

木材の非破壊検査*¹祖父江信夫*²Nondestructive Testing of Wood*¹Nobuo SOBUE*²*Keywords*: nondestructive testing, needs, research, applications, developments.

1. はじめに

近年、電磁波、超音波、AE、光、赤外線、放射線などによる計測や画像解析技術、コンピュータ制御技術の進展によって非破壊検査技術は飛躍的に進歩してきた。木材工業でも、最近、資源の有効活用、適正な加工制御、生産の自動化、製品の品質保証などの観点から計測機器による非破壊検査のニーズが増してきたが、現状では水分計測以外は目視による検査を行う場合が多く、開発途上にある技術課題が多い。北米では1950年代から水分管理やストレスグレーディングを目的とした非破壊検査に関する研究・開発が手掛けられ、最近ではハイテク技術を応用した手法の開発が精力的に推進されている^{1,2)}。わが国でも、最近、超音波やX線、画像処理技術を応用した手法が研究、開発されている。

本稿では、木材工業における非破壊検査の現状とニーズ、検査原理と応用技術の現状と課題、および最近の検査機器や手法の開発例について概説する。

2. 木材工業における非破壊検査の現状とニーズ

日本木材学会第二期研究分科会では木材工業における自動計測の現状とニーズに関する調査を実施し³⁾、関連企業と試験・研究機関に対して文書による

回答を求めた。これを基に、非破壊検査の現状とニーズを整理してみる。

まず、企業における自動計測の現状については、①水分計測、②乾燥制御、③寸法・形状計測、④温・湿度計測、⑤ライン管理、⑥強度・ヤング係数計測の順に多い。

現状の検査技術水準に対する不満や要望も多く、ニーズの多い水分計測では、内部水分や水分傾斜の検査、高周波式水分計の自動比重補正機能の付加、表面をプラスチック加工したボード類に適用できる水分計の開発などが望まれている。

開発されたら導入してみたい装置に関する回答では、現在導入している装置の傾向と似ているが、新技術として割れ検出機、節検出機、腐れ検出機、接着非破壊試験機などがみられる。その他では、木材の色彩判定機、自動製材判定機、ボード表面の欠点検査機、ボード・ラミナ・大断面構造材等のグレーディングマシン、逆目・順目判定機、ポータブル木材PHメータ、ヤニ検出機などかなり専門化した機能を持つ装置の開発も望まれている。

一方、これらの要望の受け皿となる大学や試験研究機関に対するアンケートでは、自動計測の研究開発をしているとするもの37%、また、企業から自動計測に関する相談があったとするもの47%という回答が寄せられた。問い合わせや相談を受けた項目は次のように整理される。

a. 欠陥検出：合板・集成材の欠陥、表面欠陥(割れ、節、腐れ)、内部欠陥(割れ、空洞、節)

*¹ Received July 16, 1993.*² 静岡大学農学部 Faculty of Agriculture, Shizuoka University, Shizuoka 422

b. グレーディング：製材・集成材ラミナの強度等級区分，節の識別，製材の表面密度や繊維傾斜測定，木質材料の剝離（接着）強さや接着不良の非破壊検査

c. 水分管理：製材・マットのオンライン水分計測，乾燥操作の自動化

d. 色彩管理：材色判定，塗装の調色管理

e. その他：木理判定，丸太の自動検収，樹脂注入制御，曲げ木適材選別，ボード用マット密度の管理，丸鋸の腰入れ・刃の不揃い検査など

非破壊検査に対する業界のニーズは強く，大学や試験研究所における非破壊検査技術の研究や普及に対する取り組みの強化が望まれている。

3. 非破壊検査の各論

3.1 水分計測

木材の水分計測には従来から電気式の水分計が広く利用されている。

誘電式水分計は直流抵抗式に比べてある程度深い部位の水分測定が可能で，電極の改良なども加えられている。しかし木材密度の影響が大きく，補正方法の改善が望まれている。木材にステップパルス状の電界を加える誘電パルス法⁴⁾も開発されている。

高周波抵抗式水分計の改良⁵⁾も試みられている。低含水率域では誘電式より密度依存性が少ない。

乾燥中に生じる材内の水分傾斜を検出する電気抵抗式水分計⁶⁾のセンサや誘電式水分計の電極形状や配置⁷⁾についても研究されているが，まだ，決定的な解決策を得るに至っていない。

近赤外線領域に現れる水の吸収スペクトルの強度から水分量を決定する近赤外線マルチウェーブ水分計⁸⁾なども市販されている。

木材表面の熱特性を利用する方法も非接触測定法が適用できる。赤外線ランプなどで一定の熱量を与えられた木材表面の温度は含水率に依存する。赤外線輻射温度計による温度測定により，生材や乾燥過程の水分計測が可能で⁹⁾，製材ライン仕様の製品¹⁰⁾も市販されている。

放射線の吸収を利用する方法も，安全管理の行き届いた工場では有効である。放射線の吸収には水分と密度の二因子が影響するので，密度の影響の補正が重要となる。X線のCT法（コンピュータ断層撮影法）の適用により，柱材内部の水分分布の計測も可能であり，材の密度分布が正確にわかれば含水率1%程度の精度で水分測定も可能とされている¹¹⁾。しかし，一般には個々の材の密度も未知数であり，

Table 1. 木材の非破壊検査法の分類.

水	分	電磁気……直流抵抗，高周波抵抗，誘電率，マイクロ波，赤外線，核磁気共鳴吸収
		熱特性……赤外線輻射温度
		放射線……X線・ γ 線の吸収
		弾性波……固有振動数，伝播速度や減衰
		化学的方法・その他
密	度	質量・体積計測
		マイクロ波……共振，吸収
		熱特性……赤外線輻射温度
		放射線……X線・ γ 線・ β 線などの吸収
		ピンの打ち込み深さ……ピロディン
強度等級区分	目視法	年輪解析
		機械支援法
		欠点検査法……目視の自動化
		静的方法……曲げ試験
		動的方法……縦振動，曲げ振動
節	光学情報	保証荷重試験
		AE法
		光学情報……CCDカメラ，光ファイバーセンサ，色彩色差計
		電磁気……圧電効果，マイクロ波吸収，核磁気共鳴吸収のCT法（MRI）
		放射線……X線・ γ 線のCT法
繊維走向	弾性波	熱特性……赤外線サーモグラフィー
		弾性波……超音波伝播速度のCT法
		電磁気……誘導率，マイクロ波吸収
		光学情報……レーザー，赤外線
		弾性波……伝播速度
その他の欠陥	木材腐朽	木材腐朽……打音診断，電気パルス抵抗，ピンの打ち込み，超音波速度・減衰およびCT法
		接着不良……打音診断，打撃反力，超音波速度および減衰，赤外線サーモグラフィー
		割れ……光学センサ

密度補正方法の開発と処理速度の向上が問題である。

変わった方法として縦共振の固有振動数の変化を利用した水分計測法があり¹²⁾、実大構造物では生材から気乾状態の範囲で適用できる。また、木材中を伝播する超音波の速度や減衰は水分に影響され、乾燥室中における木材含水率の監視¹³⁾に応用が試みられている。

密度測定の前で述べるようにマイクロ波の共振現象を利用すると、木材の含水率と密度を同時に計測することができる¹⁴⁾。

原子の核磁気共鳴 (NMR) 吸収現象を利用すると水に起因するスペクトルから直接に水分量が求められる¹⁵⁾。装置は非常に高価である。

製材ライン仕様のシステムの開発や改良も各国で行われており、 γ 線やマイクロ波などを用いた FINOMOIST の開発¹⁶⁾、電気抵抗式や誘電式水分計の改良¹⁷⁾、オンラインシステムの試作^{18,19)}がなされている。乾燥制御には水分変化をロードセルで検出する方法も実用化されている²⁰⁾。

業界のニーズにもあるように、より大きな断面材料の内部水分や水分傾斜のわかる水分計、乾燥室内のような高温・高湿状態に適用できる装置、木材密度の影響の自動補正機能を備えた水分計の開発が急がれる。計測原理の開発では、誘電などの電磁気特性や赤外線、質量計測などを複合した水分-密度同時決定法の検討が必要と考えられる。

3.2 密度測定

一般に密度の影響を受ける物性は水分の影響も大きく、水分計測と同様に密度と水分の相互の影響を分離する技術開発が重要である。

質量と体積を計測する方法は、製材品のように形状が限定されたものや体積測定が容易な場合には有効である。

マイクロ波の空洞型共振器を用い、マイクロ波の共振の周波数と強さから木材の密度と含水率を同時計測する装置の開発¹⁴⁾も試みられている。

熱特性による木材密度の計測²¹⁾では、一定熱量を照射した木材の表面温度から密度を推定する。水分の影響の補正が検討課題である。

X線や γ 線、 β 線などの放射線の吸収による密度計測は、紙、ボード工業の生産ラインで用いられている。ボードなどの厚さ方向の密度分布の非破壊検査にも有効である^{22,23)}。含水率の影響の補正を必要とする。

簡便な方法には、鋼製ピンの打ち込み深さから密度を推定する装置 (ピロディン)²⁴⁾などもある。

ビデオ画面における木口面の年輪構造の解析から密度を推定する方法も特定樹種には適用できる²⁵⁾。簡便な点から実用性が期待されるが、基礎データの集積が必要である。

木材の密度は、最近、建築構造物の釘接合耐力の設計基準に計算因子として導入されるなど、木構造の分野でも密度計の開発が期待されている。現在の電気式水分計のような感覚で使用できる、水分の影響を自動補正するタイプの密度計が開発目標となる。このような条件から判断すると、水分計と同様に誘電、超音波、光、質量計測などの複合技術の開発に目を向ける必要がある。

3.3 木材の強度等級区分

強度等級区分法は目視法と機械法に大別される²⁶⁾。目視法は、節、繊維走向の傾斜、割れなどの外観的な木材欠陥を目視によって調べ、欠陥の程度によって等級区分する方法である。目視法を自動化したグレーディングマシン²⁷⁾も開発されている。

機械的応力等級区分は、一般には、個々の木材をヤング係数に基づいて等級区分することを指す。静的なマシン²⁷⁾では木材に曲げ応力を負荷し、高速型グレーディングマシンも市販されている。

応力波・超音波伝播法では、木材中を伝播する弾性波の速度と密度からヤング係数を算出する。市販の装置があり、製材以外にも木質ボード類の非破壊検査や LVL 用単板の選別²⁸⁾にも利用されている。

固有振動法では共振周波数と密度からヤング係数を算出する。木口面を打撃する方法²⁹⁾は、わが国で独自の発展を遂げ、オンライン装置も実用化³⁰⁾されている。丸太³¹⁾や大断面材にも容易に適用できる特徴がある。たわみ振動を用いた装置は、グレーディングマシンとして米国で市販されている²⁸⁾。また、曲げ-ねじり複合振動を利用すると軸材料³²⁾や板材料³³⁾のヤング係数とせん断弾性係数を同時決定できる。

この他に、製品に一定荷重を負荷し、所定強度を保証する保証荷重試験法 (プルーフロード・テスト)^{26,34)}も用いられている。研究レベルでは、後に述べる AE 法の適用も試みられている。

現在、ヤング係数は木材強度の非破壊予測因子として最も有用であるが、完全な因子ではない。次世代型のグレーディングマシンでは、ヤング係数に基づく機械的等級区分法の補助因子として、後で述べる節や繊維走向に関する情報を強度予測に活用する方法の導入が期待される。

3.4 節の検出

節の検出には、人間の目のように光情報を利用す

る方法、節と周辺における密度や熱特性などの物理的性質の差異を利用する方法がある。

木材表面の色や光沢などの光学的情報を画像や色差計、光ファイバーセンサ³⁵⁾、CCD カメラ^{36,37)}などの光センサで検出し、画像処理法などによって節を認識する方法が開発されている³⁸⁾。節と周辺部である程度の色差がある場合には有効であるが、節と周辺部の色差が小さい場合は境界部の判別が難かしい^{39,40)}。

木材にX線や γ 線などの放射線を照射すると、節と周辺の組織における密度差に起因する放射線吸収の差異によって、節を検出することができる。木材内部の節の検出には、X線や γ 線のCT法^{41,42)}の適用が有効であり、また最近、核磁気共鳴吸収を利用したCT法MRI装置⁴³⁾の適用も検討されている。

マイクロ波の吸収による節の検出装置⁴⁴⁾も開発されている。

木材の圧電効果は、節の周辺で繊維走向が乱れると正常な部分と異なった電荷分布を生じさせるので、節の検出が可能となる⁴⁵⁾。

赤外線サーモグラフィー（熱画像装置）を用いた非破壊検査は、壁面タイルの剝離検査や接着不良検査法としても利用されている。材料を一定の熱環境に曝すと、材料の熱特性や欠陥の有無によって表面温度に差異が生じる。スギ心材部のように前述の光学的情報による節の検出が難しい場合や表面に近い隠れ節の検出にも有効とされている⁴⁶⁾。

超音波の伝播速度や減衰による節の検出が可能であり¹⁾、丸太内部の隠れ節の検出には超音波CT法⁴⁷⁾も適用できる。

節の情報収集には種々の原理が適用できるが、得られた情報から節を認識するには大量のデータの演算が必要となり、オンライン計測に対応するには、節を認識する効率の良い推論アルゴリズムの開発が重要である。

3.5 繊維走向の測定

木材は分子構造から細胞構造に至るまで、いろいろな構造の異方性を持っている。これらの異方性を電気や光、弾性などの性質を利用して測定すると、繊維走向を決定できる。

誘電率の異方性はよく知られており、市販の誘電式水分計でもこの現象を確認できる。オンライン繊維傾斜計^{48,49)}が米国で市販されている。

マイクロ波の吸収の異方性を利用したオンライン繊維傾斜計⁴⁴⁾もフランスで実用化されている。

レーザー光や赤外線も電磁波の一種で、木材表面や内部における反射や散乱は異方性を示し、局所的

な繊維走向の測定もできる⁵⁰⁻⁵²⁾。また、表面から厚さ方向への繊維の潜り角度の計測の可能性も報告され⁵⁰⁻⁵²⁾、逆目の判定などへの応用が期待される。

弾性の異方性も古くから知られている。超音波の伝播速度を利用して弾性主軸を決定し、繊維走向を検出する方法が研究されている⁵³⁾。

繊維走向の検出は、切削制御、ストレスグレーディングに関連した基礎技術として重要であり、発展が望まれる。

3.6 その他の欠陥の検査

最近、超音波による欠陥の検査は種々の産業分野で利用されている。

超音波探傷法は、以下に述べるように木材の腐れ、接着不良などの欠陥検査への応用が試みられている。

AE（アコースティック・エミッション）は、材料が破壊する際に放出するエネルギーによって生じる弾性波で、一般には数十kHz～数MHzの超音波領域の振動として検出されるものをさす。AEの検出によって破壊の前兆をとらえたり、欠陥を検出することができる。合板の接着不良の検出⁵⁴⁾や有節材のストレスグレーディングへの応用、木材乾燥の制御への応用、また、切削中の工具摩耗の評価や切削制御への応用も試みられている。AEの応用に関する詳細は、本誌の野口の総説⁵⁵⁾を参照されたい。

被検体を軽く打撃する打音診断は可聴音の利用法として古くから用いられている。FFTスペクトルアナライザなどの機器を用いた木造建築物の腐朽検査⁵⁶⁾も試みられている。

木材腐朽の検査に超音波を利用するアイデア⁵⁷⁻⁶⁰⁾は比較的古くからある。超音波の伝播経路に欠陥や密度変動が存在すると、超音波の減衰や伝播速度、伝播経路が変化する。超音波CT法^{47,61)}を応用した木柱の腐朽検査装置は、実用器として利用されている。その他に、現場ではピンを打ち込んだり（ピロディン）、電気パルスによる抵抗を調べる装置（シゴメーター）^{62,63)}も用いられる。

接着不良の検査法には打音診断が古くからある。打撃反力の大きさによる検査は表面付近の層剝離などの検出に有効で、ハンディな装置⁵⁴⁾も市販されている。合板のパンクの検査に、表面をブラシで摩擦した際の摩擦音による検出装置⁶⁴⁾が比較的古くに試作されている。超音波法を合板のパンクの検査に応用した装置も市販されている。その他にも、前出のサーモグラフィーによる手法が検討されている。写真撮影用電球で表面加熱する方法は⁶⁶⁾、表面付近に不良部分がある場合に有効である。

割れの検出に関しては、現時点では目視による検査以外は非常に難しい。表面割れについてはレーザーと光センサによる検出が試みられ、表面鉋削材で0.4 mm程度の割れが認識されている⁶⁷⁾。内部割れの検出については、現段階では有効な手だてではない。

3.7 材色・調色の管理

最近、半導体カラーセンサの進歩によって簡便な色彩色差計が市販されるようになり、塗装、染色など色が関係する分野への応用が進んでいる。家具用材の材色測定や着色・塗装の自動化に应用されている⁶⁷⁾。

3.8 統合システムの開発

前述の個別検査技術を統合した木材加工システムの開発もいくつか試みられている。米国のALPS^{68,69)}は家具用材の自動加工システムとして、フォトンCTによる原木内部の節の検出、挽き板の欠陥認識、最適裁断加工の機能などの統合化を目指している。わが国でも、家具の自動生産を目的とした⁶⁷⁾、設計、材の欠陥認識、木取り、切削、材色計測・調色・塗装、研磨などの機能を有するシステムが開発されている。また、製材を目的とした自動形状選別システム⁷⁰⁾では、原木の形状・欠陥認識、画像処理による最適木取り、節の認識、等級評価技術の統合化が試みられている。

3.9 林業と木材工業の接点における応用

木材資源の有効活用には、生産された木材を選別して利用する一方で、利用目的にあった木材生産を考える必要がある。ヤング係数の測定に基づく立木の非破壊検査は、強度的利用に適した品種選択、林地の選択などに必要な情報の提供、新しい森林評価システムや丸太流通の円滑化のための情報を提供する手段として活用が期待される。応力波伝播法⁷¹⁾や人間の体重を負荷する静的方法⁷²⁾が適用できる。

4. おわりに

近年の「品質管理された工業材料としての木材製品」が求められる市場のニーズから出現した構造用集成材・LVLなどのエンジニアードウッドは、非破壊検査技術の進展に支えられた新しい木質材料である。製品の信頼性の向上、原材料の多様化・低質化への対応、省力化、熟練技能者不足などの課題に対応するには、製品の非破壊検査技術の進展と生産の自動化を支援する非破壊検査技術の進展が必要とされている。

木材の非破壊検査技術の開発を難しくしている原因には、本来木材が生物材料として持っている密度、含水率、組織・構造の不均質性や個体ごとのばらつ

きが大きいこと、検査技術の蓄積が少ないために技能者の経験に基づく生産管理が行われてきたこと、また高度な設備・技術開発投資が充分にできないことなどがある。今後、非破壊検査技術の進展には、ハイテク技術やニューロ技術の応用などにも目を向けるとともに、木材の基礎研究で蓄積された知識を応用技術の開発に結び付ける取り組みが必要と考えられる。木材学会がこのような取り組みの中心になっていくことを、産業界から求められているのではないだろうか。

本稿の内容は日本木材学会第二期研究分科会活動の過程で得られた情報によるところが多い。報告書「自動計測の基礎と応用」のとりまとめに参加いただいた常任メンバーに謝意を表します。

文 献

- 1) Szymani, R.; McDonald, K.: *Forest Prod. J.*, **31**(11), 34-44 (1981).
- 2) James, W.: *Wood Fiber Sci.*, **20**(2), 277-294 (1988).
- 3) 日本木材学会第二期研究第一分科会「自動計測の基礎と応用」報告書, 1991.
- 4) 坪井 淨: 日本木材学会第二期研究第一分科会「自動計測の基礎と応用」報告書, 1991, p. 120-121.
- 5) 増馬浩志: 日本木材加工技術協会関西支部水分グレーダー開発研究会報告書, 1990, p. 87-94.
- 6) Forrer, J. B.: *Forest Prod. J.*, **34**(7/8), 34-38 (1984).
- 7) James, W. L.: *Wood Science*, **13**(4), 185-195 (1981).
- 8) Nマルチウエーブ方式デジタル水分計 (DMA-300) カタログ, 昭光通商(株)東京.
- 9) Troughton, G. E. *et al.*: *Forest Prod. J.*, **37**(1), 13-19 (1987).
- 10) NOVAX フルレンジ水分計 (赤外線モデル 8010) カタログ, NOVAX INDUSTRIES CO., Canada.
- 11) 金川 靖: 日本木材学会第二期研究第一分科会「自動計測の基礎と応用」報告書, 1991, p. 69-73.
- 12) 有馬孝禮, 早村俊二, 丸山則義, 古沢 信: 材料, **39**, 1228-1234 (1990).
- 13) James, W. L.; Boone, R. S.; Galligan, W. L.: *Forest Prod. J.*, **32**(9), 27-34 (1982).
- 14) 中山 学: 日本木材学会第二期研究第一分科

- 会「自動計測の基礎と応用」報告書, 1991, p. 118-119.
- 15) Quick, J. J.; Hailey, J. R. T.; MacKay, A. L.: *Wood Fiber Sci.*, **22**(4), 404-412 (1990).
- 16) 信田 聡: 木材工業, **43**(8), 353-358 (1988).
- 17) Quarles, S. L.; Breiner, T. A.: *Forest Prod. J.*, **39**(5), 51-54 (1989).
- 18) 谷口義昭: 日本木材学会第二期研究第一分科会「自動計測の基礎と応用」報告書, 1991, p. 110-111.
- 19) 中嶋 厚: 同上, p. 117.
- 20) 奈良直哉: 同上, p. 114-116.
- 21) 木下敏幸: 第40回日本木材学会大会要旨集, つくば, 1990, p. 97.
- 22) Laufenberg, T. L.: *Forest Prod. J.*, **36**(2), 59-62 (1986).
- 23) Winistorfer, P. M.; Davis, W. C.; Moscher, W. W. Jr.: *ibid.*, **36**(11/12), 82-86 (1986).
- 24) Görlacher, R.: *Holz als Roh-und Werkstoff*, **45**, 273-278 (1987).
- 25) Clauson, M. L.; Wilson, J. B.: *Forest Prod. J.*, **41**(3), 58-62 (1991).
- 26) 飯島泰男: 日本木材学会第二期研究第一分科会「自動計測の基礎と応用」報告書, 1991, p. 83-87.
- 27) 中井 孝: 木材工業, **41**(10), 455-459 (1986).
- 28) 神谷文夫: 同上, **40**(12), 581-585 (1985).
- 29) 祖父江信夫: 平成2年度科学研究費補助金(試験研究B)研究成果報告書(課題番号01860021), 1991.
- 30) 古沢 信, 平野 茂: 日本木材加工技術協会第10回年次大会要旨集, 東京, 1992, p. 49-50.
- 31) 荒武志朗, 有馬孝禮, 迫田忠芳, 中村徳孫: 木材学会誌, **38**(11), 995-1001 (1992).
- 32) Sobue, N.: *Mokuzai Gakkaishi*, **34**(8), 652-657 (1988).
- 33) Sobue, N.; Katoh, A.: *ibid.*, **38**(10), 895-902 (1992).
- 34) 海老原徹: 日本木材学会第二期研究第一分科会「自動計測の基礎と応用」報告書, 1991, p. 124-125.
- 35) 白川真也, 野崎兼司, 佐藤 眞: 林産試験場報, **3**(2), 9-17 (1989).
- 36) 山崎亨史, 窪田純一, 中田欣作: 同上, **7**(3), 15-19 (1993).
- 37) 和田 博: 木材学会誌, **39**(1), 19-23 (1993).
- 38) Koivo, A. J.; Kim, C. W.: *Forest Prod. J.*, **39**(9), 22-30 (1989).
- 39) 佐道 健, 岩崎昌一: 木材学会誌, **35**(12), 1073-1079 (1989).
- 40) 岩崎昌一, 佐道 健: 同上, **37**(11), 999-1003 (1991).
- 41) Funt, B. V.; Bryant, E. C.: *Forest Prod. J.*, **37**(1), 56-62 (1987).
- 42) Wagner, F. G. et al.: *ibid.*, **39**(11/12), 62-64 (1989).
- 43) Chang, S. J.; Olson, J. R.; Wang, P. C.: *ibid.*, **39**(6), 43-49 (1989).
- 44) Martin, P. et al.: *Wood Sci. Technol.*, **21**, 361-371 (1987).
- 45) Knuffel, W.: *Holzforschung*, **42**(2), 247-252 (1988).
- 46) 佐道 健, 村田巧二: 木材学会誌, **39**(1), 13-19 (1993).
- 47) 富川義朗, 山田博章: 超音波 TECHNO, **2**(2), 26-37 (1990).
- 48) McLauchlan, T. A.; Norton, J. A.; Kusec, D. J.: *Forest Prod. J.*, **23**(5), 50-55 (1973).
- 49) Samson, M.: *ibid.*, **34**(7/8), 27-32 (1984).
- 50) Matthews, P. C.: Proc. of 2nd International Conference of Scanning Technology in Sawmilling, USA, 1987, p. XI.
- 51) Soest, J. F.: *ibid.*, p. XII.
- 52) 祖父江信夫, 服部 貴: 木材工業, **48**(1), 18-20 (1993).
- 53) Bucur, V.; Perrin, J. R.: *Holz als Roh-und Werkstoff*, **47**(2), 75 (1989).
- 54) 佐藤敬一, 山口勝也, 安藤直人, 伏谷賢美: 木材工業, **44**(5), 214-218 (1989).
- 55) 野口昌巳: 木材学会誌, **37**(1), 1-8 (1991).
- 56) 有馬孝禮, 丸山則義, 早村俊二, 岡崎 光: 材料, **34**(383), 979-984 (1985).
- 57) 角谷和男: 木材研究, **34**, 22-36 (1965).
- 58) Dunlop, J. I.: *Wood Sci. Technol.*, **15**, 301-310 (1981).
- 59) Wilcox, W. W.: *Forest Prod. J.*, **38**(5), 68-73 (1988).
- 60) Bauer, C.; Kilbertus, G.; Bucur, V.: *Holz-forschung*, **45**, 41-46 (1991).
- 61) 有田紀史雄ほか4名: 木材工業, **41**(8), 370-375 (1986).
- 62) McGinnes, E. A.; Shigo, A. L.: *Forest Prod. J.*, **25**(5), 30-32 (1975).

- 63) 川口信隆, 滝沢忠昭, 高橋政治: 北海道立林産試験場報, **2**(3), 21-23 (1988).
- 64) タッピング式複合材剝離検出装置 (WOOD-PECKER) パンフレット, 三井造船^(株), 東京.
- 65) Miller, D. G.: *Forest Prod. J.*, **9**(8), 243-247 (1959).
- 66) 徐 以若, 奥村正悟, 野口昌巳: 木材学会誌, **39**(5), 544-549 (1993).
- 67) 広島県立東部工業技術センター: 広島県地域システム技術開発事業成果普及講習会用テキスト “木製品 (家具等) の高機能自動生産管理システムの開発”, 平成 2 年.
- 68) McMillin, C. W.; Conners, R. W.; Huber, H. A.: *Forest Prod. J.*, **34**(1), 13-20 (1984).
- 69) Klinkhachorn, P. *et al.*: *ibid.*, **43**(2), 11-18 (1993).
- 70) 北海道林産試験場要素技術開発グループ: 木材工業, **46**(9), 423-426 (1991).
- 71) 名波直道, 中村 昇, 有馬孝禮, 大熊幹章: 木材学会誌, **38**(8), 739-746 (1992).; **38**(8), 747-752 (1992).
- 72) 上田恒司: 木材工業, **47**(2), 54-58 (1992).