

## スギ末木枝条の乾燥過程について\*1

寺岡行雄\*2 · 合志知浩\*2

寺岡行雄・合志知浩：スギ末木枝条の乾燥過程について 九州森林研究 58：38-41, 2005 燃料として末木枝条の持つ発熱量を増大させるために、低コストで乾燥させる技術開発の第一段階として、実験室及び野外での末木枝条の乾燥プロセス、特に乾燥定数について検討した。まず、末木枝条での相対湿度と平衡含水率との関係をもとめ、次に、恒温恒湿槽内において、気温30℃、相対湿度50%の環境下での乾燥プロセスを明らかにした。自由含水率比への変換の後、乾燥速度を表す乾燥定数 $k$ を求め、設定した相対湿度との関係を検討した。最後に、野外で66日間の乾燥試験を行い、層別での乾燥プロセスを明らかにした。さらに、降雨の影響が少ない期間では相対湿度に応じた乾燥定数が得られた。今後は降雨による吸湿を防ぐシートの効果の実験および野外乾燥後の末木枝条の燃料として評価できるモデルの構築が課題である。

キーワード：林業廃材、木質バイオマスエネルギー、低位発熱量、天然乾燥

## I. はじめに

京都議定書にある温室効果ガス排出量削減の目標を達成する上で、木質バイオマスはカーボン・ニュートラルなエネルギー源として注目されている。これまでさまざまな賦存量や利用可能量の調査が行われており、大まかな利用可能エネルギー量の推計も可能である(堀尾, 2003)。しかし、これらの調査は絶乾重量ベースでの資源量調査であるため、実行可能性を検討する際のシナリオ設定においては、利用時での燃料含水率をある一定値と仮定せざるを得ない。特に木質系の燃料は含水率によって低位発熱量の減少率が著しい。例えば、含水率30%での低位発熱量が3,091kcal/kgであるのに対して、含水率が60%となると2,399kcal/kgと22%も損失してしまうことになる。エネルギー密度の低いことがバイオマスエネルギーの弱点の一つであるが、含水率を30%低下させる乾燥のためのエネルギーをかけるか、22%多い燃料を収集するためにエネルギーをかけるのかという選択になる。つまり木質バイオマスを利用するためには、効率的な収集方法だけでなく、含水率をどのようにして低下させるかが重要な課題となる。野外での木材の乾燥は、一般に葉枯し乾燥として現場で活用されているが(例えば、馬田ら, 1996)、収穫の対象となる樹幹部が測定対象であり、末木枝条に関する研究は国内ではない。また、葉枯し乾燥の乾燥メカニズムに関する理論的研究はほとんどない。ヨーロッパでは、林業廃材バイオマスのエネルギー利用における重要な要因として末木枝条の乾燥に関する研究(Jirjis, 1995)が進められているが、湿潤気候下にある日本での状況とは簡単に比較できない。

本研究では、燃料として末木枝条の持つ発熱量を増大させるために、低コストで乾燥させる技術開発の第一段階として、実験室

及び野外での末木枝条の乾燥プロセス、特に乾燥定数について検討した。

## II. 方法

## (1) 末木枝条の平衡含水率

末木枝条を、温度・湿度の一定な空気中に長時間放置すると、ある一定な水分量に落ち着き、その空気条件と平衡状態に達する。このときの水分含量を平衡含水率と呼んでいる(山下ら, 2000)。精度が高く簡便に平衡含水率を求める方法として飽和塩類溶液法(加藤, 1979)があるが、今回は槽内温度と湿度を一定に制御できる恒温恒湿槽(ナガノサイエンス製)内での静置実験により、相対湿度と平衡含水率との関係を求めた。利用した恒温恒湿槽は20℃で相対湿度50%~95%まで調節可能で、30℃では40%~95%まで、40℃以上85℃未満では30%~95%までの湿度が調節可能である。

鹿児島大学高隈演習林(垂水市所在)から採取したスギの枝条1本(採取時重量304.3g)を葉と枝に分離後、枝は10~20cm程度に裁断した。槽内温度は30℃とし、相対湿度を80%に設定した。恒温恒湿槽内にロードセル重量計(ザルトリウス製)を設置し、槽外で重量変化をモニターし、1時間ごとにパーソナルコンピュータへ出力した。4時間経過しても0.2gの重量変化が認められなくなるまで放置・乾燥し(國崎ら, 2003)、設定した槽内温度・相対湿度での平衡含水状態として重量を記録した。相対湿度80%で平衡状態に達した後、槽内温度はそのまま相対湿度を60%に設定し、再測定を開始した。再度、平衡状態に達した後に、相対湿度を50%、40%として4段階の相対湿度に応じた平衡含水時の重量を測定した。40%での測定終了後、試料を90℃のオーブ

\*1 TERAOKA, Y. and GOUSHI, T.: Drying processes of a Sugi slash as logging residue through biological-drying

\*2 鹿児島大学農学部 Fac. Agric., Kagoshima Univ., Kagoshima 890-0065

ンに投入し48時間以上乾燥させ、絶乾重量を測定した。試料の含水率は、①式の乾量基準により算出した。

$$m = \frac{W_w - W_d}{W_d} \times 100 \dots \text{①式}$$

$m$ : 含水率 (%),  $W_w$ : 試料重量 (g),  $W_d$ : 絶乾重量 (g)

以上の手順で相対湿度に応じた平衡含水率を求め、次のHasley式(吉富, 1987)にあてはめた。

$$\ln(rh) = a \times m_E^\beta \dots \text{②式}$$

ここで、 $rh$  は相対湿度 (平衡関係湿度),  $m_E$  は乾量基準平衡含水率 (%), および  $a$  と  $\beta$  は定数である。なお、あてはめにはSPSSの非線形最小自乗法を用いた。

### (2) 恒温恒湿槽での乾燥

相対湿度と平衡含水率との関係を求めるのに利用した恒温恒湿槽内で、温度30℃と相対湿度50%に固定して、静置状態での乾燥実験を行った。用いた試料は(1)と同様に高隈演習林にて採取したスギ枝条3本である。重量変化が無くなる平衡状態となるまで測定を継続し、平衡状態となった後、オープン(90℃)にて48時間以上乾燥させ絶乾重量を測定した。

乾燥時間に応じた含水率の低下をサンプル間で比較するために、何らかの関数で表現する。一般には減少指数関数が用いられる。相対湿度が一定であれば、到達する平衡含水率はほぼ同じ値となる。しかし、サンプルサイズ及び初期含水率が異なっているために、含水率の減少プロセスは簡単に比較できない。そこで、③式に表す自由含水率比( $R$ )に変換し、指数関数によってあてはめを行う。③式の最右辺にある $k$ は乾燥定数あるいは乾燥速度係数と呼ばれ、試料内部での水分拡散を表すものである(吉富, 1987)。

$$R = \frac{m_t - m_E}{m_o - m_E} = A \cdot \exp(-kt) \dots \text{③式}$$

ここで、 $m_t$  は時点 $t$ での含水率(%),  $m_E$  は平衡含水率(%),  $m_o$  は初期含水率(%)である。また、 $t$  は乾燥時間、 $A$  と  $k$  は係数である。

### (3) 野外での乾燥実験

現実には末木枝条は地拵えによって伐採跡地に堆積される。この野外での末木枝条の乾燥プロセスを明らかにするために、野外乾燥実験を行った。実験対象地は高隈演習林の庁舎横(北緯31°31'7", 東経130°46'38", 標高542m)の疎開した平地であり、測定期間は2004年7月31日から10月5日までの66日間である。

試料は39年生のスギ2本から得られた枝条を、縦横100cm×90cm、厚さ20~30cmのバッグ状の金網に詰め、1つの堆積枝条とした。堆積枝条の相対的な高さで乾燥過程が異なるものと予想されたため、上、中、下層の3層を積み上げた一つのユニットを3回繰り返した実験設定とした。各堆積枝条の枝本数、初期重量、平均木口径は表-1に示すとおりである。枝本数は15~25本であり、平均本数は17.8本であった。初期重量は5.8~11.2kgであり、平均は7.6kgであった。また、平均木口径は14.3mmであり、堆積枝条間の枝本数、初期重量、木口径に有意差( $p < 0.05$ )は認められなかった。

測定期間中、雨の日を除き原則として1日に朝夕の2回堆積枝

条ごとの重量測定を0.1kg単位で行った。測定終了後に気乾重量比で約2割の枝条サンプル抽出し、オープン(90℃)に48時間以上投入して絶乾重量を求め、堆積枝条ごとでの含水率の変化を算出した。

表-1. 野外乾燥実験に用いた堆積枝条の内訳

サンプル	層	枝本数	初期重量 (kg)	平均木口径 (mm)
I	上	15	9.2	14.6
	中	16	8.7	14.3
	下	23	11.2	15.0
II	上	18	8.0	14.1
	中	17	7.4	15.2
	下	25	7.8	14.9
III	上	15	6.5	15.2
	中	16	6.0	12.1
	下	15	5.8	13.4
平均		17.8	7.8	14.3

恒温恒湿槽内での乾燥実験と同様に、野外乾燥実験での自由含水率比の時間変化を指数関数にあてはめ、乾燥定数を求めた。ただし、野外では降水により含水率が高くなることもあるが、指数関数へのあてはめの際には降雨日のデータを除外して適用した。

なお、測定期間中の気象因子については、高隈演習林の庁舎で観測されている気象観測データを利用した。

## Ⅲ. 結果

### (1) 相対湿度と平衡含水率の関係

恒温恒湿槽内で相対湿度を4段階に変化させ、それぞれの湿度に応じた平衡状態での含水率が得られた。槽内温度を30℃に固定した場合の平衡含水率は、相対湿度が80%の時は24.4%、60%の時は17.4%、50%で15.8%、40%で14.4%であった。これらの結果を、②式にあてはめ平衡含水率式が得られた。スギ枝条の相対湿度と平衡含水率との関係をあてはめた結果得られた②式の係数とともに図-1に示している。

この平衡含水率式により、任意の相対湿度に応じたスギ枝条の平衡含水率を推定することが可能となる。

### (2) 恒温恒湿槽内での乾燥

恒温恒湿槽内温度を30℃、相対湿度を50%に設定したスギ枝条

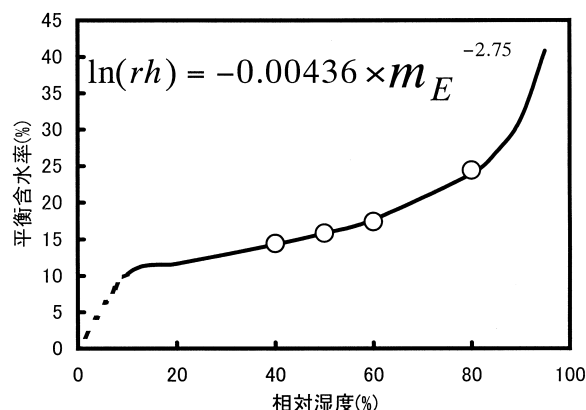


図-1. 相対湿度とスギ枝条の平衡含水率との関係

の3サンプルの乾燥プロセスを図-2に示している。サンプルによって異なる乾燥プロセスをたどっているが、一様に減少指数関数型を示している。

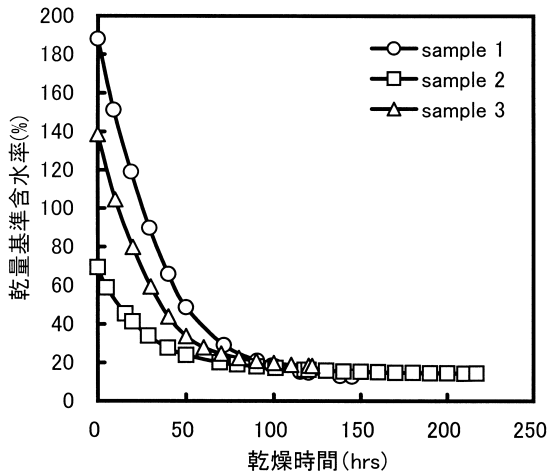


図-2. 恒温恒湿槽内でのスギ枝条の乾燥プロセス (槽内温度30℃, 湿度50%)

表-2に使用した枝条サンプルの諸元を示しているが、3つの枝条サンプルは初期重量と初期含水率が異なっていた。また、到達した平衡含水率も若干異なっており、12.6%から18.3%の範囲であった。平衡に達するに要した乾燥時間は122時間から217時間であり、乾燥時間とサンプルの初期重量との間に正の相関が認められた。

表-2. 乾燥実験に用いたサンプル枝条データ

枝条 sample	初期重量 (g)	初期含水率 (%)	平衡含水率 (%)	乾燥時間 (hrs)
1	304.1	188.0	12.6	145
2	536.2	69.0	14.4	217
3	422.1	139.0	18.3	122

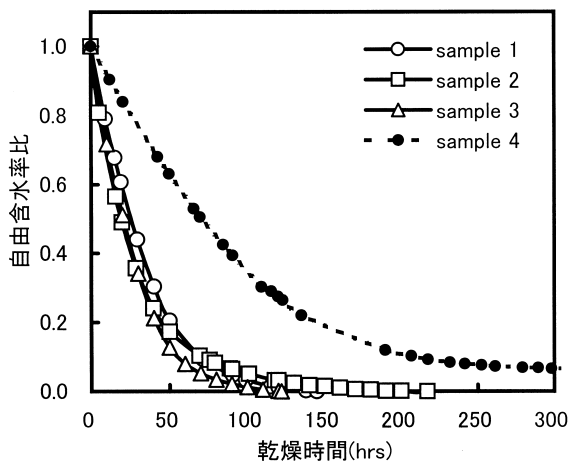


図-3. 自由含水率比の変化 (槽内温度30℃, 湿度50%)

次に③式により各サンプルの平衡含水率を自由含水率比に変換し、乾燥時間との関係を見たのが図-3である。

自由含水率比に変換することにより、相対化された乾燥プロセスが示され、サンプル間で初期重量や初期含水率が異なるにも関わらず、ほぼ同じ傾向として表される。③式の右辺に示される指数関数にあてはめたところ、乾燥定数である $k$ の値は、サンプル1が0.0333、サンプル2が0.0301となり、またサンプル3では0.0425となり、いずれも0.03以上の値を示した。

なお、図-3には(1)で相対湿度と平衡含水率を求める際に使用した、30℃, 80%での乾燥曲線も加えている (sample 4)。この相対湿度80%という条件での乾燥定数 $k$ は0.0111であった。

(3) 野外での乾燥実験

次に野外での乾燥実験の結果を示す。測定期間中の平均気温は22.7℃, 平均湿度は86%, 降水量は657.5mmであった。台風が3回来襲し、雨天も多かったため、湿度、降水量が高めになっていると思われる。また、台風後の停電により気象データが一部欠損したので、演習林に隣接する高峠アメダス観測所のデータをもとに補間した。

IからIIIまでの3サンプル×3層で9つの堆積枝条の重量変化が測定された。図-4に9つの堆積枝条の含水率の変化と、降水量を示している。全体的にみると、降雨の無い日では朝から夕にかけて乾燥が進んで含水率が低下し、夕から朝にかけては含水率の変化があまり見られなかった。雨が少なかった16日までは順調に含水率が低下した。

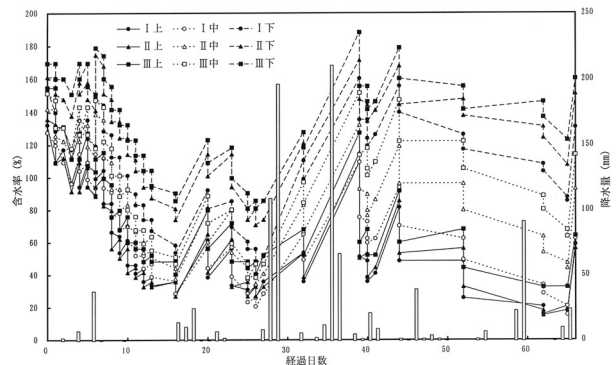


図-4. 野外におけるスギ枝条の乾燥プロセスと期間中の降水量

層別に乾燥過程を見ると、上層は実験開始から16日時点で含水率が26.8%~40.3%に達した。降雨の影響を受けて短期的に大きく上昇するが、直後は含水率が大きく減少する傾向にあり、晴天が数日続けば降雨前の含水率まで低下した。下層は、実験開始から16日時点で53.6%~85.6%に達し上層より含水率が高いことが分かる。降雨の影響を受けて含水率が大きく上昇し、上層よりかなり緩やかに低下していった。中層は、実験開始から16日時点で28.4%~46.7%と上層に近い値となった。降雨の影響によって含水率が上昇するが、上層より緩やかに下層より早く含水率が低下した。実験開始当初から、上層、中層、下層の順で低含水率になり、これらの順位が逆転することはなかった。

表-3に各堆積枝条の含水率の初期値, 最高値, 最低値を示している。堆積枝条の初期含水率は127.6%~169.5%であり、平均

含水率は147.6%であった。66日間の測定期間中での含水率の最高値は127.6%~188.2%であり、下層はいずれも高い値を示している。最低値は15.6%~81.0%の範囲であるが、サンプルⅢは一般的に高い値を示しているが、Ⅰの上・中層、Ⅱの上層では15%台を示しており、野外での乾燥でもかなり低い含水率となることが分かった。

表-3. 堆積枝条ごとの含水率 (初期値, 最高, 最低)

サンプル	含水率 (%)		
	初期	最高値	最低値
Ⅰ上層	132.3	132.3	15.6
Ⅰ中層	127.6	127.6	15.3
Ⅰ下層	153.4	160.2	46.8
Ⅱ上層	135.7	135.7	15.0
Ⅱ中層	142.0	142.0	34.3
Ⅱ下層	161.2	174.7	70.7
Ⅲ上層	154.9	154.9	32.4
Ⅲ中層	151.5	151.5	38.3
Ⅲ下層	169.5	188.2	81.0

最後に、野外乾燥実験での乾燥定数を求めるため、降雨の影響の少ない初期段階 (14日間) について自由含水率比を図-5 に示した。3つのサンプルのいずれの下層も含水率が高く適切でなかったため解析から除外した。

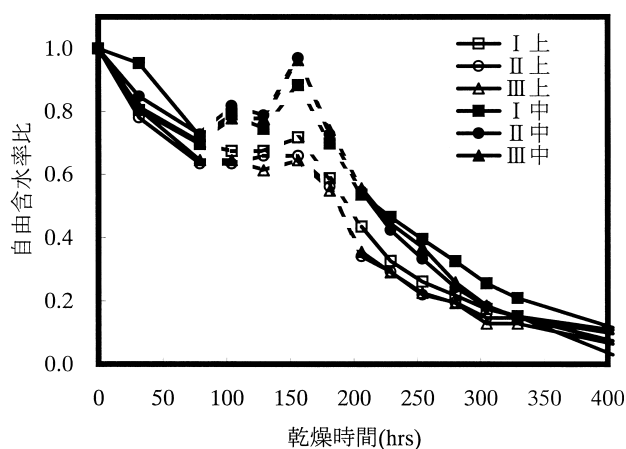


図-5. 野外での枝条乾燥実験の初期段階 (サンプルⅠとⅡの上層と中層のみを表示)

図-5中の点線で示している期間は降水があり、これらを除いたデータを対象に③式の指数関数式をあてはめた。その結果、 $k$  は0.0056から0.0070の範囲であり、平均で0.0060であった。

#### Ⅳ. 考察

林業廃材である末木枝条の燃料としての利用を考えるならば、燃料としての質を高めることが重要である。つまり、含水率を下

げることにより、低位発熱量を上げることであるが、その乾燥のために新たな燃料を投入しては意味がない。本研究の目標は、いかにエネルギー投入量を少なくして燃料の質を高めるかということであった。そのためにこれまで廃棄の対象であった、末木枝条の乾燥特性について若干の知見が得られた。

まず、末木枝条でも相対湿度に応じた平衡含水率に到達して含水率が安定することが実験でも確認され、平衡含水率曲線式を作成した。今回は30℃のみでの試験であったが、野外放置を前提としているので20℃前後での気温の設定で追試を行う必要がある。また、吸湿と放湿でヒステリシスを示すことが知られており (吉富, 1987), 変化する相対湿度の環境下でのモデル化には考慮する必要がある。

乾燥定数 $k$ が大きいほど、乾燥速度が速いと言える。各サンプルの自由含水率比の時系列変化から求めた乾燥定数 $k$ は、恒温恒湿槽での実験で相対湿度が50%で0.03, 80%で0.01となった。また、野外での乾燥初期段階では0.006前後の値を示した。今回の野外乾燥実験期間の相対湿度の平均が86%であったことから、 $k$ が0.006というのは妥当な結果であると考えられた。

サンプル全体の含水率を考えた場合、特に下層部の含水率を下げるべきであり、降雨によって濡らさない対策が必要であると考えられる。スウェーデンでは、降雨や夜露をしのぐために末木枝条の上に紙を敷いている。降水量が多い日本において十分な効果が得られるかは不明であるが、試験の価値はある。また、末木枝条の野外乾燥過程についてモデル化が必要である。Liangら (1996) により積算蒸発量と積算降水量との差から含水率を推定するモデルが提示されており、今後の検討課題である。

#### 謝 辞

現地調査において支援をいただいた、鹿児島大学高隈演習林の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 (平成16年: 課題番号16580275) の支援の下に行われました。併せて感謝申し上げます。

#### 引用文献

- 堀尾正毅 (2003) ケミカル・エンジニアリング2003年8月号: 19-26.
- Jirjis,R. (1995) Biomass and Bioenergy 9: 181-190.
- 加藤宏郎 (1979) 農産物性研究 (第1集): 102-122.
- 國崎貴嗣ら (2003) 日林誌85: 108-113.
- Liang, T. et. al (1996) Biomass and Bioenergy 10: 353-360.
- 馬田英隆ら (1996) 鹿大演研報24: 143-147.
- 山下律也ら (2000) 新版農産機械学, 文永堂: 119-121.
- 吉富 均 (1987) 野菜・茶業試験場研究報告B (金谷) 1: 67-124.

(2004年11月19日 受付; 2004年12月9日 受理)