

数値流体計算によるドーム型風洞内の風況制御方法の検討
Investigation of a method to control wind conditions in a dome-shaped wind tunnel
using CFD simulations

○竹内崇・友清衣利子・西嶋一欽

○Takashi TAKEUCHI, Eriko TOMOKIYO, Kazuyoshi NISHIJIMA

A dome-shaped wind tunnel with multiple fans has been proposed to simulate the complex three-dimensional wind conditions during typhoons. In this study, a method of controlling wind conditions in a dome-shaped wind tunnel was investigated using computational fluid dynamics (CFD) simulations. The control method for wind conditions we propose is to configure the set of input wind speeds induced with multiple fans by minimizing the error of the output wind speed relative to the target wind speed by iterative calculations using linearized transfer functions. The proposed method was verified by CFD simulations taking an observed full-scale wind condition as an example. The results show that the set of the input wind speeds that induce the target wind condition can be achieved by a few iterative calculations.

1. はじめに

現行の耐風設計は、風向別の水平風が作用するときの風荷重に基づいて行われている。しかし、実際の台風などの自然強風下においては、強い乱れを持ち風向風速が時々刻々と変化することが指摘されている¹⁾。台風強風下での複雑な風況を再現し、住家被害の拡大メカニズムをより实际的に分析することを目的として、著者らの研究グループでは、マルチファン制御によるドーム風洞の開発に取り組んでいる²⁾。ドーム風洞は三角形と四角形で構成される仮想的な半球状ドームの各面にファン付きの送風洞を取り付け、3次元的に時々刻々と変化する風況の再現を目指すものである。ドーム風洞内のある地点での風速の時刻歴波形を再現波形に対応させるためには、ドームの各流入面での流入風の条件を明らかにする必要がある。

本研究では、数値流体計算を用いて、ドーム風洞内の風況制御方法を検討した。ドーム風洞での最終的な目標は3成分の風速波形を制御することであるが、本研究では、まず水平2成分の風速波形を制御することを目標とした。

2. 解析概要

解析モデルを図1に示す。ドーム風洞は半径300mmの半球型であり、その球面上の約半分を流入面として利用し、残り半分は流出面として利用する。

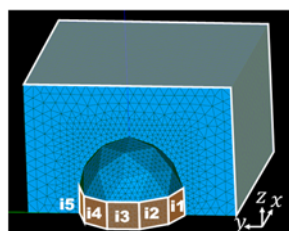


図1 解析モデル

解析においては、流出面の外側の領域も合わせた解析を行うこととし、ドーム風洞の後部は、1200mm×1200mm×600mmの箱型とし、箱の上面、側面、背面を流出面とした。また水平風の制御の簡略化を考慮し、本解析では、半球型のドームの鉛直下側に四角形の鉛直壁を設け、図1中のi1～i5の面を流入面とした。残りの面は、slip型の壁面境界として設定した。解析は汎用数値流体解析ソフトOpenFOAM v2112を用いて実施した。流体は、非圧縮性流体とし、ソルバーとしてpisoFoamを使用した。乱流モデルはLESモデルを使用した。解析領域のメッシュはテトラメッシュとし、ドーム内及びその周辺のセルサイズは約30mmとした。解析の時間刻みは0.0001秒である。

風速の再現対象点は、ドーム中央で高さ50mmの位置とした。再現目標風速は、丸山らが舞洲で観測した風速波形¹⁾のうちの、ある200秒間の水平2成分とした。解析領域の長さスケールは実際の1/50であり、風速尺度は1/5、時間尺度は1/10とした。また、ドーム風洞ではファンの回転数制御で風の乱れを再現するため、高い周波数の乱れは再現できないことが想定される。そこで、2Hzのローパスフィルターを掛けて、2Hz以下の周波数成分を再現対象とした。このように作成した20秒間の波形を目標風速とした。

3. 風速制御手法

入力風速から出力風速を得るまでの解析システムの概要を図2に示す。本解析では、入力風速を

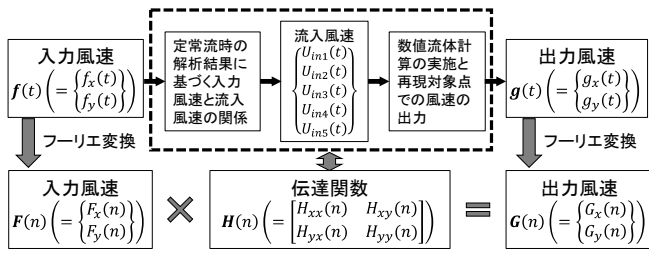


図2 解析システムの概要

設定し、それを5つ流入面の流入風速に変換し、解析を実行して、再現対象点での風速(出力風速)を得る。入力風速と流入風速の関係については、事前に、i1~i5に様々な定常風を与えた解析結果より得られた関係を用いた。入力風速 $f(t)$ を与え、出力風速 $g(t)$ を得るまでを一つのシステムとして捉えたと、フーリエ変換した入力風速 $F(n)$ と出力風速 $G(n)$ は伝達関数 $H(n)$ を用いて次のように表すことができる。

$$G(n) = H(n) \cdot F(n) \quad (1)$$

ただし、 $H(n)$ は入力風速によって値が変化する。目標風速を完全に再現した時の出力風速を $g_t(t)$ 、その時の入力風速を $f_t(t)$ とし、それぞれのフーリエ変換を G_t, F_t (以下、同様の表記) とすると、次のように表される。

$$G_t(n) = H_t(n) \cdot F_t(n) \quad (2)$$

上記の関係から $f_t(t)$ を求めることは困難であるため、本解析では下記のプロセスのように、誤差を小さくする反復計算を行い、近似的に求めた。

反復回数が*i*回目の時、風速波形 $f_i(t)$ を入力し、

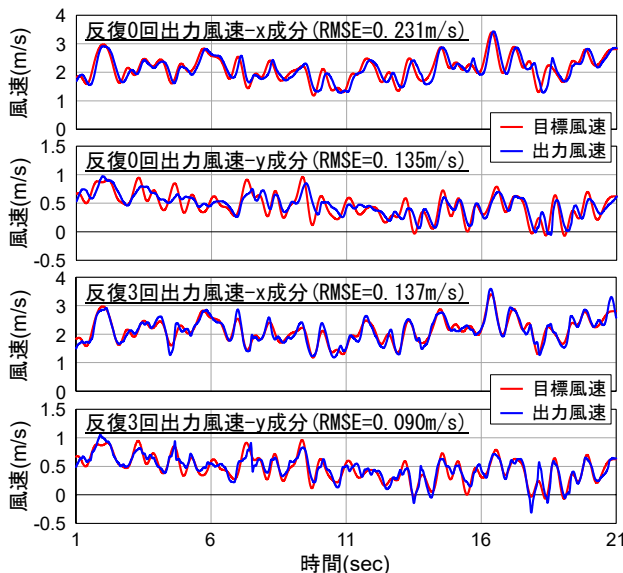


図3 出力風速と目標風速の比較

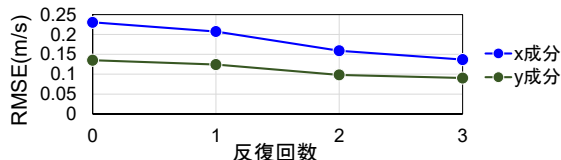


図4 反復回数による誤差の変化

出力波形 $g_i(t)$ を得る解析は次のように表せる。

$$G_i(n) = H_i(n) \cdot F_i(n) \quad (3)$$

この出力風速と目標風速の差を時刻歴で求めると、

$$\Delta g_i(t) = g_t(t) - g_i(t) \quad (4)$$

この差分 $\Delta g_i(t)$ のフーリエ変換 $\Delta G_i(n)$ を求める。伝達関数を求めれば、次式のように入力風速の補正值が得られる。なお、伝達関数は2つの解析の入力風速と出力風速を用いることで求められる。

$$\Delta F_i(n) = H_i(n)^{-1} \Delta G_i(n) \quad (5)$$

$\Delta F_i(n)$ を逆フーリエ変換し、補正波形 $\Delta f_i(t)$ を得る。これを入力風速に加え、次の解析の入力風速とする。ただし、収束の安定性を考慮して、低減係数 γ (本解析では0.5を用いた) を乗じて加える。

$$f_{i+1}(t) = f_i(t) + \gamma \Delta f_i(t) \quad (6)$$

式(3)から(6)のプロセスを繰り返すことで、 $g_i(t)$ を $g_t(t)$ に近づける。

4. 風速制御手法の検証結果

上記の手法により、再現対象点の風速が目標風速に近づくよう解析を繰り返した。なお、最初の解析においては目標風速を入力風速として用いた。図3に最初の解析(反復0回目)の出力風速と、反復を3回繰り返した後の出力風速の目標風速との比較を示す。図中に出力風速と目標風速の誤差の代表値として二乗平均平方根誤差(RMSE)を記している。最初の解析では、x成分は少し位相がずれており、y成分は風速変動を精度良く再現できていない。一方、反復3回後は、x, y成分共に目標風速に近づいていることが確認できる。図4は反復回数とRMSEの関係を示す。反復回数が増えるごとに、誤差が小さくなることが確認できる。

5. まとめ

ドーム風洞内の風況の制御手法として、伝達関数を用い、反復計算することで、出力風速を目標風速に近づける方法を考案し、数値流体計算によりその手法を検証した。今回の検証例では反復回数を増やすことで、誤差が小さくなることを示した。今後、検証例を増やし、本手法の妥当性を確認するとともに、効率的に誤差を収束させる方法を検討していく。

謝辞 本研究に用いた観測データは、大阪公立大学教授谷口徹郎先生にご提供いただいた。ここに記して感謝の意を表します。なお、本研究は京都大学防災研究所共同研究(2021G-11)の成果による。

参考文献 1) 丸山ら, 接地境界層中に置かれた2.4m立方体周りの気流・風圧性状, 日本風工学会論文集, No.99, pp227-240, 2004. 2) 友清ら, 3次元風況を再現するドーム風洞のためのマルチファンの制御と設置方法の検討, 令和3年度京都大学防災研究所研究発表講演会, C124, 2022.