十字交差二円柱から周期的に流出する縦渦による 上流円柱の縦渦励振*

(縦渦励振に及ぼす構造減衰の影響)

熊谷 勇雄^{*1}, 松本 健^{*2}
高橋 勉^{*3}, 白樫 正高^{*3}

Longitudinal Vortex Excitation of Upstream Cylinder by Longitudinal Vortices Shedding Periodically from Crisscrossed Circular Cylinders (Influence of Damping Factor to Exert on Longitudinal Vortex Excitation)

Isao KUMAGAI, Tsuyoshi MATSUMOTO,
Tsutomu TAKAHASHI^{*4} and Masataka SHIRAKASHI

^{**} Department of Mechanical Engineering, Nagaoka University of Technology,
1603-1 Kamitomioka, Nagaoka-shi, Niigata, 940-2188 Japan

The cross-flow oscillation behavior of the upstream cylinder in a criss-cross circular cylinder system was investigated using a wind tunnel. The trailing vortex is formed and shed periodically near the crossing when the gap-to-diameter ratio is 0.00 to 0.25, and the necklace vortex is shed when the gap-to-diameter ratio is 0.25 to 0.50. When the logarithmic damping factor is small, the oscillation amplitude is large over a wide range of the free stream velocity. In this velocity range, the shedding of the longitudinal vortices always synchronizes with the oscillation of the upstream cylinder, showing that the large oscillation is a vortex excitation. Increasing the logarithmic damping factor, the maximum oscillation amplitude becomes smaller and the excitation range becomes narrower. The maximum damping for the occurrence of the necklace vortex excitation is more than 2.5 times larger than that of Karman vortex excitation, while that of the trailing vortex excitation is the half of the Karman vortex excitation. The longitudinal vortex excitation regime is presented by a curve on the Strouhal number-relative frequency deviation plane.

Key Words: Criss-cross Circular Cylinders, Longitudinal Vortex Excitation, Trailing Vortex, Necklace Vortex, Karman Vortex Excitation, Lock-in Phenomenon

1. 緒言

Shirakashi ら⁽¹⁾⁻⁽³⁾や Takahashi ら⁽⁴⁾は、円柱の後流に下流円柱を十字交差配列することによるカルマン渦励振 (Cross-flow) 抑制効果について研究を行い、下流円柱直径が上流円柱直径に等しく二円柱の隙間が円柱直径の半分より小さいとき、カルマン渦励振が抑制されることを見出した。しかし、同じ配置において主流速度を増加させることにより、ある主流速度範囲にわたってカルマン渦励振よりも大きな振動が発生することが確認された。Fox⁽⁵⁾、保坂⁽⁶⁾による流れの可視化や、Shirakashi ら⁽²⁾の研究により、この新しく発見された振動は、図 1 に示すような二円柱交差部近傍から周期的に流出する 2 種類の渦の何れかによるものであることが明らかになった。これらの渦はそれぞれ Trailing vortex (図 1(a)) および Necklace vortex (図 1(b)) と呼

ばれ、どちらの渦も流れに対して平行な回転軸をもつことから縦渦と総称される。また、これらの渦により誘起される振動を縦渦励振と呼ぶ。二円柱直径が等しく、円柱直径に対する二円柱隙間の比率 (二円柱隙間比) が 0.25 以下のとき Trailing vortex が流出し、0.25 から 0.5 のとき Necklace vortex が流出する⁽²⁾。

縦渦励振は Lock-in 現象の発生に伴い誘起される⁽⁷⁾。そこで、著者らは縦渦に関する研究の第一段階として、上流円柱に機械的に振動を与え、主流速度、上流円柱振動数・振幅をパラメータとして縦渦の流出周波数を測定することにより、縦渦の Lock-in 現象発生条件を明らかにした⁽⁸⁾⁽⁹⁾。また、縦渦励振はカルマン渦励振よりも 3 倍以上大きい振動振幅を引き起こす場合がある⁽¹⁾。著者らは縦渦の中でもより大きな振動振幅を誘起する Necklace vortex に注目し、上流円柱の振動振幅より変動揚力係数を算出し、変動揚力係数に及ぼす二円柱直径比および構造減衰の影響を明らかにした⁽¹⁰⁾。

現実の流れ場において、構造物等の柱状物体が単独で存在することはまれであり十字交差の配置が多く見

* 原稿受付 2001 年 12 月 3 日。

^{*1} 正員、長岡技術科学大学大学院 (〒940-2188 長岡市上富岡町 1603-1)。

^{*2} 三菱重工業(株) (〒100-8315 東京都千代田区丸の内 2-5-1)。

^{*3} 正員、長岡技術科学大学。

E-mail: ttaka@nagaokaut.ac.jp

(a) Trailing vortex ($U=0.13\text{m/s}$, $s/d_2=0.08$, $Re=860$) (b) Necklace vortex ($U=0.13\text{m/s}$, $s/d_2=0.28$, $Re=900$)Fig.1 Photographs of longitudinal vortices shedding from two cylinders in cruciform arrangement. (in water tunnel, $d_1=d_2=10\text{mm}$)⁽⁶⁾

られるため、縦渦による構造物の振動破壊は現実的な危険性を秘めていると言える。したがって、工学的見地から縦渦による危険振動発生の予測・回避方法の確立が強く要求される。

そこで本研究では、二円柱直径が等しい十字交差二円柱において発生する縦渦励振の回避方法を確認することを目的とする。上流円柱を弾性支持し下流円柱を固定支持した十字交差二円柱を用いて風洞実験を行い、2種類の縦渦による縦渦励振の特徴および発生条件を明らかにする。また、それらの結果を既知の現象であるカルマン渦励振の場合と比較することにより、縦渦励振の抑制方法を検討する。

2. 記号

- d : 単独円柱直径 [m]
- d_1, d_2 : 上流円柱直径および下流円柱直径 [m]
- f_v : 弾性支持系における縦渦流出周波数 [Hz]
- f_{vk} : 弾性支持系におけるカルマン渦流出周波数 [Hz]
- f_{v0} : 固定系における縦渦流出周波数 [Hz]
- f_{vk0} : 固定系におけるカルマン渦流出周波数 [Hz]
- f_n : 弾性支持系における単独円柱および上流円柱の固有振動数 [Hz]
- f_c : 弾性支持系における上流円柱の振動周波数 [Hz]
- L : 上流円柱の有効長さ [m]

- m : 振動質量 [kg]
- Re : レイノルズ数 ($=d_1 \cdot U/\nu$)
- s : 二円柱隙間 [m]
- Sc : 弾性支持系における上流円柱のスクルートン数 ($=2m\delta/\rho d_1^2 L$)
- St_0 : 固定系におけるストローハル数 ($=f_{v0} \cdot d_1/U$)
- St_2 : 下流円柱直径を代表長さとしたストローハル数 ($=f_{v0} \cdot d_2/U$)
- St_c : 無次元振動数 ($=f_c \cdot d_1/U$)
- $(S_u)_{peak}$: 主流方向 (x 方向) 流れの速度変動信号 $u(t)$ のスペクトルピーク値
- U : 主流速度 [m/s]
- U_0 : 固定系における縦渦流出周波数が上流円柱の固有振動数と等しくなる場合 ($f_{v0}=f_n$) の主流速度 [m/s]
- $u(t)$: 主流方向 (x 方向) 流れの速度変動信号
- Z_{rms} : 上流円柱を弾性支持したときの上流円柱 z 方向変位の rms 値 [m]
- δ : 上流円柱の対数減衰率
- ρ : 空気の密度 [kg/m^3]
- x, y, z : 座標系 (図2 参照)

3. 実験装置および実験方法

図2に風洞実験装置テストセクションの概略、および本実験で用いる座標系を示す。図2に示すように、断面 $320 \times 320\text{mm}$ 、長さ $1,000\text{mm}$ のテストセクションをもつ吹き出し型風洞内に十字交差二円柱を設置した。本風洞の乱れ強さは、主流速度 $U=10\text{m/s}$ において 0.4% 以下である。

上流円柱はテストセクションにおいて z 方向の中心 ($z=0$) に水平に、流れに対して垂直に設置された。上流円柱の有効長さ L は 318mm で、その両端には支持軸が取り付けられ風洞側面に空けられた壁面孔を通じて風洞外部で支持された。壁面孔を通る流れによるテストセクション内部流れへの影響を除去するために、上流円柱両端に $90 \times 60\text{mm}$ 、厚さ 0.5mm のエンドプレートを取り付けた。下流円柱は風洞下部に設置されたトラバース装置に垂直に取り付けられ、 0.01mm の公差で二円柱隙間 s を調整した。

上流円柱を図2に示したように板バネにより弾性支持する場合と、振動しないように固定支持する場合の2種類の条件で実験を行った。それぞれを弾性系および固定系と呼ぶことにする。

円柱直径比 d_2/d_1 は実験において重要なパラメータである。固定系では上流円柱直径 d_1 を 26mm として、下

流円柱直径 d_2 を 18, 22, 26, 30, 32mm の 5 種類用意し, 5 通りの d_2/d_1 について実験を行った. 上流円柱のアスペクト比 L/d_1 は 12 である.

弾性系は図 2 に示すように, 上流円柱を垂直方向 (z 方向) に振動できるように風洞外部に設置された板バネにより弾性支持した. 対数減衰率 δ の影響および縦渦励振の発生条件を明らかにする実験は, 同径の円柱 ($d_1=d_2=26\text{mm}$) からなる十字交差二円柱で行った.

弾性支持されている上流円柱の対数減衰率 δ は, 円柱支持部に取り付けられた渦電流ダンパを用いて 0.008 から 0.2 の範囲で任意に調整できる. 上流円柱の δ と固有振動数 f_n は, 静止流体 (空気) 中において自由振動させたときの変位振幅の減衰より求めた. 本研究における弾性支持実験では, f_n は一定値, 約 15Hz となるように調整した. 上流円柱の z 方向の変位 (振動振幅 A) は円柱両端に設置された非接触のレーザー変位計により測定した. 主流速度 U は, 低流速領域での測定精度が高く測定器特性において時経変化がないリング型カルマン渦流速計⁽¹⁾を用いて測定した.

縦渦の周期的な流出による主流方向流れの速度変動を検出するために熱線流速計を用いた. 熱線流速計の I 型プローブを二円柱交差点近傍に設置することにより, 主流方向流れの速度変動の x 成分 (主流方向成分) を検出した. 渦流出周波数 f_v は主流方向流れの速度変動信号 $u(t)$ を FFT 解析して得られるスペクトル S_u より求めた. I 型プローブ設置位置を変えながら各種条件で S_u を測定した. その結果, 表 1 の位置にプローブを設置

Fig.2 Schematics of experimental apparatus and coordinate system (x, y, z).

Table 1 Velocity measurement position by Hot Wire Anemometer (HWA).

	Probe position		
	x/d_1	y/d_2	z/d_1
Trailing vortex	1.00	-1.25	0.25
Necklace vortex	1.00	-0.75	0.25

した場合がもっとも明確で安定的に各縦渦の発生を測定できることが求まり, 本実験を通して表 1 の位置を測定位置とした.

4. 実験結果および考察

4-1 固定系における縦渦の流出特性 上流円柱を振動しないように支持した固定系において, 渦流出周波数 f_v に及ぼす下流円柱直径 d_2 および s/d_2 の影響を図 3 に示す. Necklace vortex の f_v は, d_2 の増加に伴い直線的に減少する. しかし, s/d_2 の変化による影響はあまりない. 一方, Trailing vortex の f_v は, d_2 が小さいときには s/d_2 の変化により大きくばらつくが, d_2 の増加に伴い一定の値に近づく. しかし, d_2 および s/d_2 の変化に対して一貫した傾向は示さない.

Necklace vortex の流出周波数が下流円柱直径に依存することから, 下流円柱直径 d_2 を代表長さとしたストローハル数 St_2 を式(1)のように定義する.

$$St_2 = f_v \cdot d_2 / U \quad \cdots (1)$$

ここで, f_v は渦流出周波数, d_2 は下流円柱直径, U は主流速度である. 二円柱隙間とストローハル数 St_2 の関

Fig.3 Relationship between vortex shedding frequency and downstream cylinder diameter. (rigidly supported system, $U=8.0\text{m/s}$, $Re \approx 14,000$)

Fig.4 Relationship between St_2 and s/d_2 referred to d_2 . (rigidly supported system, $U=8.0\text{m/s}$, $Re \doteq 14,000$)

係を二円柱直径比 d_2/d_1 に関して整理すると図4のようになる。二円柱直径が等しい十字交差二円柱 ($d_2/d_1=1.0$) において、縦渦の形態は $s/d_2=0.25$ を境に変化する⁽²⁾。図4より、二円柱直径が異なる場合においても縦渦の形態が $s/d_2=0.25$ を境に変化することは明らかである。図4において、 d_2/d_1 が1.0未満の場合 St_2 は s/d_2 の増加とともに Trailing vortex の範囲 ($0 \leq s/d_2 \leq 0.25$) では増加し、Necklace vortex の範囲 ($0.25 \leq s/d_2 \leq 0.5$) に入ると s/d_2 によらず約 0.04 でほぼ一定となる。一方、 d_2/d_1 が1.0以上の場合、Trailing vortex 発生時は 0.08 を中心に不規則に変化し、 d_2/d_1 の変化に対して一貫した傾向が見えにくい。Necklace vortex の範囲では St_2 は s/d_2 の増加により徐々に減少する。しかし、 d_2/d_1 の変化は Necklace vortex に比べて Trailing vortex に対してより顕著に影響を及ぼすことが分かる。特に、Trailing vortex では d_2/d_1 が1.0を超えた場合に St_2 の値が s/d_2 の変化に対して不規則となっており、この範囲では s/d_2 以外の要因が St_2 に影響を及ぼしている可能性がある。繋がった一本の渦である Necklace vortex とは異なり Trailing vortex は2対の渦から構成されるため左右の渦の不均衡や渦発生位置の上流円柱スパン方向への移動など不安定な要素があり、これらが原因のひとつと推察するが、今のところ確認できていない。

主流方向 (x 方向) 流れの速度変動信号のスペクトルピーク値 ($S_u)_{peak}$ は、 $0.00 \leq s/d_2 \leq 0.25$ の範囲 (すなわち、Trailing vortex の流出範囲) においては $s/d_2 \doteq 0.08$ で、 $0.25 \leq s/d_2 \leq 0.50$ の範囲 (すなわち、Necklace vortex の流出範囲) においては $s/d_2 \doteq 0.28$ で最も高い値を示す⁽³⁾。これは $s/d_2=0.08, 0.28$ においてそれぞれの渦が最も周期的に流出することを示す。したがって、4-2 節以降に示す実験では s/d_2 を 0.08 および 0.28 に設定し、各縦渦の特性を調べる。

(a) Karman vortex ($\delta=0.011$, $f_n=17.0\text{Hz}$)

(b) Trailing vortex ($s/d_2=0.08$, $\delta=0.0125$, $f_n=14.5\text{Hz}$)

(c) Necklace vortex ($s/d_2=0.28$, $\delta=0.0106$, $f_n=15.2\text{Hz}$)

Fig.5 f_v (or f_{vk}) and Z_{rms} of elastically supported upstream cylinder (or single cylinder) as a function of U . ($d=d_1=d_2=26\text{mm}$)

4-2 縦渦励振に及ぼす主流速度の影響 カルマン渦, Trailing vortex ($s/d_2=0.08$), および Necklace vortex ($s/d_2=0.28$) のそれぞれにより引き起こされる励振現象を比較する。縦渦励振発生時における、主流速度に対する渦流出周波数 f_{vk} , f_v と上流円柱 (単独円柱) z 方向変位の rms 値 Z_{rms} を図5に示す。 f_{vk} , f_v と Z_{rms} の測定は、主流速度 U を一定に保った状態で行ったのち、 U を少し増加させ同じ測定を繰り返した。図5において、(a), (b), (c) はそれぞれカルマン渦, Trailing vortex, Necklace vortex の結果を示す。また、 $U=0\text{m/s}$ 近傍より描かれた

実線は固定系におけるカルマン渦および縦渦の流出周波数 f_{v0} , f_v , 15~17Hz で水平に描かれた破線は弾性支持された単独円柱もしくは上流円柱の固有振動数 f_n を示す。図 5(b), (c)において, U_0 は f_v が f_n に等しくなる時の主流速度を示す。図 5(c)において, 破線枠で囲まれ “Over range” と示された Z_{rms} は, 上流円柱の変位が変位計の最大測定レンジを超えたときのもので, 実際の Z_{rms} の値は図中の値よりも大きい。しかし, 実験中の観察では図中の値とそれほど大きな差はなかった。

図 5(a)において, U が 2.0 から 2.8m/s の狭い範囲にわたって Lock-in 現象が発生し, カルマン渦励振が誘起されていることがわかる。同様に, 図 5(b), (c)において, 矢印で示された U の範囲にわたって f_v が f_n と等しいことから, 縦渦の流出が上流円柱の振動に同期している, すなわち Lock-in 現象が発生している。また, Z_{rms} が大きくなる U の範囲は Lock-in 現象が発生する U の範囲と一致するため, この大きな振動は縦渦の流出に伴い上流円柱に作用する変動揚力による共振, すなわち縦渦励振であると見なすことができる。

図 5(b), (c)より, Trailing vortex および Necklace vortex による縦渦励振は, 図 5(a)に示した同等の対数減衰率 δ におけるカルマン渦励振に比べ非常に広い U の範囲において発生することがわかる。Necklace vortex による縦渦励振はカルマン渦励振と同様に, U_0 を含む U の範囲で発生し, その範囲は U_0 よりも高流速側に広がる。一方, Trailing vortex による縦渦励振もまた U_0 を含む U の範囲で発生するが, その範囲は U_0 よりも低流速側に広がる。

縦渦励振発生時における Z_{rms} は, カルマン渦励振発生時における Z_{rms} に比べ 3 倍以上大きい。Trailing vortex による縦渦励振の場合, Z_{rms} は U の増加に伴い連続的に増加し U_0 において最大値を示す。また, U_0 からさらに U を増加させると Z_{rms} は急激に減少する。一方, Necklace vortex による縦渦励振の場合, Z_{rms} は縦渦励振が発生する U の範囲全体にわたって大きい。Lock-in 現象の発生に伴い, 振動振幅が大きい強い励振が不連続的に起こることから, Necklace vortex が他の渦に比べて危険な渦であることがわかる。

4.3 縦渦励振に及ぼす構造減衰の影響 種々の対数減衰率 δ において, 既述の手順で U に対する Trailing vortex ($s/d_2=0.08$) および Necklace vortex ($s/d_2=0.28$) の f_v を測定したのち, 逆の手順 (すなわち, U 一定で f_v を測定したのち, U を少し減少させ測定を繰り返す) によって f_v を測定した。 $s/d_2=0.28$ (Necklace vortex),

Fig.6 Hysteresis effect of f_v when changing U . (Necklace vortex : $s/d_2=0.28$, $\delta=0.0106$, $f_n=15.2\text{Hz}$, $d_1=d_2=26\text{mm}$)

(a) Trailing vortex ($s/d_2=0.08$, $f_n \approx 15\text{Hz}$)

(b) Necklace vortex ($s/d_2=0.28$, $f_n \approx 15\text{Hz}$)

Fig.7 Relationship between U and Z_{rms} at various δ . ($d_1=d_2=26\text{mm}$) Broken line : U_0

$\delta=0.0106$ における結果を図 6 に示す。図 6 において, 塗りつぶしの測定点は U を増加させた結果, 中抜きの測定点は U を減少させた結果を示す。図 6 に示されるように, U を増加させた場合と減少させた場合で U における Lock-in 現象発生範囲が異なるヒステリシス現象が確認された。しかし, δ が 0.0226 以上の場合や Trailing vortex の場合にはヒステリシス現象は確認されなかった。

異なる対数減衰率 δ に関して測定した上流円柱の Z_{rms}

を図7に示す。図7において、(a)は Trailing vortex, (b)は Necklace vortex の結果を示す。また、図7(a), (b)に示された破線は U_0 を示す。図7(a), (b)より、Trailing vortex および Necklace vortex とともに、 δ の増加に伴いそれぞれの渦による縦渦励振が発生する U の範囲は狭くなり、 Z_{rms} も小さくなる。また、Necklace vortex の場合では δ をかなり増加させても大きな励振が発生する。これより、Necklace vortex の周期的な流出により上流円柱に作用する変動揚力は、Trailing vortex の場合に比べ大きいことがわかる。

4-4 Lock-in 現象の発生条件 渦励振に伴い上流円柱の振動に対する渦流出の Lock-in 現象が発生する。縦渦における Lock-in 現象は上流円柱が縦渦励振により振動させられている場合だけでなく、上流円柱を機械的に振動させた場合においても発生する⁽⁸⁾⁽⁹⁾。すなわち、縦渦流出の Lock-in 現象は上流円柱の振動が後流に影響を与えることにより誘起される現象であると言える。

4-2, 4-3 節において示した Trailing vortex および Necklace vortex による縦渦励振の実験結果をもとに Lock-in 現象発生条件を求めた。図8(a)に Trailing vortex, 図8(b)に Necklace vortex の Lock-in 現象発生条件をまとめる。図8(a), (b)において、縦軸の Z_{rms}/d_1 は無次元振幅を表す。また、横軸の St_c/St_0 は、 St_c が無次元振動数 ($=f_c \cdot d_1/U$)、 St_0 が固定系におけるストローハル数 ($=f_{v0} \cdot d_1/U$) である。すなわち St_c/St_0 は固定系における渦流出周波数 f_{v0} に対する上流円柱の振動周波数 f_c の比率を表す。図8において、塗りつぶしの記号は Lock-in 現象の発生を示し、中抜きの記号は非発生を示す。塗りつぶしの測定点を囲むように実線で描かれた曲線は、実験結果より推測された Lock-in 現象の発生と非発生の境界線を示す。比較のため、前報において上流円柱を機械的に振動させた実験（加振系）より求めた境界線⁽⁸⁾⁽⁹⁾を破線で示す。また、Koopman⁽¹²⁾により報告されたカルマン渦の Lock-in 現象発生領域を斜線部で示す。

Trailing vortex および Necklace vortex の場合ともに、本実験において弾性系で求められた Lock-in 現象発生領域の境界は、加振系で求められた境界とほぼ一致する。

図8(b)に示すように、 St_c/St_0 における Necklace vortex の Lock-in 現象発生範囲は $St_c/St_0=1$ を含み、 Z_{rms}/d_1 の増加に伴い $St_c/St_0 < 1$ 側に広がる。また、Necklace vortex の Lock-in 現象はカルマン渦の場合とほぼ同じ $St_c/St_0 \sim Z_{rms}/d_1$ の領域で発生する。一方、図8(a)に示されるように、Trailing vortex の Lock-in 現象発生領域は

Fig.8 Comparison of lock-in region between elastically supported system and mechanically oscillated system. ($d_1=d_2=26\text{mm}$)

Solid curve : elastically supported system

Broken curve : mechanically oscillated system

Slash region : lock-in region of Karman vortex

Necklace vortex やカルマン渦の場合に比べ非常に広く、 $St_c/St_0=1 \sim 2$ の広範囲において Lock-in 現象が発生する。

図8(a), (b)に示した St_c/St_0 の範囲において、Lock-in 現象が発生する Z_{rms}/d_1 の最小値、すなわち Z_{rms}/d_1 における Lock-in 現象発生と非発生のしきい値は、弾性系と加振系ともに $St_c/St_0 \approx 1$ において示される。そのしきい値は、Trailing vortex の場合弾性系および加振系ともに約 0.02 であったが、Necklace vortex の場合では加振系において約 0.02 であるのに対して弾性系では約 0.04 であった。これら縦渦の場合のしきい値はカルマン渦の場合のしきい値（約 0.07）に比べかなり小さく、励振現象がより微少な振動をきっかけに引き起こされることを意味する。

4-5 構造減衰の変化に対する縦渦励振の発生条件 渦励振の発生を回避する実際的な方法は、系の固有振

動数 f_n を渦流出周波数 f_{v0} から十分に遠ざけること、および構造減衰を大きくすることである。このため、任意の構造減衰に対する f_{v0} の縦渦励振発生領域を明らかにすることは、縦渦励振の発生を予測するための有効な手段である。表現を一般化させるために、 f_n に対する f_{v0} の相対的偏差（すなわち $(f_{v0}-f_n)/f_n$ ）と式(2)において定義されるスクルートン数 Sc をパラメータとして縦渦励振発生条件を考える。

$$Sc = 2m\delta / \rho d_1^2 L \quad \cdots (2)$$

ここで、 m は振動質量、 ρ は空気の密度、 L は上流円柱の有効長さである。

4-2 節において示した実験結果をもとに求めた $(f_{v0}-f_n)/f_n$ と Sc に関する縦渦励振発生条件を図 9 に示す。図 9(a) は Trailing vortex、図 9(b) は Necklace vortex の縦渦励振発生条件である。図 8(a) および (b) において、塗りつぶしの記号は縦渦励振の発生を示し、中抜きの記号は非発生を示す。実線で示された曲線は、実験結果より推測される縦渦励振の発生と非発生の境界線を示す。また、比較のため、Scruton⁽¹³⁾ により報告された $Sc-(f_{v0}-f_n)/f_n$ におけるカルマン渦励振発生領域を斜線部で示す。カルマン渦が二次元の渦であるのに対し縦渦は三次元の渦であり、式(2)によって定義されるスクルートン数 Sc は二次元流れに基づくものである。したがって、図 9(a)、(b) に示した縦渦の発生領域は本研究における上流円柱のアスペクト比 $L/d_1 \approx 12$ に関して得られたものである。

図 9(a) に示されるように、Trailing vortex による縦渦励振が発生する $(f_{v0}-f_n)/f_n$ の範囲は $(f_{v0}-f_n)/f_n = 0$ を含み、正の値側よりも負の値側に広がる。また、その範囲は Sc の増加に伴い狭くなる。一方、図 9(b) に示されるように、Necklace vortex による縦渦励振が発生する $(f_{v0}-f_n)/f_n$ の最小値は、図の Sc の全範囲にわたって約 -0.1 で一定であった。また、 Sc が小さいとき、 $(f_{v0}-f_n)/f_n$ における発生範囲はカルマン渦励振の場合と同様に負の値側よりも正の値側に広がり、その範囲は Sc の増加に伴い狭くなる。

図 9(a) および (b) より、Necklace vortex による縦渦励振の Sc における発生範囲が、Trailing vortex やカルマン渦の場合に比べ非常に広いことは明らかである。 $Sc > 60$ においてカルマン渦励振が抑制されるのに対して、Trailing vortex による縦渦励振は $Sc > 30$ において抑制される。一方、Necklace vortex による縦渦励振は Sc が本実験で用いた渦電流ダンパによって設定できる最大値 150 まで増大しても確認された。

Fig.9 Occurrence regime of longitudinal vortex excitation. ($d_1=d_2=26\text{mm}$)

Solid curve : longitudinal vortex excitation
 Slash region : Karman vortex excitation

現実の流れ場に配置された構造物、測定器等において、本実験と同様の配置は数多く存在する。渦励振による構造物、測定器等の破壊および機能低下の回避に当たっては、各渦励振の特徴に即した対応が不可欠である。図 8 および図 9 に示した結果より、Trailing vortex による縦渦励振は、カルマン渦励振が抑制される構造減衰よりも小さい構造減衰において抑制されるが、系の固有振動数が渦流出周波数よりも 2 倍以上大きい場合でも発生する。したがって、Trailing vortex による縦渦励振を回避するためには、系の固有振動数を渦流出周波数から遠ざけることよりも構造減衰を十分に大きくすることが重要である。一方、Necklace vortex による縦渦励振は、カルマン渦励振が抑制される構造減衰の約 3 倍の構造減衰においても発生するため、これを回避するには構造減衰を高くすることよりも系の固有振動数を渦流出周波数から十分に遠ざけることが重要である。これらのことから、両渦による縦渦励振を一元的な手法を用いて抑制することは危険なことが明らか

となった。両渦による縦渦励振とともに抑制することが難しい場合にはより危険である Necklace vortex 励振を抑制することを検討すべきであり、系の固有振動数を Necklace vortex 流出周波数から十分に遠ざけることを提案する。

5. 結 論

一様流中に設置された二円柱直径が等しい十字交差二円柱において、二種類の縦渦による上流円柱の縦渦励振の回避方法を明らかにすることを目的として、風洞実験装置を用いて包括的な実験を行った。上流円柱の構造減衰が 2 種類の縦渦による縦渦励振の振動振幅および発生条件に及ぼす影響を調査した。Trailing vortex および Necklace vortex による縦渦励振の発生条件をカルマン渦励振の発生条件と比較することにより、縦渦励振の最適な抑制方法を調査した。本研究において新たに得られた結論を以下に要約する。

- (1) 二円柱直径が異なる場合においても同径の場合のときと同様に二円柱隙間 s が下流円柱直径 d_2 の半分 ($0.5d_2$) 以下のとき、縦渦が流出する。縦渦の形態は $s=0.25d_2$ を境に変化し、 $s \leq 0.25d_2$ の場合 Trailing vortex, $s \geq 0.25d_2$ の場合 Necklace vortex が流出する。Necklace vortex の流出周波数は二円柱隙間に依らず一定で、下流円柱直径に比例して変化する。
- (2) Trailing vortex および Necklace vortex による縦渦励振は、カルマン渦励振に比べ非常に広い主流速度の範囲にわたって発生する。また、縦渦励振の振動振幅はカルマン渦の振動振幅に比べ 3 倍以上大きい。縦渦励振の振動振幅は対数減衰率の増加に伴い小さくなるが、その傾向は Necklace vortex よりも Trailing vortex の方が強い。
- (3) Necklace vortex の Lock-in 現象は $St_c/St_0=1$ を含む St_c/St_0 の狭い範囲において発生する。その範囲はカルマン渦の Lock-in 現象発生範囲とほぼ一致し、無次元振幅 Z_{rms}/d_1 の増加に伴い $St_c/St_0 < 1$ 側に広がる。一方、Trailing vortex の Lock-in 現象は $St_c/St_0=1 \sim 2$ の広範囲において発生する。縦渦による Lock-in 現象が発生する最小の Z_{rms}/d_1 は、カルマン渦の場合に比べ小さい。
- (4) $(f_v/f_n)/f_n$ における縦渦励振発生領域は、Trailing vortex, Necklace vortex とともに Sc の増加に伴い狭くなる。しかし、Necklace vortex による縦渦励振は、カルマン渦励振が発生する Sc の上限値の約 2.5 倍である 150 まで増加しても発生する。一方、Trailing vortex の縦渦励振は $Sc > 30$ において抑制される。
- (5) Trailing vortex と Necklace vortex による縦渦励振は抑制するための効果的な手法が異なるため両縦渦励振とともに抑制することは容易ではない。この場合、励振振幅が大きく危険度の高い Necklace vortex による渦励振を抑制することを検討すべきであり、系の固有振動数を Necklace vortex 流出周波数から十分に遠ざけることを提案する。

文 献

- (1) Shirakashi, M., Mizuguchi, K. and Bae, H.M., J. Fluids and Struct., 3 (1989), 595-607.
- (2) Shirakashi, M., Bae, H.M., Sano, M. and Takahashi, T., J. Fluids and Struct., 8 (1994), 239-256.
- (3) Shirakashi, M., Sano, M. and Higashi, K., ASME Sep. and Com. Flows, 217 (1995), 137-142.
- (4) Takahashi, T., Baranyi, L. and Shirakashi, M., Journal of the Visualization Society of Japan, 19-75 (1999), 328-336.
- (5) Fox, T.A., The Univ. of Q. Dep. of Civil Eng. Research Report, CE126, (1990).
- (6) 保坂藤・中原敦・高橋勉・バラニイ ラースロー・白樫正高, 可視化情報学会講演論文集, 16-2 (1996), 159-162.
- (7) 斐憲民・高橋勉・白樫正高, 日本機械学会論文集, 58-549, B 編 (1992), 1572-1579.
- (8) 熊谷勇雄・高橋勉・白樫正高, 日本機械学会講演論文集, 99-1, (1999), 471-472.
- (9) 熊谷勇雄・高橋勉・白樫正高, 日本機械学会論文集, 68-669, B 編 (2002), 1415-1422.
- (10) Kumagai, I., Tsuyoshi, M., Tsutomu, T., Shirakashi, M., JSME Int. J., 44-4, Series B (2001), 756-763.
- (11) Shirakashi, M., FED-Vol. 220, ASME (1995), 13-17.
- (12) Koopman, G.H., J. of Fluid Mech., 28 (1967), 501-518.
- (13) Scruton, C., Proc. Int. Conf. Wind Effects on Build. & Struct. (Teddington), Her Majesty's Stationary Office, paper 16 (1963), 798-836.