

シベリア産エゾマツの曲げ強度性能（第2報） 含水率による曲げ強度性能の変化

中谷 浩*, 坂井正孝*, 橋本 彰*, 秦 正徳**

The Bending Properties of Siberian Spruce II. The Influence of Moisture Content on the Bending Properties

Hiroshi NAKATANI*, Tadayuki SAKAI*, Akira HASHIMOTO*, Masanori HATA**

本報告では、シベリア産エゾマツ正角材の実大曲げ強度性能に及ぼす含水率の影響について検討した。生材時の縦振動ヤング率でマッチングされた10.5cm心持ち正角材3グループ（各45本）を生材、乾燥材（D15、D20）3つの乾燥レベルで曲げ試験に供した。結果は、以下のとおりである。

- 1) シベリア産エゾマツは、乾燥（D15）によって生材状態より曲げヤング率で平均16%、曲げ強度で平均40%それぞれ増加する。曲げ強度の変化は、ASTMの含水率補正式¹⁾で得られる値（23%）に比べて極めて大きい値を示した。
- 2) 生材から乾燥させた場合の縦振動ヤング率は、含水率25%から変化し始めた。
- 3) 断面内含水率の不均一分布がヤング率に及ぼす影響は小さいが、曲げ強度については外層の含水率の影響が大きかった。
- 4) 含水率変化による曲げ強度性能の補正式として、ASTM式と同型の次式を得た。

$$E1/E2 = (1.4 - 0.015MC1) / (1.4 - 0.015MC2)$$

$$\sigma 1 / \sigma 2 = (2 - 0.04MC1') / (2 - 0.04MC2')$$

但し、MC1, MC2：断面平均含水率、MC1', MC2'：外層含水率

E1, E2：含水率MC1, MC2に対するヤング率、 $\sigma 1$, $\sigma 2$ ：含水率MC1', MC2'に対する曲げ強度
本式は、含水率25%以下（25%以上の含水率では全て25%に置換する）のシベリア産エゾマツ心持ち正角材に適用する。

1. はじめに

前報⁵⁾では、シベリア産エゾマツ(*Picea jezeensis* Carr., 以下エゾマツ)の実大曲げ強度性能の概要と日本農林規格に基づく強度等級区分を行った結果を報告した。実大材の強度性能は、通常の場合、含水率15%時の値で評価しているが、在来工法用材では断面が大きいため乾燥性のばらつきの影響が出やすいことや初期含水率の違いから、人工乾燥で含

含水率15%をめざしても、数%程度のばらつきを生じることが一般的である。また、試験の目的によっては生材時を含む様々な含水率での強度データが与えられることも多い。このような状況下で実大材の強度性能の評価を進めていくためには、様々な含水率レベルで与えられた強度データを含水率15%時の値に基準化することが必要となってくる。この方策としてASTM D2915¹⁾における含水率による強度性能

の補正式がよく用いられている。ASTM式は本来2×4部材を対象に誘導されたものであり、必ずしも正角や平角といった比較的大きな断面をもつ在来工法用材に適したものか、定かではないが、これに代わる在来工法用材の含水率補正式が示されていないのが実状である。本報では、エゾマツ正角材の含水率の曲げ強度性能に及ぼす影響について検討し、エゾマツに適した強度性能の含水率補正式の誘導を試みることにした。

2. 試験方法

エゾマツ10.5cm心持ち正角材を生材時に縦振動ヤング率を測定して、ヤング率分布が等しい各45本の3つのグループを作成した。

第1のグループ(G1)は生材状態で曲げ試験、第2のグループ(G2)は含水率15%、第3のグループ(G3)は含水率20%を目標にそれぞれ蒸気式乾燥を行った後、曲げ試験に供した。曲げ試験は、いずれもスパン270cm、3等分点4点荷重法で行った。

なお、第2グループの試験体については、乾燥経過中の挙動を知る目的で、含水率25%、20%の乾燥レベルで乾燥を中止して寸法、重量、縦振動ヤング率を全数測定した。さらに、8試験体については各含水率段階で、断面を切り出し、縦横7×7等分に分割して、全乾法で含水率分布を測定した。

表一 1 供試材の縦振動ヤング率

グループ	縦振動ヤング率 tf/cm^2				
	n	平均	標準偏差	最低	最大
G1 生材試験	45	114.2	12.0	92.3	138.5
G2 D15乾燥材試験	45	115.0	13.6	86.8	145.6
G2 D20乾燥材試験	45	114.1	11.6	92.6	138.2

3. 結果と考察

3.1 生材と乾燥材の曲げ強度性能比較

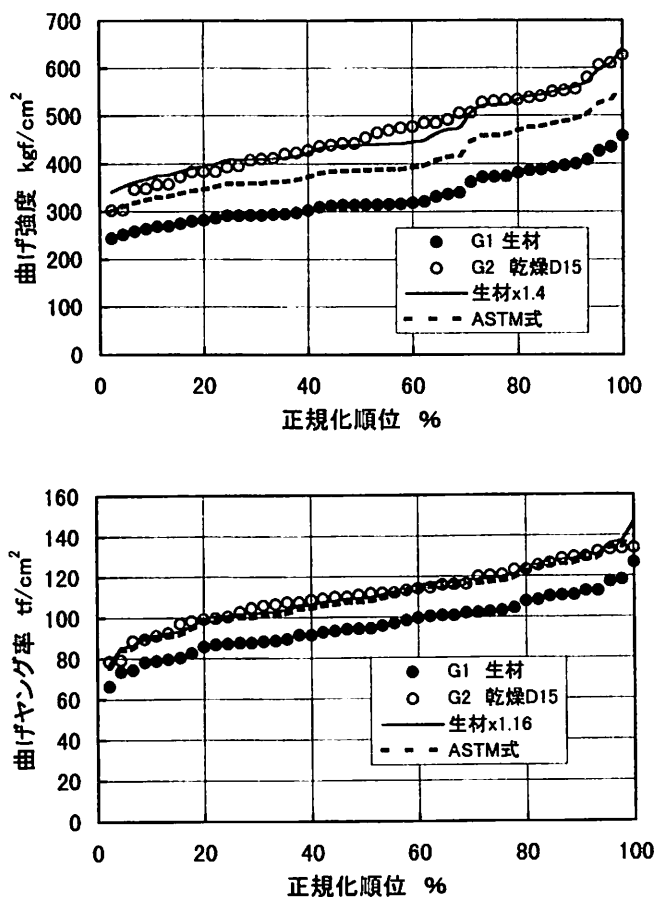
表一1に試験材料のマッチング後の縦振動ヤング率を示した。平均値、標準偏差とも3グループ間で差は小さく、マッチングは良好と見なし得る。G1, G2グループ、すなわち生材試験と乾燥材試験(D15)の寸法、強度性能の違いを表一2に、同じく曲げ強度性能の正規化順位曲線を図一1に示した。曲げ強度、曲げヤング率とも乾燥によって明らかに増加している。強度性能の増加率は曲げヤング率で平均16%、曲げ強度で平均40%が得られた。図一1では生材強度性能にこれらの増加率を与えた場合の正規化順位曲線を付記しているが、乾燥材強度性能の正規化順位データの分布と良く一致していると言える。

実大材の含水率の強度性能への影響については、中井⁴⁾がスギ、飯島³⁾らがシベリア産カラマツについて報告している。また、ASTMでは全樹種を一括して扱っている。

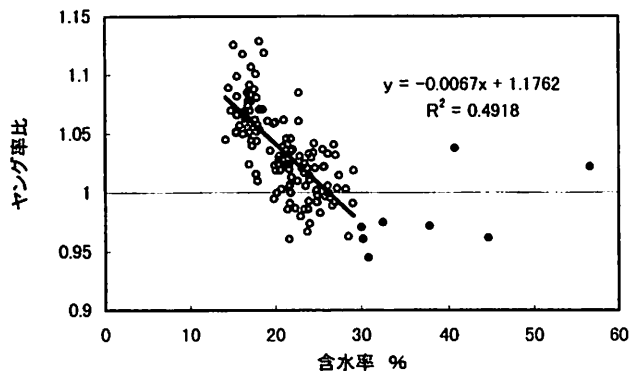
曲げヤング率の生材から乾燥材(含水率15%)への増加率は、エゾマツでは16%であり、ASTMの含

表一2 G1, G2グループの寸法・強度性能の変化

		G1 (生材)		G2 (D15)		G2 / G1 %
		平均	標準偏差	平均	標準偏差	
含水率	%	31.5	6.88	16.8	1.11	
材幅	cm	10.55	0.062	10.33	0.116	98
材せい	cm	10.56	0.058	10.32	0.111	98
断面係数	cm ³	196.1	2.07	183.5	4.76	94
断面二次モーメント	cm ⁴	1035.7	16.00	947.4	34.1	92
縦振動ヤング率	tf/cm ²	114.2	12.0	123.1	13.5	108
曲げヤング率	tf/cm ²	95.7	13.0	111.1	14.1	116
曲げ強度	kg/cm ²	327.6	53.3	459.7	81.8	140
曲げ剛性	×10 ⁶ kg·cm ²	99.1	13.5	105.2	13.1	106
最大曲げモーメント	kg·cm	64250	10426	84264	14659	131



図一 乾燥による曲げ強度性能の違い



図二 含水率による縦振動ヤング率の変化

注) 回帰直線の計算には含水率30%以上のデータ (黒丸プロット) は含まれない。

ヤング率比: 乾燥時縦振動ヤング率/生材時縦振動ヤング率

水率補正式 (14%), スギ (17%), シベリア産カラマツ (21%) と比べて, カラマツはやや大きい増加率を示すが, 他は大きな違いはないようである。

曲げ剛性についてはエゾマツで6%の増加であ

り, スギでは変化なし, カラマツでは5%の増加を報告している。各樹種とも曲げ剛性の変化は小さいようである。

曲げヤング率の変化は, 曲げ剛性の変化に, 寸法収縮による断面寸法の変化が相乗したものであり, カラマツのヤング率の変化が他の樹種より大きいのは, 乾燥収縮が大きいことが影響しているものと考えられる。

曲げ強度の生材から乾燥材への増加率については, エゾマツで40%が得られたが, この値はASTM式の23%, スギ30%, カラマツ34%に比べて非常に大きな値である。

最大曲げモーメントの変化でみると, エゾマツ31%増に対して, カラマツ21%増であり, 断面収縮によるみかけの強度増加を除いても, 乾燥によって極めて大きな強度増加を示す樹種と考えられる。

木材の強度的性質に対する含水率の影響について小田ら⁷⁾は無欠点縦圧縮試験の結果から樹種間に差異が存在することを指摘しており, 扱った針葉樹9樹種のうちエゾマツ, アカマツは乾燥による変化が最も大きかった樹種であることを報告している。

ASTM式では全樹種を一括して扱っているが, 今回の結果や小田らの報告を見ると, 含水率の強度性能への影響に樹種による違いが存在すると考えられ, 実大材でのより詳細なデータの蓄積が望まれる。

3.2 縦振動ヤング率の乾燥による変化

縦振動ヤング率の乾燥による増加率は, 表一2では8%, 同一部材での生材時からD15時の値への増加率は平均で7%にすぎず, 曲げヤング率 (16%増) に比べて乾燥による増加は小さい。

G2グループについての乾燥過程中的各含水率における縦振動ヤング率の変化を図一2に示した。生材時から含水率が低下しているにもかかわらず, 生材時に対する比率が1以下のものも認められる。固有振動周波数は含水率の低下につれて高周波側へ移行しており, 生材時に対する比率でD25時: 1.10, D20時: 1.15, D15時: 1.20となっている。また, 個体別にも低周波側へ移行したものは無かった。したがって, みかけの比重の低下が縦振動ヤング率の増加を抑えていることになるが, その原因についての詳細は不明である。

図一2の回帰式は含水率30%以下のデータに関し

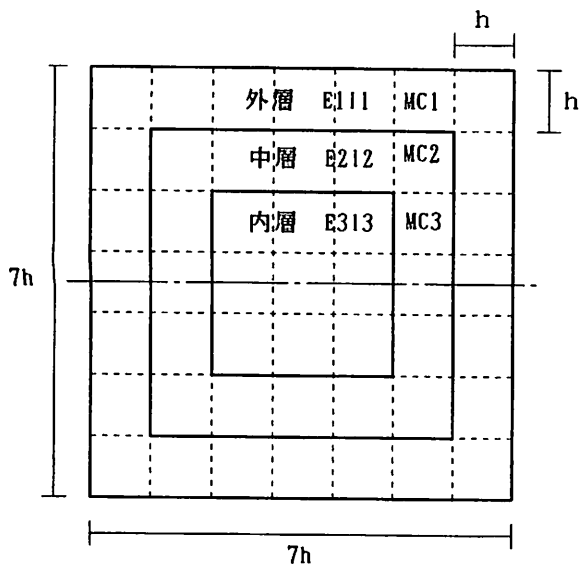


図-3 断面内含水率分布の計測

て計算したものである。この式に、比率1を代入して縦振動ヤング率の変化が始まる含水率を求めると、26%が得られた。すなわち、含水率が25%程度を境界に強度的性質の変化が始まるものと考えられる。

3.3 含水率の断面内分布

含水率の強度的性質への影響を評価する場合に実大材で問題になるのは、含水率が必ずしも断面内で一様では無いことである。通常は、断面の平均含水率を代表値として用いているが、正角や平角材では強度的影響度の高い外周部で断面平均値より含水率が低いのが一般的である。したがって、断面内のどの部位で試験時の含水率を代表させるかが、評価に

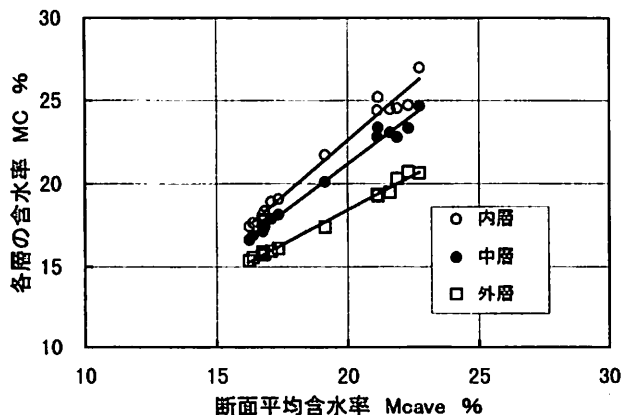


図-4 乾燥後の平均含水率と部位別含水率の関係

注) 外層 $MCa=0.83MCave+1.8$ $R^2=0.99$
 中層 $MCb=1.18MCave-2.4$ $R^2=0.99$
 内層 $MCC=1.35MCave-4.5$ $R^2=0.98$

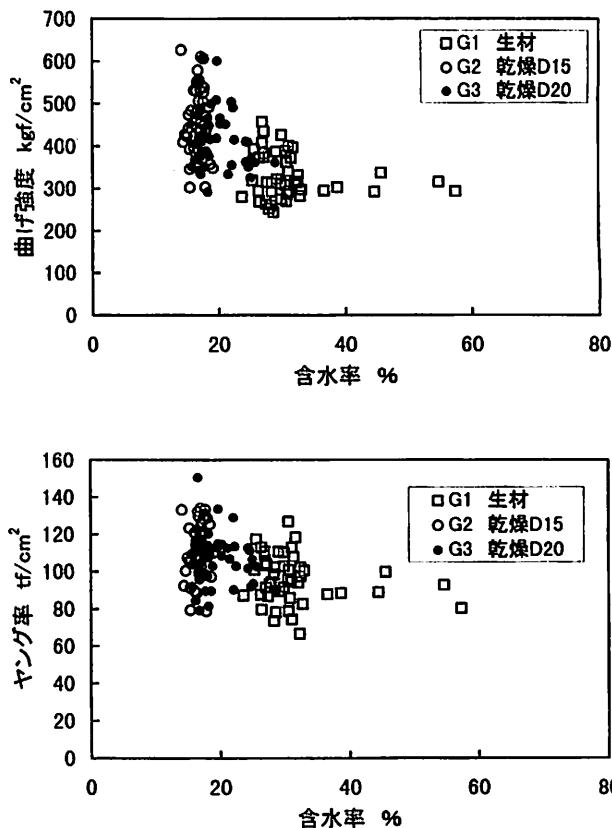


図-5 含水率と曲げ強度性能の分布

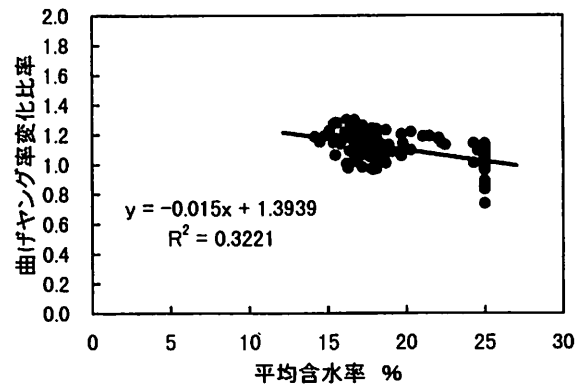
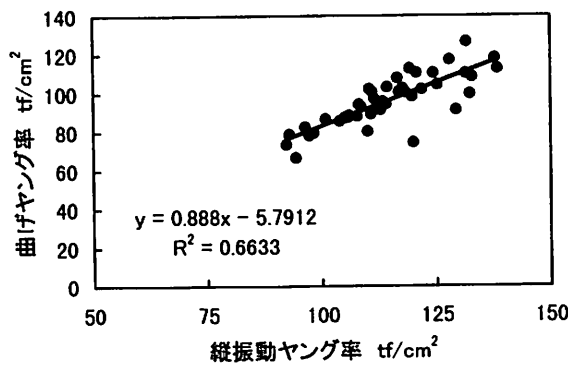
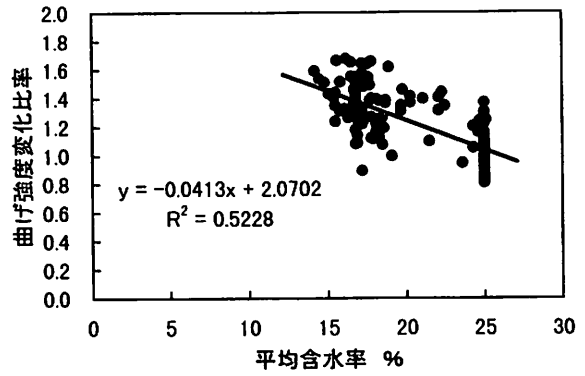
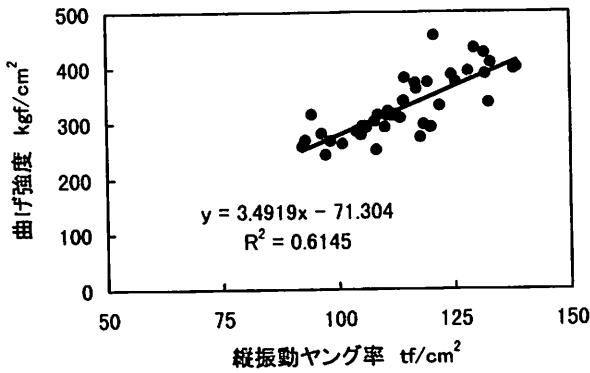
大きな影響を与えることになる。

そこで便宜的に、断面を図-3に示すような外層、中層、内層の3層に分けて考えることとする。

G2グループ(D15)について行った含水率分布測定試片の各層別含水率と断面平均含水率の関係を図-4に示した。断面平均含水率が高くなると、内層、中層含水率ではばらつきが増す傾向がみられるものの断面平均含水率と各層の含水率は密接な関係を持っており、図-4の回帰式の決定係数は各層とも0.98以上と極めて高い。したがって、断面平均含水率を用いて外層、中層、内層の含水率を高い精度で推測することができると思われる。

3.4 曲げ強度性能の含水率調整式の検討

G1, G2, G3グループの含水率と曲げ強度性能の関係を図-5に示した。縦振動ヤング率でのマッチングを行っているので、各グループは生材時には同様の強度的性質の分布を持つと思われる。しかし、含水率の低下によって曲げ強度は大きく増加し、ばらつきの増加も認められる。一方、ヤング率は増加の度合いが小さく、ばらつきもほとんど変わっていない。



図一六 生材の縦振動ヤング率と曲げ強度性能の関係

図一七 断面平均含水率と曲げ強度性能の変化

注) 変化比率は乾燥材の値/生材の値を示す

3.4.1 断面平均含水率による強度性能変化の評価
強度試験は破壊試験であるため、同一サンプルで曲げ強度の含水率による変化を試験することができない。そこで、各試験材の生材時からの強度変化比率を求めるために、生材時の曲げ強度性能を生材時の縦振動ヤング率で推定することとした。

生材で強度試験を行ったG1グループの縦振動ヤング率と曲げ強度性能の関係式(図一六)を用いて、G2(D15)、G3(D20)グループの生材時縦振動ヤング率から生材時曲げ強度性能を推定した。

こうして得られた各材の生材時強度性能と各含水率における強度性能の比率を求め、含水率(断面平均)との関係を図一七に示した。ここで、生材の含水率は、一律25%とみなした。25%に決定したのは、図一二に見られるように縦振動ヤング率の変化が25%を境に始まっていること、さらに、生材の含水率を30~22%までそれぞれ固定して、含水率と強度性能の回帰式を求めたところ、含水率25%が最も高い決定係数を与えたためである。

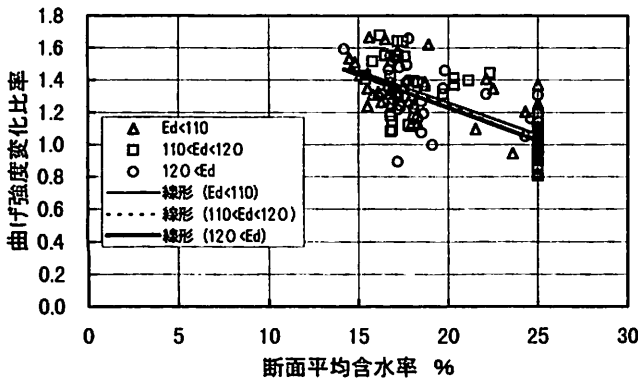
また、含水率による強度的性質の変化については、

低強度の木材では強度の増加が少ないことが指摘されている²⁾。そこで、試験材の強度的品質の違いによる影響をみるため、全試験材を生材縦振動ヤング率の大きさで再度3つのグループ(縦振動ヤング率110 tf/cm²以下、110~120、120以上)に区分し、それぞれのグループ内で含水率変動に伴う強度の変化率を求めた(図一八)。この結果をみると、それぞれの回帰直線はほとんど一致しており、生材時ヤング率の大きさは、強度変化比率に影響を与えていないとみなしうる。エゾマツでは一般的に節が小さいこともあり、欠点の影響がでにくいことが考えられる。そこで、含水率変動による強度の変化率には欠点の影響が無いものと考えて、以下の強度性能の含水率補正式を検討することとした。

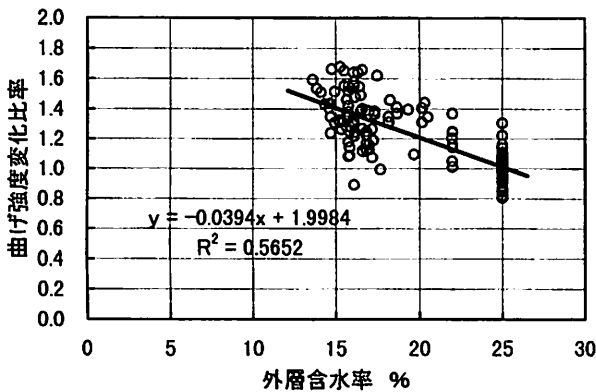
図一七の回帰式から含水率MCn(%)時のヤング率En、曲げ強度σnと生材時(MC25%)のヤング率E0、σ0との間に

$$\left. \begin{aligned} E_n / E_0 &= 1.4 - 0.015MC_n \\ \sigma_n / \sigma_0 &= 2.1 - 0.041MC_n \end{aligned} \right\} \dots (1)$$

の関係が得られる。



図一八 ヤング率区分による強度変化率の違い



図一九 外層含水率と曲げ強度の変化率

注) 曲げ強度変化率は乾燥材の値/生材の値

したがって、任意の含水率MC1, MC2間では、ヤング率、曲げ強度をそれぞれE1, σ1, E2, σ2とすると

$$\left. \begin{aligned} \frac{E1}{E2} &= \frac{(1.4 - 0.015MC1)}{(1.4 - 0.015MC2)} \\ \frac{\sigma 1}{\sigma 2} &= \frac{(2.1 - 0.041MC1)}{(2.1 - 0.041MC2)} \end{aligned} \right\} \dots (2)$$

というASTM補正式と同型のヤング率の含水率補正式が得られる (25%以上の含水率は25%とみなす)。

(2)式を用いて、生材から含水率15%に乾燥した場合の曲げ強度性能の変化を求めると、曲げヤング率で15%、曲げ強度では38%の増加となる。

3.4.2 不均一含水率分布の影響に対する考察

断面内における含水率の不均一分布が曲げ強度性能に及ぼす影響を検討する。

図一3に示されている3層に分割した含水率モデルを考え、各層の含水率は図一4の回帰式により与えられるものとする。すなわち、断面平均含水率を

MCave, 外層, 中層, 内層の含水率をMCa, MCb, MCcとすると

$$MCa = 0.83MCave + 1.8$$

$$MCb = 1.18MCave - 2.4$$

$$MCc = 1.35MCave - 4.5$$

各含水率時のヤング率は、ASTM補正式 (表3注参照) を用いて生材時ヤング率をE0として求めることとする。同補正式を用いたのは、2×4材で誘導されたものであり、式の内容に断面内の水分傾斜の影響が小さいと考えられるためである。

以上の仮定のもとに、生材時のヤング率E0の正角材が断面平均含水率MCaveに乾燥された場合、MCaveの含水率が均一に分布しているとみなした時のヤング率Eaveと実態に近い3層の含水率分布を持つとみなした時のヤング率Etの違いを求める。

各層のヤング率、断面二次モーメントをE1~E3, I1~I3, 断面全体としてのそれをEt, Itとすると

$$Et It = E1 I1 + E2 I2 + E3 I3 \quad \text{から}$$

$$Et = (E1 I1 + E2 I2 + E3 I3) / It$$

で与えられる。

$$\text{ここで, } I1 = (7h)^4/12 - (5h)^4/12$$

$$I2 = (5h)^4/12 - (3h)^4/12$$

$$I3 = (3h)^4/12$$

$$It = (7h)^4/12$$

断面の平均含水率が15%から22%の場合の均一な含水率分布に基づく断面ヤング率Eaveと各層の含水率に基づく断面ヤング率Etとの関係を生材時ヤング率100 tf/cm²として計算した結果を表一3に示した。

表一3に示すように、EaveとEtの間には最大でも3%程度の差異を生じているにすぎない。したがって、本実験で扱った程度の水分傾斜では、測定されたヤング率をその断面の平均含水率時の値とみなしてもほとんど問題がないと考えられる。

一方、曲げ強度に関しては、最も大きな応力の発生する最外層近くを起点に破壊が生じると考えると、ヤング率以上に表面含水率の影響を受けやすいと考えられる。木材の機械的等級区分法 (案)⁶⁾でも圧縮側、引張側から材せいの1/5部分で含水率を測定することを推奨している。図一9に外層の含水率を用いた場合の曲げ強度の生材からの変化率を示した。図一7の場合と比べると、決定係数が平均含水率で扱った場合の0.52から0.57へと大きくなっており、外層含水率の影響がより強いと考えられ、

表一 3 含水率分布がヤング率に及ぼす影響

MCave	MCa	MCb	MCc	Eave	Et	Et / Eave
%	%	%	%	tf / cm ²	tf / cm ²	
15	14.25	15.30	15.75	114	115	1.009
16	15.08	16.48	17.10	112	113	1.009
17	15.91	17.66	18.45	110	111	1.009
18	16.74	18.84	19.80	108	109	1.009
19	17.57	20.02	21.15	106	108	1.019
20	18.40	21.20	22.50	104	106	1.019
11	19.23	22.38	23.85	102	104	1.020
22	20.06	23.56	25.20	100	103	1.030

注) Eave : 含水率MCaveが均一に分布するとして計算されるヤング率

Et : 各層の含水率を考慮して計算されたヤング率, 図-3 参照
各ヤング率はASTM式により生材時ヤング率E0 = 100tf/cm²として計算した。

ASTM式 :

$$E = (1.44 - 0.02MC) / (1.44 - 0.02 \times 22) \times E0$$

E0はMC22%時の値とする

断面内に含水率差がある場合には、外層の含水率で曲げ強度を評価するのが適当と思われる。

図-9の回帰式から、

$$\sigma / \sigma_0 = 2.00 - 0.04MC'$$

(2)式と同様に、 σ_1 と σ_2 間では

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{(2 - 0.04MC1')}{(2 - 0.04MC2')} \dots (3)$$

が得られる。ここで、MC', MC1', MC2'は外層含水率を示す。

この式による生材から15%時までのエゾマツの曲げ強度の変化率は、40%であり、(2)式での38%の変化率と大きな違いは無い。したがって、(2)、(3)式の違いによる数値的な違いに実用上の問題は無いと考えられる。しかし、用いる含水率は外層含水率が適当であることから、誘導根拠となった(3)式を用いるのが妥当と考えられる。また、今回の結果では(2)、(3)式間に実用上の違いが無かったものの、平角や心去り材での状況、あるいは他樹種との関係等を考えていけば、同式間に違いが生じてくる可能性もあることから、外層含水率と(3)式を用いていくのが適当

と思われる。今後、新しい強度試験を実施していく際には、外層部の含水率を求めて置くことが必要と考えられる。

4. おわりに

シベリア産エゾマツの含水率による曲げ強度性能の変化を検討した。生材から含水率15%への乾燥では、ヤング率の変化は他の報告と差がないものと考えられるが、曲げ強度は40%という大きな増加率を示しており、樹種的な違いが存在すると考えられる。

この含水率による曲げ強度性能変化を表すために、強度性能の含水率補正式(2)、(3)を作成した。本式は、心持ち正角材で得られたものであり心去り材、平角材での変化については、今後とも検討する必要がある。また、曲げ強度の変動については外層の含水率で評価するのが適当と考えられるが、外層の対象範囲については明確ではなく、今後の検討を待たねばならない。

文 献

- 1) ASTM : "Standard Practice for Evaluating Allowable Properties for Grades of Structural Lumber", D2915-88, 1989 Annual Book of ASTM Standards, Vol.04.09 (1989).
- 2) Madsen, B. : In-Grade Testing-Problem Analysis, Forest Prod.J. 28(4), 42-50 (1984).
- 3) 飯島泰男, 中谷 浩 : 実大構造用材の曲げ強度性能 (第1報), 木材と技術 No.63, 1-10 (1985).
- 4) 中井孝, 田中俊成 : 間伐材等小径木の強度性能, 木材工業 39(5), 235-241 (1984).
- 5) 中谷浩, 坂井正孝ら : エゾマツの強度性能 (第1報), 富山林技セ研報 No.11, 20-28 (1998).
- 6) 日本木材学会木材強度・木質構造研究会 : 木質構造研究の現状と今後の課題, "木材の機械的等級区分法 (案)", 1994, pp.42-45.
- 7) 小田一幸, 堤壽一, 松村順司 : 樹種が異なる針葉樹材の力学的性質への含水率の影響(第2報), 木材学会誌 40(2), 113-118 (1994).

Summary

In this report, the effect of moisture contents on the bending performance of Siberian Spruce timber has been studied. We carried out bending tests of 10.5 cm square timber under 3 moisture contents level (D15, D20, Green). Number of specimens was 45 in each moisture levels, and were prepared having the same distribution of strength properties. Results are summarised as follows.

- 1) The bending properties of Siberian Spruce increased 16% in their Young's modulus and 40% in bending strength in drying to MC 15% from green. This value in bending strength is very large compared with the value (23%) calculated from the adjustment formula in ASTM.
- 2) Young's modulus by longitudinal vibration method begins to change from 25% moisture content.
- 3) The nonuniformity of moisture distribution in a section has a small influence on Young's modulus. But the bending strength is influenced largely by moisture content of the outer layer.
- 4) We show as follows a formula like that in ASTM for adjustment of the effect of moisture content.

$$E1/E2 = (1.4 - 0.015MC1) / (1.4 - 0.015MC2)$$

$$\sigma 1 / \sigma 2 = (2 - 0.04MC1') / (2 - 0.04MC2')$$

MC1, MC2 : average moisture content in a section

MC1', MC2' : moisture content of outer layer

E1, E2 : Young's modulus with moisture content of MC1 or MC2

$\sigma 1, \sigma 2$: Bending strength with moisture content of MC1' or MC2'

This formula can be used under 25% moisture content in Siberian Spruce timber with the pith. If moisture content is over 25%, then it can change to 25%.