

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 16 日現在

機関番号：13801

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24780170

研究課題名(和文) 二重エネルギー X線吸収法による木材含水率の非破壊的な測定手法の開発

研究課題名(英文) Development of a new method for nondestructive evaluation of solid wood moisture content based on dual-energy X-ray absorptiometry

研究代表者

田中 孝 (Tanaka, Takashi)

静岡大学・(連合)農学研究科(研究院)・助教

研究者番号：40612700

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円、(間接経費) 1,080,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、二重エネルギーX線吸収法という人体の骨密度や体脂肪率の測定に応用されている測定原理を木材の含水率計に適用することであった。管電圧15 kV～40 kVで発生させた複数のX線を用いることで、木材の含水率はその密度のばらつきに影響されずに一定の測定誤差のもとで可能であることを明らかにした。一方、40 kV～100 kVのX線と木材・水との相互作用に関しては多くの未解明な部分が残り、これは今後の課題となった。総じて、二重エネルギーX線吸収法は木材の含水率測定に有用であることが示された。

研究成果の概要(英文)：A theoretical equation was proposed to estimate the moisture content of wood by using a pair of X-ray beams generated with different tube voltages (between 15-40 kV) and it was experimentally demonstrated. This method has the potential to determine moisture content of solid wood using X-ray without oven-drying or assuming oven-dry density (Wood Sci Technol 2013).

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：木材 含水率 X線密度測定 非破壊計測 セシウム

1. 研究開始当初の背景

これまでに、木材の含水率を測定するための方法としてさまざまな方法が提案および実用化されてきた。しかし、いずれも木材の全乾密度に依存することから、全乾密度補正を行う必要があった。しかし木材は生物由来の材料であることから各個体の全乾密度にはばらつきがあり、平均から大きく逸脱した個体については、含水率を非破壊的に正確に推定することができなかった。

そこで本研究では、二重エネルギーX線吸収法という、近年医療分野で利用されつつある測定技術を、木材含水率の測定に応用することが可能であるか、理論および実証の両面から検証することを目的とした。

また、日本では現在、福島第一原発の事故に起因する、森林や林産物の放射性セシウムによる汚染が問題となっている。木材に含まれる放射性セシウムの少なくとも一部は、木材の自由水中に溶けた状態で存在すると考えられる。木材に含まれる放射性セシウムのうち自由水に溶けた放射性セシウムは、乾燥過程においてその大部分が表面へ移動し、乾燥後には大部分が表面に蓄積する可能性が指摘されているものの、実験的な確認がなされていなかった。そこで本研究では、デジタルX線非破壊測定技術を駆使して、乾燥中の木材に含まれる水溶性セシウムの挙動の観察を行うことの可否について検討することを目的とした。

2. 研究の目的

二重エネルギーX線吸収法は、近年人体の骨密度や体脂肪率の測定などに利用されつつある測定技術である。波長帯の異なる二種類のX線を被測定物体に照射することで、被測定物体の物質の種類を測定するものである。この手法が木材含水率の測定へ応用できるかどうか、できるとすればどのような波長帯の組み合わせがよいかについて明らかにすることが本研究の目的であった。

また、これに関連した研究として、原発事故に起因する木材への放射性セシウムの取り込まれ方の解明に対する社会的な要請が高まった。このことから、木材中のセシウムの動態の解明に本研究で確立しようとしたX線の手法を適用することができないかについて検討した。本研究のような最新のデジタルX線撮影技術を駆使して、乾燥中の木材に含まれる水溶性セシウムの挙動の観察を行った。その目的を達成するために、市販の塩化セシウム水溶液を含ませた木材を乾燥させ、塩化セシウムの分布の乾燥過程における経時変化をX線デンシトメトリの手法を用いて非破壊的に定量した。辺材と心材の違いがセシウムの移動に及ぼす影響に加え、早材と晩材の違いがそれに及ぼす影響についても検討した。

3. 研究の方法

寸法が既知だが含水率は不明の木材、および寸法も密度も既知の対照物質を二種類の波長のX線透過像を撮影したときの、木材の含水率と木材の質量吸収係数、対照物質の質量吸収係数の関係を示す理論式を検討した。立方体の形状をしたスギ小試験片を作成し、蒸留水の添加によりさまざまな含水率とした。実際に15 kV～40 kVの範囲で管電圧を変化させX線透過像を撮影し(図1)理論式と比較する実証実験を行った。

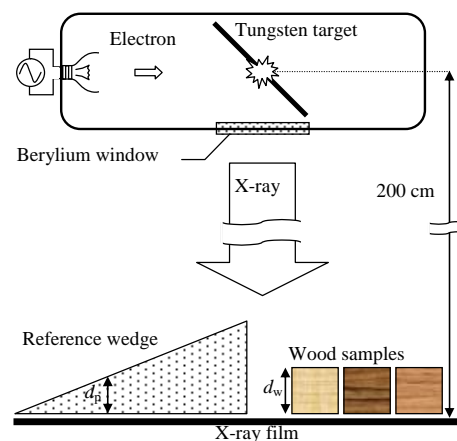


図1 撮影装置の模式図

さらに、市販の塩化セシウム水溶液を含ませた木材を乾燥させ、塩化セシウムの分布の乾燥過程における経時変化をX線デンシトメトリの手法を用いて非破壊的に定量した。辺材と心材の違いがセシウムの移動に及ぼす影響に加え、早材と晩材の違いがそれに及ぼす影響についても検討した。

4. 研究成果

まず管電圧15～40 kVで得られるX線についての二重エネルギーX線吸収法の木材含水率の検討可能性を明らかにした。管電圧の較差が大きいくほど、より正確に木材含水率を測定できると予想されていたが、それを実証的に明らかにすることができた。また、理論的な検討により管電圧の異なる二種類のX線から木材含水率を予想するための理論式を明らかにした。これにより、管電圧の較差が大きいくほどより正確に木材含水率を測定できることを理論的に証明することができた。

具体的には、木材実質、含有水分、対照物質としてアクリル板のX線質量吸収係数を、それぞれの元素組成を勘案して、

$$\mu_s = \frac{6.0}{100} \mu_H + \frac{49.5}{100} \mu_C + \frac{44.0}{100} \mu_O$$

$$\mu_m = \frac{11.1}{100} \mu_H + \frac{88.9}{100} \mu_O$$

$$\mu_p = \frac{8.0}{100} \mu_H + \frac{60.0}{100} \mu_C + \frac{32.0}{100} \mu_O$$

とおいたとき、最終的に木材の湿量基準含水率 W は、

$$W = \left(\frac{\frac{\mu_{s1}}{\mu_{p1}} \cdot \left(\frac{\mu_{m2} - \mu_{s2}}{\mu_{p2}} \right) - \left(\frac{\mu_{m1} - \mu_{s1}}{\mu_{p1}} \right) \cdot \frac{\mu_{s2}}{\mu_{p2}}}{\left(\frac{\mu_{m2} - \mu_{s2}}{\mu_{p2}} \right)^2 \cdot \frac{d_{p1}}{d_{p2}} - \left(\frac{\mu_{m1} - \mu_{s1}}{\mu_{p1}} \right) \cdot \left(\frac{\mu_{m2} - \mu_{s2}}{\mu_{p2}} \right)} - \frac{\mu_{s2}}{\mu_{p2}} \right) \times 100$$

と表せることを導出した。ここで d_p は X 線画像上での木材の写り方（画像の輝度値）に対応した対照物質アクリルの厚さであり、添え字の 1 および 2 はそれぞれ二種類の異なる X 線の波長に対応したものである。

実測との比較により、理論式による木材含水率の予想結果と実際の木材含水率は（予想どおり木材の含水率が高くなるほど対照物質アクリルとの質量吸収係数比は変化した）その y 軸に対する位置は大きく異なったため、実際にこの原理を木材含水率の測定に応用する際には、回帰的に決定した経験式を作成し、いくつかの一定の補正を行ったのちに木材含水率を予想することが推奨されることが分かった（図 2）。

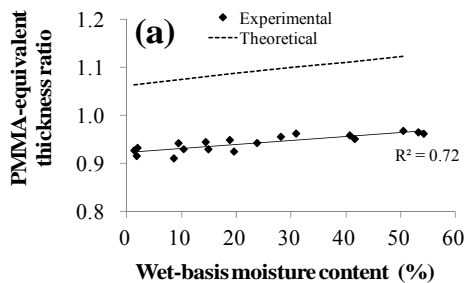


図 2 理論値（破線）と実測値（実線）の関係

以上のことから、原理的にはコストさえゆれば木材の含水率を、個体ごとの全乾密度のバラツキに左右されることなく非破壊的に測定可能であることが明らかとなった（図 3）。今後はさらなる精度の向上を目指す必要があるとともに、工業的な木材含水率測定への実用化を目指したい。

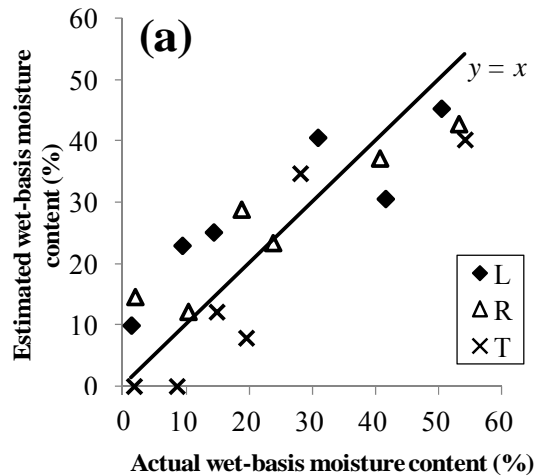


図 3 推定した含水率と実際の含水率の関係（L, R, T は X 線を照射する木材試験体面の方向である。X 線による木材含水率推定は繊維方向の影響を受けない。）

また、これに関連した研究として、木材に含まれる放射性セシウム動態の解明に X 線的手法を適用することができないかについて検討した結果について以下に述べる。

辺材に塩化セシウム水溶液を含ませてから乾燥させると、乾燥の進行に伴い木材の表面に塩化セシウムが蓄積する現象が観察された。この現象は板目面、柃目面、木口面、いずれの面にも生じた。心材では辺材ほどの効果は見られなかった。試験体内部の塩化セシウム濃度は当初の 50% 未満になったと考えられた。乾燥後の晩材部の塩化セシウム濃度は、早材部の塩化セシウム濃度よりも高かった。

以上のことから、X 線は木材中のセシウムの非破壊的な計測に適していることが分かった。これはセシウムの原子番号が極めて大きい、つまり X 線を極めてよく遮ることを利用した手法である。ただし放射性セシウムは極めて濃度が低いため、この手法によっても直接は測定できないことに注意を要する。安定セシウムを用いて伐採後の木材中の放射性セシウム動態をモデル的に把握するには非常に有用な手法である。試験体を破壊的に分割して化学分析に供することなくセシウムの分布を把握することができることも利点である。伐採後の木材に含まれる放射性セシウム動態予想への活用が今後望まれる。ちなみに本研究の結果は、放射性物質を含む木材の取扱について、木材に含まれる放射性セシウムを減らすためには、人工乾燥後に表面部分を削ることを推奨している。

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) Takashi TANAKA, Yasuo KAWAI:
Migration of cesium chloride dissolved in the liquid water of sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) during drying at 65 °C. *Holzforschung* (accepted) 2013 年 12 月 [査読有り]
Doi: 10.1515/hf-2013-0188

(2) Takashi TANAKA, Yasuo KAWAI:
A new method for nondestructive evaluation of solid wood moisture content based on dual-energy X-ray absorptiometry. *Wood Science and Technology* 47(6) 1213-1229 2013 年 11 月 [査読有り]
Doi: 10.1007/s00226-013-0569-0

[学会発表](計 3 件)

(1) 田中 孝, 村上 香, 小川秀樹, 伊藤博久, 熊田 淳, 川井安生
スギ辺材に含まれる水溶性セシウムの乾燥に伴う表面蓄積現象に及ぼす乾燥温度の影響
第 63 回日本木材学会大会(盛岡) 2013 年 3 月 27 日

(2) 田中 孝, 川井安生:
木材に含まれる水溶性セシウムの乾燥過程における表面蓄積現象の観察.
第 30 回記念日本木材加工技術協会年次大会(東京) 2012 年 10 月

(3) Takashi Tanaka, Yasuo Kawai:
Dual-energy X-ray absorptiometry as a potential tool for non-destructive evaluation of two-dimensional moisture content distribution and average moisture content in solid wood.
12th International IUFRO Wood Drying Conference (ブラジル連邦共和国パラ州ペレン) 2012 年 7 月

[図書](計 0 件)

[産業財産権]
出願状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:

種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

[その他]

(1)
(招待講演)
田中 孝:「二重エネルギーX線吸収法による木材含水率の測定」. 2013 年度木材と水研究会講演会「あたらしい木材水分計測技術」(松山) 2014 年 3 月 15 日

6. 研究組織

(1)研究代表者
田中 孝 (TANAKA Takashi)
静岡大学・農学研究科・助教
研究者番号: 40612700

(2)研究分担者
該当なし

(3)連携研究者

信田 聡 (SHIDA Satoshi)
東京大学・大学院農学生命科学研究科・准教授
研究者番号: 00201541

川井 安生 (KAWAI Yasuo)
秋田県立大学・木材高度加工研究所・准教授
研究者番号: 80279512