

# 低速風洞における制御弁による脈動流発生の研究

川又正昭\*, 吹田 年\*, 岩渕 龍\*\*

(昭和50年9月6日受理)

## Study on Generation of Pulsatile Flow by the Regulator Valves in a Low-Speed Wind Tunnel

MASAAKI KAWAMATA, MINORU SUITA and RYU IWABUCHI

Abstract:—Various aerodynamical researches in pulsatile flow on the wind tunnel tests are greatly required now. But we have few papers about the generation methods of the pulsatile flow in wind tunnels.

In this paper, we deal with the generation of the pulsatile flow by the regulator valves at a small wind tunnel. The wind tunnel has the square test section of 200mm×200mm, and is Eiffel type.

As the results, we got the pulsatile flow which was close the sine curve by the method of regulator valves that were driven by a cam plate and links mechanism. The mean flow velocity in the wind tunnel was 11~22m/s. And the frequency of the pulsatile flow was 0.3~1.4 Hz.

### 1. まえがき

従来、一般の風洞は一定流速の気流を発生する装置<sup>1)~4)</sup>として、研究に使用されてきたが、近来、過渡状態における研究や、脈動流中における研究の必要性が高まってきた。しかし脈動流を発生する風洞の研究はわずかに報告された程度である。<sup>5),6)</sup>

本大学に昭和47年に設置された風洞<sup>7)</sup>においても、脈動流発生装置が付属されたが、その性能は十分なものでなく、基本的な脈動流として要求される正弦波状の脈動流が得られなかった。この脈動流発生装置を改良して望ましい脈動流を得ることが本研究の目的であって、そのため実物風洞の1/4模型の風洞を使用して実験的研究を行なった。模型風洞を使用した理由は装置製作上の容易さ、簡単に改良がきく点にある。また遠藤<sup>5)</sup>、窪田<sup>6)</sup>らの論文を参考として両風洞が相似となる条件を満たすため脈動の周波数は実物風洞におけるものの4倍とし、流速は

実物風洞と同じ範囲内とした。

### 2. 脈動流発生法

現在、風洞で脈動流を発生させる原理的な方法として、(1)送風機の回転数を変化させる。(2)風路の途中から気流の一部を逃がす、(3)風路の抵抗を変化させる、などの方法が知られているが、本大学の風洞における脈動流発生装置は風路内にもうけた制御弁を開閉することにより、風路抵抗を変化させる方法を取っている。

### 3. 実験装置

#### 3.1 大型風洞の脈動流発生装置

本工学部に設置された大型風洞の概略図をFig. 1に示す。風洞の形式は水平吹抜け式で吹き出し口は800mm×800mmの正方形である。流速範囲は4.8~47.7m/sである。詳細については文献7)を参照されたい。

この大型風洞に付属している脈動流発生装置は風洞本

\*茨城大学工学部機械工学科(日立市中成沢町)

\*\*茨城大学大学院工学研究科機械工学専攻(日立市中成沢町)

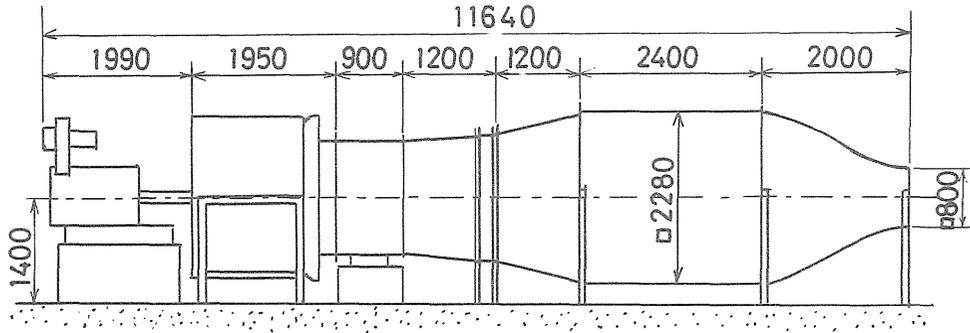


Fig. 1 The Eiffel type wind tunnel.

体の拡散胴を取りはずし、これと交換に組み込まれて使用できるようになっている。脈動流発生装置は6枚の中心付近に軸をもつ平板状の制御弁からなり、これを流れに平行な位置(これを弁角度0度とする)から、互いに接して風路を閉鎖する角度位置60度まで、リンク機構により6枚同時に開閉される。この制御弁の動作は、電動機の回転運動をプーリー、およびウォームギヤで減速し、回転円板に伝え、それに取付けたリンク機構をかいして行なわれる。また電動機の回転数を変えることにより、制御弁の開閉周波数を0.01~0.5Hzの範囲に変化することが可能である。さらに回転円板とリンク機構の取付け位置を変えることにより制御弁の開閉の角度範囲を変化させることができるようになっている。

3.2 大型風洞の静特性、大型風洞の脈動流発生装置

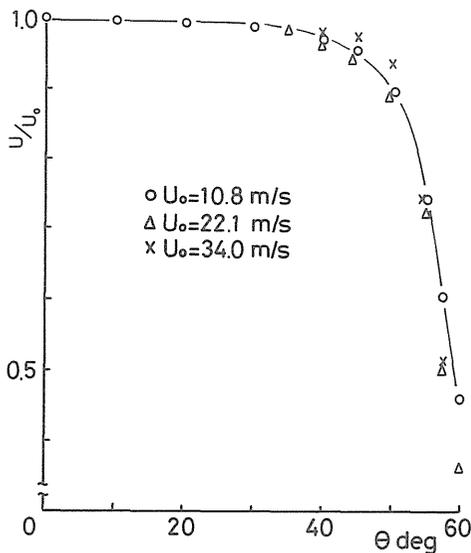


Fig. 2 Velocity change  $U/U_0$  versus angle of valves  $\theta$  at the wind tunnel.

の静特性をFig.2に示す。横軸に弁全開角度0度より弁全閉角度60度までの角度を取り、縦軸に各弁角度における流速 $U$ と弁の全開時における流速 $U_0$ の比を取り無次元化している。この図より流速と弁角度の関係は弁の全開時の流速によって、ほとんど影響を受けない。Fig.2によれば、弁特性は弁全開時より約40度閉じる状態までは流速変化が少なく、約40度付近から全閉までの間において急速に流速の減少することがみられる。なお流速の測定はピトー管を用い、吹き出し口直後の風路中心で行なった。また吹き出し口の測定位置の違いによる

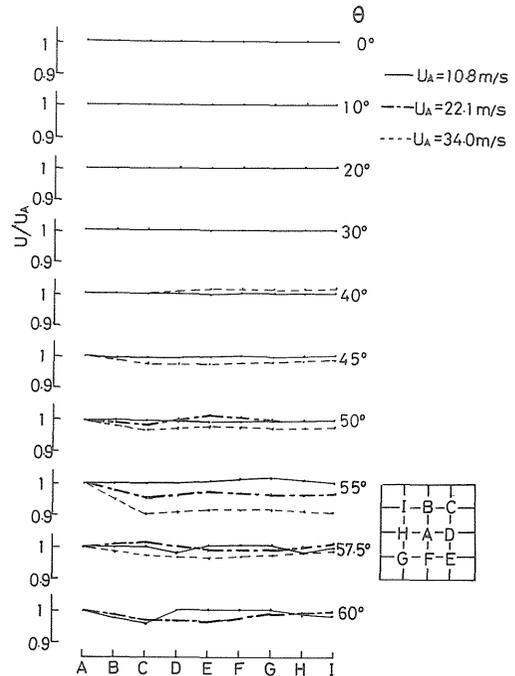


Fig. 3 Velocity change  $U/U_A$  versus angle of valves  $\theta$  at some location.

流速と弁角度の関係を Fig. 3 に示す。これによると弁角度 30 度までは吹き出し口で一様な流速を示し, 弁角度 40 度以上になると, 流速が大きいき測定位置の違いによる流速の違いがいくぶん表われている。なお横軸は吹き出し口の測定位置を表わし, 800mm 角の吹き出し口を 200mm 間隔で切り図中で示す 9 点の位置で測定した。また縦軸は各測定位置における流速  $U$  と吹き出し口中心の流速  $U_0$  の比を表わしている。

3.3 大型風洞の動特性, 大型風洞の脈動流発生装置を作動させて, その脈動流を熱線流速計と電磁オシロを使用して測定した。Fig. 4 は  $\omega t$  と  $\Delta U/\Delta U_{\max}$  の関係を示す。ここで  $\omega$  は回転円板の角速度 (後述する  $\theta$  との関係は  $\theta = \omega t$  となる),  $t$  は変動時間,  $\Delta U$  は任意の弁角度における脈動流の変動流速の片振幅,  $\Delta U_{\max}$  は最大変動流速の片振幅を表わす。この関係は Fig. 5 に示す。Fig. 6 は弁角度 0 度から 60 度, 20 度から 60 度まで動かした場合の  $\omega t$  と  $\Delta U/\Delta U_{\max}$  の関係を示したものである。この図より弁角度の変化の幅の大きい方が, 弁角度の変化の幅の小さい方より流速が変化しない区間が長いことがわかる。また脈動流として基本的に要求されるのは時間的に流れが正弦波状に変化することであるが, Fig. 4, Fig. 6 から明らかなように大型風洞の脈動流発生装置では矩形波状の流速変化を表わす。これは一般に本装置に使われているような平板状の弁の抵抗が開き角に対して著しい非線形性を示して, ほぼ指数関数的に変化することによるものである。このことを考慮すると角度がかなり変化しても, 流速変化がわずかである全開付近を省いた状態, つまり弁をある程度閉じた状態から作動させれば直線に近い応答特性が得られることになる。このような点を考慮して模型風洞を使用して装置の改良を検討した。

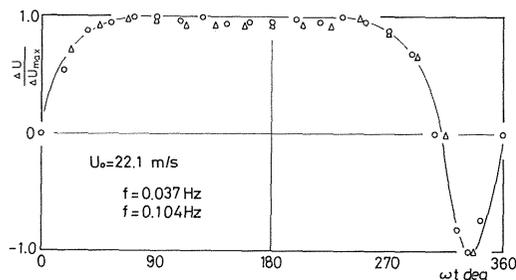


Fig. 4 Periodic velocity change in the wind tunnel.

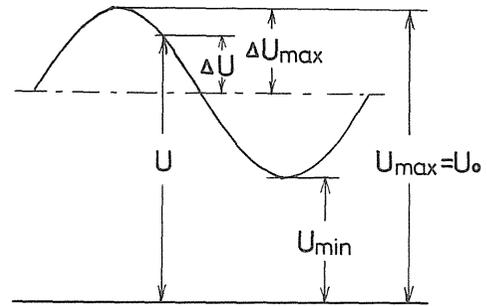


Fig. 5 Notations on the pulsatile flow.

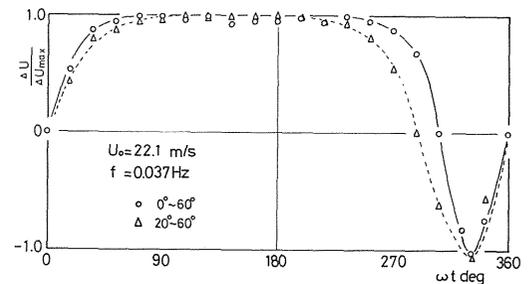


Fig. 6 Periodic velocity change at some range of valve angle.

3.4 模型風洞の概要, Fig. 7 に模型風洞の概略図を示す。模型風洞は大型風洞の  $1/4$  縮尺で風路に関してほぼ幾何学的に相似であり, 制御弁を開閉して風路の流動抵抗を変化させる機構上, 乱れに関する性能は考慮せず, 主として平均流速を問題とした。Fig. 7 の送風機①には多翼型送風機を用い, 駆動用に変速電動機④をベルト掛にした。縮流ノズル③の形状は, 大型風洞が  $1/2$  波長正弦波を用いたのに対し, 直線的なものを使用した。吹き出し口は  $200\text{mm} \times 200\text{mm}$  の正方形である。脈動流発生用の弁装置②も大型風洞の  $1/4$  の幾何学的に相似なものとした。この模型の弁による脈動流発生装置は, 大型風洞の動特性や脈動流発生装置を検討した結果, カム機構を取り入れ, 変速電動機⑤からベルト掛でカム機構⑥を動かし制御弁を作動させるようにした。また制御弁の動作範囲は, 先に述べたように弁角度 40 度から 60 度の全閉までの 20 度の間を変化させることにした。6 枚の弁を同時に動かすリンク機構は製作上複雑なので歯車を使用した。Fig. 8 に模型風洞の脈動流発生装置を示す。風路幅 570mm の間に幅 110mm の平板状の弁 6 枚を図のよ

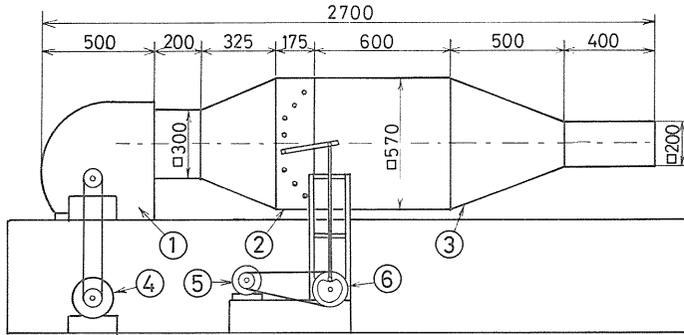


Fig. 7 The schematic diagram of the model wind tunnel.

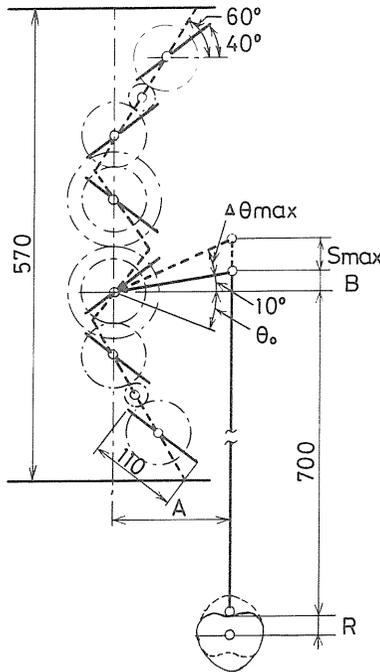


Fig. 8 Valve mechanism at the model wind tunnel.

うに配置した。

3.5 模型風洞の静特性，模型風洞の送風機の回転数

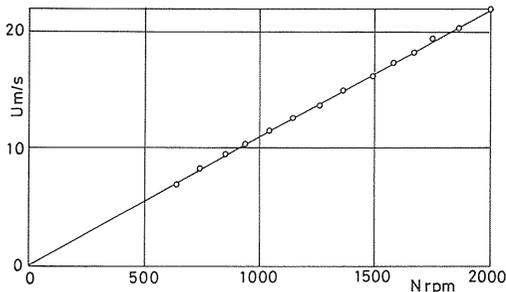


Fig. 9 Relation between the mean velocity and the number of revolution of the fan at the model wind tunnel.

と流速の関係を Fig. 9 に示す。同図から明らかなように両者の関係は直線的である。Fig. 10 に弁全開時にお

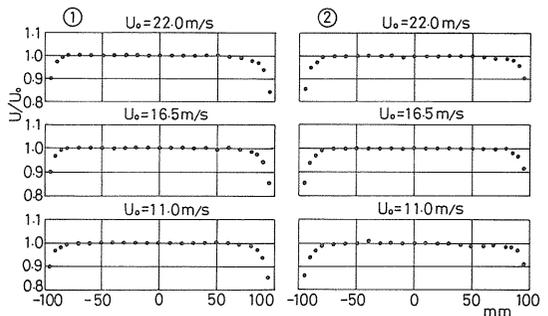


Fig. 10 Velocity distribution in the nozzle.

ける吹き出し口の流速分布を示す。①は水平方向, ②は垂直方向の流速分布を示し, それぞれ軸中心を通る断面内のものである。横軸は断面内の位置を, 縦軸はそれぞれの位置の流速  $U$  と最大流速  $U_0$  との比を表わしている。同図からわかるように吹き出し口の周辺より 20mm の範囲を除いて, ほぼ様な流速分布を示している。また Fig.11 に脈動流発生装置の静特性を示す。この特性は大型風洞の脈動流発生装置の静特性と相似なものとなっている。この場合も弁の全開時の流速の大小による影響はほとんど表われていない。Fig. 11 の静特性曲線を  $\Delta$  法を用いて指数関数で近似してみると次式が得られる。

$$\frac{U}{U_0} = -8.59 \times 10^{-6} \times e^{0.1853\theta} + 1.0 \dots\dots\dots(1)$$

ここで  $\theta$  は弁全開位置よりの動き角を表わす。また図中の曲線は式(1)を図示したものである。

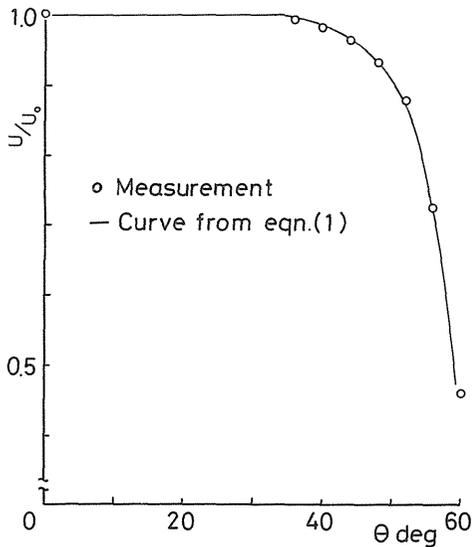


Fig.11 Velocity change versus angle of valves at the model wind tunnel.

4. 脈動流発生

4.1 脈動流発生実験方法, 前述したように弁駆動にはカム機構を取り入れ, 弁抵抗の加わる弁角度 40度から 60 度の範囲を変化させることにした。数種類の形状のカムを作り, それぞれのカムについての脈動流を熱線流速計と電磁オシロを用いて測定し, より正弦波に近い脈動流を得ようカムを修正した。同時に脈動周波数による違いなどについても検討した。Fig.12 にカムに使用し

た記号を示す。Rは基礎円半径, Sはリフト, Smaxは最大リフト,  $\theta$ はカム角度である。

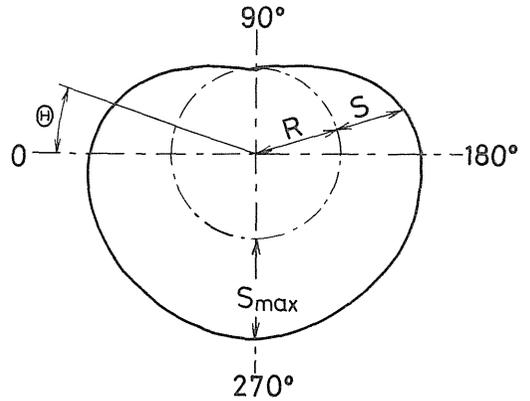


Fig.12 Shape of the cam plate.

4.2 脈動流発生実験結果

1) Aカム ( R = 55mm , Smax = 120mm )

Aカムの形状は, 弁閉鎖の付近において除々に, 弁開放付近において急速に制御弁を作動させるようにしたもので, 試験的に作ったものである。Fig.13はその脈動流波形の一例を示す。同図は脈動周波数 0.5 Hz で弁全開時における平均流速が 11.0, 16.5, 22.0m/s のものである。この図からカム角度 180 度の位置において制御弁の抵抗が不足していることが見られる。

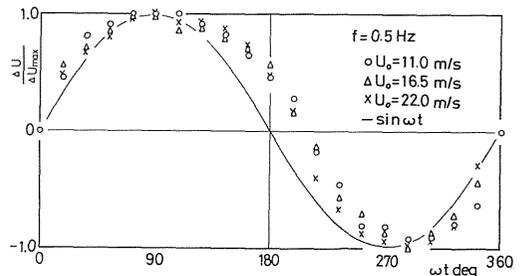


Fig.13 Periodic velocity change by the cam plate A.

2) Cカム ( R = 55mm , Smax = 120mm )

Cカムは制御弁の静特性から形状を求めたものである。つまり一定周波数で変動する正弦波曲線に沿って変化する  $\Delta U/\Delta U_{max}$  に対応する制御弁の弁角度

を静特性曲線より求めて、時間的にそのような弁角度で変化させる形状のカムを作った。Fig. 14 にその脈動流波形の一例を示す。この図よりAカムとは逆に、制御弁の抵抗は過大となったことが見られる。

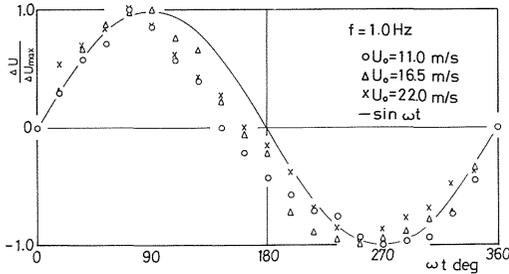


Fig.14 Periodic velocity change by the cam plate C.

3) Dカム (R = 55mm, Smax = 120mm)

Dカムは制御弁の静特性から形状を求めたCカムの形状を修正したものである。修正量はAカムとCカムの中間の値とした。Fig. 15 にその脈動流波形の一例を示す。この段階で流速変動はA, Cカムの場合に比べて正弦波状に近づいた。

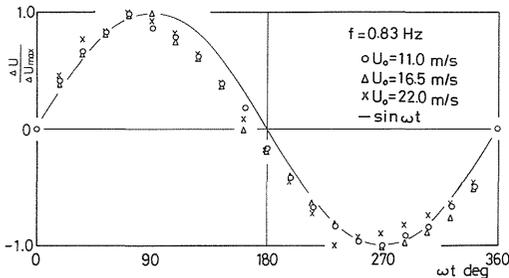


Fig.15 Periodic velocity change by the cam plate D.

4) E, F, Gカム

次にカムを回転させるトルクの不足によって生ずる回転ムラをなくすため、カムの基礎円半径を40mm, 最大リフトを60mmに縮小したEカム, およびリンク接点の遊びを少なくしたFカムを経て最終的にもっとも良いと思われるGカムを得た。Fig. 16 にEカムの脈動流波形, Fig. 17 にFカムの脈動流波形の一例を示す。Gカムは基礎円半径40mm, 最大リフト50mmで, その脈動流波形をFig. 18 ~ Fig. 23 に示す。これらの図から脈動の周波数が0.5 ~ 1.4 Hz の間に

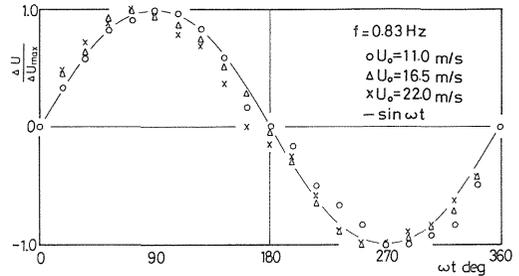


Fig.16 Periodic velocity change by the cam plate E.

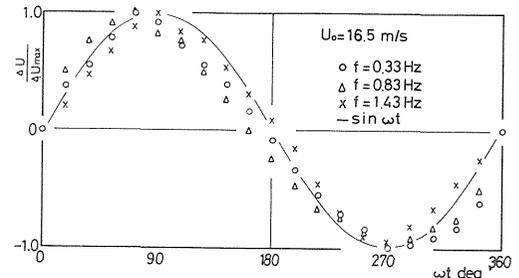


Fig.17 Periodic velocity change by the cam plate F.

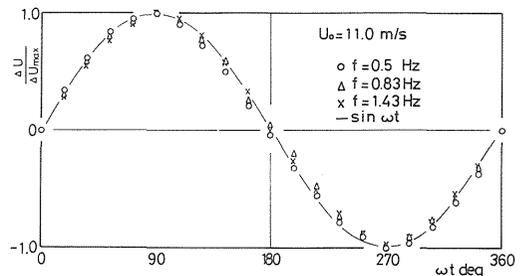


Fig.18 Periodic velocity change by the cam plate G at  $U_0 = 11.0\text{m/s}$ .

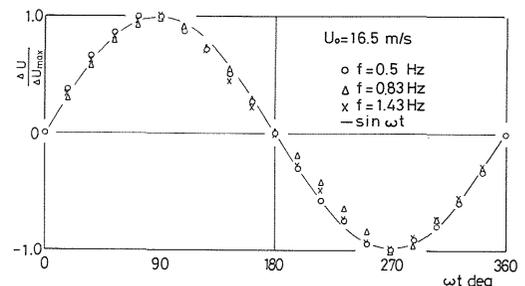


Fig.19 Periodic velocity change by the cam plate G at  $U_0 = 16.5\text{m/s}$ .

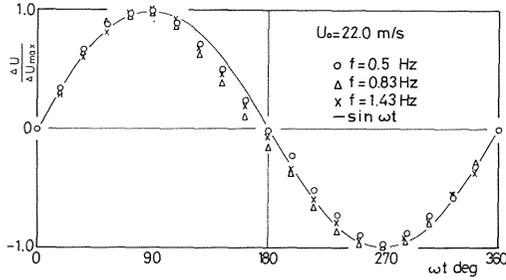


Fig. 20 Periodic velocity change by the cam plate G at  $U_0 = 22.0 \text{ m/s}$ .

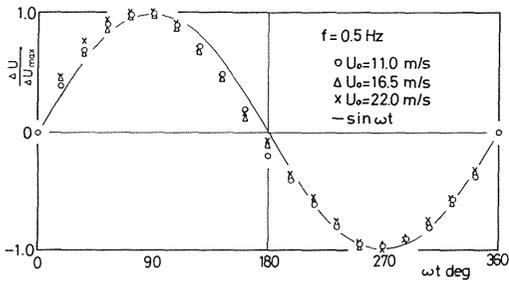


Fig. 21 Periodic velocity change by the cam plate G at  $f = 0.5 \text{ Hz}$ .

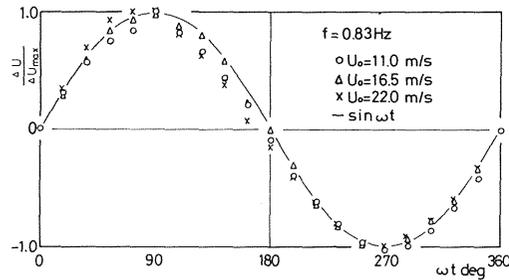


Fig. 22 Periodic velocity change by the cam plate G at  $f = 0.83 \text{ Hz}$ .

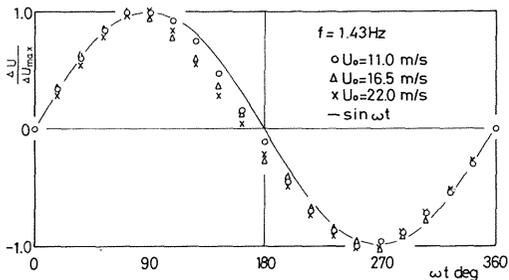


Fig. 23 Periodic velocity change by the cam plate G at  $f = 1.43 \text{ Hz}$ .

化してもその影響は小さく、脈動の最大流速を 11 ~ 22 m/s の間に変化してもその影響の小さいことが見られる。さらに G カムを使用した場合、吹き出し口の位置の違いによる脈動流波形を調べたものが Fig. 24, Fig. 25 である。測定位置は吹き出し口の垂直軸の中心で、中心を (0, 0), 中心より上下にそれぞれ 50mm 離れた位置を (0, 5), (0, -5) と表わし、3ヶ所で測定を行なった。これによると測定位置による影響は小さい。なお G カムから逆に制御弁の動特性による流速を弁角度  $\theta$  との関係の近似式として求め、実験と対比したものが Fig. 26 である。次式はこの関係を

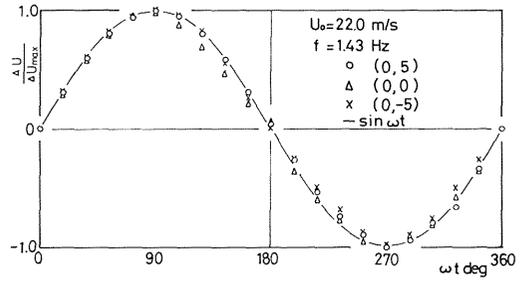


Fig. 24 Periodic velocity change at some location by the cam plate G,  $U_0 = 22.0 \text{ m/s}$ ,  $f = 1.43 \text{ Hz}$ .

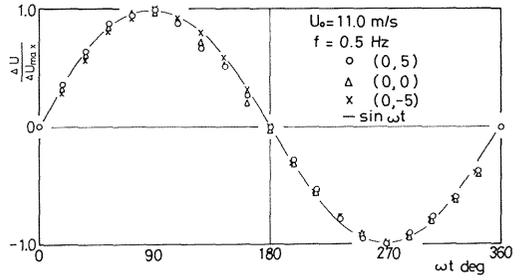


Fig. 25 Periodic velocity change at some location by the cam plate G,  $U_0 = 11.0 \text{ m/s}$ ,  $f = 0.5 \text{ Hz}$ .

示す近似式である。図中の曲線は次式を図示したものである。

$$\frac{U}{U_0} = -1.466 \times 10^{-4} \times e^{0.1374\theta} + 1.0 \dots\dots(2)$$

また変動流速とカム角度  $\theta$  の関係は、

$$\frac{\Delta U}{\Delta U_{\text{max}}} = \sin \theta \dots\dots\dots(3)$$

で表わされる。ここに  $\theta = \omega t$  である。

式(2)と式(3)より弁角度  $\theta$  とカム角度  $\theta$  の関係は

$$\theta = \frac{1}{0.1374} \ln \left\{ \frac{(U_{max} - U_{min})(\sin \theta - 1)}{-2.932 \times 10^{-4} \times U_{max}} \right\} \dots(4)$$

と求められる。ただし  $\sin \theta = 1$  のとき  $\theta = \theta_{min}$  とする。

また制御弁とリンク機構の関係より、リフト  $S$  は次式のように求められる。

$$S = A \tan(\theta - \theta_0) - B \dots(5)$$

ここで、 $A = 110\text{mm}$ 、 $B = 19.4\text{mm}$ 、 $\theta_0 = 27.8^\circ$  である。なお  $A$ 、 $B$ 、 $\theta_0$  は Fig. 8 に示す寸法である。Fig. 27 に G カムにおけるカムの形状を与えるカム線図を示す。①はカム角度とリフトの関係、②はカム角度と弁角度の関係を示す。ここで  $\Delta \theta_{max} = 22.2^\circ$ 、 $\Delta \theta$  は任意の弁角度から  $37.8^\circ$  を引いたものを表わし、 $0 < \Delta \theta < 22.2^\circ$  である。また本実験に使用したカムによる  $\Delta U_{max}$  と  $U_0$  の比は、 $\Delta U_{max}/U_0 = 0.21 \sim 0.38$  であった。

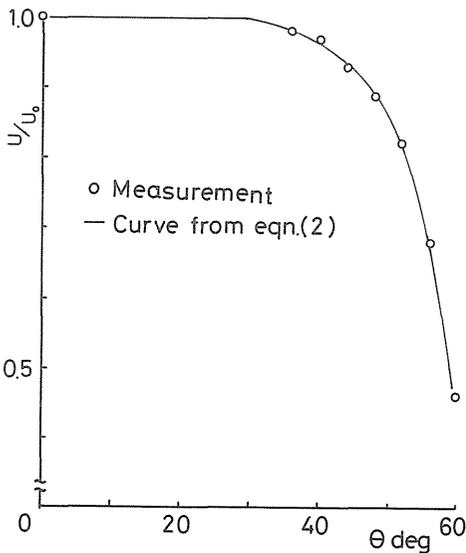


Fig.26 Velocity change versus angle of the valves at the model wind tunnel by the cam G.

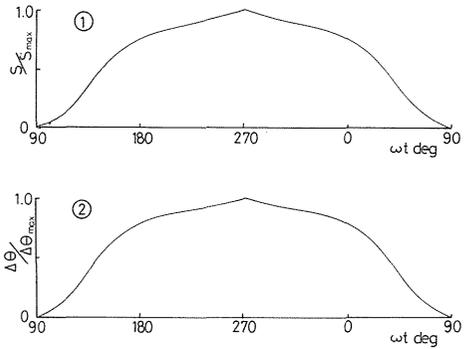


Fig.27 Stroke versus angle of the cam by the obtained suitable cam.

### 5. むすび

以上、模型風胴による脈動流発生装置を使って、ほぼ正弦波状の脈動流が得られた。

また弁全開時の平均流速  $U_0$  の下に正弦波状に変動する脈動流を得るには本研究に用いた機構を用い、カムの形状を式(3)、(4)、(5)によるリフト  $S$  となるよう製作すればよい。

なお本研究の範囲は模型風胴において平均流速  $11 \sim 22\text{m/s}$ 、脈動の周波数は  $0.3 \sim 1.4\text{Hz}$  であった。相似関係についてはまえがきでふれた所であるが、なお研究すべき点を残している。

終りに臨み 本研究を進めるに当って実験に当られた当時の卒業研究の学生、阿部克三君に御礼申し上げる。

### 参考文献

- 1) Pope. A : Wind - Tunnel Testing. 2nd. ed. (1958). 6
- 2) 村田他訳 : ポフ機械工学における空気力学実験法 (1969). 29
- 3) 堀 : 航空学会誌. 11 巻. 115 号 (1963). 229
- 4) 岩崎, 村岡 : 都立航空工業短期大学研究紀要. 第 5 集. 29
- 5) 遠藤, 航空学会誌. 14 巻. 150 号 (1966). 207
- 6) 窪田 : 日本機械学会誌. 70 巻. 582 号 (1967). 105
- 7) 工学部風胴設置委員会 : 茨城大学工学部研究集報. 第 20 巻. (1972). 257