

振動物体のロックイン現象における位相変動の過渡特性*

羽二生 博之*¹, 金 相 一*², 宮越 勝美*¹
高井 和紀*¹, Mohammad Rofiqul ISLAM*³Transitional Characteristics of Phase Shift in
Lock-In Phenomena of a Oscillating CylinderHiroyuki HANIU*⁴, Sangil KIM, Katsumi MIYAKOSHI,
Kazunori TAKAI and Mohammad Rofiqul ISLAM*⁴ Department Mechanical Engineering, Kitami Institute of Technology,
165 Koen-cho, Kitami-shi, Hokkaido, 090-8507 Japan

In this study, characteristics of phase lag between displacement of forcibly oscillating test body and velocity fluctuation caused by vortex formation behind the test body were investigated. A right isosceles triangular cross-sectioned prism was used as the test body. The base of the isosceles triangle is 100 mm and span-wise length of the prism is 300 mm. The test body was rotationally oscillated at seven different frequencies from 0.205 Hz to 0.235 Hz in 0.005 Hz interval providing the natural vortex shedding frequency is 0.220 Hz. As the result, the behavior of the phase lag is summarized as followings. i) In general sense, it is well known that the phase lag is shifted by π within the lock-in region. Besides that, intermittent phase slip was observed. ii) The velocity fluctuation does not synchronize perfectly with the forced oscillation even when the frequency of the forced oscillation is set to natural vortex shedding frequency of the test body. iii) For the case of forced oscillation frequency is set to the natural vortex shedding frequency, synchronization rate of the velocity fluctuation with the oscillation was found to be at most 80%.

Key Words: Oscillation, Phase Lag, Synchronization, Lock-In, Phase Slip, Triangular Prism, Vortex

1. まえがき

流れの中に置かれた鈍い物体背後に生成されるカルマン渦列に起因する流体力の変動により、吊り橋などが揺れるように物体が振動することがある。またこの流体力の変動周波数と物体の固有振動数が同期した場合、共振を起こして物体の破壊につながる可能性もある。このような背景から、物体後流に発生するカルマン渦列に関する研究は工学的に非常に重要であり、いろいろな分野において数多く報告がなされている。羽二生ら^{(1)~(3)}、Ongorenら^{(4)~(5)}、Kimら⁽⁶⁾、Griffinら⁽⁷⁾、Williamsonら⁽⁸⁾、Guら⁽⁹⁾、藤沢ら⁽¹⁰⁾は静止および渦励振時の円柱の後流渦の特性を調べたり制御を試みた研究の例として挙げる事ができる。中でも、2次元物体に平均自然渦放出周波数付近の周波数で微小な

並進振動や回転振動を与えて物体からの渦放出周波数をその振動周波数に同期させるロックイン現象を扱った研究は非常に多くなされている。

羽二生ら⁽¹⁾の報告によると、ロックイン領域内である範囲を超えた回転振動振幅を物体に与えると不規則変動が増大するのは、渦放出の位相に間欠的なスイッチングが起きている可能性が高いと考えられている。このような渦放出における位相の不規則変動は、周期的な変動をする流れ場の位相集合平均法などを用いた定量計測において流れ場の規則性を高めて計測精度を高めるためにロックイン現象を応用する上で大きな障害となる。したがってロックイン現象における渦放出位相の不規則変動の機構を解明することは、物体後流における流れ場の非定常構造を調べる上で非常に重要である。渦放出の位相についてはOngorenら⁽⁴⁾によると、主流に対して直角方向に三角柱をその代表寸法の ± 0.065 倍の振幅で並進振動させた場合、強制振動周波数を自然渦放出周波数の約0.9倍から約1.1倍へと変化させる過程で、渦放出の位相がほぼ π 変化することが報告されている。しかしこの位相の変化に

* 原稿受付 2008年5月12日。

¹ 正員、北見工業大学機械工学科(〒090-8507 北見市公園町165)。² 正員、北見工業大学SVBL。³ Mechanical Engineering, Rajshahi University of Engineering and Technology (Rajshahi-6204, Bangladesh)。

E-mail: harry@mail.kitami-it.ac.jp

ついて Ongoren ら⁽⁴⁾ は特に説明しておらず、強制振動周波数を変化させる過程での渦放出の位相はなめらかに変化するとされている。このように自然渦放出周波数に近い振動周波数帯で位相が急激に変化する場合、羽二生ら⁽²⁾ や Ongoren ら⁽⁵⁾ が報告しているように、それぞれの状態に対応した流れパターンの中で間欠的にスイッチングが起こっている可能性が高いと考えられる。しかし最初の Ongoren ら⁽⁴⁾ の振動変位に対する速度変動位相の計測では相互スペクトルの計算手法が用いられており、報告された自然渦放出周波数に対する約0.9倍から約1.1倍にかけての強制振動周波数の位相は時間平均値であるので、スイッチングが発生していたとしても検出はできなかったものと考えられる。また Kim ら⁽⁶⁾ は弾性自由支持円柱の渦励振時(ロックイン時)の状態を強制振動装置で再現し、振動が始まる時の流速から振動が収まる流速までの円柱の振動位相と円柱表面の変動圧力の位相との差は流速の変化によって0から π まで変化することを報告しているが、その位相差変化やスイッチングの具体的な様子は明らかにしていない。渦放出の位相変動特性については、このように Ongoren ら^{(4),(5)}、Kim ら⁽⁶⁾ の報告しかなく、スイッチングを伴う局所時間的な位相の変動特性についてはまだ報告されていないのが現状である。

本研究ではこのような現状に立脚し、流れ場の位相のスイッチングに着目して、ロックイン領域内における渦放出の局所時間的な位相変動特性を解明することを目的とした。本実験では流れの中に供試物体として三角柱を設置し、微少な回転振動を与えてその後流に形成されるはく離せん断層の近傍における流速変動をレーザ流速計(L. D. V.)により計測し、三角柱の回転振動1周期ごとに回転振動位相に対する速度波形の位相差を測定した。また測定した局所時間的な位相差の

挙動を Ongoren ら⁽⁴⁾ と Kim ら⁽⁶⁾ が測定した時間平均的な位相差の変化と比較した。

2. 実験装置および方法

本実験では、幅400mm、深さ890mmの測定断面を有する全長4500mmの還流式開水路を用いた。また供試物体は、物体からのせん断層のはく離ポイントを固定するとともに流れ場の二次元性を強めるために、直角二等辺三角形の断面を有する三角柱を用いた。供試物体は底辺 h が100mm、スパン方向の長さが300mmの亚克力製である。実験時の供試物体は図1(b)のように底辺の面が時間平均的に主流に対して直角になるように設置されている。供試物体は図1(a)のように直径6mmのステンレスパイプを軸としてクランクを介してインダクションモータで回転振動をするようになっている。また図1(a)のように後流における供試物体からのせん断層の速度変動を測定するためにレーザ流速計を用いている。測定点は、図1(b)に示すように供試物体の底辺から底辺長さ h の3倍下流で後流中心軸(x軸)から h の1倍上方の速度変動が十分に強く、y方向への測定点の移動による位相変化が少ない所とした。実験では、振幅角度を $\pm 4^\circ$ にして、物体に規則的な回転振動を与えた。回転振動の周波数は自然渦放出周波数である0.220Hzを中心に0.205Hzから0.235Hzまで0.005Hzの間隔で7通りに変化させ、各振動周波数における供試物体の振動位相と流速変動位相との差を調べた。振動周波数の精度に関しては、後述のフォトマイクロセンサーからの振動位相信号を周期カウンタに入力して変動周期をモニタリングし、振動周波数精度が0.005Hzの10%以内になるように調整した。本実験では、物体の回転振動角度のほか、主流速を11.5cm/s、水温を20°C一定として実験を行った。供試物体の回転振動位相情報はインダクションモータの回転軸に半月板を取り付け、その外周部分に設置したフォトマイクロセンサーの

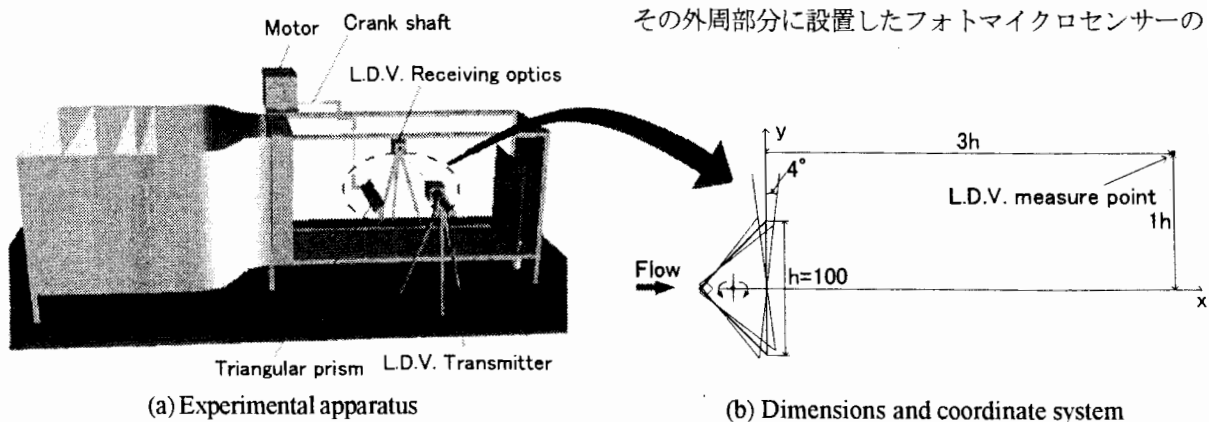


Fig.1 Experimental arrangement and definitions of symbols.

ゲートが回転する半月板によって間欠的に閉じられる ON-OFF 信号から得た。その ON-OFF 波形を基準信号とし、高周波成分を除去するデジタルフィルタリング処理を行った流速波形との位相差をゼロクロス点の時間差から振動 1 周期ごとに求めた。そのような 1 周期ごとの位相差を局所時間位相差と呼ぶことにする。

3. 結果および考察

3・1 位相差の確率密度分布の補正 図 2 は基準信号である供試物体の回転振動変位と下流側に設置されたレーザ流速計による後流渦の速度変動との位相差の確率密度分布図を求める過程を示している。図 2(a) は測定した局所時間位相差の確率密度分布を 0 から 2π まで示している。しかしこの図では位相 2π から 0 において連続的な分布が位相 0 側と 2π 側とに分断されている。そこで本実験では、一周期(位相 0 ~ 2π)の分布図の前後にそれぞれ一周期分の同じ分布図を付け足し(図 2(b)), その確率密度分布の中で位相変動の特性が最も的確に現れている 2π 分のデータの部分のみを取り出した(図 2(c))。本研究では、この過程を経て作成した分布図をそれぞれの測定条件における確率密度分布として考察する。なお一枚の確率密度分布は渦放出約 65 周期分のデータを用いて求められている。

3・2 局所時間位相差の確率密度分布 図 3 は 3・1 節で説明したような過程で得られた、供試物体の強制振動周波数を 0.205Hz から 0.235Hz までの 7 通りに変化させたときの位相差の確率密度分布を示している。特に図中(b)以降では代表的な 2 つの分布を左右に並べて示してある。なお自然渦放出周波数は 0.220Hz である。まず、図 3(a) のように、供試物体の強制振動周波数が 0.205Hz と 0.235Hz の場合における局所時間位相差の確率密度分布を見ると、緩やか

な山のような形であり、確率密度が集中する特定の位相差が存在していないことから、物体の回転振動から得られる基準信号波形と速度波形の間にはほとんど関連性がなく、これら 2 つの波形は同期していないと言える。そのため、この 2 つの強制振動周波数の領域はロックイン領域からはずれていることが分かる。

次に、強制振動周波数が 0.210Hz の場合(図 3(b))における確率密度分布を見ると、図 3(b)(ii) に▽印で示しているように、ロックイン領域外のデータには見られなかった確率密度が集中する特定の位相差が π 付近において生じているのが分かる。よって基準信号波形と速度波形は位相差が π 付近において同期する確率が高いと考えられる。しかしそのピークは線スペクトルのように突出したものではなく、位相差のばらつきを示す広がりを持っている。また図 3(b)(i) に示すようにロックイン領域外のデータと同じように位相差が特定の位相差に集中していない場合もある。したがって強制振動周波数が 0.210Hz では、基準信号波形と速度波形が同期している場合としていない場合が混在している遷移領域であると考えられる。

次に、強制振動周波数が 0.215Hz の場合(図 3(c))における確率密度分布を見ると、図 3(c)(i) に示すように強制振動周波数が 0.210Hz の場合と同様に位相差の確率密度の集中が π 付近に現れる分布が見られる。一方、図 3(c)(ii) では π 付近のほかにも 2π 付近の位相差にも確率密度が集中しており、位相差が π と 2π との間でスイッチングを起こしているものと考えられる。

さらに強制振動周波数が自然渦放出周波数と同じである 0.220Hz の場合(図 3(d))では、位相差が 2π 付近において確率密度が狭い範囲に集中している。これらのことより強制振動周波数が 0.210Hz から 0.215Hz, 0.220Hz と自然渦放出周波数に近づくにしたがって回転振動から得られる基準信号波形と速度波

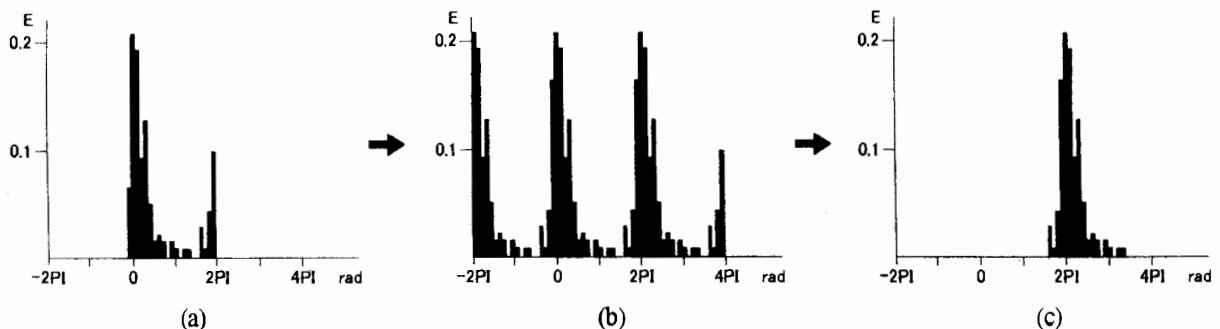


Fig. 2 Processing of probability density distributions of phase lag between forced oscillation and velocity fluctuation ($f_f=0.220\text{Hz}$)

形が同期する確率が高くなっていくと考えられる。しかし、出現頻度は低いが図3(d)(i)に示すように強制振動周波数が0.220Hzの場合においても確率密度が特定の位相に集中しない分布が存在する。このような同じ強制振動周波数においていろいろなパターンの位相差の確率密度分布が現れる現象については3・5節で詳しく述べる。

次に、強制振動周波数が0.225Hzの場合(図3(e))における確率密度分布を見ると、強制振動周波数が0.220Hzの場合と同様に 2π 付近に位相差の確率密度が集中しているが、強制振動周波数が0.220Hzの場合と比較してピーク値が低く、位相の分布も広がりを持っており、基準信号波形と速度波形が同期する確率が少し低くなっていることが分かる。

さらに強制振動周波数が0.230Hz(図3(f))での確率密度分布を見ると、ロックイン領域外のデータと同じような位相差の分布が緩やかな山のようにになっている場合(図3(f)(ii))が多く見られ、完全ロックイン領域から遠ざかるにしたがって基準信号波形と速度波形が同期する確率が低くなっていくことが分かる。

3・3 確率密度分布のモード分類 図4は図3の各強制振動周波数における確率密度分布にピークが現れた位相差をまとめたものである。図4から強制振動周波数が0.205Hzから0.235Hzまで変化する過程で、速度波形の位相差がスイッチングを伴った遷移状態を経て π から 2π へシフトしていることがわかる。また位相差が π から 2π まで変化する過程で現れる確率密度分布を分布形状によって以下のように四つに分類することが出来る。

Mode1: 強制振動周波数が0.205Hzと0.235Hzの場合のように、ロックイン領域外のデータにおける特徴である、明確なピークが現れず基準信号波形と速度波形がほとんど同期していないもの。

Mode2: 強制振動周波数が0.210Hzと0.230Hzの場合のように分布にわずかなピークが見られ、基準信号波形と速度波形が時折り同期していると思われるもの。

Mode3: 強制振動周波数が0.220Hzの場合のように、明確なピークが見られて、基準信号波形と速度波形がほぼ同期していると思われるもの。

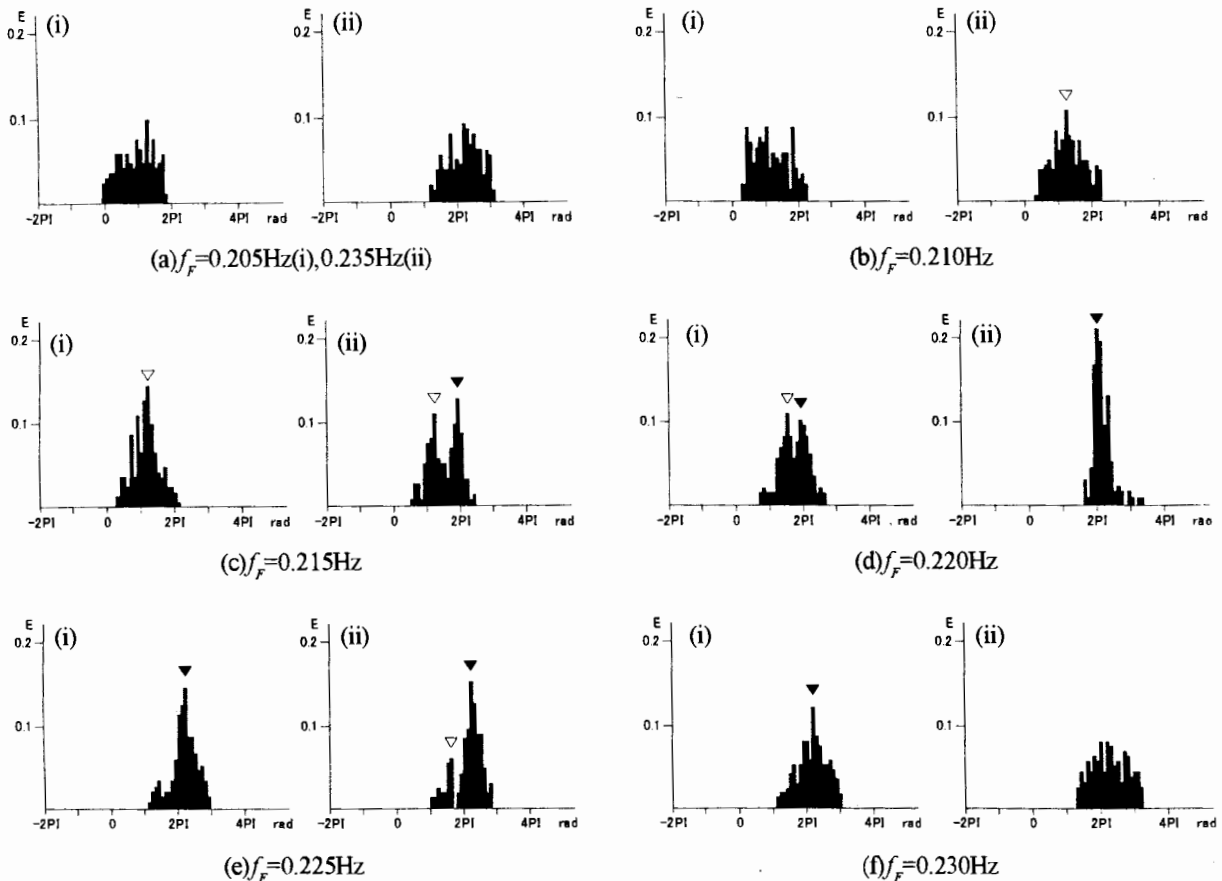


Fig.3 Probability density distributions of phase lag for each forced oscillation frequency

Mode4 : 強制振動周波数が0.215Hz から0.225Hz の場合のように、分布にピークが2カ所現れるもの。

このように分類された各強制振動周波数における確率密度分布のモードの出現割合をまとめたものが図5である。この図のように各モードの出現割合は強制振動周波数の変化につれて徐々に変化しており、ロックイン領域付近では流れ場の状況が徐々に変化していくものと考えられる。またロックイン領域内と考えられる強制振動周波数が0.210Hz から0.230Hz の間でMode2 とMode3 の出現割合が多くなっており、ロックイン領域内では速度波形と基準信号波形の位相が同期する確率が高いことがわかる。完全ロックイン領域と考えられる強制振動周波数0.220Hz から離れるにつれて、Mode3 の出現割合は減少傾向に、Mode2 の出現割合は増加傾向にあるので、基準信号波形と速度信号波形が同期するとされているロックイン領域内でも、位相の同期する確率は強制振動周波数が自然渦放出周波数の時にもっとも高く、そこから離れるにつれて位相が同期する確率が徐々に減少していくことが分か

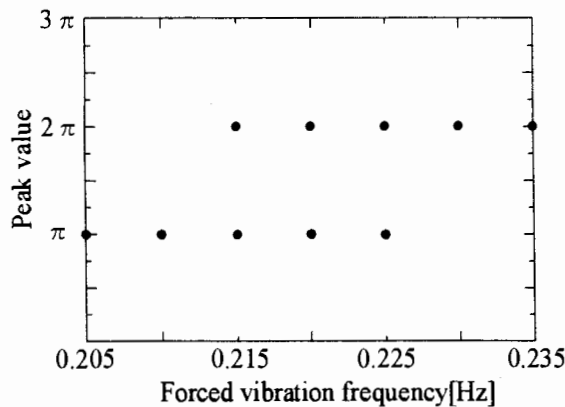


Fig.4 Peak phase in probability density distributions for each forced oscillation frequency

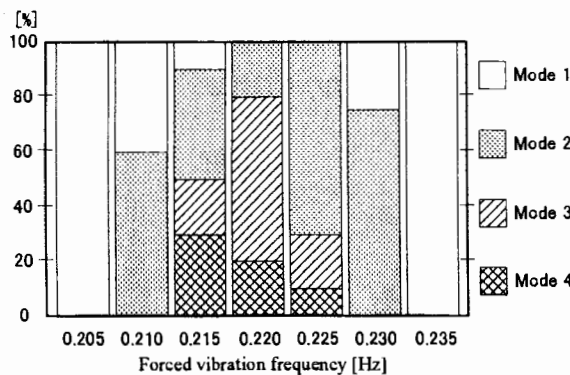
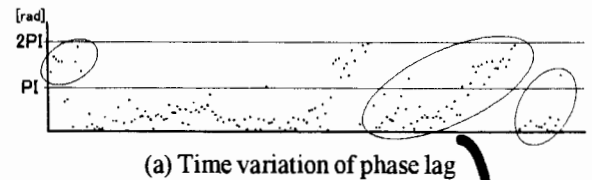


Fig.5 Time share rate of probability density distribution modes for each forced vibration frequency

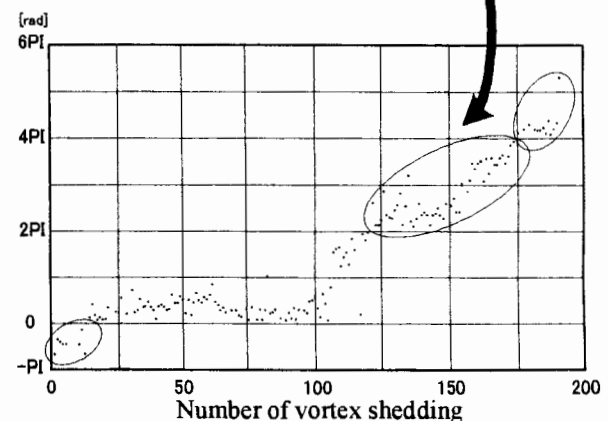
る。またMode4 は強制振動周波数が0.215Hz から0.225Hz の範囲内で見られるが、Mode4 の出現割合は強制振動周波数が0.215Hz の場合が一番高く、 π から 2π への位相のスイッチングはほぼ強制振動周波数が0.215Hz から0.225Hz の範囲内で発生していると考えられる。0.215Hz の強制振動周波数は自然渦放出周波数の約0.977倍、0.225Hz の強制振動周波数は自然渦放出周波数の約1.023倍であり、このことは強制振動周波数を自然渦放出周波数の約0.9倍から約1.1倍へと変化させる過程で、渦放出の位相がほぼ π 移動するとして Ongoren ら⁽⁴⁾ と、円柱の流力振動が発現する流速からそれが収まる流速の間で円柱の振動位相と円柱表面の変動圧力の位相が π だけ移動するとして Kim ら⁽⁶⁾ の報告と整合している。

3・4 時間変化に対する局所時間位相差の補正

図6 は局所時間位相差の時間変化の例として強制振動周波数が $f_f=0.225\text{Hz}$ の場合を示したものである。図6 (a) からは位相差が時間とともに大きくなる傾向(右上がり)が繰り返されているのが分かる。特に図の中心付近から右側にかけて、局所時間位相差の値が 2π 付近に達してから突然0付近へと戻っていることがわかる。しかし実際には位相差は 2π から0へと連続していると考えられる。したがって本研究では、位相差が 2π から0に突然変化した場合はそれ以後の位相差に 2π を加えた。逆に右下がり傾向の時こ-



(a) Time variation of phase lag



(b) Revised phase lag variation

Fig.6 Revision of phase lag variation with time ($f_f=0.225\text{Hz}$)

2πから0に突然変化した場合にはそれ以後の位相差から2πを引いてデータの値を補正した。図6(b)は補正した位相差の時間変化を示したものである。他の測定結果についても同様な補正を行った。

3・5 局所時間位相差の時間変化 図7は各強制振動周波数における局所時間位相差の時間変化を折れ線で示している。図のように時間変化は、平坦な部分と右上がりの部分および右下がりの部分で構成されている。この中で平坦な部分は局所時間位相差の値がほぼ一定であることから、強制振動の駆動機構から得られる基準信号波形と後流の速度波形が同期している状態にあると考えられる。また右上がりの部分と右下がりの部分は、それぞれ局所時間位相差が増加(渦放出の遅れ)および減少(渦放出の先行)している状態である。図7(a)のように強制振動周波数が0.205Hzのロックイン領域から外れている場合は、ほとんど平

坦な部分が存在せず位相差が連続的に同じ方向(右下がり)にずれており、基準信号波形と速度波形は全く同期していない。このような傾向は図の(g)の強制振動周波数が0.235Hzの場合でも同様である(右上がり)。残りの5つの強制振動周波数では、位相差の間欠的な同期を示す平坦な部分が存在するものがあることから、この5つの強制振動周波数の範囲はロックイン領域内であると言える。強制振動周波数 f_f が0.210Hzの場合では図7(b)のように位相差が -3π 付近に、強制振動周波数が0.215Hzの場合では図7(c)のように位相差が $-\pi$ 付近に平坦な部分が生じており、相互相関係数での極大値を用いるなどの単純な位相差解析では、位相差は $-\pi$ (又は π)付近の値となる。ここで図7(c)の平坦部が多い時系列データをより詳しく見ると、渦放出番号が0から30付近までの位相差は約 2π であり、渦放出番号が50付近では約 π となり、その後渦放出番号が80付近からは $-\pi$ となっている。この事は3・2節の図3(c)について述べた位相差の π と 2π との間のスイッチングを裏付けるものである。またこれらの強制振動周波数では位相差が連続的に右下がりに変化し続ける測定結果も発生しており、基準信号波形と速度変動波形が全く同期していない時間帯があることが分かる。この事は変化の傾向が逆の右上がりではあるが、図7(f)の $f_f=0.230$ Hzの場合も同様である。

一方図7(d)の強制振動周波数が自然渦放出周波数と同じ0.220Hzと図の(e)の0.225Hzでは、位相差が変

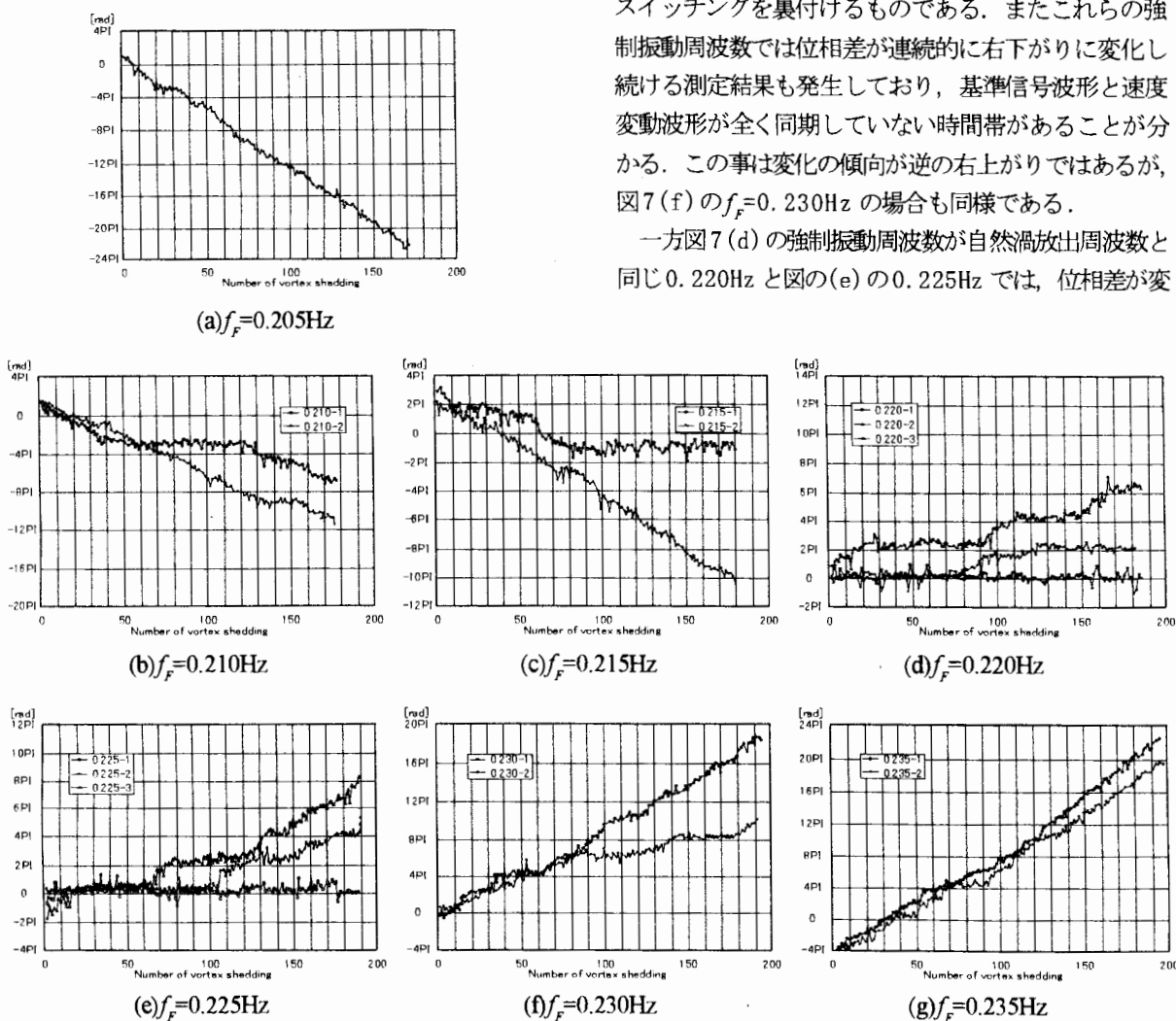


Fig. 7 Phase lag change with time at each forced oscillation frequency of test object

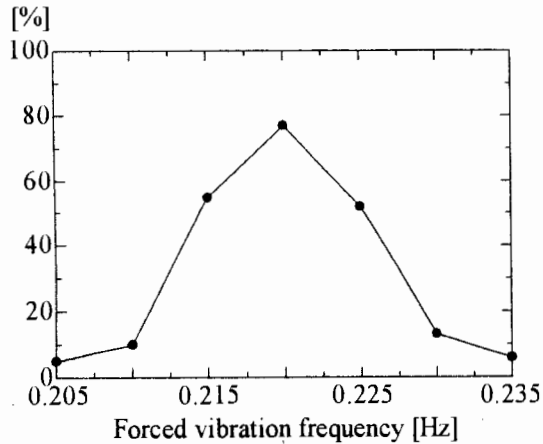


Fig.8 Occurrence rate of phase synchronization between forced oscillation frequency and vortex shedding frequency

化せず一定となる測定結果もあることから、これらの振動周波数ではロックイン領域内でも特に強制振動と渦放出の同期が強いと言える。またこれらの強制振動周波数では、位相差が 0 、 2π 、 4π 付近において平坦部が生じており、単純な位相差解析では、位相差は 0 (又は 2π) 付近の値となる。これらの事から強制振動周波数が 0.215Hz から 0.220Hz へと変化するとき位相差が π シフトすることが分かる。さらに位相差の変化傾向が右下がりから右上がりへと入れ替わるのもこれら2つの強制振動周波数の間である。また、完全ロックイン状態である強制振動周波数が自然渦放出周波数と同じ 0.220Hz では、一般的に強制振動と渦放出が完全に同期するものと考えられているが、図7(d)から明らかのように位相差が間欠的に 2π づつシフトすることが分かる。

3・6 位相同期の出現割合 図8は各強制振動周波数での位相差の時間変化(図7)における平坦部分(位相が同期している時間帯)の出現割合を示している。図より、基準信号波形と速度波形が同期している時間の割合は、強制振動周波数が 0.220Hz の場合において、最大約80%であり、そこを中心として正規分布のような分布をしていることがわかる。これらのごとより、ロックイン領域内では強制振動周波数が自然渦放出周波数に近いほど強制振動と渦放出が同期する確率が高くなるのが改めて分かる。

4. 結論

以上の実験結果から供試物体の振動と後流渦の速度変動の位相差について以下のような結論が得られた。

(1) 強制振動周波数を自然渦放出周波数の約0.9倍

から約1.1倍へ変化させる過程における渦放出の位相の変化は、スイッチングを伴った遷移状態を経るものであり、その変化量は約 π である。

(2) ロックイン領域内においても、強制振動と渦放出は完全には同期しない。

(3) 強制振動と渦放出は完全ロックイン条件に近づくほど強く同期し、同期している時間割合は完全ロックイン条件において最大で約80%である。

(4) ロックイン領域内における位相差の変化傾向は、強制振動周波数が自然渦放出周波数よりも低い時は減少傾向であり、自然渦放出周波数より大きい時には増加傾向に転ずる。

謝 辞

本研究において、実験装置製作などに協力をいただいた北見工業大学技術部小畑芳弘氏に謝意を表す。

文 献

- (1) Haniu, H., Sakamoto, H., Tanaka, D. and Obata, Y., Irregular Characteristics of Vortex Shedding in the Complete Lock-In Region (Fluctuating Characteristics of Vortex Formation Length), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.62, No.595 (1996), pp.833-840.
- (2) Haniu, H., Sakamoto, H., Inooka, Y. and Obata, Y., Relationship Between Oscillating Frequency and Vortex Shedding in Lock-In Phenomenon (In Conjunction with Biharmonic Frequency in Region of Lower Oscillating Frequency), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.61, No.586 (1995), pp.1984-1991.
- (3) Haniu, H., Sakamoto, H., Nakamura, J. and Obata, Y., Long Time Scale Fluctuation in the Irregularity of Vortex Shedding (Spectral Analysis of the Local rms Value and Circulation), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.61, No.582 (1995), pp.379-387.
- (4) Ongoren, A. and Rockwell, D., Flow Structure from an Oscillating Cylinder Part 1. Mechanisms of Phase Shift and Recovery in the Near Wake. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.191 (1988), pp.197-223.
- (5) Ongoren, A. and Rockwell, D., Flow Structure from an Oscillating Cylinder Part 2. Mode Competition in the Near Wake, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.191 (1988), pp.225-245.
- (6) Kim, S. and Sakamoto, H., Characteristics of Fluctuating Lift Forces of a Circular Cylinder during Generation of Vortex Excitation, *Wind and Structures*, Vol.9 (2006), pp.109-124.
- (7) Griffin, O.M. and Ramberg, S.E., The vortex wakes of vibrating cylinders, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 66 (1974), 553-576.
- (8) Williamson, C. H. K. and Roshko, A., Vortex Formation in the Wake of an Oscillating Cylinder,

- Journal of Fluids and Structures*, Vol. 2 (1988), 355-381.
- (9) Gu, W., Chyu, C. and Rockwell, D., Timing of Vortex Formation from an Oscillating Cylinder, *Physics of Fluids*, Vol. 6-11 (1994), 3677-3682.
- (10) Fujisawa, N., Kawaji, Y. and Ikemoto, K., Active Control of Vortex Shedding from Circular Cylinder by Rotary Cylinder Oscillations (Study of Control Mechanisms by Simultaneous Flow Visualization and Cylinder Rotation Measurement), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 62-593 (1996), pp. 109-114.
-