風洞実験工期短縮に寄与する
風洞実験模型自動製作装置の開発

丸　山　勇　祐[*1]　　中　川　尚　大[*1]
藤　橋　克　己[*1]

要　　旨

前田建設工業（株）は2019年に創業100周年を迎え，これを機に旧技術研究所の機能を併せ持ったICI総合センターを茨城県取手市に設立した．この中には風環境実験施設として大型乱流境界層風洞を新設した．この風洞では，効率的に風洞実験を行うことを目的として，ターンテーブル部分に，風洞実験模型自動製作装置を導入した．本報では，大型乱流境界層風洞の概要を紹介し，風洞実験模型自動製作装置の開発と利用状況を説明する．

風洞実験模型自動製作装置は，大型乱流境界層風洞のターンテーブル部分に設置され，ターンテーブル上に市街地や地形といった模型をGISデータに基づいて自動的に製作する装置である．装置の原理は，ターンテーブル部分に模型を成型するための6mm角の角柱棒を約7万本敷き詰め，その棒をテーブル下部に設置したトラバース装置によって水平２方向に自由に移動可能な16台のアクチュエーターで押し上げる構造となっている．この装置を用いるとおよそ一晩で直径2mのターンテーブル範囲の模型を製作することが可能となり，模型製作時間を大幅に短縮できるようになった．また，この装置で作った周辺模型を用いても風洞実験（風圧実験）結果への影響は小さいことを確認した．

キーワード　乱流境界層風洞／風洞実験模型自動製作装置／GISデータ／風圧実験

目　　次

１．はじめに
２．装置概要
３．模型自動製作装置による市街地模型作成
４．装置による模型を用いた風洞実験精度検証
５．おわりに

DEVELOPMENT OF AUTOMATIC MODELING EQUIPMENT FOR WIND TUNNEL TEST WHICH MAKES EXPERIMENTAL TIME SHORT

Yusuke MARUYAMA　　Naohiro NAKAGAWA
Katsumi　FUJIHASHI

Synopsis:

Maeda Corporation celebrated its 100th anniversary in 2019, and on this occasion established the ICI Integrated Center in Toride City, Ibaraki Prefecture, incorporating the functions of the former Technical Research Institute. Within this center, a large-scale turbulent boundary layer wind tunnel was newly constructed. To efficiently conduct wind tunnel experiments, an automatic wind tunnel model fabrication system was introduced into the turntable section. This report introduces an overview of the large-scale turbulent boundary layer wind tunnel and explains the development and application status of the automatic wind tunnel model fabrication system.

＊１本店　ICI 総合センター　ICI テクノロジーセンター

1．はじめに

前田建設工業（株）は 2019 年に創業 100 周年を迎え，これを機に旧技術研究所の機能を併せ持った ICI 総合センターを茨城県取手市に設立した．センターには風環境実験施設として大型乱流境界層風洞を新設した．この風洞では，効率的に風洞実験を行うことを目的として，ターンテーブル部分に，風洞実験模型自動製作装置（以後，「本装置」と記載）を導入した．本報では，本装置の概要を説明し，この装置を用いた実験結果が一般的な風洞実験と同等の精度が得られることを風圧実験から検証した結果を報告する．

2．装置概要

2.1 大型乱流境界層風洞

前田建設工業（株）ICI 総合センターに設置された大型乱流境界層風洞の概要について紹介する．**写真-1** に装置の全体写真，**図-1** に装置の概要図，**表-1** に装置の仕様を示す．詳細は ICI 総合センターのウェブサイト [1)2)]を参照されたい．



写真-1 風洞実験装置外観

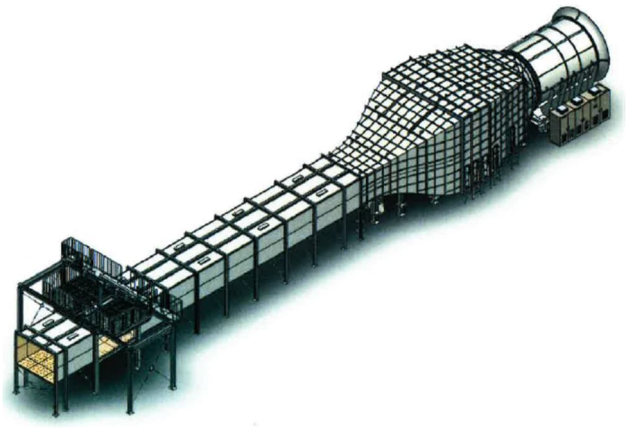


図-1 風洞の全体外観図

エッフェル型吹き出し式風洞であり，測定部分の断面は幅 3m×高さ 2m であり，風洞床面長さは 25m となっている．境界層を発達させる吹走路の長さ（ターンテーブルから風上の床面）は 20m と長めにとっており，ラフネスブロック等によって比較的上空まで乱れた境界層を作りやすくしている．風速は最大 25m/s まで吹かせることが可能である．測定部には，計測用のトラバース装置および直径 2m のターンテーブルが設置されている．このターンテーブル部分に次節で説明する風洞実験模型自動製作装置を採用している．

表-1 大型乱流境界層風洞の仕様

風洞の種類	エッフェル型境界層風洞
風洞の長さ	44, 400mm
測定胴の長さ	25, 000mm
境界層の長さ	20, 000mm
測定胴の断面	高さ ： 2, 000mm　幅 ： 3, 000mm
縮流比	1/5
風速	3. 0m/s～25m/s
平均風速の偏差	-1. 0%～1. 0%（平均風速 10m/sの場合）
乱れの強さ	1. 0% ≧（平均風速10m/sの場合）

2.2 風洞実験模型自動製作装置

風洞のターンテーブル部分には，風洞実験模型を自動的に製作する装置を設置した．装置の基本原理を**図-2** に示す．図は，風洞のターンテーブルの下部の断面を表している．原理としては，ターンテーブル上に図-3 に示すような模型を成型するための角柱棒を敷き詰め，その棒をテーブル下部に設置したトラバース装置によって水平２方向に自由に移動可能な複数のアクチュエーターで押し上げる構造となっている．

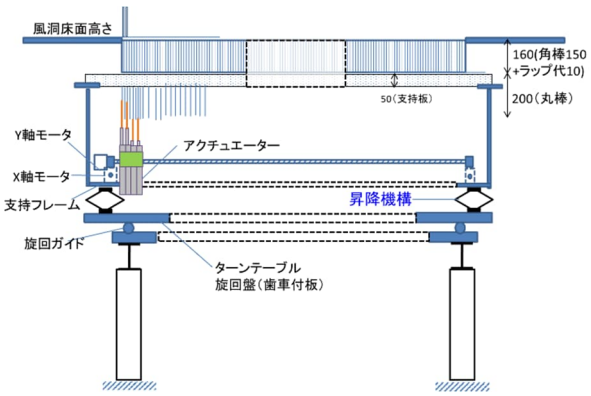


図-2 風洞実験模型自動製作装置の基本構造

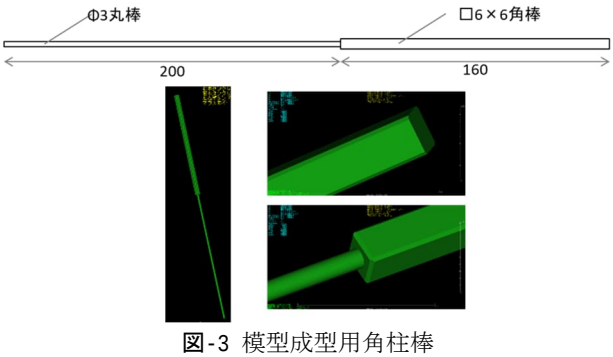


図-3 模型成型用角柱棒

このような原理で風洞実験模型を成型する考え方は，実開昭 62-019680（三菱重工），特開昭 63-168678（三井造船），特開平 9-134119（間組）等で提案されていたが，著者らが調査した範囲では実用化事例を確認できなかった．その原因として，コンパクトなアクチュエーターがなかったことや，元データとなるGISデータや3次元CADデータが現在ほど整備・普及していなかったためではないかと考えられる．本装置は，これらの原理を実用規模で具現化したものである．

装置作成にあたって，最初に検討したのはこの方法で模型を作る範囲である．角柱で建物などを再現するので，斜めのラインなどは凹凸の状態で表現される．風圧等を計測する建物近傍では計測結果に影響が生じると考えられるので，この装置で模型を作る範囲を建築学会編「建築物荷重指針を活かす設計資料２・CFD 適用ガイド」[3]に示されている「実市街地粗再現領域」に適用することとし，直径 2m のターンテーブルの中央部直径 0.8m の範囲は別途精密模型を作ることとし，その周辺を今回の装置で作ることとした．建物群を作る解像度については建築学会編「市街地風環境予測のための流体数値解析ガイドブック」[4]に書かれている格子解像度 2m をベースに，かつ建築用風洞実験模型の一般的な縮尺が 1/300～1/400 であることを考慮して，角柱の大きさを 6mm 角（実スケールで1.8～2.4m）とした．角柱棒の摺動高さ範囲は150mmとしたが，これは1/400縮尺で実物60mの高さに相当するものであり，超高層建築物としての大臣認定を必要としない 60m 以下の建物が市街地に多いことを考慮した．棒の高さ保持については，アクチュエーターで容易に押し上げることができるが，棒の自重では下がらない摩擦機構を用いることで実現した．

このサイズの角柱棒で装置による模型作成範囲を埋めるのに用いた本数は7万本強である．アクチュエーターをトラバースにより水平に移動させ棒を押し上げて元の高さに戻るのに約 5 秒かかるので，全角柱を 10 時間程度で押し上げるために 16 台のアクチュエーターを同時に動作させた．このことにより夕方実験終了後，装置をセットして帰ると次の朝に模型が成型され，異なる模型で実験できるようになる．市街地の場合全数押し上げる必要がないので，8～9 時間とやや短い時間で成型できる．写真-2 にターンテーブル下部でのアクチュエーターによる角柱棒押上状況を示す．

3．模型自動製作装置による市街地模型作成

本装置で市街地模型を製作した事例を紹介する．対象としたのは，**図**-4 に示すような建築基準整備促進事業「風圧力，耐風設計等の基準への数値流体計算の導入に関する検討」（平成27～28年度）[5]で用いられたモデル市街地である．**図**-4 の３次元 STL データから角柱中心部分にあたる位置の高さを抽出し，ターンテーブル中央部を除いて角柱棒を押し上げたイメージを図-5 に示す．これに基づいて装置で市街地を成型した結果が写真-3 となる．本装置により，対象とした市街地模型を 10 時間程度で製作できることを確認した．

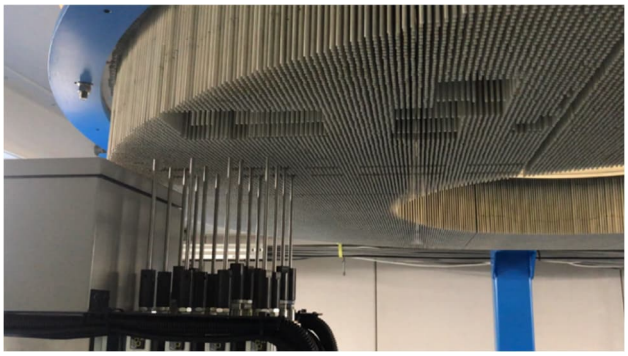


写真-2 装置の動作状況

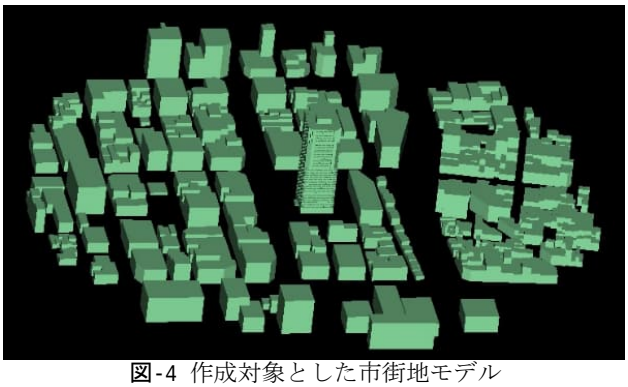


図-4 作成対象とした市街地モデル

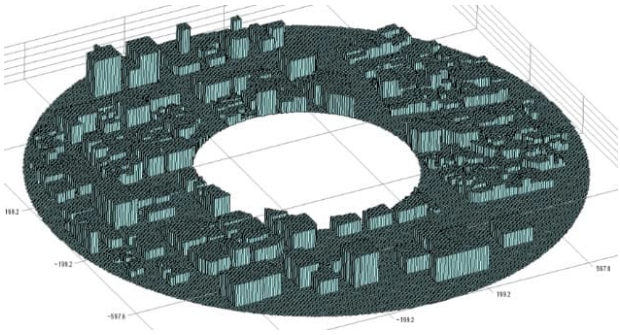


図-5 中央部を除き 6mm 角柱棒での作成イメージ



写真-3 装置で作成した市街地模型

4．装置による模型を用いた風洞実験精度検証

4.1 風洞実験概要

本装置により作られた周辺市街地模型は，6mm 角の棒で簡素化した形状を再現することから，模型壁面には実際の形状にはない凹凸が発生する．この凹凸があることで周辺市街地を流れる風が乱され，計画建物に作用する風圧や計画建物周辺の風速に影響を与える可能性が考えられる．そのため，ラフネスブロックで作った簡易な市街地と本装置で作ったものとの比較を風圧実験で検証した．

実験で再現した周辺市街地模型は，簡易的に再現した市街地とし，幅・奥行・高さ105mm のブロックを200mm 間隔で格子状に配置した．周辺市街地模型の概要を図-6，実模型の様子を**写真**-4 に示す．なお，本装置の影響を明確にするために，本装置で模型製作されないターンテーブル中心から半径 400mm の円内は模型を設置していない．自動模型製作装置により再現された模型（以後，自動模型と呼ぶ）は，あえて壁面に凹凸が出るように再現した．自動模型の様子を**写真**-5 に示す．風圧測定用の模型は，高層建物を想定し，幅・奥行き 100mm，高さ 400mm とした．風圧測定点は1つの壁面のみに配置し，測定点数は90点とした．風圧模型の概要も**図**-6 に併せて示す．

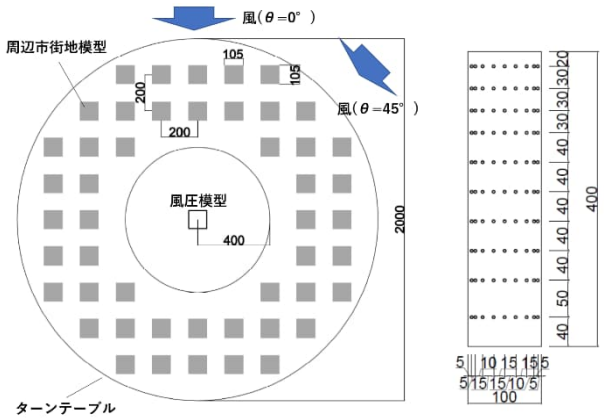


図-6 周辺市街地模型と風圧模型の概要(単位:mm)

実験風速は風圧計測模型頂部高さ(400mm)で約 9.4m/s とした．実験気流は地表面粗度区分IIIに相当する気流を再現した．平均風速，乱れ強さの鉛直分布および模型頂部高さでのパワースペクトルを**図**-7 に示す．測定風向は対称性を利用して風向角 θ＝0～180°とし，時計回りに 5°間隔で変化させた．風洞実験における長さ，時間，風速の縮尺は，1/400，1/80，1/5 とした．風圧のサンプリング周波数は 1000Hz，サンプリング数は実時間の 10 分間×5 回分に相当する実験上の 37500 個とした．風圧係数（外圧係数）は，模型頂部高さにおける平均速度圧で基準化した．ピーク値は 0.5 秒相当になるように 6 個の移動平均を実施して算定した．



写真-4 実模型の様子



写真-5 自動模型の様子

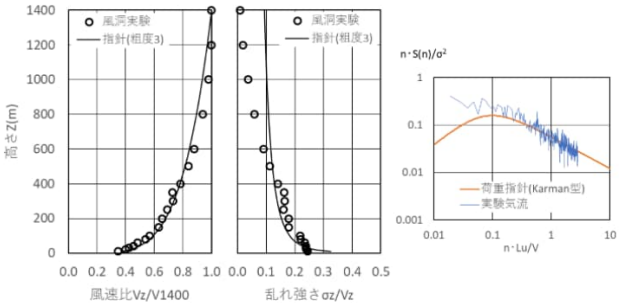


図-7 実験気流

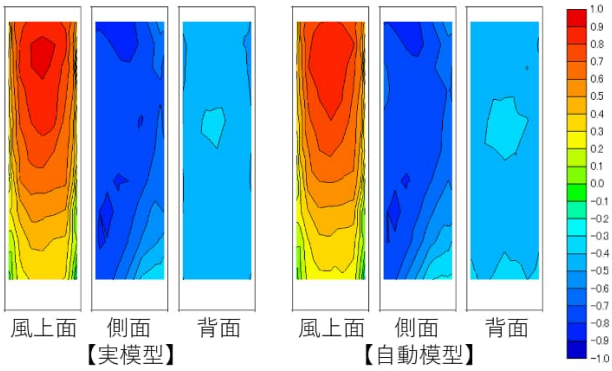


図-8 平均風圧係数分布（θ＝0°）

4.2 風洞実験結果

実験模型は壁面の１面のみに風圧測定点を設けたが，模型の対称性を利用し，ここでは θ＝0°～180°の風向の結果を組み合わせて，θ＝0～45°に結果をまとめた．風向角 θ＝0°における実模型および自動模型の平均風圧係数の分布を図-8 に示す．平均風圧係数の分布はどちらの模型においても同様の傾向を示し，風上面の淀み点付近で 0.8～0.9 程度，側面の風上端部で-0.8 程度の値を示す．なお，自動模型の平均風圧係数の方が若干小さい値を示す．

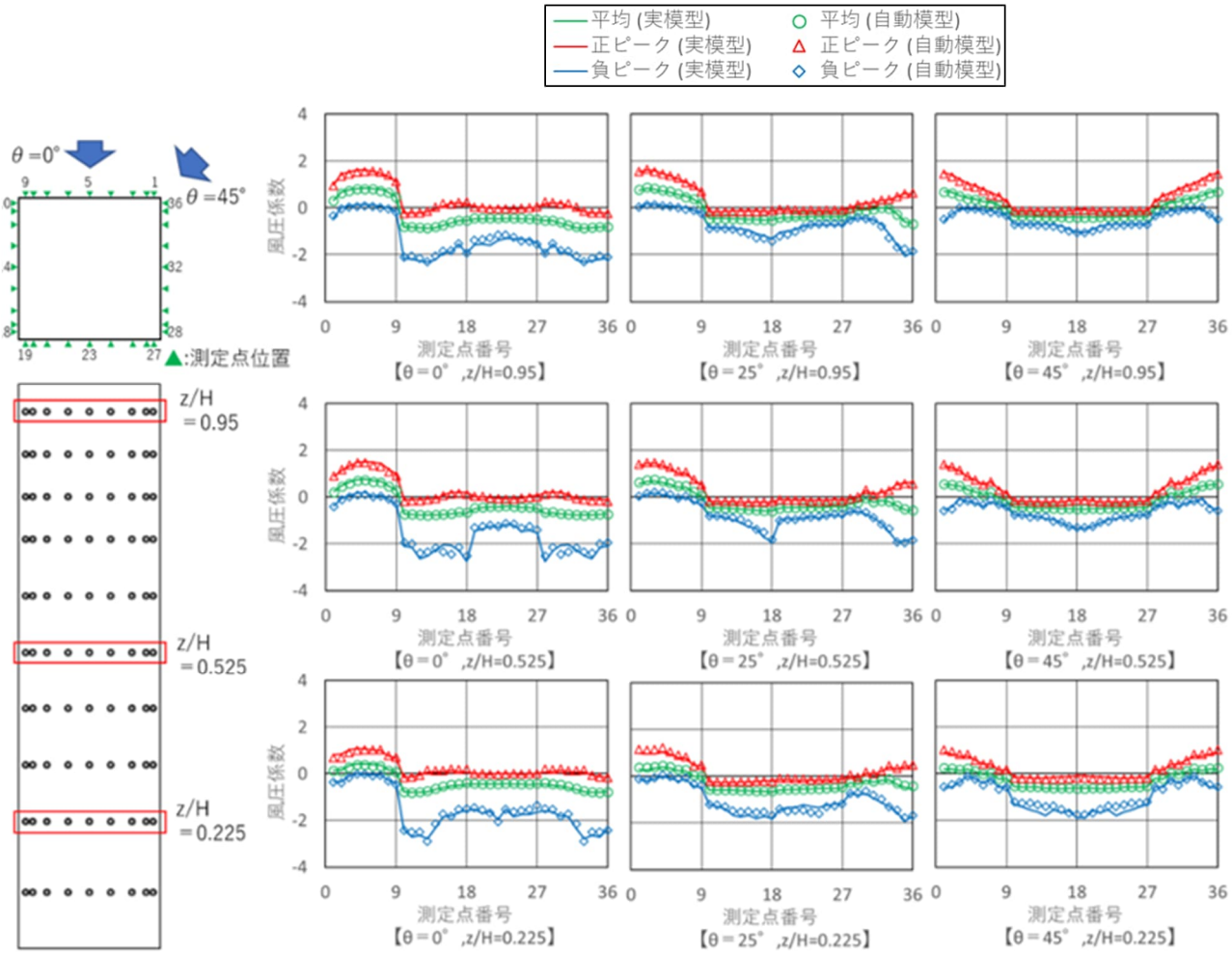


図-9 代表高さでの風圧係数の水平分布

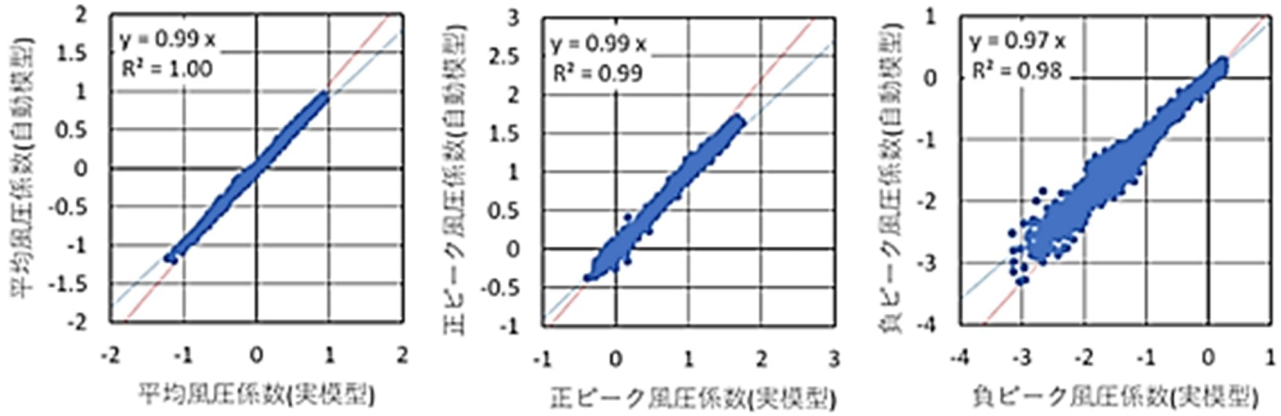


図-10 風圧係数の相関

4.3 実験精度検証結果

θ ＝0,25,45 ° の代表的な高さ(z/H＝0.95,0.525,0.225)の測定点について風圧係数（平均，正ピーク，負ピーク）の水平分布を**図-9** に示す．平均風圧係数や正のピーク風圧係数は実模型と自動模型とでよく一致していることがわかる．一方，負のピーク風圧係数は測定点により異なるが，どちらかというと小さくなる傾向にある．なお，周辺市街地模型の影響を受けやすい z/H＝0.225 の高さでも同様の傾向にあるが，風圧係数が小さくなる範囲は限定的であることから，模型の違いによる影響は小さいと考える．

平均風圧係数，正のピーク風圧係数および負のピーク風圧係数について，全測定点，全風向における実模型と自動模型の相関関係を**図-10** に示す．自動模型の風圧係数の方が若干小さくなる傾向にあるが，近似曲線の傾きは 0.97～0.99 であることから，その影響はほとんどないと考

えられる．近似曲線の決定係数はいずれの結果も 1 に近く，実験結果のばらつきも小さいことが確認できる．

5．おわりに

2019 年に新たに建設した境界層風洞の紹介をするとともに，新たに設置した風洞実験模型自動製作装置について説明した．風圧実験による検証の結果からこの装置が有効に活用できることを確認した．この装置は，外装材風荷重・構造骨組用風荷重算定用の風圧実験や建物の風応答を算定する風力実験に活用し，効率的に風洞実験業務を実施している．

2021 年の社内表彰にて「風洞実験模型製作装置」で技術部門奨励賞を，2025 年の社長表彰でこの装置を実務に活用したことにより「他社にない圧倒的な高効率を実現した風洞実験技術とその実務展開」で技術部門社長賞を受賞した．

また，一般社団法人日本風工学会の 2020 年度技術開発賞を「風洞実験模型自動製作装置」[6)7)]で受賞した．

今回開発した装置について特許出願及び審査請求を行い，令和 1 年 6 月 14 日に特許第 6538403 号として登録された．

参考文献

1) 前田建設工業（株）ICI 総合センター：ICI official web, https://www.ici-center.jp/index.html, **（2026 年 10 月 1 日現在）**

2) 前田建設工業（株）ICI 総合センター：ICI official web > FACILITY >Garage1(総合実験棟) >風環境実験施設, https://www.ici-center.jp/brain_spa_garage1_3.html, **（2026 年 10 月 1 日現在）**

3) （一社）日本建築学会編：建築物荷重指針を活かす設計資料 2（CFD 適用ガイド），（一社）日本建築学会，pp.322-326，2017

4) （一社）日本建築学会編：市街地風環境予測のための流体数値解析ガイドブック．（一社）日本建築学会，pp.131-132,157-158，2007

5) （大）東京工業大学，（大）神戸大学，（株）大林組，鹿島建設（株），清水建設（株）：平成 27 年度国土交通省建築基準整備促進事業「風圧力，耐風設計等の基準への数値流体計算への導入に関する検討」報告書，2016

6) （一社）日本風工学会：日本風工学会>学会賞>日本風工学会賞> 技術開発賞 受賞者一覧, https://www.jawe.jp/ja/2021-12-08-05-54-14/2022-08-09-01-44-00/474-2021-12-08-05-30-24.html, **（2026 年 10 月 1 日現在）**

7) 丸山勇祐，中川尚大：日本風工学会技術開発賞を受賞して，日本風工学会誌，46 巻，4 号，p.414，2021