

# トランジットタイム血流計による冠動脈バイパスグラフト血流分析

高味 良行, 田嶋 一喜

トランジットタイム血流計(TTFM)による冠動脈バイパス(CABG)グラフト術中評価は、簡便で再現性が高いことから普及している。われわれは、TTFMの血流量とCABGグラフト吻合部狭窄との関係、CABGグラフトの良否を判断するTTFMの指標について研究してきた。さらにTTFMを利用して大動脈バルーンパンピングのCABGグラフト血流への影響、右胃大網動脈グラフトの血流特性についても研究してきた。本論文では、これらの知見を中心に、CABGグラフト血流のTTFM分析についてのこれまでの研究成果を概説した。そのことにより、グラフト血流が血行動態・冠動脈の血管抵抗・灌流域のviability・グラフト径・グラフト形式など様々な要因により影響されることを考慮した上で、TTFMによるグラフト血流分析が冠循環の病態生理を科学するよいツールであることを強調した。

KEY WORDS: coronary artery bypass grafting, graft flow, transit-time flow measurement

## I. はじめに

冠動脈バイパス術(CABG)において吻合の質・血行再建の完全性は、周術期・遠隔期の臨床成績に直結する<sup>1,2)</sup>。術中グラフト吻合不良は、グラフト数の3%・患者数の8%に生じうる<sup>3,4)</sup>。近年CABG対象患者では糖尿病・腎不全・脳梗塞・末梢血管病変併存が増加し、冠動脈病変が重症化・び慢性化する中で、外科医が術中にCABGの吻合の質の良否を把握することは極めて重要と考えられる。特に技術的難度が高いとされるoff-pump CABGでは一層重要である。

術中CABGグラフト評価には、直接造影・インドシアニンを用いた造影(SPY)<sup>5)</sup>・電磁流量計<sup>6)</sup>・ドップラー法<sup>7,8)</sup>などの手法があるが、いずれも技術的再現性・簡便性に欠ける。Transit-time flowmeter(TTFM)(Medi-Stim, Oslo, Norway)による術中血流分析が簡便で信頼度・再現性が高いことが示され、近年多くの施設でこの手法が採用されている。著者らも1999年より第1世代のMedi-Stim社製TTFM(BF2000)を用いてCABGグラフト血流を分析し様々な知見を得てきた。それらの研究は、TTFMパラメーターの生理的意義を追究した研究とTTFMを利用した研究に大別される。本稿ではこれまでの著者らの知見を中心にCABGグラフト血流のTTFM分析について概説する。

## II. TTFM

TTFMは、「血流に対して下流から上流へ移動する超音波は、上流から下流へ移動する超音波より長い時間を要

して移動する。そしてその移動時間(transit time)の差は血流量により決まる」という原理に基づく<sup>9)</sup>。本法では血管径の測定も不要で、ゼロ補正も必要がなく、短時間・低流量でも正確に測定できる。歴史的には1960年代にFlanklint<sup>10)</sup>とPlass<sup>11)</sup>がこの原理を用いた血流計を報告している。MediStim社製TTFMに用いるプローベ(トランスデューサー)は、血管を挟む形で対峙する金属反射板と2つの小型圧電性クリスタルから構成される。2つのクリスタルからは血流の上流からと下流からとの2つの超音波パルスが出力される。反射板により折り返してきた超音波を、上流・下流の2つのクリスタルが各々感知することにより、下流→上流と上流→下流とのtransit timeの差が計算される(図1)。2つのクリスタルは固定されているので、transit timeの差は血流量によってのみ規定され、血管径や超音波ビームの方向などは関係ない。このプロセスは1秒間に数百回行われ、transit timeの差は10<sup>-12</sup>秒(picoseconds)のレベルまで検知する能力があるとされる。この技術は、in vitro および in vivo の実験にて血流量測定の正確さを検証されてきた<sup>12-15)</sup>。

## III. TTFM パラメーターに関する研究

### 1. 平均血流量(Qm)は何を反映しているか?

著者らは、TTFMにおいて代表的指標であるQm値が、CABGグラフト吻合の質をどのように反映しているかを、定量的評価を加えた術後グラフト造影(QCA)所見とQm値との関連から探究した<sup>16)</sup>。術後造影にて開存が確認された35名82本のグラフトについて、heel部・吻合部・toe部それぞれの径を造影所見から定量化した。それぞれの部位でのreference径としてnative冠動脈またはグラフト径を用いて、heel部・吻合部・toe部での狭窄率を求めた。径は吻合部>toe>heelであり、狭窄率は吻合部<toe<heelで有意差を示した。術中計測したQm値との

名古屋第二赤十字病院心臓血管外科(〒466-8650 名古屋市昭和区妙見町2-9)

(2010.9.16 受付, 2011.7.28 受理)

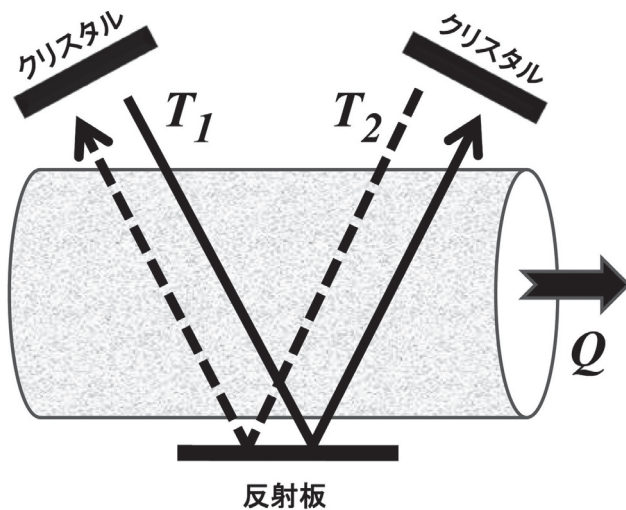


図1 Transit-time flowmeter (TTFM)の原理

細い矢印は超音波ビームの方向を示し、太い矢印は血管の血流方向を示す。Transit timeの差( $T_2-T_1$ )は血流量( $Q$ )によって規定される。

$T_1$ : 上流から下流への超音波ビームの到達時間,  $T_2$ : 下流から上流への超音波ビームの到達時間

有意な相関を示したのはheel狭窄率のみであった(図2)。TTFMでの $Q_m$ 値はCABGグラフト吻合の最も狭窄度の強い部位の狭窄度と相関すると考えられ、外科医は吻合の質の評価法として $Q_m$ 値を信用できる。なお、最近報告された心表面超音波像(10-14 MHz)を用いたoff-pump CABG吻合の形態的評価でもheelでの狭窄が問題視されており、著者らの研究でのQCA所見とも一致していた<sup>17)</sup>。ただし、グラフト血流量は、グラフト径・灌流域・心筋viability・心筋酸素消費量・血圧・冠血管抵抗など、グラフト吻合狭窄以外の因子の影響も受けることも考慮しなければいけない。

## 2. 開存グラフトを検知するcut-off値は？

FFTMによる分析で、どの指標に依って吻合の質の評価をするかは重要なテーマである。著者らは、① $Q_m$ (mL/min)・②拍動指数( $PI = \frac{\text{最大流量} - \text{最小流量}}{Q_m}$ )・③機能不全率(INSUF)(%) (= 順行性流量 / 逆行性流量)・④拡張期フィリング指数( $DFI$ )(%) (=  $100 \int Q_d / [\int |Q_s| + \int Q_d]$ )・⑤高速フーリエ変換(FFT)指数( $F_0/H_1$ )について、術後早期での開存グラフトと非開存グラフト(閉塞または75%狭窄以上)で比較検討した<sup>16, 18, 19)</sup>。DFIは、心電図信号を同時入力し収縮期を心電図上のR波のピークからT波のピークと同定することによって得られる収縮期流量( $\int Q_s$ )と拡張期流量( $\int Q_d$ )から求められる。収縮期血流は逆方向の血流を示すことがあるため、DFIを求める際には収縮期流量の絶対値( $|\int Q_s|$ )を用いた。

また、 $F_0/H_1$ は、グラフト血流曲線を高速フーリエ変換し、心拍数に相当する基本周波数でのパワー( $F_0$ )とその2

倍周波数のパワー( $H_1$ )の比と定義した。すべての指標について開存・非開存グラフトの群間で有意差を認めた上で、その間のcut-off値として、 $Q_m=15 \text{ mL/min}$ ・ $PI=5$ ・ $INSUF=15\%$ ・ $DFI=50\%$ ・ $F_0/H_1=1.0$ が得られた<sup>16, 18, 19)</sup>。

$Q_m$ 低値は吻合不全を示唆すると考えられてきた。Walpothによれば<sup>20)</sup>、 $Q_m > 20 \text{ mL/min}$ が開存を示唆するとある。しかし、筆者らは20 mL/min未満でも術後造影にて良好に開存している例を示し、 $Q_m > 15 \text{ mL/min}$ が高い感度と特異度(96%/100%)を示すことを報告した<sup>19)</sup>。最適な $Q_m$ 値は血圧・脈拍・冠動脈の血管抵抗・グラフト径など様々な要因により強く影響され<sup>21)</sup>、 $Q_m$ 値のみでの吻合評価は信頼性に欠ける。Shinら<sup>22)</sup>も、吻合に問題なくともspasticな内胸動脈(ITA)-左前下行枝(LAD)グラフトでは、 $PI$ など他の指標で問題なくとも低い $Q_m$ 値を示すことを報告した。一方、Tokudaら<sup>23)</sup>は、 $Q_m$ 低値が中期遠隔期のグラフト不全の独立した危険因子であることを報告している。

$Q_m$ 以外の指標によるcut-off値の提唱が諸家より報告されてきた。D'Anconaら<sup>3)</sup>は、1000本の動脈グラフトについて検討し、種々の指標の中で、 $PI > 5$ がグラフト不全を検知し、周術期死亡を予知する因子であると報告した。Kimら<sup>24)</sup>は、グラフト不全の指標として、収縮期優位・ $Q_m < 15 \text{ mL/min}$ ・ $PI > 3 \sim 5$ ・ $\text{insufficiency ratio} > 2\%$ を提唱した。Di Giammarcoら<sup>25)</sup>は、3つの指標 $Q_m < 15 \text{ mL/min}$ ・ $PI > 3.0$ ・% of backward flow  $> 3\%$ がグラフト不全の検知に有用であると報告した。Tokudaら<sup>26)</sup>は、左冠動脈では $Q_m < 15 \text{ mL/min}$ ・ $PI > 5.1$ ・backward flow  $> 4.1\%$ 、右冠動脈では $Q_m < 20 \text{ mL/min}$ ・ $PI > 4.7$ ・backward flow  $> 4.6\%$ が早期グラフト不全のcut-off値であるとした。

著者らは、開存グラフトに特有な台形様波形を呈する拡張期血流優位の波形を数値として表現する指標を模索する中で、血流波形のFFT解析から得られる指標であるFFT ratio( $F_0/H_1$ )の有用性を見出した。開存グラフトの血流波形をFFTによって周波数解析すると、図3に示すように心拍数に相当する基本周波数の倍数周波数でパワー値はきれいに減衰していく。そのパワー値の減衰の数値化の一つとして、基本周波数のパワー( $F_0$ )とその2倍周波数のパワー( $H_1$ )の比を用いて表現した。きれいに減衰していく開存グラフトでは、 $F_0/H_1 > 1.0$ となり、乱れて減衰していく非開存グラフトでは、 $F_0$ が $H_1$ より小さくなる。FFT解析とは、「あらゆる波形は正弦波に分解することができる」という原理に基づく。周期的な波形を時間の次元から周波数の次元に変換することであり、その波形がどのような周波数成分から成るかを解析する手法である。過去に、連続流遠心ポンプを用いた左室補助装置の研究において、ポンプ流量を増していく過程で生じる左室脱血管と左室壁との間のsucking現象の検知に、ポンプ電流波形のFFT解析が有用であるとの報告をした<sup>27)</sup>。そこにヒントを得て、TTFMの波形をFFT解析するに至っ

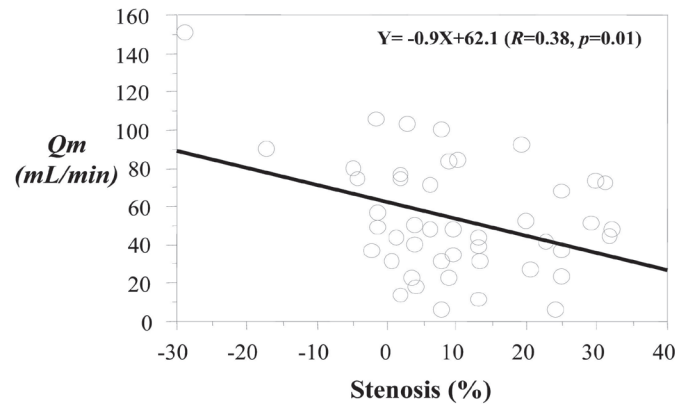
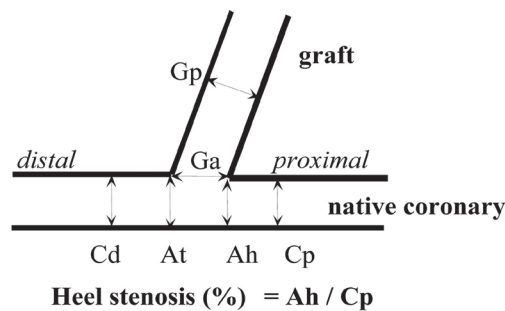
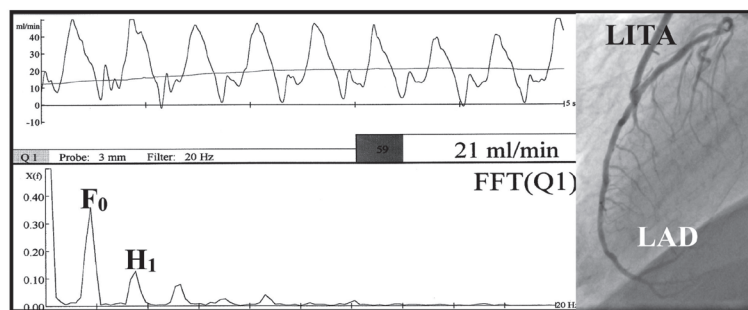


図2 術後グラフト造影の定量的評価法(上図)およびheel部狭窄率と術中グラフト平均血流量(Qm)の関係(下図)

Gp: グraft本幹径, Ga: グraft吻合径, Cd: 冠動脈末梢径, At: 吻合末梢(toe)径, Ah: 吻合中枢(heel)径, Cp: 冠動脈中枢径 (Takami Y et al. 2001<sup>16)</sup>より改変引用)



$$FFT \text{ ratio} = \frac{F_0}{H_1} = \frac{\text{Power of the fundamental frequency (heart rate frequency)}}{\text{Power of the first harmonic}}$$

図3 術後造影にて良好開存と評価された in-situ 左内胸動脈(LITA)–左前下行枝(LAD)吻合グラフトの術中血流波形(上段)とその高速フーリエ変換による周波数解析波形(下段) (Takami Y et al. 2001<sup>16)</sup>より改変引用)

た. Koenig ら<sup>28)</sup> も, Transonic 社製 TTFM を用いて, 犬の動物実験の ITA-LAD グraftにて, 血流の FFT スペクトル解析が吻合部狭窄の検知に有用であることを報告している. Hatada ら<sup>29)</sup> は, TTFM の血流波形を高速フーリエ解析し, 10 個の harmonic スペクトラムパワーの和が

グラフト不全の検知に有用であることを提唱した.

さらに心電図信号を同期入力することにより, 血流波形の収縮期成分と拡張期成分を正確に同定することができ, 開存するグラフトの血流波形が台形様波形を呈する拡張期血流優位の波形となることを数値化できる. それ



が拡張期フィリング指数 (DFI) である。Morota らの動物実験では<sup>30)</sup>、DFI とほぼ同義となる拡張期成分の指標が、吻合部狭窄の検知において、PI などの指標よりも高い特異度と感度を示した。筆者らの研究<sup>19)</sup>にて、改めて臨床的にも DFI は吻合の質の評価において有用であることが示された。

#### IV. TTFM を利用した研究

TTFM は、簡便で信頼度・再現性が高いため、様々な条件での術中 CABG グラフト血流を測定することにより、冠循環に関する知見を得る有用な手段となりえる。

##### 1. 大動脈バルーンポンピング (IABP) の CABG グラフトへの効果

筆者らは、予防的 IABP を使用した 84 名の CABG 患者において、術中に IABP 駆動時と非駆動時に TTFM にてグラフト血流分析を行った<sup>31)</sup>。術後造影検査にて開存が確認された 163 本のグラフト血流を分析し、 $Q_m \cdot PI \cdot DFI$  がいずれも IABP 駆動により増加することを示した。In-situ ITA-LAD 吻合グラフトと大動脈-冠動脈吻合 (A-C) グラフトで比較すると、前者では後者より IABP による  $Q_m$  値の増加率が大きい、DFI 増加率は小さいことを認めた。IABP 非駆動時血流の拡張期優位性が IABP 駆動による効果に差を生じると推察された。Onorati ら<sup>32)</sup> も、IABP 駆動によるグラフト血流について研究し、機能するグラフトでは平均拡張期血流と  $Q_m$  値が有意に増加することを示した。そしてその血流増加は、静脈単独 AC バイパスに比して、動脈グラフトおよび静脈による sequential グラフトにおいて大きいことを示した。ITA-LAD グラフトの IABP による  $Q_m$  増加率が大きいことは、他の領域に比して LAD の血流予備能 (flow reserve) が大きいことも影響していると考えられる<sup>31, 32)</sup>。

##### 2. 右胃大網動脈 (GEA) グラフトの血流分析

筆者らは、CABG の基本戦略として全動脈 in-situ グラフトによる aorta no-touch 手術を行う中で多用してきた in-situ GEA グラフトの血流分析を行った<sup>33)</sup>。術後造影検査にて開存が確認された 101 名の GEA グラフトの血流は、ITA グラフトに比して、最低血流量が大きく、機能不全率が高いことが示された。また拡張期早期血流増加の微分値 ( $dQ/dt$ ) が、GEA では ITA に比して小さいことが示された。開存 GEA グラフトの血流波形は、図 5 に示すように 4 型に大別された：A 型 (収縮期優位型)・B 型 (台形型)・C 型 (サインカーブ型)・D 型 (拡張期優位型)。GEA を吻合した冠動脈の狭窄度との関連を調べたところ、閉塞冠動脈に吻合された場合には D 型波形が多く、狭窄が軽度 (75~90%) である場合には C 型波形が多く認められた。

そして GEA では特異的に認められる A 型波形は、11% に閉塞を認めたため A 型で  $Q_m$  値が低値である場合には、吻合が不良である可能性が高いと考えられた。さらに筆者らは、同じく右冠動脈へ吻合された大伏在静脈

(SVG) A-C バイパスと in-situ GEA の血流を比較し、GEA 波形の 4 類型は特異的な所見であることが確かめた<sup>34)</sup>。なお、GEA グラフトに特異的である A 型波形については、心筋内走行 (myocardial bridge) する冠動脈で記録された Doppler 血流波形 (“finger-tip pattern” または “spike-and-dome pattern”)<sup>35)</sup> と極めて類似している (図 6)。この類似は GEA の A 型波形が GEA の spasm と関連があることを示唆するが、今後の検討を要する。上記以外の GEA に関する TTFM 分析研究として、Ryu ら<sup>36)</sup> は、CABG 患者で交感神経刺激 (ノルアドレナリン投与) がグラフト血流に及ぼす影響を調べ、spasm が生じやすい in-situ GEA にても、交感神経刺激により ITA と同等に血流が増加することを示した。

##### 3. その他の研究

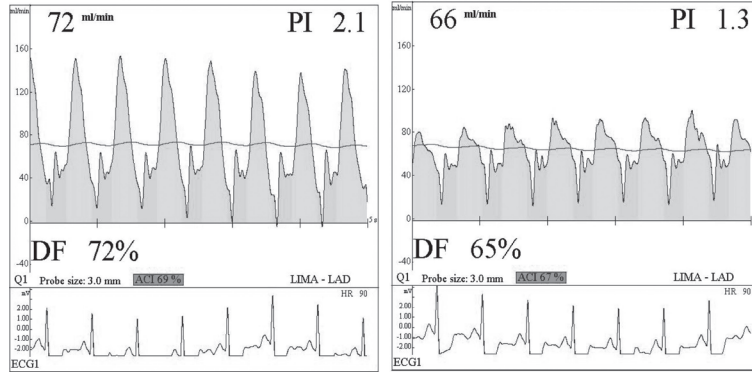
TTFM を利用した冠循環の研究としては、CABG グラフトデザインについての研究が多い。Gwozdziwicz ら<sup>37)</sup> は、sequential バイパスグラフトがたとえ大きな灌流域を有する冠動脈に途中吻合されても、その末梢のグラフト血流量が、同じ領域での単独バイパスグラフトと比較して同等レベルであることを示した。Nordgaard ら<sup>38)</sup> は、1 箇所吻合のグラフトは、2 箇所または 3 箇所吻合の sequential グラフトに比して  $Q_m$  値が低値であること、 $Q_m$  値は女性に比して男性が高値であること、PI は sequential グラフトでも 1 箇所吻合グラフトでも差がないこと、などを報告した。

Gaudino ら<sup>39)</sup> は、TTFM を用いて両側 ITA による Y グラフトの flow reserve について検討し、ドブタミン 20  $\mu$ g/kg 負荷による flow reserve が、本幹・左枝・右枝ともに 2.0 以上であることを示し、Y グラフトの血流不足についての懸念を否定した。Onorati ら<sup>40)</sup> は、ITA- 橈骨動脈 Y グラフトと橈骨動脈 A-C バイパスの血流分析比較を行い、ベースラインの血流量は同等であるが、IABP による血流増加は、グラフト吻合領域や人工心肺の有無にかかわらず、Y グラフトにおいて優ることを示した。

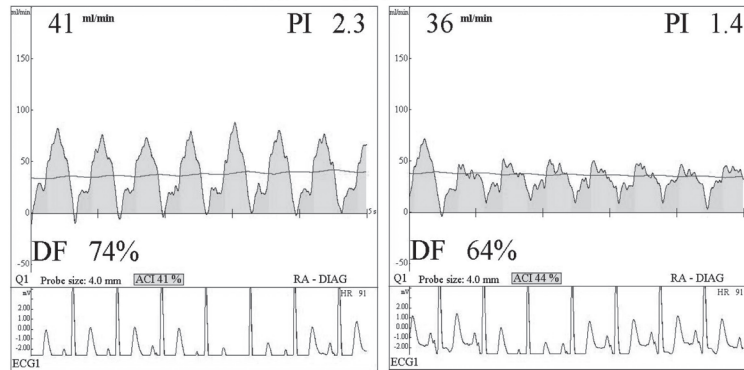
グラフト血流に対する人工心肺の影響も検討され、Hassanein ら<sup>41)</sup> は、off-pump CABG は on-pump より  $Q_m$  値が低く PI 値が高いことを示した。この所見は LAD へのグラフトでは認められず、鈍縁枝・対角枝・右冠動脈へのグラフトで認められた。その原因として off-pump での LAD 以外の領域の視野展開不良による吻合の質の低下を挙げた。Balacumaraswami ら<sup>42)</sup> も on-pump では off-pump より、 $Q_m$  値が大きく  $Q_m$ / 圧の比が高いことを示し、人工心肺による血管拡張と心虚血後の反応性充血という機序を推察した。

その他、TTFM を利用した興味深い研究としては、Shin ら<sup>43)</sup> が、CABG 術中に心房細動を誘発し、心房細動により LITA および SVG の  $Q_m$  値が有意に減少し、その影響はより LITA の方が大きいことを報告した。D'Ancona ら<sup>44)</sup> は、CABG 術中にペーシングモードおよび A-V delay を変

## In-situ内胸動脈 - 左前下行枝



## A-C バイパス: 橈骨動脈 - 対角枝



## IABP-ON

## IABP-OFF

図4 大動脈バルーンポンピング(IABP)駆動(ON)時・非駆動(OFF)時の血流波形(上段)と心電図(下段)(Takami Y et al. 2008<sup>31)</sup>より改変引用)

各図の左上に平均血流量(Qm)が示されている。

PI: 拍動指数, DF: 拡張期フィリング指数, LIMA: 左内胸動脈, LAD: 左前下行枝, RA: 橈骨動脈, DIAG: 対角枝

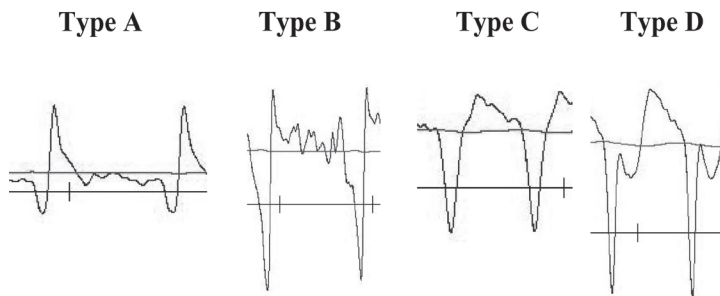


図5 術後造影にて確認された開存 in-situ 右胃大動脈グラフト血流波形の4類型(Takami Y et al. 2009<sup>33)</sup>より改変引用)

えてグラフト流量を計測し, DDD モードで A-V delay 175 ms が最もグラフト流量が多いことを示した。Verhoye ら<sup>45)</sup> は, 右冠動脈完全閉塞を伴う 3 枝病変患者に off-pump CABG を施行し, 右冠動脈へのグラフトをクランプにより左回旋枝領域へのグラフトの血流量が術前の側副血行路の程度に比例し  $5.9 \pm 6.9$  ml/min 増加するが, LAD への

グラフトには変化を認めなかった。血行再建後の完全閉塞右冠動脈への側副血行は, ほとんどが native 冠動脈からのものであることを示し, 側副血行を有する完全閉塞右冠動脈への血行再建を正当化した。Hassanein ら<sup>46)</sup> は, 大動脈弁置換 + CABG (上行大動脈からの SVG AC バイパス) の患者で, 生体弁と機械弁を比較し, SVG の血流

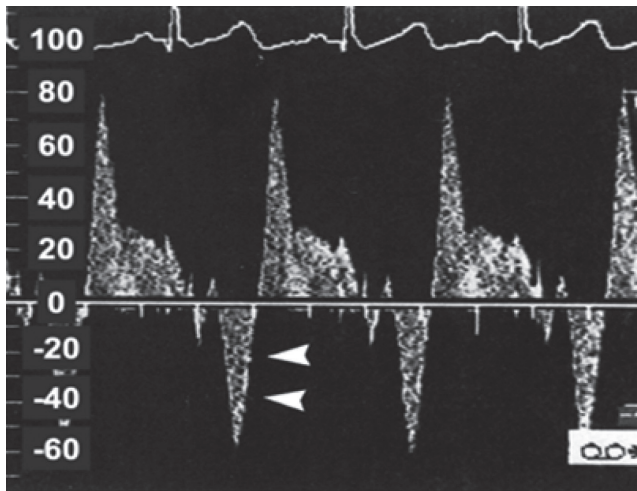


図6 心筋内走行(myocardial bridge)する冠動脈で記録された Doppler 血流波形(“finger-tip pattern”または“spike-and-dome pattern”)(Klues HG et al. 1997<sup>35)</sup>より改変引用)

が機械弁より生体弁の方が多いことを示し、機械弁が SVG の血流低下の独立危険因子であることを示した。

#### V. 今後の展望

今後追及すべき TTFM の本質としては、 $Q_m \cdot PI \cdot IN-SUF \cdot backward\ flow \cdot DFI \cdot FFT\ ratio$  などの血流評価指標のそれぞれについて、吻合の質の何を反映するかという課題が挙げられる。様々な条件でのデータを蓄積し、それぞれの指標の利用法への理解を深める研究が必要である。TTFM も技術的に進化しており、最新の Medi-Stim 社製品 Veri-Q シリーズでは、カラードップラーが搭載され、表層から 35 mm 深度まで高い分解能での血流・組織の形態的評価が可能となってきた。CABG グラフトの吻合の質の評価がさらに向上することが期待される。そして形態的評価とこれまでの血流分析の指標との関連も探究すべき課題であろう。さらに、この TTFM を利用した冠循環に関する研究も裾野が広がると考えられる。

#### VI. おわりに

本稿では、TTFM にまつわる研究の経緯を概説した。TTFM は、これまでに心臓外科医が手にした唯一の、簡便・低侵襲で信頼性の高い診断・研究ツールである。本稿を参考に、このツールを手にした心臓外科医は、TTFM への理解を深め、CABG の質を向上できるよう TTFM を使いこなすことが強く望まれる。それだけにとどまらず、心臓外科医が TTFM を冠疾患病態・冠循環生理を理解し解明するツールとして活用し、新たな知見から治療戦略を発信することが強く望まれる。

- 1) Scott R, Blackstone EH, McCarthy PM, Lytle BW, Loop FD, White JA, Cosgrove DM: Isolated bypass grafting of the left internal thoracic artery to the left anterior descending coronary artery: late consequences of incomplete revascularization. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2000; **120**: 173–184
- 2) Kleisli T, Cheng W, Jacobs MJ, Mirocha J, Derobertis MA, Kass RM, Blanche C, Fontana GP, Raissi SS, Magliato KE, Trento A: In the current era, complete revascularization improves survival after coronary artery bypass surgery. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2005; **129**: 1283–1291
- 3) D’Ancona G, Karamanoukian HL, Ricci M, Schmid S, Bergsland J, Salerno TA: Graft revision after transit time flow measurement in off-pump coronary artery bypass grafting. *Eur J Cardiothorac Surg* 2000; **17**: 287–293
- 4) Balacumaraswami L, Abu-Omar Y, Choudhary B, Pigott D, Taggart DP: A comparison of transit-time flowmetry and intraoperative fluorescence imaging for assessing coronary artery bypass graft patency. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2005; **130**: 315–320
- 5) Reuthebuch O, Häussler A, Genoni M, Tavakoli R, Odavic D, Kadner A, Turina M: Novadaq SPY: intraoperative quality assessment in off-pump coronary artery bypass grafting. *Chest* 2004; **125**: 418–424
- 6) Louagie YA, Haxhe JP, Buche M, Schoevaerdts JC: Intraoperative electromagnetic flowmeter measurements in coronary artery bypass grafts. *Ann Thorac Surg* 1994; **57**: 357–364
- 7) Canver CC, Dame NA: Ultrasonic assessment of internal thoracic artery graft flow in the revascularized heart. *Ann Thorac Surg* 1994; **58**: 135–138
- 8) Oda K, Hirose K, Nishimori H, Sato K, Yamashiro T, Ogoshi S: Assessment of internal thoracic artery graft with intraoperative color Doppler ultrasonography. *Ann Thorac Surg* 1998; **66**: 79–81
- 9) Laustsen J: Transit time flow measurement. *in* Intraoperative Graft Patency Verification in Cardiac and Vascular Surgery, ed by D’Ancona G, Karamanoukian H, Ricci M, Salerno TA, Bergsland J, Futura, New York, 2001
- 10) Franklin DL, Baker DW, Rushmer RF: Pulsed ultrasonic transit time flowmeter. *IRE Trans Biomed Electron* 1962; **9**: 44–49
- 11) Plass KG: A new ultrasonic flowmeter for intravascular application. *IEEE Trans Biomed Eng* 1964; **11**: 154–156
- 12) Wong DH, Watson T, Gordon I, Wesley R, Tremper KK, Zaccari J, Stemmer P: Comparison of changes in transit time ultrasound, esophageal Doppler, and thermodilution cardiac output after changes in preload, afterload, and contractility in pigs. *Anesth Analg* 1991; **72**: 584–588
- 13) Lundell A, Bergqvist D, Mattsson E, Nilsson B: Volume blood flow measurements with a transit time flowmeter: an in vivo and in vitro variability and validation study. *Clin Physiol* 1993; **13**: 547–557
- 14) Hartman JC, Olszanski DA, Hullinger TG, Brunden MN: In vivo validation of a transit-time ultrasonic volume flow



- meter. *J Pharmacol Toxicol Methods* 1994; **31**: 153–160
- 15) Beldi G, Bosshard A, Hess OM, Althaus U, Walpoth BH: Transit time flow measurement: experimental validation and comparison of three different systems. *Ann Thorac Surg* 2000; **70**: 212–217
  - 16) Takami Y, Ina H: Relation of intraoperative flow measurement with postoperative quantitative angiographic assessment of coronary artery bypass grafting. *Ann Thorac Surg* 2001; **72**: 1270–1274
  - 17) Ibrahim K, Vitale N, Kirkeby-Garstad I, Samstad S, Haaverstad R: Narrowing effect of off-pump CABG on the LIMA-LAD anastomosis: epicardial ultrasound assessment. *Scand Cardiovasc J* 2008; **42**: 105–109
  - 18) Takami Y, Ina H: A simple method to determine anastomotic quality of coronary artery bypass grafting in the operating room. *Cardiovasc Surg* 2001; **9**: 499–503
  - 19) 高味良行, 増本 弘: トランジットタイム血流量計による CABG 術中グラフト評価の新たな指標: Diastolic Filling Index (DFI). *日心外会誌* 2006; **35**: 5–9
  - 20) Walpoth BH, Bosshard A, Genyk I, Kipfer B, Berdat PA, Hess OM, Althaus U, Carrel TP: Transit-time flow measurement for detection of early graft failure during myocardial revascularization. *Ann Thorac Surg* 1998; **66**: 1097–1100
  - 21) Jaber SF, Koenig SC, BhaskerRao B, VanHimbergen DJ, Cerrito PB, Ewert DJ, Gray LA Jr, Spence PA: Role of graft flow measurement technique in anastomotic quality assessment in minimally invasive CABG. *Ann Thorac Surg* 1998; **66**: 1087–1092
  - 22) Shin H, Yozu R, Mitsumaru A, Iino Y, Hashizume K, Matayoshi T, Kawada S: Intraoperative assessment of coronary artery bypass graft: transit-time flowmetry versus angiography. *Ann Thorac Surg* 2001; **72**: 1562–1565
  - 23) Tokuda Y, Song MH, Oshima H, Usui A, Ueda Y: Predicting midterm coronary artery bypass graft failure by intraoperative transit time flow measurement. *Ann Thorac Surg* 2008; **86**: 532–536
  - 24) Kim KB, Kang CH, Lim C: Prediction of graft flow impairment by intraoperative transit time flow measurement in off-pump coronary artery bypass using arterial grafts. *Ann Thorac Surg* 2005; **80**: 594–598
  - 25) Di Giammarco G, Pano M, Cirmeni S, Pelini P, Vitolla G, Di Mauro M: Predictive value of intraoperative transit-time flow measurement for short-term graft patency in coronary surgery. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2006; **132**: 468–474
  - 26) Tokuda Y, Song MH, Ueda Y, Usui A, Akita T: Predicting early coronary artery bypass graft failure by intraoperative transit time flow measurement. *Ann Thorac Surg* 2007; **84**: 1928–1933
  - 27) Takami Y, Otsuka G, Mueller J, Ohashi Y, Tayama E, Schima H, Schmallegger H, Wolner E, Nosé Y: Flow characteristics and required control algorithm of an implantable centrifugal left ventricular assist device. *Heart Vessels* 1997; **12**: 92–97
  - 28) Koenig SC, VanHimbergen DJ, Jaber SF, Ewert DL, Cerrito P, Spence PA: Spectral analysis of graft flow for anastomotic error detection in off-pump CABG. *Eur J Cardiothorac Surg* 1999; **16**: S83–S87
  - 29) Hatada A, Yoshimasu T, Kaneko M, Kawago M, Yuzaki M, Honda K, Komori S, Iwahashi M, Hayashi H, Yamamoto S, Nishimura Y, Hiramatsu T, Okamura Y: Relation of waveform of transit-time flow measurement and graft patency in coronary artery bypass grafting. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2007; **134**: 789–791
  - 30) Morota T, Duhaylongsod FG, Burfeind WR, Huang CT: Intraoperative evaluation of coronary anastomosis by transit-time ultrasonic flow measurement. *Ann Thorac Surg* 2002; **73**: 1446–1450
  - 31) Takami Y, Masumoto H: Effects of intra-aortic balloon pumping on graft flow in coronary surgery: an intraoperative transit-time flowmetric study. *Ann Thorac Surg* 2008; **86**: 823–827
  - 32) Onorati F, Santarpino G, Rubino A, Cristodoro L, Scalas C, Renzulli A: Intraoperative bypass graft flow in intra-aortic balloon pump-supported patients: differences in arterial and venous sequential conduits. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2009; **138**: 54–61. Epub 2009 Mar 25
  - 33) Takami Y, Tajima K, Terazawa S, Okada N, Fujii K, Sakai Y: Transit-time flow characteristics of in situ right gastroepiploic arterial grafts in coronary artery bypass grafting. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2009; **138**: 669–673
  - 34) 高味良行, 田嶋一喜, 寺澤幸枝, 岡田典隆, 藤井 恵, 日尾野誠, 宗像寿祥, 酒井喜正: in-situ GEA グラフトのトランジットタイム血流分析(第2報): 同じ灌流域(右冠動脈)へ吻合された SVG との比較. *Gen Thorac Cardiovasc Surg* 2008; **56**: 228
  - 35) Klues HG, Schwarz ER, vom Dahl J, Reffellmann T, Reul H, Potthast K, Schmitz C, Minartz J, Krebs W, Hanrath P: Disturbed intracoronary hemodynamics in myocardial bridging: early normalization by intracoronary stent placement. *Circulation* 1997; **96**: 2905–2913
  - 36) Ryu HG, Bahk JH, Kim KB: Sympathetic stimulation increases the blood flow through the in situ right gastroepiploic artery graft after off-pump coronary artery bypass graft surgery. *Eur J Cardiothorac Surg* 2006; **29**: 948–951
  - 37) Gwozdziwicz M, Nemec P, Simek M, Hajek R, Troubil M: Sequential bypass grafting on the beating heart: blood flow characteristics. *Ann Thorac Surg* 2006; **82**: 620–623
  - 38) Nordgaard H, Vitale N, Haaverstad R: Transit-time blood flow measurements in sequential saphenous coronary artery bypass grafts. *Ann Thorac Surg* 2009; **87**: 1409–1415
  - 39) Gaudino M, Di Mauro M, Iacò AL, Canosa C, Vitolla G, Calafiore AM: Immediate flow reserve of Y thoracic artery grafts: an intraoperative flowmetric study. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2003; **126**: 1076–1079
  - 40) Onorati F, Rubino AS, Cristodoro L, Scalas C, Nucera S, Santini F, Renzulli A: In vivo functional flowmetric behavior of the radial artery graft: is the composite Y-graft configuration advantageous over conventional aorta-coronary bypass? *J Thorac Cardiovasc Surg* 2010; **140**: 292–297.e2

- 41) Hassanein W, Albert AA, Arnrich B, Walter J, Ennker IC, Rosendahl U, Bauer S, Ennker J: Intraoperative transit time flow measurement: off-pump versus on-pump coronary artery bypass. *Ann Thorac Surg* 2005; **80**: 2155–2161
- 42) Balacumaraswami L, Abu-Omar Y, Selvanayagam J, Pigott D, Taggart DP: The effects of on-pump and off-pump coronary artery bypass grafting on intraoperative graft flow in arterial and venous conduits defined by a flow/pressure ratio. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2008; **135**: 533–539
- 43) Shin H, Hashizume K, Iino Y, Koizumi K, Matayoshi T, Yozu R: Effects of atrial fibrillation on coronary artery bypass graft flow. *Eur J Cardiothorac Surg* 2003; **23**: 175–178
- 44) D’Ancona G, Hargrove M, Hinchion J, Ramesh BC, Chughtai JZ, Anjum MN, O’Donnell A, Aherne T: Coronary grafts flow and cardiac pacing modalities: how to improve perioperative myocardial perfusion. *Eur J Cardiothorac Surg* 2004; **26**: 85–88
- 45) Verhoye JP, Abouliatim I, Drochon A, de Latour B, Leclercq C, Leguerrier A, Corbineau H: Collateral blood flow between left coronary artery bypass grafts and chronically occluded right coronary circulation in patients with triple vessel disease. Observations during complete revascularisation of beating hearts. *Eur J Cardiothorac Surg* 2007; **31**: 49–54
- 46) Hassanein W, Albert A, Florath I, Hegazy YY, Rosendahl U, Bauer S, Ennker J: Concomitant aortic valve replacement and coronary bypass: the effect of valve type on the blood flow in bypass grafts. *Eur J Cardiothorac Surg* 2007; **31**: 391–396

## **Scientific analysis of flow of coronary artery bypass grafts using transit-time flowmeter**

Yoshiyuki Takami and Kazuyoshi Tajima

Department of Cardiovascular Surgery, Nagoya Daini Red Cross Hospital

Transit-time flow measurement (TTFM) has been widely applied for intraoperative evaluation of graft flow in coronary artery bypass grafting (CABG). We have investigated the relation of the parameters of TTFM and quality of the graft anastomosis. We also have searched for the TTFM parameters to predict the patency of the CABG grafts. Furthermore, we have investigated the effects of intra-aortic balloon pumping on the flow of CABG grafts and the flow characteristics of in-situ right gastroepiploic artery grafts, using the TTFM analysis, which had remained to be clarified. In this report, we summarized our findings and also related finding previously reported by other researchers. Based upon these finding, we would like to suggest that the TTFM analysis of CABG grafts is a good tool for scientific investigation of coronary circulation.

KEY WORDS: coronary artery bypass grafting, graft flow, transit-time flow measurement

J Jpn Coron Assoc 2011; 17: 196–203