

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 11 日現在

機関番号：15101
 研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2010～2011
 課題番号：22780166
 研究課題名（和文） 近赤外分光法による木質材料の荷重状態の簡易非破壊評価手法の確立
 研究課題名（英文） Nondestructive evaluation of wood stress conditions using near infrared spectroscopy
 研究代表者
 藤本 高明（FUJIMOTO TAKAAKI）
 鳥取大学・農学部・准教授
 研究者番号：40446311

研究成果の概要（和文）：木材の繊維方向および周囲方向（放射および接線方向）に対し圧縮および引張荷重を加えながら近赤外スペクトルを随時計測し，得られたスペクトル変動を多変量解析することによって荷重（応力）状態の予測モデルの構築を試みた。その結果，いずれの条件においても荷重を精度よく推定できることが分かった。木材の主要構成成分（セルロース，ヘミセルロースおよびリグニン）の力学的な寄与は，木材の方向や加力方向によって特徴的な相違を示すことが明らかになった。

研究成果の概要（英文）：The models to predict the load conditions have been built using near infrared spectra obtained from various load directions. Multivariate analysis indicated that the stress value at respective load conditions was clearly predicted with high accuracy. The major wood components, i.e. cellulose, hemicellulose and lignin showed characteristic behaviors according to the load conditions. Principal component analysis has revealed that the spectra collected from the stress conditions in elastic and plastic deformation were clearly separated into two groups.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2011 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,400,000	720,000	3,120,000

研究分野：農学

科研費の分科・細目：森林学・木質科学

キーワード：材質・物性

1. 研究開始当初の背景

近赤外領域の電磁波を用いた分光分析法は，有機系材料の非破壊計測方法として食品，医療分野等において広く応用されており，また最近では，木材関連分野の製材やパルプ工業などにおいても品質評価技術としての応用を目指した取組みが海外を中心に行われ

ている。近赤外分光法により木材の力学的性質を簡易かつ非破壊的に評価可能であることが明らかになりつつある一方，種々の荷重（応力）状態下の木材における力学性状を同法によって分析・評価する試みは国内外ともにほとんど行われていない。

木材は、セルロース、ヘミセルロース、リグニンを主要構成成分とし、それらが複雑な高次構造をもった高分子材料である。それら主要構成成分と力学的性質との関係は、これまでも多くの研究事例があるものの、いまだ議論が盛んで、一般的な傾向を得るに至っていない。例えば、細胞壁の骨格構造であるセルロースの間を充填するマトリックス物質であるヘミセルロースやリグニンの、引張りや圧縮方向への力学的な寄与についてはいまだ不明な点が多い。この原因の1つとして、両者の関係をインタクトに検討することが技術的に困難であったことが挙げられる。近赤外分光法は試料の特別な前処理を必要とせず、非破壊かつ非接触で化学的情報を計測可能であることから *in situ* 分析にきわめて適している。したがって、荷重負荷状態下の木材から構成成分に関する化学的な情報（近赤外スペクトル）をモニタリング計測することによって、化学的な高次構造と力学的性質との相互関係をより明確に検討できると考えられる。

改正建築基準法や特定住宅瑕疵担保責任に関する法律の施行などにより、住まいの性能確保と保証が問われている。これに関連して含水率や強度的性質が明確化された住宅部材の供給は増加しつつあるものの、施工後、それらの部材がどれだけの性能を担保しているか（部材の強度的な余裕など）を検証することは現状では困難である。最近の研究で、木造住宅の構造部材に生じる各種応力の許容応力度に対する割合が検討された報告があるが、その試算値は設計図面上からの推定値によっている。近赤外分光法によって非破壊的に応力状態を評価できることが明らかとなれば、住宅や土木構造物等における各部材の（力学的）性能を簡易に検査・モニタリングできるようになると期待できる。

2. 研究の目的

これまで、近赤外分光法は、木材関連研究においては、主に含有成分量の簡易・非破壊的な定量分析技術の開発などの検討が中心であり、力学物性に関する研究に適用される例は少ない。現在、木質建材の残存強度などの力学的性質の非破壊評価法としては、応力波や振動法を応用した方法などが試みられているが、境界条件などの問題によって使用範囲が限定されている。

以上の背景を踏まえ、本研究では、種々の荷重状態下の木材から近赤外スペクトルを計測し、その化学的情報を多変量解析することにより、木材の力学的性状（荷重など）を非破壊的に計測・評価する手法を確立することを目的とした。あわせて、各構成化学成分

の帰属における近赤外スペクトルの変化や、多変量解析から得られる各成分の力学物性に対する寄与度などの情報をもとに、木材の化学的性質と力学的性質との相互関係について検討した。

3. 研究の方法

供試樹種はいずれの試験も、Norway spruce (*Picea abies*)とした。圧縮試験および引張試験用として、それぞれ15体の試験片を準備した。両試験ともに、木材の繊維方向、放射方向および接線方向について行い、各方向につき5体を試験に供した。試験体の寸法は表1に示した。

表1 試験体寸法の一覧

加力方法	加力方向	寸法		
		L	R	T
圧縮	L	50	20	20
	R	20	50	20
	T	20	20	50
引張	L	300	20	20
	R	20	150	20
	T	20	20	130

L: 繊維方向; R: 放射方向; T: 接線方向. 単位 mm.

圧縮試験および引張試験は、JIS Z2101に準拠した。荷重速度は0.1 mm/minとし、変位は試験体にひずみゲージを貼り0.1秒間隔で計測した。なお、引張試験については、荷重-変位曲線を見ながら線形範囲内でのみ行った。

近赤外スペクトル計測は、Bruker Optics社製のMATRIX-Fを使用し、光ファイバケーブルを材面に接触させて拡散反射スペクトルを測定した（図1）。測定条件は、波数域11000-4000 cm⁻¹、分解能16 cm⁻¹、スキャン回数32回とした。



図1 近赤外スペクトルの測定

測定は、まず無荷重の状態では計測した後、荷重を増加させながら連続的に計測した。その結果、各試験体につき 40~70 の時系列スペクトルデータが得られた。

得られたスペクトル変動を多変量解析することによって、まず荷重（応力）状態の予測モデルの構築を試みた。モデル作成には、Partial least squares (PLS) 回帰法を適用した。同法は、下式に示すように、スペクトルデータ行列に対してまず主成分分析（特異値分解）により変数を縮約した後、得られた潜在変数を利用して回帰を行う。

$$\mathbf{X} = \sum_{a=1}^A \mathbf{t}_a \mathbf{p}_a^T + \mathbf{E} = \mathbf{TP}^T + \mathbf{E}$$

$$\mathbf{y} = \sum_{a=1}^A \mathbf{t}_a \mathbf{q}_a^T + \mathbf{f} = \mathbf{Tq}^T + \mathbf{f}$$

ここで、 \mathbf{t}_a は a 番目の潜在変数、 \mathbf{p}_a と \mathbf{q}_a はそれぞれ \mathbf{X} と \mathbf{y} 行列に対する a 番目のローディング、 \mathbf{E} と \mathbf{f} は残差、 A はクロスバリデーションから得られた PLS の成分数、 \mathbf{t} は下式のように説明変数 \mathbf{X} と PLS 重みベクトル \mathbf{w} との線形結合を示す。

$$\mathbf{t} = \mathbf{Xw}$$

解析には、主に 2 次微分処理したデータを用いた。ソフトウェアは、Unscrambler Ver. 9.6 (CAMO AS, Norway) を使用した。

圧縮試験においては、弾性領域から塑性領域に至るまでの変位区間で連続的に近赤外スペクトルを計測した。そこで、この一連のスペクトルデータセットを利用して、弾性領域と塑性領域の判別を試みた。分析方法は、SIMCA (Soft Independent Modeling of Class Analogy) 法に従った。同法は、同じクラスのサンプルがパターン空間内の限定された領域に存在すると考え、この区間領域を主成分モデルを用いて数学的に表現し、分類の手続きを与えるものである。分類の手順は、まずクラスごとに主成分分析を行って主成分モデルを得る。このときあるクラスのサンプルが出現する領域は残差標準偏差 (RDS) によって得られる。ついで、サンプルとあるクラスの主成分モデルの超平面までの距離を計算し、この距離と RDS を比較しその大小からそのクラスには属するか否かを判断する。ある訓練集合のサンプルがあるクラスに属するかどうかの定量的な判断は近似的な F 検定を行う。

4. 研究成果

木材の各方向（繊維方向、放射方向および接線方向）に対し圧縮および引張荷重を加えながら連続的に近赤外スペクトルを計測し、その変動パターンを観察した。一例として、木材の繊維方向に引張加力を与えた場合のスペクトル変化（二次微分処理したもの）を図 2 に示す。吸光度値は、加力に伴い特定の波数領域で連続的に増加または減少する傾向を示した。例えば、セルロースの非晶領域に由来する OH 基の振動バンドである 7000 cm^{-1} 付近においては、吸光度は加力に伴い増加（二次微分値では減少）する傾向が認められた。これらの結果から、木材の構成化学成分の力学刺激に対する応答を近赤外スペクトルから確認できることが明らかになった。

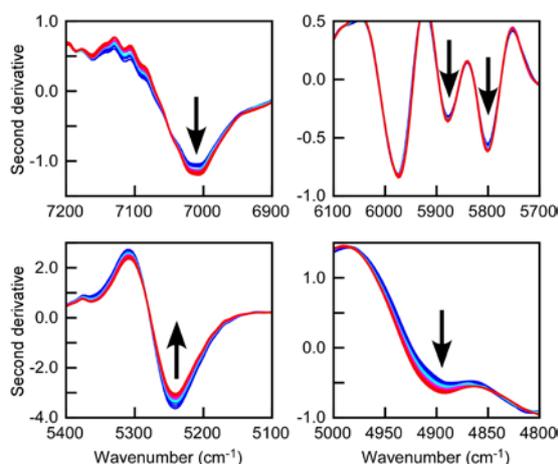


図 2 加力に伴う近赤外吸光度の変化
荷重の増加に伴い青から赤に変化するよう示した。

得られたスペクトルデータセットを用いて、各試験体に対し応力予測モデルの構築を行った。その結果、木材への加力方向（繊維方向、放射方向および接線方向）にかかわらず、圧縮および引張応力ともに精度良く推定できることが分かった ($R^2 = 0.97-0.99$, 予測誤差 = $0.46-1.57 \text{ N/mm}^2$)。一例として、繊維方向および放射方向への引張応力の予測結果を図 3 に示す。図から明らかなように、実測値と近赤外スペクトルからの推定値とは高い線形関係を示すことが分かった。なお、スペクトルを計測する測定面による影響は認められず、放射および接線断面ともに同様の精度で応力状態を評価可能であった。以上の結果から、近赤外スペクトルを木材表面から得ることによって、簡易かつ非破壊的にその応力状態を推定できる可能性が示された。

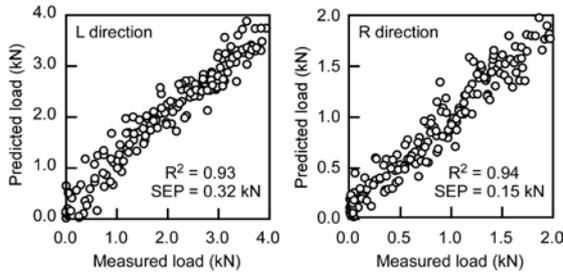


図 3 繊維方向および放射方向への引張応力の実測値と近赤外推定値との関係

木材の構成成分の力学的な寄与度を明らかにするために、応力予測モデル構築の際に得られる Loadings の変動を検討した。その結果、セルロース、ヘミセルロース、リグニン等の木材主要構成成分の力学的な寄与が、圧縮または引張加力によってそれぞれ異なることが分かった。以上の結果から、近赤外分光法は、木材の応力状態を非破壊的に評価可能であるとともに、各種応力に対し木材構成成分がどのような応答を示すかを知る上で有用な手法と考えられる。

木材の可逆・非可逆変位における分子構造に変化を明らかにする目的で、圧縮加力下において弾性領域および塑性領域から得られたスペクトルに対し判別分析を行った。その結果、両者のスペクトルは明瞭に区別できることが確認された(図4)。また、両者の判別に際しては、特徴的な振動バンド(セルロースの結晶領域に由来)が寄与していることなどが分かった。

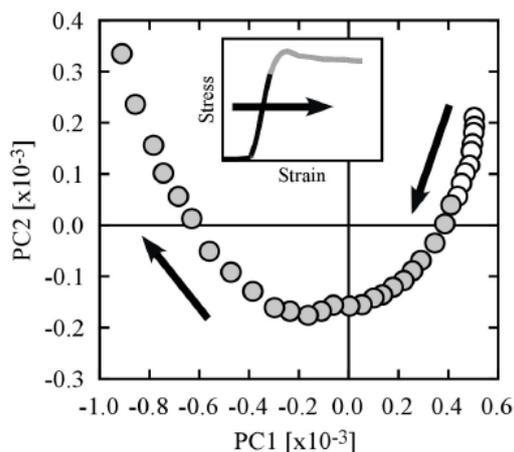


図 4 主成分分析から得られたスコアプロット
白丸は弾性領域、黒丸は塑性領域から得られたスペクトルを示す。矢印の方向に荷重(変位)が増加する。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① Fujimoto, T.; Tsuchikawa, S., “Identification of dead and sound knots by near infrared spectroscopy”, *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 18, 473-479, 2010, 査読有
- ② Fujimoto, T.; Kobori, H.; Tsuchikawa, S., “Prediction of wood density independent of moisture conditions using near infrared spectroscopy”, *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 印刷中, 査読有

[学会発表] (計 5 件)

- ① Fujimoto, T.; Tsuchikawa, S., “Rapid and nondestructive screening of natural variation of wood properties using near infrared spectroscopy”, ICNP2010, Second International Conference on Natural Polymers & Biomaterials, 2010年9月24~26日, コッタヤム, インド
- ② Fujimoto, T.; Matsumoto, K.; Tsuchikawa, S., “Nondestructive prediction of wood stress condition in axial compressive loading by near infrared spectroscopy”, The Second Asian NIR Symposium, 2010年10月15~18日, 上海, 中国
- ③ 藤本高明, 土川 覚, 近赤外分光法による様々な含水率状態における木材試料の全乾密度の推定, 第42回日本木材学会北海道支部研究発表会, 2010年11月9日, 札幌市
- ④ 藤本高明, 松本和茂, 土川 覚, 近赤外分光法を用いた引張加力下における木材応力レベルの非破壊推定, 第26回近赤外フォーラム, 2010年12月1日~3日, つくば市
- ⑤ 藤本高明, 松本和茂, 土川 覚, 近赤外分光法による軸方向加力下における木材応力状態の非破壊評価, 第61回日本木材学会大会, 2011年3月18日~20日, 京都市

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤本 高明 (FUJIMOTO TAKAAKI)

鳥取大学・農学部・准教授

研究者番号: 40446311