

スギ構造用製材の乾燥過程における表面ひずみ、乾燥応力および内部割れに関する研究

村野, 朋哉

<https://hdl.handle.net/2324/4784687>

出版情報 : Kyushu University, 2021, 博士 (農学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :



スギ構造用製材の乾燥過程における表面ひずみ、
乾燥応力および内部割れに関する研究

村野 朋哉

2022

目 次

第 1 章 緒言

1.1 研究の目的	1
1.1.1 木質資源利用の重要性	1
1.1.2 製材利用の重要性	1
1.1.3 木材乾燥技術の高度化の必要性	2
1.2 既往の研究	4
1.2.1 乾燥過程における表面ひずみ	4
1.2.2 乾燥応力	6
1.2.2.1 定性的手法	7
1.2.2.2 定量的手法	7
1.2.3 内部割れ	8
1.2.4 内部割れの自動計測	10
1.3 研究の概要	11

第 2 章 スギ正角の高温乾燥過程における材表面のひずみ分布の経時変化

2.1 実験方法	13
2.1.1 試験材	13
2.1.2 乾燥曲線の測定	13
2.1.3 乾燥過程における表面ひずみの測定	14
2.1.3.1 正角の材面撮影方法	14
2.1.3.2 薄板の表面撮影方法	14
2.1.3.3 画像分析	15
2.1.3.4 表面ひずみの測定精度の検証	15

2.1.4	ドラインゲット量の測定	16
2.2	結果と考察	16
2.2.1	表面ひずみ分布	16
2.2.2	表面ひずみとセット量の関係	18
2.3	摘要	18
2.4	図表	19
第3章 乾燥スケジュールがスギ心去り正角の内部応力に及ぼす影響		
3.1	実験方法	31
3.1.1	供試材料および乾燥試験	31
3.1.2	解放ひずみ分布の測定	32
3.2	結果と考察	32
3.2.1	心持ち正角および心去り正角の解放ひずみ分布	32
3.2.2	乾燥スケジュール間での心去り正角の解放ひずみ分布の違い	33
3.2.3	心去り正角の表層の解放ひずみと解放ひずみ傾斜との関係	35
3.3	摘要	35
3.4	図表	37
第4章 高温乾燥によってスギ心持ち正角に発生した内部割れの位置・形状		
4.1	実験方法	45
4.1.1	供試材料	45
4.1.2	内部割れ計測	45
4.2	結果と考察	46
4.2.1	抽出された内部割れ	46
4.2.2	内部割れの横断面内分布	46

4.2.3	内部割れの各パラメータ間の関係	47
4.3	摘要	49
4.4	図表	50
第5章 畳み込みニューラルネットワークを用いた内部割れ自動計測技術の開発		
5.1	実験方法	60
5.1.1	画像データ	60
5.1.2	CNNのアーキテクチャ	60
5.1.3	学習手法とハイパーパラメータ	62
5.2	結果と考察	62
5.2.1	CNNによる抽出結果	62
5.2.2	測定精度の検証	62
5.3	摘要	64
5.4	図表	65
第6章 総括		71
謝辞		74
引用文献		75

第1章 緒言

1.1 研究の目的

1.1.1 木質資源利用の重要性

近年、環境に関係する多くの問題が発生している。温室効果化ガスの排出による地球温暖化、そしてそれを一因とする自然災害の甚大化、化石資源等の非再生資源の枯渇、分解性が低いプラスチックごみによる海洋汚染などが顕在化している。このような環境問題が実社会に広く波及している中、持続可能な開発目標（Sustainable Development Goals, 以下 SDGs）への関心が高まっている。それに加え、環境問題は企業の長期的な成長にも大きな影響を及ぼすとして、環境（Environment）、社会（Social）、企業統治（Governance）を判断材料とする ESG 投資¹⁾が盛んになっている。世界持続可能投資連合（Global Sustainable Investment Alliance, GSIA）の調査によれば ESG 投資額は年々増加しており、2020 年度は 35 兆 3000 億米ドルを超えたとされている¹⁾。これは全運用資産の 35.9% を占める。日本国内最大の投資ファンドである年金積立金管理運用独立行政法人（GPIF）も ESG 投資による SDGs 達成への貢献を推進している²⁾。このため、国だけでなく企業においても ESG 投資および SDGs に関して、具体的な対応を示す重要性が高まっている。

このような背景のもと、SDGs の達成、ひいては環境問題の解決に向けて再生産可能な資源である木質資源に大きな注目が寄せられている³⁾。持続可能な森林経営を行いながら木質資源を素材およびエネルギーとして有効利用することは、地球温暖化をはじめとした環境問題の解決に多大な貢献をもたらすと考えられる。このため、木質資源の利用拡大に資する生産・利用技術の開発は重要である。

1.1.2 製材利用の重要性

現在、戦後造林が行われた国内の人工林は成熟期を迎えている。50 年生を超える人工林は 50% を超え、本格的な利用期に差し掛かっている⁴⁾。木材自給率および国産材の生産量は年々上がっているものの 2019 年度の木材自給率は未だ 37.8% であり⁵⁾、国内の資源を

十分に活用できているとはいえない。森林の持続可能な経営には、木を植えて育てるだけでなく伐採して利用するというサイクルが不可欠であり、今後は更なる国産材の利用拡大が求められる。

製材は木材を素材として利用する上で、最も基本的な材料である。木質材料は一般的に材料を構成するエレメントが小さくなるほど製造に必要なエネルギーは大きくなる⁶⁾。このため、最も製造エネルギーの小さい製材利用の促進は環境負荷の点で大きなメリットがある。しかしながら、近年は製材に比べて集成材が大きなシェアを占めており、製材の原料となる通直な A 材の丸太であっても、集成材・合板向けの小曲りした B 材並みの安価な価格で取引される傾向にあり⁷⁾、製材の国内自給率は 51.0%と低く改善の余地が残っている⁵⁾。製材の利用を拡大し、木材の販売利益を川上へ十分に還元することは、持続可能な森林経営に貢献する。

1.1.3 木材乾燥技術の高度化の必要性

近年、耐震性能への関心の高まりや住宅部材におけるプレカット材の普及を背景として、柱や梁等の構造用製材は強度性能の明示や寸法安定性の確保が求められるようになってきた。木材は含水率によって強度および寸法が変化するため、使用環境を考慮した適切な含水率まで乾かす乾燥工程が必要不可欠となっている。製材品出荷量に占める人工乾燥材の割合は、2006 年は 23%⁸⁾だったのに対し 2020 年は 46.4%⁹⁾と 2 倍に上昇した。

寺澤は木材乾燥の技術的価値は、「より速く、より完全に、より安全に、より安く仕上げる」ことにあるとしている¹⁰⁾。換言すれば低コストで高品質な材をいかに安定して生産できるかということであろうが、一般的にコストと品質はトレードオフの関係にある。木材乾燥も同様で、例えば一般的に乾燥速度を大きくするほど品質の低下につながる乾燥割れは発生しやすくなる¹¹⁾。近年、心持ち柱材の乾燥方法として開発された高温セット処理¹²⁻¹³⁾は、高温の利用による乾燥時間の短縮と、表面割れの抑制による品質の向上という、コストと品質の両方を改善する画期的な技術であった。現在はマニュアル等も整備され、生産現場で広く普及している¹⁴⁻¹⁵⁾。その一方で、高温セット処理を含む 100°C 以上の高温

乾燥を長時間行うと、熱劣化と内部割れの発生によって強度性能の低下が生じること知られている¹⁶⁻¹⁷⁾。しかし、高温乾燥による熱劣化と内部割れは複合的に生じること、製材の初期含水率および乾燥速度は一定でないため同一の乾燥スケジュールでも材によって熱履歴が異なること、また同一の乾燥スケジュールでも内部割れが発生する様相は一様ではなく材によって大きく異なることから、高温乾燥が強度性能の低下へ与える影響は明らかにされていない。黒田¹⁸⁾は「高温乾燥材に認められる強度的性質の変化には、乾燥処理に伴う細胞壁成分への熱処理の影響、割れの発生、セットの影響など、そのしくみは複雑であり、未だ明確な説明はなされていない。」と述べている。乾燥後の製品から乾燥履歴を知ることができないこと、また内部割れは外見から観測できないことも相まって、構造用製材の信頼性の低下をもたらす一因となっている。これまでは、構造用製材の最大の需要先である戸建て木造住宅では構造耐力は壁量によって計算されるため、軸材は最低限の強度性能が担保されていればよかった¹⁹⁾。しかし、今後需要の増加が期待されている非住宅の中大規模建築物では、構造計算が必須なため強度性能について高い信頼性が求められる。信頼性の高い製材を安定して供給するためには、高温乾燥による熱劣化と内部割れの発生が強度性能の低下へ与える影響の解明および適正な乾燥方法による熱劣化および内部割れの制御が必要である。

また、人工乾燥材の一般化に伴って強度性能のような機械的な性能以外に、木材特有の香りや調湿機能といった性能が製材の品質として見直されるようになってきた。木材は乾燥方法によって材色²⁰⁻²¹⁾や抽出成分²²⁾、耐久性²³⁾が異なることが明らかにされている。近年、感覚として言われてきた「木材の良さ」を検証し、木材と他材料の差別化を行う取り組みも増えており²⁴⁾、香りや調湿機能といった性能は製材の品質として今後さらに重要視されると考えられる。また、JAS法令が2018年に改正され、それまではモノの品質を保証する基準であったが生産方法や試験方法のような方法・プロセスにまで対象が拡大された²⁵⁾。現時点ではまだ木材製品では適用された例がないが、今後は最終的な製品の品質だけでなく、どのようなプロセスによって製造されたかがこれまで以上に重要になると考

えられる。

以上のように製材に求められる品質は高度化・多様化しており、生産性のみを追求して速く・安く乾燥させるだけでは不十分になっている。求められる品質の材を安定して生産するには、画一的な乾燥方法では対応することができないため、それぞれに適した乾燥方法を採用しなければならない。コストと品質のバランスを保ち、安定して供給するためには乾燥過程の材の状態について詳細に把握することが重要になる。例えば、乾燥割れの制御を考える場合、乾燥過程の木材がどのように変形し、材内にどのような応力が生じ、最終的にどのような割れが発生するのかという基礎的な知見が求められる。本研究では、このような知見を得ることを目的として、高温乾燥過程における表面ひずみ分布の挙動、心去り正角の乾燥応力分布、内部割れの位置・形状を明らかにした。さらに、内部割れの自動計測についても検討した。

1.2 既往の研究

1.2.1 乾燥過程における表面ひずみ

木材の乾燥過程では材の表面から水分が抜けていくため、木材内には含水率傾斜が形成される。加えて、木材は収縮異方性のような不均一性をもっているため、乾燥中の木材には乾燥応力が生じる。乾燥割れの発生と乾燥応力との間には密接な関係があるため、乾燥過程の乾燥応力を測定することができれば乾燥スケジュールの改良等に活かすことができる。しかし、現在乾燥応力を直接測定する方法は存在しない。このため、乾燥応力の指標として表面ひずみを用いることが検討されてきた²⁶⁻²⁹⁾。小林ら²⁸⁾はミズナラ板目材の乾燥において表面ひずみを指標として乾燥スケジュールの自動制御を行った結果、一般的な乾燥スケジュールに比べて乾燥時間が短縮され、表面割れも見られず仕上がりも良好であったことを報告している。鳥羽ら²⁹⁾はスギ心持ち正角と心持ち平角について高温セット処理過程における表面ひずみの経時変化を測定し、心持ち正角と心去り正角では異なる傾向がみられたことを報告しており、木取りが表面ひずみの変動に影響を及ぼすことを考察し

ている。従来の表面ひずみ計測に関する研究では差動トランス型変位計や π 型ひずみ計を用いた2点間の計測が行われていた。しかし、前述したように木材は収縮異方性のような不均一性をもち、加えて乾燥過程の木材内には含水率傾斜が生じるため、木材の乾燥過程における変形挙動は複雑であり、2点間の計測では表面ひずみの全容を把握することは困難であると考えられる。

近年画像解析技術の発展によってひずみ分布の測定が比較的容易に行うことができるようになってきた。1980年代に Peters ら³⁰⁾によって考案されたデジタル画像相関法 (Digital Image Correlation、以下 DIC) はシステムの簡易さや観察対象のスケールを問わず適用可能な汎用性の高さ等の理由から特に利用されることが多い。木材の膨潤・収縮挙動の測定にも多く利用されている³¹⁻³⁴⁾。

DIC は対象点の追跡にランダムパターンを利用しているため、ランダムノイズへの耐性が低いという欠点がある。このため、屋外等のノイズが多く含まれるような環境でひずみ分布を計測する場合には代替法としてサンプリングモアレ法などのような規則的なパターンを用いた手法が考案されている³⁵⁾。木材の乾燥過程は周囲の雰囲気温度、湿度が通常の大気中とは大きく異なり、また常に変動している。加えて、木材の表面からの水分の蒸発も活発であることを考慮すると、非常にノイズの混入が起きやすい環境であると考えられる。

DIC では十分な測定精度を得られるようにバックグラウンド (木材表面) を白色塗料で覆い、その上に黒色の塗料を塗布してランダムパターンを形成することが多い。しかし木材乾燥の場合、表面の大部分を覆ってしまうと表面の水分蒸発に影響を及ぼすことが懸念される。また、木材の乾燥過程では、木材の含水率が大きく変化し、長時間熱が加わるため、木材表面の色の濃淡は大きく変化する。使用する木材や乾燥条件にもよるが、木材表面をバックグラウンドとしてランダムパターンを形成する場合は、大きな誤差に繋がることが懸念される。

実際に DIC を用いて木材の乾燥過程の表面ひずみの変化を測定した研究もいくつか報

告されている。Larsen³⁶⁾らは厚さ 15 mm のスリットを入れた木口円盤を室温で乾燥させたときの木口面の表面ひずみ分布を計測し、シミュレーション結果との比較を行っている。Kang³⁷⁻³⁸⁾らはウエスタンヘムロックとホワイトオークの板材を乾燥させたときの木口面の表面ひずみの経時変化を測定し、乾燥開始直後から表面ひずみの変化が生じたこと、樹種によってひずみ分布は大きく異なることなどを報告している。また Kang³⁹⁾らはレッドオーク板材を乾燥させたときの板目面の表面ひずみの経時変化を測定し、表面割れを肉眼で確認できるようになる前から表面ひずみによって微小な割れの発生を知ることができることなどを報告している。これらの報告では良好な測定精度を得るために、乾球温度を最大 65℃としてガラス等を介さずに直接木材表面を撮影する³⁹⁾、木口面に施したシーリングをバックグラウンドとしてランダムパターンを付与する³⁶⁻³⁸⁾といった工夫がなされている。

一方で、従来の研究では最大温度 65℃の条件下でひずみ分布が測定されており、蒸煮処理過程のような極端に高湿な条件下や 100℃以上の高温条件下で測定された例はない。近年では構造用心持ち材の表面割れの発生を抑制するために、乾燥初期に乾球温度 120℃、乾湿球温度差 30℃以上の高温・低湿条件で処理する高温セット処理を取り入れた乾燥スケジュールが広く用いられている¹⁸⁾。そこで本研究では高温乾燥条件下での表面ひずみ分布の測定に Mark tracking 法を用いることを試みた¹¹⁷⁾。Mark tracking 法は測定対象物に任意に付与したターゲットの重心座標を追跡することでひずみ分布を計測する手法である⁴⁰⁻⁴¹⁾。この手法は画像分析の中では古典的な手法であるが、ランダムパターンではなく、特定の対象を追跡するためノイズへの耐性が高い。また、DIC のように画素間の濃淡値の補間を行わずに、つまり元画像の濃淡値のみに基づいてサブピクセル単位での計測を行うことができる⁴⁰⁻⁴¹⁾。一方で DIC に比べると空間分解能が大きく劣るという欠点がある⁴¹⁾。

1.2.2 乾燥応力

前節でも述べたように、乾燥割れの発生と乾燥応力は密接に関係しているため、乾燥過

程で材内の乾燥応力がどのように変化するかを把握することは極めて重要である。このため、古くから乾燥応力の測定について多くの試みがなされてきた。

1.2.2.1 定性的手法

乾燥応力を推定する手法として代表的なものに、くし型試験法とカップ法がある⁴²⁾。これらの手法では特定の形状に加工した試験片を用意し、その変形挙動から乾燥過程の木材内の乾燥応力の状態を定性的に把握することができる。乾燥操作において重要な応力転換時期の推定に利用される。近年では、くし形試験片やカップ試験片の乾燥過程の挙動をシミュレーションし、乾燥過程に起こる乾燥応力の変化について定量的な理解を進める試みもなされている⁴³⁻⁴⁴⁾。

その他には圧電素子を木材に埋め込むことで乾燥応力のモニタリングを行った例などがある⁴⁵⁾。また、切込みを入れた試験片と特殊な応力測定治具を用いて板材の乾燥過程における応力経過をモニタリングした例も報告されている⁴⁶⁾。

1.2.2.2 定量的手法

乾燥応力がはたらいている木材の一部を切り出すとその部分の応力が解放されて変形が生じる。この変形（解放ひずみ）を測定すれば、木材内にはたらいていた元々の乾燥応力を測定することができる。ただ、木材のヤング率は一定でなく、密度や繊維傾斜、含水率によって材内で変動するため⁴⁷⁾、解放ひずみからヤング率を介した乾燥応力への変換には注意を要する。このため、近年では材に切込みを入れて解放した時の応力を直接測ることで乾燥応力を測定することも試みられている⁴⁸⁻⁴⁹⁾。また、Watanabeらは近赤外分光法を用いて非破壊的に材表面の解放ひずみを推定することを試みた結果、良好な結果が得られたことを報告している⁵⁰⁾。

試験片を分割して応力を解放することで材料内部の応力を測定する方法には、逐次除去法とスライス法の大きく2種類がある⁵¹⁾。

逐次除去法は木材を徐々に削ることで応力を解放させ、残りの部分の反りや変形を測定することで、乾燥応力の分布を測定する。木口円盤に適用して乾燥応力の半径方向の分布

を測定した報告がある⁵²⁾。

スライス法は木材を小片に分割し、分割前後の変形から乾燥応力の分布を測定する。Peck⁵³⁾によって考案された本手法は、McMillen⁵⁴⁾によって改良され、板材の乾燥応力の測定に多く利用されてきた⁵⁵⁾。スライス法では一般的に、ノギスやマイクロメーター等で解放ひずみの計測を行う。このため、計測方向の断面寸法より小さい領域の応力を測定することができない。この欠点を改良し、任意の2点間での局所的な応力を測定可能な手法としてピン打ちスライス法が提案された⁵⁶⁾。ピン打ちスライス法は、虫ピンを材に打ち込み、それを標点として測定顕微鏡で2点間の距離を測ることで解放ひずみを測定する。徳本ら⁵⁶⁻⁵⁷⁾はこのピン打ちスライス法を用いてスギ心持ち正角の乾燥応力の材内分布を測定し、乾燥初期に高温低湿条件で乾燥させると乾燥終期に材表層に大きな圧縮応力が形成されることを明らかにした。乾燥応力の面からも乾燥初期の高温低湿処理が表面割れ抑制に有効なことが明らかにされ、現在の針葉樹構造用製材の乾燥スケジュールに活かされている。

ピン打ちスライス法はスライス法では測定できないような局所的な応力を計測できる一方で、測定に特殊な技術と器具が必要となる。そこで、本研究ではスキャナーと画像分析を利用することで、ピン打ちスライス法と同等以上の精度でより簡便に解放ひずみ分布を測定することを試みた¹¹⁸⁾。基本的な原理は前節でも述べた Mark tracking 法を用いており、測定対象物に付与したターゲットの重心座標を追跡することで解放ひずみを計測する。

1.2.3 内部割れ

木材に発生する割れは大きく分けて、材表面に発生する表面割れ (Surface checks)、その中でも特に木口面に発生する木口割れ (End checks)、外見からは見られない材内部に発生する内部割れ (Internal checks, Honeycomb) の3種類がある⁵⁸⁻⁵⁹⁾。また、割れの発生形態から目回り (Ring shakes)、心割れ (Heart shakes)、木口の裂け (Splits) も区別されることがある⁵⁸⁻⁵⁹⁾。ISO⁶⁰⁾では割れについて種類、位置、深さでさらに細分化され

ているが、これは外見から確認される割れのみを対象としており内部割れについては規定されていない。ASTM⁶¹⁾では木口面の割れと表面割れでは測定方法が異なるものの同じ扱いとし、特にせん断強度に関係があると考えられる位置に発生した割れのみを評価の対象としている。なお、ASTMについても内部割れの規定は存在しない。JAS⁶²⁾の構造用製材では材面と木口に発生した貫通割れについてのみ規定されており、それ以外の割れについては明確な規定が設けられていない。このように、外見から確認できない内部割れは非破壊的に測定できないこともあって各規格にも盛り込まれていない。しかし、近年国内の針葉樹構造用製材で内部割れの問題がクローズアップされるようになってきた⁶³⁾。

現在、針葉樹構造用製材の乾燥では高温セット処理をはじめとした高温乾燥が広く用いられている¹⁸⁾。一方で、過度な高温乾燥を行うと顕著な内部割れが発生することが知られており、材の強度性能の低下につながることを懸念されている⁶³⁾。このため、内部割れと強度性能との関係は過去に多くの検討がなされてきた。小原ら⁶⁴⁾、滝本ら⁶⁵⁻⁶⁶⁾はスギ心持ち正角の内部割れと曲げ強度との間に関係が見られなかったことを報告している。また、スギ心持ち平角についても心持ち正角と同様、内部割れと曲げ強度との間に明確な関係が認められないことが示されている⁶⁷⁻⁶⁸⁾。このように心持ち材では内部割れが曲げ強度の低下に与える影響は小さいと考えられてきたが、最近スギ心去り平角について内部割れ合計長さや曲げ強度との間に強い負の相関が認められたことが報告された⁶⁹⁾。その中で、特に強度低下の著しい試験体のほとんどでせん断破壊が生じており、内部割れの方向とせん断破壊が発生する方向が一致したことが強度低下につながったと指摘されている。また、心持ち正角でも内部割れによってせん断強度が低下することが示されている^{66, 70)}。

このように、内部割れが強度性能へ与える影響は材の木取りと加力方向で大きく異なり、それには内部割れの位置や形状が影響していると考えられる。内部割れの形状についていくつかの研究例があるが⁷¹⁻⁷³⁾、材内のどの位置にどのような形状の内部割れが発生するのかは明らかにされていない。また、過去の試験における内部割れを評価するパラメータは最大長さ^{66, 70)}、合計長さ^{65, 67-68)}、最大面積⁶⁶⁾、合計面積⁶⁴⁻⁶⁵⁾と複数のパラメータが用い

られているが、これらのパラメータの相互の関係についても明らかではない。本研究では、内部割れと強度性能との関係を解明する上での基礎となる知見を得ることを目的として、画像解析を用いて心持ち正角に発生した内部割れの位置および形状について分析を試みた。

1.2.4 内部割れの自動計測

木材は外見から目視で確認できる欠点があるが、意匠的な品質だけでなく強度性能等にも大きく関係する。このため、木材表面に見られる欠点を自動計測する試みが多くなされてきた。Funck⁷⁴⁾らは9つの画像解析手法（小領域の平均、標準偏差、エッジ強度によるクラスタリングと領域拡張法を組み合わせた手法、エッジ検出を用いた手法およびしきい値による手法）を用いてダグラスファー単板画像上の6種類の欠点（青変、ヤニすじ、欠け、死節、生節、ヤニつぼ）の自動検出を行い、測定精度を比較した。その結果、クラスタリングと領域拡張法を組み合わせた手法が最も精度が高かったが、青変の検出精度は60%程度であったことを報告している。また、Gu⁷⁵⁾らは手書き数字の認識で良好な性能を示したサポートベクターマシン（Support vector machine、以下SVM）を用いて、節の画像をSound knots、Dead knots、Black knots・Rotten knots、Pin knotsの4種類に自動分類したところ分類精度96.5%と良好な結果が得られたことを報告している。

近年考案された畳み込みニューラルネットワーク（Convolutional neural network、以下CNN）による深層学習は画像認識の分野で最先端の技術となっている⁷⁶⁻⁷⁷⁾。CNNを利用した画像認識技術は、自動運転や医用画像、インフラ管理、ロボティクスなどに応用が進められているが、木材においても応用が急速に進められている。Fabijanska⁷⁸⁾らはCNNを用いることで、環孔材（エルム、オーク、ヨーロッパアンアッシュ）の木口断面画像から高い精度（97%）で年輪を自動検出可能だったことを報告している。He⁷⁹⁾らはCNNを用いて画像上の死節、生節、青変、褐色変、ヤニすじ、割れの6種類の欠点について自動分類を行ったところ、分類精度99.14%と良好な結果を得たことを報告している。Hu⁸⁰⁾らはCNNを用いて、画像上の割れ、虫害部、生節、死節の4種類の欠点の分類および9つの樹種の分類を自動で行ったところ、それぞれ分類精度93.22%および96.64%と良好な結果

が得られたことを報告している。なお同じデータセットを SVM によって分類した結果は分類精度 60.87%および 71.25%であったとしている。

このように、従来の画像処理技術に比べて、CNN は木材のような不均一でバラツキが大きいような対象でも良好な結果が得られることが近年明らかにされている。また、画像上の物体の分類・検出だけでなく、画像上のどこからどこまでが物体なのかという領域分割 (Semantic segmentation) も高精度で可能になってきた⁸¹⁾。内部割れの自動計測では割れの有無だけでなく、面積のような定量的な情報が必要となる。従来の研究では欠点の分類・検出が主に行われており、欠点の大きさのような定量的なデータの測定精度の検討までは行われていない。そこで本研究では、CNN を用いた内部割れの自動計測を試みた。

1.3 研究の概要

本研究では、スギ構造用製材の主に高温乾燥過程における表面ひずみ挙動、乾燥応力の分布、内部割れの発生形状について検討を行った。

第2章では、高温乾燥過程における正角の表面ひずみの挙動を明らかにすることを目的として、画像分析手法の1つである Mark tracking 法を用いて高温乾燥過程における2次元の表面ひずみの経時変化を調べた。試験では、断面寸法 132 mm×132 mm のスギ心持ち正角および心去り正角を3種類の乾燥スケジュールで乾燥させた。また、正角表層から切り出した薄板を乾燥させたときの収縮率の分布および正角表層のドラインゲット量の分布を測定した。これにより、材表面の位置による表面ひずみの経時変化の違いを検討するとともに、表面ひずみとドラインゲットの関係調べた。

第3章では、乾燥スケジュールがスギ心去り正角の乾燥応力に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、乾燥終了時の心去り正角の解放ひずみ分布を測定した。断面寸法が 120 mm×120 mm のスギ心持ち正角、および心去り正角を3種類のスケジュールで乾燥させた。乾燥後、材中央部から厚さ 15 mm の横断面材を切り出し、4種類の方法で分割した。分割前後の試験片表面の画像から解放ひずみ分布を測定した。これにより、乾燥スケ

ジュールが心去り正角の乾燥応力に与える影響を検討し、従来得られていた心持ち正角の知見と比較した。

第4章では、内部割れと強度性能との関係を解明する上での基礎となる知見を得ることを目的として、心持ち正角に発生した内部割れの位置および形状を分析した。全国9県から調達した、高温セット処理を行ったスギ心持ち正角の乾燥材（断面寸法 105 mm×105 mm）を用いた。内部割れを含む横断面画像 978 枚から 16949 個の内部割れを抽出した。得られたデータを用いてどのくらいの大きさの内部割れが横断面のどの位置に発生していたのかを可視化した。また、内部割れの長さや面積の関係および1つの断面に発生した内部割れの最大値と合計値の関係について検討を行った。

第5章では、畳み込みニューラルネットワークを用いた内部割れの自動計測について検証を行った。試験には第3章で用いた画像から 128×128 pixel の ROI (Region of interest) 画像を 300 枚作成し、内部割れを画素単位でラベル付けしたラベル画像を作成した。それらを訓練セット 200 枚、検証セット 50 枚、テストセット 50 枚に振り分けた。訓練セットおよび検証セットを用いて、畳み込みニューラルネットワークを学習させた。その後、テストセットを用いて自動計測の測定精度を検証した。

第2章 スギ正角の高温乾燥過程における材表面のひずみ分布の経時変化

近年、画像分析手法の発展によって材表面のひずみ分布を比較的簡便に計測することが可能となってきた。画像分析手法は2次元的なひずみ分布を非接触で測定できるため、ひずみ分布が複雑でかつ材表面で活発な水分の蒸発が起こる木材乾燥過程の測定には有効な方法である。一方で、従来の報告は最大温度 65 °C の条件下で測定されており、蒸煮処理過程のような極端に高湿な条件下や 100 °C 以上の高温条件下で測定された例はない。このため、構造用心持ち材の乾燥で用いられている 100°C 以上の高温条件における表面ひずみの挙動は明らかにされていない。

本研究では高温乾燥過程における正角の表面ひずみの挙動を明らかにすることを目的に、画像分析手法を用いて材表面のひずみ分布の経時変化を測定した。

2.1 実験方法

2.1.1 試験材

長さ 3000 mm、断面寸法 132×132 mm の福岡県産スギ心持ち正角 3 本と心去り正角 1 本を用い、これらを長さ 500 mm に切断した。心去り正角は柃目面が互いに向き合っている木取りとした。各試験材のデータを Table 2-1 に示す。Fig. 2-1 に示すように切り出した試験材から乾燥曲線測定用試験体（長さ 150 mm）、表面ひずみ測定用試験体（長さ 250 mm）、自由収縮測定用試験体（長さ 80 mm）、含水率測定用試験片（長さ 15 mm）を切り出した。自由収縮測定用試験体についてはさらに表層から 5 mm 厚の薄板を切り出して以後の実験に用いた。乾燥曲線測定用試験体および表面ひずみ測定用試験体については両木口をシリコンシーラントでシーリングした。含水率測定用試験片を用いて全乾法にて生材時の含水率および全乾密度を測定した。

2.1.2 乾燥曲線の測定

乾燥曲線測定用試験体を Run1～Run3 のスケジュールで目標含水率 20 % として乾燥試験

に供した (Table 2-2)。Run1 は蒸煮後高温スケジュール、Run2 は蒸煮なし高温スケジュール、Run3 は蒸煮後中温スケジュールである。心持ち正角 (BH1~BH3) は Run1~Run3 のそれぞれに 1 つ、心去り正角 (PL) は Run1 と Run3 にそれぞれ 1 つ供した。乾燥試験中、定期的に試験体を乾燥機から取り出し質量を測定した。乾燥終了後、試験体の 4 材面の表面割れ長さと同試験体中央部の木口断面における内部割れ長さを測定した。

2.1.3 乾燥過程における表面ひずみの測定

2.1.3.1 正角の材面撮影方法

表面ひずみ測定用試験体の側面のうち 1 面に黒色シリコンアクリル合成樹脂塗料 (油性スーパーコート、株式会社アサヒペン) を塗布して、Fig. 2-2 のように直径約 2 mm のターゲットを横方向 13 列×軸方向 10 列をマーキングした。乾燥スケジュールは 2.1.2 と同様 (Table 2-2) とし、2.1.2 で得られた乾燥曲線を基に、目標含水率を 20 % として乾燥を行った。画像の取得はデジタル一眼レフカメラ (D3100、ニコン株式会社) を用いて、乾燥機の外からガラスののぞき窓を通して試験体の一材面のみを撮影した。心去り正角については木表面を撮影した。取得画像は 3076×4636 pixels (約 23 pixel/mm) であった。撮影には標準ズームレンズ (AF-P DX NIKKOR 18-55mm f/3.5-5.6G VR、ニコン株式会社) を使用し、カメラと試験体表面との距離は 450 mm とした。なお撮影する際は乾燥機内に設置した 4 つの 100 W 電球で試験体表面を照らした。また Run3 については画像の取得に加えて長さ 5 mm のひずみゲージ (KFG-5-120-C1-11、株式会社共和電業) による測定を行った。Fig. 2-2 のように 6 枚のゲージを横方向に 1 列貼り、その上からコーティング剤 (AK22、株式会社共和電業) を塗布した。ひずみの記録にはデータロガー (GL7000、グラフテック株式会社) を用いた。

2.1.3.2 薄板の表面撮影方法

自由収縮測定用試験体の表面には、2.1.3.1 と同様に横方向 13 列×軸方向 5 列のターゲットをマーキングした。その後、恒量に達するまでは温度 20 °C の恒温室で乾燥させた後、

ポリエチレンの袋に入れた状態で、40℃～105℃に徐々に温度を上げながら恒温器中で乾燥させた。乾燥中、定期的に試験体を取り出し、表面をスキャナー（GT-X970、セイコーエプソン株式会社）によって撮影した。解像度は47 pixel/mmであった。乾燥が進行すると試験体が木表側に反ったため、おもりを載せて試験体をスキャナーに押し付けて撮影した。

2.1.3.3 画像分析

Fig. 2-2 に示すような材表面に多数付与した各ターゲットの重心座標の経時変化から各ターゲット間のひずみを算出した。本手法は Mark tracking 法⁴⁰⁻⁴¹⁾などと呼ばれ、木材の分野でも破壊力学の試験などに用いられている⁸²⁻⁸³⁾。分析には画像解析ソフト ImageJ⁸⁴⁾を用いた。撮影した画像を2値化処理した後、画像内における各ターゲットの重心座標を抽出した。その後、得られた重心座標を用いて各ターゲット間の軸方向および横方向の表面ひずみを算出した。

2.1.3.4 表面ひずみの測定精度の検証

Mark tracking 法では、測定の不確かさはターゲット間の距離とターゲットの大きさに依存する。今回の試験条件における表面ひずみの測定の不確かさは既報⁴¹⁾によれば、軸方向で0.015%、横方向で0.020%程度と推定されている。実際の測定では様々な誤差要因が介在するため測定精度はさらに低下すると考えられる。一般的に、木材の収縮率は横方向に比べ軸方向が10分の1以下であることから、軸方向の測定結果は横方向の測定精度に対する指標になると考えられる。Fig. 2-3 は心持ち正角（BH2）、蒸煮後高温スケジュール（Run1）における各ターゲット間の軸方向の表面ひずみ（117区間）の結果である。なおグラフ縦軸の表面ひずみは正が伸びを、負が縮みをそれぞれ示す。乾燥終了時の表面ひずみは-0.35%となり、一般的なスギの収縮率と同程度であった⁸⁵⁾。また、蒸煮後の表面ひずみの測定結果は、一定の標準偏差を保ったまま単調に減少していることから、十分な精度で表面ひずみを測定できたと考えられた。一方で蒸煮過程では標準偏差が大きい結果となった。蒸煮中は乾燥機内が水蒸気で満たされるため、乾燥機のガラスが結露したり蒸気

によって乾燥機内が暗く曇ることで画像が不鮮明になったことが原因として考えられた。蒸煮中の表面ひずみの測定については今後改良が必要である。

2.1.4 ドライングセット量の測定

既報⁸⁶⁾を参考にドライングセット量（以下セット量）の測定を行った。具体的な手順を Fig. 2-4 に示す。2.1.3.1 の測定終了後、1 週間以上 20 °C の恒温室で保管した表面ひずみ測定用試験体から横方向 1 列分（13 個）のターゲットを含む軸方向長さ 10 mm の試験片を 3 つ切り出した。同試験片のターゲットが付与されている表面より厚さ 5 mm の薄板を切り出し、横方向に 12 分割した。分割後、寸法及び質量を測定した後、全乾状態にした。その後、常温の水を減圧注入（1.9 kPa、2 時間）した後煮沸処理（30 分）し、2.1.3.2 と同様にして全乾状態まで乾燥させた。得られた収縮曲線と分割直後の寸法に基づく収縮率との差をセット量として算出した。

2.2 結果と考察

2.2.1 表面ひずみ分布

Fig. 2-5 に心持ち正角（BH2）、蒸煮後高温スケジュール（Run1）の横方向の表面ひずみ分布の経時変化を示した。Fig. 2-5 は 12×10 の格子状のデータの各点の間を線形補間している。蒸煮後の乾燥過程に移行すると材面端部は急速に縮むのに対し、材面中央部は緩やかに縮む結果となった。この傾向は BH1 および BH3 についても同様であった。このような材面端部と材面中央部で異なる表面ひずみの挙動は、 π 型変位計を用いて心持ち正角材の高温乾燥過程を測定した例においても報告されている²⁶⁾。

Fig. 2-6 に心持ち正角（BH2）、蒸煮後高温スケジュール（Run1）の乾燥終了時点における横方向の表面ひずみ分布と厚さ 5 mm の表層薄板の横方向の表面ひずみ分布の結果を示した。薄板の表面ひずみの結果は、Run1 の乾球温度 120 °C、湿球温度 90 °C という条件における平衡含水率（約 2.7 %⁸⁷⁾）に最も近い含水率である 2.5 % 時点の値を比較として採用した。薄板は材面端部（追証）に比べて材面中央部（板目）で大きく縮む結果とな

った。この傾向は BH1 および BH3 についても同様であった。一方で正角は材面端部が材面中央部に比べて大きく縮む結果となり、薄板とは反対の傾向を示した。これは乾燥が遅れる材内部に材面中央部の縮みが拘束されるためであると考えられる。材内部の拘束によるドライグセットの発生が考慮されたスギ心持ち正角の高温乾燥のシミュレーション⁸⁸⁾においても、Fig. 2-5 にあるような乾燥初期に材面端部が急速に縮む挙動は予測されている。本研究で得られた結果はそのシミュレーションによる予測を実証する形となった。

乾燥曲線測定用試験体における割れの測定結果を Table 2-3 に示した。心持ち正角は Run1 では内部割れのみが、Run2 では内部割れと表面割れの両方が、Run3 では表面割れのみが確認された。心持ち正角の表面ひずみ測定用試験体は Run2、Run3 では乾燥終了時に全ての試験体で表面割れが見られたが、撮影を行っていた観察面に割れが発生した試験体はなかった。木取りと乾燥スケジュールによって割れ発生の様相は異なる一方で、本研究では内部割れおよび表面割れの発生に伴う特徴的な挙動（急激な表面ひずみの変化など）は観察されなかった。今回用いた試験方法では測定精度と測定間隔の問題で捉えることができなかった可能性が考えられる。

Fig. 2-7 に心持ち正角 (BH2) と心去り正角 (PL) の蒸煮後高温スケジュール (Run1) および蒸煮後中温スケジュール (Run3) における表面ひずみの結果を示した。材面中央部に比べ材面端部が大きく縮む傾向が全ての条件において認められた。この傾向は BH1 および BH3 においても同様であった。その程度は木取りや乾燥スケジュールによって異なり、心去り正角の中温乾燥条件では比較的均一な表面ひずみ分布となったのに対して (Fig. 2-7h)、心持ち正角の高温乾燥条件では材面端部と材面中央部との表面ひずみの差が大きい結果となった (Fig. 2-7b)。本手法を用いて表面のひずみ分布を測定することで、高温乾燥過程の表面ひずみの経時変化について、その詳細を比較することが新たに可能となると考えられた。

Fig. 2-8 は Mark tracking 法とひずみゲージによって測定した横方向の表面ひずみを比較したグラフである (BH2、Run3)。実線がひずみゲージによる結果を、プロットが Mark

tracking 法による結果を示した。ひずみゲージの結果についても Mark tracking 法によって得られた結果と同様、材面中央部に比べ材面端部が大きく縮む傾向を示したことが分かった。この傾向は BH1 および BH3 においても同様であった。

2.2.2 表面ひずみとセット量の関係

セット量の横方向の分布をみると、セット量は材面端部に比べて材面中央部が大きくなる結果となった (Fig. 2-6)。この傾向は BH1 および BH3 においても同様であった。Fig. 2-6 の結果にある正角と薄板の表面ひずみの差の一部はドラインゲットによる影響であると考えられる。Fig. 2-9 に乾燥終了時の表面ひずみとセット量の関係を示した。表面ひずみが大きくなるとセット量も大きくなるという正の相関関係が見られ、表面ひずみを測定することで程度セット量の推定ができると考えられた。なお本研究ではセット量と表面ひずみの関係について、乾燥条件の違いによる明確な差は認められなかった。

2.3 摘要

画像分析手法を用いて材表面のひずみ分布を経時測定することにより、高温乾燥過程における正角表面のひずみ分布の挙動について明らかにした。以下にその詳細を示す。

1. 蒸煮後の高温乾燥過程における心持ち正角の表面ひずみは、材面端部は乾燥初期に急速に縮む一方で、材面中央部は乾燥初期から終期にかけて緩やかに縮んだ。本研究の結果は既存のシミュレーション結果と同様であった。
2. 材面中央部の表面ひずみの縮みが抑制される傾向は木取りと乾燥スケジュールによらず全ての条件で観察された。この傾向は特に心持ち正角の高温乾燥条件で顕著であった。
3. 乾燥終了時の表面ひずみとセット量の間には正の相関関係が認められた。表面ひずみを測定することでセット量のある程度推定できると考えられた。

Table 2-1. Specifications of each sample.

Sawing	Sample	MC (%)	HR	d_0 (kg/m ³)	AW (mm)
	BH1	48.5	0.80	442	3.7
Boxed-heart (BH)	BH2	44.7	0.90	438	2.8
	BH3	77.2	0.90	390	4.5
Pithless (PL)	PL	82.8	0.75	317	3.9

MC: Initial moisture content, HR: Heartwood ratio, d_0 : Oven-dry density,

AW: Mean annual-ring width.

Pithless: The timber with two edge-grain faces facing each other.

Table 2-2. Drying schedules.

	Run1			Run2			Run3		
	DBT (°C)	WBT (°C)	Time (h)	DBT (°C)	WBT (°C)	Time (h)	DBT (°C)	WBT (°C)	Time (h)
Steaming	95	95	10		N/A		75	75	10
Drying	120	90	10-22	120	90	14-28	70	40	136-181

DBT: Dry bulb temperature, WBT: Wet bulb temperature, N/A: Not applicable.

Note: Specimens were dried to a moisture content below 20%.

Table 2-3. The results of surface checks and internal checks after drying.

	Total length of surface checks (mm)				Total length of internal checks (mm)			
	BH1	BH2	BH3	PL	BH1	BH2	BH3	PL
Run1	0	0	0	0	136.1	207.6	76.1	57.1
Run2	149.1	196.1	69.7	N/A	140.8	200.2	70.0	N/A
Run3	367.8	234.2	148.2	0	0	0	0	0

N/A: Not applicable

Note: Total length of surface checks is the total value of the four surfaces of the timber.

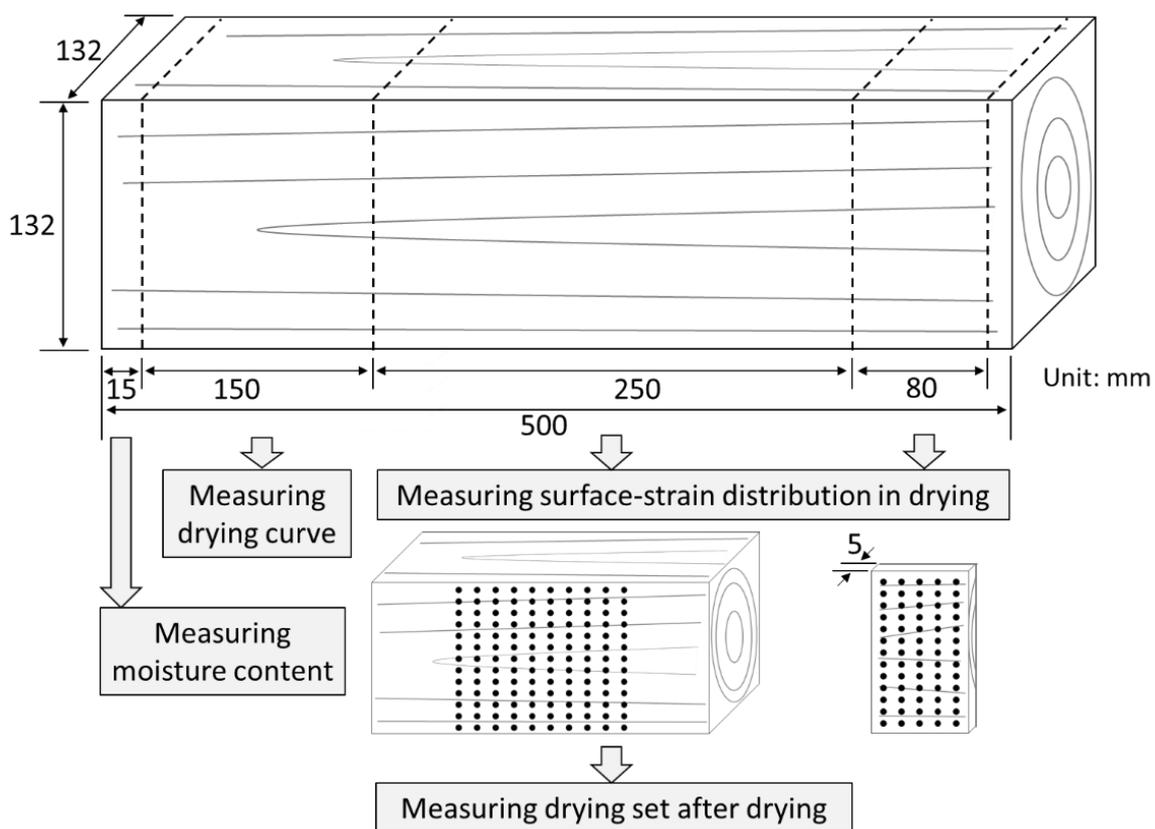


Fig. 2-1. Schematic of the specimen preparation for each test.

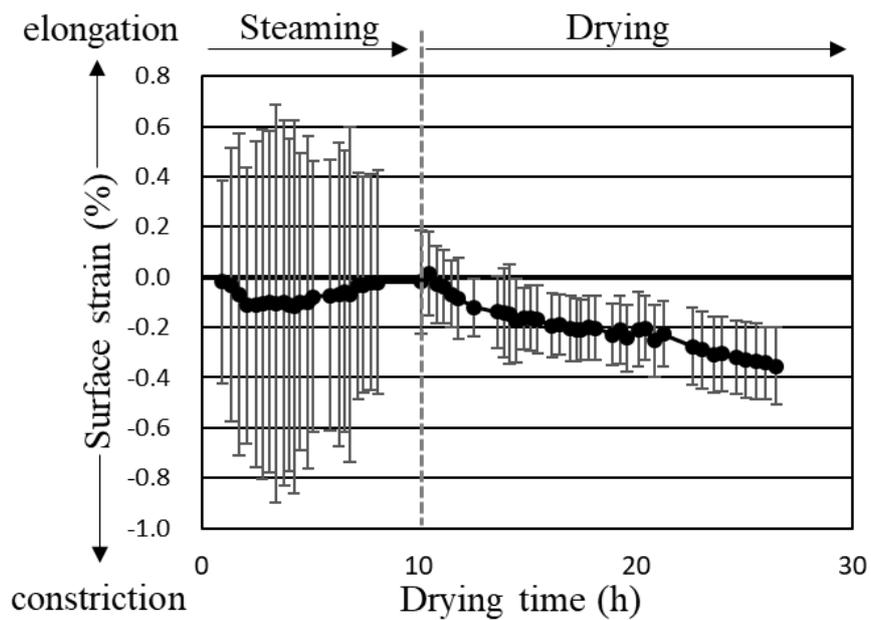


Fig. 2-3. Temporal changes of the surface strains in the longitudinal direction during drying (BH2, Run1).

Note : ●: Average of 117 sections, Error bar: Standard deviation.

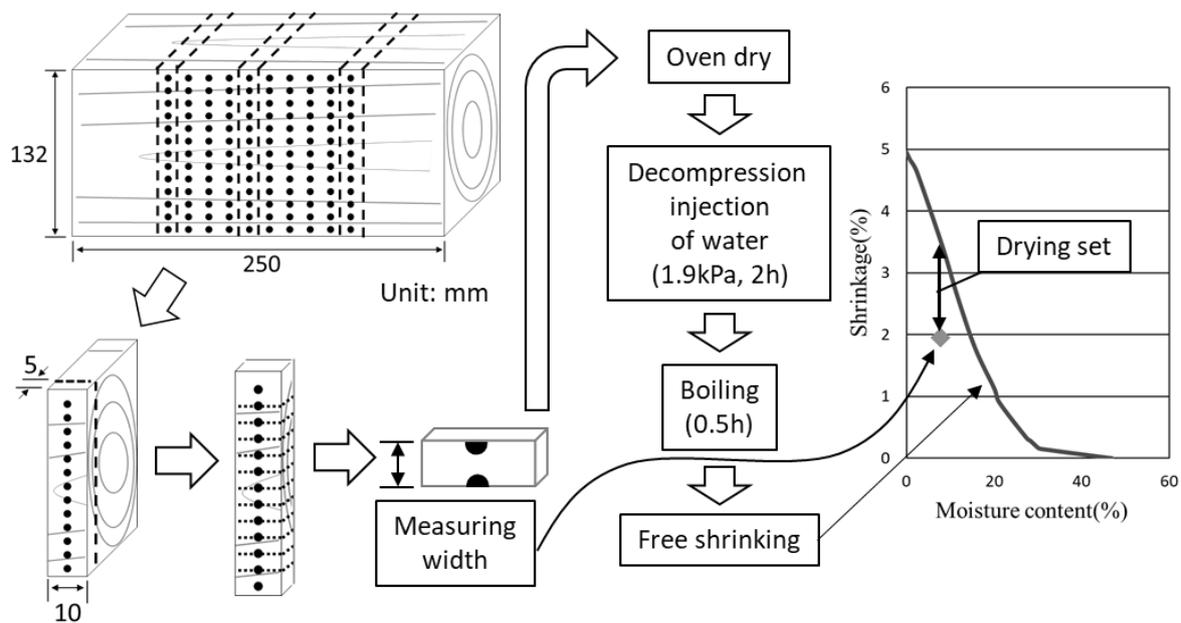


Fig. 2-4. Procedures for measuring the drying set.

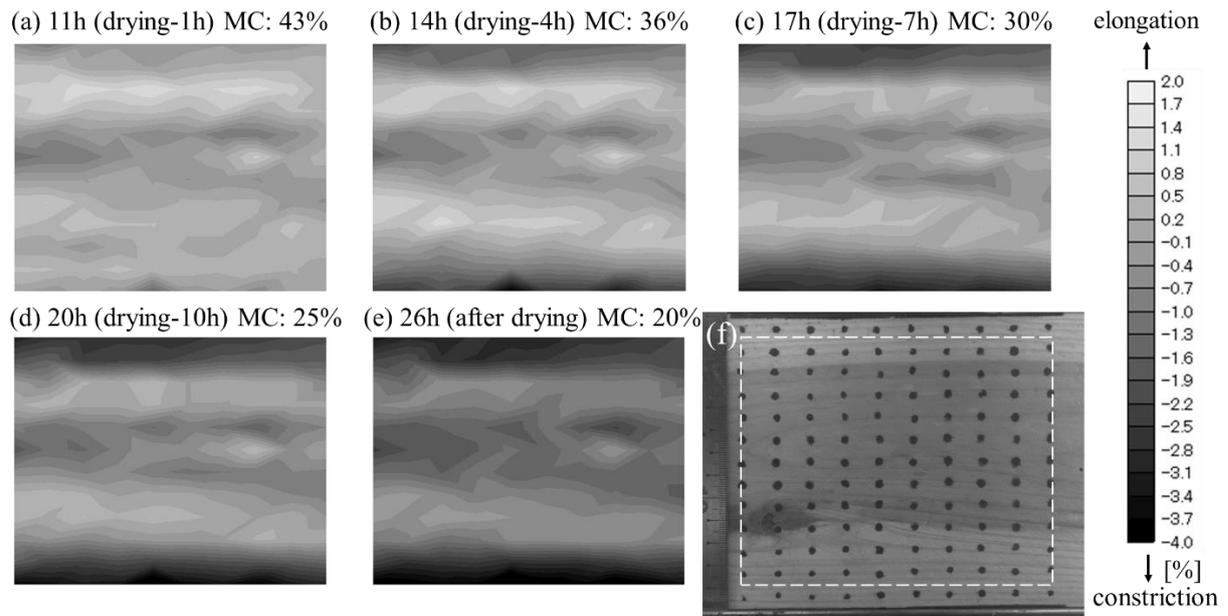


Fig. 2-5. Distributions of the surface strain in the transverse direction during and after drying (BH2, Run1).

Note: (a)-(e): Distributions of the surface strain at each time. (f): an example of captured image. MC is the moisture content estimated from the end-matched specimen.

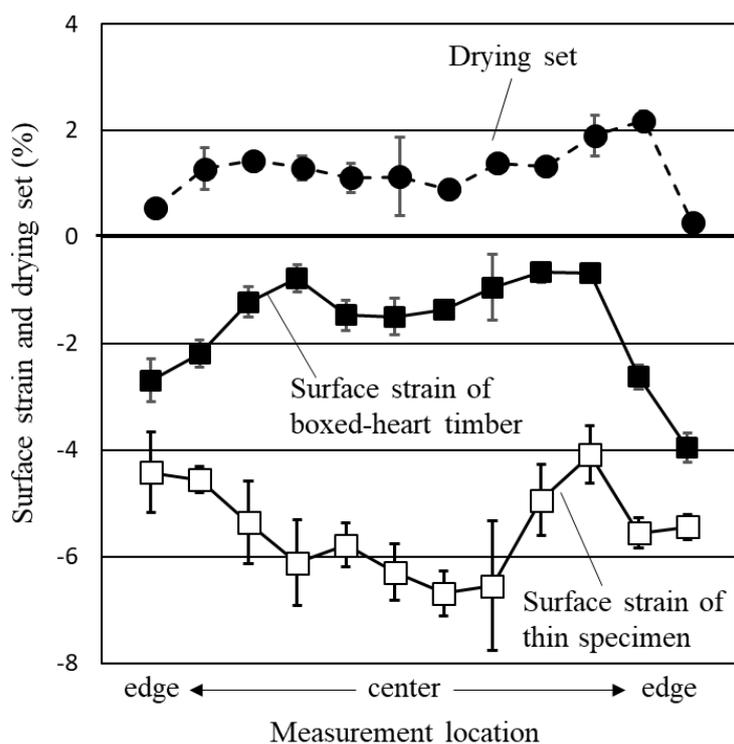


Fig. 2-6. Distributions of the surface strain and drying set in the transverse direction after drying (BH2, Run1)

Note: ■: Surface strain of boxed-heart timber after drying, □: Surface strain of the thin specimen at a moisture content of 2.5%, ●: Drying set after drying, Error bar: Standard deviation.

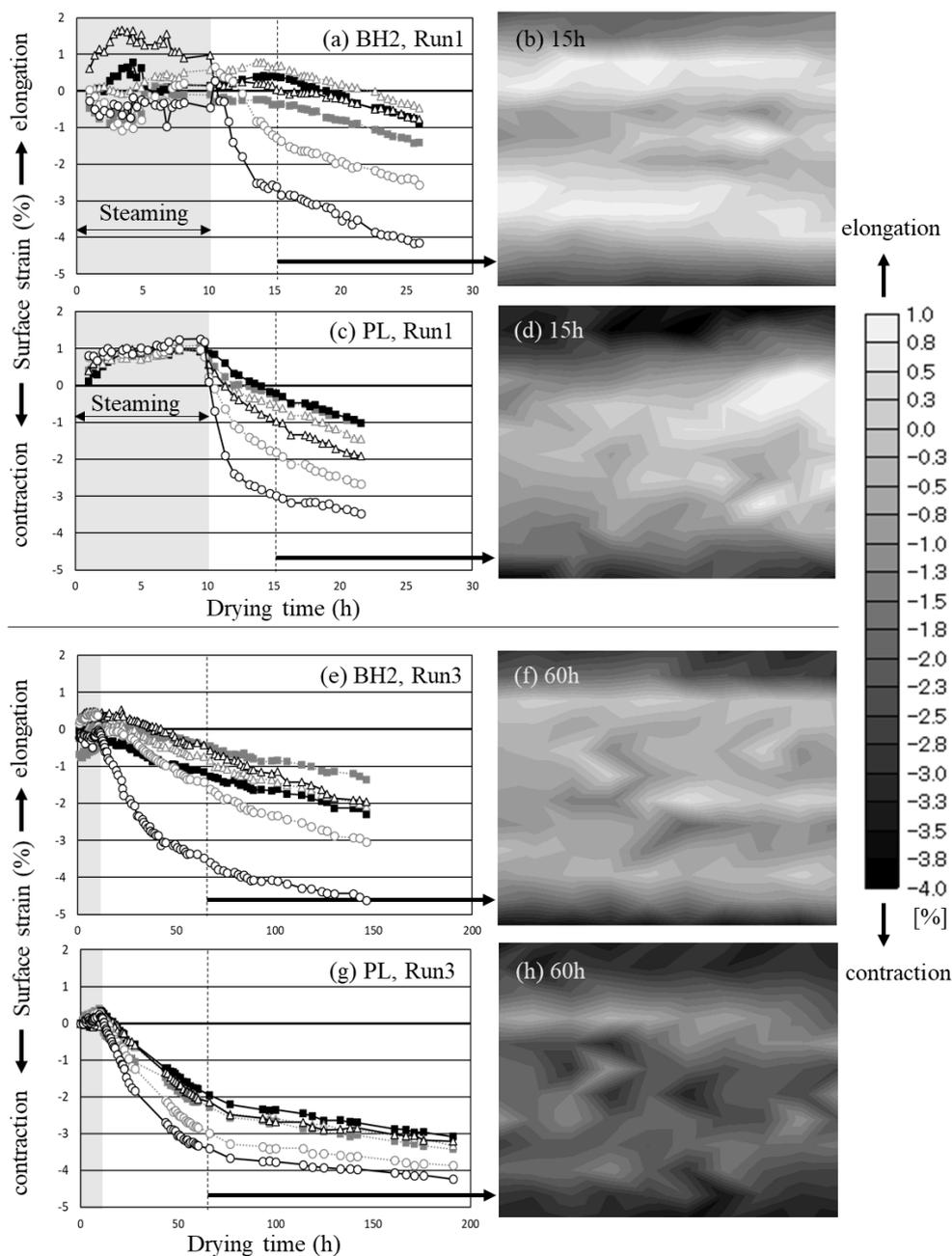


Fig. 2-7. Temporal change in the surface strain in the transverse direction for various sawing pattern and drying condition.

Note: Left column: Change in the surface strains during drying. The plots represent the average surface strain in a horizontal row (10 sections), ○: edge, △: middle, ■: center (see Fig. 2-2 for location). Right column: Distributions of surface strain at each drying condition.

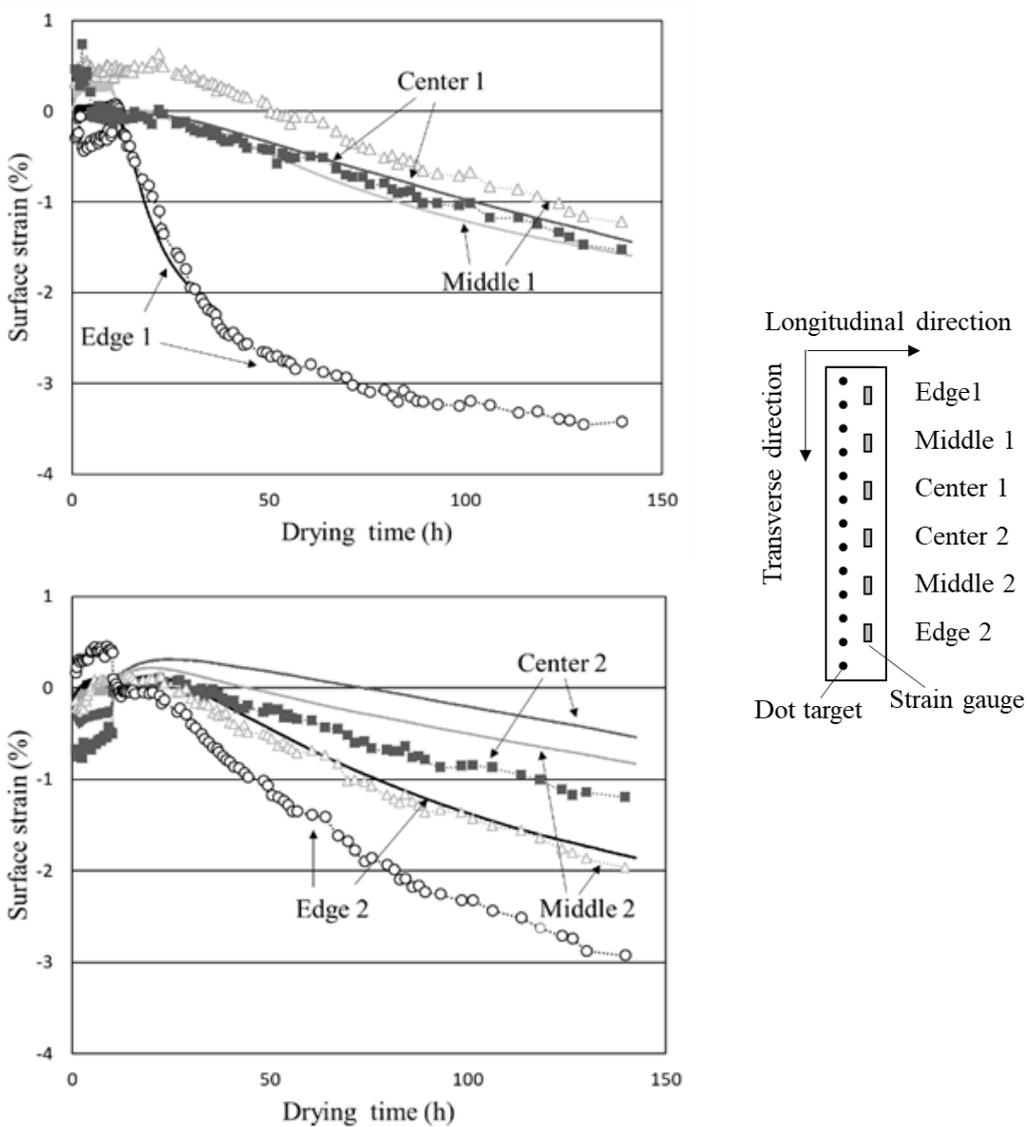


Fig. 2-8. Temporal change in the surface strain in the transverse direction measured by image analysis and a strain gauge (BH2, Run3).

Note: ○, △, ■: Image analysis (measured the targets closest to each strain gauge).
 Solid line: Strain gauge.

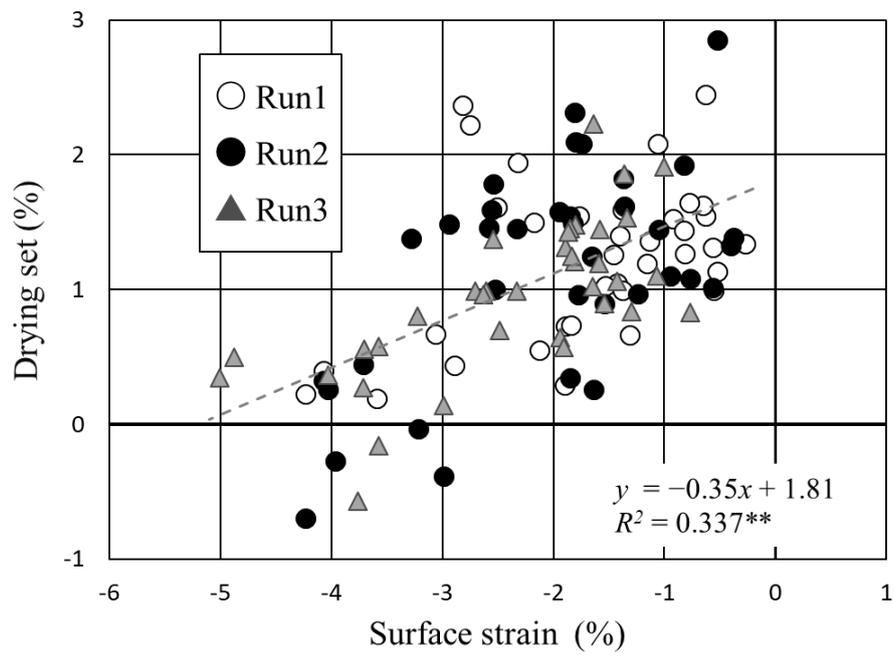


Fig. 2-9. Relationships between the surface strain and drying set after drying (BH2).

Note: **: $p < 0.01$

第3章 乾燥スケジュールがスギ心去り正角の内部応力に及ぼす影響

近年は国内の人工林の成熟化に伴い、末口径が 30cm 以上の大径木から製材される心去り正角や平角の乾燥技術の確立が求められている⁸⁹⁾。それらの製材に対する乾燥スケジュールの作成において乾燥応力を把握することは有用であるが、心去り正角については明らかにされていない。そこで本章ではピン打ちスライス法を簡易化した画像分析手法を用いた方法で解放ひずみを測定し、乾燥スケジュールがスギ心去り正角の内部応力に及ぼす影響を明らかにすることを試みた。心去り正角は木口断面の年輪の配列が対称的でなく、内部応力状態は複雑であると予想されることから、心持ち正角で測定が行われてきたような正角の直交方向だけでなく対角方向についても測定を行った。

3.1 実験方法

3.1.1 供試材料および乾燥試験

長さ 600 mm、断面寸法 120×120 mm のスギ心持ち正角 6 本と心去り正角 15 本の計 21 本の正角を用いた。初期含水率は 34%～87% (最小値～最大値) で、全乾密度は 334 ± 36 kg/m³ (平均値±標準偏差) であった。試験材の両木口をシリコンシーラントでシーリングした後、Table 2-1 に示す 3 つの乾燥スケジュールにて目標含水率を 15% として乾燥試験を行った。乾燥スケジュール HD90 は心持ち正角の乾燥スケジュールとして一般に用いられている、蒸煮+高温セット処理+中温乾燥(乾球温度 90°C)のスケジュールである¹⁸⁾。D90 は HD90 から高温セット処理を省いたものである。D70 は、心去り正角の乾燥に関する先行研究⁹⁰⁾において内部割れの発生が見られなかったスケジュールを参考にして乾球温度を 70°C と設定したものである。各乾燥スケジュールに心持ち正角 2 本と心去り正角 5 本ずつを供した。乾燥終了後、24 時間放冷した後に、試験材の中央部から厚さ 15 mm の横断面材を解放ひずみ測定用試験片として 4 枚切り出した。

3.1.2 解放ひずみ分布の測定

解放ひずみ測定用試験片を Fig. 3-1 に示す木取りによって分割し、厚さ 5 mm、幅 60 mm のスライス 23 枚を取得した。以後の試験では 23 枚のうち Fig. 3-1 のグレーの部分の 21 枚を用いた。分割は正角に対して直交方向 (Fig. 3-1-V, H) および対角方向 (Fig. 3-1-DR, DL) についてそれぞれ行った。スライスのサイズを揃えるために、対角方向のスライスは正角の最表層から少し中に入ったところから採取した。分割前に、試験片の測定面に白色の油性塗料 (油性スーパーコート、株式会社アサヒペン) を薄く塗布した後、油性マジック (マジックインキ No.700、寺西化学工業株式会社) で直径約 1mm の黒色ターゲットを付与し、スキャナー (GT-X980、セイコーエプソン株式会社) によって表面画像を取得した。1つの試験片から取得した 21 枚のスライスは 10 枚と 11 枚の 2つのグループに分けて Fig. 3-2 に示すような治具で挟み、分割前と同様にスキャナーで表面画像を取得した。画像分析には ImageJ⁸⁴⁾ を用いた。得られた画像を 2 値化処理した後、画像内におけるターゲットの重心座標を取得することで、分割前後の試験片の画像から 2 点間の解放ひずみを算出した。なお本実験で用いた画像の解像度は 5.3 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ であった。既報⁴¹⁾によれば、本研究の条件における解放ひずみの測定の不確かさは 0.001% 以下である。解放ひずみの測定が終了後、全乾法にて各スライスの含水率を測定した。

3.2 結果と考察

3.2.1 心持ち正角および心去り正角の解放ひずみ分布

Fig. 3-3 に心持ち正角および心去り正角の解放ひずみ分布および含水率分布の典型的な結果を示した。1つのグラフに Fig. 3-1 に示した 4つの分割方法の結果を示している。解放ひずみは正が伸び (圧縮応力からの解放) を、負が縮み (引張応力からの解放) をそれぞれ示す。心持ち正角は、HD90 の試験片には髓付近に内部割れが、D70 の試験片には材長全体にわたる表面割れが発生していた。このため、割れを含み測定ができなかった箇所についてはデータを除いている。心持ち正角の結果は既報⁵⁶⁾と同様 W 型のグラフとなり、

特に高温セット処理を含むスケジュール(HD90)で表層に顕著な正の解放ひずみを示した。心去り正角も表層の解放ひずみが顕著に大きい結果となったが、一方で材内層の解放ひずみについては特定の傾向がみられなかった。乾燥応力は、木材固有の収縮異方性と乾燥過程に形成される不均一な含水率分布によって材全体が均一に収縮しないことで発生すると考えられる⁹¹⁾。心持ち正角は年輪の配列と含水率分布が正角の中心について対称的であったが、一方で心去り正角は年輪の配列が正角の中心について非対称的であり、含水率分布も正角の中心について必ずしも対称的ではなかった。このように、木取りによって正角の年輪の配列と含水率分布のパターンが異なることで材内層部の解放ひずみの分布も変化することが推察された。また、乾燥前の時点で材内に残存する成長応力は心持ち正角と心去り正角では大きく異なることが推定され、心持ち正角では髓付近に接線方向および放射方向に大きな引張の成長応力が残存するが⁹²⁾、心去り正角内に残存する成長応力は比較的小さいと考えられる。材内に残存する成長応力の違いが、乾燥終了時の材内部の応力状態にも影響を与えたことが考えられた。木取りの違いが乾燥応力の形成に及ぼす影響については今後さらに検討を進める必要がある。

初期の乾球温度が大きくなるほど、表層の解放ひずみが大きくなる傾向は心持ち正角、心去り正角どちらも同じであった。乾燥終期に材表層に大きな圧縮応力が発生するのは、ドライグセットの形成が原因であると考えられている⁸⁶⁾。心去り正角についても、心持ち正角と同様の傾向を示すことから、高温セット処理を行うと材表層に大きなドライグセットが形成されることが推察された。

3.2.2 乾燥スケジュール間での心去り正角の解放ひずみ分布の違い

心去り正角における乾燥スケジュール間の結果を比較するために Fig. 3-4 に示す方法で解放ひずみ傾斜と含水率傾斜を算出した。心去り正角の解放ひずみ傾斜の結果を Fig. 3-5 に示した。なお本研究では、全ての心去り正角について乾燥終了時に表面割れ及び内部割れは確認されなかった。心去り正角の解放ひずみ傾斜の結果について二元配置分散分析を

行ったところ、乾燥スケジュールおよび分割方法で統計的に有意な差が認められた。解放ひずみ傾斜は乾燥初期の乾球温度が高いほど大きくなり、D70に比べるとD90は1.5~1.8倍、HD90は1.9~3.1倍であった。分割方法で比較すると、今回の測定方法では直交方向の解放ひずみ傾斜は対角方向のひずみ傾斜の2.0~2.7倍程度であった。ただ、本研究では対角方向についてはスライスを正角の最表層ではなく少し中に入ったところから採取しており、分割方法が変わればひずみ傾斜の傾向も変化する可能性がある。Fig. 3-3の結果にあるように、対角方向では直交方向とは異なり、解放ひずみの最大値が最外層部（スライスNo. 1および23）ではない場合も散見された。第2章にあったように、正角の材端部は材面中央部に比べると乾燥過程でより大きく縮み、ドラインゲット量は小さいという結果が得られており、材端部の乾燥過程は自由収縮に比較的近いものと考えられる。対角方向の解放ひずみ分布については今後さらに検討を進める必要がある。

三井ら⁹⁰⁾は断面寸法135 mm×135 mmのスギ心去り正角を用いて乾球温度90℃と70℃で乾燥試験を行ったところ、乾球温度70℃の条件では内部割れの発生が確認されなかったが、乾球温度90℃の条件では内部割れの発生が認められたことを報告している。また、断面寸法125 mm×130 mmのスギ心去り正角を乾球温度80~90℃のスケジュールで乾燥試験を行った報告⁹³⁾でも、全試験材の20%以上に内部割れの発生が確認されている。このように、心去り正角は高温セット処理を行わない一般的に中温乾燥と呼ばれるような乾球温度100℃以下の条件においても内部割れが発生することが分かっている。初期の乾球温度が高い条件ほど材内部の解放ひずみ傾斜は大きくなり、材内部に内部割れが生じるような応力分布状態が形成されることが本研究の結果からも推察された。乾球温度が70℃以下の乾燥条件で心去り正角を乾燥すると、内部割れの発生をかなり抑制できる可能性がある。

含水率傾斜の結果をFig. 3-6に示した。含水率傾斜の結果について二元配置分散分析を行ったところ、乾燥処理、分割位置、およびその相互作用において統計的に有意な差は認められなかった。既報⁵⁶⁾によれば本研究の含水率傾斜の領域(0~20%)において、含水

率傾斜が解放ひずみ傾斜に与える影響は最大で見積もっても -0.02%/ % (解放ひずみ傾斜 / 含水率傾斜) 程度である。このことから、本研究においては解放ひずみ傾斜へ与える含水率傾斜の影響は小さいと考えられた。

3.2.3 心去り正角の表層の解放ひずみと解放ひずみ傾斜との関係

Fig. 3-7 に心去り正角の表層の解放ひずみと解放ひずみ傾斜との関係を示した。表層の解放ひずみと材内の解放ひずみ傾斜との間には強い正の相関関係が認められた ($R = 0.9275$ 、 $p < 0.01$)。心持ち正角の解放ひずみ分布を測定した既報⁵⁶⁾でも同様の関係が報告されている。既報⁵⁶⁾ではスギ心持ち正角を用いて 95°C の蒸煮および乾球温度 120°C の高温セット処理を行った5種類の乾燥スケジュールと 85°C の蒸煮および最大乾球温度 80°C の乾燥スケジュールの計6種類のスケジュールで乾燥試験を行い、表層の解放ひずみと解放ひずみ傾斜との関係について回帰直線を導出している。その回帰直線と本研究の結果から導出した回帰直線はよく一致した (Fig.3-7)。心去り正角についても心持ち正角と同様、表層の解放ひずみを測定することで材内の解放ひずみ傾斜の推定が可能であると考えられた。

3.3 摘要

乾燥スケジュールがスギ心去り正角の内部応力に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、スライス法を用いて乾燥終了時の心去り正角の解放ひずみ分布を測定した。以下にその詳細を示す。

1. 心持ち正角と同様、心去り正角についても高温セット処理を行うと乾燥終期に表層が顕著な圧縮応力を示すことが明らかとなった。初期の乾球温度が高い条件ほど材内部の解放ひずみ傾斜は大きくなり、材内部に内部割れが生じるような応力分布状態が形成されることが推察された。
2. 分割方法で比べると、今回の測定方法では直交方向の解放ひずみ傾斜は対角方向の 2.0 ~ 2.7 倍程度であった。
3. 心持ち正角と同様、心去り正角においても表層の解放ひずみと材内の解放ひずみ傾斜

との間には強い正の相関関係が見られた。心去り正角表層の解放ひずみを測定することで材内の解放ひずみ傾斜の推定が可能であると考えられた。

Table 3-1. Drying schedules.

	HD90			D90			D70		
	DBT (°C)	WBT (°C)	Time (h)	DBT (°C)	WBT (°C)	Time (h)	DBT (°C)	WBT (°C)	Time (h)
Steaming	95	95	6	95	95	6	75	75	6
HTLH	120	90	12		N/A			N/A	
Drying	90	60	48-156	90	60	60-186	70	50	162-246

DBT: Dry bulb temperature, WBT: Wet bulb temperature, N/A: Not applicable,

HTLH: High temperature and low humidity pretreatment, Drying: Steam-heated drying.

Note: Specimens were dried to a moisture content below 15%.

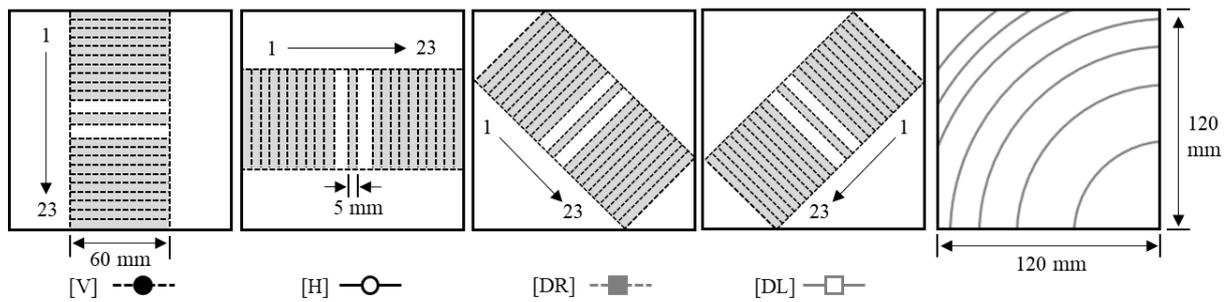


Fig. 3-1. Schematic for the dividing method of cross-cut specimens.

Note: Arrows extending from 1 to 23 indicate the direction of the slice number. The gray section (Slice No. 1~10, 12 and 14~23) is the measured specimens.

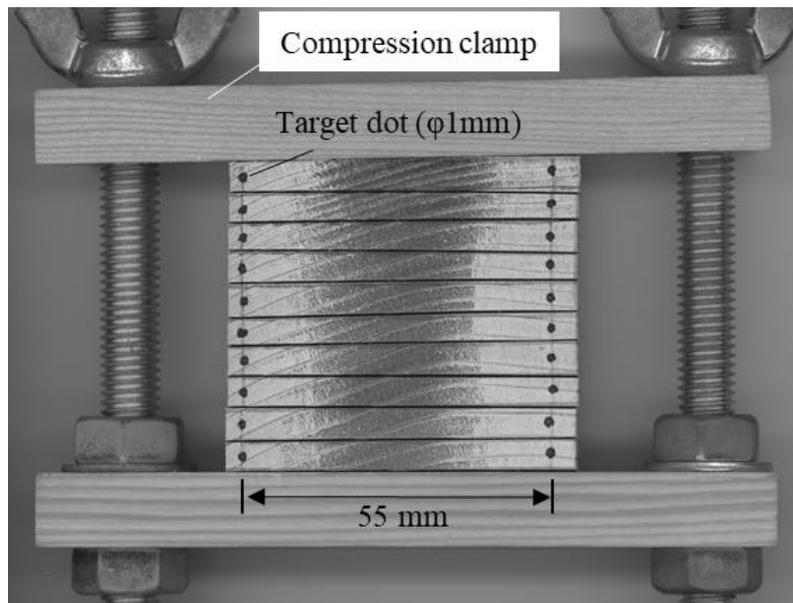


Fig. 3-2. Measurement of released strain.

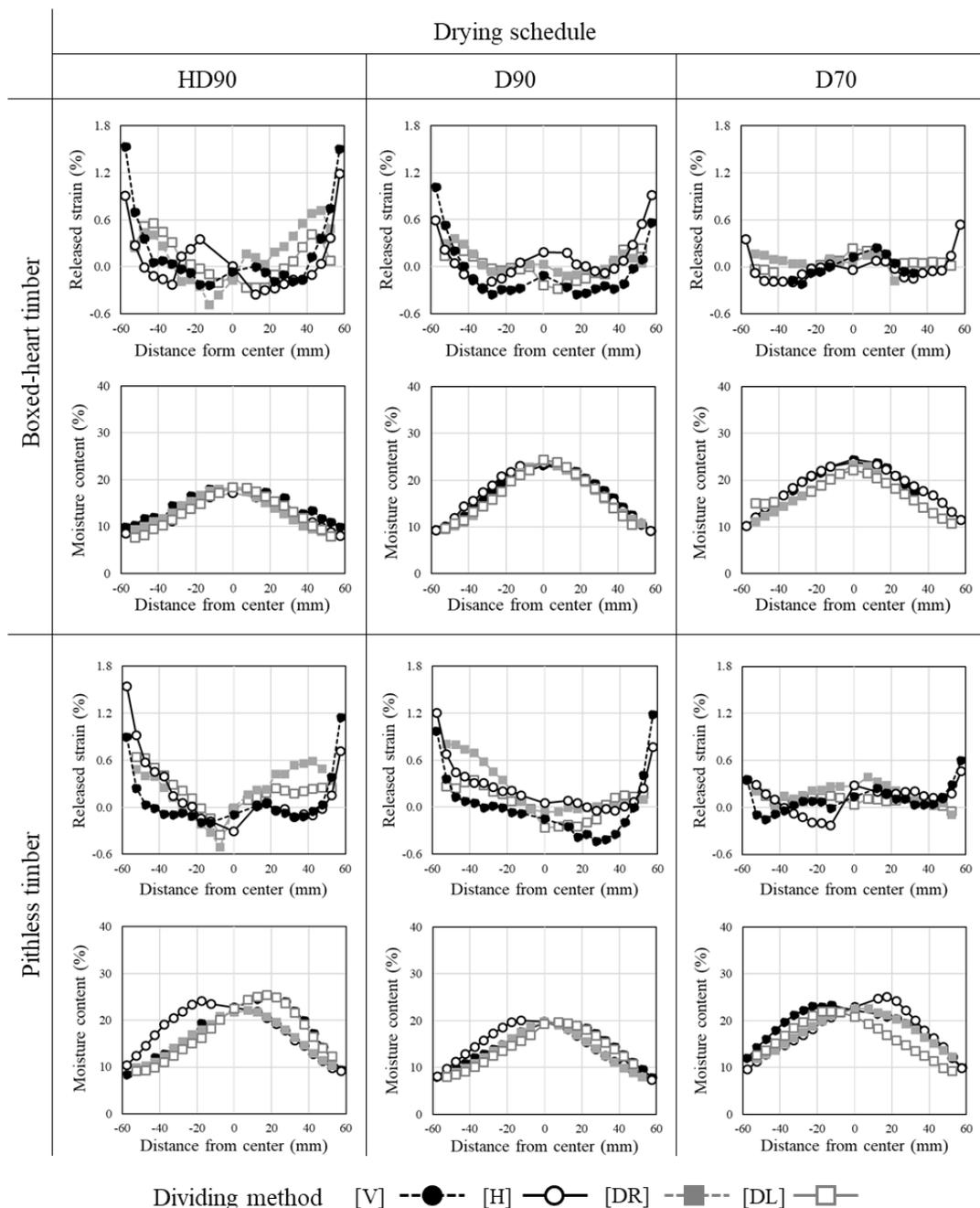


Fig. 3-3. The distribution of released strain and moisture content of dried boxed-heart timber and pithless timber.

Note: ●, ○, ■, □: See Fig. 1 for dividing pattern. See Table 3-1 for the drying schedule. Negative and positive distance from center indicate slice number 1 ~ 10 and 14 ~ 23, respectively. Negative and positive released strains indicate contraction and elongation, respectively.

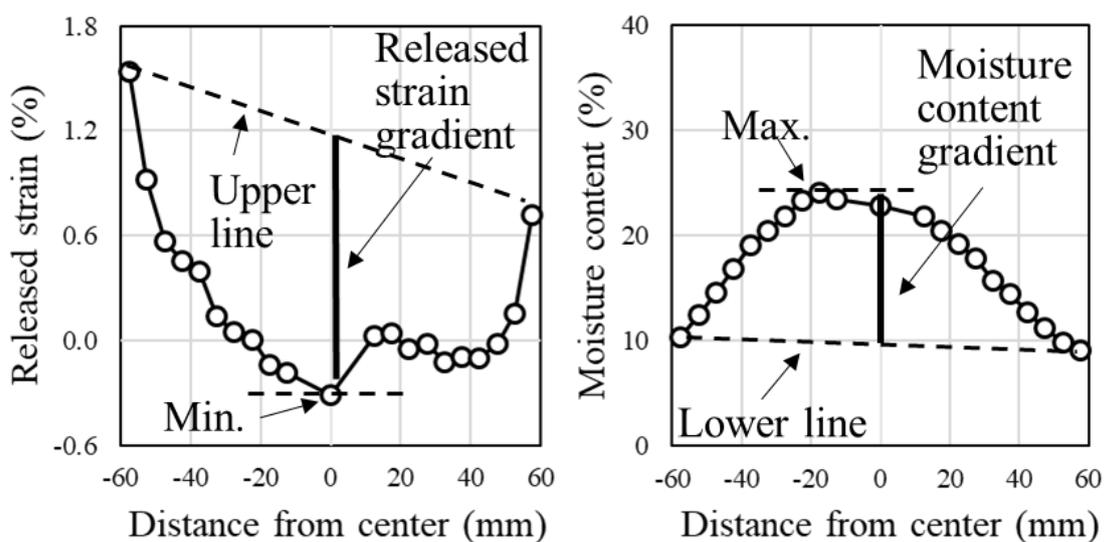


Fig. 3-4. Method for determination of released strain gradient and moisture content gradient.

Note: Released strain gradient is the distance between the center of upper line to minimum value. Moisture content gradient is the distance between maximum value to the center of lower line.

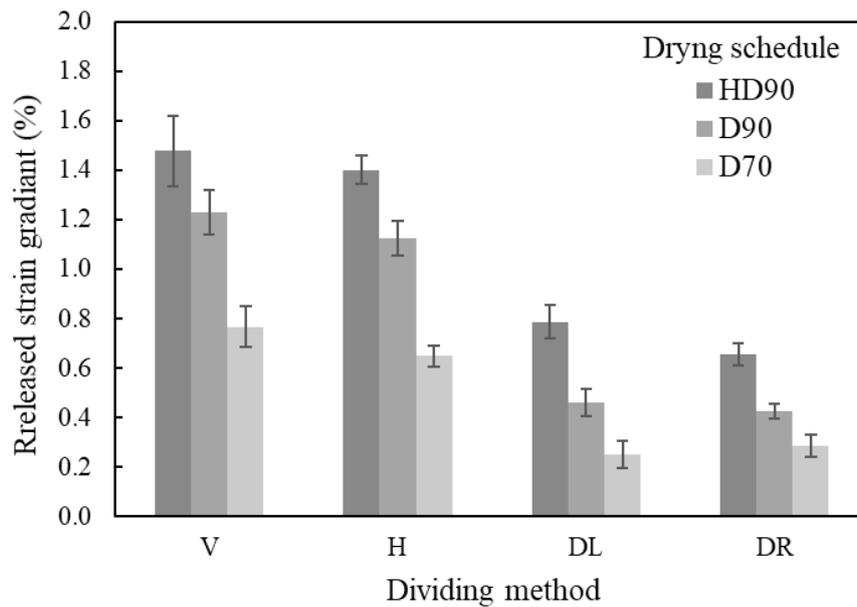


Fig. 3-5. Released strain gradient of dried pithless timbers for each drying schedule.

Note: Error bar: Standard error, $n = 5$. See Fig. 3-1 and Table 3-1 for dividing method and drying schedule, respectively. Two-way analysis of variance (ANOVA): effect of drying schedule, $p < 0.001$; effect of dividing method, $p < 0.001$; interaction between drying schedule and dividing method, $p = 0.117$.

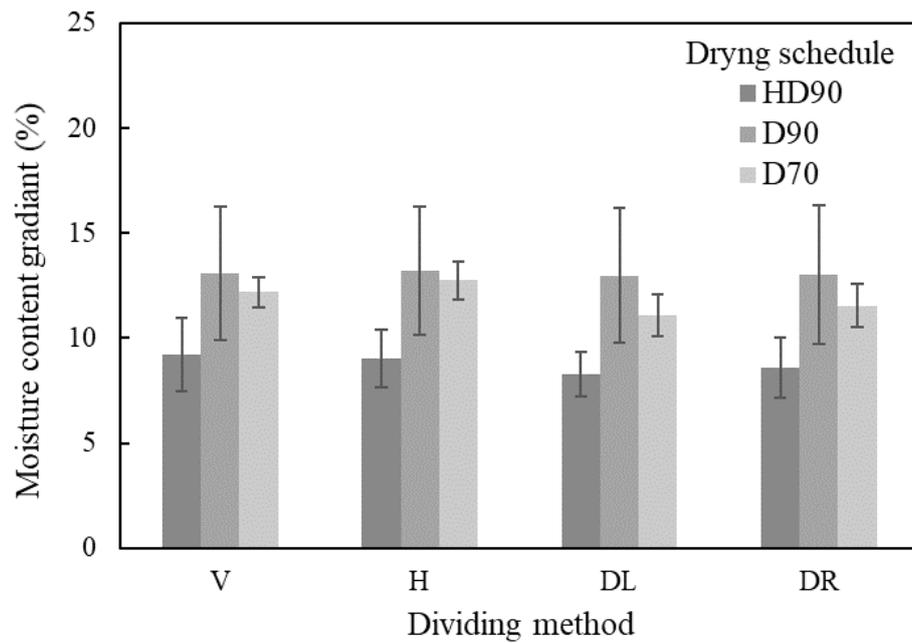


Fig. 3-6. Moisture content gradient of dried pithless timbers for each drying schedule.

Note: Error bar: Standard error, $n = 5$. See Fig. 3-1 and Table 3-1 for dividing method and drying schedule, respectively. Two-way analysis of variance (ANOVA): effect of drying schedule, $p = 0.419$; effect of dividing method, $p = 0.0727$; interaction between drying schedule and dividing method, $p = 0.685$.

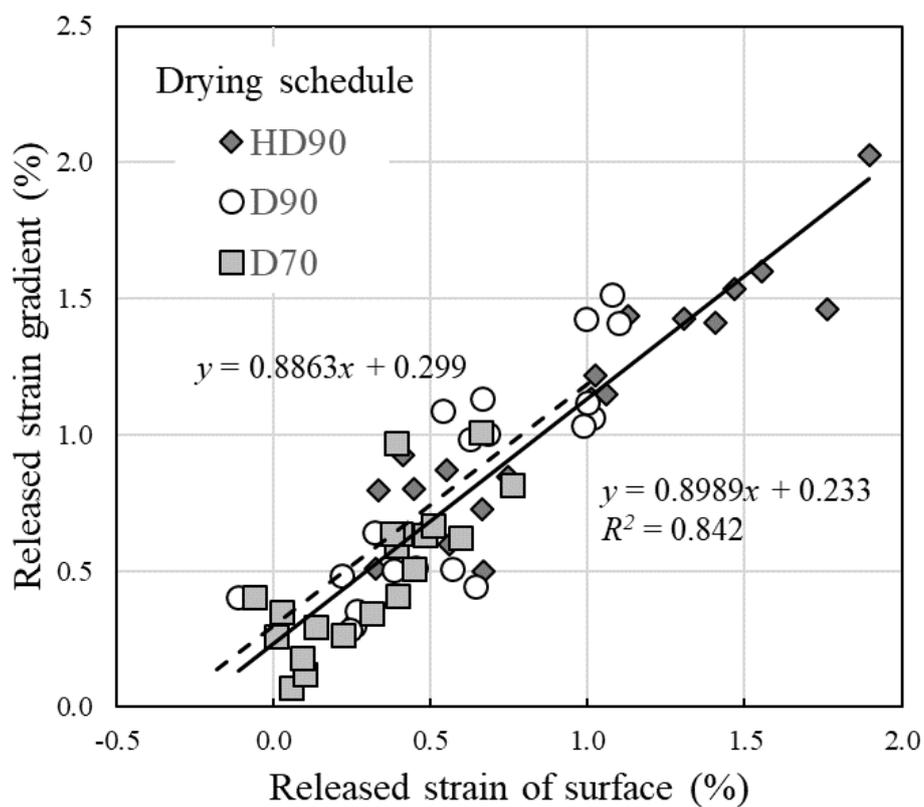


Fig. 3-7. Relationship between the released strain of surface (average of slices 1 and 23) and the released strain gradient of pithless square timber.

Note: ◆, ○, ■: See Table 3-1 for drying schedules. Straight line: Regression line of this study. Dotted line: Regression line of previous report for boxed-heart timber⁵⁶⁾.

第4章 高温乾燥によってスギ心持ち正角に発生した内部割れの位置・形状

過度な高温乾燥によって発生する内部割れは、材の強度性能への影響が懸念されている。内部割れが強度性能へ与える影響は材の木取りと加力方向で大きく異なり、それには内部割れの位置や形状が影響していると考えられる。しかし、材内のどの位置にどのような形状の内部割れが発生するのかは明らかにされていない。本章では、内部割れと強度性能との関係を解明する上での基礎となる知見を得ることを目的として、スギ心持ち正角に発生した内部割れの位置および形状について分析を行った。

4.1 実験方法

4.1.1 供試材料

全国9県から調達したスギ心持ち正角（寸法 $105 \times 105 \times 3000$ mm）1072本を用いた。試験材は蒸煮および乾球温度 120°C 以上で高温セット処理を行ったが、高温セット処理後の乾燥も含め、処理時間および温度条件は同一ではなかった。寸法および重量から気乾密度を計測後、材端部から700 mm以上離れた位置から厚さ25 mmの試験片を切り出し、スキャナーで横断面のカラー画像を取得した。画像の保存形式はJPEGとし、取得解像度は200 dpiとした。画像取得後、全乾法にて試験片の含水率をすぐに計測した。用いた正角の含水率は 14.2 ± 6.6 %で気乾密度は 440 ± 54 kg/m³であった（いずれも平均±標準偏差）。正角1072本のうち、内部割れが全く見られなかった94本を除いた978本を今回は計測の対象とした。

4.1.2 内部割れ計測

スキャンした画像から、個々の正角の横断面を 800×800 pixel（ 102×102 mm）のサイズにトリミングした。画像内に背景を含まないようにするため、トリミング画像の寸法は正角の断面寸法よりも若干小さく設定した。画像編集ソフトを用いて目視によって内部割

れ箇所を画素単位で白色に塗りつぶし、処理画像を tiff 形式で保存した。処理画像を 2 値化し、画像解析ソフト ImageJ⁸⁴⁾を用いて独立した 1 つ 1 つの内部割れの面積、長さ、幅および画像内における重心座標を計測した。本試験では、隣接する画素が 1 つでもあれば同じ割れとみなし、それ以外は独立した別の割れとしてカウントした。また、長さおよび幅は最大フェレー径 (Feret's Diameter)⁹⁴⁾および最小フェレー径で算出した。測定結果の一例を Fig. 4-1 に示した。

4.2 結果と考察

4.2.1 抽出された内部割れ

978 枚の横断面画像から合計で 16947 個の内部割れを抽出した。内部割れ単体の面積および長さのヒストグラムを Fig. 4-2 に示した。内部割れ面積および長さとも小さな割れが全体の大半を占めた。内部割れ長さの分布では小さいものが多く現れるという結果は従来の齋藤らの報告⁷¹⁾とも同様であった。本研究では、数個の割れが連なって発生していたものを 1 つの割れとはみなさずに個別の割れでカウントしたため、小さな割れに偏る傾向がより顕著になったと考えられた。試験片 1 枚ごとの内部割れの合計面積および合計長さのヒストグラムを Fig. 4-3 に示した。試験片 1 枚ごとの合計値の結果も内部割れ単体の結果と同様に小さいものが多く現れたが、その偏りは小さかった。

4.2.2 内部割れの横断面内分布

試験片の含水率で区分したときの、横断面内における内部割れの面積、長さ、割合の結果を Fig. 4-4、Fig. 4-5 および Fig. 4-6 にそれぞれ示した。Fig. 4-4 および Fig. 4-5 は円の中心が内部割れの重心座標、円の直径が内部割れの面積もしくは長さを表す。Fig. 4-6 の格子内の数字は、重心座標が格子内にある割れの個数を示し、格子の色は横断面内における発生割合を表す。

試験片の含水率別でみると、含水率 20%以上では外周部と心割れが起こった中心部に多

くの割れが集中しており、割れも小さかった (Fig. 4-4-a, b, c)。髓付近に発生する内部割れは心割れと呼ばれ、蒸煮などの湿熱による成長応力の解放によって発生することが知られている⁹⁵⁾。このため、含水率が高い段階から髓付近に内部割れが多く発生していた。含水率が20%を下回ると髓付近以外の中央部にも多くの割れが現れ、長さが30 mmを超えるような大きな割れが多数現れた (Fig. 4-5-d, e, f)。さらに含水率15%を下回ると面積が100 mm²を超えるような大きな割れが多数現れた (Fig. 4-4-e, f)。

Fig. 4-4 および Fig. 4-5 から明らかなように面積および長さの大きな内部割れは正角の四隅および髓付近とそれを結ぶ対角線上に多く確認された。断面内における発生割合をみると、試験片含水率20%以下 (Fig. 4-6-d, e, f) でも3割程度は正角の対角線付近以外の位置に発生していた。経験的に心持ち正角の内部割れは正角の対角線上に発生することが知られており^{71, 96)}、本研究はそれを裏付ける結果となった。

含水率と内部割れの関係については過去に多くの検討がされてきた。小田ら⁹⁷⁾はスギ心持ち正角を高温低湿乾燥したときの内部割れ長さは含水率15%未満の材で特に大きかったことを報告している。吉田ら⁹⁸⁾は高温セット処理後、乾球温度110°C、乾湿球温度差20°Cの条件で乾燥させた場合、含水率20%を下回った材で長さの大きな内部割れが存在する材が多かったことを報告している。また、滝本ら⁶⁶⁾は仕上がり含水率が10%を下回ると内部割れ面積が極端に大きい値が出現する傾向が見られたことを報告している。小原ら⁶⁴⁾も含水率10%以下で面積が大きな内部割れの発生がみられたと報告している。本試験の結果も従来の結果と同様の傾向を示すものであった。またスギ心持ち正角の乾燥における割れの発生時期について、小田ら⁹⁹⁾は内部割れの発生時期は含水率40~30%付近であることを考察しているが、本研究の結果からも材によっては比較的高い含水率領域ですでに内部割れが発生することが推察された。

4.2.3 内部割れの各パラメータ間の関係

1つ1つの内部割れの長さと面積との関係を Fig. 4-7 に示した。内部割れ長さと面積の

関係は2次式でよくあらわされ、ある程度の換算が可能であると考えられた。内部割れの面積を算出するのに、内部割れを近似的にひし形とみなして割れ幅と長さから面積を算出する手法が用いられる⁶⁴⁻⁶⁶⁾。そこで Fig. 4-8 に内部割れ面積を内部割れ長さ×幅÷2で推定した値と実測値との関係を示した。Fig. 4-1にもあるように、内部割れは線形の割れ以外に髓付近に星形の割れが発生する。今回はそのような星形の割れを除くため、Fig. 4-8では実測面積を凸包処理した面積で割った面積包絡度 (Solidity)⁹⁴⁾が0.55以上の割れのみを対象とした。対象の割れは14885個で全体の88%であった。推定値に比べると実測値は1.08倍程度大きかった。内部割れはひし形に比べるとやや丸みを帯びた形をしていることから、ひし形とみなした推定値は実測値に比べて若干低く見積もられる傾向があると推察されたが、面積を近似的にひし形とみなす従来の計測方法は妥当であると考えられた。

試験片ごとの割れ最大面積と合計面積および割れ最大長さと合計面積の関係を Fig. 4-9 に示した。割れ面積および長さの両者について、最大値が大きくなると合計値も大きくなる傾向が見られた。内部割れを評価する指標としてどのパラメータが最良かは強度性能との関係から決定されるべきであり、今後さらなる検討が必要である。

試験片ごとの内部割れ個数と内部割れ合計面積および内部割れ合計長さの関係を Fig. 4-10 に示した。内部割れ個数が増えると内部割れ合計面積および内部割れ合計長さは大きくなる傾向が見られた。決定係数 R^2 は合計面積が0.3833なのに対して、合計長さは0.7318と大きく異なった。山下ら⁷²⁾も内部割れ個数と内部割れ合計面積および合計長さとの間に正の相関が認められ、その相関は内部割れ個数と内部割れ合計長さの間でより強かったことを報告している。また内部割れ合計面積および合計長さと材質値との関係を検討した結果、合計長さは接線方向収縮率のみに相関が認められたのに対して合計面積は接線方向収縮率を含む7つの材質指標値と相関が認められたことを報告している。内部割れの発生個数が増えるほど合計長さは大きくなるが、割れの拡大にはそれ以外に木材の基礎的な性質に係る要因が関係していることが考えられた。

なお本試験では材中央部に発生する内部割れを対象としたが、内部割れは材長方向で変

動することが知られている⁷²⁻⁷³⁾。特に接合強度に関係する、材の木口付近で発生する木口割れについては別途検討が必要であると考えられる。

4.3 摘要

高温セット処理工程を含む乾燥によってスギ心持ち正角に発生した内部割れの位置および形状を分析した。その結果以下の知見を得た。

1. 面積および長さの大きな内部割れは正角の対角線上付近に偏在していた。
2. 含水率が20%を下回ると長さが30 mmを超えるような大きな割れが多数現れ、含水率15%を下回ると面積が100 mm²を超えるような大きな割れが多数現れた。
3. 内部割れをひし形とみなして割れ幅と長さから内部割れ面積を推定可能であった。

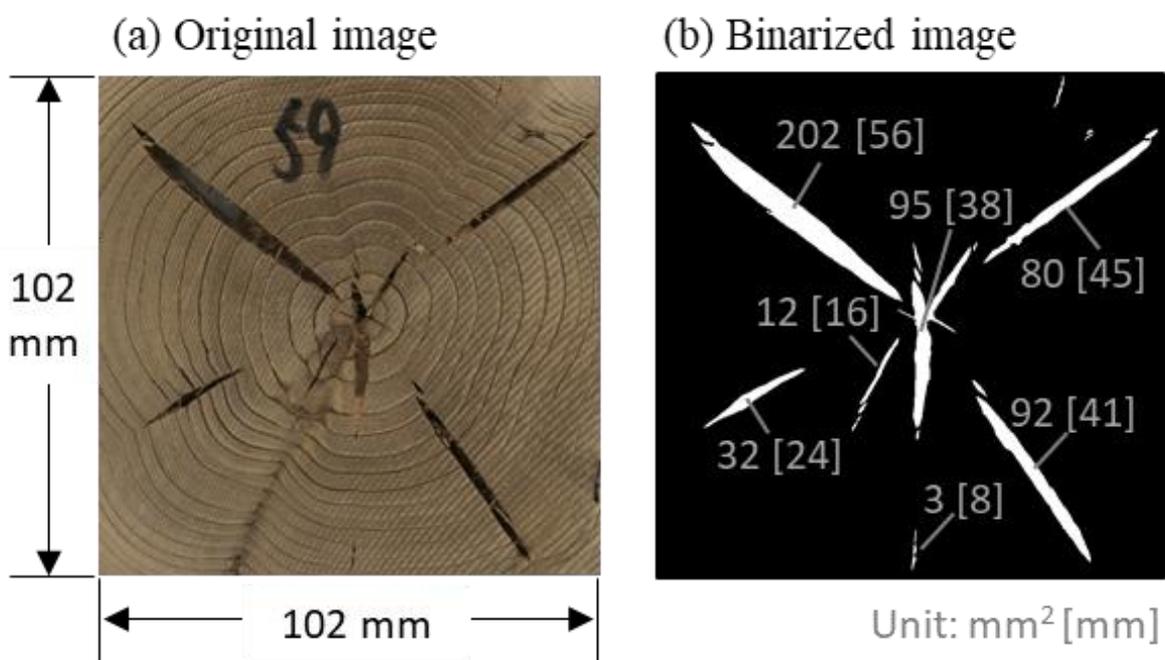


Fig. 4-1. An example of measuring result of internal checks.

Note: The gray numbers in (b) indicate internal check area and length.

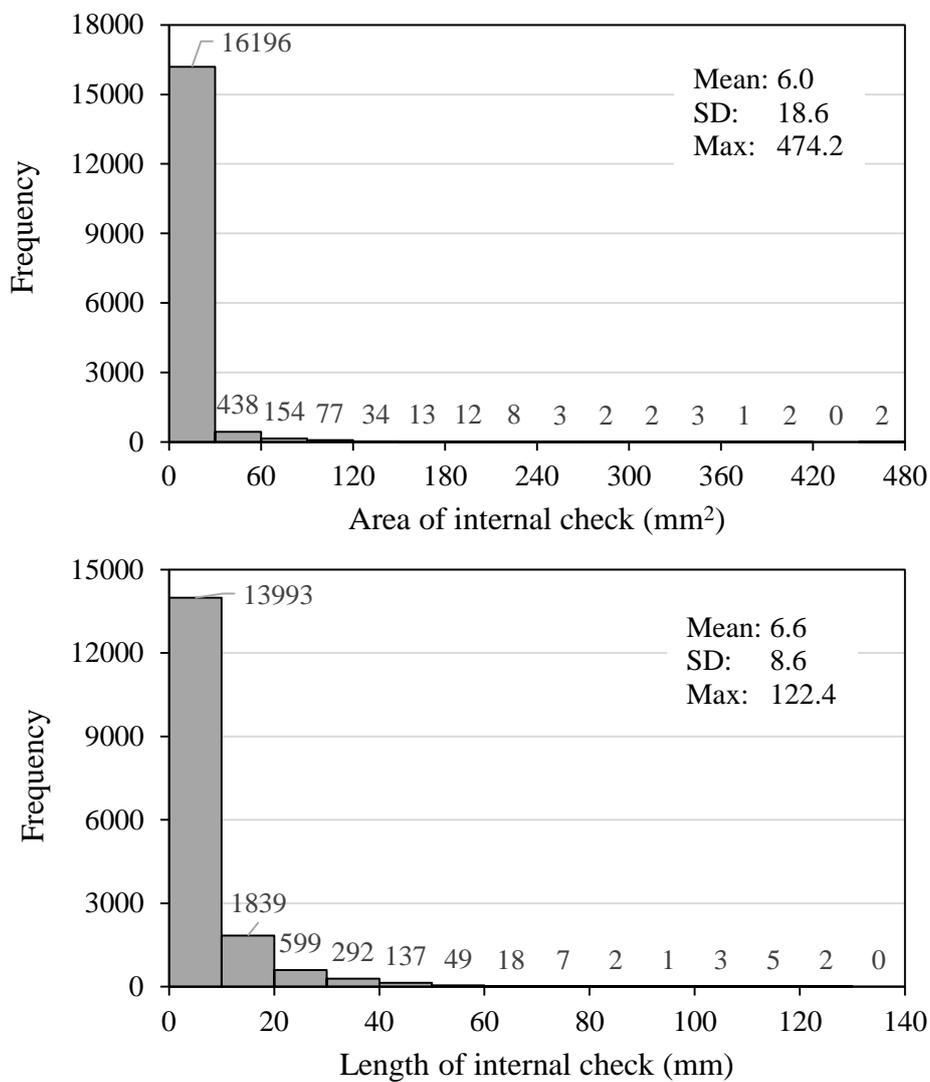


Fig. 4-2. Histograms of area and length of internal check.

Note: $N = 16947$. SD: standard deviation.

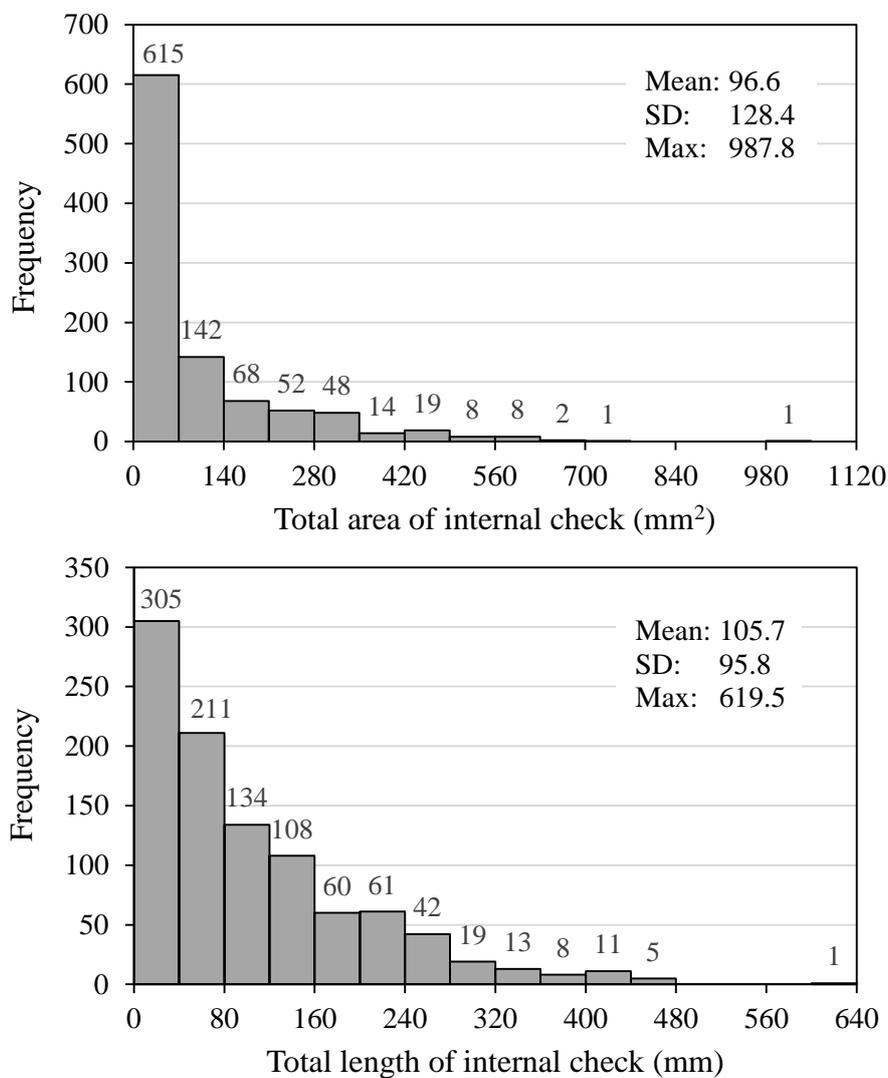


Fig. 4-3. Histograms of total area and total length of internal check.

Note: The total value is the sum of the internal checks that occurred in one test specimen. $N = 978$. SD: standard deviation.

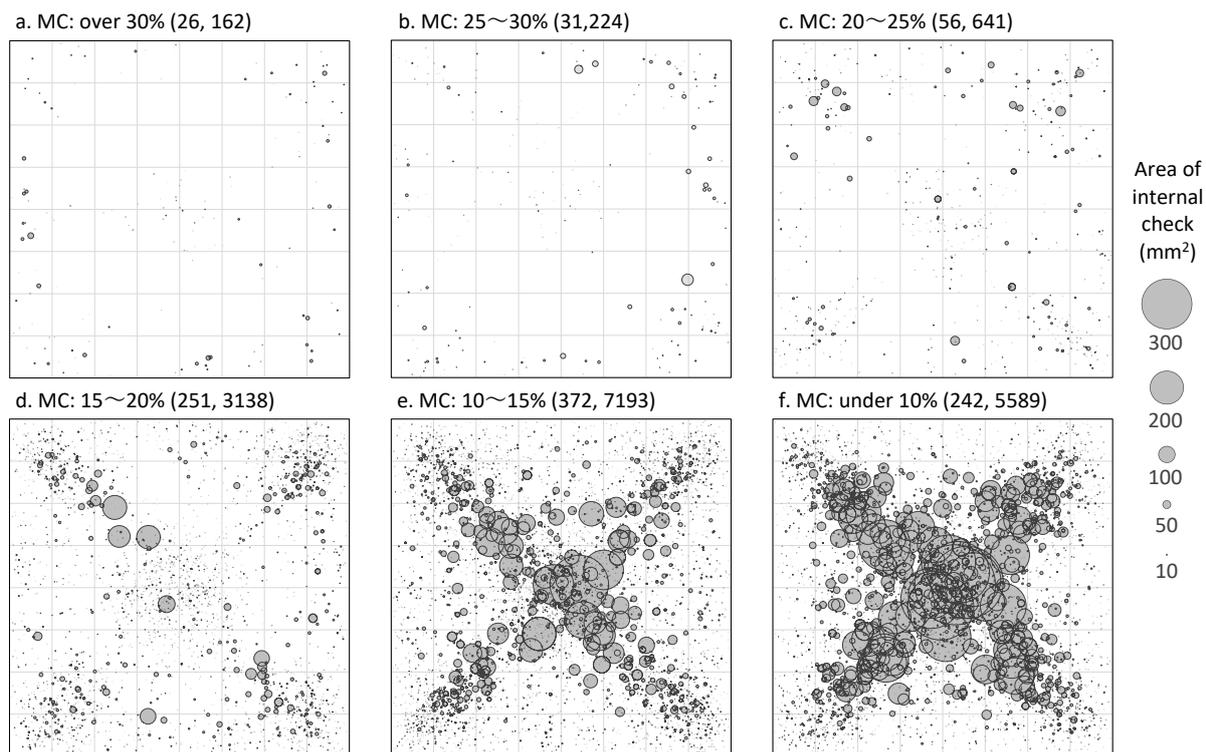


Fig. 4-4. Distribution of internal check area for transvers section classified by moisture content.

Note: The center and the diameter of the circle indicate the coordinates of center and the area of the internal check, respectively. MC indicates the moisture content of a test specimen for 25 mm thick. The numbers in parentheses are number of specimens and number of internal checks.

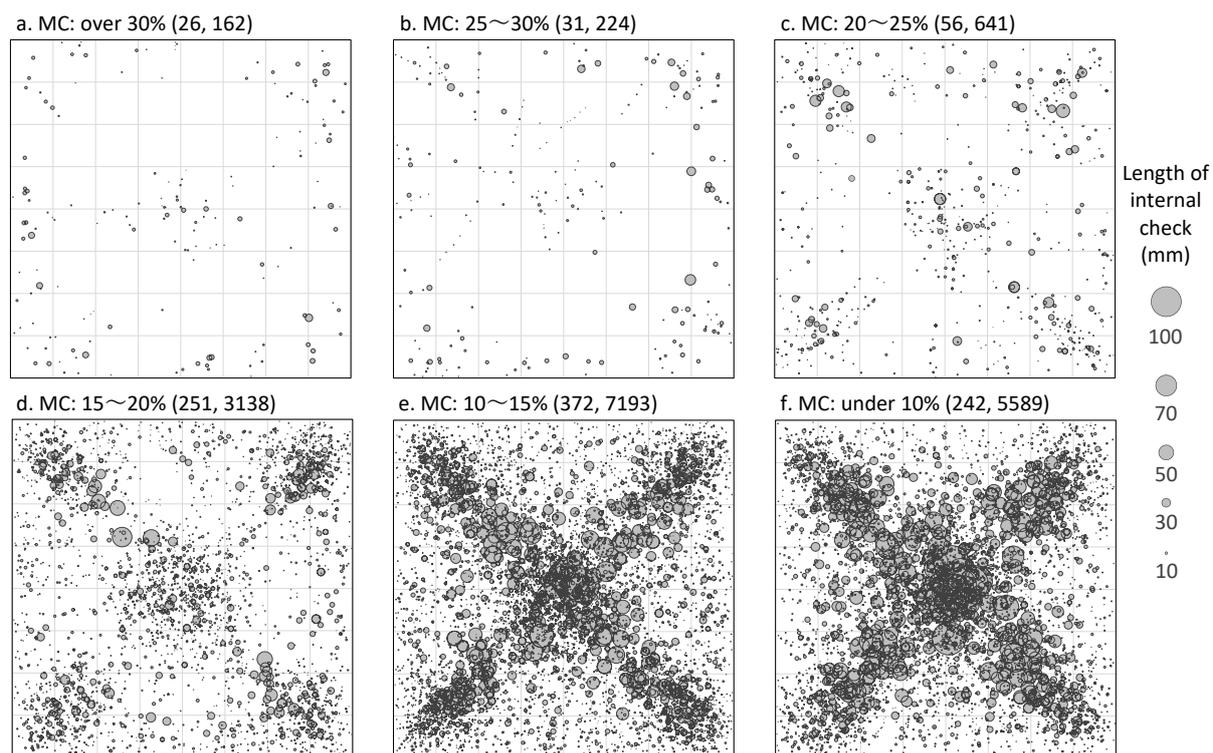


Fig. 4-5. Distribution of internal check length for transvers section classified by moisture content.

Note: The center and the diameter of the circle indicate the coordinates of center and the length of the internal check, respectively.

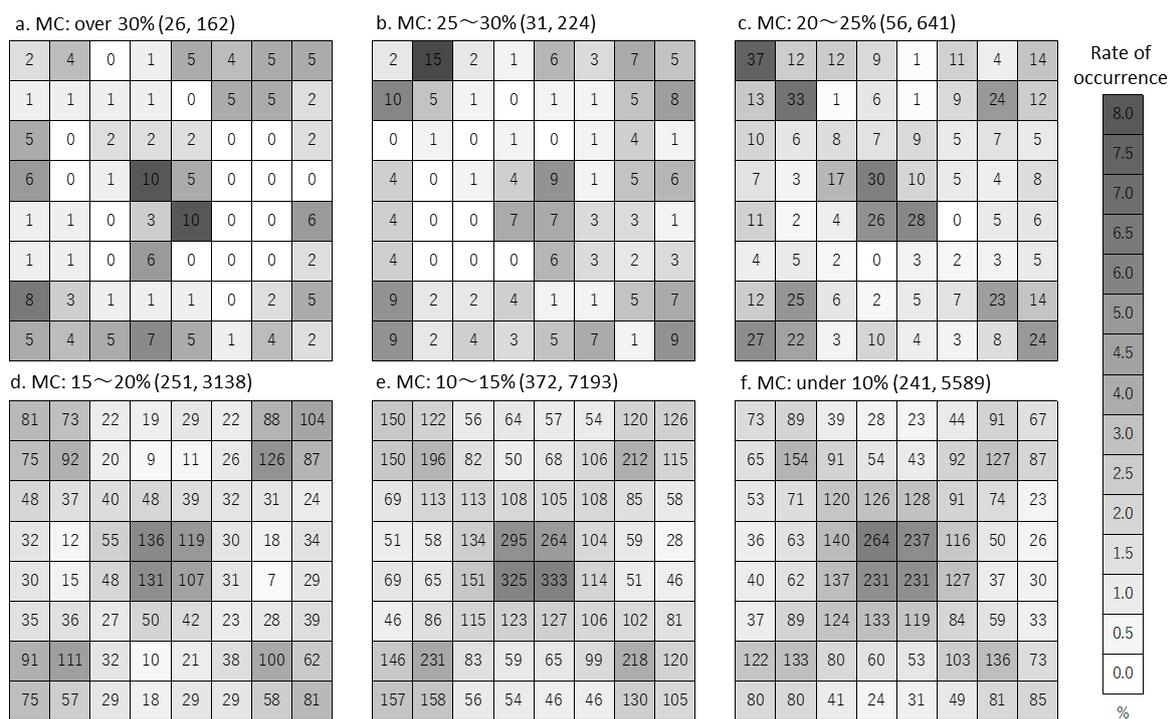


Fig. 4-6. Distribution of internal check occurrence for transvers section classified by moisture content.

Note: The numbers and the colors in the grids indicate the number and rate of internal checks, respectively.

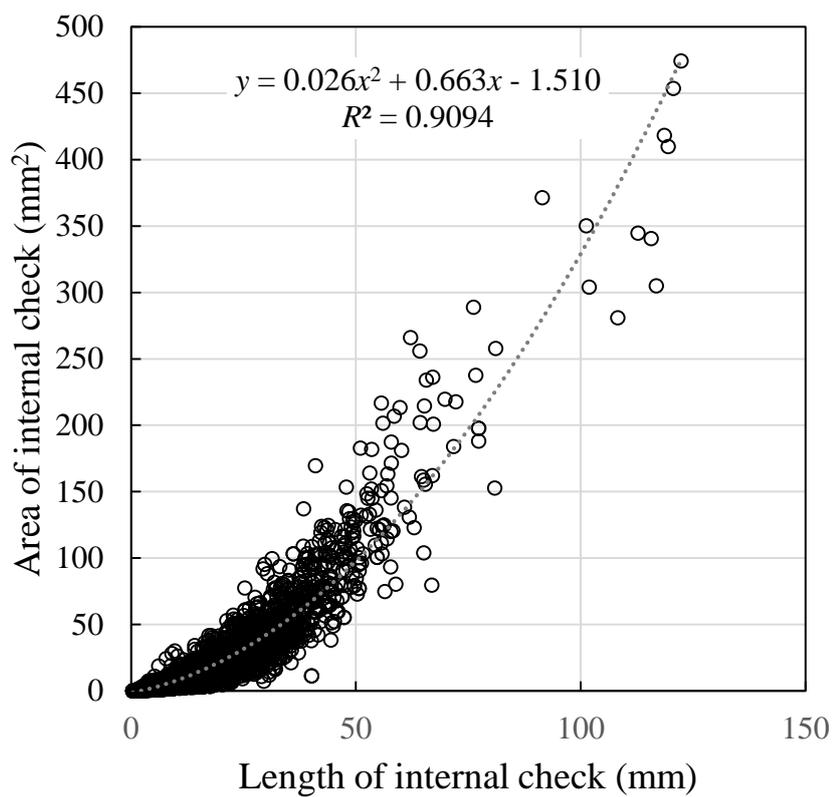


Fig. 4-7. Relationship between length and area of internal checks.

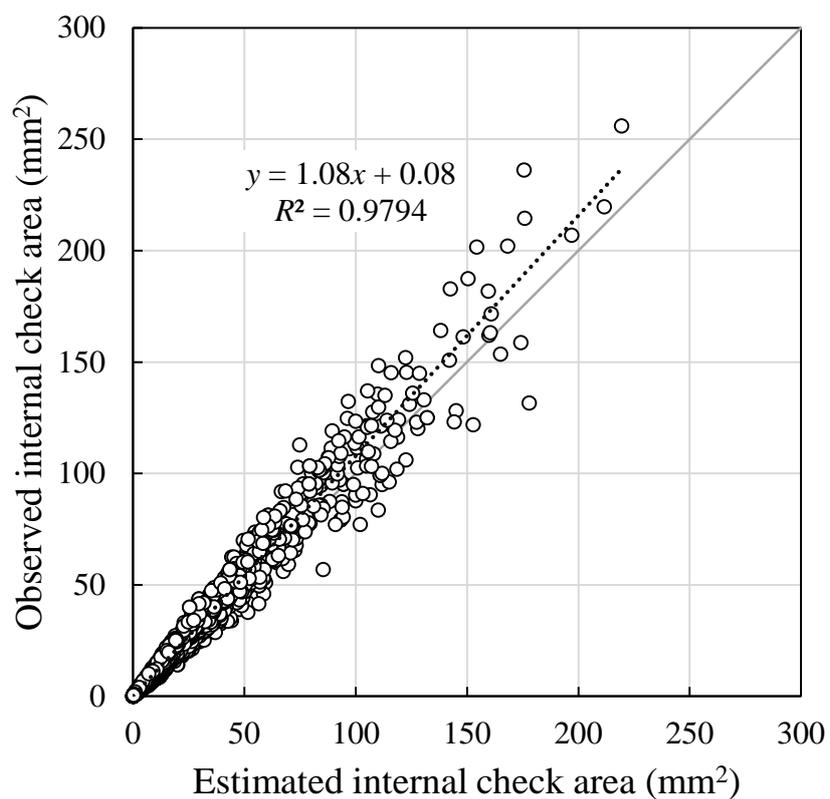


Fig. 4-8. Relationship between estimated and observed internal check area.

Note: Estimated internal check area was calculated from the length and width, assuming that the internal check was rhombus. The internal checks with Solidity⁹⁴⁾ of 0.55 or more are listed. $N = 14885$.

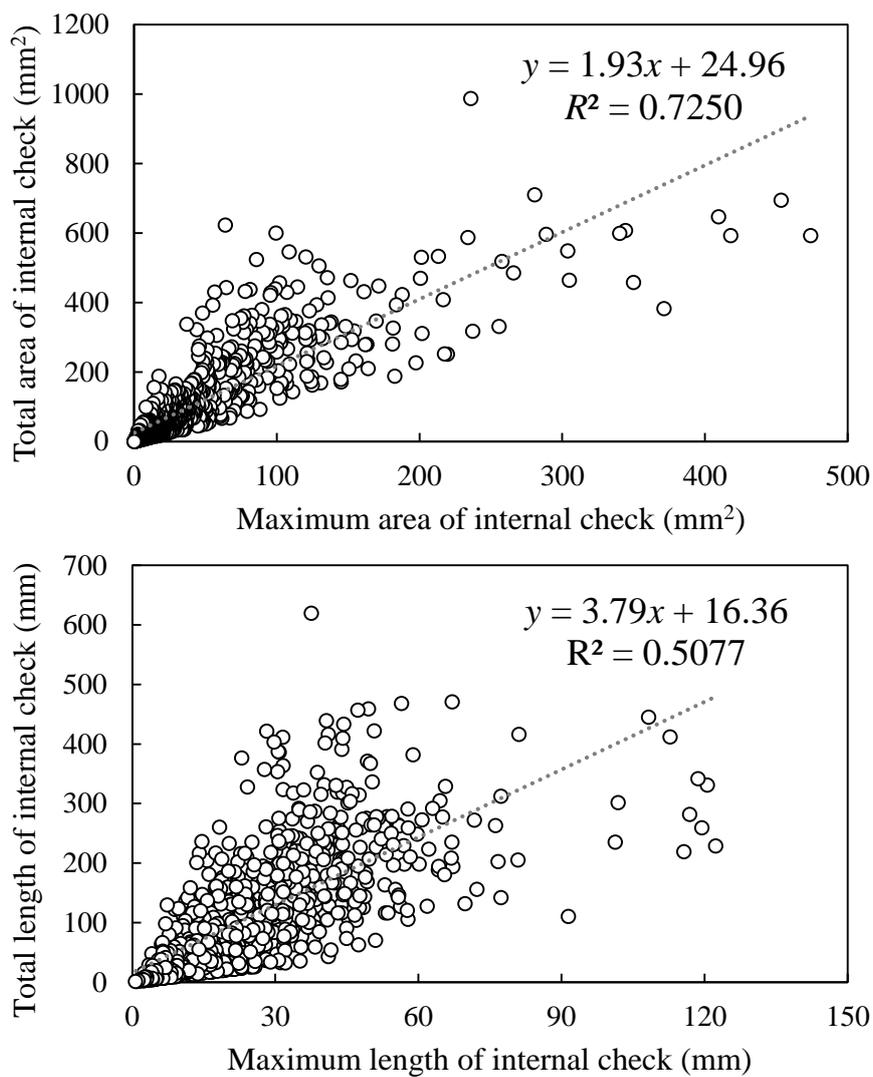


Fig. 4-9. Relationships between maximum value and total value in length and area of internal check.

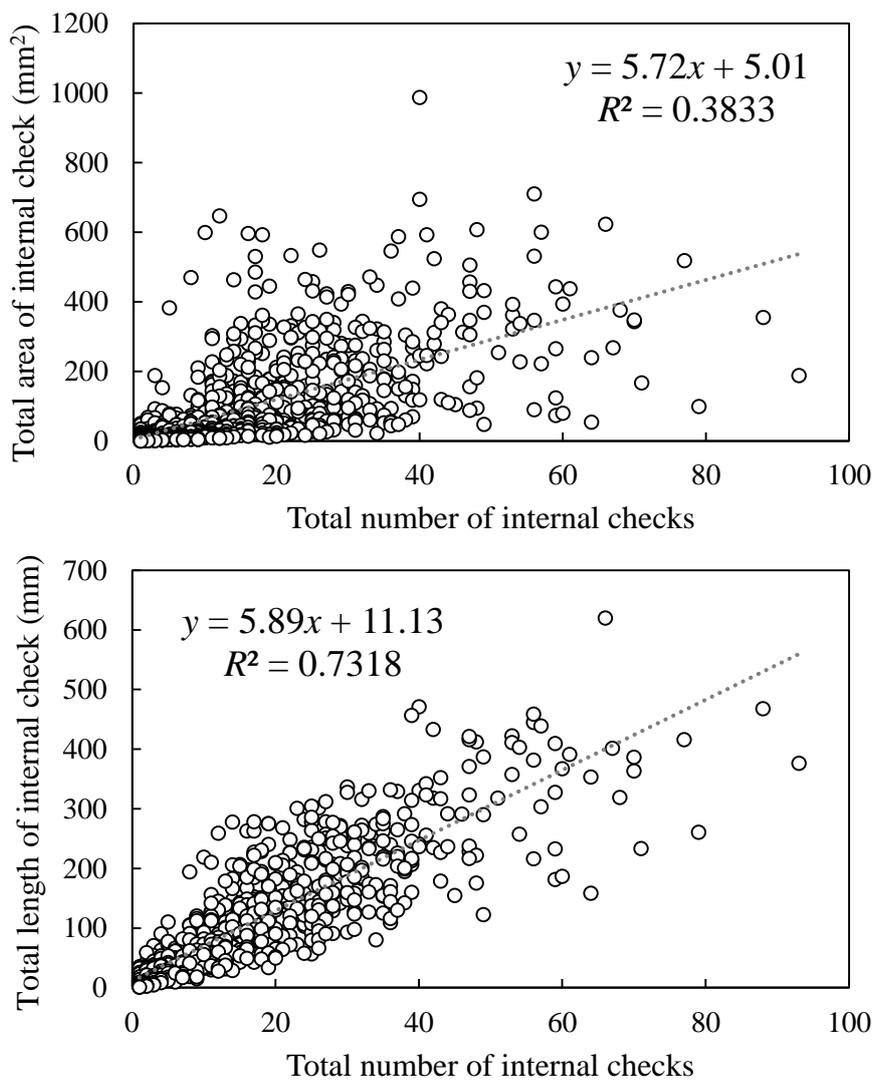


Fig. 4-10. Relationships between total number and total value in length and area of internal check.

第5章 畳み込みニューラルネットワークを用いた内部割れ自動計測技術の開発

内部割れは1つの断面内に多い場合で50個以上観察され、測定に多くの時間が必要となる。また、内部割れの測定基準は測定者によって異なるため、今後は統一を図る必要がある。近年考案された畳み込みニューラルネットワーク (Convolutional neural network、以下 CNN) による深層学習は多くの分野で顕著な成果を上げている。本章では内部割れ計測の省力化と属人性の削減を目的として畳み込みニューラルネットワークを用いた自動計測技術の検討を行った。

5.1 実験方法

5.1.1 画像データ

第4章で作成したトリミング画像 (サイズ 800 pixel×800 pixel) のうち100枚を用いた。CNNの学習および精度検証に用いるROI (Region of interest) 画像およびラベル画像の作成手順を Fig. 5-1 に示した。100枚の木口断面画像から割れを含む箇所を128×128 pixelの大きさのROI画像として計300枚切り出した。全てのROI画像について、目視で割れの箇所をピクセル単位でラベリングすることでラベル画像を作成し、TIFF形式で保存した。300枚のROI画像のうち、200枚を訓練セットに、50枚を検証セットに、50枚をテストセットにランダムに振り分けた。また、面積のヒストグラムを Fig. 5-2 に示した。訓練セットはCNNの各ニューロンのパラメータの学習に用い、検証セットはCNNを学習させるうえでのハイパーパラメータの調整に用い、テストセットは学習したCNNの汎化性能の評価に用いた。

5.1.2 CNNのアーキテクチャ

領域分割では1 pixelごとに割れか割れてないかを判別する。領域分割のためのCNNは代表的なものでFCN¹⁰⁰⁾、SegNet¹⁰¹⁾、U-Net¹⁰²⁾など様々なモデルが提案されている。本

研究では U-Net のアーキテクチャをベースに構築した。本研究で用いた CNN のアーキテクチャを Fig. 5-3 に示した。CNN は畳み込み層、活性化関数層、正規化層、プーリング層、連結層からなる。入力されたカラー画像（RGB があるため特徴マップの数は 3）は畳み込み層で畳み込み演算が行われ、新たな特徴マップ出力される。畳み込み演算は画像処理のフィルター処理に相当し、本研究ではサイズ 3×3 のフィルターを入力データに対して 1 pixel ずつスライドさせながら適用することで特徴マップが出力される¹⁰³⁾。学習の過程では、このフィルターのパラメータが更新、最適化される。なお、畳み込み演算を行うと出力データは入力データよりサイズが小さくなるため、畳み込み処理の前に入力データの周囲に固定データを埋めることで予め入力データのサイズを大きくするパディング処理が行われる¹⁰³⁾。本研究では入力データの周囲を隣接する値と同じ値で埋めるパディング処理を行った。活性化関数層では、入力が 0 より大きければそのまま出力し入力が 0 以下であれば 0 を出力する活性化関数 ReLU (Rectified Linear Unit)¹⁰⁴⁾によって信号の変換が行われる。活性化関数の後の出力データは正規化層で Batch Normalization¹⁰⁵⁾が行われ分布が調整される。Max Pooling 層では 2×2 の領域の最大値を取り出して 1 つの要素に集約することで、入力データの空間サイズが小さくなる。これらの処理によって入力データは次第に圧縮されていく。入力画像全体のクラスを分類するのであれば最終的に 1 つの値を出力すればいいが、領域分割では 1 pixel ごとにクラス分類を行わなければならない。このため、ある程度圧縮した後、今度は元のサイズまで復元を行っていく。このような構造は Encoder-Decoder 構造と呼ばれ、U-net であれば前半と後半がそれに該当する。後半の Decoder 部では前半の Encoder 部とは逆のプーリング処理が行われる。Unpooling 層では 1 つの要素を 2×2 の領域に拡張することで、空間サイズが大きくなる。また、Unpooling 後の出力データには連結層で特徴マップの連結が行われる。低層部の特徴量を連結することで正確な位置情報の復元が行われる¹⁰⁶⁾。最終的に、特徴マップの各画素はシグモイド関数によって 0~1 の実数となり、割れの可能性の高低を示す確率マップとして出力される。

5.1.3 学習手法およびハイパーパラメータ

CNN の学習では、損失関数を設定し、それができるだけ小さくなるような最適なパラメータを探索する。本研究では、損失関数に 2 値交差エントロピー (Binary cross entropy)¹⁰⁷⁾を用いた。また最適化手法には Adam¹⁰⁸⁾を用い、学習係数は 0.001 とした。CNN の学習では全ての訓練データに関して損失関数を計算するのではなく、全ての訓練データから一部のデータを無作為に抜き出して損失関数を計算するミニバッチ学習が用いられることが多い¹⁰⁷⁾。本研究もミニバッチ学習を行い、バッチサイズは 12 とした。全ての訓練データを使ってパラメータを更新する回数 (Epoch) は 50 とした。前述したように最終的な出力は 0~1 の実数からなる確率マップなので、割れかどうかのしきい値を 0.5 と設定して 2 値化したものを抽出画像とした。実装は Python で行い、フレームワークは Tensorflow¹⁰⁹⁾ + Keras¹¹⁰⁾を用いた。

5.2. 結果と考察

5.2.1 CNN による抽出結果

テストデータの抽出画像の例を Fig. 5-4 に示す。Fig. 5-4 には参考のために大津の 2 値化アルゴリズム¹¹¹⁾による結果も載せている。大津の 2 値化のような単一のしきい値による 2 値化では割れと年輪や節を区別して抽出できていない (Fig. 5-4-d)。一方で CNN による結果では割れだけを正しく認識して抽出することができていた (Fig. 5-4-c)。

5.2.2 測定精度の検証

Fig. 5-5 に手動で抽出したラベル画像の割れ面積と CNN による抽出画像の割れ面積の関係を示した。大半は手動計測と自動計測の誤差が 2 割以下に収まっており、十分な精度で計測できていた。

領域分割では学習したモデルを一致度の指標である Dice 係数や IoU (Intersection over Union) で評価することが多い¹¹²⁾。本研究では Dice 係数によって評価した。Dice 係数は

ラベル画像の割れ領域の集合を A 、CNN による抽出画像の割れ領域の集合を B とすると以下のように求まる。

$$\text{Dice coefficient} = \frac{2|A \cap B|}{|A| + |B|} \quad (1)$$

テストセットについての Dice 係数は 0.823 となり、客観的指標からも高い精度で抽出できていると推察された。スギは品種によって心材色が赤色から黒褐色まで大きく変動することが知られているが¹¹³⁻¹¹⁴、材色の違いによらず自動計測が可能であると考えられた。正角の木口断面に見られる内部割れは形状や発生位置が多様であるが、人間が直感的に割れと判別できるものに対しては木取り位置や年輪幅の影響を受けずに幅広く適用できると考えられる。

一部うまく計測できていなかった割れについて Fig. 5-6 に示した。Fig. 5-6-A, B はマジックペンの跡を割れと誤って認識していた。一方で Fig. 5-4-C, D にもあるように、マジックペンの跡を誤認識していないケースも見られた。CNN では畳み込み処理によって着目画素の周辺の情報も加味されるため、人間の視覚と同じように視野が狭いと判断を誤ってしまう可能性が高くなる。本研究で用いた画像サイズは 128×128 pixel であったが、これを大きくすれば改善する可能性がある。入力画像サイズの拡大による測定精度の向上は年輪の自動計測に CNN を用いた Fabijanska らも報告している⁷⁸。また、木粉がつまって一部埋まっている割れ (Fig. 5-6-C) や、2 つの割れが隣接しているような割れ (Fig. 5-6-D)、目視でも判別が難しいような細かい割れ (Fig. 5-6-E) などうまく抽出できていなかった。U-Net では Decoder 部で復元するときに局所的な情報が失われやすく、物体同士の境界部や細かい対象物の検出は弱いことが指摘されており、近年は DeepLab v3+¹¹⁵ や Mask R-CNN¹¹⁶ などといった改良されたモデルも提案されている。また、このような特異的な例は、学習データの不足が関係していると考えられ、データセットのサイズを大きくすればある程度改善することが見込まれる。

5.3 摘要

CNN を用いて、木口断面に発生した内部割れの自動計測を試みた。その結果、テストデータの Dice 係数が 0.823 と高い精度での抽出が可能だった。一部マジックペンの跡や木粉が詰まった割れを誤認識した例もあったため、さらなる精度の向上には学習データの増加や画像の入力サイズの拡大が必要であると考えられた。正角の木口断面に見られる内部割れは形状や発生位置が多様であるが、人間が直感的に割れと判別できるものに対しては年輪等の影響を受けずに幅広く適用できると考えられた。

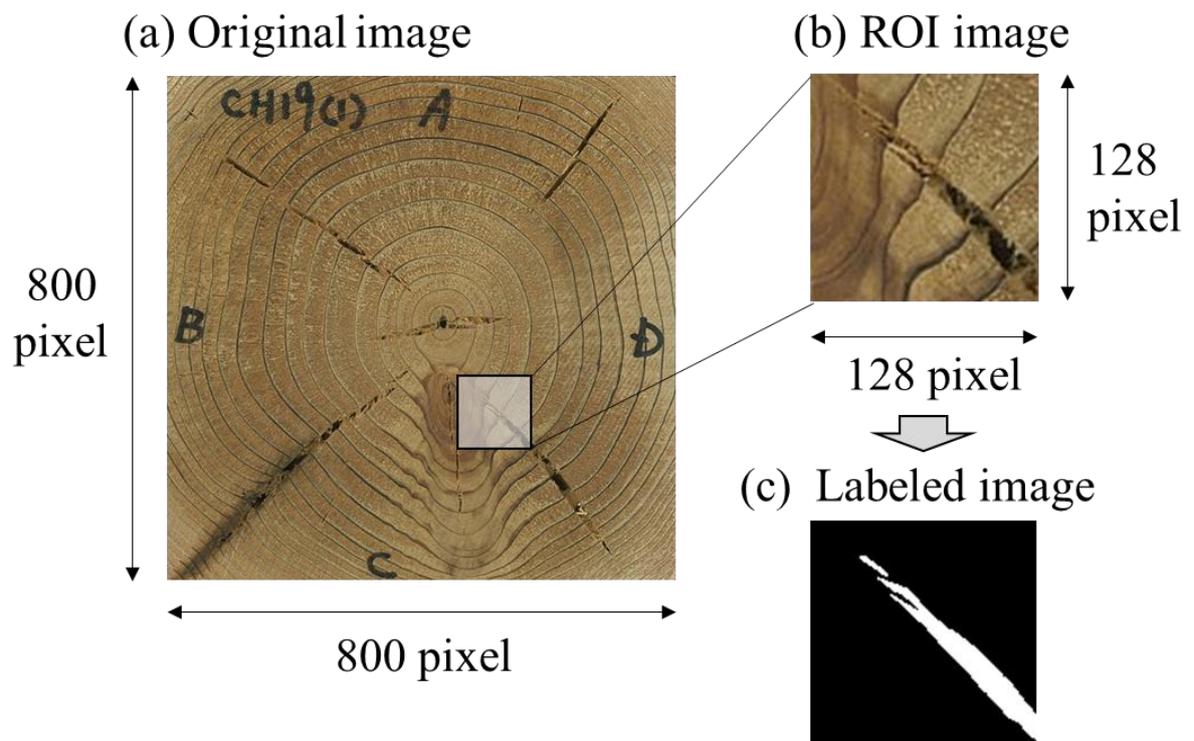


Fig. 5-1. Method for producing ROI and labeled images.

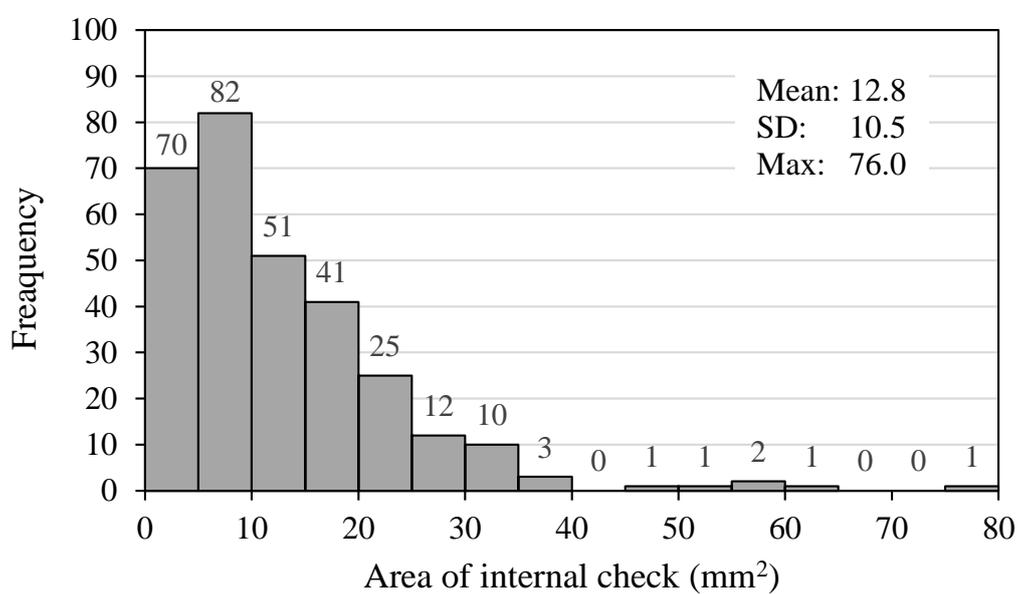


Fig. 5-2. Histograms of area of internal check for labeling images.

Note: $N = 300$. SD: standard deviation.

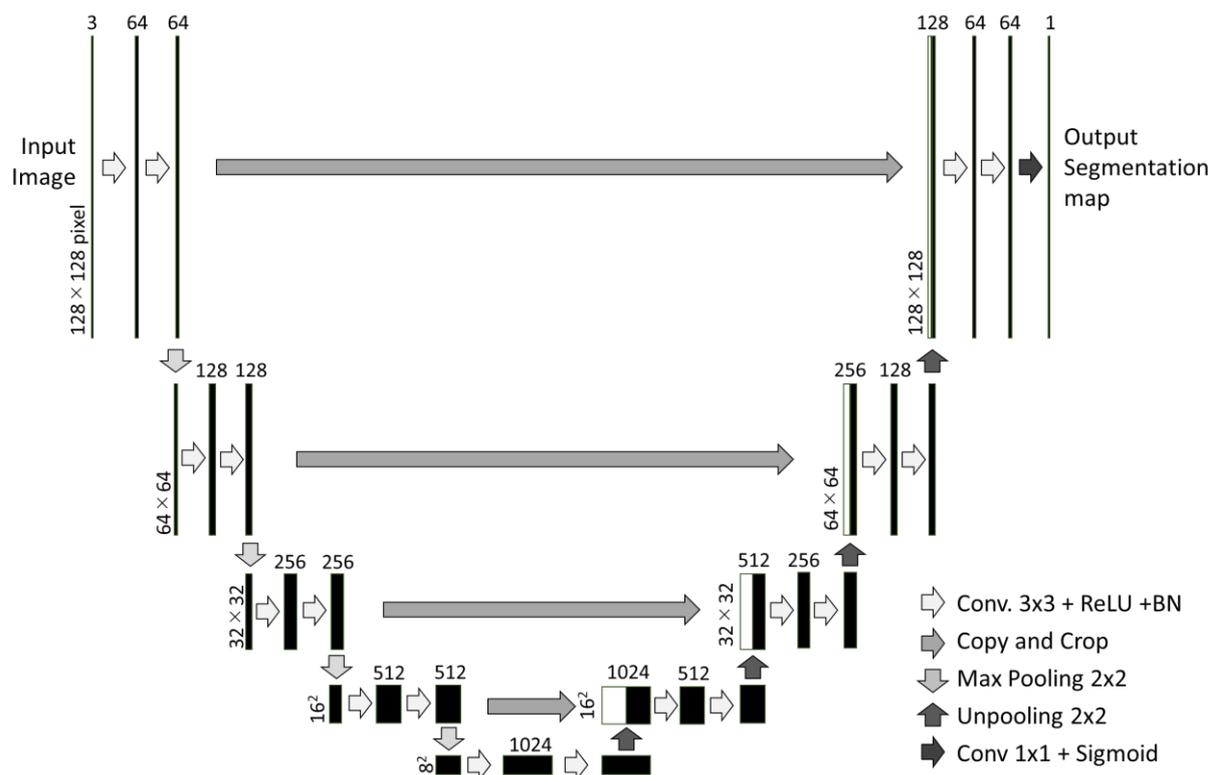


Fig. 5-3. Architecture of CNN based on U-net.

Note: Each box corresponds to a multi-channel feature map. The number of channels is denoted on top of box. The x-y size is provided at the lower left edge of the box.

Conv.: Convolution layer. BN: Batch normalization layer.

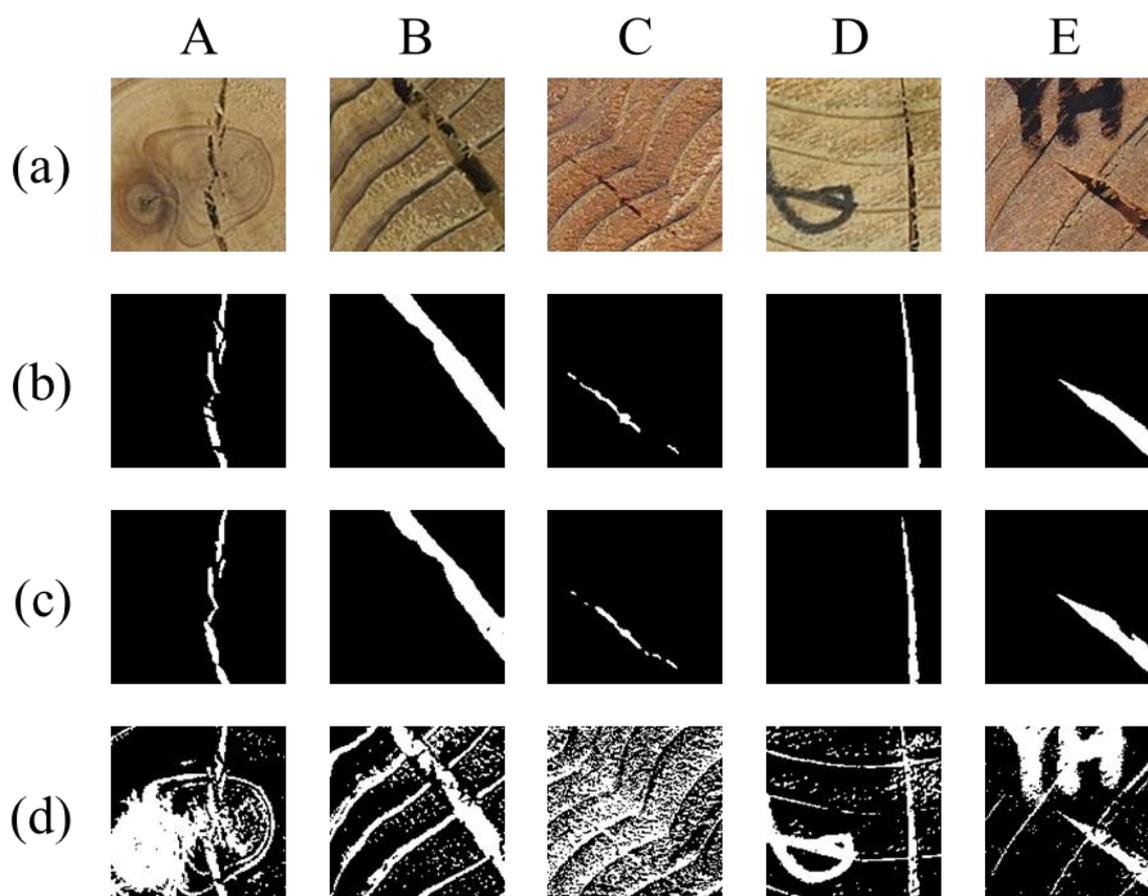


Fig. 5-4. Examples of auto segmentation results for good cases.

Note: (a) Input image (ROI image), (b) Labeled image (manual segmentation), (c) Output image for CNN (auto segmentation), (d) Output image for Otsu threshold (auto segmentation).

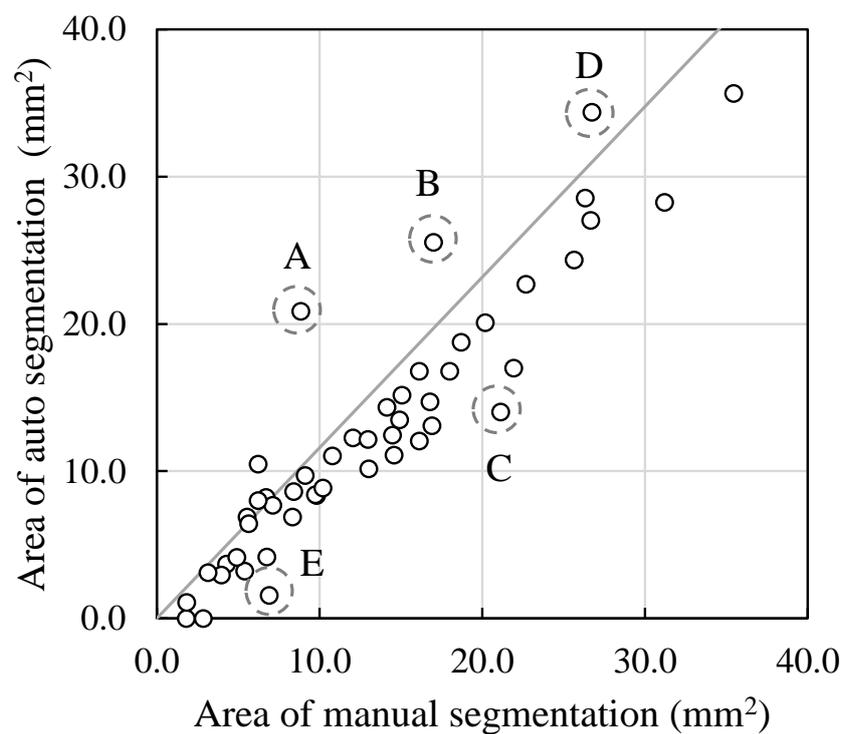


Fig. 5-5. Relationships between area of manual and auto segmentation for testing set.

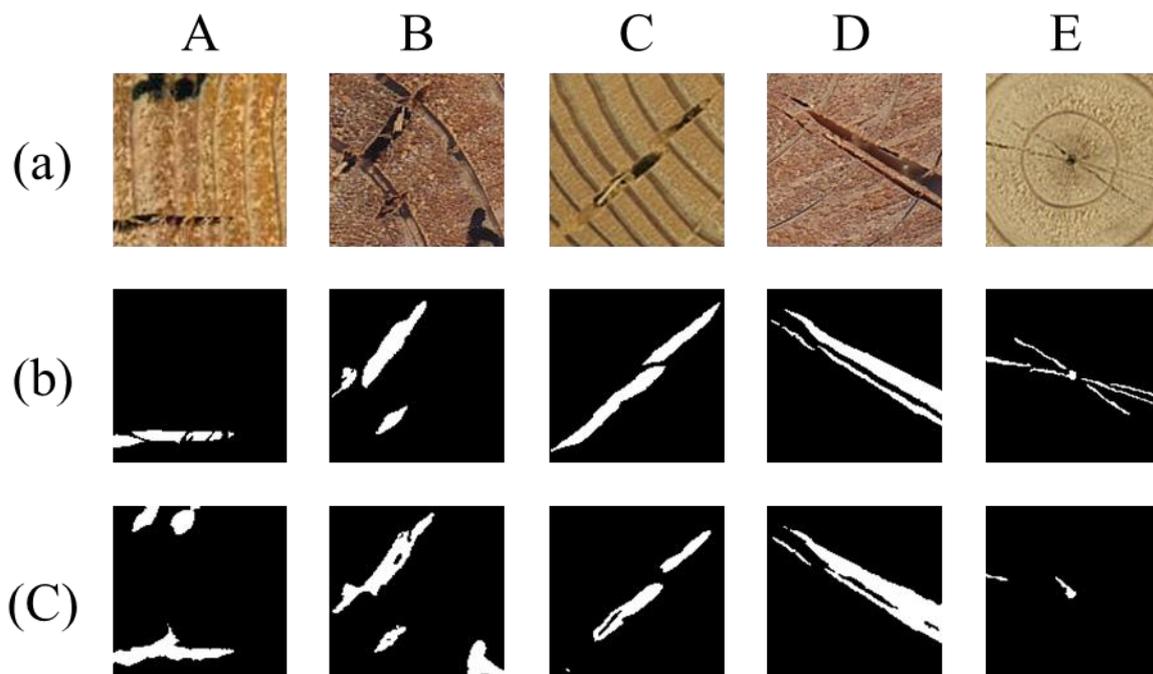


Fig. 5-6. Examples of auto segmentation results for bad cases.

Note: (a) Input image (ROI image), (b) Labeled image (manual segmentation), (c) Output image for CNN (auto segmentation). A ~ E: See Fig.4-5

第6章 総括

本論文では、スギ構造用製材の主に高温乾燥過程における表面ひずみ挙動、乾燥応力の分布、内部割れの発生形状について検討を行った。

第1章では本論文の位置づけおよび目的を示すとともに既往の研究について述べた。

第2章では高温乾燥過程における正角の表面ひずみの挙動を明らかにすることを目的とし、画像分析手法の1つである **Mark tracking** 法を用いて高温乾燥過程における2次元的な表面ひずみの経時変化を調べた。断面寸法が $132\text{ mm} \times 132\text{ mm}$ のスギ心持ち正角、および心去り正角を3種類の乾燥スケジュールで乾燥させたところ、全ての条件で材面中央部に比べて材面端部が大きく縮むという特徴的な挙動が観察された。この傾向は特に心持ち正角の高温乾燥条件で顕著であった。乾燥後、ドラインゲット量と表面ひずみとの関係を調べたところ、両者の間に正の相関関係が認められた。表面ひずみからドラインゲット量のある程度推定できると考えられた。画像分析手法を用いて表面ひずみ分布を測定することで、高温乾燥過程における表面ひずみの経時変化を詳細に把握することが可能であった。

第3章では乾燥スケジュールがスギ心去り正角の内部応力に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、スライス法を用いて乾燥終了時の心去り正角の解放ひずみ分布を測定した。断面寸法が $120\text{ mm} \times 120\text{ mm}$ のスギ心持ち正角、および心去り正角を3種類のスケジュールで乾燥させた。乾燥後、材中央部から厚さ 15 mm の横断面材を切り出し、4種類の方法で分割した。分割前後の試験片表面の画像から解放ひずみ分布を測定した。その結果、材表層は顕著な正の解放ひずみを示し、大きな圧縮応力が生じていた。この傾向は初期の乾球温度が高いほど顕著であった。また、材表層の解放ひずみと材内部に形成される解放ひずみ傾斜の間に強い正の相関関係が認められ、表層の解放ひずみから内部のひずみ傾斜を推定できると考えられた。これらの知見は心持ち正角について既に知られており、心去り正角でも同様であることが本研究によって明らかとなった。

第4章では内部割れと強度性能との関係を解明する上での基礎となる知見を得ることを

目的として、心持ち正角に発生した内部割れの位置および形状を分析した。全国9県から調達した、120℃以上の高温セット処理を行ったスギ心持ち正角の乾燥材（断面寸法 105 mm×105 mm）を用いた。内部割れを含む横断面画像 978 枚から 16949 個の内部割れを抽出した。面積および長さの大きな内部割れは正角の対角線上付近に偏在していた。このことは経験的には知られていたが、それを裏付ける結果となった。また、内部割れをひし形とみなして、面積を幅と長さから算出する従来用いられてきた方法は妥当であると考えられた。

第5章では内部割れ計測の省力化と属人性の削減を目的として畳み込みニューラルネットワークを用いた内部割れ自動計測技術の検討を行った。第4章で用いた画像から 128×128 pixel の ROI 画像を 300 枚作成し、内部割れを画素単位でラベル付けしたラベル画像を作成した。それらを訓練セット 200 枚、検証セット 50 枚、テストセット 50 枚に振り分けた。訓練セットおよび検証セットを用いて、U-net をベースにした畳み込みニューラルネットワークを学習させた。その後、テストセットを用いて自動計測の測定精度を検証したところ、Dice 係数 0.823 と非常に良好な結果を得た。人間が直感的に割れと判別できるものに対しては年輪等の影響を受けずに幅広く適用できると考えられた。

製材の乾燥では、乾燥過程の木材について未解明な部分が多いことや技術的な側面が多分に含まれることから、経験に基づいて語られる場面がしばしば見られる。しかし、今後乾燥技術を高度化し、乾燥材に対する信頼性を高めていくためにはこのような経験知を科学的手法に基づいて一つずつ検証していくことが求められる。一連の研究において主に正角を対象としたが、近年は大径材から得られる平角等の大断面材の乾燥技術の開発が求められている。第2章および第3章では同一寸法の正角でも木取りによって表面ひずみの経時変化および乾燥応力が変わることを明らかにしたが、断面寸法の影響は検討できていない。平角では木取りおよび断面寸法が変化すると割れの発生の様子が異なることから、割れの発生に関係する表面ひずみおよび乾燥応力も断面寸法の影響を受けると考えられる。特に平角は断面寸法の種類が 100 以上あるため、それらすべてに適した乾燥スケジュール

を1つずつ検討することは現実的ではなく、表面ひずみや乾燥応力を用いて統一的な理解を進めていくことが重要とある。今後は、本研究で得られた正角の知見を基準として、対象を平角にまで拡大し、断面寸法・木取りの影響を明らかにしていく必要がある。

また一連の研究においては画像による測定方法を用いた。画像を用いた方法は、測定に必要な機器が比較的安価で、幅広いスケールに対応できるという2つの大きなメリットがある。本研究で用いた手法は正角以外の平角等の大断面材にも応用が可能である。内部割れは測定の煩雑さから詳細な検討がなされてこなかったが、第5章で検討した自動計測によって計測が容易になれば、今後急速に理解が進んでいく可能性がある。一方で、画像を用いた方法は当然ながら外観から見えるものについてしか測定できず、材内部の情報を得るには材を破壊しなければならない。内部割れ等の情報を製品の品質管理に反映させるためには、今後非破壊的な測定方法も合わせて検討を行っていくことが必要である。

謝 辞

本研究の遂行ならびに本論文の作成に当たり、懇切丁寧なご指導を賜りました九州大学大学院農学研究院 農学博士藤本登留准教授、農学博士中尾哲也教授および農学博士古賀信也教授に深く感謝の意を表します。特に私の指導教官である藤本登留准教授には、学部学生の頃から約8年もの長きに渡り格別のご指導を賜りましたこと甚謝いたします。藤本登留准教授には、木材乾燥研究および研究そのものについての興味関心を抱くきっかけを与えていただきました。また、一度研究の現場から離れた私にお声をかけていただき、強く背中を押していただいたこと深く感謝しています。

私の所属する森林総合研究所木材加工・特性研究領域領域長 伊神裕司氏および木材乾燥研究室室長 吉田貴紘氏には本研究の遂行ならびに本論文の作成に集中できるよう格別のご配慮を賜りました。森林総合研究所木材乾燥研究室 渡辺憲氏および鳥羽景介氏にも貴重なご助言およびご指導を賜りました。ご自身の業務の遂行でお忙しい中、貴重な時間を割いて熱心にご指導をいただいたこと、厚くお礼申し上げます。さらに本研究の遂行ならびに論文作成に当たり、特段のご配慮をいただきました森林総合研究所先進技術開発担当チームチーム長 齋藤周逸氏、木材乾燥研究室 小井土賢二氏、九州大学大学院農学研究院 阪上宏樹助教に厚く御礼申し上げます。

実験ならびにデータ整理等において、多大なご協力をいただきました職員および研究補助員の皆様に厚く御礼申し上げます。特に木工室の下澤茂樹氏には実験に用いる試験材の特殊な形状への加工や大量の試験片の作製など、多くの作業を引き受けていただいたこと深く御礼申し上げます。

また、本論文の第4章および第5章は平成30年度および令和元年度の林野庁補助事業「合板・製材・集成材国際競争力強化対策のうち木材製品の消費拡大対策のうちCLT建築実証支援事業」の支援を受けて実施しました。同事業に参加された皆様のご協力によって試験片の調製および画像データの収集が行われました。私が同事業へ参加することを認めていただいた委員長長の石川県農林総合研究センター 松元浩氏をはじめ関係の皆様へ深く感謝いたします。

私は大変恵まれた環境で本研究の遂行ならびに本論文の作成に取り組むことができました。これはひとえに多くの方々のご支援とご協力の賜物です。皆様のご協力なしでは、本研究の遂行ならびに本論文の作成は成し得ないものでした。ありがとうございました。

引用文献

- 1) The Global Sustainable investment Alliance: “Global Sustainable Investment Review 2020”, 2021.
- 2) 年金積立金管理運用独立行政法人: “2020 年度 ESG 活動報告”, 東京, 2021, pp. 3-40.
- 3) Zhu, H., Luo, W., Ciesielski, P.N., Fang, Z., Zhu, J., Henriksson, G., Himmel, M.E., Hu, L.: Wood-Derived Materials for Green Electronics, Biological Devices, and Energy Applications. *Chem. Rev.* **116**(16), 9305-9374 (2016).
- 4) 林野庁: “令和 3 年版 森林・林業白書”, 全国林業改良普及協会, 東京, 2021, pp. 66-74.
- 5) 林野庁: “令和 3 年版 森林・林業白書”, 全国林業改良普及協会, 東京, 2021, pp. 152-170.
- 6) 大熊幹章: “木材時代の到来に向けて”, 海青社, 大津, 2018, pp. 84-93
- 7) 井口真輝: JAS 構造用製材の普及と木造建築の振興, 住宅と木材 **40**(475), 2-13 (2017).
- 8) 日本木材乾燥施設協会: “KD Report Vol.44”, 東京, 2006.
- 9) 日本木材乾燥施設協会: “KD Report Vol.64”, 東京, 2021.
- 10) 寺澤 眞: “木材乾燥のすべて 改訂増補版”, 海青社, 大津, 2004, pp. 33-35.
- 11) 寺澤 眞, 筒本卓造: “木材の人工乾燥—改訂版—”, 日本木材加工技術協会, 東京, 1986, pp. 90-98.
- 12) 吉田孝久, 橋爪丈夫, 藤本 登留: カラマツ及びスギ心持ち正角材の高温乾燥特性 -高温低温乾燥条件が乾燥特性に及ぼす影響-, 木材工業 **55**(8), 357-362 (2000).
- 13) 吉田孝久, 橋爪丈夫, 武田孝志, 徳本守彦, 印出 晃: スギ心持ち無背割り柱材の高温乾燥における高温セット法の割れ防止効果について, 材料 **53**(4), 364-369 (2004).
- 14) 吉田孝久: “今日からの木材乾燥 —乾燥マニュアル (改訂版) —”, 長野県木材協同連合会, 長野, 2002.
- 15) 「安全・安心な乾燥材生産技術の開発」研究グループ: “安全・安心な乾燥材の生産・

- 利用マニュアル 内部割れのない乾燥材生産を目指して！”，石川県林業試験場石川ウッドセンター，白山，2013.
- 16) 加藤英雄，長尾博文，井道裕史，桃原郁夫，大村和香子：“森林総合研究所交付金プロジェクト研究成果集8「スギ材の革新的高速乾燥システムの開発」”，森林総合研究所，つくば，pp. 115-120.
 - 17) 渡辺 憲，加藤英雄，長尾博文，松元 浩，藤田和彦：高温セット処理時間がスギ心持ち正角の曲げ強度およびせん断強度に及ぼす影響：ベイズ統計モデリングによる製材の乾燥試験データの評価，木材学会誌 **67**(3)，129-137 (2021).
 - 18) 黒田尚宏：スギ心持ち材乾燥のための基礎研究の展開，木材学会誌 **53**(5)，243-253 (2007).
 - 19) 国土交通省：“建築基準法施行令 第46条 構造上必要な軸組等”，2014.
 - 20) 上田 菜由，仲村匡司，北守顕久：乾燥条件の異なるスギ正角材表面の精密測色(第1報) 辺心材ならびに早晚材を区別した精密測色，木材学会誌 **59**(6)，339-345 (2013).
 - 21) 仲村匡司，上田 菜由：乾燥条件の異なるスギ正角材表面の精密測色(第2報)色の三属性に基づいた材色変化の比較，木材学会誌 **59**(6)，346-352 (2013).
 - 22) 奥田 拓，阪井彰一，千里泰三，藤本登留，清水邦義，中川敏法，村野朋哉，三好 悠，亀井裕人，佐々木隆雄，三枝康弘，和田善行，湊 俊：乾燥処理がスギ板材の抽出成分に与える影響：中温乾燥によるテルペン類の量的変化，木材学会誌 **63**(5)，204-213 (2017).
 - 23) 服部武文，橋本 茂，三好 悠，野路征昭，梅山明美，吉村 剛，アンディ・ヘルマワン，藤本登留：耐腐朽性，耐蟻性を保持したスギ板材の迅速な新規人工乾燥法の検討，木材学会誌 **67**(2)，73-85 (2021)
 - 24) 杉山真樹：“森林総合研究所交付金プロジェクト研究成果 No.72 「人間の快適性に及ぼす木材の触覚、視覚及び嗅覚刺激の効果の解明」”，森林総合研究所，つくば，2018.
 - 25) 農林水産省食料産業局：“JAS 制度の見直しについて”，
https://www.maff.go.jp/j/jas/attach/pdf/h29_jashou_kaisei-6.pdf／ 2021年9月30日参照.

- 26) 小林 功, 石川敦子, 黒田尚宏: 心持ち正角の高温セット処理における表面ひずみの挙動—二つの変位計を用いた測定について—, 第 63 回日本木材学会大会発表要旨集, 盛岡, 2013, CD-ROM.
- 27) 小林 功: 木材の乾燥過程における表面ひずみの測定法, 木材工業 **70** (1), 40-43 (2015).
- 28) 小林 功, 久田卓興: 木材乾燥における表面ひずみ測定のスケジュール管理への適用, 木材工業 **53**(2), 69-73 (1998).
- 29) 鳥羽景介, 小林 功, 山本浩之, 栗田 悟: 高温セット処理を用いた乾燥過程で起こるスギ心持ち材表面の収縮・膨潤挙動, 木材工業 **73**(12), 550-554 (2018).
- 30) Peters, W. H., Ranson, W. F.: Digital imaging techniques in experimental stress analysis. *Opt. Eng.* **21**(3), 427-431 (1982).
- 31) 村田功二: 画像相関法によるひずみ分布解析の利用法, 木材工業 **60**(3), 110-114 (2005).
- 32) Keunecke, D., Novosseletz, K., Lanvermann, C., Mannes, D., Niemz, P.: Combination of X-ray and digital image correlation for the analysis of moisture-induced strain in wood: opportunities and challenges. *Eur. J. Wood Wood Prod.* **70**, 407-413 (2012)
- 33) Peng, M., Ho, Y-C., Wang W-C., Chui YH., Gong M.: Measurement of wood shrinkage in jack pine using three dimensional digital image correlation (DIC). *Holzforschung* **66**, 639-643 (2012).
- 34) Lanvermann, C., Wittel, F. K., Niemz, P.: Full-field moisture induced deformation in Norway spruce: intra-ring variation of transverse swelling. *Eur. J. Wood Wood Prod.* **72**, 43-52 (2014).
- 35) 李 志遠, 王 慶華, 有川秀一, 米山 聡: 面内変位分布計測におけるデジタル画像相関法とサンプリングモアレ法の比較研究, 実験力学 **15**(4), 303-308 (2015).
- 36) Larsen, F., Ormarsson, S.: Numerical and experimental study of moisture-induced stress and strain field developments in timber logs. *Wood Sci. Technol.* **47**(4), 837-852 (2013).
- 37) Kang, H.-Y., Muszyński, L., Milota, M.R.: Optical Measurement of Deformations in Drying

- Lumber. *Drying Technol.* **29**(2), 127–134 (2011).
- 38) Kang, H.-Y., Kang, S.-G., Kang, C.-W., Matsumura, J.: Measurement of strain distributions in white oak boards during drying using a digital image correlation method. *J. Faculty Agric., Kyushu Univ.* **58**(1), 55–59 (2013).
- 39) Kang, C.-W., Muszyński, L., Hong, S.-H., Kang, H.-Y.: Preliminary tests for the application of an optical measurement system for the development of a kiln-drying schedule. *Drying Technol.* **34**(4), 483–490 (2016).
- 40) Sirkis, J. S.: System response to automated grid methods. *Opt. Eng.* **29**(12), 1485–1493 (1990).
- 41) Bretagne, N., Valle, V., Dupré, J.C.: Development of the marks tracking technique for strain field and volume variation measurements. *NDT and E International.* **38**(4), 290–298 (2005).
- 42) 藤田晋輔: 木材の乾燥 乾燥理論. “新編 木材工学“, 中戸莞二編, 養賢堂, 東京, 1985, pp. 318-335.
- 43) Allegretti, O., Remond, R., Perre, P.: Nonsymmetrical drying tests – Experimental and numerical results for free and constrained spruce samples. *Drying Technol.* **36**(13), 1554–1562 (2018).
- 44) Schnabel, T., Huber, H., Petutschnigg, A.: Modelling and simulation of deformation behaviour during drying using a concept of linear difference method. *Wood Sci Technol.* **51**(3), 463–473 (2017).
- 45) Ferrari, S., Pearson, H., Allegretti, O., Gabbitas, B.: Measurement of internal stress in Radiata pine sapwood during drying using an improved online sensor. *Holzforschung* **64**, 781–789 (2010).
- 46) Diawanich, P., Matan, N., Kyokong, B.: Evolution of internal stress during drying, cooling and conditioning of rubberwood lumber. *Eur. J. Wood Wood Prod.* **68**(1), 1–12 (2010)
- 47) 高橋 徹, 中山義雄: “木材科学講座 3 物理”, 海青社, 大津, 1992, pp. 121-124.

- 48) Jantawee, S., Leelatanon, S., Diawanich, P., Matan, N.: A new assessment of internal stress within kiln-dried lumber using a restoring force technique on a half-split specimen. *Wood Sci Technol.* **50**(6), 1227-1292 (2016).
- 49) Jantawee, S., Leelatanon, S., Diawanich, P., Vannarat, S., Matan, N.: Comparison of techniques for quantification of internal stress within industrial kiln-dried timber. *Eur. J. Wood Wood Prod.* **76**(2), 617-627 (2018).
- 50) Watanabe, K., Kobayashi, I., Saito, S., Kuroda, N., Noshiro, S.: Nondestructive evaluation of drying stress level on wood surface using near-infrared spectroscopy. *Wood Sci Technol.* **47**(2), 299-315 (2013).
- 51) 梅本忠宏: 残留応力の発生と制御, 日本金属学会会報 **29**(12), 973-980 (1990).
- 52) Lee, N. H., Fujimoto, N., Piao, J., Sawata, K.: Drying characteristics of log cross sections of Japanese cedar during hybrid kiln drying combined with dielectric heating. *Drying Technol.* **39**(7), 925-931 (2020).
- 53) Peck, E.C.: A new approach to the formulation of hard wood dry kiln schedules. *Southern Lumberman* **161**(2033), 136-137 (1940).
- 54) McMillen, J. M.: Stresses in wood during drying (Report 1652). Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison. 1958.
- 55) 徳本守彦: 木材の人工乾燥における表面硬化とドラインセット-1-木材の人工乾燥過程に発生するクリープとセットの推移, 木材学会誌 **35**(3), 175-184 (1989)
- 56) 徳本守彦, 武田孝志, 吉田孝久: スギ心持ち無背割り柱材における高温セット処理後の乾燥スケジュールが内部応力に及ぼす影響, 材料 **54**(4), 365-370 (2005).
- 57) 徳本守彦, 北原 誠, 武田孝志, 細尾佳宏, 吉田孝久: 高温セット法で乾燥したスギ正角材の内部応力—屋内保管と屋外保管の相違—, 材料 **59**(4), 279-284 (2010).
- 58) 寺澤 眞: “木材乾燥のすべて 改訂増補版”, 海青社, 大津, 2004, pp. 365-377.
- 59) Simpson, W. T.: “Dry kiln operator’s manual”, Forest Products Society, Madison, 1991,

- pp.180-187.
- 60) ISO 1029: “Coniferous sawn timber -Defects- Classification”, 1974, pp. 2-6.
 - 61) D245-06 (2019): “Standard practice for establishing structural grades and related allowable properties for visually graded lumber”, Annual book of ASTM standards Volume 04.10, ASTM International, 2019, pp. 88.
 - 62) JAS 1083：製材. 農林水産省（2007）.
 - 63) 池田潔彦，吉田孝久，黒田尚宏，信田 聡，飯島泰男：針葉樹構造用製材の乾燥と強度性能との関連性－乾燥割れと高温処理の影響を中心に－，木材工業 **64**(7)，308-313 (2009) .
 - 64) 小原 誠，山之内清竜，福留重人：乾燥割れを有する心持ち構造材の評価について，鹿児島県工業技術センター **20**，71-78 (2006) .
 - 65) 滝本裕美，松元 浩，小倉光貴：県産スギ正角材の曲げ強度性能に及ぼす乾燥条件の影響，石川県農林総合研究センター林業試験場研究報告 **44**，28-32 (2012) .
 - 66) 滝本裕美，松元 浩：産地別石川県産スギ正角材の同一乾燥条件における品質と強度性能，石川県農林総合研究センター林業試験場研究報告 **45**，15-19 (2013) .
 - 67) 池田潔彦，渡井 純，鈴木養樹，飯島泰男：静岡県産スギ・ヒノキ中・大径原木より採材した平角製材梁の曲げ性能，静岡県農林技術研究所研究報告 **5**，45-52 (2012) .
 - 68) 今井 信，吉田孝久，柴田直明，山内仁人，高野弑夫：県産材の高品質乾燥技術の開発(2)－スギ桁材の乾燥方法別曲げ強度特性－，長野県林業総合センター研究報告 **30**，111-119 (2016) .
 - 69) 品質・性能の優れたスギ心去りログ材の開発事業：“CLT 等木質建築部材技術開発・普及事業－成果概要集－”，木構造振興株式会社，東京，2021，pp.4-12.
 - 70) 井道裕史，長尾博文，加藤英雄：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 **60**(4)，170-174 (2005) .
 - 71) 齋藤周逸，外崎真理雄：スギ心持ち柱材の乾燥材横断面に現れた内部割れの特徴，関

- 東森林研究 **59**, 311-312 (2008) .
- 72) 山下香菜, 平川泰彦, 齋藤周逸, 池田元吉, 中谷 浩, 太田正光: スギ在来品種の心持ち正角材における高温乾燥で生じた内部割れと木口割れの変動, 森林総合研究所研究報告 **13**(4), 183-191 (2014) .
- 73) Yamashita, K., Hirakawa, Y., Saito, T., Ikeda, M., Ohta, M.: Internal-check variation in boxed-heart square timber of sugi (*Cryptomeria Japonica*) cultivars dried by high-temperature kiln drying. *J. Wood Sci.* **58**, 375-382 (2012) .
- 74) Funck, JW., Zhong, Y., Butler, DA., Brunner, CC., Forrer, JB.: Image segmentation algorithms applied to wood defect detection. *Comput Electron Agric.* **41**, 157-179 (2003)
- 75) Gu, I. YH., Andersson, H., Vicen, R.: Wood defect classification based on image analysis and support vector machines. *Wood Sci Technol.* **44**(4), 693-704 (2010).
- 76) Krizhevsky, A., Sutskever, I., Hinton, G.: ImageNet classification with deep convolutional neural networks. In *Proc. Advances in Neural Information Processing Systems* **25**, 1090-1098 (2012).
- 77) LeCun, Y., Bengio, Y., Hinton, G.: Deep learning. *Nature* **521**, 436-444 (2015).
- 78) Fabijanska, A., Danek, M.: DeepDendro - A tree rings detector based on a deep convolutional neural network. *Comput. Electron. Agric.* **150**, 353-363 (2018).
- 79) He, T., Liu, Y., Xu, CY., Zhou, XL., Hu, ZK., Fan, JN.: A Fully Convolutional Neural Network for Wood Defect Location and Identification. *IEEE ACCESS* **7**, 123453-123462 (2019).
- 80) Hu, JF., Song, WL., Zhang, W., Zhao, YF., Yilmaz, A.: Deep learning for use in lumber classification tasks. *Wood Sci Technol.* **53**(2), 505-517 (2019).
- 81) Garcia-Garcia, A., Orts-Escolano, S., Oprea, S., Villena-Martinez, V., Martinez-Gonzalez, P., Garcia-Rodriguez, J.: A survey on deep learning techniques for image and video semantic segmentation. *Appl. Soft Comput.* **70**, 41-65 (2018).

- 82) Pop, O., Dubois, F., Absi, J.: J-integral evaluation in cracked wood specimen using the mark tracking method. *Wood Sci. Technol.* **47**(2), 257–267 (2013).
- 83) Pop, O., Dubois, F.: Determination of timber material fracture parameters using mark tracking method. *Constr. and Bldg. Mater.* **102**, 977–984 (2016).
- 84) Rasband, W.S.: ImageJ. U. S. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA, <http://imagej.nih.gov/ij/>, 1997-2021 / 2021年8月18日参照
- 85) 岡野 健, 祖父江信夫: 収縮・膨潤. “木材科学ハンドブック (普及版)”, 朝倉書店, 東京, 2013, pp.124-127.
- 86) 徳本守彦, 帆苺謙一, 武田孝志, 安江 恒, 吉田孝久: 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ングセットの分布, 材料 **53**(4), 370–375 (2004).
- 87) Simpson, W.T., Rosen, H.N.: Equilibrium moisture-content of wood at high-temperatures. *Wood and Fiber.* **13**(3), 150–158 (1981).
- 88) 中尾哲也: 構造材の乾燥スケジュールの理論解析, 木材学会誌 **48**(4), 241–248 (2002).
- 89) 小林 功: 大断面材の乾燥. “最新 木材工業辞典”, 創立 70 周年記念出版等委員会編, 日本木材加工技術協会, 東京, 2019, pp. 49-50.
- 90) 三井幸成, 荒木博章, 平田晃久, 池田元吉, 小林 功, 渡辺 憲: スギ心去り正角材の中温乾燥における乾燥温度が内部割れに及ぼす影響, 日本木材加工技術協会第 34 回年次大会講演要旨集, 宮崎, 2016, pp. 43-44.
- 91) 藤本登留: 木材乾燥の基礎 乾燥応力とひずみ. “木材科学講座 7 木材の乾燥 I 基礎編”, 信田 聡・河崎弥生編, 海青社, 大津, 2020, pp. 79-84.
- 92) 奥山 剛: 樹木の成長応力, 木材学会誌 **39**(7), 747-756 (1993).
- 93) スギ大径材から得られる心去り構造材の共同調査研究委員会: “スギ大径材の共同調査研究委員会 事業成果報告書”, 宮崎県木材協同組合連合会, 宮崎, 2016, pp. 4-7.
- 94) Ferreira, T., Rasband, W.: ImageJ User Guide, <https://imagej.nih.gov/ij/docs/guide/index.html>, 2012 / 2021年8月18日参照.

- 95) 田村 紘, 金川 靖, 藤原新二, 後藤純一: スギ心持ち断面における収縮異方性に及ぼす蒸煮処理の影響, 木材工業 **58**(2), 56-60 (2003).
- 96) 寺澤 眞: “木材乾燥のすべて 改訂増補版”, 海青社, 大津, 2004, pp.566-576.
- 97) 小田久人, 蛭原啓文, 迫田忠芳, 藤本登留, 村瀬安英: 宮崎県産スギ心持ち柱材の高温低湿乾燥における乾燥性, 木材工業 **59**(6), 255-259 (2004) .
- 98) 吉田孝久, 橋爪丈夫, 武田孝志, 徳本守彦, 印出 晃:スギ心持ち無背割り柱材の高温乾燥におけるセット法の割れ防止効果について, 材料 **53**(4), 364-369 (2004) .
- 99) 小田久人, 蛭原啓文, 迫田忠芳, 藤本登留, 村瀬安英: 宮崎県産スギ心持ち柱材の高温低湿乾燥過程における含水率変動 (第 2 報) 含水率分布および含水率推移, 木材学会誌 **51**(4), 227-233 (2005) .
- 100)Long, J., Shelhamer, E., Darrell, T.: Fully convolutional networks for semantic segmentation. In *Proc. IEEE CVPR*, 3431-3440 (2015).
- 101)Badrinarayanan, V., Kendall, A., Cipolla, R.: SegNet: a deep convolutional encoder-decoder architecture for image segmentation. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* **39**(12), 2481-2495 (2017).
- 102)Ronneberger, O., Fischer, P., Brox, T.: U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. In *Proc. 18th MICCAI*, **9351**, 234-241 (2015).
- 103)齋藤康毅: “ゼロから作る Deep Learning –Python で学ぶディープラーニングの理論と実践”. オライリー・ジャパン, 東京, 2016, pp. 206-219.
- 104)齋藤康毅: “ゼロから作る Deep Learning ③ –フレームワーク編”. オライリー・ジャパン, 東京, 2020, pp. 400-401.
- 105)Ioffe, S., Szegedy, C.: Batch normalization: accelerating deep network training by reducing internal covariate shift. In *Proc. The 32nd ICML*, **37**, 448-456 (2015).
- 106)原 武史: “標準 医用画像のためのディープラーニング–実践編–”, オーム社, 東京, 2019, pp. 83-88.

- 107) 齋藤康毅: “ゼロから作る Deep Learning – Python で学ぶディープラーニングの理論と実践”. オライリー・ジャパン, 東京, 2016, pp. 87-97.
- 108) Diederik, K., Jimmy, B.: Adam: a method for stochastic optimization. arXiv:1412.6980 [cs] (2014).
- 109) Abadi M., Agarwal A., Barham P., Brevdo E., Chen Z., Citro C., Corrado S. G., Davis A., Dean J., Devin M., Ghemawat S., Goodfellow I., Harp A., Irving G., Isard M., Jozefowicz R., Jia Y., Kaiser L., Kudlur M., Levenberg J., Mané D., Schuster M., Monga R., Moore S., Murray D., Olah C., Shlens J., Steiner B., Sutskever I., Talwar K., Tucker P., Vanhoucke V., Vasudevan V., Viégas F., Vinyals O., Warden P., Wattenberg M., Wicke M., Yu Y., and Zheng X.: TensorFlow: Large-scale machine learning on heterogeneous systems, 2015. Software available from tensorflow.org.
- 110) Keras Documentation., <https://keras.io/ja/>. / 2021年11月29日参照.
- 111) Otsu, N.: Threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Syst.* **9**(1), 62-66 (1979).
- 112) 藤田広志: “医用画像ディープラーニング入門”, オーム社, 東京, 2019, pp. 61-63
- 113) 黒田慶子: スギ黒心材の発生原因と対策, *木材工業* **61**(12), 611-613 (2006)
- 114) 宮崎 寛: “九州のスギとヒノキ”, 九州大学出版会, 福岡, 1989, pp. 164-166.
- 115) Chen, LCE., Zhu, YK., Papandreou, G., Schroff, F., Adam, H.: Encoder-Decoder with atrous separable convolution for semantic image segmentation. arXiv:1802.02611 [cs] (2018).
- 116) He, KM., Gkioxari, G., Dollár, P., Girshick, R.: Mask R-CNN. In *Proc. 16th IEEE ICCV*, 2980-299 (2017).
- 117) 村野朋哉, 藤本登留, 中尾哲也, 阪上宏樹, 渡辺 憲: スギ正角の高温乾燥過程における材表面のひずみ分布の経時変化, *木材学会誌* **66**(3), 140-147 (2020)
- 118) 村野朋哉, 藤本登留: 乾燥スケジュールがスギ心去り正角の内部応力に及ぼす影響, *木材学会誌* **67**(2), 86-92 (2021)