

県産スギ材の性能評価に関する研究

2014年度～2016年度

豊嶋 勲

要 旨

末口径 30cm を超えるスギ大径丸太の出荷は 3 割を超え、梁桁材等構造材への利用増が期待されている。そこで、愛知県版スパン表作成のため、県内産スギ、ヒノキ心持ち平角材の曲げ性能について検討した。また、梁桁に適したスギ材の効率的な利用を行うため、応力波伝播速度による丸太段階での強度・含水率区分法を検討するとともに含水率変動の大きいスギ材の天然乾燥過程における含水率評価法の開発を試みた。その結果、スギ平角材の JAS 機械等級は E90 (ヒノキは E110) が最も多く、スギは全国よりやや高いヤング率の材が得られ、機械等級材の曲げ強度下限値は告示の基準強度より高い値であった。また、応力波伝播速度による丸太段階での強度・含水率区分について、E70 以上かつ含水率 100% を基準に選別した結果、適・不適に丸太全体の半数ずつを区分できることが示された。さらに、スギ平角材について応力波伝播速度と含水率関係データベースを構築した。これを基に統計学的にバラツキを考慮できるモンテカルロシミュレーション法による含水率評価を行った結果、評価値のパーセンタイル値を任意に選択することで乾燥工程における品質管理を効率よく実施できることが示された。

I 目的

第二次世界大戦後の拡大造林政策のもとで植林された針葉樹人工林の樹齢が 60 年を超え、丸太の末口径が 30 cm 以上となる木材生産が主流になりつつある (三河材流通加工センター市場出荷データ 2012)。このような丸太から得られる製材は成熟材部が多く含まれており、これを活かす用途として梁桁材など構造用製材への供給が期待されている。しかし、木造建築における梁桁利用は、ベイマツや集成材がほとんどを占め、国産針葉樹材は極めて少ない。この用途へのスギ、ヒノキの利用を増やしていくためには、安定供給、材料性能、コスト面においてユーザー側のニーズに木材供給側が対応していく必要がある。そこで、本県のスギ、ヒノキ梁桁材の強度性能評価を行う

とともに、梁桁利用に適した材を丸太段階で効率的にグレーディングを行う技術について検討した。特にスギ材は、強度性能のみならず、含水率の変動が大きく、断面の大きい梁桁材の利用には、乾燥の効率化、つまり乾燥日数の低減、乾燥コストの低減が求められる。そこで、本研究では、応力波伝播速度法を用いて、強度、含水率による選別技術、乾燥中の含水率評価技術の開発を行った。

II 方法

1. 平角材の曲げ性能評価

2014 年 5 月に伐採された西三河、東三河地域の 45～107 年生、主に 2 番玉～3 番玉で長さ 4m のスギ、ヒノキ丸太から製材されたスギ平角材

248本、ヒノキ平角材148本を試験材として用いた。試験材寸法は、スギ:120×240×4000mm、ヒノキ:105×180×4000mmとした。なお、本試験材のJASに基づく目視等級の出現頻度は図-1のとおりである。スギは東三河、西三河産とも1、2級がほとんどを占め、3級はほとんど見られない。これに対して、西三河産ヒノキは3級が最も多い。これはヒノキの枝はスギに比べ落枝しにくく、枝打ち管理が適切に実施されたかどうかにより製材の品質が大きく変動するためである。

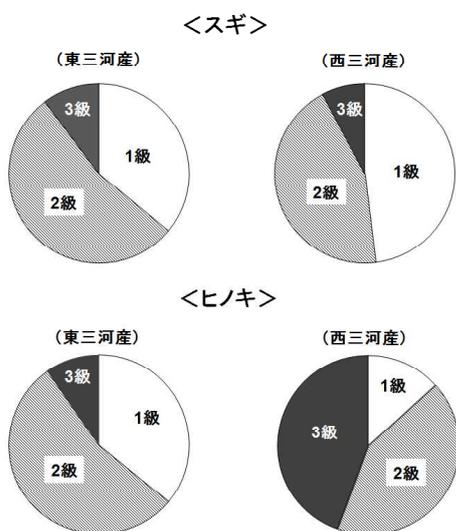


図-1 平角材の目視等級出現頻度

試験材は、天然乾燥または中温域での人工乾燥により含水率20%程度(全乾法による)まで乾燥した。試験方法は、実大強度試験機(SHIMADZU UH-1000kN)で3等分点4点荷重(スギ、ヒノキともにロードスパン:3600mm、シェアスパン:1200mm)により曲げ破壊試験を行い、曲げヤング率実験値(E_m)および曲げ強度実験値(F_m)を求めた。試験後、 E_m および F_m は次式により含水率15%時、梁せい150mmの標準条件により補正し、曲げヤング率(E_b)および曲げ強度(F_b)に調整した。

$$E_b: ((1+2.4h^2(E/G)/(3L^2-4a^2))/((1+2.4h_0^2(E/G)/(3L_0^2-4a_0^2)))$$

h : 試験材の梁せい、 h_0 : 150mm, $E/G=15$

L : 試験時のスパン、 a : 荷重点支点間距離、

$$L_0: 18 \cdot h_0, a_0: 6 \cdot h_0$$

$$F_b: (h(S+0.2L)/(h_0(S_0+0.2L_0)))^2$$

h : 試験材の梁せい、 h_0 : 150mm、

L : 試験時のスパン、 a : 荷重点支点間距離、

$$L_0: 18 \cdot h_0, a_0: 6 \cdot h_0$$

<含水率調整係数>

$$E_b: 1.14/(1.44-0.02 \cdot M)$$

$$F_b: 1.25/(1.75-0.0333 \cdot M)$$

M : 試験時の含水率(%) 20%以上はすべて20、10%以下はすべて10

2. スギ丸太の強度・含水率区分

前節のスギ丸太148本を試験材として用いた。伐採後2~3ヶ月経過した丸太の応力波伝播速度(V)を測定した。応力波伝播速度の測定は応力波式グレーディングマシン試作機(飯田工業)を使用した。センサーを木口面の髓中心に打ち込み、発信側センサーを鉄製ハンマーで定力打撃し応力波を発生させる仕組みとなっている。応力波伝播速度測定と同時に丸太の重量を測定し、両木口面から採取した円盤の容積密度から応力波伝播速度測定時の丸太の含水率(MC)を求めた。丸太の末口径と含水率を表-1に示す。

これらの丸太から製材された平角材のヤング率

表-1 スギ丸太試験材の概要

試験材数	末口径 (cm)		含水率 (%)	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
148	33.1	1.8	90.2	21.1

は前節で求めた曲げヤング率(E_b)を用いた。以上により平角材の曲げヤング率の明らかな丸太の応力波伝播速度と含水率の関係が得られる。

3. スギ平角材の天然乾燥過程の含水率評価

前節の丸太より製材した心持ちスギ平角材89本を試験材として使用した。スギ平角材の寸法は132×253×4000mmである。試験材は屋根付き屋外

で天然乾燥を行い、棧積みされた平角材の応力波伝播速度 (V_i) と重量 (W_i) の乾燥過程の経時変化を逐次測定した。応力波伝播速度の測定には、FAKOPP (Fakopp enterprise) を使用した。センサーは木口面の髓中心に打ち込み鉄製ハンマーで応力波を発生させた。試験終了後に、試験材の両端から 1m の箇所含水率測定用の板 (約 3cm 厚) を切り出し、全乾法により含水率を測定した。このピースの含水率を基に経時的に測定した平角材の含水率 (MC_i) を求めた。以上により、乾燥過程における供試平角材の応力波伝播速度と含水率 (V_i, MC_i) の経時変化が得られる。測定は、製材直後から含水率が繊維飽和点付近に至るまで 1 体につき約 7 回の測定を行い、(V_i, MC_i) 関係のデータセット 617 を得た。

含水率の評価は、(V_i, MC_i) の関係プロットの回帰線により評価値 MC_{av} を得た。さらに、スギは特に含水率の変動が大きいことから、含水率評価値を乾燥工程における含水率管理に応用するためにモンテカルロシミュレーション法を用いて評価することを試みた。そのシミュレーションの手順を以下に示す。まず図-2 に示すような (V_i, MC_i) 関係プロット群が得られたとする。これらのプロット群が基準データベースとなる。この (V_i, MC_i) 関係について回帰直線を求める。この回帰直線に、測定値 V_i を代入して、 V_i に対応する含水率の平均値 MC_{lave} を求める。次に回帰残差 RR を任意抽出し、これを上記で求めた含水率の平均値 MC_{lave} に加えて所定の含水率 MC_{ei} を求める。手順は次のとおりである。まず、任意の速度 V_i に対応する含水率の回帰残差は正規分布 (平均値: MC_{lave} , 分散: SD^2) を成すものと仮定する。具体的には、中心極限定理を用いた複数の乱数による方法で標準正規確率変数 SV (式 (1)) を計算し、含水率の残差標準偏差 SD_{mc} に乗じて求める (式 (2))。ここで SD は、式 (3) で

求められ、 V_i によらず一定であるとする。このようにして得られた回帰残差 RR を含水率の平均値 MC_{lave} に加え、これを速度 V_i に対応する含水率シミュレーション値 MC_{ei} とする (図-2)。

$$SV = \sum_{j=1}^n r_j - \frac{n}{2} \quad (1)$$

$$RR = SV \times SD \quad (2)$$

$$SD = SD_{mc} \times \sqrt{1 - COD^2} \quad (3)$$

なお、 SD_{mc} は全含水率データの標準偏差であり、 COD は (V_i, MC_i) 関係の決定係数である。また、標準正規確率変数 SV に関する式 (1) 中、 r_j は j 個目の乱数を意味し、第 1 項は区間 $[0,1]$ の一様乱数 (r_1, r_2, \dots, r_n) n 個の和である。また、 n は通常 $n=12$ 程度で十分とされている (宮川 1998、James 1980)。

上記のプロセスを十分多数回繰返すことにより、応力波伝播速度の測定値 V_i に対応する含水率シミュレーション値 MC_{ei} のデータ群を得る。なお、乱数の発生は表計算ソフト EXCEL (Microsoft) の RAND 関数を用いた。また、繰返し計算の回

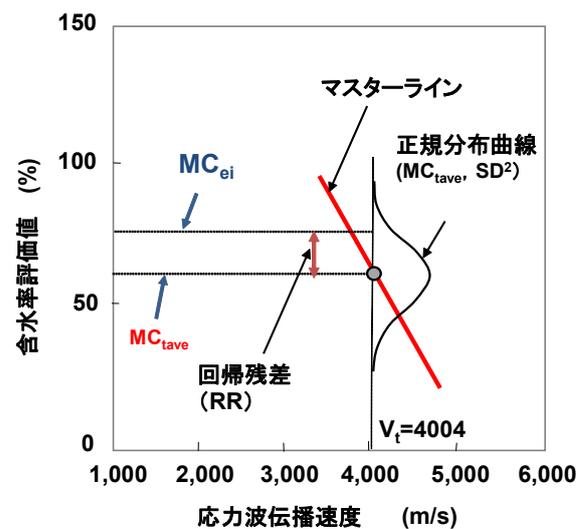


図-2 モンテカルロシミュレーション概略図

数は 5000 回とした。すなわち、一つの応力波伝播速度 V_i に対して 5000 個の含水率シミュレーション値 MC_{ci} が得られることになる。このデータ群をどのように評価して含水率評価値 MC_{em} を得るのかについては後述する。

Ⅲ 結果と考察

1. 平角材の曲げ性能評価

スギ、ヒノキ平角材の機械等級出現頻度分布を図-3に示す。スギは E90、ヒノキは E110 に区分される割合が最も多かった。スギは E70 以上が 95 %、ヒノキは E90 以上が 98 %であった。表-2 に曲げ性能試験結果を示す。スギの曲げヤング率平均値は、東三河産が 8.1kN/mm^2 、西三

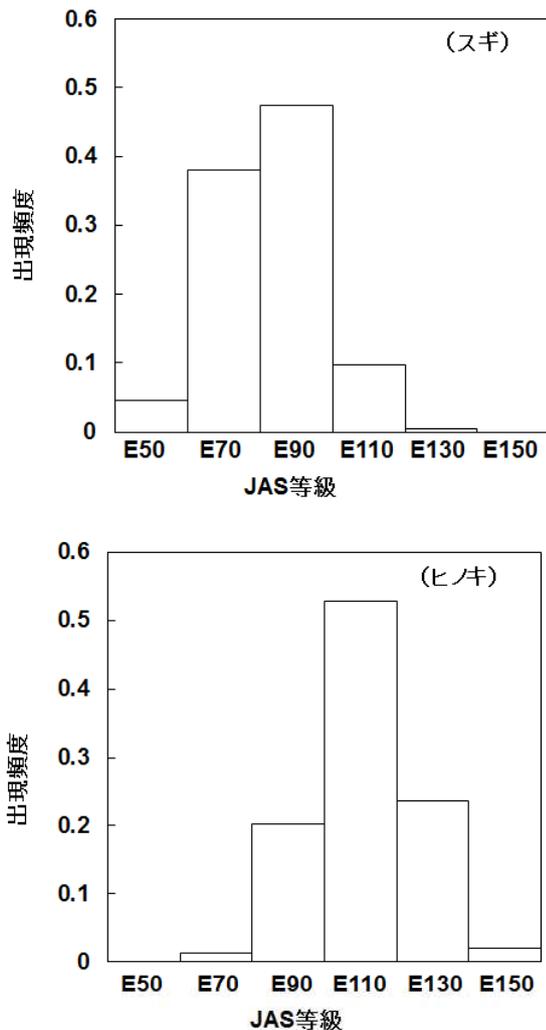


図-3 平角材の機械等級出現頻度

表-2 曲げ性能試験結果

樹種	産地	n	曲げヤング率 (E_b)		曲げ強度 (F_b)		曲げ強度下限値 [N/mm ²]
			[kN/mm ²]		[N/mm ²]		
			平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	
スギ	東三河産	197	8.1	1.2	47.6	7.5	34.2
	西三河産	51	7.6	1.3	46.6	9.2	
ヒノキ	東三河産	98	10.8	1.4	63.5	9.1	45.3
	西三河産	50	10.9	1.3	58.6	10.0	

※ 曲げ強度下限値：75 %信頼限界 95 %下側許容限界値

河産は 7.6kN/mm^2 であり、東三河産のスギ材は西三河産より有意に大きい値を示した ($p < 0.05$ t検定)。これらの値は全国のデータ (平均値 7.2kN/mm^2 : 木材の強度等データおよび解説 2011) より大きな値を示した。東海・近畿地域のスギは他

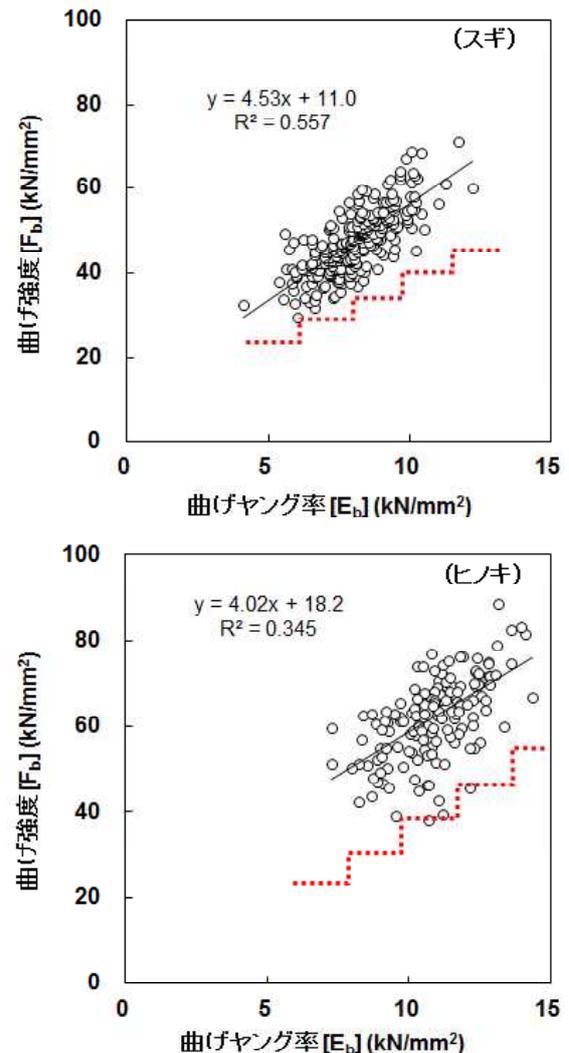


図-4 曲げヤング率 (E_b) と曲げ強度 (F_b) の関係

の地域よりヤング率が高い傾向にあることが知られている。特に東三河産のスギは高い強度を有する E90 以上が多く得られる (図-3) ことから機械等級区分材の需要開拓とその供給を積極的に進めることが望ましいと思われる。ヒノキについては両地域での差はなかった ($p=0.66$ t検定)。曲げ強度 (F_b) については東三河産スギ材が、 47.6N/mm^2 、西三河産は 46.6kN/mm^2 であり、両者に差はなかった ($p=0.45$ t検定)。一方ヒノキは、東三河産 63.5N/mm^2 、西三河産 58.6kN/mm^2 であり、有意な差があった ($p<0.01$ t検定)。これは、西三河産ヒノキは目視3級が多く、節の影響を強く受けたことによると考えられる。曲げ強度下限値 ($TL_{0.75,0.95}$) はスギ、ヒノキともに高い値を示し、告示 (国土交通省 建築基準法) の基準強度: スギ 22.2kN/mm^2 、ヒノキ 26.7kN/mm^2 を大きく上回った。図-4に E_b と F_b の関係を示す。スギ、ヒノキとも曲げヤング率と曲げ強度の関係は有意な相関関係が認められ ($p<0.01$)、スギの機械等級材は告示の基準強度を下回る試験材はなかった。一方、ヒノキは2本が基準強度を下回ったが、いずれも目視等級3級の材であった。

2. スギ丸太の強度・含水率区分

丸太の応力波伝播速度と平角材の曲げヤング率 (E_b) の関係を図-5に示す。丸太の応力波伝播速度が大きいほど平角材の曲げヤング率が有意に高くなった ($p<0.01$ $R^2=0.408$)。応力波伝播速度のみから E70 以上の平角が得られる丸太の選別を検討した。一つの考え方として、 $V=3530$ を境に選別すれば、E50 以下 (②、③) の低強度丸太を高い確率で区分することが可能となる。この場合、全試験材数の 81% (①、④) が平角材用丸太として選別されたことになる。

次に、断面の大きい平角材の乾燥で課題となる高含水率丸太の区分について考える。図-6に丸太の応力波伝播速度と丸太の含水率の関係を示す。

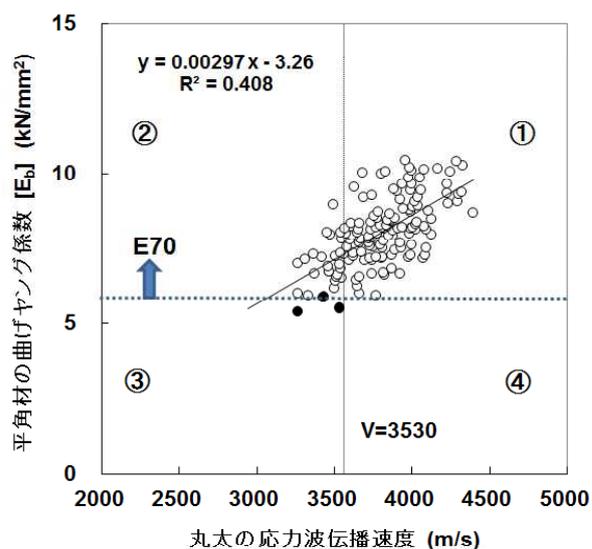


図-5 スギ丸太の応力波伝播速度と平角材の曲げヤング率 (E_b) の関係

応力波伝播速度が増加とともに含水率は有意に低くなった ($p<0.01$)。この傾向を利用して含水率区分について検討する。例えば、図-5で述べたように E70 以上を区分する目安となる $V=3530$ を含水率区分にも適用すると、丸太全数のうち 81% (①、④) が区分される。ここで丸太の含水率の高低の境を 100% (森林総研 2005) とすると、含水率 100% 以上の高含水率丸太 (①) の混入率は 27% となる。これは、区分を行わない場合の高

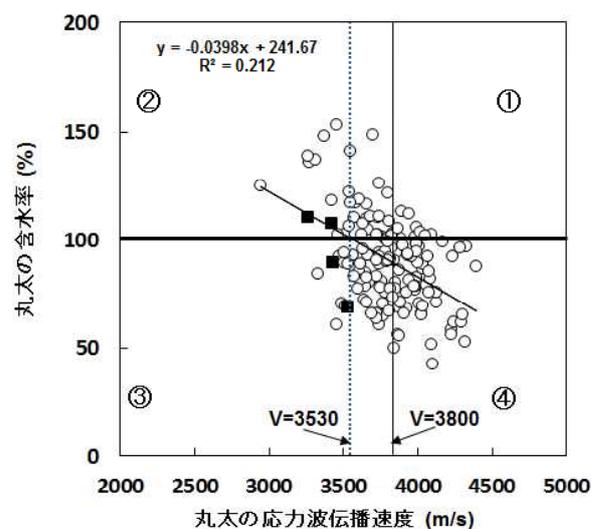


図-6 スギ丸太の応力波伝播速度と含水率の関係

含水率丸太の割合 31 %とほとんど同じである。そこで、1つの考え方として丸太全数のうち 50 %を梁桁に利用すると考えれば、 $V=3800$ を境に区分することができる。この考え方に基づけば、区分された丸太のうち、100 %を超える高含水率丸太(①)の混入率は9%に低減される。このように、木材は材質の変動の大きい材料であるため、許容される材質性能以下の材混入率や性能を満たす材料の漏落率を任意に設定することで、強度・含水率により強度・乾燥性能に応じて簡易に仕分けが実施できることが示された。

3. スギ平角材の天然乾燥過程の含水率評価

図-7に応力波伝播速度 (V_i) と含水率 (MC_i) の測定結果を示す。乾燥工程で逐次測定した試験材の応力波伝播速度は 3370 ~ 5019 m/s、含水率は 28.0 ~ 131.3%に分布していた。応力波伝播速度は含水率の低下とともに上昇し、両者の関係は回帰直線式 $MC_i = -0.04542V_i + 242.6$ で表すことができた ($R^2=0.537, p<0.01$)。なお、応力波伝播速度は材温にも影響されることが示唆されている (Sandoz 1993, Van Dyk et. al. 2005, Chan et. al. 2011)が、本研究では温度の影響は限定的であると考え、温度の影響は考慮していない。このよう

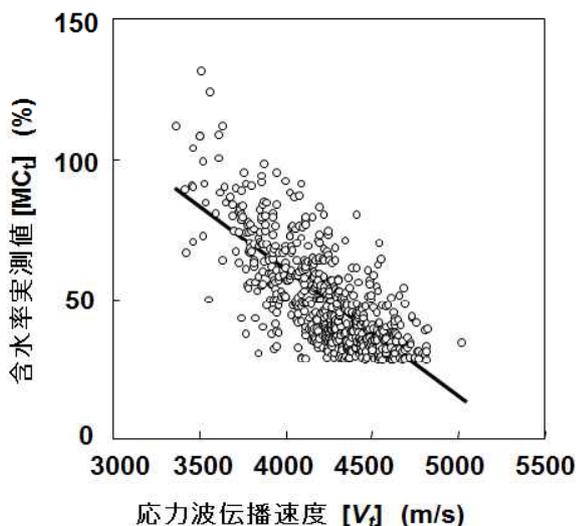


図-7 平角材の応力波伝播速度と含水率の関係

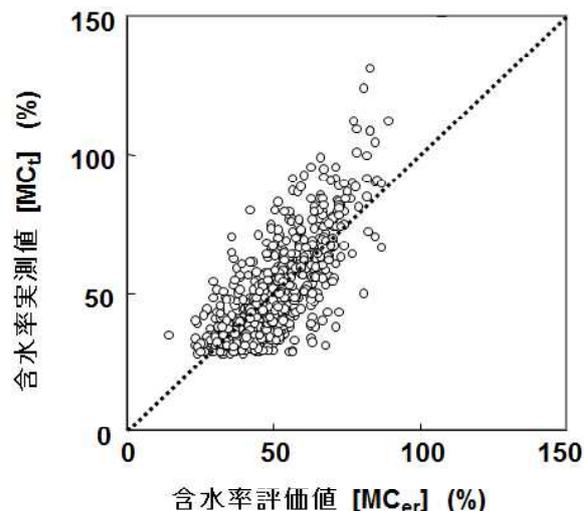


図-8 含水率評価値と実測値の関係

に、小試験体や板材での既往の研究結果 (Wang 2000, Guan 2002) と同様に、断面の大きい実大材でも応力波伝播速度は含水率の低下とともに上昇することが確認された。次に、実測した応力波伝播速度 (V_i) から回帰直線によって含水率の評価値 (MC_{er}) を求めた。図-8に含水率の評価値 (MC_{er}) と実測値 (MC_i) の関係を示す。評価精度は、応力波伝播速度と含水率の関係式の COD (0.537) に依存するため、回帰直線から離れているプロットの含水率評価値は $y=x$ (図-8の点線) から離れた。さらに詳細に評価精度を検証するため、図-9に評価値と実測値の差 $\Delta MC (= MC_{er} - MC_i)$ を4つの実測含水率域 (28 ~ 40%、40 ~ 60%、60 ~ 80%、80%以上) に分けて示す。含水率域が 28 ~ 40%と 40 ~ 60%では評価値が実測値より高く、60%以上の含水率域では実測値より低く評価される傾向が認められた。先にも述べたように、「応力波伝播速度-含水率」関係は材のヤング率に影響されるため、バラツキが増大する。これに関して、Liu et al.(2014) は、中国ポプラ (Populus cathayana) の板材を用い、「応力波伝播速度-含水率」関係のバラツキを減少させるため、全乾状態の応力波伝播速度 (V_0) を求め、測定した応力波伝播速度 (V_i) を V_0 で除した相

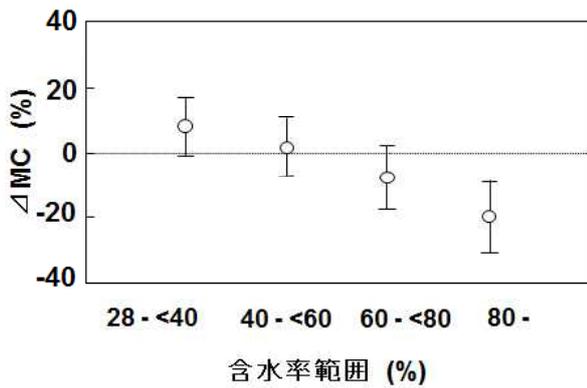


図-9 含水率評価値の精度

注) ΔMC : $MC_e - MC$ 、 \circ : 平均値、エラーバー : 標準偏差

対値 (V_i/V_0) を求めた。この相対値 (V_i/V_0) と経時的に測定した含水率 (MC_i) の関係を繊維飽和点を境とするバイリニアを用いて示した。このように相対値を用いることで「応力波伝播速度-含水率」関係のバラツキを取り除くことができよう。しかし、本研究のように断面の大きい製材では、全乾時の V_0 を測定するのは困難である。そこで次に、統計学的にバラツキを考慮できるモンテカルロシミュレーション法による含水率評価について述べる。先にも述べたようにシミュレーションの繰り返し数を 5000 回とすると、一つの応力波伝播速度 V_i に対して 5000 個のシミュレ

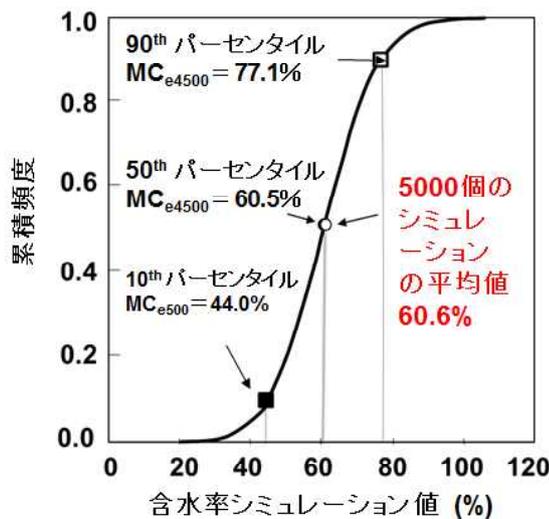


図-10 含水率シミュレーション値の累積頻度曲線

シオン値 MC_{ei} ($i=1 \cdots 5000$) が得られる。一例として応力波伝播速度 $V_i=4004$ m/s とした場合、図-7に示すデータベースを用いてモンテカルロシミュレーションにより得られる含水率シミュレーション値 (MC_{ei}) の累積頻度曲線を図-10に示す。すなわち、この速度 $V_i=4004$ m/s のときの含水率実測値 (MC_i) 69.2%に対し、21.1 ~ 106.1%の範囲の含水率シミュレーション値 (MC_{ei}) が 5000 個得られることを示している。図中のプロット (■) は最も低い評価値 ($MC_{ei}=21.1\%$) から数えて 500 番目のシミュレーション値 $MC_{e500}=44.0\%$ (10 %パーセンタイル値) を表している。同様に、50 %パーセンタイル値のプロット (●) は、2500 番目のシミュレーション値 $MC_{e2500}=60.5\%$ 、90%パーセンタイル値のプロット (□) は、4500 番目のシミュレーション値 $MC_{e4500}=77.1\%$ を表している。これら 5000 個のシミュレーション値のうち、どれを代表値として採用すればよいのかについて述べる。このシミュレーションは正規分布を仮定しているため、含水率シミュレーション値 MC_{ei} は中央値または平均値付近のシミュレーション値 (MC_{ei}) が多くなる。したがって、一つの考え方として、5000 個の MC_{ei} の平均値 60.6%を $V_i=4004$ m/s に対する評価含水率 MC_{em} として採用した場合、 MC_{em} と実測含水率の関係は図-11(a)のようになる。これによれば、プロット群は直線 $y=x$ (図-11(a)点線) を境に上下に均等に分布しており、その様子は図-8とほとんど同じである。次に、図-11(b)に10%パーセンタイル値 (MC_{e500}) と90%パーセンタイル値 (MC_{e4500}) を含水率評価値 MC_{em} として採用した場合の含水率実測値 MC_i と評価値 MC_{em} の関係を示す。これより10 %パーセンタイル値を MC_{em} として採用すると、ほとんどの評価値は実測値 MC_i を下回り、含水率を過小評価することになる。つまり、材の乾燥が評価ほどには進んでいないことを意味

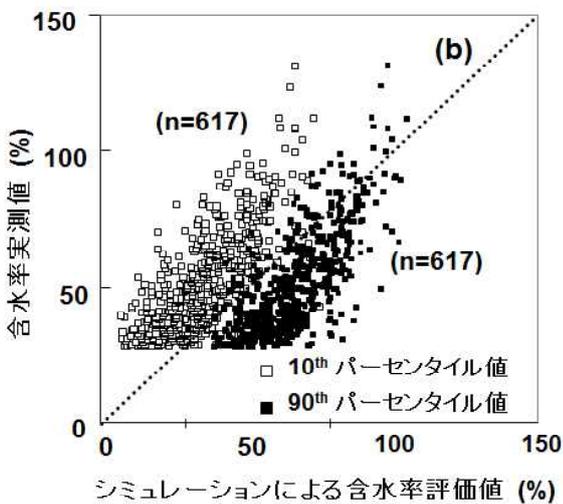
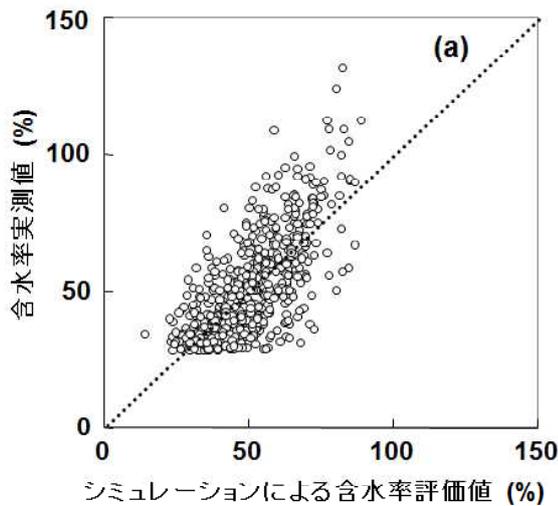


図-11 シミュレーションによる含水率評価値と実測値の関係

注) (a): 5,000個のシミュレーション値の平均値を採用した場合、(b)10thパーセンタイル値または90thパーセンタイル値を採用した場合

している。一方、90%パーセンタイル値を MC_{em} として採用すると、ほとんどの評価値が実測値 MC_i を上回り、含水率を過大評価することになる。このことは、材の乾燥が評価より進行していることを意味している。このことについて、図-12 は含水率の評価値 MC_{em} が実測値 MC_i を下回る（未乾燥率）割合および上回る（過乾燥率）と評価値 MC_{em} に採用するパーセンタイル値との関係を示したものである。これは、含水率の評価

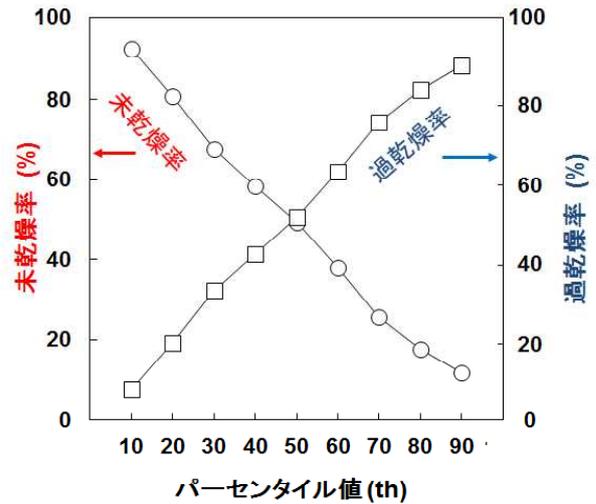


図-12 パーセンタイル値と未乾燥・過乾燥率の割合の関係

注) ○未乾燥率、□過乾燥率

値 MC_{em} として採用する MC_{ei} の違いによって、評価値が実測値を下回る割合がどのように変化するかを示している。これによれば、10%パーセンタイル値 ($i=500$) のときの評価値を MC_{em} として採用すれば、過小評価となる材は 93%で、多くの材は乾燥が評価より遅れていることになる。したがって、この場合、未乾燥材の出荷につながる危険性があることを示唆している。反対に、90%パーセンタイル値 ($i=4500$) を MC_{em} として採用すれば、12%の材が過小評価となる。このように i の増加とともに乾燥が評価より進行している材の割合が増加することになり、未乾燥材の出荷防止につながる。一方、製材の品質管理としては、過乾燥を防止したい場合もある。その場合には 10%パーセンタイル値を採用した方が過乾燥を防ぐという目的に合った評価ができる。木材、特にスギは強度、含水率ともに材質上のバラツキが大きい樹種であるので、回帰直線による含水率評価値は、実際の含水率より大きいものと小さいものが混在し、バラツキが大きくなる。しかし、本方法により強度、含水率のバラツキを考慮した含水率評価法を現場に導入することで、品質の信頼性

向上を図ることができると考えられる。

謝辞

本研究課題は、愛知県木材組合連合会主催のもと、「愛知県産材利用の手引き」検討委員会のメンバーをはじめ 2014 年度普及プロジェクト課題として県農林水産事務所および製材事業体の皆様に強度測定に御協力いただいた。また、応力波伝播速度による丸太のグレーディング技術の開発については、飯田工業株式会社と共同で実施したものである。関係者の方々には、ここに厚くお礼申し上げます。

参考文献

国土交通省 建築基準法 http://www.jlira.jp/data/jas_file11.pdf

森林総合研究所 (2006) スギ乾燥のための 10 の要点

三河材流通加工センター原木市場年間出荷データ (2012) 未公表データ

木構造振興社 (2011) 木材の強度等データおよび解説

Chan, M. J., J. C. Walker, C. A. Raymond. (2011). Effects of moisture content and temperature on acoustic velocity and dynamic MOE of radiate pine sapwood boards. *Wood Sci. Technol.* 45: 609 – 626.

Guan, H., Nishino, Y. and Tanaka, C. (2002). Estimation of Moisture Content in Sugi Wood with Sound Velocity during the Natural Drying Process. *Mokuzai Gakkaishi* 48 (4): 225-232

Hirashima, Y., Sugihara, M., Sasaki, Y., Ando, K. and Yamasaki, M. (2004). Strength Properties of Aged Wood I -Tensile strength properties of aged Keyaki and Akamatsu woods. *Mokuzai Gakkaishi* 50(5): 304-309

James, F. (1980). Monte Carlo theory and practice. *Rep. Prog. Phys.* Vol43: 1151-1153

Miyagawa, K. (1998). Elementary statistics, 3rd edn., Yuhikaku, Tokyo. 162-165, 195-199

Liu, H., Gao, J., Chen, Y. and Liu, Y. (2014) Effects of Moisture Content and Fiber Proportion on Stress Wave Velocity in Cathay Poplar(*Populus cathayana*)Wood. *BioResources* 9 (2): 2214-2225

Sandoz, J. L. (1993) Moisture content and temperature effect on ultrasound timber grading. *Wood Sci. Technol.* 27: 373 – 380.

Van Dik, H., R. W. Rice. 2005. Ultrasonic wave velocity as a moisture indicator in frozen and unfrozen lumber. *Forest Products Journal* 55 (6): 68 – 72

Wang, S. Y. and Chuang, C. T. (2000). Experimental Data Correction of the Dynamic Elasticity on the basis in Moduli, Velocity and Density of Solid Wood as a Function of Moisture Content above the Fiber Saturation Point. *Holzforschung* 54: 309-314