



[原著]

僧帽弁形成術前後における左室内腔渦流評価

伊藤記彦¹, 諏訪部章², 田代敦², 山口良考¹, 片山博徳¹, 佐藤正一³¹ 国際医療福祉大学 成田保健医療学部 医学検査学科² 岩手医科大学 医学部 臨床検査医学講座³ 順天堂大学 医療科学部 臨床工学科

要旨

心臓弁膜症の診断や術後評価において心エコー図検査は必要不可欠である。近年, 大槻らにより開発された Echo-Dynamography (EDG) 法をもとにした Vector Flow Mapping (VFM) より, 左室内腔の複雑な流れが表示可能となり, 左室内腔の血流が渦流を形成していることが明らかとなった。VFM で僧帽弁形成術 (Mitral Valve Plasty : MVP) 前後例の左室内腔の渦流について評価し, VFM が新たな心機能評価の指標に役立つか検討した。健常者 23 例と MVP 前後 17 例を対象に, 左室内腔の渦流について観察し, さらに渦流の最大渦流量 (cm^2/sec), 最大半値面積 (cm^2), 最大渦強度 ($1/\text{sec}$) について比較検討した。健常者と MVP 前後例に観察された主な渦流は拡張期であった。健常者の最大渦流量は 28.5 ± 11 (cm^2/sec), 最大半値面積は 2.2 ± 1.2 (cm^2), 最大渦強度は 15 ± 7 ($1/\text{sec}$) だった。MVP 前後例の最大渦流量は 66 ± 20 (cm^2/sec) から 39 ± 20 (cm^2/sec) へ, 最大半値面積は 4.0 ± 2.0 (cm^2) から 2.5 ± 1.5 (cm^2) へと有意 ($p < 0.01$) に縮小し, 左室拡張末期容積と有意な正の相関を示した。最大渦強度の低下は認められなかった。VFM は, 左室内腔の渦流を観察することを可能にし, MVP 前後の心機能評価の指標になりうることを示された。

キーワード : Echo-Dynamography (EDG), Vector Flow Mapping (VFM), 僧帽弁形成術 (MVP), 最大渦流量, 最大渦強度, 最大半値面積, フレーム (f), フレームレート (fr)

1. 緒言

心臓弁膜症の外科的治療方法に, 本邦では可能な限り自己弁を温存し弁を修復する弁形成術を選択するが, やむを得ず自己弁温存が困難な場合に弁置換術が実施される。心臓弁膜症の診断や外科的治療の手術前および手術後評価において, 心エコー図検査は必要不可欠な検査である。心エコー図検査の機能で, 心腔内の血流情報を得る手段

としてカラードプラ法があり, 弁逆流や短絡血流などがリアルタイムに診断できる。カラードプラ法は, ドプラ効果を応用し, 探触子から発信された超音波ビームが心腔内の血流に反射し, 探触子に向かってくる血流を赤色で, 遠ざかる血流を青色で表示し, 心腔内の血流情報を可視化している。心腔内の血流情報を得る手段には, 心エコー図検査のカラードプラ法以外に, 数値シ

連絡先 : 伊藤記彦
〒286-8686 千葉県成田市公津の杜 4-3
国際医療福祉大学成田保健医療学部医学検査科

2023 年 1 月 28 日受付
2023 年 6 月 22 日受理

E-mail: norihiko-ito3@iuhw.ac.jp

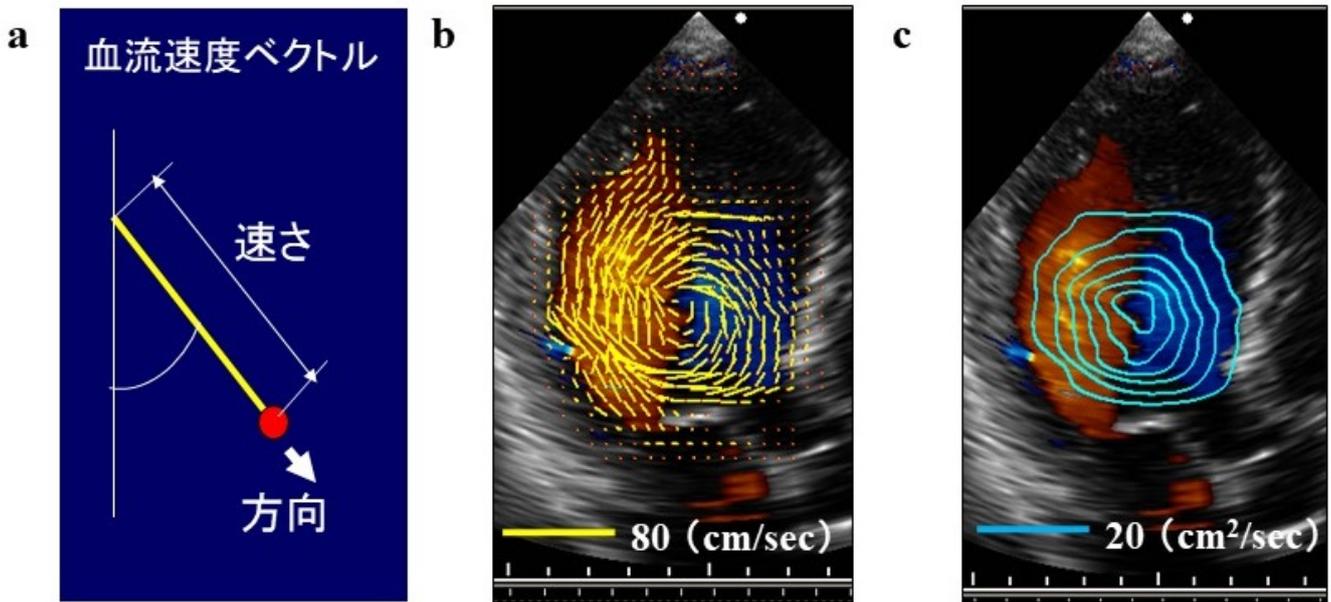


図1 血流速度情報のベクトル表示と渦流表示

a: 血流速度ベクトル.

カラードプラから得られたひとつのピクセルの血流速度情報をもとに, 血流の速さを黄色線の長さで, 血流方向を赤点で示す.

b: 左室内腔の血流をベクトル表示.

左室中央部に時計周りの大きな渦流が示され, 黄色線の長さ 1cm が 80cm/s の速度を示す.

c: 血流速度成分の渦流表示例.

等高線の中心が最高速を示し, 輪と輪の間が 20 (cm²/sec) を示す. 6つの輪なので 120 (cm²/sec) を示す.

ミュレーション法¹⁾²⁾, MRIを用いた速度マッピング法³⁾⁴⁾, コントラスト剤を用いてトラッキングする particle image velocimetry (PIV)法⁵⁾⁶⁾, などが報告されている. しかし, 特殊な装置やプログラムを用いるため臨床応用は進んでいないのが現状であり, 心腔内の血流についていまだ解明されていない点が多い.

アロカ社製の Echo-Dynamography (EDG)法による Vector Flow Mapping (VFM)解析ソフトは, カラードプラ法で得られた速度情報を流体力学的理論に基づいて処理することで, 超音波ビーム方向に依存しない速度ベクトル情報を得ることができるようになった⁷⁾⁸⁾⁹⁾. また, 左室内腔血流速度分布を観測面内流速ベクトル分布図(図.1a)として描出することも可能になった¹⁰⁾. この方法を用いると, 心腔内の血液の流れをベクトル表示でき, 血液の流れの方向・速度の大きさなど直観的に可視化できる(図.1b). VFMで左室内腔を観察すると, 複雑な渦流が形成されていること

が明らかにされ(図.1c), さまざまな心疾患における左室内腔の渦流の果たす役割の解明が期待されている.

今回我々は, EDG法によるVFM解析ソフトを用いて心周期における左室内腔の渦流を観察し, 僧帽弁形成術(mitral valve plasty: MVP)の手術前と手術後の左室内腔渦流変化が, 心機能評価の指標として役立つか検討した.

II. 対象および方法

1. 対象

洞調律で高血圧症や虚血性心疾患および弁膜症など心疾患を有さず, 心エコー図検査上異常所見を認めなかったボランティア健康者 23例(男:女=20:3, 平均年齢 59±8歳). 僧帽弁閉鎖不全症に虚血性心疾患や弁膜疾患の合併のない患者に対して, 僧帽弁形成術を施行し手術前後ともに洞調律で僧帽弁形成術後に遺残僧帽弁逆流が軽度以下の17例(男:女=13:4, 平均年齢±1SD = 55±11歳)を対象とした.

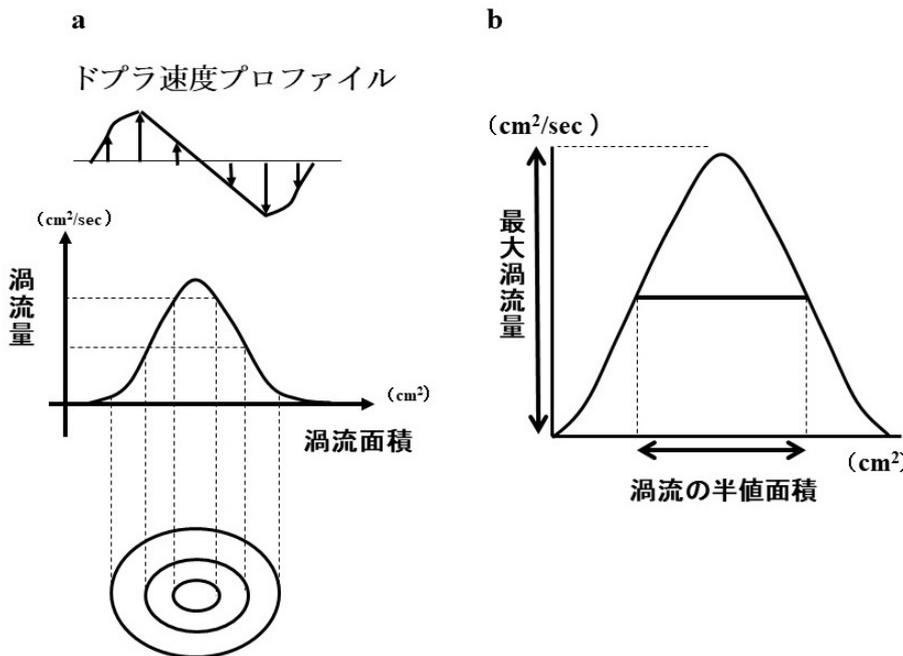


図2 Echo-Dynamographyの渦流表示の説明：渦流量と渦流の半値面積
a：渦流表示の原理。

上段の図はドプラ速度プロファイルを示し、血流が上方↑と下方↓のドプラ速度の場合、時計周りの渦流が生じる。中段の図はドプラ速度を左から右に順に積分した結果を示す。この積分した結果の2次元平面の分布が流れ関数となる。下段の図は流れ関数の等レベルの値を結んだ線で、図1cのような渦流表示になる。

b：渦流の評価としての最大渦流量と半値面積を示す。
渦流の半値面積は、流れ関数の最高値の1/2の値となる領域の渦流量積とするもので、渦流の大きさを示す指標のひとつとされる。

手術後の検査施行までの期間は、14例が平均8日後、1例が1ヶ月後、2例が6ヶ月後であった。

2. 使用超音波装置と記録方法後
心エコー図検査用の超音波装置はAloka社製SSD6500を用いた。送信周波数が2.5MHzのセクタ探触子を用いて画像を記録した。フレームレート(fr：1秒間の画像数)は約33(f/sec)、カラードプラの速度レンジは約66(cm/sec)の設定とし、心尖長軸断面像のカラードプラ動画像を呼吸止めで4秒間デジタル記録保存した。

3. 画像の解析方法

アロカ社製のEDG法によるVFM解析ソフトを用い、ベクトル表示と渦流表示について、それぞれ1心拍動画像を1(f)毎に左室内腔の渦流について観察した(図2)。渦流の評価は、最大渦流量(cm^2/sec) [単位時間(秒)あたりの最大渦流量積]、最大半値面積(cm^2)、最大渦強度($1/\text{sec}$) [最大渦流量(cm^2/sec)/最大半値面積(cm^2)]、総渦流量(cm^2/sec)および渦流持続時間(msec)の各指標を用いた。

4. 統計処理

統計処理はすべてStatView5.0(SAS Institute, Cary, NC)にて行った。健常者と患者の最大渦流量、最大半値面積、最大渦強度、総渦流量および渦流持続時間の比較にはunpaired Student's t-testを用い

た。MVP前後の最大渦流量、最大半値面積、および最大渦強度の比較にはpaired Student's t-testを用いた。各渦流の指標と左室拡張末期容積(EDV)との相関は、Pearsonの相関分析を用いた。有意水準を $p < 0.05$ とした。

III. 結果

1. 左室内腔の渦流の観察

図3.4.5に健常者とMVP前後例の等容収縮期、駆出期、等容拡張期、拡張早期、心房収縮期の代表的な渦流を示す。左室内腔の部位別に認めた渦流について、心周期の時相(等容収縮期、駆出期、拡張早期、心房収縮期)ごとの出現率をまとめた(表1.2)。

等容収縮期の渦流出現率は、左室中央部で健常者が23人中12人(52%)の出現に対して、僧帽弁形成術前(pre-MVP)が17人中15人(88%)、僧帽弁形成術後(post-MVP)で17人中14人(82%)の出現だった。左室後壁部では、健常者が23人中0人(0%)に対してpre-MVPが17人中6人(35%)、post-MVPで

17人中3人(18%)の出現だった。左室心尖部では、健常者とPre-MVPが23人中0人(0%)に対してPost MVPで17人中4人(24%)の出現だった(表.1)。駆出期の渦流出現率は、左室中央部で健常

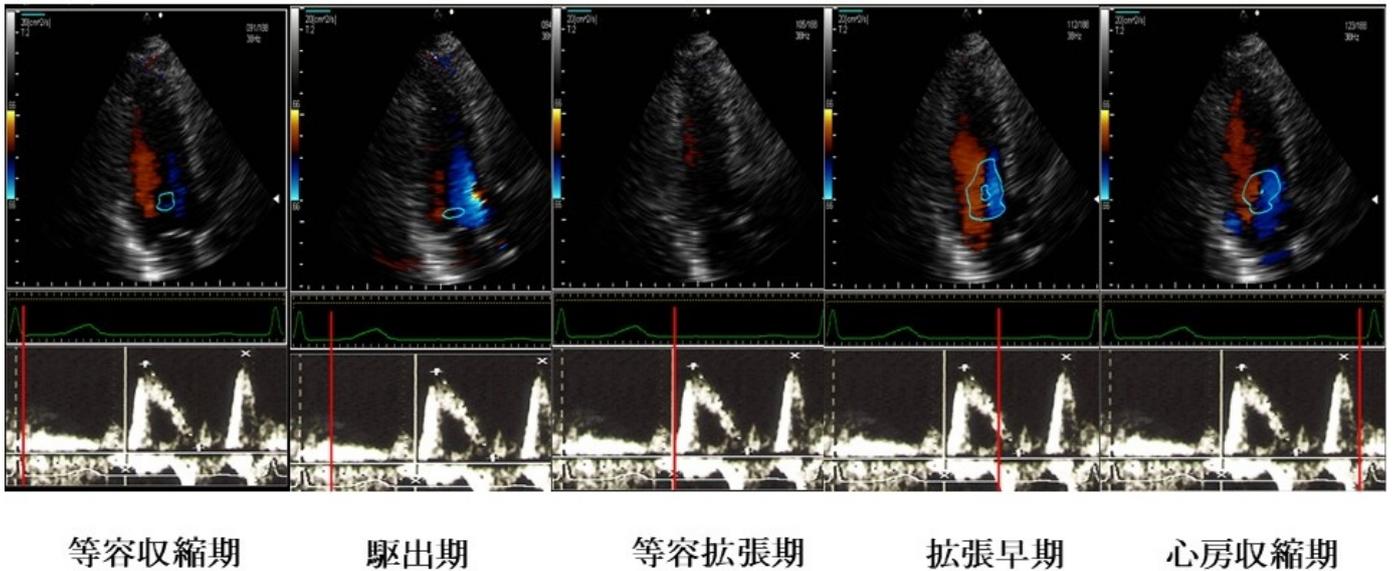


図3 健常者の心周期渦流

健常例の渦流について等容収縮期, 駆出期, 等容拡張期, 拡張早期, 心房収縮期を示す. 等容収縮期と駆出期に心房収縮期から残存する渦流を左室中部に $20 \text{ (cm}^2/\text{sec)}$ の渦流を認める. 等容拡張期は左房からの流入血流がないため渦流は認めないが, 拡張早期で左房から左室心尖部方向への赤色シグナルの流入血流と, 左室流出路の大動脈弁方向の青色シグナルの流入血流によって $40 \text{ (cm}^2/\text{sec)}$ の渦流を認める. 心房収縮期の左室流入血流による渦流は拡張早期から持続した $40 \text{ (cm}^2/\text{sec)}$ の渦流である.

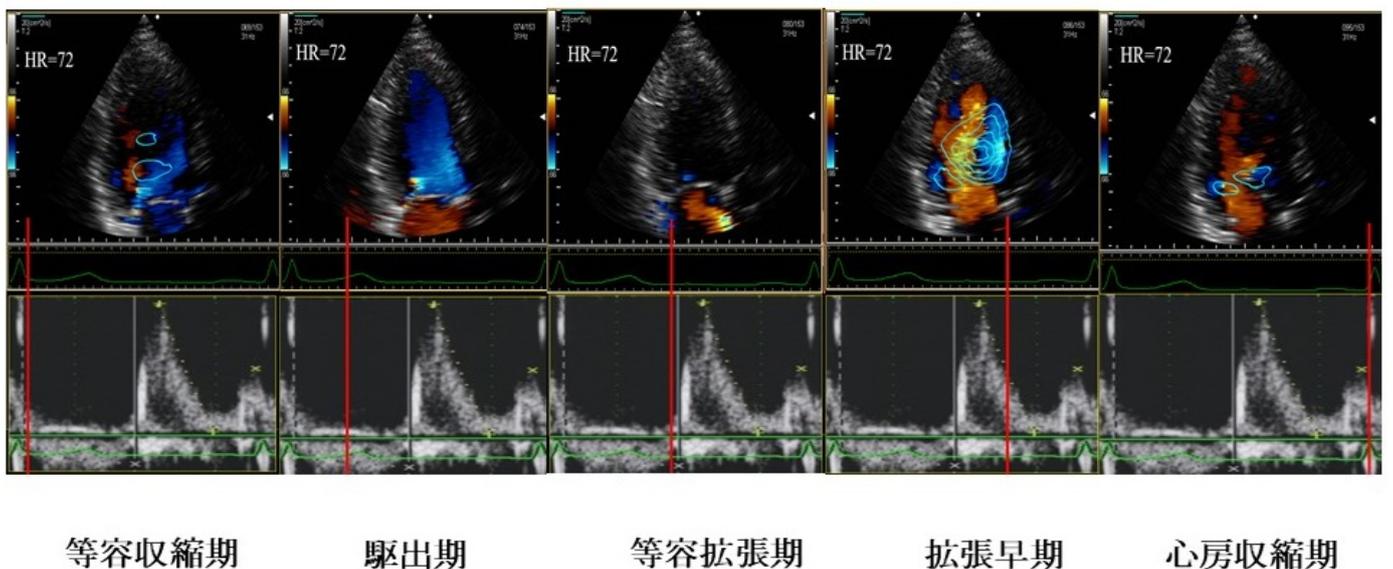
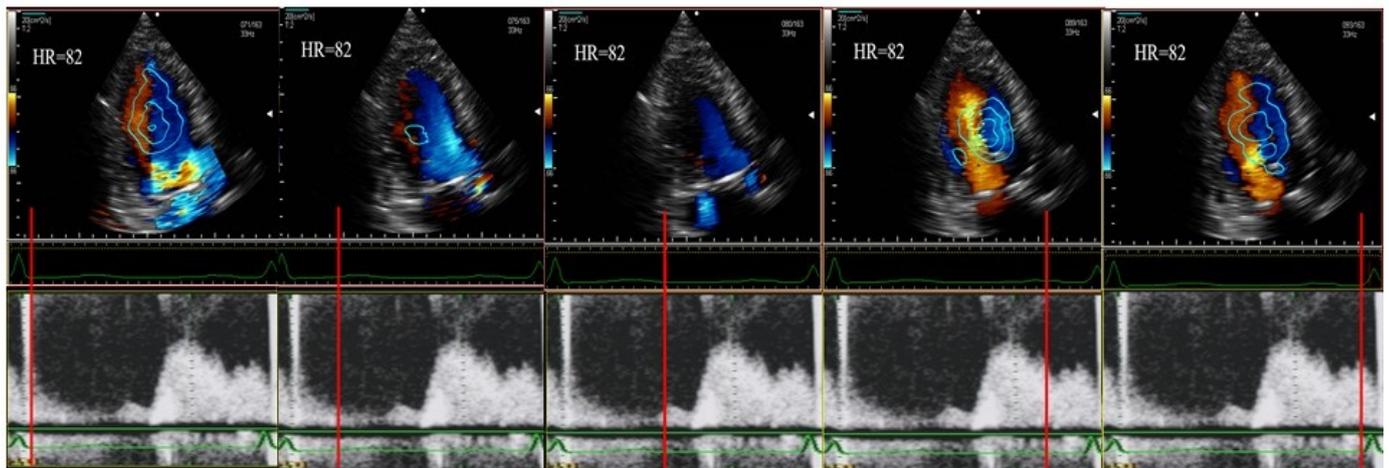


図4 僧帽弁形成術前の心周期渦流

僧帽弁形成術前 (Pre-MVP) の等容収縮期, 駆出期, 等容拡張期, 拡張早期, 心房収縮期を示す. 等容収縮期の左室中央部に $20 \text{ (cm}^2/\text{sec)}$ の2つ渦流を認める. 駆出期に渦流は認めない. 拡張早期の左室中央部に $100 \text{ (cm}^2/\text{sec)}$ の渦流と左室後壁側に $20 \text{ (cm}^2/\text{sec)}$ の渦流を認める. 心房収縮期に左室中央部と左室後壁側に $20 \text{ (cm}^2/\text{sec)}$ の渦流を認める.

者が23人中5人(23%)の出現に対して, pre-MVPが17人中8人(47%), post-MVPで17人中11人(65%)の出現だった. 左室後壁部では, 健常者が23人中0人(0%)に対してPre-MVPが17人中0人(0%)

中3人(18%), Post-MVPで17人中1人(6%)の出現だった. 左室心尖部では, 健常者が23人中0人(0%)に対してPre-MVPが17人中0人(0%), Post-MVPで23人中3人(18%)の出現



等容収縮期 駆出期 等容拡張期 拡張早期 心房収縮期

図5 僧帽弁形成術後の心周期渦流

僧帽弁形成術後 (Post-MVP) の等容収縮期, 駆出期, 等容拡張期, 拡張早期, 心房収縮期を示す. 等容収縮期の左室中央部から心尖部にかけて $60 \text{ (cm}^2/\text{sec)}$ の渦流を認める. 駆出期の左室中央部に $20 \text{ (cm}^2/\text{sec)}$ の渦流を認める. 等容拡張期では渦流を認めず. 拡張早期に左室中央部に $60 \text{ (cm}^2/\text{sec)}$ の渦流と左室後壁側に $20 \text{ (cm}^2/\text{sec)}$ の渦流を認める. 心房収縮期に左室中央部から心尖部にかけて広範囲の渦流 $40 \text{ (cm}^2/\text{sec)}$ を認める.

表1 収縮期 (等容収縮期と駆出期) の左室内腔渦流出現率

	収 縮 期					
	健常者(n=23)		僧帽弁形成術前(n=17)		僧帽弁形成術後(n=17)	
	等容収縮期	駆出期	等容収縮期	駆出期	等容収縮期	駆出期
左室中央部 (%)	52	23	88	47	82	65
左室後壁側 (%)	0	0	35	18	18	6
左室心尖部 (%)	0	0	0	0	24	18

3群の収縮期を等容収縮期と駆出期に分け, それぞれ左室中央部, 左室後壁部, 左室心尖部の出現率を示す. 健常者は左室中央部のみ渦流を認めたが, pre-MVPでは左室中央部と左室後壁側に認め, post-MVPでは全ての部位で渦流を認めた.

だった (表.1).

拡張早期の渦流出現率は, 左室中央部で3群とも100%の出現だった. 左室後壁側では健常者が23人中4人(17%)の出現に対して僧帽弁形成術前(pre-MVP)が17人中16人(94%), post-MVPで17人中3人(18%)の出現だった. 心尖部では健常者が23人中2人(9%)の出現に対してpre-MVPが17人中10人(56%), post-MVPで17人中7人(44%)の出現だった (表.2).

心房収縮期の渦流出現率は, 左室中央部で

健常者が23人中23人(100%)の出現に対してpre-MVPが17人中16人(94%), post-MVPで17人中17人(100%)の出現だった. 左室後壁側では健常者が23人中4人(17%)の出現に対してpre-MVPが17人中14人(81%), post-MVPで17人中12人(69%)の出現だった. 心尖部では健常者が23人中0人(0%)の出現率に対してpre-MVPが17人中1人(6%), post-MVPで17人中1人(6%)の出現だった (表.2).

2. 拡張早期の渦流指標の比較

表2 拡張期（拡張早期と心房収縮期）の左室内腔渦流出現率

	拡張期					
	健常者(n=23)		手術前(n=17)		手術後(n=17)	
	拡張早期	心房収縮期	拡張早期	心房収縮期	拡張早期	心房収縮期
左室中央部 (%)	100	100	100	100	100	100
左室後壁側 (%)	17	17	94	81	18	69
左室心尖部 (%)	9	0	56	6	44	6

3群の拡張期を拡張早期と心房収縮期に分け、それぞれ左室中央部、左室後壁部、左室心尖部の出現率を示す。pre-MVPの左室後壁側、左室心尖部に出現した渦流が手術後に減少した。

表3 僧帽弁形成術前後の左室容積変化と渦流の変化

	健常者 (n=23)	僧帽弁形成術(n=17)	
		術前	術後
年齢 (歳)	59 ± 8	55 ± 10	55 ± 10
体表面積 (m ²)	1.70 ± 1.20	1.69 ± 0.17	1.69 ± 0.17
心拍数 (beat/min)	59 ± 9	63 ± 11	71 ± 14
左室拡張末期容積 (ml)	89 ± 18	151 ± 42***	95 ± 25
EF (%)	67 ± 13	66 ± 11	58 ± 10
最大渦流量 (cm ² /sec)	29 ± 11	66 ± 20***	39 ± 20****
最大半値面積 (cm ²)	2.2 ± 1.2	4.0 ± 2.0**	2.5 ± 1.5#
最大渦強度 (1/sec)	15 ± 7	22 ± 15	18 ± 9
総渦流量 (cm ² /sec)	89 ± 50	286 ± 122**	188 ± 123
渦流持続時間 (msec)	271 ± 50	234 ± 53**	228 ± 86

unpaired Student's t-test: * p<0.05, ** p<0.01, *** p<0.001
paired Student's t-test: # p<0.05, ## p<0.01, ### p<0.001

僧帽弁形成手術によって手術後の左室拡張末期容積と渦流の各指標は縮小した。なかでも最大渦流量は有意に縮小した (p<0.001)。

健常者と MVP 前後例において、渦流が 100%出現した拡張早期の左室中央部の渦流について検討した (表.3)。健常者と pre-MVP を比較すると、pre-MVP の最大渦流量、最大半値面積、総渦流量および渦流持続時間は、健常者より有意に高値を示した。pre-MVP の最大渦強度は健常者より高い傾向を示したが有意差は認められなかった。健常者と post-MVP の比較では、post-MVP の最大渦流量と渦流持続時間は健常者より有意に高値を示した。post-MVP の最大半値面積、最大渦強度および総渦流量は、健常者より高い傾向を示したが有意差は認められなかった。pre-MVP に比較

し post-MVP では、最大渦流量と最大半値面積で有意に低下した。post-MVP の最大渦強度、総渦流量および渦流持続時間は pre-MVP より高い傾向を示したが有意差は認められなかった。

3. 渦流と左室拡張末期容積

EDV と渦流の関係を明らかにするために、健常者と MVP 前後例の 3 群すべての症例の EDV と渦流の各指標についてそれぞれ比較検討した (図.6)。EDV に対して最大渦流量と最大半値面積は有意な正の相関を示した (図.6a.b)。EDV と総渦流量は弱い正の相関を示した (図.6c)。EDV と最大渦強度は有意な相関を示さなかった

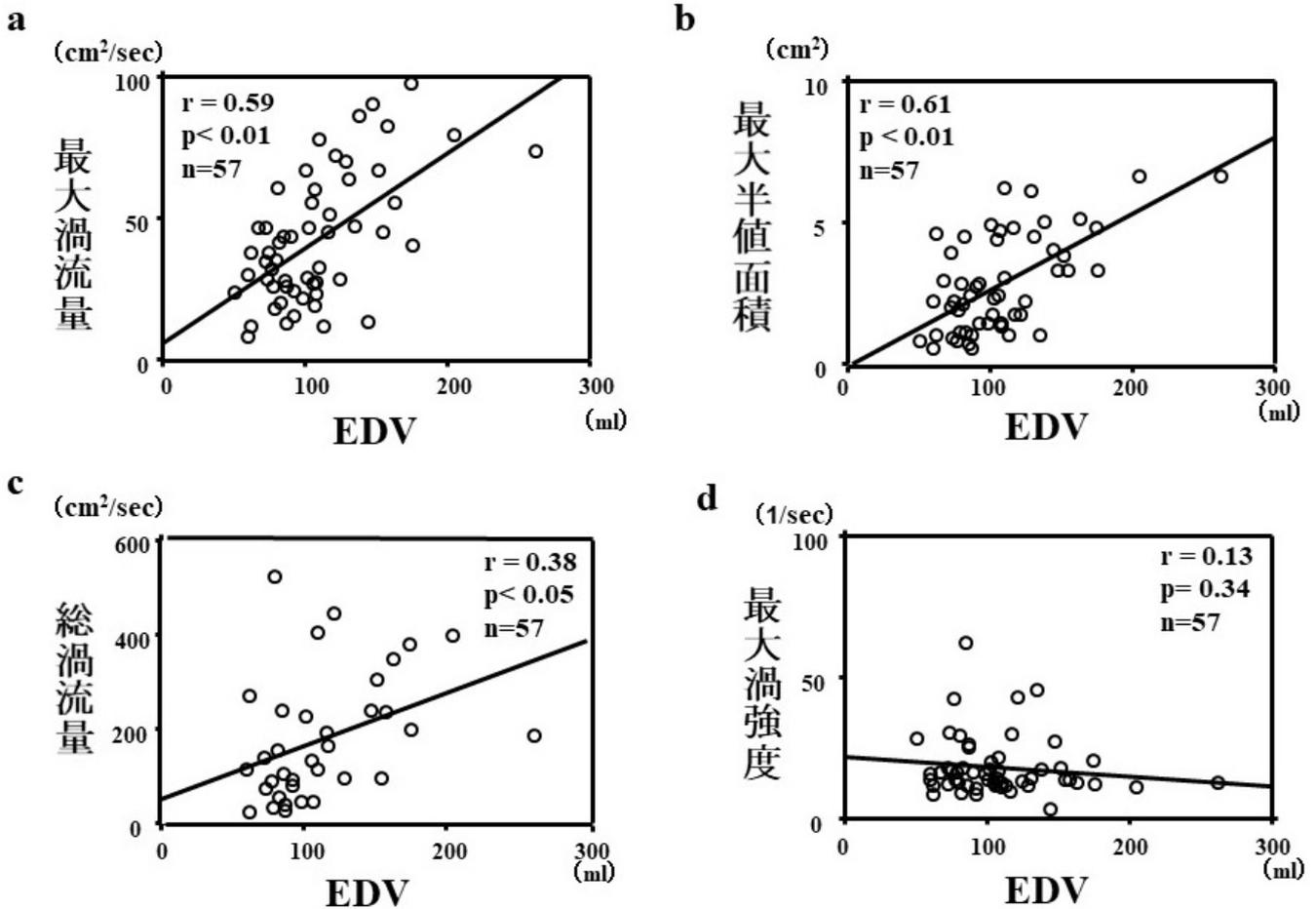


図6 左室拡張末期容積と渦流の指標
左室拡張末期容積(EDV)と最大渦流量(a), 最大半値面積(b), 総渦流量(c)および最大渦強度(d)との相関を示す。EDVと最大渦流量(a)および最大半値面積(b)は高い有意な相関を示し、総渦流量(c)と最大渦強度(d)は有意な相関を示さなかった。

(図.6d).

IV. 考察

1. EDG法とVFM解析ソフト開発について

大槻らが開発したEDG法⁷⁾⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾は、カロードプラ法で得られた情報に基づき血流解析と心臓壁運動解析で構成されている。このEDG法をもとにアロカ社は、心臓壁運動解析を含まない血流の速度ベクトルだけにフォーカスした第I世代のVFM解析ソフトを開発した。その後、アロカ社は質量保存の法則に基づくアルゴリズムを用いて、新たに第II世代のVFM¹⁷⁾解析ソフトを開発した。EDG法による第I世代VFMと質量保存則に基づく第II世代VFMの相違点について表に示す(表.4)。

本研究では、第I世代のVFMを用いて計測可能な最大渦流量, 最大半値面積, 渦

強度について解析している。

2. 僧帽弁閉鎖不全症の外科治療と対象者について

僧帽弁閉鎖不全症の外科的治療方法に、僧帽弁形成術と僧帽弁置換術がある。本邦では、可能な限り自己弁を温存し弁を修復する僧帽弁形成術を選択するが、やむを得ず自己弁温存が困難な場合に僧帽弁置換術が実施される。僧帽弁閉鎖不全症には、僧帽弁の病変による僧帽弁閉鎖不全症と、左室や左房のリモデリングによる二次的な僧帽弁閉鎖不全症がある。また、心房細動や房室ブロックなど不整脈の合併や、心筋梗塞や僧帽弁以外の弁膜疾患を合併するなど多様である。

本研究は、僧帽弁形成術の手術前と手術後の左室内腔に形成される渦流について後方視的観察研究のため、僧帽弁自体の病変に対する僧帽弁形成術施行患者を対象とし

表 4 第 I 世代 VFM (EDG 法による VFM) と第 II 世代 VFM の相違点

	第 I 世代 VFM (EDG 法による VFM)	第 II 世代 VFM
基本の式	流れ関数	2次元の質量保存則
渦流と基本流の分離	あり	なし
心臓壁の境界条件	壁を考慮しない	壁を考慮する
最大渦流量	○ (渦流から計測)	×
総渦流量	○ (渦流から計測)	×
渦の大きさ	○ (渦流から計測)	○ (限界流線から計測)
最大半値面積	○ (渦流から計測)	×
渦強度	○	×
渦度	×	○
渦領域の循環	×	○

第 I 世代 VFM (EDG 法による VFM) は流れ関数を採用し、心臓壁の運動は考慮していない。渦流成分から最大渦流量、総渦流量、渦強度が測定可能である。

いっぽう第 II 世代 VFM は 2次元の質量保存法則を採用し、心臓内壁の速度を心臓壁境界条件として考慮する。流れを渦流成分と基本流成分に分けないため、最大渦流量、総渦流量は測定できない。

た。さらに、手術前と手術後がともに洞調律の患者に限定した。

3. VFM 以外の心腔内渦流表示方法について

心腔内の渦流について、15 世紀にレオナルド・ダビンチが大動脈弁のバルサルバ洞にできる渦流について記述したのが初めてと考えられている¹¹⁾。日常の心エコー図検査で、拡張型心筋症や心筋梗塞症など、左室内腔の著明な拡大と収縮能が低下した症例に血流が鬱滞し、複雑な渦流を認めることはすでに指摘されていた。また、心疾患の病態が進行すると、心機能低下と左室内腔の拡大を伴い、左室内腔の血流動態に影響を与えるという報告もある¹²⁾。経食道心エコー図検査でも、僧帽弁狭窄症や心房細動例に左房内の血流が鬱滞し、複雑な渦流やモヤモヤエコーを認めることが指摘されていた。しかし、これらの渦流について評価した報告は、数値シミュレーション法¹⁾²⁾、速度マッピング法³⁾⁴⁾、PIV 法⁵⁾⁶⁾などによる報告のみで、渦流の定量的評価など臨床応用は進んでいなかった。

4. 折り返し現象とフレームレート (fr) における VFM の限界

カラードプラ表示で、高速血流を表示す

る際に一回の折り返し現象で表示可能な血流速度であれば VFM で解析可能だが、一回の折り返し現象を超える高速の血流速度の場合には、VFM 解析ができないことになる。そのため、左室内腔において大動脈弁逆流や高度の僧帽弁狭窄症など高速血流を伴うと VFM 解析ができない。

また、通常のカラードプラ画像は 10 fr 前後であったが、VFM の場合カラードプラ情報をより多く取得するために、B モード像の走査線密度を低下させることで 30 fr から 40 fr の動画像を得ている。その結果、通常のカラードプラ動画像よりも fr は高い設定となっている。

本研究では、このような欠点を回避するため、左室内腔の血流が高速血流を伴わない疾患で、術後の比較的短期間で治療効果が現れ、さらに当施設で症例数が多く確保できる病態を選択する必要があった。高度の僧帽弁逆流によって左室が拡張し、僧帽弁形成術によって術後の短期間に左室容量が改善し縮小する僧帽弁形成術前後の症例が適しており、しかも大動脈弁逆流を併発せず、かつ洞調律の症例を対象とした (表 3)。また、MVP の対象となった年齢が 50 歳代から 70 歳代に多く、左室拡張能の指

標である僧帽弁を通過する左室流入血流ドプラ波形パターンが年齢層で異なることを考慮し、50歳代から60歳代で体表面積もMVP症例と同程度の健常者を選定した(表.3).

EDG法によるVFMを用いることで左室内腔の血流がベクトル表示や渦流表示で視覚的に観察し、渦流の発生時相、渦流の大小および渦流の密度の濃さなど定性的な評価することができた。さらに、渦の半値面積(図.2b)という最大渦流量の1/2値の渦流面積を用いたところ、健常者とMVP前後の渦流変化を定量的に評価することができた(表.3)。一般的に渦は同じ総面積でも、強い渦の場合だと半値面積が大きくなることから、この半値面積は左室内腔に生じる渦の定量評価の新しい指標になる可能性がある。今後さらに症例を追加して検討したい。

本研究は、1フレーム(f)毎に左室内腔の渦流について観察し、健常者とMVP前後例の3群の最大渦流量、最大半値面積、最大渦強度、総渦流量および渦流持続時間について検討した。しかし、これらは心周期のなかの拡張早期と心房収縮期の渦流のみに限定した比較検討であるため、さらに心房収縮期や収縮期などの時相を限定した渦流評価と心周期を通した渦流について、増大または縮小消退する過程を観察研究する必要がある。また、解析用に取得した断面像が心尖長軸断面像のみの渦流であるため、3次元エコーによるアプローチで立体的な渦流の変化について観察研究をすることが必要と考える。

5. 渦流と左室容積について

今回のEDG法によるVFMを用いた検討で、通常的心エコー図検査では表示されなかった左室内腔の渦流を観察できることが示された。渦流出現率の結果(表.1.2)から、健常者では渦流が小さく、pre-MVPでは渦流が大きい傾向が示された。その原因として、渦流サイズ(強さと大きさ)がEDVに依存すると推測した。そこで、EDVと渦流の各指標についてそれぞれ比較検討した(図.6)ところ、EDVと最大渦流量および最大半値面積はと正の相関が

示され(図.6ab)、EDVが増加するほど最大渦流量および最大半値面積は増加傾向にあることが判明した結果から、EDVは渦流サイズに影響を与えることが示唆された。

6. 僧帽弁形成術による左室流入血流軌跡の変化

今回の解析では、post-MVPでは左室容積が縮小改善したにもかかわらず、渦流サイズは健常者と比較すると依然として大きい傾向が示された。その原因として、健常者の左室流入血流軌跡は、僧帽弁口から心尖部方向へ垂直に流入するが、post-MVPでは僧帽弁の開放角度が制限されるため、健常者の左室流入血流より指向性が限定され、左室流入血流軌跡が僧帽弁口から左室後壁側、心尖部、心室中隔の順に左室内腔を時計周りに旋回する血流が渦流に影響をおよぼすと考えられた。

7. 渦流指標の意義

渦流の臨床的意義は、台風为例えると理解しやすい。台風は、真夏に熱帯地域の暖かい空気が熱帯低気圧に発達し、中心の最大風速が34ノット以上のものと定義され、34ノット未満は温帯低気圧と呼ばれる。台風が北上し中緯度地域に移動すると、北からの冷たい空気が混じり温帯低気圧に変わり、中心の最大風速が34ノットを下回り台風は消失する。

台風の大きさ、中心の最大風速の速さ、気圧、台風の移動速度など、台風の勢力の強さにより被害の大きさも変わる。心腔内の渦流は、EDVや拡張時間などの動的要因と関連があり、特に拡張早期の時相においては、健常者の最大渦流量($29 \pm 11 \text{ cm}^2 / \text{ sec}$)、最大半値面積($2.2 \pm 1.2 \text{ cm}^2$)、最大渦強度($16 \pm 7 / \text{ sec}$)、総渦流量($89 \pm 50 \text{ cm}^2 / \text{ sec}$)を生理的な循環動態で出現する「生理的な渦流」と考える。いっぽう、心疾患など左室容積拡大によって最大渦流量や最大半値面積の増加と渦強度の増加する現象は、あたかも台風が発生し勢力を増すごとに中心速度の速い渦流が持続変形する現象と共通するところがある。

しかし、心腔内渦流の場合、心拍動に関

わる要因が密接に関わり合って渦流に影響を与えていると考えられるため、渦流が心臓に影響を及ぼすのではなく、心疾患によって左室がリモデリングし、心拍数変化、壁運動能低下、非対称壁運動により渦流の各指標が増加すると考えられる。

そのため、健常者よりも渦流指標の増加と渦流持続時間の延長を認めた場合、心腔内に異常な血流動態を示す「非効率な渦流」と考える。

さらに、MVPのように外科的治療によってリバスリモデリングした左室の渦流は「修正された渦流」と考える。

8. 等容収縮期の渦流出現について

心筋梗塞や弁膜症および心筋症などの心不全例では、等容拡張期や等容収縮期が延長し駆出時間や拡張時間が短縮する¹³⁾¹⁴⁾¹⁵⁾ことが報告されている。さらに、等容収縮期時間が延長すると左室が非対称運動を呈するため、心不全の指標になる¹⁶⁾と報告されている。これらのことから、渦流はEDV以外に心拍数や拡張時間の要素にも影響されることが考えられた。本研究では、1心拍動画を1f毎に心電図R波のfから次心拍R波までの約20枚のfをVFM解析した。最初のR波から2fぐらゐまで等容収縮期と定義し1心拍動画を1f毎にコマ送り再生し観察した。

健常者の等容収縮期に新たに出現する渦流例を認めた。pre-MVPでは等容収縮期のみでの出現と、心房収縮期から等容収縮期にかけて持続変形移動した渦流例が心尖部まで広範囲の渦流例を認めた。post-MVPでは心房収縮期から等容収縮期にかけて持続変形移動した渦流が、左室中央部から心尖部まで広範囲の渦流を認めた。

本研究では、心音図をモニタリングしていないため、等容収縮期時間の延長についての検討と、1心拍が心電図R波からR波まで約20fの画像解析のため、心房収縮期から等容収縮期まで連続する渦流についての検討はできていない。

しかし、心不全などで等容収縮期が延長すること、心疾患による左室内腔拡大、僧帽弁形成術による左室流入軌跡の変化、心拍数、駆出率、asynergyや非対称運動によ

る壁運動異常など、心臓が拡張収縮するための要因が、心腔内の渦流に関係していると考えられた。

9. 「修正された渦流」と僧帽弁形成術

post-MVPの渦流は、MVP術式の違いによって僧帽弁を通過する左室流入血流軌跡の影響を受けるため、健常者と同等に比較できず、効率の良悪ではなく人工的に手を加えられた修正された渦流と考えるため、僧帽弁の治療部位と手術手技および術前の左室容積の拡大の程度によって、手術後の左室内腔渦流パターンが予測できる可能性がある。そのため、僧帽弁逆流の外科治療の際は、左室リバスリモデリング後も健常者の「生理的な渦流」に戻す外科手術を求められる可能性がある。

以上より、EDG法によるVFMは、MVP術式の新たな評価の指標となりうる可能性が示唆された。

V 結語

EDG法によるVFMによって、通常的心エコー図検査では表示されなかった左室内腔の渦流を観察することが可能になった。僧帽弁形成術前後の拡張早期の渦流を比較すると、僧帽弁形成術後の最大渦流量、最大半値面積および最大渦強度はいずれも改善傾向を認めた。EDG法によるVFMは僧帽弁形成術式の新たな評価の指標となりうることを示唆された。

VI 付記

本研究は、岩手医科大学と国際医療福祉大学の両施設で多施設共同研究の倫理審査が承認されている。(岩手医科大学倫理審査承認番号：MH2022-085、国際医療福祉大学倫理審査承認番号：22-C-1)

謝辞

本稿を終えるにあたり、御指導と御協力を賜りました東北厚生年金病院名誉院長の田中元直先生、東京工業大学名誉教授の大槻茂雄先生、元岩手医科大学小児科教授の小山耕太郎先生、同附属病院生理検査室スタッフの方々、Aloka株式会社の岡田孝さん、久保卓也さんに深謝いたします。

利益相反

本論文において開示すべき利益相反 (COI) はない

文献

- 1) Baccani B, Domenichi F, Pedrizzetti G. Fluid dynamics of left ventricular filling in dilated cardiomyopathy. *J Biomech* 2002;35:665-671
- 2) Pedrizzetti G, Domenichini F. Nature optimizes the swirling flow in the human left ventricle. *Phys Rev Lett* 2005; 95:108-101
- 3) Kim WY, Walker PG, Pedersen EM, Poulsen EM, Poulsen JK, Oyre S, Houlind K, Yoganathan AP. Left ventricular blood flow patterns in normal subjects: a quantitative analysis by three dimensional magnetic resonance velocity mapping. *J Am Coll Cardiol* 1995; 26:224-238
- 4) Kilner PJ, Yang GZ, Willkes AJ, Mohiaddin RH, Firmin DN, Tacoub MH. Asymmetric redirection of flow through the heart. *Nature* 2000; 404:759-761
- 5) Kim HB, Hertzberg J, Lanning C, Shandas R. Noninvasive measurement of steady pulsating velocity profiles and shear rates using echo PIV: in vitro validation studies. *Ann Biomed Eng* 2004; 1067-1076
- 6) Sengupta PP, Lhandheria BK, Kornek J, Jahangir A, Yoshifuku S, Milosevic I, Belohlavek M. Left ventricular isovolumic flow sequence during sinus and paced rhythms: new insights from use of high-resolution Doppler and ultrasonic digital particle imaging velocimetry. *J Am Coll Cardiol* 2007;49:899-908
- 7) Ohtsuki S, Tanaka M. Flow function method for the display of streamlines on ultrasonic color flow image. *The Journal of the Acoustical Society of America* 1998;103: 2752
- 8) Ohtsuki S. An estimation technique of vector component of blood flow from Doppler information on a plane. *the Journal of the Acoustical Society of America* 1998;104:1844
- 9) Ohtsuki S, Tanaka M. The Flow Velocity Distribution from the Doppler Information on a Plane Three-Dimensional Flow. *Journal of Visualization* 2006;9:69-82
- 10) Tanaka M, Sakamoto T. Blood flow structure and dynamics, and ejection mechanism in the left ventricle: Analysis using echodynamography. *Journal of Cardiology* 2008;52:86-101
- 11) 上嶋徳久. 心臓の中の血流を見る. *超音波検査技術* 2009;34(1):24-33
- 12) Goetz WA, Lansac E, Lim HS, Weber PA, Duran CM. Left ventricular endocardial longitudinal and transverse changes during isovolumic contraction and relaxation: a challenge. *Am J Physiol Heart Circ Physiol* 2005;289:H196-201
- 13) Gillebert TC, Van de Veire N, De Buyzere ML, De Sutter J. Time intervals and global cardiac function: use and limitations. *Eur Heart J* 2004;25:2185-2186
- 14) Salukhe TV, Henein MY, Sutton R. Pacing in heart failure: patient and pacing mode selection. *Eur Heart J* 2003;24:977-986
- 15) Bers DM. Macromolecular complexes regulating cardiac ryanodine receptor function. *J Mol Cell Cardiol* 2004;37:417-429

- 16) Veyrat C, Larrazet F, Pellenrin D.
Renewed interest in preejectional
isovolumic phase:new applications
of tissue of Doppler indexes:
implications to ventricular
dyssynchrony. Am J Cardiol
2005;96:1022-1030
- 17) Itatani k, Okada T, Uejima T, et al :
Intraventricular flow velocity
vector visualization based on the
continuity equation and
measurements of vorticity and wall
shear stress. Jpn J Appl Phys.
2013;52:07HF16.

Evaluation of left ventricular Vortex flow change before and after mitral valve plasty

Norihiko ITO¹, Akira SUWABE², Atsushi TASHIRO², Yositaka YAMAGUCHI¹,
Hironori KATAYAMA¹, Shouichi SATO³

1) INTERNATIONAL UNIVERSITY OF HEALTH AND WELFARE NARITA HEALTH MEDICAL
CARE DEPARTMENT MEDICAL INSPECTION SUBJECT

2) DEPARTMENT OF LABORATORY MEDICINE, IWATE MEDICAL UNIVERSITY
SCHOOL OF MEDICINE

3) JUNTENDO UNIVERSITY FACULTY OF MEDICAL SCIENCE DEPARTMENT OF
CLINICAL ENGINEERING

Summary

Recently-developed Echo-Dynamography enabled to show complicated streams in the left ventricle. This method demonstrated that vortex streams occurred in the left ventricle. We compared vortex streams between the normal controls and the patients with mitral valve plasty (MVP) by Echo-Dynamography. The subjects were 23 healthy volunteers and 17 patients with MVP. By analyzing vortex streams in the left ventricle, a maximum flow (cm²/sec), a maximum half area (cm²) and a maximum intensity (1/sec) were compared. The vortex streams were observed mainly in the diastolic phase in all subjects. The maximum vortex flow rate, maximum half-value area, and maximum vortex intensity for normal subjects were 28.5 ± 11 (cm²/sec), 2.2 ± 1.2 (cm²), and 15 ± 7 (1/sec), respectively.

The maximum flow and the maximum half area in the patients were significantly decreased from 66±20 and 4.0±2.0 before MVP to 39±20 and 2.5±1.5 after MVP ($p<0.001$, $p<0.01$), and were significantly correlated with the left ventricular end-diastolic volume ($r=0.59$, $r=0.61$, $p<0.01$). The maximum intensity was also decreased from 22±15 to 18±9, but the change was not significant ($p=0.26$). This study demonstrated that Echo-Dynamography enabled to observe the vortex streams in the left ventricle and can be utilized as one of the new methods for evaluating cardiac functions in the patients before and after MVP.

Keywords: Echo-Dynamography (EDG), Vector Flow Mapping (VFM), Mitral Valve plasty (MVP), maximum vortex flow, maximum vortex intensity, maximum half area