

エアジェット押込試験による皮膚弾性特性計測の有効性に関する理論的考察 Numerical Study on Availability of Air-Jet Impinging Test to Measure Skin Elasticity

小栗 諒子 (福井大院), 牧尾 理 (福井大), 桑水流 理 (福井大), 宮本 久喜三 (P&G)

Ryoko OGURI, Graduate Student, University of Fukui
Tadashi MAKIO, Undergraduate Student, University of Fukui
Osamu KUWAZURU, University of Fukui
Kukizo MIYAMOTO, P&G Innovation Godo-Kaisha
FAX: 0776-27-9728, E-mail: oguri@csm.npes.u-fukui.ac.jp

It is important to measure skin elasticity in vivo for understanding the mechanical characteristics of skin. Various types of measuring methods have been proposed. Most of them employ contact method which has problems depending on the contact or friction. We employ a noncontact method, because it does not need to consider the contact or friction in the computational simulation. Moreover, since the air-jet test is an open system, we can downsize the total apparatus to measure the extremely thin epidermis. Instead, we need to consider the fluid-structure interaction between air-jet and skin. As the first trial, we obtained the surface pressure distribution when the air-jet was impinged on a flat wall in arbitrary conditions. The skin deformation by such surface pressure was evaluated by the finite element analysis in various conditions. Consequently, we determined the testing condition to measure the Young's modulus of epidermis.

1. 緒言

皮膚に対する力学的な検証を行うには、その粘弾性特性を明らかにする必要がある。しかし、皮膚は角層、表皮、真皮などの複数の層で構成されており、互いに異なる組織であることから、各層における力学特性に大きな差があると予想される¹⁾。これまでに様々なタイプの粘弾性特性計測法が提案されてきたが、極めて薄い角層や表皮の粘弾性特性を非侵襲で計測する方法はない。また既存法の多くは接触式であり、有限要素解析による再現では接触の取扱いに注意が必要である。一方、エアジェットを用いた非接触式計測法²⁾が提案されており、接触条件に左右されず、小型化し易いという利点がある。

本研究は表皮の弾性率計測を目的に、微小ノズルからの圧縮空気を皮膚に噴きつけ、その変形を計測する微小エアジェット押込試験を開発する。しかし本試験方法は、流体力が変形をもたらす、同時に変形が流れ場に影響を及ぼすため、数値解析による再現では、流体-構造連成解析が必要である。本研究では第一段階として、微小ノズルからの圧縮空気噴流が壁面に衝突する際の壁面圧力分布を、文献データから取得し、経験的予測式を作成する。また、壁面圧力に対する変形を有限要素解析し、表面剛性からヤング率を予測する式を開発した。このヤング率測定法を三層皮膚モデルに適用した場合を、有限要素解析により評価し、表皮のヤング率を計測するために必要な流体力とエアジェットの条件について検討する。

2. エアジェット押込試験

2.1 試験方法の概要

図1に示すように、内径 d_N のノズルから噴出する圧縮空気を、ノズル出口面から距離 h だけ離れた皮膚に垂直に噴きつけ、そのときの中央変位 u をレーザー変位計等により

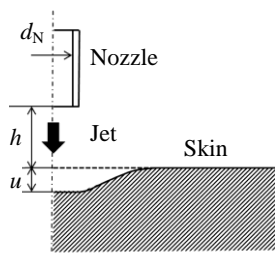


Fig.1 Air-jet impinging test.

計測する実験系を考える。最終的には、流体と構造の連成解析から皮膚(表皮および真皮)の粘弾性特性を同定したい。本報ではその前検討として、文献データに基づき、ノズル出口流速から衝突噴流の壁面圧力分布を予測し、壁面圧力による皮膚の変形を有限要素解析により評価する。また、均質材に対するヤング率予測式を開発し、皮膚への適用法と、エアジェットに求められる条件を明らかにする。

2.2 エアジェットによる壁面圧力評価

噴流が壁面に衝突する際の圧力分布を文献^{3,4)}から取得する。図2はAmano⁴⁾が壁面衝突噴流を有限体積法で解いた結果である。ただし、非圧縮粘性流体を仮定し、軸対称二次元問題として、ノズル出口流速 v_N が一様な場合を解いている。このとき、中心からの位置 r に対し、圧力分布 p はガウス分布となる^{3,4)}。そこで、この圧力分布 p を式(1)のガウス関数で近似する。

$$p = B p_D \exp\left[-\left(r/d_N\right)^2 / A^2\right] \quad (1)$$

ただし、圧力 p と位置 r はそれぞれノズル出口動圧 p_D とノズル内径 d_N で無次元化する。ここで空気密度を ρ とすれば、 $p_D = \rho v_N^2 / 2$ である。図2の曲線は式(1)による最小二乗近似結果である。このように係数 A と B を決定し、それらの h/d_N に関する変化を陽な関数で近似することにより、任意の h/d_N に対する壁面圧力分布 p を得る。

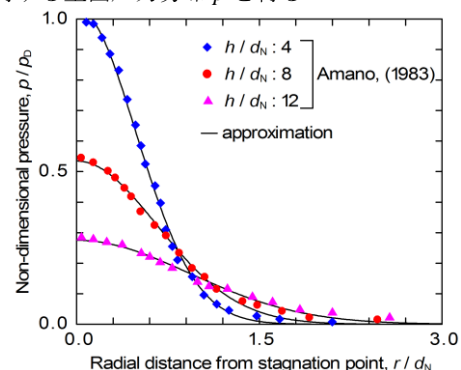


Fig.2 Wall Pressure distribution⁴⁾.

2.3 皮膚の弾性変形からのヤング率推定

ヤング率 E の均質材を仮定し、圧力に対する変位 u から材料のヤング率を予測する方法を示す。厚さ t の線形弾性

体の無限板を考え、底面を固定し、上表面の直径 d_p の円形領域に一樣圧力 \bar{p} を負荷する。材料が等方均質であれば、無次元表面剛性 $k = (\bar{p}/E)/(u/d_p)$ は t/d_p の関数となる⁴⁾。軸対称問題として本問題を有限要素解析し、様々な t/d_p に対する k を求めた。得られた k と t/d_p の関係を最小二乗近似することにより、式(2)を得た⁵⁾。

$$k = 1.208 + 0.4242(t/d_p)^{1.248} \quad (2)$$

したがって、厚さ t と一樣加圧範囲 d_p が既知であれば、無次元剛性 k が定まり、実験結果(圧力 \bar{p} と変位 u)から材料のヤング率 E が次式で求められる。

$$E = d_p \bar{p} / ku \quad (3)$$

このヤング率計測法を皮膚に適用すると、多層構造(非均質性)の影響から、 d_p により E の予測値が異なる。そこで本研究では、三層皮膚モデルに表面圧力を負荷したときの変形を有限要素解析により求め、 d_p と予測される E の関係を明らかにし、表皮のヤング率を計測するのに最適な d_p を決定する。また、その一樣圧力と等価なガウス分布圧力を実現するための流体力について検証する。

3. 解析結果と考察

3.1 流体力の経験的予測式

図2のデータに対して式(1)による近似を行ったところ、図3, 4に示す通り、係数 A , B と h/d_N の関係を得た。 A はガウス分布の広がり、 B はよどみ点の圧力を表すので、 h が0に漸近すると A , B は共に有限な値に収束し、 h が ∞ に発散すると、 A は ∞ に発散し、 B は0に漸近する。このような収束性を考慮し、実際の圧力分布と矛盾が生じないように、 A を二次関数、 B を指数関数で近似した。

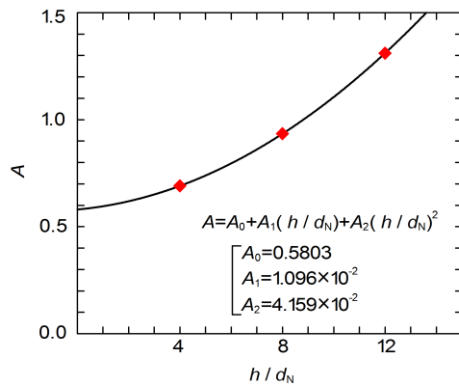


Fig.3. Relationship between A and h/d_N .

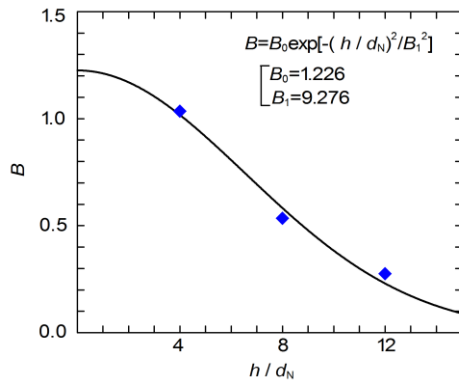


Fig.4. Relationship between B and h/d_N .

$$A = A_0 + A_1(h/d_N) + A_2(h/d_N)^2 \quad (4)$$

$$B = B_0 \exp[-(h/d_N)^2/B_1^2] \quad (5)$$

ただし、最小二乗近似から得られた係数は $A_0 = 0.5803$, $A_1 = 0.01096$, $A_2 = 0.004159$, $B_0 = 1.226$, $B_1 = 9.276$ であった。

3.2 表皮のヤング率評価方法の検討

3層モデルの有限要素解析から得られた、一樣加圧範囲 d_p に対する計測ヤング率 E の変化を図5に示す。角層、表皮、真皮のヤング率も同図に横線で示した。ただし角層、表皮、真皮の厚さはそれぞれ $10 \mu\text{m}$, $50 \mu\text{m}$, 1mm である。図5の例では、 $d_p = 25 \mu\text{m}$ で計測ヤング率が表皮のヤング率と一致する。このように、各層のヤング率と厚さを変化させて、表皮ヤング率を計測するのに最適な加圧範囲 d_p を求めたところ、平均して概ね $d_p = 40 \mu\text{m}$ が最適であった。

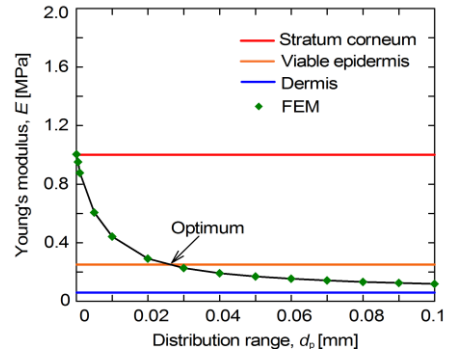


Fig.5 Result of finite element analysis.

一方、エアジェットの場合、圧力は式(1)のガウス分布である。そこで均質材に対して、ガウス分布圧力に対する変形を有限要素解析し、合力と表面変位 u が一樣圧力の場合と等しくなるガウス分布を求めた。その結果、 $Ad_N = 0.445d_p$, $Bp_D = \bar{p}d_p^2/4A^2d_N^2$ であれば、ガウス分布と一樣分布が等価になった。この関係を三層モデルにも適用する。

ここで仮に、加工の限界を考慮して、ノズル内径を $d_N = 20 \mu\text{m}$ とすると、最適一樣加圧範囲 $d_p = 40 \mu\text{m}$ から、圧力の等価性条件より $A = 0.890$ を得る。よって式(4)から、ノズル位置 $h = 0.148 \text{mm}$ が決定する。更に、式(5)にこの h を代入すれば、 $B = 0.647$ となる。故に圧力の等価性条件から動圧 $p_D = 14.8 \text{kPa}$ およびノズル出口流速 $v_N = 157 \text{m/s}$ が決定される。ただし、 $\bar{p} = 7.60 \text{kPa}$ とした。ここで仮に、ノズル長さを 1mm とすると、流速 v_N に対して、圧力損失 $\Delta p = 224 \text{kPa}$ となるので、ゲージ圧で約2気圧の圧縮空気が必要となることがわかる。

以上の考察より、内径数十 μm のノズルを、皮膚表面から $100 \mu\text{m}$ 程度離して、エアジェットを噴き付ければ、表皮のヤング率を計測できる可能性が高い。ただし、ノズルの形状や皮膚の固定方法、変位の計測方法などに関して、更に検討する必要がある。また、流体-構造連成解析を行い、より現実的な皮膚の変形を再現する必要がある。

参考文献

- 1) 松本健郎, *Fragrance J.*, 35(2), pp. 36-40, 2007.
- 2) T. Fujimura, *et al.*, *Skin Res. Technol.*, 14, pp. 504-511, 2008.
- 3) P. Bradshaw and E.M. Love, *Aeronautical Research Council Reports & Memoranda*, No.3205, 1959.
- 4) R.S. Amano, *Bull. JSME*, 26, pp.1891-1899, 1983.
- 5) 桑水流理, 宮本久喜三, 井上康子, 吉川暢宏, *計算工学講演会論文集*, 13, pp. 487-488, 2008.
- 6) 牧尾理, 小栗諒子, 桑水流理, 宮本久喜三, *日本機械学会北陸信越支部第49期総会・講演会*, 発表予定, 2012.