

## 種々の条件下における深指屈筋腱内血流量の 電解式水素クリアランス法による検討

新潟大学医学部整形外科教室（主任：田島達也教授）

**Shakya, Iswar Man**

Experimental Investigation of Blood flow in FDP  
Tendon of Japanese Monkeys Under Various  
Conditions Measured with Electrolytically  
Generated Hydrogen Clearance Method

Iswar Man Shakya, M.D.

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

Knowledge of tendon microcirculation has mostly been based on angiographic investigation in non-viable specimens. Preliminary angiographic study of FDP tendons of Japanese monkeys with Indian ink and latex solution showed that there were musculo-tendinous, vincular and osseo-tendinous systems of blood supply and two "avascular areas" in between these three systems, as in human FDP tendon.

Dynamic change of microcirculation in FDP tendons of 10 Japanese monkeys was investigated by means of electrolytically generated hydrogen clearance method, which led to the following conclusions.

1. Comparison of blood flow at two "avascular areas" and at insertion areas of long & short vinculum of FDP tendon (VLP & VBP) with pulleys incised showed no significant difference. However, with A2 pulley being preserved, distal "avascular area" showed significantly less blood flow as compared to VLP insertion area. Severance of VLP & VBP resulted in hypovascularity at 4 sites, but not in avascularity.
2. Opening of A2 & A4 pulleys resulted in significant increase in blood flow at VLP & VBP insertion area, in the maximal finger extension when the two areas came underneath A2 & A4 pulleys, respectively.
3. Blood flow at VLP insertion area that came underneath A2 pulley by finger

Address for reprints: Iswar Man Shakya, M.D.,  
Department of Orthopaedic Surgery, Niigata  
University School of Medicine, 1-Asahi Machi  
Niigata City, JAPAN.

別刷請求先: 〒951 新潟市旭町通1番町  
新潟大学医学部整形外科教室  
サッキャ・イソラ・マン

extension decreased significantly by finger flexion with 80g load, regardless of A2 pulley being preserved or severed.

4. Blood flow at the distal "avascular area" that came underneath A2 pulley by finger flexion showed no significant change by flexion with 80g load, but decreased by flexion with 200g load.
5. Above results led to the conclusion that the three systems of blood supply in FDP tendon are connected one another so that there exists no real avascular area. However change of finger position influences upon dynamic local microblood flow in FDP tendon, probably by making VLP tense during finger flexion and pulleys tight during forced flexion or extension.

Key words: FDP tendon, intratendinous blood flow, vincula, electrolytically generated hydrogen clearance method.

深指屈筋腱, 腱内血行, 腱のひも, 電解式水素クリアランス法.

## I 緒 言

従来, 2本の浅・深指屈筋腱が靭帯性および滑膜性腱鞘に被覆されている指基節領域における断裂腱の縫合による癒合は周囲との癒着なしでは得ないと考えられ指屈筋腱のこの区域は Bunnell により "no man's land" と名付けられていた。しかし, 近年は指屈筋腱損傷に対する手術手技や後療法の進歩に伴い, 一次的腱縫合によって良好な成績が得られるようになり, この区域は "skilled man's land" と改称されるようになってきた。断裂した指屈筋腱損傷の縫合後の修復過程に対しては滑液の関与を重視する考えもあるが, 修復腱の強固な癒合には腱内の血行状態が腱細胞の活性に関与し本質的に重要な要因と考えられる。

従来の腱内血行状態の研究は angiography によるものが主であった。これによると深指屈筋腱 (以下 FDP 腱) は musculo-tendinous origin の proximal system, vincular origin の intermediate system および osseo-tendinous origin の distal system の3つの vascular system より segmental supply をうけていて, この3つの vascular system の中間に2箇所 "avascular area" が認められる<sup>1)2)4)</sup>。これはその付近の血管は loop 状に終わっているためであり, この area は主として滑液の拡散によって栄養されていると解釈されていた<sup>2)</sup>。また FDP 腱の long vinculum (以下 VLP) を切離するとその腱付着部が avascular になりそこは longitudinal vessels より血液供給を受けていないと報告されていた<sup>5)</sup>。しかし, これらの研究における angiogr-

aphy の材料としては non-viable の fetus, cadaver, あるいは切断標本で行われているためこのような研究方法による所見は生体内の正常の血行動態とは異なっている可能性が大きい。

一方水素クリアランス法は生体内での局所の microcirculation を測定するよい方法として各分野で広く用いられている。そこで, 著者は電解式水素クリアランス法を用いて種々の条件下における FDP 腱内血行の動的変化を日本ザルの指屈筋腱を用いて実験的に検討した。

## II 研究材料と研究方法

### A. 予備実験

#### 1. 目的

本実験を行う前にまず予備実験として日本ザルの FDP 腱内血行は人のそれと類似しているかどうかを確認する目的で成熟した日本ザルの切断手を用いて次に述べる Hunter らと同じ方法で血管造影を行った<sup>6)</sup>。

#### 2. 方法

尺骨動脈と橈骨動脈に 21GE カニューレを挿入してから前腕を近位 1/3 で切断する。ヘパリン加生理的食塩水で十分に血管の中を灌流した後両動脈より注入液を手の皮膚全体が黒染するまで手圧で注入する。注入液は墨汁とラテックスを2:1の比で混合した液を, さらに生理的食塩水で7倍に希釈したものをを用いる。注入の際前腕の切断端を包帯で強く緊縛して注入液の漏出を防ぐ。標本を10%フォルマリンに約1週間固定し, 次に被検 FDP 腱を漏出してから75%および99%のエチルアルコールで2日間脱水する。最後に標本を tri-cresyl

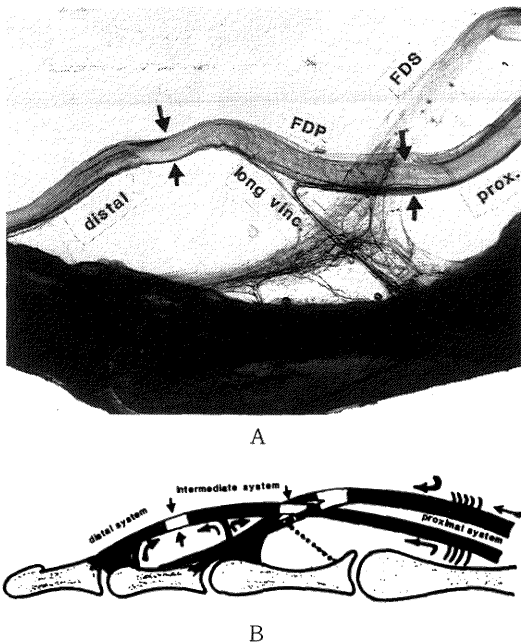


Fig. 1 The main vascular supply of digital flexor tendon visualized by angiographic study of non-viable digit of Japanese monkey. The FDP tendon is supplied by 3 main vascular systems of different origins, i.e., proximal or musculotendinous, intermediate through VLP, and distal or osseotendinous systems. Two "avascular areas" between these systems are indicated by arrows.

A: visualized by angiography.

B: schematic drawing.

phosphate と tri-n-butyl phosphate の混合液 (11:2) 中に数日間浸しておいて透明化してから transillumination で観察撮影する。

### 3. 結果

日本ザルの FDP 腱内血行は人のそれと類似していて、3つの vascular system, すなわち proximal, intermediate, および distal system よりなり、その間に "avascular area" を認めた。Proximal の "avascular area" は VLP 付着部近位端より近位約 5 mm, distal の "avascular area" はその遠位端より遠位約 5 mm を中心に 6 mm から 7 mm の長さに渡って存在していた (Fig. 1)。

## B. 本実験

### 1. 材料

成熟した日本ザル10頭 (体重: 平均 11kg) の前肢の示指から環指のうち VLP を持つ指のみ実験の対象とした。小指は他の指より短いことと、VLP が欠損していることが多いため実験の対象にできなかった。

### 2. 方法

麻酔は実験 I については pentobarbital sodium 静脈麻酔下で行ったが、実験 II では気管内挿管し 1 MAC halothane 麻酔下, pancromium bromide で人工呼吸にて調節呼吸とした (Fig. 2)。

関電極は針型単極電極 (センサ直径は実験 I で 25 $\mu$ m, 実験 II では 200 $\mu$ m) を用い, 不関電極は銀-塩化銀皿型電極 (直径 10mm) を使用した。2電極間の電流は水素クリアランス式組織血流計 (Biomedical Science 社製, モデル RBF-2) にて記録しそのクリアランスカーブからデータ解析装置 (BDA-1-2) を用いて血流量を算出した。

実験 I-A: VLP 切離前後の FDP 腱内血行の経時的変化の追究<sup>6)</sup>。

A2 から A4 Pulley まで縦切りして FDP 腱を露出後, VLP 付着部より約 5 mm 近位 (proximal "avascular area") および 5 mm 遠位 (distal "avascular area") において FDP 腱の掌側よりほぼ中央部に約 1 mm の深さで関電極 2 本を 2 カ所に刺入留置し, 一方不関電極は前腕部皮下に埋め込んだ。この 2 カ所においてまず VLP 温存時の FDP 腱内血流量を 3 回くりかえし測定し, 次に VLP のみを切離して約 30 分後に同部位での血流量を同じく 3 回くりかえし測定した。(以下の測定においても 3 回ずつくりかえし行った)。血流量測定終了後は皮膚縫合し, 患肢をギプスにて固定した。次に 3 日後, 7 日後に同様に同 2 カ所の部位で血流量を測定した。この際腱の癒着が強かった指や, 化膿した指は実験の対象にできなかった (Fig. 3(A))。

両手指の血流量測定終了後 (約 1 カ月後) 心停止させ, 拡散のみによる変化を求めた。次に予備実験と同じ方法で血管造影を行い, 透徹標本を作成して VLP 切離後の腱内血行を観察した。

実験 I-B: VLP および VBP 切離前後の FDP 腱内血行の経時的変化の追究<sup>6)</sup>。

実験 I-A と同じ方法で, 同じく 2 カ所 (proximal および distal "avascular area") で VLP および VBP 切離前と切離後約 30 分, 3 日, 7 日に血流量を測定した (Fig. 3(B))。また約 1 カ月後に切断手を用いて angio-

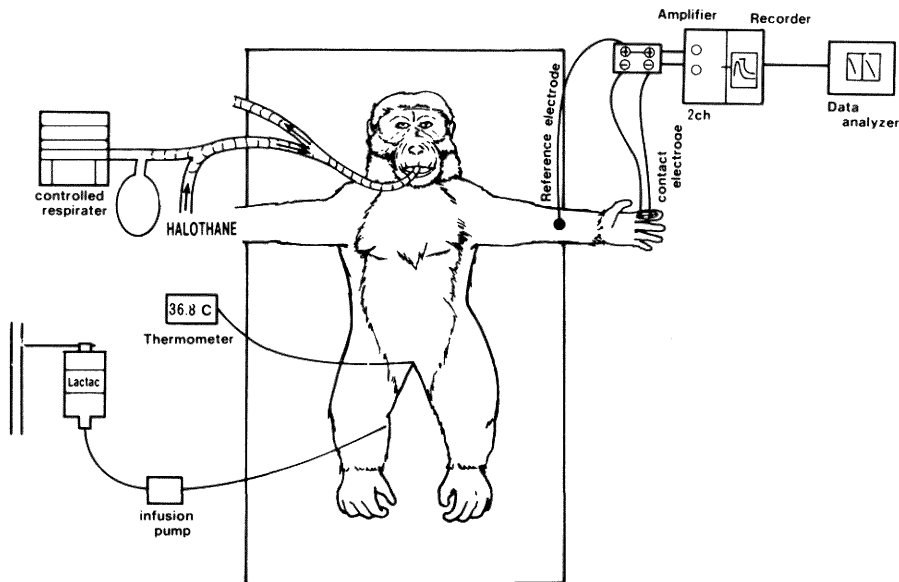


Fig. 2 Set up for measurement of blood flow in FDP tendon of a Japanese monkey with electrolytically generated hydrogen clearance method.

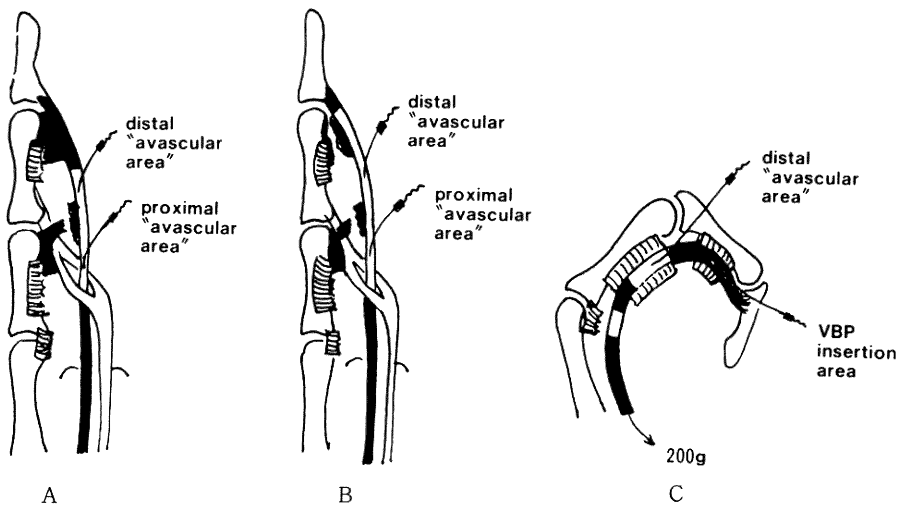


Fig. 3 Measurement of dynamic blood flow at two sites of FDP tendon.  
A: at two "avascular areas" before and after severance of VLP.  
(Expt. I-A).  
B: at two "avascular areas" before and after severance of VLP  
& VBP. (Expt. I-B)  
C: at the distal "avascular area" and the VBP insertion area  
that come underneath A2 & A4 pulley respectively at finger flexion,  
during maximum extension and flexion with the load of 200g.  
(Expt. I-C).

graphy を行い VLP および VBP 切離後の static の腱内血行を観察した。

実験 I-C: 指を他動屈曲した際 A2, A4 靭帯性腱鞘 (pulley) の圧迫による FDP 腱内血流量の変化の追究<sup>6)</sup>。

指屈曲に伴う指屈筋腱の浮き上がりを防止する滑車 (pulley) として機能を重視されている靭帯性腱鞘 A2, A4 部の2カ所を残して、他の部の靭帯性腱鞘を切開し FDP 腱を露出した。まず FDP 腱に 200 g の負荷をかけて同腱を近位方向に牽引し、指を最大屈曲させたときに FDP 腱の A2, A4 pulley の直下にくる指屈筋腱上の2点を7.0ナイロン糸をかけてマークしておいた。つぎに指を伸展して、あらかじめマークしておいた2カ所で電極を刺入した。このときの近位刺入部は、distal “avascular area” に当たり、遠位の刺入部は、VBP 付着部に当たる。はじめに、指伸展位で、電極が pulley 外に、近位の電極が A4 より近位に、遠位の電極は A4 pulley の遠位にある状態で腱内血流量を測定し、次に腱近位部に 200 g のおもりを負荷して近位方向にひき、指を最大屈曲させ、電極がそれぞれ A2, A4 pulley 直

下に移動した時点での血流量を測定した (Fig. 3(C))。

実験 II-A: 深指屈筋腱の両 vincula (VLP と VBP) 切離前後における VLP, VBP 付着部、および proximal, distal “avascular area” の4カ所における血流量の追究<sup>7)</sup>。

Pulley 全長を切開し、指完全伸展位の状態でまず vinculum 温存時 proximal および distal “avascular area”, VLP および VBP 付着部の4カ所で血流量を測定した。次に VLP および VBP を切離、電気凝固した後同4カ所で血流量を測定した (Fig. 4(A))。

実験 II-B: 指最大伸展時 A2, A4 pulley の存在による FDP 腱内血流量の変化の追究<sup>7)</sup>。

A2, A4 pulley を残してそれ以外の全 pulley を切開し、FDP 腱の VLP 付着部および VBP 付着部で、指最大伸展位 (指軽度緊張位) で vincula を温存しておき、A2, A4 pulley 切離前後の血流量を測定した (Fig. 4(B))。

実験 II-C: 指伸展および屈曲による A2 pulley 直下での FDP 腱の血流量の変化の追究 (Fig. 5)。

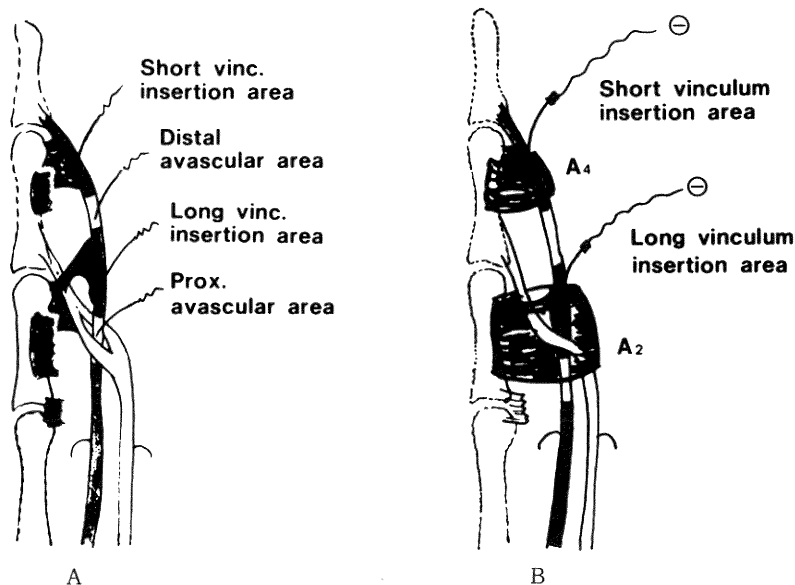


Fig. 4 Measurement of blood flow at various sites of FDP tendon before and after severance of vincula or pulleys.

A: at the VLP & VBP insertion areas, and the proximal & distal “avascular area” before & after severance of VLP & VBP. (Expt. II-A)

B: at the VLP & VBP insertion areas that came underneath A2 & A4 pulleys by finger extension, before and after incision of A2 & A4 pulleys. (Expt. II-B).

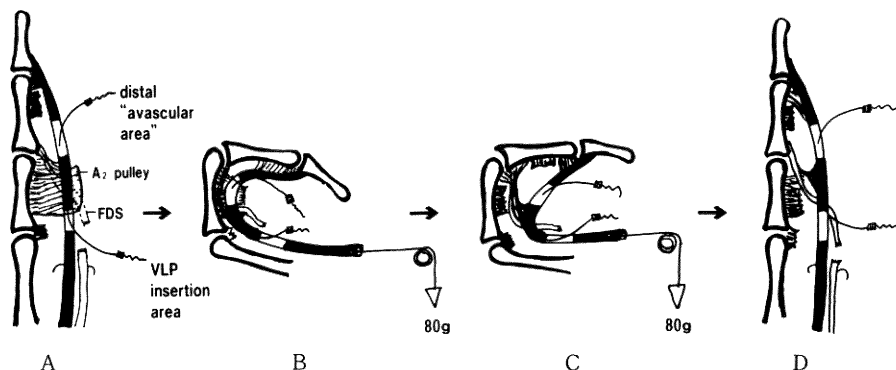


Fig. 5 Measurement of blood flow at the VLP insertion area that came underneath A2 pulley by finger extension, and the distal "avascular area" that came underneath A2 pulley by finger flexion. Measurement was done in the order of A to D. (Expt. II-C)

- A: finger extended, A2 pulley preserved.  
 B: finger flexed with 80g load, A2 pulley preserved.  
 C: finger flexed with 80g load, A2 pulley severed.  
 D: finger extended, A2 pulley severed.

A2 pulley 以外全 pulley を切開し FDP 腱を露出する。まず指伸展及び屈曲時 A2 pulley 直下にくる2カ所を7-0 ナイロン糸をかけてマークする。この際、指伸展時 A2 pulley 直下にくる部は VLP 付着部にあたり、屈曲時 A2 pulley 直下にくる部は血管造影でみる "distal avascular area" にあたる。次にこの2カ所で電極を刺入し、次の条件下で順に血流量を測定した。

1) A2 pulley 温存時、緊張のない指伸展位での計測 (Fig. 5(A)). 2) A2 pulley 温存時 FDP 腱を80gの負荷で牽引することによる指屈曲位での計測 (Fig. 5(B)). 3) A2 pulley 切開後 FDP 腱を80gの負荷で牽引し腱の浮き上がり防止のため指掌側皮膚の一部を縫合した状態における指屈曲位での計測 (Fig. 5(C)). 4) A2 pulley 切開後 FDP 腱に負荷をかけず、指伸展位での計測。平均値の有意差検定は分散が等しい場合 student's t-test, 分散が等しくない場合は Cochran-Cox test によって検定した。さらに二元配置分散分析 (くりかえしのある場合) により検定した。p値が0.05以下をもって有意とみなした。

### III 結 果

#### 実験 I-A:

1) いわゆる avascular area は真の avascular area ではなく、proximal "avascular area" と distal "avas-

cular area" ではほぼ同量の血流量を認めた。

2) VLP 切離直後両 "avascular area" で有意な (二元配置分散分析;  $p < 0.01$ ) 血流量の減少を認めた。VLP 切離3日後、7日後の血流量は切離直後の血流量に比べ有意に (二元配置分散分析;  $p < 0.05$ ) 増加した。切離3日後と7日後の血流量の間には有意差がなかった。なお、finger no. 3 の場合 distal "avascular area" での VLP 切離30分後の血流量は切離前に比べ減少してなかった。その理由としては、VLP 切離の際電極が近位へずれた可能性や血行の variation などが考えられる (Fig. 6)。

3) VLP を切離してから約1カ月後の angiography で VLP よりの血行は認められなかったが、longitudinal vessel よりの血行がみられた (Fig. 8(A))。

#### 実験 I-B:

1) VLP および VBP 切離直後両 "avascular area" で有意 (二元配置分散分析  $p < 0.01$ ) な血流量の低下を認めた。両 vincula 切離3日後の血流量は直後のそれに比べ有意 (二元配置分散分析;  $p < 0.05$ ) に増加していた。7日後の血流量は、直後の血流量に比べ増加の傾向はあったが、有意差がなかった。また、3日後、7日後の血流量の間には有意差がなかった (Fig. 7)。

2) 両 vincula 切離1カ月後の angiography で VLP, VBP よりの血行が認められなかったが、longitudinal

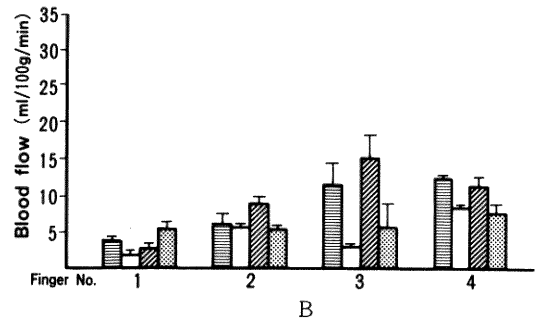
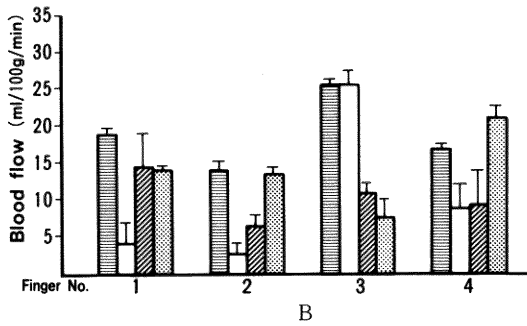
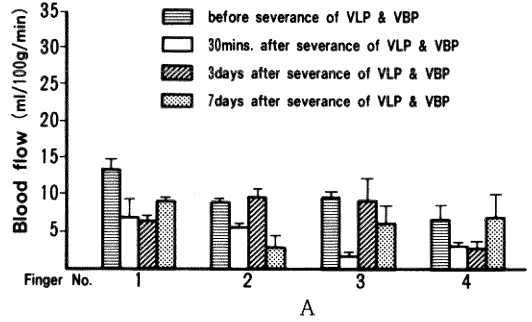
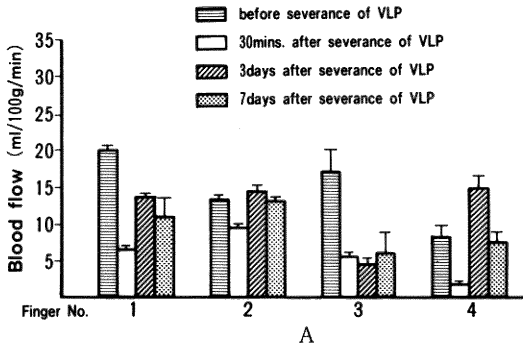


Fig. 6 Result of expt. I-A: Blood flow of FDP tendon at the "avascular areas" before and after severance of VLP. Blood flow decreased significantly (two way analysis of variances;  $p < 0.01$ ) 30 minutes after severance of VLP. Increase in blood flow was noted 3 days and 7 days after severance of VLP as compared to the blood flow measured 30 minutes after severance.  
A: at the proximal "avascular area".  
B: at the distal "avascular area".

Fig. 7 Result of expt. I-B: Blood flow of FDP tendon at the "avascular areas" before and after severance of VLP & VBP. Blood flow decreased significantly (two way analysis of variances;  $p < 0.01$ ) 30 minutes after severance of both vincula. Increase in blood flow was noted 3 days and 7 days after severance as compared to that 30 minutes after severance.  
A: at the proximal "avascular area".  
B: at the distal "avascular area".

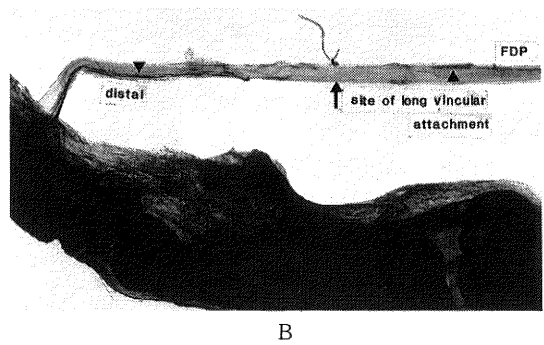
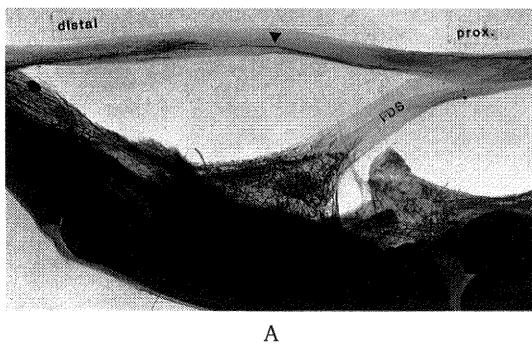


Fig. 8 One month after severance of VLP or both VLP & VBP, longitudinal blood vessels were well visualized by angiography.  
A: when VLP only was severed. B: when both VLP & VBP were severed.

vessel は認められた (Fig. 8(B)).

実験 I-C:

指屈曲時 A2 pulley および A4 pulley 直下にくる2カ所での血流量は、伸展時、同部位が pulley 外に移動した時の血流量に比べ有意 (二元配置分散分析;  $p < 0.05$ ) に減少していた (Fig. 9).

実験 II-A:

1) VLP および VBP 温存時上記4カ所での血流量は部位別に有意差がなく、いわゆる“avascular area”においても vinculum 付着部とはほぼ同量の血流量が認められた。

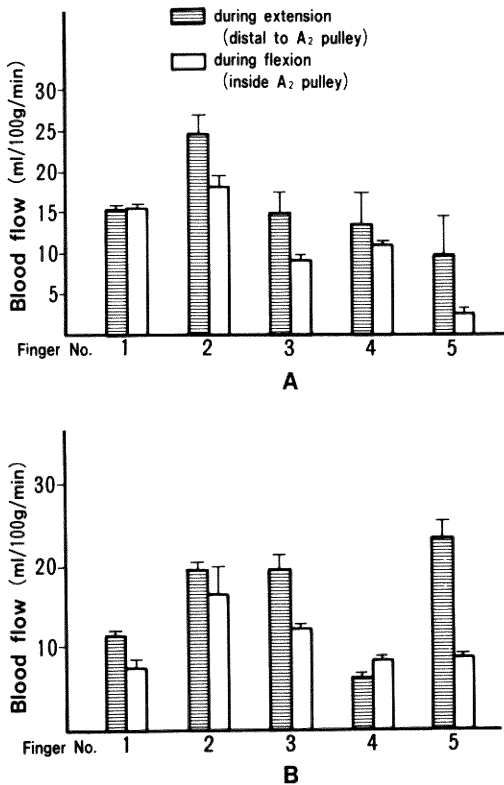


Fig. 9 Result of expt. I-C: Finger flexion by loading the FDP tendon with 200g weight caused significant (two way analysis of variances;  $p < 0.05$ ) decrease in blood flow at two sites that came underneath A2 & A4 pulley during finger flexion, probably due to direct pressure exerted by the pulleys.

A: at the distal "avascular area".  
B: at the VBP insertion area.

2) Vincula 切離後 VLP および VBP 付着部でも proximal および distal "avascular area" でも vincula 切離前と比べ血流量の有意な (二元配置分散分析;  $p < 0.05$ ) 減少を認めたが, avascular にはならなかった (Fig.10).

実験 II-B:

A2 および A4 pulley 切開後 A2 pulley 直下でも A4 pulley 直下でも血流量が有意に (student's t-test) 増加した (Fig. 11).

実験 II-C:

1) 指伸展時 A2 pulley 直下にくる部位 (VLP insertion area) での血流量は A2 pulley 温存時伸展位より屈曲 (80 g 負荷牽引にて) した際血流量に有意な (二元配置分散分析;  $p < 0.01$ ) 変化が認められた. 指5本中4本に検定したところ血流量が有意に (二元配置分散分析;  $p < 0.01$ ) 低下した.

A2 pulley 切開後屈曲位では血流量の有意な低下がみられたが、これに比べ牽引除去後伸展位では血流量の有意な (二元配置分散分析;  $p < 0.01$ ) 増加がみられた (Fig. 12(A)).

2) A2 pulley 温存時、指屈曲 (80 g にて) 位で A2 pulley 直下にくる部位 (distal "avascular area") での屈曲時の血流量は、指伸展位で同部位で測定した血流量に比べ減少したのものもあったが、有意ではなかった. 更に A2 pulley 切開後もその温存時と比べ指屈伸位共に有意差を認めなかった (Fig. 12(B)).

3) A2 pulley 温存、指伸展位で A2 pulley より遠位部 (distal "avascular area") での血流量は A2 pulley 直下 (VLP insertion area) での血流量より有意に (二元配置分散分析;  $p < 0.01$ ) 減少していた. A2 pulley 切開後も同様の傾向はみられたが有意ではなかった (Fig. 12(D)).

4) A2 pulley 温存、指屈曲位における A2 pulley 直下 (distal "avascular area") での血流量は A2 pulley より近位部 (VLP insertion area) での血流量より有意に (二元配置分散分析;  $p < 0.01$ ) 減少していた. A2 pulley 切開後は distal "avascular area" での血流量が pulley 切開前の血流量に比べ有意に (二元配置分散分析;  $p < 0.01$ ) 増加した (Fig. 12(C)).

IV 考 察

1852年 Kolliker<sup>8)</sup> は、腱はほとんど avascular であると述べていた. しかし、Berkenbusch<sup>1)</sup> は、1887年に blue Berlin ink による fresh cadaver の angiogr-



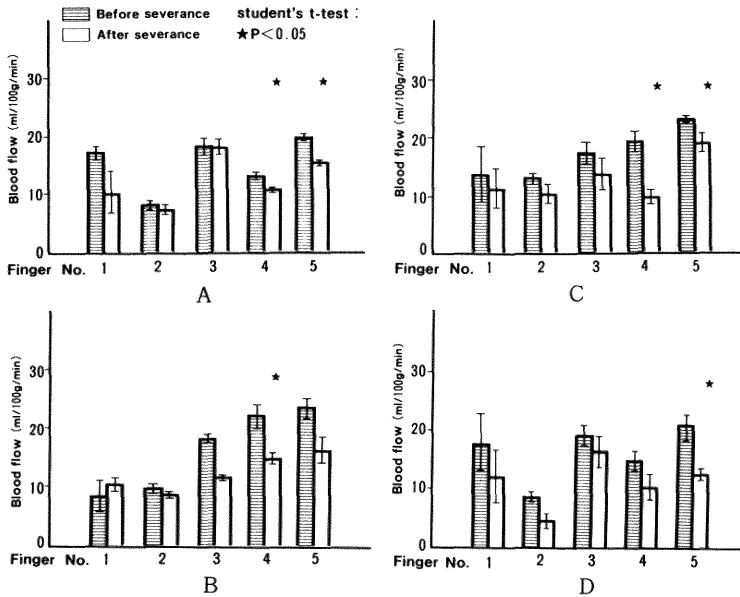


Fig. 10 Result of expt. II-A: Blood flow at 4 sites of FDP tendon, before & after severance of VLP & VBP. Although blood flow decreased significantly (two way analysis of variances;  $p < 0.05$ ) by vincular severance, the areas did not become "avascular" alluding to preserved blood supply with longitudinal vessels.

A: at the proximal "avascular area".  
 B: at the distal "avascular area".  
 C: at the VLP insertion area.  
 D: at the VBP insertion area.

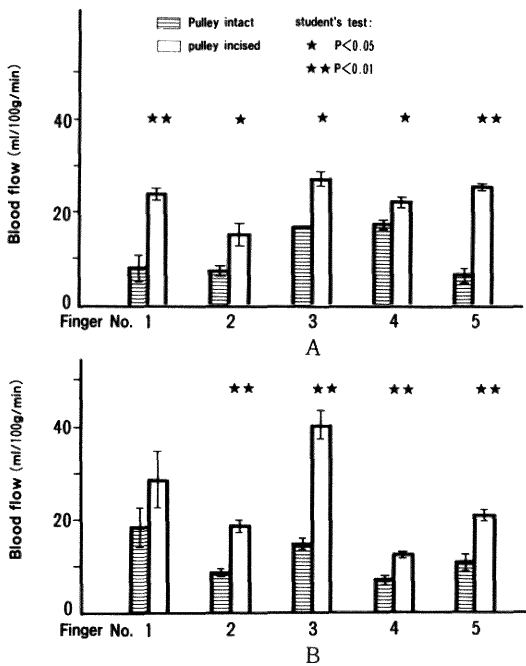


Fig. 11 Result of expt. II-B: Blood flow at the vincular insertion areas during finger extension, before and after incision of A2 & A4 pulleys. Opening of pulleys resulted in significant (student's t-test) increase in blood flow at both areas probably due to the release of pressure exerted by pulleys.

A: at the VLP insertion area.  
 B: at the VBP insertion area.

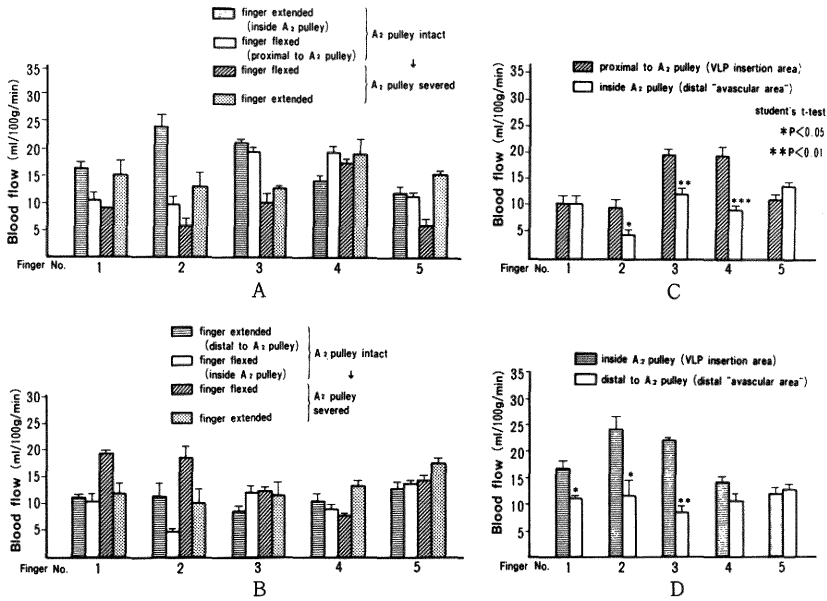


Fig. 12 Result of expt. II-C: Blood flow at the two sites of the FDP tendon measured with the finger extended or flexed, A2 pulley preserved or severed. Blood flow at the VLP insertion area (A) that came underneath A2 pulley by finger extension decreased significantly (two way analysis of variances;  $p < 0.05$ ) by finger flexion with 80g load, with A2 pulley preserved or severed. However, finger extension after severance of A2 pulley caused significant improvement in blood flow suggesting that the decrease in blood flow was probably due to the VLP being tense during finger flexion. At the distal "avascular area" (B) that came underneath A2 pulley by finger flexion, no significant change in blood flow was caused by finger flexion with 80g load and A2 pulley severance. With A2 pulley intact, and finger flexed (C) or extended (D), the distal "avascular area" showed significantly (two way analysis of variances;  $p < 0.05$ ) less blood flow as compared to the VLP insertion area, probably due to the pressure exerted by A2 pulley against VLP insertion area during extension, or distal "avascular area" during flexion.

aphy によって FDP 腱の血行は3つの source よりなり、VLP 及び VBP 付着部の中間部、また FDS の chiasma of Camper の近位部で focal avascular area を認めると述べた。Arai<sup>2)</sup> は、1907年に FDP 腱の avascular area を強調し、これは poor injection technique

によるものではなく、その付近の血管は loop 状になっているためであり、avascular area は synovial fluid の拡散によって栄養を受けると述べている。一方、Mayer<sup>3)</sup> は、1916年に flexor tendon の pulley との "frictional surface" に focal avascular area を再発

見たと述べている。また Smith<sup>9)</sup> は、1965年に pulley と接触している腱の volar surface が相対的に avascular であると述べている。1977年に Lundborg<sup>4)</sup> は、FDP 腱に3つの segmental blood supply があり、その中間の2カ所に“area of avascularity”を認めると強調している。

著者<sup>6)</sup> は、成熟した日本ザルの切断手に Indian ink による angiography を行い、FDP 腱の VLP 付着部の近位および遠位に、focal “avascular area”を認めた。さらに、この“avascular area”と pulley の位置関係を観察した結果、指最大伸展時では A2 pulley 下に VLP の近位付着部が、A4 pulley 下には VBP の近位付着部が一致することを認めた。指を最大屈曲した場合は、A2 pulley 下に distal “avascular area”が A4 pulley 下には VBP の遠位付着部が移動することを認めた。

Peacock<sup>10)</sup> は1959年に、radio-isotope による研究により、FDP 腱は近位 1/3 は proximal musculo-tendinous junction より、distal 1/3 は osseo-tendinous attachment および VBP より、中央 1/3 は単独に VLP より blood supply を受けていると報告している。また、Manske<sup>11)</sup> は、1982年に tritiated proline の注入によって FDP 腱の4カ所での diffusion および perfusion の検討を行った。Diffusion なしの条件で、perfusion のみを検討した群では、proline 注入30分後の uptake は control 群 (perfusion も diffusion もある群) の、VLP 付着部より1cm 近位 (“proximal avascular area”) で77%、VLP 付着部で84%、VLP 付着部より1cm 遠位 (“distal avascular area”) で63%、VBP 付着部で100%になっている。彼の結論は“proximal avascular area”は musculo-tendinous junction および VLP より、VLP 付着部は VLP 単独より、“distal avascular area”は VLP および VBP より、VBP 付着部は VBP および osseous attachment より vascular supply を受けており、結局 VLP 付着部は proximal および distal からの longitudinal supply を受けていないと結論づけると同時に“avascular area”でも血行を認めている。

最近では松井<sup>5)</sup>、Hunter らは angiography により、VLP を切離した場合 VLP 付着部が、adult cadaver では“avascular”になるが、young cadaver ではかならずしもそうならないと述べている。

一方、angiography の研究により、Edwards<sup>12)</sup> は、1946年に FDP 腱に動静脈およびリンパ管の longitudinal parallel system が存在すると述べている。Brockis

<sup>13)</sup> は、1953年に銀ヨードコロイドを人手指に注入することによって FDP 腱の膠原線維に沿って縦走する血管を観察している。Smith<sup>9)</sup> は1965年に FDP 腱は生存のために microcirculation が必要で、そのために collateral circulation が発達していると述べている。Ochiai<sup>14)</sup> は、1979年に Indian ink の注入によって、FDP 腱の proximal longitudinal vessel および vincular vessel の間に cross-over zone があると述べている。つまり、proximal longitudinal vessel が volar half に、vincular vessel は dorsal surface に局在するが、VLP 付着部より1cm 近位および1cm 遠位 (proximal および distal “avascular area”) では vessels が中央部に局在し、dorsal vessels とは vertical loop によってつながっていると述べている。いずれにせよ、angiography は non-viable fetus, cadaver, あるいは切断標本で実施されるため static の main vascular architecture しかみていない。次に、microsphere による方法では、各測定毎に試料を採取しなければならないため同一部位での反復測定や同一固体での異なった条件下での測定は不可能である。それに比べ、水素クリアランス法は viable specimen の種々の条件下における局所血流量を求めるよい方法とされている。この方法には、1964年に Aukland ら<sup>15)</sup> によって提唱された吸入法と、1974年に Stossek ら<sup>16)</sup> によって提唱された電気分解法の2つの方法がある。電気分解法は吸入法に比べて危険性が少ないことや操作が簡単で、短時間内に反復して測定出来る利点をもつことから各分野で広く使用されるようになった。しかし、電解式水素クリアランス法の欠点として次のことがあげられる。

1) 局所の限定された範囲でしか水素ガスが発生しないため、周囲へ拡散してゆく水素ガスの量を無視し得ない。しかし、甲州ら<sup>17)</sup> によると通電条件を一定にしておけば、拡散による変化量は、一定の組織内ではほぼ一定と考えられる。著者は電解電流量・電解時間等の通電条件を全実験中一定にした。しかし、針型単電極に関し実験Ⅰと実験Ⅱでは直径がちがっているため実験動物の FDP 腱で死後の拡散値をそれぞれ求めた。その平均値は、実験Ⅰで 12ml/100g/min で、実験Ⅱでは 18ml/100g/min であった。それぞれを実験中の測定値から差し引いて真の血流量とした。

2) 電極の挿入によるある程度の組織破壊はやむ得ないと思われるが、Senter<sup>18)</sup>、田村ら<sup>19)</sup> は電極周囲の組織学的検討から何ら障害を与えるものではないと結論付けている。

3) 電流による組織の熱傷がありうると考えられるが、甲州ら<sup>17)</sup>は卵白において  $50\mu\text{A}$ 、10秒程度では肉眼的に凝固を認めなかったと述べている。著者は実験中  $10\mu\text{A}$ 、50秒で腱の熱傷を認めなかった。

著者は実験 I で、FDP 腱の angiography で avascular area とされている 2 カ所で、指伸展、全 pulley 切開の状態で水素クリアランス法によって血流量を測定した。その結果、“avascular area”は真の avascular area にはなっていないかった。そこでこのいわゆる avascular area はどこから blood supply を受けているかが問題となる。

VLP を切離した群と、VLP および VBP を切離した群を作り、両群とも切離後約30分、3日、7日に proximal および distal “avascular area”で血流量を測定した。その結果、両群とも vinculum 切離後30分に血流量の減少が認められたが、avascular にはならなかった。また、切離3日後、7日後の血流量はむしろ増加していた。よって、いわゆる“avascular area”は vincular supply および longitudinal supply をうけていると推定できた。

では、“avascular area”での血流量は VLP 付着部および VBP 付着部に比べてどうか？ 実験 II-A としてこの 4 カ所での血流量を指伸展、pulley 切開した状態で測定した。その結果 proximal および distal “avascular area”での血流量は vincula 付着部とほぼ同量で有意差がなかった。また VLP と VBP 切離後も 4 カ所での血流量とはほぼ同量であった。両 vincula 切離後の血流量は切離前と比べ、4 カ所でも減少を認めたが、avascular にはならなかった。これによって、VLP 付着部は VLP のみより blood supply を受けているのではなく、longitudinal supply も受けていると推定できた。そこで、angiography で avascular area にみえる理由が問題となる。

実験 I-C で FDP 腱を 200g の重さで近位方向へ牽引し、指を最大屈曲させた際 A2・A4 pulley 直下にくる 2 カ所(それぞれ distal “avascular area”および VBP 付着部にあたる)での腱内血流量は指最大伸展時測定した同部位での血流量に比べ減少していた。これは、200g の牽引により VLP に緊張がかかると同時に最大屈曲により pulley の圧迫が加わるためと推定できる。

実験 I の結果の一部を第28回日本手の外科学会で発表した際には指屈曲時 A4 pulley 下では圧迫を受けてないと結論づけた<sup>6)</sup>。しかし、当時の電極がかたく、弾力性にとほしかったため、特に狭い A4 pulley の中に電

極を挿入したまま屈曲した際、電極が移動したり曲がったりしてデータのバラツキがあり、有意差が認められなかった。後期になってそれらの手術操作による誤差を除外でき、安定した結果が得られ統計学的に分析した結果、有意差を持って A4 pulley 下にも屈曲時圧迫を受けていることが推定できた。なお、実験 II では、弾力性を持つ比較的大い電極にかえたため屈曲時 pulley 内でも安定した結果が得られた。

実験 II-B で指最大伸展時、A2 および A4 pulley 直下(それぞれ VLP 付着部および VBP 付着部にあたる)で pulley 切開前後の血流量の変化を検討した。その結果 FDP 腱内血流量は pulley 切開によって増加した。指最大伸展時、指に緊張がかかり FDP 腱が pulley で圧迫を受けていると推定できた。

実験 II-C で指軽度伸展、80g 牽引により軽度屈曲した際 VLP 付着部と distal “avascular area”での血流に対する A2 pulley の影響を検討した。

VLP 付着部は指伸展時 A2 pulley 直下であり、屈曲時には A2 pulley より近位に移動する。前者におけるよりも後者における血行は A2 pulley 温存時においても切開時においても有意に減少を示した。その理由は屈曲時には VLP が緊張され、その中を通る血流が減少するためと推定された。

Distal “avascular area”は指伸展時 A2 pulley より遠位にあり、屈曲時は A2 pulley 直下に移動する。この部の血流量は80gによる屈曲によって減少したのもあったが、有意ではなかった。しかし、200g 負荷による屈曲によって有意に低下したことから負荷を増やすことによって A2 pulley による圧迫が血流に強い影響をあたえると推定された。

A2 pulley 温存時、VLP 付着部と distal “avascular area”の血行を比較すると指屈伸時共に distal “avascular area”の血行が有意に減少を示した。その理由として次のことが考えられる。遠位 “avascular area”では指伸展位においては近位で VLP 付着部が A2 pulley により圧迫されるため近位よりの vincular および longitudinal flow が減少する。一方、VLP 付着部では近位よりの longitudinal flow が減少しても vincular flow は “avascular area”に比べて多く認められると推定できる。また、屈曲時は distal “avascular area”が A2 pulley に直接に圧迫されるためこの部での血行が減少すると推定された。

**Table I** Essential results of the author's experimental study on the change of blood flow in the FDP tendon with the severance of vinculum

Conditions	All pulleys severed, finger extended				
	Time lapse	Vincula preserved	VLP only (○), or both VLP and VBP (⊙) severed		
			after 30 mins.	after 3 days	after 7 days
Site of blood flow measurement of FDP tendon					
VLP insertion area		⊙ → n.s.	↓	n.s.	
VBP insertion area		⊙ → n.s.	↓	n.s.	
Proximal "avascular area"		⊙ → n.s.	↓	↑	n.s.
		○ → n.s.	↓	↑	n.s.
Distal "avascular area"		⊙ → n.s.	↓	↑	n.s.
		○ →	↓	↑	n.s.

n.s.: not significant

↑ blood flow significantly increased.

↓ blood flow significantly decreased.

Note: blood flow in FDP tendon 30 minutes after severance of VLP or VLP and VBP significantly decreases, but it recovers significantly 3 or more days later.

**Table II** Essential results of the author's experimental study on the change of blood flow in the FDP tendon with the severance of pulleys and the change of finger positions

Conditions	Vincula preserved					
	A2 (□) or A4 (△) pulley preserved			All pulleys severed		
	Finger joints (MP + PIP + DIP)					
	extension	flexion		flexion		extension
with the weight of						
Site of blood flow measurement of FDP tendon	80g	200g	80g	200g		
VLP insertion area	□ →					↑
	□ → ↓	↓	↓	↓	n.s.	↑
Distal "avascular area"	□ →	n.s.			n.s.	n.s.
	□ →		↓			n.s.
VBP insertion area	△ →					↑
	△ →		↓			

n.s. not significant

↑ blood flow significantly increased.

↓ blood flow significantly decreased.

Note: severance of pulley significantly increases and weight loading causing finger flexion significantly decreases blood flow in a FDP tendon.

## V 総括ならびに結合

従来の腱内血行の研究は non-viable な標本の血管造影によるものが主体で、FDP 腱では musculo-tendinous origin 系, vinculum 系, および osseo-tendinous origin 系の3系統から血流を供給され、これらの中間に2カ所の“avascular area”が認められるとされていた。また FDP 腱の long vinculum (以下 VLP) の付着部は longitudinal flow がないので vinculum 系血行が遮断されると虚血的になると報告されていた。

著者は10頭の日本ザルの VLP を持つ示指から環指について電解式水素クリアランス法を用いて FDP 腱内血行動態を実験的に検討し、以下の結果を得た。

1. 予備実験として日本ザルの切断手に墨汁・ラテックスによる血管造影を行い、VLP 付着部の近位および遠位に血管の造影されないいわゆる“avascular area”を認めたが、この区域は水素クリアランス法による検査では“avascular”とはいえず、pulley 全長切開後および vincula 温存状態で指伸展位においては vincula 付着部と同程度の血流量の存在を認めた。しかし、A2 pulley 温存時においては遠位“avascular area”の血行は VLP 付着部に比べ屈伸時共に有意な ( $p < 0.05$ ) 減少を示した。その理由は、伸展位では VLP 付着部が、A2 pulley に圧迫され近位よりの血行が減少するため屈曲位では遠位“avascular area”が直接に A2 pulley に圧迫されるためと推定された (Table I)。

2. VLP と VBP の切離によって両“avascular area”と両 vincula 付着部の血流量はいずれも有意 ( $p < 0.05$ ) に減少したが“avascular”にはならなかった。両“avascular area”では VLP のみおよび VLP と VBP 共に切離した30分後に比べ切離後3日、7日の血流量は有意に ( $p < 0.05$ ) 増加していた。約1カ月後では血管造影においても長軸方向の血流を認めるようになった。

3. VLP 付着部は指伸展位では A2 pulley の直下にあり、80gの負荷による指屈曲時には A2 pulley より近位に移動する。この部の血行は前者におけるよりも後者において A2 pulley を温存しても切開しても有意に ( $p < 0.01$ ) 減少を示した (Table II)。その理由は屈曲時には VLP が緊張し、その中を通る血流が減少するためと推定された。

またこの部の血流量は指最大伸展位で A2 pulley を切開すると温存時と比べ有意 ( $p < 0.05$ ) に増加していた。その理由は A2 pulley による局所圧迫が除去されたためと推測された。

4. 遠位“avascular area”は指屈曲時 A2 pulley 直下に位置する。この部の血流は80g負荷による屈曲では有意差はなかったが、200g負荷では有意に ( $p < 0.05$ ) 減少した。負荷を増すことによって A2 pulley による局所圧迫が増し血流が減少すると推定された。

5. VBP 付着近位部は指最大伸展時に、その遠位部は指最大屈曲時に A4 pulley 直下に位置する。200g負荷による屈曲時には VBP 付着部血流量は最大伸展時に比べ有意 ( $p < 0.05$ ) に減少していた。その理由は A4 pulley で VBP 付着遠位部が圧迫されるためと推定された。

指最大伸展時に VBP 付着部血流量は A4 pulley 切開後切開前に比べ有意 ( $p < 0.05$ ) に増加した。これは指伸展位においても A4 pulley により VBP 付着部が圧迫されるためと推定された。

6. 以上の結果を総合して FDP 腱への3系統の血流は腱内で互いに連絡しているので真の“avascular area”は存在しないが、指肢位の変化により VLP の緊張、A2, A4 pulley による VLP, VBP 付着部や遠位“avascular area”の圧迫が生じ部位別に動的血流量の差が生じることを確認できた。

稿を終るにあたり、ご指導、ご校閲を頂いた新潟大学整形外科教室田島達也教授に深謝いたします。また本実験にご協力頂いた新潟手の外科研究所吉津孝衛所長、総合会津中央病院星源之助院長、日本成人病医学研究所木村華所長、県立会津短期大学安江俊二教授、新潟大学整形外科教室錦織新一技官、赤沢秀喜技官に感謝します。

(本論文の要旨は第28回、31回日本手の外科学会で発表した。)

## 参 考 文 献

- 1) Berkenbusch, H.: Die Blutversorgung der Beugesehen der Finger. Nachrichten der Koniglichen Gesellschaft der Wissenschaften, 14: 403~406, 1887.
- 2) Arai, H.: Die Blutgefasse der Sehnen. Anatomische Hefte, 34: 363~398, 1907.
- 3) Mayer, L.: The physiological method of tendon transplantation-I. Historical: anatomy and physiology of tendons. Surg. Gynecol Obstet, 22: 182, 1916.
- 4) Lundborg, G., Myrhaage, R. and Rydevik, B.:

- The vascularization of human flexor tendons within the digital synovial sheath region-structural and functional aspects, *J. Hand Surg.*, **2**: 417~427, 1977.
- 5) **Hunter, Schneider, Mackin**: Tendon surgery in the hand. 1st ed., Mosby, 67~78, 1987.
  - 6) **Shakya, Iswar Man, et al.**: Vincula 遮断および指屈曲時靭帯性腱鞘圧迫による深指屈筋腱内血流量の経時的変化についての水素クリアランス法による検討, 日手会誌第2巻第1号, 78~82, 1985.
  - 7) **Shakya, Iswar Man, 他**: 種々の条件下における深指屈筋腱内血流量の水素クリアランス法による検討(第2報), 日手会誌第5巻第6号, 1119~1122, 1989.
  - 8) **Kolliker, A.**: Manual of Human Histology (Busk, G. and Huxley, T., eds.) London, Sydenham Society, 1853.
  - 9) **Smith, J.W.**: Blood supply of tendons. *Am. J. Surg.*, **109**: 272~276, 1965.
  - 10) **Peacock, E.E.**: A study of the circulation in normal tendons and healing grafts. *Ann. Surg.*, **149**: 415~428, 1959.
  - 11) **Manske, P.R., et al.**: Nutrient pathways of flexor tendons in primates. *J. Hand Surg.*, **7**: 436~447, 1982.
  - 12) **Edwards, D.A.W.**: The blood supply and lymphatic drainage of the tendon. *J. Anat.*, **80**: 147~152, 1946.
  - 13) **Brockis, J.G.**: The blood supply of the flexor and extensor tendons of the fingers in man. *J. Bone Joint Surg.*, **35B**: 131~138, 1953.
  - 14) **Ochiai, N., et al.**: Vascular anatomy of flexor tendons. I. Vincular system and blood supply of the profundus tendon in the digital sheath. *J. Hand Surg.*, **4**: 321~330, 1979.
  - 15) **Aukland, K., Bower, B.F. and Berliner, R.W.**: Measurement of local blood flow with hydrogen gas. *Circ. Res.*, **14**: 164~187, 1964.
  - 16) **Stosseck, K., Luebbers, D.W. and Cottin, N.**: Determination of local blood flow (microflow) by electrochemically generated hydrogen: construction and application of the measuring probe. *Physiolog. Arch.*, **348**: 225~238, 1974.
  - 17) 甲州啓二, 他: 電気分解法により発生させた水素ガスを利用したの局所脳血流量測定を試み, 脳神経外科, **9(11)**: 1261~1266, 1981.
  - 18) **Senter, H.J., et al.**: An improved technique for measurement of spinal cord blood flow. *Brain Res.*, **149**: 197~203, 1978.
  - 19) 田村 晃, 他: 水素クリアランス法による脳局所血流量の測定, 脳神経. **30**: 47~54, 1978.

(平成元年2月21日受付)