Static Compression Properties of Textile Pressure Sensor

MURAKAMI Tetsuhiko^{a,*}, MASUDA Atsuji^a, IEMOTO Yoshiyuki^b, UEMATSU Hideyuki^b, TANOUE Shuichi^b

^a Industrial Technology Center of Fukui Prefecture, Kawaiwashizuka 61, Fukui, Fukui 910-0102, Japan

^b Graduate School of Engineering, University of Fukui, Bunkyo, Fukui, Fukui 910-8507, Japan

Received 22 May 2015; accepted for publication 28 September 2015

Abstract

There are no sensors, which satisfy all conditions such as flexibility, stretch, thinness and low cost although there are various sheet type pressure sensors. We have developed a new type of pressure sensor using the compression property of textile. We have already evaluated the response characteristics of the textile sensor.

This report shows the result of experiment about the static compression durability and recoverability of the textile sensor. About the static compression durability, the compression pressure decreased with an increase of the compression time of compression pressure. And the decreasing ratio of detectable pressure became small at large detectable pressure. The static compression recovery was performed when the compression time was short. However, this property was not recovered when the compression time was large.

Key Words: Textile sensor, Compression sensor, Electrically conductive yarn, Static compression durability, Static compression recoverability

テキスタイルセンサーの静的圧縮特性

村上哲彦^{a,*}, 増田敦士^a, 家元良幸^b, 植松英之^b, 田上秀一^b

^a 福井県工業技術センター, ^b 福井大学大学院 工学研究科

1. 緒 言

大面積の圧力を検知するシートセンサーは、柔軟性、伸縮性、厚み、価格などの観点から様々な材料や方法により開発されている。例えば、薄くてフレキシブルな特性を有するシートセンサーとしては、導電性ポリマー [1]、織物 [2-3]、編物 [4] 等の特性を活かしたシートセンサーが研究されているが、導電性ポリマーによるフィルムセンサーは柔軟性、伸縮性、耐久性に劣り、静電容量法による織編物センサーは電気回路の構成が複雑で使用環境の影響を受けやすい等、各々技術課題があり、これらの問題点を解決したシートセンサーは未だ実用化されていない。

福井県工業技術センターでは、平二重袋織物の圧縮特性を利用して圧力を検知できるテキスタイルセンサーを開発している [5-9]。このテキスタイルセンサーの断面写真を Fig. 1 に、テキスタイルセンサーの圧縮挙動モデルを Fig. 2 に示す。

テキスタイルセンサーの構造は、Fig. 1 および 2(a) に示すように、平二重袋織物の上層部と下層部に導電糸を交錯、かつ接触しないように配置している。テキスタイルセンサーが圧力を検知する原理を Fig. 2(b) に示す。すなわち、このテキス

Fig. 1 Cross-sectional photograph perpendicular to weft yarn of the textile sensor.

* 連絡先: 福井県工業技術センター 910-0102 福井市川合鷺塚町 61
E-mail: murakamitetsuhiko@fklab.fukui.fukui.jp, Tel: +81-776-55-0664, Fax: +81-776-55-0665

Fig. 2 Cross-sectional image perpendicular to weft yarn of the textile sensor.

タイルセンサーを圧縮したときに平二重袋織物の空間がつぶれ、上下に配置した導電糸が接触する。この時に、導電糸を含む電気回路には、通電により電気信号の変化が生じるので、これをモニターすることで圧力を検知することができる。したがって、従来のシートセンサーに比べて薄層で柔軟性に優れおり、導電糸の配置を変えることで、任意の箇所に圧力検知点を配置することができる。また、通常の織機で製造できるため価格を抑えることができ、織物製造工程を利用しているため布帛を製造するように大面積化も容易である。さらに、テキスタイルセンサーは導電糸接触時の通電を利用した簡易なシステムでの構成が可能であり、複雑な電気回路を構築する必要がなく、取り扱いが容易である等の利点が多い。

我々はこれまでテキスタイルセンサーの圧力検知応答性について報告しており、加圧時の応答性は 100 ns、除圧時の応答性は 400 ns と応答性に優れていることを確認した。また、このテキスタイルセンサーの繰り返し検知が可能である周波数領域は 30 Hz であり、感圧スイッチとして適用が可能であることを明らかにした [10]。しかし、平二重袋織物の圧縮特性を利用したテキスタイルセンサーであるため、センサーとしての耐久性を明らかにする必要がある。そこで、本報ではテキスタイルセンサーに静的圧縮圧力を付加したときの圧縮特性である、静的圧縮耐久性と静的圧縮回復性について検討した。

2. 実験方法

2.1 試料

本研究で使用するテキスタイルセンサーの織物規格を

Table 1 に示す。導電糸には芯糸にポリエステル糸、カバード糸に銅線を使用したダブルカバード糸を用いた。また、テキスタイルセンサーの構造を維持する地糸には芯糸と同じポリエステル糸をたて糸およびよこ糸に使用して、レピア織機（津田駒工業製 FR001）にて製作した。また、テキスタイルセンサーのたて糸の導電糸は約 25 mm 間隔で 2 本ずつ配置した。よこ糸の導電糸は 8 個の平二重袋織物の中央に、Fig. 2(a) に示したように 2 本配置した。

2.2 テキスタイルセンサーの静的圧縮試験評価

テキスタイルセンサーの静的圧縮試験は、Fig. 3 に示すとおりテキスタイルセンサーの上下にポリ塩化ビニル製の板（1 mm 厚）を設置し、直径 200 mm の金属製の重りにより圧縮圧力 10 kPa（荷重 320 N）、20 kPa（荷重 620 N）、40 kPa（荷重 1,240 N）の 3 種類の圧縮圧力を付加し、圧縮圧力を付加している時間（圧縮圧力付加時間）は 24 時間から 480 時間（20 日間）により行った。静的圧縮試験前と静的圧縮試験中のテキスタイルセンサーの検知した圧力（検知圧力）を測定することにより、静的圧縮耐久性を評価した。

テキスタイルセンサーの静的圧縮回復試験は、このセンサーに 20 kPa の圧縮圧力で、圧縮圧力付加時間を 72 時間（3 日）と 480 時間（20 日）の 2 種類の付加時間で行った。こ

Table 1 Textile standard of a textile sensor.

Ground yarn	Warp, Weft : Polyester multifilament 280 dtex/ 48 f Twist yarn : 600 twist/m (Toray Industries, Inc. Type 202)
Electrically conductive yarn	Double covered yarn : 3500 twist/m Core : Polyester multifilament 280 dtex/ 48 f Twist yarn : 600 twist/m (Toray Industries, Inc. Type 202) Skin : Copper wire of diameter 0.05 mm (Sanshu Electric Wire Co., Ltd. Type A)
Density	Warp density : 120 ends/inch Weft density : 90 picks/inch In setting of weaving
Textile structure	Plane weave with double structure Length of hollow : 3.4 mm

Fig. 3 Static compression examination image of the textile sensor.

の静的圧縮後に除重し、圧力を付加しない状態で静置した時間（圧縮圧力回復時間）を24時間から720時間（30日間）におけるテキスタイルセンサーの検知圧力を測定することにより、静的圧縮回復性を評価した。

テキスタイルセンサーの性能の評価に用いる検知圧力を測定するために、テキスタイルセンサーをFig. 4に示すとおりスイッチとした電気回路を構成し、テキスタイルセンサーに圧縮試験機（カトーテック製 KES-G5）で直径16 mmの加圧子を用いて圧縮速度1 mm/sで圧力を付加した。圧縮試験機で圧縮するときのテキスタイルセンサーにかかる圧力、固定抵抗の電位差の時間に対する測定例をFig. 5に示す。テキスタイルセンサーの上層部と下層部の導電糸が接触しないときは、固定抵抗の電位差は約 ± 0.01 Vで変動しており、導電糸の接触により図に示すとおり、約4 V以上の電位差が急激に発生するので、固定抵抗の電位差が0.1 Vになった時の圧力をテキスタイルセンサーの検知圧力とした。なお、1つのテキスタイルセンサーの導電糸の交錯部25箇所を3回ずつ計75回測定し、その平均値より検知圧力を求めた。

繊維は弾性限界以上の力を加えたとき、ひずみが残留して永久変形する[11]。そこで、テキスタイルセンサーの構造変

Fig. 4 Electric circuit containing the textile sensor.

Fig. 5 Pressure of textile sensor and voltage of resistance vs static compression time.

形を評価するために、センサーの上層部と下層部の導電糸の距離（導電糸間距離）を測定した。テキスタイルセンサーの導電糸間距離は、センサーを圧縮した時に49 Paの圧力が検知されてから固定抵抗の電位差が0.1 Vになるまでの圧縮距離を測定し、それぞれの圧縮圧力付加時間後のテキスタイルセンサー内10カ所の平均値より導電糸間距離を求めた。

3. 実験結果および考察

3.1 テキスタイルセンサーの静的圧縮耐久性

テキスタイルセンサーの静的圧縮耐久性の評価には、静的圧縮圧力をかけた後のテキスタイルセンサーの検知圧力を、静的圧縮をかける前のテキスタイルセンサーの検知圧力の平均29.2 kPaで除した値で定義する検知圧力比を導入した。テキスタイルセンサーに10 kPa, 20 kPa, 40 kPaの静的圧縮圧力を圧縮圧力付加時間24時間から480時間（20日間）まで付加したときの検知圧力比をFig. 6に示す。図より、検知圧力比は圧縮圧力を付加すると1以下になっている。これは、検知圧力は静的圧縮をかける前の検知圧力より静的圧縮をかけた後の検知圧力が低くなるためであり、静的圧縮をかけたことで、小さい圧縮圧力でセンサーが応答するようになったことを意味している。その検知圧力比は圧縮圧力付加時間とともに減少し、圧縮圧力が増加することにより、短い圧縮圧力付加時間で検知圧力比が減少することが確認できた。また、圧縮圧力10 kPa, 20 kPaを付加したときは、圧縮圧力付加時間を増加することにより、圧縮圧力40 kPaの検知圧力比に近づく傾向がみられた。

繊維の圧縮特性は3段階から構成されており、第1段階（圧力<100 Pa）は表面毛羽や突出繊維の曲げ変形の領域、第2段階（100 Pa<圧力<5 kPa）は繊維と繊維間の摩擦を伴うすべりによる変形の領域、第3段階（5 kPa<圧力）は繊維自体の横圧縮変形の領域と報告されている[12-13]。この報告では、ポリエステル糸334 dtexの加熱糸を使用した斜文織

Fig. 6 Ratio of detectable pressure vs static compression time.

物で試験を実施しており、本研究で用いたテキスタイルセンサー地糸のポリエステル糸 280 dtex の加熱糸と織度が近く、テキスタイルセンサーの圧縮変形の参考とした。本研究では圧縮圧力 10 kPa, 20 kPa, 40 kPa を付加しており、テキスタイルセンサーはフィラメント糸で構成されているので、主に第 2, 3 段階の圧縮変形が発生していると考えられる。このような静的圧縮をかけることでセンサー内の糸と織物構造が変形を起し、織物の二重構造がつぶれてしまうので、圧力検知させる前のセンサー内における上層部と下層部の導電糸の距離が短くなると考えられ、このことが、静的圧縮をかけたときの検知圧力の低下につながったと考えられる。そこで、それぞれの圧縮圧力付加時間をかけた後のテキスタイルセンサーの導電糸間距離を測定した。テキスタイルセンサーに圧縮圧力 20 kPa を付加したときの導電糸間距離を Fig. 7 に示す。図に示すとおり、導電糸間距離は圧縮圧力付加時間とともに減少し、480 時間（20 日）で約 0.3 mm 以下に減少する傾向がみられた。この傾向は、Fig. 6 に示す検知圧力比が圧縮圧力付加時間の増大に伴い減少する傾向と類似している。よって、上述のように圧縮圧力と圧縮圧力付加時間によりテキスタイルセンサーを構成している糸と織物構造が変形し、その空間が狭くなったことが原因で検知圧力が低下したことがわかる。

3.2 テキスタイルセンサーの静的圧縮回復性

次に、静的圧縮により変形したテキスタイルセンサーの織物構造の回復性について評価した。Fig. 8 は、テキスタイルセンサーに 20 kPa の静的圧縮圧力を 72 時間（3 日間）と 480 時間（20 日間）付加後に除重した場合の、圧縮圧力回復時間と検知圧力比の関係を示した図である。図に示すとおり、検知圧力比は、圧縮圧力回復時間とともに増加することが確認できた。圧縮圧力 20 kPa で 72 時間（3 日間）を付加したときは、検知圧力比が 720 時間（30 日）後に 1 付近の値になり、

Fig. 7 Distance between electrically conductive yarns vs static compression time at static compression pressure of 20 kPa.

Fig. 8 Ratio of detectable pressure vs static compression recovery time at static compression pressure of 20 kPa.

完全に回復することがわかった。この結果から、短時間の静的荷重を付加した場合であれば、テキスタイルセンサー内の第 2 段階の圧縮特性である繊維間のすべりを伴う変形と、第 3 段階の圧縮特性である繊維自体の横圧縮変形が回復し、テキスタイルセンサーの糸と織物構造が静的荷重付加前と同等に復元していると推察される。また、圧縮圧力 20 kPa で 480 時間（20 日間）を付加したときは、検知圧力比は長い圧縮圧力回復時間であっても約 85%にとどまり、長期間静的荷重を付加した場合は圧縮特性が回復しないことがわかった。これは、長時間の静的荷重の付加した場合は第 2, 3 段階の圧縮変形により、テキスタイルセンサーの糸と織物構造が永久変形し、荷重付加前のセンサーの糸と織物構造に回復できないほどに変形したことによると推測される。

4. 結 言

本報では、テキスタイルセンサーに静的圧縮圧力を付加したときの圧縮特性について検討した。得られた結果を以下にまとめる。

テキスタイルセンサーの静的圧縮耐久性については、(1) 圧縮圧力付加時間の増加とともに検知圧力が減少すること、(2) 圧縮圧力が高いほど圧縮圧力付加時間の増加に対する検知圧力の減少割合も大きくなること、がわかった。

テキスタイルセンサーの静的圧縮回復性については、圧縮圧力付加時間が短時間であれば、検知圧力は圧縮圧力回復時間とともに増加し、圧縮圧力付加前の検知圧力に回復するが、長時間の圧縮圧力を付加後の検知圧力は、圧縮圧力付加前の検知圧力に回復しないこと、がわかった。

今後は、テキスタイルセンサーの繰り返し圧縮耐久性や織物規格と検知圧力の関係について検討する予定である。

謝 辞

本研究を実施するに当たり，実験でご協力頂いた福井大学工学部卒業生 嵯峨祐輔氏に深く感謝申し上げます。

References

- [1] Nitta Co Ltd (2006) Japanese Patent 3882172
- [2] Fujioka J, Kuroda N (2014) J Text Mach Soc Japan, **67**, 115–119
- [3] Nagoya University (2014) Japanese Patent 5467322
- [4] Suminoe Textile Co Ltd (2014) Japanese Patent 5457063
- [5] Masuda A, Murakami T, Kondo K (2008) J Text Mach Soc Japan, **61**, 809–814
- [6] Fukui Prefecture (2009) Japanese Patent 4273233
- [7] Fukui Prefecture (2010) Japanese Patent 4565109
- [8] Fukui Prefecture, Utic Co Ltd (2013) Japanese Patent 5233055
- [9] Fukui Prefecture (2013) Japanese Patent 5352795
- [10] Masuda A, Murakami T, Kondo K, Sasaji T, Iemoto Y, Tanoue S (2010) J Text Eng, **56**, 181–185
- [11] Nakajima T, Kaneko E, Shimizu H, Gocho H, Muta M (2010) “Shinkou Hihukuzairyougaku”, p177, Koseikan Co Ltd
- [12] Matsudaira M, Qin H (1993) J Text Mach Soc Japan (predecessor journal of J Text Eng), **46**, T226–T231
- [13] Matsudaira M, Qin H (1995) J Text Mach Soc Japan (predecessor journal of J Text Eng), **48**, T191–T195