

興福寺五重塔の風洞実験

- 種別：材料試験 [木材・煉瓦・鉄・コンクリート・その他]、重量測定、
要素試験 [接合部・軸組・壁・水平構面（床・天井・小屋組・屋根）・非構造部材・その他]、
補強性能試験 [接合部・軸組・壁・水平構面（床・天井・小屋組・屋根）・非構造部材・その他]

- 基本情報

文化財名称：興福寺五重塔

文化財種別（指定年月日）：特別保護建造物（明治 30 年 12 月 28 日）

国宝（昭和 27 年 3 月）

所在地：奈良県奈良市

所有者（管理団体）：宗教法人 興福寺

構造形式：三間五重塔婆、本瓦葺

建築年：室町時代 応永 33 年（1426 年）

事業名称：国宝興福寺五重塔保存修理事業

事業期間：調査工事 令和 2 年 9 月 1 日～令和 4 年 9 月 30 日

本体工事 令和 4 年 6 月 1 日～令和 13 年 3 月 31 日（予定）

工事種別：屋根葺替および部分修理

事業者：宗教法人 興福寺

設計監理：奈良県文化財保存事務所

実験計画者：清水建設株式会社

実験機関：同技術研究所

実験年月日：令和 5 年 11 月 6 日～21 日

引用・参考文献：『史跡興福寺旧境内保存活用計画』（法相宗大本山興福寺 令和 4 年 3 月）

- 実験に至る経緯と目的

興福寺五重塔の暴風時における耐風力診断実施にあたり、時刻歴風応答解析に用いる風外力データの計測を目的として、五重塔を中心に周辺建造物の形状や周辺地形の高低差を再現した縮小模型を製作して風洞実験を行う。

基本的には現在の周辺地形、伽藍状況による影響を調べることを目的とするが、「史跡興福寺旧境内保存活用計画」によると、南大門・中金堂中門・同回廊などの建物復元を目指すとされているため、将来的に伽藍復元が成った場合の状況も併せて確認する。

● 姿図・寸法

興福寺五重塔の風洞実験模型は、図 1 に示す模型縮尺 $S=1/75$ で屋根・壁面の風圧力を評価する風圧模型と塔の水平風力を評価する風力模型の 2 種を用いた。また、周辺環境の影響を評価するため塔を中心とする直径 225m の範囲を考慮したボリューム模型として敷地および周辺地形の大きな高低差を再現した。特に図 2 に示す南側 12m の高低差に着目して作成した。



図 1 風洞実験模型（風力模型）



図 2 南側 12m の高低差

【使用材料】

風圧模型：屋根および外壁は樹脂製（一部 3D プリンターで製作），
内部の圧力計測用チューブ（塩ビ製），圧力タップは銅パイプ

風力模型：屋根および外壁は木製，内部フレームは鉄製

周辺模型：基部円盤と周辺建物は木製，地形形状：塩ビ板，スタイロホーム

【試験体寸法】

風圧・風力模型：模型縮尺 1/75（高さ 681cm，幅（初重）272mm）

周辺模型：直径 3000mm

各模型の概要を以下に示す。

・ 風圧模型

風圧実験では図 3 の五重塔の屋根（表裏）および壁面に作用する風圧力（外圧・内圧）を計測した。風圧力の計測は、屋根・壁面に測定孔を設置し、表面にかかる風圧を導圧管および導圧管チューブを介して圧力センサーに導き測定した。ただし、この測定方法は模型縮尺や離散的な測定孔の配置、測定孔の数の制約から細部形状の計測には適さないため屋根全体に作用する風力計測を目的とし、屋根軒下の斗拱等、壁面凹凸の細部は再現しないボリューム形状とした。模型製作は 3D プリンター（樹脂製）とアクリルを用いて製作を行った。測定孔は 972 点を配置した。

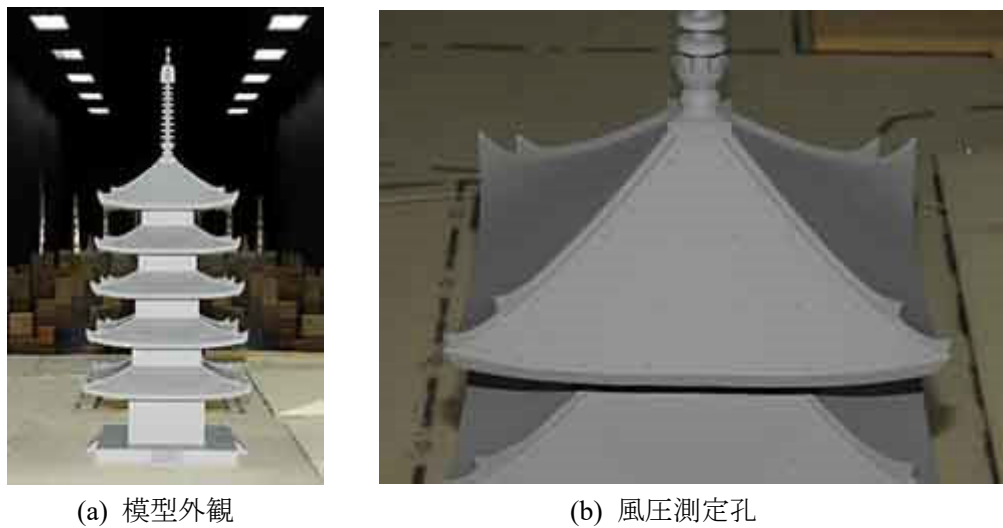


図3 風圧模型

・風力模型

風力模型は図4に示す縮尺 1/75 の縮小模型として外装は市販模型（ウッディジョー：興福寺 五重塔 木製模型 組立キット）を転用した。模型の外壁（屋根，壁面）は軽量のバルサ材を用いた木製で，軒先等の斗拱（大斗、肘木、尾垂木斗拱），手摺等の細部まで再現した形状とした。模型内部は剛な鋼鉄製のフレームで構成し，各層レベルに床板と外壁を支持する柱を設けている。更に柱脚部は歪ゲージを設置して外壁（屋根・壁面）に作用する水平力を計測する。歪ゲージは相輪の根元，五重，四重～初重の6層（各 x,y 成分の 12 成分）とした。

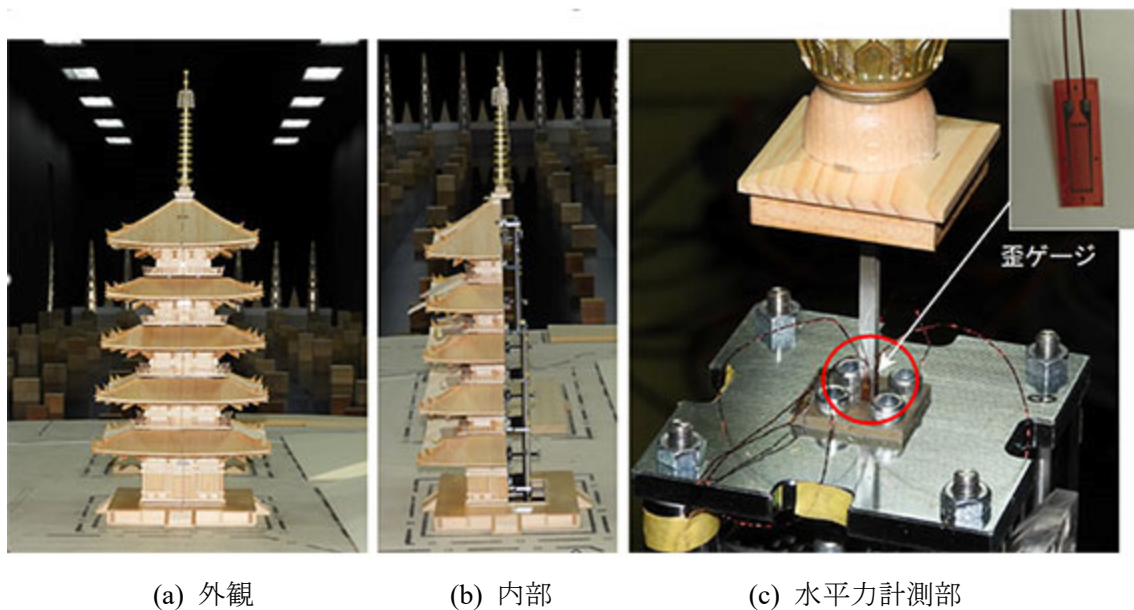


図4 風力模型

・周辺模型

周辺建物は、敷地内の北側に東金堂 ($H=16\text{m}$)、国宝館 ($H=13\text{m}$)、北西側には中金堂 ($H=20\text{m}$)、建物周辺には築地塀、基壇が点在する。また、南側に中低層の市街地が散在する。周辺地形は、南側に高低差 12m 程度の傾斜地を有し、猿沢池が広がる。東側には小地形、その他の方向は平らな形状となる。

上記の周辺環境を考慮して図 5 に示す五重塔を中心とする縮尺 $1/75$ とした直径 225m の範囲を考慮して簡略化した以下の 3 種のボリューム模型とした。

a) 周辺なし

五重塔周辺の建物なし、市街地と敷地の高低差はありとして地形の影響を把握する形状とした。ただし、南側の市街地は周辺地形と見なして再現した。

b) 現状（周辺あり）

周辺なし模型に加えて現状建物として中金堂、国宝館、東金堂、築地塀等をボリュームで表現した。上記の形状は 2023 年 12 月時点の現状を再現した周辺環境である。

c) 復元伽藍

現状模型に加えて復元予定の南大門、中門、回廊等をボリュームで表現。建物形状については参考資料の「奈良県時代の興福寺伽藍復元 建物想定断面規模」を元にボリューム形状で再現した。



(a) 周辺なし

(b) 現状（周辺あり）

(c) 復元伽藍

図 5 周辺模型

●実験概要

風洞実験では、五重塔の周辺風環境を評価するために五重塔を中心とする直径 225m の周辺市街地を縮小模型により再現。模型中央には五重塔の縮小模型（風圧・風力模型）を設置して五重塔に作用する風力係数の計測を行う。上記の縮小模型は斗拱や壁面の凹凸を省略した簡略形状の風圧模型と斗拱等の詳細形状を再現した風力模型を用いる。

ここで、風圧実験では、模型壁面へ離散点に測定孔（圧力チューブ）を配置するため細部に測定孔を設けることが物理的に不可能である。このため複雑形状を有する建物に作用する風力計測には適さない。ただし、測定孔を多数配置することで面的な風外力を計測することが可能な計測手法である。

風力実験は実建物の形状を細部まで再現した模型（風力模型）を用いることで高精度の風力係数を測定する最適な手法である。

本検討では、風圧実験の測定点 1000 点程度を配置した簡略模型を用いて屋根・壁面の外圧分布を計測、この結果を集約することで水平・鉛直方向の風力を算定。詳細模型を用いた風力実験では五重塔の水平風力を計測する。更に、風力実験で計測した水平力を元に風圧実験で計測した水平力を補正することで詳細形状と同等の興福寺五重塔に作用する水平・鉛直成方向の風力を推定した。

●実験方法

風洞実験は、図 6 の清水建設(株)技術研究所の耐風実験用風洞装置（回流式閉鎖型境界層風洞）を用いた。風洞実験装置の概要は測定部の寸法は、幅 3.5m、高さ 2.5m、長さ 20m で、模型を設置するターンテーブルは直径 3m である。以下に実験条件を示す。

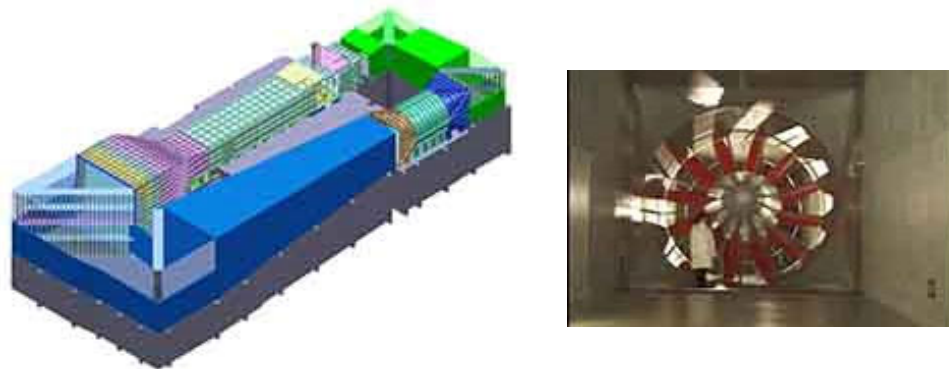


図 6 風洞実験装置の概要

・風洞気流

建設地周辺の状況を勘案して、風の鉛直方向の風速プロファイルは地表面粗度区分 III(べき指数 $\alpha=0.2$)を用いた。風洞気流は、図 7 に示す測定部の床にラフネスブロック、スパイヤーを設置することによって作成した。

・実験風向

10 度ピッチの 36 風向

・計測条件（風圧実験）

測定孔 972 点の時系列および基準速度圧の平均値

サンプリング周波数およびサンプル数：400Hz×160000 個のデータ

サンプリング時間：400 秒（実時間 116 分相当）

・計測条件（風力実験）

相輪、五重から初重の各層に作用する x,y 方向の平均風力(12ch)

サンプリング周波数およびサンプル数：200Hz×120000 個のデータの平均値

サンプリング時間：600 秒（実時間 108 分相当）

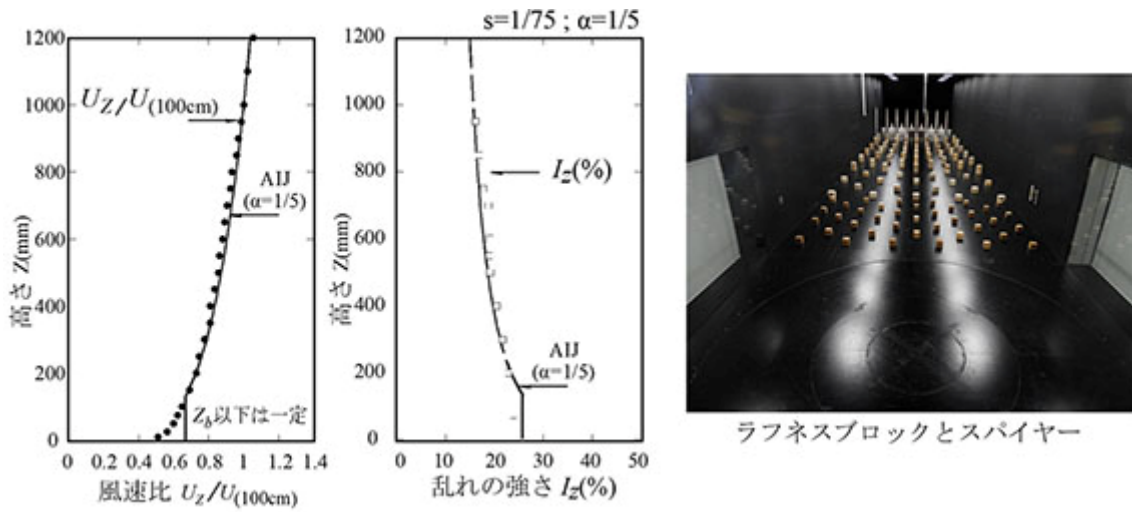


図7 実験気流

●実験結果・考察

風圧実験で計測した屋根壁面の外圧係数分布の一例を図8に示す。屋根面に作用するピーク外圧係数は一般的に負圧側が支配的であるが、屋根勾配が大きい場合は正圧も作用する。実験結果から外圧係数は五重に比べ四重の値が大きく、高さが低くなるに連れて小さくなる傾向がある。ピーク外圧係数は荷重指針の壁面の値に近似する傾向を示し、負圧側は屋根端部で局部負圧が生じ、正圧と同様に高さが低くなるに連れて小さくなる傾向がある。

図9(a)に周辺建物の有無による流れ場のイメージを示した。風上側に建物がある場合は風上側の建物と塔の間で逆流が発生し、建物間隔が広い場合は風速が低減するなど屋根壁面に作用する外圧が変化する。この現象は図8の現状・復元伽藍では風上側建物（東金堂）の影響で初重に作用する外圧係数が低減する。

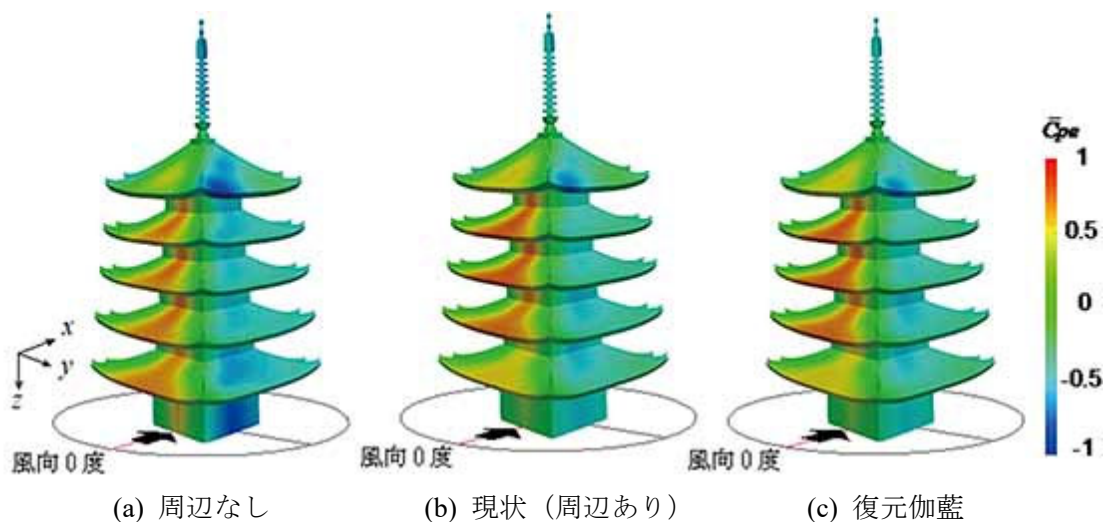


図8 屋根壁面の外圧係数分布（風向：建物正面）

また、屋根面の風力係数（表裏の差圧）は、図 8 に示す風上側の屋根面、壁面と軒下面で正圧（面を押す力）が生じており、図 9(b)に示す加力方向から風上屋根に作用する風荷重（差圧）は低減する傾向にある。

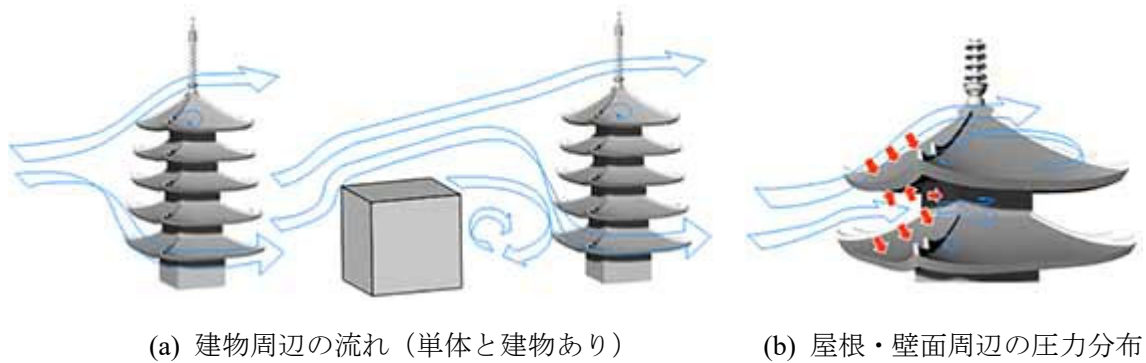


図 9 流れのメカニズム

五重塔の複雑な屋根形状に作用する風力係数の一例として風圧実験の結果から得られた鉛直成分を示す。周辺地形の影響の少ない風向 0～90 度において、塔全体に作用する平均風力係数は上向きに 0.3～0.4 程度となる（初重屋根の水平投影面積で基準化した値）。

図 10(a), (b)に、層ごとに作用する平均風力係数分布を示す。周辺地形の影響の少ない風向 0～90 度において、風上側で正圧、風下側で負圧となる。特に隅棟の風下側の負圧が顕著で上層ほどその程度は大きく、結果として層ごとの鉛直方向の平均風力係数は三重以上で上向きとなり五重で最大、初重では逆に吹き下げとなる。

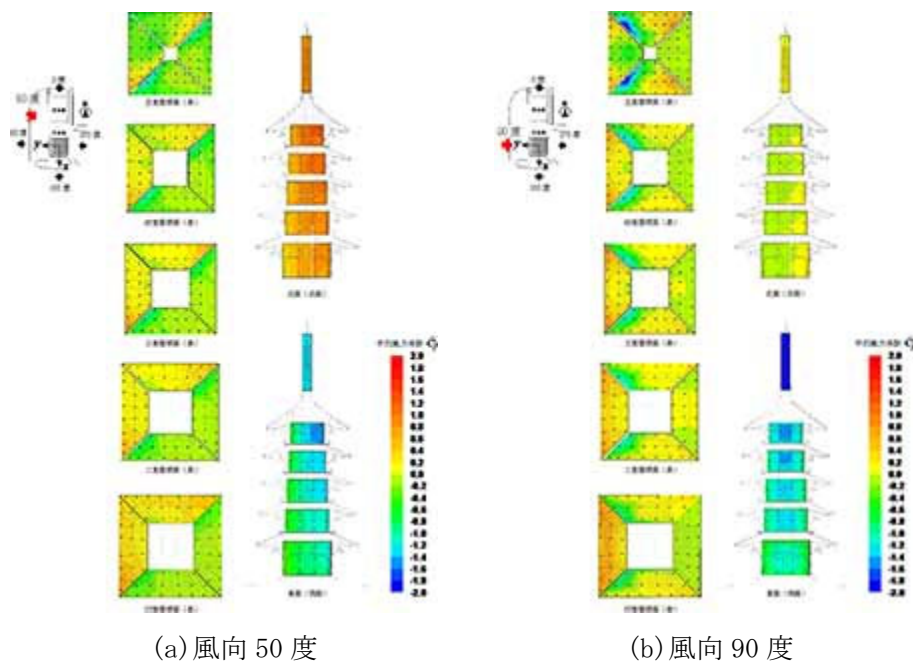


図 10 平均風力係数分布（周辺なし）

その他、五重塔の形態に起因する風圧力の特性について、実験結果より以下のことが読み取れる。

- ・ 風向 0～90 度の風力係数（各方向とも塔平面に正対する見付面積で基準化）は同程度の大きさとなっており、正対方向と斜め 45 度方向とで作用する風力に大きな差異は生じていない。また、その値は 1.2 程度で、整形な外形状の建物壁面に適用する静的な値と同等である。
- ・ 五重屋根風下側の負圧は陸屋根形状に比べ小さい。
- ・ 風向方向に作用する外力が支配的で、風向直行方向の振動は励起されにくい。

図 11 に風力・風圧実験の結果から五重塔の全体に作用する風力係数分布を示す。「現状（周辺あり）」の中金堂、東金堂の設置、復元伽藍の中門、南大門がある周辺環境では、これらの建物が風上側となる風向で風力係数の低減が顕著に見られ、風向 0～100 度、風向 300～0 度付近では風力係数が半減程度まで減少している。

風向 130～140 度付近では、市街地と中門、南大門の谷間の位置することで谷間風が生じ、更に地形の影響を受けて増速が加わり風力係数は最大値を示している。

周辺建物の変化から「周辺なし」が最大値を示し、周辺建物の増加に伴い「現状（周辺あり）」、「復元伽藍」と風力係数の値が減少する傾向が確認できた。

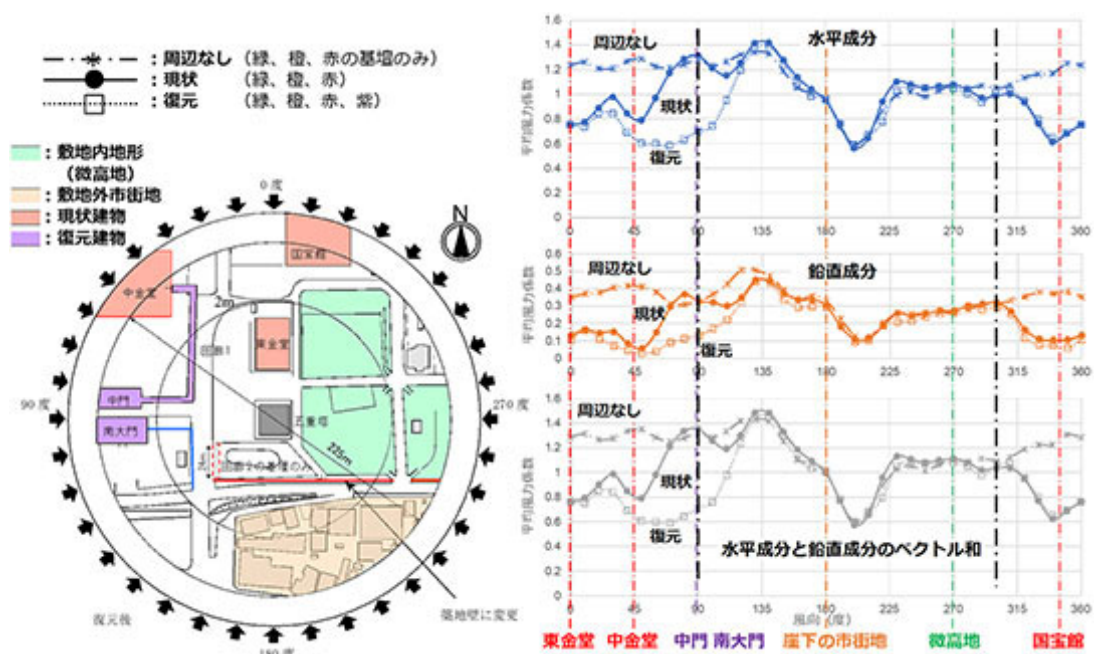
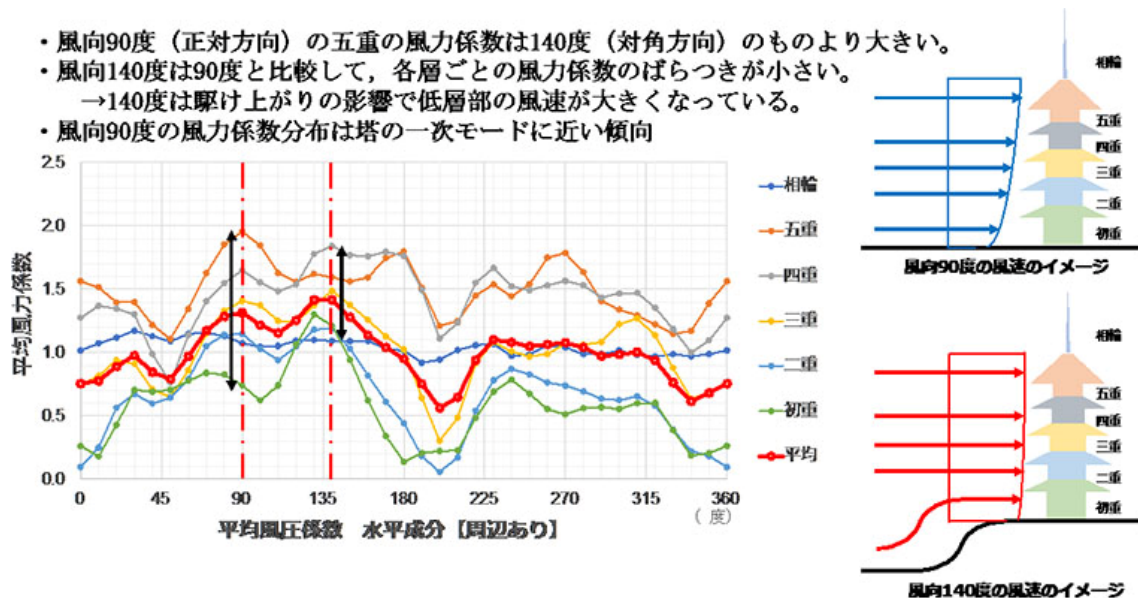


図 11 周辺環境による風力係数の変化（水平成分：x,y 方向の 2 乗和）

図 12 に現状（周辺あり）における各層に作用する風力係数の風向変化を示した。実験結果から五重から初重に作用する風力係数は風速分布に類似して高層部ほど大きな値を示す。周辺建物や地形により塔に作用する風力係数に変化が見られ、特に風向 140 度では南側地形および市街地建物の影響で下記に示す風速変化が生じていると考えられる。



●実験結果を用いた暴風時診断の結果概要

風洞試験により得られる風圧模型の計測点ごとの風力係数に、別途算定した速度圧および負担面積を乗じることで、解析モデルの節点位置に応じた時刻歴の風圧力を設定し、これを外力とする時刻歴応答解析を行った。

速度圧 q は日本建築学会 2015 年版荷重指針に準拠して、基本風速 34m/s（地上 10m における 10 分間平均風速）から設計用再現期間 500 年を想定、奈良県の風向低減係数を考慮して算出した（当該地は奈良地方気象台から直線距離約 900m で平坦地のつづく立地条件）。

実験結果による風圧係数は、前述のとおり南西風向（風向 130～140 度）で最大値を示すが、風向低減係数を考慮すると塔平面に正対する方向の風力が大きくなる。解析の結果、最大応答層間変形角は初重で 1/47（柱の傾斜は 1/25）となり、倒壊の可能性は低いと判断された。