
 論文

燃料チップ生産のための巻き枯らしによるスギ樹幹の天然乾燥

寺岡行雄^{1,*}・加治佐剛¹・東大介¹・園田高士¹・
前田清水¹・畑邦彦¹

Natural drying of standing Sugi trees by girdling treatment for fuel chip production

Yukio Teraoka^{1,*}, Tsuyoshi Kajisa¹, Daisuke Higashi¹, Takashi Sonoda¹,
Kiyomizu Maeda¹ and Kunihiro Hata¹

寺岡行雄・加治佐剛・東大介・園田高士・前田清水・畑邦彦：燃料チップ生産のための巻き枯らしによるスギ樹幹の天然乾燥，森林計画誌57：37～44，2024 巻き枯らし処理によりスギ立木の樹幹含水率を低下させ，乾燥チップ用ボイラーに利用できる含水率の燃料チップを生産することが可能か，実験的に明らかにした。鹿児島県垂水市のスギ48年生の10本で巻き枯らし処理を行い，16ヵ月間の乾燥試験を行った。巻き枯らし木の9本は開始後3.5ヵ月から13.5ヵ月で枝葉が褐色化し枯死したが，1本は16ヵ月後も枯死しなかった。試験終了後に，未処理木5本と同時に伐倒後，1本毎にチップ化し，スギチップの含水率（湿量基準）を全乾法により測定した。枯死した個体からのチップ含水率は42%以下であり，乾燥チップ用ボイラーでの燃料として利用可能であると判断された。枯死した巻き枯らし木と未処理木でのチップ含水率の差を分散分析したところ有意な差が認められた。以上より，間伐等実施の1年以上前に巻き枯らし処理を行い伐倒時点で枯死が確認できていれば，乾燥チップ用ボイラーで利用可能な含水率の燃料チップを安価に製造できると考えられた。

キーワード：巻き枯らし，天然乾燥，チップ燃料，含水率

Yukio Teraoka, Tsuyoshi Kajisa, Daisuke Higashi, Takashi Sonoda, Kiyomizu Maeda and Kunihiro Hata: Natural drying of standing Sugi trees by girdling treatment for fuel chip production. Jpn. J. For. Plann. 57: 37～44, 2024 Experiments to produce dried fuel chips by natural drying of standing Sugi (*Cryptomeria japonica*) trees using girdling treatment were performed. Ten trees were sampled from a 48-year-old stand for girdling that had been dried for 16 months, and five control trees without treatment were cut and chipped for each tree. The chip moisture contents (wet-based) were measured by the oven drying method and compared. Thus, nine girdling-treated trees had died from 3.5 to 13.5 months and could produce dried fuel chips with less than 42% moisture content. On the other hand, one girdling-treated tree had survived for 16 months, and the control trees showed high moisture content. Significant differences were observed between the moisture contents of died and survived trees by ANOVA. These results supported the feasibility of producing dried fuel chips from dead trees using girdling, which could be used for wood chip boilers.

Keyword: Girdling treatment, Natural drying, Fuel chips, Moisture content

*連絡先 (Corresponding author) E-mail : teraoka@agri.kagoshima-u.ac.jp

1 鹿児島大学農学部 (890-0065 鹿児島市郡元1丁目21-24)

Faculty of Agriculture, Kagoshima University, 1-21-24 Korimoto, Kagoshima 890-0065, Japan

I. はじめに

2014年7月からの再生可能エネルギーの固定価格買い取り制度（FIT）導入後には、木質バイオマス発電による電力でのエネルギー供給に注目が集まっている（経済産業省資源エネルギー庁，2022）が、エネルギー利用効率から見ると木質バイオマスを燃料とする場合は熱供給の方が適している。また、発電のような大規模な利用だけでなく、中小規模のボイラーに木質バイオマス燃料を使用することで燃料費の削減や二酸化炭素排出量削減に寄与することが期待されている。木質バイオマス燃料として、木質ペレット、チップ、薪等を挙げることができるが、供給可能性や価格及び利用形態の観点から本研究では燃料用チップに着目する。

木質チップボイラーには湿量基準含水率（以下、含水率とする。また、本研究での含水率は湿量基準の含水率を用いることとする。）で45%以上の燃料チップを使用できる生チップ用ボイラーと、含水率45%未満のものを使用する乾燥チップ用ボイラーの2種類がある（梶山，2013）。一般に生チップは価格が安く入手が容易である反面、生チップ用ボイラーは導入費用が高いことに加え、高含水率のチップは発熱量を著しく低下させることから、チップの消費量が増加する。一方、乾燥チップ用ボイラーは生チップ用ボイラーよりも導入費用が安い、燃料チップの含水率を一定レベル以下に下げることが必要となる。したがって、乾燥チップ用ボイラー（以下、チップボイラーとする）の安定的な稼働には、燃料チップの含水率を一定レベル以下に下げる手段を持つ事、すなわち乾燥工程をどのように確保するかが課題となる。

浦上・糸長（2008）は、燃料チップのうち未利用材由来の割合が増加しており、燃料チップの含水率調整が重要であると指摘している。スギの生立木の樹幹含水率は、季節にもよるが60%から70%となること（野原ら，1977）も珍しくない。そのため燃料チップの需要が拡大した場合、利用可能な含水率まで乾燥させた燃料チップの安定的供給は困難と考えられており（伊地知・寺岡，2012）、チップ加工の前段階での含水率低減が求められている。

これまでも燃料チップとして利用可能な含水率に低下させるための、様々な取り組みが行われてきた。例えば、丸太状態での自然乾燥の試みとして、宮田ら（2006）は20 cm程度の直径を持つヒノキ丸太残材を舗装土場で104日間自然乾燥させ、82%の含水率を38%に低下させた。市原ら（2009）は林地残材を平積みで天然乾燥させ、293日間で43%の初期含水率が12~14%にまで低下したと報告している。濱地ら（2010）は、スギ丸太を積みにした乾燥実験で、夏場であれば2ヵ月

で含水率を33%程度に低下させられるとしている。鹿児島県内でも、丸太を1~2ヵ月天然乾燥させた後の製材背板に、倉庫で乾燥させた背板をチップ化して混合し、全体としての含水率を下げる例もあった（寺岡ら，2019）。天然乾燥でない事例として、Yoshida et al.（2010）は、50~73%の初期含水率のチップを、ローラーで圧縮し46~57%に下げることができたと報告している。以上のように原木やチップの状態での乾燥の取り組みにより、燃料チップとして利用可能な含水率にまで下げることが可能である。宮田ら（2008）は、木質チップの自然乾燥実験の結果、週1回の定期的な攪拌を施すことで含水率60%が40%前後に低下したと報告している。通常の燃焼中のチップボイラーでは、多少含水率の高い燃料が投入されても問題はないが、偶然にも点火の際に含水率の高い燃料チップがあると、不完全燃焼や煙発生の原因となるため、このような攪拌作業には燃料チップ含水率の変動を減少させることも期待できる。

一方、上述の方法についてコストやエネルギーの点からみると、製材後の背板を乾燥させ、そのチップを混合して見かけ上の含水率を下げることは、技術的に簡単で有効な方法であるが、背板等の製材廃材を置いておくスペースと在庫コストが問題である。チップに加工した後の乾燥は、熱源や攪拌のエネルギーが必要である。燃料生産や燃料の質的向上のためにエネルギーを使うことは基本的に望ましくなく、できる限りコストとエネルギーを省いて燃料チップの含水率を下げる方法が必要となっている。

ところで、育林技術の一手法として、間伐作業としての巻き枯らし（浅野ら，2009；鋸谷，2010；清水・吉本，2010）がある。巻き枯らしによって樹幹内の水分減少が期待できるとされている（池田，2010）。高橋ら（1997）は、夏をはさんだ3ヵ月の巻き枯らしにより辺材部分で20%程度の含水率低下を報告しているが、具体的にどの程度の含水率が低下するのか明らかにしたものの事例は少ない。また、燃料チップの含水率を下げるために巻き枯らしを利用するという観点での研究事例はない。巻き枯らし処理により樹幹重量が軽くなるため、伐倒や集運材が効率的に行えるメリットもある。

そこで本研究では、スギを立木状態で天然乾燥させるために巻き枯らし処理を行い、チップボイラーの燃料チップに利用できるまで含水率を下げる事が可能かどうか、実験的に明らかにすることを目的とした。また、巻き枯らしによるスギの樹冠部を観察し、枯死に至る変化による乾燥段階の判断の可能性についても検討した。

Ⅱ. 実験対象及び方法

1. 巻き枯らし実験対象と方法

巻き枯らし実験対象地は、鹿児島県垂水市所在の鹿児島大学高隈演習林106林班37小班のスギ（ヤクスギ）48年生の林分である。南向きの緩斜面上部付近で、樹冠に異常がないと判断された個体を対象にして、巻き枯らし処理を行った10本（G1～G10）を林縁木ではない個体から無作為に選木した。剥皮処理を行わない未処理5本（C1～C5）は巻き枯らし木と同じ胸高直径で、かつ林縁木ではない個体から選木した（表-1）。巻き枯らし処理を行った10本（以下、巻き枯らし木とする）の平均胸高直径は26.9 cm、平均樹高は17.1 m、平均枝下高9.3 m、平均幹材積は0.33 m³であった。対照木とした剥皮処理を行わなかった5本（以下、未処理木とする）の平均胸高直径は26.9 cm、平均樹高は16.2 m、平均枝下高7.4 m、平均幹材積は0.30 m³でほぼ同じサイズであった。

表-1 巻き枯らし試験対象木と未処理木の樹木サイズ

Tree No.	胸高直径 (cm)	樹高 (m)	枝下高 (m)	幹材積 (m ³)
G1	33.4	17.4	7.5	0.471
G2	23.9	15.3	9.1	0.253
G3	29.2	17.5	7.4	0.365
G4	25.5	17.3	9.7	0.308
G5	24.8	16.7	8.5	0.244
G6	29.5	17.9	11.3	0.435
G7	32.0	18.0	10.1	0.429
G8	22.3	16.6	10.9	0.250
G9	26.6	18.3	9.8	0.340
G10	21.6	15.8	8.9	0.187
平均	26.9	17.1	9.3	0.328
C1	25.7	15.3	11.1	0.279
C2	26.4	17.0	11.5	0.264
C3	26.6	16.8	5.2	0.306
C4	27.6	15.5	5.1	0.318
C5	28.2	16.2	4.1	0.342
平均	26.9	16.2	7.4	0.302

ただし、G は巻き枯らし木、C は未処理木を示す

巻き枯らし木10本は、2012年7月に胸高位置である地上高1.2 m から下に0.5 m 幅の環状にナタを用いて剥皮処理を行った。1本あたりの処理作業時間は平均で165秒であった。巻き枯らし木は、剥皮処理後の2012年7月から2013年11月までの16ヵ月間放置し、枝葉の変化

及び枯死時期を毎月2回程度観察した。浅野ら（2009）は巻き枯らし処理後の枯死に至るプロセスでの樹冠部の変化を5段階に分けて経過観察しているが、本研究では枝葉全体が完全に褐色化したかどうかの2段階の判断基準とし、その時点で枯死とみなした。なお、未処理木は実験終了まで放置した。

2. 樹幹及びチップ含水率の測定方法

2013年11月に巻き枯らし木と未処理木の計15本を伐倒し枝払いを行い、地際から0.5 m、2.5 m、6.5 m、梢端から5 m 下の断面高で厚さ5 cm 程度の円板を採取した。円板は現地でただちに質量と2方向の直径を測定した後、ノミを使って辺材、心材、バークに分解し、それぞれの質量を測定した。次に円板試料を実験室に持ち帰り、100℃の乾燥機に投入し、72時間以上乾燥させ全乾法により辺材、心材、バーク別に含水率を算出した。同時に円板全体の含水率も求め、樹幹の含水率として円板を採取した断面高ごとに区分求積材積で重みをつけて樹幹全体の含水率を算出した（以下、樹幹含水率とする）。

伐倒後に円板を採取した残りの樹幹部分は2 m で玉切りし、速やかに鹿児島県霧島市内のチップ工場に搬送し、翌日に1本単位でチップ化した。チップは切削チップで、スクリーンサイズは40 mm、粉碎速度は11トン/時であった。巻き枯らし木と未処理木1本ごとで切削したチップを回収し、直ちに無作為に採取した2 kg 前後のチップサンプルを40リットルビニール袋に入れ、現場で質量を計測し研究室に持ち帰り、研究室で質量に変化がないことを確認した。持ち帰ったチップサンプルを3等分して3サンプルとし、100℃の乾燥機に入れて72時間以上乾燥させ全乾質量を計測した。全乾質量と乾燥前の生質量から全乾法による含水率（以下、チップ含水率とする）を求めた。

巻き枯らし木と未処理木の15本をチップ加工し、それぞれから採取した3サンプルのチップ含水率を目的変数とし、試験木を因子とする一元配置分散分析によって、チップ含水率の平均値に差があるか検定した。また、チップ含水率と樹幹含水率の関係を回帰分析した。なお、統計解析には IBM SPSS Statistics バージョン26 を利用した。

Ⅲ. 結 果

1. 枯死確認時期及び枝葉の状態

枯死確認時期及び枝葉の状態を表-2に示す。16ヵ月間巻き枯らし処理を行った立木10本のうち G1～G9の9本は枝葉が完全に褐色化し、枯死したと判断された。早いものは実験開始後3.5ヵ月で、遅いものは13.5ヵ月

で枝葉が褐色化し、枯死が確認された。また、枯死した時期が早いものから落葉が始まっていた。一方で、16ヵ月経過しても巻き枯らし木のG10は枝葉の色に変化が見られず、枯死に至らなかったと判断された。

表-2 枯死確認時期及び枝葉の状態

TreeNo.	枯死確認時期	16ヵ月経過時点 枝葉の状態
G8	3ヵ月半後	梢端を除き落葉
G9	3ヵ月半後	梢端を除き落葉
G5	4ヵ月後	梢端を除き落葉
G6	4ヵ月後	梢端を除き落葉
G7	9ヵ月半後	梢端を除き落葉
G1	9ヵ月半後	落葉始まる
G2	9ヵ月半後	落葉始まる
G3	10ヵ月半後	褐色
G4	13ヵ月半後	褐色
G10	変化なし	葉は緑
C1	生立木	葉は緑
C2	生立木	葉は緑
C3	生立木	葉は緑
C4	生立木	葉は緑
C5	生立木	葉は緑

2. 断面高別の含水率の違いについて

断面高別の樹幹部の含水率の違いを明らかにするために、採取した円板から辺材部と心材部に分けて含水率を求めた。

まず、断面高別の辺材部分の含水率を図-1に示している。巻き枯らし木のG1～G10は1本毎で、未処理木(C1～C5)は5本の平均含水率に標準誤差を付して表示している。

巻き枯らし木については、断面高が0.5 mでは含水

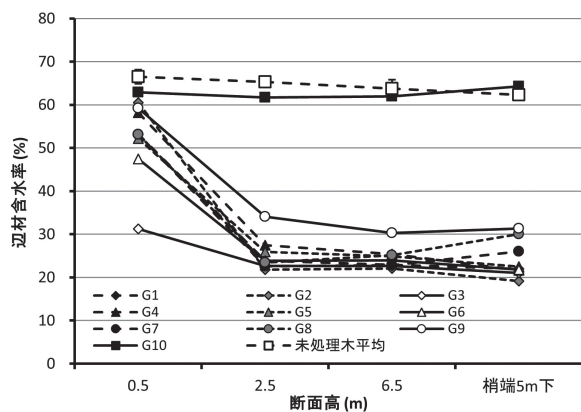


図-1 断面高別の辺材含水率
(未処理木平均の誤差棒は標準誤差, n=5)

率が高かったが、2.5 m 以上では含水率が40% 以下に低下し、それ以上の断面高での辺材含水率は20% から30% ではほぼ一定の値を示した。未処理木は断面高にかかわらず、含水率は60～70% の範囲であった。また、枯死に至らなかった G10は未処理木 (C1～C5) とほぼ同じ含水率の値であった。

次に、断面高別の心材部分の含水率を図-2に示している。巻き枯らし木は G10を除き、断面高が高くなると含水率が緩やかに減少する傾向にあったが、含水率は個体により20% 程度の幅があった。未処理木も断面高が高くなると含水率が減少する傾向を示していたが、巻き枯らし木に比べてそれらの減少は緩やかであった。

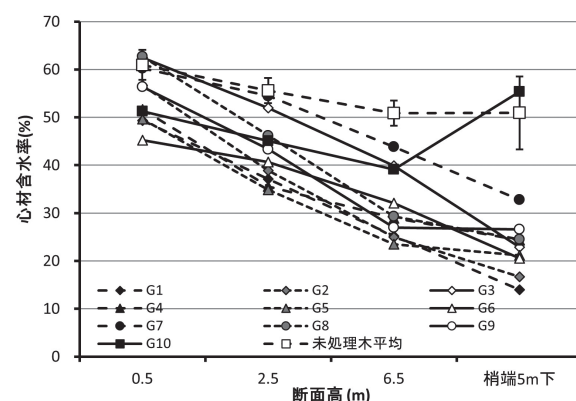


図-2 断面高別の心材含水率
(未処理木平均の誤差棒は標準誤差, n=5)

さらに、各円板の辺材と心材の断面積に応じて重みをつけて断面高別の含水率を算出した結果を図-3に示している。未処理木は断面高に関わらず60～65% 程度の高い含水率であった。枯死が認められた G1～G9の巻き枯らし木の含水率は、断面高0.5 m で45% から60% 程度と高かったが、断面高が2.5 m では50% 以下、6.5 m 以上では40% 以下となり、断面高が高くなるに従って緩やかな減少傾向を示した。一方で、16ヵ月経過後も枝葉に変化が見られなかった G10は、未処理木と同様に含水率が高い値を示し、含水率の分布パター

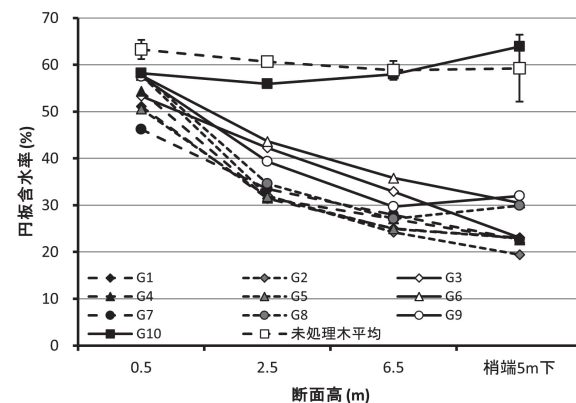


図-3 断面高別の円板含水率
(未処理木平均の誤差棒は標準誤差, n=5)

ンも枯死したと判断された G1～G9とは明らかに異なるものであった。

3. チップ含水率及び樹幹含水率の比較

チップ含水率及び樹幹含水率の比較結果を表-3に示している。

表-3 チップ含水率と樹幹含水率の比較

TreeNo.	チップ含水率 (%)	樹幹含水率 (%)
G1	39	33
G2	39	34
G3	40	39
G4	34	34
G5	34	33
G6	42	42
G7	41	33
G8	35	37
G9	39	39
G10	58	58
C1	63	62
C2	62	62
C3	63	62
C4	54	54
C5	63	62

巻き枯らし木のうち G10を除く枯死が確認された9本でのチップ含水率は G4と G5の34% が最低となっており、G6が42% となっていた。葉が褐色化せず枯死が確認できなかった G10は、チップ含水率ならびに樹幹含水率共に58% と高い値を示していた。また、未処理木には C4の54% とやや低い値を示すものもあったが、その他の4本はチップ含水率ならびに樹幹含水率共に62% から63% と高い値であった。

チップ含水率と樹幹含水率との相関関係を図-4に示している。チップ含水率と樹幹含水率との間には高い相関が認められた。図中に回帰式と決定係数及び回帰直線を示している。決定係数は0.96と非常に高かった。

4. チップ含水率と枯死確認時期の関係

実験対象とした15本のチップ含水率の平均値の低かった順に標準誤差を付して図-5に示している。巻き枯らし処理木である G1から G9は低いチップ含水率となっていた。表-2にある枯死の確認時期とあわせてみると、含水率の低かった G1から G9は13ヵ月半後までに枯死が認められた。巻き枯らし処理を行った G10は

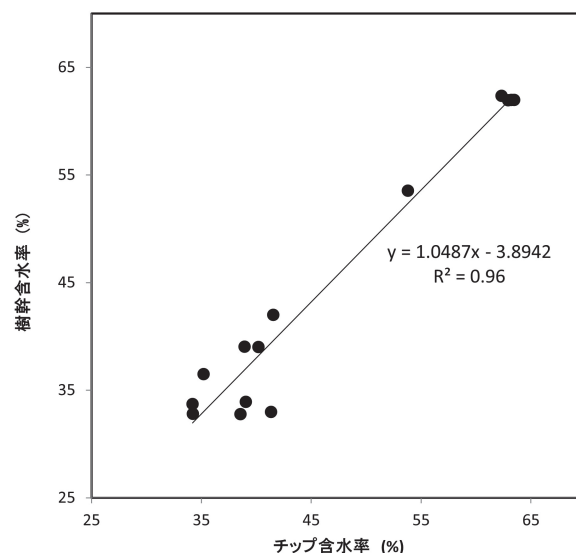


図-4 チップ含水率と樹幹含水率との相関関係

16ヵ月を経過しても枝葉は緑色で枯死は認められなかった。

枯死した時期が3ヵ月半後から4ヵ月と早かった G5, G6, G8, G9のチップ含水率はそれぞれ34%, 42%, 35%, 39%であり、枯死時期が9ヵ月半以降と遅かった G1, G2, G3, G4, G7のチップ含水率は39%, 39%, 40%, 34%, 41%であった。枯死時期が最も遅かった G4で34%という低いチップ含水率であったことから、枯死時期が早くても含水率が低いという傾向は見られなかった。

G1～G10及び C1～C5計15本のチップ含水率について一元配置分散分析を行ったところ、有意差が認められた ($p=0.0000<0.01$)。含水率が低い順に並べて多重比較 (Bonferroni test) を行った結果を図-5中に示している。巻き枯らし木で枯死が確認された G1～G9までの9本と、16ヵ月経過時で枯死に至らなかった G10及び未処理木 C1～C5の間で5%水準での有意差が認められた。これは、枯死した G1～G9のチップ含水率に

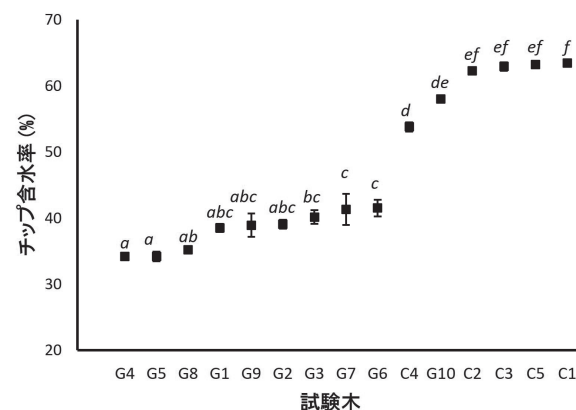


図-5 試験木ごとのチップ含水率

※図中の誤差棒はそれぞれの標準誤差で $n=3$ 。図中の文字の違いは、それぞれの含水率に5%水準での有意差があることを示す。

も有意差が認められたものの、葉が褐色化した個体と褐色化していない個体間で、チップ含水率がより大きく異なることを示していた。

IV. 考 察

1. 巻き枯らしによる含水率の低減効果

早いものは3.5ヵ月、遅いものは13.5ヵ月で枝葉が褐色化し、枯死が確認された。また、枯死した時期が早いものから落葉が始まっていた。巻き枯らし木は処理後10ヵ月から12ヵ月以降で枯死が増加するという報告(原, 2008)よりも早い時点で枯死する個体もあった。枝葉が枯死に至るプロセスは蒸散作用や樹木内部での水分移動が影響し、立地条件や立木サイズ等によって異なる可能性が考えられる。浅野ら(2009)は剥皮幅が100 cmと200 cmとで枯死に至る期間が1年間近く異なり、剥皮幅を大きくすることで早く枯死させる可能性を指摘している。本研究では剥皮幅を50 cmで統一していたため、この点についての考察はできないが、剥皮幅と含水率低下の違いも今後の検討課題となる。

巻き枯らし木の断面高別での含水率の違いについては、断面高0.5 mでの辺材含水率は高かったが、2.5 mにかけて急激に低下し、それ以上では低い辺材含水率ではほぼ一定の値を示した。これは剥皮上部の辺材外周部におけるキャビテーションの発生と、葉からの蒸散により含水率が低下したためと考えられる。また、2.5 m以上では高さにかかわらず辺材含水率は一定の値を示すことから、2.5 m以上の辺材部の仮導管は空洞状態にあったと推察される。スギの心材含水率はばらつきが大きく、樹高方向で変化パターンは様々であるとされている(中田, 2007)が、巻き枯らし木はG10を除き、断面高が高くなると心材含水率が緩やかに減少する一様の傾向を示した。また、剥皮処理位置よりも高い断面高での辺材含水率が低下したことから、剥皮位置を変えることで、ある断面高から上の部位ごとの辺材含水率を制御できる可能性を示唆している。一方、G10で梢端から5 m下の部位で心材含水率が高い値を示したのは、枝葉が枯死しておらず枝葉で光合成などの生体活動が行われていた可能性があると考えられる。

チップ化後の含水率についての結果は、巻き枯らし木のうち枯死した個体(G1~G9)のチップ含水率は42%以下であり、枯死しなかった個体(G10)及び未処理木は54%以上で両者に有意差が認められた。このことから巻き枯らし処理により枯死に至った場合は、明らかな含水率の低減効果が認められた。しかし、巻き枯らし木のG1~G9のチップ含水率にもバラツキが認められ、枯死したもののでもチップ含水率は同じではな

かった。燃料チップとして利用する場合、チップ含水率の上限が問題であり、枯死したG1~G9までの巻き枯らし木のチップ含水率は最大でもG6の42%であったことから、乾燥チップ用ボイラーで利用可能な含水率のチップであると判断された。

枯死後の樹幹内部での水分移動の可能性は少ない(亀井・津島, 1988)ことから、枝葉の枯死により葉からの蒸散作用が停止した時点で樹幹内部に水分が貯留され、枯死以降でこれ以上の樹幹内の水分減少は期待できないと考えられる。土場での燃料用丸太の天然乾燥実験結果と比較すると、宮田ら(2006)は104日間で82%の含水率を38%に低下させ、濱地ら(2010)はスギ丸太を栈積みにし、夏場の2ヵ月で含水率を33%程度に低下したと報告されている。丸太にして栈積みすると、木口からの乾燥が進み短期間で効率良く含水率を低下させることができることから、巻き枯らしによる枯死した後に丸太での天然乾燥を行うことで、さらに含水率を低下させることができる可能性がある。

2. 巻き枯らし処理による乾燥チップ生産の可能性

これまで燃料用チップの乾燥は、人工乾燥によってコストをかけて行われてきた。濱地ら(2010)はスギチップをロータリーキルンで人工乾燥を行い、含水率60%のチップを10数%にまで乾燥させるのに、84.2円/kgの乾燥コストが必要であったとしている。本研究の結果から、16ヵ月間巻き枯らし処理を行い、枯死に至った巻き枯らし木は未処理木と比較して樹幹内の水分減少が認められた。これらの巻き枯らし木をチップ化すると、乾燥チップ用ボイラーで利用できる含水率34~42%のチップを得ることができることがわかった。巻き枯らし処理に必要なコストは人件費のみであり、処理時間が1本あたり165秒であったことから、4時間で87本の巻き枯らしが実施できる。人件費を12,000円とすると1本あたり138円となり、1本あたりの質量を200 kgと仮定した場合、0.7円/kgの乾燥コストとなる。全国木材チップ工業連合会(2011)の報告では、50%の含水率を乾燥機で30%まで低下させるコストの試算値として3.7円/kg~4.1円/kgが示されており、乾燥機器を必要としない巻き枯らし処理による天然乾燥はコスト面で大変有利であると考えられる。さらに、7月に行ったヒノキの小径木に対する15cm~30cm幅の剥皮の処理時間が約37秒であったという報告(宮田・深田, 2009)もあり、作業の熟練により巻き枯らし処理のコストはさらに低減できる可能性がある。一方で、巻き枯らしによる天然乾燥には1年以上の乾燥期間を必要とすることから、間伐実施を含めた計画的な取り組みが必要となる。

ところで、燃料チップの需要が大きくなるにつれて、

含水率や形状あるいは灰分などの規格作りが必要となってきた。全国木材チップ工業連合会は2012年5月に「木材チップの品質規格規程について」を公表している（全国木材チップ工業連合会，2012）。木材チップ品質規格の中でチップの乾燥程度（含水率）について，D1（20% 未満），D2（20% 以上30% 未満），D3（30% 以上50% 未満），D4（50% 以上）の4区分としている。また，木質バイオマスエネルギー利用推進協議会（現在の一般社団法人日本木質バイオマスエネルギー協会）は2014年11月に「燃料用木質チップの品質規格」を公表した（日本木質バイオマスエネルギー協会，2014）。この中で含水率についての規格（規格中では湿量基準含水率のことを水分と表現している）は，M25（含水率25% 以下の乾燥チップ），M35（同26%～35% の準乾燥チップ），M45（同36%～45% の湿潤チップ），M55（同46%～55% の生チップ）の4段階の含水率により燃料チップを分類規定している。

巻き枯らしによる乾燥させたスギ立木からのチップは，全国木材チップ工業連合会のチップの品質規定ではD3に該当し，木質バイオマスエネルギー利用推進協議会の規格に当てはめるとM35の準乾燥チップあるいはM45の湿潤チップに相当すると判定される。これは，乾燥チップ用ボイラーに求められる含水率44% 以下という条件を満たしている。したがって，巻き枯らし処理によって枯死に至ったスギ立木の樹幹の含水率を下げる事が可能であり，特別な乾燥設備や乾燥コストをかけることなく燃料用乾燥チップを生産することが可能であると考えられる。

より大量の燃料材を必要とする木質バイオマス発電には，素材生産時に発生する大曲がり材や欠点材が利用される。素材生産現場からチップ加工工場あるいはバイオマス発電所の土場に搬入されるが，生産直後のため丸太の含水率は一般に高い状態である。そのため，土場において，数ヵ月間の天然乾燥が必要となっている。本研究での巻き枯らし処理による立木天然乾燥は，発電所向けのような大量の燃料供給を想定していないが，伐倒前に含水率が下がっていることは，直後にチップ加工しても含水率の低いチップを生産できることを意味しており，乾燥のための広い面積の土場を確保する必要がない燃料供給体制へのアイデアでもある。

3. 巻き枯らし処理終了の判断基準及び実施時期

巻き枯らし処理を行った10本のうち9本は枯死が確認された。しかし，巻き枯らし処理後16ヵ月を経過しても枝葉が緑色のままで枯死しなかったと判断された個体もあった。G10が枯死しなかった明確な理由を提示できないが，高隈演習林の造林台帳から本実験対象林分は実生のヤクスギであることがわかっており，遺伝

的な個体差が影響した可能性もある。

巻き枯らしにより低コストでの乾燥が可能であることが示されたが，森林保護の立場からの巻き枯らしによる間伐の問題点も指摘されている（大橋，2004）。巻き枯らし木がすぐに枯死しないため，長期にわたり穿孔虫に適した餌資源を供給することになるという指摘である。林内に枯死木を放置することが穿孔虫害を拡大させる要因であるが，飛来の時期をずらすために，7月に巻き枯らし処理を行い，11月に乾燥処理を終了するスケジュールでは穿孔虫被害の発生がなかったとする報告（後藤，2005）もある。福田ら（2008）は，一年目は穿孔虫被害の発生リスクが比較的低く，冬季の活動はないと報告していることから，春に巻き枯らし処理を行い，翌年の春に収穫するという穿孔虫の活動しない冬季を基軸にスケジュールを組み立てることがリスクを避ける可能性を示唆している。本研究での生産対象が燃料材であることから，穿孔虫による加害があっても穿孔や変色などの商品価値が低下するわけではないので，周囲への被害の拡大がなければ問題はないものと考えられる。

枯死した巻き枯らし木の樹幹内部の含水率は42% 以下であることが確認できた。本研究の結果から，燃料チップを製造するために間伐材を使用するのであれば，間伐での伐倒前の1年以上前に巻き枯らし処理後の枝葉の変化を観察し，枯死が確認できれば，乾燥チップ用ボイラーで利用できる程度の含水率のチップを生産できるか判断が可能であると考えられる。なお，巻き枯らし処理により枯死した個体が林内に長期間放置されると，強風時に風倒する危険性もあるため，枯死後には確実に伐倒処理する必要がある。

今後は，燃料チップを供給する事業レベルで巻き枯らし処理を行ったスギ立木から燃料チップを製造し，乾燥チップを質的，量的ともに安定的な供給が可能かどうか検証する必要がある。また，巻き枯らし木の枯死時期の個体間の差や樹幹含水率の季節変動，あるいは環状剥皮幅や剥皮位置等を明らかにすることも今後の課題である。

参考文献

- 浅野浩之・金澤好一・小野里光・鶴渕恒雄・綿貫邦男 (2009) ヒノキの巻き枯らし間伐実証試験^{*}。群馬県林試研報14, 1-9
- 濱地秀展・吉次昌則・占部達也・桑野泰光 (2010) 燃料利用に向けた木材乾燥法の検討－スギ丸太の天然乾燥及びスギチップの人工乾燥－^{*}。九州森林研究63, 191-194
- 原勇治 (2008) 巻き枯らしによる間伐木の枯損過程と残存

- 木の成長について. 鳥根県中山間七県報4, 57-63
- 福田秀志・佐野 明・久保田祐介・鈴木啓介 (2008) 穿孔性昆虫類の巻き枯らし間伐木利用状況－施業時期による比較を中心として－. 樹木医学研究12, 125-126
- 市原孝志・山口達也・政岡尚志・板井拓司・松岡良昭・宮田大輔・小畑篤史・鈴木保志・藤原新二 (2009) 木質チップボイラの燃料に用いる林地残材の平積み天然乾燥*. 日林誌91, 192-200
- 伊地知秀太・寺岡行雄 (2012) 鹿児島県における木質チップ燃料の供給・利用実態と課題. 鹿大演研報39, 15-19
- 池田潔彦 (2010) 薬剤注入, 巻き枯らしによるスギ樹幹内の含水率変動. 静岡県農林技研3, 45-50
- 後藤 誠 (2005) 穿孔虫被害の危険性が低い間伐材生産方法の検討. 徳島県森林林業研究所研究報告4, 8-12
- 梶山恵司 (編著) (2013) 木質バイオマスボイラー導入・運用にかかわる実務テキスト. <https://www.f-realize.co.jp/w-biomass/> (2020年2月11日参照)
- 亀井淳介・津島俊治 (1988) スギ立木水分分布について*. 日林九支研論集41, 221-222
- 経済産業省資源エネルギー庁 (2022) 木質バイオマス発電における人材育成テキスト. https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/saiene/data/bio_text.pdf (2023年9月8日参照)
- 野原正人・岩田隆昭・山本和雄 (1977) 針葉樹材の天然乾燥速度について. 岐阜県林セ研報5, 31-48
- 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・小畑篤史・後藤純一・板井拓司・政岡尚志・吉井二郎 (2008) 木質チップの自然乾燥における攪拌の効果*. 日林誌90, 75-83
- 宮田弘明・深田英久 (2009) 巻き枯らし間伐木から発生する昆虫相および林内への影響調査. 高知県立森林技術センター研究報告34, 32-55
- 日本木質バイオマスエネルギー協会 (2014) 燃料用木質チップの品質規格について. <https://www.jwba.or.jp/woodbiomass-chip-quality-standard/> (2020年2月11日参照)
- 中田了五 (2007) スギの樹幹内水分分布の変異とその変動要因に関する研究. 林木育種センター研究報告23, 121-254
- 鋸谷 茂 (2010) 鋸谷式間伐 実践編 なるほどQ&A 森林の健全度を高めよう. 全国林業改良普及協会
- 大橋章博 (2004) 巻き枯らしによる間伐の問題点～森林保護の立場から～. 岐阜県の林業606, <https://www.forest.rd.pref.gifu.lg.jp/rd/ikurin/0403gr.html> (2023年7月23日参照)
- 清水正俊・吉本喜久雄 (2010) 長崎県のヒノキ林における巻き枯らし間伐の検討. 長崎県農林セ研報1, 43-54
- 高橋宏成・遠藤啓二郎・中島 剛 (1997) 県産材の加工技術の開発－スギの立木乾燥試験－. 福島県林試研報30, 99-113
- 寺岡行雄・田嶋亜紀子・佐藤政宗・加治佐剛・Stefan K.PELZ (2019) スギ燃料チップ含水率の簡易測定法の精度検証と供給チップ含水率の実態. 九州森林研究72, 15-19
- 浦上健司・糸長浩司 (2008) チップボイラに対する燃料供給体制の実態と課題. 日本建築学会大会学術講演便概集534
- Yoshida T., Sasaki H., Takano T., Sawabe O. (2010) Dewatering of high-moisture wood chips by roller compression method. Biomass Bioenergy 34, 1053-1058
- 全国木材チップ工業連合会 (2011) 木材チップ等原料転換型事業調査・分析事業報告書. <http://zmchip.com/houkoku232.pdf> (2021年6月2日参照)
- 全国木材チップ工業連合会 (2012) 木材チップの品質規格規程について. <https://zmchip.com/> (2020年2月11日参照)
- ※印の引用文献の本文中での含水率は乾量基準で表現されていたが, 本文中では著者らにより湿量基準に換算して記述した。
- (2023年7月24日受付)
- (2023年10月4日受理)