

# レーザドプラによる心筋血流量測定

小笠原 康夫\*, 梶谷 文彦\*

## はじめに

1695年に Scaramucci<sup>1)</sup> が心臓の冠血流拍動パターンは他臓器と大きく異なり、主に動脈血が拡張期に心筋に流入し、心筋内の静脈血が収縮期に流出することを推論した。しかし、心収縮弛緩というメカニカルストレスに伴う血流搾出および貯留の場がより深部の心筋内冠血管であることから、300年前の Scaramucci の推論を検証するためには心表面末梢部及び心筋内の血流計測することが不可欠であった。この問題を解決するため、我々は光ファイバ型レーザドプラ血流計を開発し、その優れた血管へのアクセス性の良さを利用して、(1)心外膜側冠動脈内の血流プロフィール、(2)心筋貫入直前の微小冠動脈及び心筋から流出直後の微小冠静脈、(3)心筋内微小冠動・静脈血流速度の計測を進めてきた。特に(3)は Scaramucci の推論の直接的証明になる。ここでは、まず光ファイバ型レーザドプラ血流計のシステムの概要について述べた後、心筋へのアクセス法について触れ、次いで具体的な血流計測結果について紹介する。

## 光ファイバ型 LDV のシステム

レーザドプラ流速計 (LDV) は、1964年、Yeh と Cummins<sup>2)</sup> らの発表を嚆矢とする。水流、火災、ターボ機械内部の流れなどの計測に応用され、工学分野では盛んに使われている。医学・生物学分野における LDV による血流計測は、1972年 Riva<sup>3)</sup> がウサギ眼底血管の血流測定を行ったものが最初である。いずれにしても、流速計測の原理は、光のドプラ効果を利用したものである。レーザドプラ流速計は、使用するレーザ光の波長が数百

nm と短くかつ波長が均一で、伝達速度は格段に速いことに基づく優れた特徴をもつ。

図 1 に生体へのアクセスを容易にするために開発した光ファイバ型 LDV の基本的なシステム構成を示す<sup>4)</sup>。まず、5 mW の He-Ne レーザ光  $f_0$  ( $\lambda = 632.8$  nm) をビームスプリッターで2分する。直進するレーザ光を光ファイバを通して血流中に照射する。血球によってドプラシフトを受けた散乱光を同一のファイバによって受信する。一方、最初に2分したもう一方のレーザ光は超音波偏光器により一定周波数  $\Delta f$  だけシフトさせてこれを参照光として用いる。受信光をこの参照光とともにアバンランシェフォトダイオード (APD) に入射させて、ドプラシフト周波数すなわち血流速度に比例した電気信号を得る。光ファイバ型 LDV の測定精度をターンテーブルによる既知血流速度の計測によって検討したが、順流、逆流いずれも極めて良好な線形関係が得られている<sup>5)</sup>。

## 血管に対するアクセス法と冠血流計測

図 2 は、光ファイバ型 LDV による血管へのアクセス法を示しており、目的に応じて以下のよう

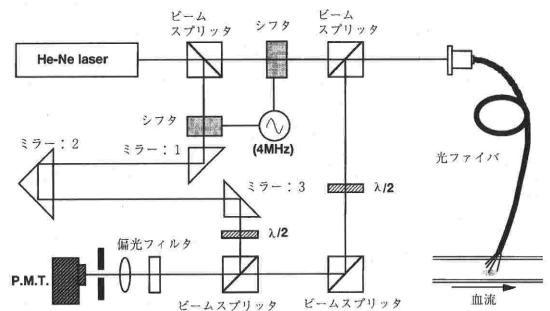


図 1 光ファイバ型 LDV のシステム構成

\*川崎医科大学医用工学

に使い分けることができる。

アクセス1：剥離冠状血管にカフを装着し、カフ側孔より60度の角度で光ファイバを血管内に挿入する。ファイバ先端の移動は、マイクromanピュレータによって数十 $\mu\text{m}$ の精度で移動させて血管内血流速度プロファイルを計測する。

アクセス2：細動脈、細静脈のように血管壁が薄い場合には、ファイバ先端を血管表面上に固定した状態で計測する。

アクセス3：心筋内の血流計測の場合には、ファイバで血管を心筋内貫入直前で刺入し、ついでファイバを心筋内冠状血管に導き、同部位での血流を計測する。

1 心筋外の比較的太い冠動脈における血流計測 (アクセス1)

アクセス1は、直径1mm以上の冠動静脈を対象とし、血管内の血流速度分布を詳細に計測することを目的としたものである。具体的には、剥離した冠血管にカフを装着し、カフ側孔より60度の角度で光ファイバを血管内に挿入する。ファイバ先端をマイクロマンピュレータによって数十 $\mu\text{m}$ の精度で移動させて、血管内血流速度プロファイルの計測を行う<sup>6,7)</sup>。

図3は、左冠動脈回旋枝中枢部における血管横断面各サンプル点での血流速度波形を三次元的に表示したものである。血流速度波形は時間軸で見ると収縮期には心筋内圧の上昇により血流が少なく、拡張期に大半の血液が流れる冠動脈特有の拡張期優位の流れパターンを示す。また、血管横断面で見ると中心ではほぼ平坦で血管壁近傍で急速に減速する台形上のパターンを示す。このように詳細な冠動脈血流プロファイルの計測は本法によって

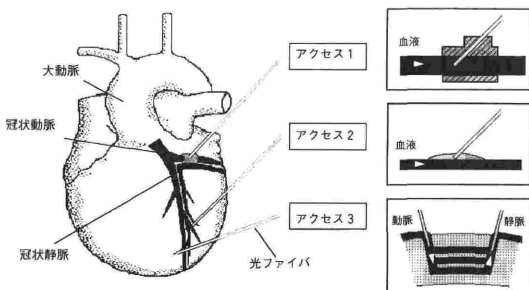


図2 光ファイバ型LDVの血管に対するアクセス法

初めて行われたものであり、血管壁におけるズリ応力の評価にとって重要であり、ズリ応力は動脈硬化が比較的多い心筋側で低い結果が得られている。

2 心筋表面の小動静脈における血流計測 (アクセス2)

本法は、直径が100 $\mu\text{m}$ 以下から数百 $\mu\text{m}$ までの細い動脈や細動脈、静脈・細静脈などの血流計測に適したアクセス法である。すなわち、光透過性が保障される薄壁で細い血管に対してファイバ挿入による外乱を加えることなく計測を行うものである。本法の大きな利点は心拍動による動きに加えて虚脱をきたしやすい冠状静脈などにも比較的容易にアクセスすることができることである。計測手技は、LDVの光ファイバピックアップ部先端を血管壁に接触させ、良好なドプラ信号を確認後、ファイバ先端をシアノアクリレートで固定する。これにより、拍動中の細い冠血管でも、安定した血流計測が可能となった。

図4は、本法で計測した数百 $\mu\text{m}$ の心房枝冠動静脈での血流パターンである<sup>8,9)</sup>。本法によって初めて可能になった計測であるが、血流波形の特徴を2, 3あげると、まず、心房動脈での血流波形の特徴は駆動圧である大動脈圧に類似したパターンであるが、心房収縮に一致して一峰性に減少するcoveを認めるのが特色である。一方、静脈では心房収縮時に大きな前方流を示し、動脈とは位相が逆転していることがわかる。この結果は、「心筋収縮力が冠動・静脈血流にどのように作用するか」という問題に対して重要な情報をもたらす。すなわち、冠動静脈を規制するのは心腔内圧(心房では低い)ではなく筋肉の収縮力であるこ

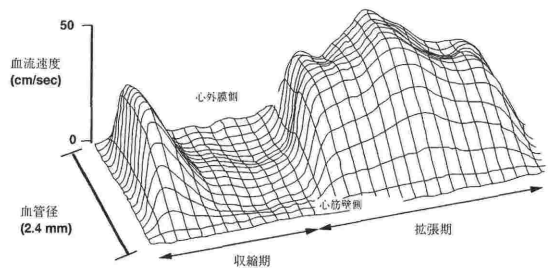


図3 アクセス法1で計測した冠動脈回旋枝中枢部の血流速度プロファイル

とが示唆される。

### 3 心筋内の小冠動・静脈血流計測 (アクセス3)

アクセス3は、心筋内に潜り込んだ心筋内冠血流を計測するもので、ファイバ先端を心筋貫入直前の冠動・静脈に刺入し、ついでファイバを心筋内に導き、同部位での血流計測を行うものである。図5は光ファイバセンサを注意深く心筋内小冠動・静脈内に導いて計測した結果の一例であり、本法によって初めて計測可能となったものである<sup>10)</sup>。波形の特徴は、まず、動脈血流は拡張期に大半の血流が流れる冠動脈特有の拡張期優位の流れパターンを示す。一方、静脈血流は動脈とは異なり収縮期優位のパターンを示し、拡張期には心筋内への吸引を意味する逆流を認める。すなわち、心筋内冠動・静脈血流には心筋収縮・弛緩の影響がより強くでていることがわかる<sup>11)</sup>。逆に中核側冠動・静脈血流波形を解析する場合は、同部位でのコンプライアンスのため心筋流入、流出血流波形が

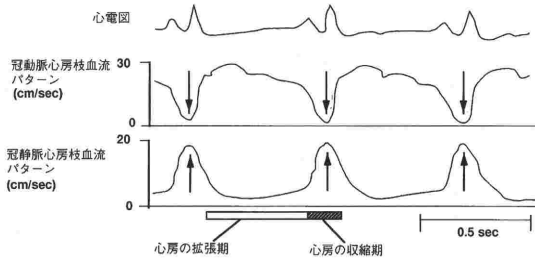


図4 アクセス法2で計測した数百 $\mu$ mの心房枝冠動・静脈での血流速度波形

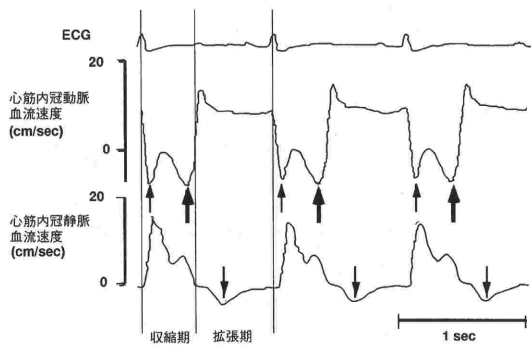


図5 アクセス法3で計測した心筋内冠動脈および静脈血流速度波形

なり変形していることに注意する必要がある。

## 結 語

ここではレーザドプラ法による冠血流計測に関して述べた。いうまでもなく血流計測も時代とともに新しい技術によって新しい情報を次々ともたらしてきている。拍動している心筋栄養血管である冠血管の血流に関しては、新しい計測法の導入もさることながらアクセス法の工夫が重要である。

## 文 献

- 1) Scaramucci J: Theoremata familiaria viros eruditos consulentia de variis physico-medicis lucubrationibus juxta leges mecanicas: Apud Joannem Baptistam Bustum: 70-80, 1695
- 2) Yeh Y, Cummins Z: Localized fluid flow measurement with He-Ne laser spectrometer. Appl Phys Lett 4: 176-179, 1964
- 3) Riva C, Ross B, Benedk GB: Laser Doppler measurements of blood flow in capillary tubes and retinal arteries. Invest Ophthal 11: 936-944, 1972
- 4) Kajiya F, Hoki N, Tomonaga G, et al: A Laser-Doppler-Velocimeter using an optical fiber and its application to local velocity measurement in the coronary artery. Experimentia 37: 1171-1173, 1981
- 5) Kajiya F, Hiramatsu O, Mito K, et al: An optica fiber laser Doppler velocimeter and its application to measurements of coronary blood flow velocities. Med Prog Technol 12: 77-85, 1987
- 6) Kajiya F, Mito K, Ogasawara Y, et al: Laser Doppler blood flow velocimeter with an optical fiber and its applications to detailed measurements of the coronary blood flow velocities. Proc SPIE 494: 25-31, 1984
- 7) Kajiya F, Tomonaga G, Tsujioka K, et al: Evaluation of local blood flow velocity in proximal and distal coronary arteries by laser Doppler method. Trans ASME J Biomech Eng 107: 10-15, 1985
- 8) 谷中正男, 辻岡克彦, 小笠原康夫ほか: 冠動・静脈心房枝の血流パターンの解析. 日本バイオレオロジー学会誌 3: 26-34, 1989
- 9) Kajiya F, Tsujioka K, Ogasawara Y, et al: Analysis of the characteristics of the flow velocity waveforms in left atrial small arteries and veins in the dog. Circ Res 65: 1172-1181, 1989
- 10) Kajiya F, Mito K, Ogasawara Y, et al: Evaluation of phasic blood flow in the coronary circulation by laser Doppler method. Fourth World Congress for Microcirculation 1: 352-353, 1987
- 11) Hiramatsu O, Mito K, Kajiya F: Evaluation of the velocity waveform in intramyocardial small vessels. In: Kajiya F, Klassen GA, Spaan JAE eds, Coronary Circulation -Basic Mechanism and Clinical Relevance, Springer-Varlag, Tokyo, 1990, pp1172-1181