

914 非侵襲による動脈の力学的健全性計測システムと臨床

A Noninvasive Measurement System for Mechanical Integrity of Artery and Clinical Data.

正 ○野方文雄（岐阜大・工），横田康成（岐阜大・工），河村洋子（岐阜大・工）

森田浩之（岐阜大学院・医学研究科），宇野嘉弘（岐阜大学院・医学研究科），

W. R. Walsh (ニュー・サウスウェルズ大学)

Fumio NOGATA, Department of Human and Information Systems, Faculty of Engineering, Gifu University

Yasunari YOKOTA, Department of Information Science, Faculty of Engineering, Gifu University

Yoko KAWAMURA, Researcher of Faculty of Engineering, Gifu University

Hiroyuki MORITA and Yoshihiro UNO, Graduate School of Medicine, Gifu University

W.R. Walsh, Prince of Wales Hospital, New South Wales University, Australia

To establish a noninvasive method for estimating mechanical integrity of artery, we examined arteries of the human aged eighties by tensile and internal pressure tests, as well as sheep and cow as comparative data. It was shown that strength and elongation decreased approximately a half and a quarter respectively than young artery specimens. We found that a relationship between E_{th} and strength has been obtained, which allows the estimation of arteriosclerosis in term of the strength. Then, a system for estimating the stiffness E_{th} has been developed using the ultrasound B-mode image of *in vivo* artery. The software permits to estimate E_{th} in real time, and a few minutes for the both side of the common carotid artery. Some clinical data were also obtained such as E_{th} -age relation, E_{th} s for both side of the common carotid artery, distribution of E_{th} , and E_{th} -IMT (Intima Media Thickness) relation. The result indicated that the E_{th} and strength are useful symptom indices for arteriosclerosis, especially for finding the beginning sclerosis that would start early twenties.

Key Words: Artery, Mechanical property, Arteriosclerosis Ultrasound, Health Examination, Image processing

1. 緒言

わが国の死因は脳血管疾患や心疾患が全体の約 3 割を占め⁽¹⁾，また，主原因の一つである動脈硬化は要介護人口増，総医療費増に強く関連している。動脈硬化の特徴は動脈壁の壁厚が全体的，局所的に肥厚が生じ機械的性質が変化する。また，内壁性状や局所的狭窄は血流に大きく影響を与え流速や乱流域の非定常性が大きくなる。更に，これらは血栓やプラーク⁽²⁾の初生・増大に起因すると考えられている。動脈硬化評価法として，動脈壁の壁厚を測定する周波数スペクトル法⁽³⁾，IMT（内中膜複合厚）値⁽⁴⁾， E_p ⁽⁵⁾血管の弾性係数を測定する Stiffness parameter β ⁽⁶⁾によって機械的性質を評価する方法がある。

本報告では，拍動による動脈血管径の微小な変化を超音波画像から計測してステフネスを評価する力学的健全性（動脈硬化）計測システムの試作と臨床結果について報告する。

2. 実験方法

2.1 生体血管に対するステフネス評価について

動脈は粘弾性を示すので応力～ひずみ関係は非線形となる。したがって，ステフネスは一義的には定義できないので，実用性を優先して安静時生理的血压域（70～140 mmHg）において $d\sigma/d\varepsilon = E_{th}$ を直線近似した。また， E_{th} と血管強度 σ_u の関係を調べた。 E_{th} の妥当性についてはこれまでに提案されている式⁽¹⁻⁶⁾と比較検討した。本研究では厚肉円筒モデルの内壁 R_a における周方向応力 σ_θ とひずみより，ステフネス E_{th} を定義した。

$$E_{th} = \sigma_\theta / \varepsilon \quad \text{---(1)}$$

$$\sigma_\theta = \{ (R_a^2 + R_b^2) P_s - (R_a^2 + R_b^2) P_d \} / (R_b^2 - R_a^2)$$

周方向ひずみ： $\varepsilon = \Delta R_a / R_a$ ， $R_b^2 - R_a^2 = R_b^2 - R_a^2$

ここで，血压差 $\Delta P = P_s - P_d$ ， R_a ：血管内半径， R_b ：外半径，圧力変動による径変化 $\Delta R_a = (R_a) - R_a$ ，アンダーラインは変形後の値である。また，従来より医療現場で使われているパラメータ $\beta = \ln(P_s/P_d) / \{ (R_a - R_b) / R_a \}$ は，圧力～血管径曲線における変化率で無次元量である。

2.1 引張試験と内圧試験による弾性係数比較

ゴム，シリコンゴム，ヒト頸動脈（80 歳代），ウシ胸大動脈と頸動脈，ヤギ，ヒツジ総頸動脈試験片を生理食塩水環境下で内圧負荷試験を行い，圧力と径変化を計測し式(1)より E_{th} を算出した。次に同試験片を切り開き板状引張試験片として E_{th} を求めた。動脈の外径計測は光学的にスクリーン上に拡大（約 7-10 倍）して計測した。

2.3 総頸動脈の力学的健全性計測システムの試作⁽⁷⁾

動脈硬化計測器として確立するために超音波画像の血管径変化より生体 E_{th} を評価するシステムを開発した。超音波探触子は 7.5MHz を用い，左右総頸動脈計測した。

3. 結果および考察

3.1 生体ステフネス E_{th} ，強度評価

各試験片の内圧および引張試験より， $\sigma_\theta \sim \varepsilon$ 曲線の安静時血压範囲 70～150 mmHg（ヒト血管内径 6～7，厚さ 0.8mm；周方向応力 0.05～0.20 MPa）を直線近似した時のステフネス E_{th} は，引張と内圧負荷について良い対応関係があった。一方，これまでにステフネスを表示する数種類の式のうち， E_p ， E_{inc} ， V_p ， β パラメータについては両者には異なる値であった。したがって，生体の血管径変

化と血圧より求められる E_{th} を血管のステフネスとして、動脈硬化を評価する事とした。Fig.1 は破断強度 σ と E_{th} の関係を示した。本図より、生体の E_{th} より強度が予測できる事が分かる、また、強度を内圧に換算し破裂圧力を本図に示した。これにより動脈硬化を破裂圧力を指標として評価できる事になる。

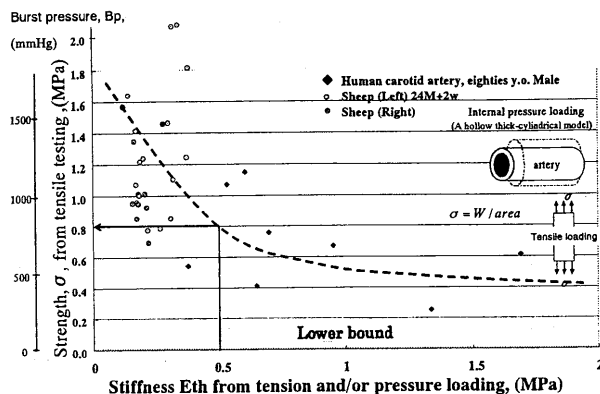


Fig. 1 Relationship between E_{th} and strength for the common carotid arteries of human and sheep.

3.2 左右頸動脈の E_{th} 、内中膜複合厚さ IMT との関係

Fig. 2 は左右総頸動脈の E_{th} と年齢依存性を示し、左右 E_{th} は年齢と共に男女とも増加し、左右頸動脈のステフネス差異は高齢者が大きい。左右のいずれかが大きいかは個人に依存する。すなわち、動脈硬化検査においては両方の頸動脈計測が必要である。動脈硬化は進行すると局所的になるので 5mm 毎の横断面で計測すると、若年者はいずれの箇所も同じ E_{th} であるが、高齢になると場所により異なる事がわかった (図省略)。すなわち、動脈硬化は局所的、また青年期から進行するので長期にわたる定期的計測が重要である。

Fig. 3 は、頸動脈エコー検査における主要な計測値 IMT (Intima Media Thickness) と E_{th} の関係を示したもので、両者は良い対応関係がある事が分かる。検査基準 IMT=1.1mm 以上の被験者は精密検査が必要とされているが、 $E_{th}=1.4\text{MPa}$ に相当する。これを破裂血圧に換算すると 500mmHg に相当する。本システムは動脈硬化進行レベルを血圧値で評価できる方法である。

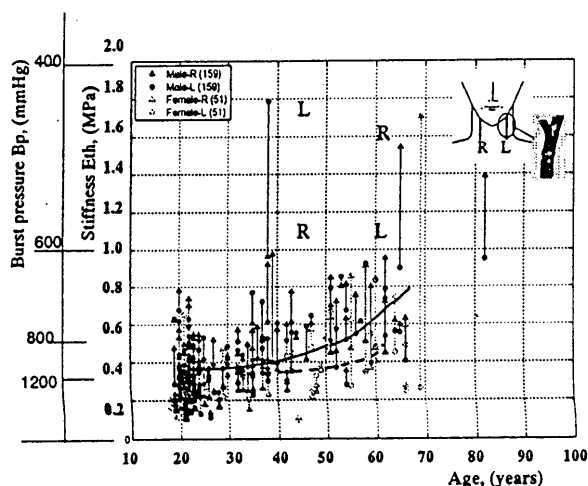


Figure 2: Clinical results of arteriosclerosis with age and location (right-left sides) for Japanese people.

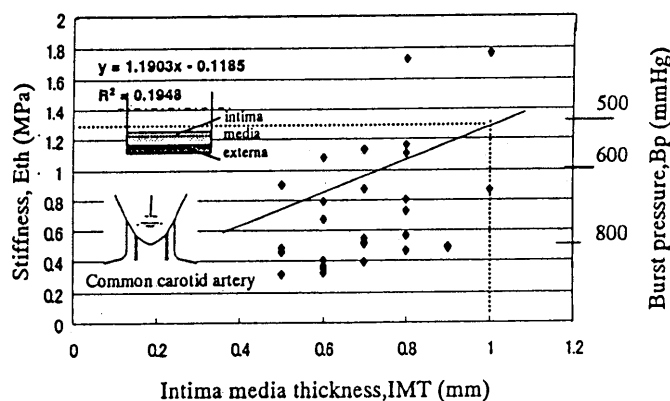


Fig. 3 Relation between E_{th} and IMT of the wall for both side of the common carotid artery.

4. 結言

本計測システムは超音波装置による頸動脈像より画像解析し生体血管ステフネスを求めている。計測時間は両頸動脈について、若年者は約 3 分、中年で約 5 分であった。結果をまとめると以下のようなものである。

1) ヒトおよび動物血管、粘弾性人工材料の引張、内圧試験より式(1)から求められるステフネス E_{th} は引張試験の E_{th} と等価であることが示された。

2) 臨床試験の結果、加齢にともない男女とも動脈硬化が進行し、高齢者ほど個人差が大きい。左右総頸動脈の弾性係数の差異は年齢と共に大きくなる。計測位置による E_{th} は、高齢になると差異が大きくなり動脈硬化は局所的に進行する事が認められた。また、IMT と E_{th} には良い関係が認められ、IMT=0.55mm 以上ではプラークの存在 (臨床データ)、約 1.1mm で破裂血圧 500mmHg に相当する事が分かった。

本研究は各医療機関における倫理委員会承認を受けて遂行し公表承認サインを保存した。平成 17-19 年度文部科学省知的クラスタ創成事業研究費 (岐阜・大垣地域) により遂行し、また、平成 12 年度~19 年度の研究室所属担当学生の協力を得て遂行した。関係者にお礼を申し上げます。

参考文献

- [1] 厚生労働省大臣官房統計情報部, 平成 16 年度人口動態統計
- [2] 工藤信樹, 張 旭: 超音波 RF エコー解析による頸動脈壁厚計測に関する検討, 超音波医学, 25, (1998) 155-166.
- [3] 山崎義光, 児玉峰男: 頸動脈エコーによる早期動脈硬化病変の定量評価, Diabetes Journal, Vol.23, No.1 (1995).
- [4] 川崎 健, 竹内光吉: 超音波変位計による非観血的総頸動脈硬化判定法, 脈管学, Vol.22, No.4 (1932).
- [5] Imura T, et al: Cardiovascular Research, 20.20, (1986) 208-214.
- [6] 林紘三郎, バイオメカニクス, コロナ社 (2000), 76-79.
- [7] 野方文雄, 動脈硬化解析システム, 動脈硬化解析方法及び動脈硬化解析プログラム, 特許第 3882084 号 (2006 年 11 月 24 日)