



# 風洞実験による建物周辺の 気流・拡散解析における課題

一般財団法人 生産技術研究奨励会 特別研究会 (RC-86)

都市環境災害に関する風洞活用研究会

令和4年3月

## まえがき

東京大学生産技術研究所奨励会では、2015年4月より「都市環境災害に関する風洞活用研究会」を組織し、都市を取り巻く環境障害や災害に関わる複雑現象の解明のために風洞を活用することを目的に、その最新の技術に関する情報交換を行っている。

風洞とは風をつくり出す装置のことで、その歴史は古く、19世紀頃から利用されている。その用途は航空機や自動車の空力特性の解明など広く用いられ、多くの科学技術の発展をうながした。建築分野では、建物に関わる風圧力を測定し、その動力学を解明する耐風工学や、ビル風などの建物があることによる風の強弱、汚染物の滞留などの環境問題の解明に利用されてきた。

このように都市環境災害の分野において、風洞実験の利用は非常に普及しているが、その一方で、その利用方法は慣習的に行われていることが多く、十分にその信頼性が確認されているわけではない。風洞実験は媒質として実際の空気を用いるため、その物理的な流体现象の再現性は計算流体力学（Computational Fluid Dynamics; CFD）に比べて高いと言われているが、風洞実験そのものが実現象をモデル化していることには変わりがなく、そのモデル化の過程において様々な問題を孕んでいる可能性がある。

この背景のもと、本研究会では、2018年度より、文献調査を中心として、風洞実験に内在する課題を明確化し、更に可能であればその解決策を模索することとした。このことは、今後の風洞実験の信頼性を高め、それを十分に活用するために重要である。本報告書は、上記に関わる本研究会での研究成果をまとめたものである。本報告書が信頼性の高い風洞実験を実施するにあたり、一助となれば幸いである。

# 都市環境災害に関する風洞活用研究会

## メンバーリスト（令和3年度）

### 代表幹事

大岡龍三 東京大学

### 幹事

菊本英紀 東京大学

### 研究会メンバー（五十音順）

新井舞子 大成建設

伊藤真二 鴻池組

小野梓 清水建設

加藤信介 東京大学

栗田剛 東急建設

佐々木澄 清水建設

佐藤大樹 大成建設

中尾圭佑 電力中央研究所

中島慶悟 鹿島建設

原田雅俊 鴻池組

胡 家龍 東急建設

林 超 東京大学

# 目次

第1編 風洞の実現象の再現性に関する問題.....	1
1 建物表面細部の模型化（ビル風と風洞実験） .....	1
1.1 はじめに .....	1
1.2 文献調査 .....	1
1.2.1 ベランダ部分の模型化について検討した実験結果[3].....	1
1.2.2 ベランダ、縦間仕切りの影響を検討した実験結果[4].....	2
1.2.3 ガイドブックにおける指針[5].....	4
1.3 まとめ.....	5
2 樹木の模型化.....	6
2.1 はじめに .....	6
2.2 樹木の防風効果 .....	6
2.3 樹木の種類 .....	6
2.4 文献調査 .....	7
2.4.1 単体および樹木列の防風効果.....	7
2.4.2 遮蔽率と風速分布の関係.....	9
2.4.3 高木と低木の組合せ植栽の防風効果.....	10
2.4.4 樹木の抵抗係数（抗力係数） .....	11
2.4.5 樹木の模型化／材料の違い .....	13
2.5 まとめ.....	15
3 防風フェンスの模型化など .....	17
3.1 はじめに .....	17
3.2 防風フェンス周りの風速増減率.....	17
3.3 風洞実験における有孔フェンスの再現方法.....	19
3.4 有孔フェンスに関する相似条件.....	20
3.5 まとめ.....	21
4 周辺市街地の模型化範囲 .....	23
4.1 はじめに .....	23
4.2 文献調査 .....	23
4.2.1 各文献での周辺市街地の模型化範囲の基準値 .....	23
4.2.2 周辺市街地の模型化範囲が及ぼす影響の評価 .....	25
4.2.3 模型の縮尺率と風洞気流の乱れのスケールによる周辺市街地の模型化範囲の目安	
37	
4.3 まとめ.....	38

<b>5</b>	<b>周辺市街地モデルの簡略化</b> .....	<b>39</b>
5.1	はじめに .....	39
5.2	文献調査 .....	39
5.2.1	ガイドブックにおける指針[1] .....	39
5.2.2	周辺市街地について詳細形状再現モデルとラフネスブロックで比較した実験結果 [2] 40	
5.2.3	単体建物壁面の形状による周辺気流への影響に関する検討 .....	46
5.3	周辺市街地のモデル作成に関する事例 .....	48
5.3.1	電動アクチュエータによる周辺市街地モデルの成型[8] .....	48
5.3.2	国土交通省の3D都市モデルデータの活用の可能性[10, 11] .....	48
5.4	まとめ .....	49
<b>6</b>	<b>平均風速の鉛直分布</b> .....	<b>51</b>
6.1	はじめに .....	51
6.2	文献調査 .....	51
6.2.1	平均風速の鉛直分布を表す法則 .....	51
6.2.2	平均風速の鉛直分布の観測例 .....	52
6.2.3	風洞実験での平均風速の鉛直分布の再現 .....	55
6.2.4	AIJ 荷重指針に示されている風速の性状[11] .....	55
6.3	まとめ .....	58
<b>7</b>	<b>境界層高さ</b> .....	<b>60</b>
7.1	はじめに .....	60
7.2	文献調査 .....	60
7.2.1	気象学的な境界層高さ .....	60
7.2.2	境界層高さを観測した例 .....	61
7.2.3	AIJ 荷重指針で示される風速の鉛直分布を定めるパラメータ[5] .....	63
7.3	風洞実験での境界層高さの再現 .....	64
7.4	まとめ .....	65
<b>8</b>	<b>実験風速・レイノルズ数効果</b> .....	<b>66</b>
8.1	はじめに .....	66
8.2	レイノルズ数 .....	66
8.2.1	円柱構造物の RE 数に関する研究 .....	68
8.2.2	球形ドームの RE 数に関する研究 .....	70
8.3	実験風速 .....	72
8.4	まとめ .....	74
<b>9</b>	<b>風洞内の圧力勾配</b> .....	<b>76</b>

9.1	はじめに .....	76
9.2	文献調査 .....	77
9.2.1	耐風実験用風洞の基本設計と建設について .....	77
9.2.2	静圧勾配のある乱流境界層流中の角柱に加わる風圧力について .....	80
9.2.3	建築系風洞における静圧勾配の例 .....	83
9.2.4	土木系風洞における静圧勾配の例 .....	89
9.3	まとめ .....	93
<b>10</b>	<b>エクマン層（高層建築の場合） .....</b>	<b>95</b>
10.1	はじめに .....	95
10.2	エクマン境界層 .....	95
10.3	実験 .....	96
10.3.1	気流作成方法 .....	96
10.3.2	風荷重 .....	99
10.3.3	歩行者環境 .....	100
10.4	CFD .....	103
10.4.1	TWFの再現 .....	103
10.4.2	大気エクマン境界層 .....	105
<b>11</b>	<b>相似性（密度フルード数） .....</b>	<b>108</b>
11.1	はじめに .....	108
11.2	文献調査 .....	108
11.2.1	Rossby number $Ro$ .....	108
11.2.2	Reynolds number $Re$ .....	108
11.2.3	Péclet number $Pe$ .....	109
11.2.4	密度フルード数 $Frd$ .....	109
11.2.5	既往文献によく使用される無次元数 .....	111
11.3	スケーリング方法の有効性 .....	111
<b>第2編 計測器の計測精度に関する問題 .....</b>		<b>114</b>
<b>1</b>	<b>圧力差に基づく計測器 .....</b>	<b>114</b>
1.1	PITOT TUBE .....	114
1.1.1	計測原理 .....	114
1.1.2	長所・短所 .....	115
1.1.3	計測事例 .....	115
1.2	IRWIN PROBE .....	116
1.2.1	計測原理 .....	116
1.2.2	長所・短所 .....	117

1.2.3	計測事例	117
1.3	COBRA PROBE (MULTIPLE-HOLES PITOT TUBE)	119
1.3.1	計測原理	119
1.3.2	長所・短所	120
1.3.3	計測事例	120
<b>2</b>	<b>温度に基づく計測器</b>	<b>121</b>
2.1	THERMAL ANEMOMETERS	121
2.1.1	計測原理	121
2.1.2	プローブの種類, それぞれの長所・短所および計測事例	121
2.2	INFRARED THERMOGRAPHY	124
2.2.1	計測原理	124
2.2.2	長所・短所	124
2.2.3	計測事例	125
<b>3</b>	<b>粒子の移動に基づく計測器</b>	<b>126</b>
3.1	LASER-DOPPLER ANEMOMETRY	126
3.1.1	計測原理	126
3.1.2	長所・短所	127
3.1.3	計測事例	127
3.2	PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY	128
3.2.1	計測原理[50]	128
3.2.2	長所・短所	130
3.2.3	計測事例	130
3.3	SCOUR TECHNIQUES	132
3.3.1	計測原理	132
3.3.2	長所・短所	132
3.3.3	計測事例	132
<b>4</b>	<b>まとめ</b>	<b>134</b>
<b>第3編 計測方法に関する問題</b>		<b>140</b>
<b>1</b>	<b>「平均風速」に関わる諸課題の整理</b>	<b>140</b>
1.1	はじめに	140
1.2	「平均風速」の定義と評価に関する諸課題	140
1.2.1	風速成分の次元数と平均風速	140
1.2.2	数学的操作の順序と平均風速	141
1.2.3	風速計の指向性が平均風速へ与える影響	143
1.2.4	計測器や解析手法による時間・空間フィルタリングの影響	146

1.3	まとめ.....	147
<b>2</b>	<b>平均風速，最大瞬間風速を評価するための平均化時間.....</b>	<b>149</b>
2.1	はじめに.....	149
2.2	平均風速を評価するための平均化時間の考え方.....	149
2.3	最大瞬間風速を評価するための平均化時間の考え方.....	150
2.4	まとめ.....	150
<b>第4編</b>	<b>風環境設計法・ガイドラインに関する問題.....</b>	<b>152</b>
<b>1</b>	<b>風環境評価指標.....</b>	<b>152</b>
1.1	はじめに.....	152
1.2	代表的な風環境評価指標.....	152
1.2.1	村上らによる風環境評価指標.....	152
1.2.2	風工学研究所による風環境評価指標.....	155
1.3	新しく提案された風環境評価指標.....	157
1.3.1	赤星らによる風の乱れの影響を考慮した風環境評価指標の提案.....	157
1.3.2	中村らによる歩行者の強風安全性に関する指標の提案.....	161
1.4	まとめ.....	162
<b>2</b>	<b>市街地低層部の風速分布推定.....</b>	<b>164</b>
2.1	はじめに.....	164
2.2	粗度対数則近似法.....	164
2.3	都市形態をパラメータとしたモデリング.....	164
2.4	モデル精度.....	166
2.5	都市キャノピー内風速.....	168
2.6	指数分布モデル.....	168
2.7	モデルの高度化.....	169
2.8	仮定の妥当性.....	170
<b>第5編</b>	<b>参考資料.....</b>	<b>172</b>
<b>1</b>	<b>LARGE-EDDY SIMULATION を用いた静圧勾配の影響に関する検討.....</b>	<b>172</b>