpm、ディスクに取り付けられた刃物の数は 4 枚、刃先角は 40 度であった。1 刃あたりの送り量は 13.2 mm であった。チップパーのディスク直径は 760 mm、定格出力は 22 kW であった。刃物は新品を使用した。

分電盤内にあるチップパーのブレーカー下側にクランプ式の電力計（日置電機株式会社製、3169-01）を取り付け、100 ms 間隔で消費電力を測定した。消費電力はチップ化時の平均値を求めた。また、全乾質量あたりの消費エネルギー E (MJ/t) を以下の (1) 式より算出した。

$$E = P \times T \times C \times 1000 / M \quad (1)$$

ここで、 P は消費電力の平均値 (kW)、 T はチップ化時の加工時間 (s)、 C は受電端投入熱量 (MJ/kWh)、 M は試験体の全乾質量 (kg) である。受電端投入熱量とは電力消費量を一次エネルギー換算するための係数で、電力供給側における発電効率、発電所内損失や送配電損失などを考慮している。今回の試験では、資源エネルギー庁 (2015) に基づき、9.00 MJ/kWh とした。また、今回の試験では生材を用いており、含水率の影響を除去するため全乾質量あたりの消費エネルギーを算出した。ディスクチップパーに木材を投入するためのベルトコンベアの消費電力は、試験体の影響を受けないと考えられるため、今回は測定対象から外した。また、チップの生産性 (t/h) を全乾質量あたりの値として加工時間から求めた。

チップ化に係るコストについては、チップパーの減価

償却費や管理費などの固定費、チップパーの保守・修理費、電気料金、油脂費や刃物費などの変動費、作業員の人件費、および 1 時間あたりの生産量からチップ全乾質量あたりのコストを算出した。減価償却費は、1 日の実労働時間を 6 時間、チップパーの耐用年数を 8 年、償却費率を 90 % として計算した。管理費および保守・修理費は、それぞれ、チップパー価格の 10 % および 45 % とした（大阪府都市整備部 2019）。電気料金は東京電力の高圧電力 A での契約とし、従量部分にかかる料金については今回の試験によって得られた消費電力を使用した。油脂費のグリース量は使用したディスクチップパーのマニュアルに記載の通りとした。カッター刃は 2 日に 1 回研磨し、30 回研磨したところで新品刃を購入、受刃は 8 日に 1 回研磨とした。生産量は今回の試験によって得られた値を使用した。原料を加工してから次の原料を加工するまでの間を考慮してチップパーの稼働率は 80 % とした。チップ化に従事する作業員は 1 人とした。

3. 結果と考察

3.1 消費電力および消費エネルギー

実験結果の 1 例として、Fig. 1 に試験体の厚さ 30 mm、幅 160 mm のヒノキをチップ化したときの消費電力の変化を示す。消費電力はチップ加工開始と同時に急激に立ち上がり、加工が終わると急速に低下していた。Fig. 2 に試験体の厚さおよび幅が異なる条件でヒノキ、カラマツ、クヌギをディスクチップパーでチップ化したときの消費電力を示す。試験体の幅、厚さが大きくなるにつれて消費電力は直線的に上昇した。ディスクチップパーは刃物を取り付けたディスクを高速回転させてチップを製造する木工機械であるが、切削部分においては、刃物が上方から直線的に降下し切削する平削りとみなすことができる。木材切削時の消費電力は、平削り時の切削抵抗と関係が深いことが知られており（藤本 2018）、また、切削抵抗は被削材の切削長さ（本実験における試験体の厚さ）や切削幅（本実験における試験体の幅）の影響を強く受け、切削長さおよび幅が大きくなるにつれて増加する（田中・喜多山 1992）。したがって Fig.2 の結果は、試験体寸法の増加による切削抵抗の増加が消費電力の上昇をもたらしたことを端的に表わしたものと考えられる。すべての寸法の値を平均して樹種別に比較すると、ヒノキ、カラマツ、クヌギでそれぞれ、消費電力は 15.1、15.5、19.7 kW であった。被削材の密度が大きいと切削抵抗や消費電力は大きくなるため（田中・喜多山 1992）、樹種による消費電力の相違には密度が影響したと考えられる。

試験体の厚さおよび幅が異なるときの全乾質量あたりの消費エネルギー E を Fig. 3 に示す。試験体の厚さおよび幅が大きくなると E は減少する傾向があった。この結果はチップパーに投入する原料の寸法が大きいほ

ど製造時の消費エネルギーを抑えられることを示している。試験体の寸法と質量が大きくなると消費電力は増加するが、質量の影響が寸法よりも大きく、質量で除して求めた消費エネルギーは減少したのと考えられる。また、消費エネルギーは加工時間の影響も受ける。しかし、試験体の寸法が異なっても加工時間に大きな差は認められなかった。ただし、試験体幅 160 mm、試験体厚さ 15 mm など薄い試験体ではチップパー刃の試験体への食い込みが悪く、加工に時間のかかった試験体が観察され、そのときは E が大きくなる傾向が認められた (Fig. 3、カラマツ、試験体幅 160

mm、試験体厚さ 15 mm など)。なお、今回の試験における加工時間はヒノキで 1.7~2.0 s、カラマツで 1.8~2.3 s、クヌギで 1.7~3.3 s であった。また、全乾質量あたりの消費エネルギーはヒノキおよびカラマツに比べてクヌギが小さい傾向があった。前述のように寸法と比較して消費電力への質量の影響が大きいために、質量で除し同寸法で比較した場合、密度の大きいクヌギの消費エネルギーは小さくなったと考えられる。

3.2 生産性およびコスト

チップの生産性を Table 2 に示す。試験体の幅および厚さが大きくなるにつれて生産性は増加した。また、樹種別ではクヌギ>カラマツ>ヒノキの順に生産性が高かった。チップの加工時間の差は小さいため、同じ加工時間で得られるチップの質量が増える条件ほど生産性が高くなったためと考えられる。

Fig. 4 にチップ化のコストを示す。試験体の幅および厚さが大きいほどコストは減少した。最も高かったのはヒノキの原料の幅 60 mm、厚さ 15 mm のときに全乾質量 1t あたり 7,611 円/t、一方クヌギの原料の幅 160 mm、厚さ 60 mm のときに最も安く 632 円/t であった。吹野ら (2008) は年間 2 万 t 処理する中間処理場での破碎コストが 5,724 円/t と報告している。森口ら (2004) はスギ林地残材の工場におけるチップ化費用をチップ層積あたり 441 円/m³ と、Yoshioka et al. (2002) はス

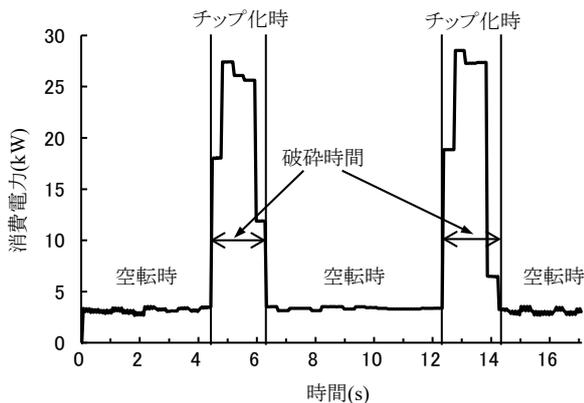


Fig. 1. 消費電力の測定例 (試験体: ヒノキ、試験体の厚さ、幅: 30mm、160mm)

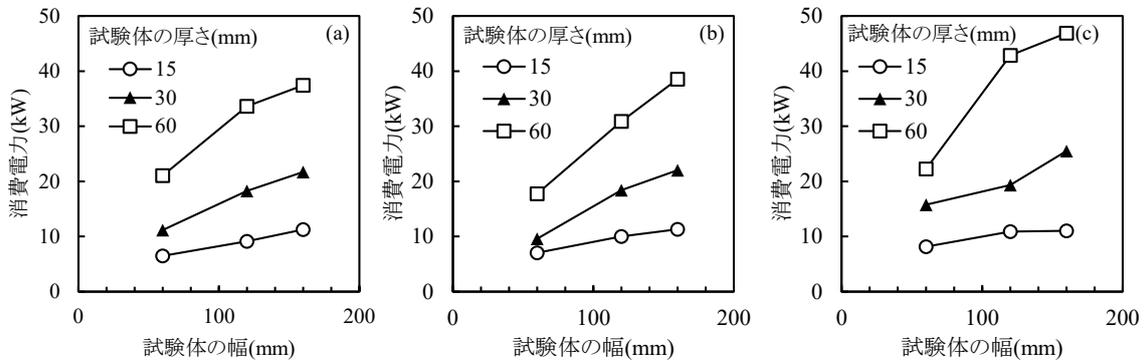


Fig. 2. 試験体厚さおよび幅が異なるときの消費電力 (a) ヒノキ (b) カラマツ (c) クヌギ

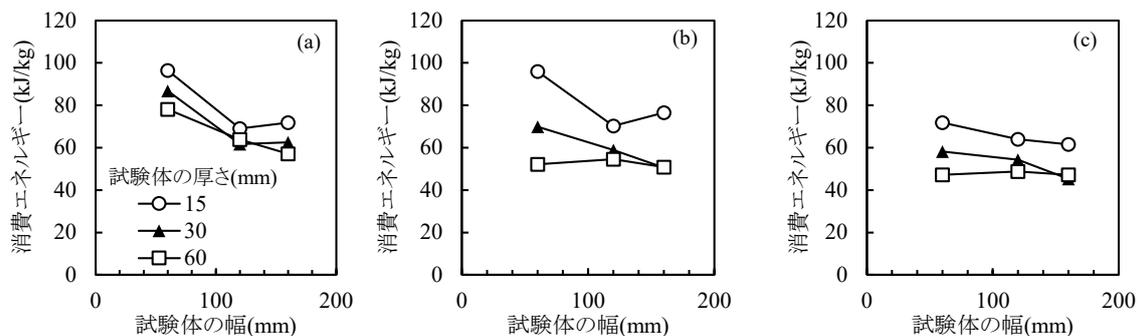


Fig. 3. 試験体厚さおよび幅が異なるときの全乾質量あたりの消費エネルギー (a) ヒノキ (b) カラマツ (c) クヌギ

Table 2. チップの生産性

樹種	試験体の厚さ	(単位:t/h)		
		試験体の幅		
		60	120	160
ヒノキ	15	0.65	1.21	1.42
	30	1.17	2.71	3.13
	60	2.43	4.80	5.92
カラマツ	15	1.17	1.68	1.64
	30	2.49	3.34	5.09
	60	4.23	7.92	8.94
クヌギ	15	0.69	1.30	1.39
	30	1.25	2.81	3.93
	60	3.07	5.10	6.83

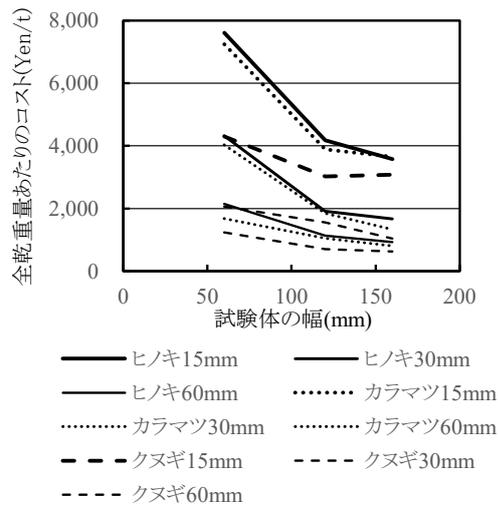


Fig. 4. チップ化コスト

ギ林地残材をタブグラインダーで破碎したときのコストを414～830円/m³と報告している。スギチップのかさ密度を0.2 t/m³と仮定すると、それぞれ、2,205円/t、2,070～4,150円/tと計算された。今回の結果はこれまでの結果を包括するものとなった。コストの内訳をみてみるともっとも多くを占めていたのが直接労務費で、次いで変動費であった。変動費の中では電気料金の占める割合が高かった。試験体が大きいほど消費電力は大きくなる (Fig. 2 参照) ため電気料金は高くなるが、生産性が高くなるため全乾質量あたりのコストは安くなった。電気料金は寸法の最も小さい条件と最も大きい条件で1.8倍しか異ならなかったのに対し、生産性は8.9倍 (3樹種の平均) の開きがあり、生産性の影響が強く反映された。なお、原料の寸法にも上限があると考えられる。チップの切削能力には問題がないため、投入口の寸法が、原料寸法の上限となる。今回使用したチップでは、厚さ80mm以下であれば幅170mmまでチップ製造が可能であった。

4. まとめ

木材のチップ製造エネルギーおよびコストに与える原料寸法および樹種の影響を明らかにするため、幅および厚さの異なる試験体をチップ化して消費電力を測定し、全乾質量あたりの消費エネルギーを求めた。また、チップの減価償却費などの固定費、電気料金や刃物費などの変動費、人件費およびチップの生産性から、全乾質量あたりのチップ製造コストを算出した。得られた結果は以下のとおりである。

- 1) チップ製造時の消費電力は試験体寸法や密度が大きくなるにつれて増加した。
- 2) 全乾質量あたりの消費エネルギーおよびコストは試験体寸法や密度が大きくなるにつれて小さくなった。これはチップ生産性の上昇が影響を及ぼしている。
- 3) 消費エネルギーおよびコストを抑えたチップ製造を行うためには、断面および質量の大きい原料を投入することが重要である。

引用文献

- 藤本 清彦 (2018) 木材の被削性評価のポイント. 木材工業, 73, 208-211.
- 吹野 信・加藤 幸治・清野 新一・石河 周平 (2008) 建築廃木材の輸送コストと破碎処理コスト. 木材学会誌, 54, 352-357.
- 森口 敬太・鈴木 保志・後藤 純一・稲月 秀昭・山口 達也・白石 祐治・小原 忠 (2004) 林地残材を木質バイオマス燃料として利用する場合のチップ化と運搬コスト. 日林誌, 86, 121-128.
- 大阪府都市整備部 (2019) “建設工事積算基準 [資料] 令和元年度”, 108.
- 林野庁 (2018) “平成29年木質バイオマスエネルギー利用動向調査”, http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/mokusitu_biomass/index.html (参照 2019-11-25)
- 資源エネルギー庁 (2015) “2013年度以降適用する標準発熱量・炭素排出係数一覧表”, https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/carbon.html (参照 2019-11-25)
- 田中 千秋・喜多山 繁 編 (1992) “木材科学講座6 切削加工”, 海青社, 35-39.
- Yoshioka, T., Aruga, K., Sakai, H., Kobayashi, H. and Nitami, T. (2002) Cost, Energy and Carbon Dioxide (CO₂) Effectiveness of a Harvesting and Transporting System for Residual Forest Biomass. J. For. Res., 7, 157-163.

Effects of dimension and species of wood materials on the energy consumption and cost during comminution by a disc chipper

Kiyohiko FUJIMOTO ^{1)*}, Tatsuya SASAKI ²⁾, Yuji IKAMI ¹⁾,
Takahiro YOSHIDA ¹⁾ and Tsutomu TAKANO ³⁾

Abstract

In Japan, the demand for woody biomass as a source of energy is increasing with current growing of the market size for this source of energy. When woody biomass is used as a source of energy, it is important to consider that the energy balance between the input to produce wood fuel and the output obtained from wood fuel along with the cost of comminuting woody biomass is important. The purpose of this study is to investigate the effects of dimension and species of wood materials on the energy and cost of wood chip production. We measured the power consumption and calculated the energy consumption per dry mass when test specimens such as Sugi (*Chamaecyparis obtusa*), Karamatsu (*Larix kaempferi*), and Kunugi (*Quercus acutissima*) of various widths and thicknesses were comminuted by a disc chipper. Additionally, the productivity of chipper comminuting, and the cost per dry mass of chip production were calculated. The power consumption was in the range from 6.5 kW to 46.9 kW, and it increased when the dimension and density of the test specimens were increased. However, the energy consumption of dry mass was in the range from 45.3 MJ/t to 96.4 MJ/t and it had a tendency to decrease when the dimensions and densities of the test specimens were increased. The comminuting cost was in the range from 632 yen/t to 7,611 yen/t, and it had a tendency to decrease when the dimensions and densities of the test specimens were increased. Additionally, the cost was strongly affected by productivity and was lower when productivity was high. These facts indicate that reduction of energy consumption and cost during woody biomass comminution can be achieved by using materials whose mass is large and by increasing productivity.

Key words: Disc chipper, power consumption, energy consumption, comminution cost

Received 12 December 2019, Accepted 20 February 2020

1) Department of Wood Properties and Processing, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

2) Department of Forest Engineering, FFPRI

3) Center for Forest Restoration and Radioecology, FFPRI

* Department of Wood Properties and Processing, FFPRI, 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki, 305-8687 JAPAN; e-mail: kiyopi@ffpri.affrc.go.jp