

# 新しく開発された非観血的血流計による末梢動脈血流量と臨床応用

—総頸動脈，大腿動脈，足背動脈の血流量  
と実験的人工血管置換前後の血流変化—

岡山大学医学部第2外科教室（主任：寺本 滋教授）

仲 宗 根 浩 二

（昭和56年11月25日受稿）

**Key words:** 非観血的血流計，流量，流速，  
血管径，壁偏位幅

## 結 言

非観血的な方法による血流計測は，循環系疾患の診断，治療および術後の follow up などにますますその重要性を増してきている。ことに末梢動脈の閉塞性疾患への応用はいろいろに試みられている。しかし超音波ドプラ法を応用した非観血的血流計による血流情報は，今日なお多くの問題点を残しており，完成された検査法とは言いがたい。たとえば超音波ドプラ法による計測は超音波ビームと血流走行とのなす角度が不明のため血流速度の絶対値の計測は不可能であった。この欠点を解消するため血流走行と角度依存性のない超音波ドプラ法による血流計測法が開発された。定量的非観血的血流計（QFM）と呼ばれる新しい装置で，血流速度の絶対値のみならず血流量も測定可能である。これは血管径の変化を経時的に計測する超音波パルスエコートラッキング法と3枚のトランスジューサーを使用することにより角度依存性をなくした血流計の2系統からなり（図1），これらをマイクロコンピューターで有機的に組み合わせたものである。すなわちこの血流計は流速に血管径を加味したもので，従来の血流計に血管径という一次元を加えたもので，この方法によりはじめて血流量の測定が可能になったといえよう。しかし本計測器は開発されてからの日時は短かく，その精度に関しては実験的にも十分な検証があるとはいえない。

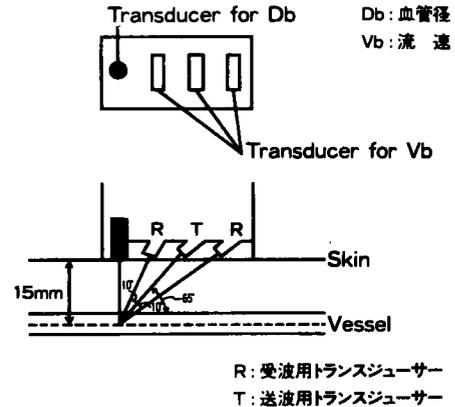


図1 定量的非観血的血流計（QFM）の概略  
QFM: Non invasive Quantitative Flow Meter.

本研究はこのQFM法の精度を検査するのを目的としたものである。犬を用いた実験では，大腿動脈の流量を本法で計測し，電磁流量計で計測した流量と比較した。臨床では，健常者で総頸動脈，大腿動脈，足背動脈の血流量や流態性状の計測をおこない，大腿動脈，足背動脈においては運動負荷による計測もおこなった。さらに人工弁置換患者の総頸動脈流量や流態性状も計測し，犬でも腹部大動脈の人工血管置換による流量変化や流態性状を計測し，人工血管置換による血流変化を検討した。

## 研究対象と方法

研究対象は，雑種成犬，健常者および僧帽弁

置換患者である。犬を用いた実験は、大腿動脈血流量を本法と電磁流量計での測定値と比較した群（1群）と腹部大動脈を人工血管で置換し、その前後で流量と流態性状を比較した群（2群）の2群である。健常者では、本法を用いて総頸動脈、大腿動脈、足背動脈の流量と流態性状を測定し（3群）、大腿動脈、足背動脈では運動負荷後にも計測した（4群）。なお僧帽弁置換患者においても流量と流態性状を測定した（5群）。

流態性状とは、本法で記録される最大、最小および平均流速や血管径とその径偏位幅である。使用した機器は、Ultrasonic quantitative flow measurement (QFM) System (Model 1400, 日本光電) である。

犬を用いた実験（1, 2群）では、9~15kgの成犬を用い、静脈注射による全身麻酔（ネブタール：25~30mg/kg）を用い、気管内挿管後従量式人工呼吸器（モデル B<sub>2</sub>, 五十嵐医科工業）で調節呼吸をおこなった。

1群では QFM にて経皮的に大腿動脈の流量を計測した。計測部位は大腿動脈の拍動をもっとも強く触れる部位でおこなった。計測は5回おこないその算術平均値を測定値とした。しかしながら本血流計は血管径測定用超音波ビームと血流速度測定用超音波ビームが深さ15mmで交叉するよう設計されているため、プローブと大腿動脈までのビーム距離がほぼ15mmとなるようプローブと皮膚の間に水を入れた薄いゴム袋を挿入した。この計測後ただちに大腿動脈を観血的に露出し血管径の実測をおこなったのち、電磁流量計（モデル：MF27, 日本光電）を使用して流量を測定した。血管径の計測はノギス（Kannon 社）を用いた。

腹部大動脈置換群（2群）では、犬を左側臥位で固定し、圧測定用カテーテル（NIHカテーテル, 6F）を鎖骨下動脈より下行大動脈へ挿入し、ポリグラフ（モデル：142-8, 三栄測器）で記録した。次いで正中切開にて開腹し、腸管を右側へ圧排し後腹膜に縦切開を加え、腹部大動脈を腎動脈末梢より大動脈分岐部まで露出したのち大動脈置換に障害となる腰動脈を結紮切離した。腎動脈と大動脈分岐部の中間点の外径を実測し、同部で電磁流量計を用い流量を計測

した。さらに同部位で QFM にて置換前流量（平均流量, 最大流量, 最小流量）、流速（平均流速, 最大流速, 最小流速）、血管径および径偏位幅の計測をおこなった。計測は5回おこない平均値とした。人工血管置換は腎動脈と大動脈分岐部の中央部を3cm切除し、実測血管径に合わせて6mmの人工血管を用いて置換した。使用した人工血管は、Cooley Woven Dacron (Meadox Medical) で、縫合糸は、Tycron (D AVIS & GECK) を用い連続縫合で吻合した。吻合後に吻合部での圧差がないことを確認し、置換後計測を吻合部末梢にて電磁流量計と QFM でおこなった。

臨床応用のためまず健常者で総頸動脈、大腿動脈、足背動脈の流量や流態性状を測定した（3群）、計測値は年令別とした（20~29才, 12人, 40~59才, 10人, 60~79才, 10人）。計測は、室温変化の少ない、しかも静かな部屋で10分間の安静仰臥位ののちおこなった。総頸動脈は右側を使用し、や、顔面を左側へ向け、鎖骨上3cmで安定した血流波形の得られる部位で計測した。計測は5回おこない平均値とした。大腿動脈は右側を使用し、獵徑靱帯直下で拍動のもっとも強く触れる部位で計測した。足背動脈では拍動の触れる部位が一定せず、もっとも拍動の強い部位で計測した。

運動負荷による大腿動脈、足背動脈の血流計測は、20~30才の健常者男子10人でおこなった。室温変化の少ない、かつ静かな部屋で10分間の安静仰臥位ののち、大腿動脈、足背動脈の計測を前述の方法でおこない負荷前値とした。負荷は5kgのおもりを3分間足関節の伸展により支える等張負荷をおこなった。負荷終了直後より計測をおこなった。計測はすみやかにおこない、遅くとも3分以内に終了するようにした。

僧帽弁置換患者の総頸動脈における血流変化は、置換後1~5年の患者10人で、平均年令43.1才であった（5群）。計測は心理的、外的刺激の少ない環境下で10分間の安静仰臥位ののち5回計測をおこない平均値とした。

## 結 果

### 大腿動脈の血流量（1群）

犬の大腿動脈の血流量を非観血的血流計 (QFM) と電磁流量計 (EMF) で測定し比較した (表1)。雑種成犬10頭で計測をおこない、 $y = 1.05x - 12.9$ ,  $r = 0.94$  ( $P < 0.001$ ) と極めて高い相関をえた (図2)。縦軸は EMF による計測値, 横軸は QFM による計測値である。実測血管径と QFM による血管径計測値も,  $y = 0.9x + 0.4$ ,  $r = 0.94$  ( $P < 0.001$ ) と高い相関を示した (図3)。

表1 QFM と EMF (電磁流量計) による犬大腿動脈の流量計測, QFM による血管径計測値と実測値

犬番号		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均値±SD
流量 (ml/min)	QFM	138	192	150	168	120	144	132	120	120	126	141±22
	EMF	127	183	163	165	110	135	110	115	114	125	134±25
血管径 (mm)	QFM	3.4	4.3	3.7	4.6	2.7	2.7	3.2	3.7	3.1	4.1	3.5±0.6
	実測値	3.5	4.5	3.5	4.5	3	3	3	4	3	4	3.6±0.6

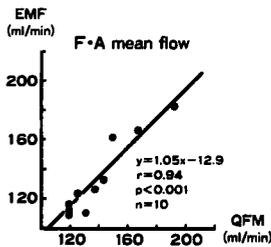


図2 QFM と EMF の流量比較

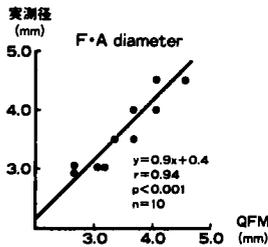


図3 QFM 血管径計測値と実測値の比較

腹部大動脈の人工血管置換前後における血流変化 (II群)

人工血管による腹部大動脈置換前後の流量 (平均流量, 最大流量, 最小流量), 流速 (平均流速, 最大流速, 最小流速), 血管径変化を犬を用いて計測した (表2)。

i) 流量

平均流量は置換前が  $4.5 \pm 0.8$  ml/sec, 置換後は  $5.2 \pm 1.1$  ml/sec と増加したが有意ではなかった。電磁流量計でも QFM 法と同様の結果であった (表3)。最大流量と最小流量はともに有意な変化はなかった。

ii) 流速

平均流速は置換前が  $16 \pm 3.6$  cm/sec, 置換後は  $19.8 \pm 4.1$  cm/sec と増加したが有意差はなく, 最大流速は  $30.8 \pm 6.1$  cm/sec から  $42.5 \pm 9.1$  cm/sec と有意な増加であった ( $P < 0.05$ )。最小流速に変化はなかった。

iii) 血管径

血管径および径偏位幅ともに変化はみられず, 人工血管置換による置換部末梢の自己血管の壁伸展性に変化はなかった。

健康者の総頸動脈, 大腿動脈, 足背動脈の流量と流態 (III群)

総頸動脈, 大腿動脈, 足背動脈の流量と流速や血管径などの流態を年齢別にみた。

1) 総頸動脈

i) 流量

平均流量は20~39才 ( $n = 12$ ) で  $10.4 \pm 2$  ml/sec, 40~59才 ( $n = 10$ ) で  $7.6 \pm 1.5$  ml/sec, 60~79才 ( $n = 10$ ) で  $7.4 \pm 0.7$  ml/sec, と加齢による流量減少がみられ, 特に40才以後で有意な

表2 犬の腹部大動脈における人工血管置換前後の血流変化 \*\*\*  $P < 0.05$

犬番号	1		2		3		4		5		6		7		8		平均値±SD	
	前	後	前	後	前	後	前	後	前	後	前	後	前	後	前	後	前	後
平均流量 (ml/sec)	4.3	5.5	5.7	7.3	5.4	5.9	4.2	4.7	4.1	4.3	5.1	6	3.2	3.7	3.7	4.3	4.5±0.8	5.2±1.1
最大 ( - )	8.3	11.5	14.0	17.9	10.8	11.3	9.2	12.7	6.5	11.6	8.3	12.7	5.6	6.6	10	12.2	9.2±2.7	12.1±2.9
最小 ( - )	1.6	2.6	2.5	3.1	1.6	2.6	2	1.8	1.9	1.7	3	2.4	1.2	1.8	1.7	1.4	1.9±0.5	2.2±0.5
平均流速 (cm/sec)	20	17	14	22	14.9	16.4	11.6	13.5	23.5	21.8	14.4	18.4	14.7	22.7	13.9	16.3	16±3.6	19.8±4.1
最大 ( - )	38.1	52.7	34.3	49.8	27.6	30.5	24.4	34.7	38.8	57.3	22	35.3	26.4	37.2	35.1	42.1	30.8±6.1	42.5±9.1
最小 ( - )	7.8	13.1	6.0	9.9	4.5	7.3	5.6	5.3	11.2	8.2	8.0	7.6	5.9	12	6.7	5.7	7.2±2	8.6±2.6
血管径 (mm)	5.1	5.0	7	6.5	6.8	6.8	6.8	6.8	4.6	5	6.6	6.4	5.3	4.6	5.8	5.8	6±0.9	5.9±0.8
径偏位幅 ( - )	0.5	0.4	0.7	0.6	0.5	0.5	0.3	0.3	0.4	0.3	0.3	0.7	0.5	0.5	0.5	0.7	0.5±0.1	0.5±0.1

表3 犬の腹部大動脈人工血管置換前後のQ  
FM 流量計測値と EMF 流量計測値

犬番号	1		2		3		4		5		6		7		8		平均値±SD		
	前	後	前	後	前	後	前	後	前	後	前	後	前	後	前	後	前	後	
流量 (ml/min)	QFM	250	330	342	438	324	354	252	282	246	258	306	360	192	222	222	258	268±48	313±66
	EMF	255	330	365	445	320	340	255	270	240	255	300	355	180	210	220	265	267±55	308±69

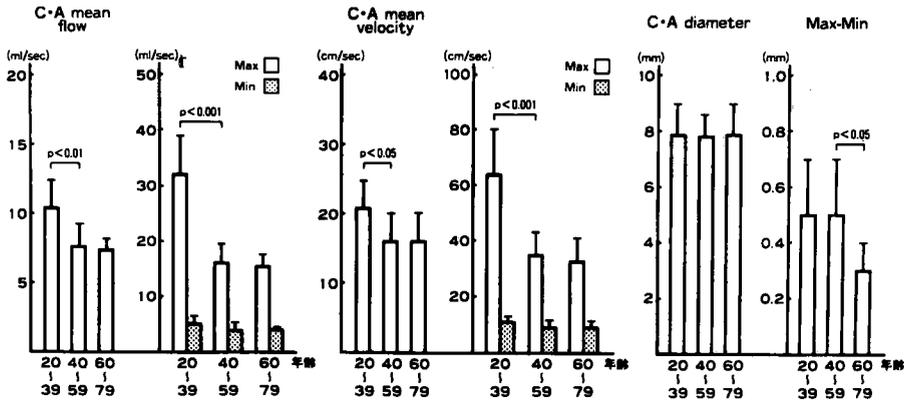


図4 総頸動脈の平均流量、最大、最小流量の年齢別変化  
 図5 総頸動脈の平均流速、最大、最小流速の年齢別変化  
 図6 総頸動脈の血管径および径偏位幅の年齢別変化

減少がみられた ( $P < 0.01$ ) (図4)。最大流量は20~39才、40~59才、60~79才で、それぞれ  $32.7 \pm 7.7 \text{ ml/sec}$ 、 $15.9 \pm 3.6 \text{ ml/sec}$ 、 $15.7 \pm 2.1 \text{ ml/sec}$  と40才を境として有意に減少した ( $P < 0.001$ )。最小流量は加齢による変化はなかった。

ii) 流速

平均流速は20~39才で  $21.3 \pm 4.3 \text{ cm/sec}$ 、40~59才、 $16.5 \pm 3.7 \text{ cm/sec}$ 、60~79才、 $16 \pm 3.8 \text{ cm/sec}$  と40才以後では有意な減少がみられた ( $P < 0.05$ ) (図5)。最大流速もそれぞれ  $63.8 \pm 16 \text{ cm/sec}$ 、 $35.7 \pm 8.6 \text{ cm/sec}$ 、 $33.4 \pm 7.7 \text{ cm/sec}$  と40才から有意な減少を示した ( $P < 0.001$ )。最小流速は加齢による変化はなかった。

iii) 血管径および径偏位幅

血管径は20~39才、 $7.9 \pm 1.1 \text{ mm}$ 、40~59才、 $7.8 \pm 0.8 \text{ mm}$ 、60~79才、 $7.9 \pm 0.9 \text{ mm}$  と加齢による変化はなかったが、径偏位幅はそれぞれ、 $0.5 \pm 0.2 \text{ mm}$ 、 $0.5 \pm 0.2 \text{ mm}$ 、 $0.3 \pm 0.1 \text{ mm}$  と60才から有意な減少を示した ( $P < 0.05$ ) (図6)。

2) 大腿動脈

i) 流量

平均流量は20~39才、 $6.5 \pm 1.8 \text{ ml/sec}$ 、40~

59才、 $4.9 \pm 1.1 \text{ ml/sec}$ 、60~79才、 $4.3 \pm 0.8 \text{ ml/sec}$  と40才以降では有意な減少がみられ ( $P < 0.05$ )。最大流量においては、それぞれ  $23.7 \pm 10.2 \text{ ml/sec}$ 、 $17.5 \pm 3.7 \text{ ml/sec}$ 、 $15.5 \pm 3.2 \text{ ml/sec}$  と40才より減少がみられるものの有意差はなく、最小流量は加齢による変化はなかった (図7)。

ii) 流速

平均流速は20~39才、 $19.1 \pm 7.7 \text{ cm/sec}$ 、40~59才、 $17.1 \pm 7.3 \text{ cm/sec}$ 、60~79才、 $7.9 \pm 2.2 \text{ cm/sec}$  と60才から有意な減少を示し ( $P < 0.01$ )。最大流速においても同様に、 $65.9 \pm 30 \text{ cm/sec}$ 、 $53 \pm 24.4 \text{ cm/sec}$ 、 $27.2 \pm 7.2 \text{ cm/sec}$  と60才から有意な減少を示した ( $P < 0.01$ ) (図8)。最小流速は加齢による変化はなかった。

iii) 血管径および径偏位幅

血管径は20~39才、 $6.9 \pm 1.3 \text{ mm}$ 、40~59才、 $6.9 \pm 1.6 \text{ mm}$ 、60~79才、 $8.5 \pm 0.9 \text{ mm}$  と60才から有意な増加がみられた ( $P < 0.05$ )。径偏位幅は、それぞれ  $0.4 \pm 0.1 \text{ mm}$ 、 $0.3 \pm 0.1 \text{ mm}$ 、 $0.3 \pm 0.2 \text{ mm}$  と減少傾向はみられたが有意差はなかった (図9)。

3) 足背動脈

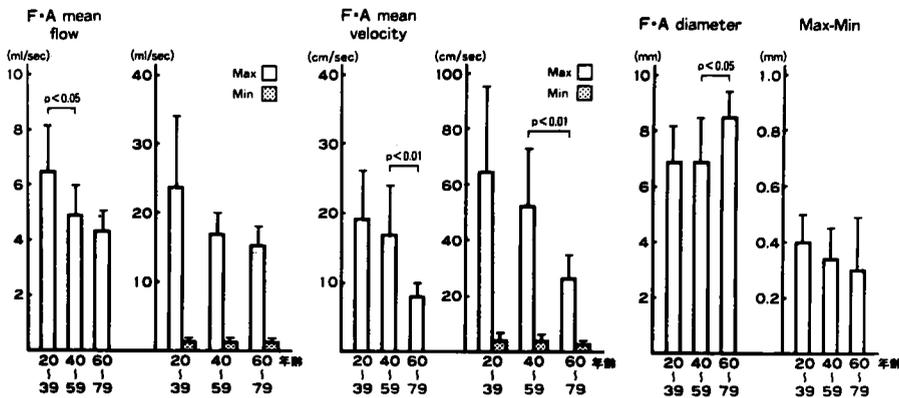


図7 大腿動脈の平均流量, 最大, 最小流量の年齢別変化  
 図8 大腿動脈の平均流速, 最大, 最小流速の年齢別変化  
 図9 大腿動脈の血管径および径偏位幅の年齢別変化

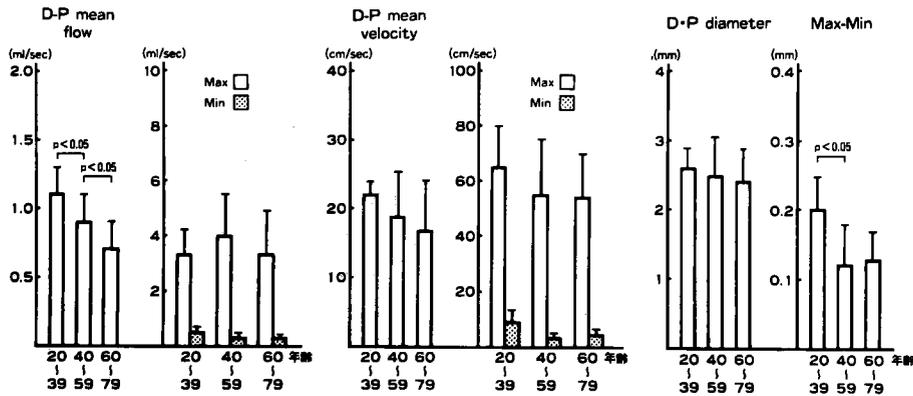


図10 足背動脈の平均流量, 最大, 最小流量の年齢別変化  
 図11 足背動脈の平均流速, 最大, 最小流速の年齢別変化  
 図12 足背動脈の血管径および径偏位幅の年齢別変化

i) 流量

平均流量は20~39才,  $1.1 \pm 0.2 \text{ ml/sec}$ , 40~59才,  $0.9 \pm 0.2 \text{ ml/sec}$ , 60~79才,  $0.7 \pm 0.2 \text{ ml/sec}$ と各年代毎に有意な減少を示した(いずれも  $P < 0.05$ ) (図10)。最大流量は, それぞれ  $3.3 \pm 0.9 \text{ ml/sec}$ ,  $4.3 \pm 1.6 \text{ ml/sec}$ ,  $3.3 \pm 1.6 \text{ ml/sec}$ と加齢による有意な変化はみられず, 最小流量も同様であった。

ii) 流速

平均流速は20~39才,  $22.3 \pm 2 \text{ cm/sec}$ , 40~59才,  $18.6 \pm 6.8 \text{ cm/sec}$ , 60~79才,  $17 \pm 8.5 \text{ cm/sec}$ と減少傾向を示したが, 有意な減少ではなかった(図11)。最大流速は, それぞれ  $65 \pm 15.2 \text{ cm/sec}$ ,  $56.9 \pm 21.3 \text{ cm/sec}$ ,  $55.9 \pm 17.5 \text{ cm/sec}$ で有意な変化はみられず, 最小流速も同

様であった。

iii) 血管径および径偏位幅

血管径は加齢による変化はみられず, 径偏位幅はそれぞれ  $0.2 \pm 0.05 \text{ mm}$ ,  $0.12 \pm 0.08 \text{ mm}$ ,  $0.13 \pm 0.04 \text{ mm}$ と40才より有意な減少がみられた ( $P < 0.05$ ) (図12)。

負荷による大腿動脈, 足背動脈の流量, 流速, 血管径変化 (IV群)

1) 大腿動脈

i) 流量

負荷前平均流量は  $6.8 \pm 0.4 \text{ ml/sec}$ , 負荷後は  $8.3 \pm 0.5 \text{ ml/sec}$ と有意な増加を示し ( $P < 0.001$ ), 最大流量も  $26.2 \pm 1.7 \text{ ml/sec}$ から  $32.5 \pm 3.2 \text{ ml/sec}$ と有意に増加した ( $P < 0.001$ ) (表4)。最小流量に変化はなかった。

表4 負荷による大腿動脈, 足背動脈の血流変化  
\*P<0.001, \*\*P<0.01, \*\*\*P<0.05

計測部位	大腿動脈 n=10		足背動脈 n=10	
	前	後	前	後
平均流量 (ml/sec)	6.8±0.4	8.3±0.5	1.2±0.3	1.6±0.3
最大 " ( . )	26.2±1.7	32.5±3.2	7±2	7.8±3.4
最小 " ( . )	1.2±0.5	1.8±0.5	0.5±0.3	0.4±0.2
平均流速 (cm/sec)	17.7±1.2	21.9±1	16.6±2.3	21.3±6.6
最大 " ( . )	64.8±4.4	77.2±4	73.2±21.4	84.2±16.6
最小 " ( . )	3.2±1.3	4.9±1.5	3.9±2.9	5.2±3.5
血管径 (mm)	7±0.2	7±0.2	2.9±0.3	3±0.5
径偏位幅 ( . )	0.4±0.05	0.43±0.03	0.2±0.08	0.2±0.03

### ii) 流速

平均流速は17.7±1.2cm/secから21.9±1.0cm/secと有意に増加し(P<0.001), 最大流速も64.8±4.4cm/secから77.2±4.0cm/secと有意な増加を示した(P<0.001). 最小流速は3.2±1.3cm/secから4.9±1.5cm/secと有意に増加した(P<0.05).

### iii) 血管径および径偏位幅

血管径に負荷による変化はみられず, 径偏位幅は0.4±0.05mmから0.43±0.03mmとやや増加したが有意差はなかった.

## 2) 足背動脈

### i) 流量

負荷前平均流量は1.2±0.3ml/sec, 負荷後は1.6±0.3ml/secと有意に増加した(P<0.01). 最大流量は7±2.0ml/secから7.8±3.4ml/secと負荷による有意な変化はみられず, 最小流量も変化はなかった.

### ii) 流速

負荷前平均流速は16.6±2.3cm/sec, 負荷後が21.3±6.6cm/secと増加したが有意差はなく, 最大流速, 最小流速も同様で有意な変化はみられなかった.

### iii) 血管径および径偏位幅

負荷前血管径は2.9±0.3mm, 負荷後が3.0±0.5mmと変化なく, 径偏位幅も0.2±0.08mmから0.2±0.03mmと変化はみられなかった.

僧帽弁置換患者の総頸動脈流量, 流速, 血管径(V群)

### i) 流量

表5 僧帽弁置換群と対照群の総頸動脈における血流比較  
\*\*\*P<0.05

計測部位	総頸動脈	
	弁置換群 n=10	対照群 n=10
計測		
平均流量 (ml/sec)	6.7±0.7	7.6±1.5
最大 " ( " )	17.5±4.4	15.9±3.6
最小 " ( " )	3.3±0.6	4.2±1
平均流速 (cm/sec)	14.5±2.2	16.5±3.7
最大 " ( " )	38.6±12.3	35.7±8.6
最小 " ( " )	7.4±1.3	9.2±2.7
血管径 (mm)	7.7±0.6	7.8±0.8
径偏位幅 ( " )	0.36±0.1	0.5±0.2

僧帽弁置換患者の平均流量は6.7±0.7ml/secで対照群(健常者:40~59才)は7.6±1.5ml/secと減少したが有意ではなかった. 最大流量に変化はみられず, 最小流量は, それぞれ3.3±0.6ml/sec, 4.2±1.0ml/secと対照群に比し有意な減少がみられた(P<0.05).

### ii) 流速

平均流速は弁置換群が14.5±2.2cm/sec, 対照群は16.5±3.7cm/secと有意な変化はなく, 最大流速, 最小流速ともに有意な変化はみられなかった.

### iii) 血管径および径偏位幅

血管径に変化はみられず, 径偏位幅は弁置換群が0.36±0.1mm, 対照群が0.5±0.2mmと対照群に比し減少したが有意な減少ではなかった.

## 考 察

超音波ドプラ法は1956年里村ら<sup>1)</sup>により微小運動検出を目的として開発された. その医学への応用は主として心臓機能検査で試みられたが<sup>2-6)</sup>, 血管内の血流からもドプラ信号が生じることが明らかとなった<sup>7)</sup>. 血流によるドプラ効果は当初は血流の乱れによる界面よりの反射と考えられていたが血流中の血球からの散乱によるものであることが明らかとなった<sup>8,9)</sup>. 初期にはこの方法は血流速度がわかるのみでその方向性については議論できないという限界があった. しか

し1966年加藤ら<sup>10,11)</sup>が周波数偏位方式, 1967年 McLeodら<sup>12)</sup>が位相弁別方式を開発し超音波ドプラ法による血流の方向指示に成功した。その後非観血的血流計測法として臨床に広く用いられるようになり、頸動脈や末梢血管に対して実際に応用されているが、血流に対する照射角度が不明のため血流を定量化することは不可能であった。血流の絶対値を計測する方法として Olsonら<sup>13)</sup>は血管径測定用トランスジューサーと一定の角度差をつけた血流速度測定用トランスジューサーを組み合わせたプローブで同時測定をおこない絶対流量を算出している。しかしこの方法では血流に対する超音波ビーム角度が明らかでなく相当の計測誤差を生じると考えられ、また血流量は平均血管径を用い流速波形より換算したもので真の流量を算出するに致っていない。Borodzinskiら<sup>14)</sup>はパルスドプラ法を応用し一定の角度差をつけた2つのトランスジューサーで血管径、照射角度を計測し、もう一方のトランスジューサーにて絶対血流速度の計測をおこない平均血管径と絶対血流速度より血流量を算出している。しかしこの方法でも血管径偏位幅を無視しており、また照射角度の精度にも問題がありかなりの誤差が生じると考えられる。Kossoffら<sup>15)</sup>はBモード断層法を応用し血管走行に対する血流速度測定用トランスジューサーの照射角度を決定し絶対血流量の算出をおこなっている。しかし本法でも血管径偏位幅の計測がおこなわれておらず真の流量計測とは言い難い。今回古幡らにより開発された本装置(Q-FM)はこれらの欠点を補うため前述のごとく3枚のトランスジューサーを用い絶対血流速度の測定を可能にし、さらに Hokansonら<sup>16)</sup>が開発した超音波パルスエコー法を応用しかなり正確な血管径の計測も可能にした。また実時間での血管径偏位幅を測定できるもので血流計測の精度はかなり高いものと考えられる。古幡ら<sup>17)</sup>は本装置の計測精度を電磁流量計と比較検討しているが、モデル実験として水槽内に5mmのアクリル性リジェット管を通し人血を用いて拍動流で流すことにより流量と深度依存性の計測をおこない、10%以内の誤差であることを報告し、また教室の大屋ら<sup>18)</sup>も動物実験にて同様の

結果を報告している。著者は本血流計を使用し雑種成犬10頭を用いて経皮的に大腿動脈の流量計測をおこない電磁流量計との比較をおこない、前述のごとく  $y = 1.05x - 12.9$ ,  $r = 0.94$  ( $P < 0.001$ )という高い相関をえた。雑種成犬使用による人工血管置換後のグラフト末梢の流量は、平均流量、最大流量ともに有意な変化はなく、平均流速も有意な変化はみられなかった。最大流速において、 $30.8 \pm 6.1 \text{ cm/sec}$  から  $42.5 \pm 9.1 \text{ cm/sec}$  と有意な増加をみたが、人工血管の壁伸展性の欠除による流速の増大か、吻合部に乱流が生じたためかは今後さらに研究を重ねる必要がある。血管径偏位幅は、置換前後ともに  $0.5 \pm 0.1 \text{ mm}$  と変化なく、壁伸展性には大きな変化はみられなかった。以上の結果より腹部大動脈の弾性血管としての機能がある程度欠除したとしても末梢循環に影響を及ぼすほどの血流障害は起きないと考えられる。しかしながら、人工血管置換による腹部大動脈の弾性血管としての特性の欠除は、心機能や末梢循環に対して未知の問題を含んでおり今後解明されるべきであろう。なお本実験は正常な血管壁をもつ大動脈の置換であること、置換部の長さが短いこと、再建直後の計測であることなどのため、閉塞性動脈疾患などの人工血管置換による長期の血行動態とは直接比較はできないが、今後このような非観血的血流計が改良され、深部血管に対する計測が可能になれば長期にわたる血行動態を明らかにできるものと考えられる。

臨床での測定方法は、被検者をできるだけ静かな場所で10分間の安静仰臥位ののち計測した。末梢血管の血行動態は微妙な心理的、外的刺激により瞬間的に変化する。金子ら<sup>19)</sup>は室温が血流状況に密接に関係することを報告しており、葛谷、小林ら<sup>20)</sup>も上腕動脈で寒冷試験をおこない血行動態の著明な変化と、このような血流パターンの易変化性が主として血管運動神経による末梢血管抵抗の増加と関係していることを報告している。今回の計測でもドアの開閉や会話などで瞬時に流量、流速に大きな変化を来すことを経験しており、血流計測に際しては慎重な態度で臨まなければならない。

藤代ら<sup>21)</sup>は QFM (モデル1400, 日本光電)

を使用し総頸動脈の加令による血流変化を検討し、若年者（20～30才代）の平均流量は11.3ml/sec、高令者（50才以上）では8.4ml/secと流量の減少を報告し、血流速は若年者で、平均流速27.7cm/secで、ことに最大流速68.5cm/sec、最小流速13.7cm/sec、高令者では、それぞれ14.3cm/sec、37.1cm/sec、6.6cm/secで、ことに最大流速の低下が著明であった報告している。また血管径については、若年者の平均血管径は7.2mm、高令者では8.6mmと加令による血管径の増大を示し、血管径偏位幅も若年者で0.54mm、高令者で0.28mmと著明に減少することを報告している。著者の計測でも平均流量は20～39才で $10.4 \pm 2.0$ ml/sec、40～59才で $7.6 \pm 1.5$ ml/sec、60～79才で $7.4 \pm 0.7$ ml/secと加令による流量の減少を示し、特に40才以後が著明であった。平均流速は、20～39才で $21.3 \pm 4.3$ cm/sec、40～59才で $16.5 \pm 3.7$ cm/sec、60～79才で $16 \pm 3.8$ cm/secと流速の減少は40才以後より著明であった。最大流速においては、それぞれ $63.8 \pm 16$ cm/sec、 $35.7 \pm 8.6$ cm/sec、 $33.4 \pm 7.7$ cm/secと加令による減少を示し、特に40才以後から著明であった。血管径および径偏位幅は、20～39才でそれぞれ $7.9 \pm 1.1$ mm、 $0.5 \pm 0.2$ mm、40～59才で $7.8 \pm 0.8$ mm、 $0.5 \pm 0.2$ mm、60～79才で $7.9 \pm 0.9$ mm、 $0.3 \pm 0.1$ mmと加令による血管径の増大は著者の計測では認められず、径偏位幅は60才以後に著明な減少がみられた。総頸動脈における加令による血行動態の著しい変化は血流速波形の平坦化で、振動性の減少によるものと考えられている。この現象は金子、白石ら<sup>22)</sup>も報告しており、今回の著者の計測結果からも定量的な裏付けがおこなわれたと考える。

頸動脈以外の末梢動脈の血流を本法を用いて計測した報告はなく、本法の下肢動脈閉塞性疾患への応用も本研究の大きな目的の一つである。閉塞性動脈硬化症、Buerger病など末梢動脈疾患においても定量的な血流情報が得られれば、術前の質的診断や再建術後のfollow upなどに極めて有用である。著者は健常者における大腿動脈、足背動脈の加令による流量、流速、血管径および径偏位幅の壁伸展性などの検索をおこなったが、大腿動脈においても40才以後になる

と著明な流量の減少がみられ、流速減少、壁伸展性の減少と合わせて40才代より動脈硬化性疾患の準備状態に入ったと考える。ことに60才以後になると流速の減少がさらに著明で、閉塞性動脈硬化症などの末梢動脈疾患が60才代より増加する事実を裏付けるものと思われる。径偏位幅からも、20～39才 $0.4 \pm 0.1$ mm、40～59才 $0.34 \pm 0.1$ mm、60～79才 $0.3 \pm 0.2$ mmと壁伸展性が減少しており、加令による壁硬化がうかがわれる。足背動脈においては大腿動脈にみられるような加令による流量、流速減少は著明でない。このことは閉塞性動脈硬化症が主として腹部大動脈分岐部より膝窩動脈の間に多発することと一致し、大腿動脈における60才以後よりの著明な流速減少も臨床とよく一致する。

血行再建前後の血行動態の分析が近年盛んにおこなわれるようになってきた。しかも非観血的に、いつでも手軽に計測できれば大きな進歩である。これまで定量的な計測ができなかったため、Sound-spectrogram法やZero-Cross-Count法を用いて流速パターンの分析が主としておこなわれてきた<sup>23,24)</sup>。再建術後の閉塞は流量よりも流れのパターンに規制されると言われている<sup>25)</sup>。しかしながら今日ではなお血流波形からの質的診断はむづかしく、他の情報を考慮する必要がある。従って血流状況を考察するうえで流量を知ることよりも基本的なことであり、流速波形と考え合わせながら流れのパターンを分析していけば長期的な術後のfollow upも可能であり、予後を考察するのに好都合であろう。

1964年、Lassenら<sup>26)</sup>により報告された<sup>133</sup>Xeクリアランス法は主として下腿筋の血流量測定に用いられ、下腿動脈閉塞性疾患の診断、経過観察、病態生理<sup>27-29)</sup>など、また健常者における下肢運動時の筋循環生理研究<sup>30,31)</sup>に幅広く応用されている。運動負荷による筋、皮膚などの血流変化を考察した報告は多いが、大腿動脈、足背動脈の定量的な血流変化を報告した論文は見当らず、著者は健常者の運動負荷による大腿動脈、足背動脈の血流変化を検討した。負荷前大腿動脈平均流量は $6.8 \pm 0.4$ ml/sec、負荷後 $8.3 \pm 0.5$ ml/secと有意な増加を示し、平均流速も

17.7±1.2cm/secから21.9±1.0cm/secと著明に増大しており、足背動脈においても同様の傾向であった。今回は末梢動脈閉塞性疾患に対して負荷実験は起こっていないが、跛行の程度に応じて負荷前後の大腿動脈、足背動脈の血流計測は質的診断のための有用なデータを提供するものと考えられる。

僧帽弁置換群の平均年齢は43.1才で同年代の対照群との総頸動脈における血流状況を比較すると、対照群の平均流量7.6±1.5ml/secであるのに対し、僧帽弁置換群は6.7±1.5ml/secと減少傾向を示し、平均流速においても同様に、対照群16.5±3.7cm/secに対し14.5±2.2cm/secと減少傾向がみられた。径偏位幅は、対照群が0.5±0.2mmに対し0.36±0.1mmと壁伸展性も減少傾向がみられた。頸動脈における血流パターンより心機能を評価しようとする試みもみられるが<sup>32,33)</sup>、やはり血流波形のみからの心機能の評価はむづかしく他の情報と合わせて考慮する必要がある。本装置は絶対血流量と流速波形が容易に得られることより流速波形の分析と合わせて頸動脈流量を考察しデータを集積していけば有用な示唆が得られるものと考えられる。

## 結 語

新しく開発された非観血的定量的血流計(QFM, モデル:1400, 日本光電)を使用し、末梢動脈(総頸動脈, 大腿動脈, 足背動脈)の血流計測をおこない、さらに人工血管置換前後の血行動態の変化を考察し以下の結果を得た。

1) 雑種成犬を使用し、大腿動脈の血流量を計

測し電磁流量計との相関をみたが、 $r=0.94$  ( $P<0.001$ ,  $y=1.05x-12.9$ )の結果を得た。

2) 健常者の総頸動脈, 大腿動脈, 足背動脈の加齢による血流変化をみた。総頸動脈の流量, 流速ともに40才以後に有意な減少を示し, 60才以後に有意な壁伸展性の減少がみられた。大腿動脈においては, 40才以後に平均流量の有意な減少がみられ, 60才以後に平均流速, 最大流速の有意な減少がみられた。なお60才以後に血管径の有意な増加がみられた。足背動脈においては, 平均流量は40才以後に有意に減少した。

3) 運動負荷により大腿動脈の平均流量, 最大流量ともに有意に増加し, また平均流速, 最大流速ともに有意な増加がみられた。足背動脈においては, 平均流量に有意な増加をみた。

4) 僧帽弁置換患者の総頸動脈における流量, 流速, 血管径および壁偏位幅は同年代の健常者に比し有意な変化はみられなかった。

5) 人工血管置換によりその末梢部での平均流量, 流速に有意な変化はなく, 壁伸展性にも有意な変化はみられなかった。

稿を終えるに臨み、御指導、御校閲を賜りました寺本滋教授に深謝いたします。また御指導、御協力いただきました岡山大学附属病院救急部、関西二助教授、終始御支援賜った内田發三講師に感謝の意を表します。あわせて御協力願った教室員各位に感謝いたします。

なお本論文の要旨は、第45回日本循環器学会、第81回日本外科学会において発表した。

## 文 献

1. Satomura, S., Matsubara, S. and Yoshida, M.: A new method of mechanical vibration measurement and its application. *Memories Inst. Sci. Indust. Res. Osaka Univ.* 13, 125—133, 1956.
2. 里村茂夫: 超音波ドブラ法による心臓機能検査の研究. 第1報. ドブラ法の原理, 策2報, 装置, 日循誌, 20, 227—228, 1956.
3. 吉田常雄, 森正義, 仁村泰治, 置村道雄, 疋田源一, 中西克己, 里村茂夫: 超音波ドブラ法による心臓機能検査法の研究, 第3報, Doppler音の種類, 第4報, 臨床的応用(予報), 日循誌, 20, 228, 1956.
4. Satomura, S.: Ultrasonic Doppler method for the inspection of cardiac function. *J. Acoust. Soc. Am.* 29, 1181—1185, 1957.
5. Satomura, S., Nimura, Y., Yoshida, T.: Ultrasonic Doppler cardiograph. *Proceeding of 3rd Internati-*

- onal Conference on Medical Electronics. London, p. 249, 1960.
6. Yoshida, T., Mori, M., Nimura, Y., Hikita, G., Takagishi, S., Nakanishi, K. and Satomura, S.: Analysis of heart motion with ultrasonic Doppler method and its clinical application. *Am. Heart J.* **61**, 61—75, 1961.
  7. 里村茂夫：超音波による末梢循環の検査法，日本音響学会誌，**15**，151—158，1959.
  8. Franklin, D.L., Schlegel, W. and Rushmer, R.F.: Blood flow measured by Doppler frequency shift of backscattered ultrasound. *Science* **134**, 564—565, 1961.
  9. Kato, K., Kido, Y., Motomiya, M., Kaneko, Z. and Kotani, H.: *Memories Inst. Sci. Indust. Res. Osaka Univ.* **19**, 51—57, 1962.
  10. 加藤金正，泉水朝見：超音波血流計（ドブラ法）における逆流指示の一方法，日本超音波医学会講演論文集，**10**，78，1966.
  11. Kato, K. and Izumi, T.: A new ultrasonic Doppler flow meter that can detect flow directions. *Med. Ultrason.* **5**，28，1967.
  12. McLeod, F.D.: A directional Doppler flow meter. *Digest of the 7th International Conference on Mechanical and Biological Engineering*. Stockholm, p. 213—214, 1967.
  13. Olson, R.M.: Human carotid artery wall thickness, diameter, and blood flow by a non-invasive technique. *J. Appl. Physiol.* **37**, 955—960, 1974.
  14. Borodzinski, K., Filipezynski, I., Nowicki, A., Powalowski, T.: Quantitative transcutaneous measurements of blood flow in carotid artery by means of pulse and continuous wave Doppler methods. *Ultrasound Med. Biol.* **2**，189—193, 1976.
  15. Kossoff, G.: Combined B-mode and pulsed Doppler technique for quantitative measurement of blood flow in deeplying vessel. *Proc. the 3rd European Cong. Ult. Med. & Biol. Oct.* 1978.
  16. Hokanson, D.E., Mozersky, D.J. and Aumner, D.S., Standness, D.E.: A phase-locked echo-tracking system for recording arterial diameter changes *in vivo*. *J. Appl. Physiol.* **32**, 728—733, 1972.
  17. 古幡博，菅野亮一，古平国泰，青柳徹，松本博治，林純，吉村正蔵：血流速度の絶対値計測をめざした超音波ドブラ法，医用電子と生体工学，**17**，264—268，1978.
  18. 大屋厚夫：超音波ドブラ法と超音波カルディオグラフィ法の併用による非観血的心拍出量測定法，岡山医学会雑誌投稿中。
  19. Kaneko, Z., Kotani, H., Komuta, K. and Satomura, S.: Studies on peripheral circulation by ultrasonic blood rheograph. *Jpn. Circ. J.* **25**, 203—213, 1961.
  20. 小林幸雄：超音波血流計による2，3の循環器疾患に対する臨床的应用に関する研究。名医学誌，**93**，368—376，1971.
  21. 藤代健太郎，古平国泰，青柳徹，吉村正蔵，古幡博，菅野亮一，林純，松本博治：Development of the non-invasive and quantitative measurement system to measure carotid blood flow. *J. Cardiography* **10**，285—295，1980.
  22. Kaneko, Z., Shiraishi, J., Omizo, H., Inaka, H., Ueshima, T.: Analysis of ultrasonic blood rheogram by the sound spectrograph. *Jpn. Circ. J.* **34**，1035—1045，1970.
  23. 仁村泰治：Ultrasonic Doppler Techniques Applied to the Assessment of the Blood Flow. 脈管学，**18**，239—251，1978.
  24. 佐野文男：Assesment of peripheral blood flow in the extremities by a Doppler ultrasonic flow meter. 脈管学，**19**，831—835，1979.
  25. 草場昭：末梢動脈血行再建術の予後判定の指標としての血流測定の意義。脈管学，**13**，174，1973，
  26. Lassen, N.A., Lindbjerg, J. and Munck, O.: Measurement of blood flow through skeletal muscle by in-

- transmuscular injection of Xe-133. *Lancet* 1, 686—689, 1964.
27. 厚美利行：Xe-133クリアランス法による下肢前脛骨筋血流量測定成績。脈管学, 12, 115—119, 1972.
  28. 下村忠朗：慢性下肢動脈閉塞症における Xe-133組織クリアランス法による皮膚。筋血流量に関する研究。脈管学, 17, 715—726, 1977.
  29. 平井正文：下肢動脈閉塞性疾患における Xe-133 クリアランス法の臨床応用。核医学, 15, 671—677, 1978.
  30. Tønnsen, K.H.: Blood flow through muscle during rhythmic contraction measured by <sup>133</sup>Xenon. *Scand. J. Clin. Lab. Invest.* 16, 646—654, 1964.
  31. Clausen, J.P. and Lassen, N.A.: Muscle blood flow during exercise in normal man studied by the Xe-133 clearance method. *Cardiovasc. Res.* 5, 245—254, 1971.
  32. 阿部裕：方向指示型超音波ドブラ法。脈管学, 21, 2601—2610, 1972.
  33. 仁村泰治：方向指示型超音波ドブラ法による動脈血流パターン。心臓, 5, 1356—1366, 1973.

**Peripheral blood flow measured by a newly developed  
non-invasive and quantitative blood flow meter (QFM)  
and its clinical use.**

**The blood flow of peripheral arteries, and the change of  
flow after experimental replacement of a prosthesis**

**Koji NAKASONE**

**The Second Department of Surgery Okayama University Medical School**

**(Director: Prof. S. Teramoto)**

A newly developed non-invasive and quantitative blood flow meter (QFM) was used to measure blood flow in human peripheral arteries (common carotid artery, femoral artery, dorsal pedal artery), and to determine hemodynamic differences after replacement of the canine abdominal aorta with a prosthesis.

The results obtained were as follows:

1) Blood flow of the canine femoral artery by QFM correlated well with that obtained by an electromagnetic flow meter with a correlation coefficient ( $r$ ) of 0.94 ( $p < 0.001$ ) ( $y=1.05x-12.9$ ).

2) In normal subjects, blood flow of the common carotid, femoral and dorsal pedal arteries changed with age, namely, the blood flow of the common carotid artery decreased after the age of 40 with a statistically significant difference and that of the femoral artery after the age of 60.

3) The blood flow and velocity in the femoral artery and dorsal pedal arteries increased markedly with exercise.

4) The effect of the prosthetic valve in the mitral position on the aortic flow was determined in the common carotid artery. However, there was no significant difference.

5) Blood flow and velocity increased after the aorta was replaced with a prosthesis, although there was no significant difference.

It was concluded in the present study that non-invasiveness and the ability of QFM to detect fine changes in flow patterns would be an ideal tool for diagnosing and following up patients with vascular disease.