

正弦波空気噴流による柔軟物のヒステリシスループ挙動

横田 理¹⁾ 長尾 光雄²⁾

1) 日大工・上席研究員 2) 日大工・機械

1 緒言

塗り薬には、主としてクリーム、軟膏、ローションがある。軟膏は水分よりも油分が多く含まれているので、乾燥しやすい部位に適している。クリームは油分よりも水分が多く含まれているので、軟膏より伸びる性質があり、サラッとしている。またローションの主成分は水分であるので、薬液は拡がりやすい性質を有する。塗り薬の塗り心地、接着剤や塗料の塗布性など、製品の定量的評価方法として、粘弾性特性の試験は有効である。柔軟物の粘弾性の測定手法は応力、あるいはひずみを与え、その応答を測定する方法が一般的である。応力、あるいはひずみの与え方で静的測定と動的測定に大別される。動的測定は、与える応力あるいはひずみを周期的に変化させ、それに対する応答を計測するので、測定時間が短いこと、与える応力あるいはひずみが小さいことから広く用いられている。動的測定には、ずり測定と引張圧縮測定があるが、これらはプレートや測定ヘッドなどの治具を介しての測定となり、また柔軟物ごとに適切な治具を選択する必要があること、柔軟物表面の粘着性、または付着性により測定が困難となることなどの問題が挙げられる。

試作機¹⁾は、負荷媒体として固体の治具ではなく、空気噴流を用いる。空気噴流による正弦片振り荷重を繰返し加え、柔軟物表面に生じたくぼみ深さの測定を行い、荷重とくぼみ深さのヒステリシスループ、ひずみエネルギーの評価を試みた。

2 正弦的荷重におけるくぼみ深さ変化

図1に示す正弦的に変化する片振り荷重を柔軟物表面に加えると、式(1)になる。

$$F = F_{\max}(1 + \sin\omega t) \quad (1)$$

柔軟物が粘弾性体である場合の波形は、くぼみ深さは荷重に対して $0 < \delta [\text{deg}] < 90$ の範囲で位相ずれの波形を示すので、くぼみ深さは式(2)になる。

$$h = h_{\max}\{1 + \sin(\omega t - \delta)\} \quad (2)$$

式(1)と式(2)の時間 t [s] を消去・整理すると、式(3)になる。

$$h_{\max}^2 x^2 - 2\cos\delta F_{\max} h_{\max} x y + F_{\max}^2 y^2 - (\sin\delta)^2 F_{\max}^2 h_{\max}^2 = 0 \quad (3)$$

ここで、 x, y を式(4)、式(5)のように置換する。

$$x = F_{\max} - F \quad (4)$$

$$y = h_{\max} - h \quad (5)$$

式(3)は、式(6)を満たすので、楕円になる。

$$h_{\max}^2 F_{\max}^2 - (\cos\delta F_{\max} h_{\max})^2 > 0 \quad (6)$$

ここで、完全粘性体 $\delta=90[\text{deg}]$ では円、完全弾性体 $\delta=0[\text{deg}]$ では直線を示す。

図2の全ひずみエネルギー U [N·m]、損失エネルギー U_{loss} [N·m]、弾性ひずみエネルギー U_{storage} [N·m] すると

$$U = U_{\text{storage}} + U_{\text{loss}} \quad (7)$$

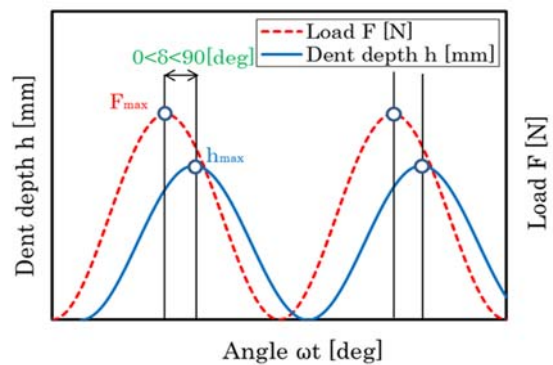


図1 正弦的荷重におけるくぼみ深さ変化

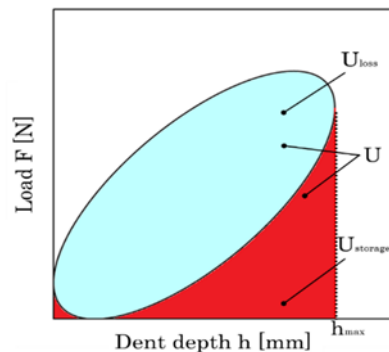


図2 損失エネルギーと弾性ひずみエネルギー

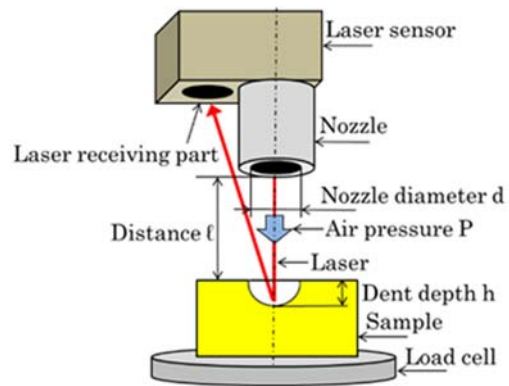


図3 測定原理

3 測定原理および実験条件

図 3 には試作機の測定原理を示す。コンプレッサから供給された圧縮空気は、レギュレータおよび、圧力センサにより調整されて、ノズルを通して柔軟物に吹き付けられる。このとき、柔軟物の表面に生じたくぼみの深さ h [mm]を、レーザ変位計によって測定する。空気噴流によって生ずる荷重 F [mN]は柔軟物下部に設置したロードセルによって測定される。ノズル口径 $d=2.5$ [mm]、ノズル先端から柔軟物表面の噴射距離 $l=15$ [mm]、ノズル内圧 $P=0\sim 20$ [kPa]、負荷・除荷サイクルを $t=10$ [s]とした。なお負荷・除荷の繰り返し数は 10 回とし、100[s]まで測定した。

4 実験結果および考察

本実験では、金属用補修剤、寒天、絹豆腐、および市販のハンドクリーム 2 種類（ハンドクリーム A、B とする）の計 5 種類の柔軟物の動的粘弾性特性を調べた。測定直前に各柔軟物の表面温度は室温と同じ 22 ± 2 [$^{\circ}\text{C}$]とした。

図 4 にハンドクリーム A の荷重およびくぼみ深さの時間変化を示す。くぼみ深さは吹き付け開始直後から 6.5[s]にかけて大きく増加し、6.5~10.7[s]にかけて減少している。その後、くぼみ深さは増減を繰り返しながら徐々に最大くぼみ深さを増やしていくが、すべての測定時間を通して最大くぼみ深さの包絡線は増加傾向にあった。図 5 にハンドクリーム A の荷重とくぼみ深さの関係を示す。繰り返し回数ごとに塑性変形が小さくなるためヒステリシスループの幅は狭くなり、楕円へと形状が近づいていく。しかしながら、完全な楕円にはならず、最大のくぼみ深さはループが描かれるごとに僅かに増加している。このように試作機による測定結果から、柔軟物ごとに異なるヒステリシスループを得ることもできた。なお、楕円の長短径と短半径の比率について定義する必要があると考える。

ヒステリシスループの面積より繰り返し数ごとの損失エネルギーを求めた。図 6 に金属用補修剤、ハンドクリーム A、ハンドクリーム B、絹豆腐、寒天の繰り返し数ごとの損失エネルギーを示す。1 回目の損失エネルギーはハンドクリーム A が最も大きく、続いて金属用補修剤、ハンドクリーム B、寒天、絹豆腐の順に小さくなった。2 回目以降ではいずれの材料も損失エネルギーは 1 回目より減少しているが、減少の割合は柔軟物ごとに異なった。2 回目以降の損失エネルギーの大きさは、金属用補修剤が最も大きく、続いてハンドクリーム A、ハンドクリーム B、絹豆腐、寒天の順に小さくなり、1 回目の結果とは異なる序列となった。繰り返し数 3 回以上になると、それらの序列に変動はなく、損失エネルギーの値もほぼ一定であった。

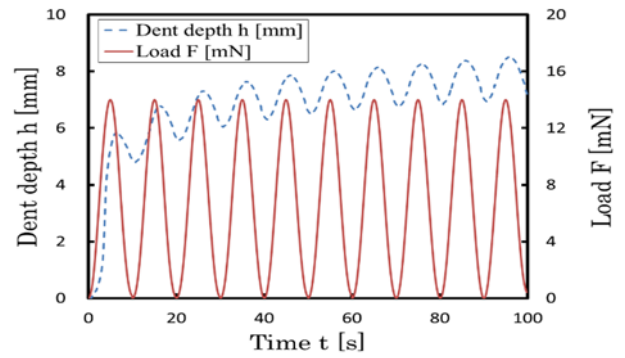


図 4 クリーム A における繰返しくぼみ変化

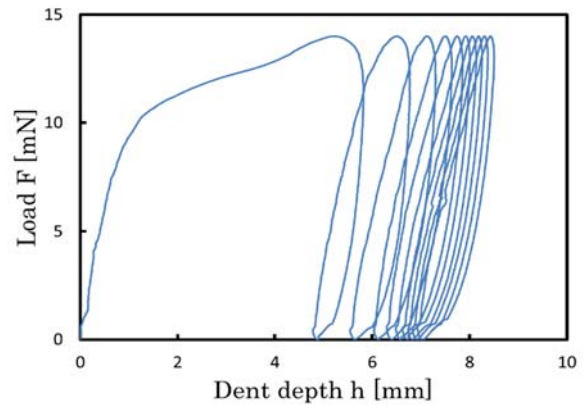


図 5 クリーム A におけるヒステリシスループ

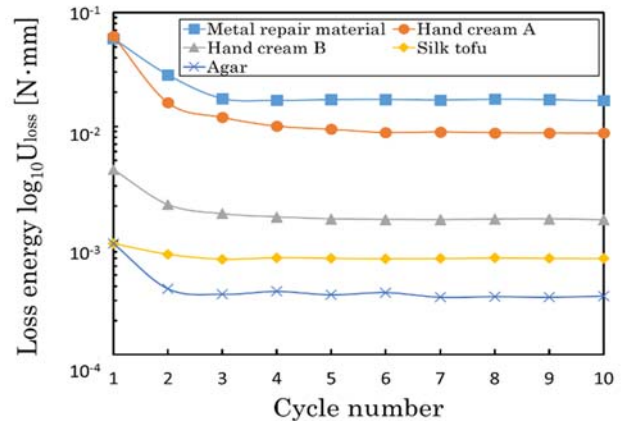


図 6 繰返し荷おける損失エネルギーの変化

5 結言

正弦波空気噴流による粘弾性体への測定結果を以下に示す。

- (1) 繰返し正弦波荷重を吹き付けることで、安定した楕円のヒステリシスループが描かれた。
- (2) 各種柔軟物の損失エネルギーも測定できた。

参考文献

- 1) 長尾, 山田, 横田: 空気噴流による正弦波負荷下での柔軟物の動的粘弾性挙動, 日本材料強度学会誌 52-1, pp. 3~9 (2018).