京都大学防災研究所年報　第37号 B-1　平6.4
Annuals, Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., No. 37 B-1, 1994

建築構造物のジェットによる空力制御

岡南　博夫・谷池　義人・桂　　順治

ACTIVE CONTROL FOR AERODYNAMIC FORCES ON A SQUARE-TOWER USING JET

By *Hiroo* OKANAN, *Yoshihito* TANIIKE and *Junji* KATSURA

Synopsis

The effects of upstream corner jets on the aerodynamic characteristics of a square-section tower are investigated in the boundary layer wind tunnel. The method is proposed to control the separating flows from structures by using jets emitted from the upstream corners.

It was confirmed that the flow pattern of the wake is changed by the corner jets and that the fluid forces acting on the structure undergo a change along with the alteration of flow pattern. The proposed method was effective for the control of the aerodynamic and aerostatic forces (lift and drag forces) of the 3-dimensional structures such as tall buildings. If a proper control algorithm such as the fuzzy active control using a self-tuning system with genetic algorithms is applied, the method with corner jets will be useful for the actuator of active control system of the aeroelastic vibration of tower-like structures with square section.

1. まえがき

長大吊り橋，および超高層ビルのような長大・高層構造物が出現するのに伴い構造物の振動問題がクローズアップされてきた．このような構造物の振動発生の原因は地震，風が主要なものとなるが，特に我が国では，強風の吹く機会が多いことから構造力学的な安全性のみならず，高層ビルのような常時問題としての居住者の快適性，使用性において問題となることも多い．また，長大橋梁の架設中における極めて振動し易い状態において，風に起因する振動が作業員の架設作業に支障をきたすという問題も発生する．このようなことから，構造物の振動制御に関する研究が多く認められるようになってきた．

構造物を対象とした振動制御において，受動的な制御手法が多く採用されてきたが，構造物の規模が大きくなり振動を抑制するために必要とする制御力が大きなものとなれば，さらに外部からエネルギーを供給する能動的制御と共に，受動制御と能動制御を組み合わせたハイブリッドタイプの制御が研究され高層構造物に採用される傾向にある．このような構造物を対象とした能動振動制御において，ロバスト性を有する制御理論の研究と共に，制御力の発生方法に関する研究は重要な研究課題と考えられる．建築構造物では，アクチュエータとしてアクティブテンドン・AMD 等が採用されているが，風に起因する振動を考えるとき，高風速領域で必要とする制御力が極めて大きくなるため，居住者が振動を感じない程度まで振動を低減することは困難となることも多い．また，制御システムに供給するエネルギーも極めて大きくなる．

そこで，制御力の発生方法として外力となる風のエネルギーを利用する方法が考えられる．長大吊り橋に

対してアクティブフラップを利用する方法が報告[1]されているが，これは翼形断面のフラップに発生する揚力を利用するものであり，フラップの迎え角を変化させ能動的に吊り橋のフラッターを制御しようとしたものである．一方，建築構造物では隅角部，あるいは屋上にアクティブフィンを設置して，このフィンの受風面積を変化させることにより生ずる風荷重の変動を制御力に利用しようとする試みも報告[2),3),4)]されている．また，定常的に外部からエネルギーを供給し，断面まわりのフローパターンを流体力学的に改善して空力振動を安定化する方法として，断面隅角部にローターを設置して剝離せん断層の制御を行う方法[5)]，および断面淀み点に沿ってスパン方向に配列した噴出孔よりジェットを噴出する方法[6)]が認められる．

本研究は，建築構造物の振動制御において，前述のような風のエネルギーを利用したアクチュエータを考えたものであり，断面上流隅角部よりジェットを噴出し，断面まわりのフローパターンを変化させることによって生ずる流体力の変化を制御力として利用する．ここでは，ジェットの噴出をコントロールすることによって発生する流体力が制御力として利用できるかどうかを風洞実験的に調べることを目的とした．そこで，静止3次元角柱を対象として，揚力・抗力の計測，およびフローパターンを流れを可視化することによって観察し，ジェットの噴出効果を調べジェットをアクチュエータとして利用するための基礎的なデータの収集を行った．

2. 実験方法

風洞は，京都大学防災研究所の境界層風洞（測定部：幅2.5 m，高さ2 m，長さ21 m）を使用した．模型は，高さ32 cm，辺長8 cm の正方形断面を有するアクリル樹脂製の矩形柱であり，風洞床面レベルに設置し，一様流中で実験を行った．**Photo. 1** に風洞に設置した模型の写真を示す．模型には，ジェット噴出用として風上面両側隅角部にそれぞれ高さ方向に沿って5個の噴出孔を設けた．噴出孔の直径は1.1 mm であ

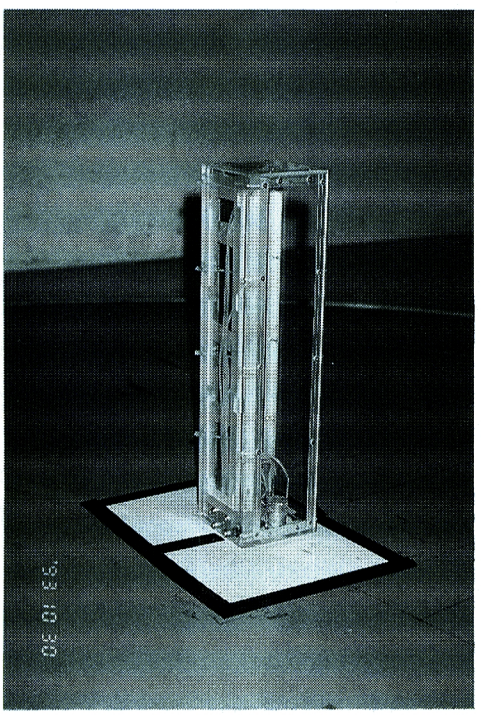


Photo. 1 Model in wind tunnel.

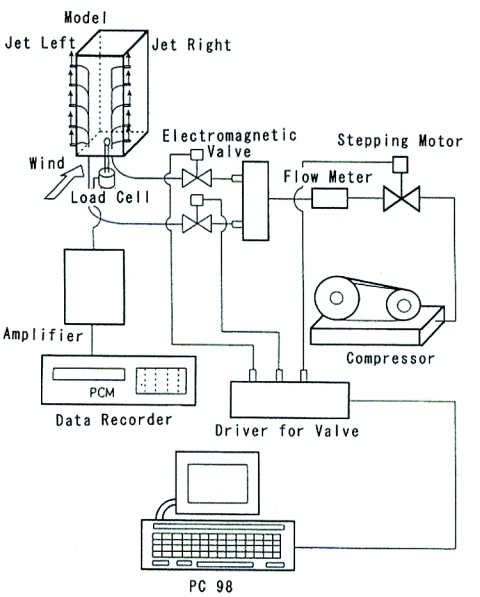


Fig. 1 Schematic description of the experimental system.

る．ジェットの噴出方向は，高さ方向上向きと下向きの2ケースで，またジェットの制御は，電磁バルブとPC98による制御信号で行った．ジェットの総噴出流量はオリフィス（試作品）と差圧計で計測する．なお，この流量計測システムは，実験前にロータメータによってキャリブレーションを行った．

模型に作用する空気力は，風洞床下に設置した6分力検出器（日章電機KK製：LMC-6511-2）で抗力・揚力，および各々による転倒モーメントを計測した．なお，各空気力のデータはPC98から転送されるジェット制御信号，およびジェットの流量を表す電圧信号と共に，実験時データレコーダに記録し，実験終了後AD変換ボード（カノープスKK製：ADJ-98）を介してパソコンのハードディスクにディジタル量としてファイルした後各種のデータ解析を行った．抗力は風下，揚力は風下に向かって左向きを正とする．実験は，風下に向かって左・右の噴出孔より矩形波信号によって交互，および同時に周期的に変動させた状態と，それぞれ定常的に噴出させた状態で空気力の計測を行った．ジェットを噴出させた状態の空気力を計測する実験装置のブロック図を**Fig. 1**に示す．

さらに，ジェットを噴出したときに変化する断面まわりのフローパターンを観察するため，ドライアイスを利用した流れの可視化を行った．流れの様子はビデオカメラにより撮影し，静止画としてプリントアウトする等，フローパターンと空気力のジェットによる周波数変化特性としての関係を調べる．

3. 実験結果および考察

3.1 静的揚力係数

空気力を利用して構造物の風向直角方向の振動を制御するとき，断面に作用する揚力を制御することが必要となる．このため，まず，風上面隅角部に設置した風下に向かって左側，および右側のジェットをそれぞれ片方だけ定常的に噴出させたときの揚力とジェットの噴出流量との関係を計測した．これは，片側のジェットを噴出させたときどの向きに揚力が発生し，またその大きさがジェット噴出流量に対してどの程度になるかといった基礎的なデータを得ることを目的としたものである．噴出流量qは以下のように無次元化した係数で表す．

$$C_q=100q/(U_H\cdot D\cdot H)\quad(\%)\qquad\cdots\cdots(1)$$

ここに，U_H：模型頂部に相当する高さにおける接近流の平均風速，

D：模型断面辺長，H：模型高さ．

なお，ジェットの特性から考えれば，ジェットの総流量よりも，むしろ各噴出孔出口におけるジェットの流速で評価したほうがよい．ここでは，噴出孔出口の流速を計測することが困難であることから総流量で評価したが，噴出孔の断面積は求めることができることから，ジェット総流量をジェットの噴出している孔の総断面積で割ることにより，近似的なジェットの流速は推定できる．

Fig. 2は，迎え角が0度の状態における静的揚力係数C_Lであり，ジェットを左，または右側片方だけから噴出させた場合の結果をジェットの噴出流量に関する変化特性として示した．

$$C_L=L/(\rho\cdot U_H^2\cdot D\cdot H/2)\qquad\cdots\cdots(2)$$

ここに，L：時間平均した揚力，ρ：空気密度．

左側のジェットを噴出すれば，左向きの揚力が発生し，右側のジェットを噴出すれば，右向きの揚力を発生する．また，ジェットの流量が増大するに従って，その大きさが増大することが知られる．このようなジェットの流量，あるいは噴出速度に関する変化特性は，従来知られている迎角変化特性あるいは断面の形状変化特性的な傾向を示す．アクティブフィンでは，受風面積を増減することによって風力の増減を発生させ構造物の振動制御に利用するが，同様にジェットは噴出流量の増減によって風力の増減を発生できることが示され，ジェットが風のエネルギーを利用する制御力になり得る可能性が示されたものと考えられる．

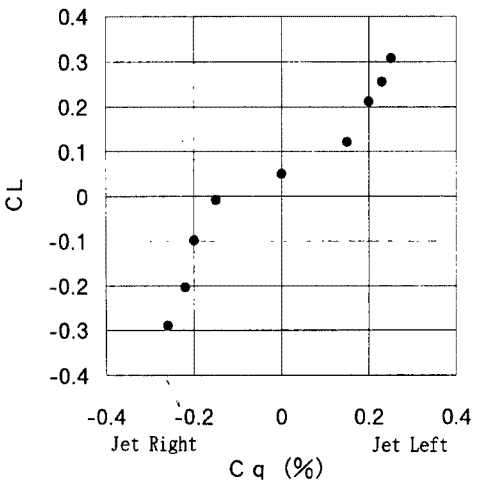


Fig. 2 Lift force coefficient versus Cq.

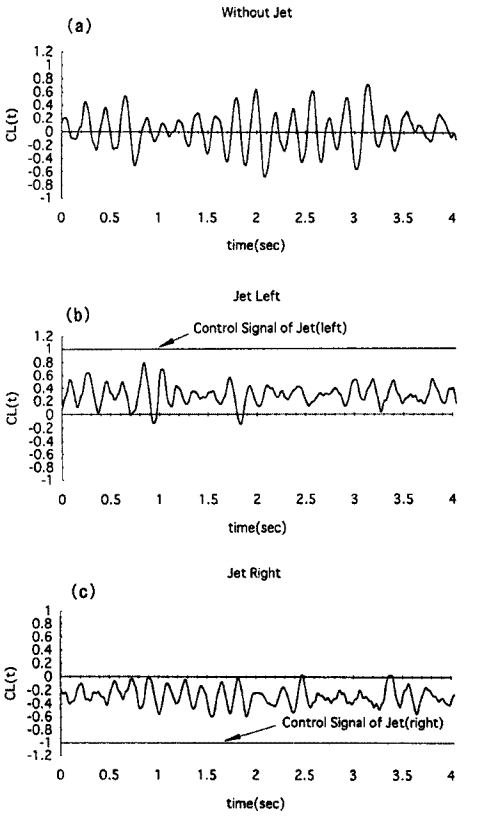


Fig. 3 Time series of lift force coefficient of the model with steady jet.

Fig. 3 は揚力係数の時間変動を表すトレースであり，最上段の(a)はジェットなし，(b)は左側のジェットを C_q=0.25 % で噴出したときの結果，(c)は右側のジェットを噴出したときの結果である．このような時間的に変動する揚力係数を時間的に平均してまとめ，C_q に関する変化特性と示した結果が**Fig. 2** である．**Fig. 3** から知られるように，迎え角がゼロであることからジェットなしの場合には，C_L の平均がほぼゼロでカルマン渦に起因した周期的な変動が認められる．一方，左右どちらか片方のジェットを噴出する場合には，ジェットの噴出している側の向きに C_L の平均値がシフトし，カルマン渦に起因する変動成分は小さくなる．これは，片側の剝離せん断層がジェットによって乱され側面に接近，あるいは付着したためカルマン渦の形成が弱められたものと考えられる．また，時間平均的な剝離せん断層の形状が左右非対称となり風向と直交する方向の空気力成分が発生したものと考えられる．このような特性を示すフローパターンは，断面に迎え角を与えた状態が予測されるが，このことを調べるために流れの可視化を行った結果が**Photo. 2** であり，風洞床面付近の角柱周りの流れの様子をドライアイスで可視化した．

Photo. 2(a) は迎え角 α がゼロでジェットなしのフローパターンで，**(b)** は α = −8度，**(c)** は α = 8度の結果である．また，**(d)**，**(e)**，**(f)** は迎え角がゼロでジェットを噴出させた結果である．**(d)** はジェットを左右同時に噴出，**(e)** は左側のジェット，**(f)** は右側のジェットを噴出した場合である．これらの流れの様子から，左側のジェットを噴出すれば，断面に負の迎え角を与えたフローパターンに，一方，右側のジェットを噴出すれば，正の迎え角を与えた状態に似た傾向を示すことが知られる．このような傾向は，従来報告されている迎え角がゼロ付近における正方形断面の静的空気力係数が，正の迎え角で負の空気力，負の迎え

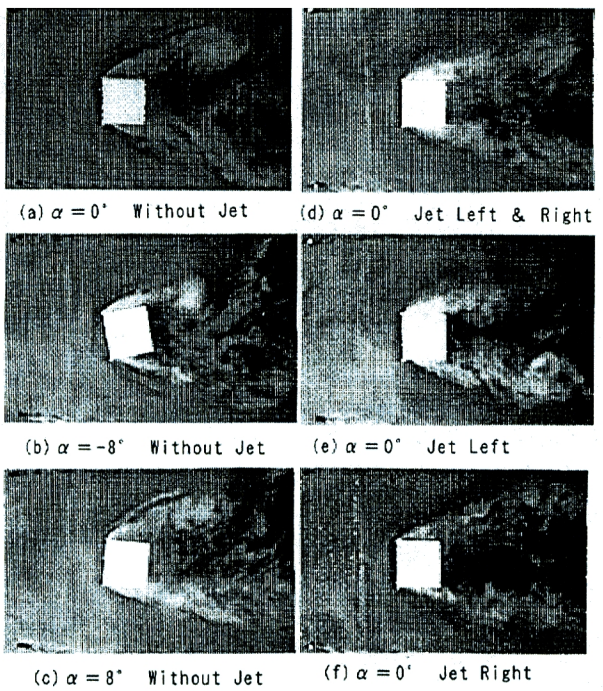


Photo. 2　Wake flow pattern on the wind tunnel floor level. (effect of jet versus angle of attack)

角で正の空気力が発生することに対応する．また，左右同時にジェットを噴出すれば，ジェットの無い場合よりwake幅が小さくなり抗力が小さくなることが**(d)**に示すフローパターンから推定される．

3. 2　変動揚力係数と変動抗力係数

ジェットを構造物の振動制御のアクチュエータとするとき，左右ジェットの切り替えに伴う空気力の動特性が問題となる．この問題を調べるために，揚力と抗力のrms値を求めジェットの周波数変化特性として評価を行う．迎え角がゼロのとき，構造物の風向方向の振動は抗力で制御し，風向直角方向の振動は揚力で制御することをジェットによるアクチュエータとして期待する．このためには，左右の噴出孔から同時にジェットを噴出させたとき抗力変動を発生でき揚力変動は生じないこと，一方，左右交互に噴出させたときに揚力変動を発生させることができて抗力変動が出ないことが理想とする特性である．

Fig. 4は，ジェットを周期的に変動させ，揚力・抗力のrms値をジェットに関する周波数変化特性として示した．横軸は，ジェットの周波数f_jを模型頂部の高さにおける接近流の平均風速Uと断面辺長Dで無次元化した無次元周波数である．縦軸は変動揚力・変動抗力のrms値をジェットの無い状態における値で正規化し，この値によってジェットの変動によって発生する空気力の変動の大きさを推定する．なお，左右の噴出孔から同時にジェットを噴出する場合のC_qの大きさは，交互に噴出する場合の2倍程度とした．これは，同時の場合にはジェット噴出時の噴出孔の数が交互の場合の2倍となり，C_qが同じであればジェットの流速が1/2となるため，C_qを2倍としてジェットの流速を同程度で評価することを目的とした．

実験結果は，初期に予想したとおりの結果が得られたと考えられる．**Fig. 4(a)**は，同時にジェットを噴出すれば抗力変動が生じ，交互に噴出すれば揚力変動が出ることを示す結果であり，**(b)**はジェットを交互に噴出するとき抗力変動が発生せず，また同時に噴出するとき揚力変動が出ないことを示す．実験結果は，ジェットの周期的な刺激によるカルマン渦の同期現象とみられる変動空気力の増幅効果が認められるが，準定常領域においてはジェットが制御力として利用できると考えられる．このような同期現象は，アクチュ

エータの特性としては好ましいものではない．しかしながら，ここでの実験結果はフィードバック制御をしているものではなく，流体力学的には当然ながらこのような特性が現れるものと考えられる．構造物の振動制御においてジェットをアクチュエータとして利用する場合には，構造物の応答を表す状態量を検出しフィードバック制御が行われるため，制御力は振動を抑制する向きに作用することになる．したがって，実際の制御システムではカルマン渦の同期現象によって応答が増大することはない．ただし，フローパターンを変化することによって発生する制御力としての流体力は，実験結果にも認められるように不確定な特性を含むため，従来，制御システムに応用されている最適制御理論のような方法は採用することはできないであろう．文献7)のようなロバスト性の強い学習機能を有するファジィ制御手法を応用することによってジェットをアクチュエータとして用いることが可能となると考えられる．

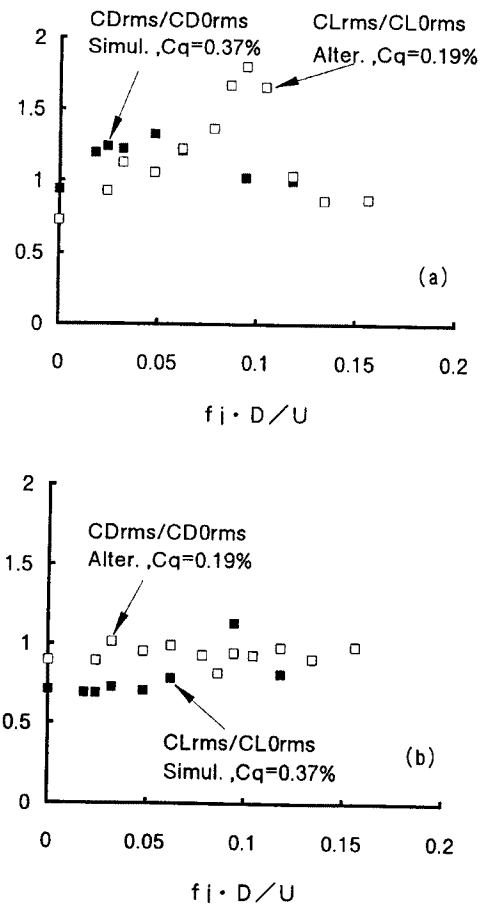


Fig. 4 Fluctuating force coefficients versus the reduced frequency of jet.

3. 3 カルマン渦の同期現象

ジェットによる剥離せん断層の刺激によって発生するカルマン渦の同期現象そのものは，前節でも述べたとおり構造物の振動制御に対し，振動の増大効果を与え悪影響をもたらす可能性を有する．しかしながら，応答に対するフィードバック制御等を行えば，振動の低減効果を与えることも可能であると考えられ，また，同期現象は流体力学的に興味ある現象であることから，本節でこの現象に関する実験結果を示す．

Fig. 5 は，パソコンから転送する左側ジェットの制御信号と共に変動揚力係数を時系列として示したものである．なお，ジェットは左右交互に噴出したもので，右側ジェットの信号は左側ジェットの信号と逆位相となるが同図には示していない．**Fig. 3** の最上段にジェットの無い状態のトレースが示されているがカルマン渦に起因する約5.2 Hz の周期的な変動が認められる．ジェットを左右交互にカルマン渦の発生周波数 f_K で噴出すれば，かなり安定した振幅で変動しジェットの無い場合より C_L の振幅値も大きい．このことは，ジェットの刺激によってカルマン渦が励起されていることを示すものと考えられる．ジェットの周波数変化特性として C_L の rms 値を **Fig. 4** に示したが，この図でカルマン渦の発生周波数付近でピーク特性が認められ，そのバンド幅もかなり広い．これは，ジェットの変動に起因したカルマン渦の同期が顕著に現れていることが推定されるが，さらに変動揚力係数の時間変動のトレースからも明らかとなる．一方，f_K より小さい周波数でジェットを噴出するときには，**3.1** で述べたジェットによる迎角効果的な準定常成分の上にカルマン渦成分の揚力が付加された形を示す．特に周波数が小さくゆっくりした変動では，ジェットの信号が矩形波であることから変動揚力の準定常成分の波形も矩形状となり，カルマン渦成分によって変形された形となっていることが認められる．したがって，カルマン渦成分の変動周波数が準定常成分の変動周波数の奇数倍となるとき，カルマン渦成分が励起されることがこれらの結果から推定できる．カルマン渦発生周波数の1/3倍程度の周波数でジェットを噴出させた結果は，準定常成分の上に明瞭なカルマン渦成分の安定

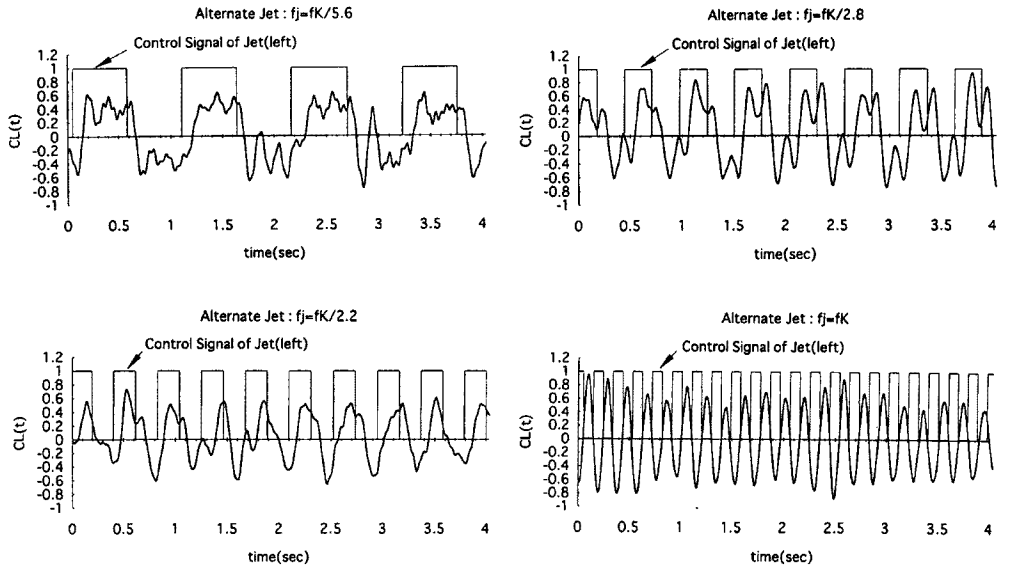


Fig. 5 Time series of lift force coefficient of the model with alternately fluctuating jet. (C_q=0.25 %)

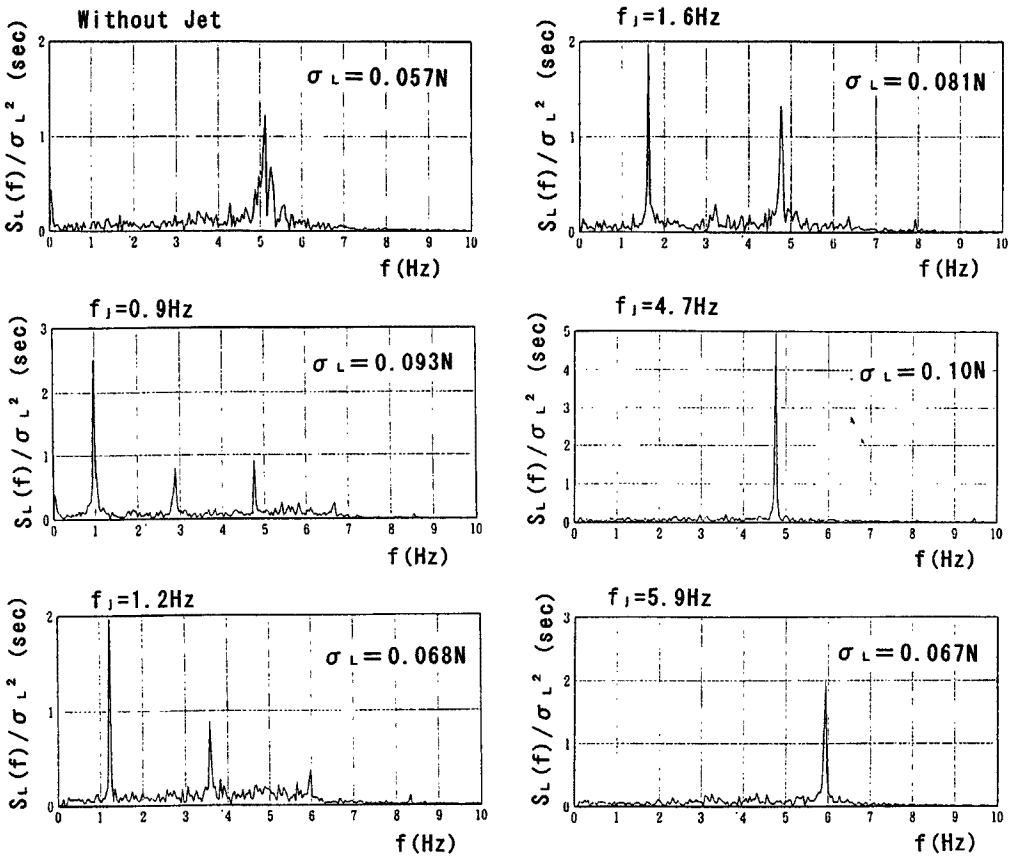


Fig. 6 Spectra of fluctuating lift force of the model with alternately fluctuating jet. (U=4 m/sec, C_q=0.25 %)

した周期成分が認められるが，これはカルマン渦の低周波励振を示したものと考えられる．

変動揚力の時系列をさらに周波数領域で評価するためパワースペクトル密度を示した図が**Fig. 6**である．ジェット無しの結果は，時系列からも推定されたとおり，約5.2 Hzにカルマン渦成分のピークがみられるがバンド幅は，ジェットを噴出した状態に対するスペクトルに比較して大きい．ジェットの周波数f_jがf_Kより小さくゆっくりした変動では，f_jの奇数倍の周波数でスペクトルのピークがみられるが，これは前述のとおりジェットの信号が矩形波であることから変動揚力の準定常成分が矩形状の特性を有することに起因する．したがってこれらのf_jの奇数倍成分が，カルマン渦の周波数f_Kと接近する場合に同期現象を発生する可能性があるもの考えられる．矩形波のスペクトルは基本波から順番に奇数倍の周波数が増大するのに伴ってそのピーク値は低減するが，その低減の状態からカルマン渦の励起状態が判断できると考えられる．f_jが0.9 Hzの結果はその5倍成分がカルマン渦成分を励起し，f_jが1.6 Hzではその3倍成分がカルマン渦の励起を引き起こしていることが推定される．一方，f_jが1.2 Hzでは，その奇数倍成分がいずれもf_Kの値とかなり相違するために同期現象が現れない．f_jが4.7 Hzではその基本波がカルマン渦と同期したものと考えられる．ただし，同期する周波数がジェットの無い場合の周波数と異なるが，これはジェットの噴出に伴って断面の形状変化的な効果によってストローハル数が変化することに起因すると考えられよう．なお，ジェットの周波数の変化に伴う変動揚力の標準偏差の値を図に示したが，この値によっても同期特性に関するある程度の推定ができる．

3. 4 同期領域の流れの可視化

ジェットを周期的に噴出したときの風洞床面レベルにおける流れの様子をドライアイスによる可視化を行った．実験時の風速を高くすれば，トレーサとしてのドライアイスの濃度が薄くなるため，なるべく低風速とすることが必要であり，本実験では0.65 m/secでビデオカメラによる撮影を行った．また，プリントアウトは，ビデオデッキで静止画として1コマづつ再生し，Macintosh（Quadra840AV）で取り込みPhotoshopでコントラスト・明暗を調整した後レーザプリンタ（リコーSP-10PS）で印刷した．ジェットの噴出流量は左右交互の場合にはC_q=0.4 %，同時ではC_q=0.6 %とした．この値は変動空気力を測定した場合と比べかなり大きい値となるが，流れの様子を強調して観察することを目的としてこの流量とした．なお，プリントされた各コマの左側上下隅角部に点滅する印は，風洞床面に設置した発光ダイオードであり，左側のジェット制御信号がパソコンから出力されるときは上のダイオードが発光して左側のジェットが噴出する．一方，右側ジェットが噴出する場合には下のダイオードが発光し白く写り，上下同時に白く写る場合には左右同時にジェットが噴出することを示す．ただし，信号がon，あるいはoffされてからダイオードが点灯，あるいは消灯するまでには若干の時間遅れを有する．

Photo. 3は，カルマン渦の発生周波数とほぼ等しいと思われる周波数でジェットを交互に噴出した結果である．この写真に示す(1)コマから順番に(21)コマまでは，ビデオ再生時2コマごとに静止画として再生したものであるが，ほぼ1周期に相当する．前述のとおり，f_j=f_Kの状態はジェットの刺激によってカルマン渦が励起され同期した状態であり，模型背後の流れが大きく変動していることが観察される．(8)コマおよび(18)コマは上下2個のダイオードが同時に点灯しており左右のジェットの信号が切り替わる瞬間を示し，この間が半周期となる．点灯に時間遅れがあるためlor 2コマ程度前が信号がonとなったタイミングと考えられる．流れの様子から判断して(6)or(7)，(16)or(17)コマが揚力がゼロとなり，それから5コマ目で最大の揚力を発生しているようにみえる．例えば，(3)コマは，左側のジェットが噴出している状態で右向きの揚力が発生している．このような信号のタイミングと揚力の変動状態は，**Fig. 5**に示す時系列のデータと対応する．

Photo. 4はf_Kの約1/3でジェットを交互に噴出したフローパターンであり，ビデオ再生時に3コマごとに再生した結果である．(1)から(42)コマ目までででジェットの変動がほぼ1周期にあたる．(10)，(30)コマあるいはそれぞれ1コマ前が左右のジェットの信号が切り替わる瞬間となる．したがって，ほぼ20コマが

半周期となる．**Fig. 5** の $f_j=f_K/2.8$ の結果は，ジェットの信号切り替わり時点から 1/4 周期より若干遅れた時点でジェット噴出側の向きの揚力が最大となっていることがわかる．(1)，(21) (41) コマはこの状態のフローパターンに相当すると考えられ，各コマは信号切り替わり時点から 11 コマ目であり 1/4 周期より 1 コマ遅れた時点となる．(1)，(41) コマの右側のジェットが噴出しているフローパターンは，それぞれ右回

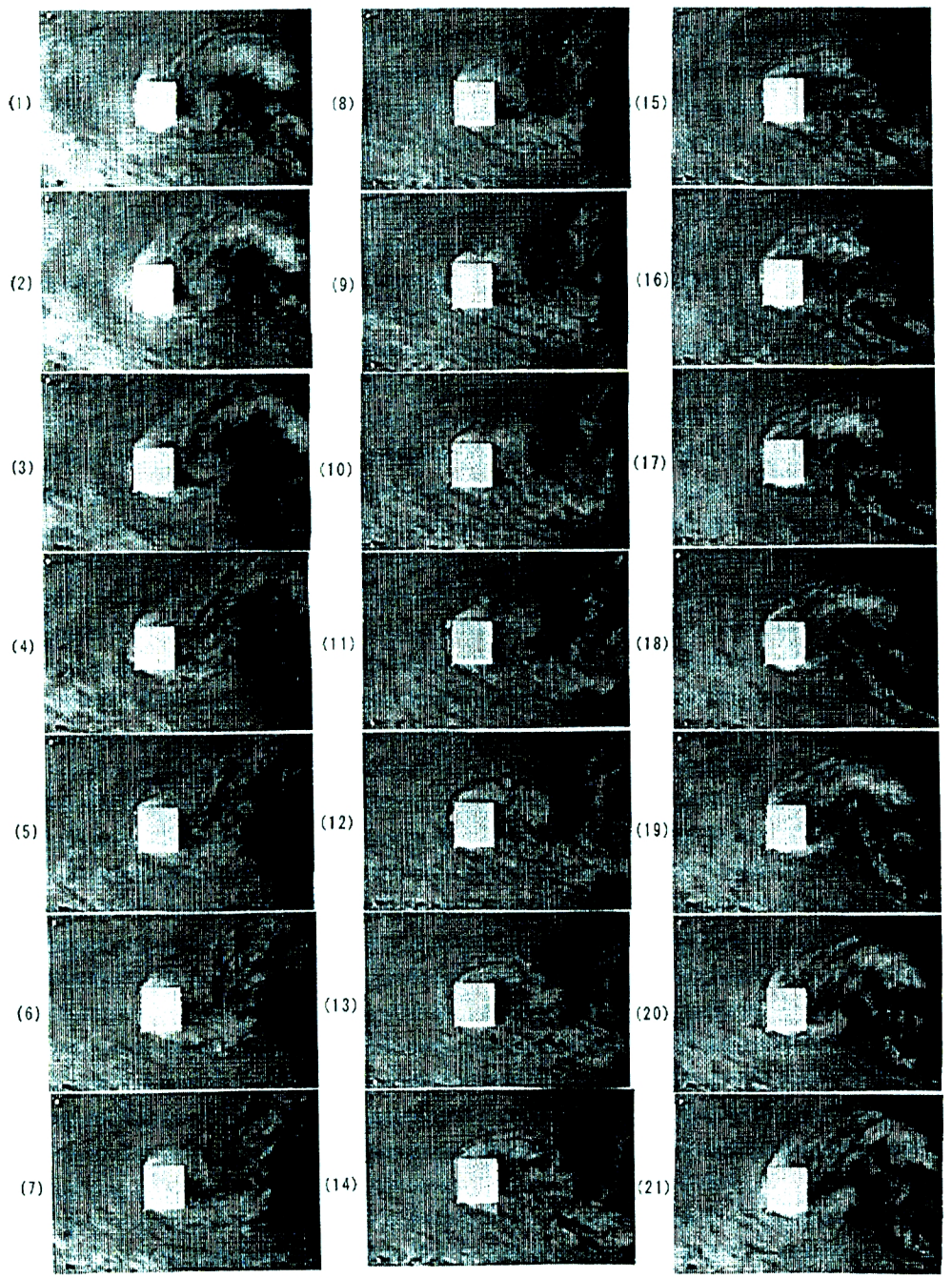


Photo. 3　Time variation of flow pattern of the model with alternately fluctuating jet. ($f_j=f_K$, $C_q=0.4$ %)

りの迎え角を与え，さらに右側から渦を放出している状態と考えられる．この状態は，迎角効果としての準定常成分とカルマン渦による揚力成分が右向き（負）に最大の揚力として作用した状態と考えられる．(21)コマの左側のジェットが噴出している状態では，前述の(1)，(41)コマの状態と逆向きとなっていることがわかる．このように**Fig. 5**の時系列，および**Fig. 6**のスペクトルで認められたカルマン渦の低周波数励起

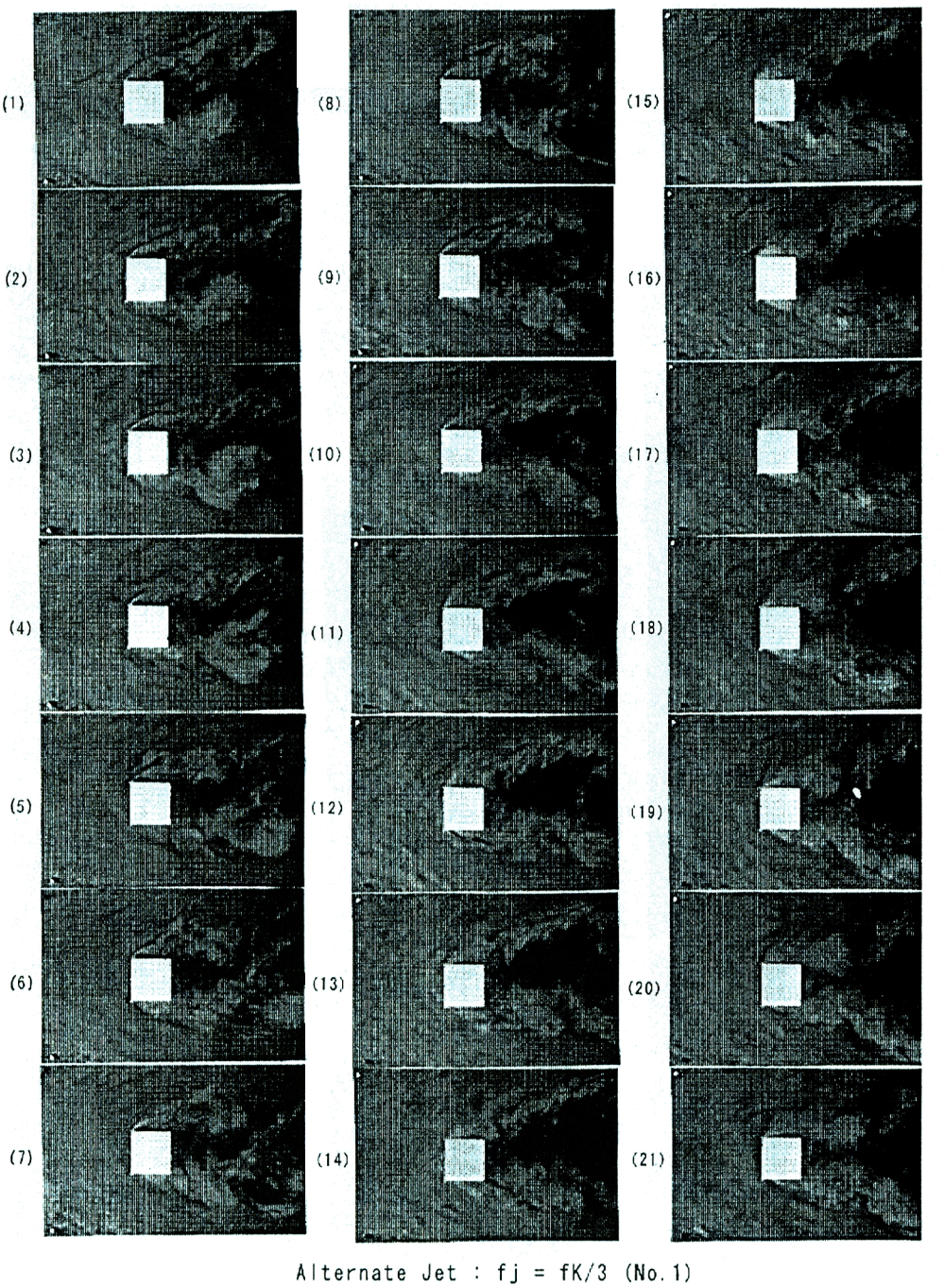


Photo. 4(a) Time variation of flow pattern of the model with alternately fluctuating jet. ($f_j=f_K/3$, $C_q=0.4$ %)

がフローパターンによっても確認できた．

Photo. 5 は，カルマン渦発生周波数とほぼ等しい周波数を有する左右同時に変動するジェットを噴出させた状態のフローパターンである．この結果はフローパターンの１周期の時間変化を示すが，$f_j=f_K$ において同時ジェットの刺激で同期現象が現れたことを示す．脈動流中における正方形断面の変動揚力のパワース

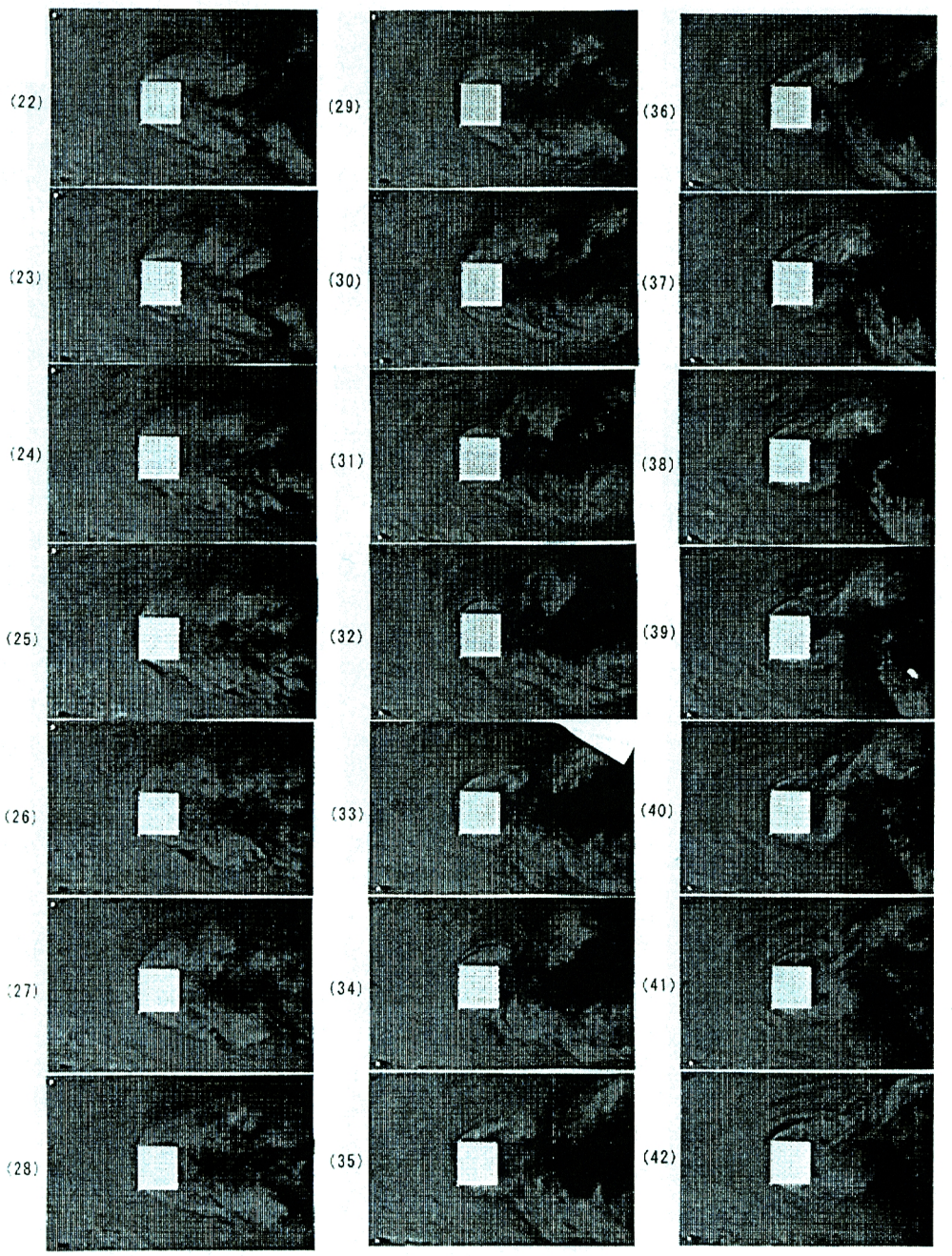


Photo. 4(b)　Time variation of flow pattern of the model with alternately fluctuating jet. ($f_j=f_K/3$, $C_q=0.4$ %)

ペクトルの測定結果によれば，迎え角がゼロの場合には顕著な同期特性は認められないが，迎え角を与えることにより顕著な同期特性示すことが文献8)に示されている．断面前縁からの剥離せん断層に与える刺激という効果で考えれば，脈動流と前面隅角部の同時ジェットによる刺激は，よく似た効果を与えるものと思われる．したがって，本実験では迎え角がゼロであることから，$f_j=f_K$ では同期特性はみられないのではな

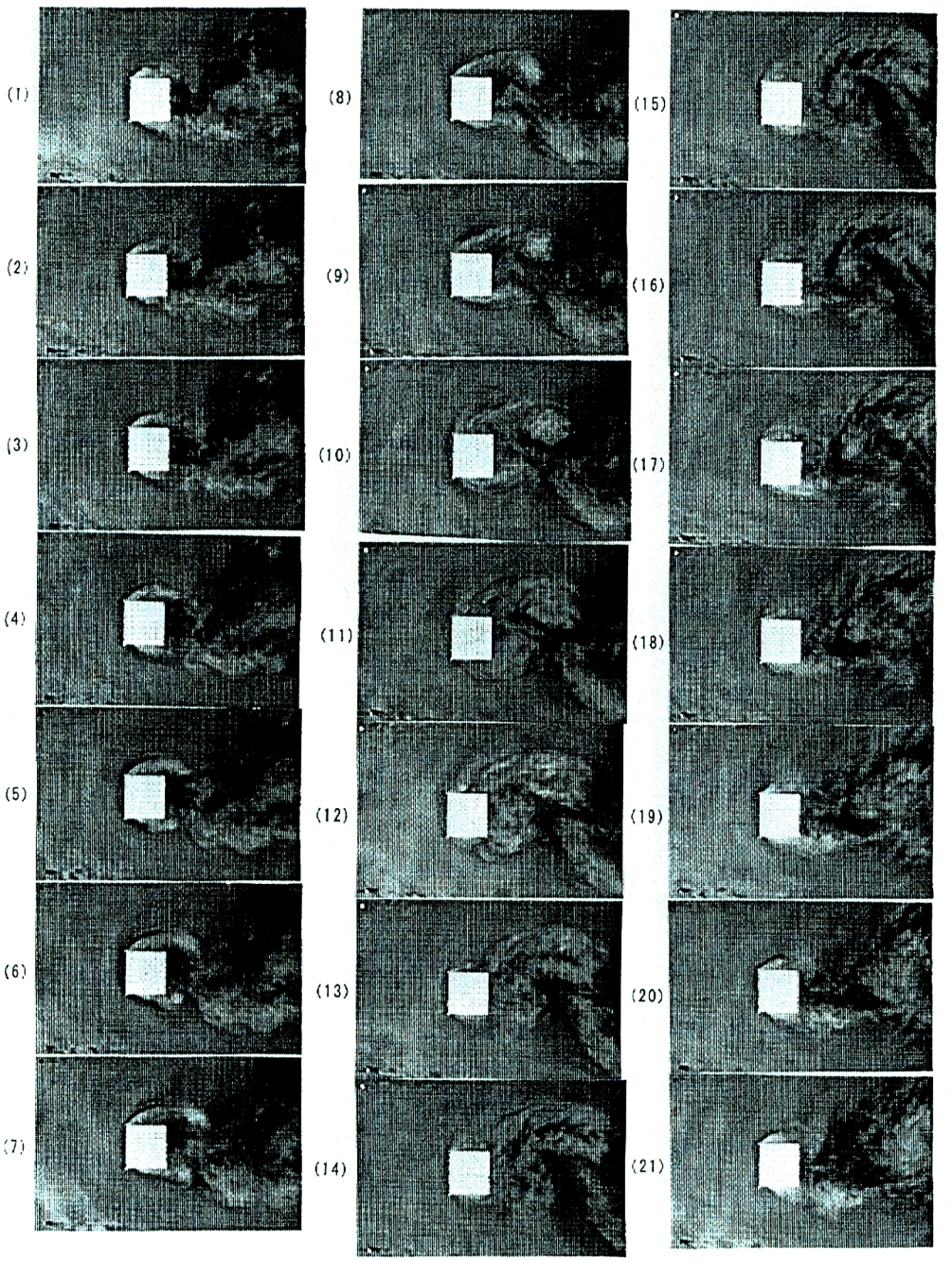


Photo. 5 Time variation of flow pattern of the model with simultaneously fluctuating jet. ($f_j=f_K$, $C_q=0.6$ %)

いかと考えた．しかしながら，**Fig. 4** に示した変動揚力の rms 値が同時ジェットの周波数特性として $f_j = f_K$ の近傍においてピーク特性がみられた．これは模型を製作する際の精度によって左右のジェットの噴出状態が一様でなくアンバランスが生じたことに起因すると考えられる．文献8)の脈動流中の結果を **Fig. 7** に示すが，迎え角がゼロでは同期特性はみられないが迎え角が8度で変動揚力のスペクトルに顕著な同期特性が認められる．ジェットの噴出に左右アンバランスがあれば，平均的にみて **3.1** で述べたようなジェットによる迎角効果が発生し，このため同時ジェットの変動を与えるとき，若干の迎え角を与えた状態でジェットによる刺激を加えたような状態となると考えられる．このため，**Fig. 7** に示す脈動流中での同期特性と同様の現象が発生したものと考えられる．

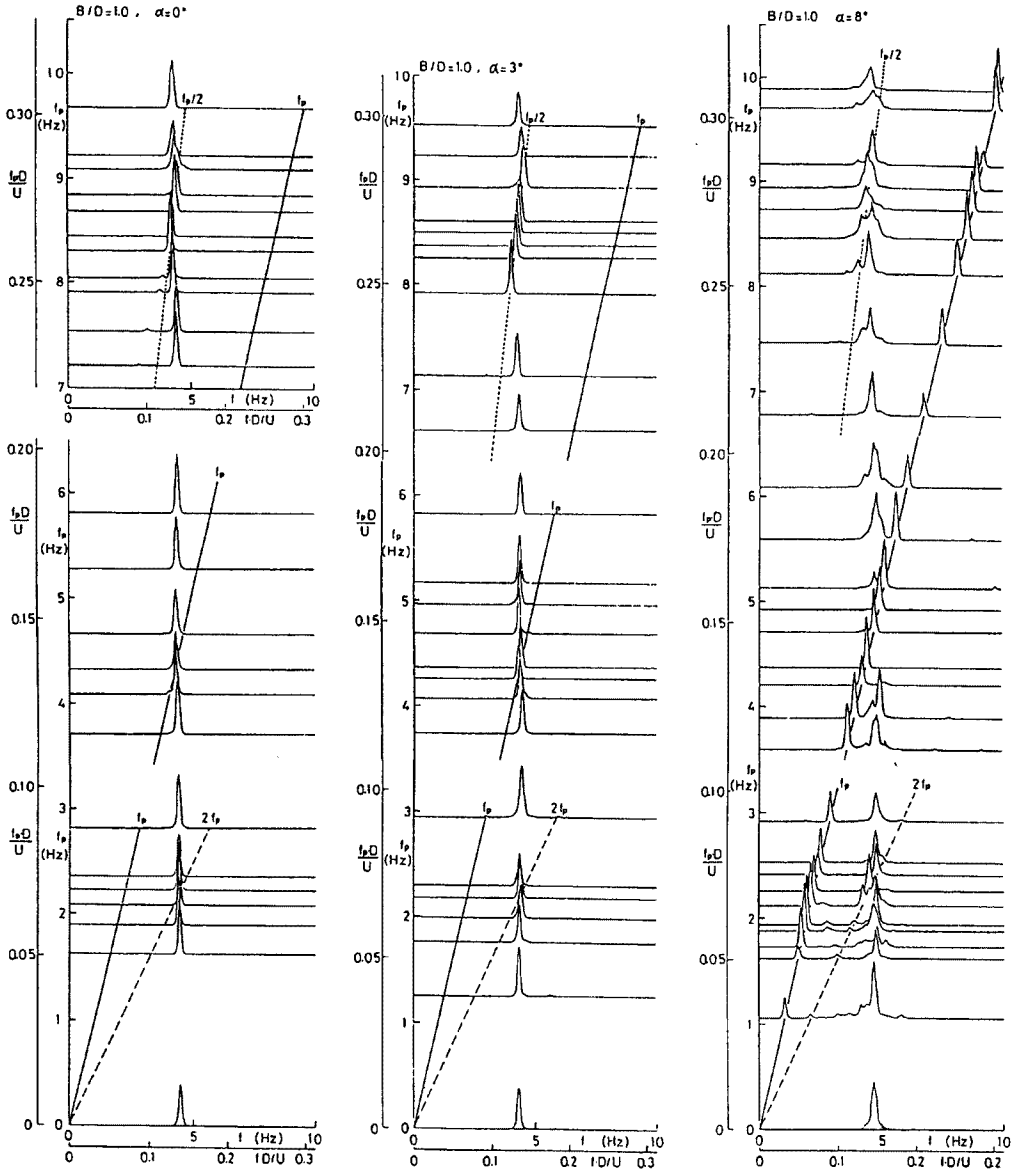
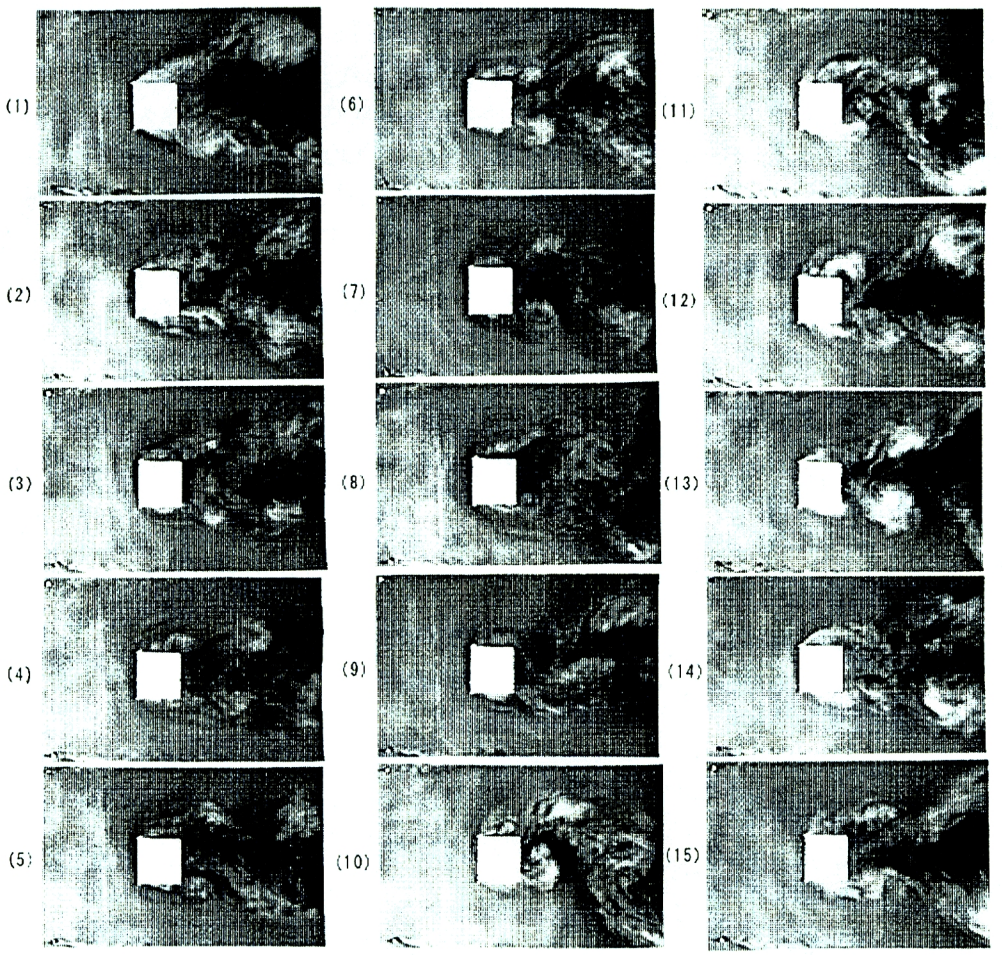


Fig. 7　Spectra of fluctuating lift force of a square-section in the pulsating flow[8].



Simultaneous Jet
(1)Without Jet (2)fj=6 fK (3)fj=4 fK (4)fj=3 fK (5)fj=2.7fK
(6)fj=2.5fK (7)fj=2.4fK (8)fj=2.3fK (9)fj=2.2fK (10)fj=2.1fK
(11)fj=2 fK (12)fj=1.9fK (13)fj=1.7fK (14)fj=1.5fK (15)fj=1.3fK

Photo．6 Wake flow pattern of the model with simultaneously fluctuating jet. (C_q=0.6 %)

Fig. 7 では再付着角以下の迎え角を与えた場合に2倍の脈動周波数によるカルマン渦の励起がみられることが示されているが，この特性がジェットの刺激で発生するかどうかを調べた結果が**Photo. 6** である．これは，カルマン渦の発生周波数より大きな周波数で同時にジェットを噴出させた状態のフローパターンを示す．$f_j=f_K$ の場合と同様に $f_j=2f_K$ 近傍の周波数に対して **Fig. 7** の結果と同様に同期特性の発生することが認められる．このことも，左右のジェットの噴出状態にアンバランスがあること，またジェットの噴出流量が大きいため，ジェットの剝離せん断層に与える効果は脈動流の効果よりも大きい等の原因も考えられる．また，$f_j=2f_K$ 近傍以外の周波数ではジェットの周波数に相当する周波数で前面隅角部より対称的に渦が発生し側面に沿って流下，その後，後流に放出されることが認められ，文献8)の脈動流中の結果とよく似たフローパターンを示すことが知られる．

4. むすび

風に起因する構造物の振動を制御するための風のエネルギーを利用する方法として，風上面隅角部よりジ

ェットを噴出し構造物周りのフローパターンを変化させることによって生ずる流体力をアクチュエータの制御力とする方法を考えた．ジェットの噴出をコントロールすることによって流体力を制御することが可能かどうかといった点等を調べることを目的として風洞実験を行った．得られた結果は以下のとおりである．

（1）ジェットの噴出をゆっくりコントロールする準定常的な運動に関しては，ジェットを構造物の風に起因する振動制御のアクチュエータとして利用できる．

（2）ジェットを噴出孔を周期的に切り替えて噴出する際の動的問題として，カルマン渦の同期現象が発生する．この同期特性は，振動制御においては問題となるが，構造物の振動応答，あるいはwake内の圧力・流速等をアウトプットとみなすフィードバック制御によって対処できると考えられる．

本研究では，噴出孔の形状，配列等を考慮してジェットの特性を最適化したものを考えていない．したがって，今後ジェットの効果をより高いものとするための実験的な検討を加え，実構造物に本手法を応用するするため実現可能と考えられる程度の供給エネルギーをできる限り小さくすることが必要となろう．また，本実験は一様流における実験であったが，さらに乱流中における実験と共に，実際の構造物規模のスケールによる実験的な検討を行い，ここで対象とした流体力学的な現象に対するレイノルズ数の問題等風洞実験における相似則に関する問題に関しても検討すべきであろう．

最後に，本実験を行うに際して御支援を頂いた京都大学防災研究所丸山敬助手，実験装置の製作と実験を手伝って頂いた防災研究所杉政和光技官，市川信夫技官，羽野淳介技官に感謝の意を表する．

本研究は，文部省科学研究費一般研究C（研究代表者・岡南博夫）の援助を受けて行った．

参考文献

1) 中辻　亘，小林紘士：長大橋梁の風による振動の空力的アクティブ制御，土木学会第48回年次学術講演会，1993，pp.814-815.
2) Abdel-Rohman, M.：The Feasibility of Active Control of Tall Buildings, Proc. of the Second International Symposium on Structural Control, University of Waterloo, Ontario, Canada, 1985, Structural Control, Martinus Nijhoff Publishers, 1987, 1-16.
3) 氏本育史，向井洋一，馬場研介，橘英三郎，井上豊：アクティブフィンシステムによる構造物の風制振（その1－制御システム），日本建築学会大会学術講演梗概集，1993，pp.771-772.
4) 向井洋一，氏本育史，馬場研介，橘英三郎，井上豊：アクティブフィンシステムによる構造物の風制振（その2－風振動制御実験），日本建築学会大会学術講演梗概集，1993，pp.773-774.
5) 久保喜延，小坪千野，立石美代子：三次元角柱のローターによる空力弾性振動制御，第2回振動制御コロキウムPART B講演論文集，1993，pp.33-40.
6) 岡南博夫，橋口賢治，矢野伸男：Jetによる空力安定化効果に関する基礎的研究，第11回風工学シンポジウム論文集，1990，pp.79-84.
7) 岡南博夫，古田均，金吉正勝，田中洋：ファジィアクティブ制御のチューニングに対する遺伝的アルゴリズムの応用，第2回振動制御コロキウムPART B，1993，pp.207-pp.214.
8) 岡南博夫：構造物の耐風性に及ぼす気流変動の効果に関する研究，京都大学提出博士論文，1988.