空気噴流による柔軟物の粘弾性特性*

長尾 光雄^{*1}, 望月 康廣^{*2}, 西本 哲也^{*1}, 横田 理^{*1}

Viscoelasticity of Soft Samples by Air Jet

Mitsuo NAGAO^{*1}, Yasuhiro MOCHIZUKI, Tetsuya NISHIMOTO and Osamu YOKOTA

^{*1} Nihon Univ. College of Engineering, Dept. Mechanical Engineering
Tokusada, Tamura-machi, Koriyama-shi, Fukushima, 963-8642 Japan

There have been few reports on test methods for viscoelasticity properties of soft samples using an air jet instead of plungers for loading and unloading. Authors propose a method of evaluating their viscoelasticity properties, such as soft processed foods and industrial products, using the air jet with newly developed test equipment. In this method, loading and unloading can be performed using the air jet in a very short time, loading time can be arbitrarily set, and the shape of the dents formed on the surface of soft samples can be instantaneously measured using light from a semiconductor laser. Using the developed equipment, authors measured the shape of the dents formed on soft samples, measured the depth of the dents for various loading times, types of soft samples and pressures, and evaluated the viscoelasticity properties of the soft samples with respect to elastic compliance and equivalent dent depth.

Key Words : Viscoelasticity, Material Testing, Softness, Creep, Creep Recovery, Compliance, Nozzle, Laser-Aided Diagnostics, Laser Measurement

1. 緒 言

柔軟物は、一定の外力が加えられるとクリープを起こし、除荷されるとクリープ回復を起こす。クリープ挙動やその回復挙動は、弾性変形を表わすばねと粘性を表わすダッシュポットの二つの要素を組み合わせた力学的モデルが利用され、弾性と粘性の係数が求められる。柔軟物の測定方法には、引張り、圧縮、ねじり、曲げ、およびひずみ変形などがあり、それらを測定する方法にはレオメータがある。これは、工業材料を対象にする万能試験機の機能を備えたもので、荷重と変形を同時に検出して柔軟物の破断や粘弾性を測定する。このときに用いられる圧子（プランジャー⁽¹⁾あるいはアダプターを指す）には、針、コーン、円盤、球体、および板状刃などがあり、柔軟物や試験方法によって圧子を適切に選択して試験が行われる。例えば、ゲル状食品の試験には定荷重あるいは定速度で圧子を柔軟物に押し込む方法で粘弾性特性を調べる。しかし、圧縮、粘性、クリープ、および応力緩和などの試験により圧子が異なり、またその可動速度も柔軟物の急激な変形に対応しない場合がある。

本研究^{(2),(3)}では、負荷および除荷を特定の圧子で行うのではなく、空気噴流を用いて柔軟物表面にくぼみを生じさせ、その瞬時の形状変化をレーザ光により計測できる測定方法を提案し、その計測装置の開発を行っている。ここでは、柔軟物に与えた負荷時間や負荷の大きさによるくぼみ深さを測定し、そのクリープおよびクリープ回復挙動から、提案するコンプライアンスや等価深さによる柔軟物の粘弾性を評価したので報告する。

2. 柔軟物のクリープおよびクリープ回復挙動

図1はクリープおよびその回復曲線、図2はそのときの四要素等価モデルを示す。図1において、くぼみのクリープ挙動は時間 $t = 0 \sim t_r$ の間に空気噴流を柔軟物表面に負荷し続けたときのくぼみ深さの変化を示し、クリープ回復挙動は時間 $t = t_r$ で除荷したときのくぼみ深さの変化を示す。柔軟物表面に発生したクリープ挙動のくぼみ深さ h_0 は式 (1) で表す。

* 原稿受付 2012 年 12 月 15 日

^{*1} 正員, 日本大学工学部機械工学科 (〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原 1 番地)

^{*2} 正員, 日本大学大学院工学研究科博士後期課程

E-mail: nagao@mech.ce.nihon-u.ac.jp

$$h_{(t)} = h_1 + h_2 + h_3 = h_1' + h_2' + h_3' \quad (1)$$

式 (1) のクリープ挙動は、図 2 に示したばねとダンパーを用いた式 (2) ⁽⁴⁾ で示せる。

$$h_{(t)} = \frac{F}{G_1} + \frac{F}{G_2} \cdot \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{G_2}{\eta_2} \cdot t\right) \right\} + \frac{F}{\eta_3} \cdot t \quad (2)$$

式 (2) において、第 1 項の G_1 および第 3 項の η_3 はマクスウェルモデルのばねの弾性率とダッシュポットの粘性率であり、第 2 項の G_2 および η_2 はフォークトモデルのばねの弾性率とダッシュポットの粘性率である。柔軟物表面に生じるくぼみ深さのクリープ挙動において、くぼみ深さ $h_{(t)}$ は荷重 F に依存するので次のように示せる。

$$h_{(t)} = J \cdot F \quad (3)$$

$$J = h_{(t)} / F \quad (4)$$

ここで、 J はくぼみ深さのコンプライアンスと呼ぶことにし、その単位は mm/N で、1N 当たりどの程度のくぼみ深さが得られたかを示す。式 (4) は式 (1) より次のように示せる。

$$J = h_1 / F + h_2 / F + h_3 / F \quad (5)$$

一方、クリープ終了時、あるいはクリープ回復直前の最大くぼみ深さ h_r に対する任意の時間のくぼみ深さの割合をくぼみの等価深さと定義すると、式 (1) は式 (6) のように示せる。等価深さの単位は無次元である。

$$h_{(t)} / h_r = h_1 / h_r + h_2 / h_r + h_3 / h_r \quad (6)$$

式 (1)、式 (5)、および式 (6) の右辺の第 1 項、第 2 項、および第 3 項は、それぞれ最大くぼみ深さの変形に対する瞬間弾性変形、遅延弾性変形、および変形が残留する永久変形である。これらのことより、柔軟物の粘弾特性は、弾性率や粘性率でその物性を求める代わりにコンプライアンスや等価深さで表示することができる。

Fig.1 Viscoelasticity characteristics provided during creep and creep recovery processes.

Fig.2 Four elements equivalent model.

Fig.3 Depth measuring method of produced dents.

Fig.4 Summary of measuring equipment.

3. 柔軟物表面のくぼみの測定方法

本測定法は、空気噴流を利用する方法であるため、食品や生体部位⁽⁵⁾の柔らかさや粘弾性特性が測定できる計測装置である。図3に示すように、ノズルより噴き出した空気が柔軟物の表面に当たり、その表面にくぼみが生じる。くぼみは噴流の強さに大きく依存すると考え、噴流の強さによるくぼみ深さの時間的変化を測定することで、柔軟物の粘弾性特性が調べられる。計測装置の外観を図4に示した。なお、実験に用いたノズル口径 $d_0=1.0\text{mm}$ 、噴射距離 5mm とし、柔軟物の寸法はくぼみ形状の測定に影響しない範囲の直径 50mm 、厚さ 20mm にした。なお、対象とした柔軟物は、人肌ゲル、スライム、プリン、絹豆腐、および木綿豆腐である。

4. 実験結果

4・1 負荷時間を変化させた場合の粘弾性特性

図5はスライム表面に噴射圧力 P を 20kPa 一定として、噴射時間 t_r が 5秒 、 10秒 、 15秒 、および 20秒 の4段階に変えたときの負荷開始から 100秒 までのくぼみ深さのクリープおよびクリープ回復を示す。図5のくぼみ深さのクリープ曲線は、非線形を示す遅延弾性変形と永久変形が表れる。負荷時間が短いとくぼみは浅く、負荷時間が長くなると、その深さは深くなる。また、クリープ曲線は負荷時間に関わらず、一つの曲線で示された。クリープ回復曲線の瞬間弾性変形はわずかに現われるが、遅延弾性変形は長い時間を必要としており、永久変形も残留する。

Fig.5 Variation of dents depth for creep time.

Fig.6 Variation of dents depth which appeared on soft samples.

4・2 各種柔軟物による粘弾性特性

図6には、スライムと人肌ゲルの工業材料、プリン、絹豆腐、および木綿豆腐の加工食品のくぼみ深さのクリープおよびクリープ回復挙動を示した。このときの負荷条件は、それぞれ噴射圧力 20kPa 、噴射時間 20秒 、経過時間 60秒 とした。負荷時間 7秒 までのくぼみ深さは、プリンが最も大きいので柔らかく、続いてスライム、絹豆腐、人肌ゲル、木綿豆腐の順に小さくなる。しかし、 7秒 を過ぎると、スライムとプリンのくぼみ深さは逆転し、スライムの方が深くくぼむ。これらの挙動については、プリンは瞬間弾性変形の占める割合が大きく、遅延弾性変形や永久変形の占める割合が少ないためであり、スライムは永久変形の占める割合が大きく、瞬間弾性変形や遅延弾性変形は少ない。負荷停止後の 40秒 間におけるくぼみ深さのクリープ回復は、スライムはゆっくり回復し、続いて絹豆腐、プリン、木綿豆腐、人肌ゲルの順にくぼみ深さが浅くなる。スライムは瞬間弾性変形がほとんどなく、遅延弾性変形の占める割合が大きいと考える。一方、プリンと絹豆腐は、瞬間弾性変形、遅延弾性変形、および永久変形の3つの挙動が現われるが、人肌ゲルと木綿豆腐の場合はクリープ回復の大部分は瞬間弾性変形である。

4・3 圧力を変化させた場合の粘弾性特性

図7は、人肌ゲルと絹豆腐に対して圧力変化を5段階に分け、負荷時間 20秒 とし、除荷後の時間軸に対するくぼみ深さの変化について示した。負荷圧力は、人肌ゲルは $40\text{kPa} \sim 60\text{kPa}$ の範囲、絹豆腐は $20\text{kPa} \sim 40\text{kPa}$ の範囲

で 5kPa ごとにくぼみの深さを測定した。(a) の人肌ゲルは、負荷直後のくぼみの発生は瞬間に現われ、また除荷直後も瞬間にくぼみ深さが回復し、その後、5 秒以内で完全に回復している。人肌ゲルは瞬間弾性変形が強い柔軟物であることが分かる。(b) の絹豆腐のクリープは図 6 から分かるように、人肌ゲルとスライムの中間の挙動を示す。負荷直後では瞬間弾性変形を示し、その後粘弾性挙動を示す。除荷直後には瞬間弾性変形を示した後、緩やかに遅延弾性変形の回復を示し、80 秒後には負荷圧力に相応した永久変形が見られる。くぼみ深さ曲線には、凸凹の小さな振幅が現われている。これは、豆腐製造工程における気孔の発生、水の量および食物繊維や凝固剤の分量が影響したものと考えられる。

Fig.7 Elapsed time of dents depth on soft samples for pressure.

5. 考 察

5・1 クリープおよびクリープ回復のコンプライアンス

図 7 に示した人肌ゲルおよび絹豆腐について、式 (5) より算出したそれぞれの挙動に対するコンプライアンスの経過時間を図 8 に示す。図 8 (a) の人肌ゲルにおいては、各圧力で得られたクリープ挙動のコンプライアンスおよびクリープ回復挙動のコンプライアンスはほぼ一つの合成曲線で示された。しかし、(b) の絹豆腐の場合には、両曲線にばらつきのある曲線になっている。これらの理由として、人肌ゲルとスライムなどの工業製品は、製造方法、組成や機械的特性の規格が統一されているため、本測定結果はほぼ同じ結果になったと予想される。一方、豆腐やかまぼこなどの加工食品は、気孔の存在があり、弾力性、歯切れ度、および硬さなどが統一されていないことが原因と考える。表 1 は、噴射圧力 40kPa を負荷したときの人肌ゲルと絹豆腐の最大くぼみ深さ h_r におけるクリープ挙動のコンプライアンスを式 (5) より算出した結果である。人肌ゲルのそれは、 $h_1/F=68 \text{ mm/N}$ で最も大きく、続いて $h_2/F=12 \text{ mm/N}$ 、 $h_3/F=5 \text{ mm/N}$ となった。絹豆腐では、 $h_1/F=60 \text{ mm/N}$ が大きく、続いて $h_3/F=22 \text{ mm/N}$ 、 $h_2/F=10 \text{ mm/N}$ の順になった。したがって、これらには瞬間弾性変形、遅延弾性変形、および永久変形が異なる機械的特性を有していることが分かる。

5・2 クリープおよびクリープ回復のくぼみの等価深さ

図 7 に示した人肌ゲルと絹豆腐について、式 (6) より算出したそれぞれの挙動に対する等価深さを調べ、得られた結果を図 9 に示す。図 9 (a) の人肌ゲルの等価深さ曲線はコンプライアンス曲線と同様に一つの合成曲線で示され、(b) の絹豆腐の等価深さ曲線はばらつきのある曲線になっている。表 2 には、噴射圧力 40kPa を負荷した人肌ゲルと絹豆腐の最大くぼみ深さ h_r におけるクリープ挙動の等価深さを示す。人肌ゲルの等価深さは、 $h_1/h_r=80 \%$ と高い割合を占め、続いて $h_2/h_r=14 \%$ 、 $h_3/h_r=6 \%$ の割合になった。絹豆腐では、 $h_1/h_r=65 \%$ 、続いて $h_3/h_r=24 \%$ 、 $h_2/h_r=11 \%$ になった。したがって、これらは、瞬間弾性変形、遅延弾性変形、および永久変形の占める割合が分かる。

Fig.8 Elapsed time and compliance for pressure.

Fig.9 Elapsed time and equivalent depth for pressure.

Table 1 Creep compliance for pressure at 40 kPa.

	h_1/F [mm/N]	h_2/F [mm/N]	h_3/F [mm/N]
Skin gel	68	12	5
Kinu-tofu	60	10	22

Table2 Creep equivalent depth for pressure at 40 kPa.

	h_1/h_r [%]	h_2/h_r [%]	h_3/h_r [%]
Skin gel	80	14	6
Kinu-tofu	65	11	24

6. 結 言

空気噴流による柔軟物のくぼみ深さの測定法を提案し、その粘弾性特性を調べた。得られた結果を要約する。

- (1) 空気噴流を柔軟物表面に瞬時に負荷・除荷させ、くぼみ深さの粘弾性特性が調べられる。
- (2) 柔軟物による瞬間弾性変形、遅延粘弾性変形、および永久変形の特性が確認できた。
- (3) クリープとクリープ回復の測定が簡単にでき、またくぼみ深さのクリープ挙動に関わるコンプライアンスや等価深さが評価できた。

文 献

- (1) 仲濱信子, 大越ひろ, 森高初恵, “おいしさのレオロジー”, (2012), pp.56-67, アイ・ケイ コーポレーション.
- (2) 横田 理, “柔らかさ測定方法及び柔らかさ測定装置”, 特許 4247474,(2009),平成 21 年.
- (3) 長尾光雄, 横田 理, 依田満夫, “柔らかさおよび粘弾性を計測できる機能性試験機の開発”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.76, No.770 (2010), pp.2598-2603.
- (4) 後藤兼平, 平井西夫, 花井哲也, レオロジーとその応用, (1962), pp.74-88, 共立出版.
- (5) 西本哲也, 永井孝太, “自動車急制動時の下肢筋電応答に及ぼす加齢の影響”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.78, No.792 (2012), pp.2962-2971.