

トドマツ水食い材の高温中の振動特性

大崎 久司 久保島吉貴^{*1} 外崎真理雄^{*1} 太田 正光^{*2}

Vibrational Properties of Wetwood of Todomatsu (*Abies sachalinensis*) at High Temperature

Hisashi OHSAKI Yoshitaka KUBOJIMA Mario TONOSAKI Masamitsu OHTA

The object of this study was to understand precisely the drying characteristics of wetwood of todomatsu (*Abies sachalinensis* Mast.). For this purpose, the vibrational properties of wetwood of todomatsu at high temperature were compared with those of normal parts that had lower green moisture content than the wetwood. Specimens were cut respectively from the wetwood and normal parts, and matched in the radial direction. The specimens and the measuring systems were placed in an electric drying oven and free-free vibration tests were conducted in the oven under absolutely dry conditions. The wetwood and the normal parts were tested separately. The temperature was raised from room temperature to 200°C and then lowered to 50°C in steps of 25°C. The specific Young's modulus decreased with an increase in temperature during the heating process while it increased with the decreasing temperature during the cooling process. There was no significant difference in the specific Young's modulus between the wetwood and the normal part at all tested temperatures. The loss tangent took a minimum value at about 100°C in both the heating and cooling processes. There was no significant difference in the loss tangent between the wetwood and the normal part. Thus, the elastic and viscoelastic behaviors of the wetwood appear to be similar to those of the normal part in the temperature range of an actual kiln-drying process.

Key words: wetwood, *Abies sachalinensis* Mast., vibrational properties, high-temperature drying
水食い, トドマツ, 振動特性, 高温乾燥

北海道産トドマツ (*Abies sachalinensis* Mast.) の水食い部の振動特性を, 隣接する正常部の振動特性と比較した。寸法が長さ 180mm (L) × 幅 25mm (R) × 厚さ 10mm (T) の試験体を, 水食い部と正常部からそれぞれ切り出し, R 方向にマッチングした。全乾状態にした試験体と測定装置を電気恒温器の中に設置した。温度を室温から 200°C まで 25°C 刻みに上昇させた後 50°C まで 25°C 刻みで降下させ, 各温度で両端自由たわみ振動試験を行った。比ヤング係数は, 昇温と共に減少し, また降温と共に増大し, 水食い部と正常部において有意差が認められなかった。損失正接は, 昇温, 降温の両

過程において 100℃付近で最小値をとり、水食い部と正常部に有意差はなかった。よって、トドマツ水食い材の振動特性の挙動は、実際の乾燥過程の温度域においては、正常材と同様と思われる。

1. はじめに

エゾマツ、カラマツと同様に北海道における主要な造林樹種のひとつであるトドマツ¹⁾ (*Abies sachalinensis* Mast.) は、時として水食いとよばれる材部を含むことがある。水食いは、含水率が通常の心材部より高い心材部であり、林分の 40% 以上の立木に発生することもある²⁾。水食いは、高含水率であるために、乾燥時間や乾燥コストの増大といった問題が発生する。また、水食いを含む材は、乾燥中に割れを生じやすく、その結果、品質や歩留まりが低下する。

水食いを含むトドマツの適正な乾燥スケジュールの作成のためには、水食いの発生の研究³⁾ や、乾燥後の特性の研究⁴⁻⁶⁾ だけでなく、乾燥中の物性の変化も研究する必要がある。加えて、水食い部の物性を正確に調べるために、正常部（本研究では正常な含水率の材のことを「正常部」とよぶ）とは切り離して試験する必要がある。しかしながら、そのように 2 つの部分切り離した研究はほとんど見られない。乾燥による割れや狂いに関係するトドマツの強度特性については、これまでに検討されてはいるが、これらは水食い部と正常部の両方を含む実大サイズの材で計測された結果である。

そのため、トドマツ水食い材の乾燥過程中的物性を調べる第一歩として、温度が水食い部と正常部の振動特性に与える影響を比較検討した。振動特性は木材の強度に対応しており、高温条件においても測定ができる。さらに、振動試験は非破壊試験なので、同じ試験体を乾燥過程で連続的に使用することができる。

2. 実験

2.1 試験体

試験体は北海道産のトドマツを用いた。寸法は 180mm（長さ方向：L）×25mm（半径方向：R）×10mm（接線方向：T）とした。試験体は同じ材から水食い部と正常部を目視の判断により切り離し、それらを R 方向にマッチングした。これは、樹幹内の水食いの発生状況のために、L 方向、T 方向へのマッ

チングはできなかったためである。今実験においては、水食いは正常部の外側に発生していた。加熱試験に先立ち、すべての試験体を、気乾にした後に 105℃で全乾にした。

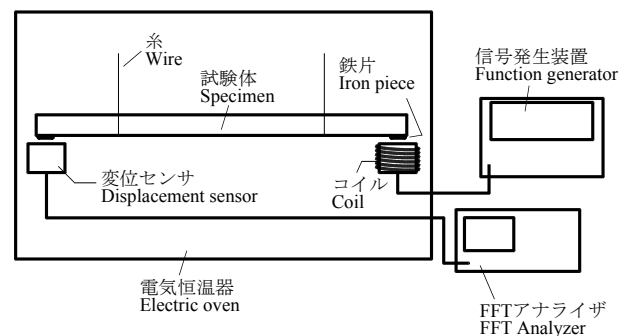
振動試験体は、水食い部、正常部それぞれ 3 体ずつとした。加熱中の試験体の寸法、重量、温度の変化を調べるために、同じ寸法の試験体を別途 2 体使用した。

2.2 振動試験

既往の研究⁷⁾と同様に、両端自由たわみ振動試験を行って、共振周波数と損失正接を測定した。

第 1 図に振動試験の装置を示す。試験体は両端自由たわみ振動の 1 次共振モードの節の位置で、直径 0.12mm のポリウレタン製ワイヤにより支持した。加振用電磁石 (ELECTRO Corporation 製 High Temperature Speed Sensor 3030 HTB, 温度範囲：-73 ~ +273℃) で片方の端から T 方向に振動を加えた。試験体の変位は振動検出用変位計 (KEYENCE 製, High Accuracy Positioning Sensor SH-816, 温度範囲：-10 ~ +200℃, 直線範囲：1 ~ 2V) によって検出し、FFT アナライザ (小野測器製, Multi-Purpose FFT Analyzer CF-5220) によって分析した。

損失正接は共振曲線の頂点から 6dB 低下した箇所のバンド幅より計算した。試験体の共振周波数の範囲はおおよそ 1400 ~ 1540Hz であった。この周波数範囲では、損失正接は共振周波数に依存しない⁸⁻¹¹⁾。共振曲線を描くのに 100 秒を要した。



第 1 図 試験装置

Fig. 1. Apparatus for vibration test.

2.3 温度調整

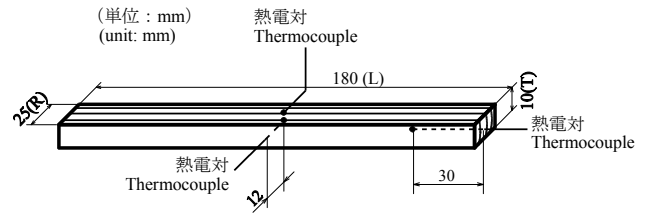
振動試験体、温度測定用試験体、寸法および重量測定用試験体は電気恒温器（(株) いすゞ製作所製コスモス）中に置いた。振動試験では、試験体と電磁石、変位計といった測定装置を第1図に示すように恒温器中に設置した。室温（約24℃）での振動測定の後、恒温器の温度を25℃刻みに増加し200℃まで上昇させた後、50℃まで25℃刻みで降温させた。本研究では、これらの温度制御過程をそれぞれ、昇温過程、降温過程と称することにする。降温過程において、50℃以下に保つことが難しいので、室温においては振動試験は行わず、50℃までで終了した。

恒温器内の温度が設定温度になって25～30分後に振動試験を行った。降温過程の最後2つの温度（75、50℃）については40～60分後とした。寸法および重量は、各設定温度になったとき、恒温器外に取り出し測定した。温度測定用試験体には第2図に示すように、LR面上、LT面中央からR方向へ12mmの深さの位置、およびRT面中央からL方向へ30mmの深さの位置にそれぞれT型熱電対を設置した。温度上昇の速度は5℃/minであった。

3. 結果と考察

第3図に試験体の温度変化を示す。恒温器中では水食い部と正常部の温度は、同様な傾向であった。第4図に試験体重量の変化を示す。これらの変化は、加熱開始前に測定した全乾状態での重量との比で表す。重量は昇温過程で温度が上昇するにつれて減少し、降温過程で温度が下がるにつれてわずかに増加した。重量は175～200℃の間で最も減少した。重量増加は測定時の水分の吸着によると考えられ、重量減少は木材の熱分解と揮発成分の損失のためと考えられる⁷⁾。この傾向は、水食い部と正常部とで同様であった。

比ヤング係数の温度依存性を検討した。振動試験体の寸法と重量は、直接には測定できないので、ここでは共振周波数 (f_r) を用いた。寸法変化が1%より小さいので、共

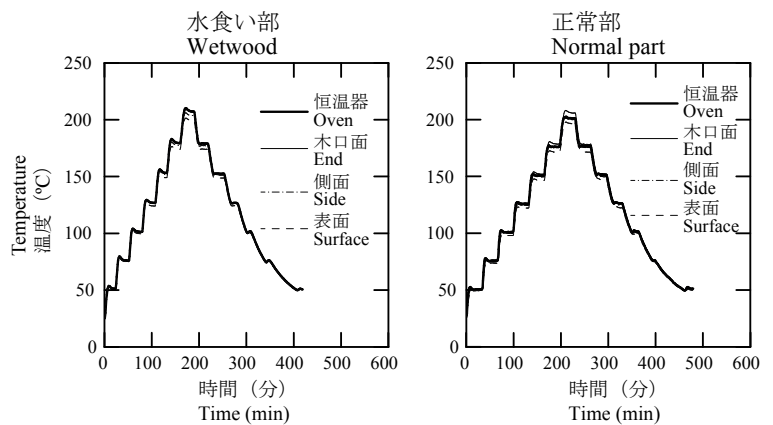


第2図 熱電対の設置箇所

LR面上、LT面中央からR方向へ深さ12mm、およびRT面中央からL方向へ深さ30mmに熱電対を設置。

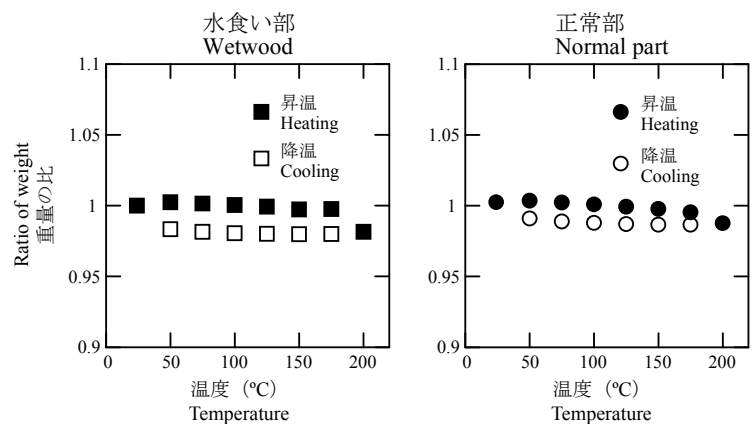
Fig. 2. Thermocouples for measuring surface and interior temperatures of the specimens.

Thermocouples were placed on the LR-plane and inserted in the R-direction at a depth of 12 mm from the central point of the LT-plane and in the L-direction at a depth of 30 mm at the central point of the RT-plane.



第3図 試験体の温度

Fig. 3. Temperatures of wetwood and normal specimens during heating and cooling.



第4図 試験体重量の変化

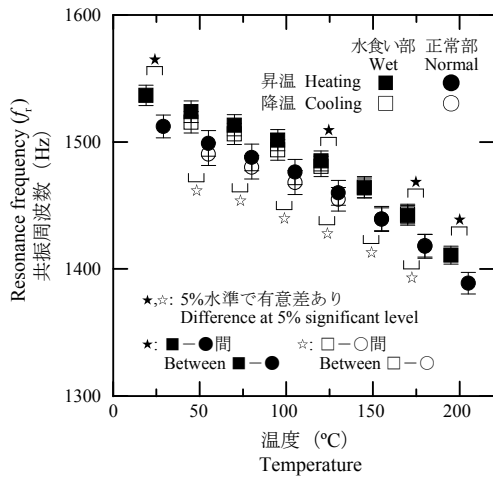
試験開始前の全乾状態の値との比で表す。

Fig. 4. Changes in weight of wetwood and normal wood during heating and cooling.

The ratios were calculated based on the value measured after oven drying at 105℃ before the heating process.

共振周波数は比ヤング係数の挙動を表していると見なしてよい。第5～8図に水食い部と正常部の測定結果を示す。ここでは点が重ならないように、それぞれ温度軸で-5℃, +5℃ずらしてプロットしてある。

水食い部と正常部の共振周波数は、昇温過程では温度の上昇に従い減少し、降温過程では温度の減少に従い増加した(第5図)。共振周波数の減少は木材の熱軟化によると考えられる。共振周波数は昇温過

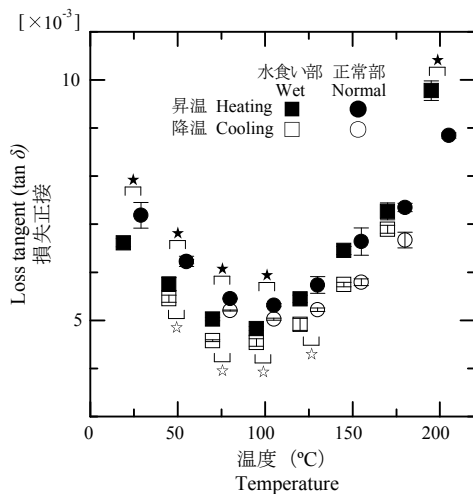


第5図 共振周波数の変化

水食い部と正常部の結果は、点が重ならないように5℃ずらして各々プロットした。エラーバー：標準偏差

Fig. 5. Changes in the resonance frequency of wetwood and normal wood during heating and cooling.

The results for the wetwood and the normal part were offset by -5℃ and +5℃, respectively, to avoid overlapping of the plots. Error bars show standard deviations.



第6図 損失正接の変化

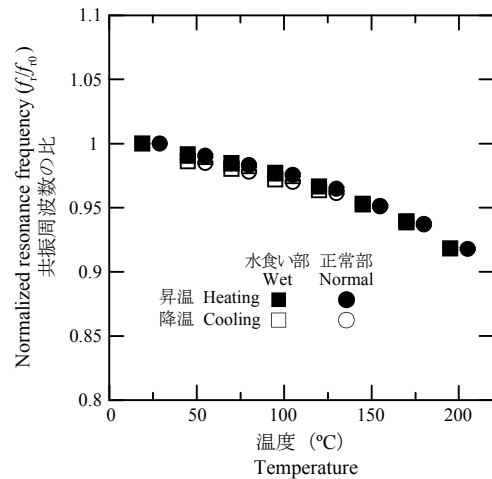
第5図参照

Fig. 6. Changes in the loss tangent of wetwood and normal wood during heating and cooling.

Refer to Fig. 5.

程の175～200℃の間で最も減少した。この結果は、前述の175～200℃での重量の減少と一致した。

第6図に損失正接の変化を示す。損失正接は、昇温、降温の両過程において約100℃で最小値となった。損失正接の変化は、室温～150℃の範囲よりも、150～200℃の範囲において大きかった。この傾向は

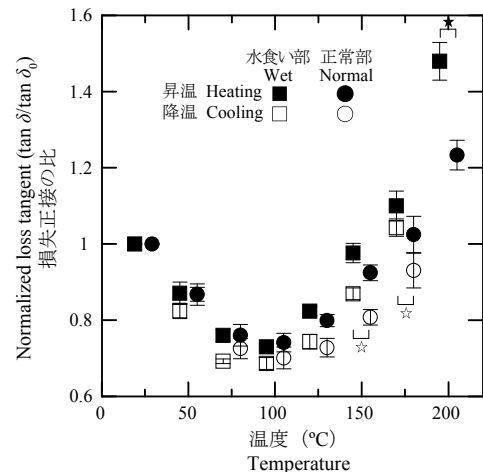


第7図 昇温過程、降温過程における共振周波数の比 (f_r/f_{r0}) の変化

第5図参照。比は加熱試験前の全乾状態の値を基に計算した。

Fig. 7. Changes in the normalized resonance frequency (f_r/f_{r0}) of wetwood and normal wood during heating and cooling.

Refer to Fig. 5. The values were calculated based on the values measured after oven drying at 105℃ before the heating test.



第8図 昇温過程、降温過程における損失正接の比 ($\tan \delta / \tan \delta_0$) の変化

第5図参照。比は加熱試験前の全乾状態の値を基に計算した。

Fig. 8. Changes in the normalized loss tangent ($\tan \delta / \tan \delta_0$) of wetwood and normal wood during heating and cooling.

Refer to Fig. 5. The ratios were calculated based on the values measured after oven drying at 105℃ before the heating test.

既往の研究と同様^{7,12-16)}であった。

水食い部は正常部より共振周波数が大きく、損失正接が小さかった(第5, 6図)。多くの場合、t検定では水食い部と正常部に有意差が認められた。これらの結果は、今回供した試験体のマッチングがR方向であったため、すなわち年輪幅(水食い部:3mm, 正常部:5mm)の影響¹⁷⁾、もしくは水食い部と正常部の木材特性の違いによるものと考えられる。このことを明らかにするために、室温全乾状態での測定値との比をとって検討した。

第7図に共振周波数の比の温度による変化を、第8図に損失正接の比の温度による変化を示す。全乾後に室温で測定した値を添字0で表す。寸法変化が前述のように無視できるほど小さいので、共振周波数の変化が比ヤング係数の変化と対応する。

各設定温度での共振周波数の比(f_i/f_{i0})と損失正接の比($\tan \delta / \tan \delta_0$)を水食い部と正常部でt検定により比較すると、一部の設定温度を除いて全体としては有意差がなかった。そのため、実際の人工乾燥の温度の範囲で温度が変化する環境において、水食い部と正常部の弾性、粘弾性の差は見られないと思われる。これらの結果は実際の乾燥過程における水食い部の挙動を知るための基礎となると思われる。乾燥過程においても水食い材は正常材と同様な強度特性を示すと考えられる。

4. まとめ

室温から200℃まで温度変化させた状態で、トドマツの水食い部と正常部を用いて振動試験を行った。結果は以下のとおりである。

1. 共振周波数は、昇温過程において温度の上昇に従い減少し、降温過程において温度の下降に従い増加した。水食い部と正常部の f_i/f_{i0} を比較すると、すべての設定温度において有意差は認められなかった。
2. 損失正接は、昇温、降温の両過程において約100℃で最小値をとった。水食い部と正常部の $\tan \delta / \tan \delta_0$ を比較すると、有意差が認められなかった。
3. これらの結果は、乾燥過程において、水食い材は正常材と同様な強度特性を示すことを示唆している。

文 献

- 1) 北海道水産林務部企画調整課：“平成14年度北海道森林づくり統計表”，北海道，2003，p.7.
- 2) 松井崇史，田保史明，斎藤秀之，渋谷正人，高橋邦秀：第114回日本林学会大会学術講演集，2003，p.664.
- 3) 石田茂雄：北海道大学農学部演習林研究報告 **22** (2)，273-373，(1963).
- 4) 信田聡：木材工業 **50**，7-12 (1995).
- 5) 信田聡：木材工業 **50**，63-65 (1995).
- 6) 吉本昌朗，信田聡：東京大学農学部演習林報告 106号，91-139 (2001).
- 7) Kubojima, Y., Wada, M., Tonosaki, M.: *Wood Science and Technology* **35**, 503-515 (2001).
- 8) 矢野浩之，則元京，山田正：木材学会誌 **32**，990-995 (1986).
- 9) 矢野浩之，山田正，湊和也：木材学会誌 **32**，984-989 (1986).
- 10) 矢野浩之，近藤久嗣，木村保典：木材学会誌 **38**，1119-1125 (1992).
- 11) 小野晃明，片岡明雄：木材学会誌 **25**，535-542 (1979).
- 12) Fukada, E.: *Journal of the Physical Society of Japan* **6**，417-421 (1951).
- 13) James, W. L., Boone, R. S., Galligan, W. L.: *Forest Products Journal* **32**, 27-34 (1982).
- 14) Bernier, G. A., Kline, D. E.: *Forest Products Journal* **18**，79-82 (1968).
- 15) Sellevold, E. J., Radik, F., Hoffmeyer, P.: *Wood and Fiber Science* **7**, 162-169 (1975).
- 16) 程鵬，中尾哲也，小林定教：木材学会誌 **45**，51-56 (1999).
- 17) Kubojima, Y., Okano, T., Ohta, M.: *J. Jpn. Wood Res. Soc.* **43**, 634-641 (1997).

—技術部 製材乾燥科—

—*1:(独)森林総合研究所—

—*2:東京大学大学院—

(原稿受理:07.12.7)