

図 1 全体構成

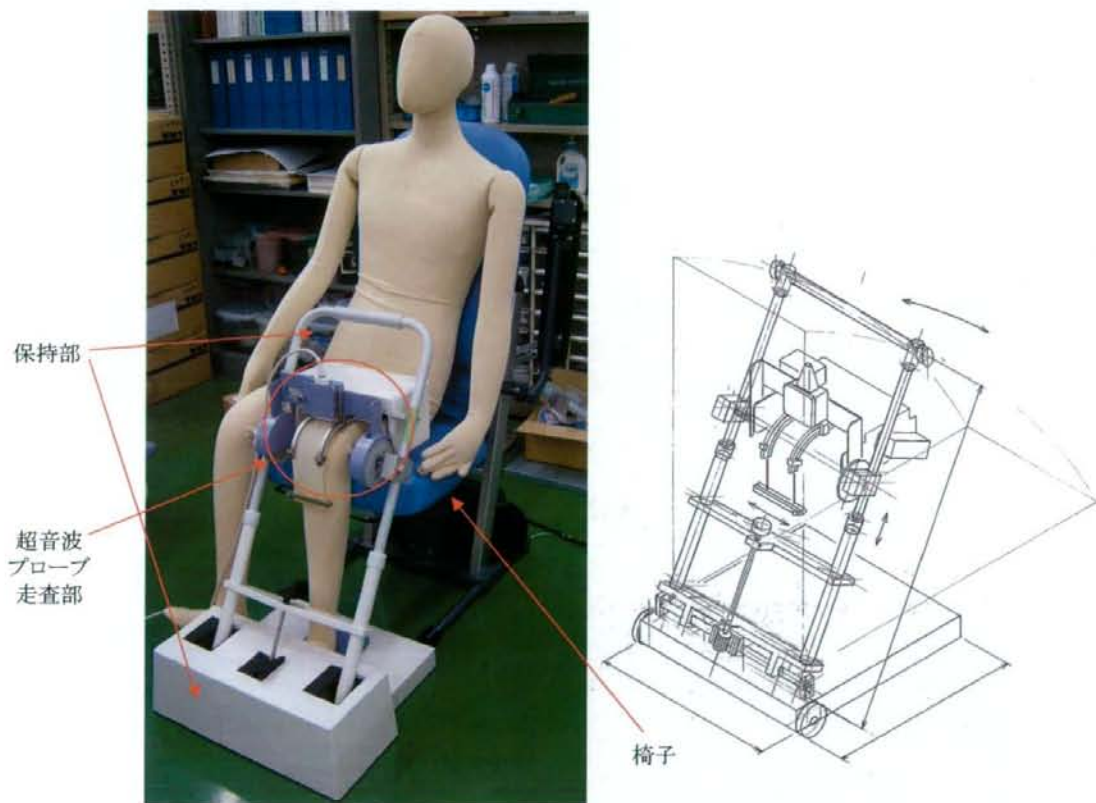


図 2 超音波ブローブスキャナーの試作機の概観と模式図

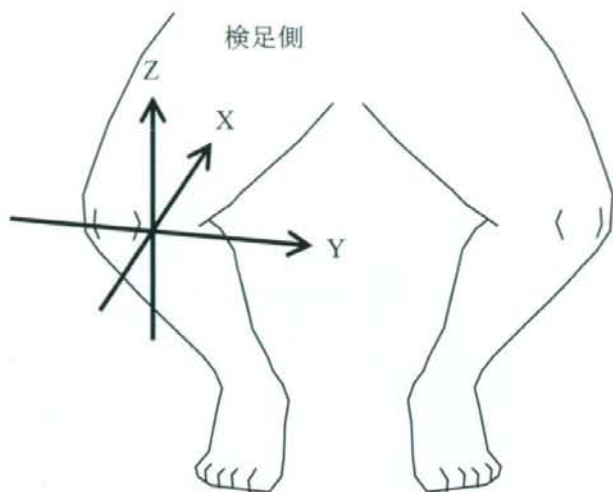


図 3 超音波プローブスキャナーの保持部の可動方向の説明図

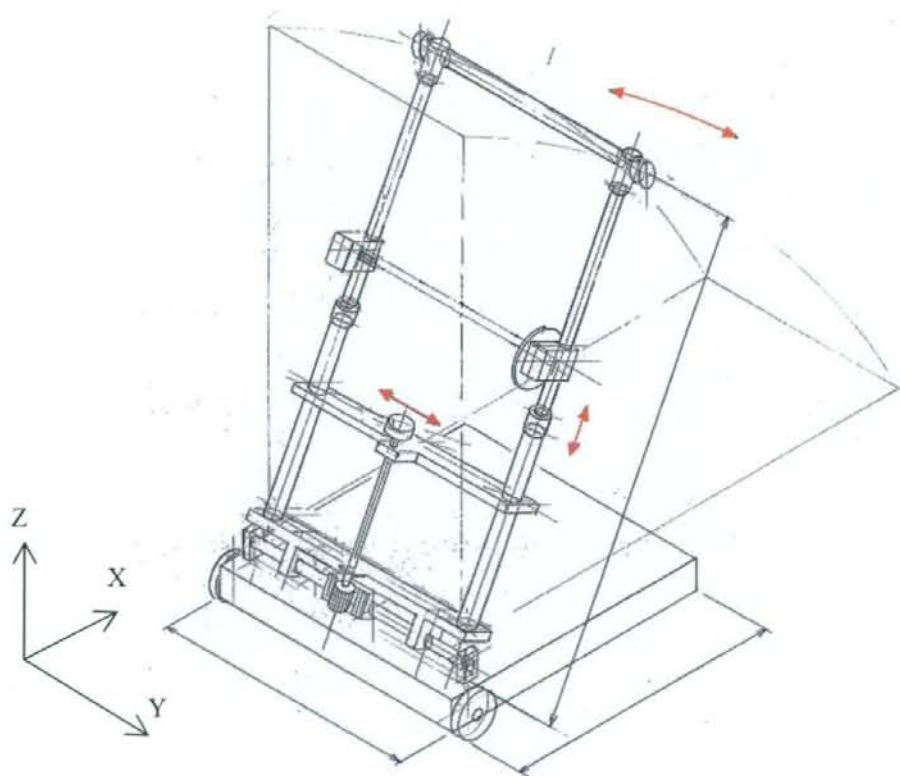


図 4 超音波プローブスキャナーの保持部

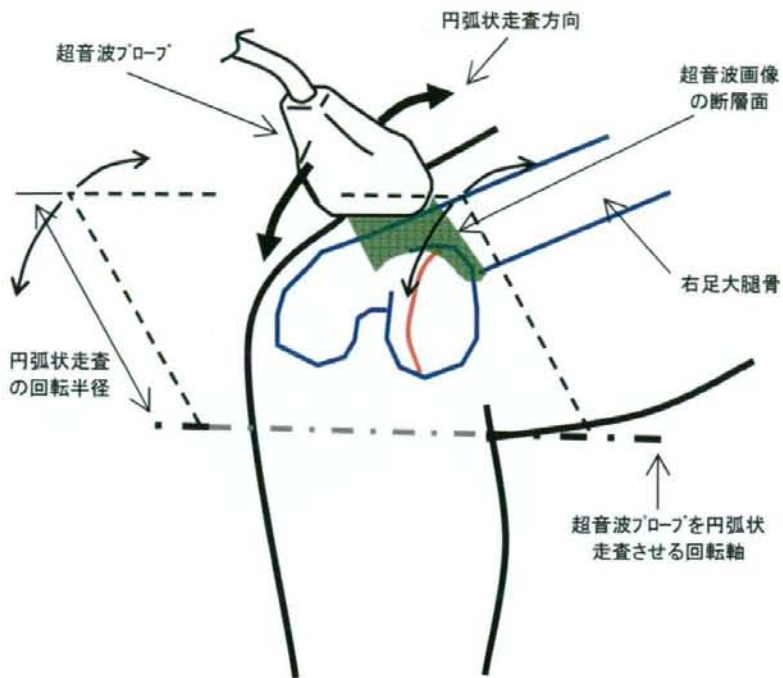


図 5 超音波プローブ走査部の模式図

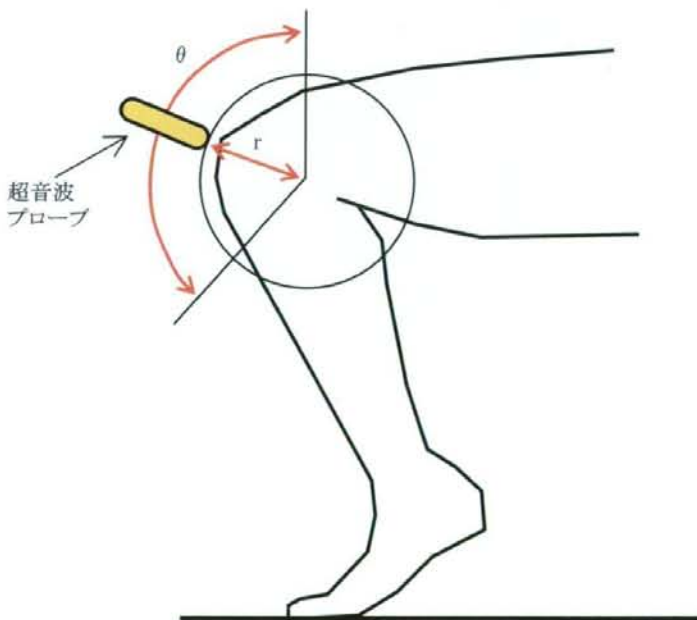
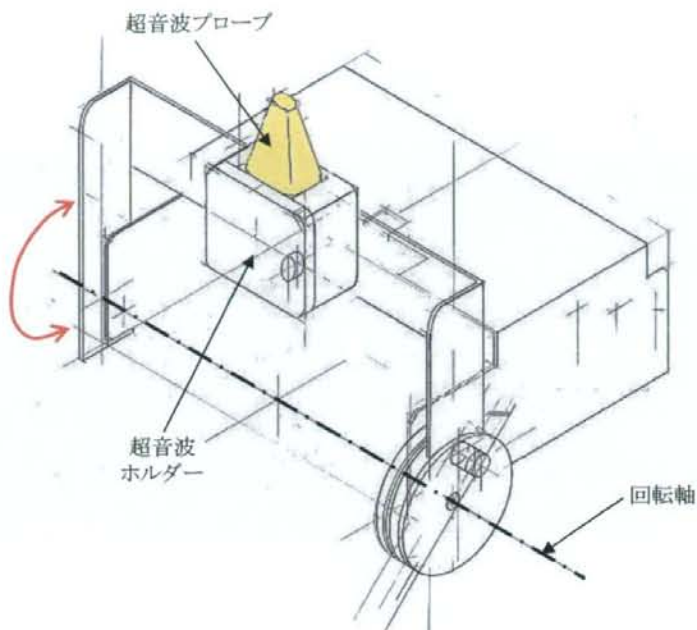
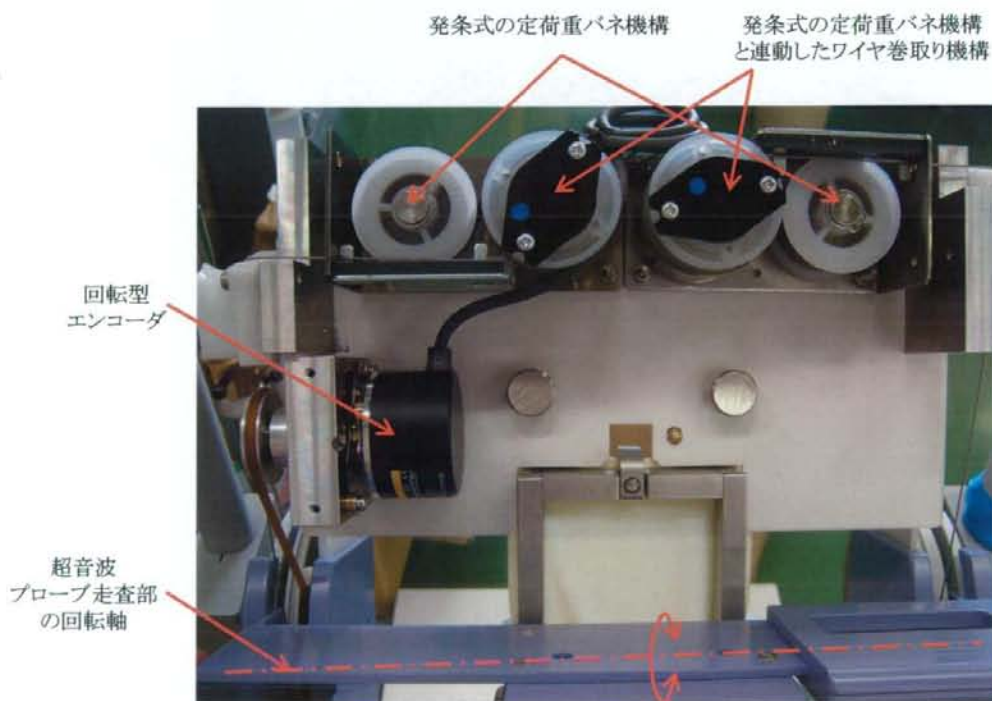


図 6 超音波プローブ走査部の模式図：側面視



(1) 超音波プローブ走査部の模式図



(2) 試作機の超音波プローブ走査部：上面視

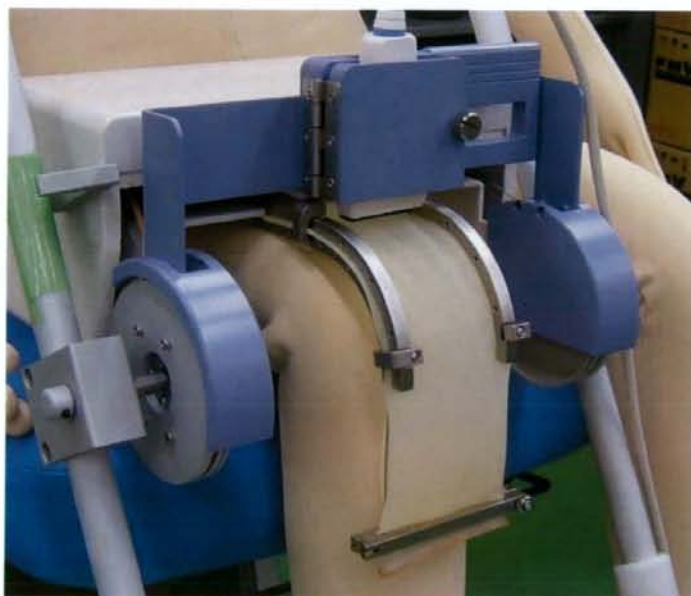
図7 超音波プローブ走査部



(1) 水を充填していない状態



(2) 水を充填した状態



(3) 水袋を装着した状態

図8 水袋



(1) 座面が最低位置の状態



(2) 座面が最高位置の状態



(3) 座面上下動作用スイッチ



(4) 座面下の足挟みこみ防止機構

図9 椅子

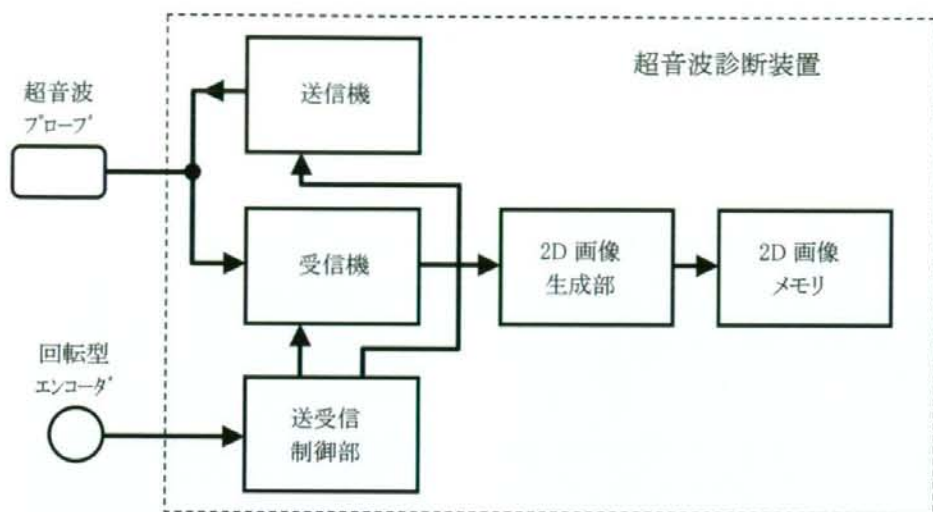


図 10 超音波プローブ、回転型エンコーダ、および超音波診断装置の構成

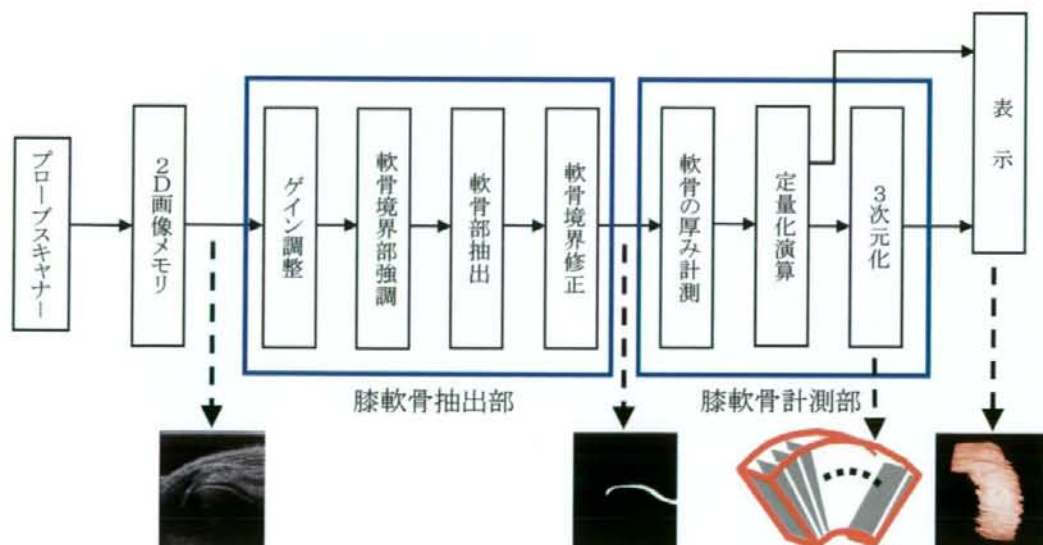


図11 膝軟骨抽出部と3D画像化の構成（膝軟骨計測部を含む）

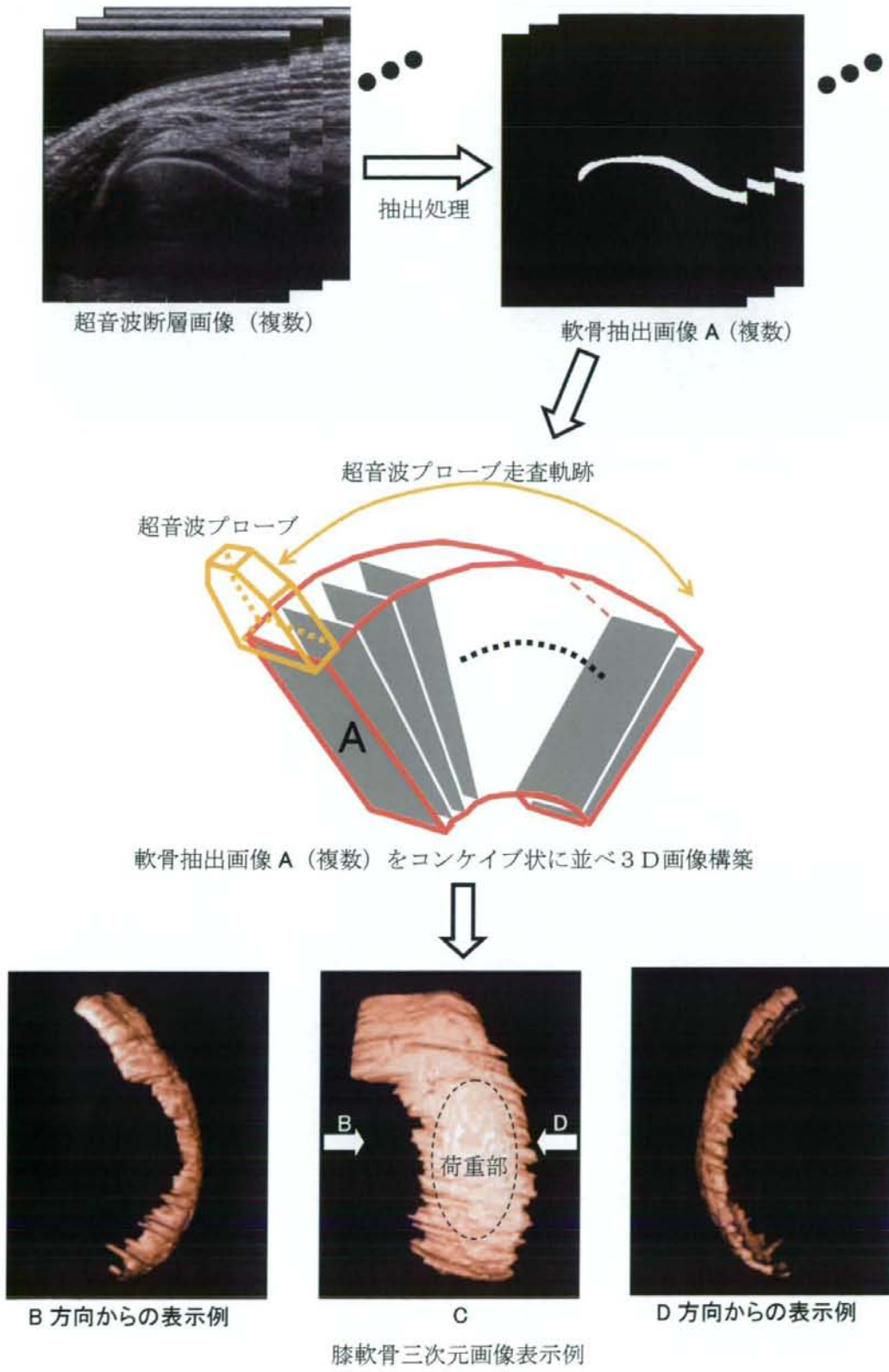
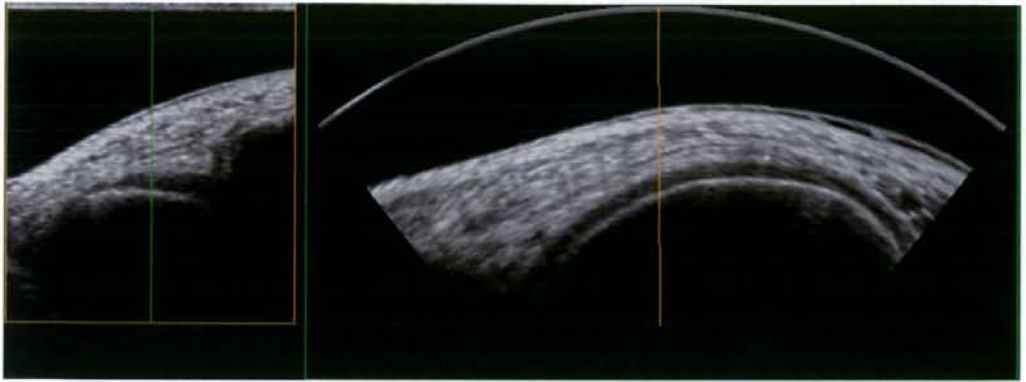


図12 膝軟骨の2D断層画像から3D表示までの流れの模式図



(1) 断層画像例

(2) 超音波プローブ走査方向の断層画像例

図13 膝軟骨の電子スキャン断層画像例(1)と超音波プローブ走査方向の断層画像例(2)

超音波 B-mode 画像を用いた 3 次元軟骨形態計測測定に関する研究

分担研究者 中島 義和 東京大学大学院工学系研究科 准教授

研究要旨

これまでに超音波を用いて関節軟骨を三次元的に評価した先行研究はない。超音波 B-mode 画像を用いて膝関節軟骨を撮像し、得られた画像より三次元モデルを作成、軟骨厚を計測した。臨床用 MRI を用いて同様に軟骨三次元モデルを作成、軟骨厚を算出し、超音波画像による定量値の精度評価のため、それらを比較検討した。双方の間には有意な相関がみられ、超音波を用いた関節軟骨三次元評価は、関節軟骨の形態定量法として有用であると考えられた。

A. 研究目的

関節軟骨を臨床用超音波診断装置を用いて三次元的に評価した先行研究はこれまでにない。今回、2007 年度の研究を基に関節軟骨診断用下肢保持具ならびにプローブスキャナーを作製し、これらを用いて三次元超音波軟骨画像を取得した。この画像データを基に関節軟骨三次元表面形状モデルを作成し、MRI 画像を基に作成した関節軟骨三次元表面形状モデルと比較を行い、精度評価を行った。

B. 研究方法

対象は、36 歳および 59 歳の健常男性の volunteer に対して行った。まず、2007 年度の大腿骨内側顆部関節軟骨の形状に関する研究を基に作製した関節軟骨診断用下肢保持具ならびにプローブスキャナーを使用し、右膝大腿骨内側顆部の超音波撮像を行った。撮像機器は、Prosound・ α 10 およびリニアプローブ UST-5412（アロカ株式会社、東京都三鷹市）を用いた。作製したプローブスキャナー（図 1）は、超音波プローブと皮膚表面の間に水袋が介在しており、膝関節皮膚表面と水袋の間に十分な量のエコーゼリー（アロカ社、GEL-SCAN-PA）を塗布し、また、水袋表面にもエコーゼリーを塗布し、その上を一定の回転半径をもったレールに沿って、プローブが移動し一定間隔角度で超音波画像を取得する機構となっている（図 1, 2）。

プローブスキャナーの回転中心からプローブ表面までの距離は 70mm とした。B-mode 画像で確認しながら、プローブ回転中に大腿骨内側顆部関節軟骨表面がプローブから約一定の距離を保つような位置にて膝関節を約 120° 屈曲位にて設置した。

撮像条件は、Tissue Harmonic, 5MHz にて行った。取得スライス画像は、解像度：横 420 pixel×縦 468 pixel、pixel size : 0.08547 mm x 0.08547 mm であった。また、スライス画像間の角度は 0.796°、スライス枚数は 101 枚であった。

得られた超音波スライス画像は、それぞれ超音波プローブが円弧状に移動する間に取得されているため、その配列は、図 3C の如く扇形となっている。一般的に、平行スライス画像データの場合、各スライスの 1 pixel の大きさに加えて、スライス間の距離がわかれば、空間的配列は可能である。しかし、扇形に並ぶスライス画像データの場合、各スライスの 1 pixel の大きさに加えて、扇形の中心軸（プローブの移動円弧の中心軸）の位置情報と、各スライス画像の角度位置情報が必要である。空間的配列情報は、プローブスキャナーの回転軸に設置されているエンコーダにより算出し、各スライス画像にこれらの情報を付与した。これらのデータを専用で作成した画像ソフトを用いて、各スライス画像を配列した（図 3A, B）。本ソフトは、MPR（Multiple plane reconstruction）機能をもっており、こ

の機能を用いて、平行スライスデータを再構築し出力した。

出力された画像データを画像処理ソフト Mimics (Materialise, Leuven, Belgium)に取り込み (図 4)、閾値および手動を用いて軟骨領域を各スライスにおいて抽出し、それらの領域から三次元表面形状モデル (以下、US_3D_model) を作成した (図 5)。

次に、超音波撮像による定量評価値の精度を検討するため、MRI 撮像による三次元表面形状モデルを作成する。超音波撮像を行った同一の volunteer の膝関節に対し、MRI 撮像を行った (図 6)。撮像機種は、Achieva 3.0T X-series (フィリップスエレクトロニクスジャパン、東京) を用い、撮像条件は、DESSwe法 (Eckstein et al. 2006; Eckstein et al. 2007) を用いて以下の如く行った。

512 pixel × 512 pixel, pixel size : 0.313 mm × 0.313 mm, スライス厚 : 0.600 mm, スライスギャップ : 0.291 mm

MRI 撮像の DICOM データを出力し、画像処理ソフト Mimics (Materialise, Leuven, Belgium)に取り込む。閾値および手動を用いて軟骨領域を各スライスにおいて抽出し、それらの領域から三次元表面形状モデル (以下、MRI_3D_model) を作成する (図 7)。

作成した US_3D_model、MRI_3D_model 両方の STL データを三次元データ検査ソフト

(Rapidform XOV, INUS technology, ソウル、韓国) に読み込み、形状による位置合わせを行った (図 8)。ソフト上で、大腿骨内側顆部遠位の関節面に対してほぼ平行となるような基準面を作成する (図 9)。ここで、基準面上に 1mm 間隔で軟骨厚測定基準点を作成する。任意の基準点 x からの基準面に対する法線と、US_3D_model、MRI_3D_model との交点をそれぞれ Cx_US、Cx_MRI とする。STL データは、表面形状を表現する小さな三角形 (ポリゴン) の集合体データであるが、点 Cx_US、点 Cx_MRI におけるポリゴンの垂線方向への表面 (大腿骨内側顆部軟骨上面) から表面の距離 (大腿骨内側顆部軟骨下面) をそれぞれのモデルの関節軟骨厚と規定し、それぞれ、Tc-US、Tc-MRI とした (図 10)。超音波画像を用いた軟骨モデルにおける軟骨厚の精度評

価のために、US_3D_model を用いた軟骨厚測定値 (Tc-US) と MRI_3D_model を用いた軟骨厚測定値 (Tc-MRI) について、回帰分析および Pearson の相関係数の算出を行った。有意水準は $p < 0.05$ とした。統計学的解析には、SPSS Statistics 17.0 (エス・ピー・エス・エス、東京) を使用した。

(倫理面への配慮)

今回の研究で用いられる超音波はすでに臨床で用いられているものと周波数・音圧ともにかかわらず安全性は確立されている。また、検査の際に負荷される荷重は被検者が日常生活において常に受けている荷重より充分小さいものでありこの検査による組織への損傷は無く安全である。

検査に際しては対象者に口頭および文書を用いて説明を行い、十分に理解し同意を得られたもののみを対象とした。また、全研究を通して対象者の個人情報公開されない。

C. 研究結果

36 歳男性の Tc-US (超音波モデル軟骨厚)、Tc-MRI (MRI モデル軟骨厚) の平均はそれぞれ、 2.28 ± 0.54 mm、 1.99 ± 0.47 mm であった。

Tc-US を x、Tc-MRI を y としたときの一次回帰直線式は、

$$y = 0.6004x + 1.0846$$

であった (図 11)。また、Pearson の相関係数は 0.518、p 値は 0.001 未満であり Tc-US と Tc-MRI との間には有意な相関が見られた。

59 歳男性の Tc-US (超音波モデル軟骨厚)、Tc-MRI (MRI モデル軟骨厚) の平均はそれぞれ、 1.81 ± 0.73 mm、 1.76 ± 0.47 mm であった。

Tc-US を x、Tc-MRI を y としたときの一次回帰直線式は、

$$y = 0.9656x + 0.1097$$

であった (図 12)。また、Pearson の相関係数は 0.627、p 値は 0.001 未満であり Tc-US と Tc-MRI との間には有意な相関が見られた。

D. 考察

今回比較対象としたMRIモデルの基となったMRI画像撮像法であるDESSwe法は、過去の研究(Eckstein et al. 2006)においてその精度の検証がなされており、今回比較対象モデル作成のための撮像法として採用した。結果において、両被検者共に、超音波モデルとMRIモデルの定量値について高い相関を示したことは、超音波画像を用いた三次元モデル作成およびその定量評価値の正確性が高いと考えられた。

図11に示されたように、36歳被検者の超音波画像を基にした表面形状モデルの軟骨厚は、MRIモデルに比べ、値の大小の幅が小さかった。これは、B-mode画像の解像度が0.08547mmと十分に高いが、超音波送信ビームの焦点距離におけるスポットの大きさが約1mmであり、軟骨の細かい凹凸を十分に検出できない可能性があることが要因の一つであると考えられた。しかし、59歳被検者のモデルにおいては(図12)、一次回帰直線の傾きが1に近く、また切片も小さかった。また、双方のモデルにおいて、軟骨厚の相関は非常に高く、超音波B-mode画像による関節軟骨三次元モデルの定量評価は、臨床的に応用できる可能性が高いと考えられた。

今回の研究では、超音波画像において軟骨の表面と考えられる部分の反射波高輝度信号領域および骨軟骨境界と考えられる部分の反射波高輝度信号領域において閾値および手動的方法を用いて境界を決定し、軟骨領域の抽出を行った。今回の手法に加えて、最適なフィルタリングや境界強調などの画像処理法を加えることでより精度の高い軟骨抽出が可能であると考えられる。これらの抽出作業の自動化も含め、臨床応用に向けて今後検討が必要であると考えられる。

E. 結論

昨年度の研究を基に作製した超音波スキャナーを用いて大腿骨内側顆部関節軟骨の画像を収集し、三次元表面形状モデルを作成、MRI画像をもとに作成した三次元表面形状モデルと共に定量評価・比較を行った。2被検者にお

いてそれぞれ軟骨厚の有意な相関がみられ、臨床的に有用である可能性が示唆された。

F. 研究発表

1. 論文発表

Matsuyama J, Ohnishi I, Sakai R, Bessho M, Matsumoto T, Miyasaka K, Harada A, Ohashi S, Nakamura K. A New Method for Evaluation of Fracture Healing by Echo Tracking. *Ultrasound Medicine & Biology*, Vol.34, no.5, p.775-783, 2008

2. 学会発表

Ohashi, S; Ohnishi, I; Matsumoto, T; Matsuyama, J; Bessho, M; Tobita, K; Kaneko M; Nakamura, K, Evaluation of Measurement Precision for Articular Cartilage Ultrasound Speed by Time of Flight Method, 55th Annual Meeting of Orthopaedic Research Society, Transactions, 2162, 2009

松山 順太郎、大西 五三男、酒井 亮一、別所 雅彦、大橋 暁、宮坂 好一、飛田 健治、松本 卓也、原田 烈光、芳賀 信彦、中村 耕三、超音波エコートラックング法を用いた骨癒合判定、日本整形外科学会誌、88(8), S907, 2008

大橋 暁、大西 五三男、松本 卓也、別所 雅彦、飛田 健治、中村 耕三、超音波を用いたヒト関節軟骨音速測定値に軟骨変性度が与える影響についての検討、日本整形外科学会誌、88(8), S994, 2008

宮坂 好一、酒井 亮一、鈴木 浩之、大塚 利樹、原田 烈光、吉川 義博、松山 順太郎、大西 五三男、中村 耕三、超音波による骨癒合強度定量評価の新しい計測システムの開発、日本超音波医学会誌、Vol. 35 Supplement, S550, 2008

R. Sakai, K. Miyasaka, E. Minagawa, T.

Ohtsuka, A. Harada, Y. Yoshikawa, J. Matsuyama, K. Tobita, K. Nakamura, I. Ohnishi, A Minute Bone Bending Angle Measurement Method using Echo-Tracking for Assessment of Bone Strength In Vivo, 2008 IEEE International Ultrasonics Symposium, Transactions, 2C-5, 2008

大西 五三男、松山 順太郎、飛田 健治、別所 雅彦、大橋 暁、松本 卓也、金子 雅子、中村 耕三、超音波エコートラッキング法を用いた骨癒合の評価、第22回日本創外固定・骨延長学会抄録集 p.60, 2009

G. 知的財産権の出願・登録状況（予定を含む。）

1. 特許取得

特願 2008-188709, 超音波プローブ支持装置、2008.7.22

特願 2008-188727, 超音波プローブ用の膝用音響整合器、2008.7.22

特願 2008-188639, 骨検査システムおよび下腿支持装置、2008.7.22

特願 2008-294434, 超音波診断装置、2008.11.18

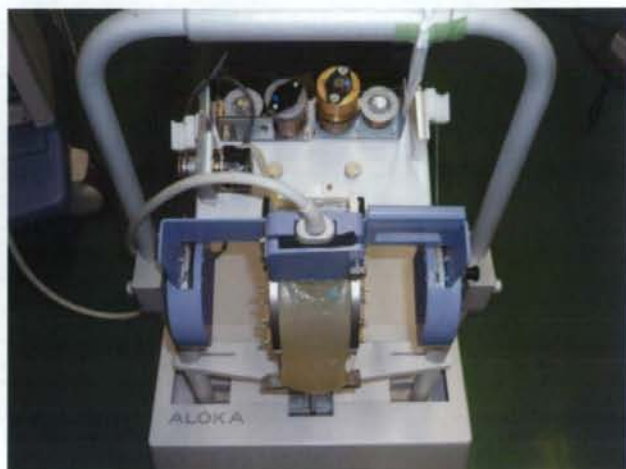


図1 下肢保持具・プローブスキャナー（左：全体像、右：スキャナー部拡大図）



図2 大腿骨内側顆部撮像風景（左：撮像開始位置、右：撮像終了位置）

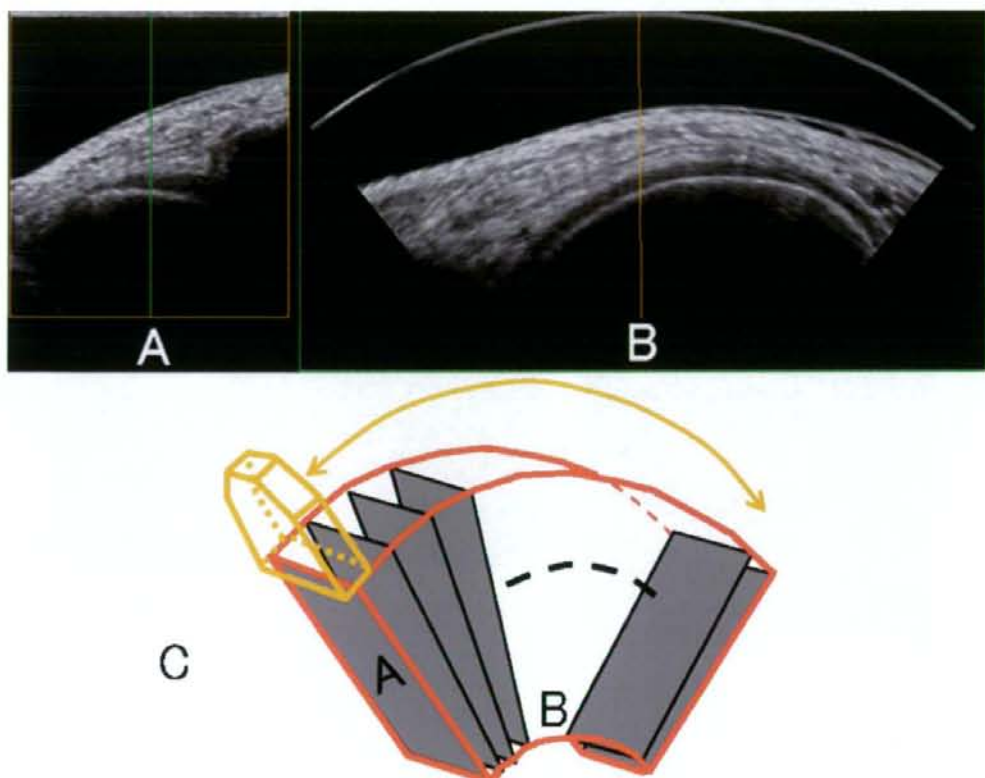


図3 プローブの動きと画像の配列

A：各位置で得られる超音波画像

B：三次元再構成によって得られた関節軟骨側面画像

C：プローブの動きと画像配列の関係模式図

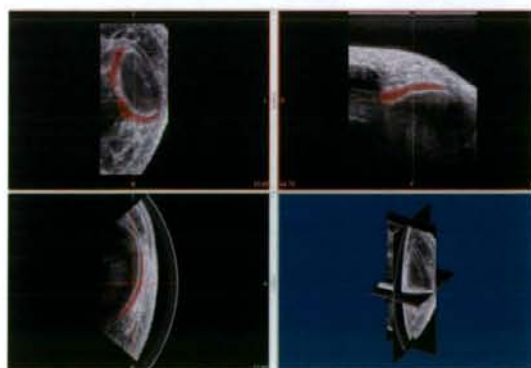


図4 DICOM 画像処理ソフトを用いた軟骨領域抽出



図5 超音波画像より作成した3次元表面形状モデル



図6 MRIによる右膝関節撮像（左：撮像風景、右：撮像画像）



図7 MRI画像より作成した3次元表面形状モデル



図8 超音波関節軟骨モデルとMRI関節軟骨モデルとの位置合わせ



図 9 軟骨厚測定点を決定するための基準面を作成し、基準面上に関節軟骨厚測定基準点を1mm 間隔に作成



図 10 各基準点における基準面に対する法線と各三次元モデルとの交点における各三次元モデルの厚さを計測
超音波モデル、MRI モデルの各点の厚さをそれぞれ $Tc-US$, $Tc-MRI$ とした

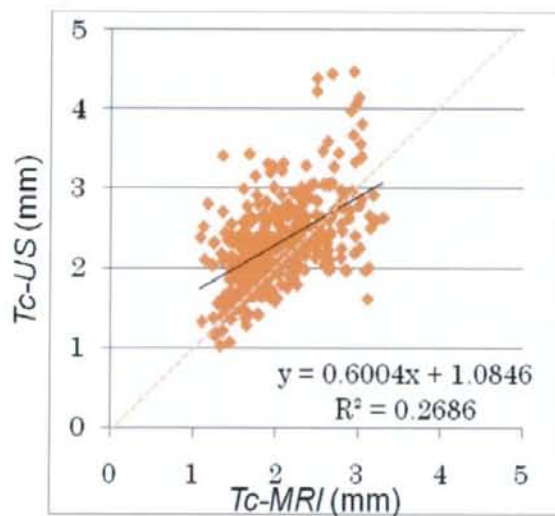


図 11 超音波モデル軟骨厚 ($Tc-US$) と MRI 軟骨モデル厚 ($Tc-MRI$) との関係 (36 歳男性)
有意な相関($p < 0.0001$)がみられた

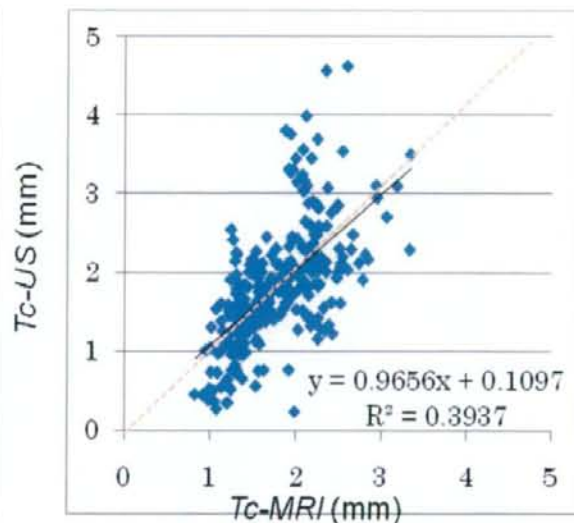


図 12 超音波モデル軟骨厚 ($Tc-US$) と MRI 軟骨モデル厚 ($Tc-MRI$) との関係 (59 歳男性)
有意な相関($p < 0.0001$)がみられた

Ⅲ 研究成果の刊行に関する一覧表

研究成果の刊行に関する一覧表
【H20. 4. 1～H21. 3. 31】

書籍

著者氏名	論文タイトル名	書籍全体の編集者名	書 籍 名	出版社名	出版地	出版年	ページ
なし							

雑誌

発表者氏名	論文タイトル名	発表誌名	巻号	ページ	出版年
Matsuyama J, Ohnishi I, Sakai R, Bessho M, Matsumoto T, Miyasaka K, Harada A, Ohashi S, Nakamura K.	A new method for evaluation of fracture healing by echo tracking.	Ultrasound Me d Biol	34	775-83	2008
Ohashi, S; Ohnishi, I; Matsumoto, T; Matsuyama, J; Bessho, M; Tobita, K; Kaneko M; Nakamura, K	Evaluation of Measurement Precision for Articular Cartilage Ultrasound Speed by Time of Flight Method	55th Annual Meeting of Orthopaedic Research Society	Transactions	P2162	2009
松山 順太郎、大西 五三男、酒井亮一、別所 雅彦、大橋 暁、宮坂 好一、飛田 健治、松本 卓也、原田 烈光、芳賀 信彦、中村 耕三、	超音波エコー-tracking法を用いた骨癒合判定	日本整形外科学会雑誌	88巻8号	S907	2008
大橋 暁、大西 五三男、松本 卓也、別所 雅彦、飛田 健治、中村 耕三	超音波を用いたヒト関節軟骨音速測定値に軟骨変性度が与える影響についての検討	日本整形外科学会雑誌	82巻8号	S994	2008
宮坂 好一、酒井亮一、鈴木 浩之、大塚 利樹、原田 烈光、吉川 義博、松山 順太郎、大西 五三男、中村 耕三	超音波による骨癒合強度定量評価の新しい計測システムの開発	日本超音波医学会誌	Vol. 35 Supplement	S550	2008

R. Sakai, K. Miyasaka, E. Minagawa, T. Ohtsuka, A. Harada, Y. Yoshikawa, J. Matsuyama, K. Tobita, K. Nakamura, I. Ohnishi	A Minute Bone Bending Angle Measurement Method using Echo-Tracking for Assessment of Bone Strength In Vivo	2008 IEEE International Ultrasonics Symposium	Transactions	2C-5	2008
大西 五三男、松山 順太郎、飛田 健治、別所 雅彦、大橋 暁、松本 卓也、金子 雅子、中村 耕三	超音波エコーtracking法を用いた骨癒合の評価	第22回日本創外固定・骨延長学会	抄録集	p. 60	2009