

信州大学審査学位論文

アカマツ大断面製材の人工乾燥技術の確立と構造用梁材への適用

2015年9月

中嶋 康

アカマツ大断面製材の人工乾燥技術の確立と構造用梁材への適用

中嶋 康

Establishment of kiln-drying technology for Japanese red pine (*Pinus densiflora*) heavy timber and its applications for structural beams

Yasushi Nakashima

目次

第1章 序論

1.1 背景	1
1.2 既往の研究	2
1.3 研究の目的と本論文の構成	7

第2章 アカマツ平角材の乾燥技術に関する研究

2.1 仕上げ加工後の寸法変化に及ぼす含水率の影響	
2.1.1 はじめに	8
2.1.2 実験方法	8
2.1.3 結果と考察	12
2.1.4 まとめ	19
2.2 内部割れの発生に及ぼす高温セット処理条件の影響	
2.2.1 はじめに	20
2.2.2 実験方法	20
2.2.3 結果と考察	24
2.2.4 まとめ	33
2.3 高温セット処理後の乾燥時間の推定	
2.3.1 はじめに	34
2.3.2 実験方法	34
2.3.3 結果と考察	36
2.3.4 まとめ	38
2.4 平角材の人工乾燥スケジュールの確立	
2.4.1 はじめに	39
2.4.2 結果と考察	39
2.4.3 まとめ	40

第 3 章 梁材としての強度特性に関する研究	
3.1 たいこ材と平角材の曲げ強度性能に及ぼす輪生節の影響	
3.1.1 はじめに	41
3.1.2 実験方法	41
3.1.3 結果と考察	45
3.1.4 まとめ	55
3.2 曲げ強度性能に及ぼす表面割れと高温セット処理の影響	
3.2.1 はじめに	56
3.2.2 実験方法	56
3.2.3 結果と考察	58
3.2.4 まとめ	62
3.3 伝統的仕口による接合部のせん断耐力特性	
3.3.1 はじめに	63
3.3.2 実験方法	63
3.3.3 結果と考察	68
3.3.4 まとめ	73
第 4 章 アカマツ板材の利用技術に関する研究	
4.1 水平構面としてのせん断耐力特性	
4.1.1 はじめに	74
4.1.2 実験方法	74
4.1.3 結果と考察	79
4.1.4 まとめ	83
4.2 薬剤注入および塗装による防火特性	
4.2.1 はじめに	84
4.2.2 実験方法	84
4.2.3 結果と考察	88
4.2.4 まとめ	93
第 5 章 総括	94
謝辞	95
参考文献リスト	96
要旨	104

第1章 序論

1.1 背景

1.1.1 アカマツの資源量

アカマツ(*Pinus densiflora* Sieb. et Zucc.)は、日向を好む陽樹で、根が深く乾燥に耐える性質を有する。また、アカマツは他の植物では生育が捗らないような厳しい環境でも適応することが可能であり、裸地、崩壊・火災跡地、伐採跡地に侵入して二次林を形成することが多く、荒れた土地での植生回復や土壌の侵食・崩壊防止としての公益的機能を担っている^{1,2)}。また、アカマツは北海道以南の本州、四国、九州の屋久島まで分布し、天然林は各地で地域品種を形成している^{3,4)}。

国内のアカマツ蓄積量は約 405 百万 m^3 (人工林：約 195 百万 m^3 , 天然林：約 210 百万 m^3)とされ、樹種別ではスギ(約 1,757 百万 m^3)およびヒノキ(約 676 百万 m^3)に次いで蓄積が多く、国内の針葉樹と広葉樹を合計した総蓄積(約 4,887 百万 m^3)の約 8.3%を占めている⁵⁾。さらにアカマツ人工林の齢級別の蓄積量は、9~10 齢級が最頻値となっており、10 齢級を適正伐期と仮定した場合、アカマツ人工林は既に多くの面積で大径化が進行し、伐期が到来していると考えられる。

アカマツ素材生産量は 624 千 m^3 で、上述の蓄積量に対する割合は約 0.2%となり、スギ(0.6%)およびヒノキ(0.3%)と比較して低い状況にある⁶⁾。また、平成 2009 年⁷⁾のアカマツ蓄積量および素材生産量と比較すると、蓄積量は 5 年間で約 4.8%増加している一方で、素材生産量は約 11%減少している。さらに、合板向けのアカマツ素材生産量は 5 年間で 2 倍以上増加しているのに対して、製材向けは約半分まで減少している。

この理由として、沢辺(1996)は、アカマツ製品はベイマツ製品よりも価格的に有利であったにも関わらず、アカマツは供給が不安定な点が弱点となり、ジャスト・イン・タイムに供給の安定したベイマツで市場が定着し、純木造住宅以外では使われることが少なくなってしまうこと、他にもアカマツの未乾燥材は含水率が他の樹種に比べて高く重いため取り扱いに難点があり、さらに建て上げてからの乾燥が進行しねじれ狂いの発生する材が多いなど、品質の面からも外材との競合で難点があったと報告している⁸⁾。

1.1.2 アカマツの材質と利用

アカマツの材質を他の樹種と比較すると、気乾密度(含水率 15%時の密度)は $0.53g/cm^3$ でカラマツ($0.53 g/cm^3$)と同等、スギ($0.38 g/cm^3$)よりも高い値を示す⁹⁾。また、アカマツの板目面硬さ、曲げヤング率、曲げ強さ、縦圧縮強さはカラマツとほぼ同等で、スギよりも高い値を示す¹⁰⁾。さらに、アカマツのせん断強さは、カラマツの約 1.2 倍、スギの約 1.6 倍、引張強さはカラマツおよびスギの 1.5 倍以上の値を示す⁹⁾。一方、板目方向および柾目方向の平均収縮率はスギよりも大きく、カラマツとほぼ同等の値を示し、乾燥により「狂い」が発生しやすい性質を有する⁸⁾。

アカマツは国内の針葉樹の中では高密度材であり、たわみにくさはカラマツと同等で、外部からの引張や曲げに対する抵抗力が強い特性を有していることから、古来より、木造

建築の梁桁に利用されてきた³⁾。そのため、アカマツの製材は角物類を中心にした木取りであり、化粧面への利用に適した役物であれば見え係りの梁・敷居に使われ、化粧面への利用に適さなければ見え隠れの梁・垂木・貫・胴縁等に使われてきた¹¹⁾。

沢辺(1996)によれば、岩手県内の製材所のマツ製材品の生産内訳は、建築用材のうち板類 20.2%、挽割 15.4%、挽角 43.3%と報告されており¹²⁾、現代でも主は平角等の挽角中心の木取りであることがわかる。

1.1.3 建築部材としてのアカマツ材の品質

上述したとおり、古来よりアカマツ材は住宅の梁桁材等の構造材として用いられてきた。

一方、平成 7 年 1 月に発生した阪神・淡路大震災を契機として、住宅供給者側が取得者に対して十分に住宅の品質情報を開示し、取得者が自己責任のもとでの確かな判断を行い、安心安全な住宅を取得できることを目的として、平成 12 年 4 月に「住宅の品質確保の促進等に関する法律(品確法)」が施行された。この法律には、住宅の生産からアフターサービスまで一貫して住宅の質が確保されるような枠組みを図るため、瑕疵担保責任の充実や住宅性能表示制度が盛り込まれた¹³⁾。さらに、平成 21 年 6 月に、住宅の長寿命化を推進して国民生活と経済を発展させることを目的として「長期優良住宅の普及に関する法律(長期住宅法)」が施行された¹⁴⁾。

品確法および長期住宅法とも、建築物の最低レベルの基準を定めた建築基準法に対し、ある一定レベルの品質および性能を認証し、住宅の品質確保の促進、住宅購入者の利益保護等を目的としている。この法律が施行されて以降、品確法または長期住宅法のもとで建築される木造住宅の部材には、強度や含水率の明示が必要不可欠となり、古来より梁材として使われてきたアカマツ材についても、製材の日本農林規格(製材 JAS)に基づき¹⁵⁾、強度、含水率、寸法精度の品質表示が住宅を設計・施工する需要者から要求されるようになり^{16~18)}、製材品の強度性能、含水率および寸法精度等の品質を確保するためには、乾燥処理が大前提であるため、アカマツを製材する生産者からは、研究者に対して、品質が管理されたアカマツ大断面製材の乾燥材生産技術の開発が要望されるようになった。

また、アカマツ梁材を丸太から製材する過程で、丸太の側から製材される板材を住宅の床下地材として利用する際には、品確法が施行されて以降、住宅性能表示制度に対応するため、水平構面のせん断耐力性能評価が必要となった。

さらに、平成 22 年 10 月には、国内の木材自給率の向上を目的として「公共建築物等における木材の利用の促進に関する法律」が施行された¹⁹⁾。これにより、アカマツ板材は大型公共施設等の内装材としての利用促進が期待されるが、そのためには、建築基準法が規定する防火に関する内装制限に対応するための保存処理技術の開発が必要となった。

1.2 既往の研究

1.2.1 アカマツ材の乾燥技術に関する研究

木材乾燥の目的は、木材の含水率を住宅施工環境下の平衡値まで低下させることで、施工後の収縮およびねじれなどの寸法変化に伴うトラブル^{20・21)}を回避することにある。木材の乾燥技術を確立するには、乾燥する樹種、断面寸法別の乾燥スケジュールの検討が重

要であり、そのためには、乾燥方法が仕上がり後の含水率、寸法精度、強度特性、割れ等の品質に及ぼす影響について、学術的な知見が不可欠となる。しかし、既往のアカツ材の乾燥に関する研究は、主として柱材等の小・中断面製材が主たる対象であり、大断面製材の乾燥に関する研究は少ない。

以下に、既往のアカツ材の乾燥研究を示す。

○ 天然乾燥技術

天然乾燥は製材品を屋外又は解放された屋内で太陽熱、風など自然エネルギーを利用して乾燥する方法である²²⁾。天然乾燥は広い土地を必要とする以外には特別な施設を必要とせず、自然条件で乾燥するため材の熱による変質等が生じにくいという利点がある。また、近年の地球温暖化問題を背景として乾燥過程で化石燃料を使用しないことから、環境に配慮した乾燥方法として、その重要性が見直されてきている²³⁾

野原ら(1978)は、スギ、ヒノキ、アカツ材の断面寸法別および季節別の天然乾燥時間の研究を行い、天然乾燥時間は8月開始が最も短いこと、アカツ材は他の樹種と比較して天然乾燥時間が短いこと、断面寸法が大きくなるほど天然乾燥時間は長くなることを報告している²⁴⁾。Simpson(2000)らは、オーク、カエデ、ブナ、イエローポプラ、パイン、ベイマツ材の天然乾燥時間の研究を行い、平均気温と相対湿度をパラメータとしたシミュレーションにより乾燥時間は推定可能としている²⁵⁾。内田(2010)らは、天然乾燥期間が異なるアカツ材の断面内の含水率分布を比較し、乾燥期間が長いほど断面内の含水率分布は15%に収束するとしている²⁶⁾。

○ 人工乾燥技術

人工乾燥は木材を収容する乾燥室、必要なエネルギーの発生および供給装置を用いて人為的に乾燥時間や仕上がり含水率を制御する方法である。人工乾燥は、施設設備やエネルギーコストを必要とする反面、割れ等の損傷の発生を最小限に抑制しながら、より短期間で必要な含水率まで乾燥することができる。製材 JAS では、人工乾燥材の含水率基準を定めており、住宅の横架材に使われる構造用製材の仕上げ材の含水率基準を 20% 以下 (SD20) と 15% 以下 (SD15) に定めている²⁷⁾。

現在の構造用製材の人工乾燥の主流は、国内で最も広く普及している蒸気式人工乾燥設備を用いた高温セット処理法による人工乾燥技術である²⁸⁾。高温セット処理法による人工乾燥の考え方は、乾燥開始時に蒸煮し、その後は急速に高温低湿とし、材表面に薄い、均一で大きな引張セットをつくり、その後の乾燥の進行中に発生しやすい表面割れを防止させるとともに、材の中心部分に対しては、高含水率時の長時間の高温加熱による細胞の落ち込みによる収縮率の増大を促し、表面に圧縮応力を発生させることにより表面割れを防止しようとするものである²⁹⁾。

アカツ材を対象として、高温セット処理法を用いた人工乾燥技術に関する研究は、久慈(2001)らが温度 100℃超によるアカツ材の人工乾燥を行った結果、低温 (65℃) や中温 (85℃) の人工乾燥と比較して、乾燥速度が速く、表面割れ等の欠点が抑制されたことを報告している³⁰⁾。また、吉田(2012)らは、スギ・ヒノキ・カラマツ・アカツ材の高温セット処理法による人工乾燥特性を比較し、アカツ材は他の樹種と比較して表面割れが多いことを報告している³¹⁾。加世田(2012)らは、高温セット処理法による人工乾燥で

アカマツ正角材の表面割れが他の樹種と比較して多くなる原因として、他の樹種と比較して、高温セット処理時の表層の収縮が大きく、表面割れの抑制を目的として表層に形成される引張セットが小さいため表面割れの発生が大きくなることを報告している³²⁾。

また、高温セット処理法による人工乾燥は、断面内に内部割れが発生すると報告されている。松元(2009)らは、ヒバの高温セット処理法による人工乾燥で、高温セット処理 24 時間は高温セット処理 12 時間と比較して内部割れが 40%大きくなるとしている³³⁾。また、伊藤(2011)らは、トドマツ正角材の高温セット処理法による人工乾燥で、105℃と比較して、120℃では内部割れの発生が大きいとしている³⁴⁾。さらに、藤田(2011)らはヒノキ正角材の断面内に発生した内部割れ面積と各種強度との関係を検討し、せん断強度で最も高い相関が認められたことを報告している³⁵⁾。

1.2.2 アカマツ梁材の強度特性に関する研究

住宅の梁材には、屋根、外壁および雪による鉛直荷重が掛かるため、この荷重により梁材がたわみ、住宅に有害な変形及び振動障害が生じないように³⁶⁾、住宅の設計時に梁材の使用環境や荷重継続時間などを考慮して設定された許容応力度から断面積を算出する必要がある。梁材としての製材品の許容応力度は、樹種および品種の特性を考慮して地域別の検討が行われており、アカマツ材についても曲げ強度試験データを基にしたスパン表が作られている³⁷⁾。

しかし、既往のアカマツ材の強度特性に関する研究はアカマツ心持ち正角材を対象として行われており、平角材およびたいこ材のような矩形の大断面製材について節径比が曲げ強度性能に及ぼす影響を検討した事例は少ない³¹⁾。

また、近年の製材品の人工乾燥の主流である高温セット処理法による人工乾燥技術は、高温セット処理温度および処理時間が曲げ強度性能に影響を及ぼすことが報告されており、高温セット処理したアカマツ材についても、曲げ強度性能を天然乾燥材と比較し、さらに国交省が示す基準強度との整合性を検証する必要がある。

以下に、既往のアカマツ材の強度性能評価に関する研究を示す。

○ 曲げ強度性能に及ぼす輪生節の影響

アカマツ材の曲げ強度性能に関する研究は、錦織(1987)らがアカマツ正角材の曲げ強度試験を行い、節の出現により低い目視等級となったグループでは、58.8%が基準強度を下回ることを報告している³⁸⁾。小玉(1995)らは、アカマツ正角材の節径比が曲げ変形性能に及ぼす影響を検討した結果、節径比などの目視的因子は試験体の塑性域の変形性能と一定の傾向を有していると報告している³⁹⁾。東野(1997)らは、枝打ちされたアカマツ正角材の強度性能を検討した結果、枝打ちによりアカマツ製材品は節径比の減少により強度性能は向上することを報告している⁴⁰⁾。

○ 曲げ強度性能に及ぼす表面割れおよび高温セット処理の影響

製材品の表面割れは、外観上および施工上の問題に起因することから、工務店やハウスメーカーなど需要者の評価は厳しい一方、表面割れが曲げ強さなどの力学的性質に及ぼす影響は確認されていないことは多く報告されている^{41)~43)}。しかし、実際にアカマツ梁材を用いる設計・施工者は、住宅購入者に対してアカマツの表面割れが曲げ強さに及ぼす影

響は確認されないことを説明する責任があり、そのため実際に実験を行った際のデータの提供を求めている。

また、高分子材料である木材は、乾燥時の熱履歴や含水率減少履歴などの環境変化が異なる場合、微細構造の変化も異なるため、処理後の弾性率に顕著な差異が認められる⁴¹⁾。このため、古くから高温で人工乾燥処理した木材の強度性能に関する研究が多くの樹種で行われている。Eddy(1955)らは、120℃高温熱処理したベイマツ板材について、天然乾燥と比較して曲げ強度が22～42%減少するとしている⁴⁵⁾。Salamon(1963)は、104～107℃で人工乾燥したベイマツ板材について、60℃の人工乾燥材と比較して曲げ強さが20%低下するとしている⁴⁶⁾。Salamon(1965)は、105℃で人工乾燥したベイツガ板材について、70℃の人工乾燥材と比較して曲げ強さに明らかな低下は見られないとしている⁴⁷⁾。ベイツガについては鷺見(1978)も120℃高温で人工乾燥した材の曲げ強度試験を行っており、60℃人工乾燥材と有意な差は見られないと報告している⁴⁸⁾。Cech(1971)は、115℃で人工乾燥したスプルー板材について、60℃の人工乾燥材と比較して曲げヤング係数が3.8%低下するとしている⁴⁹⁾。Huffman(1972)は、105℃で人工乾燥したアスペン板材について、65℃の人工乾燥材と比較して曲げヤング係数は変わらず、曲げ強さが4%低下するとしている⁵⁰⁾。Koch(1972)およびYao(1979)は、115℃で人工乾燥したサザンパイン板材について、55℃または70℃の人工乾燥材と比較して曲げ強さに明らかな低下は見られないとしている^{51)・52)}。Huffman(1977)は、116℃で人工乾燥したバンクスマツ、スプルー、バルサムモミ板材について、66℃の人工乾燥材と比較して曲げヤング係数は変わらないが、曲げ強さが11%低下するとしている⁵³⁾。Gahards(1983)は、112℃で人工乾燥したイエローポプラ板材について、72℃の人工乾燥材と比較して曲げ強さに明らかな低下は見られないとしている⁵⁴⁾。吉田(1999)らは、100℃～130℃で人工乾燥したカラマツ正角材について、乾燥温度間で曲げ強さに明確な差は確認されなかったと報告している⁵⁵⁾。山本(1999)は110℃および80℃でそれぞれ人工乾燥したアカマツ平角材の目視等級別の曲げ強さを比較した結果、目視等級が低いグループほど、温度間での曲げ強さの差が大きいとされている⁵⁶⁾。武田(2005)らは、130℃で人工乾燥したカラマツ正角材について、天然乾燥材と比較して、断面内部の曲げ強さの低下が著しいことを報告している⁵⁷⁾。

1.2.3 アカマツ梁材の伝統的仕口のせん断耐力特性に関する研究

梁と柱または梁と桁を緊結する接合部は、一方の部材が地震等により負担した力を他方の部材に伝達する重要な役割を担うため、鉛直荷重時に接合部が先行破壊しないようにせん断耐力を確保した設計を行う必要がある。アカマツは古来より伝統的工法による木造住宅の梁として使われており、柱と梁の接合に用いられてきた伝統的仕口について、耐力の発現機構を解明したうえで、せん断耐力を評価する必要がある。

接合部に関する既往の研究として、中嶋(2009)らは外層にカラマツラミナ、内層にスギラミナを用いた異樹種集成材について、梁受金物で接合した梁・柱・桁・梁のせん断耐力を評価した結果、スギ単一樹種の集成材を用いた場合よりも接合部のせん断耐力は高くなることを報告している⁵⁸⁾。また、原田(2008)らは生材および乾燥材を柱材に用いた柱梁接合部の実大せん断試験の結果、生材は乾燥材と比較してせん断体力の低下が見られたことを

報告している⁵⁹⁾。また、中嶋(2009)らは、クリ平角材およびアカマツ平角材について、梁受金物で接合した梁-柱のせん断耐力を比較した結果、クリ平角材を用いた接合部のせん断耐力は、アカマツを用いた場合よりも高くなることを報告している⁶⁰⁾。また、公益財団法人日本住宅・木材技術センターでは、ほぞ・欠きこみを駆使した伝統的工法による柱-梁接合部のせん断試験を行い、伝統的工法によるせん断耐力は、金物工法と異なり梁材の断面で負担していることを明らかにした⁶¹⁾。

1.2.4 アカマツ板材の利用技術に関する研究

アカマツ丸太から平角材を製材する際、平角材に相接した面から板材が生産される。沢辺(1998)によると、アカマツ板類は挽き角類と異なり、県内の市場に半数以上が出荷されるとしていることから⁶²⁾、板材価格には平角材のように関東市場までの運搬コストを上乗せする必要がないため、外材との価格競争力も有利であり、さらに建築部材としての付加価値を加えることにより、内装材として利用促進も期待できると考えられる。

一方、沢辺(1998)は、アカマツ製品の安定供給を阻害するのは、青変被害による原木供給の季節変動と結論付けており、青変被害によるアカマツ製品の通年出荷体制の不備が製品価格や供給の不安定につながり、需要先のアカマツ利用離れ、代替材の進出という悪循環に陥っていると指摘している。

青変被害とは、春から夏にかけてアカマツを伐採して一定期間が経過すると、材が黒、青色に変色して化粧性などが低下する被害であり⁶³⁾、変色した材は建築材料としての利用が困難となり、製材歩留りが著しく減少することから、アカマツ材の伐採時期を秋から冬に限定させる大きな要因となっている。谷内らは、この問題を解決するため、青変菌類による変色メカニズム、林内での感染経路を明らかにし^{64) 65)}、アカマツ丸太の青変防止技術として、積算温度から算出された猶予期間内に伐採から製材・乾燥処理する方法⁶⁶⁾と、伐採直後の丸太への防虫・防カビ剤散布により青変を防止する方法^{67) 68)}の2種類を報告している。また中嶋(2009)らは、青変防止処理技術の導入による、製材歩留り、製品販売額および収益性の評価・解析を行った結果、青変防止技術の導入により、春から夏に伐採した丸太でも、製材歩留りの減少は著しく抑制されるため、製品販売額が増加し、収益性は確保されることを検証した⁶⁹⁾。

以上の研究により、青変被害によるアカマツ板材の供給の不安定さは技術的に解決されている。本研究では、アカマツ板材の用途として、水平構面への利用と、難燃材注入処理による不燃材料としての利用に着目して検討を行った。

以下に、既往の研究を示す。

○ 水平構面への利用に関する研究

現在、国策として地域材の住宅部材への活用を推進するための支援が展開されている⁷⁰⁾。その中で、木造住宅の水平構面に使われる面材料として、アカマツの板材を使用する工法は、木目を意匠的に現すことが可能で、審美性が向上することから、地域材による家づくりの象徴として活用が期待されている。一方、アカマツ板材を用いた水平構面を住宅の設計に組み入れる場合、水平構面の短期許容せん断耐力のデータが必要となるため、実際に水平構面の面内せん断試験を行い、せん断性能を評価する必要がある。

山辺(2009)は、水平構面に使用する板材を厚くすることで床剛性は増し、構造用合板を用いた場合と近い耐力性能が得られることを報告している⁷¹⁾。南(2010)らは、幅が150mmの厚板を3枚幅はぎした板幅455mmのパネルを用いた水平構面のせん断性能の検証を行い、せん断変形角1/15radを越えても耐力が向上する非常に粘り強い性能であったことを報告している⁷²⁾。後藤(2010)は、スギ板材を用いた水平構面のせん断性能評価を目的として、構面の種類、下地となる根太および垂木の有無、板材の断面寸法、釘打ち方法別の水平構面のせん断試験を行い、各仕様別の短期許容せん断耐力を提案している⁷³⁾。

○ 防火処理技術に関する研究

現在、「公共建築物等における木材の利用の促進に関する法律」の施行により、学校、公会堂、病院などの公共性の高い特殊建築物⁷⁵⁾への地域材の活用を推進するための活動が全国的に展開されている。しかし、これらの建築物は建築基準法に定められる内装制限⁷⁶⁾により、防火材料認定要領の不燃⁷⁶⁾、準不燃⁷⁷⁾、難燃⁷⁸⁾基準を満たさなければ使用することができない。そのため、アカマツ材を内装材として用いる際には、防火材料認定要領の基準を満たすための難燃薬剤含浸量および含浸方法に関する検討が必要である。

原田(2003)らは、厚さ15mmのアカマツ材へのカルバミルポリリン酸アンモニウムの注入処理において、80kg/m³の薬剤注入量で日本の建築基準法の難燃材料、160kg/m³の薬剤注入量で準不燃材料の基準を満たす材料となるとして、アカマツ難燃化木材の商品化に成功している⁷⁹⁾。また、吉野(1989)らは、カルバミルポリリン酸アンモニウムで処理されたカラマツ難燃化木材を⁸⁰⁾、伊藤(1995)はシリカ系薬剤とリン酸二水素アンモニウムの併用による難燃化処理を報告し⁸¹⁾、商品化に成功している。一方、防火薬剤処理の多くは、酸性の水溶液を用いた処理であるため、材料表面の日焼けによる変色、材料の吸放湿による薬剤の浸出(白華現象)が問題となっており、施工後の瑕疵を避けるためにも、防火処理後の塗装による白華現象の抑制効果を検討する必要がある。

1.3 研究の目的と本論文の構成

本研究は、全国的に豊富な資源の蓄積を有し、古来より木造住宅の梁材および内装材として使われてきたアカマツ材について、近年の建築基準法改正を契機として建築部材に要求される性能および品質に対応した乾燥技術の開発、構造用梁材として利用するための強度性能に及ぼす諸要因の解明および平角材の製材過程で得られる板材の利用開発など一連の研究を行い、アカマツ大断面製材の利用技術に関する新たな知見を深め、アカマツ大径丸太材の有効活用に資することを目的とした。

第1章は、研究の背景並びに既往の研究について概説し、研究スキームを提示した。第2章は、アカマツ平角材の乾燥技術の確立に向けて検討を行った。第3章では、梁材としてのアカマツ材に求められる強度性能について検討した。第4章では、平角材を製材する際に得られる板材の利用技術について検討した。第5章では、本研究により得られた新たな学術的知見と確立した技術について総括を行った。

第2章 アカマツ平角材の乾燥技術に関する研究

2.1 仕上げ加工後の寸法変化に及ぼす含水率の影響⁹²⁾

2.1.1 はじめに

近年の地球温暖化問題を背景として、製材品を屋外又は開放された屋内で自然乾燥させる天然乾燥は、乾燥過程で化石燃料を使用しないことから、環境に配慮した乾燥方法として、その重要性が見直されてきている。また、アカマツ(*Pinus densiflora Sieb. Et Zucc.*)の平角材は、地域材を用いた住宅建築に積極的な消費者および設計・施工者から梁桁材としての需要が大きい部材であり、古くから天然乾燥が行われている。

一方、最近になって、設計・施工者は天然乾燥したアカマツ平角材を梁桁材として用いる際、住宅引渡し後の床鳴り等のトラブルによる瑕疵を回避するため、竣工後の平角材の変形の有無など、天然乾燥材の性能評価と基準整備を求めるようになってきている⁸³⁾。

そのため、地域製材所などの天然乾燥材の生産者は、設計・施工者からの要求に対して、天然乾燥した平角材の修正挽き後の寸法変化等の性能を明確に示し、瑕疵保証制度に耐え得るレベルの品質保証を行う必要がある⁸⁴⁾。

しかし、これまでの天然乾燥技術に関する研究では、製材直後の生材の含水率減少量に及ぼす天然乾燥期間の影響については検討されているが⁸⁵⁾、天然乾燥材の修正挽き後の寸法変化に及ぼす天然乾燥期間の影響までは検討されていない。

そこで本研究では、天然乾燥したアカマツ平角材の修正挽き後の寸法変化とねじれの発生に及ぼす天然乾燥期間の影響を検討するため、天然乾燥期間を最小160日間、最大1250日間として、天然乾燥後に修正挽きした平角材(以下天然乾燥材とする)の仕上がり含水率、静置後の断面寸法の変化とねじれの発生量を天然乾燥期間別に比較し、さらに天然乾燥材の仕上がり含水率および寸法基準の「製材等の日本農林規格(以下製材JASとする)」への適合性についても併せて評価した。

また、実際にアカマツ平角材の製材・販売を行っている製材所では、天然乾燥材の材色を有したうえで、かつ仕上がり含水率15%以下の乾燥材需要に対応するため、天然乾燥材の人工乾燥機による追加乾燥処理も行われている。

天然乾燥後に追加乾燥した平角材は、天然乾燥材と比較して、表面割れ、ねじれなど欠点が増大する一方で、仕上がり含水率は確実に低下することから、修正挽き後の寸法変化は少なくなることが予想される。

そこで、天然乾燥後に人工乾燥機で追加乾燥したアカマツ平角材(以下人工乾燥材とする)について、修正挽き後の仕上がり含水率、静置後の断面寸法の変化およびねじれの発生量を、天然乾燥材と比較した。

2.1.2 実験方法

○供試材

1条件あたり20体の岩手県産心持ちアカマツ平角材(274×151×4000mm)を、6条件の乾燥期間で天然乾燥を行い、計120体の平角材を試験に供した。

○天然乾燥条件

天然乾燥の栈積みは、下部の地上高 300mm、栈木間隔約 500mm、栈木幅約 30mm 角とし、栈積み上部に簡易屋根を設置した(図 2.2.1)。

表.2.2.1 に天然乾燥条件を示す。天然乾燥は終了日を 2010 年 10 月とし、それぞれ 160 日間、260 日間、400 日間、520 日間、890 日間、1250 日間の 6 条件とした。外気の温湿度を温湿度計(Onset 社製, HOBO Pro U23-001)で測定したところ、平均気温 12.2℃、平均湿度 87.2%であったことから、平衡含水率は 20%であったと推定される⁸⁶⁾。

なお、試験体によっては、ある時点で含水率が平衡に達し、季節的な含水率変化の領域に達している可能性も考えられたが、断面寸法が大きくなると、吸湿に伴う材内の水分分布の変化は小さくなることから⁸⁷⁾、平衡状態に達した後の平角材の含水率の季節変動は相対的に小さいものと考えられる。

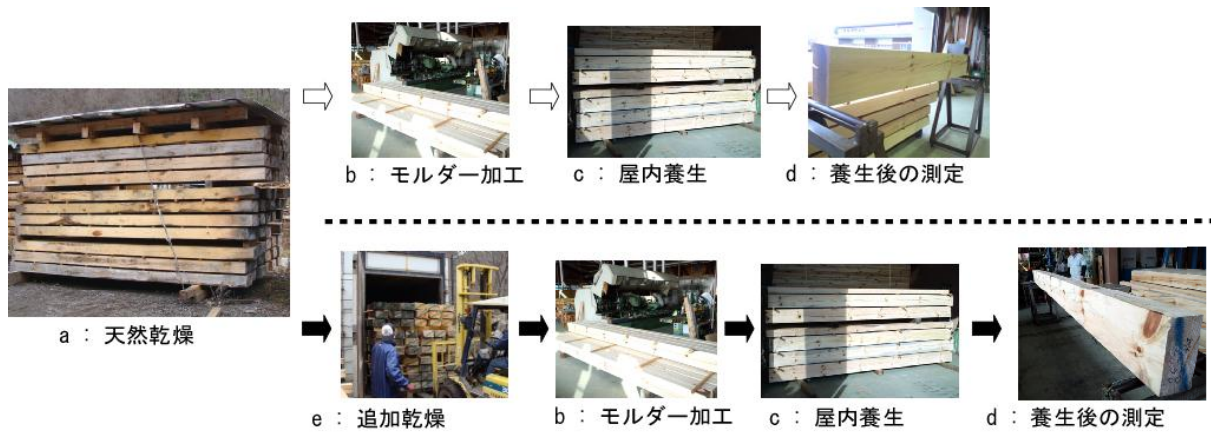
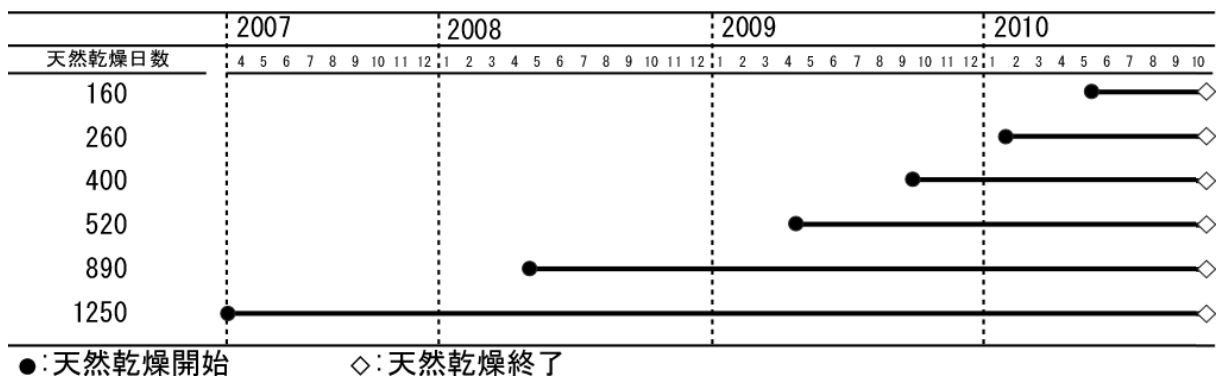


図 2.1.1. 天然乾燥試験および人工乾燥試験の流れ

Note : ⇨ : 天然乾燥
 ➡ : 天然乾燥後の人工乾燥

表 2.1.1 天然乾燥期間



○修正挽き方法

天然乾燥が終了した平角材のうち、各条件から 9～11 体の平角材について、帯鋸で隣接の 2 面が直交するように挽いた後、モルダーで断面寸法を幅×高さを 120×240 mm 角に仕上げた(図 2.1.1b)。修正挽きした平角材は、直後に重量と幅の寸法を測定した。

○人工乾燥条件

天然乾燥が終了した平角材のうち、修正挽きしなかった残りの平角材 9～11 体については、蒸気式乾燥機で 5 日間の人工乾燥後処理を行った(図 2.1.1e)。人工乾燥条件は、過去の試験結果にならい^{88) 89)}、乾球温度 80℃、湿球温度 60℃で 3 日間行った後、湿球温度を 75℃まで上昇させて 2 日間調湿処理した。

人工乾燥機から搬出した平角材は、屋内で 2 週間養生した後、前述と同様に修正挽きを行い、修正挽き直後の重量と幅の寸法を測定した。

○静置条件

修正挽きした平角材は、平成 22 年 12 月から建物の屋内で 1 ヶ月間静置した(図 2.1.1c)。室内の温湿度を温湿度計(Onset 社製、HOBO Pro U23-001)で測定したところ、平均気温 3.3℃、平均湿度 64%であったことから、平衡含水率は 12%であったと推定される⁸⁶⁾。静置期間終了後、再び平角材の重量と幅の寸法を測定した(図 2.1.1d)。

○仕上がり含水率と静置後の含水率

静置後に木口から 500mm の位置で厚さ 10mm の材片を採取し、全乾法で静置後の含水率 U を求めた。また、仕上がり含水率 U_a は、修正挽き直後の含水率とし、修正挽き直後に測定した平角材の重量と静置後の含水率から、以下の式で算出した。

$$U_a = \left\{ \frac{W_a - W_0}{W_0} \right\} \times 100(\%) \dots (1)$$

$$W_0 = \frac{W}{\frac{U}{100} + 1} \dots (2)$$

U_a : 仕上がり含水率 (%)

W_a : 修正挽き直後の重量 (kg)

W_0 : 含水率 0% 時の推定重量 (kg)

W : 静置後の重量 (kg)

U : 静置後の含水率 (%)

また、仕上がり含水率と静置後の含水率との差を、静置前後の含水率変化量(%)として求めた。

○ 静置後の寸法変化，ねじれ，繊維傾斜

図 2.1.2 に静置後の寸法変化量とねじれの測定方法を示す。寸法変化量は，修正挽き直後と静置後に測定した平角材の平均寸法の差(mm)とした。したがって，平均寸法の差がマイナスだと収縮，プラスだと膨張となる。なお，幅が広い面の寸法は，測定箇所によって静置期間中に表面割れが拡大し，その箇所のみ寸法変化がプラスとなったケースが見られたことから，寸法測定は幅が狭い面を採用した。ねじれは静置後の平角材をスパン 3800mm の基準台上に幅面を下にして載せ，平角材の一方の長さ方向の端部を基準台に固定し，残る片側の端部と基準台からの浮き上がり量を測定した⁹⁰⁾。

また，アカマツ材のねじれは材の繊維傾斜と相関関係が認められることから^{91) 92)}，平角材の表面割れの両端までの長さ(L)と，割れの端と材縁との各距離(h2-h1)の差から，各平角材の繊維傾斜を求めた⁹³⁾。

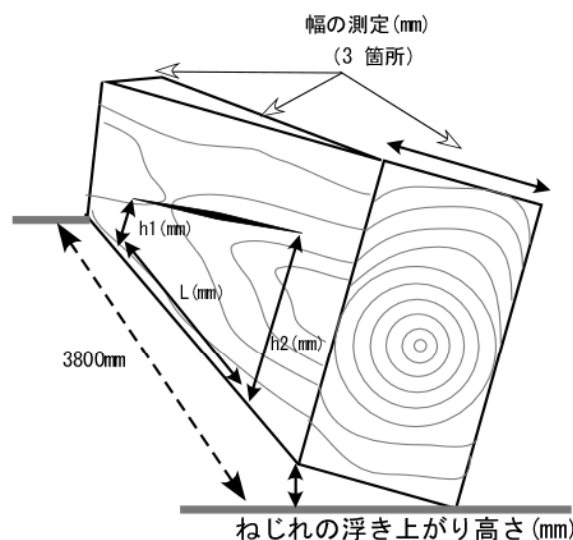


図 2.1.2. 寸法変化、ねじれ、繊維傾斜の測定方法

Note : 寸法変化 (mm) = 養生前後の寸法の差

: 繊維傾斜 (mm/m) = $(h2-h1) / L \times 1000$

2.1.3 結果と考察

○天然乾燥期間と仕上がり含水率の関係

図.2.1.3 に天然乾燥材の仕上がり含水率と静置後の含水率を天然乾燥期間別に示す。全ての天然乾燥期間で、仕上がり含水率は 25%以下となった。仕上がり含水率の平均値を天然乾燥期間で比較すると、天然乾燥 160 日間で平均 20.8%となり、天然乾燥 260 日間、400 日間、520 日間、890 日間、1250 日間と比較して大きかった。一方、天然乾燥 260 日間、400 日間、520 日間、890 日間、1250 日間の仕上がり含水率は 18.0~19.5%と天然乾燥期間で有意な差は見られず、かつ平均気温と湿度から推定した平衡含水率以下の値となった。河崎は、岡山県で試験を行った場合、心持ちアカマツ平角材は天然乾燥期間 1.5~2 ヶ月で平衡状態に達すると報告している⁸⁵⁾。

本試験の条件を河崎の報告と比較すると、断面寸法がやや大きく、乾燥開始時期も夏期に対して 260 日間のロットでは冬季であり、本試験の方が乾燥しにくい条件ではあるが、これらの条件を勘案しても、260 日の時点では全ての材が平衡状態に達していると考えられる。

また、静置前後の含水率変化量は、平均 2.0~4.5%の減少であった。これは、静置場所の平衡含水率が仕上がり含水率よりも低く、静置中に放湿したことによると考えられる。通常、乾燥材の使用場所は屋内であることから、天然乾燥材はその乾燥期間によらず、屋内に置いた時点から屋内環境の平衡含水率に漸近するまで、含水率の減少が進行することが示された。

図.2.1.4 に人工乾燥材の仕上がり含水率を人工乾燥前の天然乾燥期間別に示す。全ての天然乾燥期間で人工乾燥材の仕上がり含水率は 15%以下となった。さらに人工乾燥材の静置前後の含水率変化量は、平均 0.01~0.04%の増加であった。これは、天然乾燥とは異なり、人工乾燥材は静置場所の平衡含水率が仕上がり含水率よりも高く、静置中に吸湿したことによると考えられる。さらに、天然乾燥材と比較して、人工乾燥材の含水率変化量は平均で 0.04%以下、最大でも 0.3%以下と小さいことから、吸脱湿ヒステリシスにより人工乾燥材の平衡含水率は天然乾燥材と比較して低下していると考えられた。

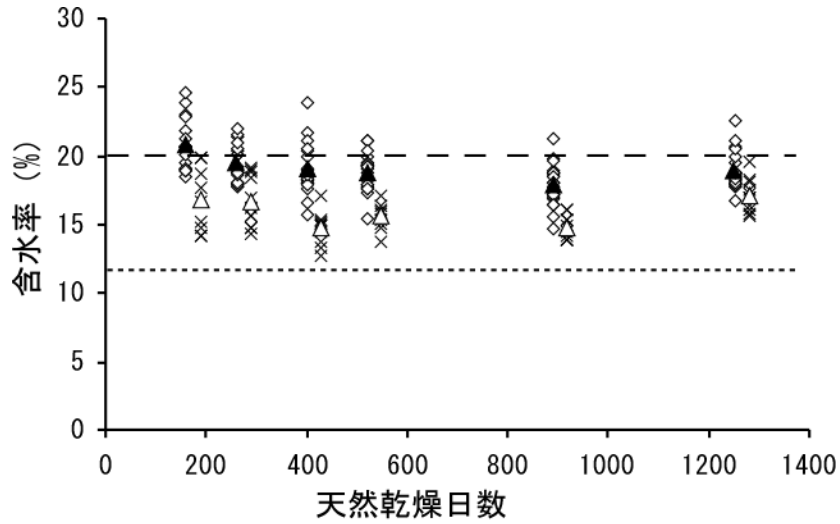


図 2.1.3 天然乾燥後および養生後の含水率

Note: ◇: 天然乾燥後(▲:平均値)

×: 養生後(△:平均値)

- - -: 天然乾燥場所の平衡含水率

---: 養生場所の平衡含水率

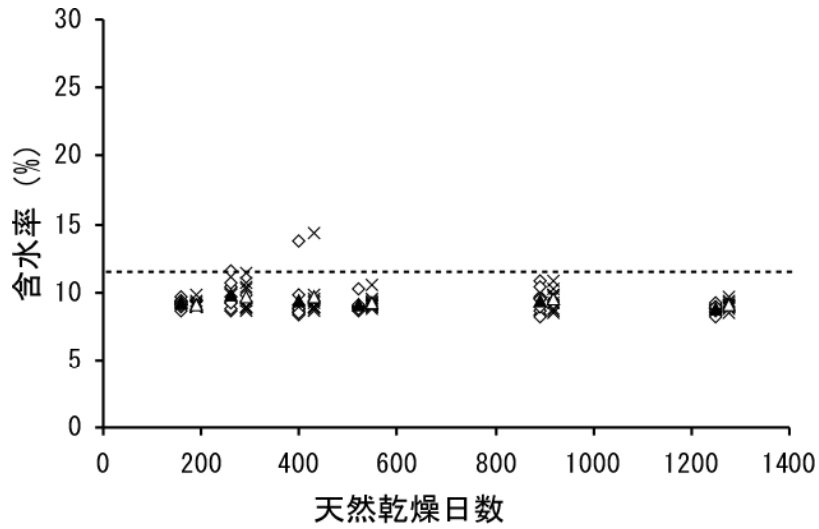


図 2.1.4 人工乾燥後および養生後の含水率

Note: ◇: 人工乾燥直後(▲:平均値)

×: 養生後(△:平均値)

---: 養生場所の平衡含水率

○修正挽き後の寸法変化とねじれ

図 2.1.5 に天然乾燥材と人工乾燥材の静置後の寸法変化量を天然乾燥期間別に示す。天然乾燥 160 日間の寸法変化量は平均 - 1.4mm(収縮)で、他と比較して寸法変化が大きかった。一方、天然乾燥 260 日間、400 日間、520 日間、890 日間、1250 日間の寸法変化量は平均 - 0.9mm から - 1.0mm となり、これらの天然乾燥期間で修正挽き後の寸法変化量に有意な差は認められなかった。

人工乾燥材の修正挽き後の寸法変化量は - 0.1~+0.5mm となり、天然乾燥材と比較して寸法変化が少なかった。これは、人工乾燥材の静置前後の含水率変化量の場合と同様に、人工乾燥材の仕上がり含水率は静置場所の平衡含水率よりも低いことから、吸湿に伴い+となる寸法変化もあったと考えられる。

図.2.1.6 に天然乾燥材と人工乾燥材の静置前後の含水率変化量と寸法変化量との関係を示す。天然乾燥材、人工乾燥材とも、含水率変化量と寸法変化量には相関が見られた。このことから修正挽き後の寸法変化は含水率変化が影響しており、仕上がり含水率が高い天然乾燥材は、人工乾燥材と比較して静置前後の含水率変化が大きいため、修正挽き後の寸法変化も大きくなると考えられる。

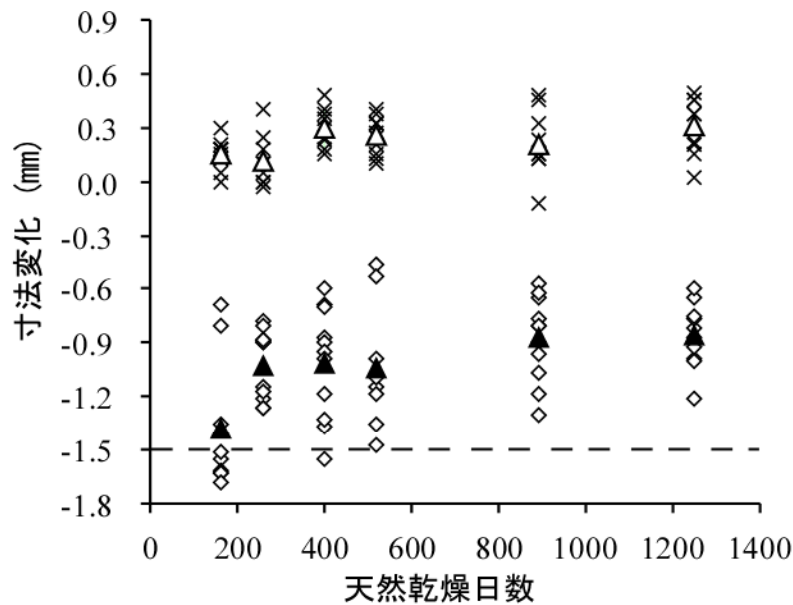


図 2.1.5 天然乾燥材と人工乾燥材の養生後の寸法変化の比較

Note: ◇: 天然乾燥材 ▲: 平均
 ×: 人工乾燥材 △: 平均
 : 寸法変化: - : 収縮, + : 膨潤
 : --- : 製材JASの基準

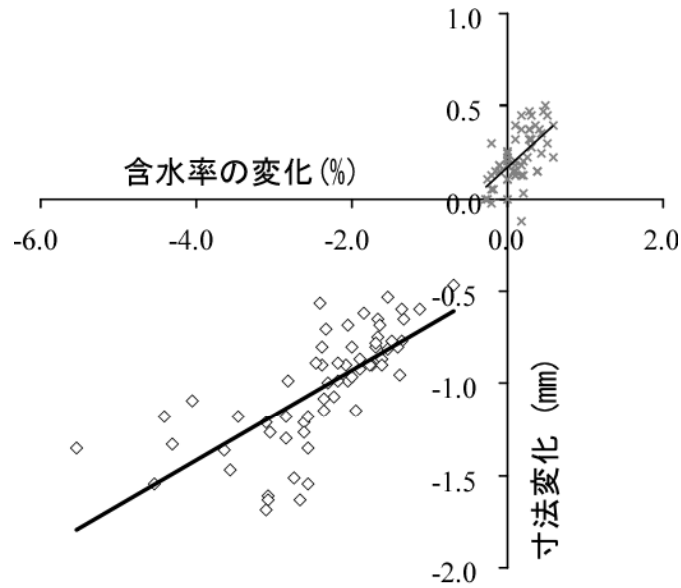


図 2.1.6 含水率変化と寸法変化との関係.

◇ 天然乾燥材 $y=0.24x-0.44$ ($r=0.71^{**}$)

× 人工乾燥材 $y=0.39x+0.17$ ($r=0.62^{**}$)

r : 相関係数 ** : 1%有意水準

○ 修正挽き後のねじれの発生

図 2.1.7 に修正挽きした天然乾燥材の静置後のねじれを天然乾燥期間別に示す。天然乾燥材のねじれは平均 3.1~3.6mm となり、天然乾燥期間で有意な差は認められなかった。

図 2.1.7 に修正挽きした人工乾燥材の静置後のねじれを示す。人工乾燥材の修正挽き後のねじれは平均 1.1~2.0 mm となり、天然乾燥材よりも少なかった。

図 2.1.9 に天然乾燥材の繊維傾斜と修正挽き・静置後のねじれの関係を示す。繊維傾斜と修正挽き後のねじれには相関が見られた。そこで、図 2.1.10 に繊維傾斜が 50 mm/m~100 mm/m までの天然乾燥材 36 体について、含水率変化量とねじれとの関係を示す。寸法変化の場合と同様に、天然乾燥材の修正挽き後の含水率変化量とねじれには相関が見られた。このことから、修正挽き後のねじれの発生は、含水率変化が影響しており、仕上がり含水率が高い天然乾燥材は、人工乾燥材と比較して含水率変化量が大きいことから、修正挽き後のねじれも大きくなると考えられる。

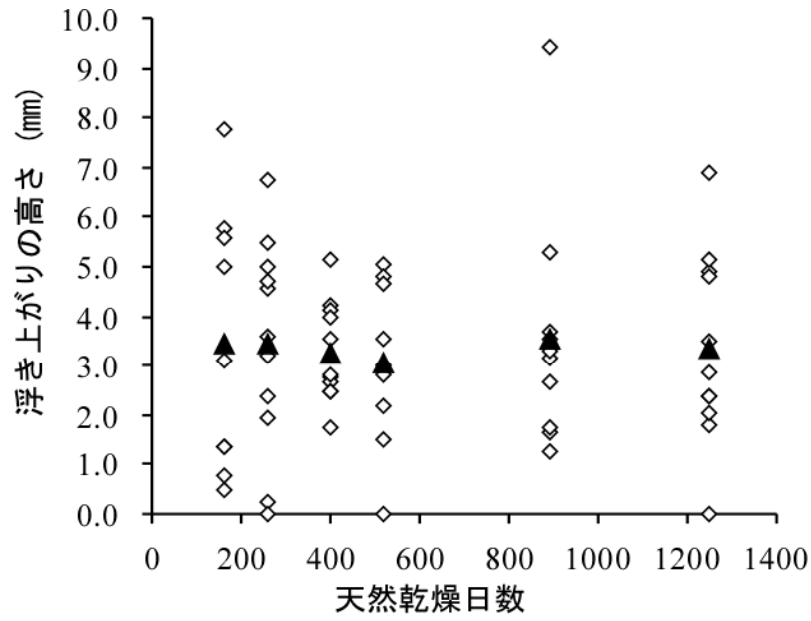


図 2.1.7. 天然乾燥材の養生後のねじれの比較.
 Note: ▲: 平均値

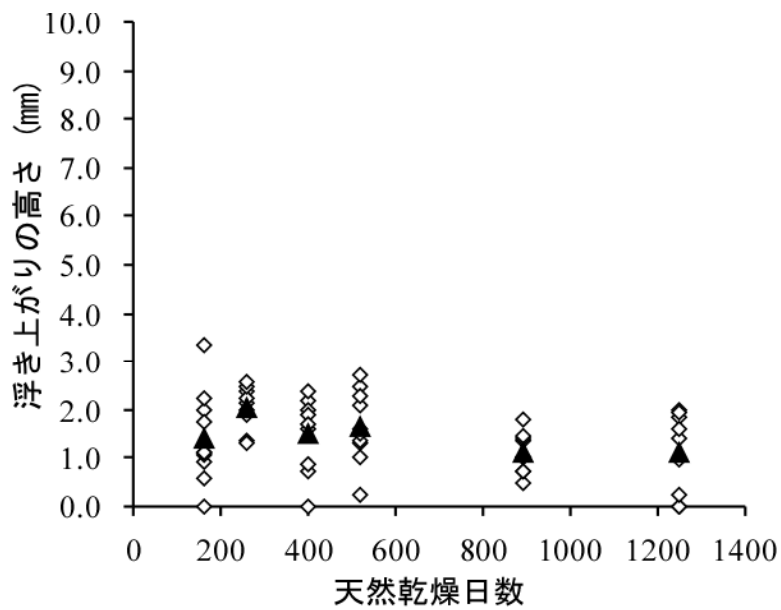


図 2.1.8 人工乾燥材の養生後のねじれの比較.
 Note: ▲: 平均値

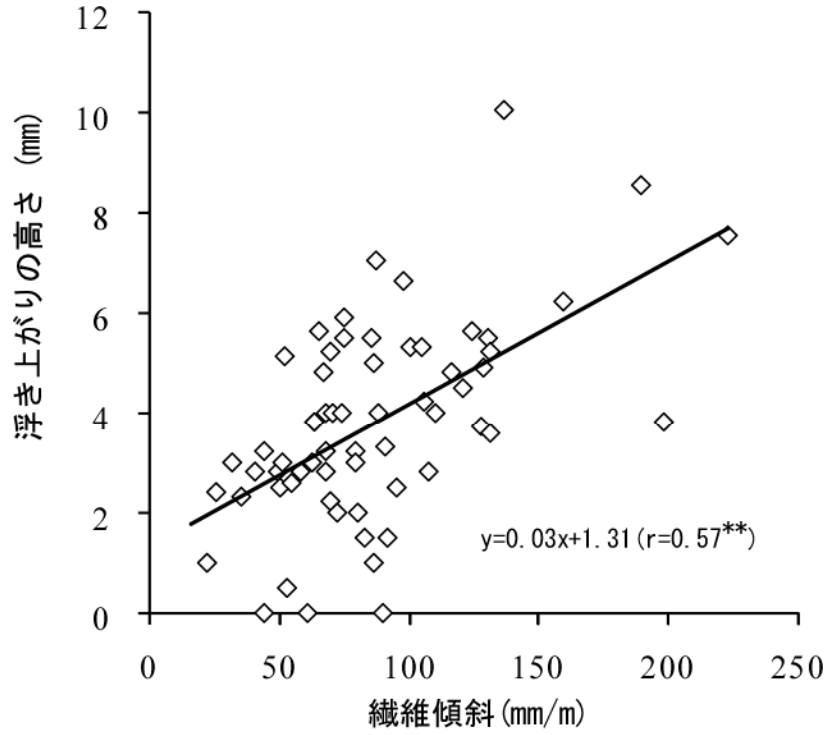


図 2.1.9 繊維傾斜と養生後のねじれの関係.

r : 相関係数coefficients ** : 1%有意水準

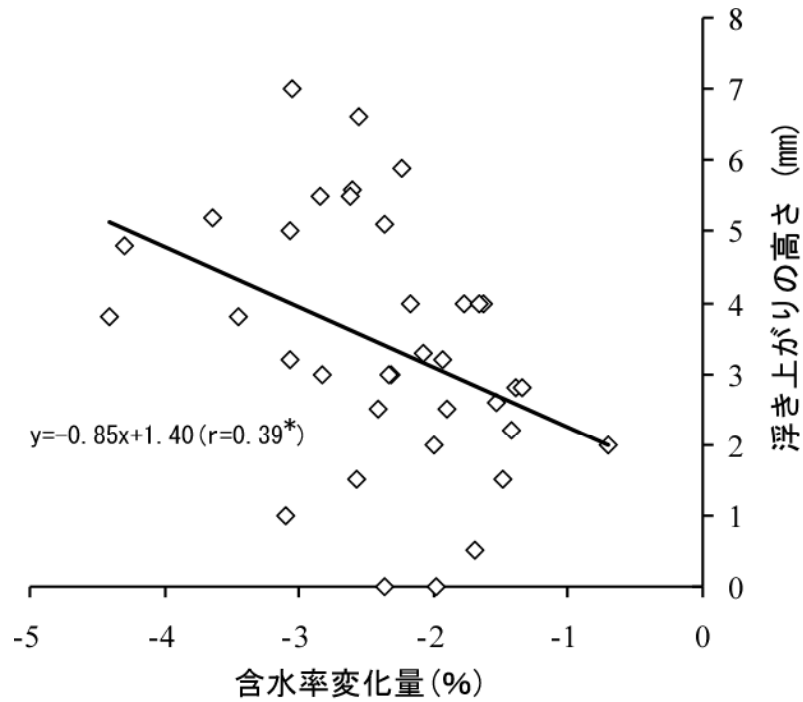


図 2.1.10 含水率変化と養生後のねじれ発生との関係

注：繊維傾斜の範囲を50mm/m～100mm/mまでとする。

r : 相関係数coefficients * : 5%有意水準

○ 天然乾燥材の製材 JAS への適合評価

製材 JAS では、乾燥材の含水率基準の適合判定について、荷口から抜き取った試験材のうち、基準に適合する数が総数の 90%以上としている⁹⁴⁾。そこで、図 2.1.11 に仕上がり含水率が 20%以下となった天然乾燥材の出現率を天然乾燥期間別に示す。含水率 20%以下の出現率は、天然乾燥 160 日間、260 日間、400 日間で 60%以下、天然乾燥 400 日間で 75%、520 日間、890 日、1250 日間で 85~90%となり、天然乾燥期間が長いほど、基準に適合する試験体の割合が増加する傾向を示した。

さらに、製材 JAS では、製材品の辺長が 75mm 以上の場合、表示された寸法と実際に計測した寸法との差が 0~1.5mm の範囲内と規定している⁹⁵⁾。したがって、アカマツ平角材の幅の寸法を 120 mm と表示した場合、修正挽きする際の設定寸法を +1.5mm 歩増しして 121.5mm とするのは寸法規定の範囲内となる一方で、修正挽き後の寸法変化量が -1.5mm よりも大きくなる(材幅が 120mm より小さくなる)と、製材 JAS の寸法規定の範囲外となる。

上述したとおり、天然乾燥期間を 160 日とした平角材は、11 体中 6 体の修正挽き後の寸法変化量が -1.51~-1.68mm となり、-1.5mm よりも大きくなった。一方で、天然乾燥期間を 260 日間以上の条件の平角材は、修正挽き後の寸法変化がほぼ全ての試験体で -1.5mm 以内となり、製材 JAS の寸法基準に適合する平角材が増加する傾向を示した。

以上の結果から、天然乾燥期間を一定以上とすることで、天然乾燥材でも製材 JAS の含水率基準および寸法基準を満たす乾燥材の生産が可能であることが示された。さらに、今後は実際の現場での天然乾燥材の生産コストも考慮に入れたうえで、仕上げ乾燥の併用を含めた天然乾燥期間の検討が必要と考えられる。

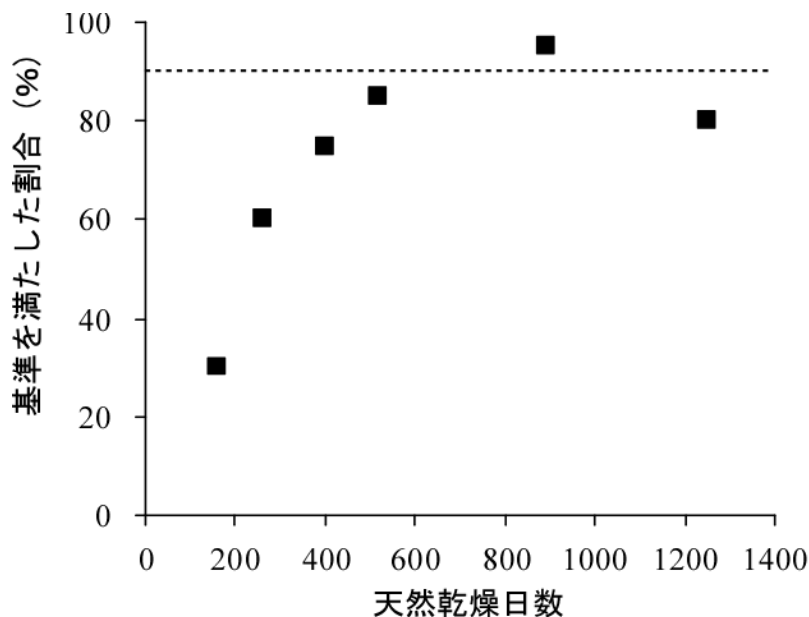


図 2.1.11 天然乾燥日数別の含水率20%以下の出現率の割合
——：製材JASが規定する出現率の下限

2.1.4 まとめ

天然乾燥材の修正挽き後の寸法変化およびねじれの発生は、修正挽き後の含水率変化が影響しており、天然乾燥 160 日間とした条件と比較して 260 日間以上の仕上がり含水率は低く、仕上がり含水率が低いほど、修正挽き後の寸法変化とねじれは小さくなった。

また、天然乾燥期間が 260 日間以上の 5 条件は、仕上がり含水率、寸法変化、ねじれも同程度であった。さらに、これらの材の修正挽き後の寸法変化は-1.5 mm以内にとどまり、製材 J A S の含水率基準と寸法基準を満たすことが示唆された。また、天然乾燥後の人工乾燥機による追加乾燥は、修正挽き後の寸法変化とねじれの抑制に効果的であることが明らかとなった。

2.2 内部割れの発生に及ぼす高温セット処理条件の影響¹⁰⁷⁾

2.2.1 はじめに

古来より木造軸組工法住宅の横架材として利用されてきた針葉樹心持ち平角材は、近年になり針葉樹人工林で蓄積量が増えつつある大径材の有効活用方法の一つとして、その利用促進が期待されている。

また、平成 12 年に住宅の品質確保の促進等に関する法律が施行されて以降、木造軸組工法住宅に使われる構造材は含水率・強度・表面割れ等の品質表示が求められており、心持ち平角材の利用促進には、人工乾燥技術の確立が不可欠とされている⁹⁶⁾。

現在、木材乾燥装置として国内で最も広く普及している蒸気加熱方式を用いた人工乾燥設備(以下蒸気式乾燥とする)を使用して、人工乾燥時の最高温度を 100℃超とする高温セット処理法は、心持ち正角材の乾燥時間の短縮と表面割れ発生の抑制に効果的とされている⁹⁷⁻¹⁰¹⁾。

また、高温セット処理法による針葉樹心持ち平角材の人工乾燥試験でも、心持ち正角材の場合と同様の効果が確認されており、高温セット処理法を用いた心持ち平角材の人工乾燥技術の開発は、心持ち平角材の利用促進に資すると考えられる。

一方で、木造軸組工法住宅の横架材として用いられる心持ち平角材は、柱間のスパン、垂木または根太等を通じて上部に積載される重量、さらに使用する樹種により、必要となる断面寸法が異なるため、心持ち平角材の樹種および断面寸法が高温セット処理後の品質に及ぼす影響について検討が必要となるが、これらに関する報告は少ない。また、高温セット処理法により断面内に発生する内部割れは、せん断強度低下の要因となると報告されており^{102,103)}心持ち平角材に内部割れが発生した場合、横架材の接合部のせん断耐力の低下が危惧されるため、内部割れを抑制した高温セット処理法の検討が必要である。

そこで本研究は、針葉樹心持ち平角材の適切な高温セット処理条件の検討を目的として、アカマツ (*Pinus densiflora* Sieb. et Zucc.)・カラマツ (*Larix kaempferi* Carrière.)・スギ (*Cryptomeria japonica* D.Don)の 3 樹種について、3 種類の断面寸法の心持ち平角材に、処理温度と時間が異なる 6 条件の高温セット処理を行い、高温セット処理直後の含水率分布、内部割れと表面割れの発生の違いを条件別に比較することで、高温セット処理条件が心持ち平角材の内部割れと表面割れの発生に及ぼす影響を分析した。

2.2.2 実験方法

○供試材

試験体は末口径約 30cm の丸太から製材したアカマツ、カラマツ、スギ心持ち平角材とした。試験体の長さは約 2000mm とし、断面寸法は長辺を 265mm、短辺を 135、155、185mm の 3 種類とした。試験体は高温セット処理時に木口からの急激な水分蒸発を防ぐため、木口をシーリング材(積水化学工業株式会社:セキスイシリコンシーラント)でシールした。また、試験体は高温セット処理前に長さ、長辺と短辺の寸法(mm)および質量(kg)を測定した。

○高温セット処理条件

人工乾燥機は高温タイプの蒸気式乾燥機(株式会社新柴:SKD-045Jr)を使用した。表 2.2.1 に本研究で実施した高温セット処理条件と試験体数を示す。

高温セット処理前の初期蒸煮は全て乾球温度 95℃, 湿球温度 95℃で 12 時間とした。本研究では, 高温セット処理時の最高温度が, 高温セット処理直後の含水率, 仕上がり後の内部および表面割れの発生に及ぼす影響を検討するため, 処理時間を 48 時間, 乾球温度を 100℃, 110℃, 120℃, 130℃ (以下 100℃-48h, 110℃-48h, 120℃-48h, 130℃-48h とする) の 4 種類とし, 乾湿球温度差は全ての条件で 30℃とした。

さらに, 高温セット処理時間の影響についても検討するため, 乾球温度を 130℃, 処理時間を 8 時間, 24 時間(以下 130℃-8h, 130℃-24h とする)の 2 種類に 130℃-48h の結果を加えて比較した。本研究で実施した高温セット処理条件は, 合計 6 条件であり, 条件別に供試した試験体数は, 樹種および断面寸法毎に 3 体とした。

表 2.2.1 高温セット処理*条件と試験体数

高温セット処理条件					
乾球温度		100℃	110℃	120℃	130℃
湿球温度		70℃	80℃	90℃	100℃
処理時間	8h	-	-	-	3
	24h	-	-	-	3
	48h	3	3	3	3

*: 生材時の心持ち平角材を乾燥初期に高温低湿で処理する方法

○ 高温セット処理直後の測定

図 2.2.1 に実験全体の流れを示す。本来の高温セット処理法による人工乾燥は, 高温セット処理後に乾球温度 90℃, 湿球温度 60℃の中温乾燥工程に移行し, 含水率を目標値まで低下させることとしている¹⁰⁴⁾。本研究では, 高温セット処理直後の含水率が, 仕上がり後の内部および表面割れの発生に及ぼす影響を検討するため, 高温セット処理直後の含水率の測定, および断面内の内部割れと表面割れの有無を観察するとともに, 半年間の天然乾燥で含水率を目標まで低下させた後の含水率, 断面内の内部と表面割れを測定した。

図 2.2.2 に高温セット処理直後の含水率測定方法を示す。高温セット処理直後の試験体は, 質量を測定後, 木口より 500mm の箇所では長辺の両表面から 50mm の位置で分割した試験片を切り出し, 表面からの距離が 5, 15, 30, 50, 75, 100, 125, 132.5mm の位置で小分割した試験片の含水率を全乾法により測定し, 断面内の含水率分布を求めた。したがって, 小分割した試験片の厚さは, 短辺 135mm では 35mm, 155mm では 55mm, 185mm

では 85mm となる。さらに、小分割した試験片を含む全体の全乾前後の質量差から求めた含水率を高温セット処理直後の含水率とした。

2.4 天然乾燥後の測定

高温セット処理直後の含水率試験片を採取した後、試験体は 2012 年 5 月から同年 11 月までの約半年間、岩手県林業技術センター(岩手県矢巾町)の実験棟内で天然乾燥した。天然乾燥中の室内の平均温度は約 19℃、平均湿度は 59%であり、平衡含水率は約 11%と推定される⁹⁷⁾。図 2.2.2 に天然乾燥後の内部および表面割れの測定方法を示す。天然乾燥終了後、試験体の木口 500mm の部位から、厚さ 50mm の試験片を採取し、木口面のスキャン画像に対し、imageJ1.43u(NIH)を用いて画像解析を行い¹¹⁸⁾、内部割れ長さ合計(mm)を測定した。また、試験片の表層に発生した割れの最大幅を表面割れ幅(mm)としてデジタルノギス(精度 0.1mm)で測定した。表面および内部割れの測定が終了した試験片は、全乾法により仕上がり含水率 (%)を測定した。

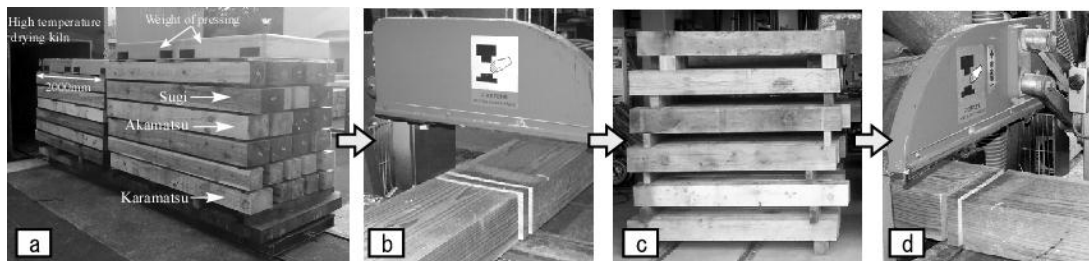


図 2.2.1 心持ち平角材の高温セット処理試験の流れ

- a: 異なる条件による高温セット処理
- b: 試験体は高温セット処理直後に含水率試験体を採取
- c: 半年間、屋内で天然乾燥
- d: 養生後、試験体は含水率試験体を採取し、内部割れと表面割れを測定
樹種はアカマツ、カラマツ、スギ心持ち平角材。

断面寸法は、短辺が135mm, 155mm, 185mm. 長辺は265mmに統一.

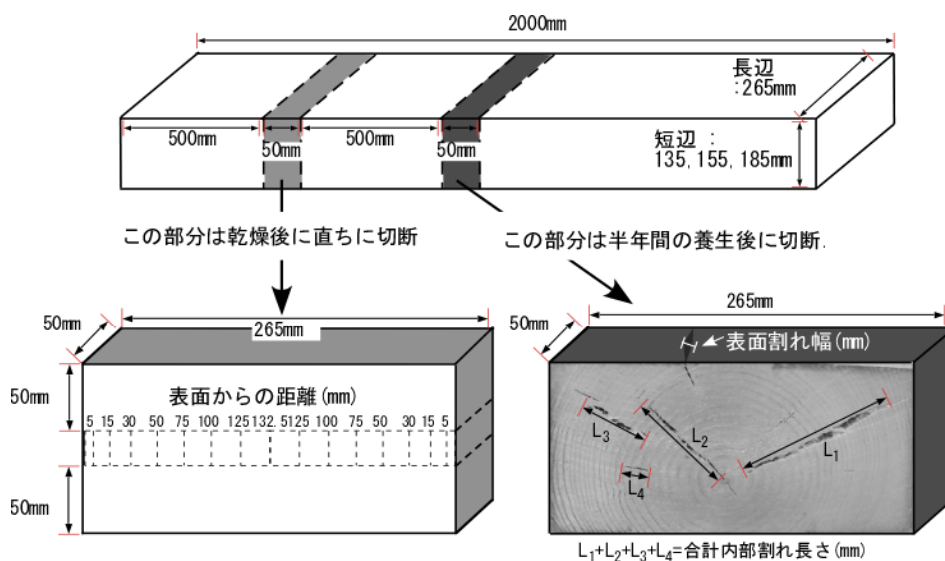


図 2.2.2 含水率測定、内部割れおよび表面割れの測定方法

○高温セット処理前の含水率の推定

高温セット処理前の含水率は、高温セット処理前後の質量および高温セット処理直後の含水率から全乾質量を推定して以下式(1)、(2)のとおり求めた。

$$U_i = \left\{ \frac{W_i - W_0}{W_0} \right\} \times 100(\%) \dots (1)$$

$$W_0 = \frac{W_s}{\frac{U_s}{100} + 1} \dots (2)$$

U_i : 高温セット処理前の含水率 (%)

U_s : 高温セット処理直後の含水率 (%)

W_i : 高温セット処理前の質量 (kg)

W_s : 高温セット処理後の質量 (kg)

W_0 : 推定全乾質量 (kg)

2.2.3 結果と考察

○高温セット処理条件と含水率との関係

図 2.2.3 に断面寸法を全て含めた高温セット処理前後および天然乾燥後の含水率の平均値を樹種別、高温セット処理条件別に示す。全ての樹種で、含水率は高温セット処理により急激に低下し、さらにその後の半年間の天然乾燥でも低下した。また、高温セット処理直後の含水率は、高温セット処理条件と樹種により異なる傾向が見られた。

図 2.2.4 に高温セット処理直後の含水率の平均値を断面寸法別に示す。アカマツとカラマツは、全ての高温セット処理条件で短辺 135mm の試験体と比較して短辺 185mm は含水率が高くなる傾向が見られた。一方で、スギは高温セット処理直後の含水率のバラツキが大きく、断面寸法による含水率の差が他の樹種と異なる傾向が見られた。

図 2.2.5 にアカマツ心持ち平角材の高温セット処理直後の含水率をセット処理時の温度別に示す。アカマツ心持ち平角材の高温セット処理直後の含水率は、セット処理時の温度に反比例して直線的に低下することが示された。また、断面寸法が大きいほど同じ温度でも高温セット処理直後の含水率は高いことが示された。

図 2.2.6 にアカマツ心持ち平角材の高温セット処理直後の含水率を処理時間別に示す。高温セット処理時の温度が同じ場合、アカマツ心持ち平角材の高温セット処理直後の含水率は、セット処理時時間に反比例して直線的に低下することが示された。また、断面寸法が大きいほど同じ処理時間でも高温セット処理直後の含水率は高いことが示された。

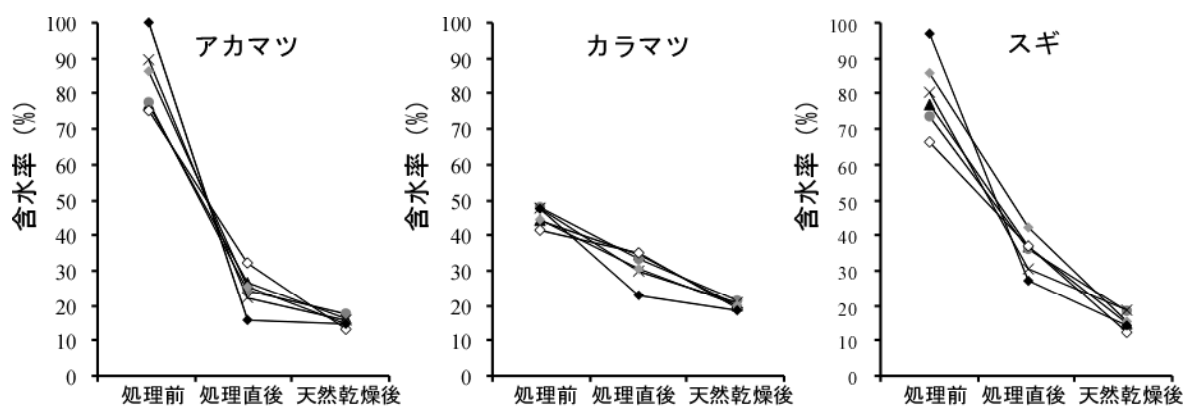


図 2.2.3 高温セット処理前後と天然乾燥後の含水率の比較

▲ 100°C-48h ● 110°C-48h × 120°C-48h
 ◇ 130°C-8h ◆ 130°C-24h ◆ 130°C-48h

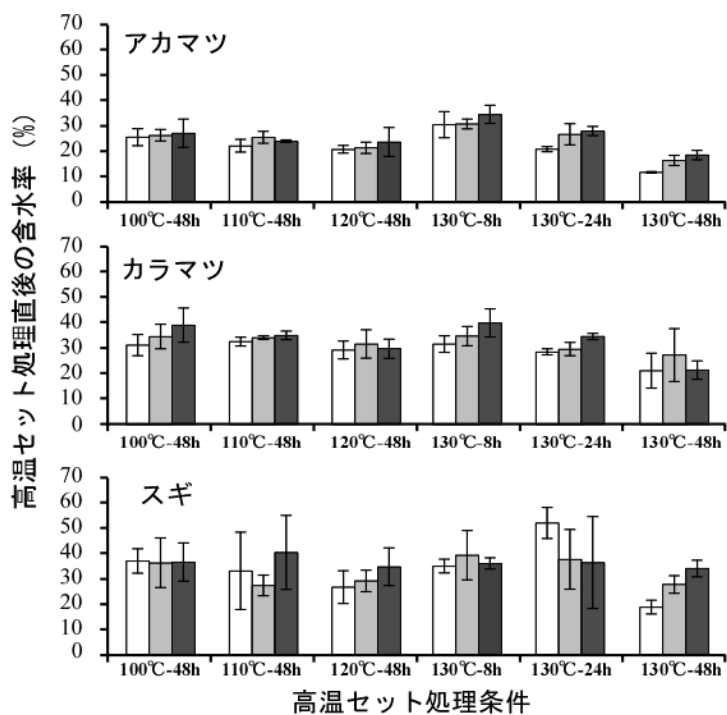


図 2.2.4 高温セット処理条件と高温セット処理直後の含水率の関係

短辺の長さ □ 135mm ■ 155mm ■ 185mm

誤差バー:標準偏差

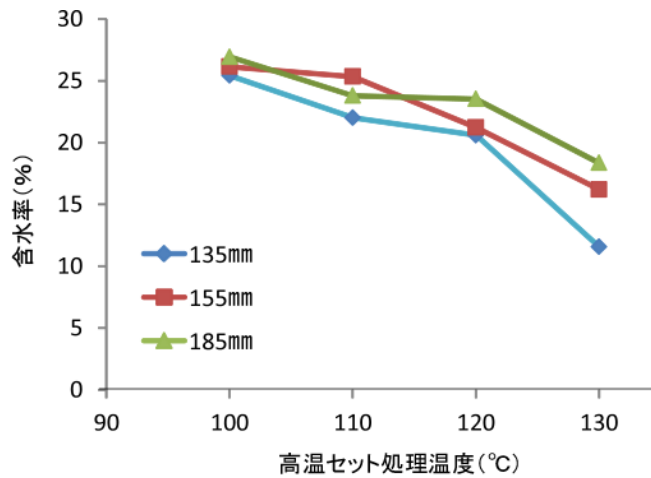


図 2.2.5 高温セット処理温度別の含水率の比較

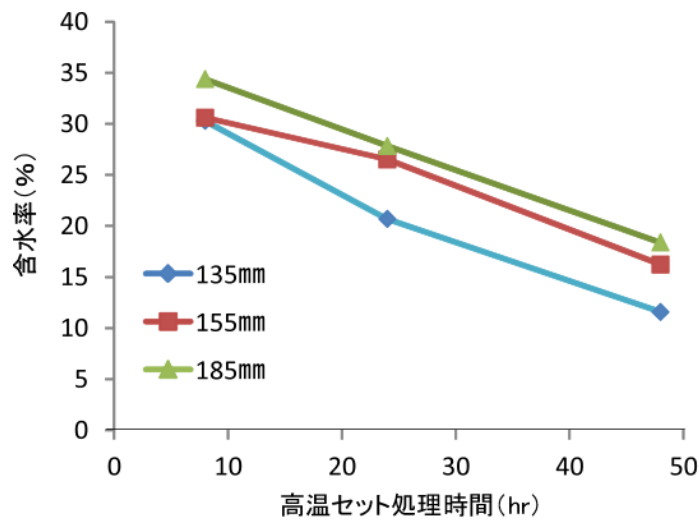


図 2.2.6 高温セット処理時間別の含水率の比較

図 2.2.7 に高温セット処理前と高温セット処理直後の含水率の関係を樹種別に示す。スギは高温セット処理前と高温セット処理直後の含水率との間には危険率 5%で有意な正の相関関係が示されており、高温セット処理条件と含水率との関係を断面寸法別に検討する際は、あらかじめ重量選別を行うなど、生材含水率のバラツキの影響を排除する必要があると考えられる。

図 2.2.8 に高温セット処理条件 100°C-48h と 130°C-48h の高温セット処理直後の含水率分布の平均値を断面寸法別に示す。高温セット処理条件 130°C-48h の含水率分布は、100°C-48h と比較して、表面から内側にかけての含水率の低下が大きく、高温セット処理時の温度が高くなると、断面内部まで高温セット処理直後の含水率が減少することが示された。

さらにアカマツは、高温セット処理条件 100°C-48h と比較して、130°C-48h では短辺 135mm の含水率分布が短辺 155mm および 185mm よりも下方に位置しており、アカマツの場合、高温セット処理時の温度が高くなると、断面内部の含水率減少の程度が断面寸法でも異なると考えられた。

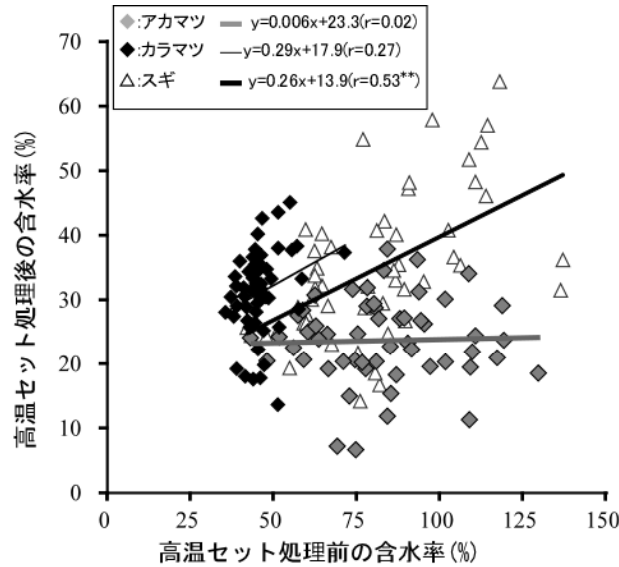


図 2.2.7 高温セット処理前後の含水率の関係

r : 相関係数 ** 1%水準有意

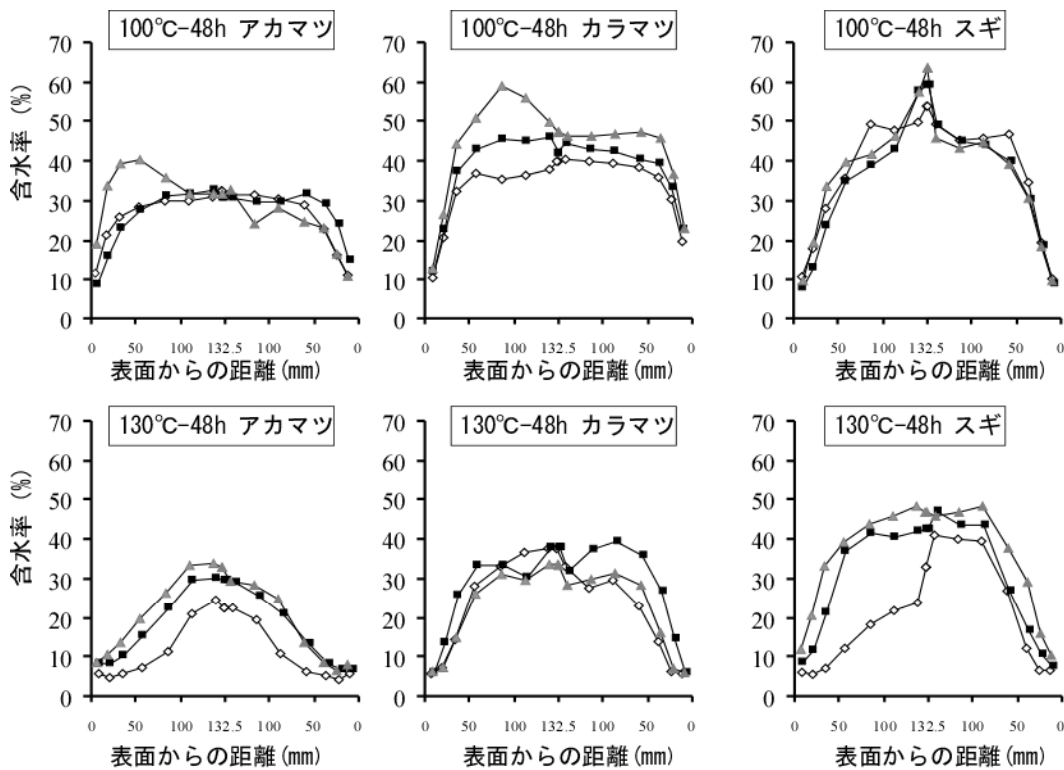


図 2.2.8 高温セット処理条件 100°C-48hと130°C-48hの断面内含水率分布の比較
短辺の長さ ◇ 135mm ■ 155mm ▲ 185mm

徳本らは、心持ち正角材の高温セット処理での表層と内層との応力転換は表層の含水率と関係し、表層の含水率 10%前後で応力転換が認められると報告している¹⁰⁶⁾。

そこで図 2.2.9 に高温セット処理直後の含水率が 10%以下となった部位の表層からの距離を高温セット処理温度および処理時間別に示す。全ての樹種で、高温セット処理時の温度が高いほど、また高温セット処理時間が長いほど内部まで乾燥が進行し、含水率 10%以下の表層からの距離が長くなっていることが示され、高温セット処理による応力転換がより内部で発生していると推察された。さらに全ての樹種で、高温セット処理時の乾球温度が高いほど、また高温セット処理時間が長いほど、断面寸法による含水率 10%以下の表層からの距離の差が大きくなる傾向が見られた。

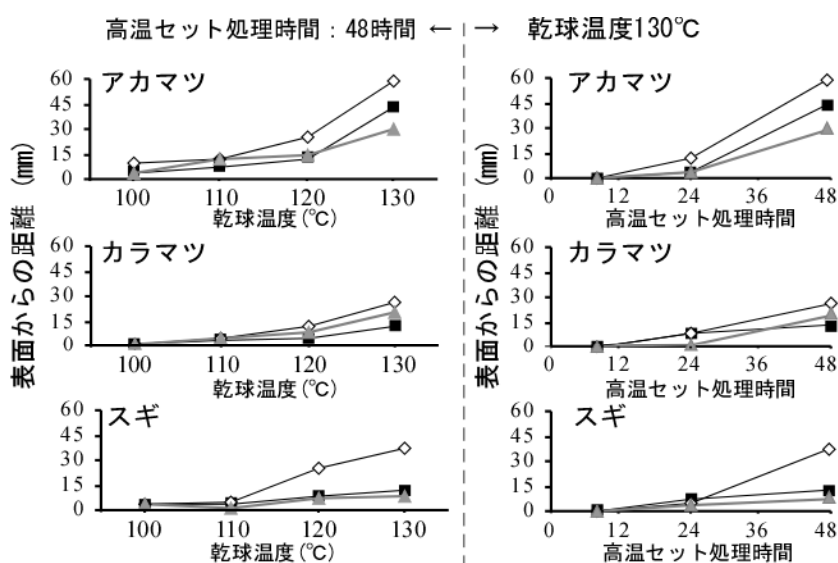


図 2.2.9 高温セット処理直後に含水率10%以下となった部位の表面からの距離.
短辺の寸法 ◇ : 135mm ■ : 155mm ▲ : 185mm

○ 高温セット処理条件と内部割れとの関係

高温セット処理直後の試験片採取時(図 2.2.2)に、試験体の断面を観察した結果、全ての試験体で内部割れは観察されず、内部割れは高温セット処理後の天然乾燥中に発生したと考えられた。図 2.2.10 に高温セット処理条件別の内部割れ長さ合計の平均値を樹種別、断面寸法別に示す。全ての樹種で、内部割れ長さ合計は高温セット処理温度が高いほど、処理時間が長いほど増加する傾向を示した。一方で、断面寸法と内部割れ長さ合計との間に明確な関係は見られなかった。また、樹種と内部割れとの関係を検証するため、断面寸法を全て含めた場合の樹種を要因とする内部割れの分散分析を高温セット処理条件別に行った結果、全ての高温セット処理条件で樹種間の内部割れ長さ合計には、危険率 5%で有意な差が見られなかった。

図 2.2.11 に断面寸法を全て含めた場合の、高温セット処理時の乾球温度と内部割れ長さ合計との関係を樹種別に示す。全ての樹種で高温セット処理時の乾球温度が高くなると内

部割れ長さ合計の平均値も大きくなる傾向が見られた。そこで、高温セット処理時の乾球温度と内部割れとの関係を検証するため、高温セット処理時の乾球温度を要因とする分散分析および多重比較を行った結果、アカマツとスギは危険率 5%で乾球温度 100℃と比較して 120℃, 130℃で有意な差が認められた。一方で、カラマツは全ての高温セット処理条件で内部割れ長さ合計に危険率 5%で有意な差は見られなかった。

図 2.2.12 に断面寸法を全て含めた場合の、高温セット処理時間と内部割れ長さ合計との関係を樹種別に示す。乾球温度 130℃の場合、全ての樹種で高温セット処理時間が長くなると内部割れ長さ合計の平均値も大きくなる傾向が見られた。そこで、高温セット処理時間と内部割れとの関係を検証するため、高温セット処理時間を要因とする分散分析および多重比較を行った結果、アカマツとスギは危険率 5%で 8 時間と比較して 24, 48 時間で有意な差が認められた。また、カラマツは危険率 5%で 8 時間と比較して 48 時間で有意な差が認められた。

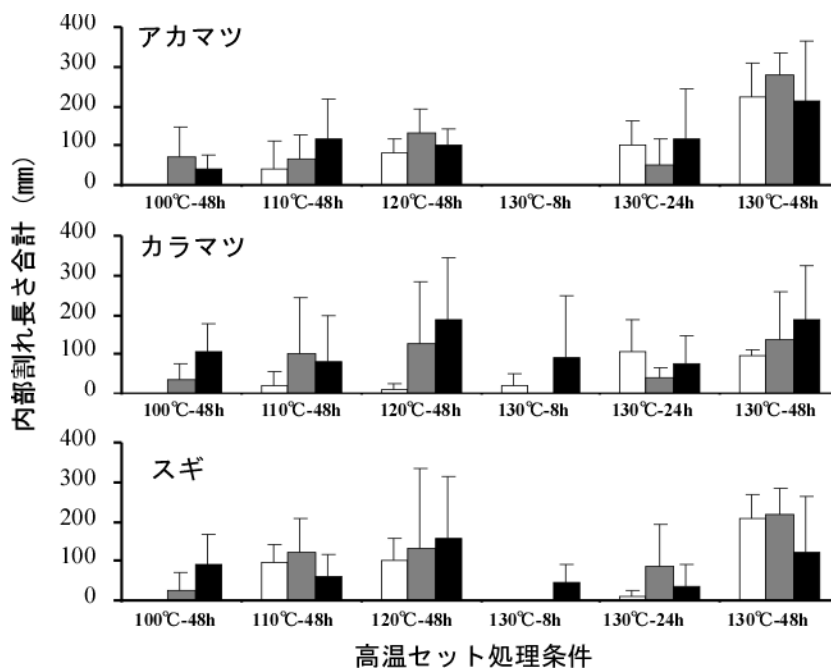


図 2.2.10 高温セット処理条件と合計内部割れ長さの関係
短辺の長さ □:135mm ■:155mm ■:185mm

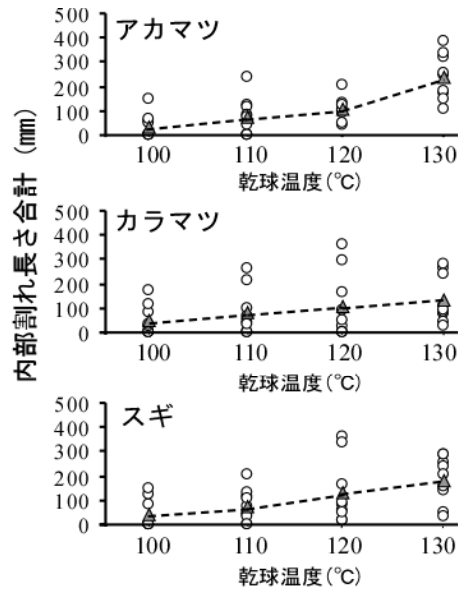


図 2.2.11 内部割れ長さ合計に及ぼす高温セット処理温度の影響

▲ : 平均値

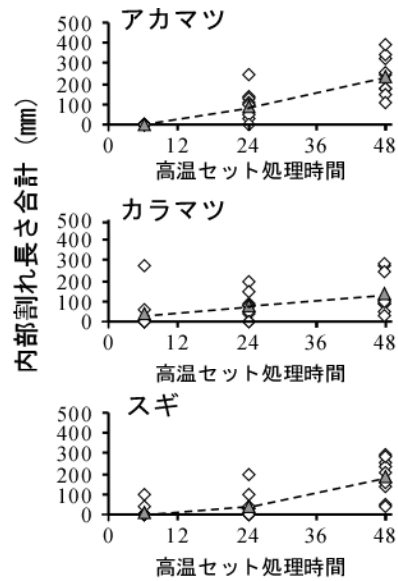


図 2.2.12 内部割れ長さ合計に及ぼす高温セット処理時間の影響

▲ : 平均値

内部割れの発生は内層部に発生する引張応力に影響されることから^{101, 106)}、高温セット処理条件で内部割れ長さに差が見られたのは、図 2.2.8, 図 2.2.9 に示すとおり、高温セット処理直後の含水率が処理条件で異なったことによると推察された。そこで、図 2.2.13 に高温セット処理直後の含水率と内部割れ長さ合計との関係を樹種別、高温セット処理条件別に示す。アカマツは高温セット処理直後の含水率と内部割れ長さ合計との間に危険率 1% で、スギは危険率 5% で有意な負の相関関係が見られた。さらに、高温セット処理直後の含水率を説明変数とする近似直線の傾きは、乾球温度別と処理時間別とで、ほぼ同様の傾向を示しており、高温セット処理直後の含水率が内部割れの発生に影響していることが示された。

一方で、カラマツは高温セット処理直後の含水率と内部割れ長さ合計との間に有意な相関関係が見られなかった。カラマツは他の樹種と比較して、高温セット処理直後の含水率以外にも、高温セット処理前の断面内の含水率分布、心材率、年輪幅など材質的な因子が内部割れの発生に影響を及ぼしていると推察されるが、その詳細な原因については今後の検討が必要である。また、アカマツとスギは、高温セット処理直後の含水率が内部割れの発生に影響していることが示されたことから、内部割れを制御する方法として、高温セット処理中の含水率計測は有用な手段の一つであると考えられた。

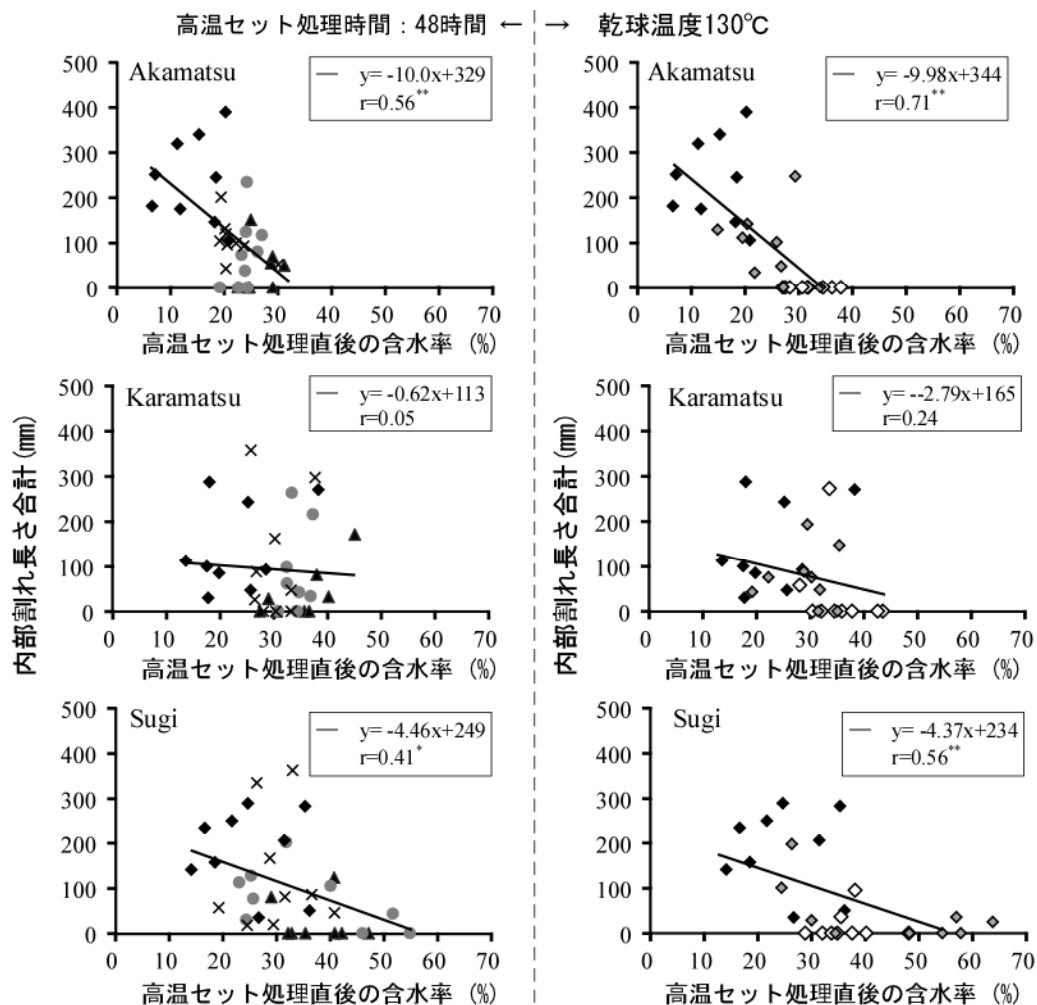


図 2.2.13 高温セット処理直後の含水率と内部割れ長さ合計との関係。

▲:100°C-48h ●:110°C-48h ×:120°C-48h ◇:130°C-8h ◆:130°C-24h ◆:130°C-48h
r : 相関係数 * 5%有意水準 ** 1%有意水準

○ 高温セット処理条件と表面割れとの関係

図 2.2.14 に高温セット処理条件別の表面割れ幅の平均値を断面寸法別に示す。カラマツとスギは高温セット処理条件で、表面割れ幅に明確な差が見られなかった。一方で、アカマツは全ての高温セット処理条件で、スギ、カラマツと比較して表面割れ幅が大きくなる傾向が見られた。アカマツは他の樹種と比較して、高温セット処理時の表層の収縮が大きく、表面割れの抑制を目的として表層に形成される引張セットが小さいため表面割れの発生が大きくなることが報告されており²⁷⁾、今回の結果からも同様の傾向が示されたと考えられる。図 2.2.7 に示すとおり、アカマツはカラマツ、スギと比較して、高温セット処理により含水率の減少が内部まで進行しており、高温セット処理時に表層の収縮がより内部まで発生したことにより、表面割れが大きくなったとも推察された。

また、アカマツとスギは、高温セット処理条件によらず、短辺 185mm の試験体の表面割れ幅の平均値が他の寸法よりも大きくなる傾向が見られた。この原因として、心持ち平角材は短辺の寸法が大きくなると、高温セット処理中に表層に形成される引張セットが小さくなる、または高温セット処理後の天然乾燥過程で表層に発生する圧縮応力が小さくなることが考えられるが、その詳細な原因については今後の検討が必要である。

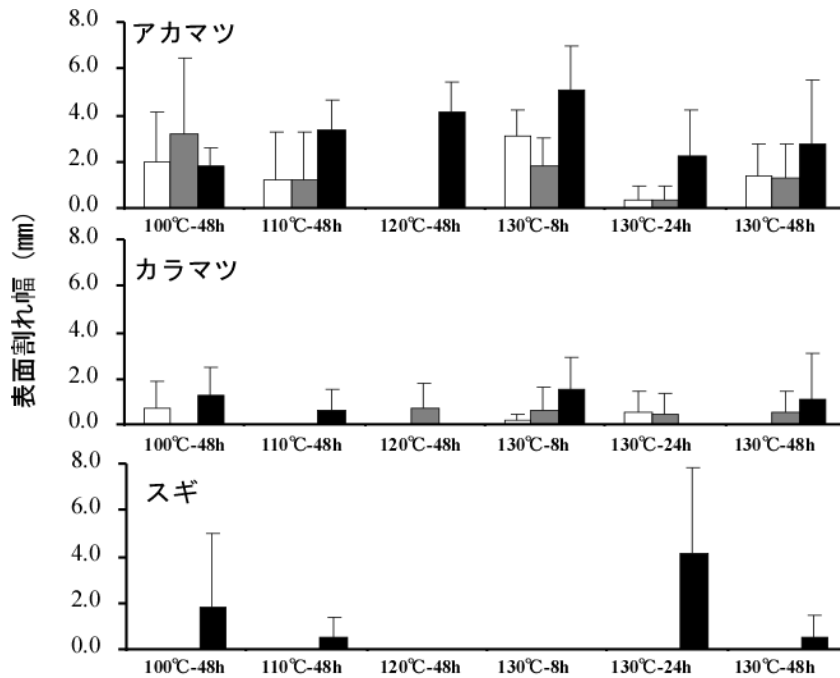


図 2.2.14 高温セット処理条件と表面割れ幅の関係
短辺の長さ □:135mm ■:155mm ■:185mm

2.2.4 まとめ

心持ち平角材の内部割れと表面割れの発生を抑制した高温セット処理技術の開発を目的として、アカマツ・カラマツ・スギ心持ち平角材の高温セット処理条件と断面寸法が内部割れと表面割れの発生に及ぼす影響を分析した。その結果、アカマツとスギは高温セット処理直後の含水率が内部割れの発生に影響を及ぼすことが示され、高温セット処理中の含水率の計測は、内部割れの発生を抑制する方法として有用な手段の一つであると考えられた。また、高温セット処理条件によらず、アカマツの表面割れはカラマツ、スギと比較して、大きくなる傾向が示された。さらに、アカマツとスギは断面寸法が大きくなると、表面割れも大きくなる傾向が示された。

2.3 高温セット処理後の乾燥時間の推定¹⁰⁷⁾

2.3.1 はじめに

近年、心持ち平角材(以下「平角材」という。)の人工乾燥は表面割れ抑制と乾燥時間短縮に効果的な高温セット処理が主流となっており、最近では樹種別の高温セット処理温度および処理時間に関する研究も報告されている。

一方、高温セット処理による人工乾燥技術は、高温セット処理後に平角材の含水率を目標値まで低下させるための乾燥温度 100℃以下の人工乾燥(以下「中温乾燥」という。)の検討も必要となる。

さらに、高温セット処理直後の平角材の含水率は、高温セット処理条件および樹種で異なるため、高温セット処理直後の含水率が中温乾燥時間に及ぼす影響を明らかにする必要がある。そこで本研究は、高温セット処理後の中温乾燥の検討を目的として、温度と時間が異なる高温セット処理をした平角材の中温乾燥試験を行い、中温乾燥前後の含水率から高温セット処理後の適正な中温乾燥時間を推定した。

2.3.2 実験方法

○試験体

試験体は末口径約 30cm の丸太から製材したアカマツ、カラマツ、スギ平角材とした。試験体の長さは約 2000mm とし、断面寸法は 155mm×265mm とした。試験体は高温セット処理時に木口からの急激な水分蒸発を防ぐため、木口をシーリング材でシールした。

表 2.3.2 に試験体の材質測定結果を示す。試験体は高温セット処理前に重量と寸法を測定し、生材密度を求めた。試験体数は条件別に各樹種 5 体とし、生材密度の平均が条件間で等しくなるよう振り分けた。

○高温セット処理条件

人工乾燥機は高温タイプの蒸気式乾燥機を使用した。

表 2.3.2 に本研究で実施した高温セット処理条件を示す。高温セット処理前の初期蒸煮は乾球温度 95℃、湿球温度 95℃で 12 時間とした。本研究では、高温セット処理時の時間(以下「高温セット処理時間」という。)および処理温度(以下「高温セット処理温度」という。)が、高温セット処理直後の含水率に及ぼす影響を検討するため、高温セット処理時間を 18 時間および 36 時間とし、高温セット処理温度を 100℃、110℃、120℃とし、合計 6 種類の高温セット条件(以下 100℃-18h, 100℃-36h, 110℃-18h, 110℃-36h, 120℃-18h, 120℃-36h とする)で試験を行った。また、乾湿球温度差は全ての条件で 30℃とした。

高温セット処理後、試験体は直ちに乾燥機から搬出し、高温セット処理直後の質量を測定した。中温乾燥：高温セット処理直後の試験体は質量を測定後、直ちに乾球温度 80℃、湿球温度 50℃で中温乾燥した。中温乾燥時間は、高温セット処理温度 100℃と 110℃は約 14 日間、120℃は約 7 日間とした。

表 2.3.1 試験体の密度と初期含水率

樹種	n	幅		高さ	長さ	生材密度	初期含水率
		mm	mm	mm	mm	kg/m ³	%
アカマツ	30	mean	262	141	2025	673	73.5
		S.D	0.5	0.9	19.5	71.8	20.7
カラマツ	30	mean	262	142	2066	613	48.8
		S.D	0.5	0.9	19.7	64.3	18.4
スギ	30	mean	263	142	2040	607	105.0
		S.D	2.0	2.2	25.4	132	45.5

・mean:平均値
 ・S.D:標準偏差

表 2.3.2 高温セット処理条件と中温乾燥条件

高温セット条件	高温セット処理		中温乾燥	
	乾球温度	処理時間	乾球温度	処理時間
	°C	h	°C	h
100°C-18h	100	18	80	341
100°C-36h		36		323
110°C-18h	110	18	80	358
110°C-36h		36		340
120°C-18h	120	18	80	176
120°C-36h		36		158

・初期蒸気は湿球温度95°Cで12時間
 ・高温セット処理および中温乾燥の乾湿球温度差は30°C

○含水率の測定

中温乾燥直後の試験体は、質量を測定後、木口より 500mm の箇所から長さ 50mm の小片を採取し、全乾前後の質量差から仕上がり含水率を求めた。また、試験体の初期含水率および高温セット直後の含水率は、高温セット処理前後に測定した質量、中温乾燥後の質量および仕上がり含水率から推定した。

○中温乾燥時間の推定

中温乾燥時の平衡含水率を 2.9%として、中温乾燥前後の含水率から乾燥速度係数(k 値)を算出し¹⁰⁸⁾、¹⁰⁹⁾、中温乾燥時の含水率減少曲線を求めた。このとき、含水率減少曲線の始点を高温セット処理直後の含水率、終点を含水率 15%として、始点から終点までの時間を中温乾燥時間とした。

2.3.3 結果と考察

○ 高温セット処理直後の含水率の比較

図 2.3.1 に高温セット処理直後の含水率を高温セット処理条件別および樹種別に示す。アカマツおよびカラマツの高温セット処理直後の含水率は、高温セット処理温度が高いほど低くなった。さらに、高温セット処理直後の含水率は、全ての樹種および高温セット処理条件で、高温セット処理時間 18 時間と比較して 36 時間で低くなった。

一方、スギの高温セット処理直後の含水率は、アカマツおよびカラマツと比較して高くなった。さらに、スギの高温セット処理直後の含水率のバラツキは、アカマツおよびカラマツと比較して大きくなった。

図 2.3.2 に初期含水率と高温セット処理直後の含水率の関係を樹種別および高温セット処理条件別に示す。スギの初期含水率は、アカマツおよびカラマツと比較してバラツキが大きく、これにより同一の高温セット処理条件でも、高温セット処理直後の含水率にバラツキが生じていることが示された。また、アカマツの初期含水率と高温セット処理直後の含水率の相関は、カラマツおよびスギと比較して低く、アカマツの高温セット処理直後の含水率に及ぼす初期含水率の影響は、カラマツおよびスギと比較して少ないと考えられた。

○ 高温セット処理後の中温乾燥時間

図 2.3.3 に中温乾燥終了後の仕上がり含水率を条件別および樹種別に示す。アカマツおよびカラマツの仕上がり含水率は、高温セット処理時間 18 時間と比較して 36 時間で低くなり、高温セット処理直後の含水率が中温乾燥後の仕上がり含水率に影響していると考えられた。

図 2.3.4 に高温セット処理直後の含水率と中温乾燥時間との関係を樹種別に示す。含水率 15% までの中温乾燥時間は、全ての樹種で高温セット処理直後の含水率と正の相関が見られた。このことから、中温乾燥時間は高温セット処理直後の含水率に影響されることから、高温セット処理直後の含水率を把握することで、中温乾燥時間の推測は可能と考えられた。

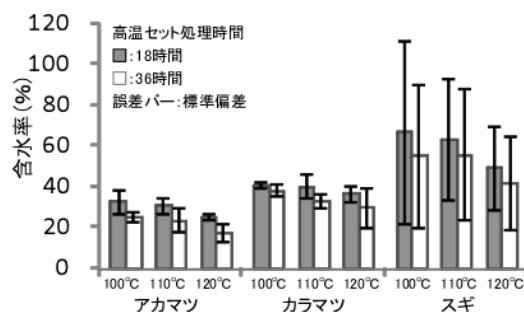


図 2.3.1 高温セット処理直後の含水率の比較

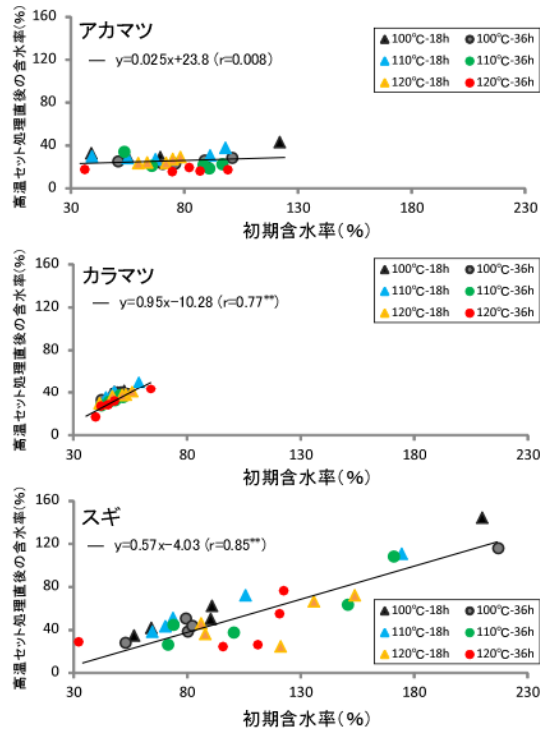


図 2.3.2 初期含水率と高温セット処理直後の含水率の関係

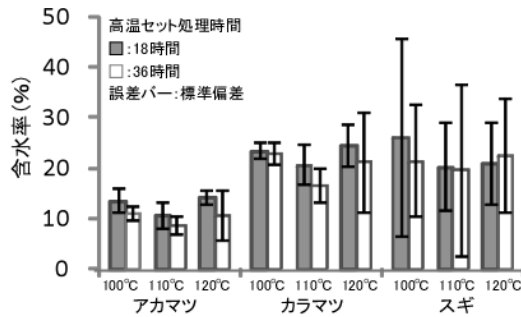


図 2.3.3 中温乾燥後の含水率の比較

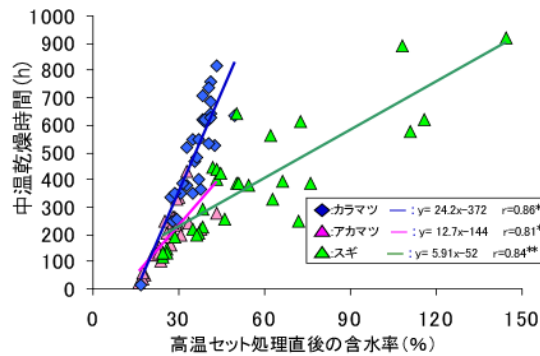


図 2.3.4 高温セット処理直後の含水率と中温乾燥時間の関係

2.3.4 まとめ

高温セット処理後の中温乾燥の検討を目的として、温度と時間が異なる高温セット処理をした平角材の中温乾燥試験を行い、中温乾燥前後の含水率から高温セット処理後の適正な中温乾燥時間を推定した。その結果、高温セット処理後の中温乾燥時間は、高温セット処理直後の含水率から推定可能であることが明らかとなった。また、仕上がり含水率の均一化を図るためには、高温セット処理直後の含水率の均一化が重要であることが明らかとなった。

2.4 平角材の人工乾燥スケジュールの確立

2.4.1 はじめに

上述で検討したアカマツ心持ち材の高温セット処理温度およびセット処理後の人工乾燥時間の研究から、以下のことが明らかとなっている。

- ① 高温セット処理直後の含水率は、高温セット処理温度が高いほど、処理時間が長いほど低下（図 2.2.5, 図 2.2.6）
 - ② 仕上がり後の内部割れは、高温セット処理温度 120℃以上で拡大(図 2.2.11)
 - ③ 内部割れは、処理時間に比例して拡大(図 2.2.12)
 - ④ 高温セット処理直後の含水率が低いほど、内部割れは大きい（図 2.2.13）
 - ⑤ 高温セット処理温度 110℃以上になると、仕上がり後の表面割れ幅に有意な差は見られない（図 2.2.14）
 - ⑥ 高温セット処理直後の含水率から、中温乾燥時間は推定可能（図 2.3.4）
- そこで、アカマツ心持ち平角材の人工乾燥スケジュールの確立を試みた。

2.4.2 結果

○ 高温セット処理条件の検討

図 2.2.14 に示すとおり、高温セット処理後の表面割れは、高温セット処理温度 110℃以上で有意な差は見られない。人工乾燥は処理温度が高いほど、内部割れの拡大、材色変化、強度低下、燃料コスト増大¹¹⁰⁾につながることから、表面割れを抑制するためのアカマツ心持ち平角材の高温セット処理温度は 110℃以下とした。

図 2.2.12 に示すとおり、アカマツ心持ち平角材の内部割れ長さは、高温セット処理温度が同じ場合、処理時間に比例し、処理時間 24 時間の内部割れ長さは処理時間 48 時間の半分以下となる。また、図-11 に示すとおり、高温セット処理 110℃で処理時間を 48 時間とした場合の内部割れ長さは平均で約 75 mmとなっている。そこで、アカマツ心持ち平角材の高温セット処理後の内部割れを 50 mm以下と設定した場合、処理時間は 24 時間とした。

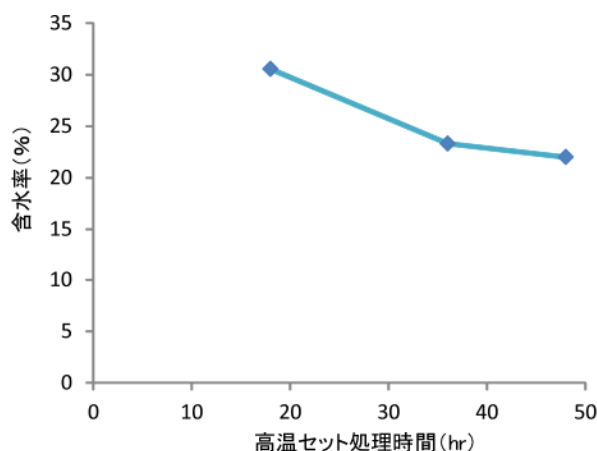


図 2.4.1 高温セット処理温度110℃での処理時間別の含水率の比較

○ 高温セット処理後の人工乾燥時間の検討

図 2.4.1 にアカマツ心持ち平角材の高温セット処理温度を 110℃とした場合の処理時間と高温セット処理直後の含水率との関係を示す。図から、高温セット処理温度 110℃、処理時間 24 時間とした場合の高温セット処理直後の含水率は約 28%であることが示された。そこで、図 2.3.4 に示した、アカマツ平角材の高温セット処理直後からの乾燥時間の以下の推定式から高温セット処理後の中温乾燥時間を求めた結果、約 210 時間と推定された。

$$y=12.7x-144 \quad y: \text{高温セット処理後の中温乾燥時間} \quad x: \text{高温セット処理直後の含水率}$$

上述の検討結果をまとめたアカマツ心持ち平角材の高温セット処理法による人工乾燥スケジュールを表-4 に示す。

また、今回作成した心持ち平角材の断面寸法は、短辺を 135 mmとしているが、短辺が 135 mm以上の平角材に、表 2.4.1 の高温セット処理条件を適用した場合、内部割れおよび表面割れの発生は短辺 135 mmの平角材と場合と同程度になることが予測される。一方で、断面寸法が大きいほど、高温セット処理直後の含水率は高いことから、高温セット処理後の中温乾燥時間は上述した式により補正が必要である。

2.4.3 まとめ

図 2.4.2 に示すとおり、今回作成したアカマツ心持ち平角材の高温セット処理法による人工乾燥スケジュールは、県内の製材所に普及することを目的として乾燥マニュアルとして刊行している。

表 2.4.1 内部割れ長さ合計を 50 mm以内にする人工乾燥スケジュール

ステップ	乾球温度 (°C)	湿球温度 (°C)	処理時間	備考
①	95	95	10	蒸煮
②	110	80	24	高温セット
③	80	50	210	乾燥



図 2.4.2 アカマツ心持ち平角材の高温セット処理による人工乾燥マニュアル
(発行:岩手県林業技術センター 2015.3 全20ページ)

第3章 梁材としての強度特性に関する研究

3.1 たいこ材と平角材の曲げ強度性能に及ぼす輪生節の影響¹¹¹⁾

3.1.1 はじめに

アカマツ丸太の髄を中心として平行に2材面を製材したアカマツたいこ材は、古くから伝統的建築物の小屋梁、桁に使われており、最近では地域材を利用した住宅で、床梁を意匠的に露出させる「あらわし」としても用いられている。

たいこ材は、同一規格の寸法を揃える事が難しいため、加工・木組みに熟練技術を必要とし、建築までの手間やコストが嵩むことから、近年は横架材としての需要は減少している。一方で、同材は平角材と比較して、丸太の利用歩留まりが高い、地域材を利用した公共施設または伝統的建築物の横架材としての需要が根強い、外材との競合が少ない、曲げ強度性能が高い¹¹²⁻¹¹⁶⁾などメリットも存在することから、今後人工林の高齢級化に伴い、生産量の増大が見込まれるアカマツ並材の中大径材の有効利用と国産材自給率の向上に向けて、一定の生産基盤を整備しておく必要がある¹¹⁷⁾。

また、たいこ材は平成19年に「製材の日本農林規格（以下製材JASとする）」の構造用製材として規定化されており¹¹⁸⁻¹¹⁹⁾、軸組工法住宅の横架材の設計で、平角材よりも曲げ強度性能が高いたいこ材を用いることにより、平角材と同程度の耐力を有する横架材を、より小径の丸太から得ることが可能となり、丸太の効率性向上に資すると予想される。

しかし、これまでのアカマツたいこ材の曲げ強度性能の研究では、平角材で行われてきたように¹²⁰⁻¹²¹⁾、曲げ強度性能に及ぼす輪生節の影響を検討し、製材JASの目視等級別の曲げ強度性能を検討した報告が見られない。

アカマツ平角材の場合、節径比と曲げ強度は高い相関を示し、さらに曲げ破壊では輪生節からの目切れが起因となる形態が多いことから、横架材としてのアカマツたいこ材の曲げ強度性能を平角材と比較する際は、節の影響を考慮した製材JAS目視等級別で評価する必要がある。

そこで本研究では、アカマツたいこ材の生産基盤整備を目的として、同じ地域で伐採したアカマツ丸太から製材したたいこ材と平角材の静的曲げ強度試験を行い、両者の曲げ強度性能について製材JASの目視等級別に比較した。さらに、細りのない同一の直径丸太から同一幅のたいこ材と平角材を製材したと想定した場合の、両者の丸太の直径と曲げ強度性能との関係を比較することで、たいこ材利用による丸太利用の効率性を評価した。

3.1.2 実験方法

○ 供試材

供試材としてのアカマツ丸太は、末口径28cm～36cm、長さ約4.2m、本数は91本とした。丸太は伐採後、直ちに幅150mmになるように丸太の髄を中心として平行に2材面を製材し、たいこ材とした。たいこ材は約1年半屋外で天然乾燥を行い、さらに半年間屋内で養生した後、平行する2材面の間隔を120mmに修正挽きし、供試材に仕上げた。

また、比較対照としての平角材は、たいこ材の丸太と同等の末口径をもつアカマツ丸太(末口径約 32cm,長さ約 4.2m)120 本について、幅 150mm,高さ 270mm の寸法で製材し、その後約 1 年半屋外で天然乾燥を行い、モルダーで寸法を高さ 240mm,幅 120mm,長さ 4000mm に仕上げた。

○ 目視等級区分および動的ヤング係数測定

たいこ材と平角材の広い材面は材縁部と中央部の単節・集中節を、狭い材面は全面にある単節・集中節を全て測定し、それぞれ材面の幅で除した節径比 (%)を求めた¹²²⁾。さらに試験体は平均年輪幅も測定し、製材 JAS の甲種構造材の構造用Ⅱに示されている節径比および平均年輪幅の上限値に従い目視等級 1 級, 2 級, 3 級および等級外に区分した¹²³⁾。

また、試験体は、曲げ試験前に FFT アナライザ(株式会社小野測器 CF-4210Z)を用いて縦振動法により 1 次の固有振動周波数を測定し、密度から動的ヤング係数(E_f)を求めた。

○ 曲げ強度試験

図 3.1.1 にたいこ材の曲げ強度試験状況を示す。たいこ材の曲げ試験は、丸身のついた面に加力するエッジワイズ方式とし、材の転倒を防ぐため、振れ止めを設置し、さらに両側の支点が試験機に接する位置に木製のくさびを挿入した。また、試験に供したたいこ材の末口径と元口径はほぼ同一であったが、丸太の 1 番玉から製材したたいこ材の中で、元口径が根張り等により、明らかに末口径よりも大きい供試材は、元口側の支点部分を切削し、末口径と同じ長さに調整した。曲げ強度試験は、構造用木材の強度試験マニュアル¹²⁴⁾に従い、能力 100 トンの油圧式強度試験機(株式会社前川試験機製作所)を用いて、スパン 3900mm,荷重点間距離 1300mm,せん断スパン 1300mm の 3 等分点 4 点荷重で行った。曲げ強度試験後、スパン中央の全体たわみから(1)式によるせん断の影響を含んだ見かけの曲げヤング係数(以下 E_m)と、(2)式による曲げ強度(以下 f_m)を算出した。

また、図 3.1.2 に示すように、たいこ材の断面二次モーメント (I)と断面係数 (Z)は、中央部の直径(以下、直径とする)を梁せい(h)として算出した。なお、平角材およびたいこ材の曲げ試験において、スパン中央の全体たわみは、支点部のめり込みを含めた値とした。

$$E_m = \frac{a(3L^2 - 4a^2)(F_2 - F_1)}{48I(w_2 - w_1)} \quad (1)$$

a : 試験条件の荷重点-支点間距離(1300mm)

L : 試験条件のスパン(3900mm) F_2 - F_1 :荷重変形曲線の直線部分の荷重の増分

I :断面 2 次モーメント(平角材: $bh^3/12$, たいこ材:図 3.1.2 参照)

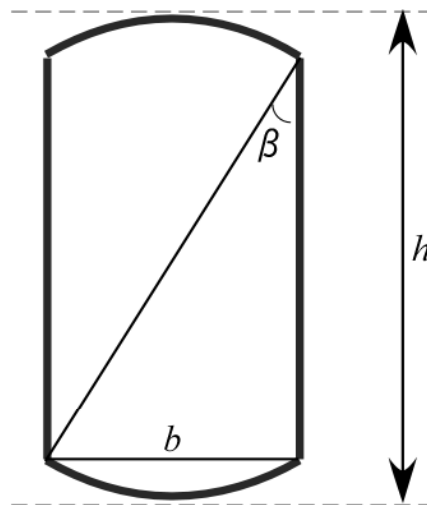
h : 梁せい (mm) b : 幅 (mm) w_2 - w_1 : F_2 - F_1 に対応する変形の増分

$$f_m = \frac{aF_{ult}}{2Z} \quad (2)$$

F_{ult} : 最大荷重 Z : 断面係数(平角材: $bh^2/6$, たいこ材:図 3.1.2 参照)



図 3.1.1 アカマツたいこ材の静的曲げ試験.



$$I = \frac{b(\sqrt{h^2 - b^2})^3}{12} + \frac{h^4}{128}(4\beta - \sin 4\beta)$$

$$Z = \frac{2I}{h}$$

図 3.1.2. たいこ材の断面2次モーメント.
 I : 2次モーメント領域 Z : 断面係数
 h : 高さ, b : 幅

なお、たいこ材の中央部の梁せい(h)は平均 309mm であり、それに対して曲げ強度試験時のせん断スパンは 1300mm と短いことから、たいこ材の $E_m \cdot f_m$ は、平角材と比較してせん断の影響を大きく受けていると考えられる。

一方で、本研究は、アカマツ並材の中大径丸太の有効利用の推進を目的として、通常の伐採現場での最大採材長 4.2m で伐採された、同等の末口径の丸太から製材した平角材とたいこ材を、同じ試験条件で実施したときの曲げ強度性能について比較・検討するため、式(1)・(2)で求めた平角材とたいこ材の $E_m \cdot f_m$ は両者の比較のための参考値とし、併せて横架材としての実用的な指標として、曲げ破壊時の最大荷重(以下 F_{ult})についても、両者を比較することとした。

さらに、構造用木材の強度試験マニュアルでは、試験方法に示される標準スパンと異なるスパンを用いた場合は $E_m \cdot f_m$ に係数を乗じ調整することとしている¹⁴⁹⁾。しかし、圧縮側・引張り側の材面が曲率をもつたいこ材に対して、平角材の調整係数が適用できるか不明であること、さらにたいこ材は真のヤング係数とせん断弾性係数の比(E/G)が不明であることから、本研究ではスパン条件による調整は行わないこととした。

また、たいこ材と平角材の f_m については、テイルフィット 2P-ワイブル分布を適用させた場合の信頼度 75% の 5% 下側許容限界値(以下 $f_{0.05}$)を各目視等級区分別に求めた¹²⁶⁾。曲げ強度試験終了後、文献¹²⁷⁾を参考として、図 3.1.3 に示すように破壊形態を 5 分類とし、各分類での出現率を求めた。さらに、供試材の非破壊部から試験片を採取し、全乾法による含水率(MC)と平均年輪幅(ARW)を求めた。

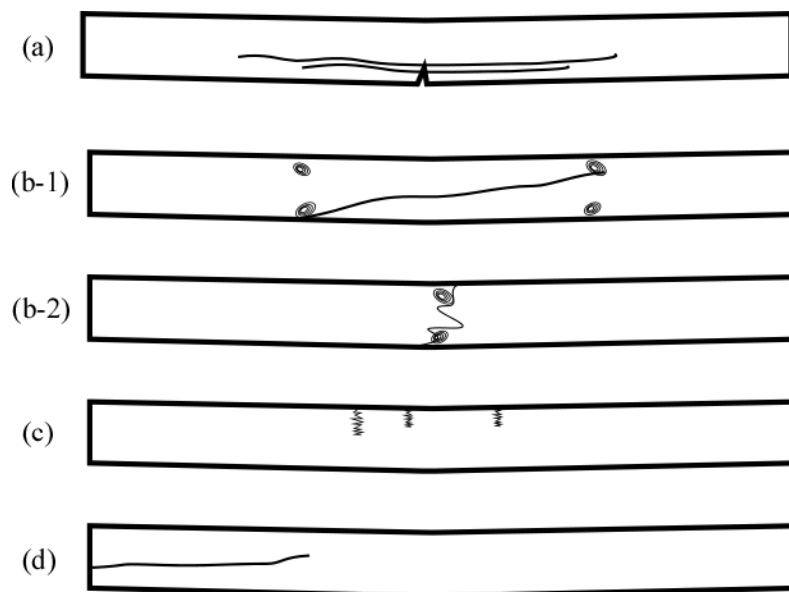


図 3.1.3 曲げ試験による破壊形態の分類

- (a) : 単純引張り破壊
- (b-1) : 節を起因とする交差木理の引張破壊
- (b-2) : 節からの目切れ破壊
- (c) : 圧縮破壊
- (d) : 水平せん断破壊

3.1.3 結果と考察

○ たいこ材と平角材の曲げヤング係数の比較

表 3.1.1 にたいこ材と平角材の材質特性の平均値を目視等級別に示す。たいこ材および平角材とも目視等級は、ほとんどが材縁部の最大節径比で決定され、最大節径比と平均年輪幅の基準で異なる目視等級と判定された試験体は見られなかった。

表 3.1.1 たいこ材と平角材の材質特性の平均値

たいこ材												
目視等級	n	ρ	MC	h	ARW	節径比 (%)		E_f	E_m	F_{ult}	f_m	$f_{0.05}$
		kg/m ³	%	mm	mm	材縁	中央	kN/mm ²	kN/mm ²	kN	N/mm ²	N/mm ²
I	11	510 (10.3)	15.6 (2.8)	314 (10.5)	5.7 (11.6)	8.2 (64.7)	15.5 (20.3)	10.2 (17.9)	8.8 (17.1)	136.6 (19.3)	47.5 (12.9)	-
II	36	502 (7.8)	15.3 (4.4)	315 (10.6)	6.5 (14.7)	19.2 (15.5)	21.3 (34.3)	9.8 (12.1)	9.3 (19.7)	122.8 (20.1)	43.4 (12.5)	30.9
III	33	494 (7.3)	15.1 (4.6)	302 (9.0)	6.7 (14.7)	28.5 (14.6)	30.8 (42.0)	8.9 (12.1)	8.5 (26.6)	103.4 (23.0)	39.9 (17.8)	25.2
Out of grade	11	494 (8.1)	15.5 (2.9)	305 (11.9)	6.8 (12.1)	41.8 (18.8)	39.1 (31.1)	8.1 (14.5)	7.6 (25.8)	97.7 (28.7)	37.5 (28.8)	-
平角材												
目視等級	n	ρ	MC	h	ARW	節径比 (%)		E_f	E_m	F_{ult}	f_m	$f_{0.05}$
		kg/m ³	%	mm	mm	材縁	中央	kN/mm ²	kN/mm ²	kN	N/mm ²	N/mm ²
I	11	482 (13.2)	15.2 (8.2)	239.7 (0.2)	4.7 (21.7)	11.0 (22.2)	15.0 (27.3)	9.5 (15.8)	10.0 (15.9)	78.0 (15.0)	44.0 (15.0)	-
II	47	480 (8.1)	15.5 (9.0)	239.8 (0.3)	5.7 (22.3)	18.3 (22.8)	27.5 (24.7)	8.8 (9.7)	9.0 (17.6)	69.1 (20.4)	39.0 (20.4)	19.5
III	49	483 (7.3)	15.0 (9.5)	240.0 (0.6)	6.2 (29.5)	26.1 (18.7)	39.2 (22.6)	8.2 (10.0)	8.1 (18.5)	56.2 (25.9)	31.7 (25.9)	18.1
Out of grade	13	489 (4.3)	14.3 (6.5)	240.1 (0.2)	6.2 (22.7)	40.9 (14.2)	43.7 (19.9)	8.1 (7.8)	7.8 (18.1)	51.5 (25.0)	29.0 (25.0)	-

n: 試験体数, ρ :密度, MC:含水率, h:高さ, ARW:平均年輪幅, E_f : 動的ヤング率, E_m : 静的曲げ強さ, F_{ult} : 最大荷重, f_m : 曲げ強さ, $f_{0.05}$: 信頼度 75% の 5% 下側許容限界値. (): 変動係数 (%).

また、図 3.1.4 に示すとおり、たいこ材と平角材の目視等級別の出現率は、それぞれ 1 級が 9%と 12%、2 級が 39%と 40%、3 級が 41%と 36%、等級外が 11%と 12%となり、たいこ材と平角材の出現率は同程度であった。

たいこ材と平角材の密度、含水率、梁せい、平均年輪幅、 E_f 、について目視等級を要因とする分散分析を行った結果、たいこ材・平角材ともに密度、含水率、梁せい、平均年輪幅は、目視等級間で有意な差は認められなかった。一方、 E_f では、たいこ材と平角材ともに、目視等級 1 級・2 級と比較して、目視等級 3 級に 5%水準の有意差が認められた。小玉らは、節径が大きくなると繊維走行が節を迂回することから、縦振動の方向と繊維走行との角度が大きくなり共振周波数が低下すると報告しており¹²⁸⁻¹²⁹⁾、本研究でも目視等級間で E_f に有意な差が見られたのは、節径比が固有振動数に影響を及ぼしたことが要因と考えられる。

図 3.1.5 にたいこ材と平角材の材縁部の最大節径比と E_m との関係を示す。たいこ材および平角材とも、最大節径比と E_m にはそれぞれ有意水準 1%および 5%の負の相関関係が見られた。このことから、たいこ材は平角材と同様に、 E_m が輪生節の存在により低下する可能性があると考えられた。

図 3.1.6 にたいこ材と平角材の E_f と E_m との関係を示す。たいこ材および平角材ともに、 E_f と E_m の間には有意水準 1%の相関関係が見られた。また、たいこ材の E_f を説明変数とする E_m の回帰直線は平角材の回帰直線とほぼ重なっており、たいこ材の E_m を基準とする機械等級区分の判定で、打撃式による E_f は平角材と同様に有効な指標であると考えられる。

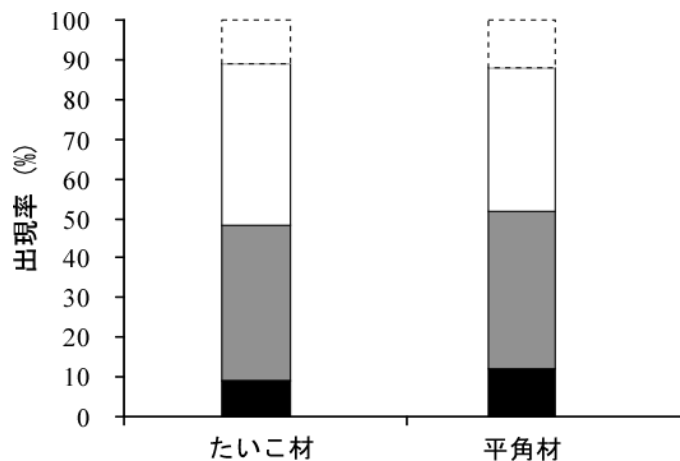


図 3.1.4 目視等級別の出現頻度の比較
目視等級 1級: ■, 2級: ■, 3級: □

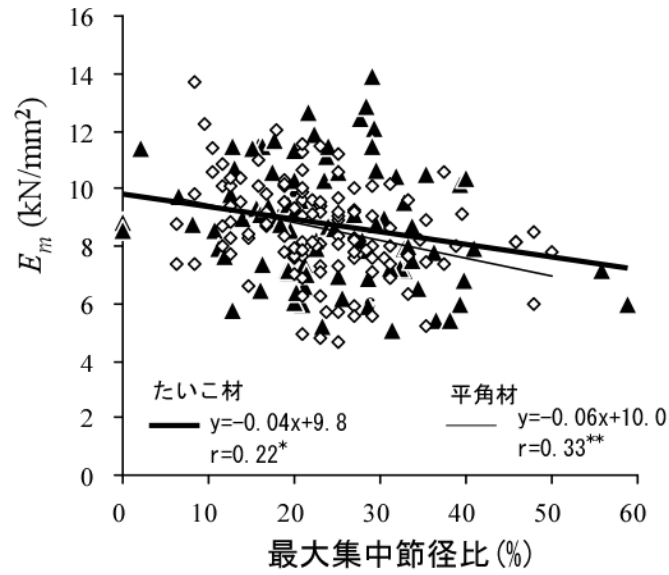


図 3.1.5 最大集中節径比と静的ヤング係数との関係.

▲ : たいこ材, ◇: 平角材

r : 相関係数 * : 5%有意水準 ** : 1%有意水準

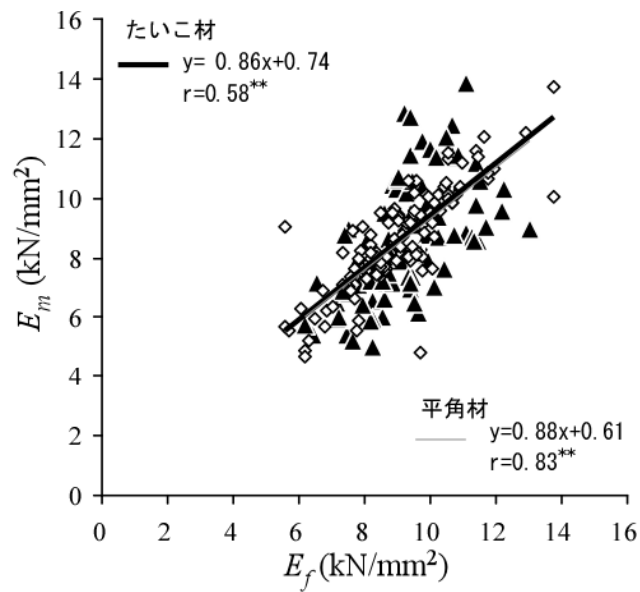


図 3.1.6 動的ヤング係数と静的ヤング係数の関係

▲: たいこ材 ◇: 平角材

r : 相関係数 ** : 1%有意水準

○ たいこ材と平角材の曲げ強度の比較

表 3.1.1 に示すたいこ材と平角材の f_m について、目視等級を要因とする分散分析を行った結果、たいこ材・平角材ともに、目視等級 1 級・2 級と比較して、3 級に 5%水準の有意差が認められた。

そこで、図 3.1.7 にたいこ材と平角材の破壊形態別の相対頻度を目視等級別に示す。たいこ材は平角材と比較して試験スパンに対して梁せいの比が大きいため、破壊形態はせん断破壊の割合が大きくなった。一方で、たいこ材は平角材と同様に、目視等級 1 級および 2 級と比較して 3 級では節からの目切れ破壊の割合が大きくなった。すなわち、たいこ材も平角材と同様に、節径比が大きくなり目視等級が低下すると、節を起因とする曲げ破壊の割合が多くなるため、 f_m も低下すると考えられた。

また、平角材の f_m に対するたいこ材の f_m の比は、目視等級 1 級:1.08, 2 級:1.11, 3 級:1.26 となり、目視等級が低くなるとたいこ材と平角材の f_m の比が大きくなる傾向を示した。そこで、図 3.1.8 にたいこ材と平角材の材縁部の最大節径比と f_m との関係を示す。たいこ材および平角材ともに、最大節径比と f_m の間には有意水準 1%の負の相関関係が見られた。また、最大節径比を説明変数とするたいこ材の f_m の回帰直線の傾きが、平角材の回帰直線よりも小さいことから、たいこ材は平角材と比較して、節径比の増大に伴う f_m の低下が抑制されていると考えられた。

また、たいこ材の目視等級 2 級および 3 級の $f_{0.05}$ 木材の基準強度¹³⁰⁾(2 級:20.4N/mm², 3 級:14.4N/mm²)を下回ることはなかった。このことは、製材 JAS 認定工場がない地域で、生産者または地域が自主的に行う目視検査として、3 級の欠点基準で選別して格外を排除することにより、目視等級 3 級での基準強度で設計することが安全側であることの裏付けとなると考えられる。一方で、たいこ材と平角材の目視等級 1 級は、テイルフィット 2 P-ワイブル分布を計算するために最低限必要な試験体数を満たしていなかったことから、今後の検討が必要である。

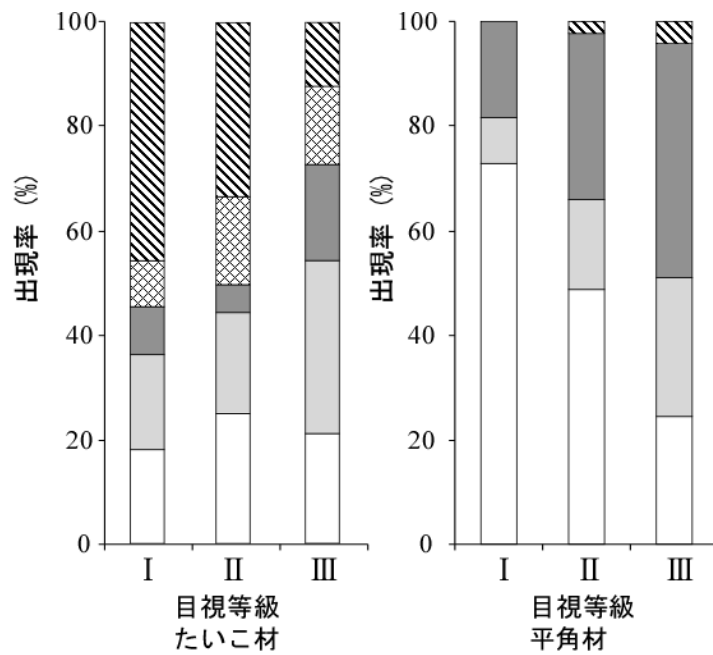


図 3.1.7 破壊形態別の出現率の比較

(a): □ (b-1): ◻ (b-2): ◼ (c): ▨ (d): ▩

図-34参照

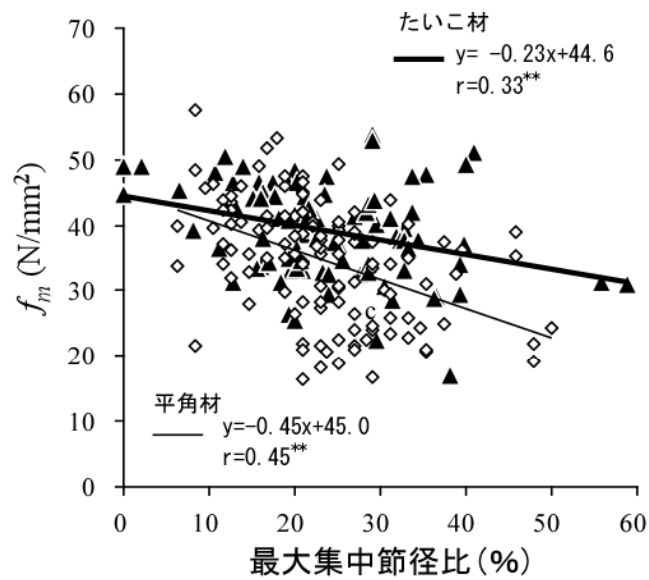


図 3.1.8 最大集中節径比と曲げ強さの関係

▲ : たいこ材, ◇ : 平角材

r : 相関係数 ** : 1%有意水準

○ たいこ材と平角材の最大荷重の比較

表 3.1.1 に示すとおり、たいこ材の梁せい(h)は平角材と比較して大きいため、 F_{ult} も平角材と比較して大きくなった。そこで図 3.1.9 に、たいこ材と平角材の梁せいと F_{ult} との関係を目視等級別に示す。なお、たいこ材の F_{ult} は実測値、平角材の F_{ult} は表 3.1.1 に示す f_m の平均値を式(2)に代入して梁せいごとに求めた。また、ここでは平角材の f_m について梁せいによる寸法効果の調整は行わなかった。

全ての目視等級で、たいこ材は梁せいと F_{ult} に正の相関関係が見られた。また、目視等級 1 級・2 級では、たいこ材の梁せいを説明変数とする F_{ult} の回帰直線が、平角材の直線と重なり、同一のはり背に対する最大荷重は平角材とたいこ材とで同程度となる傾向を示した。一方で目視等級 3 級になると、たいこ材の回帰直線が平角材の直線よりも上回り、同一のはり背に対するたいこ材の最大荷重が平角材の同値よりも明らかに大きい傾向を示した。また、梁せいを 240mm とした場合の平角材の F_{ult} に対するたいこ材の F_{ult} の比を回帰直線から推定した結果、目視等級 1 級:1.11, 2 級:1.14, 3 級:1.37 となり、目視等級が低くなるとたいこ材と平角材の F_{ult} の差が大きくなった。

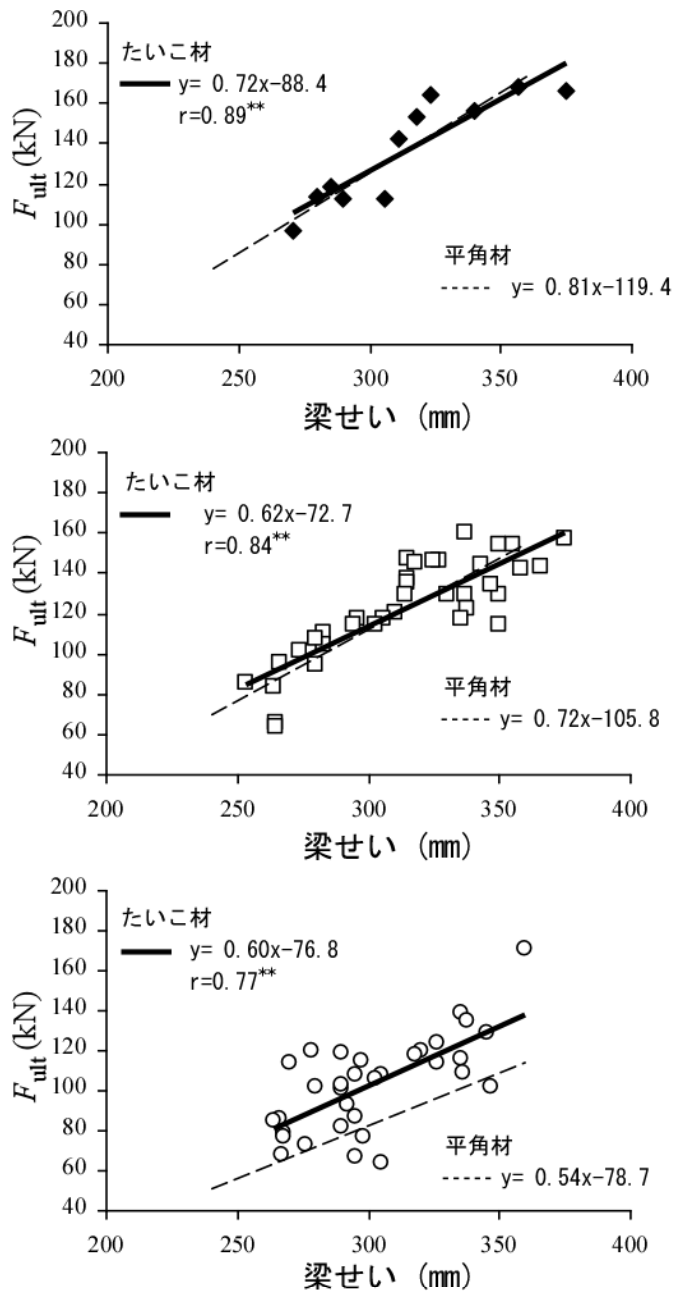


図3.1.9 たいこ材と平角材の目視等級別の梁せいと最大荷重との関係

◆：目視1級, □：目視2級, ○：目視3級

---：平角材の推定値.

**：1%有意水準

○ 曲げ強度性能と丸太の直径との関係

細りのない同じ直径の丸太から同じ幅のたいこ材と平角材を製材した場合、たいこ材の梁せいは平角材よりも大きくなるため、横架材としての最大荷重はたいこ材のほうが大きくなる。

さらに、アカマツ平角材は乾燥に伴う収縮およびねじれが大きいため、仕上がり後の製品寸法を得るための生材寸法は、梁せい・幅ともに製品寸法よりも大きく挽く必要がある。

一方で、たいこ材は平角材と異なり、製材するのは幅の間隔のみであるため、仕上がり後の梁せい(h)が平角材と同じ場合、必要とする丸太の直径は平角材よりも小さくなる。

そこで、実際のアカマツ製材現場から、平角材とたいこ材それぞれの仕上がり後の寸法と直径との関係を聞き取りしたところ、以下のとおり平角材は式(3)、たいこ材は式(4)の関係が得られた。

$$\text{平角材を挽く丸太の直径}(d) = \sqrt{(1.12h)^2 + (1.12b)^2} \quad (3)$$

1.12: 仕上がり寸法に対する生材寸法の歩増し割合(12%)

h: 梁せい(mm)

b: 幅(mm)

$$\text{たいこ材を挽く丸太の直径}(d) = 1.03 \times h \quad (4)$$

1.03: 仕上がり後の寸法に対する生材寸法の歩増し割合(3%)

図 3.1.10 で示した梁せい(h)と F_{ult} との関係について、説明変数の梁せい(h)を、式(3)および(4)により丸太の直径(d)とした場合の F_{ult} との関係を図-41 に示す。結果、全ての目視等級で、たいこ材の回帰直線が平角材の直線よりも上回り、同一の直径に対するたいこ材の最大荷重が平角材の同値よりも明らかに大きい傾向を示した。そこで、図-41 で丸太の直径を 300mm とした場合、平角材の F_{ult} に対するたいこ材の F_{ult} の比は、目視等級 1 級:1.59, 2 級:1.62, 3 級:1.95 となり、同一径の丸太の有効利用の観点からも、たいこ材は平角材と比較して効率的であることが示された。

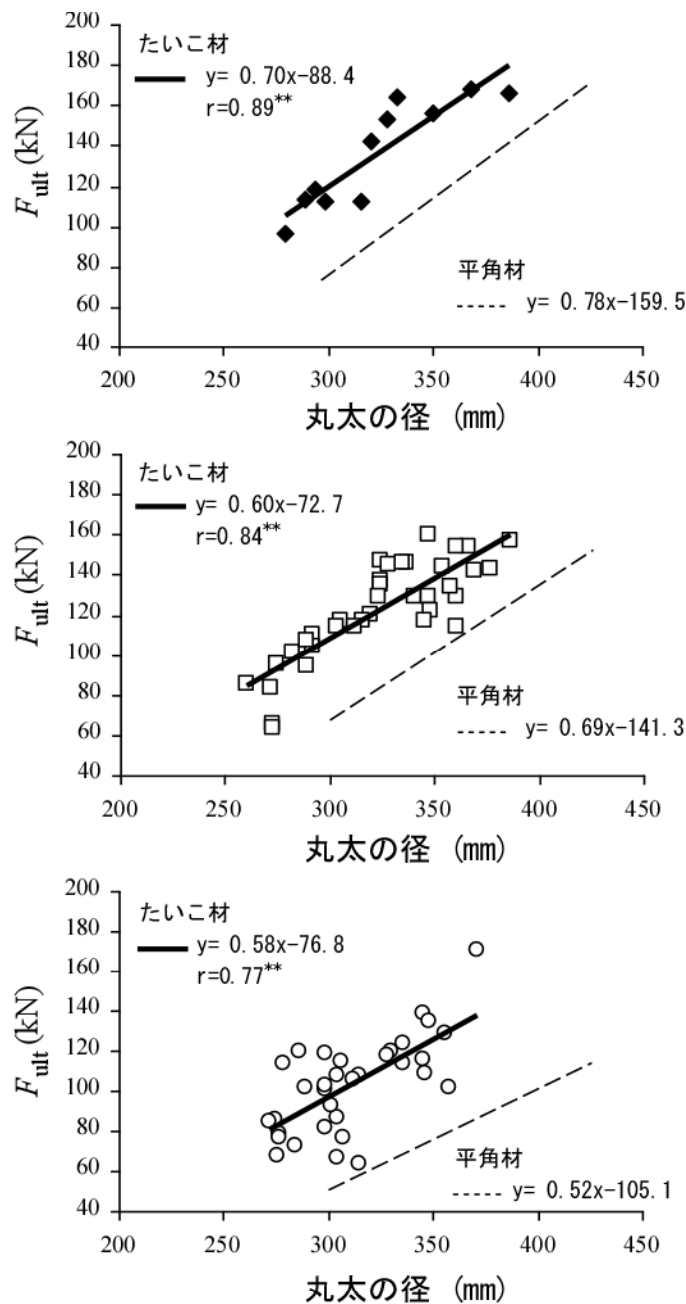


図 3.1.10 たいこ材と平角材の目視等級別の丸太の径と最大荷重との関係

◆：目視1級, □：目視2級, ○：目視3級

---：平角材の推定値. 丸太の径は本文中の式(3)と(4)から推定

**：1%有意水準

また、曲げ剛性 (EI)について、細りのない同一直径の丸太から幅 120mm のたいこ材と平角材を製材した場合の比較を試みた。計算の手順は、まず、平角材は式(3) から、たいこ材は式(4)から丸太の直径ごとのたいこ材の形状・寸法を求めて、これから断面二次モーメント (I)を算出した。次に、表 5-1 に示した目視等級ごとの E_m 平均値をそれぞれの I に乗じて EI を算出し、直径別の EI について平角材に対するたいこ材の比を目視等級別に算出した。

試算結果を図 3.1.11 に示す。図から明らかなように、全ての目視等級で平角材の EI に対するたいこ材の EI の比は 1 以上となり、さらに丸太の直径が小さいほど、その比は大きくなる傾向がみられた。また、丸太の直径が 300mm の場合では、平角材の EI に対するたいこ材の EI の比は、目視等級 1 級:1.44, 2 級:1.70, 3 級:1.54 となり、最大荷重と同様に曲げ剛性の観点からも、たいこ材は平角材と比較して効率的であることが示された。

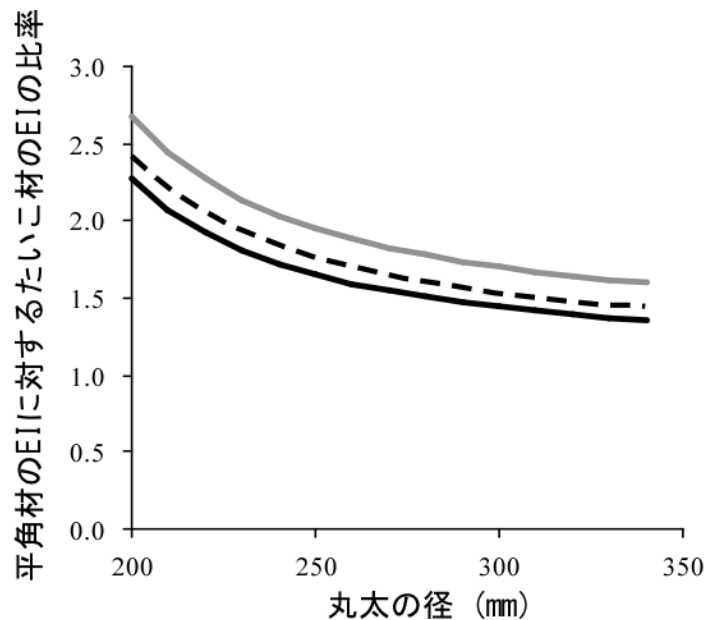


図 3.1.11 丸太の径と平角材の EI に対するたいこ材の EI の比率の関係.

目視等級 1 級:—, 2 級:---, 3 級 :— · —

目視等級別の曲げ剛性は E_m より計算

3.1.4 まとめ

横架材としてのたいこ材の曲げ強度性能に及ぼす輪生節の影響を検討するため、同じ地域で伐採したアカマツ丸太から製材したたいこ材と平角材の静的曲げ強度試験を行い、両者の曲げ強度性能について製材 JAS の目視等級別に比較した。さらに、たいこ材と平角材の丸太の直径と曲げ強度性能との関係を目視等級別に比較することで、たいこ材利用による丸太利用の効率性を評価した。得られた結果は次のとおりである。

1. たいこ材は平角材と同様に、節径比が大きくなると曲げヤング係数および曲げ強度は低下する傾向が見られた。一方で、たいこ材は平角材と比較して、節径比の増大に伴う曲げ強度の低下が抑制されており、このため目視等級が低くなると最大荷重も平角材と比較して高くなった。
2. 直径 300mm の丸太から得られるたいこ材の平角材に対する最大荷重の比は目視等級 1 級, 2 級, 3 級でそれぞれ 1.59, 1.62 及び 1.95 となり、同一直径の丸太の有効利用の観点からも、たいこ材は平角材と比較して効率的であることが示された。

3.2 曲げ強度性能に及ぼす表面割れと高温セット処理の影響¹⁵⁶⁾

3.2.1 はじめに

人工乾燥時の乾燥温度を 100℃以上とする高温セット処理法による人工乾燥（以下高温乾燥という）は、アカマツ、カラマツ、スギなど針葉樹心持ち材を、従来の中温乾燥よりも短時間・低コストで乾燥する方法とされている¹³²⁾。その一方で、高温乾燥は、木材が 100℃以上の高温にさらされることによる材の変色、材料強度の低下が問題とされている¹³³⁻¹³⁶⁾。

最近になって、材の変色抑制のため、乾燥初期の温度を 100℃以上の高温とし、乾燥中期から末期にかけて温度を 100℃以下の中温まで低下させ、さらに乾燥終了後に養生期間を設定する方法が公表されている¹³⁷⁾。しかし、この方法をアカマツ心持ち平角材に適用した場合、乾燥直後の仕上がり含水率と養生期間との関係が明らかになっていないこと、さらにこの方法で乾燥したアカマツ心持ち平角材の曲げ強度性能について報告した事例がない。そこで本研究では、材の変色を抑制する高温乾燥方法をアカマツ心持ち平角材に適用した場合の、乾燥直後の含水率と養生期間との関係について検討を行い、さらに養生後の曲げ強度性能を評価・分析した。

3.2.2 実験方法

○ 供試材

岩手県産アカマツ丸太(末口径φ28~33cm, 長さ400cm)から、135×265×4000mmの平角材を製材した。試験体数は、曲げ強度用を24体とし、高温乾燥中の乾燥経過測定用を1体とした。

○ 乾燥条件

図 3.2.1 に乾燥試験状況を示す。乾燥機は(株)新柴製の蒸気式乾燥機を用いた。

図 3.2.2 に高温乾燥スケジュールを示す。アカマツ心持ち平角材を、乾球温度 95℃、湿球温度 95℃で 10 時間蒸煮した後、乾燥初期を乾球温度 120℃、乾湿球温度差 30℃で 24 時間、乾燥中期を乾球温度 105℃、乾湿球温度差 40℃で 36 時間、乾燥末期を乾球温度 90℃、乾湿球温度差 40℃差で乾燥経過測定用試験体の含水率 20%以下まで乾燥した。

高温乾燥中の含水率は、乾燥経過測定用試験体に水分抵抗式含水率センサーを材中 40mm に打ち込み、これにより追跡した。乾燥終了後、試験体を室内で 7 ヶ月間養生した。



図 3.2.1 アカマツ平角材の高温乾燥状況

○ 含水率測定

試験体の重量を乾燥前、乾燥直後、養生 1 ヶ月後、養生 3 ヶ月後、養生 7 ヶ月後に測定した。養生 7 ヶ月後に、試験体の幅と高さをモルダーで 120×240mm に切削し、直ちに曲げ強度試験を行った後、厚さ 30mm の含水率測定試片を採取し、全乾法で含水率を測定した。この含水率を養生 7 ヶ月の含水率として、養生 7 ヶ月後の試験体の重量から全乾重量を推定した。

乾燥前、乾燥直後、養生 1 ヶ月後、養生 3 ヶ月後の重量を、推定した全乾重量で割り返して、各時点での含水率を算出した。

○ 水分傾斜の測定

乾燥経過測定用の試験体から、乾燥前、乾燥直後、養生 3 ヶ月後、養生 7 ヶ月後にそれぞれ、木口より 20cm の部位から厚さ 30mm の材片を切り出し、72 分割した。

得られた小片の含水率を、全乾法により測定し、材の表面から 20mm 未満を外側部、20 mm 以上 40 mm 未満を中間部、40mm 以上を中心部として、各部位の含水率の平均値と標準偏差を算出した。

○ 曲げ強度試験

・節と表面割れの測定

修正挽き後、試験体の全ての面の節径(mm)を測定した。測定した節から、各試験体の最大節径比(%)と集中節径比(%)を求め、「製材の日本農林規格」の構造用Ⅱの目視等級区分に基づき 1 級～3 級に分類した。

節の測定終了後、各試験体の最大割れ幅(mm)と合計割れ長さ(mm)を求めた。

・実大曲げ強度試験

曲げ試験は「構造用木材の強度試験法」¹⁴⁸⁾に基づき、全スパン 3900mm の 3 等分点 4 点荷重方式とし、荷重速度 3～5mm/min で、試験体が破壊するまで加力した。試験終了後、次式により曲げ強さ(N/mm²)と曲げヤング係数(N/mm²)を算出した。

$$f_m = aF_{ult} / (2Z)$$

f_m : 曲げ強さ(N/mm²) a : 支点間の距離(1300m) F_{ult} : 最大荷重(N)

Z : 断面係数($b \times d^2 / 12$) b : 試験体の幅(120mm) d : 試験体の梁せい(240mm)

$$E_m = a(3L^2 - 4a^2) \cdot (F_2 - F_1) / \{48I(w_2 - w_1)\}$$

E_m : 曲げヤング係数(N/mm²) L : 全スパン(3900m) I : 断面 2 次モーメント($b \times d^3 / 12$)

$F_2 - F_1$: 荷重変形曲線の直線部分の荷重の増分(N) F_1 : 最大荷重の 10%

F_2 : 最大荷重の 40% $w_2 - w_1$: $F_2 - F_1$ に対応する変形の増分(mm)

なお、実験で得られた曲げ強さ、曲げヤング係数は、曲げ強度試験後に測定した全乾法による含水率をもとに、以下の式の係数を用いて含水率 15%時の値に調整した¹⁴⁹⁾。

曲げ強さ : $K_{m-F} = 1.25 / (1.75 - 0.0333M)$ 曲げヤング係数 : $K_{m-E} = 1.14 / (1.44 - 0.02M)$

M : 含水率(%)

3.2.3 結果と考察

○ 乾燥経過

図 3.2.3 に乾燥前，乾燥直後，養生 1 ヶ月後，養生 3 ヶ月後，養生 7 ヶ月後の含水率の変化を示す。試験体の平均含水率は，乾燥直後で 21.3%(SD:2.9)，養生 3 ヶ月で 17.9%(SD:1.7)，養生 7 ヶ月で 13.4%(SD:0.7)となり，養生中の含水率低下，個体間のバラツキの減少が見られた。

図 3.2.4 に製材 JAS に規定する D20 をクリアする試験体の出現割合を示す。D20 をクリアした試験体の割合は，乾燥直後で 29%，養生 1 ヶ月で 29%，養生 3 ヶ月で 88%，養生 7 ヶ月で 100%となり，養生期間が長いほど増加した。

○ 乾燥経過と水分傾斜

図 3.2.5 に養生中の水分傾斜の推移を示す。乾燥直後と比較して，養生 3 ヶ月後は水分傾斜の減少が見られた。また，養生 3 ヶ月後と比較して，養生 7 ヶ月後も水分傾斜の減少が見られた。また，上述したとおり，養生 3 ヶ月後に全体の約 90%の試験体が含水率 JAS20 をクリアした。しかし，図に示すとおり，養生 3 ヶ月後では中心の含水率は 20%以上であった。

乾燥後の水分傾斜は，材の寸法変化に影響するとされている¹³⁸⁾。そのため，水分傾斜の少ない高温乾燥条件，養生期間の検討が今後必要である。

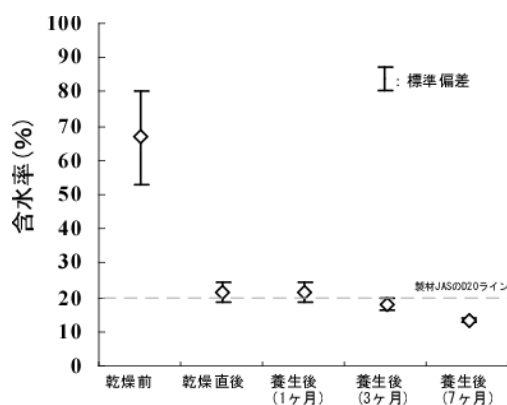


図3. 2. 3 高温乾燥前後の含水率変化

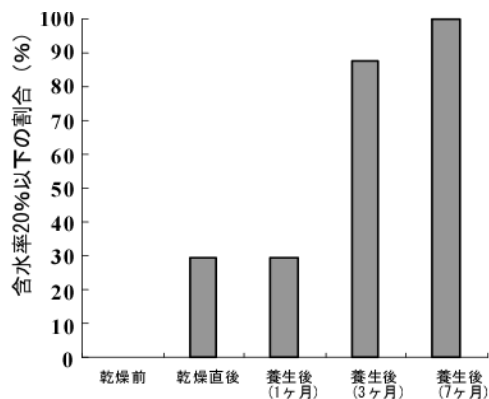


図 3.2.4 JAS-D20をクリアする試験体の出現割合

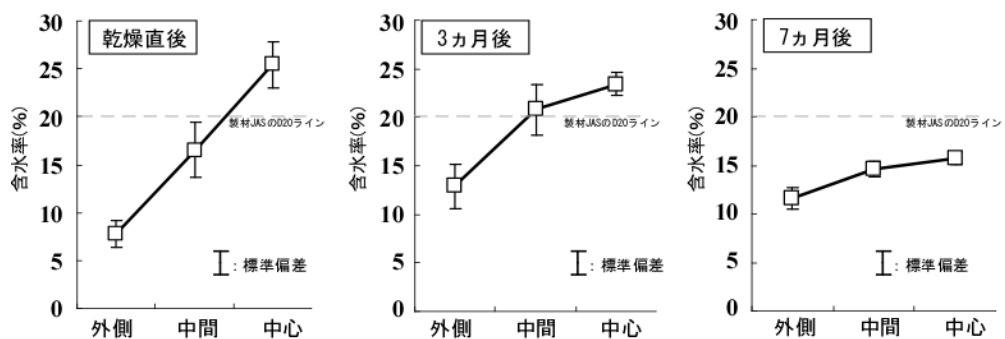


図 3.2.5 高温乾燥したアカマツ平角材の養生中の水分傾斜の推移

○ 曲げ強度

表 3.2.1 に曲げ強度試験結果を目視等級区分別に示す。目視等級区分別の試験体数は、1 級が 3 体、2 級が 11 体、3 級が 8 体となり、2 級および 3 級と比較して 1 級の本数が少なかった。また、全試験体(24 体)中 2 体が、製材 JAS の目視等級外となった。各等級区分の曲げヤング係数の最小値は、1 級で 11.9kN/mm²、2 級で 7.6kN/mm²、3 級で 7.4kN/mm² となり、日本建築学会が規定する基準弾性係数を下回る値は見られなかった。

また、各等級区分の曲げ強さの最小値は、1 級で 44.6N/mm²、2 級で 27.3N/mm²、3 級で 20.0N/mm² となり、国土交通省が規定している基準強度を下回る値は見られなかった。

○ 表面割れと曲げ強さ

図 3.2.6 に合計割れ長さ(合計割れ長さ)と曲げ強さの関係を示す。最大割れ幅、合計割れ長さ(合計割れ長さ)と曲げ強さとの間に明確な関係は見られなかった。

表 3.2.1 アカマツ平角材の曲げ強度試験結果

目視等級区分	試験体数	節径比				集中節径比				含水率 %	密度 kg/m ³	曲げヤング係数 kN/mm ²	曲げ強さ N/mm ²	基準強度(甲種構造材)	
		狭い材面		広い材面		狭い材面		広い材面						曲げヤング係数*	曲げ強さ**
		材縁 %	中央 %	材縁 %	中央 %	材縁 %	中央 %	材縁 %	中央 %						
1級	3	平均値	5.6	7.2	12.1	5.6	7.2	24.7	14.1	529	13.5	50.3	6.5	33.6	
		標準偏差	9.6	6.3	3.6	9.6	6.3	5.1	0.5	61	2.0	5.0			
		変動係数	173.2	86.8	29.5	173.2	86.8	20.6	3.7	12	15.2	10.0			
		最小値	0.0	0.0	8.8	0.0	0.0	19.2	13.6	467	11.9	44.6			
		最大値	16.7	11.3	15.8	16.7	11.3	29.2	14.7	590	15.8	53.9			
2級	11	平均値	25	19	21	26	16	40	13.4	491	9.4	34.4	6.5	20.4	
		標準偏差	10.6	4.4	6.6	15.7	7.0	7.3	0.5	27	1.3	3.5			
		変動係数	41.8	23.2	31.5	61.3	43.1	18.3	4.0	6	13.4	10.2			
		最小値	0	7	14	0	0	28	12.5	435	7.6	27.3			
		最大値	39	22	35	48	24	52	14.2	534	12.0	38.9			
3級	8	平均値	35.0	25.6	18.8	40.1	25.7	42.9	13.4	471	8.6	29.2	6.5	14.4	
		標準偏差	9.0	2.2	2.0	11.4	11.9	8.3	0.8	28	0.8	5.9			
		変動係数	25.6	8.4	10.9	28.4	46.5	19.3	5.8	6	9.5	20.4			
		最小値	25.8	22.1	16.7	25.8	0.0	31.7	12.5	431	7.4	20.0			
		最大値	48.3	29.2	20.8	58.3	40.8	56.7	14.7	500	9.6	40.8			

*木質構造設計基準・同解説-許容応力度・許容耐力設計法(日本建築学会) **平成12年5月31日 建設省告示第1452号

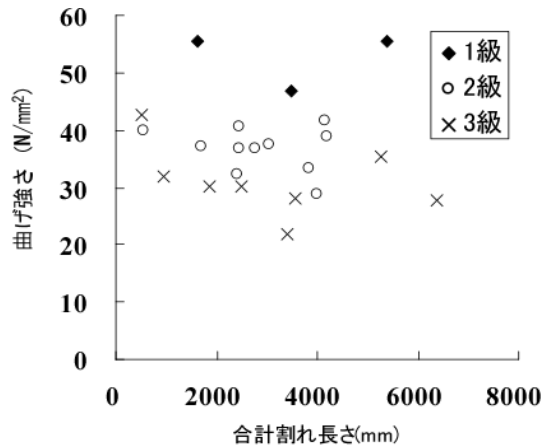


図 3.2.6 合計割れ長さ(合計割れ長さ)と曲げ強さとの関係

○ 天然乾燥材との比較

図 3.2.7 に曲げヤング係数と曲げ強さの関係について、今回強度試験を行った高温乾燥材と、過去に行った天然乾燥材の値とで比較した結果を示す。高温乾燥及び天然乾燥とも、曲げヤング係数と曲げ強さは正の相関を示した。一方で、曲げヤング係数を説明変数とする高温乾燥材の回帰直線は、平角材の回帰直線よりも下方に位置しており、同一のヤング率に対する高温乾燥材の曲げ強さは、天然乾燥材と比較して約 1 割低下することが示された。これは、高温処理により表面および内側の靱性が低下し、脆弱化したことによると推測される。

天然乾燥材と比較して高温乾燥材の曲げ強さは低下することは、カラマツ正角材でも報告されており、武田らは、130℃で高温乾燥したカラマツ正角材の実大曲げ強さは、天然乾燥材と比較して約 25%低下しており、高温乾燥材は天然乾燥材と比較して断面内部の曲げ強さの低下が著しいと報告している⁵⁴⁾。

一方、表 3.2.1 に示す通り、今回高温乾燥したアカマツ平角材の曲げ強さは、全ての等級で基準強度を下回ることがないことが示されている。そのため、高温乾燥材の強度性能を明らかにするためにも、高温乾燥したアカマツ平角材の曲げ強さのデータ数を増やし、信頼率 75%の 5%下限値と国土交通省が提示する基準強度との比較を行う必要がある。

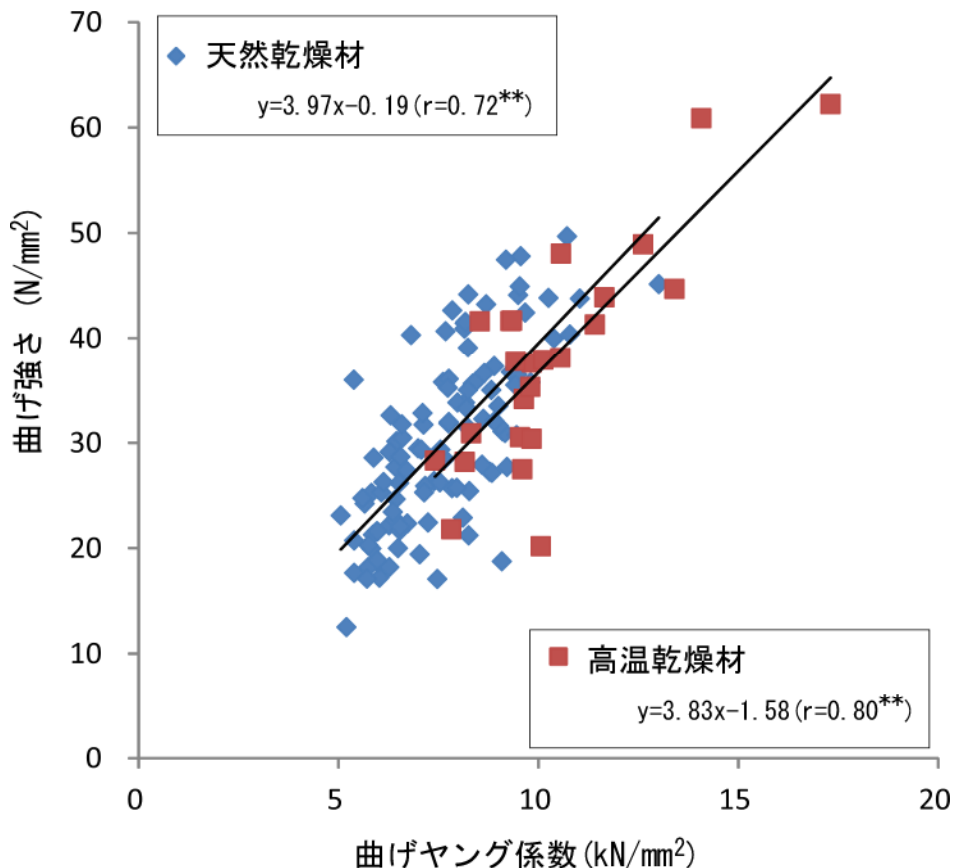


図 3.2.7 高温乾燥材と天然乾燥材のヤング係数と曲げ強さとの関係の比較

r : 相関係数coefficients ** : 1%有意水準

3.2.4 まとめ

高温乾燥後に7ヶ月間養生した平角材の含水率は、製材の日本農林規格に示される含水率基準 D20 以下となった。また、高温セット処理法で人工乾燥したアカマツ平角材の曲げ強度は、表面割れの多寡によらず、国土交通省が告示している基準強度を下回ることはなかった。

一方で、高温乾燥したアカマツ平角材の曲げ強さは、天然乾燥材と比較し打て約1割低下することが示された。そのため、高温乾燥材の強度性能を明らかにするためにも、高温乾燥したアカマツ平角材の曲げ強さのデータ数を増やし、信頼率75%の5%下限値と国土交通省が提示する基準強度との比較を行う必要がある。

3.3 伝統的仕口による接合部のせん断耐力特性¹³⁹⁾

3.3.1 はじめに

岩手県内の人工林はその多くが資源として利用可能な時期を迎えつつあり、適切な森林施業を確実に実施しながら、木材としての持続的な利用促進が求められている。その一環として近年では、木材の地産地消を目的とした地域材による家づくりが注目されている。

地域材による家づくりでは、その地域に古くから根付いた伝統的工法が使われることが多く、その中でも金物等を使わず嵌合により住宅の柱・梁を接合する伝統的工法は、施工後の接合具の露出が無く、審美性に優れていることから、梁桁などの横架材の木組みを意匠的に現す工法として用いられている。

一方、近年の大地震による家屋の倒壊被害を受けて、木造軸組工法住宅の構造材の接合部には、せん断耐力の性能評価が求められるようになり、実際の設計では、接合部のせん断耐力に応じた補強金物の使用が建築基準法で義務付けられている。

伝統的工法による接合部のせん断耐力性能に関する研究は、これまでも他県で実験¹⁴²⁾が行われている一方で、地域によって樹種および加工形態が異なるため、共通的な設計手法が確立されるまでに至っておらず、伝統的工法による接合方法を広く普及をする上での課題となっている。

また、岩手県沿岸北部に多く蓄積されているアカマツ材は、住宅の横架材として使われることから、同地域の伝統的工法による梁・柱接合部のせん断性能評価は、アカマツ材の利用促進を図る上で、有益な資料になる。

そこで本研究では、梁材に県産アカマツ材、柱材にスギまたはクリ材を用いた梁・柱の伝統的工法による接合部のせん断耐力の発現機構の解明およびせん断耐力評価を目的として、岩手県沿岸北部で用いられている伝統的工法2種類で接合した梁・柱接合部の実大せん断試験を行い、既報の梁受け金物による接合部のせん断耐力⁵⁷⁾と比較した。

3.3.2 実験方法

○ 供試材

表 3.3.1 に本実験で使用した部材の密度、動的ヤング率、含水率を樹種別に示す。本実験では梁材としてアカマツ、柱材としてスギとクリを用いた。

アカマツとクリは1年間の天然乾燥、スギは最高温度 80°Cで人工乾燥を行い、半年間養生した後に柱と梁に加工した。柱の寸法は長さ×幅×高さを 690×120×120(mm)とし、梁の寸法は 700×120×240(mm)とした。

柱と梁の動的ヤング率は、FFT サウンドアナライザー (エーデス機械産業:AD-3524, 材の厚さ 50mm で設定)を使用して測定した。また、柱と梁の含水率は高周波式木材水分計 (エーデス機械産業:DELTA200XL)を使用して測定した。

○ 伝統的工法による接合部

図 3.3.1 に本研究で用いた伝統的工法による接合部を示す。接合部の加工は、岩手県久慈市にある久慈高等職業訓練校で行った。

伝統的工法による接合部は梁に加工した二枚の貫を柱に貫通させ鼻栓で固定する仕口(以下、「二枚貫-鼻栓」とする)と、柱に加工したホゾに梁の先端を挿入し、込み栓で固定する仕口(以下、「二枚ホゾ-込栓」とする)とした。なお、鼻栓および込み栓の樹種はクリ材とした。

表 3.3.1 梁および柱材の材質

樹種	部位	部材数	密度 kg/m ³	動的ヤング率 kN/mm ²	含水率 %
スギ	柱	28	402(35.4)	5.25(0.63)	12.4(1.26)
クリ	柱	24	679(93.8)	8.06(0.91)	27.4(7.84)
アカマツ	梁	26	487(22.9)	9.45(1.88)	19.9(0.89)

()内は標準偏差を示す。

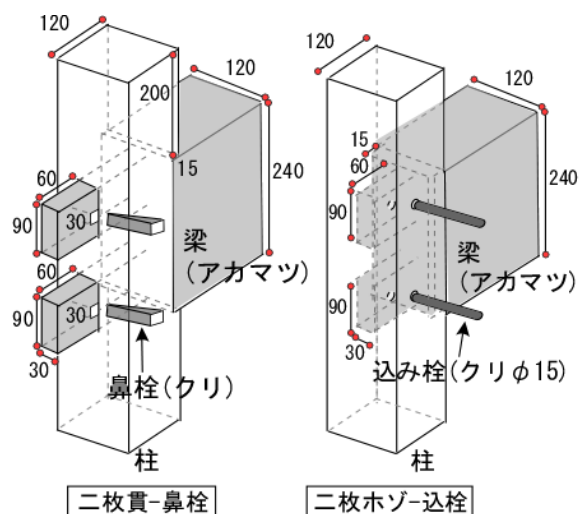


図 3.3.1 梁と柱の伝統的構法による接合部

○ 梁受け金物による接合部

図 3.3.2 に本研究で使用した梁受け金物とドリフトピンおよび梁受け金物による接合部を示す。梁受け金物による接合部(以下、「金物接合」とする)は、(財)日本住宅・木材技術センターが開発した Z 梁受け金物(BH-195)を使用した。

図 3.3.3 に金物接合による梁と柱の接合方法を示す。梁受け金物に柱、梁を取り付ける接合具は、ドリフトピン、角根六角ボルト、座金、六角ナットとし、接合具の仕様等は全て梁受け金物の規格に従った。

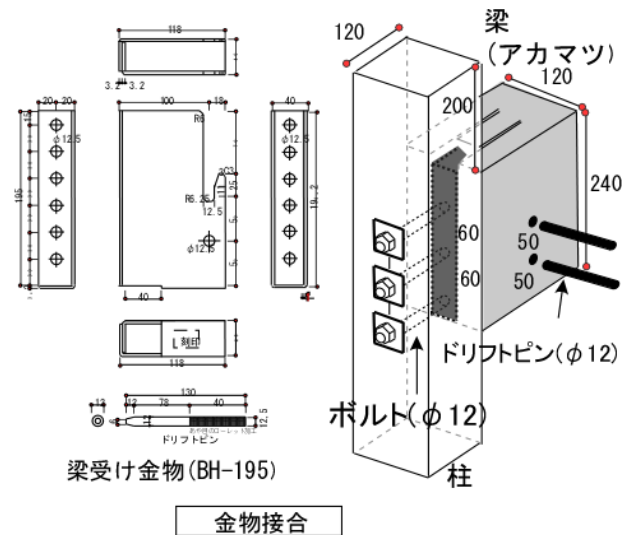


図 3.3.2 梁と柱の梁受け金物による接合部

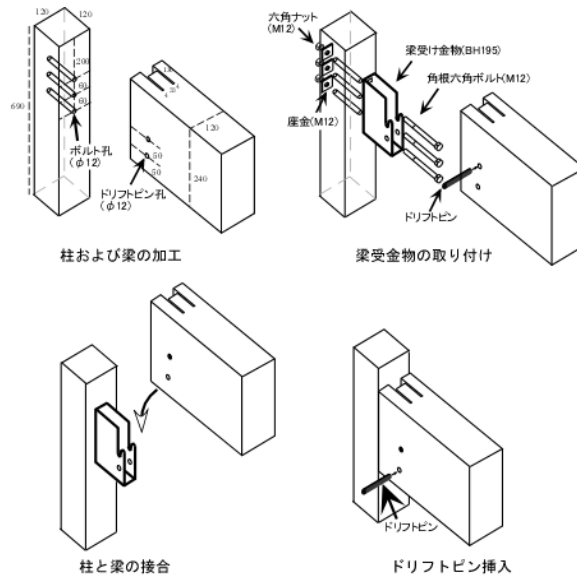


図 3.3.3 梁と柱の梁受け金物による接合方法

○ 接合部の樹種条件と試験体数

表 3.3.2 に接合部の樹種条件別の試験体数を示す。接合部の樹種の組み合わせは、梁をアカマツ、柱をスギまたはクリとした。接合方法は伝統的工法による接合部 2 種類による接合と梁受け金物による接合とし、1 条件あたりの試験体は 3~6 体とした。

○ せん断試験方法

図 3.3.4 にせん断試験の加力装置と接合試験体の設置方法を示す。加力装置は油圧式加力試験機（前川製作所製:容量 1000kN）を使用した。加力は変位速度一定の単調加力(約 13mm/min)とし、最大荷重到達後に 80%まで低下した時点で終了した。加力時間は平均で 6~7 分であった。

試験体は、左右の柱の前後 4 箇所柱と梁の相対的な変位を測定するための変位計を設置し、これらの平均値を梁の柱に対する相対変位とした。

変位、荷重データはデータロガー（TDS301:東京測器製）を介してパソコンに収録した。

表 3.3.2 梁および柱材の組み合わせと試験体数

柱の樹種	二枚貫-鼻栓	二枚ホゾ-込栓	金物接合
スギ	6	5	3
クリ	4	4	4

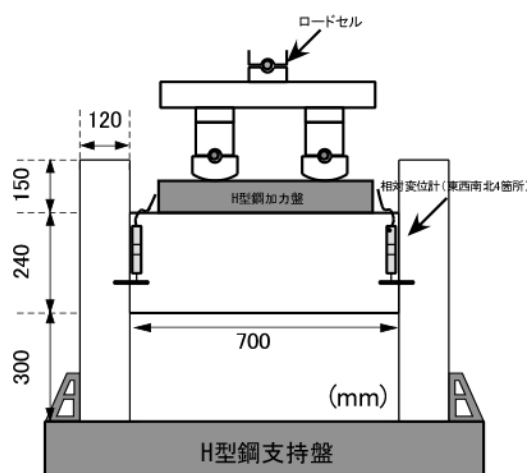


図 3.3.7 せん断試験の加力状況

○ 解析方法

図 3.3.5 に接合部のせん断試験による荷重-変位曲線例を示す。本実験では「木造軸組工法住宅の許容応力度設計」に基づく特徴点抽出と完全弾塑性モデルの自動化ツール^{141), 142)}により、以下の方法で特徴点抽出と完全弾塑性モデルを作成し、接合部のせん断耐力を求めた。

- 1) 0.1Pmax と 0.4Pmax を通る直線（直線Ⅰ）を引く。
- 2) 0.4Pmax と 0.9Pmax を通る直線（直線Ⅱ）を引く。
- 3) 直線Ⅱと同じ傾きで曲線に接する直線（直線Ⅲ）を引く。
- 4) 直線Ⅲと直線Ⅰの交点を許容応力（Py）とする。
- 5) Pyに相当する曲線上の点（Ⅳ）と原点を結んだ傾きを剛性（k）とする（直線Ⅴ）。
- 6) 荷重が Pmax の 0.8 倍まで低下する曲線状の点を通り、縦軸に平行な直線を引く（直線Ⅵ）。
- 7) 直線Ⅴ，x 軸，直線Ⅵ，x 軸に平行な直線Ⅶにより囲まれる部分の面積が、荷重-変位曲線と x 軸と直線Ⅵとで囲まれる部分の面積と等しくなるように直線Ⅶの位置を決め、直線Ⅶと y 軸の交点を終局耐力(Pu)とする。

また、接合部の許容せん断耐力は、降伏耐力または最大荷重×2/3 の値について、信頼水準 75%における 95%下側許容限界を求め、これらのうち小さい方の値とした。

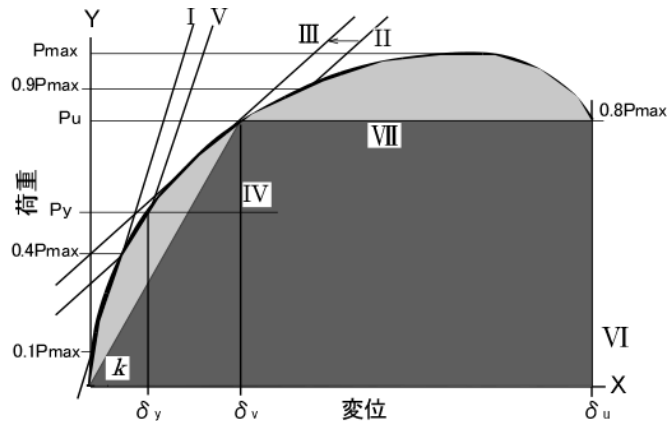


図 3.3.5 完全弾塑性モデルによるせん断耐力の評価

3.3.3 結果と考察

○ 破壊形態

写真 3.3.1 に伝統的工法による接合部の破壊形態を示す。伝統的工法による接合部は最大荷重到達後に破壊が確認され、柱に梁がかかる部分(二枚ホゾ・込栓では大入れの下側)のめり込み(写真 a)、梁の下側の割裂(同 b)、梁の上側の割裂(同 c)、鼻栓および込栓の曲げまたはせん断による変形(同 d)が見られた。また、柱がスギの場合、写真 7-1a に見られるめり込みは、柱と梁の両者に確認されたのに対し、柱がクリの場合は、主に梁側のアカマツに大きく見られた。

写真 3.3.2 に金物接合の破壊形態を示す。金物接合も伝統工法による接合部と同様に最大荷重到達後に破壊が観察され、ドリフトピンの梁材へのめり込み(写真 a)、梁受け金物の下アゴ部分の梁材のめり込み(同 b)、梁受け金物の変形(同 c)、柱の割裂(同 d)が確認された。

上述のとおり、伝統的工法による接合部は金物接合と比較して、せん断破壊で梁の損傷が多く見られていることから、その耐力発現機構は梁の柱に対するめり込み抵抗と梁の抜けに対する栓のせん断抵抗と推定される。一方、金物接合の耐力発現機構はボルトおよび金物の引き抜き抵抗であり⁵⁷⁾、両者のせん断耐力の発現機構は異なることが示された。



写真 3.3.1 伝統的構法による接合部の破壊形態



写真 3.3.2 梁受け金物による接合部の破壊形態

○ 荷重-変位曲線の比較

図 3.3.6 に柱をスギとした場合の接合部の荷重 - 変位曲線を接合条件別に示す。二枚貫-鼻栓の最大荷重は、二枚ホゾ-込栓および金物接合よりも高くなる傾向が見られた。この原因として、二枚貫-鼻栓は梁と柱の接する面積が大きいいため、梁の柱に対するめり込み抵抗が大きくなったことによると考えられる。

また、二枚ホゾ-込栓と金物接合の荷重 - 変位曲線を比較すると、最大荷重は同程度となった一方で、二枚ホゾ-込栓の最大荷重点時の変位は、金物接合と比較して大きくなる傾向が見られた。

さらに、金物接合では写真 3.3.1 に示した破壊が発生すると同時に荷重も低下した一方で、伝統的工法による接合部では、写真 3.3.2 に示した破壊は最大荷重到達後のさらに変位が増大する過程で発生する傾向を示した。

図 3.3.7 に柱をクリとした場合の、接合部の荷重 - 変位曲線を接合条件別に示す。柱をスギとした場合と比較して、二枚貫-鼻栓および二枚ホゾ-込栓は最大荷重点時の変位が大きくなる傾向を示した。この原因として、クリはスギと比較して密度が高く、かつ繊維直交方向に放射組織が多く存在し、梁と柱が接する箇所のめり込みに対する抵抗力が大きくなるためと考えられる。また、金物接合についても柱をスギとした場合よりも、クリとしたほうが最大荷重および最大荷重点変位が大きくなる傾向が見られた。

図 3.3.8 に (δ_y, P_y) 、 (δ_v, P_u) および (δ_u, P_u) の平均値を結んで得られた完全弾塑性モデルを接合条件別に示す。柱をスギとした場合、二枚貫-鼻栓の直線は二枚ホゾ-込栓および金物接合よりも上側となり、接合部のせん断耐力が高いことが示された。また、二枚貫-鼻栓および二枚ホゾ-込栓の終局耐力に至るまでの変位は金物接合と比較して大きく、伝統的工法による接合部は破壊に至るまでの吸収エネルギーが金物接合と比較して大きいと考えられた。

また、柱をクリとした場合、全ての接合部の直線は柱をスギとした場合よりも高くなった一方で、接合条件間での直線の差異は、柱をスギとした場合と比較して小さくなった。

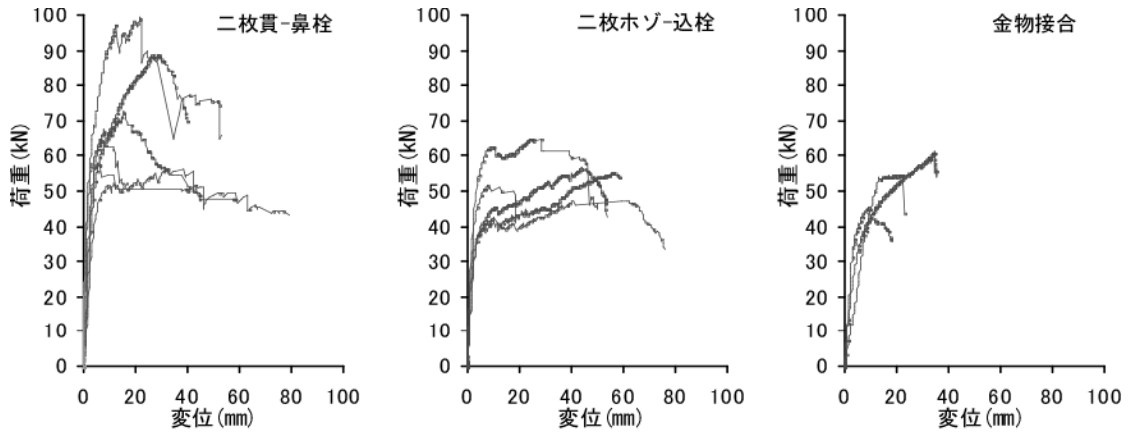


図 3.3.6 柱をスギとした場合の接合条件別の荷重-変位曲線

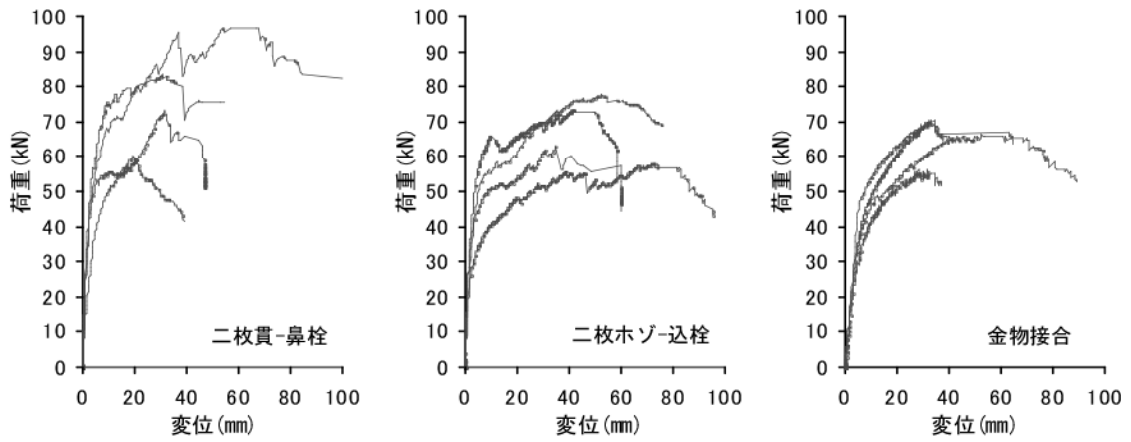


図 3.3.7 柱をクリとした場合の接合条件別の荷重-変位曲線

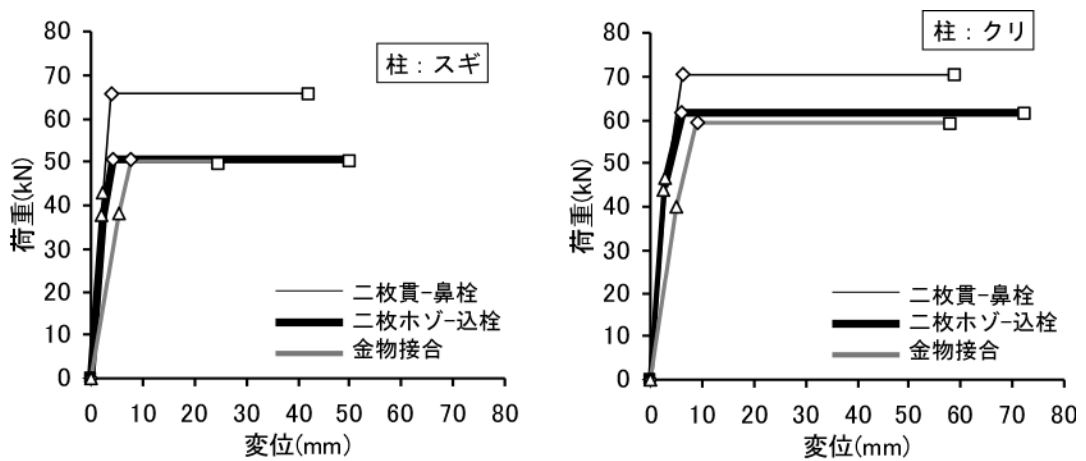


図 3.3.8 完全弾塑性モデルによる荷重-変位の比較

Δ ; (δ_y, P_y) \diamond ; (δ_v, P_u) \square ; (δ_u, P_u)

○ せん断耐力の比較

表 3.3.3 に接合部のせん断耐力の平均値を示す。柱の樹種によらず、二枚貫-鼻栓のせん断耐力の平均値は、全ての項目で金物接合によるせん断耐力を下回ることはなかった。また、二枚ホゾ-込栓のせん断耐力の平均値も、降伏耐力(P_y)以外では、金物接合によるせん断耐力を下回ることはなかった。

図 3.3.9 に接合部の許容せん断耐力を、接合条件および柱の樹種別に示す。柱をスギとした場合、二枚貫-鼻栓および二枚ホゾ-込栓の許容せん断耐力は、金物接合の約 1.6~2.0 倍となり、金物接合のせん断耐力を下回ることはなかった。一方で、柱をクリとした場合、伝統的工法による接合部の許容せん断耐力は、金物接合の約 0.8 倍となり、金物接合を下回る結果となった。柱がクリの場合で、伝統的工法による接合部の許容せん断耐力が金物接合の値を下回ったのは、表 3.3.3 に示すとおり、伝統的工法による接合部のせん断耐力のバラツキが、金物接合よりも大きかったことによる。そのため、今後は試験体数を増やし、ばらつきを同程度とした上での比較・検討が必要である。

表 3.3.3 接合部条件別のせん断耐力の比較

柱の樹種	接合の種類	試験体数	P_{max}^* kN	P_y kN	P_u kN	K kN/mm
スギ	二枚貫-鼻栓	6	73.2 (0.24)	42.5 (0.22)	65.6 (0.24)	20.3 (0.53)
	二枚ホゾ-込栓	5	55.2 (0.12)	37.1 (0.07)	50.5 (0.13)	12.8 (0.40)
	金物接合	3	53.8 (0.15)	38.0 (0.21)	49.9 (0.16)	7.3 (0.41)
クリ	二枚貫-鼻栓	4	78.1 (0.20)	45.9 (0.21)	70.1 (0.21)	13.0 (0.40)
	二枚ホゾ-込栓	4	68.0 (0.13)	44.6 (0.19)	61.8 (0.15)	10.6 (0.24)
	金物接合	4	65.6 (0.10)	39.9 (0.14)	59.5 (0.11)	6.6 (0.19)

* P_{max} : 最大荷重, P_y : 降伏耐力, P_u : 終局耐力, K: 初期剛性 値はすべて平均値で、()は変動係数を示す。

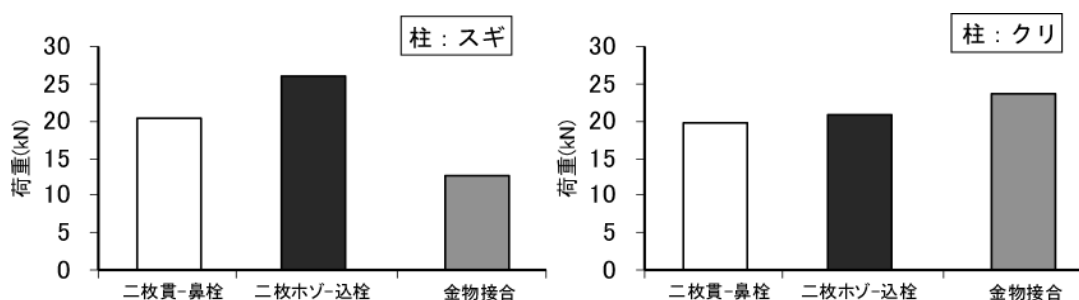


図 3.3.9 接合条件別の許容せん断耐力の比較

3.3.4 まとめ

梁材に県産アカマツ材，柱材にスギまたはクリ材を用いた伝統的工法による梁・柱接合部のせん断耐力の発現機構の検討およびせん断耐力評価を目的として，岩手県沿岸北部の伝統的工法２種類で接合した梁・柱接合部の実大せん断試験を行い，梁受け金物で接合した梁・柱接合部のせん断耐力性能と比較した。

その結果，伝統的工法による接合部のせん断耐力は，梁の柱に対するめり込み抵抗と梁の抜けに対する栓のせん断抵抗が影響していることが明らかとなった。また，梁・柱の接合方法でせん断耐力に明確な差は見られないことが明らかとなった。

第4章 アカマツ板材の利用技術に関する研究

4.1 水平構面としてのせん断耐力特性¹⁴³⁾

4.1.1 はじめに

現在、国策として地域材の公共施設および住宅部材への活用を推進するための支援が展開されている。その中で、木造住宅の床組の材料として、一般的に使用される合板の替わりに、板材を使用する工法は、木目を意匠的に現すことが可能で、審美性が向上することから、地域材による家づくりの象徴として活用されてきている。

一方、木造住宅の床組は、水平荷重に対する耐力性能が要求されるため、財団法人日本住宅・木材技術センター(以下日本住宅・木材センターとする)では床組に使われる材料別の床倍率を公表しており、その中で板材を用いた床組の床倍率も設定されている¹⁴⁴⁾。

しかし、日本住宅・木材技術センターが公表している板材を用いた床組の床倍率は、板材の樹種がスギで、かつ寸法は幅 180mm 以上、厚さ 12mm 以上とされており、幅 180mm 以上の板材は、通常の寸法と比較して幅が広く調達が困難であり、価格も高くなる。このため、地域材で住宅を建築する設計・施工現場からは、入手が比較的容易な幅 100mm 程度の小幅板、または小幅板の短辺同士を接着加工して幅を 910mm とした幅はぎ板を用いた床組のせん断耐力の評価が求められている。

そこで本研究は、小幅板および幅はぎ板の床組への利用適性の評価を目的として、アカマツ (*Pinus densiflora* Sieb. et Zucc)・スギ (*Cryptomeria japonica* D. don) 小幅板および幅はぎ板を用いた床組の面内せん断試験を行い、それぞれのせん断耐力の特徴について検討し、さらに床組別の床倍率を算出し、日本住宅・木材技術センターが作成した既存の床倍率一覧表と比較し、評価した。

4.1.2 実験方法

○ 梁桁材と根太材

写真 4.1.1 に床組の試験体で使用した梁桁と根太材を示す。床組の軸組部材は、アカマツ平角材(120×150mm, 含水率 15%以下)とし、梁と桁の仕口はプレカット加工による腰掛蟻継ぎとした。また面内せん断試験は柱脚固定方式で行うこととし、四隅をホールダウン金物(S-HD25)で固定し、M16 ボルトで直交する梁に緊結した。

写真 4.1.2 に板材を軸組部材に固定させるための根太を示す。根太はアカマツ平割材(45×105mm, 含水率 15%以下)とし、根太間隔は 303mm とした。実際に県内で板材を用いた床組を施工している工務店からの聞き取りにより、梁に架けるための加工形態は半欠きとし、N90 釘を脳天打ちとした。

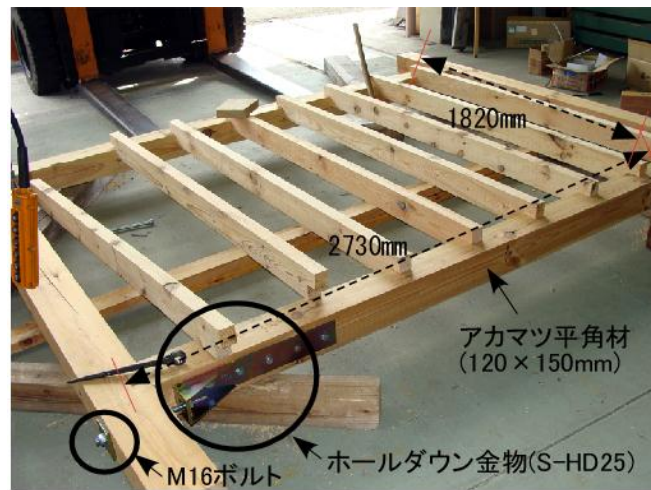


写真 4.1.1 面内せん断試験で使用する軸組部材



写真 4.1.2 板材を軸組部材に固定させるための根太

○ 小幅板および幅はぎ板

写真 4.1.3 に面材料として使用した小幅板を示す。小幅材の樹種はアカマツとスギとし、幅 105mm、長さは 2730mm、厚さは 15mm とした。一体の床組で、17 枚の小幅板を使用し、試験体数は 1 樹種あたり 3 体とした。

写真 4.1.4 に面材料として使用した幅はぎ板を示す。幅はぎ板の材料は、幅 105mm のアカマツおよびスギ小幅板とし、水性ビニルウレタン系接着剤を厚さ面に塗布後、高周波プレスにより両側圧蹄、加熱し接着した。接着時の圧蹄は 10kg/cm²、プレス時間は約 10 分とした。幅はぎ板の寸法は幅 910mm、長さは 2730mm、厚さは 15mm で、一体の床組で 2 枚の小幅板を使用した。



写真 4.1.3 面材料として用いた小幅板

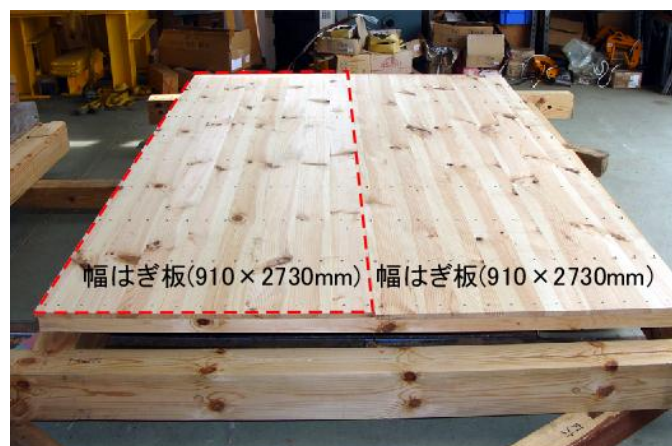


写真 4.1.4 面材料として用いた幅はぎ板

○ 留め付け方法と試験体数

図 4.1.1 に根太への小幅板および幅はぎ板の留め付け方法を示す。留め付けに使用する釘は N50 とし、板面への脳天打ちとした。現場の聞き取りから、小幅板の留め付け釘の間隔は 65mm とし、1 体の床組に 340 本の釘を用いた。

また、幅はぎ板の留め付け釘も N50 とし、打ち込みの間隔は 65mm と 150mm の 2 種類とし、1 体の床組にそれぞれの打ち込み間隔で 280 本と 130 本の釘を用いた。

表 4.1.1 に本実験で行った床組の仕様別の試験体数を示す。試験体数は、小幅板を用いた場合で繰り返し 3 体×2 樹種で計 6 体とし、幅はぎ板を用いた場合で繰り返し 3 体×2 樹種×2 種類の留め付け方法で計 12 体とした。

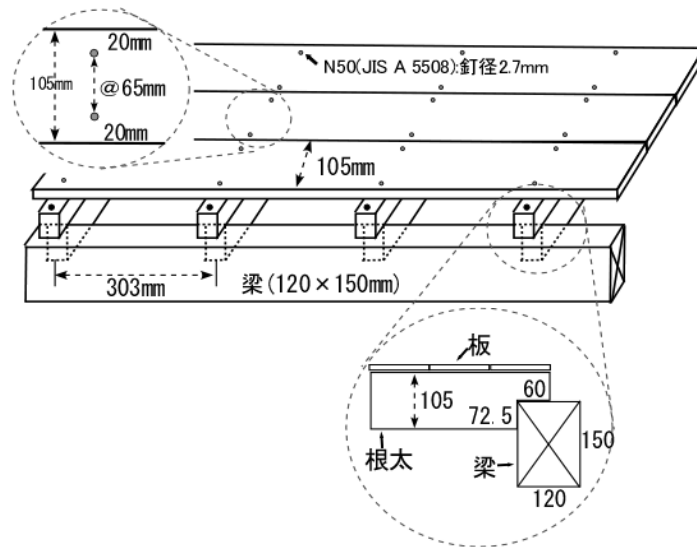


図 4.1.1 留め付け釘の間隔と根太掛け方法

表 4.1.1 板材の形状別、樹種別の試験体数

板材の形状	留め付け釘 の間隔	樹種	
		スギ	アカマツ
小幅板	65mm	3	3
	150mm	3	3
幅はぎ板	65mm	3	3
	150mm	3	3

○ 面内せん断試験方法

図 4.1.2 に床組の面内せん断試験の加力方式を示す。加力装置は面内せん断試験機(JT トーシ製)を使用した。床組の面内せん断試験は日本住宅・木材技術センター発行「木造軸組工法住宅の許容応力度設計 2008 年版」に基づいて行った。加力速度は 1mm/sec の正負交番繰り返しとし、見かけのせん断変形角が 1/600 ラジアン(以下, rad とする), 1/450 rad, 1/300 rad, 1/250 rad, 1/150 rad, 1/100 rad, 1/75 rad, 1/50 rad, 1/30 rad, 1/20 rad, 1/10rad の正負変形時で 1 回ずつ行った。試験は最大荷重到達後, 最大荷重の 80% に低下または, 見かけのせん断変形角 1/10rad まで行った。

○ せん断耐力の解析方法

変形角, 荷重データはデータロガー (株式会社東京測器製, TDS301) を介してパソコンに収録し, 得られたデータから, 図 4.1.3 に示すとおり包絡線による荷重-変形角曲線を作成した。

荷重-変形角曲線からは, 特徴点抽出と完全弾塑性モデルの自動化ツール¹⁴¹⁾により, 降伏耐力(P_y), 降伏変位(δ_y), 終局耐力(P_u), 終局変位(δ_u), 初期剛性 (k), 完全弾塑性モデルの降伏点変位(δ_v) および構造特性係数(D_s)を求めた。

また, P_y , $0.2P_u/D_s$, $2/3P_{max}$, 見かけのせん断変形角 1/120rad 時の耐力($P_{1/120}$)の平均値にばらつき係数を乗じた値の最小値を短期基準せん断耐力とし, 得られた短期基準せん断耐力から床倍率を求めた。

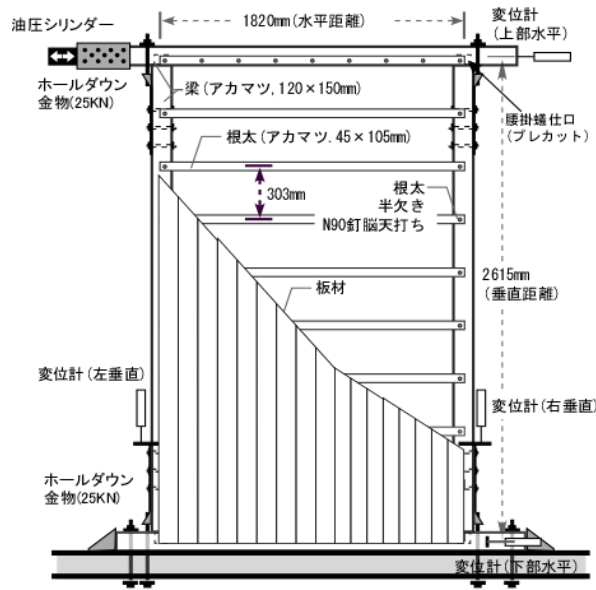


図 4.1.2 面内せん断試験方法

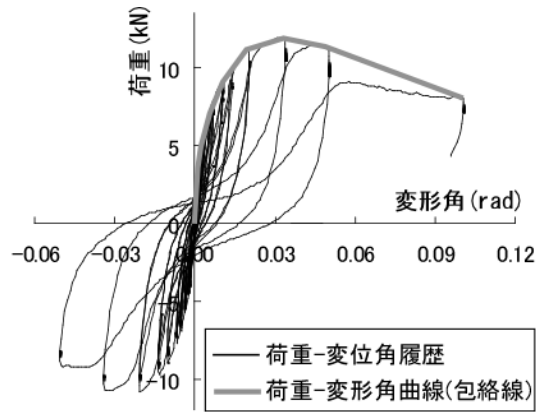


図 4.1.3 包絡線による荷重-変形角曲線の作成例

4.1.3 結果と考察

○ 破壊形態

写真 4.1.5 に小幅板を用いた床組の試験終了時の破壊形態を示す。小幅板を用いた床組は、変形角が大きくなるにつれて、板相互のずれ量が大きくなった。一方で試験時の最大変形角である $1/10\text{rad}$ に到達しても、根太からの留め付け釘の引き抜けは発生しなかった。

写真 4.1.6 に幅はぎ板を用いた床組の試験終了時の破壊形態を示す。小幅板と同様に、幅はぎ板を用いた床組でも、幅はぎ板相互のずれは確認された一方で、接着層の剥離は確認されなかった。

また、幅はぎ板の外周の留め付け釘は根太からの引き抜けが見られ、変形角 $1/30\text{rad}$ から、大きな浮き上がりおよび引き抜けが発生した。さらに、留め付け釘の間隔を 65mm とした床組は、板の留め付け釘の引き抜けより先行して、根太の先行破壊で試験が終了した試験体も見られた。



写真 4.1.5 小幅板を用いた床組の破壊形態



写真 4.1.6 幅はぎ板を用いた床組の破壊形態

○ 荷重-変形角曲線の比較

図 4.1.4 に全ての樹種別および試験条件別の荷重-変形角曲線を示す。小幅板を用いた床組の荷重-変形角曲線は、幅はぎ板を用いた床組と比較して、試験開始直後から曲線の立ち上がりが小さかった。一方で、小幅板を用いた床組は幅はぎ板を用いた床組と比較して、最終変形角である 1/10rad でも荷重の低下が見られず、大変形でも破壊せずに耐力が回復することが示された。幅はぎ板を用いた床組は、留め付け釘の間隔で荷重-変形角曲線は異なり、釘の間隔を 65mm とした場合は、最大荷重が大きくなることが示された。

また、荷重-変形角曲線は、小幅板を用いた床組と幅はぎ板を用いた床組では明らかに異なる傾向が見られた一方で、同じ床組で異なる樹種間では明確な違いは見られなかった。

図 4.1.5 に $(\delta y, P_y)$, $(\delta v, P_v)$ および $(\delta u, P_u)$ の平均値を結んで得られた完全弾塑性モデルによる変形角と荷重の関係を樹種別に示す。小幅板を用いた床組と比較して、幅はぎ板を用いた床組は、全ての変形角で荷重が大きくなった。その一方で、小幅板を用いた床組は、幅はぎ板を用いた床組と比較して、最大耐力に到達するまでの変形角が大きいことが示された。

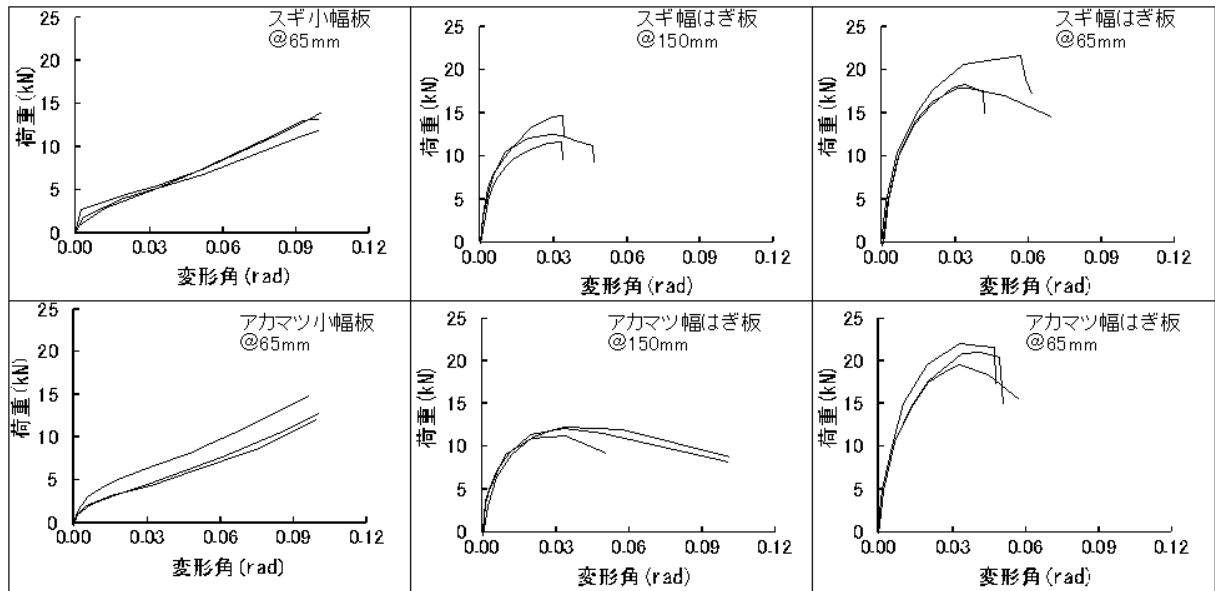


図 4.1.4 小幅板および幅はぎ板を用いた床組の樹種別の荷重-変形角曲線
@ : 留め付け釘の間隔

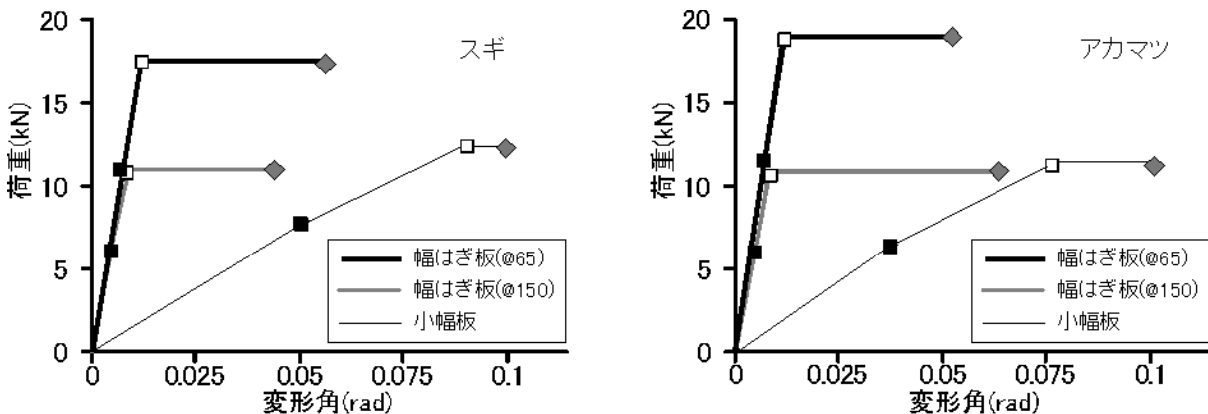


図 4.1.5 完全弾塑性モデルによる変形角と荷重の関係

■: δ_y, P_y □: δ_v, P_v ◆: δ_u, P_u @: 留め付け釘の間隔

○ せん断耐力の比較

図 4.1.6 に小幅板を用いた床組と幅はぎ板を用いた床組のせん断耐力を項目別に示す。スギ小幅板を用いた床組のせん断耐力は、アカマツ小幅板を用いた床組と比較して P_u , P_{max} が大きくなった。しかし、小幅板を用いた床組はせん断耐力のバラツキが大きいいため、使用する樹種が床組のせん断耐力に及ぼす影響については、今後も検討が必要と考えられる。一方で、幅はぎ板を用いた床組は、板の樹種でせん断耐力に明確な差は見られなかった。

また、幅はぎ板を用いた床組では、留め付け釘の間隔を 150mm から 65mm にすることで P_{max} , P_y , P_u および $P_{1/120}$ で約 1.6 倍、初期剛性で約 1.2 倍のせん断耐力の増加が見られた。しかし、留め付け釘の間隔を 150mm から 65mm にすることで、釘の本数は 2 倍以上必要となったため、留め付け釘一本あたりのせん断耐力は低下することが示された。これは 3.1 の破壊形態で示したとおり、留め付け釘の間隔を 65mm とした場合、留め付け釘の引き抜けよりも先に根太の破壊が見られたことによると考えられる。したがって、根太の仕様を半欠きよりも引き抜けの抵抗が高い、落とし込み等により、留め付け釘の間隔を狭くすることによるせん断耐力の向上効果は大きくなると推測される。

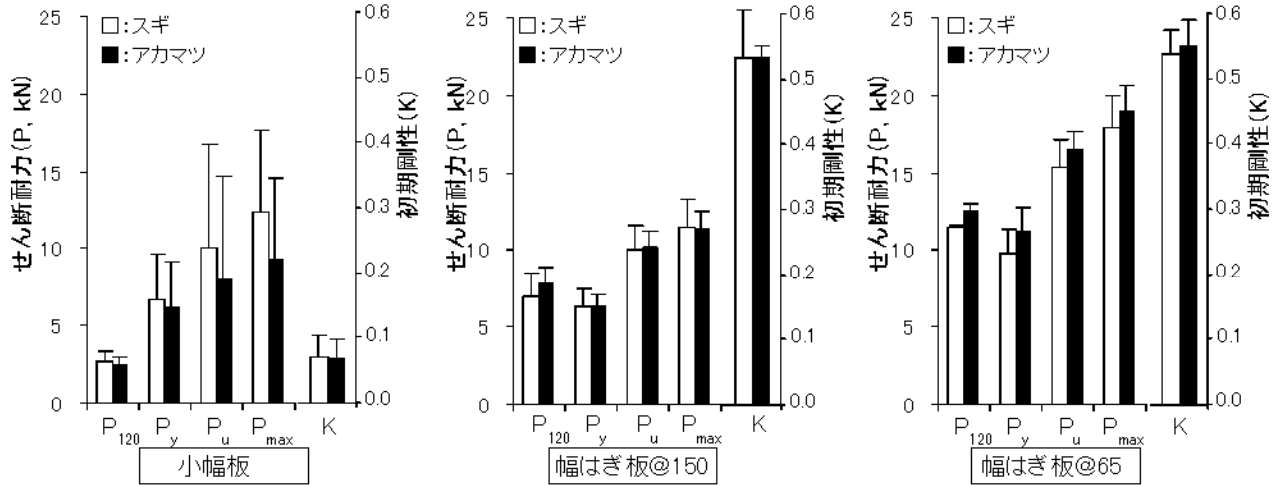


図 4.1.6 小幅板および幅はぎ板を用いた床組のせん断耐力の樹種別の比較
 誤差バー:標準偏差 @:留め付け釘の間隔

○ 床倍率の評価

図 4.1.7 に小幅板および幅はぎ板を用いた床構面の床倍率を樹種別に示す。小幅板を用いた床組の床倍率は、既存の 180mm の板材を用いた床組の床倍率(0.36)を下回ることはなかった。

また、幅はぎ板を用いて留め付け釘の間隔を 150mm とした床組の床倍率は、既存の構造用合板またはパネルを用いた床組の床倍率(1.6)を下回ることがなかった。さらに、留め付け釘の間隔を 65mm とすることで、床倍率は約 1.5 倍まで上昇することが示された。

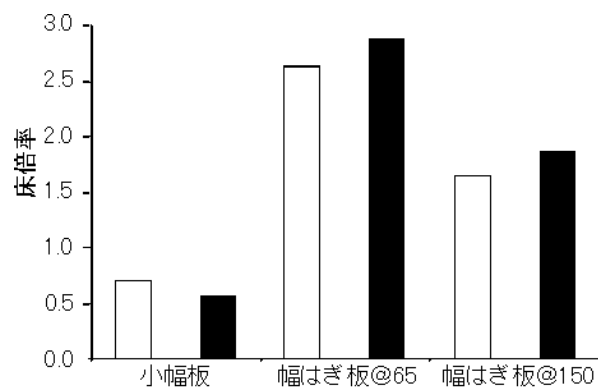


図 4.1.7 床組の床倍率の比較
@ : 留め付け釘の間隔

4.1.4 まとめ

地域材を用いた製材品の床組への利用適性の評価を目的として、アカマツ・スギ小幅板および幅はぎ板を用いた床組の面内せん断試験を行い、小幅板および幅はぎ板による床組のせん断耐力の発現について検討し、さらにそれぞれ床倍率を算出し、財団法人日本住宅・木材技術センターが作成した既存の床倍率一覧表と比較し、評価した。

その結果、板材を用いた床組は大変形でも破壊せずに耐力が回復すること、また、幅はぎ板を水平構面の面材とすることで、床倍率は約 1.6~1.8 となり、既存の床組の仕様に示されている構造用合板または構造用パネルを用いた床組の床倍率と同程度となることが明らかとなった。

4.2 薬剤注入および塗装による防火特性¹⁴⁵⁾

4.2.1 はじめに

日本では、防火材料は、不燃材料、準不燃材料、難燃材料に区分されており、建築基準法改正により、木質不燃材料開発が可能になったことともあいまって、近年、木質防火材料の開発が活発に行われている。

木質系の防火材料では、水溶性の防火薬剤を減圧・加圧法により、木材に注入する手法が一般的である。薬剤としては、ホウ酸・ホウ酸塩系の薬剤や無機リン酸・窒素系の薬剤等が使用される例が多い。防火薬剤の注入量と防火性能の関係について、原田(2003)らは、厚さ 15mm のアカマツ材へのカルバミルポリリン酸アンモニウムの注入処理において、80kg/m³の薬剤注入量で日本の建築基準法の難燃材料、160kg/m³の薬剤注入量で準不燃材料の基準を満たす材料となるとしている。

しかし、防火薬剤を注入した材料には、吸湿等により注入した薬剤が材料表面に吹き出してくる「白華」への対応などが求められている。この解決法の一つとしては、表面塗装がある。表面塗装は、材料の仕上げとしても重要であるが、可燃性の塗膜の場合には、表面を塗装することで、付与した防火性能が低下することも懸念される。また、防火処理木材への塗装性やその耐久性に関する研究も重要な課題である。防火薬剤を注入した木材の多湿条件下あるいは外装用としての利用条件下における耐久性に関する知見は、Ostman¹⁴⁶⁾や Winandy¹⁴⁷⁾の総説にとりまとめられている。しかし、防火薬剤の注入と塗装の組合せで防火性能を向上させるという観点からの検討は行われていない。

本研究では、防火薬剤を注入したアカマツ材、シナ材の防火性能がセラミック塗装により向上するかどうかについて検討した。また、防火処理木材を塗装した場合の塗膜の性能について検討した。

4.2.2 実験方法

○ 防火性能試験

・試験体の作成

所定の防火性能を有する木材を調製するための処理条件を確定するため、防火薬剤の濃度を変えた試験体を作成した。また、無機系の塗装の有効性を確認するため、同一条件で処理した試験体に対し、塗装を施したものと無塗装のものを作成した。

防火薬剤を注入する試験体は厚さ 20mm アカマツ材およびシナ板材とした。4000mm(L) x 120mm(T) x 20mm(R)の板材を各樹種 6 枚ずつ用意し、1 枚の板から 300mm(L) x 120mm(T) x 20mm(R)の無欠点板を 3 枚調製した。注入する防火薬剤はカルバミルポリリン酸アンモニウム（重合度 n=5~10)を主成分とする薬剤（丸菱油化製、ノンネン W2-50)とした。原液濃度は 50%，pH は 5.6~6.8 であった。注入する薬剤濃度は 0%，6.25%，12.5%，25%，37.5%の 5 段階に調整された。それぞれの薬剤濃度の液体で満たしたバットに、アカマツ板、シナ板を同一の板から調製した 3 枚の板を入れ、以下の条件で薬液を注入した。

減圧処理：25torr (3333Pa)，2 時間

加圧処理：9.8kg/cm² (0.96MPa), 24 時間

常圧：24 時間

薬液を注入した試験体は、常温（15～20℃）で 1 週間、45℃で 2 週間乾燥した後、厚さ 15mm に調製された。薬剤含浸量は、計算式 (1)式を用い、厚さを調製した試験体の密度と含水率から算出した。

$$AC = \{(W_1 / (U_1 / 100 + 1)) - (W_0 / (U_0 / 100 + 1))\} / V_0 \quad (1)$$

AC：薬剤含浸量 (kg/m³) W₀：含浸処理前の試料重量 (kg), U₀：含浸処理前の含水率(%), W₁：含浸処理後の試料重量 (kg), U₁：含浸処理後の含水率(%), V₀：含浸前の試料の体積 (m³)

薬剤濃度と注入された薬剤含浸量との関係は図 4.2.1 のとおりである。薬剤の濃度が高いとき、アカマツの薬剤含浸量はシナのそれより高い傾向を示した。

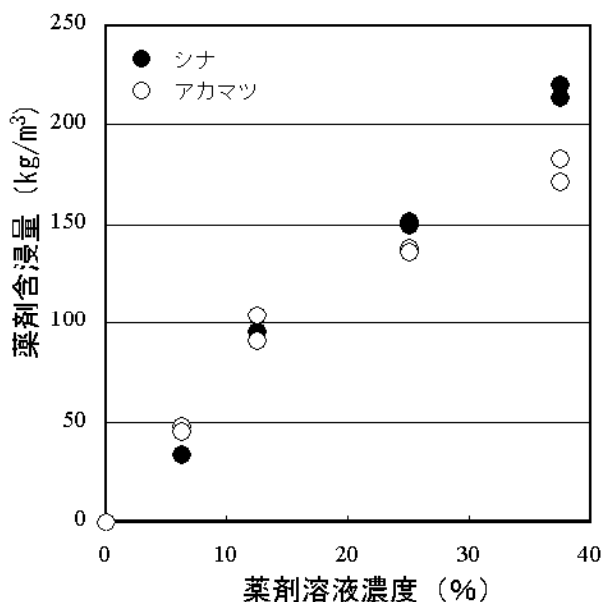


図4.2.1 アカマツとシナの薬剤溶液濃度と含浸量との関係

防火薬剤を含浸させた長さ 30cm の板を長さ方向に 2 分して 15cm の試験体とした。2 分した片側にセラミック塗料 (CRB-90, 日板工業製) を塗布し乾燥 (表面: 4 回塗装, 裏面 3 回塗装), もう片側は無塗装のまま乾燥した。CRB-90 (CRB) は SiO_2 と Ag を主成分とする抗菌・防かび・高硬度・耐蝕性能を有するセラミック塗料である。乾燥後, 試験体は 100mm×100mm に調製された。

上述の実験は, 防火薬剤 (カルバミルポリリン酸アンモニウム) とアルコキシ金属塩系塗料との組合せによる防火性能への相乗効果を検討するためのものであるが, 実際の商品開発に当たってはより簡易な注入方法が好ましい。

そこで, 温冷浴法により, 厚さ 6mm のシナ材に防火薬剤を温冷浴法により注入し, これを 3 層積層したあと厚さ 15mm に仕上げ, 表面に無機系塗料を塗布したものの作製し, 所期の防火性能を有する材料を開発することができるか検討した。2000mm(L) x 140mm(T) x 6mm(R) のシナ単板を 21 枚用意し, 濃度 30% に調製した防火薬剤 (ノンネン W2-50) を温冷浴法により注入した。

処理条件は, シナ材の煮沸 2 時間, 防火薬剤への浸漬 48 時間, 液切り 3 時間, 80°C での乾燥 3 日間であった。単板への薬剤含浸量 (有効成分固形量) は 181~272kg/m³ (平均 229 kg/m³) であった。単板 3 枚の薬剤含浸量の合計がほぼ等しく (230 kg/m³ 程度) となるように単板を選択し, 3 層のシナ試験体を 7 体作成した。

接着剤は, 大鹿振興製の水性高分子イソシアネート系樹脂接着剤 (大鹿製 PI6000) であった。圧縮圧力は 10kg/cm² (0.98MPa), 圧縮時間は 3 時間であった。接着後, 両表面を 1.5mm ずつ, 両側面を 5mm ずつ削り, 2000mm(L) x 130mm(T) x 15mm(R) に仕上げた。

この 7 体の試験体のうち, 3 体をコーンカロリーメータのサンプル作製用とし, 330mm の長さで切断して 330mm(L) x 130mm(T) x 15mm(R) とした。この内, いくつかのサンプルの表面には塗装を施した。表面の塗装に用いた塗料は, 以下のとおりであった。

- (1) アルコキシ金属塩系塗料(CRB): 日板工業製 CRB-90, 主成分 SiO_2 , Ag, 塗布量 50g/m²
- (2) 水性ウレタン塗料(AR): 和信化学工業製 AQUIREX No.3400, 塗布量 50g/m²
- (3) 植物性塗料(OS): 日本オスモ製オスモカラー クリア, 塗布量 30g/m²
- (4) 油性ポリウレタン塗料(UP): 斉藤塗料製, 両面塗布

塗装された試験体から 100mm x 100mm x 15mm の試験体 3 体を得た。

なお, CRB で塗装する 3 層のシナ材試験体については, 上記とは別に 0 kg/m³, 80kg/m³, 113 kg/m³, 170 kg/m³, 141kg/m³, 205kg/m³, 216kg/m³ の薬剤が含浸させ, 表面に CRB を塗布した試験体も作製し, コーンカロリーメータ試験に供した。

○ コーンカロリーメータ試験

建築基準法では, 不燃材料, 準不燃材料, 難燃材料に対し, それぞれ 20 分間, 10 分間, 5 分間の不燃性という性能基準が示されており, 燃焼発熱性についてはコーンカロリーメータ試験 (ISO5660-1)¹⁴⁸⁾ による評価が行われている。判定基準は, 50kW/m³ の輻射熱強度での所定時間の加熱に際して, 以下の性能を有することとされている。

- (1) 総発熱量が 8MJ/m² 以下であること。
- (2) 防火上有害な裏面まで貫通する亀裂及び穴がないこと。

(3) 発熱速度が 10 秒以上継続して 200kW/m² を超えないこと。

材料の認定に際しては、コーンカロリメータ試験に加え、マウスを用いるガス有害性試験でも評価を受けることとなっているが、本研究では、試験体の防火性能はコーンカロリメータ（アトラス社製，cone 2a）により評価した。試験は，ISO5660-1 に準じて行った。

実験条件は以下のとおりであった。

ヒータからの輻射熱強度は 50kW/m²。試験体の設置方向は水平方向。試験体の寸法は 100mm x 100mm x 厚さ(試験体)であった。試験体側面からの燃焼の影響を少なくするため，ステンレスカバー（加熱面開口部の面積は 0.0088m²）を使用した。コンピュータへのデータの取込みは 2 秒間隔で行った。試験時間は，20 分間（不燃材料試験）または 10 分間（準不燃材料試験）とした。燃焼試験の繰返しは 2 とした。試験の評価項目は，着火時間(tig)，酸素濃度等から計算される発熱速度（HRR）と所定時間（5 分間，10 分間，20 分間）における総発熱量（THR5，THR10，THR20）であった。

○ 塗膜性能試験

塗膜性能試験には，コーンカロリメータ試験用に作製した 3 層のシナ材（薬剤含有量約 230kg/m³）試験体より作製した。塗膜の性能は，アルコキシ金属塩系塗料(CRB)の性能を見ることを主目的とするが，比較のため，市販の木材用透明塗料の中から，油性ポリウレタン塗料，水性ウレタン塗料，植物性塗料も用いた。油性ポリウレタン塗料は上述の UP，水性ウレタン塗料は AR，植物性塗料は OS であった。

塗装は刷毛塗りでを行い，それぞれ 3 回塗りした。試験体は，塗装後，室温で 24 時間乾燥された。塗膜性能試験体の寸法は，150mm(L) x 70mm(T) x 15mm(R)であった。

塗装性能試験は，JIS-K-5600¹⁴⁹⁻¹⁵⁰塗料一般試験法，第 7 部塗膜の長期耐久性，第 2 節耐湿性（連続結露法）及び第 7 節促進耐候性（キセノンランプ法）に準拠し，防火処理した塗装試験片の塗膜の耐久性について検討を行った。

なお，耐湿試験に用いた試験機は，温度差劣化試験機（スガ試験機（株）製）で，温度 50℃，相対湿度 95%の条件で行った。また，促進耐候性試験に用いた試験機は，キセノンロングライフウェザーメータ（スガ試験機（株）製）で，降雨条件なしで行い，24 時間ごと分光光度計（（株）東京電色製）による色差の測定を行った。

4.2.3 結果と考察

○ 薬剤注入量と無機系塗料の効果

減圧・加圧法により、カルバミルポリリン酸アンモニウムを注入した試験体の樹種、薬剤含有量、塗装の有無による燃焼発熱性への影響を比較した。

コーンカロリメータ試験における最高発熱速度、5分間の総発熱量、10分間の総発熱量、20分間の総発熱量を図4.2.2, 図4.2.3, 図4.2.4, 図4.2.5にそれぞれ示す。

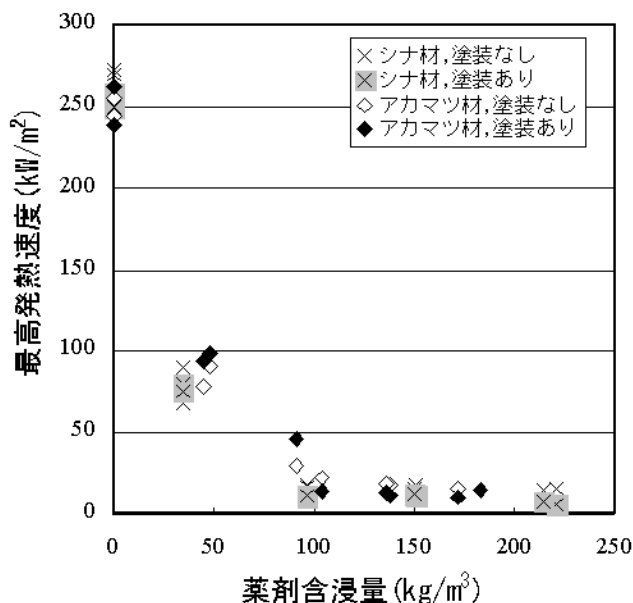


図4.2.2 最高発熱速度に及ぼす防火処理木材のGRB塗装の効果

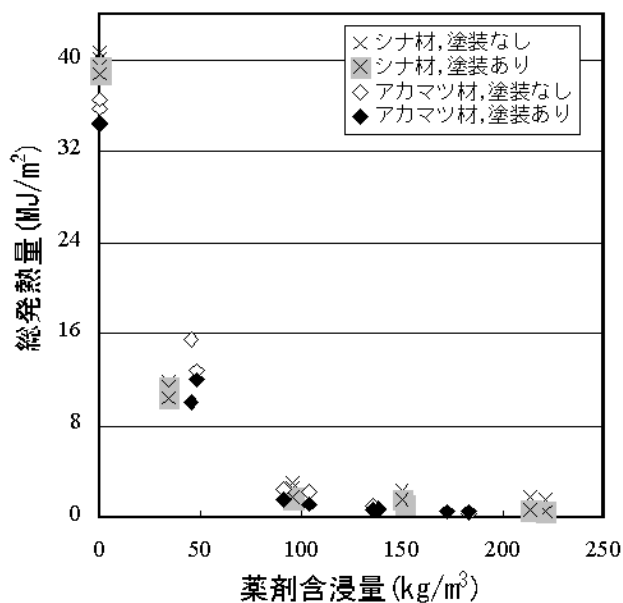


図4.2.3 5分間の総発熱量に及ぼす防火処理木材のGRB塗装の効果

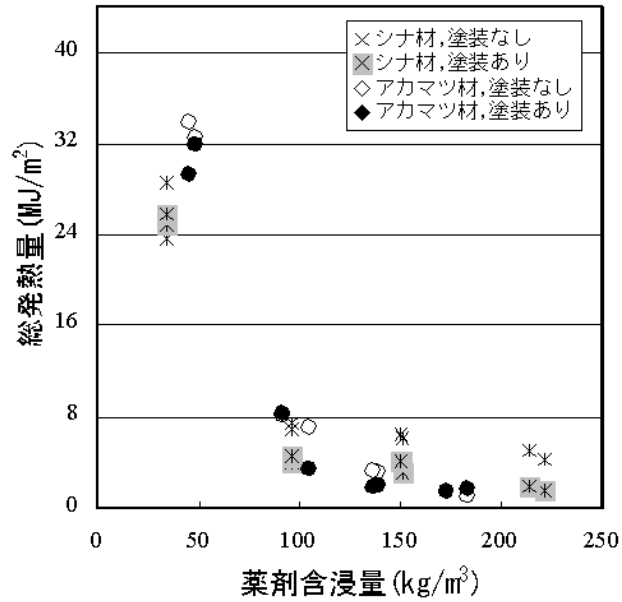


図4. 2. 4 10分間の総発熱量に及ぼす防火処理木材のGRB塗装の効果

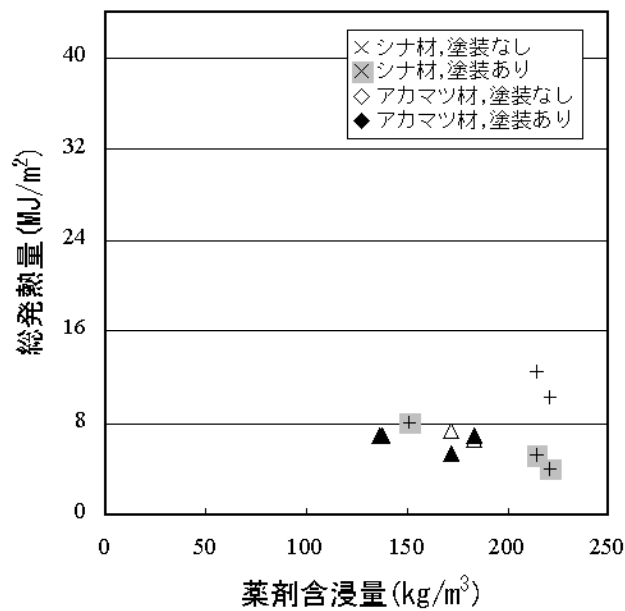


図4. 2. 5 20分間の総発熱量に及ぼす防火処理木材のGRB塗装の効果

これらの図より、シナノキ、アカマツとも防火薬剤の注入量の増加に伴って最大発熱量、総発熱量とも減少していることが明らかである。また、CRBで塗装されたものは未塗装のものに比べて発熱量が若干低くなる傾向があり、CRB 塗装が発熱速度の低減にわずかながら効果があるといえる。

樹種による差異に関しては次のような傾向が観察された。無処理では、着火後 180 秒および 300 秒間の平均発熱速度で比較すると、無処理・無塗装のシナノキ（密度 380kg/m^3 ）は、 145kW/m^2 、 140kW/m^2 、アカマツ（密度 530kg/m^3 ）のそれは 131kW/m^2 、 127kW/m^2 であり、シナノキは低密度にもかかわらずアカマツよりも発熱速度が大きい。

木材の平均発熱速度は、厚さが同じであれば、密度の高いものほど大きくなる傾向が見られるが、相関はさほど高くはない。原田によれば、これは樹種の特徴、特に組織構造の影響が大きいとしている^{151,152}。

防火薬剤を注入したものでは、低濃度での薬剤処理ではシナノキの総発熱量がアカマツに比べて低いのに対し、薬剤注入量が多い場合では逆の関係になっている。こうした差異も樹種の特徴であると考えられるが、そのメカニズムについては今後の検討課題である。

また、セラミック塗装の効果は、シナノキでは顕著だが、アカマツではほとんど差が見られなかった。図 4.2.6 に異なる濃度の薬剤で処理したシナノキ材の発熱速度の推移を示す。

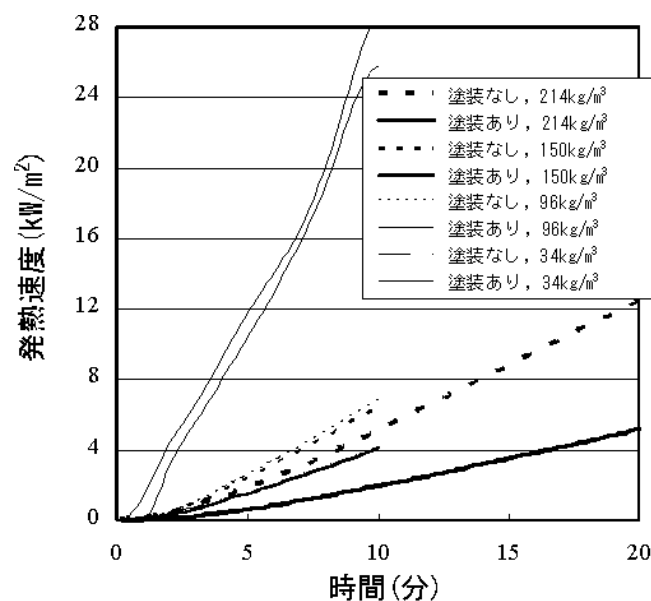


図4.2.6 処理別のシナ材の発熱速度曲線の比較

図 4.2.6 から、シナノキでは、セラミック塗料(CRB)の効果が明らかである。図 4.2.4 より、セラミック塗装をしていれば、シナノキ、アカマツとも 100kg/m^3 程度の薬剤注入量があれば、10 分間の総発熱量を 8MJ/m^2 以下に抑えることができ、準不燃材料クラスの方法となる。

また、アカマツで 150kg/m^3 以上の薬剤が注入されていれば、シナノキで約 210 kg/m^3 の薬剤が注入され、セラミック塗装がされれば、20 分間の加熱試験においても総発熱量を 8MJ/m^2 以下に抑えることができ、不燃材料クラスの方法となることが明らかとなった(図 4.2.5)。

アルコキシ金属塩系塗料である CRB は、アルコール性の加水分解・縮重合型の塗料であり、木材表面に疎水性・遮蔽性のガラス質膜を形成する。そのため、このアルコキシ金属塩系塗料と先に含浸させたリン酸を含む防火薬剤との相乗効果により、防火処理木材の性能が向上し、より少ない防火薬剤量の含浸量で不燃材料の基準を満たすことが可能になったと考えられる。

木材は、加熱により熱分解し、可燃性ガスを放出することで燃焼が促進される。リン酸系防火薬剤は可燃性ガスを発生する化学的過程を変性させることによって、可燃性混合気体が形成されにくくする作用があるとされている。一方、アルコキシ金属塩系塗料は、加熱初期の段階で、その塗膜が熱を遮蔽し、可燃性ガスの発生を遅延させるとともに、可燃性ガスを材内に封じ込める効果があると推測される。

○ 温冷浴法と塗料の種類の見直し

以上の結果より、防火薬剤の注入とアルコキシ金属塩系塗料との組み合わせにより防火性能が向上することが明らかとなったが、実際の製品生産ではより簡易な設備での薬剤注入方法が望ましい。

そこで、薬剤注入方法として温冷浴法を取り上げた。温冷浴法とは、木材を温浴中で煮沸する温浴処理工程と、煮沸した木材を防火薬剤溶液中に浸漬して薬剤を含浸する冷浴処理工程からなる。非加圧式処理方法を用いるので、含浸作業が簡易になり、防火処理木材の製造が容易になる。

ただし、同じ薬剤濃度での薬剤の浸透性は、減圧加圧法に比べて劣る。また、厚い木材への均一な薬剤注入は難しい。そこで、厚さ 6mm シナノキを防火処理し、それを3層積層接着することとした。また、試験体表面にアルコキシ金属系塗料を塗布することとした。他方、防火処理した木材を内装材として利用する場合には、美観や表面からの防火薬剤の析出を押さえるため、仕上げの塗装は不可欠である。そこで、塗料が防火性能に及ぼす影響を把握するため、アルコキシ金属系塗料に加え、木材の塗装に一般的に用いられる塗料による塗装を行った試験体についても防火性能評価を行った。

温冷浴法により薬剤を注入した3層のシナノキ材に各種塗装を施した試験体のコーンカロリーメータ試験結果を表 10-1 に示す。薬液濃度が同じ場合、温冷浴法で木材に注入される薬剤量は、減圧・加圧法で注入される薬剤量よりも少ない。温冷浴法で注入した試験体では、 113 kg/m^3 の薬剤が注入され、表面をセラミック塗装したものでも10分間の総発熱量が 12.2 MJ/m^2 となった。

この結果からセラミック塗装をする場合であっても、10 分間の総発熱量を 8MJ/m^2 以下とするには、約 150kg/m^3 の薬剤注入が必要といえる。

防火薬剤が約 230kg/m^3 注入された 3 層のシナノキ材に各種塗料を塗装した試験体の総発熱量を表 10-1 に示す。CRB, AR, OS, UP で塗装された試験体の 10 分間の総発熱量の平均はそれぞれ、 2.7MJ/m^2 , 7.9MJ/m^2 , 6.1MJ/m^2 , 7.1MJ/m^2 で、CRB は他の塗料に比べ発熱量が格段に低く抑えられている。

また、CRB で塗装したものは 3 体中 1 つを除いて未着火で最高発熱速度も $8\sim 9\text{MJ/m}^2$ あるが、AR 塗装材は 20~31 秒で着火し最高発熱速度は $38\sim 116\text{kW/m}^2$ 、OS 塗装材は 12~15 秒 (1 体は未着火) で着火し最高発熱速度は $23\sim 74\text{kW/m}^2$ 、UP 塗装材は 13~19 秒で着火し最高発熱速度は $111\sim 124\text{kW/m}^2$ であった。

以上の結果から、防火薬剤を注入処理したシナノキ材への塗装には、CRB が効果的であり、この塗布により、より少ない薬剤注入量で準不燃材料や不燃材料グレードの防火材料を開発することができることが示唆された。

○ 塗膜性能

本研究における防火処理木材は、建築物の内装材への利用を目的としていることから、防火性能に加え、光変色や温湿度の変化に対応できる性能が必要である。特に、水溶性の防火薬剤で処理された木質防火材料の場合、注入された薬剤が空気中の湿気と反応し、白い粉状となり素材表面に噴出するトラブルを引き起こす場合が多い。こうしたトラブルへの対処方法としては、塗装に期待されるところが大である。また、そうした塗料には、高い耐光性能と耐湿性能が求められる。

図 4.2.7 に防火処理した 3 層シナ材に CRB, AR, OS, UP を塗布し促進耐光性試験を行った結果を示す。AR, OS では 24 時間までの ΔE が 6~8、120 時間で ΔE が 18~23 となっており、耐光性が弱い塗料であることがわかる。

一方、UP, CRB においては、120 時間で ΔE が 10~12 となり、AR, OS の半分程度の変色度合いであり、比較的安定した耐光性を示した。

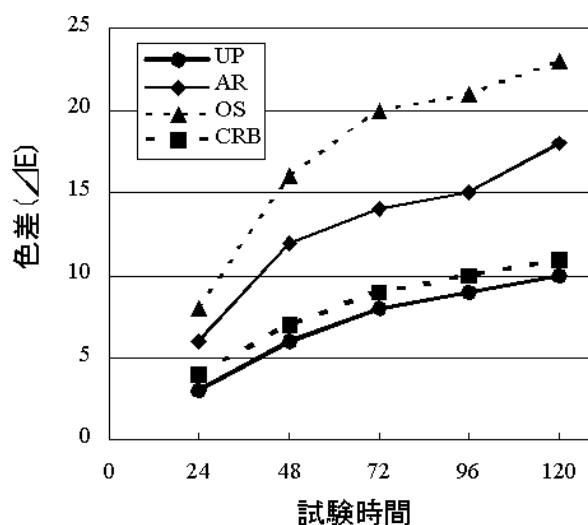


図4.2.7 促進耐光性試験による色差の比較.

図 4.2.8 に耐湿試験を行った結果を示す。AR では 48 時間で、OS では 144 時間で防火処理薬剤が塗面に噴出し、耐湿性が弱い結果となった。

一方、UP、CRB では 240 時間でも薬剤の噴出は見られず、強い耐湿性を示し、通常の室内環境であれば問題なく利用できる結果となった。CRB はガラス膜を形成し、UP は 3 次元の化学結合を形成する。これらが塗膜を強固にし、高湿度の環境においても防火処理木材に耐湿性を与えたものと思われる。以上の結果から、これらの塗装は通常の室内環境においては問題なく使用できることが示された。

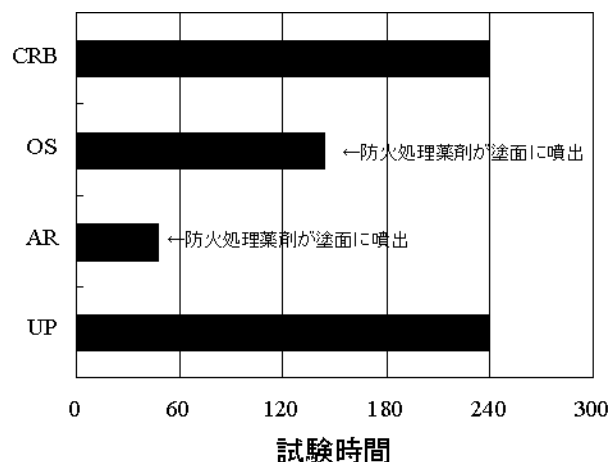


図4.2.8 耐湿試験による防火処理木材の塗装条件別の耐湿試験.

4.2.4 まとめ

減圧・加圧法による薬剤注入の場合では、10 分間の加熱試験では 100kg/m^3 程度の薬剤注入と 50g/m^2 のアルコキシ金属塩系塗料の塗布により総発熱量で 8MJ/m^2 以下（準不燃材料レベルの性能）を達成した。さらに CBR 塗装を行うことで、アカマツの場合は注入量 150kg/m^3 で、シナノキの場合は 210kg/m^3 の注入で不燃材料レベルの性能が得られた。

温冷浴法による注入の場合には、厚さ 6mm のシナノキ単板を 3 層積層して厚さ 15mm に仕上げた。防火薬剤を約 150kg/m^3 注入し、表面にアルコキシ金属塩系塗料を塗布した 3 層シナノキの 10 分間の総発熱量は 8MJ/m^2 以下、また、防火薬剤の注入量を 230kg/m^3 程度にすると、10 分間の総発熱量を 3MJ/m^2 以下となった。

アルコキシ金属塩系塗料は耐光性、耐湿性にも優れており、内装用の木質防火材料の開発に有用であることが明らかとなった。

第5章 総括

本研究は、全国的に豊富な資源の蓄積を有し、古来より木造住宅の梁材および内装材として使われてきたアカマツ材について、近年の建築基準法改正を契機として建築部材に要求される性能および品質に対応した乾燥技術の開発、構造用梁材として利用するための強度性能に及ぼす諸要因の解明および平角材の製材過程で得られる板材の利用開発など一連の研究を行い、アカマツ大断面製材の利用技術に関する新たな知見を深め、アカマツ大径丸太材の有効活用に資することを目的とした。

本研究により得られた新たな知見と確立した技術は、以下のとおり総括される。

【新たな学術的知見】

I. 乾燥技術

- ① 加工後の平角材の寸法変化は含水率変化の影響を受ける。
- ② 高温セットで生じる内部割れは、高温セット処理直後の含水率と関係。
- ③ 人工乾燥時間は高温セット処理直後の含水率から推定可能。

II. 梁材としての強度特性

- ① たいこ材は平角材と比較して節径の増大に伴う曲げ強さの低下が抑制。
- ② 表面割れは平角材の曲げ強さに影響を及ぼさない。
- ③ 高温セットした平角材の曲げ強さは、天然乾燥と比較して約1割低下。

III. 板材の利用技術

- ① 板材を用いた水平構面は、せん断変形の回復に伴い耐力も回復。
- ② 難燃薬剤とCRB塗料の組み合わせは防火性能向上の相乗効果あり。

【確立した技術】

I. アカマツ平角材の乾燥技術

- ① 製材JASの基準に基づき、使用後の寸法変化が少ない天然乾燥技術を確立
- ② 従来の人工乾燥と比較して、表面割れおよび内部割れの発生を抑制した人工乾燥スケジュールを構築。

III. アカマツ板材の利用技術

- ① 木造軸組工法住宅の床構面への板材または幅はぎ材の利用技術。
- ② 難燃剤の注入量を抑えた防火処理木材の製造技術を確立し、商品化。

アカマツ材を住宅の梁材として利用促進するためには、人工乾燥により平角材の含水率を的確な状態まで低下させ、かつ個体間の品質のばらつきを可能な限り抑制することが最も重要なことである。今後、国産材を製材品等の建築用部材として加工・供給する生産者は、需要者である設計・施工者が求める品質に対して、従来までの情緒的な説明でなく、JAS等の品質基準に対応させて生産していることを論理的に説明することが必要不可欠となる。本研究による一連の学術的成果が、アカマツ大断面製材の人工乾燥技術の確立と構造用梁材への適用の一助となることを期待して総括とする。

謝 辞

本論文をまとめるにあたり、終始御指導を賜りました信州大学学術研究院（農学系）武田孝志教授，佐々木邦博教授，安江恒准教授，細尾佳宏准教授ならびに徳本守彦名誉教授，秋田県立大学木材高度加工研究所の林知行教授に深く感謝の意を表します。

長野県林業総合センター元所長の橋爪丈夫氏，現所長の吉田孝久氏からは，信州大学農学部森林科学科の学生の頃より，針葉樹心持ち材の人工乾燥技術および木材の強度試験のご指導をいただきました。深く感謝の意を表します。

秋田県立大学木材高度加工研究所の飯島泰男名誉教授からは，木材の強度性能評価と統計手法についてご指南をいただきました。深く感謝の意を表します。

国立研究開発法人森林総合研究所の原田真樹氏，軽部正彦氏からは，木材の接合および水平構面のせん断性能の試験・評価手法について，最初から最後まで懇切丁寧にご指導いただきました。深く感謝の意を表します。

国立研究開発法人森林総合研究所の原田寿郎氏，独立行政法人岩手県工業技術センターの穴沢靖氏からは，木材の防火処理技術および塗装技術に関して，貴重な専門知識を惜しみなく与えていただきました。深く感謝の意を表します。

岩手大学農学部の沢辺攻名誉教授，関野登教授，小藤田久義准教授，岩手県立大学盛岡短期大学の内田信平准教授からは，木を勉強する会および AFR を通じて，建築部材としての木材の利用技術に関する知識を与えていただきました。深く感謝の意を表します。

久慈地方森林組合の澤口敬志氏，株式会社マルヒ製材の日當和孝氏，株式会社坂東木材の坂東学氏，合資会社ヤマゼン木材の山崎重雄氏からは，試験体となるアカマツ材の調整に多大なるご協力をいただきました。深く感謝の意を表します。

岩手県林業技術センター元研究部長の東野正氏，上席林業普及指導員の多田野修氏，谷内博規氏からは，岩手県庁採用当初から研究員に必要な資質と，岩手県の林業・林産業の現場を教えていただきました。深く感謝の意を表します。上席専門研究員の蓬田英俊氏からは，学術論文の書き方についてご指導いただきました。さらに，林業技術センターの皆様からも，多くの激励とご協力をいただきました。厚く御礼申し上げます。

最後に，学位取得のため信州大学大学院総合工学系研究科への進学を後押しし，今日までの約 5 年間も支え続けてくれた妻の中嶋美菜子と，たくさん励ましと応援をいただいた康生・陽菜子・理菜子に感謝します。

2015 年 9 月 中嶋 康

参考文献リスト

- 1) 沢辺攻:マツ資源とその利用に関する流動実態調査, 岩手県農林水産部編, 1996, P.1, 岩手県.
- 2) 矢頭献一:図説 樹木学-針葉樹編, 1964, P.129-133, 朝倉書店.
- 3) 川尻秀樹:魅力再発見の樹木図鑑「マツ」, 林業新知識 1月号, 10-11(2010).
- 4) 岩泉正和:アカマツ・クロマツの地域品種, 独立行政法人森林総合研究所林木育種センター林木遺伝資源情報第13号-3(75), (2008)
- 5) 森林・林業統計要覧 2014, 林政部企画課統計調査班編, 2013, pp.7-13, 林野庁.
- 6) 林野庁,平成 25 年木材需給報告書:
<http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?lid=000001127034>
- 7) 森林・林業統計要覧 2009, 林政部企画課統計調査班編, 2008, pp.7-13, 林野庁.
- 8) 沢辺攻:マツ資源とその利用に関する流動実態調査, 岩手県農林水産部編, 1996, pp.55-56, 岩手県.
- 9) 伏見賢美, 木方洋二, 岡野 健, 佐道 健, 竹村富男, 則元 京, 有馬孝禮, 堤 壽一, 平井信之:“木材の物理”, 文永堂出版, 1985, p266.
- 10) 独立行政法人森林総合研究所:“改訂 4 版 木材工業ハンドブック”,丸善株式会社,2004, p194.
- 11) 中野正志:製材木取りシリーズ 15-南部アカマツ製材木取り-, 木材工業 35(4), 182-185(1980).
- 12) 沢辺攻:マツ資源とその利用に関する流動実態調査, 岩手県農林水産部編, 1996, P.46, 岩手県.
- 13) 藤沢好一:戸建て住宅の生産と品質保証体制-品確法がもたらしたもの-, 建材試験情報 2, 6-12(2005)
- 14) 青木謙治:構造的観点から見た長期優良住宅の要求性能, 木材工業 65(11), 495-499(2010)
- 15) 一般社団法人全国木材検査・研究協会:“製材の日本農林規格並びに改正の要点および解説”, 一般社団法人全国木材検査・研究協会,2013, p195.
- 16) 沢辺攻:県産製材品の県内需要に関する実態調査, 岩手県林業水産部編, 1998, P.57, 岩手県.
- 17) 信田聡, 黒田尚宏, 吉田孝久, 池田潔彦, 西村仁雄, 高木真由, 飯島泰男:設計・施工者の木造利用実態調査(4)設計・施工業者の乾燥材に関する意向分析, 日本木材学会大会研究発表要旨集 59, CD-ROM(2009).
- 18) 飯島泰男, 高木真由:住宅分野への地域材供給支援事業「データ収集・整備事業」意向調査アンケート結果報告, 住宅と木材`9-7, 6-10(2009)
- 19) 森林組合編集部:特集:(1) 木材利用促進法が成立:公共建築物での木材利用を促進~住宅など他分野でも, 森林組合 480, 2-5(2010)
- 20) 河崎弥生,古川郁夫,作野友康,中尾哲也:木造住宅における製材品の上棟後の寸法変化と発生したトラブル, 木材工業 55(2), 61-66(2000)

- 21) 沢辺攻:マツ資源とその利用に関する流動実態調査, 岩手県農林水産部編, 1996, P.48, 岩手県.
- 22) 寺澤眞:“木材乾燥のすべて”,海青社,1994, pp433-447.
- 23) 信田聡:天然乾燥, 木材工業 66(7), 290-295(2011)
- 24) 野原正人, 岩田隆昭, 山本和雄:針葉樹材の天然乾燥速度について, 岐阜県林業センター研究報告 5, 31-48(1977)
- 25) Simpson, W.T. Hart, C.A.: Estimates of air drying times for several hardwoods and softwoods, Forest Products Laboratory General Technical Report121(2000)
- 26) 内田信平,瀧澤真由美,戸沢美保子,澤口敬志:天然乾燥アカマツ平角材の含水率分布の推移ー乾燥期間と林内の含水率分布の関係ー, 日本木材学会大会研究発表要旨集 60, CD-ROM(2010)
- 27) 一般社団法人全国木材検査・研究協会:“製材の日本農林規格並びに改正の要点および解説”, 一般社団法人全国木材検査・研究協会,2013, p195.
- 28) 吉田孝久, 橋爪丈夫, 武田孝志, 徳本守彦, 印出 晃:スギ心持ち無背割り柱材の高温乾燥における高温セット法の割れ防止効果について, 材料 53(4), 364-369(2004).
- 29) 寺澤眞:“木材乾燥のすべて [改訂増補版]”,海青社,2004, p724.
- 30) 久慈敏,中嶋康,東野正:アカマツ心持ち平角材の人工乾燥, 岩手県林業技術センター研究報告 9, 15-21(2001)
- 31) 吉田孝久, 池田潔彦, 東野 正, 黒田尚宏, 信田 聡, 相馬智明:針葉樹桁材の蒸気式高温乾燥-スギ・ヒノキ・カラマツ・アカマツ桁材の乾燥特性-, 第 62 回日本木材学会大会研究発表要旨集, 札幌, 2012, p. 25
- 32) 加世田純之助,藤本登留,吉田孝久:心持ち柱材の表面割れに関連する 4 樹種の材質比較, 日本木材学会大会研究発表要旨集 62, CD-ROM(2012).
- 33) 松元浩,吉田孝久:能登ヒバ高温乾燥材の内部割れに及ぼす高温セット時間の影響, 日本木材学会大会研究発表要旨集 59, CD-ROM(2009)
- 34) 伊藤洋一,土橋英亮:トドマツ正角材の内部割れ抑制による最適乾燥条件の検討, 日本木材学会大会研究発表要旨集 61, CD-ROM(2011)
- 35) 藤田誠,田中誠,加藤英雄,井道裕史:乾燥工程で生じた内部割れの強度性能への影響, 日本木材学会大会研究発表要旨集 61, CD-ROM(2011)
- 36) 国土交通省:建築物の使用上の支障が起こらないことを確かめる必要がある場合およびその確認方法を定める件, 建設省告示第 1459 号, 平成 12 年 5 月 31 日
- 37) 東野正:岩手県産アカマツ横架材のスパン表について, 岩手県林業技術センター技術情報 No.16, 1(2005)
- 38) 錦織勇,勝部理市,安井昭:構造用製材の強度性能 (III) ーアカマツ正角材の曲げ強度, 島根県林業技術センター研究報告 38, 51-59(1987)
- 39) 小玉泰義:岡山県産アカマツ材の実大曲げ試験, 日本木材学会大会研究発表要旨集 45, 137(1995).

- 40) 東野正,高橋忠幸：枝打ちされたアカマツ材の強度性能，岩手県林業技術センター研究報告 7, 1-23(1997).
- 41) 岡崎泰男,飯島泰男,小林好紀：スギ乾燥材の割れと強度の関係，日本木材学会大会研究発表要旨集(54), 93(2001)
- 42) 荒武志朗,有馬孝禮,迫田忠芳,中村徳孫：スギ構造材の干割れが力学的性質に及ぼす影響—曲げ強さと曲げヤング係数について—木材工業 48(4), 166-170(1993)
- 43) 中嶋康,東野正：スギ正角材の乾燥温度及び乾燥割れと座屈の関係，日本木材学会大会研究発表要旨集 52, 117(2002)
- 44) 寺西康浩, 中嶋 康, 金山公三, 杉山真樹：2012年度日本木材学会木質物性研究会・木材と水研究会合同講演会・見学会開催報告，木材工業 68(2), 69-72(2013).
- 45) A. A. Eddy and R. D. Graham: The Effect of Drying Conditions on Strength of Coast Type Douglas Fir, Forest Products Journal5, 226-229(1955).
- 46) Salaman, M. : Quality and strength properties of Douglas-fir at high temperature, Forest Products Journal13, 339-344(1963).
- 47) Salaman, M. : Effect of High Temperature Drying on Quality and Strength of Western Hemlock, Forest Products Journal15, 122-126 (1965).
- 48) 鷺見博史：木材の高温乾燥 第2報，木材学会誌 24, 385-399 (1978).
- 49) M. Y. Cech and D. R. Huffman : High Temperature kiln Drying Of Spruce Joist, Forest Products Journal21, 55-60(1971).
- 50) Huffman, D.R. : Kiln drying aspen studs, Forest Products Journal22 , 21-23(1972).
- 51) P. Koch : Drying Southern Pine at 240F- Effects of Air Velocity and Humidity, Board Thickness and Density, Forest Products Journal22 (9), 62(1972).
- 52) Yao, J., Taylor,F : Effect of high temperature drying on the strength of southern pine dimension lumber, Forest Products Journal29 (8), 49-51(1979).
- 53) Huffman,D.R. : High-temperature drying effect on the bending strength of spruce-pine-fir joists, Forest Products Journal27(3), 55-57(1977).
- 54) Gerhards,C.C. : Effect of high-temperature drying on bending strength of yellow-poplar 2 by 4's, Forest Products Journal33(2), 61-67(1983).
- 55) 吉田孝久, 橋爪丈夫, 中嶋康, 武田孝志：カラマツ心持ち正角材の強度特性に及ぼす高温乾燥の影響(I)—曲げ強度特性—, 木材工業 54(3), 122-125(1999).
- 56) 山本学：人工乾燥温度が曲げ強度に及ぼす影響—太田川流域産スギ,アカマツ平角材の乾燥及び強度特性について—, 広島県立林業技術センター研究報告 31, 33-37(1999).
- 57) Takashi Takeda, Yasushi Nakashima : Impact Bending Strength of Small Specimens Cut from Japanese larch Timber Kiln-dried by the High-temperature Setting Method, Eurasian Journal of Forest Research8(2), 105-110(2005).
- 58) Yasushi Nakashima, Masaki Harada, Tomoyuki Hayashi, Masahiko Karube,

Tadashi Higashino : Shear tests of double shear plate connector joints in Sugi-Japanese Larch composite glulam beams, *Journal of Wood Science*52(1), 44-50(2006).

- 59) 原田真樹, 中嶋康, 軽部正彦, 林知行: 生材および乾燥材を柱材に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)
- 60) 中嶋康, 東野正, 谷内博規, 澤口敬志: クリ材を用いた梁受け金物接合部のせん断試験, *木材工業* 64(12), 624-628(2009).
- 61) 財団法人日本住宅・木材技術センター: 長寿命木造住宅推進方策検討事業報告書(別冊2), 財団法人日本住宅・木材技術センター編, 2002, pp.445-484.
- 62) 沢辺攻: 県産製材品の県内需要に関する実態調査, 岩手県林業水産部編, 1998, P.57, 岩手県.
- 63) 谷内博規, 小岩俊行, 升屋勇人, 土居修一: 林地におけるアカマツ青変挙動と防カビ剤, 防虫剤を併用した際の青変防止効果, *日本木材保存協会第21回年次大会講演要旨集*, 12-17(2005).
- 64) 谷内博規, 多田野修: 岩手県内のアカマツ素材生産・製材業者の青変被害に関する認識と施業の現状, *木材保存* 29(6), 268-272(2003).
- 65) 谷内博規, 小岩俊行, 升屋勇人, 土居修一: *Leptographium wingfiedii* がアカマツ材を青変する際の温度, 水分, 酸素の影響, *木材学会誌* 49(6), 446-451(2003).
- 66) 谷内博規: アカマツ丸太の品質管理による青変被害の抑制, *第58回日本木材学会大会研究発表要旨集*, 145(2008).
- 67) 谷内博規, 小岩俊行, 升屋勇人, 土居修一: 伐採直後の薬剤処理によるアカマツ青変防止効果, *日本木材加工技術協会第23回年次大会講演要旨集*, 59-60(2005).
- 68) 谷内博規, 小岩俊行, 升屋勇人, 土居修一: 林地におけるアカマツ丸太の青変に対する防虫剤と防黴剤の効果, *木材保存* 32(4), 151-158(2006).
- 69) 中嶋康, 谷内博規, 澤口敬志: 青変防止処理がアカマツ丸太の製材歩留りに与える影響, *岩手県林業技術センター研究報告* 16, 9-15(2009).
- 70) 宮代博幸: 木材利用ポイント事業の概要について, *木材情報* 263(4), 1-5(2013).
- 71) 山辺豊彦: “ヤマベの木構造”, 株式会社エクスナレッジ, 2009, p217.
- 72) 南宗和, 北守顕久, 小松幸平: 製材幅矧ぎパネルを用いた水平構面の面内せん断試験, *日本木材学会大会研究発表要旨集* 60, CD-ROM(2010).
- 73) 後藤隆洋: スギ板材を用いた水平構面の構造性能, *建築技術* 12月号, 144-147(2010).
- 74) 国土交通省: 建築基準法施行令第128条の4, 2003
- 75) 国土交通省: 建築基準法施行令第129条, 2000
- 76) 国土交通省: 建築基準法第2条第9号, 2004
- 77) 国土交通省: 建築基準法施行令第1条第5号, 2000.
- 78) 国土交通省: 建築基準法施行令第1条第6号, 2000.
- 79) Harada T, Uesugi S, Taniuchi H : Evaluation of fire retarding wood treated with poly-phosphatic carbamate using cone calorimeter. *Forest Products*

Journal 53(6):81-85(2003).

- 80) 吉野杏里, 柴田直明:カラマツ等県産材の需要開発に関する研究-難燃材の開発-, 長野県林業総合センター業務報告, 41-42(1989)
- 81) 伊藤彦紀: 国産針葉樹の難燃化処理技術の開発・製造に携わって, 林業技術 688, 24-25(1999).
- 82) 中嶋 康, 武田孝志:天然乾燥したアカマツ平角材の修正挽き後の寸法変化とねじれ評価, 木材学会誌 58(3), 118-124(2012).
- 83) 飯島泰男: 消費者の目から見た国産材と木造住宅, 森林技術 750, 2-6(2004)
- 84) 河崎弥生:「地域資源活用型木造住宅」を提案する上での乾燥材の位置づけ, 第 54 回日本木材学会大会研究発表要旨集, 札幌,2004, p.151.
- 85) 河崎弥生:平成 6 年度岡山県木材加工技術センター業務報告書, 11-16(1995).
- 86) 高橋徹, 中山義男:"木材科学講座 3 物理"海青社, 京都,1992, pp.32.
- 87) 川添正伸, 祖父江信夫, 平井信之: 第 48 回日本木材学会大会研究発表要旨集, 静岡, 1998, p.68.
- 88) 中嶋康:アカマツ平角材の乾燥技術 II, 岩手県林業技術センター研究成果速報 271, (2010)
- 89) 中嶋康: アカマツ心持ち平角材の中温乾燥技術の開発, 第 61 回日本木材学会大会研究発表要旨集, 京都, 2011, p.23.
- 90) 財団法人日本住宅・木材技術センター:品質・性能向上技術調査・開発事業報告書(国産針葉樹乾燥材の生産技術マニュアル), 2-3(2003)
- 91) 久慈敏, 東野正, 千葉一弘:第 48 回日本木材学会大会研究発表要旨集, 静岡, 1998, p.580.
- 92) 中嶋康:岩手県林業技術センター研究報告 19, 1-7(2011)
- 93) 財団法人日本住宅・木材技術センター:平成 11 年度住宅資材性能規定化対策事業報告(構造用木材の強度試験法), 60-61(2000)
- 94) 社団法人全国木材組合連合会:わかりやすい新製材 JAS の解説, p29(2008)
- 95) 社団法人全国木材組合連合会:わかりやすい新製材 JAS の解説, p11(2008)
- 96) 西村勝美:新局面を迎えたわが国の製材事情-製材マーケットと製材業の生産構造-, 平成 23 年度 木材強度・木質構造研究会秋季シンポジウム資料, 東京, 2011, pp.44-45
- 97) 黒田尚宏: I. 木材加工技術のこれまでとこれから-2. 乾燥-, 木材工業 63(11), 498-500(2008).
- 98) 吉田孝久:木材の高温乾燥研究の変遷-高温高湿スケジュールから高温低湿スケジュールへ-, 木材工業 63(9), 401-405(2008).
- 99) 吉田孝久, 橋爪丈夫, 武田孝志, 徳本守彦, 印出 晃:スギ心持ち無背割り柱材の高温乾燥における高温セット法の割れ防止効果について, 材料 53(4), 364-369(2004).
- 100) 徳本守彦, 帆苅謙一, 武田孝志, 安江 恒, 吉田孝久:高温セット法で乾燥したスギおよびヒノキ心持ち柱材内のドライグセットの分布, 材料 53(4),

- 370-375(2004).
- 101) 黒田尚宏：スギ心持ち乾燥のための基礎研究の展開，木材学会誌 53(5)，243-253(2007).
 - 102) 井道裕史，長尾博文，加藤英雄：乾燥に伴う内部割れがスギ製材品のせん断強度に及ぼす影響，木材工業 60(4)，170-174(2005).
 - 103) 加藤英雄，林 知行：乾燥による木材の内部割れが抱える問題，住宅と木材 11，18-24(2009).
 - 104) 「安全・安心な乾燥材生産技術の開発」研究グループ："安全・安心な乾燥材生産・利用マニュアル Chapter 3 推奨乾燥条件"石川県林業試験場 石川ウッドセンター，石川県，2012，pp.14-25.
 - 105) 「安全・安心な乾燥材生産技術の開発」研究グループ："安全・安心な乾燥材生産・利用マニュアル Chapter 4 内部割れの評価法"石川県林業試験場 石川ウッドセンター，石川県，2012，pp.42-43.
 - 106) 徳本守彦，武田孝志，吉田孝久：スギ心持ち無背割り柱材における高温セット処理後の乾燥スケジュールが内部応力に及ぼす影響，材料 54(4)，365-370(2005).
 - 107) 中嶋 康，武田孝志：心持ち平角材の高温セット処理による人工乾燥技術の開発-高温セット処理後の中温乾燥時間に及ぼす高温セット処理条件の影響-，第 65 回日本木材学会大会研究発表要旨集，CD-ROM(2015).
 - 108) 寺沢真・岩下睦：乾燥操作に関する基礎的研究 第 1 報 乾燥特性由線について，林業試験場研究報告 81，89-96(1955).
 - 109) 信田 聡，中嶋 厚，千葉宗昭，奈良直哉：トドマツ人工林材の乾燥試験（第 1 報）-正角材の天然乾燥-，林産試月報 392(9)，1-9(1984).
 - 110) 中嶋 康，飯島泰男：乾燥方法が異なるスギ心持ち正角材の表面割れおよび乾燥コスト分析，木材工業 68(12)，570-575(2013).
 - 111) 中嶋 康，東野 正，武田孝志，飯島泰男：横架材としてのアカマツたいこ材の曲げ強度性能に及ぼす輪生節の影響，木材学会誌 59(4)，179-187(2013).
 - 112) 丸山則義，有馬孝礼，飯島泰男：タイコ材の座屈試験，日本建築学会大会学術梗概集 C-2,1263-1264 (1985).
 - 113) 米田昌世：カラマツ丸太およびたいこ挽材の実大 曲げ性能（第 1 報），林産試験場報 1,1-11 (1987).
 - 114) 中井 孝：スギ丸太・たいこ材の実大曲げ強度性能，日本建築学会大会学術梗概集 C-2,167-168 (1990).
 - 115) 中井 孝，長尾博文，田中俊成：スギ中目材丸太・たいこ材の実大曲げ強度性能，日本建築学会大会学術梗概集 C-2,909-910 (1993).
 - 116) 東野 正，中野正志：県産アカマツ丸太及びたいこ材の強度性能，岩手県林業試験場成果報告 23,43-48 (1991).
 - 117) 沢辺攻：県産製材品の県内需要に関する実態調査，岩手県林業水産部編，1998，pp54-55，岩手県.
 - 118) 農林水産省告示第 1083 号：“製材の日本農林規格”，農林水産省(2007).

- 119) 中田 直：製材の JAS 規格，木材工業 63(5),222-225 (2008).
- 120) 東野 正,中野正志,高芝俊雄：アカマツ正角材の曲げ強度性能，岩手県林業技術センター研究報告 6,29-48 (1996).
- 121) 中嶋 康：アカマツ平角材の実大曲げ強度性能-製材 JAS に基づく目視等級・機械等級区分と曲げ強度との関係，岩手県林業技術センター研究成果速報 287 (2011).
- 122) 社団法人全国木材組合連合会:わかりやすい新製材 JAS の解説, p71-72(2008)
- 123) 社団法人全国木材組合連合会:わかりやすい新製材 JAS の解説, p14(2008)
- 124) "構造用木材の強度試験マニュアル"，(財)日本住宅・木材技術センター編集,東京,2011,pp8-10.
- 125) "構造用木材の強度試験マニュアル"，(財)日本住宅・木材技術センター編集,東京,2011,pp84-85.
- 126) 飯島泰男：構造用木材の強度性能評価法の標準化，木材学会誌 53(2),63-71 (2007).
- 127) Jozsef Bodig, Benjamin A. Jayne:" Mechanics of Wood and Wood Composites" Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1982, pp.305.
- 128) 小玉泰義,章 忠：小玉泰義,章 忠:木材学会誌 46(3)木材学会誌 46(3),197-202 (2000).
- 129) 小玉泰義,章 忠,川畑洋昭：小玉泰義,章 忠,川畑洋昭:木材学会誌 47(6)，木材学会誌 47(6),473-478 (2001).
- 130) 建設省告示第 1452 号：“木材の基準強度 F_c, F_t, F_b 及び F_s を定める件”，国土交通省(2000).
- 131) 中嶋 康，東野 正，坂東 学：高温乾燥したアカマツ心持ち平角材の曲げ強度試験，岩手県林業技術センター研究報告 18，7-12(2010).
- 132) 吉田孝久：追い風に乗れ！国産材 II. 木材加工技術の高度化 4.高温乾燥技術の進展，木材工業 61(11)，499-501(2006).
- 133) 中嶋厚，瀧澤忠昭，山崎亨史：トドマツ人工林材の高温乾燥試験.日本木材学会大会研究発表要旨集 46，158(1996)
- 134) 橋爪丈夫,伊東嘉文,吉田孝久,印出稔,印出晃,鈴木徹夫,羽場俊夫：乾燥条件がカラマツ正角の強度に及ぼす影響，日本木材学会大会研究発表要旨集 53，91(2003).
- 135) 飯島泰男，狩野仁美，林和男，澁谷栄，土居修一：スギ材の材質変化に及ぼす乾燥条件の影響(II)力学的性能について，日本木材学会大会研究発表要旨集 53，594(2003).
- 136) 小田久人,重山晴義：県産スギ平角材の乾燥方法別強度性能に関する研究，宮崎県林業技術センター業務報告 33，35-36(2001).
- 137) 社団法人全国木材組合連合会編：わかりやすい樹種別乾燥材生産の技術マニュアル，pp 68-71(2004).
- 138) 河崎弥生：高温乾燥したスギ柱材中の水分分布と乾燥後の寸法変化，木材工業 53(4)，166-171(1998).
- 139) 中嶋 康：伝統的工法を用いた梁・柱接合部のせん断性能評価，岩手県林業技術

- センター研究報告 21, 1-7(2013)
- 140) 地方独立行政法人北海道立林産試験場：道産材を用いた伝統的接合部の強度性能評価, 平成 23 年度林産試験場年報, p25(2012).
- 141) 軽部正彦・原田真樹・林知行：荷重変形曲線のモデル化とその問題点共有のための提案特徴点抽出の自動化ツールについて.日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), 215-216(2001)
- 142) 日本住宅・木材技術センター：木造軸組工法住宅の許容応力度設計(2008 年版).571-572pp.財団法人日本住宅・木材技術センター.東京(2008).
- 143) 中嶋康：小幅板および幅はぎ板を用いた床組のせん断耐力の評価, 岩手県林業技術センター研究報告 22, 9-15(2014)
- 144) 財団法人日本住宅・木材技術センター：木造住宅のための住宅性能表示-表 13, pp163(2009)
- 145) Toshiro Harada, Yasushi Nakashima, Yasushi Anazawa : The effect of ceramic coating of fire-retardant wood on combustibility and weather ability, *Journal of Wood Science*53(3), 249-254(2007).
- 146) Ostman B, Voss A, Hughes A, Hovde PJ, Grexa O : Durability of fire retardant wood products at humid and exterior conditions Review of literature, *Fire and Materials*25, 95-104(2001)
- 147) Winandy JE : Thermal degradation of fire-retardant-treated wood: Predicting residual service life, *Forest Products Journal* 51(2), 47-54(2001).
- 148) International Organization for Standardization (2002) Reaction-to-fire tests - Heat release, smoke production and mass loss rate – Part 1: Heat release rate (cone calorimeter method), ISO 5660-1 second edition, ISO, Geneva
- 149) Japanese Standards Committee (1999) Japanese Industrial Standard, Testing method for paints- Part 7: Long-period performance of film- Section 2: Resistance to humidity (Continuous condensation) JIS K 5660-7-2, Tokyo
- 150) Japanese Standards Committee (1999) Japanese Industrial Standard, Testing method for paints- Part 7: Long-period performance of film- Section 7: Accelerated weathering (Exposure to filtered xenon-arc radiation) JIS K 5660-7-7, Tokyo
- 151) 原田寿郎：放射加熱による木材の炭化(第 2 報)質量減少速度から計算される炭化量, *木材学会誌* 42(2), 194-201(1996).
- 152) Harada T : Time to ignition, heat release rate and fire endurance time of wood in cone calorimeter test, *Fire and Materials* 25(4), 161-167(2001)

要 旨

我が国の森林資源は、植えて育てる時代から利用して更新するという時代を迎えているが、いわゆる大径材問題等を背景として、学術的知見を基盤とした技術的ブレークスルーが強く望まれているところである。

本論文では、アカマツ大径材の構造用梁材としての利用に関して、製材の日本農林規格（製材 JAS）が規定する品質基準を満たす人工乾燥技術について検討し、さらに近年の大震災を契機として制定された住宅性能表示制度に対応するため、構造用梁材としての実際の利用上の強度特性を明らかにするとともに、あわせて、平角材を製材する際に同時に得られる板材の利用開発など一連の研究を行い、アカマツ大径丸太材の有効活用に資することを目的とした。

第 1 章は研究の背景並びに既往の研究について概説し、研究スキームを提示した。

第 2 章では、アカマツ平角材の仕上げ加工後の形状変化に及ぼす含水率の影響を検討した。その結果、仕上げ加工後の寸法変化および狂いの発生は、仕上げ加工後の含水率変化が原因であることを示し、一定期間以上の天然乾燥により含水率を適切に低下させた乾燥材は、製材 JAS の品質に対応可能であることを明らかにした。

次に高温セット処理法による人工乾燥技術の検討を行った。その結果、高温セット処理直後の含水率が低いほど、断面内に発生する内部割れは大きくなることから、高温セット処理中の含水率の下限値を設定することで、内部割れの発生は抑制可能であることを明らかにし、さらに高温セット処理後の含水率から仕上がり含水率までの乾燥時間を求めるための推定式を提案することにより、製材 JAS が示す含水率基準に対応した人工乾燥スケジュールを確立している。

第 3 章では、たいこ材と平角材の曲げ強度性能に及ぼす輪生節の影響を検討した。その結果、たいこ材は平角材と比較して、節径比の増大に伴う曲げ強さの低下が抑制されることを明らかとし、たいこ材の丸太利用の効率性を証明した。次に、曲げ強度性能に及ぼす表面割れと高温セット処理の影響を検討した。その結果、表面割れの多寡によらず、アカマツ平角材の曲げ強さは製材 JAS が示す目視等級に依存することを明らかとした。また、高温乾燥したアカマツ平角材の曲げ強さは、国交省が提示する目視等級区分別の基準強度を満たすが、一方で天然乾燥材と比較して曲げ強さが約 1 割低下することを示した。また、梁材にアカマツを用いた場合の梁・柱接合部の検討もを行い、金物工法および伝統的工法による接合部のせん断耐力特性を評価した。

第 4 章では、平角材を製材する際に得られる板材の利用技術について検討した。最初に、水平構面を構成する面材としての利用を検討した。その結果、アカマツ板材を面材として用いた水平構面は大変形時でも破壊せず、変形の回復とともにせん断耐力も回復することを明らかとした。また、板材を幅はぎし、幅広の面材として水平構面に用いた水平構面は、せん断耐力性能が大きく向上することを明らかとした。

次に、大型公共施設の内装材としての利用を検討するため、難燃薬剤注入による不燃処理技術の開発を行った。その結果、薬剤を注入したアカマツ板材にアルコキシ金属塩系塗

料を塗装した壁材は，塗装しない場合よりも防火性能が向上することを明らかとし，これにより従来よりも少ない薬剤による不燃材料の製造技術を確立した。

第 5 章では一連の研究の総括を行った。今後，国産材を製材品等の建築用部材として加工・供給する生産者は，需要者である設計・施工者が求める品質に対して，従来までの情緒的な説明でなく，JAS 等の品質基準に対応させて生産していることを論理的に説明することが必要不可欠となる。本研究による一連の学術的成果が，アカマツ大断面製材の人工乾燥技術の確立と構造用梁材への適用の一助となることを期待する。