

延長骨のリモデリング

—Pixel Value Ratio を用いての検討—

大阪府立母子保健総合医療センター整形外科

松村 宣政・川端 秀彦・田村 太資
杉田 淳・鈴木 歩美

要旨 【目的】骨延長を施行すると、出現した間隙には仮骨が形成される。多くの症例において仮骨は延長終了後に単純 X 線画像にて次第に濃度が増し、その後中心部に髓腔が開通する。しかし、そのリモデリング過程やリモデリング完了までに要する期間については不明な点が多い。そこで大腿骨延長を施行した 5 例 9 骨について画像上の Pixel Value 値を計測してリモデリング過程を追跡した。

【結果】延長前の骨断面を単純 X 線画像の Pixel Value 値で表示すると、皮質骨部に頂点をもつ 2 峰性のグラフで示された。延長終了直後の仮骨断面ではそのようなピークが存在せず、不均一な値を示した。抜釘時の延長仮骨は管状構造を有しておらず、中央に最大値をもつ 1 峰性のグラフとなった。最も経過の速い症例では延長終了後 12 か月で再度 2 つのピークが存在するようになり、皮質骨と髓腔の存在が示唆された。しかしその一方で延長終了後 24 か月経過しても元の管状構造が構築できないままの症例も存在した。

【まとめ】単純 X 線画像上の Pixel Value 値で仮骨が管状骨構造を再獲得するまでのリモデリング過程を追跡することができた。

はじめに

骨延長術では、延長器装着手術を行った後、単純 X 線画像にて仮骨を確認しながら延長を行い、目標の延長量に到達した後に仮骨の成熟を待って抜釘する。治療はこの段階で終了するが、その後も仮骨は形態学的、力学的に変化していく。長管骨は周囲の皮質骨と中心部の髓腔からなる管状構造を有しているが、抜釘時の延長仮骨は管状構造を有しておらず、単純 X 線画像でも比較的均一な濃度で示される骨である。長期的にこの延長仮骨を単純 X 線画像で追跡すると、次第に辺縁部では濃度が増し、中心部では濃度が減じて髓腔が

再開通し、元来の管状骨構造を呈するようになる。本研究ではこの仮骨のリモデリング過程を単純 X 線画像上の Pixel Value 値(以下、PV)を計測することによって追跡し、リモデリング完了までに要する期間とその過程を調べた。

対象および方法

2005 年 8 月～2008 年 8 月までに大腿骨の骨延長術を施行した症例のうち、延長終了後に 2 年以上の経過が追跡可能であった症例 5 例 9 肢(男性 1 例、女性 4 例)について検討した(表 1)。骨折などの合併症を生じた症例は含まれていない。使用した延長器は Ilizarov 創外固定器 2 例 4 肢、EBI

Key words : bone lengthening(骨延長), matured callus(成熟仮骨), pixel value ratio(Pixel Value 比)

連絡先 : 〒 594-1101 大阪府和泉市室堂町 840 大阪府立母子保健総合医療センター整形外科 松村宣政
電話(0725)56-1220

受付日 : 平成 23 年 2 月 24 日

	疾患	手術時年齢	性別	延長量	EFI
症例 1 右	軟骨低形成症	14 歳 11 か月	女性	72 mm	55.1
症例 1 左	軟骨低形成症	14 歳 11 か月	女性	71 mm	55.9
症例 2 右	軟骨無形成症	14 歳 1 か月	女性	62 mm	31.1
症例 2 左	軟骨無形成症	14 歳 1 か月	女性	62 mm	31.1
症例 3 右	偽性軟骨無形成症	8 歳 9 か月	女性	41 mm	40.2
症例 3 左	偽性軟骨無形成症	8 歳 9 か月	女性	39 mm	42.3
症例 4 右	偽性軟骨無形成症	9 歳 0 か月	男性	50 mm	32.4
症例 4 左	偽性軟骨無形成症	9 歳 0 か月	男性	50 mm	32.4
症例 5	片側肥大症	13 歳 5 か月	女性	22 mm	60.0

表 1.
症例一覽

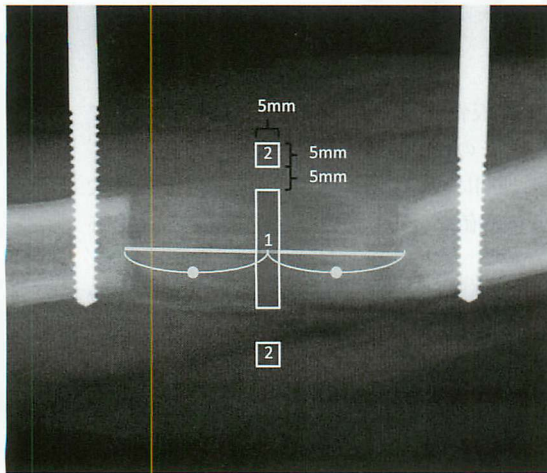


図 1. Pixel Value の計測方法. 本文参照

1. 仮骨の Pixel Value
2. 軟部組織の Pixel Value

$$\text{Pixel Value Ratio} = (\text{仮骨の Pixel Value}) / (\text{軟部組織の Pixel Value})$$

社製 dynafix rail system 2 例 4 肢, Orthofix 社製 slide lengthener 1 例 1 肢であった。骨延長術施行時の平均年齢は 11.8 ± 3.1 歳であった。疾患の内訳は軟骨低形成症 1 例 2 肢, 軟骨無形成症 1 例 2 肢, 偽性軟骨無形成症 2 例 4 肢, 片側肥大症 1 例 1 肢であった。片側肥大症を除く 4 例 8 肢については両側の大腿骨の延長を施行した。片側肥大症の 1 例では健側大腿骨を延長した。骨延長量は平均 $5.2(2.2 \sim 7.2)$ cm, 延長期装着期間は平均 218 (132~397) 日であった。EFI(external fixation index)は平均 42.3(31.1~60)であった。

大腿骨正面単純 X 線写真を ① 手術前日, ② 延長終了時, ③ 抜釘時, ④ 延長終了後 6 か月, ⑤ 延長終了後 12 か月, ⑥ 延長終了後 24 か月に撮影した。撮影された単純 X 線画像から Image J(NIH)

を用いて画像の PV を算出した。具体的には図 1 のように仮骨中央に 5 mm 幅の関心領域を設定し, その PV を計測して骨軸に沿って平均化し, 仮骨横断面の PV の分布図を作成した。次に, 仮骨境界より 5~10 mm 骨外に位置する内外側 2 か所の 25 mm^2 の軟部組織の PV の平均値を求め, 軟部組織の PV とした。仮骨の PV を軟部組織の PV に対する比率(Pixel Value Ratio; 以下, PVR)で算出した。

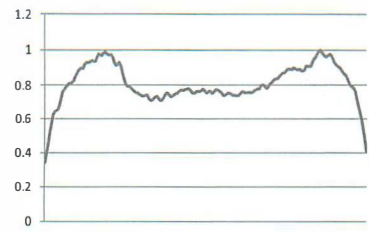
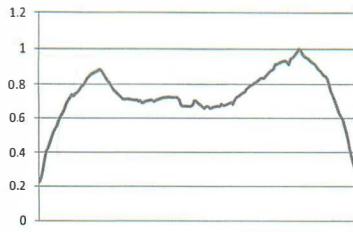
結果

術前的大腿骨骨切り予定部において上記の方法で PVR を算出し, グラフを描くと皮質骨部に頂点をもつ 2 峰性の波形が得られた。最大値を 1.0 とすると髓腔部中央の値は 0.6~0.8 であった。しかし, 延長終了時には 2 峰性の波形が消失し, 全体にわたって振幅の大きい, 乱雑な波形を示した。抜釘時には概ね, 中央部に最大値をもつ 1 峰性の波形を示した。その後, 速い症例では延長終了後 6 か月で再度 2 つの頂点が観察されたが, その位置は術前のものより中央よりに存在していた。延長終了後 12 か月では多くの症例で 2 峰性の波形を示した。延長終了後 12 か月・24 か月と経過するにつれて 2 つの頂点はより明確となり, 位置も次第に術前に近い部位になっていった。

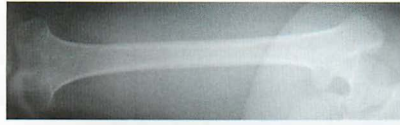
次に EFI が 55.1 および 31.1 と異なるが, 性別・手術部位・原疾患・延長器が同じで, 骨延長量・手術時年齢などの条件が類似する症例 1 と症例 2 の右側に着目して比較検討した(図 2)。延長終了時に比較すると, 症例 2 では振幅は大きいが全体としては中心部に頂点をもつ 1 峰性の波形に

症例1

症例2

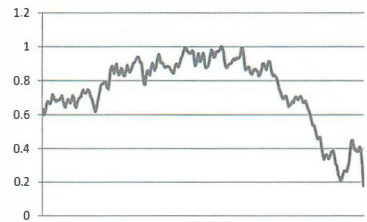
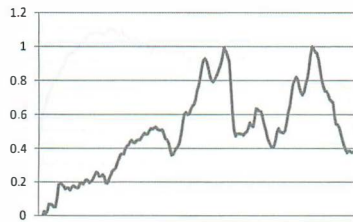


a. 術前

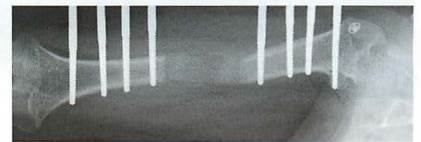
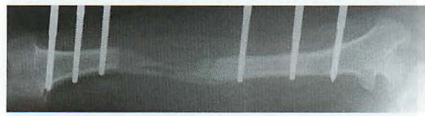


症例1

症例2

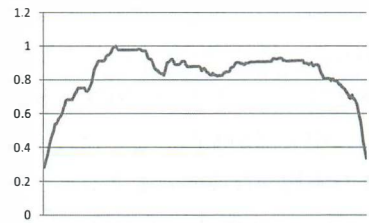
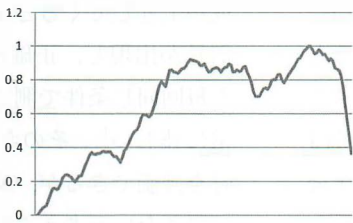


b. 延長終了時



症例1

症例2



c. 延長終了後6か月

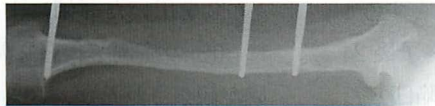
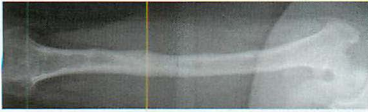
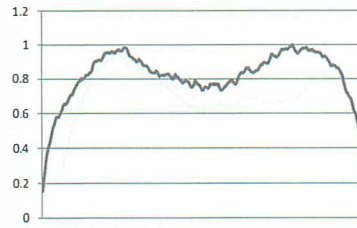


図 2. 症例 1：右大腿骨延長(EFI=55.1)と症例 2：右大腿骨延長(EFI=31.1)の比較

症例1

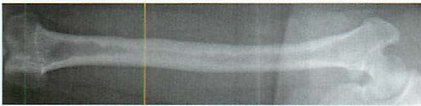
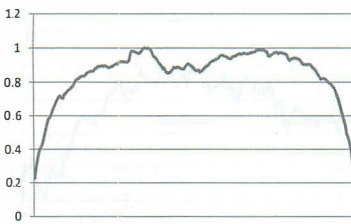


症例2

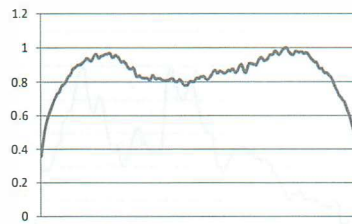


d. 延長終了後 12 か月

症例1



症例2



e. 延長終了後 24 か月

図 2. つづき

なっていたのに対し、症例1では全体的に不均一であった。延長終了後6か月の波形を比較すると症例2は頂点が中央から内外側の2か所に移るとともに中央部が陥凹してきたのに対して、症例1はまだ不均一な波形のままであった。延長終了後12か月では症例2は手術前に近い波形を示したのに対し、症例1はようやく中央を頂点とする1峰性の波形を示すようになった。延長終了後24か月においても、症例1はやや中央部が陥凹しただけで12か月前とほとんど変化がなかった。

考 察

過去には、エコー・CT・MRI・DEXA・PVなどを使用して骨延長により出現した仮骨の成熟を評価している報告がみられる。

エコーは安価で簡便な方法であるが、仮骨の濃

度が上昇してくると反射の影響で画像上に高輝度信号が出現し、正確な評価ができなくなる³⁾。また毎回同じ条件で測定し、比較検討することが非常に難しい¹⁾。そのためエコーでは術後早期の仮骨を評価できるが、成熟までを長期的に追うことはできないと考えられる。

CTを用いた評価によると、創外固定器抜去時に30%の症例で仮骨の周囲に沿って骨皮質の形成が観察されたが、70%の症例では不規則な仮骨形成が観察されるにとどまった。不規則な仮骨は次第に吸収され、全例で全周性に皮質骨が形成され、抜釘後18か月で髄腔の開通がみられた⁷⁾。CTを用いるとリモデリングの過程を確認できるが、頻回な撮影は放射線被曝の問題を有している。

Tjernstromらは、MRIを用いて仮骨の中心と周辺における画像上の輝度変化を調べて仮骨の成

熟過程を調査し、創外固定器抜去時には仮骨中心部に骨髄のシグナルは存在しないが、術後6か月で仮骨中心部に骨髄のシグナルが出現し、最終的に辺縁に皮質骨を示す構造が全周性に出現するまでに1年の歳月がかかったと述べている⁷⁾。MRIでリモデリング過程を追跡することは可能であるが、撮影が他の手段ほど簡便ではなく、経済的負担も考慮に入れなければならない。

DEXAを用いた仮骨の評価は数多くの報告がある^{1)~4)6)8)}。SaranらはDEXAの結果が仮骨の強度と相関するために創外固定器抜去時期の指標としても使用できると報告しており⁶⁾、仮骨の強度面からの成熟度を測る上でも有用な方法であると考える。EyresらはDEXAを用いて延長仮骨の量と形成速度を長期間にわたって追跡することができたと報告し³⁾、彼らはDEXAを用いて仮骨の中心部と辺縁部のBMDの差を検出することによって仮骨の成熟を調べている²⁾。術前的大腿骨のBMDを計測し、縦軸に骨密度、横軸に骨幅をとってグラフを作成すると、内外側皮質骨部に頂点が存在する2峰性のグラフが描かれ、術後5か月の延長仮骨において同様のグラフを作成するとピーク値は術前より低いものの元の皮質骨部付近に頂点をもつグラフが得られたと述べている。この結果は延長仮骨のリモデリング過程の一端を表しており、延長仮骨の横断面における骨密度変化を経時的に追跡していくことで仮骨の成熟過程を観察できると考えられる。

HazraらはDEXAを用いて計測した骨密度とPVには相関係数0.79の相関があり、PVは仮骨の強度を示していると報告している⁴⁾。また、創外固定器抜去の至適時期についてPVを用いて評価した方法がDEXAを用いた方法よりも優れていたという報告がある⁸⁾。以上の報告をふまえて、我々は最も簡便で安価な方法として、経時的に撮影された単純X線画像上のPVを計測することで延長仮骨の成熟過程を追跡することとした。

単純X線画像を撮影する条件は厳密には毎回異なる。そこでHazraの方法に準じて、軟部組織

に対する仮骨の値を比として計測することで条件を一定にできると考えた。仮骨のPixel Value値を測定する場所として延長終了時に最も仮骨の出現が遅い中央部²⁾に幅5mmの関心領域を設定した。軟部組織のPVを測定する場所は骨辺縁から5mmから10mmの骨外に設定した。仮骨形成が良好な症例では元の長管骨よりも太い仮骨が形成される症例があるが⁹⁾、5mm離すことで純粋な軟部組織のPVを測定することが可能となる。

術前の長管骨のPVRを計測しグラフを描くと、Eyresら²⁾³⁾の描いたDEXAで測定した骨密度のグラフにほぼ合致した。PVRのグラフにおける頂点は内外側の骨皮質を表している。PVRは延長直後は頂点のない乱雑な値をとるが、次第に中央部を頂点とする1峰性のグラフとなり、仮骨のリモデリングに伴って頂点が内外側2つになるとともに中央部が陥凹してくることが経時的に観察された。単純X線画像と照らし合わせて考えると中央部の陥凹は髓腔の開通を示し、内外側のピークの出現は皮質骨の形成を表していると考えられた。

しかし、抜釘後、単純X線画像で長期間追跡しても仮骨部分が硬化したままで髓腔の開通が得られない症例があった。それらの症例では骨形成が不良でEFIが大きい傾向があった。そこでEFIが異なる2症例間(症例1, 2)で比較を行った。術前のPVRを描いたグラフは両者とも皮質骨部を頂点とする2峰性のグラフであった。延長終了時において比較するとEFIが小さい症例では早くも中心部を最大とする1峰性のグラフを示したのに対し、EFIが大きい症例では全体的に粗雑であった。延長終了後12か月において、前者は手術前に類似するグラフを示したのに対し、後者はようやく中央をピーク値とする1峰性の波形で示されるようになった。EFIの良好な症例では延長終了後12か月と24か月で変化しないことから考えると、延長終了後約1年でリモデリングが完了していることが示唆された。この結果はCTやMRIでリモデリング過程終了までを追跡した過去の報

告⁷⁾にほぼ合致した。しかし一方で EFI の大きい症例では延長終了後 24 か月経過しても中央部がわずかに陥凹しただけで、単純 X 線画像上も髄腔の開通が得られていない。さらなる時間を経て髄腔構造が構築されてくるのか、あるいは中途半端な髄腔開通だけでリモデリングが終了するのかについては更に長期的な観察が必要である。髄腔開通が不十分な管状骨は構造上の脆弱性が存在し、骨折などの合併症が危惧されるために慎重なフォローが必要であると考えられる。

まとめ

- 1) 単純 X 線画像における PVR で延長骨のリモデリング過程を追跡した。
- 2) 仮骨形成が良好な症例では髄腔がすみやかに再開通し、延長終了後 12 か月でリモデリングが完了した。
- 3) 仮骨形成が不良な症例ではリモデリングが生じにくく、長期間経過しても不十分な形で終了する可能性がある。

文 献

- 1) Babatunde OM, Fragomen AT, Rozbruch SR et al : Noninvasive quantitative assessment of bone healing after distraction osteogenesis.

HSS J 1 : 71-78, 2010.

- 2) Eyres KS, Bell MJ, Kanis JA et al : New bone formation during leg lengthening. Evaluated by dual energy X-ray absorptiometry. J Bone Joint Surg Br 75 : 96-106, 1993.
- 3) Eyres KS, Bell MJ, Kanis JA et al : Methods of assessing new bone formation during limb lengthening. Ultrasonography, dual energy X-ray absorptiometry and radiography compared. J Bone Joint Surg Br 75 : 358-364, 1993.
- 4) Hazra S, Song HR, Biswal S et al : Quantitative assessment of mineralization in distraction osteogenesis. Skeletal Radiol 37(9) : 843-847, 2008.
- 5) Venkatesh KP, Modi HN, Devmurari K et al : Femoral lengthening in achondroplasia. J Bone Joint Surg Br 91(12) : 1612-1617, 2009.
- 6) Saran N, Hamdy RC : DEXA as a predictor of fixator removal in distraction osteogenesis. Clin Orthop Relat Res 466 : 2955-2961, 2008.
- 7) Tjernstrom B, Thoumas KA, Pech P et al : Bone remodeling after leg lengthening : Evaluation with plain radiographs and computed tomography and magnetic imaging scans. J Pediatr Orthop 12 : 751-755, 1992.
- 8) Zhao L, Fan Q, Venkatesh KP et al : Objective Guidelines for removing an external fixator after tibial lengthening using Pixel Value Ratio. Clin Orthop Relat Res 467 : 3321-3326, 2009.

Abstract

Remodeling of Matured Callus After Bone Lengthening : Evaluation with Pixel Value Ratio on Plain Radiograms

Nobumasa Matsumura, M. D., et al.

Department of Orthopaedic Surgery, Osaka Medical Center and Research Institute for Maternal and Child Health

【Introduction】 During bone lengthening, callus is generated in the bone gap. After maturation of callus the callus gradually remodels its architecture. We followed the callus with Pixel Value Ratio on plain radiograms to know how long it will take to finish remodeling.

【Patients and Methods】 We followed 9 femurs in 5 children. The average age was 11.8 years at operation. All were gradual lengthening and were followed more than 2 years after stop lengthening. Plain radiograms were periodically taken. In each film, we set 5 mm thickness rectangular zone at the center of the callus as location of interest (LOI). Pixel values (PV) in the LOI were divided with the average PV of the soft tissue to define the pixel value ratio (PVR). Distribution of the PVR was evaluated.

【Results】 The PVR of the original bone showed two peaks representing its tubular architecture. Just after the distraction period, the PVR showed the inhomogeneous value. The remodeling had completed within 1 year in cases with good callus formation and its PV got two peaks again. But in cases with poor callus formation, the remodeling was poor and its PVR distribution did not restored.

【Conclusions】 We could follow the callus remodeling with PVR on plain radiograms. The remodeling finished within a year as far as the callus formation was good.