

Flow void による弁逆流・短絡の定量推定に関する基礎的検討

瓜谷富三¹, 岡村正博², 近藤 武¹, 安野泰史¹,
坂倉一義², 古賀佑彦³, 山口弘次郎^{4,3}

¹藤田保健衛生大学衛生学部診療放射線技術学科,

²同 医学部内科, ³同 医学部放射線科

⁴東芝那須工場

序 言

近年 field echo 法により flow void を計測し、特定の指標から弁逆流量や短絡量を評価する試みが多く報告されている。それらは一般に flow void の大きい方が重症という考え方とっており^{1),2)}, flow void の大きさを基にした指標と Sellers 分類との相関などが研究対象となっている²⁾。

われわれも臨床例により指標を検討したが、報告の様な結果が得られない場合があったので、ファントム実験で検証したところ、開口部の直径も流量も小さいにも拘らず、flow void が大きい場合があって、指標の信頼性に問題があることがわかった。

本研究ではこれらの変量間の関係を調べ、原因を明らかにすると共に、検討結果を利用して、flow void の大きさから開口部の直径、流量、流速、逆流量、シャント量などを推定する方法を検討することとした。

方 法

各変量間の関係を調べるために、文献³⁾に報告した流水ファントム実験から得た基礎データを

用い、実験式を導出して、検討することとした。また開口部の直径、流量、逆流量などの推定の可能性については、実験式を展開し、開口部の直径、流量を表す式を求め、実験データを代入し計算値と比較検討することとした。

(1)流水ファントム実験

流水ファントム；内径 7 cm, 長さ 30 cm の硬質塩化ビニール管に、流入口と流出口を設け、途中に直径 1.5, 2, 4, 6, 13 mm のオリフィスを取付けた。

水は電動ポンプで送り、流量は 6 cc/s から 90 cc/s まで変化させ flow void を発生させた。

MRI 装置と測定条件；0.5T 超電導型 MRI 装置（東芝 MRT-50 A）を用いた。パルス系列は TR 50 ms, TE 22 ms, flip angle 30°, スライス厚 10 mm, マトリックス 128×128, 加算回数は 8 回とし、flow void の長軸を通る直交 2 断面を撮像し、flow void の大きい方を計測した。Flow void の外縁のトレースは profile curve を参考に決定した。Window level, width は同一条件とし、オリフィス直径 d と流量 Q に対する flow void の到達距離 L , 長軸を含む断面積 A , 体積 V を求めた³⁾。

(2)実験式の導出

データの中で、流量 Q と開口部直径 d に対す

キーワード quantitative calculation, magnetic resonance imaging, valvular regurgitation, septal shunt flow, flow void evaluation

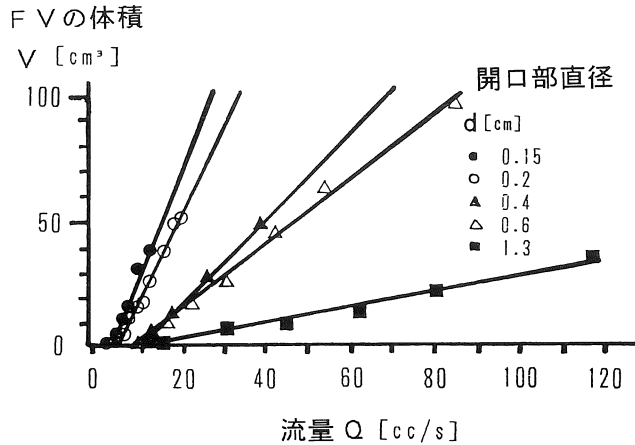


図1. 流水ファントムによる実測データ。オリフィスの直径dをパラメータとした流量Qとflow voidの体積Vとの関係。

るflow voidの体積Vの関係は直線性が良く、実験式への展開が容易で、基礎データとしてこれを選んだ(図1)。

Flow voidの体積とレイノルズ数とは簡単な関係にあると考え⁴⁾、オリフィス流速をUとして、データを $U \times d$ に変換し、X軸にとり、VをY軸にとってグラフ化した(図2)。データのバラツキを見ると、オリフィスの工作精度が不十分なために起きる直径の誤差と収縮係数不均一の影響が出ており、補正を加えた後、統計操作を行うこととした。

結 果

(1)実験式とその展開

図2から得られた式は次の通りである。

$$V = a \cdot U \cdot d + b \quad (a, b \text{ は定数}) \dots\dots\dots \textcircled{1}$$

これを展開すると多くの式が得られるが、以下はflow voidの体積Vと弁や中隔の圧較差Pを与えて、オリフィス直径dと流量Qを求める式である。

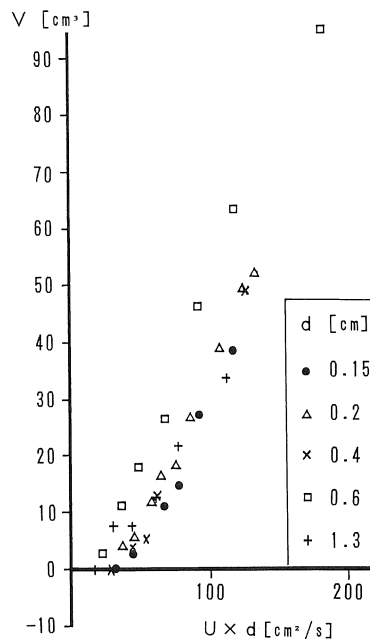


図2. Flow voidの体積と流速×直径の関係。図1.のデータを変換し、X軸に流速Uと直径dの積をとってプロットした。

$$d = \frac{V-b}{a \cdot U} = \frac{V-b}{a \cdot C_v \sqrt{2P/\rho}} \dots\dots\dots ②$$

$$Q = \frac{C_c \pi (V-b)^2}{4 \cdot a^2 \cdot U} = \frac{C_c \pi (V-b)^2}{C_v 4 \cdot a^2 \cdot \sqrt{2P/\rho}} \dots\dots\dots ③$$

C_c : 収縮係数 C_v : 速度係数
 ρ : 流体の密度

ここで速度係数 C_v は一定としてよいかどうか問題になるが、実験データで確かめた結果、 d と円筒内径 D の比は 0.186 以下、レイノルズ数 R_e は 1430 以上あり、 C_v は一定と考え式を展開した。

Flow void の体積 V は通常最大値を計測するので、 U または P も最大値をとると流量 Q も最大値が得られる。一方、 V を時間関数 $V(t)$ と考えると、 T を心周期とし、逆流量もしくはシャント量 R は次のように表すことができる。

$$R = K \left\{ \int_0^T V(t) dt - bT \right\} = K(F - bT) \dots\dots\dots ④$$

$$K = \frac{C_c \pi d}{4a} = \frac{C_c \pi (V_m - b)}{4a^2 C_v \sqrt{2P_m/\rho}}$$

$$F = \int_0^T V(t) dt$$

V_m , P_m は V , P の最大値を表す。

また次の考察および臨床応用で検討する相対量の間の関係は上記の②, ③, ④式から下のよう導かれる。

$$\frac{\Delta Q}{Q} = 2 \frac{\Delta(V-b)}{(V-b)} - 0.5 \frac{\Delta P}{P}, \dots\dots\dots ⑤$$

$$\frac{\Delta d}{d} = \frac{\Delta(V-b)}{(V-b)} - 0.5 \frac{\Delta P}{P}, \dots\dots\dots ⑥$$

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta(V_m - b)}{(V_m - b)} - 0.5 \frac{\Delta P_m}{P_m} + \frac{\Delta F}{F} \dots\dots\dots ⑦$$

(2) 開口部径・流量の推定

データから得られた $a = 0.54$ [cm・s], $b =$

-18.4 [cc] を使い、両式に流速または圧較差のデータを代入し、計算値と実験データを対比したところ、ほぼ合致していることが分かった。図3に結果を示す。

考察および臨床応用

(1) 従来の臨床指標について

従来の臨床指標では重症の程度を flow void の大きさを基に評価しようとしているが、上記の②, ③, ④の式からも分かるように、変量が1つ不足していることが明らかである。隠れた変量、圧較差の値で流量や直径がどれだけ変わるかを図4に示す。

(2) 定常流と拍動流、補足変量

本実験では定常流を用いたが、拍動流でも実験式が成立つかどうかにつき別の実験で拍動数を80まで上げて検討した。 V の外縁は最大値以外はやや不明瞭であったが、特別な矛盾はみられなかった⁵⁾。補足変量是非侵襲で手軽に得られ、かつ正確であることが望ましい。流速 U に対しては超音波データが適しているが、圧較差 P に対しては非観血血圧から想定した値を使わざるを得ないと思われる。

(3) 臨床応用

②, ③, ④式から Q , d , R を計算するには人体に於ける定数 a , b を求める必要がある。理論的には可能であるが、定数決定には十分な臨床データの集積と検証が必要である。これに対し、やや簡易なアプローチとして相対量から絶対量を求める方法について述べる。例えば僧帽弁逆流で、従来の flow void による指標が同一の2人の患者があった場合、重症度は等しいと評価するところ²⁾、②~⑦式から圧較差の大きい患者の方が流量、直径、逆流量共に小さいことが分る。2人の患者の $(V-b)$ も等しいとすると⑤, ⑥, ⑦式の右辺第1項は0となり、一方の患者の Q , d , R が何%小さいかが分かる。

このことは一人の患者の Q , d , R が精密検査で既知であれば、その他の患者の Q , d , R も計

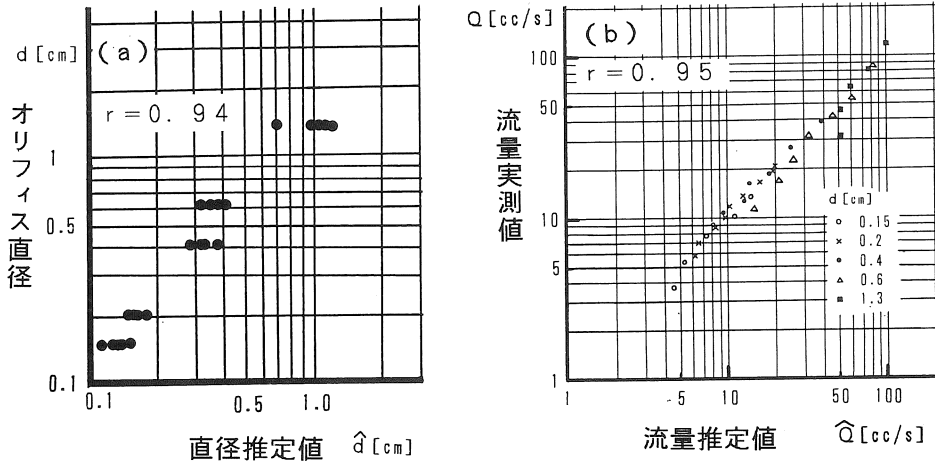


図 3. 直径の推定値と実測値の比較 (a) および流量の推定値と実測値の比較 (b). 本文の②, ③式に実験データの flow void の体積, 圧較差 (流速) を代入し推定値を求め, 実測値との相関を調べた.

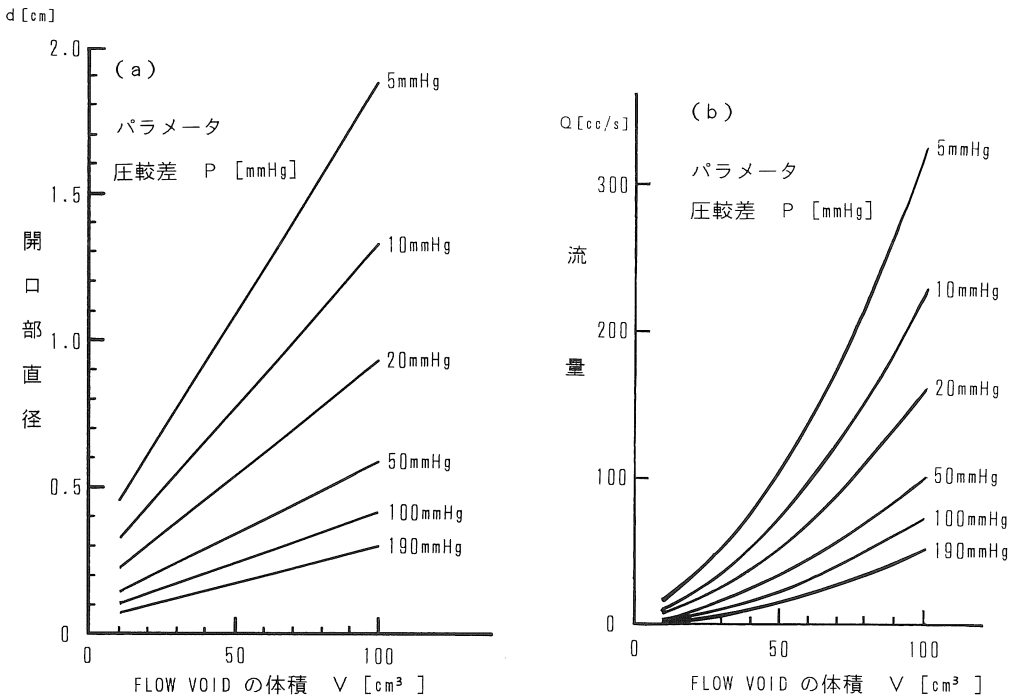


図 4. 圧較差をパラメータとした flow void の体積と直径の関係 (a) および flow void の体積と流量の関係 (b).

算できることを示す。bの値は一人の被検者について薬物等で血圧を変え、その前後のV, UまたはPを測定すれば、下式で求めることができる。V₁, U₁, P₁は血圧を変える前の値でV₂, U₂, P₂は血圧を変えた後の値である。

bは主にシステムに依存する量で、個人差の影響は少ないと考えられるので、数人について平均をとると確実である。

$$b = \frac{U_2 \cdot V_1 - U_1 \cdot V_2}{U_2 - U_1} = \frac{V_1 \sqrt{P_2} - V_2 \sqrt{P_1}}{\sqrt{P_2} - \sqrt{P_1}}$$

(4)その他の課題

臨床の場面でしばしば現れる変形したflow voidや大きいpotential coreをもつflow voidについて体積の計測と実験式との整合を工夫する必要がある。今回は最も簡単な円形オリフィスを使ったが、今後はもっと実際の逆流部や短絡部に近い形と材質のファントムで実験する必要がある。

結 論

A. Flow voidについて実験式を導入し、変量間の関係を検討した。従来の評価指導では変量が一つ不足していることを明らかにした。

B. 開口部の大きさと流量を実験データをもとに推定することを試み、変量として流速(圧較差)を補い実験式に代入した結果、ほぼ合致していることが分かった。

C. 臨床応用のためには更にデータの集積と若干の課題の解決が必要であるが、当面、簡便に行える方法も検討した。本法による臨床推定は可能でかつ有用と思われる。

謝辞 本実験に御協力頂きました杉石病院杉石宗隆院長、放射線科山田和弘技師に心から感謝申し上げます。なお、本研究の一部は(財)中部電力基礎技術研究所 助成研究R-01027により助成を得ました。あわせて深く感謝申し上げます。(なお、本論文の要旨は第17回日本磁気共鳴医学大会において発表した)

文 献

- 1) Pflugfelder PW, Landzberg JS, et al. : Comparison of cine MR imaging with Doppler echocardiography for the evaluation of aortic regurgitation. AJR, 152 : 729-735, 1989.
- 2) 久保田修平, 西村恒彦 : シネMRI法による心疾患に於ける弁逆流の評価. 日磁医誌, 9 : 246-256, 1990.
- 3) 岡村正博, 安野泰史, 近藤 武, 他 : 心臓シネMRI上に出現するflow voidの大きさから弁逆流流量および短絡血流量を定量的に推定出来るか? 一流水ファントムによる検討一. 日磁医誌, 11 : 203-207, 1990.
- 4) Evans AJ, Russel AB, et al. : Effects of turbulence on signal intensity in gradient echo images. Investigative Radiology, 7 : 512-518, 1988.
- 5) 坂倉一義, 近藤 武, 瓜谷富三, 他 : 拍動流ファントムによるflow voidの実験的検討. 日磁医誌, 11 : 154, S-2, 1991.

Study on the Quantitative Calculation of Valvular Regurgitation and Septal Shunt Flow by Means of Flow Void.

Tomizo URITANI¹, Masahiro OKAMURA², Takeshi KONDO¹,
Hirohumi ANNO¹, Kazuyoshi SAKAKURA², Sukehiko KOGA³,
Koujiro YAMAGUCHI^{4,3}

¹*Department of Radiological Techninology, School of Health Sciences,*

²*Department. of Internal Medicine, School of Medicine,*

³*Department of Radiology, School of Medicine, Fujita Health University
1-98 Dengakugakubo, Kutsukake, Toyoake, Aichi 470-11*

⁴*Toshiba Nasu Works*

Many studies concerning the evaluation of valvular regurgitation and shunt flow based on the size of the flow void have been performed recently. With the popularization of MRI, these method has entered general clinical use. However, problems related to its reliability have also been reported. In this paper we clarify the causes of these problems and propose a method for the quantitative calculation of regurgitation and shunt flow based on the results obtained by this analysis. Initially, the formulae obtained by a flow phantom experiment was used to study the relationships between each variate. Then, we found that conventional evaluation of regurgitation and shunt flow has been made without a variate in its criteria. Furthermore, we also confirmed that the calculated and experimental diameter of the orifice and the flow rate were in good agreement. We also discussed quantitative calculation techniques which is currently applicable in clinical use, although further data accumulation and verification are required before its general use.