

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 24 日現在

機関番号：84601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24501264

研究課題名(和文)MRIを用いた水浸出土木材の内部性状の可視化に関する基礎的研究

研究課題名(英文)A basic study on visualization for internal property of waterlogged wood using MRI

研究代表者

山田 哲也(YAMADA, Tetsuya)

公益財団法人元興寺文化財研究所・研究部・研究員

研究者番号：80261212

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：水浸出土木材を収縮・変形をさせることなく、適切な保存処理を行うためには、水浸出土木材の劣化状態など木材内部の状態を把握する必要がある。そのための方法として医療分野で広く活用されている磁気共鳴イメージング(Nuclear Magnetic Resonance Imaging：MRI)の利用を検討した。その結果、MR画像は、外観からは確認することのできなかつた水浸出土木材内部の状態を可視化した。

MRIは、水浸出土木材の内部性状を把握するための非破壊診断法として有効的な手法であった。

研究成果の概要(英文)：In order to perform proper conservation treatment of the waterlogged wood without shrinkage and deformation, It is necessary to grasp the internal state of the waterlogged wood. For example, such as the state of deterioration. As a method of that purpose, We considered use of the MRI utilized widely at the medical field. As a result, MR imaging were visualized the internal state of the waterlogged wood which it was not able to confirm from the appearance.

MRI was effective approach as a non-destructive diagnostic method to understand the internal properties of the waterlogged wood.

研究分野：保存科学

キーワード：水浸出土木材 MRI MR画像 保存処理 ポリエチレングリコール トレハロース

1. 研究開始当初の背景

地下水に浸かった状態で遺跡から出土した木材や木製遺物(水浸出土木材)は、出土時に良好な形状を保った状態で発見されるが、木材の主要な構成成分であるセルロースとヘミセルロースを含む多糖類が腐朽菌によって著しく分解消失し、細胞壁の強度が低下するなど微小構造の劣化が進行しているため、不用意に乾燥させてしまうと収縮や変形、割れが生じる。この水浸出土木材を収縮・変形をさせることなく、展示・保管に耐える状態にするためには、なにかしらの保存処理を施し、木材として安定した状態にする必要がある。そのため、水浸出土木材に対して、ポリエチレングリコール(PEG)含浸法、真空凍結乾燥法、糖アルコール含浸法などの水溶性薬剤を含浸させる保存処理方法や、アルコール・キシレン樹脂法、高級アルコール法、脂肪酸エステル法などの有機溶剤に置換した後に非水溶性薬剤を含浸させる保存処理方法が開発され、現在まで実施されてきている。

保存処理の方法は、水浸出土木材の樹種、劣化状態、大きさ、形状、表面の性状(漆などの塗料や墨書の有無)などにより決定されるが、なかでも適切な保存処理の選択には劣化状態など木材内部の状態を把握することが重要となる。しかし、破壊することが出来ない貴重な木製遺物の劣化状態を非破壊で正確に把握する方法はまだ確立されているとは言い難いのが現状である。

今日まで、X線やX線CT(X-ray Computed Tomography)の画像を用いて内部性状を把握することは試みられている。しかし、これらはX線の透過性を可視化したものであり、木材中の水分分布に関する情報を得るには磁気共鳴イメージング(Nuclear Magnetic Resonance Imaging: MRI)がより優れている。近年、水浸出土木材の劣化状態を把握するために、非破壊測定技術としてMRIによる内部性状の評価が注目されている。MRIは、医療分野で広く一般に用いられているが、そのパラメータを含めた撮像法は非常に多岐にわたり複雑である。様々な画像を得られる可能性のある反面、その画像の解釈を含めた検討は、保存処理の専門知識とMRI画像の知識を融合しなければならない。

2. 研究の目的

水浸出土木材を収縮・変形をさせることなく、形状を安定した状態にするためには、適切な保存処理をほどこす必要がある。その適切な保存処理を選択するためには、水浸出土木材の劣化状態など木材内部の状態を把握することが重要である。そのために、医療分野で広く活用されている非

破壊測定技術としてのMRIを利用して、水浸出土木材の保存処理を行う上で重要な情報となる木材内部の劣化状態を可視化し、その木材の内部性状を正確に把握する方法を確立することと、水浸出土木材に保存処理を実施して、経時的に保存処理(薬剤含浸)過程のモニタリングを行い、保存処理薬剤の含浸プロセスの可視化を試み、各段階における適切な撮像手法を確立することが本研究の目的である。

3. 研究の方法

(1) 京都大学医学部附属病院内に設置されている臨床研究用の1.5Tesla MR装置(東芝メディカルシステム社製)を利用し、保存処理前の水浸出土木材(広葉樹:クリ材、針葉樹:マツ属二葉松類、針葉樹:ヒノキ材の柿経束)の断層像を適切な空間分解能で撮像するための撮像シーケンス(従来のT1強調画像、T2強調画像、プロトン密度強調画像、近年広く用いられ水の拡散現象を反映するとされる拡散強調画像など)を検討した。そのうえで、各シーケンスの撮像条件(field of view, matrix, 受信バンド幅、撮像コイル、acceleration factorなど)をも検討した。また、縦緩和(T1)時間および横緩和(T2)時間を強調した画像を撮像するためのパラメータ(repetition time, echo time)、定量値を計測するための撮像条件(repetition timeの組み合わせ、echo timeの組み合わせ)などの検討をしながらMR画像の撮像をおこなった。

(2) MRIとX線CTを用いて水浸出土木材(広葉樹:クリ材、針葉樹:マツ属二葉松類)の保存処理(薬剤含浸)過程のモニタリングを行い、保存処理前の水浸出土木材試料と同様に、様々な撮像シーケンスや撮像条件の検討をおこないながら、保存処理薬剤の含浸プロセスの可視化を試みた。

(3) 針葉樹:マツ属二葉松類の丸太材(直径11.5cm、長さ27cm、含水率450%)を木口方向に5cmと10cmの長さにそれぞれ切断した後に、ポリエチレングリコール(PEG)溶液に20%毎に2週間含浸させた後に、3D Field echo法にてMTC pulseありとなしの2種類の画像を各々撮像のうえ、そのMR画像に関心領域を設定し、MTC pulseありとなしの画像から磁化移動率(magnetic transfer ratio: MTR)およびその変化率 $MTR(PEG(+)) - MTR(PEG(-))$ を算出して、高分子物質に対して反応性のある磁化移動(magnetic transfer)効果とPEGの浸透性を評価した。

(4) かまぼこ型した針葉樹:モミ属(長さ38cm、幅18cm、厚み9cm、含水率370%)を長軸方向に2分割して、さらに木口面に対

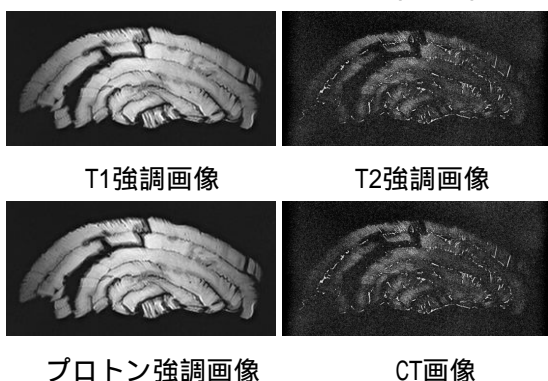
して約5cm幅で7分割に裁断した試料(9×9×5cm)を作製して、ポリエチレングリコール(PEG)溶液(20-100%溶液を20%毎)およびトレハロース溶液(30-70%溶液を10%毎)を各分割試料に順番に2週間ごと含浸させ、最終14週目に全ての薬剤濃度の浸透性を評価するために緩和時間変化を測定した。緩和時間測定は、T1計測はInversion Recovery法(TE/TR = 12/8485 ms, TI = 20, 50, 100, 200, 400, 800, 1600 ms)、T2計測はSpin echo法(TR = 12120 ms, TE = 15, 30, 45, 60, 75 ms)を用いて横断像にて画像データを取得した。その後、木材の内側部分と外側部分に関心領域を設定し、信号強度を測定して緩和時間を算出した。

4. 研究成果

(1) 医療の分野では広く一般に用いられているMRIのパラメーターを含めた撮像法は非常に多岐にわたり複雑で様々なMR画像を得られるがその画像の解釈が難しい。そのうえ、水浸出土木材毎にその劣化状態がかなり異なっていることも加味されたMR画像の解釈がさらに難しいこと数多くがあり、異なる劣化状態で出土した水浸出土木材に対して最適な撮影条件を導き出すことは難しいことであった。

そのなかで、T1強調画像、T2強調画像、プロトン密度強調画像の各シーケンスやTI(Inversion Time)を変化させたIR(Inversion Recovery)法、3D Field echo法でMTC pulseありとなしの撮像などの様々なMR画像を得ておく必要性が確認された。

保存処理前の水浸出土木材(広葉樹:クリ材、針葉樹:マツ属二葉松類、針葉樹:ヒノキ材の柿経束)のMR imagingに関する検討を行った結果、T1強調像やプロトン密度強調像の撮像シーケンスにおいて比較的良好な画像を得ることができた(図1)。



T1強調画像

T2強調画像

プロトン強調画像

CT画像

図1. 柿経束中央部の断層像

これらのMR画像から水浸出土木材中に存在する水分の殆どが結合水の状態で木材内部に存在する可能性と、埋没中に地下水に多く暴露されて劣化の進行が考えられる表面部分ほどT1強調画像において高信号を示

してT1(縦緩和)短縮効果が強く認められることが確認できた。また、T2強調画像やプロトン密度強調画像では、早材部で高信号、晩材部や節の部分で低信号を示し、年輪構造に沿ったコントラストを描出することが観察された。

(2) 水分の無くなった保存処理後のMR画像やCT画像は、元来の出土木材の状態に、薬剤や保存過程による情報が付加・修飾され、その解釈が非常に困難になる。そのため、保存処理前から経時的に保存処理過程を追うことにより、薬剤含浸の状態の把握も含めた木材の情報を得ることは有効であった。

水浸出土木材の保存処理(薬剤含浸)過程でのMR画像やCT画像によりモニタリングを行い、保存処理薬剤の含浸プロセスを可視化することは、水浸出土木材中の水分量が多く保存処理薬剤が低濃度の場合はMR画像が、水分量の少なく保存処理薬剤が高濃度になるに従ってCT画像が有効的であった。

また、3種類の薬剤(ポリエチレングリコール、ラクチトール+トレハロース、脂肪酸エステル)を用いた保存処理方法で保存処理を行った後の水浸出土木材(広葉樹:クリ材)に対して、CT画像を撮像したところ、保存処理薬剤及び薬剤の含浸濃度が異なると画像コントラストが大きく異なるため、CT値を比較することである程度の含浸状況を確認することができた。

(3) 磁化移動(magnetic transfer)効果とポリエチレングリコール(PEG)の浸透性を評価した結果(図2)、PEG溶液濃度が上昇するとMTRが低下した。10cm裁断試料は、中間部・年輪中心部はPEG 40%まで、辺縁部は60%まで MTRの低下が持続した。一方、5cm裁断試料は、中間部・年輪中心部はPEG 80%まで、辺縁部はPEG100%まで MTRの低下が持続した。また、MTRの低下から体積の大きな水浸出土木材は、高濃度PEGに置換するには2週間では不十分であることが示された。これらのことからMTRを計測することにより非破壊でPEGの浸透性を評価できることが明らかになった。

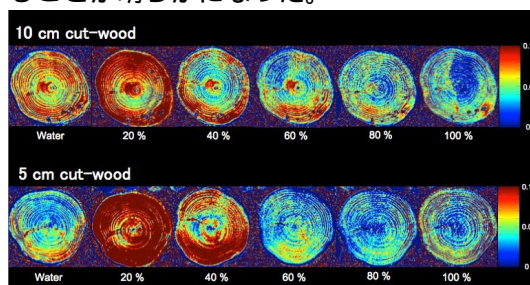


図2. 各PEG濃度におけるMTR画像の比較

(4) ポリエチレングリコール(PEG)含浸濃度(20 - 100%)の緩和時間勾配は、外

側部分： $T1 = -2.74 \text{ ms} / \%$ 、 $T2 = 0.19 \text{ ms} / \%$ 、内側部分： $T1 = -1.50 \text{ ms} / \%$ 、 $T2 = 0.26 \text{ ms}$ であった。また、トレハロース含浸濃度（30 - 70 %）との緩和時間勾配は、外側部分： $T1 = -2.80 \text{ ms} / \%$ 、 $T2 = -0.14 \text{ ms} / \%$ 、内側部分： $T1_{in} = -0.06 \text{ ms} / \%$ 、 $T2 = -0.14 \text{ ms} / \%$ であった。このことから、PEG、トレハロースともに、 $T1$ を計測することで水浸出土木材内部の薬剤の含浸状態を測定することが可能であった。

（5）臨床研究用のMRIを利用することによって、水浸出土木材内部の水分分布に関する情報を得て、木材の劣化状況を可視化することができた。このことから水浸出土木材の内部性状を把握することが可能であり、水浸出土木材の内部性状の評価や薬剤含浸プロセスを知るための非破壊診断法としてMR画像を取得することは有効的な手法であるとの確証を得た。しかし、現状では医療機関にしかMR装置が設置されていないために、容易にMR画像を得ることは難しい。加えて、MR画像の解釈には、水浸出土木材の保存処理を手がけている研究者とMR装置の操作に習熟した技師やMR画像に関する知識の豊富な研究者との共同作業が不可欠であることを強く再認識した。

この水浸出土木材にMRIを用いて内部性状を把握する研究はまだ始まったばかりである。そのため、医療分野のように人体組織に対する適切なMR画像の撮像条件や多くのデータの蓄積あるわけではなく、目的に応じた最適な撮像法を即座に選択できる状況ではない。従って、積極的に水浸出土木材の撮像に関する様々な条件や方法を検討してそのデータを蓄積してゆく必要がある。また、今後は、水浸出土木材内部の水分量の分布を簡易に定量的に評価できる手法を検討してゆかねばならない。

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕（計3件）

金澤裕樹、山田哲也、木戸晶、藤本晃司、小澤聡、小泉幸司、大國万希子、植田直見、富樫かおり、磁化移動効果を用いたポリエチレングリコールの浸透性測定、日本磁気共鳴医学会、2014年9月20日、ホテルグランヴィア京都（京都府京都市）

金澤裕樹、山田哲也、木戸晶、藤本晃司、小澤聡、小泉幸司、大國万希子、植田直見、富樫かおり、MRIを用いた水浸出土木材の内部性状の可視化 - 磁化移動効果を用いたポリエチレングリコールの浸透性測定 - 、日本文化財科学会、2014年7月5日～6日、奈良教育大学（奈良県奈良市）

山田哲也、木戸晶、藤本晃司、長尾泰輔、小泉幸司、柴垣哲彦、植田直見、富樫かおり、MRIとX線CTを用いた愛知県清須市

清洲城下町遺跡出土柿経束の内部性状の可視化、日本文化財科学会、2014年7月5日～6日、奈良教育大学（奈良県奈良市）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山田 哲也 (YAMADA, Tetsuya)
公益財団法人元興寺文化財研究所・研究部・研究員
研究者番号：80261212

(2) 研究分担者

植田 直見 (UEDA, Naomi)
公益財団法人元興寺文化財研究所・研究部・研究員
研究者番号：10193806

大國 万希子 (OKUNI, Makiko)
公益財団法人元興寺文化財研究所・研究部・技師
研究者番号：40250352

木戸 晶 (KIDO, Aki)
京都大学・医学（系）研究科（研究院）・助教
研究者番号：80595710

藤本 晃司 (FUJIMOTO, Koji)
京都大学・医学（系）研究科（研究院）・助教
研究者番号：10580110

(3) 研究協力者

金澤 裕樹 (KANAZAWA, Yuki)
徳島大学・大学院医歯薬学研究部（医学系）・助教
研究者番号：80714013