

境界層加速による正方形角柱の耐風制振法

SUPPRESSION OF AERODYNAMIC VIBRATION OF SQUARE SECTION
BY ACCELERATION OF BOUNDARY LAYER

久保喜延* 安田英明** 加藤九州男***

By Yoshinobu KUBO, Hideaki YASUDA and Kusuo KATO

The suppression of aerodynamic vibration of deflective structures such as pylons of long suspension bridges, high-rise buildings and towers is very important to construct these structures. The present paper deals with the suppression method of aerodynamic vibration of a square section prism by accelerating the boundary layer by the rotating cylinders set at the most upstream corners of the prism as shown in Fig.1. The aerodynamic vibration of the prism could be suppressed by the accelerating the boundary layer with certain rotary velocity of rotating cylinder. The increment of rotary velocity corresponds to making the prism much more shallow. The boundary layer control by one rotating cylinder is more effective than by two rotating cylinders set at upper and lower corners of the most upstream surface.

1. まえがき

土木構造物および建築構造物は、年々長大化および高層化しており、断面形状が非流線形であることもあって、風による振動が以前にも増して問題になってきている。風による振動の抑制法としては、原理的には質量を M 、構造減衰を C 、系の剛性を K 、空気力を F とした場合の振動方程式において

$$m \ddot{y} + c \dot{y} + k y = F$$

左辺の各項を大きくする（質量 M を増す、構造減衰 C を増す、剛性 K を増す）か、右辺の空気力 F を小さくする（断面形状を流線形化する）かによって、応答振幅を小さくするという方法で行なわれてきている。

また、最近では同調型質量ダンパーや液体ダンパーも用いられるようになってきたが、これらは、特定の振動数にのみ効力を発揮するものであり、種々の振動数を含むと考えられる現象に対しては、充分にその効力を発揮しない。これに対して、本研究では、風速、風向の変化に追従する耐風制振法の開発を目指すために、空力弾性振動を誘起する原因となっている境界層を制御することによって、空力弾性振動を抑制することを試みている。

Schlichting¹⁾によれば、境界層制御には、次の6つの方法が考えられるとのことである。

(1) 物体壁面を動かすことによって、流れの剥離を遅らせる。

*) 工博 九州工業大学 助教授 工学部設計生産工学科 (〒804北九州市戸畑区仙水町1-1)

**) 九州工業大学 大学院生 工学部設計生産工学科 (〒804北九州市戸畑区仙水町1-1)

***) 九州工業大学 助手 工学部設計生産工学科 (〒804北九州市戸畑区仙水町1-1)

- (2)物体壁面から境界層中に流体を送り込むことによって、流体を加速する。
- (3)境界層内の流体を吸い込むことによって、剥離流による境界層を除去する。
- (4)境界層中に異種気体を送り込むことによって、壁面と主流との間での熱交換率を低下させる。
- (5)適当な形状をした物体によって、層流から乱流への遷移を遅らせる。
- (6)壁面の冷却によって境界層を安定させる。

(2)や(3)の方法は気体の噴出や吸い込みを用いる方法であるが、気体の定量的な制御がかなり難しいようである。角柱の空力弾性振動を抑制するために噴流を使った研究も行なわれているが^{2), 3)}、物体から噴流を送り出す方法や定量的な検討にかなりの問題があるようである。

本研究で行なっている方法は、上記の(1)に属するもので、Fig.1に示すように物体の上流側剥離点に回転軸を設けて流体を加速することによって、流体の剥離を遅らせるものである。この方法は、飛行機の高揚力翼の開発⁴⁾やトレーラートラックの抗力減少装置の開発⁵⁾などに用いられてきているものであるが、矩形柱などの空力弾性振動抑制に用いられた例はない。

2. 実験方法

使用した模型は、Fig.1に示す150x150x900mmの正正方角柱で、直径15mmの回転軸を上流側の上下隅に設けている。この直径は、市販されているサーボモーターの最高速回転数回転軸の表面回転速度を最大接近流速6m/sの2倍まで実験できるように決めた。さらに、正正方角柱の辺長は、回転軸の直径が辺長の10%になるように決めた。模型の骨組み部は、5mm厚のジュラルミン製で側面壁は軽量化のために穴あきとし、その部分を5mm厚の発泡スチロール板で覆っており、回転軸はステンレス棒で、プーリーを介してサーボモーターで駆動されるようになっている。サーボモーターは、角柱内部にセットされ、外部に設けたドライバーによって回転数はコントロールされる。また、正正方角柱の表面圧力が回転軸の回転数に応じて変化する様子を見るために、Fig.1に示すように角

柱中央部の各側壁毎に10点ずつの圧力孔を設け、風洞外部に設けたステッピングモーター駆動のスキナーで測定の切り替えを自動的に行なっている。Fig.2にその計測システムのブロック図を示している。

実験は、(I)角柱静止状態で回転軸の回転数を変化させた場合の表面圧力の測定、(II)回転軸の回転数を変化させた場合の自由振動実験による応答測定 の2つに大別される。また、それぞれにおいて①上下の回転軸の周速度を接近風速に対する比の形で同時に変化させた場合、②上下の回転軸の周速度を変えた場

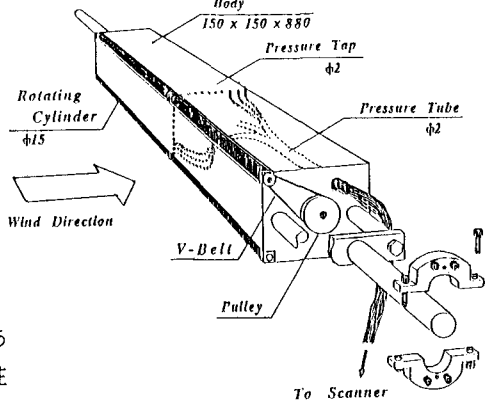


Fig. 1 Experimental model for a square prism with rotating cylinders driven by DC servomotor set in the prism.

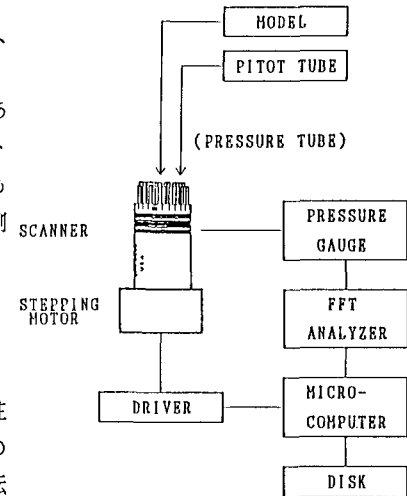


Fig. 2 Block diagram for measuring system to measure the surface pressure on the square prism.

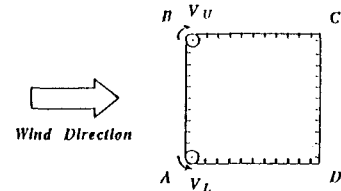


Fig. 3 Definition of the pressure tap locations.

合、③片側の回転軸の周速度のみを変えた場合の3つの場合について測定を行なっている。自由振動実験における諸元は以下の通りである。模型重量 $W = 6.04 \text{ kgf}$ 、固有振動数 $f = 2.79 \text{ Hz}$ 、対数構造減衰率 $\delta = 0.013$

3. 静止模型における表面圧力分布

回転軸の周速度と表面圧力分布との関係を見るために、Fig.3に示す圧力孔の位置で測定された表面圧力の測定結果を次式に示す平均圧力係数 C_p および変動圧力係数 C_p' で整理している。特に、変動圧力係数はR.M.S.を用いた表現となっている。

$$C_p = \frac{P_m - P_0}{\frac{1}{2} \rho V_0^2} \quad \text{----- (1)}$$

$$C_p' = \frac{\text{R.M.S.}}{\frac{1}{2} \rho V_0^2} \quad \text{----- (2)}$$

ただし、 P_m ：測定圧、 P_0 ：上流無限遠点での圧力、 ρ ：空気密度、 V_0 ：上流無限遠点での流速

3.1 平均圧力分布

上下の回転軸を同じ回転速度で回転させた場合の平均圧力の挙動を示したのがFig.4である。図中 V_U 、 V_L はそれぞれ上側回転軸および下側回転軸の周速度の接近流速に対する比率を示している。これによると、前面圧分布は、回転速度の変化に対して分布形状は変わらない。これに対して、側面圧および背面圧は、回転速度の増加とともにかなり変化する。特に、側面圧分布形状は、回転軸が回転していない場合には、側面上でほぼ一定の圧力値となっているのに対して、回転軸の回転速度の増加とともに下流側の圧力の回復がおおきくなっている。下流側測点の圧力係数は、 $V_U = V_L = 0.0$ で $C_p = -1.7$ 程度であったものが、 $V_U = V_L = 1.0$ では $C_p = -0.8$ 程度にまで回復している。回転速度を上昇しても最下流端の測点での圧力係数はこれ以上回復はしないようであるが、回転速度の上昇とともに側面上流側での圧力回復が大きくなっている。しかし、 $V_U = V_L \geq 1.2$ ではそれ以下の回転速度の場合に見られたほどの回転速度の上昇に対する顕著な圧力変化は現われていない。Fig.5には、背面圧の平均値と回転速度比との関係および側面の最上流測点での圧力係数と回転速度比との関係を示している。側面の最下流測点での圧力係数値は、背面の圧力係数値とも一致しており、回転速度比が $V_U = V_L \leq 1.0$ では、回転速度比の増加

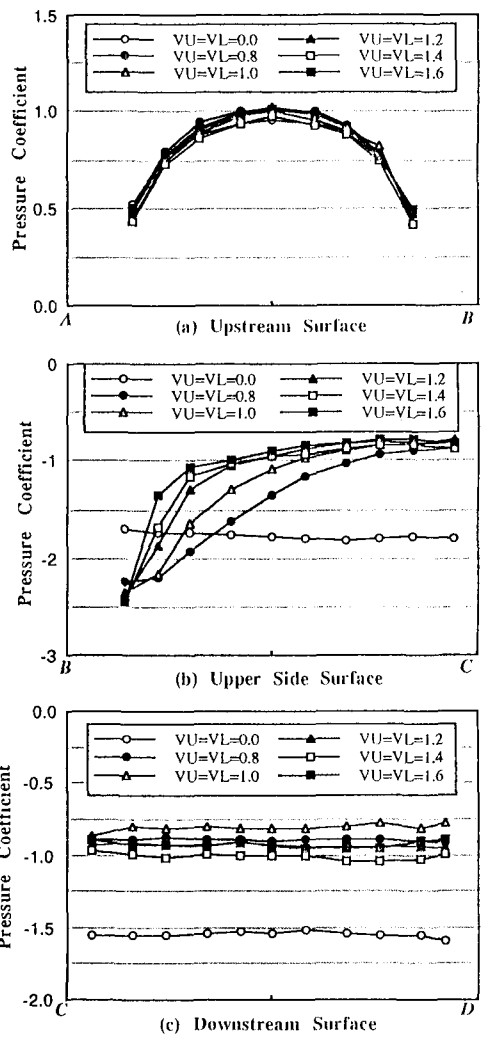


Fig 4 Mean pressure coefficient distributions of Case 1 ($V_U = V_L$).

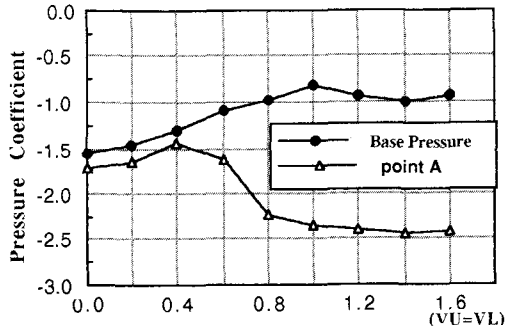


Fig. 5 Pressure coefficient of down stream surface and most upstream point on the side surface.

に対して背面圧係数は、式(3)の直線関係で回復しているが、 $V_U = V_L > 1.0$ では、逆に僅かながら減少している。周辺流れと境界層がほぼ同じ流速になった時に背面圧が最も小さくなり、物体周辺流れとして無理のないものとなっていると考えられる。

$$C_p \div -1.5 + 0.7V_U$$

$$(V_U = V_L \leq 1.0) \quad (3)$$

同様に側面圧の最上流端の圧力係数の回転速度比に対する動きをみると、速度比が $V_U > 1.0$ になった場合、圧力係数はほとんど変化していない。このことは、回転速度比を $V_U > 1.0$ にしても空力弾性振動に対する制振効果はあまり期待できないことを意味している。

次に、上側回転軸を静止させて、下側回転軸のみを回転させた場合の圧力分布について考察する。

Fig. 6 Mean pressure coefficient of each surface of the case $V_U=0.0$.

前面圧の分布は、上側に歪んだ圧力分布形状となっているが、上側面圧力の分布は下側回転軸の回転によって圧力回復をし、上側面の上下流側ともほぼ同じ圧力係数となっている。これに対して、回転軸がある側の下側面の圧力分布は、上下回転軸を回転させた程の圧力回復はないものの、回転速度比が増加するにしたがって、上下回転軸を回転したものになんて近くなっている。この傾向は、回転速度比が大きくなるにしたがって下流側測点の圧力回復が大きくなり、上流側測点の圧力の低下が大きくなっており、回転速度比を増すにしたがって空力弾性振動の抑制に寄与すると推察される。

上側の回転速度比を固定して下側の回転速度比を変化させた場合についても実験を行なったが、これらは、上述の2つのケースの中間的な特性を示しており、空力弾性振動に対しても上

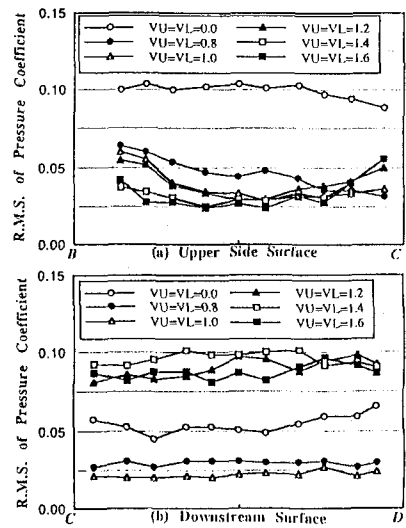
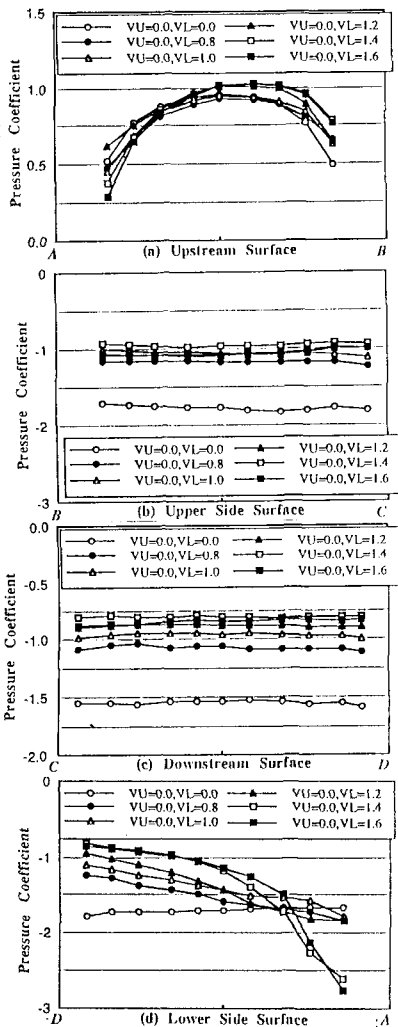


Fig. 7 Fluctuating pressure coefficient of upper side and downstream surfaces of the case $V_U=V_L$

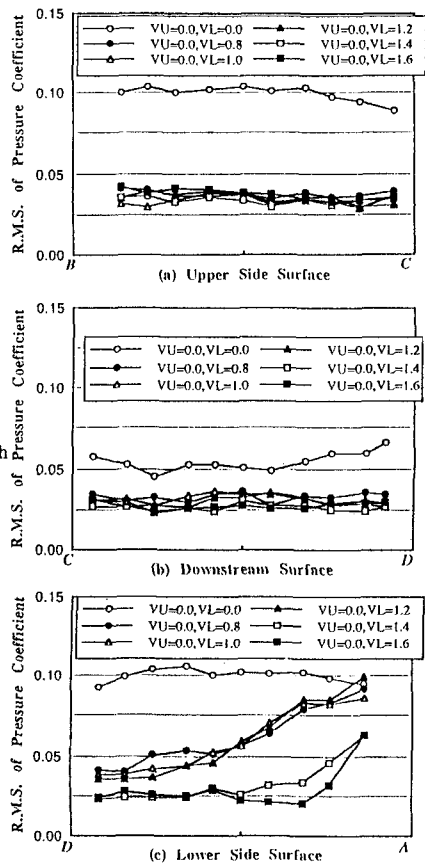


Fig. 8 Fluctuating pressure coefficient of side and downstream surfaces of the case $V_U=0.0$

述の2ケースの中間的な挙動を呈するものと推察される。

3.2 変動圧力係数

Fig.7およびFig.8は、それぞれ上下回転軸を同じ回転速度で回転した場合と、上側回転軸を静止させ下側回転軸を回転させた場合とについて、変動圧力のR.M.S.値で表した変動圧力係数分布の測定結果を示したものである。Fig.7によれば、側面上では変動圧力係数が $V_U=V_L=0.0$ で $\bar{C}_p=0.1$ であったものが、上流側の測点で若干大きめとなっているものの、 $V_U=V_L=1.6$ で $\bar{C}_p=0.03$ 程度まで小さくなっている。これに対して、背面では $V_U=V_L=0.0$ で $\bar{C}_p=0.05$ であるが、 $V_U=V_L=1.0$ で $\bar{C}_p=0.024$ と最小値を取り、 $V_U=V_L \geq 1.2$ で $\bar{C}_p=0.08$ と側面とは異なって、回転速度が接近流速より大きくなると、変動圧力係数がかなり大きくなっている。周辺流速と物体表面上の流速が近くなることで、表面せん断層が薄くなったことで抗力が最小値を取るものと考えられる。Fig.8の上側回転軸を静止させた場合は、上側面はいずれの回転速度においても側面全体にわたって $\bar{C}_p=0.03$ 程度の値となっている。背面も同様の傾向を有している。これらに対して回転軸が回転している下側面では平均圧力係数と同様に、上流側の変動圧力係数が大きく、下流側の変動圧力係数が小さくなっており、回転速度を増すにしたがって、上流側の変動圧力係数が減少している。測定手法上、測点間の圧力の位相差を測定することはできなかったが、これらのことから類推すると、上下の回転軸を回転させている場合は、各側面上での測点の間の位相差はほとんど一致しており、下側の回転軸のみを回転させている場合、特に下側面での測点間の圧力に位相差が生じているのではないかと考えられる。

4. 空力弾性振動特性

自由振動実験によって、回転軸を回転させた場合の制振効果について検討した結果が、Fig.9~11である。上下の回転軸の回転速度が同じ場合の結果を示したのがFig.9と10である。これによれば、回転軸を静止させた場合には、換算風速 $V_r=6$ あたりからギャロッピングが発生しているが、 $V_U=V_L=0.8$ では $V_r=4.8$ で渦励振が発生し、 $V_r=6$ で発生していたギャロッピングが $V_r=9.6$ に移行している。回転速度を増すと、ギャロッピングは消えるが、渦励振の振幅は僅かながら小さくなるものの、ほぼ同じ風速で発生している。この渦励振の最大振幅が生じている風速で、回転数を変化させた場合の接近流速に対する回転速度比と渦励振最大振幅との関係を示したのがFig.10である。これによると、回転速度比を $V_U=V_L \geq 1.2$ とした場合には渦励振の振幅はほとんど変化しない。このことは、側面の平均圧力係数の分布においても $V_U=V_L \geq 1.2$ では顕著な差が現われなかったことと対応しているものと考えられる。このように、回転速度比を増すことによって、ギャロッピングが高風速側に移行し、大きな速度比においては消滅していることや渦励振の振幅が小さくなっていること、側面の平均圧力が上流側で著しく低下し、下流側で回復していることは、回転軸の回転で境界層を加速することによって、正方形角柱が扁平な矩形柱に近付いていることを意味していると考えられる。

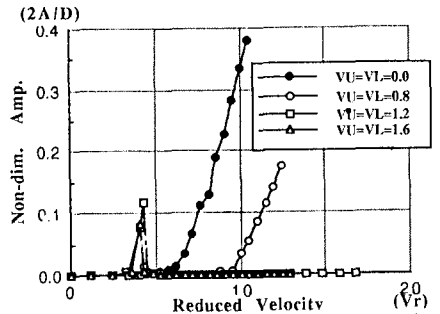


Fig. 9 Dynamic responses of square prism with two rotating cylinders.

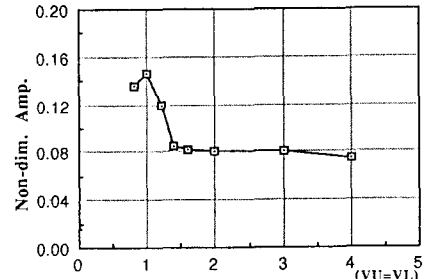


Fig. 10 Maximum amplitudes in vortex excited vibration to rotary velocity of two rotating cylinders.

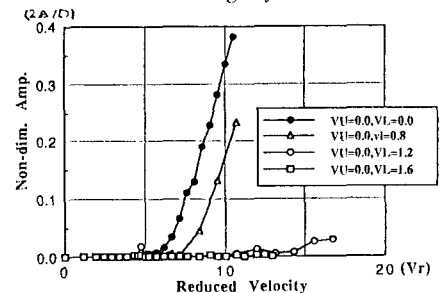


Fig. 11 Dynamic responses of square prism with one rotating cylinder.

上下回転軸の同速度比での回転のみでは完全な制振は行えないことが分かったため、上側回転軸を静止させ、下側回転軸のみを回転させた場合について検討した結果が、Fig.11である。この場合は、下側回転軸の回転速度比を $V_L=0.8$ とした場合には、上下回転軸を同速度比で回転したものとは異なって、渦励振はほとんど発生せず、ギャロッピングが $V_r=7.1$ に移行している。回転速度を増すと、僅かながら渦励振の発生が見られるものの、ギャロッピングに相当する振動の振幅は著しく減少する。 $V_L=1.6$ では、これら2つの振動は全く観測されないほどにまで制振されている。これは、変動圧力係数の項で述べたように側面上での圧力の位相差が関係して、渦励振やギャロッピングを制振させているものと考えられる。

5. まとめ

正方形角柱の上流端の上下に回転軸を取り付け、これを回転することによって境界層を加速し、正方形角柱に生じる空力弾性振動を抑制できるか否かを、表面圧力の測定と自由振動実験によって検討を行なった。その結果、以下のような知見を得た。

- (1) 回転軸による境界層の加速制御は、確実かつ簡単に行えるが、
- (2) 空力弾性振動の制振という観点からすると、両側面での境界層を加速することのみで、物体を見かけ上偏平なものとするという考え方だけでは、偏平にできる能力に限界があるため、十分な制振を行なうことができない。そのためには、位相差についての確認はなされていないが、上下面での表面圧力の位相差をずらすこと、これは迎角を与えることとも関連するが、制振におけるポイントであるようである。本研究で行なったものでは、上下の回転軸を同速度で回転した場合が前者にあたり、十分な制振が行なわれなかった例である。また、下側のみの回転で行なったものは十分な制振が行なわれており、これは後者の例であろう。
- (3) 回転軸による境界層の加速は、空力弾性振動の制振のみならず、抗力の低減にもなるため長大構造物および高層構造物の静的風荷重の低減にも寄与することになる。平均圧力係数の測定結果のうち、背面圧についてみると、回転軸を静止させている場合の平均圧力係数が $C_p=-1.5$ であるものが、 $C_p=-0.6$ 程度まで減少するため、風荷重を60%も軽減できることになる。

今後、本制振法の実用化に向けて、さらに詳細な検討を進めていく計画である。

謝辞

本研究を着手するにあたって、カナダのBritish Columbia大学のV.J.Modi教授は貴重な助言とヒントを与えて下さった。九州工業大学建設工学教室の卒論生沖井宏成君、落田健太郎君はじめ構造工学研究室の諸氏には、実験およびデータ整理において多大な協力を頂いた。なお、本研究は、文部省科学研究費補助金一般研究(B)によって行なわれている。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) H.Schlichting; Boundary Layer Theory, McGraw-Hill, 7th ed., 1979.
- 2) 岡南博夫他; Jetによる空力安定化効果に関する基礎的研究(1), 日本風工学会誌第41号, pp.49-50, 1989年
- 3) 園部好洋; 境界層制御による角柱の安定化に関する一実験, 土木学会第45回学術講演会概要集, 1990年.
- 4) V.J.Modi; Moving Surface Boundary-Layer Control for Aircraft Operation at High Incidence, J. of Aircraft, AIAA, Vol.18, No.11, pp.963-968, 1981.
- 5) V.J.Modi; Moving Surface Boundary-Layer Control as Applied to Two and Three Dimensional Bluff bodies, Proc. of 8th International Colloquium on Industrial Aerodynamics, 1989.

(1990年10月12日受付)