

立体造形模型を用いたローコスト風圧実験技術の開発

寺崎 浩^{*1}

Keywords : wind pressure test, 3d model, low-cost

風圧実験、立体造形、ローコスト

1. はじめに

建築物の耐風設計用風荷重を精度よく評価するため、一般に風圧実験が実施されるが、風圧実験には多大なコストがかかるため、従来は実験を適用するのは大規模な建築物が主な対象であった。本研究は、立体造形模型を用いてローコストな実験技術を新たに開発することにより、風圧実験の適用範囲を広げ、様々な規模の建物の耐風安全性向上を図ることを目的としている。

2. 従来模型と立体造形模型

図-1 に従来模型と今回開発した立体造形模型の概要を示す。従来模型は、模型表面の計測孔（金属パイプ付）から導圧チューブと呼ばれるビニルチューブ数百本を模型内部に通して風洞床下の多点風圧センサーまで接続するもので、模型製作やセンサー接続およびそのチェック作業に多大なコストを要していた。

一方、立体造形模型は、模型外形と模型内部の内部配管を立体造形で一体に製作したもので、模型製作コストや製作時間を大幅に低減可能とした。また、立体造形模型では、圧力漏れを生じることなく数百本のチューブを一括接続できる新たなコネクタ装置を開発することにより、さらなる実験の効率化を可能とした。

3. 配管の伝達特性評価法の開発

変動風圧実験では、風圧センサー部分で計測された風圧の変動特性は、途中の長いビニルチューブや内部配

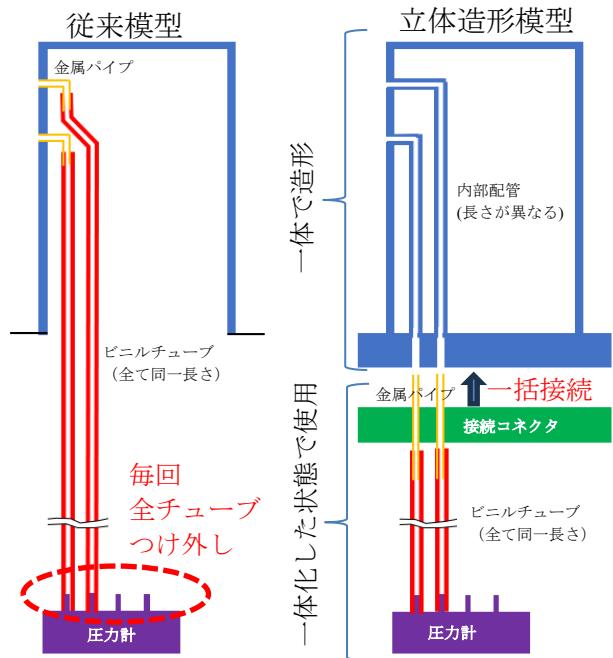


図-1 従来模型と立体造形模型の概要
Fig.1 Overview of conventional models and 3D models

管+ビニルチューブの応答特性の影響（ヘルムホルツ共振）を受けるため、これらの導圧空間の応答特性を事前に周波数応答特性実験で計測し、計測した風圧データを補正する必要がある。

3.1 従来模型の応答特性補正方法

従来模型では、全ての計測点のビニルチューブの長さを同一としているため、一種類の応答特性を計測しておき、全計測点の風圧データを補正すればよい。

*1 技術センター 都市基盤技術研究部 空間研究室

3.2 立体造形模型の応答特性補正方法

立体造形模型の内部配管は風圧計測点毎に長さが異なり、さらにコネクタ装置と圧力計を結ぶビニルチューブ（全計測点で同一長さ）と連続して導圧空間を構成している。従来の方法を踏襲すると数百点の全ての計測点のケースについて応答特性を計測する必要があるがこれは現実的でない。

ここではまず、代表的な長さ13種類の立体造形内部空間を有する応答特性計測用試験体を作成し、その13種類の応答特性を一回の試験で確認することにした。

試験体は図-2に示すように風圧模型と同様に圧力計測穴付近は内径 $\phi 1.0\text{mm}$ でその他の内部配管は内径 $\phi 1.5\text{mm}$ 、内部配管の長さは10mm、20mm、50mm～500mm(50mmピッチ)、175mmの13種類とした。試験体の先には接続装置と同じ内径 $\phi 1.0$ のステンレスパイプ40mmの先に内径 $\phi 1.5\text{mm}$ のビニルチューブ500mmを接続した。

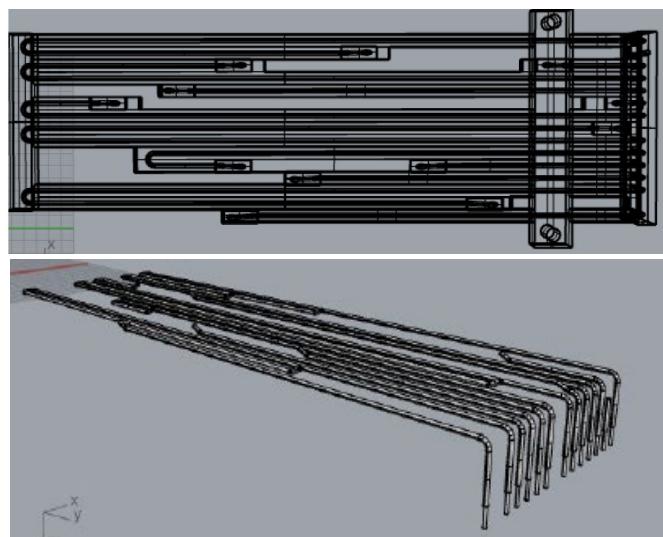


図-2 応答特性計測用試験体

Fig.2 Test piece for measuring response characteristics

図-3に13種類の圧力伝達特性(倍率gain,位相角phase)を示す。図-3より、内部配管の長さが変わると圧力伝達特性の曲線は直線的に変化する。内部配管長が隣り合った2種類のデータ間では、1次・2次の共振振動数近傍も含め曲線は倍率gain、位相角phaseとともに近しい形状を示すことから、これら2種類の結果から中間の内部配管長に対応した応答曲線を線形補間して求めることが可能であるものと判断できる。図-4は確認用に計測した内部配管長175mm+チューブ500mmの応答曲線(真値)と内部配管長150mm+チューブ500mmと

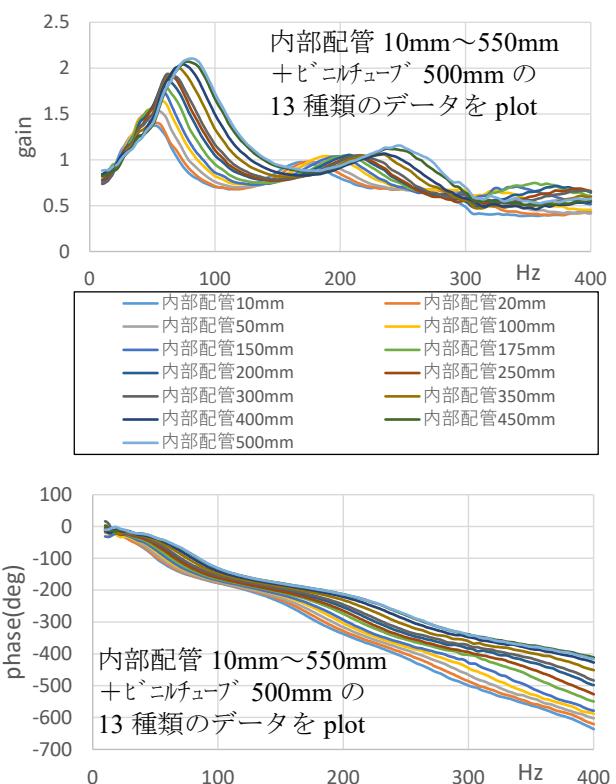


図-3 伝達関数(内部配管長10mm-500mm 13種類)
Fig.3 Transfer function (internal piping length 10mm-500mm 13 types)

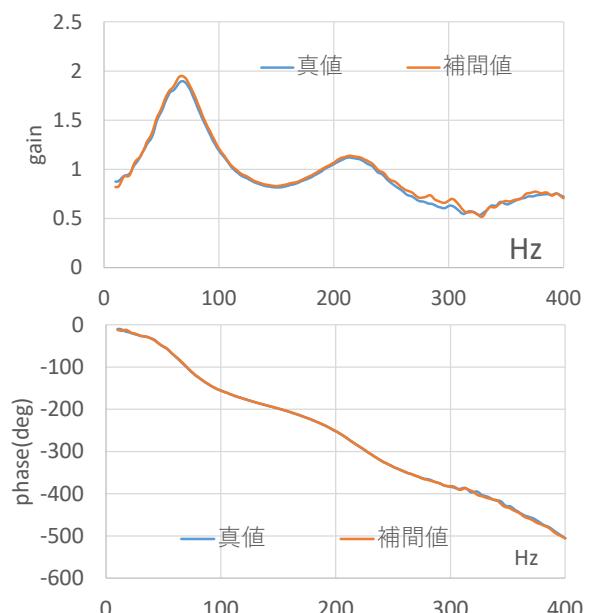


図-4 伝達関数(内部配管長175mmと150mm-200mm
補間値)
Fig.4 Transfer function (internal piping length 175mm and 150mm-200mm interpolated value)

200mm+チューブ 500mm の特性を平均した値（補間値）を比較したものであり、補完値は、ほぼ真値に一致している。以上より、内部配管長 10mm~550mm 間の任意の長さの応答曲線を個別に計測することなく自動生成する技術を構築した。

4. 高層建物帳壁外圧係数の風圧実験

風圧計測点 100 点程度の実験模型を作成し、高層建物帳壁の外圧について検討した¹⁾。計測点配置と内部配管の設計上・製作上の収まりについても検討した。従来模型と、模型内部の内部配管を一体化した立体造形模型を製作し両者の風圧実験結果を比較する。

4.1 風圧模型

検討対象は塔状比 3 の角柱 (B:D:H=100mm:100mm:300mm) とした。風圧計測高さは 10 層とし、計測点数は主に計測する壁面で 7 点 × 10 層 = 70 点、その壁面に接する両側壁面の平面端部 (1 点 × 10 層 × 2 壁面 = 20 点) の合計 90 点である (図-5)。平面端部の計測点位置は平面角から 3mm とした。

4.1.1 従来模型

外壁は厚さ 3mm のアクリル製で、風圧計測点位置に内径 φ 1.0mm の銅製パイプ + 内径 φ 1.5mm のビニルチューブ 850mm で構成されている (写真-1(1))。

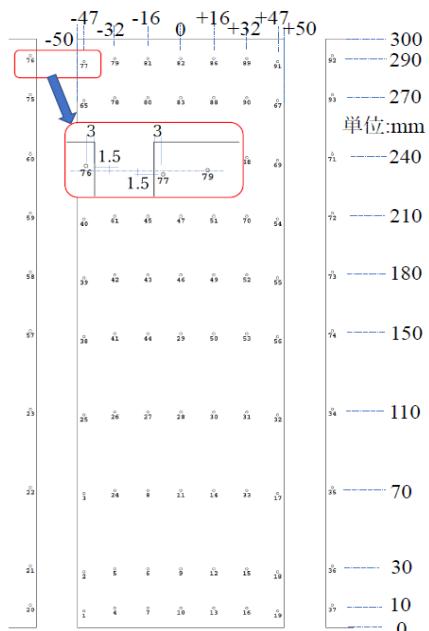


図-5 風圧計測点位置

Fig.5 Wind pressure measurement point location

4.1.2 立体造形模型

立体造形手法は、光硬化性の液体樹脂にレーザーを照射して硬化させ、一層ずつ積層する光造形を採用した。光造形装置の積層ピッチは $x/y/z=0.05/0.1/0.15$ mm である。角柱模型寸法は 100mm × 100mm × 300mm であるが、立体造形部分は計測点と内部配管を含む 100mm × 20mm × 300mm (基礎部分を除く) の平板状部品として、残りの部分はアクリル製とした (写真-1(2))。

立体造形模型の 3D データ作成には Rhinoceros® を用いた。Rhinoceros に形状を入力する命令は、別途、配管設計補助ソフトを作成し、配管データ用マクロコマンドを発生させた。同時に、補助ソフトは内部配管相互の干渉チェック機能も有している。内部配管部分は外形 φ 3mm、内径 φ 1.5mm、風圧計測穴部分は φ 1.0mm とした (図-6)。立体造形の外壁厚さは 3mm である。

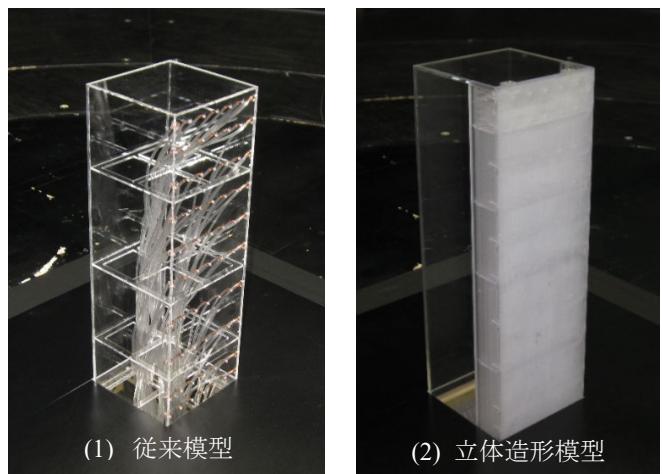


写真-1 風圧模型の概要

Photo.1 Wind pressure model overview

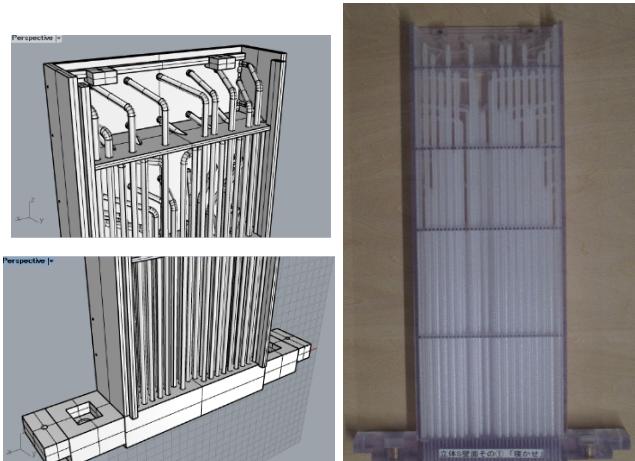


図-6 内部配管の状況

Fig.6 Internal piping status

4.1.3 接続装置（93点）

立体造形模型内部の内部配管は模型下部基礎と接続装置（図-7）で全配管を一括で着脱可能とした。接続部分の圧力漏れを防ぐために、着脱の容易な特殊なシリング材を使用した。接続装置は30mm×100mmのスペースに93本のパイプが設置されている。

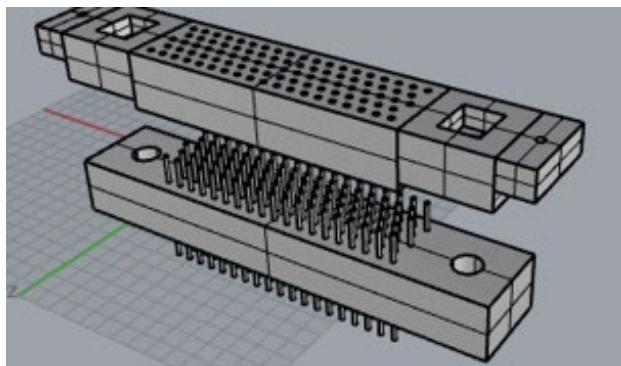


図-7 接続装置（93点）

Fig.7 Connection device (93 points)

4.2 風洞実験

4.2.1 実験概要

模型の縮尺を1/300と仮定し、実験気流は地表面粗度区分IIIを目標とした($U_h=10.7\text{m/s}$ 、模型頂部での風速の乱れ強さ $I=15.4\%$ 、風速の乱れのスケール $L_x=62\text{cm}$)。風圧の計測条件は、サンプリング周波数1,000Hz、データ個数65,536、風向0~355°(5°ピッチ)72風向、デジタルローパスフィルタ300Hzとした。伝達関数の特性データは、内部配管長10mm~500mm間にについて1mm刻みに作成し、風圧模型の各計測点の配管長(34mm~335mm)のデータ補正を行った。計測した変動風圧の統計値は、ピーク値評価は実大0.25秒相当の移動平均、実大10分間相当のアンサンブル値とした。

4.2.2 実験結果

図-8に従来模型と立体造形模型の風圧統計値の全計測点・全風向における相関を示す。統計値の相関に2割程度のばらつきがみられるが、風圧実験によるばらつきを考慮すると、概ね同等な風圧実験結果と考えられる。

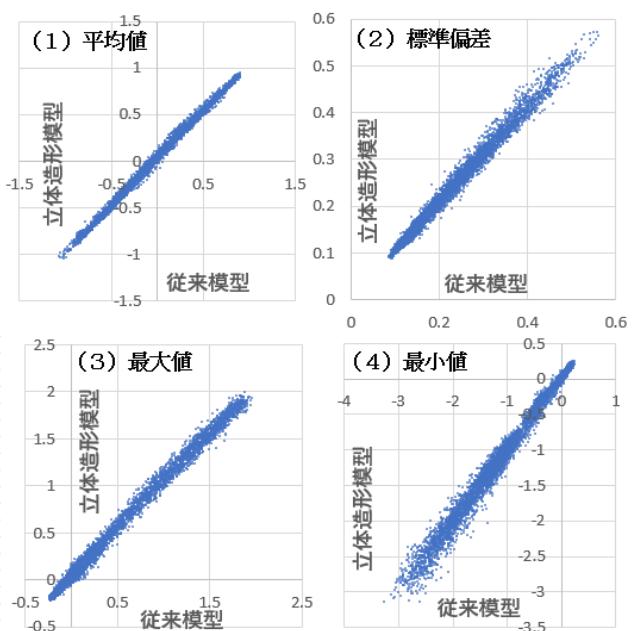


図-8 外圧係数統計値の相関関係
Fig.8 Correlation of external pressure coefficient statistics

5. 高層建物屋上目隠し壁およびベランダ手摺の風力係数の風圧実験

より実用的な風圧模型として、高層集合住宅を対象とした計測点400点程度の実験模型を作成し、部材の両面に外圧を受ける部位（屋上目隠し壁、ベランダ手摺）に作用する風力（＝表面圧-裏面圧）について検討した²⁾。さらに計測点配置と内部配管の設計上・製作上の收まりについても検討した。ここでは従来模型と立体造形模型を同一の外形で製作し両者の風圧実験結果を比較する。

5.1 風圧模型

検討対象は縮尺1/300を想定した塔状比3.09の26階建ての高層建物（B:D:H=110mm:110mm:340mm）とした（図-9(a)、写真-2）。階高は1Fが15mm、2F~26Fが12mmとし、2F以上の階にはベランダ（平面外形B':D'=120mm:120mm、手摺高さ5mm、床と手摺の厚さ1.5mm）を設置した（図-9(b)）。また、屋上階には独立壁を有する。ベランダ手摺裏面の外圧係数はベランダ内側の帳壁の外圧をベランダ壁裏面圧として代用している。

5.1.1 従来模型

アクリル製とし、風圧計測点数は220点である（図-9(a)の黄色の部分のみ計測）。風圧計測点位置の内径 $\phi 1.0\text{mm}$ の銅製パイプ+内径 $\phi 1.5\text{mm}$ のビニルチューブ870mmで構成されている。

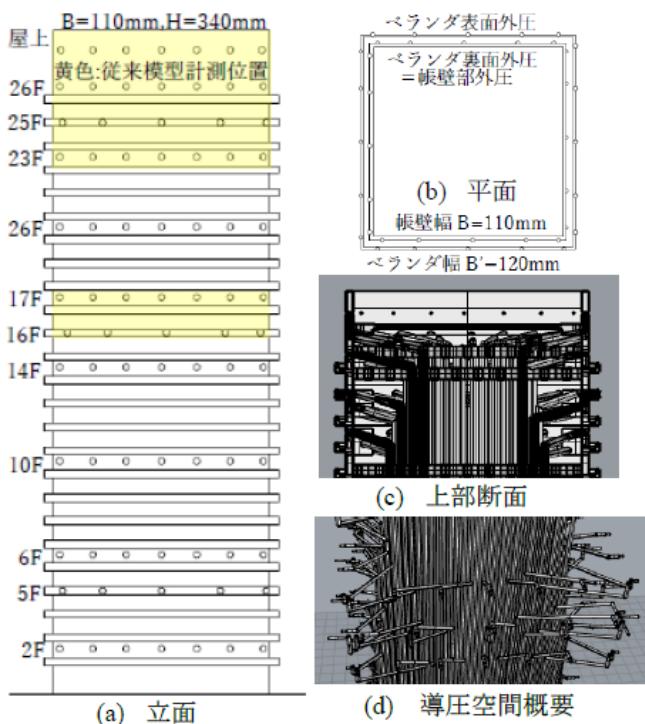


図-9 風圧計測点位置
Fig.9 Wind pressure measurement point location

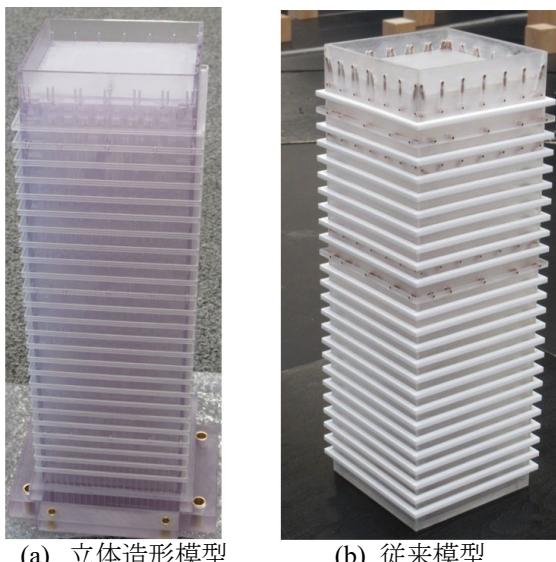


写真-2 風圧模型の概要
Photo.2 Wind pressure model overview

5.1.2 立体造形模型

風圧計測点数は 385 点である (図-9(a), (b))。内部配管は外形 ϕ 3mm, 内径 ϕ 1.5mm, 風圧計測孔部分近傍は内径 ϕ 1.0mm とした。模型内部配管の状態を図-9(c), (d)に示す。図-10 に立体造形模型におけるベランダ手摺表, 裏面の外圧計測点の概要を示す。

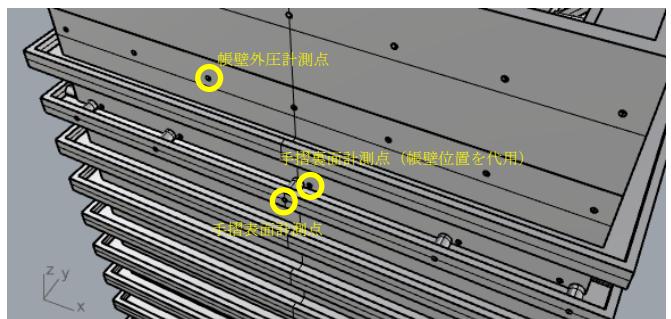


図-10 手摺・帳壁風圧計測点位置
Fig.10 Handrail wall and curtain wall wind pressure measurement points

5.1.3 接続装置 (413 点)

立体造形模型内部の内部配管は模型下部の接続装置 (写真-3) で全配管を一括で接続可能とした。接続装置は $110\text{mm} \times 110\text{mm}$ のスペースに 413 本のパイプが設置されている。

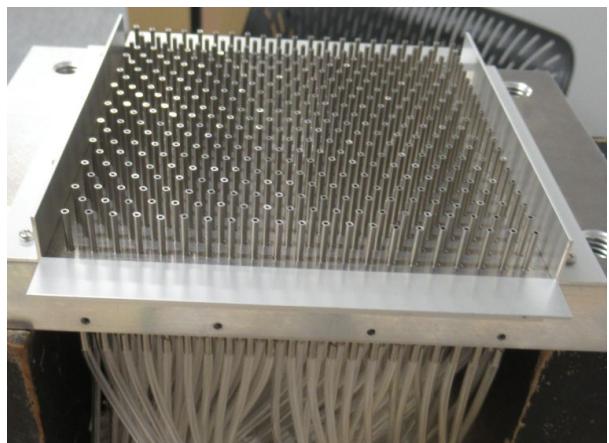


写真-3 接続装置 (413 点)
Photo.3 Connection device (413 points)

5.2 風洞実験

5.2.1 実験概要

模型の縮尺を 1/300 と仮定し, 実験気流は地表面粗度区分 III を目標とした ($U_h=10.7\text{m/s}$, 模型頂部での風速の乱れ強さ $I=14.2\%$, 風速の乱れのスケール $L_x=70\text{cm}$)。風圧計測条件は, サンプリング周波数 1,000Hz, データ個数 65,536, 風向 $0\sim355^\circ$ (5° ピッチ) 72 風向, デジタルローパスフィルタ 300Hz とした。計測した変動風圧の統計値は, ピーク値評価は実大 0.25 秒相当の移動平均, 実大 10 分間相当のアンサンブル平均値とした。伝達関数の特性データはビニルチューブ長 550mm+内部配管長 10mm~500mm について 1mm 刻みに作成し, 風圧模型の各計測点の内部配管長 (60mm~416mm) の周波数補正を行った。計測した変動風圧の統計値とし

て、ピーク値評価は実大 0.25 秒相当の移動平均、実大 10 分間相当のアンサンブル値とした。

5.2.2 実験結果

図-9(a)の黄色の部分に示す立体造形模型と従来模型の計測点から、屋上目隠し壁、ベランダ表・裏の平面内の外圧計測位置がほぼ同一である外圧計測点 78 点を使用して風力係数 (=表面外圧係数 - 裏面外圧係数) 39 点を算定した。この風力係数統計値の全風向における立体造形模型と従来模型の相関を図-11 に示す。外圧係数を比較した図-8 に比較して、相関関係がばらつく傾向があるが、概ね立体造形模型と従来模型で同程度

の値が得られている。ばらつきが多少大きめとなっている原因として、本実験の立体造形では風圧計測孔近傍の導圧空間が $\phi 1.0$ と細めとなっている部分が従来模型の計測孔近傍の金属パイプ長よりも長くなっていることが一因として考えられる。

6.まとめ

建物模型の製作に立体造形を用いて模型内部の配管まで一体として造形することにより、模型製作のコストや製作時間を大幅に低減した。立体造形模型の製作コストは、屋上目隠し壁、ベランダ手すり模型において、従来模型の計測点数を立体造形模型と同じ 385 点に換算した製作費と比較すると、約半分であった。

また、圧力漏れを生じることなく数百本のチューブを容易に一括接続・着脱できるコネクタ装置を開発し、実験準備期間を 1/4 程度に短縮した。

さらに、模型内部の配管長 + 外部チューブ長に応じて必要となる圧力補正データに関し、計測点ごとに配管長さが異なる立体造形模型でも対応可能な補正システムを構築することで本技術を実用化した。

以上より、本技術の有効性およびローコスト効果が確認されたため、今後風圧実験の適用範囲を拡大し、建築物の耐風安全性向上に努めてゆく。

参考文献

- 1) 寺崎浩：立体造形模型を用いた変動風圧実験、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 I, pp.159-160, 2023.7
- 2) 寺崎浩：立体造形模型を用いた変動風圧実験 その 2 ベランダを有する高層建物の風圧実験、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 I, pp.123-124, 2024.8

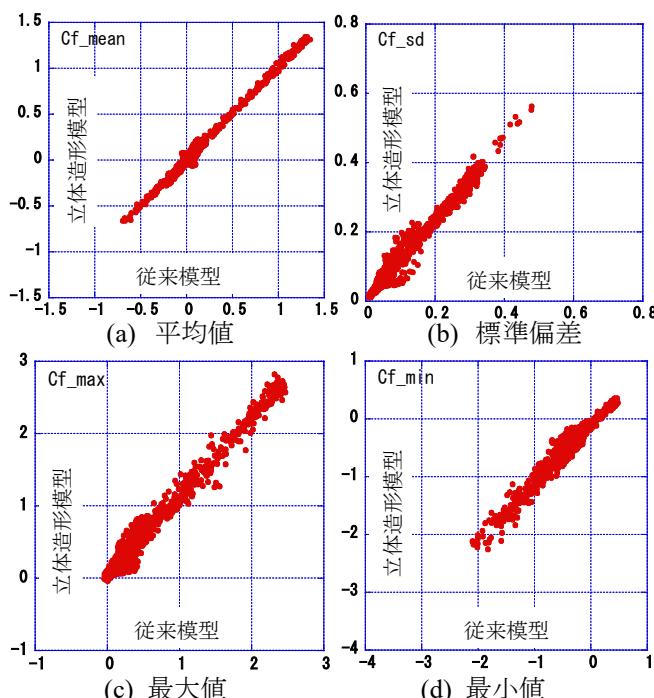


図-11 風力係数統計値の相関関係
Fig.11 Correlation of wind factor statistics