純流体逆形フィードバック発振器の発振原理*

花 田 桂 一**

Principle of the Inverse Feedback Fluidic Oscillator

Keiichi HANADA

A new wall attachment type pure fluid oscillator was developed by means of inverse feedback loops. These loops are generally called positive feedback loops between right outlet and left control inlet and between left outlet and right control inlet. This inverse feedback oscillator itself is not self-excited, but needs one trigger pulse in order to begin oscillation.

The principle of the oscillation of the inverse feedback oscillators was studied theoretically and experimentally. It was found that their frequencies were about twice as much as that of the conventional feedback oscillator. The pulse width of the inverse feedback oscillations was decided by the phase lag between two cycles, right to left cycle and left to right cycle. If these two cycles are different from each other, the oscillation will soon be stopped as the oscillation continues. However, these two cycles were experimentally found to be the same and the stable oscillation did not stop even when the device was asymmetrical. The reason why these two cycles were the same was studied and the stable conditions for the pulse width were discovered.

1. はじめに

フルイデックスシステムの試作が盛んに行なわれている。フルイデックス回路には、アナログ型とデジタル形がある。後者では、図1(a)の二安定側形付着形純流体フィードバック発振器¹⁾がしばしば使われる。筆者は、この普通形フィードバック（以下フィードバックとも呼ぶ）とは逆のフィードバックをもつ素子（図1(b)）に、トリガパルスを加えると、安定した発振が生じることを見いだした。そしてこれを、その外観の形状から、逆形フィードバック発振器と命名した²⁾。筆者は、その特性を調べ、発振原理を見いだしたので、次に報告する³⁾。

2. 発振理論

2.1 発振原理

逆形フィードバック素子（図1(b)）を考える。いま、その主噴流が素子の片側の側壁に付着すると、立上り時間が短い（普通は3ms程度以下）ステップ状静圧力が付着点近くに発生する。そのステップ状圧力の立上り起点が、進行波として、非付着側の制御ノズルに逆形にフィードバックされて現われるまでの時間 t_f は、近似的に

$$t_f \approx \frac{l'}{a_0} \quad (1)$$

l' : フィードバック長さ(m)

a_0 : 音速(m/s)

である。これは、断面積が一樣な、末端未閉鎖管路内でのステップ状静圧力変化の立上り起点の伝達速度が、ほぼ音速に近いからである^{1), 4), 5)}。そこで、図2から、逆形フィードバック発振の発振原理は、「現在付着している主噴流が、以前に反対側へ切換わったとき、その反対側の流出路内に生じたステップ状圧力信号が、現在の付着側制御ノズルにもどってきて、主噴流を切換える原理」であることがわかる。したがって、切換時間を図3のように定義すれば、逆形フィードバック発振の発振周期 T_f

(a) 普通形フィードバック発振器

(b) 逆形フィードバック発振器

注: 本論文では、フィードバック経路の断面が一樣である場合を取扱う

図1 二安定側壁付着形純流体フィードバック発振器

* 原稿受付 昭和48年2月12日。昭和42年度精機学会秋季大会学術講演会（昭和42年11月9日）および昭和46年度山梨地方講演会（昭和46年10月23日）にて発表。

** 正 会 員 東洋大学工学部（川越市と井中野台2100）

図2 逆形フィードバック発振の発振原理

および発振周波数 f_i は、

$$\tau_i = t_f + t_{si} \doteq \frac{l'}{a_0} + t_{si} \quad (2)$$

t_{si} : 逆形フィードバック発振の切換時間 (s)

$$f_i = \frac{1}{t_f + t_{si}} \doteq \frac{1}{\frac{l'}{a_0} + t_{si}} \quad (3)$$

となる。そして発振周期には、切換信号が、右から左へと伝わり切換わる周期 $\tau_r = t_{fr} + t_{sl}$ と、左から右へと伝わり切換わる周期 $\tau_l = t_{fl} + t_{sr}$ の二つの周期が混合していることが知れる (図3)。

なお、普通形フィードバック発振の周波数 f_{or} は、同様の切換時間の定義によって、

$$f_{or} = \frac{1}{2(t_f + t_{sor})} \doteq \frac{1}{2(\frac{l'}{a_0} + t_{sor})} \quad (4)$$

t_{sor} : 普通形フィードバック発振の切換時間

だから¹⁾、フィードバック長さが等しい。逆形フィードバック発振と普通形フィードバック発振との間には、 $t_s \ll t_f$ ならば、 t_{si} と t_{sor} との相違が無視できて、

$$f_i \doteq 2f_{or} \quad (5)$$

の近似式が成立する。

2.2 パルス幅

逆形フィードバック発振のパルス幅は、前節で述べた左右二つの周期間の位相差によって決定される (図3)。この点が、今までの普通形フィードバック発振によるパルス幅の決まり方⁶⁾ (三角波の重ね合せだけによる方法) と根本的に異なる点である。

パルス波形が、左右対称の台形であると仮定し、流出

\\\\\\\\ の部分をトリガパルスと考えてもよい

—— τ_l の周期で繰返す波形

—— τ_r の周期で繰返す波形

パルス幅は τ_l と τ_r の位相差で決まる

(波形の縦軸のゼロレベルは明示していない)

P_l と P_r および P_{er} と P_{li} とは波形が逆相 (裏がえし) になっている

図3 逆形フィードバック発振の発振波形

路内静圧力のパルス幅 (パルス波形の高さが、波高値の 1/2 になる時点間の時間) を左右で $\tau_{wl m}$ および $\tau_{wr m}$ とし、切換時間 $t_{esl m}$, $t_{esr m}$, 周期 $\tau_{l m}$, $\tau_{r m}$, パルス番号などを、図3のように定める (m は正の整数)。このようにすると、逆形フィードバック発振が始まってから (発振の途中の任意のパルスを 1 番目と考えても全く同様である)、 n 番目の左パルス幅 $\tau_{wl n}$ および右パルス幅 $\tau_{wr n}$ は、左右が逆相であることを考慮して、図3から、

$$\left. \begin{aligned} \tau_{wl n} &= \left(\tau_{wl 1} + \sum_{k=1}^{n-1} \tau_{rk} \right) - \sum_{k=1}^{n-1} \tau_{lk} \\ \tau_{wr n} &= \left(\tau_{wr 1} + \sum_{k=2}^n \tau_{lk} \right) - \sum_{k=1}^{n-1} \tau_{rk} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

n と k は正の整数で、パルス番号を表す。

$$\tau_{rk} = t_{frk} + t_{sl}(k+1), \quad \tau_{lk} = t_{flk} + t_{srk}$$

のように表わされる。ここで、 k の値にかかわらず、 $\tau_{rk} = \text{一定} = \tau_r$, $\tau_{lk} = \text{一定} = \tau_l$ の場合は、式(6)はそれぞれ

$$\left. \begin{aligned} \tau_{wl n} &= \tau_{wl 1} + (n-1)(\tau_r - \tau_l) \\ \tau_{wr n} &= \tau_{wr 1} + (n-1)(\tau_l - \tau_r) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

となる。さらに、左右が対称で、 $\tau_r = \tau_l$ なら、

$$\tau_{wl n} = \tau_{wl 1}, \quad \tau_{wr n} = \tau_{wr 1} \quad (8)$$

となり、パルス幅は一定になる。なお、付着流を切換え

図4 パルス幅の安定化機構

られる最小のパルス幅 τ_{wc} が存在すると考えられ、パルス幅が τ_{wc} より小さくなると、発振は停止する。 τ_r が τ_l の状態が長くつづくと、パルス番号が増加するから、式(7)から、自然に、片側のパルス幅が τ_{wc} 以下となり、発振は停止する。

2.3 パルス幅の安定化機構

切替信号伝達時間は、フィードバック長さが変わらない限り、実用上、一定と考えられる。したがって、パルス幅変化は、式(6)から、切替時間の変化によって生ずることになる。そこで、左右の切替時間が、相異なっていると、式(7)から、パルス幅は変化していく。その変化するパルス幅を変化しなくするためには、パルス幅の変化につれて、その変化をくいとめる方向に、切替時間が変化する必要がある。したがって、切替時間が、その切替えが起る直前のパルス幅と関数関係にあることが、パルス幅が安定化するための必要条件である。

ところで、逆形フィードバック発振の場合、実験的には、パルス幅が大きくなると、そのパルスが立ち下がる時の切替時間は、多くの場合、減少する傾向にあることが確かめられた。そこで、パルス幅が増大すると、切替時間が減少する場合を例にとって、図4によって安定化機構を説明しよう。横軸に切替時間、縦軸に左右のパルス幅(単位は時間)をとる。図式解法を容易にするために、左のパルス幅は上向きに増大するように、右のバ

表1 パルス幅と切替時間の関係の組合せ

$\frac{\partial t_{srn}}{\partial \tau_{wrn}}$	$\frac{\partial t_{sln}}{\partial \tau_{wln}}$	+	0 (非関数関係)	-
+	+	発散 ①	発散 ②	収束 ④
0 (非関数関係)	+	発散 ②	発散 ③	収束 ⑤
-	+	収束 ④	収束 ⑤	収束 ⑥

ただし $\left| \frac{\partial t_{sln}}{\partial \tau_{wln}} \right| < 1$, $\left| \frac{\partial t_{srn}}{\partial \tau_{wrn}} \right| < 1$

パルス幅が途中で τ_{wc} 以下になれば、どの場合でも発散になる

ルス幅は下向きに増大するようにとることにする。そして、パルス幅の変動前の互いに相等しかった切替時間を t_{s0} とし、そのときの左右のパルス幅 τ_{wlo} , τ_{wro} が、図上で一点(図4のA点)で表わされるように、左右のパルス幅の目盛の相対位置を決める。ここで、主噴流が左に付着している期間中に、左から右への切替時間 t_{sl} を短くし、右から左への切替時間 t_{sr} を長くするステップ状の要因が入ると考える。この直後の、左付着流が右へ切替わる切替時間 t_{sl1} と左パルス幅 τ_{wl1} とは、図4の特性曲線 a (図では、簡単化のため特性曲線はすべて直線で描いてある)の上にあるはずである。切替時間 t_{sl1} は、 $t_{sl1} = t_{s0} = \Delta t_{sl1}$ ($\Delta t_{sl1} > 0$) で表わされるから、左パルス幅 τ_{wl1} は、 τ_{wlo} よりも Δt_{sl1} だけ短くなるので、図4で $\triangle ABC$ は直角二等辺三角形となる。したがって、A点から左下に45°の直線を引き、それと曲線 a との交点 B の座標が (t_{sl1}, τ_{wl1}) である。

ここで、右付着流に着目すると、左パルスの立下り部分(後縁)が、 Δt_{sl1} だけ短くなった分が右パルスに影響して、右パルスの立上り部分(前縁)は Δt_{sl1} だけ早くなる。そこで、前に述べたと同様の原理によって、点Cから、直線 $t_s = t_{s0}$ と45°をなす直線を右下へ引いて、曲線 b と交わる点 D を求めると、この点が、右パルス幅 τ_{wr1} と切替時間 t_{sr1} とを表わす。

次に、左に付着した付着流については、同様の作図法によって、点 E, 点 F が求められ、点 G までくる。点 G においては、特性曲線 b が左側にあるから、この切替時間は t_{s0} より短い。したがって、ここでは、45°の直線が右下りでなく、左上りになることに注意を要する。

このようにして、左パルス幅が減少し、右パルス幅が増大していき、結局、特性曲線 a および b と、直線 $t_s = t_{s0}$ とに内接する正方形の角の点 α と点 β に帰着する⁹⁾。

パルス幅と切替時間との関数のグラフの傾きの組合せとして、一般的に、表1が考えられ、それらに対する代

図5 パルス幅の安定, 不安定の種類

図6 実験装置の全体図

表的な作図は図5となる。そのときのパルス幅の収束や発散は表1のようなになる。ただし、表1での偏微分係数 $\partial t_{sin}/\partial \tau_{win}$ は、実験した場合の、 t_{sin} の変化分の τ_{win} の変化分に対する比の意味である。 $\partial t_{srn}/\partial \tau_{wrn}$ についても同様である。表1では、不安定なつり合い点がある場合と、無数につり合い点がある場合とは、実用的見地から発散に入れた。 $\partial t_{sin}/\partial \tau_{win}$ と $\partial t_{srn}/\partial \tau_{wrn}$ の絶対値は、通常1よりはるかに小さいので、1および1より大きい場合は本論文では扱わない。

要するに、パルス幅が安定して、逆形フィードバック発振が持続するには、その切換時間とパルス幅との間に適当な関数関係の発生が必要である。また、逆に切換時間とパルス幅との間に表1に示す収束の場合の関数関係があれば、必ずパルス幅は安定する。したがって、表1に示す収束の場合の関数関係の組合せは、逆形フィードバック発振で、パルス幅が安定化するための必要で十分な条件である。

3. 実験装置および実験方法

実験装置の概略を図6に、使用した二安定側壁付着形

P_c は点B, P_t , P_r は点Aの圧力

図7 使用した二安定側壁付着素子の形状

素子の形状、寸法および各部の名称を図7に示す。変動静圧力（厳密には、下板の壁面の変動静圧力）の測定には、豊田工機製半導体小型圧力変換器を使用した。本研究では発振の最適条件を調べるのが本旨でないので、溝深さ、供給ノズル幅、側壁角などは図7のように固定し、制御ノズル幅、セットバック量、出口オリフィス幅、スプリッタ距離および供給空気圧力を数種類にかえて、逆形フィードバック発振の理論が成立しているかを実験的に確かめる方法をとった。図7のAQRSBの長さを、フィードバック長さとした。

4. 実験結果とその検討

実験結果を図8～図11に示す。以下、それについての検討を述べる。

4.1 発振原理

図8と図9から、理論式(5)が成立していることが明らかである。したがって、前述した発振原理が実験的にも確認されたことになる。

4.2 発振のトリガについて

図10をみると、制御ノズルから入れた一発のトリガパルスの立上り起点の時刻からはかって、切換信号伝達時間の t_f 後から逆形フィードバック発振が発生しているから、片側制御ノズルから単発パルスを入れる方法に

$W_j=0.5$ mm, $W_c=2.39$ mm, $W_o=9.0$ mm, $S_b=1.16$ mm, $O_s=0.3$ mm, $L_s=7$ mm, $O_{ro}=0.5$ mm, $d_f=5$ mm, $P_s=0.5$ kg/cm², $Q_s=21$ l/min, $T=23^\circ\text{C}$

図8 フィードバック長さと切替信号伝達時間

$W_j=0.5$ mm, $W_c=3.5$ mm, $W_o=9.0$ mm, $S_b=1.4$ mm, $O_s=0.14$ mm, $L_s=7$ mm, $O_{ro}=0.5$ mm, $d_f=5$ mm, $P_s=0.5$ kg/cm², $Q_s=19$ l/min

図9 フィードバック長さと発振周波数

(a) 左付着時に左制御ポートから単発トリガパルス入力 (図10(b)) を入れて発生した逆形フィードバック発振

$W_j=0.5$ mm, $W_c=4.0$ mm, $W_o=9.0$ mm, $S_b=1.72$ mm, $O_s=0.28$ mm, $L_s=7$ mm, $O_{ro}=0.5$ mm, $d_f=5$ mm, $l'=899$ cm, $P_s=0.5$ kg/cm², $T=19.5^\circ\text{C}$, $t_f=l'/a_0=26.2$ ms, 横軸 10 ms/div (0.5 ms/mm)

図10 単発トリガパルス入力による発振の発生過程

(b) 主噴流圧力をゼロにしたときのトリガパルス波形

よって、図3の原理で、発振のトリガが与えられたものと解される。

4.3 パルス幅の安定化機構

$W_j=0.5$ mm, $W_c=4.0$ mm, $W_o=9.0$ mm, $S_b=1.74$ mm, $O_s=0.3$ mm, $L_s=7$ mm, $O_{ro}=0.5$ mm, $d_f=5$ mm (切替時間を大きくするためS端側7 cm は $d_f=2$ mm), $l'=899$ cm, $P_s=0.5$ kg/cm²

図中の数字はパルス番号を表す

図11 パルス幅変動入力を加えたときのパルス幅と切替時間の変動

パルス幅の変動に伴う切替時間の変動を精度よく調べることは、一定時期に一定のトリガパルスを加えることのむずかしさや、ノイズなどのために⁷⁾、かなり困難であった。そのため、パルス幅の変動についての実験データ (図11) は、理論と比べるとかなり大きいばらつきが生じ、また安定化の直前で安定点への不連続現象が見られるが、その傾向は理論と一致した。したがって、前述したパルス幅の安定化機構は、実験的にも成立して

いることがわかった。

逆形フィードバック発振器で、パルス幅と切替時間との間に関数関係がある事実の流体力学的根拠は、動的切

換時間を決める実験式が明らかでないため⁶⁾ 解明できない。

図 11 から、逆形フィードバック発振器は、周期がほぼ一定の近似的なパルス幅変調器として使える可能性をもつことがわかる。また、切り換りのたびごとに、パルス幅の変化が進行するため、わずかな左右の切換時間の差が、最終的に大きなパルス幅の変化を生ずることから、普通形の場合⁶⁾ と比べて、パルス幅変調の応答がおそく、反面、変調のゲインが大きいことがわかる。さらに、この特性から、逆形フィードバック発振が可能な素子の非対称性の程度をパルス幅として検出できることも考えられる。また、左右の切換時間の同値化の現象を詳しく調べることは、動的切換時間の研究に有用であろう。

5. 結 論

(1) 二安定側壁付着形素子のフィードバック流を、左右逆に制御ノズルに導くことによって、逆形フィードバック発振が生ずることを見いだした。

(2) 逆形フィードバック発振の原理がわかった。

(3) 周波数は、同じフィードバック長さをもつ普通形のフィードバック発振のほぼ 2 倍の周波数を示す。

(4) 素子に多少の左右の非対称性があっても、左右の周期の同値化、すなわちパルス幅の安定化が生じて、安定した発振に入ることが確認された。

(5) 逆形フィードバック発振の応用としては、パルス幅変調器、素子の左右の非対称性の検出、動的切換時間の研究などが考えられる。

本研究と本報告は、東大生産技術研究所大島康次郎教授に負うところが大きい。ここに厚く感謝する。

記 号

本報告で用いた主な記号 (図 7 に未記載のもの) を以下に記す。

f : 発振周波数 (Hz)

τ : 発振の 1 周期 (s, ms)

τ_w : パルス幅 (s, ms)

τ_{wc} : 発振が停止しない最小のパルス幅 (s, ms)

P_s : 供給空気圧力 (kg/cm²)

P_c : 制御圧力 (kg/cm²)

P : 静圧力 (kg/cm²)

Q_s : 供給空気流量 (l/min)

t_f : 片側のフィードバック路を切換静圧力信号が伝わる時間、切換信号伝達時間 (s, ms)

t_s : 切換時間 (s, ms)

a_0 : 音速 (m/s)

d_f : フィードバック管内径 (mm)

l' : フィードバック長さ (図 7 の AQRSB) (m, cm)

T : 気温 (°C)

下つき記号

i : 逆形フィードバック発振の場合

or : 普通形フィードバック発振の場合

e : 実験値

c : 算出値 (P_c , W_c , τ_{wc} を除く)

r : 右、または、右から左へ

l : 左、または、左から右へ

参 考 文 献

- 1) 花田桂一: フィードバック形流体発振器の研究, 精密機械, **33**, 6 (1967) 34.
- 2) 花田桂一: 純流体フィードバック発振器の特性について, 第 2 回純流体素子シンポジウム資料 (1967) 7.
- 3) 花田桂一: 純流体逆形フィードバック発振器のパルス幅変調の原理と特性, 精機学会昭和 46 年度山梨地方講演会前刷 (1971) 18.
- 4) F. T. Brown: Pneumatic Pulse Transmission with Bistable Jet Relay Reception and Amplification, Sc. D. Thesis, M.I.T., may (1962) 35.
- 5) 花房, 篠田: 純流体素子回路におけるパルス信号伝達について, 第 13 回自動制御連合講演会前刷 (1970) 195.
- 6) H. Hanafusa et al.: Fluidic Servo Amplifier Operated by P.W.M. Mode, Proc. IFAC Symp. on Fluidics, Paper E5, June-July (1971) 1.
- 7) H. Hanafusa et al.: Accuracy of Switching Pressure of Fluidic OR-NOR Device, Proc. 2nd Intern. J. S.M.E. Symp. Fluid Machinery and Fluidics, Sept. 6 (1972) 213.