



特 集



境界層風洞の紹介と気流の生成手法

東京大学の風工学実験室

Wind Tunnels at the University of Tokyo

石原 孟^{*1}

Takeshi ISHIHARA

菊地 由佳^{*2}

Yuka KIKUCHI

1. 東京大学風工学実験室の概要

東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻風工学実験室には、全径間風洞・強風シミュレーション風洞・煙風洞の3つの設備が設置されている¹⁾。煙風洞は、幅の狭い2次元的な測定部を持ち、煙により35本の流脈を可視化でき、近年では構造物の後流について学生に教えるために用いられている。全径間風洞は、昭和39年に作られ、平成8年に改装された風洞幅16m、高さ1.9m、測定洞の長さ5.8m、最大風速17m/sであり、長大橋梁の全橋弾性模型の実験が行える唯一の風洞として我が国の長大橋梁の耐風性研究に多大な貢献をしてきた。図1には明石海峡大橋箱桁案の全橋模型実験実施時の様子を示している。強風シミュレーション風洞は、縦置き回流型の境界層風洞であり、風洞幅1.5m、高さ1.8m、測定洞の長さ11m、最大風速30m/sである。各風洞の詳細な仕様および他の風洞実験における写真は文献1)を参照されたい。本稿では2000年頃より、本実験室において実施してきた風洞実験について紹介する。



図1 明石海峡大橋箱桁案の全橋模型実験

2. 風洞実験とその工夫点

過去に風工学実験室において実施した風洞実験の事例を表1に示す。

2002年、複雑地形における風況予測の高精度化のため、北海道積丹半島を対象に複雑地形上の乱流場の計測を実施した²⁾。逆流を検出可能なスプリットファイバースコープを用い、自然風を模擬した乱流境界層に置かれた実地形における流れ方向の速度成分の平均値およびその標準偏差を計測し、数値解析モデルの検証データとした。本実験を用いた検証を基に、風況予測手法を高精度化し、風況予測ソフトウェアMASCOTの開発が行われた³⁾。一般的な建築物における風洞実験の縮尺率1/200~1/400であるのに対して、縮尺率1/2000スケールでの地形模型を作成する必要があった。150mm高さの低い境界層を作成することに工夫が必要であり、スパイヤーではなく2列の30mm高さのラフネスブロックを使用した。

沖縄県宮古島では、2003年台風14号の強風により1000本以上の電柱および7基の風車の倒壊・折損といった被害が生じた。そこで、宮古島地方気象台周辺建物の影響を評価するため、縮尺率1/1000の市街地模型を製作し、気象台測風塔地点における平均風速および乱れの強さの鉛直分布を測定すると共に、風車設置地点における倒壊時の最大瞬間風速の推定を行った⁴⁾。本実験では、図2(a)のように、都市計画図に基づき、気象台の測風塔を中心とす

*1 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻 教授 ishihara@bridge.t.u-tokyo.ac.jp
Professor, Department of Civil Engineering, School of Engineering, The University of Tokyo
*2 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻 講師
Lecturer, Department of Civil Engineering, School of Engineering, The University of Tokyo

表1 近年実施した主な風洞試験

	試験内容	実施風洞施設	実施年	文献
1	複雑地形上の乱流場の計測	全径間風洞	2002	2), 3)
2	宮古島市街地における乱流場の計測	強風シミュレーション風洞	2004	4), 5)
3	風車後流の模型実験	強風シミュレーション風洞	2005	6), 7)
4	着氷送電線のギャロッピングの模型実験	全径間風洞	2004	8), 9)
5	並列ケーブルのウェイクギャロッピングに関する模型実験	全径間風洞	2012	10), 11)
6	照明電柱の渦励振の模型実験	強風シミュレーション風洞	2017	12)
7	ナセルの風圧模型実験	強風シミュレーション風洞	2018	13)

る半径 700m 以内のすべての建物を再現した近傍市街地の模型を作成した。近傍模型の上流側には、気象台からの距離 700m から 1320m までの近隣市街地の模型を設置し、更に最も強い風速が記録された北風および南西風の実験に際しては、気象台からの距離 1320m から 2140m までの遠方市街地の模型も上流側に設置し、海までの全ての地物の影響を考慮している。ターンテーブルの中心位置より 7.3m 上流側にスパイヤーを設置し、平坦な地形上の大気境界層を再現している。近年、数値風洞を作成し、数値流体解析により、風洞実験と同等の精度で地形、建物、植生が都市域の風況に与える影響を評価できることを示した⁵⁾。数値風洞においても、図 2(b)に示すように、スパイヤーを再現することで境界層乱流の生成を行っている。

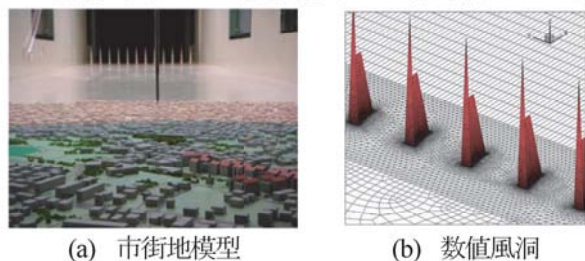


図2 市街地における乱流場の計測実験

2005 年には、風車後流のモデル化を行うことを目的に、図 3(a)に示す縮尺率 1/100 の風車模型を用いた風洞実験を行った。海風・陸風および風車の運転状況を模擬するため、乱流強度や風車のスラスト係数を系統的に変化させた風車後流の風速分布を計測した⁶⁾。風車模型の相似則を満たすために、ナセル部にモーターを内蔵し、高い周速比（翼端速度と風洞風速との比）における実験を可能とした。しかし、当初、製作した木製翼は、風車回転（約 3000rpm）による荷重に耐えきれずひびが入ったため、CFRP 製に変更した。境界層乱流は、図 3(b)に示すようにスパイヤーとフェンスを組み合わせることにより、低い乱流強度と高い乱流強度（洋上と陸上の乱流境界層）を実現した。本実験データを基に、風車後流のモデル化の研究が進められ、世界で広く使われる後流モデルの提案に繋がった⁷⁾。



(a) 風車模型



(b) スパイヤーとフェンス

図3 風車後流の模型実験

2004 年には、着氷雪した送電線の風による自励振動現象の解明のため、部分模型を全径間風洞内に設置し、着氷雪送電線のギャロッピング現象の解明およびデータ取得を行った⁸⁾。本実験を基に、非定常空気を考慮した着氷雪送電線のギャロッピング解析手法が開発された⁹⁾。風洞実験用のギャロッピング模型は製作上左右完全に対象ではないため、CFD による予測結果を検証する際には、左右方向の実験値の平均をとるように対応した。

2012 年には、橋梁の並列ケーブルのウェイクギャロッピングに関する模型実験を実施した¹⁰⁾。ケーブル両端をバネ支持とするために、図 4 に示すように風洞内にフレーム架台を 2 基設置し、気流の 2 次元性を確保するために 2 次端板を取り付けた。本実験を基に、数値シミュレーションによるウェイクギャロッピング現象とヘリカルワイヤによる制振メカニズムの研究がなされた¹¹⁾。

図4 並列ケーブルの実験装置の設置状況¹⁰⁾

2017 年には、橋梁上の照明電柱の渦励振の模型実験を行い、ヘリカルワイヤによる空力制振の効果を評価するとともに、数値流体解析モデルの検証データを取得した。照明電柱模型の基部の接合部が緩かったために、当初は

減衰が大きくなり、接合部をリブプレートで補強した。この研究ではヘリカルワイヤによる制振メカニズムについて、数値流体解析により解明した¹²⁾。

2016年、台風16号により南大隅風力発電所で風車のナセルカバーが飛散・損傷した事故を受けて、異なる乱流強度に対するナセルに作用する風圧係数の平均値とピーク値を計測した。当初作成した風車模型を用いると、ナセルに振動が発生したため、図5(a)に示す風車模型の基部をリブプレートで補強した。境界層乱流は、図5(b)に示すように、50mm高さおよび25mm高さのラフネスブロック、スパイヤー、フェンスを組み合わせることによって、低・中・高乱流強度の条件を作成した。実験結果を基に、ピーク風圧係数を乱流強度と平均風圧係数の関数としてモデル化するとともに、既往のGLガイドラインにより求めたピーク風圧係数が過小評価される可能性があることを示した¹³⁾。

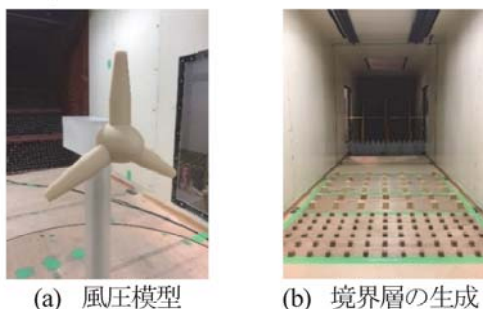


図5 強風シミュレーション風洞における風圧実験

3. まとめ

本稿では、風工学実験室で近年に実施された風洞実験を紹介した。複雑地形および都市内外の風況および風車後流の測定、風と構造物の相互作用による空力不安定現象の解明と予測、構造物に作用する風圧の計測とモデル化に大別することができる。いずれの風洞実験のデータも、メカニズムの解明にとどまらず、数値解析による予測の高度化およびモデル化を支える検証データとなった。

地形や都市といった大きな領域を対象とする際に、境界層乱流の作成に工夫が必要であった。また、模型の強度が問題となることが多く、十分に強度の高い模型を製作することが重要であることが分かった。

参考文献

- 1) 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻、「風工学実験室」, https://bridge.t.u-tokyo.ac.jp/files/wind_tunnel.pdf, (2024. 5)
- 2) 石原 孟, 山口 敦, 藤野 陽三, 「複雑地形における局

所風況の数値予測と大型風洞実験による検証」, 土木学会論文集, No. 731, I-63, pp. 195-211, (2003)

- 3) 石原 孟, 山口 敦, 「風況予測ソフトウェア MASCOT の技術と解析例」, 日本風力エネルギー学会誌, Vol. 37, No. 1, pp. 2-5, (2013)
- 4) 石原 孟, 山口 敦, 高原 景滋, 銘苅 壮宏, 新城 文博, 「風洞実験と気流解析に基づく台風0314号の最大風速の推定」, 構造工学論文集, Vol. 51A, pp. 911-920, (2005)
- 5) Ishihara, T., Qian, G. W., Qi, Y. H., “Numerical study of turbulent flow fields in urban areas by using modified k-ε model and large eddy simulation”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 206, pp. 1-20, (2020)
- 6) 石原 孟, 高橋 孝介, 山口 敦, 藤野 陽三, 「風洞実験による風車後流の計測およびそのモデル化に関する研究」, 日本流体力学会年会, (2005)
- 7) Qian, G. W., Song, Y. P., Ishihara, T., “A control-oriented large eddy simulation of wind turbine wake considering effects of Coriolis force and time-varying wind conditions”, Energy, Vol. 239, pp. 1-16, (2021)
- 8) 清水 幹夫, 石原 孟, ファバン フック, 「風洞実験による着氷雪送電線の定常および非定常空力特性に関する研究」, 第18回風工学シンポジウム論文集, pp. 245-250, (2004)
- 9) 岡 新一, 石原 孟, 「非定常空気力を考慮した着氷雪送電線のギャロッピング解析に関する研究」, 日本風工学会論文集, Vol. 45, No. 2, pp. 27-41, (2020)
- 10) 久保 義人, 結城 洋一, 石井 博典, 畠中 真一, 河藤 千尋, 「実物大供試体を用いた橋梁の並列ケーブルのウェイクギャロッピング特性」, 構造学論文集 Vol.58, Vol.58A, pp. 518-527, (2012)
- 11) Li, T., Ishihara, T., “Numerical study on wake galloping of tandem circular cylinders considering the effects of mass and spacing ratios”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 210, pp. 1-15, (2021)
- 12) Ishihara, T., Li, T., “Numerical study on suppression for vortex-induced vibration of circular cylinder by helical wires”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 197, pp. 1-11, (2020)
- 13) Goit, J. P., Ishihara, T., “Aerodynamic loads on wind turbine nacelles under different inflow turbulence conditions”, Wind Energy, Vol. 23, No. 3, pp. 645-659, (2019)