

人皮膚の表皮ヤング率計測方法の開発

Development of Young's Modulus Measurement for Human Skin Epidermis

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

Tadashi MAKIO, University of Fukui, Bunkyo 3-9-1, Fukui-shi, Fukui

Ryoko OGURI, University of Fukui

Osamu KUWAZURU, University of Fukui

Kukizo MIYAMOTO, P&G Innovation GK

Key Words: Biomechanics, Skin, Elasticity, Finite Element Method, Air Puff

1. 結 言

アンチエイジングは体を正常な状態から更に良くし、疾病・疾患に強い体を作る助けを行うことである。抗しわ治療など、いわゆる「皮膚の若返り」による精神的健康の向上もアンチエイジングに含まれる。これらは Quality of Life の向上を目指しており、精神的向上が身体的向上にも繋がるとするものである⁽¹⁾。

ここで、皮膚の老化を表す小じわに注目する。しわは皮膚の変形であり、その形成メカニズムの解明には、力学的視点が必要不可欠である⁽²⁾。そこで本研究では表皮の Young 率の計測方法を開発する。しかし個人差や環境の影響など、実際には皮膚のばらつきがあり、それらを被験者ごとに計測する必要がある。ヤング率の計測は決して小じわではなく、皮膚の病理状態を知るためにも活用できる。

本研究では計測法としてエアジェット試験を用いる。有限要素解析により、皮膚表面に一樣圧力が作用したときの変化量を調べ、角層・表皮・真皮^{(3),(4)}の Young 率および厚さの影響を明らかにする。表皮層の Young 率を計測するために、圧力をかけるのはエアジェットで行う。そのためガウス分布圧力がかかるため一樣圧力では利用できない。一樣圧力と等価なガウス分布圧力を求める必要がある。一樣圧力をかけた場合に、表皮層の Young 率を計測できる加圧範囲 d_{opt} を決定する。更に、それと等価なガウス分布圧力を与えた場合の計測誤差を検証する。これらの結果に基づき、圧力と変形から表皮層のヤング率を計測する方法を開発する。

2. 有限要素解析

2.1 均質材モデルを使用しての解析

モデルは図1を使う。ただし、均質で圧力 \bar{p} 、範囲 $C_U=d/2$ 、全体厚さ t 、変位 u の線形弾性体と仮定。まず均質材を用い Young 率 E の予測式を作る。このモデルの Young 率 E は 1.0MPa とし、ポアソン比 ν は 0.4 とする。四角形 8 節点要素を用いる。軸対称問題として解析する。

\bar{p} と u の関係が線形だと仮定すると $p=Ku$ となり K を表面剛性と呼ぶ。 K を無次元化したものを無次元剛性 $k=Kd/E$ として表す。 k は厚さ t と加圧範囲 d に依存している⁽⁵⁾。

\bar{p} と u を計測すれば Young 率 E を次式で求める事が出来る。

$$E=dp/ku \quad (1)$$

まずは底面固定の均質材に圧力をかけた場合、無次元剛性 k の式を求める。このとき k の具体的な関数 $k(t/d)$ を解析する。

E の予測式を作成するには一樣圧力を用いている。しかし実験はエアジェットで行うため、ガウス分布圧力となる。 E の予測式を利用するには一樣圧力と等価なガウス分布圧力を求め、エアジェットの圧力を一樣分布圧力に換算する必要がある。等価なガウス分布圧力を求めるために、まずは一樣圧力の合力とガウス分布圧力での合力を等しくする。 $C_U=d/2$ とし一樣圧力での力を式で表わすと、

$$F = \bar{p}\pi C_U^2 \quad (2)$$

ガウス分布圧力の定義は

$$p' = p_0 \exp(-r^2/C_G^2) \quad (3)$$

と書けるので、ガウス分布における力を式で表わすと、

$$F = p_0\pi C_G^2 \quad (4)$$

よって

$$\bar{p}C_U^2 = p_0C_G^2 \quad (5)$$

となればよい。しかし、 p_0 と C_G が一意に決まらない。そこで有限要素解析を行い、変位 u が等しくなる p_0 と C_G を求める。

2.2 3層モデルを使用しての解析

図1のように3層モデルに一樣圧力をかけた場合の有限要素解析を行い、実際の皮膚の変形を予測する。文献データ⁽²⁾を基に標準的な皮膚と思われる基準値として、角層、表皮、真皮の Young 率をそれぞれ $E_1=1.0\text{MPa}$ 、 $E_2=0.25\text{MPa}$ 、 $E_3=0.06\text{MPa}$ とし、厚さをそれぞれ $t_1=0.01\text{mm}$ 、 $t_2=0.05\text{mm}$ 、 $t_3=1\text{mm}$ とする。どの層もポアソン比 ν は 0.4 とする。四角形 8 節点要素を用いる。ここから各パラメータを変化させ、各層の影響を調べる。

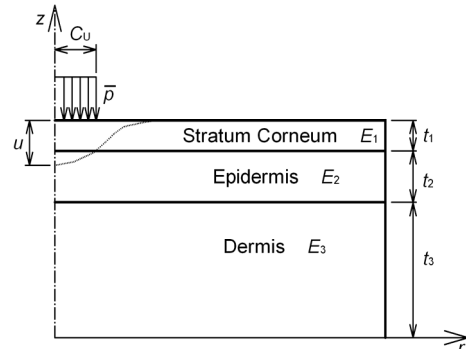


Fig.1 Three-layered skin model

一樣圧力 $\bar{p}=1\text{kPa}$ とする。加圧範囲を $d=0.0001\text{mm}$ から 0.1mm の中で変化させる。均質材の E 計測方法を適用する。 d を変え計測値 E の変化を調べる。計測値 E が表皮 Young 率 E_2 と等しくなる d_{opt} を求める。表1のように一部の値を変更し解析を行い、 d_{opt} の変化を調べる。 t_2 、 E_3 、 t_3 は一定とする。これは実際の皮膚のばらつきを考慮し、個人差があっても計測出来る加圧範囲にするためである。

Table 1 Parameters of stratum corneum and epidermis

	E_1 [MPa]	E_2 [MPa]	t_1 [mm]
①	1.0	0.25	0.01
②	1.0	0.2	0.01
③	1.5	0.25	0.01
④	2.0	0.25	0.01
⑤	1.0	0.25	0.02

3. 結果

3.1 ヤング率測定法

均質材モデルに対し、 d と t を系統的に変化させ、有限要素解析から得られた k の変化を図2に示す。ただし、横軸は

t を d で無次元化した値である。また、 k' は $t \rightarrow \infty$ のときの k の収束値である。無次元剛性 k の収束値は $k'=1.208$ であった。また加圧範囲が変わっても同じグラフ上にプロットがあることから、加圧範囲の影響を正しく反映できている。

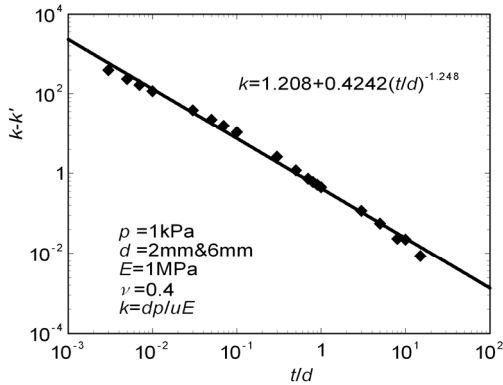


Fig.2 Relationship between t/d and $k-k'$

計算結果を最小二乗近似して得られた式は

$$k = 1.208 + 0.4242(t/d)^{-1.248} \quad (6)$$

となった。以上より厚さ t と圧力範囲 d が既知であれば、 k が定まる。計測した表面剛性 $K (= \bar{p}/u)$ から式(1)に代入することで Young 率 E を求められる。

3.2 一様分布圧力と等価なガウス分布圧力

u と C_G の関係を求めた。均質材において $d=0.04\text{mm}$ で一様圧力をかけたときの表面変位と、ガウス分布圧力をかけたときの表面変位が同じになるように C_{Gopt} を決める。図3に有限要素解析から得られた u と C_G の関係を示す。交点が C_{Gopt} であり、次式で表わされる。

$$C_{Gopt} = 0.890C_U = 0.445d \quad (7)$$

式(7)を3層モデルにも適用し、その妥当性を検証する。

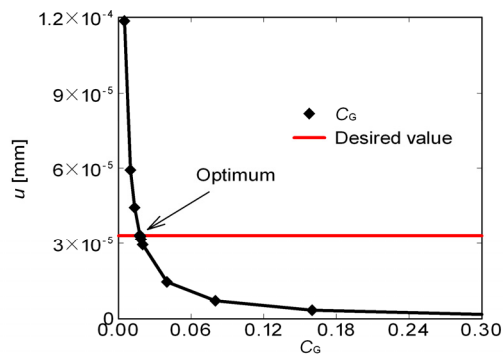


Fig.3 Relationship between C_G and u

3.3 加圧範囲 d_{opt} の決定

加圧範囲を変えた場合の計測値 E の変化を図4に示す。このグラフからは、加圧範囲に依存して計測値 E が $E_1 \sim E_3$ の範囲で変化することが分かる。表皮層の Young 率を計測できる最適な加圧範囲が d_{opt} である。

更に、実際の皮膚のばらつきの影響を調べた。表1のように一部パラメータを変更し解析を行った場合でも、 t_2 が大きくなると最適な加圧範囲が広がるかを確認した。表皮層の厚さを 0.1mm 、 0.2mm とし解析をしたものが図5である。表皮層の厚さ t_2 が大きくなる場合、それに伴い最適な加圧範囲が広がる事が分かった。実際の顔の皮膚では、 $t_2=40\mu\text{m} \sim 80\mu\text{m}$ 程度なので図の斜線部がおおむねこの範囲に納まる厚

さの範囲である。それらを考慮すると、表皮層の Young 率を計測できる最適な加圧範囲は $d_{opt}=0.04\text{mm}$ である。

3層モデルにおいて、 $d=d_{opt}=0.04\text{mm}$ で計測したとして、一様圧力および、それと等価なガウス分布圧力のときの計測された Young 率の違いを調べた。ガウス分布圧力の使用による Young 率の誤差は+2.88%となった。3層モデルで表1のようにパラメータを変更したモデルで Young 率の誤差を解析すると最大で+3.61%、最小で+1.67%となった。Young 率や厚さが2倍になった場合においても誤差が大きく変化しないことが分かる。よって、 $d_{opt}=0.04\text{mm}$ より $C_{Gopt}=0.0178\text{mm}$ を決定することができた。

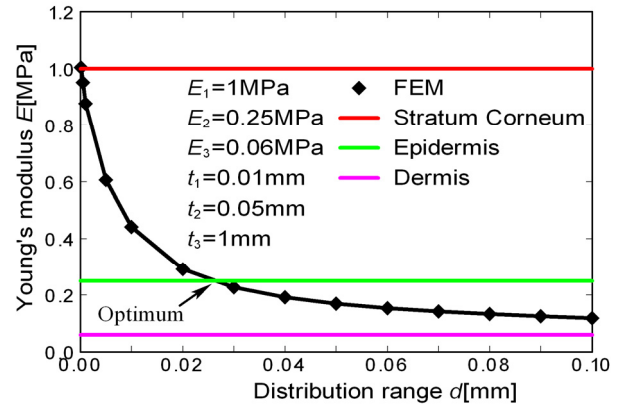


Fig.4 Relationship between Distribution range and Young's modulus

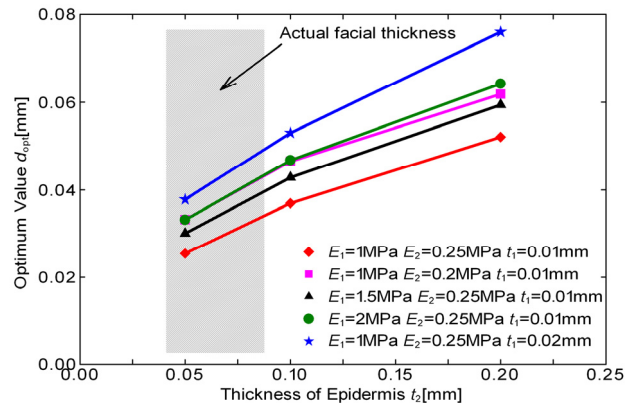


Fig.5 Relationship between thickness of epidermis and optimum value

4. 結 言

一定圧押し試験による均質材の Young 率予測式を開発した。この計測法をエアジェットで行うために一様圧力と等価なガウス分布圧力を求めた。更に3層皮膚に適用して、表皮の Young 率を計測するために最適な加圧範囲 $d_{opt}=40\mu\text{m}$ を決定した。

文 献

- (1) 日本美容皮膚科学会 監修：美容皮膚科学，(2005)，南山堂。
- (2) 松本健郎，Fragrance Journal， Vol.35(2)，(2007)，pp. 36-40。
- (3) 安田利頭 著，漆畑修 改訂：美容のヒフ科学 改訂8版，(2002)，南山堂。
- (4) 朝田康夫 監修：美容の医学 美容皮膚科学事典，(2010)，中央書院。
- (5) 桑水流理，宮本久喜三，井上康子，吉川暢宏：顔皮膚の力学的特性に関する実験的および解析的検討，計算工学講演会論文集， Vol.13，(2008)，pp. 487-488。