

風洞における自然風および建物作用風圧のシミュレーション

丸田榮蔵（建築工学科）

1. はじめに

建築と風の係わりは、風環境問題としてのビル風障害、台風などの防風災害、超高層建築物の振動障害など多義に亘る。いずれの問題についても、自然風の性状が現象を左右する。これらの現象を再現する方法には、風洞実験とCFD解析がある。CFD解析は、風洞実験では見出せない複雑乱流の特性を洗い出すなど、近年コンピュータの飛躍的發展に伴い盛んに研究が勧められてきている。しかしながら、境界値問題など解決すべき諸問題もあり、現時点では信頼性には疑念も残されているのが現状である。また、結果を比較する対象とする風洞実験についても、計測方法に関して十分条件を与えるものではない。すなわち、基準値とする結果に多少の疑問符を与える。

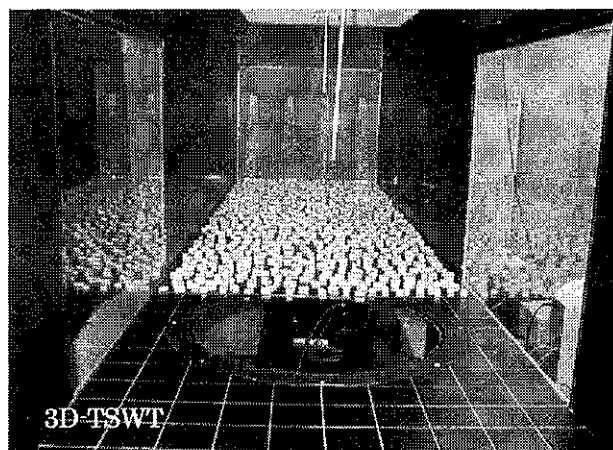
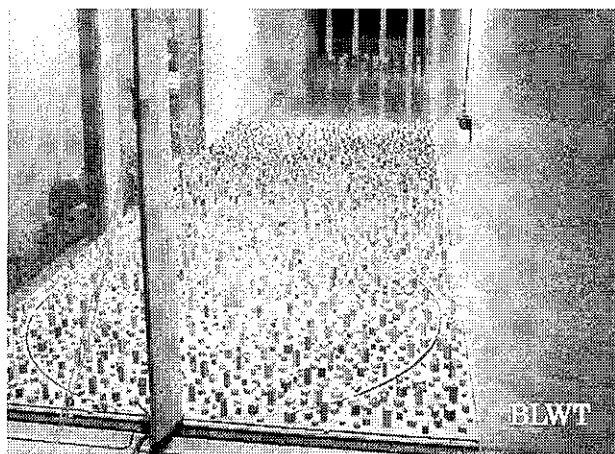
本研究は、基準値を与えるべき風洞実験のあり方として、自然風およびそれによって派生する現象のシミュレーションについて検討し、かつハイテクリサーチセンター（以後HRCと呼ぶ）の簡易風洞の自然風シミュレーションとLDA計測について検証するものである。

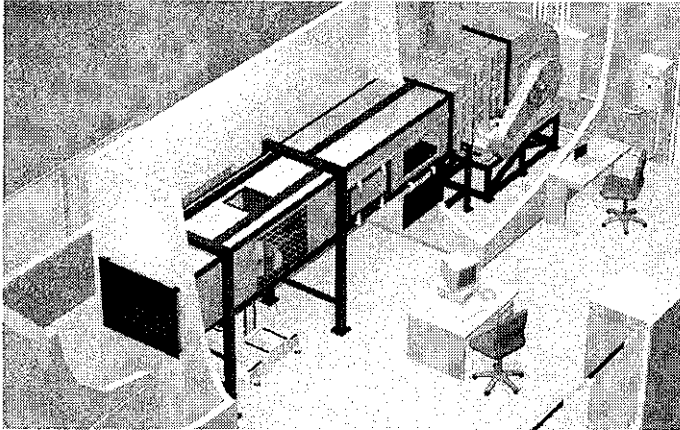
2. 自然風のシミュレーション検討

一般に、自然風の生成には大気安定度が関係するが、暴風時は乱流の混合が盛んになることから、対流など気温の影響が無視され、大気乱流境界層の形成が単に地表地物の摩擦効果にのみ関係する、いわゆる中立大気とみなすことができるとされている。中立大気の性状に関する風洞実験は、これまでにJ. Counihan¹⁾ および丸田^{2), 3)} などにより進められてきており、実測との検証についても期待される結果を提示されてきたと言える。特に、自然風のもつ乱流特性としての乱れの強さ、レイノルズ応力、変動風速パワースペクトルについてのシミュレーションとその地域的特性について明らかにされてきている。

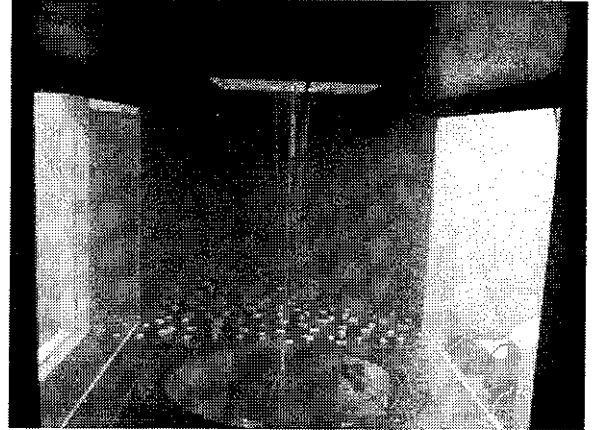
本研究では、HRC風洞で再現される境界層の乱流特性に対するシミュレーションについて、熱線風速計（HWA：Hot Wire Anemometer）による計測結果を検討するとともに、レーザードップラー風速計（LDA：Laser Doppler Anemometer）による同様の計測結果に対する精度について比較検討を行うものである。

以下に示される風洞は、生産工学部の乱流境界層風洞（BLWT：Boundary Layer Wind Tunnel）とHRCの3次元乱流煙風洞（3D-TSWT：3-Dimensional Turbulent Smoke Wind Tunnel）である。BLWTは、幅2.2m×高さ1.8mの風路断面、14mの吹走距離（Fetch）、および1m/s～25m/sの風洞出力を有するものである。また、3D-TSWTは、風路断面1.0m×0.8m、Fetch 3.5mの乱流境界層形成を可能としたもので、全長8.53mのエッフェルタイプであるが煙を漏らさないために間仕切りで計測室から隔離した密閉室内を循環する回流型とした。測定部のターンテーブルは直径65cmで厚み10mmの強化ガラスとした。これは、外部に設置したLDAプローブから模型周辺流れの計測を考えたもので、模型についてもガラス製もしくはアクリル製を考えている。風洞送風機は、容量14m³のシロッコファンとした。





3D-TSWT および計測室の状況イラスト



3D-TSWT の LDA 計測

BLWT と 3D-TSWT の両風洞において再現した乱流境界層に対して、X型熱線風速計を用いて u, v, w 3成分の平均風速と乱流の計測を行った。結果は、平均風速 U (主流成分)、各成分の乱れの強さ $u/U, v/U, w/U$ 、レイノルズ応力 $-\rho uw$ 、乱れのスケール L_x (主流方向) に関する鉛直分布 (Wind profile)、ならびに u, v, w 3成分の変動風速パワースペクトル $S_u(n), S_v(n), S_w(n)$ を求め、両風洞のシミュレーションについて比較検討した。

乱流境界層は、BLWT に対してはラフネスブロック、のこぎり型バリアー、および Counihan タイプ渦発生装置を用い、また 3D-TSWT に対してはラフネスブロックとスパイヤーを用い、日本建築学会荷重指針⁵⁾ に規定される地表粗度区分IV (指数 $\alpha=0.27$ の指数分布式) に相当する風を目標として再現された。なお、ラフネスブロックは、丸田の方法³⁾ に従い、ラフネスの体積密度と面積密度を考慮しランダムに配置した。

風洞気流のシミュレーションに対する結果は、主流方向の平均風速 U の鉛直分布を図1、 uw 成分に対するレイノルズ応力の鉛直分布を図2、乱れの強さの鉛直分布を図3、乱れのスケールの鉛直分布を図4、そして変動風速スペクトルを図5に示している。図1～図3には、測定円盤中に全くラフネスブロックを設けていない場合 (No surroundings) の鉛直分布についても合わせて示してある。なお、図は、実寸表示としている。

縮尺率の決定は、下式のカルマンスペクトル式における乱れのスケール L_x について縮尺換算したものである。

$$S\left(\frac{nL_x}{U}\right) / \sigma^2 = 4 \left(\frac{nL_x}{U}\right) / \left[1 + 70.8 \left(\frac{nL_x}{U}\right)^2\right]^{5/6}$$

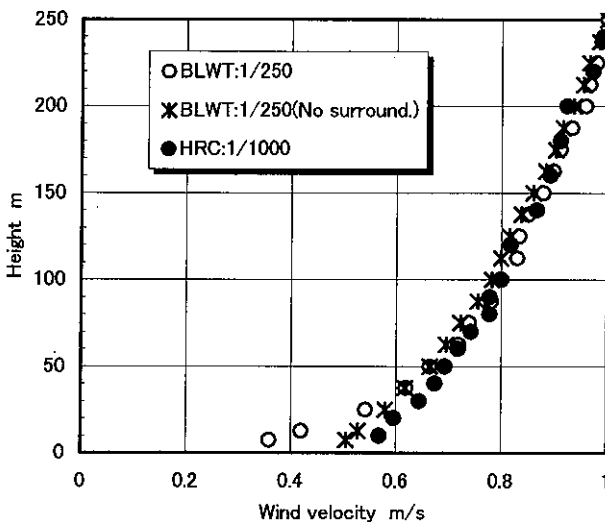


図 1 鉛直速度分布

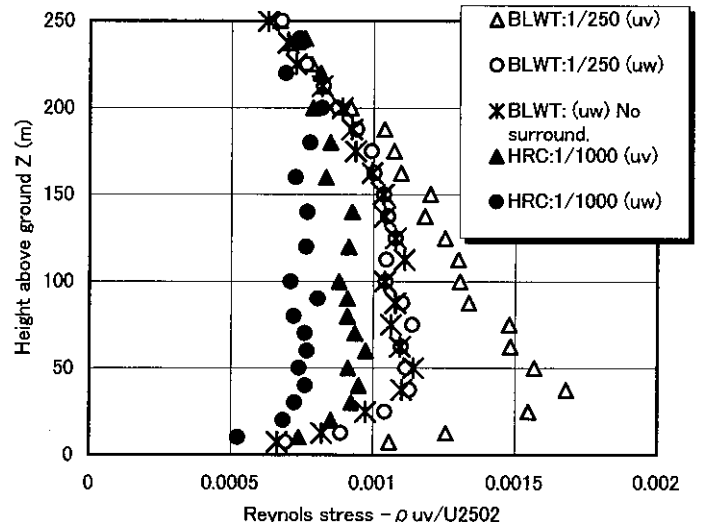


図 2 レイノルズ応力分布

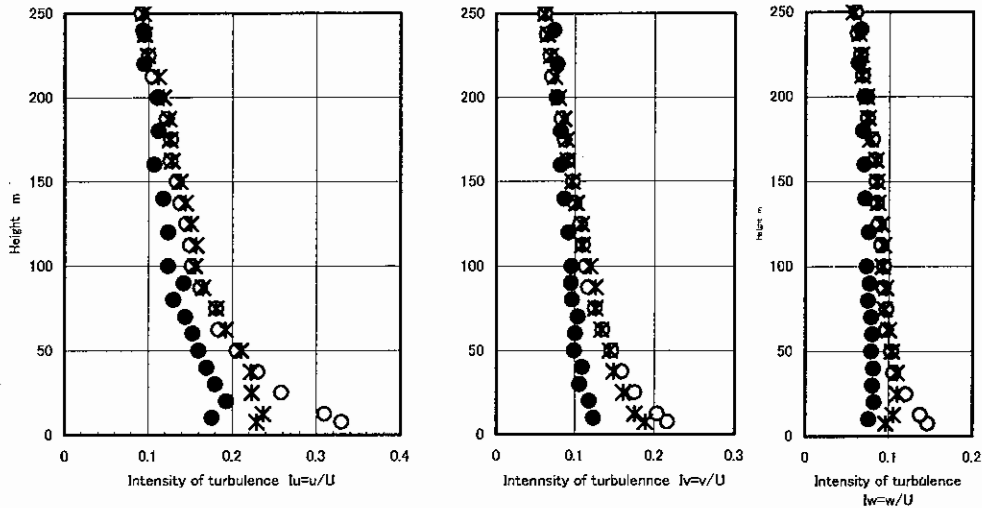


図 3 乱れの強さの鉛直分布

HRC の 3D-TSWT で作られた境界層は、BLWT の縮尺率 1/250 と比べてはるかに小さい縮尺 1/1000 相当である。また、測定部周辺の円盤がガラスであることから、低層での風速の回復が生じ、平均風速の鉛直分布が立つようになる (図 1)。あわせて、乱れは総じて小さくなる傾向にある。特に、乱れの強さおよびレイノルズ応力についても、BLWT の円盤の性状と比べてもかなり小さく、ガラスとベニヤ板の素材による摩擦の差異が大きく影響しているものと推察される (図 2 および図 3 を参照)。さらに、 u, v, w 3 成分の大きさおよび相互の比率については、既往研究^{1), 2)}に匹敵する適当なものと判断された。

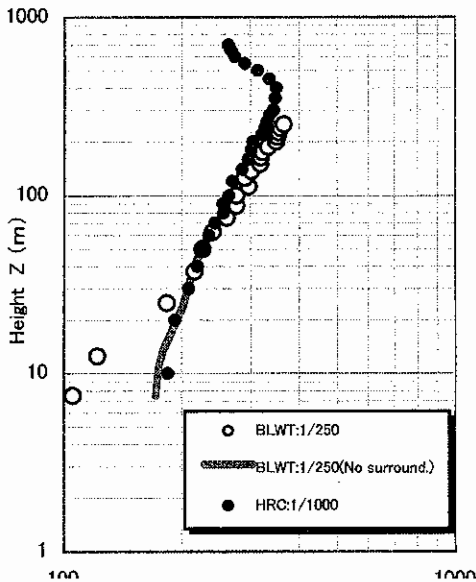


図 4 乱れのスケール

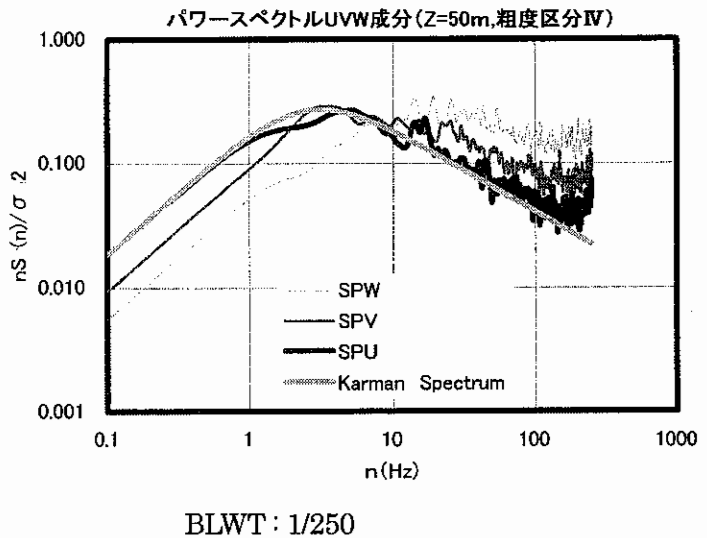


図 5-1 変動風速スペクトル

乱れのスケールは、主流 u 成分についてのみ、Taylor の仮設 ($L_x = t \times U$; $t = \int C(\tau) d\tau$) により解析した。結果は、両風洞の境界層ともに高さにわたりほぼ一致し、特に、3D-TSWT の L_x は、BLWT の 1.8m 円盤の No surroundings と一致することから、ガラスの摩擦効果の影響を十分反映したものと推察された (図 4)。

変動風速の 3 成分パワースペクトルは、地上高さ $Z=50$ m について解析し、BLWT と 3D-TSWT の比較を行った。U 成分のパワースペクトル $S_u(n)$ は、カルマンスペクトルとほぼ一致した。また、w 成分のパワースペクトル $S_w(n)$ は、最も高周波側でピークを持つことについても、これまでの結果^{1), 2)}と対応している。

以上の結果から、HRC の 3D-TSWT において地表粗度区分IVを目標として作られた乱流境界層のシミュレーションは、ほぼ縮尺 1/1000 に相当したものであると判断できた。

3. LDA 計測の検討

一般に、物体回りの流れの変動特性を計測する方法として熱線風速計が用いられてきた。これは、LDA の装置自体が巨大なため小規模風洞では風洞中の静圧および流れに大きな影響を及ぼすことにより、これまで LDA 計測が避けられてきた。しかし、熱線風速計による計測においては、物体に接近した場所では熱線プローブの影響により正確な計測は困難とされてきた。

そこで、本研究では、前出の HRC の 3D-TSWT 写真に見られるように、風洞外部からガラス越しにレーザー照射する非接触の計測を試みるものであるが、レーザーのガラスの屈折によるデータレート特性への影響問題も考えられ、LDA による変動風速の計測手法について検討する必要が生じた。

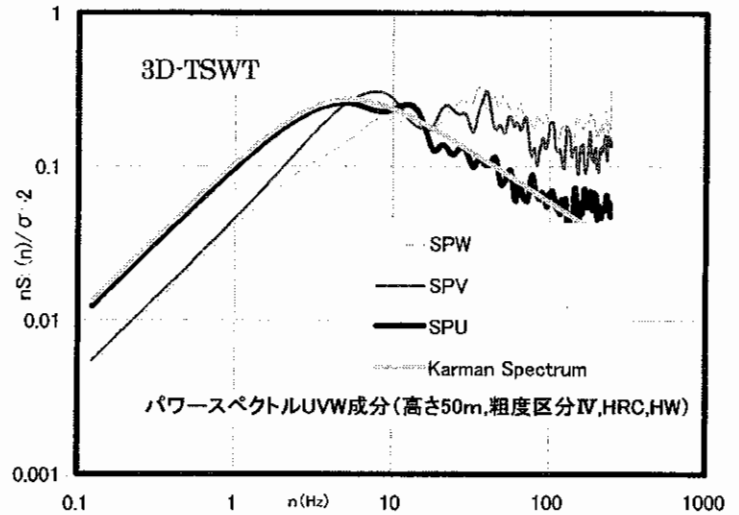


図 5-2 変動風速パワースペクトル

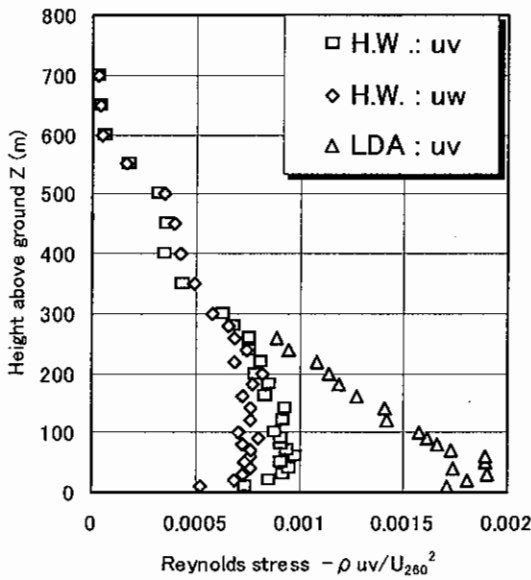


図 6 レイノルズ応力に対する HWA と LDA 計測の比較

2D-LDA によるレイノルズ応力 $-\rho uv$ は、2D-HWA のそれと比較すると、低層において倍程度大きくなった (図 6)。この影響は、図 7 のパワースペクトルから判断されるところ高周波域において生じた著しい arising によるものである。

この原因は、レーザーが 10mm ガラスを通過することによって、著しくデータレートが低下することが図 8 から判明した。従って、この改善策として、ガラス厚と Data Rate の関係を明らかにし、できる限りガラスの屈折による影響を回避する必要性を示した。

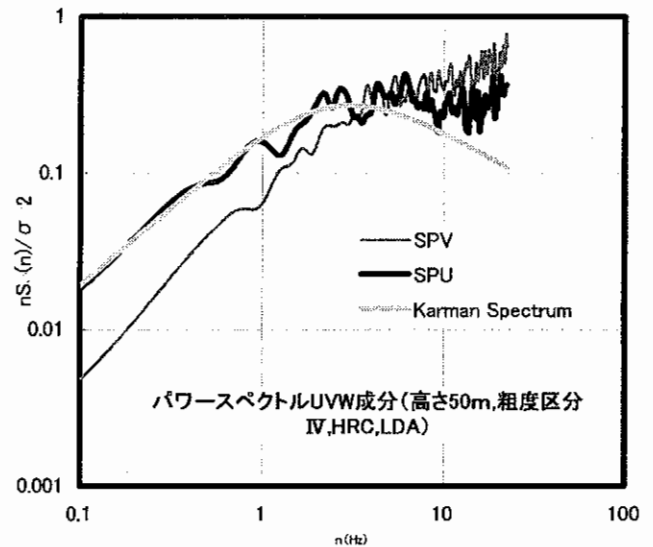


図 7 LDA によるパワースペクトル

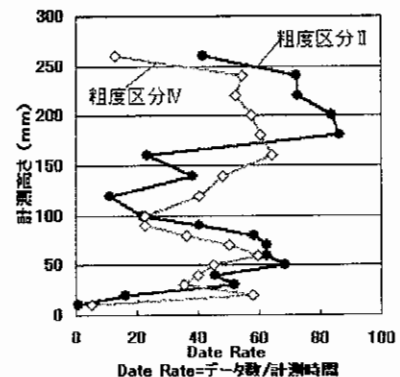


図 8 10mm ガラスにおけるデータレート

変動風速に関しては、LDA による障害が生じたが、平均風速については計測時間を長くすることによってほとんど問題が生じないことがわかった。下の LDA による一辺 10 cm のキューブ回りの計測により、非接触状態での周辺流れに対する可能性が見出された。

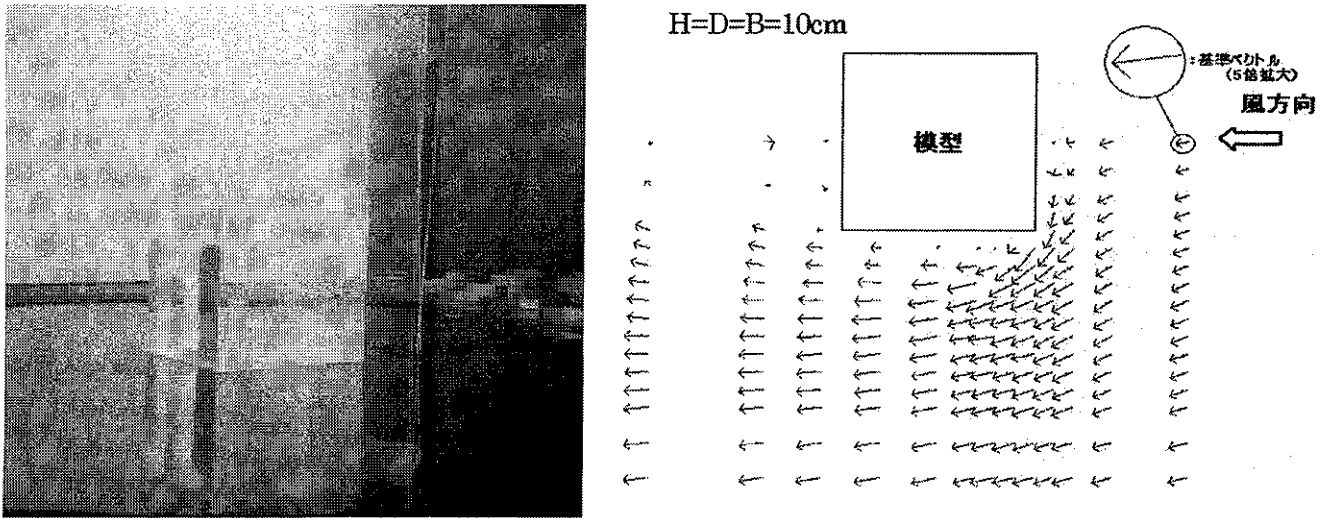


図9 LDAによる正四角柱まわりの流れ計測

4. 風圧変動のシミュレーション検討

高層建築物の振動時の作用風圧性状は、これまで風洞実験での計測は不可能とされ、ほとんど解明されない状況にあった。最近、筆者らの研究グループ⁹⁾は、HVS (Hybrid Vibration System) を開発し、建物振動時の風力を計測することを可能とした。今回、さらに NHVS (New Hybrid Vibration System) と称し、モデル壁面に直付けされた圧力センサーから振動状態の瞬間的風圧力を測定することが可能となった。この NHVS の原理は、風洞に設置された図 10 に示された本装置上の建物模型表面風圧から瞬時に振動変位量を PC で計算し、その変位相当をサーボモータにより強制振動させる。すなわち、これをリアルタイムで応答させる。

今回、G. V. Parkinson⁶⁾ による Galloping 励振時の想定風圧分布 (図 11) について、本システムにより再現を試みた。Galloping 励振が生じている振動波形の振幅位置 (図 12 参照) における風圧分布を調べた結果、図 13 を得た。

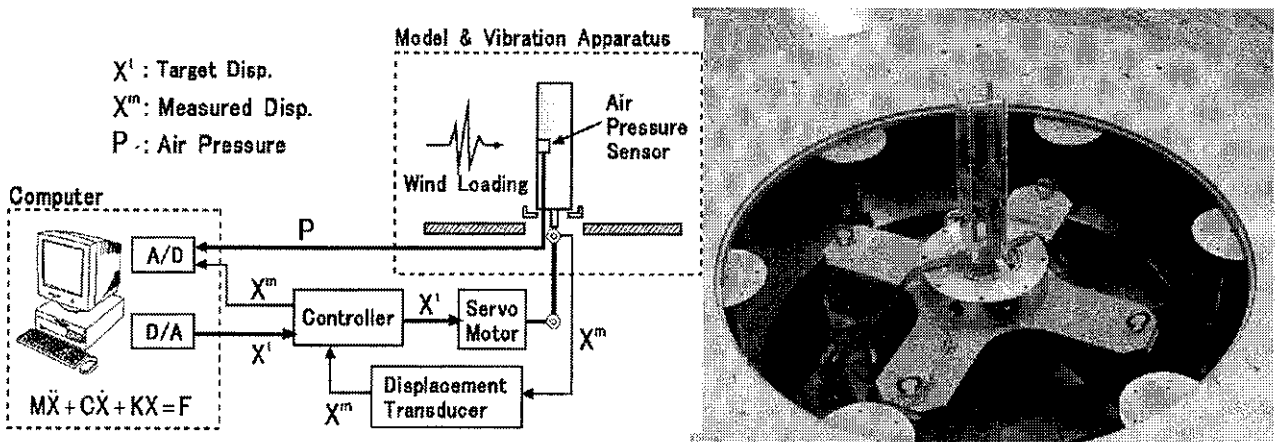


図10 NHBS の概念と装置

図 12 の共振時の波形と図 13 の風圧分布を対比すると、ピーク波形時の位置 C と位置 G の分布は、まさに Parkinson の提案した Galloping 時の想定風圧分布を風洞実験にて再現したものと言える。近い将来、HRC の風洞に本装置が設置した場合、入射する変動風速と振動時の風圧性状の関係が明らかにされるものと考えられる。

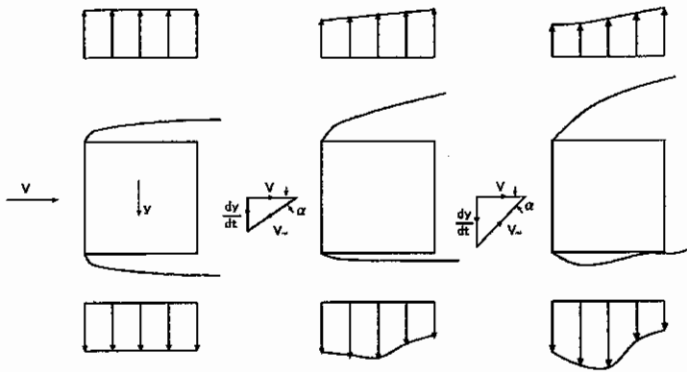


図 11 Galloping 励振時の風圧分布

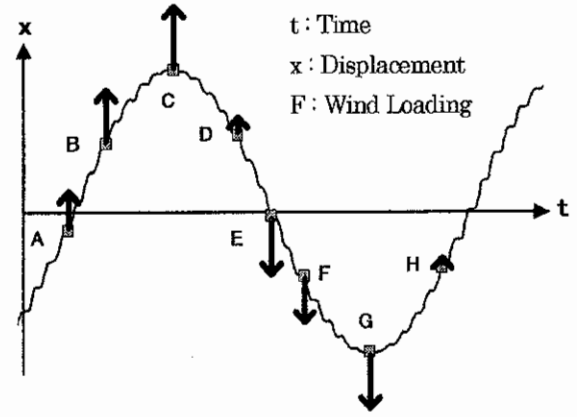


図 12 共振時の風圧分布検討位置

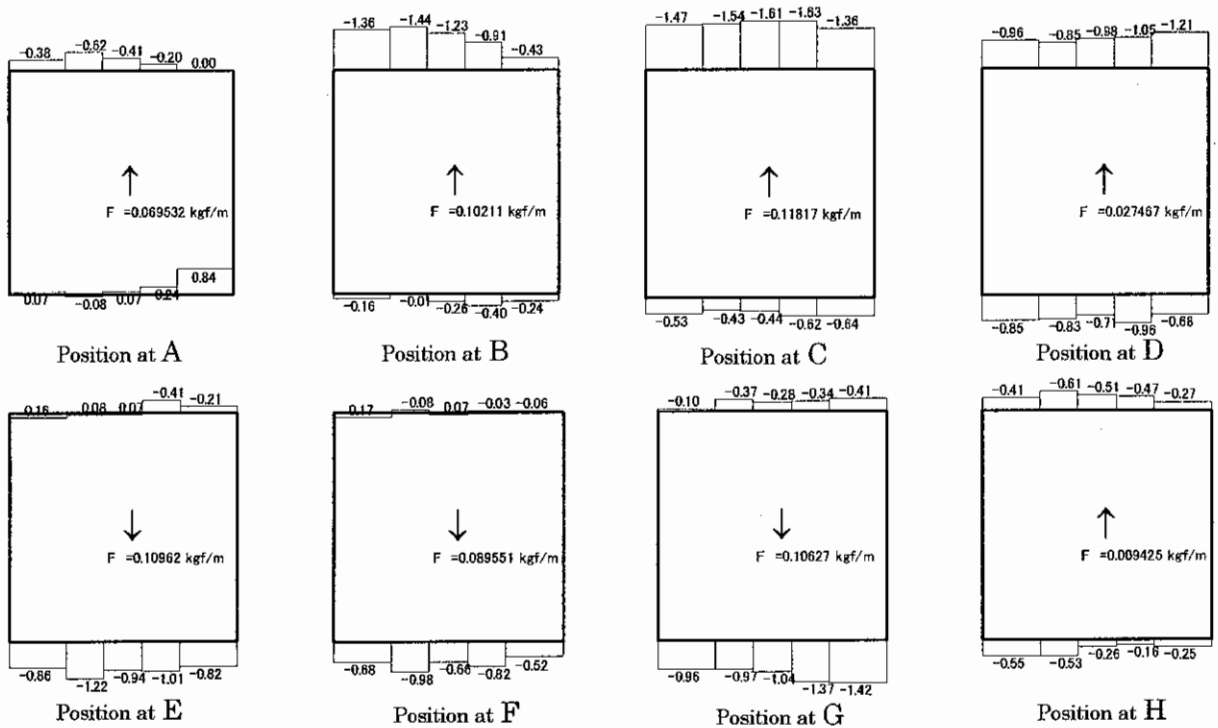


図 13 Galloping 励振時の風圧分布に関するシミュレーション

参考文献

- 1) J. Counihan, The Structure and the Wind Tunnel Simulation of Rural and Urban Adiabatic Boundary Layers, Symposium on External Flow, University of Bristol, 4 to 6 July 1972
- 2) 亀井丸田、高層建築物周辺に生じる強風領域の実験的研究(第2報・垂直速度分布の粗度パラメータの地域分類および強風領域の地域的効果) 日本建築学会論文報告集、第264号・昭和53年2月、pp.31-40
- 3) 丸田、亀井、建築物周辺気流に関する風洞実験方法(第III報 大気乱流境界層のSimulation) 生産工学部報告、1981年6月、第14巻第1号、pp.89-107
- 4) 日本建築学会編、建築物荷重指針・同解説、1993
- 5) M. Kanda, E. Maruta, Y. Homma and K. Ueda, Development of Hybrid Experimental System Combined with Random Response Analysis for Unsteady Aerodynamic Vibration of Structures, 1995, Proceeding of 9th International Conference on Wind Engineering, pp.287-298
- 6) G. V. Parkinson, Wind-induced Instability of Structures, Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. A. 269, pp.395-409 (1971)