

令和 5 年 4 月 24 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02299

研究課題名（和文）人工乾燥に伴う内部割れの影響を考慮した木材の剛性・強度評価

研究課題名（英文）Stiffness and Strength Evaluation of Wood Considering The Effect of Internal Cracks due to Kiln Drying

研究代表者

佐藤 利昭（Sato, Toshiaki）

九州大学・人間環境学研究院・准教授

研究者番号：00637887

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 9,300,000円

研究成果の概要（和文）：建築物に用いる木材には乾燥処理が不可欠で、短期間で工程を終える人工乾燥が今日では主流である。人工乾燥は、木材の内部に割れが生じ易い特徴を持つが、このような内部の割れが構造部材として期待される剛性・強度に如何なる影響を及ぼすかは明らかでない。本研究はこの課題に対して、CT スキャンを利用して木材内部の情報を補完し、さらに実大曲げにおいて画像解析も併用することで、内部の割れを含む木材の欠点が破壊現象に与える影響を調べたものである。検討の結果、節等の不可避の欠点の方が割れより影響が大きいことが明らかとなった。またあわせて、割れの要因となる木材中の水分移動も検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

木材は様々な力学的性質を持つ。天然材料であるが故に成長環境に左右され、完全に同一の個体がないことから、予め強度・剛性を知ることが難しい。また同じ個体内でも位置により強度・剛性が異なる不均質性も併せ持つ。さらに、木材内部の水分量、厳密には結合水が力学的性質に影響を及ぼすことで知られ、これらの性質を勘案して安全に利用するために、これまでは統計的な手法を基にその強度体系を支えてきた。一方、近年多様化したその利用用途を勘案すれば、より詳細な検討が不可欠で、本研究の学術的価値は、可能な限り条件を絞りこみ、その強度・剛性の評価を試みた点にある。

研究成果の概要（英文）：Drying is indispensable for wood used in buildings, and kiln drying, which completes the process in a short period of time, is the popular method of drying today. It is not clear how cracks affect the stiffness and strength expected of structural members. In this study, CT scans were used to supplement information on the interior of wood. Furthermore, by using image analysis in full-scale bending tests, we investigated the effect of wood defects including internal cracks on fracture phenomena. In addition, we investigated the movement of water in wood, which is a factor in cracking.

研究分野：建築構造

キーワード：人工乾燥 内部割れ 欠点 強度 剛性 靱性

1. 研究開始当初の背景

樹木は、材齢 50 年程度の伐採適齢期まで CO₂ を効率的に吸収し、伐採・製材された木材も利用を続ける限り炭素を固定することから、脱炭素社会を構築する 1 つの方策として、世界各国で木材の利用用途の拡大が図られている。木材の最大の利用用途である建築分野では、欧米を中心に部材・構法等の開発が進められ、我が国でも約 10 年ほど前に施行された規制緩和を契機に、木造ブームと呼ばれるほど木造建築が増加している。建築物に用いる木材には乾燥処理が不可欠で、短期間で工程を終える人工乾燥が今日では主流である。人工乾燥は、木材の内部に割れが生じ易い特徴を持ち、このような内部の割れの抑制方法が数多く検討されている反面、構造部材として期待される剛性・強度に如何なる影響を及ぼすかを検討した報告は皆無に等しく、それらの因果関係を明らかにする必要がある。

2. 研究の目的

図 1 に人工乾燥を終えた木材の断面を例示するように、木材の割れは年輪を跨ぐように髄から放射方向に生じる。このような断面内部の割れを、表面に生じる割れと区別して内部割れと呼ぶ。乾燥により木材が割れる要因は、年輪の半径・接線方向の収縮率の相違と乾燥中の水分傾斜との相互関係と考えられ、断面が大きく、乾燥の速度が速いほど、それらの影響が強く表れることから、一般に割れが生じ易い。このような内部割れを有する木材を実験的に調べ、強度等の力学的性質が劣ると結論付けた研究はいくつかあり、確かに連続性が確保されない点から応力集中等が生じることは想像に容易い。しかし、この内部割れが「如何なるメカニズムで構造部材の剛性・強度に影響を与えるか」は一切議論されていない。本研究は、これらの点を実験と理論の両面から明らかにすることを目的としたものである。



図 1 木材の乾燥に伴う内部割れ

3. 研究の方法

本研究では、研究目的を達成するため、大きく (1) 木材内部の情報を補完した実大曲げ実験による力学的性質の把握、(2) 乾燥過程における割れのメカニズムの解明の 2 点を検討した。以下、項目毎に研究の方法をまとめて記す。

(1) 木材内部の情報を補完した実大曲げ実験による力学的性質の把握

本研究では、木材の乾燥による影響に着目するため、丸太の選定および製材・乾燥工程を管理し、木理が通直な実大寸法の木材を試験体として用意した。製材工程など部材供給以前の状況まで把握する点で、建築分野の実験としては特徴的であるが、本研究の独自性は CT 撮影を用いて内部割れを含む木材内部の状況を把握することにある。樹木の病理診断を目的に木材に CT 撮影や MRI 撮影を適用した事例は 10 年ほど前から報告されており、目的である内部割れの他、各断面の年輪や髄の位置が把握できることから、この方法を選択した。このように木材内部の情報を整理した実大実験の実施例は過去にないため、本研究では内部割れはもちろん、木材の寸法効果等に因ると片付けられていた欠点などが力学的性質に与える影響までを調べるものである。実大実験に際しては、内部割れ近傍の挙動を詳しく調べるため、ゲージによる歪み計測と共に、画像計測も併せて実施し、結果との対応関係を分析した。

(2) 乾燥過程における割れのメカニズムの解明

乾燥に関する研究はこれまでに相当数あるが、乾燥過程における木材中の水分の状態、水分量によって異なる収縮量、さらには割れの発生要因を調べたものは殆どない。本研究では、先の述べた CT 画像により割れの位置は明らかとなっているため、割れの発生要因を水分移動によるものと仮定した上で、木材中の水分移動の様子を実験的に求めることを計画した。ここで採用した研究方法は、(1) と同様、丸太の選定からはじめ、乾燥をしていない状態からの水分移動を、天然乾燥下および人工乾燥下を想定した温湿度環境に木材を養生し、所定の養生期間を経た木材を細分化して、それらに含まれる水分量を調べるものである。時間による変化、環境による差異を踏まえて結果を調べ、割れの発生メカニズムを考察した。

4. 研究成果

先の研究方法に示した (1) と (2) の検討内容について、各項目で得られた成果を順にまとめる。なお、ここに記す成果は 2023 年 4 月時点で一部公表済みであるが、現在、いくつかの論文を準備しており、査読期間も含め 2024 年度中にすべての成果の公表を計画している。

(1) 木材内部の情報を補完した実大曲げ実験による力学的性質の把握

本項目で得られた最大の成果は、一対一に対応づけられる木材内部の情報と実大曲げ試験の結果を得たことと考えている。試験体の制作は慎重に行い、まず熊本県北部の樹齢 43 ~ 66 年のスギ・ヒノキの植林地より長さ 4 m の直材を伐採・選定した。得られた丸太は各樹種 30 本で、まず丸太を断面 135 mm 角に製材した上で、標準的な乾燥スケジュールによる人工乾燥を行い、その後曲げ試験に用いる試験体として断面 120 mm 角、長さ約 2640 mm に再度製材したものである。これら各 30 本の試験体について、まず乾燥前の含水率が低い順に試験体番号を付すこととし、さらに人工乾燥後に内部割れや節等の欠点に関する情報を得るため、CT スキャンを利用して個々の試験体について、部材断面毎の木材内部の情報を補完した。

実施した曲げ試験は、等曲げ区間を設けた 4 点 載荷試験で、フィードバック制御によって載荷速度 = 0.05 mm / s に保ち、試験体の破壊を視認した時点で試験を終了した。今回のシリーズでは、試験体が破壊に至るまでに最も短い場合で 14 分以上の載荷時間を要した。試験体セッティングの概要と計測箇所は図 2 に示す通りである。試験条件のうち特に載荷点と支持点の拘束には配慮し、4 点すべてでピンと試験体の間にテフロンシート 2 枚を挟んだ鋼板を配置した。これは、材軸方向の変形を可能な限り拘束しないため、厳密にはテフロン摩擦分の拘束効果を持つことになる。

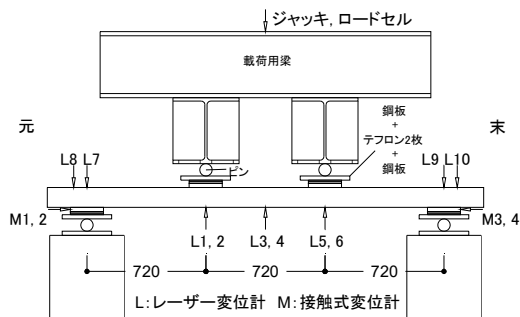
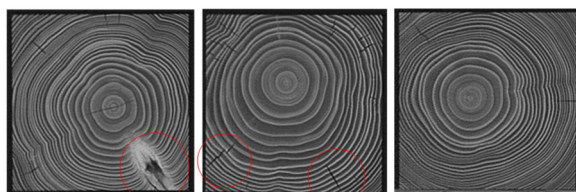


図 2 試験体のセッティングと計測位置

以上に加え、本研究では画像・映像による記録を可能な範囲で実施した。これは CT スキャンによる木材内部の情報と破壊性状を対応付けるため、主に等曲げ区間の試験体の様子を 3 方向から記録した。以降、類似の結論となるため、スギの試験体より得られた知見をまとめる。まず破壊現象と対応させる CT スキャンの結果は、当該試験体の破壊位置における断面内の情報を基に、図 3 に示すようにグループ I ~ III に分類した。グループ I は、図 3 (a) のように破壊部近傍に内部割れと節の両者が認められた場合で、計 11 体がこれに該当した。グループ II は、同図 (b) に示すように内部割れのみが確認された試験体で計 13 体、最後のグループ III は同図 (c) のように内部割れや節などの欠点を確認できなかった試験体で計 5 本であった。試験結果として、各試験体の荷重-変位関係をグループ毎に色分けして図 4 に示してある。なお、同図の変位は、木材の純粋な曲げたわみ量である。



(a) グループ I 節・内部割れ有 (b) グループ II 内部割れのみ有 (c) グループ III 欠点無

図 3 破壊箇所の断面の分類方法

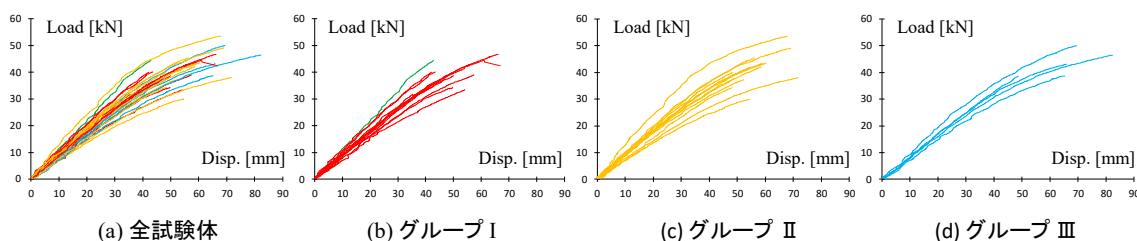


図 4 破壊箇所の断面情報に基づくグループ別の試験結果(載荷荷重-試験体中央のたわみ)

図 4 の結果より、まず (a) とした全体の結果より、特に傾きに注目すればグループ間に明瞭な差異は認められないことから、各グループの剛性に大きな偏りはないものと推察される。一方、(b) ~ (d) としたグループ別に描いた結果を相互に比較すると、横軸の中央たわみが破壊時にグループ I が最も短く、次いでグループ II、グループ III の順に延びている様子が窺える。すなわち欠点の影響がより強いほど、試験体が脆性的な破壊を呈していることが示唆される。この傾向を、強度と変形性能の両側面から調べるため、図 5 に破壊荷重との対応関係、図 6 に破壊時のたわみ量との対応関係を整理した結果を示す。

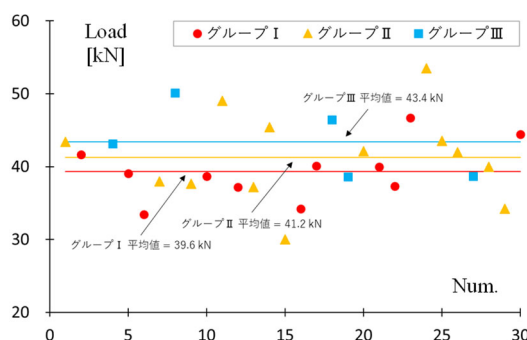


図 5 各グループと破壊時の荷重の関係

まず図 5 の結果より、破壊時の荷重に着目した場合、グループによる差異は確認できるが、全体のバラツキを勘案すると、明瞭とは言えない。今回、試験体とした木材は、すべて同じ山林から選定したものだが、それらのヤング係数は当然異なり、さらに同じ試験体内でも位置によって異なるため、強度という観点で結果を整理することは困難と予想される。一方、図 6 の結果に着目すると、結果には同様にバラツキが認められるが平均的には、グループ I と II で約 5 mm、グループ II と III で約 10 mm と全体の 1 ~ 2 割を占める差異が認められることから、これを有意差と判断した。

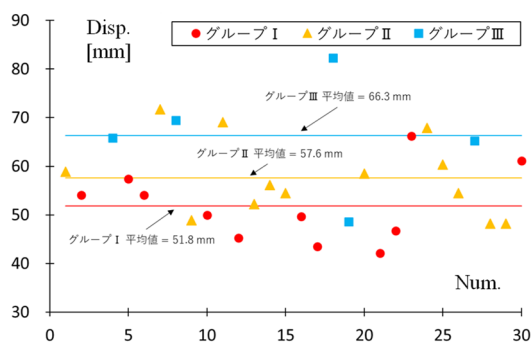


図 6 各グループと破壊時の変形の関係

以上が本項目で得た成果の概略である。本報告の段階で、これらの整理に各試験体を細分化して制作した試験片による要素実験を加えた結果に対し、さらに理論的枠組みを与えた論文を準備している段階にある。これがまとめ次第、対外論文として投稿する計画で、審査を経ておそらく 2024 年度中には、すべての結果が公表できると考えている。

(2) 乾燥過程における割れのメカニズムの解明

本項目では先の (1) で影響を認めた割れの発生要因である乾燥中の木材の様子を実験的に調べたものである。実験には、我が国の代表的な樹種であるスギ材を用い、再び伐採直後の丸太の長さ 4 m の直材 10 本を調達し、140 mm 角に粗挽きした後、図 7 に示すように材長方向に 12 分割することで、断面 140 mm 角、長さ 290 mm の試験体を得ることとした。試験体制作後は、実際の部材の乾燥環境を模擬する上で木口面からの乾燥を避けるべきと考え、シーリング剤を塗布した。その後、2 種類の乾燥条件に分けて所定の期間乾燥させた後、図 8 に示すように断面 25 mm 角、長さ 150 mm の試験体に断面を 25 分割し、すべての結合水を除去して重量より水分量を求める全乾法によりそれぞれ含水率を求めた。

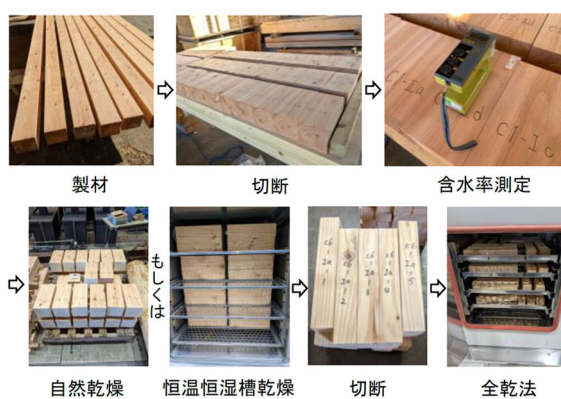


図 7 木材の水分移動に関する実験の流れ

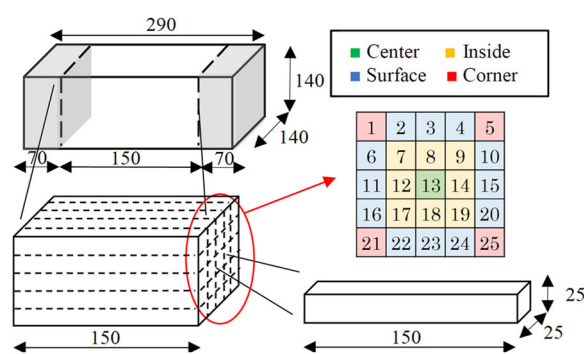


図 8 水分移動を調べる試験体の制作と番号

今回設けた 2 種類の乾燥条件は、人工乾燥の環境を模擬した 80 °C、40 % の恒温恒湿環境と、天然乾燥の環境に近い環境として外気に近い室内環境である。以降では前者の試験体を恒温恒湿槽試験体、後者を自然乾燥試験体と呼ぶ。それぞれの環境における平衡含水率は、恒温恒湿槽環境で 6.53 %、自然環境では 7.6 ~ 16.8 % と予想した上で、1 週毎に水分移動を調べた。今回、検討の対象とした試験体は、使用した恒温恒湿槽の容量の制限から、恒温恒湿槽試験体で 4 m 製材 2 本分、自然乾燥試験体で 3 本分、シーリング剤の効果を検証するモニター材として 1 本分の計 6 本とした。用意した試験体 10 本より、目視で状態を確かめ選別した。

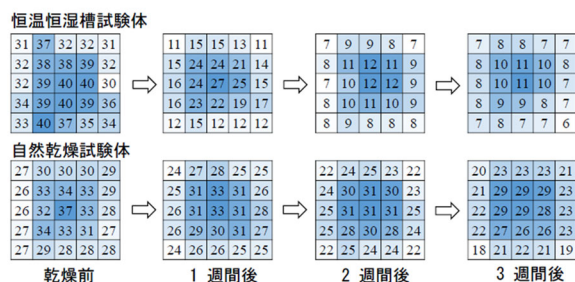


図 9 含水率の断面分布の時間変化

得られた結果として、図 9 に各乾燥条件における 1 週間毎の断面内の含水率の変化を示してある。同図から分かるように、含水率は、自然乾燥試験体で断面全体で均等に減少しているが、恒温恒湿槽試験体は乾燥初期には表面で、その後には内側で含水率が大きく減少していることが分かる。

これらの結果をさらに整理すると、人工乾燥のように強制的に乾燥を進める場合には、まず木材表面から含水率が減少し、それに追従するように内部の含水率が減少する関係が明瞭に表れ、結果として図 10 に示すように割れのメカニズムを推定した。

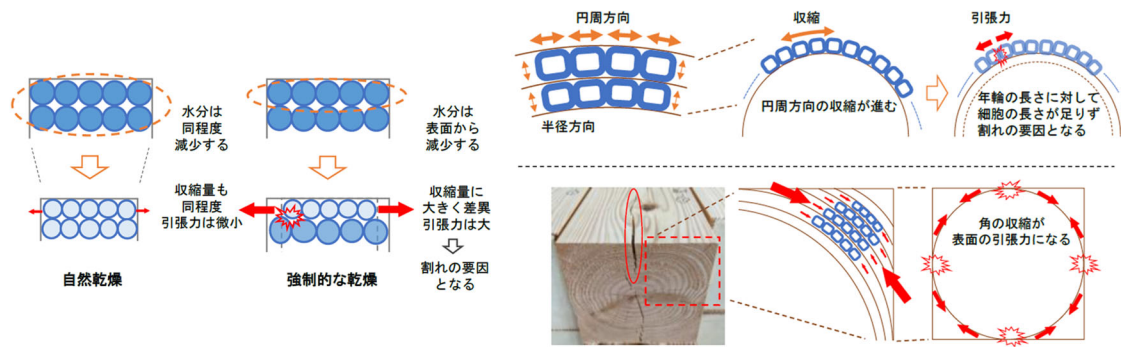


図 10 木材の乾燥過程における割れのメカニズム(左:内部割れ, 右上および右下:表面割れ)

図 10 に示したように、人工乾燥において割れが発生するメカニズムは、強制的に乾燥を行う場合、自然乾燥で断面内の水分が均等に抜けていく場合と異なり、断面内の含水率の変化に部位間で時間差が生じるため、ある時点での収縮量が細胞の部位により異なることに起因すると考えられる。したがって、隣り合う細胞での収縮量の差により、細胞間に引張力が生じ、乾燥割れの発生要因となるというのが、今回の調査で得た仮説である。人工乾燥では、木材の蒸煮、高温セット処理を行うことで、細胞を軟化させ、表面での割れを防ぐものであるが、軟化する領域には限りがあるため、軟化していない細胞では割れが発生し、内部割れとなると考えられる。細胞の軟化には温度が影響するため、内部割れの発生に関するさらなる議論には、今回得た水分移動の知見に加え、木材断面内の温度勾配に関する知見も必要であることが分かった。

この他、同様の考察から直接的な本課題の問題設定ではないが、天然乾燥における仮説も同図に示すように得られたのも成果と考えている。これらの成果は、2022 年度いっぱいにかけて得たものであるため、まだ成果の一部も対外的には公表できていない。この点についても、先と同様、2024 年度中を目処に成果の公表を急ぐ予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 川口太一, 佐藤利昭
2. 発表標題 欠点がスギ製材の曲げ破壊に与える影響に関する実験的考察
3. 学会等名 日本建築学会九州支部
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 川口太一, 佐藤利昭
2. 発表標題 欠点がヒノキ製材の曲げ破壊に与える影響に関する実験的考察
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2022年～2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------