

## 速報

横打撃共振法による推定心材含水率の季節変化<sup>\*1</sup>倉原雄二<sup>\*2</sup>・武津英太郎<sup>\*2</sup>・栗田 学<sup>\*2</sup>・久保田正裕<sup>\*2</sup>

倉原雄二・武津英太郎・栗田 学・久保田正裕：横打撃共振法による推定心材含水率の季節変化 九州森林研究 73：111－114, 2020  
横打撃共振法は樹幹の直径と樹幹を打撃した際の共振周波数により非破壊的に立木の心材含水率を推定する手法である。非破壊的で測定に要する時間が短いことから多数の個体の測定が必要である林木の育種に有効である。しかし、共振周波数は季節により変化することが知られており、異なる季節に測定した値の比較は困難である。今回、横打撃共振法による推定心材含水率の季節変化の原因と補正方法について検討した。2017年6月から2019年6月までの2年間の測定値について気温との関係を解析した結果、推定心材含水率は測定当日の最低気温と高い正の相関関係があった。推定心材含水率の季節変化の原因は気温の変化による樹幹のヤング率変化に起因する共振周波数の変化であると推測した。推定心材含水率の個体の順位変動は小さく直径と共振周波数の積 ( $df$ ) を測定当日の最低気温で補正することで異なる時期に測定した推定心材含水率の比較が可能であると考えられる。

キーワード：スギ、心材含水率、非破壊的評価、横打撃共振法

## I. はじめに

スギ (*Cryptomeria japonica*) の心材含水率は高く、個体によるばらつきが大きい。このことは製材品としての利用が必要となる乾燥を困難にしている原因である (森林総合研究所, 2006)。スギの心材含水率のばらつきは遺伝的なものであることから育種による改良が可能である。育種のためには心材含水率の評価が必要であるが、心材含水率の測定は立木の伐倒をとまなうために多数の個体の測定は困難であることが多い。立木の心材含水率の非破壊的な評価手法に横打撃共振法がある (釜口ほか, 2000)。横打撃共振法は直径と樹幹を打撃した際の共振周波数から心材含水率を推定する手法で、測定に要する時間が短く多数の個体の測定が可能であり、林木の育種における有効性が認められている (中田・田村, 2006; 井城ほか, 2010)。しかし、心材含水率を推定に用いる共振周波数は季節的な変化があることが指摘されている (中田, 2007)。横打撃共振周波数の季節変化は、横打撃共振法による心材含水率の推定値の季節変化をもたらすために、同時期に測定した同じ林分の個体や系統の比較はできるが、時期が異なると比較が困難である。中田 (2007) では毎回の測定は共振周波数のみで直径の測定は春と秋および実験終了時だけであり、心材含水率の推定値の季節変化は詳細にはわからなかった。また、共振周波数と気温の間に負の相関関係があることを指摘していたが、共振周波数の変化の直接の原因ではないとしている。今回、横打撃共振法による測定を2年間繰り返し行い、横打撃共振周波数の季節変化がもたらす推定心材含水率の測定日時による違いの原因を推定し、その補正を検討した。

## II. 材料と方法

## 1. 横打撃共振法による測定

九州育種場内 (熊本県合志市) に1995年に設定された育種素材保存園に植栽されているスギ第一世代精英樹58個体 (30クローン) を用いた。2017年6月19日からおおむね1週間から10日間に一度、胸高直径および横打撃共振周波数の測定を行った。2019年6月25日までの測定を解析に用い、その期間の平均測定間隔は8.0日であった。胸高直径は直径巻尺を用いて1mm単位で測定を行った。横打撃共振周波数は加速度ピックアップ (リオン製 PV-55) をFFTアナライザ (リオン製 SA-78) に接続し、胸高部位を打撃し測定を行った。周波数レンジは各個体の共振周波数に応じて1000 Hz, 2000 Hz, 5000 Hzと切り替えた。それぞれの周波数レンジでの分解能は10 Hz, 20 Hz, 50 Hzであった。推定心材含水率は釜口ほか (2000) の以下の式により計算した。

$$u = 1.93 \times 10^{11} \times 1 / (D \cdot Fr)^2 - 100$$

$u$ : 推定心材含水率 (%)

$D$ : 直径 (cm)

$Fr$ : 共振周波数 (Hz)

## 2. 解析と補正の検討

推定心材含水率と気温の関係を検討するために、菊池観測所 (熊本県菊池市) の2017年6月18日～2019年6月25日までの気温のデータを用いた (気象庁, 2019)。菊池観測所は九州育種場の最寄りの観測所で、北北東に8.4 kmの距離に位置する。標高は90 mである九州育種場とほぼ同じ83 mとともに内陸部の台地に位置する。このため九州育種場と近い気象条件であると判断し、気温データを解析に用いた。

各個体の推定心材含水率の測定日による順位変動を調べるため

<sup>\*1</sup> Kurahara, Y., Fukatsu, E., Kurita, M. and Kubota, M.: Seasonal change of estimated heartwood moisture content measured by lateral impact vibration method.

<sup>\*2</sup> 森林研究・整備機構森林総合研究所林木育種センター九州育種場 Kyushu Regional Breed. Office, Forest. Tree Breed. Ctr., For. & Forest Prod. Res. Inst., Forest Res. Man Org., Koshi, Kumamoto 861-1102, Japan

に Spearman の順位相関を求めた。気温と推定心材含水率の関係を検討するために、測定日の最低気温、平均気温、最高気温および測定日前日の最低気温、平均気温、最高気温と推定心材含水率の相関係数を求めた。推定心材含水率の気温変化による変化を補正するために、直径と共振周波数の積と気温との関係について線形混合モデルを用いて解析を行った。解析には R ver. 3.6.0 (R Development Core Team, 2019) を用いた。

### Ⅲ. 結果と考察

#### 1. 測定値の推移

表-1に本研究で用いたクローン名の一覧および試験開始当初の各クローンの胸高直径、周波数、推定心材含水率の平均値および成長錐コア採取により測定した心材含水率の平均値を示す。成長錐コアは2018年9月に採取し、乾量基準含水率を測定した。調査を開始した2017年6月19日の胸高直径の平均値は28.2 cm (最大38.2 cm, 最小17.1 cm, 標準偏差5.1 cm, 変動係数0.18) であった。2年経過後の2019年6月25日の胸高直径の平均値は29.8 cm (最大40.6 cm, 最小18.7 cm, 標準偏差5.3 cm,

表-1. 供試クローンの一覧

クローン名	個体数	平均 DBH (cm)	平均 周波数 (Hz)	平均 推定心材含水率 (%)	心材含水率 (%)
県浮羽7号	2	32.4	975	98	139
県八女12号	2	26.9	1100	148	114
県甘木5号	2	32.6	880	138	146
福岡署2号	2	32.3	880	140	159
県藤津12号	2	25.4	1000	209	210
県藤津24号	2	20.4	1430	128	173
県唐津1号	2	24.2	1180	151	178
県唐津6号	2	17.6	1790	96	92
県長崎2号	2	27.2	945	194	237
県対馬5号	1	27.3	1160	92	146
長崎署6号	2	30	890	172	186
県球磨5号	1	33.9	930	94	166
水俣署5号	2	30.2	920	152	169
人吉署3号	2	27	1000	173	133
県竹田11号	2	27.9	1160	91	129
県日田1号	2	34	845	135	140
県国東17号	2	32.7	855	150	191
県日出1号	2	24.9	1170	132	149
県四日市3号	2	25.2	1300	80	128
県東臼杵5号	2	27.1	1040	144	188
県東臼杵8号	2	31.9	855	162	154
宮崎署5号	2	33.1	870	134	97
宮崎署6号	2	32.5	925	120	191
綾署1号	2	23	1180	170	129
県始良4号	2	32.7	915	117	138
県始良9号	2	26.3	1290	71	135
県肝属2号	2	33.8	875	128	153
県日置7号	2	26.7	1220	95	149
県薩摩1号	2	29	995	132	112
県熊本20号	2	21.7	1490	100	131

変動係数0.18) であった。2017年6月19日の共振周波数の平均値は1070 Hz (最大1820 Hz, 最小790 Hz, 標準偏差248 Hz, 変動係数0.23) であった。共振周波数の全個体平均値は夏には低下し冬には上昇するという1年を周期とする変化を示し(図-1), 標準偏差も同様であった。

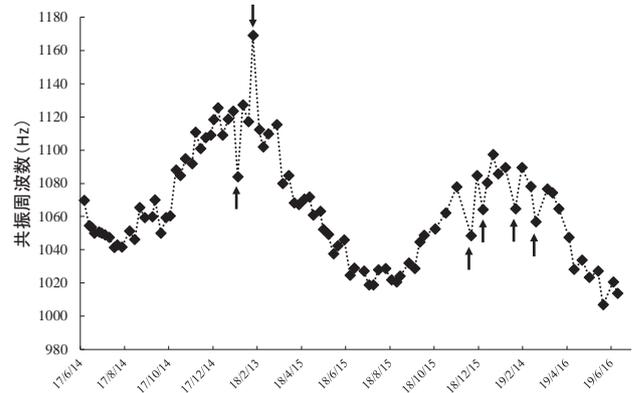


図-1. 共振周波数の全個体平均値の推移

変動係数は0.23~0.26の間で推移したが、季節的な変化は見られなかった。冬期には図-1に矢印で示した共振周波数が大きく変動した測定日が存在した。冬期における共振周波数の大きな変動のうち、1点は共振周波数の上昇で、他はすべて低下であった。共振周波数が大きく変動した測定日の気象をアメダスデータを元に検討した。共振周波数が大きく上昇した測定日の数日前から最低気温が氷点下になっており、最高気温も低温が続いていた。また、同時期に別の場所で伐倒したスギの樹幹中の水分の凍結を確認した。このことからこの上昇は中田(2007)と同様に樹幹中の水分の凍結によるものと判断した。共振周波数が大きく低下した測定日では、気温が直前の測定日より大きく上昇していた。共振周波数は樹幹中の水分が凍結するような低温時だけではなく、0℃以上でも気温の影響を受けていることが示唆された。2017年6月19日の推定心材含水率の平均値は133% (最大248%, 最小66%, 標準偏差, 36.2%, 変動係数0.27) であった。推定心材含水率の全個体平均値は夏には上昇し冬に低下するという1年を周期とする変化を示し(図-2), 標準偏差も同様であった。変動係数は0.22~0.33の間で推移し冬期に大きくなり、夏期には小さくなるという季節性のある変化を示した。推定心材含水率

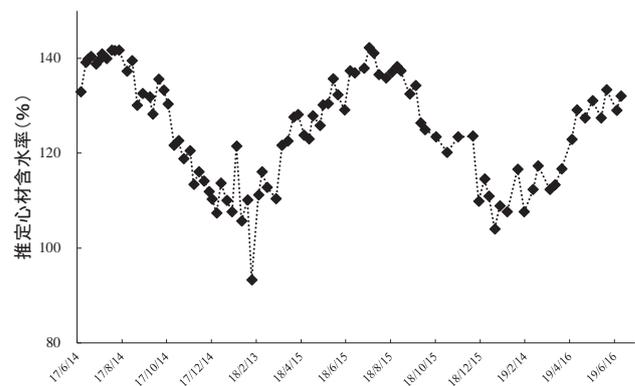


図-2. 推定心材含水率の全個体平均値の推移

は計算式(釜口ほか, 2000)より共振周波数とは逆の動きであり、冬期の急激な変化も同様であった。推定心材含水率と当日の平均気温を図-3に示す。両者の動きはよく一致しており、推定心材含水率と気温との間に密接な関係があると考えられる。

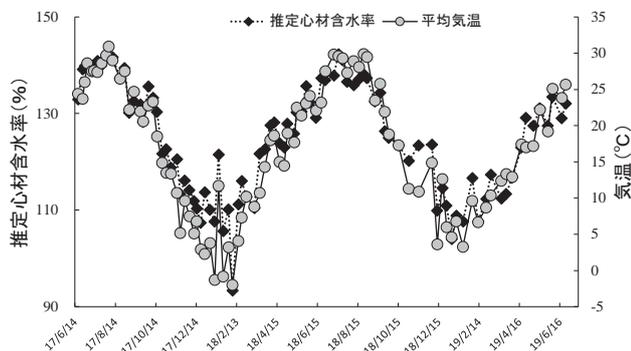


図-3. 推定心材含水率の全個体平均値と気温の推移の関係

## 2. 個体の推定心材含水率の順位変動

2017年6月19日に測定した推定心材含水率を基準として各測定日との Spearman の順位相関を求めた。図-4に Spearman の順位相関係数の推移を示す。相関係数はおよそ0.8から0.9の間で推移し、季節的な変化は見られなかった。測定時期による順位変動は小さく季節的な変動がなかったことから、季節変動の補正が出来れば異なる時期に測定した推定心材含水率の比較が可能であると判断した。

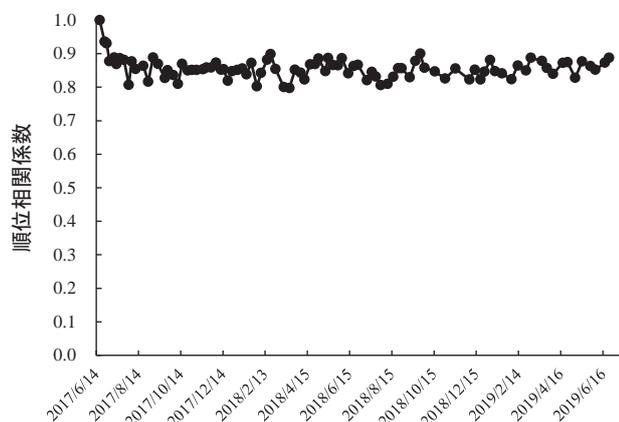


図-4. 推定心材含水率の順位相関係数の推移

## 3. 推定心材含水率と気温の関係および補正の検討

推定心材含水率は気温との関係があると思われることから、推定心材含水率の全個体平均値と測定日の最低気温、平均気温、最高気温および測定日前日の最低気温、平均気温、最高気温の相関係数を求めた。各気温とも相関係数は1%水準で有意となり、当日の最低気温との相関係数は0.970で最も高く、以下前日の平均気温(0.967)、当日の平均気温(0.966)、前日の最低気温(0.948)、前日の最高気温(0.943)、当日の最高気温(0.927)の順であった。木材のヤング率は温度依存性があり(松本、

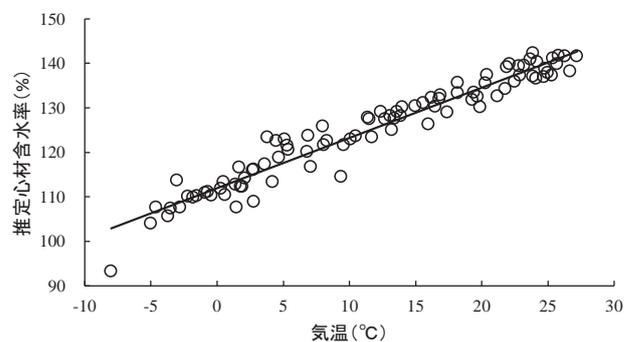


図-5. 測定当日の最低気温と推定心材含水率の全個体平均値の関係

1962), 温度が上がるとヤング率は低下する。周波数はヤング率が下がると低下することから気温の上昇で樹幹の温度が上昇し、それにともない共振周波数が低下して推定心材含水率が上昇するという仮定が成り立つ。測定当日の最低気温と推定心材含水率の全個体平均値の関係を図-5に示す。共振周波数の変化を気温で補正することができれば、測定時期の違いによる変化を取り除くことができる。共振周波数は成長にともなう胸高直径の増大でも変化するため、共振周波数を直接補正することは困難である。共振周波数と直径の関係は釜口ほか(2000)が示す理論式により反比例の関係にあり、今回のように成長により直径が変化していく場合でも、ヤング率、密度、形状係数が変化しないと仮定した場合、直径( $d$ )と共振周波数( $f$ )の積( $df$ )は一定である。したがって $df$ の変化を気温で補正することで共振周波数の変化を間接的に補正することができる。Rのパッケージlibrary(lme4)の線形混合モデルlmerを用いて $df$ を従属変数、最低気温を独立変数として個体をランダム効果、当日の最低気温を固定効果として解析した。固定効果である最低気温の傾きは $-76.0$ となり、 $1^{\circ}\text{C}$ の最低気温の上昇は $76\text{ cm}\cdot\text{Hz}$ の $df$ の低下をもたらすことがわかった。測定当日の最低気温により $df$ を補正することで異なる季節に測定された横打撃共振法による推定心材含水率の比較が可能となる。

## IV. まとめ

2年間の横打撃共振法による測定結果の解析により、推定心材含水率の季節変化の原因を気温の変動による樹幹のヤング率の変化に起因する共振周波数の変化であると推定し、補正方法について考察した。 $df$ を当日の最低気温で補正することで、推定心材含水率の季節変動を補正した。推定心材含水率の個体値の順位変動は少なく、測定日の最低気温または同様に推定心材含水率と高い相関関係のある前日の平均気温および当日の平均気温によって補正することができると考えられる。

## 引用文献

- 井城泰一ほか(2010) 木材学会誌 56: 33-40  
 釜口明子ほか(2000) 木材学会誌 46: 13-19  
 気象庁(2019) 過去の気象データ・ダウンロード  
 URL: <http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index>

php (2019年11月5日利用)  
松本昴 (1962) 九大演報 36 : 1 - 86  
中田了五・田村明 (2006) 木材学会誌 52 : 137 - 144  
中田了五 (2007) 林育研報 23 : 121 - 254  
R Core Team (2019). R: A language and environment for  
statistical computing. R Foundation for Statistical Computing,

Vienna, Austria. URL : <https://www.R-project.org/>  
森林総合研究所 (2006) [森林総合研究所 第1期中期計画成果  
集 18] スギ乾燥のための10の要点  
URL : [https://www.ffpri.affrc.go.jp/pubs/chukiseika/  
documents/1st-chukiseika-18.pdf](https://www.ffpri.affrc.go.jp/pubs/chukiseika/documents/1st-chukiseika-18.pdf) (2019年11月5日利用)  
(2019年11月8日受付 ; 2019年12月25日受理)