

# 角状構造物に作用する ギャロッピング振動時の非定常空気力について

## UNSTEADY AERODYNAMIC FORCE EXCITING RECTANGULAR-CROSS-SECTIONED STRUCTURES INTO GALLOPING VIBRATIONS

斎藤 通\* 松本 勝\*\* 本田明弘\*\*\*

By Toru SAITO, Masaru MATSUMOTO and Akihiro HONDA

The galloping vibration of rectangular-cross-sectioned structures has been the subject of engineering studies in which the exciting forces are estimated using the quasi-steady theory. The quasi-steady theory, however, is said to be good only in application to cases involving high wind velocities (50 and above in reduced velocity), and phenomena have frequently taken place which defy explanation by the quasi-steady theory. On the other hand, the reduced wind velocity for the structures in natural wind is high at  $V/fD = 0$  to 100 with the structural members but only about  $V/fD = 0$  to 50 at the most with any fabricated structures, and thus the structural behaviors in the latter range of wind velocities cannot be fully explained by the quasi-steady theory. The authors focused their study on this galloping vibration and through numerical analysis of the flow around the rectangular cross section as well as of the aerodynamic force acting on the cross section, explored aerodynamic phenomena.

### 1. まえがき

角状構造物に発生するギャロッピング振動については、古くよりDen-Hartog<sup>(1)</sup>等により、準定常理論を用いて、励振力や限界風速を推定することが試みられている。しかしながら準定常理論が完全に成り立つのは、非常に高い風速（無次元風速 $[V/fD]$ で50以上）と言われており<sup>(2)</sup>、それ以下の風速においては準定常理論では説明することができない現象がしばしば生じている。

一方、我々が通常対象とする自然風中の構造物の無次元風速は、部材では $V/fD = 0 \sim 100$ になるが、構造物本体ではたかだか $V/fD = 0 \sim 50$ であり、上記準定常理論で十分説明できる風速領域にはない。

その代表的な現象は、無次元風速が $V/fD = 5 \sim 10$ で発生する渦励振との干渉問題であり、数多くの研究者により実験並びに解析が行われて来た<sup>(3)</sup>。その結果、完全剥離型の渦励振が発生する共振風速の直前では、渦による非常に大きな減衰力が作用するため、ギャロッピング振動は完全剥離型渦励振の共振風速以下では発生しない（ギャロッピング振動の発振風速は、完全剥離型渦励振の共振風速に一致する）事が明らかになった<sup>(4)(5)</sup>。しかしながら、無次元風速が $V/fD = 20 \sim 50$ におけるギャロッピング振動の特性についてはあまり

\* 三菱重工業（株） 長崎研究所 流体・伝熱研究室 主務 （〒850-91 長崎市飽の浦町1番1号）

\*\* 工博 京都大学 工学部 助教授 （〒606 京都市左京区吉田本町）

\*\*\* 三菱重工業（株） 長崎研究所 流体・伝熱研究室 （〒850-91 長崎市飽の浦町1番1号）

明らかにされておらず、溝田等<sup>(2)</sup>によれば、上記無次元風速領域における非定常空気力は位相差において準定常理論と異なるとの指摘がある程度である。

本研究では、上記準定常理論で説明が困難な無次元風速の内  $V/fD=20\sim50$  におけるギャロッピング振動（以下非定常ギャロッピング振動と呼ぶ）を対象に、断面周り流れ、及び断面に作用する非定常空気力を、コンピュータを用いた数値解析より求め、その作用形態を明らかにすると共に、振動発生メカニズムについて若干の考察を加えた。

## 2. 基本断面周りの流れの解析

基本断面として、斜張橋の主塔シャフト断面を初め多くの土木構造物の部材又は本体構造物として用いられている矩形断面（断面比  $B/D=1.5, 2.0$ ,  $B$ : 幅,  $D$ : 高さ）を対象にコンピュータを用いた数値解析を行い、振動時の断面周りの流れ及び断面に働く非定常空気力を算出した。解析には、文献<sup>(6)</sup>に示す渦点法を用いた。計算は無次元風速 ( $V/fD$ ,  $V$ : 風速,  $f$ : 振動動数,  $D$ : 高さ) が  $5\sim50$ 、無次元振動振幅 ( $y_0/D$ ,  $y_0$ : 片振幅,  $D$ : 高さ) が  $0.02$  について行った。試験結果の 1 例を、図 1～図 4 に示す。これら一連の図より分かるように、いずれの断面でも、その背後で、反対符号の渦が交互に巻き上がり、交番渦が形成される。また、断面に働く非定常揚力は、いずれの風速においても物体の振動周期ではなく、ストローハル成分に対応する無次元周期で変動する。

また、変動抗力の平均値は、おおよそ  $1.6\sim1.7$  程度と従来の試験結果<sup>(7)</sup>とほぼ一致している。

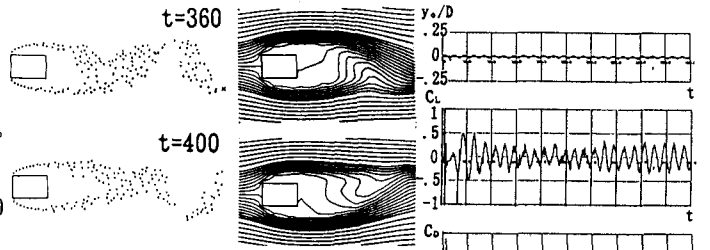


図 1 振動矩形断面周りの流れ  
( $B/D=1.5, V/fD=5, y_0/D=0.02$ )

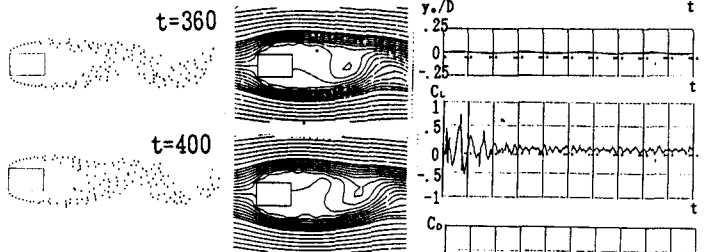


図 2 振動矩形断面周りの流れ  
( $B/D=1.5, V/fD=50, y_0/D=0.02$ )

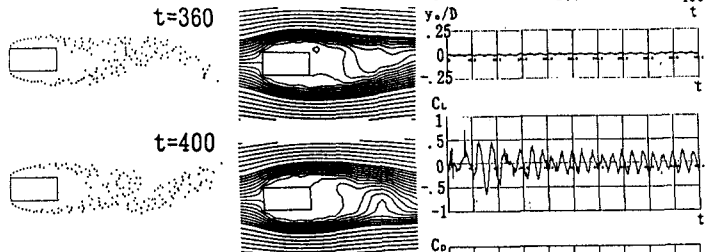


図 3 振動矩形断面周りの流れ  
( $B/D=2.0, V/fD=5, y_0/D=0.02$ )

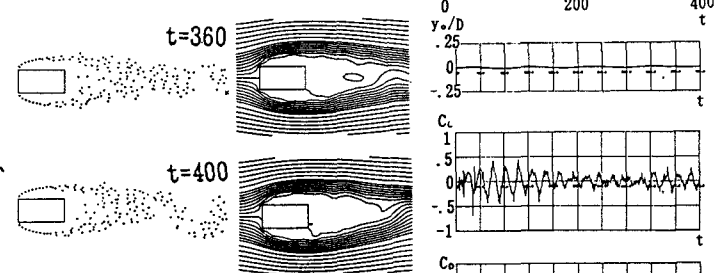


図 4 振動矩形断面周りの流れ  
( $B/D=2.0, V/fD=50, y_0/D=0.02$ )

上記の結果をもとに、横軸に無次元振動変位を、縦軸に非定常揚力を取り、リサージュを描いたものが図5である。図5より分かるように、ストローハル成分のために、非常に複雑な波形を描くため、数値フィルターを用いて、ストローハル成分を除去し、今回対象としている振動周期成分のみの非定常揚力を取り出し、再度リサージュを描いた。その結果を図6に示す。なお、図7には、上記の結果をもとに位相差並びに下式より等価な空力減衰の平均値を求め、風洞におけるバネ支持模型試験結果と比較した。

$$\delta_a = \frac{1}{8\pi} \cdot \left(\frac{V}{fD}\right)^2 \cdot \left(\frac{D}{\gamma_0}\right) \cdot \left(\frac{\rho D^2}{M}\right) \cdot \left(\frac{B}{D}\right) \cdot \left(\frac{2}{\pi \gamma_0 \rho V^2 D}\right) \cdot \frac{1}{n} \int_0^{nT} F_y(t) \dot{y}(t) dt \quad (1)$$

上式各記号は以下の諸量を示す。

$\delta_a$ : 空力減衰、 $\rho$ : 空気密度、 $M$ : 単位長さ当たりの質量、 $n$ : 波数、 $y$ : 変位、 $\cdot$ : 時刻の1階微分

図7より分かるように、いずれの断面の場合も、数値解析より求めた空力減衰の風速に対する変化特性は、風洞におけるバネ支持試験結果とよく一致している。

またその値は、図8に示す静的3分力試験結果の揚力傾斜より、準定常理論を用いて推定した結果と概ね一致する。しかしながら、位相差については、数値解析結果によると、無次元風速 $V/fD=20$ では、おおよそ $\phi=50^\circ \sim 60^\circ$ で、準定常理論の場合の位相差 $\phi=90^\circ$ とは異なる。また無次元風速 $V/fD=50$ へと高まるに連れて、位相差は $\phi=90^\circ$ に近づいて行く。

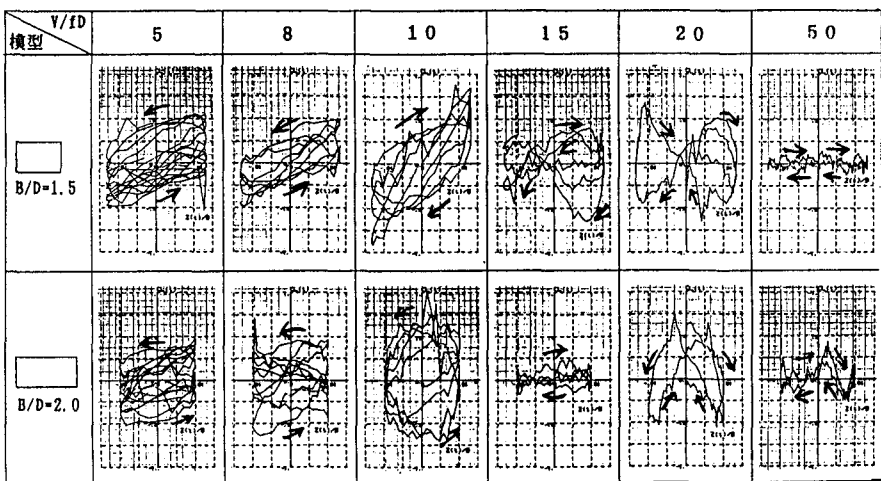


図5 非定常揚力係数 $C_L$ と無次元変位 $y/B$ のリサージュ（生波形）

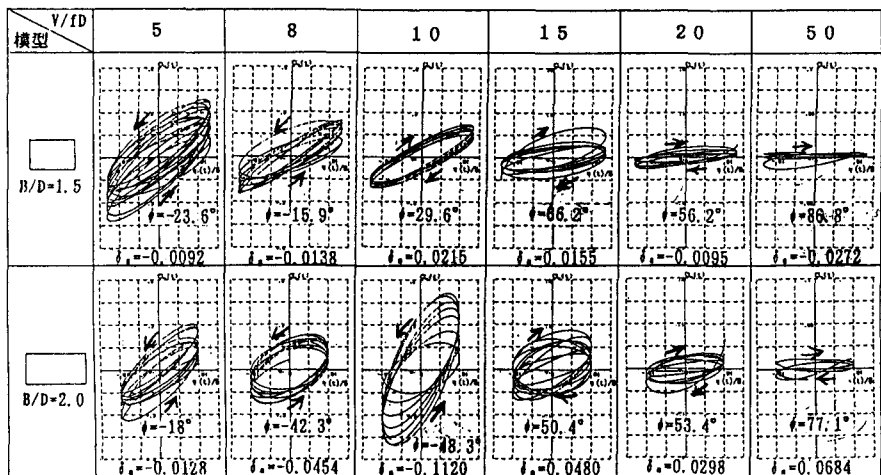


図6 非定常揚力係数 $C_L$ と無次元変位 $y/B$ のリサージュ（フィルタ通過後）

いて行く。上記の結果は、文献(2)に示された風洞試験結果と同様の結果であり、数値解析においても、無次元風速が $V/fD=20 \sim 50$ の領域におけるギャロッピング振動については、その非定常空気を、完全には準

定常理論を用いて説明することができないことが明らかになった。ここでは、前頁に示すような領域におけるギャロッピング振動を、準定常理論で説明できる $V/fD$ が50以上のギャロッピング振動と区別して『非定常ギャロッピング振動』と以下呼ぶことにする。

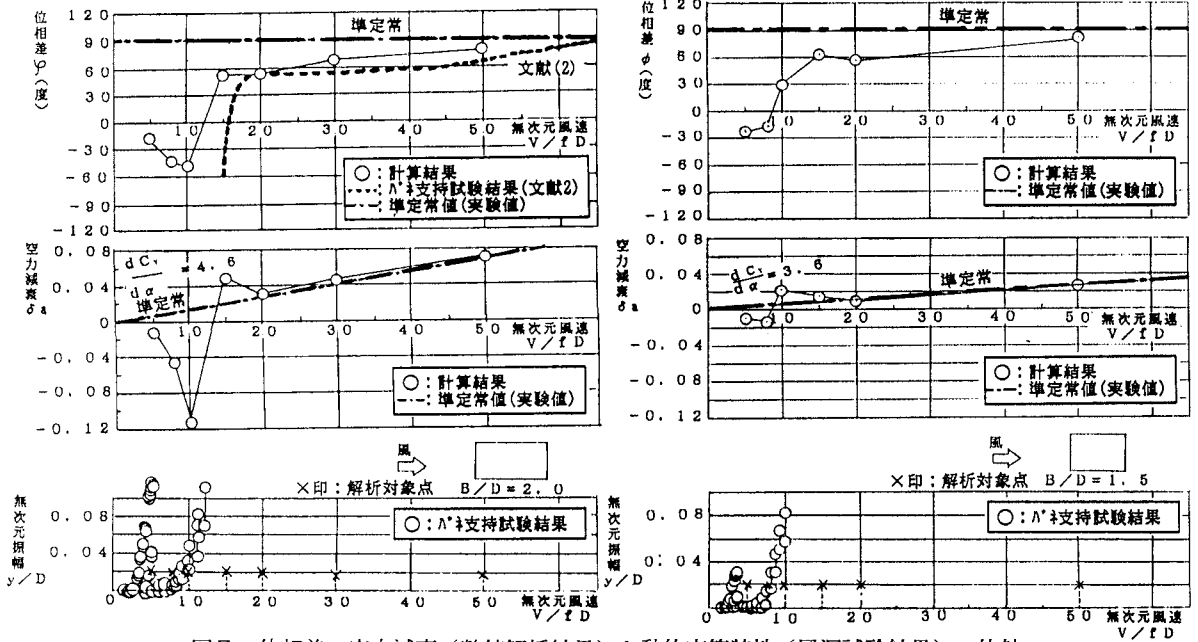


図7 位相差・空力減衰(数値解析結果)と動的応答特性(風洞試験結果)の比較

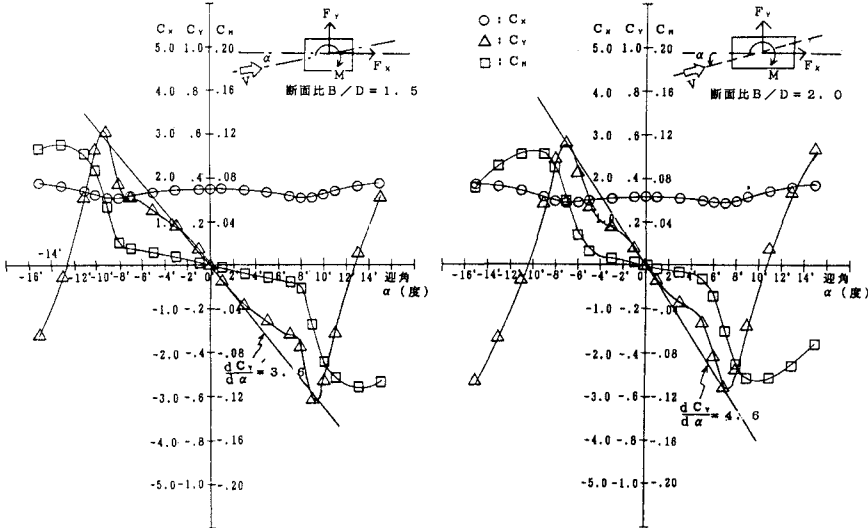


図8 静的3分力試験結果(風洞試験結果)

### 3. 非定常ギャロッピング振動時に作用する非定常空気力

非定常効果としては、以下に示すような2通りの効果が考えられる。図9に示すように準定常の考え方としては、時事刻々の断面後流の流れは、断面が静止しているときの後流の流れに一致すると考える。しかしながら、実際には断面の後流は、静止物体の後流とは異なり時事刻々振動する物体から吐き出される流れが

主流によって後流に流れ去り、蛇行したものとなっていると考えられる。そのため、振動している物体に作用する非定常空気力は、上記蛇行した後流の影響を受ける。もう一つの非定常効果としては、流れの追従性が考えられる。すなわち、物体の流れに対する僅かな姿勢変化により空気力が極端に変わるような断面では、流れは振動物体の動きに追従せず、振動物体に作用する非定常空気力は準定常で考えた場合の非定常空気力に比べ変化すると考えられる。図10には振動物体周りに作用する非定常圧力の変動成分の時事刻々の分布形状を示す。図10より分かるように、最大変位点における変動圧力は、準定常理論の場合には、上下で対称と考えられるが、実際には上下で対称となるのは更に時刻がおおよそ1/3周期経った後で、明らかに変動圧力と振動変位の間には準定常理論とは異なった位相差が存在する。

また、圧力は後縁側より前縁側の方が激しく変動していることが分かる。上記の様に考えた場合、振動物体に作用する非定常空気力は、準定常理論で考えた場合の空気力との絶対値の比、及び位相差をそれぞれ無次元振動数  $k (=fd/V)$  の関数として  $\kappa(k)$  及び  $\phi(k)$  とすると以下のように表すことができる。

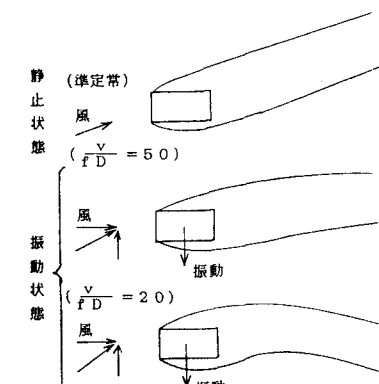


図9 振動物体背後の流れのイメージ図

$$F_y(t) = F_{y0} \kappa(k) \sin(2\pi f t + \phi(k)) \quad (2)$$

式(2)中  $F_{y0}$  は準定常空気力の絶対値を示す。  
ここで、式(2)を式(1)代入し非定常空力減衰を求め、準定常理論で考えた場合の空力減衰との比を  $\xi(k)$  と表すと  $\xi(k)$  は式(3)で表される。

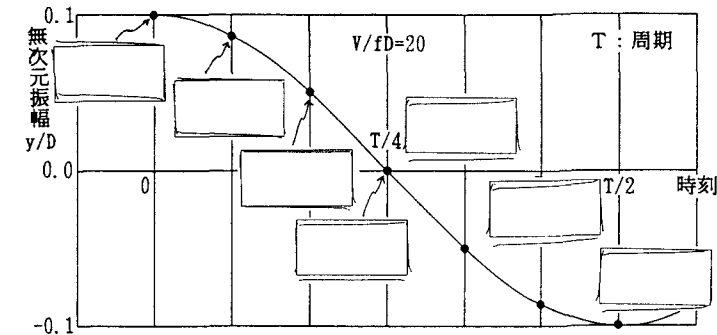


図10 振動矩形断面周りに作用する非定常圧力の変動成分の時間変化 (数値解析結果、 $V/fD = 20$ )

$$\xi(k) = \kappa(k) \phi(k) \quad (3)$$

上式において  $\xi(k)$  は空力減衰における非定常効果であり、 $\kappa(k)$  は空気力の絶対値に起因した非定常効果を  $\phi(k)$  は空気力の位相差に起因した非定常効果を表す。尚  $\phi(k)$  は、式(4)で  $\phi(k)$  と関係づけられる。

$$\phi(k) = \sin \psi(k) \quad (4)$$

図7に示す解析結果より、上記  $\phi(k)$  及び  $\kappa(k)$  を算出すると図11のようになる。図11より分かるように、 $\phi(k)$  及び  $\kappa(k)$  共に無次元振動数  $k$  が増大するに連れて(言い換えれば、無次元風速が減少するに連れて)減少する傾向にある。ここで、 $\phi(k)$  は非定常効果を準定常理論値との比として表す関数であるので、 $k \rightarrow 0$  の(即ち高風速になる)時1になり、且つ  $k \rightarrow \infty$  の(即ち低風速になる)時次第に1より小さな値になり0に近づく周期関数になる事が考えられる。そこで下式のような関数を当てはめ解析結果より  $\lambda$  の値を求

めると表1のようになる。

$$\phi(k) = \frac{\sin(\lambda k)}{\lambda k} \quad (5)$$

表1より分かるように $\lambda$ の値は多少のばらつきはあるが、おおよそ $\lambda = 21$ になる。図12は $\lambda = 21$ とした時の、位相差 $\phi(k)$ を上記近似曲線を用いて求めたものであるが、無次元風速が $V/fD > 20$ で、ほぼ解析値に近い位相差 $\phi(k)$ を与える事ができると考えられる。

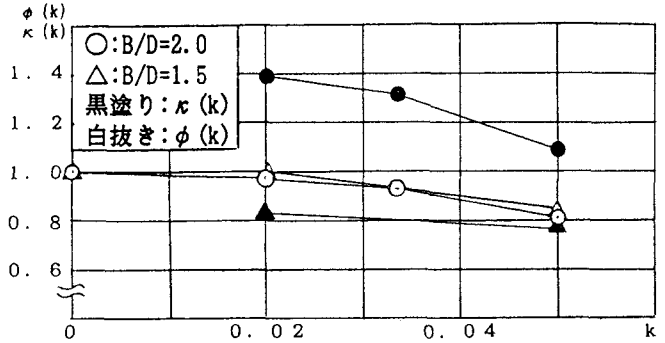


図11 非定常効果  $\phi(k)$ ,  $\kappa(k)$

一方空気力の絶対値に与える非定常効果 $\kappa(k)$ については、図11より分かるように $k$ が増加するに連れて減少する傾向にあるが、断面の違いによる系統的な変化特性を見いだす事はできなかった。

表1 解析値より求めた $\lambda$ の値

| k       | 0.050 | 0.033 | 0.020 |
|---------|-------|-------|-------|
| B/D=2.0 | 22.4  | 21.0  | 19.5  |
| B/D=2.0 | 20.8  | ----- | 15.0  |

これは、 $\kappa(k)$ が無次元振動数 $k$ 以外のパラメータ(例えば無次元振幅 $y_0/D$ や静的揚力傾斜 $dC_p/d\alpha$ 等)の影響を強く受けているものと考えられ今後の研究が待たれる。

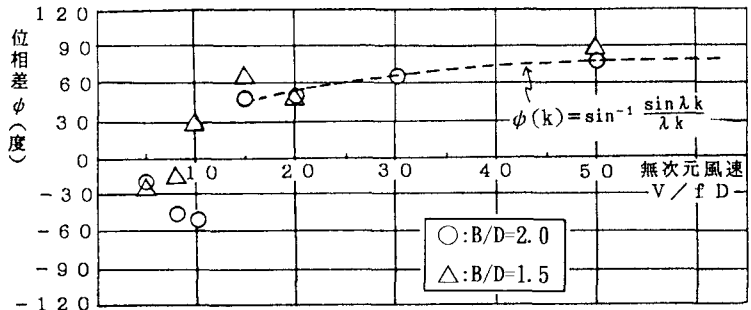


図12 非定常ギャロッピング振動時の非定常空気力の位相差

#### 4 あとがき

本研究では、無次元風速が $V/fD = 5 \sim 50$ を対象にコンピュータを用いた数値流動解析を実施し、なかでも無次元風速が $V/fD = 20 \sim 50$ におけるギャロッピング振動時の非定常空気力、圧力分布を詳細解析し、その特性を調べた。その結果、数値流動解析でも、上記無次元振動数の領域において、以下に示す非定常空気特性があることが判明した。すなわち、見かけ上の空力減衰はほぼ準定常理論に近い値を示すが、位相差は準定常理論で考えた場合の値(90度)とは明らかに異なり非定常性があり、本非定常性を圧力分布からも裏付けすることができた。さらに本研究では、上記解析結果をもとに、非定常効果を空気力の絶対値にかかわるものと位相差にかかわるものとに分離し、特に位相差による非定常効果については、系統的な変化特性を求め比較的よく一致する近似曲線を求めた。今後はさらに、絶対値による非定常効果についても、解析並びに実験を重ね系統的な特性を見つけて行く予定である。以上に示す非定常効果は、通常我々が対象とする自然風中の構造物の風速領域で発生していると考えられ上記の非定常性を明らかにすることにより、構造物に発生するギャロッピング応答特性をより正確に推定できるようになると共に、本非定常性を利用することにより、断面の空力特性を改善することも可能ではないかと考えられる。なお、本論文作成に当たり、終始御指導御助言いただきました、京都大学工学部白石成人教授に、深く感謝致します。

参考文献 1) Den-Hartog, J. P.: Mechanical Vibrations, McGraw-Hill, 1956. 2) 溝田武人、中村泰裕、矩形断面柱の非定常揚力と後流の速度変動について、第3回風工学シンポジウム論文集、1974年12月 3) 松本壽、箱型断面を有する土木構造物の耐風性に関する基礎的研究、昭和47年10月 4) 白石成人、松本壽、充てり面の渦励振限界風速と応答特性について、風工学研究誌 No. 10、1981年10月 5) 斎藤通、本田明弘、長大箱形橋の耐風性及び耐振対策法について、構造工学論集 Vol. 36A、1990年3月 6) 稲室隆二、足立武司、風工学における流れの数値シミュレーション、日本風工学会誌、第28号、昭和61年6月 7) 中村泰裕、溝田武人、吉村健：矩形およびH形断面柱の空力3次元特性について、九大応力研究所報、No. 40、1973年

(1991年9月30日受付)