

動脈硬化症によるコロトコフ音 スペクトルの変化について

森 反 俊 幸* 片 山 貴 文*
斎 藤 正 男* 矢 崎 義 雄**

1. 要 旨

動脈硬化の程度を無侵襲かつ定量的に診断することは予防医学の面からも臨床医学の面からも重要な問題である。本研究は血圧測定時に発生するコロトコフ音のスペクトルを分析することにより動脈硬化の定量的な診断法を提案するものである。20歳代～50歳代の健常者について安静時に脈波・コロトコフ音記録計で脈波形、コロトコフ音、血圧、p-ktime を記録し A/D 変換後 FFT によりスペクトルを分析した。また虚血性心疾患患者（39名、平均年齢59.9歳）についても同様な測定を行った。まず血圧測定時の血行動態モデルから乱流周波数を計算しこのピーク周波数が収縮期のコロトコフ音スペクトルと良く一致したところから収縮期でのコロトコフ音の発生は乱流が原因であることを示した。つぎに健常者と虚血性心疾患患者のコロトコフ音スペクトルを比較検討した。その結果、虚血性心疾患患者のコロトコフ音スペクトルのピーク値は 48.5 Hz であり健常者の 25 Hz 前後の値より 2 倍前後高くまた半値幅も 2 倍前後高くかつ高周波の乱れが現れることが分かった。これらの結果はコロトコフ音スペクトルを分析することにより動脈硬化が無侵襲で定量的に診断できる可能性を示している。

2. 序 言

動脈硬化性疾患としての脳卒中、虚血性心疾患

による死亡数は依然多く、これらの疾患を予知し予防することは重要な問題である。この問題を解決するためには、まず動脈硬化の程度を定量的に診断する必要がある。しかし現在の健康診断はかならずしも動脈硬化の程度を定量的に診断しておらず、上記疾患が発症するまで見落されることが多い。また最も基本的なバイタルサインである血圧値の測定に関しても聴診法の場合、いろいろ問題が生じている。例えば大動脈閉鎖不全の患者や高拍出量状態にある患者ではコロトコフ音が消失しない事、動脈硬化性変化の著明な患者では収縮期圧が高めに測定される事などである。これらはコロトコフ音の発生機序が不明のままコロトコフ音の発生、消滅を基準として血圧値を決定していることに、起因するものである。本研究はまずコロトコフ音の発生機序について考察し血圧測定時における誤差について言及する。次に健常者と虚血性心疾患患者について収縮期圧、拡張期圧でのコロトコフ音波形、脈波形、コロトコフ音スペクトルを分析し血管壁硬度との関連について合理的なパラメータ設定をおこなう。その知見をもとに動脈硬化の無侵襲定量的診断法を提案する。

3. 血圧測定時の血行動態

狭窄のある流れ場の下流は強い乱流混合が生じる。図1にモデル図を示す。このような流れ場では空間的変動が激しい為、時間的慣性項は無視でき定常流れの理論が適用出来る。

円形 Jet の流れ方向の中心流速は¹⁾

$$U_m/U_0 = 6.5 \times (D_0/X) \quad (1)$$

U_0 : 弁出口血流速

*東京大学医学部医用電子研究施設

**東京大学医学部第3内科

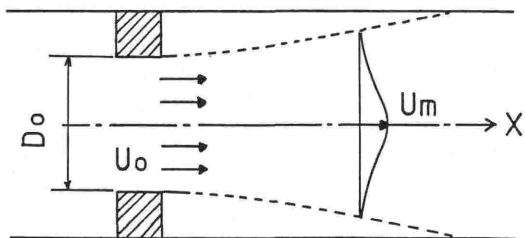


Fig. 1 Hemodynamic model while measuring blood pressure

D_0 : 弁口直径

X : 流れ方向距離

U_m : 流れ方向中心血流速

(1)式は自由 Jet に適用出来る式であるが、拘束 Jet の場合でも絞り直径比0.3~0.7に対しては近似的に適用出来る²⁾ことが判明している。乱流によって生じる音の周波数は、速度相関のスケールに対応するから、波長の短い音すなわち高周波の音は Jet 出口で多く発生し、低周波の音は Jet 出口から遠ざかるにしたがって多く発生する。音源としての乱れ強さは発達領域に入ると急激に弱まるから初期領域と発達領域の境目あたりすなわち再付着点近傍で最も多く発生することになる。円管の場合直径を D とすれば $5D$ 下流で最大となる。乱れによって励起された波による音の周波数の振幅はストローハル数0.4のとき最大となる³⁾。

ストローハル数と周波数の関係は

$$St = f \cdot D_0 / U_m \tag{2}$$

ここでは U_m の代わりに群速度 $0.6U_m$ を用いて乱流周波数を計算する。上腕動脈の内径を 5 mm として計算するとピーク周波数は 25 Hz となる。したがって乱流音場理論からコロトコフ音スペクトルのピーク値は 25 Hz 近傍となるはずである。これを実験により検証する。

4. 実験方法

20~30歳代健常者6名、40歳代健常者17名、50歳代健常者17名を対象に安静時に空気伝導型の脈波・コロトコフ音記録計で血圧、コロトコフ音波形、脈波形、脈波通過後コロトコフ音が発生するまでの時間 (P-K time) を記録し A/D 変換後 FFT によりコロトコフ音スペクトルを分析した。20~30歳代のボランティアの健常者については運

動負荷も行った。また虚血性心疾患患者39名 (45~80歳, 男性22名, 女性17名平均年齢59.9歳) を対象に安静時での血圧, コロトコフ音波形, P-K time, 脈波形を記録し同様の解析を行った。さらに16次の線形予測分析法によりコロトコフ音スペクトル包絡線をもとめた。

5. 成績

図2, 3に健常者の安静時での収縮期圧, 拡張期圧の脈波形とコロトコフ音波形を示す。矢印の位相でコロトコフ音が発生している。収縮期圧では脈波の立上がりから約 150 ms 遅れて発生するが、拡張期圧では脈波の立上がりとはほぼ同位相で発生していることがわかる。図4は運動負荷後の収縮期圧での脈波形, コロトコフ音波形である。円内の波形が収縮期でコロトコフ音波形である円内に見られる波形は図2, 3で見られたような鋭いピークを持つ波形でなく、形も逆転しておりコロトコフ音発生位相も脈波の立上がりとはほぼ同期している。その後鋭いピークをもつ波形が出現する。このような逆転した波形は虚血性心疾患患者にも見られた。この時のコロトコフ音を収縮期圧として測定した場合と鋭いピークをもった波形

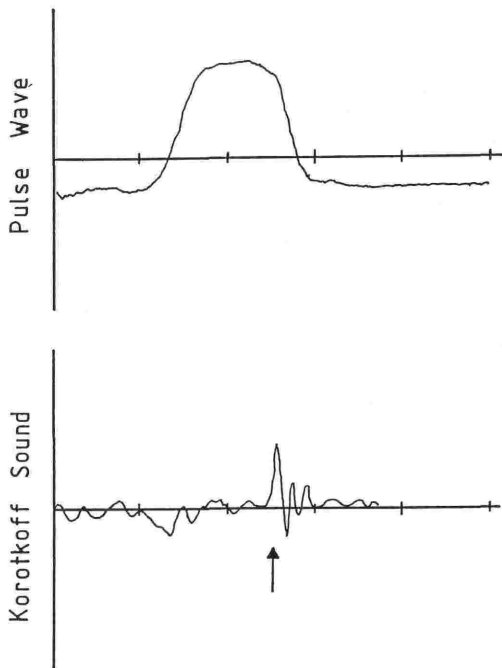


Fig. 2 Pulse wave and Korotkoff sound at systolic blood pressure (rest)

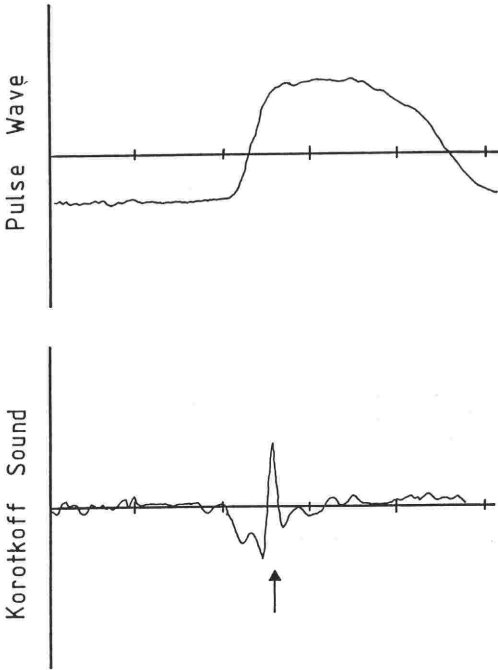


Fig. 3 Pulse wave and Korotkoff sound at diastolic blood pressure (rest)

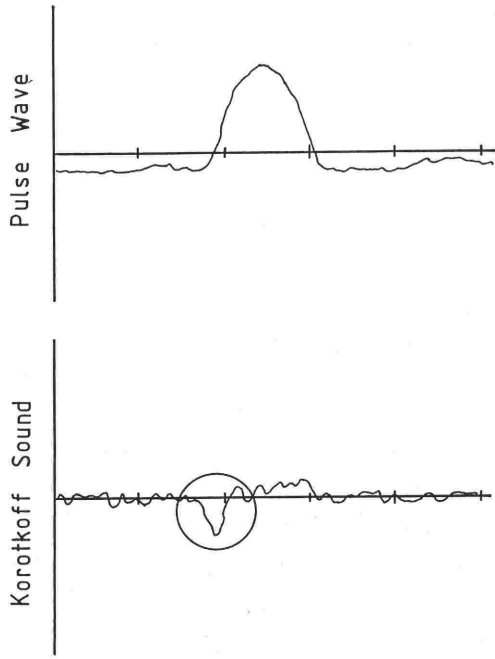


Fig. 4 Pulse wave and Korotkoff sound at systolic blood pressure (exercise load)

の時のコロトコフ音を収縮期圧として測定した場合とでは、逆転した波形のコロトコフ音の方が 20 mmHg 程度高く測定される。動脈硬化が強くなり鉛管状の動脈になれば、実際の血圧より高く測定される現象いわゆる pseudo-hypertension はこの波形が原因と考えられる。聴診間隙もこの波形が原因と思われる。この逆転した波形は健常者で安静時には認められない波形であり興味深い。虚血性心疾患患者は動脈硬化を起こしていると考えられるから、診断に応用出来る可能性がある。ただ運動負荷後にも見られるのであるから血行動態が影響しているのかもしれない。図5に聴診間隙のない場合の p-ktime, 図6に聴診間隙のある場合の p-ktime を示す。聴診間隙のない場合収縮期圧から拡張期圧に測定が進むにつれて p-ktime は短くなるが聴診間隙のある場合 p-ktime は上下に変動することがわかる。スペクトルのままの形では判断することが非常に難しいのでスペクトル包絡線を求める。図7に健常者のコロトコフ音スペクトルの包絡線を、図8に虚血

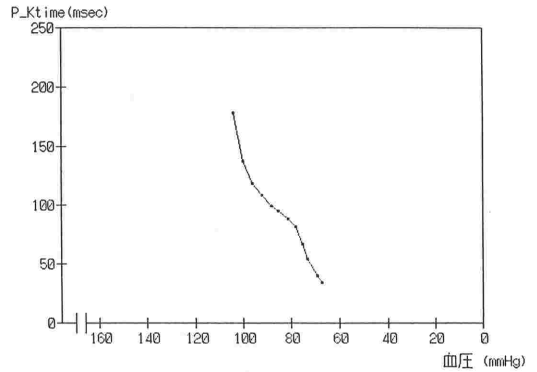


Fig. 5 Change in P-Ktime (no auscultatory)

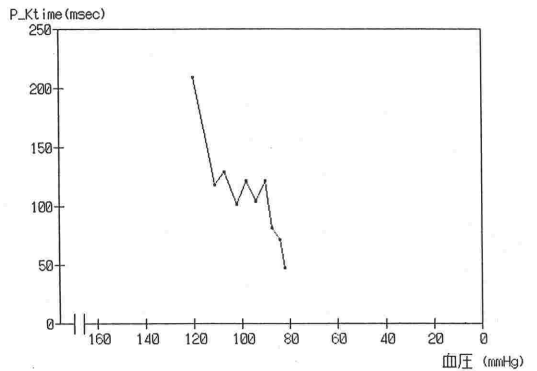


Fig. 6 Change in P-Ktime (auscultatory)

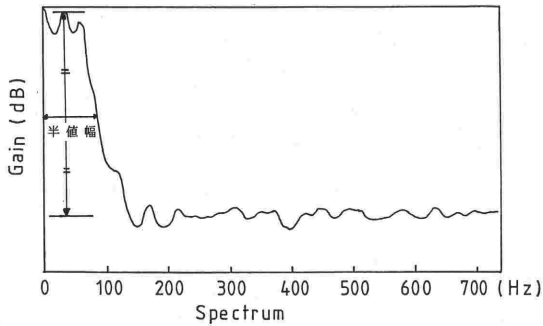


Fig. 7 Spectrum envelope of normal

性心疾患患者のコロトコフ音スペクトルの包絡線を示す。ピーク値は20~30歳代健常者で 22 Hz, 40歳代 22.9 Hz, 50歳代 25.9 Hz であった。これは理論的に計算した結果と非常に良く一致する。年齢によりわずかに増加するがこれは加齢による血管壁の硬化と思われる。統計的に処理しピーク周波数の正常範囲を 22.47 ± 5.99 Hz すなわち 16.48~28.46 Hz と定める。同様に半値幅は20~30歳代 38 Hz, 40歳代 43.8 Hz, 50歳代 44.1 Hz である。正常値の範囲は同様に統計処理し 40.33 ± 10.4 Hz すなわち 29.9~50.7 Hz とする。虚血性心疾患患者のピーク値は 48.5 Hz, 半値幅 91.5 Hz となり健常者の値と比較すると2倍前後高いことがわかる。健常者に比べて高周波成分の乱れが多いことが分かる。これらのデータからコロトコフ音スペクトルのピーク値と半値幅, 高周波での変動, コロトコフ音波形により誤差の少ない血圧測定法, 動脈硬化の定量的な診断の可能性が示された。

6. 考 案

(1) コロトコフ音にたいする乱流の関与について

図2でわかるように収縮期血圧でのコロトコフ音は脈波の通過後約 150 ms 遅れて発生する⁴⁾。これは程度にもよるが血管内に障害があった場合の乱流の発生時間とほぼ等しい。また乱流音場理論から導かれたコロトコフ音スペクトルのピーク値と実際計測した値とが非常によく一致しておりこれらの結果から判断すれば収縮期でのコロトコフ音は血流の乱れによるものと考えてよいと思われる。拡張期でのコロトコフ音は脈波の上上がり

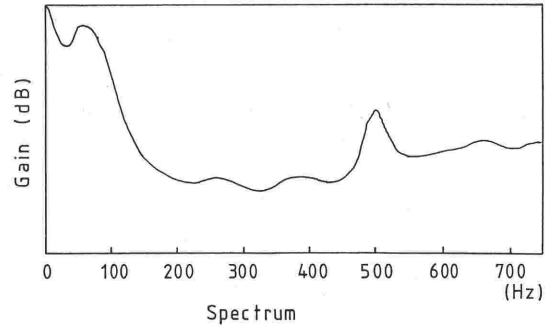


Fig. 8 Spectrum envelope of patient with IHD

とはほぼ同期して発生しており衝撃波面が管壁を急激にふくらませる事によりコロトコフ音が生じるという清水らの衝撃波説⁵⁾を支持している。

(2) 血圧測定時の誤差について

虚血性心疾患患者および運動負荷後の収縮期のコロトコフ音は図4に見られるような円内の波形をコロトコフ音として記録するところが多かった。この音は聴診器でも確認された。これをもとに収縮期圧を決定した時と健常者で見られたような鋭いピークを持った波形で収縮期圧を決定したときでは約 20 mmHg 高く測定される。pseudo-hypertension はこの音が原因と思われる。聴診間隙もこの音である可能性が強い。運動負荷後でもこの音は見られまた拡張期でなかなか消失しなかった。大動脈弁閉鎖不全患者でコロトコフ音が消失しないのもこの波形が原因と思われる。運動負荷後と大動脈閉鎖不全患者の共通点は血流が速いことであるが血流が速いとなぜこの音が発生しかつ消失しないのか今後の検討課題である。

(3) 動脈硬化症とコロトコフ音スペクトルについて

図7, 8からわかるように健常者と虚血性心疾患患者のコロトコフ音スペクトルはかなり異なっている。特徴的なことは虚血性心疾患患者のスペクトルはピーク値が高いこと, 半値幅が広いこと, 高周波の乱れがあることである。これらはいずれも血流の乱れが多いことと動脈が硬化したことにより音響学的にもコロトコフ音に含まれる周波数成分のうち高い成分が増えたものである。すなわち硬化が生じた血管壁は血流の乱れを促進していると考えられる。事実弾性壁は乱れの発生を抑制する⁶⁾という研究もある。これは血流で発生した

乱れの高周波成分が弾性壁により低周波に転化する為と考えられる。動脈壁の弾性は壁面ずり応力を減らした抵抗を減らす役割を持っている。動脈が硬化すればずり応力が増えそのずり応力がまた血管の硬化をまねき次々に血流の高周波成分を作り出す。この高周波成分はまたずり応力を増すことになる。したがってコロトコフ音のスペクトルの高周波成分を測定することは直接動脈壁の硬度を示すパラメータといえる。

7. ま と め

血圧測定時の血行動態をモデルにより解析し収縮期のコロトコフ音は乱流が原因であることを示した。また健常者と虚血性心疾患患者のコロトコフ音スペクトルを比較検討した結果虚血性心疾患患者のスペクトルのピーク値は健常者のピーク値の2倍であり半値幅も2倍であること、さらに虚血性心疾患患者のスペクトルは高周波の乱れが生

じることが示された。これらの特性を用いる事により動脈硬化が無侵襲で定量的に診断出来る可能性が示された。

参 考 文 献

- 1) 生井武文, 井上雅弘: 粘性流体の力学. 理工学社, pp. 218, 1978.
- 2) 井口 学, 他2名: オリフィスを設けた円管内の振動流れにおける速度分布と再付着点距離. 機会学会論文集50巻, 435号, 昭和59年.
- 3) Moore, C. J.: The role shear-layer instability waves in jet exhaust noise. *J. Fluid. Mech.*, **80**: 321, 1977.
- 4) 池辺 潤: 脳動脈瘤の音響的検査システムに関する基礎的研究. 文部省科学研究費一般研究成果報告集, 昭和62年.
- 5) 清水優史, 他1名: コロトコフ音発生機構の解明(最低血圧での機構), 日本機会学会論文集, **48**巻, 434号, pp. 1936-1944, 昭和57年.
- 6) 松信八十男: 血管弾性と血流の基本問題. 慈恵医科大学外共同研究シンポジウム論文集, pp. 95-106, 1986.

Change in Korotkoff sound spectrum caused by Arteriosclerosis

Toshiyuki Moritan*, Takahumi Katayama*
Masao Saito* and Yosio Yazaki**

*Institute of Medical Electronics, Faculty of Medicine,
University of Tokyo

**The Third Department of Internal Medicine, Faculty of Medicine,
University of Tokyo

The present physical checkup can not indicate the degree of progress of arteriosclerosis quantitatively. This study intend to show the method of noninvasive diagnosis for the arteriosclerosis. The subjects consisted of 40 healthy men. And 39 patients with ischemic heart diseases consisted of 22 males and 17 females ranging from 45 to 80 years of age, with an average age of 59.9 years. We have recorded pulse wave and Korotkoff sound wave. After A/D conversion, Korotkoff sound

spectrum has been analyzed by FFT. The Korotkoff sound spectrum of healthy men peaked at 28.5 Hz while that of patients with IHD peaked at 48.5 Hz. In the cause of turbulent blood flow, envelope of Korotkoff sound spectrum cause a peak at a highfrequency and also an irregular change has been undergone. In conclusion, the analysis of the envelope of Korotkoff sound spectrum, the diagnosis of arteriosclerosis can be performed noninvasively and quantitatively.

Key words: Korotkoff sound spectrum, arteriosclerosis, turbulent blood flow, noninvasive, quantitative.