

人体体表の硬さ

Stiffness of human body surface

生活工学・感覚工学研究室 浦滝真理子 Mariko URATAKI

1. はじめに

肩が凝ったり背中が張ったりすると、患者は苦痛を感じる。このとき他者が患者の凝ったり張ったりした部分を指先で触って圧をかけると、その部分の筋肉が明らかに硬くなっているのがわかる。この硬さは、背中においては縦に連続していることもあるが、多くは皮膚下方に球状に硬い部分が指先に触れるようである。この硬い部分の径はその主要部は数 mm 程度のもと考えられるが、その中心部に毫針の針尖を刺入することによりこの硬い部分が反射的にほどけることがある。すると、患者はその部位が楽になり、他者がその部位を指先で触れても実際に柔らかくなった様に感ずる。

しかしこれらは、すべてその様な感じがするだけであって、殆ど何の客観性もない。しかし確かに、凝った肩を触ってみれば硬く感ぜられ、凝っていない人の肩は柔らかく感ずる。この、指先で感ずる筋肉の硬さを客観的に示す適切な指標を求めるところを目的とした。おそらく、生理学的にはその筋肉の血流速度などが指標となり、また、組織の乳酸濃度や温度分布などが指標となりうるであろうが、本研究では直接的に指で押す感覚を表す指標を求めるところ、体表からの圧と変位の関係を求めてこれを検討した。

2. 実験

(1) 装置

電動式マイクロメーター(MCH3-25 Mitsutoyo)の可動部先端に荷重測定用のロードメーター (LM-500GK 共和電業) を取り付け、その先に球 (半径 $R = 2.5, 5, 7.5$ mm, アクリル樹脂製) を固定した。このマイクロメーターを三脚 ($M = 3$ kg) で垂直に固定し、球先端が皮膚表面に接するようにした上でマイクロメーターを押し下げた。ただし、マイクロメーターには、ロードメーターからフィードバックがかかっており、必要以上に強い力がかからないようにしてある。このマイクロメーターの変位 δ とロードメーターで測定した力 F とを X-Y レコーダー (F-35C RIKEN DENSHI) で F - δ 曲線として記録した。装置の概念図を Fig. 1 に示す。

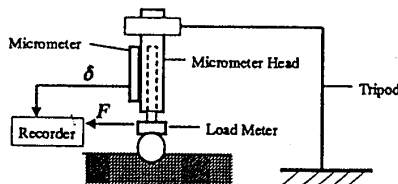


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus.

(2) 方法

マイクロメーターの変位速度 v は、 $v = \pm 0.5$ cm/sec とした。荷重 F は、 $F = 0 \sim 100$ gw の間に設定し、 $F = 100$ gw になると押し込み速度は反転して引き上げるようにした。

(3) 試料および対象

[シリコン試料]

円柱状シリコン試料 (半径 $r = 5$ cm) は主剤/硬化

剤配合比を変えて硬、軟の 2 種類を作製した。測定は硬シリコン円柱 (厚さ l) 上に軟シリコン円柱 (厚さ d) を載せた二層円柱 (厚さ $h = d + l$) (Fig. 2) を、上面から球 (半径 $R = 2.5, 5.0, 7.5$ mm) で圧迫して、 F (力) - δ (変位) 曲線を求めた。ただし d または l が 0 の単層円柱も測定した。

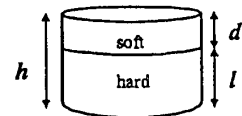


Fig. 2 Double layer silicone disk.

[人体]

前腕肘窩遠位二寸 (前腕長を 12 寸とする)、上腕二頭筋膨隆部、大臀筋膨隆部を測定対象とし、半径 $R = 7.5$ mm の球で圧迫した。

3. 結果と考察

[シリコン試料]

(1) 単層試料

厚さ $h = 50$ mm の硬、軟シリコンを半径 $R = 7.5$ mm の球で圧迫したときの F - δ 曲線を Fig. 3 に示す。図は Hooke の法則から期待される直線ではなく曲線を示した。また、ややヒステリシスを示したが、これは変位掃引速度を小さくすれば減少するものと思われる。

一般に、弾性率 E 、ポアソン比 ν の弾性体を半径 R の球で圧すると、そのときの加えた力 F と押し込み距離 δ との関係は

$$F = \frac{4}{3} \sqrt{R} \left(\frac{E}{1-\nu^2} \right) \delta^{\frac{3}{2}}$$

なる Hertz の式で表される⁵。よって、 F - δ 曲線での結果をこの式に従ってプロットしなおした (Fig. 4)。図は薄い試料 ($h < 15$ mm) では折れ曲がった二本の直線、厚い試料では一本の直線となった。折れ曲がり点に対する深さ d_c より小さい変位 $\delta < d_c$ における傾き k は h の増加とともに指数関数的に減少し、やがて一定値 k_∞ を取った (Fig. 5)。これは試料厚みが大きくなると、試料下台 (剛体) の影響が試料の厚さに吸収されて反映しなくなることを表している。Fig. 5 より求めた緩和厚み λ は硬シリコンでは約 15 mm、軟シリコンでは約 21 mm であった。下台の影響が現れない k_∞ を用いて Hertz の式より弾性率 E を求めると、硬シリコンは $E_{\text{硬}} = 66$ kPa、軟シリコンは $E_{\text{軟}} = 30$ kPa となった (ポアソン比は $\nu = 1/2$)。

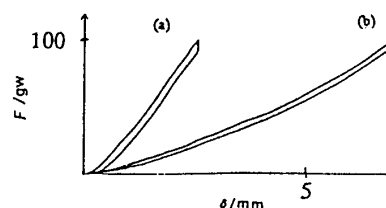


Fig. 3 F - δ characteristics for silicone disks ($h = 50$ mm, $R = 7.5$ mm). (a) hard silicone (b) soft silicone

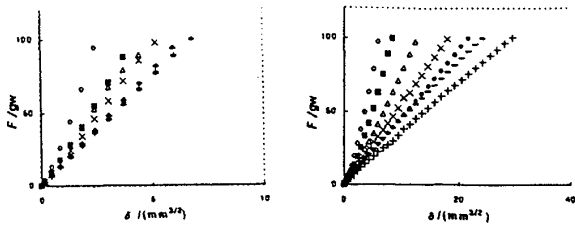


Fig. 4 Hertz plot for hard(a) and soft(b) silicones.
(h : ○ 5mm, ■ 10 mm, △ 15 mm, × 20 mm, ● 30 mm, - 40 mm, + 60 mm, R = 7.5 mm)

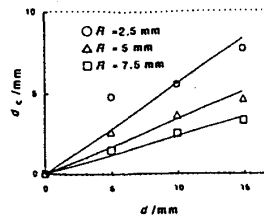


Fig. 8 Relation between d_c and d .

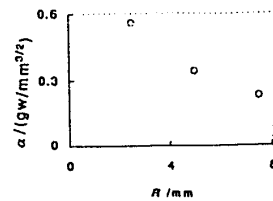


Fig. 9 Relation between α and R .

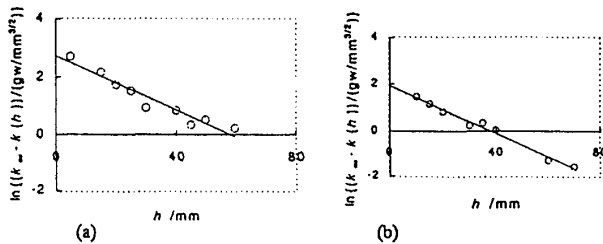


Fig. 5 Gradient k of straight lines in Hertz plot and thickness h of silicone disk ($R = 7.5$ mm). (a)hard silicone (b)soft silicone

(2)二層試料

硬シリコン (厚さ $l = 70$ mm) の上に 厚さ d の軟シリコンを載せた二層シリコン試料を上面から球 (半径 $R = 7.5$ mm) で圧迫したときの Hertz plot を Fig. 6 に示す。 d の増加とともに直線の傾き k は指数関数的に減少した (Fig. 7)。緩和厚みは $\lambda = 9$ mm である。半径 $R = 2.5, 5.0$ mm の球で圧迫した場合もほぼ同様の結果であった。これは緩和厚み $\lambda = 9$ mm に比べて十分厚い軟シリコンが上層にある試料では、深部に硬シリコンが存在することを本法では検出できないことを意味している。 Fig. 6 の $d = 5 \sim 15$ mm のグラフは折れ曲がった二本の直線から成り立っている。この折れ曲がり点に対する深さ d_c を d に関してプロットした (Fig. 8)。図は原点を通る直線となり、その傾き α を R に関してプロットした (Fig. 9)。図は $R \rightarrow \infty$ にて一定値に漸近したが、これは上面より均一圧を加えたとき軟シリコンがある割合に圧縮されると硬シリコンと同じ弾性率になることに対応しているものと思われる。

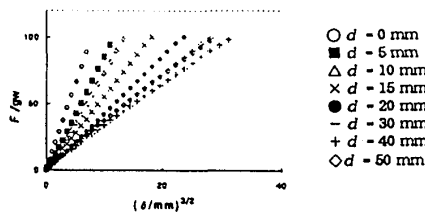


Fig. 6 Hertz plot for double layer silicone disks ($l = 70$ mm, $d = 0, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50$ mm, $R = 7.5$ mm).

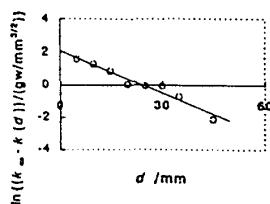


Fig. 7 Gradient k of straight lines in Hertz plot and thickness d of soft silicone disk ($R = 7.5$ mm). (a)hard silicone (b)soft silicone

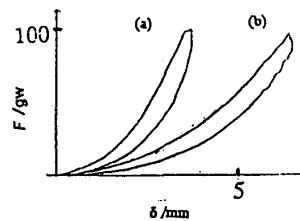
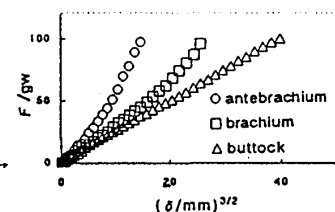


Fig. 10 F - δ characteristics for antebrachium(a), brachium(b) and buttock(c).



この前腕、上腕、臀部の Hertz plot は3本の折れ曲がった直線から成り立っている様に見える。今回は値の小さな折れ曲がり深さ d_c のみを検討対象とした。また、半径 $R = 7.5$ mm の球で圧迫したシリコンでの結果 $d_c = 0.23d$ より折れ曲がり深さ d_c から d を算出した。 d と d_c を Table. 1 に示す。

Table. 1 d_c and d obtained from Hertz plot for antebrachium, brachium and buttock.

	R/mm	d_c/mm	d/mm
antebrachium	7.5	2.7	11.7
brachium	7.5	2.9	12.6
buttock	7.5	—	—

Table. 1 の d は軟組織と硬組織との境界の深さを表しているものと思われる。

【謝辞】

本研究の御指導を頂きました東京衛生学園基礎医学研究室會澤重勝博士、並びに御協力頂きました同研究室の方々に感謝いたします。

【参考文献】

1. 中原一郎「材料力学 下巻」養賢堂、2000
2. L. Landau, E. Lifshitz「弾性理論」東京図書、1972
3. 河野邦夫、伊藤隆造、境章「解剖学」医歯薬出版会社、1999
4. 阿部孝、福永哲夫「日本人の体脂肪と筋肉分布」杏林書院、1995
5. Heinrich Hertz, "Miscellaneous Papers", MacMillan, 1896