

平成20年6月12日現在

研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2007年度～2008年度
 課題番号：19360253
 研究課題名（和文）ユニバーサルな等価静的風荷重分布と電子的空力データベースに基づく耐風設計法の開発
 研究課題名（英文）Development of wind-resistant design for structure based on Universal Equivalent Static Wind Load method and aerodynamic database
 研究代表者
 田村 幸雄（TAMURA YUKIO）
 東京工芸大学・工学部建築学科・教授
 研究者番号：70163699

研究成果の概要：

すべての部材の最大荷重効果を同時に再現するユニバーサルな等価静的風荷重により，電子的空力データベースに基づく耐風設計手法の確立を図るためのデータベースを構築した。具体的にはすでに構築されている「電子的風圧風力データベース」を利用し，様々な屋根形状，建物形状および構造形式に対して FEM モデルを作製し，すべての部材の最大荷重効果を求め，ユニバーサルな等価静的風荷重分布のデータベース化を行った。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	11,200,000	3,360,000	14,560,000
2008年度	4,800,000	1,440,000	6,240,000
年度			
年度			
年度			
総計	16,000,000	4,800,000	20,800,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築構造・材料

キーワード：荷重論

1. 研究開始当初の背景

従来から，紙媒体の基規準類によって建築物の耐風設計が行われているが，その基本となっているガスト影響係数法による等価静的風荷重分布では，荷重分布は平均風力分布に相似となり，平均風力係数がゼロに近い場合は，適切に等価静的風荷重を与えることができない。また，応答時の1次振動モードを仮定するため，高次モードの寄与が無視できない大スパン屋根やドーム構造などでは，適切に風荷重を評価することができない。また，風力の建物表面上の時空間的分布は非常に

複雑で，各部材の最大応力や各部の変形は，全ての部材，全ての部位で同時に最大値に達することはない。さらには，部材毎に異なる風向で最大値が発生することも考えられる。このように，一般に風力の変動や建築物の動的応答は極めて複雑で，上記のような単純な設計用風荷重算定手法には限界がある。にもかかわらず，ガスト影響係数法は世界中で最も広く使われている。その理由は，高層建築物の応答では，1次振動モードが卓越することと，平均風力分布と1次振動モードが近似しており，比較的容易に等価静的風荷重が見

積もれることである。最近では、様々な研究者により、最大荷重効果に着目した種々のガスト影響係数法を提案しているが、これらの荷重分布は最大荷重効果をもたらす真の荷重分布ではなかったり、1つの最大荷重効果に対応するものであったりと、全ての部材の最大荷重効果を保証できないものであった。

2. 研究の目的

申請者らのグループは、1つの荷重分布で全ての部材の最大荷重効果を同時に再現するユニバーサルな等価静的風荷重の算定手法を提案し、その有効性を証明してきた(例えば、勝村、田村、中村、2005、日本建築学会構造系論文集、No.590、pp.31-36)。インターネットで構築される電子情報社会の到来は、紙の媒体による従来型の基規準に基づく設計が、いずれは、コンピュータ内に構築された建物モデル(FEMモデル)に風洞実験や流体数値解析で得られる建物表面風圧の電子的空力データベースに基づく耐風設計体系に移行するであろうことも示唆している。前述のとおり、申請者のグループと企業の共同研究グループは、建築物表面に作用する多点風圧記録に基づいた応答計算による耐風設計の必要性をいち早く主張し、世界に先駆けて多点風圧計測システムを考案し(Ueda, Hibi, Tamura, Fujii, 1994, J. Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, Vol.51, pp.93-104)、電子的空力データベースの構築を試みてきている。一方、Simiuら(1998)もこれらの展開に着目し、電子的空力データベースに基づく風荷重基準の構築を呼びかけている。米国・Notre Dame大学、カナダ・Western Ontario大学、台湾・淡江大学などに、電子的空力データベースの構築の試みがなされている。

将来的には、電子化データベースに基づく耐風設計が世界的趨勢になる筈であり、設計の効率化と精度維持の側面からは、ユニバーサルな等価静的風荷重の必要性が増してくるものと考えられる。本研究では、その方向への発展を促進し、関連問題を解決して、合理的な新耐風設計手法を提案する。

3. 研究の方法

(1) ユニバーサルな等価静的風荷重分布のより合理的な解析手法の解明(田村、勝村)

平成19年度は、ユニバーサルな等価静的風荷重分布のより合理的な解析手法の解明を図った。特に部材の最大せん断力分布に関しては、得られるユニバーサルな等価静的風荷重の分布が、不自然な分布となる場合がある。滑らかに自然な等価静的風荷重分布を得るためには、部材の最大せん断力の符号の組合せが重要となる。そのため、変動風圧場ではなく、変動部材応力場のPOD解析結果に

基づき、全部材のせん断力の正負の分布を決定し、これに基づく等価静的風荷重分布の算出を試みた。建築物表面で多点で同時に計測された変動風圧の時刻歴波形が与えられると、建築物の構造体に関する有限要素モデルに作用させ、応答解析を行うことにより、各部材の応力が求まる。設計では、各部材の最大応力が重要であり、1つの等価静的な風荷重分布で全ての部材の最大荷重効果を再現することができれば、設計では極めて有効である。 $[I_r]$ を影響関数マトリクスとすると、全ての部材に対する最大荷重効果 $\{R_{MAX}\}$ は、ユニバーサルな等価静的風荷重 $\{F_U\}$ により、 $\{R_{MAX}\}=[I_r]\{F_U\}$ と表される。申請者らはユニバーサルな等価静的風荷重 $\{F_U\}$ を、任意の基本荷重分布の線形和 $\{f_1, f_2, \dots, f_n\}\{C\}=[F_U]\{C\}$ で表すこととした。申請者らは、基本荷重分布として変動風圧分布をPOD解析(田村, 1995, 日本風工学会誌, No.65)して得られるノルム1の規準モード $[]$ を採用している。この理由は、POD解析による規準モードが直交関数であることと、物理的に意味のある分布を用いることで最大荷重効果が効率的に表せるとの予想に基づくものである。結果的に $\{R_{MAX}\}=[I_r]\{F_U\}=[I_r][]\{C\}=[R_0]\{C\}$ となり、マトリクス $[R_0]$ は影響関数マトリクスと規準モードの積で表せる。問題はこの代数方程式において係数ベクトル $\{C\}$ を求める問題に帰結する。マトリクス $[R_0]$ が正則で逆マトリクスが存在するならば、解 $\{C\}$ は一意に定まる。しかし、風洞実験において建物に作用するN点の変動風圧データが得られた場合、計算される共分散マトリクスは $N \times N$ となる。通常、対象とされる最大荷重効果の数、つまり部材応力の数Mは、風圧測定点数Nより多く、マトリクス $[R_0]$ は特異行列となり、直接解くことができない。そこで、特異値分解により $[R_0]$ を列正規直交行列 $[U]$ および正規直交行列 $[V]$ と特異値 $[S]$ に分解すると、係数ベクトル $\{C\}$ は $\{C\}=[V][S]^{-1}[U]^T\{R_{MAX}\}$ のように導かれる。つまり、係数ベクトル $\{C\}$ を最小自乗の意味の近似解として求めれば、M個の最大荷重効果 $\{R_{MAX}\}$ をN個の荷重分布の重ね合わせにより表現することができるのである。これによって、多くの場合、部材の曲げモーメントに関しては、適切な等価静的風荷重分布が得られる。しかし、剪断力に関しては、不自然な分布が得られることがある(Fig.1)。そこで、全部材の変動せん断力に対してPOD解析結果を実施し、その主要モードの分布形状を検討し、全部材の剪断力の正負の分布を決定する。これによって、自然な等価静的荷重分布が得られる可能性のあることは、Katsumura, Tamura, Nakamura (2005, IABSE, 既出)によって、確認されている(Fig.2)。

(2) 電子的空力データベースの基礎資料を充

実させるための風洞実験の実施（吉田）

屋根形状の異なる建築物の変動風圧力を、東京工芸大学所有のエッフェル型境界層風洞により、多点風圧計測装置を用いて測定する。ユニバーサルな等価静的風荷重分布算定法の検討で用いてきた開放型の片持ち屋根の他に、以下の形状の建物模型による変動風圧実験を実施した(Table 1)。

- ・フラット屋根（12 体）
- ・切妻屋根（96 体）
- ・寄棟屋根（8 体）
- ・ドーム屋根（28 体）

模型表面には、負担面積が均等になるように、300～400 点の風圧孔を配して風洞実験を行う。その際、風圧チューブの影響は予め求めたゲインとフェイズを用いて補正した。実験気流は、日本建築学会・建築物荷重指針・同解説(2004)の地表面粗度区分 および を用いて作成した。

(3) 電子的空力データベースの構築とウェブ上への公開（松井）

従来の紙の媒体による基規準に基づく設計手法から脱却し、電子的空力データベースに基づく耐風設計手法の確立を図ることが、本研究の大きな目的であり、このための必須要素として空力データベースの構築とウェブ上への公開を図った。既に公開している低層建物を主とする 116 のモデルの他に、中層建物や高層建物の電子的空力データベースをより充実させ、公開した。公開にあたっては、気流の平均風速分布、乱れ強さ分布、模型および気流の幾何学的縮尺、風速の縮尺、時間の縮尺など、必要な情報は全て公開した。公開は、東京工芸大学・風工学研究センター・技術情報室、http://www.wind.arch.t-kougei.ac.jp/eng/w_it.html からとなる。本研究のフローと達成する項目を Fig.3 に示した。また、平成 19 年度～平成 20 年度の年次計画を Fig.4 に図示した。

平成 20 年度

(4) ユニバーサルな等価静的風荷重分布の解析（田村，勝村）

平成 19 年度に検討するユニバーサルな等価静的風荷重分布のより合理的な解析手法に基づいて、各種建物形状と主要な構造形態に対応した等価静的風荷重分布を解析した。検討した建物形状は

- 低層建物（切妻屋根，寄棟屋根，陸屋根，ドーム屋根）

であり、構造形態は

- 山型ラーメン（切妻屋根，寄棟屋根の低層建物）

- トラス構造（ドーム屋根の低層建物）

とした。対象とする最大風荷重効果は

- 各部材の最大せん断力，最大曲げモーメント，最大軸力

とした。これらの構造形式に対して、

SAP2000 により FEM モデルを作製した。

各種建物形状と構造形態に対する電子的空力データベースに基づいて、時刻歴風応答解析を行い、各部材の最大応力を算定した。全部材の最大荷重効果に基づいて、これらを同時に再現するユニバーサルな等価静的風荷重分布を算定した。なお、各部材の最大荷重効果は、建物形状や構造形態だけでなく、風向や気流の特性によっても大きく変わるため、気流別、風向別の最大荷重効果を算定した。

(5) ユニバーサルな等価静的風荷重分布のデータベース化（田村，松井）

得られたユニバーサルな等価静的風荷重分布をデータベース化し、ウェブ上へ公開した。電子化空力データベースと同様に、本学の風工学技術情報室からの公開とする。

(6) 電子的空力データベースの基礎資料を充実させるための風洞実験の継続実施（吉田）

現実に用いられる低層建物，中層建物，高層建物の形状や，気流の条件は，極めて多種多様である。可能な限り多くのケースについて空気力の情報を蓄積することが必要であり，それらの電子的空力データベースを構築することは実務上有益である。そこで建築物の中で最も多い低層建築物の切妻屋根を重点的に，屋根の勾配，建物高さ，および奥行きとの組合せにより合計 143 パターンの模型に対し，風向角や実験気流を変えて風洞実験を実施した。

(7) 電子的空力データベースの構築とウェブ上への継続公開（松井）

多点風圧風洞実験で得られた各種建物模型の変動風圧に関する電子的空力データベースをより充実させ，本学の風工学技術情報室からウェブ上へ継続的に公開した。

(8) ユニバーサルな等価静的風荷重分布と電子的空力データベースに基づく新耐風設計法の開発（田村，勝村，松井）

以上のようにして構築された各種建物モデルの電子的空力データベースと，全ての部材の最大荷重効果を同時に評価できるユニバーサルな等価静的風荷重分布のデータベースにより，従来の紙に書かれた設計指針を媒体とする設計体系から大きく脱却した合理的でかつ効率的な耐風設計体系を構築することができた(Figs.5 & 6)。電子的空力データベースから生の多点風圧データをダウンロードし，風応答解析を風向別に行い，各部材の最大荷重効果を評価する道筋と，ユニバーサルな等価静的風荷重分布に基づいて各部材の最大荷重効果を評価する道筋が可能となった。本研究では，上記に必要な全ての要素技術を開発し，新耐風設計体系の雛形を提示することができた。

Table 1 低層建築物モデルの実験ケース

建物形状	幅 (mm)	奥行 (mm)	高さ (mm)	屋根勾配 (°)	ケース数
陸屋根	160	160	40	0	12
		240	80		
		400	120		
			160		
切妻屋根	160	160	40	4.8	96
		240	80	9.4	
		400	120	14	
			160	18.4	
				21.8	
				26.7	
				30	
寄棟屋根	160	240	40	26.7	8
			80	45	
			120		
			160		

建物形状	幅 (mm)	軒高 (mm)	軒から高さ (mm)	ライズスパン比(屋根勾配, %)	ケース数
球形屋根	300	0	0	0%	27
		100	30	10%	
		200	60	20%	
		300	100	33%	
			120	40%	
			150	50%	
	260	87%			

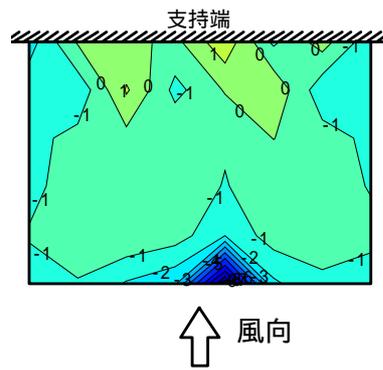


Figure 1 すべての部材の最大せん断力を再現するユニバーサルな等価静的風荷重分布

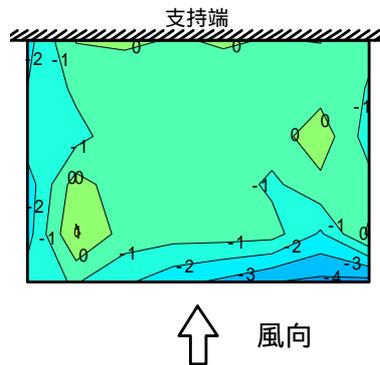


Figure 2 荷重効果の POD 解析を取り入れたすべての部材の最大せん断力を再現するユニバーサルな等価静的風荷重分布

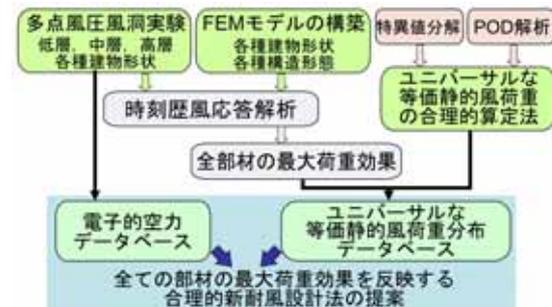


Figure 3 本研究のフローと達成する項目

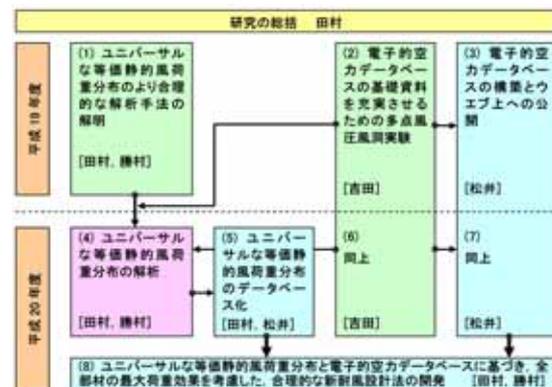


Figure 4 平成 19, 20 年度の年次計画

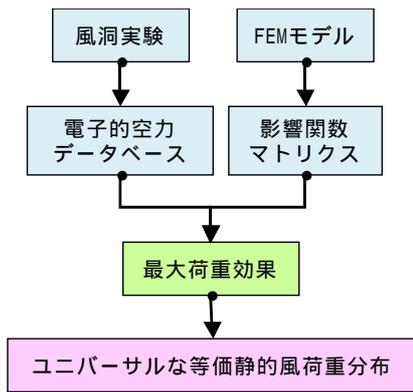


Figure 5 ユニバーサルな等価静的風荷重分布データベース化の流れ

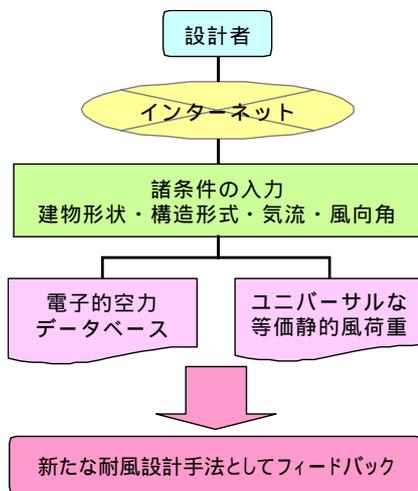


Figure 6 新耐風設計手法の確立

4. 研究成果

電子的空力データベースの構築が推進され、多くの設計者や研究者が風圧風力に関する生データを共有でき、これを用いた風応答解析などにより、強風時の各部材の詳細な挙動を把握して、より高度な耐風設計を一般の設計者が独自に行うことが可能となる。また、ユニバーサルな等価静的風荷重分布を如何に求めるかという学術的に斬新な問題に解を与えるだけでなく、等価静的風荷重分布のデータベースが構築されることによって、多くの設計者が実設計で苦慮している全ての部材の最大荷重効果を評価できる手法が与えられ、大スパン屋根などの設計用風荷重分布を合理的に求めることが可能となる。これら極めて困難な課題の解決だけでなく、基規準類への反映も期待される。性能設計の観点から強く要求される各種限界状態に対応する精度の良い風荷重評価を可能とし、従来型の設計体系から脱却し、IT時代の現状に即応したより合理的な耐風設計体系が提案され、

経済効果や省資源効果も甚大と考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 0 件)

[学会発表](計 6 件)

- ・吉田智哉, 共振成分を含む最大荷重効果とユニバーサルな等価静的風荷重 その1 大スパン片持ち構造屋根の動的解析, 日本建築学会大会学術講演会, 2007.8.29-31, 福岡大学
- ・勝村 章, 共振成分を含む最大荷重効果とユニバーサルな等価静的風荷重 その2 最大荷重効果と等価静的風荷重, 日本建築学会大会学術講演会, 2007.8.29-31, 福岡大学
- ・Yuanqi Li, Universal equivalent static wind load estimation for spatial structures based on wind-induced envelope responses, The 4th International Conference on Advances in Wind and Structures, 2008.5.29-31, Korea
- ・Y. Tamura, Pressure distribution and flow fields providing extreme aerodynamic forces, Sixth International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics & Applications, 2008.6.20-24, Italy
- ・勝村 章, 建築物群内に配置された低層構造物のユニバーサルな等価静的風荷重 その1 ユニバーサルな等価静的風荷重の算定, 日本建築学会大会学術講演会, 2008.9.18-20, 広島大学
- ・吉田智哉, 建築物群内に配置された低層構造物のユニバーサルな等価静的風荷重 その2 建物群が風荷重効果に与える影響, 日本建築学会大会学術講演会, 2008.9.18-20, 広島大学

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

[その他]

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田村 幸雄 (TAMURA YUKIO)
東京工芸大学・工学部建築学科・教授
研究者番号: 70163699

(2) 研究分担者

松井 正宏 (MATSUI MASAHIRO)
東京工芸大学・工学部建築学科・教授
研究者番号：60350576

(3)研究分担者

吉田 昭仁 (YOSHIDA AKIHITO)
研究者番号：90329219