

肺動脈弁左尖エコーグラムの  
b-c slope を規定する因  
子に関する実験的研究

Experimental study on  
the determinants of the  
b-c slope of the pul-  
monic valve echogram

田原 稔  
田中 弘允  
吉村 寿一  
中尾正一郎  
桜井 修吾  
鄭 忠和  
厚地 良彦  
金久 卓也

Minoru TAHARA  
Hiromitsu TANAKA  
Hisakazu YOSHIMURA  
Shoichiro NAKAO  
Shugo SAKURAI  
Chuwa TEI  
Yoshihiko ATSUCHI  
Takuya KANEHISA

**Summary**

In order to examine the determinants of the b-c slope of the pulmonic valve echogram, an experimental study was performed in 12 open-chest dogs.

Using an electromagnetic flowmeter with the probe attached to the pulmonary trunk just above the pulmonary valve, blood flow, flow acceleration and stroke volume were recorded. The right ventricular pressure was also recorded. Echocardiograms were obtained with a transducer placed on the pericardium of the right ventricular outflow tract. Constriction of the pulmonary artery or inferior vena cava was made to change the hemodynamic states.

The b-c slope was widely varied as the relationships between the direction of ultrasound beam and the locus of the valve when opening was changed. Four criteria were made for selection of the pulmonary valve echogram in which the above-mentioned relationships were maintained nearly constant. Using the criteria, correlations between the b-c slope and the hemodynamic measurements such as maximum blood flow, maximum flow acceleration, stroke volume and peak pressure of the right ventricle were examined. Among these 4 measurements the maximum flow acceleration correlated best with the b-c slope. The peak pressure of the right ventricle seemed to correlate with the b-c slope by the changes of maximum flow acceleration.

The data obtained when the relationships between the direction of ultrasound beam and the locus of the valve were not maintained constant showed that the correlations of the b-c slope to the maximum flow acceleration and to the peak pressure were not significantly different.

In conclusion it can be said that (1) the b-c slope is influenced by the relationship between the direction of ultrasound beam and the locus of valve when opening, and (2) if this relationship was maintained

鹿児島大学医学部 第一内科  
鹿児島市宇宿町 1208-1 (〒 890)

The First Department of Internal Medicine, Faculty  
of Medicine, Kagoshima University, Usuki-cho 1208-  
1, Kagoshima 890

Presented at the 16th Meeting of the Japanese Society of Cardiovascular Sound held in Tokyo, March 28, 1978  
Received for publication May 13, 1978

fairly constant the b-c slope seems to be determined best by the maximum flow acceleration in the pulmonary trunk.

**Key words**

b-c slope      Maximum flow acceleration      Maximum blood flow      Stroke volume      Peak pressure of the right ventricle

はじめに

肺動脈弁エコーは、肺高血圧症<sup>1,2)</sup>、弁性肺動脈弁狭窄症<sup>3)</sup> および肺動脈漏斗部狭窄症<sup>4)</sup> のさいに特徴的変化を示すこと、したがってこれらの疾患の診断に有用であることが知られており、臨床に広く用いられている。しかしながら、肺動脈弁エコーの異常所見の発生メカニズムは必ずしも明らかにされていない。

肺動脈弁 b-c slope についても同様である。すなわち、Nanda ら<sup>1)</sup>は、肺高血圧症においてこの指標が肺動脈平均圧と正の相関を有することを報告したが、Weyman ら<sup>2)</sup>はこのような事実を認めなかったと述べている。Kerber ら<sup>5)</sup>は、イヌを用いた実験において、肺動脈弁開放速度は肺動脈平均圧と相関を有しないことを見出し、急性肺高血圧の診断にこの指標が有用でないこと、および臨床でみられる肺高血圧症のさいの肺動脈弁開放速度の増大は肺動脈圧以外の因子に関連があることを報告した。しかし、竹内ら<sup>6)</sup>は、同じくイヌにおいて肺高血圧作成時には opening slope が増大することを報告している。このように肺高血圧時の b-c slope の態度のいかんとその発生のメカニズムについては見解の一致が得られていない。

著者らは、肺動脈弁 b-c slope を規定する因子の決定を目的として、まずエコービームの方向との関係を、ついで右心系の血行動態を変化させた時の血行力学的測定値との関係を検討し、興味ある成績を得たのでここに報告する。

対象と方法

12頭の雑種成犬(体重16~27kg)を対象とした。ペントバルビタール(30mg/kg)で静脈麻酔後、

tidal volume 450~650 ml, 呼吸数20~25/分の条件で、respirator model SN-480-3(シナノ)を用いて人工呼吸を行った。正中開胸後、右室心尖部より右室腔へクルナンドカテーテル(9F)を挿入し、Sstatham P 23-1 D と三栄測器製 Biophysigraph 180 system を使用して右室圧の記録を行った。また、肺動脈主幹部に日本光電製電磁流量計 MF-27 を装着して、肺動脈血流量、肺動脈血流量の積分値(右室1回拍出量と等しい)、および肺動脈血流量の微分値を連続的に記録した。超音波装置は東芝製 Sonocardiograph SSL-51 U を、探触子は3MHz、口径5mmの平板型を用いた。肺動脈弁の記録は、探触子を右室流出路の心のう面上に直接あてて行った。記録装置は東芝製 strip chart recorder model OR-01 A を使用し、紙送り速度100mm/secで心電図、血行力学的諸指標および心エコー図を同時記録した。

コントロールの記録を行った後、肺動脈狭窄(pulmonary artery constriction, 以下 PAC と略)、または下大静脈結紮(inferior vena cava constriction, 以下 IVCC と略)を作成し、同様の記録を行った。PACの作成にさいしては、まず左肺動脈第一分枝を結紮し、ついで右主肺動脈をテフロンテープで徐々に締めつけ種々の程度の肺動脈高血圧を形成した。b-c slopeの計測は、Weymanらの方法によった。得られた血行力学的諸曲線から、右室収縮期圧(以下 RVP と略)、肺動脈血流量の最大値(以下 max F と略)、一回心拍出量(以下 SV と略)、および肺動脈血流量の微分の最大値(以下 max dF/dt 又は flow acceleration と略)を測定し分析に用いた。

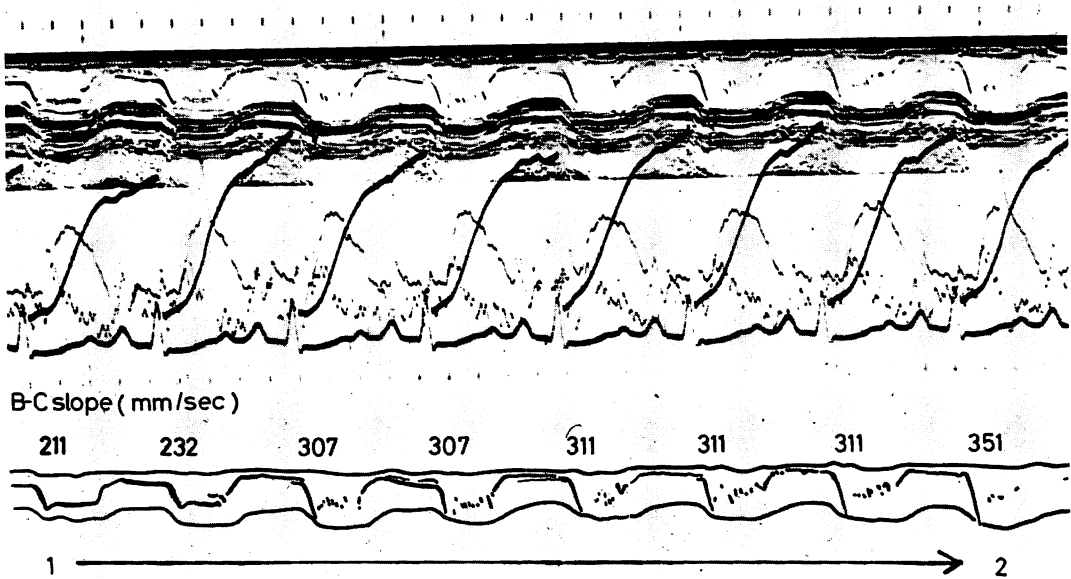


Fig. 1. Pulmonic valve echogram and the hemodynamic curves (upper panel) recorded during manipulation of the transducer as shown in Fig. 2. Lower panel shows the echogram drawn separately, and the figures indicate the b-c slope of each beat.

結 果

1. エコービームの方向と b-c slope

エコービームの方向を変化せしめて b-c slope を検討した実験の 1 例を Fig. 1, 2 に示す。まず肺動脈弁の b-c slope をとらえることができる範囲内で、心のう面と探触子のなす角度ができるだけ大きな部位をさがして探触子をあて、ついで心のう面となす角度を漸次減少させつつ、探触子をあてる部位を心尖部方向へ移動せしめて記録したエコーを Fig. 1 に示す。血行力学的諸曲線には、各心拍ごとに大きな変動が認められないにもかかわらず、肺動脈弁エコー像はしだいに変化し、それにつれて b-c slope も 211 mm/sec から 351 mm/sec へと変化している。Fig. 2 は、Fig. 1 のエコーが得られたビーム方向と肺動脈弁左尖 (posterior leaflet) の開放軌跡との関係を描いた模式図である。図中 1 の方向では、ビームの方向は左尖開放軌跡のそれよりかなりずれてくるが、

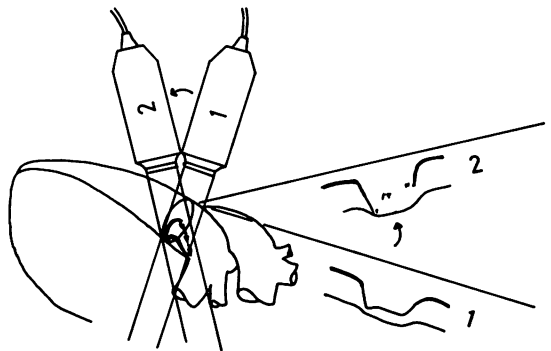


Fig. 2. Diagram illustrating how the relationships between the direction of ultrasound beam and the locus of the valve when opening influence the pulmonic echo patterns and the b-c slope.

2 の方向では両者のずれの程度はかなり少なくなってくるものと推定される。

上の観察から、b-c slope は同一の血行力学的状態のもとにおいても、ビームの方向と肺動脈弁左尖の開放軌跡との相互関係によって変化するも

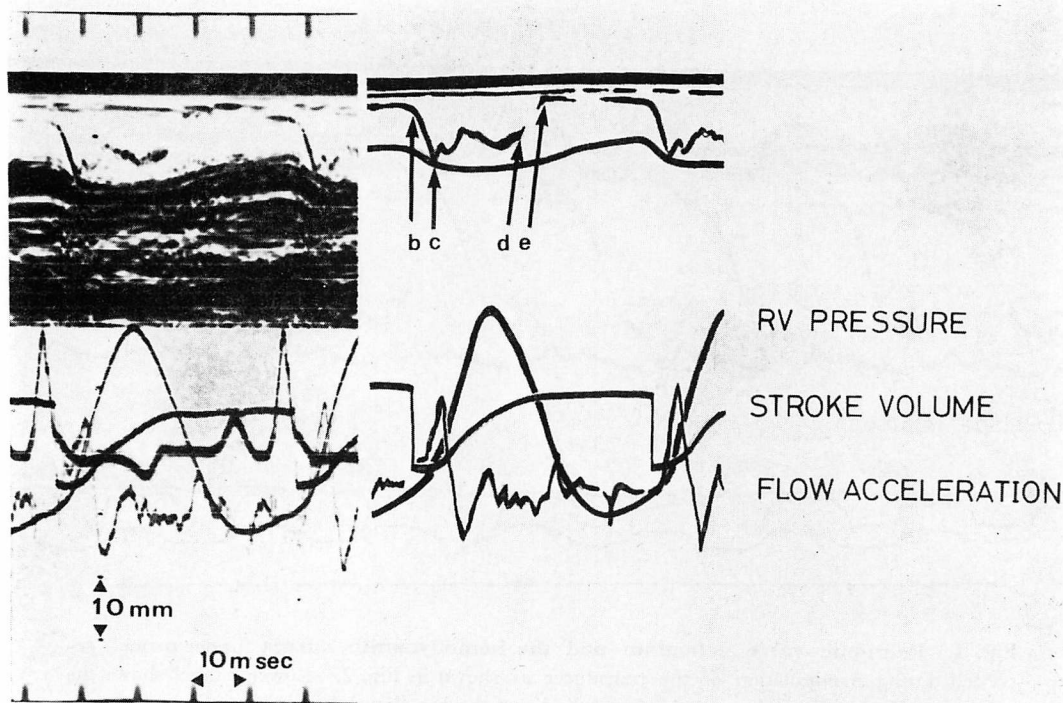


Fig. 3. A representative record and its drawing showing a proper echogram for measuring the b-c slope.

のと考えられた. このことは, 血行力学的変化が b-c slope に及ぼす影響をみるさいには, ビームの方向と開放軌跡の関係が一定であることが必要条件であることを意味する. それで, 両者の関係を一定に保つために, 以下の実験においては b-c slope の計測点の選択についてつぎのような基準を設定してみた. すなわち, 1) b 点が肺動脈径の上3分の1以上の部位にあること, 2) b-c 間が直線的であること, 3) c 点が atrio-pulmonary sulcus にわずかに重なること, 4) 比較的連続的に弁エコーの記録が可能であることの4つの基準である. Fig. 3 にこれらの基準を満足するエコーグラムを示した.

このような基準を満足するエコーグラムを得るためには, PAC や IVCC を形成した後で, その程度に応じて探触子の方向を動かしてゆくことが必要であった. このようにして記録する方法を I

法とした. これに対して, I 法のような記録方法, つまり血行力学的変化に従ってビームの方向を変えるような方法は臨床的には適用できないと考えられたので, エコーパターンの一定性は無視して, 実験期間中探触子の位置と方向を固定して記録する方法をも行ってみることにし, これを II 法と名づけた.

## 2. 血行力学的諸計測値と b-c slope

Fig. 4 は, イヌ No. 6 の PAC 作成時の b-c slope と max dF/dt, max F および SV との相関を I 法により検討した結果を示している. b-c slope と max dF/dt および max F との間にはそれぞれ  $r=0.930$  ( $p<0.001$ ), および  $r=0.890$  ( $p<0.001$ ) の正の相関があったが, SV との間には有意の相関がみられなかった. このイヌでは b-c slope は max dF/dt と最も高い相関を示したわけである. なおこの例ではキャリブレーション

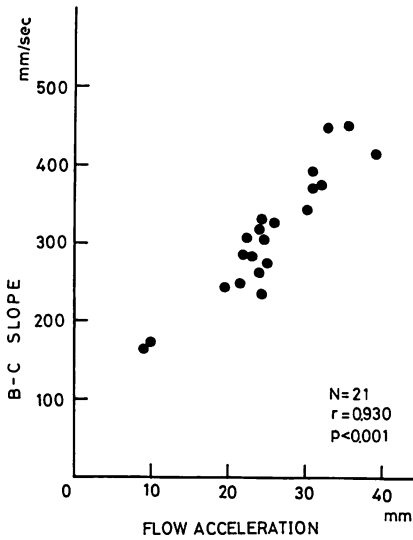


Fig. 4A. Correlation between the b-c slope and the maximum flow acceleration (dog 6).

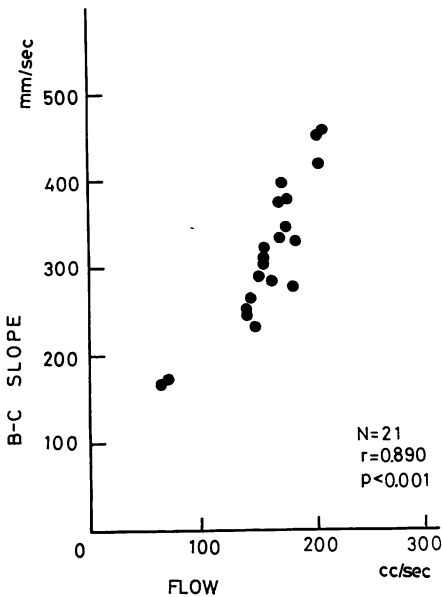


Fig. 4B. Correlation between the b-c slope and the maximum flow (dog 6).

をしなかったために、max dF/dt の単位は cc/sec<sup>2</sup> でなく mm とした。

Fig. 5 は、やはり I 法によりイヌ No. 3 において PAC を作成した時の b-c slope と max dF/dt

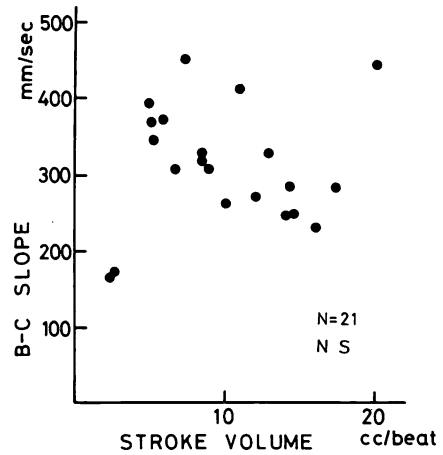


Fig. 4C. Correlation between the b-c slope and stroke volume (dog 6).

dt および RVP との相関を検討したグラフである。Max dF/dt は b-c slope と  $r=0.883$  と高い相関を示したが、RVP は  $r=0.677$  と比較的低い相関しか示さず、とくに RVP が 70 mmHg を越すとほとんど負の相関を思わせるような所見である。

Fig. 6 は、イヌ No. 7 において、PAC と IVCC を別々に行い、I 法によりエコーグラムを記録計測した時の b-c slope と max dF/dt および RVP との相関をみたグラフである。図中の黒丸は RAC 時の値を示している。Max dF/dt は、PAC では  $r=0.768$  ( $p<0.001$ )、IVCC では  $r=0.766$  ( $p<0.001$ ) と正の相関を示した。これに対して RVP は IVCC では  $r=0.568$  ( $p<0.05$ ) と低い相関を示したにすぎず、また PAC ではむしろ  $r=-0.703$  ( $p<0.001$ ) と負の相関がみられた。PAC と IVCC とを一括してみると、RVP が約 50 mmHg までは正相関がみられるが、それ以上では明らかに負相関となっている。Max dF/dt と RVP との関係をみると、IVCC では  $r=0.670$  ( $p<0.01$ ) とある程度の正の相関を示すが、PAC では  $r=-0.778$  ( $p<0.001$ ) と負の相関を示した (Fig. 6C)。PAC と IVCC とを一括してみた場合、やはり RVP

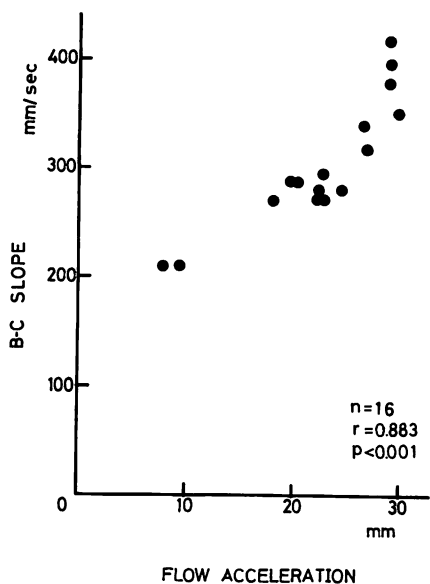


Fig. 5A. Correlation between the b-c slope and the maximum flow acceleration (dog 3).

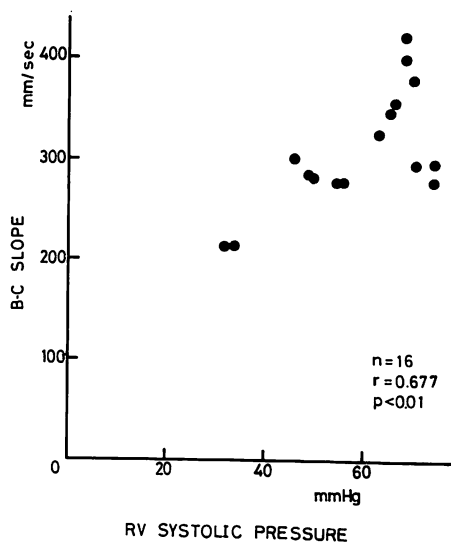


Fig. 5B. Correlation between the b-c slope and the peak pressure of the right ventricle (dog 3).

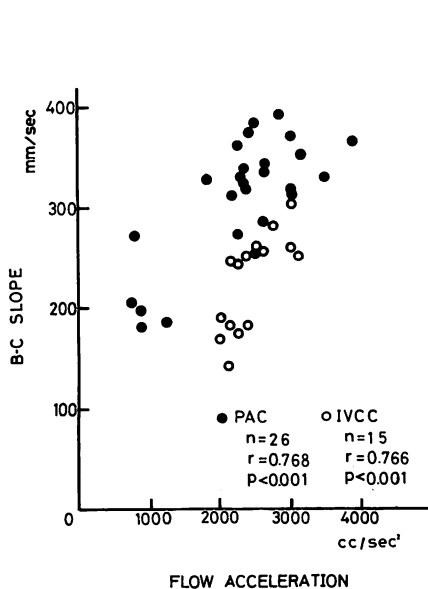


Fig. 6A. Correlation between the b-c slope and the maximum flow acceleration (dog 7).

PAC: pulmonary artery constriction, IVCC: inferior vena cava constriction.

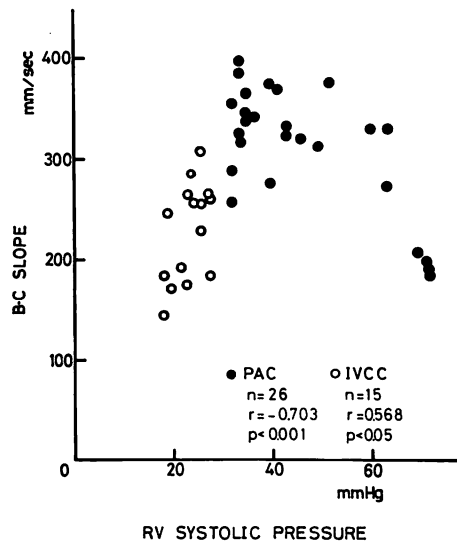


Fig. 6B. Correlation between the b-c slope and the peak pressure (dog 7).

At the pressure levels below 50 mmHg, the b-c slope increases as the pressure increases. At the pressure levels greater than 50 mmHg, the b-c slope decreases as the pressure increases.

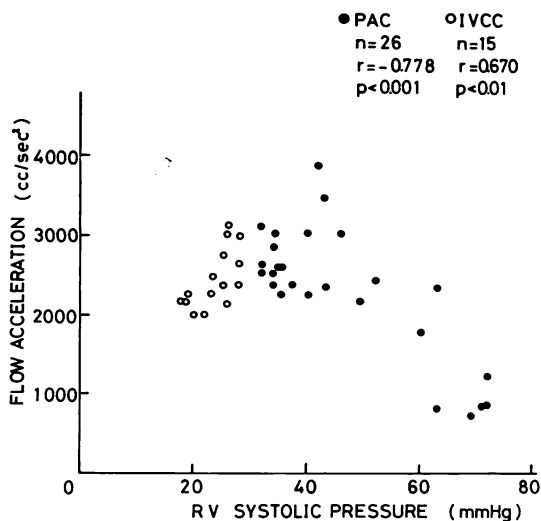


Fig. 6C. Correlation between the maximum flow acceleration and the peak pressure (dog 7).

At the pressure levels below 50 mmHg, the maximum flow acceleration increases as the pressure increases. At the pressure levels greater than 50 mmHg, the maximum flow acceleration decreases as the pressure increases.

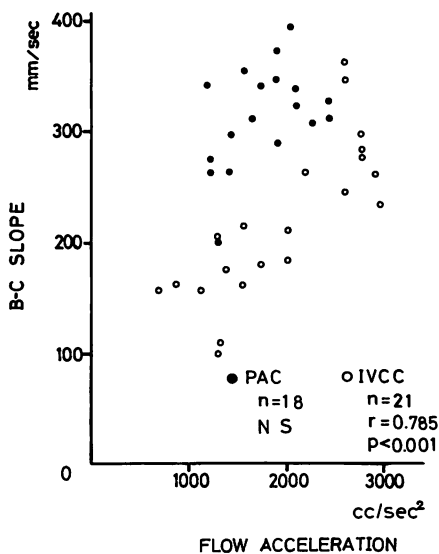


Fig. 7A. Correlation between the b-c slope and the maximum flow acceleration (dog 12).

Echocardiographic data were obtained when relationships between the direction of ultrasound beam and the locus of the valve were not maintained constant.

が約 50 mmHg までは  $\max dF/dt$  と RVP は正の相関, それを越すと明らかに負の相関を示すことが分る.

つぎに II 法により検討した結果の一部を示す. Fig. 7 はイヌ No. 12 において PAC と IVCC とを別々に作成し, b-c slope と  $\max dF/dt$  および RVP との相関をみた結果を示している. 上述の第 I 法で検討した 3 頭のイヌの場合と異なり,  $\max dF/dt$  は IVCC の場合には  $r=0.785$  ( $p<0.001$ ) と正の相関を示したが, PAC では相関がみられず, RVP は PAC の場合  $r=0.870$  ( $p<0.001$ ), IVCC の場合  $r=0.810$  ( $p<0.001$ ) と, ともに高い相関を示した.

以上のような方法で, 12 頭のイヌについて, b-c slope と血行力学的各測定値との相関を, I, II 法別に検討した結果を Table 1 に示す. さらに, Table 1 の相関係数間で有意差検定を行い (RVP の値が 10% 以下の時に有意差ありとした), 各測定値と b-c slope との相関性の大小を検討した. その結果をまとめたものが Table 2 である.

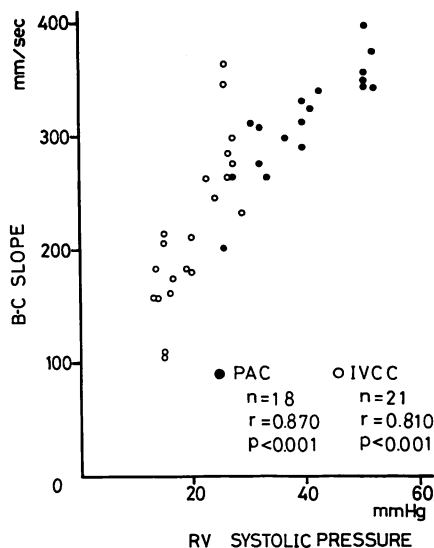


Fig. 7B. Correlation between the b-c slope and the peak pressure of the right ventricle (dog 12).

Echocardiographic data were obtained in the same manner as were in Fig. 7A.

**Table 1. Correlation coefficients between the b-c slope and hemodynamic measurements**

Methods	Parameters		dF/dt		F		SV		P		n		
	Data	Dog No.	r	p	r	p	r	p	r	p			
I	1	PAC	0.897	***	0.890	***			NS	0.512	**	33	
	2	PAC	0.775	***					0.701	***	0.759	***	25
	3	PAC	0.883	***					NS		0.677	**	16
	4	PAC	0.615	***					NS		0.670	***	31
	5	PAC	0.683	**					NS		NS		19
	6	PAC	0.891	***					NS		0.657	**	16
	6	PAC	0.930	***					NS		NS		21
7	PAC	0.768	***			0.758	***		-0.703	***	26		
	7	IVCC	0.766	***			0.585	*	0.568	*	15		
II	8	PAC	NS		0.831	***				0.770	***	25	
	8	IVCC	0.909	***							0.850	***	15
	9	IVCC	0.855	***					0.859	***	0.856	***	21
	10	PAC	0.841	***					0.684	***	0.572	**	20
	11	PAC	0.915	***					NS		NS		13
	11	PAC	0.837	***					NS		NS		18
	11	IVCC	0.803	***					0.735	***	0.779	***	24
	12	PAC	NS						NS		0.870	***	18
	12	IVCC	0.785	***			0.803	***	0.810	***	21		

Method I indicates that the b-c slope was obtained using 4 criteria, whereas method II indicates that the b-c slope was obtained when relationships between the direction of ultrasound beam and the locus of the valve were not maintained constant.

PAC: pulmonary artery constriction, IVCC: inferior vena cava constriction, dF/dt: maximum flow acceleration, F: maximum blood flow, P: peak pressure of the right ventricle.

\*\*\*:  $p < 0.001$ , \*\*:  $p < 0.01$ , \*:  $p < 0.05$

**Table 2. Results of comparison of respective correlation coefficient of hemodynamic measurements with the b-c slope**

	dF/dt vs F				dF/dt vs P		
	dF/dt > F	dF/dt < F	dF/dt = F		dF/dt > P	dF/dt < P	dF/dt = P
I	1	0	1	I	3	0	4
II	1	0	0	II	2	2	4
Total	2	0	1	Total	5	2	8
	dF/dt vs SV				P vs SV		
	dF/dt > SV	dF/dt < SV	dF/dt = SV		P > SV	P < SV	P = SV
I	6	0	3	I	4	1	2
II	3	0	4	II	1	0	5
Total	9	0	7	Total	5	1	7
	F vs SV						
	F > SV	F < SV	F = SV				
I	1	0	1				
II	1	0	0				
Total	2	0	1				



相関係数間に有意差があれば不等号で、そうでなければ等号で示してある。Max F, max dF/dt, SV の3者間の比較では、I法, II法のいずれの場合でも b-c slope との相関は  $\max dF/dt > \max F > SV$  の順であった。つぎに  $\max dF/dt$  と RVP との比較では、II法では両者間に差は認められないが、I法では明らかに  $\max dF/dt$  が RVP よりも b-c slope との相関がより高いことがわかった。

### 考 案

心エコー図により肺動脈弁の開放速度を正確に測定する上で重要なことは、ビームの中心が問題とする弁を正確にとらえ、かつビームの方向がその弁の開放軌跡と一致することである。この研究で著者らは、血行力学的にほぼ一定の状態であるにもかかわらず、b-c slope はビームの方向によって大幅に変動することを実証した。実際上は肺動脈弁の開放軌跡の決定が不可能であるため、真の開放速度を測定することはできない。しかし、開放軌跡とビームの方向との関係をほぼ一定に保つことができれば良いという考えから、一部経験的事実をもとにして4つの基準を設けてみた。基準1は、b点が後方であれば b-c slope は低値を示すのに対し、肺動脈径の前3分の1以上であればほぼ一定の値を示すことを経験的に認めたからである。基準2は、b-c間が直線ではなく開放初期の部分はゆるやかで、その後急峻となることしばしば経験されるので、計測上客観性をもたせるために b-c間が直線であるものとしたのである。基準3は、atrio-pulmonary sulcus よりはるかに前方にC点がある場合には、多くは b-c amplitude が小で必ずしも弁尖をとらえていないおそれがあること、またC点がこの sulcus より深く後方にあれば b-c slope を決定することができないためである。基準4は、肺動脈弁後方尖エコーが連続的に記録可能である場合には、弁の軌跡とビームの方向とのずれがあまり大きくないことを意味すると考えられたことによる。

先に述べたように、弁の開放軌跡を決定することは困難であるため、ここで得られた b-c slope は開放速度そのものではなく、両者のずれの角度を  $\theta$  とすれば b-c slope の値を  $\cos \theta$  で割って得た値が真の弁開放平均速度と考えられる。しかし、この  $\theta$  の値を実験中できるだけ一定に保つことができれば、開放速度を規定する血行力学的諸指標を検討するためには、b-c slope は十分な妥当性を有するものと考えられる。この研究ではこのような考え方に立って、すなわちI法によって b-c slope に相関性の高い血行力学的指標を決定しようと試みた。イヌ No. 6 では、 $\max dF/dt$ ,  $\max F$  および SV の中では、 $\max dF/dt$  が最も高い正の相関を示した (Fig. 4)。イヌ No. 3 では、 $\max dF/dt$  と RVP とではやはり  $\max dF/dt$  がはるかに高い相関を示し、RVP と b-c slope との関係では RVP が 70 mmHg を越すと逆に b-c slope は低下する傾向にあった (Fig. 5)。イヌ No. 7 では、b-c slope と  $\max dF/dt$  とは、PAC と IVCC の両者において高い相関を示した。しかし、b-c slope と RVP とでは、PAC と IVCC を一括して見た場合 RVP が 50 mmHg 以下では高い正の相関があったが、その値を越すと負の相関を示すことが明らかとなった。そして、 $\max dF/dt$  と RVP との相関は、やはり RVP が 50 mmHg 以下では正であり、それ以上では負であったので、RVP は  $\max dF/dt$  を介して b-c slope を規定していると考えることができる (Fig. 6)。12頭の動物について  $\max dF/dt$ ,  $\max F$ , SV および RVP の中で最もよく b-c slope に相関するものを相関係数間の有意差検定により検討した結果、それは  $\max dF/dt$  であることを証明することができた。

ここで考慮しておかねばならない点は、この研究の実験条件についてである。麻酔、開胸下では無麻酔、非開胸の場合に比して心機能や心拍出量が低下している可能性があること、またさらに IVCC や PAC を行うことによってこの傾向がさらに強まることが考えられる。したがって、こ

こで得た成績は, 心機能や心拍出量が比較的低下している状態下において適用されるべきであり, 高心拍出量状態下でのそれとは別に検討されねばならない。

さて, b-c slope と最も高い相関を有する max dF/dt は何を意味するものであろうか。この指標に関する報告は少ないが, 左心機能のよい指標であるという成績がある<sup>7,8)</sup>。種々の心機能状態における max dF/dt が, b-c slope を決定するものと考えられる。

最後に, II 法による検討の結果について述べる。この結果では, max dF/dt と RVP との間に明らかな差はみられなかった。I 法の結果との相違の理由の1つとして, 肺動脈分枝狭窄により肺動脈や右室の拡大が起これ, ビーム方向が弁開放軌跡に近づいたために, 見かけ上 b-c slope の増大が起こったことがあげられる。臨床的には, この II 法と同様な現象が起こっている可能性があるものと考えられる。b-c slope と肺動脈圧との相関について一定した臨床成績が得られていない理由として, 肺動脈弁開放軌跡とエコービームとの空間的關係ならびに右心のポンプ機能が症例ごとに異なっていることがあげられよう。

## 結 論

麻酔, 開胸犬を用いて, 肺動脈弁 b-c slope を規定する因子について検討し, つぎの成績を得た。

1) b-c slope はビーム方向と弁開放軌跡の空間的關係により大きな影響を受ける。

2) この関係が一定であれば, コントロール, 肺動脈狭窄 (PAC) および下大静脈結紮 (IVCC) の状態下では肺動脈血流量最大値 (max F), 一回

心拍出量 (SV), 肺動脈血流量微分最大値 (max-dF/dt) および右室収縮期圧 (RVP) の中では, max dF/dt が b-c slope と最も高い相関を示した。

3) RVP は max dF/dt を介して b-c slope に影響しているものと考えられた。

## 文 献

- 1) Nanda NC, Gramiak R, Robinson TI, Shah PM: Echocardiographic evaluation of pulmonary hypertension. *Circulation* **50**: 575, 1974
- 2) Weyman AE, Dillon JC, Feigenbaum H, Chang S: Echocardiographic patterns of pulmonic valve motion with pulmonary hypertension. *Circulation* **50**: 905, 1974
- 3) Weyman AE, Dillon JC, Feigenbaum H, Chang S: Echocardiographic patterns of pulmonic valve motion in valvular pulmonic stenosis. *Amer J Cardiol* **34**: 644, 1974
- 4) Weyman AE, Dillon JC, Feigenbaum H, Chang S: Echocardiographic differentiation of infundibular from valvular pulmonic stenosis. *Amer J Cardiol* **36**: 21, 1975
- 5) Kerber RE, Maximov M, Cent CV: Determinants of pulmonic valve opening velocity-Experimental echocardiographic studies. *Circulation* **54** (Suppl II): 61, 1976 (abstr)
- 6) 竹内 守, 松家治道, 横山英明, 五十嵐丈記, 大崎 饒, 村尾 誠, 富田壽夫, 伊藤一輔, 小林 毅: 肺高血圧における肺動脈弁動態の実験的検討. *医学のあゆみ* **103**: 153, 1977
- 7) Noble MIM, Trenchard D, Guz A: Left ventricular ejection in conscious dogs: I. Measurement and significance of the maximum acceleration of blood from the left ventricle. *Circulat Res* **19**: 139, 1966
- 8) Nutter DO, Noble RJ, Hurst VW: Peak aortic flow and acceleration as indices of ventricular performance in the dog. *J Clin Med* **77**: 307, 1971