

## 骨端線損傷の病態生理と疫学

京都府立医科大学大学院医学研究科・運動器機能再生外科学(整形外科学教室)

金 郁 喆

**要 旨** 骨端軟骨は骨に比して脆弱な組織である。本稿では骨端軟骨に骨端離開を生じさせ、破断時の軟骨の強度や剛性、ひずみなどの材料特性を明らかにした。また、周囲軟部組織やその三次元的起伏の生体力学的関与、および成長に伴う生体力学的変化について検索した。その結果、骨端軟骨はマッチ棒程度の強度で、周囲軟部組織やその三次元的起伏により力学的に補強されていた。また、成長に伴って粘性的性質から弾性的性質に変化することが明らかになった。さらに、骨端線損傷の疫学的調査では発生率は小児骨折の17.9%と海外の報告と同等であった。男女とも growth spurt の時期に多く、受傷原因は転倒・転落・突き指が主因であった。部位別には肘関節周辺の骨端線損傷が多数を占めていた。治療は保存療法が主体であるが、海外の報告より手術症例が多かったのは総合病院での症例が多かったためと考えた。

### はじめに

骨端軟骨は長管骨の成長を司る重要な組織であるが、骨組織に比べて力学的に脆弱なため、小児骨折における骨端線損傷は日常的によくみられる外傷である。本稿ではこの骨端軟骨の生体力学的特性とその脆弱な組織がどのような防御機構によって生理的な負荷から守られているかを明らかにするとともに、小児骨折における骨端線損傷の発生頻度、性別、年齢分布、Salter-Harris分類などの疫学的調査について報告する。

### 骨端線損傷の病態生理

#### 1. 骨端軟骨の生体力学的特性

##### 1) 骨端軟骨板自体の生体力学的特性

① 幼若家兎骨端軟骨の材料特性を静的力学試験によって検索した<sup>4)12)</sup>。生後5週の雄白色家兎を安楽死させ、尺骨遠位部(平坦で楕円型の骨端軟骨板)を摘出した。周囲軟部組織を鋭的に除去し骨端一骨端軟骨一骨幹端の骨性部分をメチルメタクリ

レートで包埋した複合試験片を作製した。静的力学試験にはインストロン万能試験機を用いた。その結果、ねじり試験(0.2 rpm : rotation per minute)での最大破断応力  $\tau_{max}$  は  $0.90 \pm 0.12$  MPa (n=22)であり、引張試験(0.2 mm/min)の最大破断応力  $t_{max}$  は  $0.90 \pm 0.26$  MPa (n=10)であった。

② ヒトの骨端軟骨自体の力学的強度について検索した<sup>7)</sup>。切断を余儀なくされたヒト骨端軟骨を用いた。骨端一骨端軟骨一骨幹端の複合試験片(1辺3mm, 長さ4cmの四角柱)を作製して試験片とした。静的引張試験の結果、最大破断応力は1.12~1.52 MPaであった。

③ 圧縮試験での骨端軟骨の力学的強度<sup>1)</sup>体重約1100gの雄NZW白色家兎の脛骨近位部骨端軟骨を材料とし、圧縮試験を行った結果、骨幹端部での骨折をきたした。Salter-Harris V型の損傷モデルは作れなかった。

##### 2) 骨端軟骨周囲軟部組織の力学的関与<sup>5)</sup>

骨端軟骨の周囲軟部組織である perichondrial

**Key words :** biomechanical properties, growth plate, physal injury, epidemiology

連絡先 : 〒602 8566 京都市上京区河原町広小路 京都府立医科大学整形外科 金 郁喆 電話(075)251 5549

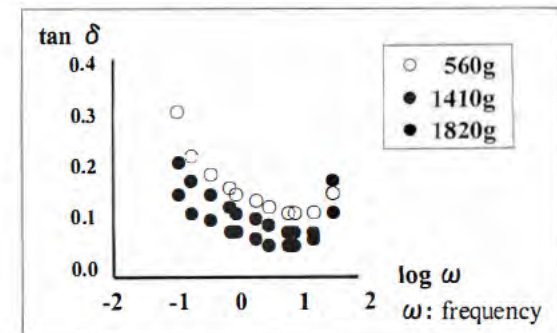
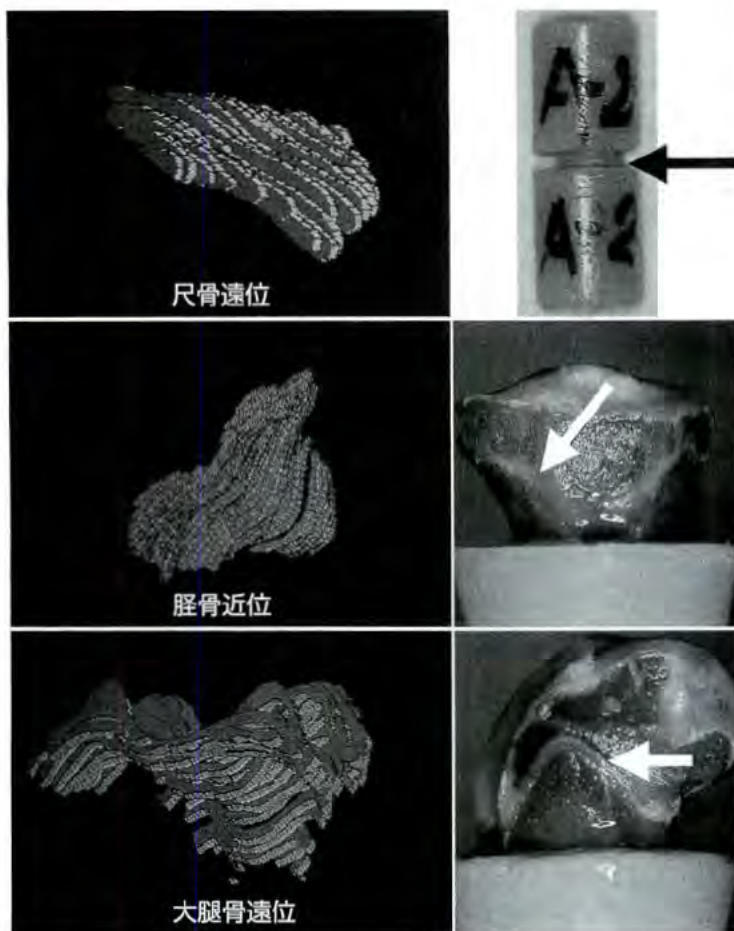


図 2. 損失正接の周波数特性と体重による変化  
損失正接は周波数 1~10 Hz の間最小値をとり、体重の増加につれて低下した

a  
b  
c

図 1

骨端軟骨板の三次元的起伏と試験片

- a : 尺骨遠位：平坦な楕円形状
- b : 脛骨近位：翼状でハート型
- c : 大腿骨遠位：4つの円錐状突起をもつ楕円形状

ring と perichondrium を除去した除去群と温存群の力学的比較を行った。その結果、引張試験(引張速度 0.2 mm/min)では除去群の最大破断強度(kgf)は  $2.72 \pm 0.78$ 、温存群は  $4.44 \pm 1.09$  であった。ねじり試験では除去群の最大破断強度(kgfc)は  $0.37 \pm 0.05$  で温存群は  $1.04 \pm 0.20$  であった。骨端軟骨周囲軟部組織は骨端軟骨の力学的強度を約 2 倍高めていた。

### 3) 骨端軟骨板の三次元的起伏の力学的影響<sup>6)</sup>

1000 g の幼若雄 NZW 家兎から三次元的起伏の異なる骨端軟骨部(図 1)を摘出した。

- ① 平坦で楕円形状をもつ尺骨遠位骨端軟骨
- ② 鳥が羽を広げたような翼状でハート型形状の脛骨近位骨端軟骨
- ③ 大小 4 つの円錐状突起をもつ楕円形状の大腿骨遠位骨端軟骨

これらに静的ねじり試験(0.2 rpm)を行った。軸方向の共役応力は非拘束設定とし、Salter-Har-

ris I 型の損傷を生じさせた際の最大破断強度を計測した。その値を用いて骨端軟骨板が同じ面積を有した平坦な軟骨と仮定した際の最大剪断応力  $\tau_{max}$ (kgf/cm)を算出した結果、①は 0.90、②は 1.82、③は 2.67 となった。②と③の値はそれぞれ①の約 2 倍、3 倍であった。 $\tau_{max}$  は材料定数なのでこの差は三次元的起伏による影響と考えた。三次元的起伏がねじり負荷での骨端軟骨の力学的強度を高めていた。

## 2. 成長過程にともなう力学的特性の変化

### 1) 静的引張試験における力学的特性の変化<sup>15)</sup>

幼若雄日本白色家兎を材料とし、静的引張試験(引張速度 10 mm/min)と同時に非接触変位測定システム(CCD カメラ)を用いてひずみ計測を行った。楕円形に近似させ最大破断応力および Young 率を算出した。最大破断応力は体重の増加につれて  $0.57 \sim 2.59$  MPa ( $1.13 \pm 0.53$ ) に、Young 率は  $3.29 \sim 61.0$  MPa ( $21.1 \pm 14.0$ ) に変

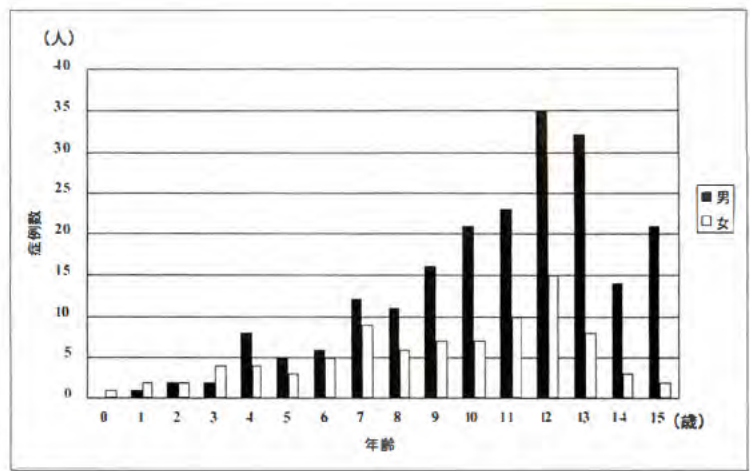


図 3. 骨端線損傷の年齢別・男女別症例数

化した。体重と正の相関(最大破断応力： $r=0.43$ ,  $p<0.05$ , Young 率： $r=0.56$ ,  $p<0.05$ )を認めた。最大破断ひずみは  $0.023\sim0.265(0.105\pm0.069)$  であり、体重と負の相関( $r=0.63$ ,  $p<0.05$ )を認めた。組織学的な破断部位は増殖細胞層における肥大細胞層との境界部分であった。

### 2) 成長過程における動的粘弾性特性の変化<sup>14)</sup>

成長に伴う粘弾性的性質の変化を、動的粘弾性スペクトロメーターを用いて検索した。雄日本白色家兔の橈骨および尺骨遠位部を材料とし、粘弾性スペクトロメーターの初期圧を 100 g、ひずみは 5% に設定した。周波数を 0.01, 0.1, 1, 10, 20, 40, 80 Hz と変化させた。その結果、絶対弾性率は  $0.6\sim2.6(1.57\pm0.47)$  MPa, 貯蔵弾性率は  $0.6\sim2.6(1.57\pm0.50)$  MPa, 損失弾性率は  $0.1\sim0.5(0.21\pm0.10)$  MPa, 損失正接は  $0.06\sim0.31(0.14\pm0.06)$  となった。損失正接は損失弾性率と貯蔵弾性率の比である。貯蔵弾性率は弾性的性質を損失弾性率は粘性的性質を反映している。周波数の増加で絶対弾性率、貯蔵弾性率は増加、損失弾性率には変化はなかった。損失正接は 1~10 Hz の周波数の間で最小値を有し、0.1~20 Hz において体重と損失正接に有意な負の相関(図 2)を認めた。損失正接が高いと繰り返し負荷において劣化しやすい。損失正接が成長過程を通じて 0.1~20 Hz の周波数域で有意に最低値を有していたことから骨端軟骨板は日常生活動作範囲で耐久性の高い材質であった。

### 3. まとめ

- 1) 骨端軟骨は引張、ねじり、曲げ負荷に弱く、圧縮負荷に強かった。
- 2) 骨端軟骨部は骨端軟骨周囲軟部組織により補強されていた。
- 3) 骨端軟骨の三次元的起伏はねじり負荷に対して抵抗する構造であった。
- 4) 引張負荷で脆弱な部位は増殖細胞層における肥大細胞層との境界部分であった。
- 5) 骨端軟骨は成長につれ力学的強度を増し、粘性的性質から弾性的性質に変化した。
- 6) 骨端軟骨板は日常生活動作での繰り返し負荷に対して耐久性の高い組織であった。

### 骨端線損傷の疫学

#### 1. 目的

総合病院 5 施設<sup>2)</sup>, 開業医院 3 施設<sup>3)</sup>の計 8 施設での小児骨折に対する骨端線損傷の発生頻度を調査し、性別、発生部位別、Salter-Harris 分類(以下 S H 分類とする)別に疫学的検討を行った。

#### 2. 対象

15 歳以下の小児骨折は 1656 例であり、男児 1188 例、女児 468 例であった。骨端線損傷は 297 例で、男児 209 例、女児 88 例であった。受傷時年齢は 8 か月~15 歳、男児平均 10.2 歳、女児平均 9.3 歳であった。

#### 3. 結果

1) 発生頻度：小児骨折に対する骨端線損傷の割合は 17.9% であった。男児は 17.6%、女児は

表 1. 骨端線損傷の部位別・Salter Harris 分類別症例数

	I	II	III	IV	計
手指骨	5	48	8	4	65
上腕骨外顆		48		4	52
橈骨遠位	2	33	1	1	37
腓骨遠位	25	8			33
上腕骨内上顆	26				26
足趾骨	4	12	4		20
胫骨遠位	2	11	4	2	19
上腕骨近位	9	5			14
中手骨	1	4			5
大腿骨遠位	1	3	1		5
橈骨近位	3	1			4
中足骨	1	1	1		3
尺骨近位	1	1	1		3
尺骨遠位	1	2			3
骨盤骨	3				3
上腕骨遠位		2			2
鎖骨遠位		2			2
鎖骨近位	1				1
	85 例	181 例	20 例	11 例	297 例

表 2. 骨端線損傷の受傷原因

転倒		134 例	(45.1%)
サッカー	20		
自転車	15		
バスケットボール	9		
柔道	9		
野球	8		
その他	73		
転落		68 例	(22.9%)
突き指		39 例	(13.1%)
バスケットボール	12		
ドッチボール	10		
野球	9		
その他	8		
交通事故		15 例	(5.1%)
その他		33 例	(11.1%)
不明		8 例	(2.7%)
計		297 例	(100%)

表 3. 骨端線損傷の治療方法別症例数

Salter Harris Type	保存療法		手術療法	
	開業医院	総合病院	開業医院	総合病院
I	65 (30.1%) (28)	37	19	(0 19)
II	130 (60.1%) (62)	68	52	(5 47)
III	16 (7.4%) (10)	6	4	(1 3)
IV	5 (2.3%) (3)	2	6	(1 5)
計	216	(103 113)	81	(7 74)

表 4. 骨端線損傷の発生頻度

	発生頻度	小児骨折
Worlock ら (1986 年)	18.5%	923 例
Mizuta ら (1987 年)	17.9%	1974 例
自験例	17.9%	1656 例

18.8%であり、男女間に大きな差は認めなかった。骨端線損傷の年齢別発生頻度は、12歳時が男児35例、女児15例の計50例で最も高かった。男女別、年齢別では、男女児とも12歳時にピークを認めた(図3)。S-H分類では、II型が61.3%と最も多く、I型28.3%、III型6.7%、IV型3.7%でV型の症例はみられなかった。

2) 発生部位：手指骨骨端線損傷が65例で最も多く、ついで上腕骨外顆骨折52例、橈骨遠位骨端線損傷37例、腓骨遠位骨端線損傷33例の順で頻度が高かった。S-H分類では、I型で最も頻度が高かったのは上腕骨内上顆骨折で26例、II型は手指骨骨端線損傷と上腕骨外顆骨折がともに48例、III型は手指骨骨端線損傷で8例、IV型は手指骨骨端線損傷・上腕骨外顆骨折で4例であった(表1)。

3) 受傷原因：転倒が134例で最も多く、次に転落68例、突き指39例であった。サッカー、ドッチボール、バスケットボール等、スポーツ活動中の受傷の頻度が高かった(表2)。

4) 治療法：全8施設での治療法は保存療法216例(72.7%)、手術療法81例(27.3%)であった(表3)。

#### 4. 考察

1) 発生頻度：小児骨折に対する骨端線損傷の割合はWorlockら<sup>13)</sup>は18.5%、Mizutaら<sup>8)</sup>は17.9%と報告している。今回我々が行った調査では17.9%であり、従来の報告と大きな差を認めなかった(表4)。骨端線損傷の発症は男児13歳時、女児12歳時にピークがあり、いずれも男女のgrowth spurtの時期と致していた。この年齢層は体格の急激な発達だけでなく、運動量の増加や

表 5. 骨端線損傷の部位別発生頻度

	Mizuta (n=353)	Ogden (n 443)	自験例 (n=297)
上腕骨遠位	6.8(%)	12.7(%)	26.3(%)
手指骨	25.8	9.3	21.9
橈骨遠位	28.3	25.7	12.5
腓骨遠位	3.4	3.4	11.1
足趾骨	7.1	4.7	6.7
胫骨遠位	9.3	13.5	6.1
上腕骨近位	2.0	6.1	4.7
中手骨	4.2	1.8	1.7
大腿骨遠位	0.3	3.8	1.3
橈骨近位	4.5	1.1	1.3
中足骨	1.4	0.7	1.0
尺骨近位	0.3	0.7	1.0
骨盤骨	0	5.2	1.0
尺骨遠位	4.5	2.5	1.0
鎖骨遠位	0.8	0.2	0.6
鎖骨近位	0	0.7	0.3
胫骨近位	1.1	4.5	0
大腿骨近位	0	2.0	0
腓骨近位	0	0.5	0

スポーツ活動の高度化を目差す時期でもあり、外傷にさらされる危険性も高いと考えられる。Mizuta ら<sup>8)</sup>は男児で12歳時、女児で11歳時に、Peterson ら<sup>10)11)</sup>は男児で14歳時、女児で11、12歳時にピークがあったと報告した。男児の方が年長の傾向にあり、これは骨端線閉鎖時期の男女間の相違による影響もあるものと考えられる。Salter-Harris 分類別の症例数の割合では Mizuta ら<sup>8)</sup>は S-H I 型 8.5%、S-H II 型 73.0%、S-H III 型 6.5%、S-H IV 型 12%、S-H V 型 0% であり、Peterson らは S-H I 型 13.2%、S-H II 型 53.6%、S-H III 型 10.9%、S-H IV 型 6.5%、S-H V 型 0% であったと報告しており、我々の調査では(表3)S-H I 型の割合が従来の報告より高かった。

2) 発生部位：従来の報告<sup>8)9)</sup>に比べ、上腕骨遠位骨端線損傷や腓骨遠位骨端線損傷の頻度は高く、橈骨遠位骨端線損傷の頻度が低かった(表5)。これは、海外の文献とで母集団が必ずしも一定ではないことや、欧米との生活様式やスポーツ活動の内容の相違等も要因として考えられる。I 型の腓骨遠位骨端線損傷の診断は単純 X 線では困難なことがあるが、局所所見にて I 型の腓骨遠位骨端線損傷が疑われる場合には我々はストレス撮影を実施している。従来の報告に比べ腓骨遠位骨端線離断の症例数が多いのは診断法の違いによるものと考えている。上腕骨外顆骨折で従来から S-H IV 型とされていたが、近年は上腕骨小頭を横切る骨折が IV 型、骨折線が骨端線に平行に走って滑車におよぶものは II 型と分類されることが多い<sup>3)</sup>。今回の調査では、上腕骨外顆骨折 52 例中 48 例(92.3%)が II 型であった。従来の報告では上腕骨外顆骨折を IV 型とするものが多く、部位別発生頻度の差としてあらわれたものと考えられる。対象、期間とも総合病院の方が多く、上腕骨遠位骨端線損傷などの症例が多くなったものと考えた。

3) 受傷原因：スポーツでの転倒が 45.1% と半数近くをしめていた。スポーツ中の骨端線損傷はバスケットボール 21 例、サッカー 20 例、野球 17

例、柔道 9 例の順に多く、これら 4 種目で合計 67 例(22.6%)を占めていた。転落は 22.9% を占めており、主に肘周辺や手関節周辺の骨折の主な原因であった。

4) 治療法：骨端線損傷の治療法については、Mizuta ら<sup>8)</sup>は 92.1%、Peterson ら<sup>10)</sup>は 92.7% が保存的に治療されたと報告している。本調査では 72.7% が保存療法であった。これは上腕骨遠位部の骨折などに対して手術をよく行っている総合病院での症例が多かったこと、対象が総合病院での症例の方が多く、その調査期間も長かったことに起因していると考えた。

#### 参考文献

- 1) 石野明成, 榊田喜三郎, 山下文治ほか: 骨端軟骨板の生体力学的特性に関する研究—圧縮強度について—(第1報). 中部整災誌 27: 250-251, 1984.
- 2) 河本浩栄, 金 郁喆, 細川元男ほか: 小児骨折に対する骨端線損傷の疫学的検討. 日小整会誌 8: 196-200, 1999.
- 3) 河本浩栄, 金 郁喆, 細川元男ほか: 開業医院での小児骨端線損傷の疫学調査. 日小整会誌 9: 259-263, 2000.
- 4) 金 郁喆, 榊田喜三郎, 山下文治ほか: 骨端軟骨板の力学的強度と形態学的特殊性. 中部整災

- 誌 31 : 737 739, 1986.
- 5) 金 郁喆, 榊田喜三郎, 山下文治ほか: 骨端軟骨板の力学的強度に關与する perichondrium の役割. 中部整災誌 29 : 2212 2215, 1986.
  - 6) 金 郁喆: 骨端軟骨板の三次元的形態と生体力学的特性との關連性. 京府医大誌 97 : 1429 1438, 1988.
  - 7) 金 郁喆, 日下部虎夫, 石野明成ほか: ヒト骨端軟骨板の生体力学的強度. 日整会誌 63 : 931, 1989.
  - 8) Mizuta T, Benson WN, Foster BK et al : Statistical analysis of the incidence of physeal injuries. J Pediatr Orthop 7 : 518 523, 1987.
  - 9) Ogden JA : Injury of the growth mechanisms of the immature skeleton. Skel Radiol 6 : 237 253, 1981.
  - 10) Peterson HA, Madhok R, Benson JT et al : Physeal fractures : Part 1. Epidemiology in Olmsted country, Minnesota, 1979 1988. J Pediatr Orthop 14 : 423 430, 1994.
  - 11) Peterson HA : Physeal fractures : Part 3. Classification. J Pediatr Orthop 14 : 439 448, 1994.
  - 12) 鈴木雅清: 骨端離開のメカニズムに關する力学的基礎的研究. 京府医大誌 97 : 247 258, 1988.
  - 13) Worlock P, Stower M : Fracture patterns in Nottingham children. J Pediatr Orthop 6 : 656 660, 1986.
  - 14) 吉田宗彦: 成熟過程における家兎骨端軟骨板の動的粘弾性特性の變化. 日本臨床バイオメカニクス 15 : 147 150, 1994.
  - 15) 吉田宗彦: 成熟過程における家兎骨端軟骨板の生体力学的特性の變化. 京府医大誌 104 : 617-629, 1995.

## Abstract

### Pathophysiological and Epidemiological Study of Physeal Injury

Wook Cheol KIM, M. D.

Department of Orthopaedics, Graduate School of Medical Science,  
Kyoto Prefectural University of Medicine

The growth plate is injured more easily than bone by mechanical loading. In this paper the biomechanical properties of the growth plate were examined to clarify the pathophysiology. The maximum strength of the growth plate was similar to that of a match stick. The surrounding soft tissue of the perichondrium and perichondrial ring reinforced the maximum strength of the growth plate against tensile and torsional loading. A three dimensional contour of the growth plate also demonstrated the power of resistance against torsional loading. The viscoelasticity of the growth plate became the more elastic with increasing growth. In this paper we also examined the study of growth plate epidemiologically. The incidence of physeal injury was 17.9% among all fractures in children. This incidence was similar to that reported elsewhere. Both boys and girls also showed a peak incidence of physeal injury during in their growth spurt periods. the main causes for physeal injury were falling down, and falling with toe or finger sprain. The most frequent site of injury was around the elbow joint. The treatment method was mostly conservative. However among our cases, operative treatment was slightly more frequent than in other reports. This was likely due to more severe cases of physeal injury being referred to us as a general hospital.