

# 非定常変動風力が建物応答に与える影響について

## Influence of Non-stationary Wind Force on Building Response

学籍番号 47-086734  
氏名 市原 義孝 (Ichihara, Yoshitaka)  
指導教員 神田 順 教授

### 1. 研究背景・目的

現在、最大荷重を評価対象とする耐風設計では、設計期間内で最大となる一定平均風速と風速乱れ成分からなる荷重評価が行われる。しかし近年、超高層建物で普及してきた履歴型制振部材やアクティブ制振装置等、累積疲労損傷やエネルギー吸収能力を評価対象とした部材を設計する際には、最大荷重の評価以外に時間変化する平均風速の評価が求められる。そのため、予め定められた設計許容値を最大荷重が超えない事を確認する現在の手法では、平均風速が時々刻々と変化する時系列データに対して構造性能を評価する事は難しい。また、平均風速の時間変化を考慮しない評価は、一定平均風速と予期せぬ平均風速の傾きとの間で荷重評価の誤差を生み出しかねない。

そこで本研究は、自然風の非定常状態の解明と風速の非定常性を考慮した荷重評価を明らかにする事を目的に、柏キャンパスデータに基づいた非定常模擬風速の一般化を行う。平均風速の時間変化に着目したスペクトル応答解析による推定式を提案する事で、非定常風荷重評価について議論する。

### 2. 非定常風データ観測概要

解析の対象となる台風を図 1 に示す。観測地点は東京大学柏キャンパス P3 (高さ

20m)、P4 (43m) である。(図 2) 観測データは 2 秒毎に記録された風向 (72 風向)・風速 (m/s) データを用いる。

### 3. 新たな風モデルの提案

従来の風モデルは、評価時間一定平均風速 $\bar{U}$ と定常確率過程に従った風速乱れ成分 $u(t)$ によって (1) 式のように定義される。

$$U(t) = \bar{U} + u(t) \quad (1)$$

(1) 式によるモデル化は、最大風力による荷重効果を推定する上で有効であるが、平均風速の時間変化が考慮されていない。そこで本研究では新たに時間変化の概念を組み込み、非定常風モデルとして

$$U(t) = \bar{U}(t) + u'(t) \quad (2)$$

$\bar{U}(t)$ : 時間変化する平均風速,  $u'(t)$ : 乱れ成分

(2) 式を提案する。(2) 式は時間変化する平均成分の扱い方によって定義が異なる。ここでは以下の 2 つのモデルを提案する。

#### 3.1 線形近似風モデル

線形近似風モデルは、対象時間を短く評価する事で風速平均値の変動は線形的に近似が可能、という仮定に基づく非定常風モデルである。その変動成分は最小二乗法による近似直線を平均成分として定義される。表 1 に風速乱れ強さについて定常風モデルとの比較結果を、サンプルデータ中最大風速を観測した前後 30 分間のデータを抽出

表 1 風速乱れ成分 線形近似モデルと定常風モデルの比較

Linear/Constant	L/C	L/C	L/C	L/C	L/C	L/C	L/C
台風\Time	-30min	-20min	-10min	0min	+10min	+20min	+30min
No.0206 P4	0.16/0.17	0.15/0.15	0.19/0.19	MAX	0.18/0.21	0.20/0.24	0.23/0.23
No.0221 P3	-	0.25/0.25	0.29/0.33		0.26/0.26	0.26/0.27	0.27/0.27
No.0221 P4	-	-	0.18/0.18		0.15/0.15	0.19/0.19	0.17/0.20
No.0310 P4	0.19/0.20	0.16/0.16	0.18/0.19		0.18/0.19	0.20/0.20	0.17/0.20
No.0406 P4	0.21/0.22	0.17/0.17	0.25/0.25		0.18/0.18	0.16/0.17	0.20/0.21
No.0421 P4	0.18/0.19	0.23/0.23	0.21/0.22		0.23/0.24	0.15/0.16	0.22/0.23
No.0422 P3	0.26/0.26	0.26/0.26	0.23/0.23		0.24/0.25	0.28/0.31	0.22/0.25
No.0422 P4	0.23/0.24	0.21/0.22	0.23/0.25		0.25/0.29	0.24/0.26	0.19/0.20
No.0918 P4	0.19/0.20	0.21/0.21	0.24/0.24		0.21/0.22	0.26/0.26	0.27/0.27

表 2 EMD モデルとの比較

EMD/Constant	E/C	E/C
台風\Time	-30min	+30min
No.0206 P4	0.18/0.25	
No.0221 P3	0.28/0.33	
No.0221 P4	0.17/0.20	
No.0310 P4	0.18/0.20	
No.0406 P4	0.20/0.21	
No.0421 P4	0.21/0.23	
No.0422 P3	0.25/0.31	
No.0422 P4	0.23/0.32	
No.0918 P4	0.23/0.25	

表 3 最大風速観測前後 30 分間風速変化率

台風\Time	-30min	-20min	-10min	0min	+10min	+20min	+30min
No.0206 P4	9%	2%	9%	MAX	17%	22%	7%
No.0221 P3	-	2%	29%		3%	8%	7%
No.0221 P4	-	-	4%		7%	0%	20%
No.0310 P4	5%	9%	6%		10%	1%	17%
No.0406 P4	13%	2%	5%		0%	6%	12%
No.0421 P4	13%	4%	15%		8%	5%	9%
No.0422 P3	6%	0%	10%		7%	22%	20%
No.0422 P4	9%	10%	17%		25%	17%	11%
No.0918 P4	11%	1%	4%		10%	5%	5%

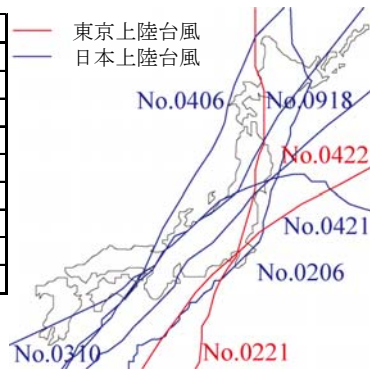


図 1 台風進路図

表 4 最大風速観測前後 30 分間風速変化率と発生確率

風速変化率	0 - 5 %	5 - 10 %	10 - 15 %	15 - 20 %	20 - 25 %	25 - 30 %
発生確率	23.53%	37.25%	17.65%	9.80%	7.84%	3.92%

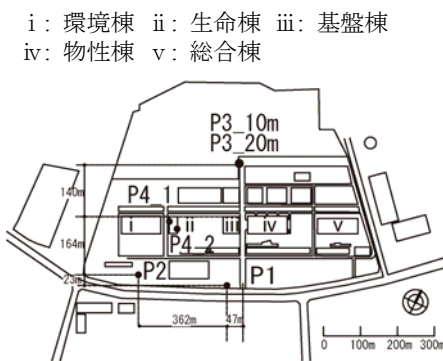


図 2 柏キャンパス観測地点

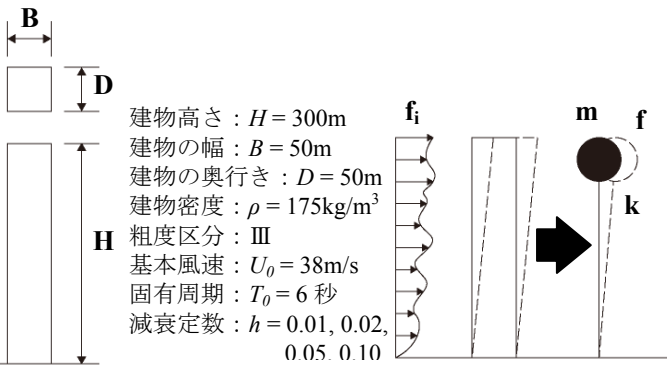


図 4 想定建物条件と解析モデル

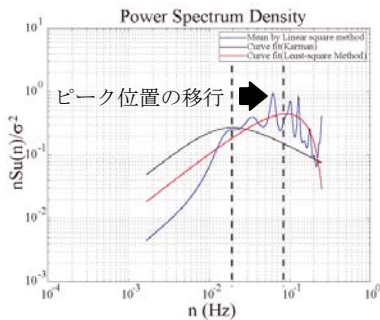


図 3 スペクトル特性 例

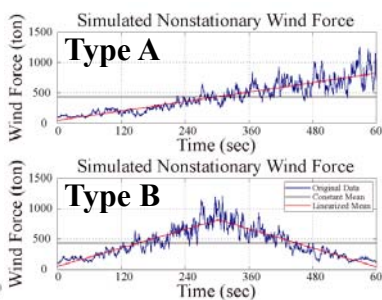


図 5 非定常模擬風力

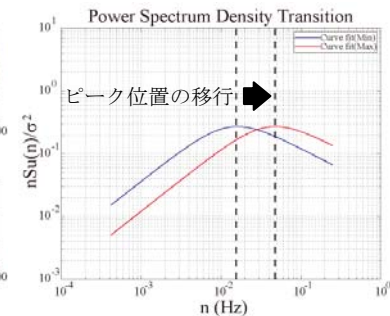


図 6 模擬風速スペクトル特性

して比較した。表より 10 分間の評価時間に対して線形近似風モデルの優位性を確認できる。

### 3.2 EMD 非定常風モデル

Xu 等<sup>\*1</sup>による非定常風モデルは、長い対象時間の平均風速変動をモデル化するのに適している。表 2 に乱れ強さについて EMD 手法と定常風モデルとの比較を示す。表より 60 分間の評価に対して EMD 手法の優位性が確認出来る。

## 4. 非定常風速の一般化と模擬風速作成

非定常風速に対する荷重評価を行う上で、「荷重指針<sup>\*2</sup>」による評価時間 10 分間を採用する。3.1 節より、10 分間に対する平均成分は線形的に近似可能な事から、本研究では線形近似風モデルに基づく非定常風速の一般化と模擬風速の作成を行う。非定常風の一般化のため、図 1 に示された台風について風速変化率を新たに定義する。

$$U_{CR} = \left| \frac{\bar{U}(t)_{\max \text{ or } \min} - \bar{U}}{\bar{U}} \right| \quad (3)$$

各台風サンプルから得られた最大風速前後 60 分の変化率・発生確率を表 3, 4 に示す。表より風速の変化率はおおよそ 0% - 30% の間で推移している事が確認できる。

次に非定常変化時のスペクトル特性について図 3 に示す。図よりスペクトル形状は一定平均風速による理論値に近いのに対して、ピーク位置がやや高周波数側に移行している事を確認できる。この傾向はサンプルが観測地近くを通過したデータで特に確認出来た。そこで、線形近似風モデルに基づく非定常模擬風速を作成するにあたり、風速平均成分の変化に比例したスペクトル

ピーク位置の変化を組み込む。この時スペクトル形状は「荷重指針<sup>\*2</sup>」によるパワースペクトル密度に従うとし、時間変化する平均成分を三角級数モデルに代入し、求めた。風速は再現期間 500 年に相当するレベルとして「荷重指針<sup>\*2</sup>」の再現期間換算係数を用いて頂部風速  $U_H = 65.9(\text{m/s})$  とした。対象建物と想定立地条件を図 4 に示す。図 5 にシミュレートされた単調増加モデル (Type A)、逆 V 字モデル (Type B) の風力を、図 6 に模擬風速内でのスペクトルピーク位置変化の範囲を示す。図 5 に示す風速変化率は 50% である。模擬風力波形は 1 波形につき 0.5 秒刻み 1200 ステップで作成した。

## 5. 非定常変動模擬風力による応答評価

解析モデルは、減衰定数  $h$  をパラメータとし、1 次モードの風応答のみに着目し、水平 1 自由度の 1 質点モデルにより行った。振動モデルの質量と外力は、建物の 1 次固有振動モードを頂部 1 とした直線モードであると仮定し、1 次のモーダル質量とモーダル外力を与えた。(図 4)

本研究は、時間変化する平均成分に対応したスペクトル解析による最大変位応答を推定するため、「建築物の耐風設計<sup>\*3</sup>」による式に最大風速時間帯を推定する補正係数と風速変化率を加えた (4) 式を提案する。

$$x(t)_{\max} = \frac{9}{10} \left( \bar{x}(t)_{\max} + (1 + U_{CR}) k_p \sigma_x \right)$$

$$\bar{x}(t) = \frac{F_q(t)}{k} \quad (4)$$

$\bar{x}(t)$  : 時間変化する平均成分による変位,  $k_p$ : ピークファクター,  $\sigma_x$ : 応答標準偏差,  $k$ : 建物水平剛性

(4) 式による応答計算値と時刻歴応答計算値の比較を、風速変化率 50%, 25% 毎にそれ

表 5 減衰定数, 風力別最大変位応答 風速変化率 50%

模擬風力モデル	Type A(単調増加)		Type B(逆V字)		Type C(定常)	
	時刻歴	スペクトル	時刻歴	スペクトル	時刻歴	スペクトル
h=0.01	145cm	161cm	150cm	165cm	86cm	96cm
h=0.02	135cm	134cm	133cm	135cm	76cm	78cm
h=0.05	113cm	108cm	114cm	110cm	64cm	62cm
h=0.10	105cm	97cm	105cm	98cm	57cm	55cm

表 7 応答誤差率 風速変化率 50%

Type A(単調増加)		Type B(逆V字)	
時刻歴	スペクトル	時刻歴	スペクトル
168%	168%	173%	172%
178%	172%	176%	174%
176%	174%	178%	176%
185%	176%	185%	178%

表 6 減衰定数, 風力別最大変位応答 風速変化率 25%

模擬風力モデル	Type A(単調増加)		Type B(逆V字)		Type C(定常)	
	時刻歴	スペクトル	時刻歴	スペクトル	時刻歴	スペクトル
h=0.01	106cm	117cm	110cm	119cm	86cm	96cm
h=0.02	94cm	95cm	94cm	97cm	76cm	78cm
h=0.05	81cm	78cm	82cm	79cm	64cm	62cm
h=0.10	75cm	70cm	73cm	71cm	57cm	55cm

表 8 応答誤差率 風速変化率 25%

Type A(単調増加)		Type B(逆V字)	
時刻歴	スペクトル	時刻歴	スペクトル
123%	122%	128%	124%
124%	123%	124%	125%
127%	126%	128%	128%
132%	127%	128%	128%

ぞれ表 5, 6 に示す。参考値として、定常模擬風力による応答値を Type C として併記する。スペクトル解析値、時刻歴解析値は共に 50 波による応答値のアンサンブル平均によって求め、各応答値を評価した。表より、風速変化率に関わらず、(4) 式による応答値と時刻歴応答解析による応答値の間にばらつきが少なく、応答期待値としての提案式の妥当性を確認できる。

次に、一定平均風速による定常風モデルとの応答誤差率を検証する。応答誤差率は、定常模擬風力 (Type C) による最大値  $x_{max}$  に対する非定常模擬風力 (Type A, B) による最大値  $x(t)_{max}$  として以下に定義する。

$$Er = \frac{x(t)_{max}}{x_{max}} \quad (5)$$

(5) 式によるモデル毎の応答誤差率を表 6, 7 に示す。表より、応答誤差率は風速タイプ、減衰定数によらず風速変化率毎におよそ一定の値を取ることが確認できる。

## 6. まとめ

本研究は、従来の定常風モデルに対する荷重評価に対して、時間変化する平均成分を考慮した非定常風モデルによる荷重評価

を明らかにする事を目的に行われた。以下に、本研究から得られた知見をまとめる。

3 章では、風速の非定常風が強い事象に対して、線形近似モデルもしくは EMD 非定常風モデルによる風速のモデル化を提案した。この時、線形近似風モデルは 10 分間に対して有効であるのに対して、EMD 非定常風モデルは 60 分間と長い時間に対して有効であることを示した。

4 章では、評価時間 10 分間に対する非定常模擬風速を提案した。非定常模擬風速の一般化は、一定平均風速に対する風速変化率によって定義される。時間変化する平均風速成分に対してスペクトルピーク位置を時々刻々と変化させる事で、模擬風速に非定常風特性を反映した。

5 章では、非定常模擬風力に対してスペクトル解析による応答予測式を提案した。提案式は最大風速発生確率の高い評価時間を特定する補正係数と風速変化率を従来の式に加えることで、応答値を推定する。

## 参考文献

\*1 Xu, Chen Characterizing Non-stationary Wind Speed Using Empirical Mode Decomposition Journal of Structural Engineering, (2004)

\*2 日本建築学会 建築物荷重指針・同解説 2004

\*3 大熊, 神田, 田村 建築物の耐風設計 1996