

主論文の要約

Research on hygrothermal properties of tension wood G-fiber

(引張あて材ゼラチン繊維の熱・水分物性に関する研究)

K.C.Sujyan

20 世紀後半における人工林の造成は、主として熱帯・亜熱帯地域においてなされてきた。早急に利益回収が可能である樹種として、早生広葉樹であるアカシア類やユーカリ類が用いられ、その成功は広葉樹パルプの大量生産を可能にした。10 年ほど前までは、これら早生広葉樹林の造成は、チーク材やマホガニー材に匹敵するような、経済価値の高い構造用材（建築物や家具原料）を、大量かつ迅速に供給する意図をも含んでいた。しかしながら、用材利用する上での難問が、文字通り山のように生じたことから、現在では、用材生産を諦める風潮が急速に広まりつつある。とは言え、もし用材利用する上での難問を解決できるならば、植林バイオマス利用の多様化が促進され、それによって早生広葉樹林造成への経済的動機の向上が図られることになる。ひいては、アグリビジネス（注：現在なお続く天然林の乱開発の主原因とされる）の植林産業への転換が促され、結果として天然林の乱開発を抑制することに繋がり、また石油や金属などの非循環資源への依存圧をも低減することになるだろう。

早生広葉樹資源を用材利用する上で、最も大きな難点は、成長応力（樹幹内残留応力分布）による製材障害と、人工乾燥によって生じる製材の不規則な変形（乾燥変形とされている）である。これらの加工障害が、得られる資源の利用歩留まりを著しく低下させる。早生広葉樹は若齢であるために、樹幹形状が劣悪（非通直、非円形断面）であり、それゆえ樹幹二次木部に引張あて材繊維が形成される。引張あて材繊維は、樹幹の傾斜部分の上側に生じ、そこに発生する引張の成長応力は、正常繊維の 10 倍以上もの大きさに上る。その原因は、引張あて材繊維細胞壁の最内層として、ゼラチン状層（以下 G 層）が形成されるからだとされている。異常な成長応力は、伐採丸太の端部に心割れを引き起こし、続く製材工程では板や柱材の反りを招く。博士学位申請者は、人工乾燥（その初期段階は、湿熱処理と同等）する際に生じる製材の不規則な変形にも、引張あて材繊維のゼラチン層が主体的に関わっていると予想している。以上を背景として、本論文では、引張あて材繊維を含んでいる広葉樹材の、湿熱処理による異常な変形挙動の原因解明を試みた。

コナラ、パラゴムノキ、ウリハダカエデの樹幹傾斜部位に形成された、典型的な引張あて材繊維に着目し、そこに発生する引張応力は、製材後にも粘弾性的に残留していると考え、その湿熱回復ひずみ（高含水状態での加熱が引き起こす寸法変化）の検出を試みた。

湿熱処理温度 120°C (0.2MPa) での実験の結果、(1) 引張あて材繊維の湿熱回復ひずみは、繊維軸方向には収縮であり、その大きさは成長応力を大きく上回る（数倍程度）こと、一方、正常材繊維は極めて小さな伸びであり、その大きさは無視し得るほど小さいこと、(2) 湿熱回復ひずみはゼラチン層の発達程度と高い相関関係があること、(3) 繊維軸と直角な方向の湿熱回復ひずみは、引張あて材繊維も正常材繊維も伸びであり、前者の方が大きいこと、ただし、繊維方向の湿熱回復ひずみよりも絶対値は小さめであることを見出した。併せて、(4) 繊維軸方向の（繊維と直角方向についても）湿熱回復ひずみは、湿熱処理のごく初期に生じる部分（Initial Recovery）と、処理時間の累積とともに徐々に解放される部分（Continuum Contraction）とからなることを発見した。以上の結果を第2章としてまとめた。

次いで、湿熱処理温度の影響を調べた。3通りの処理温度 80°C、100°C、120°Cで、コナラ引張あて材試験片に湿熱処理を施した。その結果、(1) 繊維軸方向の最終的な湿熱回復ひずみ（収縮ひずみ）は、処理温度 80°C、100°C、120°Cではほぼ同じであること、(2) Initial Recovery は処理温度 100°Cおよび 120°Cにおいて見られ、80°Cでは見られない（無視し得る大きさである）こと、また、(3) Continuum Contraction の大きさは処理温度 80°Cで最も大きく、処理温度 100°Cおよび 120°Cの方が小さいことを見出した。以上の結果を、化学反応速度論における一次反応モデル（分解反応）を用いて解析した。具体的には、湿熱回復ひずみと処理時間との関係に及ぼす、処理温度の影響を、シミュレーションによって検討した。その結果、(4) Initial Recovery、Continuum Contraction とともに、一次反応モデルで説明できること、(5) Initial Recovery を記述する反応速度定数は、処理温度の増加に伴って敏感に増加するが、Continuum Contraction を記述する反応速度定数は温度変化に関して鈍感であること、(6) 一次反応モデルは、クリープ回復と数学的には同じ形式で表されることから、湿熱回復は、G層に粘弾性的にセットされていた複数種類の応力が、水分存在下での加熱によって促進的に解放される現象であること、などを推論した。これらの成果を第3章としてまとめた。

続いて、室温での乾燥・再膨潤の繰り返し、引張あて材繊維の寸法変化挙動に及ぼす影響を調べた。また湿熱回復挙動との違いを考察した。その結果、(1) 乾燥・再膨潤処理を繰り返し与えると、引張あて材繊維は、軸方向に不可逆的に収縮してゆくこと（これも“何らかの応力の遅延解放”である可能性がある）、一方、(2) 繊維と直角方向には、遅延解放ひずみを生じないか、あるいはごく僅かな収縮を示すこと、そして(3) 軸方向の遅延解放ひずみは、高温（100°C以上）での湿熱回復に見られるような Initial Recovery に相当する初期の急速な回復ひずみを示さないこと、(4) 繰り返し処理に伴う寸法変化のパターンは、軸方向については処理温度 80°Cにおける湿熱回復挙動に類似していることなどを明らかにした。これらの結果から、引張あて材繊維においては、乾燥・再膨潤の繰り返しが湿熱回復に類似する効果（ただし軸方向寸法変化のみ）を生み出すことを見出した。これらの成果を第4章にまとめた。

以上の結果を総合し、以下の結論を導いた。

- (1) 湿熱処理は、引張あて材繊維において異常な（大きな）寸法変化（湿熱回復ひずみ）を引き起こす。このことは、繊維軸方向において特に顕著である。この特性が、引張あて材繊維を含む広葉樹材を人工乾燥する際に見られる、異常な乾燥変形の一要因であると考えられる。
- (2) 湿熱回復ひずみは、複数の一次反応の重ね合わせによって説明される。すなわち、処理温度に対する **Initial Recovery** および **Continuum Contraction** の挙動の違いが、引張あて材の湿熱回復挙動の処理温度依存性の原因であると考えられる。
- (3) 乾燥・再膨潤処理の繰り返しは、湿熱回復による遅延解放に類似する効果を生み出す。