

成長期における長管骨骨幹部仮骨延長法が 骨端板に及ぼす影響についての実験的研究

新潟大学整形外科科学講座（主任：田島達也教授）

本 間 政 文

An Experimental Study on the Effect of Limb Elongation
by Callotasis on the Growth Plate

Masafumi HOMMA

*Department of Orthopedic Surgery
Niigata University School of Medicine
(Director: Tatsuya TAJIMA)*

The effect of callus distraction on the proximal and distal growth plates of the elongated bone was investigated roentgenologically and histologically in 68 growing rabbits. The right tibia was elongated by 0.25 mm every 12 hours in 24 rabbits, 0.5 mm in another 24 rabbits, 1.0 mm in 12 rabbits and 1.5 mm in 8 rabbits. The total amount of elongation in each group reached 42 mm, which was roughly equal to 36 to 48% of the length of the contralateral tibia kept untreated as the control. Four rabbits of 0.25 mm group were sacrificed every two weeks and four rabbits of each of other three groups were sacrificed every week. The investigation led to the following conclusions.

1. The callus formation was good in 0.25 and 0.5 mm/12 hrs group but poor in 1.0 and 1.5 mm/12 hrs group.
2. In 0.25 mm/12 hrs group, the longitudinal epiphyseal growth was scarcely inhibited during an entire period of elongation.
3. In 0.5 mm/12 hrs group, the longitudinal epiphyseal growth was not inhibited until the amount of elongation reached about 23% of the length of contralateral tibia. Beyond this point, the inhibition of the growth gradually increased with increasing elongation.
4. In 1.0 mm/12 hrs group, the longitudinal epiphyseal growth was more markedly affected than in 0.5 mm/12 hrs group. The significant narrowing of the growth plate was observed at the 1st week of elongation.

Reprint requests to: Masafumi HOMMA,
Department of Orthopedic Surgery,
Niigata University School of Medicine,
Niigata City, 951, JAPAN.

別刷請求先: 〒951 新潟市旭町通1番町
新潟大学整形外科科学教室

本間政文

5. In 1.5mm/12hrs group, the epiphyseal growth was most severely inhibited among all groups.
6. The growth rate was accelerated at the 1st or 2nd week in 0.25, 0.5, 1.0mm/12hrs group. This growth activation could be ascribed not only to the operative stimulus but also to the compression force which met the optimal condition to stimulate the growth plates in the initial period of elongation.

Key words: limb elongation, growth plate, callotasis, physal distraction,
脚延長, 骨端板, 仮骨延長法, 骨端板牽引法.

I. 緒 言

脚長差は、種々の先天性疾患や下肢長管骨の骨端板損傷などで起こるため、かつて脚長差を来す本邦での最大の原因であったポリオ²⁵⁾が消滅した現在でも、脚長差の調整を必要とする症例が少なくない。調整の方法には、骨端板閉鎖術¹⁴⁾や epiphyseal stapling⁵⁾などを健側肢に行ってその永続的短縮ないしその成長の一時的抑制か、患側肢の延長かいずれかをを行わねばならない。前者は大きな脚長差の調整は困難で、staple を除去するタンミングを誤ると、骨端板早期閉鎖をおこすなどの欠点がある。

一方患側肢の延長には、骨端板に牽引力を加え、その部位で延長を行う骨端板牽引法と、骨幹部で骨切りを行ってその部で延長を行う方法の2つがある。どちらの方法にせよ、年少児に対して脚延長を行うには、延長効果を損なわないために、延長後にも患側の骨端板機能が健側と同じかそれに近いレベルに維持されている必要がある。

骨端板牽引法は、骨端板の残存する小児にはまず第一選択となる延長方法であるが、骨端板離開や早期閉鎖が起こり易いため、骨端板閉鎖直前の年長児に適応が限られていた²⁹⁾。しかし1986年 De Bastiani¹⁰⁾¹¹⁾は12時間ごとに 0.25mm という緩徐な速度で骨端板牽引を行えば骨端板離開は起こらず、延長後の骨端板機能も温存されたと報告し、自然の骨端板閉鎖までに長年月が期待される年少児にもこの方法の適応が拡大されたかに見えた。ところがその後、この速度で牽引しても骨端板離開や早期閉鎖を来した臨床例が著者の自験例も含め内外で報告⁷⁾¹⁷⁾¹⁹⁾³¹⁾され、この牽引方法にはまだ問題があることが判明した。

一方後者の骨切り部で延長する方法は、骨端板閉鎖後の成人に対して用いられた方法で、近年ソビエト連邦の Ilizarov^{21)~24)}の方法に準じ緩徐に延長を行い、骨延長

部を骨移植ではなく仮骨により充填させる仮骨延長法 (callotasis) が一般的に用いられている。

そこで年少児の脚延長には、骨端板機能の温存という点から考えてこの仮骨延長法の方が骨端板牽引法より安全と考えられるが、この場合、延長される長管骨の近位遠位両骨端板には骨端板牽引法における牽引力とは逆に、軟部組織の緊張がもたらす圧迫力が加わることになる。しかしこの圧迫力が骨端板機能を促進するか抑制するかは十分明らかにされているとはいえない。

本研究の目的は、骨端板閉鎖まで長年月が期待される年少児にも骨端板機能を大きく損なうことなく仮骨延長法が用い得るかどうかを検討することである。そのために種々の延長量と延長速度で仮骨延長法を行い、それによって生ずる骨端板への圧迫力が及ぼす影響を、X線学的、組織学的に検討した。

II. 材料ならびに方法

A. 材 料

生後7~8週 (体重 1.4~1.8kg) の日本白色種系雑家兎68羽を用いた。

B. 手術方法

ケタラルール (40mg/kg) とセラクタール (3mg/kg) の混合筋注により麻酔導入後、家兎の右下腿前内側中央に約 2cm の縦切開を加え、脛骨骨膜も同皮切に沿って縦切る。次に脛骨骨膜下に径 1.5mm の K-wire で水平に6~8個の骨孔を作り、この骨孔の近位と遠位で、各骨端板より1~1.5cm 離れた骨幹部に2本ずつ径 1.5mm の k-wire 刺入する。これらに自作の turnbuckle を接続し、手動的に骨孔に沿って骨折を起こさせる。骨膜はできるかぎり縫合し、左側は全く侵襲を加えない対照側とした。

C. 延長方法

1) 延長量

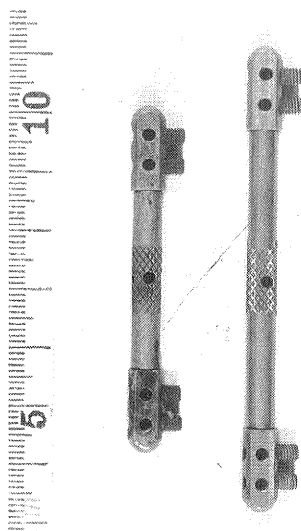


図1 家兎の脚延長に用いた真鍮製の turn-buckle. 長さが20mm異なるものを2種作成したが、どちらも21mmまで延長が可能で pitch は1回転1mmである。

自作の turnbuckle は1回転1mmの pitch であり21mmの延長が可能である。そこで長さの20mm異なるものを2種類作り、21mm以上の延長を行う時は、長い turnbuckle に付け換えて延長を継続し、最大で42mmまで延長できるようにした(図1)。本実験で用いた家兎の下腿骨長径は延長開始時9cm前後であり、従ってこの turnbuckle によって、最大で健側肢の40%前後の延長を見込んだ。

2) 延長速度

手術操作によって侵襲を受けた骨髄血行の回復を考慮して、術後7日目より延長を開始した。延長速度は以下の4群に分け、各群とも turnbuckle が最大延長量に達する42mmまで延長を行った。すなわち、12時間ごとに0.25mm延長する家兎24羽、0.5mm延長する家兎24羽、1.0mm延長する家兎12羽、1.5mm延長する家兎8羽である。最も緩徐な12時間ごとに0.25mm延長群のみ延長開始から14日おきに4羽ずつ屠殺し、他の3群は7日おきに4羽ずつ屠殺した。各群の最大延長量に達するまでの期間は各々12, 6, 3, 2週間である。

D. 評価方法

1) X線学的評価(図2)

屠殺後、両脛骨の軟X線撮影を行い、精度1/20mmのノギスにより両脛骨全長(右:D, 左:d)と骨切り部を挟んだ2本のK-wireの間隔(L)を計測し、こ

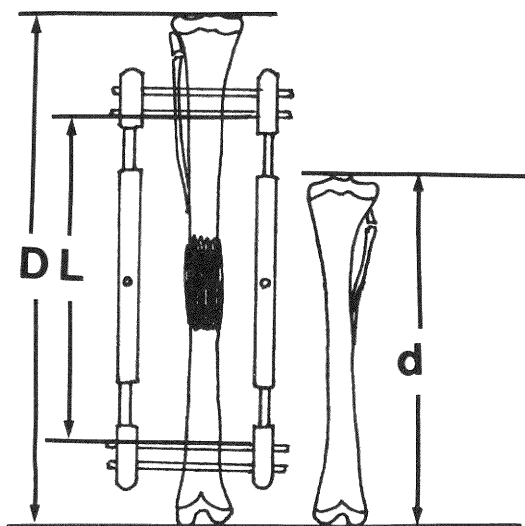


図2 X線学的評価法

- D: 屠殺時の右延長側脛骨全長
 - d: 屠殺時の左対照側脛骨全長
 - L: 骨切りレベルの近位・遠位に隣接した2本のK-wireの間隔
 - 1: 延長開始時の2本のK-wireの間隔(X線計測によらない実測値)
 - e (延長距離) = L - 1
 - 延長率(%) = $e/d \times 100 = (L-1)/d \times 100$
- 骨幹骨切り部における延長距離を差し引いた骨端板実質成長による脛骨長の比較。
- 右: D - e (延長距離除外脛骨長)
左: d (対照側脛骨長)

れから延長開始時のK-wireの間隔(1)を引いて実際の延長距離($e=L-1$)を求め、さらにこれを対照側全長(d)で除して、延長率を%で表した。また骨幹部延長を施した右脛骨近位遠位両骨端板での成長量と左側のそれとを比較するため、右脛骨長より延長距離を差し引いた距離(D-e)(以下、延長距離除外脛骨長)と左の脛骨長(d)とを比較した。

2) 組織学的評価

軟X線撮影後、両脛骨近位端と遠位端を2cmの長さで切り出し、さらに各々を前顔面方向に半切し、前半分は非脱灰標本用に、後半分は脱灰標本用とした。前者は10%ホルマリン固定の後、エタノール脱水、メチルメタクリレート包埋をへて、マルトークリスタルカッターにて厚さ約300 μ mの前顔面切片を切り出し、50 μ mの研磨標本を作成した²⁰⁾。この切片にtoluidine blue染色を行い、バルサム封入後、半自動解析装置(Mutoh、

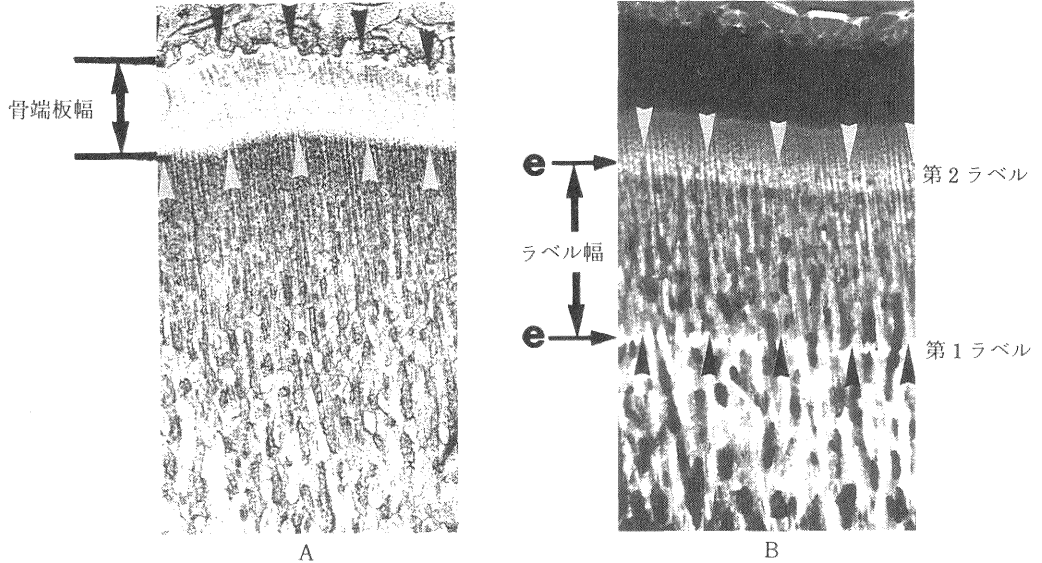


図3 骨端板の幅と成長率の計測

- A: 普通光観察 (toluidine Blue 染色, $\times 10$).
骨端板の幅 (矢印) を, 成長軟骨細胞の円柱状配列に沿った方向でデジタルマイザーにて計測する.
- B: 同一視野の蛍光観察 (UV-2A 励起, $\times 10$)
第1ラベルと第2ラベルの最も骨端核側 (e) の間隔 (矢印) を同様にデジタルマイザーで計測する.

Tokyo) を用いて, 落射蛍光顕微鏡 (Nikon, Tokyo) を用いた普通光観察により骨端板の幅を, 骨標識剤を用いた蛍光 (UV-2A 励起) 下の観察により骨端板における成長率 ($\mu\text{m}/\text{day}$) の計測を行った¹⁶⁾ (図3). 脱灰用の後半分は10%ホルマリン固定, キ酸脱灰後, パラフィン包埋し, 前額面にて $3\mu\text{m}$ の薄切片を作り, toluidine blue 染色を行って, 非脱灰標本の所見の参考とした. 2回骨標識には屠殺4日前にカルセイン (3,3'-Bis [N-N-di (carboxymethyl)-aminomethyl]-fluorescein 15 mg/kg) を筋注し, その72時間後に oxytetracycline 25 mg/kg を筋注した. 線状に並んだ2本の蛍光の距離を計測し, その値を投与間隔の日数の3で除して1日の平均を求め対照側の同部位の計測値と比較した.

3) 統計学的解析

各延長群における延長距離除外脛骨長と対照側脛骨長, 骨端板幅, 成長率の計測値について延長側と対照側で t 検定を行った.

III. 結 果

A. 12時間ごと 0.25mm の延長群

1) X線学的所見

延長中に骨切り部が早期骨癒合をおこした家兔が, 延長開始後6, 8, 10週延長群で各1羽, 12週延長群で2羽あった. また4週延長群で骨折した家兔が1羽, 10週延長群で turnbuckle のゆるみのため予定延長量が得られなかった家兔が1羽あり, これらの計7羽は計測から除外した. この延長群のX線所見を図4に示す.

延長距離除外右脛骨長と左脛骨長を比較 (図2参照) すると, 延長開始2週後には延長側が長い, 4, 6, 8週と週を追うに従ってその差は, 1.0, 0.92, 0.58mm と減少し, 延長量が30%に及ぶ10週以降は逆転して対照側の方が長くなっていた. しかし両側の実測値に有意な差は無かった (図5).

2) 組織学的所見

(a) 脛骨骨端板の幅 (図6)

近位骨端板の幅は両側とも時間経過とともに漸次減少し, 延長後2週から延長側が対照側より狭く, 12週まで

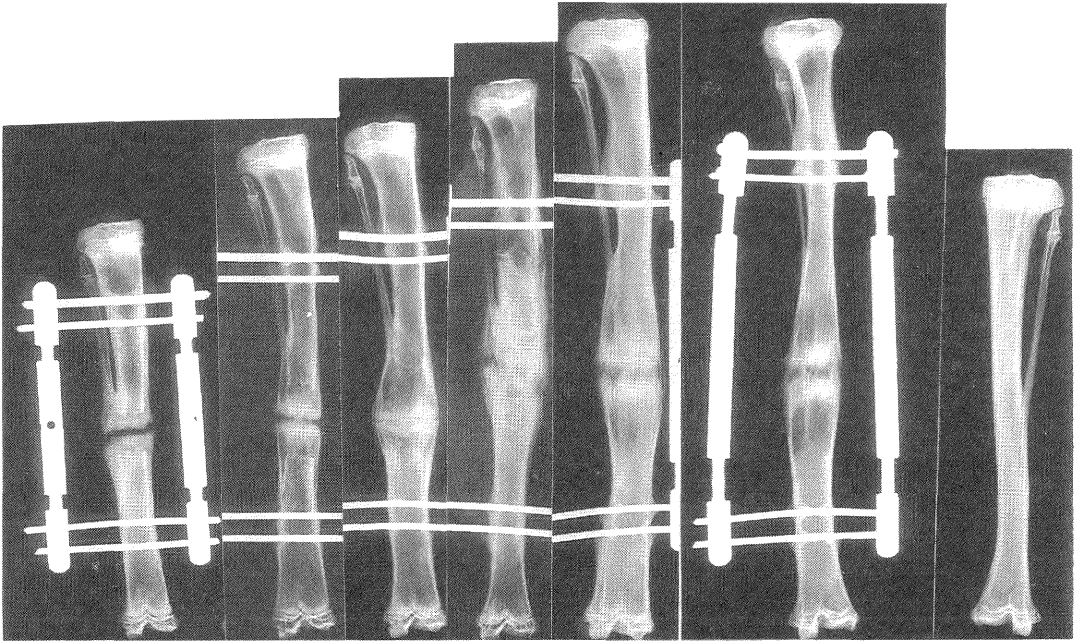


図 4 12時間ごと 0.25mm 延長群の X線所見

2週おきに屠殺した各群の softex 計測による延長率の平均は、左より各、9.1, 14.2, 18.5, 24.7, 30.3, 36.3%であり、延長部の仮骨形成はすべての家兎で良好であった。右端は延長側最右端の屠殺時における対照側脛骨を示す。

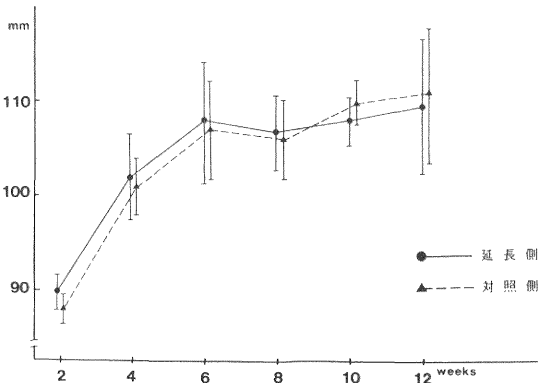


図 5 12時間ごと 0.25mm 延長群の右延長距離除外脛骨長 (D-e) と左対照側脛骨長 (d) の比較。延長率が30%となる10週で逆転が起きる。

この傾向が続いた。

遠位骨端板の幅も大方近位と同様の傾向を示したが、延長後10週で延長側では3羽の全家兎に、また対照側では3羽中1羽に骨端板閉鎖を認めた。12週では延長側、対照側ともに全家兎の遠位骨端板が閉鎖していた。

(b) 脛骨骨端板における成長率 (図 7)

近位骨端板の成長率は延長後2週では延長側の方が $43 \mu\text{m}/\text{day}$ ほど大きいですが、4週以降では対照側が $40 \mu\text{m}/\text{day}$ 大きかった8週を除けば両側の間にほとんど差はなく、12週でも $30 \mu\text{m}/\text{day}$ 程度の差に留まった。

遠位骨端板においても近位と同様の傾向を示し、延長後2週では延長側が $24 \mu\text{m}/\text{day}$ 大きく、4週以降は平均からみると延長側の成長率が僅かに小さいが、大きな差はなく推移した。

近位と遠位骨端板の成長率の和を両側で比較すると、延長開始後2週で $34 \mu\text{m}/\text{day}$ 延長側が大きく、4週以降は逆転して12週の延長終了時まで対照側が延長側より大きいもののその差は比較的僅かな範囲に留まった。

B. 12時間ごと 0.5mm の延長群

延長中骨折を起こした3, 6週屠殺群の各1羽は評価対象から除外した。

1) X線学的所見

この延長群の X線所見を図 8 に示す。

この速度の延長群では延長開始後2週までは延長距離除外右脛骨長が左脛骨長に比してごく僅かに長いが、3週以降は逆転して延長側が短くなり、対照側との差は時

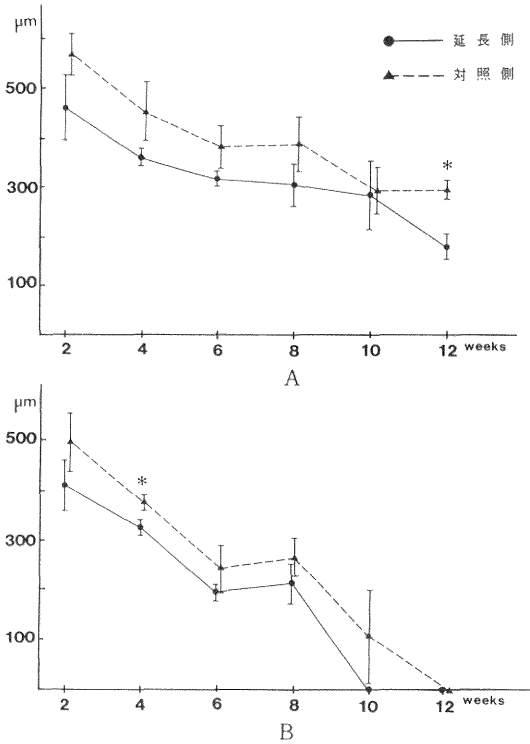


図 6 12時間ごと 0.25mm 延長群の骨端板幅
 A：近位骨端板幅
 12週に至るまで延長側は対照側より狭い。
 (* : p < 0.05)
 B：遠位骨端板幅
 10週で延長側 3羽と対照側 1羽に骨端板閉鎖を認める。12週では延長側対照側ともに閉鎖した。(* : p < 0.05)

間経過とともに開いてゆく傾向があった。統計的に有意な差は認められなかった(図 9)

2) 組織学的所見

(a) 脛骨骨端板の幅 (図10)

近位骨端板の幅は、延長開始1週後には延長側と対照側でほとんど差はないが、2週以降から延長側が一貫して短くなり、時間経過とともにその差は開いて6週後には有意差 (p < 0.05) を示した。

遠位骨端板の幅は、延長開始1週後には延長側がやや厚いが、2週以降からは一貫して延長側が有意に薄く、4週以降は有意差 (p < 0.05) を示した。

(b) 脛骨骨端板における成長率 (図11)

近位骨端板の成長率は延長開始1, 2週で延長側成長率が有意 (p < 0.05) に大きいのが、4週から逆転し、5,

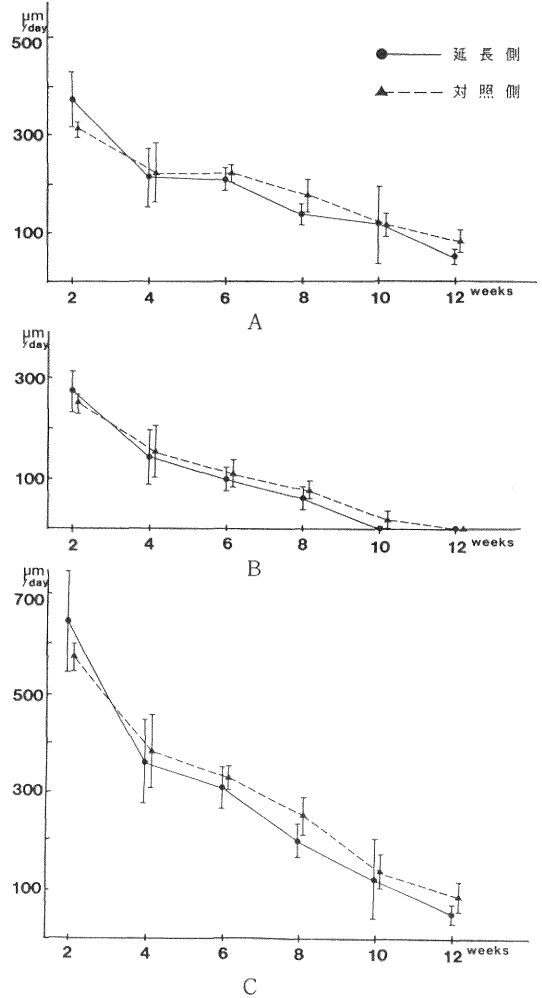


図 7 12時間ごと0.25mm 延長群の骨端板における成長率

A：近位成長率

延長側と対照側の間にはほとんど差を認めない。

B：遠位成長率

近位骨端板同様に延長側と対照側の間にはほとんど差を認めない。

C：近位・遠位両成長率の和

4週で逆転するが、12週まで延長側と対照側に大きな差はない。

6週では有意 (p < 0.05) に対照側を下回った。

遠位骨端板の成長率は、延長1週後には延長側が対照側を上回っているが、近位骨端板より1週早く2週で逆転が起こり、5, 6週で有意 (p < 0.01) に延長側が対

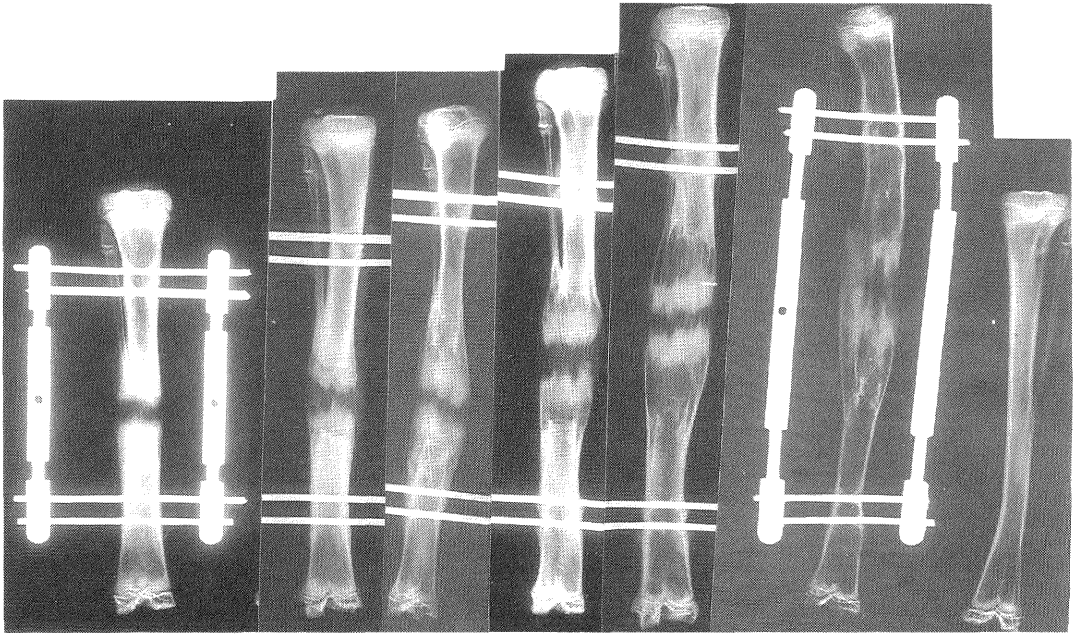


図 8 12時間ごと 0.5mm 延長群の X線所見

1 週おきに屠殺した各群の延長量の平均は左より各々 9.6, 14.6, 22.8, 29.3, 36.7, 41.6% であり, すべての家兎で延長部の仮骨形成は良好であった. 右端は延長側最右端の屠殺時における対照側脛骨を示す.

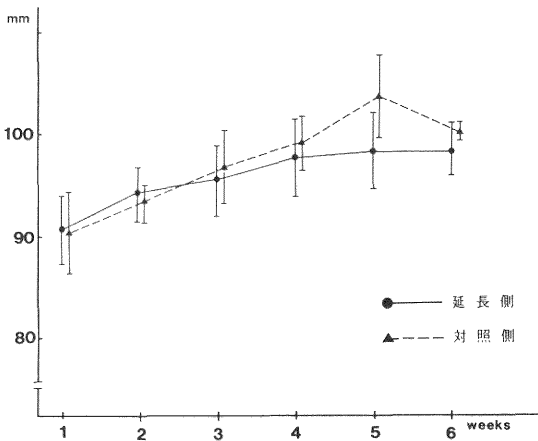


図 9 12時間ごと 0.5mm 延長群の右延長距離除外脛骨長 (D-e) と左対照側脛骨長 (d) の比較. 延長率が23%になる3週で逆転が起こる.

照側を下回った.

近位遠位両成長率の和を比較すると, 延長後1週では延長側が有意 ($p < 0.05$) に大きく, 2週ではその差は

せばまり, 3週ではついに逆転し, 4週 ($p < 0.05$), 5, 6週 ($p < 0.01$) で有意に延長側が対照側を下回った (図 12, 13).

C. 12時間ごと 1.0mm の延長群

1) X線学的所見

この延長群の X線所見を図14 に示す.

この速度の延長群では延長開始後1週で, 延長距離除外脛骨長が左脛骨長より長く, 2週ではほぼ同一となり, 牽引終了時の3週では逆転して延長側が対照側を下回っていた. しかし前2群と同様に有意差はなかった (図15).

2) 組織学的所見

(a) 脛骨骨端板の幅 (図16)

この群では, 延長開始後すでに1週目から延長側の近位 ($p < 0.05$)・遠位両骨端板の幅が対照側より狭く, 延長の経過とともにその差はますます顕著となった ($p < 0.01$).

(b) 脛骨骨端板における成長率 (図17)

近位骨端板の成長率は延長後1週で延長側が対照側を上回っていたが, 2週ではほぼ同一となり, 3週では対照側を有意 ($p < 0.05$) に下回った.

遠位骨端板では, 延長側成長率は延長後1週から僅か

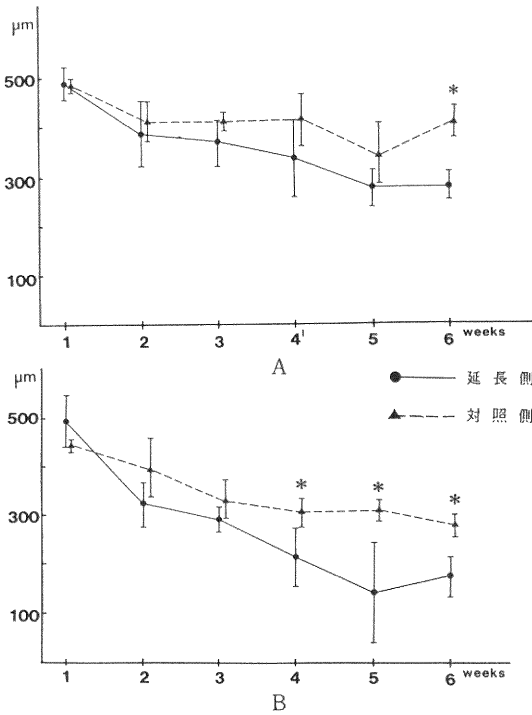


図10 12時間ごと 0.5mm 延長群の骨端板幅
 A：近位骨端板幅
 延長経過とともに差は増加し、6週で有意差 (* : p < 0.05) を示した。
 B：遠位骨端板幅
 4週以降有意差 (* : p < 0.05) を示した。

に对照側を下回り、2、3週とも对照側より低い値を示した(3週で有意差. p < 0.01).

近位・遠位両骨端板の成長率の和を比較すると、延長1週後には延長側成長率が对照側を平均では上回るが、2週目には逆転し、3週では大きく对照側を下回った(p < 0.05).

D. 12時間ごと 1.5mm の延長群

この延長速度では2週屠殺群に1羽骨折を生じ、評価対象から除外した。

1) X線学的所見

この延長群のX線所見を図18に示す。

延長距離除左右脛骨長は延長1週後からすでに平均値で1.5mm 对照側より短く、2週後にはその差は増大したが、有意の差はなかった(図19)。

2) 組織学的所見

(a) 脛骨骨端板の幅(図20)

延長開始1週後には、近位・遠位両骨端板とも 100μm

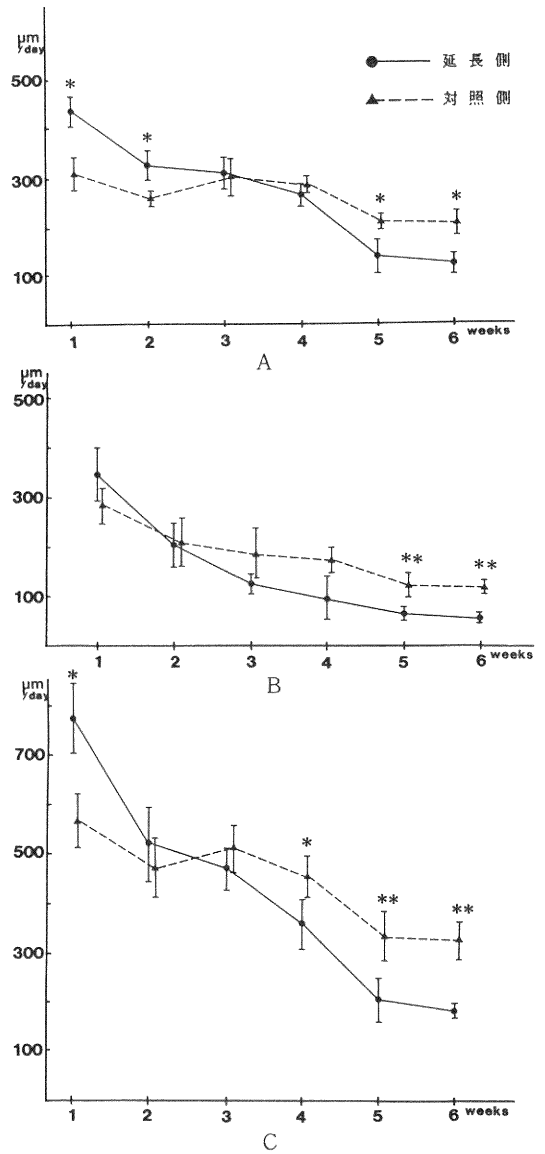


図11 12時間ごと 0.5mm 延長群の骨端板での成長率

A：近位成長率

1, 2週は有意 (* : p < 0.05) に延長側が高く、5, 6週では有意 (* : p < 0.05) に低下を示した。

B：遠位成長率

近位骨端板より1週早く逆転が起こる。 (** : p < 0.01)

C：近位・遠位両成長率の和

3週で逆転が起こる。 (* : p < 0.05, ** : p < 0.01)

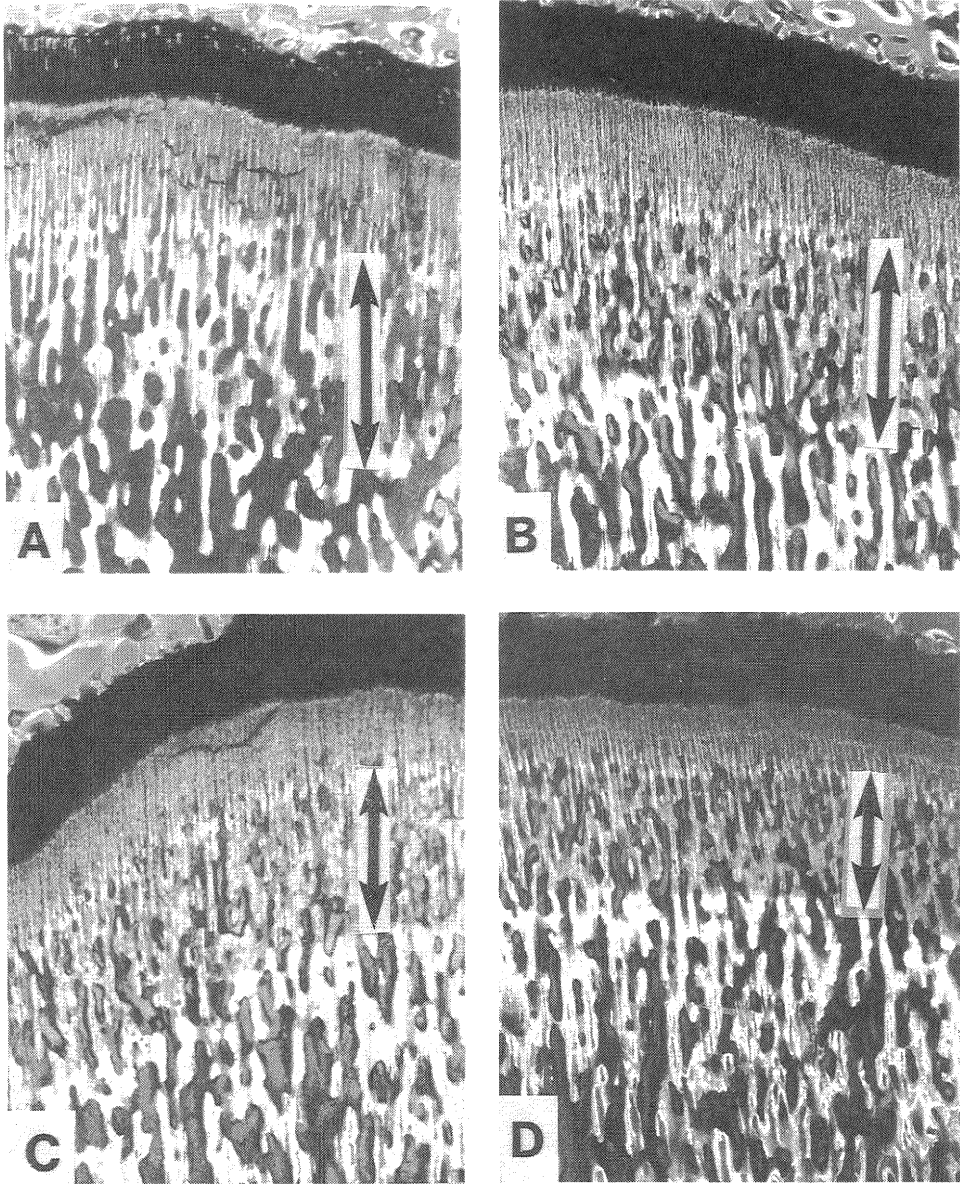


図12 12時間ごと 0.5mm 延長群の延長後 1 週における蛍光ラベル幅の比較
(A：延長側近位, B：対照側近位, C：延長側遠位, D：対照側遠位各骨幹部
部. UV-2 A 励起, toluidine blue 染色, $\times 10$).
延長後 1 週では, 延長側の成長率が近位・遠位共に対照側より大きい(矢印).

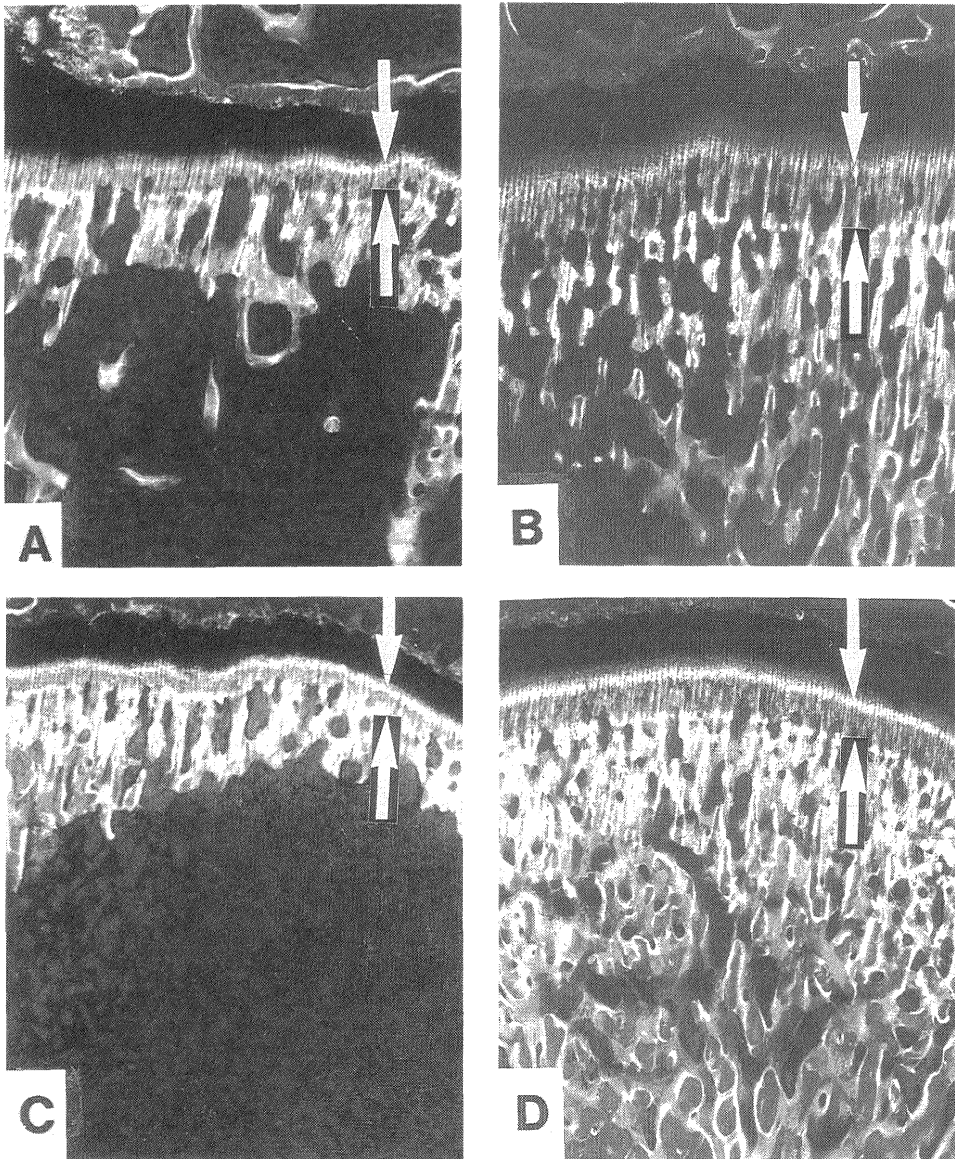


図13 12時間ごと 0.5mm 延長群の延長後6週における蛍光ラベル幅の比較
 (A:延長側近位, B:対照側近位, C:延長側遠位, D:対照側遠位各骨幹端部. UV-2A 励起, toluidine blue 染色, ×10).
 延長後6週では延長側の成長率が近位・遠位共に対照側より低い(矢印).

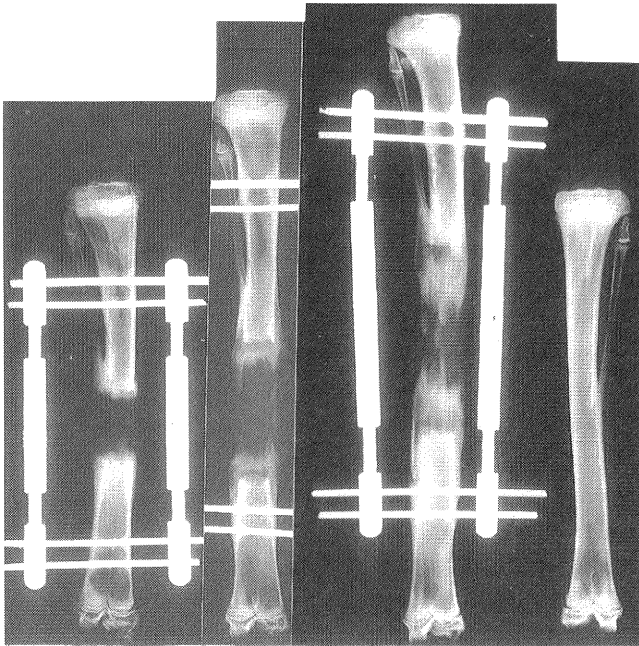


図14 12時間ごと 1.0mm 延長群のX線所見
1週おきに屠殺した各群の延長量の平均は左より各々18.3, 31.9, 42.0%であった。延長部の仮骨形成は延長後1週ではほとんど見られず、2週になって僅かに見られ、3週では延長部の近位と遠位にかなりの仮骨が出現したが前2群に比べ形成は不良であった。右端は延長側最右端の屠殺時における対照側脛骨を示す。

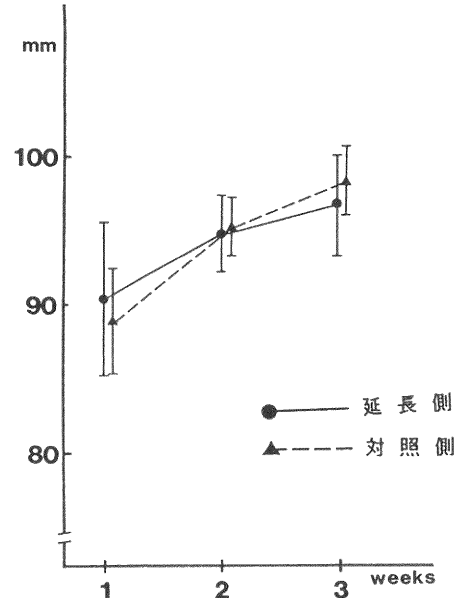


図15 12時間ごと 1.0mm 延長群の右延長距離除外脛骨長(D-e)と左対照側脛骨長(d)の比較。2週ではほぼ同一となる。

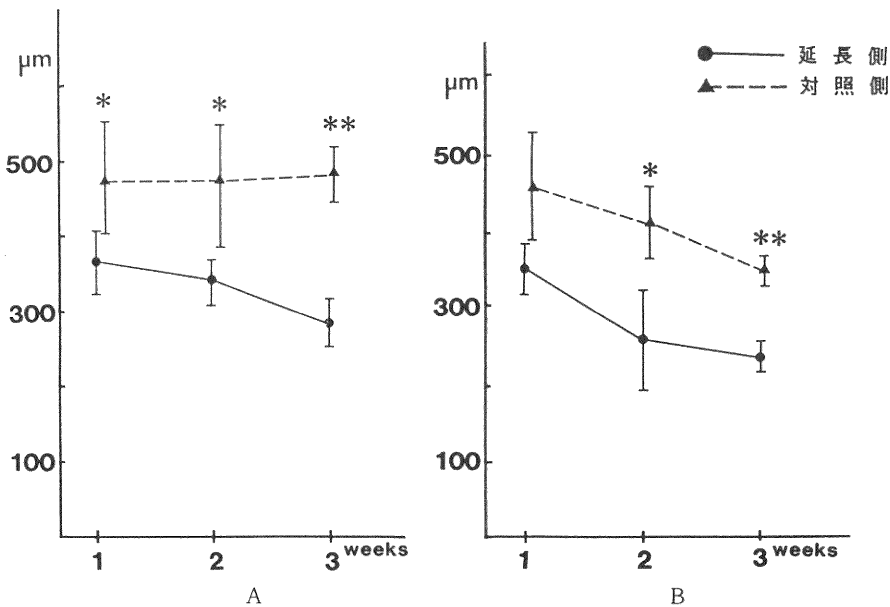


図16 12時間ごと 1.0mm 延長群の骨端板幅

- A：近位骨端板幅
延長後1週よりすでに延長側が有意に狭い。（*： $p < 0.05$ ，**： $p < 0.01$ ）
- B：遠位骨端板幅
延長後2週より有意差を示した。（*： $p < 0.05$ ，**： $p < 0.01$ ）

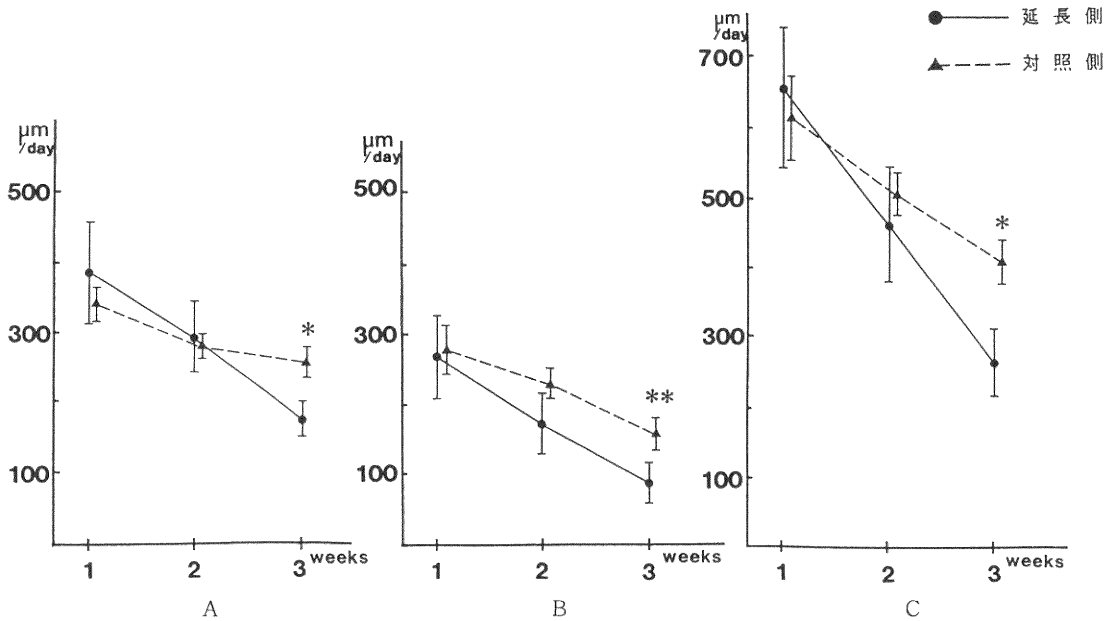


図17 12時間ごと 1.0mm 延長群の骨端板における成長率

- A : 近位成長率
延長後3週で延長側が有意に低下を示した。(* : $p < 0.05$)
- B : 遠位成長率
延長側は延長後1週より僅かに対照側を下回った。(** : $p < 0.01$)
- C : 近位・遠位両成長率の和
延長後2週ですでに逆転が起きる。(* : $p < 0.05$)

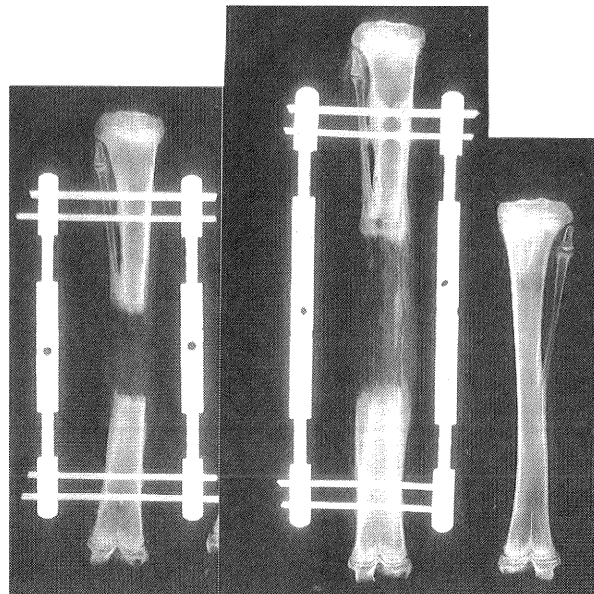


図 18 12時間ごと 1.5mm 延長群のX線所見

1週おきに屠殺した各群の延長量の平均は左より各々26.3, 48.5%であり、仮骨形成は4群中最も不良であった。右端は延長側最右端の屠殺時における対照側脛骨を示す。

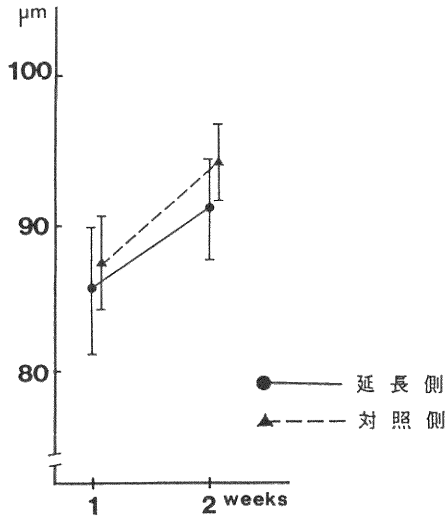


図 19 12時間ごと 1.5mm 延長群の右延長距離除外脛骨長 (D-e) と左対照側脛骨長 (d) の比較。延長後 1 週ですでに延長側が短い。

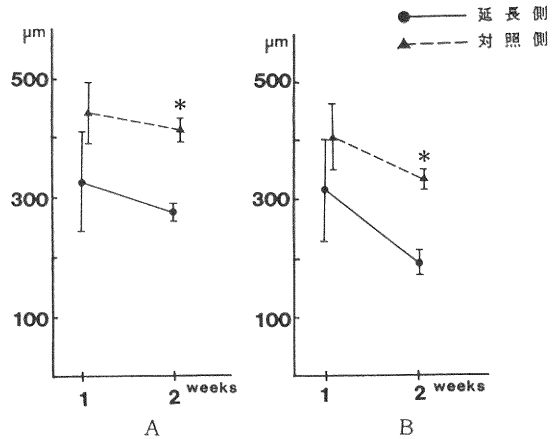


図 20 12時間ごと 1.5mm 延長群の骨端板幅

A：近位骨端板幅

延長後 1 週より延長側の狭小化を認める。
(*: $p < 0.05$)

B：遠位骨端板幅

近位と同様に、延長後 1 週より延長側の狭小化を認める。
(*: $p < 0.05$)

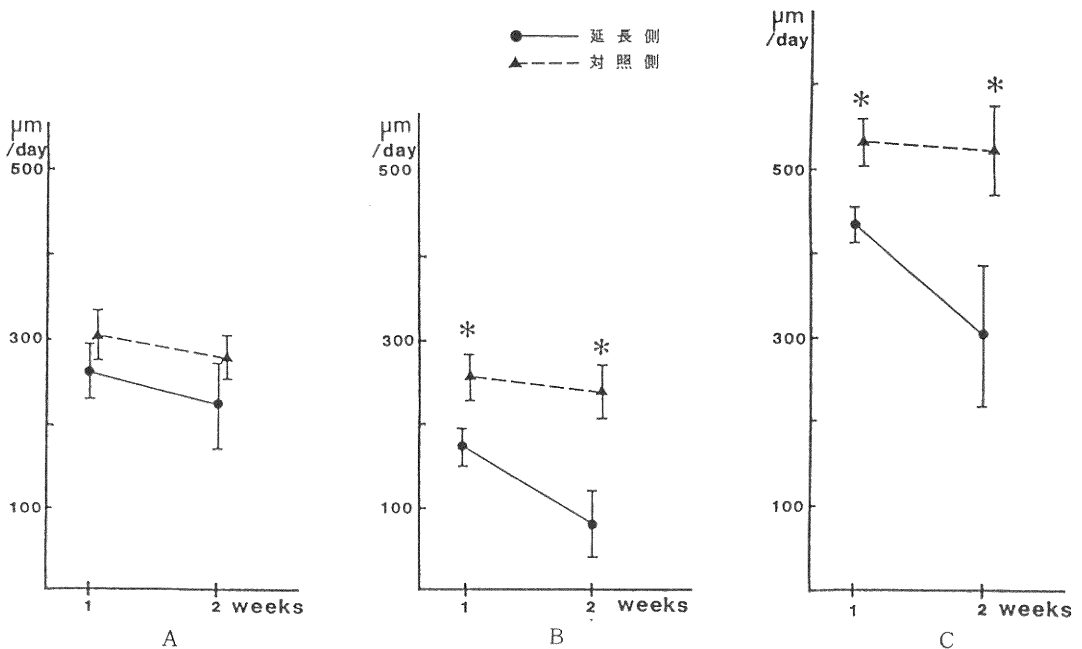


図 21 12時間ごと 1.5mm 延長群の骨端板における成長率

A：近位成長率

延長後 1 週より延長側は対照側より低い。

B：遠位成長率

延長後 1 週より延長側は対照側より低い。 (*: $p < 0.05$)

C：近位・遠位両成長率の和

延長後 1 週より延長側の成長は高度な低下を示した。 (*: $p < 0.05$)

以上の差で延長側が対照側より狭く、2週目にはさらにその差が増大していた ($p<0.05$)。

(b) 脛骨骨端板における成長率 (図21)

近位・遠位両骨端板とも、延長開始1週後より延長側成長率が対照側より低く、2週後にはその差はより顕著となった。

近位・遠位両骨端板の成長率の和を比較すると、延長開始後1、2週ともに有意 ($p<0.05$) に延長側成長率が対照側を下回っていた。

IV. 考 察

A. 本研究の特長

骨端板が開存している成長期の長管骨延長術においても、骨端板牽引による方法より骨幹部骨切りによる仮骨延長法の方が骨端板の離開や早期閉鎖をおこす危険が少なく有利と考えられる。この方法を実施する際の延長速度は、延長によって生ずる圧迫力が骨端板へ及ぼす影響を考慮する上で最も重要な意味を持つと考えられる。また、骨移植を必要としないこの方法は、以前の延長法ではほとんど不可能であった高度の延長を可能とした¹⁾⁹⁾。骨端板へ加わる圧迫力はこの延長量によっても大きく影響を受けると考えられるため、延長速度のみならず延長量が骨端板に影響を及ぼす可能性についても検討する必要がある。骨幹部における脚延長術が骨端板に及ぼす影響の実験的ないし臨床的検討は、現在まで渉猟し得る範囲で小原³²⁾、村瀬³⁰⁾、Shapiro³⁴⁾、Pennecot³³⁾の報告がある。ただし小原の用いた延長法は4～6回で健側の10～20%を急激に延長する方法で、現在広く用いられている仮骨延長法に準じた実験モデルとは言い難い。村瀬はWagnerの牽引速度に従って、1日1回1.5mmで牽引を行ったが、延長量は最大10%までであり、仮骨延長法で容易に延長される10%以上の延長量が骨端板に及ぼす影響を検討してはいない。ShapiroはWagner³⁵⁾とAnderson³⁾の方法で延長を行った18例を報告したが、原因疾患は様々であり、延長量とその骨端板への影響の関係については検討を加えていない。

本研究では実際の仮骨延長法で用いる可能性がある1日3.0mm(12時間ごと1.5mm)までの4種類の速度で延長を行い、延長量が最高40%前後に達するまでの骨端板の変化を観察した。

B. 延長速度と仮骨形成

Ilizarov²⁴⁾は雑種成犬を用いた実験で1日0.5、1.0、1.5、2.0mmの速度で延長を行うと、1.5、2.0mmの2群では骨延長部に局所的な乏血がおこり仮骨形成は阻

害され、0.5mmでは逆に骨延長部の早期骨癒合がおこるため、1日1mm程度の延長速度が至適であると報告した。しかし柑本ら²⁶⁾は成長期家兎脛骨にOrthofix M-100を用いて12時間ごと0.25mmの速度で35日間(17.5mm)延長し、全家兎に延長が可能であったと報告している。著者の実験では、12時間ごと0.25mmの延長群の5羽に延長部の早期骨癒合を認め、Ilizarovの報告に類似した結果を得たが骨端板に対する悪影響は最も少なかった。柑本らと異なる結果を得た原因は、創外固定器や鋼線の強度、家兎の週齢の差などによると考えられ、これらの点を考慮すれば12時間ごと0.25mmの牽引速度は骨端板への悪影響も最も少ないことから、仮骨牽引法にとって十分実用に供しうる速度と考えられる。

C. 各延長速度と延長量が骨端板に及ぼす影響

1) 成長率と脛骨長の変化

本実験で評価した3つのパラメーター、すなわち軟X線写真の計測による延長距離を除外した脛骨長、骨端板の幅、成長率のうち、屠殺時前後における骨端板機能を最も鋭敏に反映する指標は成長率である。延長距離除外脛骨長は屠殺時までの毎日の成長率の総和と強く関連するので、まずこの2つについて考察する。

(a) 12時間おき0.25mm延長群

この延長群では、延長側の近位・遠位両骨端板における長径成長は延長初期に賦活化されており、4週には僅かに逆転がおこるが、それ以降も成長抑制は増大することはない。延長量が36.3%になる最終の12週目でも対照側との成長率の差は近位と遠位の和で33 μ m/day程度にとどまった。このことから、この牽引速度が延長側の骨端板に及ぼす成長抑制の影響は極めて少ないといえる。この延長群では、延長側遠位骨端板が延長開始後10週で閉鎖したが、同時に対照側にも閉鎖が起きている家兎が1羽あり、その2週後には残り3羽の対照側骨端板の閉鎖を認めた。従って、この速度での延長では延長側の遠位骨端板は比較的生理的閉鎖に近い時期まで開存し得たといえる。家兎の2週間はヒトではおよそ2年に相当するので、脛骨遠位骨端板の閉鎖直前2年に見込まれる成長量だけ延長効果の相殺が予想される。しかし骨端板閉鎖前の2年間は成長率が極めて低くなるため、Anderson²⁾の表で予測した2年間の成長量は男子で約2mm女子で約3mmにすぎず、この分だけ延長を余分に行えば十分補正が可能と考えられる。軟X線計測による延長距離除外脛骨長は成長率の推移をよく反映し、骨端板での成長抑制が少ないことを裏付けている。

(b) 12時間おき0.5mmの延長群

12時間おき 0.5mm の延長群では、成長率は前群に比べ延長経過とともにダイナミックな変化を示した。近位・遠位両骨端板の成長率の和は、延長後1週で延長側が 204 μ m/day も有意 ($p < 0.05$) に対照側を上回り、2週でも 46 μ m/day 上回るが3週では逆転して、それ以降は延長側の抑制は延長経過とともに増大した。すなわちこの牽引速度では、3週付近で骨端板抑制を来すような圧迫力が生じ始めると考えてよい。近位と遠位の成長率を別個にみると、遠位の方が1週間早く成長の低下傾向が現れていたが、これは足関節は膝関節より関節の表面積が小さいため、単位面積当りの圧迫はより大きくなると考えられること。また家兎は安静時強い膝屈曲位をとっていることから膝では圧迫力のベクトルは脛骨長軸と大きくずれるが、足関節では膝ほど強い屈曲位をとらないため圧迫力の影響を受けやすいなどによって考えられた。この群の成長率は前群のそれとほぼ同一の挙動を示したが、賦活ないし抑制の程度はより顕著となっている。軟X線計測による延長距離除外脛骨長は成長率が前群より顕著に変動することを反映して、成長率で延長側の抑制傾向が見られる3週目(延長量で23%)に同時に逆転して延長側が短くなり、その後延長の経過と共に対照側との差が開いてゆく傾向が認められた。以上より、この延長速度では延長量で23%程度までの延長が骨端板における成長を抑制しない安全な延長量と考えられた。

(c) 12時間おき 1.0mm の延長群

この延長群では、延長後2週ですでに 45 μ m/day の延長側の成長抑制が起きており、3週には抑制は 145 μ m/day に達する。

softex 計測による延長距離除外脛骨長も成長率と同様の挙動を示した。従って、成長率からみて安全と思われる延長量は延長後1週の18%程度と考えられた。村瀬は1日 1.5mm の延長速度で10%の延長を行い、延長側の成長抑制は認めなかったと報告したが、より速い延長速度である本群での結果をみれば、村瀬の行った延長は十分安全域に入っていたと考えられる。

(d) 12時間おき 1.5mm の延長群

この延長群では、他の3群と異なり、延長後1週目から 100 μ m/day にも及ぶ高度の成長率の抑制が観察された。2週目には抑制は 223 μ m/day にも達する。従って、この延長速度は延長量の多少にかかわらず安全に延長を行える速度ではないと考えられた。

2) 骨端板の幅の変化

骨端板の幅の変化は延長開始後の1~2週間は成長率と異なる挙動を示している。すなわち、12時間ごと 0.5

mm 群以外のすべての群で、初回屠殺時の骨端板の幅は延長側が狭かった。成長が充進しているのにも拘らず骨端板の幅が対照側より狭い原因は明確な説明が困難であるが、延長開始の初期において、なんらかの原因で成長軟骨細胞の分裂増殖の充進以上に、石灰化やそれに引き続いておこる骨化が充進しているため骨端板の幅の増加が起こらなかったと考えられた。一方急速な延長群で延長初期より骨端板の幅の狭少化がみられる原因は、延長による圧迫力が成長軟骨の分裂増殖を抑制しているためと考えられる。2週以降はどの延長群も一貫して延長側の骨端板の幅は対照側より狭いが、その程度は12時間おき 0.25mm の延長群でもっとも軽く延長速度の上昇につれ狭少化傾向が強まっていた。

D. 骨端板に加わる圧迫力

仮骨延長法において骨端板にどれだけの圧迫力がかかっているのか、またどの程度の圧迫力が成長を促進ないし抑制するかは最も本質的な興味ある問題である。現在骨端板に対する持続的圧迫力の影響については2つの考えがある。すなわち骨端板に対する圧迫力はその大きさに比例して常に成長を抑制するという考えと、ある至適圧迫力では成長は促進されるがそれを上回ると抑制に転じるという考えである。前者の考えは1863年に発表された Heuter-Volkman の法則¹⁸⁾として今日まで知られている。また Arkin⁴⁾は幼若家兎を用い実験的にこの法則を支持する結果をえた。Bonnell¹⁶⁾は家兎大腿骨遠位骨端板に鋼線を介して持続圧力をかけ、圧迫力に比例した成長抑制を認めている。一方後者の考えを支持する報告には、鷲谷³⁶⁾の実験がある。彼はゴム紐で家兎の下腿長軸方向に持続的圧迫力を加え、体重 1kg あたり 1.0 kg までの圧迫では過成長を、3kg では成長抑制を観察した。

Frost¹³⁾は臨床例の観察から、成長率は単位時間に加わる動的な圧迫力の平均値によって変化し、ある適切な圧迫力で成長は最も促進し、それ以上でも以下でも緩徐となると論じている

もし、圧迫力に比例して成長抑制がくるとすれば延長初期におきた成長の充進は主として手術や延長による血流変化の結果おきたことになる。骨切り術や異物挿入が長径成長を充進させることは Ferguson¹⁴⁾以来、小山²⁸⁾、大吉⁸⁾、吉川³⁶⁾など本邦でも多くの報告があり、これらの著者は手術後2~8週で成長の充進がおこるとしている。骨切りの部位や挿入する異物の種類により成長の充進の程度は異なるが、吉川の報告した骨髄腔アルギン酸挿入家兎脛骨では、術後2週で平均 2.1mm もの成

長亢進が観察されており、この値は本実験で得られた延長側の亢進より大きい。この亢進の原因は骨髓腔に長期間乏血が続くため骨端部に代償性の血流上昇が起きるためとされているが、仮骨延長法でも延長中央部においては乏血状態²⁷⁾にあるため、この機序による成長亢進の可能性も否定できない。一方、著者とほぼ同一の方法を用いた村瀬³⁰⁾の報告では、手術のみで延長を行わなかった対象群の脛骨近位成長率は、手術後1, 2, 4週後も対照側より2.8~3.8%の僅かな増加を示したにすぎない。村瀬の結果から考えると、本実験で観察した延長初期にみる成長亢進は、圧迫力が延長量の増加とともに徐々に上昇するにつれ、延長初期に至適条件となり、成長亢進を来たした結果とも考えられる。鷲谷によれば、持続的に1kgをかけたとき成長亢進が最大で、1カ月間に最大1050 μ m 対照側より脛骨長径が延長したと報告している。このことは、圧迫を加えた側の脛骨が対照側と比べ1日平均約34 μ m ずつ多く伸びたことになるが、著者の実験における12時間ごと0.5mm 延長群の成長亢進は近位遠位をあわせると1日200 μ m にも達しており、単に圧迫力の刺激のみでこの成長亢進が起きているとも思われない。従って、延長初期においては手術や延長による骨端部の血行促進と至適な圧迫条件がともに存在し、相乗効果を起こしているのではないかと推察している。

延長3~4週以降各群でみられる成長抑制はその一貫した増加傾向より圧迫力の上昇が主たる原因と思われる。Pennegot³³⁾は、12時間おきに0.75mm 延長した臨床例で、延長時の軟部組織の抵抗力を創外固定器に取り付けた圧センサーで計測し、延長量が術前の延長肢と比べ15%以上になると、その後の延長量と圧上昇ならびに骨端板の成長抑制がよく相関すると報告した。この15%という値は、家兎を用いた本研究の12時間ごと0.5mm 延長群の23%という安全域にかなりよく対応しており興味深い。

V. 結 語

幼若家兎の脛骨骨幹部で種々の速度の脛骨延長を行い、成長期における仮骨延長法が骨端板に及ぼす影響をX線学的、組織学的に検討した結果、以下の結論を得た。

- 1) 12時間ごとに0.25mm ないし0.5mm 延長した群における延長部の仮骨形成は良好であったが、12時間ごとに1.0mm ないし1.5mm 延長群では不良であった。
- 2) 脚延長中の脛骨近位・遠位両骨端板における長径

成長は、12時間ごと0.25mm で延長した群で延長量が健側の36%に達するまで抑制が少なく、延長中に観察された遠位骨端板の閉鎖時期も延長側と対照側で大差なかった。

3) 12時間ごと0.5mm の延長群では延長量が対照側の23%になると骨端板における成長抑制が現れ、以後延長量に比例して抑制は増大した。

4) 12時間ごと1.0mm の延長群では延長量が対照側の18%以降急激に成長抑制が生じ、その増大傾向は前群より顕著であった。また骨端板の幅の有意($p < 0.05$)な狭小化も延長後1週から観察された。

5) 12時間ごと1.5mm の延長群では、成長抑制が延長開始初期より最も高度に認められた。

6) 以上の結果から、仮骨延長法における適切な延長速度と延長量は、仮骨形成と骨端板における成長抑制を考慮すると、12時間ごと0.25mm で少なくとも対照側の36%前後までか、12時間ごと0.5mm で23%前後までと考えられ、これらの条件で延長を行えば骨端板への抑制効果は少なく、成長期の仮骨延長法は骨端板の成長力を温存できる実際的方法と考えられた。

7) 12時間ごと0.25, 0.5mm で延長した脛骨近位・遠位両骨端板と12時間ごと1.0mm で延長した近位骨端板で、延長開始初期の1~2週に延長側成長率の上昇がみられた。その原因は、metaphysis 部の血流変化のみでなく、延長開始とともに上昇してゆく骨端板への圧迫力が延長初期に成長を賦活化するのに至適な大きさであることにもよると推察された。

謝 辞

稿を終えるにあたり、終始御指導いただきました田島達也教授ならびに高橋栄明助教授に深謝いたします。また創外固定器の製作にあたり御協力と御助言を下された新潟大学工学部機械工学科原利昭教授、同大学院生小田竜二氏に慎んで感謝の意を表します。本研究に技術面での多大な御協力を頂いた当教室の錦織新一技官、赤沢秀喜技官、斉藤昌文技官に御礼申し上げます。本論文の一部は、第2回創外固定研究会、第4回日本整形外科学会基礎学術集会において発表された。

参 考 文 献

- 1) Aldegheri, R., Trivella, G., Renzi Brivio, L., Tessari, G., Agostini, S. and Lavini, F.: Lengthening of the lower limbs in achondroplastic

- patients. *J. Bone Joint Surg.* **70-B**: 69~73, 1988.
- 2) **Anderson, M., Messner, M.B., Green, W.T.:** Distribution of lengths of the normal femur and tibia in children from one to eighteen years of age. *J. Bone Joint Surg.* **46-A**: 1197-1202, 1964.
 - 3) **Anderson, W.V.:** Leg lengthening. *J. Bone Joint Surg.* **34-B**: 150, 1952.
 - 4) **Arkin, A.M. and Katz, J.F.:** The effects of pressure on epiphyseal growth. The mechanism of plasticity of growing bone. *J. Bone and Joint Surg.*, **38-A**: 1056~1076, 1956.
 - 5) **Blount, W.P. and Clark, G.R.:** Control of bone growth by epiphyseal stapling, preliminary report, *J. Bone Joint Surg.* **31-A**: 464~477, 1949.
 - 6) **Bonnel, F., Peruchon, E., Baldet, P., Dimeglio, A. and Rabischong, P.:** Effects of compression on growth plates in the rabbit. *Acta orthop. scand.* **54**: 730~733, 1983.
 - 7) **Crawford, E.J.P., Jones, C.B., Dewar, M.E., Aichroth, P.M.:** Distraction forces in children undergoing epiphyseal leg lengthening. *Orthopaedic Transactions*, **11**: 302~303, 1987.
 - 8) 大吉 清：骨幹部骨傷及び異物挿入が長管状骨骨長径成長に及ぼす影響に関する実験的研究。日整会誌, **29**: 555~564, 1954.
 - 9) **Dal Monte, A. and Donzelli O.:** Tibial lengthening according to Ilizarov in congenital hypoplasia of the leg. *J. Pediatr. Orthop.*, **7**: 135~138, 1987.
 - 10) **De Bastiani, G., Aldegheri, R., Renzi Brivio, L. and Trivella, G.:** Limb lengthening by distraction of the epiphyseal plate. *J. Bone and Joint Surg.*, **68-B**: 545~549, 1986.
 - 11) **De Bastiani, G., Aldegheri, R., Renzi Brivio, L. and Trivella, G.:** Chondrodiastasis-controlled symmetrical distraction of the epiphyseal plate. *J. Bone and Joint Surg.*, **68-B**: 550~556, 1986.
 - 12) **De Bastiani, G., Aldegheri, R., Renzi Brivio, L. and Trivella, G.:** Limb lengthening by callus distraction (Callotasis). *J. Pediatr. Orthop.*, **7**: 129~134, 1987.
 - 13) **Frost H.M.:** Intermediary organization of the skeleton, CRC press inc., Boca Ration Florida, 1986.
 - 14) **Ferguson, A.B.:** Surgical stimulation of bone growth by a new procedure. *J.A.M.A.*, **100**: 26~27, 1933.
 - 15) **Green, W.T. and Anderson, M.:** Epiphyseal arrest for the correction of discrepancies in length of the lower extremities, *J. Bone Joint Surg.*, **39-A**: 853~872, 1957.
 - 16) 羽場輝夫, 高橋栄明, 古田佳久：多色蛍光標識剤と蛍光装置, 骨形態計測 Volume 6 骨の定量的分析法, 乗松尋道(編), pp. 195~202, 西村書店, 新潟, 1986.
 - 17) 浜西千秋：成長軟骨帯牽引法による脚延長の経験。日整会誌, **62**: S992, 1988.
 - 18) **Hueter, C.:** Anatomische Studien an den Extremitatengelenken Neugeborener und Erwachsener. *Virchow's Arch. f. Pathol. Anat.*, **25**: 572~599, 1862.
 - 19) 本間政文, 田島達也, 高橋栄明, 原利昭, 小田竜二：定速延長による大腿骨遠位骨端板への牽引力の推移と組織学的反応。日整会誌, **62**: S459, 1988.
 - 20) 本間哲夫, 若松英吉：非脱灰研磨染色標本作成法, 骨形態計測ハンドブック. 高橋栄明(編), pp. 34~44, 西村書店, 新潟, 1983.
 - 21) **Ilizarov, G.A., Deviatov, A.A.:** Operative elongation of the leg with simultaneous correction of the deformities. *Ortop. Travmatol. Protez.*, **30**: 3, 32~37, 1969.
 - 22) **Ilizarov, G.A., Deviatov, A.A.:** Operative elongation of the leg. *Ortop. Travmatol. Protez.*, **32**: 8, 20~25, 1971.
 - 23) **Ilizarov, G.A., Trohova, V.G.:** Operative elongation of the femur., *Ortop. Travmatol. Protez.*, **34**: 11, 51~55, 1973.
 - 24) **Ilizarov, G.A., Schreinen, A.A. and Imerlishvili I.A., Bakhlykov, Y.N., Onirkova A.M. and Marterl, I.I.:** On the problem of improving osteogenesis conditions in limb lengthening. In abstracts of first international symposium on experimental and clinical aspects of transosseous osteosynthesis in the method developed in KNIIEKOT, Kurgan, September 20~22, 1983, 4~5.
 - 25) **Kawamura, B., Hosono, S., Takahashi, T., Yano, T. and Kobayashi, Y.:** Limb lengthening by means of subcutaneous osteotomy. *J. Bone Joint*

- Surg., **50-A**: 851~878, 1968.
- 26) **Kojimoto, H., Yasui, N., Goto, T., Matsuda, S. and Shimomura, Y.:** Bone lengthening in rabbits by callus distraction. *J. Bone Joint Surg.*, **70-B**: 543~549, 1988.
- 27) 柑本晴夫, 安井夏生, 佐々木健, 北田明良, 清水 浩, 下村 裕: 仮骨延長法における延長速度と血行. 日整会誌, **62**: S456, 1988.
- 28) 小山 明: 成長期長管状骨における骨傷の長径成長に及ぼす影響に関する研究. 日整会誌, **35**: 81~96, 1961.
- 29) **Monticelli, G., Spinelli, R.:** Distraciton epiphyseolysis as a method of limb lengthening. *Clin. Orthop.* **154**: (part 1) 284~291, (part 2) 292~303, (part 3) 304~315, 1981.
- 30) 村瀬鎮雄: 下肢延長術の骨長径成長に及ぼす影響の実験的研究. 日整会誌, **46**: 227~244, 1972.
- 31) **Nakamura, K., Nagano, A., Tobimatsu, H. and Kurokawa, T.:** Tibial lengthening by epiphyseal distraction. *J. Jpn. Orthop. Assoc.* (日整会誌), **62**: 37~41, 1988.
- 32) 小原 昇: 下肢延長術の骨長径成長におよぼす影響の実験的研究. 札幌医誌, **52**: 61~85, 1983.
- 33) **Penneçot, G.F., Herman, S. and Pouliquen, J.C.:** Retentissement de l'allongement progressif sur le cartilage de croissance. Interet de la mesure du couple. *Rev. chir. orthop.*, **69**: 623~627, 1983.
- 34) **Shapiro, F.:** Longitudinal growth of the femur and tibia after diaphyseal lengthening. *J. Bone Joint Surg.*, **69-A**: 684~690, 1987.
- 35) **Wagner, H.:** Operative lengthening of the femur. *Clin. Orthop.*, **136**: 125~142, 1978.
- 36) 鷺谷澄夫: 負荷条件の成長期長管骨長径成長に及ぼす影響に関する実験的研究. 日整会誌, **31**: 719~735, 1957.
- 37) 吉川 修: 骨髓腔閉塞の長管状骨々長径成長に及ぼす影響に関する実験的研究. 日整会誌, **32**: 1057~1070, 1959.

(平成元年2月21日受付)