

令和 2 年 6 月 29 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03847

研究課題名(和文)立木用X線検査装置による国産主要造林樹種の非破壊的材質および水分特性の評価

研究課題名(英文) Nondestructive evaluation for wood quality and water conductivity of major plantation species in Japan with the developed CT X-ray inspection

研究代表者

古賀 信也 (Koga, Shinya)

九州大学・農学研究院・教授

研究者番号：20215213

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,900,000円

研究成果の概要(和文)：野外で使用可能な立木用非破壊X線CT材質検査装置の開発を進めている。本研究期間に、新たに試作機を製作・改良し、その装置でわが国の主要針葉樹4種および広葉樹5種の樹幹を撮像し、3次元CT画像を得た。その結果、最初の試作機よりも高品位の画像が得られ、針葉樹では、心材と辺材の水分状態の違い、腐朽および節の位置、心材部の年輪、キャビテーション発生箇所などが明瞭に抽出できることが確認できた。一方、広葉樹では、樹種によっては心材と辺材の区分や年輪の抽出が難しいこと、ある樹種ではあて材が検出可能であること等が確認できた。ターゲットとする樹種や材質指標に適した最適検知条件についてさらなる検討が必要である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

立木用非破壊X線CT検査装置の開発を進めている。本研究期間に試作機を製作し、安全性が確保された実験室内において、その装置を用いスギやヒノキなどの針葉樹4種とクリなどの広葉樹5種の幹にX線を照射し、3次元CT画像を得た。得られた画像から節、腐朽の位置が明瞭に把握できること、針葉樹では幹内の水の分布や中心部付近の年輪等が明瞭に判別できること、広葉樹では水の分布や木材の密度分布の判別が容易な樹種とそうでない樹種があり、樹種ごとに撮影条件をかえる必要があることが分かった。現在のところ、野外の立木を非破壊で診断・検査できるX線CT装置は存在しない。引き続き実用化に向け、開発研究を進めていく予定である。

研究成果の概要(英文)：We are developing a non-destructive X-ray CT wood quality inspection system for standing trees in the field. During this research period, a new prototype was manufactured and improved, and 3D-CT images of the stems of four coniferous trees and five broad-leaved trees were obtained with the prototype. Higher-quality images were obtained than those from fist prototype. We confirm that the difference in moisture content between heartwood and sapwood, location of the decay and the knots, growth rings in the heartwood, and location of the cavitation can be clearly extracted in coniferous trees. On the other hand, we confirm that it is difficult to distinguish heartwood and sapwood, and extraction of growth rings, and tension wood can be extracted in some species. These depend on the species. It is necessary to further study the optimum detection conditions suitable for the target tree species and characteristics of wood.

研究分野：木材理学

キーワード：非破壊 超小型X線源 X線CT法 生立木 年輪 水分分布 材密度分布 欠点

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 国内外で持続可能な森林経営の実現に向けた取り組みが進められるなか、高品質材の安定供給体制をいかに構築していくかは重要な課題である。研究代表者である古賀は、これまで資源育成(林業)段階から材質評価の実施とその評価に基づく材質(品質)制御が必要不可欠であるという観点から材質研究を進めてきた。しかしながら、これまでの研究は伐採木を対象にした計測が中心であり、常に伐採許可、伐採に要する時間・労働力・安全性、伐採・搬出方法など伐採にからむ諸問題が存在し、種々の木材性質は大きく変動するにもかかわらず得られるサンプル数・データ数に限界があった。加えて、木材性質は気象・地形・土壌・隣接木などの生育環境や樹齢の影響を受けるが、伐倒するので同一個体の木材性質の経時的変化を長期間追跡する研究は困難であった。同様に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、岡野は造林学・生態学的の立場から樹木の成長・腐朽等の生態学的特性に関する研究、内海は木材組織学・樹木生理学の立場から樹木の水分通道機構の解明に関する研究を実施し、それぞれ多くの研究成果を挙げてきたが、伐採を伴う破壊的手法による林木や苗木の観察・実験が主であり、生立木の経時的変化の追跡にもとづく研究への展開や深化には限界があった。さらに、街路樹・貴重保存樹・木造文化財の保全・管理等に係る実用的な分野からも、野外で使用できる非破壊的な検査・診断装置の開発が強く求められている状況にある。以上を背景に、研究代表者である古賀は、野外で使用でき、中・大径の生立木に対応した簡便で精度の高い非破壊的な検査装置を開発する必要があると考え、非破壊的手法(応力波伝播法、X線透過法、NMR技術等)を用いた共同研究に着手した(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線源を開発し(鈴木2008)、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線源の開発に成功した(鈴木2010)。この線源を用い平成22~24年度の科学研究費補助金(基盤研究(C)一般、代表:古賀信也)により、立木用ポータブル非破壊材質検査装置の開発のための予備試験を開始した。その後、平成25~27年度の科学研究費補助金基盤研究((B)一般、代表:古賀信也)によって屋内型の試作機を製作し、立木に対する測定項目・観察対象物に適したX線検知条件の探索実験を行った。その結果、試作機による撮像では、穿孔性害虫による穿孔跡、髄、節、心材と辺材の境界、心材内の高含水率領域、心材部の年輪等が検出可能であることを確認できたが、一部の材質指標の検出に限界があり、大径木への対応、撮像範囲の拡大、画像の高品位化等について課題が残り、さらなる改良が必要であることを認めた。

2. 研究の目的

本研究では、上述の試作機で得られた知見をもとに改良型装置を新たに製作し、その装置の評価・改良を繰り返しつつ、その装置を用いてわが国の主要造林樹種であるスギ、ヒノキ、カラマツ、クロマツおよび主要広葉樹数種の樹幹を対象に非破壊検査を実施し、得られた画像を材質学的および水分生理学的見地から検討し、装置の評価を行うことを目的とした。

3. 研究の方法

(1) X線線源の開発と改良および装置全体の調整

画像解像度の向上と大径木への対応を図るためX線源の管電圧のさらなる高エネルギー化および管電流の高出力化にむけ技術的改良を図る。また焦点サイズの縮小化および軽量化にむけた技術的改良を加える。X線評価システムによるX線源・検出器・制御部のバラック試験を行い、その評価結果に基づき装置全体の調整を行う。

(2) 新たな検出器の開発および画像処理方法検討

画像の高品位化および幹軸方向への撮影範囲拡大による3D化を図るため、新たなX線検出器について検討を行う。具体的には、まず市販のデジタルX線検出器を用い生材状態の樹木のCT撮像実験を行い、画像処理方法、とくにCT画像構築時におけるノイズ処理について技術的な検討を行なうとともに、得られた画像の品位、画像上での木材内の心材と辺材における水分状態の違い、節、腐朽、年輪、材の密度の違いなどが抽出可能かどうか検討する。



写真1 試作した立木用X線検査装置

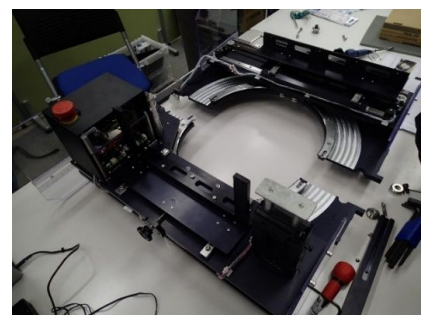


写真2 軽量の自動回転台座

(3) 装置全体の軽量化と自動回転撮像

野外で使用するには軽量であることが重要である。X線源および検出器を搭載する軽量で精密な自動回転台座、最適な脚等の部材の探索を行う。

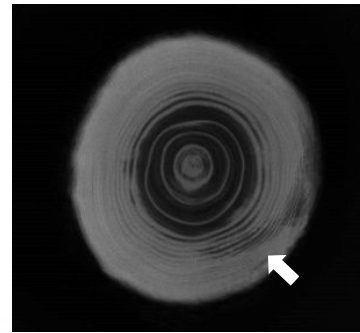
(4) 平成 29 年度に製作した改良型装置による様々な樹種の室内での撮像実験

産業技術総合研究所の室内において生材状態の針葉樹および広葉樹数種を対象に改良型装置による撮像実験を行い、その結果について評価する。また産業技術総合研究所の室内において苗木に対する撮像実験により樹幹内の水分状態の経時変化が追跡可能かどうか評価する。

4. 研究成果

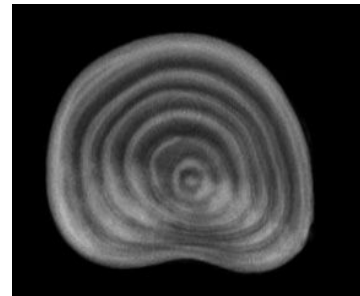
(1) X線源の管電圧の高エネルギー化、管電流の高出力化にむけた技術的改良、焦点サイズの縮小化および軽量化にむけた技術的改良が加えられた。また、短時間での連続照射による線源の高温化が認められたがその対策が講じられた。

(2) 新たな検出器の開発および画像処理方法検討については、まず市販のデジタルX線検出器を用いた生材状態のスギ材のCT撮像実験の結果、3次元CT画像を再構築でき、心材と辺材の水分状態の違い、節、腐朽、年輪の抽出が十分可能であることを明らかにした。この結果を踏まえ、さらに最適な検出器について検討し、最終的に産業技術総合研究所で開発中であった薄膜トランジスタアレイ使用のフラットパネル型検出器（有感面積：310mm×256mm、200um角のピクセル（1552×1280px））を採用した。この検出器の採用により幹軸方向への撮影範囲の拡大および画像の高品位化が実現できた。



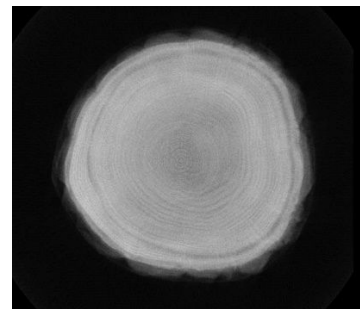
スギ（直径 12 cm）
矢印：キャピテーション部位

(3) 装置全体の軽量化と自動回転撮像については、軽量で精密な回転台座、装置全体の重量を支えるとともに野外の不安定な場所でも対応可能な脚を探索し、改良型の検査装置を特注により製作した（写真1）。これにより、立木を挟み込んで台座に搭載されたX線源と検出器を360度回転させることができるようになり（写真2）、遠隔地のPC制御によりX線照射と検出を1度刻みで自動回転させながら撮像可能となった。得られた撮像からCT画像として再構築できるようになった。



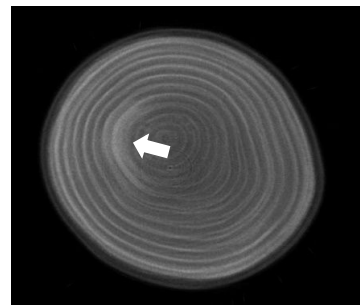
クリ（直径 12 cm）

(4) 針葉樹4種（スギ、ヒノキ、カラマツ、アカマツ）および広葉樹5種（クリ、ミズナラ、コナラ、シラカンバ、マテバシイ）の各1~2個体から得られた生材状態の丸太を改良型装置で撮像した結果、平成25年度に製作した試作機で得られた画像よりも高品位の3次元CT画像が得られた（写真3）。針葉樹では、心材と辺材の水分状態の違い、腐朽、心材の年輪、スギ辺材における節付近のキャピテーション発生部位が明確に抽出できることが確認できた。一方、広葉樹では、心材と辺材の区分が樹種によっては難しいこと、クリとシラカンバでは年輪が抽出可能であるが、コナラとミズナラでは年輪が不明瞭であること、シラカンバではあて材が検出できること等が確認できた。広葉樹における樹種による画像品位の違いの要因として、年輪幅、組織構造、材の密度、含水率等が複雑に関係していることが考えられた。ターゲットとする樹種（とくに広葉樹）、材質指標に適した最適撮像・検知条件についてさらなる検討が必要である。



ミズナラ（直径 12 cm）

令和元年度末に改良型装置を用いたクロマツ鉢植え苗木（根元直径3cm、樹高183cm）の撮像を行った。今後、複数回にわたり同じ苗木を対象に撮像を行い、樹幹内の水分状態の経時変化について明らかにする予定である。



シラカンバ（直径 12 cm）
矢印：引張りあて材

写真3 各樹種のX線CT画像

(5) 以上のように本装置は試作機段階であり、野外の立木を対象にした非破壊材質検査を実施できる状態にはないが、本研究により材質検査をはじめ様々な研究に適用できる可能性が示された。現在のところこのような装置は国内外に見当たらず成果を発表した国際学会(21st International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium)においても開発後の共同研究の申し出が複数ある等国内外の研究者の関心も高い。今後、さらなる改良および撮像実験を実施し、実用化を急ぐ必要がある。

<引用文献>

古賀信也, 岡野哲郎, 小林 元, 田代直明, 内海泰弘: 立木の非破壊的品質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

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 古賀信也、内海泰弘、鈴木良一、藤原 健、加藤英俊、岡野哲郎、池田武文
2. 発表標題 超小型X線源を用いた立木用X線CT検査装置の開発（ ）
3. 学会等名 第69回日本木材学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 池田武文、薬師川穂、大島一正、加藤英俊、藤原健、米田稔
2. 発表標題 絵かき虫が潜入した葉の組織解剖特性
3. 学会等名 日本植物学会第81回大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Takefumi Ikeda
2. 発表標題 Xylem dysfunction in pine trees suffered from pine wilt disease
3. 学会等名 IUFRO 125th Anniversary Congress (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 古賀信也、内海泰弘、鈴木良一、加藤英俊、藤原 健、岡野哲郎、池田武文
2. 発表標題 超小型X線源を用いた立木用X線CT検査装置の開発
3. 学会等名 第129回日本森林学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shinya Koga, Ryouichi Suzuki, Takeshi Fujiwara, Hidetoshi Kato, Tetsuo Okano, Yasuhiro Utsumi, Takefumi Ikeda
2. 発表標題 Development of a portable X-ray CT device for nondestructive inspection of standing trees
3. 学会等名 21st International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	内海 泰弘 (Utsumi Yasuhiro) (50346839)	九州大学・農学研究院・准教授 (17102)	
研究分担者	鈴木 良一 (Suzuki Ryouichi) (80357300)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・首席研究員 (82626)	
研究分担者	加藤 英俊 (Kato Hidetoshi) (60583747)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・主任研究員 (82626)	
研究分担者	藤原 健 (Fujiwara Takeshi) (90552175)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・研究員 (82626)	
研究分担者	池田 武文 (Ikeda Takefumi) (50183158)	京都府立大学・生命環境科学研究科・教授 (24302)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	岡野 哲郎 (Okano Tetsuo) (00194374)	信州大学・学術研究院農学系・教授 (13601)	