

## 論 文

## 数年間放置されたスギ枝条の容積密度と含水率について

寺岡 行雄<sup>1)</sup>・合志 知浩<sup>2)</sup>

## The bulk density and moisture content of sugi slashes after several years' piling

TERAOKA Yukio<sup>1)</sup> and GOUSHI Tomohiro<sup>2)</sup><sup>1)</sup> 鹿児島大学農学部生物環境学科

Department of Environmental Sciences and Technology, Faculty of Agriculture, Kagoshima University, Korimoto, Kagoshima 890-0065

<sup>2)</sup> 元鹿児島大学大学院農学研究科

Graduate School of Agriculture, Kagoshima University, Korimoto, Kagoshima 890-0065

Received Sep 30, 2009 / Accepted Dec 8, 2009

## Summary

The objective of this study was to identify the bulk densities and moisture contents of sugi (*Cryptomeria japonica*) slash over a few years natural drying process in a clear cutting field for site preparation. The slash samples, 155 branches in total, were collected from 3-year, 2-year and 1-year slash piles, and fresh branches from four living sugi trees in Takakuma Experimental Forest of Kagoshima University. The bulk density and moisture content of the slash branches were measured. The results showed that the moisture contents of branches were 45.3% for 3-year drying, 98.6% for 2-year drying, 52.6% for 1-year drying, and 92.2% for living branches. The bulk densities were 0.481 for living branches, 0.447 for 1-year drying, 0.437 for 2-year drying, 0.432 for 3-year drying, and there was a significant differences in bulk densities for each drying periods as 1% level ANOVA. Also, there was a significant difference in the bulk densities of three layers (upper, middle, lower) in the slash piles. A half-life period of the branch bulk density was calculated as 15.6 years. In the making of slashes for woody fuel, it would be necessary to examine the natural drying period from two aspects, the heat calorific value improvement by decrease in moisture content and the loss in woody biomass weight from the decomposition process.

Key words : forestry residue, woody fuel, drying period, natural drying, decomposition

キーワード : 林地残材, 燃料化, 放置年数, 野外乾燥, 分解

## はじめに

カーボンニュートラルな燃料である木質バイオマスの利用に期待が高まっている。土木・建設廃材, パルプ黒液, 製材廃材および林業生産に伴い排出される林地残材があるが, 林地残材以外はエネルギーまたはマテリアルとして利用されており, 利用可能量は多くない。林地残材の年間発生量は390万トンで, そのほとんどが未利用であるとされており (東大総研ホームページより), 林地残材を有効活

用とする方策が課題となっている。林地残材とは, 木材生産を行う林業生産活動の結果排出される残材であり, 立木を伐倒した後, 枝払いにより生じる枝条と造材の際に切り捨てられる先端部分をあわせて末木枝条と呼ばれている (写真 - 1)。林地残材には枯死木や根元部分の端材も含まれるが, 本研究では枝条に焦点を絞って検討を行った。

伐採直後の木材は高含水率である (池田ら, 2004)。含水率によって変わる (筒本, 1996) 実際に利用可能な熱量は低位発熱量と呼ばれ, より多くの発熱量を利用可能とす



写真 - 1 1年放置された堆積枝条

るために枝条を乾燥させることが重要である。海外においては、アメリカ合衆国での末木枝条の乾燥実験 (Rogers, 1981), また、スウェーデンにおけるヤナギの野外乾燥 (Gigler *et al*, 2004), あるいはドイツウヒの皆伐後1年間の野外での乾燥 (Nurmi, 1999) などが報告されている。一方、日本における木材の天然乾燥として、伐採後の葉枯らし乾燥が一般的に知られているが、科学的な検討は少なく (馬田ら, 1996), その乾燥メカニズムに関する研究もほとんど無い。森口ら (2004) によって林地残材の含水率の経年変化について研究されているが、ある時点における経過年数の異なる端丸太サンプルの比較であり、乾燥過程についての研究は筆者らによるもの程度である (寺岡・合志, 2005)。

以上のように、末木枝条を野外において長期放置することによって乾燥させることは燃料としての質を高める意味で有益であるものの、長期間の野外での放置は木材腐朽菌等による木質部分の分解によって可燃バイオマスが減少することになる。これはエネルギー利用の観点からすればマイナス要因でもある。スウェーデンでは、堆積した林地残材チップの生化学的成分に関する研究 (Jirjis and Theander, 1990) や末木枝条の乾燥と微生物による分解過程についての報告 (Jirjis, 1995) がある。日本では、生態学分野での物質循環研究として、落葉落枝や倒木の腐朽に関する研究が行われてきた (Yoneda, 1975; 河原・佐藤, 1977)。しかし、燃料利用を前提とした末木枝条の分解過程についての報告は我が国にはない。そこで、現実の地拵えにより堆積され数年間放置されたスギ末木枝条を対象として、野外放置による木部分解過程に伴う容積密度の違いと放置年数と枝条含水率の関係を明らかにすることを目的とした。

## 研究材料と調査方法

### (1) 研究材料

末木枝条を野外において長期放置すると、時間の経過とともに木質部分が分解される。幹などの木材部分は分解によって軽くなっていくが、分解に伴う木材の容積の変化はほとんど見られない (河原・佐藤, 1977)。また、木材の分解の程度は比重によって表すことができる (Yoneda, 1975; 河原・佐藤, 1977) とされている。ここでいう比重とは、木材関係分野での容積密度のことであり、絶乾重量を十分に飽水した状態の容積 (材積) で除することにより得られる。すなわち、屋外に放置された末木枝条の容積密度の変化から、放置年数の経過による木材の分解の程度を明らかにすることができる。そこで、時間の経過と劣化・分解量の関係について検討するために、実際に野外で長期間放置された堆積枝条から無作為に枝条をサンプリングし、それぞれの枝条から約10cmの長さのサンプルを4~5本採取した。

なお、本研究は同一のスギ枝条の含水率や容積密度を継続的に測定したものではない。高隈演習林の品種および施業方法が同じと見なされる林分において伐採年次別に地拵えされたスギ枝条の初期の容積密度や性質に基本的な差はないものと仮定して行った。

高隈演習林6林班の疎開した平地において3年前 (2001年度) に皆伐・地拵えの結果堆積された末木枝条から41本のサンプルを採取し、これらを3年放置と呼ぶことにする。次に、8林班の皆伐跡地において2年前 (2002年度) に皆伐・地拵えされた堆積枝条を堆積枝条の上層、中層、下層の層別にそれぞれ13本、10本、11本で計34本のサンプルを採取し、これらを2年放置とした。2年放置に隣接する皆伐跡地で、1年前 (2003年度) に皆伐・地拵えされた堆積枝条を堆積枝条の上層、中層、下層の層別にそれぞれ16本、14本、13本で計43本のサンプルを採取し、これらを1年放置とした。さらに、8林班皆伐跡地付近のスギ立木を4本伐倒し、高さ別の枝から計155サンプルを採取し、0年放置の生枝と呼ぶことにする。すべてのサンプルは乾燥しないよう、ビニル袋に入れてただちに研究室へ持ち帰った。なお、枝条の採取は2004年9月9日に行った。

### (2) 実験方法

サンプルは、まず樹皮を剥がし、中央付近で1.5cm程度の厚さに切断した測定用の2ピースを準備し、採取時の初期含水率と容積密度の測定にそれぞれ利用した。

初期含水率の測定は、以下の手順で行った。まず、ピースに切断後ただちに重量を0.01g単位で測定した後、100

のオープンで3日以上乾燥させ絶乾状態とした。シリカゲルを入れたデシケータ内で常温に冷却し、速やかに絶乾重量を測定した。含水率は以下の(1)式の乾量基準で計算することとした。

$$\text{含水率} = (\text{採取時の木材重量} - \text{木材の絶乾重量}) \div (\text{木材の絶乾重量}) \times 100(\%) \quad (1)式$$

次に容積密度の測定は以下の手順で行った。採取・切断したピースを蒸留水で煮沸し、冷却することを、ピースが十分に飽水するまで数回繰り返した。飽水したピースを浮力法により体積を100分の1 cm<sup>3</sup>単位で測定した。なお、浮力法は、物体の空気中の重さと水中の差がその物体と同容積の水の重さに等しいというアルキメデスの原理を利用したものである(大隅, 1987)。体積を測定したピースをオープンに投入し、3日以上経過した後、絶乾重量を0.01g単位で測定した。各ピースの容積密度を下記(2)式で算出した。

$$\text{容積密度} = (\text{ピースの絶乾重量}) \div (\text{ピースの体積}) \quad (2)式$$

以上によって得られたサンプルピースの放置年数別および1年及び2年放置での上層、中層、下層別での含水率の違いを明らかにした。また、容積密度に関しては、測定結果から、生枝、1年放置、2年放置、3年放置での差異があるか分散分析で検討した。また、容積密度の経年変化を以下の(3)式(河原・佐藤, 1975)で検討した。

$$= \rho_0 \times \exp^{-kt} \quad (3)式$$

ここで、 $\rho$  : 容積密度,  $\rho_0$  :  $t=0$ のときの初期値,  $t$  : 時間(年),  $k$  : 分解率である。初期容積密度が2分の1になるまでの期間を半減期と呼んでおり、(3)式中で初期容積密度に乗じてある $\exp^{-kt}$ が0.5になる時間( $t$ )を求めた。

## 結 果

得られたサンプル枝数は表-1に示すように以下の通りであった。3年放置は全層からランダムに選ばれ41本であった。2年放置は、上層が13本、中層が10本、下層が11本の計34本であった。1年放置は上層から16本、中層から14本、下層から13本の計43本であった。0年生の生枝は4本の個体からサンプリングし、それぞれ34本、36本、17本および68本の計155本のサンプル枝を利用した。

まず、含水率の違いについて図-1に結果を示している。3年放置では平均含水率が45.3%で標準偏差は22.5%であった。以下、平均含水率とプラスマイナスの標準偏差を示すと、2年放置での上層は36.1±12.8%、中層で107.2±52.8%、下層で147.0±20.3%と上層から下層になるにつれて、含水率が大幅に上昇した。2年放置全体の平均では98.6±56.5%であった。1年放置での上層は31.4±9.6%、中層で52.8

表-1 放置期間と堆積層別のサンプル枝本数

放置年数	種類	サンプル数(本)
3年放置	全層	41
	上層	13
	中層	10
2年放置	下層	11
	小計	34
	上層	16
1年放置	中層	14
	下層	13
	小計	43
0年(生枝)	上層	34
	中層	36
	下層	17
	小計	68
	小計	155

±19.6%、下層で105.1±49.8%であり、2年放置と同様に下層ほど含水率が高くなっていた。1年放置全体での平均は52.6±45.4%であった。生枝では4個体からの枝の平均値が96.5%、89.5%、95.0%、90.6%であり、個体による含水率の差は小さかった。生枝全体での平均含水率は92.2%(標準偏差16.7%)であった。

次に、容積密度の違いを表-2に放置期間別で示している。生枝の平均容積密度は0.481、1年放置した枝条は0.447、2年放置した枝条は0.437、3年放置した枝条は0.432であり、3年間放置した枝条の容積密度は生枝より約0.05低かった。これらについて分散分析した結果を表-3に取りまとめているが、1%レベルで有意差が認められた。さらに、フィッシャーのLSD(最小有意差)法を用いて放置期間別で比較した結果、生枝と1年以上放置との間に有意差が見られた(図-2)が、1~3年放置した枝条の間では、容積密度の違いに有意差は認められなかった。また、1年放置と2年放置をこみにした層別での容積密度の違いについて結果を表-4に示している。層別の容積密度は上層で0.451、中層で0.423、下層で0.453となっており、分散分析の結果、層別の容積密度には5%水準で有意差があった(表-5)。フィッシャーのLSD法で比較した結果、中層が他2層より有意に低かった(図-3)。

さらに、容積密度の経年変化について図-4に示している。放置年数の経過とともに容積密度は徐々に減少する傾向にあった。当てはめられた推定式は図-4中に示すように、分解率を示す $k$ が0.0444であり、これから求められる半減期は約15.6年であった。

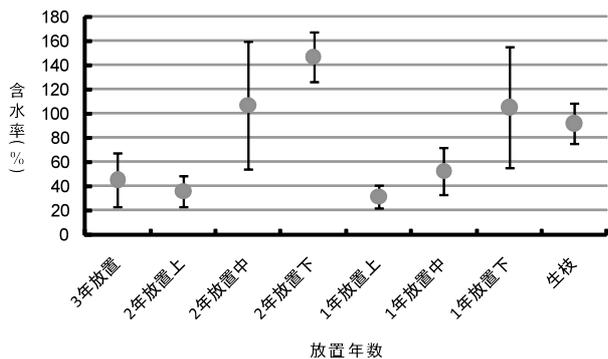


図 - 1 放置期間と堆積層別の含水率 (誤差棒は標準偏差を示す)

表 - 2 放置期間別容積密度

	サンプル数	平均	合計	平方和	分散	標準偏差	標準誤差
生枝	155	0.481	74.549	36.521	0.00433	0.066	0.0053
1年放置	43	0.447	19.207	8.692	0.00268	0.052	0.0080
2年放置	34	0.437	14.896	6.606	0.00241	0.049	0.0085
3年放置	41	0.432	17.699	7.745	0.00262	0.051	0.0081
全体	273	0.449	126.351	59.564	0.01204		

表 - 3 容積密度の分散分析表

要因	自由度	平方和	平均平方	F 値
全体	272	1.086		
放置期間	3	0.123	0.041	11.425**
誤差	269	0.963	0.004	

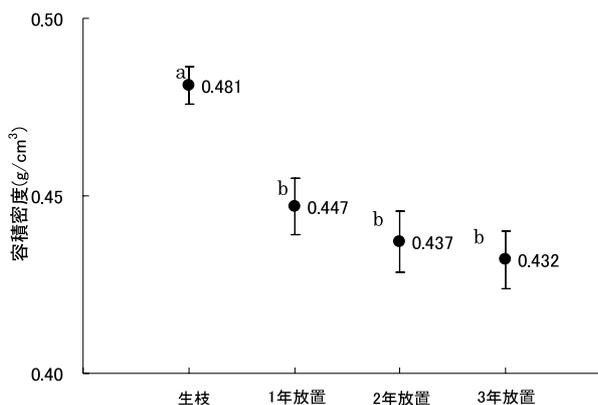


図 - 2 放置期間別平均容積密度

表 - 4 層別容積密度

	サンプル数	平均	合計	平方和	分散	標準偏差	標準誤差
上層	29	0.451	13.087	5.957	0.002	0.043	0.0081
中層	24	0.423	10.096	4.272	0.001	0.033	0.0068
下層	24	0.453	10.919	5.068	0.004	0.066	0.0138
全体	77	0.442	34.103	15.297	0.007		

表 - 5 層別容積密度の分散分析表

要因	自由度	平方和	平均平方	F 値
全体	76	0.194		
層	2	0.017	0.00869	3.648*
誤差	74	0.176	0.00238	

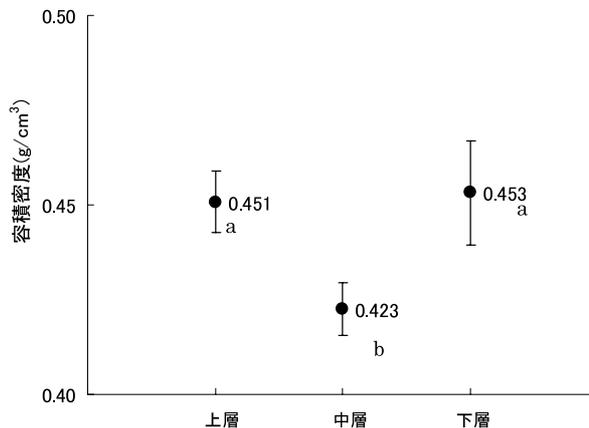


図 - 3 層別平均容積密度

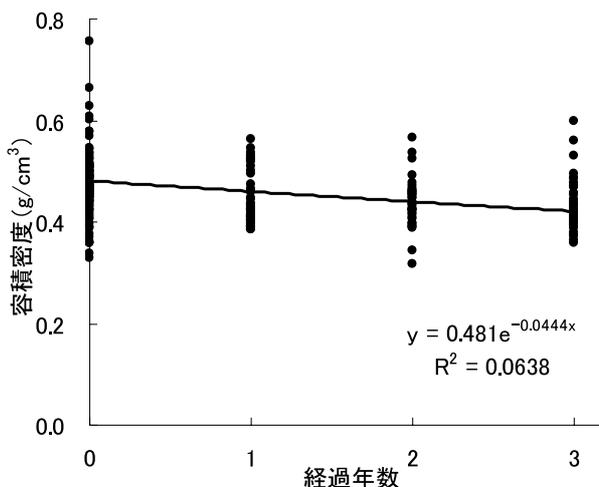


図 - 4 放置年数による容積密度の変化 (容積密度の初期値は生枝平均の0.481に固定して計算した)

### 考 察

まず、枝条の含水率の違いでは、3年放置での平均が45.3%、2年放置全体の平均で98.6%、1年放置全体の平均が52.6%、生枝全体での平均が92.2%であった。3年放置および1年放置の枝条は斜面上に地拵えされていたが、2年放置では末木枝条の堆積場所が谷部であったため、含水率が高くなっていてと考えられた。2年放置を除くと、生枝から3年放置にかけて、放置年数の経過とともに枝条の含水率が減少していることがわかった。林業生産により排出される末木枝条が高含水率であることが、燃料化を考える上で問題となっているが、地拵え作業により林地

に堆積・放置されることで含水率を大きく減少させることができることを示している。防水シートで覆うなどの特別な処理をしなくても、末木枝条の含水率は減少していることが分かった。ただし、1年放置の例でも上層が31.4%であったのに対して中層で52.8%、下層で105.1%となっており、堆積層別での含水率（乾燥）の違いを解消するための工夫が必要だろう。

次に、容積密度の違いについて見てみる。木質部分の分解による容積密度は、放置年数で有意差があることから、3年という短い期間でも分解が進行していると考えられた。一方、末木枝条の堆積した層別での有意差が無かったことから、堆積枝条内における位置的な違いは劣化・分解の進行にはあまり影響せず、放置年数が大きく影響していることが示唆された。間伐林内におけるヒノキの容積密度の半減期は7.6年、カラマツは4.1年（稲垣・深田、2003）であり、これらと比較すると今回の実験から得られた半減期15.6年という結果は非常に長い。これらの原因として、枝条が堆積させた形で放置されていたことなどが挙げられるが、今回の結果からは明らかなことは言えない。

容積密度減少を示す(3)式から、放置年数3年間の木質部分の容積密度の減少率は約13%であると計算された。また今回は葉のサンプルを採取しなかったが、國崎ら(2003)のスギ間伐林における林地残材乾重の推定に関する研究での調査結果では、放置後27ヶ月のうちに枝条に着いている絶乾葉重量は大きく減少していた。これらのことは、3年間で枝条の劣化・分解が進行し、それに伴って多くの熱量が失われることを意味している。しかし、窒素分や微量元素の多くを含んでいる樹皮、葉が数年の間に林地に還り、窒素分や微量元素が少ない枝の多くが残っていることも意味しており、養分還元の見点から見れば数年間放置して利用することが望ましいと言える。

以上を総括すると、鹿児島のような多雨多湿な気候においても野外乾燥は有効であり、蒸発による乾燥と降雨による吸水を繰り返しながらも、末木枝条の含水率は徐々に低下して行く。一方で、放置年数が3年となると容積密度が13%減少していた。木質部分の腐朽・分解が進んでも、体積に大きな変化は見られない（河原・佐藤、1977）ことから、容積密度の減少は木質部分の絶乾重量の減少を意味しており、燃料として利用可能な木質部分が13%少なくなったと言える。したがって、末木枝条の燃料化を考える際には、野外放置による含水率の低下による発熱量の向上と、木質部分の分解による燃料利用可能量の減少による発熱量の減少の両面から、野外放置期間や方法を検討する必要があると言える。

## 謝 辞

本研究の現地調査に支援をいただいた鹿児島大学高隈演習林の井倉洋二博士および職員各位に感謝申し上げます。この研究は（独）日本学術振興会科研費基盤研究(C)（平成16年：課題番号16580275）の一部として行なわれました。併せて感謝申し上げます。

## 引用文献

- Giglera, J.K, van Loonb, W.K. and Sonneveld, C. (2004) Experiment and modelling of parameters influencing natural wind drying of willow chunks. *Biomass and Bioenergy*, 26 : 507-514.
- 池田潔彦・伊藤憲吾・平川泰彦(2004)林分内におけるスギ、ヒノキ生材含水率分布と葉枯らし処理後の変動. *木材工業*, 59(1) : 13-18
- 稲垣善之・深田英久 (2003) ヒノキ林における放置間伐林の分解にともなう重量減少と窒素動態. *森林応用研究* 1 : 159-162.
- Jirjis, R. and Theander, O. (1990) The effect of seasonal storage on the chemical composition of forest residue chips. *Scandinavian journal of forest research* 58(3) : 437-448.
- Jirjis, R. (1995) Storage and drying of fuel. *Biomass and Bioenergy*, 9 : 181-190.
- 河原輝彦・佐藤明(1975)Litterの分解について ( ) - 亜高山帯林での分解について - . *日林誌*57(10) : 357-360.
- 河原輝彦・佐藤明(1977)リターの分解について ( ) - アカマツの葉、幹および根の分解率の推定 - . *日林誌*59(9) : 321-326.
- 國崎貴嗣・三石麗・伊藤寛規・佐藤和樹・澤辺攻(2003)スギ間伐林における林地残材乾重の推定. *日林誌*, 85 : 108-113.
- 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(2004)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(2) : 93-97.
- Nurmi, J. (1999) The storage of logging residue for fuel. *Biomass and Bioenergy*, 17 : 41-47.
- 大隅眞一 (編著) (1987)森林計測学講義. 養賢堂, 東京, p41
- Rogers, K.E. (1981) Preharvest drying of logging residues. *Forest products journal*, 31(12) : 32-36.
- 寺岡行雄・合志知浩(2005)スギ末木枝条の乾燥過程. *九州森林研究*, 58 : 34-37.
- 東大総研, バイオマス情報ヘッドクォータホームページ, <http://www.biomass-hq.jp/beginner/index.html>

(accessed 2009-9-26).

筒本卓造(1996)熱エネルギーとしての利用. 木材の事典  
(浅野猪久夫編), 朝倉書店, 東京, 433-435.

馬田英隆・井之上俊治・松元正美・野下治巳・松野嘉昭  
(1996)スギ間伐材の葉枯らし乾燥. 鹿大演研報, 24: 143-147.

Yoneda, T. (1975) Studies on the rate of decay of wood litter on the forest floor I some physical properties of decaying wood. Jap. J. Ecol. 25(1): 40-46.

## 要 旨

数年間放置されたスギ枝条の容積密度と含水率について、寺岡行雄・合志知浩 地拵えにより堆積され数年間放置されたスギ末木枝条の容積密度の変化と枝条含水率の違いを明らかにした。鹿児島大学高隈演習林にて伐採後に行われた地拵えにより、堆積された枝条のうち3年間放置、2年間放置、1年間放置および採取直前に伐採した生枝(計155本)を対象として、含水率および容積密度の測定を行った。なお2年放置と1年放置では堆積の層を区分し、上層、中層、下層からそれぞれサンプル枝を採取した。その結果、枝条の含水率では、3年放置での平均が45.3%、2年放置で98.6%、1年放置で52.6%、生枝全体では92.2%であり、2年放置を除いて徐々に含水率が減少していた。次に、容積密度の違いでは、生枝が0.481、1年放置が0.447、2年放置が0.437、3年放置が0.432であり、放置年数により容積密度には1%レベルで有意差が認められた。さらに、フィッシャーのLSD法により放置期間別での比較では、生枝と1年以上放置との間に有意差が見られたが、1~3年放置した枝条の間では、容積密度の違いに有意差は認められなかった。層別での容積密度の違いでは、上層で0.451、中層で0.423、下層で0.453となり、5%水準で有意差があった。さらに、放置年数の経過とともに徐々に減少する容積密度の傾向から、分解による半減期を求めると約15.6年であった。末木枝条の燃料化を考える際には、野外放置による含水率の低下による発熱量の向上と、木質部分の分解による燃料利用可能量の減少という両面から、野外放置期間や方法を検討する必要がある。