

熊本県林業研究・研修センター研究報告 No. 48-4

長く断面寸法の大きい構造材の乾燥に関する研究 平成30年度～令和2年度（単県）

池田 元吉
中村 圭子

要 旨

資源の高齢級化に伴い大径化が進むスギ・ヒノキ資源の利用促進には資源の形質や量に応じた製品づくりが急務である。スギの需要拡大が期待される用途の一つとして、木造住宅の横架材、中低層非住宅建築物への利用事例が増加している心持ち平角材が挙げられる。そのためには構造材としての信頼性確保が不可欠であり、強度性能の選別、他部材との安定した接合性能のために、材端部付近の内部割れ低減対策を含めた乾燥技術が重要である。

そこで、適切な乾燥技術の確立に関して、高温セット処理を含む乾燥スケジュールによる人工乾燥の目標となる含水率の確認を目的に、高温セット処理のみを行い、その後屋内天然乾燥したスギ心持ち材の断面寸法と重量を適時測定し、寸法変化が収束するまでの時間及び含水率を調べた。その結果、天然乾燥約300日間で寸法変化はほぼ収束すること、その時の含水率は含水率計指示値で20%程度（全乾法含水率で15%程度）であった。この値は、高温セット処理を含む乾燥スケジュールによる人工乾燥の目標含水率を検討するうえで有益な情報と考える。

適切な乾燥技術の確立に関してもう一つ、乾燥前の材の含水率区分の簡略化を目的に、乾燥材の水管理に広く用いられている含水率計による選別の可能性について検討した。その結果、今回の試験では材の元口側1か所の含水率計指示値により、材重量による選別（決定係数0.71）と同程度以上の精度（決定係数0.86）による選別ができることが分かった。

次にシリコーン系シーリング剤を用いた木口面シールによる材端部付近の内部割れ抑制効果について検討した。その結果、シールすることで材端部の過乾燥を抑制し明らかに内部割れの抑制に効果があることが分かった。

第1章 スギ心持ち材の組み合わせ乾燥（高温セット+天然乾燥）による寸法安定性の確認

1. はじめに

心持ち材の乾燥では、高温セット処理を含む乾燥スケジュールが広く用いられている。この乾燥方法の特徴としては、乾燥時間を短縮できることや材表層部に形成される引張セットによる材面割れ抑制効果が挙げられる。一方、この乾燥法による材の品質は、スケジュールによっては過乾燥となる材があり、過乾燥による内部割れの発生や強度性能の低下などが課題となっている。

高温セット処理材の特性については、横断面方向の含水率や平衡含水率ならびに形成されるドラインゲット（テンションセット）の分布やセットの回復に関する報告がある^{1) 2)}。同処理による材表層の平衡含水率の低下は、使用環境に応じた材の吸放湿による材横断面寸法の変化に影響を及ぼし、寸法変化が収束する際の部材平均含水率は、高温セット処理をしていない材と異なるのではないかと考えられる。しかし、同処理材の長期にわたる寸法変化に注目した測定事例は少ない。

そこで、高温セット処理材の寸法変化が収束する含水率の把握を目的に、同処理のみを行った材を屋内天然乾燥し、長期にわたり寸法・重量を測定して寸法変化と含水率との関係を調べた。

2. 試験方法

スギ心持ち正角材（標準寸法：166×166×6000 mm）20本を表－1に示すスケジュールで高温セット処理した。処理時間は22時間である。処理後に6m材3本から取った長さ約2.4m材6本（6m材1本から天然乾燥の供試材2本ずつを採取）を屋内で天然乾燥した。天然乾燥中は適時に重量、寸法、含水率（製材の日本農林規格に示す方法に準じた1製材当たり6か所（相対する2材面（A、C面）の元口側、中央部、末口側の計6か所））等を測定した。天然乾燥中の材含水率は、6m材を鋸断する際に供試材の両側から採取した含水率測定用試片の含水率（全乾法含水率）を基に算出した。使用した含水率計は高周波容量式の携帯型木材水分計（（株）ケット科学製、HM-520）である。高温セット処理には当センターの高温蒸気式乾燥機（（株）新柴設備製、SKD-50LPT型、写真－1）を使用し、天然乾燥には当センターの養生庫を使用した。なお、セット処理工程終了時に乾燥機の運転を停止した。

3. 結果と考察

セット時の乾球温度（DBT）・湿球温度（WBT）・外気温・材温（材表面20mm、45mm、80mm深さ）の変化を図－1に示す。材表面から深さ毎の到達材温は20mmで114℃、45mmで111℃、85mm（材横断面中央部）で103℃であった。また、各材温が100℃に達するまで要した時間は、順に9.3時間、10時間、11時間で、20mmと85mmの時間差は1.7時間であった。冷却工程においても、材表面から材温が下降し始め、徐々に内部の材温が下降することが確認された。今回、高温セット処理は外気温15℃前後の冬期に行った。材の出炉タイミングを外気温と材温（材表面20mm深さ）の差20℃以内とすれば、運転開始から80時間経過以降と推察された。

高温セット処理と天然乾燥の組合せ乾燥を行った時の試験材寸法の変化について図－2に、含水率計指示値（6か所の平均値）の変化について図－3、推定した全乾法含水率の変化を図－4に示す。なお、各図の経過日数は高温セット処理開始直前をゼロとして表した。供試材20本の平均含水率は、処理前が約55%、処理後は約28%で、処理による含水率低下量は約27%であった。天然乾燥約300日弱で、含水率は含水率計指示値で約20%、全乾法含水率では約15%となり、寸法変化はほぼ収束することが確認された。このことは、高温セット処理を含む乾燥法における目標含水率の設定において有益な情報と考える。

また、天然乾燥127日後の材内含水率分布と含水率計及び全乾法による平均含水率を図－5に示す。127日間（約4か月間）の天然乾燥中に材内の含水率傾斜が小さくなることで含水率計指示値と全乾法含水率の差が数%に縮小したと推察された。このことは、断面が大きな材の含水率管理手法を検討するうえで有益な情報と考える。

表－1 高温セット処理スケジュール

工程名	ステップ	処理時間 (時間)	乾球温度 (℃)	湿球温度 (℃)	蒸気温度 (℃)	主ファン
蒸煮	1	2	0	110	96	3
	2	6	0	110	96	2
セット処理	3	2	120	96	0	1
	4	2	120	93	0	1
	5	18	120	90	0	1
冷却	6	随時				
セット処理時間		22				



写真－1 試験状況

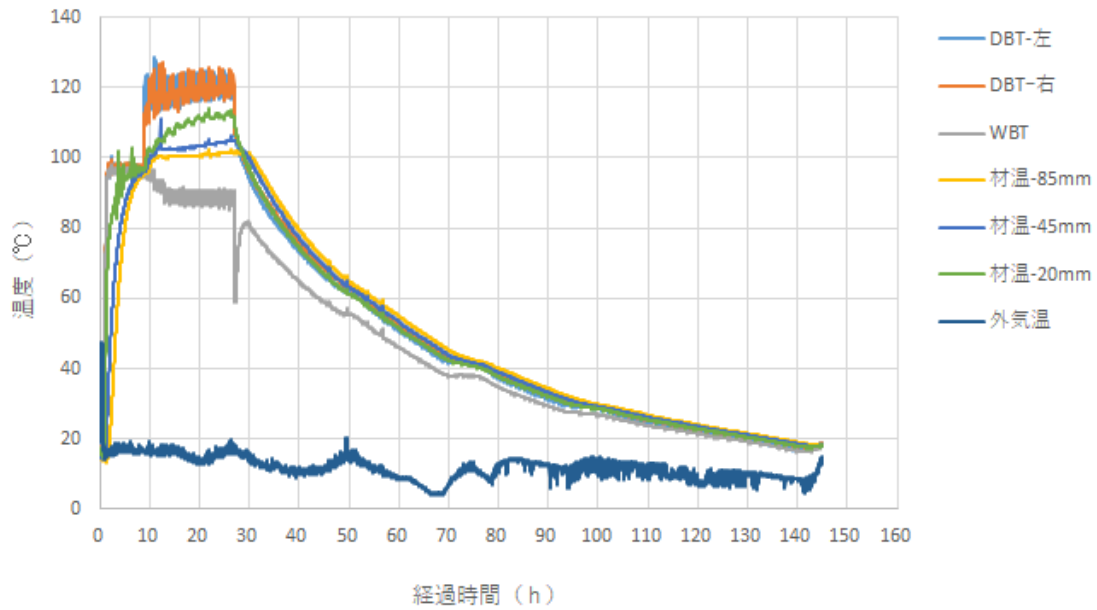


図-1 高温セット処理の状況

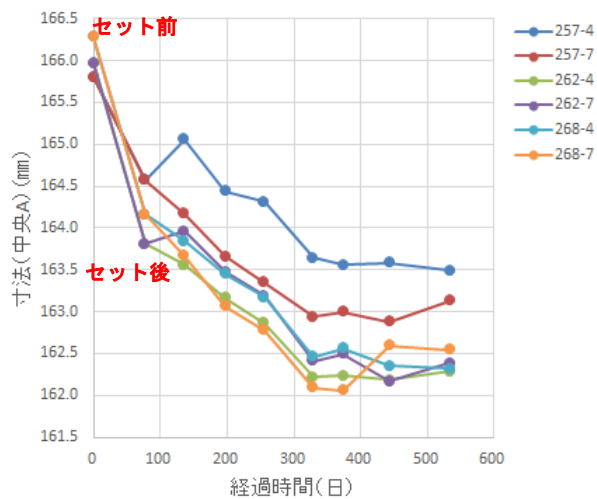


図-2 試験材中央寸法の変化

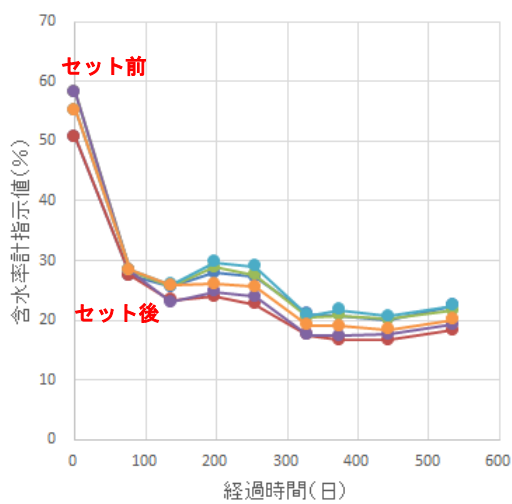


図-3 試験材含水率指示値(平均値)の変化

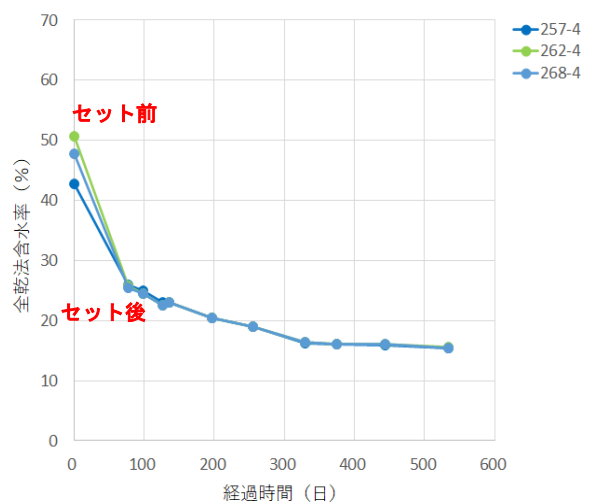
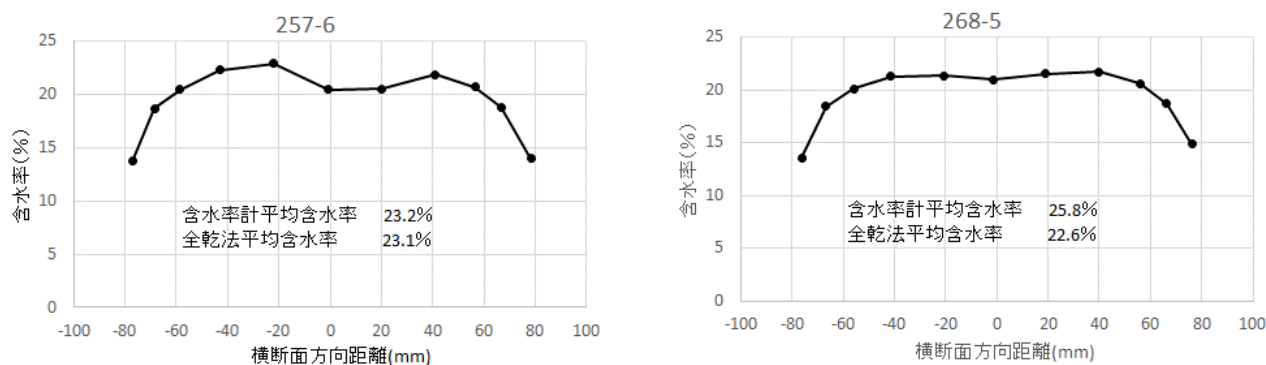


図-4 推定した全乾法含水率の変化



図－５ 天然乾燥 127 日後の横断面含水率分布の一例

第 2 章 乾燥前選別法の検討

1. はじめに

スギは生材含水率のばらつきが大きい樹種であることから、人工乾燥では一釜に入れる材の含水率をある程度揃えることが望まれる。生材含水率を分ける指標として材の重量（生材密度）が有効であることが知られている。しかし、重量測定には専用の装置が必要なこと、測定には人手と時間がかかるといった課題がある。そこで、乾燥前の材含水率の簡便な選別方法を検討した。選別には乾燥材の含水率管理に広く用いられている高周波容量式の携帯型木材水分計（（株）ケット科学製、HM-520、写真－2、以下含水率計という）を用いた。高周波容量式含水率計の特徴は、繊維飽和点より高い含水率でも測定できることである。しかし、人工乾燥前の材の選別に利用している事例が見当たらない。そこで、本研究では含水率計による乾燥前の材の選別について検討した。

2. 試験方法

供試材はスギ心持ち平角材（標準寸法：135×255×4000 mm）50 本とし、乾燥後仕上げ寸法が 120×240×4000 mmとして県内の 4 製材所から入手したものである。

乾燥前後に測定した材の重量及び含水率から乾燥前選別法を検討した。乾燥スケジュールは 95℃初期蒸煮 8 時間、乾球温度（DBT）120℃、湿球温度（WBT）90℃の高温セット処理 18 時間、その後 DBT90℃、WBT60℃中温乾燥 193 時間である（表－2）。

表－2 乾燥スケジュール

パターン	ステップ	残り時間	加熱温度	排気温度	蒸煮温度	主ファン	
						コード	周波数(Hz)
5	1	1	0	110	95	3	48
	2	1	0	110	95	2	53
	3	5	0	110	95	1	58
	4	18	120	92	88	1	58
	5	1	110	82	78	1	58
	6	1	100	72	68	1	58
	7	50	90	62	58	1	58
	8	50	90	62	58	1	58
	9	50	90	62	58	1	58
	10	50	90	62	58	1	58
	11	50	90	62	58	1	58
	12	60	0	62	0	3	48
	13	0		END			



写真－2 高周波容量式含水率計

3. 結果と考察

セット時の乾球温度 (DBT)・湿球温度 (WBT) 及びモニター材の含水率変化を図-6 に示す。供試材 3 体から長さ約 0.4m のモニター材を切出し、両木口をシリコン系シーリング剤でシールした。乾燥中のモニター材の測定タイミングは乾燥スケジュールのステップ進行を目安に、乾燥機を一時停止して行った。

表-3 及び図-7 に乾燥前後の供試材の概要を示す。含水率は 6 か所 (製材の日本農林規格に示す方法に準じた 1 製材当たり 6 か所 (相対する 2 材面 (A、C 面) の元口側、中央部、末口側の計 6 か所)) の平均値である。乾燥前の横断面寸法は短辺 133~135~139 mm (最小値~平均値~最大値)、同様に長辺 253~255~257 mm で、4 社の仕上げ寸法に対する余寸は短長辺ともにおおよそ 15 mm であった。製材重量は 70~88~129 kg の幅があり、4 社の材密度 (kg/m^3) の平均値は小さい順に 539、563、613、737 kg/m^3 、これらの変動幅は製材所が入手する材の地域性 (スギ品種の地域性) や集荷範囲の広狭などの影響が現れたものと考えられる。乾燥によって含水率の平均値は 68% が 19% へ、最大値は 115% が 33% へ大きく減少している (表-3)。しかし、この 33% は全乾法含水率では 50% を超える値 (50.4%) であり、乾燥前の選別の必要性を示す結果と考える。

乾燥前の製材重量と乾燥後の全乾法含水率 (供試材の両木口から 1 m 位置から採取した試片の全乾法含水率の平均値) との関係を図-8 に示す。両者の間には強い相関 ($R^2=0.71$) があり、乾燥前の製材重量による含水率区分の有効性を示している。しかし、この方法の取組み事例は少ない。

図-9 に、乾燥前に製材 J A S の水分管理に定める 1 製材当たり 6 か所 (相対する広い 2 材面 (A、C 面) の元口側、中央部、末口側の計 6 か所) で測定した含水率計指示値平均値 (以下、6 か所含水率) または、測定部位別の指示値と全乾法含水率との関係を示す。6 か所含水率と全乾法含水率の関係には図-8 に示した製材重量の関係より強い相関関係があることから、含水率計による乾燥前区分が可能と考えられる。しかし、測定箇所は 6 か所と多く生産現場への普及は難しいと考えられることから、測定箇所数を減らすことを目的に、測定部位別含水率計指示値と全乾法含水率の関係を調べた。両者の相関は、測定材面に関わらず、元口側が強く、中央部、末口側の順に弱かった。指示値の出現範囲は元口側と中央部は同程度、末口側では低い方の値は元口・中央と同程度、高い方の値が低くなったことで出現範囲は狭くなり区分精度が低下したことがわかる。なお、この測定部位による指示値の変化については、スギ製材の樹高方向で異なる心材率や密度及びそれらの変動による乾燥具合が影響していると考えられことから更なる検討が必要と考える。また、元口側と同等の区分精度が期待される中央部の測定は、元口側、末口側の材両端部に比べ測定者の移動距離が長くなり作業効率の低下が懸念され、効率低下を抑えるため測定者数を増やすなどの対応を行えばコスト増が懸念される。これらのことから、含水率による選別の精度を維持しながら測定箇所数を減らすには、元口側または末口側のみの測定が有効と考えられる。

また、図-9 に示す今回の乾燥前後の含水率の関係から、乾燥前含水率計指示値 80% 程度を境界として、仕上がり含水率 20% を超える乾燥が不十分な材が認められた。このことから、選別の境界となる閾値がこの範囲に存在すると考えられる。

人工乾燥後の水分管理についても検討を行ったところ、乾燥前と同様に元口側の値のみによる含水率推定が最も高い精度であった (図-10)。

含水率計による水分管理を生産工程のどの位置に組込むかは重要である。量産工場の場合、搬送装置 (ライン) 上を移動する材の含水率を自動測定し、その値に応じてライン内で集積することが有効と考えられる。一方、携帯型含水率計で個々に測定する場合、重さ 100 kg 前後の材を人力で仕分け・集積す

ることは難しいと考えられることから比較的簡易な搬送装置を改良した区分装置が必要と考えられる。

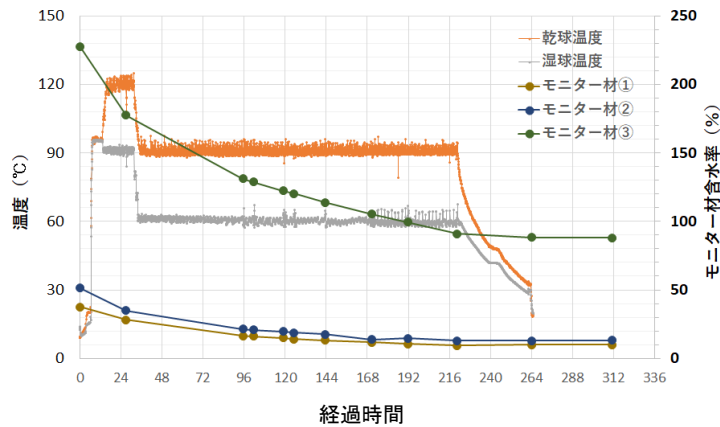


図-6 乾燥の状況

表-3 供試材の乾燥前後の概要

単位	寸法(mm)						重量(kg)		密度(kg/m ³)		含水率(%)	
	短辺		長辺		長さ		乾燥前	乾燥後	乾燥前	乾燥後	乾燥前	乾燥後
最小値	133	129	253	248	4,027	4,025	70	49	496	360	44	13
平均値	135	132	255	252	4,117	4,117	88	65	618	477	68	18
最大値	139	135	257	255	4,238	4,223	129	84	907	609	115	33
変動係数(%)	—	—	—	—	—	—	18	11	18	10	31	37

※含水率は含水率計指示値6か所平均値

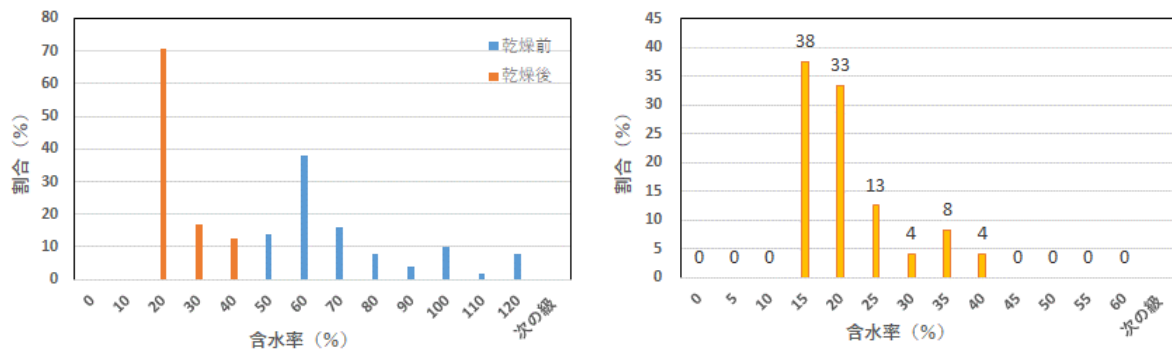


図-7 左：乾燥前後の含水率のヒストグラム、右：乾燥後含水率のヒストグラム

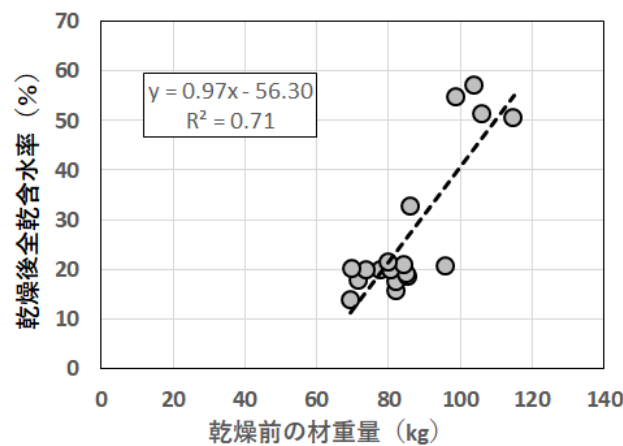
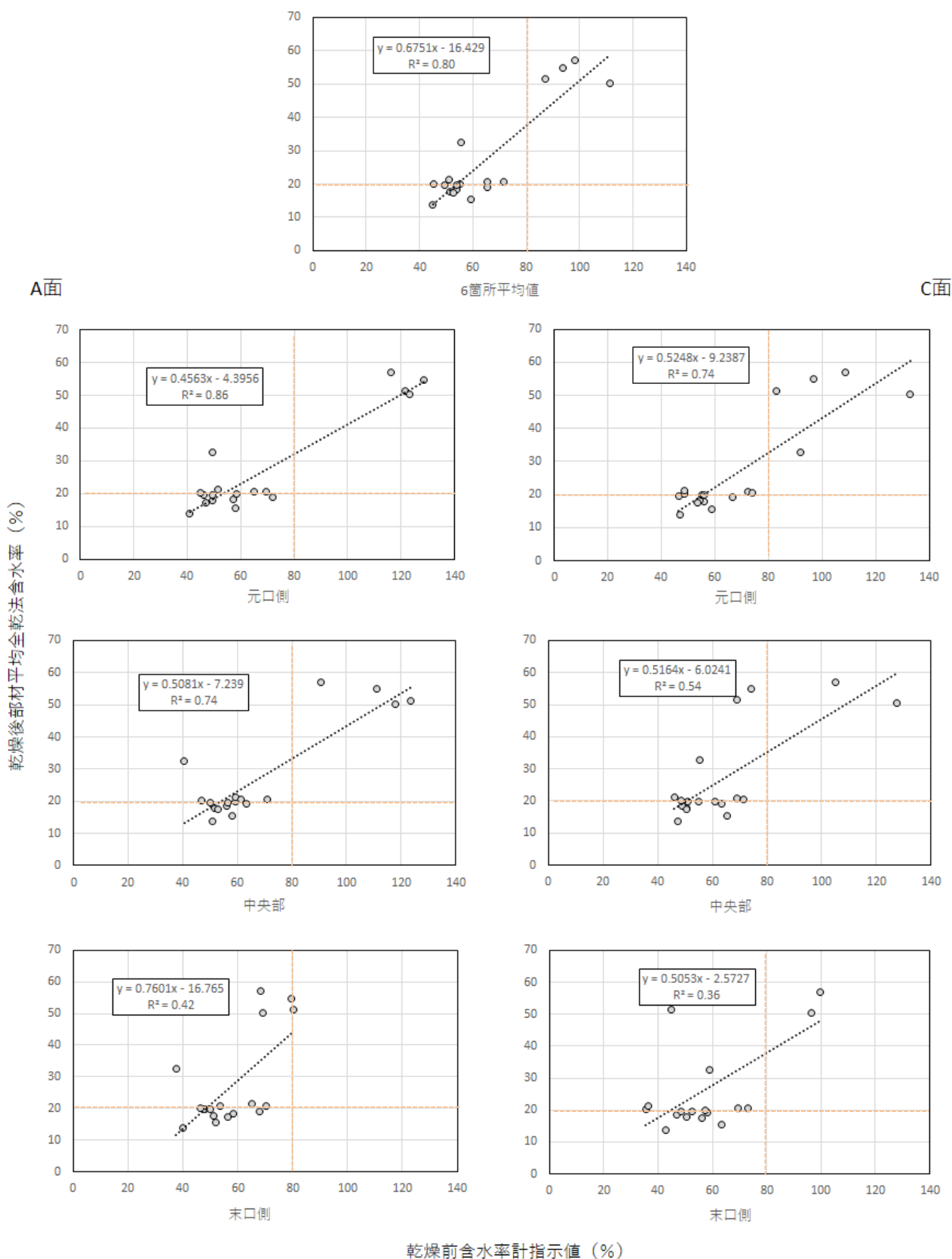


図-8 乾燥前材重量と乾燥後全乾法含水率の関係



図－9 乾燥前含水率計指示値と乾燥後全乾法含水率の関係

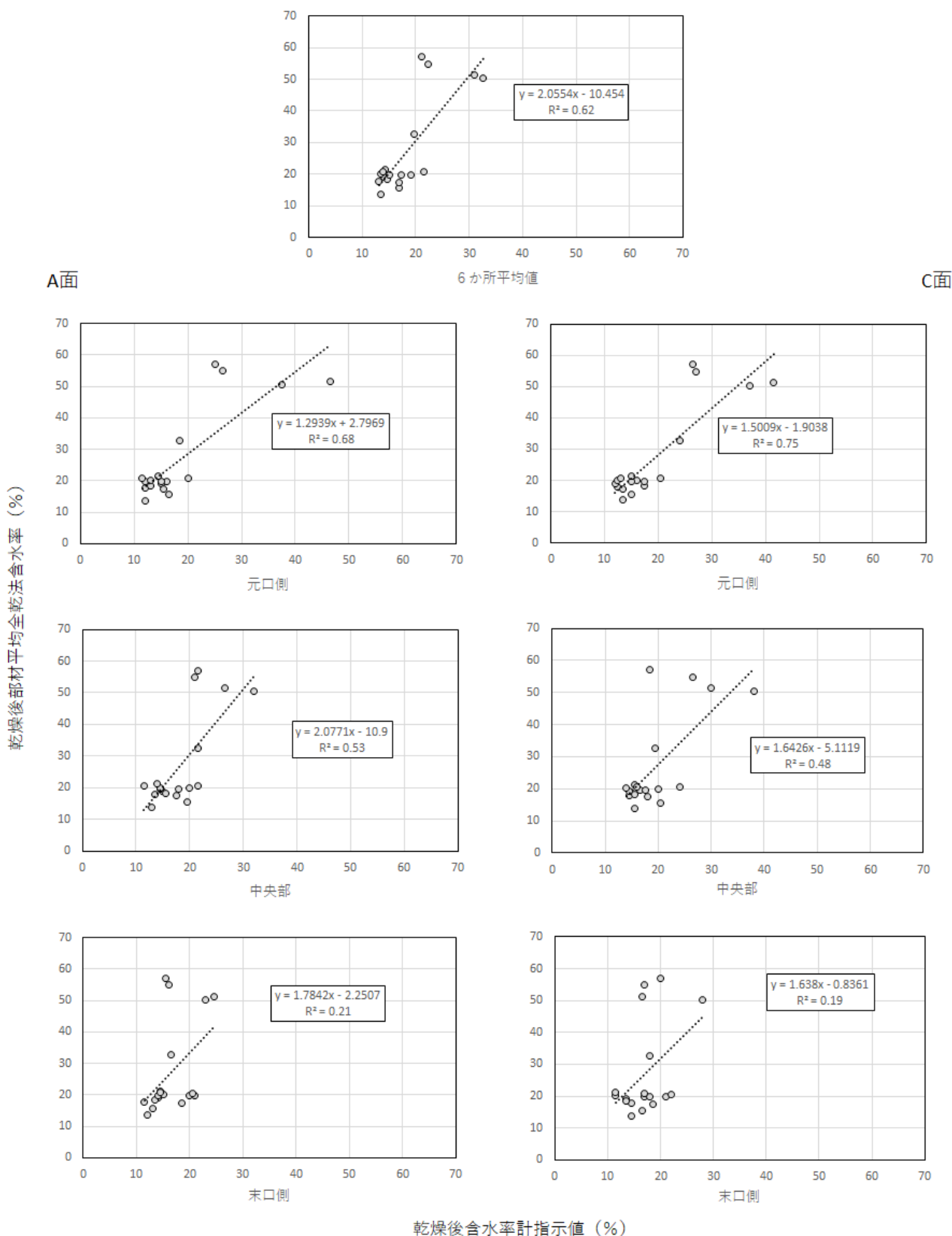


図-10 乾燥後含水率計指示値と乾燥後全乾法含水率の関係

第3章 材端部内部割れ対策の検討

1. はじめに

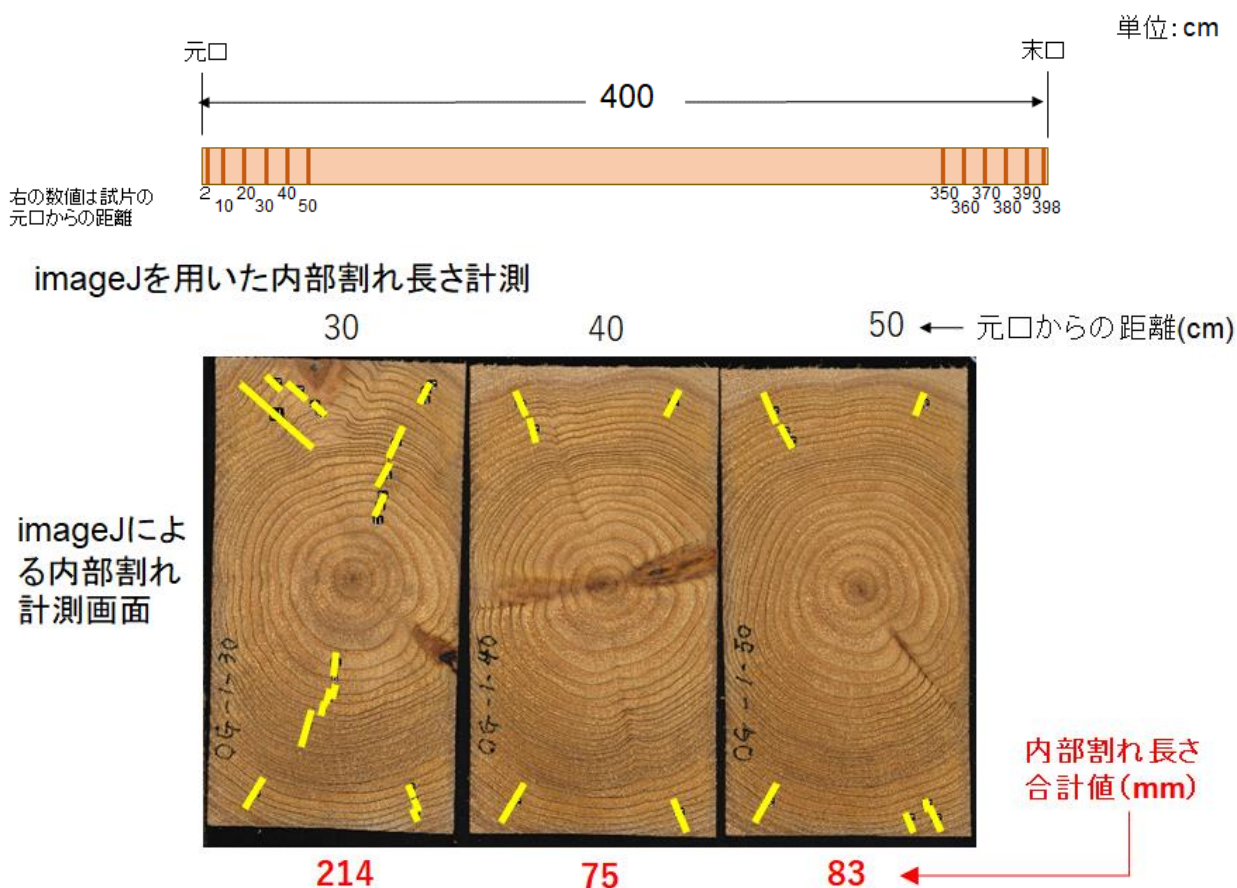
横架材に使われることが多い平角材は住宅・非住宅を問わず主要な構造材の一つである。横架材の端部は他部材との接合部にあたり、当該部分の内部割れは接合性能に影響し構造材としての信頼性低下につながる懸念される。そこで、内部割れの主な原因と考えられる材端部付近の過乾燥を防ぐため、シリコン系シーリング剤による木口シールを用いた内部割れの抑制について検証した。

2. 試験方法

本試験は、第2章 乾燥前選別法の検討の供試材を用いて同時に行った。供試材及び乾燥スケジュールは先述のとおりである。乾燥前後に材の寸法、重量、含水率を測定した。乾燥前の見かけの密度の平均値が等しくなるよう供試材 50 本を 2 グループに分け 1 グループの両木口をシールした。使用したのはシリコン系シーリング剤（セメダイン株式会社製の 8060 プロおよび同社同等品）である。塗布状況を写真-3 に示す。50 本中 3 本から長さ 1 m 弱のモニター材（両木口をシール）を作製し乾燥中は、適時に乾燥機を一時停止してモニター材を取り出し重量を測定した。乾燥後、内部割れ発生状況を調べるため、50 本中 18 本（シールあり 9 本、なし 9 本）の材端から 2、10、20、30、40、50 cm の位置で厚さ 2 cm 程の試片 6 枚を採取し画像ソフト（ImageJ）を用い内部割れ長さを測定・記録した（図-11）。その後、全乾法で含水率を求めた。また、18 体の乾燥後の含水率は両木口から 1 m 位置から採取した試片の全乾法含水率の平均値とした。



写真-3 木口へのシーリング剤塗布状況（左：乾燥前、右：乾燥後）



図－1 1 内部割れ、含水率試片採取方法および内部割れ計測例

3. 結果と考察

図－1 2 に試片採取位置別含水率（全乾法含水率）を示す。乾燥具合を元口側（距離0側）含水率を比べると 30%を境に 2 グループに分けられる。グループ別に木口シールの有無による材端部付近の乾燥状態をみる。30%超材では元口側と末口側に大きな差がみられる。具体的には、図中の乾燥前含水率 122%シールあり材では元口から末口に向けて含水率はほぼ一定の勾配で低下し両木口では 50%程度の差が生じている。一方、116%シールなし材では元口から 50 cm内の含水率は大きく低下し、距離 100 cmでピークがみられる。これらのことは、木口シールの乾燥抑制効果を示すものである。また、この図は前述の図－9と同様に、含水率計による乾燥前含水率が 80%程度を超える材を、現在広く用いられている高温セット処理を含む乾燥スケジュールで適正含水率まで乾かすことの難しさを示していると言える。80%を超える材を乾燥する場合、前処理との組合せ乾燥や減圧下での内部加熱乾燥などの検討が必要と考えられる。これらのことは、丸太段階で材質選別を行い高含水率の丸太からは板材などの乾燥し易い製品づくりに取り組むなど、丸太の形状・材質に応じた合理的な生産に向けた仕組みづくりの重要性を示すものでもある。

次に、図－1 3に図－1 2から含水率 30%未満グループの一例を抽出して示す。乾燥前後の含水率変化はシールありで 50%（元口側含水率計指示値）が 21%（全乾法含水率）に、同様にシールなしで 59%が 20%になっている。材全体では同様の乾燥具合であるが、両木口近くの含水率を比較すると、シールなしが 10%以下まで乾いているのに対して、シールありは元口側が 15%、末口側が 13%程と明らかな差がみられた。

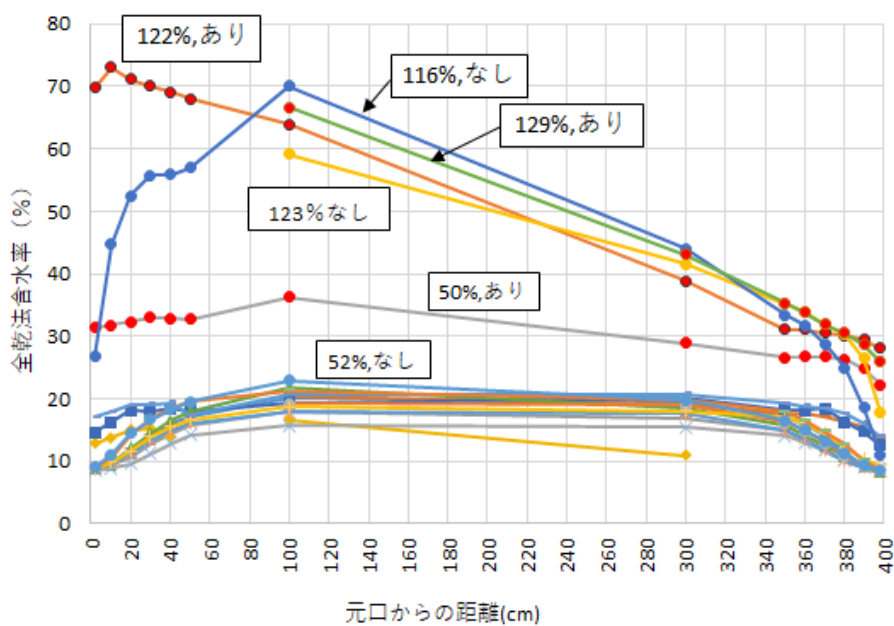


図-12 試片採取位置別の含水率状況
 ※図中の数値は含水率計による乾燥前元口側1材面の測定値
 ※“あり”、“なし”は木口シールの有無

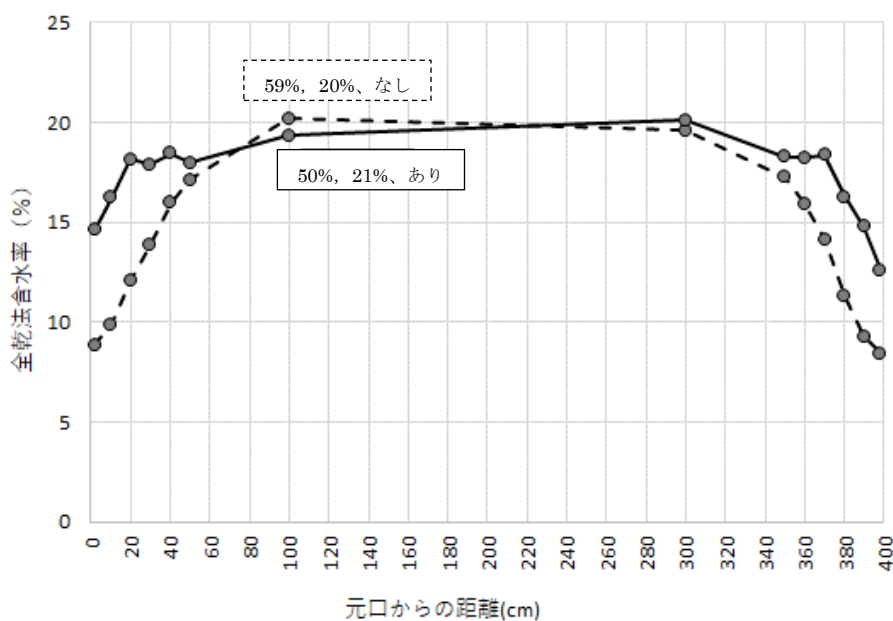


図-13 試片採取位置別の含水率状況の一例

※図中の数値は左から含水率計による乾燥前元口側1材面の測定値、乾燥後全乾含水率
 ※“あり”、“なし”は木口シールの有無

図-14に内部割れ観察用試片の採取位置と内部割れ長さの関係を示す。内部割れは乾燥し易い木口近くに多く発生し、木口から50cm中心側の位置では、両木口側ともに大幅に減少している。また、内

部割れが少なくなる木口からの距離に元口側、末口側での差は見られない。

図-15に内部割れを調べた試片の含水率と内部割れの関係を示す。内部割れ長さは、含水率70%程の試片ではゼロに近く、繊維飽和点(28~30%)前後の試片でわずかに見られるようになり、15%程度まではわずかに増加、それより低くなると急激に大きくなっている。図-16は内部割れが急激に増える含水率を把握するため、図-15のX軸の描写範囲を狭くしたものである。この図において、許容される内部割れ長さを満たす境界値となる含水率の推定を試みる。図中の指数関数によれば含水率13%で割れ長さ33mm、同様に12%で72mmとなり、含水率13%を下回ると急激に割れ長さが増加すると考えられる。よって、若干の余裕を持たせた境界値含水率は第1章における天然乾燥中の材の寸法変化が含水率約15%で収束することを考慮し、13%より高い15%が合理的ではないかと考えられる。なお、図-15中、木口シールあり・含水率13%程で内部割れ長さ500mm程のポイントがあるが、長い内部割れが発生した材質的な特徴について明らかではなく、今後の検討課題の一つと考える。

今後、横架材としての接合部の信頼性向上や中大規模木造建築物の主要構造部材としての平角材については、今後、要求性能はより厳しくなることが予想される。その様な中、材端部の内部割れ抑制に木口シールが有効であると考えられる。

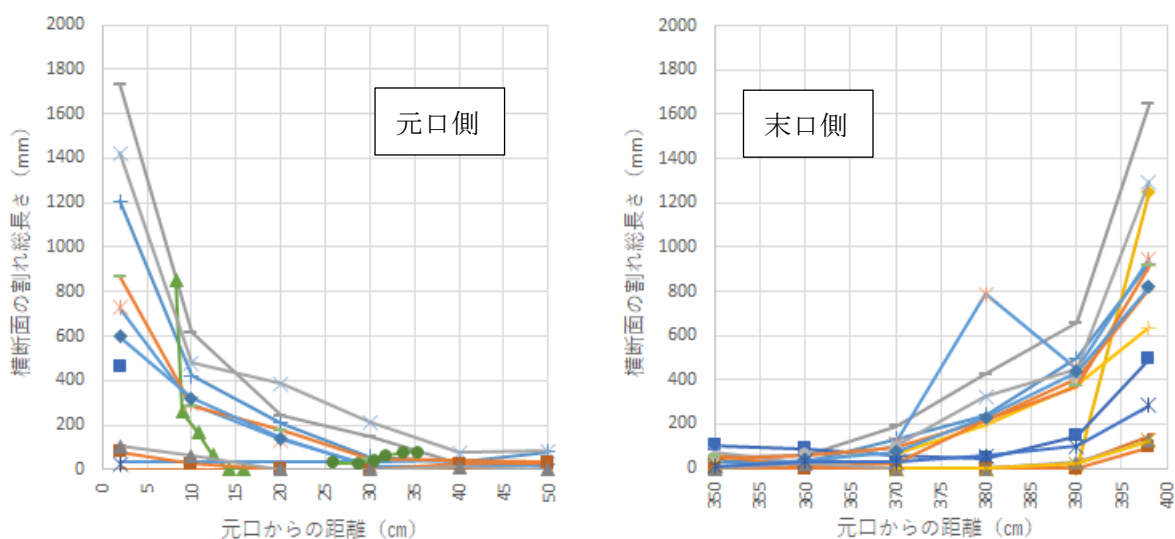


図-14 試片採取位置別と内部割れの関係

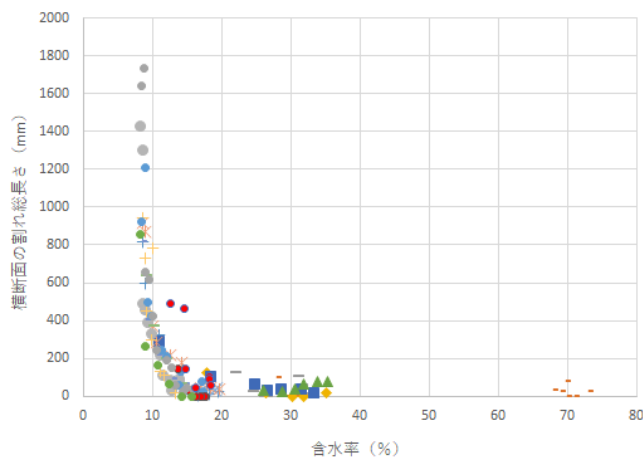
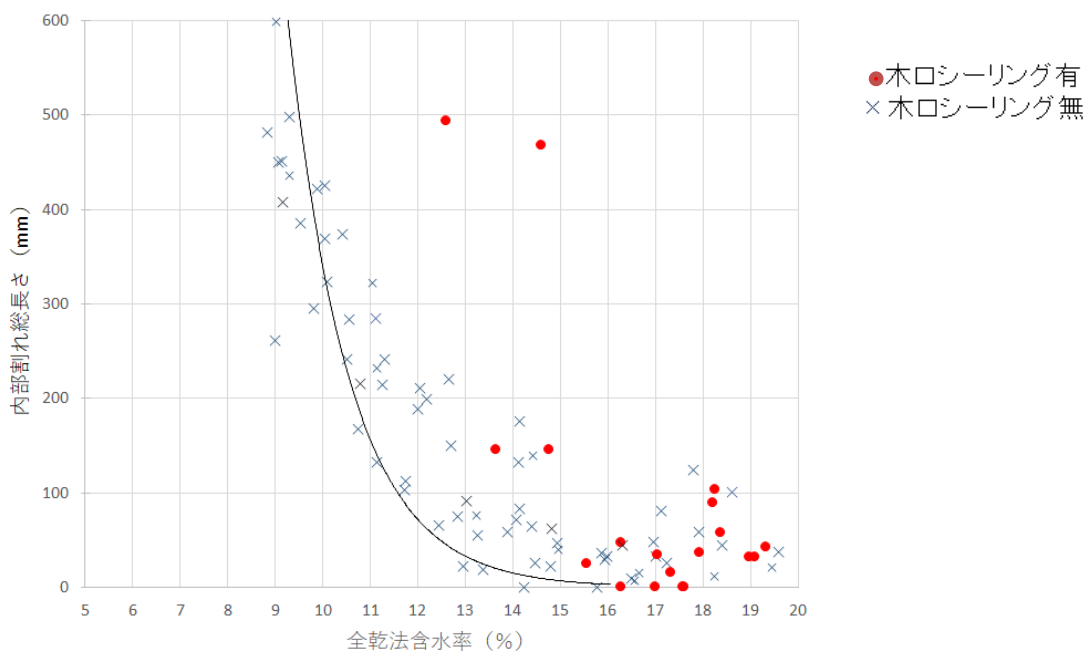


図-15 割れ調査試片の含水率と横断面の割れ総長さの関係



図一 16 割れ調査試片の含水率と横断面の割れ総長さの関係の一例

第4章 総合考察

断面寸法の大きい材を適切に乾燥し構造材としての信頼性を高めるため、高温セット処理材の寸法安定性と含水率の関係の把握、乾燥前の材含水率の簡便な区分方法の検討、材端部付近の内部割れ抑制法の検討に取組み、以下の結論を得た。

- 1) 高温セット処理した材は、全乾法含水率が約 15%（含水率指示値約 20%）まで低下すると寸法変化が小さくなり、寸法安定性がみられることが確認された。
- 2) 乾燥材品質管理用の含水率計を用い、製材の元口側 1 か所の測定値による選別の可能性が示唆された。区分精度は重量による区分と同等以上であった。
- 3) シリコン系シーリング剤による木ロシールは、材端部付近の含水率低下を抑え、材端部の内部割れ発生を抑制する確かな効果があることが確認された。^{3) 4)}

第5章 今後の課題

今回の研究結果を実際の現場で活用していくためには、特に下記内容についてさらなる検討が必要であると考えられる。

- 1) 乾燥材品質管理用の含水率計を用いた乾燥前選別においては、スギは初期含水率のばらつきが大きい樹種であるため、選別の境界となる閾値をさらに検討し、仕上がり含水率のばらつきを抑える必要がある。さらに、高含水率材については前処理などの乾燥方法の再検討が必要と考えられる。
また、含水率計を生産工程のどの位置に組込むかの検討も重要である。
- 2) 乾燥前選別において、元口側 1 か所の値を用いることが有効である可能性が明らかになったが、更なるデータ蓄積と検討が必要と考える。また、今回の供試材は心持ち材であり、心去り材の場合の測定箇所については、別途検討が必要である。

- 3) 木口シールによる材端部付近の内部割れの抑制効果が明らかになったが、現場においてシーリング剤を塗布する簡易な方法や塗布量の検討が必要である。

引用文献

- 1) 河崎弥生ほか：品確法に対応するための高品質乾燥材の生産技術の開発（Ⅱ）、岡山県農林水産総合センター森林研究所木材加工研究室 研究報告（2003）
- 2) 徳本守彦ほか：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 巻 4 号 p.370 - 375(2004)
- 3) 中村圭子ほか：スギ心持ち材における乾燥前選別及び材端部内部割れ対策の検討、日本木材加工技術協会第 39 回年次大会（旭川・オンライン）、p.54-55(2021)
- 4) 中村圭子ほか：誘電率型含水率計による水分管理簡略化の検討、第 72 回日本木材学会大会予稿集 E-15-P-10(2022)

謝辞 本試験の一部は熊本県木材協会連合会の支援により、「平角材の生産増を目的とした乾燥実証事業」を活用して行った。