

骨皮質の Internal Remodeling を促進し陽極酸化を 防止できる骨通電刺激法の実験的研究

新潟大学医学部整形外科学教室（主任：田島達也教授）

渡 辺 元

Experimental Study of the Effect of Microelectrical Current on
Internal Remodeling of Canine Femur and of Anodic Oxidation
—with Special Reference to Pulse Current of Charge Recovery Type—

Gen WATANABE

*Department of Orthopaedic Surgery, Niigata
University, School of Medicine
(Director: Prof. Tatsuya TAJIMA)*

The effect of microelectrical current on internal remodeling and anodic oxidation in long tubular bone was examined using femurs of 24 adult mongrel dogs.

To minimize anodic oxidation, obtaining effective stimulation, a generator with pulse current of charge recovery type was made.

The femur of dog was stimulated for four weeks by various waveform current, i.e., pulse current of charge recovery type, 1 Hz 10uA; pulse current, 1 Hz, 10 uA; direct current, 10 uA; and alternating rectangular pulse, 1 Hz, 10 uA.

The effect was evaluated by histomorphometric parameters in terms of number of resorption cavities (Ar), number of osteons with osteoid seam (osAf) and area of bone resorption around the electrode.

The following results were obtained.

1. A significant increase of internal remodeling of bone was noted in the femur as stimulated by pulse current of charge recovery type as compared with the nonstimulated femur.
2. The smallest area of bone resorption was shown in a portion around anode of pulse current of charge recovery type pulse, which occurred less anodic oxidation, and larger area was also observed in order of pulse current and direct current.

No significant difference of the area of bone resorption was shown among

portions around cathode and anode of pulse current of charge recovery type stimulation and electrodes of alternating rectangular pulse.

3. Using pulse current of charge recovery type the internal remodeling of bone around cathode of femur, in which both cathode and anode were inserted, showed a more increase than that around cathode, which was inserted only in femur, and anode was placed in subcutaneous tissue of the thigh.
4. The internal remodeling around cathode of pulse current of charge recovery type pulse stimulation showed a significant increase than that around the electrode of alternating rectangular pulse stimulation.

Key words: electrical stimulation, anodic oxidation,
pulse current of charge recovery type, internal remodeling of bone
電気刺激, 陽極酸化, 電荷回収型パルス波, 骨のインターナル リモデリング

I. 緒 言

1953年, 保田の発表¹⁾以来, 骨の電気現象と骨の modeling あるいは remodeling との密接な関連について幾多の研究がなされた. さらに骨外からの電気刺激が遷延治療骨折の治療に用いられるようになった²⁾³⁾. 骨の電気刺激としては骨に電極を刺入して通電する invasive method と体外から変動する磁力を加え骨に誘導電流を励起する non-invasive method とがある. これらの方法の中で invasive method の方が直接的でありより顕著な仮骨形成と remodeling の促進が報告されている. しかしその問題として, 陽極と陰極とをともに骨内に刺入しておいた方が通電刺激を確実にするが陽極成分が電気分解により溶出する陽極酸化による電極周囲の組織刺激性や発癌性や骨吸収などの好ましくない影響がある.

骨に対する internal remodeling の促進効果をより確実にする invasive method で陽極酸化のような好ましくない現象を防止する方法として①電極材料をプラチナやカーボンにする方法②刺激電流波形で陽極酸化を防止する方法が考えられる. 前者については材料費その他問題があるので著者は後者の方法を検討目的とした. それについて好ましい波形を理論的に考察し電荷量が正負同値となり電気分解が起こり難く, 陰性直流成分をもつ電荷回収型パルス波 (pulse current of charge recovery type) が考えられたのでその刺激装置を作成し, 従来使用されていた直流, 単相性パルス波, 交流矩形波刺激とこの装置による刺激における骨の internal remodeling の促進効果と陽極酸化防止効果について比較検討した (Table 1). さらに作成した電荷回収型パルス波による

通電に際して電極設置部位による刺激効果の差についても検討した.

II. 実験材料・方法および結果

実験 I

1. 目 的

電流量が同じ $10\mu\text{A}$ で陽極と陰極が区別できる電荷回収型パルス波および直流・単相性パルス波の3種類の異なる波形の通電刺激を加えたときの波形別に陽極周囲の骨吸収の大きさを比較した. そのうち電荷回収型パルス波通電が長管骨骨皮質での internal remodeling におよぼす影響について検討した.

2. 実験材料及び方法

- a. 材料: 体重 7.5Kg から 19Kg の雑種成犬14頭を用い, 各犬をそれに加える電気刺激の波形により3つの群に分けた. 通電期間は全て4週間とした (Table 1).
- b. 電極および刺激波形: 直径 1mm の stainless steel 製 (316L austenitic stainless steel) の Kirschner 鋼線2本にそれぞれリード線を接続し, 両鋼線の間隔を 15mm にして歯科用レジンで固定したものを電極とした. 第1群に用いた波形は陰性矩形で discharge duration 450 msec とコンデンサーを用いて陰性方向と同量の電荷を陽性方向へ spike wave で discharge させる 1Hz でパルス波高が $-10\mu\text{A}$ となるような定電流波形 (以下電荷回収型パルス波), 2群には pulse ratio $1:1$, 1Hz , $10\mu\text{A}$ の陰性矩形パルス波の定電流波形 (以下単相性パルス波), 第3群には $10\mu\text{A}$ の定電流直流を用いた (Fig. 1).
- c. 電極設置および通電方法: 両大腿部に後外方皮切を加えて大腿骨骨幹部に達し, その中央部の外側で骨膜

Table 1 Classification of materials due to waveform in Experiments I, II and III

Exp	Group	Condition of stimulation			Right femur	Period of stimulation (weeks)	Left femur	Number of dogs
		Wave form	Hz	μA				
I	Group 1	pulse current of charge recovery type	1	10	stimulated	4	sham op.	5
	Group 2	pulse current	1	10	stimulated	4	sham op.	5
	Group 3	direct current		10	stimulated	4	sham op.	4
II	Group 4	pulse current of charge recovery type alternating rectangular pulse	1	10	stimulated	4	stimulated by a.r.p. ²⁾	5
			1	10	by p.c.c.r.t. ¹⁾			
III	Group 5	pulse current of charge recovery type	1	10	insertion of anode and cathods	4	insertion of only cathode ³⁾	5
Total								24

1. p.c.c.r.t. = pulse current of charge recovery type

2. a.r.p. = alternating rectangular pulse

3. Anode was placed in subcutaneous tissue of the left thigh.

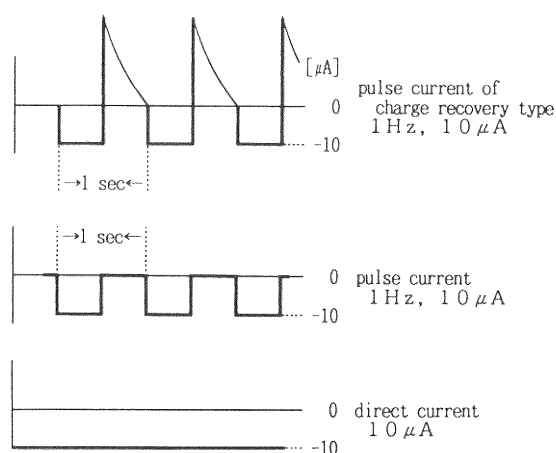


Fig. 1 Wave forms of stimulating current, applied in group 1, 2 and 3.

を縦切りして骨皮質を露出した。電極を外側から刺入し、その対向している内側皮質も貫通するように電極を刺入固定した。また、刺激装置および電源部は腰部皮下に埋没させ犬が自由に運動できるようにした。通電は直ちに右大腿骨のみ4週間行なった。左大腿骨には電極を刺入したのみで通電せず control とした (Fig. 2)。

d. 標本の作製：4週間後屠殺し、両大腿骨を採取して骨膜等の軟部組織を除去した後、普通写真および軟X線を撮影した。その後70%エチルアルコールで24時間固定してポリエステル樹脂内に包埋し、通電側の陰極お

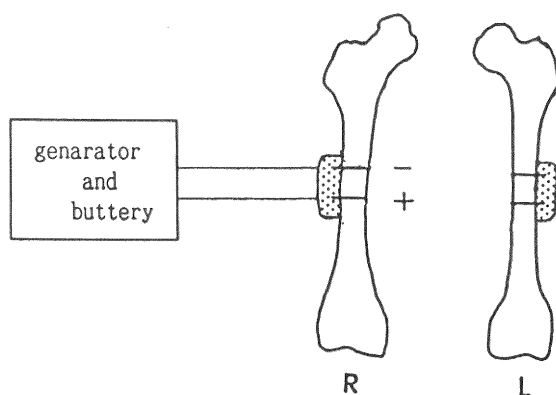


Fig. 2 Schematic drawing of the Experiment I. In both femurs of adult mongrel dogs, electrodes made of stainless steel Kirschner wires with one millimeter in diameter, were inserted and fixed with Resin 15 millimeter apart.

Various waveform currents were used to stimulate the right femur. The left femur was not electrically stimulated.

および陽極, control 側の2つの電極刺入部位から各々5枚の厚さ約 100 μm の非脱灰横切切片を Bronwill 硬組織薄切装置で作成した (Fig. 3)。1頭につき電極挿入部1カ所各々5枚計20枚の切片を Villanueva の tetra-chrom 染色⁴⁾をして計測した。

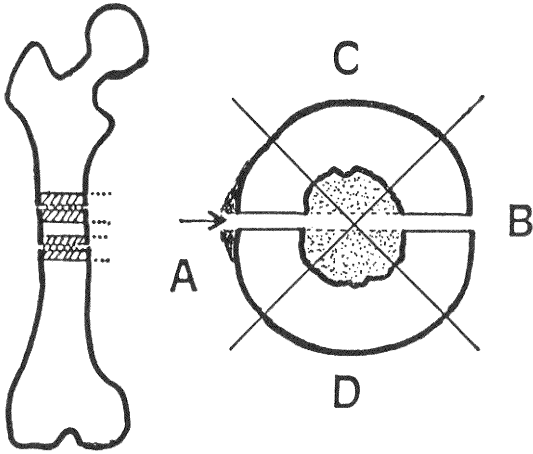


Fig. 3 Undemineralized cross section, ca. 100 μ m, was made from the region, at which each electrode was inserted, and each section was divided into four quadrants, i.e.
 A-quad.: lateral (inlet of electrode) aspect
 B-quad.: medial (outlet of electrode) aspect
 C-quad.: anterior aspect
 D-quad.: posterior aspect

e. 計測方法

1) 陽極周囲の骨吸収の計測

大腿骨の各切片を電極との位置関係から大腿骨の外側（電極刺入部）をA、内側をB、前方をC、後方をDの4象限に分けた（Fig. 3）。波形による骨吸収の

相異を比較するために各犬毎にA、B象限において陽極に接して陽極刺入方向と完全に平行に薄切された2切片のみを選んで外側、内側の骨皮質の吸収域の面積および皮質巾をそれぞれ計測した。計測にはミニコンピューター（Canon BX-1[®]）とデジタイザー（武藤工業製）を接続した画像解析装置を使用した。個体の大きさによる影響を除くためこの吸収域の面積を皮質巾で除した値を各犬で求め、3群の平均値で比較した（Fig. 4）。

2) 電荷回収型パルス波刺激による internal remodeling の計測

(a) 骨皮質面積の計測

第1群の大腿骨の各切片を実体顕微鏡で約9倍に拡大してミニコンピューターとデジタイザーを接続した画像解析装置を使用して各象限毎に骨皮質面積を計測した。

(b) 組織動態の parameter の計測

高橋⁵⁾の計測方法に従い、第1群のA象限における単位面積当たりの吸収腔数（以下吸収腔数または Ar と略す）個数/mm²と単位面積当りの類骨層を伴う第2次骨単位数（以下骨単位数または osAf と略す）個数/mm²を計測した。

3. 結果

a. 陽極周囲の骨吸収

1) 肉眼所見

直流を通電した骨の陽極周囲に黄褐色の着色を認

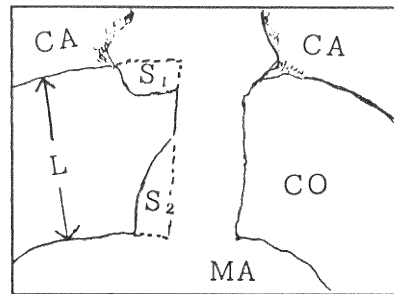
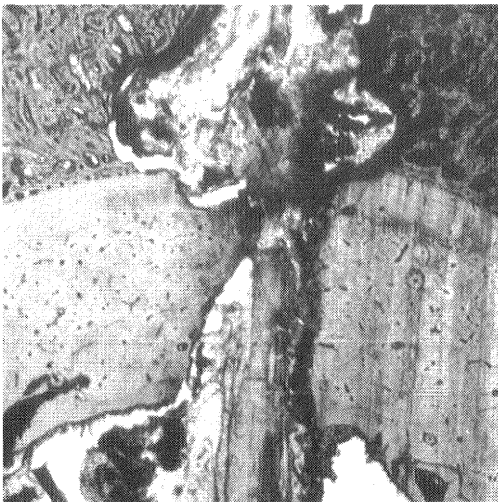


Fig. 4 Area of bone resorption around the anode.
 CO: cortex CA: callus MA: marrow

$$\text{Area of bone resorption/width of cortex} = \frac{\sum S_i}{L}$$

める切片もあったが電荷回収型パルス波と単相性パルス波の切片に着色は認めなかった。

2) 骨吸収域 (Fig. 5)

陽極周囲の骨吸収域は波形を問わずA象限に大きく、B象限では小さい傾向があった。そして、その両象限での吸収域の合計を波形別にみると直流が最も大きく、次に単相性パルス波で電荷回収型パルス波は最も小さく有意差 ($p < 0.01$) が認められた。

b. 組織学的計測結果 (Fig. 6)

本実験では、電荷回収型パルス波の刺激効果の有無を知るため、刺激効果の最も大きい第1群のA象限の骨皮質のみに限定して検討した。

1) 第1群の吸収腔数 (Ar) について

各犬の通電側の陰極および陽極部と control 側の各電極部について Ar を計測し、それぞれについて t 検定を行った。5 頭全例が陰極部陽極部ともに co-

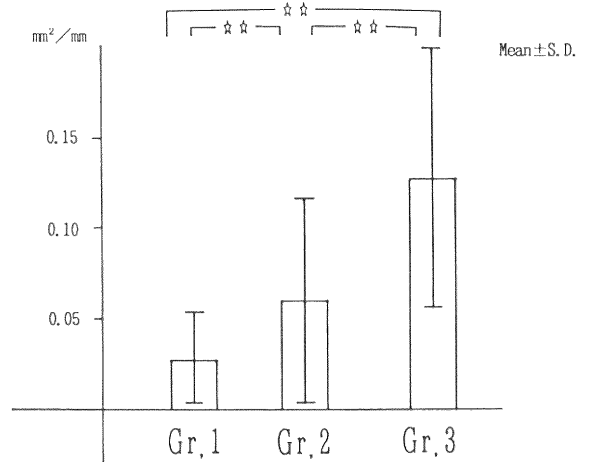


Fig. 5 The result of area of bone resorption around the anode in the Experiment I.
☆☆ $p < 0.01$

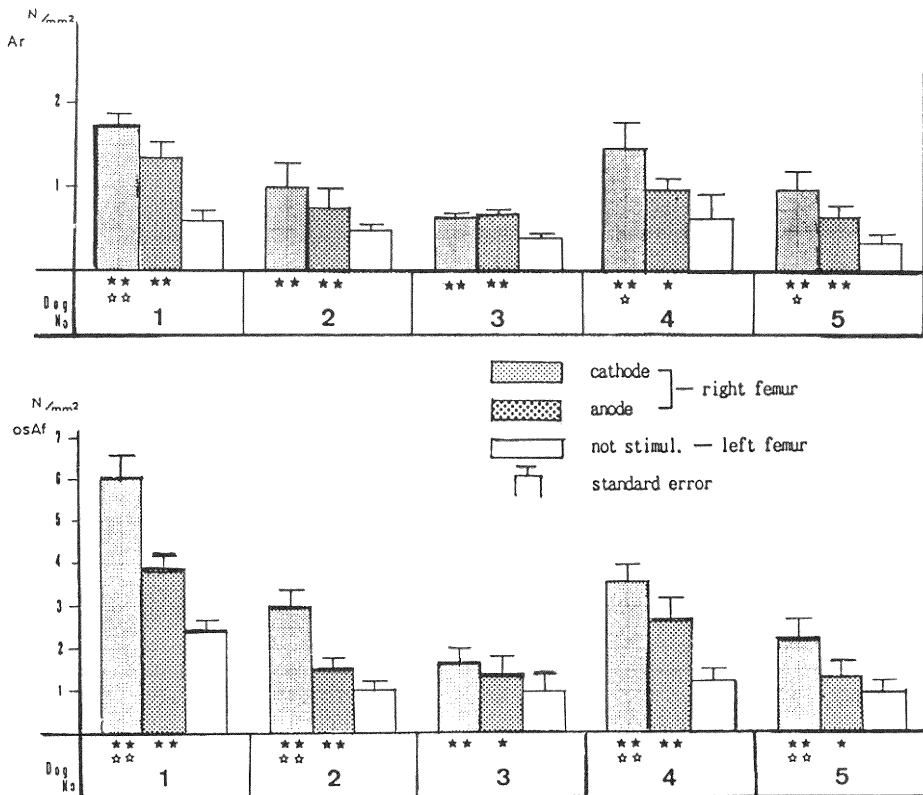


Fig. 6 The result of histomorphometric measurements in the Gr. 1 of the Experiment I.

Number of resorption cavities (Ar)

Number of osteons with osteoid seam (osAf)

★★ $p < 0.01$, ★ $p < 0.05$ vs. not stim.

☆☆ $p < 0.01$, ☆ $p < 0.05$ cathode vs. anode

ntrol よりも有意の差をもって増加していた。陰極部と陽極部との間では陰極部の方が5頭中3例に有意の増加を示した。

2) 第1群の骨単位数 (osAf) について

5頭全例が陰極部、陽極部ともに control よりも有意の差をもって増加していた。陰極部と陽極部の間では陰極部の方が4頭に有意の増加を示した。

実験 II

1. 目的

著者⁶⁾⁷⁾は電荷回収型パルス波が陽極酸化を起こし難いことを寒天板内通電により証明し報告しているが理論的には交流が一番陽極酸化を起こさないことより、交流矩形波と電荷回収型パルス波通電が長管骨骨皮質での internal remodeling におよぼす影響について比較検討した。

2. 実験材料および方法 (Fig. 7)

a. 材料：体重7Kg から 10Kg の雑種成犬5頭

(第4群)の両大腿骨を用いた (Table 1)。

b. 電極材料および電極設置方法：実験 I と同様の stainless steel 電極と設置方法を用いた。



Fig. 7 Femurs of adult mongrel dog were stimulated, with a jacket containing the generators and the batteries, for four weeks in the Experiment II.

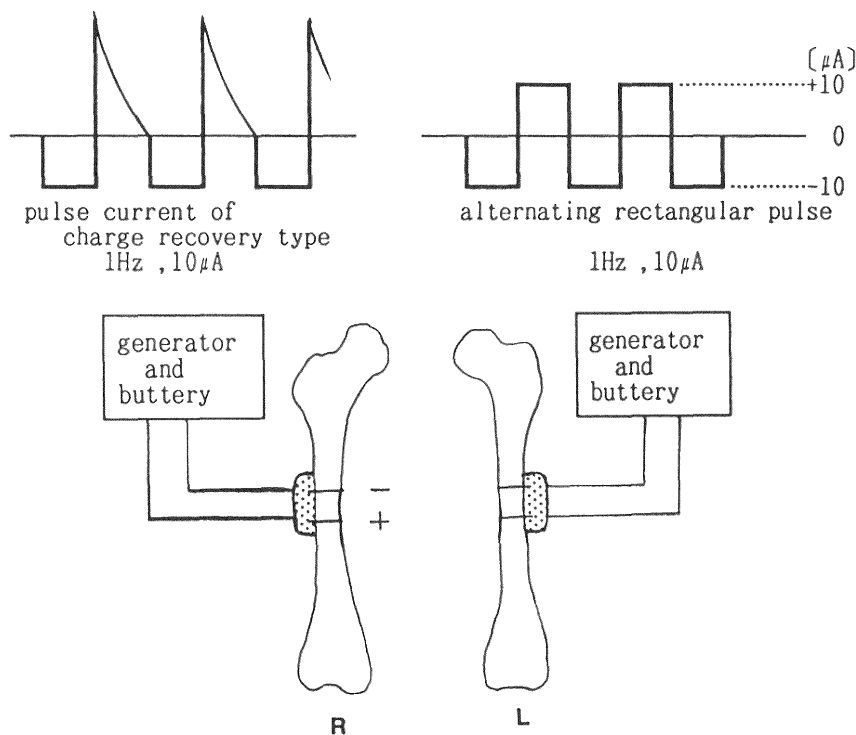


Fig. 8 In Experiment II (group 4), electrodes, stainless steel Kirschner wires were inserted into both femurs of five mongrel dogs and fixed with Resin. The right femur was stimulated by pulse current of charge recovery type, 1Hz, 10μA, and the left femur was stimulated by alternating rectangular pulse, 1Hz, 10μA.

c. 刺激装置：1 Hz, 10 μ A 電荷回収型パルス波と pulse ratio 1:1 で陰陽対称形の 1 Hz, 10 μ A の定電流の交流矩形波刺激装置を同時に使用した (Fig. 8)

d. 通電方法：両大腿骨に刺入した電極からのリード線は皮下を貫通させて頸部より体外に出し、術後約3週間創が完全に治癒するのを待って、犬が自由に運動出来るように作った布製ジャケットの内ポケットに入れた刺激装置および電源部を接続した。右大腿骨には非対称形の電荷回収型パルス波、左大腿骨には交流矩形波を4週間（電極刺入後第4週から第7週まで）通電刺激した

(Fig. 7).

e. 標本の作製：実験 I と同様とした。

f. 計測方法：実験 I と同様にして各々の電極に接する部の骨の吸収域と各々の電極刺入部の吸収腔数と骨単位数を計測した。

3. 結果

a. 電極周囲の骨吸収域 (Fig. 9)

電荷回収型パルス波の陽極部と陰極部と交流矩形波の2電極部のA, B象限について各2切片を計測した。2カ所の交流電極部は合計して平均値を求めた。この3数

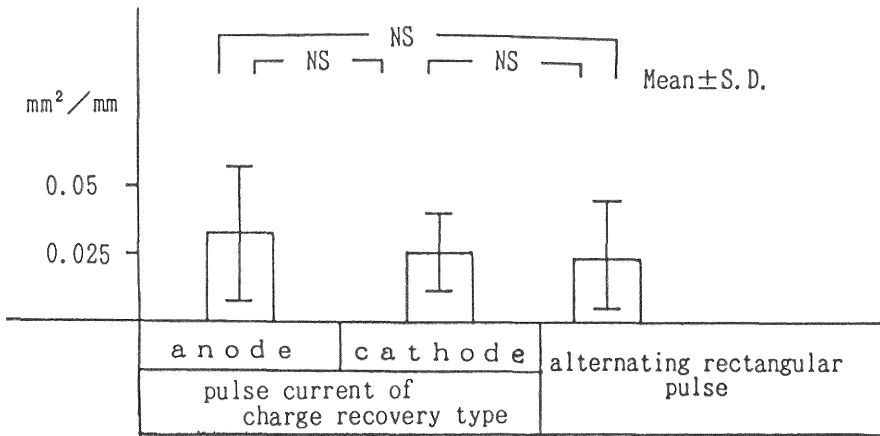


Fig. 9 The result of area of area of bone resorption around the electrode in the Experiment II.

NS: non significant

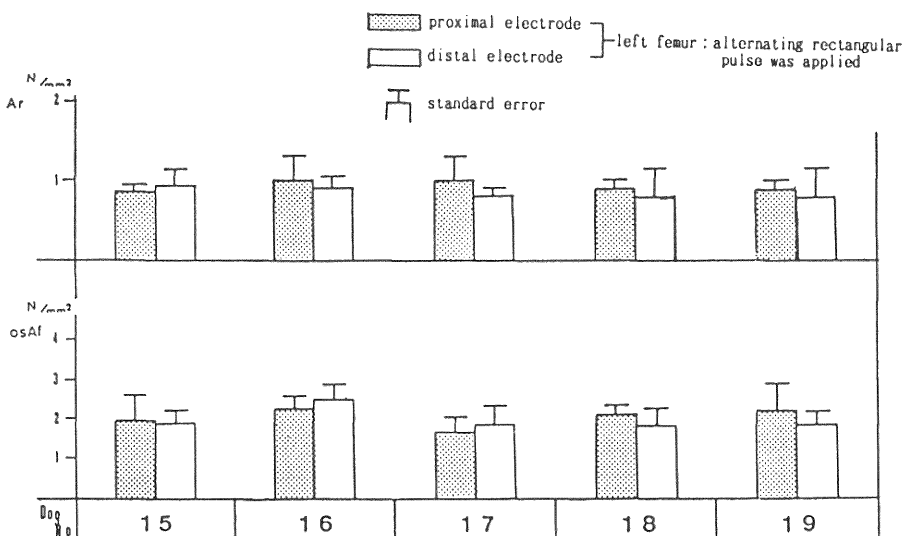


Fig. 10-1 The result of histomorphometric measurements in the Experiment II.

値については互いに有意の差はなかった。

b. 組織学的計測結果

A象限の骨皮質における数値を各々の電極刺入部の間で比較した。

1) 交流矩形波通電した左大腿骨の中樞側と末梢側の比較 (Fig. 10-1)

(a) 吸収腔数 (Ar) について：5頭中全例が中樞側と末梢側との間に差がなかった。

(b) 骨単位数 (osAf) について：全例が両者の間に有意の差がなかった。

2) 電荷回収型パルス波通電の陰極刺入部と交流矩形波通電の電極部との比較 (Fig. 10-2) Ar, osAf はともに全例が電荷回収型パルス波の陰極部の方が有意の増加を示した。

3) 電荷回収型パルス波通電の陽極刺入部と交流矩

形波通電の電極部との比較 (Fig. 10-2)

(a) 吸収腔数 (Ar) について：5頭中4例が両者の間に有意の差を認めなかった。

(b) 骨単位数 (osAf) について：これも5頭中4例は両者の間に有意の増加を認めなかった。

実験 III

1. 目的

微小電流通電による刺激効果を確実に得るには体内のどの部位に電極を設置したらよいかを調べるために、電極設置部位による長管骨骨皮質での internal remodeling の影響の差について検討した。

2. 実験材料および方法

a. 材料：体重 10Kg から 14Kg の雑種成犬5頭を第5群とし、その両大腿骨を用いた。

b. 方法：右大腿骨には実験 I と同様に 15mm 間隔

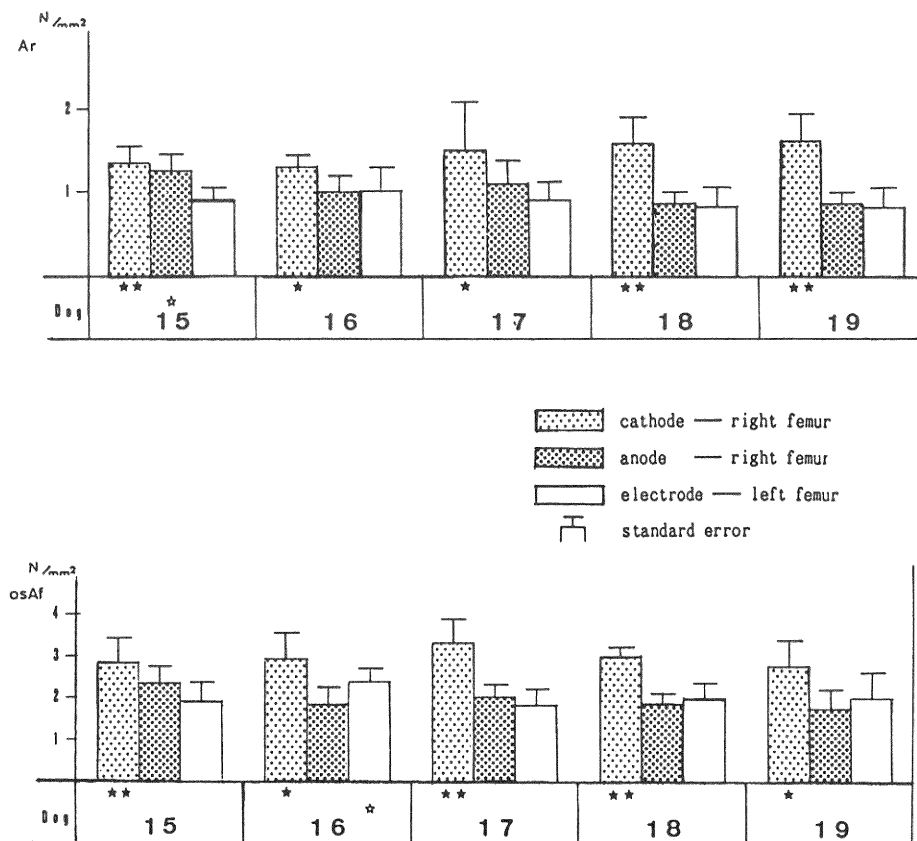


Fig. 10-2 The result of histomorphometric measurements in the Experiment II.

★★ $p < 0.01$, ★ $p < 0.05$ cathode vs. left femur
 ☆ $p < 0.05$ anode vs. left femur

にした陰極と陽極を設置した。左大腿骨には陰極のみ刺入して陽極は十分な表面積を得るように直径 2 mm, 長さ 250mm の Kirschner 鋼線を直径約 40mm のラセ

ン状にしたものを電極として左大腿前面の皮下組織内に設置した。1 Hz 10 μ A の電荷回収型パルス波刺激装置および電源部は、左右別個にして各々の腰部皮下に埋没

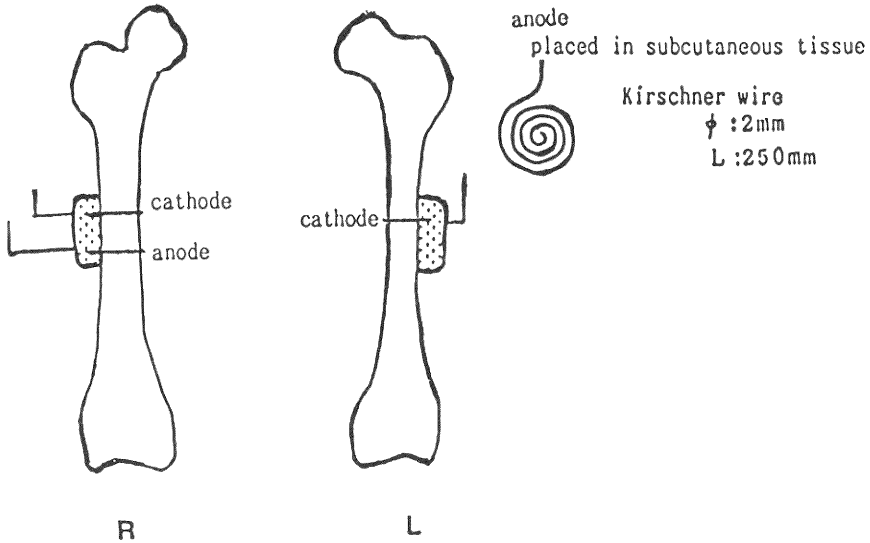


Fig. 11 Schematic drawing of the Experiments III (group 5). Both femurs of five adult mongrel dogs were stimulated by pulse current of charge recovery type for four weeks.

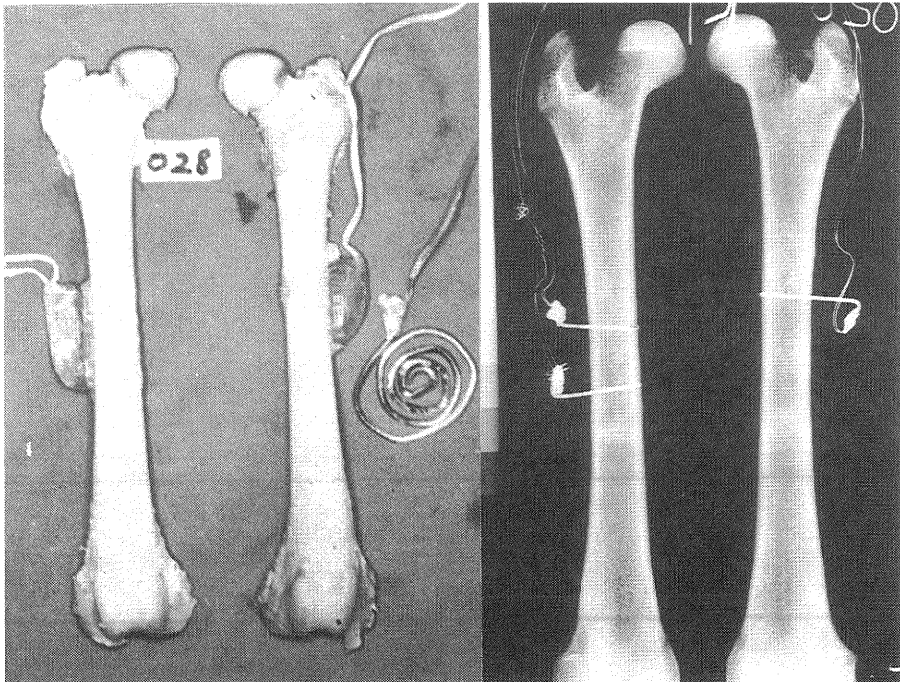


Fig. 12 Photograph and roentgenogram of both femurs at four weeks after beginning stimulation in the Experiment III.

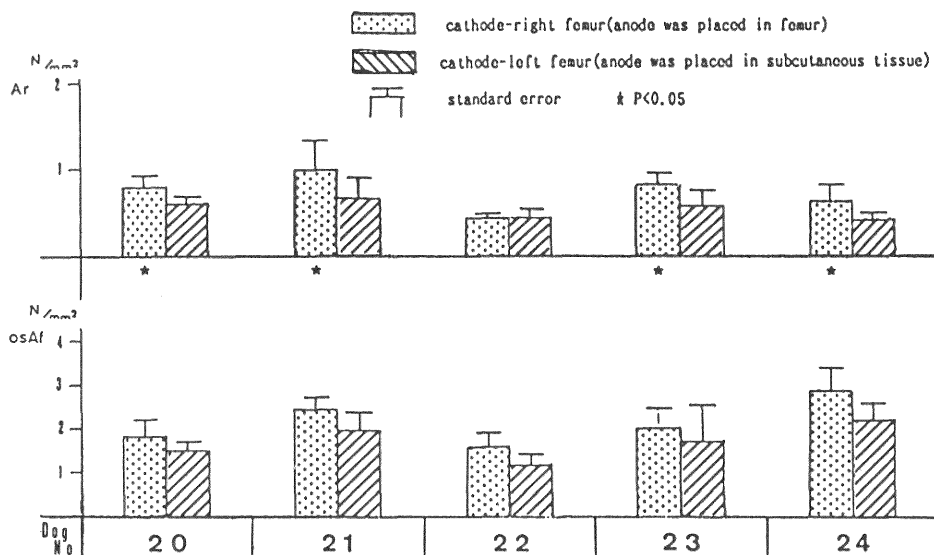


Fig. 13 The result of histomorphometric measurement in the Experiment III.

させ、刺入時直ちに通電開始し4週間通電刺激した (Fig. 11).

c. 標本の作製：左右大腿部は陰極部と陽極部の2カ所、左大腿部からは陰極部のみから横切切片を作成した以外は実験Iと同様とした。

d. 計測方法：実験Iと同様にして各々の電極刺入部の Ar と osAf を計測した。

3. 結果

a. 肉眼的および軟X線所見 (Fig. 12)

陰極と陽極を骨内に設置した右大腿骨と陰極のみ骨内に設置した左大腿骨に形成された仮骨量には明確な差はなかった。陽極を設置された皮下組織にも異常を認めなかった。

b. 組織学的計測結果 (Fig. 13)

両極を骨内に設置した右大腿骨の陰極部と陰極のみ骨内に設置した左大腿骨の陰極部の数値を比較した。

- 1) 吸収腔数 (Ar) について：両極とも骨内の方が5頭中4例に有意の増加を示した。
- 2) 骨単位数 (osAf) について：両極とも骨内のはうが5頭とも高値を示したが統計学的には全例とも有意の差は示さなかった。

III. 考 察

A. 陽極酸化と骨壊死

1954年、保田⁸⁾は微小電流による仮骨形成の促進に

ついて報告した際、同じく1mA以上の微小電流によって骨の破壊が起こることを報告した。Friedenberg⁹⁾は30mA以上の電流で陽極部に骨吸収が起こること、高橋¹⁰⁾外川¹¹⁾は100 μ Aで陽極部に暗褐色の反応と骨壊死が起こることを報告した。これらの刺激電流は全て直流微小電流であるが、従来は微小電流による陽極酸化は起こらないとされてきた¹²⁾。著者は、この陽極酸化と骨の壊死や吸収との間に密接な関係があるものと考えた。

1978年、Suzuki¹³⁾はstainless steelを陽極として、1, 10, 100 μ Aの直流、0.1, 1, 50Hzの10と20 μ Aのパルス波を通電すると陽極周囲に鉄、クローム、ニッケルが溶出することを証明し微小電流による陽極酸化が起こることを指摘した。1979年著者らも次のような報告した⁶⁾⁷⁾。まず生体内モデルとして寒天板に直流10 μ Aをstainless steel製電極に通電すると陽極周囲の寒天が褐色に着色し、この着色寒天をX線元素分析すると電極組成成分である鉄、クローム、ニッケルを検出して陽極酸化溶出が起こることを証明した⁶⁾。この陽極酸化溶出は波形を変えることにより減少させられる。つまり直流10 μ A、単相性パルス波1Hz、10 μ A、および電荷回収型パルス波1Hz、10 μ Aの微小電流通電による陽極酸化溶出を比較すると直流が一番溶出が大きく、次に単相性パルス波で電荷回収型パルス波はほとんど溶出がみられなかった。さらに著者らは微小電流通電により生体内でも陽極酸化溶出が起こっていることを下記のことよ

り証明した⁷⁾。すなわち犬の大腿骨に stainless steel を電極材料として両極を刺入して直流 10 μ A を 6 週間通電した場合陽極部の大腿骨の非脱灰横切切片をみると陽極刺入部が暗褐色に着色していた。この着色部の X 線元素分析を行ってみると電極組成成分である鉄、クローム、ニッケルが検出され鉄とクロームについて線分析を行うと陽極に近い所にピークがあり離れるに従って減少していた。

陽極酸化により溶出する電極組成元素の組織刺激性や発癌性について問題になるが、鉄については、保志¹⁴⁾は組織刺激性は中等度であるとするものの、川原¹⁵⁾は培養線維芽細胞の増殖度は顕著に抑制され強力な細胞毒性を持っていると述べている。

クロームについて保志¹⁴⁾川原¹⁵⁾は毒性はほとんど示さなかったと述べている。ニッケルについて、保志¹⁴⁾は著明な組織刺激性を示すこと、川原¹⁵⁾はかなりの細胞毒性を有することを証明した。

Hueper¹⁶⁾はニッケル粉の懸濁液をラットに注入して肉腫の発生をみたと報告している。コバルトについては、Heath¹⁷⁾が carcinogen となり得ることを強調し、Swanson¹⁸⁾は Co-Cr-Mo 合金 (Vitallium) の摩耗粉で実験的にコバルトのみの粉を用いたときに生ずるのと似た悪性腫瘍が発生したと報告している。また、stainless steel でも McDougall¹⁹⁾や Dobe²⁰⁾らによる悪性腫瘍が発生の報告がある。悪性腫瘍発生については、陽極酸化による体内への金属溶出が電流量、刺激期間の関係から臨床的に問題になる程のものではないと思われるが陽極酸化を極力避けて刺激効果が得られる方法が好ましいと考える。

Wright²¹⁾は stainless steel で骨の破壊吸収が起こることを認め、これが体内イオン化によるものとしてこれを防ぐため silicone coating をほどこす試みをしている。

著者の本実験結果で陽極酸化を起し難い電荷回収型パルス波通電の陽極周囲の骨吸収が直流や単相性パルス波のそれよりも少なかったことより、骨の壊死や吸収は陽極酸化現象による要素が非常に大きく、陽極酸化を防止することにより骨の壊死や吸収を減少させることができると考えた。

B. 電荷回収型パルス波通電が骨皮質での internal remodeling におよぼす影響について

1. 骨皮質内の basic multicellular unit (BMU) としての吸収腔および骨単位

Frost²²⁾は骨の remodeling が起こる際には個々の

骨芽細胞や破骨細胞がばらばらに働くのではなく、同じ機能を営む一群の骨芽細胞または破骨細胞が組織学的にも機能的に一つの生理的な単位として働くとして、この細胞群よりなるこの単位を basic multicellular unit (BMU) と名付けた。さらに高橋²³⁾²⁴⁾は次のように述べている。remodeling の機能的単位である BMU はホルモン、ビタミン、機能的ストレスなどの刺激によって前破骨細胞が活性化 (activation) されて破骨細胞に分化し、骨の吸収 (resorption) が起こり次にその同じ部位に骨芽細胞ができ、基質である類骨の形成とそれに続くミネラルの沈着による骨の形成 (formation) が起こる。このように remodeling の機能的単位である BMU の活動の順序は activation→resorption→formation で進行する。従って吸収腔数と骨単位数をそれぞれ数えることは骨皮質内の remodeling を知ることになる。

2. 通電効果の検討

本実験と同様の条件の実験をした高橋¹⁰⁾外川²⁵⁾が、電極刺入部である A 象限で最も変化が大きいと述べているので本実験でも A 象限での刺激効果の有無を調べた。実験 I において電荷回収型パルス波通電側では吸収腔数 (Ar) および骨単位数 (osAf) がともに control 側よりも有意の差をもって増加しており陰極部の方が陽極部よりも増加する傾向が認められた。従って通電により骨皮質での internal remodeling は高められたと結論される。また直流成分を持った陰極の方が spike 波である陽極よりも internal remodeling が高められる傾向があることが判った。

外川²⁶⁾は直流で花岡²⁷⁾は単相性パルス波通電で internal remodeling が高められたと報告しており、電気刺激は保田らが述べた仮骨形成のみならず骨皮質での internal remodeling をも高めることが判った。

C. 陽極酸化を最小にして刺激効果をも高める方策について

1. 刺激波形での検討

実験 I で電荷回収型パルス波は直流や単相性パルス波よりも陽極酸化を起し難いこと、刺激効果があることが判った。ある程度電荷を回収する Jørgensen²⁸⁾が刺激効果を得たとする非対称形パルス波で Hinsonkamp²⁹⁾は電極刺入部の骨吸収と電極組成金属の溶出をみたし報告している。陽極の骨吸収を考慮して Hellinger³⁰⁾は交流矩形波を臨床的に応用して刺激効果が得られたと報告している。しかし実験 II でこの波形と同様の交流矩形波と電荷回収型パルス波とを比較すると骨吸収については有意の差がなく、電荷回収型の陰極部の吸収腔数およ

び骨単位数が有意に増加していたことより陽極酸化については共に起し難いが骨皮質での internal remodeling は電荷回収型パルス波によるとより高められると結論される。

2. 電極設置部位での検討

陽極酸化の影響を減ずるために陽極を骨周囲の軟部組織や皮膚に設置する方法がある。実験Ⅲで両極を近接して骨内に設置した場合と陰極のみ骨内に設置した場合とを比較すると吸収腔数が両極骨内の方が有意の増加を示し骨単位数では有意の差は示さなかったが高橋、外川によると BMU が新生する場合骨吸収期間は2週間以内であると述べていることより刺激期間をもっと延長すれば骨単位数も差が出てくるものと考えられ、両極とも骨内の方が internal remodeling をより高める傾向を認めた。

また1982年、著者らは犬をつかった in vivo での電荷回収型パルス波刺激の際の impedance を測定して次のような報告をした³¹⁾。ビーグル種成犬を静脈麻酔下に電荷回収型パルス波、1 Hz、10 μ A を通電しオシロスコープに導かれた波形を Debye 型の等価回路でシュミレートすることにより R_1 , R_2 , C の値を求めた結果、impedance は電極の刺入深度や電極間距離による差は殆どなく陽極を不関電極として皮下や筋肉内に設置すると impedance は約半分となり電極の接触抵抗が大きな因子であることをうたがわせた。生体の電気特性には異方性、非線形性、周波数依存性、温度依存性など多様であり、白田³²⁾が述べているように人体皮膚の impedance は部位、年齢、性別により差があるために皮膚電極で安定した通電刺激を行うことは困難である。骨への刺激効果をより確実にするには陰極を骨折線内に設置して陽極は皮膚表面あるいは筋肉内に置くよりも陰極に近接した同一骨内に設置した方がよいと考えられる。

D. 電気刺激による骨形成効果について

Klapper³³⁾ はパルス波直流とパルス波交流をラットを使って比較し、交流のほうに骨形成効果を認める組織内での電磁場の発生が有効刺激になると推論している。Treharne³⁴⁾ は in vitro で同じ電荷量の直流とパルス波直流を比較し、直流の方に効果を認め刺激効果は電荷量ばかりでなく時間にも関係すると考えた。本実験で電荷回収型パルス波通電で直流成分を持った陰極部の方が internal remodeling が高められた犬が多かったことより、刺激時間の方が関係が深いと考えられる。

IV. 結 語

電荷回収型パルス波、直流、単相性パルス波、交流矩形波の4種類の波形を雑種成犬大腿骨に通電して骨の internal remodeling の促進効果および陽極酸化の程度を検討し以下の結論を得た。

1. 電荷回収型パルス波通電により骨皮質の internal remodeling が高められることが確認された。

2. 電荷回収型パルス波と直流および単相性パルス波による刺激を比較すると陽極周囲の骨吸収は電荷回収型パルス波で他の波形より少なく、交流矩形波とはともに少なく差がなかった。この結果から電荷回収型パルス波による陽極酸化防止効果が確認された。

3. 電荷回収型パルス波通電の際、陰極は骨内に置いて陽極を骨外の皮下に設置して検討したが、陽極を骨内に置く方が骨皮質内の internal remodeling は高められることを確認できた。

4. 陽極酸化防止効果のある電荷回収型パルス波通電と交流矩形波通電の際の骨皮質の internal remodeling 促進効果を比較した結果、internal remodeling は前者の陰極部の方が後者電極部より高められ、前者陽極部の方と後者電極部とはその差がないことを認めた。

稿を終えるにあたり、ご校閲いただきました恩師田島達也教授に深謝いたします。また、終始ご指導下さった高橋栄明助教授、ご指導ご助言いただいた斎藤義明教授、および外川裕先生、花岡司先生、錦織新一技官、赤沢秀喜技官、吉田芳雄技官、斎藤昌文技官に厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 保田岩夫：骨折治療に関する基礎的諸問題。京都医学会誌，4：395～406，1953。
- 2) Bassett, C.A.L., et al.: Effects of electric currents on bone in vivo. Nature, 204: 652～654, 1964.
- 3) Brighton, C.T., et al.: Cellular response and mechanisms of action of electrically induced osteogenesis. Bone and Mineral Research, Annual 4. ed. by W.A. Peck, Elsevier, Amsterdam-New York-Oxford, 213～254, 1986.
- 4) Villanueva, A.R., et al.: A tetrachrome stain for fresh, mineralized bone sections, useful in the diagnosis of bone disease. Stain Technol.,

- 39: 87~94, 1968.
- 5) 高橋栄明: 非脱灰骨組織像の読み方. 骨代謝, **6**: 53~63, 1973.
- 6) Watanabe, G., et al.: The effect of microelectrical current on electrodes in the agar disk. JCEEBH, Abstracts, **1**: 6, 1979.
- 7) 渡辺 元, 他: 微小電流通電における陽極酸化について. 整形外科基礎科学, **7**: 147~154, 1980.
- 8) 保田岩夫: 力学的仮骨と電機学的仮骨. 日整会誌, **2** 8: 267~268, 1954.
- 9) Friedenberg, Z.B., et al.: Bone reaction to varying amounts of direct current. Surg. Gynec. Obstet., **131**: 894~899, 1970.
- 10) 高橋栄明: 微小電流による骨の吸収への影響. 整形外科基礎科学, **4**: 145~154, 1977.
- 11) 外川 裕, 他: 微小電流による骨皮質の internal remodeling におよぼす影響. 医学のあゆみ, **103**: 219~221, 1977.
- 12) Brighton, C.T., et al.: Treatment of nonunion with constant direct current. Clin. Orthop., **124**: 106~123, 1977.
- 13) Suzuki, H., et al.: Anodic oxidation in electrical stimulation of bone. JCEEBH, Abstracts, **1**: 15, 1978.
- 14) 保志信男: 諸金属の生体内腐食の病理組織学的並びに組織化学的研究大阪大歯誌, **4**: 283~339, 1959.
- 15) 川原春幸: インプラントと生物理工学. 歯界展望別冊, 122~148, 1975.
- 16) Hueper, W.C.: Experimental studies in metal cancerigenesis. I. Nickel cancer in rats. Texas Rep. on Biol. and Med., **10**: 167~186, 1952.
- 17) Heath, J.C.: Cobalt as a carcinogen. Nature, **173**: 822~823, 1954.
- 18) Swanson, S.A., et al.: Laboratory tests on total joint replacement prostheses. J. Bone Joint Surg., **55-B**: 759~773, 1973.
- 19) McDougall, A.: Malignant tumor at of bone plating. J. Bone Joint Surg., **38**: 709, 1956.
- 20) Dube, V.E., Fisher, D.E.: Hemangioendothelioma of the leg following metallic fixation of the tibia. Cancer, **30**: 1264, 1972.
- 21) Wright, J.K., et al.: Electrolysis stainless in bone. J. Bone Joint Surg., **38**: 745, 1956.
- 22) Frost, H.M.: Bone remodeling and its relationship to metabolic bone diseases. Charles thomas, Springfield, Illinois, 1973.
- 23) Takahashi, H., et al.: Evidence that bone resorption precedes formation at the cellular level. Henry Ford Hosp. Med. Bull., **12**: 359~364, 1964.
- 24) 高橋栄明: 骨と改変 (remodeling) クリニカ, **5**: 647~652, 1978.
- 25) 外川 裕, 他: 骨皮質の internal remodeling に対する微小電流の作用. 骨代謝, **10**: 186~190, 1977.
- 26) 外川 裕: 長管骨骨皮質の internal remodeling におよぼす微小直流の影響に関する実験的研究. 日整会誌, **57**: 817~835, 1983.
- 27) 花岡 司: パルス波微小電流が骨皮質内での Internal Remodeling および骨癒合に及ぼす影響についての実験的研究. 日整会誌, **57**: 151~166, 1983.
- 28) Jørgensen, T.E., et al.: Electrical stimulation of human fracture healing by means of a slow pulsating, asymmetrical direct current. Clin. Orthop., **124**: 124~127, 1977.
- 29) Hinsenkamp, M., et al.: Corrosion of implants during electric stimulation of fracture healing. Electric stimulation of bone growth and repair. Burny, F., et al. (eds.), Berlin Springer-Verlag., 77~83, 1987.
- 30) Hellinger, J., et al.: Electrical stimulation of the callus formation by mean of bipolar rectangular pulse sequences. Arch. Orthop. Traumat. Surg., **96**: 241~246, 1980.
- 31) 渡辺 元, 他: 骨の電気刺激に用いる電極の骨内および皮膚におけるインピーダンス. 整形・災害外科, **25**: 1051~1052, 1982.
- 32) 白田小夜子: 人体皮膚の等価回路について. 日本生理誌, **33**: 778~786, 1971.
- 33) Klapper, L., et al.: Mechanism of electrical stimulation of bone formation. Ann. N.Y. Acad. Sci., **238**: 530~542, 1974.
- 34) Trehanne, R.V., et al.: An in vitro study of electrical osteogenesis using direct and pulsing currents. Clin. Orthop., **145**: 300~306, 1979.

(平成元年2月20日受付)