

気管内心機図

津崎 晃一* 長野 政雄*

要 旨

心拍動に伴う気管内における気体の圧、および流量変化波形（気管内心機図）からそれぞれ心機能と密接に結び付いていると考えられるパラメータを抽出し、心エコー法による心機能評価と比較した。圧変化波形からは弁開閉に基づくと考えられる棘波間隔より心収縮時相を求め、心エコー法による心収縮時相と比較した結果、前駆出時期、左室駆出時間においてそれぞれ良好な相関($r=0.82, 0.93$)を得た。また流量変化波形からは心収縮力を反映すると考えられるパラメータとして、心収縮に引き続き起こる吸気方向の流速変化およびその最大微分値を求め、同様に心エコー法による心筋短縮率および平均円周短縮速度と比較した結果、心収縮力をよりよく示す平均円周短縮速度とは、流速変化より、最大微分値のほうが良好な相関($r=0.46, 0.71$)を認めた。また、これらに加えて、気管内心機図の発生機序に及ぼす肺動脈拍動の影響について併せて検討を加えた。

はじめに

心収縮に伴う気管内の気体の振動現象は、気道内圧変化、気流速度変化、気道内ガス濃度変化などからとらえることができ、これらの周期的変化は一般に cardiogenic oscillation と総称されている¹⁾。われわれは、気管内麻酔に際して、無呼吸状態とした場合、この心拍動に一致した気道内圧変化、気流速度変化を気管内チューブの口側端に接続した高精度の圧トランスデューサや呼吸流量計を介して測定することにより非観血的に心機能を評価することを試みており、気管内心機図 (intratracheal pneumocardiogram, ITCG) と名づけ一連の検討を加えている²⁾⁻¹¹⁾。今までの研究から、気道内圧変化波形 (ITCG-P) においては弁の開閉

に伴う棘波が明確に認められ、この棘波間隔から求められる心収縮時相は、従来の心電図、心音図、頸動脈波からえられる心収縮時相と良好な相関が認められている²⁾³⁾。

また気流速度変化波形 (ITCG-F) では、心収縮に伴う吸気方向成分の流速変化とその最大微分値 ($\max dF/dt$) がそれぞれ一回心拍出量および左室の $\max dP/dt$ と良い相関関係にあることが認められており⁶⁾、特にこの $\max dF/dt$ は心臓のポンプ機能よりも心筋の収縮性の変化をより反映すると考えられている¹¹⁾。図1に代表的な ITCG-P、ITCG-F およびその微分波形 (dF/dt) を示す。今回は、①ITCG-P から求められる心収縮時相と心エコー法より求められる心収縮時相および従来の方法による心収縮時相との比較検討、②ITCG-F から求められる心収縮力を示すパラメータと心エコー法による心機能パラメータとの比較検討、③未だ十分に解析が加えられていない気管内心拍動波の発生機序に及ぼす肺動脈拍動の影響についての検討を行い、気管内麻酔中の非観血的な心機能モニターとしての気管内心機図の有用性に評価を加えた。

研究方法

① 呼吸循環系に特に異常のない成人の手術予定患者21人を対象とし、気管内挿管後、循環系の安定した時点で気管内チューブの口側端に圧トランスデューサを接続し、ITCG-P と同時に心電図、心音図、頸動脈波、心エコー図を記録測定し、それぞれから心収縮時相を求めた。ITCG-P では、図1の如く心電図の QRS 波の後に現れる上向きの棘波をBとし、心電図のT波の後に現れる上向きの棘波をCとした。このBが大動脈弁開放に、またCが大動脈弁閉鎖に対応しており、従って心電図 QRS 波の始まりからCまでが electromechanical systole (EMS)、BからCまでが left ventricular ejection time (LVET)、前者から

*慶応義塾大学医学部麻酔学教室

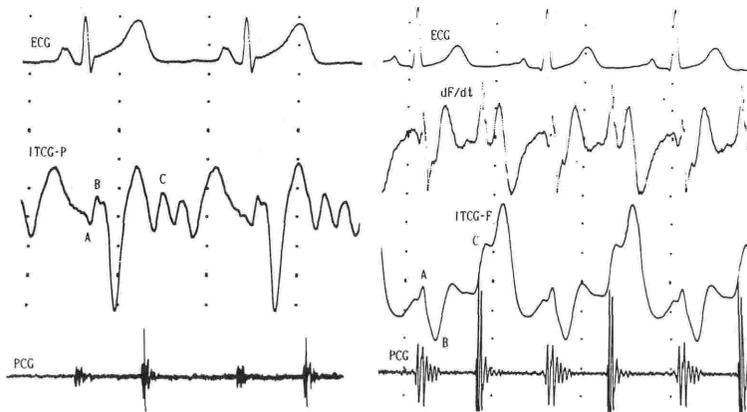


図1 代表的な ITCG-P, ITCG-F, dF/dt 波形

後者を差し引いたものが preejection period (PEP) に相当する。

心エコー法では、心電図の QRS 波の始まりから大動脈弁閉鎖までを EMS, 大動脈弁開放から閉鎖までを LVET, 前者から後者を差し引いたものを PEP とした。従来の方法による心収縮時相も含めて三者の比較を相関係数を求めることにより行った。

② 上記方法と同様に、呼吸循環系に特に異常のない成人の手術予定患者22人を対象とし、気管内挿管後、循環系の安定した時点で気管内チューブの口側端に呼吸流量計を接続し、ITCG-F と同時に心エコー図を記録した。心エコー図からは、左心機能を示すパラメータとして心筋短縮率 (fractional shortening, FS) および平均円周短縮速度 (mean velocity of circumferential fiber shortening, mean V_{cf}) をそれぞれ左室短軸の拡張終期径と収縮終期径より算出した。また ITCG-F からは心機能を示すパラメータとして心収縮に引き続く吸気方向成分の振幅 (A-B) とその一次微分の最大値 (max dF/dt) を求めた。これらのパラメータ間の相関係数 r を求めることによって ITCG-F と心エコー法の比較を行った。

③ ITCG-F の A-B 成分に関しては、現在までの研究からも左室収縮の関与が大きいと考えられているが、B-C 成分については肺空塞栓などによる肺高血圧時の際に増高することが認められており、肺循環の影響が大きいと思われる¹¹⁾。そこで肺循環の拍動性を変化させる目的で右心バイパスによる動物実験を行った。雑種成犬を対象

とし、上大静脈および下大静脈に脱血カニューレを挿入し、送血カニューレを肺動脈に挿入した。それぞれのカニューレの周囲にテーピングを行い完全右心バイパスが実施できるように体外からテープを調節可能とした。開胸後、対照値としての ITCG-F を記録し、心拍動下にローラーポンプにより 100 ml/kg/min の流量で完全右心バイパスを行い肺動脈基部を閉塞させた。この状態で静脈還流はすべてリザーバーに貯留し、リザーバーからローラーポンプを経て非拍動流が肺動脈へ送られる。循環系の安定した時点をとらえて肺動脈に定常流が流れているときの ITCG-F を記録し B-C 成分の対照値との比較を行った。

成 績

① 心収縮時相 (ITCG-P)

ITCG-P による心収縮時相と他法との比較を表1に示す。従来の方法による心収縮時相および心エコー法による心収縮時相は、共に ITCG-P による心収縮時相と良好な相関を認めるが、一般に心エコー法との相関が良好で、特に LVET に関しては、5%の有意水準をもって、心エコー法との相関が高かった。

② 心収縮力 (ITCG-F)

ITCG-F による心収縮力パラメータと各心機能パラメータとの相関係数による比較を表2に示す。心エコー法から求めたパラメータとの比較では、一般に A-B の波高との相関よりは max dF/dt との相関のほうが良好で、特に mean V_{cf} においては5%の有意水準をもって max dF/dt

表1 ITCG-P による STI と他法による STI との比較 (n=21)

		相関係数	回帰方程式 (msec)
PEP	(conventional)	0.804	$Q-B=1.06 \times PEP - 0.01$
	(echocardiography)	0.822	$Q-B=1.05 \times Q-Ac + 0.01$
LVET	(conventional)	0.72	$B-C=0.81 \times LVET + 0.10$
	(echocardiography)	0.926	$B-C=0.96 \times Ao-Ac + 0.01$

表2 各心機能パラメータとの相関係数

	A-B (波高)	max dF/dt	n
stroke volume	0.81	...	35
max dP/dt	0.90	0.88	22
E_{max}	...	0.93	16
fractional shortening	0.56	0.68	22
mean V_{cf}	0.46	0.71	22

との相関が高かった。参考のために一回心拍出量, max dP/dt, E_{max} との比較を今までの報告⁶⁾に基づいて併記した。

③ ITCG-F の B-C 成分と肺循環

完全右心バイパス下に肺動脈を定常流とした時の ITCG-F 波形を図2に示す。この図から肺動脈圧波形がほぼ定常流となっており、同時に右心バイパスの影響のために左房圧の若干の上昇と左室圧の若干の低下が認められる。この左心系の圧変化、特に左室圧の変化が ITCG-F の波形に及

ぼす影響も認められるが、肺動脈の血流を定常流とした時の B-C 成分の減少の程度は左心機能の低下に伴う A-B 成分の減少の程度を上回っており、B-C 成分の A-B 成分に対する比率で表現すると、対照値の0.45に対し、右心バイパス下では0.26であった。

考 案

無呼吸状態とした場合、気管内チューブを介して、心拍動に伴った微細な気体の bulk movement をとらえることができる。この気管内の気体の運動を圧変化や流量変化として定量的に評価し、解析を加えることによって心機能に関する情報を抽出しようとする試みは以前より行なわれていた¹²⁾¹³⁾。当教室では、この無呼吸時にみられる気管内心拍動波から心機能を検索する際に、圧変化と流量変化においてそれぞれ異なった情報を含んでいる可能性のあることに着目し、ITCG-P、

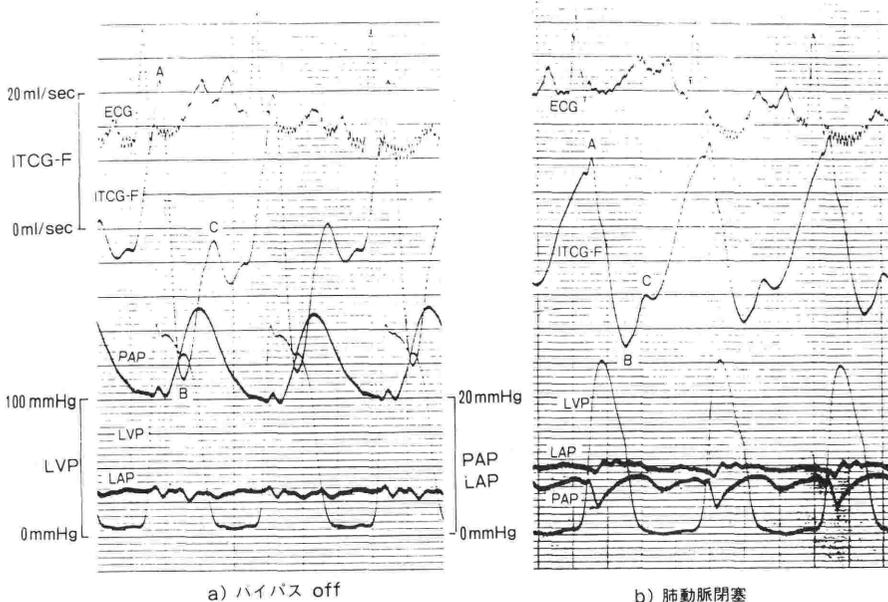
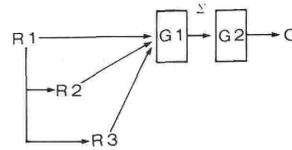


図2 右心バイパス下、肺動脈閉塞による影響 (灌流量 100 ml/kg/min)

ITCG-F として追求を行ってきた^{2)~11)}。ITCG-P では、圧トランスデューサを気管内チューブの口側端に接続して測定するために、密閉された空間内での心拍動に伴う圧変化を、ほとんど時間遅れなくとらえることができ⁷⁾、弁開閉に一致した棘波間隔から心収縮時相を、また心尖拍動図を加えて心拡張期時相⁸⁾を解析することができる。心収縮時期について、従来の方法および心エコー法と比較した今回の結果では、心エコー法との相関が高く、この ITCG-P による心収縮時相の測定は正確度が高い方法であると考えられた。また従来の測定方法の複雑さや、計測困難例があることを考慮すると、気管内挿管下であれば容易に測定できる ITCG-P は気管内麻酔中の有用な心機能モニターであると思われた。一方、気管内チューブの口側端に呼吸流量計を接続して測定する ITCG-F は心拍動に伴う量的変動を反映していると考えられており、これからえられる定量的なパラメータは心機能と密接に結び付いていることが今までに示されている¹¹⁾。今回の心エコー法による心機能パラメータとの比較においては、心エコー法の技術的問題や、吸入麻酔薬の負荷による気道系の変化のために高い相関係数がえられなかったが、今までの報告¹¹⁾と同様に A-B 成分の波高はポンプ機能の指標である fractional shortening と、また max dF/dt は心筋の収縮性の指標である mean V_{cf} とそれぞれ相関の高い傾向にあった。このように A-B 成分に関しては、心収縮との関連が心エコー法からも認められたが、B-C 成分については肺動脈圧との相関がいわれているのみである¹¹⁾。この ITCG の発生機序を解析する目的で、信号線図に表わすと図3の如くで、信号源としては心拍動そのもの、左室-大動脈系の拍動、右室-肺動脈系の拍動が考えられ、これらが肺間質、気道、気管内チューブという信号伝達系を介して出力されることが理解される。この信号源から伝達系である肺間質や気道へは肺の各部分によって伝わる振動の位相や振幅が異なることが報告されており¹⁴⁾¹⁵⁾、線形システムを仮定するならば、これらのベクトル和が出力として測定されることが考えられる。今回の右心バイパスによる実験では、B-C 成分に着目して肺動脈の拍動性が及ぼす影響をみたが、肺動脈の血流を定常流とし拍動性を消失させることにより、B-C 成分の波高



信号源：	信号伝達系：	出力：
R1 心拍動	G1 肺間質、気道	C 圧トランスデューサ
R2 左室-(大動脈)	G2 気管内チューブ	呼吸流量計
R3 右室-肺動脈		

図3 ITCG の信号線図

の著明な減弱を認め、この B-C 成分の発生に肺動脈の拍動性が大きく関与していると考えられた。

まとめ

- ① ITCG-P による心収縮時相は、心エコー法による心収縮時相と良好な相関を示した。
- ② ITCG-F からえられた収縮期における心機能パラメータは心エコー法による心機能パラメータと相関を示し、特に max dF/dt と平均円周短縮速度とに良好な相関を認めた。
- ③ 右心バイパスによる実験では、ITCG-F の B-C 成分に及ぼす肺動脈拍動性の影響が認められた。

引用文献

- 1) Dahlstrom, H., Murphy, J. P., Roos, A.: Cardiogenic oscillations in composition of expired gas. The "pneumocardiogram". J. Appl. Physiol. 7:335-339, 1954.
- 2) 関口宏昌: 気管内心拍動波 (ITCG) に関する研究—従来の非観血的心収縮時相測定法との比較検討。日胸疾会誌 15 : 422-430, 1977.
- 3) 関口宏昌, 重松俊之, 山田かず子, 小野 章, 真木博幸, 長野政雄: 気管内心拍動波による新しい心機能測定法の検討。麻酔 25 : 357-362, 1976.
- 4) 長野政雄, 武田純三, 重松俊之, 山田かず子, 天野道之助: 気管内心機能図に及ぼす麻酔薬の影響。麻酔 28 : 269-273, 1980.
- 5) 重松俊之, 関口宏昌, 山田かず子, 小野 章, 長野政雄, 天野道之助: 気体流量変化からみた気管内心拍動波について。麻酔 29 : 135-140, 1980.
- 6) 重松俊之: 心筋収縮力測定法としての気管内心拍動波の検討—イソプロテレノール・輸液前後の左室内圧との関連—麻酔 29 : 135-140, 1980.
- 7) 関口宏昌, 重松俊之, 菊地 元, 小野 章, 長野政雄: 気管内心拍動波 (ITCG) 測定用トランスデューサの検討。医器誌 46 : 412-416, 1976.
- 8) 山田かず子, 長野政雄, 重松俊之, 菊地 元, 武田

- 純三, 天野道之助: 気管内心機図の拡張期時相について. 麻酔 27:132-136, 1978.
- 9) 武田純三, 真木博幸, 増田純一, 高橋純一, 一杉安秀, 重松俊之, 長野政雄: 気管内心機図 (ITCG-P) の心収縮時相に及ぼす心負荷の影響. 麻酔 30:368-372, 1981.
- 10) 長野政雄: 気管内心機図. 循環制御 2:221-330, 1981.
- 11) 真木博幸: 気管内心機図の波形分析とその心機能評価への応用. 循環制御 4:125-134, 1983.
- 12) Luisada, A.: The internal pneumocardiogram. Am. Heart. J. 23:676-691, 1942.
- 13) Smith, N. T., Reitan, J. A.: The pneumocardiogram: A potential monitor for the operating room. Anesth. Analg. 49:781-787, 1970.
- 14) West, J. B., Hugh-Jones, P.: Pulsatile gas flow in bronchi caused by the heart beat. J. Appl. Physiol. 16:697-702, 1961.
- 15) Wei, J. H., Hoffman, E. A., Ritman, E. L., Wood, E. H.: Cardiogenic motion of right lung parenchyma in anesthetized intact dogs. J. Appl. Physiol. 58:384-391, 1985.

Intratracheal pneumocardiogram

Koichi Tsuzaki and Masao Nagano

Department of Anesthesiology, School of Medicine, Keio University

The oscillatory air movements in the trachea concomitant with the heart beat is called as the cardiogenic oscillations. We have measured these air movements by high-gain pressure transducer and pneumotachograph that attached to the proximal side of the endotracheal tube in series during apnea. From the standpoint of its application to the noninvasive monitoring of cardiac function, we have named these phasic pressure and flow changes as an intratracheal pneumocardiogram (abbreviated as ITCG-P and ITCG-F, respectively). Present study shows that the systolic time intervals (STI_s) derived from the spike waves of ITCG-P, which synchronized with the cardiac valvular motion, cor-

relate well with the STI_s by echocardiography ($r=0.82, 0.93$ for PEP and LVET, respectively). On the other hand, the contractile parameters derived from ITCG-F do not correlate so good with the echocardiographic assessment of the cardiac function except for the correlation between the maximum differential value of ITCG-F (max dF/dt) and mean V_{cf} ($r=0.71$). As for the origin of positive deflections of ITCG-F, there exists the evidence that shows the influences of pulmonary circulation. These influences are also recognized by animal experiments in which steady pulmonary flow condition under right ventricular bypass shows marked attenuation of positive component.

Key words: intratracheal pneumocardiogram, echocardiography, cardiac function, systolic time intervals