アモルファス磁歪ワイヤ S I 効果形毛根式気流センサ素子

Hair-Type Air-Flow Sensor Element Using Amorphous Magnetostrictive Wires

アリシェン アブドカリム・沈 麗萍・毛利 佳年雄

名古屋大学工学研究科電気工学専攻, 名古屋市千種区不老町 464-8603

A. L. X. Abudukelimu, L. P. Shen, and K. Mohri

Department of Electrical Eng., Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8603

(2000 年 10 月 6 日受理, 2001 年 1 月 24 日採録)

A sensitive air-flow sensor element was constructed, using an arched CoSiB magnetostrictive amorphous wire connected to a straight hair-type amorphous wire. A sharp pulse current is applied through the arched wire to generate the stress-impedance (SI) effect with a strong skin effect. The resolution for air flow detection is about 0.16 m/s, which is almost the same as that of conventional heated resistance wire-type air-flow sensors. The amorphous wire air-flow sensor element is suitable for adding an air-flow-sensing ability to intelligent robots.

Key words: amorphous wire, stress-impedance (SI) effect, air flow sensor, robot

1. はじめに

最近, 人間型ロボットやペット用ロボットなど, 人間との見かけ上のコミュニケーションを行う自動機械の需要が高まり, 視覚, 聴覚, 嗅覚, 触覚や圧覚などの体性感など多種多様なセンサを多数装着して, より自然な知的行動を実現する要求が高まっている. この場合, より高感度で小型・軽量のマイクロセンサが必要である. これらのセンサの内, まだ実現されていないセンサがいくつかあるが, 気流感覚用センサもそのひとつである. 気流感覚は, 人間をはじめ生物のもつ高度な感覚であり, 環境の変化を空気の動きとしていわゆる肌で感じるものであり, 微風で気配を感じるなどの動作を行う.

従来の高感度の気流センサは, 抵抗線を 300 °C 程度に熱した状態で空間に張り, 気流によって抵抗線の温度が減少して電気抵抗値が減少することを利用するものが主に普及している. この熱線抵抗型気流センサは, 高温加熱のため, 電子回路から離して使用する必要があり, また繰り返し使用による寿命が短い, 機械的衝撃に対する信頼性が低いなどの問題がある. これに対して, アモルファス負磁歪ワイヤは強靱弾性体で耐食性が高く, 表皮効果を生じる通電励磁によって応力インピーダンス効果 (SI 効果)¹⁾を生じ,

ゲージ率が 4000 に達する高感度の応力・ひずみ検出特性を示す. したがって, このアモルファスワイヤの SI 効果を利用することにより, 熱線型でなく室温動作で高感度の気流センサが実現できる可能性がある. 本稿では, 20 μ m 径の CoSiB アモルファスワイヤ (ユニチカ社特製) を直径 5 mm の半円形アーチに整形して SI 効果素子とし, アーチ中点に気流圧力を受けるための微小片を先端にもつ 5 mm 長の垂直のアモルファスワイヤを固定した高感度の気流センサヘッドを構成した. センサ回路は, CMOS IC マルチパイププレートによるパルス通電励磁方式²⁾であり, 回路全体の消費電力は 10 mW 以下であるので, 小型軽量の携帯型センサになる. ここでは, 本気流センサの動作原理と基本特性および考察を述べる.

2. アモルファスワイヤ S I 効果形気流センサの構成

Fig. 1 (a) は, 気流センサのヘッドの構成を示す. ①は張力アニールを施した 20 μ m 径の CoSiB アモルファスワイヤ (磁歪 $= -3 \times 10^{-6}$) を直径 5 mm の半円形に整形して, 両端を回路基板に半田づけで固定する. この半円アーチの中点に垂直の 5 mm 長の零磁歪アモルファスワイヤ (30 μ m 径) を接着剤で固定し, 先端に 1 mm $\times$ 2 mm のセロファンテープ片を固定し気流受圧部とした. ②は規準用アーチであり, ①のアーチ部と同一材料, 同一形状である. ②は気流印加に対してインピーダンスの変化は生じない. Fig. 1 (b) は, (a) の①と②のアーチ部に表皮効果を生じさせるパルス通電を行う CMOS IC 回路を示す. 2 個の CMOS インバータ Q1, Q2 と RC によるマルチパイププレート発振回路の方形波出力電圧を R_D , C_D の微分回路で交流パルス電圧に変換し, さらに電源電圧 V_{DD} でバイアスされた CMOS インバータ Q3, Q4 で正極のパルス列に整形・増幅してアモルファスワイヤアーチに通電する.

通電パルスの立ち上がり時間 t_r は 10 ns であり, 励磁に関しては周波数が $1/n t_r$ ($n=2\sim3$) の交流に対応するので, 約 30 MHz の交流を通電した場合に相当する. したがって, 強い表皮効果が発生し, ワイヤアーチのインピ

ーダンスの大きさ $|Z|$ は,

$$|Z| \approx (a/\sqrt{2\rho}) R_{dc} \sqrt{\omega \mu(\sigma)}. \quad (1)$$

に従って、印加される応力 σ によって高感度に変化する¹⁾。ここで、 a : ワイヤ半径 ($10 \mu\text{m}$) , ρ : ワイヤ抵抗率 ($130 \mu\Omega\text{-cm}$) , R_{dc} : ワイヤ直流抵抗 (32Ω) , ω : 通電電流の角周波数, μ : ワイヤ円周方向の最大微分透磁率で σ の関数である。2 個のアーチ部①, ②のパルス電圧はショットキーバリアダイオード (SBD) および R_H , C_H のピークホールド回路で直流電圧に変化され、差動アンプに入力されてセンサ出力電圧 E_{out} に変化される。したがって、気流を印加しない場合は $E_{out} = 0$ である。センサヘッドには、小型ポンプ式気流発生機 (柴田科学製 MP-2N 型) で気流を印加し、ヘッド近傍に熱線抵抗型微風速計 (柴田科学製 ISA-80 シリーズ) を設置して流量を読み取った。

Fig. 1 (a) Air-flow sensor head using a $20\text{-}\mu\text{m}$ -diameter CoSiB amorphous wire.

C : 100 pF , R : $20 \text{ k}\Omega$, C_D : 100 pF , R_D : 200Ω , VR : $3 \text{ k}\Omega$, C_H : 2000 pF , R_H : $51 \text{ k}\Omega$, V_{dd} : 3 V .

Fig. 1 (b) Air-flow sensor circuit with a CMOS IC multivibrator.

3. 気流検出特性

Fig. 2 は、受圧片にはほぼ垂直に気流を印加した場合のセンサ出力波形である。(a) は気流速度が 0.2 m/s の微弱気流、(b) はその 10 倍の 2 m/s の場合である。気流発生がポンプ動作のため、センサ出力波形はヘッド垂直部のアモルファスワイヤの傾斜による直流分その他、ヘッド垂直部の振動による交流分が現れている。

Fig. 2 Sensor output waveforms at $V = 0.2 \text{ m/s}$ in (a) and at $V = 2 \text{ m/s}$ (b).

Fig. 3 は、センサ出力電圧の直流分 E_{dc} と気流速度 V の関係の測定結果である。 E_{dc} は $V = 0.16 \text{ m/s}$ から検出され、 V に比例して増加するが、 $V = 2 \text{ m/s}$ で最大値を示した後、 V をさらに増加させると E_{dc} は減少する。これは、微小な気流では気流圧が受圧部に垂直に印加されて垂直ワイヤからアーチ部への曲げモーメント応力の変換効率が最大であるが、 V の増加とともに受圧部が垂直ワイヤとともに湾曲して弾性傾斜して行き、気流圧 P が気流方向と受圧部のなす角度 θ に対して $P \sin \theta$ (P) で変化するためである。 $V = 2 \text{ m/s}$ で $\theta \approx 50^\circ$ である。 $\sin \theta$ (P) $\approx 1 - \alpha P^2$ で近似すると、受圧部の圧力 F は $F \approx P - \alpha P^3$ となり、 $P = 1/\sqrt{3\alpha}$ で F は最大となる。 α は垂直アモルファスワイヤの長さやバネ定数および受圧部の面積と質量で決まる定数である。

Fig. 3 DC component E_{dc} of the sensor output vs. V characteristics.

Fig. 4 AC component E_{ac} of the sensor output, f vs. V characteristics.

Fig. 4 は、間欠的発生気流によるセンサ出力の交流分振幅 E_{ac} 対平均風速 V 特性の測定結果である。 E_{ac} は $V = 0.2 \text{ m/s}$ から検出され、 $V = 2.5 \text{ m/s}$ まで V に比例して増加している。 この交流分の振動数は、 V によらず、約 32 Hz のほぼ一定の値を示している。 これは、交流分がヘッドの垂直部のアモルファスワイヤの固有振動によるものと考えられる。

そこで、この垂直部を倒立振子のモデルによって固有周波数を考察した。 バネ定数（復原力定数） k 、長さ L 、先端質量 m の倒立振子の固有振動周波数 f は次式で表されている³⁾。

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k - mgL}{J}} \quad (2)$$

$$J = mL^2$$

$$I = \int_A r^2 dA = \pi \frac{d^4}{32}$$

$$k = (4/3)EI/L$$

ここで、アモルファスワイヤのヤング $E (= 13 \times 10^3 \text{ kg/mm}^2)$ 、剛性能率 J 、断面二次モーメント I 、アモルファスワイヤの直径 d を用いて、(2) の各定数を求め、 f の理論値をもとめると $f = 29.69 \text{ Hz}$ となった。 f の大きさは理論値と実験値がほぼ一致した。

(a) E_{out} vs. V characteristics for the x direction.

(b) E_{out} vs. V characteristics for the y direction.

Fig. 5 E_{out} vs. V characteristics for two direction flows.

Fig. 5 は、気流を受圧部に垂直方向に印加した場合（x 方向）と平行に印加した場合（y 方向）の V に対する E_{dc} および E_{ac} の変化特性の測定結果である。

受圧部が微小であり、また気流が乱流であるため、気流検出の指方性は明確ではないが、 E_{dc} 成分は x 方向と y 方向の比は約 2 : 1 である。また E_{ac} 成分は約 3 : 1 である。

4. おわりに

20 μ m 径負磁歪アモルファスワイヤを半円形に整形し、垂直の受圧部で気流圧を受ける形式の SI 効果形高感度気流センサ素子を構成した。分解能は約 0.16 m/s である。従来の熱線抵抗形気流センサと同程度の感度を示すので、ヘッドを加熱する必要がない気流センサとなる、また CMOS IC 回路で構成され、消費電力は 10 mW 以下であるので、電池駆動が容易な携帯形センサとなる。

本センサは、間欠気流に対して直流分と交流分の出力を示し、直流分は平均気流、交流分は気流変化に対応する。この交流分の周波数は受圧部の固有振動数であることが解析された。

今後は複数個のセンサアレイにより、風向の検出などを行う予定である。

参考文献

- 1) L. P. Shen, T. Uchiyama, K. Mohri, E. Kita and K. Bushida, "Sensitive Stress-Impedance Micro Sensor Using Amorphous Magnetostrictive Wire," IEEE Trans. Magn. Vol. 33, No. 5, pp. 3355-3357 (1997).
- 2) 毛利佳年雄：日本応用磁気学会会誌, 19, 5, pp. 847 ~ 856 (1995).
- 3) 板生 清：情報マイクロシステム, p. 98 (朝倉書店, 東京, 1998) .