

# 風洞実験におけるハイブリッド振動法

川口 彰久      本間 義教  
佐々木 晶 邦

## Hybrid System for Evaluating Aerodynamic Forces on a Structure

Akihisa Kawaguchi      Yoshinori Honma  
Akikuni Sasaki

### Abstract

A hybrid system has been developed for evaluating aerodynamic forces on a structure. This system combines a computer with a mechanical system, and it has been tested in a wind tunnel. Its advantages can be widely used to evaluate the quasi-static wind force on a stable structure and unsteady wind forces on a moving structure. The structural characteristics of the model can be set as numerical values in a computer. The system is expected to be widely used to investigate the interaction of wind effects on a super-tall building. This paper describes the concept of the system and verifies its validity.

### 概 要

ハイブリッド振動法は、従来の振動実験装置にコンピュータを組み込んだ、斬新的な風力評価のための風洞実験法である。本実験法の利点としては、準定常理論に基づく風外力の評価から、渦励振や空力不安定振動などの振動依存風力まで幅広く利用できる点である。また、風外力に対する振動を応答解析の結果として与えるので、構造物の剛性や減衰の特性を数値データや非線形関数として設定することができる。このような実験手法としての拡張性は、今後の超々高層建物の耐風設計の検討に展開できるものと期待される。本報は、このハイブリッド振動法概念と動作を検証した結果を報告するものである。

### 1. はじめに

高層建物や超々高層建物の構造性能を評価する場合に、風の影響を合理的に評価することが非常に重要になりつつある。特に、耐震設計の観点から質量を軽減し周期を長くした建物は、風との相互作用による影響が無視できない状況となることが予測される。すなわち、通常は準定常仮定に基づいて風励起振動を予測評価することができるが、構造物が風により振動すると、その振動に依存した風力が付加され、発散的な不安定振動が発生することがあるためである。この空力不安定振動の発生に関しては、風の強さや乱れの大きさも影響するが、建物の形状と質量、減衰が空力不安定性に大きく依存するので、

実験的あるいは解析的に研究が進められている。

構造物への風の作用を評価する手法として、以下の風洞実験が一般的に行われている。

- ① 風力実験：準定常理論の適用を前提として、振動しない模型を天秤装置に設置して風力を評価する。
- ② 自由振動実験：動特性を再現した模型の挙動から、風と建物の相互作用を評価する。
- ③ 強制振動実験：模型を強制的に振動させて、その振動に依存する風力を評価する。

本件のハイブリッド振動法は、風力と建物挙動の関係を合理的に評価するために、上記の実験装置にコンピュータを組み込んだ、従来にない画期的な実験手法である。

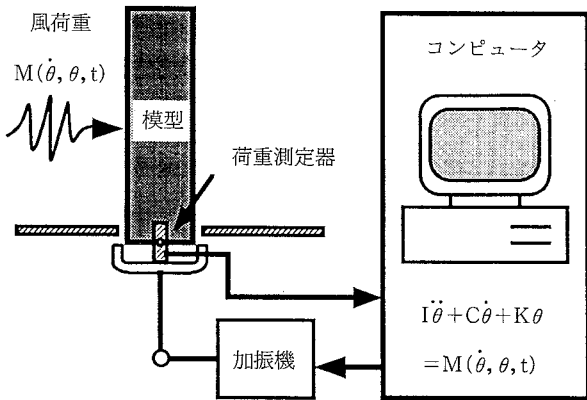


図-1 ハイブリッド振動法の概念

## 2. ハイブリッド振動法

ハイブリッド振動法は、基本的にリアルタイムに応答解析を実施して、風外力と振動挙動の相互作用をシミュレーションするものである<sup>1),2)</sup>。ハイブリッド振動法の概念を図-1に示す。本手法では、天秤装置で検出した風力を外力として、模型則に準拠した模型の応答を解析的に予測し、その量に見合った変形を模型に与えるものである。この操作をリアルタイムに繰返すことにより、風力変動と振動の相互作用を合理的に評価することが可能となるのである。システムフローを図-2に示す。

ハイブリッド振動法の利点を、以下に示す。

① 調査対象となる建物の形状をある縮尺で製作設置し、質量分布や振動特性は数値データとして、コンピュータに入力する。したがって、従来の自由振動実験で必要であった質量、剛性、減衰の機械的な調整が不要となる。もちろん、入力する質量や剛性、減衰は相似則に基づいて設定する。

これらの特性値を関数として与えることも可能であり、剛性や減衰の非線形性を考慮した挙動も評価することが可能である。また、実際の構造物に制振装置を組込んだ場合を想定すると、風励起振動に対する減衰効果を、風洞実験上でリアルタイムに検証することもできる。

② 振動する模型に作用する風力と振動挙動を同時に計測評価できるので、渦励振や空力不安定振動の発生機構を解明するに役立つものと期待される。

③ コンピュータ上の設定を変更すれば、従来の風力実験や強制加振実験も可能であり、多用途な風洞実験装置として活用できる。

## 3. 振動方程式

一質点系の剛模型が、基部の回転軸周りにロッキング振動すると、振動方程式は以下となる。

$$I\ddot{\theta} + C\dot{\theta} + K\theta = M \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで、I：質量慣性モーメント  
C：構造減衰

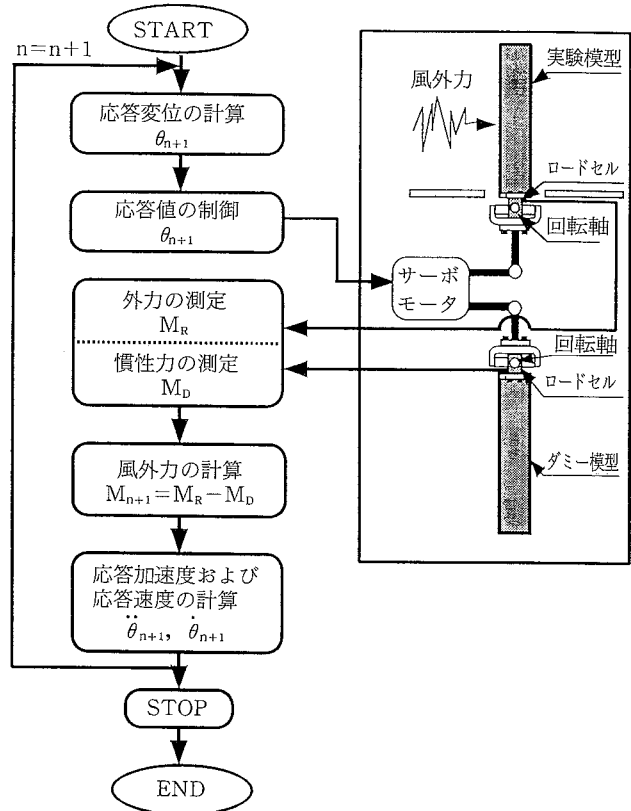
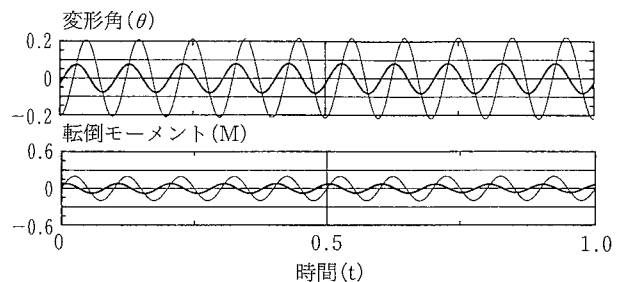
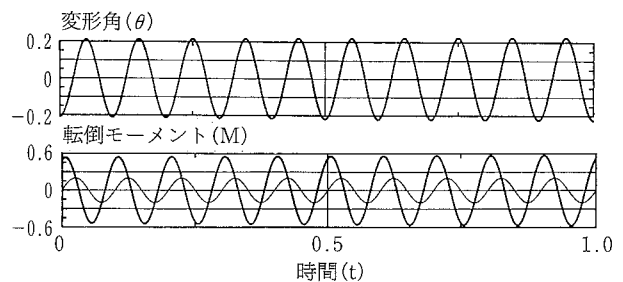


図-2 ハイブリッド振動法のフロー



(1) 理想状態(細線)と実験模型の慣性力を除去しない場合(太線)



(2) 理想状況(細線)と実験模型の慣性力を応答解析で除去した場合(太線)

図-3 質量慣性力除去のシミュレーション

K：回転剛性  
M：風力の転倒モーメント(実験値)  
θ：転倒角(予測値)

ところで、実験装置の機構上の制約、すなわち質量ゼ

ロの実験装置は不可能であるため、模型-装置系が有する質量が慣性力となって、実験精度を損なう恐れがある。慣性力除去の方法は、ダミー模型を気流の影響のない空間に用意し、本来の模型と同時に振動させて、慣性力を除去している。ダミーによる慣性力除去法は、慣性力を的確に除去できるが、実験装置の機構を複雑にし、またダミー模型を必要とするなど、新たな問題が発生する。

ハイブリッド振動法ではコンピュータを組込んでいる点を生かして、模型の質量が算定できれば、解析的に除去できると考えた。すなわち、実験では模型自身による慣性力が、荷重として付加されているので、天秤装置で計測された荷重は以下のように定義される。

$$M'' = M + M' = M + I'\ddot{\theta} \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 $M''$  : 天秤が計測した転倒モーメント

$M'$  : 慣性力による転倒モーメント

$I'$  : 模型の質量慣性モーメント

ここで、真の転倒モーメントを(1)式に代入する。

$$(I + I')\ddot{\theta} + C\dot{\theta} + K\theta = M'' \quad \dots\dots\dots(3)$$

そこで、質量慣性モーメントの比を  $\alpha = (I + I')/I$  と定義すると、運動方程式は次式で表される。

$$I\{\alpha\ddot{\theta} + 2\eta_m\omega\dot{\theta} + \omega^2\theta\} = M'' \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここで、 $\omega$  : 固有円振動数

$\eta_m$  : 構造減衰の減衰定数

慣性力の影響を解析的にシミュレーションした結果を、図-3に示す。これは、実験模型の質量慣性モーメントを解析対象の10%と想定して強制加振した場合である。図中の細線は、実験模型の質量がゼロの場合の理想的な外力と応答であり、太線は模型の慣性力の影響を受けた状態である。ところが、質量慣性モーメントの比  $\alpha$  を導入すると、外力は両者とは別の値を示すことになるが、応答そのものは、理想的な挙動と完全な一致を示す。

#### 4. 検証

ハイブリッド法の妥当性を検証するために、1自由度系装置による検証実験の結果を示す。

まず、強制加振により単調振幅振動に対する再現精度を調べると、周波数が高く振幅が大きいと落ちる傾向を示すが、周波数  $n=15$  Hz・転倒角  $X/H=1/116$  の場合でも、 $1/2,000$ 以下の精度が確保されることを確認した。図-4は、周波数  $n=8$  Hz・転倒角  $X/H=1/116$  の場合の転倒角と転倒速度の時系列波形を示したものである。

図-5に示す減衰定数2%を想定した場合の衝撃力に対する自由減衰波形の結果をみると、振幅に依存することなく減衰定数は一定となっている。この点は、本来の構造物や従来の実験装置で現れた振幅依存性と異なる傾向であるが、実験時に設定した初期減衰が振幅に影響されないため、減衰特性に大きく依存する空力不安定性に関連した振動挙動を評価する上で、好ましい結果であると判断できる。

空気力に対する検証は、河井<sup>3)</sup>の自由振動実験の結果と比較することで行った。図-6は、辺長比1/1のアスペ

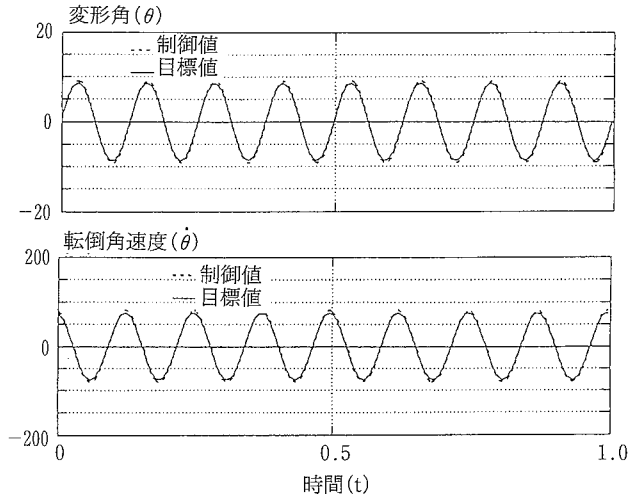


図-4 制御の検証 (周波数 8 Hz, 振幅1/116)

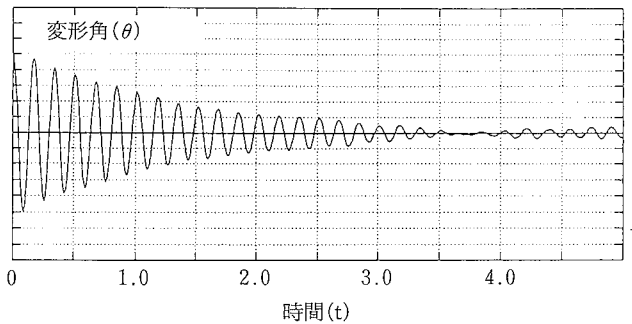


図-5 衝撃力に対する自由減衰波形の例 (減衰定数 2%)

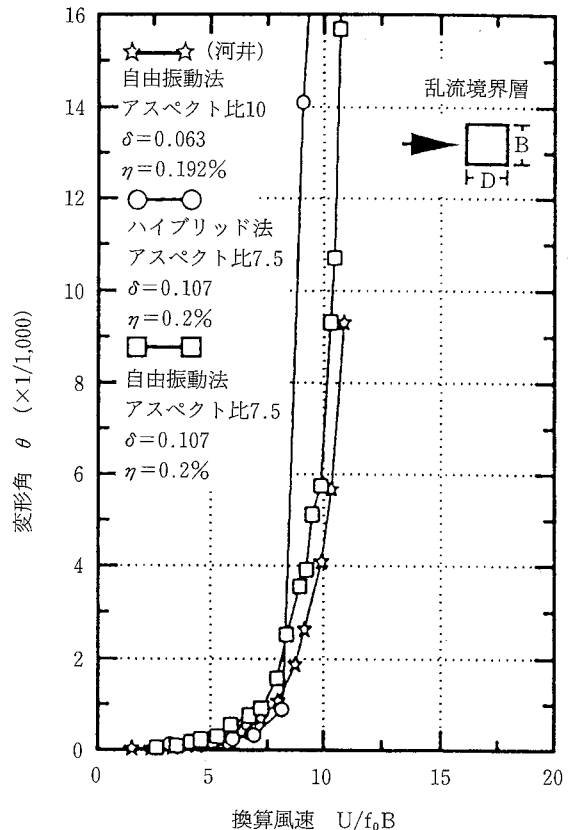


図-6 応答曲線の比較 (辺長比1/1, 減衰定数約 2%)

クト比7.5(河井の実験は10)の乱流境界層流中での応答曲線を示すもので、典型的なギャロッピング現象の例である。ギャロッピングの発進風速  $U/f_0B=8$  は、ハイブリッド振動法では立ち上がり若干低速にあることと、振巾の増大傾向が急激ではあるが、おおむね良い対応を示しているといえる。図-7は、ハイブリッド振動法で捉えたギャロッピング現象(発散現象)の状況である。

図-8は、ハイブリッド振動法を用いた実験で、減衰定数をパラメータとした応答曲線を比較したものである。減衰定数のわずかな違いが、空力不安定振動の発生の有無に強く影響している状況を読みとることができる。空力不安定振動(ギャロッピング現象)を実験的に調査する場合には、実験パラメータである質量減衰パラメータ( $=2\eta m/\rho BDH$ , ここで、 $\eta$ :減衰定数,  $m$ :質量,  $\rho$ :空気密度,  $BDH$ :体積)をいかに正確に与えることができるかが、予測の精度を左右することとなる。この点で構造・振動特性を数値データとして入力できるハイブリッド振動法は、今後の研究に大いに役立つものと期待される。

5. まとめ

構造物の耐風設計を進める際に実施される風洞実験にコンピュータを組込んだハイブリッド振動法について報告した。機械的装置であるために、質量慣性力によるノイズの影響を受けるが、質量比  $\alpha$  を導入することで、解析的に解決の道を開いた。また、検証実験結果から、空力不安定振動の予測に大きな影響を与える減衰の設定に関して、本手法の特徴が威力を発揮することも示した。

今後ますます風の影響を受ける構造物の出現が予測される状況にあって、より現実的な装置の開発と非定常空気力の発生メカニズムについて調査を継続する予定である。

謝辞

ハイブリッド振動法の風洞実験への適用に関する研究は、日本大学生産工学部建築工学科丸田栄蔵教授、神田亮助手のご指導により進めているもので、ここに記して謝意を表します。

参考文献

1) 神田 亮, 丸田栄蔵, 本間義教, 上田邦彦:ハイブリッ

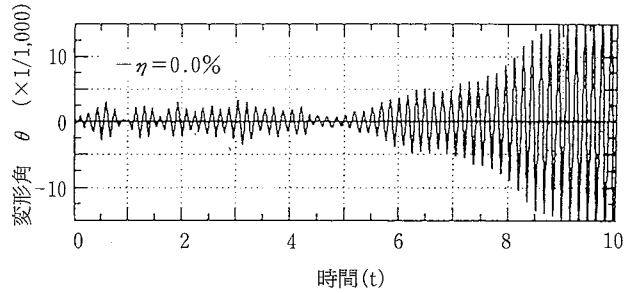


図-7 ギャロッピング振動現象の波形(減衰定数0%)

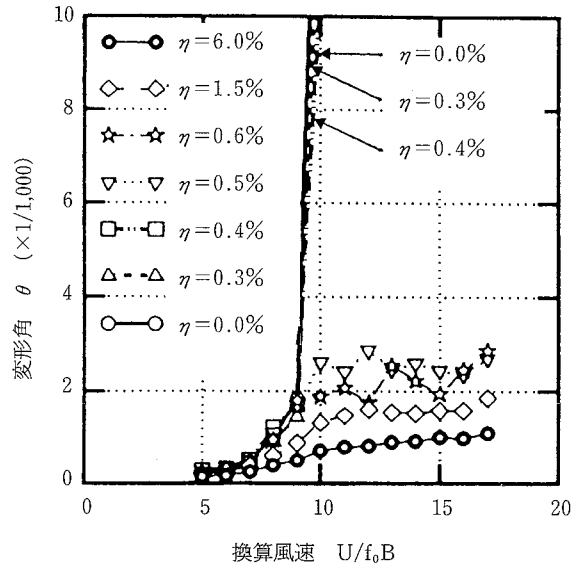


図-8 応答曲線に与える減衰の影響(風直交方向)

ド振動法による構造物の非定常空力振動シミュレーション, 第13回風工学シンポジウム, p. 335~340, (1994)  
 2) Kanda M., Maruta E., Honma Y., Ueda K. : Development of Hybrid Experimental System Combined with Random Response Analysis for Unsteady Aerodynamic Vibration of Structure, 9th IWEC, (1995)  
 3) 河井宏允: 高層建築物の渦励振, ギャロッピング, フラッター, 第12回風工学シンポジウム, p. 267~272, (1992. 12)  
 4) 川口, 他: 楕円形状をした高層ビルの空力特性, 日本風工学会誌, 第63号, p. 127~128, (1995.4)  
 5) 伊藤雅保, 他: 多目的大型風洞について, 大林組技術研究所報, No.51, p. 139~140, (1995.8)