

丸太の横断面内ヤング係数分布簡易評価方法の開発

森林総合研究所 長尾博文、加藤英雄、井道裕史、原田真樹、藤本清彦

北海道総研林産試験場 松本和茂

製材品の強度はヤング係数と相関があるため、丸太の段階で得られる製材品の強度を予測するには、丸太の横断面内でヤング係数がどのように分布しているのかを知る必要があります。これまでは丸太から多くの小試験体を採取してヤング係数を1つずつ測定するしかなく多大な時間と労力が必要でした。そこで、丸太の外周部を少しずつ削りながらヤング係数を測定することで丸太の横断面内ヤング係数分布を求める簡易評価法を開発しました。この評価法を従来の小試験体による方法と比較したところ、同等の精度で評価でき、測定時間を大幅に短縮できることがわかりました。

丸棒加工機を用いたヤング係数分布の簡易評価法の開発

丸棒に加工する機械（写真1および2）を用いて丸太を外側から少しずつ削っていくことで、丸太の横断面内ヤング係数分布を簡易に評価する方法を開発しました。

丸棒加工とは、丸太の表面を切削加工して、材長方向の直径が一定の円柱材に加工することです。例えば、直径が24cmを超える大きな円柱材は、写真1の旋盤型の丸棒加工機によって加工され、一般に社寺建築等の柱材などに使用されます。一方、直径が小さな円柱材は写真2の丸棒削り機によって加工され、杭などの土木用材として使用されます。

縦振動法によるヤング係数（ E_{fr} 、以下ヤング係数）は試験体を打撃することで簡単に求められ、その値はおおよそ試験体の平均的なヤング係数を示すことが知られています。そこで、丸太を少しずつ削りながらその時々々の円柱材のヤング係数を測定し、切削加工によって削られた部分のヤング係数を推定する方法を開発しました。

具体的には、図1に示した連続する*i*番目と*j*番目の

円柱材間で切削された黄色い部分のヤング係数（ E_{fri-j} ）は、*i*番目と*j*番目のヤング係数（ E_{fri} 、 E_{frj} ）と木口の断面積（ A_i 、 A_j ）から以下の式によって求めることができます。

$$E_{fr(i-j)} = \frac{E_{fri} \times A_i - E_{frj} \times A_j}{A_i - A_j}$$

開発した簡易評価法の有効性

簡易評価法によって算出されたヤング係数分布と、図2のように丸太から小試験体を採取して測定したヤング係数分布とを比較しました。スギとカラマツの結果の例をそれぞれ図3と図4に示します。図中の●は簡易評価法によるヤング係数を、○は小試験体のヤング係数を、樹心（髄）からの距離を横軸にして示しています。いずれの樹種においても、丸太の樹心から樹皮側に近づくにつれてヤング係数は変化していますが、開発した簡易評価法と小試験体の結果はほぼ一致しており、小試験体による方法と同等の精度で丸太の横断面内のヤング係数分布を評価できることが明らかになりました。



写真1 旋盤型丸棒加工機



写真2 丸棒削り機

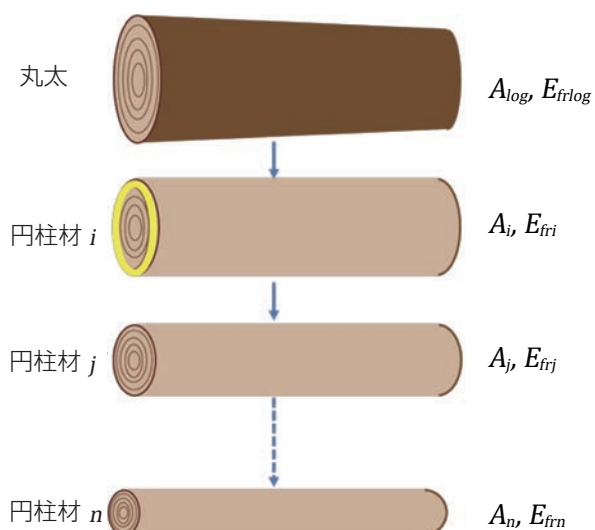


図1 丸棒加工によるヤング係数測定イメージ
 A : 木口面の面積、 E_{fr} : ヤング係数

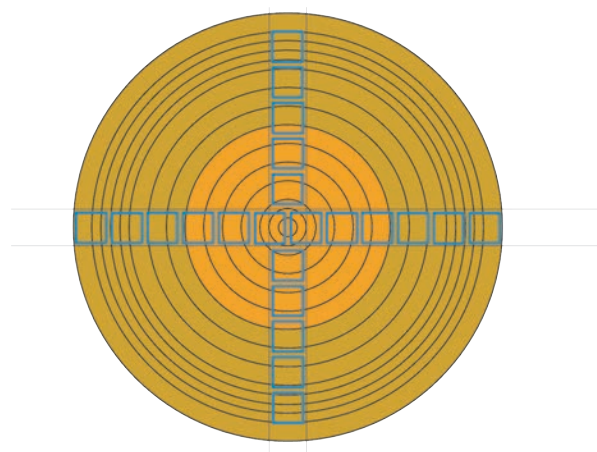


図2 従来法によるヤング係数測定のための
 小試験体採取方法

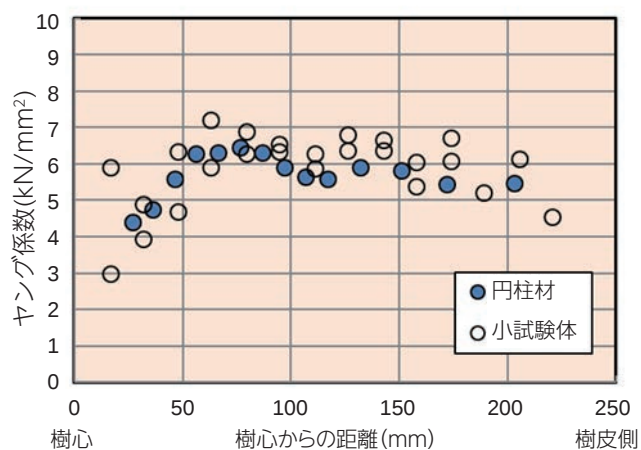


図3 丸太横断面内におけるヤング係数の
 半径方向の変化(スギの例)

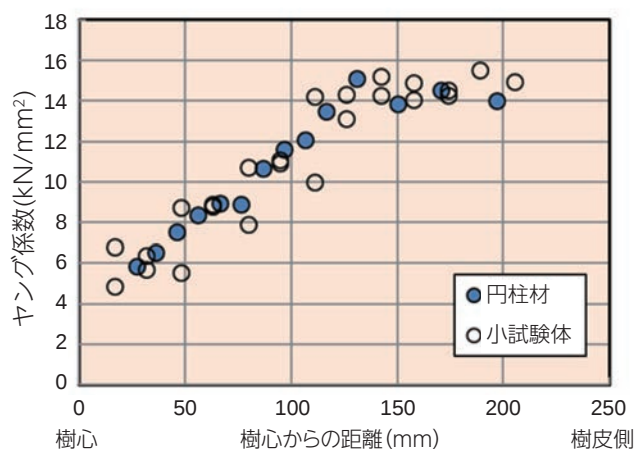


図4 丸太横断面内におけるヤング係数の
 半径方向の変化(カラマツの例)

丸太の心材含水率を非接触・非破壊で評価

静岡県農林技術研究所森林・林業研究センター 池田潔彦、長瀬亘

マイクロメジャー（株） 杉山晃広、森林総合研究所 三好由華

スギ大径材から丸太の心材含水率を非接触で評価する手法を開発しました。低周波電磁波の位相と減衰の値によって推定する手法とガンマ線の透過数によって推定する手法です。どちらの手法でも、実測した含水率との間に相関関係が認められました。また、これらの手法による丸太心材含水率の推定値と製材・人工乾燥した後の平角の実測した含水率との間にも有意な相関関係が認められ、丸太段階での選別に有効であることを確認しました。

大径材の含水率評価のねらい

スギの心材含水率は個体間に大きなばらつきがあるため、同じ乾燥条件（乾燥スケジュール）で人工乾燥を行ったときに、目標含水率に達しないものが発生します。目標含水率に達しなかったものは再度乾燥するため、コストの増加につながります。丸太段階で心材含水率が評価できれば、心材含水率の高い丸太を選別し、異なる乾燥スケジュールを適用したり、平角ではなく乾燥時間の短い板材を採材したりするなどの対応を行えるようになり、再乾燥にかかる手間やコストを削減できます。そこで、低周波電磁波とガンマ線を利用した含水率計測技術を開発し、装置を試作しました（図1）。また、試作した装置による丸太段階での含水率による選別可能性を検討しました。

丸太心材含水率を非接触・非破壊で知る

スギ大径材を試験体として周波数52MHzの低周波電磁波およびガンマ線を使用して丸太心材含水率の評価を試みました。低周波電磁波は丸太の上下にアンテナを設置して測定しました。低周波電磁波の位相（電気信号の遅れ）や減衰（電気信号の減少）を測定したところ、低周波電磁波の位相から減衰を差し引いた値は丸太の心材含水率と相関関係のあることがわかりました（図2）。ガンマ線による測定では、丸太の下部に放射線発生源（コバルト60）を、

上部に受信部を設置し、丸太断面長さ（ガンマ線の透過距離）当たりのガンマ線透過数を測定しました。その値を丸太心材含水率と比較したところ、負の相関関係があることがわかりました（図3）。

丸太心材含水率によって選別し、効率的な乾燥に活かす

丸太段階で低周波電磁波の位相、減衰、ガンマ線透過数を測定した後、平角を採材して乾燥試験を行いました。平角は同じ乾燥スケジュールで乾燥しました。その結果、乾燥後の平角の心材含水率は、低周波電磁波の位相から減衰を差し引いた値と正の相関関係が、ガンマ線透過数と負の相関関係が認められました（図2、3）。また、図4および図5の縦の破線は、電磁波による評価値やガンマ線による評価値によって心材含水率100%と推定される値です。心材含水率が100%以下と推定された丸太から採材された平角は、乾燥後の含水率が20%以下となる比率が高くなることがわかりました。例えば心材含水率100%を閾値として丸太を選別し、乾燥スケジュールを変えるなどの工夫で、平角を効率的に乾燥できると考えられます。

今後は、丸太内部の含水率分布推定精度の向上を図るとともに、選別する際の区分閾値の選定等を進め、工場等への装置・手法の試験的な導入を進めていきます。

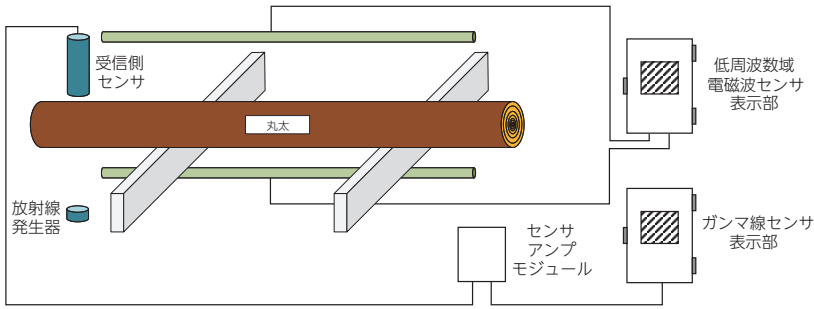


図1 低周波電磁波及びガンマ線を利用した丸太含水率推定装置

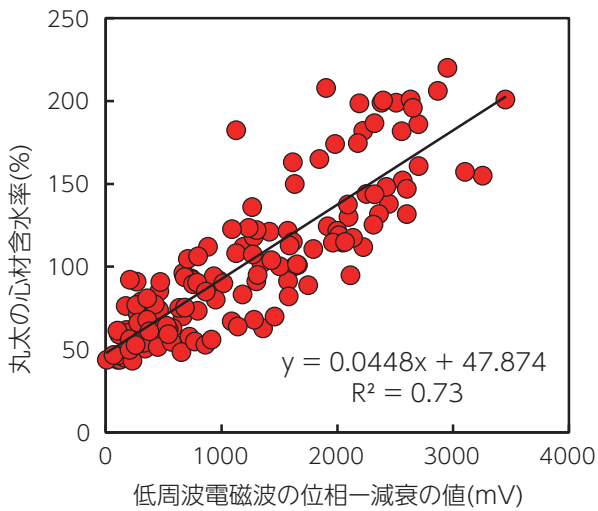


図2 低周波電磁波の位相から減衰を減じた値と丸太心材含水率の関係

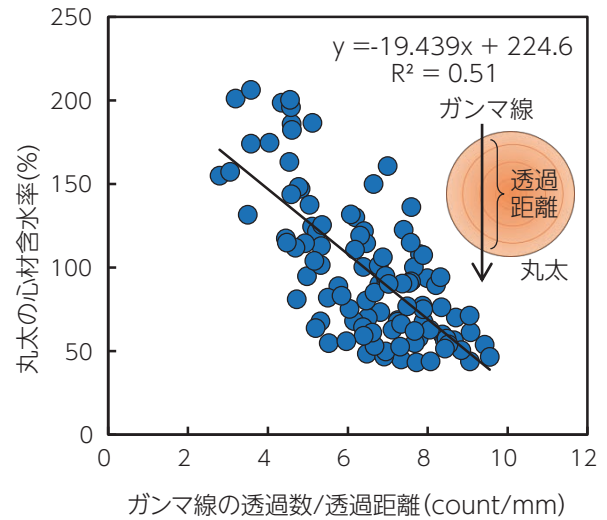


図3 ガンマ線透過数と丸太心材含水率の関係

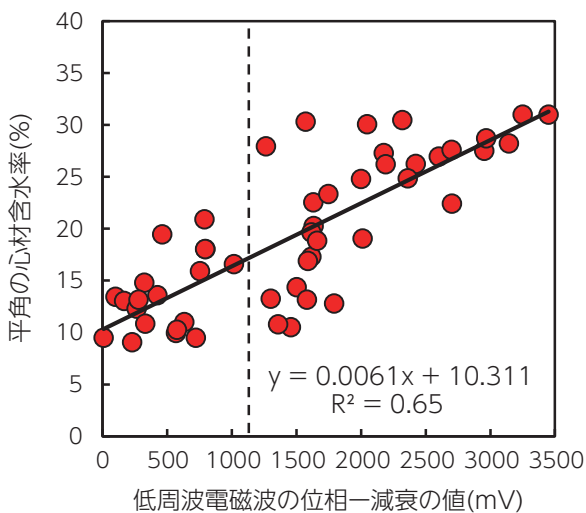


図4 低周波電磁波の位相から減衰を減じた値と乾燥後の平角心材含水率の関係

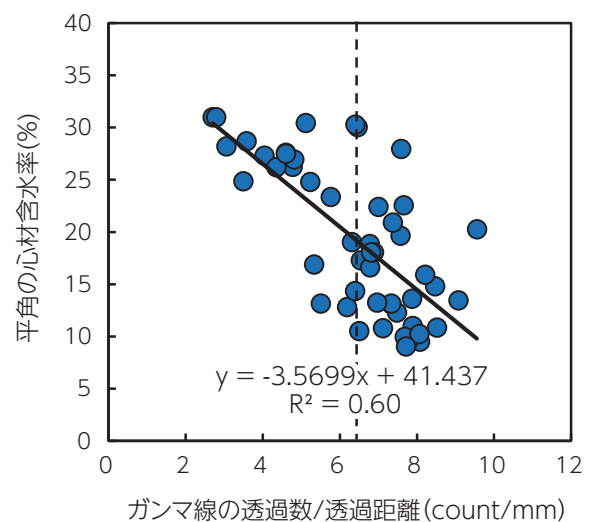


図5 ガンマ線による評価値と乾燥後の平角心材含水率の関係

丸太木口面の連続硬さ測定から密度を推定

熊本県林業研究・研修センター 池田元吉、中村圭子

熊本県菊池地域振興局 荒木博章、熊本県玉名地域振興局 野口琢郎

熊本県林業振興課 平田晃久

スギ大径材から採材される製材品の強度的性質を丸太段階で推定するためには密度の分布がとても重要です。そこで、丸太の木口面で硬さを連続的に測定することで密度の分布を推定する装置を試作し、密度の推定精度を確認しました。その結果、丸太の木口面で樹心から樹皮までの範囲で測定した硬さデータから、採材後に得られる製材品の密度を推定できることがわかりました。

反力（硬さ）の連続測定法

大径材を効率よく利用するためには製材木取りに反映できる丸太の形状や材質の分布に関する情報が欠かせません。特に密度は木材の強度的性質と深く関係しているので、とても重要な情報です。そこで、密度と相関があると考えられる木材表面の硬さを測定することで、丸太横断面内の密度分布を推定できないか検討しました。木材表面の硬さを表す指標として鋼球を丸太木口面に押し付けたときに鋼球が受ける反力を測定しました（図1）。鋼球は電動アクチュエーターに取付けられたロードセルに固定されているため、鋼球が移動することで反力を連続的に測定することができます。ただし、チェーンソーによる断面では測定できないので、測定前に木口面を丸鋸で切削して表面を整える必要があります。得られた反力（硬さ）曲線を図2に示します。晩材（年輪）で高い値を示しており、早材と晩材の密度の差が大きいスギの特徴をよく反映しています。

硬さ曲線からの製材品密度推定法

硬さ曲線から製材品の密度を推定するために、製材品の採材位置に該当する部分（図2のオレンジの

部分）の硬さの値をすべて合計し、実際に採材された製材品の密度と比較しました（図2右）。硬さの合計値が大きくなるにつれて製材品の密度も大きくなる傾向が認められ、硬さ曲線から製材品の密度をある程度推定できることがわかりました。しかし、決定係数は0.24であり、強い相関関係ではありませんでした。

そこで、樹心を中心にして硬さ曲線を回転させることでデータを平面に広げ、製材品密度の推定精度の向上を図りました（図3(a)）。平面に広げたデータにおいて採材する位置にあたる硬さデータをすべて合計し、採材後に得られた製材品の密度と硬さデータの合計値を比較したところ、両者の間には正の相関関係（決定係数0.58）が認められました（図3(b)）。硬さ測定により丸太段階で製材品の密度を推定できることがわかりました。

実用化に向けて

実用化に向けて、測定に必要な範囲の丸太木口を平滑にする加工法、丸太端部に容易に固定・取外しできる小型軽量の硬さ測定装置開発が必要と考えています。

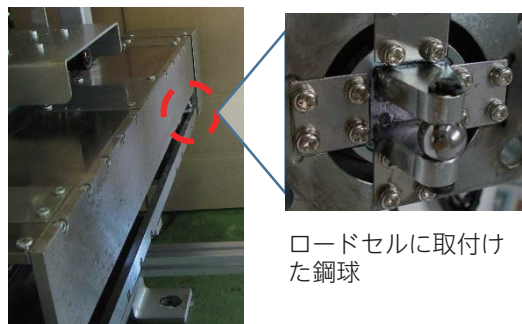
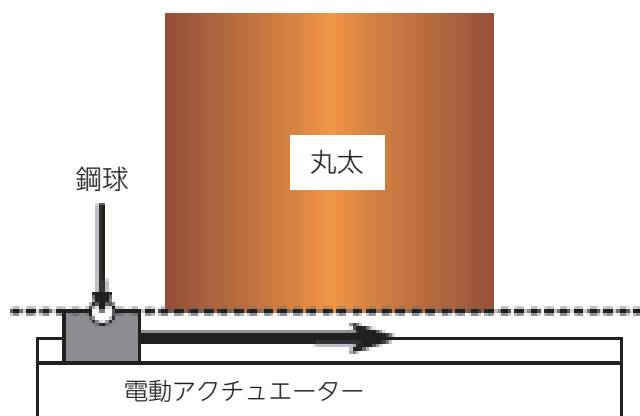
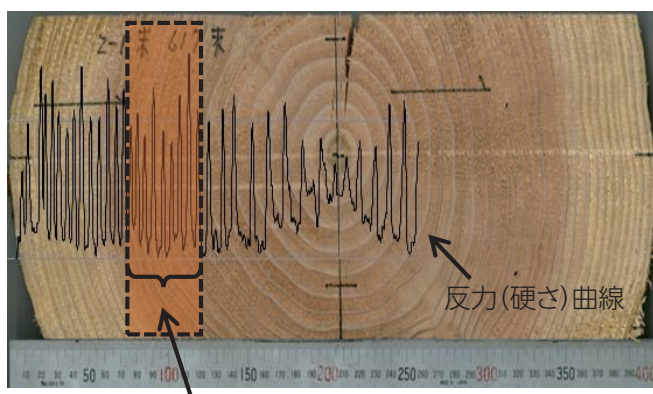


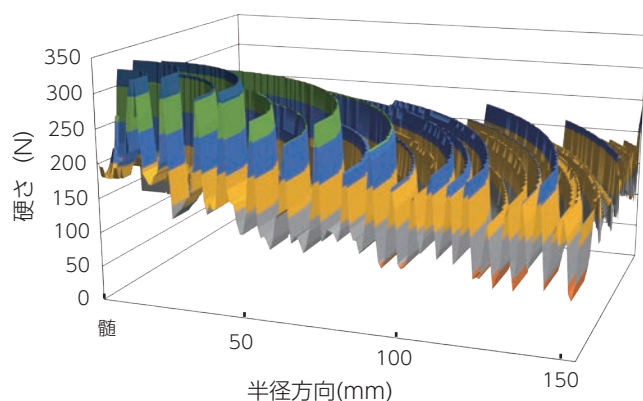
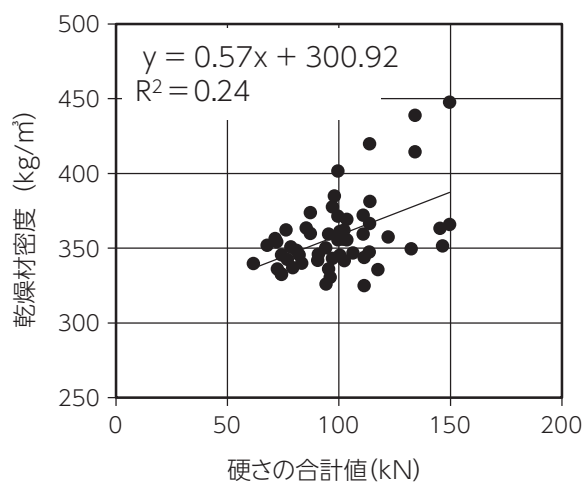
図1 木口面での反力（硬さ）の測定方法

左：測定の概略図、右：ロードセルに取付けた鋼球

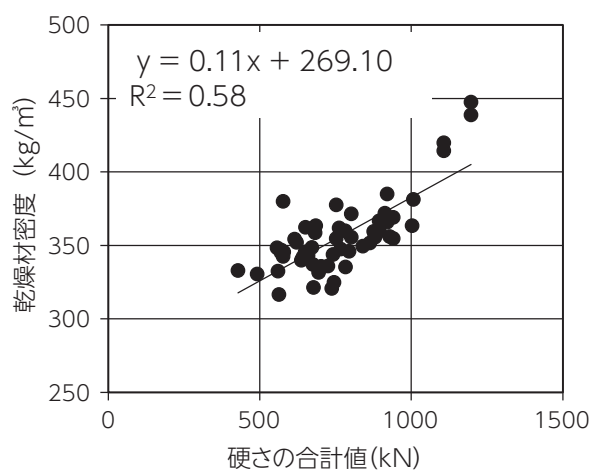


採材する製材品に該当する部分の硬さデータを合計

図2 丸太木口面における反力（硬さ）曲線の測定例と硬さの合計値と製材品の密度の関係



(a) 硬さ曲線を平面に広げた例



(b) 平面に広げた硬さ曲線から求めた硬さ合計値と密度の関係

図3 硬さ曲線を平面に広げた例と硬さの合計値と製材品密度の関係

形状認識等による丸太品質評価技術の開発

オーアイ・イノベーション(株) 太田章介、向達毅

スギなどの人工林から得られる大径材には、長手方向で径の変化が大きく、断面形状がいびつで、樹心が偏っている個体が多く存在します。大径材を効率よく製材品として利用するためには、従来の直材を想定した小・中径材用の形状測定方法では不十分と考えられ、木口面の年輪情報等の取得を含めた測定装置が必要です。そこで、物体の動きなどを測定できるモーションセンサーによって丸太の側面全体の画像と形状の情報を得る装置を試作しました。この装置では従来の方法では難しかった樹心位置の自動検出を、ディープラーニング手法によって実現しました。さらに樹心付近の年輪数を測定する手法も開発しました。

大径材の形質評価技術の必要性

大径材には元玉が多く含まれ、太くて重いだけでなく、長手方向における径の変化が大きく、特に元口側の断面形状がいびつで、樹心（髄）が偏っている個体が多く存在します。また、樹心付近の年輪幅の個体間の差が大きいのも特徴です。したがって、大径材の場合には、従来の通直な小・中径材を対象とした丸太形質の測定技術とは異なる技術が必要です。

大径材に適した形状測定装置の開発

従来は距離センサーを使って丸太の長さ方向の数か所について輪郭を測定し、全体の側面形状を認識するのが一般的でした。今回は形状変化の大きい大径材に対応するため、物体の動きなどを測定できる安価なモーションセンサーを使って、丸太の側面画像と形状情報を同時に取得できる方式を採用しました。長さ1mの丸太用の試験機から試作を始めて順次センサーを直列に増設して改良し、現場での使用を想定した実大サイズ（長さ4mの丸太用）の試験機を試作した結果、測定誤差 $\pm 1.5\text{mm}$ 以内という高い精度を実現しました（図1、図2、図3）。

樹心位置の特定、年輪数測定装置の開発

大径材から心去り材（樹心を含まない製材品）を

製材する際には、樹心の位置を把握する必要があります。しかし、従来の画像解析手法では樹心の位置を正確に自動で把握することは困難でした。そこで、ディープラーニング手法を用いて、丸太の木口面画像から樹心位置を検出する装置を試作しました。その結果、樹心位置の検出誤差の平均値は 2.0mm （標準偏差 1.3mm ）であり、十分な精度で樹心を検出できることがわかりました（図4）。

また、一般に樹心から15年輪程度より外側は、成熟材と呼ばれ強度等が安定しています。丸太から強度の高い製材品を生産するためには、成熟材部の把握が重要です。そこで、樹心付近の年輪数を自動測定する装置を試作しました。撮影した木口面画像を画像解析により2値化して年輪数を測定する方法を検討しましたが、個体ごとに2値化の領域と閾値を手動で補正する必要があり、自動化が困難でした。そこで、ディープラーニング手法を用いて2値化の領域と閾値を自動設定して明瞭な2値化画像を得るプログラムを作成しました。その結果、十分な精度で年輪数を測定できる可能性があることがわかりました（図5）。

さらに、これまでに述べた丸太の形状測定、樹心位置の特定、年輪数の測定を同時に行うことができる装置を試作し、実用に耐えうる装置であることを確認しました。



図1 試作した長さ2mの丸太用の試験機



図2 試作した実大丸太用測定装置

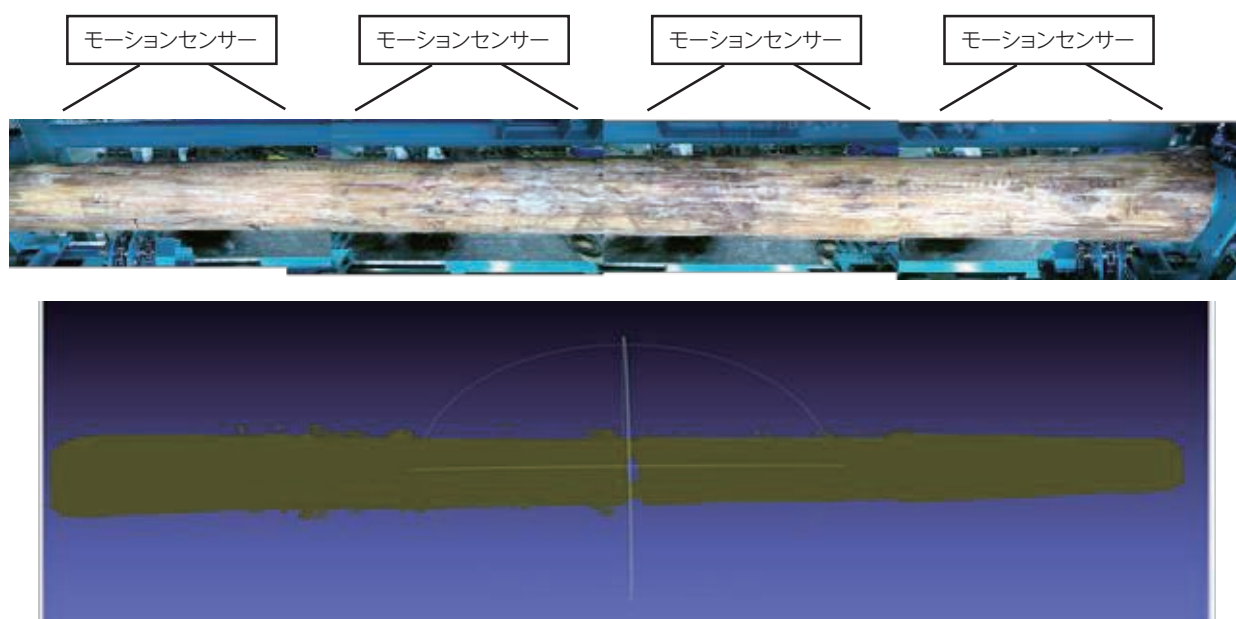


図3 試作機で測定した丸太(上図)と測定値をもとに構成した丸太の3D画像(下図)

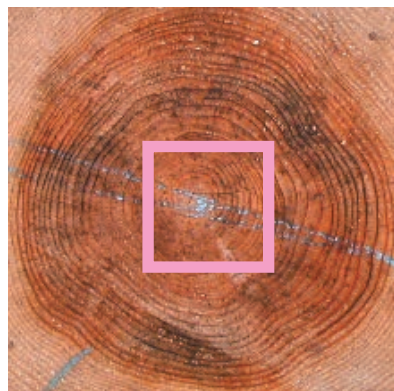
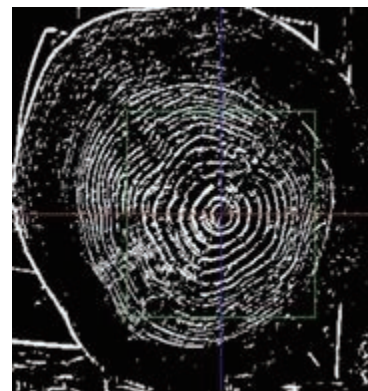


図4 図中の四角の中心が樹心として検出した場所

図5 年輪数計測画像の例
左：撮影したカラー画像、右：2値化した画像