

柔軟物表面に現れるくぼみ深さの動的粘弾性挙動に関する研究

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

食品や化粧品のような柔軟物の測定は、静的あるいは動的に負荷（または変形）を与えることにより、それらの粘弾性挙動が調べられる。動的粘弾性の測定は、時間の経過とともに周期的に変化する荷重（またはひずみ）を与え、そのひずみ（または荷重）を計測することにより得られる。この方法は静的粘弾性測定と比較して、測定に要する時間が短いことに加え、与える負荷（ひずみ）が小さいことから、破損による物性の変化が起きにくいので、柔軟物への動的粘弾性測定が広く用いられている。しかし、現在用いられている粘弾性測定装置は、固体のプランジャを柔軟物に接触させることで負荷を行うため、柔軟物の粘着力や付着力により、測定が困難となる場合がある。さらには、柔軟物に合わせたプランジャを選択するので、測定条件を揃えることが難しい。

開発した試作機⁽¹⁾では、負荷媒体は固体のプランジャではなく、空気噴流を用いて柔軟物表面にくぼみを生じさせ、そのくぼみ深さをレーザ変位センサにより測定する。ここでは、くぼみ深さ変化の動的粘弾性挙動を測定・評価したので報告する。

2. 動的粘弾性挙動の測定原理

動的粘弾性挙動の負荷を空気噴流 $F(t)$ で行い、それを式(1)のように柔軟物表面に吹き付ける。

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

このときの柔軟物表面のくぼみ深さの時間的変化は、柔軟物が完全弾性体である場合には図1に、完全粘性体の場合には、図2のように $\delta = 90[\text{deg}]$ の位相差の波形が示される。柔軟物が粘弾性体の場合のくぼみ深さは $0 < \delta [\text{deg}] < 90$ の範囲内で波形が示される。このときのくぼみ深さの波形は、式(2)のように表される。

$$h(t) = h_{\max} |\sin(\omega t - \delta)| = |h_1 \sin(\omega t) - h_2 \cos(\omega t)| \quad (2)$$

$$h_1 = h_{\max} \cos \delta, \quad h_2 = h_{\max} \sin \delta$$

ここで、フックの法則が成り立つときの弾性率を複素弾性率 E^* とし、複素数を i とする、

$$E^* = E' + iE'' \quad (3)$$

E' [N/m] は貯蔵弾性率、 E'' [N/m] は損失弾性率であり、損失正接 $\tan \delta$ は式(4)、あるいは図3に示される。

$$E''/E' = \tan \delta \quad (4)$$

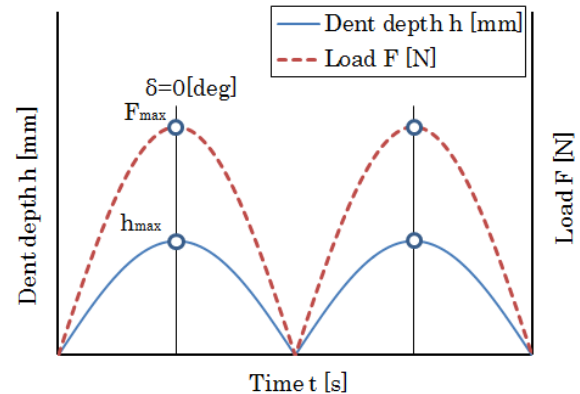


Fig.1 Relationship between dynamic load and dent depth for elastic body.

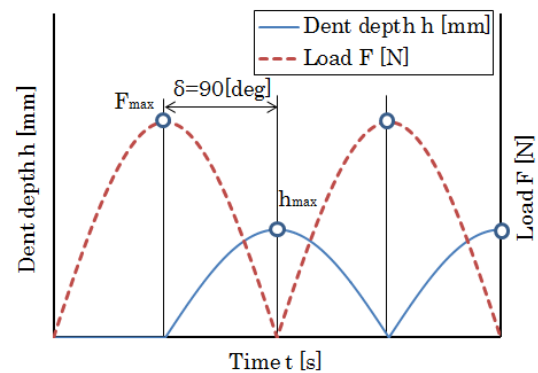


Fig.2 Relationship between dynamic load and dent depth for viscous body.

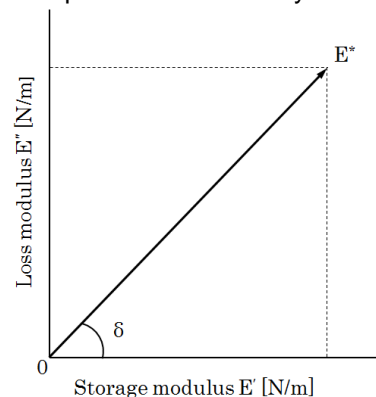


Fig.3 Relationship between storage modulus and loss modulus.

3. 実験装置および実験条件

図4には試作機の概略図を示す。圧縮空気をノズル先端から柔軟物に吹き付ける。柔軟物表面に生じたくぼみ深さ h [mm] は、変位センサ受光部で測定される。圧縮空気による荷重 F [mN] は柔軟物下部のロードセルにより測定される。ノズル内径 $d = 2.5$ [mm]、

ノズル先端から柔軟物表面の距離 $l=15$ [mm]、ノズル圧 $P=0\sim 25$ [kPa]として、負荷・除荷サイクルは $t=0\sim 5$ [s]の範囲で圧力上昇、 $t=5\sim 10$ [s]の範囲で圧力低下させる。

4. 実験結果および考察

寒天、絹豆腐、ウレタンゲル、および市販のハンドクリーム 2 種類（それぞれハンドクリーム A, B とする）の計 5 種類の柔軟物について、動的粘弾性特性の試験を行った。ここで、測定直前の試料の表面温度は室温と同じ 22 ± 2 [$^{\circ}\text{C}$]とした。

図 5 に寒天の荷重とくぼみ深さの時間変化を示す。1.5~2.0[s]における荷重の増加は、バルブが開いた際に、管路内の残留圧縮空気が噴き出すためであり、粘弾性特性の評価には影響しない。くぼみ深さは吹き付け開始から $t=5.1$ [s]まで増加し、それ以降は減少に転じる波形を示した。このとき F_{\max} と h_{\max} の位相差 δ は 2.4 [deg]であった。

図 6 にはウレタンゲルの荷重と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から時間 $t=5.9$ [s]まで増加を続け、それ以降は減少に転じた。 F_{\max} と h_{\max} の位相差 δ は 21.3 [deg]であった。ウレタンゲルは寒天に比べ、最大くぼみ深さ h_{\max} が現れるのが遅いため、 δ の値が大きくなるので、柔軟物ごとに異なる波形が得られたことが分かる。

図 7 には、寒天、ウレタンゲル、絹豆腐、ハンドクリーム A、およびハンドクリーム B の貯蔵弾性率と損失弾性率の関係を示す。 E' は、絹豆腐が最も大きく、次いでハンドクリーム B、ハンドクリーム A、寒天、ウレタンゲルの順であった。このことから、絹豆腐は最も硬く、ウレタンゲルは最も軟らかいと評価できる。 E'' は、ハンドクリーム A が最も大きく、次いでハンドクリーム B、絹豆腐、ウレタンゲル、寒天の順であるので、ハンドクリーム A は最も粘りが大きく、寒天は最も粘りが小さいと評価できる。 $\tan \delta$ については、ハンドクリーム A が最も大きく、次いでウレタンゲル、ハンドクリーム B、絹豆腐、寒天の順であった。これらのことから、ハンドクリーム A は最も粘性的な柔軟物であり、寒天は最も弾性的な柔軟物であると評価できる。

以上の結果より、空気噴流を利用した本試作機は、各種柔軟物の動的粘弾性挙動が評価できる。

5. 結 言

- (1) 試作機による空気噴流で負荷するくぼみ深さの時間経過で、動的粘弾性特性が測定できる。
- (2) 5 種類の異なる柔軟物において、貯蔵弾性率、損失弾性率、及び損失正接が評価できた。

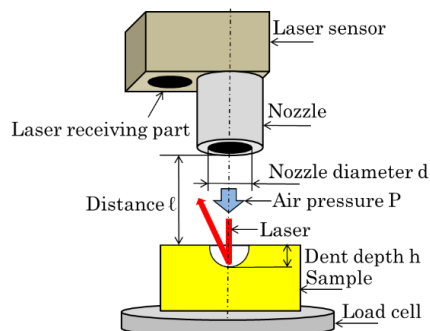


Fig.4 Measurement principle.

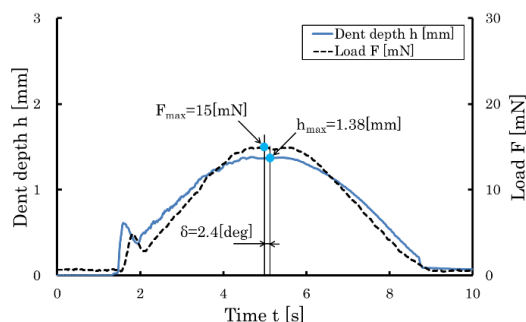


Fig.5 Variation of dent depth and load for time of agar.

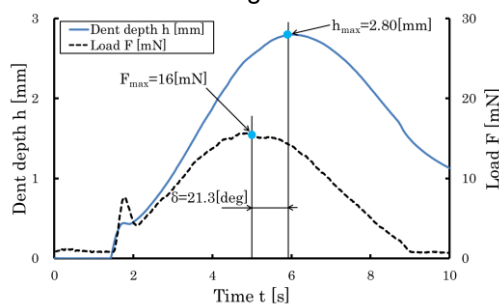


Fig.6 Variation of dent depth and load for time of urethane gel.

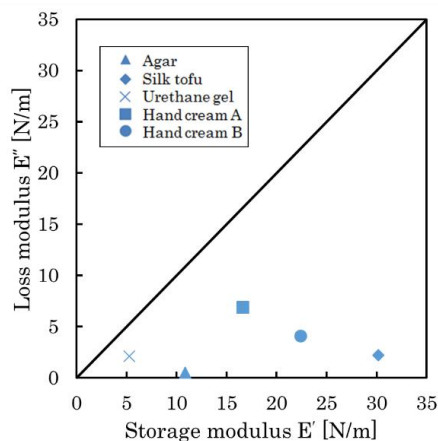


Fig.7 Relationship between storage modulus and loss modulus for each sample.

参考文献

- (1) 横田 理: 特別講演「粘弾性評価における計測技術の展開」, 精密工学会東北支部, (2017年10月14日)