

The Relation of the Intracompartmental Pressure with the Muscular Blood Flow and the Distal Blood Flow under Externally Applied Pressure in the Rabbit Leg

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-04 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/8062

家兎下腿圧迫下における筋膜区画内圧, 筋血流量 および末梢血流量の関係

金沢大学医学部整形外科科学講座 (主任: 野村 進教授)

宮 森 邦 夫

(昭和63年9月1日受付)

家兎を用いて、下腿全体の圧迫条件下における前脛骨筋血流量と末梢非圧迫部位の血流量の関係を検索し、末梢血流量より圧迫部位での筋血流量の予測を試みた。下腿全体を皮膚上より圧迫する目的で作製した加圧器により 10mmHg ごとに圧を増加させ、電気分解式水素クリアランス法を用いて前脛骨筋血流量を測定し、インピーダンスプレチスモグラフィ法を用いて末梢血流量を足部で測定した。前脛骨筋の存在する前方筋膜区画内圧の測定には連続注入法を用い、加えた圧との関係を求めたところ両者は、 $r=0.984$, $p<0.005$ (Student's t-test) と有意の相関を示し、加えた圧から前方筋膜区画内圧の算出が可能であった。前脛骨筋血流量は非操作時には $32.2 \pm 16.9 \text{ ml/min/100ml}$ (平均値 \pm 標準偏差) で加える圧が増加するに従って減少し、40mmHg で消失した。末梢血流量も加える圧が増加するに従って減少し、80mmHg で消失した。筋血流の消失する 40mmHg では、末梢血流量は対照側と比較すると $52.3 \pm 12.3\%$ に低下した。従って下腿全体が均一に圧迫される条件下では、末梢血流量が50%程度に減少すると圧迫部位での筋血流が消失すると言える。臨床的には下腿全体の内圧が亢進した場合、即ち腫脹のある骨折に対しギプス固定を行った場合に、末梢の血流量が50%程度に減少すると筋血流が消失し compartment 症候群が発症する可能性が高い。以上よりインピーダンスプレチスモグラフィ法による末梢血流量の測定は、筋血流量を反影する事が確かめられたため、本法は compartment 症候群の早期診断及び早期治療に有用である。

Key words intracompartmental pressure, muscular blood flow, distal blood flow, compartment syndrome

整形外科領域において、骨折を伴った四肢の外傷に際し最も治療に急を要する病態としては、主要血管の閉塞による循環障害と、compartment (以後単独で用いる場合は筋膜区画とする) 内圧の亢進による筋組織の微小循環障害、即ち compartment 症候群があげられる。これまで compartment 症候群の診断は、高度の腫脹の存在や筋阻血による疼痛、末梢の色調の変化や動脈拍動の消失といった循環障害の所見、阻血による末梢神経障害としての知覚運動麻痺などの臨床所見により行われてきた¹⁾。しかしながら末梢の動脈拍動の消失は必ずしも出現するものでなく、骨折による疼痛や神経損傷による知覚運動障害が混在している場合、局所所見のみでは病態の把握

が困難である^{2,3)}。更に骨折の治療の際にはギプス固定を必要とする場合が多いが、ギプスにより局所が被覆され診断を一層困難にする⁴⁾。

現在、筋血流量を直接測定する方法としては、放射性同位元素を局所に注入してその代謝を測定する方法や吸入式水素クリアランス法があるが、いずれも簡単に臨床に適用できる方法ではない。近年臨床的に compartment 症候群が疑われる場合、筋膜区画内圧を測定することにより筋組織の微小循環状態を推測している⁵⁻⁷⁾。しかしながら内圧の測定には清潔操作下でのプローベの刺入が必要であり、多くの症例に対する適応には問題がある。

compartment 症候群において筋膜区画内圧が亢進

Abbreviations: インピーダンス法, impedance plethysmography 法: 電解法, 電気分解式水素クリアランス法: 連続注入法, continuous infusion method.

した場合には、当該部位の筋組織の微小血流のみならず末梢部位の血流も低下すると考えられるが、これまで行われてきた末梢動脈拍動の触診による判定では定量性に欠け、診断に際しての意義が少なかった。著者は最も compartment 症候群が発症しやすい状態、即ち四肢の骨折に対してギプス固定を行った場合には全ての筋膜区画内圧がほぼ一様に亢進し、内圧の高まる程度に従って末梢血流量も段階的に減少すると考えた（図1）。従って末梢血流を定量的に測定する事により、筋膜区画内の筋血流障害の程度を推測する事が可能と考え、両者の関係を求める目的で今回の実験を行った。末梢の血流量測定には Impedance Plethysmography 法（インピーダンス法）を用いたが、本法は測定電極間の組織全体の血流量を反映するとされ⁷⁰⁾、臨床应用到当たっては非侵襲的に連続測定が可能で、四肢の血流量の評価には最も適していると考えられている。

対象および方法

成熟家兎下腿を用いて実験を行った。実験の概略

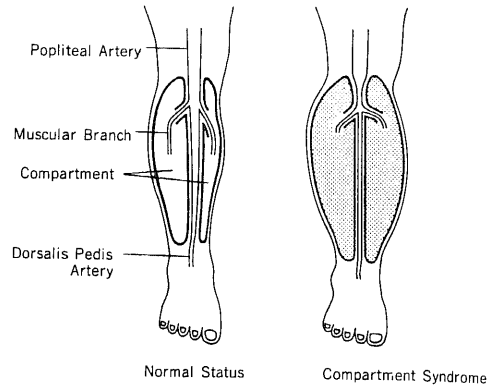
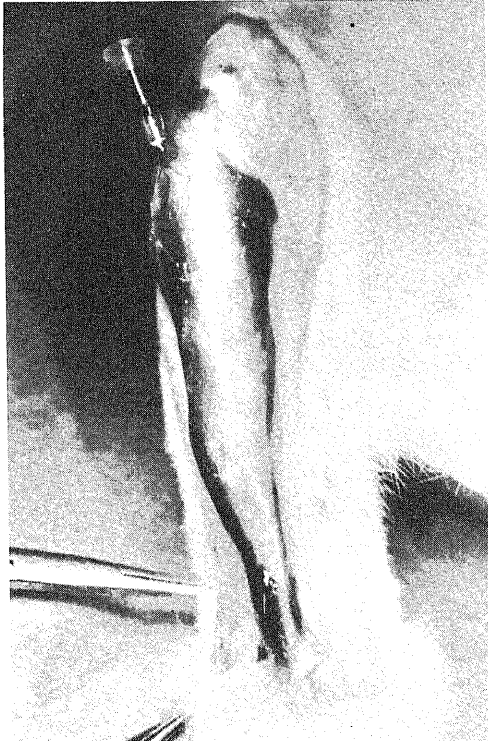


Fig.1. Schema of the comparison between normal status and compartment syndrome. In compartment syndrome, increased intracompartmental pressure ceases the muscular blood flow while pulsation of the distal artery can be palpable.



(a)



(b)

Fig. 2. Distribution of the dye injected in the anterior tibial muscle. Anterior view of the leg (a) and its cut surface (b). Note the boundary of the anterior compartment.

としては、まず家兎下腿の筋膜区画の構成と下腿部動脈圧を調べた。次に家兎下腿全体を圧迫する目的で作製した加圧装置（以後加圧器とする）を用いて、加えた圧（以後外圧とする）と筋膜区画内圧の関係を求めた。加圧器により加えた外圧と筋膜区画内圧が相関する事を確かめた後、外圧と筋膜区画内筋血流量の関係を、電気分解式水素クリアランス法（電解法）により求めた⁹⁾。また同一条件下で、加圧器より末梢の血流量をインピーダンス法により測定し¹⁰⁾、加圧部筋血流量との関係を求めた。以上の結果から筋膜区画内圧、筋血流量および末梢血流量の関係を検討した。

1. 基礎的実験

1. 家兎下腿の筋膜区画構成

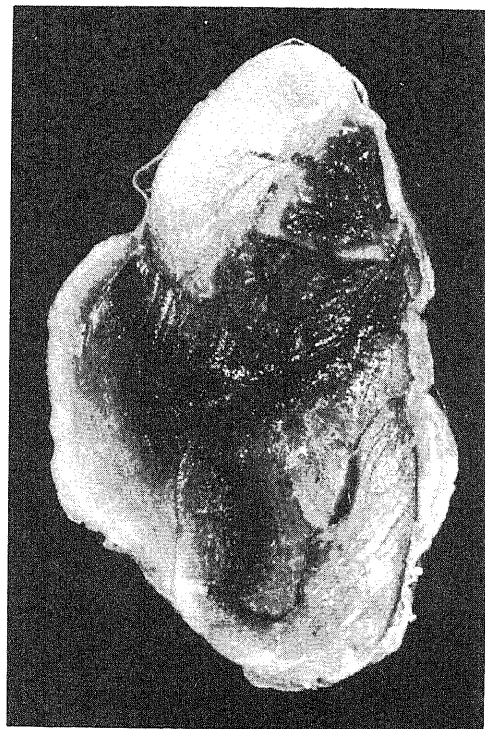
家兎下腿の筋は脛骨、腓骨、骨間膜を境に前方の伸筋群と後方の屈筋群に分けられる。前方では前脛骨筋、長趾伸筋、第4・5趾伸筋、長・短腓骨筋の6筋より成り、前2者はヒトでは前方筋膜区画に当り後4者は外側筋膜区画に当たる。後方では膝窩筋、

脛・腓側趾屈筋、浅趾屈筋、ヒラメ筋、内・外側腓腹筋の7筋より成り、ヒトでは前3者が深後方筋膜区画、後4者が浅後方筋膜区画に当たる¹¹⁾。家兎下腿の筋膜区画の構成を知る目的で、新鮮屍肢を用いて検索した。インジゴカルミン液を生理的食塩水で希釈し、皮内針にて前脛骨筋及び脛側趾屈筋に注入し、肉眼的に色素の拡散状態を調べた。また10%ホルマリンで固定し脱灰した後、下腿中央部で割を入れ割面での色素の拡散状態を調べた。

前脛骨筋に注入した色素は、長軸方向において近位では膝関節高位、遠位では足関節高位の伸筋支帯で止まり下腿固有の閉鎖系であった。割面では伸側全ての筋周囲に色素が広がり単一の筋膜区画であった（図2 a, b）。脛側趾屈筋に注入した色素は、長軸方向において遠位では足関節高位で止まるが、近位では神経・血管束に沿って漏出し膝関節高位を越え大腿屈側にまで広がる。割面では屈側全ての筋周囲に色素が広がり単一の筋膜区画であったが、完全な閉鎖系ではなかった（図3 a, b）。従って、家兎下腿



(a)



(b)

Fig. 3. Distribution of the dye injected in the tibial digital flexor muscle. Lateral view (a) and its cut surface (b). Note the boundary of the posterior compartment.

では前方と後方の二つの筋膜区画に分けられる。

2. 家兎下腿部動脈圧

下腿部を加圧するに先立ち5羽の家兎5肢を用いて、以下に述べる主実験と同一条件下に家兎下腿部の動脈圧を測定した。測定の部位として膝関節部の伏在動脈を選び、総頸動脈圧と同時に測定記録した。両部位の動脈圧の比較のため、総頸動脈収縮期圧をほぼ100mmHgに保って測定を行った。その結果、総頸動脈と伏在動脈の収縮期圧は、それぞれ 99.0 ± 1.9 mmHg, 97.6 ± 1.7 mmHgの値を示した。従って家兎においては総頸動脈と伏在動脈の収縮期圧はほぼ等しいと考えてよい。

II. 主実験

1. 実験方法

1) 実験動物と条件

体重約3.5Kgの白色家兎をSodium Pentobarbital 25mg/Kgで耳介静脈より静脈麻酔した後、気管切開して挿管し笑気1.0~1.5l/min, 酸素0.5~1.0

l/min, フローセン0.5~1.5%にて人工呼吸器により調節呼吸とした。血圧は総頸動脈で監視し、全ての測定中に収縮期圧を90~100mmHgに保った。調節呼吸の際、筋弛緩剤は筋トーンスおよび筋血流への影響を考え使用しなかった。室温は20°C~24°Cで

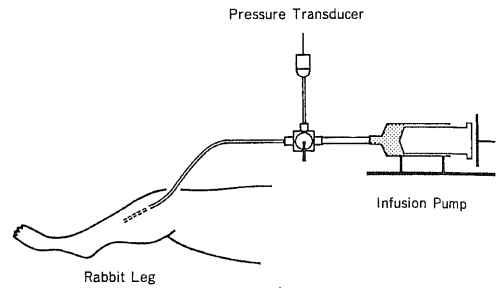
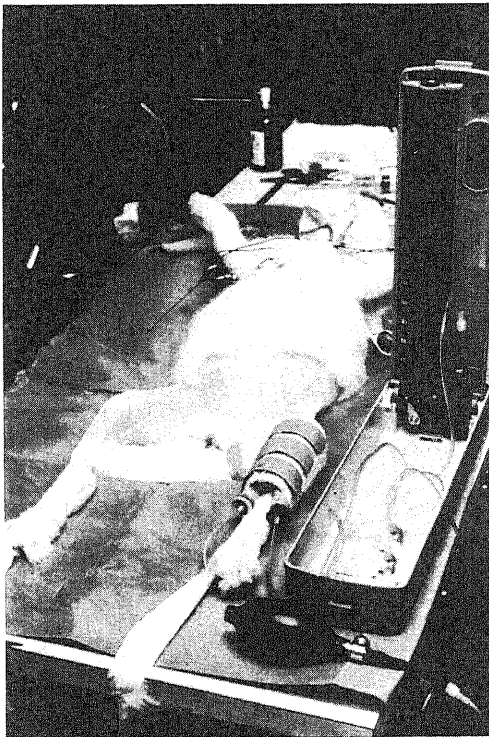
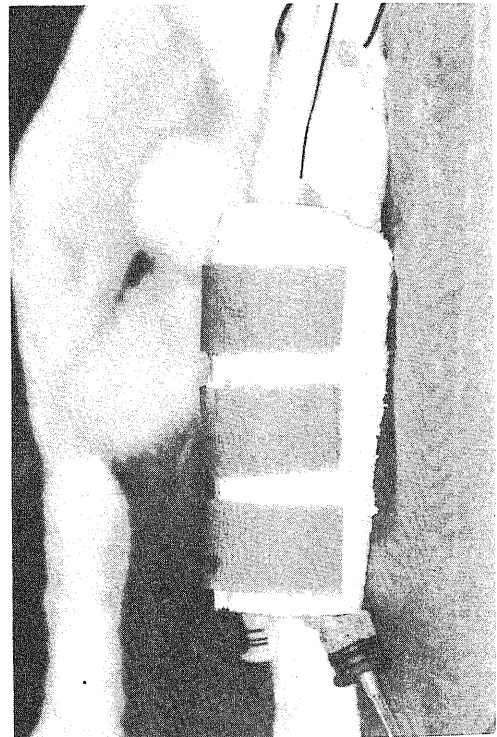


Fig. 4. Set-up for measurement of the intra-compartmental pressure. The infusion pump is driven at the rate of 0.162ml/hr.



(a)



(b)

Fig. 5. Equipments for applying the external pressure to a rabbit leg (a) and close-up view of the cast (b). The length of the cast is the same as the rabbit leg and the pressure can be applied to the whole portion of the leg.

ば一定であった。

2) 筋膜区画内圧の測定

筋膜区画内圧の測定は手技が容易で、連続測定が可能な Matsen らの continuous infusion method (連続注入法)を用いた¹²⁾。皮膚に約 3mm の小切開を加え筋膜を 19G 針にて穿刺しこれを介して先端に 2 個の側孔を有する外径 1mm の硬膜外カテーテル (八光電気製作所製, 長野) を筋腹の中央に刺入した。皮膚, 筋膜は層毎に 5-0 ナイロン糸にて縫合し, 持続注入ポンプ (HARVARD APPARATUS COMPACT INFUSION PUMP) によりヘパリン加生理的食塩水を毎時 0.162ml の速度で注入し, 内圧を測定記録した (図 4)。

3) compartment 症候群のモデル

i. 下腿全体の圧迫

筋膜区画内圧を高め筋組織の血流を障害する目的で, 下腿全体を圧迫する加圧器を作製した。骨折の外固定材料である PLITON-100 (東京衛材研究所製, 東京) を用いて下腿と同長の円筒を作製し, その内壁全面に 2 枚のゴム風船を貼り合せこれを加圧する事により外圧を加えた。外圧はゴム風船と連結管で連結したスタンド型血圧測定用水銀柱で測定した (図 5 a, b)。

ii. 前方筋膜区画のみの内圧亢進

前方筋膜区画のみの内圧を高めるため, Mubarak らの方法⁹⁾に準じて 37°C に加温した生理的食塩水を経皮的に刺入した 22G 針を介して前脛骨筋に注入した。加圧に当たっては, 筋膜区画内圧を測定しつつ生理的食塩水を容れた容器の高さを調節して目的とする内圧にした (図 6)。

iii. 後方筋膜区画のみの内圧亢進

ii と同様の方法で脛側趾屈筋に生理的食塩水を注入し, 後方筋膜区画の内圧を高めた。

4) 筋血流量の測定

筋血流量の測定には電解法を用いた⁹⁾¹³⁾。血流測定装置は, 水素ガス発生回路として低電流直流電気刺激装置 (日本光電社製 SEN-3201, 東京) を微小電流用に改良したものを用い, 水素ガス測定回路として UH メーター (ユニークメディカル社製 PGH-201, 東京) と記録装置 (ユニークメディカル社製 U-228-2P) を用いた。電極は関電極として, 水素ガス発生電極と測定電極よりなる電極間距離が 300 μ m の双極電極を用い, 不関電極として銀/塩化銀皿型電極を用いた (図 7 a, b)。筋血流量の測定実験に限り, 関電極先端の凝血防止の目的でヘパリン 500 単位/Kg の静注を行った。

測定部位としては, 臨床的に compartment 症候群で最も多く障害される前脛骨筋を選択した。内圧測定と同様の方法で 19G 針を刺入し, これを介して前脛骨筋中央部に関電極を刺入した。2 個の不関電極は大腿部皮膚上に置いた。直流電気刺激装置にて 8 μ A の微小電流を水素濃度が一定になるまで通電し, 水素クリアランス曲線を記録した。これらの値を片対数表に描くと, 急速相と緩速相の二相性の直線になるが急速相の部分から水素濃度の半減期を求めた。電解法では家兎生存中の半減期には血流のない状態での拡散による値も加味されているので, 15%塩化カリウム液 1ml/Kg を静注し死後の半減期を求め, 下記の甲州らの計算式により血流量 (F) を算出した¹⁴⁾。

$$F = 69.3 (1/Tc - 1/Td) \quad (\text{ml/min/100ml})$$

Tc: 生存中の半減期

Td: 死後の半減期

5) 末梢血流量の測定

加圧部位より末梢の血流量を測定するためインピーダンス法を用いた¹⁰⁾。使用機器はインピーダンスプレシスモグラフ (日本光電社製 AI-600G) と微分ユニット (日本光電社製 ED-600G) 及び記録計 (日本光電社製 WT-645G) で, AI-600G は微小血流量が測定出来るように感度を高める改良を行った。本法はヒトにおいてはテーブ電極を用い非侵襲的に測定可能であるが, 家兎では体毛があるため直径 0.8mm の Kirschner 鋼線 2 本を用いて電極間距離 3cm の双極電極を作製し, 足背部皮下に刺入して測定を行った

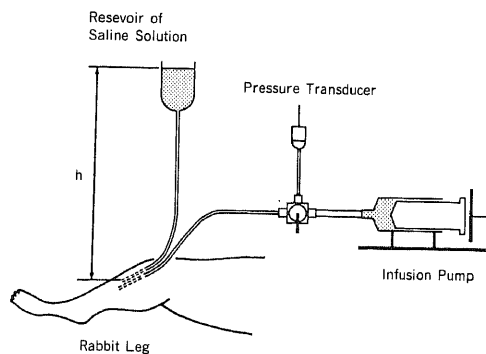


Fig. 6. Increment of anterior compartment pressure by infusing saline solution. Height of the reservoir is adjusted at the appropriate intracompartmental pressure. Infusion pressure in centimeter of water is converted to millimeter of mercury by dividing height (h in centimeter) by 1.35.

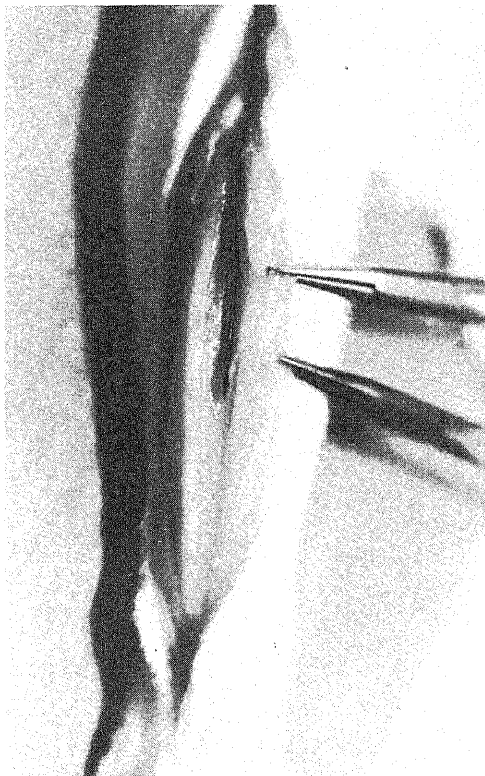
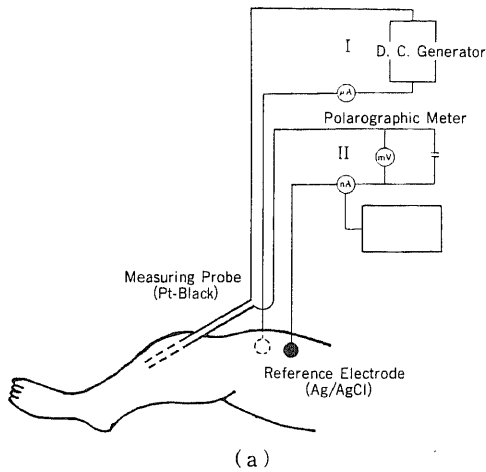


Fig. 7. Set-up for measurement of muscular blood flow with electrochemically generated hydrogen clearance method (a) and measuring electrode inside the muscle (b). Circuit I is for the generation of hydrogen pulses and circuit II is for the polarographic measurement of the hydrogen partial pressure. The reference electrode consists of silver/silver chloride (Ag/AgCl) and the measuring probe consists of platinum black (Pt-Black).

(図 8 a, b).

この測定により、電圧電極間インピーダンス (Z_0)、脈波 (ΔZ 波)とその微分波 (dz/dt 波)が得られる。Kubicekらは電流電極と電圧電極をそれぞれ2本ずつ用いた4電極法によるインピーダンス法で、電圧電極間の1回駆出量を下記の計算式により求めている(図9)¹⁵⁾。

$$\Delta V = \rho \cdot \left(\frac{L}{Z_0}\right)^2 \cdot \frac{dz}{dt} \text{ min} \cdot T$$

ΔV : 1回駆出量 (ml)

ρ : 血液比抵抗 ($\Omega \cdot \text{cm}$)

L : 電圧電極間距離 (cm)

Z_0 : 電圧電極間インピーダンス (Ω)

$\frac{dz}{dt} \text{ min}$: ΔZ の一次微分の最小値 (Ω/sec)

T : 駆出時間 (sec)

本実験においては、家兎足部の測定可能な長軸の長さが短いため2電極法を用いたが、2電極法においても両側を同じ方法で測定して血流量を相対値として求めるには特に問題がないとされている⁷⁾¹⁶⁾。従って血流量の算出には、Kubicekらの計算式を用いて加圧側の非加圧側に対する血流量の比として求めた。また非操作時にも血流量には軽度の左右差があるため、この時の血流量比で各加圧時の血流量比を除して真の減少率を求めた。またインピーダンス法では呼吸により ΔZ 波の基線が変動するため、測定の数秒間は人工呼吸器を停止させた。

2. 測定項目

1) 加圧器により加えた外圧と筋膜区画内圧との関係

家兎下腿10肢を用いて、加圧器により外圧を加えた時の前方筋膜区画内圧の変化を調べた。内圧測定用の硬膜外カテーテルを前脛骨筋中央部に刺し非操作時の内圧を測定した後、外圧を10mmHg毎に上昇させて内圧を測定し Student の t 検定法を用いて両者の相関を検討した。

2) 加圧器により加えた外圧と前脛骨筋血流量との関係

9羽の家兎を用いて外圧と前脛骨筋血流量との関係を調べた。加圧器を下腿に装着し、非加圧時および外圧を10mmHg毎に上昇させた時の水素ガスクリアランス曲線を記録した。最後に塩化カリウム液を静注し死直後の水素ガスクリアランス曲線を記録した後、それぞれの半減期から各条件下の血流量を算出した。

3) 加圧器により加えた外圧と末梢血流量の関係

9羽の家兔を用いて加圧時の足部血流量の変化を調べた。加圧器を下腿部に装着し、外圧を10mmHg毎に上昇させて下腿全体の内圧を高めた時の末梢部の血流量を測定した。

4) 前方筋膜区画のみの内圧亢進時の末梢血流量の変化

4羽の家兔を用いて単一区画の compartment 症候群を想定し、前方筋膜区画のみの内圧を高めた時の末梢血流量の変化を調べた。この検索には前脛骨筋血流量が消失する内圧が必要である事から、下腿全体を圧迫した時の筋血流量の実験結果を参考にして、前脛骨筋血流量が消失する外圧と同じだけ内圧を高めた。

5) 後方筋膜区画のみの内圧亢進時の末梢血流量の変化

4羽の家兔を用いて後方区画のみの内圧亢進時の血流量の変化を調べた。先に述べたように後方区画は完全な閉鎖系ではないが、加圧器による加圧時の

血流量の変化との比較のため、生理的食塩水を連続注入することにより内圧を一定に保って測定を行った。非操作時の脛側趾屈筋内圧を測定して血流測定を行った後、内圧を4)の前方筋膜区画のみの内圧亢進時と同じだけ高め血流測定を行い、末梢部の血流量の減少率を求めた。

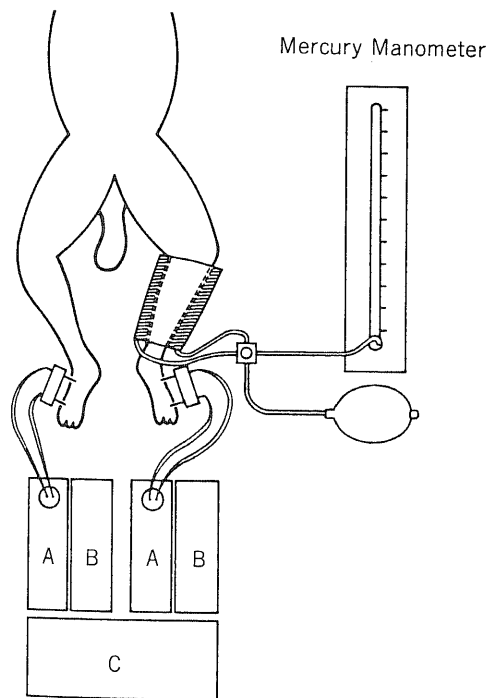
成 績

1. 加圧器により加えた外圧と前方筋膜区画内圧との関係

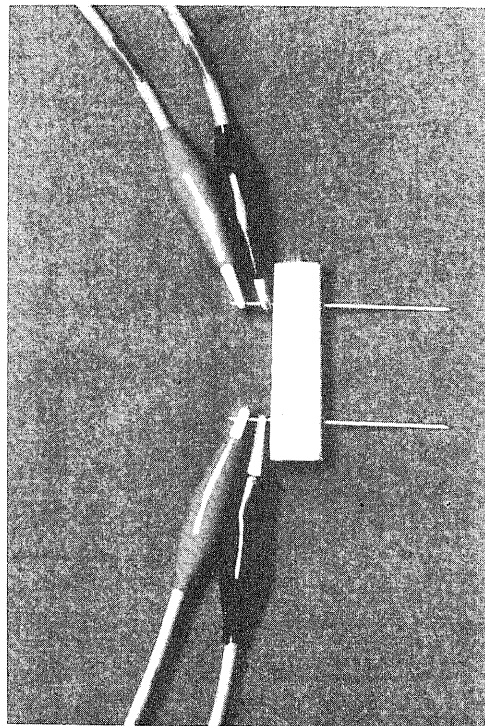
非操作時の前方筋膜区画内圧は 12.0 ± 3.3 mmHg (平均値±標準偏差) で、以後外圧を上昇させるに従って内圧も上昇し、得られた内圧は非操作時の内圧と加えた外圧の和より僅かに高い値を示した (図10)。得られた内圧から非操作時の内圧を減じた値 (Y) と外圧 (X) との関係は

$$Y = 1.09X + 1.6, r = 0.984$$

で示され、0.5%の危険率で有意の相関関係が認めら



(a)



(b)

Fig. 8. Set-up for measurement of segmental blood flow at the foot using impedance plethysmographic technique (a) and close-up view of bipolar electrode (b). A, impedance plethysmograph (AL 600G); B, differentiator (ED 600G); C, recorder (WT 645G).

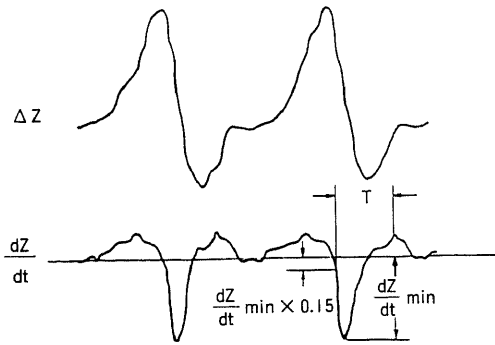
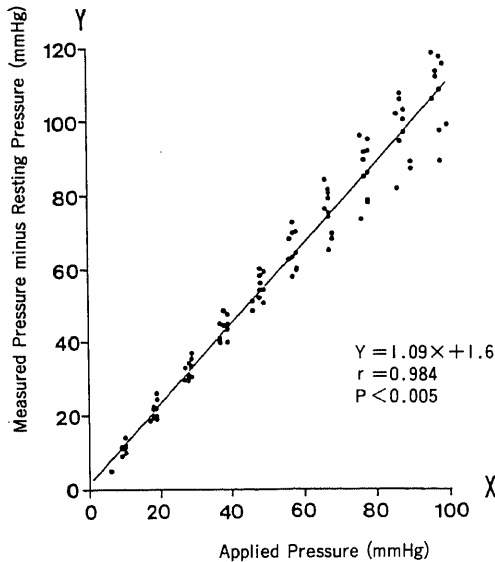


Fig. 9. Schematic drawing of ΔZ and dZ/dt . ΔZ , impedance change; dZ/dt , first derivative of ΔZ with respect to time; dZ/dt min, minimum value of dZ/dt ; T, ejection time obtained from the distance between the point that is 15% of dZ/dt min below the base line and the point at the top of the coming upward spike.



Resting Pressure : 12.0 ± 3.3 mmHg

Fig. 10. Relation between the externally applied pressure and the measured pressure. The applied pressure (X) is compared to the pressure difference between the measured pressure and the resting pressure (Y). The resting pressure is shown as mean \pm S. D..

れた (図10).

2. 加圧器により加えた外圧と前脛骨筋血流量との関係

9羽の家兔の非加圧時の前脛骨筋血流量は 32.2 ± 16.9 ml/min/100ml であった。筋血流は、外圧を増加させるに従って漸減し3例は 30mmHg で、6例は 40mmHg で消失した (表1)。

3. 加圧器により加えた外圧と末梢血流量の関係
得られた脈波は、外圧を増加させるに従って低下し血流量も漸減した (図11)。脈波の消失する外圧、即ち末梢血流の消失する外圧は、60mmHg が2例、70mmHg が5例、80mmHg が2例であった (表2)。加圧器を用いて外圧を加えた時の前脛骨筋血流量と末梢血流量の変化は図12の如くになり、前脛骨筋血流の消失する外圧 40mmHg では末梢血流量は $52.3 \pm 12.3\%$ であった。

4. 前方筋膜区画のみの内圧亢進時の末梢血流量の変化

加圧器により加えた外圧と前脛骨筋血流量との関係より、外圧 40mmHg で前脛骨筋血流は消失する事から、前方筋膜区画の内圧を 40mmHg 高めて末梢血流量を測定した。非操作時の内圧は 12.8 ± 3.1 mmHg で、加圧後の終圧は 53.9 ± 2.5 mmHg となり、平均 41.1mmHg 内圧を高めた。その結果、加圧後の末梢血流量は $82.7 \pm 5.9\%$ に減少した (表3)。

Table 1. Blood flow of anterior tibial muscle under externally applied pressure

EP(mmHg)	0	10	20	30	40
Number of rabbit					
1	61.0	24.3	8.3	2.1	0
2	52.7	39.5	15.9	3.5	0
3	16.6	4.2	0.7	0	
4	38.8	20.8	6.9	1.4	0
5	15.2	13.9	4.2	2.8	0
6	27.7	20.8	13.9	0	
7	11.1	9.7	5.5	3.5	0
8	33.3	22.9	20.8	17.3	0
9	33.3	20.1	7.6	0	
mean \pm S.D.	32.2 \pm 16.9	19.6 \pm 10.0	9.3 \pm 6.3	3.4 \pm 5.4	0

Muscular blood flow (ml/min/100ml) at every pressures are shown in the table. The blood flow was measured at anterior tibial muscle with electrochemically generated hydrogen clearance method. EP, externally applied pressure (mmHg)

5. 後方筋膜区画のみの内圧亢進時の末梢血流量の変化

非操作時内圧は $3.25 \pm 1.2 \text{ mmHg}$, 加圧後の終圧は $44.3 \pm 2.6 \text{ mmHg}$ で平均 41.1 mmHg 加圧した. 加圧後の末梢血流量は $63.6 \pm 7.3\%$ であった (表4).

考 察

これまで compartment 症候群を対象として種々

の実験モデルを作製し, 筋膜区画内圧と筋血流量の関係を求めた論文は散見される¹⁷⁻²²⁾. 筋組織の血流量を測定する方法が繁雑で臨床応用されるに至っていないため, 筋膜区画内圧を測定することにより局所の血流量を推測するという方法であり, 測定手技は比較的簡単のため現在臨床にも用いられている有用な方法である.

しかしながら内圧測定法による評価には, 二つの

Table 2. Relation between relative segmental blood flow of distal portion and externally applied pressure

EP(mmHg)	10	20	30	40	50	60	70	80
Number of rabbit								
1	97.8	90.7	76.7	63.9	63.0	29.0	0	
2	70.2	64.8	54.0	50.5	36.1	29.2	11.8	0
3	91.9	75.3	72.8	58.5	26.8	24.3	13.7	0
4	89.0	84.4	65.5	50.0	45.2	26.4	0	
5	90.1	88.3	61.6	37.0	12.5	0		
6	97.2	94.7	73.3	35.9	33.2	0		
7	86.1	78.8	76.2	74.8	65.6	32.9	0	
8	89.7	82.1	57.7	48.4	43.1	36.3	0	
9	77.4	65.4	59.1	52.0	49.9	39.5	0	
mean \pm S.D.	87.7 \pm 8.9	80.5 \pm 10.5	66.3 \pm 8.6	52.3 \pm 12.3	41.7 \pm 16.9	24.2 \pm 14.5	2.8 \pm 5.6	0

Relative blood flow (%) is obtained by comparing blood flow of pressurized leg with opposite leg at every pressures. The blood flow was measured at the foot with impedance plethysmographic technique. EP, externally applied pressure (mmHg)

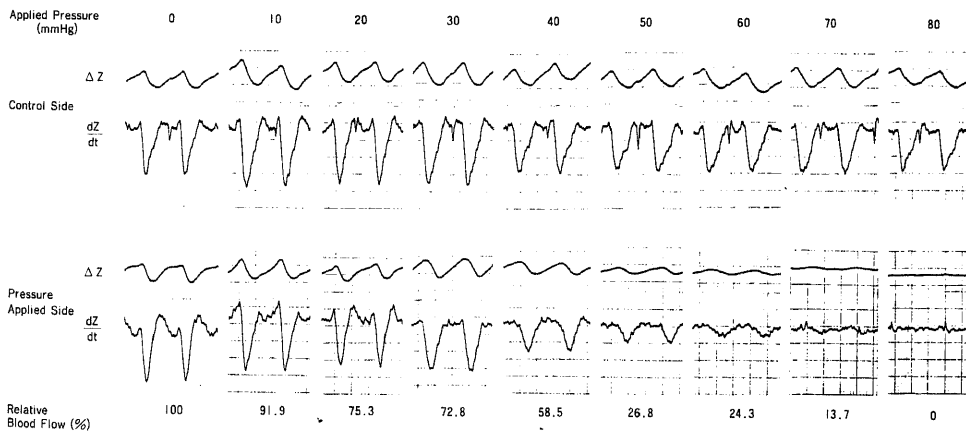


Fig.11. An example of alteration of the segmental blood flow of the distal portion according to increment of the externally applied pressure. The upper is the control side and the lower is the pressure applied side.

問題点がある。第一に、この方法が血流量を反映するとしても筋膜区画の内圧の変化による影響しか受けて、血流そのものを測定していない事にある。即ち、血圧や心拍数の変動などによって血流量に変化をきたしても、筋膜区画内圧には変化をきたさず血流量の変化を捕らえられない²⁹⁾。第二に、内圧測定法では筋膜区画内にプローベの刺入が必要であり、連続測定の際にはこれを留置する必要があるため患者にとって侵襲的になる事である。

従って外傷を受けた四肢に広く内圧測定法を用い

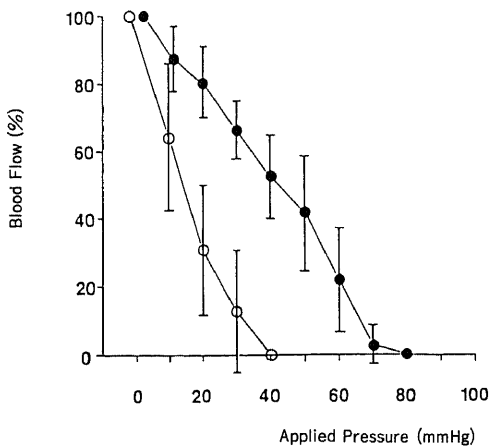


Fig.12. Relation between applied pressure and blood flow. Relative segmental blood flow of the distal portion and relative muscular blood flow are shown with closed and open circles, respectively.

Table 3. Relative blood flow after infusion of saline solution within anterior compartment

Number of rabbit	initial pressure (mmHg)	final pressure (mmHg)	relative blood flow (%)
1	11.0	56.0	76.7
2	10.0	51.5	83.1
3	17.0	56.0	90.6
4	13.0	52.0	80.3
mean ± S.D.	12.8 ± 3.1	53.9 ± 2.5	82.7 ± 5.9

Relative blood flow (%) is obtained by comparing blood flow of leg injected saline solution in anterior compartment with blood flow of opposite leg. The blood flow was measured with impedance plethysmographic technique.

る事は適切ではない。緒言で述べた如く四肢外傷における compartment 症候群は、整形外科領域において血管閉塞と共に治療に急を要する疾患であるが、これらの病態を評価できる簡便な検査法はこれまで無かった。著者はインピーダンス法が四肢血流量の定量的評価に有用な事を知り、この方法が compartment 症候群の評価に用いられないかと考え本実験を行った。即ち外傷を受けた四肢の血流状態のスクリーニングにインピーダンス法を用いる為、筋膜区画の内圧を高め筋阻血が起こる時の末梢側血流量を定量的に測定した。

compartment 症候群のモデルとしては、下腿全体を圧迫する目的で加圧器を使用し、単一筋膜区画の内圧を高める目的で加温した生理的食塩水を注入した。前者は骨折に対してギプス固定を行った時に生じる compartment 症候群を想定し、下腿部全体に均一に圧迫がかかるように注意した。後者は、単一筋膜区画内での出血や薬液の注入などによる特殊な compartment 症候群を想定して実験を行ったが、このような場合には下腿全体の血流に及ぼす影響は少なくなり、局所の血流量の推測には内圧測定法が良い適応になると考えられる。

これまでに用いられている筋膜区画内圧測定法としては、一回注入法⁹⁾、連続注入法¹⁰⁾、wick カテーテル法⁴⁾があるが、各測定法により正常値が異なっている事に注意すべきである。これらの内で連続注入法と wick カテーテル法は連続的に測定が可能であるが、Guyton らによると両者の測定する圧の意味は異なる²⁰⁾。組織圧は固体組織圧 (solid tissue pressure)

Table 4. Relative blood flow after infusion of saline solution within posterior compartment

Number of rabbit	initial pressure (mmHg)	final pressure (mmHg)	relative blood flow (%)
1	5.0	48.0	68.4
2	3.0	43.0	69.7
3	2.0	42.0	53.7
4	3.0	44.0	62.7
mean ± S.D.	3.3 ± 1.3	44.3 ± 2.6	63.6 ± 7.3

Relative blood flow (%) is obtained by comparing blood flow of leg injected saline solution in posterior compartment with blood flow of opposite leg. The blood flow was measured with impedance plethysmographic technique.

と間質液圧 (interstitial fluid pressure) に分けられ、連続注入法では固体組織圧と間質液圧を合せた全組織圧 (total tissue pressure) を測定し、wick catheter 法では間質液圧のみを測定するとされる。局所の微小血管には固体組織圧と間質液圧の両者とも影響を与えるとされる事から、本実験には連続注入法を用いた。本法は急激な加圧によってもプローベ先端の閉塞が生じる事がなく、加圧実験に適している。本実験において得られた前方筋膜区画の安静時内圧は、平均 12.0mmHg とこれまでの報告よりやや高い値であるが¹²⁾、これは加圧器を装着するため足関節を安静時の肢位からやや底屈位としたためと思われる。足関節を底屈させると下腿伸筋群は伸展される為、前方筋膜区画内圧は数 mmHg 上昇し、背屈させると数 mmHg 低下する²⁰⁾。

加圧器を用いて下腿全体を圧迫し、外圧を段階的に増加させた実験においては、加えた外圧と前方筋膜区画内圧の関係を調べた。その結果、前方筋膜区画内圧は外圧と有意の相関を示し、安静時内圧と外圧の和より僅かに高くなった。従って前方筋膜区画内圧は、得られた回帰式を用いると外圧のみから算出可能である。よって筋膜区画内圧、筋血流量、末梢血流量の3者の関係は、加えた外圧とそれぞれの関係を求める事により得られる。

筋血流量を求める方法としては、近年では放射性同位元素やガスを用いた局所でのクリアランスより求める方法が一般的になっている。家兎前脛骨筋血流量を求めた実験では、Matsen らは吸入式アルゴンクリアランス法で $12.0 \pm 4.0 \text{ ml/min/100ml}$ ²⁰⁾、吸入式水素クリアランス法を用いたものでは Mishra らは $8.2 \pm 1.7 \text{ ml/min/100ml}$ ²⁰⁾、Ogata らは $52.9 \pm$

$11.9 \text{ ml/min/100ml}$ の値を示している²⁰⁾。本実験において用いた電解法は、既に骨髓²¹⁾や末梢神経²²⁾の血流測定に用いられているが、骨格筋血流の測定に用いた報告はない。今回の実験により、電解法における家兎前脛骨筋血流量として $33.9 \pm 13.9 \text{ ml/min/100ml}$ の値を得た。本測定値は、これまでの諸家の報告した結果から大きく逸脱するものでなく、骨格筋血流量としては妥当な値と考えられる。加圧器を用いた実験では、外圧を増加させ内圧を高めるに従って筋血流量は低下し、筋膜区画内圧と筋血流量の関係を良く反映した。筋血流は外圧 30mmHg で消失する個体もあったが、多くは 40mmHg で消失した。即ち、本実験に用いた加圧方法で筋膜区画内圧を高めた場合、外圧が 40mmHg の時には前脛骨筋血流は全て消失していると言える。

筋膜区画内圧を高めて筋血流の消失する内圧を求めた実験を文献的に調べてみると、表5の如くなる^{17)18)20)~22)28)}。これらの結果は、加圧条件や測定方法が異なるため単純な比較はできず、初期には 80mmHg 以上という値もみられるが、最近の報告では臨床的に compartment 症候群が発生するとされる内圧 40~60mmHg に近い値を示している。本実験では筋膜区画内圧と筋血流量の関係を同一肢で測定していないが、外圧と内圧の関係の回帰式を用いると外圧 40mmHg の時に内圧は 57.2mmHg と計算されるので、筋血流が消失する内圧は 57.2mmHg と言える。従って筋血流が消失する筋膜区画内圧もこれまでの報告と一致している。

また電解法は、血流のない時の拡散値が求められるれば臨床応用が可能である。四肢骨格筋において血流のない時の拡散値を求める為には、測定ごとに中

Table 5. Previously reported pressures necessary for producing muscular ischemia

Cheif author	Material	Indicator pressure	applying method	Result
Dahn (1967)	human T.A.	Xe-133	cuff	*equal to DP
Sheridan (1975)	rabbit T.A.	Rb-86	balloon	*over 80 mmHg
Clayton (1977)	rabbit hams.	Xe-133	plastic air splint	**over 80 mmHg
Matsen (1979)	rabbit T.A.	Ar	pressure chamber	*80 mmHg
Ogata (1982)	rabbit T.A.	H2	elastic bandage	**48.2 mmHg
Smith (1984)	human forearm	Xe-133	cuff	*DP minus 30 mmHg

* Pressure necessary for producing muscular ischemia was obtained by measuring externally applied pressure.

** Pressure necessary for producing muscular ischemia was obtained by measuring intramuscular pressure.

DP, diastolic blood pressure; T. A., anterior tibial muscle; hams., hamstring muscles

枢部位でタニケットを用いて短時間駆血すればよく、本法を用いて骨格筋血流量の測定が臨床的にも可能であると考えられる。従って compartment 症候群を疑って最終的に診断に迷う場合には、電解法を用いて筋血流量を定量的に測定する事ができる。

末梢部位での血流測定から中枢側の筋血流を評価する目的で行われた実験には、僅かに Smith らの photoplethysmography 法を用いた報告がある²⁰⁾。彼らは血圧測定用カフをヒト前腕に装着し、加圧量と Xe-133 を用いた筋血流量および photoplethysmography 法を用いた爪床部での末梢血流量との関係を求めている。その結果カフ圧が拡張期血圧より 30mmHg 低い時に筋血流は消失し、脈波高は27%に低下するとしている。しかしながらこの部位での測定では、精神的緊張や室温など周辺環境の影響を強く受ける皮膚の血流を中心に測定しているため、再現性に問題があると思われる^{20,21)}。

本実験では、末梢部の血流測定には電極間の測定部分全体の血流量を反映するとされるインピーダンス法を用いたため、外的因子の影響を受けにくいと考えられる。本法を用いた実験で松本は家兎大腿動脈を結紮した時、下腿血流量が21.9%に低下するとし¹⁰⁾、同一条件で篠田は電解法を用いて脛骨骨髓血流量が14.7%に低下するとしている⁹⁾。両者は測定している組織は異なるが、同一阻血条件下での下腿部で測定しており、二つの血流測定法の結果は同じ程度の減少率を示している事から、インピーダンス法の定量性を裏付けるものと考えた。

本実験における加圧器による下腿全体の圧迫実験によれば、末梢血流量は外圧を増加させるに従って漸減し、外圧 60~80mmHg で消失した。また下腿全体を圧迫した時に前脛骨筋血流の消失する外圧 40mmHg において、末梢血流量は52.3%に低下した。この結果より下腿全体の内圧が亢進した時には、末梢血流量が50%程度に低下すると前脛骨筋血流が消失すると言える。

注入法による前方区画加圧実験では末梢血流量は82.7%と僅かの低下に止まり、単一区画のみの compartment 症候群の評価はインピーダンス法では困難と思われた。また後方区画の加圧では末梢血流量は63.6%に低下した。これは後方区画に生理的食塩水を注入すると、下腿部に分布する殆どの動脈が膝窩部で圧迫されるため、注入法による前後両区画の加圧と同じ状態になるためと思われた。血流量の減少程度も加圧器を用いた実験結果に近似した値を示した。

著者は本実験において、四肢外傷の際にギプス固定を行って生じる compartment 症候群のモデルとして家兎下腿を用い、加えた外圧と筋膜区画内圧・筋血流量・末梢血流量のそれぞれの関係を求めた。臨床的に compartment 症候群は前脛骨筋に最も多く発症する事から、これまでの実験的研究においても筋膜区画内圧と前脛骨筋血流量の関係を求めた報告が多い。それらの結果によれば内圧 40~60mmHg で筋血流が消失するとするものが多いが、著者の結果でも内圧に換算すると 57.2mmHg で筋血流が全て消失し諸家の報告と一致する。即ち本実験で用いた圧迫方法や内圧測定法および電解法による血流測定法が妥当な方法であると考えられる。このような圧迫条件下で筋血流が消失する状態を末梢血流の立場から調べる方法は、臨床的には末梢動脈拍動の有無を確める定性的な方法しかなかった。そのため末梢動脈拍動が触知不能となった時には、治療の時期を逸しているという事が多かった。インピーダンス法によれば末梢血流量を定量的に測定する事が可能で、今回の実験結果によれば筋血流が消失する時には末梢血流量は52.3%に低下する事が判明した。この結果を臨床的に応用すると、腫脹のある骨折にギプス固定を行い末梢血流量が50%程度に低下した場合には、compartment 症候群を疑って適切な治療を行う必要があると言える。

インピーダンス法は末梢部分の血流を測定しているため、障害部位である筋膜区画の内圧を直接測定する方法に比べ間接的な方法である。しかしながら臨床応用においてはプローベの刺入を必要とせずギプス固定を続けたまま測定でき、直接血流を反映するという内圧測定法にはない利点を有している。従って多くの症例に対してスクリーニングに用いる事ができ、また同一症例に対し連続測定を行う事によりモニターとして用いる事も考えられる。以上の点から、インピーダンス法は、簡便かつ早期の compartment 症候群の診断法であると言える。

結 論

四肢の外傷に対するギプス固定後に発生する compartment 症候群の早期診断法として、末梢部位の血流量の測定が有用かどうかを調べるため、家兎下腿を用いて実験的に検索した。血圧条件を一定とし、compartment 症候群のモデルとして作製した加圧器を用いて、下腿全体を圧迫し筋膜区画内圧を上昇させた時の筋血流量を電気分解式水素クリアランス法により測定し、末梢血流量をインピーダンス法

により測定した。

1. 電解法による家兎下腿の正常時の前脛骨筋血流量は、前方筋膜区画内圧が $12.0 \pm 3.3 \text{ mmHg}$ の時 $33.9 \pm 13.9 \text{ ml/min/100ml}$ であった。下腿全体を圧迫する加圧器を用いて外圧を加え筋膜区画内圧を段階的に高めると、筋血流量は漸減し外圧 40 mmHg 、即ち筋膜区画内圧としては 57.2 mmHg で筋血流は消失した。

2. インピーダンス法を用いて末梢血流量を測定した時、加圧器を用いて下腿全体を圧迫し外圧を加え筋膜区画内圧を段階的に高めると、末梢血流量は漸減し外圧 80 mmHg で末梢血流は消失した。

3. 下腿全体を一様に圧迫して前脛骨筋血流が消失する外圧 40 mmHg の条件では、末梢血流量は $52.3 \pm 12.3\%$ に低下した。

従って四肢の骨折に対しギプス固定を行った場合、インピーダンス法を用いて末梢血流量が 50% 程度に低下した時には、筋血流が消失し compartment 症候群が発症している可能性が高い。以上の結果から、末梢血流量の測定は、compartment 症候群の早期診断、早期治療に有用と判断された。

謝 辞

稿を終えるに臨み、御指導、御校閲を賜りました恩師野村 進教授に深く感謝いたします。また御指導、御助力を頂きました松本忠美講師ならびに当教室の血流測定に関する研究に携わっておられた諸先輩とその業績に感謝いたします。

本研究の要旨は、第67回中部日本整形外科災害外科学会、The Seventh Annual Meeting of the Bioelectrical Repair and Growth Society (1987, Tronto) に於いて発表した。

文 献

- 1) Matsen, F. A.: Compartmental syndrome. *Clin. Orthop.*, **113**, 8-14 (1975).
- 2) Blount, W. P.: Volkmann's ischemic contracture. *Surg. Gynecol. Obstet.*, **90**, 244-246 (1950).
- 3) Leach, R. E., Hammond, G. & Stryker, C. W. S.: Anterior tibial compartment syndrome. *J. Bone Joint Surg.*, **49-A**, 451-462 (1967).
- 4) Mubarak, S. J., Hagens, A. R., Owen, C. A., Garetto, L. P. & Akesson, W. H.: The wick catheter technique for measurement of intramuscular pressure. *J. Bone Joint Surg.*, **58-A**, 1016-1020 (1976).
- 5) Mubarak, S. J., Owen, C. A., Hagens, A.

R., Garetto, L. P. & Akesson, W. H.: Acute compartment syndromes: Diagnosis and treatment with the aid of the wick catheter. *J. Bone Joint Surg.*, **60-A**, 1091-1095 (1978).

6) Whitesides, T. E., Haney, T. C., Morimoto, K. & Harada, H.: Tissue pressure measurements as a determinant for the need of fasciotomy. *Clin. Orthop.*, **113**, 43-51 (1975).

7) Nyboer, J.: Electrical impedance plethysmography-A physical and physiologic approach to peripheral vascular study. *Circulation*, **2**, 811-821 (1950).

8) 吉良枝郎：インピーダンスプレチスモグラフィ。血流測定（沖中 遙，堀原 一，本田西男編），第1版，150-152頁，医学書院，東京，1974。

9) 篠田耕三：電気分解式水素クリアランス法による骨髄内局所血流量の測定。十全医学会誌，**94**，678-688 (1985)。

10) 松本忠美：阻血下における血流量と骨癒合の関係。十全医学会誌，**92**，1-15 (1983)。

11) Barone, R., Pavaux, C., Blin, P. C. & Cuq, P.: Atlas d'anatomie du lapin, Masson et Cie, Paris, 1973. 望月公子訳：兎の解剖図譜，第1版，67-71頁，学窓社，東京，1977。

12) Matsen, F. A., Mayo, K. A., Sheridan, G. W. & Krugmire Jr., R. B.: Monitoring of intramuscular pressure. *Surgery*, **79**, 702-709 (1976).

13) Stossek, K., Lubbers, D. W. & Cottin, N.: Determination of local blood flow (micro-flow) by electrochemically generated hydrogen. *Pflugers Arch.*, **348**, 225-238 (1974).

14) 甲州啓二，遠藤俊郎，高久 晃，斎藤建夫：電気分解法により発生させた水素ガスを利用しての局所脳血流量測定を試み。脳神経外科，**9**，1261-1266 (1981)。

15) Kubicek, W. G., Kottke, F. J., Ramos, M. U., Patterson, R. P., Witsoe, D. A., Labree, J. W., Remore, W., Layman, T. E., Schoening, H. & Gramela, J. T.: The Minnesota impedance cardiograph-theory and applications. *Biomed. Eng. (London)*, **9**, 410-416 (1974).

16) 笹岡京子，小川桂屹，小林 宏：電気インピーダンス・プレチスモグラフィにおける4電極法と2電極法の比較。医学と生物学，**104**，149-154 (1982)。

- 17) Clayton, J. M., Hayes, A. C. & Barnes, R. W.: Tissue pressure and perfusion in the compartment syndrome. *J. Surg. Res.*, **22**, 333-339 (1977).
- 18) Dahn, I., Lassen, N. A. & Westling, H.: Blood flow in human muscles during external pressure or venous stasis. *Clin. Sci.*, **32**, 467-473 (1967).
- 19) Hargens, A. R., Mubarak, S. J., Owen, C. A., Garetto, L. P. & Akeson, W. H.: Interstitial fluid pressure in muscle and compartment syndromes in man. *Microvasc. Res.*, **14**, 1-10 (1977).
- 20) Matsen, F. A., King, R. V., Krugmire Jr., R. B., Mowery, C. A. & Roche, T.: Physiological effects of increased tissue pressure. *Int. Orthop. (SICOT)*, **3**, 237-244 (1979).
- 21) Ogata, K. & Whitesides, L. A.: Effects of external compression on blood flow to muscle and skin. *Clin. Orthop.*, **168**, 105-107 (1982).
- 22) Sheridan, G. W. & Matsen, F. A.: An animal model of the compartment syndrome. *Clin. Orthop.*, **113**, 36-42 (1975).
- 23) Zweifach, S. S., Hargens, A. R., Evans, K. L., Smith, R. K., Mubarak, S. J. & Akeson, W. H.: Skeletal muscle necrosis in pressurized compartments associated with hemorrhagic hypotension. *J. Trauma*, **20**, 941-947 (1980).
- 24) Guyton, A. C., Granger, H. J. & Taylor, A. E.: Interstitial fluid pressure. *Physiol. Rev.*, **51**, 527-563 (1971).
- 25) Gershuni, D. H., Yaru, N. C., Hargens, A. R., Lieber, R. L., O'hara, R. C. & Akeson, W. H.: Ankle and knee position as a factor modifying intracompartmental pressure in the human leg. *J. Bone and Joint Surg.*, **66-A**, 1415-1420 (1984).
- 26) Mishra, S. K. & Haining, J. L.: Measurement of local skeletal muscle blood flow in animals by the hydrogen electrode technique. *Muscle Nerve*, **3**, 285-288 (1980).
- 27) 宇賀治行雄: 末梢神経牽引による神経内血流動態に関する実験的研究—電気分解式水素クリアランス法による血流量の測定—。 *十全医学会誌*, **96**, 599-612 (1987).
- 28) Smith, D. J., Bendick, P. J. & Madison, S. A.: Evaluation of vascular compromise in the injured extremity: A photoplethysmographic technique. *J. Hand Surg.*, **9A**, 314-319 (1984).
- 29) 永坂鉄夫: 皮膚血行。 *医学のあゆみ*, **140**, 418-421 (1987).
- 30) 仁木偉瑾夫: 指尖脈波。末梢血管疾患の無侵襲診断法 (塩野谷恵彦, 大原 到, 坂口周吉編), 第1版, 87-95頁, 永井書店, 大阪, 1983.

The Relation of the Intracompartmental Pressure with the Muscular Blood Flow and the Distal Blood Flow under Externally Applied Pressure in the Rabbit Leg
Kunio Miyamori, Department of Orthopedic Surgery, School of Medicine, Kanazawa University, Kanazawa 920—J. Juzen Med. Soc., 97, 883—897 (1988)

Key words: intracompartmental pressure, muscular blood flow, distal blood flow, compartment syndrome

Abstract

The author attempted to evaluate the vascular status of muscle under externally applied pressure using the non-invasive impedance plethysmographic technique at the distal portion. A tubular plastic splint, having two balloons inside the wall, was prepared to pressurize the whole length of a rabbit leg. The balloons were inflated to apply external pressure to the rabbit legs simulating compartment syndrome. The external pressure was applied every 10mmHg up to 100mmHg, and compared with the intracompartmental pressure of anterior tibial muscles measured by continuous infusion method. The local blood flow of anterior tibial muscle in every pressure condition was measured by electrochemically generated hydrogen clearance method. In the same way, the segmental blood flow of the non-pressurized distal portion was measured at the foot using impedance plethysmographic technique. The intracompartmental pressure correlated well with the externally applied pressure in the model ($r=0.984$, $p<0.005$, Student's t-test). The blood flow of anterior tibial muscle at rest was 32.2 ± 16.9 ml/min/100ml. The muscular blood flow gradually decreased as the applied pressure increased. Most of the muscular blood flow ceased at the pressure of 40mmHg. The distal blood flow also gradually decreased as the applied pressure increased and ceased at the pressure between 60mmHg and 80mmHg. The relative distal blood flow, which means the blood flow ratio of the pressurized side to the control side, at 40mmHg was $52.3\pm 12.3\%$. At that pressure, the intracompartmental pressure could be calculated as 57.2mmHg from the regression equation obtained from the pressure relation. Consequently when the distal blood flow decreases to 50% in the clinical situation such as fractures with cast fixation, the occurrence of compartment syndrome should be suspected. From these results, it can be concluded that blood flow measurement of distal portion with the impedance plethysmographic technique allows the early diagnosis and treatment of compartment syndrome of the extremities.