

風により運動する二つの角柱の相互干渉

石 崎 潑 雄・許 昌 九

MUTUAL INTERFERENCE OF THE OSCILLATING TWO CYLINDERS IN WIND

by Dr. Eng Hatsuo ISHIZAKI and Changgoo HUH

Synopsis

The effects of mutual interference of two square cylinders in wind tunnel are described. The tests are made by putting a square cylinder near another oscillating cylinder in wind. The results are listed in figures, showing that the instable oscillation of the square cylinder decays distinctly or completely when the other square cylinder is placed within 4 times of the breadth of the cylinder section.

1. ま え が き

風にさらされている角柱が振動し、空力的不安定の現象を起すことはよく知られており、G. V. Parkinson¹⁾, C. Scruton²⁾ らの研究がある。筆者らもそれについて実験を行ない、結果³⁾を既に報告した。この角柱を実際の風により振動しやすい地上の構造物と想定するならば、角柱は単独に存在するのでなく複数のものが隣接している場合もあると考えられる。そのような場合の空力的挙動を知ることも重要であろう。筆者らは隣接する複数の角柱の配置で最も単純な場合として二つの角柱が風向に対して直列と並列に位置しているとき、角柱間の間隔を変化させて、その相互干渉による影響が角柱の振動に与える効果と挙動を風洞実験により調べてみた。また、この角柱の運動は角柱まわりの空気の流れとも密接な関連があるので、その流線についても観察を行なった。

この二つの角柱の相互干渉の影響を明らかにするには、まず単独角柱についての知識がその手懸りになることから、単独角柱の不安定振動について既に報告している筆者らの実験結果から、その模様を述べて、二角柱の相互干渉について考察を進めることにする。単独角柱が起す不安定振動は主に揚力による交番力が外力として作用することによるといわれており、この問題を論ずるにはこの揚力の消長過程を明らかにすることが重要である。

これについて G. V. Parkinson は、不安定振動を起す単独角柱に作用する外力を、静止している角柱周り

の圧力分布から求める近似的な方法を提案している。これによると Fig. 1 のように角柱の運動速度と一般流の速度をベクトル的に加えて相対的な風向を考えることにより、運動している角柱を静止状態時、迎角 α をもつ風を受けた場合のように想定すると、その結果角柱の振幅の変化が迎角 α の変化に相当することから、当然揚力も変化を受けることになる。この仮定で、種々の迎角の場合の静止角柱の圧力分布を求め、それにより運動している角柱に作用する揚力の変化を計算し

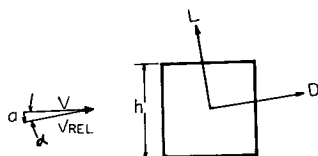


Fig. 1 Cylinder section and flow geometry.

ている。なお、このとき流れは一様であり、二次元的であると考える。

また C. Scruton は実験により風速と振巾の関係を求め、その結果から運動系の減衰率、角柱の大きさ、質量等に対して不安定となる風速の領域を求めている。この両者のいずれの研究にも、運動している角柱まわりの圧力変化、特に揚力の変化についての説明および仮定があまり明確でないと考えられる。既に筆者らは、これらの研究のように間接的に揚力の変化を推定する方法ではなく、直接、運動している角柱まわりの圧力変動を測定し、不安定振動と圧力変動の関係を調べている。その前回の実験で得られた結果を簡単に次に述べてみる。

i) 角柱に作用する揚力がまったく規則的に変動するのは、角柱の運動系固有のある限られた風速時で角柱の運動が定常的で、かつある大きさ以上の変位を示すときのみである。なお、そのときの揚力変動の周期は角柱の運動系の固有周期と全く同一である。Photo. 1 にその記録の一部を示す。

ii) 角柱の運動変位がある一定値より小さいときは、定常運動をしている場合でも、Photo. 2 に示すよう

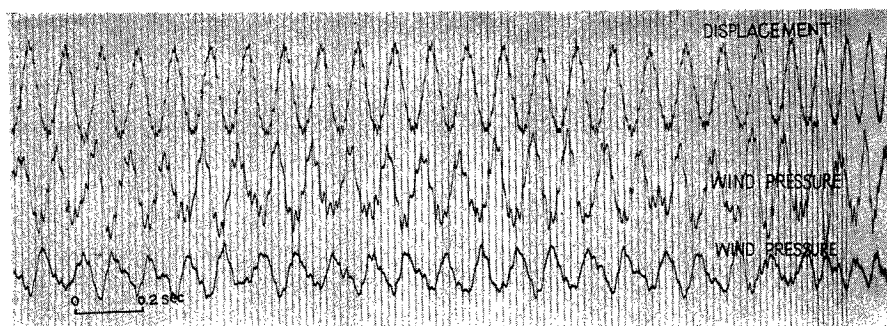


Photo. 1 Record of fluctuating wind pressure on an oscillating cylinder.

にその揚力変動は静止角柱の場合の揚力変動と同様に規則的でない。しかし運動変位がある大きさに近づくにつれて揚力変動は運動系の固有周期に近い周期的変動を含む割合が多くなる。

iii) 角柱の大小、角柱の運動系の固有振動数の相異があっても、筆者らの実験の範囲では角柱の寸法、運動系の固有振動数、風速の関係から求める常数 S が常に一定な風速で不安定現象が生じる。このとき S は次の関係式から定まる。

$$S = ND/v$$

v : 風速, N : 振動系の固有振動数 (渦の発生振動数)

D : 角柱の一辺の長さ

通常この常数 S をストローハル数と呼んでいる。筆者らの実験においては $S=0.08$ 位の値を示した。

このようにある一定の風速のところで不安定振動が生じるのは揚力を規則的に変動せしめる渦の生成、剥離が規則的であることを意味する。この渦の生成剥離を直接視測することは容易でないため、筆者らは静止角柱まわりの流線の形と、運動している角柱表面の風向直角方向の圧力変動から、角柱表面の渦の生成、剥

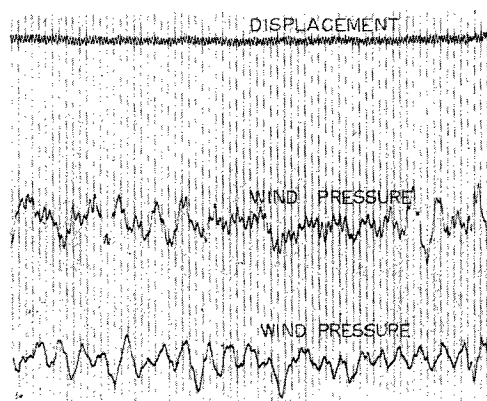


Photo. 2 Record of fluctuating wind pressure under small oscillating cylinder.

離のときの流線の状態を想定し考察を加えてみる。角柱が静止しているときは渦の発生が完全に規則的でないため揚力の交番が規則的でなく従って角柱の運動系に共振強制力を与えない。しかしある風速のところでは角柱の運動系が、カルマン渦により、僅かな変位を与えられるとその変位が規則的な渦の発生を容易にする自励作用をなして遂には不安定振動を起す。従って、そのとき角柱まわりに発生する渦が規則的となりやすいような空気の流れの状態が形成されているとも想像される。これらのことから筆者らは定常な流れから、上のような規則的な渦が生じる条件を見出す方法として、逆に角柱から規則的な渦を生じさせていると考えられる空気流れの中にもう一つの角柱をさらして、空気流れに干渉を与える実験を試み、二角柱間の相互干渉による角柱まわりの空気流れの模様を観察すると同時に、不安定振動がどのような影響を受けるか、角柱の配置間隔を変化せしめて調べてみた。

2. 実験方法

単独角柱については既報の論文にその実験方法を述べてあるのでここではそれを省略し、二角柱の相互干渉についてのみ記す。

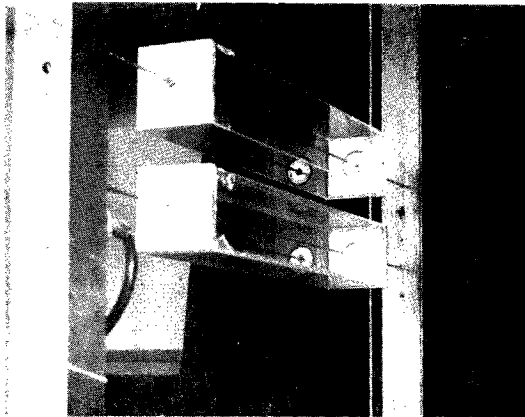


Photo. 3 View of two cylinders setting to frame.

実験はゲッチング型、吹出口径 1.0 m の風洞を用いて行なった。角柱は Photo. 3 に示すように径 5 mm の真鍮棒で支え、その棒を支間長 1.2 m にとって剛な鉄骨フレームに固定せしめた。このとき、角柱の一つは風により運動が生じるように取付られており、もう一つの角柱は風によって運動しないよう固定させた。実験にあたっては最初からこのように二つの角柱を並べて、風を吹かせたのではなく、はじめに運動しうる角柱を取付け、風を吹かせて角柱が定常な振幅最大の振動を持続する共振風速を求め、その風速をセットした状態で、風によって動かないもう一つの角柱を風向方向に直列、または並列に角

柱間隔をいろいろ変化させて取付けて、さきの運動する角柱の振動の振巾を測定した。このとき角柱は運動、固定の双方とも $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ 、 $5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ 断面、長さ 60 cm のものを用いており、この大小の角柱を Fig. 2 に示したような種々の組合せの配置状態にして実験を行なっている。またこれらの実験のとき系により流線の状態の観察も併せて行なった。方法としてはストロボにより光を断続的に与え、写真撮影を行った。実験時の角柱の共振風速は $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ 断面の大模型では 12.5 m/sec でその運動系の固有振動数は 10.5 cps であり、 $5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ 断面の小模型では共振風速 6.9 m/sec 運動系の固有振動数は 12.5 cps である。角柱の材料はアクリライト板を用いており、その厚さは 3 mm であり単位長さ当りの重量は大角柱で 15 gr/cm 、小角柱は 7.5 gr/cm である。

3. 実験結果

Fig. 3 から Fig. 8 にわたって Fig. 2 の組合せによる角柱の種々の配置の場合の振巾と角柱の間隔との関係を示した。Fig. 9 には固定角柱と振動している運動角柱の系による流線の観察結果を示した。また Fig. 10 には固定二角柱間の間隔を変化させたときの風向直角方向の面の一点の風圧係数を示した。圧力の測定はマノメーターによった。

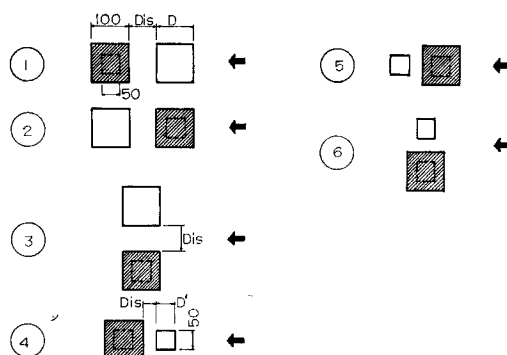


Fig. 2 The arrangements of combined two cylinders.

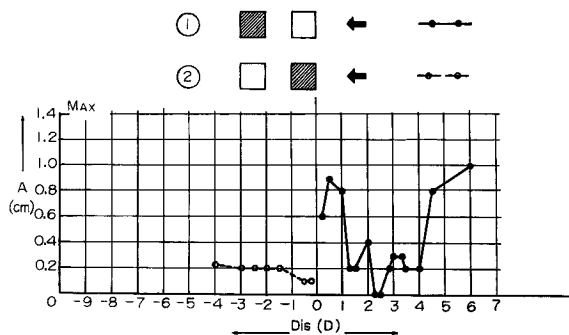


Fig. 3 Displacement of an oscillating cylinder versus the distance between cylinders.

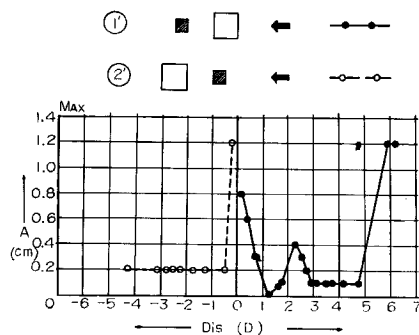


Fig. 4 Displacement of an oscillating cylinder versus the distance between cylinders.

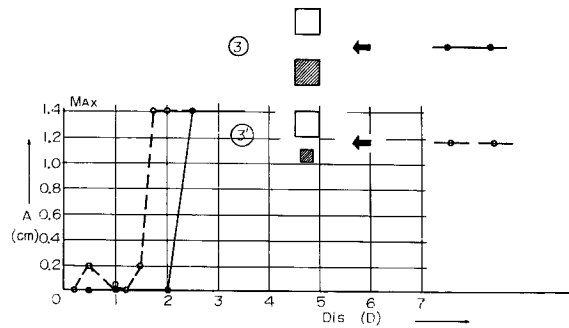


Fig. 5 Displacement of an oscillating cylinder versus distance between cylinders.

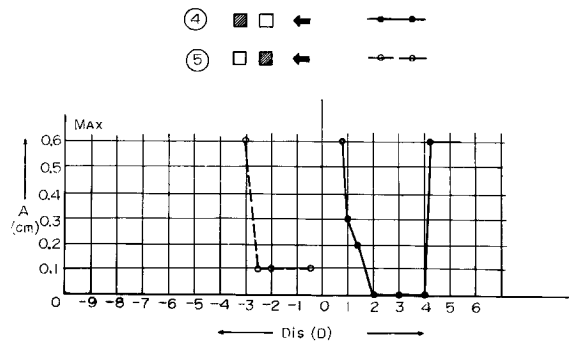


Fig. 6 Displacement of an oscillating cylinder versus distance between cylinders.

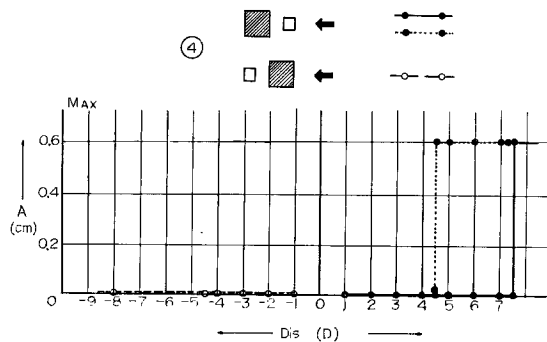


Fig. 7 Displacement of an oscillating cylinder versus distance between cylinders.

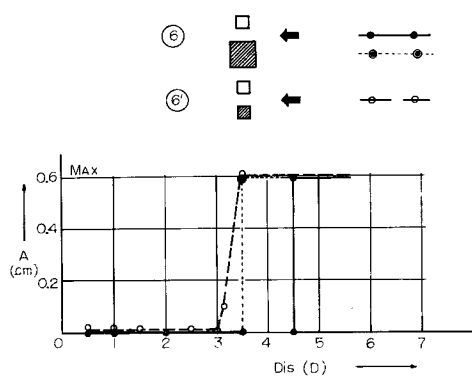


Fig. 8 Displacement of an oscillating cylinder versus distance between cylinders.

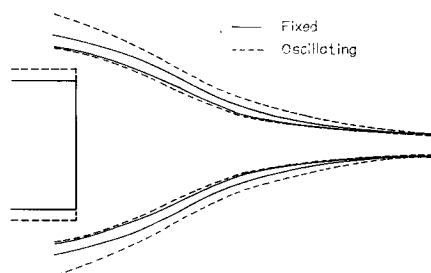


Fig. 9 View of the stream lines around fixed cylinder and oscillating cylinder.

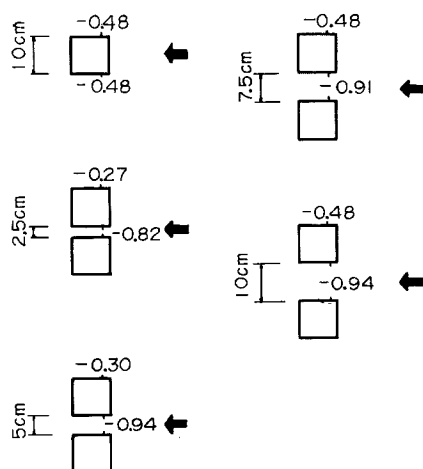


Fig. 10 Wind pressure coefficients of the two parallel cylinders.

4. 実験結果についての考察

以上の実験結果を整理し、それについて若干の考察を加えてみる。

i) 風向方向に直列に二角柱が配置している場合 まず、前方の角柱、後方の角柱の断面寸法が同一のときについて述べる。はじめに前の角柱が運動し、後の角柱が固定されているとき、 $5\text{cm} \times 5\text{cm}$ 断面、 $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ 断面とも角柱間の間隔が $1D$ 以下では運動する角柱の振動の変位は単独角柱のときの振巾最大時の変位とあまり変らないが、 $2D$ では角柱はほとんど静止に近い。しかし $4D$ 以上になるとまた単独角柱の振巾最大時の変位となる。すなわち $2D$ の間隔のときに最も干渉の効果が著しい。次に前の角柱が固定、後の角柱が運動する場合、 $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ 断面では間隔が $4D$ に至ってもその変位は最大振巾の 0.2 位であり、干渉の効果があらわれている。 $5\text{cm} \times 5\text{cm}$ 断面では間隔が $2.5D$ までは $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ 断面の場合と同じく、その変位は最大振巾の 0.2 位であるが、 $3D$ 以上では単独角柱と同じ最大振巾の変位を示している。ついで前の角柱と後の角柱の断面寸法が異なるものについて述べる。前の角柱が $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ 断面の運動する角柱であり後の角柱が $5\text{cm} \times 5\text{cm}$ 断面で固定の場合、前の運動角柱の変位は角柱間隔が $1D \sim 5D$ の間において単独時の最大振巾の 0.2 位の値であるが、 $1D$ ではほとんど静止している。次に $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ 断面の運動角柱が後にあり、 $5\text{cm} \times 5\text{cm}$ 断面の固定角柱が前にあるとき、前の運動角柱の変位は角柱間隔が $0.5D$ 以下では単独角柱の場合と同様の最大振巾の値を示すが $0.5D$ 以上の間隔では最大振巾の 0.2 位の値を示している。次いで $5\text{cm} \times 5\text{cm}$ 断面の前の角柱が運動し、 $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ 断面の後の角柱が固定のとき、運動する前方の角柱の変位は角柱間隔が $4D'$ まではほとんど静止状態であるが、 $4D'$ 以上になると単独角柱の最大振巾の変位と同じく最大の変位となる。しかしこのとき Fig. 7 に示されるように間隔が $8.5D'$ に至っても静止状態を保つ場合もあり、何の原因によるものかは、はっきりしない。ただ間隔が $4.5D'$ の点で特別な点があらわれている。次に $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ 断面の前方の角柱が固定で $5\text{cm} \times 5\text{cm}$ 断面の後方の角柱が運動する場合、運動角柱の変位は角柱間隔が $8D'$ に至ってもほとんど静止状態で前の角柱の影響は非常に大きい。なお、 D' は大小二角柱の組合せによる場合の、角柱間の距離を示す小角柱の辺の長さである。

ii) 風向方向に並列に二角柱が配置している場合 角柱が風向に並列に二つ並んでいる場合の角柱相互の干渉は割合単純な関係を示している $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ 断面の二角柱の内、一方が固定、一方が運動しうる場合、角柱の間隔が $2D$ 以下ではその運動角柱の振巾は 0 で殆んど静止である。しかし $2D$ 以上では単独角柱と同じで相互干渉の影響はないようである。 $5\text{cm} \times 5\text{cm}$ 断面の二角柱でも、角柱の間隔が $3D$ 以下では運動角柱の変位はなく殆んど静止である。しかし $3D$ 以上になると $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ 断面の場合と同様、単独角柱と同量の変位であった。次に角柱断面の異なる二角柱が並ぶ場合、 $5\text{cm} \times 5\text{cm}$ 断面の角柱が運動し、 $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ 断面の角柱が固定のとき $3.5D'$ 以下の間隔では運動角柱の変位はなくほとんど静止しており、 $3.5D'$ 以上では単独角柱と同じ大きさの変位を示している。しかしまたこのときもさきに示した直列のときの例のように $4.5D'$ の間隔に至るまで静止状態を保つ場合もあり、立上り点が二つあった。 $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ 断面の角柱が運動角柱で、 $5\text{cm} \times 5\text{cm}$ 断面角柱が固定のとき運動角柱の変位は角柱間隔が $1.5D$ 以下では静止状態であり、 $1.5D$ 以上では単独角柱と同様に大きい振巾であった。このときの間隔 D は 10cm を $1D$ とみているため、 $1.5D$ といえどもさきの $3.0D'$ に相当することから、大小の二角柱が並列しているときは、どちらが運動角柱であっても相互干渉を受ける絶対距離は同じである。

以上、風向に対して直列と、並列に位置している角柱間の干渉により運動変位に与える影響について述べたが、一般的に直列に角柱が並ぶ場合にはその間隔の変化による影響が複雑微妙であり、僅かな変化にも反応するようである。また直列配置のとき、前の角柱より、後の角柱の方が干渉の影響による振巾減少の効果があるようである。固定した角柱が運動角柱より大きい方がまた干渉の影響が大きく、逆の場合はその干渉による効果が弱められる。

次に並列に並ぶ場合であるが、これは角柱の大小による影響はあまり顕著でなく、むしろその間隔の絶対

距離に影響が大きい。従ってその相互干渉の影響も単純であり、ある間隔以下は静止、それ以上は単独角柱と同様という簡単な関係である。そして並列の場合はその間隔が $4.0D$ 以上ではほとんど単独角柱と同じと見なせる。

次に $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ 断面の二角柱を固定せしめてその間隔を変化させたときの対応する二点の揚力成分の風圧係数を求めたが、それによると単独角柱では対応する二点の値は当然同じで、その差は0であるが、並列のときは、隣の角柱に面する点の圧力は単独の場合より大きくなり、その反対側の面では逆に少なくなっている。これは角柱間の間隔が小さいほど、その傾向が強い。すなわち間隔が小さい程、相互干渉の影響が大きいことが当然のことながらうかがえる。

最後に写真撮影による糸の流線の観察結果によると、運動している角柱まわりの流線の状態は静止角柱まわりの流線の状態が、単に運動変位分だけ平行移動した様子を示している。

5. む す び

以上の結果から、風を受けて振動する角柱が他の角柱の干渉により、その運動変位に変化をうけることは明らかにされたが、これらの結果は単に運動角柱の振巾の増減を示すに止まるので、筆者らはさらに、既報の今回の実験結果と結びつけて考察を加えてみたい。今回の実験結果によると、風による不安定振動時の角柱の風向直角方向表面の圧力変動は、定常的であつ、常に負の圧力を示している。これは明らかに渦が角柱の表面に生成され剥離した過程の圧力変動であろう。これはまえがきにおいて述べたように規則的な渦の生成剥離のある状態である。そこでこのような規則的な渦の発生に関する問題が重要になる。筆者らはここで、流線観察の結果と圧力変動測定結果から Fig. 11 の流線の形を与えて説明を加えてみる。Fig. 11 (a)

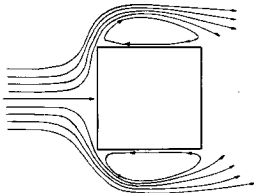


Fig. 11 (a) Stream lines around a square cylinder.

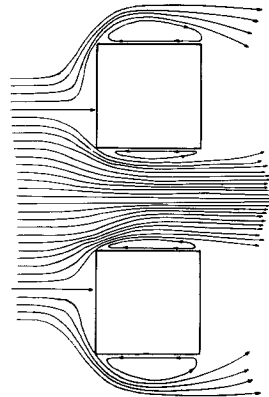


Fig. 11 (b) Stream lines around the two parallel cylinders.

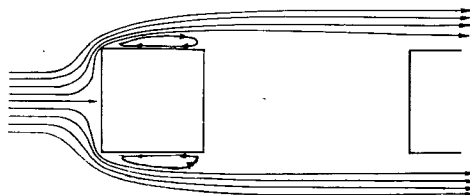


Fig. 11 (c) Stream lines around the two serial cylinders.

の単独角柱の場合、これは不安定振動を起している場合の流線の形である。これからわかるように静止のときは明らかに角柱の形状は流れに対称であるが、カルマン渦が発生しているため角柱に作用する力は、つねに対称なつり合った状態ではなく、対応する面の圧力の差による揚力が生じる。また、この対応する面は対称の条件であるから揚力が交番的になる可能性が大きいと思われる。これは **Fig. 11 (c)** の二角柱が直列にある場合についてもいえる。しかしこの **Fig. 11 (c)** の場合、この例の間隔では角柱は前方のもの、後方のものとも不安定振動を起さない。これについては後に説明を加えるが、この場合にも揚力の交番性が起りやすいと考えられる。**Fig. 11 (b)** の場合のように並列に二角柱が並んでおり、その間隔が小さいときは **Fig. 10** の風圧係数からもわかるように揚力の交番は起りにくく、揚力の作用方向は時間的に変化がなく常に一定と考えられる。従って並列の二角柱には不安定振動が生じない。それでは揚力の交番性が起る可能性が単独角柱の場合と同様の条件にある直列の二角柱に不安定振動がないのは何故かと考えてみる。本例にある角柱間隔では前後両方の角柱が相互に角柱両側の流れを円滑にするガイドの役割を果し、風向直角方向の面に渦動領域が広がるのを抑制する効果を与えることから、角柱の両側部分に一般流に較べて気圧の低くなる領域が小さいため、角柱の運動領域が小さく、従って運動変位も小さい。角柱の運動変位がある一定の大きさより小さいと渦が規則的に剥離する自励作用の効果が少く、角柱表面から規則的に渦が発生しにくくなり、揚力の交番も規則的でないから、従って不安定振動を起さない。単独角柱では風向直角方向の面の側に生じる渦動領域がある一定の大きさの変位を角柱に許容する範囲をもつため、渦が規則的に発生するのを容易にする自励作用があり、従って揚力の交番が規則的であることから不安定振動が起るものと考えられる。

以上は不安定現象を生ぜしめる機構の推定にすぎないが、角柱が運動しているとき、そのまわりの空気を伴って動くことは **Fig. 9** からわかる。これは G. V. Parkinson らのように静止する角柱の圧力分布に置換える取扱いでもよいと考えられるが、筆者らは渦の発生が規則的となる自励効果を可能にするある一定の大きさの変位を境界にして、運動角柱に作用する圧力分布が大きく異なるのではないかと考える。この運動系の変位がある一定の大きさになるための因子は、運動系の構造的要素にも大いに関係があると思われる、それは曲げ剛性、減衰率、寸法等による影響が重要であろう。

最後に結果を要約すると本実験では二角柱の相互干渉の効果により角柱の運動は必ず抑制低減されており、かついかなる場合にも単独角柱よりも振巾が小さかった。これらから実際の風により振動しやすい構造物には隣接する構造物の干渉作用がその振動抑制に有利に作用する場合が多いのではないかと考えられた。

参 考 文 献

- 1) G. V. Parkinson ; "On the aeroelastic instability of bluff cylinders", Journal of Applied Mechanics, June 1961, pp. 252~258.
- 2) C. Scruton ; "On the wind-excited oscillations of stacks, towers and masts", International conference on the wind effects on buildings and structures, Paper 16, N.P.L., Teddington, England, June, 1963.
- 3) 石崎澁雄・許昌九 ; "角柱表面に作用する風圧の変動について", 京都大学防災研究所年報, 第7号, 昭和39年3月, pp. 195~198.