

スギ板材の蒸気式中温乾燥における反り抑制

石田洋二・松元 浩

要旨：スギ大径材から採材した板材の反りを効果的に抑制するため、仕上がり断面寸法 38×140 mm の 206 材を対象とし、蒸気式中温乾燥時の重り载荷と乾燥初期の蒸煮時間についてそれぞれ 3 条件を設定し比較検討した。その結果、板材の反りを抑制し材面品質を高める条件として、人工乾燥時の重り载荷を 540 kg/m²とし、蒸煮時間を 12 時間とする条件が最も効果的であると考えられた。

キーワード：スギ、板材、反り、重り载荷、初期蒸煮

I. はじめに

樹木は肥大生長によって生じるひずみによって樹幹内に応力を蓄積していく。これを成長応力というが、樹皮側では軸方向に沿って引張の、樹心側では圧縮の応力分布を持つため、製材時に材が樹皮側を凹面として湾曲する原因となる¹⁾。更に材が乾燥する過程では、成長応力に加えて材内の収縮率の差に起因する乾燥応力が生じ、更に複雑に湾曲する²⁾。スギの大径化により 1 本の丸太から板材を多数生産する場面が増えてきているが、製材される板材の多くは板目材または追い柁材となり、上記の理由から反り（板材の広い面に対する湾曲）が多く、大きく生じることで、歩留まり低下や利用上の支障を来す懸念がある。実際、筆者らによるスギ柁組材を対象とした調査では、JAS の等級で下位（3 級以下）に格付けされたもののうち、3 割が反りによるものであった³⁾。このような製材の変形を抑制する手段として、水分や熱を材に作用させることで応力緩和を図る方法や、湿熱状態で外部からの拘束力により矯正する方法が有効であることが知られている^{1, 4)}。近年のスギ大径化を鑑み、心去り正角や心去り平角に対する重り载荷や蒸煮処理による曲がり・反りの抑制効果を検討した例は多くみられるが^{5, 6)}、スギ板材に対しこれらの手段を組み合わせ、効果的な条件を検討した例は少ない。そこで、本報告では、仕上がり断面寸法 38×140 mm の柁組材（以下、206 材）を対象として、蒸気式中温乾燥下での効果的な重り载荷と蒸煮時間の検討を行った。なお、製材の日本農林規格によれば、板類と呼ばれる製材の定義は断面の短辺が 75mm 未満かつ幅が短辺の 4 倍以上となっている⁷⁾。

206 材は厳密には板類に当てはまらないが、ラミナ、間柱など一般的に板類として認識される製材と類似した断面寸法であり、また柁組壁工法構造用製材及び柁組壁工法構造用たて継ぎ材の日本農林規格（以下、ツーバイフォー材の JAS）では反りの明確な基準値も定められていることから⁸⁾、今回は 206 材を試験対象とした。

II. 試験方法

1. 重り载荷試験

末口径 40cm 以上、長さ 4m の石川県産スギ丸太より断面寸法 45×155mm に製材した板材 54 体を供試材とした。乾燥前における材の寸法、重量、高周波木材水分計（ケット科学研究所製 HM-520）による含水率および材の反りを測定した。これらの測定項目は後の工程でも共通して行ったため、ここでは品質測定と呼ぶ。品質測定結果より、反りおよび密度が均等となるように 18 体ずつの 3 グループに振り分けし、人工乾燥時の重り载荷条件として条件 A：270 kg/m²、条件 B：540 kg/m²、条件 C：1080 kg/m² の 3 条件を設定し



図-1. 人工乾燥時の棧積み状況

表-1. 重り载荷試験の乾燥スケジュール

ステップ	処理時間 (h)	乾球温度 (°C)	湿球温度 (°C)
蒸煮	7	90	90
	48	90	86
乾燥	48	90	85
	48	90	83
	48	90	82
	48	90	80
	48	90	78
	48	90	76
	144	90	74

た。なお、ここに表した載荷条件の値は、棧積み上に設置した重り総荷重を、1 段当たりの製材上面の総面積で除したものである。人工乾燥は、蒸気式木材乾燥機（新柴設備製 SK IF 60HPT）を使用して 90℃の蒸煮 7 時間、乾球温度 90℃、湿球温度 86～74℃、乾燥時間 20 日間の中温乾燥とした（図-1）。乾燥スケジュール詳細は表-1 に示すとおりである。乾燥後の試験体について、乾燥前と同様に材の品質測定を行ったのち、断面寸法 38×140mm の 206 材にモルダー加工し仕上げた。モルダー後の材についても同じく品質測定を行った。

2. 蒸煮試験

末口径 40cm 以上、長さ 4m の石川県産スギ丸太より断面寸法 45×155mm に製材した板材 30 体を供試材とした。乾燥前における材の品質測定結果より、反りおよび密度が均等となるように 10 体ずつの 3 グループに振り分けし、人工乾燥初期の蒸煮条件として条件 D：蒸煮なし、条件 E：蒸煮 12 時間、条件 F：蒸煮 24 時間の 3 条件を設定した。蒸煮温度は 90℃共通とした。蒸気式木材乾燥機（新柴設備製 SK IF 60HPT）を使用し、各条件で設定した蒸煮工程を

表-2. 蒸煮試験の乾燥スケジュール

ステップ	処理時間 (h)			乾球温度 (°C)	湿球温度 (°C)
	条件	D	E	F	
蒸煮		0	12	24	90
乾燥			48	90	86
			48	90	85
			48	90	83
			48	90	82
			48	90	80
			48	90	78
			48	90	76
			144	90	74

行った後、乾球温度 90℃、湿球温度 86～74℃、乾燥時間 20 日間の中温乾燥とした。乾燥スケジュール詳細は表-2 に示すとおりである。乾燥中の重り載荷は、前項の重り載荷試験の結果から最も適当と考えられた荷重とした。乾燥後の試験体について、材の品質測定を行ったのち、断面寸法 38×140mm（206 材）にモルダー加工し仕上げた。モルダー後の材についても品質測定を行い、加えて材面に現れた削り残しの面積を測定した。

Ⅲ. 結果および考察

1. 重り載荷試験

重り載荷の各条件における、乾燥前、乾燥後およびモルダー後における品質測定結果を表-3 に、各工程における反り率の変化を図-2 に示す。反り率とは、反りの矢高を材長で除した百分率（％）である。図-2 において、乾燥後では

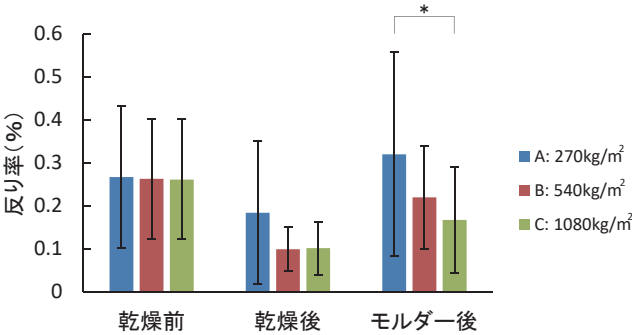


図-2. 重り載荷試験の乾燥前、乾燥後、モルダー後の反り率の変化
エラーバーは標準偏差
*: 5%有意差あり (Tukey-Kramer の多重比較)

表-3. 重り載荷試験の乾燥前、乾燥後、モルダー後における品質測定結果

乾燥前	条件A			条件B			条件C		
	反り率 (%)	密度 (kg/m³)	含水率 (%)	反り率 (%)	密度 (kg/m³)	含水率 (%)	反り率 (%)	密度 (kg/m³)	含水率 (%)
平均値	0.27	572	80.9	0.26	564	80.9	0.26	561	81.1
最大値	0.75	703	112.0	0.58	766	115.0	0.55	641	104.0
最小値	0.05	478	51.5	0.07	476	64.5	0.08	456	56.5
標準偏差	0.17	67.4	16.6	0.14	70.3	13.3	0.14	58.5	12.4
乾燥後	条件A			条件B			条件C		
	反り率 (%)	密度 (kg/m³)	含水率 (%)	反り率 (%)	密度 (kg/m³)	含水率 (%)	反り率 (%)	密度 (kg/m³)	含水率 (%)
	0.18	370	9.8	0.10	358	10.0	0.10	370	10.4
	0.60	444	10.5	0.23	434	11.5	0.28	437	12.5
	0.05	311	9.0	0.03	304	9.5	0.03	304	9.5
標準偏差	0.17	42.1	0.5	0.05	41.7	0.6	0.06	45.8	0.8
モルダー後	条件A			条件B			条件C		
	反り率 (%)	密度 (kg/m³)	含水率 (%)	反り率 (%)	密度 (kg/m³)	含水率 (%)	反り率 (%)	密度 (kg/m³)	含水率 (%)
	0.32	372	10.6	0.22	364	10.7	0.17	378	11.1
	0.88	454	11.5	0.45	434	11.5	0.43	448	12.0
	0.00	321	9.5	0.05	307	10.0	0.05	314	10.5
標準偏差	0.24	42.2	0.6	0.12	40.9	0.5	0.12	48.2	0.6



図-3. 栈木跡（条件 C）

いずれの条件も乾燥前と比べて反り率の減少がみられた。また乾燥後の条件 A と比べて条件 B と条件 C の反り率の平均値はおよそ半分であり、ばらつきが小さく抑えられていた。このことから、 540 kg/m^2 以上の重り载荷があれば反りを抑制できる可能性が高いことが推察される。モルダー後においては、いずれの条件もある程度の反りが回復したが、载荷荷重が大きいほど抑制効果が残存しており、条件 A と条件 C 間に有意差が認められた（Tukey-Kramer の多重比較, $p < 0.05$ ）。ただし、条件 C の材面には、栈木によるめり込みが大きく生じ、モルダー後においても栈木跡が散見されたことから（18 体中 4 体、図-3）、 1080 kg/m^2 の载荷では過剰である

表-4. モルダー後の反り等級の構成割合（重り载荷試験）（%）

等級	条件A	条件B	条件C
1級	61.1	72.2	83.3
2級	11.1	22.2	5.6
3級	16.7	5.6	11.1
等級外	11.1	0.0	0.0

と考えられる。モルダー後の材について、ツーバイフォー材の JAS に基づく反りの格付け（甲種枠組材）を行ったところ、枠組壁工法の現場で指定されることの多い 2 級以上となった割合は、条件 A で 72.2%，条件 B で 94.4%，条件 C で 88.9% であり（表-4）、条件 B でも格付け上の効果は条件 C と遜色なかった。以上から、 206 kg/m^2 材の反り抑制のための载荷条件は、 540 kg/m^2 程度が適当と考えられる。

2. 蒸煮試験

本試験での重り载荷の条件は一律 510 kg/m^2 とし、前項の重り载荷試験により適当と考えられた 540 kg/m^2 とほぼ同等の载荷とした。この载荷条件の下で、蒸煮時間の違いが反り抑制効果に与える影響を検討した。

蒸煮時間の各条件における、乾燥前、乾燥後およびモルダー後における品質測定結果を表-5 に、各工程における反り率の変化を図-4 に示す。図-4 において、乾燥後ではいずれの条件も反り率は減少していたが、条件 D と条件 E が同程度で最も減少しており、条件 F の減少はそれ

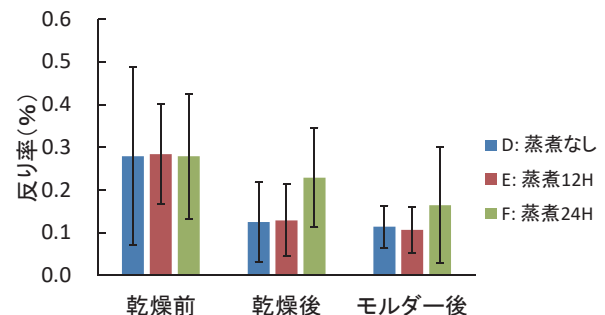


図-4. 蒸煮試験における乾燥前、乾燥後、モルダー後の反り率の変化
エラーバーは標準偏差

表-5. 蒸煮試験の乾燥前、乾燥後、モルダー後における品質測定結果

乾燥前	条件D			条件E			条件F		
	反り率 (%)	密度 (kg/m^3)	含水率 (%)	反り率 (%)	密度 (kg/m^3)	含水率 (%)	反り率 (%)	密度 (kg/m^3)	含水率 (%)
平均値	0.28	595	84.8	0.28	606	89.2	0.28	599	77.0
最大値	0.65	1104	132.5	0.50	1018	131.5	0.50	1075	131.5
最小値	0.05	427	51.5	0.09	433	56.5	0.04	427	49.5
標準偏差	0.21	225.4	31.1	0.12	206.8	27.1	0.15	211.0	26.9
乾燥後	条件D			条件E			条件F		
	反り率 (%)	密度 (kg/m^3)	含水率 (%)	反り率 (%)	密度 (kg/m^3)	含水率 (%)	反り率 (%)	密度 (kg/m^3)	含水率 (%)
平均値	0.13	373	10.4	0.13	364	10.3	0.23	361	9.9
最大値	0.36	444	11.5	0.28	452	12.0	0.41	453	11.0
最小値	0.04	286	9.5	0.04	307	9.5	0.05	298	9.0
標準偏差	0.09	44.7	0.6	0.08	42.0	0.8	0.12	52.1	0.6
モルダー後	条件D			条件E			条件F		
	反り率 (%)	密度 (kg/m^3)	含水率 (%)	反り率 (%)	密度 (kg/m^3)	含水率 (%)	反り率 (%)	密度 (kg/m^3)	含水率 (%)
平均値	0.11	381	10.5	0.11	368	10.5	0.16	369	10.1
最大値	0.18	449	11.5	0.21	452	13.5	0.41	461	11.5
最小値	0.03	299	9.5	0.03	315	9.5	0.00	302	9.5
標準偏差	0.05	42.5	0.6	0.05	40.3	1.2	0.14	53.0	0.6

表-6. モルダ－後の反り等級の構成割合
(蒸煮試験) (%)

等級	条件D	条件E	条件F
1級	100.0	100.0	80.0
2級	0.0	0.0	10.0
3級	0.0	0.0	10.0
等級外	0.0	0.0	0.0

より小さかった。最も蒸煮時間の長い条件Fでは反り抑制効果は弱まる結果となったが、この原因については、長時間の蒸煮処理により、反りが過大に評価されるような何らかの狂いが生じたなどの可能性が考えられるが、明確な根拠は見出せなかった。モルダ－後の各条件の反り抑制効果の傾向は、乾燥後の傾向と同様であった。モルダ－後の材について、ツーバイフォー材のJASに基づく反りの格付け（甲種枠組材）を行ったところ、2級以上となった割合は、条件Dで100.0%、条件Eで100.0%、条件Fで90.0%であった（表-6）。

次に、モルダ－後の材面における削り残しの発生状況を比較した。削り残しは、乾燥後に材面に存在する反りや幅反り、ねじれなど平坦性を損なう種々の狂いが原因となり、モルダ－加工時に刃にかからず未切削となった部分である。削り残し面積の平均値を条件間で比較すると、条件Dが最も大きく（図-5）、条件Dは削り残しの面では抑制効果は小さかったようである。このことは、削り残しの原因となる反り以外の狂いを抑制するためには、ある程度の蒸煮処理が有効であることを示唆している。

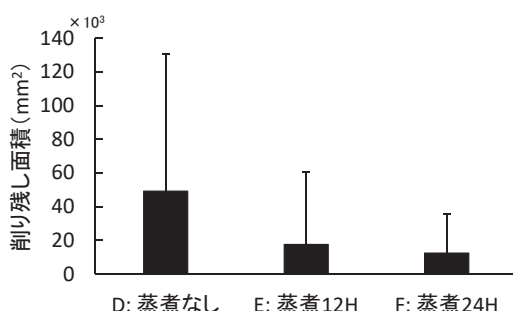


図-5. モルダ－後の材面における蒸煮時間別の削り残し面積
エラーバーは標準偏差

以上の結果をまとめると、206材の蒸気式中温乾燥において90℃の初期蒸煮を行う場合、蒸煮時間24時間では反りの発生が大きくなったことから過剰と考えられ、他方で蒸煮を全く行わなければ削り残しのリスクが高まったことか

ら、12時間程度の蒸煮が適当であると考えられる。

IV. まとめ

206材の蒸気式中温乾燥における反り抑制技術の検討のため、重り載荷試験および蒸煮試験を行った。その結果、載荷条件として540 kg/m²程度、乾燥初期の蒸煮時間として12時間程度の処理を組み合わせ乾燥することが適当と結論付けられた。この結果は、206材と断面寸法が類似した板材（ラミナや間柱など）にも適用可能であり、県内の生産現場における製品の品質や歩留まり向上に寄与する指針になると考えられる。

引用文献

- 1) 野田 龍・藤本登留・新貝敏憲：スギおよびヒノキ乾燥材製品の生産における丸太熱処理の有用性. 木材工業 70 (12), 584-587 (2015).
- 2) 塩倉高義・小林 純：スギ，ヒノキ，カラマツ小角材の縦反りについて. 東京農業大学農学集報 21 (2), 208-213 (1976).
- 3) 石田洋二・松元 浩・小倉光貴：県産スギ大径材から採材した枠組壁工法構造用製材の品質調査. 石川県林業試験場研究報告 52, 15-18 (2021).
- 4) 古田裕三・三好由華：ティンバーメカニクス-木材の力学理論と応用-. 日本木材学会 木材強度・木質構造研究会編, 海青社, 滋賀, 2015, 79-97.
- 5) 小倉光貴・松元 浩・石田洋二：石川県産スギ大径材から製材した正角の品質調査（第1報）-供試丸太の形質と製材工程及び製材された正角の品質-. 石川県林業試験場研究報告 52, 19-22 (2021).
- 6) 高橋秀彰：スギ心去り平角材の反り矯正方法の検討（第2報）. 第66回日本木材学会大会要旨集, 2016, C28-P-03.
- 7) JAS 1083：製材. 農林水産省 (2019).
- 8) JAS 0600：枠組壁工法構造用製材及び枠組壁工法構造用たて継ぎ材. 農林水産省 (2020).