高温セットが材の強度劣化に及ぼす影響

誌名	研究報告 / 群馬県林業試験場
ISSN	09186115
著者名	工藤,康夫 小林,慧 町田,初男 井道,裕史
発行元	群馬県林業試験場
巻/号	23号
巻号補足	
掲載ページ	p. 53-63
発行年月	2019年5月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council Secretariat

AgriKnowledge

高温セットが材の強度劣化に及ぼす影響

Effects of a high-temperature setting method on the strength deterioration of wood

工藤康夫・小林慧・町田初男*・井道裕史　***

要旨

1　高温セット材の曲げ強度は、セット温度、セット時間による影響を受けていなかった。

2　無欠点小試験片によるせん断試験の結果、セット時間が長くなるほど、せん断強度の低下が認められた。

3　実大試験体によるせん断試験の結果、セット時間が長くなると内部割れが増大し、さらにその内部割れがせん断強度の低下に影響を及ぼしていることが認められた。

キーワード：スギ、高温セット、曲げ強度、せん断強度

Ⅰ　はじめに

木材の高温乾燥は、乾燥時間の大幅な短縮、ユーザーからのクレームの原因となる心持ち材の表面割れを大幅に減少する利点がある一方で、内部割れや熱に起因すると考えられる強度の劣化が危惧されている。近年は、高温セット後、中温乾燥や天然乾燥に移行する乾燥スケジュールが一般的になっているが、内部割れは高温セット後の乾燥の段階で発生することが報告されており（中嶋ら，2014)、高温セットを用いた木材乾燥では内部割れの発生を完全に抑えることは困難である。内部割れによる強度劣化は、特に梁桁材に使用される横架材の場合に影響が大きい。横架材は曲げ荷重が加わる場所に用いられるが、曲げ強度の特性として、材の中立軸上にせん断応力の最大値が加わるため、高温セットにより発生した内部割れが、せん断強度を低下させる大きな原因となりうることが考えられる（秋田県立大学木材高度加工研究所，2011)。さらには、せん断の影響を含んだみかけで評価される曲げヤング係数の低下が懸念される。

そこで本研究では、高温セットによる材の劣化を明らかにするため、高温セットの温度や時間が曲げ強度及びせん断強度に与える影響を、高温セットの温度や時間を変えて調査した。

また、得られた結果から、生産現場で活用可能な強度等級評価の高い高温セットスケジュールを提案した。

Ⅱ　材料と方法

1　曲げ強度試験

群馬県産スギから製材した幅135mm×せい200mm×長さ4,500mmの未乾燥の心持平角材50体を、蒸気式木材乾燥機（日本電化工機（株）製、DKSH-15HT）を用いて、３条件により蒸煮、高温セットと中温乾燥の組み合わせ乾燥を行った（表－１)。なお、仕上がり含水率は全て20%を目標とした。表－１の処理後に屋内で数か月間養生を行い、帯鋸製材機（イシタ製IAT-1100）で幅120mm×せい180mm×長さ4,500mmに仕上げた。

*　群馬県立農林大学校　**　国立研究開発法人森林総合研究所

曲げ強度試験は、万能強度試験機（インストロン・ジャパン製5582EX/H）を使用し、構造用木材の強度試験マニュアル（日本住宅・木材技術センター, 2011）に準じて、支点間18h＝3,240mm、荷重点間6h＝1,080mm、載荷速度20mm／minで３等分点４点曲げ試験を行った。曲げヤング係数は、全区間に対する中央の変位からせん断の影響を含んだみかけの曲げヤング係数を算出した。曲げ試験終了後、非破壊部分を切り出してその重量を測定し、恒温器中で103±2℃で恒量になるまで静置して全乾法による含水率を求めた。

曲げヤング係数及び曲げ強度が含水率の影響を受けるのを防ぐため、ASTM D2915の補正式を用いた。含水率10%以上20%以下の範囲について、表－２に示す補正係数ｋｍ-ｆ（曲げ強度）、ｋｍ-Ｅ（曲げヤング係数）により含水率15%時の値に補正した。

表－１　曲げ強度試験の乾燥スケジュール

スケジュール	試験体数	蒸煮		高温セット処理			乾燥		
		蒸煮温度(℃)	処理時間	乾球温度(℃)	湿球温度(℃)	処理時間(h)	乾球温度(℃)	湿球温度(℃)	処理時間(h)
110℃24h	15	80	10時間または設定温度到達時間	110	80	24	90	60	216
120℃20h	20	90		120	90	20	90	60	168
125℃48h	15	90		125	95	48	90	60	168

表－２　ASTM D2915の補正式

ｋｍ-ｆ＝1.25／（1.75-0.0333M）

ｋｍ-Ｅ＝1.14／（1.44-0.02M）

Ｍ：試験時の含水率（%）

２　せん断強度試験

曲げ強度試験とは別に、幅135mm×せい200mm×長さ4,000mmの未乾燥のスギ心持平角材56体を、長さ1,000mmと3,000mmに切断してエンドマッチングを行った（図－１）。1,000mm材は桟積みの上、室内で重量変化が無くなるまで天然乾燥を行い（以下、ＡＤ材）、一方の3,000mm材は蒸気式木材乾燥機（日本電化工機（株）製、DKSH-15HT）を用いて５条件による乾燥を行った（以下、ＫＤ材、表－３）。乾燥終了後は数か月間室内で養生を行った。なお、仕上がり含水率は 20%を目標とした。

表－３　いす型せん断強度試験の乾燥スケジュール

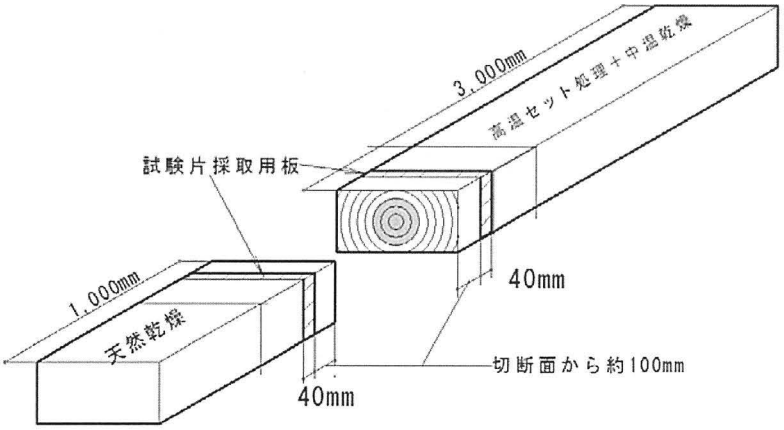
スケジュール	試験体数	蒸煮		高温セット処理			乾燥		
		蒸煮温度(℃)	処理時間(h)	乾球温度(℃)	湿球温度(℃)	処理時間(h)	乾球温度(℃)	湿球温度(℃)	処理時間(h)
110℃12h	12	80		110	80	12	90	60	216
110℃24h	10	80	10時間または設定温度到達時間	110	80	24	90	60	168
120℃12h	12	90		120	90	12	90	60	168
120℃20h	12	90		120	90	20	90	60	168
120℃48h	10	90		125	95	48	90	60	168

（１）無欠点いす型小試験片によるせん断試験

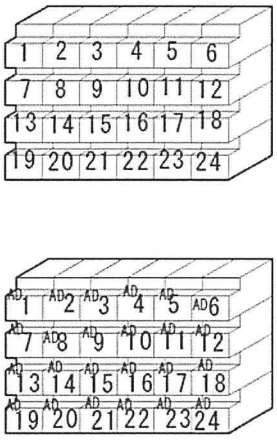
乾燥と養生終了後、ＡＤ材、ＫＤ材より、切断面の約100mm付近から厚さ40mmの試験片採取用板を

採取した。バンドソーと糸鋸を用いて板を24分割の上、断面位置により番号を付し（図－１、図－２）、高さ40mm、幅30mm、奥行30mm、加工面切り取り深さ各10mmの無欠点いす型小試験片（図－３）を作製した。

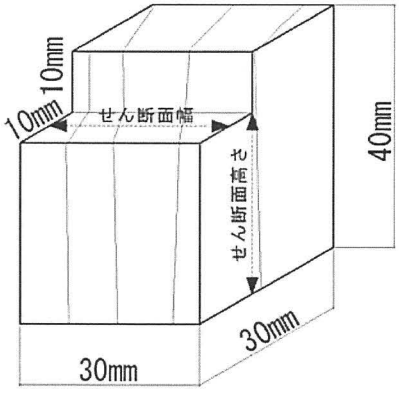
デジタルノギスを用いて全ての試験片のせん断面高さ及び幅を計測してせん断面の面積を求めた後、万能強度試験機（インストロン・ジャパン製 5582EX/H）を使用し、JISZ2101に準じて載荷速度1mm／minで最大荷重を測定した。最大荷重をせん断面積で除してせん断強度を算出した。せん断試験終了後、試験片の重量を測定し、恒温器中で103±2℃で恒量になるまで静置して全乾法による含水率を求めた。それぞれの高温セット処理条件によるＫＤ材のせん断強度と、エンドマッチングしたＡＤ材のせん断強度を比較した。なお、無欠点試験片による試験を行う目的から、節や割れがある試験片は欠点材として比較評価の対象から除外した。



図－１　試験体の切断及び試験片採取用板の採取方法



図－２　試験片の分割方法



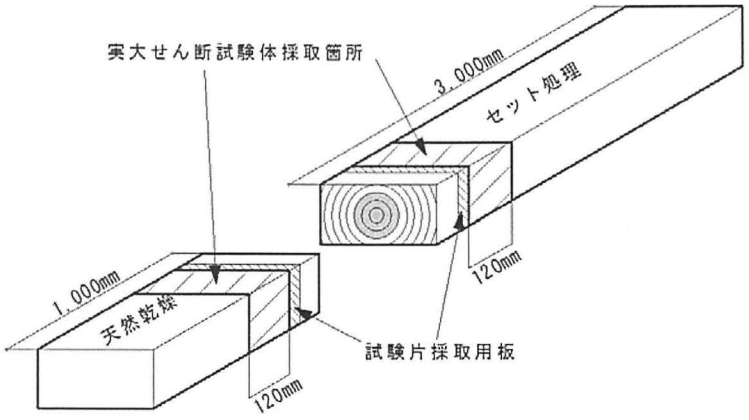
図－３　無欠点いす型小試験片

（２）実大いす型試験体によるせん断試験

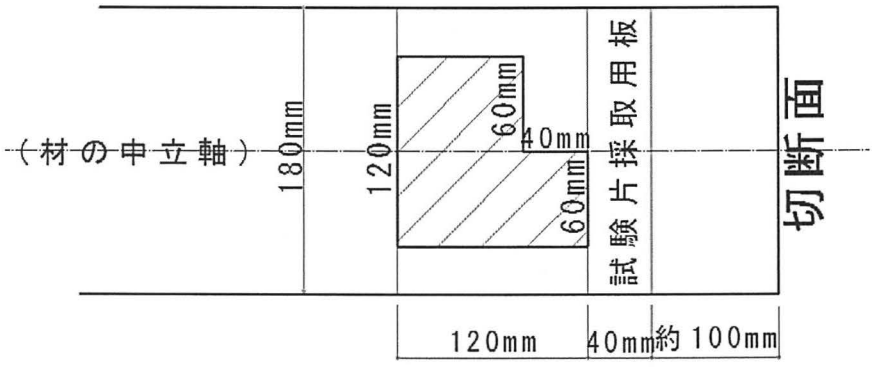
乾燥、養生終了後、ＡＤ材、ＫＤ材からバンドソーを用いて試験片採取用板の採取箇所隣接部（図－４）から、せん断面が材の中立軸と一致するよう（図－５）、図－６に示す実大いす型試験体（高さ120mm、幅120mm、奥行120mm、加工面切り取り部高さ40mm×奥行60mm）を作製した。デジタルノギ

スを使用して、せん断面高さ及び幅を計測してせん断面の面積を求めた後、せん断面から20㎜以内に存在する全ての割れについて、内部割れと表面割れに分類の上、せん断面に平行となる最大割れ長さを計測した（図－７）。これにより計測された表面割れの長さは製材品本来の表面割れ深さ、また内部割れの長さは製材品の内部割れ幅に該当するが、本研究ではこれらを全て割れ長さ累積として分析した。

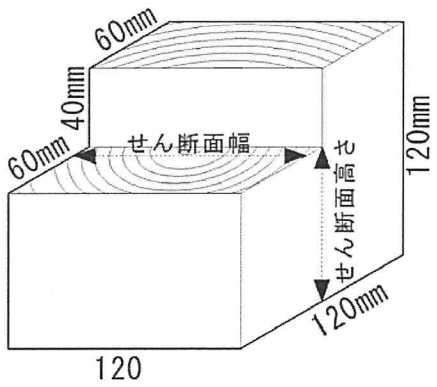
せん断試験は、3000kN油圧式短柱圧縮試験機（前川試験機製作所製、A-300-B4）に実大いす型治具を設置して実大いす型試験体が破壊に至るまでの最大荷重を測定した（図－８）。最大荷重をせん断面積で除してせん断強度を算出した。それぞれの高温セット処理条件によるせん断強度と、エンドマッチングした天然乾燥のせん断強度を比較した。



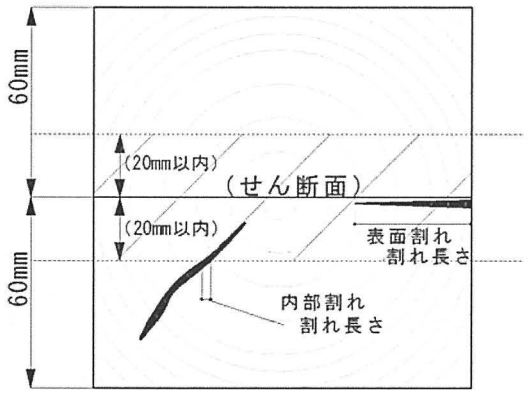
図－４　実大いす型試験体採取位置



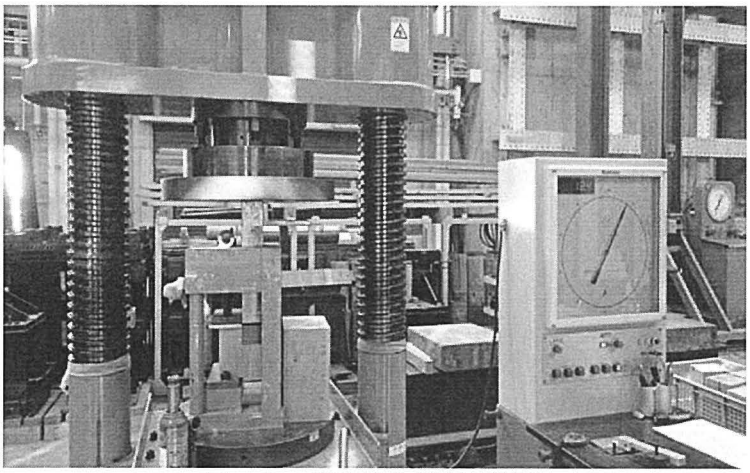
図－５　実大いす型試験体木取



図－６　実大いす型試験体



図－７　割れの測定方向



図－８　実大せん断強度試験

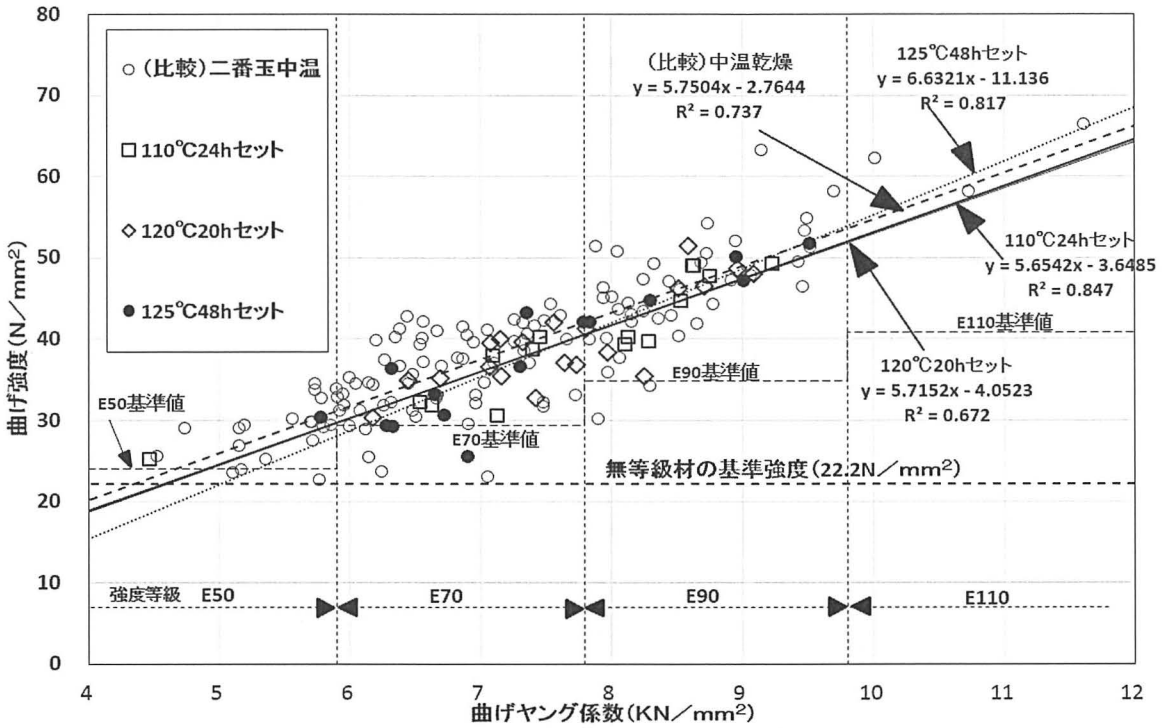
Ⅲ　結果及び考察

１　曲げ試験

図－９に、曲げヤング係数と曲げ強度の関係を示す。比較として別途試験（工藤ら,2014）で用いたスギ二番玉から製材して中温乾燥（85℃）した心持平角材（以下、二番玉中温という）の曲げ強度と曲げヤング係数の関係を併記した。全ての高温セット条件で曲げヤング係数と曲げ強度に高い相関関係（$R^2>0.6$）が認められ、回帰直線は二番玉中温とほぼ同様の傾向を示していた。

また、Steel-Dwassによる多重比較の結果、二番玉中温と各高温セット条件の間、及び、全ての高温セット条件の間で曲げ強度、曲げヤング係数に有意差が認められなかった（$p>0.05$）。さらに、いずれの高温セット条件も各強度等級の基準強度をほぼ上回っていた。

このことから、今回実施した高温セット条件では高温セットの温度、時間ともスギの曲げ強度に影響を与えないことが確認された。

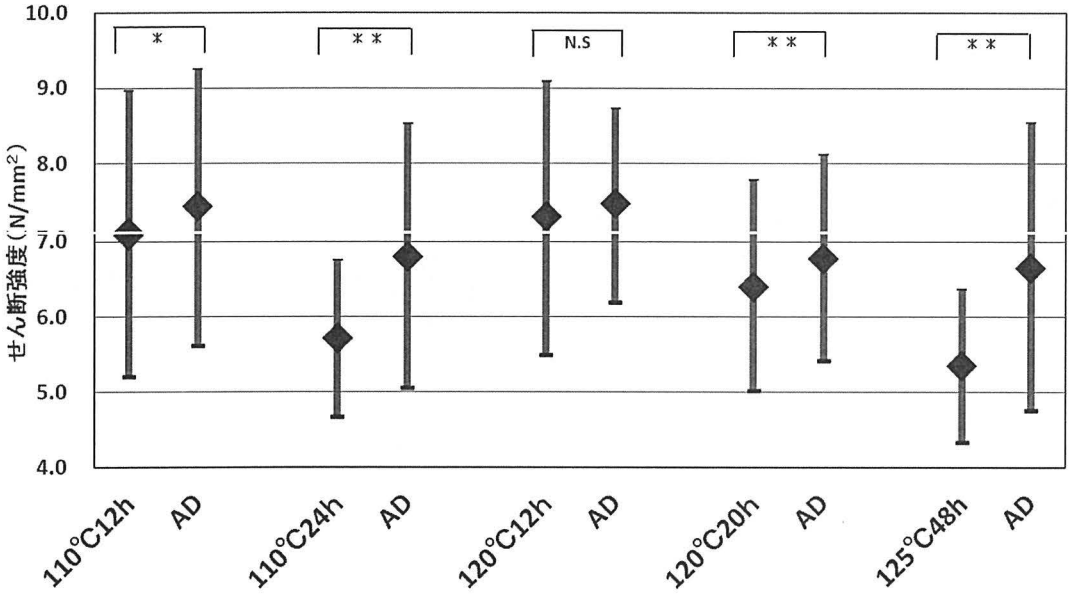


図－９　曲げヤング係数と曲げ強度の関係

２　せん断強度試験

（１）無欠点いす型小試験片によるせん断強度試験

図－10に無欠点小試験体によるせん断強度試験の結果を示す。図中横軸は高温セットの温度と時間の条件を、ＡＤは高温セット条件それぞれのエンドマッチングをした天然乾燥材（以下、対比ＡＤという）の結果を示す。また、中心の点は平均値、エラーバーは標準偏差を表す。全ての高温セット条件において、対比ＡＤと比べてせん断強度の平均値が低い値を示していた。各高温セット条件の結果と、対応する対比ＡＤの間でｔ検定を行った結果、120℃12hでは有意差は認められなかったが、３条件で（110℃24h、120℃20h、125℃48h）有意水準１％で有意差が認められ、また110℃12hで有意水準５％で有意差が認められた。高温セット時間が長いほど対比ＡＤとのせん断強度の差が大きかった。このことから、高温セット温度が同じ、もしくはほぼ同じ場合、処理にかかる時間が長いほど材の強度劣化が生じ、せん断強度が低下することが確認された。



図－10　無欠点いす型小試験体によるせん断強度試験の結果

＊＊　有意水準１％で有意

＊　有意水準５％で有意

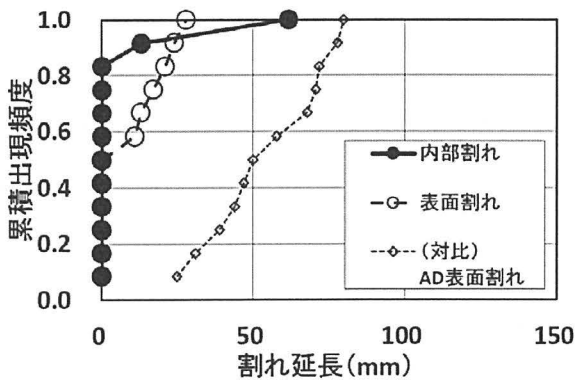
N.S　有意差なし

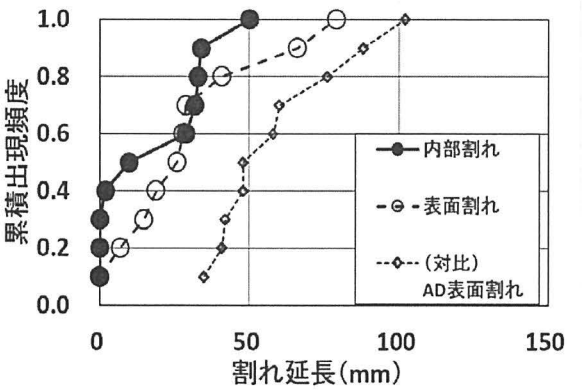
（２）実大いす型試験体によるせん断強度試験

図－11から図－15に実大いす型試験体による高温セット処理条件別の割れ延長を示す。それぞれ対比ＡＤの表面割れを併記した。

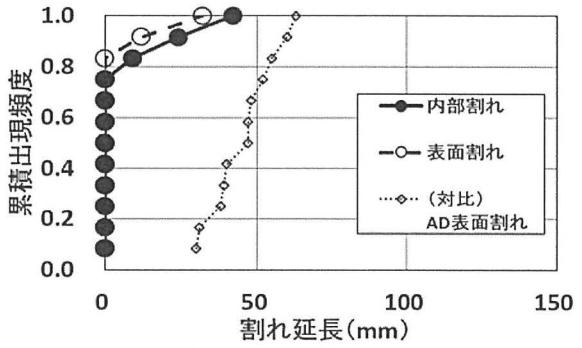
各条件とも、対比ＡＤに比べて表面割れが大幅に少ないこと、また高温セットの表面割れと対比ＡＤの表面割れの累積出現頻度線がほぼ同様の傾向を示していた。このことから全ての条件で表面割れの抑制効果があることが認められた。また、図－16に110℃12hと110℃24hの内部割れの比較、図－17に120℃12h、120℃24h、125℃48hの内部割れの比較を示す。同一、またはほぼ同一の高温セット温度の場合、処理時間が長くなるほど内部割れが増大していた。このことから、高温セット材でみられる内部割れはセット処理時間の影響を大きく受けると推察される。

今回実施した高温セット条件の中で、表面割れ、内部割れのいずれも少ない110℃12h、120℃12hが最も割れの抑制効果があるセット条件であると考えられる。

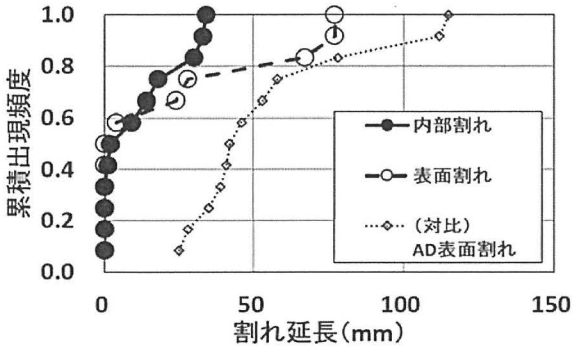




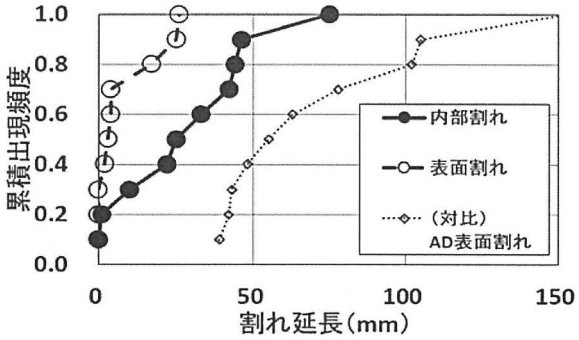
図－11　110℃12hの割れ



図－12　110℃24hの割れ

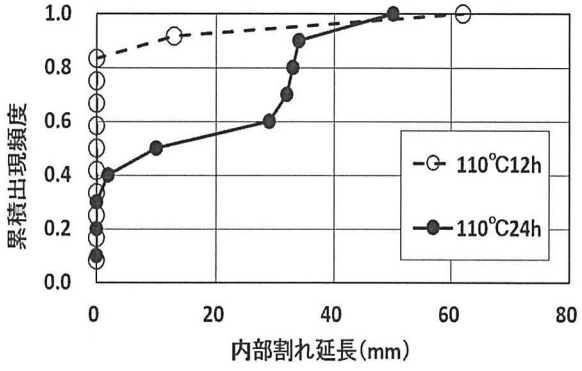


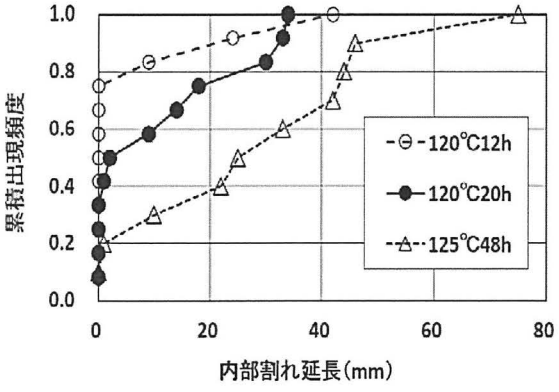
図－13　120℃12hの割れ



図－14　120℃20hの割れ

図－15　125℃48hの割れ





図－16 セット時間別内部割れ比較
(110℃)

図－17 セット時間別内部割れ比較
(120～125℃)

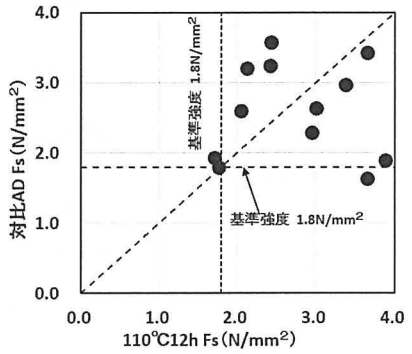
図－18から図－22に、実大試験体せん断強度の各セットスケジュールと対比ＡＤの関係を示す。各条件ともスギのせん断強度の基準強度である1.8N／mm² をほぼ上回っていた。なお、110℃24h対比ＡＤで0.60N／mm²、120℃20h対比ＡＤで0.71N／mm²、125℃48hで1.18N／mm²と、せん断強度の基準値を大幅に下回った試験体があったが、これらは割れ延長が内部割れで75mm、表面割れで100mmを越えたものであった。

無欠点いす型小試験体によるせん断強度では、高温セットの時間が長くなることによって熱による強度劣化が生じ、結果的にせん断強度が低下するとことが確認されたが、実大試験体によるせん断強度は、各セットスケジュールとも高温セット材に比べて対比ＡＤのせん断強度が相対的に低い傾向がみられながらも、それぞれのセットスケジュールと対比ＡＤでt検定を行った結果、各セットスケジュールとも有意水準５％で有意差は認められなかった。

このことから、実大試験体によるせん断強度は、熱による強度劣化の他、内部割れ及び表面割れの影響を強く受けると推察される。そこで、図－23に長さ1mm以上の内部割れ延長とせん断強度の関係を示した。その結果、内部割れ延長とせん断強度には負の相関関係が認められ、相関係数r=−0.44（決定係数 $r^2=0.195$）であった。他の研究事例でも、内部割れが大きくなるに従って、せん断強度が低下したとする報告があり（井道ら,2005）、高温セットによって発生した内部割れがせん断強度の低下に影響を及ぼすと考えられる。

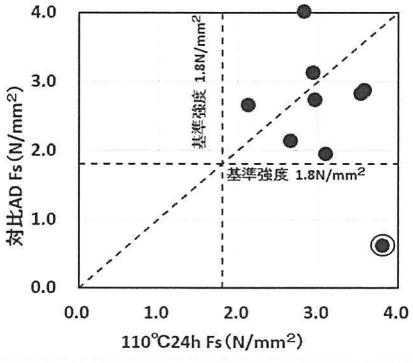
また、対比ＡＤの試験体では、割れの長さが100mmを越えたもの以外にも基準強度を下回るものが複数存在したことから、表面割れもせん断強度に大きな影響を及ぼすと考えられるが、表面割れ長さとせん断強度の関係には相関関係が認められなかった。

以上の結果から、高温セット処理温度が同一であっても、処理の時間が長くなると材の強度劣化が生じ、同時に内部割れが増大してせん断強度が低下することが確認された。このことから、せん断強度の低下を防ぐためには、高温セットにより確実に表面割れを抑えながら、高温セット処理時間を可能な限り短縮することが望ましい。



図－18 110℃12hと対比ADのせん断強度の関係（いす型実大試験体）

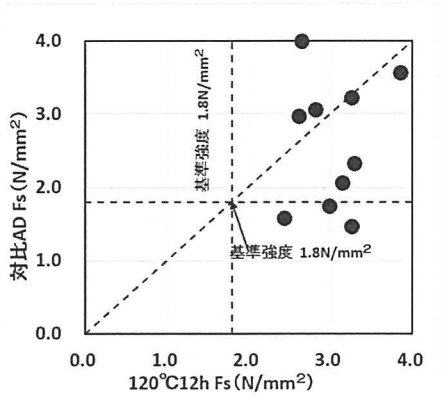
110℃12hと対比ADに有意差なし



図－19 110℃24h と対比ADのせん断強度の関係（いす型実大試験体）

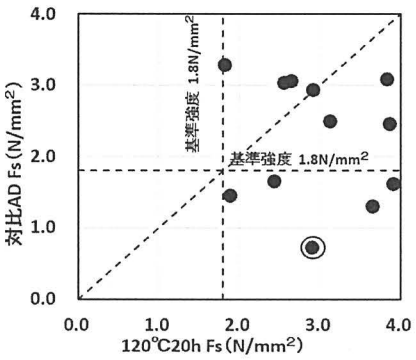
図中の◯：表面割れ延長100mm以上

110℃24hと対比ADに有意差なし



図－20 120℃12hと対比ADのせん断強度の関係（いす型実大試験体）

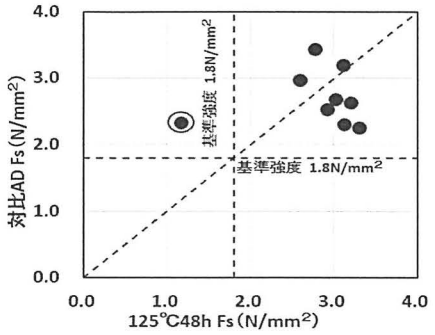
120℃12hと対比ADに有意差なし



図－21 120℃20h と対比ADのせん断強度の関係（いす型実大試験体）

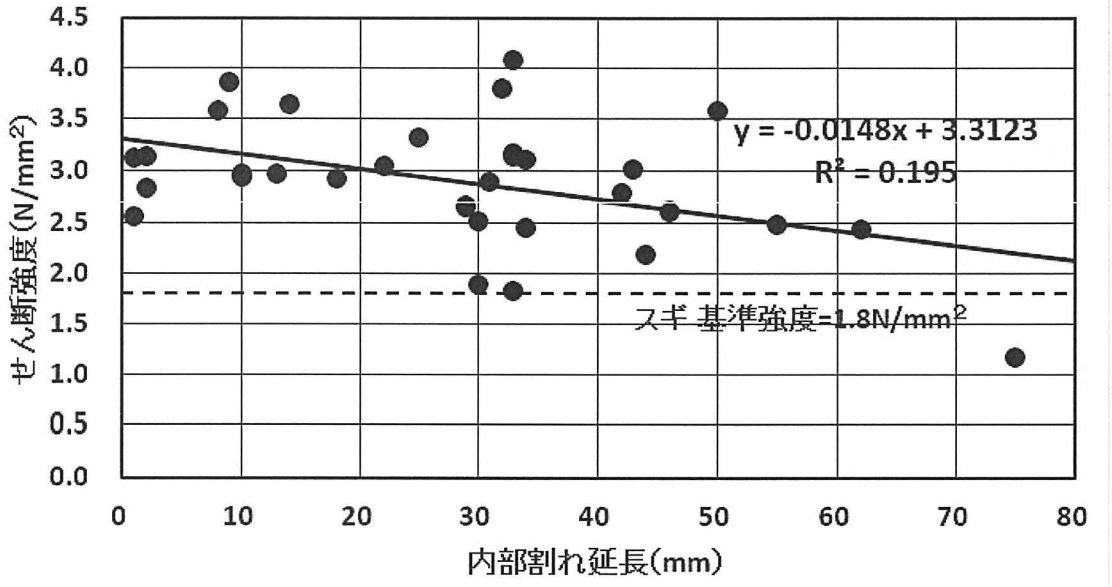
図中◯：表面割れ延長100mm以上

120℃20hと対比ADに有意差なし



図－22 125℃48h と対比ADのせん断強度の関係
（いす型実大試験体）

図中の ○：内部割れ延長75㎜以上
125℃48hと対比ADに有意差なし



図－23 内部割れとせん断強度の関係（全セットスケジュール）

Ⅳ　おわりに

1　材の強度劣化を防ぐ高温セットスケジュールの検討

今回試験を行った高温セット処理条件はいずれも曲げ強度、表面割れの発生量や延長に大きな差が無かった。高温セット最大の目的である表面割れの抑制については乾球温度が110℃以上で、乾湿温度差30℃であれば、いずれの温度設定でも表面割れの抑制に大きな差は無いと推察できる。しかし、セット時間が長くなるに従って材の強度劣化や内部割れの増大を引き起こし、結果的にせん断強度の低下を招く恐れがあることが確認されたことから、高温セット時間はできるだけ短時間とする必要がある。

今回の試験の結果から、高温セット時間は12時間程度で十分であると結論づけることができたものの、乾燥材生産工程の実情、乾燥機の容量や仕様、ボイラー等熱源の能力、また外気温などの現場要素を考慮した場合、表－４に示す蒸煮終了後セット温度到達までに要する時間を見込んだセット時間の設定が推奨される。

表－４　強度低下を防ぐ高温セット推奨スケジュール（スギ心持材130mm×200mm）

スケジュール	蒸　煮		高温セット処理			乾燥工程(参考)		
	蒸煮温度(℃)	処理時間(h)	乾球温度(℃)	湿球温度(℃)	処理時間(h)	乾球温度(℃)	湿球温度(℃)	処理時間(h)
110℃セット	80	12※1	110	80	12+α※2	90	60	216
120℃セット	90	12※1	120	90	12+α※2	90	60	216

※1 材中心部が蒸煮温度に到達するまでの最短時間(但し、乾燥機の容量、熱源能力、季節により適宜変更すること)

※2 αは蒸煮終了後、セット温度到達にかかる最短時間

引用文献

秋田県立大学木材高度加工研究所（2011），コンサイス木材百科，，210pp，秋田

井道裕史・長尾博文・加藤英雄（2005），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，Vol60，NO. 4，170-174

工藤康夫・町田初男・小黒正次（2014），県産スギ平角材の強度性能に関する研究，群馬県林業試験場研究報告第19号，10-14

中嶋康・武田孝志・細尾佳宏・徳本守彦（2014），心持ち平角材の内部および表面割れに及ぼす高温セット処理条件の影響，木材学会誌，Vol60，NO. 6，309-318

製材の日本農林規格　農林水産省告示第1083号（2007）

日本住宅・木材技術センター（2011），構造用木材の強度試験マニュアル，
http://www.howtec.or.jp/kenkyu/m-kyoudosiken.pdf（参照 2012.12.21）

乾燥材生産の技術マニュアル（社団法人全国木材組合連合会，2004）

木材の基準強度Fc、Ft、Fb、及びFsを定める件（平成12年12月26日建設省告示第2465号、改正平成27年8月4日国土交通省告示第910号）