資料

新設汎用境界層風洞の基本性能について

On the Performance of New Wind Tunnel

須田 健一^{*1} 織 茂 俊 泰^{*2} 今 田 英 次^{*3}

Kenichi SUDA, Tosiyasu ORIMO, Eiji IMADA

SUMMARY

This paper describes the outlines and the performance of the new boundary layer type wind tunnel constructed at Sato Kogyo Engineering Research Center. It is the multi-purpose wind tunnel which can be used for many researches on the wind engineering. Considering that it will be used principally for the architectural design, it was designed to have a long test-section. And it has a large test-section, so the wind tunnel test for the large buildings can be conducted. Its maximum windspeed is above 30m/s. This paper describes also the results of the simulation on the boundary layer flow using spires and roughness blocks.

1. はじめに

超高層建物の建設はますます増加し、また、余暇時間の増加に伴い、種々のレジャー・イベント施設の大型化も進んでいる。このような構造物の設計を行うには、その安全性や居住性に対して、より過酷な影響を及ぼすようになる風に対する検討が欠かせないものになってきている。建物周辺への風の影響等を含めて、より合理的な耐風設計を行うには、自然風を再現できる風洞で模型実験を行うことが、現時点では最も有効で、かつ、合理的な手段である。

このような要求に答えるため、佐藤工業中央技術研究

所内に大型回流型境界層風洞が新設された。本風洞は平成3年秋に竣工し、諸調整、基本性能調査、風作りを経て、平成4年春より稼働し始め、同年秋までに実物件5件についても風洞実験を実施してきている。

本報告は、上記風洞の概要について記すものである。

2. 風洞の概要および構成

2. 1 設計方針

本風洞実験施設の計画に当たっては、特に以下のような点に考慮して、計画および設計を進めた。

風工学分野で行われる種々の風洞実験（ビル風害実験、

- * 1 佐藤工業株式会社中央技術研究所、主席研究員
Research Head, Engineering Research Center, SATO KOGYO Co., Ltd.
- * 2 佐藤工業株式会社中央技術研究所
Engineering Research Center, SATO KOGYO Co., Ltd.
- * 3 佐藤工業株式会社中央技術研究所
Engineering Research Center, SATO KOGYO Co., Ltd.

(原稿受理: 1992年12月10日)

Fig. 1 風洞実験棟の平面図
(Plan of the wind tunnel of Engineering Research Center, SATO KOGYO Co., Ltd.)

風圧実験、風力実験、振動実験、拡散実験、風力換気実験等) に対応可能な汎用タイプとすること。

超高層建築物等の大規模建築物も、比較的、大きな縮尺で実験が可能な大きさの測定部断面を有すること。ただし、建設場所の敷地に限界があり、この限界内で、所定の性能を有しながら、上記の要求をいかに満足させるかがポイントであった。

風洞の性能目標としては、ほとんどの場合に境界層風洞として使用されることを考慮して、風速の偏差および乱れの強さを1%以下とすることとした。風洞風速は、最大風速30m/sを目標とした。

また、トラバース装置の閉塞率を最小にすることを、その設計目標の一つとした。

また、風洞胴体部に関しては、その剛性を高めて、壁面等の振動が実験気流に影響しないようにすること、外気温に対する断熱性についても十分に配慮すること、を要

求した。

2. 2 風洞実験棟建屋の概要

風洞実験棟は、鉄骨造平屋建であり、外壁はALC版、屋根は断熱材立て込みのダブル折板とした。風洞実験棟の平面はFig. 1に示すとおりである。実験棟は風洞を一体的に包含するように計画されており、柱割や梁伏もこれを前提に決められた (Photo. 1参照)。

2. 3 風洞の概要および諸元

Fig. 1に示すとおり、本風洞は回流型境界層風洞である。Table 1に本風洞の諸元および仕様をまとめて示した。測定部断面は幅2.2m×高さ1.85m (断面積4.07㎡) とした。

Table 1 風洞の諸元および概要仕様
(Outlines and performance of the wind tunnel)

風洞型式	回流型境界層風洞
測定洞寸法	幅2.2m×高さ1.85m×長さ16.8m (ターンテーブル中心まで13.0m)
縮流比	3.01
測定部風速	~31m/s (0.6m/sより連続可変)
風量	7,500m ³ /min
風速分布	±1.0%以下 (断面寸法の80%以内)
乱れの強さ	0.7%以下 (ターンテーブル中心)
送風機	静翼型一段軸流送風機 (φ-3,040) 回転数 ~500 rpm
モーター	直流電動機 75KW AC200V 回転数 ~1,150 rpm 制御 サイリスターレオナード方式

Photo. 1 風洞の鉄骨フレーム
(Steel frame of the wind tunnel)

Photo. 2 測定部
(Working section)

風洞本体は、鋼製の工場製作部分を除き、天井面・壁面・床面とも鉄骨下地に厚さ25mmの合板貼りとしている。鉄骨下地はフレーム材を1,500mmピッチとし、これに繋ぎ材を450mmピッチで入れているほか、壁面のフレーム材を建物の構造材と繋いでおり、また、天井面および床面のフレーム材を吊り材または方柱で補剛することにより、十分な剛性を確保するようにした（Photo.

Table 2 付帯装置の仕様
(Specification of the accessory equipments)

装 置	仕 様
電動3次元 トラバース装置	型 式: 3次元およびセンサー軸回転 トラバース装置 位置決め方法: 連続自動位置決め機能、連続 位置決め機能、ワンポイント 位置決め機能を選択 移 動 方 式: 上下動、一軸水平動、回転の組 合わせによる3次元トラバース 方式 移 動 範 囲: 水平軸…… -150～ 900mm 0～1,050mm (延長ロッド使用時) 上下軸…… 0～1,323.5mm 回転軸…… -190～ 190° センサー軸…… -190～ 190° 移 動 分 解 能: 水平軸、上下軸…… 0.1mm 回転軸センサー軸…… 0.09°
	型 式: テーブル上下移動機能付 ターンテーブル サ イ ズ: 直径1,800mm 位置決め方法: 連続自動位置決め機能、連続 位置決め機能、ワンポイント 位置決め機能を選択 移 動 範 囲: 回 転…… 360° エンドレス 移 動 分 解 能: 0.01°

Photo. 3 3次元トラバース装置
(3-D Traverser)

1参照)。また、建物外壁とは別に、風洞本体の壁面を設けて、間に空気層を取ることによって、断熱を図っている。Photo. 2に測定部を示した。

2. 4 測定部付帯設備の概要

ターンテーブル装置および3次元トラバース装置の仕様はTable 2に示すとおりである。ターンテーブルの直径は1,800mmである。3次元トラバース装置は、上下動、一軸水平動に回転動を組合わせた移動方式のものである（Photo. 3参照）。風路内に入るのは上下方向のシャフトのみであり、トラバース装置による風洞の閉塞率は最大でも1.6%と極めて小さくすることができた。これらは制御用および計測用コンピュータの連動によって自動運転・計測が可能である。

3. 風洞の基本性能

3. 1 整流装置の効果について

整流装置を設けない場合、整流ネット(#34)を1枚および2枚設置した場合のそれぞれについて、ターンテーブル中心での風速の乱れの強さの測定例をFig. 2に示した。整流装置を設けない場合には、高風速になっても、乱れの強さは1%を上回った。整流ネットを1枚設置し

Fig. 2 乱れの強さ（ターンテーブル中央、高さ $z=675\text{mm}$ ）
(Intensity of turbulence at the working section)

Fig. 3 静圧分布
(Distribution of static pressure along the wind tunnel)

た場合は、整流装置を設けない場合より乱れの強さはわずかに減ずる程度であった。しかし、整流ネットを2枚設置すると、5m/s未満の低風速を除けば、乱れの強さは1%以下になり、目標の性能をほぼ達成できた。また、後述のように、この状態で、風速分布はほぼ一様になっていることも確認できた。したがって、本風洞は整流ハニカムの設置も可能な設計になっているが、この結果を考慮して、現在はハニカムは設けず、整流ネット2枚のみを設置した状態で稼働している。

3. 2 静圧分布

静圧分布の測定結果をFig. 3に示した。これらは、いずれも測定部での平均風速10m/sの場合である。縮流洞出口以降、送風機までの間の静圧分布は3者ともほぼ同様である。送風機～縮流洞入口間では整流ネット1枚設置するごとに約2mm H₂O程度の静圧上昇が生じている。その他、圧損の大きい部分は、縮流洞を除けば、飛散防止ネットを取り付けた第3コーナベンだけである。また、測定洞の風上端～風下端間では約0.5mm H₂Oの圧力減少が生じているが、圧力係数に換算すると0.08であり、余り大きくはない。

Fig. 4 ターンテーブル中央での風速分布 (偏差%)
[整流ネット2枚を設置した場合]
(Distribution of mean wind speed deviation at the working section)

Fig. 5 ターンテーブル中央での乱れの強さの分布
[整流ネット2枚を設置した場合]
(Distribution of intensity of turbulence at the working section)

3. 3 風速および乱れの強さの分布

ターンテーブル中央断面内での、断面中心の平均風速に対する各点の平均風速の偏りおよび乱れの強さの分布を、Fig. 4およびFig. 5に示した。平均風速の偏差は風洞床近傍を除けば、ほぼ1%以下である。乱れの強さは測定部中心で約0.7%、その他でも風洞床近傍を除けば、ほぼ1%程度または以下である。ともに当初目標の性能が確保されている。なお、床面および壁面の境界層厚は約20cm程度である。

3. 4 振動

風洞測定洞胴体の下地鉄骨フレーム材の中間に相当する床仕上げ面および壁仕上げ面に小型加速度計を設定し、自由振動実験を行った結果、風洞床面および壁面の基本振動数はそれぞれ、110～130Hz、80Hz前後であった。したがって、それぞれ十分な剛性を有しており、また、ファンとの同調や床・壁の同調は生じないものと判断される。

また、風洞風速10m/sの場合、測定洞胴体床面、測定部

Fig. 6 風洞運転中の風洞内温度の変化
(風洞風速 10m/s)
(Time variation of the temperature in
the wind tunnel)

下部の地下ピットのコンクリート・ベース上、および、その上に設置した振動測定用マス（防振ゴム等、未設置の状態）上での上下方向最大加速度はそれぞれ2.9, 1.4, 1.1gal, 水平方向最大加速度はそれぞれ1.5, 0.7, 0.8galであった。この時、コンクリート・ベースおよび振動測定用マス上での振動は、いくつかの振動数で小さなピークを示す程度であり、極めてランダムなものであった。

3. 5 風路内の温度変化

風速を一定にして、ファンを継続的に運転して、その間の風洞内部の温度変化を、風洞外部の温度（測定室室温）とともに連続測定した結果をFig. 6に示した。風洞内部の温度の測定位置はターンテーブル中心とし、T型熱電対を用いて測定した。Fig. 6は風速10m/sの場合である。3時間の運転の間の温度上昇は、測定室室温0.8℃の上昇に対して、風洞内温度の上昇は1.9℃であった。運転開始後、風洞内温度は徐々に上昇した。その後、風洞内温度が測定室室温に近づくと、風洞内温度は測定室室温の変化に従うように変化しつつ、測定室室温に近づいている。このように、風洞内温度の変化には、ファンの運転の影響によるものの他に、測定室室温が影響している様子が分かり、外気温の直接の影響は少ないことが分かる。

4. 実験気流の生成方法の検討

4. 1 境界層流れの生成方法

境界層流れのシミュレーションには、一般にスパイヤやラフネス・ブロック等が用いられる。しかし、スパイヤのみでは、厚い境界層の作成は可能であるが、乱流特性までを十分にシミュレートすることは難しいといわれている。一方、ラフネス・ブロックのみでは、乱流特性はシミュレートできても、十分な厚さの境界層を生成

種類	大	中	小
H(cm)	880	1,100	1,470
D(cm)	220	272	368
W(cm)	130	160	220
台	5	4	3

Fig. 7 スパイヤの形状
(Shape of the spires)

種類	大	中	小
H(mm)	100	50	25
D(mm)	100	50	25
W(mm)	100	50	25

Fig. 8 ラフネス・ブロックの形状
(Shape of the roughness blocks)

することは困難であるとされている。

したがって、今回はスパイヤとラフネス・ブロックを併用する方法によって、境界層流れを生成することを検討した。

4. 2 スパイヤおよびラフネス・ブロックの試設計

風洞において境界層を再現する方法にはいまだルールは無いが、一応の目安として、スパイヤおよびラフネス・ブロックの試設計を、H. P. A. H. Irwinの提案¹⁾に基づいて行った。スパイヤはFig. 7に示すような形状の「三角スパイヤ」であり、考慮の対象はFig. 7に示す3種である。また、考慮したラフネス・ブロックの大きさはFig. 8に示した3とおりである。

目標とする境界層を、日本建築学会建築物荷重指針・同解説の第6章「風荷重」で規定されている各地表面粗度区分におけるものと考えた場合、試設計の結果を記すと以下のとおりである。なお、文献1)の方法で検討できるのは、ベギ指数と境界層厚である。

- ・地表面粗度区分Ⅱに対して、縮尺率=1/200はスパイヤ大で、縮尺率=1/300はスパイヤ中で、縮尺率=1/400はスパイヤ小で、所要の境界層（ベギ指数と境界層厚）を実現できる。
- ・地表面粗度区分Ⅲに対して、縮尺率=1/200の境界層厚は実現できない。縮尺率=1/300はスパイヤ大、縮尺率=1/400はスパイヤ中で、縮尺率=1/500はスパイヤ小で所要の境界層を実現できる。ラフネスは大、中、小

Table 3 スパイヤとラフネス・ブロックの配置と境界層作成結果
(Layout of roughness blocks and spires and the characteristics of the simulated wind)

	スパイヤ	ラフネス・ブロックの種類と間隔(mm)			境界層		
		間 隔 (mm)			厚 さ (mm)	べき指数	乱れの強さ (z=100mm) (%)
①	大 中 小	12000~8000	8000~4000	4000~1000			
		-	-	-	140	0.145	6.8
		-	-	-	1000	0.112	8.3
		-	-	-	1100	0.125	8.3
②	大	-	-	-	800	0.131	9.4
		大 @ 1000	-	-	1200	0.145	13.1
		大 @ 800	-	-	1100	0.201	12.1
		大 @ 500	-	-	1100	0.242	21.6
		大 @ 400	-	-	1000	0.278	25.6
		中 @ 800	-	-	1200	0.139	10.5
	中	中 @ 500	-	-	1200	0.154	11.8
		中 @ 400	-	-	1200	0.184	15.9
		小 @ 200	-	-	1100	0.270	18.9
		大 @ 1000	-	-	1100	0.168	10.8
		大 @ 800	-	-	1000	0.220	13.0
		大 @ 500	-	-	1100	0.241	17.8
③	中	大 @ 400	-	-	1000	0.294	17.3
		中 @ 800	-	-	1100	0.143	9.4
		中 @ 500	-	-	1100	0.158	12.5
		中 @ 400	-	-	1100	0.175	14.9
		小 @ 200	-	-	1100	0.232	16.9
		小 @ 500	-	-	1200	0.126	10.1
	小	小 @ 400	-	-	1200	0.142	10.4
		小 @ 200	-	-	1100	0.160	10.7
		大 @ 1000	-	-	900	0.160	11.7
		大 @ 800	-	-	800	0.235	15.3
		大 @ 500	-	-	800	0.271	19.4
		大 @ 400	-	-	800	0.317	23.0
④	中	中 @ 800	-	-	900	0.145	12.6
		中 @ 500	-	-	800	0.169	11.6
		中 @ 400	-	-	800	0.180	16.0
		中 @ 200	-	-	800	0.264	19.2
		小 @ 500	-	-	900	0.132	10.2
		小 @ 400	-	-	900	0.133	10.4
	小	小 @ 200	-	-	900	0.156	14.7
		中 @ 400	小 @ 200	小 @ 200	1000	0.162	12.5
		中 @ 400	中 @ 400	小 @ 200	900	0.173	14.5
		中 @ 200	小 @ 200	小 @ 200	1000	0.185	12.9
		中 @ 200	中 @ 200	小 @ 200	900	0.190	18.2
		中 @ 400	中 @ 400	小 @ 200	1000	0.200	12.9
⑤	中	中 @ 400	中 @ 200	小 @ 200	1200	0.197	18.3
		中 @ 200	中 @ 200	小 @ 200	1200	0.229	14.2
		中 @ 200	中 @ 200	中 @ 200	1100	0.267	22.2
		中 @ 400	小 @ 400	小 @ 400	900	0.142	10.9
		中 @ 400	中 @ 200	小 @ 200	900	0.172	10.3
		中 @ 400	中 @ 400	小 @ 200	800	0.178	13.3
	小	中 @ 200	中 @ 200	小 @ 200	700	0.187	12.9
		中 @ 200	中 @ 200	小 @ 200	800	0.201	12.8
		中 @ 400	中 @ 400	小 @ 200	700	0.218	13.4
		中 @ 400	中 @ 200	小 @ 200	800	0.212	13.5
		中 @ 400	中 @ 400	小 @ 200	800	0.212	13.5
		中 @ 400	中 @ 400	小 @ 200	800	0.212	13.5

のいずれも利用できる。

- ・地表面粗度区分Ⅳに対して、縮尺率=1/200および1/300の境界層厚は実現できない。縮尺率=1/400はスパイヤ大で、縮尺率=1/500はスパイヤ中で所要の境界層を実現できる。ラフネスは大、中のいずれかが利用できる。

4. 3 境界層生成方法の検討方法

スパイヤおよびラフネス・ブロックは各々、上記の3種類を用いるものとして、実際に境界層を生成し、生成された境界層の特性をチェックした。

この時、次のような目的に従って、スパイヤとラフネス・ブロックの組合わせを考慮した。

- ①スパイヤの効果を明らかにするため、スパイヤのみを用いた場合。

Fig. 9 乱れの強さとべき指数の関係
(Relation between the intensities of turbulence and the power-law indexes)

- ②ラフネス・ブロックの役割を明らかにするため、スパイヤにラフネス1種類を組合わせた場合。

- ③所要の境界層への近似度を高めることを意図した場合を想定して、スパイヤにラフネス複数種類を組合わせた場合。

すなわち、Table 3に示すようなスパイヤおよびラフネス・ブロックの組合わせについて検討を行った。

4. 4 生成した境界層流れの特性

生成した境界層流れの特性をTable 3中に示した。これより、以下のようなことが分かる。

- ①スパイヤの効果について

スパイヤによって厚い境界層流れを作ることができる。その厚さは、スパイヤ中、小ではほぼスパイヤの高さに等しい。しかし、風速の鉛直分布を表すべき指数 α は、再現が必要と考えられる $\alpha=0.15\sim0.40$ に比べて、 $0.11\sim0.13$ と小さい。また、乱れの強さも10%以下できわめて小さい。

- ②ラフネス・ブロックの効果について

スパイヤにラフネス・ブロックを組合わせた場合、境界層厚の増加はほんの僅かであり、今回用いたサイズのラフネス・ブロックでは境界層厚の増加には余り効果はないことが分かる。

一方、ラフネス・ブロックを組合わせることによって、べき指数 α は増大し、ほぼ所要の値近くに達する。 α の増大は大きなラフネスを用いた場合ほど著しく、ブロック小で間隔500mm以上ではほとんど増大しない。また、乱れの強さも同様に増加する。Fig. 9に床上100mmに

Fig. 10 平面密度とべき指数の関係
(Relation between the 2-dimensional densities of roughness block and the power-law indexes)

Fig. 11 平面密度とべき指数の関係
(Relation between the 3-dimensional densities of roughness block and the power-law indexes)

おける乱れの強さとべき指数の関係を示した。境界層の縮尺を $1/300$ と考えると、通常考えられている(1)式の関係にはほぼ対応していると見られる。

$$\sigma_v/V(30) = \alpha \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $\sigma_v/V(30)$ ：地上30mでの乱れの強さ
ただし、ブロック大の場合には、ブロック中、小に比べて、べき指数が同じでも乱れの強さは若干、小さい。

③所要の境界層および試設計との比較

上述した所要の境界層厚に対して、地表面粗度区分Ⅲ、Ⅳに対するものはほぼ実現できた。地表面粗度区分Ⅱに対しては、縮尺率の大きい場合は実現できた。しかし、生成した境界層は上記の試設計よりも厚くなり、今回用いたサイズのスパイヤでは、より小さい縮尺率における厚さの小さい境界層は再現できなかった。したがって、用いるべきスパイヤは、試設計より小さなサイズのものとすることが示唆された。

④複数種類のラフネス・ブロックを組合わせた場合に

ついて

Fig. 10はラフネス・ブロックの平面密度とべき指数の関係を、Fig. 11は立体密度とべき指数の関係を示している。立体密度は(2)式より求めたものである。

$$\text{立体密度} = \text{平面密度} \times (H/10) \dots\dots\dots (2)$$

ここで、H：ラフネス・ブロックの高さ(cm)

なお、複数種類のラフネス・ブロックを用いた場合の密度は、流れ方向の平均値である。

複数種類のラフネス・ブロックを用いた場合でも、立体密度が等しければ、1種類のラフネス・ブロックを用いた場合とほぼ同等のべき指数になっている。

また、平面密度よりも立体密度の方がべき指数のばらつきが少なく、ラフネス・ブロックの効果は立体密度によって評価できることが分かる。

5. まとめ

先程、当社研究所内に新設された大型回流型境界層風洞の概要と基本性能について記した。基本性能の調査により、本風洞は建築用汎用風洞として十分な性能を有していると判断できた。また、建築関連の風洞実験に不可欠な自然風の再現方法の検討結果についても記した。境界層流れのシミュレーションにおけるスパイヤやラフネス・ブロックの役割について考察ができ、また、ほぼ所要の境界層流れを再現できることが確認できた。

謝辞

本風洞の設計は当社建築設計本部、風洞装置の設計・製作は(株)都市環境リサーチによるものです。担当されました各位およびご協力をいただきました関係各位に対し、謝意を表します。

また、風洞の企画当時、快く風洞の見学をさせていただき、有意義なアドバイスをいただきました、多くの大学や研究機関の方々に対して、改めて、御礼を申し上げます。

参考文献

- 1) H. P. A. H. Irwin ; The Design of Spires for Wind Simulation, J. W. E. & I. A., Vol.7, 1981, pp.361 - 366,