

# NewHybrid 振動法による高層建物の非定常空力振動シミュレーションに関する研究

## - その1システム概要と性能検証 -

日大生産工(学部) 名波 航 日大生産工(院) 平田 和也  
 (有)WindStyle 松山 哲雄 日大生産工 神田 亮  
 日大生産工 丸田 榮藏

### 1. 序論

近年の建築、施工技術の発展、また、社会的要求により数多くの高層建物が建設されるようになってきている。構造物の高層化は、軽量化、低減衰化を伴う傾向にあり、風荷重のような外力に対する振動を無視できないものとなってくる。しかし、構造物の風応答性状は、構造物に作用する非定常空気に大きく影響を受け、非定常空気力は構造物の応答との相互作用を含んでいるため、非常に複雑である。過去の風洞実験による非定常空気を把握する方法としては、主に自由振動法や強制振動法が用いられてきた。

筆者等は、数値実験と風洞実験を組み合わせた新たな手法としてハイブリッド振動法(以下H.V.T.)を提案<sup>1)</sup>し、開発<sup>2)</sup>を行ってきた。過去の研究では、相互作用を含む振動現象を再現でき、また、風外力に対する弾塑性応答解析を追跡できるなどの成果をあげている。しかし、加振時の慣性力が測定値に含まれ、また、高速制御に関するリアルタイム性についても完全な保証がされていないのが現状である。以上のことを踏まえて、本論文では、H.V.T.の精度向上のため、制御方式を変位制御から速度制御に変え、3次元1自由度ロッキング振動をシミュレーションした。

### 2. ハイブリッド振動システム

H.V.T.は、ハイブリッド式実験手法の一種で、コンピュータ内でStep-by-stepの数値積分を、随時、モデルからの圧力測定値を用いながら行う。特に、圧力センサーを用いたH.V.T.をニューハイブリッド振動法(以下N.H.V.T.)と称す。開発するシステムの構成図をFig.1に示す。

システムは、大きく分けて、風圧力と模型の変位を測定する測定機構、応答値をモデル上で再現する制御機構、応答計算を行う応答計算機構がある。各機構には、主なパーツとして、測定機構には、圧力計、変位計、A/D変換機が、制御機構には、D/A変換機、サーボモータ、加振治具が、応答計算機構には、Step-by-stepの計算を行うコンピュータプログラムがそれぞれ含まれる。本章では、これらの機構の具体的な役割などについて述べる。

### 2.1 測定機構

ここで用いる模型は、寸法が、100mm×100mm×500mmの角柱で、足元がロッキング振動するように支持されている。模型表面は、アクリル製であり、合計で60個の圧力センサーが配置されている。圧力センサーは、模型に作用する風圧力を測定するためのものである。センサーの取り付け状態をFig.2に示す。圧力センサーは、模型の加振時に、同時に加振されるので、圧力感知部分が圧力と同時に慣性力を感知する。この慣性力は、シミュレーションの精度を低下させるため、本システムでは、慣性力の除去が可能な圧力センサーを導入する。圧力センサーの詳細な仕組みを、Fig.3に示す。このセンサーは、センサー内に圧力感知部分を2つ有し、それらが、並列に配置されている。感知部分の一方は、模型表面圧+慣性力-室内圧を感知するようになっている。他方は、慣性力+室内圧から室内圧を自動的に差し引かれ、慣性力のみを感知するようになっている。最終的に、2つのセンサーから測定された値を電氣的に差し引き、表面圧-室内圧を検出できるようになっている。

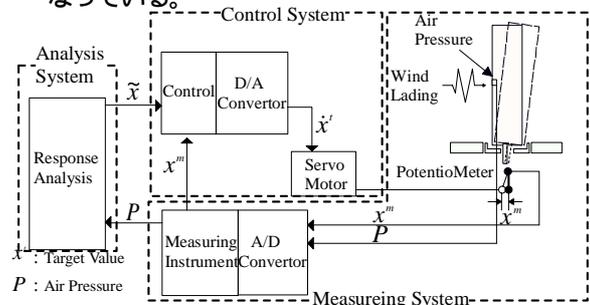


Fig.1 N.H.V.T System

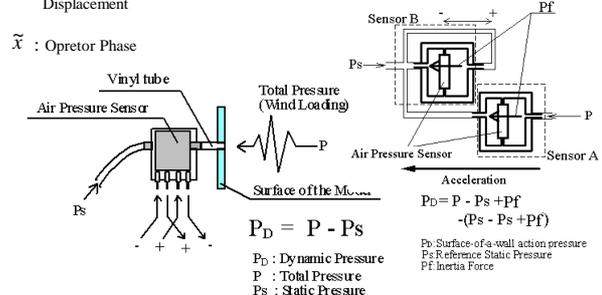


Fig.2 Air Pressure Sensor

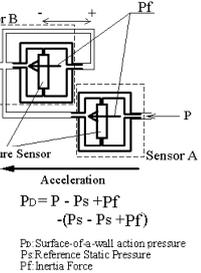


Fig.3 Noise Canceling Mechanism

## 2.2 制御機構

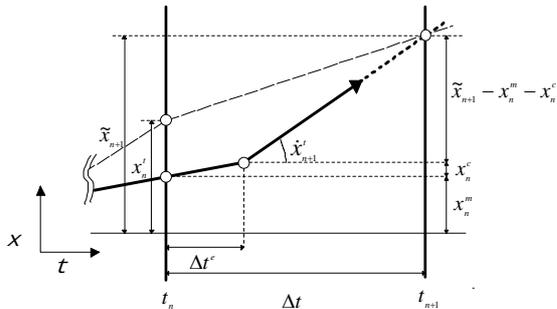
なるべくスムーズな挙動をさせ、加振時の慣性力を抑えるため、また、出来るだけ現実に近い速度状態を模型上に再現するため、本システムでは、速度制御方式を採用した。この制御方式の概念図をFig.4に、フローチャートをFig.5に示す。この制御方式は、速度の適性値を制御できるだけでなく、変位も、同時に適性値に制御できるのが特長である。n+1 ステップにおける制御の目標速度値 $\dot{x}_{n+1}^t$ は、下式によって定められる。

$$\dot{x}_{n+1}^t = \frac{\tilde{x}_{n+1} - x_n^m - x_n^c}{\Delta t - \Delta t^e} \quad (1)$$

ただし

$$x_n^c = \dot{x}_n^t \cdot \Delta t^e$$

式中の変数の詳細については、Fig.4を参照。前ステップで実際に制御された変位(以下、制御変位)が目標とした変位(以下、目標変位)と同値であれば、さらに、 $t_n$ 秒で遅れなくn+1ステップの制御が開始されれば、式中 $x_n^m = x_n^t$  また、 $x_n^c = 0$ となる。結果、 $\dot{x}_{n+1}^t = (x_{n+1} - x_n) / \Delta t$  となり、応答計算から求められる値のみで、目標速度値を決定することができる。すなわち、補正などは必要ないことになる。しかし、実際の制御では、目標変位と制御変位は一致することは極稀であり、また、各機構に対するわずかな遅れは、避けることができない。目標変位と制御変位をいつもほぼ一致させ、かつ、滑らかに速度応答値の再現性も確保できる制御を実現するには、Fig.4に示すような目標値の補正を行う。



$x^c$ : Control Error	$x^m$ : Measured Value
$\dot{x}^t$ : Target Velocity	$\Delta t$ : Integral Time Interval
$\tilde{x}$ : Operator Phase	$\Delta t^e$ : Time lag of Control
$P$ : Air Pressure	$n, n+1$ : Step on the discrete time

Fig.4 Conceptual Diagram of Control

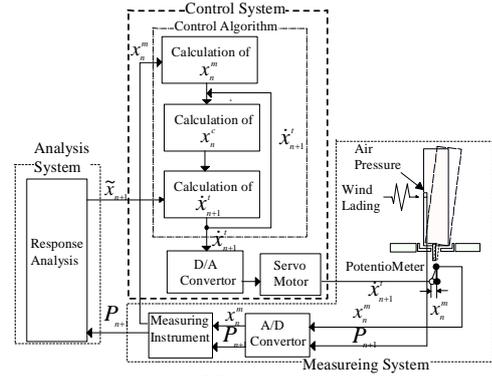


Fig.5 Detail of Control System

## 2.3 応答計算機構

N.H.V.T.では、測定および制御を行いながらその値を用いて、応答値を計算する必要がある。対象とする現象が非線形であるため、ここでは、応答計算を行うために、逐次積分法を用いる。逐次積分をN.H.V.Tで行う際には、いくつかの制約があるが、これらの制約を受けてもお積分計算が可能で、かつ、安定性、精度に優れている手法として、O.S.法を採用した。この手法を以下に示す。また、O.S.法を用いた本システムのフローチャートをFig.6に示す。

$$\begin{aligned} M\ddot{X}_{n+1} + (1+\alpha)C\dot{X}_{n+1} - \alpha C\dot{X}_n \\ + (1+\alpha)(K^l X_{n+1} + K_{n+1}^E \tilde{X}_{n+1}) \\ - \alpha(K^l X_n + K_n^E \tilde{X}_n) \\ = (1+\alpha)F_{n+1} - \alpha F_n \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \tilde{X}_{n+1} = X_n + \Delta t \dot{X}_n + \Delta t^2 \left( \frac{1-\beta}{2} \right) \ddot{X}_n \\ X_{n+1} = \tilde{X}_{n+1} + \Delta t^2 \beta \ddot{X}_{n+1} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\dot{X}_{n+1} = \dot{X}_n + \Delta t \left\{ (1-\gamma) \ddot{X}_n + \gamma \ddot{X}_{n+1} \right\} \quad (4)$$

$$\beta = \frac{(1-\alpha)^2}{4}, \gamma = \frac{1}{2} - \alpha \quad (5)$$

ここに  $M$  : 質量、 $C$  : 減衰係数、 $F$  : 風外力、  
 $t$  : 時間刻み、 $\ddot{X} \cdot \dot{X} \cdot X \cdot \tilde{X}$  : 加速度・速度・変位・  
 予測子変位、 $K^E$  : 非線形剛性、 $K^l$  : 線形剛性

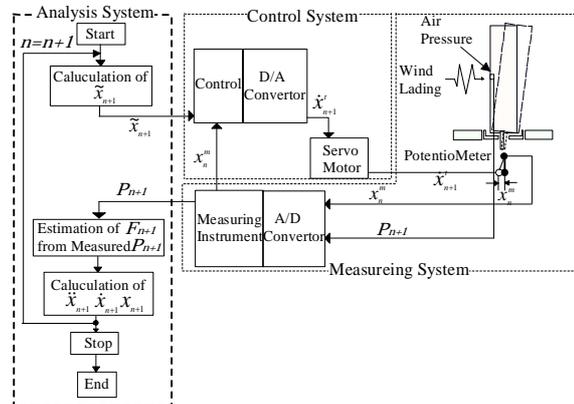


Fig.6 Flowchart of Analysis System

### 3. システムの基本性能の検証

本章では、開発したシステムの性能に関する検証を行う。まず、個々の機器や各機構別に実施する。次に、複数の機構を連動させて行い、最後に全機構を接続して、構造物の振動現象を再現する。

#### 3.1 測定器及び計測機構の検証

今回、速度制御方式(式(1)参照)にしたため、 $x^m$ の精度は、 $\tilde{x}$  及び  $x^l$  の精度に大きく関わってくる。よって、ポテンシオメータの精度を確かめる必要がある。ここでは、加振器を正弦波によって振動させ、その動作をポテンシオメータ及び、レーザー変位計によって同時測定した。レーザー変位計は、以前に振幅及び、位相について問題がないことを確かめている。ポテンシオメータとレーザー変位計の波形はほぼ一致しているため、ポテンシオメータの精度は高いことがわかる。Fig.7 にポテンシオメータ及び、レーザー変位計の時刻歴を示す。

また、模型内部に設置されている差圧計と、模型表面の測定孔とは、長さ 50mm の導圧チューブで繋がっている。N.H.V.T.は、リアルタイムで制御し、非定常空気を捉える必要があるため、導圧チューブによる伝達特性を考慮して、適切に計測値  $x^m$  を補正しなければならない。Fig.8 に導圧チューブを通る前と、通った後の振幅の比を表した伝達特性、位相遅れの伝達特性を示す。Fig.8 に示すように、振幅比は最大でも 1.05 以下である。そのため、導圧チューブによる振幅の影響は、ほぼ無視しても影響ないといえる。位相遅れは、100Hz で 2Deg ずれていることがわかった。すなわち、60  $\mu$ sec、位相遅れがあることとなる。この遅れを考慮し、 $\phi$  を定め、リアルタイムで補正する必要がある。

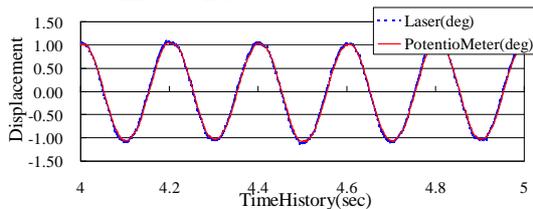


Fig.7 Potentio Meter Test

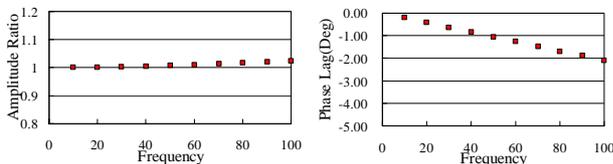


Fig.8 Transfer Function of Air Pressure Tubes

#### 3.2 加振器を含む制御機構の検証

ここでは、速度制御における変位の精度を確かめるため、常に 0 を目標値とする、いわゆるゼロフォールド制御を行う。システムでは、Fig.9 に示す黒太線の経路のみを作動させる。制御目標速度は、式(1)に示すように、現在の変位  $x^m$  を常に考慮して決定されているため、変位は、速度を常に目標にしても

正しく保たれているはずである。Fig.10 に補正計算を行わない場合のポテンシオメータ、D/A の時刻歴波形、Fig.11 に行った場合の時刻歴波形を示す。補正計算を行わない場合、ただ速度のみを追従するだけで、変位に生じた誤差が補正されず、変位がドリフトしている。補正計算を行うと、この現象が解消され 0 を保ち続けられる。よって、速度制御における制御機構は、速度を目標とした場合でも変位のゼロ軸がほぼ正しく保たれていることがわかった。

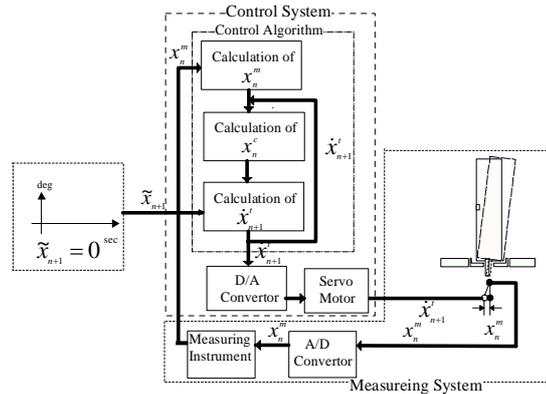


Fig.9 Detail of Control System Test

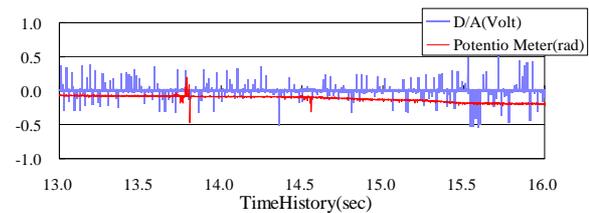


Fig.10 Time History without Compensation

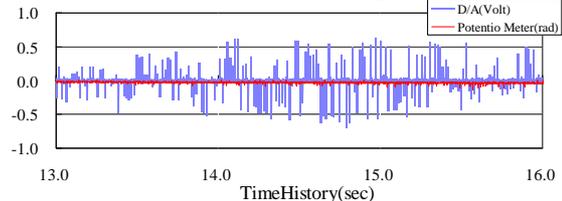


Fig.11 Time History with Compensation

#### 3.3 制御機構と応答計算機構を連動させた検証

N.H.V.T.で、1 自由度系弾性体の振動シミュレーションをする場合、システムに入力される外力と、出力される応答の振幅と位相には、1 自由度系の伝達関数に示されるような関係がなくてはならない。もしそうでなければ、システムに何らかの欠陥があると考えられる。ここでは、制御機構と応答計算機構を連動させ、伝達関数が理論どおりなるかを確かめることにより、各機構の連動性を含めた検証を行う。設定するモデルの振動パラメータは、回転慣性  $I = 0.07292 \text{ Nmsec}^2$ 、固有円振動数  $\omega_0 = 31.4 \text{ rad/sec}$ 、 $h = 2.0\%$  で、 $t$  は 2msec である。D/A 変換は、 $t$  と同時間隔で式(1)に示すように  $\dot{x}_{n+1}^l$  に見合う電圧を出力する。外力として入力する信号は、0.06Hz から 250Hz まで、一定のパワーを有する一様乱数とした。

目標変位の時刻歴波形と、制御変位の時刻歴波形を Fig.13 に示す。また、それらの振幅の伝達関数を Fig.14、位相の伝達関数を Fig.15 に示す。結果はかなり良好である。また、紙面上掲載しなかったが、他の振動パラメータで行った場合も、同様な傾向である。これらの結果より、個々の機構のみならず2つの機構を連動させた場合でもシステムの作動には、問題がないことが確かめられた。

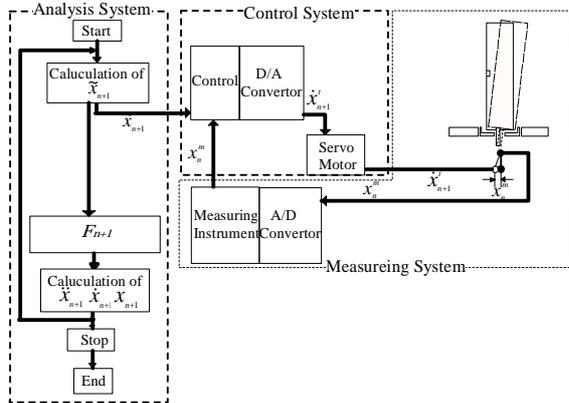


Fig.12 Detail of Control and Analysis System Test

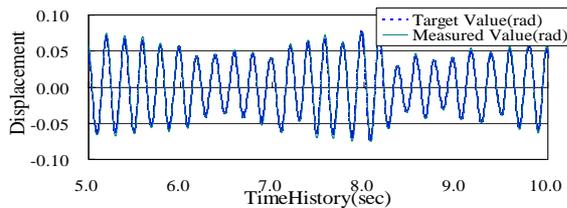


Fig.13 Response under Random Vibration

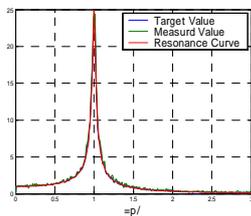


Fig.14 Transfer Function (Gain)

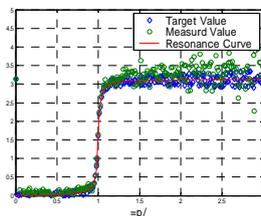


Fig.15 Transfer Function (Phase)

### 3.3 三つの機構を連動させた場合の検証

最終的な検証である風洞気流中における、モデルの空力振動をシミュレーションする前に、全機構を連動させ、静止気流中における振動現象をシミュレーションし、各機構の連動性を含めたシステムの検証を行う。シミュレーションは Fig.16 の黒太線の部分を連動させて行う。シミュレーションは、初期変位  $x_0 = 0.068\text{rad}$  を与え、その振動を再現した。振動現象は自由振動となるのが安易に想像できる。振動パラメータは、回転慣性  $I = 0.07292\text{Nmsec}^2$ 、固有円振動数  $\omega_0 = 31.4\text{rad/sec}$ 、 $h = 2.0\%$  である。もし、センサー等にノイズが発生すれば、応答値はゆがみ、自由振動波形は正確に再現されない。シミュレーションして得られた変位応答の時刻歴波形を Fig.17 に示す。図中は、計算された応答値と、モデル上で再現

された応答値を重ねて示す。また、自由振動波形のピーク値に漸近している曲線は、振動パラメータから求めた振幅の曲線  $e^{-h \cdot \omega_0 t}$  である。計算された応答値と、測定された応答値はよく一致し、ピーク値は曲線にもよく漸近している。これらの事実から、加振によりセンサーに発生するノイズなどによる精度の低下もなく、システムは全機構を連動させても、良好に作動することがわかった。

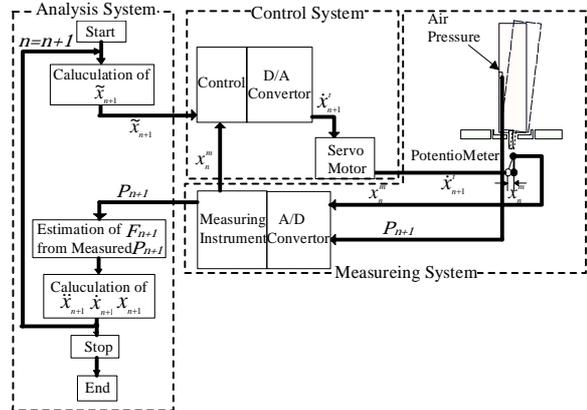


Fig.16 Detail of All System Test

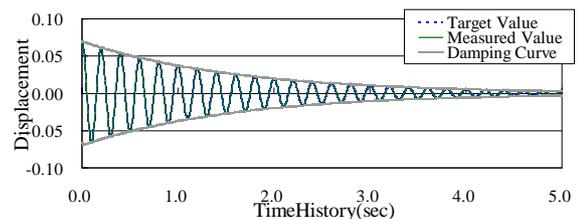


Fig.17 Time History of Simulated Free Vibration

## 4.まとめ

N.H.V.T のシステムの開発を行い、システムの概要、また、各機構の役割を述べるとともに、検証を行った。その結果、本システムでは、良好な精度で振動を再現することがわかった。その2、その3では、本システムを用いて風洞気流中における角柱の空力振動現象シミュレーションを行う。

### 【参考文献】

- 1) M.Kanda, A.Kawaguchi, T.Koizumi, E.Maruta: A new approach for Simulating aerodynamic vibrations of structures in a wind tunnel-development of an experimental system by means of hybrid vibration technique, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 91 (2003)1419-1440
- 2) I.Hirata, T.Matsuyama, M.Kanda, E.Maruta: New Hybrid Vibration Technique for Simulating Aerodynamic Vibration of Structures in a Wind Tunnel, Report of the research institute of industrial technology nihon university
- 3) 中島正愛他：実験制御誤差制御機能を有したサブストラクチャ振動的実験のための数値積分法，日本建築学会構造系論文報告集 第454号(1993)，61-71