

過剰荷重に対する骨の変化に関する実験的研究

(本論文の要旨は第28回日本整形外科学会において発表した)

岡山大学医学部第一(陣内)外科教室(指導:陣内教授)

副 手 小 林 康 三 郎

〔昭和31年3月10日受稿〕

内 容 目 次

第1章 緒言ならびに文献	
第2章 実験方法	
第3章 橈骨部分切除後尺骨のレ線学的研究	
第1節 実験方法	
第2節 実験成績	
第3節 小 括	
第4章 骨模型による光弾性学的研究	
第1節 緒言ならびに文献	
第2節 実験材料ならびに実験装置	
第3節 実験方法ならびに予備試験	
第4節 実験成績	
第1項 骨肥厚に関する実験成績	
第1目 橈骨部分切除直後の場合	
第2目 橈骨切除後12週目の場合	
第3目 橈骨部分切除とともに尺骨を一部削除した直後の場合	
第4目 橈骨部分切除とともに尺骨を一部削除して2週後の場合	
第2項 骨彎曲の変化に関する実験成績	

績	
第1目 橈骨部分切除直後の場合	
第2目 橈骨部分切除後8週目の場合	
第3目 橈骨部分切除後33週目の場合	
第5節 考按ならびに小括	
第5章 水銀微細粒子注入による骨血管のレ線学的所見	
第1節 緒言ならびに実験方法	
第2節 実験成績	
第3節 小 括	
第6章 組織学的研究	
第1節 実験方法	
第2節 実験成績	
第3節 小 括	
第7章 総括ならびに考按	
第8章 結 論	
主要文献	
附 図	

第1章 緒言ならびに文献

1920年 Looser¹⁾ が佝僂病患者下肢のレ線像において透明層“Aufhellungszone”を認め、これについて詳細な報告をなし、これを骨改変層“Umbauzone”と名づけて以来、骨の抗力と作用力との関係については過労性骨障害“Ueberlastungsschäden”として臨床的にも軍陣医学、スポーツ医学、災害医学方面より多大の注目をあびるようになり、臨床的には

Deutschländer²⁾ (1921), Osterland³⁾ (1934), Asal⁴⁾ (1936), Wachsmuth⁵⁾ (1937), Reischauer⁶⁾ (1937), Drescher⁷⁾ (1938), Schink⁸⁾ (1938), Dengler⁹⁾ (1938) 等の、また実験的には Martin¹⁰⁾ (1920), W. Müller¹¹⁾ (1924), 名倉¹²⁾ (1939), Greifenstein¹³⁾ (1930), Kuntischer¹⁴⁾ (1936), Henschen¹⁵⁾ (1936), 石原¹⁶⁾ (1940), 菊池¹⁷⁾ (1952), 市村¹⁸⁾ (1942), 竹林・蔡¹⁹⁾ (1936), 高岸²⁰⁾ (1953) 等の多数の報告がなされている。

すなわち, Martin¹⁰⁾ (1920) は正常犬の橈骨中央部の一部を切除し仮関節を作り, 尺骨にレ線上骨膜肥厚, 仮骨形成および透明層の発生をみ, また W. Müller¹¹⁾ (1924) は家兎下肢を屈曲して腹壁筋肉内に縫合, 膝蓋骨を持続的に牽張位に固定し, その異常機械的刺戟により膝蓋骨に骨折線様透明層が発生するのを認め, また名倉²⁾ (1939) は家兎の一側股関節に種々の関節変形を実験的に作り, それによつて他側関節に異常荷重負担をあたえ, その関節に生ずる変形に関して詳細なる検索をした. さらに Greifenstein¹³⁾ (1930), Küntschner¹⁴⁾ (1936) も Martin, Müller と大体同様の方法により実験を行つている. また Henschen¹⁵⁾ (1936) は金属材料と骨との繰返し荷重に対する疲労現象を結晶学的に比較して両者全く同一なるものと骨には生物学的反応があるため一層複雑であるとしている. 石原¹⁶⁾ (1940), 菊池¹⁷⁾ (1952) は市村¹⁸⁾ 考按のモーターを利用する方法により規則正しく家兎の前腕を叩き, さらに竹林・蔡¹⁹⁾ (1936), 高岸²⁰⁾ (1953) は家兎上下2肋骨を絹糸にて締結し, 呼吸運動に依る締結部を支点とする連続性の橈屈運動を起さしめ骨に透明層を発生せしめている.

つきにかゝる骨に過剰荷重が加わる場合の骨変化に関して, 仮骨の形成に注目をあたえたのは W. Müller²⁵⁾ (1922) をもつて初めてする.

すなわち W. Müller の実験によれば, 犬の橈骨々体部の一部を切除して仮関節を作れば, これに相對した尺骨は約6週間後, レ線像において不鮮明なる境界を示し, つぎに骨膜性骨新生を見, 骨は紡錘状に肥厚する. そしてこの部は初め無構造であるが, 半年後には骨髓腔と厚い骨皮質とが區別されるようになる. これは尺骨に対する機械的刺戟が正常以上に強くなつたため, この部に骨添加作用が起り, 一たん新機能に應ずるだけに肥厚した後には, 再び不必要な添加骨が吸収によつて整理されるのである. すなわちかゝる変化は異常荷重負担に対する骨組織の反応性修理

的作用の結果だと説明している.

Greifenstein もまたこれを追試し, この仮骨を代償性骨腫と命名している. また Küntschner²⁶⁾ (1940) は犬の大腿骨々髓腔に無骨折のまゝ種々の異物を挿入しその際皮質外層の骨膜に著しい仮骨新生を来すことを認め, この無骨折性仮骨の原因を化学的或は機械的刺戟によるとのべている. さらに Maatz²⁷⁾ (1943) は犬の脛骨々髓腔内に無刺戟性金属パネを挿入, かつこれを緊張せしめていわゆる無骨折性仮骨を生ぜしめ, 保田²⁴⁾ (1954) も家兎の正常なる大腿骨に外部よりパネ圧縮法により圧迫を加え, 同様に無骨折性仮骨の生ずることを追試している. さらにまた菊池¹⁷⁾ (1953) は石原の方法に準じ市村考按のモーターを利用することによつて正常家兎長管骨に繰返し屈撓力をあたえ, これに無骨折性仮骨形成を生ぜしめ, その骨血管の変化について詳細なる記述をなした.

かくの如く過剰荷重に対して生ずるいわゆる力学的仮骨に関してはかなり多くの研究報告がある.

一方, 機械的刺戟の影響による骨の変化に関しては Julius Wolff²⁸⁾ (1871) の骨応変則 (das Gesetz der Knochentransformation) を初めとして多数の論説を出見することができ, 各家の意見も未だ一致を見ない現況である. すなわち J. Wolff によれば, 骨は静力学的条件に対し一定の法則に従つてその構造を順応する能力がある. 例えば長管骨が彎曲するときには, その彎曲凹側には圧迫力が増加するために骨皮質は肥厚し, 骨海綿質も密なる構造を示すに至るけれども, 彎曲の凸側は圧力の軽減によつて骨皮質は細く, 骨梁網も空疎となる. すなわち圧力の増加は Knochenanbau に導き, これに反し, 圧力の減少は Abbau に導くと説明している.

Pommer²⁹⁾ (1885) は, 骨組織が骨質の損傷を起さない範囲内において各種機械的刺戟すなわち “Druck, Zug” を受けた場合, その部には徐々に直接的骨添加作用が惹起され, これに反して, かゝる刺戟を受けなかつた部

分においては骨吸収作用が起り、これによつて骨は新しい条件、すなわち機能に適応した形状ならびに構造に改造せられるといつてゐる。

Roux³⁰⁾ (1883) の提唱した機能適応論に従えば、骨は新しい機能に応じて、その構成と形態とを変え得る性質をもつとせられ、圧力および圧力と牽引力の交番作用の増加により骨新生は促進せられ、その低下により廃用性萎縮に陥るとせられ、すなわち Wolff の基本的思想が形を変えていい現わされたものといえる。Hüter 及び Volkmann 両教授によつて提唱された理論は、骨の生育は圧力の異常増加によつた障碍せられ、圧力の軽減によつて促進されると説かれている。

Wehner³¹⁾, Biebl³²⁾ は一定の圧迫応力下には多量の仮骨が形成されるとのべ、Krompecher³³⁾ は物理的因子を圧迫、牽引、無作用に分け、骨組織の形成はこれら外力のそれぞれに適応した分化形式で行われるとのべている。

また名倉³⁴⁾ は骨の作用力が骨の抗力よりも小さいか等しいときには、作用力の増加は Knochenanbau を促進し、その減少は Abbau に導くとのべている。その他保田²⁴⁾ は単に骨軸に沿う圧縮力だけでなく、軸に直角に加わる圧縮力の場合にも、外骨膜にては骨性仮骨を、内骨膜にては骨幹部に長大かつ肥厚せる骨梁の発生することを組織学的及びレ線学的に認め、仮骨の成形は骨の圧縮部より起ると結論している。また菊池¹⁷⁾ は無骨折性仮骨は加圧側において牽張側より強度に現われるがその変化には本質的な差異はないとのべている。

かくの如く機械的異常刺激に対する骨の変化に関しては古くより諸家の研究報告があり、とくにその際発生する仮骨形成に関しては、それが機械的要求の異常増加により促進されるという点におゝむね諸家の意見の一致を見ているようであり、さらに現今ではそれに対する純生物力学的な条件が重要視されて来つゝあるが、私はこれら無骨折性仮骨に関する実験的研究が多くは機械的的刺激を骨に人工的

に短期日内に加えることにより行われているのに対して、もし正常骨に、比較的自然的な状態の下で徐々に異常荷重負担が加わる場合には、これが骨の応変 Knochentransformation と関連していかなる態度をとるか、とくにその際生ずる仮骨形成は力学的にいかなる機序によるものかを検索すべく、Müller 等の行つた方法に準じ、正常骨に異常荷重負担をあたえ、これをレ線学的に逐次経過を追つて観察するとともに骨模型による光弾性写真を撮り、その内部に生ずる歪より応力の分布状態を検索し、さらにまたこの際出現する骨変化において、骨血管がいかなる変化を示し、どのような役割を演じているかを見んとして、組織学的に検索するとともに血管造影法を応用してさらに詳細なる実験を行つた次第である。

第2章 実験方法

実験動物には 6 ないし 10 匹の成熟犬を用い、成長期にある犬はさけた。

骨に異常荷重を負荷するため、さきに Martin, W. Müller, Willich, Reischauer, Küntscher, Greifenstein, Dengler 等が行つた実験に準じ橈骨の一部を切除することにより尺骨に過剰の負荷をあたえることにした。私は橈骨切除部位を上(近位)、中、下(遠位)の 3 群に分つて実験を行つた。

手術方法としては 3% 塩酸モルヒネ液にて麻酔した犬の前腕橈骨側中央部に通常の無菌法を施した後、約 5cm の皮膚切開を加え、橈腕伸筋と総指伸筋を両側に開排した後、尺骨および軟部組織をなるべく傷害しないようにリューエル氏円鑿鉗子をもつて橈骨中央部を骨膜下に約 1.0cm 切除し、水溶性ペニシリン 20 万単位注入後、軟部組織皮膚縫合を行い手術を終えた。なお、術後麻酔の覚醒するまでは該肢に懸垂繃帯を施し、無痛下に急に起立せんとして尺骨に骨折の発生するのを防ぐようにした。以後は別にギプス固定を施さず、自由の状態で飼育し一定期間後屠殺した。

第3章 橈骨部分切除後尺骨のレ線学的研究

第1節 実験方法

術後1週間ないし10日間の間隔をおいて逐次的にレ線撮影を行い、術後33週まで追求した。なお、撮影に当つては橈骨と尺骨の重り合うのを避け、常に一定方向より撮影した。

第2節 実験成績

動物はすべてが必ずしも一定の経過をとるものではなく、場合によつては術後1週間以内に骨折を起すものもあり、また生来短太な尺骨を有するものにおいては長時日にわたつてもほとんど変化を示さないものもあり、各経過における所見は必ずしも一様ではないが、一般的なものについてのべることにする。

第1項 骨幹中位 1/3 部切除群

術後1週目ですでに骨皮質部の朦朧化を来すものもあるが著明なる異常所見は見あたらない。

1～2週後、凸側（橈骨側）、凹側（橈骨反対側）ともに骨皮質部はやゝ幅広くなり、境界僅かに朦朧となる。なおその頃より、凸側え凸を向ける骨の生理的彎曲度に減少を来し始めるものもあり、なお一部には骨幹部にて凹側へ凸を向ける軽度の骨彎曲を示し始めるものもあるが何れも著明ではない。

2～3週目には骨幹部陰影は切除相当部よりやや下方において濃度を増し、凹側部においては外骨膜の肥厚増殖像が現われ、骨彎曲度の変化も漸次著明となつて来る。

4～5週目にては凹側部の外骨膜肥厚像はその度を増し、一部にはいわゆる外骨膜性仮骨を思わせる紡錘状陰影を呈し始めるものもあり、骨髓腔も一般にやゝ狭小となつてくる。なお一部には凹側に骨吸収像を示すものもある。

6～7週目には骨彎曲度も著明に減少し、あるものはほとんど直線に近い状態にまで、さらに進んでは凹側に凸を向ける逆の骨彎曲にさえまでも進展する。

凹側における外骨膜所見は漸次膨隆し、8

～10週において最高となり、骨髓腔も非常に狭小となる。なお、甚だしきは（No. 4 例）写真1のように骨幹長の1/2にわたり、またその幅も肥厚前の2.5倍に達する長大なる紡錘状骨仮形成を見たものもある。

12週目頃よりこの仮骨像は次第に外骨膜層状肥厚の所見に変わり、辺縁をのこして漸次吸収されてゆく。

一方凸側部においては凹側部よりやゝ遅れ、8～9週目頃より外骨膜肥厚増殖像が出現し、10週目頃より外骨膜性仮骨像が現われてくるが、その変化の程度も弱く、また早期に消退する。その変化は凹側部の場合と本質的には差がない。

なお、かゝる仮骨の出現している骨皮質部に骨折線様の透明層を認めたものは1例もなかった。

代表的な1例（No. 13 例）についてレ線学的所見を経時的に示すと第1表の如くであり、さらにそのレ線写真は写真2に示す如くである。

第2項 骨幹近位 1/3 部切除群

本実験群においても、第1群中央部切除群の場合と大体同様な所見であるが、たゞ特異な所見は第1群に比して、骨彎曲度の減少ならびにいわゆる外骨膜性仮骨の発生時期が遅れてみられ、その変化の程度も弱く、かつまた変化の発生部位も第1群よりはやや上方にみられる点である。なかにはかなり長時日にわたつて、骨彎曲度の減少のみみられ、外骨膜肥厚所見の現われないものもある。しかし両者の差は量的比較の問題であつて本質的には差異はない。代表的な1例（No. 48 例）についてレ線学的所見を逐次的に示したのが写真3および第2表である。

第3項 骨幹遠位 1/3 部切除群

本実験群においても前2群とはやゝ同様な所見を示すが、注目すべき所見としては、骨彎曲の変化ならびに外骨膜性仮骨所見が前2群に比して早期に見られかつさらに膨大となれる点である。しかし質的には両者の間に著明な差異は認められなかつたので省略する。

第1表 第1群 逐次的レ線所見 (No. 13 例)

術後 日数	骨皮質部 朦朧化		骨彎曲 度の変 化	骨幹部 陰影濃 化	外骨膜肥厚 増殖像		外骨膜性仮骨		骨髓腔 狹小	骨皮質部吸収像		骨折線 様透明 層
	D	Z			D	Z	D	Z		D	Z	
1 週	⊥	—	⊥	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3 週	+	⊥	⊥((→)	⊥	⊥	—	—	—	—	—	—	—
5 週	+	+	+(→)	⊥	+	—	⊥	—	⊥	—	—	—
7 週	++	+	+(→)	+	++	+	+	—	+	—	⊥	—
8 週	+	+	—	++	+	+	+	⊥	++	—	—	—
10 週	+	+	⊥(→)	++	(—)	⊥	++Ⓔ	⊥	++	⊥	—	—
12 週	+	+	—	++	(—)	(—)	++Ⓔ	+	++	⊥	—	—
14 週	+	+	—	++	(—)	(—)	++Ⓔ	+Ⓔ	++	—	—	—
16 週	+	+	—	++	(—)	(—)	++	+	++	—	—	—
18 週	+	+	—	++	(—)	(—)	++	+	++	—	—	—

D: 加圧側(凹側) Z: 牽張側(凸側) ⑺: 外骨膜層状肥厚所見 (—): 外骨膜性仮骨像に移行

第2表 第2群 逐次的レ線所見 (No. 48 例)

術後 日数	骨皮質部 朦朧化		骨彎曲 度の変 化	骨幹部 陰影濃 化	外骨膜肥厚 増殖像		外骨膜性仮骨		骨髓腔 狹小	骨皮質部吸収像		骨折線 様透明 層
	D	Z			D	Z	D	Z		D	Z	
1 週	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3 週	⊥	—	⊥((→)	⊥	—	—	—	—	—	—	—	—
5 週	+	+	⊥((→)	⊥	—	—	—	—	—	—	—	—
7 週	++	+	+(→)	+	⊥	—	—	—	—	—	—	—
8 週	+	+	++(→)	+	⊥	⊥	—	—	—	—	—	—
10 週	++	++	++(→)	++	++	+	+	⊥	+	⊥	—	—
12 週	+	+	+(→)	++	++	++	++	+	++	⊥	⊥	—
14 週	+	+	⊥(→)	++	+	+	++	++	++	—	+	—
17 週	+	+	—	++	(—)	(—)	++Ⓔ	++Ⓔ	++	⊥	+	—
22 週	+	+	⊥	++	(—)	(—)	++Ⓔ	++Ⓔ	++	—	+	—
24 週	+	+	—	++	(—)	(—)	++Ⓔ	++Ⓔ	++	⊥	⊥	—
27 週	+	+	—	++	(—)	(—)	++	++	++	—	—	—
30 週	+	⊥	⊥	++	(—)	⊥	++	++	++	—	—	—
33 週	+	⊥	—	++	(—)	—	++	+	++	—	—	—

D: 加圧側(凹側) Z: 牽張側(凸側) ⑺: 外骨膜層状肥厚所見 (—): 外骨膜性仮骨像に移行

第4項 一側両前腕骨切除を行つた 場合における対側前腕骨に 生ずる変化について

本実験群においては、各症例とも尺骨には認め得べき異常所見は見出せなかつた。

橈骨においては、術後3週目頃より、その凹側(尺骨側)中位近位境界部のあたりに、骨皮質部の朦朧化を認めるが、その他には特異な所見は見出されなかつた。

しかし1例(No. 35 例)において、その部に術後6週目頃より外骨膜性肥厚増殖像が発

生し、60日目には外骨膜性仮骨像に移行するのを認めたものがある。なお、骨彎曲の変化、骨幹部陰影濃化像ならびに横走透明層は認めえなかつた。

第2節 小 括

以上の逐次的レ線学的所見を小括すると、

1) 橈骨を切除せる尺骨のレ線所見に現われる最初の変化はまづ骨皮質部陰影の境界朦朧化であり、次いで生理的骨彎曲度の減少、骨幹部陰影濃化、さらには外骨膜の肥厚増殖像をみ、これは漸次外骨膜性仮骨像に移行し、

骨髓腔も狭小となり、最大荷重部を中心に紡錘状のいわゆる力学的仮骨の出現をみる。

2) 凹側（橈骨反対側）における力学的仮骨は凸側（橈骨側）のそれよりも早期にかつ高度に現れるが、その変化には本質的な差異はない。

3) レ線所見の出現は中位 1/3 部切除群においては近位 1/3 部切除群におけるよりも早期かつ顕著に現れ、下位 1/3 部切除群では他 2 群に比してより早期かつ著明である。

しかしこれらは量的の問題であつて本質的な差異はない。

4) 一側両前腕骨切除を行える場合の対側前腕骨におけるレ線所見は、尺骨においては特異な異常所見の発現をみない。

橈骨においてはその凹側（尺骨側）骨幹上部に骨皮質部陰影朦朧化、およびごく軽度の外骨膜性仮骨像の出現をみた例がある。

第 4 章 骨模型による光弾性学的研究

第 1 節 緒言ならびに文献

正常骨に持続的異常荷重負担が加わつた場合に生ずる仮骨形成による骨の肥厚ならびに骨彎曲に関しては、W. Müller²⁵⁾ はこれを骨組織の反応性修理的作用の結果だと説明し、緒家の意見もおおむねこれと一致しているようであるが、未だこれに対する生物力学的な関係の詳細な考察はなされていないように思われる。そこで私は光弾性実験を応用して肥厚前後の骨の内部にどんな歪がおこるかを知ることによつて、応力の分布状態を検索し、仮骨形成に関して力学的条件がいかなる役割を演じているかを知らうと企てた。

光弾性実験³⁶⁾というのは構造物の模型について偏光を利用して応力の分布状態を実験的にしらべる方法であつて、その目的は、(1)理論計算によつて求めた成績を実験的に確める場合、(2)機械あるいはその他の構造物の設計に際して、強度および材料節約の点から最も適当な形を実験的に求める場合、(3)精密機械の部分品の変形あるいは歪の状態をしらべる場合等に分けて考えられる。(1)の場合

が従来最も利用された方面であるが、近時は(2)の目的に利用されることが多く、さらに最近(3)の目的にも利用されている。

光弾性実験の原理は 1816 年英国の Brewster³⁷⁾ によつて発見されたもので、ガラスのような透明な均一等方体すなわち非晶体に力を加えて応力を生ぜしめるとこの透明物体は一時的に結晶体の性質を帯び一時的屈折現象を呈する。例えばガラスのブロックをとりこれに上下より圧縮力を加えながら側方から普通の光を投入するとガラス内においてこれは外力の方向に振動する異常光線とこれと直角方向に振動する常光線の 2 つに分れ、それぞれのガラス内における進行速度は応力の存在しないときよりも減少するが、とくに常光線の方の減少が大であることが知られている。いい換えると非晶体であるガラスが荷重方向に光軸をもつ単光軸結晶に一時的に変化することを意味する。従つてこの両光線が透明体を通過する間に光波の相対的遅れあるいは位相差を生ずるのであるが、この遅れは実際には応力と比例の関係をなしている。

今 δ を上記の常、異常両光線の相対的遅れ、 h を透明体を光が通過する方向の厚さ mm、 σ_1 、 σ_2 を光の方向に垂直な面内における 2 つの主応力の値 kg/mm²、 λ を光の波長とすると、これらの間には次式のような関係がある。

$$\delta = \frac{2\pi ch}{\lambda} (\sigma_1 - \sigma_2) \dots \dots \dots (1)$$

(C は物質に特有な常数)

すなわち位相差は波長 λ に逆比例することがわかる。以上のべたように複屈折によつて生ずる位相差 δ は主応力の差 $\sigma_1 - \sigma_2$ に比例するのであるから δ の値を適当な光学的方法によつて知ることができれば $\sigma_1 - \sigma_2$ の値が知れるわけである。この目的に用いるのが偏光である。

いま偏光子 P_1 、 P_2 の軸方向を互に直交の状態に置きその中間に非晶体の透明試験片を置いて外力を加え、生じた主応力 σ_1 、 σ_2 の

一つの方向が P_1 の軸となす角を ϕ とし、振動方程式を $A \sin \omega t$ (A は振幅) とすれば、 P_2 を通過した後の光の強さ I に関しては次の式が成立する。

$$I = A^2 \sin^2 2\phi \sin^2 \frac{\delta}{2} \cdot \sin^2 \omega t \cdots \cdots (2)$$

すなわち外力を加えた試験片を直交偏光子の間に置いて見ると、主応力方向と偏光子の軸となす角 ϕ が一定ならば、位相差 δ とともに光の強さが変化する。云い換えると $\delta = 0, 2\pi, 4\pi \cdots$ のとき視野は暗黒となり、 $\delta = \pi, 3\pi, 5\pi \cdots$ のとき視野は最も明るくなる。そして δ は上述の(1)式により $\sigma_1 - \sigma_2$ と比例するから試験片に加える力を増して δ が増すと、ともに視野は最初の暗黒より始まって明、暗相互に変化することがみられる。

従つて視野が暗黒になる順番（これを消光次数あるいは縞次数という）を数えることによつて主応力差 $\sigma_1 - \sigma_2$ を知ることができる。

このことは主応力方向 σ_1, σ_2 の何れかが偏光子の振動面 P_1 か P_2 の方向と一致する個所において暗黒となることを示すもので、これを逆に利用して主応力の方向を知ることができる。しかしこれは差し当り $\sigma_1 - \sigma_2$ の値を知る上において不便であるから、視野が ϕ の値に影響されないように装置を作る必要がある。この目的のために四分の一波長板が使用される。これは普通雲母の薄板で作つたものであつて、これに主面と 45° をなす方向の振動面をもつ平面偏光を入射せしめると雲母結晶は複屈折現象を起して、常、異常両光線に分れ雲母板を通過せる後の両光線は互に光波の位相差を生ずるが、この位相差を丁度使用波長の $1/4$ になるように雲母板の厚みをとつてあるから両光線の合成波は円軌道を描くいわゆる円偏光となる。すなわち一組の四分の一波長板を加えることによつて(2)式の $\sin^2 2\phi$ の項は1となり視野の明るさは主応力の方向に無関係で主応力差 $\sigma_1 - \sigma_2$ のみによつて定まることになる。すなわち、

$$I = A^2 \sin^2 \frac{\delta}{2} \cdot \sin^2 \omega t \cdots \cdots (3)$$

なる式が成立する。以上が光弾性実験の原理の概略である。

この実験では立体模型を用い三次元の光弾性実験で、衝撃力による変化をみれば最も真に近いものを知りうるわけであるが、(三次元光弾性実験方法としては A. G. Solakian および G. Oppel によつて最初に試みられたいわゆる凍結法と Weller によつて始められた光散乱法の2つがある) 現在のところ、二次元光弾性実験（すなわち平面によるもの）で静力学的荷重によつて知ることを主としている。しかしこれからでも補足的に行われた三次元実験の結果から見て十分に目的は達し得ることが知られている³⁸⁾。なお、この実験には試験片として Phenolite を用いるが、このような均等物質による実験結果が他の構造物に応用しうるか否かについては、弾性理論から、そのものが弾性体であれば、応力の分布状態の比例には変りないことが証明されている。

光弾性実験の医学的応用については、すでに1935年 B. Zák³⁹⁾ がセルロイドを用いて、歯科医療器によつて歯および歯槽に生ずる引張りを定性、定量的に解析し、補填の静力学的問題の研究に応用しているし、また1936年 Alexander⁴⁰⁾ はその医学的応用を指摘し、さらに1939年 H. Milch⁴¹⁾ は大腿骨および踵骨の光弾性写真を撮り、定量的応用の可能性を示唆し、Roux および Wolff の法則を実験的に立証している。なお、わが国においても1952年三木・正林⁴²⁾ は大腿骨上端、脊柱、膝蓋骨を選んで光弾性実験を行い、骨の形態、骨梁の構造等が、力学的に合理的なことを認め、実験的に求めた応力の分布と骨の部分的強度とを比較して、外力による骨の圧縮に対する力学的弱点を知つて、予想される骨折部位、変位等を考察している。さらにまた、1951年岡田⁴³⁾ は光弾性実験により、骨折時に骨内軸法、内副子法の際にいかなる内力分布が起るかを主として定性的に測定している。

かくのごとく、光弾性学の医学研究への応用はますます盛んになりつつある。

第2節 実験材料ならびに実験装置

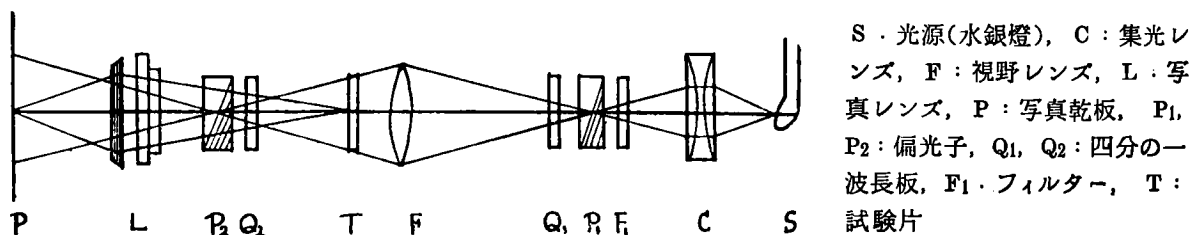
実験材料としてはセルロイド (Cocker⁴⁴⁾) またはベークライト等を用いる方法もあるが、私は玉野市三井造船所研究部小泉、鈴木両氏のすゝめにより“Phenolite”を用いた。このものは高圧下で作られるベークライトと異つて、常圧で石炭酸とホルマリンをアンモニアの触媒作用で結合した人工樹脂で、ヤング率 $10000 \sim 67000 \text{ kg/cm}^2$ 、光弾性常数 $40 \sim 60$ ブリュスター、光弾性感度 α は緑色 $5461\text{\AA}$ にて $0.73 \sim 1.1$ で、光弾性実験には都合のよい性質をもっている。その他米国では Foster の作ったグリピタール樹脂に類似する“Fosterite”を三次元実験に用いている。本邦でこれにやゝ近いものには Glycol にマレイン酸を結合させビニール樹脂を加えたものがある。

骨模型の光弾性実験には、骨の組織的強度、構造、方向性等を一応度外視して均質なものと仮定して二次元的にレ線像より得た尺骨の

形態を複写してこれと全く同型に、厚さ 5.9 mm の Phenolite 模型試験片として応力の入らないように削り出した。試験片加工に際しては initial stress を防ぐため圧力を加えないように、また切削によつて温度を上昇せしめないようにとくに注意し、なお輪廓は板の面に対して正確に直角になるようにした (写真4参照)。

実験装置は第1図の通りで、水銀ランプあるいはアーク灯から出た光は集光レンズCによつて収斂され、フィルター F_1 を通過した単色光は偏光子 P_1 を通つて偏光となり、さらに四分の一波長板 Q_1 によつて円偏光となる。開いた光は視野レンズFによつて再び収斂され、この光は四分の一波長板 Q_2 、偏光子 P_2 を通過して写真レンズLに入り、視野レンズFの後方に置かれた試験片Tの像は乾板P上に投影されることになる。試験片は上下左右に移動できるしつかりとした荷重台に装置した。

第1図 光弾性実験装置



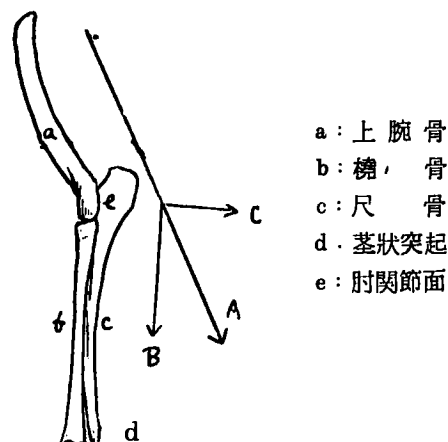
第3節 実験方法ならびに予備試験

第1項 荷重方法

緒言においても記述したように、骨の構造、組織的強度、方向等は各部位において異なるものであるが、一応これら諸因子は度外視して二次元的に均質なものとみなし、また一方附着筋の収縮牽引による力学的因子や、歩行等による動力学的な諸条件をもこれを無視して、起立時の体重負荷による静力学的立場より実験を行つた。

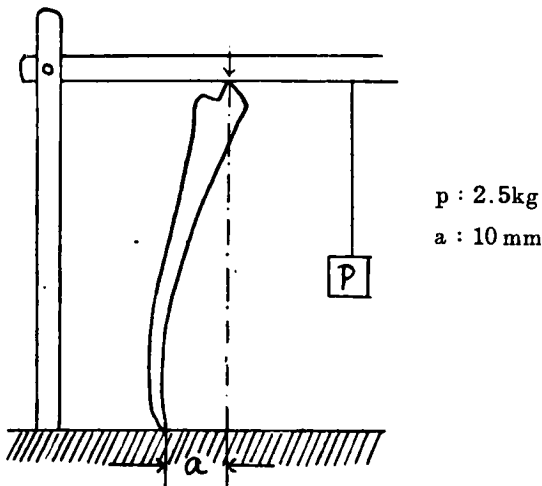
正常骨の起立時、上腕骨と前腕骨の位置的關係は第2図に示す如くで⁴⁵⁾、上腕骨を介して尺骨に加わる体重Aは茎状突起を支点とし、肘関節面においてBとCに分解できると考え

第2図 正常犬起立時、上腕骨と前腕骨の位置的關係



られる。そこで、荷重条件としては可及的基本肢位に近い第3図、に示すとき方法で荷重台上に装置した。なお、試験片の荷重に際しては、試験片下端（尺骨茎状突起）を金属製荷重台上にあてて立て、台の枠にとりつけた

第3図 荷重方法



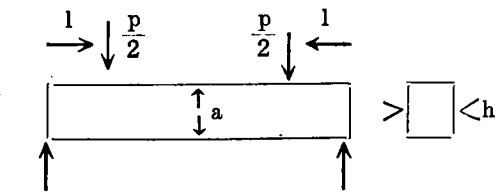
支柱に支点を有する横杆を試験片上端にあてこれを力点とし、横杆の他端に錘をかけて固定荷重した。錘は常に2.5kgを用い、力点より台上へ下した垂線の位置（重点）と試験片下端との距離（a）は常に10mmとした。

第2項 予備試験

仮骨形成に関して力学的関係がいかなる役割を演じているかをしらべるために、私は縞写真法による周辺応力の分布状態について検索してみた。

光弾性写真から主応力差の分布を求めるには縞写真の所要の断面および周辺について縞の消光次数を数え、この断面および周辺の直角方向に適当な長さのスケールをもつてプロットすればよいのである。試験片の自由周辺においては主応力の何れか一方が0であるから、縞次数 n は直ちに周辺の切線方向の主応力を示すわけである。スケールは応力の目盛を示すものであつて光弾性感度 α をカリブレート（目盛）すれば得られる。そこで実験に先立ち、光弾性感度 α のカリブレーションを行つた。それには、第4図に示す如く梁形試験片を両端で自由に支え、両端より等距離 l の2点で等荷重 $p/2$ を加えるときは、

第4図 光弾性感度のカリブレーション



巾 $a=8\text{mm}$ 厚 $h=5.9\text{mm}$ $l=34\text{mm}$ $p=50\text{kg}$

$$\delta = \frac{3 \cdot p \cdot l}{h \cdot a^2}$$

によつて応力 δ が求められ、一方縞次数 n を実測することにより α は求め得られるわけである。すなわち、 δ を試験片中の応力とすれば、上式より、

$$\delta = \frac{3 \times 50 \times 34}{5.9 \times 8^2} = 1.35$$

となる。一方、フェノライトの光弾性感度 α は、

$$\alpha = \frac{n}{\delta \cdot h}$$

であるから、

$$\alpha = \frac{5}{1.35 \times 5.9} = 0.63$$

となる。なお、 n は写真5より実測されたものである。これによつて光弾性感度 α は求められたわけであるから、縞写真より得られる縞次数を n とすれば、 n 次の応力 δ は、

$$\delta = \frac{n}{\alpha \cdot h} = \frac{1}{0.63 \times 5.9} \cdot n = 0.27n$$

となる。例えば、

3次の縞は、 $0.27 \times 3 = 0.81 \text{ kg/mm}^2$

を示すことになる。

第4節 実験成績

縞写真による周辺応力の分布状態には、各症例の間に大なる差異を認めなかつたので、代表的な症例 No. 13 右側例、No. 13 左側例、No. 48 例について述べることにする。

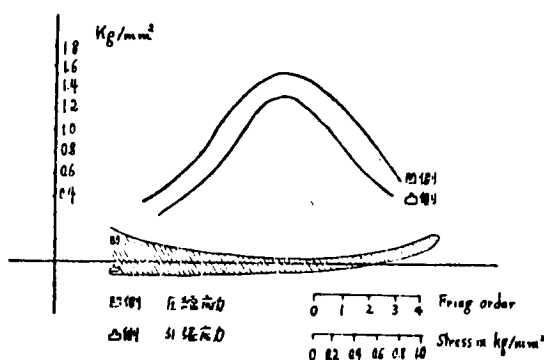
第1項 骨肥厚に関する実験成績

1) a) 橈骨部分切除直後の場合 (No. 13 右側例)

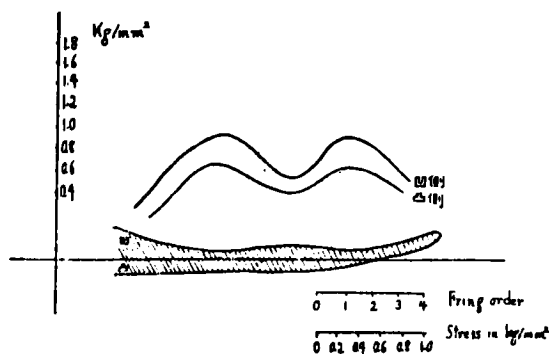
本症例のレ線像は写真2(a)に示すとおりで、この平面で得た尺骨の形態を復写してこれと全く同型のフェノライト試験片を作製し、これを第3図に示したとき荷重方法で求めた光弾性写真は写真6(a)のごとくであ

る。すなわち骨幹部に著明な応力を認め、両骨端に移行するに従い応力は次第に減少している。なお最大応力は骨幹部中位遠位境界部あたりに認められ、さらに凹側には圧縮応力が、凸側には引張り応力が発生していることがわかる。いまこれら凸凹両側面の周辺応力の分布状態をしらべるために、この縞写真より、さきに予備実験で求めたスケールをもつてプロットすれば第5(a)図のごとくなる。

第5図 橈骨部分切除後尺骨周辺応力分布図
(No. 13 右側例) (a) 術直後



(b) 術後12週目



すなわち凹側にては最高次数6次までを数え、その応力は 1.62 kg/mm^2 ($\delta = 0.27 \times n = 0.27 \times 6 = 1.62$) を示している。凸側にては5次が最高で 1.35 kg/mm^2 ($\delta = 0.27 \times n = 0.27 \times 5 = 1.35$) の応力値を示している。この図より、骨幹部にはかなり大なる応力が発生し、しかも凹側は凸側に比してより大なる応力が現われていることがわかる。

b) 橈骨切除後12週目の場合 (No. 13 右側例)

次に橈骨切除後12週目においては尺骨のレ

線像は写真2(c)に見る如く、仮骨形成による著明なる紡錘状骨肥厚を生じて来る。これと同型の試験片を作り、前回と同様の荷重方法で撮影した光弾性写真は写真6(b)に示す如くである。すなわち骨肥厚部は凸凹両側ともに肥厚前に比して著しく縞次数が減少し、応力の減少を示し、最大肥厚部において最も著しい。骨肥厚部の上下両移行部においては、肥厚前に比して応力の減少は認められるが、なおこれらの部には認め得べき応力の発生が現われている。すなわち最大応力発生部は肥厚前は骨幹部中位遠位境界部であつたものが肥厚後は肥厚部の上下両移行部に移行している。いま肥厚前の場合と同様なスケールをもつてプロットすれば、その周辺応力の分布状態は第5(b)図に示す如くで、凹側最大肥厚部は2次にまで減少し、肥厚部の上下両移行部は3次を示し、その応力値はそれぞれ 0.54 kg/mm^2 ($\delta = 0.27 \times n = 0.27 \times 2 = 0.54$)、および 0.81 kg/mm^2 ($\delta = 0.27 \times n = 0.27 \times 3 = 0.81$) である、凸側肥厚部の引張り応力は1次と2次の中間で略々 0.4 kg/mm^2 を現わし、肥厚境界部においては2次、 0.54 kg/mm^2 の値を示している。すなわち肥厚後は肥厚前 (1.62 kg/mm^2) に比して約 1 kg/mm^2 の応力の減少を来している。

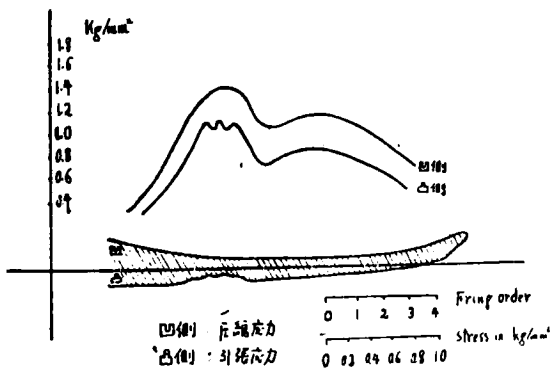
2) a) 橈骨部分切除とともに尺骨を一部削除した直後の場合 (No. 13 左側例)

1) a) および b) の実験を行つた同一犬の他側肢を使用し、橈骨中央部を切除するとともに、その尺骨中央部の一部を削除した直後の光弾性写真は写真7(a)に示す如くである。なお、本手術は右側肢手術後約2ヶ月して行つたものである。写真に示す如く削除部を中心にして著明なる応力の集中が見られ、骨幹遠位部には認め得べき応力が出現しているが、上下方に向うに従い応力は次第に減少している。応力の集中点は最大削除部にほぼ一致し、凹側圧縮応力は凸側引張り応力より大である。同様な方法で周辺応力の分布状態をプロットすれば第6(a)図に示す如くである。

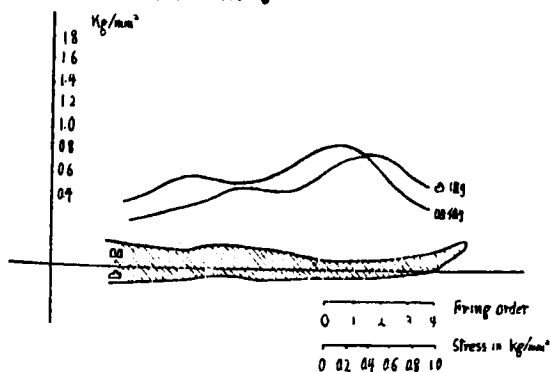
- b) 橈骨部分切除と、ともに尺骨の一部削除して2週後の場合 (No. 13 左側例).

橈骨切除と、ともに尺骨の一部を削除したところ、術後2週目にして尺骨削除部はとくにその凹側部において著明なる骨肥厚を生じて来た。同条件の下に撮影した縞写真は写真7(b)に示す如くである。すなわち、骨幹部は一般に肥厚前に比して著明なる応力の減少を来し、これは骨肥厚部においてとくに顕著である。骨肥厚部より遠位骨幹部にはなお認め得べき応力が出現し、最大応力発生部は骨肥厚下方移行部に求められ、骨肥厚部における凹凸両側の応力の差は減少している。同様な方法でプロットした周辺応力の分布図は第6(b)図に示す如くで、全くことなつた曲線がえられ、骨肥厚部の応力減少および最大応力発生部の移行の状態が判然と比較できる。

第6図 橈骨部分切除兼尺骨一部削除例
尺骨周辺応力分布図 (No. 13 左側例)
(a) 術直後



(b) 術後2週目



第2項 骨彎曲の変化に関する実験成績

- a) 橈骨部分切除直後の場合 (No. 48 例)

本症例のレ線像は写真3(a)に示すとおり

で、これより得た光弾性写真は写真8(a)に見る如くである。No. 13 右側例と同様に骨幹部に認め得べき応力が発生し、上下両骨端に向うに従つて次第に減少し、なお凹側圧縮応力は凸側引張り応力より大である。周辺応力の分布図は第7(a)図に示す如くである。

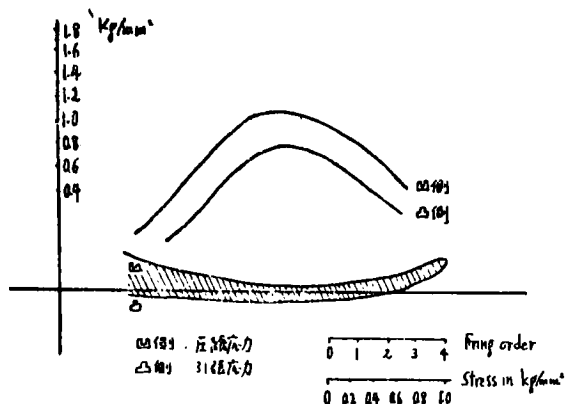
- b) 橈骨部分切除後8週目の場合 (No. 48 例)

橈骨部分切除後尺骨は漸次その生理的彎曲度を減じ、術後8週目においては写真3(b)に示す如く殆んど直線に近い状態となつてくる。なお仮骨形成による骨の肥厚は未だ認められない。同様な条件の下に撮影した光弾性写真は写真8(b)に示す如くである。すなわち、術直後に比して骨幹部は凹凸両側とも全般にわたつてほぼ一様な応力の軽度の減少を呈している。応力の集中はなお骨幹遠位部にあり、両骨端に向うに従つて漸次応力の減少が見られ、凹側圧縮応力は凸側引張り応力より大である。同様なスケールをもつてプロットすれば周辺応力の分布状態は第7(b)図に示す如くで、第7(a)図と比較すれば彎曲度の変化による応力減少の状態が判然とする。

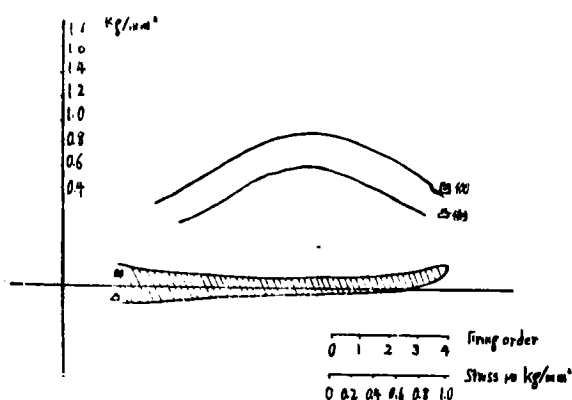
- c) 橈骨部分切除後33週目の場合 (No. 48 例)

術後8週目にて彎曲度の減少から殆んど直線状にまでなつた尺骨は、なおもその彎曲度の変化を続け、さらに10週目頃よりは骨幹部に仮骨形成による骨肥厚を来し始め、術後33週目には写真3(d)にみる如き著明なる骨肥厚を来すに至つた。その光弾性写真は写真8(c)に示す如くで、縞次数より明らかに応力の著明な減少をよみとることができる。骨肥厚部は骨幹近位部とほぼ同高の次数にまで低下し、僅かに肥厚部遠位側移行部において認め得べき応力の発生をみるに過ぎない。すなわち最大応力発生部は肥厚部遠位側凹側面に移行していることがわかる。これをさらに明らかにするために求めた周辺応力分布図は第7(c)図に示す通りである。

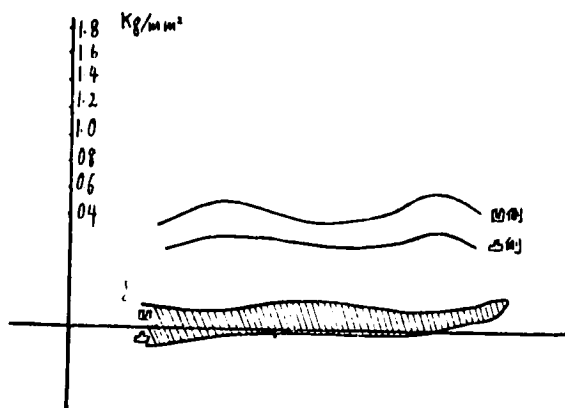
第7図 橈骨部分切除例尺骨周辺応力分布図
(No. 48 例) (a) 術直後



(b) 術後8週目



(c) 術後33週目



第5節 考按ならびに小括

橈骨部分切除直後の正常尺骨光弾性写真によれば、応力の集中は骨幹部中位遠位境界部のあたりに認められ、しかも凹側面における圧縮応力は凸側面の引張り応力より大である。術後数週後より該尺骨は仮骨形成による紡錘状骨肥厚を生じてくるが、この部は肥厚前の最大応力発生部にほぼ一致し、しかも仮骨形成が凸側よりも凹側に著明に現れることは、

肥厚前の凹側圧縮応力が凸側式張り応力より大なることからして、仮骨形成は応力の大なる、いいかえれば異常荷重負担の強くかかる部分に発生し、しかも加圧側において牽張側より強度に現れるということが力学的にいえる。

肥厚後応力は著明な減少を示すが、これは肥厚を来したことにより力学的に非常に安定性を帯びたことを示唆するもので、この肥厚こそ橈骨尺骨両骨で支持していた体重を橈骨部分切除により尺骨のみにて代償しなければならなくなつた生理的代償反応と解してよいと思う。さらに最大応力発生部が肥厚部の上下両移行部に移動したことは、さらに進んでこれらの部に仮骨の形成が続発することを予想できるものである。

橈骨部分切除とともに尺骨中央部の一部を削除した場合、最大応力の発生はこの削除部を中心としてみられたが、2週後生じた仮骨形成による骨肥厚がこの中央削除部に一致したことは、そうでない場合、骨肥厚発生部が骨幹遠位部にあつたことと比べ合わせて、仮骨形成に対して応力の役割の大なることを端的に物語るものであり、なお、凸側面より大なる応力発生をみた凹側面に、より大なる仮骨形成を生じたこともこのことを裏書きするものである。

さらに術後2週目肥厚後の応力が肥厚前に比して頓に減少したことは力学的に非常に安定性を帯びたといえるもので、一つの生理的修復機転の結果と解釈してよいであらう。なお最大応力部が肥厚遠位移行部にあることは引きつゞきこの部に仮骨の形成を来すことを予想せしめるものである。

骨彎曲の変化に関しては、術後いまだ仮骨形成の生じない時期において、次第に骨彎曲度の減少を来し、ついに直線に近くになつてくるが、その発生機転がいつこにあるかはさておいて、ともかく力学的実験結果として、彎曲度の減少により応力の減少がもたらされた事実は、骨彎曲度の減少もまた、骨肥厚の場合と同様、異常荷重負担に対して骨組

織が応力的な安定性を求めようとする一つの反応性代償作用の結果とみなしてさしつかえないと思う。

以上の結果を小括すると、

1) 橈骨切除例における術直後の正常尺骨には骨幹遠位部に大なる応力の発生を見、橈骨切除とともに尺骨中央部の一部を削除した場合における術直後の尺骨には削除部を中心として最大応力の発生を見た。しかも凹側圧縮部の応力は凸側牽張側のそれより大である。

2) 骨肥厚は橈骨切除例にては骨幹遠位部に、橈骨切除兼尺骨削除例にては骨幹中央削除部に発生した。これより仮骨の形成は応力の集中部すなわち荷重負担の最も強くかかる部分に一致して発生し、しかも加圧側において牽張側よりも強度に現われるといえる。

3) 肥厚後骨内の応力は肥厚前のそれと比較して全般に著明なる減少を示した。これは肥厚部においてとくに顕著である。この結果は肥厚により骨が力学的に非常に安定性を帯びたことを物語るものであり、骨肥厚は異常荷重負担に対する一種の反応性代償作用の結果だといえる。

4) 橈骨切除後生じた骨彎曲度の減少も、正常骨と比較して応力の減少を招来した。このことより骨彎曲度の減少もまた、骨組織が異常荷重負担に対して応力的に安定性を求めようとする一つの反応性代償作用の結果で、骨肥厚と同意義を有するものといえる。

第5章 水銀微細粒子注入による 骨血管のレ線学的所見

第1節 緒言ならびに実験方法

骨血管系に関して一言簡記するならば、Lexer⁴⁶⁾は長管骨々血管をつぎの4系統に大別し、(1)栄養動脈系(骨体部血管系)、(2)骨膜血管系、(3)メタフィーゼ血管系、(4)エピフィーゼ血管系としている。

このうち栄養動脈は皮質を斜に貫いて骨髓内に進入し、こゝで両骨端に向つて上行および下行の2枝にわかれ、さらに骨髓内においてそれぞれ数枝に分岐してメタフィーゼにお

よび、主として骨皮質内半を栄養するとされている。骨膜血管は通常網状をなして骨体部をとりまき、正常の場合その血行はきわめて貧弱であり、Johnson⁴⁷⁾によれば骨膜血管は骨皮質外半を栄養するのみとしている。そして正常の場合骨皮質をとおしての骨髓血管と栄養動脈との間の吻合は、直接にはないといっている。

実験方法は、血管造影剤として菊池¹⁷⁾は朱墨を使用した。私は津下、道岡³⁵⁾が創案したつぎのごとき方法で行つた。すなわち、水銀50gに脱水ラノリンを10gの割合に加えて乳鉢ですり、水銀を微細粒子となし、注入時にはこれにテルペン油15ccを混入して加温攪拌後たゞちに屠殺直後の上腕動脈より注入した。注入後は動脈を結紮して暫時放置し、軟部組織を除去したのちレ線撮影を行つた。

第2節 実験成績

骨に過剰荷重が加わつた場合、骨血管に生ずる変化はつぎの項目に掲げる如くである。

1) 骨栄養動脈の変化。

骨栄養動脈に生ずる変化は、その分岐状態の複雑化と血管陰影の淡細化である。

かかる変化は術後10日目頃から起り始め、術後3週目頃までは過剰荷重の最も強く働らく箇所すなわち尺骨骨幹部中1/3部に著明で、その下行枝より多数の微細血管が分岐するのがみられるが、栄養動脈起始部附近すなわち尺骨上1/3部にてはその変化は殆んど認められない。

しかし3週目頃からはこの変化はかなり広範囲にまでおよんでくる。

かかる変化は術後約14週目頃まで継続してみられるが、以後は漸次正常に復してくる。

2) 肥厚増殖せる外骨膜部および該部固有骨皮質部における変化。

肥厚増殖せる外骨膜部、いわゆる外骨膜性仮骨部および該部固有骨皮質部における変化は血管の拡張、新生又は侵入所見である。

術後1週間ないし10日目頃においては荷重負担部すなわち尺骨骨幹部中1/3部の骨膜に、不均等な点滴状陰影として微細血管の発生を

みる。

術後2週目になると紡錘状肥厚部の中心を中心としてほぼ放射線状に並列する微細な血管の新生を見、これはさらに粗な血管網を形成し骨肥厚部に蟄集してくる。なお、これらの新生血管は一部骨栄養動脈と吻合せる状態を呈している。かゝる変化は異常荷重負担の強くかゝる部分に著明であつて、その範囲もおゝむね紡錘状骨肥厚部に限局されたものである。

かゝる所見は手術後3週目を頂点として8週目まではかなり著明であるがその後次第に弱まってくる。

術後各時期の骨血管の変化は第3表に示す通りであり、写真9は術後3週目の骨血管造影所見である。

第3表 骨血管のレ線学的変化

犬 番 号	術後屠 殺まで の日数	骨 栄 養 動 脈		肥厚増殖せ る外骨膜部 及び該部固 有骨皮質部
		分 岐 の 複 雑 化	血管陰影 淡細化	血管の拡張 新生・侵入
No. 2	1 週	—	—	+
No. 7	10 日	+	++	++
No. 51	2 週	+	+	+
No. 50	3 週	++	++	++
No. 33	5 週	++	++	+
No. 36	8 週	+	+	+
No. 17	10 週	++	+	⊥
No. 37	12 週	+	+	—
No. 13	14 週	+	⊥	—
No. 25	17 週	⊥	—	—
No. 14	21 週	—	—	—

第3節 小 括

血管造影法による骨栄養動脈の変化はその分岐の状態の複雑化と陰影の淡細化である。術後10日目頃から起り始め、術後約14週目頃まで存続する。

また肥厚増殖した外骨膜部、いわゆる外骨膜性仮骨部および該部固有骨皮質部には血管の侵入、新生、拡張を認めるが、この変化は術後1週目より起り始め、術後8週目頃より

次第に弱まってくる。

第6章 組織学的研究

第1節 実験方法

水銀は各分子間の凝集力強く、周囲組織との粘着性に乏しいため、微細血管の検索にはなお不十分な点があるので、さらに墨汁注入法をあわせ行つた。これには市販の良質固形墨をすつて、これに5%の割にゲラチンを加え、さらにフランネルで濾過したものを使用した。水銀注入法と同様屠殺直後、上腕動脈より注入、一定時間動脈結紮後軟部組織を除去して骨標本を取り出した。

取り出した骨標本は10%中性ホルマリンにて固定後、10%塩酸液中にて電気脱灰をなし、ツェロイチン包埋後ヘマトキシリン・エオジン重染色を施し鏡検した。なお一部は無染色透明切片として観察した。

第2節 実験成績

第1項 骨血管の変化

1) 固有骨皮質部

固有骨皮質部における骨血管の主な組織学的変化はハーベルス氏管の拡大、走行の不整および著明なる内部血管の拡張、充血である。血管の切離、出血巣および血管栓塞の所見は認められない。かゝる血管の変化は凹側圧縮側においては早期かつ旺盛であるが、凸側牽張側においては凹側のそれよりも貧弱である。

2) 外骨膜性仮骨部

外骨膜性仮骨部における骨血管の所見は新生血管の侵入である。手術後早期に出血巣の認められるものもあるが、血管栓塞の所見は認められない。なお、凹側圧縮側における変化は凸側牽張側におけるそれよりも早期かつ旺盛である。

以上骨血管の所見は手術後早期にすでに著明に認められ、手術後10～14週目までかなり強く遺残する。これらの変化を経時的に示せば第4表の如くであり、その組織標本は写真10、写真11に見る如くである。

第4表 骨血管の組織学的所見概括

犬 番 号	術後 屠殺 マ デノ 日数	固有骨皮質部								外骨膜性仮骨					
		ハーベルス氏管の 拡大・走行不整		血管の 拡張		血管の切 離出血巣		新生髓 腔形成		血管の拡張・ 新生・侵入		新生髓腔形成		血管の切離 出血巣	
		D	Z	D	Z	D	Z	D	Z	D	Z	D	Z	D	Z
No. 2	1 週	卅	+	⊥	—	—	—	—	—	+	—	—	—	+	—
No. 51	2 週	卅	+	⊥	—	—	—	—	—	+	⊥	—	—	—	—
No. 12	3 週	卅	卅	卅	⊥	—	—	⊥	—	卅	⊥	⊥	—	—	—
No. 10	4 週	卅	卅	卅	⊥	—	—	⊥	⊥	+	⊥	卅	+	—	—
No. 33	5 週	卅	⊥	卅	+	—	—	+	+	卅	+	+	—	—	—
No. 35	7 週	卅	+	卅	卅	—	—	卅	+	卅	+	卅	—	—	—
No. 4	9 週	卅	+	+	+	—	—	+	⊥	卅	卅	+	—	—	—
No. 37	12 週	卅	卅	卅	+	—	—	—	+	卅	卅	卅	—	—	—
No. 13	14 週	卅	+	+	+	—	—	卅	—	卅	+	卅	卅	—	—
No. 25	17 週	+	—	—	—	—	—	卅	+	卅	—	卅	—	—	—
No. 14	21 週	+	⊥	—	—	—	—	卅	—	—	—	+	—	—	—
No. 68	25 週	+	—	—	—	—	—	+	—	+	—	卅	+	—	—
No. 1	30 週	⊥	⊥	—	—	—	—	卅	—	—	—	+	+	—	—
No. 18	35 週	+	—	—	—	—	—	卅	+	+	⊥	卅	—	—	—

第2項 外骨膜性変化

外骨膜性の変化は外骨膜の肥厚増殖について膨大なる骨様組織すなわち外骨膜性仮骨の発生であつて、これが窩状に吸収されて新生髓腔を形成しながら次第に骨組織へと移行する。骨組織中には最後まで幅の広い新生骨髄の遺残がみられ、内容は次第に正常骨髄に近似してくる。なお、外骨膜の変化も手術後18週に至れば殆んど正常に復する。

かゝる外骨膜性変化においても、その所見は凹側圧縮側に強く牽張側においては微弱であるがその性質には本質的な差は在存しない。

第3項 固有骨皮質部の変化

固有骨皮質部における骨細胞壊死はとくに凹側圧縮側に強く、手術後1週目より発現し、3週目頃までは相当広範囲にわたつてみられるが、術後6週目以後には吸収せられて骨壊死像は極めて少い。吸収像は凸側牽張側においてとくに旺盛で、術後10日目頃より著明となり術後10週目まではかなり顕著に認めうる。なお、骨吸収の状態は主として窩状吸収である。ハーベルス氏管は拡張し走行不整となり、また血管の拡張充血が著しい。

第4項 内骨膜及び骨髓部の変化

内骨膜性の変化は全般に微弱で特記すべき所見を見出し得ない。

骨髓部における線維性骨髓の発生はおゝむね手術後12週目まで認めうる。

第3節 小 括

全期を通じて外骨膜性の変化がその主なるものである。すなわち、過剰荷重負担部である骨幹部とくにその凹側圧縮部における骨膜の肥厚増殖像、さらにこれにひきつゞき術後5～6週目頃から現れる著明な外骨膜性の骨様組織すなわち外骨膜性仮骨形成の発現である。固有骨皮質部の変化も著明で骨細胞壊死およびその後長期間にわたる吸収像が認められる。外骨膜性仮骨部および固有骨皮質部には多数の小髓腔の形成が見られ、その後さらに幅員を加えた新生髓腔の形成となり、ついには線維性骨髓の形態をとるにいたる。内骨膜性の変化は著明ではない。

第7章 総括ならびに考按

骨に過剰荷重が加わる場合、すなわち生骨に繰返し継続せる軽度の機械的外力が作用し、しかもその作用が骨の硬度限界内にあるとき、その集積が生骨の構造を改築しつつには連絡

遮断せられ、いわゆる骨折をもきたすことを過労性骨障碍、疲労性骨折等と呼び、さらにその際骨折に先んじて生ずる仮骨ないし骨膜肥厚を非骨折性仮骨 *Frakturloser Kallus* (König, Küntscher²⁶⁾), 骨折先行性仮骨 *Praefraktuelle Kallus* (Seeliger⁴⁸⁾), 代償性骨症 *Vikarieierende Osteose* (Greifenstein¹³⁾), 骨膜紡錘状肥厚 *Spindlige Wucherung* 等と称して古くより数多くの臨床的ならびに実験的報告がなされている。いま、これら骨の抗力と作用力との不均衡な場合に生ずる骨変化についての先達諸賢の報告を纏いてみよう。

正常骨に過剰作用力が加わる場合に関しては、1921年 *Deutschländer* は臨床的に初めて扁平足にあらざる一種の足疾患、すなわち外傷なくして第3中足骨に裂離骨折と骨肥厚をきたした疾患を報告し、毒力の弱い細菌によつて亜急性の骨膜炎および骨炎を生じたものであるとした。この *Deutschländer* 氏病あるいは *Fußgeschwulst* について *Bittrolff*⁴⁹⁾ (1926) は継続する機械的荷重に対する中足骨の *Insuffizienz* であるといふ、*Erb*⁵⁰⁾ もこの説を支持した。*Ollonqvist*⁵¹⁾ (1931) は新兵に本疾患の発生することを知り、組織学的検査の結果出血と不規則なる骨層板構造を有する新生骨のあることを発見したが、これは疾患ではなくし荷重による裂離骨折であるとし、新生骨および骨膜性仮骨は裂離の結果生じたものであると断定した。この頃から新兵と本病との関係が重要視され始めたが、*Osterland*³⁾ (1934), *Asal*⁴⁾ (1936), *Reischauer*⁶⁾ (1937) 等は何れも相ついで兵士につき本病の調査を行つた。*Osterland* は骨折原発説を唱え、これは機械的障碍であるとなし、*Frakturresorptionsspalte* なる名称をあたえたほどである。以上の如く軍陣医学を初めとして、近時はスポーツ医学、あるいは平時の職業病として本邦においても多くの報告を見出すことができる。すなわち、城戸⁵²⁾ (1950) は野球投手の肘関節についてレ線学的に詳細な報告をなし、また大木⁵³⁾ (1944), 井口⁵⁴⁾ (1944), 鈴木⁵⁵⁾ (1943), 水町⁵⁶⁾ 等もそれぞ

れ過剰荷重に対する正常骨の反応に対して臨床的に興味ある報告をなしている。

正常骨に実験的に異常荷重をあたえた報告も、さきに緒言にてのべた如く、*Martin*¹⁰⁾ (1920) が正常犬橈骨中央部の一部を切除して同側尺骨に自然的に過剰荷重をあたえ、その変化を交感性仮関節として説明したのを初めとして、*W. Müller*¹¹⁾ (1924), *Greifenstein*¹³⁾ (1930), *Küntscher*¹⁴⁾ (1936), 名倉¹²⁾ (1939), *Willich*, *Reischauer*⁶⁾, *Dengler*⁹⁾ 等さらに特殊装置を用いて人工的に屈撓運動を起さしめた石原¹⁶⁾ (1940), 菊池¹⁷⁾ (1952), 市村¹⁸⁾ (1942), 竹林・蔡¹⁹⁾ (1936), 高岸²⁰⁾ (1953) 等数多くの文献がある。

次に、作用力は正常であるが骨が病的な場合についてみるに、1920年 *Looser*¹⁾ が晩発性佝僂病患者の骨にレ線上透明層を発見して、これを骨改造層 *Umbau zone* と名づけてより、病的骨に対する機械力の影響が注目され、内藤⁵⁷⁾ (1923) は *Osteogenesis imperfecta*, *Rachitis*, *Osteomalazie*, *Hungerosteopathie*, 等の骨質軟弱を特有とする骨系統疾患について報告し、これをレ線学的ならびに組織学的に観察して、透明層の周囲の骨質は毎常密生し、とくに凹側に著しき骨膜性肥厚あるいは著明なる仮骨形成を認めるが、この屈曲側において縦軸に沿ひ紡錘状に肥厚せる骨生成は危険なる屈曲に対して完全骨折を保護するための代償性反応だと説いている。

井口⁵⁸⁾ (1941) は病的骨に対する機械的作用力がいかなる反応を起すか、すなわち正常骨と全く同様な結果を生ずるか或は異りたる反応を惹起するかを解明せんとし、塩化アムモニウム投与によるアチドーシス家兎骨に対して石原とほぼ同様な方法をもつて前腕骨に対して屈撓力を作用せしめ、その反応を検討している。また、土橋⁵⁹⁾ (1943) は塩化アムモニウム服用家兎の橈骨を切除して尺骨に過剰荷重をあたえ、その変化についてレ線学的ならびに組織学的考察を加えている。また、大野⁶⁰⁾ は実験的に家兎に佝僂病を惹起せしめ、その長管骨に繰返し屈撓運動をあたえてその

骨反応を検索している。

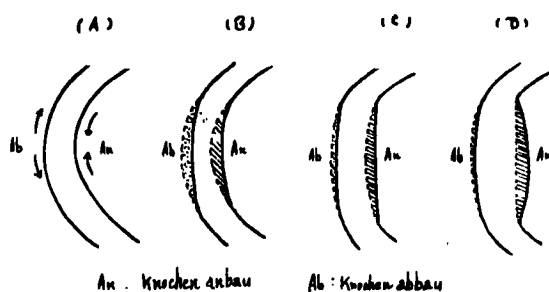
以上の如き臨床的ならびに実験的研究報告の多くは Looser のいわゆる骨改造層を対象としたものであつて、その際生ずる非骨折性仮骨或は力学的仮骨に関して詳細な考察を加えたものは極めて少い。そこで私は、さきに W. Müller 等が行つた実験に準じて正常骨に、実験的になるべく自然な状態のまゝで、過剰荷重を加え、その際生ずる骨変化をレ線学的、光弾性学的、組織学的に追求し、いささかの知見をえたのでこゝに総括しあわせて考察を加えてみたいと思う。

まづレ線学的研究において、その主要な変化として骨皮質部陰影の境界朦朧化、ついで生理的骨彎曲度の減少、骨幹部陰影濃化、さらに外骨膜の肥厚増殖像をみ、これが漸次外骨膜性仮骨像に移行し、ついには最大荷重部を中心とする紡錘状のいわゆる力学的仮骨の出現することを認めた。しかも凹側（橈骨反対側）における紡錘状力学的仮骨は凸側（橈骨側）のそれよりも早期にかつ高度に現れることを知つた。なお、かゝる仮骨の出現している骨皮質には骨折線様の変化は微塵も認められなかつた。

以上のレ線学的所見は W. Müller¹⁾ を初めとして臨床的ならびに実験的に多数報告されている先達諸賢のレ線学的所見とおゝむね一致するところである。たゞ土橋²⁷⁾は橈骨を切除せる塩化アムモニウム服用家兎尺骨のレ線学的所見において外骨膜性仮骨形成が橈骨側(凸側)において反対側(凹側)よりも早期に出現し、しかもその仮骨の形が凸側においては橈骨切断端相對部に紡錘状に出現し、凹側においては殆んど平面状に見られるとのべており、私の実験成績と相反するものであるが、その成因についての詳細な考察はなされていないようである。私は尺骨の生理的彎曲度の減少的变化を含めて、凹側により著明な仮骨形成を見たが、その成因についてはつぎの如く解釈すれば妥当であると考え。

すなわち、第8図に見る如く、最初(A)なる生理的彎曲度の状態において、凹側面に

第 8 図



においては上下方に向う圧迫力を、凸側面においては牽張力による圧力の軽減をこゝむる。

Julius Wolff²⁸⁾ (1871) の骨応変則によれば圧力の増加は Knochen anbau に導き、圧力の減少により骨は Abbau に導かれるのであるから、圧迫力を受ける凹側面には Knochen anbau が、反対に凸側面においては Knochen abbau が生ずる。かゝる Anbau, Abbau の変化が徐々に継続的に起れば尺骨は次第にその生理的彎曲度を減じ、(B)の状態になるが、かゝる変化はさらに進んでほぼ直線的なる(C)の状態にまで進展するに至る。ほぼ直線的になつた(C)の状態においても凹側面はさらに圧迫力を継続して受けるため、Anbau なる現象はさらに進行し、こゝに紡錘状仮骨形成による骨肥厚となつて現れてくるわけである。かゝる現象をまたある面より考察すれば、骨折に対して非常に不安定なる(A)なる状態はその屈曲、骨折の危険から逃れるべく、少しでも安定した(B), (C)の状態に進展し、さらにその安定性をより高めるべく修理的骨増殖を来して(D)の状態にまで進展すると考えることができる。すなわち、Roux の提唱する新機能に依じてその形態を改造したものと解釈されるわけである。さらに、Osteogenesis imperfecta 患者の臨床的報告に際し、内藤⁵⁵⁾はその際とくに凹側面に発生する紡錘状仮骨形成が“Zerrung”の作用を受けて凸側面に生じた小なる骨離断の修理補強的意味の代償性骨反応なりと説明しているが、私の実験例では全時期を通じて全く1例においても骨離断を証明しえなかつた。これにより骨肥厚が骨離断のみの修理的骨反応とは解されないものと思う。なお、レ線上

尺骨におけるこれらの所見の出現が中位 1/3 部切除群において近位 1/3 部切除群よりも早期かつ著明に、遠位 1/3 部切除群よりもおくれてかつ軽度に現れたことは切除橈骨末梢遺残部の支持力の関係によるものと思う。

Martin は犬の橈骨の一部を切除した場合、尺骨に生ずる仮骨形成および横走透明層は橈骨切除部位の対応側にできるといふ、これを交感性仮関節と呼び、ある種のホルモンが骨間靱帯を通して尺骨に作用したものであるとのべたが、私の実験で仮骨の形成が橈骨切除部位には関係なく何れの場合にも最大荷重部である骨幹中 1/3 部に生じたことは、仮骨の形成が力学的要請と密接なる関係をもっていることを立証しえたものと信ずる。

つぎにレ線学的にえた過剰荷重に対する骨反応所見が、生物力学的にいかなる関係を呈しているかを検索すべく行つた光弾性実験からは、紡錘状仮骨形成が肥厚前の骨内最大応力発生部位に一致し、しかもより大なる圧縮応力を示せる凹側面に、より早期かつ高度に仮骨形成が起るのを認めた。

そもそも仮骨形成の問題は従来主として骨折に関連してのべられてきたのであるが、近時 Küntscher 一派等により骨折の有無に関せず、温熱的、化学的 (Levander²¹⁾, Savante²²⁾, Leriche & Policard²³⁾), 或は電気的刺戟 (保田²⁴⁾) によつてさえも仮骨は発生することが実証されてきている。一方、純機械的刺戟による仮骨形成すなわち無骨折性仮骨についても、W. Müller を初めとして古くより多数の研究報告をみ、現今はその力学的機序の詳細なる追求にまでおよんでおり、Küntscher²⁶⁾ (1940), Maatz²⁷⁾ (1943), 保田²⁴⁾ (1954), 菊池¹⁷⁾ (1953) 等多数の実験報告がなされている。理論的にも J. Wolff を初めとして、一定の圧迫応力下には多量の仮骨の形成がみられるとする Wehner³¹⁾, Biebl³²⁾ の説や、名倉³⁴⁾ の機能的要請と該骨抗力との相関関係において、前者が後者よりも小さいか等しいとき、機械的要請の増加は Knochen anbau を促進するとする説を見出すことができる。か

くして仮骨形成は機械的要請の異常増加により促進されるという点に諸家の意見の一致をみているようであるが、極く最近、保田⁶¹⁾ (1954) は仮骨形成は骨面に垂直なる方向に、圧縮力または引張力の加わる部におこり、しかもその量は力学的エネルギーに比例するということを実験的に立証している。これは菊池¹⁷⁾ が家兎長管骨に繰返し屈撓力を加えて、圧縮力、引張力による仮骨形成の状態を検索した結果と一致するものであり、私が光弾性実験においてえた実験成績において、仮骨形成が最大応力発生部すなわち機械的要請の最も大なる部分に一致してみられ、しかもより大なる凹側圧縮応力部に、凸側引張応力部よりも早期かつ高度に仮骨形成が見られた事実は、仮骨と力に関する先達諸賢の説をより客観的に立証したものと思惟するものである。

つぎに、紡錘状肥厚を来した骨の内部応力は、肥厚前のそれと比較して著明な減少を示しているのを認めた。

そもそも仮骨形成による骨肥厚の成因について最初に考察を加えたのは W. Müller であるが、氏はこの骨肥厚を、尺骨に対する機械的刺戟が正常以上に強くなつたためこの部に骨添加作用を惹起せしめ、新機能に応ずるために骨組織が示した反応性修理的作用の結果だと説明しており、その後の多くの報告も屈曲や骨折を保護するための修理的、代償的反應とのみ記されており、その具体的な裏づけはなされていないようである。私の実験成績において、肥厚により応力の著明な減少を示したことは、とりもなをさず応力的に非常に安定性を帯びたことを示唆するものであり、先駆者の理論的考察を些かでも客観的に説明し得たものと考えらるものである。

つぎに、過剰荷重に対する骨反応の際、骨彎曲にまで言及している報告は、W. Müller の他極めて少数にしか認められず、しかもこれに対する力学的考察は殆んどこれを見出すことができない。

私は光弾性実験において、彎曲度の減少もまた、応力の減少を来すことを認めたが、こ

れすなわち応力的に安定性を帯びたことを物語るものであり、さきにレ線学的所見のところでのべたように、彎曲度の減少は、屈曲、骨折の危険から逃れるべく少しでも安定性を求めようとして新機能に応じてその形態を改造したものであると解釈した Roux の機能適応論を或る面において具体化し得たものと思考するものである。

つぎに、水銀微細粒子注入による骨血管のレ線学的所見において、私は骨栄養動脈の分岐状態の複雑化、血管陰影の淡細化、および肥厚増殖せる外骨膜部、いわゆる外骨膜性仮骨部あるいは該部固有骨皮質部の血管の拡張、新生又は侵入の所見を認めた。かゝる変化は手術後早期では荷重の最も強くかゝる骨幹中1/3部に著明であつて、レ線像に認められる外骨膜性の変化とおゝむね並行し、時にこれに先行して存在する。骨血管のレ線像については従来主として骨折治癒機転ならびに移植骨の運命に関する研究に際して深く検討されたところで、過剰荷重負担骨の骨血管に関しては菊池¹⁷⁾を除いて殆んどこれを見出すことができないが、私の実験成績においても、菊池の結果と本質的な差異は見出せなかつた。

組織学的にみられる骨血管の変化すなわちハーベルス氏管の拡大、走行不整、内部血管の拡張、充血および外骨膜性仮骨部を含めた外骨膜部の血管の拡張、新生侵入は骨血管造影による肉眼的の所見よりもさらに先立つてみられ、骨皮質部に発生する初期骨壊死とはゞ時期を同じくしている。すなわち、骨壊死発現の時期においてすでに骨血管の変化が現われていることは注目し得る。

異常荷重負担に対する骨の組織学的所見に関しては古来より幾多の報告があり、その変化の成因に関しても種々様々で、名倉³⁴⁾は骨内部に起る最初の変化は骨組織結合中絶で、それより軟骨仮骨が形成されるとし、Asai⁴⁾、Osterland³⁾もこの純骨折説を主張している。しかし1941年石原¹⁶⁾は正常家兎長管骨に繰返し屈曲運動を作用せしめ組織病理学上の最

初の変化は骨組織の生活力減退による骨皮質部壊死像であり、ついで高度なる非骨折性仮骨および線維性骨髄の発生をみ、屈曲運動の牽引側には骨吸収が旺盛なることを実証している。引続き井口⁵⁶⁾もアチドース長管骨に同様な荷重をあたえ、最初に壊死を、ついで骨吸収、非骨折性仮骨を認めている。この骨壊死の成因については井口⁵⁶⁾、土橋⁵⁷⁾、大野⁵⁸⁾等は繰返し屈曲力によつて骨層板間の迂りあるいは結合弛緩を来した結果、骨細胞の生活力が減じたゝめと考え、またPartsch⁶²⁾は圧縮による局所循環障害を、模はなかんづく局所貧血を重視している。またHenschenは組織疲労によつておこる退化現象であつて最初に血管損傷、壊死を来し、二次的に疲労現象として骨構造の結晶に迂り線を生ずるのであると記載している。正常骨に比較的自然的な状態のまゝで過剰荷重を与えた私の実験においても、組織学上の最初の変化は骨壊死像であり、続いて仮骨形成の発生することを認めた。なお骨血管のレ線像においてみられた骨栄養動脈の細小淡細化は、この時期における骨栄養の障害をもたらし骨壊死発現に対し一要因になるものと考えられる。最後に組織学上ならびに、骨血管造影によるレ線学上のこれらの所見は単純撮影によるレ線学上の変化が著明なる時期にはゞ一致して顕著であつた。

第8章 結 論

私は正常犬橈骨を一部切除することにより尺骨に過剰荷重を与え、その際おこる骨変化をレ線学的、光弾性学的ならびに組織学的に検索し、つぎの如き結果を得た。

1) レ線所見に現われる最初の変化はまづ骨皮質部陰影の境界朦朧化であり、ついで生理的骨彎曲度の減少、骨幹部陰影濃化、さらに外骨膜の肥厚増殖像が見られ、これは漸次外骨膜性仮骨像に移行し、骨髓腔も狭小となり、最大荷重部を中心に紡錘状のいわゆる力学的仮骨の出現を見る。凹側（橈骨反対側）における力学的仮骨は凸側（橈骨側）のそれ

よりも早期かつ高度に現れるが、その変化には本質的な差異はない。

なお、仮骨形成は仮骨切除部位には関係なく、何れの場合にも最大荷重部である骨幹中1/3部に発生した。このことは仮骨の形成が力学的要請と密接なる関係をもっていることを立証しえたものと信ずる。

2) 骨模型による光弾性実験において、仮骨形成は最大応力発生部すなわち過剰荷重の最も強くかかる部分に一致して発生し、しかも、より高度に仮骨の出現を見た凹側面の圧縮応力は凸側面の引張応力より大なることを認めた。また、肥厚後骨内の応力は肥厚前のそれと比較して著明なる減少を示しているのを認めた。すなわち力学的に非常に安定性を帯びたことを示唆するものであり、骨肥厚が過剰荷重に対する一種の反応性修理作用なることを客観的に立証しえたと思う。

なお、骨彎曲度の減少においても骨肥厚と

同様な結果を認めた。

3) 水銀微細粒子注入による骨血管のレ線学的所見において、骨栄養動脈の分岐状態の複雑化、血管陰影の淡細化、および肥厚増殖せる外骨膜部、いわゆる外骨膜性仮骨部あるいは該部固有骨皮質部の血管の拡張、新生、侵入の所見を認めた。これらの所見は単純レ線像に認められる外骨膜性の変化とお互に並行してみられた。

4) 組織学上、骨血管の拡張、新生、侵入の所見は比較的初期すなわち固有骨皮質部における初期壊死像の発生時期とほぼ一致してみられた。

稿を終るに臨み、御指導、御校閲を賜った恩師陣内教授に衷心より感謝の意を表するとともに、終始御助言を頂いた整形外科教室津下助教授、ならびに実験に際して御指導御援助をいただいた玉野市三井造船所研究部長小泉、同部員鈴木両氏に深甚なる謝意を捧げる。

文

- 1) Looser . Deutsche Zeitschr. f. Chir. 152, 211 (1920)
- 2) Deutsch länder . Zbl. Chir. Jg. 48, Nr. 39, 1422 (1921)
- 3) Osterland : Arch. Klin. Chir. 179, 567 (1934)
- 4) Asal : Arch. Klin. Chir. 186, 511 (1936)
- 5) Wachsmuth . Chirurg. Jg. 9, 16 (1937)
- 6) Reischauer . Zbl. Chir. Jg. 64, Nr. 49, 2793 (1937)
- 7) Drescher . Zbl. Chir. Jg. 65, Nr. 37, 2048 (1938)
- 8) Schink : Röntgen pr. Jg. 10, 825 (1938)
- 9) Dengler . Zbl. Chir. Jg. 65, Nr. 46, 2531 (1938)
- 10) Martin . Arch. Klin. Chir. 114, 664 (1920)
- 11) W. Müller : Münch. med. Wschr. 71, 854 (1924)
- 12) 名倉 : 日本整形外科学会雑誌, 16, 370 (1941)
- 13) Greifenstein : Brun's Beitrag. 150, 588 (1930)
- 14) Küntscher : Chirurgie. 10, 726 (1938) Zbl. Chir. 65, 964 (1938)
- 15) Henschen . Arch. Klin. Chir. 186, 98 (1936)

献

- 16) 石原 : 日本整形外科学会雑誌, 15, 905 (1940)
- 17) 菊池 : 新潟医学会雑誌, 67, 455 (1952)
- 18) 市村 : 日本整形外科学会雑誌, 17, 143 (1942)
- 19) 竹林, 蔡 : 台湾医学会雑誌, 35, 2526 (1936)
- 20) 高岸 : 福岡医学雑誌, 44, 665 (1953)
- 21) Levander . Acta. Path. et. Microbiolo. Scand. (1949)
- 22) Sevante : Chir. XII (1941)
- 23) Policard et Leriche . Surg. Gyn & Obst 43, 308 (1926)
- 24) 保田 : 第27回日本整形外科学会総会抄録 (1954)
- 25) W. Müller . Münch. med. Wschr. 69, 1475 (1922)
- 26) Küntscher . Klin. Wschr. 19, 6 (1940)
- 27) Maatz . Arch. Orthop. u. Unfallchir. 42, 513 (1943)
- 28) Julius Wolff : Monogr. Berlin. (1871) 神中整形外科学, 83.
- 29) Pommer : Monogr. Vogel. Leipzig., (1885)
- 30) Roux : Monogr. Leipzig, (1883)
- 31) Wehner . Arch. Klin. Chir. 113 (1920)
- 32) Biebl . Zbl. Chir. 46 (1937)
- 33) Krompecher : Die Knochenbildung, Gustav

- Fischer, (1937)
- 34) 名倉：日本整形外科学会雑誌, 16, 363 (1941)
 - 35) 津下, 道岡：綜合医学, 10, 201 (1953)
 - 36) 西田・応力測定法, 80 (1943)
 - 37) Brewster：Phil. Trans. (1816)
 - 38) 正林：日本整形外科学会雑誌, 26, 220 (1952)
 - 39) B. Zák Photoelastische Analyse in der orthodontischen Mechanik. Zeitschr. f. Stomat. 22—37, 87—103 (1935)
 - 40) Alexander Photo-Elasticity, Rhode Island State College of Aeronautics. (1936)
 - 41) H. Milch・Photoelastic Studies of Bone Forms. Journ. of Bone & Joint Surg., Vol. 22 (1940)
 - 42) 三木, 正林：日本整形外科学会雑誌, 28, 37 (1954)
 - 43) 岡田 日本整形外科学会雑誌, 25, 180 (1951)
 - 44) Cocker Phil. Mag. (1910)
 - 45) W. Ellenberger, H. Baum Anatomie des Hundes.
 - 46) Lexer. Untersuchungen über Knochenarterien, Hirschwald, Berlin. (1904)
 - 47) Johnson. J. Bone surg. 9, 153 (1927)
 - 48) Seeliger. Arch. Klin. Chir., 122, 588 (1922)
 - 49) Bittrolff, 土橋：日本整形外科学会雑誌, 17, 1644 (1943) より引用.
 - 50) Erb Dtsch. med. Wschr. 61, 1343 (1935)
 - 51) Ollonqvist: Arch. Klin. Chir. 166, 412 (1931)
 - 52) 城戸：日本整形外科学会雑誌, 24, 14 (1950)
 - 53) 大木：海軍軍医会雑誌, 33, 415 (1944)
 - 54) 井口：海軍軍医会雑誌, 33, 727 (1944)
 - 55) 鈴木・軍医団雑誌, 362, 857 (1943)
 - 56) 水町 日本整形外科学会雑誌, 11, 269 (1936)
 - 57) 内藤：日本整形外科学会雑誌, 1, 101 (1926)
 - 58) 井口・日本整形外科学会雑誌, 16, 1123 (1941)
 - 59) 土橋・日本整形外科学会雑誌, 17, 1643 (1943)
 - 60) 大野 日本整形外科学会雑誌, 18, 325 (1944)
 - 61) 保田 日本整形外科学会雑誌, 28, 267 (1954)
 - 62) Partsch：Arch. Klin. Chir. 147 (1927)

Ist Surgery Department, Medical School of Okayama University
(Director : Prof. D. Jinnai)

Experimental studies on the changes of the bone to overweight.

By

Kozaburo Kobayashi

When overweight is added to normal bone a relation forms with its transformation. Therefore, the author made experiments on normal adult dogs by resecting parts of their radial bones and giving overweight to its ulna to see what attitude it took.

1) The main X-ray findings were the decrease of physiological curve of the bone and the spindle shaped periosteal callus at the part getting the greatest overweight.

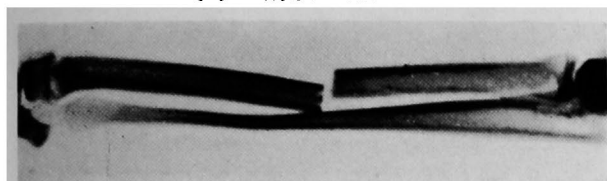
2) It was concluded from the distribution of stress and strain in the inner part that the part producing future dynamic callus was the same as the place receiving maximum stress before its thickening. Stress as well as production of callus seen in the compressed part of the concaved side was much greater than that of the retracted part of the convexed side. Stress appearing in the bone after its thickening was generally reduced comparing to its previous state and stability was formed. Comparing to normal bones decrease of the curve helped in reducing stress.

3) Changes seen in nutritional arteries by arteriography showed complicated distribution and fine shadows. Formation and dilation of new vessels were also seen histologically in dynamic callus and bone.

4) Histologically it was mainly the development of periostal callus. There was dilation of Haver's canal and its passage was irregular with its inner vessels dilated and showing hyperemia. Hyperemia, new development and intrusion of vessels were obvious also in the callus.

写真 1. 逐次的 X 線学的所見 (No. 4 例)

(a) 術後 2 週目



(b) 術後 10 週目

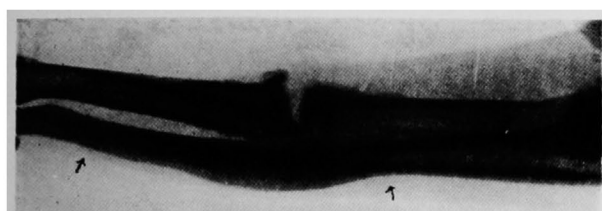
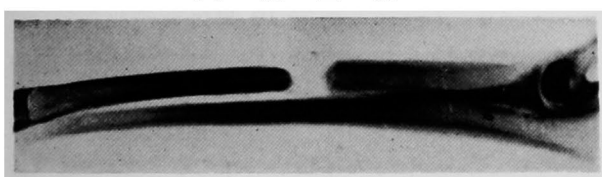
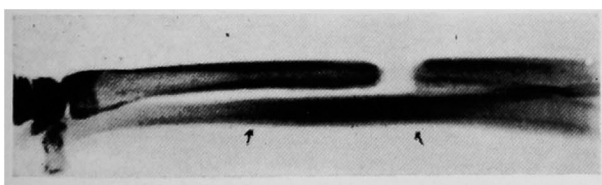


写真 2. 逐次的 X 線学的所見 橈骨中 1/3 部切除群 (No. 13 例)

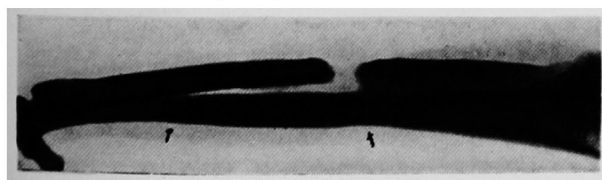
(a) 術 直 後



(b) 術後 7 週目



(c) 術後 11 週目



(d) 術後 18 週目

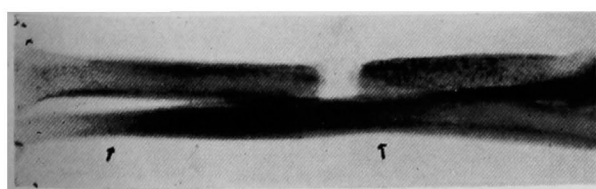
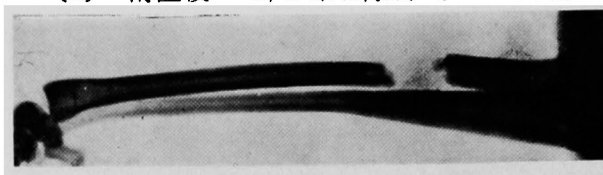


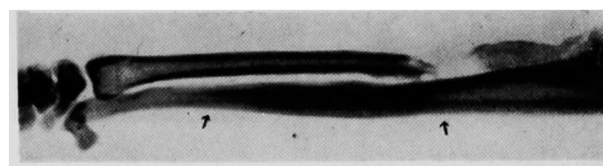
写真 3. 逐次的 X 線学的所見 橈骨上 1/3 部切除群 (No. 48 例)



(b) 術後 8 週目 (骨彎曲度の減少)



(c) 術後 24 週目



(d) 術後 33 週目



写真 4. 骨模型 (フェノライト試験片)

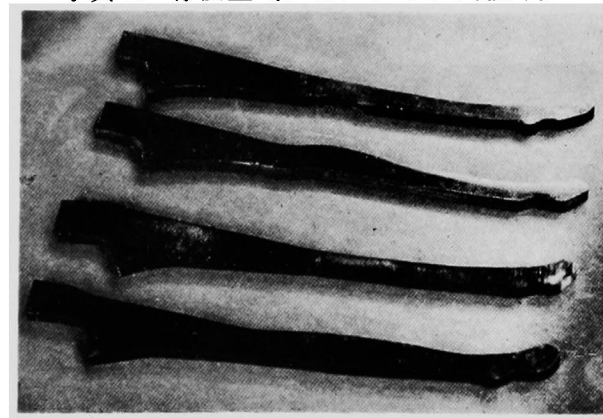


写真 5.

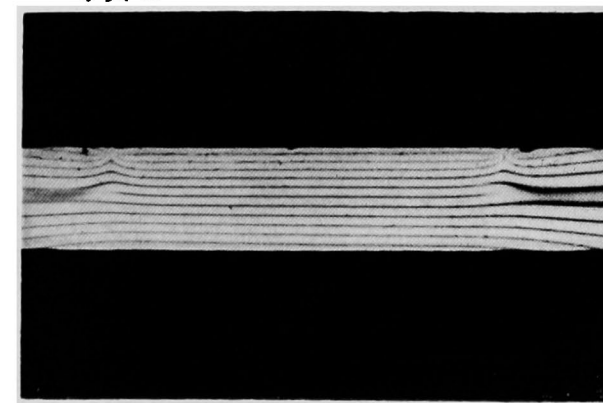
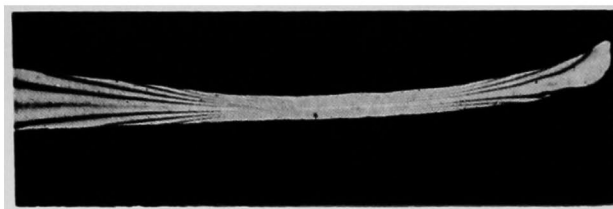


写真 6. 橈骨部分切除後尺骨光弾性写真

(a) 術直後 (No. 13 右側例)



(b) 術後 12 週目

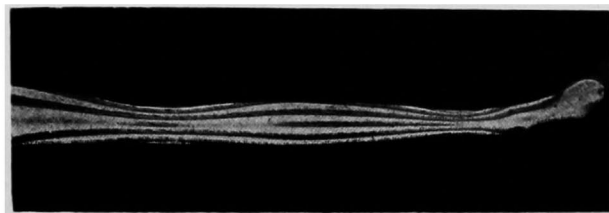
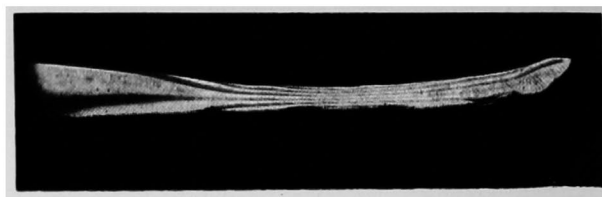


写真 8. 橈骨部分切除後尺骨光弾性写真

(a) 術直後 (No. 48 例)



(b) 術後 8 週目



(c) 術後 17 週目

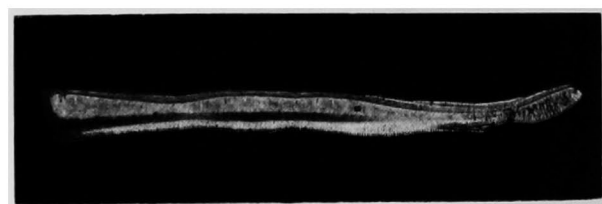
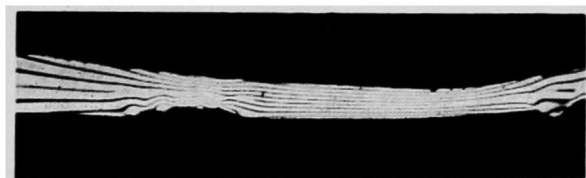


写真 7. 橈骨部分切除兼尺骨一部削除

尺骨光弾性写真

(a) 術直後 (No. 13 左側例)



(b) 術後 2 週目

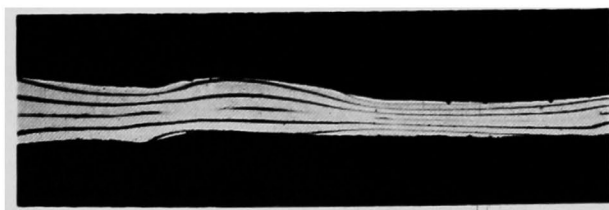
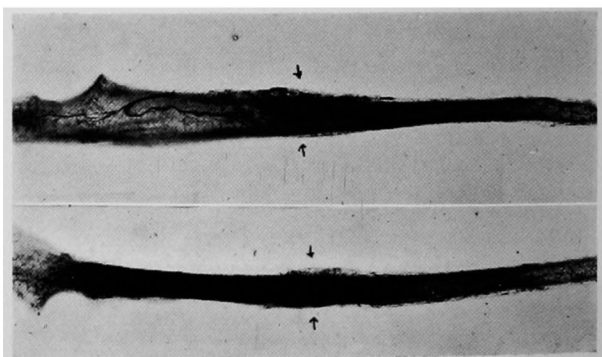
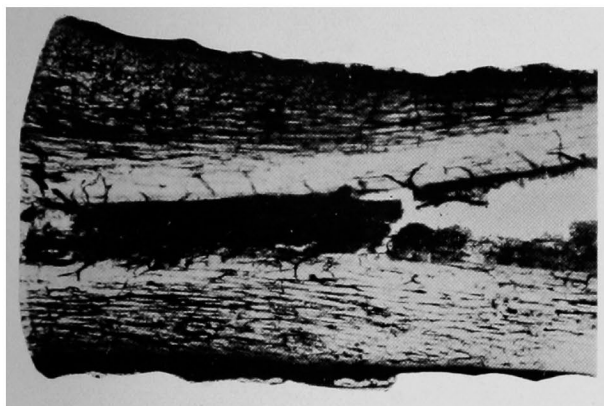
写真 9. 水銀微粒子注入による骨血管の
X線学的所見 (No. 50 例)

写真 10. 墨汁注入による骨血管の透明標本
($\times 10$)

(a) 縦断面



(b) 横断面

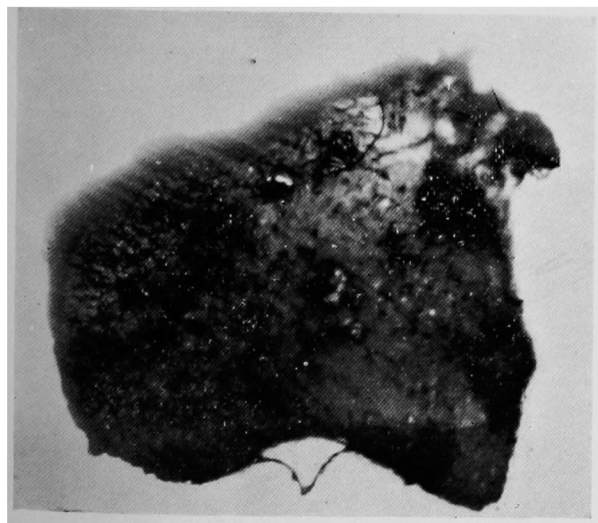


写真 11. 墨汁注入による骨血管の組織標本
(ヘ・エ染色 5×8 倍)

(a) 縦断面



(b) 横断面

