



Title	核磁気共鳴法による下肢動脈血行動態の評価-加齢による変化と下肢動脈閉塞性疾患における病的血行動態の特徴-
Author(s)	野村, 邦紀; 二谷, 立介;瀬戸, 光他
Citation	日本医学放射線学会雑誌. 1993, 53(11), p. 1313-1323
Version Type	VoR
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/15133">https://hdl.handle.net/11094/15133</a>
rights	
Note	

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

## 核磁気共鳴法による下肢動脈血行動態の評価 —加齢による変化と下肢動脈閉塞性疾患における病的血行動態の特徴—

富山医科薬科大学放射線科

野村 邦紀 二谷 立介 瀬戸 光  
亀井 哲也 柿下 正雄

(平成5年6月7日受付特別掲載)  
(平成5年9月2日最終原稿受付)

MR Evaluation of Common Femoral Arterial Flow: Age-related Changes and Characteristics in Obstructive Arterial Disease of Lower Extremities

Kuninori Nomura, Ryusuke Futatsuya, Hikaru Seto,  
Tetsuya Kamei and Masao Kakishita

Department of Radiology, Toyama Medical and Pharmaceutical University

---

Research Code No. : 508.9

---

Key words : MR imaging, Flow velocity, Femoral artery, ASO

---

Flow velocity measurements of the common femoral arteries in 60 lower extremities of 30 healthy subjects and 12 lower extremities of 7 patients with arteriosclerosis obliterans (ASO) were performed by means of magnetic resonance imaging with a use of presaturation bolus tracking (PBT) method. Our PBT method can provide both precise determination of flow velocity and evaluation of flow patterns within 30 minutes in the clinical setting.

In phantom study, MR flow velocity had good correlation with actual flow velocity ( $r=0.997$ ). 30 healthy volunteers were classified into three groups; group I (20-40 years), group II (41-60 years) and group III (61-80 years). Starting time of acceleration (STA) were shortened as the age progressed. Peak reverse velocity (PRV), maximum deceleration rate (MDR), peak forward velocity/mean velocity ratio (PFV/MV) and pulsatility index (PI) were significantly decreased in group III as compared to group I and group II. Although intraluminal flow profile showed almost uniform during acceleration time on MR images, flow profile became disproportioned and reverse flow was observed in the medial portion during deceleration time. These characteristic hemodynamics were recognized in all healthy subjects regardless to the different age group.

In ASO, STA was prolonged and PFV, PRV, Maximum acceleration rate, MDR, PFV/MV, PI, Vascular sectional area, flow volume were significantly decreased ( $p<0.001$ ) as compared to the control healthy group III. As the result we obtained marked characteristics such as flattening of curves and disappearance of reverse flow in MR flow waveform. On MR images, disproportion of intraluminal flow profile, decreased flow velocities during acceleration time and disappearance of reverse flow (11 of 12 extremities) during deceleration time were observed.

## はじめに

下肢閉塞性動脈硬化症(ASO)は高齢者における運動制限や寝たきりの主要な原因の一つである。近年インターベンショナル・ラジオロジーの手技が発達し、外科的手術を必要とせずに治療することが可能となり<sup>1)-2)</sup>、本疾患の早期発見の重要性が増している。本疾患の非侵襲的な診断法として、現在はカラードップラ超音波断層法(USD法)が広く用いられている<sup>3)</sup>。USD法は比較的簡便に下肢血管の形態、血流を評価できる利点があるが、操作に熟練を要し、また音波投射角度の補正や被験者のヘマトクリット値により測定値が変動する欠点がある<sup>4)-6)</sup>。

近年、非侵襲的な血管系描出、血流速度測定法<sup>7)-11)</sup>として、MRアンジオグラフィ<sup>12)</sup>、Pre-saturation bolus tracking法(PBT法)<sup>13)-17)</sup>、Phase encoding法<sup>18)-21)</sup>などの磁気共鳴撮像法を応用した手法が開発されてきた。この中でPBT法は血管の描出と同時に血流速度測定が可能であり、また原理的に被験者や撮像装置などの測定条件の影響を受けにくい利点を有している。本研究ではファントムを使用してPBT法の血流測定精度を検討した後、臨床例に適用し、健康人の加齢による下肢血行動態の変化を確定するとともに、ASO患者における本法の臨床的意義を検討した。

## 対象

## 1. 年齢階層別健康人

血圧が正常で心血管系に異常を認めず、またankle pressure index(API)が正常(1.00以上)であった健康人を年齢別にI群(20~40歳)15例30肢、II群(41~60歳)8例16肢、III群(61~80歳)7例14肢に分類して検討した。

## 2. ASO患者

ASO患者(57~78歳)について7名の患肢12肢を測定した(Table 1)。ASO患者の重症度はFontaine分類のII度あるいはIII度であった。ASO群と健康人のIII群(61~80歳)7例14肢とを対比した。

以上の健康人、およびASO患者について安静時の総大腿動脈血流をPBT法により測定した。

## 測定方法

## 1. PBT測定法

MR診断装置はSIMENS社製MAGNETOM H15(1.5T)を用いた。FLASH(fast low angle shot)法を基本としたシーケンスを使用し、心電図同期の上、480~920/11/2(TR/TE/excitation)、matrix size 256×128、FOV 25cm、スライス厚5mm、スライス数3枚とした。presaturation bolusの厚みは5mmとし、心電図のR波の0~600msec後に印加し、心周期の40msec

Table 1 Summary of patients with ASO

Patient No.	API		Fontaine class	R Extremity		L Extremity	
	R	L		central stenosis	peripheral stenosis	central stenosis	peripheral stenosis
1	0.43	0.76	II	EIA 75%>	(-)	EIA 50%	SFA 75%>, 50%
2	0.40	0.37	III	EIA 75%>	(-)	EIA 75%>	SFA 75%>
3	0.38	1.18	II	CIA 100%	PA 100%	(-)	(-)
4	0.34	0.46	II	CIA 100%	(-)	EIA 75%	(-)
5	1.11	0.51	II	(-)	PA 100%	CIA-EIA 100%	(-)
6	0.61	0.49	II	CIA 95%	(-)	CIA-EIA 100%	(-)
7	0.25	0.41	III	EIA 99%	SFA 100%	EIA 100%	PA 100%

Abbreviation : CIA ; common iliac artery

EIA ; external iliac artery

SFA ; superficial femoral artery

PA ; popliteal artery

毎の bolus profile を撮影した。また bolus の後縁の最新部と presaturation band 後縁との距離を bolus 移動とした。

## 2. 血管ファントムを用いたメスシリンダー法と PBT 法による測定値の比較評価

自作血流モデルファントムを用いて基礎実験を行った。

内径 10 mm、外径 13 mm のシリコンチューブの血管ファントムに 10 cm/sec から 140 cm/sec までの 14 種類の定常流を流し、メスシリンダー法、PBT 法により速度を測定した。メスシリンダー法では単位時間にチューブより流れれる水の量とチューブ内径より平均流速を算出しこれを流速とした。

## 3. 健康人および ASO 患者の PBT 法による血流測定

最低 10 分間安静臥床後、不整脈その他心疾患の所見がないことを心電図により確認し、両上肢血圧を測定した。またドップラ血流計（ハントリーメディカル社製ミニドプレックス D 500）を使用し 12 cm 幅の cuff を装着して上肢収縮期圧と足背動脈収縮期圧および後脛骨動脈収縮期圧を測定した。足背動脈と後脛骨動脈とで得られた収縮期血圧のいずれか高い方と上肢収縮期圧との比を API とした<sup>22)</sup>。

上記測定の後に両側総大腿動脈の PBT 法による MR 血流測定を行った。

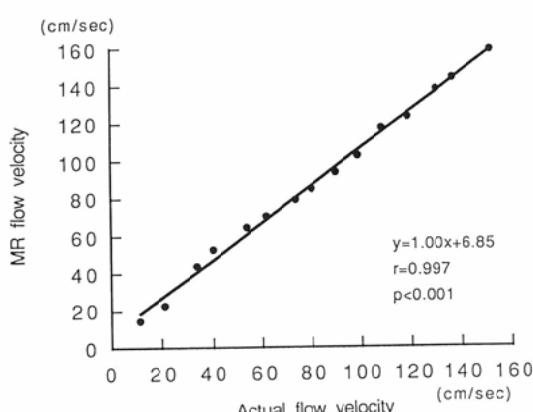


Fig. 1 Relation between actual flow velocity and MR flow velocity

MR 測定値より流速変化曲線を描き Fig. 2 に示すような 10 項目および MR 像より 2 項目の計 12 項目の指標を計測した。なお心時相における血管の動きが各指標の精度を劣化させることが考えられたが、シネ動画表示で今回の測定部位の動きは少なく、この補正は行わなかった。

1. 最高順行流速：Peak foward velocity [PFV] (cm/sec)；心取縮により駆出された動脈血が総大腿動脈を通過する最高速度。

2. 最高逆行流速：Peak reverse velocity [PRV] (cm/sec)；心取縮が終わり順行方向への圧がなくなった時点より生ずる逆行血流の最高速度。

3. 平均流速：mean velocity (cm/sec)；全 RR 間隔の平均流速。

4. 加速開始時間：Starting time of acceleration (sec)；心電図 R 波から順行血流の加速開始までの時間。

5. 加速時間：Acceleration time (sec)；加速開始より順行最高速度までに要する時間。

6. 減速時間：deceleration time (sec)；順行最高速度より速度ゼロあるいは定速度になるまでに要する時間。

7. 最大加速度率：Max. acceleration rate (cm/sec<sup>2</sup>)；速度変化曲線上の最大加速勾配。

8. 最大減速度率：Max. deceleration rate (cm/sec<sup>2</sup>)；速度変化曲線上の最大減速勾配。

9. 最高順行流速・平均流速比：Peak foward v./mean v. ratio；最高順行流速(a)を平均流速(c)で除した値。

10. 脈波形因子：Pulsatility index；流速波形の最高順行流速(a)と最高逆行流速(b)の和を平均速度(c)で除した値。

また MR 像より血管断面積を求め、また平均血流量との積より血流量を計算し、次の 2 項目の指標についても検討した。

11. 血管断面積：Vascular sectional area (cm<sup>2</sup>)；位置決め用の FISP (fast imaging with steady precession) 画像上の血管内の高信号部を血管内腔とし、角度補正して血管断面積とした。

12. 血流量：Flow volume (ml/min)；血管断面積に平均血流速度を乗じて、分単位の流量を求めた。

統計処理は、平均値、標準偏差を算出し、また unpaired t test により有意差検定を行い、危険率 5%以下を有意差ありと判定した。

## 結 果

### 1. 血管ファントムを用いたメスシリンダー法と PBT 法による測定値の比較評価

Fig. 1 にメスシリンダー法による速度と PBT 法による速度との関係を示す。回帰式  $Y = 1.00X + 6.85$ ,  $r = 0.997$  ( $p < 0.001$ ) と極めて良好な相関を示した。

### 2. 健康人における大腿動脈 MR 像

Fig. 3 に健康人（23 歳、男性）の各心時相の MR 画像を示す。加速時間内では帯状低信号の bolus の形態は、加速開始前とほぼ同一でそのまま平行移動したように見える。減速時間にはいると血管の内側と外側に速度差が生じ、さらに内側で逆行血流を認める。

Fig. 4 に本例の総大腿動脈の内側と外側の速度変化曲線を示すが、このような内側に限局した逆行血流のピークは、年齢に関係なく健康人全例に認められた。

### 3. 健康人における年齢階層別 MR 流速波形分析

Table 2 に健康人の年齢階層別の、各速度指標の平均値と標準偏差を示す。

#### 1. 最高順行流速：平均値および標準偏差は、

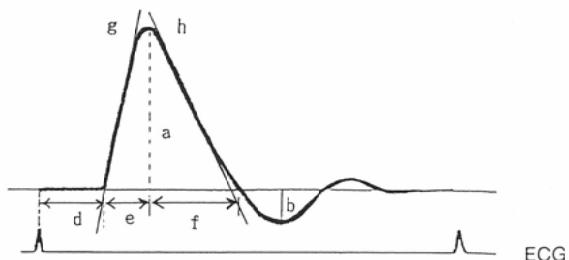


Fig. 2 Indices of MR flow waveform

a : peak forward velocity (cm/sec)

b : peak reverse velocity (cm/sec)

c : mean velocity (cm/sec)

d : starting time of acceleration (sec)

e : acceleration time (sec)

f : deceleration time (sec)

g : maximum acceleration rate (cm/sec<sup>2</sup>)

h : maximum deceleration rate (cm/sec<sup>2</sup>)

i : peak forward v./mean v. ratio = a/c

j : Pulsatility index = (a+b)/c

Vascular sectional area (cm<sup>2</sup>) and Flow volume (ml/min) are calculated from MR image.

I 群、II 群、III 群でそれぞれ  $104.2 \pm 25.6$ ,  $110.7 \pm 24.0$ ,  $85.0 \pm 31.7$  (cm/sec) であった。

I 群および II 群と III 群との間に危険率 5%以下で有意差が見られ、III 群で有意に減少していた。

2. 最高逆行流速：平均値および標準偏差は、I 群、II 群、III 群でそれぞれ  $-33.5 \pm 11.5$ ,  $-40.6 \pm 15.9$ ,  $-19.9 \pm 7.9$  (cm/sec) で、I, II 群と III 群との間に危険率 1%以下で有意差が見られ、III 群で絶対値は有意に減少していた。

3. 平均流速：平均値および標準偏差は、I 群、II 群、III 群でそれぞれ  $15.5 \pm 6.8$ ,  $15.9 \pm 5.5$ ,

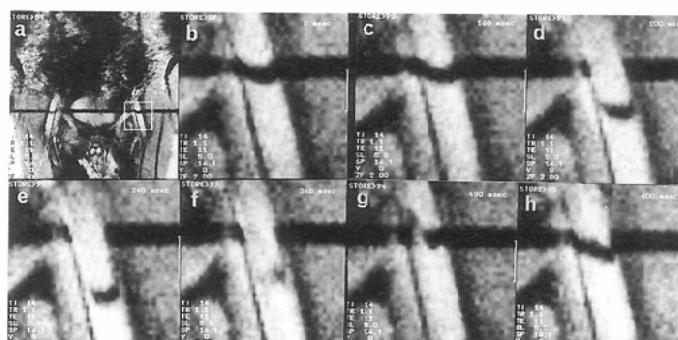


Fig. 3 MR images of left common femoral artery in a healthy subject :

Although intraluminal flow profile showed almost uniform during acceleration time (d, e), flow profile became disproportionate (f) and reverse flow was observed in the medial portion (g) during deceleration time.

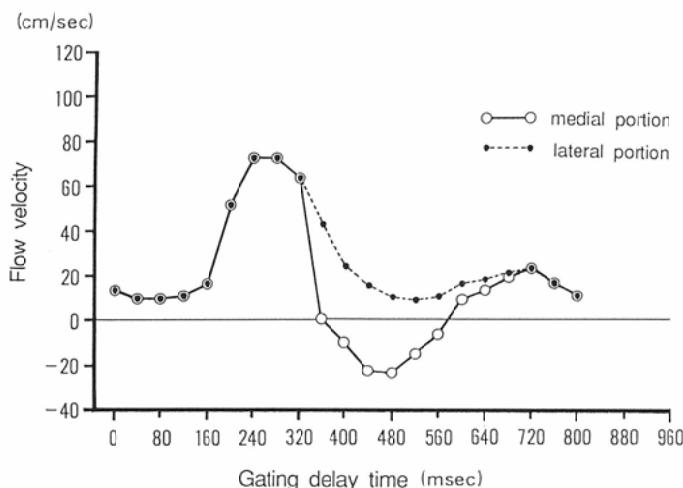


Fig. 4 Relation between flow velocity and gating delay time in a healthy subject measured by MR flow waveform

$16.5 \pm 8.2$  (cm/sec) で、各群間に有意差は見られなかった。

4. 加速開始時間：I 群、II 群、III 群の平均値および標準偏差はそれぞれ  $136 \pm 16$ ,  $118 \pm 14$ ,  $97 \pm 14$  (msec) で加齢とともに短縮し、3 群相互間に危険率 1% 以下で有意差が見られた。

5. 加速時間：I 群、II 群、III 群の平均値および標準偏差はそれぞれ  $112 \pm 19$ ,  $107 \pm 16$ ,  $102 \pm 31$  (msec) で、各群間に有意差は見られなかった。

6. 減速時間：I 群、II 群、III 群の平均値および標準偏差はそれぞれ  $141 \pm 54$ ,  $117 \pm 26$ ,  $154 \pm 42$  (msec) で、I 群と II 群との間に危険率 5% 以下で、また II 群と III 群との間にも危険率 1% 以下で有意差がみられたが、加齢に伴う一定の傾向は見られなかった。

7. 最大加速率：I 群、II 群、III 群の平均値および標準偏差はそれぞれ  $1070 \pm 248$ ,  $1181 \pm 303$ ,  $1048 \pm 405$  ( $\text{cm/sec}^2$ ) で、I 群、II 群、III 群間に有意差は見られなかった。

Table 2 Indices of common femoral arterial flow in each healthy group (Mean  $\pm$  SD)

	group I (n=30)	group II (n=16)	group III (n=14)	
Peak foward v. (cm/sec)	$104.2 \pm 25.6$	$110.7 \pm 24.0$	$85.0 \pm 31.7^{\text{I}}$	※
Peak reverse v. (cm/sec)**	$-33.5 \pm 11.5$	$-40.6 \pm 15.9$	$-19.9 \pm 7.9^{\text{II}}$	※
Mean v. (cm/sec)	$15.5 \pm 6.8$	$15.9 \pm 5.5$	$16.5 \pm 8.2$	
Starting time of ACC (sec)***	$0.136 \pm 0.016$	$0.118 \pm 0.014^{\text{II}}$	$0.097 \pm 0.014^{\text{II}}$	※ ※
Acceleration time (sec)	$0.112 \pm 0.019$	$0.107 \pm 0.016$	$0.102 \pm 0.031$	
Deceleration time (sec)	$0.141 \pm 0.054$	$0.117 \pm 0.026^{\text{I}}$	$0.154 \pm 0.042$	※ ※
max ACC rate ( $\text{cm/sec}^2$ )	$1070 \pm 248$	$1181 \pm 303$	$1048 \pm 405$	
max DEC rate ( $\text{cm/sec}^2$ )***	$-1196 \pm 626$	$-1040 \pm 576$	$-591 \pm 314^{\text{II}}$	※
Peak foward v./Mean v.**	$7.93 \pm 3.44$	$7.38 \pm 1.94$	$5.82 \pm 1.91^{\text{I}}$	※
Pulsatility index**	$9.90 \pm 5.25$	$8.96 \pm 3.31$	$6.76 \pm 3.23^{\text{I}}$	
Vascular sectional area ( $\text{cm}^2$ )***	$0.84 \pm 0.15$	$0.83 \pm 0.13$	$1.14 \pm 0.26^{\text{II}}$	※ ※
Flow volume (ml/min)	$923 \pm 435$	$956 \pm 381$	$1206 \pm 521$	

Significance between each index and aging <sup>I</sup>p < 0.05 <sup>II</sup>p < 0.01 <sup>III</sup>p < 0.001

Significance of between group I and group II <sup>I</sup>p < 0.05 <sup>II</sup>p < 0.01

Significance of between group I and group III <sup>I</sup>p < 0.05 <sup>II</sup>p < 0.01

Significance of between group II and group III <sup>I</sup>p < 0.05 <sup>II</sup>p < 0.01

8. 最大減速率：I群，II群，III群の平均値および標準偏差はそれぞれ $-1196 \pm 626$ ， $-1040 \pm 576$ ， $-591 \pm 314$  (cm/sec<sup>2</sup>) で加齢とともに減少し，I群とIII群との間に危険率1%以下で，II群とIII群との間に危険率5%以下で有意差が見られ，III群で絶対値は有意に減少していた。

9. 最高順行流速・平均流速比：I群，II群，III群の平均値および標準偏差はそれぞれ7.93±3.44，7.38±1.94，5.82±1.91と加齢とともに減少し，I群およびII群とIII群との間に危険率5%以下で有意差が見られ，III群で値は有意に減少していた。

10. 脈波形因子：I群，II群，III群の平均値および標準偏差はそれぞれ9.90±5.25，8.96±3.31，6.76±3.23と加齢とともに減少し，I群とIII群との間に危険率5%以下で有意差が見られた。

11. 血管断面積：I群，II群，III群の平均値および標準偏差はそれぞれ0.84±0.15，0.83±0.13，1.14±0.26で，I，II群とIII群との間に危険率1%以下で有意差が見られた。

12. 血流量：I群，II群，III群の平均値および標準偏差はそれぞれ923±435，956±381，1206±521で，I群，II群，III群間に有意差は見られなかった。

#### 4. ASO患者における大腿動脈MR像

次にASO患者の各心時相のMR像(Fig. 5)と総大腿動脈速度変化曲線(Fig. 6)を呈示す

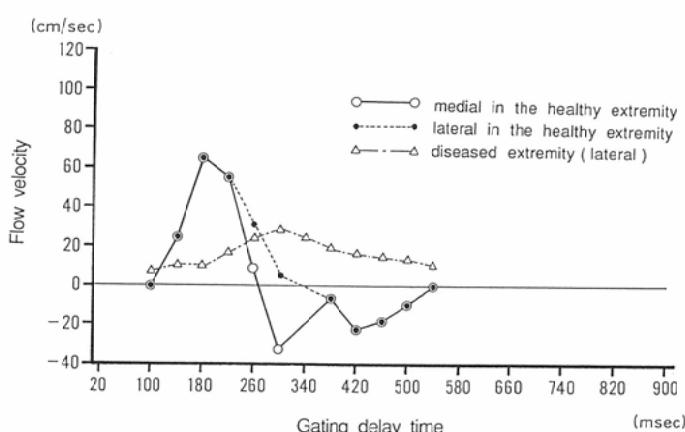


Fig. 5 Relation between flow velocity and gating delay time in a patient with ASO measured by MR flow waveform

る。本例は74歳、男性で左総腸骨動脈～外腸骨動脈に閉塞があり、これより末梢および右肢には狭窄あるいは閉塞のない症例である。

Fig. 6(A)は心電図R波より180 msec後の像であるが、対側右大腿動脈では直線状のピストン流(plug flow)パターンのbolusが基線より13 mm(速度に換算して76.5 cm/sec)移動しているのに対して、病側左大腿動脈では外側に限局した矢頭状の3.1 mm(18.2 cm/sec)の移動を認めるに過ぎない。

Fig. 6(B)はR波より260 msec後の像で、対側右肢で内側と外側の移動距離がそれぞれ外側で6.2 mm(36.5 cm/sec)，内側で1.8 mm(10.6 cm/sec)と差が生じた時相である。病側左肢では外側に限局した4.9 mm(28.8 cm/sec)の矢頭状の血流を認めるだけである。

Fig. 6(C)はR波より460 msec後の像である。対側右肢では内側に3.6 mm(21.2 cm/sec)の逆高血流を認める。しかし病側左肢では外側に限局した3.1 mm(18.2 cm/sec)の順行血流を認めるだけである。

Fig. 6(D)はR波より540 msec後の像である。対側右肢ではbolusの移動距離はゼロである。病側左肢では依然として外側に限局した2.2 mm(12.9 cm/sec)の順行血流を認める。

以上、病側である左肢では、心周期を通して外側に限局した小さな順行性血流が見られた。

#### 5. ASO患者におけるMR流速波形分析

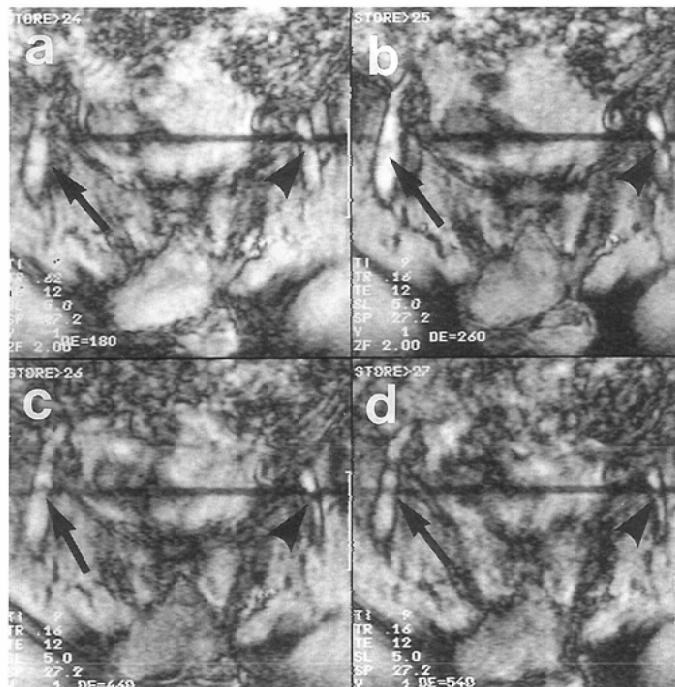


Fig. 6 MR images of bilateral common femoral arteries in a patient with ASO:

In lt. common femoral artery which is diseased side, disproportion of intraluminal flow profile (arrow head), decreased flow velocities and disappearance of reverse flow were observed. In rt. side, plug flow pattern during acceleration time and reverse flow in the medial portion at deceleration time were observed (long arrow).

Table 3 に ASO 患者 (7名 12 肢) と 健康人 III 群 (7名 14 肢) で各速度指標の平均値と標準偏差の比較を示す。

1. 最高順行流速：平均値および標準偏差は、ASO 患者、健康人で、それぞれ  $41.6 \pm 15.5$ ,  $88.7 \pm 30.9$  (cm/sec) であり、ASO 患者の流速は有意に低かった ( $p < 0.001$ )。

2. 最高逆行流速：ASO 患者では 1 例を除いて逆行性ピークは認められなかった。これを流速をゼロと計算すると、ASO 患者と健康人の平均値および標準偏差はそれぞれ、 $-1.5 \pm 5.3$ ,  $-23.4 \pm 11.3$  (cm/sec) であり、ASO 患者の流速の絶対値は有意に低かった ( $p < 0.001$ )。

3. 平均流速：平均値および標準偏差は、ASO 患者、健康人でそれぞれ  $16.9 \pm 6.6$ ,  $16.5 \pm 7.7$  (cm/sec) であり、両群間に有意差は認められ

なかった。

4. 加速開始時間：平均値および標準偏差は ASO 患者、健康人でそれぞれ  $167 \pm 43$ ,  $105 \pm 20$  (msec) であり、ASO 患者では健康人と比較して有意に遅延していた ( $p < 0.01$ )。

また、測定部位より中枢側に完全閉塞のある病肢の加速開始時間は対側肢と比較すると明らかに延長していた。また病肢の狭窄の程度が重いほど加速開始時間が延長していた。

5. 加速時間：平均値および標準偏差は ASO 患者、健康人でそれぞれ  $116 \pm 40$ ,  $107 \pm 27$  (msec) であり、両群間に有意差を認めなかつた。

6. 減速時間：ASO 患者ではあきらかな減速終了時間を同定できなかった。健康人での平均値および標準偏差はそれぞれ  $142 \pm 42$  (msec) であ

Table 3 Indices of common femoral arterial flow in patients with ASO and healthy group III (Mean±SD)

	ASO (n=12)	group III (n=14)
Peak forward v. (cm/sec)	41.6±15.5***	85.0±31.7
Peak reverse v. (cm/sec)	9.0±11.0***	-19.9±7.9
Mean velocity (cm/sec)	17.0±6.6	16.5±8.2
Starting time of ACC (sec)	167±43**	0.097±0.014
Acceleration time (sec)	116±40	0.102±0.031
Deceleration time (sec)	N. A.	0.154±0.042
Max ACC rate (cm/sec <sup>2</sup> )	325±253***	1048±405
Max DEC rate (cm/sec <sup>2</sup> )	-336±353*	-591±314
PFV/MV	2.58±1.04***	5.82±1.91
Pulsatility Index	2.12±1.69***	6.76±3.23
Vascular sectional area (cm <sup>2</sup> )	0.53±0.38***	1.14±0.26
Flow volume (ml/min)	487±309**	1206±521

Significance of between ASO and group III \*p<0.05 \*\*p<0.01 \*\*\*p<0.001

N. A.: not assessed

った。

7. 最大加速度率：平均値および標準偏差は ASO 患者、健康人でそれぞれ 325±265, 1021±377 (cm/sec<sup>2</sup>) であり、ASO 患者では有意に減少した (p<0.001)。

8. 最大減速度率：平均値および標準偏差は ASO 患者、健康人でそれぞれ 336±353, 601±293 (cm/sec<sup>2</sup>) であり、ASO 患者では有意に減少した (p<0.05)。

9. 順行最高流速・平均流速比：平均値および標準偏差は ASO 患者、健康人でそれぞれ 2.58±1.04, 5.94±1.70 であり、ASO 患者では有意に減少した (p<0.001)。

10. 脈波形因子：平均値および標準偏差は ASO 患者、健康人でそれぞれ 2.12±1.69, 6.95±2.85 であり、ASO 患者では有意に減少した (p<0.001)。

11. 血管断面積：平均値および標準偏差は ASO 患者、健康人でそれぞれ 0.53±0.39, 1.06±0.27 であり、ASO 患者では有意に減少した (p<0.001)。

12. 血流量：平均値および標準偏差は ASO 患者、健康人でそれぞれ 487±309, 1126±483 であり、ASO 患者では有意に減少した (p<0.001)。

## 考 察

### 1. 健康人の加齢による変化

加速開始時間は、I 群に比し II 群すでに短縮し、III 群ではさらに II 群より短縮していた。加速開始時間は心電図の R 波から流速波形の順行血流の立ち上がりまでの時間であり、心臓から測定部位（今回は総大腿動脈）まで脈波が伝わるまでの時間と考えられる<sup>23)-24)</sup>。この変化、すなわち伝達速度の上昇の原因としては、動脈壁老化の進行による壁の compliance の低下<sup>25)-26)</sup>が最も大きな要因と考えられる。加速開始時間は今回検討したうち、唯一 II 群で有意の変化が現れ、III 群で変化が強くなった指標であり、動脈壁老化の最も鋭敏な指標と考えられる。

最高逆行流速、最大減速度率、最高順行流速/平均流速比、脈波形因子などの順行性、逆行性ピークの振幅に関連する指標は、いずれも高齢群 III 群において、それ以下の年齢の I, II 群に比べると減少していた。この中で最も減少のはっきりしていたのは最高逆行流速であり、危険率 1%以下で有意差が見られた。加速時間、減速時間には一定の傾向が見られなかったが、PBT 法の時間分解能が不十分なためとも考えられた。

今回施行した PBT 法では血管内 bolus 形態の観察により血管内の血流速度パターンが評価可能である。この結果、総大腿動脈血流は加速期には

血管内速度分布がほぼ均等なピストン流 (plug flow) パターンを呈し、減速期に入ると内外血流差が生じ、血管内側に限局して逆行性ピークが出現することが判明した。これは頸動脈分岐部等で、渦流の影響により血管内腔外側に出現する逆行性血流と異なる所見である。上記のように最高逆行流速は総大腿動脈の加齢変化を表す重要な指標の一つであり、これを正確に評価できるのは PBT 法の利点である。ASO 患者での presaturation bolus は鮮明さが劣化しているが、これは血流速度成分によるボクセル内での phase dispersion により presaturation bolus そのものの低輝度信号像が維持されないためと思われる。

逆行性ピークが総大腿動脈の内側に出現した理由は、総大腿動脈より分岐する浅大腿動脈が内側方に位置するためで、同血管に逆行性血流が存在し他の主要分岐である深大腿動脈に存在しないことは一部症例の連続波ドップラ検査にて確認した。Taylor らは超音波ドップラ検査により総腸骨動脈、外腸骨動脈に見られる逆行血流について記述しており、その成因として下肢において末梢血管抵抗が高いことを上げている<sup>27)</sup>。すなわち、中枢動脈に生じた駆出圧は末梢血管抵抗が高いため動脈壁を広げるようにも強く働き、動脈壁の弾性があるとこの圧を吸収し、中枢側の駆出圧が減少した時点で逆行血流を生ずる。加齢により逆行血流ピークが小さくなった原因として、駆出圧の低下と下肢動脈壁の弾性低下が考えられる。

レオロジーから見た場合、動脈硬化の局在部位はヒトの観察結果によればおおむね低ずり応力部とされるところであり、血管分岐部の側壁や彎曲の内弯側とされているが、動物実験や高脂血症患者ではむしろ高ずり応力領域に好発するという矛盾する事実がある。今回我々が得た結果によれば、総大腿動脈血管腔内側は内弯側ではあるが逆行血流の動きからみれば高ずり応力を受けていると考えられ、上記の矛盾の一部を解く可能性があると考えている。

血管断面積も高齢群III群においてそれ以下の年齢の I, II 群に比べると危険率 1% 以下で有意に増加していた。III群の身長、体重は I, II 群に比

べて有意差はなく、動脈硬化の進行による血管壁の変化が推測される。

## 2. ASO 患者における血行動態の特徴

ASO 患者では高齢健康人群に比して最高減速率、最高逆行流速、最高順行流速/平均流速比、脈波形因子は有意に減少した。これらの指標は健康人においていずれも加齢による減少を認めたが、ASO 患者では高齢健康人群よりさらに減少していた。

中でも最高逆行流速は ASO 患者では 1 例を除いて消失していた。この原因として加齢による変化と同様な動脈壁の硬化性変化による末梢動脈の弾性低下に加えて、中枢側を含めた動脈狭窄、閉塞によって rebound を生むに十分な血液量が加速期に得られないこと、あるいは中枢側への反転圧が阻害されることなどが考えられた。また、心機能低下による血液駆出の障害も考えられるが、明らかな心不全徵候を呈する症例は含まれていない。

また高齢健康人では見られず ASO 患者で初めて見られた変化として最高順行流速、最高加速率、血流量の有意な減少が認められた。これらの変化は病肢の狭窄による直接的な血行障害、あるいは閉塞がある場合の側副路からの血流が不十分であることに起因していると思われる。

一方、加速開始時間は有意に遅延していた。加齢による変化では加速開始時間は加齢とともに短縮していたが、この指標は ASO 患者では逆に遅延していた。加速開始時間は脈波伝達の速度を表しており、測定部位である総大腿動脈までに有意狭窄がある場合狭窄が脈波伝達に影響したと考えられる。また総大腿動脈までに完全閉塞がある場合、脈波は直接には総大腿動脈に伝わらず側副路を迂回して伝わることになり、加速開始時間の遅延はより顕著になったものと思われた。

血管断面積は有意に減少した。この指標は健康人の場合加齢により増加していたが、ASO 患者では高齢健康人群より明らかに減少していた。測定部位は血管造影上の狭窄病変とは一致しておらず、病変部以外の動脈にも狭窄性の変化が進行していることが示唆された。

平均流速、加速時間では ASO 患者と健康人との間に有意な差異はなかった。

以上 ASO 患者の総大腿動脈における病的血行動態に有意であったのは、最高順行流速、最高加速度、最高減速率、最高順行流速・平均流速比、脈波形因子、血管断面図、血流量の減少 ( $p < 0.001$ )、逆行血流の消失、加速開始時間の延長 ( $p < 0.01$ ) であった。なかでも高齢健康人には見られず ASO 患者に特徴的であったのは、最高順行流速、最高加速度、血流量、血管断面積の減少、逆行血流の消失、加速開始時間の延長であった。

ASO では間欠跛行などの表立った臨床症状のない Fontaine I 度の患者は正確に診断把握しきれない現状にある。さらに ASO 予備軍とでも言うべき高脂血症患者、高血圧患者などに対するスクリーニングの意義も含めて、ASO の早期発見はますます重要である。このような状況下において、PBT 法を適用することによって血行動態悪化の初期像を鋭敏に捉えることが肝要であると思われる。今回の検討で得られた結果のうち最高逆行流速の絶対値の減少あるいは消失、加速開始時間の延長が ASO のスクリーニングの良い指標になるとを考えている。

### 結 語

1. 血管ファントム実験において、PBT 法による流速測定は、メスシリンダー法による実測値との比較において、 $r=0.997$  と良好な相関を示した。

2. 健康人に対する測定では、総大腿動脈における血管内流速分布は、加速時ではほぼ均等であるが、減速時では不均等を生じ内側寄りに逆行血流を認めた。

3. I 群に比較して II 群で加速開始時間が短縮し、III 群ではその変化が強くなるとともに、最大減速率、最高逆行流速、最高順行流速/平均流速比、脈波形因子などの減少も認めた。

4. ASO 患者では、心周期を通して血管内に局限した小さな順行性血流が見られた。

5. ASO 患者では、加速開始時間が延長し、最

高逆行流速、最大減速率、最高順行流速/平均流速比、脈波形因子などが、対照高齢健康人 (III 群) に比較して、さらに格段の差をもって減少し、加えて最高順行流速、最大加速度、血管断面積、血流量が有意に減少しているのを認めた。その結果流速変化曲線が平坦化し、逆行血流相が消失するという極めて特徴ある所見を認めた。

6. PBT 法の流速波形は、時間分解能はやや低いが、MR 画像上において血管内に偏在して出現する逆行性血流や ASO 病肢に局在する順行性血流の形態と速度を両肢同時に鋭敏に観察評価できる点において優れていた。

### 謝 辞

本論文の要旨の一部は第 52 回日本医学放射線学会総会にて発表した。稿を終えるに臨み、研究にあたり御助力と御助言を戴きました富山医科薬科大学外科学第一教室の山本恵一教授、横川雅康助手をはじめとする血管外科グループの皆様に厚く御礼申し上げます。プログラム作製など協力いただいたシーメンス旭メディック㈱の松浦元、滝沢修両氏に感謝の意を表します。

### 文 献

- 1) 古寺研一、石飛幸三、平松京一：腸骨動脈・大腿動脈狭窄に対する PTA—アプローチの方法別成功率について—、日本医放会誌、45 : 1309-1312, 1985
- 2) Colapinto RF, Stronell RD, Johnston WK : Transluminal angioplasty of complete iliac obstruction. AJR 135 : 859-862, 1986
- 3) 尾本良三、カラートラスリアルタイムドプラ断層心エコー図法 改訂第 2 判, 119-126, 1987, 診断と治療社
- 4) Taylor KJW. Doppler US Part I. Basic principles, instrumentation, and pitfalls. Radiology 174 : 297-307, 1990
- 5) Johnston KW, Maruzzo BC, Cobbold RS. Errors and artifacts of doppler flow-meters and their solution, Arch-Surg 112 : 1335-42, 1987
- 6) 河越卓司、梶山梧朗、坪倉篤雄：血液ヘマトクリット値の変化と超音波ドプラによる平均流速測定：流路モデルを用いた基礎的検討。Jpn J Med Ultrasonics 18 : 232-237, 1991
- 7) Suryan G. Nuclear resonance in flowing liquids. Proc. Ind. Acad. Sci., Section A 33 : 107-111, 1951
- 8) Singer JR. Blood-flow rates by NMR measurement. Science 130 : 1652-1653, 1959
- 9) Hansen G, Crooks LE, Davis P, et al. In vivo imaging of the rat anatomy with nuclear mag-

- netic resonance. Radiology 136:695-700, 1980
- 10) Singer JR. Nuclear magnetic resonance blood flow measurement. *Cardiovasc Intervent Radiol* 8: 251-159, 1986
- 11) 牧壯, 滝沢修: 基礎的研究の進歩 MRIによる血流情報, 臨床成人病 21: 419-431, 1991
- 12) Edelman RR, Mattle HP, Atkinson DJ, et al. MR Angiography AJR 154: 937-946, 1990
- 13) Edelman RR, Wedeen VJ, et al. Multiphasic MR imaging: a new method for direct imaging of pulsatile CSF flow. Radiology 161: 779-783, 1986
- 14) Hennig J, Muri M, Brunner P, et al. Quantitative flow measurement with the fast Fourier flow technique. Radiology 166: 237-240, 1988
- 15) Edelman RR, Mattle HP, et al. Quantification of blood flow with dynamic MR imaging and presaturation bolus tracking. Radiology 171: 551-556, 1989
- 16) 中島 智, 丸山敏文, 松浦 元, 他: Presaturation 法と cine MRI を用いた髄液拍動流の観察—第1報—, CT 研究 12: 277-286, 1990
- 17) 中島 智, 朱田精宏, 出口 之, 他: Presaturation 法と cine MRI を用いた髄液拍動流の観察(第2報)—髄液拍動流による成人脳室拡大病態の分類—CT 研究 13: 609-616, 1991
- 18) Bryant DJ, Payne JA, Firmin DN, et al.: Measurement of flow with NMR imaging using a gradient pulse and phase difference technique. J-Comput-Assist-Tomogr 8: 588-593, 1984
- 19) Moran PR, Moran RA, Karstaedt N: Verifica-
- tion and evaluation of internal flow and motion; true magnetic resonance imaging by the phase gradient modulationmethod. Radiology 154: 433-441, 1985
- 20) Maier SE, Meier D. Human abdominal aorta: comparative measurements of blood flow with MR imaging and multigated Doppler US. Radiology 171: 487-492, 1989
- 21) Enzmann DR, Pelc NJ. Normal flow patterns of intracranial and spinal cerebrospinal fluid defined with phasecontrast cine MR imaging. Radiology 178: 467-474, 1991
- 22) 白井由行: 超音波ドップラー法による下肢閉塞性動脈疾患の血行動態に関する研究, 脈管学 24: 469-478, 1984
- 23) 長谷川元治: ヒト大動脈脈波速度に関する基礎的研究, 慎医誌 85: 742-760, 1970
- 24) Kelly R, Hayward C, Avolio A: Noninvasive determination of age-related changes in the human arterial pulse. Circuration 80: 1652-1659, 1989
- 25) 川崎 健. 硬化家児大動脈の機能と構築——脈波速度, 局部容積弾性率及び中膜弾性線維エラスチンについて——. 慎医誌 90: 1-22, 1975
- 26) 木下重博, 八木普一. 超音波変位計による頸動脈弹性特性の測定. 医用電子と生体工学, 特別号 1975: 409-410
- 27) Taylor KJW. Blood flow in deep abdominal and pelvic vessels: ultrasonic pulsed-Doppler analysis. Radiology 154: 487-493, 1985