

平成 28 年 6 月 10 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25292105

研究課題名(和文)立木用ポータブルX線検査装置の開発と材質研究およびマツ材線虫病研究への適用

研究課題名(英文) Developing a non-destructive portable inspection system with ultra-compact X-ray source, and applying to assesment of wood quality and pine wilt disease of standing tree

研究代表者

古賀 信也 (Koga, Shinya)

九州大学・(連合)農学研究科(研究院)・准教授

研究者番号：20215213

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,900,000円

研究成果の概要(和文)：超小型X線源を用いた検査装置を試作した。4樹種(スギ、ヒノキ、クロマツ、カラマツ)の室内実験により得られたCT画像から樹幹内の節の分布、心材と辺材の区分、年輪等の抽出が可能であり、小径木対象にした材質調査であれば非破壊的に適用可能であることを実証した。ただし、クロマツのCT画像からは、マツ材線虫病による症状とも関連するとされている水分通道停止領域(低含水率領域)の特定は困難であった。したがって、現段階における本装置の解像度ではマツ材線虫病に関する研究には活用できないことが分かり、装置のさらなる改善が必要である。

研究成果の概要(英文)：We are developing a non-destructive portable inspection machine using the ultra-compact X-ray source developed by Dr. Suzuki for a standing tree. We conducted a experiment for green wood of 4 species (Japanese cedar, Japanese cypress, Japanese black pine, Japanese larch) with a prototype machine. We found that it is possible to detect heartwood, sapwood, growth ring and knots area from the obtained CT images. This means that the developed portable inspection machine would have applicability to non-destruct wood quality assessment for standing tree. We showed that the developed portable inspection machine do not have applicability to research on pine wilt disease presently because it is difficult to detect the xylem cavitation area in sapwood from CT images due to lower resolution. There is a need for further improvement of the machine. destruct wood quality assessment presently because,

研究分野：木質科学

キーワード：非破壊 X線 材質 樹病 生立木 フィールド

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 研究代表者である古賀は、これまで資源育成(林業)段階から材質の評価およびコントロールが必要不可欠であるという立場から材質研究を進めてきた。しかしながら、これまでの研究では伐倒木を対象にした測定が中心であり、常に伐採にからむ諸問題(伐採許可、伐採に要する時間や労働力、伐採・搬出方法)があり、木材性質は大きく変動するにもかかわらずサンプル数・データ数に限界があった。また木材の性質は、気象・土壌・隣接木などの生育環境や樹齢の影響をうけるとされているが、伐倒してしまうのでその個体の木材性質の経時的変動を追跡し、科学的な評価を実施することができないといった問題がある。一方、研究分担者である池田は森林保護学の立場からマツ材線虫病を含む樹木の衰弱・枯死発生機構に関する研究、また岡野は生態学の立場から樹木の成長等の生態学的特性に関する研究、さらに内海は木材組織学の立場から、多様で複雑な樹木の水分通道機構の解明に関する研究を行うなどそれぞれの研究者が各分野で多くの成果を挙げてきた。しかしながら、これらの研究では、伐採を伴う破壊的手法による樹木の観察や調査あるいは非破壊的手法であったとしても苗木等の小径木を対象としており、さらなる研究の展開・深化を行うためには、野外で使用でき、大径の生立木に対応した簡便で精度の高い非破壊的検査装置の開発が必要であると考えた。いうまでもなく、このような装置は、早期の腐朽診断、水喰い材診断、材質評価を可能にするため、林木・街路樹・貴重木の管理等実用的な分野からも早急の開発が求められている。これらのことを背景に申請者は、2004年度から非破壊的手法(応力波伝播法、X線透過法、NMR技術等)を用いた研究に着手した(古賀ら 2006)。

(2) 他方、研究分担者である鈴木は、2007年度に小型電子加速器を応用した乾電池駆動超小型高エネルギーX線源の開発に成功(鈴木 2008)し、さらに改良を重ね2008年度には、カーボンナノ構造体の冷陰極電子源を用いた実用的な可搬型X線源を開発に成功した(鈴木 2010)。この装置は、低電力用X線管および電源等一式は小型ケース(幅370mm, 奥行130mm, 高さ350mm)に収まり、片手で容易に持ち運びができる(重量約4kg)、ヒーターやフィラメントが無く、予熱不要で、必要な時にすぐX線を発生できる。X線の発生時にしかエネルギーを消費しないため乾電池やノートパソコンのUSB電源でも100キロボルト以上のX線を発生できる、10キロワット以上の電子ビーム出力による高速撮影にも対応できる、という優れた特性をもっている。

(3) この鈴木らが開発した超小型X線源を用い、立木用ポータブル非破壊材質検査装置

開発に向けた基礎研究を2010年度から2012年度にかけて科学研究費補助金(基盤研究(c)一般、代表古賀信也)の支援を受けて実施した。その研究期間における主な成果として、心材含水率、腐朽、材の密度等の材質指標の情報抽出に適したX線源および検知器の設計に必要な基礎情報を実験により得て蓄積するとともに、山地野外での使用に適したハードウェアの検討を行った。

### 2. 研究の目的

本研究では、これまでの基礎研究をさらに進め、実際に期間内に試作機を製作し、評価・改良を繰り返しつつ、その装置による含水率・密度等の材質評価およびマツ樹体内におけるサイエンチュウの動きと木部の反応の観察を行い、新たな知見を得ることを目標にした。

具体的には、樹幹内の水分分布、密度分布、樹脂道等木部の組織構造観察に適したX線検知条件の探索とソフトウェア・ハードウェアの開発、さらに軽量で出力・パルス幅を変更可能なX線源の開発、試作機の製作とフィールドでの立木材質評価試験およびマツ材線虫病罹病木観察の実施、フィールド試験による装置の評価とそれに基づいた改良を行うことを目的とした。

### 3. 研究の方法

本研究期間に以下の項目と方法にもとづき研究を進めた。

(1) 立木に対する測定項目・観察対象物に適したX線検知条件の探索(2013年度)

産業技術総合研究所内においてスギ生材(直径18cm)を対象に鈴木らが開発した現行の可搬型X線源およびX線検出器(X-SCAN, XR8850-12, 308mm幅, 3072ドット)を用いX線照射力・時間・間隔、線源から対象物までの距離等諸条件下で種々の実験を行うとともに同様の条件下におけるX線用イメージアナライザー(富士フィルム, FLA-7000)で得られた画像との比較検討を行う。

(2) 試作装置のソフトウェア・ハードウェアの検討、設計と製作(2013年度)

前回採択された科学研究費補助金(基盤研究(c)一般、代表:古賀信也、2010~2012年度)による予備実験および上記(1)の実験結果を踏まえ、野外フィールドでの使用に適したハードウェアの検討、測定項目・観察対象物に適した画像処理方法の検討、CT画像再構成方法の検討、ソフトウェアの開発を行う。最終的にプロトタイプの実験装置の設計と製作を行う。

(3) 新たなX線源の開発(2013~2015年度)

野外フィールドでの使用に適するよう現行の可搬型X線源よりもさらに軽量かつ高出力を可能とするカーボンナノ構造体電子源を用いたX線源を開発する。

(4) 試作装置の画像評価と改良(2014~2015年

度)

産業技術総合研究所内において試作装置を用いた実証実験を行い、立木に対する観測項目・観察対象物に適した X 線検知条件の探索、測定項目・観察対象物に適した画像処理方法、CT画像再構成方法の検討、ソフトウェアの改良を行う。

(5) 試作装置による材質研究およびマツ材線虫病研究への適用の検討(2015 年度)

2013 年度に試作した装置を用い両研究への適用が可能かどうか検討する。九州大学福岡演習林および北海道演習林から得られた生材状態で保存したスギ(1個体)、ヒノキ(1個体)、クロマツ(1個体)、カラマツ(2 個体)の円板(直径 15cm~20cm,高さ約 25cm)を産業技術総合研究所に持ち込み試作装置で撮像し、その評価を行う。同時に各円板の木口面を画像スキャナ(エプソン,GT-X970)で読み取り、読み取った画像から心材径を測定し横断面内の心材率を求め、X 線画像と比較検討を行う。

(6) 野外フィールドにおける実証試験にむけた他手法による立木の材質調査(2013~2015 年度)

信州大学農学部附属アルプスフィールド科学教育研究センターにおいてカラマツ等の生立木を対象に樹幹半径方向の打撃音波速度およびレジストグラフ(IMLRESI F500)による樹幹接線面の穿孔抵抗値の測定を行い実施が予定されている野外立木を対象にした X 線装置による結果との比較検討を行うためのデータ収集を行う。

(7) 安全対策の検討(2013~2015 年度)

開発装置は X 線発生器であることから放射線障害防止のための所定の手続き・対策等に関する情報を収集するとともに野外適用のための諸条件の探索を行う。

#### 4. 研究成果

(1) 立木に対する測定項目・観察内容に適した検知条件の探索

プロトタイプ装置製作にむけて、現行の可搬型 X 線源の X 線特性の把握、立木樹幹横断面内の年輪配置、木材の密度分布、節・腐朽等の欠点分布、水分分布等の材質指標に適した検知器製作のための X 線照射力・時間・間隔、線源から対象物までの距離等の最適条件に関するデータを蓄積した。また X 線用イメージアナライザーで得られた画像と X 線検出器によるデータとの関係性を評価した。

(2) 試作装置のハードウェア・ソフトウェアの検討、設計と製作

上記(1)の結果に基づきプロトタイプ装置の設計を行った。研究期間や予算等総合的に考慮し、その設計に準拠した装置を購入し、産業技術総合研究所に設置した(写真1)。

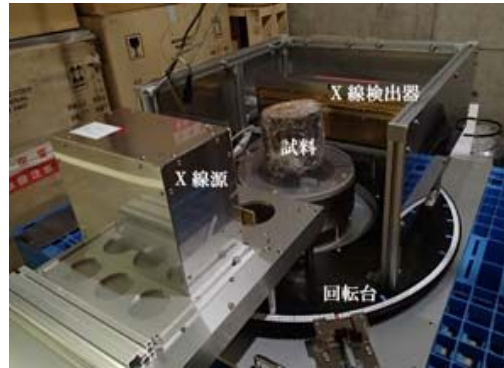


写真1 試作装置(X線源,回転台,試料台,X線検出器,制御ユニット)から構成

(3) 新たな X 線源の開発

現行の可搬型 X 線源よりもより軽量かつ高出力を可能とする X 線源の開発を行った。その成果の一部として、新たな可搬型 X 線源(幅 155mm,奥行 70mm,高さ 160mm,重量 2.5kg,最大管電圧 150keV,最大管電流 20 mA,連続照射が可能,電源 USB5V)を開発した(写真2)。



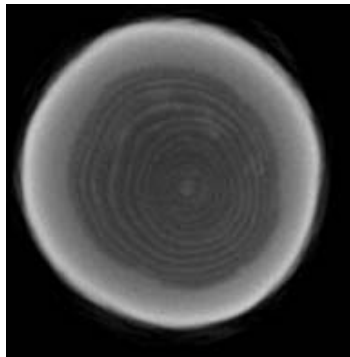
写真2 新たに開発した可搬型 X 線源

(4) 試作装置の画像評価と改良

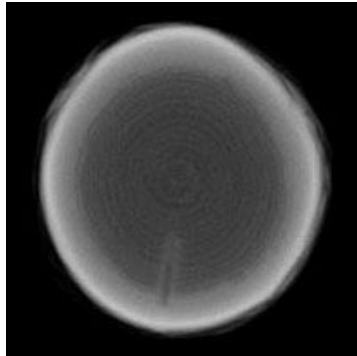
画像再構成ソフトウェアの撮影素子位置の調整およびフィルタの調整によって再構成画像の品位向上が図られ、得られた画像から針葉樹乾燥材における髓の位置および年輪が鮮明に確認できることが明らかになった。またアクリル製基準樹木模型を用い様々な水分条件下での撮影実験を行いながら調整し、生材状態にある木材においても鮮明な画像が取得できる状態となった。さらに、画像処理と CT 画像再構成に係わるソフトウェアおよび電気制御系統等の改良により、画像処理速度の向上、不具合の頻度が減少し連続測定が可能となった。

(5) 試作装置による材質研究およびマツ材線虫病研究への適用の検討

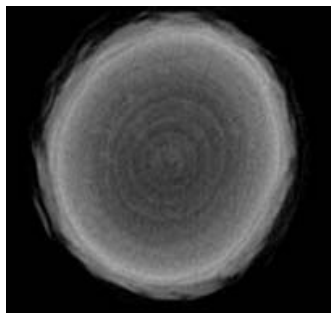
生材状態の針葉樹4樹種5個体を対象にした実験により得られた X 線 CT 画像から生材状態にある樹幹内の節の分布、心材と辺材の区分、心材において異常部位と推定される高含水率領域



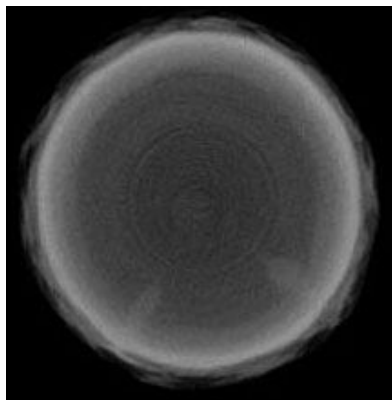
スギ (直径:15 cm)



ヒノキ (直径:15 cm)



クロマツ (直径:14 cm)



カラマツ (直径:17 cm)

写真3 測定した4樹種の樹幹のX線CT像  
高含水率領域,高密度領域は白色,逆は黒色  
で示している。画像から心材と辺材,心材部  
の年輪,節等が確認できる。

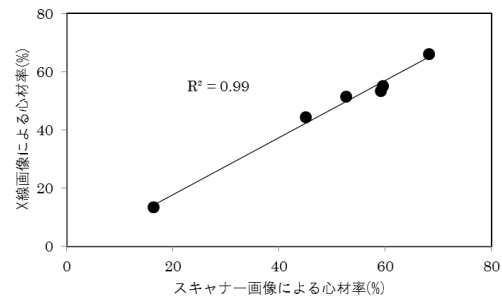


図1 樹幹横断面のスカナ画像とX線  
CT画像による心材率の関係

域や心材内の年輪抽出が可能であること,さらにその情報から心材に含まれる年輪数,各年輪の幅,心材率(横断面内に占める心材面積の割合)等を求めることができた。また,X線CT画像から計算された心材率等の材質指標は,丸太木口面に対する画像スカナで得られた画像によるそれらと高い相関関係があることが確認できた(図1)。これらのことから直径20cm程度の針葉樹の樹幹を対象にした基礎的な材質調査であれば,本装置は十分適用可能であることを実証できた。

ただし,生材状態にあるクロマツ樹幹のCT画像からは,心材と辺材の区分のみ可能で,辺材における低含水率領域の特定は困難であった。したがって,本装置の現段階における解像度では,マツ材線虫病による症状とも関連するとされている水分通道停止領域の特定ができないことが分かった。マツ材線虫病研究への適用には引き続き画像の解像度・品位をあげるための改良が必要であることが分かった。

(6) 野外実証試験にむけた他手法による立木の材質調査(2013~2015年度)

カラマツ等生立木の横断面内の打撃音波速度および樹幹接線面の穿孔抵抗値データを蓄積し,年輪幅,腐朽等との関係について検討した。

(7) 安全対策の検討

放射線障害防止のための所定の手続き・対策等に関する情報を収集するとともに野外適用のための諸条件の探索を安全対策の観点から行った。試作装置ではX線遮蔽に鉛よりも軽量のタングステンシートを用いているが,より軽量の遮蔽シートの探索を行った。

(8) 研究成果の公表

2015年末までの結果をとりまとめ第66回日本木材学会(名古屋市)で発表した。また,専門雑誌への論文投稿にむけ各実験データ整理と解析と文献情報の収集等を行った。

(9) 今後の課題

今後の課題として,X線源の高出力化,X線照射回数の増加,測定角度の細分化等によって高含水率域である辺材画像の高精細化と年輪抽出の検討,より大径の樹木への対応の

検討， 野外での使用に適した軽量の脚や台座の開発あるいは探索と安全対策の検討などが挙げられた。当初の計画では，試作装置によるフィールド実証試験と装置の評価を行う予定であったが，解決すべき課題が多数あり実施できなかった。今後とも室内での実証実験と改良，安全対策等の検討を重ね立木用非破壊検査装置の実現にむけて研究を進める予定である。

#### <引用文献>

古賀信也，岡野哲郎，小林 元，田代直明，内海泰弘：立木の非破壊的品质評価技術の開発にむけた基礎的研究。平成 16 年度～17 年度九州大学教育研究プログラム・研究拠点形成プロジェクト（B タイプ）研究成果報告書。106p.， 2006  
鈴木良一：高エネルギー電子ビーム発生装置及び X 線装置 特願 2008-024046  
鈴木良一，小林慶規，石黒義久：針葉樹状カーボンナノ構造体を用いた冷陰極 X 線源，X 線分析の進歩，41：201-206，2010

#### 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）

〔学会発表〕（計 1 件）

古賀 信也、内海 泰弘、鈴木 良一、加藤 英俊、岡野 哲郎、池田 武文、大澤 昌巳、超小型 X 線源を用いた立木用 X 線 CT 検査装置の開発、第 66 回日本木材学会大会、2016 年 3 月 28 日、名古屋大学（名古屋市）

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.forest.kyushu-u.ac.jp/prod/>

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

古賀 信也（KOGA Shinya）  
九州大学大学院・農学研究院・准教授  
研究者番号：20215213

##### (2) 研究分担者

内海 泰弘（UTSUMI Yasuhiro）  
九州大学大学院・農学研究院・准教授  
研究者番号：50346839

鈴木 良一（SUZUKI Ryoichi）  
産業技術総合研究所・計測フロンティア研究部門・首席研究員  
研究者番号：80357300

加藤 英俊（KATO Hidetoshi）  
産業技術総合研究所・計測フロンティア研究部門・研究員  
研究者番号：60583747

池田 武文（IKEDA Takefumi）  
京都府立大学・生命環境科学研究科・教授  
研究者番号：50183158

岡野 哲郎（OKANO Tetsuo）  
信州大学・農学部・教授  
研究者番号：00194374