

耐風設計支援システム - WINDS -
Wind-Resistant Design Support System - WINDS-

佐々木晶邦 Akikuni Sasaki

1. はじめに

近年、大都市中心部や周辺部における大規模再開発が増加しており、オフィスビルやマンションといった高層建築物の建設が計画されている。一方、建築物の設計が仕様規定型から性能規定型へ移行したため、基本計画段階で目標とする性能を発注者と協議の上で明示することが求められるようになった。すなわち、設計者が、期待される目標性能を現状の設計が満足するか否かを適切な方法で判断することが求められている。

一般的な中高層建築物の耐風設計を行う場合、次の観点での検討が必要となる。

- 1) 風揺れ居住性の評価
- 2) 外装材・構造骨組設計用風荷重の算定

風揺れ居住性評価および構造骨組設計用風荷重算定のフローチャートを Fig. 1 に示す。一般に、構造物に作用する風力は形状に対して強い依存性があり、また周囲の建物や地形による影響を無視し得ないケースもある。このような条件に当てはまるケースにおいては、風力実験の実施を念頭に置く必要がある。しかし、基本計画段階においては、平面形状や周辺環境が類似した過去の実験結果から対象建物の空力特性を類推して、設計用風荷重の概算や居住性能を予測・評価することも適切であると考ええる。

そこで、既存の風力実験結果をデータベース化して、設計の計画段階から耐風設計を容易に行うためのツール¹⁾(WIND96)を作成したが、規基準ないし設計風速再現期間による設計用風荷重の比較や、風揺れ居住性能評価といった機能を追加すると共に、ユーザーインターフェースを備えたアプリケーションとして耐風設計支援システム(通称 WINDS)を開発した。

2. システムの特徴

WINDS は、デスクトップ型標準機(OS:Windows NT, 2000, XP)における利用を想定して構築を行ったアプリケーションである。WINDS のシステム構成を Fig. 2 に、ユーザーインターフェースの外観を Fig. 3 に示す。ユーザーは、システムのメインウィンドウ上で「風速計算」、「振動モード設定」、「データベース選択」といったサブウィンドウを呼び出して計算パラメータの入力作業を行い、「計算結果表示」サブウィンドウで風荷重や居住性能評価結果の確認を行う。各サブウィンドウが有する機能および計算項目を a) ~ e) に記す。

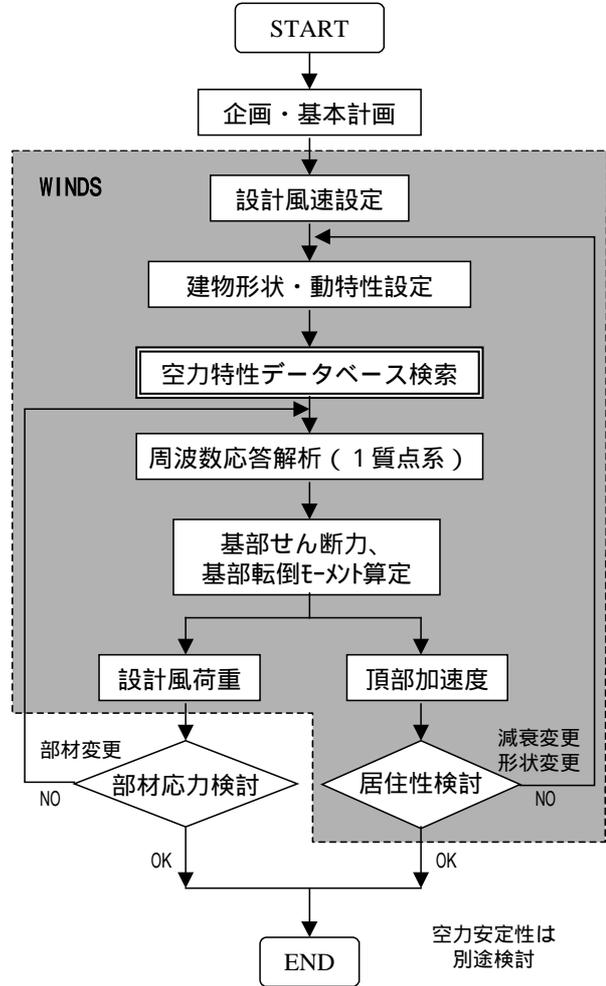


Fig. 1 耐風設計のフローチャート
Flowchart of Wind Resistant Design

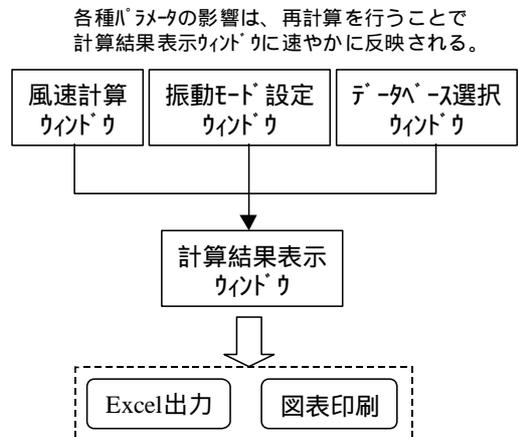


Fig. 2 WINDS のシステム構成
System Components of WINDS

a) 風速計算ウィンドウ

設計風速や風荷重を計算するためのパラメータを入力する。入力項目は、建設予定地、計画建物形状（高さ、見附幅、奥行）、建物重量、1次固有振動数、1次減衰定数、居住性検討用の1年再現風速を計算するための気象官署、である。パラメータを入力後、表示を切り替えると、日本建築学会建築物荷重指針²⁾（以後、荷重指針と表記）ないし新旧建築基準法に基づいた設計風速および再現期間1年風速が表示される。

b) 振動モード設定ウィンドウ

周波数応答解析では、建物を1質点系として解析を行うが、多質点系の1次振動モードを設定することで、直線と仮定したモード形の影響を補正することができる。

c) データベース選択ウィンドウ

天秤実験データベースの検索・選択を行う（Fig. 4）。実験模型や実験状況の写真、座標系が表示され、必要であれば表示を拡大することができるので、計画建物に類似したデータを容易に検索することができる。

d) 計算結果表示ウィンドウ

表示を切り替えることで、各種設計風速毎にX・Y・ねじれ方向について計算された建物基部せん断力、転倒モーメント、転倒角、頂部加速度が表示される。併せて、X・Y方向およびねじれの居住性能評価結果が表示される。計算結果のプリンター出力、Excelワークシート出力も用意されている。

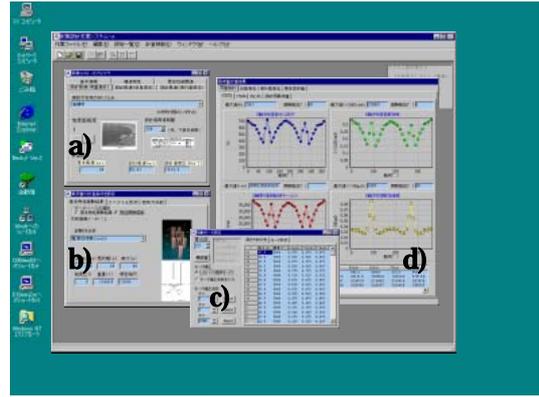


Fig. 3 ユーザーインターフェースの外観
User Interface of WINDS

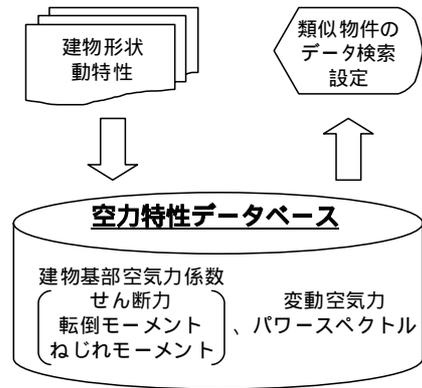


Fig. 4 空力特性データベース
Wind Force Database

Table 1 データベースの内容
Contents of Wind Force Database

実験ケース	実験種類	実験内容	模型寸法(mm)	実験気流		
1 A-00	プロトタイプ	角柱	600×75×75			
2 A-		隅欠き、隅欠き比 = 1/15、1/10、1/6				
3 B-		円形隅欠き、隅欠き比 = 1/15、1/10、1/6				
4 C-		隅切り、隅欠き比 = 1/15、1/10、1/6				
5 D-		隅丸、隅欠き比 = 1/15、1/10、1/6				
6 E-		風穴型、3ケース				
7 F-00		メガフレーム型				
8 G-00		層回転型				
9 H-00		層くびれ型				
10 I-A0		角柱 + 壁面付加物、3ケース	400×75×75			
11 J-0		屋上付加物、側壁無し / 有り				
12 L_		角柱				
13 M_		層くびれ型				
14 N_		層回転型				
15 O_		頂部隅切り型、隅切り比 = 1/6				
16 P_		風穴型、4面開口				
17 Q_		隅欠き、隅欠き比 = 1/10、2ケース				
18 R_		円形隅欠き、隅欠き比 = 1/10、2ケース				
19 S_	受託実験	高層ビルA、形状検討、12ケース	350×100×100			
20 T_		高層ビルA、実施形状、3ケース	350×200×68			
21 U_		高層ビルB、3ケース	560×70×70			
22 V_		高層ビルC、18ケース	500×130×130			
23 W_		高層ビルD、3ケース	290×225×68			
24 X_		高層ビルE、5ケース	360×80×210			
25 Y_		煙突A、14ケース	500×70×70			

e) 計算項目

WINDS を用いて計算・評価・処理を行うことができる項目を以下に示す。

- 1) 荷重指針および新旧建築基準法による設計風速・設計速度圧の計算
- 2) 気象官署における日常風観測データによる再現期間1年風速の計算
- 3) 建築物基部におけるせん断力，転倒モーメントおよび転倒角の計算
- 4) 建築物頂部における応答加速度の計算
- 5) 日本建築学会居住性能評価指針³⁾(以後，居住性指針と表記)に基づく居住性能評価
- 6) 計算結果の Excel 出力，図表印刷

3. 空力特性データベース

蓄積した空力特性データベースの内訳を Table 1 に示す。表中の実験気流は，荷重指針における地表面粗度に対応している。実験種類がプロトタイプと表示されている実験ケースについては，詳細な空力特性が文献⁴⁾に記述されているので参考にされたい。データベースに登録されているデータは，Fig. 4 に示す実験風向毎の建物基部空気力係数 C_{FX} , C_{FY} , C_{MX} , C_{MY} , C_{MT} の平均値及び変動値，および変動空気力のパワースペクトルである。建物基部空気力の座標系を Fig. 5 に示す。なお， C_{FX} , C_{FY} : X, Y 方向の基部せん断力係数， C_{MX} , C_{MY} : X, Y 軸周りの基部転倒モーメント係数， C_{MT} : 基部ねじれモーメント係数である。

4. 計算および評価方法

4.1 最大・最小空気力

建物の応答が作用する風荷重と線形関係にあり，振動に依存する空気力は発生しないものとする。この時，並進及びねじれ振動の1次固有振動にのみ着目すると，スペクトルモーダル法を用いて建物の最大・最小変形を与えるせん断力 F_X , F_Y および転倒・ねじれモーメント M_X , M_Y , M_T を，(1)~(5)式のように算定することができる。

$$F_X = F_{Xave} \pm g_X \sqrt{\sigma_{FX1}^2 + \sigma_{FX2}^2} \quad (1)$$

$$F_Y = F_{Yave} \pm g_Y \sqrt{\sigma_{FY1}^2 + \sigma_{FY2}^2} \quad (2)$$

$$M_X = M_{Xave} \pm g_Y \sqrt{\sigma_{MX1}^2 + \sigma_{MX2}^2} \quad (3)$$

$$M_Y = M_{Yave} \pm g_X \sqrt{\sigma_{MY1}^2 + \sigma_{MY2}^2} \quad (4)$$

$$M_T = M_{Tave} \pm g_T \sqrt{\sigma_{MT1}^2 + \sigma_{MT2}^2} \quad (5)$$

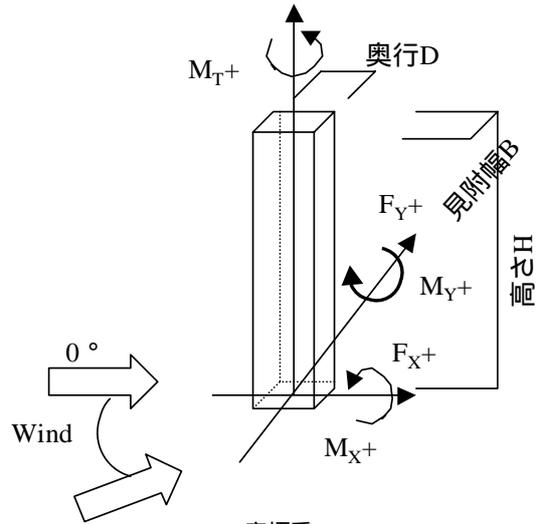


Fig. 5 座標系
Coordinate System

ここで， F_{Xave} , F_{Yave} : X, Y 軸方向の平均せん断力(KN)， g_X , g_Y , g_T : X, Y 軸方向およびねじれのピークファクター， M_{Xave} , M_{Yave} , M_{Tave} : X, Y 軸周り平均転倒モーメントおよび平均ねじれモーメント(KN・m)， $FX1$, $FY1$: X, Y 軸方向せん断力の非共振成分(KN)， $FX2$, $FY2$: X, Y 軸方向せん断力の共振成分(KN)， $MX1$, $MY1$, $MT1$: X, Y 軸周り転倒モーメントおよびねじれモーメントの非共振成分(KN・m)， $MX2$, $MY2$, $MT2$: X, Y 軸周り転倒モーメントおよびねじれモーメントの共振成分(KN・m)である。

4.2 応答

建物の挙動は，変動する風荷重に対して常に線形の関係にあることを前提とする。従って，転倒角及びねじれ角は以下のように計算できる。

$$\theta_X = \frac{X}{H_N} = \frac{M_Y}{(2\pi \cdot n_{X0})^2 m_X \cdot Z_N^2} \quad (6)$$

$$\theta_Y = \frac{Y}{H_N} = \frac{M_X}{(2\pi \cdot n_{Y0})^2 m_Y \cdot Z_N^2} \quad (7)$$

$$\theta_T = \frac{M_T}{(2\pi \cdot n_{T0})^2 I_T} \quad (8)$$

質点 i での並進運動により生じる加速度は，次式により求められる。

$$\ddot{X}_i = g_X (2\pi \cdot n_{X0})^2 \left[\sigma_{MY2} \cdot \mu_{Xi} \cdot Z_N / \left\{ (2\pi \cdot n_{X0})^2 m_X^* \cdot Z_N^2 \right\} \right] \quad (9)$$

$$\ddot{Y}_i = g_Y (2\pi \cdot n_{Y0})^2 \left[\sigma_{MX2} \cdot \mu_{Yi} \cdot Z_N / \left\{ (2\pi \cdot n_{Y0})^2 m_Y^* \cdot Z_N^2 \right\} \right] \quad (10)$$

質点 i の剛心からの水平距離 L(m)におけるねじれ振動により生じる加速度は，次式により求められる。

$$\ddot{T}_i = g_T (2\pi \cdot n_{T0})^2 \left[\sigma_{MT2} \cdot \mu_{Ti} \cdot Z_N / \left\{ (2\pi \cdot n_{T0})^2 I_T \right\} \right] \quad (11)$$

ここで、 X, Y, T : X, Y 軸方向の転倒角およびねじれ角(rad), H_N : 最上部の質点高さ(m), m_X, m_Y : X, Y 軸方向の一般化質量($t \cdot s^2/m$), n_{X0}, n_{Y0}, n_{T0} : X, Y 軸方向およびねじれの1次固有振動数(Hz), I_T : ねじれの質量慣性モーメント($t \cdot m \cdot s^2$), $\ddot{X}_i, \ddot{Y}_i, \ddot{T}_i$: 質点 i の X, Y 軸方向およびねじれによる加速度(m/s^2), $\mu_{Xi}, \mu_{Yi}, \mu_{Ti}$: X, Y 軸方向およびねじれの振動モードである。

4.3 設計用風荷重

設計用風荷重の鉛直分布は、日本建築センター「建築物風洞実験ガイドブック」⁵⁾に準拠して、最大変形をもたらす等価荷重として、建物上層部に作用する層せん断力、転倒・ねじれモーメントを計算する。

4.4 居住性能評価

居住性能評価は、居住性指針を基に行った。従って、再現期間1年の最大加速度を Table 2 に示す性能評価基準に照合することにより行う。

5. 計算例

ここでは、WINDS を使用して居住性能評価を行った。計算にあたり、以下の条件を設定している。

- a) 建設地: 東京都 23 区内
- b) 用途: オフィス
- c) 建設地粗度区分: ないし
- d) 建物寸法: 高さ 150m, 見附幅 50m, 奥行 50m
- e) 建物重量: 100,000ton
- f) 固有振動数: X, Y, ねじれ共に 0.2~0.5Hz
- g) 減衰定数: 居住性検討用として 1.0%
- h) データベース: ケース W (高層ビル D-type 1)

WINDS が出力した居住性能評価結果を Fig. 6 に示す。図中のグラフにある実線は、Table 2 に示されるランク (クリアすることが望ましい基準), ランク (標準的な建物の基準), ランク (許容限界値) を満たす上限となるレベル H-1~H-4 を表す。想定したオフィスビル頂部における最大加速度は固有振動数の増加につれて減少する。ねじれに伴う加速度においてはこの傾向が顕著に見られることから、想定したケースでは固有振動数 (=ねじれ剛性) を増加することがねじれの居住性を改善するために有効であることが分かる。

6. まとめ

建築構造設計部門における耐風設計実務の効率化を図るため、耐風設計支援システム(WINDS)を開発した。こ

Table 2 建築物の用途別性能評価区分
Classification of Habitability Evaluation for Building

建物用途 / ランク	ランク	ランク	ランク
住居用途	H-1	H-2	H-3
オフィス用途	H-2	H-3	H-4

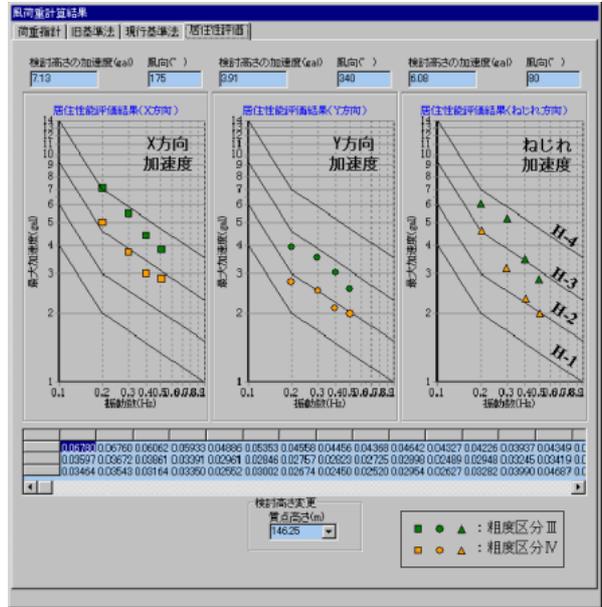


Fig. 6 WINDS による居住性能評価結果
Evaluated Results of Habitability by WINDS

のシステムを利用れば、建物形状の違いによる設計風荷重や風揺れ居住性の検討、制振装置による付加減衰効果の確認、といった作業を容易に行うことが出来る。ただし、空気力特性は形状に対して強い依存性があるので、より精度良く風荷重を評価するためには縮尺模型による風洞実験を行って空力特性を厳密に評価する必要がある。

今後、改訂が予定される荷重指針や、耐風設計関連の研究動向を踏まえて機能追加を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 川口彰久, 他: 耐風設計支援システム 超高層建物を対象とした設計用風荷重・風揺れ予測のためのデータベース (WIND96), 研究報告書, (1997)
- 2) 日本建築学会編: 建築物荷重指針・同解説, 日本建築学会, (1993)
- 3) 日本建築学会編: 建築物の振動に関する居住性能評価指針・同解説, 日本建築学会, (1991)
- 4) 佐々木晶邦, 他: 超高層構造物の空力特性改善技術に関する研究 形状による空力特性改善効果の調査, 研究報告書, (2001)
- 5) 日本建築センター編: 実務者のための建築物風洞実験ガイドブック, 日本建築センター, (1994)