構造工学論文集　Vol. 52A（2006年3月）　　土木学会

角柱後流における円柱のウェイクエクサイテーションの励振機構

Mechanism for wake excitation of a circular cylinder in the wake of rectangular cylinders

長尾文明*，野田　稔**，郡　崇志***，宇都宮英彦****
Fumiaki Nagao, Minoru Noda, Takashi Koori, Hidehiko Utsunomiya

*工博，徳島大学助教授，工学部建設工学科（〒770-8506 徳島市南常三島町 2-1）
**工博，徳島大学助手，工学部建設工学科（〒770-8506 徳島市南常三島町 2-1）
***徳島大学大学院，工学研究科建設工学専攻（〒770-8506 徳島市南常三島町 2-1）
****工博，徳島大学名誉教授（〒770-8506 徳島市南常三島町 2-1）

Lots of investigations concerning to the wake excitation for tandem circular cylinders have been carried out. It is well known that this phenomenon is caused by the interaction between the downstream cylinder and the wake flow of the upstream cylinder. However, due to the sensibility of flow properties around a circular cylinder to the Reynolds number, this phenomenon is affected by the Reynolds number.

In the study, some kinds of rectangular cylinders were used instead of the upstream circular cylinder to reduce the Re-number effects. The effects of the separated flow from the upstream rectangular cylinder on the aerodynamic response of the downstream circular cylinder and the excitation mechanism of the downstream circular cylinder were experimentally examined. Model response measurement with two degrees of freedom system and the unsteady surface pressure measurement of the downstream circular cylinder were carried out.

Key Words: Wake excitation of circular cylinder, Unsteady pressure properties, Wake of rectangular cylinders
キーワード：円柱のウェイクエクサイテーション，非定常圧力特性，角柱の後流

1．はじめに

斜張橋の並列ケーブル等において発生することが知られているウェイクエクサイテーションは，上流側ケーブル等の上流側部材の後流と下流側ケーブル等の下流側部材との相互干渉によって発生することが広く知られている [1) 2)]．しかし，直列円柱の相互位置関係により上流側円柱の後流の影響が複雑に変化するため，振動中におけるフローパターンや作用する非定常空気力を理論的に取り扱うことは非常に困難であり，詳細については未だ解明されていない．

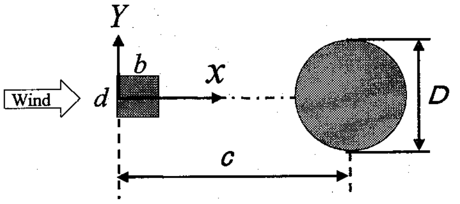
その複雑な性質の一つとして，応答特性の振動数依存性（同一寸法・質量・減衰の模型を用いて固有振動数のみを変化させた場合，換算風速（U/fD；U,平均風速，f,固有振動数，D，円柱直径）を用いた応答評価において固有振動数の影響が除去できない現象）が指摘されている [3)]．この現象は作用する平均風速が変化することにより上流側円柱の剥離性状が変化するレイノルズ数依存性と考えることも可能である．著者らは，レイノルズ数依存性を極力排除し，問題を単純化するために，上流側の物体を角柱に置き換えることによって上流側構造物の後流特性に及ぼすレイノルズ数の影響を除き，角柱後流内の円柱に発生するウェイクエクサイテーションについて検討を続けている [4) 5)]．

本研究においては，2自由度ばね支持応答実験を行い，角柱寸法の応答に及ぼす影響と，角柱後流において自由振動中の円柱の非定常表面圧力分布から後流側円柱に作用する励振力特性を検討するものである．

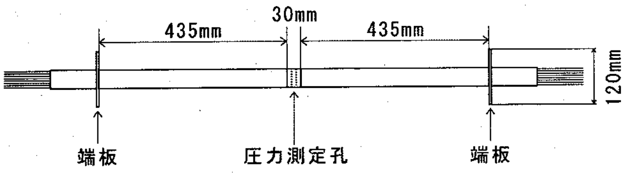
2．実験概要

図－1に示すように，上流側角柱として辺長 d の正方形角柱を用い，角柱の剥離点から直径 D=40mm の円柱中心までの距離を水平間隔 c として，正方形柱と円柱を直列に配置した．ここで，両模型の中心を結ぶ軸(x 軸)と気流作用方向は一致している．表－1に示した構造諸元を用いて8本のコイルスプリングで下流側円柱を弾性支持した．円柱は，主流方向（水平方向，x 軸）と主流直交方向（鉛直方向，Y 軸）に振動することが可能であり，円柱の振動はひずみゲージを用いてそれぞれの方向

の変位を測定した．また，下流側円柱模型には，図－２に示すように円周上に 10° ピッチ，合計 36 点の圧力孔を設けており，表面圧力を計測できるようになっている．ここでは，ばね支持状態において振動中の円柱表面に作用する非定常圧力も測定した．圧力孔は直径 1mm であり，圧力孔から長さ 4 m，内径 1 mm のビニール製導圧管を介して風洞外に導き，気流や振動に影響の無いところに固定された微風圧計測システム（共和電業株式会社製）の圧力センサ部に接続して測定を行った．導圧管による変動圧力の減衰，時間差に対しては，スピーカーを用いた検定装置を使用して校正を行った（変動圧力振幅の減衰はほとんどなく補正は行っていない．一方，導圧管の長さに依存する時間差は 0.0311 秒の遅れであり，検出された圧力データの補正を行った．なお，この時間差は，固有振動数成分においては，位相遅れ 17.5 度に相当する．）また，圧力データの評価時間は 120s であり，サンプリング周波数は 100Hz である．なお，本実験は徳島大学工学部風工学研究室の風洞（室内循環型の閉断面押し込み式風洞：測定胴部 1.0×1.5×4m　測定風速 1m/s ～13.5m/s）を使用した．



図－１　模型配置



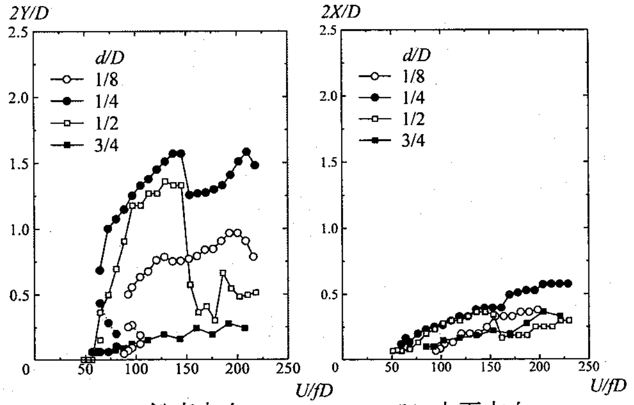
図－２　圧力計測模型

表－１　模型構造諸元

円柱直径　D (mm)	40
質量　M (kg/m)	1.098
円柱長　ℓ (mm)	900
固有振動数　f_X (Hz)	1.48
固有振動数　f_Y (Hz)	1.56
対数減衰率　δ_X	0.017
対数減衰率　δ_Y	0.034
スクルートン数　Sc_X	19.4
スクルートン数　Sc_Y	39.3

3．応答特性

図－３に，上流側に辺長比 b/d=1 の正方形柱を設置し，寸法を変化させた場合の下流側円柱の主流直交および主流方向の 2 自由度応答実験結果（*V-4* 図）を示す．正方形柱と円柱との水平間隔 c/D は，参考文献 6)において，主流直交方向に大きな応答が発生することが確認されている c/D=3 とし，正方形柱の厚み d を d/D=1/8 から 3/4 の範囲で変化させた．鉛直方向の応答が卓越しているが，水平方向にも振動している．d/D=1/8，1/4，1/2 では，不安定なリミットサイクルを有するハードフラッター型のような応答(以下，ハード型とする)を示しており，d/D=3/4 では，応答はほとんど現れなかった．また，d/D=1/8, 1/4, 1/2 に関しては，角柱寸法の増加に伴い，発振風速は低風速側へ移る．なお，d/D=1/4，1/2 に関して U/fD =150 付近で急に応答量が小さくなる変化については，今後詳細な検討を行う必要がある．



(a) 鉛直方向　　(b) 水平方向

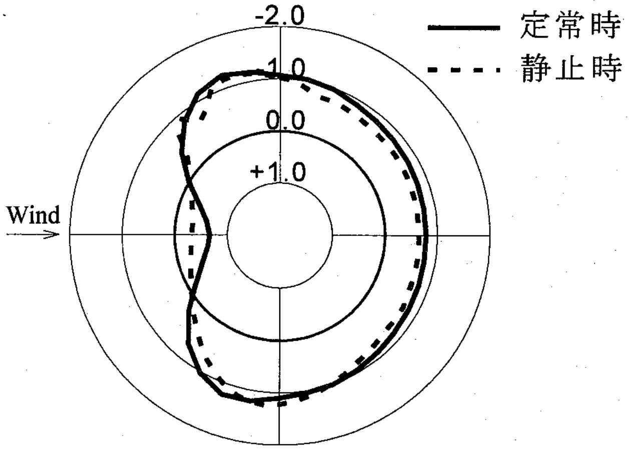
図－３　正方形柱設置時の円柱の空力振動応答

4．平均圧力分布特性

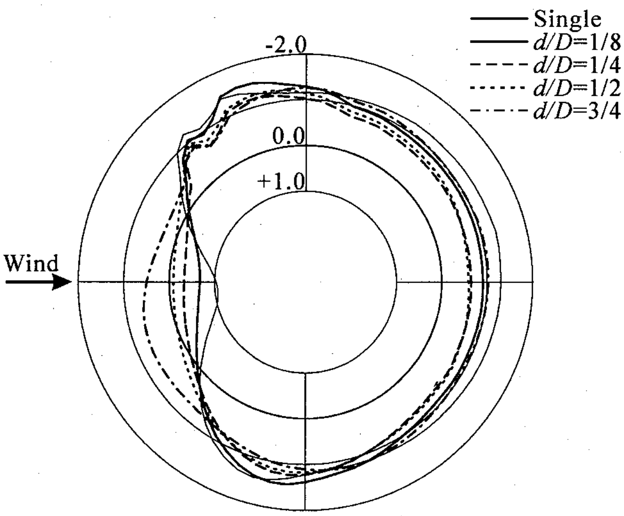
下流側円柱が静止状態の場合における下流側円柱の平均圧力分布特性を図－４に示す．ここで，各圧力孔の位置を表す角度としては，図－５に示すように円柱のよどみ点をβ=0° とし，反時計方向をプラスとして標記する．図－４は，水平間隔を c/D=3 とした状態で，正方形柱の寸法を d/D=1/8, 1/4, 1/2, 3/4,に変化させた場合における円柱表面の平均圧力係数の分布を示したものである．図より，正方形柱の寸法変化によって，円柱の上流面側の圧力に差が生じている．上流側に d/D=3/4 の正方形柱を設置した場合，上流面側が負圧になっており，この場合では上流側正方形柱と下流側円柱の間に伴流域が形成されていると考えられる．そして，よどみ点付近の圧力は，正方形柱の寸法が小さくなるに従って回復し，d/D=1/8, 1/4, 1/2 のケースにおいては，正圧となっている．また，剥離流の影響を受けてよどみ点から±35° から±90° の範囲において負圧が増大している．また，d/D=1/2 以下の正方形柱を上流側に設置した場合における下流側円柱の平均圧力係数の分布は，比較的類似していることが認められる．したがって，上流側角柱からの剥離流の円

柱上流面への流入は上流側正方形柱が d/D=3/4 から 1/2 に変化するときに生じており，このときに応答特性が大きく変化することと対応していると考えられる．

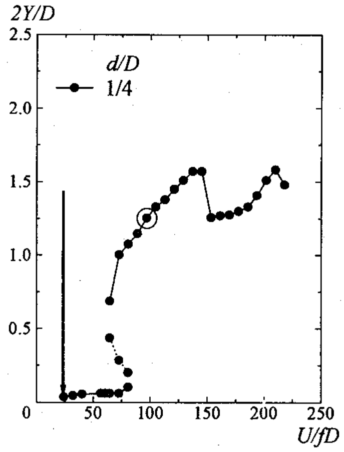
また，図－6は，図－7において，○印で示した上流側角柱を d/D=1/4 の正方形角柱とした場合の換算風速 V/fD=100，無次元振幅 Y/D=0.63 の定常振動中と静止時における平均圧力係数分布を示したものである．振動時の下流側円柱は，最大あるいは最小変位位置付近では上流側角柱の後流の外部に位置することから上流側のよどみ点付近の正圧が静止時における値より大きな値となっている．また，背面における負圧も振動中において若干大きな値となっているが，±70° 付近における負圧の最大値には両者にほとんど差が生じていない．



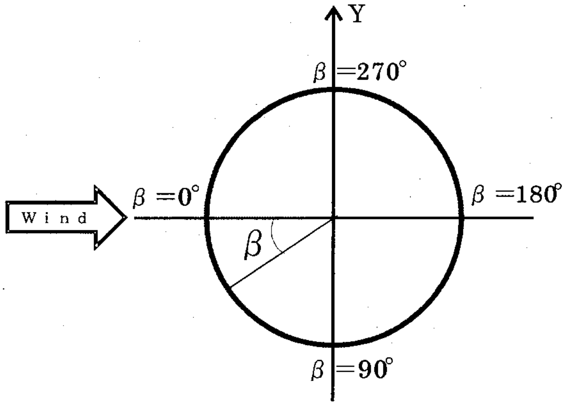
図－6　定常振動時（d/D=1/4，V/fD=100，Y/D=0.63）と静止時の平均圧力分布（c/D=3）



図－4　正方形柱の寸法を変化させた場合の静止時の平均圧力分布（c/D=3）



図－7　表面圧力計測条件（d/D=1/4，c/D=3）



図－5　下流側円柱の角度の表記方法

5．非定常圧力特性と仕事

ここでは，鉛直振動が卓越することより，計測された変動表面圧力 $P(t)$は，鉛直変位 $Y(t)$（式（1））との関連を考慮して以下のように定式化される．

$$Y(t)=Y_0\cos\omega t \tag{1}$$

$$P(t)=(\rho U^2/2)\cdot\{C_P+C_P'(t)\} \tag{2}$$

ここで，Y_0；鉛直方向振動振幅，ω；固有振動数，C_P；平均圧力係数，$C_P'(t)$；変動圧力係数．

また，単位長さあたりに作用する変動揚力，$F_L(t)$，は変動表面圧力を用いて以下のように表現される．

$$F_L(t)=\sum_{i=1}^{N=36} P_i\cdot\sin\beta_i\cdot dl \tag{3}$$

ここで，β_iは，図－5に示すように各圧力孔の位置をよどみ点から反時計方向にプラスとして標記した角度であり，dlは，各圧力孔が代表している周長である．

このとき，変動揚力が振動1周期になす仕事量は次式で与えられ，

$$W_L=\int F_L(t)\cdot\dot{Y}(t)\cdot dt \tag{4}$$

ここでは，動圧と代表長として円柱直径 D を用いて以下のように振動1周期における無次元化を行った単位長さあたりの変動揚力がなす仕事量，W_L*，と単位長さあたりの変動揚力がなす無次元仕事の時間的な変化を表す W_L*(t) を用いて検討している．

$$W_L^* = W_L \Big/ \frac{1}{2}\rho U^2 D^2 = \int C_L(t)\cdot \dot{Y}/D \cdot dt = \int W_L^*(t)dt \qquad (5)$$

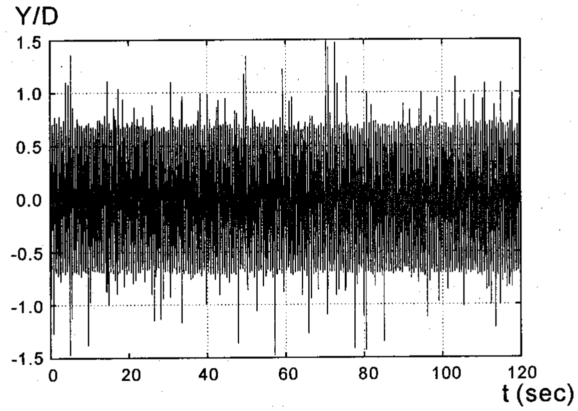
ここに，$C_L(t)$は，変動揚力係数である．

同様に変動揚力を形成する個々の変動圧力のなす単位面積あたりの無次元仕事，W_P*，を以下に示す．

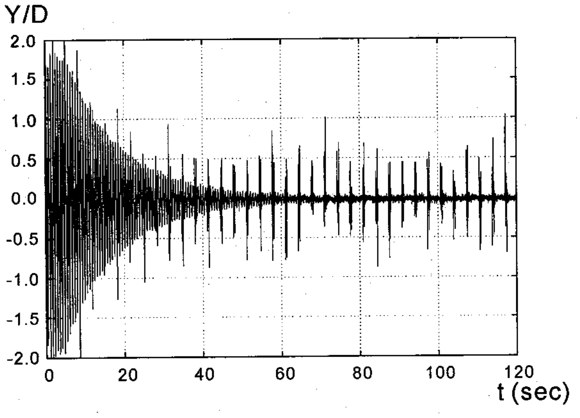
$$W_P^* = W_P \Big/ \frac{1}{2}\rho U^2 D = \int C_P'(t)\cdot \sin\beta \cdot \dot{Y}/D \cdot dt = \int W_P^*(t)dt \qquad (6)$$

ここに，W_P*(t)は，変動圧力の鉛直方向成分がなす鉛直方向の無次元仕事の時間変化を示している．

圧力測定は，図－7に示したように，上流側角柱を d/D=1/4 の正方形角柱とし，換算風速 V/fD=100，無次元振幅 Y/D=0.63 の定常振動中と換算風速 V/fD=25 において，減衰振動中（図中の矢印（↓）で表示）に行った．



(a) 定常状態，V/fD=100，Y/D=0.63



(b) 減衰状態，V/fD=25

図－8　鉛直変位の時刻歴，d/D=1/4，c/D=3

両状態の振動時刻歴を図－8に示す．定常振動中と減衰振動中ともに電気的なノイズが混在している．なお，減衰振動は計測開始後60秒でほぼ静止しており，計測した120秒中，前半の60秒を解析対象としている．

5. 1　定常振動時における非定常圧力特性と仕事

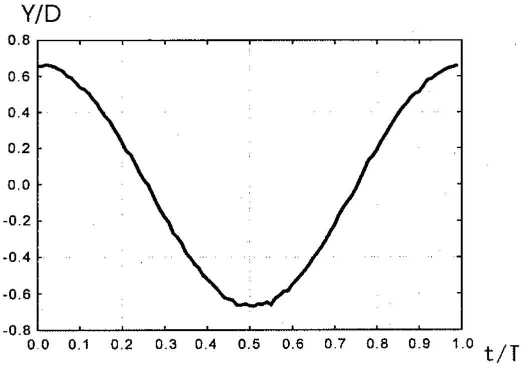
図－9に，円柱の鉛直振動1周期毎にアンサンブル平均を行った（振動1周期を100分割し，それぞれのデータをアンサンブル平均した）鉛直方向振動振幅，Y/D，変動圧力，$C_P'(t)$，変動圧力のなす鉛直方向無次元仕事，$W_P^*(t)$，そして，変動揚力のなす無次元仕事，$W_L^*(t)$，の1周期における時間変化を示す． (a)図に示す鉛直応答変位より明らかなように，図中の時間原点は鉛直変位の最大点と若干異なっているが，ほぼ正弦的な振動がアンサンブル平均によって再現できている．(b)図に示した変動圧力，$C_P'(t)$，より，$C_P'(t)$の正負の生じる時間割合が 1:1 ではないことが明らかであり，変動圧力が固有振動数成分のみで表現できないことが示されている．この現象は，特に，β=50° 付近と 300° 付近において顕著である．(c)図の変動圧力のなす無次元仕事，$W_P^*(t)$，の分布から，当然のことではあるが，β=±90° 付近の仕事量が大きくなっており，下向きおよび上向きに変位を始めるとき上下面でともに正（励振力）の仕事をしている．そして変位が最小と最大点に近づくときに負（減衰力）の仕事となっており，これを円周上（0<β<360°）で積分した結果を変動揚力のなす無次元仕事，$W_L^*(t)$として(d)図に示している．(d)図より，正の仕事をなす時間の占める割合が長く，また，仕事量も大きいことから振動1周期において正の仕事が発生していることが明らかであり，1周期にわたって積分して求めた無次元仕事量は，W_L^*=0.285 となる．この値は，周波数解析によって求めた鉛直振動数成分のみのなす仕事(W_L^*=0.277)より，若干大きくなっており，より正確な仕事量が振動1周期にわたって捉えられていると考えられる．

上記の結果を，振動変位が最大(ωt=0)からωt=π/4 毎に最小点（ωt=π）まで，円柱の周囲に極座標表示したものを図－10 に示す．瞬間的には，±90° 付近のみならず，よどみ点付近を除いた上流側においても大きな仕事がなされていることが理解できる．しかしながら，振動1周期における変動圧力のなす仕事を図－11に示すが，1周期にわたって平均すると，β=±90° 付近の仕事量が支配的になっている．

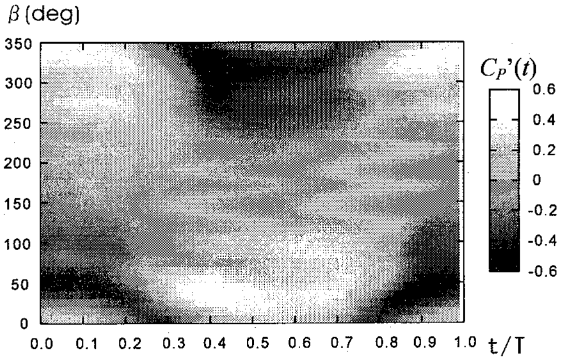
図－12は，図－9，10に示した変動圧力に平均値を加えた定常振動中における瞬間圧力の分布と瞬間圧力のなす仕事を振動1周期についてアンサンブル平均した結果を表示したものである．(a)図に示した瞬間圧力の時間的変化から，下面側（β=50～120°）の絶対値の大きな負圧が，t/T=0.2 付近から t/T=0.35 程度までの間に，徐々に回復し，一方，上面側（β=240～310°）では，t/T=0.3 付近から t/T=0.38 付近にかけて急激に大きな絶対値の負圧

が生じており，t/T=0.3 付近において，円柱の下面側に位置していた上流側角柱の後流が円柱の上面側に変化する流れのスイッチングが発生していると考えられる．同様に，t/T=0.8 付近において，上述の流れと逆の現象が生じていることも容易に判断できる．この流れのスイッチングの発生が振動の 1/4 周期（$\omega t=\pi/2$ および$\omega t=3\pi/2$）より若干遅れていることが励振力の形成に大きく寄与していると考えられる．

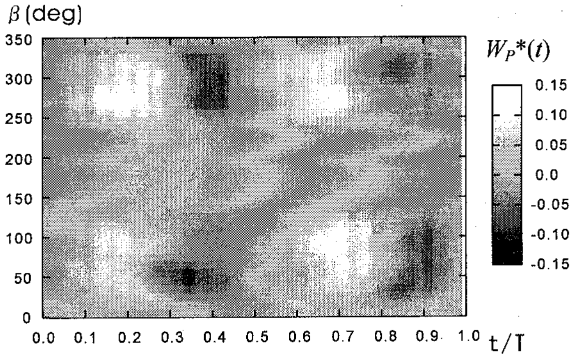
この現象は，参考文献 4)で得られた可視化結果（下流側円柱が中立位置を横切る瞬間において，定常応答振動時には，下流側円柱と上流側角柱の間に発生させた煙は，円柱の変位する方向に偏在している．一方，減衰振動時には，円柱の上下にほぼ対称に煙が存在する．すなわち，定常振動中における流れのスイッチングが中立位置より遅れて発生する結果）と一致している．



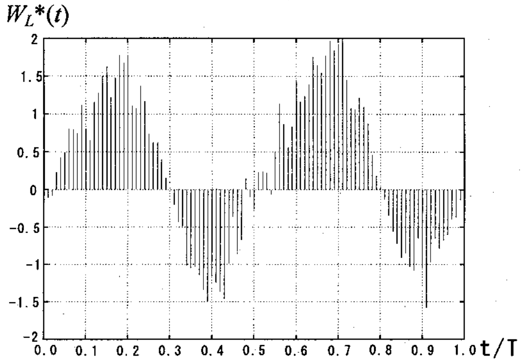
(a)　鉛直方向応答振幅，Y/D



(b)　変動圧力係数，$C_P'(t)$

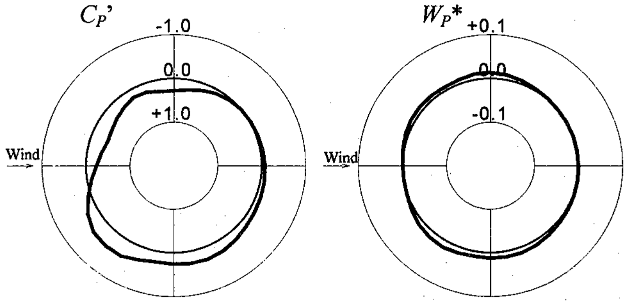


(c)　変動圧力のなす無次元仕事，$W_P*(t)$

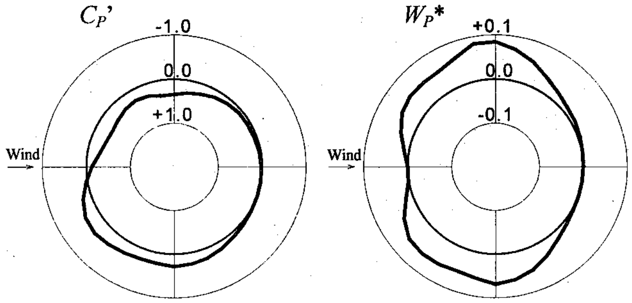


(d)　変動揚力のなす無次元仕事，$W_L*(t)$

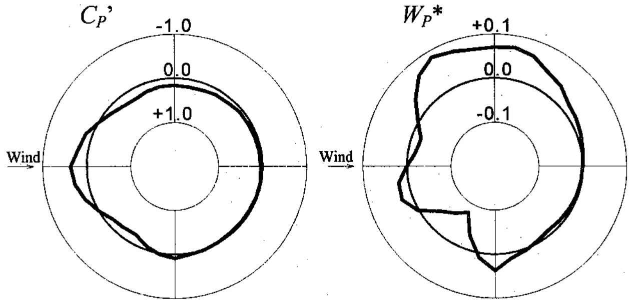
図－9　定常振動 1 周期における圧力と仕事



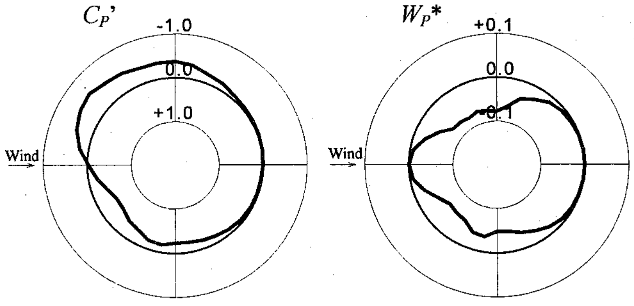
(a)　ω t=0



(b)　ω t=π/4

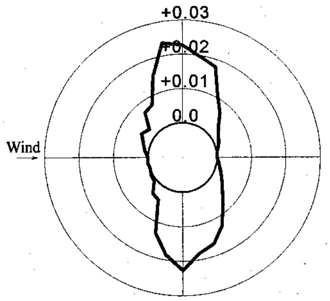


(c)　ω t=π/2



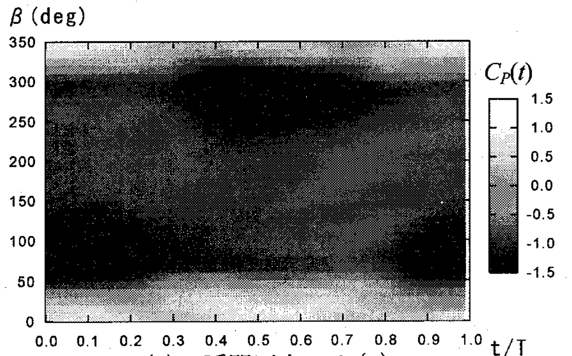
(d)　ω t=3π/4

図－10　1 周期における変動圧力振幅と圧力のなす仕事

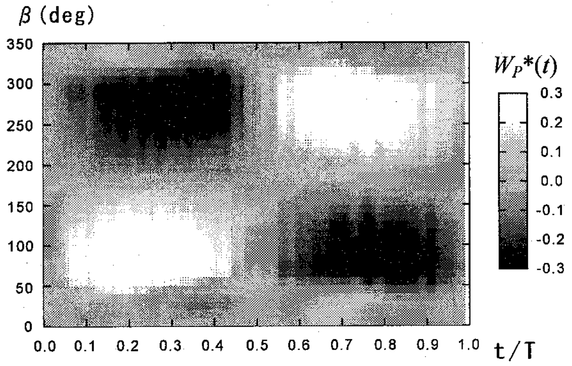


図－11　定常振動 1 周期における変動圧力のなす仕事

また，図－12(b)に示した瞬間圧力のなす仕事に注目すると，下向きに振動しているときには下面側が，逆に，上向きに振動しているときは上面側が励振力を供給し，振動方向と逆の面が減衰力を付加する結果となっている．1 周期にわたって平均圧力のなす仕事は当然 0 であり，平均圧力は全仕事量には寄与しないが，変動圧力に平均圧力を加えて瞬間圧力で検討すると定性的な励振機構の説明が可能である．



(a)　瞬間圧力，$Cp(t)$



(b)　瞬間圧力のなす無次元仕事，$W_P*(t)$

図－12　定常振動 1 周期における瞬間圧力と仕事

5. 2　減衰振動時における非定常圧力特性と仕事

前節と同様に減衰振動中において，記録されたデータの前半 60 秒のデータを用いてアンサンブル平均した鉛直方向振動振幅，Y/D，変動圧力，$C_P'(t)$，変動圧力のなす鉛直方向無次元仕事，$W_P*(t)$，そして，変動揚力のなす無次元仕事，$W_L*(t)$，の 1 周期における時間変化を図－13 に示す．(b)図に示す変動圧力の変化からは明確な流れのスイッチング現象が捉えられず，仕事量も減衰となることは明らかであるが，振動方向によって仕事の正負が異なっている．振動振幅が時々刻々と変化しており，アンサンブル平均した結果から定量的な評価ができないことが明らかである．

そこで，データ長を 1024 個（約 10 秒）とした短時間のスペクトル解析を実施し，その間における鉛直振動成分の変動圧力のなす仕事の例を図－14 に示す．振動振幅の大きさに関係なく，$\beta=\pm90°$ 付近において，励振力が作用し，$\beta=\pm45°$ 付近において減衰力が働いている．振幅が大きいほど，仕事量は大きくなっているが，$\beta=\pm45°$ 付近における減衰力の作用は，流れのスイッチングのタイミングと関連があると考えられ，今後，さらに検討する必要がある．

6. まとめ

角柱後流において生じる円柱のウェイクエクサイテーションの発生機構について，主流方向と直交した成分（鉛直方向振動）が卓越するタンデム配置の場合について，振動中の表面圧力測定から検討を加えた結果，以下の知見を得た．

振動 1 周期毎にアンサンブル平均を行った変動圧力ならびに瞬間圧力の分布から，下流側円柱に作用している空気力は，円柱の固有振動数成分の正弦振動的なものではなく，上流側角柱の後流の影響を受けた非常に複雑な特性を有していること明らかとなった．

また，鉛直方向振動数成分のみによる空気力を用いても，全体に作用する仕事量のおおよその推定は可能であるが，アンサンブル平均処理を行うことにより，振動 1 周期における円柱に作用する励振力特性をより詳細に検討することが可能となった．瞬間圧力分布からは，振動方向の面に励振力が作用し，逆に，振動方向と反対方向の面に減衰力が作用することが明らかとなり，変動揚力は振動 1 周期で励振力と減衰力がそれぞれ 2 度作用し，この非定常空気力特性の形成に上流側角柱と下流側円柱間のギャップフロー（上流側角柱の後流のスイッチング）の生じるタイミングが重要な役割を果たしていることも明らかとなった．これらのことより，本研究で用いたアンサンブル平均処理手法は，角柱後流において生じる円柱のウェイクエクサイテーションの非常に複雑な励振機構の解明に有効な手段であると判断できる．

今後，圧力分布特性と詳細な流れの可視化結果との対応関係や上流側円柱を角柱に置き換えた場合において得られた成果の並列ケーブル等の上流側物体が円柱の場合に対する適用可能性とその限界についても検討する必要がある．

参考文献

1）宇都宮英彦，鎌倉米康，‘近接する並列円柱系の空気力学的挙動，土木学会論文集，pp.1-8, 1983.

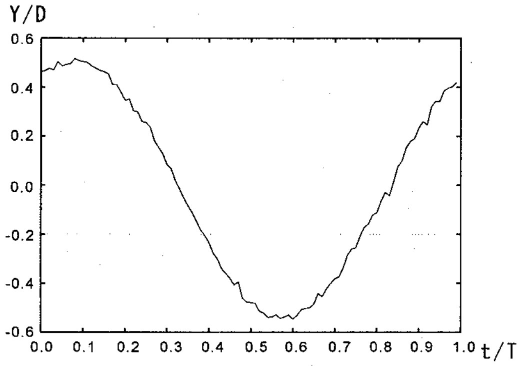
2）F.Nagao et. al., ‘Aerodynamic Properties for Closely Spaced Triple Circular Cylinders’ 5APCWE, Kyoto, pp.149-152, 2001.

3）藤沢伸光，‘並列ケーブルのウェークギャロッピングに関する一実験’，第 13 回風工学シンポジウム論文集，pp.239-244, 1994.

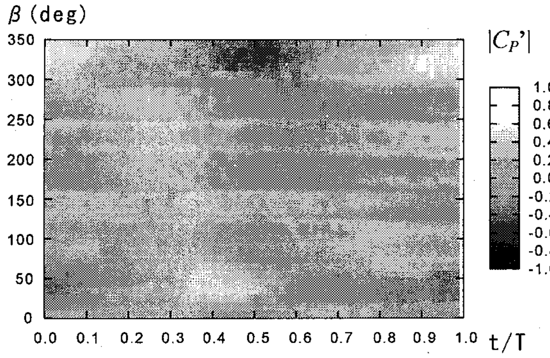
4）宇都宮英彦　他，‘角柱後流の作用による円柱の空力振動特性に関する研究’，第 17 回風工学シンポジウム論文集，pp.309-314, 2002.

5）宇都宮英彦　他，‘角柱後流内の円柱のウェイクエクサイテーションに関する研究’，第 18 回風工学シンポジウム論文集，pp.395-400, 2004.

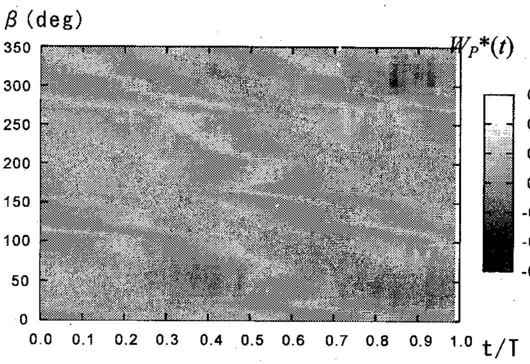
6）F.Nagao et. al., ‘Properties of Aerodynamic Vibrations of a Circular Cylinder in the Wake of Several Kinda of Rectangular Cylinders’ Proc. 11th Int. Conf. on Wind Eng., Lubbock, Texas, pp.2469-2476, 2003.



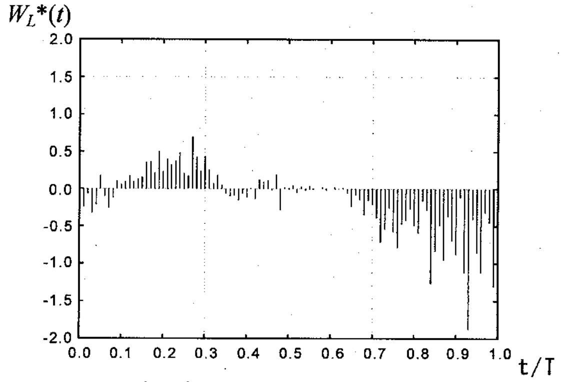
(a)　減衰時における鉛直方向平均応答振幅，Y/D



(b)　変動圧力，$C_P'(t)$

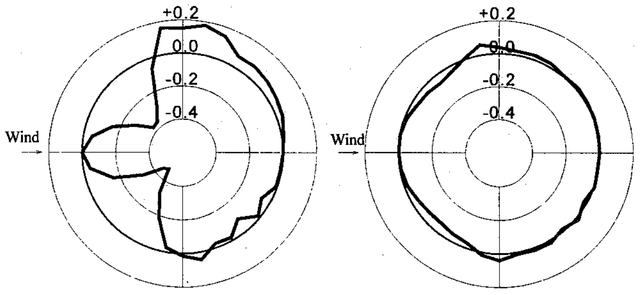


(c)　変動圧力のなす無次元仕事，$W_P{*}(t)$



(d)　変動揚力のなす無次元仕事，$W_L{*}(t)$

図－13　減衰振動中における圧力と仕事



(a) 0.15>Y/D>0.08, (0<t<10.1s)　(b) 0.07>Y/D>0.04, (15<t<25.1s)

図－14　減衰振動中における変動圧力のなす仕事

(2005 年 9 月 10 日受付)