

図16 ギヤを内装している(左:内部, 右:カバー有り)

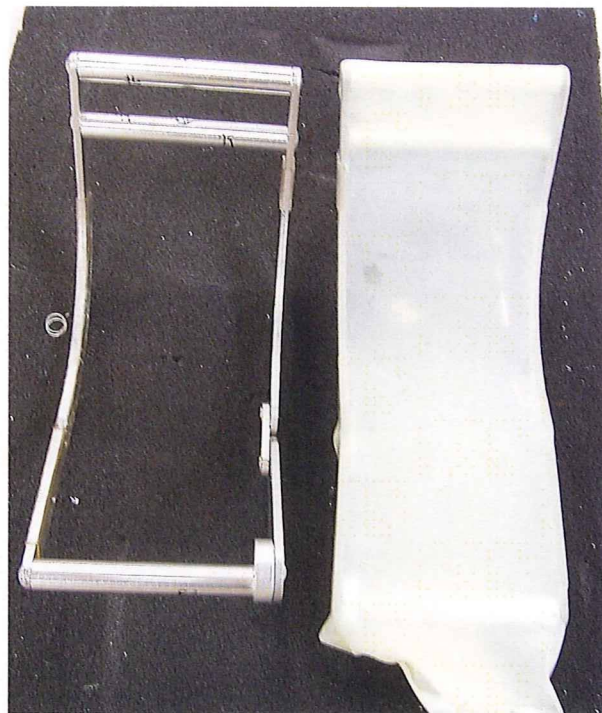


図17 フレームを水袋に内装
(左:水袋取付け前, 右:取付け後)

超音波 3 次元軟骨形態計測測定精度の向上に関する研究

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。昨年度、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に改良を加え、超音波 B-mode 画像を用いてボランティアの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、さらに昨年度より精度の向上がみられた。

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。我々は、昨年度、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、それら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、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の比較を行い、精度評価を行った。さらに、今年度においては、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に改良を施し、ボランティアにおいて実際の超音波撮像を施行、MRI との比較による測定値精度評価を行った。

B. 研究方法

対象は、昨年度撮像を行った 36 歳および 59 歳の健常男性の volunteer に対して再度撮像を行った。今年度、臨床超音波膝関節撮像のために改良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。空間的角位置情報は、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 x 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)に取り込んだ。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)を作成した(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(図 7、8)、形状およびポイントレジストレーション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し、基準面上に 1mm 間隔で軟骨厚測定基準点を作成した(図 9)。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 とした。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には公開されない。

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）をそれぞれ、x、yとしたときの一次回帰直線式は、

$$y = 0.7498x + 0.6481$$

であった（図11）。また、R²は0.5826、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）をそれぞれ、x、yとしたときの一次回帰直線式は、

$$y = 0.6432x + 0.3296$$

であった（図12）。また、R²は0.6017、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、12に示されたように、いずれのボランティアにおいても、一次回帰直線の傾きが1より小さかった。これは、B-mode 画像の解像度が0.08547 mm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1mmφ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、昨年度の超音波測定結果（図13）と比較すると、いずれのボランティアにおいてもR²が本年度において高くなっており、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の改良によって、軟骨厚測定値の精度の向上が得られたと考える。

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現在開発中であるが、これらの機能を加えることでより精度の高い軟骨抽出・測定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

本年度改良を行った関節軟骨診断用下肢保持具ならびにプローブスキ

ャナーを用いての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 (書籍)

大西五三男、松山順太郎、超音波エコートラッキング法を用いた新しい骨強度評価法、*Journal of Clinical Rehabilitation*. Vol18, No.10,940-942, 2009

2. 学会発表

超音波エコートラッキング法を用いた骨粗鬆症に対する骨強度判定の試み

松山 順太郎 大西 五三男
別所 雅彦 大橋 暁 飛田
健治 松本 卓也 中村 耕三、
第 36 回 日本臨床バイオメカニクス
学会 2009. 10

Ohashi, Satoru; Ohnishi, Isao;
Matsumoto, Takuya; Bessho,
Masahiko; Matsuyama, Juntaro;
Tobita, Kenji; Kaneko, Masako;
Nakamura, Kozo, Evaluation of the
Accuracy of Articular Cartilage
Thickness Measurement by
Conventional and Real-time Spatial
Compound Ultrasonography,
Transactions of 56th Annual
Meeting of the Orthopaedic
Research Society, 35, 1364, 2010

Tobita, Kenji; Ohnishi, Isao;

Matsumoto, Takuya; Ohashi,
Satoru; Bessho, Masahiko; Kaneko,
Masako, - Effect of low-intensity
pulsed ultrasound stimulation on
gap healing in a rabbit osteotomy
model evaluated by micro computed
tomography-based 3-dimensional
cross-sectional moment and
cross-sectional moment of inertia,
Transactions of 56th Annual
Meeting of the Orthopaedic
Research Society, 35, 0695, 2010

宮坂好一、廣田浩二、酒井亮一、皆川
栄一、大橋暁、大西五三男、中村耕三
超音波による関節軟骨音速
の高精度計測法、*超音波医学*、36 卷
supplement, S455, 2009

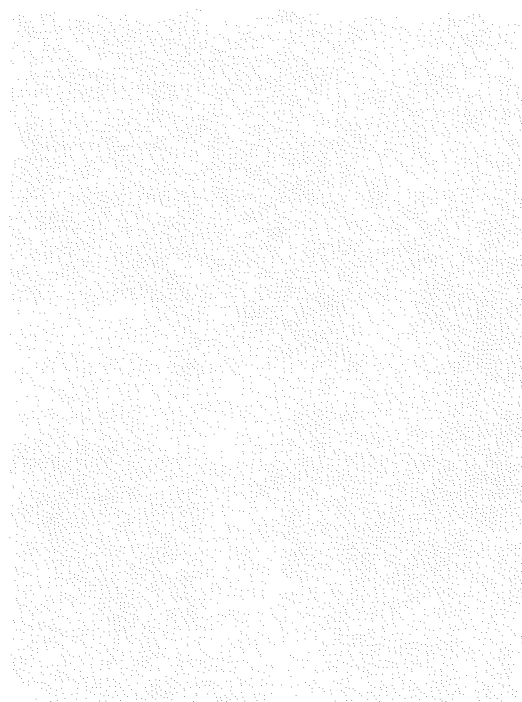
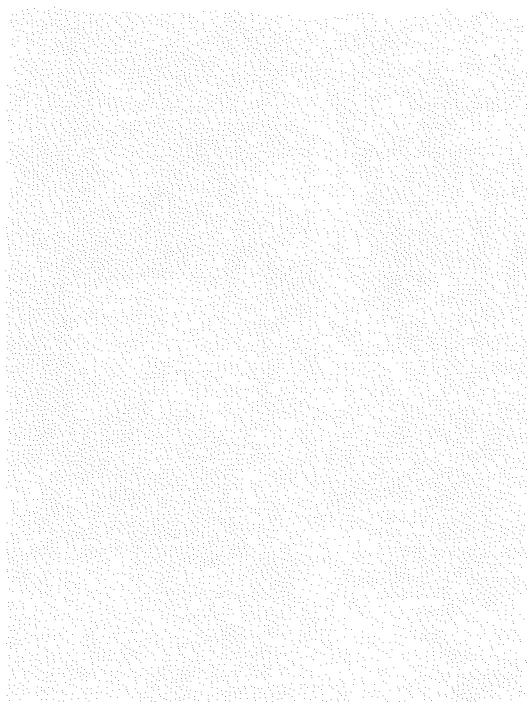
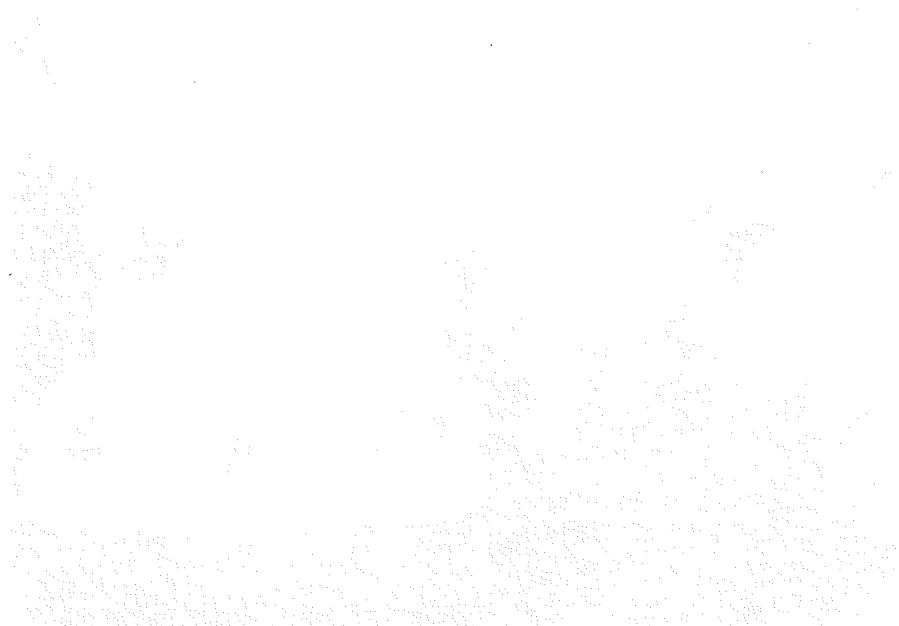
飛田健治、大西五三男、松本卓也、大
橋暁、別所雅彦、金子雅子、中村耕三、
創外固定を用いたウサギ脛骨骨切モ
デルにおける低出力超音波パルスの
効果-マイクロ CT を用いた 3 次元
的 Bone Strength Indices 評価-、*日本創
外固定・骨延長学会雑誌*、21 卷、p.78,
2010

飛田健治、大西五三男、松本卓也、大
橋暁、別所雅彦、松山順太郎、金子雅
子、中村耕三、低出力超音波パルス治
療の骨癒合リモデリング期に対する
効果 マイクロ CT を用いた仮骨の
髓腔化・皮質骨化の定量評価、*日本整
形外科学会雑誌*、83 卷 8 号、S1239,
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 2010-47403, 超音波骨癒合診断装置, 出願日: 2010年3月4日
発明者: 大西五三男, 松山順太郎, 飛田健治, 酒井亮一



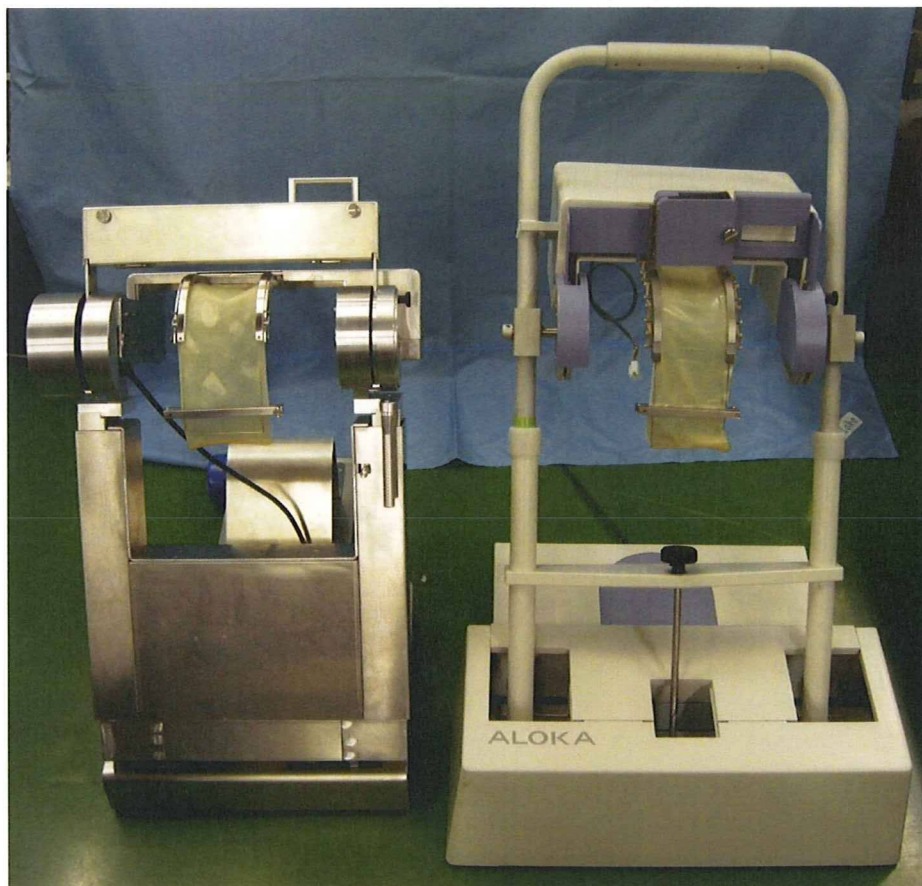


図1 下肢保持具・プローブスキャナー（左：今年度，右：昨年度）

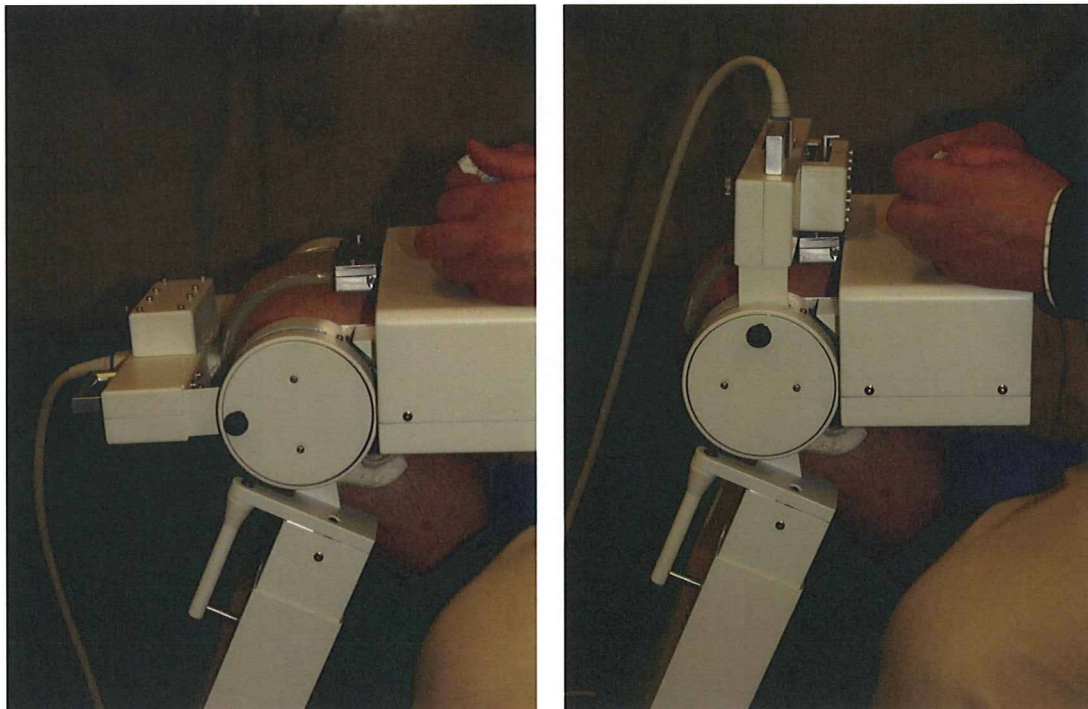


図2 大腿骨内側顆部撮像風景（左：撮像中位置、右：撮像終了位置）

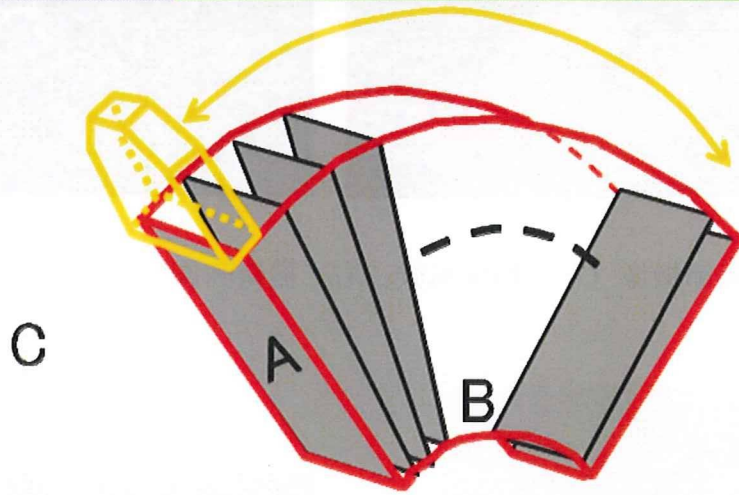
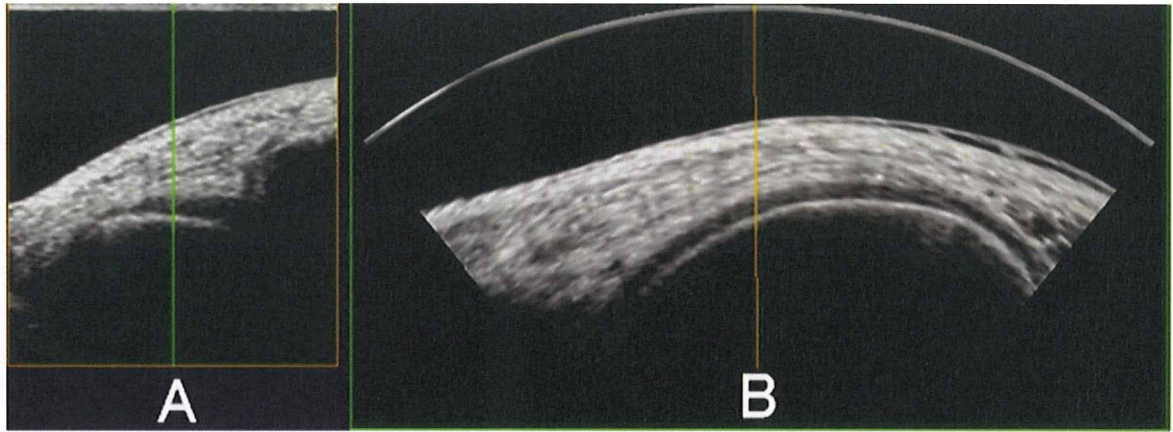


図3 プローブの動きと画像の配列

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

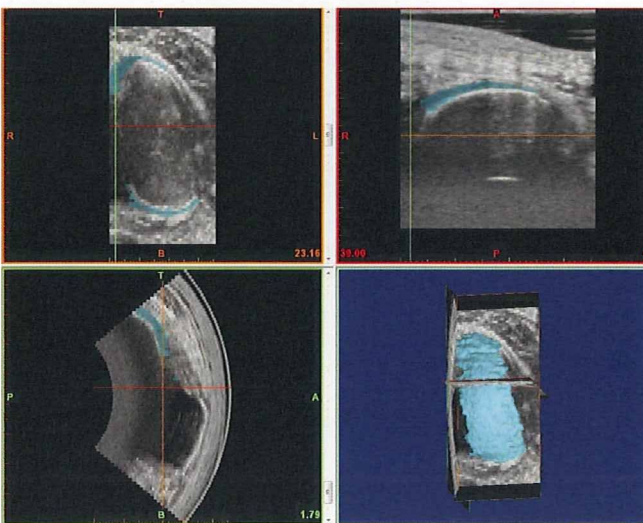


図4 DICOM 画像処理ソフトを用いた軟骨領域抽出

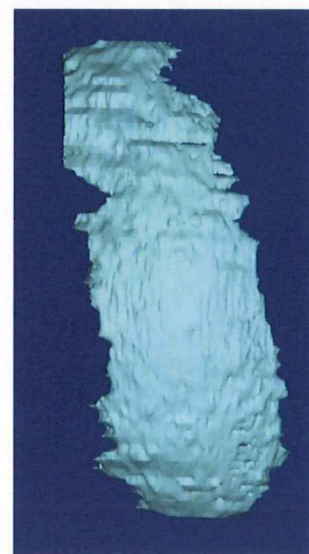


図5 超音波画像より作成した3次元表面形状モデル

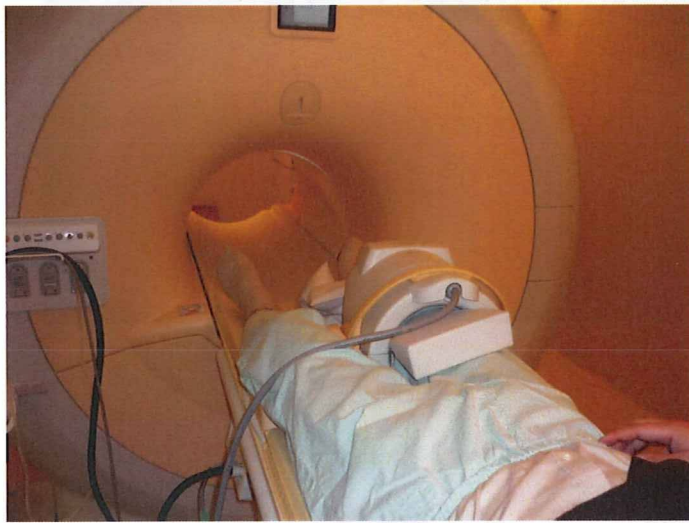


図 6 MRI による右膝関節撮像（左：撮像風景、右：撮像画像）

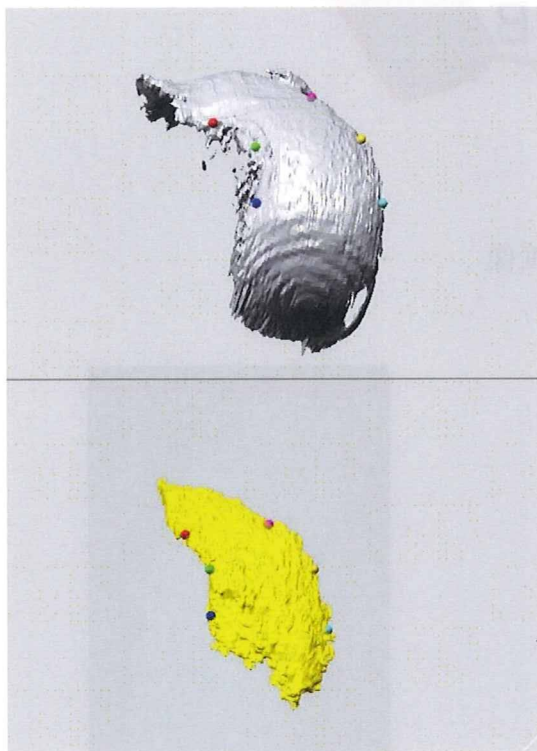


図 7 MRI 画像より作成した 3 次元表面形状モデル
（上）および超音波モデル（下）

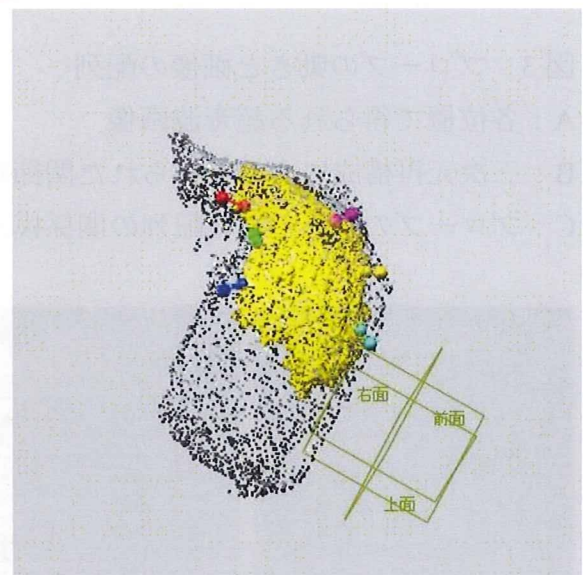


図 8 超音波関節軟骨モデルと MRI 関節軟骨モデル
との位置合わせ

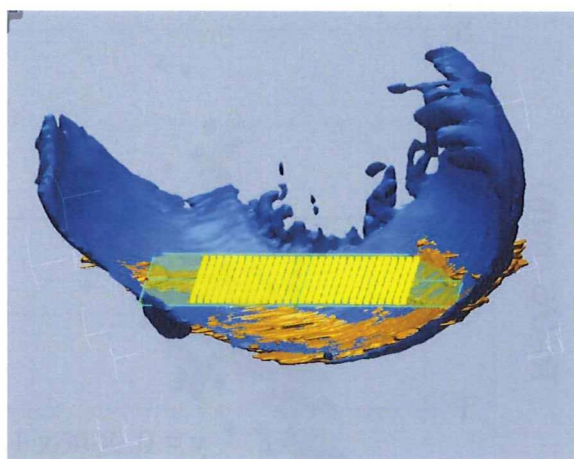


図 9 軟骨厚測定点を決定するための基準面を作成し、基準面上に関節軟骨厚測定基準点を1mm 間隔に作成

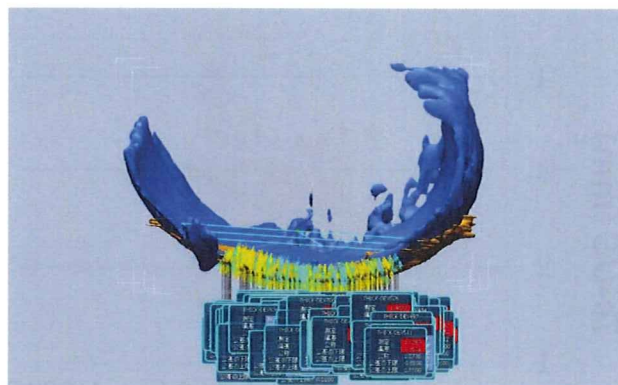


図 10 各基準点における基準面に対する法線と各三次元モデルとの交点における各三次元モデルの厚さを計測
超音波モデル、MRI モデルの各点の厚さをそれぞれ $Tc-US$, $Tc-MRI$ とした

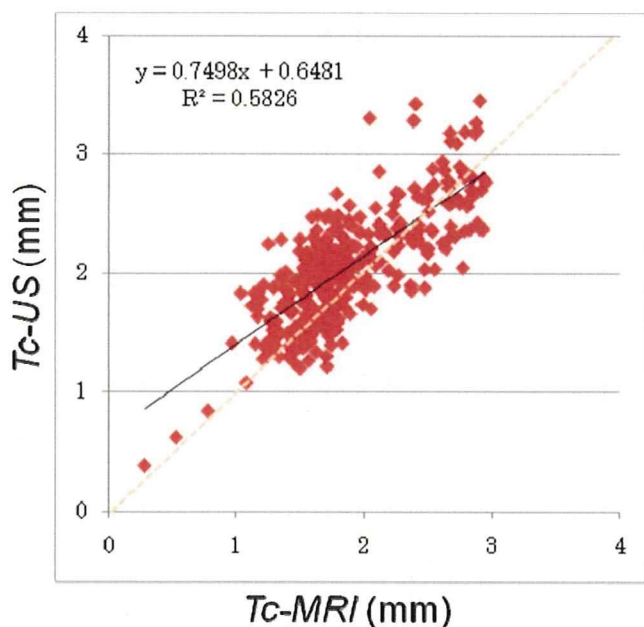


図 11 超音波モデル軟骨厚 ($Tc-US$) と MRI 軟骨モデル厚 ($Tc-MRI$) との関係 (36 歳男性)
有意な相関($p < 0.0001$)がみられた

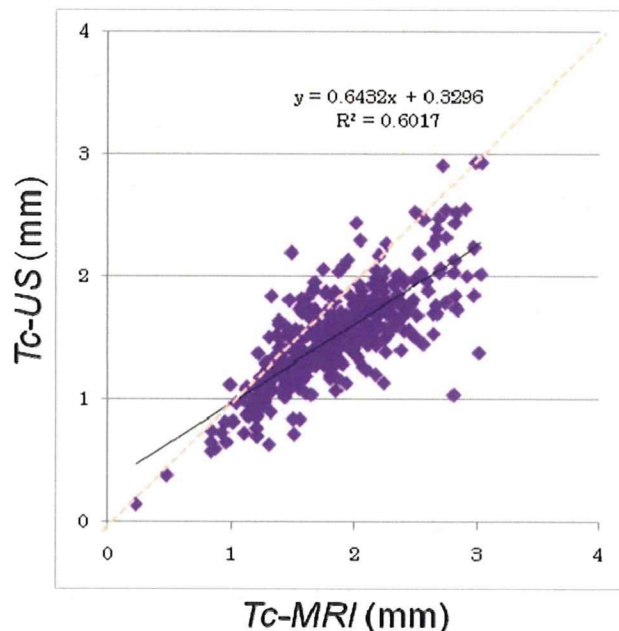


図 12 超音波モデル軟骨厚 ($Tc-US$) と MRI 軟骨モデル厚 ($Tc-MRI$) との関係 (59 歳男性)
有意な相関($p < 0.0001$)がみられた

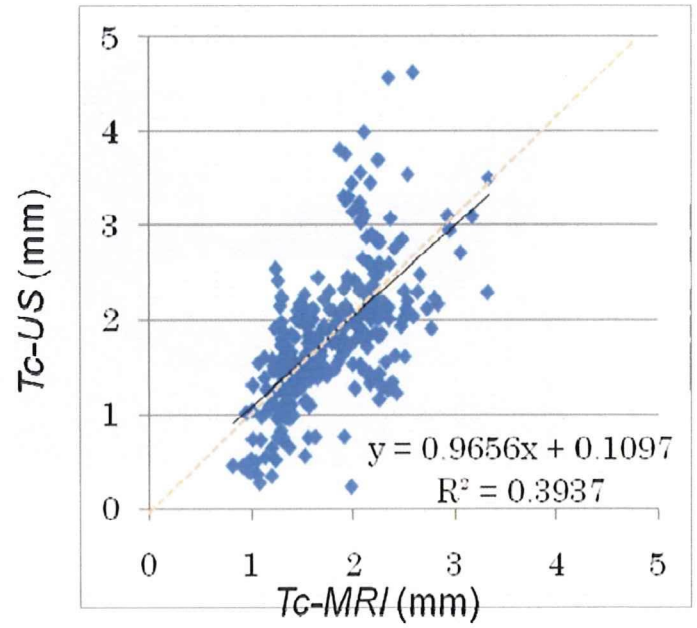
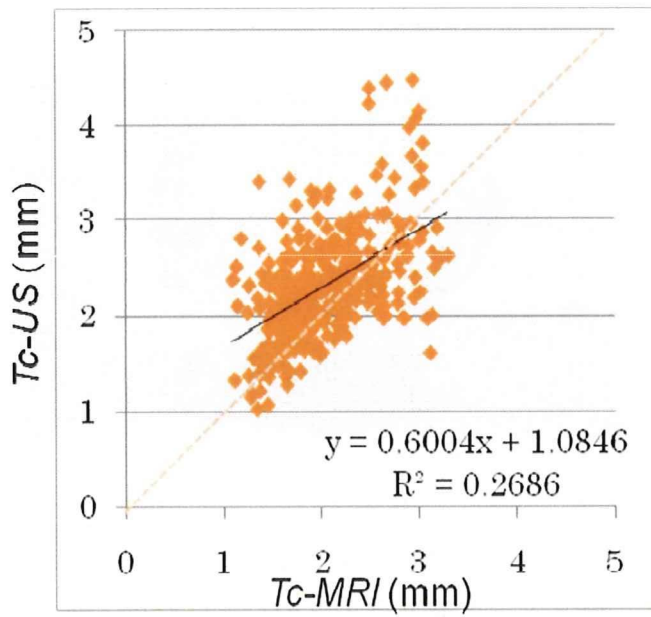


図 13 昨年度のボランティア (左: 36 歳男性、右: 59 歳男性) における超音波モデル軟骨厚 ($Tc-US$) と MRI 軟骨モデル厚 ($Tc-MRI$) との関係 (いずれにおいても有意な相関($p < 0.0001$)がみられた)

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

【H21. 4. 1～H22. 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
大西五三男、松山順太郎	【骨折とその治癒機転】超音波エコートラッキング法を用いた骨癒合判定法	森 諭史	Clinical Calcium	医薬ジャーナル社	東京	2009	682-690 (19巻5号)

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
宮坂好一、廣田浩二、酒井亮一、皆川栄一、大橋暁、大西五三男、中村耕三	超音波による関節軟骨音速の高精度計測法	超音波医学	36巻、supplement	S455	2009
飛田健治、大西五三男、松本卓也、大橋暁、別所雅彦、金子雅子、中村耕三	創外固定を用いたウサギ脛骨骨切モデルにおける低出力超音波パルスの効果 -マイクロCTを用いた3次元Bone Strength Indices評価-	日本創外固定・骨延長学会雑誌	21巻	78	2010
飛田健治、大西五三男、松本卓也、大橋暁、別所雅彦、松山順太郎、金子雅子、中村耕三	低出力超音波パルス治療の骨癒合リモデリング期に対する効果 マイクロCTを用いた仮骨の髓腔化・皮質骨化の定量評価	日本整形外科学会雑誌	83巻8号	S1239	2009
Tobita, Kenji; Ohnishi, Isao; Matsumoto, Takuya; Ohashi, Satoru; Bessho, Masahiko; KANEKO, MASAKO	- Effect of low-intensity pulsed ultrasound stimulation on gap healing in a rabbit osteotomy model evaluated by micro computed tomography-based 3-dimensional cross-sectional moment and cross-sectional moment of inertia	Transactions of 56th Annual Meeting of the Orthopaedic Research Society	35	0695	2010

Ohashi, Satoru; Ohnishi, Isao; Matsu moto, Takuya; Besho, Masahiko; Matsuyama, Juntaro; Tobita, Kenji; KANEKO, MASAKO; Nakamura, Kozo	Evaluation of the Accuracy of Articular Cartilage Thickness Measurement by Conventional and Real-time Spatial Compound Ultrason ography	Transactions of 56th Annual Meeting of the Orthopaedic Research Society	35	1364	2010

IV 研究成果の刊行物・印刷

CLINICAL CALCIUM

5

2009

Vol.19 No.5

特集

骨折とその治療機転

〔特集ゲスト編集〕

森 諭史

聖隷浜松病院 骨・関節外科部長



〔学術アドバイザー〕

大内尉義

東京大学大学院医学系研究科
加齢医学講座教授

三木隆己

大阪市立大学大学院
医学研究科老年内科学教授

松本俊夫

徳島大学大学院
ヘルスバイオサイエンス研究部
生体情報内科学教授

Ⓢ 医薬ジャーナル社

超音波エコートラッキング法を用いた骨癒合判定法

大西 五三男* 松山 順太郎**

骨癒合強度を定量的に診断することは骨折治療に重要であるが、現状ではX線写真による定性的な方法に依存している。超音波のエコー信号の位相変化を測定するエコートラッキング法(以下、ET法)を用い、骨癒合強度の定量測定法を開発した。本法を用い、脛骨骨折患者に対し骨癒合の強度判定を行った。下腿の近位・遠位を支持し、骨折部近傍において25Nの曲げ荷重を加え、骨折部の近位・遠位骨片の傾斜角(ET変形角)を測定した。正常な骨癒合過程が進行した症例では、ET計測による変形角の経時変化は指数関数的な減少を示し、骨癒合過程が定量的に評価可能であった。骨癒合が遷延した症例では変形角の減少はわずかで、停止した症例では、ET変形角の減少はなく、骨癒合不全であることが診断可能であった。ET法により非侵襲に骨癒合の進行と遷延が定量的に診断可能であった。本法は非侵襲で治療法を問わず適用できる利点がある。

Bone fracture and the healing mechanisms.

A New Method for Evaluation of Fracture Healing by Echo Tracking.

The Department of Orthopaedic Surgery, The University of Tokyo.

Isao Ohnishi

The Department of Rehabilitation, The University of Tokyo Hospital.

Juntaro Matsuyama

Assessment of bone healing on radiographs is not necessarily objective. A clinical system was developed to quantify the stiffness of healing fractures of the tibia in patients by the echo tracking (ET) method in a manner similar to a three-point bending test. The lower leg was supported. An ultrasound probe was placed on the proximal and distal fragments and a load of 25 N was applied. With a multiple ET system, two probes measured the displacement of five tracking points on each of the proximal and distal fragments of the tibia, thereby detecting the bending of the two fragments generated by the load. ET angle was defined as the sum of the inclinations of the proximal and distal fragments. Patients with tibial fracture treated by a cast or internal fixation were measured over time. In patients with radiographically normal healing, the bending angle de-

*東京大学大学院医学系研究科感覚・運動機能医学整形外科・講師(おにし・いさお)

**東京大学医学部附属病院リハビリテーション部(まつやま・じゅんたろう)

creased exponentially over time. However, in patients with nonunion, the angle remained the same over time. It was demonstrated that the ET method could be clinically applicable to evaluate fracture healing as a versatile, quantitative and noninvasive technique.

はじめに

臨床において、骨癒合は主にレントゲンの画像情報を基に診断されている。しかし、レントゲン画像による情報は、仮骨の形態変化をみているに過ぎず、骨折部の強度を評価していないため、骨癒合の評価は結局のところ主観的判断によるところが大きい。事実 Bhandari らは、444 名の整形外科医を対象に、脛骨骨幹部骨折の骨癒合をどのように評価しているかを調査した¹⁾。骨癒合の評価には X 線写真上で、仮骨のサイズ、皮質の連続性、骨折線の経時的な消退、患者の歩行能力や荷重支持の程度などが用いられていることが明らかになった。しかし、骨癒合の評価には医師間でかなりの相違があり、さらには、遷延治癒や骨癒合不全、また変形治癒の認識においては大きな相違があることが事実となった。つまり、現状において行われている骨癒合の診断法は決して十分であるとは言えない。

我々はこれらの問題点を克服し、非侵襲かつ定量的な骨癒合判定の可能な骨折の力学的評価法を新たに開発した。骨は荷重が負荷すると変形するが、その際、粘弾性体である骨は、荷重に対する変形(歪)の可逆性・非可逆性・時間依存性によって弾性・塑性・粘性といったさまざまな力学特性を示す。この変形(歪)を定量的に検出することにより、骨の力学的特性が評価できる。我々は、この骨の変形を非侵襲・非接触に検出するため超音波を用いた。超音波は骨表面で反射し、Bモード画像では骨表面を鮮明な高信号で描出することが可能である。しかし、Bモード画像による骨変形

の定量的評価は精度が不十分である。そこで骨(骨表面)の荷重にともなう変形を正確に計測するため、エコートラッキング法(以下、ET法)を用いた。ET法は、組織からの RF (radio frequency) エコー信号の位相を検出して、超音波の波長以下の精度で組織の微小変位を計測する技術である。我々は、生体において、骨の荷重負荷後の変形を正確かつ定量的に計測し、骨癒合判定を可能にする診断装置を開発し、臨床応用した。

ET法について

超音波測定において、Bモード画像における測定対象物の距離の測定精度は超音波の波長に依存する。例えば 7.5 MHz のプローブを用い測定した場合は、波長の距離分解能の限界である約 210 μm が精度となる。これに対し、ET法は、組織からの RF エコー信号の位相を検出して、超音波の波長以下の精度で組織の微小変位を計測する技術である。例えば、ある時刻 $t = t_0$ にある深さの組織が、超音波パルスの繰り返し周期 T の間に ΔZ だけプローブから遠ざかるように変位すると、RF 信号の位相は組織の変位 ΔZ に応じて微小時間 Δt だけずれる。ET法は RF 信号の初期設定した位相をトラッキングすることにより組織の微小変位計測を可能にしている(図 1)。この技術は 1970 年代に Hokanson らにより提案されて血管壁の変位計測に実用化された²⁾。この ET法を骨の微小変位を計測するために RF エコー信号を骨に特化する形で処理し、より高精度な測定が可能となる ET 計測システムを開発した。超音波診断装置に

ET : エコートラッキング, RF : radio frequency

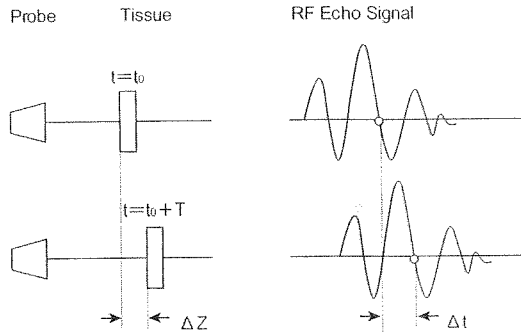


図1 エコトラッキング法の原理

時刻 $t = t_0$ にある深さの組織が、超音波パルスの繰り返し周期 T の間に ΔZ だけプローブから遠ざかるように変位すると、RF 信号の位相は組織の変位 ΔZ に応じて微小時間 Δt だけ変位する。ET 法は RF 信号の初期設定した位相をトラッキングすることにより、組織の微小変位を計測する。

(文献3より引用改変)

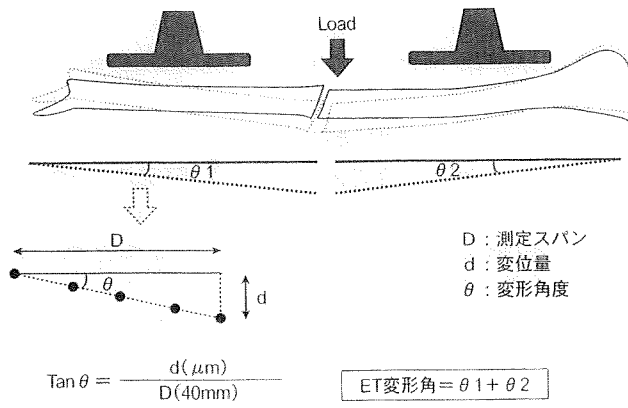


図2 臨床測定における評価法

骨折近傍に加えられた微小荷重により変形した骨表面の角度変化を、骨折近位遠位の2カ所ので ET 多点計測する。各々5点の測定点を直線回帰し、その直線の変位量と測定スパンから変形角度を算出し、ET 変形角を求める。この評価法により、超音波ビーム方向と測定面内での回転による併進がキャンセルされる。

(文献6より引用改変)

接続された 7.5 MHz リニアプローブから骨に超音波を照射する。骨表面からの受信 RF エコー信号は、診断装置内の専用インターフェイスを介してコンピュータに出力される。アナログ RF エコー信号をデジタル信号に変換し記録する。RF 信号から位相変化を検出する。この方法で骨表面の特定の変位を $2.6 \mu\text{m}$ の精度で計測する³⁾。

骨折の癒合について特に定量的評価が必要な部

位は、下肢の長管骨である。後療法における部分荷重歩行時の荷重量の設定には、骨癒合の定量的な判断ができれば非常に有用である。そこで、まず脛骨の骨幹部骨折を評価できるシステムを開発した。脛骨の3点曲げを行い、曲げ変形角度を ET によって計測する方法を開発した(図2)。すなわち、脛骨の近位骨片と遠位骨片に5点ずつトラッキングポイントを設け、各点の荷重後に生ず

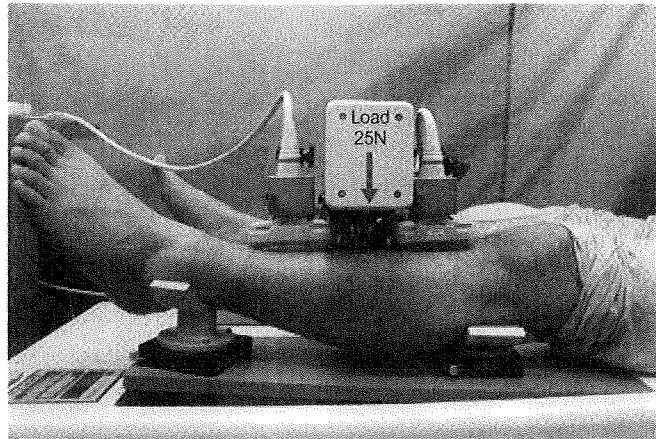


図3 自動荷重装置による臨床測定

荷重方向は脛骨前内側面に垂直に行う。前内側面に垂直に設置されているプローブに平行になるよう荷重する。荷重開始直前より抜重後までET計測を行う。健常者の脛骨においても変形角の検出が可能である。

(筆者ら提供)

る変位を計測することで、曲げ角度を測定した。詳細は省くが、ETによる変位角の計測精度は0.004度であった⁴⁾。

本法を用いて脛骨幹部骨折の症例の骨癒合を定量的に評価した。3点曲げ荷重を行うことにより荷重による変形と併進方向をビーム方向に一致させ、測定誤差を減少させることができる。また、プローブを下肢に固着させる測定では荷重に対しプローブ自体が併進することが考えられるため、プローブを外部より保持する計測法を用いた。評価法は、荷重部の近遠位部で曲げにより生じる骨の変位角を測定する方法を用いた。

金属平板上のマグネット式の3関節アームに装着されたプローブを脛骨表面に垂直に設置する。これは、得られた骨表面のAモード波形のAmplitudeが最大になる点とする。フォースゲージを用い脛骨に荷重を加える。この際、荷重方向は脛骨前内側面に垂直に行うが、これは前内側面に垂直に設置されているプローブに平行になるよう

荷重する。荷重開始直前より抜重後までのET計測を行う。健常者の脛骨においても変形角の検出が可能である(図3)。

脛骨幹部骨折症例において、ET変形角を用いて経時的に評価した。測定時には、B画像により骨折部位を特定し、近位もしくは遠位の骨折断端より30mm程度の健常皮質骨部を荷重中心とし、骨折近位と遠位の皮質骨部にそれぞれプローブを設置した。また、金属プレートによる内固定治療を行っている症例では、荷重点・近遠位の測定点いずれも金属プレート上に設置し、荷重によるプレートの変形角を検出した。

測定は2～4週程度の間隔で実施される整形外科の受診時に行い、経時的なET変形角度の測定を行い評価した。各回の測定は各5回行い、5回の平均と標準偏差を算出した。また、受診時には同時にレントゲン撮影も行い、レントゲンとの比較検討を行った。