

スギ心持ち正角材の高温乾燥における内部割れと その抑制に関する研究

A study of Internal Cracks in Sugi (*Cryptomeria Japonica* D.DON)
Boxed-heart Square Timbers caused by High Temperature Drying and
Development of the Drying Method reducing the Internal Cracks

植 原 平

2005

目 次

緒言

1. 研究の目的	1
2. 既往の研究	2
3. 研究の概要	4

第1章 予備実験によるスギ心持ち正角柱材の内部割れの検討

	6
1.1 概説	6
1.2 材料および実験方法	6
1.2.1 供試材料	6
1.2.2 乾燥機と操作の概要	6
1.2.3 乾燥後の内部割れの判定	7
1.2.4 乾燥スケジュール	8
1.3 結果と考察	9
1.4 要約	12

第2章 高温乾燥過程における開放ひずみによる内部応力の推定

2.1 概説	13
2.2 材料および実験方法	13
2.2.1 供試材料	13
2.2.2 実験方法	14
2.3 結果と考察	16
2.3.1 乾球温度120℃持続時間における開放ひずみと含水率	16
2.3.2 乾球温度120℃持続後の乾燥過程における開放ひずみと含水率	18

2.3.3	含水率と材温のモニタリングによる 内部割れ抑制乾燥方法の開発	20
2.4	要約	23
第3章 スギ正角柱材の高温乾燥における内部割れと内部ひずみ との関係		
3.1	概説	24
3.2	材料および実験方法	24
3.2.1	ひずみ測定用供試材	24
3.2.2	ひずみの計測方法	25
3.3	結果と考察	30
3.3.1	乾燥スケジュール	30
3.3.2	13.2cm角柱材の乾燥	32
3.3.3	11.5cm角柱材の乾燥	38
3.4	要約	44
第4章 スギ高温乾燥過程に発生する内部割れの抑制		
4.1	概説	45
4.2	材料および実験方法	45
4.2.1	ひずみ測定用供試材	45
4.2.2	乾燥スケジュール	45
4.3	結果と考察	46
4.3.1	内部ひずみの推移	46
4.3.2	ひずみ変化量の推移	48
4.3.3	ひずみ変化量と内部割れの推定	50
4.4	要約	52
第5章 内部割れ抑制乾燥法の開発		
5.1	概説	53

5.2	材料および実験方法	5 3
5.3	結果と考察	5 3
5.4	要約	5 5
総括		5 6
引用文献		6 0
謝辞		6 2
和文摘要		6 3
Summary		6 7

緒 言

1. 研究の目的

国産材需要が減少した要因の一つに、住宅構造用材に主として使用される柱材の乾燥材供給の遅れがあげられる。未乾燥のスギ、ヒノキ柱材（心持ち正角材）は近年、プレカットの急増、住宅構造仕様の変化などによって施工後に不具合を生ずる等の問題が出てきた。そして、品質確保促進法の制定により住宅の性能が厳しく求められ、背割りのない、寸法精度の高い乾燥材が要求されるようになった。特に、国産主要製材品であるスギ（国産材柱角生産量の約6割がスギである。）は乾燥材の生産が進まず、クレームや瑕疵保証を回避するため、住宅メーカー・工務店は集成材へ需要が転嫁し、在来軸組工法における柱角の集成材の使用割合は、平成13年度で50%に上る数字になっている¹⁾。

ところで、スギの乾燥で特に問題が発生するのは背割りのない心持ち柱材、平角のような断面が大きい構造用部材においてである。特にスギ材の背割りのない心持ち柱材の乾燥が難しいと言われてきた理由に、生材含水率の高さと乾燥割れの生じやすさが上げられる。すなわち、スギ材は他の針葉樹材に比べ格段に生材時の含水率が高く、その上バラツキが大きい。そのため、乾燥に長時間を要し全てを均一な乾燥材に仕上がるのが容易でない。また心持ち柱材は乾燥過程において、その形状から木材の持つ収縮の異方性により材面に必然的に割れが生じやすい。その上、乾燥コスト面でも製品の市場価格競争に合うコスト低減も要求されるなど、これらのスギ材乾燥の抱える問題を解決することが国産材の需要回復における急務となっている。そのため、スギ乾燥の抱える課題に取り組むべく、様々な乾燥方式により、乾燥機の性能向上、乾燥方法の改善が行われてきた。これを受けて、乾燥室数は年々増加の一途をたどり、一室あたりの生産規模も大きくなってきている。乾燥方式では、最近、5年間の針葉樹製材部門に限定すると、乾燥時間の短縮のため高温蒸気式乾燥が主流を占めていると報告されている²⁾。スギ心持ち柱材の乾燥において、蒸気式乾燥

機による 100℃以上の温度域を用いた高温乾燥法は、乾燥時間が短縮でき、しかも乾燥中に材面割れが発生しにくいなどの特長があり、近年、急速に普及してきている。一方で、高温乾燥の欠点として、内部割れが生じやすいことは良く知られている³⁾⁵⁾。内部割れが多く生じることにより、柱材の強度低下や、仕口・継ぎ手の接合不良、釘の保持力低下などが生じるなどの影響が懸念される⁶⁾。特に、内部割れの存在は、材面割れと違って外観では判断できないため、一層、不安を抱かせることになる。この現状では、高温乾燥した乾燥材が市場から後退を余儀なくされ、その結果、スギ柱材の需要が減少していくことになりかねないと危惧する。このような状況下において、高温乾燥による内部割れを防止する方法として、他の乾燥法を併用して仕上げる試みが有効であるという報告がある⁷⁾。しかしながら、針葉樹製材工場において高温蒸気式乾燥が主流を占めている現在²⁾、乾燥材生産現場の現状の設備を考えた場合、さらなる設備投資は現実的とはいえないため、スギ心持ち柱材の内部割れを抑制する高温乾燥法の確立が望まれている。このような状況下で、わが国の人工林蓄積面積の約 6 割を占め今後ますます生産量の拡大が予測されるスギの需要を確保する上から不可欠であると言われている。高温乾燥の内部割れの抑制が可能となれば、国産材の需要拡大に大きな飛躍が期待されものとする。

そこで本研究では、スギ心持ち正角材の高温乾燥における内部割れの発生メカニズムを解明することにより、内部割れを抑制する乾燥方法を開発することを目的とする。

2. 既往の研究

木材乾燥分野、特に人工乾燥においては、古くから家具、木工に使用された広葉樹の乾燥に比較して、建築用材、特に国産針葉樹の乾燥はその必要性が重要ではなかったことにより、歴史的にまだ日は浅く、その上、スギ柱材の高温乾燥となると、なおさら、近年に始まったばかりである。スギ柱材の高温乾燥に関しては、以下の研究がある。

三次、村口らは、スギ柱材の高温乾燥試験において、乾燥温度の違いによる乾燥速度について研究している。乾燥速度は乾球温度 115℃が 105℃の約 2 倍になり、高温による乾燥速度の促進効果が認められたが、115℃の乾燥条件では、多くの試験材に材面割れと内部割れが発生したと報告している。なお、材面割れの発生は乾燥スケジュールの組み立てにより、減少することができたと報告している⁸⁾。中畠らは、トドマツとスギ柱材の高温乾燥試験の結果、材面割れが少ない反面、内部割れの発生が多いと報告している⁹⁾。吉田らは、スギ柱材の高温乾燥で乾球温度 120℃、湿球温度 90℃一定のスケジュールを発表した。この報告では、高温低湿の乾燥条件で乾燥を行うことにより、材面割れは少なく、乾燥時間も 80 時間と短時間で、従来の一般的な 50℃～80℃の中温乾燥に比較して、5 分の 1 に乾燥時間を短縮できる乾燥方法が提案された¹⁰⁾。ただし、内部割れについては報告されていない。藤本は高温乾燥における表面割れが少ない理由について、スギ心持ち正角材での表層のドラインゲット機構について詳しく報告している¹¹⁾。

これらの研究では、高温乾燥における乾燥時間の短縮と材面割れの抑制効果に関する研究を報告している。一方、スギ心持ち柱材の高温乾燥における内部割れに関しては、以下のような研究がある。

植原は高温乾燥後の解放ひずみから内部応力を推定し、高温乾燥による内部割れを防止する乾燥スケジュールの改善に、中間コンデショニングをすることが、内部割れの低減に効果が認められたと報告している¹²⁾。さらに、植原はスギ柱材の高温乾燥による内部割れを効果的に抑制できる木材乾燥管理システム¹³⁻¹⁴⁾を開発している。これは乾燥中の柱材の内部に含水率計と熱電対を組み合わせ、中間層と中心の含水率と材温を計測し、その部分が繊維飽和点近くになると乾燥条件を制御して内部割れを抑制する乾燥方法である¹⁵⁻¹⁷⁾。中尾は乾燥スケジュールの理論解析によって、高温低湿乾燥条件のシュミレーションを行い、スギ心持ち柱材の内部応力の変化から内部割れを考察している¹⁸⁾。印出らは内部割れ防止のための新乾燥技術として、高温セッティング処理後の開放ひずみ

のひずみ分布と含水率分布から、初期高温セット時間の割れに及ぼす影響を報告している¹⁹⁾。徳本らは、高温セット処理後と、高温セット処理後に複数のスケジュールで人工乾燥した後のスギ柱材の内部応力分布をスライス法により測定し、その相違を検討している²⁰⁾。

以上のように、住宅構造用材としての品質向上に応えるべく、スギ心持ち柱材の高温乾燥について様々な研究がなされている。しかしながら、これら報告は、乾燥中に発生する内部割れに影響を与える木材の乾燥応力状態を直接測定したものではない。現在のところ、連続して高温乾燥中のスギ心持ち柱材の材内部のひずみ挙動と内部割れとの関連について観測された例はなく、技術の確立には乾燥中の発生メカニズムの解明が不可欠である。従って、内部割れを抑制する乾燥技術の確立には現在のところまだ至っていない。

3. 研究の概要

本研究では、スギ心持ち正角材の背割りなし柱材の高温乾燥における内部割れの発生を抑制する乾燥方法を検討した。

スギ心持ち柱材における内部割れの発生は柱材の材内部の乾燥収縮に伴い応力の均衡が保たれなくなった箇所を起こると考えられる。乾燥条件と発生応力との関連を検証し、発生メカニズムの解明を行うことにより、高温乾燥による内部割れを抑制する新乾燥技術を開発することを目的として研究を行った。

本研究で検討した内容を以下に示す。

第1章では、予備実験により、スギ柱材の高温乾燥による内部割れの実態を検討した。これにより、乾燥スケジュールの違いによる内部割れの発生状態から内部割れの発生因子を検討した。

第2章では、高温乾燥における乾燥過程の内部割れと応力との関連を検討した。応力の判断は、乾燥中のサンプルを乾燥機内から取り出して、開放ひずみをスライス法により測定した。そのひずみ分布と含水率分布から、測定時点における柱材の横断面の内部応力を推定し、内部割れの発生メカニズムを分析し

内部割れの抑制について検討した。これらの結果を応用した高温乾燥中の柱材の内部の含水率と材温をモニタリングして内部割れを抑制する乾燥方法を検討した。

第3章では、ひずみゲージを用いて、スギ柱材内部の横断面の対角線にひずみゲージを埋め込んで高温乾燥中のひずみを連続して測定し、その挙動と内部割れとの関連について観測した。そして、高温乾燥における内部割れのメカニズムを検討した。

第4章では、第3章の結果を受けて、ひずみゲージを用いて高温乾燥中の内部ひずみ変化を監視して内部割れを抑制することを検討した。ひずみ変化の分析結果、内部割れは、1時間あたりのひずみ変化量が大きい部分で発生しやすいことが明らかになった。

第5章では、スギ柱材の高温乾燥中の内部ひずみを、ひずみゲージを材に埋め込むことによって計測し、ひずみ変化速度を監視因子として、乾燥機内の乾球温度を制御することにより、内部割れを抑制する乾燥方法を試みた。

第1章 予備実験によるスギ心持ち正角柱材の内部割れの検討

1.1 概説

スギ心持ち正角材の背割りなし柱材（以下、柱材という）の高温乾燥は、乾燥が短時間であり、材面割れを抑制するのに有効であるが、内部割れが発生することが欠点である。高温乾燥は乾燥初期に乾球温度 120℃の乾燥条件により行うことが材面割れを抑制するのに有効であると報告されている¹⁰⁾。そこで、乾球温度 120℃の乾燥条件による高温乾燥を行い、乾燥後の内部割れを観察することにより、内部割れの抑制について検討した。

乾燥後の含水率は集成材のラミナ含水率規格である 15%以下に仕上げることにした。

1.2 材料および実験方法

1.2.1 供試材料

栃木県産で製材直後のスギ心持ち正角材の断面寸法 11.5cm×11.5cm、材長 300cm の無背割り柱材を試験体とした。

1.2.2 乾燥機と操作の概要

乾燥機仕様：高温使用 1F 型蒸気式乾燥機（新柴設備 SK-1F10LPH）

室内寸法 ： 1,400mmW×1950mmH×4,500mmL

容量本数 ： 11.5cm × 11.5 × 300cm = 70 本

： 13.2cm×13.2cm×300cm = 54 本

計測器 ： 測温装置は白金測温抵抗体

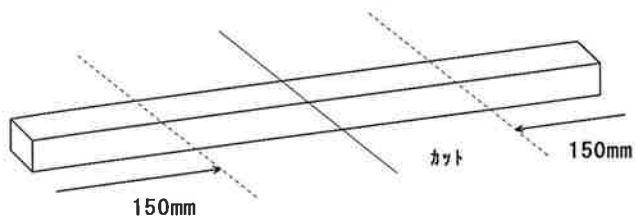
加熱装置 ： 蒸気式（ボイラー，三浦工業製 NR300XE 蒸発量 300kg/h）

燃料 ： 灯油

1. 2. 3 乾燥後の内部割れの判定

各実験による乾燥後の内部割れの判定を以下に示す²¹⁾。

柱材の長さ方向の中央断面を第 1-1 図，第 1-2 図のように垂直に鋸断した。



第 1-1 図 内部割れの観察部位



第 1-2 図 中央断面をカット

木口面の割れ度は次の基準に従って判定した（第 1-3 図）。

- ①なし : 木口面に割れがなし
- ②小 : 割れ面が最大幅 1mm×長さ 20mm 未満
- ③中 : 小以上で割れ面が最大幅 2mm×長さ 50mm 未満
- ④大 : 中以上



第 1-3 図 内部割れ度の判定

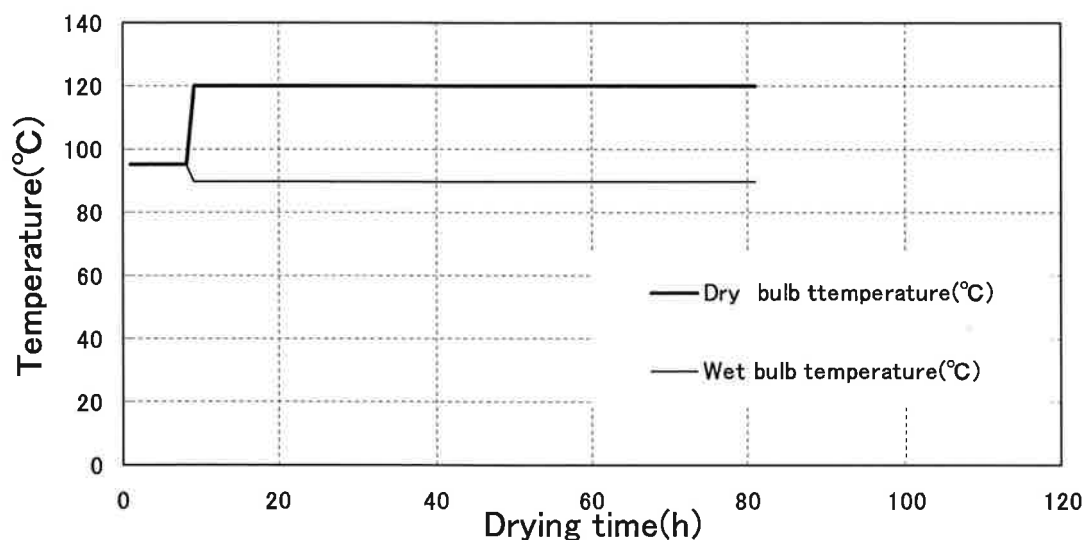
1. 2. 4 乾燥スケジュール

乾燥スケジュールは次のように行った。

実験 1：乾燥時間が短く，材面割れの抑制効果があると提案された乾燥スケジュールによって内部割れの実態を実験により確認する。スケジュールは初期蒸煮 9 時間，乾球温度 120℃ 湿球温度 90℃の乾燥条件は 72 時間持続であり，総乾燥時間は 81 時間である（第 1-4 図）。実験 2，3 は初期蒸煮 8 時間後，乾球温度 120℃持続時間の違いによる内部割れの発生を検討する。

実験 2：乾球温度 120℃の持続時間を実験 1 の約 1/2 の 37 時間とし，その後乾球温度を 110℃に温度を下げるスケジュールを検討する。乾燥時間は，被乾燥材の乾燥後の平均含水率を 15%に設定して乾燥を行う。含水率は材内に設置した含水率計の端子から乾燥中の経過をモニタリングする。

実験 3：乾球温度 120℃の持続時間を実験 1 の 1/4 の 18 時間とし，その後乾球温度を 107℃に下げるスケジュールを検討する。乾燥時間は実験 2 と同様に行う



第 1-4 図 実験 1：乾球温度 120℃持続時間 72 時間の乾燥。

1. 3 結果と考察

実験1のスケジュールの結果、材面割れは少なく良好であったが、全ての試験材の横断面に内部割れが観察された（第1-5図）。内部割れ度の小は、構造用材としての使用には問題ないと考えられるが、本実験において内部割れの大、中が多く発生しており、乾燥スケジュールの改善が必要とされた。

乾燥結果：初期平均含水率 86.1%

：乾燥後平均含水率 10.6%

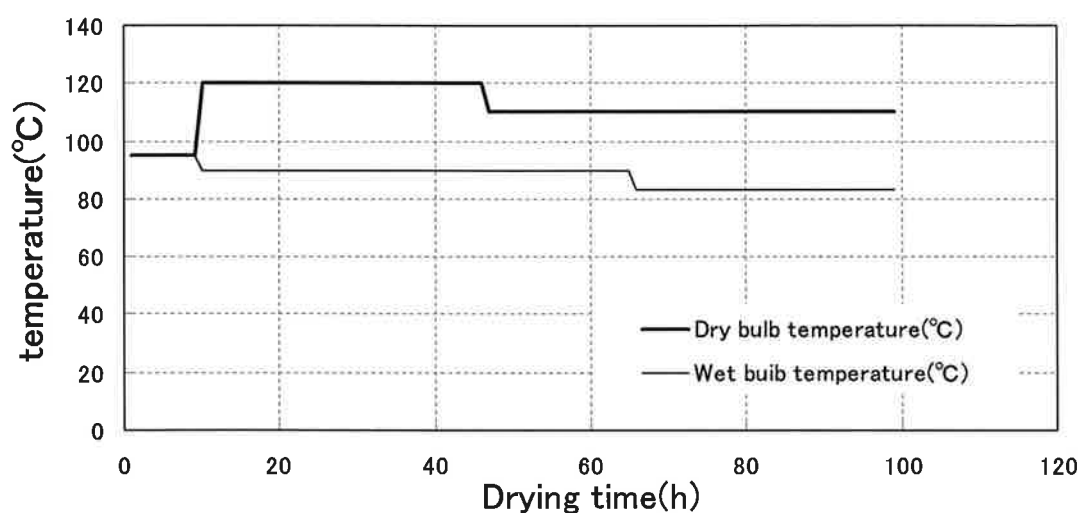
内部割れの発生率

なし	0%
小	33.3%
中	40.5%
大	26.2%



第1-5図 乾燥後、材長300cmの柱材の中央断面を切断した横断面に見られる内部割れ。

実験 2 は乾球温度 120℃持続を 37 時間後、乾球温度を 110℃に下げたことにより乾燥時間は 99 時間になった（第 1・6 図）。これは、乾球温度 120℃の持続時間を短くしたことが乾燥速度に影響したと考える。内部割れの発生率は実験 1 と比較して大，中が顕著に減り，内部割れの無い本数が 17.5%になったことにより，乾球温度 120℃の持続時間が内部割れの発生に関係していることが示唆された。



第 1・6 図 実験：2 乾球温度 120℃持続 37 時間後，110℃に温度を下げる。

乾燥結果：乾燥時間 99 時間

内部割れの発生率

初期平均含水率 107.6%

なし 17.5%

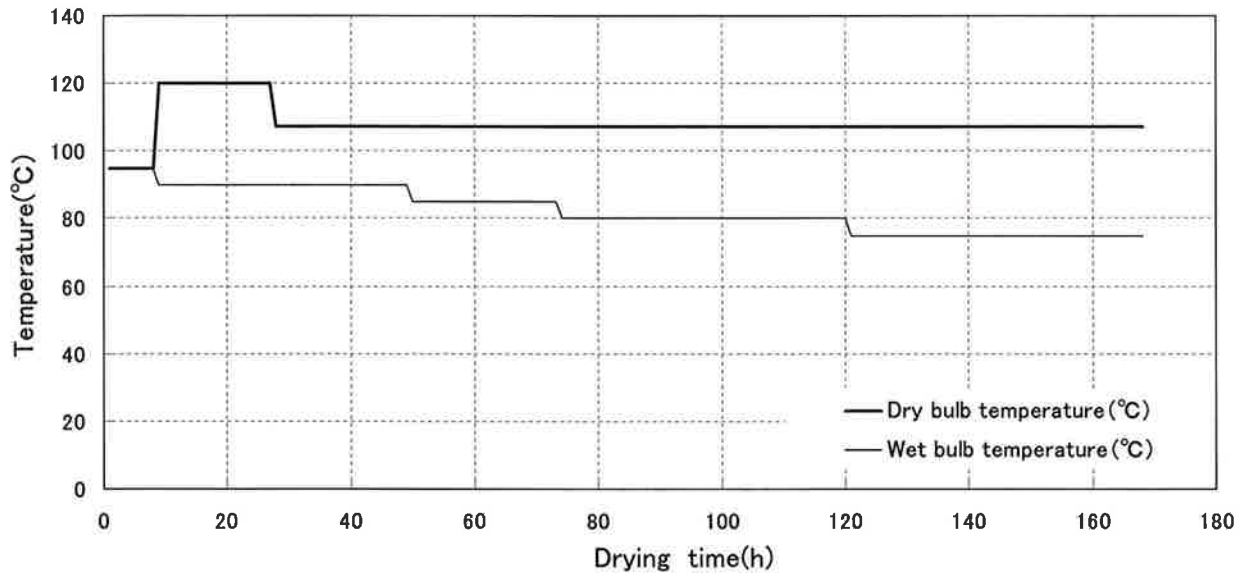
乾燥後平均含水率 17.1%

小 45.6%

中 21.1%

大 15.8%

実験 3 は、乾球温度 120℃ 持続 18 時間後、107℃ に温度を下げた(第 1-7 図)。
その結果、内部割れの無い本数が 58.1% になり、120℃ の持続時間が内部割れ
に関係していることが確認された。乾燥時間は 168 時間を要したことで問題が
あり検討を要する。



第 1-7 図 120℃，18 時間持続乾燥スケジュール

乾燥結果：

乾燥時間 168 時間

初期平均含水率 104.2%

乾燥後平均含水率 10.6%

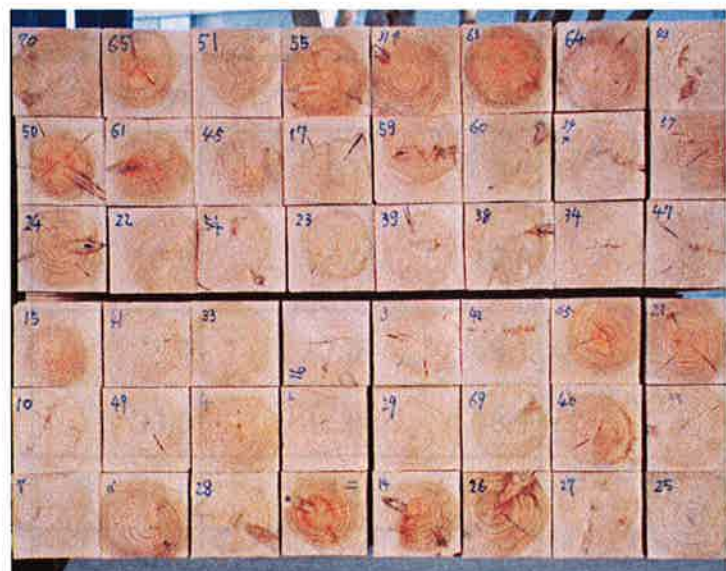
内部割れの発生率

なし 58.1%

小 16.1%

中 11.3%

大 14.5%



第 1-8 図 内部割れ発生状況

1. 4 要約

各実験結果の一覧を第 1-1 表に示す。高温乾燥による内部割れを，乾球温度 120℃の持続時間を比較することにより，その発生率を検討した。実験 1 は乾燥時間が短く，材面割れの防止に効果的であるとされる乾球温度 120℃で 72 時間持続の乾燥を行った。その結果，内部割れが全数に発生した。実験 2 は乾球温度 120℃の持続を 72 時間の約 1/2 の 37 時間と短くした。内部割れ低減効果が認められた。実験 3 では内部割れの低減を目的に 120℃の持続時間を更に実験 1 の 1/4 に短くした。内部割れの無い割合が 58.1%と著しく向上した。実験の結果，乾球温度 120℃の持続時間を短くすると内部割れは減少するが乾燥時間は長くなり，高温乾燥の特長である乾燥時間の短縮を考慮した乾燥方法の検討を要する。乾球温度 120℃持続 18 時間と 37 時間では，内部割れ度の中と大の発生率に大きな変化はなかった。これは，乾球温度 120℃持続時間以降における乾燥条件において，内部割れが発生する因子があるものと推察され，今後の研究課題とされる。

第 1-1 表 実験結果一覧

		実験1	実験2	実験3
乾燥時間		81	99	168
120℃持続時間		72	37	18
乾燥後 平均含水率(%)		10.6	17.1	10.6
内部 割 れ 率	なし	0	17.5	58.1
	小	33.3	45.6	16.1
	中	40.5	21.1	11.3
	(%) 大	26.2	15.8	14.5

第2章 高温乾燥過程における開放ひずみによる 内部応力の推定

2.1 概説

前章において、高温乾燥における内部割れを、乾球温度 120℃持続時間の比較により発生状態を確認した。内部割れを抑制するためには、内部割れの起因となる材内部の挙動を把握することにより、抑制するための検討が可能になると考える。

従来、広葉樹乾燥では新規樹種の乾燥スケジュールの作成や既存乾燥スケジュール管理に、乾燥中の応力を推定する手法として櫛形試験法、スライス法^{22・23)}やカップ法²⁴⁾などが用いられている。しかし、スギ心持ち正角柱材の高温乾燥においては、これらの手法による研究報告は少なく、乾球温度 120℃持続時間における表層のドラインゲットと乾燥後における内部応力の考察に関してのみである^{12,19,20)}。

そこで、本研究では乾燥過程における柱材の開放ひずみを測定し、乾燥中の内部応力の変化過程を推定することによって、高温乾燥による内部割れの抑制を検討する。

2.2 材料および実験方法

2.2.1 供試材料

栃木県産の製材直後のスギ心持ち正角材、断面寸法 11.5cm×11.5cm、材長 300cm の無背割り柱材の4本を、各柱材の中央部分から材長 120cm の材を採取してひずみ測定用試験体とした。試験体の両側を切断した2片から全乾法により生材含水率を求めた。生材含水率はサンプルAが91%、サンプルBは98%、サンプルCは98%、サンプルDは95%であった。乾燥機内には他の柱材70本を積み、試験体は乾燥機内から乾燥中に取り出し易いようにセットして乾燥した。

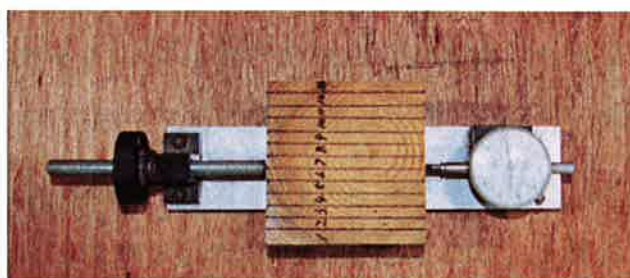
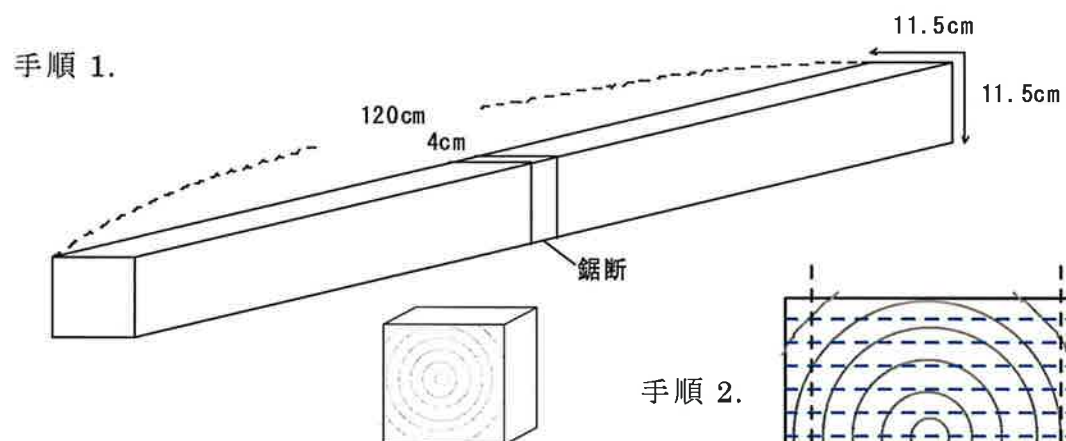
2. 2. 2 実験方法

ひずみ測定は、乾球温度 120℃ 持続時間における開放ひずみと乾球温度 120℃ 持続終了後の乾球温度 108℃ から 105℃ における開放ひずみを測定した。試験体は乾燥時間に応じて、乾燥機内から取り出して、第 2-1 図に示す手順にてひずみを測定した。開放ひずみ s (mm/mm) は次の式によって求めた。

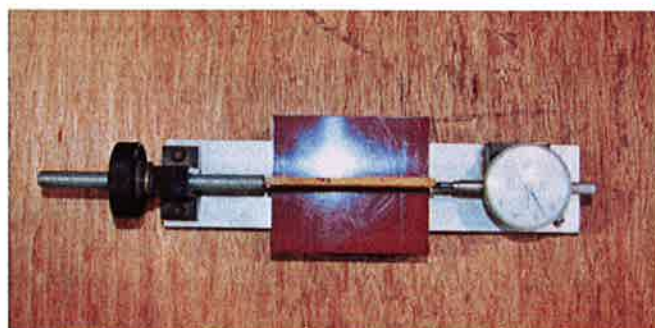
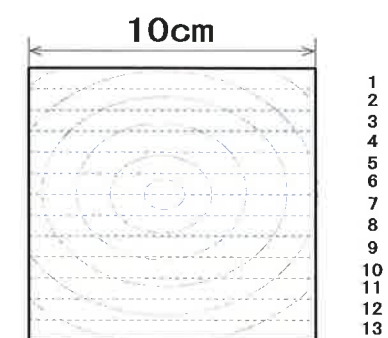
$$s = (l - l_0) / l_0 \quad (1)$$

ここで、 l_0 はスライス前の長さ (mm)、 l はスライス後の長さ (mm) である。

開放ひずみ s は各層にかかる応力を取り除いてその長さを測る。この時の長さがスライス前より収縮すればこの層は引張応力をうけて引張ひずみを生じていたことになり、膨張すれば圧縮応力をうけて圧縮ひずみを生じていたことになる²⁵⁾。ここでは負の値を引張ひずみ、正の値を圧縮ひずみとして表示はひずみ s を 10^{-3} とした。なお、寸法はマイクロゲージによって測定し、 $1/100\text{mm}$ 単位とした。

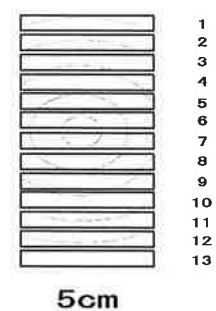


手順 3. マイクロメーターにより
スライス前に各等分の長さを測定



スライス巾は約 9mm

手順 4. スライス後に各スライスの長さを測定



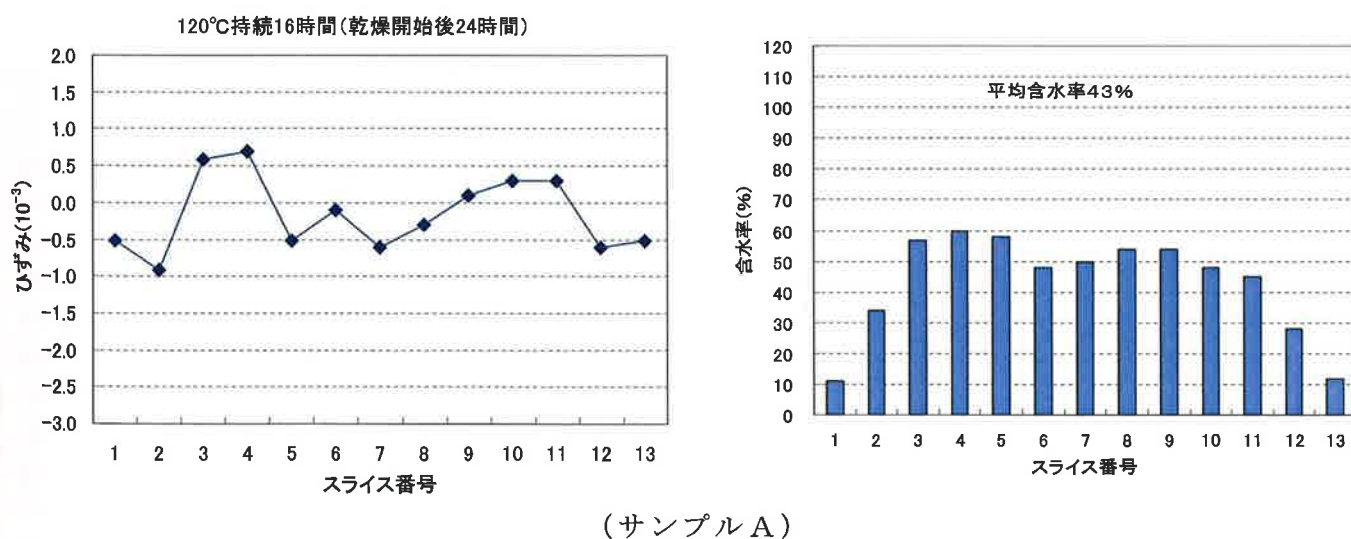
手順 5. 各スライスの含水率測定

第 2・1 図

2. 3 結果と考察

2. 3. 1 乾球温度 120℃持続時間における開放ひずみと含水率

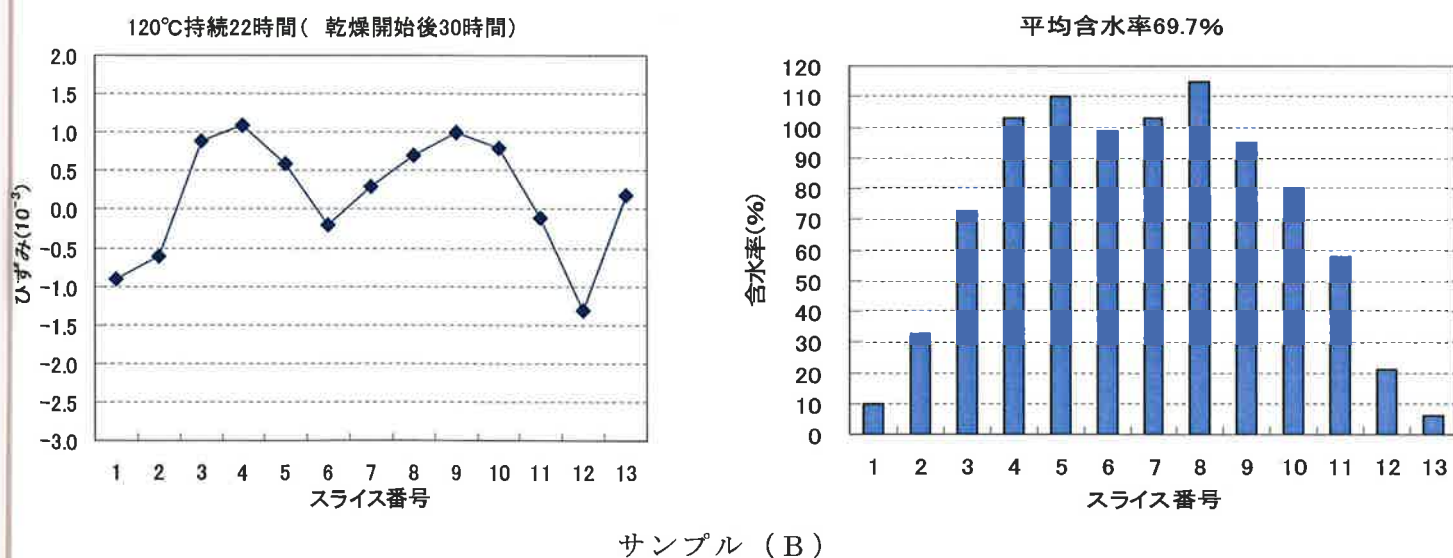
第 2・2 図の 11.5cm 角柱材の 120℃持続 16 時間、乾燥開始後 24 時間に乾燥機内から取り出し、スライス法により測定したサンプル A のひずみと含水率を示す。表層のスライス 1, 13 は負の値にはあるが正側へのひずみ変化を示している。2 層目のスライス 2, 12 は負の値の引張ひずみを示している。これは表層のスライス 1, 13 の収縮は完了して引張応力は小さくなり、圧縮応力に変化をし始めていることが推察される。スライス 2, 12 は収縮が始まり引張応力にあることがひずみ分布により推察される。この時点における含水率は表層 1, 13 が約 10%, 2 層目のスライス 2, 12 が繊維飽和点の約 30%であった。ひずみと含水率の分布から表層のスライス 1, 13 は引張応力から圧縮応力への転換をし始めていることが推測される。2 層目のスライス 2, 12 は収縮が始まっていることから、引張応力がこの層に移行していて、この時点において材面割れの発生が起こる可能性は低いといえる。



第 2・2 図 乾球温度 120℃持続 16 時間における開放ひずみと含水率

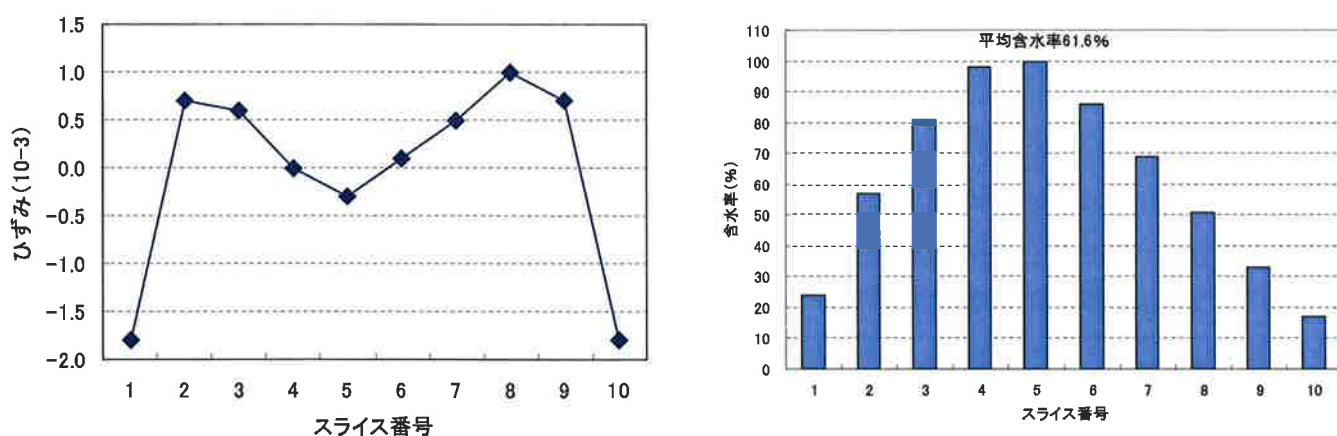
第 2・3 図は 120℃ 持続 22 時間、乾燥開始後 30 時間の時点におけるサンプル B の開放ひずみと含水率分布である。スライス 13 が正の値にあり圧縮ひずみを示し圧縮応力に転じている。2 層目のスライス 12 は -1.3×10^{-3} の引張ひずみを示し、収縮が進行して引張応力が大きくなっていることがひずみ分布から推測される。一方、スライス 1 は負の値にあるが、2 層目のスライス 2 がスライス 12 と同様に負の値にあり、スライス 1 は正側への変化をし始めた状態にあると考える。この時点における含水率はスライス 13, 12 が約 6%, 20% であり表層には圧縮応力、2 層目には引張応力が明らかであることを示しているといえる。スライス 1, 2 の含水率は約 10%, 30% であり、スライス 1 は引張応力から圧縮応力への変化をし始めていることが、ひずみと含水率の分布から推察される。よって、サンプル A と同様に、この時点において材面割れの発生の可能性は低いといえる。

これらのひずみと含水率分布との比較から、材面割れと内部割れにおけるひずみ変化と含水率は次のように考えられる。表層が正側の変化を示して引張応力から圧縮応力の逆転が起こり、2 層目の含水率が 30% 以下、ひずみは負の値を示し収縮が始まっている、つづいて、2 層目から 3 層目に乾燥による収縮が進行し、引張ひずみが増大するものと推察される。



第 2・3 図 乾球温度 120℃ 持続 22 時間における開放ひずみと含水率

第 2-4 図は乾球温度 60℃の中温乾燥におけるひずみを示す。高温乾燥と比較して、表層の負の値が大きいことに特徴がある。これは、表層に大きな引張応力があることが推測され、材面割れの起こりやすい状態にあると考えられる。一方、高温乾燥では、このような大きな表層のマイナスのひずみは示されていない。これは、高温乾燥に材面割れが少ないことを良く示しているといえる。

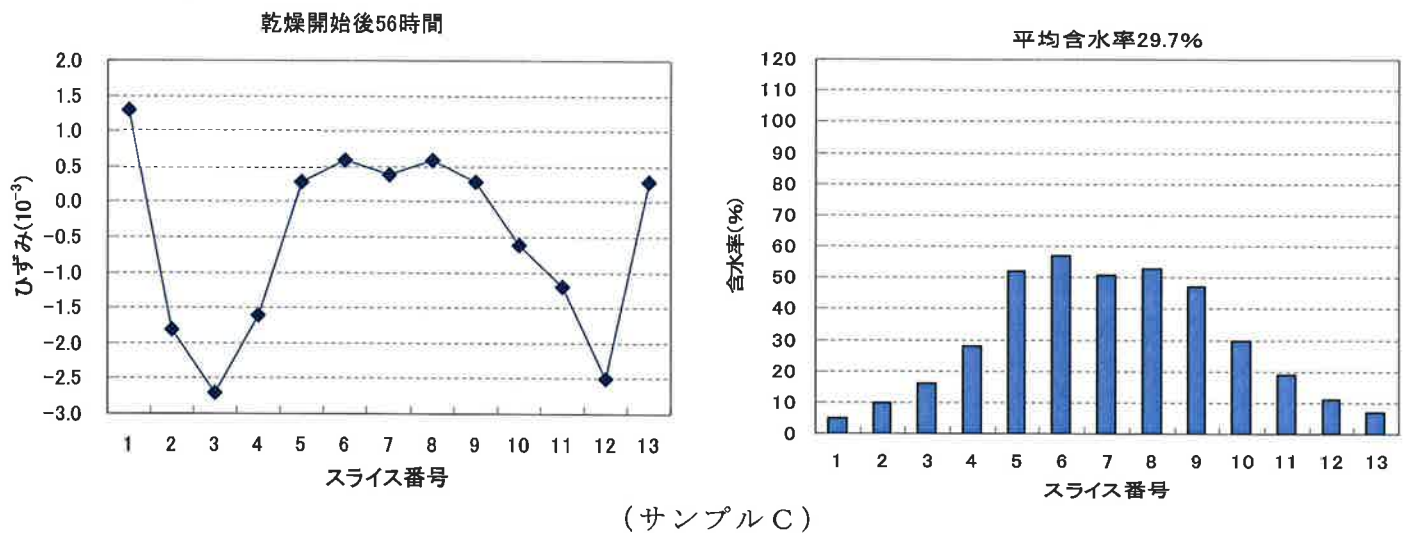


第 2-4 図 60℃中温乾燥におけるひずみ

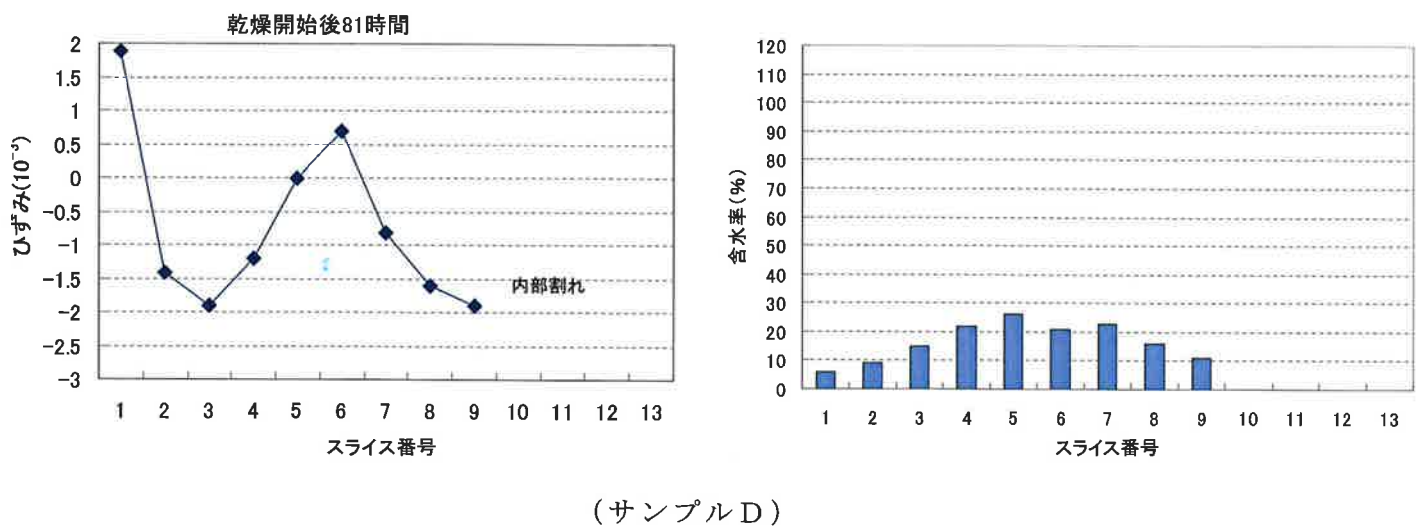
2. 3. 2 120℃持続後の乾燥過程における開放ひずみと含水率

乾燥開始後 56 時間の 11.5cm 角柱材のサンプル C のひずみ分布とその含水率分布を第 2-5 図に示す。スライス 3, 12 は約 -2.5×10^{-3} の大きな引張ひずみを示している。これは、この層の付近の収縮が増大したことにより大きな引張応力が生じていたものと推定される。特にスライス 1 は大きな正の圧縮ひずみを示して、表層は大きな圧縮応力になっていると考えられる。これは、スライス 3 に大きな引張応力が生じていたことに起因するものと推察される。スライス 3 付近は引張応力の増大により、内部割れの発生が起こりやすい状態にあるものと考えられる。第 2-6 図、乾燥開始後 81 時間内のサンプル D には内部割れが発生していた。スライス 1 が $+2.0 \times 10^{-3}$ の大きな圧縮ひずみを示し、スライス 3 は -2.0×10^{-3} の大きな引張ひずみである。内部割れのあったスライ

ス 11 付近は -2.0×10^{-3} より大きな引張ひずみであったと推察され、この付近に引張応力が増大したことにより内部割れが発生したものと考えられる。サンプル C，D の表層の圧縮ひずみと内層の引張ひずみとの絶対値約 $\pm 4.0 \times 10^{-3}$ が内部割れの発生の境界線があったものと考えられる。よって、内部割れを抑制するには 3 層目の約 20～30mm 層の引張応力が大きくならないように制御することがポイントであるといえる。



第 2・5 図 乾燥開始後 56 時間におけるひずみ分布と含水率分布

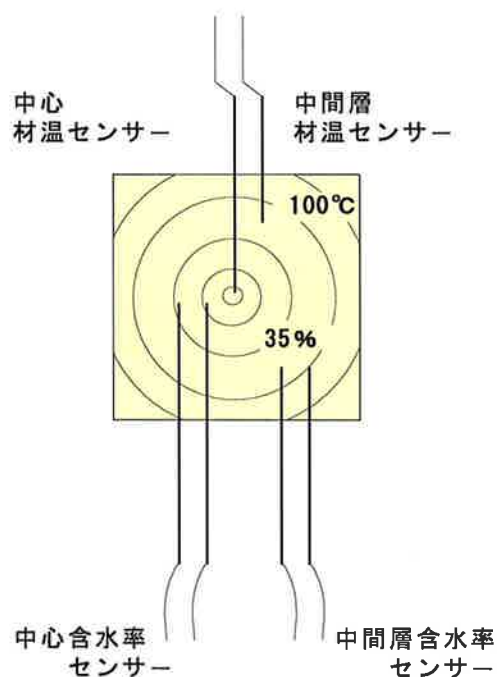


第 2・6 図 乾燥開始後 81 時間におけるひずみ分布と含水率分布

2. 3. 3 含水率と材温のモニタリングによる内部割れ抑制乾燥法の試み

高温乾燥過程における開放ひずみの測定により，3層目付近の引張ひずみが大きくなると内部割れが発生しやすいことが示唆された。これを踏まえて，内部割れを抑制する方法を，柱材の内部の含水率と材温を計測することによって，計測部の収縮を予測して，乾燥速度を制御することを試みた。ここで，含水率は乾燥による収縮を予測するために，材温は乾燥状態の管理に用いる。内部割れを抑制するには，収縮が始まる前に乾燥速度を遅くして，収縮の進行による引張応力が大きくなるように制御する必要がある。第1章より，乾球温度120℃持続時間を短くして乾球温度を下げたことが乾燥時間を長く要したと考えられる。よって，乾球温度を下げることにより乾燥速度を低下させることが可能と考え乾球温度の制御により行った。

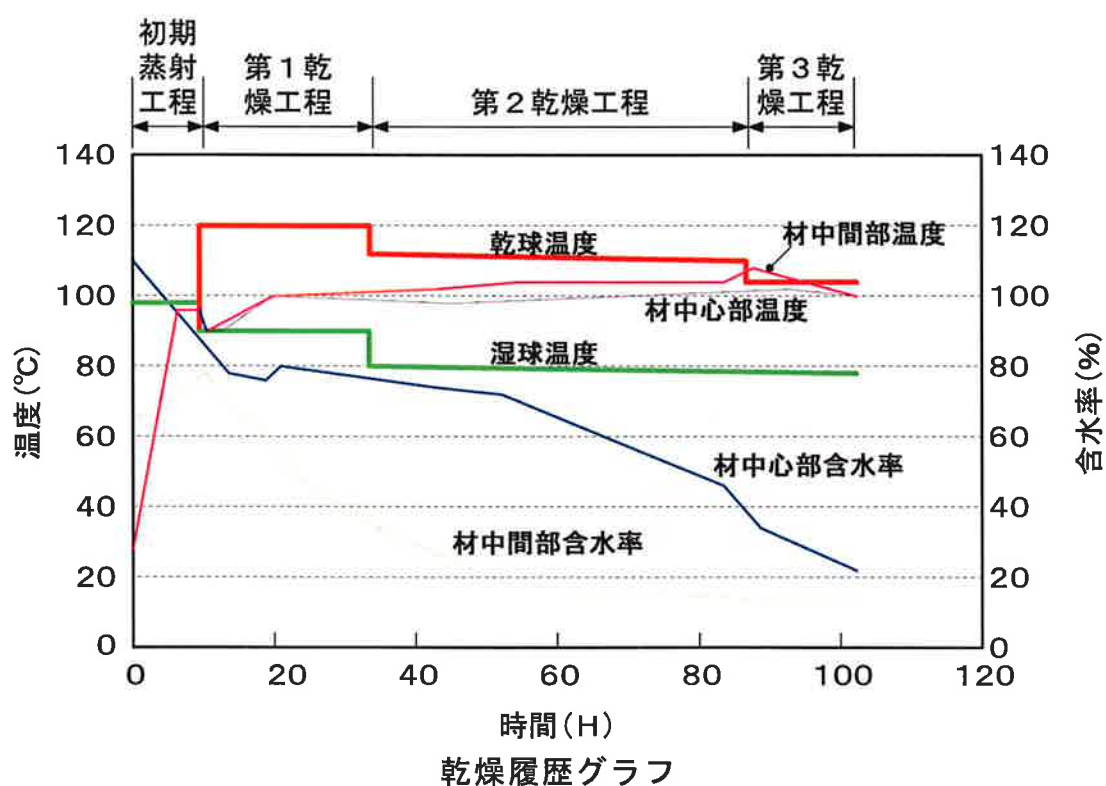
乾燥方法は，乾燥中の柱材内部に含水率計端子と熱電対を一組として，上記の3層目に相当する約26mmの深さに埋め込み乾燥状態をモニタリングする。他の一組は中心に埋めこみ，中心付近の乾燥状態と仕上がり含水率の決定をモニタリングする（第2・7図）。



第2・7図 センサー取り付け位置

含水率と材温をモニタリングして、スギ柱材を乾燥した履歴を第2-8図に示す

内部割れの抑制方法は、柱材の深さ約2.6cmの中間層の材温が100℃を超えて、含水率が35%に達した時点に、乾球温度120℃から110℃以下に下げて乾燥速度を遅くすることにより、乾燥による収縮を小さくする。これにより、内部割れの要因となる引張応力を緩和して内部割れを抑制することが可能となる。



第2-8図 含水率と材温のモニタリングによる内部割れ抑制乾燥方法

乾燥後の結果（第 2・9 図），第 1 章の実験 3 と比較して内部割れの発生率は内部割れ度の大の低減と乾燥時間の短縮に効果が認められた。

乾燥後の結果：

乾燥時間 102 時間

初期平均含水率 81.1%

乾燥平均含水率 13.7%

内部割れの発生率

なし 53.0%

小 27.0%

中 13.0%

大 7.0%



第 2・9 図 内部割れ抑制法による乾燥後の横断面

2. 4 要約

高温乾燥中のスギ柱材を乾燥機内から取り出して、乾燥過程における開放ひずみを測定した。

乾燥開始の蒸煮後、乾球温度 120℃の持続時間のひずみは、材面からの深さ約 1cm の層が含水率約 10%あたりで引張応力から圧縮応力への逆転が始まり、深さ約 2cm 層の収縮が進行する。この時点において、材面割れの発生は起こらない状態になると考えられる。つづいて、約 2cm 層の含水率が 20%になると、表層 1cm は正に転じて表層は圧縮応力になり、材面割れは完全に起こらなくなることが開放ひずみの測定より確認された。

内部割れの発生は以下のように考えられる。表層から内層へ順次乾燥が進み、11.5cm 角柱材では、材面からの深さ約 2cm から 3cm の層が収縮し始める。この時点で表層 1cm の層は圧縮応力状態になり既に乾燥は完了している。つづいて、乾燥が進み内層における接線方向の収縮が増大すると表層に圧縮応力が増大する。すなわち、内部割れは、乾燥による内層の接線方向の収縮と、大きな圧縮ひずみから示されるドラインゲットされた表層の拘束によって引張応力が増大することにより、内部割れが発生するものと考えられる。よって、内部割れを抑制するには、材面からの深さ 2cm から 3cm の層が収縮をし始めるころに乾燥速度を低下させ収縮の進行を制御する必要があると考える。つづいて、これらの知見により、内部割れを抑制する乾燥方法を試みた。

柱材の約 2.6cm 深さに含水率計の端子と材温の計測に熱電対を埋め込み、乾燥状態をモニタリングして、繊維飽和点を乾燥条件による制御ポイントとした内部割れを抑制する乾燥方法を検討した。その結果は、内部割れの低減に有効な乾燥方法であることが実証された^{13,14,26)}。

第 3 章 スギ正角柱材の高温乾燥における内部割れと内部ひずみとの関係

3. 1 概説

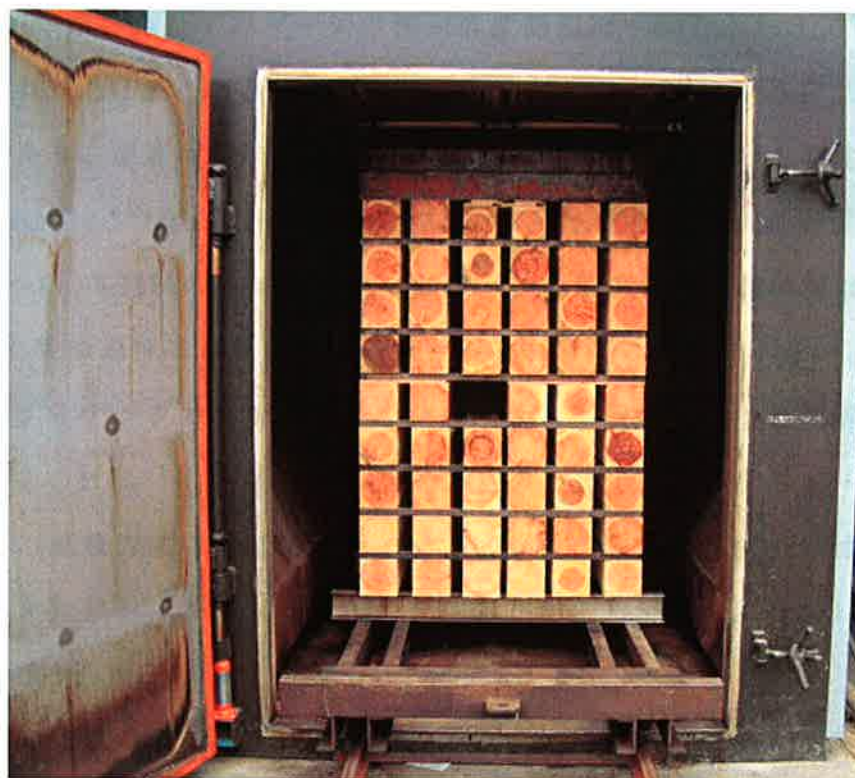
前章において、乾燥機内からサンプル材を取り出して、開放ひずみを測定した。この結果、測定時点における柱材の内部応力を推定することが可能であり、高温乾燥における乾燥過程の内部応力の変化過程の概要を把握することができた。さらに、内部割れを抑制するためには、乾燥中の材内部における乾燥応力を的確かつ迅速に、しかも連続的に推定して制御することが必要である。高温乾燥中の内部割れは、乾燥による接線方向の収縮と、ドラインゲットされた表層の拘束による引張応力によって起こると考えられるが¹¹⁾、材内部のひずみ挙動と内部割れとの関連について観測された例はない。そこで、本研究では高温乾燥中のスギ心持ち正角材の材内部の挙動を連続的に計測する手段として、試験体内部にひずみゲージを設置した。ひずみゲージをスギ心持ち正角無背割り材内部に埋め込み、高温乾燥過程での内部ひずみを連続して計測し、乾燥後に観察された内部割れとの関連について検討する。

3. 2 材料および実験方法

3. 2. 1 ひずみ測定用供試材

製材直後の栃木県産スギ心持ち正角材を試験体として用いた。1 回目の実験は断面寸法 13.2cm×13.2cm、材長 300cm の無背割り柱材 1 本を被乾燥材とした。柱材の中央部分から材長 120cm の材を採取してひずみ測定用試験体とした。試験体の両側を切断した 2 片から全乾法により生材含水率は 85%であった。乾燥機内には他の柱材 52 本を栈積みして、栈積み内の中央部にひずみ測定用試験体を差し入れて乾燥した（第 3 -1 図）。また、2 回目の断面寸法 11.5cm×11.5cm、材長 300cm の無背割り 1 本の柱材についても、同様の実験を行った。生材含水率は 98%であった。乾燥機内には他の柱材 57 本を栈積みして、1 回

目と同様に乾燥を行った。乾燥機は高温仕様 IF 型蒸気式乾燥機（新柴設備製 SK-IF10LHP）を用いた。



第 3・1 図 乾燥機内搬入後状況（新柴設備製 SK-IF10LHP）

3. 2. 2 ひずみの計測方法

ひずみ測定用試験体の木口から 30cm の材内部の 4 ヶ所にひずみゲージを埋め込んだ。第 3・2 図に示すように供試材横断面对角線の $1/4$ に当たる位置で、接線方向のひずみが計測できるように 4 本のひずみゲージ a, b, c, d をそれぞれセットした。ひずみゲージを設置する手順は、各側面中央より斜め 45 度にドリルで 2.5mm の埋め込み孔を隣接の側面中央に向けて貫通させた（第 3・3 図）。次に埋め込み用のひずみゲージ（共和電業製, KFG-3・120・C20・11）を孔に挿入（第 3・4, 5 図）し、ゲージが孔の中央にくるようにセットしリード線を出しておきながら、孔の入口からゲージ固定用エポキシ樹脂接着剤（共和電

業製,EP-34B)を計測孔全体に注入して充填密封した。以降は耐熱リード線に接続し、耐熱リード線を1ゲージ3線法でデータロガー(東京測器製,THS-1100)に接続し、乾燥中のひずみを計測した(第3-6図)。

なお、本報に用いたひずみゲージの使用温度範囲は -55°C から 150°C である。ゲージ型式は 20°C を基準として $\pm 1.8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 以内を満足する自己温度補償型ゲージであり、温度補償範囲は 10°C から 100°C である。実用上の性能検査の結果、 $\pm 1.8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ の上下限温度を100%満足する自己温度補償の上限は 115°C であった。本実験の木材乾燥時における計測部の材内最高温度は 107°C であり、しかも乾燥過程における 100°C 以上の材内温度の変化は小さい。従って、本実験のひずみデータは本計測目的を評価できる範囲内であると判断できる。

乾燥終了後、材温が約 30°C において乾燥機外へ出して、ひずみゲージ計測部の横断面を、繊維方向に垂直に鋸断した。切断後、各ひずみゲージ付近における内部割れを観察し、計測部の横断面を撮影したのち、同時に計測したひずみとの関係を検討した。

また、乾燥経過のモニタリングとして、試験体のひずみ計測点から長さ方向10cm離れた位置に電気抵抗式含水率計の端子と熱電対を埋め込み、含水率と材温を計測した^{13,14,26)}。

なお、ひずみゲージを用いた計測値は、ここでは、ひずみゲージの伸縮を表し、元の長さから膨張すれば、正の値を引張ひずみとし、元の長さから収縮すれば、負の値を圧縮ひずみまたは乾燥による収縮ひずみと定義する。



第 3・3 図 側面中央より斜め 45 度にドリルで 2.5mm の埋め込み孔を隣接の側面中央に向けて貫通させた



第 3・4 図 埋め込み用のひずみゲージ(共和電業製,KFG・3・120・C20・11)



第 3・ 5 図 ゲージが孔の中央にくるようにセットしリード線を出しておきながら，孔の入口からゲージ固定用エポキシ樹脂接着剤(共和電業製,EP-34B)を計測孔全体に注入して充填密封した。

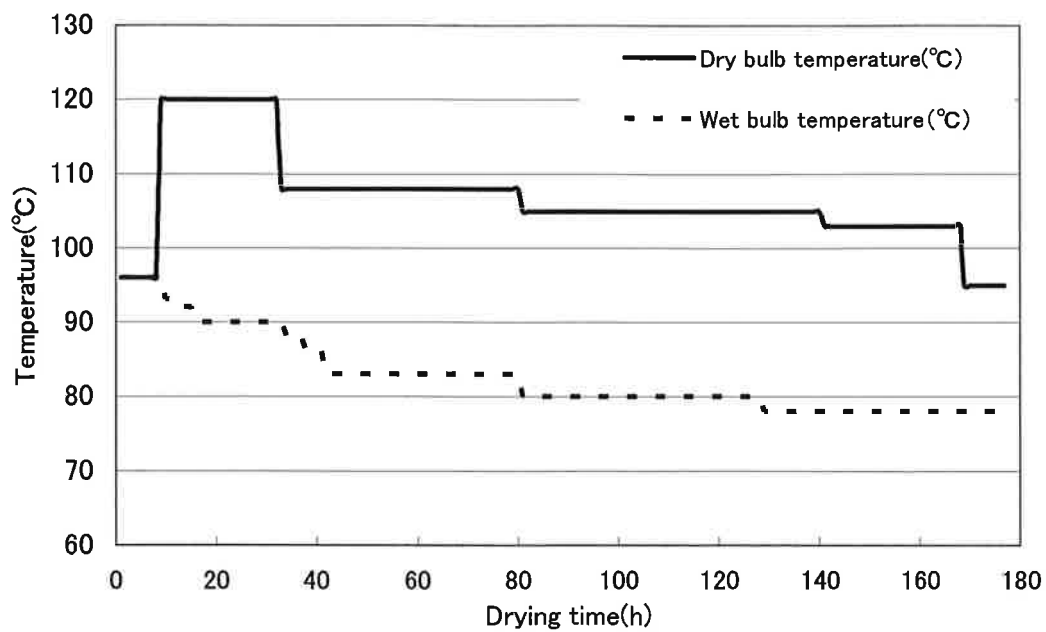


第 3・ 6 図 ひずみゲージを埋め込んだ試験体を他の被乾燥材の中に差し入れリード線をデータロガーに接続して乾燥中のひずみを連続して計測

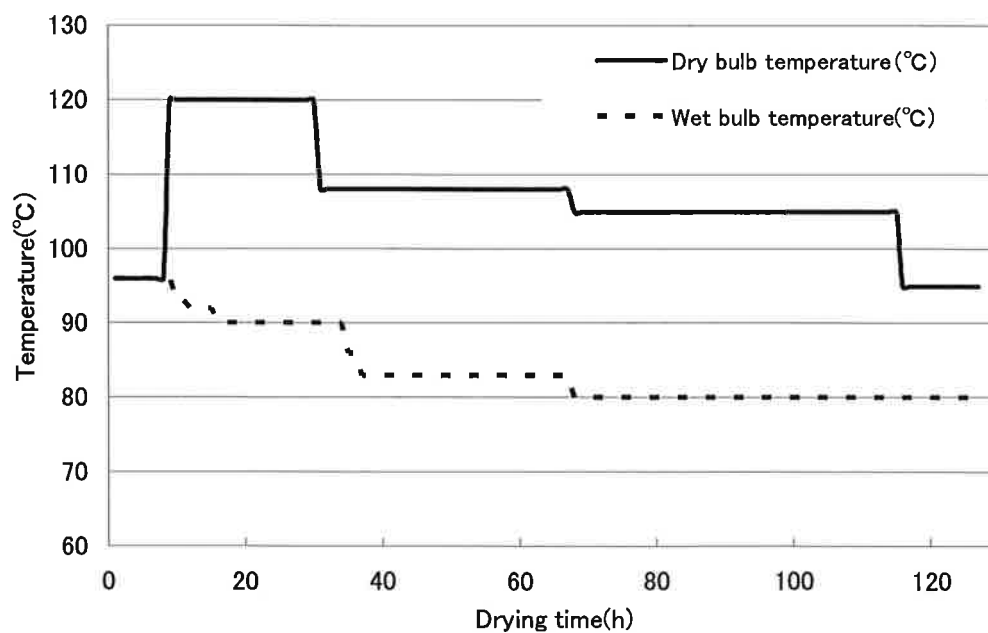
3.3 結果と考察

3.3.1 乾燥スケジュール

今回行った高温乾燥では、まず、96℃で蒸煮し、その後、表面割れ抑制を目的として、乾球温度 120℃、湿球温度 90℃で 20 時間以上乾燥し、以降は、内部割れの発生を抑制するために、乾球温度を 108℃から 105℃へと段階的に下げ、乾湿球温度差を 25℃とした。13.2cm 角の柱材と 11.5cm 角の柱材を乾燥したときの乾燥スケジュールをそれぞれ第 3 - 7, 8 図に示す。13.2cm 角柱材の乾燥においては、蒸煮後、乾球温度 120℃で 24 時間乾燥させたのに対し、11.5cm 角柱材においては、22 時間とした。この時間において、乾燥経過のモニタリングとして、表面から約 2.8cm の深さにセットした含水率計は 30%以下、熱電対は約 103℃を示しており、繊維飽和点以下となっていた^{13・14,26)}。この段階で、表層は圧縮応力に転じていると推定され、柱材の表層は、割れを生じさせることなく、乾燥されていた^{11,27)}。その後は、段階的に乾球温度を下げ、13.2cm 角柱材では乾燥開始後約 180 時間、11.5cm 角柱材では約 130 時間で含水率計は目標含水率の 15%に達したので乾燥を終了させた。乾燥終了後、ひずみ計測部近くからサンプルを採取して、全乾法により含水率を算出した。13.2cm 角柱材は 10%、11.5cm 角柱材は 16%であった。



第 3・7 図 スギ 13.2cm 角柱材の乾燥スケジュール

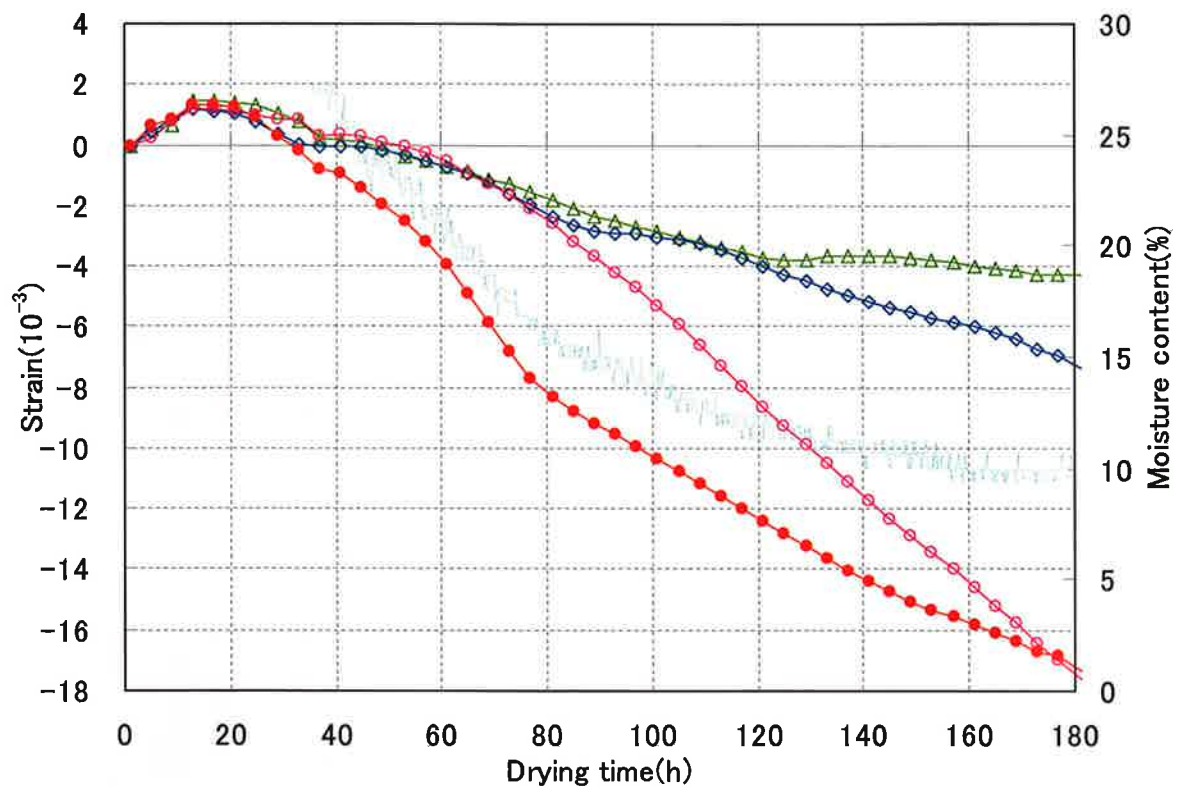


第 3・8 図 スギ 11.5cm 角柱材の乾燥スケジュール

3. 3. 2 13.2cm 角柱材の乾燥

13.2cm 角柱材の乾燥時における内部ひずみの時間変化を第 3・9 図に示す。測定された 4 箇所 of のいずれも、乾燥開始後約 30 時間までは、正の引張ひずみを観測した。引張ひずみは 13 時間前後でピークを示し、その後、減少し、負の値へとなくなっていった。これは、乾燥開始から蒸煮を 8 時間行ったことによる熱膨張や内部の蒸気圧の上昇等により、接線方向が膨潤したことによるものと考えられる²⁸⁾。乾燥開始後約 20 時間から全てのゲージは圧縮側を示しており、この時点において、各ゲージ付近では、乾燥による収縮が始まっていることを示している。これは、材内部の接線方向の収縮とドラインセットされた表層の拘束による引張応力も受けていると考えられる。乾燥開始後約 30 時間以降、ゲージ 1d のみが、大きな収縮を示し始めた。これは、ひずみゲージ 1d 付近において、内部割れが発生して、内層の引張応力から一部開放されたことによるものと推察される²⁷⁾。つづいて乾燥開始後約 80 時間以降、ゲージ 1c が、収縮が大きくなっている。乾燥開始後約 120 時間において、ゲージ 1b が、収縮の進行を示す。これらも、引張応力の増大により、内部割れが発生したことによるものと考えられる。各ゲージに内部割れの発生が推察された時間以降において、収縮の増大が乾燥終了まで続いた。高温乾燥において発生する内部割れは、乾燥による収縮と、ドラインセットされた表層の拘束による引張応力によって引き起こされると考えられるが、割れの発生により、内部の乾燥収縮が進行することが示されたといえる。

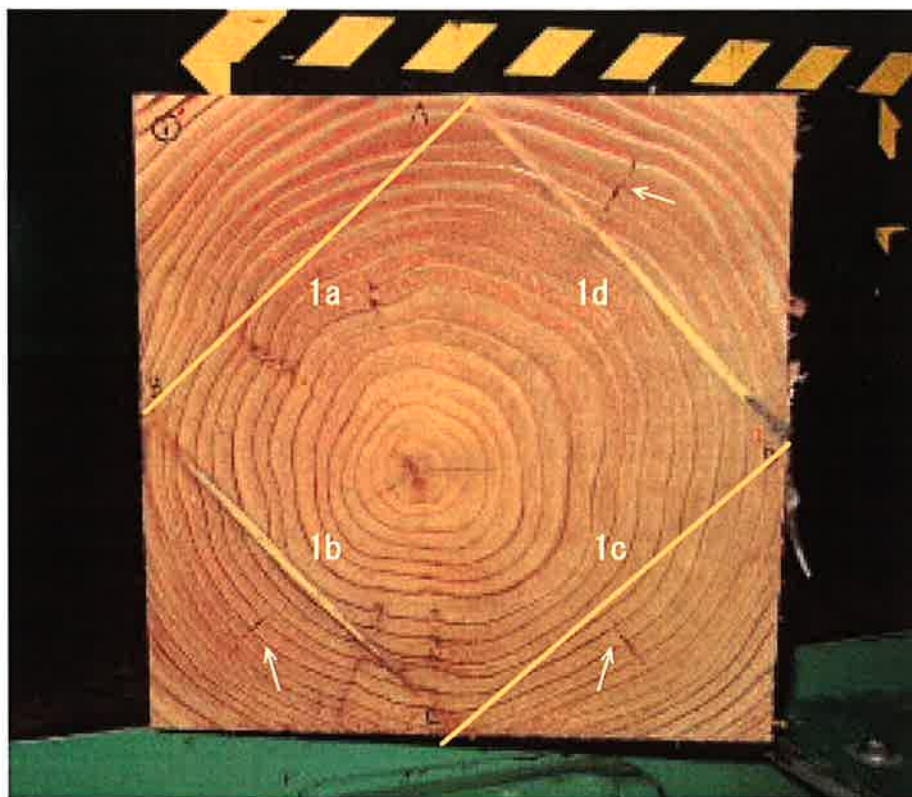
一方、乾燥時間内に、ゲージ 1a は、急激な収縮を示さなかった。ゲージ 1a 付近において内部割れが発生しなかったものと考えられる。



第 3 - 9 図 スギ 13.2cm 角柱材の横断面における乾燥中のひずみ変化

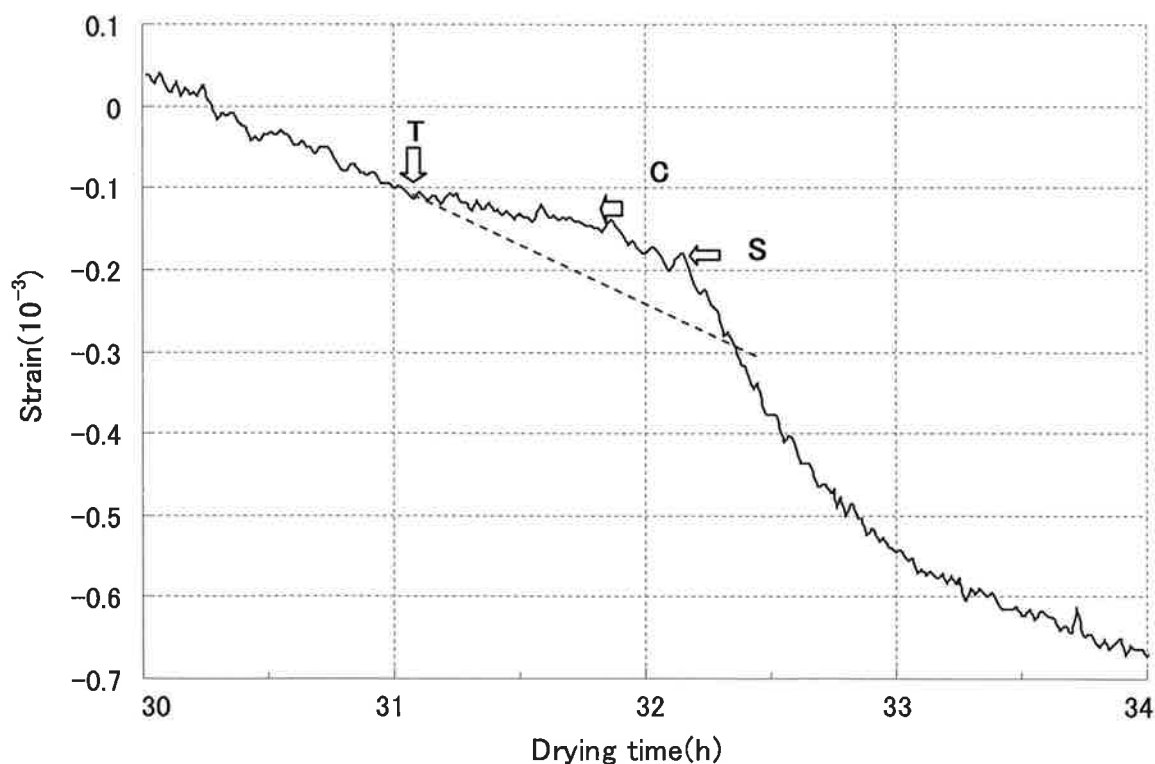
—△ : ゲージ 1a, —◇ : ゲージ 1b, —○ : ゲージ 1c, —● : ゲージ 1d.
 — 含水率

13.2cm 角の乾燥後にゲージ計測部を切断した横断面の状態を第 3・10 図に示す。ゲージ b, c, d 付近に、放射状の割れが認められた。一方、明確な収縮ひずみを示さなかったゲージ 1a の近傍には内部割れは認められなかった。以上の結果は、第 3・9 図における内部ひずみの時間変化の結果とよく対応しているといえる。内部割れは、いずれも、やや表層側の横断面の対角線付近に発生していた。



第 3・10 図 スギ 13.2cm 角柱材の乾燥後に切断した試験体の横断面

内部割れは引張応力の増大により発生するものと考えられ、各ゲージにおいて内部割れの推定発生時間におけるひずみの変化過程を詳細に検証した。ゲージ 1d は第 3-11 図に示すように、乾燥による収縮が進行する過程において、乾燥開始後約 31 時間に収縮速度の低下傾向を示している。これは、この時点において、ゲージ 1d 付近に引張応力が増大したことにより、収縮の進行が抑えられたものと考えられる。つづいて、乾燥開始後約 32 時間に収縮が大きくなっている。これは、31 時間後の引張応力の増大により、32 時間前後に内部割れが発生し、引張応力から一部開放され、収縮が大きくなったものと考えられる。



第 3-11 図 ゲージ 1d のひずみ変化

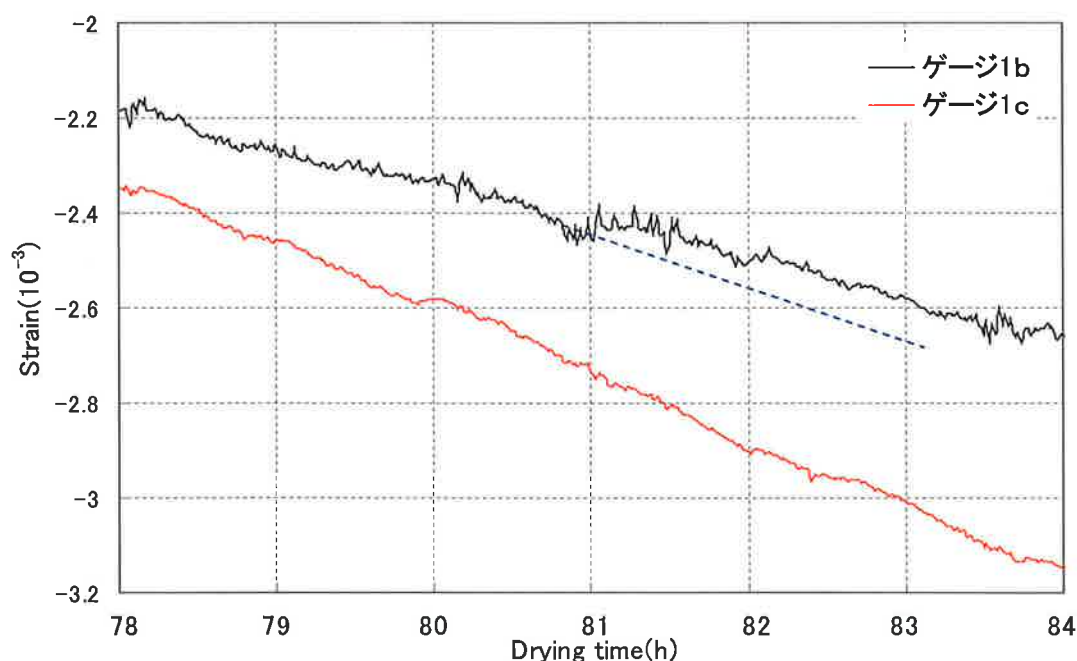
T : 収縮ひずみの進行速度の低下

C : 内部割れの発生

S : 収縮の増大

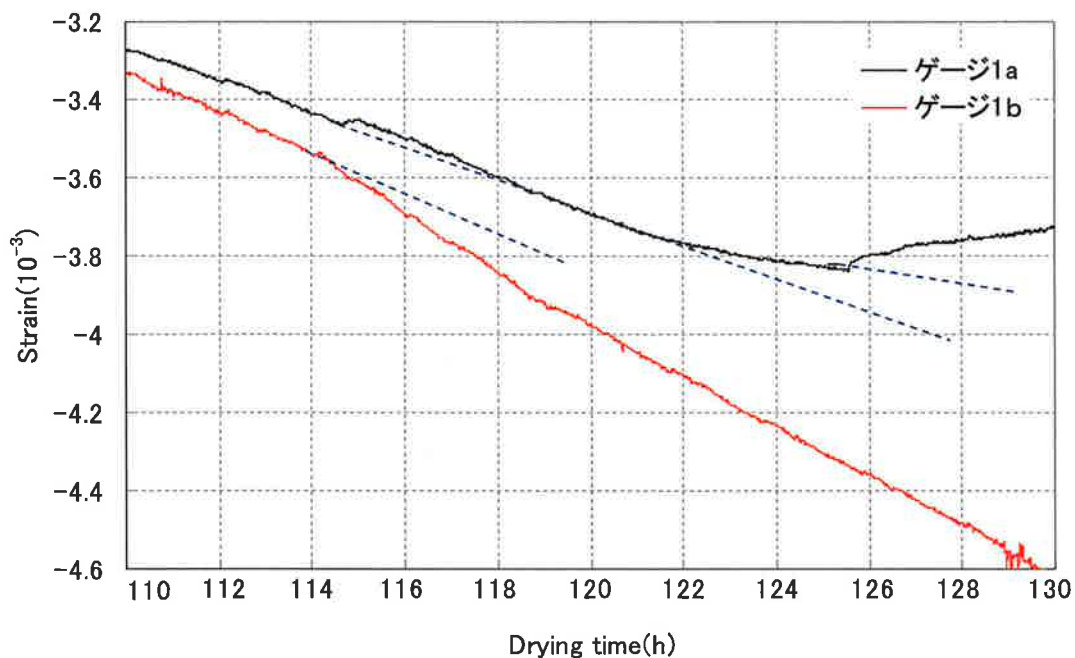
----- : 傾向線

ゲージ 1c は乾燥開始後約 80 時間において、収縮ひずみの増大を示し内部割れの発生が推定される。第 3-12 図，ゲージ 1c は乾燥開始後約 80 時間において僅かに引張側へのひずみ変化後，すぐに変化前と同様に収縮が進行している。一方，隣接のゲージ 1b は乾燥開始後 81 時間に引張側への変化後，収縮の鈍化傾向を示している。これらは，ゲージ 1b とゲージ 1c の 81 時間以降の収縮ひずみの変化の違いを明らかに示している。これは，ゲージ 1c に 80 時間に内部割れの発生が推察され，大きな引張応力を受けることなく収縮は進行し，隣接のゲージ 1b は 81 時間以降に引張応力が増大してきたことで収縮が鈍化したものと考えられる。



第 3-12 図 ゲージ 1c とゲージ 1b のひずみ変化との関係

ゲージ 1b は、81 時間以降、引張応力を受けながら乾燥収縮が進行していると推察される。第 3・13 図、ゲージ 1b は乾燥開始後約 114 時間に収縮の増大を示している。隣接のゲージ 1a は 115 時間以降において断続的な引張側へのひずみ変化を示している。これは、ゲージ 1b の 114 時間の内部割れによる収縮の増大により、隣接のゲージ 1a 付近の引張応力が大きくなり、収縮ひずみの進行が低下したことを示しているものと考ええる。

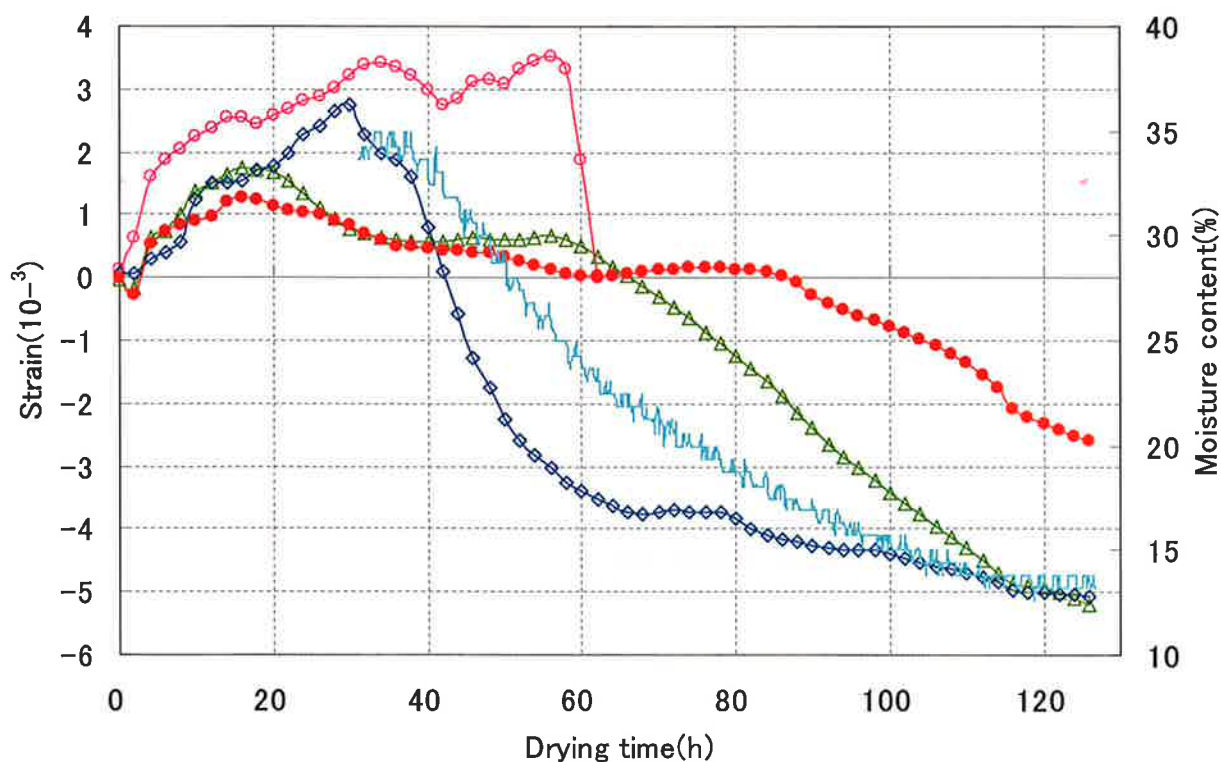


第 3・13 図 ゲージ 1b とゲージ 1a のひずみ変化との関係

これらは、ゲージ 1c、1b の収縮の増大で示される内部割れが発生したことによる、隣接のゲージ付近が引張されことを示しているものと考ええる。これは、年輪の接線方向の各ゲージ付近は引張されながら乾燥収縮することにより、引張応力が増大し、内部割れが発生しやすい状態になるものと考えられる。

3. 3. 3 11.5cm 角柱材の乾燥

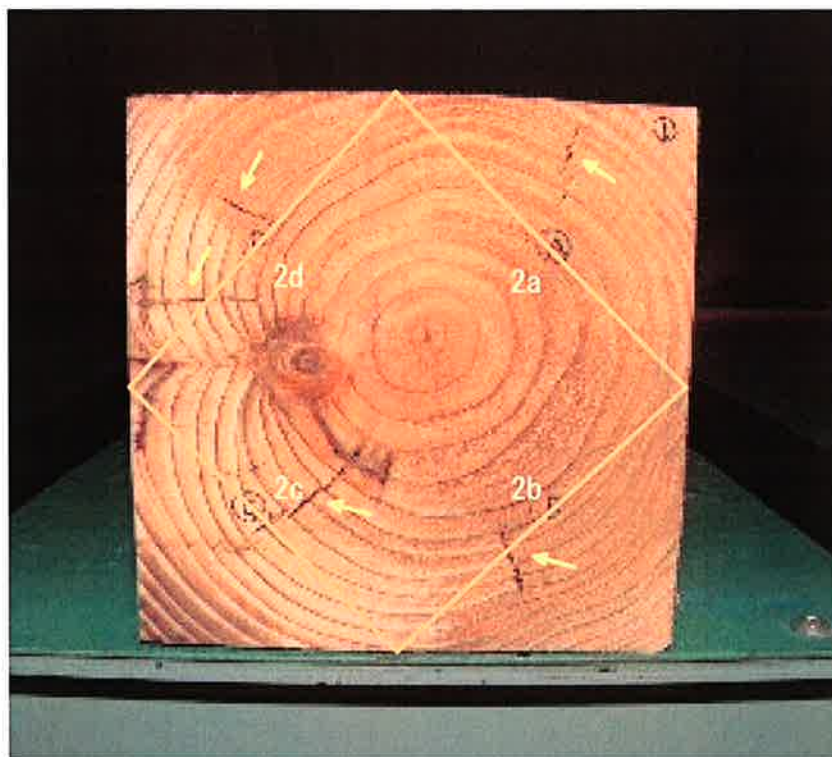
11.5cm 角柱材の乾燥時における内部ひずみの時間変化を第 3-14 図に示す。測定された 4 箇所のいずれも、13.2cm 角柱材の場合と同様、乾燥開始後、正の引張ひずみを観測した。乾燥開始後約 30 時間において、ゲージ 2b が、急激に大きな圧縮側のひずみ変化を示し始めた。つづいて乾燥開始後約 60 時間においてゲージ 2a が、乾燥開始後約 90 時間においてゲージ 2d が、同様に大きな収縮を示した。これらも、引張応力の増大により、内部割れが発生したことを示すものと考えられる。ゲージ 2c は乾燥開始後約 56 時間の引張ひずみのピークから急激に圧縮側に変化して、約 5 時間後の 61 時間に断線した。



第 3-14 図 スギ 11.5cm 角柱材の横断面における乾燥中のひずみ変化

—△— : ゲージ 2a, —◇— : ゲージ 2b, —○— : ゲージ 2c, —●— : ゲージ 2d,
— : 含水率

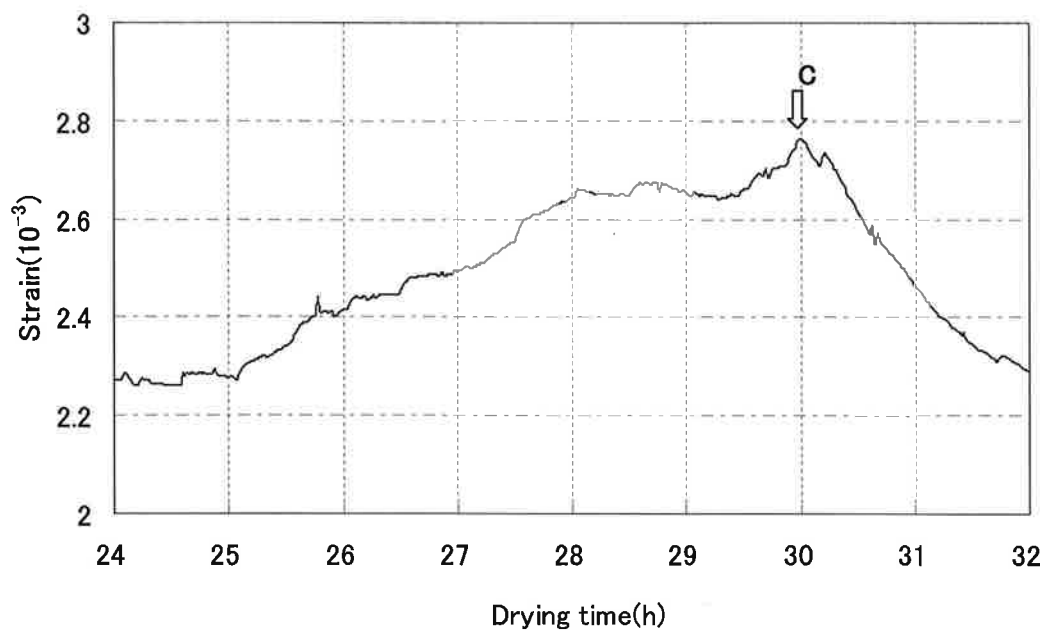
11.5cm 角柱材の乾燥後にひずみゲージ計測部を切断した横断面の状態を第 3-15 図に示す。全てのひずみゲージ近傍に内部割れが認められた。第 3-10 図および第 3-15 図の横断面に認められる内部割れは、ゲージ 2c 付近はやや中心よりにあるのを除くと、心持ち正角材横断面の表層に近い対角線付近において、放射状に発生していることに特徴が見られた。この部分に大きな引張応力が発生していたと考えられる。ゲージ 2c は計測部に内部割れが認められる。これは、内部割れによりゲージ 2c が断線した原因と考えられる。



第 3-15 図 スギ 11.5cm 角柱材の乾燥後に切断した試験体の横断面

13.2cm 角柱材と同様に，内部割れの推定発生時間における各ひずみゲージのひずみ変化過程を詳細に検討する。

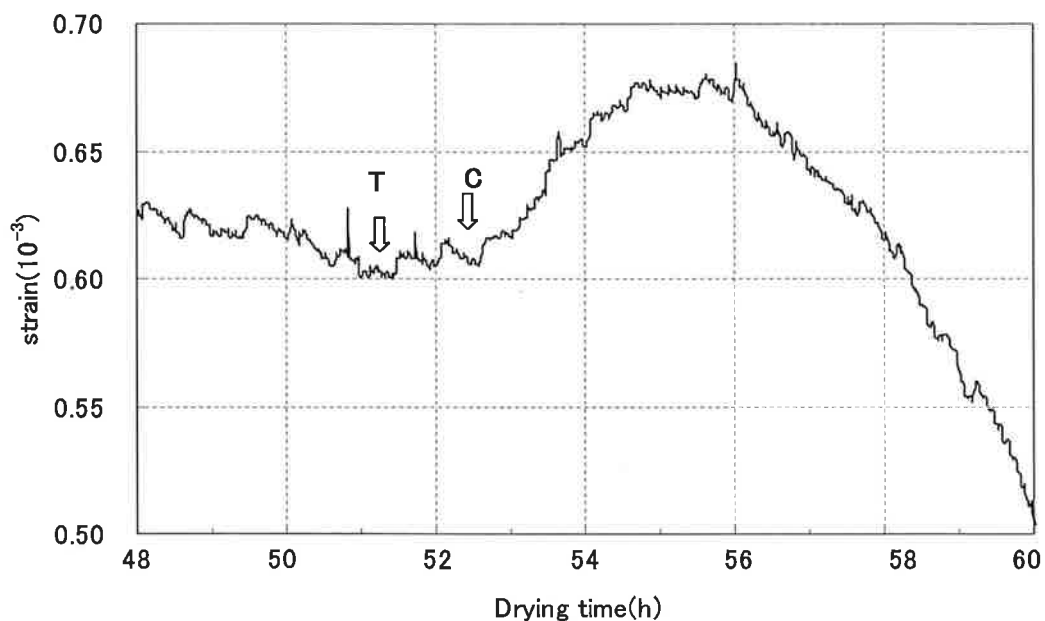
第 3-16 図に示すように，ゲージ 2b は正の値にある時間内に内部割れが認められる。乾燥開始後約 29 時間前に負側（圧縮側）への変化を示して，約 29.5 時間のち再び引張側へ増大している。乾燥開始後約 30 時間に負側へ急激に増大している。これは，乾燥開始後約 29 時間前に負側へのひずみ変化が観測されることから，この時点から引張応力が大きくなったと考えられ，29.5 時間にゲージ 2b の計測線上に内部割れが発生したことにより，一時的に，ゲージ 2b 付近が伸長したことを示しているものと考えられる。つづいて乾燥開始後約 30 時間に内部割れによる引張応力の開放により収縮ひずみが増大したものと考えられる。



第 3-16 図 ゲージ 2b のひずみ変化

C：内部割れの発生

前述のように、ゲージ 2a 付近は乾燥開始後約 60 時間に内部割れが発生したと推定された。第 3・17 図に示すように、乾燥開始後約 51 時間に負側への進行が鈍化し引張側へのひずみ変化を示し、約 53 時間から 56 時間まで大きな正側への変化をしている。これは 51 時間から引張応力が増大し、53 時間にゲージ 2a の外側に内部割れが発生したことにより、一時的に伸長したことを示唆する。乾燥開始後約 56 時間に負側へ急激な変化を示している。これは、この時点において内部割れしたことにより、引張応力からの開放により負側へ増大したものと考えられる。

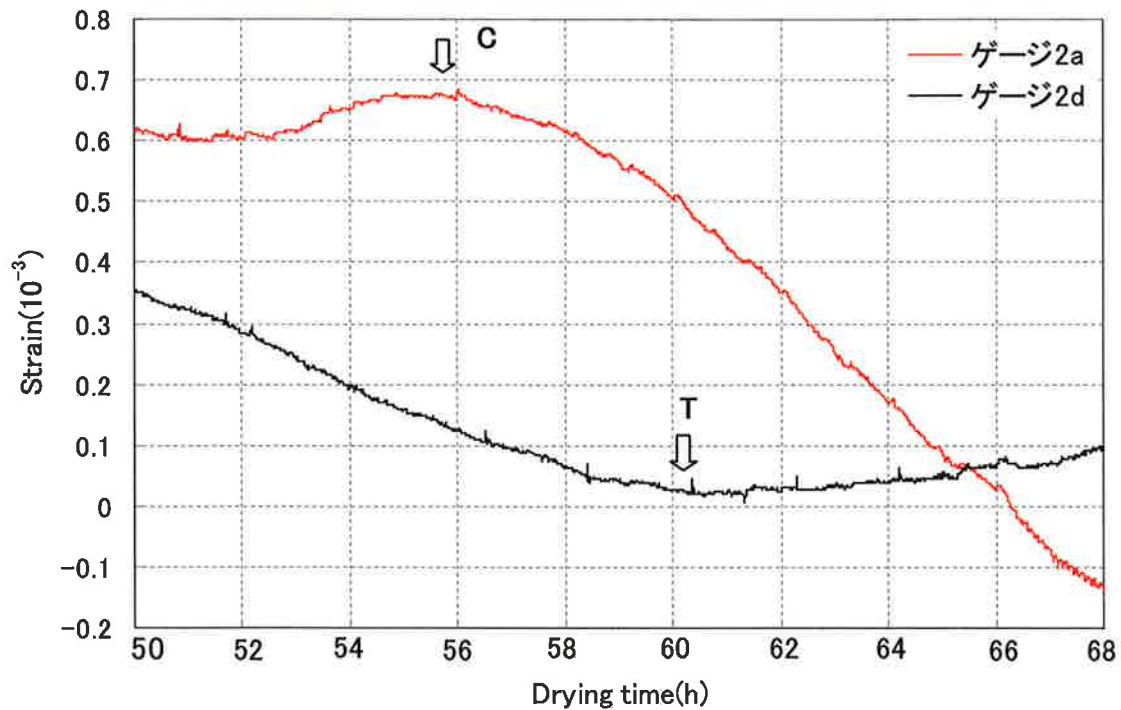


第 3・17 図 ゲージ 2a のひずみ変化

T : 負側の進行の鈍化

C : 内部割れの発生

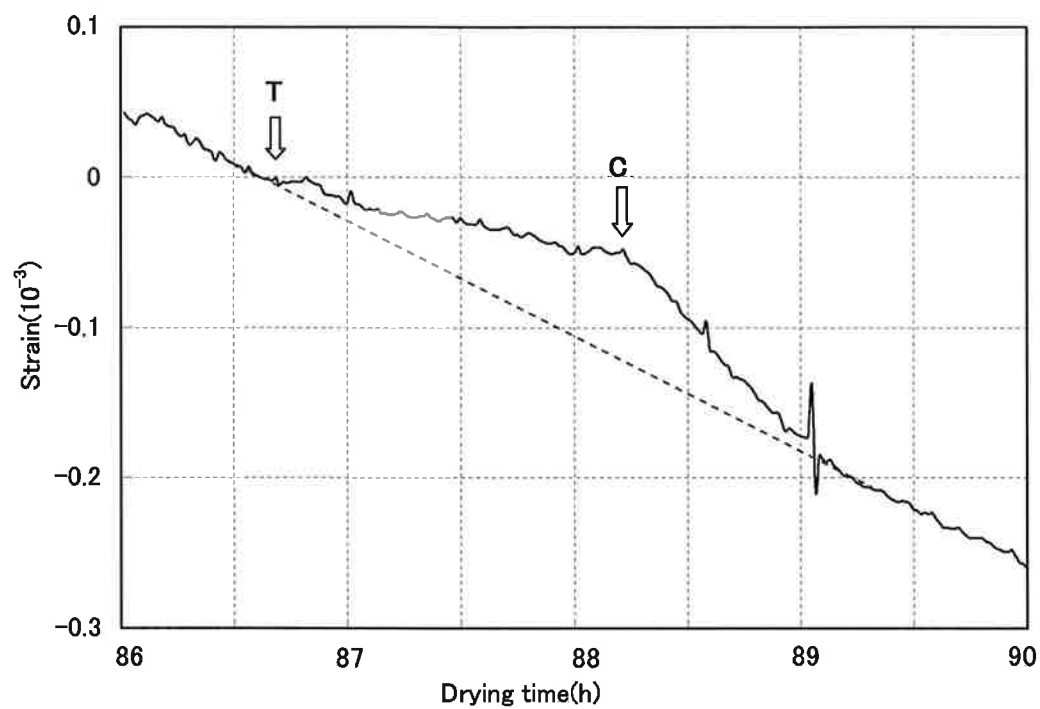
同様に、隣接のゲージ 2d で乾燥開始後約 60 時間に引張側のひずみが観測される（第 3-18 図）。これは、乾燥開始後約 56 時間にゲージ 2a 付近の収縮の増大で示される内部割れにより、隣接のゲージ 2d 付近が引張されたものと考えられる。



第 3-18 図 C : ゲージ 2a の内部割れ

T : ゲージ 2d の引張側のひずみ変化

ゲージ 2d は乾燥開始後約 87 時間に収縮速度の低下を示している。この時点において引張応力が大きくなり進行が抑えられたものと理解でき、乾燥開始後約 88 時間に内部割れが発生したことを示しているものとする(第 3-19 図)。



第 3-19 図 ゲージ 2d のひずみ変化

T : 収縮速度の低下

C : 内部割れの発生

乾燥による収縮過程において、内部割れが発生する前に観測された収縮ひずみの進行の低下は、引張応力の増大により収縮の進行が抑えられたことに起因するものと考えられる。心持ち正角柱材の高温乾燥において、内部割れの発生は、乾燥開始後 30 時間で既に発生している可能性が示されたが、これは、乾燥割れを抑制するための新たな乾燥スケジュールの開発においてきわめて重要な知見である。

3. 4 要約

スギ心持ち正角無背割り材の高温乾燥過程での材内部のひずみを連続して計測し、内部割れとの関係について検討した。内部ひずみの計測は、長さ 120cm の 2 本の柱材試験体の木口から 30cm の位置にひずみゲージを埋め込んで行った。結果は以下のように要約できる。

- (1) 高温乾燥における内部割れは、心持ち正角材横断面の表層に近い対角線付近において、放射状に発生した。
- (2) 乾燥収縮が進行する過程において、内部割れが発生する前に、引張応力の増大によるものと考えられる収縮の進行が抑えられているひずみ変化が観測された。
- (3) 乾燥中に観測された急激な収縮ひずみの増大は、内部割れの発生に伴う引張応力からの開放によるものと考えられる。
- (4) 内部割れは、乾燥開始後、約 30 時間で既に発生していると考えられ、その後、順次、別の箇所においても割れが発生していくことが、ひずみの変化過程を観測することにより明白になった。

第4章 スギ高温乾燥過程に発生する内部割れの抑制

4.1 概説

前章において、スギ正角無背割り材の高温乾燥中の内部ひずみを、ひずみゲージを材に埋め込むことによって計測し、乾燥過程におけるひずみ変化より、内部割れと収縮ひずみとの関係を検討した。その結果、乾燥過程における内部割れの発生のメカニズムが明らかになった。そこで、内部割れの発生を予測できるひずみ変化を監視因子として、内部割れの抑制が可能か検討した。

監視因子は、乾燥による収縮過程における収縮ひずみの進行低下と急激な収縮ひずみの増大のひずみ変化が考えられる。

前章により、内部割れは、乾燥開始後 30 時間内で発生するとの知見を得た。乾燥スケジュールは、乾燥開始後 30 時間内の内部割れを防止するため、乾球温度 120℃の持続時間を短縮した。

4.2 材料および実験方法

4.2.1 ひずみ測定用供試材

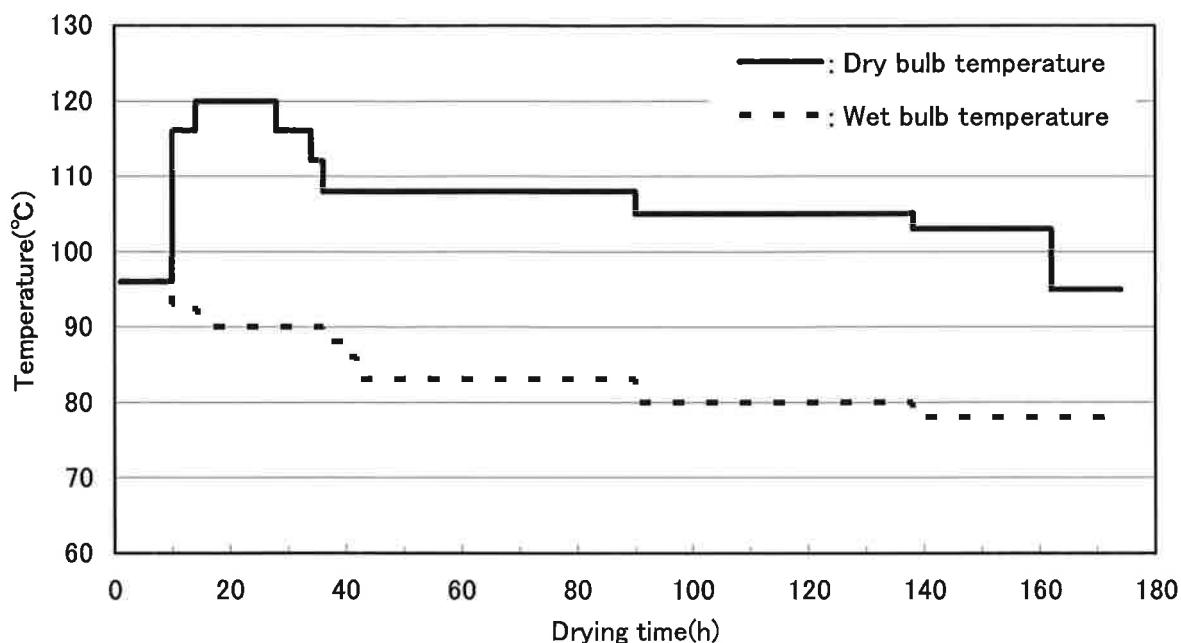
栃木県産で製材直後のスギ心持ち正角材 51 本を被乾燥材とした。これらは、断面寸法 13.2cm×13.2cm、材長 300cm の無背割り柱材で、平均重量は 35.0kg であった。被乾燥材の中から 33.7kg の材 1 本を選択して、中央部分から材長 120cm の材を採取してひずみ測定用供試材とした。乾燥機内に残りを栈積みして、栈積み内の中央部にひずみ測定用供試材を差し入れて乾燥した。

なお、ひずみの計測方法は第3章と同様である。

4.2.2 乾燥スケジュール

乾燥機は前章と同様に高温仕様 IF 型蒸気式乾燥機（新柴設備製 SK-IF10LHP）を用いた。

乾燥スケジュールは第4-1図に示すように、蒸煮 10 時間後、昇温して乾球温度 120℃を 14 時間持続後、徐々に乾球温度を下げるスケジュールとした。



第 4-1 図 乾燥スケジュール

4. 3 結果と考察

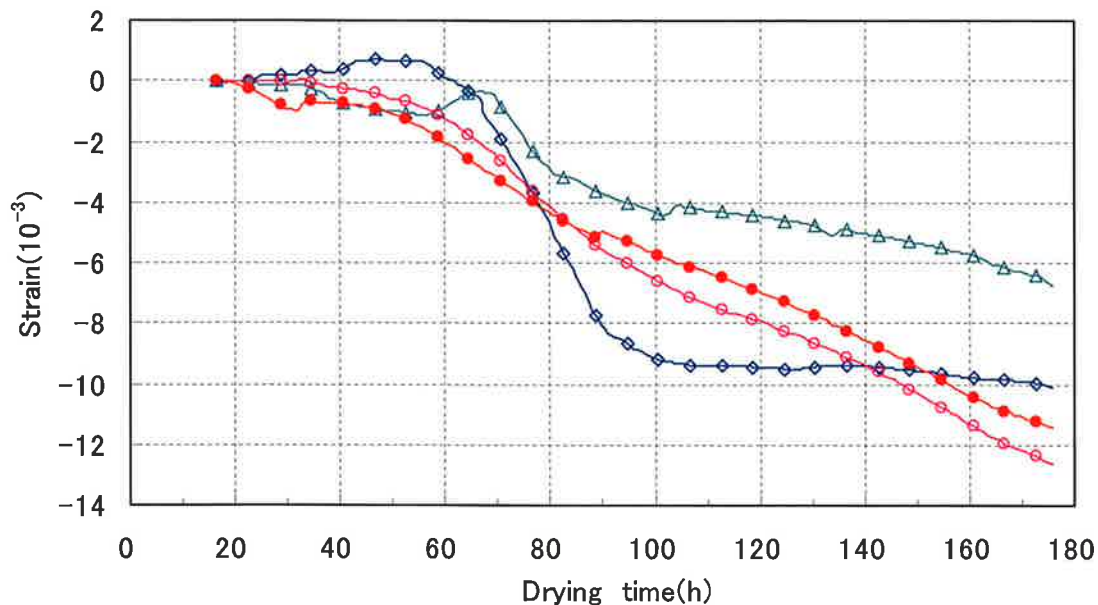
4. 3. 1 内部ひずみの推移

ここでは、木材の内層部に取り付けたひずみゲージによって計測された乾燥中のひずみを内部ひずみと定義する。

乾燥中における各ひずみゲージで計測したひずみの推移を第 4-2 図に示す。各ゲージ付近に内部割れが生ずると、心持ち正角材の同断面の接線円周上に埋め込まれたゲージ a, b, c, d のひずみは内部割れの発生前に特徴的な挙動を示すものと考えた。

各ゲージのひずみ推移には相違が認められる。ゲージ b は乾燥開始から 60 時間前後まで正の値を示している。これは、ゲージ b 付近において引張ひずみが発生していたことを示す。その他のゲージの近辺においては、引張ひずみよりも乾燥による収縮ひずみが大きかった。ゲージ b は 60 時間から 90 時間にかけて、急激に収縮ひずみが大きくなっている。ゲージ b のこの時間におけるひ

ずみ変化は、内部割れが発生したことを推定させるものといえる。ゲージ b は、100 時間以降ほぼ一定となっている。ゲージ a はゲージ b と対照的な推移を示し、60 時間前後から引張側に变化した後、70 時間から 80 時間前後まで収縮ひずみが顕著に増大し、その後ひずみは緩やかに負の方向へ推移した。ゲージ c とゲージ d は乾燥終了まで乾燥経過とともに収縮ひずみが単調に漸増した。ゲージ b を除く、これらの、ゲージ a, c, d も収縮ひずみは 40 時間から乾燥終了まで増大しており、内部割れが発生していることも否定できない。内部割れの発生を抑制するには、発生前の内部ひずみの情報を的確に入手する必要がある。



第 4-2 図 乾燥中の試験体の横断面に埋め込まれた各ゲージによるひずみ変化

△ : ゲージ a, ◇ : ゲージ b, ○ : ゲージ c, ● : ゲージ d

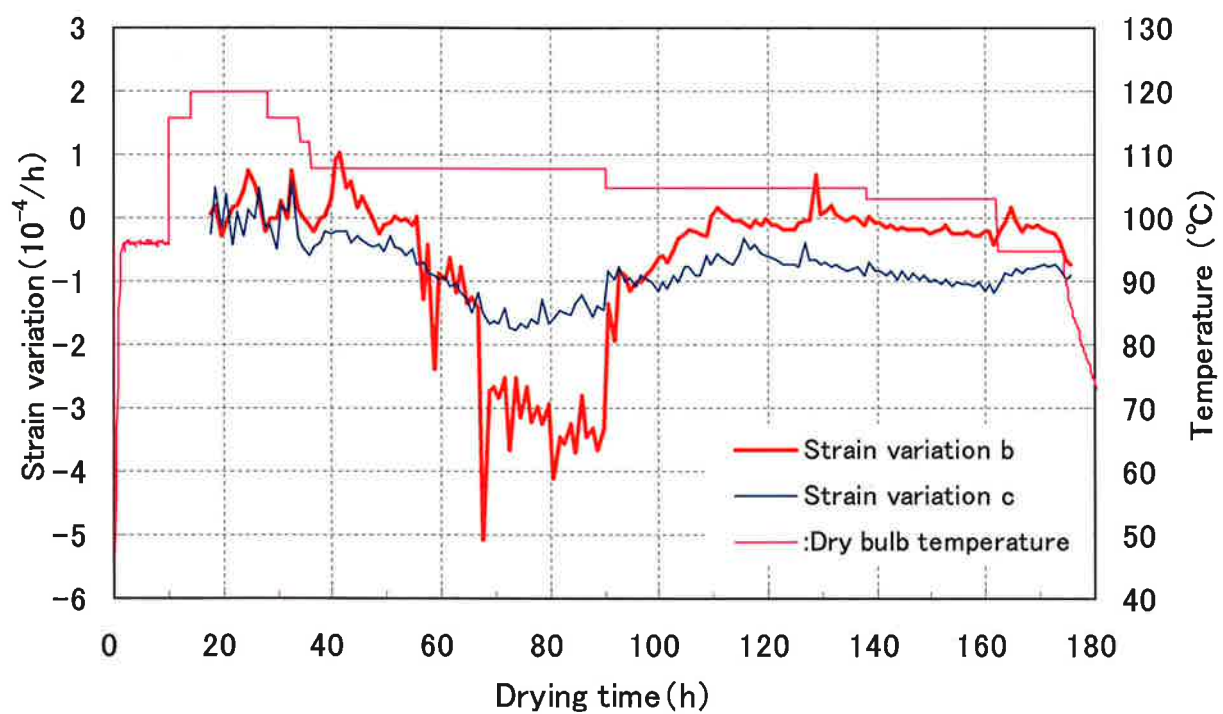
4. 3. 2 ひずみ変化量の推移

内部ひずみを計測し、その変化を監視することで、乾燥過程におけるひずみの伸縮状態を把握することはできるが、ひずみの絶対値によって内部割れの発生を判断し、即座に対応することは難しいといわざるを得ない。そこで、乾燥過程におけるひずみを 1 時間当たりの変化量として検討した。1 時間当たりのひずみ変化量 s を次のように定義した。

$$s = s_{t+1} - s_t \quad (1)$$

ここで、 s_t は時刻 t におけるひずみ、 s_{t+1} は時刻 $t+1$ におけるひずみである。

第 4.3 図 に、4 本のゲージの中で最も顕著な圧縮ひずみの増加を示したゲージ b と、ひずみ推移が単調であった隣接のゲージ c の 1 時間当たりのひずみ変化量を示す。ゲージ b, c のひずみ変化量は 40 時間前後まで引張と圧縮を不規則に繰り返している。これは、乾燥前期であることから、各ゲージ計測付近は伸縮を繰り返しながら乾燥が進んでいる状態であると考えられる。ゲージ b は 57 時間あたりから圧縮側のひずみ変化量が激しく変動しながら急速に増大し、68 時間において最大ひずみ変化量 -5.08×10^{-4} を示し、90 時間までの間に -2.51×10^{-4} から -4.09×10^{-4} の大きな圧縮側への変化のピークを示した。一方ゲージ c も 57 時間から 68 時間前後は圧縮側へのひずみ変化量の増大が進んでいる。従って、この間に、ゲージ b の変化量は大きな変動が示され、ゲージ b 付近に大きな引張応力が発生していたと考えられる。その後、ゲージ b, c とも 90 時間に乾球温度を 108°C から 105°C に下げたことにより 1 時間当たりのひずみ変化量は小さくなった。これによる 1 時間後の変化量の減少率はゲージ b が 59%, ゲージ c は 42% であった。



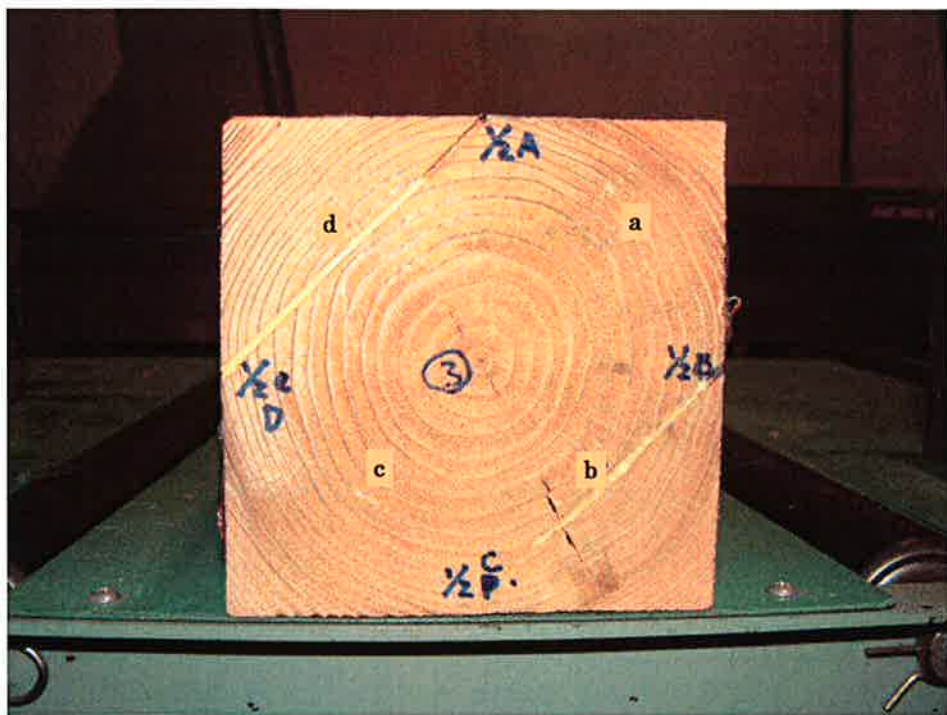
第 4-3 図 ひずみゲージ b とひずみゲージ c の乾燥中における
1 時間あたりのひずみ変化量

4. 3. 3 ひずみ変化量と内部割れの推定

乾燥終了後にひずみゲージ設置部位の木口断面を観察した結果、第 4-4 図に示すように 4 つのひずみゲージの内、a, c と d の部位には内部割れはなく、ひずみゲージ b の計測部位近傍にのみ内部割れが認められた。

ゲージ b のひずみ変化量は乾燥 57 時間から急速に圧縮側へ増大し、最大ひずみ変化量を示した乾燥 68 時間から 90 時間に顕著な圧縮側のピークを示した。従って、ゲージ b の近傍における内部割れは 68 時間に発生し、ここで乾燥による接線方向の引張応力が開放されたと考えられ²⁶⁾、それから 90 時間までの間に内部割れが広がったものと推定できる。このときのひずみ変化量は、およそ $-3.00 \times 10^{-4}/h$ であった。

なお、内部割れが認められなかったゲージ a, c, d の最大ひずみ変化量は $-2.99 \times 10^{-4}/h$, $-1.72 \times 10^{-4}/h$, $-1.41 \times 10^{-4}/h$ であった。これらの結果より、計測しているひずみの変化量が $-3.00 \times 10^{-4}/h$ より大きな収縮になると内部割れが発生する可能性が高いと推定される。そこで、内部割れの発生を抑制するためには、ひずみ変化量が $-3.00 \times 10^{-4}/h$ になる前に 1 時間当たりの変化量を低下させる乾燥条件に切り替える必要があると考える。つまり、本実験の場合には乾球温度を 108°C から 105°C に下げたことによりひずみ変化量の絶対値が小さくなっていることから、乾球温度の制御によって内部割れの防止が可能であることが示唆された。従って、ひずみゲージを用いて内部ひずみの変化量を連続計測して、 $-3.00 \times 10^{-4}/h$ より大きな収縮の進行にならないような条件で乾燥することにより、内部割れを抑制する乾燥条件を確立することが可能になると考えられる。



第 4 - 4 図 乾燥後に切断した試験体横断面。

ひずみゲージ b の近傍に内部割れが認められる

4. 4 要約

高温乾燥におけるスギ心持ち無背割り正角材の内部ひずみを計測して、そのひずみ変化を監視因子として、内部割れを抑制する方法を検討した。その結果は次のように要約できる。

(1) 内部割れの発生は1時間当たりのひずみ変化量が急速に大きくなる部分で起こり易いことが明らかになった。これにより、内部割れを抑制するには、ひずみゲージを用いて内部ひずみの変化量を連続計測して、 $-3.00 \times 10^{-4}/\text{h}$ より大きな収縮の進行にならないような条件で乾燥することにより、内部割れを抑制する乾燥条件を確立することが可能となると考えられる。

(2) 乾球温度を108℃から105℃に下げたことによりひずみ変化量の絶対値が小さくなっていることから、乾球温度の制御によって内部割れの防止が可能であることが示唆された。

第5章 内部割れ抑制乾燥法の開発

5.1 概説

第4章において、1時間あたりのひずみ変化量が $-3.00 \times 10^{-4}/h$ より大きな収縮の進行にならないような条件で乾燥することにより、内部割れを抑制する乾燥条件を確立することが可能となると考えられた。また、ひずみ変化量のコントロールは乾球温度の制御によって、内部割れの抑制が可能であることが示唆された。

そこで、乾燥過程における1時間あたりのひずみ変化量（速度）を監視因子として、内部割れが発生する前に、乾燥機内の乾球温度を下げることで、抑制することが可能であるか検証した。

5.2 材料および実験方法

スギ心持ち無背割り正角材、70本を被乾燥材として乾燥試験を行った。断面寸法は11.5cm×11.5cm、材長300cmで乾燥方法は前述と同様とした。ひずみの計測方法も前述と同様に行った。

第3章において、乾燥開始の蒸煮8時間、乾球温度120℃持続22時間乾燥の30時間で内部割れが発生する知見が得られた。本実験では、前章と同様に30時間内の内部割れを避けるため、120℃持続を15時間に短縮し段階的に乾球温度を下げるスケジュールにした。

5.3 結果と考察

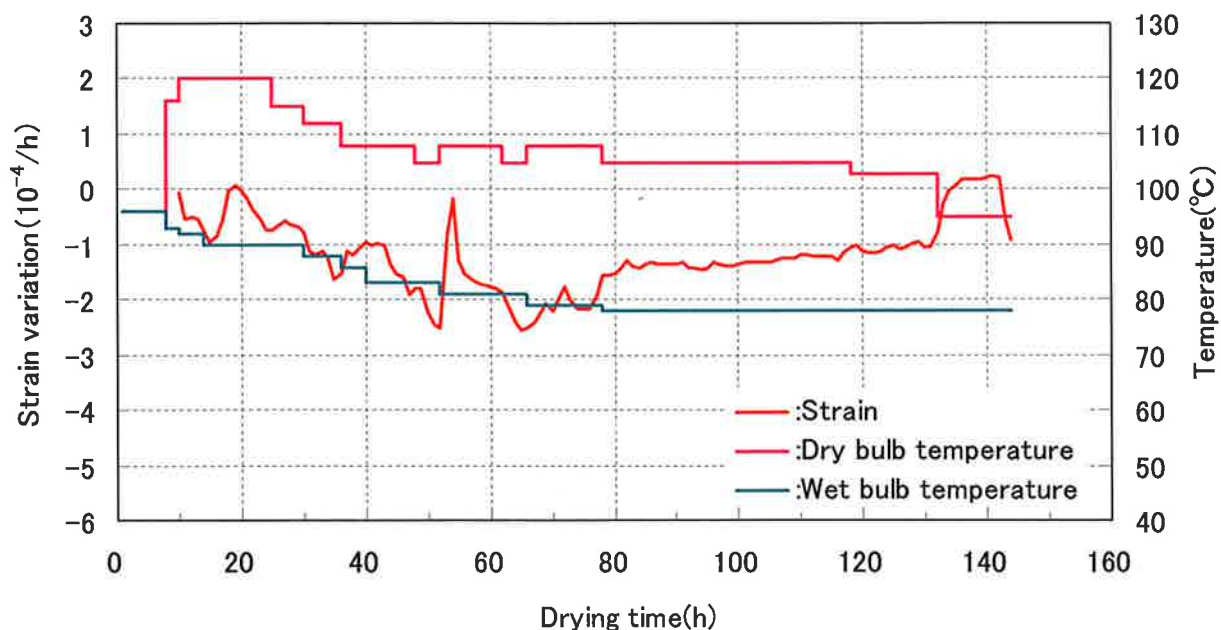
第5.1図に1時間あたりのひずみ変化量をモニタリングして乾燥条件を制御し、変化量をコントロールした乾燥スケジュールを示す。

乾燥開始後43時間あたりから圧縮側のひずみ変化量が急速に増大傾向となり、48時間に1時間あたりのひずみ変化量が -2.00×10^{-4} に近づいたので、湿球温度をそのままにして乾球温度を108℃から105℃に下げた。4時間後、

ひずみ変化量は -2.50×10^{-4} をピークに減少に転じたので、乾燥速度を上げるため乾球温度 108℃に戻し湿球温度を 83℃から 81℃に下げた。その後 62 時間あたりから変化量が再び増大したので 1 回目と同様に制御を行った。

乾燥後にひずみゲージ計測部位を切断して断面を検査した結果、予測どおり計測部位に内部割れは認められなかった。被乾燥材 69 本の内部割れを検査した結果、5 本に割れ巾 1mm、長さ 20mm 未満の小さい内部割れが認められたに過ぎない。内部割れの発生率は 7 %であった。第 4 章のひずみ変化量をコントロールしなかった乾燥スケジュールの内部割れ発生率は 16%であった。

このように、1 時間当たりのひずみ変化量が急速に増大しないように、乾球温度の調整により乾燥条件を制御してひずみ変化量をコントロールすることで内部割れを抑制することが可能であることが検証された。



第 5・1 図 1 時間あたりの変化量をモニタリングして、乾燥条件を制御した乾燥スケジュール

5. 4 要約

乾燥過程における 1 時間あたりのひずみ変化量（速度）を監視因子として、内部割れが発生する前に、乾燥機内の乾球温度を下げることで、抑制することの可能性を検証した。検証の結果は次のように要約できる。

(1) 乾燥中のひずみの変化過程を 1 時間あたりの変化量（速度）として監視することにより、内部割れの発生を予測することが可能であった。

(2) 乾燥条件を乾球温度で制御することによりひずみ変化量が、 $-3.00 \times 10^{-4}/h$ より大きな収縮の進行にならないようにコントロールすることが可能であり、その結果内部割れを抑制する効果が認められた。

総 括

住宅構造用材，とりわけ，スギ心持ち正角無背割りの柱材の乾燥方法において，高温乾燥は，乾燥時間が短縮でき，しかも材面割れが少ないなどの特長があり，近年，急速に普及している。一方で，高温乾燥の欠点として，内部割れが生じやすいことは良く知られている。木材乾燥分野では内部割れが多く生じることにより，住宅構造用材としての使用上において柱材の強度低下や，仕口・継ぎ手の接合不良，釘の保持力低下などが生じるなどの影響が懸念されている。特に，内部割れの存在は，材面割れと違って外観では判断できないため，一層，不安を抱かせることになっている。高温乾燥による内部割れの抑制が可能となれば，国産材の需要拡大に大きな飛躍が期待されると考えられる。したがって，スギ柱材の内部割れを抑制する高温乾燥法の確立が望まれている。

本研究は，高温乾燥過程において発生する内部割れの抑制を検討するために，内部割れと内部ひずみとの関連を研究した。内部割れの発生メカニズムを解明することによって，内部割れを抑制する乾燥方法を提案した。本研究によって得られた主な成果は，次のように総括される。

1. 予備実験によるスギ心持ち正角柱材の内部割れの検討

スギ心持ち正角材の背割りなし柱材（以下，柱材という）の高温乾燥は，乾燥初期に乾球温度 120℃，湿球温度 90℃の乾燥条件により行うことが材面割れを抑制するのに有効であると報告されている。そこで，乾球温度 120℃の乾燥条件による高温乾燥を行い，乾燥後の内部割れの実態を検討することにより，内部割れの抑制における基礎的知見を得る。

乾球温度 120℃，湿球温度 90℃で 72 時間持続の乾燥を行った。内部割れが全数に発生した。次に，乾球温度 120℃の持続を 37 時間とし，その後温度を 110℃に下げるスケジュールの乾燥をした結果，内部割れ低減効果が顕著に認められた。内部割れは乾球温度 120℃の持続時間と関係することが示唆された。

ので、内部割れの低減を目的に 120℃の持続時間を 18 時間にした。その結果、内部割れの低減効果は認められたが、内部割れの比較的大きい発生率は、120℃持続 37 時間と 18 時間では大きくは変わらなかった。これは、高温区域においては、単純に乾球温度を下げるだけでは、内部割れを防止できない因子があるものと推察された。

2. 高温乾燥過程における開放ひずみによる内部応力の推定

乾燥後の内部割れの発生率からは、乾燥中における内部割れの発生状況を推察することができない。そこで、次に乾燥過程における柱材の開放ひずみを測定し、内部応力を推定することによって、内部割れの抑制を検討した。開放ひずみは高温乾燥中のスギ柱材を乾燥機内から取り出して、スライス法により測定した。

開放ひずみの分布から、内部割れは 11.5cm 角柱材では材面から深さ約 2.6cm が負のひずみ（引張ひずみ）のピークとなり、表層の正のひずみ（圧縮ひずみ）がピークであるときに、内部割れの危険性が最も大きくなることが推定された。すなわち、11.5cm 角柱材では材面から深さ約 2.6cm あたりの収縮が進行し、その部分における引張応力が大きくなると内部割れが発生し易くなると推察される。深さ 2.6cm あたりの乾燥状態を計測することにより、収縮が進行する前に収縮速度を遅くすることで、内部割れの抑制が可能と考えられる。そこで、中間層約 2.6cm の含水率と材温を計測することにより乾燥状態をモニタリングして、内部割れを抑制する乾燥方法を開発した。

3. 高温乾燥における内部割れと内部ひずみとの関係

高温乾燥過程における開放ひずみを測定することにより、測定時点における柱材の内部応力を推定すること可能であり、高温乾燥における乾燥過程の内部応力の変化過程の概要を把握することができた。次に、ひずみゲージを高温乾燥中のスギ心持ち正角無背割り材内部に埋め込み、高温乾燥過程での内部ひず

みを連続して計測し、乾燥後に観察された内部割れとの関連について検討した。結果は以下のように要約される。

ひずみゲージをスギ柱材の横断面の四角の中央部に取り付けて、乾燥中の内部ひずみを連続計測することが可能であった。高温乾燥後の横断面に認められた内部割れは、心持ち正角材横断面の表層に近い対角線付近において、放射状に発生しており、この箇所に大きな引張応力があったと考えられる。高温乾燥中のひずみの変化過程において、内部割れが発生する前に、引張のひずみが観測された結果、引張応力の増大による内部割れの発生メカニズムが明らかになった。乾燥中に観測された急激な収縮ひずみの増大は、内部割れの発生に伴う引張応力からの開放によるものと考えられる。内部割れによる収縮ひずみの増大により、隣接の対角線付近が引張されながら、乾燥収縮することにより、引張応力が増大し、内部割れが発生しやすくなることがひずみの時間変化の観測により明らかになった。このように、内部割れは、順次、別の箇所においても割れが発生していくことが、ひずみの変化過程を観測することにより推察された。

内部割れは、乾燥開始後 30 時間で既に発生している可能性が示されたが、これは、乾燥割れを抑制するための新たな乾燥スケジュールの開発において、きわめて重要な知見であるといえる。

4. 高温乾燥過程に発生する内部割れの抑制

高温乾燥過程における内部割れ発生のメカニズムが把握できたことにより内部割れの抑制方法を検討した。その結果、乾燥中におけるひずみ変化を単にモニタリングした絶対値で内部割れを判断し、即座に対応することは困難であった。内部割れを抑制するためには、乾燥中の材内部における乾燥応力を的確かつ迅速に、しかも連続的に推定して制御することが必要である。そこで、乾燥過程におけるひずみを 1 時間当たりの変化量（変化速度）として検討した。1 時間当たりのひずみ変化量 s を次のように定義した。

$$s = s_{t+1} - s_t$$

ここで、 s_t は時刻 t におけるひずみ、 s_{t+1} は時刻 $t+1$ におけるひずみである。

高温乾燥中のひずみ変化を1時間当たりのひずみ変化量として検討したところ、内部割れが観察されたゲージのみが1時間当たりのひずみ変化量が $-3.00 \times 10^{-4}/h$ より大きな収縮の進行が観測された。内部割れの発生は1時間当たりのひずみ変化量が急速に大きくなる時間帯で起こり易いことが明らかになった。そこで、内部割れの発生を抑制するためには、ひずみ変化量が $-3.00 \times 10^{-4}/h$ になる前に、1時間当たりの変化量を低下させる乾燥条件に切り替える必要があると考えられた。

5. 内部割れ抑制乾燥法の開発

高温乾燥中におけるひずみ変化を観測し、1時間あたりの変化量が $-3.00 \times 10^{-4}/h$ より大きな収縮の進行にならないように、乾球温度を制御することで、内部割れを抑制する乾燥方法を試みた。その結果、ひずみ変化量が大きくなる前に乾球温度を下げて、ひずみ変化量をコントロールすることが可能であり、内部割れを抑制する効果が認められた。

本研究において、高温乾燥におけるスギ柱材の内部割れの発生メカニズムが明らかになり、内部割れを抑制する手法が示された。

高温乾燥における内部割れの抑制は、まだ十分とはいえないが、本研究の成果が、今後の高温乾燥技術の進展に大きく寄与し、国産材の需要拡大の飛躍になることを期待する。

引用文献

- 1) 木材需給と木材工業の現況（平成 14 年度版）2002(12),（財）日本住宅・木材技術センター, 175-176
- 2) 木材需給と木材工業の現況（平成 14 年度版）2002(12),（財）日本住宅・木材技術センター, 178
- 3) 木材需給と木材工業の現況（平成 14 年度版）2002(12),（財）日本住宅木材技術センター, 177-178
- 4) 久田卓興：建築用針葉樹材の乾燥に関する資料集（Ⅲ）（財）日本住宅・木材技術センター 2000, pp.69-72.
- 5) 黒田尚宏：木材工業 55(11),p.526 (2000).
- 6) 林 和男：日本木材学会組織と材質研究会・木材と水研究会・レオロジー研究会木材強度・木質構造研究会・生物劣化研究会,乾燥問題を考える,2002, p.13.
- 7) 吉田孝久, 伊藤嘉文, 橋爪丈夫 :第 53 回 日本木材学会大会研究発表要旨集, 福岡, 2003, p.114.
- 8) 愛媛県林業試験場研究報告 第 19 号 (1998) P70-77
- 9) 北海道立林産試験場：木材高温乾燥の実用化技術の開発,平成 8 年度～9 年度 技術開発研究費補助事業成果普及講習会テキスト(1998).
- 10) 第 49 回 日本木材学会大会要旨集 1999.4 東京, 東京農業大学
吉田孝久, 橋爪丈夫 P.130
- 11) 藤本登留：日本木材学会レオロジー研究会・木材と水研究会シンポジウム講演会講演集, 宇治, 2001, 34-39.
- 12) 植原 平：日本木材加工技術協会, 第 19 回年次大会講演要旨集,東京, 2001,pp22-23.
- 13) Uehara, T : U.S.Patent 6,381,871B2(2002).
- 14) 植原 平：特許第 3361312 (2002).

- 15) 植原 平：木材工業 56(11), 516-518(2001)
- 16) 植原 平：“木材情報” 日本木材総合情報センター，東京，2002，2.
- 17) 植原 平：JOURNAL of TIMBER ENGINEERING 52, vol.16 No.2
38-41
- 18) 中尾哲也：木材学会誌 48, 241-248 (2002) .No. 4
- 19) 印出 晃，檜原正規，徳本守彦，武田孝志，吉田孝久，伊藤嘉文，秋山俊夫：
第 53 回 日本木材学会大会 研究発表要旨集，福岡，2003，p.127.
- 20) 徳本守彦，坂口奈央，武田孝志，吉田孝久：第 53 回 日本木材学会大会
研究発表要旨集，福岡，2003，p.129.
- 21) 植原 平，萩尾勝彦，井上嘉彦，原田 聡：“木材乾燥低コスト化技術研究
成果報告書”，木材乾燥低コスト化技術研究組合，東京，2003，P.227.
- 22) 満久嵩麿：“木材の乾燥”， 森北出版，1972，pp.78-86,
- 23) 寺沢 真：“木材乾燥のすべて”，海青社，1994，pp.378-384, pp566-574.
- 24) 西尾 茂：木材工業 27(12), 596-598 (1972).
- 25) 満久嵩麿：“木材の乾燥”， 森北出版，1972，p.78
- 26) 植原 平：特開平 15-080504(2003).
- 27) 寺沢 真：木材工業 18 (8), 354-357(1963).
- 28) 田村 紘，金川 靖，藤原信二，後藤純一：木材工業 58, 56 - 60(2003).

謝 辞

本研究の遂行ならびに本論文の作成にあたり，研究全般にわたって終始懇切なご指導と激励を賜った，鳥取大学農学部教授 作野友康先生，島根大学生物資源科学部教授 西野吉彦先生に心から深く感謝申し上げます。

また実験の遂行に当たってご協力頂いた住友林業株式会社筑波研究所，主任研究員 綿引誠氏に心から御礼申しあげます。

本研究を遂行するにあたり，多くのご配慮を賜りました，住友林業株式会社筑波研究所の歴代の所長，グループ長の井上嘉彦氏に心より感謝申し上げます。同時に，研究の推進に当たって様々なご協力やご助言をいただいた，主任研究員 高橋浩一氏 他，研究所の皆様に感謝いたします。

また，筆者がマルニ木工株式会社の勤務時代に木材乾燥の基礎を教えいただいた，平田 英史氏，東 春行氏に感謝致します。

その他多くの方々のご指導とご協力，激励の言葉をいただき本論文が作成できましたことをここに記し，心より感謝申し上げます。

摘 要

緒言

住宅構造用材，とりわけ，スギ心持ち正角無背割りの柱材の乾燥方法において，高温乾燥は，乾燥時間が短縮でき，しかも材面割れが少ないなどの特長があり，近年，急速に普及している。一方で，高温乾燥の欠点として，内部割れが生じやすいことは良く知られている。内部割れが多く生じることにより，住宅構造用材としての使用上において柱材の強度低下や，仕口・継ぎ手の接合不良，釘の保持力低下などが生じるなどの影響が懸念されている。高温乾燥による内部割れの抑制が可能となれば，国産材の需要拡大に大きな飛躍が期待される。したがって，スギ柱材の内部割れを抑制する高温乾燥法の確立が望まれている。

本研究は，スギ心持ち正角材の高温乾燥における内部割れの発生メカニズムを解明することにより，内部割れを抑制する乾燥方法を開発することを目的とする。

1. 予備実験によるスギ心持ち正角柱材の内部割れの検討

スギ柱材の高温乾燥では，乾燥初期から乾球温度 120℃，湿球温度 90℃の条件により乾燥を行うことが乾燥時間の短縮と材面割れを防止するのに有効であると報告されている。そこで，乾球温度 120℃の乾燥条件による高温乾燥を行い，乾燥後の内部割れの実態を検討することにより，内部割れの抑制における基礎的知見を得る。

乾球温度 120℃，湿球温度 90℃で 72 時間持続の乾燥を行った。内部割れが全数に発生した。次に，乾球温度 120℃の持続を 37 時間とし，その後温度を 110℃に下げる乾燥をした結果，内部割れ低減効果が顕著に認められた。内部割れは乾球温度 120℃の持続時間と関係することが示唆されたので，内部割れの低減を目的に 120℃の持続時間を 18 時間にした。その結果，内部割れの低減

効果は認められたが、内部割れ度の比較的大きい発生率は、120℃持続 37 時間と 18 時間では大きくは変わらなかった。100℃以上の高温区域においては、単純に乾球温度を下げるだけでは、内部割れを防止できない因子があるものと推察された。

2. 高温乾燥過程における開放ひずみによる内部応力の推定

高温乾燥過程における柱材の開放ひずみを測定し、内部応力を推定することによって、内部割れの抑制を検討した。開放ひずみは高温乾燥中のスギ柱材を乾燥機内から取り出して、スライス法により測定した。

開放ひずみの分布から、内部割れは 11.5cm 角柱材では材面から深さ約 2.6cm の層が負のひずみ（引張ひずみ）のピークとなり、表層の正のひずみ（圧縮ひずみ）がピークであるときに、内部割れの発生し易い状態であることが明らかになった。すなわち、11.5cm 角柱材では材面から深さ約 2.6cm 層の収縮が進行し、その部分における引張応力が大きくなると内部割れが発生し易くなると推察される。深さ 2.6cm 層の乾燥状態を計測することにより、収縮が進行する前に収縮速度を遅くすることで、内部割れの抑制が可能と考えられる。そこで、中間層約 2.6cm 層の含水率と材温を計測することにより乾燥状態をモニタリングして、内部割れを抑制する乾燥方法を提案した。

3. 高温乾燥における内部割れと内部ひずみとの関係

ひずみゲージをスギ柱材の横断面の四角の中央部に取り付けて、乾燥中の内部ひずみを連続して計測し、乾燥後に観察された内部割れとの関連について検討した。高温乾燥後の横断面に認められた内部割れは、心持ち正角材横断面の四角の対角線に放射状に発生しており、この箇所に大きな引張応力があったと考えられる。

乾燥収縮が進行する過程において、内部割れが発生する前に、引張応力の増大によるものと考えられる収縮の進行が抑えられたひずみ変化が観測された。

つづいて、乾燥中に観測された急激な収縮ひずみの増大は、内部割れの発生に伴う引張応力からの開放によるものと考えられる。内部割れによる収縮ひずみの増大により、隣接の対角線付近が引張されながら、乾燥収縮することにより、引張応力が増大し、内部割れが発生しやすくなることがひずみの時間変化の観測により明らかになった。このように、内部割れは、順次、別の箇所においても割れが発生していくことが、ひずみの変化過程を観測することにより推察された。これらの結果、スギ心持ち正角材の高温乾燥における内部割れの発生メカニズムが明らかになった。

内部割れの発生は、乾燥開始後 30 時間で既に発生している可能性が示されたが、これは、乾燥割れを抑制するための新たな乾燥スケジュールの開発において、きわめて重要な知見であるといえる。

4. 高温乾燥過程に発生する内部割れの抑制

内部割れを抑制するためには、乾燥中の材内部における乾燥応力を的確かつ迅速に、しかも連続的に推定して制御することが必要である。さらに、内部割れを効果的に抑制するために、高温乾燥中のスギ心持ち正角材の内部にひずみゲージを取り付けて、内部割れが発生する前のひずみ変化を監視し、抑制する方法を検討した。その結果、高温乾燥中のひずみ変化を 1 時間当たりのひずみ変化量として検討したところ、内部割れが観察されたゲージのみが 1 時間当たりのひずみ変化量が $-3.00 \times 10^{-4}/h$ より大きな収縮の進行が観測された。内部割れの発生は 1 時間当たりのひずみ変化量が急速に大きくなる時間帯で起こり易いことが明らかになった。そこで、内部割れの発生を抑制するためには、ひずみ変化量が $-3.00 \times 10^{-4}/h$ になる前に、1 時間当たりの変化量を低下させる乾燥条件に切り替える必要があると考えられた。

5. 高温乾燥による内部割れ抑制乾燥法の開発

高温乾燥中におけるひずみ変化を 1 時間あたりの変化量として評価すること

により、 $-3.00 \times 10^{-4}/\text{h}$ より大きな収縮にならないように、乾球温度を制御することで、内部割れを抑制する乾燥方法を試みた。その結果、ひずみ変化量が大きくなる前に乾球温度を下げて、ひずみ変化量をコントロールすることが可能であり、その結果内部割れを抑制する効果が認められた。

6. まとめ

スギ心持ち正角無背割りの柱材の高温乾燥における内部割れを抑制する研究を行った。ひずみゲージを材内部に埋め込むことによって、乾燥中のひずみを連続して計測し、ひずみ変化と内部割れとの関係を検討した。その結果、高温乾燥中のひずみの時間変化を観測することにより、内部割れの発生メカニズムを把握することが可能であった。つづいて、ひずみ変化速度を監視因子として、乾燥機内の乾球温度を制御することにより、内部割れを効率的に抑制できることを示した。

Summary

For use as a constructional material as pillars, etc., wood must be dried to reduce its moisture content to a certain level to prevent deformation or cracking on shrinkage. In particular constructional wood recently tends to be supplied in pre-worked form, and dried wood with higher dimensional stability and less susceptibility to cracking has been demanded.

Recently, the high temperature drying method has become popular for drying sugi(*Cryptomeria japonica* D.DON) boxed-heart square timbers as pillars in a short time while suppressing surface checks. However, it is well known that internal cracks in sugi boxed-heart square timbers often occur during high temperature drying above 100°C. This has led to a keen demand for developing a drying technique which restrains internal cracks. In this thesis, I studied on internal cracks in sugi boxed-heart square timbers caused by high temperature drying and development of the drying method reducing the internal cracks.

The results obtained are as follows:

1 . Preliminary test to study internal cracks of high temperature drying.

The wood drying method comprising sugi boxed-heart square timbers by initial steaming at 95 °C for 8hours followed by drying at a dry bulb temperature of 120°C and a wet bulb temperature of 90°C for 72 hours has been proposed as a technique for achieving drying in a short time while suppressing cracking on the surface. We experimented on high temperature drying of sugi 11.5cm boxed- heart square timbers length 300cm.

Test.1 did the schedule same as above drying. Internal cracks were observed on the cross section in all pieces, but few surface checks. For study

to reduce internal cracks were scheduled after initial steaming for high temperature drying as follows.

Test.2 was scheduled by drying at a dry bulb temperature 120°C for 37hours, then 110°C for 54hours. Internal cracks decreased to 17.5%.

Test.3 was scheduled by drying at a dry bulb temperature 120°C for 18hours, then 107°C for 54hours. Internal cracks decreased to 58.1%. Internal cracks decreased as shorter 120°C drying time. However, the ratio of extreme internal cracks were not much difference between test.2 and test.3. This may be other factor what have without reference to 120°C continual drying time on high temperature drying.

2 . Relationship between internal cracks and strains measured by slice method

Strains figured as follows. Strains measured length before slice and after slice to even each 8.8mm of 13pieces on the cross section in 11.5cm boxed-heart square timbers which took out the samples from kiln dryer during high temperature drying.

The shell(the layer of wood near the surface) reversed to compression strains from tension strain during 16hours to 24hours drying at a dry bulb 120°C. The moisture contents were 10% at this time.

After drying at a dry bulb 120°C, the middle of layer 2.6cm depth from surface of 11.5cm square became steep tension strain, and the shell also became steep compression strain.

This means tension stress was developing at a dry bulb 108°C, 60hours after beginning. After the drying completed, internal cracks appeared at this middle of layer 2.6cm zone showed steep tension strains. Moisture content was below 15% at the part of the layer.

So, we tried not to develop tension stresses of 2.6cm layer by monitoring moisture contents and temperature inside the wood during high temperature drying. This monitoring method is to control temperature in kiln chamber for restraint of internal cracks cause in the part of the wood from severe tension stresses. Thus, could restrain internal cracks.

3. Relationships between internal cracks and shrink strains during high temperature drying.

Interior strains in sugi (*Cryptomeria japonica* D.DON) boxed-heart square timbers were measured by using strain gauges during high temperature drying above 100°C. We studied relationships between internal cracks and strains during high temperature drying of two specimens with the length of 120cm. Results obtained were as follows.

- 1) Internal cracks occur radially at each corner of the square cross section of the timbers.
- 2) The steep increase of the internal shrinkages may be attributed to the liberation from the tensile stress owing to the outbreak of the cracks.
- 3) It is surmised that the first internal crack can occur within about 30 hours after the beginning of the high temperature drying, and after that internal cracks may occur at the other corners of the square cross section.

4. The restraint of internal cracks during high temperature drying

We tried to catch the outbreak of the cracks by monitoring the strain variations using strain gauges during high temperature drying. It was very hard to catch the strain variation when internal cracks happened at that time during high temperature drying. So, we tried watching as the strain variation per hour. This strain variation per hour figured as

follows.

$$S = S t + 1 - S t$$

S =Strain variation per hour. $S t$ =time , $S t + 1$ =time after one hour

The results obtained are summarized as follows :

- 1) Internal cracks occurred at greater than the shrink strain variation $- 3.0 \times 10^{-4}/h$.
- 2 Internal cracks were observed close to the point where the strain variation per hour showed the largest values.
- 3) It is possible to restrain the internal cracks by control of the strain within the shrink strain variation $- 3.0 \times 10^{-4}/h$.

5 . The restrain method of the internal cracks during high temperature drying

We controlled the strain not to cross the shrink strain variation $- 3.0 \times 10^{-4}/h$ by monitoring of the strain variation per hour.

The strain variation can be controlled by varying the dry bulb temperature during high temperature drying, and thus internal cracks could be effectively prevented.

学位論文の基礎となる学会誌等公表論文のリスト

題 目 : スギ正角材の高温乾燥における内部割れ抑制 主論文

著 者 名 : 植原平 綿引誠 西野吉彦 作野友康

学 術 雑 誌 名 : 木材学会誌

巻 ・ 号 ・ 頁 : 50巻・5号・310-315

発 表 年 月 日 : 2004年9月25日

学術論文該当部分 : 第4章、第5章

題 目 : スギ心持ち正角柱材の高温乾燥における内部割れと収縮
ひずみとの関係 主論文

著 者 名 : 植原平 綿引誠 西野吉彦 作野友康

学 術 雑 誌 名 : 木材学会誌

巻 ・ 号 ・ 頁 : 51巻・4号(予定)

発 表 年 月 日 : 2004年12月17日 受理 掲載可
2005年7月予定

学術論文該当部分 : 第3章