

林地残材丸太から切削式チップにより作られたチップの寸法分布と樹種 および丸太形状との関係

鈴木保志^{*1}・宮田大輔²・秦野瑤子²
山口達也^{3,4}・吉井二郎^{3,5}・後藤純一¹

鈴木保志・宮田大輔・秦野瑤子・山口達也・吉井二郎・後藤純一：林地残材丸太から切削式チップにより作られたチップの寸法分布と樹種および丸太形状との関係 日林誌 89:92~101, 2007 木質チップボイラで使用するために林地残材丸太を切削式チップで粉碎したチップの寸法を計測し、寸法分布および樹種・丸太形状との関係を分析した。篩い分けと層別サンプリングにより求めた長辺・短辺・厚さの分布は対数正規分布でよく表現できた。樹種・丸太形状との関係では、長辺と短辺ではスギより比重の大きなヒノキで有意に大きい寸法となっていた。短辺については径の大きな丸太の方が寸法の大きいチップの割合が有意に多かった。厚さと長短比は樹種・丸太形状と有意な関係は認められなかった。丸太の長さはチップ寸法に有意な影響を与えていなかった。チップのスクリーニングでは、篩の呼び寸法以上のサイズのチップが篩を通過する可能性があるが、寸法分布を考慮し篩寸法を適切に選択すれば長辺寸法の管理は可能であることが示唆された。
キーワード：寸法分布、切削式チップ、木質チップ、木質バイオマス、林地残材丸太

Suzuki, Y., Miyata, D., Hatano, Y., Yamaguchi, T., Yoshii, J., and Gotou, J.: Relationship between Chip Size Distribution and Tree Species, Log Diameter and Length: On Wood Chips Processed from Logging Residue Stems with a Cutter-type Chipper. J. Jpn. For. Soc. 89:92~101, 2007 Dimensions of wood chips from logging residue stems and comminuted with a cutter-type chipper were measured to examine size distributions and analyze the relationship between tree species and shape of the logs. Size distributions of the chips (destined for burning in a wood chip boiler), i.e. length, width, and thickness were obtained through sieving and a stratified sampling method and expressed with log-normal distributions. Chip length and width of *Chamaecyparis obtusa* were significantly larger than those of *Cryptomeria japonica* which has a smaller specific gravity. The proportion of chips with greater width was significantly greater for larger diameter logs than for smaller diameter logs. There was no significant relationship between chip thickness and length-width ratio with the factor of tree species and log shape. Chips larger than a nominal sieve size often go through the sieve; however the results suggest that the actual length of sieved chips can be controlled by appropriate selection of sieve size as related to chip size distribution.

Key words: cutter-type chipper, logging residue stems, size distribution, wood chip, woody biomass

I. はじめに

化石燃料を代替するエネルギー源の一つとして林地残材を活用しようとする試みが、現在日本の各地で始められている。木質バイオマス一般を直接燃焼によりエネルギー利用する場合、ペレット等の成型燃料として用いられる場合もあるが、日本の木質ペレット工場はまだ規模・数ともに小さいこともあり(ペレットクラブ, 2004)、特に現状の林地残材についての試みにおいては木質チップとして用いられる場合が多い。

燃焼利用する場合の木質チップの品質や規格では、寸法

Y分布・含水率・発熱量・樹種・樹皮割合などが重要とされている(Suadicani and Gamborg, 1999; 熊崎, 2004; Spinelli *et al.*, 2005; 日本エネルギー学会, 2006)。寸法分布はチップを燃焼させるバーナのタイプや、チップをバーナに送る供給装置の種類に関係する。熊崎(2006)によると、浮遊燃焼方式のバーナでは最大サイズ6mm以下の均一な燃料が必要である。流動層燃焼方式では、最大サイズについてはタイプにより50~100mmと許容範囲が広い反面、最小サイズについても制限がある(熊崎, 2006, の例では6mm以上)。より単純な構造の堆積燃焼方式のパイルバーナでは火格子の隙間と燃料補給口の大きさで最小・最大サ

* 連絡・別刷請求先 (Corresponding author) E-mail: ysuzuki@kochi-u.ac.jp

¹ 高知大学農学部 (783-8502 南国市物部乙 200)

Faculty of Agriculture, Kochi University, B200 Monobe, Nankoku 783-8502, Japan.

² 高知大学大学院農学研究科 (783-8502 南国市物部乙 200)

Graduate School of Agriculture, Kochi University, B200 Monobe, Nankoku 783-8502, Japan.

³ 高知県立森林技術センター (782-0078 香美市土佐山田町大平 80)

Kochi Prefectural Forest Technology Center, 80 Oohira, Tosayamada, Kami 782-0078, Japan.

⁴ 現勤務先: 高知県中央林業事務所 (782-0012 香美市土佐山田町加茂 777)

Kochi Prefectural Central Forestry Office, 777 Kamo, Tosayamada, Kami 782-0012, Japan.

⁵ 現勤務先: 高知県立林整備公社 (780-8064 高知市朝倉丁 280-2)

Present address: Kochi-ken Shinrin Seibi Kousha, D280-2 Asakura, Kochi 780-8064, Japan

(2006年6月29日受付; 2006年10月25日受理)

イズが決まるが、燃料供給にスクリーを用いるものでは最大サイズはおおむね 50 mm 程度となっている。なお、チップの種類や残材の特性によって作られるチップの寸法分布は異なる(紙・パルプ技術協会編, 1969)ため、木質バイオマスを利用するシステムでは、これらを考慮して適寸チップを供給できるようにする必要がある。

本研究では、チップの寸法分布に着目し、利用対象となるチップボイラに求められる寸法分布のチップを残材丸太から生産するための基礎的知見を得ることを目的として、残材丸太の樹種・形状とチップの寸法分布との関係を分析した。木質チップの寸法計測は篩い分けによる方法が一般的であり、比較的小さなサイズの場合には篩の名目寸法が用いられ(Asikainen and Pulkkinen, 1998; Royse and Sanchez-Vazquez, 2001), 一定以上の大きなサイズのものがある場合には別途個別に最大辺長を計測する方法が取られることが多い(Suadicani and Gamborg, 1999; Mattsson and Kofman, 2003; Jirjis, 2005; Spinelli *et al.*, 2005)。しかし、細長い形状のチップの場合、篩の名目寸法以上の大きさのものが上位区分の篩を通過してしまう。また、大きさの幅が大きい草本枝条の計測規格では、対数正規分布を仮定し幾何平均の方法を用いて平均値や標準偏差を表すように定めたものもあり(ANSI/ASAE, 1998), 長尺チップの多い計測でこれを応用した研究もみられる(Jensen *et al.*, 2004)。そこで、本研究では篩い分けと層別サンプリングを併用して篩階級別にチップ寸法を個別に計測し、対数正規分布を仮定して集計を行うことで正確な寸法分布を表現することを試みた。また、従来の方法と比較してこの方法の有効性を確認し、この方法により得られた寸法分布を用いて適寸チップ割合に関する考察を行う。

II. 方 法

1. 分析対象

本研究では、高知県による 2004 年度のドラムチップを用いて行われたチップ化試験でスギ・ヒノキの根元部および中幹部の残材丸太から作られたチップを分析した。以下、背景について説明する。

高知県では「中山間地域における森林バイオマス資源の有効利用技術開発事業」において、地場産業であるハウス園芸農業で使用されている重油ボイラを木質チップボイラに代替するための実証試験が行われている(鈴木, 2004; 高知県, 2004, 2005)。この事業の実証試験で現在用いられているボイラはスクリー式の供給装置を用いており、望ましいチップ寸法はボイラ開発メーカーにより最大 50 mm × 10 mm × 10 mm までと指定されている。サイズの最大長はスクリーを用いる堆積燃焼方式の標準的な値(熊崎, 2006)であるが、幅や厚さにも制限がある点では条件は厳しいものといえる。

この事業では木質チップの原料に物部川流域における伐出作業で発生する林地残材を用いる計画であるが、当該地域で発生する林地残材には根元部あるいは中幹部の丸太形

状のもの割合が高い(森口ら, 2004b; 秦野ら, 2006)。このため、発生林地残材を無駄なく利用するためには、小型のチップでもチップ化可能な径の細い末木のみでなく、根元部などの径が大きな残材丸太もチップ化の対象とする必要がある。2002 年 11 月に実施された林地残材のチップ化と運搬コストの調査では、径 30 cm までの残材は移動式ディスクチップによりチップ化し、径の太い残材のチップ化には直径 60 cm まで処理可能なチップ化工場の定置式ディスクチップが用いられた(森口ら, 2004b)。ディスクチップは木材の太さに関係なく繊維方向に対し一定の角度で切削を行うため、大きさの均一なチップの生産に適している(熊崎, 2005)。その後、高知県の事業では山土場やストックヤードで大型の移動式チップを用いる試験を実施した。このとき、ディスク式で適当なものがないため破碎式チップが用いられたが、「長型で 5~20 cm と長く不揃い」なチップしか得られなかった(高知県, 2004)。これは、40~50 mm のスクリーンを装備していてもチップがピン形状であることから大きなサイズのチップがスクリーンを通過してしまっただけと考えられる。このため、2004 年度のチップ化試験では移動式で直径 46 cm まで粉碎可能なドラムチップが用いられた(高知県, 2005; 秦野ら, 2005)。

すなわち、本研究で分析するチップは 1 機種のみで作られたものであるが、その機種は山土場やストックヤードで使用可能かつある程度大径の材も粉碎可能という実用上の条件を満たす数少ない選択肢から選ばれている。したがって、得られた結果の有効性は決して低くないと考えられる。材の含水率については、残材発生から間もないかあるいは時間が経過していても山土場等に放置されていた場合は、生材に近い高い含水率のまま(森口ら, 2004a; 宮田ら, 2006)チップ化されることになる。チップ化する前に標高の低いストックヤード等で自然乾燥することも提案されている(宮田ら, 2006)がまだ一般的ではない。供試残材丸太の制約もあり、今回は含水率については生材に近い状態のみについて分析することとした。

2. 実験計画とチップ化

供試残材丸太は高知県香美市内の物部川流域スギ・ヒノキ人工林の間伐作業で発生後、チップ化試験のために同市内高知県立森林技術センターに搬送されたものの中から抽出した。林齢は 30~40 年生程度、伐採からの経過日数は 1 カ月程度以内であった。チップ寸法分布に対する樹種と丸太形状の影響を分析するため、末口直径数種類と長さ数種類の組み合わせについて、スギとヒノキ同数ずつ、皮付きで曲がり強くなく不定形でない供試残材丸太を選定した。その結果、末口直径は 20 cm と 30 cm の 2 種類、長さは 50 cm, 100 cm, 150 cm の 3 種類とし、それぞれの直径と長さの組み合わせについてスギ・ヒノキ 3 本ずつの供試残材丸太を得た。これらはすべて立木の部位にして根元部あるいは中幹部に相当している。ただし、末口直径 30 cm で長さが 150 cm のものはなかったため、径と長さの組み合わせは 20・50 (径 20 cm, 長さ 50 cm を以下このように

記す), 20・100, 20・150, 30・50, 30・100の5種類とした。すなわち, 要因として樹種(2水準)と丸太形状(径と長さの組み合わせ; 5水準)を設定し, $2 \times 5 \times 3 = 30$ 本の丸太を準備した。

チップ化に先立ち末口・元口直径と長さをcm単位で計測し, スマリアン法で実材積を算出した。直径は設定した径級に対し末口・元口の平均径にして ± 3 cm程度の範囲内, 長さはスギ30・100で86cmのものが1本あったが, 他は設定長さの1割減から1cm超の範囲内であった。また, チップ化時の含水率は, 他の供試残材丸太でスギ・ヒノキそれぞれ根元部と中幹部に相当するものから5本ずつを選び中央部の円盤を採取してJIS Z2101(日本工業調査会, 1994)により計測したところ, スギ $113.2 \pm 9.6\%$, ヒノキ $101.9 \pm 3.8\%$ であった(含水率は乾量基準, \pm は標準誤差SE, 以降も同様; $n=10$)。

供試残材丸太のチップ化は, 2004年11月10日に高知県立森林技術センターの苗畑管理倉庫および堆肥舎前の広場において, 新キャタピラー三菱社製の移動式ドラムチップパBC1800AM(79kW/2,400rpm)により行った。このチップパの切削ドラムは径914mm×幅520mm, 回転速度945rpmで, 横置きにされたドラムにはその半分の幅のナイフ4枚が90度おきに左右交互に装着されている。投入テーブルと投入口に縦置きに配置された2個の送りローラを介して径46cmまでの残材丸太等を処理できる。ローラの送り速度は最大45m/minで10段階に設定可能である。送り速度は寸法分布に影響すると考えられる要因の一つであるが, 予備試験を実施して検討した結果, 本実験では比較的安定して処理できる4段目に固定してチップ化を行うこととした。なお, 引き続いて行われた生産性調査(高知県, 2005; 秦野ら, 2005)では一時7段目も用いられたが, 投入工程が追いつかないこともあり主に4段目で作業が行われた。4段目にした場合の送り速度の実測値は11m/minであった。チップ化に際し特に丸太の樹皮は剥がしていない。

チップ化では同樹種・同形状の丸太3本を一組としてチップパに投入し, チップパの吐出口にフレコンバッグを取り付けてチップを回収した。丸太1本を回収単位とすれば実験の繰り返し数を増やすことができるが, 残留チップの混入などの影響を減らすため, 1単位の回収量を多くして各回の実験精度を確保することを優先した。チップ化の順番は, 事前準備の不足で完全なランダム化はできなかったが, 恣意的にならないように心がけた。なお, ヒノキ30・100については機械トラブルのため1本の丸太でチップ化に失敗したため, 成功した丸太2本分のチップのみを用いることとなった。回収したチップは一度全てを農業用コンテナ(内寸474mm×315mm×292mm, 容積 0.0436 m^3)数杯に移し, これらからチップ寸法計測用サンプルとして丸太一組すなわち樹種と丸太形状の組み合わせ($2 \times 5 = 10$ 種類)ごとにコンテナ1杯分のチップを偏りがないように抽出した。なお, 増加係数(コンテナ容積から算出したチップ層

積を丸太実材積で割った値)は, 平均2.56であった。

3. チップ寸法の計測

サンプルチップは高知大学農学部を持ち帰り, 樹種と丸太形状の組み合わせ1種類ごとにホーロー角バット($620 \text{ mm} \times 405 \text{ mm} \times 110 \text{ mm}$; 0.0276 m^3)2杯にほぼ等分し, 気乾状態になるまで約2カ月間自然乾燥させた。乾燥は主に室内で行ったが, 乾燥を促すために定期的な攪拌や天気の良い日中には屋外で日にあてるなどの措置を適宜行った。気乾後の含水率は15~20%程度となった。

チップの寸法計測は, 篩い分けにより個別チップを層別抽出する方法で行った。まず, 土の粒度試験(JIS A 1204; 日本工業調査会, 2000)で用いられる篩のうち, 2, 9.5, 19, 26.5, 37.5, 53, 75mmの7種類を用いて気乾状態のチップを篩い分けし, 各階級の質量を計測した(100mmの篩も併用したがこれに残留するチップ片はなかった)。2mm篩残留分以上の階級についてはチップ片を20個無作為抽出し, 寸法を計測した。該当数が20個以下の場合には全数を計測した。樹皮付きの有無では特に分別せず, 樹皮付きであるかどうかの記録のみとした。

寸法は, チップ片の形状を四角柱に近い形状とみなし, 縦・横・高さのうち大きなものから長辺・短辺・厚さと定義した。長辺は最大長としたが, 短辺と厚さは平均長とし, ノギス等によりmm単位の精度で計測した(図-1)。平均長は, 目視で一様と判断されたものは1カ所の計測により, そうでないものは複数箇所を計測した平均として求めた。なお, 製紙用チップでは木材組織の繊維方向を「長さ」, 接線方向を「幅」, 放射方向を「厚さ」と定義している(紙・パルプ技術協会, 1969; 図-1の例では「長さ」は短辺, 「幅」は長辺に相当する)。本研究では最大寸法を把握する必要から, 大きさの序列を重視した定義とした。また, チップ形状の指標として, 長辺を短辺で割った長短比を定義した。

篩分けはバット1杯分(約 0.02 m^3)を1計測単位として行った。ただし, 寸法計測については同一の樹種・丸太形状のバット2杯分をまとめて行った。これは, 篩の目が粗い階級でチップ片が少ない場合があった(37.5mm篩残留

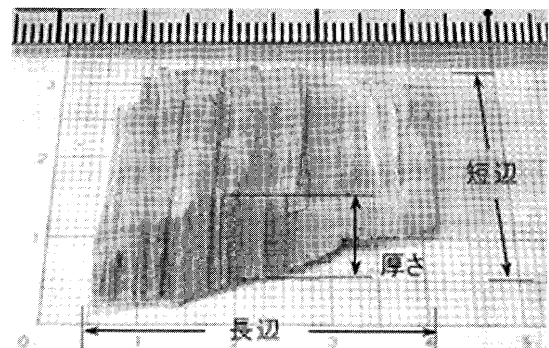


図-1. チップ寸法の計測方法

mm単位で計測。図の台紙は1mm方眼。長短比=長辺/短辺。

分：平均 18.9 個，53 mm：7.0 個，75 mm：8.2 個； $n=10$ ）ためである。チップや枝条片の寸法分布を計測した他の研究 (Asikainen and Pulkkinen, 1998；Suadican and Gamberg, 1999；Jensen *et al.*, 2004) あるいは計測方法に関する規格 (ANSI/ASAE, 1998) では，サンプル量は 0.01 m^3 ，篩の呼び寸法は 1.17～63 mm までの間で 5 種類程度を用いているものが多い。篩は場合により格子形状の他に丸穴やスリット状のものも用いられている。また，チップ寸法の個別計測は最も目の大きな篩を通過しなかったチップ片についてのみ行われている。

寸法分布は，篩い分けの階級ごとに気乾質量と個別計測したチップ寸法のヒストグラムを作成し，気乾質量比により寸法ヒストグラムを加重平均することで，相対度数分布および累積相対度数分布として求めた。寸法ヒストグラムの階級の閾値は，長辺では 2, 10, 20, 30, 50, 100, 150, 200 mm，短辺は長辺と同様とし上限は 100 mm まで，厚さは 1, 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30 mm，長短比については 1, 1.5, 2, 3, 5, 10, 15, 20 とした。閾値の数は 6～8 個，階級数は 7～9 である。寸法ヒストグラムの階級中心値は，平均値等を算術平均により求める場合は閾値の算術平均 (例：2～10 mm では $(2+10)/2=6.0 \text{ mm}$)，幾何平均による場合は閾値の幾何平均により求めた (例：2～10 mm では $\sqrt{2 \times 10}=4.47 \text{ mm}$)。最大閾値以上の階級中心値は該当する全個別計測寸法の算術平均により求めた (長辺 $n=46$ ，短辺 $n=1$ ，厚さ $n=2$ ，長短比 $n=17$)。2 mm 篩通過分についてはチップ片が微細なこともあり個別寸法を計測していない。2 mm 篩通過分の気乾質量割合は 3% 程度であり全体に及ぼす影響は小さいことから，平均値や標準偏差の計算では曖昧さを避けることを重視し，2 mm 篩通過分は除外することとした。累積相対度数分布の計算では全体の整合性を保つことを重視し，便宜上 2 mm 篩通過分の気乾質量割合は寸法ヒストグラムの最小階級に加えることとした。こうすることにより，2 mm 篩通過分に寸法ヒストグラムの最小階級以上の寸法値をもつチップがあると，累積相対度数分布の最小階級近辺は多少不正確になる可能性がある。しかし，III. 2. で分析するようなある一定の値以上となるチップの割合については正確な値が得られる。

このようにして，長辺・短辺・厚さ・長短比のそれぞれにつき 20 個 (樹種と丸太形状の組み合わせ 10 種類それぞれにつき 2 計測単位) の累積相対度数分布を得た。これをもとに，要因分析の目的変数となる平均値や，ある寸法値以上のチップ割合の値を算出した。また，チップサンプル全体の寸法分布として，20 計測単位を総合した累積相対度数分布も作成した。なお，ヒストグラムを用いて平均値等を算出する場合，階級区分が細かい方が正確な値が得られる。本研究では前述した 9 区分としたが，長辺の全サンプル総合の場合について 10 mm 以上の区分を 10 mm 間隔とする 21 区分として集計しても，9 区分で得られた平均値や標準偏差との差異は $\pm 1\sim 3\%$ の範囲内であった。このため，9 区分による集計でも実用上精度に問題はないと判断し

た。

4. 要因分析

III. 1. の実験計画により設定した要因は A「樹種」と B「丸太形状 (径と長さ)」の 2 要因で，水準数はそれぞれ 2 (A1：ヒノキ，A2：スギ) と 5 (B1：20・50，B2：20・100，B3：20・150，B4：30・50，B5：30・100) である。要因 A，B の組み合わせごとに二つの累積相対度数分布を作成しているため，データの形式は繰返し (2 回) のある 2 元配置と同じである。しかし，実質的な実験の繰返しは 1 回なので，測定繰返し (永田，2000) を有する，繰返しのない 2 元配置法として分散分析を行った。繰返しのない 2 元配置実験なので 2 要因の交互作用を検定することはできないが，測定誤差 (2 次誤差) を実験誤差 (1 次誤差) と分離できるため，母平均の推定精度が向上する。また，1 次誤差 (交互作用と交絡している) が 2 次誤差で有意でない場合には，有意な交互作用が存在する可能性は小さいと推論することができる。

目的変数は，4 種類のチップ寸法 (長辺・短辺・厚さ・長短比) の分布を表す指標として，平均と標準偏差に加え，基準値以上となるチップ片の割合とした。基準値は，高知県の事業のチップボイラに指定されている値 (50 mm × 10 mm × 10 mm) と得られた寸法分布とを勘案し，長辺では 30 mm と 50 mm，短辺では 20 mm と 30 mm，厚さでは 5 mm と 10 mm，長短比では 3 と 5 とした。これらはおおむね分布の上位 25% 点と上位 10% 点に相当している。平均と標準偏差は III. 1. での考察を踏まえ，算術平均ではなく幾何平均の方法によるものとした。

要因 B は本来，丸太の径 (2 水準) と長さ (3 水準) という二つの要因を設定しようとしたが，30・150 の組み合わせの供試残材を用意できなかったため，5 水準の 1 要因となったものである。そこで，要因 B が有意だった場合には，Scheffé の対比 (Zar, 1999) により，丸太の径 2 グループ (20 cm, 30 cm) と長さ 3 グループ (50 cm, 100 cm, 150 cm) それぞれのグループ間で有意差が認められるかどうかを検定した。

III. 結果と考察

1. 全体での計測値と分布形

III. 2. に記した方法で求めた全サンプル (20 計測単位) についてのチップ寸法実測値の累積相対度数分布 (図-2；実線と白抜き記号のグラフ) から分布の中心となる 50% 点を読み取ると，長辺では約 21 mm，短辺では約 13 mm，厚さでは約 3 mm，長短比では約 1.7 である。得られた相対度数分布から算術平均により平均値を計算すると，たとえば長辺では 34.1 mm とこれよりもかなり大きな値となる。一方幾何平均による方法で求めた平均値は 20.8 mm と実測値の分布の中心にかなり近い (表-1)。この傾向は他の寸法値，すなわち短辺・厚さ・長短比でも同様である。なお，幾何平均による平均値 X_{gm} は，対数変換した値の算術平均を逆対数変換して得られる (1 式；ANSI/ASAE, 1998)。

表-1. 全サンプルについてのチップ寸法の基礎統計

計測値 計算法 ²⁾	長辺		短辺		厚さ		長短比 ¹⁾	
	幾何平均	算術平均	幾何平均	算術平均	幾何平均	算術平均	幾何平均	算術平均
平均値	20.8 mm	34.1 mm	9.9 mm	14.3 mm	2.9 mm	4.2 mm	2.08	2.70
標準偏差	2.59	37.8 mm	2.22	10.2 mm	2.13	3.5 mm	1.83	2.60
歪度 ³⁾	0.05	2.81	-0.13	1.95	0.28	1.99	1.17	4.46
尖度 ⁴⁾	2.77	12.36	2.06	10.12	2.34	8.50	4.13	32.63

¹⁾ 長短比 = 長辺/短辺。 ²⁾ 幾何平均は対数正規分布を仮定, 算術平均は正規分布を仮定。「幾何平均」での歪度と尖度は対数変換した値で求めた。 ³⁾ 対称分布, 0; 左傾分布, 正; 右傾分布, 負。 ⁴⁾ 正規分布, 3; 鋭峰分布, 3より大; 鈍峰分布, 3より小。

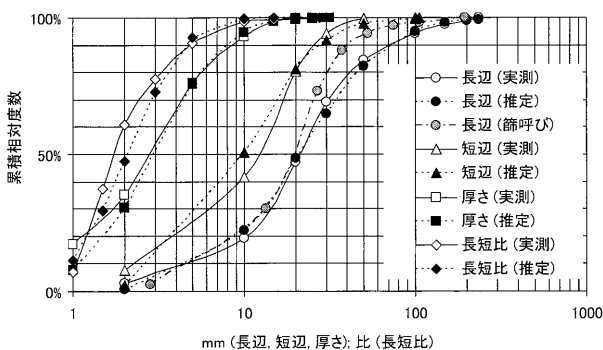


図-2. チップ寸法の累積度数分布

実線と中抜き記号(○等)のグラフは実測値, 破線と塗り潰し記号(●等)のグラフは対数正規分布に従うことを仮定し幾何平均による平均値 X_{gm} と標準偏差 S_{gm} から推定した累積度数分布。一点鎖線と灰色塗り潰しのグラフ(長辺, 節呼び)は ANSI/ASAE (1998) に順じて篩の格子対角長を呼び寸法として算出したもの。

$$X_{gm} = \log^{-1} \sum_i P_i \log \bar{X}_i \quad (1)$$

ただし, 上式において P_i は階級区分 i の相対度数, \bar{X}_i は階級区分 i の幾何平均による階級中心値 (II. 2. 参照) である。

分布の正規性について検討すると, 算術平均による歪度と尖度はそれぞれ 2~4, 9~33 程度 (表-1) と正規分布の場合の値 (0, 3) から大きく外れ, どの寸法値の分布も左傾した鋭峰分布ということになる (岸根, 1986)。しかし, 対数変換した寸法値では, 長辺・短辺・厚さの歪度と尖度はそれぞれほぼ 0 と 3 である。長短比では歪度 1.2, 尖度 4.1 とやや離れるが, 算術平均によるものよりは十分正規分布の場合の値に近い (表-1)。また, 正規確率紙による視覚的な方法 (たとえば, 岸根, 1986; 永田, 1996, など) によっても対数変換した値の正規性を確認できた。以上から, 長短比についてはあてはまりがやや悪いものの, チップ寸法値の分布は対数正規分布に従っているとみなしてよいものと思われる。

ある分布が対数正規分布に従うとき, 分布の母数として平均 X_{gm} と標準偏差 S_{gm} が得られていれば, 標準正規分布の z を用いて任意の累積相対度数 X に相当する値 \hat{X} を (2) 式により推定することができる。

$$\hat{X} = X_{gm} \cdot S_{gm}^z \quad (2)$$

ここで S_{gm} は幾何平均により求められた対数正規分布の標準偏差 (無次元) で, X_{gm} を用いて (3) 式により得られる (ANSI/ASAE, 1998)。

$$S_{gm} = \log^{-1} \left[\sum_i P_i (\log \bar{X}_i - \log X_{gm})^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

図-2 の破線と塗り潰し記号のグラフは X_{gm} と S_{gm} を用いて (2) 式により推定したチップ寸法値の累積相対度数分布である。長辺と厚さでは全域にわたり実測値とよく適合している。短辺と長短比では累積相対度数 30~80% の範囲で実測値との乖離が目立つが, 累積相対度数 80% 以上では実測値の分布をよく再現している。すなわち, チップ寸法の X_{gm} と S_{gm} を知る事ができれば, 特に寸法値の大きな部分については寸法分布をよく推定することができるものと思われる。

チップ寸法の実測をせず, 篩分けのみの情報から寸法分布を求めた場合, どの程度実測値と異なるかを, 長辺の場合について確認してみる。このとき, 草本枝条の計測規格 (ANSI/ASAE, 1998) に倣い, 篩の格子対角長を呼び寸法として累積度数分布を求めた (図-2; 一点鎖線と灰色塗り潰し記号のグラフ)。つまり, 格子幅 (本来の呼び寸法) x mm の篩の呼び寸法を $x\sqrt{2}$ mm とし, この篩に残留したチップの長辺はすべて $x\sqrt{2}$ mm より大きいとみなす。このようにして求めた呼び寸法の累積度数分布グラフを実測値のグラフと比較すると, 20 mm 以下程度のサイズの小さい部分では差は少ないが, それ以上になると呼び寸法によるグラフは過少評価が目立つ。累積相対度数 80% では 10 mm, 90% では 30 mm ほど実測値よりも小さな寸法値となっている。このことから, 特に大きなチップの寸法分布を知ろうとする場合, 篩分けとサンプリングによる個別計測を併用する本研究の計測方法は効果的といえる。

2. 長辺・短辺・厚さ・長短比の分析

目的変数としたチップ寸法分布の指標値のうち, ある寸法値より大きな割合は, 品質管理における不良率のように 0 から 1 の間の値をとる変数である。こうした変数をそのままの値で分析すると, 誤差範囲が 0 から 1 の範囲外となる場合があることのほか, たとえば 0.50 を 0.45 にする効果と 0.06 を 0.01 にする効果では後者の方が実質的な効果は高いにもかかわらず同等に評価されてしまう, などの問題がある。そのため, こうした場合に適当とされている方法

の一つとして、もとの値 P を (4) 式でロジット変換 (永田, 1996) した値 $L(P)$ を用いて分析を行った。

$$L(P) = \log \frac{P}{1-P} \quad (4)$$

以下の図表での水準平均等は逆変換してもとの割合に戻した値を示した。このため SE は + と - で異なる値になっている。

長辺の X_{gm} , S_{gm} , 30 mm より大の割合, 50 mm より大の割合と樹種および丸太形状との関係を分析した結果, X_{gm} と 30 mm より大の割合が樹種で有意, S_{gm} が樹種および丸太形状と有意であった (表-2; X_{gm} 等の全平均は 20 計測単位の平均であり全体から計算した表-1 の値とはわずかに異なる)。樹種の効果は X_{gm} と 30 mm より大の割合についてはヒノキがスギよりもサイズが大きい (水準平均: ヒノキ 26 mm, スギ 17 mm) あるいは割合が多い (ヒノキ 38%, スギ 22%) というものであった。これには, ヒノキはスギよりも比重が高い (供試残材と同一地域の調査結果ではヒノキ 0.407, スギ 0.311; 森口ら, 2004b; 宮田ら, 2006) ことが影響しているものと思われる。

長辺の S_{gm} では樹種の効果は逆の傾向で, 丸太形状も有意であったが径級と長さの対比では有意でなく, 一貫した傾向はみられなかった (表-2; 図-3)。 S_{gm} の樹種に関する水準平均はヒノキで 2.33, スギで 2.59 と 1 割程度の差であるが, (2) 式にみられるように分布には指数的に影響するのでその効果は小さくない。樹種についての超過割合の有意性は 30 mm 超より 50 mm 超とサイズが大きい方が低くなっている。これは平均値付近ではスギより有意にヒノキが大きいという樹種別の長辺サイズの差が, 逆の効果をもつ S_{gm} の影響により分布の右方に偏るに従い小さくなっていくためと考えられる。

短辺ではすべての目的変数で樹種の要因が有意であり,

X_{gm} , 20 mm より大の割合, 30 mm より大の割合では長辺と同様にヒノキがスギよりも寸法が大きくなる傾向であった (表-3)。特に X_{gm} と 20 mm より大の割合では長辺における場合よりも寄与率も高く, 水準間の差もより明確になっている。 S_{gm} も長辺と同様ヒノキよりスギが 1 割程度大きかった。丸太形状の要因は 20 mm より大の割合, 30 mm より大の割合で有意であり, いずれも径級の対比で 30 cm が 20 cm よりも該当サイズを超過するチップの割合が有意に高い傾向を示した。対比における p 値は「20 mm よりも大の割合」の方が「30 mm よりも大の割合」よりやや小さいが, 丸太形状の要因の寄与率 (表-3; 20 mm よりも大の割合: 26%, 30 mm よりも大の割合: 63%) と水準平均の差異 (図-4) から判断すると, 前者よりも後者において径級による差がより明確に現れている。

厚さと長短比では, どの指標値も樹種と丸太形状の 2 要因について有意ではなかった。紙・パルプ技術協会 (1969)

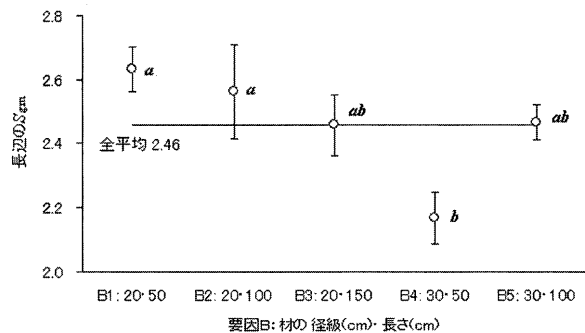


図-3. 要因 B (材の径級と長さ) の 5 水準別の幾何平均による長径の標準偏差 S_{gm}

縦棒は ±SE, 異なるアルファベットは水準平均間に有意差があることを示す (Tukey-test, Zar, 1999; $\alpha=0.05, n=4$)。

表-2. 長辺の分析結果

従属変数	X_{gm} (mm) ¹⁾	S_{gm} ¹⁾	30 mm より大の割合	50 mm より大の割合
全平均 (n=20)	21.5	2.46	28.9%	13.8%
要因 A: 樹種				
p 値 [寄与率] ²⁾	0.02 [56.9%]*	0.00 [31.8%]**	0.01 [47.4%]*	0.16
水準平均 ± SE (n=10) ³⁾				
A1: ヒノキ	26.5 ± 1.7 ^a	2.33 ± 0.06 ^b	37.6% +3.8% ^a -3.7%	
A2: スギ	16.6 ± 0.7 ^b	2.59 ± 0.07 ^a	21.5% +1.6% ^b -1.5%	
要因 B: 径級 (cm)・長さ (cm)				
p 値 [寄与率] ²⁾	0.45	0.00 [43.0%]**	0.11	0.67
水準平均 ± SE (n=4) ³⁾		(図-3を参照)		
径級の対比				
p 値 (20 cm vs. 30 cm)		0.08		
長さの対比				
p 値 (50 cm vs. 150 cm)		0.95		
p 値 (50 cm vs. 100 cm)		0.52		
p 値 (100 cm vs. 150 cm)		0.95		

¹⁾ X_{gm} , 幾何平均; S_{gm} , 幾何平均による標準偏差 (ANSI/ASAE, 1998)。²⁾ **1%, *5%有意。寄与率は有意な要因のみについて示した。³⁾ 水準平均は有意な要因のみについて示した。ただし要因 B については図と重複するため省略した。異なるアルファベットは水準平均が有意に異なることを示す ($\alpha \leq 0.05$)。超過割合についての分析はロジット変換で行い逆変換した値を記しているため, SE は + と - で異なる値になっている。

表-3. 短辺の分析結果

従属変数	X_{gm} (mm) ¹⁾	S_{gm} ¹⁾	20 mm より大の割合	30 mm より大の割合
全平均 (n=20)	10.3	2.15	18.8%	5.0%
要因 A: 樹種				
p 値 [寄与率] ²⁾	0.00 [70.5%]**	0.05 [32.9%]*	0.00 [60.5%]**	0.00 [16.4%]**
水準平均 ± SE (n=10) ³⁾				
A1: ヒノキ	12.6 ± 0.6 ^a	2.07 ± 0.05 ^b	27.2% +3.2% ^a -3.0%	6.9% +2.0% ^a -1.6%
A2: スギ	8.0 ± 0.2 ^b	2.23 ± 0.02 ^a	12.5% +1.0% ^b -0.9%	3.6% +0.8% ^b -0.7%
要因 B: 径級 (cm)・長さ (cm)				
p 値 [寄与率] ²⁾	0.14	0.29	0.05 [26.3%]** (図-4 を参照)	0.00 [63.5%]** (図-4 を参照)
水準平均 ± SE (n=4) ³⁾				
径級の対比				
p 値 (20 cm vs. 30 cm)			0.01*	0.02*
グループ平均 ± SE ³⁾				
径級 20 cm (n=12)			15.3% +2.0% ^a -1.8%	3.2% +0.7% ^a -0.6%
径級 30 cm (n=8)			25.0% +4.3% ^b -3.9%	9.6% +1.5% ^b -1.3%
長さの対比				
p 値 (50 cm vs. 150 cm)			0.13	0.10
p 値 (50 cm vs. 100 cm)			0.13	0.28
p 値 (100 cm vs. 150 cm)			0.96	0.56

^{1), 2), 3)} 表-2 と同様。

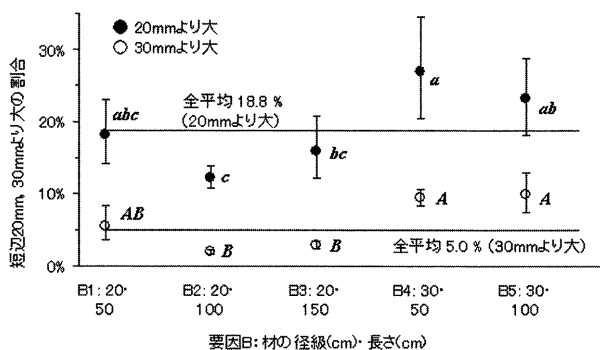


図-4. 要因 B (材の径級と長さ) の 5 水準別の短辺が 20 mm および 30 mm より大きいチップの割合

図-3 と同様。ただし水準間の有意差を示すアルファベットは小文字 (20 mm より大) と大文字 (30 mm より大) で区別している。

は、「一般にチップの厚さは、長さの 15~25% ぐらいで、密度が高い樹種ほど、同一長さでも厚くなる傾向がある」としている。ただし長さは繊維方向、幅は放射方向で定義されているので、この言及における長さとは本研究の長辺と短辺に必ずしも対応するわけではなく、逆になる場合もある。本研究の結果では、厚さの長辺と短辺に対する比を全サンプルについての X_{gm} (表-1 の幾何平均による平均値) から計算するとそれぞれ 13.9, 29.3% となり、ほぼ上記の紙・パルプ技術協会 (1969) の記述通りになっている。一方、厚さは比重の差に関係している樹種の要因について有意ではなかった。短辺あるいは長辺は繊維方向となる場合が多いが、チップ片の繊維方向の「長さ」を決めるのは繊維の軸方向に直角な木口切削であり、木口切削の抵抗は

比重との関係が強いことが知られている (田中・喜多山, 1992; 「幅」と「厚さ」の両端はそれぞれ縦切削, 横切削による)。このため、長辺と短辺、特に短辺で樹種の要因が有意となったと考えられる。

径級によるチップ寸法の差は、短辺の平均値以上のサイズでの超過割合でのみ有意であった。送りローラの速度が一定で丸太が軸方向にチップ化される場合、径級が大きな方が切削ドラムから残材に加えられる単位時間当たりの切削エネルギーは小さくなる。このため、粗めのチップ、すなわちチップ寸法が大きくなるものと考えられる。したがって、切削ドラムの回転数が一定で送り速度が高くなってもチップ寸法は大きくなると考えられる。

樹種と丸太形状の要因の交互作用が存在する可能性が低い、すなわち 1 次誤差が 2 次誤差で有意でなかった目的変数は、長辺の S_{gm} と短辺の 30 mm よりも大の割合のみであった。これらでは交互作用は存在しない可能性が高く、単要因としての効果がより明確に現れている。繰り返しのない 2 元配置実験での交互作用を検定する方法として、2 計測値の平均値についてテューキーの加法性の検定 (廣津, 1992; 石村, 1992) を適用してみると、短辺の X_{gm} でのみ有意であった ($p=0.03$)。スギでは丸太形状の 5 水準が 7.1~8.8 mm とあまり相違がないのに対し、ヒノキでは 20・100 (9.7 mm) と 30・50 (15.6 mm) で差が大きい (他は 12.1~13.2 mm) という傾向で、後者の大小関係は短辺の 20 mm よりも大の割合 (図-4) に似ている。すなわち、短辺の X_{gm} や 20 mm よりも大の割合では、上記のような交互作用が存在している可能性がある。

3. 寸法基準を満たすチップの割合

得られた寸法分布を用いて、寸法基準を満たすチップ割

表-4. 長辺・短辺・厚さ別の気乾質量割合の集計 (%)

		短辺					小計
		10 mm 以下	10~ 20 mm	20~ 25 mm	25~ 30 mm	30 mm より大	
長辺 50 mm 以下							
厚さ	10 mm 以下	40.6	31.9	6.3	2.4	1.2	82.5
	10 mm より大	0.0	0.9	0.2	0.3	0.6	2.0
	小計	40.6	32.9	6.5	2.7	1.8	84.5
長辺 50 mm より大							
厚さ	10 mm 以下	1.2	5.3	1.6	1.1	1.5	10.7
	10 mm より大	0.0	0.6	0.6	0.9	2.7	4.8
	小計	1.2	5.9	2.2	2.1	4.2	15.5

合について検討する。まず、比較的厳しい寸法基準として、高知県の事業で用いられているボイラの供給装置に指定されている適チップ寸法 50 mm × 10 mm × 10 mm 以下を適用してみる。全チップサンプルについて、長辺・短辺・厚さに関し気乾質量割合のクロス集計をすると、長辺 50 mm 以下、短辺 10 mm 以下、厚さ 10 mm 以下のチップは全体の 41% であった (表-4)。すなわち約 6 割が不適ということになる。厚さは全体でも 10 mm より大きいものは 7% であるが、短辺 10 mm 以下という基準は厳しいようである。短辺の基準を 20 mm 以下にすると適チップは約 7 割に、25 mm 以下にすると約 8 割となる。実際にはスクリーニングを行うにしても長辺以外を基準とした選別は難しいこともあり、現在この事業では長辺 50 mm のみを基準として運用されている。全サンプルについての長辺 50 mm 以下のチップ割合は 84% である。また、流動層燃焼方式での上限最大サイズ 100 mm (熊崎, 2006) に相当する長辺 100 mm 以下では 94% (最小サイズ 6 mm を考慮すると 6 mm 以下の 12% を除いて 84%) である。一方、チップ供給がスクリー方式でも長辺 200 mm 以上の長尺チップの混入割合が 1% 以下とされているボイラもある (佐々木, 2006)。本研究の結果では該当割合は 1% なので、そのようなボイラであればほぼ問題なく使用可能と考えられる。

長辺 50 mm 以下のチップを選別する場合、篩の呼び寸法は 50 mm より小さくする必要がある。格子形状の呼び寸法 (格子幅) 50 mm の篩を通過するチップ割合は、本研究の場合約 96% (図-2; 「長辺 (篩呼び)」のグラフで横軸が対角寸法 70.7 mm の場合の累積相対度数) であり、これに相当する長辺の実測寸法は約 106 mm である。すなわち、50 mm の篩で篩い分けすると実際には長辺 106 mm 以下のチップが選別されることになるであろう。長辺 50 mm 以下のチップを選別するためには、以下のように考えると、呼び寸法 16 mm 程度の篩を用いる必要があると思われる。すなわち、図-2 の「長辺 (実測)」のグラフで横軸 50 mm での累積相対度数 (約 85%) に相当する寸法を「長辺 (篩呼び)」のグラフから読み取ると約 23 mm である。これを $\sqrt{2}$ で割る (格子枠の寸法に直す) と約 16 mm となる。同様にして、長辺 100 mm 以下の場合に

は「長辺 (篩呼び)」のグラフから約 51 mm が読み取られ、これを $\sqrt{2}$ で割って約 36 mm となる。

もし短辺や厚さの寸法も厳密に選別する必要があるときには、長短比や長辺・短辺に対する厚さの割合といった情報が有用になると思われる。たとえば本研究の場合長短比の総平均は約 2 で、調べた要因と有意な関係はなかった。すなわち長辺 50 mm 以下のチップでは半分以上が短辺 25 mm 以下と予想され、実際には長辺 50 mm 以下のチップの約 8 割が短辺 25 mm 以下であった (表-4)。篩の寸法との関係では、格子篩では格子の対角長が残留するチップの短辺長を規定しているとも考えられる。このため、長短比等の性質をさらに詳しく知ることができれば、篩い分けのみで、ある程度長辺も含めた寸法の選別を制御できる可能性がある。

本研究では樹皮付きの残材丸太を使用した。篩い分けでは樹皮の有無での分別は行わなかったが、形状計測のサンプリングでは樹皮の有無を記録した。篩階級別に最大 20 個抽出したチップ片に占める樹皮付きのものの割合を比較すると、53 mm 以上の篩階級では他の階級よりも有意に高かった (53 mm 篩残留分: 31.2%, 75 mm: 15.2%; $n=10$, $\alpha=0.01$, Tukey-test, Zar, 1999; その他の篩階級は 0.0~2.4% で有意差なし; 全平均 3.1%; 分析はロジット変換した値で行った)。このことから、樹皮を取り除くことができれば大きいサイズのチップを減らすことが可能と考えられる。なお、分析は樹種と丸太形状の要因も含め三元配置の分散分析で行ったが、交互作用も含め篩階級単要因以外の要因で樹皮付きチップの出現割合は有意ではなかった。

4. 他のチップとの比較

2002 年 11 月に本研究の関わる事業において最大処理径 30 cm の移動式ディスクチップ (東興産業 150 型) により作られたチップ寸法 (森口ら, 2004b) を幾何平均の方法により集計すると、 X_{gm} は長辺 23.2 mm, 短辺 13.9 mm, 厚さ 3.6 mm と本研究よりもやや大きく、長短比は 1.67 とやや小さかった ($n=160$; 気乾質量の記録はなかったため長辺 × 短辺 × 厚さを体積とみなし体積で重み付けをして算出した)。 S_{gm} は長辺, 短辺, 厚さがいずれも 1.49 と本研究 (2.59, 2.22, 2.13; 表-1) よりも小さくサイズが揃っていることを示している。長短比の S_{gm} も 1.52 と本研究の 1.83 よりも小さい値であった。これは、チップ化された丸太が本研究より細いものが多かったこともあるが、チップがディスク方式で均一なチップを作るのに適した方式であること (熊崎, 2005) がおもな原因と考えられる。厚さは 10 mm を超えるものはなく、長辺 50 mm より大のチップ割合は 4.2% と少なかった。50 mm × 10 mm × 10 mm 以下のチップは本研究と同程度の 41.8% であったが、短辺を 20 mm までとすると 89.0%, 30 mm までとすると 95.8% のチップが寸法範囲内となっていた。

本研究で用いたチップの生産性調査 (高知県, 2005; 秦野ら, 2005) で多数の残材をチップ化した際、長さが短い残材では送りローラと切削ドラムの間で材が暴れるような

状態になりチップ化が断続的になる場面がしばしばみられた。このため、材の長さやチップ寸法との間に有意な関係があることが予想されたが、分析の結果では有意性は認められなかった。岩手県における木質バイオマス利用事業で本研究より一回り小さなドラムチップ（BC1000 XLM；切削ドラムの径 530 mm×幅 430 mm）とディスクチップ（森口ら，2004b，で用いられたものと同型）を用いて長尺チップの発生量を分析した結果では、「長尺チップの発生は、材が送りローラを外れ、無制御状態となったときにみられた。ディスク方式は、送りローラとディスク盤との間に三角状の空間ができ、小径材が複数本投入された場合に多く発生する傾向が強かった」とされており（佐々木，2006），ドラム方式の方が送りローラに制御されない状態による問題は少ないようである。なお、この報告でチップ化された残材丸太は長さ 2 m のアカマツ材で平均径は 8 cm と細い。

岩手県の事例ではボイラに不適とされる寸法は長辺 20 cm 以上と本研究の場合よりも基準は緩いため、検討されているのは長辺 10 cm 以上のチップについてである。その質量割合・個数ともにドラム方式（10～15 cm：0.62%，587；15～20 cm：0.13%，77；20 cm～：0.09%，21）がディスク方式（それぞれ 1.07%，1321；0.38%，327；0.24%，117）より少ない。しかし、1 個当たり質量としてドラム式対ディスク式の比として比較すると 10～15 cm で 1.4，15～20 cm で 1.5，20 cm～で 2.1 と、ドラム式の方が大きく、長尺部分でその傾向が強い。これは短辺や厚さが大きいことを示唆している。すなわち、ドラム式の方が寸法分布のばらつきが大きく粗いチップが発生するという点で、高知県の事例と同様の傾向を示している。

IV. おわりに

ドラムチップで残材丸太から作られたチップ片の寸法を篩い分けと層別サンプリングの方法により計測し、対数正規分布を仮定する方法で寸法分布をよく表現できることを確認した。標準偏差が平均値に比例するような分布の場合、対数変換すると標準偏差は平均値と無関係になり、正規分布に従うことが知られている（永田，1996）。チップ片の寸法は土粒子などと同じく寸法範囲が広く、たとえば 1 cm 程度のサイズのチップの寸法のばらつきは 10 cm 程度のサイズのチップの寸法のばらつきと同じとは考えにくいことなどから、妥当な結果と考えられる。

チップ寸法と樹種・丸太形状との関係では、比重の大きな樹種で長辺と短辺が、径の大きな丸太で短辺が大きなサイズになる傾向が認められた。ただしチップボイラへの使用で最も問題となる長辺の大きなチップ割合に関してはこれら要因との有意な関係は認められなかった。したがって、試験した範囲の残材丸太については、とりわけ検討したチップボイラに不適な性質のものはなかったといえる。たとえば積込み効率などの点で不利な短くて径の太い残材丸太がチップ寸法の面でも不適ということはなかった。ただし、残材丸太については異なる含水率（自然乾燥後のもの

など）やより小径のもの、チップについては異なる送り速度や機種についてなど、さらなる実験による検証は必要である。なお、こうした条件について、III 章までの結果から可能な範囲で検討してみると以下のようなことが考えられる。

材の含水率と切削抵抗については、田中・喜多山（1992）は「一般に、被削材の含水率の低下に伴い、切削抵抗は繊維飽和点付近から増加し始め、含水率 10%前後で最大値を示したのち、全乾に向かってほとんど変わらないか、やや低下する」としている。繊維飽和点は、日本の材ではほぼ 30%とみなしてよい（寺澤，2004）ので、チップ化以前に材に施す乾燥処理が自然乾燥程度ならば、チップの寸法分布にも大きな影響はないと思われる。ただし、田中・喜多山（1992）で示されている実験結果は含水率 50%以下についてであり、生材に近い高含水率では傾向が異なる可能性も考えられる。チップの送り速度については、III.2. に記したように材に与えられる単位時間当たり切削エネルギーという面からは材の直径という条件と同様の影響が考えられる。実験で有意差が認められた直径 20 cm と 30 cm は木口面積にすると約 2 倍の差があることから、送り速度が 2 倍異なるとチップの寸法分布にも同程度の差が出るのが推測される。チップの機種については、切削刃の種類や切削角の相違による影響が考えられる。切削角が大きいと切削抵抗は大きくなる（田中・喜多山，1992）。したがって、同じ刃先角ならドラム半径が小さい方が切削角は大きくなるため、チップが粗くなる可能性が考えられる。

一方チップボイラの送り装置に求められる寸法基準のうち比較的厳しいものを適用すると、適チップは全体の 4 割程度しかなかった。長辺のサイズのみに限定しても 2 割弱が不適となる。中型以下の移動式チップにはスクリーンが装備されていない場合が多いが、そのような基準を満たすためにはスクリーニングなどの措置が必要と考えられる。

寸法に関して最も品質のよいチップは、製紙用チップ工場などで丸太の樹皮を剥いだ後に大型の定置式ディスクチップを用いて作られるものと考えられる。しかし林地残材を木質バイオマスとして利用するシステムを考えるとき、山土場や中間土場で剥皮をせずに移動式のチップでチップ化する必要がある場合も少なくないであろう。そうしたシステムの構築に際しては、チップ化の経費に加え、チップ寸法といった品質面の管理も重要な検討事項である。

本研究の一部は第 116 回日本森林学会大会で口頭発表した（宮田ら，2005）。試験用残材およびチップ化作業では香美森林組合の、チップの供試では（株）新キャタピラー三菱の協力を得た。ここに記して謝意を表す。本研究は、高知県森林局による「木質バイオマス利用システム事業」（高知県 H16 年度「中山間地域における森林バイオマス資源の有効利用技術開発事業」）の 2004 年度事業、および文部科学省科学研究費研究「森林において発生する未利用バイオマス資源の把握と収穫技術の開発による資源化」（基盤 C、

後藤純一代表, 2004~2006年度)の一部として実施された。

引用文献

- ANSI/ASAE (1998) ANSI/ASAE S424.1 MAR98. Method of determining and expressing particle size of chopped forage materials by screening. *In* ASAE Standards 1998. ASAF, St. Joseph, MI. 562-564.
- Asikainen, A. and Pulkkinen, P. (1998) Comminution of logging residues with Evolution 910 R chipper, MOHA chipper truck, and Morbark 1200 tub grinder. *J. For. Eng.* 9(1): 47-53.
- 秦野瑤子・後藤純一・宮田大輔・鈴木保志・山口達也・吉井二郎 (2005) 木質バイオマス利用のための中間土場における林地残材のチップ化. *日林学術講* 116: 170.
- 秦野瑤子・後藤純一・鈴木保志・山下 博・吉井二郎・政岡尚志・板井拓司 (2006) 土場残材の流通における経済性と経費削減の可能性. *日林学術講* 117: 127.
- 廣津千尋 (1992) 実験データの解析—分散分析を超えて—. 432 pp, 共立出版, 東京.
- 石村貞夫 (1992) 分散分析のはなし. 373 pp, 東京図書, 東京.
- Jensen, P.D., Mattsson, J.E., Kofman, P.D., and Klausner, A. (2004) Tendency of wood fuels from whole trees, logging residues and roundwood to bridge over openings. *Biomass Bioenerg.* 26: 107-113.
- Jirjis, R. (2005) Effects of particle size and pile height on storage and fuel quality of comminuted *Salix viminalis*. *Biomass Bioenerg.* 28: 193-201.
- 紙・パルプ技術協会編 (1969) 紙パルプの製造技術全書 第1巻 原木・調木. 302 pp, 紙・パルプ技術協会, 東京.
- 岸根卓郎 (1986) 理論応用統計学. 600 pp, 養賢堂, 東京.
- 高知県 (2004) 平成 15 年度成果報告書 バイオマス等未活用エネルギー実証試験事業・同事業調査 バイオマス等未活用エネルギー実証試験事業 中山間地域における森林バイオマス資源の有効利用技術調査. 86 pp, 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 東京.
- 高知県 (2005) 平成 16 年度成果報告書 バイオマス等未活用エネルギー実証試験事業・同事業調査 バイオマス等未活用エネルギー実証試験事業 中山間地域における森林バイオマス資源の有効利用技術開発事業. 21 pp, 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 東京.
- 熊崎 実 (2004) 木質チップの種類と品質基準. 季刊・木質エネルギー 4: 22-24.
- 熊崎 実 (2005) 木質バイオマスの細片化: その原理. 季刊・木質エネルギー 6: 22-24.
- 熊崎 実 (2006) 木質燃料の特性と燃焼装置との相性. 季刊・木質エネルギー 10: 22-24.
- Mattsson, J.E. and Kofman, P.D. (2003) Influence of particle size and moisture content on tendency to bridge in biofuels made from willow shoots. *Biomass Bioenerg.* 24: 429-435.
- 宮田大輔・鈴木保志・後藤純一 (2006) 林道端と舗装土場における林地残材の自然乾燥. *日林誌* 88: 245-253.
- 宮田大輔・鈴木保志・秦野瑤子・後藤純一・山口達也・吉井二郎 (2005) 林地残材バイオマスの乾燥とチップ形状. *日林学術講* 116: 171.
- 森口敬太・鈴木保志・後藤純一・稲月秀昭・白石祐治・山口達也・小原 忠 (2004a) 林道端に集積されたスギ残材の含水率の経年変化. *日林誌* 86: 93-97.
- 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 (2004b) 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.
- 永田 靖 (1996) 統計的方法のしくみ. 238 pp, 日科技連, 東京.
- 永田 靖 (2000) 入門 実験計画法. 386 pp, 日科技連, 東京.
- 日本エネルギー学会 (2006) バイオマス用語辞典. 518 pp, オーム社, 東京.
- 日本工業調査会審議 (1994) JIS Z 2101: 1994 木材の試験方法. 38 pp, 日本規格協会, 東京.
- 日本工業調査会審議 (2000) JIS A 1204: 2000 土の粒度試験方法. 12 pp, 日本規格協会, 東京.
- ベレットクラブ (2004) 木質ベレット関連事業に関する全国調査の結果 (2000年1月~2003年12月). 3 pp, ベレットクラブ, 京都.
- Royse, D.J. and Sanchez-Vazquez, J.E. (2001) Influence of substrate wood-chip particle size on shiitake (*Lentinula edodes*) yield. *Bioresour. Technol.* 76: 229-233.
- 佐々木誠一 (2006) 移動式チップパーの長尺チップの発生量. 岩手県林業技術センター研究成果速報 193: 1.
- Spinelli, R., Hartsough, B.R., and Magagnotti, N. (2005) Testing mobile chippers for chip size distribution. *Int. J. For. Eng.* 16(2): 29-35.
- Suadicani, K. and Gamborg, C. (1999) Fuel quality of whole-tree chips from freshly felled and summer dried Norway spruce on a poor sandy soil and a rich loamy soil. *Biomass Bioenerg.* 17: 199-208.
- 鈴木保志 (2004) 中山間地域における森林バイオマス資源の有効利用に向けて—第 11 回森林生産システム研究会報告—. *森林学誌* 19: 171-174.
- 田中千秋・喜多山繁 (1992) 木質科学講座 6 切削加工. 142 pp, 海青社, 大津.
- 寺澤 眞 (2004) 木材乾燥のすべて. 737 pp, 海青社, 大津.
- Zar, J.H. (1999) *Biostatistical analysis*, 4 th ed. 663 pp, Prentice-Hall Inc., Upper Saddle River, NJ.