Dynamic Compression Durability of Textile Pressure Sensor

MURAKAMI Tetsuhiko^{a,*}, MASUDA Atsuji^a, SASAJI Toshinori^b,
IEMOTO Yoshiyuki^b, UEMATSU Hideyuki^b, TANOUÉ 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 17 December 2015; accepted for publication 16 June 2016

Abstract

This paper shows the experimental results about the dynamic compression durability of a textile sensor. Results obtained are as follows; (1) There were few changes of the detective pressure of the textile sensor in one million repetitive compression numbers or less. (2) The repetitive compressions caused the deformation of electrically conductive yarn. And then, the detective pressure of the textile sensor increased with the compression number greater than two million. In addition, the non-detecting points also increased with the compression number greater than two million because of breakage of electrically conductive yarn by dynamic compression. (3) Pressure detection characteristics of the textile sensor before loading the dynamic compression were maintained in one million repetitive compression numbers or less.

Key Words: Textile sensor, Compression sensor, Electrically conductive yarn, Dynamic compression durability, Repetitive compression

テキスタイルセンサーの動的圧縮耐久性

村上哲彦^{a,*}, 増田敦士^a, 佐々治俊典^b, 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 [1]。こうしたシートセンサーの一つとして、エレクトロニクス技術とテキスタイル技術の特性を組み合わせた e-テキスタイル分野でもセンサーの開発が進められている。開発されているシートセンサーは、主に静電容量法による繊維物センサー [2-5] であるため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の技術課題があり、これらの問題を解決するために PLLA 繊維を使用したシートセンサー [6] も検討されている。

こうした静電容量法以外のシートセンサーとして、平二重袋織物の上層部と下層部に導電糸を配置し、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（以下、

TS と呼称する）を福井県工業技術センターが開発している [7-9]。この TS は導電糸の接触による通電で圧力を検知するため、静電容量法に比べると複雑な回路を構築する必要がなく、取り扱いが容易である。また、TS はテキスタイルの構造でセンサー機能を構築しているため、センサーをテキスタイルに組み込む方法 [10,11] と比べると、薄層化が容易でセンサーの剥離がないため高耐久性であり、製織工程においてセンサー機能を構築できるため、比較的安価に大面積化と量産化が可能である。そこで、繊維企業で TS を応用した入退出者数計測システムが実用化されており、家庭用交流 100 V 電源での連続使用の他にバッテリー駆動にすることで、設置場所を自由に設定できる [12-14]。

我々はこれまで TS 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だけでなく、繰り返し検知が可能である周

* 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

波数の上限は 30 Hz であり、感圧スイッチとして応用が可能であることを明らかにした [15]。また、TS は平二重袋織物の圧縮特性を利用したセンサーであるため、織物規格により TS が検知する圧力（以下、検知圧力と呼称する）を制御でき、導電糸本数を増加することで検知圧力のばらつきを抑制できることを明らかにした [16]。さらに、TS のよこ糸が検知圧力に及ぼす影響について検討し、よこ糸の種類を変えることで検知圧力を制御できることを示唆した [17]。加えて、TS を利用した実用的なシステムを開発するため、センサーとしての静的圧縮耐久性を検討し、低荷重であれば検知性能の低下も少なく、除重後の検知性能もすみやかに回復することを明らかにした [18]。しかし、前述の実用化事例のように実際にシートセンサーとして TS が使用される場合は繰り返し圧縮が想定されるため、動的圧縮耐久性についての評価も必要となる。そこで、本報では TS に動的圧力の負荷をかけたときの圧縮特性である動的圧縮耐久性と圧力検知応答性について検討する。

2. 実験方法

2.1 試料

本研究で使用する TS 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、鞘糸に銅線を使用したダブルカバード糸を用いた。また、TS 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。TS の断面写真を Fig. 1 に示す。図のとおり、TS はたてよこ二重組織による袋織物になっている。次に、構造と圧縮挙動モデルを Fig. 2 に示す。TS の構造は Fig. 2(a) に示すとおり、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。TS が圧力を検知する原理を Fig. 2(b) に示す。この TS 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、この電気信号の変化をモニターすることで圧力を検知す

Table 1 Textile standard of the textile sensor used in this study.

Electrically conductive yarn	Double covered yarn : 3500 twist/m Core : Polyester multi-filament 330 dtex/ 96 f 450 twist/m (Toray Industries, Inc. Type 262) Skin : Copper wire with a diameter of 0.05 mm (Sanshu Electric Wire Co., Ltd. Type A)
Ground yarn	Warp, Weft : Polyester multi-filament 330 dtex/ 96 f 450 twist/m (Toray Industries, Inc. Type 262)
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 : 3.5 mm

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

(a) Non-compression state

(b) Compression state

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

ることができる。また、TS のたて糸の導電糸は約 50 mm 間隔で 2 本ずつ配置した。よこ糸の導電糸は、上層部が 6 本、下層部が 6 本の平二重袋織物の 12 袋間隔で、Fig. 2(a) に示したように平二重袋織物の下層部中央に 2 本配置した。

2.2 テキスタイルセンサーの動的圧縮試験評価

TS の動的圧縮試験には、疲労試験機（島津製作所製 EHF-EV）を使用した。Fig. 3 に示すとおり、この TS の上下に塩化ビニル製の板（1 mm 厚）を設置し、直径 200 mm の加圧板により 0 ~ 20 kPa（荷重 620 N）の正弦波状の動的な繰り返し圧力の負荷をかけた。過去の TS の圧力検知応答性の報告 [15] より、この TS の繰り返し検知が可能である周波数の上限は 30 Hz であったため、繰り返し周波数は確実に検知可能な周波数 20 Hz に設定し、繰り返し圧縮回数を最大 1,000

Fig. 3 Illustration of the dynamic compression test for the textile sensor.

Fig. 4 Electric circuit for testing the textile sensor.

万回とした。また、動的圧縮試験前後のTSの検知圧力を測定・比較することにより、動的圧縮耐久性を評価した。

TSの性能の評価に用いる検知圧力を測定するために、Fig. 4に示すようにTSをスイッチとした電気回路を構成した。回路に接続したTSに、直径16 mmの円形加圧子を装着した圧縮試験機（カトーテック製 KES-G5）により圧縮速度1 mm/sで圧力を付加した。TS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、両者の導電糸が接触すると約4 V以上の電位差が急激に発生するので、本研究では固定抵抗の電位差が0.1 Vになった時の圧縮圧力をTSの検知圧力とした。なお、検知圧力は1つのTSの導電糸の交錯部16箇所を3回繰り返して測定し、その平均値で評価した。

また、TSは動的圧縮を受けることにより圧力検知応答性の減少が考えられるため、動的圧縮試験前後のTSの圧力検知応答性を比較した。まず、動的圧縮試験前のTSに、周波数1～40 Hzで最大20 kPaの繰り返し圧縮圧力を付加して圧力検知応答性を測定した。次に、周波数20 Hz、最大20 kPaで100万回の繰り返し圧力の負荷をかけたTSに、周波数1～40 Hzで最大20 kPaの繰り返し圧縮圧力を付加して圧力検知応答性を測定し比較した。

3. 実験結果および考察

3.1 テキスタイルセンサーの動的圧縮耐久性

TSの動的圧縮耐久性の評価には、動的圧力の負荷をかけた後（以下、動的圧力負荷後と呼称する）のTSの検知圧力を、動的圧力の負荷をかける前（以下、動的圧力負荷前と呼称する）のTSの検知圧力の平均31.3 kPaで除した値で定義する検知圧力比を導入した。また、測定結果は検知可能であった測定点の平均値で評価し、検知できなくなった測定点については次節3.2で考察する。

TSに周波数20 Hzで最大20 kPaの繰り返し圧力の負荷をかけたときの検知圧力比と繰り返し圧縮回数との関係をFig. 5に示す。図より、繰り返し圧縮回数100万回以下では検知圧力比が1以下であり、200万回以上では検知圧力比が1以上になり徐々に増加する傾向がみられた。

検知圧力比が1以下になる現象は、動的圧力負荷前の検知圧力より動的圧力負荷後の検知圧力が低くなることを示しており、動的圧力の負荷をかけることで、小さい圧縮圧力でTSが応答するようになったことを意味している。松平と秦[19, 20]は、織物の圧縮特性は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している。これらの報告では、ポリエステル糸334 dtexの加撚糸を使用した斜文織物で試験を実施しており、本研究で用いたTS地糸のポリエステル糸330 dtexの加撚糸と織度が近いので、本研究で検討しているTSの圧縮変形の参考とした。本研究では周波数20 Hzで最大20 kPaの繰り返し圧力の負荷をかけていること、TSはフィラメント糸で構成されていることから、TSの変形は主に第2、3段階の圧縮変形であると考えられる。したがって、TS内の糸と織物構造が変形を起こして織物の二重構造がつぶれ、TS内における上層部と下層部の導電糸

Fig. 5 Ratio of detective pressure as a function of the number of cycles of dynamic compression at the maximum compression pressure of 20 kPa.

の距離が短くなると考えられる。以上のことから、動的圧力の負荷をかけたときの検知圧力が低下し、検知圧力比も 1 以下に低下したと推測される。

繰り返し圧縮回数 200 万回以上では検知圧力比が繰り返し圧縮回数とともに増加する傾向については、上記の圧縮圧力による糸や織物構造の圧縮変形とは違う要因が考えられる。そこで、動的圧力負荷前後の TS の導電糸周辺の様子を観察した。Fig. 6(a) (b) に動的圧力負荷前、Fig. 6(c) (d) に繰り返し圧縮回数 200 万回の負荷をかけた後の TS の表面写真を示す。TS は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して検知するため、たて糸とよこ糸の交錯点に導電糸の銅線が存在する必要がある。動的圧力負荷前の Fig. 6(a) では、交錯点にたて導電糸の銅線が存在しているが、繰り返し圧縮回数の 200 万回の負荷をかけた Fig. 6(c) では、交錯点のたて導電糸の銅線が上下にずれて変形しており、たて導電糸を構成する銅線には、この繰り返し変形に起因したと推測される破断部分も観察された。つまり、繰り返し圧縮圧力により、この導電糸内の銅線の位置について微細なずれが発生し、動的圧力負荷前の圧縮圧力以上でないと、上下に配置した導電糸の銅線が接触することができなくなり、結果として繰り返し圧縮回数 200 万回を超えると検知圧力が増加したと考えられる。

また、繰り返し圧縮回数 200 万回の負荷をかけた導電糸は、Fig. 6(c) (d) のとおり、たて導電糸のみに銅線の変形や破断が観察された。これについて、本研究で用いた TS はたて糸が曲がり、よこ糸は真直ぐな織物構造である [21] ため、曲がり大きいたて導電糸に銅線の変形や破断が発生したと推測される。

以上のことにより、本研究で検討した TS では、繰り返し圧縮回数が 200 万回以上の動的圧縮圧力を受けることに伴う導電糸の銅線の変形による検知圧力の増加と、前述の 100 万回以下の動的圧縮圧力で測定された TS 内の糸と織物構造の変形による検知圧力の減少の両方が 200 万回以上では発生していると推測される。繰り返し圧縮回数が 100 万回以下であれば、検知圧力比が 1 以下であるが、回数が 200 万回以上になると、TS 内の糸と織物構造の変形による検知圧力の減少よりも、交錯点のたて導電糸の銅線の変形によるずれのため検知圧力の増加が大きい。したがって、所定の検知圧力で使用するには繰り返し圧縮回数 100 万回以下で使うことが望ましい。また、使用可能な繰り返し圧縮回数が 100 万回であることは、例えば、1 日に約千人の入退出者を計測する用途の場合、1 年間の保障期間中に問題なく稼動することを意味し、実用的にも十分な性能を有すると考えられる。

Fig. 6 Surface photographs of the textile sensor before or after loading dynamic compression.

3.2 テキスタイルセンサーの動的圧縮負荷後の検知確率

本研究では、TSの導電糸の交錯部16箇所の検知圧力を測定したが、動的圧力の負荷をかけることにより検知圧力の測定できない箇所が発生した。そこで、TSの動的圧力負荷後に圧力を検知できる確率を評価するために、動的圧力負荷前の16の検知箇所について、動的圧力負荷後の検知圧力の測定の可否を調べた。また、動的圧力負荷後の検知圧力の測定可能な検知箇所を、動的圧力負荷前の16の検知箇所を除いた値で定義する検知確率を導入して評価した。TSに周波数20 Hzで最大20 kPaの繰り返し圧力の負荷をかけたときの検知確率と圧縮圧力の繰り返し回数との関係をFig. 7に示す。図より、繰り返し圧縮回数が100万回以下では検知確率が1であり、TSのすべての検知箇所が機能しているが、200万回以上になると検知確率は繰り返し回数の増加とともに減少し、検知圧力が測定できない箇所が増加した。これらの検知圧力が測定できない箇所では、Fig. 6(c)に示したとおり導電糸の銅線が複数箇所で破断して電氣的に絶縁状態となることが確認できたことから、交錯点付近の導電糸の銅線は最も大きな繰り返し圧縮荷重を受けるため、繰り返し圧縮回数が200万回近傍になると、塩化ビニル製の板やTSの地糸に衝突して導電糸の銅線が破断しはじめるかと推測される。このことにより、周波数20 Hzで最大20 kPaの繰り返し圧力の負荷をかけた場合、繰り返し圧縮回数が100万回以下では導電糸の銅線の破断に起因する検知圧力の測定できない箇所が発生しないと考えられ、前節で述べた繰り返し圧縮回数100万回というTSの使用限界を裏付ける結果を得た。このように、本研究で得られたTSの繰り返し圧縮の使用限界は、TS内導電糸の銅線の変形や破断が主に起因していた。しかし、めっき技術による電気抵抗値が低い導電糸[21]などをTSに応用することで、使用限界を向上させることが可能であると考えられる。

Fig. 7 Detectable probability as a function of the number of cycles of dynamic compression at the maximum compression pressure of 20 kPa.

3.3 テキスタイルセンサーの動的圧縮負荷後の圧力検知応答性

次に、動的圧力負荷後のTSの圧力検知応答性を評価するために、動的圧力負荷前のTSと、周波数20 Hz、最大20 kPaで100万回の繰り返し圧力の負荷をかけたTSのそれぞれに、周波数1～40 Hzで最大20 kPaの繰り返し圧縮圧力を付加して検知圧力を測定した。Fig. 8は、最大20 kPaで100万回の繰り返し圧力の負荷をかける前と負荷をかけた後のTSの検知圧力比と繰り返し圧縮圧力の周波数との関係を示した図である。図より、動的圧力負荷前後の検知圧力比は、いずれも周波数30 Hzまでは緩やかに減少し、30 Hzを超えると急激に減少している。この現象については、前の報告[15]のとおりに、周波数が高くなるほどTSの糸と織物構造が加圧前の状態に復帰できないため、特に周波数40 Hzの場合はTSの二重構造の空間が非常に狭い状態で繰り返し圧縮されるためであると推測される。また、各周波数における検知圧力比は動的圧力負荷前後で大きな差は見られない。

動的圧力負荷前後のTSの圧力検知応答性について周波数20 Hzの場合の例をFig. 9に示す。動的圧力負荷前のTSに、周波数20 Hzで最大20 kPaの繰り返し圧縮圧力を付加したときの圧力検知応答性をFig. 9(a)に示す。図より、TSに付加した周波数20 Hzの繰り返し圧縮圧力に応じて、固定抵抗両端の電圧波形には周波数20 HzのONとOFFの明確な矩形波を観測することができた。次に、周波数20 Hz、最大20 kPaで100万回の繰り返し圧力の負荷をかけた後のTSの圧力検知応答性をFig. 9(b)に示す。図より、Fig. 9(a)同様に周波数20 Hzの明確な矩形波を観測することができた。したがって、動的圧力負荷前後のTSの圧力検知応答性はほぼ同じであり、周波数20 Hzで最大20 kPaの繰り返し圧力を100万回負荷しても圧力検知応答性に変化がないことがわかった。このことより、繰り返し圧縮回数100万回以下であれば、最大20 kPaの動的圧力負荷後もTSの圧力検知応答性は維持されることがわかった。

Fig. 8 Ratio of detective pressure as a function of compression frequency.

Fig. 9 Response of the textile sensor at compression frequency of 20 Hz.

4. 結 言

本報では、TS に動的圧力の負荷をかけたときの動的圧縮耐久性および圧力検知応答性について検討した。明らかにになったことを以下にまとめる。

(1) TS は周波数 20 Hz で最大 20 kPa の動的圧力の負荷をかけたとき、繰り返し圧縮回数が 100 万回以下であれば、動的圧力の負荷をかけることによる検知圧力の変化が少ない。

(2) 周波数 20 Hz で最大 20 kPa の動的圧力負荷後の TS は、繰り返し圧縮回数が 100 万回以下であれば、動的圧力負荷前の圧力検知応答性が維持される。

(3) 動的圧力の繰り返し圧縮回数が 200 万回を超えると、TS 内の導電糸の銅線の変形や破断により、繰り返し圧縮回数の増加とともに検知圧力の増加や測定不能な検知箇所の増加が見られた。

このように、TS は優れた動的圧縮耐久性と圧力検知応答性があるので、入退出者数計測システムなど耐久性と応答性の両方が要求される分野への応用に適していることがわかつ

た。また、本研究で得られた TS の繰り返し圧縮の使用限界については、TS 内導電糸の銅線の変形や破断が主に起因しており、めっき技術による電気抵抗値が低い導電糸などを TS に応用することで、使用限界を向上させることが可能であると考えられる。

References

- [1] Nitta Co Ltd (2006) Japanese Patent 3882172
- [2] Fujioka J, Kuroda N (2014) J Text Mach Soc Japan, **67**, 115–119
- [3] Shibata K (2014) J Text Mach Soc Japan, **67**, 723–725
- [4] Enokibori Y, Mase K (2015) J Text Mach Soc Japan, **68**, 477–483
- [5] Suminoe Textile Co Ltd (2014) Japanese Patent 5457063
- [6] Tajitsu Y, Yamamoto T (2015) Sen'i Gakkaishi, **71**, 232
- [7] Masuda A, Murakami T, Kondo K (2008) J Text Mach Soc Japan, **61**, 809–814
- [8] Fukui Prefecture (2009) Japanese Patent 4273233
- [9] Fukui Prefecture (2013) Japanese Patent 5352795
- [10] Toda M, Akita J, Sakurazawa S, Iwata K (2007) J Text Mach Soc Japan, **60**, 142–147
- [11] Takahashi H (2010) J Text Mach Soc Japan, **60**, 607–610
- [12] Fukui Prefecture (2010) Japanese Patent 4565109
- [13] Fukui Prefecture, Utic Co Ltd (2013) Japanese Patent 5233055
- [14] FUKUI e-Textile research group (2015) Sen'i Gakkaishi, **71**, 277–281
- [15] Masuda A, Murakami T, Kondo K, Sasaji T, Iemoto Y, Tanoue S (2010) J Text Eng, **56**, 181–185
- [16] Murakami T, Masuda A, Yoshida Y, Iemoto Y, Uematsu H, Tanoue S (2016) J Text Eng, **62**, 51–56
- [17] Murakami T, Masuda A, Hirakue M, Iemoto Y, Uematsu H, Tanoue S (2016) J Fiber Sci Tech, **72**, 120–125
- [18] Murakami T, Masuda A, Iemoto Y, Uematsu H, Tanoue S (2016) J Text Eng, **62**, 1–5
- [19] Matsudaira M, Hong Q (1993) J Text Mach Soc Japan (predecessor journal of J Text Eng), **46**, 226–231
- [20] Matsudaira M, Hong Q (1995) J Text Mach Soc Japan (predecessor journal of J Text Eng), **48**, 191–195
- [21] Kitada F (1970) “Clothing material summary” 174, Corona Publishing Co Ltd
- [22] Hori T (2011) J Text Mach Soc Japan, **64**, 471–476