高い周波数領域で作動する FM 復調素子および 流体信号発生器の開発†

齊 藤 進*・酒 井 俊 道*

Development on a Fluidic Frequency Demodulation Element and a Fluid Signal Generator for High Frequency Operation

Susumu SAITO* and Toshimichi SAKAI*

In fluidics, frequency demodulating circuits (f/a converters) have been used in temperature sensors and revolutional speed sensors. The conventional types of the circuits were constructed by using some fluidic devices which were connected by transmission lines, and the operating frequencies were usually under 1 kHz.

In this experiment, the frequency demodulation was conducted by only one fluidic element and the frequency range was up to 10 kHz without using beat frequency technique.

The developed element was constructed by acting the main jet of the first stage to the main jet of the second stage directly without transmission line. By this method, the element with excellent frequency characteristics was obtained.

A fluid signal generator which was able to obtain high frequency fluid signals was also developed in this study. The signal generator produced up to 10 kHz with a nearly constant amplitude.

By applying the fluid signal to the fluidic element directly without using beat frequency technique, the operation up to 10 kHz was recognized. The output pressure change was about 17 Pa/Hz.

Keyword:

fluidics, frequency demodulation, f/a converter, fluid signal generator, rotating speed sensor

† 第16回フルイディクスシンポジウムで発表 (昭56・10)

* 東京理科大学工学部 東京都新宿区神楽坂 1-3

* Faculty of Engineering, Science University of Tokyo, Shinjuku, Tokyo

(Received March 29, 1982)

(Revised June 7, 1982)

1. はじめに

フルイディクスにおいて FM 復調回路は温度検出や回転数検出およびその制御などに用いられている^{1),2)}。しかしこれまでのものは噴流偏向形増幅素子を数個用い、その周波数領域は 1 kHz 以下のものがほとんどであると思われる。この周波数領域を拡大することができれば、その応用範囲が広がりかつ性能改善に役立つと考えられる。本研究においては、単一の素子で FM 復調を行う素子を開発した。この素子は前段の主噴流を次段の主噴流に直接作用させるような構造となっており、これまでの素子間を結合する伝達管路を用いない点に特色がある。著者らは以前に伝達管路を用いず主噴流を次段の主噴流に直接衝突させるような構造の多段増幅素子を開発し、それが周波数特性に優れていることを述べたが³⁾、本研究で開発した素子も高い周波数領域での作動を可能とすることを目的とする。

Fig. 1 Shilhouette of the element

Fig. 2 Details of the element

ものである。これに伴い、入力信号として高い周波数の正弦波状の流体信号を発生させる必要がある。そこで回転体により 10 kHz 程度の高い周波数を発生させることが可能な流体信号発生器を開発した。ここでは、この流体信号発生器の特性と発生させた流体信号を開発した FM 復調素子に入力させた場合における結果について述べる。

2. 素子形状および流体信号発生器構造

2.1 素子形状

Fig. 1 に素子形状を示す。Fig. 2 は干渉領域部詳細である。Fig. 3 は上カバープレートと下カバープレートを示す。Fig. 3(a) に示すように上カバープレートの主噴流流路部がすべてくり抜いてある。この詳細は Fig. 7 に示すようである。このことにより、Fig. 7 X_1-X_2 , Y_1-Y_2 の領域で各主噴流の左右に圧力勾配が加わらず、主噴流の動特性をよくすることが

(a) upper coverplate

(b) lower coverplate

Fig. 3 Coverplates

(a) Fluid signal generator

(b) Details of R

Fig. 4 Fluid signal generator

できる³⁾。また、Fig. 1, Fig. 2 よりわかるように 1 段目主噴流は 2 段目主噴流に直接に作用している。従来、FM 復調回路等を構成する場合、素子間を伝達管路を用いて結合していたが、本研究においては伝達管路を用いず多段結合するような構造となっている。このように伝達管路を用いない結合により、その管路の周波数特性の影響を除去することが可能であり、周波数特性を改良することができる。

2.2 流体信号発生器

Fig. 4 は回転体による正弦波状流体信号を発生させる流体信号発生器の概略である。Fig. 4(a) に示すように回転軸には 24 個の $\phi 1.0$ の小孔が 15 度の間隔で設けてあり、この小孔より噴流を噴出し、Fig. 4(b) に示すように 22.5 度の間隔の 6 個の受流口により噴流を受けることにより正弦波状流体信号を発生させる。したがって、となり合う受流口には 180 度の位相差があり、回転軸が 7.5 度回転するごとに位相が 180 度変化する。また正弦波状流体信号は回転数の 24 倍の周波数が得られる。Fig. 4(b) に受流口部の詳細を示す。Fig. 4(b) に示すように受流口部には溝を設けてあるが、後に Photo. 1 や Fig. 10 に示すように、この溝を設けることにより波形や周波数特性を改良することができる。この場合、溝の深さの異った四種類 (Type H, Type I, Type J, Type K) について特性の違いを測定した。回転軸は可変モータ (出力 75W) を用い、歯付ベルトおよびプーリで増速して回転軸を駆動し、最大 480 s^{-1} (28,000 rpm) 程度まで回転させ

Fig. 5 Operating principle

た。これにより最大 11 kHz 程度の流体信号を発生させた。回転軸と受流口部のスキマは空気消費量を少なくするために極力小さくしたが、このスキマは直径差で $30 \mu\text{m}$ 程度である。また流体信号発生器への供給流量は質量流量 $0.79 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$ である。

3. 作動原理

Fig. 5 に作動原理を示す。流体信号発生器と素子との間を図に示すように内径 3 mm のビニール管 (A, A', B, B', C, C') で結合する。この場合、A, A', C, C' の長さは同一であり、B, B' の長さは前者よりも短くなっている。また A と A' は位相差が 180 度である。(B と B', C と C' も同様)。Fig. 5 は周波数が低く、管路の長さの違いによる位相差がほとんど生じていない状態を示す。今、回転軸からの噴流が管路 A, B, C の受流口に入ったとすると、各主噴流は実線で示すように偏向する。この状態から回転軸が 7.5 度回転し、管路 A', B', C' の受流口に噴流が入ると、各主噴流は破線で示すように偏向する。すなわち、この場合、出力通路 D に入る主噴流 (d) は大きく振動し、出力通路 E に入る主噴流 (e) は振動しない。すなわち、出力通路 D の平均出力流量 (圧力) は出力通路 E よりも小さい。周波数が高くなるに従い、管路の長い A, A', C, C' を通る流体信号は管路 B, B' を通るものに比べてより大きく位相が遅らされ、出力通路 D に入る主噴流 (d) の振幅は小さくなり、主噴流 (e) の振幅の増大する。すなわち、出力通路 D の平均出力流量は増大し、出力通路 E の平均出力流量は減少する。この位相差が 180 度になると、出力通路 D, E の平均出力流量は周波数が低い状態と正反対になる。さらに周波数が高くなり位相差が 360 度になると最初の周波数が低い状態と同じになる。以後位相差が 180 度変化すると

Fig. 6 Experimental setup

に上記の状態を繰返す。すなわち、周波数に応じた出力流量（圧力）が出力通路 D, E より得られる。

4. 実験方法

Fig. 6 は実験装置概略である。流体信号発生器の回転軸の回転数を回転軸の上端に設けた溝とギャップセンサにより検出し、そのパルスを回転同期信号発生器に導き、その出力を X - Y レコーダの X 軸に入力する。素子への入力信号を素子の制御ノズル上で制御ノズル出口より 7mm の点 (**Fig. 2** P, Q 点) で外径 1.6 mm の超小型半導体圧力変換器（最大 3.5 kgf/cm²、固有振動数 500 kHz）を用い、その受圧面をカバプレートと同一にして検出した。その出力を振動分析器および位相計に導き、それらの出力を X - Y レコーダの Y 軸に入力することにより、入力信号の振幅比 (**Fig. 6** レコーダ①) および管路の長さの違いによる位相差 (**Fig. 6** レコーダ②) の周波数特性を測定した。また素子の出力は左右の出力通路を容量をもたせて全閉し、それぞれの平均出力圧を半導体圧力変換器で検出し、その出力を X - Y レコーダの Y 軸に入力することにより、周波数に応じた素子の左右の出力圧力変化 (**Fig. 6** レコーダ③) を測定した。なお、各供給ポートへの質量流量は **Fig. 1** に示すように流路深さ 0.4 mm の場合、 $Q_1=5.52 \times 10^{-5}$ kg/s, $Q_2=6.48 \times 10^{-5}$ kg/s であり、流路深さ 1.0 mm の場合、 $Q_1=1.38 \times 10^{-4}$ kg/s, $Q_2=1.24 \times 10^{-4}$ kg/s である。ここで Q_1, Q_2 はそれぞれ第 1, 第 2 主ノズルへの供給流量を示す。

5. 理論的に推定される素子の周波数特性

3 章で作動原理を述べたように、素子へは周波数に応じた位相差をもつ入力信号を入力するわけであるが、ここでは入力信号を一定振幅でかつ位相差なく入力した場合における素子の出力通路入口での 2 段目主

Fig. 7 Configuration of the element

噴流の振幅の周波数特性 $M(\omega)$ を理論的に推定してみる。すなわち、素子がどの程度の周波数まで応答するかを考察してみる。この理論においては、著者らが以前に発表した Kirshner の理論⁴⁾ を応用した理論³⁾ を用いて計算を行った。ここではこの理論を簡単に記す。**Fig. 7** に記号の説明を示す。

1 段目主噴流の X_2 点での振幅の周波数特性を $M_1(\omega)$ すると、

$$M_1(\omega) = \frac{B_1}{\rho \omega^2} \{2[1 + \beta_1^2(1 - K_1)](1 - \cos K_1 \beta_1) + K_1^2 \beta_1^2 - 2K_1 \beta_1 \sin K_1 \beta_1\}^{1/2} \quad (1)$$

ここで

$$K_1 = \frac{\alpha_1}{\beta_1}, \quad \alpha_1 = \omega \int_0^{X_1} \frac{dx}{u_{e1}}, \quad \beta_1 = \omega \int_0^{Y_2} \frac{dx}{u_{e1}} \quad (2)$$

ただし B_1 : 定数, u_{e1} : 主噴流中心流速, ρ : 密度, ω : 角周波数

つぎに 2 段目主噴流のみの振幅の周波数特性 $M_2(\omega)$ は

$$M_2(\omega) = \frac{B_2}{\rho \omega} \{2[1 + \beta_2^2(1 - K_2)](1 - \cos K_2 \beta_2) + K_2^2 \beta_2^2 - 2K_2 \beta_2 \sin K_2 \beta_2\}^{1/2} \quad (3)$$

ここで

$$K_2 = \frac{\beta_2}{\alpha_2}, \quad \alpha_2 = \omega \int_0^{Y_1} \frac{dy}{u_{e2}}, \quad \beta_2 = \omega \int_0^{Y_2} \frac{dy}{u_{e2}} \quad (4)$$

ただし B_2 : 定数, u_{e2} : 主噴流中心流速

したがって入力信号を一定振幅で入力した場合にお

(a) Theoretically estimated frequency characteristics of the element (depth; 0.4 mm)

(b) Theoretically estimated frequency characteristics of the element (depth; 1.0 mm)

Fig. 8 Theoretically estimated frequency characteristics

ける2段目の主噴流の周波数特性 $M(\omega)$ は

$$M(\omega) = M_1(\omega) \cdot M_2(\omega) \quad (5)$$

ここで u_{c1} は遷移領域内では主ノズル出口での平均流速 u_1 を用い、発達領域では次式によった.

$$u_{c1} = u_1 \frac{x_0}{x} \quad (6)$$

ただし x_0 はコア領域の長さであり、レイノルズ数などによっても異なるが、ここでは $x_0 = 5.2 \text{ bs}$ とした. また2段目主噴流における u_{c2} も同様に計算を行った. また u_1, u_2 は主ノズル出口における平均流速であるが、本実験の場合、Fig. 1 に示すように素子の流路の深さ 0.4 mm , 1.0 mm において実験を行ったが、素子流路深さ 0.4 mm の場合、 $u_1 = 230 \text{ m/s}$, $u_2 = 270 \text{ m/s}$ であり、素子流路深さ 1.0 mm の場合、 $u_1 = 230 \text{ m/s}$, $u_2 = 206 \text{ m/s}$ である. 素子の各寸法は Fig. 2 に示すようである. 上記の条件で振幅の周波数特性を計算した結果を Fig. 8(a), (b) に示す. Fig. 8 はデシベル値で表示し、 100 Hz における値を 0 dB とした. Fig. 8 より 10 kHz 程度まではほとんど振幅一定であり、 20 kHz 程度においてもその減衰は小さい. したがって本研究で開発したFM復調素子は 10 kHz 以上の作動が可能と推定される.

Fig. 9 Frequency characteristics of the fluid signals (receiver mouth; Type H)

6. 実験結果および考察

6.1 素子への入力信号波形

Photo. 1(a), (b) は超小型半導体圧力変換器により素子の制御ノズル上 (Fig. 2 P, Q点) で検出した正弦波状流体信号の波形をデジタルメモリスコープで記録したものである. Photo. 1(a) においては受流口形状として Fig. 4(b) に示す Type H を用い、Photo. 1(b) においては Type J を用いている. また管路 A, C の長さは 300 mm 、管路 B の長さは 50 mm である. 写真の上段および下段はそれぞれ、Fig. 2 P, Q点で検出しものである. Photo. 1(a)より Photo. 1

(b) におけるもののほうがより正弦波に近いことがわかる. すなわち受流口形状としては Type J のように受流口部に溝を設けたほうがより正弦波に近い流体信号が得られることがわかる.

6.2 素子への入力信号の周波数特性

Fig. 9~11 は流体信号発生器の受流口としてそれぞれ Type H, J, K を用いた場合において、伝達管路の長さを 300 mm (管路 A, A', C, C') と 50 mm (管路 B, B') に設定した場合における、振幅比と管路の長さの違いによる位相差の周波数特性を測定した結果である. 振幅比についてみると Fig. 9~11 とも多くのピークを示すが、これは管路の共振によるものである.

(a) Waveforms (receiver mouth; Type H)

(b) Waveforms (receiver mouth; Type J)

upper stage; waveforms detected at P point (length of the line B: 50 mm)
lower stage; waveforms detected at Q point (length of the line A, C: 300 mm)

Photo.1 Waveforms

Fig. 9 に示すように、受流口形状が Type *H* の場合、共振時における振幅比のピークが大きいことがわかる。このピークの大きさは Fig. 9, Fig. 10, Fig. 11 に示すように、受流口形状が Type *H*, *J*, *K* と溝が深くなるに従い、小さくなることわかる。また位相差についてみると、Fig. 9 に示すように、受流口形状として Type *H* を使用した場合、周波数変化と位相差は直線的でなく、複雑なものである。これは Fig. 9 からわかるように Type *H* の受流口形状においては共振の度合いが大きく、そのため共振周波数付近で位相が急激に変化するためである。Fig. 9, Fig. 10, Fig. 11 からわかるように Type *H*, *J*, *K* と受流口部の溝が深くなるに従って周波数変化に対する位相差の変化がより直線的になることがわかる。これは溝が深くなるに従って共振時における振幅比のピークが小さくなるように、共振の度合いが溝が深くなるほど小さくなるためである。なお、Type *I* の受流口形状の実験結果は示していないが、Fig. 9 と Fig. 10 の中間的なものである。

FM 復調素子への入力信号としては、波形は正弦波に近く、振幅比はできるかぎり周波数によらず一定であり、位相差は周波数変化に対して直線的に変化するものほど好ましい。したがってこの点からは受流口の溝が深くなるほど流体信号発生器としては好ましい。しかし、溝が深くなるほど振幅は小さくなる傾向にあり、また Fig. 10, Fig. 11 より Type *J* と Type *K* での違いは周波数特性において大きな差はないように思われる。したがってここでは FM 復調素子への入力信号としては Type *J* の受流口形状による流体信号発生器からの信号を用いた。

Fig. 12 は Fig. 10 と同様に受流口形状として Type *J* を用いているが、この場合、管路長さが 500 mm (管路 *A*, *A'*, *C*, *C'*) と 50 mm (管路 *B*, *B'*) となっている。Fig. 12 からわかるように管路長さが長くなると共振によるピークはより小さくなり、位相差も周波数に対してかなり直線的に変化していることがわかる。しかし管路長さがさらに長くなると周波数が高くなるに従い、振幅が小さくなる傾向にある。

Fig. 9~12 に示すように、流体信号発生器により得られた流体信号は約 10 kHz 程度まで発生しており、

Fig. 10 Frequency characteristics of the fluid signals (receiver mouth; Type *J*)

Fig. 11 Frequency characteristics of the fluid signals (receiver mouth; Type *K*)

Fig. 12 Frequency characteristics of the fluid signals (receiver mouth; Type *J*)

しかも共振による振幅の変化があるがほぼ振幅は一定であることがわかる。この周波数の上限は使用した可変モータの回転数によるものであり、さらに回転を高くすることができれば、さらに高い周波数の流体信号が得られると考えられる。

6.3 素子の平均出力圧力の周波数特性

5章で述べたように FM 復調素子は 10 kHz 以上の応答を示すと考えられる。また流体信号発生器は 10 kHz 以上の流体信号を発生させることが可能であ

Fig. 13 Mean output pressures with input frequency (length of the line A,C; 300mm, depth; 0.4mm)

Fig. 14 Mean output pressures with input frequency (length of the line A,C; 500mm, depth; 0.4mm)

Fig. 15 Mean output pressures with input frequency (length of the line A,C; 300mm, depth; 1.0mm)

り、Fig. 10, Fig. 12 より素子へはほぼ一定振幅の流体信号が入力していると考えられる。したがって 10 kHz 以上でも十分作動すると考えられる。

Fig. 13, Fig. 14, Fig. 15 は素子への入力信号とし

て、Fig. 10, Fig. 12 に示すような受流口形状 Type J を用いた場合における周波数と素子の左右平均出力圧力の関係を示す。いずれも 10 kHz 以上の作動が認められる。左右出力圧力の交差点の周波数は、Fig. 10, Fig. 12 に示すように入力信号の位相差が -90 度、 -270 度、 -450 度……の周波数にほぼ一致する。Fig. 15 に示すように、10 kHz 程度において左右出力圧力変化が直線的な領域は $9.5 \text{ kHz} \sim 10.3 \text{ kHz}$ 程度であり、この 800 Hz の変化で $1.4 \times 10^4 \text{ Pa}$ の出力圧力変化が得られることがわかる。これは 10 kHz 程度に流体信号が 1 Hz 変化をすると素子の左右出力圧力変化が $1.7 \times 10^4 \text{ Pa}$ 変化することになる。すなわち流体信号発生器の回転数が 25,000 rpm (417 s^{-1}) において 1 rpm の変化に対し、素子の左右出力圧力変化は 7 Pa となる。これは比較的大きな圧力変化と考えられる。

7. ま と め

高い周波数領域で作動可能な FM 復調素子を開発した。これに伴い、回転体により 10 kHz 程度までの高い周波数の正弦波状流体信号を発生させることが可能な流体信号発生器を開発した。また流体信号発生器と素子間を結合する伝達管路の共振現象をできるかぎり抑えるよう、流体信号発生器の受流口形状を工夫した。

この流体信号を FM 復調素子に入力した結果、10 kHz 以上での周波数領域でも作動が可能であり、周波数変化に対する圧力変化も大きかった。

参 考 文 献

- 1) C.R. Halbach, et al.: A Pressure Insensitive Fluidic Temperature Sensor, Advances in Fluidics, ASME, 298/312 (1970)
- 2) A.L. Hezemans and W.E. Gasseling: Entwurf und Ausführung einer Drehzahlre Glung für eine Hydrostatische Übertragung mit einem Fluidik-Double-Phasediscriminator, 7th Cranfield Fluidics Conf. K2, 23/48 (1975)
- 3) S. Saito, et al.: Development of Fluidic Amplifiers with High Gain and Excellent Frequency Characteristics, Bulletin of the JSME, 23-185, 1819/1826 (1980)
- 4) J.M. Kirshner: Response of a Jet to a Pressure Gradient and Its Relation to Edgetone, The 2nd Int. JSME Sympo. Vol. 3, 63/69 (1972)