



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Micro-MRIを用いたMRE(Magnetic Resonance Elastography)による動的粘弾性計測 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	鈴木, 逸人
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第12020号
Issue Date	2015-09-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/59953
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.1/jp/
Type	doctoral thesis
File Information	Hayato_Suzuki_review.pdf, 審査の要旨



学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士(工学) 氏名 鈴木 逸人

審査担当者 主 査 教 授 梶原 逸朗
副 査 教 授 大橋 俊朗
副 査 教 授 小林 幸徳
副 査 教 授 山本 徹 (保健科学研究院)
副 査 但野 茂 (函館工業高等専門学校)

学位論文題名

Micro-MRI を用いた MRE(Magnetic Resonance Elastography) による動的粘弾性計測
(Dynamic Viscoelasticity Measurement by Magnetic Resonance Elastography using Micro-MRI)

Magnetic resonance elastography(MRE) は、臓器や組織を加振しながら MRI 撮影することで非侵襲に硬さや動的粘弾性特性を計測する手法である。これまで、臨床応用に向け、ヒト臓器や組織に対して MRE 計測が試みられてきた。計測対象を十分に振動させる加振方法、組織の硬さまたは動的粘弾性特性の計測精度が実用化するための課題となっている。これら *in vivo* による硬さや粘弾性特性に対する計測手法の検証や改良には、*in vitro* での MRE 計測が重要である。特に、動的粘弾性特性の計測において、MRE 計測は、レオメータなど従来の装置では計測することが難しい数十～数百 Hz における特性や弾性率分布を計測できる可能性がある。計測手法をさらに検討し高精度化することで、*in vitro* での MRE 計測は、臨床応用にむけた定量的な診断基準の探索、医療・福祉機器の設計や食品の評価、シミュレーションに用いる物性値の計測など様々な応用が考えられる。

MRE 計測では計測対象全体に振動を伝搬させる必要がある。これまで、空気圧やピエゾ等を用いた加振方法が提案され生体軟組織の MRE 計測に用いられてきた。しかし、試験片内部で生じる最大変位は数十 μm 以下と非常に小さく、信号ノイズ比が低いという問題があった。著者らは、この問題を解決するため加振周波数 50～250Hz、加振振幅 0.1～0.5 mm で加振可能な弾性棒型縦波加振機構と臨床用 MRI と比較して小型・低磁場で同等の空間分解能を有する 0.3 T micro-MRI を用いた MRE システムを開発した。本システムを用いて動的粘弾性特性を計測可能であるか検討する必要がある。

本研究では、はじめに、micro-MRI を用いた MRE システムを用いて硬さの異なる 0.6～2.0 wt% アガロースゲルの貯蔵せん断弾性率 G' と損失せん断弾性率 G'' を計測した。その結果 G' の加振周波数に対する依存性と G'' が G' に対して非常に小さくなる傾向を確認した。これまで報告されてきた G', G'' の傾向と一致したことから本システムにおいて動的粘弾性特性を計測可能であることを示した。さらに、高周波数、高振幅ほど計測面内における G' のばらつきが減少し、計測精度が向上することを明らかにした。

次に、本システムを用いて異なる粘弾性体の動的粘弾性特性を MRE 計測可能であるか検討した。本研究では、加振周波数 50～250 Hz、加振振幅 0.5 mm における 5～15 wt% ゼラチンゲルの動的粘弾性特性を MRE 計測した。その結果、本システムで計測したゼラチンゲルの動的粘弾性特性は、これまでの報告と同様の傾向を示すことを確認した。さらに、圧縮試験により求めた弾性率が同じ値と

なるアガロースゲルとゼラチンゲルの G' , G'' を比較し, 本システムで材料の異なる粘弾性体の動的粘弾性特性の違いを計測することができることを示した. また, 5 wt% ゼラチンゲルと 15 wt% ゼラチンゲルにより作製した複層型試験片の MRE 計測を行った. 単層型ゼラチンゲル試験片と複層型ゼラチンゲル試験片の G' には, 有意差が認められず, 加振周波数に対する傾向も一致した. 本システムを用いて複層型試験片についても粘弾性特性を計測することができた.

本システムを用いて *in vitro* の軟組織の動的粘弾性特性について検討した. 自重で変形するほど軟らかい生体軟組織の試験片を効率的に加振する方法として, 試験片をゼラチンゲルに包埋し加振する方法を提案した. 軟組織の例としてブタ肝臓を 15 wt% ゼラチンゲルに包埋し MRE 計測を行った. その結果, ブタ肝臓を 15 wt% ゼラチンゲルに包埋した場合, 加振振幅と同程度かそれ以上の最大振幅の波が伝搬したことを確認した. ブタ肝臓を包埋したゼラチンゲル領域の G' は, 単層型および複層型ゼラチンゲルの G' 同程度となり, また, ブタ肝臓領域の G' は周波数に依存して増加する傾向も確認された. 以上より, 本手法の有効性を示した. また, 繊維組織の例としてウシ骨格筋の MRE 計測を行った. 繊維方向と繊維直交方向に縦波加振を行った場合に粘弾性特性が受ける影響を検討した. その結果, 繊維組織に縦波加振を行った場合, 加振方向により動的粘弾性特性の加振周波数に対する傾向が異なる可能性を示した.

以上より, 本研究では micro-MRI を用いた MRE システムにおいて加振周波数 50~250 Hz, 加振振幅 0.1~0.5 mm における動的粘弾性特性の MRE 計測が可能であることを示した. 加振条件が 0.6~2.0 wt% アガロースゲル, 5~15 wt% ゼラチンゲル, ブタ肝臓, ウシ骨格筋の動的粘弾性特性に与える影響について検討し, 軟組織をゼラチンゲルに包埋する加振方法を提案した.

これを要するに, 本研究は, 弾性棒型縦波加振機構と micro-MRI を用いた MRE システムを開発し, 高分子ゲルおよび臓器試験片の動的粘弾性特性を加振周波数 50~250 Hz, 加振振幅 0.1~0.5 mm の条件で計測可能にしたことから, 生体工学および生体医療計測分野の発展に対して貢献するところ大なるものがある. よって著者は, 北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格あるものと認める.