



特集



風工学における風洞利用

風洞内に瞬発気流等の非定常気流を発生させる方法について

Generation of Unsteady Flows in the Wind Tunnel

八木知己*

Tomomi YAGI

1. はじめに

一般に、構造物や列車等に作用する空気力や風圧力は定常気流下で評価され、その値を耐風設計に使用している。しかし、竜巻やダウンバーストといった突風現象下では、極めて短時間に風速が上昇するため、非定常性の強い風が構造物に作用することが考えられる。過去の研究においても、ステップ関数状に流速が変化する流体が物体に作用する場合、もしくは物体がステップ関数状の速度で動く場合(図1参照)には、瞬間的に定常流体力よりも大きな抗力が物体に作用すること(オーバーシュート現象図2参照)が実験で確認されている¹⁾²⁾。また揚力については、抗力と同様に定常揚力よりも大きな力が作用する場合(オーバーシュート現象)や、ギャロッピングが生じるような断面では、瞬間的に逆向きの揚力が発生する場合(アンダーシュート現象)があること等、種々の振る舞いを示すことが明らかとなっている³⁾。このような流体力のオーバーシュート現象のメカニズムについては、出発(Nascent vortex)といった渦に起因した現象であるとする研究⁴⁾⁶⁾もあるが、詳細は未だ明らかになっておらず今後の課題といえる。古い研究では、オーバーシュート現象を実験的に検討するために、鉛直水路を用いた実験¹⁾や水槽中で物体自身を急発進させる実験²⁾等が行われてきたが、風工学の分野でも突風風洞の開発が行われている³⁾。さらに、2005年から2006年に日本各地で、竜巻によるものと思われる突風災害が相次ぎ、2007年に平成19年度科学技術振興調整費「竜巻

等の実態および発生予測と対策」(研究代表者: 田村幸雄教授)⁷⁾と題した研究が実施された。その一環として、「竜巻、ダウンバーストなどの突風特有の非定常空気力に関する研究」も開始され、各研究機関で風洞内に突風を発生させる試みが行われた。以下に、国内で取り組まれている突風風洞をはじめとする非定常気流風洞を紹介する。

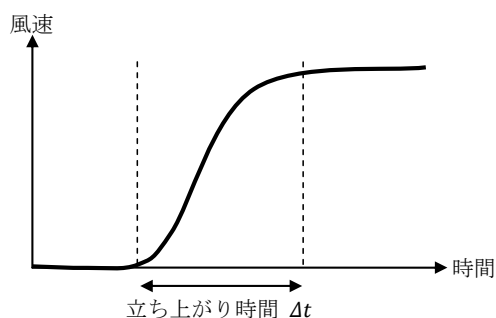


図1 ステップ関数状の風速変化

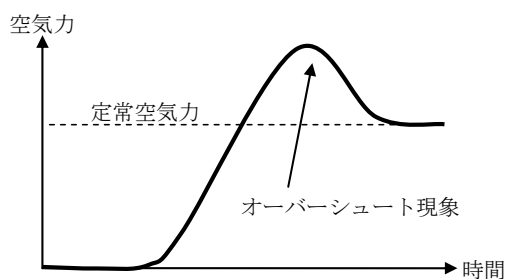


図2 空気力のオーバーシュート現象

* 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 助教
Assistant Professor, Department of Civil and Earth Resources Engineering, Kyoto University

2. 突風時の非定常空気力

突風が構造物に作用した際の空気力特性を調査するために、風洞風速をステップ関数状に変化させ、その時の非定常空気力を測定する実験が行われているが、その物理的意味を以下に考える。

まず歴史的な非定常揚力の定式化について述べる。物体に作用する揚力の過渡特性を表わす時間関数（空力 Indicial 応答関数）には、鉛直変位速度が 0 からある値までステップ関数状に変化する場合の等価 Wagner 関数と、鉛直 sharp edge ガストを受ける場合の等価 Küssner 関数がある。一般にこれらの関数は、非定常空力周波数関数を風洞実験で計測し、逆ラプラス変換によって求めることが多い。具体的には、等価 Wagner 関数は、鉛直の定常正弦波振動状態での非定常揚力（等価 Theodorsen 関数、非定常空気力係数）から、等価 Küssner 関数は、正弦波状の鉛直変動気流下で計測された非定常揚力（等価 Sears 関数）から求められる。等価 Wagner 関数や等価 Küssner 関数は、それぞれ物体速度ならびに気流の変動風速に起因した非定常性を表わす関数であるが、突風の場合は主風速 U が非定常に変化し、かつ揚力は U の 2 次式で表わされるため、通常空力 Indicial 応答関数では表せない。そこで、主風速の自乗 U^2 に対する空力 Indicial 応答関数を定義し、突風時の空気力の過渡特性を調べる試みも行われている^{3),5),6)}。この突風時の空力 Indicial 応答関数は、揚力ならびに抗力のそれぞれに対して定義が可能である。計測方法としては、風洞内にステップ関数状の気流を発生させて、同時に物体に作用する非定常過渡空気力を計測し、この非定常風速と非定常空気力の関係から空力 Indicial 応答関数を同定することになる。

また、この関数は厳密な意味で等価 Küssner 関数とは全く異なるが、周期変動流中の非定常空気力（等価 Sears 関数）を計測することで、等価 Küssner 関数との比較も可能である。その際、揚力の検討には周期鉛直変動気流発生装置、抗力の場合には周期脈動流発生装置等を用いて、風洞内に周期変動気流を発生させる必要がある。

3. 瞬発気流の発生方法と問題点

風洞内にステップ関数状の風速変化を発生させる方法としては、大きく分けて 2 種類あり、風洞内にシャッターを設け、閉鎖状態から急激に開放することによって瞬発気流を発生させる方法と AC サーボモータで風洞ファンを駆動し瞬間的に風速が上昇するよう制御

する方法に分けられる。シャッターを開閉する方式では、吸込式の風洞が用いられることが多いが、シャッターを閉じた状態で風洞内の気圧が低下することを避けるために種々の工夫が必要である。回避策としては、シャッターを完全に閉じずに最初からある程度の風を吹かせておく方法もある。その場合、風速 0m/s からの立ち上がりとはならない。

図 1 に示すように、風洞内に厳密な意味でのステップ関数状の風速変化を実現することは不可能であるが、風速の立ち上がり時間をいかに短くするかが課題となる。これまでの研究で、風速の立ち上がり時間が短い程、オーバーシュート現象等の空気力の非定常性が強く現れることが確認されている。立ち上がり時間の検討には、次式の無次元化された立ち上がり時間 Δt^* が提案されている^{2),8)}。

$$\Delta t^* = \frac{U \Delta t}{D}$$

ただし、 Δt は立ち上がり時間（図 1 参照）、 U は定常風速、 D は物体代表長である。しかし、突風時の構造物に作用する空気力の非定常性が、いかなるパラメータで説明できるかについては未だ不明な点が多い。したがって、突風に関する風洞実験の相似則の問題は今後の課題といえる。

4. 各研究機関の非定常気流発生風洞の紹介

以下に各研究機関における突風風洞をはじめとする種々の非定常気流を発生させることが可能な風洞を紹介する。各風洞を用いた研究成果については、それぞれの文献を参照されたい。

4.1 京都大学の突風風洞^{3),5),6)}

京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻内に設置された突風風洞（図 3、図 4 参照）は、測定部高さ 200mm、幅 200mm、測定部全長 3,000mm の吸込式風洞であり、図 4 に示すように下流部に空気吸入窓、2 種類のシャッター A、B を有する。定常風速はシャッター A のスリットを調整することにより制御され、非定常な瞬発気流はシャッター B を全閉の状態から急激に開放の状態にすることにより発生させることができる。低風速レベル（約 2m/s）から高風速レベル（約 4m/s、約 8m/s 等）へおよそ 0.05 秒程度で達することが可能である。また、前述の主流方向周期変動気流を発生させるためにパルセーター（脈流発生装置）を風洞下流側に設置してある。パルセーターのブレードが回転す

ることにより、周期的に風洞出口の開口率を変化させることができ、主流方向に周期変動気流を与えることが可能である。



図3 京都大学の非定常気流発生風洞

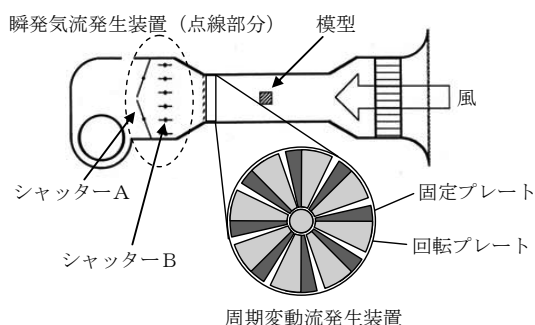


図4 非定常気流発生風洞の概要



(1) 翼列閉鎖時



(2) 翼列開放時

図5 九州大学のエッフェル型吸込式風洞

4.2 九州大学における突風生成方法^{8),9)}

九州大学大学院人間環境学研究院のエッフェル型吸込式風洞(図5, 図6参照)では、脈動流発生装置の翼列駆動を利用して風洞内に突風を発生させている。計測部断面寸法は $1.5\text{m} \times 1.5\text{m}$ 、計測部全長は 3m 、計測部前面の風速調整部は約 2.5m である。図6に示すように本風洞は、脈動流生成装置の翼列を閉じることで測定部を無風状態にし、翼列を瞬時に開放することで最短 0.2 秒の立ち上がりを持つステップ関数的な突風を生成させることに成功している。さらに、前述の翼列を閉鎖した状態で下流側吸込部の圧力が低下する問題を、吸込部の天井と床面に別途翼列を配置して、突風制御の翼列開閉と反転同期させることによって回避している。

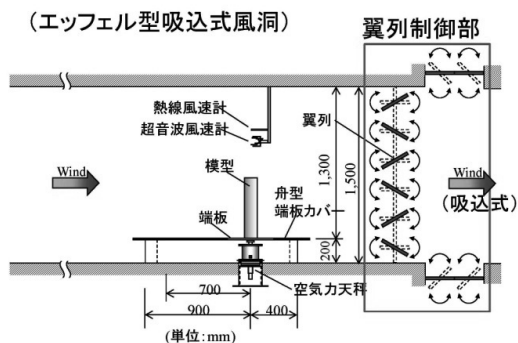


図6 非定常気流発生装置の概要

4.2 宮崎大学のマルチファン型風洞¹⁰⁾

宮崎大学工学部材料物理工学科に設置されたマルチファン型風洞（図7、図8参照）では、それぞれのファンを制御することによって、急加速流ならびに急減速流を発生させることが可能である。本マルチファン型風洞は開放型押し出し式の風洞であり、図8に示すように、扇形にひろがった送風部入り口の面内に99個（11行×9列）のファンを配置されている。それぞれのファンは、AC200V サーボモーター（出力750W）に直づけされ、独立にパソコンで制御される。測定部の断面の大きさは、横2,540mm×縦1,800mmである。測定部は8個の可搬胴を組み合わせで構成され、いろいろな長さ可以实现できる（最大15.5m）。特に、急加速流を実現するためには、測定部をできるだけ短くする必要があり、少数の風洞カートを使用している。風洞風速を制御する入力信号として、定常風速に至るまでの時間を0.02秒と設定した場合、実際に観測された風速の立ち上がり時間は、風速0.1m/sから5.1m/sに上昇させた場合は1.28秒、風速3.0m/sから8.0m/sに変化させた場合は0.85秒となっている。

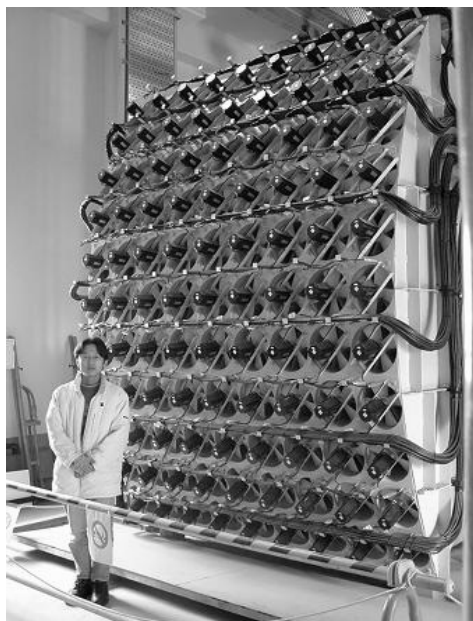


図7 宮崎大学のマルチファン型風洞

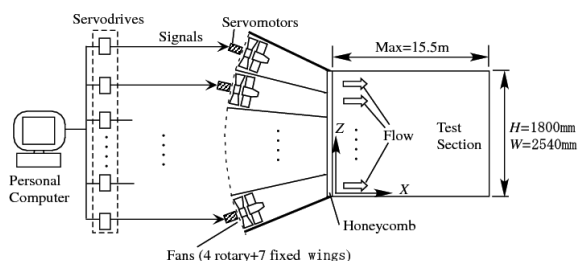


図8 マルチファン型風洞の概要

4.3 日本大学のACサーボモータ風洞^{11),12)}

日本大学理工学部土木工学科に設置されたACサーボモータ風洞では、突風ならびに風向が急変する非定常気流を発生させることに成功している。突風の生成に使用した風洞は、図9に示すようにACサーボモータで駆動する4つのファンを縦2段横2列にマトリクス配置したエッフェル型風洞である。測定部風路は40cm×40cmの正方形断面である。気流の最高風速は16m/sで、風速0m/sの状態から0.2秒程度で到達できる性能を有している。また、突風のみならず風向が急変する際の構造物や走行車両等への影響を検討することは極めて重要な課題である。図10に示すように、ACサーボモータ風洞を2台もしくは3台水平面内で交差角45度に配置することで、風向変動を有する非定常気流を生成し、風向が急変する際の物体に作用する非定常空気を測定することが可能である。



図9 日本大学のACサーボモータ突風風洞

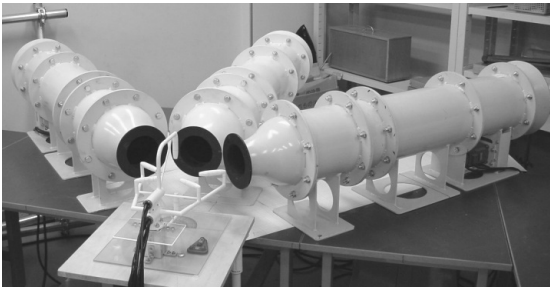
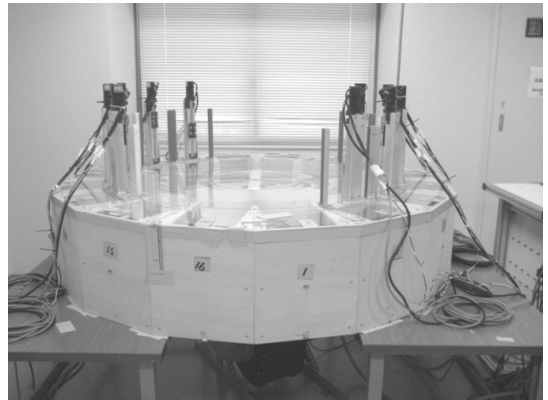


図 10 風向変動気流の生成方法

4.4 九州工業大学の風向変動風洞

九州工業大学工学部建設社会工学科に設置された風向変動風洞(図 11, 図 12 参照)では, 自然風が持つ風向変動特性に近い非定常気流を作成することを目的とし, 大きな風向変化を持つ気流の作成が試みられている. 本風向変動風洞は 2 階建て構造になっており, 2 階部分では測定部を中心に放射状に配置された流入風路と流出風路により構成されている. 1 階部分は, それぞれ流入・流出風路とシロッコファンに繋がる 2 つの半円形の部屋に分かれている. 各流入出風路には, コンピューターで開閉制御が可能なシャッターが設置されており, このシャッターの開閉で風向を変化させることができる. 現在のところ, 風速変動を比較的小さく抑えたことで, 大きな風向変化を 0.5 秒程度で実現できるとのことである.



(2) シャッター開閉制御装置付き風洞

図 11 九州工業大学の風向変動風洞

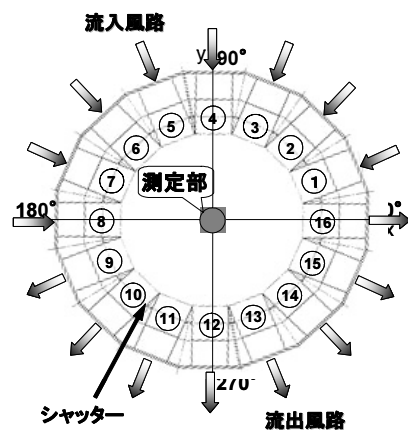


図 12 風向変動風洞の平面図



(1) 風洞全体写真

5. おわりに

突風に遭遇した際の構造物や列車に作用する空気力については, 未だ不明な点が多数残されており, 今後更なる研究が必要といえる. それに伴って突風に関する風洞実験法を確立することも急務の課題である. 現在, 日本風工学会では, 「竜巻等の突風研究会」(主査: 前田潤滋教授) において精力的に研究活動が進められており, 突風時の非定常空気力をはじめ, 突風の風洞実験方法についても飛躍的に研究が進むことを期待したい.

謝辞

本原稿の作成に当たって、宮崎大学の小園茂平先生、九州工業大学の木村吉郎先生、日本大学の野村卓史先生、九州大学の前田潤滋先生には、写真・図面等をご提供頂き、また貴重なご意見を賜りましたことに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) Sarpkaya, T., Separated flow about lifting bodies and impulsive flow about cylinders, AIAA Journal, vol.4, No.3, pp.414-420, 1966
- 2) Taneda S., The Development of the Lift of an Impulsively Started Elliptic Cylinder at Incidence, Journal of the Physical Society of Japan, Vol. 33, No. 6, pp.1706-1711, 1972
- 3) 白石成人, 松本 勝, 北川雅章, 風速が急変する場合の物体に作用する空気力, 第 7 回風工学シンポジウム論文集, pp.107-113, 1982
- 4) Sarpkaya T., An analytical study of separated flow about circular cylinders, Transactions of the ASME, Journal of Basic Engineering, Vol.90, pp.511-520, 1968
- 5) Matsumoto, M., Shimamura, M., Maeda, T., Shirato, H., Yagi, T., Hori, K., Kawashima, Y. and Hashimoto, M., Drag force on 2-D cylinders due to sudden increase of wind velocity, Proceedings of the 12th International Conference on Wind Engineering, pp.1727-1734, 2007
- 6) 松本 勝, 白土博通, 八木知己, 橋本三智男, 竜巻等の突風による構造体に生じる非定常空気力, 日本風工学会誌, No.115, pp.103-106, 2008
- 7) 「竜巻等の実態および発生予測と対策」研究成果報告書, 平成 19 年度科学振興調整費(重要政策課題への機動的対応の推進), 研究代表者: 田村幸雄, 2008
- 8) 竹内崇, 前田潤滋, 川下寛正, 車輛形状物体に作用する風力に及ぼす突風の立ち上がり時間の影響第 20 回風工学シンポジウム論文集, pp.331-336, 2008
- 9) 川下寛正, 前田潤滋, 早田友彦, 他 3 名, ステップ関数的突風を受ける楕円柱の風力特性, 第 20 回風工学シンポジウム論文集, pp.325-330, 2008
- 10) 山口靖之, 柏木悠己, 小園茂平, 急加速流を受ける車体の空気力特性に及ぼす偏揺れ角の効果, 第 20 回風工学シンポジウム論文集, pp.349-354, 2008
- 11) 野村卓史, 関野洋一郎, 鈴木洋司, 風向が時間変化する気流による非定常空気力の測定, 第 17 回風工学シンポジウム論文集, pp.297-392, 2002
- 12) 野村卓史, 瞬間的に変化する風速下の空気力に関する実験, 第 56 回理論応用力学講演会講演論文集, pp.101-102, 2007
- 13) 木村吉郎, 中島紘志, 久保喜延, 加藤九州男, 風向変動風洞の試作とその特性, 日本流体力学会年会 2008, 論文番号 16032, 2008