

ISSN 1349-0605

森林総合研究所
交付金プロジェクト研究 成果集 8

スギ材の革新的高速乾燥システム の開発

独立行政法人 森林総合研究所
2006. 1

森林総合研究所
交付金プロジェクト研究 成果集
8

独立行政法人
森林総合研究所

序 文

建築基準法の改正や住宅の品質確保促進法の施行によって、住宅等に用いる木材には厳しい品質が要求されるようになり、寸法精度が高く狂いの生じない製品が求められるようになった。このため、住宅に用いる木材製品についても乾燥が不可欠な要素となってきた。しかし、わが国では従来から建築用材を積極的に人工乾燥して利用する歴史がなかったため、乾燥材需要は輸入乾燥材や集成材へ向かうこととなり、国産材需要低迷の要因となった。

わが国には約1,000万haの人工林が育っており、その多くが伐期を迎えつつあるが、これらの木材資源の有効利用は林業および木材産業の活性化だけでなく、地球環境保全の目的からも重要な課題である。このうちスギは蓄積の6割近くを占める主要な樹種であるが、他の樹種に比べ乾燥が難しく、既存の乾燥技術では乾燥時間が長くなり、乾燥コストが高くなる問題点がある。このことがスギ材需要拡大のネックとなっていた。

こうした状況を打破するためには、従来に比べ格段に短時間かつ低コストで乾燥し、しかも高い品質を確保できる革新的な乾燥技術の開発が必要である。このため、本研究では高品質なスギ乾燥材の安定供給と利用拡大を可能にするための一連の技術開発、すなわち「乾燥の効率化・品質安定化のための材質評価技術の開発」、「品質安定化・乾燥歩止まり向上のための木材改質技術及び乾燥処理条件の改良」、「圧力・温度制御による木材可塑化機構の解明による乾燥処理技術の開発」、「乾燥方法に応じた建築用材の品質評価と乾燥処理技術の体系化」に取り組んだ。

その結果、原木内部の含水率分布や丸太密度の簡易評価方法、原木丸太の段階で最終製品の強度性能予測方法、原木を選別することによって乾燥効率の向上や製品の付加価値化を図る方法、乾燥のモニタリング技術、高温処理による心持ち材の乾燥割れ抑制技術、高温の加圧過熱蒸気による高速処理等、スギ乾燥材の品質向上と効率化を図る技術を開発することができた。これらに加えて、様々な乾燥材の性能、乾燥の環境負荷、コスト等を明らかにすることにより、スギ乾燥材生産のための一連の技術を開発することができた。

ここに成果を刊行し、広く関係者の参考に供するとともに、今後、これらの成果がさらに発展し、スギ材乾燥の普及、スギ材の需要拡大につながる事を期待する次第である。

この研究は当初、農林水産技術会議のプロジェクト研究としてスタートし、森林総合研究所の独立行政法人への移行に伴って交付金プロジェクトとして実施することとなった。予算申請に際してご尽力頂いた農林水産技術会議事務局地域研究振興課ならびに林野庁研究普及課、木材課の各位に深く感謝申し上げます。また、本研究の評価委員としてご批判ご指導いただいた、岡野健、祖父江信夫、笠木和雄の諸先生、委託研究をお引き受けくださった、長野県林業総合センター、愛媛県林業技術センター、大分県林業試験場、熊本県林業研究指導所、京都大学生存圏研究所、高知大学農学部、愛媛大学農学部、九州大学農学研究院、住友林業株式会社、山本ビニター株式会社の各位に深甚な感謝の意を表する。

平成18年1月

独立行政法人 森林総合研究所
理事長 大熊 幹章

研究課題：スギ材の革新的高速乾燥システムの開発

目 次

研究の要約

I 研究年次及び予算区分	1
II 主任研究者	1
III 研究担当機関	2
IV 研究目的	2
V 研究方法	2
VI 研究成果	5
VII 今後の課題	7
VIII 研究発表（論文等）	8

第1章 乾燥の効率化・品質安定化のための材質評価技術の開発

1. 丸太の非破壊的材質評価技術・用途判別技術の開発	
（1）丸太内部の水分量測定評価技術	15
（2）丸太の材内密度分布評価技術の開発	21
（3）部材の強度性能確保を目的とした非破壊手法による原木丸太の用途判別技術の開発	25
（4）製材歩止り及び製品用途を考慮した原木丸太の選別・仕分け技術の開発	30
2. 乾燥過程の材質変化モニタリングによる装置制御技術の開発	
（1）乾燥過程における材の乾燥経過モニタリング手法の開発	36

第2章 品質安定化・乾燥歩止り向上のための木材改質技術及び乾燥処理条件の改良

1. 乾燥材の品質向上及び品質安定化のための乾燥効率化技術の開発	
（1）柱材の材面割れ及び内部割れ防止技術の開発	41
（2）圧縮等による材の狂い抑制技術の開発	47
（3）薬剤処理による材の割れ及び狂い抑制技術の開発	52
（4）圧力可変スケジュールによる乾燥効率化技術の開発	58
（5）減圧乾燥における乾燥効率化技術の開発	64

2. 大型構造物を可能とする丸太及び大断面材の乾燥処理技術の開発	
(1) 蒸煮減圧処理による心持ち平角材の乾燥前処理技術の開発	70
(2) マイクロ波加熱による丸太材の高速乾燥技術の開発	75

第3章 圧力・温度制御による木材可塑化機構の解明による乾燥処理技術の開発

1. 高温・高圧条件下での木材組織の可塑化・応力緩和機構の解明	
(1) 組織構造の解析による高温・高圧下における水蒸気移動経路と透過性の把握	80
(2) 高温・高圧条件下での乾燥による粘弾性変化の解明	84
(3) 高温・高圧条件下での乾燥応力発生と応力緩和機構の解明	88
2. 圧力・温度条件の制御による高速乾燥処理技術の開発	
(1) 多様な圧力下における加熱条件の制御による高速乾燥技術の開発	94
(2) 乾燥過程のモニタリングによる効率的な高周波印加制御方式の開発	99

第4章 乾燥方法に応じた建築用材の品質評価と乾燥処理技術の体系化

1. スギ品種等の材質特性に応じた最適乾燥プロセスの解明と乾燥コスト評価	
(1) 乾燥プロセス評価のための遺伝形質等に基づくスギ材の選別指標の解明	103
(2) 材質・用途別乾燥プロセスの最適化と乾燥コスト評価	110
(3) 高速乾燥システム等によるスギ乾燥材の強度及び耐久性能評価	115
2. 木材用途に対応した性能及び信頼性確保のための乾燥処理技術の体系化	
(1) 乾燥材の品質の違いが接合部の性能に与える影響	121
(2) 壁、床に組み込まれた乾燥材の強度的品質評価	127
(3) 狂い防止等住宅部材としての要求性能を満たす乾燥材品質の明確化	131
(4) 乾燥プロセスの環境負荷評価	137
(5) 用途に対応した性能確保のための乾燥処理技術の体系化	141

研究の要約

I 研究年次及び予算区分

研究年次：平成12年度～16年度（5カ年）

予算区分：平成12年度

農林水産技術会議 特別研究

平成13年度～16年度 運営費交付金（交付金プロジェクト）

II 主任研究者

主査 森林総合研究所 所長 廣居忠量(平成12年 4月 1日～平成13年 3月31日)
森林総合研究所 理事長 廣居忠量(平成13年 4月 1日～平成16年 3月31日)
田中 潔(平成16年 4月 1日～平成17年 3月31日)

副主査

森林総合研究所 研究管理官 海老原徹(平成12年 4月 1日～平成12年 9月30日)
林 良興(平成12年 9月30日～平成14年 3月31日)
研究管理官（木質資源利用研究担当）
久田卓興(平成14年 4月 1日～平成16年 3月31日)
藤原勝敏(平成16年 4月 1日～平成17年 3月31日)

推進リーダー・推進責任者

森林総合研究所 木材利用部 加工技術科長
久田卓興(平成12年 4月 1日～平成14年 3月31日)
研究管理官（木質資源利用研究担当）
久田卓興(平成14年 4月 1日～平成16年 3月31日)
藤原勝敏(平成16年 4月 1日～平成17年 3月31日)

チームリーダー

(1系)

森林総合研究所 木材利用部 材質研究室長
平川泰彦(平成12年 4月 1日～平成13年 3月31日)
木材特性研究領域 組織材質研究室長
平川泰彦(平成13年 4月 1日～平成15年 3月31日)
木材特性研究領域長
平川泰彦(平成15年 4月 1日～平成17年 3月31日)

(2系)(3系)

森林総合研究所 木材利用部 乾燥研究室長
黒田尚宏(平成12年 4月 1日～平成13年 3月31日)
加工技術研究領域 木材乾燥研究室長
黒田尚宏(平成13年 4月 1日～平成16年 3月31日)
加工技術研究領域長
黒田尚宏(平成16年 4月 1日～平成17年 3月31日)

(4系)

森林総合研究所 木材利用部 接合研究室長

林 知行(平成12年 4月 1日～平成13年 3月31日)

構造利用研究領域 材料接合研究室長

林 知行(平成13年 4月 1日～平成17年 3月31日)

取りまとめ責任者

森林総合研究所 加工技術研究領域長 黒田 尚宏

Ⅲ 研究担当機関

森林総合研究所 木材特性研究領域、加工技術研究領域

構造利用研究領域、木材改質研究領域

委託先 愛媛大学農学部、長野県林業総合センター、大分県林業試験場、

高知大学農学部、愛媛県林業技術センター、九州大学農学研究院、

熊本県林業研究指導所、京都大学生存圏研究所(京都大学木質科学研究所)

山本ビニター株式会社、住友林業株式会社筑波研究所

Ⅳ 研究目的

我が国の人工林蓄積の6割近くを占めるスギは、高い含水率や水分が抜けにくい性質のほか、材質のばらつきが大きく、用途面でも芯持ち材としての使用が多いことから、乾燥処理が難しく、乾燥コストは他樹種よりも格段に割高である。このため、未乾燥材が大半を占める国産スギ材は、入手が容易で低廉な輸入乾燥材やこれを原料とする集成材にシェアを奪われ、需要の低迷が続いている。さらに、建築基準法の改正によって、木材製品にもこれまで以上に高い性能保証や製造者責任が求められるようになり、戦後の植林により伐採可能時期がピークを迎えつつある国産スギ材の利用環境は、より一層の困難が予想されている。

こうした状況を打破するため、輸入乾燥材よりも安価かつ性能を保証し得る国産スギ製材の供給を可能とする革新的な乾燥技術の開発が急務となっている。スギは我が国の林業、木材産業、木造住宅産業における主要な原材料であるため、その成否は、木材生産者や製材業者の雇用だけではなく、わが国の人工林が抱える間伐促進をはじめとする林業活性化、さらには森林機能の維持・管理にまで影響を及ぼす重要な問題である。

このため、本研究では高品質なスギ乾燥材の安定供給と利用拡大を可能にするための一連の技術開発、すなわち材質的なバラツキの多いスギ材の用途を原木供給段階で選別する技術の開発、圧力制御下における水分除去と木材物性に係る最新の知見を活用した乾燥日数を従来の数分の一に短縮可能な革新的高速乾燥技術の開発を行い、建築用材としての性能確保と経済性を達成する乾燥技術の体系化を図る。

Ⅴ 研究方法

第1章 乾燥の効率化・品質安定化のための材質評価技術の開発

1 丸太の非破壊的材質評価技術・用途判別技術の開発

スギ材の乾燥材生産の効率化、高品質化、低コスト化を実現するには、木材加工の早い段階で、丸太の持つ材質的特性を把握し、適正な用途及び加工方法を判断する必要がある。このため、木材の密度及び含水率を非破壊的に原木段階で評価する方法、最終製品の強度性能等を原木段階で

予測し最適用途を原木段階で判別する方法、最終製品の品質・用途、価値、乾燥効率を考慮しながら製材歩止まりを向上させる方法について検討した。

2 乾燥過程の材質変化モニタリングによる装置制御技術の開発

高温乾燥や減圧乾燥過程における材温、材内圧力等の条件と材色等の材質変化を明らかにし、乾燥過程における含水率のモニタリングに基づいて乾燥装置を制御する技術について検討した。

第2章 品質安定化・乾燥歩留まり向上のための木材改質技術及び乾燥処理条件の改良

1 乾燥材の品質向上及び品質安定化のための乾燥効率化技術の開発

現在蒸気加熱式乾燥法が主流を占め、乾燥時間の短縮や乾燥コスト低減の目的から乾燥温度は高温化する傾向にあるが、高温での乾燥では内部割れ等の欠点の発生にもつながるため、高温乾燥において温度・湿度の制御による割れ防止技術を検討した。温湿度制御のみでは乾燥品質の向上には限界があるため、圧力条件を組み合わせる従来の蒸気式乾燥スケジュールの改良、減圧下での熱風乾燥条件についても検討を行った。小中径丸太からのスギ製材では、反りや曲がりなどの狂いが製品の歩止りを低下させるため、歩止り向上を目的とし、圧縮等による材の狂い抑制技術や薬剤処理による乾燥材の品質安定化技術についても検討した。

2 大型構造物を可能とする丸太及び大断面材の乾燥処理技術の開発

梁桁用材など大断面材の乾燥に関しては、適正な含水率まで乾燥するためにはコスト増になり、割れの低減も困難であるため、適正な人工乾燥法が未だ確立されていない。このため、平角材等の大断面材の前処理や天然乾燥等との併用による乾燥方法について検討した。また、スギ丸太についても新たな大型木構造が広まりつつあるなかで新規の乾燥材需要が見込まれるが、効率的な乾燥方法の開発には至っていないため、高温前処理やマイクロ波加熱等を利用した丸太材の高速で品質の安定した乾燥材生産システムについて検討した。

第3章 圧力・温度制御による木材可塑化機構の解明による乾燥処理技術の開発

1 高温・高圧条件下での木材組織の可塑化・応力緩和機構の解明

乾燥の促進を図るための諸条件を解明するため、特に高温高圧処理による透過性の変化を取り上げ、高温・高圧下における水蒸気移動経路を顕微鏡的手法によって可視化し、透過性向上のための処理条件を検討した。また、熱処理が応力の除去や割れの抑制に与える影響を把握するため、木材を高圧条件下で加熱乾燥処理した際の粘弾性の変化と水分との関係を明らかにし、乾燥過程で生じる著しい応力の緩和機構を解明し、高速乾燥における割れ等の欠点や残留応力の低減効果について検討した。

2 圧力・温度条件の制御による高速乾燥処理技術の開発

スギ材乾燥を短時間処理が可能な技術とするためには、高温処理によって乾燥応力の発生を低減しながら圧力制御によって木材外への水分移動を促進するとともに、乾燥材の品質を制御するための広範囲の材温制御が必要である。このため、圧力容器内における飽和蒸気や過熱蒸気加熱、高周波加熱、減圧など、温度と圧力の広範囲な制御に基づく新しい乾燥技術について検討した。また、高周波加熱による乾燥効率の向上のため、適正な高周波印加条件とその制御方法について検討した。

第4章 乾燥方法に応じた建築用材の品質評価と乾燥技術の体系化

1 スギ品種等の材質特性に応じた最適乾燥プロセスの解明と乾燥コスト評価

密度や生材含水率等の木材性質の固体内・間のばらつきに起因して、スギ製材品の乾燥性は固体や断面の形状によって異なるため、スギ製材品の生産効率を上げ、乾燥コストを低減させるには、材種や用途による的確な選別に基づいて、製材の適正な乾燥プロセスを構築する必要がある。このため、スギ品種等の材質の相違に基づいて、その乾燥特性を明らかにするとともに、コストと乾燥設備、乾燥処理条件等との関係について総合的な評価を行った。また、スギ材の乾燥工程における乾燥条件が強度や耐久性能に与える影響は明らかにされていないため、性能要求に対応するために強度や耐久性と乾燥条件との関係について検討した。

2 木材用途に対応した性能及び信頼性確保のための乾燥処理技術の体系化

木造住宅に使われている製材の含水率は様々であり、要求される部材の施工条件に合致する乾燥基準を明確に提示することが必要である。このため、乾燥割れや施工後の含水率変化が接合部の性能に及ぼす影響を解明し、スギ製材の乾燥度合いと構造部材（床および壁）との強度性能の関係を把握し、さらには乾燥法別・部材別に寸法安定性を評価した。また、用途に応じた最適のシステムを構築するため、乾燥工程の環境負荷についても検討し、様々な乾燥技術とシステムの総合的な評価に基づいてスギ材の利用拡大に資する乾燥処理技術の体系化を図った。

(研究実施計画表)

研究課題名	研究実施年度					担 当
	12	13	14	15	16	場 所、研究領域等
I 乾燥の効率化・品質安定化のための材質評価技術の開発						
1 丸太の非破壊的材質評価技術・用途判別技術の開発						
(1) 丸太の材内含水率評価技術の開発	←				→	森林総研・木材特性研究領域
(2) 丸太の材内密度分布評価技術の開発	←				→	森林総研・木材特性研究領域
(3) 部材の強度性能確保を目的とした非破壊的手法による原木丸太の用途判別技術の開発	←				→	森林総研・構造利用研究領域
(4) 製材歩止り及び製品用途を考慮した原木丸太の選別・仕分け技術の開発			←		→	森林総研・加工技術研究領域
2 乾燥過程の材質変化モニタリングによる装置制御技術の開発						
(1) 乾燥過程における材の乾燥経過モニタリング手法の開発	←			×	→	愛媛大学・農学部
II 品質安定化・乾燥歩止り向上のための木材改質技術及び乾燥処理条件の改良						
1 乾燥材の品質向上及び品質安定化のための乾燥効率化技術の開発						
(1) 湿熱処理による材の割れ防止技術の開発	←				→	長野県林業総合センター
(2) 圧縮等による材の狂い抑制技術の開発	←				→	大分県林業試験場
(3) 薬剤処理による材の割れ及び狂い抑制技術の開発	←				→	高知大学・農学部
(4) 圧力可変スケジュールによる乾燥効率化技術の開発	←				→	森林総研・加工技術研究領域
(5) 減圧乾燥における乾燥効率化技術の開発	←				→	愛媛県林業技術センター
2 大型構造物を可能とする丸太及び大断面材の乾燥処理技術の開発						

(1) 大型構造物の性能保証のための大断面材の乾燥技術の開発	←					熊本県林業研究指導所
(2) マイクロ波等を利用した丸太材の高速乾燥技術の開発	←					九州大学・農学研究院
Ⅲ 圧力・温度制御による木材可塑化機構の解明による乾燥処理技術の開発						
1 高温・高圧条件下での木材組織の可塑化・応力緩和機構の解明						
(1) 組織構造の解析による高温・高圧下における水蒸気移動経路と透過性の把握	←					森林総研・木材特性研究領域
(2) 高温・高圧条件下での乾燥による粘弾性変化の解明	←					森林総研・木材特性研究領域
(3) 高温・高圧条件下での乾燥応力発生と応力緩和機構の解明	←					京都大学生存圏研究所
2 圧力・温度条件の制御による高速乾燥処理技術の開発						
(1) 多様な圧力下の加熱条件の制御による高速乾燥技術の開発	←					森林総研・加工技術研究領域
(2) 乾燥過程のモニタリングによる効率的な高周波印加制御方式の開発	←					山本ビニター（株）
Ⅳ 乾燥方法に応じた建築用材の品質評価と乾燥処理技術の体系化						
1 スギ品種等の材質特性に応じた最適乾燥プロセスの解明と乾燥コスト評価						
(1) 乾燥プロセス評価のための遺伝形質等に基づくスギ材の選別指標の解明	←					森林総研・木材特性研究領域
(2) 材質・用途別乾燥プロセスの最適化と乾燥コスト評価	←					森林総研・加工技術研究領域
(3) 高速乾燥システム等によるスギ乾燥材の強度及び耐久性能評価	←					森林総研・構造利用研究領域 木材改質研究領域
2 木材用途に対応した性能及び信頼性確保のための乾燥処理技術の体系化						
(1) 乾燥材の品質の違いが接合部の性能に与える影響の解明	←					森林総研・構造利用研究領域
(2) 壁、床に組み込まれた乾燥材の強度的品質評価	←					森林総研・構造利用研究領域
(3) 狂い防止等住宅部材としての要求性能を満たす乾燥材の品質基準の明確化	←					住友林業（株）・筑波研究所
(4) 乾燥プロセスの環境負荷評価	←					森林総研・構造利用研究領域
(5) 用途に対応した性能確保のための乾燥処理技術の体系化				←		森林総研・加工技術研究領域

Ⅵ 研究成果

第1章 乾燥の効率化・品質安定化のための材質評価技術の開発

1 丸太の非破壊的材質評価技術・用途判別技術の開発

原木段階でのスギ材の選別技術について、周波数掃引によるインピーダンス測定に基づいた原木内部の含水率分布を計測する新しい測定法を開発（特許申請）し、またピロディンやレジストグラフによる密度の簡易評価方法を提示した。また、原木丸太のヤング係数分布モデルから製材品の強度性能を予測する方法を明らかにし、さらに製材における用途を考慮した原木選別の効果を明らかにし、原木の用途区分と用途に適した製材品を効率よく製材できることを示した。

2 乾燥過程の材質変化モニタリングによる装置制御技術の開発

乾燥過程の材のモニタリング技術については、乾燥条件が乾燥過程における応力（ひずみや変形）、材色等の経過に与える影響を解明した。また、温度と圧力を同時に測定することによって含水率経過を評価できることを明らかにし、高周波減圧乾燥や高温乾燥における新しい乾燥モニタリング技術を開発した。

第2章 品質安定化・乾燥歩留まり向上のための木材改質技術及び乾燥処理条件の改良

1 乾燥材の品質向上及び品質安定化のための乾燥効率化技術の開発

心持ち柱材の割れ防止技術について、乾燥初期に乾球温度120℃、乾湿球温度差30℃の処理下で表層にドラインゲットを形成することによって材面割れ抑制が可能であること、またゲットが形成された後に、100℃以下の温度条件、つまり中温乾燥や天然乾燥、さらに高周波減圧乾燥を行うことによって内部割れも抑制できることが明らかになった。柱材乾燥の効率を向上させるためには、蒸気式乾燥においては弱減圧処理の効果が、また減圧乾燥では熱風・高周波併用加熱の効果が明らかになった。曲がりによる歩止り低下を抑えるには、棧積みへの適当な荷重積載や、波形プレートによる棧積み方法が効果のあることが明らかになり、曲がり抑制治具を開発した。また、高温パラフィン液相乾燥処理によって寸法安定性が向上することも明らかになった。これらは、既存の乾燥技術の実用化に貴重な情報を与え、特に割れの抑制技術は急速に民間企業に普及しつつある。

2 大型構造物を可能とする丸太及び大断面材の乾燥処理技術の開発

心持ち平角製材の乾燥前処理としての蒸煮減圧処理条件が明らかになり、前処理として蒸煮減圧処理した大断面材の仕上げ乾燥条件について、蒸気式乾燥機や簡易乾燥施設を用いたシステムを提案した。また、丸太の割れ抑制のための前処理の最適条件ならびにマイクロ波等による仕上げ乾燥の適正条件を明らかにし、既存技術の改良と効率化を促進するとともに各種用途に合うスギ丸太の適正乾燥システムを開発した。

第3章 圧力・温度制御による木材可塑化機構の解明による乾燥処理技術の開発

1 高温・高圧条件下での木材組織の可塑化・応力緩和機構の解明

生材状態での水分透過性を解明するための方法を応用し、透過経路への木材処理条件の影響を明らかにした。高温水蒸気中における動的粘弾性及び含水率の変化をリアルタイムで測定するための方法を確立し、高温水蒸気処理下における温度・湿度条件と粘弾性との関係を明らかにした。同時に、高温高湿の過熱蒸気雰囲気下では乾燥終期における乾燥応力が抑制されること、および発生する応力の予測方法を明らかにした。また、従来測定が困難であった高温下での平衡含水率が明確になり、高温下における乾燥条件の確立に資した。

2 圧力・温度条件の制御による高速乾燥処理技術の開発

心持ち無背割り材の高速乾燥技術の開発のため、割れを抑制するための過熱蒸気による前処理条件、ならびに常圧以上における圧力制御による急速乾燥条件を明らかにした。加圧過熱蒸気を使って心持ち柱材を従来の1/4の乾燥日数で急速に乾燥する方法を開発し、さらに加圧過熱蒸気と減圧乾燥を組み合わせることによって品質向上と急速乾燥を同時に実現する方法を開発した。また、高周波加熱による効率的な乾燥促進のための高周波印加システムを開発した。

第4章 乾燥方法に応じた建築用材の品質評価と乾燥技術の体系化

1 スギ品種等の材質特性に応じた最適乾燥プロセスの解明と乾燥コスト評価

スギの人工乾燥による正角材の曲がり及び割れの発生に関係する品種や樹幹内の採材位置の影響等を明らかにし、ヤング係数等を基準とした乾燥前選別が欠点の発生を抑制するために効果的であることを明らかにした。乾燥方法とエネルギー消費との関係を明らかにするとともに、システム化によるコスト低減のための必要条件が提示し、スギ材の乾燥方法別乾燥コストの予測方法や低コストの乾燥システムを導入するための指針を得た。スギ乾燥材の曲げ、圧縮、引っ張り、せん断等の強度性能、ならびに耐久性や耐蟻性が処理温度と時間に影響されることを明らかにし、適正な乾燥処理条件を明確にするための指針を得た。

2 木材用途に対応した性能及び信頼性確保のための乾燥処理技術の体系化

プレカット継手、柱梁、柱脚等の各種接合部、ならびに面材壁、筋交い壁、床組の構造体について、部材の含水率や乾燥方法の違いが強度性能に与える影響が明らかになり、建築用途における乾燥材使用の効果を示した。加えて、住宅の内装施工における乾燥材含水率の基準を明らかにした。一般的な工場と比較的簡易に得られるデータから環境負荷評価を行う手法を確立した。処理条件別の乾燥コスト、これらを総合的に勘案し、建築用材としての用途別適性乾燥処理方法を提示した。

VII 今後の課題

第1章 乾燥の効率化・品質安定化のための材質評価技術の開発

1 丸太の非破壊的材質評価技術・用途判別技術の開発

原木丸太の選別技術の開発について、含水率等の新しい測定方法や製品強度の推定方法など新しい手法を提案した。また、ヤング係数及び含水率の評価に基づく、用途判別方法も提案した。今後は、さらに実用化に向けた非破壊技術のシステム化等を検討し、生産現場での実用化技術の開発が必要である。

2 乾燥過程の材質変化モニタリングによる装置制御技術の開発

材内圧力と温度の同時測定によって含水率測定が可能であることなど、乾燥制御に応用できる技術の開発が行われたが、実用化には至っていない。また、乾燥による損傷発生を予知する技術など、乾燥材のモニタリングをさらに高度化することが今後の課題である。

第2章 品質安定化・乾燥歩留まり向上のための木材改質技術及び乾燥処理条件の改良

1 乾燥材の品質向上及び品質安定化のための乾燥効率化技術の開発

乾燥効率化のための幅広い湿熱処理、減圧処理、スケジュール、栈積み方法、薬剤処理等の諸処の処理条件を明らかにし、また乾燥材生産の現場において乾燥材の品質向上や歩留まり向上に応用できる技術や処理材の利用方法も明らかにした。高温乾燥など一部の技術は既に現場においても普及しつつあるが、さらに諸々の技術を乾燥材生産の効率化と乾燥材の高品質化に向けて乾燥材生産現場へと具体的に応用することが課題となる。

2 大型構造物を可能とする丸太及び大断面材の乾燥処理技術の開発

乾燥処理の効率化と処理材の品質向上に資する多くの条件が提示されるとともに、新しい処理技術の提案を行った。平角材の乾燥では蒸煮・減圧処理条件の適正化を進め、また丸太の乾燥ではマイクロ波加熱による処理条件と材の品質を明らかにした。丸太・大断面製材の乾燥は困難で

あるため、各種用途に合った適正乾燥システムの確立と更なるコスト低減を実現するための技術開発が課題として残されている。

第3章 圧力・温度制御による木材可塑化機構の解明による乾燥処理技術の開発

1 高温・高圧条件下での木材組織の可塑化・応力緩和機構の解明

高温下における木材の水分移動性、粘弾性、応力緩和について新たな知見が集積され、高温下での乾燥の促進や割れの抑制機構を説明するための様々な知見を得た。それらの知見は高温処理過程における乾燥条件の制御や乾燥品質の評価技術に応用できることが期待されるため、さらに実大材のデータ収集が必要であり、また熱処理・乾燥技術の適正化に向けた物性制御技術の確立が課題として残されている。

2 圧力・温度条件の制御による高速乾燥処理技術の開発

乾燥の高速化と処理材の品質確保を同時に実現するための処理条件の解明が進み、また圧力等の加熱条件の適正な制御を行うための装置改良が進んだ。圧力制御方式の高速乾燥技術によれば生産規模拡大が可能であり、また廃材をエネルギー源とすれば乾燥コストの大幅な低減が期待される。しかし、現段階では、設備の大型化や性能の適正な制御、省エネルギー化が課題であり、高温処理材の用途開発を含め実用化に向けた検討が課題として残されている。

第4章 乾燥方法に応じた建築用材の品質評価と乾燥技術の体系化

1 スギ品種等の材質特性に応じた最適乾燥プロセスの解明と乾燥コスト評価

材質選別、コスト評価、強度性能評価等に基づいて最適な乾燥プロセスを構築するための指針が得られたが、材質的な変異の大きなスギの乾燥プロセスを確立するには、さらにスギ材質の多様性に対応したデータ収集と解析に基づいて、最適乾燥プロセスの実用化に向けたコスト評価の検討が必要である。また、乾燥材の品質保証に向けて、強度等のデータベースの整備が必要である。

2 木材用途に対応した性能及び信頼性確保のための乾燥処理技術の体系化

乾燥処理が接合強度、構造強度、住宅施工等に与える影響が解明され、木造住宅における乾燥材利用のメリットを啓発する様々なデータが得られたが、乾燥材利用の拡大と需要者の信頼性確保に向けて、スギ乾燥材利用のためのデータベースの整備が必要である。また、乾燥工程の環境負荷の評価手法や効率的な乾燥材生産システムの提案を行ったが、さらに低環境負荷・省エネルギー・高品質乾燥材生産を実現するための実用化研究が必要である。

VIII 研究発表（論文等）

第1章

- 1) 蔡 英春, 林和男: 高周波減圧乾燥における木材内の圧力および温度の同時同位置測定・日本木材学会中国・四国支部第12回研究発表要旨集, 愛媛, 44-45 (2000)
- 2) 鈴木養樹: 日本木材学会大会研究発表要旨集, 51, 543 (2001)
- 3) 岡田直紀, 平川泰彦, 藤原健, 山下香菜: ピロディンを用いたスギ丸太の密度測定, 日本木材学会大会発表要旨集, 51, 532 (2001)
- 4) Cai, Y. and K. Hayashi: Pressure and Temperature Distribution in Wood during Radio Frequency/Vacuum Drying, Proc. 7th IUFRO Wood drying Conference, 386-391 (2001)

- 5) Sugimori, M., Y. Teraoka and K. Hayashi: Clustering Sugi Timbers Based on the Ratio of Heartwood for Drying, Proc. 7th IUFRO Wood drying Conference, 422-425 (2001)
- 6) 鈴木養樹：木材の材内含水率分布及びその分布を測定する方法並びにそれらの装置，特願 2002-250113 (2002)
- 7) 鈴木養樹：日本木材学会大会研究発表要旨集，52，529 (2002)
- 8) 山下香菜，平川泰彦，藤原健，岡田直紀，費本華：ピロディンによる木材密度の測定条件の検討，日本木材学会大会発表要旨集，52，514 (2002)
- 9) 鈴木養樹：インピーダンス測定によるスギ丸太内部の水分分布評価手法，第2回つくばテクノロジー・ショーケースアブストラクト，29 (2003)
- 10) 鈴木養樹，黒田尚宏：高含水率域における木材の誘電特性（第1報）高周波数領域での誘電特性，木材学会誌，49 (3)，161-170 (2003)
- 11) 山下香菜，藤原 健，平川泰彦，岡田直紀：ピロディンによる丸太密度の推定，日本木材加工技術協会年次大会講演要旨集，21，16-17 (2003)
- 12) 村田光司，伊神裕司，松村ゆかり，藤本清彦：スギ中丸太の挽き材試験～丸太含水率を考慮した木取りと歩止り～，日本木材加工技術協会年次大会講演要旨集，21，52-53 (2003)
- 13) 蔡 英春，林 和男：材内圧力および温度による含水率予測の可能性，日本木材学会中国四国支部研究発表要旨集，13 (2003)
- 14) 鈴木養樹：丸太の水分を計る，APAST，14 (3)，52-57 (2004)
- 15) 松村ゆかり，村田光司，伊神裕司：スギ中丸太の挽き材試験～丸太のヤング率を考慮した木取りと歩止り～，日本木材学会研究発表要旨集，54，152 (2004)
- 16) 狩野仁美，渋谷栄，林和男，飯島泰男，土居修一：スギ心材の抗蟻性におよぼす高温乾燥の影響，木材学会誌，50，91-98 (2004)
- 17) 山下香菜，長尾博文，加藤英雄，井道裕史：レジストグラフによる密度分布の推定，第55回日本木材学会大会研究発表要旨集，181 (2005)
- 18) 村田光司，伊神裕司，松村ゆかり：スギ中丸太の挽き材試験～丸太のヤング率と含水率を考慮した木取りと歩止り～，日本木材学会研究発表要旨集，55，190 (2005)
- 19) 長尾博文：非破壊評価による原木の用途区分，木工機械，201，3-6 (2005)
- 20) Murata K., Ikami Y., Matsumura, Y: Conversion of middle diameter sugi logs into sawn lumber: saawing yield by using sawing patterns in consideration of log strength, International Forestry Review, 7 (5), 125 (2005)
- 21) Matsumura Yukari, Murata Kohji, Ikami Yuji: Influence of sorting logs by Young's modulus and moisture content on sawing lumber yield and quality, Proceedings of 17th International Wood Machining Seminar, 100 (2005)

第2章

- 1) 松岡良昭，他3名：パラフィン液相乾燥におけるスギ構造材へのパラフィン浸透特性，日本木材学会大会研究発表要旨集，51，123 (2001)
- 2) 松岡良昭，他5名：パラフィン液相乾燥におけるスギ構造材の乾燥特性，木材工業，56 (6)，270-274 (2001)
- 3) 齋藤周逸他：80 ～ 110 ℃の温度域におけるスギ心持ち柱材の人工乾燥，日本木材学会大会研

- 究発表要旨集, 51, 115 (2001)
- 4) 齋藤周逸他：乾燥温度によるスギ柱材の乾燥特性, 日本林学会関東支部講演要旨集, 53, 51 (2001)
 - 5) 池田元吉他 3 名：乾燥前処理としての蒸煮減圧処理条件の検討, 日本木材学会大会研究発表要旨集, 51, 113 (2001)
 - 6) 藤本登留, 渕ノ上亮次：マイクロ波加熱によるスギ丸太の適正乾燥技術の開発, 日本木材学会大会研究発表要旨集, 51, 122 (2001)
 - 7) Y.Matsuoka, W.Ohmura, S.Fujiwara, Y.Kanagawa : Durability of Sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) wood treated in high temperature liquid paraffin (IRG/WPO2-40221) (2002)
 - 8) 松岡良昭, 他 4 名：パラフィン高温液相乾燥におけるスギ構造材へのパラフィン浸透特性, 木材学会誌, 48 (5), 356-362 (2002)
 - 9) 齋藤周逸他：乾燥温度によるスギ柱材の乾燥特性, 日本林学会関東支部論文集, 53, 231-232 (2002)
 - 10) 森田裕資, 他 6 名：スギ丸太材のマイクロ波高速乾燥技術の開発ー乾燥特性試験ー, 日本木材学会大会研究発表要旨集, 52, 143 (2002)
 - 11) 森田裕資, 他 6 名：スギ丸太材のマイクロ波高速乾燥技術の開発ー高温低湿乾燥との関係法ー, 日本木材学会大会研究発表要旨集, 52, 144 (2002)
 - 12) 吉田孝久：高温セット法における材面割れと内部割れ抑制, 日本木材学会大会研究発表要旨集, 53, 114 (2003)
 - 13) 豆田俊治：高温乾燥によるスギ心持ち柱材の曲がり抑制効果, 日本木材学会大会研究発表要旨集, 53, 126 (2003)
 - 14) 森田裕資, 他 3 名：スギ丸太材のマイクロ波高速乾燥技術の開発ー各種前処理との関係ー, 日本木材学会大会研究発表要旨集, 53, 116 (2003)
 - 15) 森田裕資, 大橋兼広, 藤本登留, 他 4 名：スギ丸太材のマイクロ波高速乾燥技術の開発ー乾燥特性試験ー, 日本木材学会大会発表要旨集, 52, 143 (2002)
 - 16) 森田裕資, 大橋兼広, 近藤和幸, 他 4 名：スギ丸太材のマイクロ波高速乾燥技術の開発-高温低湿乾燥との関係法-, 日本木材学会大会発表要旨集, 52, 144 (2002)
 - 17) Fujimoto, N.: International Symposium on Microwave Science and Its Application to Related Fields, Nara, 208-209 (2002)
 - 18) 世見淳一, 藤本登留, 大橋兼広, 近藤和幸：スギ丸太材のマイクロ波高速乾燥技術の開発ー各種前処理との関係ー, 日本木材学会大会発表要旨集, 53, 116 (2003)
 - 19) Saito S.: A finish characteristic by drying temperature of SUGI boxed heart square timber , Proceedings of 8th International IUFRO Wood drying Conference, 278-283 (2003)
 - 20) 齋藤周逸：スギ心持ち柱角材の乾燥温度による特性, 日本木材加工技術協会年次大会講演要旨集, 21, 54-55 (2003)
 - 21) 豆田俊治, 三ヶ田雅敏：スギ柱材の乾燥時における曲がり抑制技術, 木科学情報, 10, 1, 6-7 (2003)
 - 22) 豆田俊治, 三ヶ田雅敏：スギ柱材の乾燥時における曲がり抑制技術, 木科学情報, 10, 1, 29-30 (2003)
 - 23) 池田元吉：スギ心持ち平角材の乾燥前処理としての蒸煮減圧処理条件の検討, 第 10 回日本木

材学会九州支部大会大会講演集, 10, 23 (2003)

- 24) 齋藤周逸, 外崎真理雄: スギ心持ち柱材の内部割れによる欠損量, 日本木材学会大会要旨集, 54, 556 (2004)
- 25) 池田元吉, 中尾哲也, 作野友康: 蒸煮減圧処理したスギ心持ち材の含水率変化および寸法の経時的変化, 日本木材学会大会発表要旨集, 54, 143 (2004)
- 26) 藤本登留, 大橋兼広, 近藤和幸, 丸本一樹: スギ丸太材のマイクロ波高速乾燥技術の開発-用途別適正乾燥法について-, 日本木材学会大会発表要旨集, 54, 142 (2004)
- 27) 藤本登留, 他 5 名: マイクロ波加熱によるスギ丸太の乾燥, 材料, 54 (4), 371-376 (2005)

第 3 章

- 1) 東原貴志, 師岡淳郎, 則元京: 水蒸気処理木材の圧縮変形固定とその機構, 木材学会誌, 46, 291-297 (2000)
- 2) Higashihara, T., T. Morooka and M. Norimoto: Permanent fixation of the transversely compressed wood by steaming and its mechanism, Wood Research, 87, 28-29 (2000)
- 3) Abe, H., Funada R., Kuroda N., Furusawa O., Shibagaki M., Fujii T. Confocal laser scanning microscopy of water uptake during the recovery of compressed and drying-set wood. IAWA J. 22: 63-72 (2001)
- 4) 石川敦子, 黒田尚宏, 香川 聡, 安部 久: 熱処理下におけるスギ材の透過性, 日本木材学会大会研究発表要旨集, 51, 542 (2001)
- 5) Ishikawa, A., Kuroda, N., Kagawa, A., Abe H : Permeability of Sugi (Cryptomeria Japonica D. Don) Wood under High-Temperature Treatments, Proceedings of 7th International IUFRO Wood Drying Conference, 412-415 (2001)
- 6) 久保島吉貴, 外崎真理雄, 鈴木養樹, 石川敦子: 高温水蒸気中における生材小試験体の含水率変化, 日本木材学会大会研究発表要旨集, 51, 112 (2001)
- 7) Kubojima, Y. and others: Real-time measurement of vibrational properties and fine structural properties of wood at high temperature, Wood Science and Technology, 35, 503-515 (2001)
- 8) Morooka, T., W. Cheng, K. Ohshima and M. Norimoto: The stress in wood under superheated steam above 100C, 2001 Proceedings of the Korean Society of Wood Science and Technology Annual Meeting, 32-35, April, Seoul, Korea (2001)
- 9) Cheng, W., T. Morooka and M. Norimoto: The stress occurring in wood under high temperature steam, Proceedings of the 7th international IUFRO wood drying conference, 256-261, July, Tsukuba, Japan (2001)
- 10) 東原貴志, 師岡淳郎, 則元京: 熱処理木材の圧縮変形固定とその機構, 木材学会誌, 47 (3), 205-211 (2001)
- 11) 小林功, 久田卓興, 黒田尚宏: スギ柱材高周波加熱減圧乾燥における乾燥性に及ぼす圧力の影響, 日本木材学会大会研究発表要旨集, 51, 118 (2001)
- 12) 香川聡, 石川敦子, 安部久, 黒田尚宏: 含水木材での水分通導性評価と通導経路の可視化手法の検討, 日本木材学会大会研究発表要旨集, 52, 11 (2002)
- 13) 石川敦子, 黒田尚宏, 加藤厚: 高温蒸気処理下におけるスギ材の含水率, 日本木材学会大会研究発表要旨集, 52, 131 (2002)

- 14) 石川敦子, 黒田尚宏: 高温水蒸気処理したスギ材の吸湿特性, 森林総合研究所研究報告, 1 (3), 179-180 (2002)
- 15) 久保島吉貴, 鈴木養樹, 外崎真里雄: 高温水蒸気中における木材の振動特性, 日本木材学会大会研究発表要旨集, 52, 130 (2002)
- 16) Kubojima, Y., Suzuki, Y., Tonosaki, M.: Real-time measurement of vibrational properties of green wood at high temperatures. *Wood and Fiber Science*, 34, 643-650 (2002)
- 17) Cheng, W., T. Morooka and M. Norimoto: Shrinkage stress occurring in the drying process of wood using superheated steam, *Wood Research*, 89, 25 (2002)
- 18) Higashihara, T., T. Morooka, M. Inoue and M. Norimoto: Permanent fixation of transversely compressed wood by steaming and its mechanism, *Proceedings of the 6th Pacific Rim Bio-based Composites Symposium*, 567-573 (2002)
- 19) 小林功, 黒田尚宏, 久田卓興: スギ心持ち柱材乾燥の前処理としての過熱蒸気処理, 日本木材学会大会研究発表要旨集, 52, 133 (2002)
- 20) 安部久, 香川聡, 石川敦子, 黒田尚宏: スギ材の水透過性の組織内変位と高温・高圧処理による影響, 日本木材学会大会研究発表要旨集, 53, 135 (2003)
- 21) 小林功, 石川敦子, 黒田尚宏: 高温域における圧力制御によるスギ柱材の乾燥, 日本木材学会大会研究発表要旨集, 53, 120 (2003)
- 22) 小林功, 黒田尚宏, 久田卓興, 高橋保市: スギ心持ち無背割り柱材乾燥の前処理としての過熱蒸気処理の効果, *木材工業*, 58 (6), 258-263 (2003)
- 23) 東原貴志・井上雅文・師岡淳郎・則元京: 水蒸気処理によるセルロース系繊維の変形固定とその機構, *木材学会誌*, 49 (4), 260-266 (2003)
- 24) Kubojima, Y., Suzuki, Y., Tonosaki, M., Ishikawa, A. 2003. Moisture content of green wood in high temperature water vapor. *Holzforschung*, 57, 634-638.
- 25) 久保島吉貴: 高温域での木材の振動特性のリアルタイム測定, *A P A S T*, 13 (4), 76-80 (2003)
- 26) 久保島吉貴, 鈴木養樹, 外崎真里雄: 高温高湿条件における生材の振動特性. 第54回日本木材学会大会研究発表要旨集, 149 (2004)
- 27) Kubojima, Y., Suzuki, Y., Tonosaki, M. Real-time vibration testing method of wood in superheated water vapor. *Bulletin of the Forestry and Forest Products Research Institute*, 3 (4), 335-339 (2004)
- 28) Cheng, W., T. Morooka and M. Norimoto : Shrinkage stress of wood during drying under superheated steam above 100 ° C: *Holzforshung*, 58 (4), 423-427 (2004)
- 29) 東原貴志, 師岡淳郎, 廣澤修一, 則元 京: 水蒸気処理および熱処理による木材の化学変化と圧縮変形固定の関係, *木材学会誌*, 50, 159-167 (2004)
- 30) 小林功, 石川 (本田) 敦子, 黒田尚宏: スギ心持ち柱材の過熱蒸気による前処理と減圧乾燥, 日本木材学会大会発表要旨集, 54, 536 (2004)
- 31) 小林功: 過熱水蒸気を利用したスギ柱材の乾燥および熱処理技術の開発, 2003 年度日本木材学会木材と水研究会シンポジウム要旨集, 13-20 (2004)
- 32) 永田総司, 上田守, 山本泰司: 高周波・蒸気複合乾燥における効率的な高周波印加制御方法の研究 (I), 日本木材学会大会発表要旨集, 54, 148 (2004)
- 33) Kubojima, Y., Suzuki, Y., Tonosaki, M., Vibrational properties of green wood in high temperature water vapor, *Holzforschung*, 59 (4), 446-450 (2005)

- 34) Kagawa, A., A. Sugimoto, K. Yamashita, H. Abe: Temporal photosynthetic carbon isotope signatures revealed in a tree ring through $^{13}\text{CO}_2$ pulse-labeling. *Plant, Cell & Environment*, 28 (7), 906-915 (2005)
- 35) Cheng, W., T. Morooka and M. Norimoto : Factors reducing shrinkage stress of wood during drying under superheated steam above 100°C , *Holzforschung* (投稿中)
- 36) 永田総司, 上田守, 山本泰司 : 高周波・蒸気複合乾燥における効率的な高周波印加制御方法の検討, 日本木材学会大会研究発表要旨集, 55, 71 (2005)
- 37) 永田総司, 山本泰司, 丸本一樹, 藤本登留 : スギ心持柱材の高周波・蒸気複合乾燥に伴う内部割れのAE測定, 日本木材学会大会研究発表要旨集, 55, 71 (2005)
- 38) 久保島吉貴, 小林功, 外崎真理雄 : 高温高湿条件におけるスギ実大生材の含水率の経時変化, 日本木材学会大会研究発表要旨集, 55, 71 (2005)
- 39) 小林功, 黒田尚宏, 石川 (本田) 敦子 : 高温過熱蒸気によるスギ心持ち無背割り柱材の乾燥, 木材工業, 60 (9), 439-444 (2005)

第4章

- 1) 山下香菜, 平川泰彦, 齋藤周逸, 中谷 浩 : ボカスギの樹幹内の材質変動と人工乾燥した正角材に生じた割れ及び狂いとの関係, 日本木材学会大会研究発表要旨集, 51, 42 (2001)
- 2) Yamamoto, K., W. Ohmura, I. Momohara: Influence of high Temperature Drying on wood Durability, *Proceedings of 7th International Wood Drying Conference*, 318-321 (2001)
- 3) 原田真樹, 林陽子, 林知行, 軽部正彦, 大釜敏正 : プレカット継手及びボルト, 釘接合部の強度性能におよぼす部材含水率の影響, 日本木材学会大会研究発表要旨集, 51, 187 (2001)
- 4) Harada, M. and others: Effect of Moisture Content of Members on Mechanical Properties of Timber Joints, *Proceedings of 7th International IUFRO Wood Drying Conference*, 440-443 (2001)
- 5) 三井信宏, 杉本健一, 神谷文夫, 城井秀幸, 山下実 : 乾燥程度の異なるスギ製材で構成した耐力壁の強度性能?初期性能?, 日本木材学会大会研究発表要旨集, 52, 194 (2001)
- 6) 三井信宏, 杉本健一, 神谷文夫 : 初期乾燥程度の異なるスギ製材で構成した耐力壁の強度性能, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1, 関東, 293-294 (2001)
- 7) 恒次祐子, 有馬孝礼 : 木材乾燥過程の環境負荷評価 (I), 日本木材学会大会研究発表要旨集, 51, 463 (2001)
- 8) 平川泰彦, 山下香菜, 齋藤周逸, T.G.Jones, 中谷 浩, 池田元吉 : 材質の異なるスギの正角材における人工乾燥による割れ及び狂いの発生について, 日本木材学会大会研究発表要旨集, 52, 64 (2002)
- 9) 加藤英雄, 久保島吉貴, 長尾博文, 井道裕史 : 飽和水蒸気中で熱処理したスギ小試験体の曲げ強度性能, 日本木材学会大会研究発表要旨集, 52, 116 (2002)
- 10) 原田真樹, 後藤崇志, 軽部正彦, 林知行 : 割れを有する製材を主材としたボルト・釘接合部のせん断試験, 日本木材学会大会研究発表要旨集, 52, 227 (2002)
- 11) 三井信宏, 杉本健一, 神谷文夫 : 初期乾燥程度の異なるスギ製材で構成した耐力壁の強度性能 (その2. 半年経過後の比較), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1, 北陸, 213-214 (2002)
- 12) 平川泰彦, 山下香菜, 齋藤周逸, 池田元吉, 中谷 浩 : 材質の異なるスギ正角材を高温乾燥したときの内部割れ及び狂いの発生の違いについて, 日本木材学会大会研究発表要旨集, 53,

60 (2003)

- 13) 黒田尚宏：スギ柱材乾燥に要するエネルギーの現状－?蒸気加熱式乾燥の場合－，日本木材学会大会研究発表要旨集，53，120 (2003)
- 14) 加藤英雄，久保島吉貴，長尾博文，井道裕史：飽和水蒸気中で熱処理したスギ小試験体の縦圧縮強度およびせん断強度，日本木材学会大会研究発表要旨集，53，90 (2003)
- 15) 原田真樹，中嶋康，軽部正彦，林知行：生材及び乾燥材を用いた柱梁接合部の実大せん断試験，日本木材学会大会研究発表要旨集，53，207 (2003)
- 16) 恒次祐子，久田卓興，有馬孝礼：木材乾燥過程の環境負荷評価 (II)，日本木材学会大会研究発表要旨集，53，534 (2003)
- 17) 林知行：構造用木質建材の現状と課題，材料，53，3，331-338 (2003)
- 18) 黒田尚宏：スギの乾燥-概説，林業技術，No.736，8-13 (2003)
- 19) Momohara, I., Ohmura, W., Katoh, H., Kubojima, Y. : Effect of high-temperature treatment on wood durability against the brown-rot fungus, *Fomopsis palustris* and the termite, *Cotrotermes formosanus*., *Proceedings of the 8th International IUFRO Wood Drying Conference*, 284-287 (2003)
- 20) 三井信宏，杉本健一，神谷文夫ほか：初期乾燥程度の異なるスギ製材で構成した耐力壁の強度性能 (その3 2年経過後の比較)，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-1 分冊，87-88 (2003.9)
- 21) 加藤英雄，齋藤周逸，長尾博文，井道裕史他：乾燥温度がスギ製材品の縦引張り強度に及ぼす影響，日本木材学会大会研究発表要旨集，54，117 (2004)
- 22) 平川泰彦ら：スギ造林木の心材含水率の変動，木材工業，59(4)，159-165 (2004)
- 23) 大村和香子，加藤英雄，小林功，桃原郁夫：スギ心材の熱処理条件とシロアリの摂食量との関係，木材工業，59(4)，170-173 (2004)
- 24) 黒田尚宏：スギ材乾燥の効率化のために，林木の育種，No.212，13-14 (2004)
- 25) 黒田尚宏：これからの新しい木材乾燥技術，木工機械，No.199，5-8 (2004)
- 26) 黒田尚宏：スギ材の革新的人工乾燥システムの開発，木材工業，59 (8)，341-346 (2004)
- 27) 黒田尚宏：スギ材の乾燥-最近の技術開発の動向-，木の建築，9，36-39 (2004)
- 28) 三井信宏：耐力要素を構成する部材の含水率が強度性能へ与える影響について，2004 年度木材と水・木材強度・木質構造研究会合同シンポジウム講演要旨集，66-73 (2004)
- 29) 林知行：構造用木質建材のこれから，木材工業，60，2，97-100 (2005)
- 30) 黒田尚宏：木材の乾燥に関する研究の現状と課題，木材学会誌，1，10-12 (2005)
- 31) 平川泰彦，山下香菜，齋藤周逸，池田元吉：5品種のスギの異なる地上高から採材した心持ち正角材における人工乾燥による曲がり矢高及び割れ長さの変動と木材性質との関係，日本木材学会大会研究発表要旨集，55，55 (2005)
- 32) 加藤英雄，久保島吉貴，小林功，長尾博文，井道裕史：飽和水蒸気中で処理したスギ小試験体の衝撃曲げ性能，日本木材学会大会研究発表要旨集，55，67 (2005)
- 33) Harada, M., Y. Hayashi, T. Hayashi, M. Karube, T. Ohgama: Effect of moisture content of members on mechanical properties of timber joints, *J. of Wood Science*, 51(3), 282-285 (2005)

第1章 乾燥の効率化・品質安定化のための材質評価技術の開発

1. 丸太の非破壊的材質評価技術・用途判別技術の開発

(1) 丸太内部の水分量測定評価技術

ア 研究目的

スギ材を効率よく乾燥させるためには、予め原木段階で水分量・分布ごとに丸太を区分・選別する必要がある。本研究では、原木における水分量による選別が可能になるように、丸太等大断面材における非破壊的簡易水分検出手法の開発を主な目的とした。振動による検出法¹⁾や重量選別等²⁻⁴⁾が提案されているが、比較的簡便な電気的な手法を採用した。特に交流抵抗（インピーダンス）測定⁵⁾は広範囲な周波数域において高速計測が可能であり、抵抗の大きさだけでなく位相差も利用可能である。乾量基準である全乾法で求めた含水率と複数の周波数で計測した電気容量・位相差との関係に基づいた新しい水分検出手法⁶⁾について検討した。

イ 研究方法

(1) 飽水から気乾までの含水率ごとの誘電率の特性把握

飽水から気乾状態までの乾燥過程で試料の重量を適宜測定し、インピーダンス測定終了後、全乾重量を求め、乾量基準における含水率を算出した。それぞれの含水率ごとにスギ材の電気容量 $C(F)$ ・インピーダンス $Z(\Omega)$ ・位相角 (θ) および損失 D を周波数100Hzから1.8GHzまでの周波数範囲で適宜測定し、さらにインピーダンスと位相角から誘電率を計算した。試験体は、木口、柾目、板目面それぞれの方向について電気的特性を評価できるように厚さ3mm以下で作製した。

高周波数帯域の測定⁷⁾には、アジレントテクノロジー（株）製のインピーダンスアナライザーHP4291Bを用い、常温（20℃）における飽水状態の誘電率を周波数1MHzから1.8GHzの範囲で測定した。一方、低周波数帯域の測定には、HIOKI（株）製のLCZメーターZ3531を用いた。高周波測定と同様にインピーダンスおよび位相角より計算して誘電率を求めた。測定に用いた周波数域は100Hzから1MHzであった。

(2) スギ丸太における内部水分量の評価

丸太を挟んで対向する電極を作製し、長さ80cm、直径平均40～50cmのスギ丸太に固定しインピーダンス測定を行った。インピーダンス測定後、直ちに測定部位の円盤を切り出し、円盤の重量を測定した後、3cm四方のブロックで分割し、105℃で1日乾燥して、全乾法にしたがって樹幹内含水率分布を求めた。インピーダンスと位相角の測定には、HIOKI（株）製のLCRハイテスタ3522およびZ-ハイテスタ3531を用いた。出力電圧は3V、delayは0.2secに設定した。1回の測定所要時間は2～3分であった。掃引周波数は、100Hzから1MHzまでの範囲を均等に40ポイントに分割設定して行った^{6,10)}。

(3) スギ丸太心材含水率推定の試み

スギ丸太から厚さ5cmの円盤を連続して切り出し、生材の状態で重量を測定した。5cm×5cmの電極を円盤横に対向させて固定した後、LCRメーターで、10-100kHzの周波数範囲における電

気容量を測定した。電気容量の測定後、105℃の定温乾燥器で乾燥させ、全乾重量を測定し、円盤の含水率を求めた。周波数 1000, 10k, 100kHz でそれぞれの電気容量と円盤の平均含水率との関係を求めた。

ウエ 結果および考察

(1) 高周波数域 (1MHz~1.8GHz)における高含水率材の誘電率の挙動について

L (繊維) 方向とT (柁目) 方向で、誘電率の異方性が顕著に現れることを明らかにした。心材部と辺材部で誘電率の含水率変動に伴う挙動の差異も現れた。飽水状態では、100MHz付近に誘電損失の谷を観測した (図1-1-1-1)。乾燥に伴い、誘電損失の谷を示す値は低下した。含水率約10%では、10MHz付近に誘電損失のピークが現れた (図1-1-1-2)。

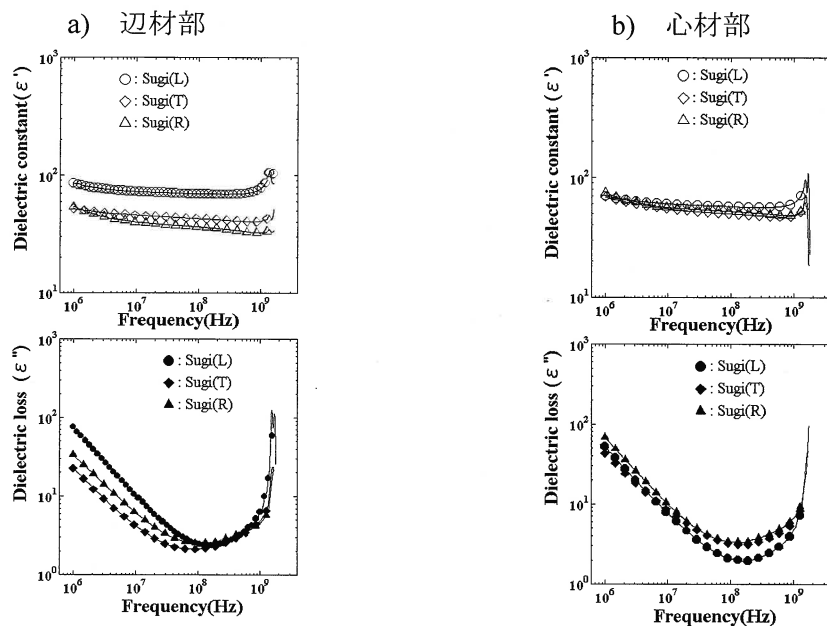


図1-1-1-1 スギ辺材・心材の飽水時における誘電率周波数特性

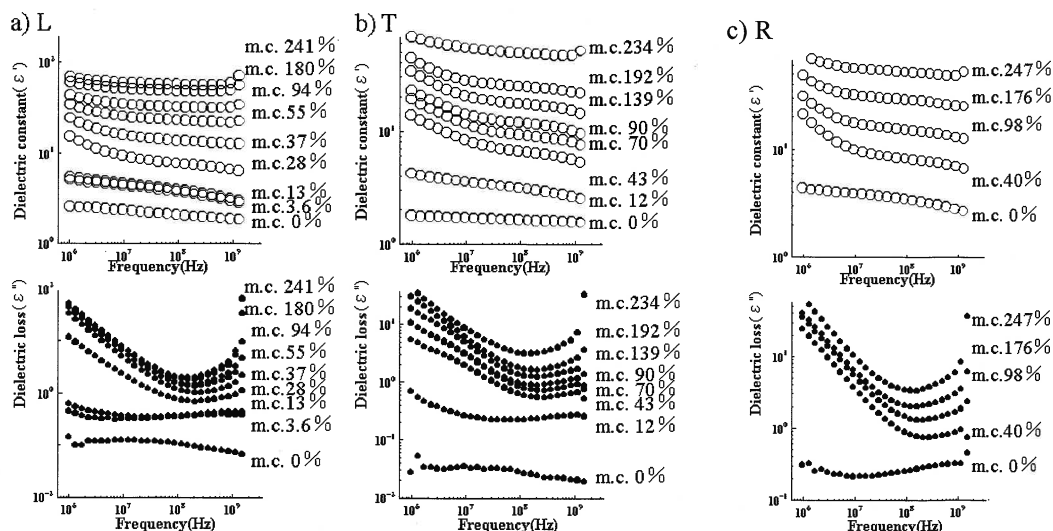


図1-1-1-2 スギ心材部の乾燥過程における誘電率の周波数特性

(2) 低周波数域 (DC~1MHz) における高含水率材の誘電率の挙動について

低周波数域での誘電率 ϵ' と含水率との関係を図1-1-1-3に示す。界面分極の一種である電極分極の効果により低周波数で非常に大きな値を示した。含水率30%以下で急激に誘電率は減少する傾向を示し、L方向も同じ傾向であった。これらの誘電率の含水率依存性から、低~高含水率の推定には複数の検量線を必要とすることが明らかになった。測定周波数が低下すると、含水率と誘電率の直線相関性は小さくなる傾向を示し、バラツキが大きくなった。

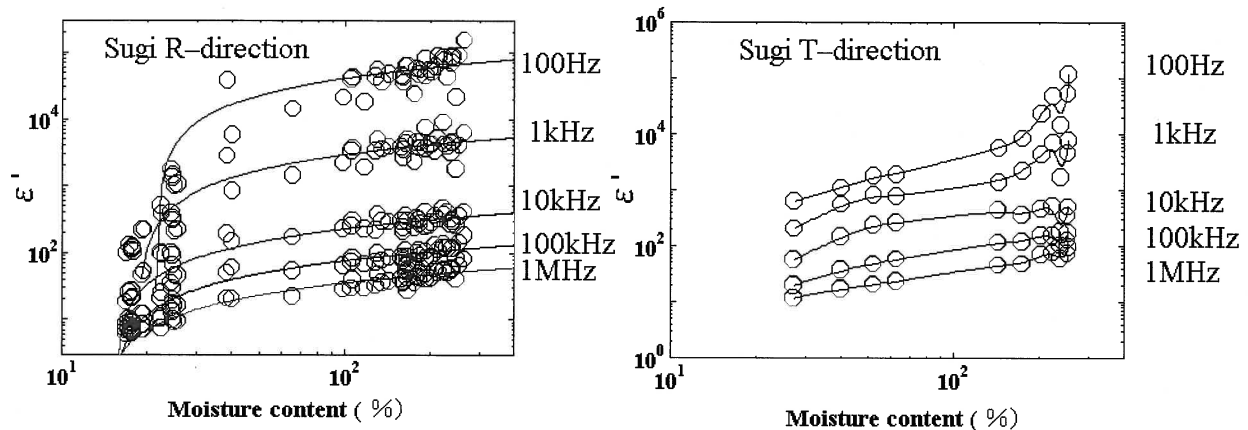


図1-1-1-3 低周波数域における見かけ上の誘電率と含水率との関係

(3) 丸太インピーダンス測定

対向する電極間で電界が到達可能な距離と周波数との関係を明らかにするために0.1Hz~100kHzまで測定できるものと50Hz~5MHzまで測定できるLCRメーターをそれぞれ用いてインピーダンスを測定した。スギ円盤から髄を通るように厚さ3cm、幅3cmで切り出した試験体に針状電極を差し込んで樹幹内横方向のインピーダンスを計測した。電圧レベルは1Vから5Vであった。電極間を順次変えて、測定を繰り返した。周波数と距離、インピーダンスの関係の1例を図1-1-1-4に示す。

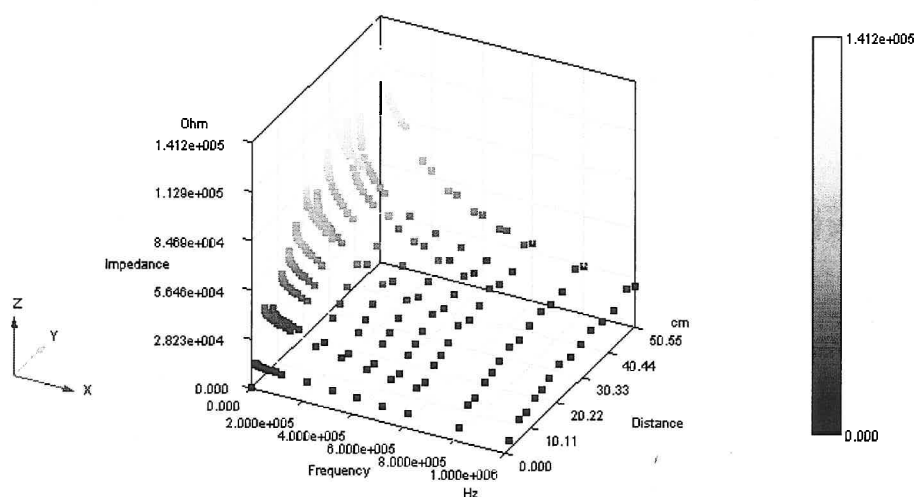


図1-1-1-4 周波数・電極間距離とインピーダンスとの関係

電極間距離が狭まると、インピーダンス（交流抵抗）は低下し、高い周波数の場合では、その変動幅は小さい傾向を示した。上村は、パルプ用原木の重量検収に誘電率型含水率計を活用し、木口面と側面から電極を押し当ててそれぞれ測定を行い、円盤含水率と計器による含水率指示との差を求め、良好な結果を報告している⁸⁻⁹⁾。

しかしながら、平均含水率を原木選別の基準とするには、スギは心材と辺材部での含水率変動が大きく、それだけでは不十分である。丸太用の含水率計が市場で存在するかと言われれば、現状では存在しない。丸太だけでなく、大断面・高含水率用含水率計は、まだ開発されておらず、市販されていない。

その主な理由は、①大きな需要がないこと、②形状が不定形で計測が困難、③含水率表示は乾量基準であるため、全乾状態での重量情報が必要なことなどが考えられる。通常、繊維飽和点（仮道管等の内こう側面に結合水として吸着出来る限界点）を越え、結合水から自由水（液状のもの）へ変わると、電気を蓄える性能を示す電気容量は急激に増加する。その結果、一般に電気容量から算出する含水率と全乾含水率（105℃で重量が安定するまで乾燥させた時の重量を基準に算出したもの）との測定誤差は大きくなる。このため、問題点として、実際の含水率測定の際には、検量線が1本ではなく複数必要になること、さらには過大な容量に起因する測定精度の不足が発生することがある。そこで、平均含水率ではなく、丸太内での部位による水分量の評価手法を検討した。

樹幹内での距離情報（位置）と同時に含水率を評価するためには、1）電極間距離を変えること、2）複数の周波数での電界を用いる方法が考えられる。丸太のような不定形の場合、2）を採用するのが、最も簡便であり、装置も簡単な構成になることが当初予想された。

写真1-1-1-1のように非導電性ゴムに面積5 cm×5 cmの電極（ステンステープ）をつけ、荷造り用ベルトにて丸太の周囲に固定した¹⁰⁾。HIOKI（株）製のインピーダンスアナライザ3521を用いて、対向電極間のインピーダンスと位相角を計測した。新たに、対向電極を押し当て出来る治具を作製し、測定を行った結果、ベルト固定法と同様良好な結果が得られた（写真1-1-1-2）。

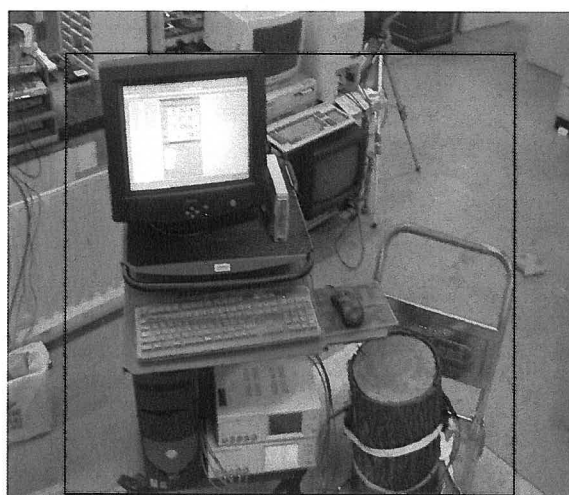


写真1-1-1-1 インピーダンス測定の装置と
測定風景

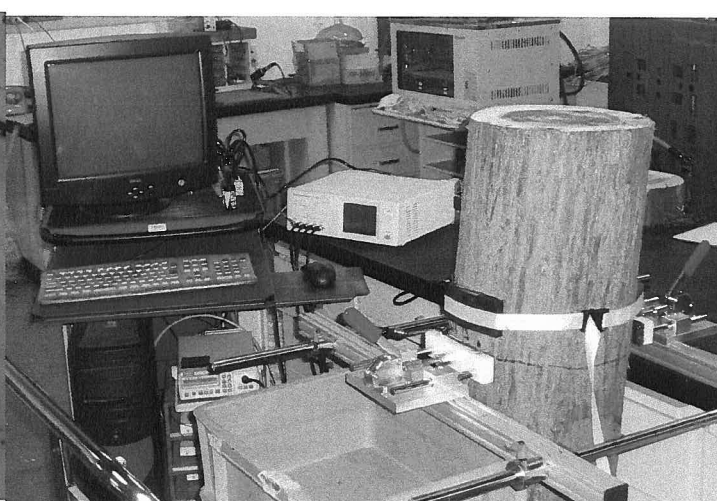
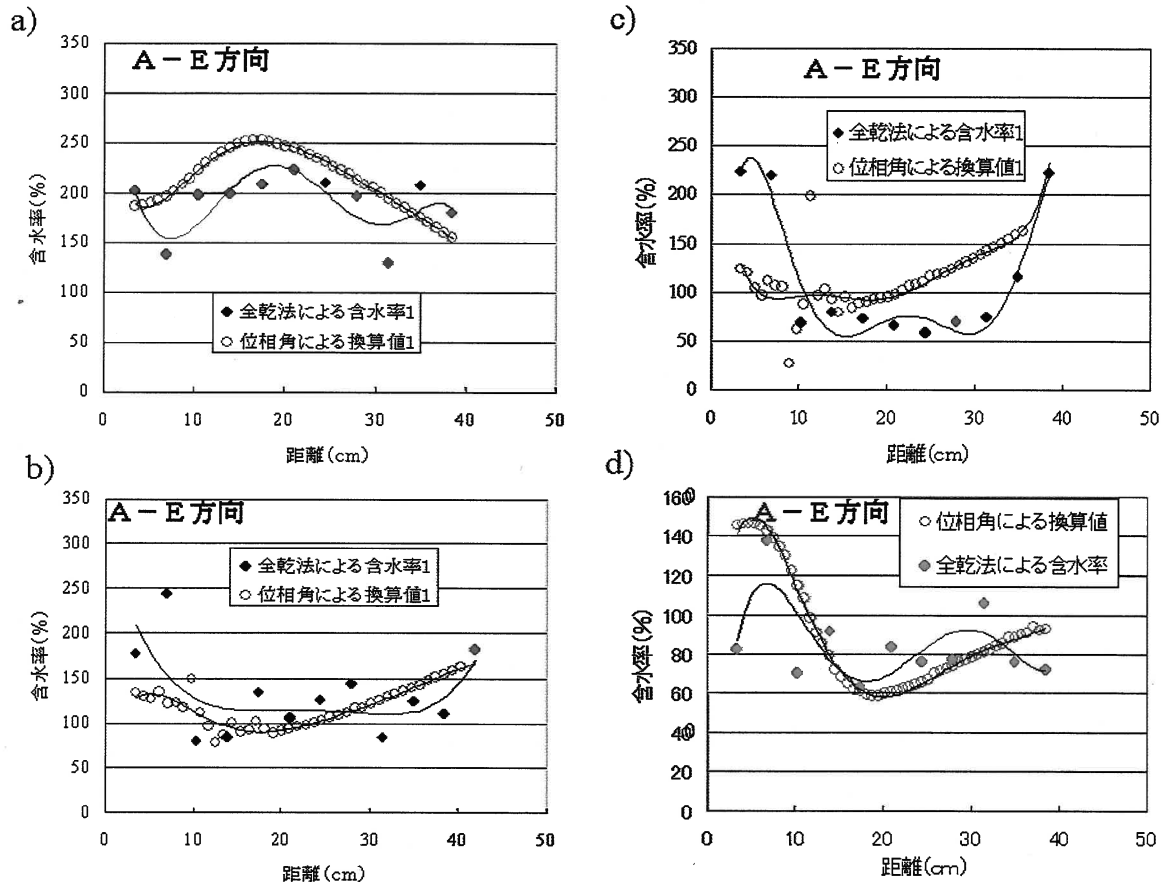


写真1-1-1-2 インピーダンス測定用治具

周波数掃引インピーダンス測定法による位相角 θ （発信部での電圧、電流に対する受信部側での電圧電流の時間のずれ）を用いて丸太樹幹内方向での水分分布の可視化を試みた。¹¹⁾（図1-1-1-5参照）

図1-1-1-5 樹幹内含水率分布と推定含水率分布の比較



(4) 見かけの丸太心材含水率と電気容量との関係について

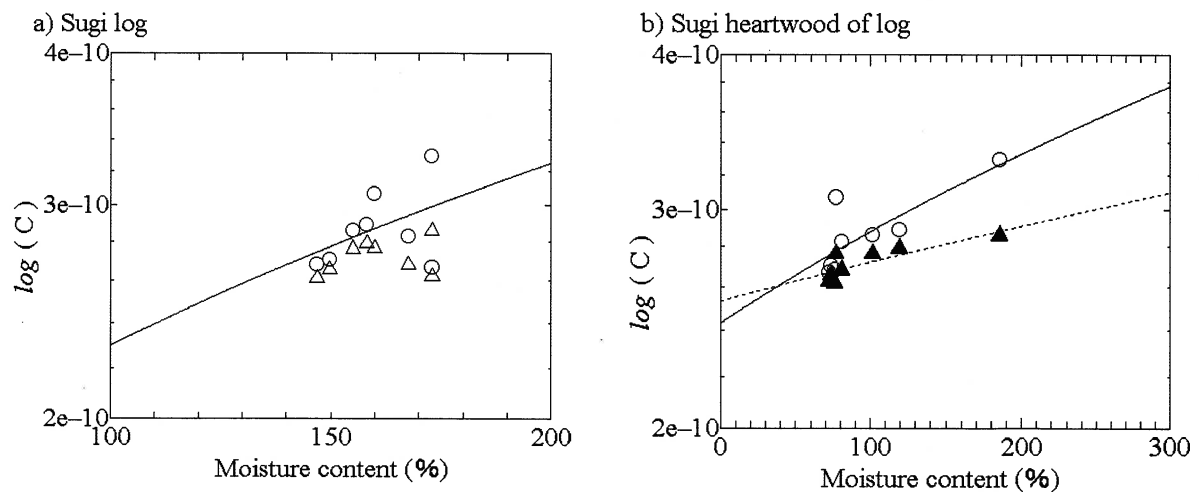


図1-1-1-6 スギ円盤の平均含水率a)および平均心材含水率b)と電気容量との関係

周波数10kHz, 100kHzで測定した円盤の平均含水率と電気容量の関係は、含水率の幅が広範囲で

得られず、明確な関係が求められなかった。(図1-1-1-6参照)

心材含水率と電気容量との間には、周波数10kHz、100kHzの両者とも相関関係が認められるが、平均含水率の変化量の幅と比較して電気容量の変化量の幅は狭いため、精度を向上させるのは困難である。

オ 今後の問題点

電気的手法による丸太内水分分布推定の技術には、まだ①測定精度の向上、さらに②それぞれの掃印周波数での減衰曲線から効率の良い測定周波数と樹幹内距離との関係を明らかにすること、③得られた信号から水分分布の画像表現方法の確立などが主な課題として残されている。

原木丸太(樹皮付き)の状態での測定可能であることから、原木市場等における丸太の含水率選別への応用が期待され、他の手法と比較しても、現場への即時適用ができる利点はある。また、将来は立木のまま内部水分量を評価できる可能性があり、時系列的にモニタリングできれば、公園内の樹木管理にも応用できる可能性があると予測している。

カ 要約

スギ丸太含水率による選別技術の1つとして、樹幹内の水分分布を電気的手法により推定する手法を見いだした。高含水率、樹皮を含んだまま計測可能であるため、活用範囲が広い。平均心材含水率の推定は、水分分布推定と同じ電気的手法の一部を転用すると可能になることが認められた。しかし、測定個体数は現状では十分とは言えず、実用化までには至っていない。

キ 引用文献

- 1) 釜口明子、中尾哲也、小玉泰義：木材学会誌 46(1)、13-19 (2000)
- 2) 日本機械学会編：湿度・水分計測と環境のモニタ、技報堂出版、306-311 (1992)
- 3) 祖父江信夫：木材学会誌、39(9)、973-979 (1993)
- 4) 上村武：林業試験場研究報告、119、95-172 (1960)
- 5) 斉藤寿義：林業試験場研究報告、335、1-13 (1986)
- 6) 鈴木養樹：第2回つくばテクノロジーショーケース、29 (2003)
- 7) 鈴木養樹、黒田尚宏：木材学会誌、49(3)、161-170 (2003)
- 8) 上村武：木材工業、16(7)、12-17 (1961)
- 9) 上村武：木材学会誌、10(5)、182-187 (1964)
- 10) 鈴木養樹：「木材の材内含水率及びその分布を測定する方法並びにそれらの装置」(特願2002-250113)
- 11) 鈴木養樹：APAST、14、52-57 (2004)

(森林総合研究所木材特性研究領域 鈴木養樹)

(2) 丸太の材内密度分布評価技術の開発

ア 研究目的

スギの材質特性を原木段階で判定することができれば、丸太を用途別に選別して製材し、乾燥することにより、効率的にスギ材を利用することができると考えられる。様々な材質特性の中でも、密度は乾燥速度や乾燥による割れや狂いなどの欠点の発生に加え、製材の強度的性質にも影響を与える重要な因子である。スギ丸太については、密度の個体間の変異、丸太内の密度分布などをふまえて丸太内の密度分布測定手法や原木丸太の選別法の開発が必要とされている。本課題では、乾燥効率を踏まえたスギの材質特性を原木段階で判定するために、スギ丸太の平均密度の推定及び丸太内の密度分布を推定する方法を開発することを目的とした。

イ 研究方法

(1) 密度の半径方向変動

スギ5品種（アヤスギ、クモトオシ、ボカスギ、ヤブクグリ、リュウノヒゲ）について地上高1m部位または2m部位からストリップを採取し、軟x線デンシトメトリにより年輪ごとの気乾密度を測定した。髄からの距離による平均的な密度変動を検討するために、髄からの距離2cmごとに各個体の平均値を求めた。また、品種として区分されていないスギの例として、収穫試験地産のスギを加えた。

(2) ピロディンによる密度推定

1) ピロディンの打ち込み深さの測定

バネエネルギー6Jで足つきタイプのピロディン (Pilodyn 6J Forest) を用いた。ピロディンを対象面に垂直になるように保持してピンを打ち込んだ後、0.1mm単位で打ち込み深さを読みとった。打ち込み深さの測定は生材状態で行った。

2) ピン直径、測定部位、測定回数の検討

ピロディンにφ2.0、2.5、3.0、5.0mmと直径が異なるピンを装着し、打ち込み深さと密度との関係を検討した。また、打ち込み方向が打ち込み深さに与える影響を検討するために、丸太側面及び丸太木口面のそれぞれにおいて打ち込み深さの測定を行った。さらに丸太内での測定部位の違いが測定値に及ぼす影響を検討するために、4m丸太の両端部および中央部のそれぞれ4方位で測定を行った。

3) ピロディン打ち込み深さと密度の関係

ピロディン打ち込み深さの測定にはアヤスギ、ボカスギ、リュウノヒゲスギの各品種と栃木県産及び高知県産のスギ丸太を用いた。また、木材の密度とピロディン打ち込み深さの関係を検討するために、年輪構造の影響が小さいと考えられる散孔材17種類と密度範囲を広げるために環孔材10種類を加えた。これら丸太の側面を剥皮し、φ2.5mmのピンを打ち込み、打ち込み深さを測定した。打ち込み部近傍を含むブロックを用いて浮力法により全乾容積密度を測定し、打ち込み深さと密度の関係を検討した。

4) ピロディン打ち込み深さと丸太の平均密度の関係

小ブロックを用いて測定した容積密度から、それぞれのブロックの髄からの距離を半径とする円の面積によって重み付けして平均密度を算出し、丸太密度とした。

(3) 丸太側面からの穿孔抵抗の測定

レジストグラフ（ニードル直径 3mm）を用いて丸太側面から丸太の長軸に直角にプローブを反対側の側面まで貫通させ、ニードルの回転トルクの変化から穿孔抵抗の変化を測定し、その出力値をレジストグラフ出力値とした。

(4) 木口面表面粗さの測定

スギ木口の丸鋸切削面を対象としてレーザー変位計を用いて切削面の高さを測定した。走査速度5mm/sec、サンプリング周期200hz、サンプリング間隔0.025mmで計測を行った。

(5) 表面硬さ

広葉樹材25種（密度0.26～1.00g/cm³）から小ブロックを作製し、木口面でデュロメータ硬さの測定を行い、ブロックの気乾密度との関係を検討した。スギについては、早材と晩材を別に測定し、それぞれ早材密度及び晩材密度との関係を検討した。

ウエ 結果と考察

(1) 密度の半径方向変動

気乾密度の半径方向変動パターンはいずれの品種においても髄付近が最も密度が高く、樹皮側に向かって減少した(図1-1-2-1)。髄付近の密度が高い部分の半径は品種によって異なるが、2～4cmの範囲であった。一方、年輪幅が広い部分の半径は4～8cmであり、密度が変動する範囲（2～4cm）よりも広がった。丸太内で密度の半径方向変動を見た場合に、密度が高く、髄からの距離により減少する部分は髄を中心にして直径4～8cm程度の範囲にあると考えられた。このような密度の変動部位について年輪内平均密度と早材及び晩材平均密度との関係をみたところ、平均密度と晩材密度との間には有意な相関はみられなかったが、平均密度と早材密度との間には有意な相関（ $r = 0.88$ ）がみとめられた。このことから髄付近の密度変動は主として早材密度の変動によることがわかった。

(2) ピロディンによる丸太密度の推定

1) スギ材にピロディンを用いる場合の条件設定

ピンの直径別にピロディン打ち込み深さと容積密度の関係をみたところ、直径が小さいピンの方が密度範囲に対する打ち込み深さの幅が広く、密度による打ち込み深さの差が大きいことがわかった。また、スギで想定される容積密度の範囲（0.2～0.55g/cm³）においては、φ2mmのピンではピロディンの最大打ち込み深さ40mmを越える場合があることが予想された。これらの点から、パネエネルギー6Jのピロディンについてはφ2.5mmあるいはφ3mmのピンを用いることが適当であると考えられた。

丸太の部位による打ち込み深さの差は小さく、丸太の方位、長さ方向ともに有意ではなかった。ただし、地際部では他の部位に比べて小さかった。同じ部位において5回繰り返し測定したところ、5回の測定値と初めの3回の測定値とでは平均値、標準偏差及び変動係数にほとんど差が無く、測定回数は1カ所あたり3回で十分と判断した。

2) 打ち込み部の密度とピロディン打ち込み深さの関係

広葉樹材における容積密度とピロディン打ち込み深さとの間には、容積密度0.2～0.8g/c

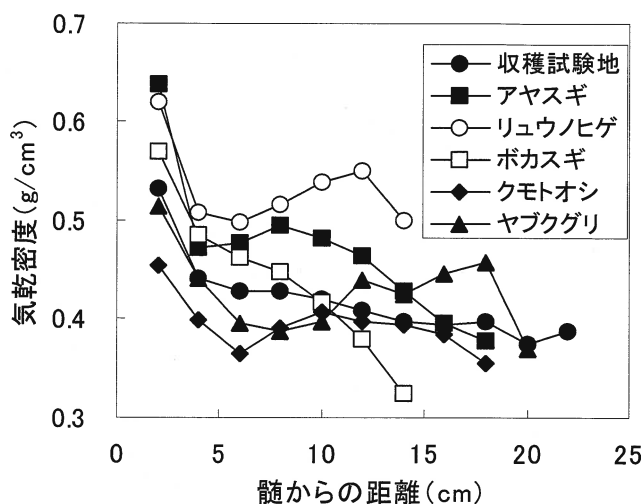


図 1-1-2-1 気乾密度の半径方向変動

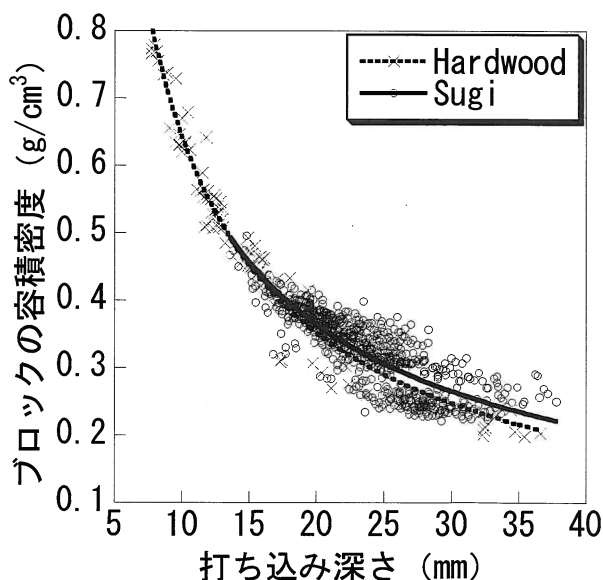


図 1-1-2-2 広葉樹材及びスギにおけるピロディン打ち込み深さと容積密度の関係

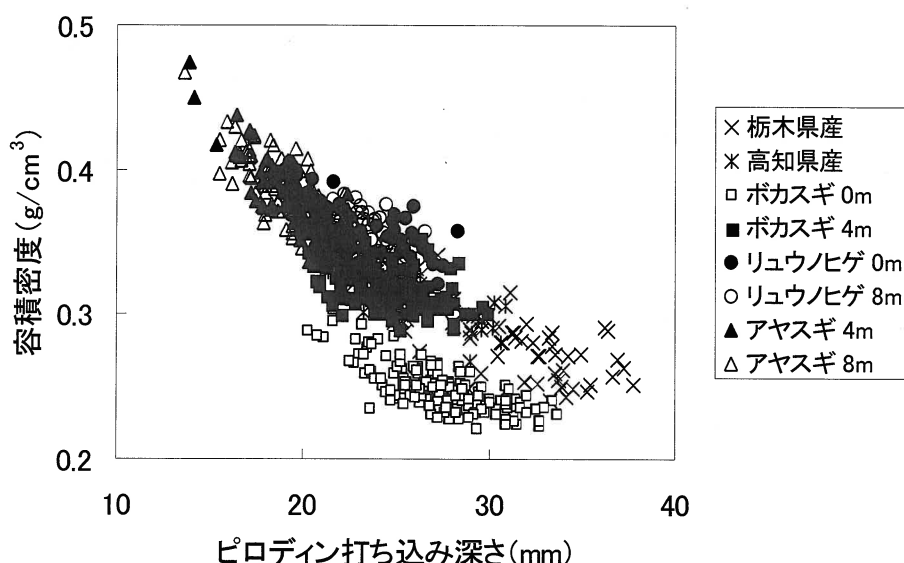


図 1-1-2-3 スギにおけるピロディン打ち込み深さと打ち込み部の容積密度

m³の範囲において強い負の相関があり、密度が大きくなるにつれて打ち込み深さが漸減する傾向を示した(図1-1-2-2)。スギにおける密度と打ち込み深さの関係は、広葉樹材と同様に負の関係にあったが、産地や品種、個体内での部位によって回帰直線が異なった(図1-1-2-3)。スギは年輪内の密度が一様ではないために、年輪内の平均密度と晩材率の関係などが品種等によ

って異なると考えられ、年輪構造が密度とピロディン打ち込み深さの関係に関与すると考えられた。

3) ピロディン打ち込み深さからの丸太密度の推定

ピロディン打ち込み深さと丸太密度との間には負の相関があり ($r=-0.84$)、回帰式 $y=0.58-0.011x$ によって打ち込み深さから推定した丸太密度の推定値の95%信頼区間は $\pm 0.05\text{g/cm}^3$ であった(図1-1-2-3)。

(3) レジストグラフ出力値と密度の関係

レジストグラフにより測定した穿孔抵抗の変化と容積密度の関係を2cmごとの平均値で比較したところ、貫入口側の樹皮から髄付近までについてはほぼ同調した変動を示したが、髄を越えて穿孔が深くなるにつれて差が大きくなった(図1-1-2-4)。容積密度と穿孔抵抗との関係は貫入口付近でよい相関($R=0.90$)がみられたが、穿孔深さとともに相関係数は減少した。したがって、貫入口付近では密度の推定精度が高いが、丸太内部が生材状態にあるため、穿孔深さとともに切り屑の排出抵抗が増加し、推定精度が低下すると考えられた。

(4) 木口面表面粗さプロファイル

木口面を走査した結果、x線デンシトメトリに類似した早材部と晩材部からなるプロファイルを得た。プロファイル中のピークが晩材に相当するかどうかについて、軟x線デンシトメトリによる密度プロファイルを比較して検討したところ両者はほぼ同調しており、ピークが高密度の晩材に起因すると判断した。半

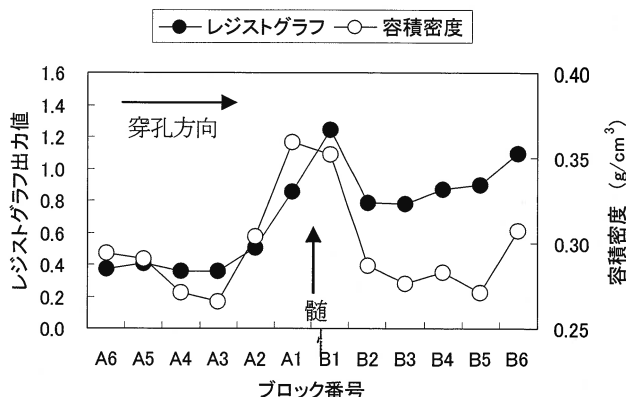


図 1-1-2-4 レジストグラフ出力値の半径方向変化

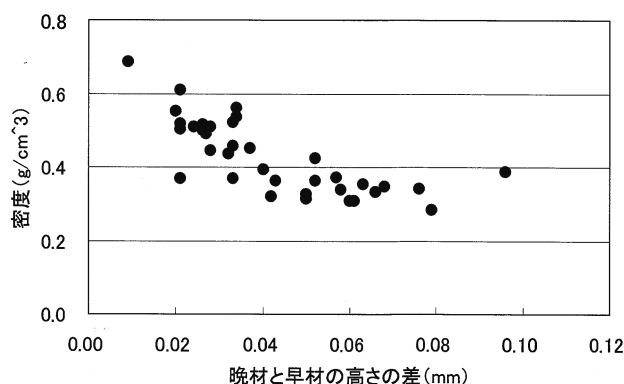


図 1-1-2-5 レーザー変位計による早晩材の
高さの差と密度の関係

径方向の密度変動には早材部の密度変動が大きく関与することから、早晩材の密度差に着目し、表面プロファイル上で晩材部の高さと早材部の高さの差をパラメータとして選び、軟x線デンシトメトリにより得た各年輪の平均密度との関係を検討したところ、早晩材の高さの差と平均密度の間には負の関係が認められた(図1-1-2-5)。0.35g/cm³以下の低密度域では高さの差と密度の関係は明確ではないが、高密度域では高さの差と密度の関係の傾きが大きいことから、髄近くの高密度部を検出できる可能性が示唆された。

(5) 表面硬さと密度の関係

広葉樹材の生材の木口面におけるデュロメータ硬さとブロックの気乾密度との間には正の関係($r=0.91$)があった。また、スギの早材木口面において測定したデュロメータ硬さは早材密度の変化に類似した半径方向の変動を示した。デュロメータ硬さと密度との間に正の相関があること、早材密度と平均密度との間に正の相関があることから早材部のデュロメータ硬さから密度を推定することができると考えられた。

オ 今後の問題点

一般に、密度の変動は年輪内の変動、個体内の部位による変動、林分内の個体間変動の順に小さくなるとされている。本課題が対象とした丸太内の密度分布は個体内の部位による密度の変動であり、より大きな年輪内の密度変動を部位別に平均化したものと考えることができる。したがって、本課題ではピロディンや穿孔抵抗、表面粗さプロファイルなど年輪内の密度変動を平均化できる手法を検討した。これらの手法では年輪内変動の影響が比較的小さかったものの、程度の違いはあっても年輪内の密度変動の影響を受けていると考えられる。測定部位の密度はピロディンによって定量的に求めることができたが、その他の方法による丸太内の密度変動の推定は定性的には可能であったが、定量化には問題が残った。今後、丸太内密度変動を定量的に評価するためには、年輪構造の影響を軽減するための測定条件を検討することが必要である。

カ 要約

スギの材質特性を原木段階で判定することができれば、丸太を用途別に選別して製材し、乾燥することにより、効率的にスギ材を利用することができると考えられる。様々な材質特性の中でも、密度は乾燥速度や乾燥による割れや狂いなどの欠点の発生に加え、製材の強度的性質にも影響を与える重要な因子である。スギ丸太については、密度の個体間の変異、丸太内の密度分布などをふまえて丸太内の密度分布測定手法や原木丸太の選別法の開発が必要とされている。本課題では、乾燥効率を踏まえたスギの材質特性を原木段階で判定するために、スギ丸太の平均密度の推定及び丸太内の密度分布を推定する方法を開発することを目的とした。丸太密度の測定にはピロディンを用い、丸太内の密度変動を推定する手法としてレジストグラフによる穿孔抵抗、表面粗さ計による切削面プロファイル、デュロメータ硬さを用いた方法を試みた。ピロディンを用いてスギ材の密度の推定を行う場合の測定条件を確立した。樹種や品種が異なってもピロディンの打ち込み深さと密度との間に負の関係があることを明らかにし、ピロディンの打ち込み深さから打ち込み部の密度を推定することが可能となった。また、ピロディンの打ち込み深さと丸太平均密度との間にも負の相関があり、その回帰式($y=0.58-0.011x$)から丸太密度を推定した場合の推定値の95%信頼区間は $\pm 0.05\text{g/cm}^3$ となり、丸太側面でのピロディン打ち込み深さの測定により、原木丸太のグループ分けが可能であると考えられた。これは密度による原木丸太の選別を行う上で、有効な手法となりうると考えられる。

(森林総合研究所木材特性研究領域 藤原 健、山下香菜、鈴木養樹)

(森林総合研究所構造利用研究領域 長尾博文、加藤英雄、井道裕史)

(元森林総合研究所、現京都大学農学研究科 岡田直紀)

(3) 部材の強度性能確保を目的とした非破壊手法による原木丸太の用途判別技術の開発

ア 研究目的

現在、製材用の原木丸太は径級や形態に基づいて仕分けされている。しかし、原木丸太から構造物材料として利用される製材品や集成材用ラミナ等を採材するとき、性能規定化が進む今後はその原木丸太についても、強度を想定した仕分け方法が求められていく。また、低コストでの木材乾燥を実現するには、乾燥前の製材品、さらに原木丸太の段階で水分状態を把握し、それを基に仕分けした後に乾燥することは合理的と思われる。

そこで、本課題では、スギ材を対象に、原木丸太の段階で非破壊的手法によって測定したヤング係数および水分状態に基づいた、用途別原木丸太選別技術を開発することを目的とし、その有効性について検証を行った。また、原木丸太の段階で、木取りされる各製材品の強度性能を高精度で推定することを目的として、“原木丸太のヤング係数分布モデルに基づいた製材品の強度性能推定法”をスギへ適用することの可能性についても検討した。

イ 研究方法

(1) 栃木県産スギ丸太（末口径：26～34cm、材長：365cm）を60本入手し、縦振動法によるヤング係数を測定した後、平角（仕上がり断面寸法：105mm×210mm）に製材した。その後、人工乾燥と天然乾燥によって乾燥した後、曲げ破壊試験を行った。曲げ破壊試験は、支点間距離を3500mm、支点と荷重点間距離を1200mmの4点荷重方式で実施した。なお、丸太を仕分けするための強度および水分状態のパラメータとして、それぞれ縦振動法によるヤング係数とみかけの密度を用いた。

(2) 愛媛県産スギ丸太55本を用いて、丸太時に実測した末口径(R)、縦振動法によるヤング係数($E_{fr_{Log}}$)、および木取りされた製材品(断面寸法：30mm×110mm、試験体数：505本)の髄からの距離(r)をパラメータとして、製材品のヤング係数推定値($E_{fr_{timber}}$)を算出し、実測した製材品のヤング係数と比較した。また、すべての製材品について縦引張り試験(チャック間距離：1700mm)を実施し、ヤング係数と同様に、原木丸太段階で縦引張り強度を推定することの可能性について検討した。

ウエ 結果と考察

(1) すべての丸太について測定したみかけの密度（図1-1-3-1）の中間値（752kg/m³）を境界値として2つのグループ、すなわち高密度グループと低密度グループごとに仕分け、これらの丸太から製材された平角の乾燥前及び乾燥後の含水率分布を2グループごとに図1-1-3-2に示した。低密度グループでは生材平角のほとんどの含水率が100%を下回っているのに対し、高密度グループでは100%aを平均値として分布している。したがって、丸太の段階におけるみかけの密度は、製材後生材状態での平角のみかけの密度を把握することが可能であることが明らかになった。ま

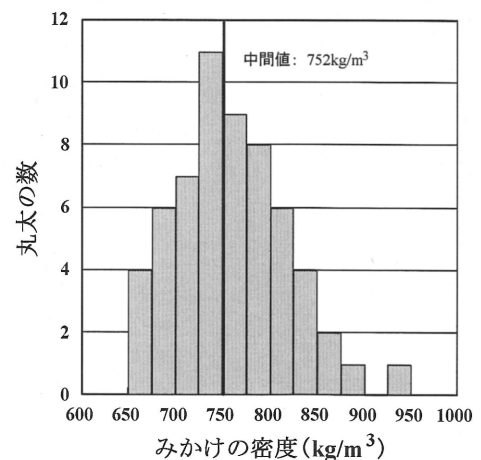


図 1-1-3-1 スギ丸太のみかけの密度分布

た、高密度グループの丸太から製材された平角は低密度グループのそれに比べて、乾燥後の含水率が高いものが多くみられた。すなわち、原木丸太の段階におけるみかけの密度は、製材された平角の乾燥効率を考慮して仕分ける際の有効なパラメータであることが示唆された。なお、高密度グループの丸太のヤング係数の平均値は 7.37kN/mm^2 であり、低密度グループの 6.65kN/mm^2 に比べて約11%高い値を示している。これは、丸太のみかけの密度が水分状態のみでなく、実質の密度にも影響を受けていることに起因するものと思われる。

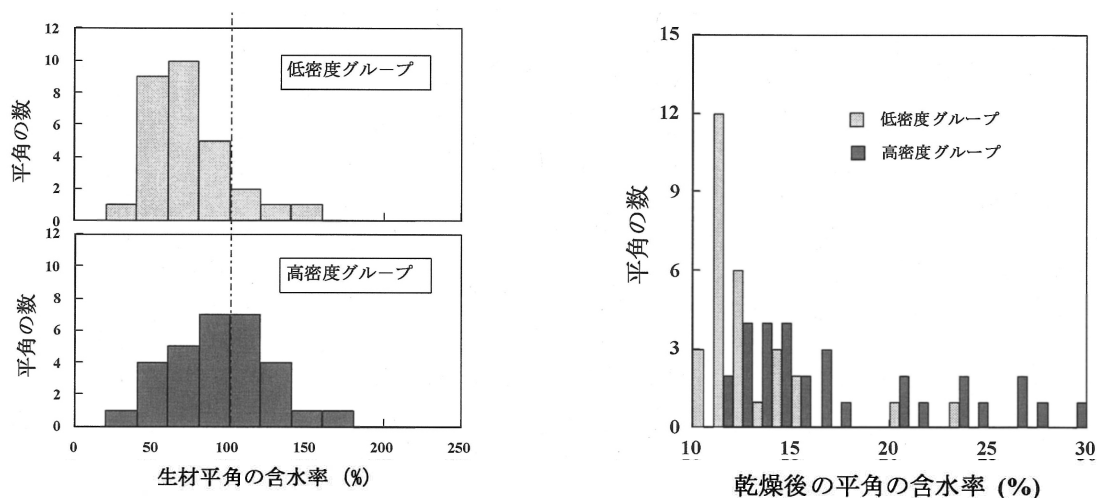


図 1-1-3-2 丸太時の密度グループでみたスギ平角の乾燥前（生材）及び乾燥後の含水率分布

丸太の縦振動法によるヤング係数と平角の曲げヤング係数との関係を図1-1-3-3に示した。原木丸太の段階における縦振動法によるヤング係数によって平角の曲げヤング係数を評価できることが明らかになった。これらの結果から、乾燥と強度のパラメータとしてみかけの密度及び縦振動法によるヤング係数を基に、原木丸太の用途選別方法のフローの一例を図1-1-3-4に示した。

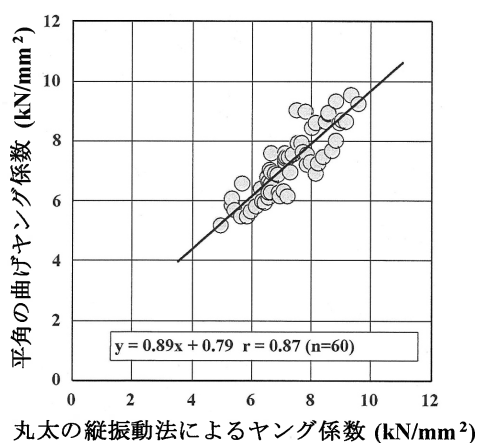


図 1-1-3-3 丸太の縦振動法によるヤング係数と平角の曲げヤング係数との関係

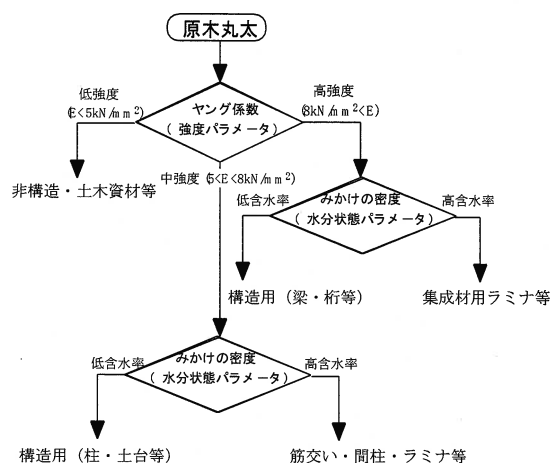


図 1-1-3-4 原木丸太の用途判別フローの一例

(2) 一般に、スギ等の丸太内部において、ヤング係数は髄から樹皮側に向かってある一定の年

輪あるいは距離まで増加し、その後ほぼ安定した値を示すことが知られている。図1-1-3-5はこの傾向を模式化したものであり、前者を未成熟材部、後者を成熟材部という。まず、実用性を考慮し、髄から一定距離を未成熟材部と成熟材部との境界とし、2つの直線にモデル化した。次に、平均直径が約33cmの供試丸太から木取りした無欠点小試験体の縦振動法によるヤング係数を測定し、図1-1-3-6に示したように、ヤング係数と髄からの距離との関係を導いた。その結果、未成熟材部の直線の傾きとして0.028が得られ、未成熟材部と成熟材部との境界は髄から80mmの位置であった。

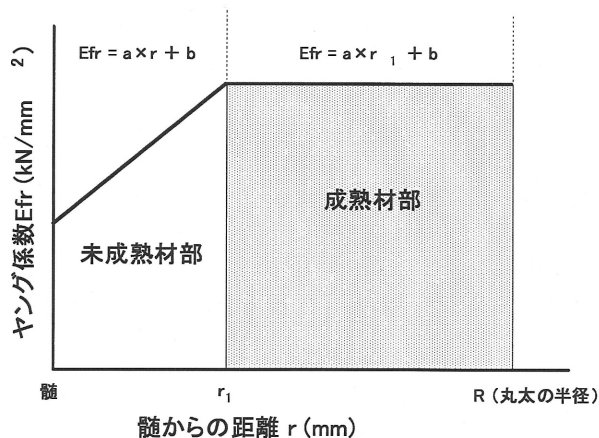


図 1-1-3-5 丸太横断面におけるヤング係数分布の模式図の用途判別フローの一例

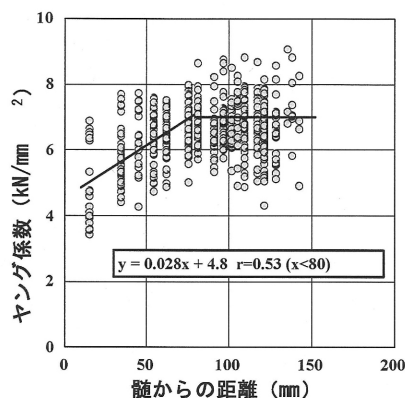


図 1-1-3-6 丸太横断面におけるヤング係数の変動

一方、丸太のヤング係数については、固有振動数と密度から簡便にヤング係数が測定できる縦振動法（写真1-1-3-1）を適用することが有効であり、この方法で得られる値は横断面内に分布するヤング係数の平均値を表すことが知られている。そこで、これらを基に、丸太内半径方向におけるヤング係数の分布を表す推定式（1）、（2）を作成した。すなわち、本推定式によって、図1-1-3-7に示したような丸太の半径（R）およびヤング係数（ Efr_{Log} ）から髄から任意の距離（r）に位置する製材品のヤング係数（ Efr_{Timber} ）を求めることができる。

$$Efr_{Timber} = 0.028 \times \left(r - 80 + \frac{80^3}{3R^2} \right) + Efr_{Log} \quad (r < 80) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$Efr_{Timber} = 0.028 \times \frac{80^3}{3R^2} + Efr_{Log} \quad (r \geq 80) \quad \dots\dots\dots (2)$$

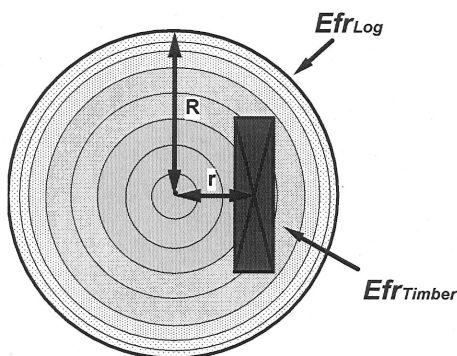


図 1-1-3-7 ヤング係数推定法

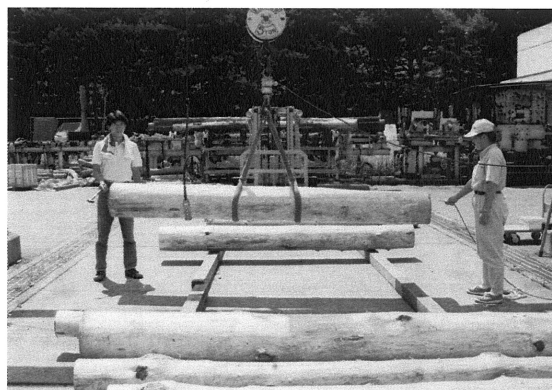


写真 1-1-3-1 丸太の縦振動の固有振動数測定の様子

これらの推定式の精度を検証するため、製材品のヤング係数推定値と実際にスギ丸太から木取りした製材品のヤング係数実測値とを比較した（図1-1-3-8）。なお、一般に原木丸太は生材状態であるのに対して、製材品は気乾状態で測定されることになるので、まずスギ製材品のヤング係数に及ぼす含水率の影響を明らかにし、その結果を基に、製材品のヤング係数推定値は上記の式から得られた値を含水率15%に補正している。その結果、図1-1-3-8に示したように、製材品のヤング係数の推定値と実測値とはほぼ一致しており、本式を用いることによって、原木丸太の段階で、丸太内部の各位置から採材される製材品のヤング係数を高精度で推定できることがわかった。

また、これと同様に、原木丸太段階で縦引張り強度を推定することの可能性についても検討した。その際、製材品のヤング係数推定値から縦引張り強度推定値を算出する式として、「製材品の強度性能に関するデータベース」データ集〈5〉（強度性能研究会、2001.5）に収められているヤング係数（ Efr ）と縦引張り強度（ σ_t ）との回帰式(3)を用いた。

$$\sigma_t = 3.53Efr - 0.92 \quad r=0.62 \quad (n=883) \quad (3)$$

推定式(1)、(2)で算出された製材品のヤング係数推定値を式(3)に代入して得られた縦引張り強度推定値と、実測した製材品の縦引張り強度との関係を図1-1-3-9に示した。図1-1-3-9は図1-1-3-8よりも予測精度が低いが、ここで用いた式(3)の回帰直線の相関係数が0.62程度であることを考慮すれば、製材品のヤング係数によって推定するのとはほぼ同等の精度で、原木丸太段階で製材品の縦引張り強度を推定できる可能性が認められた。

次に、図1-1-3-8で使用したデータを元に、丸太段階で求めた製材品のヤング係数推定値の分布と製材後に実測した製材品を実測したヤング係数実測値の分布を図1-1-3-10に示した。両ヤング係数はほぼ同様の分布であることが認められる。すなわち、丸太の半径、ヤング係数、及び製材品の寸法と木取り方法が明らかであれば、丸太の段階で、製材品のヤング係数の分布を把握できる。したがって、集成材用ラミナのように、集成材の等級にしたがった構成による各機械区分の在庫管理が可能になり、ラミナの歩留まりを向上させることに有効であることが示唆された。

オ 今後の問題点

本研究で開発した“原木丸太のヤング係数分布モデルに基づいた製材品の強度性能推定法”では、供試した試験体の試験結果に基づいて、未成熟材部と成熟材部との境界（髄からの距離）、及び未成熟材部における髄からの距離と縦振動法によるヤング係数との関係から求めた直線式の傾きを決定し、モデル化した。さらに、本推定法の汎用性を確認するために、異なる産地のスギへの適用性を

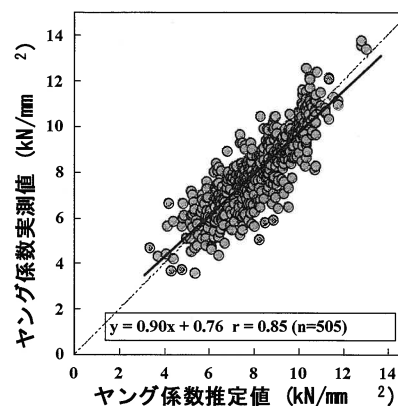


図 1-1-3-8 製材品のヤング係数の推定値と実測値との関係

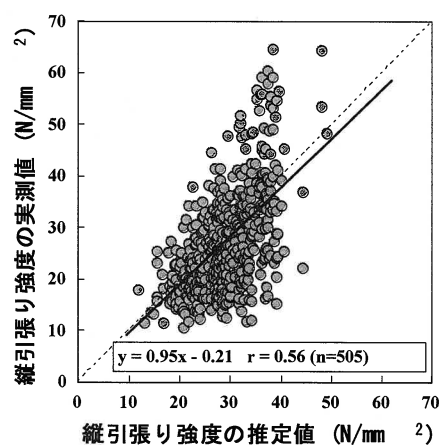


図 1-1-3-9 製材品の縦引張り強度の推定値と実測値との関係

検証し、精度高く推定できることが明らかになった。しかし、同じスギであっても、品種や産地によってこのモデルが異なってくることも想定できないわけでもない。したがって、本推定法を適用する場合には、適用されるスギについてモデル、すなわち前述の境界値と傾きについて確認し、場合によって変更することにも必要になろう。

カ 要約

原木丸太の段階で非破壊的手法によって測定したヤング係数等に基づいて、原木丸太を用途別に選別する技術を開発した。まず、強度および乾燥効率を評価するための非破壊パラメータとして原木丸太の縦振動法によるヤング係数およびみかけの密度

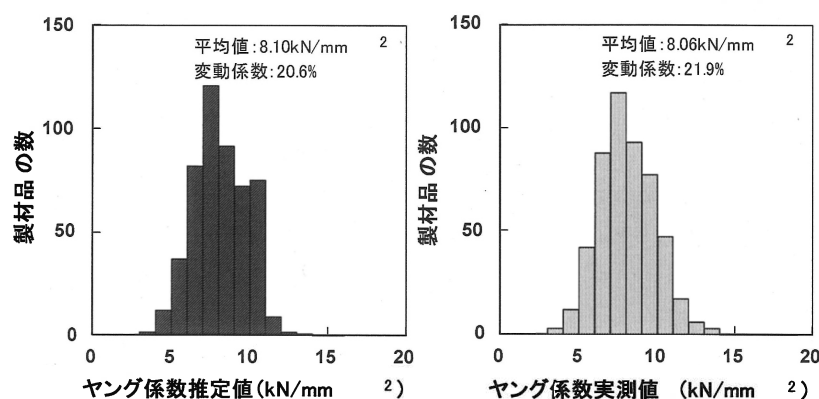


図 1-1-3-10 ヤング係数推定値と実測値との分布の比較

度を採用し、その丸太から平角を木取りし、その後平角を人工乾燥し、ヤング係数を測定することによって有効性について検討した。その結果、原木丸太の縦振動法によるヤング係数は平角の曲げヤング係数を評価できた。また、丸太段階におけるみかけの密度は、製材後の生材状態での平角のみかけの密度を反映し、みかけの密度の高い丸太から製材された平角は低い丸太からのものに比べて、人工乾燥後の含水率の高いものが多くみられた。したがって、原木丸太のヤング係数は製材品の強度性能を評価するための、また、みかけの密度は乾燥効率を考慮するための有効なパラメータであることがわかった。

次に、原木丸太の段階でヤング係数分布モデルに基づいた製材品の強度性能推定をスギへ適用することの可能性についても検討した。原木丸太の縦振動法によるヤング係数と半径、および木取りされる製材品の位置（髄からの距離）をパラメータとした同推定法で得られた製材品のヤング係数推定値は、実測されるヤング係数をより高精度に推定できることがわかった。さらに、この方法で得られた製材品のヤング係数推定値を既往の研究で得られているヤング係数と縦引張り強度との回帰式に代入することによって、製材品のヤング係数によって推定するのとはほぼ同等の精度で、原木丸太の段階で製材品の縦引張り強度を推定できる可能性が認められた。

キ 引用文献

1) 長尾博文、鷲野剛三、加藤英雄、田中俊成：樹幹内のヤング係数分布に基づいた製材品の強度推定- カラマツへの試み-、木材学会誌、49(2)、59-67 (2003)

(森林総合研究所構造利用研究領域 長尾博文、加藤英雄、井道裕史)

(4) 製材歩止り及び製品用途を考慮した原木丸太の選別・仕分け技術の開発

ア 研究目的

丸太を適正に仕分けして最適な木取りで製材することは、効率的な製材生産に不可欠である。一般に、丸太はその形質によって仕分けされているが、建築材料としての品質性能に対する要求が高くなった昨今において、製品の用途に求められる性能や含水率に応じて丸太段階で仕分けすることができれば、より効率的な製材生産および乾燥の効率化が可能となる。

製材歩止りおよび製材品用途を考慮したスギ丸太の選別・仕分け技術を開発するために、製品用途として求められる寸法と品質に応じた製材品を生産するための丸太の選別・仕分け技術を検討するとともに、標準的な木取りパターンを設定して試験製材を行い、その製材歩止りを検討する。

イ 研究方法

(1) 含水率による丸太の仕分けと試験製材

栃木県産スギ中丸太 58 本を供試丸太とし、日本農林規格(JAS)に準じて等級格付けを行うとともに、重量を測定し、(1)式により丸太材積、(2)式により見かけの密度を求め、(3)式により含水率を推定した。

$$V = \frac{(l_t^2 + 2l_m^2 + l_b^2 + l_t l_m + l_m l_b) \times L}{24\pi} \quad \dots (1)$$

$$\rho = \frac{g}{V} \quad \dots (2)$$

$$u_e = \frac{\rho}{0.374} \times 0.374 \times 100 \quad \dots (3)$$

ここで、 $V(\text{cm}^3)$ は丸太材積、 $l_t(\text{cm})$ は末口の周囲長、 $l_m(\text{cm})$ は中央部の周囲長、 $l_b(\text{cm})$ は元口の周囲長、 L は材長(cm)、 ρ は見かけの密度(g/cm^3)、 u_e は推定含水率(%）、 g は丸太の重量(g/cm^3)、 $0.374(\text{g}/\text{cm}^3)$ は過去の研究¹⁾で求めたスギの平均全乾密度。

推定含水率により丸太を2グループに仕分けし、含水率の高いグループの丸太については乾燥のしやすい比較的断面の小さい製材品(集成材要ラミナ)を主製品とする木取りを採用し、含水率の低いグループの丸太については比較的断面の大きい製材品(正角)を主製品とする木取りを採用して試験製材を行い、その製材歩止り、製材品の含水率と曲がりを検討した。

(2) 節と動的ヤング係数による丸太の仕分けと試験製材

栃木県民有林産スギ中丸太 60 本を供試丸太とし、丸太をまず材面の節の有無により2グループに仕分けし、各々のグループを動的ヤング係数により2グループに仕分けし、それぞれのグループごとに節、動的ヤング係数を考慮した標準木取りを設定し、試験製材を行い、その製材歩止りを検討した。なお、動的ヤング係数は縦振動法により求めた。

$$E_{fr} = 4 \times L^2 \times fr^2 \times \rho \quad \dots (4)$$

ここで、 $E_{fr}(\text{GPa})$ は動的ヤング係数、 $fr(\text{Hz})$ は縦振動の一次固有振動数。

主製品を造作材、集成材用ラミナ、平角、正角、板とした標準木取りを設定して試験製材を行い、製材歩止り、主製品の含水率、動的ヤング係数および曲がりについて検討した。

(3) 含水率と動的ヤング係数による丸太の仕分けと試験製材

まず丸太の動的ヤング係数と含水率を考慮した4パターンの標準木取りを設定した。次に、丸太を動的

ヤング係数の順に並べて奇数番目(グループA)、偶数番目(グループB)の2グループに分け、グループAでは動的ヤング係数と含水率を考慮してそれぞれの標準木取りに丸太を割り振り(仕分けし)、グループBでは無作為にそれぞれの標準木取りに丸太を割り振った。それぞれを標準木取りで試験製材を行い、その製材歩止り、主製品の含水率、動的ヤング係数および曲がりについて、グループ(仕分けの有無)による差異を検討した。

ウエ 結果と考察

(1) 含水率による丸太の仕分けと試験製材

含水率による丸太の仕分けでは、見かけの密度と過去のデータの平均全乾密度(0.374g/cm³)より丸太含水率を推定した結果、丸太の推定含水率が100%を中心にほぼ正規分布していた(図1-1-4-1)。そこで、推定含水率が100%以上と以下の2グループに仕分けし、100%以下のグループには12cm正角を主製品とする木取りを、100%以上のグループには2.4cm厚の板を主製品とした木取りを用いて試験製材を行った。その結果、形量歩止りと価値歩止りは、100%以下のグループでそれぞれ58.0%、67.1%で、100%以上のグループでそれぞれ55.5%、55.9%であった。丸太の含水率は製材歩止りに影響を与えないが、2つのグループ間で製材歩止りに差が出たのは木取りの違いによるものである。挽き角を主製品とする場合と板類を主製品とする場合では、断面積の大きい挽き角を主製品とするほうが鋸の挽き道による歩止りの低下が板類を主製品とするより少なく、形量歩止りが高くなったと考えられる。推定含水率100%以下のグループの価値歩止りが高くなった理由としては、挽き角の価格指数が板類より高く設定されていること、比較的

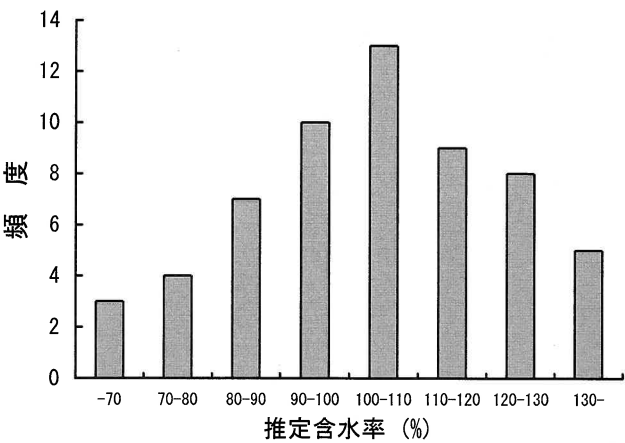


図1-1-4-1 推定含水率の頻度分布

品質のよい丸太が推定含水率100%以下のグループに多く含まれたことなどが考えられる。製品の曲がり(矢高)の平均値は、乾燥によりbowが挽き材直後より減少したが、crookがわずかながら増加した(表1-1-4-1)。乾燥時に栈積みに重石をかけたため、bowが若干矯正されたと考えられる。丸太の推定含水率とその丸太から生産された製材品の含水率の平均値には相関関係が認められた(図1-1-4-2)。これにより、丸太の見かけの密度から推定した含水率から製品の平均含水率を推定でき、丸太の仕分けのパラメータとなることが示唆された。

表1-1-4-1 製材品の曲がり(含水率により丸太を仕分けしたもの)

数量	挽き材直後						乾 燥 後					
	Bow			Crook			Bow			Crook		
	平 均	標準偏差		平 均	標準偏差		平 均	標準偏差		平 均	標準偏差	
2.7×13.0	333	13.1	6.06	3.5	2.41		7.3	5.1035		4.5	3.6134	
5.0×11.2	100	13.5	4.62	3.7	1.82		7.4	3.9338		4.4	2.1419	
13.0×13.0	23	3.9	3.15	2.5	1.81		2.5	1.5036		3.0	2.4768	

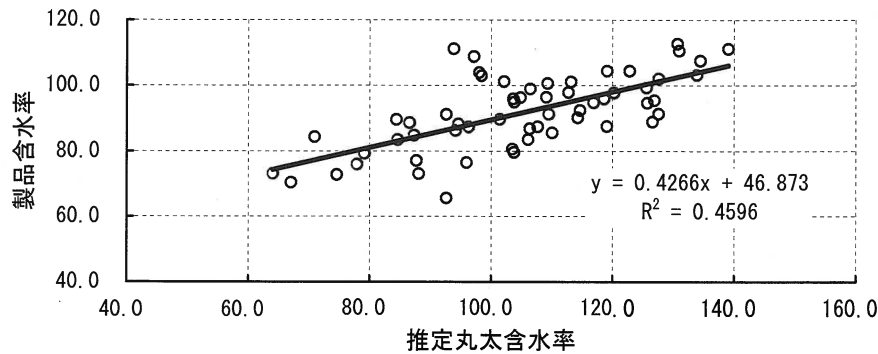


図1-1-4-2 推定丸太含水率と製品含水率の関係

(2) 節と動的ヤング係数による丸太の仕分けと試験製材

節と動的ヤング係数による仕分けに使用した供試丸太の剥皮後の推定含水率は 61.1～137.7% (平均 103.1%)、動的ヤング係数 E_{fr} は 6.55～10.76GPa (平均 8.57GPa) (図 1-1-4-3) であった。供試丸太の動的ヤング係数 E_{fr} を剥皮前後で比較するとほとんど等しかった (図 1-1-4-4)。この結果は、剥皮後のほうが動的ヤング係数が高くなるというニホンカラマツの結果²⁾とは異なった傾向を示している。樹種によって傾向が異なるのかは試験体数が少ないため明言することはできない。図 1-1-4-5 に示す標準木取りで試験製材を行った結果、粗挽き製材の形量歩止りと価値歩止りはそれぞれ、廻し挽き・板木取りで 64.0%と 82.7%、廻し挽き・角木取りで 68.1%と 91.4%、杵挽き・板木取りで 64.2%と 65.7%、杵挽き・角木取りで 67.4%と 78.0%であった (表 1-1-4-2)。隣接 2 材面以上無節の丸太において廻し挽きを採用し、外周部からいわゆる役物と呼ばれる価格指数の高い造作材を挽いたことによりそれらで価値歩止りが高くなっている。これは過去の研究⁴⁾と同じ傾向を示している。図 1-1-4-6 は丸太の動的ヤング係数と製材品のヤング係数の関係を示しており、ある程度の相関関係が認められ、過去の結果³⁾より相関が高かった。丸太のヤング係数が仕分けのパラメータとなりうるであろう。また、粗挽き製材直後の製材品の平均曲がり率は bow と crook がそれぞれ、3.0cm 厚で 0.41%と 0.09%、3.5cm 厚で 0.34%と 0.08%、5.0cm 厚で 0.35%と 0.08%、13.0cm 厚で 0.07%と 0.05%であった。

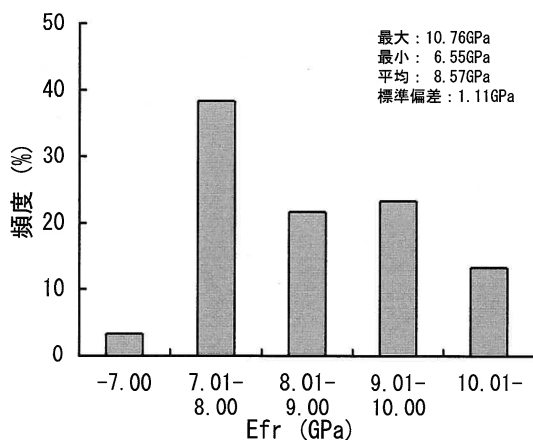


図1-1-4-3 剥皮後丸太のEfrの頻度分布

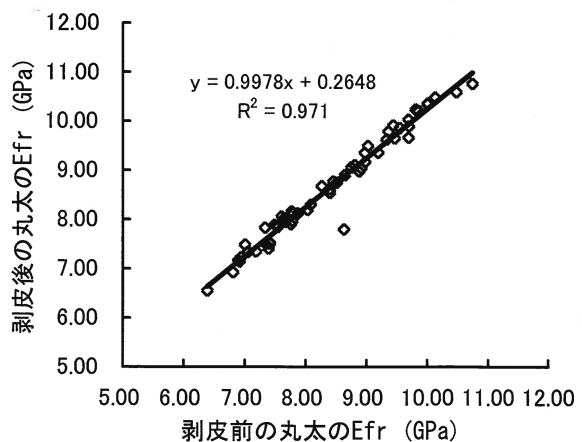


図1-1-4-4 剥皮前後の丸太のEfr

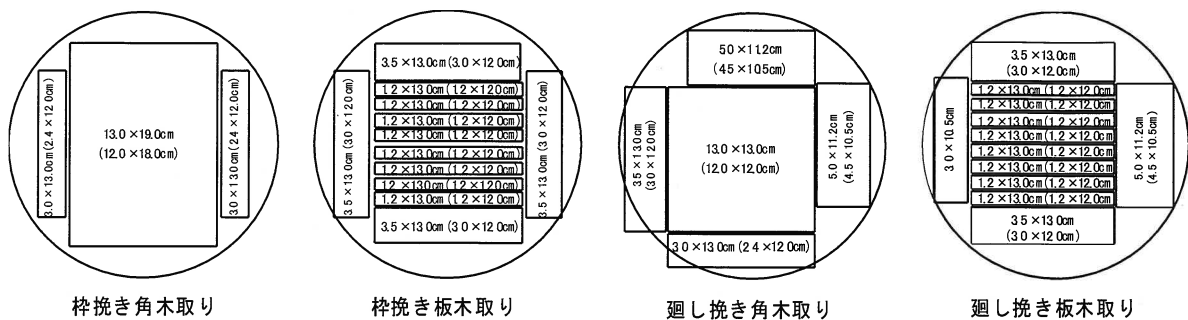


図1-1-4-5 丸太材面の品質とヤング率を考慮した標準木取り

表1-1-4-2 製材歩止り (%)

木取り	本数	形量	価値
廻し挽き・板	24	64.0	82.7
廻し挽き・角	21	68.1	91.4
粗挽き・板	8	64.2	65.7
粗挽き・角	7	67.4	78.0

注) 粗挽きの製材歩止り

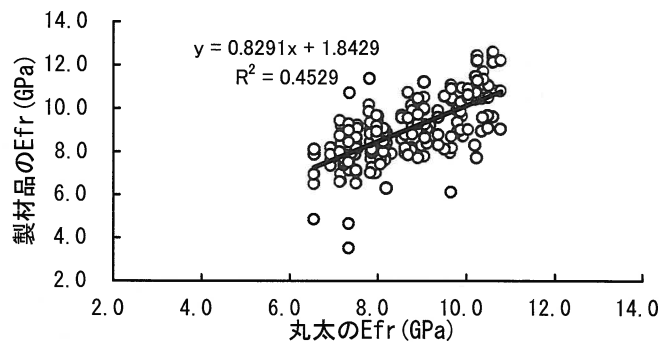


図1-1-4-6 丸太のEfrと製材品のEfrの関係

(3) 含水率と動的ヤング係数による丸太の仕分けと試験製材

含水率と動的ヤング係数による丸太の仕分けに用いた供試丸太の剥皮後の推定含水率は 55.8～119.5% (平均 89.7%)、動的ヤング係数 E_{fr} は 4.6～10.2 GPa (平均 7.1 GPa) であった (表 1-1-4-3)。グループ A では、標準木取りの主製品を、強度が低く含水率の低い丸太で正角(木取り I)、強度が低く含水率の高い丸太で平割(木取り II)、強度が高く含水率の低い丸太で平角(木取り III)、強度が高く含水率の高い丸太でラミナ(木取り IV)とした (図 1-1-4-7, 1-1-4-8)。粗挽き製材の形量歩止りと価値歩止りは、グループ A でそれぞれ 66.0%、74.6%、グループ B でそれぞれ 64.9%、71.0%と明確な差は生じなかった (表 1-1-4-4)。同程度の形質の丸太を同じ標準木取りで製材すれば、形量歩止りと価値歩止りはほぼ同じ結果となる。また、粗挽き製材直後の製材品の bow と crook の平均矢高はそれぞれ、 2.6×11.2 cm で 13.2 mm と 3.6 mm、 3.0×13.0 cm で 12.1 mm と 3.9 mm、 3.5×11.2 cm で 12.5 mm と 3.3 mm、13.0 cm 厚で 4.2 mm と 3.4 mm であった。粗挽き製材直後の正角と平角の平均含水率は、グループ A でそれぞれ 70.8%、73.5%、グループ B でそれぞれ 74.5%、80.3%と推定含水率によって比較的低い含水率に仕分けしたグループ A のほうが低くなる傾向を示した (図 1-1-4-9)。丸太の含水率による仕分けの影響が現れている。粗挽き製材直後の 3.0×13.0 cm 材の動的ヤング係数 E_{fr} の頻度分布は、比較的高いヤング率に仕分けしたグループ A のほうがグループ B より高いヤング係数の頻度が高かった (図 1-1-4-10)。丸太の動的ヤング係数による仕分けの影響が認められる。これらの結果から、丸太段階で含水率や強度を考慮した仕分けを行い、それに適した製材木取りで製材することにより、用途に適した製材を効率よく製材できる可能性が示唆された。

表1-1-4-3 供試丸太*の推定含水率とヤング係数

グループ	推定含水率(%)		ヤング係数(Gpa)	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差
A	90.3	15.51	7.2	0.94
B	89.0	11.61	7.1	0.91
全体	89.7	13.60	7.1	0.92

表1-1-4-4 粗挽き製材の平均製材歩止り

木取り	グループA		グループB	
	形量(%)	価値(%)	形量(%)	価値(%)
I	65.9	76.9	65.5	76.5
II	65.9	69.3	63.1	63.3
III	66.9	76.5	66.4	75.7
IV	65.1	69.9	64.6	68.8
全体	66.0	73.1	64.9	71.1

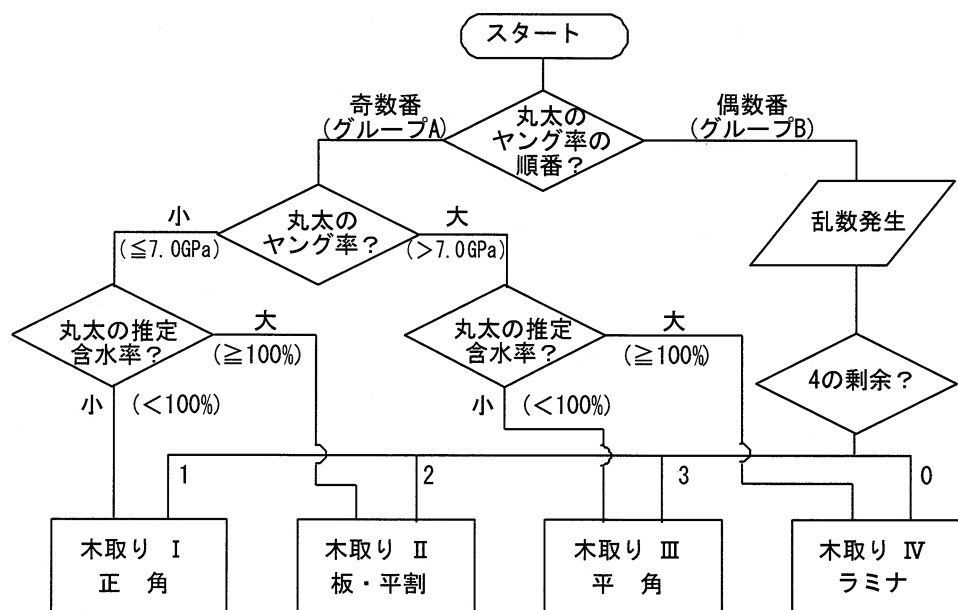


図1-1-4-7 含水率と動的ヤング率による丸太の仕分け方法

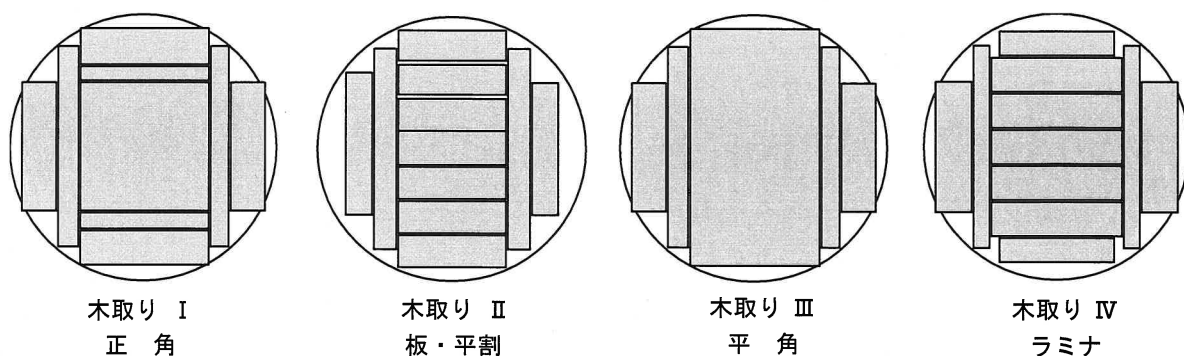


図1-1-4-8 丸太含水率と動的ヤング係数を考慮した標準木取り

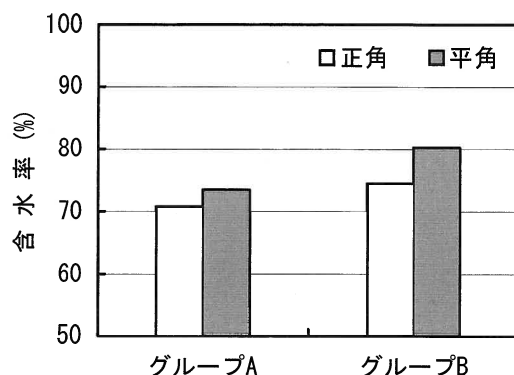


図1-1-4-9 挽き材直後の挽き角の平均含水率
注) 高周波型含水率計により測定

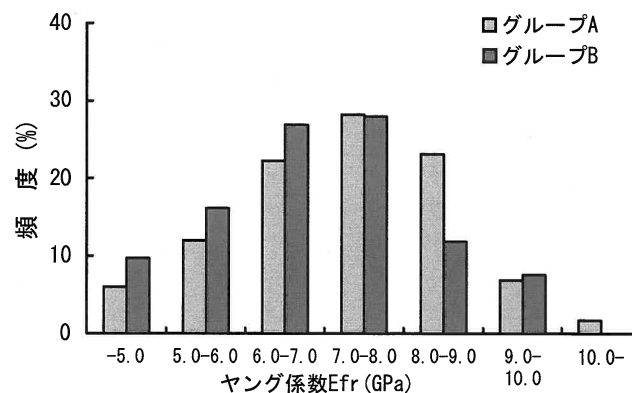


図1-1-4-10 30×130mm材の挽き材直後のヤング係数の分布

オ 今後の問題点

より効率的な製材生産のためには、丸太の含水率およびヤング率を考慮して仕分けし、径別の標準木取りを設定する必要があるが、そこまでには至っていない。また、どの段階で仕分けをするのが有効か、例えば原木市場なのかそれとも製材工場なのか、検討する必要がある。さらに、仕分けから製材、乾燥、出荷までのシステムを工場レイアウトを含めて検討することが重要となってくる。

カ 要約

製材歩止りおよび製材品用途を考慮したスギ丸太の選別・仕分け技術を開発するために、製品用途として求められる寸法と品質に応じた製材品を生産するための丸太の選別・仕分け技術を検討するとともに、標準的な木取りパターンを設定して試験製材を行い、その製材歩止りを検討することを目的とした。丸太含水率による仕分け、丸太材面品質と動的ヤング係数による仕分け、丸太含水率と動的ヤング係数による仕分けを行い、標準木取りを設定して製材試験を行った結果、丸太段階で含水率や動的ヤング係数を考慮した仕分けを行い、それに適した製材木取りで製材することにより、丸太の含水率や動的ヤング係数が製材品のそれらに反映された。これらの丸太の仕分け方法を用いることにより、用途に適した製材品を効率よく製材・乾燥できる可能性が示唆された。

キ 引用文献

- 1) 松村ゆかり他：木材工業，59(12)，591-594 (2004)
- 2) 高田克彦、平川泰彦：木材工業，55(8)，352-356 (2000)
- 3) 中村昇，名波直道，有馬孝禮：木材工業，50(5)，215-219 (1995)
- 4) 村田光司，西村勝美，藤原勝敏：木材工業，44(1)，13-18 (1989)

(森林総合研究所加工技術研究領域 村田光司、伊神裕司、松村ゆかり)

2. 乾燥過程の材質変化モニタリングによる装置制御技術の開発

(1) 乾燥過程における材の乾燥経過モニタリング手法の開発

ア 研究目的

乾燥前や乾燥後では、あらゆるセンサー技術が使えるため、木材の状態の計測は乾燥中に比べれば容易であり研究は行いやすいため、やがて信頼性の高い計測法が構築されるものと考えられる。しかし特に高温乾燥や高周波減圧乾燥のような高速乾燥システム下では、高温、減圧、強力な電場など、電氣的計測には悪条件下であるため、従来のモニタリング方法では困難であるだけでなく、乾燥中に被乾燥材を手にとって見るができないため乾燥状態を把握しにくい。したがって高速乾燥システム下で、木材を正しく精度良くしかも安全に乾燥するためには、乾燥中の木材から何か情報を取り出し、その情報を解析することによって、含水率や乾燥応力をモニタリングする必要がある。そのためには何が適当であるのかを見いだし、それによって乾燥状態を把握する技術確立し、木材乾燥技術の向上に資することを目的とする。また高温乾燥では高温高圧下にさらされることになるので、材質変化を考慮しなければならない。特に強度的性質、耐久性が重要と考えられたのでこれについても調べることに、これらに対するモニタリング指標として材色を取り上げ、その有効性を検討することも目標とした。

また高速乾燥の場合、初期含水率のばらつきが大きいと仕上げ含水率のばらつきも大きいとされている。したがって、いくらモニタリング技術を確立しても、初期含水率や乾燥速度が異なるものが混在するとその効果が有効に働かないことが考えられるので、前もって初期含水率や乾燥速度を選別する手法の開発をすることも目的とした。

イ 研究方法

(1) 選別：厚さ4cm 幅12cm、長さ40cmのスギ板材を試験材とした。重量を測定した後画像解析により心材率を求めた。その後65℃、69%の条件ですべての材がおおむね平衡になるまで乾燥を行い乾燥速度と初期重量、乾燥速度と心材率の間のクラスター解析を行った。また乾燥を途中で止め含水率分布についてクラスター解析を行った。

(2) 含水率のモニタリング：断面6cm×12cmのスギ柱材を使用して、高温乾燥を行った。高温乾燥は乾燥終了時まで高温を維持する方法(乾球温度120℃、湿球温度90℃、以下120A)と、途中から温度を80℃に下げる方法(120B)で行った。コントロールとして乾燥温度80℃での実験も行った。乾燥中、温度と圧力を同時に同位置で測定するセンサーを作成し、両者を測定した。圧力はすべて水蒸気分圧として、相対湿度を求め、測定した温度と求めた相対湿度から平衡含水率を使って含水率を推定した。その後その場所の含水率を全乾法で求め比較を行った。

(3) 材質：乾燥による材色変化、強度変化、耐蟻性の変化を定法によって調べた。

ウエ 結果と考察

(1) 選別の効果

生材密度および心材率と平均乾燥速度についてクラスター解析を行った。2つの乾燥実験における実験結果のクラスター解析および乾燥後の含水率分布を検討した結果、全乾密度が大きくばら

つくため生材密度だけでは良好な選別基準になりえないことが分かった。また心材の含水率が大きく異なるため心材率も単独では選別の基準になり得ないことが分かった。両者を併用することによって、仕上げ含水率が平均化すること、時間の短縮がはかれることが分かった。4 cm 厚の板の場合であるが、生材密度の選別基準は0.8 トン/m³、心材率は40 または50%が今回得られた基準である（図 1-2-1-1）。

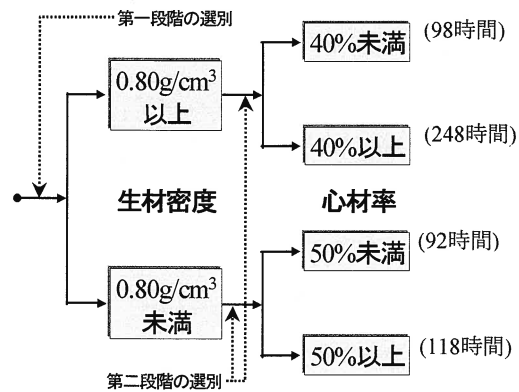


図 1-2-1-1 選別の有効性

(2) 温度と圧力の同時同位置測定による含水率の推定

注：括弧内の時間は15%までになる時間

高周波減圧乾燥、高温乾燥の下では乾燥過程中的の木材内部の圧力は外周より高く外部の空気が材内へ侵入できず、材内圧力は水蒸気のみで維持していると考えられる。すなわち検出される内部圧力は水蒸気分圧 P であり、これと同位置温度に相当する蒸気圧 P_s に対する比から相対湿度 ϕ が求まることになる。温度と相対湿度がわかればそれに相当する平衡含水率が求まる。これを測定位置の含水率とすれば、繊維飽和点以下の含水率が測定できることになる。図 1-2-1-2 は高温乾燥時の材中央部の温度 ($T_{1.2}$) と材内圧力 ($P_{1.2}$) を示す。 $T_{sp1.2}$ は材内圧力に相当する沸点である。10 時間くらいまで材内圧力は空気存在で高くなっているが、それ以降は材内圧力に相当する沸点と測定温度はほとんど同じであり、この間は水蒸気だけで圧力を維持していると考えられる。30 時間くらい経過すると温度がわずかに上昇し、材内の圧力が減少している。それにつれて、材内圧力に相当する沸点も減少している。これは、材内に温度に相当する飽和蒸気圧を維持するだけの水分が無くなったことを示しており、測定位置が繊維飽和点より低くなったと思われる。 $T_{1.2}$ に相当する水蒸気圧と $P_{1.2}$ の比率を相対湿度 ($\phi_{1.2}$) としたのが図 1-2-1-3 である。 $T_{1.2}$ と $\phi_{1.2}$ から平衡含水率を求め、それを含水率としたのが図 1-2-1-3 に示してある。推定含水率は、乾燥後に求めた温度と材内圧力を測定した部分の全乾法含水率とよく一致している。最終年度はさらに多くのデータを集めたが、乾燥直後（まだ木材が熱いとき）の推定含水率は、冷却後の実測含水率より 2-3% 低いものの、冷却の途中で 1.2-1.3% くらいの誤差に留まった。

図 1-2-1-4 は高周波減圧乾燥の結果である。この場合は 3 カ所の含水率を測定している。推定含水率と実測含水率の比較をしたのが図 1-2-1-5 である。何れの位置も推定含水率と実測含水率はよく一致している。高温乾燥においても推定含水率と実測含水率はよく一致した。

以上の結果より乾燥中の材内圧力と温度の同時同位置測定は含水率のインプロセス測定の可能性があることを示す。

高温乾燥中の損傷は主として割れと思われるが、割れが発生しその近傍にセンサーがあれば温度と圧力は変化することが考えられる。温度圧力を同時同位置で測定すると、図 1-2-1-2 に見られるように圧力の方が変動が大きく木材中の情報を鋭敏に捉える可能性があると思われた。しかし圧力変化が生じているときに内部で何が発生しているかまでは特定できなかったのも、温度圧力の変化と木材内部の挙動の関係は今後の課題である。

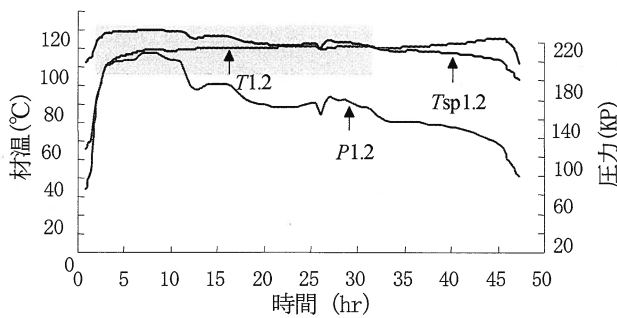


図 1-2-1-2 高温乾燥下での材内圧力、材温の経過

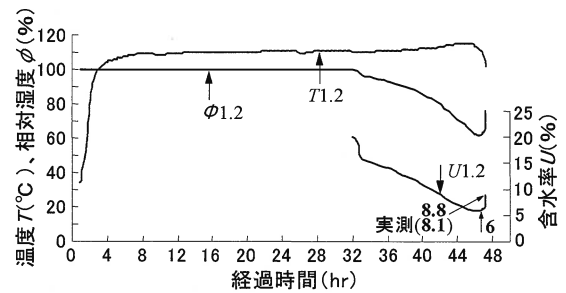


図 1-2-1-3 温度、相対湿度および推定した含水率の経過

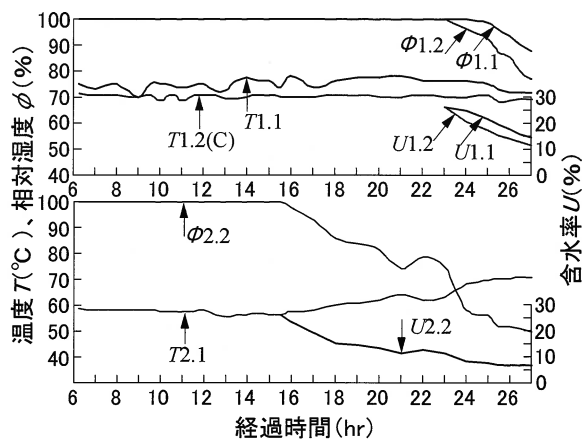
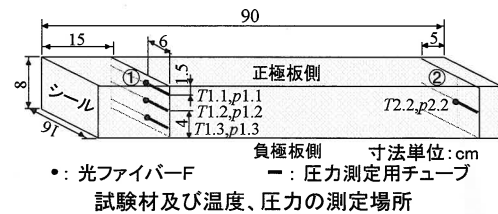


図 1-2-1-4 温度、相対湿度および推定した含水率の経過



乾燥後上図で示す断面①での含水率分布(%)

12.67	10.84	9.76	11.01	14.1	14.15	14.95
11.24	9.33	7.77	7.93	13.5 (15)	10.32	12.0
12.89	13.06	9.24	8.32	10.59	11.4	14.25
16.3	14.07	12.66	12.31	10.3 (11.8)	12.98	18.4
19.71	15.79	21.24	25.58	11.24	31.33	25.0
				16.5 (17.8)		
				23.75		

図 1-2-1-5 推定含水率と実測含水率の比較

(3) 温度と材質変化および化学成分変化

高温で処理すると、よく知られているように、ヘミセルロースの減少、EMCの減少、強度特に衝撃強さの低下があることを確認した。また材色の変化とヘミセルロースの変化とはおおむね一致することも確認した。次に高温乾燥後については次のような変化が確認できた。

材色変化は乾燥温度が 120°C の場合には表面だけでなく、内部まで変化しており、心辺材の差が認識できなくなる。一方 80°C では表面だけで内部の色変化はほとんどなかった。これは材色変化が材質変化に対応しているとすると表面の材色変化を測定しても材質のモニタリングはできないことを示していることになる。また材色変化には空気が影響する場合としない場合がある可能性もある。平衡含水率は 120°C で最後

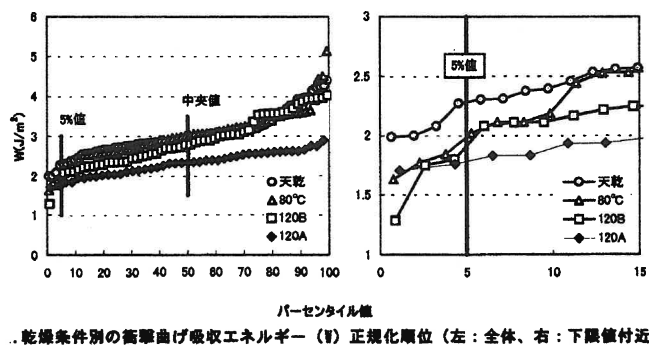


図 1-2-1-6 乾燥条件による衝撃曲げ吸収エネルギーの変化

まで乾燥すると大きく減少した。図 1-2-1-6 に示すように 120℃で最後まで乾燥すると (120A)、衝撃吸収エネルギーが大きく減少した。乾燥初期だけ高温で乾燥し、その後は中温で乾燥すれば (120B) 中央値あたりの低下はあまり見られないが、5%下限値を見ると低下しており、今後実用性への影響、乾燥後の選別の必要性が議論されるべきだろう。なお今回の実験では 80℃での乾燥でも 5%下限値は低下しているという結果を得たので、この取り扱いも今後の検討を待たなければならない。

120℃で最後まで乾燥する (120A) と耐蟻性が低下することもわかった。途中 (12 時間経過後) で乾燥温度を下げると平衡含水率、強度、耐蟻性の変化は少なく、処理時間が材質におよぼす大きな因子となることがわかる。しかし、特に耐蟻性があまり低下しない材もあるので、この差について検討した結果、抽出成分であるフェルギノールの量が多い場合には乾燥温度による耐蟻性の低下が少なく、量が少ないと大きく影響が出ることもわかった。このように乾燥温度だけでなく抽出成分の存在量も耐蟻性に寄与することがわかった。

また、温度圧力の測定に並行して、材質のインプロセス予知指標となる因子の検討を行った。図1-2-1-7は高温乾燥した材のNIRスペクトルの2次微分を示す。1700および1725nmでは天然乾燥に比較してピークが小さくなっており、また1670nmのピークでは大きくなっている。これは、相対的に見てヘミセルロースの減少とリグニンの増加を示している。また、1400～1600nmのピークは変化が無くセルロースは変化がないと思われるので、熱処理による材質変化の従来の知見と合致しており、NIRの利用は材質変化の因子の一つと思われる。

図1-2-1-8は乾燥後の材色変化をみたものである。乾燥時間が長くなるにつれて赤みが減少し黄味が増加する。このような材色変化は木材の吸湿性能や収縮性能、強度的性質にも影響するとと思われるので、材質材色変化も材質変化の指標となりうると思われる。

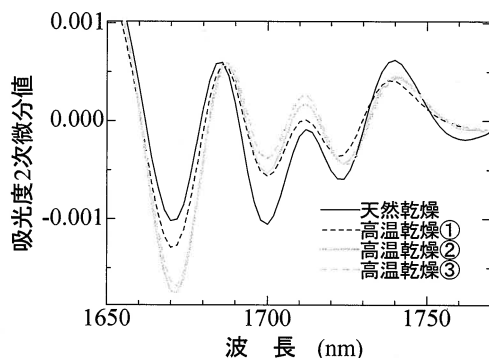


図1-2-1-7 高温乾燥材のNIRスペクトル
2次微分値

1670nm : リグニン由来、1700、1725nm : ヘミセルロース由来

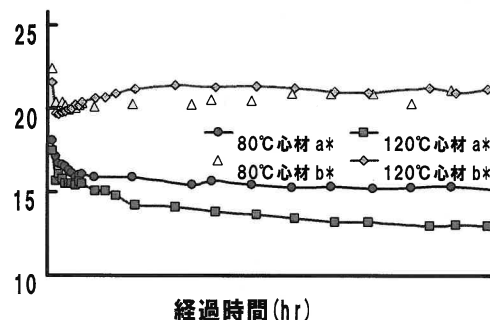


図 1-2-1-8 乾燥中における心材表面の
材色変化

オ 今後の問題点

高速乾燥である高温乾燥や高周波減圧乾燥における含水率測定の可能性を示した。しかし温度と圧力はインプロセスで測定できるが、湿度と含水率は計算をしなければならず、必ずしもインプロセスではない。これを実行できるプログラム作成が必要である。また、100℃以上や減圧下での乾燥では、木材中の圧力はほぼ水蒸気圧を示していると考えてもよいことが分かったが、高温

セット処理乾燥法のように実際の乾燥工程では乾球温度を 100℃以下にする場合の木材内部圧力の低下についての検討が必要になってくる。また、高温高湿処理による平衡含水率の変化、樹種による変化を求めること等が今後の問題点である。

カ 要約

高温乾燥や高周波減圧乾燥のような高速乾燥システムでは、乾燥操作を間違いなく行うためには、乾燥中の木材からの情報を解析することによって、含水率、乾燥応力および材質などをモニタリングする必要がある。そのために、材内温度、材内圧力、および非対称の含水率分布が発生する時の断面変形を取り上げ、含水率および含水率分布、応力（ひずみ、変形）の経過を調べた。また材質変化をモニタリングする方法の基礎として材色変化を取り上げ、断続的に測定した。高温乾燥では、材内温度は含水率および含水率分布を相対的に表していることがわかった。しかし、材内の温度と圧力を同時に測定すると、繊維飽和点を切ったかどうかの判定ができるだけでなく、平衡含水率表から含水率をモニタリングできることを高周波減圧乾燥で示した。これは、高温乾燥のように木材内部が外周温度より高い場合にも温度と圧力から含水率を測定することの可能性を示している。非対称含水率分布を持った試験材のカップ量から、乾燥中に発生するひずみを求めたが、高温乾燥の場合には表面セットのためカップ量が少なくなることがわかった。しかし、柱材を想定した場合板厚が大きいため、低温乾燥でもカップ量が少なく、非対称含水率分布を持った試験材で乾燥応力をモニタリングするためには、余程精度を上げる必要があることがわかった。

高温乾燥した材は衝撃強度が低下するが、高温乾燥を短時間にすれば衝撃強度の低下はある程度抑えられることがわかった。また高温乾燥を行った材の耐蟻性は低下するが、ある種の抽出成分の含有量によっては低下しないこともわかった。材色の変化は乾燥温度に大きく影響を受け、材色はヘミセルロースの減少に影響を受けることが確認された。乾燥前の選別によってモニタリング技術の精度を向上させるため、生材密度および心材率と平均乾燥速度についてクラスター解析を行った。生材密度と心材率を併用することによって、仕上げ含水率が平均化すること、時間の短縮がはかれることがわかった。

キ 引用文献

- 1) Cai, Y.C, Hayashi, K.: Pressure and Temperature Distribution in Wood During Radio-Frequency/Vacuum Drying. 7th International IUFRO Wood Drying Conference, Tsukuba, Japan. p.386-391 (2001)
- 2) Franz F.P.Kollmann, Wilfred A.Cote, Jr.: Principles of Wood Science and Technology I Solid Wood. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York. pp.190 (1968)
- 3) Anastasios Koumoutsakos, Stavros Avramidis, Savvas Hatzikiakos: Radio frequency vacuum drying of wood. IIExperimental model evaluation. Dring technology. 19(1). 85-98 (2001)
- 4) Hedlund, B.A.: Method for measuring internal pressure and temperature in wood during vacuum drying. Proc. 4th IUFRO international wood drying conference, 286-293 (1994)

(愛媛大学農学部：林和男)

第2章 品質安定化・乾燥歩止り向上のための木材改質技術及び乾燥処理条件の改良

1. 乾燥材の品質向上及び品質安定化のための乾燥効率化技術の開発

(1) スギ柱材の材面割れ及び内部割れ防止技術の開発

ア 研究目的

スギ材の割れを防止し乾燥時間の短縮を図るためには、乾燥処理温度の上昇と適度な湿度条件の維持が有効である。しかし処理雰囲気の水湿度や処理時間によっては、材面割れや内部割れの発生を増加させる原因となることから、割れを抑制するための適正な水湿度処理条件の解明が必要である。特に、高温下での乾燥では内部割れの阻止が大きな課題である。したがって、本課題においては割れを低減させながら、乾燥時間の短縮も同時に実現するため、水湿度処理による割れ発生のおくみを明らかにし、割れ防止のための指針を得ることを目的とする。

なお本文中、乾燥初期に高温低湿処理により表層にドラインゲットを形成する方法を高温セットと呼ぶ。

イ 研究方法

材面割れ及び内部割れの発生時期や発生条件を明らかにするため、長野県根羽村産のスギ心持ち柱材（無背割り材）11.7×11.7×300cm（一部400cm材）を供試材とし、以下の試験を実施した。材面割れの評価は、割れ幅1mm以上の割れに対して4材面の長さの合計、また内部割れの評価は、片木口より1m部の横断面における内部割れ面積の合計とした。含水率は、内部割れ評価試験片の隣接部より採取した試験片により全乾法で求めた。

(1) 高温乾燥における材面割れ及び内部割れ発生時期の究明

95℃6時間蒸煮後、①DBT120℃/WBT90℃×24時間（23本）、②DBT120℃/WBT90℃×48時間（23本）、③DBT120℃/WBT90℃×72時間（23本）の高温低湿乾燥とコントロール条件として④DBT90℃/WBT60℃×144時間の中温低湿乾燥（50本）を実施し、仕上がり含水率と材面割れ、内部割れとの関係を検討した。高温乾燥における含水率減少の様子を図2-1-1-1に示した。

(2) 中間蒸煮による内部割れ抑制効果

95℃6時間蒸煮後、DBT120℃/WBT90℃×72時間の高温乾燥の課程で、⑤中間蒸煮2時間を2回行ったもの（21本）、⑥中間蒸煮5時間を2回行ったもの（21本）について、材面割れと内部割れの発生を調査した。

(3) 内部割れに及ぼす乾燥温度の影響 —高温セット後の天然乾燥と中温乾燥—

95℃6時間蒸煮後にDBT120℃/WBT90℃×24時間の高温セットを行い、これらを⑦天然乾燥を行ったもの（21本）、⑧90℃/60℃の中温乾燥を行ったもの（21本）について、材面割れと内部割れを調査した。

(4) 内部割れ抑制に及ぼす乾燥速度の影響 —高温セット後の高周波減圧乾燥—

95℃6 時間煮沸後に⑨DBT120℃/WBT90℃×24 時間の高温セットを行い、材温 55℃～75℃/80Torr×65 時間の高周波減圧乾燥を行ったもの（42 本）、⑩DBT120℃/WBT90℃×18 時間の高温セット後、材温 65℃～75℃/80Torr×48 時間の高周波減圧乾燥を行ったもの（42 本）について、材面割れと内部割れを調査した。

ウエ 結果と考察

（1）高温乾燥における材面割れ及び内部割れ発生時期の究明

1）材面割れ、内部割れの発生状況

材面割れは、90℃乾燥（イ（1）④）より 120℃乾燥（イ（1）①②③）の方が少なかった。また内部割れは、90℃乾燥では全く発生しなかった。これらのことは乾燥温度の調整により材面割れ及び内部割れが抑制できる可能性があることを示唆した。

2）材面割れ、内部割れが発生する時点の含水率

高温乾燥（イ（1）①②③）における仕上がり含水率と材面割れ長さ及び内部割れ面積の関係を図 2-1-1-2 に示した。材面割れは含水率 20%までは増加する傾向にあり、その後は減少傾向にあった。これは一旦発生した割れが、含水率の減少と共に閉じていくものが数多く存在したことによる。このことは、応力解放ひずみの測定により、仕上がり含水率が低くなるに従って表層の圧縮応力が増大することから説明された。一方、内部割れが確認される平均含水率は、30～40%付近からであるが、顕著に発生するのは 15%付近からであった。また内部割れ面積は、含水率が低下するほど増大する傾向にあった（図 2-1-1-3、2-1-1-4）。

これら一連の現象は、乾燥初期に表層の引張応力のため材面割れが生じ、乾燥中期から末期には、表層は乾燥初期のドラインセットを受けて圧縮応力に転じ材面割れは閉塞、さらに材内部は逆に引張応力のため内部割れが増大したと判断された。

図 2-1-1-3 より仕上がり含水率と内部割れ面積の相関は高い。なお内部割れの発生が最初を確認される第 2 層（表面から 2cm 程度入った部分）の含水率と仕上がりの平均含水率とはほぼ一致した。

内部割れの多くは、四隅から 2～3cm ほど入った部分（第 2 層近辺）に放射方向に発生し、含水率が低下するに従い髄に向かって拡大するものが多い。この部分の軽微な割れから大きな割れまでの 96 箇所について、割れ付近 1cm 四方部の含水率を測定した結果は、全てが 30%以下の含水率であった。このことから、内部割れは材内部の収縮に伴い発生することが推測された。

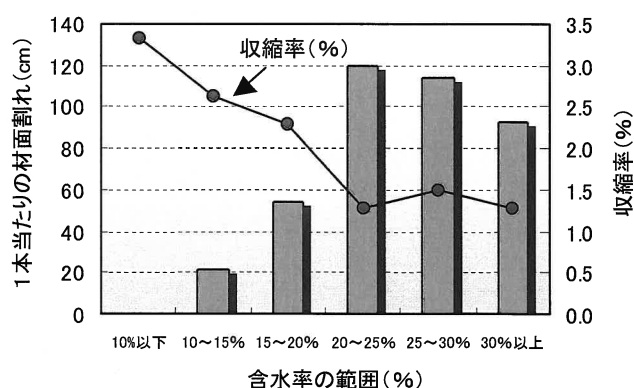
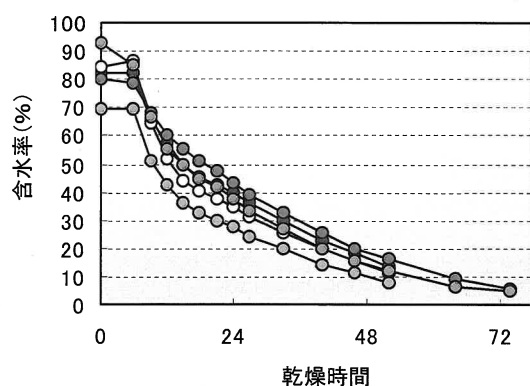


図 2-1-1-1 乾燥経過図（95℃煮沸後 DBT120℃/WBT90℃） 図 2-1-1-2 仕上がり含水率別の材面割れ発生状況

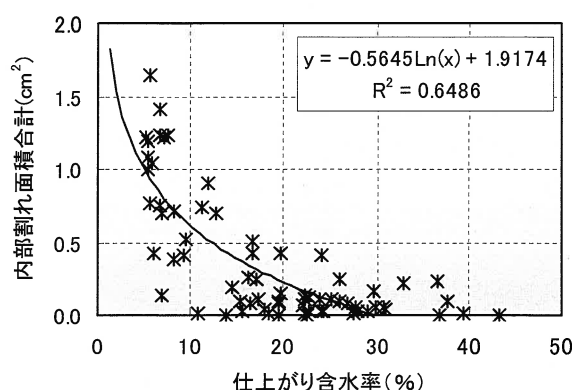


図 2-1-1-3 仕上がり含水率と内部割れ面積との関係

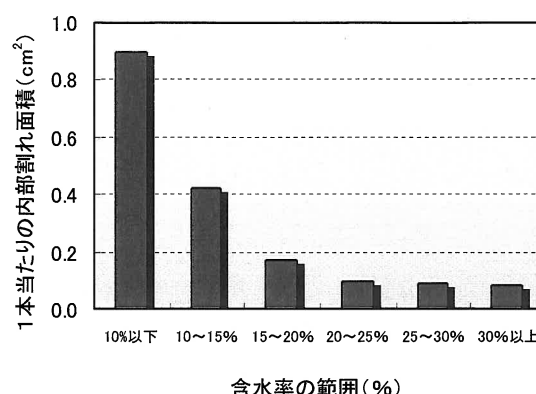


図 2-1-1-4 仕上がり含水率別の内部割れ発生状況

(2) 中間蒸煮による内部割れ抑制効果

5 時間中間蒸煮の乾燥スケジュールを図 2-1-1-5 に示した。乾燥後の含水率は、中間蒸煮 2 時間の場合が 11.6% (7.0~18.2%)、5 時間の場合が 16.0% (7.8~31.8%) であり、両者とも仕上がり含水率のバラツキが大きかった。いずれも乾燥前選別等が必要であると思われた。

内部割れは、中間蒸煮を組み込むことによりある程度抑制することができた。また、中間蒸煮の時間が長いほど、その効果は大きかった (図 2-1-1-6)。

一方材面割れを幅 1mm 以上の発生本数で比較すると、中間蒸煮 5 時間の 16 本に対して中間蒸煮 2 時間は 10 本であり、2 時間の場合の方が少なかった。このことから、過度の中間蒸煮は、乾燥を遅らせる原因になり、また材面割れの閉塞効果を薄める原因になると思われた。

言い換えれば、中間蒸煮によってドライグセットを途中で緩和すると、材内層の引張応力は小さくなり、内部割れ発生が抑制される。同時に、材表層は圧縮応力が小さくなり、この分閉塞効果は小さく材面割れが残り、結果的に材面割れが多くなったと推測された。

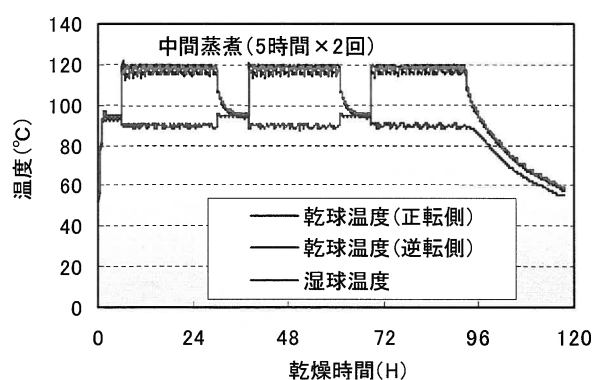


図 2-1-1-5 乾燥スケジュール
(中間蒸煮 5 時間 2 回の場合)

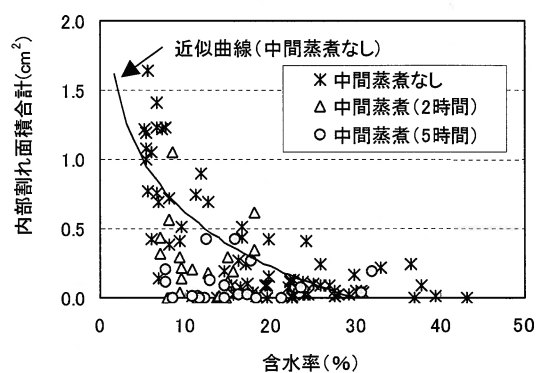


図 2-1-1-6 仕上がり含水率と内部割れ面積との関係

(3) 内部割れに及ぼす乾燥温度の影響 —高温セット後の天然乾燥と中温乾燥—

高温セット後、終始 100℃以上の高温乾燥を続けると、図 2-1-1-3 のとおり、含水率 30% 付近からは内部割れの発生の危険が大きくなることが明らかとなった。

そこで、内部割れ発生に及ぼす乾燥温度の影響をみるため、材面割れ抑制のための 24 時間高温セットを行った後に天然乾燥 (1 年間) した場合と、高温セット後に乾球温度 90℃、湿球温

度 60℃（中温低湿乾燥）とした場合（図 2-1-1-7）の 2 条件で内部割れ発生状況を検討した。

高温セット+天然乾燥での仕上がり含水率の平均は 13.9%であった。また高温セット+中温乾燥での仕上がり含水率の平均は 14.0%で、この時の水分傾斜は図 2-1-1-8 のとおりであった。

高温セット+中温乾燥の内部割れ面積を図 2-1-1-3（高温乾燥：高温セット+高温乾燥）と併せて図 2-1-1-9 に示した。図から高温セット+中温乾燥での割れは、終始高温乾燥を続ける方法に比べかなり小さかった。また高温セット+天然乾燥での内部割れは極めて小さいものが数本の材に存在した程度であった。

以上のことより、高温セット後に 100℃以下の乾燥に移行すると、天然乾燥は勿論、低湿での中温乾燥においても内部割れの発生は極めて少ないことが明らかとなった。

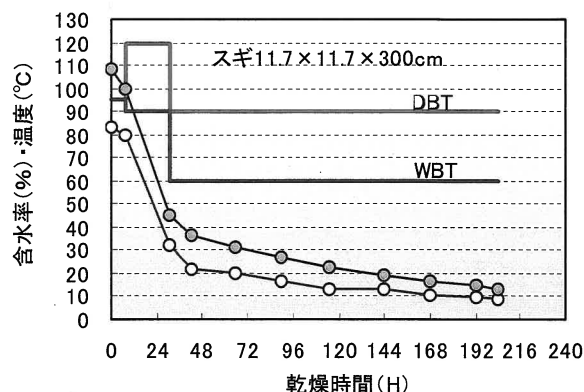


図 2-1-1-7 乾燥スケジュールと含水率経過

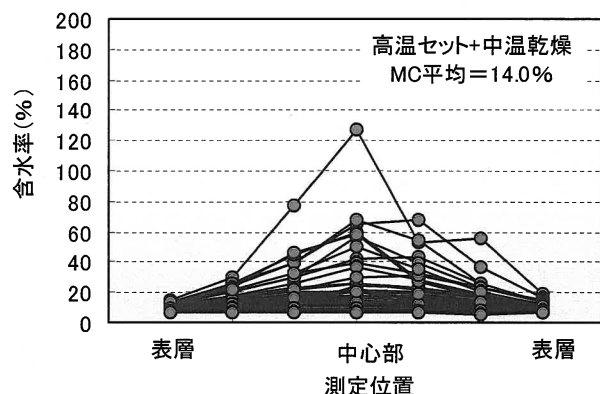


図 2-1-1-8 乾燥後の水分傾斜

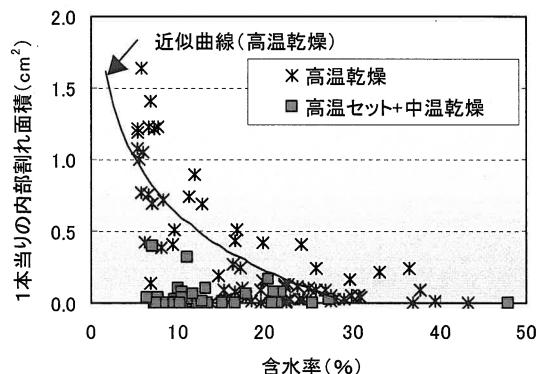


図 2-1-1-9 仕上がり含水率と内部割れとの関係

（４）内部割れに及ぼす乾燥速度の影響 —高温セット後の高周波減圧乾燥—

前項の試験より、高温セット後に天然乾燥や中温乾燥を行うと、内部割れの発生は極端に少なくなることがわかった。この理由として、乾燥中期から末期にかけての乾燥温度の影響が大きいと判断されたが、温度を 100℃以下にしたことは、同時に乾燥時間が延長されたことにもなる。従って材内部がゆっくり収縮したことから内部割れが少なくなった可能性も考えられる。

そこで材内部を急速に乾燥した場合、内部割れはどうなるのかを明らかにするため、高温セット後に高周波減圧乾燥を試みた。試験は 2 回行い、再現性についても検討した。

第 1 回目の乾燥は、高温セット時間を 24 時間とし、高周波減圧乾燥は、材温 55℃～75℃で 65 時間行った（以下⑨）。第 2 回目の乾燥は、高温

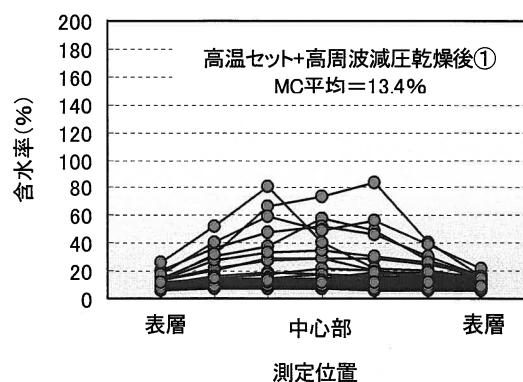


図 2-1-1-10 高周波減圧乾燥後①の水分傾斜

セット時間を 18 時間とし高周波減圧乾燥は、材温 65℃～75℃で 48 時間行った（以下⑩）。また⑩については 4m 材を供試材とし、高温セット後及び高周波減圧乾燥後のそれぞれで内部割れを木口から 1m の部分で測定した。

1) 仕上がり含水率と水分傾斜

高周波乾燥終了時での含水率の平均は⑨で 13.4%、⑩で 18.8% となり、⑩の方が高温セット時間が短い分、さらに高周波減圧乾燥の時間が短い分、仕上がり含水率は高かった。

高温セット+高周波減圧乾燥⑨における水分傾斜を図 2-1-1-10 に、また高温セット+高周波減圧乾燥⑩における高温セット後、高周波減圧乾燥後の水分傾斜を図 2-1-1-11、12 に示した。

高温セット後の含水率の平均は⑨で 31.0%、⑩で 38.1% となり、⑩においては、この時点での材表層（表面から 1.5cm まで）の含水率の平均は 20.1% であった。その後の高周波減圧乾燥で材面割れの閉塞が確認された材が多かったことから、18 時間の高温セットで表層はドライグセットされた状態であったと推測される。含水率からすると、高温セットにより、表層の含水率が少なくとも 20% 付近に達したことを目安とし、次の乾燥に移行できるものと思われる。この値についてはさらなる追求が必要である。

2) 内部割れ

内部割れ面積を図 2-1-1-3（高温乾燥：高温セット+高温乾燥）と併せて図 2-1-1-13 に示した。内部割れ面積は、いずれの乾燥方法においても含水率が減少するほど大きくなる傾向はあるものの、高温セット後に高周波減圧乾燥を組み合わせた方法では、終始高温乾燥を行ったものに比べかなり少なかった。

ここで乾燥時間について考えてみると、高温乾燥での蒸煮を含めた全 78 時間に対して、高周波減圧乾燥を組み合わせた方法では⑨が全 95 時間、⑩が全 72 時間であり、平均の仕上がり含水率は多少違うものの、乾燥中期から末期にかけての乾燥速度はほぼ同程度とみなせる。

従って、乾燥中期から末期にかけて内部割れ発生の危険がある時期に、高周波減圧乾燥を行って乾燥速度を速め急激な乾燥を行ったとしても、乾燥温度（材温）が中温程度であれば内部割れ発生の危険は少ないことが明らかとなった。つまり今回の試験から、内部割れの発生には温度が影響し、乾燥速度の影響は少ないものと思われた。

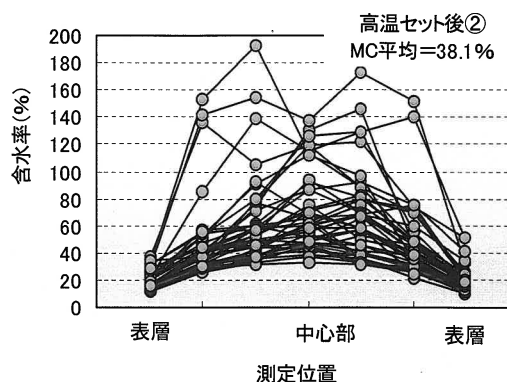


図 2-1-1-11 高温セット後②の水分傾斜

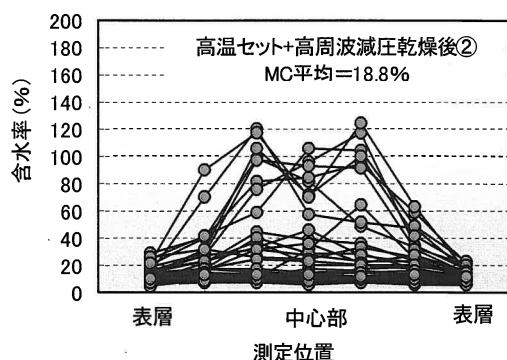


図 2-1-1-12 高周波減圧乾燥後②の水分傾斜

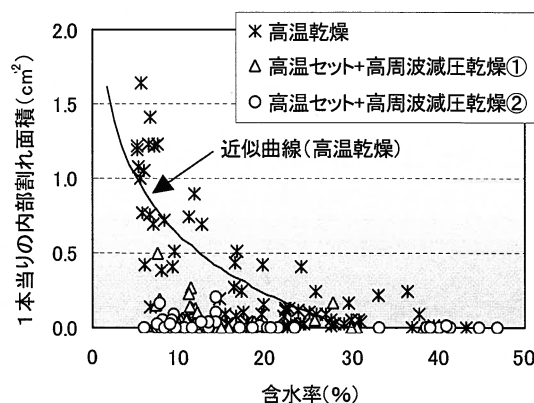


図 2-1-1-13 仕上がり含水率と内部割れとの関係

3) 材面割れ

材面割れに関しては、乾燥初期の高温セットにより、その後の乾燥方法をどのように選択しても、高温セット後よりも減少することがわかった。高温セット後の柱1本当りの材面割れ長さは、およそ100～150cmであるが、この値は視覚的にも天然乾燥のみの乾燥材に比べれば、はるかに小さいものであった。

高温セット+高周波減圧乾燥⑩の高温セット時間は、18時間で他の乾燥方法よりも6時間短くしたが、この高温セット時間においても材面割れ抑制効果は大きいものと思われた。

オ 今後の問題点

今回試験に供したスギ柱材は、仕上がり寸法を10.5cm柱として製材寸法11.7cm正角材を対象としたが、今後これ以上の断面寸法の材に対しても、高温セットによる割れ防止が有効であるのか確認する必要がある。また、乾燥仕上がり時点での材表層部の圧縮応力は、材面割れの閉塞効果から確認されるが、10.5cm柱に仕上げた場合での材表層部における圧縮応力の状態を数量的に把握しておく必要があり、さらに、表層からどのくらいまで圧縮応力が存在するのか、削り込んでいった場合の応力状態を把握しておく必要がある。

高周波減圧乾燥との組み合わせでは、高周波減圧乾燥へ移行する段階で棧積みの手間を省略するため、同一装置内で乾燥可能な新しい乾燥機の開発が望まれる。

カ 要約

スギ柱材の材面割れ及び内部割れを防止する乾燥方法を、乾燥時間の短縮を考慮しながら各種高温乾燥スケジュールの中で検討した。

その結果、乾燥初期の高温セット（高温低湿処理）により材面割れ抑制が可能であった。また、乾燥初期に発生した材面割れは、乾燥末期にはかなりの確率で閉塞した。高温セットは、初期含水率によって左右されると思われ、材表層（表面から1.5cmまで）の含水率が20%程度、時間にすると18時間程度が適当と思われた。

高温乾燥を乾燥末期まで続けると、乾燥中期から末期にかけて内部割れが発生し、内部割れは含水率の低下に伴って増大した。この内部割れ抑制のため、高温セット後の中間蒸煮を検討したが、内部割れは減少する反面、材面割れの閉塞効果は少なくなった。

また高温セット後、内部割れ発生の時期である乾燥中期から100℃以下の中温乾燥や天然乾燥、さらに高周波減圧乾燥を行うことを検討した結果、全ての方法で内部割れは抑制できた。特に、高周波減圧乾燥との組み合わせにより、短時間で割れの少ない乾燥が可能であった。

キ 参考文献

- 1) 藤本登留、有田秀三、又木義博：材料、46（4）、390-394(1997)
- 2) 藤本登留：木材工業技術短信、第17巻、第2号(1999)
- 3) 例えば、久田卓興：木材学会誌、21（6）、357-362(1975)
- 4) 例えば、徳本守彦：木材学会誌、35（3）、175-184(1989)
- 5) 寺澤眞、金川靖、林和男、安島稔：木材の高周波真空乾燥、海青社(1998)

（長野県林業総合センター：吉田孝久）

(2) 圧縮等による材の曲がり抑制技術の開発

ア 研究目的

スギ一般材による構造用製材の乾燥では、曲がり等の発生から、製品歩留まりが低下するケースが多い。そのため、乾燥コストを間接的に押し上げ、乾燥材生産が進まない要因の1つとなっている。本研究では、乾燥過程における曲がり抑制方法を開発し、乾燥歩留まりの向上を図ることを目的とした。

イ 研究方法

(1) 栈木圧と曲がり抑制

栈木圧の違いが曲がり抑制に及ぼす影響を調べるために、栈木圧を無、0.25MPa、0.49MPa、0.74MPaの4条件で乾燥し、乾燥前後の曲がり量の増減から曲がりの抑制量を評価した。供試材は、スギ4m小曲材から製材した正角材（11.5×11.5×400cm）144本で、製材品の曲がり量の平均値と標準偏差がほぼ等しくなるように4区分したものをを用いた。栈積は、アルミ製栈木（2.5×2.5×100cm）を用いて、栈木間隔95cmで、製材品の最大曲がり面を上面に配置した。なお、乾燥は高温スケジュール（蒸煮6時間、乾湿球温度120－90℃24時間、100－70℃72時間）で行った。

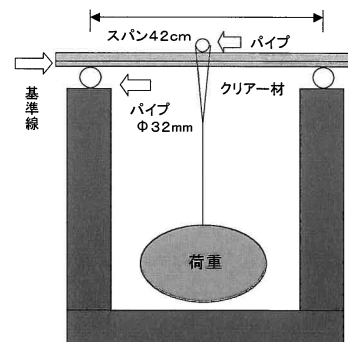
(2) 乾燥スケジュールと栈木圧がめりこみ量と曲がり量に及ぼす影響

乾燥スケジュールと栈木圧がめりこみ量に及ぼす影響を調べるため、表2-1-2-1の3種類の乾燥スケジュールごとに3種類の栈木圧（0.25MPa、0.49MPa、0.74MPa）条件で乾燥して材のめりこみ量を測定した。供試材はプレーナ処理したスギ心持ち材（11.3×11.3×100cm）27本及びクリアー試験体（3×3×50cm）18本を用いた。

表2-1-2-1 乾燥スケジュール

	蒸煮条件	乾燥条件
高温低湿乾燥	98℃, 6h	DBT120℃, WBT90℃, 24h
高温乾燥	98℃, 6h	DBT100℃, WBT98～85℃, 124h
中温乾燥	なし	DBT80℃, WBT77～65℃, 266h

曲がり量の試験は、クリアー試験体（3×3×50cm）9本を用い、図2-1-2-1に示す条件で材中央に10kg、20kg、30kgの荷重をつり下げ、表1と同じ3条件で乾燥後、除荷して材の曲がり量を測定した



(3) 燻煙加熱処理による曲がり抑制

燻煙加熱処理による曲がり抑制効果を調べるため、燻煙加熱処理材を製材後、蒸気式人工乾燥機で乾燥し、その曲がり量を無処理材と比較し、曲がり抑制効果を評価した。供試材はスギ丸太76本で、図2-1-2-1 曲がり量試験図 燻煙加熱処理と対照（無処理）材の2グループに区分した。前者を材中心部の温度が80℃以上で30～40時間保つ条件で燻煙加熱処理した後、両者を11.5cm正角に製材して曲がり量を測定した。さらに、両グループを圧縮（栈木圧0.25MPa）と無圧縮に分け、高温低湿乾燥で目標含水率15%に乾燥後、曲がり量を測定し、曲がり抑制効果を比較した。

(4) 乾燥スケジュールによる曲がり抑制

乾燥スケジュールの違いと曲がり抑制の関係を明らかにするため、表2-1-2-2に示す乾燥スケジュールで乾燥後、曲がり量を測定し、乾燥スケジュールの違いと曲がり抑制効果を比較した。

このとき、使用栈木及び載荷の条件は波形プレート載荷、通常の栈木載荷、無載荷の3通りとし、載荷条件との関係も同時に検討した。供試材は、スギ3m大曲材から製材した正角材（11.5×11.5×300cm）100本の曲がり量を均等に4区分したものをを用いた。なお、波形プレートはアルミ製（厚さ2mm）で、100×100×2cm（凹凸部高さ）の形状である（写真2-1-2-1）。栈木圧は、波形プレートが0.05MPa、通常栈木が0.16MPaとした。

また、曲がり量の経時変化を調べるため、乾燥直後、3ヶ月後、8ヶ月後、12ヶ月後の時点で曲がり量の測定を行い、乾燥スケジュールの違いと曲がり抑制効果を検討した。

表2-1-2-2 乾燥スケジュール

	蒸煮条件	乾燥条件
高温低湿乾燥①	98℃, 4h	DBT120℃, WBT90℃, 36h → DBT100℃, WBT70℃, 60h
高温低湿乾燥②	98℃, 4h	DBT120℃, WBT90℃, 12h → DBT55℃, WBT30℃, 168h
中温乾燥	85℃, 12h	DBT85℃, WBT85~60℃, 156h
低温乾燥	なし	DBT55℃, WBT30℃, 264h(一定)

（5）治具等による水平方向の曲がり抑制

乾燥による水平方向の曲がりを抑制するため、栈木や矯正治具を用いた試験を行った。一般に栈木による材の拘束力は垂直方向で大きく、水平方向では製材品の寸法むらや不均一な製品の収縮から部位によっては小さくなることが推測される。この水平方向の拘束力を高めることが曲がり抑制に有効と考え、栈木表面に金属製ステップルを打ち込んだ改良栈木（図2-1-2-2）と、水平方向の製材品の曲がり矯正治具（写真2-1-2-2）を用いて拘束した。供試材はスギ正角材（11×11×400cm）40本で全て曲がり材である。曲がり量が均一になるように4区分し、各材の最大曲がり面が水平方向になるように栈積みした。栈木の種類および圧縮方法は、アルミ製栈木、改良栈木、曲がり矯正治具、無載荷の4種類で垂直方向の栈木圧は、0.26MPaとした。曲がり矯正治具による水平方向の圧縮は、材間にスペーサーを挿入し、ネジボルトで水平方向の隙間がなくなるまで圧縮した。乾燥は、高温スケジュール（蒸煮6時間、乾湿球温度120－90℃60時間）とし、乾燥終了後、水平方向の曲がり量を測定し、改良栈木及び曲がり矯正治具の曲がり抑制効果を評価した。

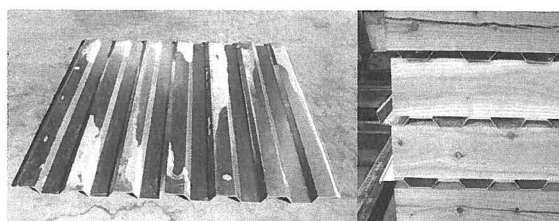


写真2-1-2-1 波形プレートと栈積圧縮の様子

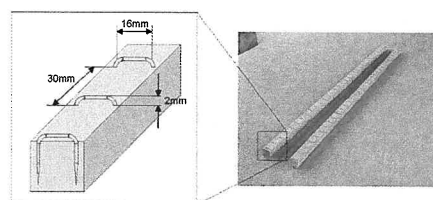


図2-1-2-2 改良栈木

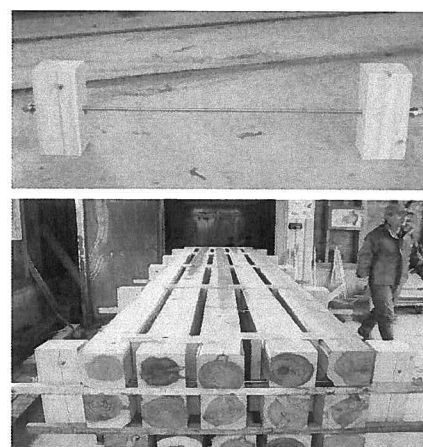


写真2-1-2-2 曲がり矯正治具と圧縮の様子

ウエ 結果と考察

（1）栈木圧と曲がり抑制

各栈木圧と曲がり抑制量を図2-1-2-3に示す。曲がり抑制量の平均値は、無載荷材が-2.28mm、0.25MPaの栈木圧の材が-0.36mm、0.49MPaの栈木圧の材が-0.78mm、0.74MPaの栈木圧の材が-1.29mmであり0.25MPaの栈木圧の材と無載荷材が危険率1%で、0.49MPaが危険率5%で有意であった。0.74MPaの栈木圧の材とは有意差は認められなかった。次に、栈木の材表面へのめりこみ量を図2

-1-2-4に示す。栈木圧が大きいほど、めりこみ量も大きくなることが確認された。以上の結果から、スギ正角材の曲がり抑制方法として栈木圧0.25MPaの積載荷重が有効であり、それを超す栈木圧ではめりこみ量が大きくなるため、曲がり抑制の効果が小さいと考えられた。

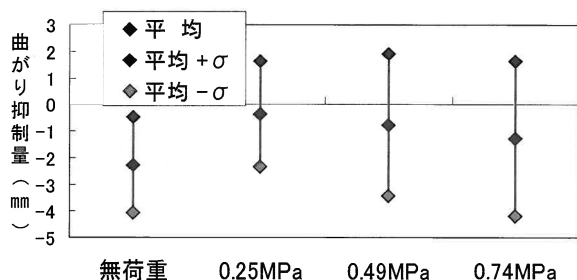


図2-1-2-3 栈木圧と曲がり抑制量

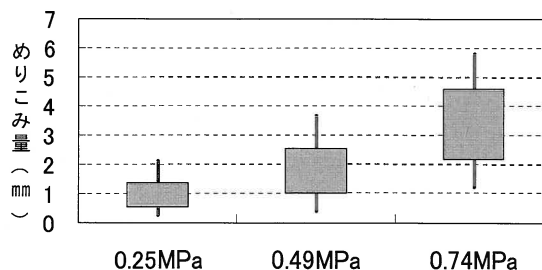


図2-1-2-4 栈木圧とめりこみ量

(2) 乾燥スケジュールと栈木圧がめりこみ量と曲がり量に及ぼす影響

実大材及びクリアー試験体の栈木のめりこみ量を、図2-1-2-5及び図2-1-2-6に示す。いずれの乾燥条件においても栈木圧0.25MPaでは1mm前後と小さい値を示したが、栈木圧が増大するに従い、乾燥スケジュールによる差異が生じた。すなわち、高温乾燥のめりこみ量が最も大きく、以下、高温低湿乾燥、中温乾燥の順であった。これは、高温高湿状態に曝される時間が大きく影響したと考えられた。このことから、めりこみ量を抑えることで曲がり抑制効果を高めるためには、栈木圧を0.30MPa以下に保つ必要があると考えられた。また、ロットを幾段も積み上げる場合、下段の栈木圧の調整が必要と考えられた。

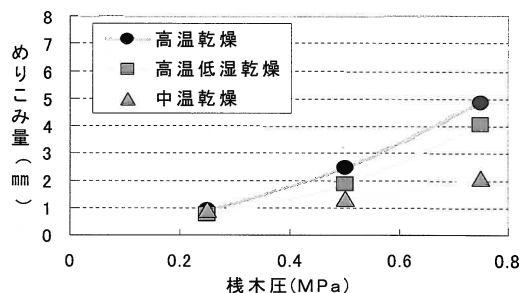


図2-1-2-5 実大材の栈木圧とめりこみ量

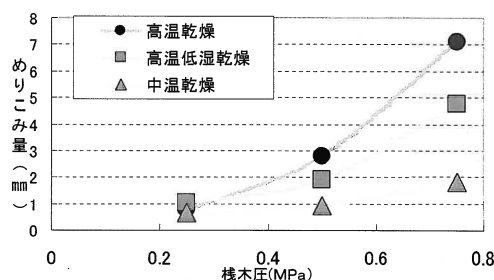


図2-1-2-6 クリアー材の栈木圧とめりこみ量

乾燥スケジュールと曲がり量の関係を表2-1-2-3に示す。いずれの乾燥スケジュールにおいても荷重が大きいほど曲がり量は増大した。また、高温乾燥、高温低湿乾燥、中温乾燥の順に大きく、高温乾燥の積載重量30kgでは破壊に至った。このことから、高温あるいは高温低湿乾燥において、積載荷重を大きくすることで曲がり抑制効果が期待できると推測された。

(3) 燻煙加熱処理による曲がり抑制

燻煙加熱処理材と無処理材の曲がり量を図2-1-2-7に示す。製材直後の曲がりの平均値は、それぞれ1.6mmと2.1mmであり、統計上の有意差は認められたものの実用的な差は生じなかった。さらに、無圧縮、圧縮とも燻煙加熱処理材と無処理材との間に実用的な差は認められなかった。

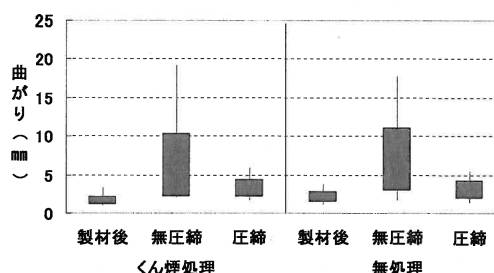


図2-1-2-7 燻煙処理と無処理の曲がり量

以上のことから、この燻煙加熱処理材では、乾燥による曲がり抑制効果はさほど期待できないことがわかった。

(4) 乾燥スケジュールによる曲がり抑制

各乾燥スケジュールごとの曲がり量の平均値を図2-1-2-8に示す。低温スケジュールは、載荷と無載荷間に差は認められず、中温及び高温スケジュールでは載荷の曲がりが小さくなり、曲がり抑制の効果が認められた。また、通常栈木と波形プレートでは曲がり抑制に大きな差は認められなかった。波形プレートの栈木圧が通常栈木の約1/3であることを考えると、波形プレートの栈木圧を大きくすることで、曲がり抑制効果も大きくなる可能性が示唆された。また、無載荷では、高温で乾燥時間が短く高速に乾燥したものほど曲がりが大きくなる傾向が認められた。栈木のめりこみ量は波形プレートが栈木と比較し、いずれの場合も小さく、波形プレートは大きな荷重で曲がりを抑制でき、しかもめりこみ量を抑える場合に有効であることがわかった(図2-1-2-9)。

曲がり量の経時変化を図2-1-2-10に示す。乾燥後12ヶ月経過した時点で、最大矢高の平均値が小さい順に高温低湿乾燥①、高温低湿乾燥②、中温乾燥、低温乾燥で、高温条件で乾燥した方が、曲がりの最大矢高が小さかった。

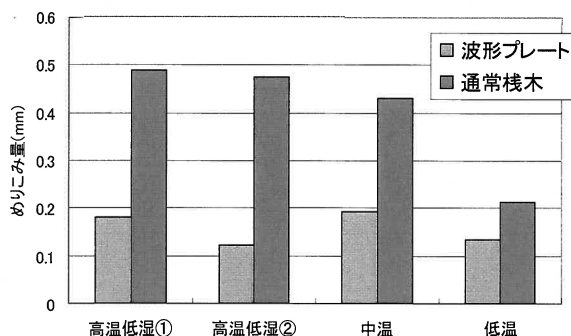


図2-1-2-9 めりこみ量の比較

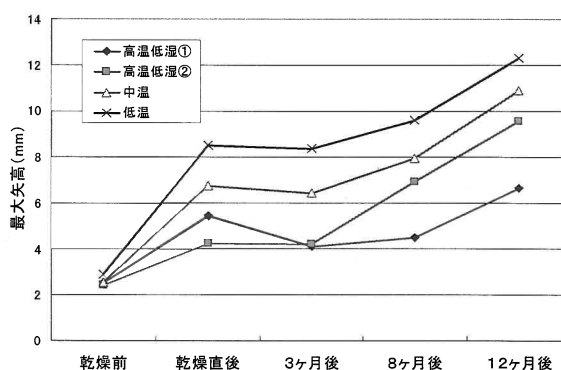


図2-1-2-10 曲がり量の経時変化（圧縮材）

(5) 治具等による水平方向の曲がり抑制

水平方法の曲がり抑制量を図2-1-2-11に示す。改良栈木とアルミ製栈木の間には曲がり抑制の差異は認められず、この乾燥条件においては両栈木とも水平方向の材の動きを拘束していた。一方、矯正治具は曲がりの抑制が認められ、乾燥前の曲がり材の矯正に有効であると考えられた。しかし、この治具では、水平方向の材の収縮に対して圧力はかけられない。そこで、乾

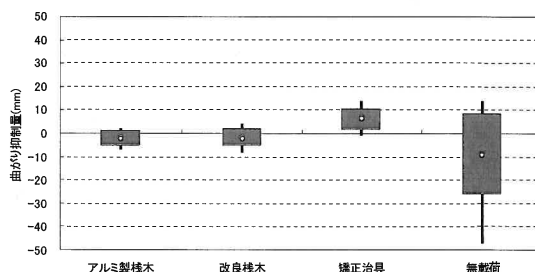


図11 水平方向の曲がり抑制量

表2-1-2-3 乾燥スケジュールと曲がり量

区分	荷重 (kg)		
	10	20	30
高温低湿乾燥	1	4	21
高温乾燥	2	6	90(破壊)
中温乾燥	2	3	7

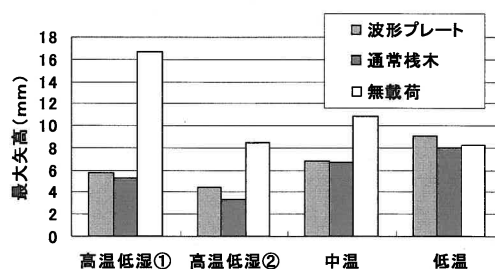


図2-1-2-8 乾燥スケジュールと曲がり量

乾燥前の曲がりを矯正し、さらに材の収縮に連動して圧縮する方法として正角材の対角線方向に圧縮する矯正棧木を開発した(写真3)。

オ 今後の問題点

曲がり抑制効果の持続性が不明瞭な点、あるいは、曲がりの原因が材質に強く影響され完全な曲がり抑制が困難な点等があげられる。今後は、曲がり抑制効果の持続性を明確にするとともに、成長応力や密度等の材質指標因子から曲がりの原因を特定することで、さらに効果的な曲がり抑制について検討したい。

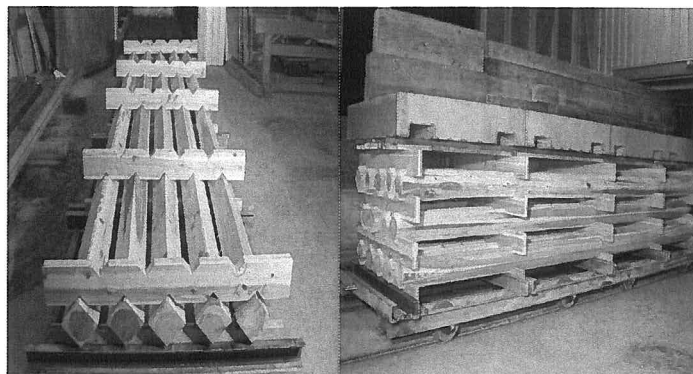


写真3 曲がり矯正棧木

カ 要約

スギ製材の乾燥において、材の変形による歩留まりの低下を抑えることを目的とし、圧縮等による材の曲がり抑制技術の開発に関する試験を行った。

棧木による材表面へのめりこみ量は、積載する荷重が大きいほど増大し、過度の荷重は棧木のめりこみ量が大きくなるだけで、曲がり抑制に効果がなかった。曲がりを抑制する方法として棧木圧0.25Mpaの荷重を積載することが有効であった。

乾燥時のめりこみ量は、棧木圧が大きくなるほど増加し、その量は乾燥方式によってめりこみ量に差異を生じた。高温乾燥が最もめりこみ量が大きく、以下、高温低湿乾燥、中温乾燥の順であった。

燻煙加熱処理による曲がり抑制効果については、製材直後の燻煙加熱処理材と無処理材の曲がり発生に有意差が認められたものの、人工乾燥後の曲がりに顕著な差は認められなかった。

棧木圧を増大させずに、材全体への荷重を大きくする方法として、波形プレートを用いた圧縮乾燥を行った。通常の棧木と波形プレートを用いた場合とでは、曲がり抑制に顕著な差は見られなかったものの、載荷量を増やして棧木圧を増大させれば、より効果的な曲がり抑制が期待できることが示唆された。

水平方法の曲がり抑制については、改良棧木とアルミ製棧木の間には曲がり抑制の差異は認められなかったが、矯正治具は曲がりの抑制が認められた。また、曲がり矯正棧木は、乾燥前にすでに曲がりが生じている材の矯正に有効であると考えられた。

キ 引用文献

- 1) 豆田俊治：日本木材学会大会研究発表要旨集53、126(2003)
- 2) 豆田俊治、三ヶ田雅敏：木科学情報10、1、6-7(2003)
- 3) 豆田俊治、三ヶ田雅敏：木科学情報10、1、29-30(2003)

(大分県農林水産研究センター林業試験場：青田 勝)

(3) 薬剤処理による材の割れ及び狂い抑制技術の開発

ア 研究目的

化粧的な目的で住宅に使用される部材等では、乾燥による割れや狂い、変色等の発生を抑制しなければならない。住宅関係の法整備により寸法安定性の高い住宅部材の需要が高まりをみせている中、各種乾燥前処理技術の検討や既存乾燥方式の複合化等様々な取組みがなされているが、乾燥による割れ、狂いおよび変色等の発生を抑制した低コストで効率的な乾燥技術は未だ確立されていない。

そこで、本研究では乾燥による割れや狂いが少なく寸法安定性の高い乾燥材を供給することが可能な、薬剤処理との併用による新しい乾燥技術の開発を目的とする。

イ 研究方法

(1) 薬剤処理による割れ防止効果

ポリエチレングリコールおよび市販の割れ防止剤（コシプラスDC、ランバーメイト等）を用いて、注入処理の有無別にスギ平角試験材（厚 13.2×幅 25.2×長 400cm、処理有 5 本、処理無 8 本）について同一乾燥スケジュール（乾球温度 70–84℃、湿球温度 68–70℃）で中温蒸気式乾燥を行い、乾燥中の重量変化をロードセルにて計測して含水率減少経過を求めて、乾燥終了後に収縮率および表面割れ発生状況（0.5mm 以上の幅の割れを測定対象として、試験材 1 本あたりの総割れ長さと最大割れ幅）を測定した。また、試験材 20 本を恒温恒湿装置に設置して、住宅内の温熱環境を想定して乾燥条件（乾球温度 30℃、関係湿度 30%）と湿潤条件（乾球温度 30℃、関係湿度 90%）を設定して、各条件を 3 日間継続して乾湿繰り返しを 3 サイクル行い、その間の全乾法含水率変化と材長方向中央位置の厚さと幅の寸法変化を測定した。薬剤注入処理条件は、注入前の乾燥を実施せずに、前排気に 30 分、注入処理に 60～90 分（注入圧力 15kg/cm²、標準注入量約 200kg/m³）、後排気に 15 分、全体で約 3 時間とした。

(2) 高温パラフィン液相乾燥による割れ防止と乾燥材の寸法安定性

パラフィン温度が 90℃、120℃、150℃におけるスギ 120x120mm 正角材および 120x240mm 平角材の乾燥経過ならびに乾燥後の表面割れを測定した。また、前処理として高温パラフィン処理を短期間施した後、中温乾燥における表面割れ防止効果を調べた。さらに、スギ丸棒材（90mm φ、長さ 1,300mm、平均心材率 51.4%）15 本を用意し、120℃のパラフィン液相中で 24 時間乾燥した材を 5 本、150℃のパラフィン液相中で 18 時間乾燥した材を 5 本、無処理材 5 本を試験体とした。各試験体の含水率を均一にするため、恒温恒湿槽内で温度 50℃、相対湿度 70%の条件で調湿後、屋外暴露試験に供した。試験体の繊維方向を地面と垂直にし、土壤中に 300mm 埋めて屋外に設置した。

(3) パラフィン乾燥材の耐久性試験

防腐効力試験用として、スギ辺材 2 種類（20mm×20mm×10mm、30mm×30mm×450mm）を用意した。まず、20mm×20mm×10mm の寸法の材について、パラフィン処理温度は 90℃、120℃、150℃の 3 種類とし、処理時間は 30 秒とした。次に、30mm×30mm×450mm の寸法の材について、パラフィン処理温度 90℃、120℃、150℃の 3 種類で含水率 30%以下まで液相乾燥したのち、モルダー加工をし、パラフィンを削り落として 20mm×20mm×10mm の試験片を作成した。JIS K 1571 により

防腐性能を、日本木材保存協会規格第 11 号により耐蟻性能を調べた。対象材として無処理材および DDAC 薬剤と CUBAZ 薬剤注入材を用意した。

(4) スギ丸棒材の暴露試験

スギ丸棒材（直径 90mm、長さ 1.3m）をパラフィン加熱液相中（120℃および 150℃）で乾燥処理後、含水率を平準化するため、調湿処理を行ってから暴露試験に供した。供試本数はパラフィン加熱液相処理材 20 本（120℃10 本、150℃10 本）、天然乾燥材（無処理材）10 本の計 30 本である。暴露は、スギ丸棒材を地面に対して垂直に立て一部を地中に埋める方法（縦置き）と地面から離し水平に設置する方法（横置き）の 2 種類とし、種類ごとに 15 本の試験材を供した。

ウエ 結果と考察

(1) 薬剤処理による割れ防止効果

薬剤処理の有無別にスギ平角 4m 長試験材の中温蒸気式乾燥中の含水率減少経過を、ロードセル上に設置した試験材 3 本ずつについて図 2-1-3-1 に示す。初期含水率 75、83、114%の薬剤処理した試験材が 22 日後に 15、13、15%に達し、対照材である無処理試験材は初期含水率 71、94、94%が 21 日後に 10、16、19%まで乾燥した。このように、両者に所要時間の違いがほとんどみられなかったことから処理した薬剤は乾燥経過に影響を与えないことが認められた。薬剤処理した平角 4m 長試験材 5 本について乾燥終了後に表面割れの発生状況をみると、試験材 1 本あたり 4 材面合計の表面割れ長さは約 50cm で、最大割れ幅の平均は約 2mm であった。無処理材 8 本については表面割れ長さが約 136cm、最大割れ幅の平均が約 6mm で、処理材が無処理材よりも割れ長さや割れ幅ともに約 3 分の 1 と非常に小さかった。なお、スギ 120x120mm 正角材および 120x240mm 平角材をポリエチレングリコールおよび市販の割れ防止剤（コシプラス DC、ランバーメイト等）に浸漬あるいは塗布した場合、木口割れに対してはある程度の効果が認められたが、表面割れに対しては十分な効果が認められなかった。この原因は、木口面以外ではこれらの薬剤の浸透が十分でなかったためと考えられる。

薬剤処理の有無別にスギ平角 170cm 長試験材各 10 本のうち含水率が 22%以下の試験材 3 本について、また乾湿繰り返し試験中の厚さ方向寸法変化率（試験前の寸法に対する変化率）を図 2-1-3-2 に注入処理の有無別に示す。厚さ方向の寸法変化率をみると、処理材の変化率は湿潤条件後にプラス側す

なわち膨潤側に無処理材よりも大きく出現する傾向を示していたが、個々の試験材を比較すると処理材の変化率が小さいものもあれば大きなものもあり、両者に大きな差は認められなかった。

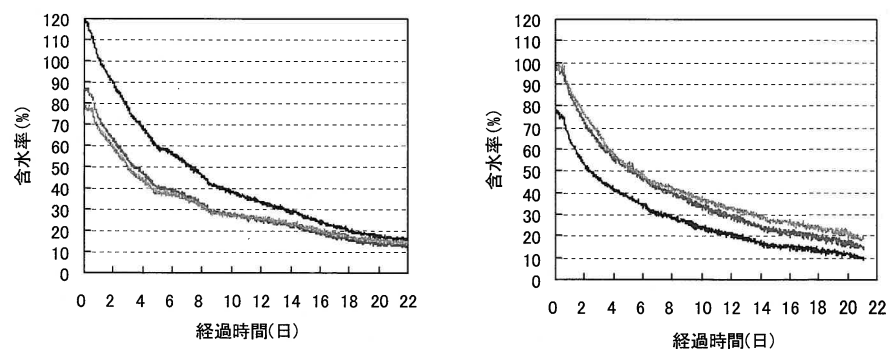


図 2-1-3-1 スギ平角材の中温蒸気式乾燥中の含水率減少経過
(左図：処理材、右図：無処理材)

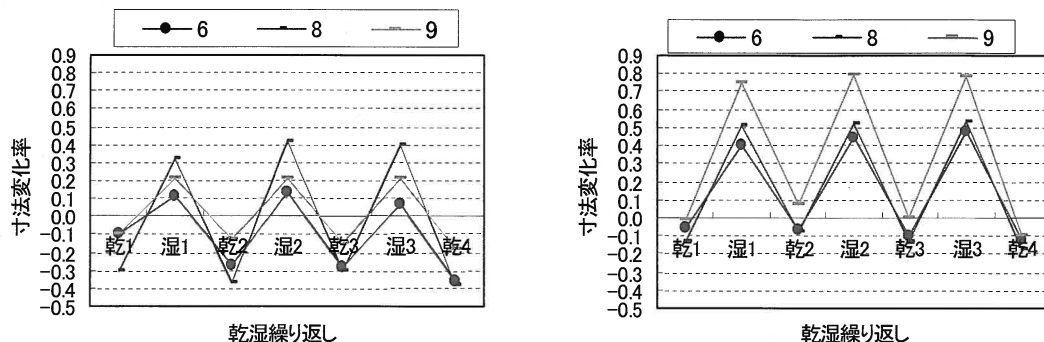


図 2-1-3-2 スギ平角材の寸法安定性試験中の厚さ方向寸法変化
(左図：処理材、右図：無処理材)

(2) 高温パラフィン液相乾燥による割れ防止効果と寸法安定性

120、150℃の高温パラフィン中では約4日間で乾燥でき、表面割れも少なく外観的には良好な仕上がりであったが、内部割れが発生し全体としては不良であった。高温パラフィン液相中での乾燥は、高温蒸気式乾燥と同様に乾燥の初期において高温域での熱弾性変形と引張りセットが形成され¹⁾、その後材内の水蒸気の圧力差²⁾により乾燥が急速に進行するものと考えられ、表面割れが少なく、内部割れが多い仕上がりとなった。乾燥経過を追って表面層のセットを調べると、約1日で表面割れ抑制に効果のある表面セットが形成されているのが明らかとなった。そこで、50-90℃の中温乾燥の前処理として利用することとした。

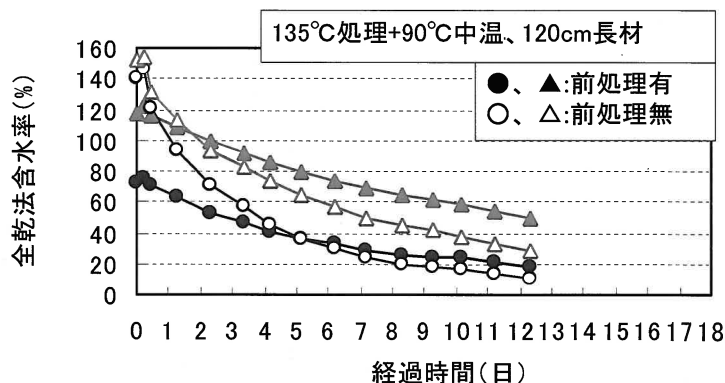


図 2-1-3-3 スギ平角材の中温乾燥中含水率減少経過

図 2-1-3-3 に示すように、乾燥速度はパラフィンによる表面被覆により低下するものの、内部割れがなく、表面割れの少ない良好な乾燥材を得ることができることを明らかにした。なお、内部割れを発生させないためには前処理は6～12時間とする。

屋外暴露における各処理材の含水率の経時変化を図 2-1-3-4 に示す。試験開始時(1月)に約15%であった含水率は、いずれの処理材においても11ヶ月経過時(12月)には上昇している。これは降雨量と土壌中の含有水分が大きく関与し、吸湿傾

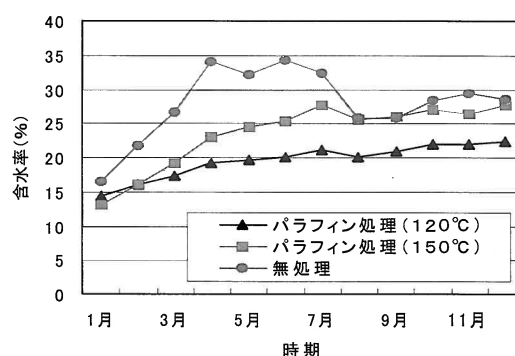


図 2-1-3-4 屋外暴露における各処理材の含水率変化

向を示したと考えられる。パラフィン処理材は無処理材に比べてパラフィンの高い撥水性¹⁾のために、吸湿が抑制され含水率変化が小さい。さらに無処理材では4～7月の間、含水率が30%を越えるのに対し、パラフィン処理材では処理温度に関係なく、30%未満を保持している。このため、パラフィン処理材は腐朽の発生³⁾が遅延すると予測できる。屋外暴露における各処理材の割れの経時変化を表1に示す。パラフィン処理材は液相乾燥終了時(屋外暴露スタート時)において、10本のうち1本のみ割れ幅1mm以上の割れがあった。暴露後もほぼ同様の状態であった。一方、無処理材では屋外暴露スタート時に5本すべてに割れがあり、暴露10ヶ月後にはスタート時とほぼ同様の状態となった。

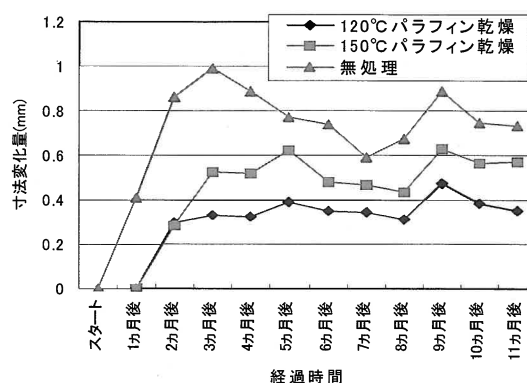


図 2-1-3-5 スギ丸棒の屋外暴露試験における寸法変化量

屋外暴露における寸法変化量の経時変化を図2-1-3-5に示す。パラフィン処理材の寸法変化量は、含水率や割れ発生変化と同様に無処理材と比較して少なく、また変化量の増減幅も明らかに少なく、寸法安定性において優った。

表 2-1-3-1 割れ幅 1mm 以上の割れの経時変化

処理方法	No.	割れ長さの合計/割れ幅の平均(最大割れ幅)			
		スタート時	5ヵ月後	8ヵ月後	10ヵ月後
120℃パラフィン乾燥	1,2,5	なし	なし	なし	なし
	3	なし	なし	1.40	なし
	4	78.22/1.26(1.26)	77.79/1.0(1.0)	1.74	170/1.15(1.15)
150℃パラフィン乾燥	11～16	なし	なし	なし	なし
無処理	22	2302/2.28(3.03)	1300/1.0(1.0)	3.51	1983/1.59(1.88)
	23	1644/1.57(1.98)	570/1.3(1.3)	3.90	2005/2.75(3.30)
	24	1560/3.75(4.50)	1230/1.8(2.2)	7.21	1197/3.79(4.36)
	28	1704/3.31(3.99)	1365/1.4(1.9)	4.73	1339/2.68(3.04)
	29	1370/2.86(3.26)	1565/1.75(2.4)	6.10	1585/2.81(3.37)

※8ヵ月後は最大割れ幅のみの値

単位：mm

(3) 高温パラフィン液相乾燥材の耐久性

パラフィン処理したスギ辺材小試験体を用いて防腐、防蟻試験を行った。図2-1-3-6には、防腐効力試験の結果を示す。対象として用いた防腐剤ほどの防腐効果は認められなかったが、無処理材に比べると十分な効果があることがわかった。パラフィン処理材の質量減少率は3.4%から10.3%で無処理材の35.6%と比べて低く、一定の防腐性能がある。パラフィン処理材の間では、処理時間が長く、注入量が多い方が逆に質量減少率が高くなっている。これは、耐候操作の60℃での乾燥処理によって、パラフィンが溶融し、材表面を均一に被覆したためではないかと考えられる。他方、プレーナー等で表面のパラフィンを除去すると無処理材より腐朽が進むことが明ら

かになった。防蟻試験においても同様な結果であった。この原因を調べるためにヘミセルロースの分子量を測定すると、パラフィン処理により分子量が低下し、これによって腐朽が進むものと考えられる。DDAC および CUBAZ による処理材の質量減少率は 1% 前後で極めて防腐性能が高い。以上の結果、パラフィンの撥水効果により、乾燥と防腐・防蟻処理が可能なこの乾燥法では最終製品の形で、すなわち生材の段階で仕口やボルト穴を開けた状態でパラフィン乾燥すべきと判断される。

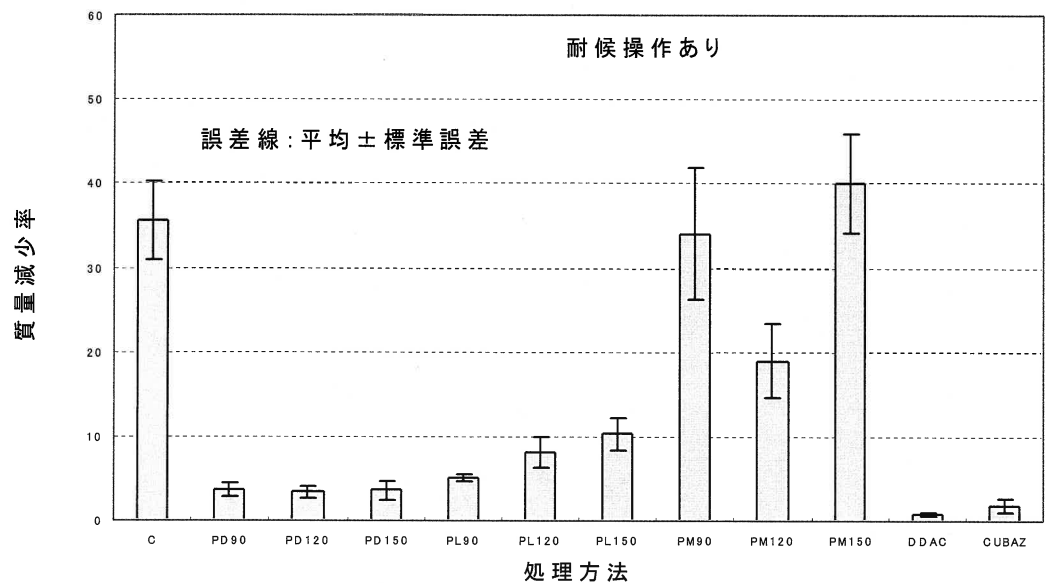


図 2-1-3-6 防腐効力試験における質量減少率

PD90, PD120, PD150 : 処理温度 90℃, 120℃, 150℃で処理時間 30 秒
PL90, PL120, PL150 : 処理温度 90℃, 120℃, 150℃で処理時間 30 秒後 80℃まで放置
PM90, PM120, PM150 : 処理温度 90, 120, 150 でパラフィンを削除、
DDAC, CUBAZ : 薬剤

(4) スギ丸棒材の暴露試験

スギ丸棒の暴露試験における材の割れ発生及び含水率を暴露開始から 20 ヶ月にわたって調べた結果を表 2-1-3-2 に

示す。パラフィン乾燥材、特に 150℃で処理したものは15ヶ月経過しても割れの発生は認められなかった。また、120℃処理材では割れが閉じているのが認められた。処理材で特徴なのは割れ幅が無処理材に比べ大幅に狭い

表 2-1-3-2 スギ丸棒材（縦置き）の割れ発生状態の経時変化

試験材	スタート時				暴露5ヵ月後				暴露10ヵ月後				暴露15ヵ月後				暴露20ヵ月後				
	含水率	幅	長さ	個数	含水率	幅	長さ	個数	含水率	幅	長さ	個数	含水率	幅	長さ	個数	含水率	幅	長さ	深さ	個数
パラフィン120℃	14.4	1.6	1117	8	20.1	1	78	1	21.9	1.15	170	1	23.9	0	0	0	23.5	1.5	1290	14.00	4
パラフィン150℃	13.1	0	0	0	25.2	0	0	0	26.3	0	0	0	29.1	0	0	0	28.7	2.5	715	7.25	4
天然乾燥	16.5	29	7210	13	34.2	1.5	6030	9	29.2	2.7	8109	12	34.4	2.3	6867	13	26.3	2.1	20990	18.27	41

注) 割れは1mm以上について測定し、割れ幅は平均値を示す。割れ長さの単位:mm

ことである。スギ丸棒材（縦置き）の含水率の経時変化は総じて一年の上半期に上昇し、下半期に横ばい状態であるといえた。これは、温湿度変化および雨量変化と連動している。無処理材は3ヶ月経過すると含水率が30%を上回るが、150℃でのパラフィン処理材は17ヶ月目に初めて30%を越えた。パラフィン乾燥したスギ丸棒を外構材、たとえばガードレール程の強度は要求されない転落防止柵等を想定して暴露試験を行ったが、無処理材に比べると防腐・防蟻効果があり実用化できることが明らかとなった、しかし、材表面が高温になる夏場では材に浸透したパラフィンが滲出することがあり、さらに融点の高いパラフィンを使用する必要がある。

オ 今後の問題点

パラフィン乾燥材を外構材として使用できることが明らかになったため、高知県内の市町村と共同して転落防止柵あるいは横断防止柵として使用している。現在施行距離は約2kmに達している。さらに、パラフィン浸透量と耐久性を明らかにし、利用用途拡大が必要である。

カ 要約

乾燥による割れや狂いが少なく、その後の寸法安定性の高い乾燥材を供給することが可能な、薬剤処理との併用による新しい乾燥技術の開発を目的として、スギ平角材における割れ防止薬剤の処理効果を検討するために、薬剤処理したスギ平角材の中温蒸気式乾燥経過、割れ発生量および収縮率や、乾燥後の乾湿繰返し試験による寸法安定性を測定して無処理の対照材と比較した。その結果、乾燥経過にはほとんど違いは認められなかったが、表面割れの発生状況は無処理材よりも非常に小さくなる傾向であった。乾湿繰返し試験中の処理材の含水率変化は、無処理材よりも大きくなる傾向であった。

スギ平角材の急速乾燥のためには、135℃パラフィン乾燥前処理を6～12時間行うことによって、表面割れ抑制効果が認められ、内部割れも抑制される。パラフィン処理材は、無処理材と比べて明らかに一定の防腐効力があるが、DDAC、CUBAZの処理材より劣る。パラフィン処理材は、無処理材と比べて明らかに一定の防蟻効力があるが、パラフィンが削り落とされると無処理材よりも劣る。これは、ヘミセルロースの熱分解によると考えられる。

また、高温パラフィン液相乾燥材の寸法安定性と耐久性を検討するために、横断防止柵あるいは転落防止柵を想定して、90mmφ、長さ1,300mmのスギ丸棒を120、150℃の高温パラフィン液相中で乾燥後屋外に暴露し、含水率、割れ発生量、寸法変化量を経時的に測定した。その結果、パラフィン乾燥材の含水率は30%以下で推移し、割れ発生もなく、寸法変化量も小さく、パラフィン処理材の寸法安定性や耐久性における優位性が明らかとなった。

キ 引用文献

- 1) 吉田孝久、橋爪丈夫、藤本登留：木材工業, 55(8), 357－362 (2000)
- 2) 寺澤 眞、金川 靖、林 和男、安島 稔：木材の高周波真空乾燥, 68－71 (1998)
- 3) 社団法人日本木材保存協会著：木材保存学入門, 69 (1998)

(高知大学農学部 金川 靖)

(4) 圧力可変スケジュールによる乾燥効率化技術の開発

ア 研究目的

蒸気エネルギーを利用した空気加熱式乾燥機は普及率の最も高い木材乾燥装置である¹⁾。木材乾燥技術において従来から行われている乾燥方式は常圧状態(101.3kPa)で温度、相対湿度の組み合わせを基にした制御方法である²⁾。本研究では、この蒸気による空気加熱式乾燥機に対して、技術移転が即時に可能である、温度と相対湿度という従来の組み合わせに気圧条件を加えた最適乾燥スケジュールの開発を試みた。

イ 研究方法

(1) 乾燥速度指標の作成

温度に対する湿度を、従来の相対湿度値から、飽和蒸気圧に対して水蒸気分圧を差し引いた指標で表すこと試みた。これは、飽和蒸気圧から水蒸気分圧を差し引いた値は木材からの水分蒸発に比例すると考えられるからである。各気体の物性値は蒸気表³⁾を参考にした。

(2) 常圧状態の乾燥試験

住宅用構造材に使用される実大製材品を用いて、最終用途や乾燥装置の性能を考慮し、実用的に技術移転可能な温度域で適正乾燥スケジュール開発のための試験をした。評価方法は、最終製品の品質とコストを考慮して、乾燥時間、割れ欠点の発生状況、収縮率、材色等とした。

(3) 弱減圧状態の乾燥試験

常圧状態で最適と考えられた乾燥温度域を用いて、住宅建築に適当な品質の乾燥材生産のための最速乾燥法を検討した。ここでは乾燥時間の短縮のため水分蒸発を促す効果のある減圧を組み入れた。減圧条件は常圧(101.3kPa)から5〜10kPa程度の減圧度とした。

ウエ 結果と考察

(1) 乾燥速度指標の作成

常圧(101.3kPa)状態における乾燥スケジュールの指標の、温度(℃)と乾湿球温度差(℃)に値する絶対圧力指標および絶対湿度図表を開発作成した。表2-1-4-1は乾燥温度と乾湿球温度差の関係から導かれた絶対湿度を各温度の飽和蒸気量(圧)から差し引いた表である。従来はこの値が平衡含水率または相対湿度で表されていたため、木材表面からの水分蒸発を比較することは明確に行いにくかった。表2-1-4-1では、これらの値が大きいほど木材表面からの水分蒸発が大きいことを表しており、従来よりも滑らかな曲線で連続的な乾燥スケジュールが作成可能と思われた。また、この図表を近似式として表して、さらに各数値が導きやすい方法を検討中である。

(2) 常圧状態の乾燥試験

表2-1-4-2は本研究に用いた温度域別の人工乾燥スケジュールである。これらのスケジュールは過去の試験⁴⁻⁶⁾に基づいて実験的に確立したものである。各試験ではこれらのスケジュールに初期蒸煮処理を8時間加えている。この初期蒸煮処理は、スギ柱材の人工乾燥時に、表面割れの軽減効果があると認められている⁷⁾。

表 2-1-4-1 絶対湿度を各温度の飽和蒸気量（圧）から差し引いた値

		乾球温度(℃)																				
		10	20	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120
乾 湿 球 温 度 差 (℃)	2	2.3	3.0	4.3	5.2	6.3	7.4	8.6	10.9	12.3	15.4	17.1	21.1	25.9	28.2	34.3	41.6	44.4				
	3	3.3	4.3	6.4	7.6	9.3	9.3	12.7	16.1	18.8	21.8	27.0	30.7	37.6	42.2	51.1	56.5	67.9				
	4	4.3	5.9	8.2	10.0	11.9	13.9	16.9	20.2	24.0	29.8	34.8	40.3	49.2	56.2	67.8	76.5	85.6				
	5	5.3	7.1	10.1	12.4	14.4	17.8	21.0	24.4	29.2	36.3	42.7	50.0	60.8	70.2	80.4	91.4	109.2				
	6	6.3	8.5	11.9	14.3	17.0	20.5	24.3	29.6	34.4	41.1	50.6	59.6	69.6	80.7	97.1	111.3	126.8	143.6			
	7	7.2	9.7	13.7	16.3	19.5	23.7	28.5	33.8	39.6	47.5	56.5	66.8	78.3	94.7	109.7	126.3	144.5	164.4			
	8	8.1	10.9	15.2	18.3	22.1	26.3	31.8	37.9	44.8	53.9	64.4	74.0	87.0	101.7	122.3	141.2	162.2	185.2			
	9		12.1	17.1	20.3	24.1	29.0	35.1	42.1	50.0	60.3	70.3	83.6	98.7	115.7	134.8	156.2	179.9	206.0			
	10		13.2	18.6	22.2	26.7	31.6	38.4	45.2	53.9	65.1	76.2	90.8	107.4	126.2	143.2	166.1	191.6	219.9			
	11		14.2	20.1	23.8	28.7	34.2	40.9	49.4	59.0	70.0	82.1	98.0	113.2	133.2	155.8	181.1	209.3	240.7	274.4		
	12		15.4	21.3	25.4	30.8	36.8	44.2	52.5	62.9	74.8	88.1	102.8	122.0	143.7	168.4	196.0	227.0	261.5	298.8		
13		16.3	22.8	27.4	32.3	38.8	47.5	56.7	68.1	79.6	94.0	112.4	130.7	154.2	180.9	206.0	238.8	275.3	315.0			
14			24.0	28.6	34.4	41.4	50.0	59.8	70.7	84.4	99.9	117.2	139.4	164.7	189.3	220.9	256.4	296.1	331.2			
15			25.6	30.2	36.4	43.3	52.5	62.9	74.6	89.2	105.8	124.4	145.2	171.8	197.7	230.9	268.2	310.0	355.5			
16			26.8	31.8	37.9	46.0	55.0	65.0	78.5	92.4	109.7	129.3	154.0	178.8	206.1	240.9	280.0	323.8	363.7	417.3		
17			28.0	32.9	39.5	47.3	56.6	68.1	81.1	97.2	115.6	136.5	159.8	185.8	218.6	255.8	291.8	337.7	388.0	445.7		
18			34.9	41.5	49.2	59.9	71.2	85.0	100.5	119.6	141.3	165.6	196.3	227.0	265.8	303.6	351.6	404.2	464.6			
19			36.1	43.1	51.2	61.6	74.4	87.6	105.3	125.5	146.1	171.4	203.3	235.4	270.8	315.4	365.4	420.4	474.0			
20			37.3	44.6	53.1	64.1	76.4	91.5	108.5	129.4	153.3	180.2	206.8	243.8	280.7	327.1	379.3	436.7	492.9			
22				47.7	57.1	68.2	80.6	96.7	116.5	137.3	162.9	191.8	224.3	260.5	300.6	350.7	400.1	461.0	521.3	596.2		
24					60.3	72.4	85.8	101.9	121.3	145.2	170.1	200.5	238.3	277.3	320.6	374.3	427.8	485.3	559.1	640.0		
26						76.5	91.0	107.1	126.1	151.1	179.7	212.2	248.8	289.8	335.5	391.9	448.6	517.8	587.4	672.9		
28							79.0	94.1	112.3	134.2	159.0	186.9	220.9	259.3	302.4	350.5	409.6	476.3	542.1	615.7	705.7	
30								98.3	117.4	140.6	164.9	194.1	229.6	269.8	319.2	370.4	427.3	490.2	566.4	653.5	738.6	

表 2-1-4-2 用いた温度域別の人工乾燥スケジュール

スケジュール番号		1	2	3	4	5	6	7	8
乾球温度	°C	50-70	60-80	85-95	90-100	100-110	110	120	135
湿球温度	°C	46-59	56-69	81-82	85-89	95-99	90	90	90
平衡含水率	%	14.1-8.0	13.8-7.7	12.5-6.6	11.1-6.5	12.0-6.2	4.1	2.2	1.5

表 2-1-4-1 のスケジュールを用いて全体的に図 2-1-4-1 のような初期含水率分布をもつスギ柱材の乾燥試験を行った。各回の試験に使用したスギ柱材 49 本とした。初期含水率は試験材のサイズが同じ場合は図 2-1-4-2 の回帰直線により初期含水率の推定が可能であった。

図 2-1-4-3～8 に表 2-1-4-1 の各温度域で乾燥試験を行った結果を示す。図 2-1-4-3 は図 2-1-4-1 の平均値に標準偏差（ σ ）を加えた初期含水率 100～110%の材が平均 20%になるまでの乾燥時間である。乾燥温度が高い方が、乾燥時間は短かった。これは常圧状態では、温度が高い方が処理温度に対して絶対湿度が低い状態

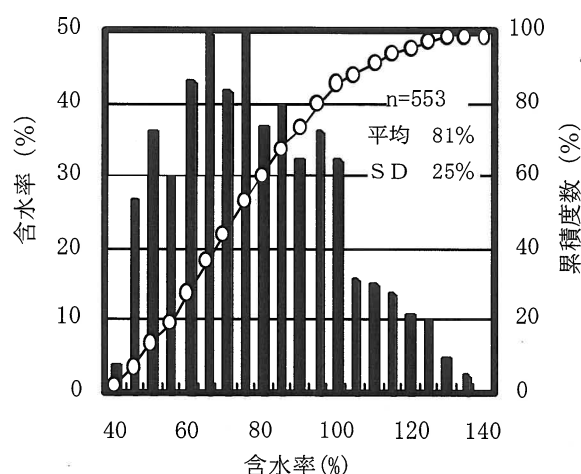


図 2-1-4-1 スギ柱材の初期含水率分布

に木材表面がさらされ、表面からの水分蒸発量が大きくなるからと考えられる。

図 2-1-4-4、5 は乾燥材の品質を左右する欠点の発生である。図 2-1-4-4 は乾燥過程で柱材の表面に現れた表面割れの数である。平均処理温度 20℃の天然乾燥に比べて人工乾燥の方が表面割れは少なかった。これは人工乾燥が温度と湿度を制御することで乾燥応力の発生を抑えることが可能なためである。また、乾燥温度が 85～100℃の温度域で表面割れの発生が少なくなったのは、水分と熱が同時に作用する場合には木材は強さや硬さを減少し、ある程度軟化するため⁸⁾と考えられる。これは、木材の構成成分である リグニン等の軟化が湿潤状態では 100℃以下になるからである。すなわち、スギ材の場合、乾燥温度が 85～100℃では乾燥過程で発生する応力を細胞自身が変形して吸収することが可能な温度域と考えられる。人工乾燥で 100℃を超えた場合に表面割れが増加したのは、水の沸点である 100℃を超えると、たとえ装置内で増湿を盛んにおこなっても、常圧状態では乾燥速度が速く、通常の乾燥方法では表面割れの発生原因である乾燥引張り応力の緩和と熱軟化による細胞変形が割れの限界応力を吸収できないからと考えられる。

85～100℃の温度域で表面割れの発生を抑えられる乾燥初期条件は表 2 の乾燥スケジュール番号 4 と 5 および表 1 の指標から推定すると約 80g/m³未満と考えられる。

図 2-1-4-5 は試験材断面で観察された内部割れの数である。この図に示されるように、乾燥温度が 100℃以上になると急激に内部割れの数が増加した。内部割れの発生は内層部の幅方向の収縮が表層部のそれよりも大きいときに発生する⁹⁾。したがって、この内部割れを生じさせないためには乾燥初期に過度な収縮を起こさせない乾燥条件が必要である。表 2 の乾燥スケジュール番号 4 と 5 および表 2-1-4-1 の指標から推定すると乾燥最終条件で約 200g/m³を超えないことが内部割れを生じさせない境

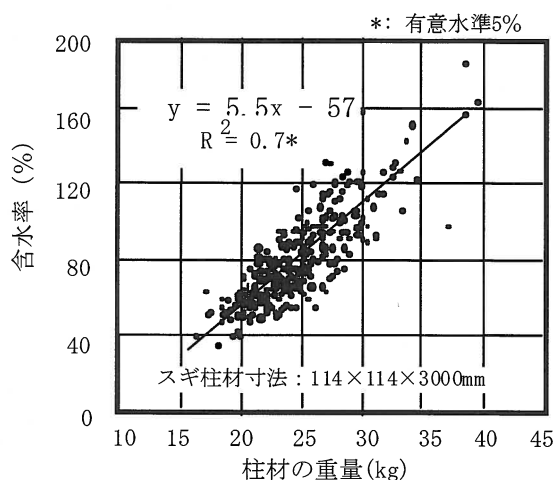


図 2-1-4-2 スギ柱材の重量と初期含水率の関係

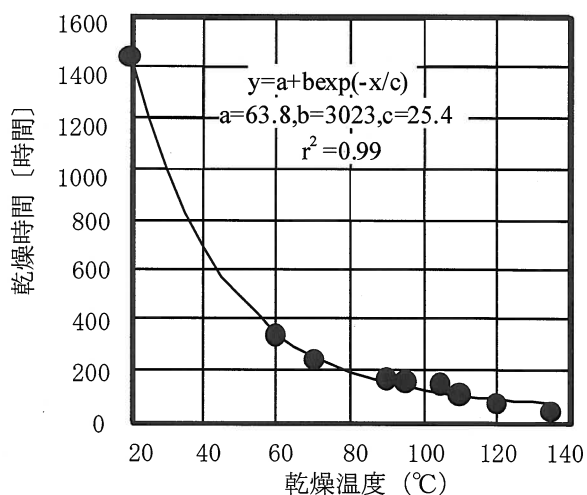


図 2-1-4-3 含水率が 20%を下回るまでの時間

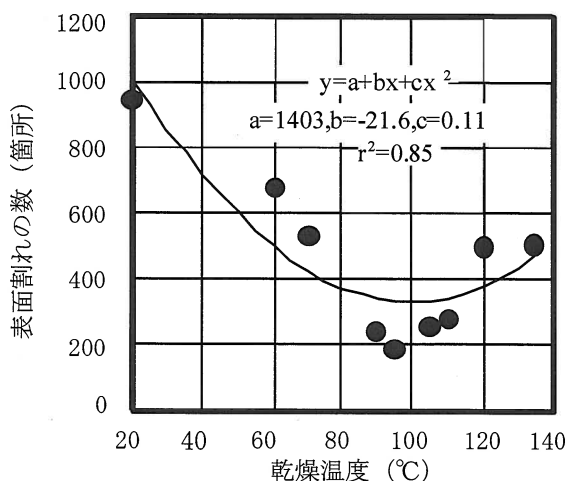


図 2-1-4-4 材面に現れた表面割れの数

界乾燥条件と思われた。

これらの内部割れは表面上にはほとんど現れないため¹⁰⁾、この乾燥素材を製品化する時、たとえばプレーナ加工やプレカット加工等を行った時に出現する可能性が考えられる。一般的に内部割れは欠点であり、100℃以上の乾燥処理では出現の確率が高く、常圧状態における乾燥処理では今後の検討課題と思われる。

図 2-1-4-6 は乾燥処理温度による平均収縮率である。乾燥温度が高い方が表面の乾燥にともなう引っ張りセットが大きく、細胞の落ち込みの現象も生じたと考えられ、結果として乾燥終了時の収縮率が大きくなった。

最終製品の寸法を保つため、製材寸法は乾燥にともなう収縮および曲がり量等を考慮して決まる。これらのデータから収縮率だけを考慮した製材寸法は天然乾燥の場合は 108mm、135℃の場合は 117mm と考えられた。したがって、製材後の乾燥工程の処理温度域で製材寸法は変わる。同様の製品寸法を製造するときには、乾燥処理温度が低い方が製材寸法は小さく抑えられると考えられる。

図 2-1-4-7、8 は天然乾燥材を基準にした材色の評価である。明度 (L*)、色度 (a*)、色度 (b*) および彩度 (c*) を比較検討した。これらの値は、人工乾燥が一般的になる前の従来の天然乾燥の値を基準にした。比較方法は各温度で天然乾燥材の基準値に対する変化率で表した。

スギ材の場合は辺材の白色、心材の赤色が一般市場における評価の対象と考えられる。このことから、辺材の場合は明度 (L*) および黄色成分の色度 (b*) の変化に着目した。図 2-1-4-7 を見ると、明度 (L*) は 100℃を超えない乾燥処理では変化率が小さかった。色度 (b*) は 70℃までの乾燥処理では変化率が少なかった。一方、心材の場合は赤色成分の色度 (a*) に注目した。ここでは 70℃までの乾燥処理を超えると変化率が大きくなった。したがって、人工乾燥処理後の材色を重視する場合には 70℃を超えない温度が最も望ましいと考えられた。建築材の場合は構造

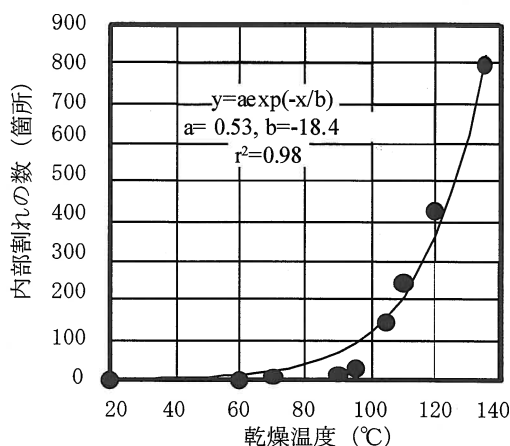


図 2-1-4-5 材面に現れた内部割れの数

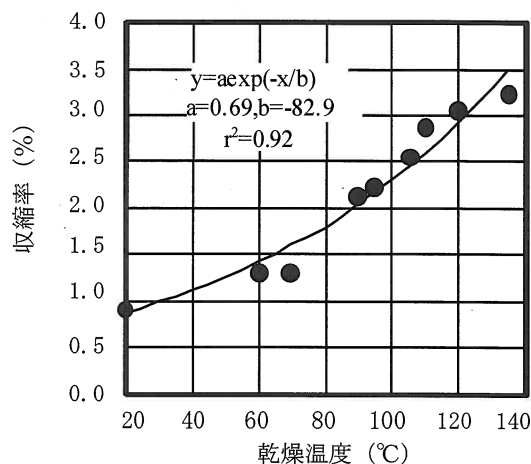


図 2-1-4-6 幅方向の収縮率

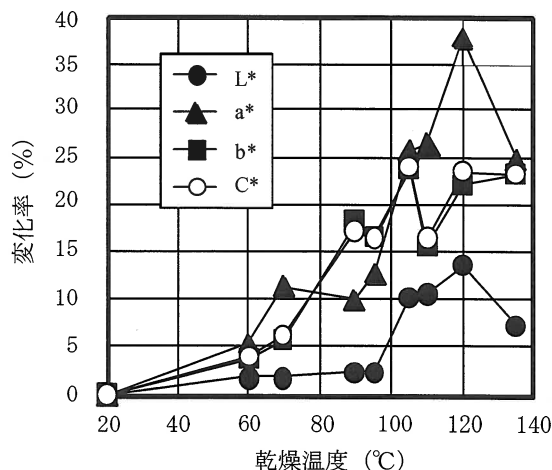


図 2-1-4-7 天然乾燥材の値を基準とした辺材色の変化率

材として使われるので、辺材色が黄色く変色しても問題は少ないことを条件に組み入れれば100℃を超えない乾燥処理が望ましいと考えられた。

以上のことから、スギ心持ち柱材の常圧状態における乾燥温度は、乾燥時間、収縮率、欠点発生および材色の乾燥温度による変化を総合的に判断した結果、50～70℃が適当と考えられた。ただし、最終用途が建築用構造材として乾燥時間をできるだけ短縮したい場合は85～95℃が適当と思われた。初期含水率100%とし、これを20%まで乾燥したときの時間は50～70℃の場合10日、85～95℃の場合8日である。この結果、従来では70～80℃の条件で乾燥したときに14日を要した¹¹⁾乾燥時間を、乾燥スケジュールの改良により大幅な短縮が可能となった。

(3) 弱減圧状態の乾燥試験

本試験では実大のスギ柱材を用いて乾燥試験を行った。減圧は常圧(101.3kPa)から-5kPaを試験対象条件とした。弱減圧としたのは、減圧度を大きくすると熱媒体である空気の密度が小さくなり熱の移動が少なくなり非効率となる可能性があるからである。乾燥温度は85～95℃とした。図2-1-4-9に乾燥温度は85～95℃のスケジュールで乾燥試験を行った常圧および弱減圧時の乾燥経過を示す。この結果、弱減圧処理では、乾燥末期の乾燥速度が約8%速くなった。

これは同じ乾燥温度でも、減圧により飽和蒸気圧が下がり約5℃の沸点降下による効果と考えられた。乾燥速度が速くなった8%の値は、常圧における飽和蒸気圧と-5kPaのときの飽和蒸気圧の比にほぼ相当した。乾燥時間では初期含水率100%の試験材が約4～5日で20%を下回ったことから、今後有望な乾燥方法に発展すると期待できる。

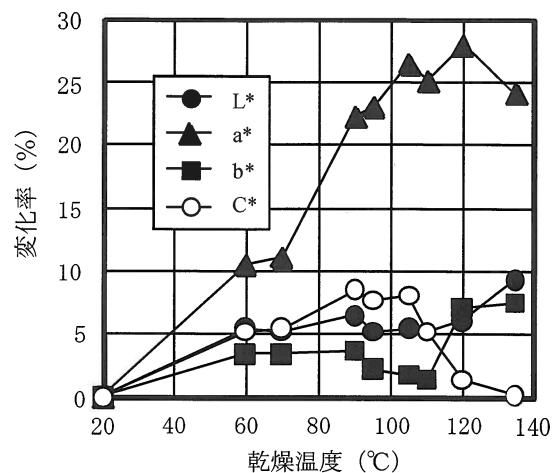


図 2-1-4-8 天然乾燥材の値を基準とした心材色の変化率

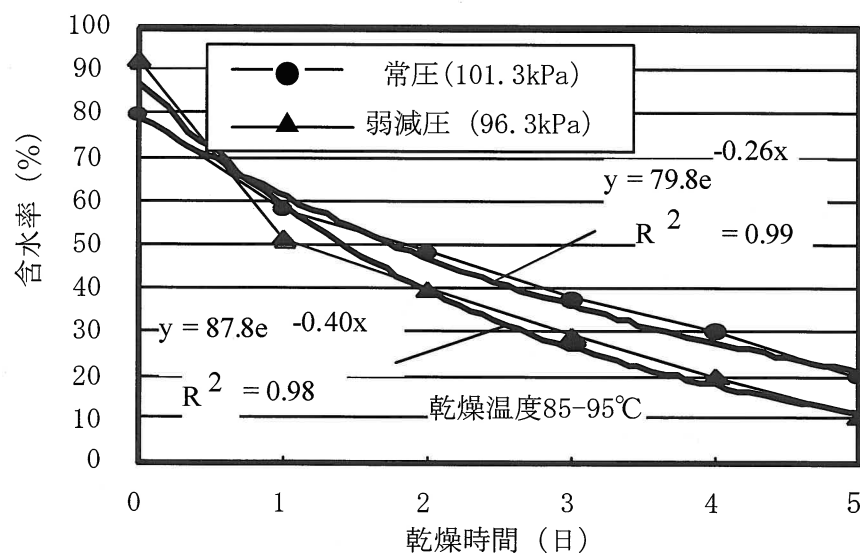


図 2-1-4-9 常圧および弱減圧乾燥時の乾燥速度

オ 今後の問題点

本研究により弱減圧乾燥処理は今後の有望な乾燥処理方法のひとつと考えられた。ただし、今回試験した装置では減圧中の湿度制御が困難であった。これは、減圧時と同時に装置内湿度を除湿してしまうからである。この問題点を解決するために、将来的には装置的な開発および、その開発装置を用いて効率的な熱媒体密度の研究開発を行えば、最終製品の品質を高めながら最速に乾燥処理が可能な技術開発ができると考えられた。

カ 要約

乾燥温度別の最適乾燥スケジュールが開発された。天然乾燥および 50℃から 135℃にわたる 8 段階の乾燥スケジュール試験を行った。ここで乾燥時間、割れ等の欠点発生、製材歩止まりに影響する収縮率、材色を総合的に判断した結果、常圧状態におけるスギ心持ち柱材の人工乾燥処理の適正乾燥スケジュールは、建築用の一般材を対象とした場合では 85～95℃、建築用でも造作材等の見えがかりに用いる場合には材色変化の少ない 50～70℃の温度域と考えられた。また、これらスケジュールを応用して、さらに乾燥速度を速めたい場合には弱減圧状態で乾燥処理する技術開発を進めることが必要と考えられた。

また、スギ材は初期含水率等の人工乾燥工程に関わる材質的な偏差が大きいことが本研究によって明らかになった。したがって、今回開発した乾燥スケジュールを最大限に活用するためには、乾燥処理前に物理的または化学的な前処理を行い、さらに選別工程として、含水率や密度等の初期条件を揃えれば割れを最小限に抑えて効率的に乾燥処理することが十分可能と考えられた。

キ 引用文献

- 1) (財) 日本住宅・木材技術センター：平成 15 年版木材需給と木材工業の現況、(財) 日本住宅・木材技術センター 編、東京、pp200-201 (2004)
- 2) 森林総合研究所監修：第 4 版木材工業ハンドブック、丸善、東京、pp300-317 (2004)
- 3) 蒸気表、日本機械学会編、丸善、東京 (1999)
- 4) 齋藤周逸：平成 11 年度森林総研研究成果選集、24-25 (2000)
- 5) 齋藤周逸他：日林関東支部論集、52、173-176 (2001)
- 6) 齋藤周逸他：日本林学会関東支部論文集、53、231-232 (2001)
- 7) 齋藤周逸：木材工業、53、601-606 (1998)
- 8) 浅野猪久夫編：木材の事典、朝倉書店、東京、pp131 (1982)
- 9) 寺沢真、筒本卓造：“改訂版 木材の人工乾燥”、日本木材加工技術協会、東京、pp26-28 (1986)
- 10) 齋藤周逸、外崎真理雄：日本木材学会大会要旨集、54、p. 556 (2004)
- 11) (社) 全国木材組合連合会編：乾燥材生産の技術マニュアル、pp9-14 (2003)

(森林総合研究所加工技術研究領域 齋藤周逸)

(5) 減圧乾燥における乾燥効率化技術の開発

ア 研究目的

減圧乾燥においては、熱板¹⁾や高周波²⁾等による効率的な熱付与方法が検討され、既に広葉樹材を主な対象とした高周波減圧乾燥技術が実用化されているが、コスト的にスギ材の乾燥に活用されていないのが現状である。また、減圧下での空気加熱は加熱が難しく、加熱－減圧の繰返しにならざるを得ない³⁾。これを打破するためには、減圧下における新しい技術の開発が必要であり、本研究では、特に熱風減圧乾燥における減圧度と熱風温度の違いによる乾燥特性及び高周波の印加方法等を検討し、減圧下での外部加熱及び内部加熱併用技術の開発を行う。

イ 研究方法

(1) 熱風減圧乾燥特性

圧力を常圧、73.3、46.7、26.7kPa、熱風温度を70℃、90℃の計8条件で乾燥を行ない、乾燥速度等の乾燥特性を検討した。試験材は、13.0cm正角・材長4.0m(背割りなし)56本を平均含水率が同程度になるように4グループに分けた後、熱風温度間でエンドマッチングした材長1.0m(片側コーティング)の小試験体をそれぞれの試験で14本ずつ用いた。乾燥は熱風温度一定で、湿球温度はなりゆきとし、風速は一定(ファンの周波数一定)とした。一定時間毎にモニター材を4本ずつ取り出し、重量・割れ等を測定するとともに、材温は表層から0.5cm、3.3cm、6.5cmの3箇所を熱電対で測定した。乾燥終了後には、全ての材で材端から25cm、50cm、75cmの3箇所ですべて全乾法により含水率を求めた。

(2) 熱風高周波併用減圧乾燥

減圧下で熱風と高周波を併用した乾燥方法を検討するために、圧力を40.0～46.7kPa、材中心温度と熱風温度を83℃で制御した熱風高周波併用減圧乾燥を実施した。高周波は13.56MHz、陽極電流1.0A、陽極電圧7kVで、高周波印加の材温制御は木口に挿入したPtセンサー(テフロン加工)と発振率により制御し、極板にはアルミの波形極板を用いた。また、比較のために圧力・温度を変えた2条件(①圧力20.0～22.7kPa・材中心温度70～72℃、②圧力9.3～10.7kPa・材中心温度56～58℃)の高周波減圧乾燥を行った。試験材は、平均初期含水率80%程度の実大材(材長3.0m、13.0cm角、背割りなし)をそれぞれ24本ずつ使用し、蒸煮はすべての試験で95℃・12時間実施した。

(3) 複合乾燥①(熱風減圧乾燥+熱風高周波併用減圧乾燥)

乾燥初期には大きな乾燥速度が得られる熱風減圧乾燥を行い、含水率が約40%からは乾燥速度をあまり低下させずに、含水率のバラツキと水分傾斜を小さくする目的で、熱風高周波併用減圧乾燥を実施した。

予備試験を数回実施し、比較的良好と認められた高温での熱風減圧乾燥の結果、及び高周波印加方法の結果から、以下の条件で複合乾燥①を実施した。

スギ実大材、13.0cm角、材長3.0m(背割りなし)、初期含水率約100%のものを10本用い、常圧で蒸煮を90℃・12時間実施した後、圧力70kPa・熱風温度110℃・24時間、圧力30.7kPa・熱風温度90℃・12時間の合計36時間を熱風減圧乾燥で実施し、その後、同30.7kPaで熱風温度65℃・材中心温度85℃で熱風高周波併用減圧乾燥を行った。

乾燥終了後は材温が下がるのを待って乾燥機から取り出し、割れを測定するとともに、含水率と水分傾斜を両木口から0.5mと中央の計3カ所で測定した。また、内部割れは含

水率試験片で最大のものを測定した。

なお、高周波印加の方法はイ（２）と同様であるが、材温制御については、木口面の材温が低下するため、実質的には材中央・中心に挿入した光ファイバーセンサーで制御を行った。

（４）複合乾燥②（高温セット＋熱風減圧乾燥, 高温セット＋熱風高周波併用減圧乾燥）

イ（２）の方法から、より実用的な複合乾燥方法として、高温セットを行った後に、熱風減圧乾燥や熱風高周波併用減圧乾燥を行う方法（複合乾燥②）を検討した。

スギ正角小試験体（13.3cm 角・材長 1.3m・背割りなし）をそれぞれの試験で 24 体ずつ用い、片端をエポキシ樹脂でコーティングし、試験材とした。実験 1 は、蒸煮を 90℃で 9 時間実施した後、高温セット（乾球温度 120℃・湿球温度 90℃で 16 時間処理）を行い、その後、圧力 47.3kPa に減圧し、乾球温度 90℃、湿球温度はなりゆきとした。実験 2 は高温セットの後、圧力 47.3kPa に減圧し、乾球温度 80℃、湿球温度はなりゆきで、材中心・中央に挿入した光ファイバー式温度計の温度が 85℃～90℃になるように高周波の発振（陽極電流 0.8A、陽極電圧 5kV）を制御した。実験 3 は比較のため、高温セットの後、乾球温度 90℃、湿球温度 60℃で実施した。

ウエ 結果と考察

（１）熱風減圧乾燥特性

表 2-1-5-1 に試験結果の概要と、図 2-1-5-1、図 2-1-5-2 にモニター材の含水率減少経過を示す。今回の試験では、圧力別の乾燥速度（試験体 14 本の平均）は、圧力に関わらず熱風温度 90℃は 70℃に比べ約 2 倍の乾燥速度を示した。なお、圧力が低くなるに伴い乾球温度 90℃、70℃とも乾燥速度は速くなり、圧力 26.7kPa は常圧に比べ約 2 倍の乾燥速度を示した。

表 2-1-5-1 熱風減圧乾燥試験結果

試験区分		初期含水率	乾燥後含水率	乾燥時間	乾燥速度	材面割れ合計	木口割れ合計
圧力 (kPa)	熱風温度 (℃)	(%)	(%)	(hr)	(%/hr)	(cm)	(cm)
常圧	90	73.7	22.6	94	0.54	52	143
73.3	90	70.6	23.4	70	0.67	33	174
46.7	90	72.4	21.7	57	0.89	40	192
26.7	90	73.6	23.6	46	1.09	61	196
常圧	70	73.4	21.0	190	0.28	86	108
73.3	70	70.9	20.6	141	0.36	74	154
46.7	70	67.8	22.0	128	0.36	75	239
26.7	70	70.3	21.8	102	0.48	49	203

（注） 含水率は全乾法で試験体14本の平均。材面割れと木口割れは1本当たりの平均長さ。

また、みかけの乾燥効率〔投入熱量（重油及び乾燥機・ボイラーの電気系統の熱量の和）に対する蒸発に要した熱量（材温の上昇及び水分蒸発に要する熱量の和）の比で、材の充填率を考慮している〕を温度別に、常圧に対する比として図 2-1-5-3 に示した。圧力が低くなるにつれ乾燥効率は高くなり、減圧の効果は大きい。圧力 26.7kPa における関係湿度¹⁾は、90℃で約 38%と低く、常圧と比較すると非常に厳しい乾燥条件と言える。しかし、圧力 26.7kPa における乾燥効率は、90℃で約 30%、70℃で約 20%しかなく、乾燥機の構造上放熱が大きいことと、熱せられた蒸気を圧力維持のため真空ポンプで吸引するため、熱風減圧乾燥の効率は極端に低いと言わざるを得ない。

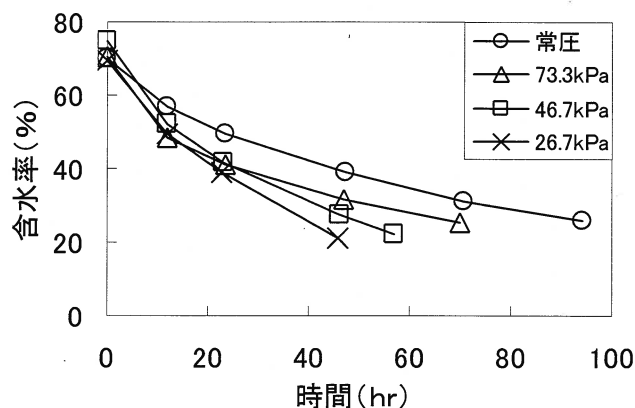


図 2-1-5-1 熱風減圧乾燥 (90℃) における含水率の推移

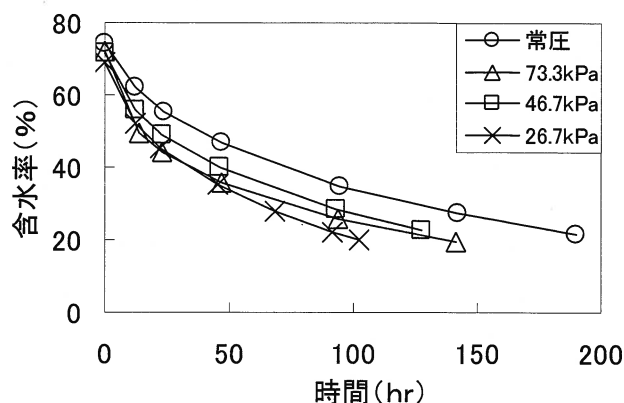


図 2-1-5-2 熱風減圧乾燥 (70℃) に含水率の推移

一方、90℃乾燥における各圧力別材中心温度の推移を図 2-1-5-4 に示した。常圧と圧力 73.3kPa はすみやかに温度が上昇したが、それ以下の圧力では圧力が低くなるほど温度上昇に時間がかかり、特に圧力 26.7kPa では、90℃及び 70℃ともその傾向が顕著で、表層から 0.5cm の材温も同様であった。これらのことから、減圧乾燥においては圧力が低すぎると水蒸気等による木材への熱伝達は少なく、加熱管等からの輻射熱による影響が大きくなることが窺える。

(2) 熱風高周波併用減圧乾燥

表 2-1-5-2 に乾燥結果を示す。乾燥時間は各条件で顕著な差はなかった。また熱風高周波併用減圧乾燥と高周波減圧乾燥 1 では、図 2-1-5-5 のとおり表面割れや木口割れの発生に顕著な差は認められなかったが、圧力を下げた高周波減圧乾燥 2 では表面割れが多く水分傾斜も他の条件と比べ強い M 型が残った。なお、内部割れは 3 条件において発生しなかった。

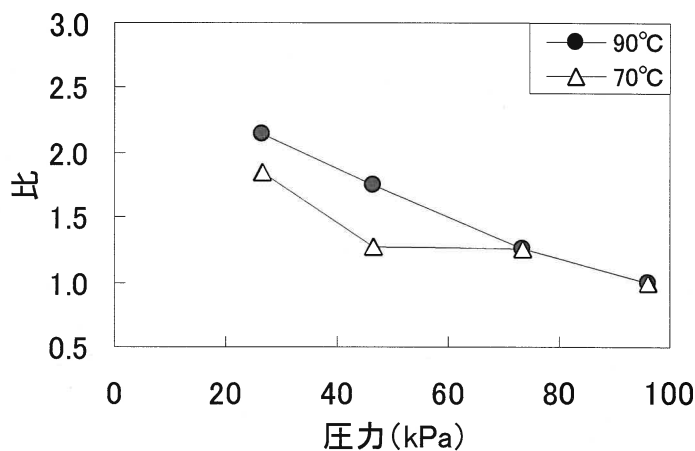


図 2-1-5-3 常圧に対する乾燥効率の比

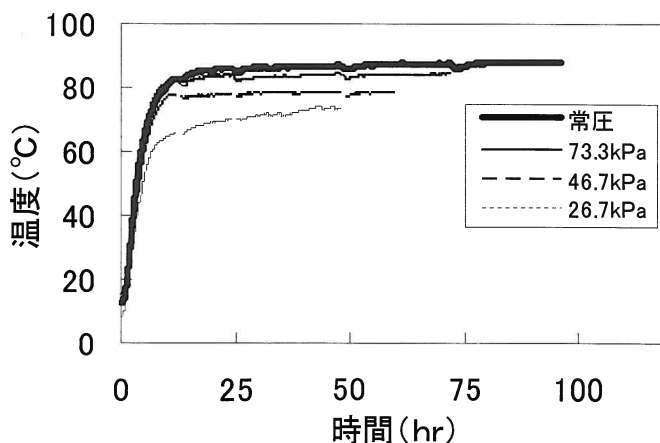


図 2-1-5-4 90℃における材中心温度の推移

表 2-1-5-2. 熱風高周波併用減圧乾燥及び高周波減圧乾燥試験結果

試験区分	初期含水率 (%)	乾燥後含水率 (%)	乾燥時間 (hr)	高周波消費電力 (kWh)
熱風高周波併用減圧乾燥	76.2	17.8	59	227.3
高周波減圧乾燥①	73.4	15.4	64	361.5
高周波減圧乾燥②	90.9	18.3	61	347.5

(注) 含水率は任意の14本。乾燥時間には蒸煮時間を含む。

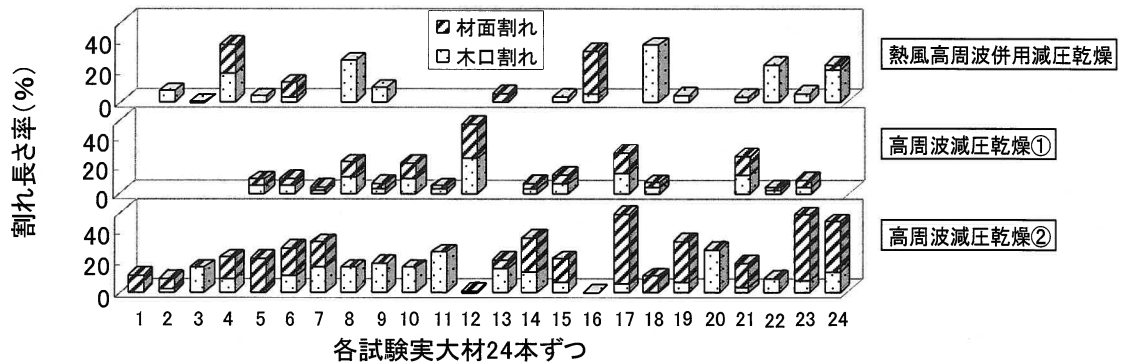


図 2-1-5-5 乾燥後の割れの状況

注：割れ長さ率は総材面長に対する割れ長さ合計の率

今回の試験では、乾燥時間の短縮及び高周波消費電力や水分傾斜を少なくするには、熱風高周波併用減圧乾燥が有効と認められるが、材面割れが高温乾燥に比べ比較的多いことと初期含水率が高いものは乾燥が不十分であった。

(3) 複合乾燥①（熱風減圧乾燥＋熱風高周波併用減圧乾燥）

モニター材 2 本の含水率減少経過を図 2-1-5-6 に示した。乾燥初期から高周波を印加すれば、短時間で乾燥が可能であるが、今回は乾燥開始後 48 時間目から高周波を印加しており、仕上がり含水率のバラツキを抑えるためには、高周波の印加時期を乾燥後期にすることが適当と認められた。また、高周波の効率（高周波消費電力に対する蒸発に要した熱量のみかけの比で、熱風による乾燥は含んでいない。）は、乾燥後期の高周波印加のため約 15%であった。

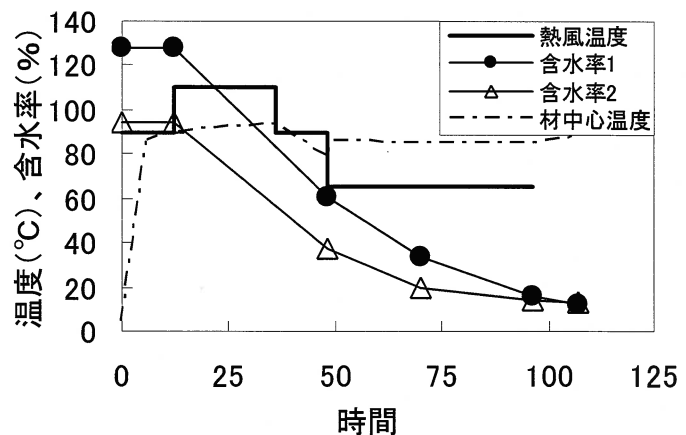


図 2-1-5-6 モニター材の乾燥経過

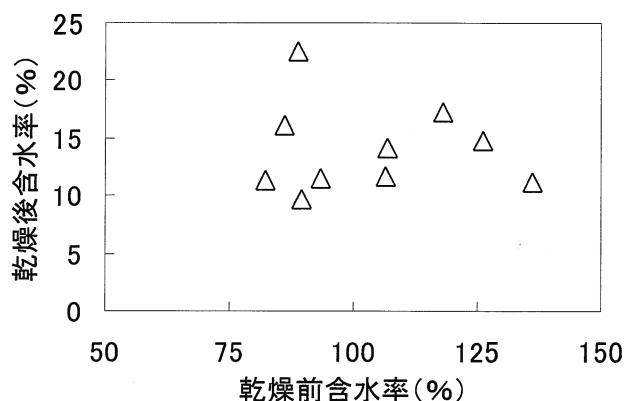


図 2-1-5-7 乾燥前後の含水率

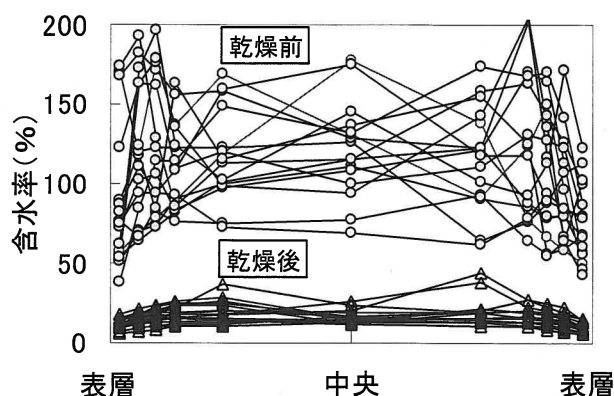


図 2-1-5-8 乾燥前後の水分傾斜
(小試験体)

一方、乾燥前後の含水率の関係を図 2-1-5-7 に示した。仕上がり含水率で 20% を超えたものは 1 体のみでバラツキも比較的少なかった。乾燥後の水分傾斜は、図 8 のとおり弱い M 型を示した。なお、水分傾斜は実大材で実施した方法と同様の方法で乾燥した、小試験体のものである。

材面割れ本数と割れ幅及び内部割れに関しては、視覚的に認識できるものは全て測定したが、表 2-1-5-3 のとおり比較的少ないものとなった。割れ本数は温度が高いため発生率は少なかったが、割れ幅に関しては小さいというより割れが閉じている場合が殆どであり、これは熱風減圧乾燥時点で既に割れがあったものが、高周波の印加により閉じたためである。

(4) 複合乾燥② (高温セット+熱風減圧乾燥, 高温セット+熱風高周波併用減圧乾燥)

図 2-1-5-9 に実験 1 (高温セット+熱風減圧)、図 2-1-5-10 に実験 2 (高温セット+熱風高周波併用減圧)、図 2-1-5-11 に実験 3 (高温セット+熱風乾燥) のモニター材の乾燥経過を示した。

実験 1 では実験 3 に比べ高温セットの後、同じ温度で減圧しただけであるが、乾燥時間は約半分、コスト (電力と重油の消費量/リットル/m³) は約 70% に短縮できた。乾燥後の水分傾斜は実験 3 に比べ減圧したため、材中心部の含水率がやや低く、台形の形をしていた。乾燥後の含水率は 20% とまだ高い状態であったが、乾燥後の割れは実験 3 と有意差はなく、高温セットの効果と思われる。

一方、実験 2 は高温セットの後、熱風と高周波を併用し減圧したため、乾燥時間は実験 3 に比べると約 35% に短縮され、乾燥

表 2-1-5-3 材面割れ等試験結果

表面割れ及び木口割れ			内部割れ
本数(本)	長さ(cm)	割れ率(%)	本数(本)
1.3	67.2	5.6	1.0

(注) 割れは小口割れ及び材面割れの合計。
数値は全体の平均値。
割れ率は総材面長に対する割れた合計長さの率。

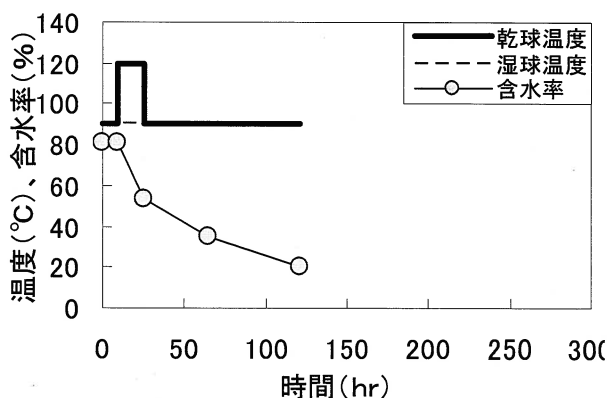


図 2-1-5-9 実験 1 (高温セット+熱風減圧)
のモニター材の乾燥経過

後の含水率も 15%と低く、水分傾斜も少なかったが、コストは約 1.9 倍であった。

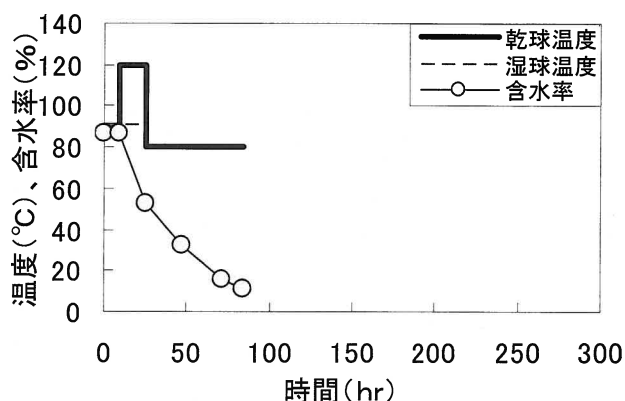


図 2-1-5-10 実験 2 (高温セット+熱風高周波併用減圧) モニター材の乾燥経過

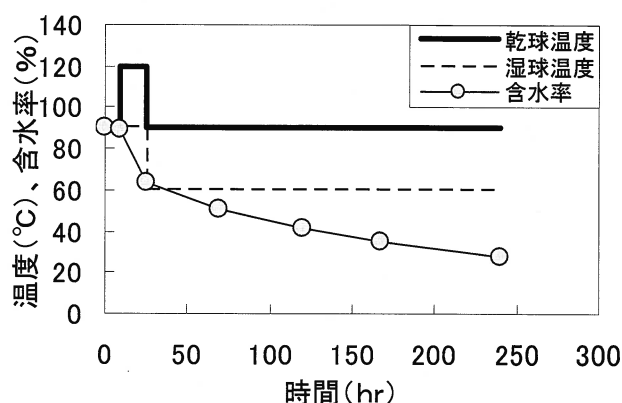


図 2-1-5-11 実験 3 (高温セット+熱風乾燥) のモニター材の乾燥経過

オ 今後の問題点

今回の試験では、高周波の印加に際し、木口の材温が設定温度より 10℃以上低く、特に含水率が高いものは、温度上昇に時間がかかった。このため、材中央中心に挿入した光ファイバーセンサーで制御を行ったが、今後は材温制御位置、方法並びに材内の温度や圧力等を同時にモニターする技術が必要と認められる。

熱風高周波併用減圧乾燥を乾燥後期に実施した方法では、品質はよいものの、まだコスト的に高いため、減圧度等についてさらなる検討を要する。また、他の乾燥方法との併用や、材料的に背割り材や平角等の適用方法について、高周波の印加時期や方法を含め検討する必要がある。

カ 要約

減圧下における圧力と熱風温度との関係を把握するため、圧力・温度別に熱風減圧乾燥を実施した結果、以下のことが明らかになった。①乾燥速度は圧力に関わらず乾球温度 90℃は 70℃に比べ約 2 倍の乾燥速度を示した。②圧力が低くなるに伴い乾燥速度は速くなり、特に乾球温度 90℃においては、圧力 26.7kPa は常圧に比べ約 2 倍の乾燥速度を示した。

また、熱風減圧乾燥を乾燥初期に高温で処理し、乾燥中期から後期にかけて熱風高周波併用減圧乾燥を実施することにより、乾燥速度の向上が図られ、かつ割れが少なく含水率のバラツキや水分傾斜が小さい等、品質のよい乾燥が可能であった。

高温セットの後に、熱風減圧乾燥や、熱風高周波併用減圧乾燥を実施した方法は、さらに材面割れを抑制した、高速乾燥方法として有効であった。

キ 引用文献

- 1) 金川 靖, 寺沢 真: 木材工業 33, 109-113 (1978).
- 2) 金川 靖: 木材工業 40, 66-70 (1985).
- 3) 筒本卓造, 益子義広: 木材工業 33, 538-540 (1978).

(愛媛県林業技術センター 武智正典、越智仁夫)

2. 大型構造物を可能とする丸太及び大断面材の乾燥処理技術の開発

(1) 蒸煮減圧処理によるスギ心持ち平角材の乾燥前処理技術の開発

ア 研究目的

スギ資源の充実や伐期の長期化に伴い中目材の供給量は増加している。中目材の用途は、柱一丁取り適寸丸太に比べて幅広く、最近では新たな用途として厚み 30 mm 程度の板が住宅建築に利用される事例が増えている。しかし、中目材の有効利用には、製材歩留まりが高い大断面材である心持ち平角材を、住宅の主要構造材である横架材に利用することが望まれる。現在、横架材にはベイマツ乾燥材や集成材が多く利用されている。その理由は、住宅供給側がそれらの部材に住宅の構造信頼性を担保できるだけの信頼性があると判断しているためであろう。スギ心持ち平角材を、それらの部材と同様の状況にするためには、信頼性の高い乾燥技術が不可欠である。

ところで、蒸煮減圧処理はスギ心持ち柱材乾燥の前処理として、割れ発生の抑制、含水率の低減と均一化、短い処理時間、安いランニングコスト、また既存の乾燥施設との組合せ乾燥による乾燥エネルギー低減などの長所が示されている¹⁾。これらの長所を、信頼性の高い乾燥スギ心持ち平角材供給システムの乾燥前処理に活用することを目的に処理条件の検討を行った。次に、検討の結果得られた処理条件を考慮し、実用機で実大サイズのスギ心持ち平角材を前処理し、処理による含水率変化、長期放置中の材収縮の経時変化から、組合せ乾燥法の開発を目標とした。

イ 研究方法

(1) 処理条件の検討

県産スギ心持ち正角材や平角材を供試材として、処理条件検討のため以下の実験を行った。使用した蒸煮減圧装置は㈱ヤスジマ製、圧力容器の有効内径60cm、有効長さ2mである。蒸煮温度の制御は缶内の圧力制御で行い、使用最高圧力は2MPaである。

蒸煮温度検討のため、蒸煮温度と主に材表層の硬さとの関係を求めた。蒸煮温度は120℃～190℃の範囲である。処理材の外観、採取した試片による材内部の観察ならびにPILODYN 6J（ピン径2.5mm）を用いた材表層の硬さ試験の結果を蒸煮温度の判断因子とした。

蒸煮時間検討のため、断面寸法と材内温度との関係を求めた。供試材には、1体の平角材（厚み12×幅24×長さ400cm）から採った長さ1m、材厚が同じで材幅12cm、18cm、24cmの3種類各1体ずつを用いた。供試材3体を蒸煮温度120～130℃で同時に蒸煮し材温（以下、材横断面中央部の材温を示す）を測定した。同じく蒸煮時間検討のため、材含水率と材温との関係を求めた。供試材には、含水率17～61%のスギ心持ち正角材（12×12×200cm）4体を用いた。蒸煮温度は120～150℃で、4体を同時に蒸煮し材温を測定した。

これらの試験結果から、強度性能の低下がないと判断された蒸煮温度130℃以下において、処理の均一性を高めるために必要な蒸煮時間について再検討を行った。蒸煮温度は110℃、120℃、130℃の3条件である。120℃蒸煮では、蒸煮工程以降に缶体内部を缶体内部の加熱管で加熱した。各処理に

よる含水率変化、特に材表層の含水率状況を調べた。

減圧方法については、所定圧力まで連続的な減圧と段階的な減圧を行い、含水率低下に差があるかを検討した。

(2) 実用機で処理した実大サイズの平角材における寸法安定性ならびに品質評価

実験用装置による処理条件の検討結果を踏まえ、実用機で実大サイズのスギ心持ち平角材（13cm×22cm×4m）を処理（表 2-2-1-1）し、含水率変化、放置中の寸法変化、および割れの発生状況を調べ、長期放置後に曲げ強度試験を行った。使用した装置はヒルデブランド製 PS ドライヤーである。処理条件毎の供試体数は 10 本ずつで、各グループの生材密度の平均値がほぼ等しくなるよう区分した。処理直後の含水率は条件毎に 3 本ずつの供試材で測定した。含水率測定試片は材長中央部から採った。処理後、屋根付で周囲を寒冷紗で覆った環境で長期間放置した。放置中の栈積みは、コンクリート製 U 字溝（高さ約 70cm）上に H 鋼と栈木を渡し、地上高さ 90cm 以上の高さで行った。

ウエ 結果と考察

(1) 処理条件の検討

蒸煮温度190℃、160℃の場合、材色は著しく暗色化し、切り出した木口試片では材表層部に年輪界に沿った部分的な剥離、過乾燥の高温乾燥材で見られる放射状の内部割れが多数生じるなど明らかな材質劣化がみられた。蒸煮温度130℃で材温120℃以下の場合、外見上の劣化はなく、材面から打ち込んだピロディン打ち込み深さにも処理材と無処理材との差はなかった。これらのことから、蒸煮温度は130℃以下が妥当と推察された。また130℃以下の蒸煮では、処理直後に両木口付近以外の部位から切り出したいずれの木口試片においても、髄から放射状に伸びた長さ2～3cm程度の割れ数本がみられた。この髄付近の割れについて、特に繊維方向のつながりの程度を観察するため材を割裂した。その結果この割れは、蒸煮工程以降の開放や減圧工程において、材内に生じた蒸気が材外へ排出される経路として、繊維方向にほぼ連続していると推察される状況であった。

材温変化は、材横断面の長辺寸法ではなく、短辺寸法にほぼ依存することが確認された。次に、材質に大きな違いがなく含水率が異なる材を同時に蒸煮した場合、十分な蒸煮時間ではいずれの材温も蒸煮温度に達するが、材温上昇過程では、含水率が低い材より高い材が常に低い温度で推移した。これらのことから、蒸煮減圧処理においても、処理材の横断面短辺寸法を揃えること、また材の重量選別などで処理時含水率のばらつきを小さくすることが処理の均一性を高めるために有効であることが

表 2-2-1-1 実用機での処理条件と材温の状況

処理区分	処理時間 (分)						材温状況	
	蒸煮	降圧	排水	減圧	開放	合計	到達温度* (℃)	100℃以上の時間 (分)
A	400	240	0	90	30	760	116.4	336
B	180	130	110	90	30	540	101.3	156
C	400	60	180	360	60	1060	115.7	312

*: 到達温度は測定した各グループ3本の平均値を示す。
蒸煮温度はいずれの条件も120℃である。

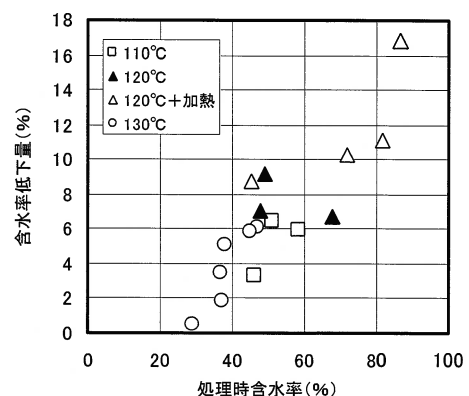


図 2-2-1-1 処理時含水率と処理による含水率低下量との関係

分かった。

蒸煮温度130℃以下における蒸煮時間等の再検討から得られた結果の一つとして、処理時含水率と含水率低下量との関係を図2-2-1-1に示す。処理時含水率が80%を超える場合の含水率低下量は10%以上であったが、同様に30%程度ではその低下量はわずかであった。全体として、処理時含水率と含水率低下量との間には正の相関関係 ($r^2=0.74$) がみられた。処理時含水率が似かよった材で含水率低下量を比較すると、110℃ (処理時含水率:46.3%) で2.3%、120℃ (47.7%) で4.8%、130℃ (46.9%) で4.1%、120℃+加熱 (45.5%) で6.0%であった。120℃+加熱のように蒸煮工程以降に缶内を加熱した場合、水分蒸発に伴う被処理材の材温低下が緩やかになることで水分蒸発可能な時間が長くなり、含水率低下を促進することが伺える。次に、処理直後の含水率分布の一例を図2-2-1-2に示す。材表層の含水率は、材全体の含水率変化 (図2-2-1-1) からは明らかではないが、いずれの条件でも繊維飽和点以下まで乾いており、120℃+加熱は表層含水率低下に効果的であることがわかる。

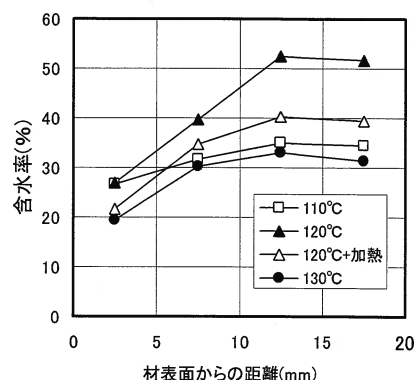


図 2-2-1-2 処理後の材表面部の横断面方向の含水率分布の一例

蒸煮減圧処理の均一性を高めるためには、処理材全ての材温が蒸煮温度に達することが望まれる。ところで、蒸煮減圧処理はスギ心持ち柱材の乾燥前処理に利用されているが、蒸煮時間は材短辺寸法から算出され、実験に供した12cm正角材の場合、蒸煮時間は120分×1.5=180分となる。この算出法による時間の蒸煮では、材温が蒸煮温度に達した例はみられず、処理の均一性のためには蒸煮時間の延長が必要と推察された。一例として、12cm正角材を用いた減圧手法の検討では、120℃蒸煮で材温が蒸煮温度に達するまでに要した時間は約240 分間であった。このように、より長時間の蒸煮に適した蒸煮温度を再考したところ、これまでの実験結果から120℃が妥当と考えられた。

減圧手法の検討において、含水率低下量に対する減圧手法の影響は明らかではなかった。ただし、減圧程度にもよるが減圧時間を十分にとることによって、処理直後の材横断面方向の含水率分布は、表層と材中央部 (髓付近) の含水率が低い、いわゆるM型の分布 (図 2-2-1-3 参照) になることがわかった。処理直後の含水率分布がM型かどうかをみることは、蒸煮減圧処理全体が効率よく行われたかどうかのチェックに有効であろう。また、含水率低下量に対する心材率の影響が大きいと推察された。

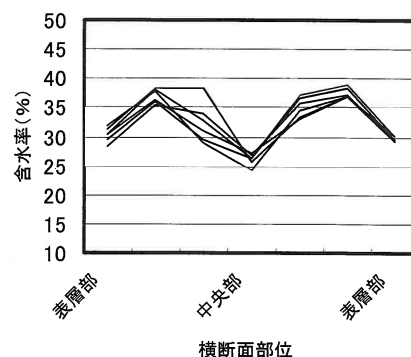


図 2-2-1-3 処理後のM型含水率分布の一例

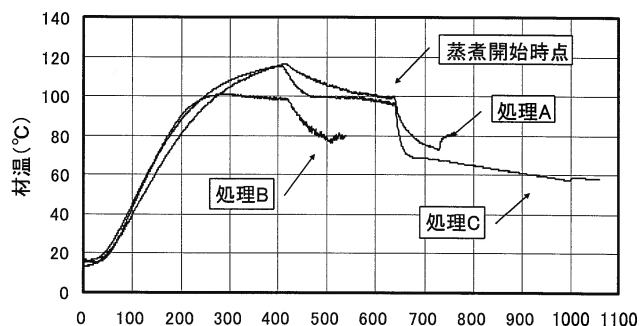


図 2-2-1-4 実用機における処理中の材温変化

(2) 実用機で処理した実大サイズの平角材における寸法安定性ならびに品質評価

図 2-2-1-4 に処理中の材温変化の一例を、図 2-2-1-5 に処理直後の含水率分布 (図の上段) と放置中の材長辺方向の収縮率 (図の下段) の経時変化を無処理材も含めて示す。処理直後の材横断面方向の含水率は、いずれの処理においても表層と中央部が低い分布(M型)であった。材中央部含水率が低い理由は、蒸煮以降の降圧・排水 (開放状態)・減圧の工程において、蒸煮で生じた髄割れを通して材内水分が蒸気の状態で材外へ除去されたためと推察される。次に、処理Aに比べ処理Cの含水率が全体的に低かった。これは減圧時間が長い処理Aの方が、蒸煮工程以降、水分蒸発が可能な時間が長く維持されたためと推察される。このことは、減圧以降の材温が処理Aに比べて処理Cが低く推移していることから伺える。

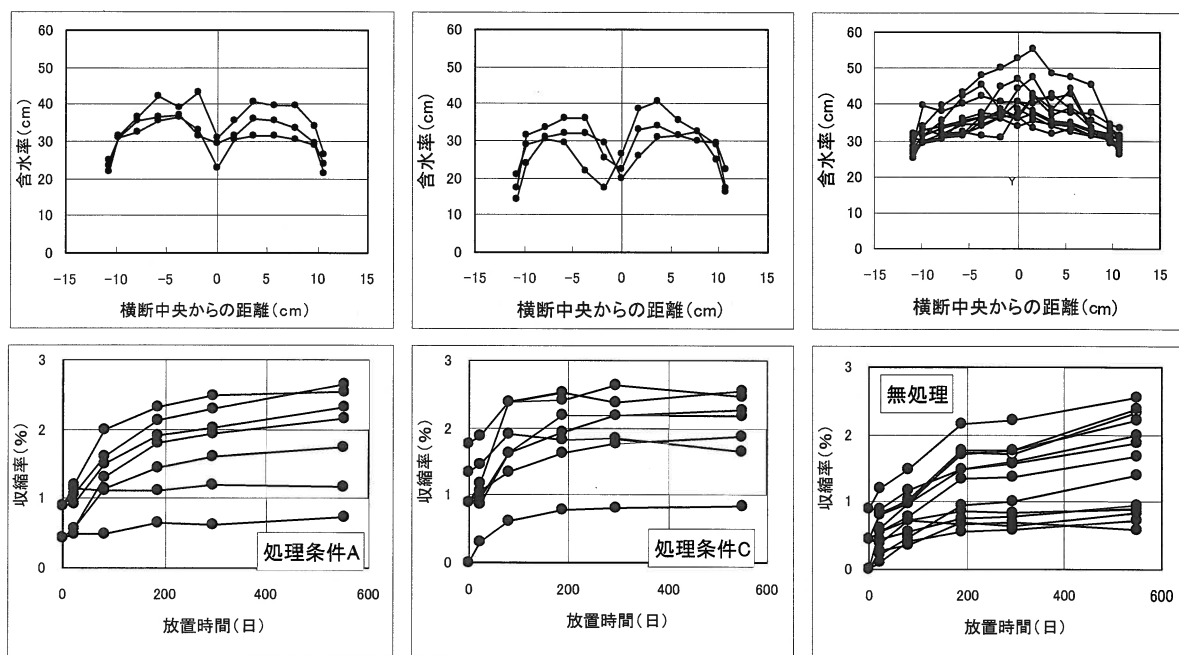


図 2-2-1-5 処理条件ごとの放置 (養生) 中の材収縮率の経時変化

収縮率の経時変化は、無処理材では放置 500 日を過ぎても増加するものがみられたが、処理材では無処理材より短い放置 100 日弱~200 日程度で収束する傾向であった。収束状況は処理条件で若干異なった。処理直後の含水率が最も低かった条件Cが、処理による収縮率が大きく収束時間は短かった。これらのことから条件AとCを比べれば、条件Cの方が処理時間は若干長い、蒸煮減圧処理として効率の良い条件と推察された。また、条件Cの排水 (開放状態) 180 分間は、その間の材温がほぼ 100℃で、缶内は大気圧に等しいことから、活発に水分が蒸発する状況ではないと推察される。よって、この 180

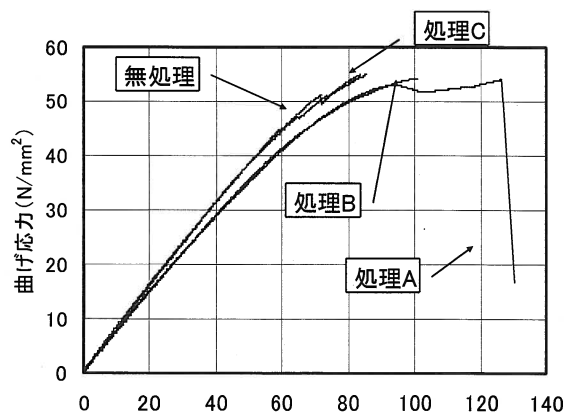


図 2-2-1-6 曲げ応力と全たわみとの関係

分間を短縮しても試験した条件Cと同等の効果が得られることが期待される。長期放置後の割れの状況は、無処理材に比べ処理材の方が割れの量、割れ幅ともに少なかった。特に、無処理材では材長に等しい長さの割れが幅広材面の両面に発生する材が多かったが、処理材では幅広材面の一方に割れが発生する傾向がみられた。

図 2-2-1-6 に曲げ応力とたわみとの関係の一例を示す。供試材のヤング係数により、線図の立ち上がりの勾配に若干の差がみられるが、曲げ強度性能に差はみられていない。図 2-2-1-7 に曲げ試験時の含水率分布の一例を示す。無処理材の含水率が最も高く、最も低いのは処理条件Cの材であった。この含水率分布からは、処理条件Cのように、処理により材表層と材中央部の含水率を積極的に低下させることが、材全体の含水率低下を促進し、短時間での材収縮の収束につながったことが伺える。

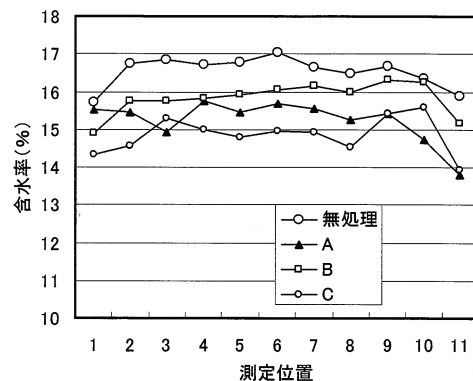


図 2-2-1-7 曲げ試験時（長期養生時）の水分状態例（材長さ方向）

オ 今後の問題点

処理材の仕上げ乾燥方法が課題である。本プロジェクト研究では、処理材を屋内で長期間放置、言い換えれば長期間の天然乾燥で仕上げ乾燥を行った形であるが、材の乾燥収縮が収束するのに3ヶ月強の長時間を要した。実用面では仕上げ乾燥までの時間短縮が強く求められるであろう。よって、処理材の含水率分布を考慮した中温域の蒸気式乾燥スケジュールの開発が当面の課題と考える。また、当所では養生倉庫内での利用を前提に試作した簡易加熱装置を用いた乾燥に関するデータを収集中である。乾燥を促進する雰囲気での養生施設内で蒸煮減圧処理材の仕上げ乾燥を行うような低コスト乾燥法の開発も肝要と考える。

長期放置後に仕上げ加工した平角材の品質は、材色に問題はなく、材面割れの軽減が課題としてあげられた。この課題に対しては、先に示した仕上げ乾燥方法の乾燥スケジュールや養生施設内の雰囲気を検討することで対応すべきことと考える。

カ 要約

- ①大断面製材であるスギ心持ち平角材に適した蒸煮減圧処理スケジュールが開発できた。
- ②適正な蒸煮減圧処理を行ったスギ心持ち材の処理直後の材横断面方向の含水率分布は、材表層と材中央部の含水率が低い、M型になると推察された。このM型の含水率分布は、同処理が効率的に行われているかどうかを判断する目安になると考えられた。
- ③処理後長期放置した実大材の曲げ試験の結果、同処理による強度性能の低下はみられなかった。

キ 引用文献

- 1) 全国木材組合連合会：“わかりやすい乾燥材生産の技術マニュアル”、全国木材協同組合連合会、pp. 50-60 (2000)

(熊本県林業研究指導所 池田元吉)

(2) マイクロ波加熱による丸太材の高速乾燥技術の開発

ア 研究目的

短時間で、しかも割れの発生が少なく寸法安定性に優れた丸太等大断面構造材の乾燥技術の開発により、他樹種で多くを占められていた在来軸組工法や丸太工法の横架材におけるスギの需要増が期待されるばかりではなく、新たな大型木構造スタイルが広まりつつあるなかで新規の需要開拓が見込まれる。しかも、残留応力が少なくその後の挽き曲がりがない場合は、乾燥丸太から製材する新たな効率的加工法が考えられる。しかし、これらスギの大断面材は内層部の乾燥性が悪いことや乾燥割れが発生しやすいことが知られている。そこで、本課題ではその内層部の乾燥促進に効果があると考えられるマイクロ波加熱方式の応用による高速乾燥技術の開発を目的に実験を行った。

イ 研究方法

(1) マイクロ波加熱方式による丸太の乾燥特性

スギ生材丸太（直径 13～15 cm、長さ 50 cm）を剥皮したのち、シリコンコーキングで両木口をコーティングしたものを供試材とした。乾燥試験は、九州電力株式会社所有のマイクロ波加熱減圧乾燥装置（周波数 2450MHz、最大出力 3.6kw、ターンテーブル直径 60 cm、新日本無線株式会社製）を使用して実施した。測定：材内温度分布－表面から 1 cm（表層）、4 cm（中層）、7 cm（中心）の位置に感温部が来るようにアルコール温度計を埋め込み、3 点の最大温度が 115～120℃になるようにマイクロ波を ON/OFF 制御し、測定した。乾燥試験－中心部温度を 70℃、90℃、110℃の 3 種類に設定した。測定項目は、含水率、割れ測定、丸太面解放ひずみ、横断面内含水率分布である。この測定項目は、2 年目以降の丸太の測定も同様である。

(2) 実用型マイクロ波加熱乾燥システムによる実大スギ丸太の乾燥特性

スギ生材丸太を 11 本皮付きのまま供試した。用いた実用型乾燥システム（亜細亜製作所製：写真 2-2-2-1）は、マイクロ波加熱特有の内部加熱を利用した大断面材乾燥の高速化とともに、単木処理のマイクロ波加熱ブースと多数木貯蔵可能な調湿ブースの間を効率的に回転させることにより、マイクロ波加熱で生じる加熱、乾燥ムラを少なくしていることを特徴とする。その照射には 30 秒の照射時間に対して 12 秒のインターバルをもつ間欠照射で行った。なお、照射ブースでの加熱は材温が 100℃を大きく越えないように時間およびマイクロ波出力を設定した。照射終了から調湿ブース過程を終えて次の照射までの一巡の工程は 90 分になるように設定した。目標仕上がり含水率は 20～30%とした。乾燥および乾燥後放置過程の含水率分布および丸太面解放ひずみを調べるとともに、乾燥後心持ち柱材に木取った後の寸法変化、変形、割れおよび含水率の変化等についても測定した。また皮付きのまま、および剥皮して 24 時間の高温低湿処理（乾球温度 120℃、湿球温度 90℃）を行った後マイクロ波乾燥した場合についても、検討した。

(3) 各種前処理を行ったスギ丸太のマイクロ波加熱乾燥システムにおける乾燥特性

前処理としての葉枯らしおよび丸太の天然乾燥（皮付き）を行い、それらの皮付きおよび皮剥丸太についてマイクロ波加熱乾燥を行った。さらに、皮剥丸太を高温低湿乾燥により表層の急速乾燥を前処理として行う、割れ止め処理について検討した。高温低湿処理は 12 時間の蒸煮後、乾球温度 120℃、湿球温度 90℃の条件で 48 時間行った。

（４）マイクロ波加熱乾燥における剥皮、背割り、熱風処理の適切な組み合わせについて

表 2-2-2-1 に示す各乾燥システム条件について 3 から 6 本ずつ 4m スギ丸太を供試した。前処理はこれまでの結果を基に、条件を緩くする考えから 95℃で 12 時間蒸煮後、D B T 95℃・W B T 90℃一定で 72 時間行った。後処理は D B T 90℃・W B T 85℃一定で 48 時間処理を試みた。さらに、伐採直後の小径木（B 2）および中径木（B 1）を準備し、無背割りおよび背割り丸太の乾燥として比較的良好と考えられた乾燥システム条件①、⑤で乾燥試験を行った。この試験においては丸太面に節もない、いわゆる化粧丸太を専門家に依頼して剥皮、背割り（条件①）を行っている。径級は小径丸太で約 12 c m から 14 c m、中径丸太で 19 c m から 21 c m に分布していた。

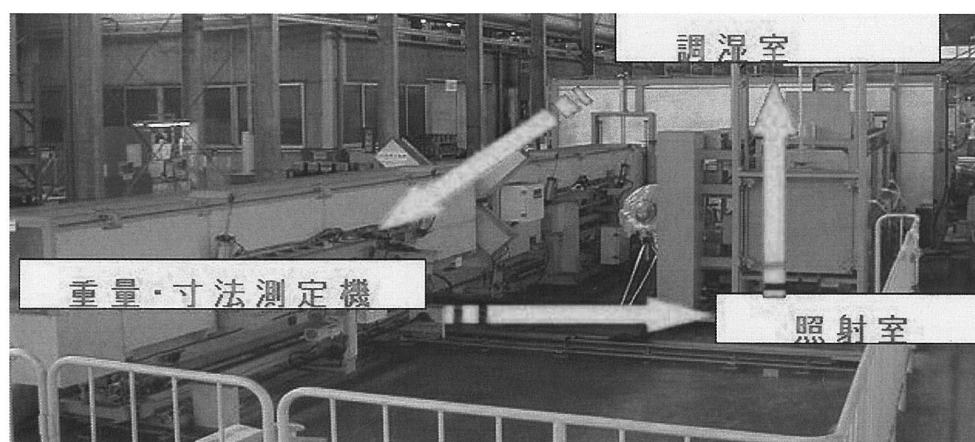


写真 2-2-2-1 マイクロ波加熱丸太乾燥装置

表 2-2-2-1 マイクロ波乾燥 1 回目試験における乾燥システム（左から右への加工処理順）

処理条件番号： 試験丸太 No.	剥皮	背割り	前処理	マイクロ波 加熱乾燥	剥皮	背割り	後処理
①：1－1～3	○	○		○			
②：1－4～6		○		○	○		
③：1－7～11				○	○	○	
④：2－1～5				○	○		○
⑤：2－6～11	○		○	○			

ウエ 結果と考察

（１）マイクロ波加熱方式による丸太の乾燥特性¹⁾

材内温度分布の推移を調べたところ、マイクロ波加熱開始直後には表層が早く高い温度になるが、すぐに中層部や中心部が表層部よりも高い値を示すようになり、設定温度の 115℃から 120℃に中層部や中心部が達して以降も外層部は 100℃程度を維持した。その後乾燥が進むと、中間層や中心部が設定温度を維持しても、外層部はさらに温度が下がっていく傾向を示した。

乾燥速度は、含水率 40%から 15%までの乾燥時間で比較すると、初期含水率による影響でバラツキがあるものの、設定温度 110℃の方が 90℃よりも 2 倍以上の乾燥速度を示した。さらに全乾燥時間での具体例で示すと、14 c m の径級で初期含水率 100%程度のものでは 90℃で 2 日間程度を

要するが、110℃では1日以内に仕上がることがわかった。

乾燥後の含水率分布変化では、110℃の乾燥でいずれも乾燥終了時まで外層部で高い含水率傾斜を保ったまま乾燥が進んだ。一方 90℃では、内層部の極端な含水率低下も無く、比較的均一な含水率分布状態のまま乾燥が進行した。

解放ひずみは、小さいながらも乾燥前は伸びひずみや縮みひずみが混在したが、乾燥中および乾燥後はやはり小さい値であるが全て伸びひずみが測定された。すなわち、乾燥終了までいずれの設定温度でも丸太面（繊維直角方向）には圧縮応力がはたらき、割れの危険性が小さいものと考えられた。実際、目視では明確な割れは乾燥終了まで認められなかった。しかし、その後の室内放置状態で全ての丸太で大きな割れ（V字割れ）発生が見られた。マイクロ波加熱による丸太の乾燥では、乾燥速度は遅くなるものの、材内温度 100℃以下で材温を設定することにより内層部の極端な含水率低下を防ぐとともに外周部の乾燥も促進し、乾燥後の割れ発生を抑える必要があるものと考えられる。

（2）実用型マイクロ波加熱乾燥システムによる実大スギ丸太の乾燥特性^{2,3)}

マイクロ波照射による各部位の材温変化から、間欠法による温度差の緩和効果が、特に1サイクル目で確認された。また、数サイクル目からは、外層の大きな降温経過により中心層で外層より高い温度を示した。平均で120%の生材含水率が50サイクル程度で30%を切る乾燥経過を示す（図2-2-2-1）。乾燥時間で示すと3日間程度であり、皮付きで11本をシステム内で回転させる間欠照射を行っているが、一般的な人工乾燥に比べ非常に高速な乾燥法であることがわかる。表面の割れは、乾燥中および乾燥後2ヶ月程度まで見られなかったが、その後全ての丸太に顕著な表面割れが発生した。乾燥中の解放ひずみ測定でも外層で圧縮応力を示しており、乾燥中は割れの心配がないものと考えられたが、乾燥後2週間で引張応力に転じていた。心持ち柱材表面にはマイクロ波加熱で生じたと考えられる丸太の内部割れが現れたが、放置中、割れ幅に大きな変化はなかった。材面幅の平均はいずれも放置中に収縮したが、ほとんど1%以下の収縮率であった。表面割れが許容されるならば、寸法安定性の面からは乾燥材が1回の製材および表面加工で木取することも可能と考えられた。

高温低湿処理を行った丸太の含水率、特に外層含水率は、剥皮丸太で低い値を示した。樹皮の有無が高温低湿処理の効果に大きく影響する事が示唆された。しかし今回は、剥皮丸太も高温低湿処理後の外層含水率が繊維飽和点前後までにしかならず（図2-2-2-2）、前処理の段階で割れ止めの要因と考えられるセットを形成できていないものと推定された。前処理により発生した表面割れは、マイクロ波乾燥で中心層含水率が低下することにより、閉じていく傾向が見られた。しかし、その後の放置過程では割れが広がる傾向が見られた。マイクロ波乾燥の所要時間は、未処理材の45～94時間に対し、剥皮前処理材は10～13時間と極端に短くなるとともに、比較的均質な含水率分布に仕上がった（図2-2-2-2）。

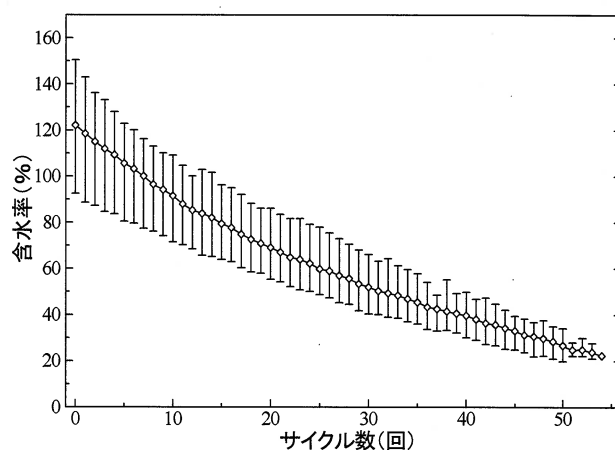


図 2-2-2-1 マイクロ波乾燥による丸太の乾燥経過

(3) 各種前処理を行ったスギ丸太のマイクロ波加熱乾燥システムにおける乾燥特性⁴⁾

マイクロ波加熱乾燥後の割れ発生を抑えるため、前処理との連係を試みた。葉枯らし材は、すべての丸太辺材部で100%から200%の含水率が見られ、期待した丸太外周部の含水率低下は見られなかった。そのためか、皮付きでは未処理生材の乾燥と同様、乾燥後に割れは見られず、なおも表層の含水率が高い状態にあり、その後割れが生じた。一方、未処理生材および葉枯らし材の皮剥丸太は、乾燥により半数以上に割れが見られ、それらはさらに割れ幅が広がると共に、割れていない丸太もその後早い段階で大きな割れが生じた。これら表面の応力を測定した結果、乾燥中の圧縮の応力が、乾燥後時間が経過すると引張応力に転換していた。ただし、剥皮丸太は表層の含水率低下に従いマイクロ波加熱乾燥後期には既に引張応力が見受けられた。

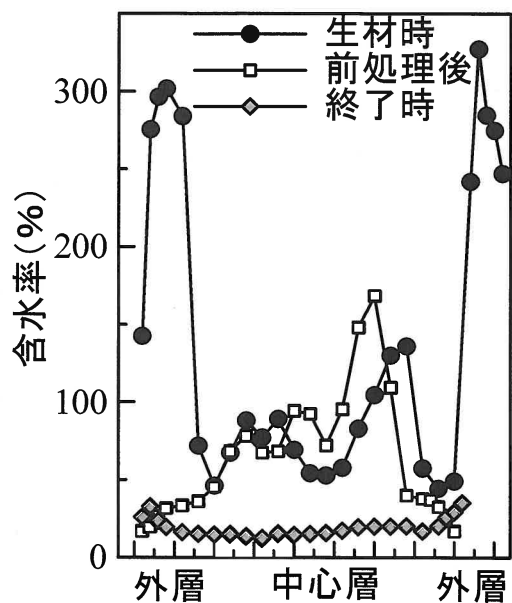


図 2-2-2-2 高温低湿処理スギ剥皮丸太の半径方向含水率分布の一例

天然乾燥丸太では、外周部の含水率はすべて100%以下に低下していた。そのため、マイクロ波加熱乾燥後には皮付き材でも割れが見られた。乾燥後の割れ幅の増加が生材に比べ小さい傾向を示した。

前項の実験で、剥皮材であっても丸太表面は24時間の高温低湿処理で30%以下の含水率にならず、当然乾燥に伴う表層の引張セットが形成されていないことが推定された。その後のマイクロ波加熱乾燥でも割れが十分閉じることはなかった。そこで、たとえ割れても、その後の内層部の乾燥により割れが十分閉じるような表層の引張セットの形成が、可能となる処理時間を予備調査によって調べた。丸太(長さ60cm、径14~16cm)の高温低湿処理時間を24、48、72時間の3段階に変え、その後の室内放置による割れの変化を調べた。その結果、72時間では比較的内層部まで乾燥が進み処理後には割れがすべて閉じていた。48時間では、処理後に見られた割れが次第に閉じ、最終的にはすべて閉じるセットが形成されていることが分かった。24時間では、処理後に割れ幅の現象は見られるものの、十分ではなかった。そこで、48時間の処理を実大丸太で実施して、マイクロ波加熱乾燥する連係を試みた。その結果、前処理により大きな割れが発生したものの、マイクロ波加熱乾燥により割れ幅が大きく減少することを確認した。

(4) マイクロ波加熱乾燥における剥皮、背割り、熱風処理の適切な組み合わせについて⁵⁾

乾燥システム条件①の背割りおよび剥皮をした丸太をマイクロ波乾燥した場合は内層も外層も大きく含水率が低下した。しかし、丸太によっては心材含水率が高いものもあり、マイクロ波乾燥によっても内層部で乾燥が遅れているものも見られた。一方、剥皮をしないとマイクロ波乾燥で外周部の乾燥が遅れるばかりか、乾燥後の剥皮が難しく、皮の付き具合で丸太面に色のムラができる危険性がある。背割りをしない丸太を割れずに乾燥する方法として、熱風乾燥とマイクロ波乾燥を連係させたシステム条件⑤については、前処理によって外層部で大きく乾燥が進む。しかし、内層部の含水率の低下は小さかった。その後のマイクロ波乾燥により、高い内層部の含水

率が大きく低下する傾向が見られるが、外層部においても一定の含水率低下がある。

なお、①は背割り丸太であっても剥皮されているため外周部で低い含水率の傾斜も見られ、解放ひずみが数百 μ 以下の小さな引張り応力が見られた。節が多い丸太あるいは、節が無い化粧用丸太の場合でも割れがほとんど発生していない。ただし、大きい丸太で木口割れが発生したものがあつた。木口部に存在していたため（木口割れ）、木口への割れ止め剤の塗布も必要である。

さらに、②における皮付き背割り丸太は1000 μ 以上のひずみの大きな圧縮応力が測定されているか小さな引張り応力であり、乾燥直後の割れが見られなかった。皮により外周部の乾燥がその内部よりも遅れているためであるが、その後の放置状態での割れが発生した。③や④のように背割りもしない皮付き丸太は、マイクロ波乾燥では割れることはないが、剥皮後の後処理により大きく発生した。

背割りをしない丸太を割れずに乾燥させる方法として、前処理熱風乾燥を行った処理条件⑤は節の近辺で多くの割れが見られた。応力も引張りの傾向にあつた。節の無い丸太を試験したところ、中径木では比較的大きな割れができたものの、小径木ではほとんど割れずに乾燥する事ができた。ただし前処理による色の暗色化が認められる。

オ. 今後の問題点

本研究では、背割りが無い中径木における割れない乾燥法が見いだされなかった。乾燥後の品質安定性を重視したこれらの割れ防止乾燥法の開発が今後に残された課題と考えられ、熱風などとの関係の検討がさらに必要であろう。

カ. 要約

次の2種類の用途に対する乾燥法としてマイクロ波加熱乾燥システムは有効であるものと考えられる。①背割り化粧丸太（桁丸太、化粧柱丸太等）－ 1週間程度のマイクロ波加熱乾燥システムのみで乾燥して、1, 2ヶ月の養生により、従来の化粧丸太としての材色を保ち、割れもなく短時間で製品化できる。②背割り無し小径丸太（割れ無し小径丸太）－ マイクロ波乾燥の前に剥皮後熱風乾燥を行うことで、背割り無しで表面割れの無い乾燥丸太を生産できる。ただし、材色が熱風乾燥により暗色化し、従来の和風住宅に多用されている化粧丸太には使えない。

マイクロ波加熱乾燥を使った表面割れの無い丸太の高速乾燥技術は以上であるが、とくに①は付加価値が高くコスト的にも実用化でき、普及に移しうる成果と考えられる。

キ. 引用文献

- 1) Fujimoto, N :Proc. International Symposium on Microwave Science and Its Application to Related Fields, Nara, pp.208-209 (2002)
- 2) 藤本登留, 森田裕資, 大内毅, 林翰謙, 大橋兼廣, 近藤和幸 : 材料 54, 371-376 (2005)
- 3) 藤本登留他 : 第 52 回日本木材学会大会要旨集, pp143-144 (2002)
- 4) 藤本登留他 : 第 53 回日本木材学会大会要旨集, pp116 (2003)
- 5) 藤本登留他 : 第 54 回日本木材学会大会要旨集, pp142 (2004)

(九州大学農学研究院 藤本登留)

第3章 圧力・温度制御による木材可塑化機構の解明 による乾燥処理技術の開発

1. 高温・高圧条件下での木材組織の可塑化・応力緩和機構 の解明

(1) 組織構造の解析による高温・高圧下における水蒸気移動経路と 透過性の把握

ア 研究目的

高温・高圧水蒸気処理による透過性改善を基にした乾燥の効率化技術の開発が行われるためには、処理による木材の微細な組織構造の変化による透過性の変化と、木材の物性の変化を明らかにする必要がある。水蒸気による前処理によって、ラジアタパインの透過性が格段に向上するという報告がニュージーランド森林研究所によってなされている¹⁾。しかし、蒸気の透過経路や透過性そのものが把握されていないために、乾燥促進のための適正な温度・圧力条件が明らかにされていない。特に、透過性には木材の組織構造が大きく寄与しており、ラジアタパインと異なった構造を持つスギについては研究されていない。また、温度、圧力、湿度の複合作用による木材の透過性の変化については明らかにされていない。高温・高圧を活用して木材を乾燥するための適正な条件を明らかにするため、処理によるスギ材の透過性変化を評価する上で、蒸気の透過経路としての細胞壁孔等の構造的な変化を評価する必要がある。そこで本研究では、100℃以上の飽和水蒸気で処理された木材における、乾燥性、水分の透過性、自由水の透過経路を明らかにすることを目的としている。

イ 研究方法

(1) 飽和水蒸気処理： 100℃以上で飽和水蒸気圧環境を形成できる耐圧容器内で、スギ辺材および心材から得た木材片（30mm(L) x 30mm(R) x 30mm(T)）を、処理温度100℃、120℃、および140℃で処理した。

(2) 乾燥速度の測定： 処理材、未処理材を40℃に設定した真空乾燥装置で乾燥し、一定時間おきに重量減少量を測定し、乾燥速度を算出した。

(3) 透過性の評価： 試験体の一部は、直径9mm、長さ20mmの円筒状に成形され、独自に考案した水分透過性試験装置で、水分透過性と透過部位の解析を行った。この装置は、試験片の木口面の一端から一定圧力で水溶性の蛍光染料を注入し、もう一端から染料が溢出してくる時間とその部位を解析した。透過試験中の画像はデジタルビデオカメラに録画し、試験終了後、画像を詳細に解析した。

(4) 易透過部位の解析： 試験片は試験終了直後、液体窒素で凍結し、凍結乾燥を行って、蛍光顕微鏡および共焦点レーザー顕微鏡で透過部位の解析を行った。また、エネルギー分散型X線分析装置を用いて染料の分布を分析した。

(5) 組織構造の観察： 処理・未処理材の一部は、液体窒素で凍結後乾燥を行って、走査型電子顕微鏡で観察した。

(6) 処理による重量及び比内部表面積の変化： スギ辺材（2mm(L) x 30mm(R) x 15mm(T)）を、処理温度100、120、140、および160℃の飽和水蒸気下で5時間処理し、処理後の重量変化を測定した。また、飽和塩 ZnCl_2 、 MgCl_2 、 KNO_3 を用いたデシケータ法により熱処理後の水分吸着に関

わる比内部表面積を求めた。

ウエ 結果と考察

(1) 処理による水分移動性の変異

辺材、心材ともに処理により含水率が低下した(図 3-1-1-1)。含水率が 200%から 150%に低下する時の乾燥速度は 100~120℃の処理のとき辺材はあまり変化が見られず、心材では向上した(表 3-1-1-1)。辺材、心材ともに 140℃の水蒸気による処理では、乾燥速度の向上が著しかった。

辺材部では、処理材、未処理材ともに早材部の広い範囲で易透過部位を示す蛍光染料の分布が見られ、処理、未処理に関係なく早材部では透過性がよいと考えられる(図 3-1-1-2)²⁾³⁾。心材部では、未処理材において早材部の年輪境界に近い部分と早晚材の移行部で蛍光の分布が見られたが、処理によってその部位が広がっていく傾向が見られた(図 3-1-1-2)。また、易透過部位を示す蛍光物質の試料内における分布様式を蛍光顕微鏡で観察すると、未処理材では蛍光染料の分布は 1 から数個の仮道管の集合で小さなパッチ状に見られたが、処理材では、蛍光染料が分布している仮道管が大きな集合状をなしている様子が観察された。このため、処理によって隣接する仮道管間の自由水の透過性が改善されると考えられる。しかしながら、蛍光顕微鏡及びエネルギー分散型 X 線分析装置による観察では、処理、未処理を問わず蛍光染料の分布は心材の放射柔細胞内には認められず、放射柔細胞は水分の透過に関与せず、飽和水蒸気処理によっても透過性は改善しないと考えられる。

(2) 処理による組織構造の変異

辺材部の有縁壁孔では、飽和水蒸気処理によってマルゴ、トールスに大きな変化は見られなかったが、心材部では処理によって沈着物質が取り除かれているような状態が観察された(写真 3-1-1-1)。この結果、飽和水蒸気処理による心材部での透過性の改善は、仮道管間の有縁壁孔の壁孔壁に沈着していた物質が、処理によって除去されたために起こると考えられる。一方、140℃の飽和水蒸気で処理された辺材の内こう部分では、イボ状層が溶出し、ミクロフィブリル状の構造が見られるような部分が観察された(写真 3-1-1-2)。

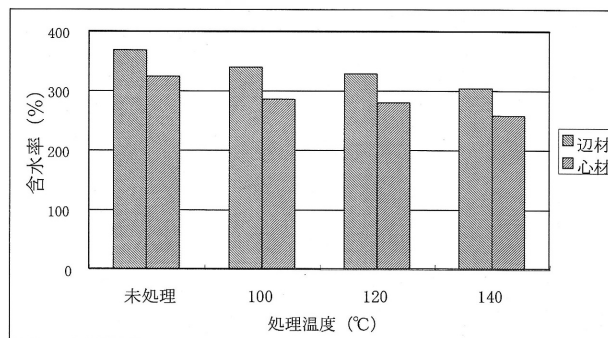


図 3-1-1-1 飽和水蒸気処理と含水率の変化

表 3-1-1-1 飽和水蒸気処理と処理材の乾燥速度 (%/hr)

処理温度	辺材	心材
(無処理)	8.7	6.0
100	8.3	8.0
120	8.5	7.2
140	12.4	10.2

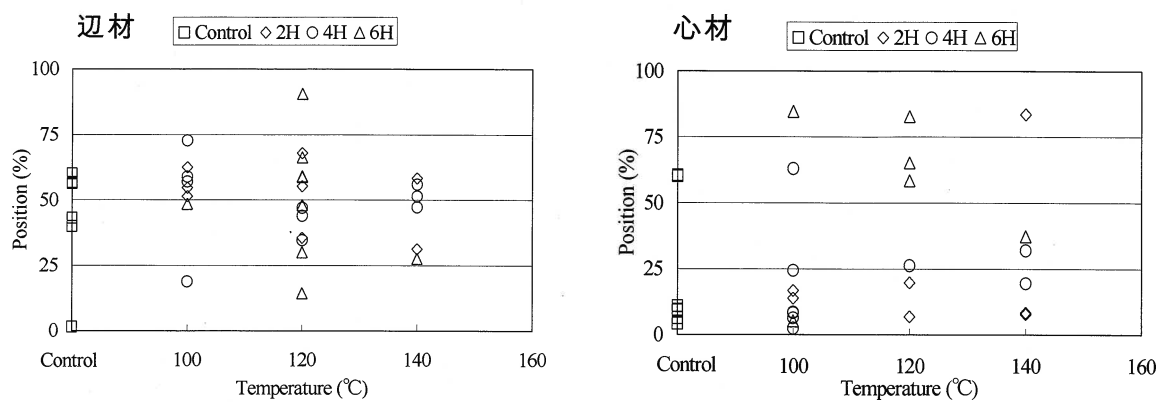


図 3-1-1-2 年輪内での溢出部位の変異と飽和水蒸気処理による影響

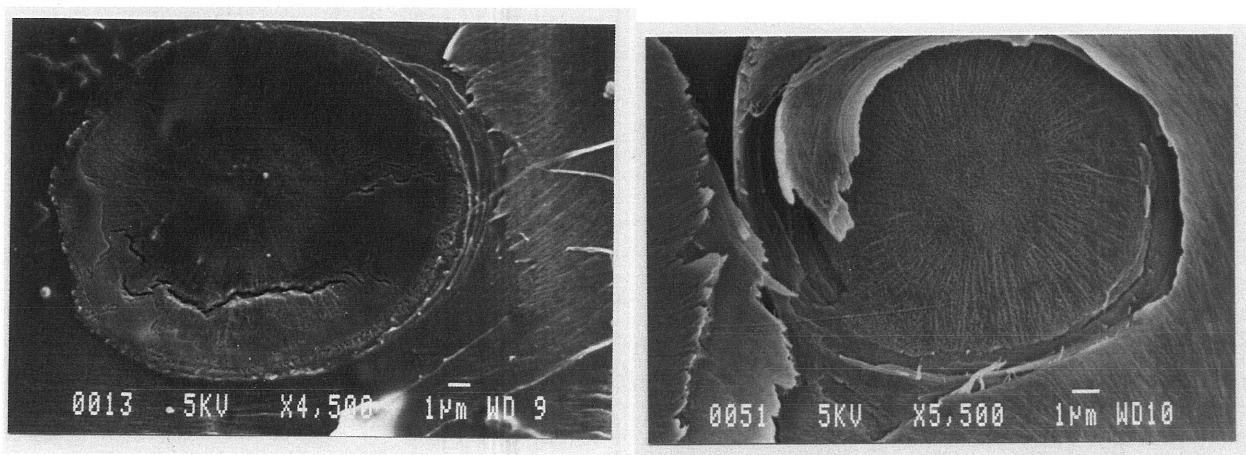


写真3-1-1-1 飽和水蒸気処理による心材仮道管の壁有縁壁孔の微細構造の変化
左：処理前、右：処理後

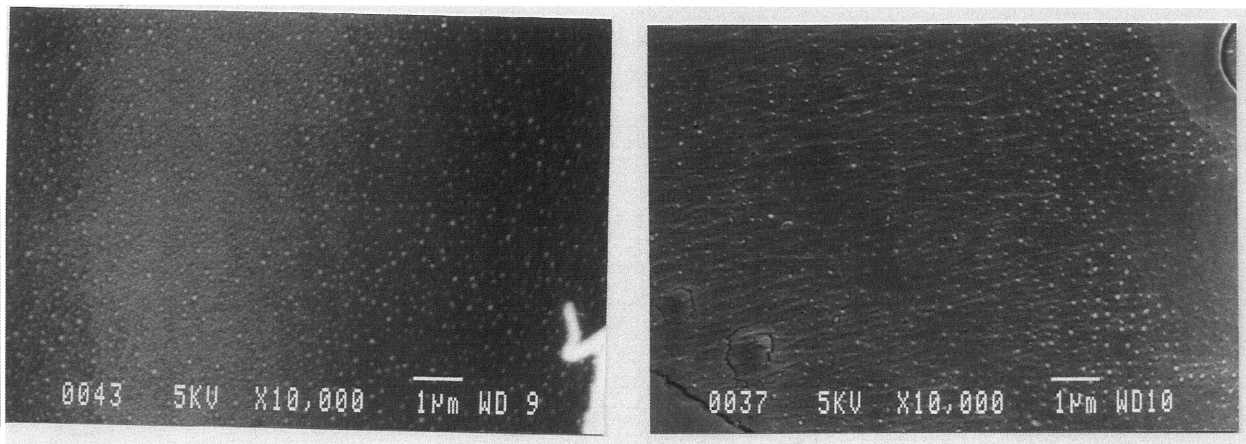


写真3-1-1-2 140℃の飽和水蒸気処理による辺材仮道管内こう表面の微細構造の変化
左：処理前、右：処理後

(3) 処理による重量及び比内部表面積の変化

飽和水蒸気で処理した材の単分子層吸着量は、100℃～120℃の熱処理温度ではあまり変化しないが、それ以上の処理温度で上昇した（図 3-1-1-3）。また、処理による重量減少率は、

100℃ではほぼ0%であったが、温度の上昇とともに徐々に増加し、120℃以上の温度で急激に増加した。このことは、120℃までの処理温度では、抽出成分等の分解によって重量減少が起こるが、それ以上の温度になると細胞壁のヘミセルロースが分解することで、単分子吸着量が急激に減少すると考えられる。

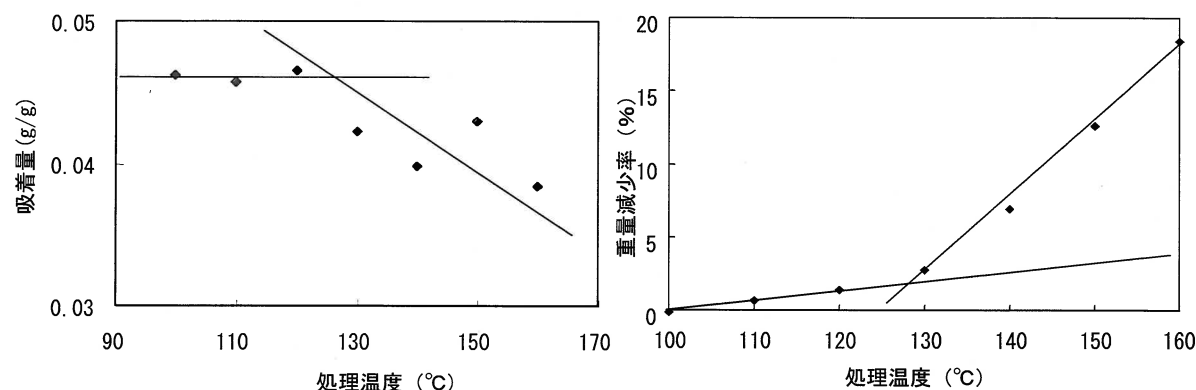


図3-1-1-3 飽和水蒸気処理による単分子層吸着量（左）と重量減少率（右）

オ 今後の問題点

100℃以下の温度で処理されたスギ材については検討を行わなかったが、これまで乾燥性については報告があるので、それらを参考にしたい。晩材部の細胞内こう中の自由水の移動性については把握できなかったので、晩材部に存在する水分の樹木にとっての役割（機能）等について検討が求められる。

カ 要約

スギ材は年輪内では、早材部の年輪初期の部分と早晩材の移行部で水分の透過性がよく、心材部では100℃以上の飽和水蒸気処理によって、透過しやすい部位が広がる。これは、主に仮道管間の有縁壁孔の壁孔壁に沈着した物質が処理により除去されたために起こると考えられる。しかし、辺・心材ともに晩材部の内こうの狭い仮道管の水分の透過性は悪く、処理によってもあまり改善されない可能性がある。一方、120℃以上の処理では、処理によって著しい重量減少が起こるため、細胞壁実質のヘミセルロース成分が分解され始めると考えられ、スギ材を100℃以上の飽和水蒸気で処理する場合は、100℃から120℃の温度で処理を行うことが望ましいことが明らかになった。

キ 引用文献

- 1) Matsumura, J., Booker, R. E., Donaldson, L. A., Ridoutt, B. G. : IAWA J. **19**, 25-33 (1998)
- 2) Yata, S., Mukudai, J., Kajita, H. : Bull. Kyoto Prefect. Univ. For. **26**, 43-51 (1981)
- 3) Abe, H., Funada, R., Kuroda, N., Furusawa, O., Shibagaki, M., Fujii, T. : IAWA J. **22**, 63-72 (2001)

(森林総合研究所木材特性研究領域 安部久、香川聡、同加工技術研究領域 石川敦子)

(2) 高温・高圧条件下での乾燥による粘弾性変化の解明

ア 研究目的

木材乾燥における適正条件の解明のためには、木材から水分が失われる際の温度・湿度・材内応力と木材の粘弾性との関係が明らかになっていなければならない。乾燥条件の高温・高圧化に伴って、木材の性質は大きく変わることが考えられるため、これを明らかにすることを目的とした。そこで、非破壊的で簡便な試験方法である振動試験を行い、1気圧以上の高温高湿（高圧）条件における木材の粘弾性の経時変化に関する情報を得ることとした。

イ 研究方法

(1) 高温高湿条件における生材の含水率

ステンレス製の板ばねに高温用歪みゲージを貼付し、台に固定し、片持ち梁を作成した。その先端に木材を吊るし、歪みと荷重の関係から乾燥過程の木材の重量を求めるための装置を試作した。結線は4アクティブゲージ法とした。密閉型過熱容器（エスベック社製高度加速寿命試験装置EHS-411M）内でシトカスプルス生材（*Picea sitchensis* Carr.、寸法110mm(R)×25mm(L)×10mm(T)、初期含水率180-190%）を板ばねに吊るし、容器内の温度、相対湿度、圧力および片持ち梁の歪みをリアルタイム測定した。設定温度は107-160℃、設定相対湿度は75-99%とした。

(2) 高温高湿条件における生材の振動特性

試験体には上記と同様の寸法および初期含水率のシトカスプルス生材を用いた。高温水蒸気中での振動試験系を試作し、試験体、試験体支持系、加振用電磁石、振動検出用変位計を上記の密閉型加熱容器に入れ、両端自由撓み振動試験を行い、比ヤング率と損失正接を測定した。振動検出用センサは防湿のために耐熱ゴムとシリコン樹脂で被覆した。設定温度は115-150℃、設定相対湿度は75-98%とした。試験終了後、試験体を全乾状態にして室温で振動試験を行い、この時の値を1とした。更に、別途室温で振動特性の含水率依存性を測定した。

ウエ 結果と考察

(1) 高温高湿条件における生材小試験体の含水率変化

- 1) 試験体の温度変化は初期の上昇領域、沸点付近での安定領域、再上昇領域、設定温度付近での安定領域の4領域に分けられた（図3-1-2-1）。
- 2) 本実験系により、従来困難であった高温高湿条件における木材の含水率の経時変化を追跡することが可能となった（図3-1-2-1）。
- 3) 平衡含水率は設定温度および湿度が比較的低い場合には既往の推定値に比較的近い値であったが、高温、高湿になるに連れて既往値¹⁾よりも大きくなった（表3-1-2-1）。
- 4) これらの値を用いて、高温高湿条件における温度-相対湿度-水蒸気圧力-平衡含水率図を作成した。

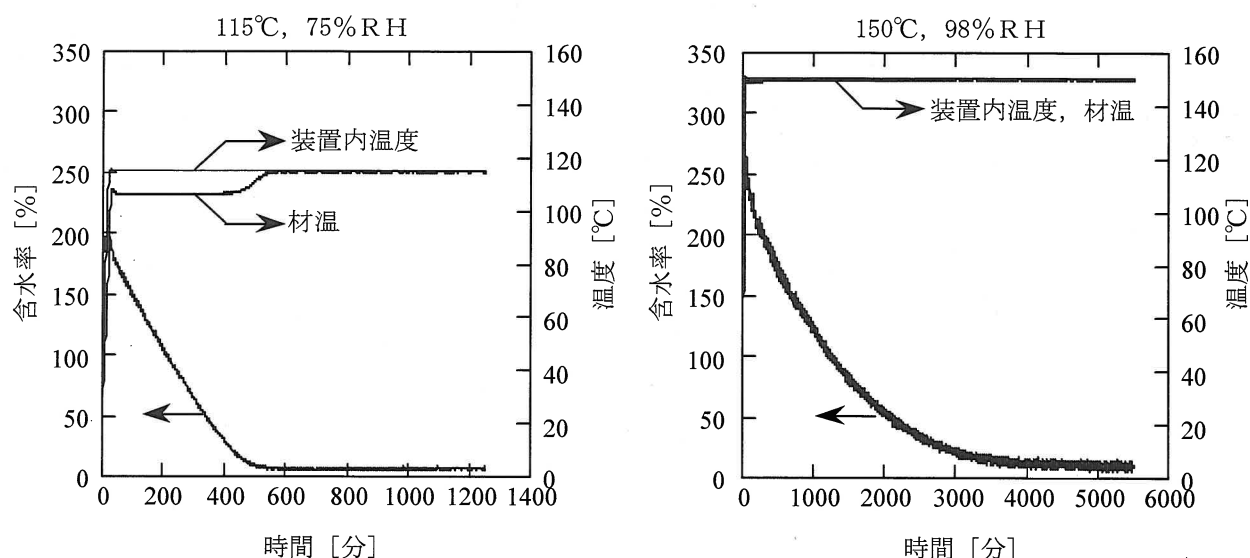


図 3-1-2-1 高温高湿条件での材温、含水率の経時変化

表 3-1-2-1 各温湿度条件における平衡含水率 (%)

RH[%]	設定温度 [°C]											
	107	110	115	120	125	130	135	140	145	150	155	160
75			7.2	6.5	6.1	5.4	5.0	4.6	4.4	4.1	3.9	3.8
80			8.2	7.1	6.9	5.7	5.4	5.0	4.5	4.3	3.8	3.7*
85		9.9	8.6	7.8	7.5	6.9	5.9	5.2	4.5	4.4	4.1	
90		11.3	10.4	9.4	8.8	7.3	6.4	5.5	4.9	4.4	4.3	
95	13.2	11.3	12.5	11.6	9.9	8.1	7.8	6.6	5.7	5.1		
98	16.9	17.2	17.3	18.3	13.8	13.6	12.2	14.7	12.3	9.9		
99	18.5	19.1	20.6	20.9	22.3	28.2	29.3	27.1	24.2	29.6		

* 79% RHで測定

(2) 高温高湿条件における生材の振動特性

1) 従来困難であった高温水蒸気中における木材の振動特性の経時変化を追跡することが可能となった。すなわち、センサが十分な出力（本研究では 2V）を保つ時間を約 30 分から約 360 分に延長出来たので、センサ内への湿気の浸入をかなり抑制することが出来たと言える（図 3-1-2-2）。この被覆でも初期から平衡になるまでの全過程を一つのセンサでは追跡出来なかったもので、途中でセンサを交換したが、経時変化は連続した曲線で表現出来た（図 3-1-2-1 左下）。これはセンサ交換時の試験体の含水率変化が小さかったことによる。

2) 図 3-1-2-3 に示すように、材温変化の各領域を振動特性の経時変化に適用すると、比ヤング率と対応する共振周波数は材内温度の上昇と共に減少し（領域 I）、材内温度が沸点で安定し始めた頃に最小となった後、増大に転じ（領域 II、III）、含水率が安定すると安定した（領域 IV）。損失正接は領域 I において増大し、領域 II 初期に最大となった後減少に転じ、領域 III で引き続き減少し、領域 IV で安定した。即ち、比ヤング率と損失正接の経時変化は対

応した。

3) 高温高湿条件における振動特性の経時変化の傾向は設定湿度によって変わらなかったが、変化量は湿度非制御（低湿度）と比較して遥かに大きかった。また、様々な平衡含水率における振動特性は室温よりも比ヤング率は著しく小さく、損失正接は非常に大きかった。よって、木材の物性に温度と水分の相乗効果が大きく寄与すると考えられた。

4) これらの結果は、高温高湿条件を取り入れた乾燥スケジュールを作成する際の背景的な知識として活用される。

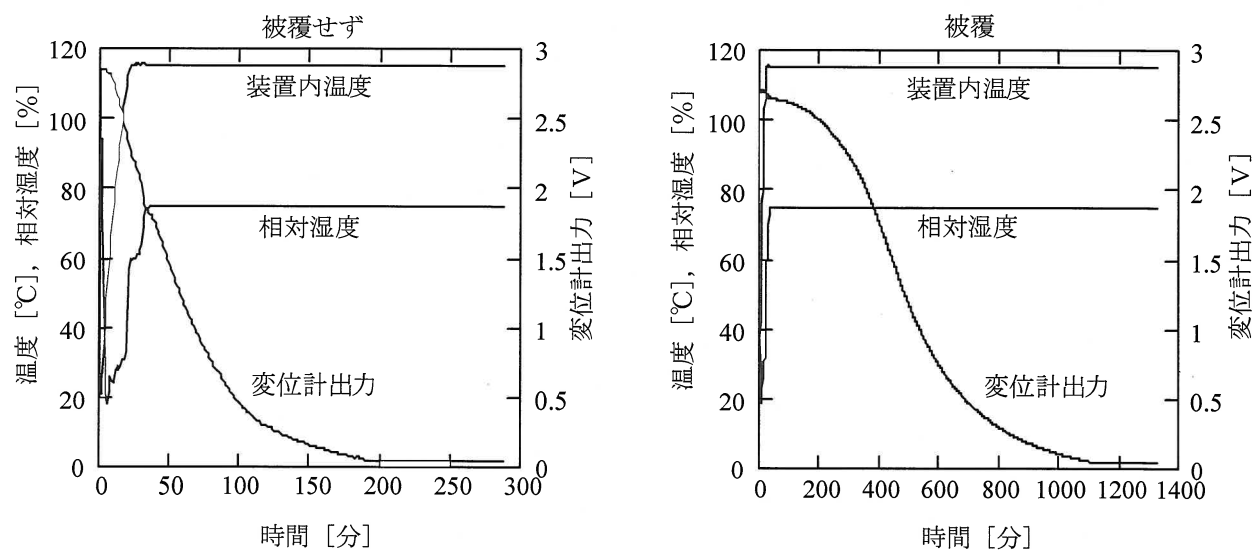


図3-1-2-2 高温高湿条件における変位計出力に対する被覆の効果（115℃、75%RH）

オ 今後の問題点

- 1) 高温高湿条件における実大材の含水率について検討する必要がある。
- 2) 高温高湿処理による木材の強度特性の変化について検討する必要がある。

カ 要約

木材乾燥における適正条件の解明には、木材から水分が失われる際の温度・湿度・材内応力と木材の粘弾性との関係が必要であるため、木材を高湿条件下で加熱した際の動的粘弾性の変化をリアルタイムで測定し、乾燥処理過程における動的粘弾性の変化と水分との関係を検討した。

- 1) 試作した試験系により、従来困難であった高温高湿条件における木材の含水率および振動特性の経時変化を追跡することが可能となった。
- 2) 平衡含水率は温度および湿度が比較的低い場合には既往の推定値に比較的近い値であったが、高温、高湿になるに連れて既往値よりも大きくなった。
- 3) 高温高湿条件における温度- 相对湿度- 水蒸気圧力- 平衡含水率図を作成した。
- 4) 比ヤング率および損失正接はそれぞれ材内温度の上昇と共に減少、増大し、材内温度が沸点で安定し始めた頃に最小、最大となった後、増大、減少に転じ、含水率が安定するといずれも安定した。高温高湿条件における比ヤング率および損失正接の経時変化は湿度非制御の場合

と同様の傾向を示したが、変化量ははるかに大きかった。また、様々な平衡含水率における振動特性は高温では室温よりも比ヤング率は著しく小さく、損失正接は非常に大きかった。よって、木材の物性に温度と水分の相乗効果が大きく寄与すると考えられた。

5) これらの結果は、高温高湿条件を取り入れた乾燥スケジュールを作成する際の基礎的なデータとして活用される。

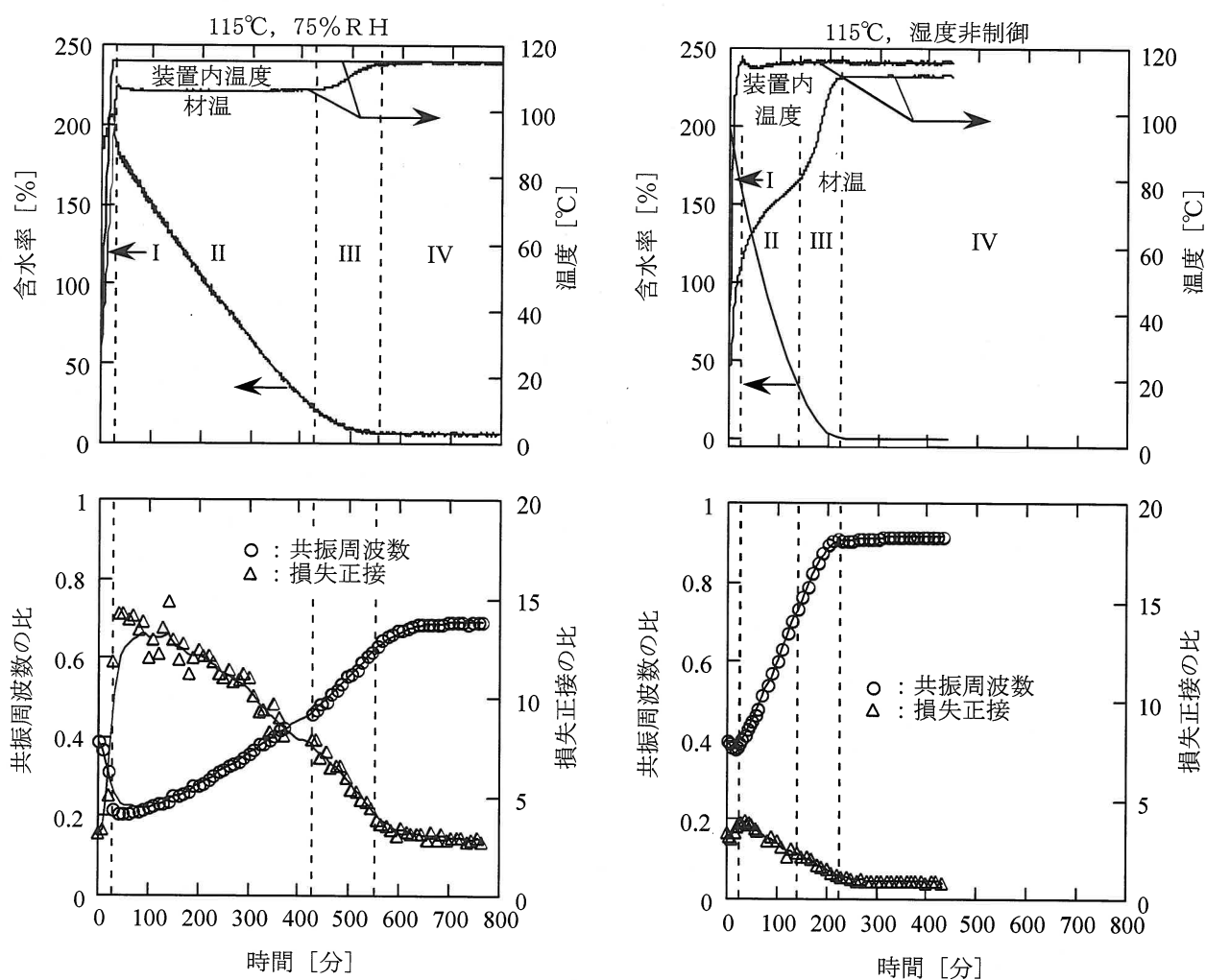


図 3-1-2-3 高温高湿条件における振動特性の経時変化

キ 引用文献

- 1) W. G. Kauman: For. Prod. J. 6(9)、328-332 (1956)

(森林総合研究所木材特性研究領域 久保島吉貴)

(3) 高温高圧条件下での乾燥応力発生と応力緩和機構の解明

ア 研究目的

乾燥の過程で木材に生じる不均一な収縮が原因で、割れ、落ち込みなどの損傷の発生や、内部応力の残留が起こる。このため、乾燥による歩留の低下、切削後や使用過程での反り・狂いの発生を招く。これらの問題は、乾燥方法や乾燥スケジュールに強く依存するが、基本的には、水分・温度が非定常下における木材の粘弾性挙動と深く関連している。最近、飽和水蒸気下における木材の応力緩和の測定で、温度が100℃以上になると、急激な応力緩和が短時間で起こることが明らかになりつつあり、このことを応用した木材の新しい加工、例えば、圧密木材の製造、曲げ木の変形の永久固定、木質ボード類の寸法安定性の向上などが検討されている。本研究では、100℃以上での飽和および不飽和水蒸気下における木材の粘弾性挙動を詳しく調べ、得られた知見を有効に活用して、割れなどの損傷や内部残留応力の少ない乾燥条件を明らかにすることを目的とした。

イ 研究方法

(1) 試料：吉野産スギ(*Cryptomeria japonica*)心材部(比重 0.37)を用い、収縮応力および引張応力測定にはL方向 10mm、R方向 50mm、T方向 65mmの含水率約 120%に調整した試料を、圧縮応力、圧縮応力緩和測定にはL方向 10mm、R方向 20mm、T方向 20mmの乾燥試料を用いた。

(2) 収縮応力測定時の乾燥条件：試料の乾燥は180℃、80%RH以下の一定の条件で行った。80℃での乾燥には恒温恒湿器を、100℃以上での乾燥は過熱水蒸気発生装置を装備したオートクレーブを用いて行った。

(3) 収縮応力測定：過熱水蒸気下での乾燥過程で、試料に生じる収縮応力を測定するために耐熱・耐圧引張ロードセルを開発し、オートクレーブ中に設置した。用いたロードセルは測定温度雰囲気中に 20 分以上放置することにより、0 点のドリフトを生じることなく長時間にわたって高い安定性を示すこと、高温において正しく負荷荷重を検出することを確認した。

(4) 引張強度測定：収縮応力測定と類似の装置で測定した。

(5) 圧縮応力および圧縮応力緩和測定：試料を180℃、100%RH以下の所定の雰囲気と平衡となした後、耐圧ロードセルにより初期厚さの50%の圧縮を加えることにより測定した。

(6) 回復度：試料の変形回復量を次式で定義される回復度(g)によって評価した。

$$g = (T_R - T_C) / (T_0 - T_C)$$

T_0 は初期寸法であり、 T_C は、50%圧縮による応力緩和測定時の寸法、 T_R は、煮沸による変形回復後の寸法である。

(7) 過熱蒸気雰囲気での平衡含水率の測定：

試料の含水率測定には重量法を用い、磁気浮遊型天秤(RUBOTHERM 製)による重量測定を行った。その場合、天秤部と試料部は遮断されており、試料は天秤に直接吊るされることなく、天秤側の電磁石と試料部側の永久磁石を用いた磁場で連結される。そのため、試料部が高温高圧であっても天秤がかく乱されることなく、正確な重量測定が可能となる。

ウエ 結果と考察

(1) 過熱水蒸気下で生じる構造変化

100℃以上の高温水蒸気下での乾燥過程で、木材は、FSP 以上の湿潤状態から全乾状態に至るまでの各含水率状態を経る。各含水率で木材中に生じる構造変化は、湿潤でのそれと、全乾でのそれとの中間的あるいは複合的なものであると推定される。これら両極端の水分状態（湿潤状態と全乾状態）で、100℃以上で高温処理した横圧縮材について2、3の膨潤液体による変形回復を試み、木材中に生じる構造変化を詳細に検討した。この結果、湿潤材の場合には、処理条件に応じて、木材構成成分の分解が主たる場合と、架橋や結晶化によるものとは異なる凝集構造の生成が主たる場合があること、全乾材では、木材構成成分の分解の他に、広範囲の処理条件で生じるような、湿潤材の場合とは異なる凝集構造が生成していることが分かった。このような凝集構造に木材セルロースが関係するか否かを検討するため、セルロース系繊維の水蒸気処理を行った。ガラス棒に巻いた2種のセルロース系繊維（木綿糸、レーヨン糸）を190℃、20分間水蒸気処理し、試料に与えた変形が水蒸気処理により固定されるか否かを観察した。その結果、レーヨン糸に与えた変形は水蒸気処理により固定されたが、木綿糸の場合は固定されなかった。木綿糸と木材が同じセルロースⅠの構造を持つことや、木綿糸に関するX線回折の結果より、190℃、20分間程度の水蒸気処理では、セルロース部分での凝集構造の形成はほとんどなく、セルロースは変形固定にほとんど関与しないと考えられた。木材構成成分の分解に関連して、180℃水蒸気処理材について化学成分分析を行った（表3-1-3-1）。表からホロセルロース中のアルカリ可溶物量が著しく減少することがわかる。また、熱水抽出物および残渣中の構成糖の定量結果より、木材構成成分のうちヘミセルロースが水蒸気処理過程で相当溶脱すると考えられ、ヘミセルロースとリグニンによるリグニンリッチな構造の生成が推定された。

表 3-1-3-1 180℃水蒸気処理試料の化学成分の変化

処理時間 (min.)	灰分	Klason リグニン	酸可溶性 リグニン	ホロセルロー ス	α-セルロー ス	アルカリ 可溶部	抽出残渣	熱水抽出 物	重量損 失
無処理	0.51	35.0	0.58	76.6	50.1	26.5	96.7	3.3	0
水蒸気処理									
5	0.48	36.0	0.53	68.1	49.3	18.8	92.7	5.8	1.5
10	0.43	35.8	0.55	63.4	45.0	18.4	91.6	6.1	2.3
20	0.43	35.2	0.59	62.5	45.7	16.8	88.9	8.0	3.1
30	0.48	34.2	0.55	59.0	44.9	14.1	86.9	8.5	4.6
60	0.46	34.8	0.58	52.3	40.4	11.9	83.5	8.9	7.6

注：無処理全乾試料に対する各種構成成分の割合（％）を示す。

(2) 過熱水蒸気による乾燥の過程で生じる収縮応力

収縮応力の測定に先立って、高温不飽和水蒸気雰囲気での試験装置の開発を行った。応力—ひずみ関係等について測定した結果、装置は不飽和水蒸気雰囲気での粘弾性測定に極めて有効であることがわかった。この装置を用いて過熱水蒸気雰囲気(180℃)での乾燥過程で生じる収縮応力と 100℃以下(80℃)でのそれとの違いを検討した。80℃での乾燥では、相対湿度が異なると、乾燥に要する時間は大きく異なった(1~7 時間)が、含水率で比べると(図 3-1-3-1a)、乾燥時間が異なっても、同じ含水率に達していれば、おおむね同じ収縮応力を与え、含水率 50%付近から、含水率の低下に伴って収縮応力は急激に増加した。接線方向収縮応力についてもほぼ同様の結果が得られた。また顕著な乾燥割れが生じる際の収縮応力、最大収縮応力は相対湿度によらず約 0.8MPa であった。一方、180℃での乾燥では、80℃の場合に比べて、乾燥速度は速く、相対湿度によらず、乾燥時間は類似していて、20~70 分の範囲であった。しかし、同じ含水率で比べると(図 3-1-3-1b)、80℃の結果と異なり、相対湿度の増加に伴って、収縮応力の増加は抑制され、60%RH 以上の乾燥の場合には、最大収縮応力は

0.2MPa 以下に留まった。同様の結果が接線方向収縮応力についても観察された。しかし、同じ含水率で、接線および放射方向収縮応力をくらべると、相対湿度 0%付近では放射方向の値の方が相対湿度 60%以上の相対湿度では接線方向の値のほうが大きくなった。これは、過熱水蒸気下では、乾燥に関係しない収縮応力が発生し、その接線方向値が放射方向値より大きいためと考えられた。この収縮応力は予備水蒸気処理で除去可能であり、予備処理後に 180℃、80%RH で乾燥する際に、収縮を拘束しても、全乾付近まで割れは生じなかった。

さらに収縮応力の測定範囲を 140~180℃、0~100%RH に拡大した。140℃で、0 および 20%RH での乾燥終期の収縮応力は、100℃以下で乾燥した場合と同様の高い値となったが、20~80%RH ではそれらは相対湿度の増加とともに 0.8 から 0.2MPa まで順次減少した。160℃でも同様な傾向が認められたが、この場合には、乾燥終期収縮応力について収縮応力の高いグループ(40%RH 以下

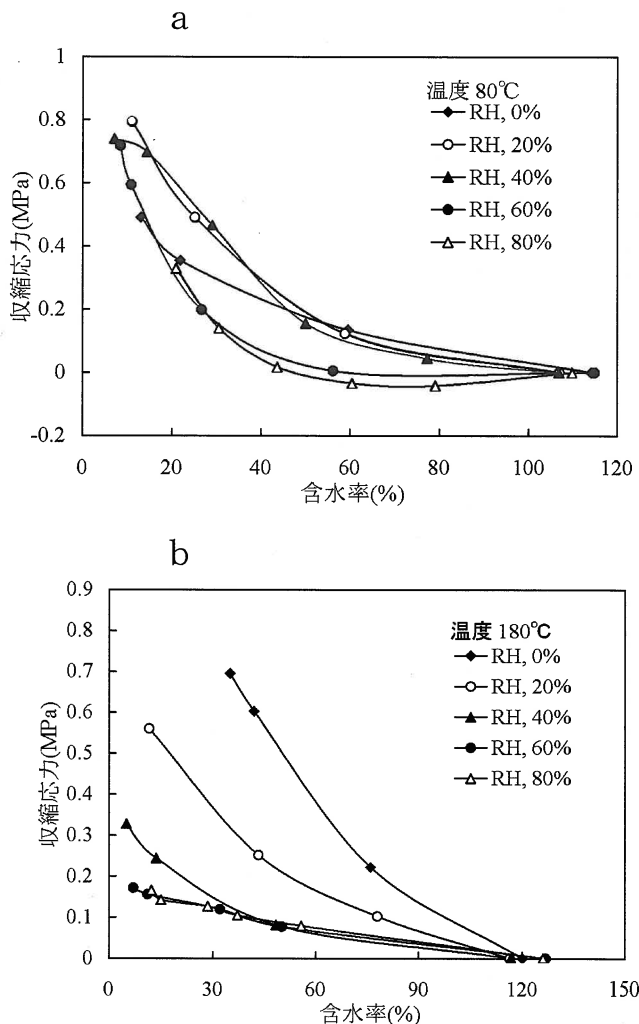


図 3-1-3-1 含水率変化と収縮応力の関係
a: 80℃ b: 180℃

で乾燥の場合) と、収縮応力の低いグループ (60%RH 以下で乾燥の場合) の 2 者に分離した。この傾向は温度増加とともにさらに顕著となった。これらのことから、140℃、60%RH 以上の条件での過熱水蒸気乾燥で収縮応力は低い値にとどまることがわかった。このような収縮応力の温度、湿度による変化は応力緩和から予測できること、収縮応力の大きな低下には応力緩和が効果的に作用していることがわかった。

(3) 収縮応力の予測

上で明らかになった収縮応力の予測を行うために、過熱水蒸気雰囲気での応力-ひずみ挙動、応力緩和、変形固定等を検討した。応力-ひずみ曲線は、相対湿度の増加につれて、どの温度についても、凹凸の多い乾燥材型の曲線から、滑らかな湿潤材型のそれへと順次移行した。これに伴い、降伏値やヤング率は、大きく低下したが二者の対数は直線関係を示した。応力緩和曲線パターンは相対湿度による違いは温度の増加につれて顕著となり、高温、高相対湿度の過熱水蒸気を用いるほど、木材構成成分分子の分解が促進されることが推定された。回復度-処理時間曲線は温度や相対湿度で異なったが、一定相対湿度で温度を変化させる場合、および一定温度で相対湿度を変化させる場合のそれぞれについて、曲線を時間軸について移動することにより、すべてのプロット点は一本の曲線に乗り、回復度-時間合成曲線が得られた。

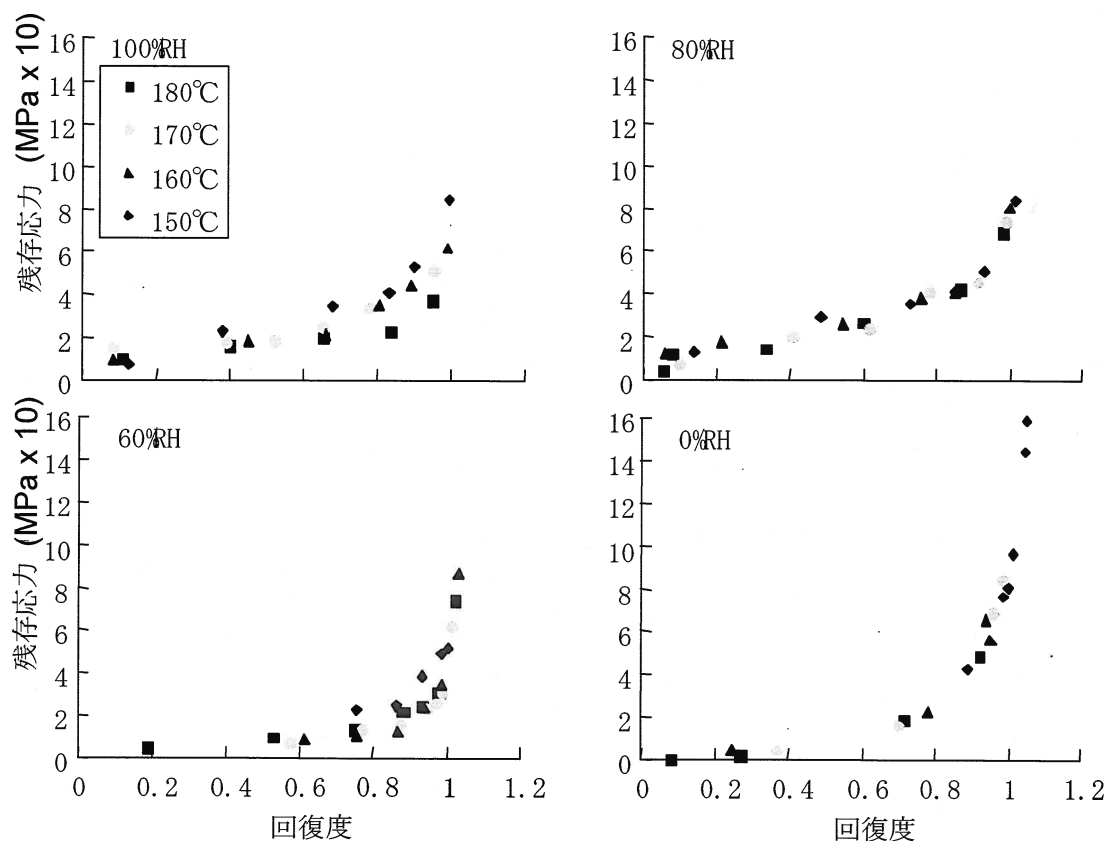


図 3-1-3-2 残存応力と回復度の関係

すなわち、過熱水蒸気下で任意の時間(t:分)、温度(T:℃)、相対湿度(H:%)について、回復度 g (t、 T、 RH)は、次式で表された。

$$g = 0.96 \times \exp(-7.7 \times 10^{a+b-2} \times t) \quad (1)$$

と表された。ただし、a、bはそれぞれ温度、相対湿度に関するシフトファクターであり、

$$a = 0.03 \times T - 5.4, b = 0.0017 \times H - 1.2, \text{である。}$$

また、応力緩和終了時の残存応力と回復度との関係を各相対湿度について求めると、プロット点は一本の曲線で表され、回復度は処理温度や時間に依らず、各相対湿度での残存応力のみで決まることがわかった(図 3-1-3-2)。また、各相対湿度での曲線の形は、熱処理(0%RH)と飽和水蒸気処理(100%RH)の場合の特徴を併せ持つものとなった。相対残存応力—回復度曲線は相対湿度とともに順次変化することから、任意の相対湿度での残存応力—回復度曲線を得ることが出来た。これら回復度—時間合成曲線および残存応力—回復度曲線を組み合わせることにより、乾燥終期の収縮応力を求めることができた。

(4) 過熱水蒸気下での平衡含水率

上の議論はすべて相対湿度を基準になされてきたが、過熱水蒸気下での木材の各種の性質を理解するうえで含水率情報は不可欠である。このため、試験方法の項で述べた装置を開発し、高温高圧雰囲気でのスギ材の含水率を測定した。図 3-1-3-3 に 40～180℃、相対湿度 20～90%RH の範囲の吸着等温線を示す。各相対湿度で比較すると測定温度範囲で温度の増加とともに含水率は直線的に低下した。しかし、吸着等温線の形状は温度の増加とともに BDDT の分類で II 型から III 型に移行するように見え、吸着水の存在形態は高温域では従来と異なることが示唆された。高温での吸着等温線を得たことにより水分による変化をこれまでの相対湿度基準から含水率基準に変換して整理することが可能となった。

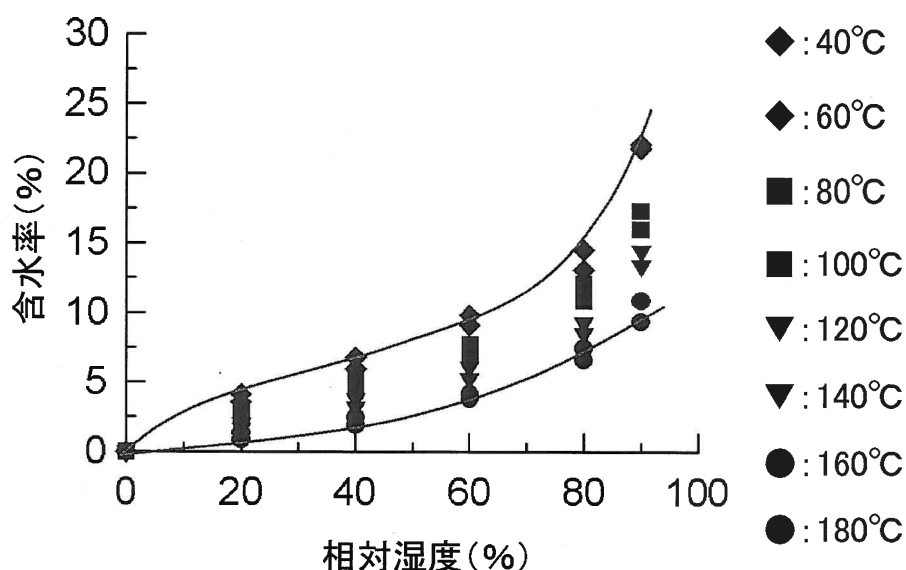


図 3-1-3-3 吸着等温線

オ 今後の問題点

これまで本研究での力学測定等の実験は比較的短時間（1時間オーダー）について行ってきた。これは例えば180℃で高相対湿度ではこの程度の短時間で木材横方向の残留応力がほぼ0になることによる。しかし、実際の乾燥においてはさらに長時間を要し、材の劣化が問題となる。L方向の応力緩和は横方向と異なって、短時間で0にはならず、徐々に進行し、セルロース部分が受けるダメージを反映するように思われる。今後、この部分の検討が必要と考える。

また、収縮応力の予測を行う際に、これまで圧縮応力緩和をもとにして論じてきた。しかし、乾燥応力、収縮応力は引張特性の問題であり、引張応力緩和や引張強度に関するデータが不可欠であり、今後に残された問題である。

カ 要約

スギ材の乾燥過程で収縮変形を拘束して現れる応力（収縮応力）が、100℃以上の過熱水蒸気を用いた乾燥で低減されるかどうかを検討するために、温度 80-180℃、相対湿度 0-80%RH での乾燥を行い、各乾燥過程での収縮応力（R 方向）を測定した。この結果、乾燥終期のそれは 80℃での乾燥では、相対湿度によらず相当に大きい値になるのに対して 140℃、60%RH 以上での乾燥では低い値に留まった。このような収縮応力の抑制機構は、高温・高相対湿度雰囲気での応力緩和に関係し、応力緩和値は圧縮変形の回復度—時間曲線について見出された時間—温度、時間—相対湿度換算則を通じて、任意の時間、温度、相対湿度で予測可能であることが分かった。また、従来、過熱水蒸気下での材の水分状態は相対湿度を指標に推定してきたが、研究の過程で過熱水蒸気下での平衡含水率の測定が可能となった。

キ 引用文献

- 1) 水蒸気処理木材の圧縮変形固定とその機構、木材学会誌、46、291-297(2000)
- 2) Permanent fixation of the transversely compressed wood by steaming and its mechanism、Wood Research、No.87、28-29 (2000)
- 3) W. Cheng、T. Morooka and M. Norimoto: Shrinkage stress occurring in the drying process of wood using superheated steam、Wood Research、No.89、25 (2002)
- 4) The stress in wood under superheated steam above 100C、2001 Proceedings of the Korean Society of Wood Science and Technology Annual Meeting、32-35、April、Soul、Korea (2001)
- 5) The stress occurring in wood under high temperature steam、Proceedings of the 7th international IUFRO wood drying conference、256-261、July、Tsukuba、Japan (2001)
- 6) 熱処理木材の圧縮変形固定とその機構、木材学会誌、47(3)、205-211(2001)
- 7) Cheng、W.、T. Morooka and M. Norimoto: Shrinkage stress of wood during drying under superheated steam above 100° C: Holzforschung、58(4)、423-427 (2004)
- 8) 東原貴志、師岡淳郎、廣澤修一、則元 京: 水蒸気処理および熱処理による木材の化学変化と圧縮変形固定の関係、50、159-167(2004)

(京都大学生存圏研究所生物機能材料分野 師岡敏朗)

2. 圧力・温度条件の制御による高速乾燥処理技術の開発

(1) 多様な圧力下における加熱条件の制御による高速乾燥技術の開発

ア 研究目的

現状では、蒸気式乾燥機のように圧力一定（一気圧）の下で温度・湿度を制御する乾燥方法、もしくは減圧乾燥機のように温度は成り行きとして圧力を制御する方法が通常の乾燥法である。この方法では乾燥時間の短縮に限界があり、また割れの抑制にも限界がある。スギ柱材乾燥を現状よりもさらに短時間処理が可能な技術とするためには、乾燥応力の発生をできるだけ低減しながら木材外への水分移動を促進する技術が必要である。このためには、木材内外の温度と圧力条件を広い範囲で制御することが不可欠である。

したがって、多様な圧力下での加熱及び圧力条件の最適な制御方法を検討し、高速でしかも欠点の少ない乾燥材供給のための高速乾燥技術の開発を目的とする。

イ 研究方法

(1) 過熱蒸気処理を前処理として用いる試験

温度と圧力を同時に制御することによって湿度を調整した 100℃以上の高温蒸気、いわゆる高温過熱蒸気を用いて蒸気式乾燥の前処理を行い、スギ心持ち無背割り柱材の表面割れ、内部割れとともない乾燥を目指して試験を行った。試験の簡単な流れを図 3-2-1-1 に、それぞれの試験条件及び試験材の初期含水率、寸法を表 3-2-1-1 に示す。

試験材は栃木県産のスギ心持ち柱材で、寸法は断面 108mm×108mm、長さ 3 m である。これを 800mm にカットして前処理材と無処理材に分けて試験を行った。木口面からの水分蒸発を抑えて、実大材の乾燥速度に近づくよう両木口にシリコンシーリング剤を塗布した。

前処理条件は、温度 140℃及び 160℃、相対湿度約 40% 及び 25%（どちらも絶対圧力 0.15MPa）、処理時間 4 時間の 2 条件である。蒸気式乾燥の条件は乾球温度 90℃、湿球温度 75℃一定とした。乾燥試験中は一定時間ごとに試験材を取り出して重量を測定し、試験終了後に重量および表面割れの発生状況を測定した。

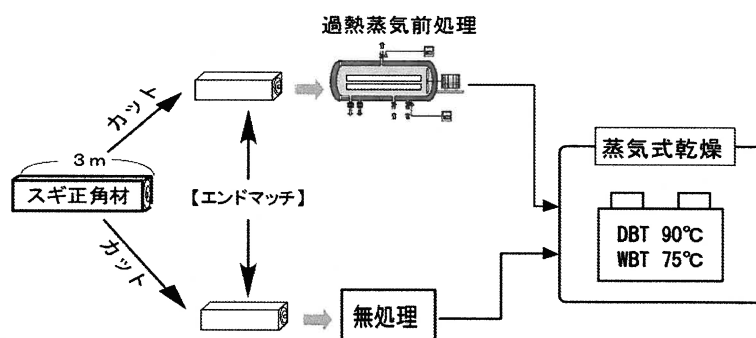


図 3-2-1-1 過熱蒸気処理を前処理として用いる試験の流れ

表 3-2-1-1 過熱蒸気による前処理試験の処理条件と試験材

前処理			蒸気式乾燥	試験材			
温度(℃)	相対湿度(%)	時間(h)		長さ(mm)	断面(mm)	木口シール	初期含水率(%)
140	40	4	乾球温度: 90℃ 湿球温度: 75℃	800	108 × 108	両木口	95.1
160	25	4					97.9
無処理							97.2

(2) 過熱蒸気のみによって乾燥する試験

より大きな乾燥速度を得るため、全乾燥期間を通じて 100℃以上の高温過熱蒸気を用いた乾燥試験を行った。いわゆる高温乾燥では、乾燥初期に急激に高温低湿状態を作り出して柱材の表層部にドラインゲットを形成し、その後の表面割れを抑制しようとするが¹⁾、高温低湿条件を乾燥終了まで維持すると内部割れが発生するため、乾燥途中から温度を下げる^{2),3)}。この内部割れは、表層に形成されたドラインゲットが乾燥後期における内層の収縮を阻害するために発生すると考えられている¹⁾。従って、乾燥初期における表層部の含水率傾斜を緩やかに保ち、ドラインゲットの形成を表層のみでなく内層にまで及ぼすことができれば内部割れが避けられると思われる。100℃以上の高温域で高湿雰囲気であれば、このような処理ができる可能性があり、図 3-2-1-2 の過熱蒸気を用いたスケジュールAを考案した。湿度条件を飽和状態から徐々に下げてゆき、約3日間で乾燥する。対照試験として同じ処理装置を用いて、高温乾燥と似せたスケジュールBによって乾燥試験を行い、含水率分布の経過などを比較した。

試験材は栃木県産のスギ心持ち柱材で、寸法は断面 108×108mm、長さ 3 m の試験材から 650mm にカットして用いた。平均初期含水率はスケジュールAで 90%、Bでは 78%である。含水率傾斜の経過を調べるため、エンドマッチさせた4本ずつの4グループに分け、それぞれのグループを上記スケジュールで11時間、24時間、51時間、72時間処理して取り出し、測定した。

(3) 過熱蒸気処理と高周波加熱減圧乾燥を組み合わせ、低温で高速な乾燥を試みる試験

割れ抑制と高速化に加えて変色を抑制するため、高温加圧過熱蒸気処理後に減圧乾燥へ移行する乾燥法を試みた。試験材は栃木産のスギ心持ち無背割り柱材で、長さ 1300mm、断面 114mm×114mm、含水率は 50～116%で、各試験に4本ずつを用いた。試験条件を表 3-2-1-2 に示す。乾燥後の表面割れと含水率を調査し、切断した中央部断面の様子をフラットヘッドスキャナーで撮影し、画像処理ソフト(ImageJ)にて内部割れ面積と断面積との比を測定した。また、材色については、試験材の表面を約 2mm 削って測色計((株) ミノルタ製 CR200)にて測定し、別途用意した天然乾燥材の材色との色差を測定した。測定部位は心材に限定し、表色は L*a*b*表色系を用いた。

処理の手順は、乾燥の前半に 6～22 時間の過熱蒸気処理によって表層にドラインゲットを形成し、その後、高周波加熱減圧乾燥へ移行した。乾燥温度は過熱工程で 130℃あるいは 115℃一定とし、130℃の場合は絶対圧力を 0.27 から 0.21MPa まで 18～22 時間で下げ、115℃の場合は 0.17 から 0.13MPa まで下げた。相対湿度に換算すると 100%から 40%の範囲である。高周波加熱減圧工程では圧力 150mmHg、高周波発振機投入電力を 5 及び 10kW/m³とした。

ウエ 結果と考察

(1) 熱蒸気処理を前処理として用いる試験

図 3-2-1-3 に前処理材と無処理材を蒸気式乾燥機で乾燥した試験における含水率経過を示す。黒が無処理材、白抜きが処理材である。試験が始まった直後の乾燥速度は無処理材の方が明らかに大きい。前処理による含水率減少が十分大きいために、含水率が 20%に至るまでの乾燥時間は処理材の方が短く、約5日間程度の差が生じた。表 3-2-1-3 に乾燥試験終了後の含水率、乾燥日数、表面割れの結果を示す。仕上がり含水率にばらつきが認められるものの、処理材は無処理材に比べて表面割れが少なく、乾燥時間が短いことは明らかである。なお、表面割れについては、試験材を取り出しながら測定したため測定時に材温が下がって割れが生じた可能性もある。しかし、乾球温度 90℃、湿球温度 75℃(平衡含水率 6%)という厳しい乾燥条件を用いたこと、無処

理材、処理材ともに同じ条件で測定していること、エンドマッチ材であるにもかかわらず大きな差があらわれていることなどから、過熱処理材の表面割れが無処理材に比べて少ないという結果には変わりはないと考えられる。これらの結果より、無背割りのスギ心持ち柱材乾燥においては、過熱蒸気前処理を導入することによってその後の仕上げ乾燥における表面割れの抑制及び乾燥時間の短縮が期待できる。

表 3-2-1-4 過熱蒸気による乾燥試験の結果

スケジュール	温度 (°C)	初期含水率 (%)	終了時 含水率(%)	乾燥時間 (h)	表面割れ長さ 合計(cm)
スケジュールA	130	89.2	11.6	72	23.4
スケジュールB	115	78.2	16.4	72	43.2

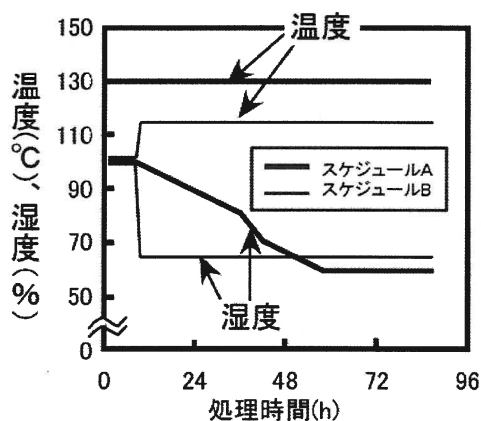


図 3-2-1-2 過熱蒸気のみによる乾燥試験の処理条件

A:湿度をゆっくり下げる条件
B:湿度を急激に下げる条件

表 3-2-1-2 過熱蒸気処理と高周波加熱減圧乾燥の組み合わせ試験条件

試験番号	過熱蒸気処理条件			減圧乾燥条件	
	温度	相对湿度	時間	高周波発信機 投入電力	圧力
	(°C)	(%)	(h)	(kW/m³)	(mmHg)
対照試験	無処理			10	150
試験1	130	100%→80%	22		
試験2		100%→40%	18		
試験3		100%→70%	48		
試験4	115	100%→65%	12	5	

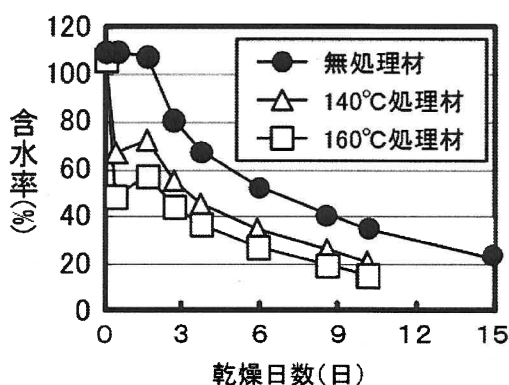


図 3-2-1-3 前処理材と無処理材の含水率経過

表 3-2-1-3 過熱蒸気前処理と蒸気式乾燥の結果

前処理	含水率(%)			乾燥 日数	表面割れ	
	処理前	処理後	乾燥 試験後		本数	長さ合計 (cm)
無処理	97.2	19.3	14.9	16	279	
140°C	95.1	67.9	17.5	10.1	0	0
160°C	97.9	52.2	14.1	10.1	2	12

(2) 過熱蒸気のみによって乾燥する試験

表 3-2-1-4 はそれぞれの乾燥条件における乾燥終了後の含水率と表面割れの結果である。どちらも表面割れは少ない。また、試験終了後の試験材の中央部を鋸断した断面の写真 3-2-1-1 を示

す。スケジュールBでは大きな内部割れが観察されたが、スケジュールAでは初期蒸煮時に発生したと思われる髄付近の割れを除いて、ごく小さな割れが2本認められただけであった。

どちらのスケジュールも、表層をドラインゲットすることによって表面割れを抑制するという考え方は同じであり、表

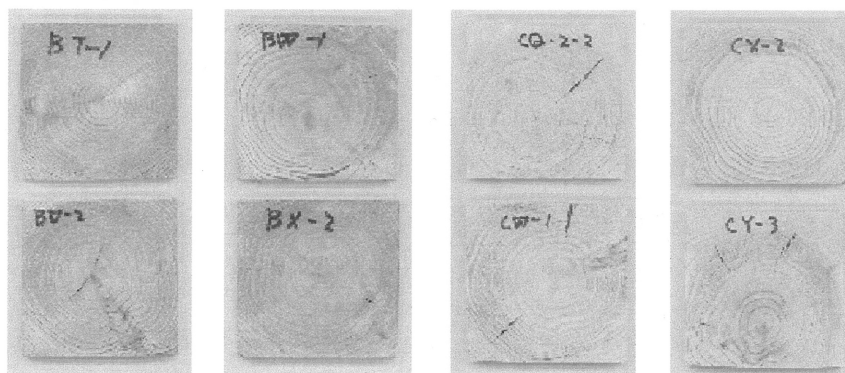


写真 3-2-1-1 過熱蒸気による乾燥試験後の内部割れの様子

面割れは十分少ない結果であった。しかし、内部割れに関しては大きな違いが認められた。この違いは含水率分布の経過の違いと考え合わせると、ゆっくり乾燥されることによって、ドラインゲットが形成された層がスケジュールAの方が厚く、表層部が内層の収縮をあまり阻害しなかったためと推測される。

(3) 過熱蒸気処理と高周波加熱減圧乾燥を組み合わせ、低温で高速な乾燥を試みる試験

結果の概要を表 3-2-1-5 に、内部割れの結果を図 3-2-1-4 に、材色の結果を図 3-2-1-5 に示す。

対照試験の乾燥時間は 48 時間と非常に短く材色も良好だったが表面割れが多く、内部割れも認められた。試験 1 では過熱蒸気処理材について同様のパワーを投入して乾燥したところ、表面割れは減少したが、内部割れが増大した。表面割れの抑制処理を施さずに大きなパワーを投入すると、多くの表面割れが発生することから、過熱蒸気処理の表面割れ抑制効果が認められる。また、過熱処理がなくても内部割れが発生したことは、この内部割れの原因は表層のドラインゲットではなく、別の要因であると思われた。また、試験 1 では材色も大きく変色しており、変色の主な原因が過熱処理であることを示している。そこで、試験 2 では過熱処理条件を緩和するため、処理時間は同じで湿度をより低くまで下げたところ、表面割れ、内部割れは問題ない

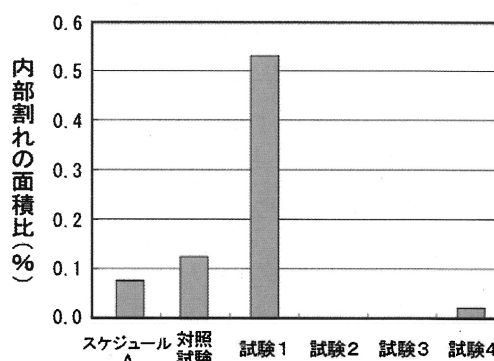


図 3-2-1-4 過熱蒸気処理＋高周波減乾燥試験終了後の内部割れの比較

表 3-2-1-5 過熱蒸気処理と高周波加熱減圧乾燥の組み合わせ試験の結果

試験番号	結 果				
	乾燥時間	初期含水率	終了時含水率	表面割れ長さ合計	内部割れ
	(h)	(%)	(%)	(cm/m)	
対照試験	48	96	7	77	少ない
試験1	49	80	7	35	多い
試験2	67	79	11	0	なし
試験3	107	104	13	20	なし
試験4	88	82	13	15	少ない

が、材色は期待したほど変わらなかったもので、試験 3 では過熱処理温度を 115℃に下げることにした。しかし、処理温度が下がることによって表面割れの抑制効果がなくなることを危惧して処理時間を長くしたため、材色にはほとんど変化がなく、処理時間が長すぎると判断した。試験 4 では、同様の温度で処理時間を 12 時間として試験を行ったところ、表面割れ、内部割れは試験 3 と同程度、材色はかなりの改善が認められた。

今回行った条件の範囲では、過熱処理を 115℃、12 時間とした試験 4 が表面割れ、内部割れ、変色ともに最も良好な結果で、なおかつ乾燥時間は 88 時間であり、最も良好な結果であった。

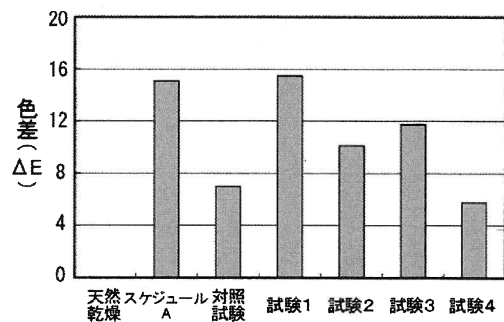


図 3-2-1-5 過熱蒸気処理＋高周波減圧乾燥試験終了後の材色の比較
(天然乾燥材野色を基準にして)

オ 今後の問題点

今回の一連の試験によって、心持ち柱材を高温・高湿処理することによって、内部割れを抑制しつつ高速で乾燥できることがわかったが、大きな変色が発生した。また、過熱蒸気処理条件を表層のドライグセット形成処理と捉え、その後、高周波加熱減圧乾燥へ移行することによって変色を抑制しつつ、高速乾燥を実現できた。今後、処理条件を一般化するため、柱材の表面割れを避けるために必要十分な処理が施されたことをリアルタイムで判定する機構の開発、内部割れを非破壊で検出する手法の開発などが必要と思われる。また、製材品の品質保証の観点から、熱処理の程度と特に劣化との関連を一般化する必要がある。

カ 要約

スギ心持ち無背割り柱材について、過熱蒸気による割れの抑制と高速乾燥との両立について検討を行った。過熱蒸気による前処理によって、その後の乾燥工程における表面割れの発生を抑制することができたが、乾燥速度の増大は軽微であった。過熱蒸気を用いた乾燥では大きな乾燥速度を維持しつつ、表面割れ、内部割れともに非常に少なく乾燥することが可能であった。130℃試験においては、初期含水率 100%程度の柱材がおおむね 3 日で乾燥できると推定された。しかし、このスケジュールでは大きな変色が認められ、材の劣化が危惧された。変色を抑制するために過熱蒸気処理後に高周波加熱減圧乾燥に移行する試験を行ったところ、軽微な変色でかつ表面割れ、内部割れも少なく 4～5 日で乾燥できた。

キ 引用文献

- 1) 藤本登留：日本木材学会レオロジー研究会・木材と水研究会シンポジウム資料、34-39 (2001)
- 2) 吉田孝久、橋爪丈夫、藤本登留：木材工業、55、357-362 (2000)
- 3) 吉田孝久、伊東嘉文、橋爪丈夫：第 53 回日本木材学会大会要旨集、p114 (2003)

(森林総合研究所加工技術研究領域 小林功、黒田尚宏、石川(本田)敦子)

(2) 乾燥過程のモニタリングによる効率的な高周波印加制御方式の開発

ア 研究目的

高周波加熱は木材内部の加熱に有効であり、特に乾燥速度の向上と水分傾斜の抑制に効果が高い。高周波加熱の問題点は、電気を利用するためエネルギーコストが高いことであり、これを低減する省エネルギー対策が課題となっている。高周波加熱の利用を必要最低限に制御する必要がある。本研究では、高周波電界中で利用可能な材温測定と木材水分の減少量測定の技術を用い、乾燥過程のモニタリングにより乾燥状態に合った効率的な高周波加熱の印加制御方法の開発を目的とする。

イ 研究方法

(1) 試験装置 恒温恒湿器（エスペック㈱ LHU-113）に小型高周波発振機（山本ビニター㈱）と電極などを組み込み、高周波・蒸気複合乾燥の条件設定が高精度に行える試験装置を製作した。さらに試験材の重量を測定するための電子天秤、材内温度を測定するための光ファイバー式温度測定装置、それらのデータを集積する装置を組み合わせ図3-2-2-1に示す試験装置を構成した。

(2) 試験材 試験材には115mm角の3mスギ柱材(奈良県産)を用いた。試験①、②では3m材2本より節のない部位300mmを1体ずつ切り出し、1面に背割りを施したものを2体供試した。これを評価試験ごとに同供試材を繰り返し使用することとし、減圧吸水処理を行い初期含水率が常に100%前後になるように調整した。試験③、④、⑤は3m材2本より材長中央部の隣接する300mm材を3体ずつ切り出し、無背割りで使用した。初期含水率は試験③では約70%、試験④、⑤では約120%であった。それぞれの全乾重量は試験材を採取した両端の試験片の全乾法結果をもとに算出した。全ての試験材は両木口をシールして使用した。

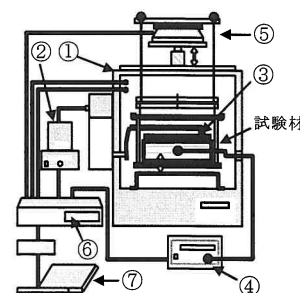


図3-2-2-1 試験装置の構成

- ① 恒温恒湿器
- ② 高性能小型高周波発振機
- ③ 電極
- ④ 光ファイバー式温度計
- ⑤ 電子天秤を用いた重量連続測定装置
- ⑥ 制御装置
- ⑦ データ集積装置

(3) 試験方法 試験条件を表3-2-2-1に表す。試験①では、全投入エネルギーを一定とするため乾燥時間を一定とし、外部加熱と高周波印加の消費電力を一定とした状態で、印加時期のみを前期・中期・後期と変えた。試験②では印加時期を固定して、高周波出力を変化させた。試験③では試験①②の試験結果の再現性を生材で確認した。試験④では、実際に現場で使用されている乾燥スケジュールにおける評価を行うために、まず試験材を高周波・蒸気複合乾燥試験機（山

表3-2-2-1 試験条件

試験材	試験No.	評価項目	試験条件	高周波印加時期	高周波出力密度 W/kg	高周波出力 W	高周波投入エネルギー kWh	乾燥時間 hr	印加期間 hr
吸水緑返材	①	印加時期	A	印加なし	—			216	—
			B	乾燥12hr後	20	60	1.96	96	35.0
			C	乾燥36hr後			1.96		35.3
			D	乾燥60hr後			1.95		35.9
	②	出力	A	乾燥66hr後	20	62	1.36	92	26.0
			B		30	94	0.89	33	19.0
			C		45	142	0.79	31	15.0
生材	③	印加時期	A	乾燥12hr後	20	60	5.55	107	95
		印加時期・出力	B	乾燥72hr後	20	60	3.95	139	67
		出力	C	乾燥72hr後	45	130	1.50	97	15
	④	出力 (高温セット有り)	A	乾燥96hr後	20	70	3.88	170	74
			B	乾燥96hr後	45	160	2.45	134	38
	⑤	AE測定		乾燥120時間後	45	160	2.89	146	26

本ビニター(株)にて高温セット処理を施した後、本試験装置に移して比較した。試験⑤では試験④と同条件下で、内部割れの AE 測定を試みた。外部加熱の条件は試験①～③では蒸煮を想定した DBT80℃/WBT78℃×6 時間(昇温 3 時間、保持 3 時間)処理した後、DBT80℃/WBT60℃一定で 75～210 時間とした。試験④⑤では 95℃の蒸煮を 6 時間(昇温 3 時間、保持 3 時間)処理した後、DBT120℃/WBT90℃×24 時間の高温セットを行い、その後 DBT80℃/WBT60℃一定で 104～140 時間とした。印加期間中は、常に高周波整合を完全にとった状態で高周波加熱した。高周波エネルギーの投入量は試験①では一定とし、試験②～④では含水率を 15%以下に仕上げるまで可変とした。高周波の印加は材心温度で上限 105℃・下限 100℃の ON・OFF 制御を行った。

ウエ 結果と考察

(1) 吸水繰返し材による印加時期と高周波出力によるエネルギー効率の比較(試験①、②)

試験結果を表3-2-2-2に示す。エネルギー効率は、脱水量より算出した蒸発潜熱(2257kJ/kg)と高周波投入エネルギー(1kWh=3600kJ)から求めた。

(1-1)印加時期の比較(試験①)

全乾燥期間の乾燥速度とエネルギー効率の比較を図3-2-2-2に示す。全乾燥期間で比較した場合、印加時期を後期とした条件①-Dが、乾燥速度、エネルギー効率共に最も高い値を示した。図3-2-2-3の印加期間中の材心温度を比較したところ、同一投入エネルギーにおいて100℃以上を維持した割合は①-Dが最も高く、このことがエネルギー効率を高めた要因であると考えられる。

(1-2)高周波出力の比較(試験②)

乾燥速度とエネルギー効率の比較を図3-2-2-4に示す。最も高周波出力の高い条件②-Cが、乾燥速度、エネルギー効率共に最も高い値を示した。印加期間中の材心温度の割合を図3-2-2-5、3-2-2-6に示す。条件②-Cは、最も速やかに材心が昇温し、最も長い時間材心温度が105℃を維持している。

表 3-2-2-2 試験結果 (1)

試験 No.	評価項目	試験条件	含水率%				エネルギー効率%		乾燥速度%/hr	
			初期	印加前	印加後	仕上	全期間	印加期間	全期間	印加期間
①	印加時期	A	95.7	—	—	17.3	—	—	0.36	—
		B	95.9	70.9	25.6	21.0	35.7	21.6	0.73	1.29
		C	101.2	52.1	21.8	18.3	39.6	14.5	0.86	0.86
		D	102.6	37.3	14.3	14.3	42.1	11.0	0.92	0.64
②	出力	A	95.6	32.5	13.5	—	—	13.7	—	0.73
		B	97.5	29.5	13.2	—	—	19.5	—	0.86
		C	95.6	33.1	13.0	—	—	24.9	—	1.34

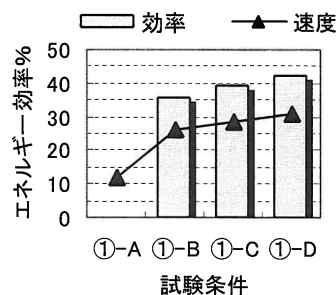


図 3-2-2-2 試験①の全乾燥期間の比較結果

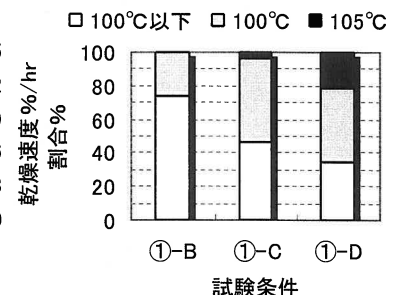


図 3-2-2-3 印加期間中の材心温度の割合 (試験①)

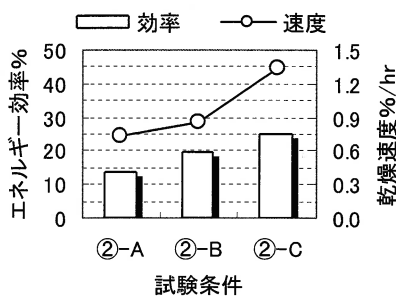


図 3-2-2-4 試験②の印加期間の比較結果

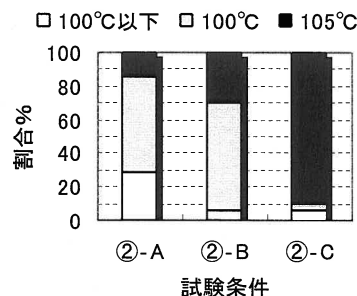


図 3-2-2-5 印加期間中の材心温度の割合 (試験②)

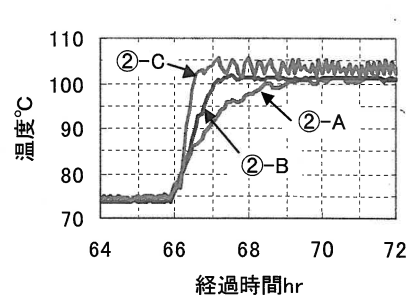


図 3-2-2-6 試験②の材心温度経過

以上のことから、熱気乾燥単独で乾燥速度が大きく低下する乾燥後期において、高周波印加を複合すること、また高周波出力を高くすることがエネルギー効率を高めることを確認した。これは速やかに材心が昇温することで、長時間材心温度を105℃以上とすることができると考えられる。

(2) 生材による印加時期と高周波出力によるエネルギー効率の比較(試験③)

試験結果を表3-2-2-3と図3-2-2-7に示す。条件③-Aと③-Bの印加時期については、全乾燥期間の比較において乾燥後期の印加条件の方が、エネルギー効率が高い。条件③-Bと③-Cの高周波出力による比較結果では、高周波出力が高い条件でエネルギー効率が高い。いずれも(1)の試験結果と同様の結果となり、再現性が確認された。図3-2-2-8、3-2-2-9に示すように材心温度の保持割合と速やかな昇温の傾向についても(1)の試験と同様となった。但し、エネルギー効率は(1)の結果より低下する傾向にあり、吸水材と生材の違いと考えられる。

表 3-2-2-3 試験結果 (2)

試験 No.	評価項目	試験条件	含水率%			エネルギー効率%	
			初期	印加前	仕上	全期間	印加期間
③	印加時期	A	74.7	69.9	12.8	12.7	11.7
	印加時期	B	70.5	43.4	14.0	15.4	8.0
	出力	C	72.9	42.0	15.7	39.3	18.1

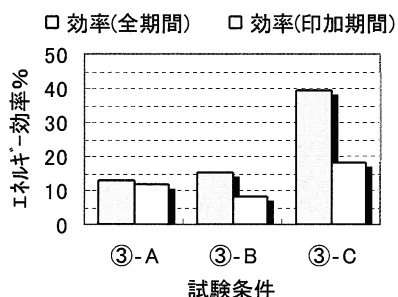


図 3-2-2-7 試験③の比較結果

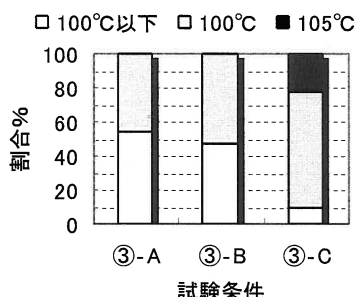


図 3-2-2-8 印加期間中の材心温度の割合 (試験③)

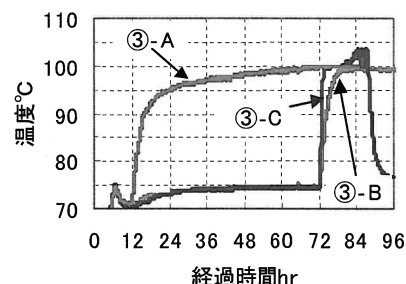


図 3-2-2-9 材心温度の経過 (試験③)

(3) 高温セット材の高周波出力によるエネルギー効率の比較(試験④)

試験結果を表3-2-2-4と図3-2-2-10に示す。前処理に高温セットを行った場合においても、高周波出力を上げた条件の方が、エネルギー効率が向上した。印加期間の材心温度の保持割合(図3-2-2-11)と速やかな昇温(図3-2-2-12)も(1)と(2)と同様な傾向を示した。

表3-2-2-4 試験結果 (8.3)

試験 No.	評価項目	試験条件	含水率%			エネルギー効率%	
			初期	印加前	仕上	全期間	印加期間
④	出力	A	121.0	45.3	14.9	26.3	7.5
		B	120.6	47.1	12.4	44.4	14.3

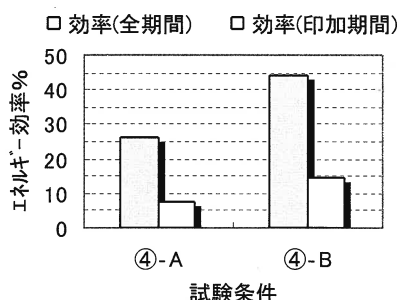


図 3-2-2-10 試験④の比較

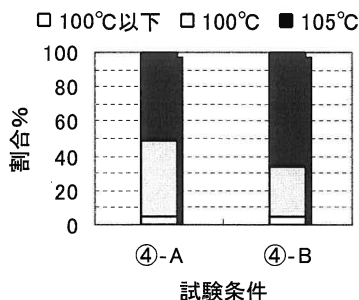


図 3-2-2-11 印加期間中の材心温度の割合 (試験④)

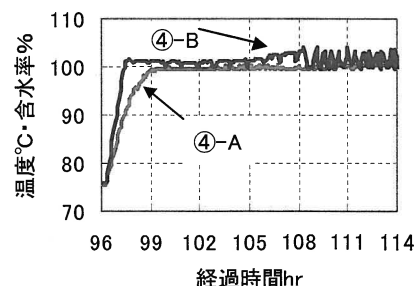


図 3-2-2-12 材心温度の経過

(4) 内部割れのAEモニタリングによる乾燥終了時点の推定(試験⑤)

AEセンサ(株NF回路設計ブロック AEセンサ:AE-901-200-WP、AEテスト:9501)とセラミック製丸棒を用いて、高周波・蒸気複合乾燥中の内部割れのAE測定を試みた(図3-2-2-13)。試験中に発生したAEは1分ごとのトータルカウントとして、データ集積した。内部割れのAE測定結果を図3-2-2-14に、発生した内部割れの様子を図3-2-2-15に示す。AEは、外部加熱単独乾燥時に数回測定された後、印加期間中にも測定された。測定されたAEと内部割れの発生時期や発生箇所との関連は特定できなかったが、高周波加熱中に連続してAEのモニタリングができることが確認された。高周波・蒸気複合乾燥においては、高周波印加の最終段階で含水率が15%以下になった時期より内部割れの発生が増加することが確認されており、内部割れAEのモニタリングにより高周波印加の終了点の推定への利用を検討したい。

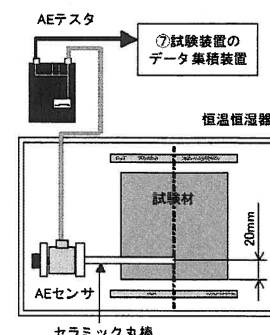


図3-2-2-13 AE測定方法(試験⑤)

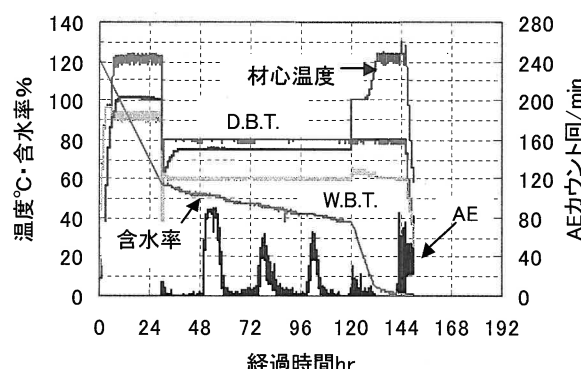


図3-2-2-14 AE測定結果(試験⑤)

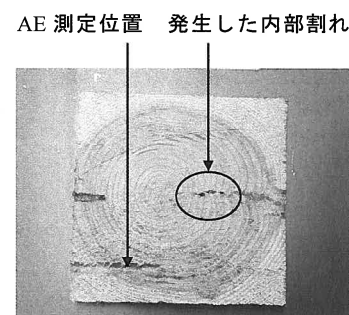


図3-2-2-15 発生した内部割れ

オ 今後の問題点

材温をできる限り速やかに、また長時間 100℃以上の高温に保持することが、エネルギー効率を高めることを確認したが、材温のモニタリングによる適切な高周波印加制御方法の検討ができなかった。また、高周波・蒸気複合乾燥における内部割れのAE測定を試みた。今後は、内部割れの発生条件を明確にし、乾燥終了時を把握する制御因子としての利用を検討する。

カ 要約

研究目標としたエネルギーコストの低減対策として、高周波の印加時期を乾燥後期にし、高周波出力を上げることでエネルギー効率を高め、省エネルギー化できることが確認できた。これらの成果は、乾燥現場における高周波・蒸気複合乾燥のスケジュールに利用することができる。

キ 引用文献

- 1) 永田総司ほか：第54回日本木材学会大会研究発表要旨集、p148(2004)
- 2) 永田総司ほか：第55回日本木材学会大会研究発表要旨集、p71、p186(2005)

(山本ビニター株式会社 山本泰司、上田守、永田総司)

第4章 乾燥方法に応じた建築用材の品質評価と乾燥処理技術の体系化

1. スギ品種等の材質特性に応じた最適乾燥プロセスの解明と乾燥コスト評価

(1) 乾燥プロセス評価のための遺伝形質等に基づくスギ材の選別指標の解明

ア 研究目的

本研究の目的は、スギ材質の品種間変動に関する情報を収集・整理すると同時に、乾燥特性に影響する木材性質を明らかにし、乾燥特性に応じた原材料選別基準の指標となり得る木材性質を明らかにすることである。

これまでの研究から、木材の人工乾燥時の乾燥速度やエネルギー消費量は密度と生材含水率、中でも心材含水率との関係が深く、正角材の曲がりなどの狂いや割れには材の収縮率が関係することが知られている。さらに収縮率の変動には密度、ミクロフィブリル (Mf) 傾角や年輪構造が関係することが推定されており、密度とMf傾角は繊維方向のヤング係数の変動にも関係することから、それらの木材性質相互の関係やスギの品種間での違い等を整理しておくことも重要である。

本課題では、スギの心持ち正角材を対象に、中温と高温乾燥時に発生する曲がり、表面割れ及び内部割れと木材性質との関係について調べた。また、木材乾燥に影響する重要な要因でありながらこれまで報告の少ない心材含水率と収縮率などの品種間変動等に関する情報収集を行った。

イ 研究方法

既往のデータを参考に品種間でヤング係数や密度が異なるスギ5品種を選び供試木とした。供試木及び採材後の原木丸太の概要は表4-1-1-1のとおりである。

表1 供試木の概要

品種名	採取地	樹齢	本数	DBH	樹高	心材含水率		MOE	
		年				1 番丸太	4 番丸太	1 番丸太	4 番丸太
			本	cm	m	%	%	GPa	GPa
ボカスギ	富山県 (宮ヶ谷地)	33	22	25.4	—	67.8	72.0	3.31	5.90
ボカスギ	富山県 (西ヶ谷地)	33	20	25.4	16.7	61.6	65.8	3.69	6.01
ボカスギ	富山県 (西ヶ谷地)	33	20	26.7	—	—	—	3.30	5.48
リュウノヒゲ	熊本県 (菊池)	52	30	23.8	20.9	57.7	50.4	8.03	9.66
アヤスギ	熊本県 (菊池)	48	30	31.7	—	49.2	—	6.31	7.91
ヤブクグリ	熊本県 (小国)	39	30	29.8	21.6	103.1	67.8	4.84	7.35
クモトオシ	熊本県 (菊池)	53	30	25.1	22.8	196.0	107.4	9.56	10.56

* 供試木は、地上高8mまでを採取し、4m材2本を輸送後2mに玉切り。

(基礎材質試験) 伐採した個体の地際 (地上高0.3m) から8mの試験材を採取後、4mに玉切りして3品種 (ボカスギ、リュウノヒゲ、アヤスギ) については地際から約30cm厚さの円盤を1.5~1.8mごとに1個体から5枚ずつ、2品種 (クモトオシ、ヤブクグリ) については地上高1.3mの部分から順に1.5~2.0mごとに4枚ずつ採取し、残りの丸太とともに以下の試験に供した。1番丸太 (ボカスギ、リュウノヒゲ及びアヤスギ)

ぎは地上高0.3～2.1m部分、クモトシとヤブクグリは地上高1.5～3.3m部分）と4番丸太（地上高約5.9～7.7m部分）の動的ヤング係数を生材状態で縦振動法により測定した。円盤からは、幅3～5cmのストリップを採取し、髓を含む2方向について、生材含水率、容積密度（浮力法）、気乾密度と年輪構造（軟X線デンシトメトリ）及び異なる3方向の収縮率（T:接線、R:半径、L:繊維方向）を測定し（JIS試験体と髓から外側に連続的に作製した小試験体）、さらに1方向からストリップを採取しMf傾角を測定した。

（乾燥試験）横断面寸法が11.5cm×11.5cmの心持ち正角材を製材し（他に8×8、12×12、13×13、14×14 cm、1番正角と4番正角はそれぞれ1番丸太と4番丸太に対応する）、生材状態でのヤング係数と密度を測定後乾燥試験を行い、乾燥後のヤング係数、密度、含水率、曲がり矢高、表面割れ及び内部割れ長さの測定を行った。内部割れについては、正角材の両端、中央部および両端と中央部の中間から厚さが約2～3cmのストリップを計5枚採取し、割れの長さ、最大割れ幅、割れの数を測定した。

ウエ 結果と考察

（1）スギの乾燥による狂い及び割れと木材性質との関係

a. 狂い（曲がり）

心持ち正角材を中温（80～90℃）及び高温乾燥（120℃）し、曲がりとそれらの木材性質との関係について検討した。曲がり矢高は、乾燥法に関係なく正角のヤング係数の低い3品種の1番正角で大きい傾向が認められた（図4-1-1-1）。ヤング係数の低い個体では、一般に未成熟材部のMf傾角が大きく、L収縮率が大きいために（図4-1-1-2）、曲がりが大きくなったことが考えられる。また、断面を小さくした場合には、曲がり矢高が大きくなる傾向を認めた。この理由は、髓に近いほど一般にMf傾角が大きくL収縮率も大きくなるためと考えられる。

b. 表面割れ

正角材を中温乾燥し、表面割れの発生と木材性質との関係について検討した。供試した4品種で、1番正角に比べて4番正角の方が表面割れ長さが長かった（図4-1-1-3）。原因としては、地上高の違いによる心材率の違い（含水率勾配の違い）や未成熟材率の違いなどが考えられたが、心材率との間には明確な関係は認められなかった（図4-1-1-4）。辺心材の含水率の違い等による材内での乾燥過程における水分傾斜が割れの原因になることが知られているが、クモトシでは高含水率心材のために水分傾斜が辺心材間で極めて小さいにも拘わらず、4番正

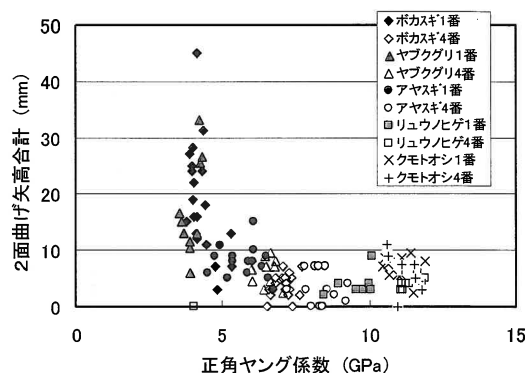


図4-1-1-1 5品種の高温乾燥材の曲がり矢

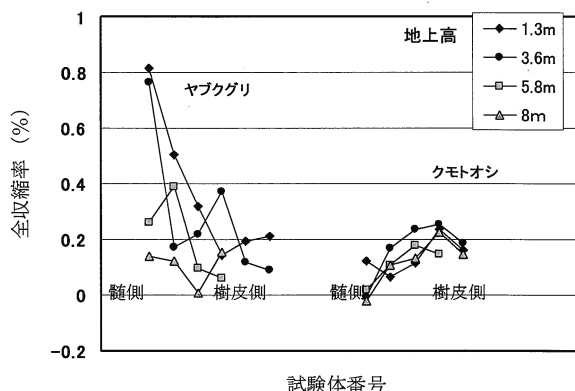


図4-1-1-2 2品種の（L）収縮率の違い

角で割れの長い傾向は他の品種と特に変わらなかった（図4-1-1-3）。

以上の結果から、採材した正角の地上高の違いによる表面割れ長さの違いは、水分傾斜だけでなく、正角の内側と外側との木材性質の違いも関係している可能性が示唆された。そこで木材の収縮率のTR比について調べたが、TR比は樹幹内でばらつきが大きく、TR比だけでは割れ長さの違いの説明が出来なかった。しかし、T及びRの収縮率を地上高別に比較したところ、例えばクモトオシでは、地上高に関わらず、TとRの収縮率の水平方向変動は随から外側に漸増後ほぼ一定となるが、地上高の低い側では明らかに漸増の勾配が小さなケースが認められた（図4-1-1-5）。すなわち、地上高の低い側では、T及びRの収縮率の絶対値が小さい傾向があった。この傾向は、同一品種内で平均値を比較した時に地上高の高い側の樹幹外側のRの収縮率が大きいことともほぼ一致している（表4-1-1-2）。4番正角で割れが長い一因として、地上高の高い上側の正角でT及びR、またはRの収縮率が大きいため、乾燥後半に材の内側がドライグセットされた時に割れが発生しやすくなる可能性が考えられる。地上高によるTとRの収縮率の違いの原因としては、クモトオシでは密度の影響が大きかったが、他の品種では明瞭な関係は認められなかった。

c. 内部割れ

スギの正角材を高温乾燥し、内部割れと木材性質との関係について検討した。内部割れ長さの合計は、クモトオシ以外の全ての品種では1番と4番正角の間で違いがあり1番正角で長かつ

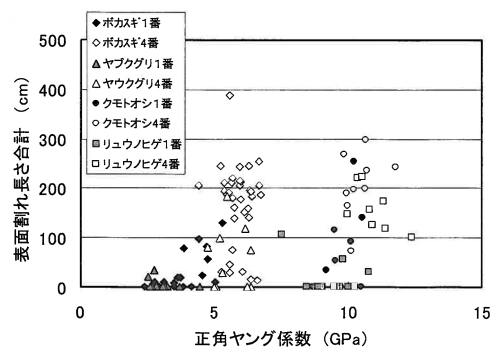


図4-1-1-3 4品種のヤング係数と表面割れ

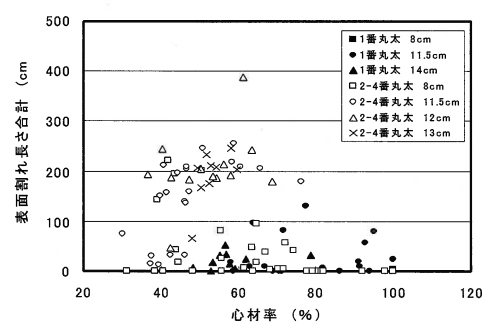


図4-1-1-4 ボカスギの径別の心材率と表面割れ長さとの関係

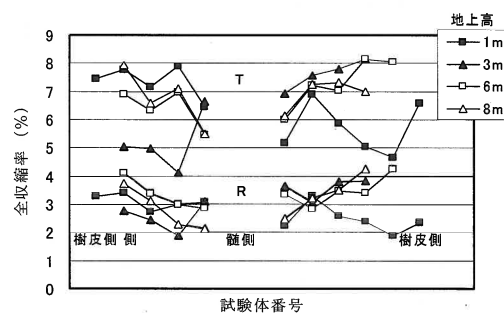


図4-1-1-5 クモトオシのT,R収縮率

表4-1-1-2 各品種の容積密度と収縮率

地上高 (m)	品種名	容積密度 (g/cm ³)	樹幹の内側 全収縮率(%)				T/R	容積密度 (g/cm3)	樹幹の外側 全収縮率(%)				T/R
			T	R	L	T			R	L			
0.3	ボカスギ	0.324	5.23	2.40	1.40	2.2	0.265	5.23	2.14	0.27	2.4		
0.3	アヤスギ	0.386	5.93	2.45	0.92	2.4	0.358	6.16	2.45	0.26	2.5		
0.3	リュノヒゲ	0.349	7.06	2.62	0.15	2.7	0.333	6.23	2.71	0.35	2.3		
1	クモトオシ	0.320	6.77	2.77	0.10	2.4	0.318	7.56	3.12	0.22	2.4		
1	ヤブクグリ	0.356	6.19	2.73	0.89	2.3	0.332	5.84	2.49	0.18	2.3		
6	ボカスギ	0.316	5.6	2.66	0.18	2.1	0.324	6.17	2.92	0.18	2.1		
6	アヤスギ	0.395	6.3	2.05	0.31	3.1	0.415	6.00	2.73	0.16	2.2		
6	リュノヒゲ	0.346	7.31	3.08	0.18	2.4	0.361	6.82	3.70	0.26	1.8		
8	クモトオシ	0.329	6.48	2.55	0.09	2.5	0.352	7.03	3.26	0.14	2.2		
8	ヤブクグリ	0.367	5.77	2.51	0.33	2.3	0.400	7.16	4.09	0.12	1.8		

たが、クモトオシでは違いがなかった（図4-1-1-6）。違いの原因を調べるために、1番正角と4番正角のヤング係数を比較したところ、クモトオシでは差がなかったが、それ以外の全ての品種で1番正角のヤング係数が低かった（図4-1-1-6）。一方、密度との関係でみると（図4-1-1-7）、アヤスギ、リュウノヒゲ及びヤブクグリでは、密度は1番正角より4番正角で高かったが、ボカスギでは1番正角の方が高かった。密度は、ボカスギでは一般に樹幹下部側で高く、アヤスギなどでは逆に低い傾向があるため、このような違いが現れたものと考えられる。

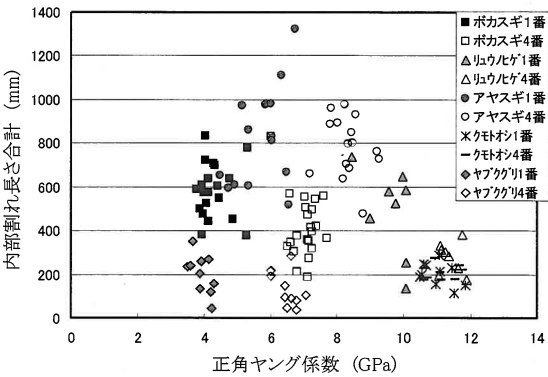


図4-1-1-6 正角の動的ヤング係数と内部割れ長さ合計との関係

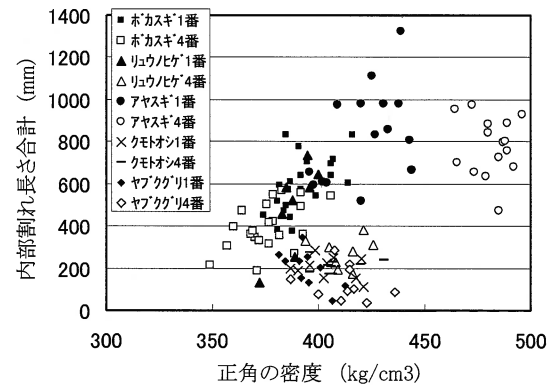


図4-1-1-7 正角の密度と内部割れ長さ合計との関係

以上のことから、同一品種内で地上高により内部割れ長さが異なる要因として木材性質を考えた時には、密度は品種間で地上高による変化の傾向が異なることから違いの原因をうまく説明できないので、ヤング係数が重要であることが示唆された。ヤング係数の変動にはMf傾角の影響が大きいので、曲がりと同様にL収縮率を考えてみると、Mf傾角の大きい地上高の低い側の正角ではL収縮率が大きく、正角の外側がドライイングセットされた時の内部応力がより大きくなるので、内部割れが大きくなる可能性が示唆された。Mf傾角とL収縮率の地上高による差の小さいクモトオシでは、1番と4番正角間での内部割れの差がほとんど認められないこともその仮説を裏付けている。

d. まとめ

以上の結果をまとめると、狂いや割れには収縮率の影響が大きく、中でもこれまで報告が少なかった繊維方向のL収縮率の影響を無視できないことが明らかとなった。既往の報告では^{1)~4)}、小野らがスギの未成熟材ではL収縮率が大きな値を示すことを報告しているが、これまでは一般的にスギのL収縮率は無視できるほど小さいものと考えられてきた（表4-1-1-3）。しかし、本課題では、スギのL収縮率等が樹

表4-1-1-3 スギの収縮率の既往のデータ^{1)~4)}

報告者	品種名	未成熟材			成熟材		
		T	R	L	T	R	L
小野ら	アヤ	-	-	0.820	-	-	0.210
	ウラセバル	-	-	0.407	-	-	0.243
	ホンスギ	-	-	0.229	-	-	0.175
池田	アヤ	7.1	4.2	-	7.3	4.0	-
	アヤ(2)	5.3	2.6	-	6.1	2.8	-
中野	スギ(1)	7.19	2.44	0.19	7.25	2.90	0.25
	スギ(2)	6.76	2.50	0.14	6.57	2.68	0.19
	スギ(3)	6.50	2.48	0.15	6.70	3.08	0.19

(単位は%)

幹内の高さ方向においてもMf傾角と密度の影響で品種によっては極めて大きく変動するために、それらが正角間の欠点発生の違いに大きな影響を及ぼしていることが明らかとなった。したがって、欠点の発生を抑制するためには、木材性質の品種特性を考慮して丸太の採材や正角の木取り法を検討し、乾燥前に材料選別する必要があることが示唆された。

(2) 木材性質の品種間変動

次に、木材乾燥に関わる木材性質について、スギの精英樹クローンや品種を対象に既往の報告をレビューし、本課題での測定結果も加えて情報の整理を行った。

スギの辺材含水率は基本的に飽水状態であり、密度による影響で値が変わっていると考えてよいが(図4-1-1-8)、心材では含水率の品種間変動が認められている。スギの心材含水率について既往のデータを整理したところ、精英樹クローンでは平均心材含水率が約137% (図4-1-1-9)、品種では53品種の平均値が115%で (図4-1-1-10)、変動の範囲はほぼ40%~280%であった。乾燥用のスギのはえ積み材の含水率が80%程度で扱われるのに比べれば、生材の心材含水率の平均値はやや高いといえる。収集した在来有名品種の個別のデータは表4-1-1-4に示した⁵⁾。

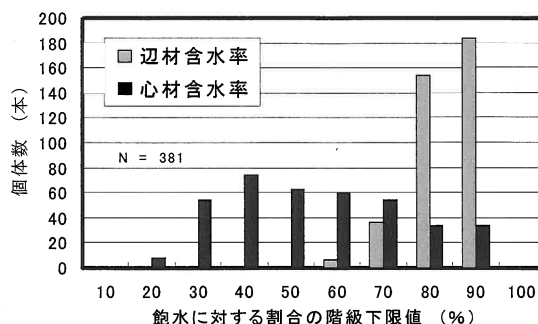


図4-1-1-8 スギの飽水に対する含水率

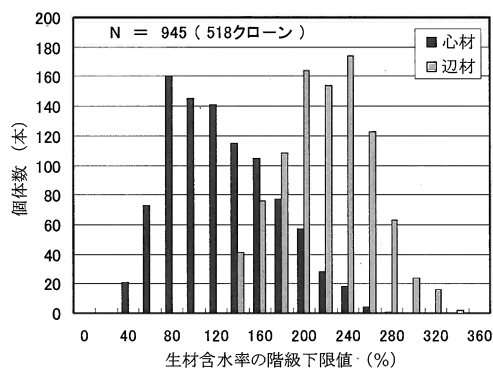


図4-1-1-9 辺材と心材の生材含水率のクローン間変動

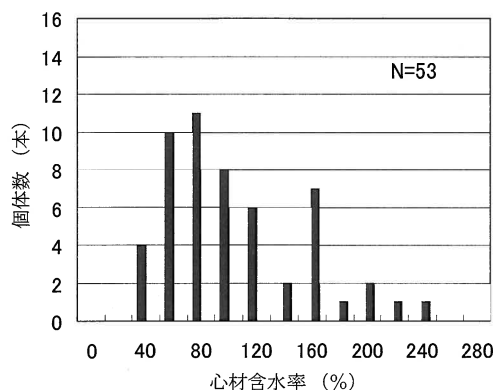


図4-1-1-10 スギ品種の心材含水率の頻度分布

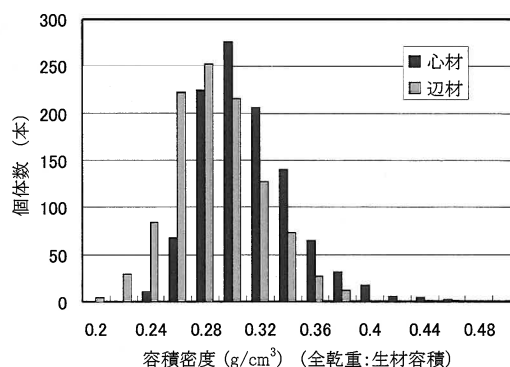


図4-1-1-11 精英樹クローンの密度の頻度分布 (1050個体)

表4-1-1-4 スギの生材含水率のデータ⁵⁾

	品種名 (クローン名)	報告者	心材含水率 %	辺材含水率 %	個体 数 本	地上 高 m	樹齢 年	胸高 直径 cm
1	アオスギ (オミオ含む)	小田 他3報	72 69-81	264 199-270	30	1.2	34	24
2	アカスギ	三輪	105	224	3	1.8	52	29
3	アカバ	廣田ら 河澄ら	77 59	205 /	30 5	1.2 1.2	30 20	19 12
4	アジガサワスギ	中田ら	116	259	3	1.5	33	27
5	アヤスギ	池田ら 庄野 他9報	58 63 49-69	208 181 178-270	33 30	1.2 1.2	30 32	21 21
6	アラカワ (オヤマダカリ含む)	庄野 他4報	140 92-141	238 224-277	30	1.2	26	22
7	イトシロスギ	中田ら	90	241	3	1.5	32	25
8	イワオ	庄野 他4報	94 75-115	201 222-307	30	1.2	24	18
9	ウラセバル	小田 他3報	123 77-123	/ 228-239	21	0.7	20	20
10	エダナガ	三輪	179	249	1	1.8	52	42
11	オキノヤマスギ	中田ら 三輪ら	86 72	208 256	3 3	1.5 1.2	30 20	17 /
12	オビアカ	小田 池田ら 他4報	93 81 90-147	176 212 188-241	30 33	1.2 1.2	31 33	20 23
13	カラツキ	三輪	187	272	1	1.8	52	30
14	ガリン	三輪	211	248	1	1.8	52	32
15	キジン	河澄ら 平川	111 134	/ 191	5 3	1.2 1.5	20 24	16 19
16	クマスギ	中田ら 三輪ら	134 111	224 267	3 6	1.5 1.2	34 20	28 /
17	クモトオン	芦原ら 中田ら 他6報	172 208 152-215	209 243 190-254	30 3	1.2 1.5	26 33	22 27
18	クロスギ	三輪	168	235	3	1.8	52	36
19	カワシマ	平川	97	245	3	1.5	24	21
20	コウベアオバ	三輪	160	227	1	1.8	52	25
21	コウラスギ	三輪	64	228	3	1.8	52	19
22	サンブスギ	三輪 三輪ら	85 114	204 211	3 3	1.8 1.2	52 20	29 /
23	シバヒラ	三輪	177	237	3	1.8	52	24
24	シャカイン	池田ら 平川	100 57	190 192	33 3	1.2 1.5	38 24	21 16
25	シラサヤ	三輪	103	225	3	1.8	52	22
26	タテヤマスギ	中谷ら 他2報	100 105-114	174 205-222	30	1.2	40	27

注：引用文献については、木材工業 Vol. 59-4 を参照されたい。

	品種名 (クローン名)	報告者	心材含水率 %	辺材含水率 %	個体 数 本	地上 高 m	樹齢 年	胸高 直径 cm
27	チリメンドサ	三輪 中田ら	240 204	272 308	3 3	1.8 1.5	52 30	27 25
28	テナガ	三輪	62	226	1	1.8	52	22
29	トウドウスギ	中田ら	92	242	3	1.5	33	26
30	トサアカ	三輪ら	214	289	1	1.8	52	40
31	トサグロ	三輪ら	255	273	1	1.8	52	44
32	トヤマスギ	三輪	72	208	3	1.8	52	22
33	ナカムラ	小田 廣田ら	175 157	/ 214	21 31	0.7 1.2	20 28	16 20
34	ナンゴウスギ (コハナコナリ)	三輪 三輪	102 92	211 233	3 1	1.8 1.8	52 52	29 25
35	ハチロウスギ	中田ら	85	239	3	1.5	31	25
36	ハネカワ	三輪	52	230	1	1.8	52	24
37	ヒキ	三輪	85	178	3	1.8	52	14
38	ヒダリマキ	三輪	173	230	3	1.8	52	26
39	ヒノデ	芦原ら 河澄ら	99 76	206 /	20 5	1.2 1.2	29 20	24 16
40	ホウズキ	三輪	142	242	3	1.8	52	25
41	ホンジロ	三輪	153	172	3	1.8	52	24
42	ホンスギ	廣田ら 他2報	54 93-107	187 225-231	30	1.2	40	20
43	ホンナスギ	中田ら	102	195	3	1.5	34	25
44	ボカスギ	中谷ら 中谷 他3報	73 71 65-89	248 253 212-301	29 30	1.2	30	27
45	マアカ	中田ら	96	221	3	1.5	30	31
46	マキノサキスギ	中田ら	124	231	3	1.5	33	23
47	マヤママスギ	三輪ら 中田ら	139 122	255 229	6 3	1.2 1.5	20 30	/ 25
48	ミネヤマ	三輪	120	150	3	1.8	52	17
49	ムラスギ	中田ら	92	200	3	1.5	34	28
50	メアサ	河澄ら 河澄ら	68 75	/ /	5 6	1.2 1.2	20 20	14 16
51	ヤイチ	河澄ら 河澄ら	53 64	/ /	5 6	1.2 1.2	20 20	17 15
52	ヤブクグリ (ハナギ)	芦原ら 小田 他7報	102 85 65-116	215 / 186-250	16 21	1.2 0.7	30 35	25 17
53	リュウノヒゲ	平川ら	58	147	30	2.3	52	24
54	道南精英樹クローン	安久津	47-213	138-364	157(ク ローン)	34~ 38	18~ 28	22

密度は、心材含水率ほど大きな個体間変動を示さないこと（558クローンで変動係数が10%程度）が報告されている^{6)、7)}。スギのシステム化事業の在来有名品種15品種の平均密度値は0.287~0.384 (g/cm³)（辺心材含む）の範囲にあり⁸⁾、精英樹の心材の平均値は0.322 (g/cm³)であった（図4-1-1-11）。

収縮率については、L収縮率に関する既往の知見が少ないので実際に測定を行った（表4-1-1-2）。品種による特徴としては、地上高の低い樹幹の内側で、L収縮率の値が0.9%~1.4%と大きい品種があり、値が小さい品種の10倍近くになること（表2、表3）、割れなどへの影響の大きいことが報告されているTR比は1.8~3.1と変動するものの樹幹内でのバラツキが大きいことが明らかになった。また、R収縮率は、地上高の高い樹幹の外側での値が全品種で高い傾向が認められた（表4-1-1-2）。

Mf傾角は品種間で大きな違いがあり、品種によっては傾角の大きい範囲が樹幹の基部側で広い場合があり、いわゆるスギの未成熟材の性質に極めて大きな影響があること、さらには十数品種の未成熟材部での平均値は22～44度、成熟材では5～29度と品種間差が大きいことが報告されている^{9), 10)}。

オ 今後の問題点

本課題では、スギの人工乾燥による正角材の曲がり及び割れの発生に関係する品種や樹幹内の採材位置の影響等について興味深い知見が得られたが、それらの詳細についてはまだ解明されたわけではない。また、ここで推定した材料選別による欠点抑制効果についても実用的に意味があるか否かなどの確認がされたわけではないので、今後ともそれらについて検討を行っていく必要がある。

カ 要約

本課題では、5品種の異なる材質のスギを対象に木材の人工乾燥時に発生する曲がり、表面割れ及び内部割れと木材性質との関係について調べた。その結果、これまでに知られている割れの発生に影響の大きい含水率、密度、TとR収縮率等の他に、L収縮率が曲がりだけでなく内部割れにも強く影響を及ぼしている可能性が示された。スギのL収縮率の変動にはMf傾角と密度の影響が大きく、それらはヤング係数の変動にも関わるため、ヤング係数が欠点発生を予測する指標の一つになる可能性がある。既往の知見以外で注目される乾燥時の欠点発生に関わるスギの木材性質としてはMf傾角が挙げられ、それは樹幹内だけでなく品種間変動も大きいいため、スギの欠点の発生に品種間差を生じさせている一因となっているものと考えられる。

本課題では、ヤング係数の低い品種の1番丸太など地上高の低い側から採材した正角材ほど大きな曲がりや内部割れがおきやすく、それに対してヤング係数が高い地上高の高い側の丸太では表面割れが発生しやすい傾向があることが明らかとなった。したがって、ヤング係数等を基準とした原木選別を乾燥前に行い、材料の性質に合わせて乾燥スケジュールを調整することが欠点の発生を抑制するために効果的であると考えられる。

キ 引用文献

- 1) 小野和雄ら；日輪九支研論集，26，255-256(1973)
- 2) 小野和雄ら；日輪九支研論集，24，263-266(1970)
- 3) 池田元吉ら；日輪九支研論集，51，179-180(1998)
- 4) 中野達夫；森林総研・木材部資料61(1)，6-7(1986)
- 5) 平川泰彦ら；木材工業，59(4)，159-165(2004)
- 6) 藤澤義武；林木育種センター研究報告，15，31-107(1998)
- 7) 平川泰彦ら；森林総合研究所研究報告，2(1)，31-41(2003)
- 8) 林野庁編；平成5～6年度林業誌研究報告書（スギ品種の材質特性の評価），36，59-117(1997)
- 9) 藤崎謙次郎；愛媛大農演報，23，47-58(1985)
- 10) 山下香菜ら；木材誌，46(6)，510-522(2000)

(森林総合研究所木材特性研究領域 平川泰彦、山下香菜)

(2) 材質・用途別乾燥プロセスの最適化と乾燥コスト評価

ア 研究目的

スギ乾燥材の生産効率を上げ、ひいてはコスト低減を図るためには、密度や生材含水率等の乾燥にかかわる材質指標に基づき、しかも最終用途の品質をも勘案した原材料選別の導入と、各加工製品の品質やコストに適合する乾燥処理技術とが必要である。このため、スギの乾燥工程の効率性に基づいて適正な乾燥条件を明らかにし、求められる品質に応じて効率の良い乾燥プロセスを構築することを目的としている。

イ 研究方法

(1) 製材工場等における乾燥調査に基づいて、スギ材乾燥の事例¹⁻⁴⁾を参照し、材種、材積、初期含水率、容積密度数、乾燥温度、乾燥機の種類等の乾燥条件とエネルギー消費量との関係を検討した。エネルギーの消費量は、ボイラー燃料の消費量と乾燥にかかる電力量（電装、高周波発振機）の和とした。燃料消費量から熱量への換算は、ボイラー効率を85%とし、灯油とA重油の発熱量 kcal/kg をそれぞれ 11060、10500 として、灯油 7427kcal/ℓ、A 重油 7586kcal/ℓ として計算によって求めた。電力消費量は、860kcal/kWh として熱量に換算した。なお、コストの計算では、灯油・重油代は 38 円/ℓ、電気代は 19 円/kWh とした。

(2) 寸法を調整したスギ材を試験材とし、高周波加熱減圧乾燥試験を行い、消費電力量、乾燥時間等を求めた。乾燥試験に用いた高周波発振機は富士電波工機製 FDY-301(最大出力 3kW、周波数 6.7MHz)、缶体はヤスジマ製 SB-900(容量 1.655m³)である。

(3) 乾燥機の熱効率は、乾燥機で消費した総熱量 H に対する木材の加熱および水分蒸発に要する熱量 H_t の割合 (%) として表す。H (kcal) は運転（乾燥機&ボイラー&高周波）に要した電力消費からの換算熱量とボイラーの燃料消費からの換算熱量との和であり、H_t (kcal) は木材（実質&水分）の加熱に要する熱量 H₁ と水分蒸発に要する熱量 H₂ との和である。

(4) 柱材、平角材の乾燥スケジュール（乾燥時間、乾燥温度）と仕上がりに関する情報を収集し、処理条件が異なるときの正角、平角の相違と乾燥処理時間との関係について検討した。平角材の蒸気式および蒸気高周波複合乾燥による乾燥事例⁵⁾を調査し、蒸煮処理、減圧工程、蒸気高周波複合乾燥工程などにおける消費電力量、乾燥時間等を求めた。材種による乾燥時間の相違、方法の相違によるエネルギー消費量のデータに基づいて、材種や方法による熱効率の相違を検討した。

(5) 乾燥に係るコストを試算するために、直接的にかかる経費（エネルギー費、設備費、人件費）に関する情報収集に基づいて、乾燥温度、材種、乾燥方法の相違、天然乾燥との組み合わせ、木質廃棄物の活用等が乾燥コストに与える影響を、月間生産量との関係をベースに整理した。

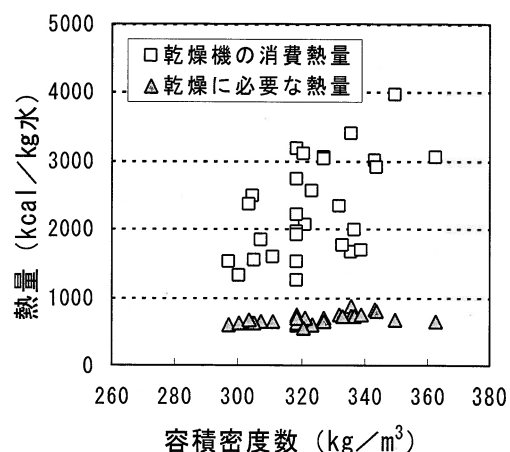


図 4-1-2-1 容積密度数と消費熱量との関係

ウエ 結果と考察

(1) 消費エネルギーと熱効率の把握

図 4-1-2-1 には、製材工場における乾燥機の消費熱量を、木材加熱と水分蒸発に必要なエネルギーの和として求めた乾燥に必要な熱量と併せて、容積密度数との関係を示している。乾燥に必要なエネルギーは容積密度数によって増加することが予測され、図 4-1-2-1 においてもその傾向が明らかである。他方、実際に乾燥機によって消費される熱量についても、事例間のばらつきは大きいものの密度の増加に伴う熱量消費の増加傾向が認められている。ちなみに、図 4-1-2-1 の両熱量を使って蒸気式乾燥機の熱効率を求めると、工場におけるスギ柱材乾燥の熱効率は 15～50% に広く分布し、平均的に 36% 程度であることが明らかになった。

図 4-1-2-2 に、乾燥温度（乾燥処理時間内における平均乾球温度）が熱効率に与える影響を示した。図中の A、B、C は乾燥機のタイプの相違を、また括弧内の数字は乾湿球温度差を表している。すなわち、100℃以下の温度範囲では乾燥温度が高いほど熱効率が低下する傾向も認められるが、100℃以上の高温乾燥ではばらつきが大きく、全体的には処理温湿度の影響は明確ではない。他方、高温では乾燥機の種類による影響が顕著に現れ、乾燥機の気密性、断熱性、吸排気システム等の影響が伺われる。

また、見かけ上熱効率と収容材積との間には相関関係が認められ、熱効率は以下の式により近似的に表すことができた。

$$\text{熱効率} \approx 625 / \text{収容材積}^{0.887} \quad 1)$$

(2) 高周波加熱・減圧乾燥における熱効率

高周波加熱・減圧乾燥試験機における熱効率について、発振電力との関係を図 4-1-2-3 に示す。効率は発振電力に依存し、発振電力を小さくしすぎると効率は低下することが明らかである。他方、材断面の寸法が効率に与える影響は明らかではなく、また減圧度の影響は明確ではなかった。また、材種にかかわらず、平均乾燥速度 0.2%/hr を維持した場合には割れの発生は認められず、その熱効率は 30% 程度であった。ところで、発振周波数の上昇によって高周波発振効率が向上（約 20%）

することが知られている。また、初期蒸煮による予備加熱によって高周波加熱の必要熱量を 20% 以上減らすことができるものと推定できた。すなわち、高周波加熱を併用する場合、処理条件によっては 30% 程度から 60% 程度への熱効率の向上が期待できる。他方、熱風加熱・減圧乾燥では、一定熱風温度（乾球温度）において減圧度が上がるほど、効率は向上することが明らかにされている⁶⁾。これらの結果から、乾燥に減圧工程を組み入れる場合、適切な材温の制御に加えて、処

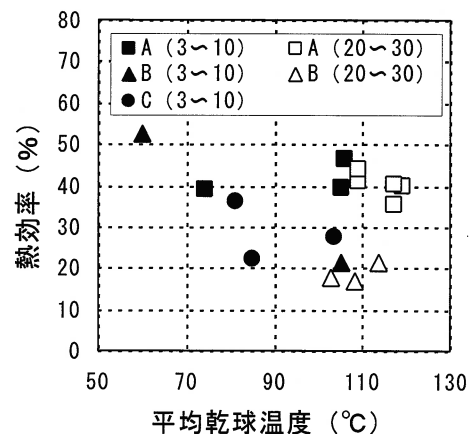


図 4-1-2-2 平均乾燥温度と熱効率との関係

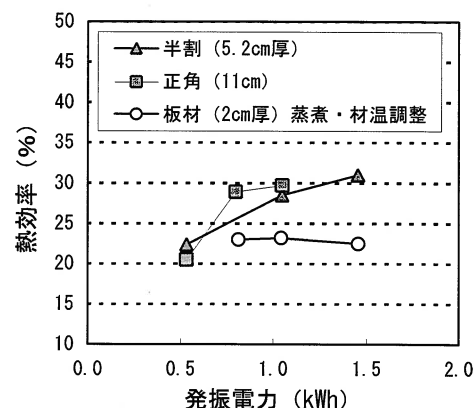


図 4-1-2-3 高周波加熱・減圧乾燥における発振電力と熱効率との関係

理雰囲気の過熱度の上昇によっても熱効率が向上するものと予測した。

(3) 材種別・乾燥方法によるエネルギー消費の変化

蒸気加熱乾燥、熱気・高周波複合乾燥、および高周波加熱・減圧乾燥によって柱材および平角材を乾燥した場合に、単位消費熱量（消費熱量 kcal/脱水量 kg）と熱効率との関係を求め、図 4-1-2-4 に示す。すなわち、乾燥方法によらず、ほぼ一つの関係式で表されることが確認できた。ちなみに、単位消費熱量は次式で近似できる。

$$\text{単位消費熱量} = 115640 \times \text{熱効率}^{-1.16} \quad (2)$$

(4) 乾燥初期条件の相違に伴う消費エネルギーコストの予測

単位熱消費量をコストに換算するには、電気による消費と燃料による消費量の割合に影響される。このため、式 2 から直接的にコスト換算は難しい。そこで、25 ケースの乾燥事例について、単位重量の水分を乾燥するのに要する柱材のエネルギーコスト Y (円/kg 水) と熱効率 E (%) との関係を求め、エネルギーコストを平均的に以下の式で表すことができた。

$$Y \div 420 / \text{熱効率} \quad (3)$$

ところで、断面の変化による乾燥時間の变化は乾燥温度によって異なり、温度域

が高いほど乾燥時間の相違は小さくなると考えられる。ちなみに、平均的に中温乾燥 (80~90) では 1.6 倍ほど、高温乾燥 (100~110) では 1.3 倍ほど、柱材と比較して平角材の乾燥時間がかかる。熱効率が乾燥温度によって影響を受けず、他方消費熱量 (燃料消費量) は乾燥時間によって変化すると考えると、平角材のエネルギーコストは次のように求められる。

$$\text{中温乾燥: } Y \text{ (円/kg 水)} = 705 / \text{熱効率} \quad (4)$$

$$\text{高温乾燥: } Y \text{ (円/kg 水)} = 546 / \text{熱効率} \quad (5)$$

柱材の立米あたり、初期含水率の相違とコスト (m³あたり) の関係は次のように換算できる。すなわち、蒸発水分量 = 容積密度数 $R \times$ 材積 m³ $\times$ 含水率低下量 % / 100 の関係であるから、単位材積あたりの柱材のエネルギーコスト K (円/m³) と効率 E および容積密度数 (R) との関係は次のように表すことができる。

$$K \text{ (円/m}^3\text{)} = 4.3 \times (u_i - u_e) \times R / \text{熱効率} \quad (6)$$

ここで、 u_i と u_e は、それぞれ初期含水率と最終含水率である。したがって、効率と材積との間の関係 (式 1) を合わせると、エネルギーコストは、便宜的に以下の式で表すことができる。

$$K \text{ (円/m}^3\text{)} = 0.0069 \times (u_i - u_e) \times R \times \text{収容材積}^{0.887} \quad (7)$$

式 7) と式 5) に基づいて、柱材と平角材のエネルギーコストと初期含水率および容積密度数との関係を、図 4-1-2-5 に示している。例えば、平均容積密度数が 300kg/m³、平均初期含水率が 100% のスギ柱材を 20% まで乾燥させる場合、単位材積あたりのエネルギーコストは 2400 円ほどと見積もることができる。なお、コストと熱効率との関係から、蒸気加熱式乾燥の熱効率が 50% 以上の高い範囲では漸次コスト限界値 (4.3 円/kg 水) に近づくために、効率向上がさほどエネ

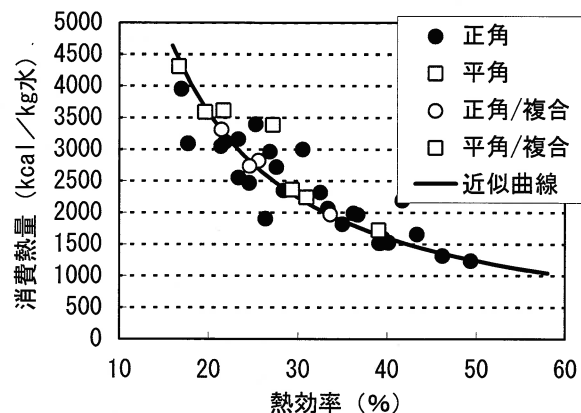


図 4-1-2-4 単位消費熱量（消費熱量 kcal/脱水量 kg）と熱効率との関係

ルギーコストの大きな低下につながらないことが示された。

(5) 乾燥にかかる総コストの評価

コスト評価の前提条件とコスト積算の根拠を表 4-1-2-1 に示す。表 4-1-2-2 に、柱材（構造用一般材）を生産する場合、乾燥方式、ボイラー燃料、および月間乾燥材生産量と乾燥コストとの関係を示す。乾燥材製品の歩止り（含水率基準、割れ等の評価に基づく）は乾燥条件によって異なるが、ここでは製品率を100%としている。総じて乾燥コスト（ m^3 当たり）は月間生産量の増加に伴って減少するが、 500m^3 程度までは生産量拡大の効果は特に大きいと予測される。生産量の拡大効果には、乾燥機容量⁴⁾、もしくは回転率を上げることが寄与している。生産量が大きい場合には、特に木屑利用の効果⁷⁾ が顕著になると考えられる。工場廃材を燃料とした過熱蒸気乾燥の新システム導入の効果は大きいと予測されるが、さらに的確な予測のためには設備費、木屑供給量・価格の的確な評価に基づくシステム設計が必要である。なお、表には示していないが、天然乾燥と人工乾燥との組み合わせによる効果も認められ、天然乾燥後の仕上げに中温乾燥を行う場合15%程の削減が期待される。また、表 4-1-2-3 に示すように、乾燥前選別の効果については、選別を行って100%以下の柱材のみを乾燥（月間生産量 120m^3 、製品歩止り100%）した場合、選別をしない場合の再乾燥や保管に要する経費の付加によるコスト上昇率を勘案すると、40%程のコスト低減効果があるものと推定される。

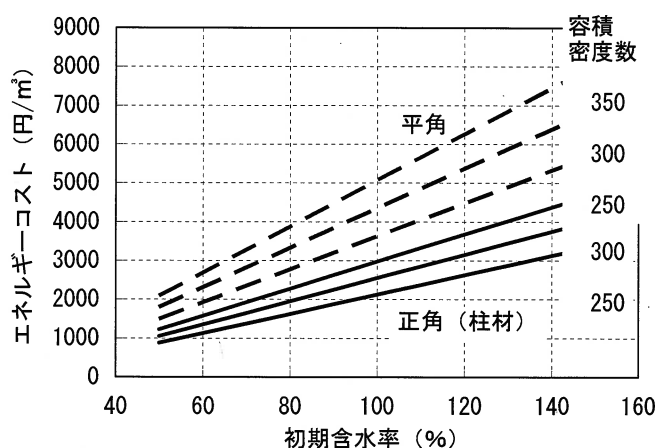


図 4-1-2-5 初期含水率とエネルギーコストとの関係
（目標 20%、熱効率 40%、17 円/kg 水）

乾燥機容量⁴⁾、もしくは回転率を上げることが寄与している。生産量が大きい場合には、特に木屑利用の効果⁷⁾ が顕著になると考えられる。工場廃材を燃料とした過熱蒸気乾燥の新システム導入の効果は大きいと予測されるが、さらに的確な予測のためには設備費、木屑供給量・価格の的確な評価に基づくシステム設計が必要である。なお、表には示していないが、天然乾燥と人工乾燥との組み合わせによる効果も認められ、天然乾燥後の仕上げに中温乾燥を行う場合15%程の削減が期待される。また、表 4-1-2-3 に示すように、乾燥前選別の効果については、選別を行って100%以下の柱材のみを乾燥（月間生産量 120m^3 、製品歩止り100%）した場合、選別をしない場合の再乾燥や保管に要する経費の付加によるコスト上昇率を勘案すると、40%程のコスト低減効果があるものと推定される。

表 4-1-2-1 乾燥コストの積算条件・根拠等

乾燥方法	乾燥条件等	積算根拠等
天然乾燥	初期含水率100%、目標含水率25%、乾燥日数90日、地価公示価格50,000(円/㎡)、棧積み面積(3㎡/7×6×3段)、乾燥場面積(棧積み面積の2.5倍)、構築物単価20,000(円/㎡)	土地代:原価償却費(償却年数20年)、借入利息(利率1.85%)、固定資産税(課税標準額=地価の75%、税率1.4%) 施設費:原価償却費(償却年数20年、償却率0.05、残存10%)、借入利息(利率1.85%)、固定資産税(税率1.4%)、維持管理費(償却費の10%) 人件費:積み降ろし他1500円/㎡ 雑費:水道代、フォーク燃料他
蒸気式乾燥	初期含水率100%、目標含水率20%、容積密度数320kg/㎡、乾燥機容量30㎡、熱効率36%、乾燥日数7日(高温乾燥)、12日(中温乾燥)、23日(低温乾燥)	設備費:原価償却費(償却年数8年、定額法償却率0.125、残存10%)、借入(利率1.55%)、固定資産税(税率1.4%)、維持費(償却費の10%) 人件費:操作・管理200円/㎡、積み降ろし他1500円/㎡、ボイラー管理30万/月(木屑の場合) エネルギー費:電気代20円/kWh、A重油45円/L木屑0円/kg その他雑費:水道代、記録紙、フォーク燃料他
前処理(蒸気式乾燥)+天然乾燥	初期含水率100%、目標含水率25%、容積密度数320kg/㎡、前処理日数2.5日(高温セット、含水率低下50%)、天然乾燥90日(初期含水率50%)	蒸気式乾燥及び天然乾燥にかかる経費積算の考え方は上記と同じ
前処理(蒸気式乾燥)+天然乾燥	初期含水率100%、目標含水率20%、容積密度数320kg/㎡、天然乾燥日数30日(含水率低下50%)、蒸気式乾燥(中温)7日	蒸気式乾燥及び天然乾燥にかかる経費積算の考え方は上記と同じ
過熱蒸気式乾燥	初期含水率100%、目標含水率20%、容積密度数320kg/㎡、乾燥機容量15㎡、乾燥日数3日、木屑自動ボイラー	設備費:原価償却費(償却年数8年、定額法償却率0.125、残存10%)、借入(利率1.55%)、固定資産税(税率1.4%)、維持費(償却費の10%) 人件費:30万/月×人数(操作・管理、積み降ろし、ボイラー管理他) エネルギー費:電気代20円/kWh、木屑0円/kg、圧力容器2400kwh/月×機数、ボイラー21000kwh/月(2100kg/h)、粉碎等4000kwh/月 その他雑費:水道代、記録紙、フォーク燃料他

オ 今後の問題点

加圧過熱蒸気による新システムの導入、木質廃材の利用による大幅な乾燥コスト低減の可能性が明らかになったが、さらに的確な生産コスト評価のためには、電力供給システムを含めた製材工場全体の設備、端材等の収集・処理方法、規模別生産材種、生産材種別の乾燥材価格等の検討が必要である。

表 4-1-2-2 各種方式、乾燥エネルギー源、生産量と柱材乾燥にかかるコスト

乾燥方式	温度(℃)	乾燥日数(日)	エネルギー源	乾燥コスト(円/m ³)		
				100m ³	300m ³	500m ³
蒸気式乾燥(中温)	60～70	19	灯油・A重油	12,000 (100%)	10,000 (83%)	9,000 (75%)
蒸気式乾燥(高温～中温)	120～90	7	灯油・A重油	9,500 (79%)	8,000 (67%)	7,500 (63%)
蒸気式乾燥(高温～中温)	120～90	7	木質廃材	11,000 (90%)	7,000 (58%)	5,500 (46%)
加圧過熱蒸気乾燥(高温)	130	3	木質廃材	11,000 (90%)	5,000 (42%)	4,000 (33%)

注: 括弧内パーセンテージは、蒸気式100m³時のコストに対する割合

カ 要約

スギ材の方法別乾燥コストを予測し、低コストの乾燥システムを導入するための指針を得るため、乾燥方法とエネルギー消費との関係を明らかにするとともに、システム化によるコスト低減のための必要条件を提示した。すなわち、乾燥コスト

表 4-1-2-3 含水率選別の有無と柱材乾燥にかかるコスト

条件	初期含水率	処理方法	乾燥コスト(円/m ³)		コスト上昇率
仕分け有り	100%以下のみ	高温(30m ³)	7,740		0
	100%以下	高温(15m ³)	8,700	14,040	81%
	100%以上	天然+中温(15m ³)	5,340		
仕分けなし	—	高温(30m ³)	8,650	10,850	40%
	—	天然(養生)	2,200		
	30%程度	高温(30m ³) 中温(10m ³ 、再乾燥)	8,650 4,150	12,800	65%

注: 月間生産量120m³、仕分けのない場合の歩止りは60%を想定。

の低減のためには、乾燥機の熱効率の向上とともに、生産規模に拡大はもとより、乾燥前選別や天然乾燥との組み合わせの導入、さらには木質廃材の活用などを考慮する必要があることを示した。

キ 引用文献

- 1) (財) 日本住宅・木材技術センター: 建築用木材の乾燥に関する調査 (1999)
- 2) 木材乾燥低コスト化技術研究組合: 平成 11 年度・12 年度実施報告書 (2000、2001)
- 3) 住友林業(株): 私信 (2001)
- 4) 大分県: 大分県産スギ乾燥材生産技術マニュアル (1997)
- 5) 山本ビニター(株): 私信 (2003)
- 6) 武智正典: 私信 (2002)
- 7) 木質バイオマスエネルギー技術研究組合: バイオマスエネルギー利用技術の開発報告書 (2001)

(森林総合研究所加工技術研究領域 黒田尚宏、齋藤周逸、小林功、石川敦子)

(3) 高速乾燥システム等によるスギ乾燥材の強度および耐久性評価

ア 研究目的

飽和水蒸気中で熱処理したスギ小試験体を対象とし、湿熱処理がスギ小試験体の強度および耐久性に及ぼす影響を検討することを目的とした。また、異なる乾燥条件で乾燥したスギ構造材を対象とし、乾燥条件がスギ構造材の強度および耐久性に及ぼす影響を検討することを目的とした。

イ 研究方法

(1) 飽和水蒸気中で熱処理したスギ小試験体の強度および耐久性

気乾状態および生材状態のスギ小試験体を飽和水蒸気中で熱処理した。処理条件は、設定温度が 105, 135, 150℃の 3 条件、設定時間が 6, 24, 72 時間の 3 条件の組み合わせで計 9 条件とした。熱処理後、20℃、65%RH の恒温恒湿室で調湿し強度試験と耐久性試験にそれぞれ供試した。

強度試験は、静的曲げ試験、縦圧縮試験、せん断試験、衝撃曲げ試験について行った。静的曲げ試験は、寸法が 20(R)×20(T)×270(L)mm の試験体を用い、スパンは 240mm とし、柃目面荷重の中央集中荷重で単調増加荷重で行った。縦圧縮試験は、寸法が 20(R)×20(T)×40(L)mm の試験体を用い、単調増加荷重で行った。せん断試験は、静的曲げ試験に供した試験体の非破壊部分から寸法が 20(R)×20(T)×30(L)mm、せん断面積が 20×20mm の JIS いす型試験体を採用し、JIS Z 2101 で行った。せん断面は、柃目面および板目面とした。衝撃曲げ試験は、寸法が 20(R)×20(T)×270(L)mm の試験体を用い、スパンは 240mm とし、98.0J の衝撃エネルギーをもっている衝撃ハンマーでスパン中央の柃目面を打撃して行った。

耐久性試験は、気乾状態および生材状態で熱処理したスギ小試験体について、耐朽性試験と耐蟻性試験を行った。耐朽性試験は、各供試材から寸法が 20(R)×20(T)×10(L)mm の試験体を採用し行った。耐朽性試験の培地には、JWPA の素材耐朽性試験用培地を用い、供試菌はカワラタケおよびオオウズラタケとした。質量減少率の測定は、腐朽操作開始後、4、8、12 週目に試験体を取り出して行った。耐蟻性試験は、各供試材から寸法が 20(R)×20(T)×10(L)mm の試験体を採用し行った。質量減少率の測定は、1 試験体をイエシロアリ職蟻 150 頭、兵蟻 5 頭を投入した試験容器に入れ、26±2℃、75%RH の環境で 10 日間強制摂食させて行った。

(2) 異なる乾燥条件で乾燥したスギ構造材の強度および耐久性

木口断面を 110×110mm、長さを 3m に採材したスギ心持正角材と、木口断面を 55×115mm、長さを 3m に採材したスギ平割り材を用いた。スギ心持正角材は、密度と縦振動法によるヤング係数の平均値と変動係数がほぼ等しくなるように 3 グループに分類し、それぞれ異なる乾燥条件で乾燥した。乾燥条件は、乾燥温度が 90、120、135℃、目標含水率を 12%とした。スギ平割り材は、密度と縦振動法によるヤング係数の平均値と変動係数がほぼ等しくなるように 5 グループに分類した。このうちの 4 グループは、1 グループを天然乾燥、残りの 3 グループを人工乾燥した。天然乾燥の期間は、7 ヶ月とした。人工乾燥の条件は、乾燥温度が 65、90、120、135℃、目標含水率を 12%とした。乾燥後、強度試験と耐久性試験にそれぞれ供試した。残りの 1 グループは、生材状態で強度試験に供試した。

スギ心持正角材の強度試験では、静的曲げ試験、縦圧縮試験、せん断試験（ショートスパン法、いす型方式）を行った。スギ平割り材の強度試験では、縦引張り試験を行った。静的曲げ試験は、

木口断面が 105×105mm、長さが 2100mm の試験体を用い、スパンを梁せいの 18 倍とした 3 等分点 4 点荷重方式で単調増加荷重で行った。縦圧縮試験は、曲げ試験に供した試験体の非破壊部分から、木口断面が 100×100mm、長さが 300mm とした試験体を用い単調増加荷重で行った。ショートスパン法によるせん断試験は、木口断面が 100×100mm、長さが 700mm の試験体を用い、スパンを梁せいの 5 倍とした中央集中荷重方式の単調増加荷重で行った。いす型方式によるせん断試験は、木口断面が 100×100mm、長さが 300mm、せん断面積が 100×100mm の試験体を用い、実大いす型治具で行った。縦引張り試験は、木口断面が 105×50mm、長さが 2500mm の試験体を用い、チャック間距離を 1500mm とし単調増加荷重で行った。

スギ心持正角材の耐久性試験では、細分割法による耐朽性試験と耐蟻性試験および野外暴露試験を行った。スギ平割り材の耐久性試験では、細分割法による耐朽性試験と耐蟻性試験を行った。細分割法による耐朽性試験と耐蟻性試験は、供試材から寸法が 20(R)×20(T)×10(L)mm の試験体を採用し、小試験体と同様の方法で行った。野外暴露試験は、断面寸法が 100×100mm、長さが 400mm の試験体で行った。試験地は、鹿児島県日置郡吹上町の吹上浜共同試験地とした。試験体は、平成 15 年 5 月 22 日に試験体の約 300mm を地中に埋設した。試験体数は、各条件で 10 体とし、1 区につき各条件 1 本ずつ、計 10 区設けた。試験開始後、平成 15 年 9 月 10 日、平成 16 年 10 月 27 日に目視による食害度評価を行い、条件ごとに平均食害度を算出した。

ウエ 結果と考察

小試験体に関する強度試験の結果、最大応力は、静的曲げ強さ、縦圧縮強さ、せん断強さ、衝撃曲げ強さとも、処理時間が長くなるに従って減少し、その傾向は、温度が高くなるに従って顕著だったが、減少の割合は応力によって異なった（表 4-1-3-1～4）。熱処理の影響を受け無処理との間に有意差があったのは、静的曲げ強さと衝撃曲げ強さであり、特に衝撃曲げ強さは、その影響が顕著であった。一方、熱処理の影響は認められるものの、無処理との間に有意差がなかったのは、縦圧縮強さとせん断強さだった。また、せん断強さの場合、熱処理の影響はせん断面によって異なり、せん断面が柢目面の方が熱処理の影響があった。曲げヤング係数および縦圧縮ヤング係数は、処理時間が長くなるに従って低くなり、この傾向は処理温度が高くなるに従って顕著であったが、各最大応力と比べるとその傾向は極めて小さく、平均値および分散は各処理条件の間に有意差はなかった。含水率は、すべての強度試験において、処理温

表 4-1-3-1 静的曲げ試験の結果

熱処理条件	含水率 (%)			静的曲げ強さ (N/mm ²)			
	n	ave.	COV (%)	n	ave.	COV (%)	
control	20	12.5	2.7	20	54.1	10.6	
105℃	6hours	20	12.4	2.5	20	53.9	11.8
	24hours	20	12.7	3.1	20	51.9	8.2
	72hours	20	11.5	3.5	20	50.7	10.5
135℃	6hours	20	10.8	2.9	20	51.2	8.3
	24hours	20	10.4	3.4	20	43.8	12.4
	72hours	20	8.9	3.1	20	45.3	10.7
150℃	6hours	20	10.0	4.5	20	49.0	12.2
	24hours	20	8.6	3.8	20	40.3	13.3
	72hours	20	7.9	3.2	20	36.4	16.7

注：n：試験体数、COV：変動係数

表 4-1-3-2 縦圧縮試験の結果

熱処理条件	含水率			縦圧縮強さ			
	(%)			(N/mm ²)			
	n	ave.	COV (%)	n	ave.	COV (%)	
control	20	11.6	0.3	20	29.4	3.2	
105℃	6hours	20	11.8	0.2	20	27.6	2.4
	24hours	20	11.2	0.2	20	28.9	2.3
	72hours	20	10.7	0.3	20	28.8	2.2
135℃	6hours	20	10.1	0.3	20	29.4	2.8
	24hours	20	9.5	0.2	20	29.5	2.7
	72hours	20	8.5	0.3	20	30.5	3.1
150℃	6hours	20	8.5	0.4	20	30.8	3.6
	24hours	20	7.7	0.3	20	28.5	2.3
	72hours	20	7.5	0.3	20	29.5	2.5

注：n：試験体数、COV：変動係数

度が高い方が低く、同じ処理温度の場合、時間が長くなるに従って低くなる傾向だった。

小試験体に関する耐朽性試験の結果、処理温度が 105℃の場合、全ての処理時間で無処理との間に差はなかった。しかしながら、処理温度が 135℃から 150℃へと高くなるに従い、無処理との質量減少率の差が大きくなった（表 4-1-3-5）。また、処理時間が長くなるに従ってその差は大きかった。気乾状態で熱処理した場合と生材状態で熱処理した場合とでは、後者の方が処理温度および処理時間の影響が顕著だった。

小試験体に関する耐蟻性試験の結果、処理温度が高い方が質量減少率は大きく、処理時間毎では、処理温度が高い方が質量減少率は大きかった。また、その傾向は、気乾状態（図 4-1-3-1）と生材状態（図 4-1-3-2）とで異なった。

構造材に関する強度試験の結果、最大応力の平均値は、含水率補正をしない場合、縦圧縮強さ、せん断強さ、縦引張り強さで、90℃と 135℃との間に有意差があり、135℃の方が小さかった。含水率補正をした場合も同様であった。曲げ強さの平均値は、含水率補正をした場合としない場合ともに、乾燥温度 90℃とその他の条件との間に有意差はなかったが、最大荷重時のたわみは、90℃と 135℃との間には有意差があり、135℃の方が小さかった（表 4-1-3-6 ～ 4-1-3-10）。また、曲げ試験および曲げ方式によるせん断試験では、乾燥温度 135℃でせん断破壊する確率が大きく、この原因の一つとして、内部割れが影響していることが明らかになった。

構造材に関する耐朽性試験の結果、カワラタケよりもオオウズラタケの方が概して質量減少率は大きく、8 週目では乾燥温度 135℃が最も大きかった（表 4-1-3-11）。

構造材に関する耐蟻性試験の結果、乾燥温度が高い方が質量減少率は増加する傾向を示したが、平均値に有意差はなかった。また、採材位置の違いによる差はなかった（図 4-1-3-3、4-1-3-4）。

構造材に関する野外暴露試験の結果、試験開始から 4 ヶ月後では、乾燥温度 120℃の平均食害度、食害発生率食害指数が最も小さかったが、1.5 年後では、乾燥温度 135℃の食害指数が若干大きいものの、乾燥条件による違いは認められなかった（表 4-1-3-12）。

表 4-1-3-3 せん断試験の結果

	熱処理条件	含水率 (%)			せん断強さ (N/mm ²)		
		n	ave.	COV (%)	n	ave.	COV (%)
固山炭	control	20	12.6	2.4	20	8.56	10.7
	6hours	20	12.2	2.1	20	8.25	13.2
	105℃ 24hours	20	11.6	2.2	20	7.37	11.1
	72hours	20	11.1	2.2	20	6.70	11.3
	6hours	20	10.8	3.0	19	7.56	15.1
	135℃ 24hours	20	10.1	2.6	20	7.69	13.4
	72hours	19	9.3	4.7	19	7.22	16.8
	6hours	20	9.4	5.9	20	7.69	18.9
	150℃ 24hours	21	8.1	4.4	21	6.92	9.4
	72hours	20	7.5	5.2	20	7.14	12.4
	control	20	12.7	3.0	20	6.11	17.3
	6hours	20	12.4	3.3	20	6.02	19.5
固山炭	105℃ 24hours	20	12.0	3.9	20	5.90	20.2
	72hours	20	11.1	2.3	20	6.12	20.0
	6hours	20	10.8	3.4	20	5.63	21.0
	135℃ 24hours	20	10.2	3.7	20	6.18	22.4
	72hours	21	9.1	5.2	21	5.60	24.2
	6hours	20	9.5	5.1	20	5.50	17.5
	150℃ 24hours	19	8.3	4.5	19	5.05	22.3
	72hours	20	7.9	4.1	20	4.87	26.7

注：n：試験体数、COV：変動係数

表 4-1-3-4 衝撃曲げ試験の結果

熱処理条件	含水率 (%)			衝撃曲げ強さ (N/mm ²)		
	n	ave.	COV (%)	n	ave.	COV (%)
control	23	13.4	1.2	23	87.2	12.3
6hours	21	12.9	1.4	21	81.0	13.0
105℃ 24hours	21	12.4	1.3	21	77.3	12.6
72hours	21	11.8	1.6	21	68.4	28.8
6hours	21	11.2	1.9	21	69.8	28.8
135℃ 24hours	21	10.1	1.9	21	65.6	22.3
72hours	21	9.1	1.8	21	65.0	22.8
6hours	21	9.6	2.8	21	65.9	28.0
150℃ 24hours	21	8.8	2.7	21	54.6	26.4
72hours	21	8.1	2.4	21	44.9	34.2

注：n：試験体数、COV：変動係数

表 4-1-3-5 小試験体による耐朽性試験の結果

condition		気乾状態										生材状態									
		質量減少率-4週目 (%)					質量減少率-8週目 (%)					質量減少率-4週目 (%) 心材					質量減少率-4週目 (%) 辺材				
		n	min.	ave.	max.	COV	n	min.	ave.	max.	COV	n	min.	ave.	max.	COV	n	min.	ave.	max.	COV
control	心材	12	0.16	3.32	11.59	107.1	12	22.08	30.90	43.34	24.2	12	-3.83	-1.55	1.28	-97.7	12	10.37	23.23	31.88	30.0
105℃	6時間	12	0.00	9.03	16.71	56.6	12	11.10	29.37	42.16	38.7	12	-1.44	1.85	13.79	240.3	12	15.91	28.05	37.52	21.5
	24時間	12	1.30	9.98	17.39	51.0	12	10.93	27.58	44.63	36.8	12	1.66	12.30	24.68	64.8	12	15.54	28.25	33.42	18.1
	72時間	12	0.00	13.00	22.49	58.7	12	17.61	31.73	43.33	27.9	12	9.99	31.07	45.75	40.0	12	0.72	16.74	41.82	94.0
135℃	6時間	12	0.46	12.03	22.59	71.0	12	24.10	32.01	38.12	14.9	12	14.14	24.98	40.71	35.8	12	34.02	38.61	47.28	10.5
	24時間	12	4.01	8.53	12.24	34.7	12	14.57	24.24	37.85	35.0	12	1.19	17.47	37.49	70.2	12	17.45	30.36	38.58	27.2
	72時間	12	-0.38	1.40	5.52	146.1	12	3.59	15.03	24.86	54.6	12	-0.73	9.16	26.49	117.0	12	-0.61	12.92	33.65	79.7
150℃	6時間	12	1.01	10.49	19.59	61.4	12	9.04	17.30	28.32	31.6	12	1.65	21.30	40.44	64.7	12	5.89	30.08	42.16	45.0
	24時間	12	-0.89	1.22	5.66	155.8	12	0.62	10.99	20.93	47.8	12	0.69	11.05	27.04	74.5	12	14.86	24.26	32.56	24.4
	72時間	12	-1.54	-0.77	-0.08	-56.7	12	-0.30	2.08	8.67	138.4	12	-1.64	3.94	17.33	171.5	12	2.11	10.19	19.93	65.7

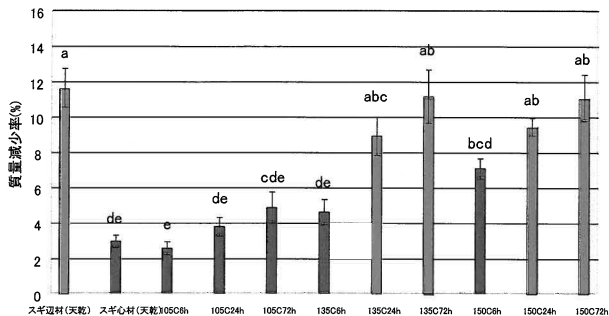


図 4-1-3-1 小試験体による耐腐性試験の結果 (気乾状態)

注: 同じ文字は互いに有意差がない(p=0.05)

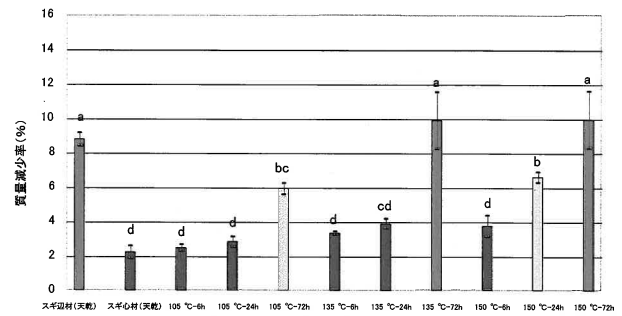


図 4-1-3-2 小試験体による耐腐性試験の結果 (生材状態)

注: 同じ文字は互いに有意差がない(p=0.05)

表 4-1-3-6 正角材による曲げ試験の結果

乾燥 条件		MC (%)	Eapp (kN/mm ²)	Etrue (kN/mm ²)	σbp (N/mm ²)	σb (N/mm ²)	Eapp-r (kN/mm ²)	Etrue-r (kN/mm ²)	σbp-r (N/mm ²)	σb-r (N/mm ²)	def_p (mm)	def_Pmax (mm)
90℃ 174時間	min	11.0	5.03	5.62	10.3	20.2	4.92	5.25	9.5	18.7	12.9	17.6
	ave	12.4	7.40	8.10	30.5	37.7	7.09	7.76	28.5	35.2	27.8	39.8
	max	18.3	9.49	11.03	46.0	55.6	9.41	10.59	42.1	50.9	36.0	81.1
	sd	1.2	1.09	1.42	7.1	9.1	1.04	1.36	6.5	8.4	4.8	10.8
	COV (%)	9.8	14.7	17.5	23.2	24.1	14.7	17.6	22.7	23.8	17.3	27.0
120℃ 72時間	min	8.3	5.24	5.72	13.4	19.9	5.00	5.45	12.0	17.8	12.2	22.6
	ave	18.0	7.18	8.27	30.4	36.4	7.23	8.34	30.5	36.7	28.3	39.1
	max	47.8	9.74	11.84	44.3	57.5	9.80	12.52	42.2	52.3	36.4	66.6
	sd	10.4	1.12	1.51	6.9	8.2	1.16	1.62	5.7	7.2	5.2	7.9
	COV (%)	57.6	15.6	18.3	22.7	22.4	16.0	19.4	18.5	19.6	18.2	20.1
135℃ 45時間	min	7.9	5.11	5.85	16.1	20.6	4.65	5.33	14.4	18.4	17.1	22.0
	ave	11.3	7.37	9.03	30.7	34.9	6.94	8.49	28.1	32.0	28.1	35.4
	max	14.8	9.63	16.27	45.1	56.7	9.41	15.03	43.9	53.1	36.4	52.8
	sd	2.0	1.17	1.96	6.5	7.8	1.17	1.88	6.5	7.8	4.2	7.1
	COV (%)	17.3	15.9	21.7	21.0	22.2	16.9	22.2	23.1	24.3	14.8	20.0

n : 試験体数

MC : 含水率

Eapp : 見かけのヤング係数

Etrue : 真のヤング係数

σbp : 比例限度応力

σb : 曲げ強さ

-r : 含水率15%に補正したときの値 (ASTM 2915による)

def_p : 比例限度たわみ

def_Pmax : 最大荷重時のたわみ

表 4-1-3-7 正角材による縦圧縮試験の結果

乾燥 条件	n		MC (%)	E _c (kN/mm ²)	σ _{cp} (N/mm ²)	σ _c (N/mm ²)	E _{c-r} (kN/mm ²)	σ _{cp-r} (N/mm ²)	σ _{c-r} (N/mm ²)	Strain _p (μ)	strainP _{max} (μ)
90℃ 174時間	54	min	10.6	5.56	17.6	26.5	5.18	16.3	21.6	2876	2911
		ave	11.6	7.90	28.1	34.4	7.46	23.6	28.9	3650	5490
		max	13.5	11.31	36.6	41.4	10.84	31.0	35.2	4570	8674
		sd	0.7	1.44	4.9	3.8	1.37	4.0	3.2	403	1113
		COV (%)	6.3	18.2	17.5	11.1	18.3	17.0	11.1	11.0	20.3
120℃ 72時間	53	min	9.0	4.91	10.8	19.2	4.53	11.5	19.3	1617	3393
		ave	12.0	7.49	23.1	28.8	7.12	19.7	24.7	3169	5243
		max	16.6	12.26	34.0	38.4	11.97	27.1	30.1	4109	11260
		sd	1.8	1.49	5.6	4.3	1.42	4.1	2.8	562	1391
		COV (%)	15.2	19.9	24.2	14.9	19.9	20.6	11.5	17.7	26.5
135℃ 45時間	50	min	8.2	5.75	16.5	20.5	5.36	14.6	17.1	2133	960
		ave	10.5	7.92	26.4	31.2	7.35	21.2	25.0	3406	4543
		max	12.9	11.03	38.1	39.3	10.46	29.5	33.6	4344	6443
		sd	1.1	1.39	4.5	4.0	1.30	3.5	3.3	475	1131
		COV (%)	10.7	17.6	17.1	12.9	17.7	16.6	13.2	13.9	24.9

n : 試験体数

MC : 含水率

Ec : 縦圧縮ヤング係数

σcp : 縦圧縮比例限度応力

σc : 縦圧縮強さ

-r : 含水率15%に補正したときの値 (ASTM 2915による)

strainp : 比例限度ひずみ

strainPmax : 最大荷重時のひずみ

表 4-1-3-8 正角材によるせん断試験の結果

乾燥条件		MC (%)	τ_{ch} (N/mm ²)	τ_{ch-r} (N/mm ²)
90℃ 174時間	min	10.7	4.3	4.1
	ave	12.0	6.4	6.1
	max	14.4	8.9	8.5
	sd	0.8	0.9	0.8
	COV (%)	6.4	13.9	13.8
120℃ 72時間	min	8.6	4.2	4.1
	ave	11.5	7.0	6.6
	max	14.8	8.9	8.6
	sd	1.8	1.0	0.9
	COV (%)	15.2	14.6	14.3
135℃ 45時間	min	7.7	0.7	0.6
	ave	10.2	5.1	4.8
	max	12.3	6.7	6.3
	sd	1.3	1.2	1.1
	COV (%)	12.9	22.9	23.4

n : 試験体数

MC : 含水率

 τ_{ch} : いす型治具によるせん断強さ

-r : 含水率15%に補正したときの値 (ASTM 2915による)

CSC-L_{max} : 見かけのヤング係数

表 4-1-3-9 正角材によるせん断試験の結果

乾燥条件	n	MC (%)	τ_{ss} (N/mm ²)	τ_{ss-r} (N/mm ²)	CSC-L _{max} (mm)
90℃ 174時間	min	10.9	3.8	3.6	0.0
	ave	11.9	6.0	5.7	8.4
	max	15.3	8.2	7.7	40.0
	sd	1.0	1.0	0.9	12.7
	COV (%)	8.2	16.3	16.1	151.6
120℃ 72時間	min	9.3	3.4	3.7	13.8
	ave	13.2	5.6	5.4	36.0
	max	38.3	7.7	7.1	100.0
	sd	5.8	1.1	0.9	15.6
	COV (%)	43.9	18.7	17.0	43.4
135℃ 45時間	min	7.6	2.3	2.1	21.7
	ave	10.8	4.9	4.6	57.6
	max	14.5	7.5	7.1	109.4
	sd	1.7	1.2	1.2	25.0
	COV (%)	15.8	25.0	26.4	43.4

n : 試験体数、上段() 曲げ・せん断複合破壊、下段() せん断破壊

 ρ : 密度

MC : 含水率

 τ_{ss} : ショートスパン法によるせん断強さ

-r : 含水率15%に補正したときの値 (ASTM 2915による)

CSC-L_{max} : 木口面の最大割れ長さ

表 4-1-3-10 平割り材による縦引張り試験の結果

乾燥条件	n	MC (%)	Et (kN/mm ²)	σ_{tp} (N/mm ²)	σ_t (N/mm ²)	Et-r (kN/mm ²)	σ_{tp-r} (N/mm ²)	σ_{t-r} (N/mm ²)	Strain _p (μ)	strain _{Pmax} (μ)
60-70℃ 168時間	min	11.9	4.13	9.8	14.5	4.03	9.3	13.7	1759	2216
	ave	13.5	7.21	24.0	28.6	7.03	23.1	27.5	3340	4144
	max	15.7	10.74	36.5	40.6	10.35	35.8	40.7	5203	7062
	sd	1.0	1.35	6.8	6.2	1.31	6.5	5.9	750	813
	COV (%)	7.4	18.7	28.4	21.8	18.6	28.2	21.5	22.4	19.6
90℃ 120時間	min	11.9	4.65	12.7	13.6	4.51	12.0	13.4	1541	2283
	ave	13.5	7.43	22.6	25.4	7.25	21.8	24.5	3076	3475
	max	15.7	10.11	33.0	39.9	9.88	33.4	40.7	4129	5212
	sd	1.0	1.31	5.6	6.0	1.29	5.4	6.0	609	590
	COV (%)	7.3	17.6	24.8	23.7	17.7	24.8	24.5	19.8	17.0
120℃ 40時間	min	9.3	4.48	11.3	11.3	4.28	10.6	10.6	1899	2046
	ave	11.5	7.57	20.9	23.9	7.13	19.1	21.9	2820	3230
	max	15.0	10.87	29.0	46.0	9.94	27.1	43.4	4403	5255
	sd	1.4	1.34	3.9	5.7	1.25	3.7	5.3	501	599
	COV (%)	12.3	17.6	18.6	23.7	17.5	19.2	24.2	17.8	18.5
120℃ 48時間	min	9.6	4.87	7.5	13.2	4.59	6.7	11.8	1510	2246
	ave	11.2	7.31	20.9	24.4	6.85	19.0	22.1	2887	3401
	max	13.6	9.79	33.5	42.5	9.25	30.7	39.9	4537	5724
	sd	0.9	1.25	6.3	6.1	1.16	5.7	5.6	730	650
	COV (%)	8.0	17.0	30.0	25.2	16.9	29.8	25.4	25.3	19.1
135℃ 30時間	min	9.6	5.04	8.4	14.2	4.80	8.1	12.7	1091	1971
	ave	11.7	7.71	16.6	21.4	7.30	15.3	19.8	2133	2868
	max	15.8	10.63	32.8	40.2	10.27	31.1	40.3	3381	4259
	sd	1.5	1.26	4.8	5.0	1.22	4.6	5.1	506	533
	COV (%)	12.6	16.3	28.8	23.5	16.8	29.9	25.7	23.7	18.6
天然乾燥 7ヶ月	min	14.3	4.10	13.1	13.4	4.17	13.5	13.7	1948	2728
	ave	15.8	7.32	22.8	26.5	7.42	23.2	27.0	3168	3665
	max	18.5	10.11	30.2	37.2	10.27	30.9	38.2	4432	5426
	sd	0.7	1.29	4.3	5.3	1.33	4.4	5.5	569	746
	COV (%)	4.6	17.6	18.9	20.1	17.9	18.9	20.2	18.0	20.4
未乾燥 (生材)	min	43.6	4.23	12.9	17.2	4.83	15.9	21.2	2446	3321
	ave	82.3	6.28	25.3	31.5	7.16	31.1	38.7	4001	5390
	max	173.9	8.30	45.0	45.5	9.46	55.3	56.0	5955	10117
	sd	31.3	1.08	6.4	6.0	1.23	7.9	7.4	812	1391
	COV (%)	38.0	17.2	25.3	19.0	17.2	25.3	19.0	20.3	25.8

n : 試験体数

MC : 含水率

Et : 縦引張りヤング係数

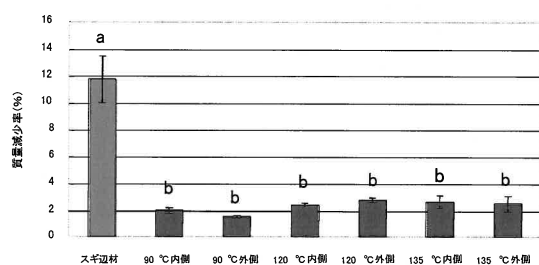
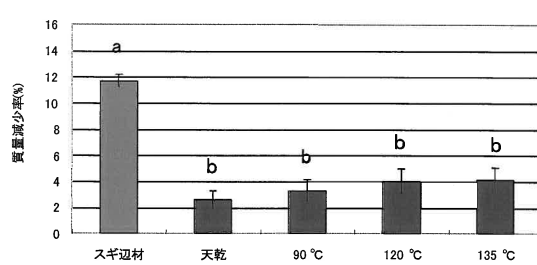
 σ_{tp} : 縦引張り比例限度応力 σ_t : 縦引張り強さ

-r : 含水率15%に補正したときの値 (ASTM 2915による)

strain_p : 比例限度ひずみstrain_{Pmax} : 最大荷重時のひずみ

表 4-1-3-11 平割り材による耐朽性試験の結果

condition	カワラタケ										オオウズラタケ									
	質量減少率-4週目 (%)					質量減少率-8週目 (%)					質量減少率-4週目 (%)					質量減少率-8週目 (%)				
	n	min.	ave.	max.	COV	n	min.	ave.	max.	COV	n	min.	ave.	max.	COV	n	min.	ave.	max.	COV
control	12	5.9	12.8	16.1	24.7	12	28.8	33.9	37.2	7.0	12	-1.0	15.8	24.4	59.9	12	47.3	55.6	57.1	4.9
天然乾燥	12	-1.6	0.1	1.1	111.5	12	-0.5	0.9	2.7	128.1	12	-2.9	-0.6	7.1	-476.4	12	-1.5	20.6	44.8	79.8
90℃	12	-0.7	2.3	6.8	100.6	12	0.5	3.0	10.3	92.5	12	-0.9	4.6	23.4	152.4	12	0.8	18.6	50.8	81.2
120℃	12	-0.1	1.2	3.1	84.6	12	0.5	5.2	20.0	129.3	12	0.2	4.7	13.4	110.8	12	4.0	26.6	45.2	43.4
135℃	12	-0.6	1.0	3.8	133.9	12	0.6	3.9	10.7	91.0	12	-1.4	6.8	17.5	97.7	12	5.0	32.4	48.6	38.3

図 4-1-3-3 正角材による耐蟻性試験の結果
注：同じ文字は互いに有意差がない(p=0.05)図 4-1-3-4 正角材による耐蟻性試験の結果
注：同じ文字は互いに有意差がない(p=0.05)

オ 今後の問題点

強度試験に関しては、小試験体および構造材ともに、熱処理条件や乾燥条件によって20℃65%RHにおける平衡含水率が異なった。小試験体に関する一連の強度試験はこの状態で実施したため、最大応力の差は、含水率の違いによって生じた可能性があると考えられる。構造材に関する一連の強度試験は気乾状態で実施したが、乾燥条件の違いによって含水率が異なっていたため、小試験体同様、含水率の違いによって最大応力に差が生じたと考えられる。そのため、熱処理材および乾燥材の強度性能に及ぼす含水率の影響について、今後検討する必要がある。

カ 要約

飽和水蒸気中で熱処理したスギ小試験体を対象とし、湿熱処理がスギ小試験体の強度および耐久性に及ぼす影響を検討することを目的とした。また、異なる乾燥条件で乾燥したスギ構造材を対象とし、乾燥条件がスギ構造材の強度および耐久性に及ぼす影響を検討することを目的とした。その結果、処理時間が長くなるに従って強度および耐久性は減少し、その傾向は、温度が高くなるに従って顕著であった。また、適正な条件で乾燥した構造材の強度および耐久性は、実用上支障をきたす恐れはないが、高温かつ長時間という過度な条件では、強度および耐蟻性が低下することが明らかになった。

(森林総合研究所構造利用研究領域 加藤英雄、長尾博文、井道裕史)

(森林総合研究所木材改質研究領域 桃原郁夫、大村和香子)

2. 木材用途に対応した性能及び信頼性確保のための乾燥処理技術の体系化

(1) 乾燥材の品質の違いが接合部の性能に与える影響

ア 研究目的

スギの需要拡大に対する方策として乾燥処理は不可欠である¹⁾。しかし、スギはその内部に多くの水分を含んでおり、しかもそれが抜けにくく、乾燥によって内部割れなどを生じやすい。この割れは接合部の性能に大きな影響を与えると考えられる²⁾。本研究は、木造住宅に用いられる接合部を従来の方法による乾燥材、新しい高速乾燥法による乾燥材、そして生材を用いて作成し、①乾燥方法の違いが、接合部の強度性能に与える影響、②部材の含水率（あるいは含水率の変化）が接合部の性能に与える影響、を解明することを目的としている。

イ 研究方法

断面寸法105mm×105mm、長さ1500mmに製材したスギ正角の生材（栃木県産心持ち材）、同寸法で、目標含水率を5%として高温乾燥した材（同、過乾燥材）、および目標含水率を15%として高温乾燥した材（同、乾燥材）を用いて腰掛け蟻継手あるいは腰掛け鎌継手接合部試験体（図4-2-1-1a）を作成して曲げ加力試験を行い、最大荷重および初期剛性と部材含水率との関係を検討した（図4-2-1-1b）^{3), 4), 5)}。

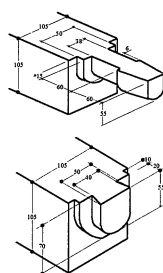


図4-2-1-1a プレカットの形状

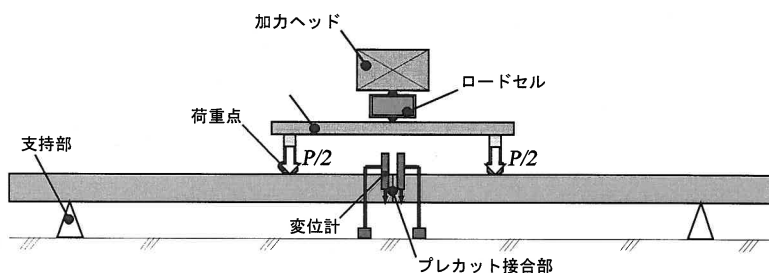


図4-2-1-1b 継手接合部試験方法

上記の曲げ試験体と同じ材料を用いたボルトおよび釘接合部の鋼板添え板式せん断試験を行い、得られた最大応力および初期剛性と部材含水率との関係を検討した（図4-2-1-2）^{3), 4), 5)}。また、同寸の生材試験体に対して穴開け加工等を施した後、1年間屋内で自然乾燥させた材を主材とする接合部試験体を作成して同様にボルトおよび釘接合部のせん断試験を行い、乾燥によって生じた割れのタイプと強度性能との関係について検討した⁶⁾。

スギ生材および乾燥材を柱材、ベイマツ集成材を梁材とした柱・梁接合部を作成してせん断加力試験を行い、最大荷重、剛性および吸収エネルギーと柱材の種類との関係を検討した。接合形式として、傾ぎ大入れおよび羽子板ボルトを用いたものと金物工法用金物（クレテック）を用いたものの2種類を用意し、それぞれ

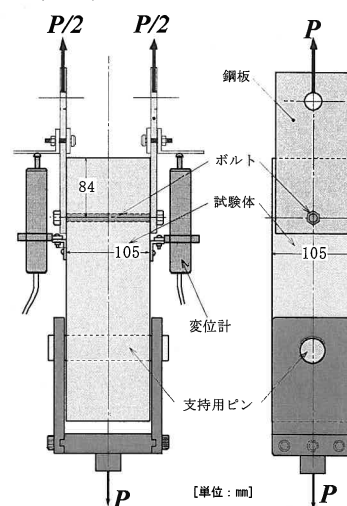


図4-2-1-2 ボルト接合部試験

について、柱材に生材を用いたもの、割れを有しない乾燥材を用いたもの、割れを有する乾燥材を用いたものの計6種類の試験体を作成した（図4-2-1-3）⁷⁾。

屋内自然乾燥(G)・目標含水率15%の人工乾燥(D)・同5%(H)の3方法で乾燥し、十分な養生期間を経て含水率が安定した105mm角スギ製材を用いて隅柱(L)・中柱(T)・ホールダウン(HD)の各接合形式の柱脚接合部を作成して加力試験を行い、引き抜き最大荷重と部材乾燥法との関係について検討した（図4-2-1-4）。接合金物については一般的に使用されているものを数種選び、また、接合金物に用いた接合具は、釘(ZN65・ZN90)・ボルト(M12)・専用ビス(45mm長)とした。なお、L型にはGDHの3乾燥方法、T型にはD、耐力10kNのHD型にはGDH、耐力25kNのHD型にはDによる部材を用いた。また、L・T型は土台相当部材にほぞ穴を穿ち、接合具が干渉しないように表裏から金物を取り付けた。柱相当部材のほぞは設けなかった。作製した試験体に対し、直ちに加力(P:65体)・1年間屋内保管(I:56体)・屋外暴露(O:56体)の3グループに分けた⁸⁾。

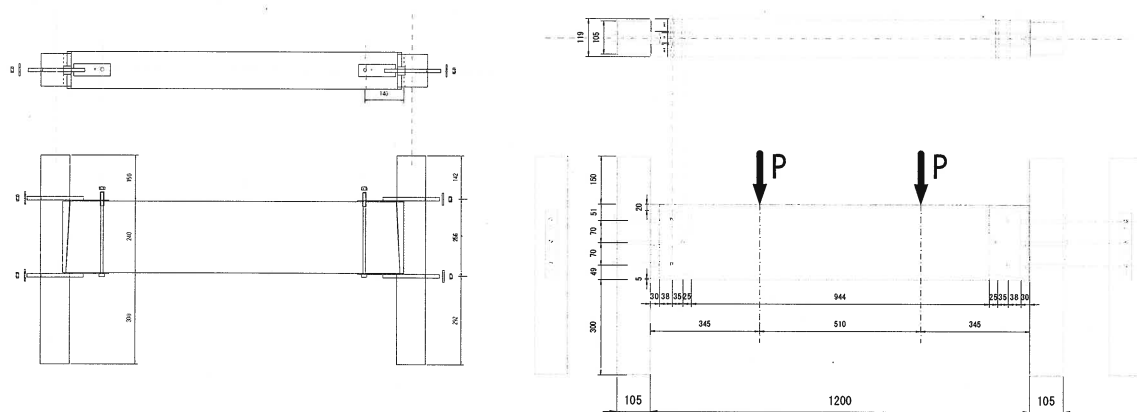


図4-2-1-3 柱・梁接合部せん断試験方法

(左：傾ぎ大入れ・羽子板ボルト接合、右：構造用金物接合部)

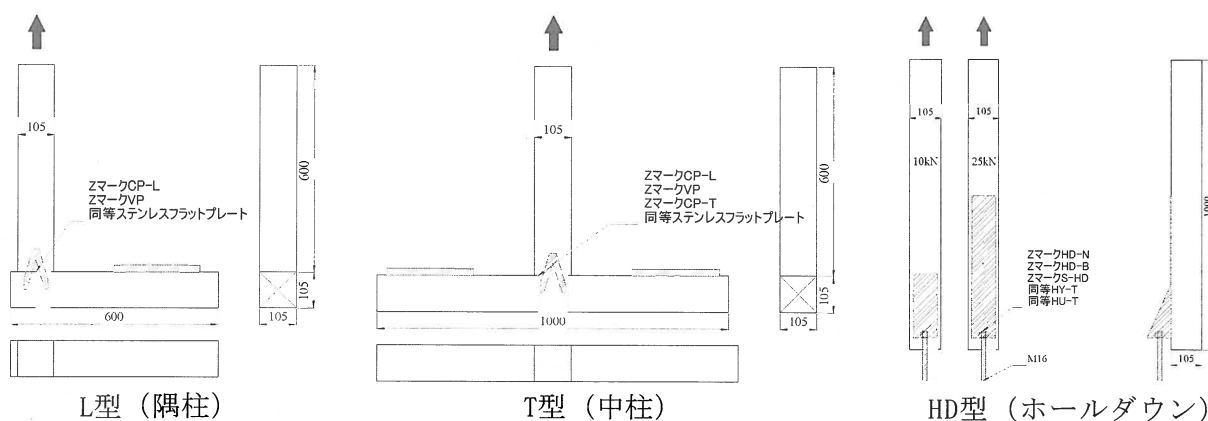


図4-2-1-4 柱脚接合部試験方法

105mm角スギ生材とボルトM12を用いたボルト接合部試験体のクリープ試験を行い、部材の含水率変化とクリープ変形量との関係について検討した（図4-2-1-5）。試験環境は恒温恒湿及び屋内であり、負荷条件は降伏耐力の2/3および3/4とした。

ウエ 結果と考察

プレカット継手の最大荷重はばらつきが大きく、継手の強度と部材含水率との間に明確な関係を見出すことはできなかった。このばらつきの原因としては、人工乾燥によって生じた内部割れの存在等が考えられるが、内部割れの定量化をはじめ解決しなければならない問題があり、さらに検討を要する。継手の初期剛性は、鎌継手については、ばらつきが大きく、明確な傾向が認められなかった。これについても内部割れの影響が考えられる。一方、蟻継手については含水率が高いほど剛性が大きくなり、一般的な木材の性質とは逆の傾向を示した。蟻継手は鎌

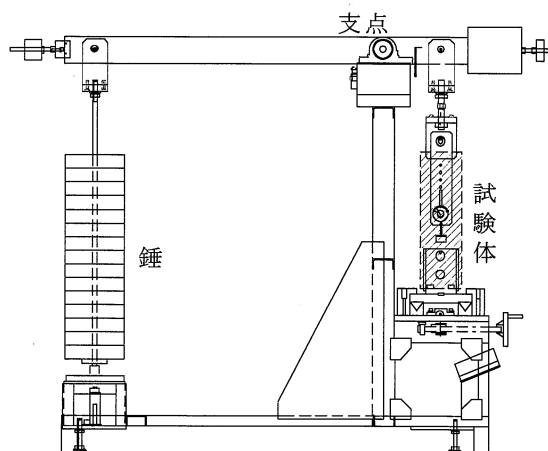


図4-2-1-5 接合部クリープ試験方法

継手に比べてほぞ長さが短く、回転によって抜けやすい構造であった。部材含水率が高い場合にはオスとメスの部材が互いに潰れあうために抜けが生じにくいのに対し、含水率が低い場合にはこのような潰れが生じにくいため、オスとメスの部材がすべりながら抜け出し、見かけ上たわみが大きくなり、剛性が低下したものと考えられる（図4-2-1-6）^{3), 4)}。

ボルト・釘接合部について、初期剛性は、部材含水率が高いほど低下する傾向を示した（図4-2-1-7）^{3), 4), 5)}。また、自然乾燥によって発生した割れの存在によって、ボルト接合部の最大応力は低下したのに対し、釘接合部の最大応力は割れの影響を受けなかった。初期剛性については、いずれの接合部についても、割れの影響は顕著ではなかった⁶⁾。

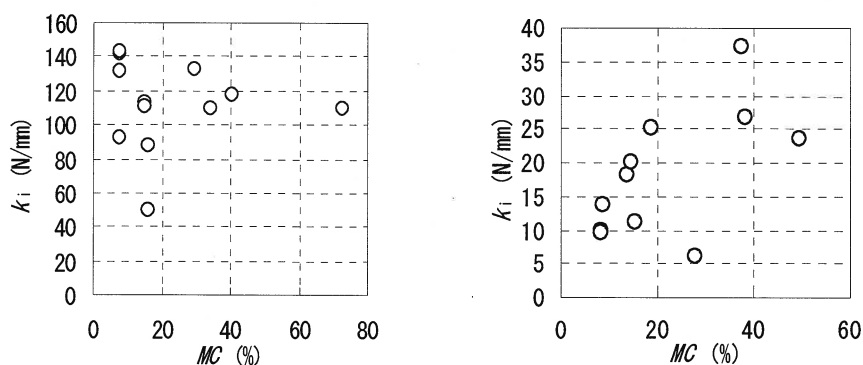


図4-2-1-6 継手の初期剛性と含水率との関係（左：鎌継手、右：蟻継手）

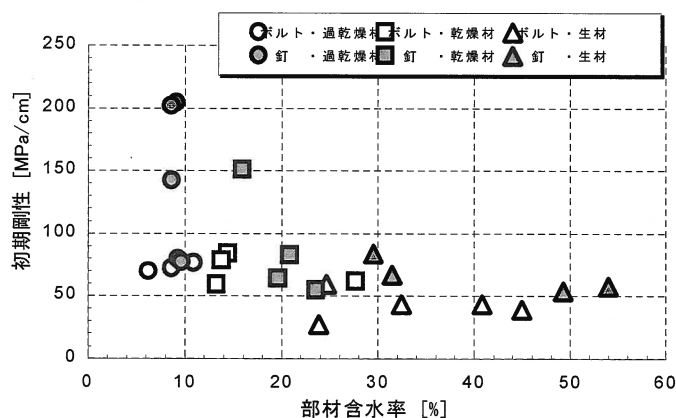


図4-2-1-7 ボルト・釘接合部の初期剛性と含水率との関係

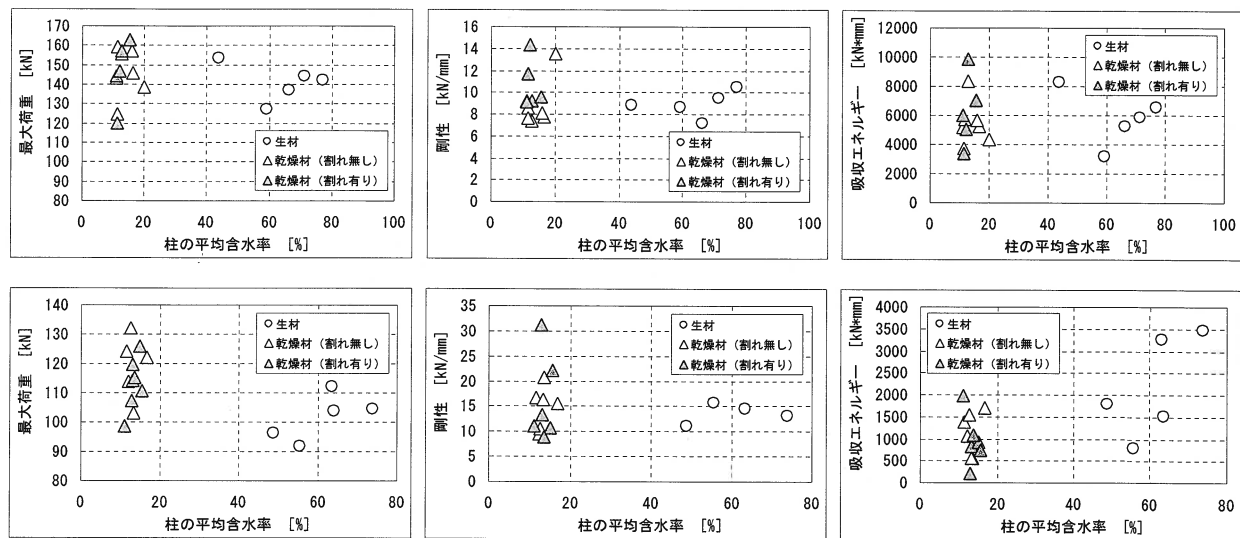


図4-2-1-8 柱・梁接合部の性能と柱材含水率との関係
(上段：羽子板ボルト接合、下段：構造用金物接合)

柱・梁接合部については、柱材を乾燥することにより、羽子板ボルト接合部、金物工法用接合部のいずれについても、最大荷重の増加が認められた。しかし、剛性および吸収エネルギーについては明確な影響は認められなかった。また、柱材の割れは、羽子板ボルト接合部については顕著な影響が認められなかったが、構造用金物接合部については、最大荷重および吸収エネルギーを低下させる要因となった(図4-2-1-8) ⁷⁾。

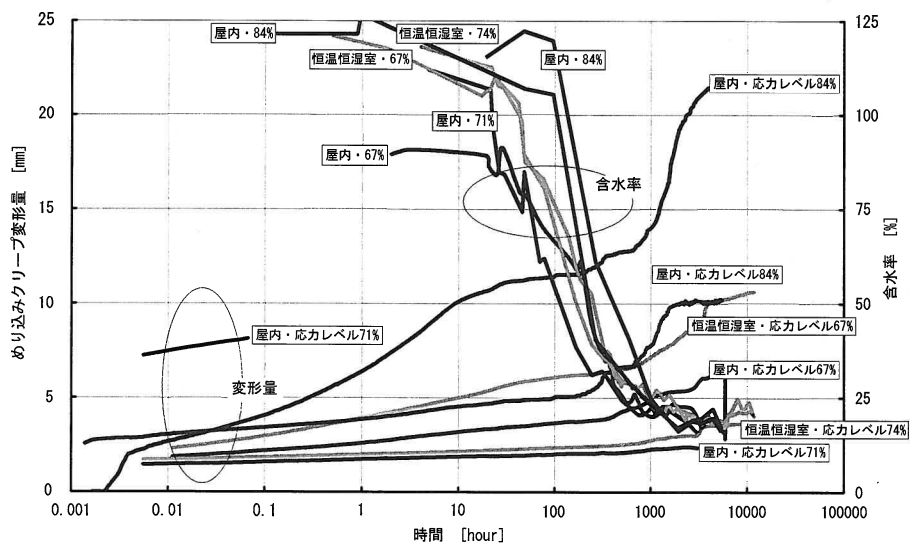


図4-2-1-9 ボルト接合部のクリープ変形量と部材含水率との関係

生材を用いたボルト接合部のクリープ試験では、応力レベルおよび周囲の温湿度条件に関わらず部材含水率の減少と共にクリープ変形量の急激な増加が認められた。変形量の増加が認められたのは、部材含水率が繊維飽和点以下になった時点とほぼ一致した。従って、未乾燥材を建築用材として用いる場合、変形量の増加による構造的な狂いが生じやすいことが明らかとなった(図4-2-1-9)。

柱脚試験体の引抜き最大荷重は、各金物の設計許容耐力に対して十分な余力を持って上回った。組立直後の加力結果については、L型の殆どの破壊は土台側の割裂、T型は土台が割裂したVP以外は接合具のぬけ出しを伴っていた。L型は乾燥に伴う割れの影響が大きく、またTでも顕著な割れがあるものは最大荷重が低くなった。HD型は耐力25kNの殆どが金物の破壊であったが、耐力10kNではそれに加えて木材の割裂と接合具のせん断破壊が混在した。1年後に加力した試験体のうち、屋外暴露した試験体では取付け部分や木材自体の折損が多かった。直ちに加力したものと1年間屋内保管したものでは、金物の破壊が多かったことを考えると、暴露条件が厳しすぎたか、あるいは人工乾燥によって変化した成分は暴露によって変化しやすいかの二つの要因が考えられた。屋外暴露したHD型では、人工乾燥したものの1/3が折損したことに比べ、自然乾燥したものは折損しなかったことから考えると、後者の要因が大きいようにも見えた（表4-2-1-1）⁸⁾。

表4-2-1-1 柱脚接合部の強度性能

形式	金物名と短期許容耐力(kN)		試験体数、破壊* Pmax 平均値(Pmax 最小値)									総 数
			直ちに加力			1 年間屋内保管			1 年間屋外暴露			
			G**	D**	H**	G**	D**	H**	G**	D**	H**	
L 型 (隅柱)	Z マーク金物 CP-L	(3.4)	2 9.0 (8.8)	2 10.1 (8.8)	2 9.1 (7.3)	1 8.4	1 9.9	1 7.7	1 7.1	1 10.1	1 6.5	12
	Z マーク金物 VP	(3.9)	2 8.9 (8.0)	2 13.1 (11.5)	2 9.0 (8.3)	1 9.3	1 13.6	1 11.3	1 10.9	1 10.6	1 8.3	12
	同等金物 ステンレスフラットプレート	(3.9)	2 11.6 (8.3)	2 13.1 (11.0)	2 16.1 (14.3)	1 14.8	1 11.6	1 9.5	1 5.7	1 12.2	1 10.2	12
T 型 (中柱)	Z マーク金物 CP-L	(3.4)		3 12.1 (11.8)			1 10.4			1 10.0		5
	Z マーク金物 CP-T	(3.4)		3 15.1 (13.3)			1 19.8			1 18.9		5
	Z マーク金物 VP	(3.9)		3 14.7 (14.3)			1 17.3			1 11.6		5
	同等金物 ステンレスフラットプレート	(3.9)		3 15.3 (12.5)			1 13.2			1 12.9		5
HD 10kN	Z マーク金物 HD-N	(9.8)	1 ▽ 43.8	1 46.8	1 39.3	1 28.7	1 49.3	1 39.3	1 48.5	1 48.9	1 × 25.2	9
	Z マーク金物 HD-B	(10.0)	1 51.5	1 39.3	1 39.8		1 47.1	1 33.2	1 37.6	1 45.2	1 53.3	8
	Z マーク金物 S-HD	(10.0)	1 39.0	1 ▽ 42.0	1 39.0	1 41.4	1 39.2	1 × 37.5	1 39.8	1 ▽ 49.2	1 ▽ 46.0	9
	同等金物 パイプ引寄せ HY-T	(10.0)	1 ● 58.8	1 ● 46.3	1 47.0	1 — 31.3	1 46.4	1 43.2	1 46.0	1 45.7	1 × 28.8	9
	同等金物 ホールダウン HU-T	(10.0)	1 ● 53.8	1 53.3	1 43.3	1 42.1	1 42.1	1 47.5	1 42.0	1 60.8	1 ▽ 50.4	9
HD 25kN	Z マーク金物 HD-N	(23.0)		4 ▽ × ● ▽ 68.3 (61.8)			1 78.5			1 × 61.2		6
	Z マーク金物 HD-B	(25.0)		4 ● ● ● ● 69.1 (67.0)			1 ● 77.7			1 66.4		6
	Z マーク金物 S-HD	(25.0)		4 ▽ ▽ ▽ ▽ 50.0 (42.3)			1 ▽ 45.1			1 ▽ 54.5		6
	同等金物 パイプ引寄せ HY-T	(25.0)		4 ▽ ▽ ▽ ▽ 67.0 (65.8)			1 × 66.5			1 ▽ 68.4		6
	同等金物 ホールダウン HU-T	(25.0)		4 ▽ ● ▽ ▽ 69.3 (65.3)			1 ▽ 73.0			1 × 53.5		6
試験体総数			11	43	11	7	17	8	8	17	8	130

^{*}破壊の形式:なし:接合具に関する破壊、●:ボルト、▽:金物、×:母材破壊、_ :顕著な割れ

^{**}乾燥法: G: 自然乾燥、D: 目標含水率 15%で人工乾燥、H: 同 5%で人工乾燥

オ 今後の問題点

研究スケジュールの都合により、本プロジェクト研究で開発された高速乾燥材を用いて検証を行うことができなかった。しかしながら、高速乾燥によって生ずる可能性のある内部割れや材質

の変化等と接合部の問題を、より悪条件下でかつ一定の範囲ながら評価することができた。高速乾燥材の信頼性を維持し、それを高めるためにも本研究成果の不安要素について追証されることが望まれる。

カ 要約

本研究は、高速乾燥法により得られた乾燥材を建築部材として評価するために、①乾燥方法の違いが、接合部の強度性能に与える影響、②部材の含水率（あるいは含水率の変化）が接合部の性能に与える影響、を解明することを目的として、プレカット継手、ボルト・釘接合部、柱・梁接合部、柱脚接合部の性能を評価し、乾燥方法の違いおよび部材含水率が、各種接合部に与える影響を明らかにすることができた。このうち、プレカット継手、ボルトおよび釘接合部、柱・梁接合部に関して、部材を乾燥材とすることの有利点を整理することができ、一定の成果を得ることができた。柱脚接合部についても、乾燥材について各金物の設計許容耐力に対して十分な余力を持って上回ることを確認した。生材を用いたボルト接合部について乾燥の進行によってクリープ変形が増加することが明らかになった。一方、各種接合部の性能が高温乾燥材によく見られる内部割れの影響を受けたこと、および、屋外暴露によって人工乾燥した部材を用いた柱脚接合部では母材の破壊する割合が増加したことは、今後も注意を要する点である。

ただし、研究スケジュールの都合により、本プロジェクト研究で開発された高速乾燥材を用いて検証を行うことができなかった。高速乾燥材の信頼性を維持し、それを高めるためにも本研究成果の不安要素について追証されることが望まれる。

キ 引用文献

- 1) 林知行：材料53(3)，331-338(2003)。
- 2) 林知行：木材工業60(2)，89-91(2005)。
- 3) 原田真樹，林陽子（千葉大教），林知行，軽部正彦，大釜敏正（千葉大教）：第51回日本木材学会大会研究発表要旨集，東京，2001，p.187。
- 4) M. Harada, Y. Hayashi, T. Hayashi, M. Karube, T. Ohgama: Proceedings of 7th International IUFRO Wood Drying Conference, Tsukuba, 2001, pp.440-443.
- 5) Masaki Harada, Youko Hayashi, Tomoyuki Hayashi, Masahiko Karube, Toshimasa Ohgama: J. Wood Sci. 51, 282-285(2005)
- 6) 原田真樹，後藤崇志（島根林技セ），軽部正彦，林知行：第52回日本木材学会大会研究発表要旨集，岐阜，2002，p.227。
- 7) 原田真樹，中嶋康（岩手林技セ），軽部正彦，林知行：第53回日本木材学会大会研究発表要旨集，福岡，2003，p.1a221515。
- 8) 軽部正彦，林知行，原田真樹：第55回日本木材学会大会研究発表要旨集，京都，2005，p.88。

（森林総合研究所構造利用研究領域 原田真樹、軽部正彦、林知行）

(2) 壁、床に組み込まれた乾燥材の強度的品質評価

ア 研究目的

スギ製材は、乾燥技術が確立されていないことや、コストが高いために適切に乾燥された製材が供給されておらず、構造設計者にとって積極的に使いたい材料とは言えない。これらの問題を解決するためには、乾燥にともなう収縮、ゆりみ、割れ等が、構造部材の剛性や耐力にどの程度影響を与えるものであるかを把握する必要がある。そこで本研究では、スギ乾燥材の主要な三種の材料（正角、平角、幅はぎ板）の用途である壁及び床の水平加力実験を行い、乾燥材を用いた構造部材の強度性能評価、及び乾燥程度と強度性能の関係を把握することを目的とする。

イ 研究方法

壁の静的試験については、910×2730mmの面材（針葉樹合板、OSB、せっこうボード）を2枚張った壁および2つ割筋かいを逆Vの字型に施工した壁を外気温に近い実験場に半年から4年間放置後、無載荷式の水平せん断加力試験で実験を行った。試験体は、製作から試験までの間に壁の4隅のホールダウンボルトに緩みが生じていたので、試験条件統一のため加力直前に製作直後の締付けトルクと同じ29.4kN・mmの増し締めを行った。加力スケジュールは、みかけのせん断変形角が1/300、1/200、1/150、1/100、1/75、1/50radにおいてそれぞれ3回づつの正負交番载荷とし、最後に壁試験体頂部での変形が200mm近くに達するまで変形を与えた。試験体製作から実験終了までの一連の過程を図4-2-2-1に示す。

壁の動的試験については、静的試験と同様な910×2730mmの針葉樹合板を2枚張り、壁のはりに緊結した架台に慣性力44.2kNの錘を載せ、土台側をアクチュエータによる加速度制御で振動試験を行った。入力は、エルセントロNS波100%である。

床については、3640×10920mmの実大サイズの試験体を作製し、床両端部をピン、ローラーで支持し、スパンを4等分する中央3点を3本の油圧ジャッキで水平方向に加力する。加力スケジュールは設計荷重を $P=41.56\text{kN}$ とし、1/2P、P、3/2Pで正負繰り返し载荷を行った後、試験体が破壊に達するまで変形を与えた。

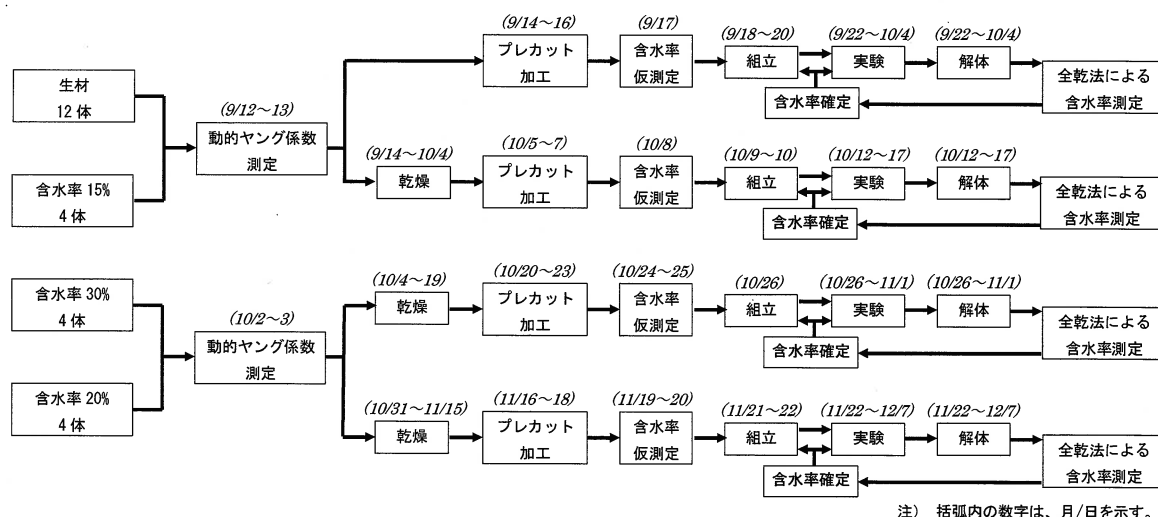


図 4-2-2-1 試験体製作から製作直後の実験までの過程

ウエ 結果と考察

【最大耐力】

生材で構成した耐力壁の乾燥をともなう時間経過が最大耐力に及ぼす影響を図4-2-2-2に示す。

耐力壁の種類によらず、時間経過に伴う含水率の低下によって、最大耐力は上昇する傾向を示した。耐力壁の平均含水率が4年経過して生材から15、6%台まで低下したときの最大耐力の増加は、筋かい壁で1.4倍、針葉樹合板壁で1.5倍、OSB壁1.1倍、せっこう壁で1.1倍であった。

【初期剛性】

生材で構成した耐力壁の乾燥をともなう時間経過が初期剛性に及ぼす影響を図4-2-2-3に示す。

生材から15、6%台まで含水率が低下すると、面材張り壁でおよそ1/2まで剛性が低下し、それ以降の低下は認められなかった。筋かい壁の場合は、初期剛性の低下率は20%程度であった。せっこう壁に関しては、半年経過後の試験において加力トラブルが生じたため、検討から除外した。

これらの結果より静的試験においては、時間経過に伴う含水率の低下は、最大耐力を上昇させ、初期剛性は低下させるという定性的な傾向を得た。

【壁倍率】

初期剛性と最大耐力を総合的に判断する指標として壁倍率と含水率の関係を調べた。その結果を表4-2-2-1に示す。

鴛海らの実験によれば、含水率の影響がない場合、面材系の耐力壁では、降伏耐力が壁倍率の算定因子であり、筋かい壁では、靱性を考慮した終局耐力が算定因子となる傾向を示すとの記述がみられる。筋かい壁の場合、2体の例外を除き壁倍率の4つの項目のうち、実験時の含水率が18%以下であれば、靱性を考慮した終局耐力が算定因子となり、18%より高いと降伏耐力が算定因子となる傾向を示した。

針葉樹合板壁の場合は、実験時の含水率が18%以下であれば、特定変形時の耐力 ($R=1/120$) が算定因子となり、18%より高いと降伏耐力が算定因子となる傾向を示した。またこの境目は、経年変化が0年（製作直後実験）と半年以上経過後実験であった。OSB壁の場合は、1体の例外を除き実験時含水率の値によらず降伏耐力で壁倍率は決定される傾向が認められた。

せっこう壁の場合も1体の例外を除き、OSB壁と同様に実験時の含水率によらず、降伏耐力で壁倍率が

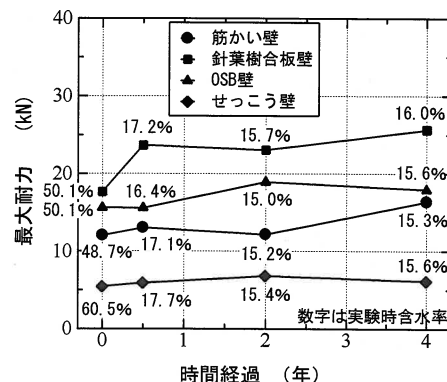


図 4-2-2-1 乾燥をともなう時間経過が最大耐力に及ぼす影響

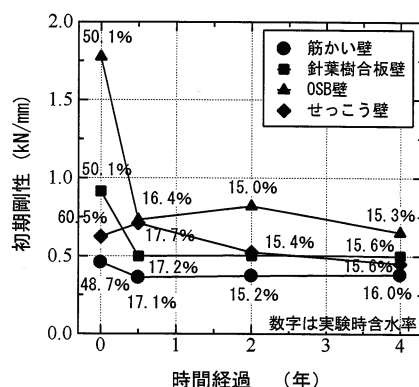


図 4-2-2-3 乾燥を伴う時間経過が初期剛性に及ぼす影響

表 4-2-2-1 壁倍率算定結果

試験体種類	経年 (年)	製作時平均含水率 (%)	実験時平均含水率 (%)	P(1/120) (kN/m)	Py (kN/m)	2/3Pmax (kN/m)	0.2Pu/Ds (kN/m)	壁倍率
筋かい壁	0	86.76	48.73	4.51	3.63	4.41	4.71	1.8
	0	26.18	24.73	5.15	5.68	5.68	4.26	2.1
	0	20.81	17.43	5.25	6.16	6.38	3.60	1.8
	0	17.31	16.17	5.20	5.28	5.77	4.48	2.2
	0.5	106.7	17.13	4.00	4.89	4.78	3.56	1.8
	2	103.9	15.17	4.67	5.39	4.46	3.49	1.7
	2	30.45	13.35	4.37	5.62	5.87	4.59	2.2
	2	21.55	12.63	5.91	7.14	6.34	3.02	1.5
	2	18.47	12.73	5.37	4.85	5.52	4.17	2.1
	4	102.6	15.95	4.27	6.04	6.00	4.92	2.1
	4	33.69	14.08	4.40	6.26	5.90	4.20	2.1
	4	20.35	14.18	4.87	5.30	5.72	3.24	1.6
針葉樹合板壁	0	80.14	50.14	5.35	5.14	6.47	6.29	2.6
	0	28.80	25.30	6.57	6.45	7.88	7.24	3.2
	0	28.90	23.32	7.52	7.03	7.78	7.87	3.5
	0	19.24	18.24	6.43	5.37	6.60	8.45	2.7
	0.5	66.48	17.18	5.66	7.19	8.67	5.85	2.8
	2	92.96	15.73	5.58	6.43	8.44	6.54	2.8
	2	31.16	13.02	6.72	7.50	9.24	7.53	3.4
	2	20.58	12.99	6.95	7.39	8.96	7.77	3.5
	2	27.69	13.06	6.62	7.20	8.98	7.40	3.3
	4	96.49	15.64	5.92	7.62	9.40	6.83	3.0
	4	32.06	14.34	6.24	7.47	9.38	7.16	3.1
	4	21.68	13.88	6.62	7.10	8.58	7.77	3.3
OSB壁	4	19.92	13.98	6.76	7.77	9.32	7.75	3.4
	0	91.26	50.07	5.26	4.36	5.71	6.32	2.2
	0.5	95.08	16.42	5.60	4.98	5.71	5.16	2.5
	2	90.97	14.99	5.78	5.85	6.94	5.20	2.6
	4	113.2	15.30	5.10	5.60	6.57	4.98	2.4
	4	31.18	13.73	5.33	4.92	6.25	5.66	2.5
せっこう壁	4	23.67	13.63	5.57	5.15	6.25	5.39	2.6
	0	107.3	60.47	2.23	1.91	1.99	2.76	0.9
	0.5	101.3	17.71	2.61	2.11	2.17	2.99	1.0
	2	98.85	15.40	2.64	2.45	2.50	2.62	1.2
	4	110.9	15.59	2.13	2.19	2.25	2.66	1.0

註) 壁倍率は、ばらつき係数を1として求めた値である。

決定された。

図4-2-2-4は、生材で構成した耐力壁の時間経過を伴う含水率の低下によって壁倍率がどの程度上昇するかを調べたものである。耐力壁製作直後の壁倍率に対する経年後の壁倍率比（以後増大係数と略す）は、筋かい壁で1.0倍、針葉樹合板壁で1.1倍、OSB壁で1.2倍、せっこう壁で1.2倍であった。

【耐力壁の動的性能】

図4-2-2-5に入力としてエルセントロNS波を用いた場合の耐力壁のはりで捉えた時刻歴応答加速度を示す。

人工乾燥材を用いた耐力壁の応答時刻歴において15秒近辺で再び応答加速度が大きく反応している。C-2の試験体においては、この近辺で層間変位が最大となっている。

加速度応答倍率、固有応答振動数および最大層間変位を表4-2-2-2に示す。平均含水率が15%台のC-2、C-5の場合、固有応答振動数は、1 Hz強の値を示し、最大層間変位は47mm程度で部材変形角にして1/58radとなった。生材を用いた耐力壁の固有応答振動数の平均は、0.86Hzを示し、最大応答変位は、60.1mmから69.2mm程度と人工乾燥材より大きく、部材変形角にして1/45rad から1/39radとなった。

この結果より入力エルセントロNS波100%においては、生材より人工乾燥材を用いた耐力壁の層間せん断力は大きい、層間変位は小さくなる傾向を示した。

【床の強度性能】

図4-2-2-6に床構面の荷重と中央変形量の関係を示す。床に関しては、スギの軸材にスギ構造用合板(JAS 2級、厚さ 12mm)をPNF2150釘で150mm間隔に留め付けた場合、破壊形態は、釘のパンチングアウトと引き抜きが半々であったが、軸材をベイマツ乾燥材にした場合は、全て釘のパンチングアウトであった。しかしながら、最大耐力はほぼ同じであった。この結果より、面材にスギ合板を用いる場合は、軸材は、未乾燥のスギ材を用いても、人工乾燥したベイマツ材を用いても強度性能に大きな差はないことがわかった。

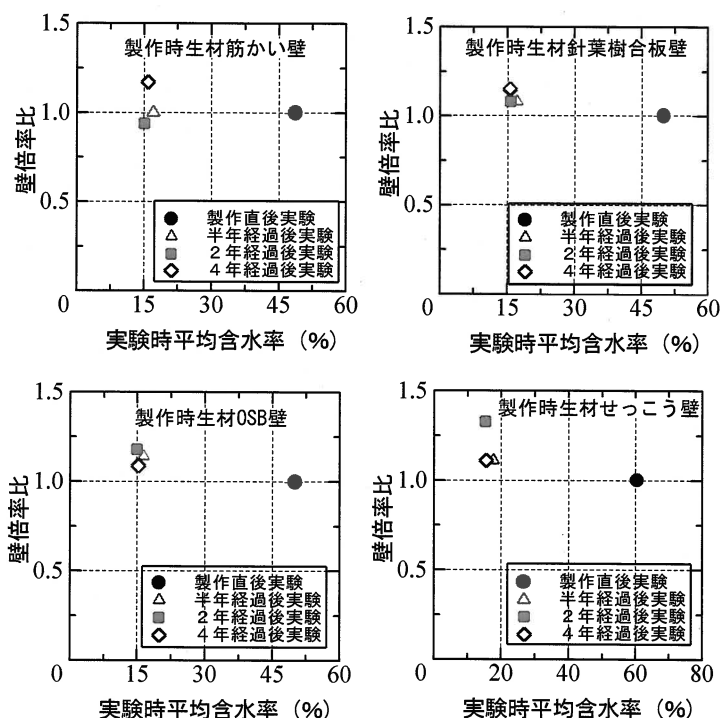


図4-2-2-4 生材で構成した耐力壁の経年に伴う壁倍率比の変化

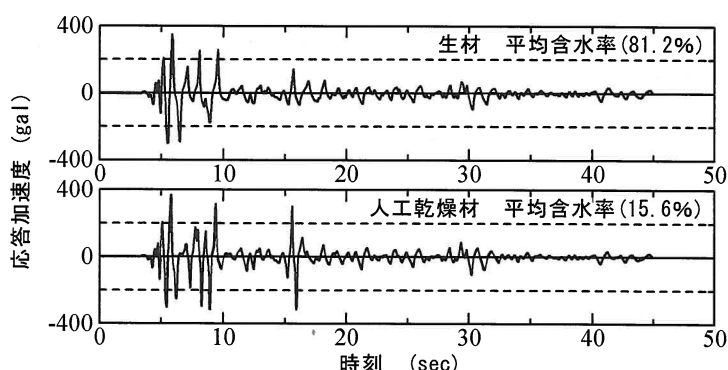


図4-2-2-5 加速応答時刻歴

表4-2-2-2 エルセントロNS波に対する応答値

	試験体名	平均含水率 (%)	加速度応答倍率	固有応答振動数 (Hz)	最大層間変位 (mm)
生材	A-1	46.3	0.81	0.89	69.2
	A-2	69.3	1.00	0.85	64.0
	A-3	57.6	1.02	0.84	61.2
	A-4	81.2	1.02	0.84	61.4
	A-5	49.5	1.02	0.88	60.1
人工乾燥材	C-1	18.2	0.97	0.85	56.1
	C-2	15.6	1.08	1.15	46.9
	C-5	15.6	1.16	1.09	46.8

次に釘間隔を通常の150mmから半分の75mm（高強度スギ床）にすることによって、最大耐力が29%上昇し、ベイマツ人工乾燥材とラワン針葉樹複合合板で構成した床（通常床）の耐力の9割程度まで高めることができた。また、初期剛性に関しては、37%程度向上させることができた。

さらに軸材は人工乾燥したベイマツ材を用い、面材をスギ三層ボードにした場合、通常床のおよそ1.2倍の耐力を有することがわかった。

これらの結果より、軸材にスギ生材を用いた場合には、面材にもスギ合板を用いた方が合理的であり、その際に釘のピッチは墨だしなしで通常ピッチの中間点に増し打ちするだけで、通常床の9割程度まで耐力を上げることが可能であることがわかった。また、さらなる高強度を求める場合には、軸材を人工乾燥したベイマツ材を用い、面材をスギ三層ボードにすると、通常床の1.2倍まで耐力を上昇することが可能となった。

オ 今後の問題点

筋かい壁に関しては、節を完全に除去することは事実上不可能なため、含水率の影響のみを求めることは困難であった。また、このデータは含水率が法律上規定されていない構造形式の試験体で実験を行っているが、法律上規定される構造形式へのデータのキャリブレーションが残されている。

カ 要約

経年変化による乾燥によって最大耐力は増加し、初期剛性は減少するという定性的傾向を把握することができた。また、製作時の壁倍率に対する実験時の壁倍率の比（増大係数）が求まった。

軸材にスギ生材を用いた床の場合、面材にもスギ合板を用いた方が合理的で墨だしなしで通常ピッチの中間点に増し打ちするだけで、通常床の9割程度まで耐力を上げることが可能である。

キ 参考文献

- 1) 山田文男、大橋好光、坂本功、松岡秀尚、凌克臣、董玉庫：乾燥度の違いによる2階建て在来軸組の水平加力実験「その1．筋交い耐力壁タイプ」、日本建築学会大会学術講演梗概集（九州）、129-130（1998）
- 2) 鴛海四郎、後藤隆洋、清水庸介：木質系耐力壁の試験・評価方法の検証、第52回日本木材学会大会研究発表要旨集、p195（2002）

（森林総合研究所構造利用研究領域 三井信宏、青井秀樹、青木謙治、杉本健一、神谷文夫）

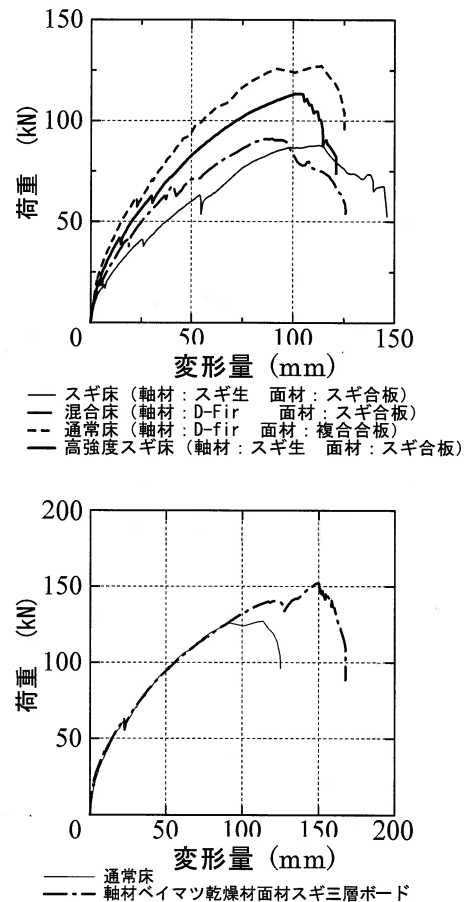


図4-2-2-6 床構面の荷重と中央変形量の関係

(3) 狂い防止等住宅部材としての要求性能を満たす乾燥材品質の明確化

ア 研究目的

現在、木造住宅に使われている製材の含水率は様々であり、要求される乾燥基準も部材によって様々である。したがって、建築後の部材による住宅性能の劣化を防止するには施工後の適正な含水率を確定する必要がある、そのための乾燥材の乾燥法・スケジュール別の乾燥度（含水率）の基準を明らかにすることが目的である。

イ 研究方法

(1) 乾燥材の環境条件下における形状変化調査

環境試験に供した試験材はスギとヒノキ心持ち背割りなしの正角材そしてホワイトウッド集成材の柱用材、これらは断面寸法 10.5cm×10.5cm、長さ 300cm である。スギ平角材は 10.5cm×21.0cm の梁用材、長さ 300cm である。試験に供する前に、含水率計（ケット社製 MOC02）により含水率を測定して、含水率約 6% から 25% を目安に、材面割れがなく通直な材を選択した。試験終了後、全乾法により試験材の含水率から全乾重量を換算して試験前の含水率を算出した。

試験材は、高温乾燥処理した柱材（スギ、ヒノキ）、低温予備乾燥 38℃ と人工乾燥 50℃ で仕上げた（以下低温乾燥材と呼ぶ）材面割れの無い柱材（スギ、ヒノキ）と梁材（スギ）、および市場に流通しているホワイトウッド集成材である。それらの試験材を、温度 20℃、関係湿度 65%（平衡含水率 12%）の条件下に 30 日間、ついで温度 20℃、関係湿度 30%（平衡含水率 6%）の条件下に 30 日にわたって環境試験室に放置し、10 日間ごとに形状変化を計測した。

計測方法は、含水率測定用に重量を計測、断面寸法は両端、中央の 3 ヶ所各 4 面の寸法をノギスにて計測した。曲がり材は材長に対する中央矢高を水糸と金尺によって測定し、各 4 面の最高矢高を集計して求めた。ねじれは各 4 面の最大を傾斜角度計によって求めた。

(2) 施工後に乾燥材の形状変化が及ぼす影響

住宅において内部クロス貼り施工後に、壁下地の変形等により不陸を生じることがある。本試験では、柱材の曲がりにより壁の中央部が室内側に張り出してきた状態を再現し、どのくらいで孕み出しを認知できるかを確認する。

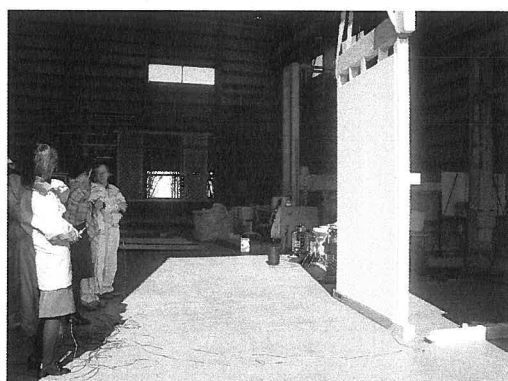


写真 4-2-3-1 クロス貼り壁試験体と観測状況

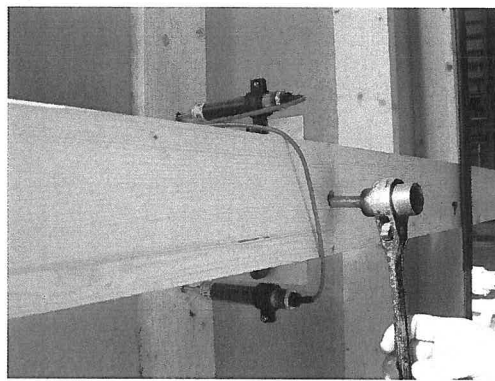


写真 4-2-3-2 クロス孕み出し方法
後側から、ボルトを回して押し出す。

昼間の太陽光線における室内クロス孕み出しの観測と夜間の照明下における室内クロス孕み出しの観測をする。昼間の試験概要は①クロス貼りをした試験体を太陽光のもとに鉛直に設置する（写真 4-2-3-1）。②試験体の中央部を後ろより押しだし、壁の孕みだしを再現する（写真 4-2-3-2）。③試験体の正面に、3m 離れて観測者が 5 名並び、壁の孕み出しを観察する。④壁の孕み出しを確認できた時点の変位量を計測値とする。試験体のパターンを、表 4-2-3-1 に示す。クロスの種類は、一般的なクロスで多少の凹凸とアイボリー色が付いているもの（クロス A）と、塗り壁調の物で表面は平滑、色は白色に近いもの（クロス B）の 2 種類を用意した。

夜間の試験概要は①照明は蛍光灯とダウンライトの 2 種を用いて、それぞれ、柱材の高さに吊るし、壁際と、50 cm、100 cm の距離ごと照明を吊るして観測する。②観測者は、女 6 人、男 6 人により、別々に観測する。③壁の孕み出しを確認できた時点の変位量を計測値とする。

表 4-2-3-1 試験パターン

試験パターン	太陽光方向	クロス種類	試験回数
1	平行	クロス A	5 回
2	45 度		3 回
3	平行	クロス B	5 回
4	45 度		3 回

ウ 結果

（1）乾燥材の環境条件下における形状変化

高温乾燥により処理されたスギ柱材の含水率 20% 以上は、環境試験期間 2 ヶ月内に十分な形状変化を得るまで含水率が低下しなかった。そこで、スギ柱材 16 本（試験前の含水率 9%~18%）について、環境試験期間内に生じた含水率減少量と形状変化との関係を検討した。

含水率減少と曲がり、断面寸法変化（収縮率）と傾斜角（ねじれ）の変位量との関係を図 4-2-3-1、4-2-3-2、4-2-3-3 に示す。いずれの形状変化試験においても強い相関があり、これらの回帰直線式から変位を予測することは有効であるといえる。

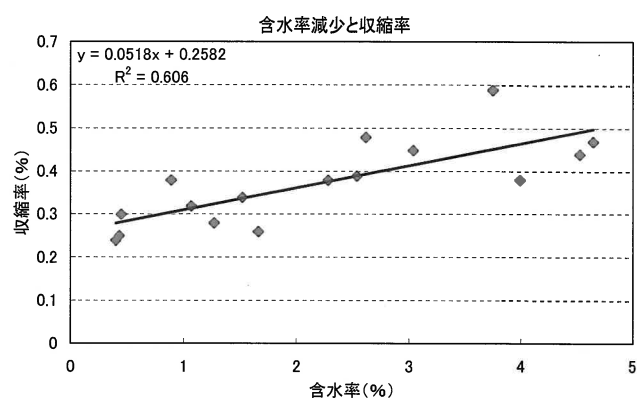


図 4-2-3-1 含水率減少と収縮率
（断面寸法変化）

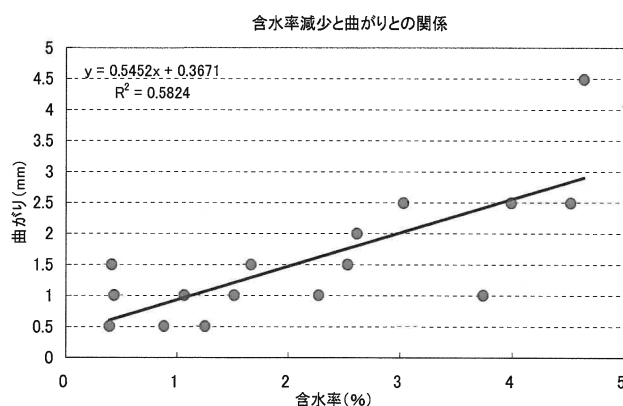


図 4-2-3-2 含水率減少と曲がり（中央矢高）

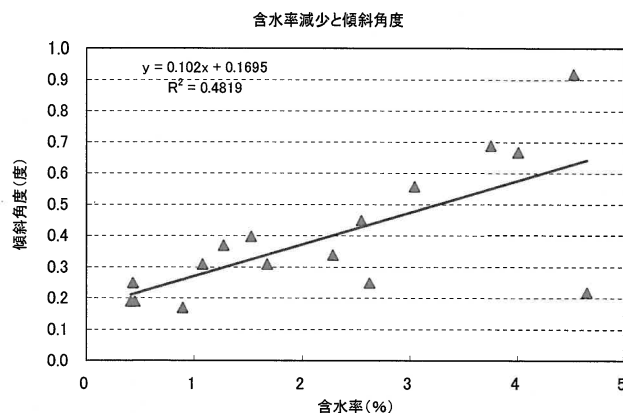


図 4-2-3-3 含水率減少とねじれ（傾斜角）

低温乾燥材の試験前含水率はスギ柱材が平均 18.7%、ヒノキ柱材が平均 18.0%、スギ梁材が平均 23.4%であった。各試験材は各 5 本とした。これらの低温乾燥材は室内温度 20℃、関係湿度 30%の条件下において、全ての試験材に材面割れが発生した。

スギ柱材の 5 本すべての試験材に材面割れが発生した状態（写真 4-2-3-3）と各試験材の材面割れ面積を示す（表 4-2-3-2）。材面割れが発生したことにより、断面寸法において割れた材面と割れない材面に伸長と収縮の差が大きく生じた。（図 4-2-3-4）。収縮は平均 2.6%、最大で 3.4%、伸長は平均 2.1%、最大 3.2%であり、割れによる断面寸法の形状変化が大きいことが認められた。また、ねじれにおいても平均 3.5 度であり、これは 6.4mm の高さに相当する大きな形状変化量となった（図 4-2-3-5）。

スギ梁材の 5 本のすべての試験材の 21.0cm 幅材面に割れが発生した（写真 4-2-3-4）。これにより、割れが多く発生した梁背 210 材面の平均収縮率は 1.2%を示し、最大は 1.7%、約 3.6mm であり、割れが少ない幅 105 材面の平均収縮率は 2.8%を示し、最大は 3.4%、約 3.6mm の収縮であった（図 4-2-3-6）。

表 4-2-3-2 各スギ柱試験材の材面割れの状況

含水率と材面割れ					
試験材番号	1	2	3	4	5
試験前含水率(%)	18.2	18.8	18.6	18.0	19.7
試験後含水率(%)	12.0	12.7	12.3	12.1	13.0
材面 1 mm2	5×700	3×3000	4×800	4×2000	5×1200
材面 2		1×400			3×500
材面 3			3×400		
材面 4	4×2300		3×1900	5×900	3×1600
合計面積cm2	127	94	101	131	148

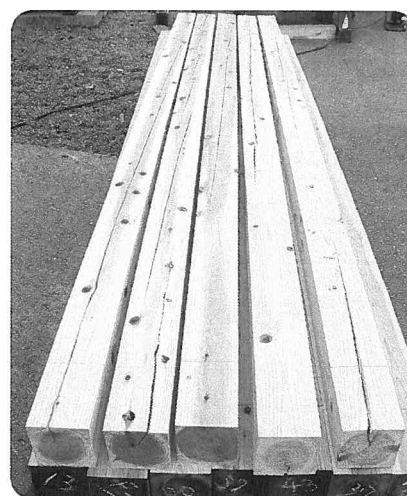


写真 4-2-3-3 スギ柱材の試験中に発生した材面割れ

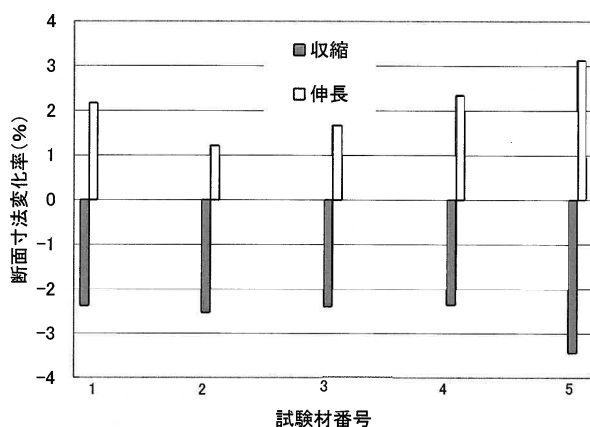


図 4-2-3-4 スギ柱材の割れによる収縮と伸長の増大

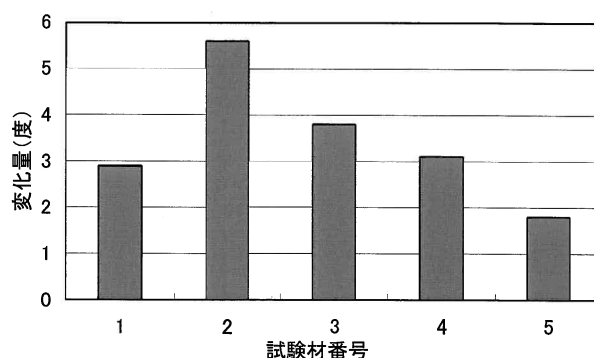


図 4-2-3-5 スギ柱材の割れによるねじれの増大

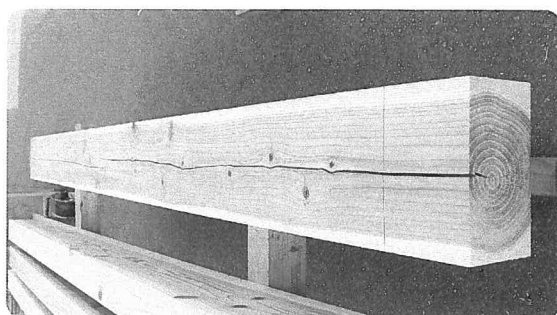


写真 4-2-3-4 スギ梁材の材面割れ

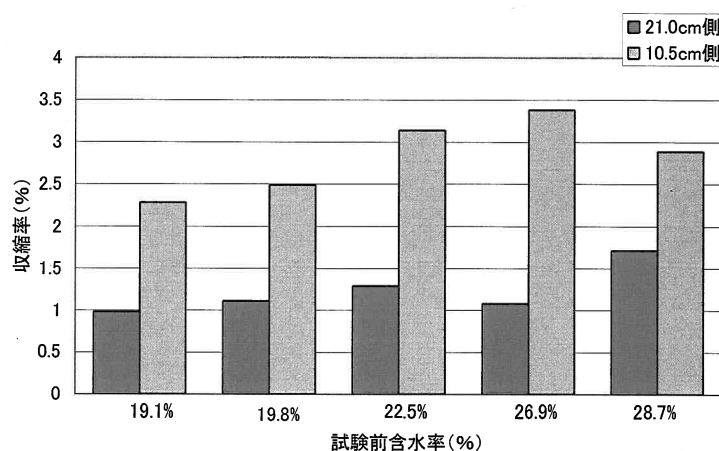


図 4-2-3-6 梁背 210 材面と幅 105 材面の試験前含水率と収縮率

(2) 施工後に乾燥材の形状変化が及ぼす影響

昼間の太陽光における室内クロスの子み出しは、太陽光の方向については、壁に平行になるほど子み出しが視認しやすくなる為、平行方向をメインに計測したが、参考として 45 度で光が入る場合も計測した。施工後の柱材が中央部において壁下地材側の曲がりにより、室内クロスの子みだしの視認を太陽光の下で観測した結果、次のようなことが確認された (図 4-2-3-7)。太陽光が平行に入った場合は、子みだしが 2mm に近づく辺りより認識され始め 6mm を越えるとほとんどの人が子みに気がつく。45 度で光が入った場合は、5mm を越えた辺りで認識され始め、10mm を越えても確認できない場合がいくつかあった。太陽光の方向については、45 度より平行の方が視認性はよい。

夜間の室内照明下における室内クロス子み出しの観測は、ダウンライトの壁際の観測のみが 4mm を超えたあたりから認識され始めたが、その他の位置および蛍光灯下においてはほとんど視認できなかった。その結果、太陽光に比べて、視認性は大きく低下した。

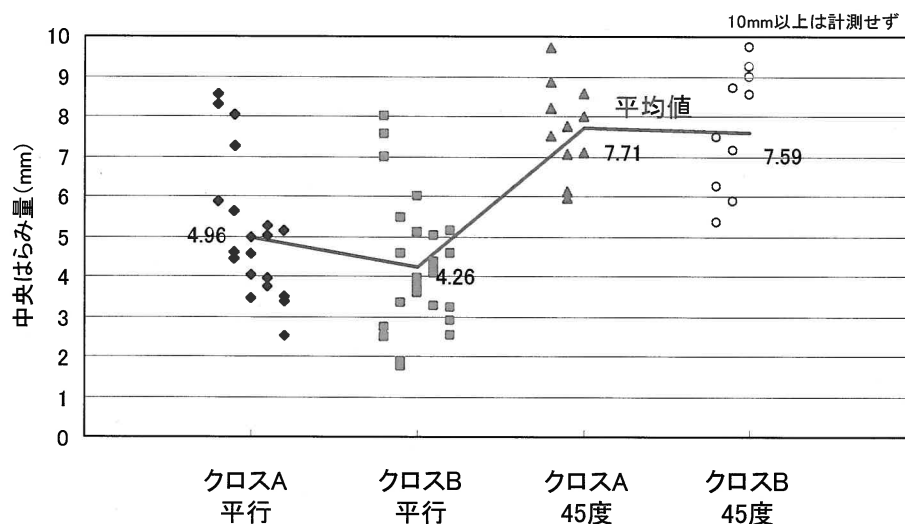


図 4-2-3-7 太陽光線下の昼間におけるクロス子み出し観測結果

エ 考察

環境試験期間内の高温乾燥材の含水率減少と形状変化とは強い相関がある。これにより、施工後に柱材の置かれた平衡含水率 6%の環境により、施工前の含水率 15%以上の柱材が 12%^{1, 2)}になった時点の含水率減少に伴う形状変化の予測を表 4-2-3-3 に、各試験材の環境試験後の形状変化比較を表 4-2-3-4 に示す。

スギ高温乾燥材の含水率 12%は集成材と比較して形状変化に大きな違いはない。低温乾燥材では含水率 18%であったことにより試験中に材面割れが発生し、高温乾燥材と比較して断面寸法と傾斜角の形状変化が大きくなったものと考えられる。ヒノキについても低温乾燥材は材面割れが発生し、スギ低温乾燥材と同様に断面寸法と傾斜角に影響をしたと考えられる。一方、スギ高温乾燥材では材面割れは生じていないが曲がりとは同含水率 18%の低温乾燥材と比較して大きい。

各試験材の形状変化から柱材として性能を満たす適正な含水率を確定するために、クロス孕み出しの観測データから柱材の形状変化の限度を考察した。クロス B の太陽光線に平行の孕み出しの平均視認は 4.25mm である。この値をトラブルの起こる形状変化の限度とすれば、高温乾燥材では 20% 含水率形状変化の予測値の曲がり 4.7mm は限度外となる。低温乾燥材の含水率 18%では材面割れが発生し、2.6%収縮と 2.1%伸長の断面寸法変化とねじれ 3.4 度の高さ 6.2mm となり、柱材として適用されない。また、材面割れによるこの様な形状変化により、壁下地材（石膏ボード）の隙間や受け棧の緩みなどの不具合が起こることが懸念される。

スギ梁材は平均含水率 23.4%もあったこともあり、梁背に材面割れが生じた。これは、高含水率による収縮の増大と材面割れによる収縮の助長により大きな形状変化になったと考えられる。

表 4-2-3-3 含水率別柱材の形状変化予測

施工前	施工後	施工前-後	断面寸法	中央矢高/3r	傾斜角
含水率(%)	含水率(%)	含水率(%)	収縮率(%)	曲がり(mm)	ねじれ(度)
20	12	8	0.67	4.7	0.99
18	12	6	0.57	3.6	0.78
15	12	3	0.41	2	0.48

表 4-2-3-4 各柱材の環境試験後の形状変化比較

	試験前	試験後	断面寸法	中央矢高	傾斜角度
試験材	含水率(%)	含水率(%)	収縮率(%)	曲がり(mm)	ねじれ(度)
集成材	12.1	10.6	0.4	0.6	0.3
スギ高温乾燥材	12.0	10.0	0.1	1.1	0.4
スギ低温乾燥材	18.7	12.4	2.6	1.8	3.4
ヒノキ高温乾燥材	13.0	11.8	0.3	0.5	0.6
ヒノキ低温乾燥材	18.0	14.0	1.5	1.7	1.6

オ 今後の問題点

乾燥材の寸法変化について定量的な数値が得られた。曲がり材については検討を行わなかったが、乾燥材の施工前に既に曲がりがあるものは施工後に増大すると推測される。したがって、適正含水率を確定するためには、初期の許容基準の曲がりを加算した形状変化を検討する必要がある。

カ 要約

乾燥材が狂い防止等住宅部材としての要求性能を満たすためには、施工後の適正な含水率を確定する必要がある。そのための乾燥材の乾燥法・スケジュール別の乾燥度（含水率）の基準を明らかにすることを目的とした。

スギとヒノキ芯持ち背割りなしの高温乾燥した柱材、低温乾燥したスギ柱材と梁材、ヒノキ心持ち背割りなしの柱材を環境条件、室内温度 20℃、関係湿度 65%に 30 日間、ついで室内温度 20℃ 関係湿度 30%の下で 30 日間放置した場合の形状変化を調査した。比較としてホワイトウッドの集成柱材についても測定を行った。

施工後の形状変化による限度を調査するため、壁体に貼られたクロスの柱の変形による孕み出しを再現して、どのくらいで認知できるか観測した。

これらの結果は以下のように要約される。

- (1) 高温乾燥材の 12%含水率柱材の形状変化は集成材と同等であったが、高温乾燥材 15%以上では曲がりの形状変化が集成材と比較して大きい。
- (2) 低温乾燥材の 18%含水率のスギ柱材は室内温度 20℃、関係湿度 30%条件下では材面割れが生じたことにより、収縮と伸長の断面寸法変化とねじれの傾斜角が著しく大きくなった。
- (3) クロス貼り施工試験の柱の曲がりによるクロス孕み出しでは 4.26mm が視認の平均であった。
- (4) 高温乾燥材の 20%含水率材は曲がりの形状変化が大きくなり、クロスの目地切れや孕み出しが認識されるなど不具合を生じる懸念があり、柱材としては適さない。
- (5) 低温乾燥材の 18%含水率柱材は、断面寸法と傾斜角の形状変化が大きく、クロスの目地切れや孕み出し、建て付けの不具合を生じるなどの懸念があり、柱材として適用できない。
- (6) 低温乾燥の高含水率のスギ梁材は梁背面に材面割れが生じる。このため、高含水率による収縮の増大と幅方向の収縮の助長により大きな形状変化となり、強度低下、接合の緩みや床鳴りなどが懸念される。
- (7) 高温乾燥材は低湿度環境条件下においても材面割れは起こり難い。
- (8) 乾燥材の施工後の狂いは材面割れによる影響が大きく、このため施工後に不具合の原因となるものと考えられ、施工後に材面割れを生じない乾燥材を供給することが重要である。

キ 引用文献

- 1) 河崎弥生：第 51 回日本木材学会大会研究発表要旨集、p128 (2001)
- 2) 信田聡、斉藤周逸、吉田孝久、河崎弥生、西村勝美：第 52 回日本木材学会大会研究発表要旨集、p125 (2002)

(住友林業株式会社筑波研究所 植原 平)

(4) 乾燥プロセスの環境負荷評価

ア 研究目的

木材は一般に他材料に比較して加工エネルギーが小さく、環境負荷の小さい材料であることが知られている。このことを適切な評価方法で定量的に評価することにより、持続可能な社会の形成に向けてより良い木材利用のあり方を考えていくことが必要である。

木質系材料の製造エネルギーの中では乾燥にかかるエネルギーが比較的大きい。環境に与える負荷が小さいことがこれからの材料選択の決定要素の1つとなるであろうことを考慮すると、木材乾燥における環境負荷を定量的に評価し、環境負荷のより小さい乾燥法を選択すること、またはそれぞれの乾燥法を環境負荷をより低減させる方向に改善していくことが今後生産者にとって不可欠のこととなると考えられる。

本研究の目的は木材の乾燥プロセスにおける環境負荷を、二酸化炭素(CO₂)排出量を指標として評価するための方法を確立することである。また、乾燥材のライフサイクル全体を通しての環境負荷を同じくCO₂排出量を指標として評価する方法も合わせて検討する。これにより生産者が比較的簡易に自工場で生産している乾燥材の環境負荷を知り、他と比較したり、改善点を抽出したりすることができる環境負荷評価方法の開発を目的とする。

イ 研究方法

(1) 評価手法の検討：製品の環境負荷を評価するために一般的に行われている手法について調査し、本研究で確立を目指す評価手法の枠組みを決定した。その後現地調査を実施し、現場で簡易に得られるデータを用いてCO₂排出量を算出する実際的方法について検討した。また、乾燥および加工に要するエネルギーの消費によるCO₂排出量を算出するために必要となる、エネルギー源別CO₂排出原単位について調査を行い、本研究において使用するデータの整備を行った。

(2) 木材乾燥過程におけるCO₂排出量の算出：乾燥条件の違いが環境負荷へ及ぼす影響を検討するために、1回の乾燥にかかるエネルギーの調査データ¹⁾を用いてCO₂排出量を算出し、各乾燥条件との関係を検討した。また単位乾燥材積あたりのCO₂排出量を求めた。

(3) 環境負荷評価の実施：乾燥製材を生産している国内17工場を対象に製品生産量およびエネルギー消費量のアンケートを行った結果に対して、(1)で検討した評価方法を用いてCO₂排出量の算出を行い、各工場における環境負荷の定量的評価を試みた。

(4) 現地調査の実施：国内3工場を対象に現場で簡易に得られるデータにどのようなものがあるかについて聞き取り調査を行い、評価手法がより実地的なものとなるようフィードバックを行った。また現場データに本研究で考案した評価手法を適用し、評価可能かを確認した。

(5) 乾燥材のライフサイクルにおける環境負荷評価のために、乾燥材と未乾燥材の輸送におけるCO₂排出量原単位の試算を行った。

ウエ 結果と考察

(1) 評価手法の検討：製品の環境負荷評価手法として現在最も一般的に行われているのはライフサイクルアセスメント(LCA)と呼ばれるものである。当初はその一部分であるライフサイクルインベントリー分析の考え方を基本として、乾燥プロセスの各過程におけるCO₂排出量を積み上げてその乾燥法の環境負荷とすることを考えた。その後現地調査を行ったところ、各過程の詳細なデータを基とした積み上げは現場では困難なことが判明したため、評価指標はCO₂排出量のままとし、現場で比較的簡易得られるデータから評価を行う方法を以下のように考案した。

① 評価は図4-2-4-1に示すフローに従う。

② 図4-2-4-2に示すデータシートに月別製品生産量と消費エネルギー量を記入する。

③ 消費エネルギーのうち、電力、軽油は生産品目別生産量の比で、各製品製造のために消費したものとして振り分け、重油、灯油は乾燥のみのために消費したものとする。

④ 表4-2-4-1に示すCO₂排出原単位をそれぞれのエネルギー使用量に乘じ、CO₂排出量を算出する。

なお排出原単位については、あるエネルギーを使用することによる直接排出だけではなくて、間接的影響も含めて考慮するために、産業連関表を利用したデータを用いることとし、公表されている各種データベースから、物量あたりの排出量データを得ることができる日本建築学会によるものを採用することとした。

(2) 乾燥過程におけるCO₂排出量：乾燥過程におけるCO₂排出量に影響を及ぼす因子を分析した結果、図4-2-4-3、

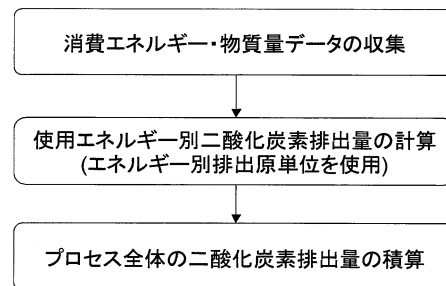


図4-2-4-1 評価の概念図

表4-2-4-1 二酸化炭素排出原単位²⁾

電力	0.533	kg-CO ₂ /kwh
軽油	2.921	kg-CO ₂ /l (1ℓ)
プロパンガス	3.171	kg-CO ₂ /kg
灯油	2.677	kg-CO ₂ /l (1ℓ)
重油	2.835	kg-CO ₂ /l (1ℓ)
木くず	0.112	kg-CO ₂ /kg

区分		平成 年					計
		4月	5月	6月	7月		
消費エネルギー	電力(kWh)						
	軽油(l)						
	プロパンガス(kg)						
	重油(l)						
	灯油(l)						
	木くず(t)						
生産品目	製材(m ³)						
	チップ(m ³)						
	集成材(m ³)						
	乾燥材(m ³)						

図4-2-4-2 データシート

4-2-4-4 に示すように重油・灯油といった燃料については水分蒸発量と、電力については乾燥時間との相関が認められた。また、図 4-2-4-5 に示すように乾燥温度によって水分蒸発量あたりの CO₂ 排出量に違いが見られ、高温乾燥の方が中温乾燥に比べて単位水分蒸発量あたりの CO₂ 排出量が多くなっていた。これらをもとに高温乾燥と中温乾燥における排出量の試算を行ったところ、高温乾燥で中温乾燥のより 16 日以上乾燥日数を短縮できれば排出量が少なくなるという結果となった。図 4-2-4-6 に示すように実際の乾燥例でも乾燥温度により排出量が異なる傾向が認められた。全体の平均をとった結果、本調査における木材乾燥過程の CO₂ 排出量は約 120kg-CO₂/m³ であった。

(3) 環境負荷評価の実施：国内 17 工場を対象に 1) で検討した方法で、CO₂ 排出量の評価を行った。図 4-2-4-7 に乾燥材および未乾燥材の単位生産量あたり CO₂ 排出量の関係を示した。乾燥材の単位生産量あたり CO₂ 排出量は、工場の製品生産量(工場規模を表す)によって異なる傾向にあったが、未乾燥材はその傾向は認められなかった。本調査においては乾燥材製造による CO₂ 排出量は、約 150kg-CO₂/m³ であった。

(4) 現地調査：現地調査を行った工場について (1) で検討した方法を用いての単位生産量あたりの排出量を算出したところ、38kg-CO₂/m³~76kg-CO₂/m³ となった。これは乾燥材以外も含んだ全製品の平均的な値であるので妥当であると思われる。また乾燥材の製造に伴う排出は月により約 73kg-CO₂/m³ から 167kg-CO₂/m³ の開きがあったが、これは燃料のまとめ買いなどの影響もあると考えられる。図 4-2-4-8 に示すように月別の推移をみることで工場の環境負荷減少を検討することができる可能性もあると考えられた。

(5) エネルギー・経済統計要覧によると、貨物部門の自動車におけるエネルギー消費原単位は 3,788kJ/t・km(98 年度)である。軽油を用いて木材を陸輸すると仮定すると、CO₂ 排出原単位は 0.29kg-CO₂/t・km(1t を 1km 運ぶと 0.29kg-CO₂ の排出)となる。例として比重

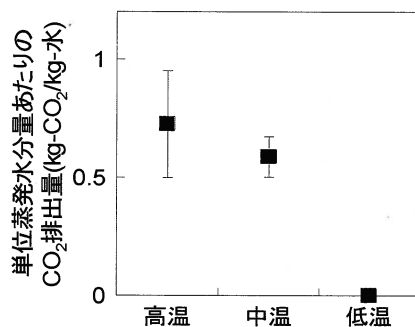


図 4-2-4-5 乾燥温度による水分蒸発量あたりの CO₂ 排出量

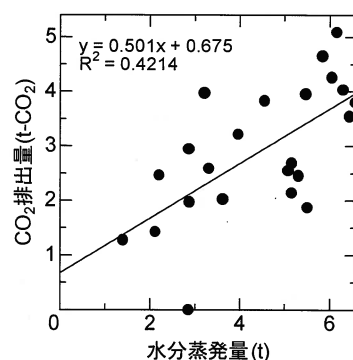


図 4-2-4-3 水分蒸発量と燃料消費による CO₂ 排出量の関係

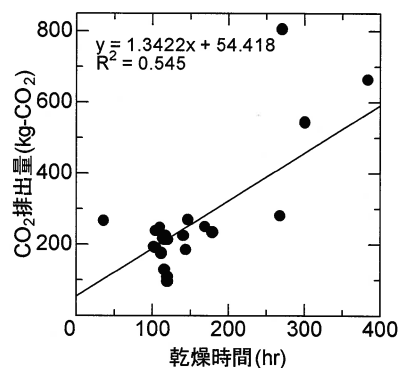


図 4-2-4-4 乾燥時間と電力消費による CO₂ 排出量の関係

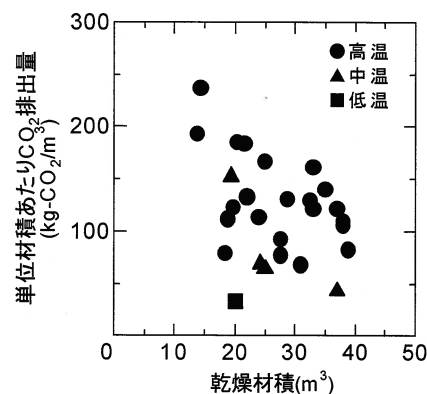


図 4-2-4-6 乾燥材積と単位材積あたり CO₂ 排出量の関係

0.35、含水率 100%の未乾燥材と、同じ材を含水率 15%まで乾燥させた材を運搬したときの運送エネルギーによる排出を試算したところ、未乾燥材で $0.20\text{kg-CO}_2/\text{m}^3\cdot\text{km}$ 、乾燥材で $0.12\text{kg-CO}_2/\text{m}^3\cdot\text{km}$ となり、乾燥材の場合には未乾燥材の約 6 割の排出となることが分かった。

オ 今後の問題点

本研究では、乾燥材の生産現場にて現状で得られるデータに基づき、 CO_2 排出量を簡易に算出することのできる方法について検討したが、今後はより厳密に LCA の手法に沿って乾燥材生産に伴う環境影響を評価することも必要であると考えられる。各種エネルギー源消費量については、様々な条件で乾燥を行った際の実測値に関してデータの蓄積が必要であると考えられる。また乾燥材生産業全体の傾向を把握するために、本研究で提案した調査法を用い、長期的な調査を行うことも有用であると思われる。

カ 要約

木質系材料の製造エネルギーのうち比較的多くのエネルギーを消費する乾燥過程について、エネルギー消費による環境負荷を二酸化炭素 (CO_2) 排出量を指標として定量的に評価する手法の開発を目的とした。特に生産者が本格的な LCA を実施する前段階として、簡易に得られるデータを用いて自工場で生産する乾燥材の環境負荷を把握することができるようなものを目指した。結果として、一般的な工場で比較的簡易に得られるデータから環境負荷評価を行うことができる手法を確立し、実際に木材乾燥による CO_2 排出量、また乾燥材製造に伴う CO_2 排出量を定量的に評価することができた。

キ 引用文献（または参考文献）

- 1) 日本住宅・木材技術センター：建築用針葉樹材の乾燥に関する資料集(III) (2000)
- 2) 日本建築学会：建物の LCA 指針(案) (1999)
- 3) (社)未踏科学技術協会エコマテリアル研究会編：LCA のすべて－環境への負荷を評価する－、工業調査会、東京 (1995)
- 4) LCA 実務入門編集委員会編：LCA 実務入門、産業環境管理協会、東京 (1998)

(森林総合研究所構造利用研究領域 恒次祐子)

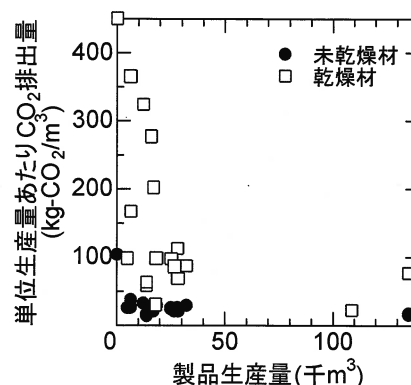


図 4-2-4-7 製品生産量と単位生産量あたりの CO_2 排出量の関係

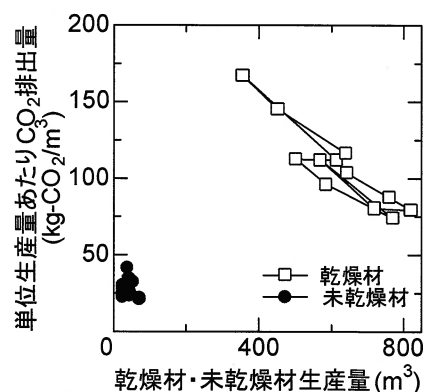


図 4-2-4-8 現地調査対象工場における月別製品生産量と単位生産量あたりの CO_2 排出量の関係

(5) 用途に対応した性能確保のための乾燥処理技術の体系化

ア 研究目的

乾燥材への需要を背景として、高温乾燥をはじめとする様々な乾燥方法による乾燥材生産が行われるようになり、乾燥方法には製品用途による適正な評価基準が求められている。また、乾燥材の品質評価についても、従来の割れや材色等の見掛けだけではなく、寸法安定性、耐久性、強度性能、接合性能、構造性能などの住宅の性能と連携した総合的な評価が必要になっている。乾燥コストの係るスギ材であるがために、建築部材としての適性評価に基づく木材乾燥処理条件の総合的な評価と効率的な生産システムの構築とが求められている。このため、スギ材の用途や求められる性能に応じた乾燥技術の適正な評価とそのシステム化を図ることが目的である。

イ 研究方法

蒸気加熱式乾燥機における乾燥スケジュール、蒸煮処理や過熱蒸気処理等の熱処理が材色、ヤング率及び強度、耐久性および耐蟻性などに与える影響に関する情報収集を行った。また、蒸気式および蒸気高周波複合乾燥による柱材および平角材の乾燥スケジュールおよびコストに関する情報を収集した。次いで、乾燥温度、処理時間などを処理条件として取り上げ、それぞれの評価指標（強度性能、耐蟻性、平衡含水率、材色など）との関係を検討し、用途別の品質基準と処理条件との関係をまとめた。特に構造用材については、木材の熱劣化による強度および耐蟻性の低減を勘案し、適切な処理時間について検討した。また、原木丸太の選別技術、乾燥材の品質向上技術、乾燥時間の短縮、乾燥コスト等の当プロジェクト成果に基づいて、効率的なスギ乾燥材生産システムについて検討した。

ウエ 結果と考察

1) 高温処理における品質確保

一般的に、熱処理が性能変化に与える影響は、木材成分の熱分解によって生じ、高温湿熱条件（とくに高含水率かつ処理温度 100℃以上、もしくは処理湿度 100%かつ温度 100℃以上）によって促進されることが知られている。ちなみに、図 4-2-5-1 には、強度性能の指標のうち MOR および仕事量の変化率と飽和蒸気処理時間との関係（無欠点小試験片）を文献値¹⁾（ベイマツ）とともに示した。MOR と比較して仕事量は熱処理の影響を受けやすいことが示され、またいずれの指標も処理時の温度（材温）に影響されることが明らかである。そこで、高温乾燥条件の評価指標としての湿熱処理時間 t を、蒸煮時間 + 100℃以上での処理時間とし、ただし含水率 30%までの処理時間 > 100℃以上での処理時間のとき、 $t = \text{全処理時間} \times 1/2$ と定義した。例えば、12 時間の蒸煮処理後 120℃一定で高温乾燥する場合、約 100～105℃での湿熱処理を 50 時間程度行ったことに相当する。表 4-2-5-1 は、各種乾燥条件にお

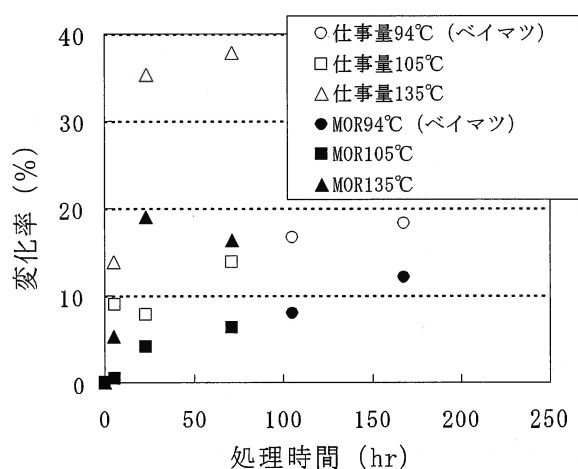


図 4-2-5-1 飽和蒸気処理時間と強度等の変化率との関係

ける湿熱処理時間と各種性能変化に大きな差が生じる時間(境界時間)とを比較したものである。なお、境界時間は、無欠点の小試験体に基づくものである。一部の乾燥条件に、性能維持の境界時間を越えるものもあり、温度と処理時間に限界があることを示している。ちなみに、実大の柱材についての結果(第4章1.(2))では、通常120℃以下の乾燥であれば性能変化への危険性は高くはないことが示されており、ここでの推定結果を裏付けている。

表 4-2-5-1 構造用柱材の高温処理条件と境界湿熱処理時間

乾燥方法	乾燥温度条件	乾燥日数	湿熱時間 (hr)		境界処理時間 (hr)		
			全体	表層	MOR	たわみ量	耐蟻性
圧力制御式	高温130℃	3	48	24	30	15	39
	高温115℃～減圧(50℃)	3	24	12	150	50	57
熱気・高周波複合	高温120℃～中温80℃	4～5	48	36	150	50	57
蒸気式	高温120℃一定	4～5	48	24	150	50	57
	高温120℃～高温110℃	5	48	24	150	50	57
	高温120℃～中温90℃	6	36	24	150	50	57

- 1) 初期MC100%～目標MC20%
- 2) 乾燥日数には降温工程を含まない
- 3) 湿熱時間は、平均含水率30%以上で材温100℃以上での処理時間
- 4) MORおよびたわみ量の境界処理時間は低減率10%までの処理時間、耐蟻性は自然乾燥材と有意差が生じる時間で、いずれも小試験体による結果に基づく。

2) 心持ち材の割れ抑制の条件

乾燥製品の品質確保のためには、少なくとも割れを抑制することが必要であり、これまでに割れ抑制のための種々の乾燥条件が明らかにされている。すなわち、心持ち材の材面割れを防ぐには、蒸気式乾燥機による高温低湿処理もしくは高温加圧過熱蒸気処理によって材面に高温セットを形成させる処理が有効であり、一方で内部割れを防ぐには引き続き乾燥工程において材温の低下等による乾燥過程の制御が必要である。材面・内部ともに割れを抑制するために、当プロで検討された主な乾燥条件を表 4-2-5-2 に示す。

表 4-2-5-2 各種乾燥処理条件における仕上がり効果

乾燥方式			温度（℃）	乾燥日数の目安（日）		割れの抑制効果		処理後含水率
						表面割れ	内部割れ	
圧力制御式	単一	高温過熱蒸気乾燥	130	3		○	○	○
	組合わせ	過熱蒸気前処理	130	1	3	○	○	○
		高周波加熱・減圧乾燥	50～60	2				
	組合わせ	過熱蒸気前処理	140	0.25	10	○	○	○
	蒸気式中温仕上げ乾燥	90	10					
組合わせ	過熱蒸気前処理	140	0.25	90～150	○	○	△	
	自然乾燥	10～30	120～150					
蒸気式	単一	高温前処理	120	1	7	○	○	○
		中温仕上げ乾燥	90	6				
	組合わせ	蒸気式高温前処理	120	1	4	○	○	○
		高周波加熱・減圧乾燥	50～60	3				
	組合わせ	蒸気式高温前処理	120	1	90～150	○	○	△
	自然乾燥	10～30	100～120					
マイクロ波式	組合わせ	マイクロ波加熱乾燥 調湿	100～110 50～60	50サイクル	3	△	○	○

3) 用途区分とその処理条件・方法

乾燥方法・条件は、求められる乾燥材の品質や価格、生産コスト、生産を取り巻く社会環境等に基づいて決定される。表 4-2-5-3 に、乾燥条件、操作等についての様々な検討結果に基づいて、乾燥方法・条件の評価指標と乾燥条件選択のための基準や考え方を示した。表 4-2-5-4 には、乾燥材の品質や生産の効率性を勘案して、適性と思われるスギ材の用途別の乾燥処理方法を示した。

表 4-2-5-3 乾燥方法・条件の評価指標と乾燥条件選択のための基準

乾燥条件の評価基準			評価指標	条件選択の基準等
品質の面	部材の性能	強度	曲げ強さ等	乾燥温度130℃、処理時間
		脆弱性	最大たわみ量	乾燥温度120℃以下
		耐朽性	重量減少率	乾燥温度の限界なし
		耐蟻性	重量減少率	乾燥温度120℃以下
		寸法安定性	平衡含水率	高温有利
	外観等	材色	a, b, L*	乾燥温度60℃以下
		割れ	材面割れの数・幅・長さ	高温熱処理効果、内部割れ抑制、初期含水率
		狂い	狂い量	選別効果、操作
	その他	接合・構造性能	接合強度、剛性	内部割れの抑制、部材強度、含水率
		TVOC	放散量	高温有利
コスト面	乾燥経費	エネルギー費	消費熱量、乾燥日数、生産規模	乾燥温度の効果、廃材利用効果、天然乾燥との組み合わせ効果、選別
		設備費	熱効率	低温有利
		人件費	自動化・省力化	—
		維持費	耐久性	低温有利
その他	社会的価値	環境負荷	CO2排出量	—
	安全性	住環境への影響	VOC排出量等	低温有利

表 4-2-5-4 用途区分とその処理条件・方法

材種・用途		工程	原木の選別	製材	製材選別	乾燥処理		品質の評価等	備考
						前処理	乾燥・仕上げ		
平角	梁・桁材	通直材	自動木取り 自動製材	重量選別	蒸煮・高温処理	中温・高周波	含水率、強度	高周波複合	
正角材	管柱 土台	通直材	自動木取り 自動製材		天然乾燥	中温	含水率、強度	蒸気式（中温）、 弱減圧可	
	管柱 土台	通直材		重量選別	蒸煮・高温処理	中温	含水率、強度	高温	
	管柱 土台	通直材		重量選別	蒸煮	過熱蒸気 過熱蒸気・減圧	含水率、強度	圧力容器、廃材利用、発電	
	化粧柱	通直材	背割り加工			低温	含水率、材色	除湿可	
板材	造作材 下地用材	通直材 曲がり材	自動木取り 自動製材		天然乾燥	中温	含水率、材色		
	ラミナ	通直材 曲がり材	曲がり挽き	重量選別	天然乾燥	中温	含水率、強度		
丸太	建築用	通直材			高温処理 天然乾燥	マイクロ波 中温 天然乾燥	含水率		
効率化・高品質化の条件		材質の評価 乾燥歩止り	製材・乾燥 歩止り向上	選別基準の 適正化	割れの抑制、含水率の均一化 省エネ化、高速化		含水率測定法の 適正化		

3) 原木丸太の選別

スギ乾燥材の品質、乾燥の効率の向上には選別が不可欠であり、選別を行うには、丸太の材質指標の導入とその区分方法が必要である²⁾。このため、原木丸太の選別指標とその方法について表 4-2-5-5 にまとめた。少なくとも含水率 80～100%程度を境に2段

表 4-2-5-5 心持ち材の製材・乾燥処理を想定した丸太の選別指標と選別方法

対象	選別指標	乾燥性評価の尺度	選別の方法
材の性質	重量	乾燥時間	重量測定
	心材含水率	乾燥時間	(電気測定等)
	容積密度数	乾燥時間、割れ	(レジストグラフ等)
	ヤング率	乾燥時間、割れ、強さ	重量・振動測定
形質 (外見)	丸太径	乾燥時間	機械計測、画像処理
	心材色	乾燥時間	目視
	辺心材率	乾燥時間	目視
	曲がり(通直性)	変形(反り・ねじれ)	機械計測
	繊維傾斜	変形(反り・ねじれ)	目視
	偏心率	変形(反り・ねじれ)	目視、画像処理
	年輪幅	乾燥時間、割れ	目視

階選別できれば、品質向上とコスト削減への効果が期待できる。また、製材工場が用途と生産量に合わせて丸太の品質と量を選択できるような原木選別システムは、特に小規模の工場における効率向上には必要である。

6) 効率的スギ乾燥材生産システムのフロー

乾燥材生産の効率向上には、原木の性質に応じた適切な乾燥前選別とともに、生産規模とエネルギー費削減の影響が特に大きい。エネルギー費削減には、工場廃材のエネルギーとしての利用、廃熱や排水の循環利用、付加的な電力の補助が必要となり、また様々な材種と生産規模の確保への対応ができる乾燥施設の整備とが必要である。図4-2-5-2には、選別を導入し、かつ工場端材を利用した生産システムのフロー（例）を示している。工場規模が大きい場合には、適切な乾燥方法・条件の導入による乾燥材品質確保と大幅なコスト低減が期待できると考えられる。

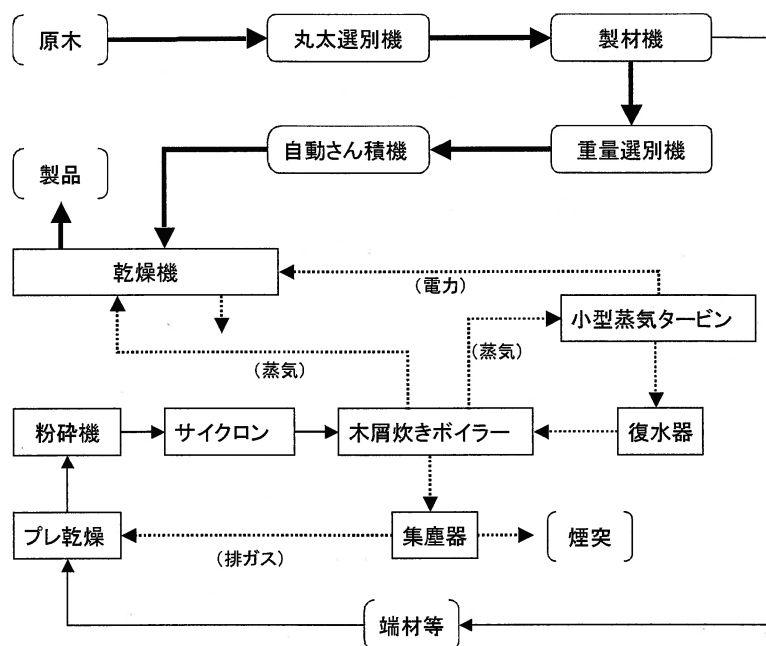


図 4-2-5-2 乾燥材生産システムのフロー図

オ 今後の問題点

今後スギ乾燥材の生産のためには、森林施業の変化に伴

う原木条件の多様化と、また地域による原木生産および乾燥材生産に的確に対応するシステムが必要であり、また木材乾燥への木質残廃材のエネルギー転換利用がコスト低減には不可欠と思われる。そのため、原木供給、乾燥機、熱・電力のコジェネシステムの効率化など、地域事情や生産規模に適合できる乾燥材生産システムの検討が必要である。

カ 要約

乾燥材の生産性の向上と品質の確保、生産コストの低減化のための乾燥材生産システムを検討し、スギの多様な木材条件、求められる品質、生産規模等に対応した乾燥方法・条件を明らかにした。また、原木の選別、割れの抑制による乾燥材の高品質化、過熱蒸気処理等による乾燥の高速化技術、廃材利用によるエネルギーコストの低減などによる、効率性の高い合理的な乾燥材生産システムの導入を図るための指針が得られた。

キ 引用文献

- 1) Forest Products Laboratory: "Wood handbook: Wood as an engineering material" (1974)
- 2) 黒田尚宏: スギの乾燥- 概説、林業技術、No. 736:8-13 (2003)

(森林総合研究所・加工技術研究領域 黒田尚宏、齋藤周逸、小林功、石川敦子)

~~~~~  
「交付金プロジェクト」は、平成13年度に森林総合研究所が独立行政法人となるにあたり、これまで推進してきた農林水産技術会議によるプロジェクト研究（特別研究など）の一部、および森林総合研究所の経費による特別研究調査費（特定研究）を統合し、研究所の運営費交付金により運営する新たな行政ニーズへの対応、中期計画の推進、所の研究基盤高揚のためのプロジェクト研究として設立・運営するものである。

この冊子は、交付金プロジェクト研究の終了課題について、研究の成果を研究開発や、行政等の関係者に総合的且つ体系的に報告することにより、今後の研究と行政の連携協力に基づいた効率的施策推進等に資することを目的に、「森林総合研究所交付金プロジェクト研究成果集」として刊行するものである。  
~~~~~

ISSN 1349-0605

森林総合研究所交付金プロジェクト研究 成果集 8

「スギ材の革新的高速乾燥システムの開発」

発 行 日 平成18年 1月 1日

編 集・発 行 独立行政法人 森林総合研究所

〒305-8687 茨城県つくば市松の里1番地

電話. 029-873-3211 (代表)

印 刷 所 (株) 梶本