

強風時変動風速の異方向成分間の相関特性 : ある島しょ部高度200mまでの強風観測記録の分析

藤村, 真弓
九州大学大学院人間環境学府都市共生デザイン専攻博士後期課程

前田, 潤滋
九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門

森本, 康幸
九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門

<https://doi.org/10.15017/19125>

出版情報 : 都市・建築学研究. 15, pp.49-54, 2009-01-15. 九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門
バージョン :
権利関係 :

強風時変動風速の異方向成分間の相関特性 —ある島しょ部高度200mまでの強風観測記録の分析—

Cross-correlation between Longitudinal and Lateral Components of Strong Winds
—Analysis of Strong Wind Records up to Height of 200m at Some Place of Island—

藤村真弓*, 前田潤滋**, 森本康幸**

Mayumi FUJIMURA, Junji MAEDA and Yasuyuki MORIMOTO

We report on the structure of atmospheric turbulence especially focusing on the spatial correlations of three fluctuating components of wind speed using our records measured at a transmission tower located at the tip of a cape. According to our results, the profiles of the longitudinal and lateral wind speeds due to typhoons were different from those due to non typhoons. And we showed that cross-correlations between the longitudinal and vertical lateral components of the fluctuating wind speeds were explained by the theoretical expressions in the isotropic turbulence theory, using the correlation coefficients of the longitudinal and vertical lateral components normalized by the longitudinal scale of turbulence of the longitudinal wind speed.

Keywords: Transmission tower, Strong wind observation, Turbulence structure, Cross-correlation
送電鉄塔, 強風観測, 乱流構造, 相互相関

1. はじめに

送電鉄塔と架渉線との連成系の強風応答計算法には、周波数応答手順に基づくガスト影響係数法と逐次積分を実施する時刻歴応答法とが知られている¹⁾。ここでは風速場の風速変動成分に縦方向成分(いわゆる主風方向成分 u)のみを取り扱うのが一般的であるが、風速増加に伴う送電線面の傾斜の増大は送電線剛性の非線形性を顕著にさせ、場合によっては、風速の鉛直横方向成分(w)を無視できなくなると考えられる²⁾。一方、台風や竜巻などによる飛散物の外装材や壁面への被害が注目されているが、森本ら³⁾は飛散物の飛散距離に及ぼす変動風速の縦方向成分の影響を検討し、乱れの強さが大きいほど最大飛散距離が大きくなることを試算している。強風下での構造物応答や飛散物の飛散状況を考える上で変動風速が重要なパラメータとして認識される場合は少なくないが、変形増加に伴って幾何学的非線形性が顕著になる送電線の動的応答²⁾や飛散物の飛跡に及ぼす風速変動全体の影響を明らかにするためには、変動風速の縦方向成分のみならず水平横方向成分(v)や鉛直横方向成分(w)を含む風速3成分の多次元変動風速場での強風応答シミュレーションを行う必要がある。自己回帰モデル⁴⁾を用い

て3成分変動風速場を生成シミュレートする場合には変動風速の相互相関関数が必要となるが、同方向成分間(u 成分間, v 成分間, w 成分間)の相関関係に関して前田ら⁵⁻⁷⁾の研究を始め多くの研究が報告され、変動風速の同方向成分間の相互相関関数は定式化されている⁸⁾。一方、異方向成分間(u 成分と v 成分間, u 成分と w 成分間, v 成分と w 成分間)の相関関係について、 u 成分と v 成分および v 成分と w 成分の相関係数は十分小さく無視でき、 u 成分と w 成分の相関係数はレイノルズ応力として定式化されている⁸⁾。しかしながら、 u 成分と w 成分の相互相関関数は定式化されていない。

本論では、ある島しょ部先端に位置する高さ200mの送電鉄塔での強風実測データを用いて、とくに変動風速の縦方向成分(u)と鉛直横方向成分(w)の2成分の異方向成分間の相関関係を等方性乱流場の経験式と比較整理し、3成分変動風速場のシミュレーション実施のための乱流構造の情報を提供する。なお、本報告は鉄塔自身の強風応答に関する内容を主とした文献⁹⁾を、強風下での風速成分間の特性に着目して再構成したもので、鉄塔自身の動特性等については既報告¹⁰⁻¹³⁾を参照するものとした。

* 都市共生デザイン専攻 博士後期課程
** 都市・建築学部門

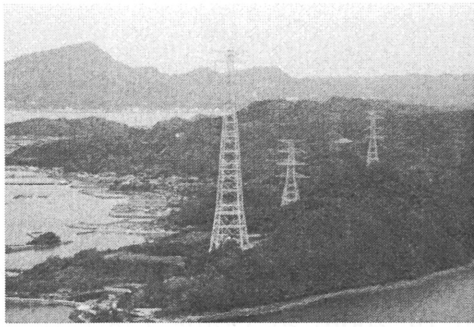


写真1 観測鉄塔の遠景

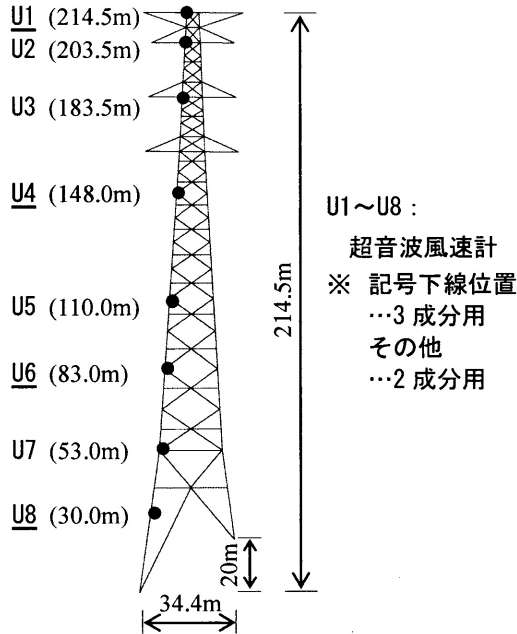


図2 風速計設置位置

2. 強風観測の概要

2.1 観測鉄塔と周辺地形

観測に用いた鉄塔は熊本県天草上島の南東部の海拔50mの島しょ先端に位置し、島しょの西斜面に片継ぎ足で立っている高さ214.5mの500kV中空鋼管懸垂型鉄塔である(写真1)。観測鉄塔と方位の関係は図1に示すとおりで、鉄塔北側は丘陵が連なり、南側と東側および西側は海に囲まれているが、東側は島しょの丘陵部が20m程度鉄塔片継ぎ足側の下部を遮っている。

2.2 観測記録の概要

観測鉄塔周辺の風況を観測するために、超音波風速計8器(3成分用4器と2成分用4器)を観測鉄塔の支柱材から支柱材の直径の3倍程度離して設置した(図2, 写真2)。計測のサンプリング周波数は120Hzである。強風観測を1996年から1997年にかけて非台風時および台風時に実施したが、以下で検討する観測名を表1に、また台風の経路を図3に示す。各強風観測の風向別サンプル数を表1に示すが、南風および西風に関するデータが多い。ここに、1サンプルの時間長さは600secで、U2風速計の平均風速が10m/s以上の記録を対象とした。なお、塔頂に設置したU1風速計の風速記録は風速計近傍にあった航

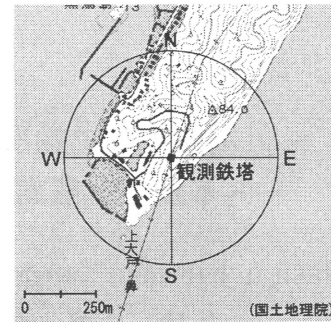


図1 観測鉄塔周辺地形と観測鉄塔と方位の関係

表1 観測サンプル数

強風成因	観測名	観測期間	サンプル数				合計
			N	E	S	W	
非台風	S9603.1	1996年3月7~8日	0	0	6	3	9
	S9603.2	1996年3月30日	0	0	12	8	20
台風	T9606	1996年7月18日	4	0	0	3	7
	T9612	1996年8月14日	0	4	1	3	8
	T9708	1997年6月28日	0	0	11	4	15

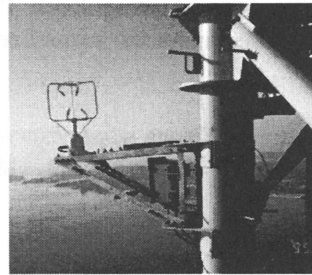


写真2 風速計支持台

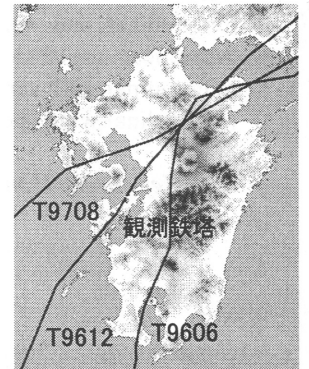


図3 台風経路

空灯の影響を強く受けたため、本報告の検討から除外した。

3. 強風成因による風速3成分の鉛直分布特性の比較

著者らは、台風9612号通過時の観測記録から現地での風況特性を風向別に検討し、地形の影響を受けにくいと考えられる南西の風向では、上空になるほど風速3成分の乱れの強さが等しくなることや、縦方向成分(u)、水平横方向成分(v)および鉛直横方向成分(w)の乱れのスケールが ${}^xL_u: {}^xL_v: {}^xL_w=2:1:1$ に近づくことなどから、地表面付近を除いて等方性乱流場の特性に近づくことを報告している¹¹⁾。本節では、表1に示す観測記録のうち送電鉄塔が風下側となる西風の観測記録を検討対象として、平均風速の鉛直分布や風速3成分の乱れの強さおよび乱れのスケールの高度変化などについて、台風時と非台風時の強風成因別の比較検討を行う。検討では各風速計における観測結果を箱ひげ図で表記し、最小値、第1四分点、中央値、第3四分点および最大値を用いた。

3.1 平均風速と最大瞬間風速の鉛直分布

図4にU2平均風速に対する各風速計の平均風速比

\bar{U}/\bar{U}_{U2} の箱ひげ図を、図5にU2最大瞬間風速に対する各風速計の最大瞬間風速比 $U_{\max}/U_{\max U2}$ の箱ひげ図を示す。さらに、各標本中央値の鉛直分布をU2設置高さを基準高さとして最小二乗法によりべき指数近似して得られたべき指数を表2に示す。強風成因別に見ると、平均風速と最大瞬間風速のべき指数はともに台風時の方が非台風時に比べて小さく、より立った鉛直分布であることが分かる。べき指数は地表面の状態や大気安定度などによって大きく異なるが^{14, 15)}、ここでは同じ風向で検討しているので、台風時と非台風時の差違は地表面粗度以外の要因と考えられる。

3.2 乱れの強さと乱れのスケールの鉛直分布

乱れの強さ I の鉛直分布の箱ひげ図を図6に示す。強風成因によらず、 u 成分と v 成分は同程度、 w 成分がその2分の1程度の乱れの強さを持つことがわかる。また、各成分の鉛直分布を強風成因別に比較すると、非台風時ではU5風速計を境にして分布の様子が異なることがわかる。一般に乱れの強さの鉛直分布は高さのべきで表現されるが、上空までの全層を一つのべき指数では十分な近似ができないとする報告もある¹⁶⁾。この報告内容は、今回の分析では台風時に比べて非台風時の乱れの強さの鉛直分布特性により当てはまると言える。

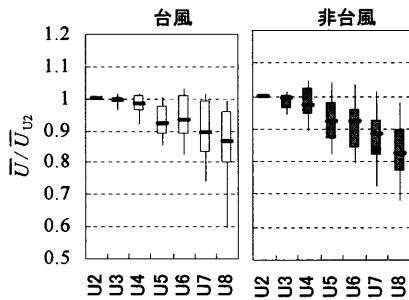


図4 平均風速比の鉛直分布

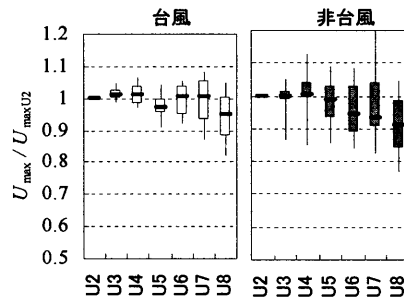


図5 最大瞬間風速比の鉛直分布

表2 べき指数

	台風	非台風
平均風速	0.08	0.10
最大瞬間風速	0.02	0.05

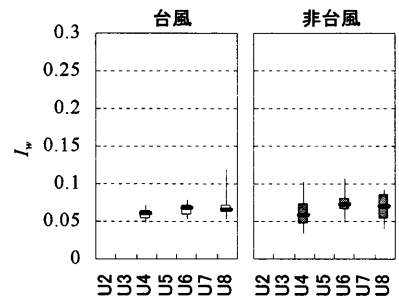
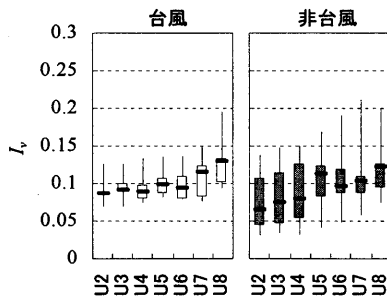
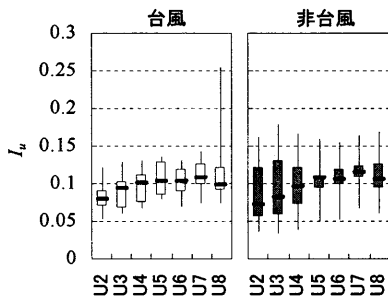


図6 乱れの強さの鉛直分布(左から u , v , w 成分)

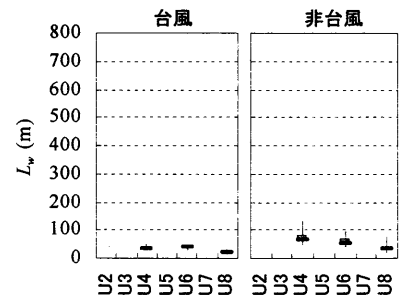
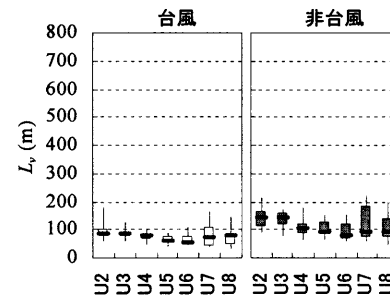
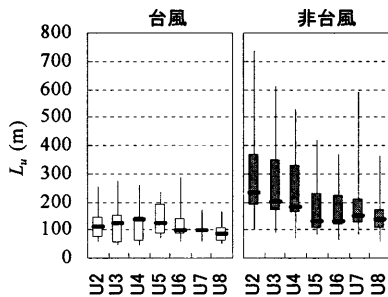


図7 乱れのスケールの鉛直分布(左から u , v , w 成分)

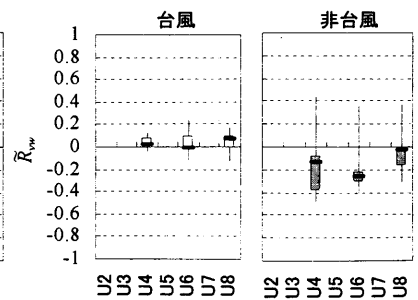
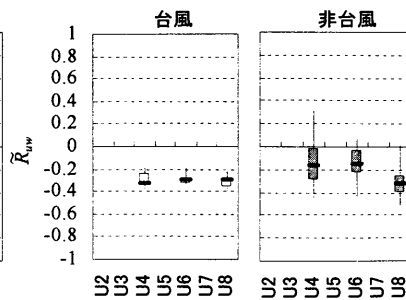
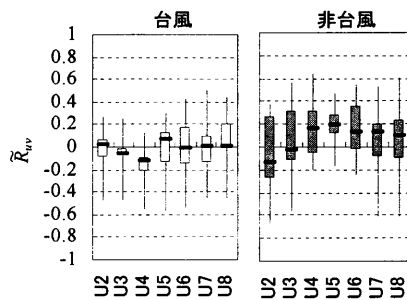


図8 異方向成分間の相関係数の鉛直分布(左から $u-v$, $u-w$, $v-w$)

各変動風速成分の主風向 x 軸の乱れのスケール L の鉛直分布を図7に箱ひげ図で示す。すべての乱れのスケールにおいて、非台風時の方が乱れのスケールは大きく、大熊らの報告¹⁷⁾とは異なる。また、台風時では乱れのスケールが U4 風速計より上方で変化しないのに対し、非台風時には高さに伴い増大し、強風成因によって鉛直分布特性が異なった。このような特徴は平均風速および最大瞬間風速の鉛直分布特性と同様の傾向を示した。

3.3 異方向成分間の相関係数の鉛直分布

図8に変動風速の異成分間の相関係数 \tilde{R} の箱ひげ図を示す。強風成因によらず、 u 成分と w 成分の相関係数はその他の相関係数に比べて絶対値が大きく ESDU74031⁸⁾ の記述と一致する。しかしながら、非台風時の高さ 80m から 150m の中間層における相関係数の絶対値は台風時に比べて若干大きいことがわかる。

4. 変動風速の縦方向成分と鉛直横方向成分の相関関係

上述のように、変動風速の u 成分と w 成分の相関係数の絶対値が他の組み合わせに比べて大きいので、3 成分変動風速場を生成する場合、 u 成分と w 成分の相互相関関係を主として考慮する必要がある。観測記録のうち西

風で U2 平均風速が 20m/s 以上の計 3 つのサンプルを用いて、式(1)で定義する 2 点 A, B(図9)の変動風速の u 成分と w 成分の相互相関係数 $\tilde{R}_{uw}^c(\zeta, \tau)$ を、相関係数 $\tilde{R}_{uw}^c(0,0)$ と同一点の相互相関係数 $\tilde{R}_{uw}^c(0, \tau)$ および鉛直横方向 2 点間の空間相関係数 $\tilde{R}_{uw}^c(\zeta, 0)$ を用いて検討する。

$$\tilde{R}_{uw}^c(\zeta, \tau) = R_{uw}^c(\zeta, \tau) / \left(\sqrt{u^2} \sqrt{w^2} \right) \quad (1)$$

$$R_{uw}^c(\zeta, \tau) = E[u(z, t)w(z + \zeta, t + \tau)]$$

ここに、 ζ および τ はそれぞれ 2 点間の鉛直距離と time lag である。

4.1 相関係数 $\tilde{R}_{uw}^c(0,0)$

u 成分と w 成分の相関係数 $\tilde{R}_{uw}^c(0,0)$ の鉛直分布を図10にサンプル別に示す。図からわかるように、どのサンプルにおいても相関係数は -0.3 ~ -0.4 で、高さ方向でほとんど変化しない。図中には各サンプルの観測値を用いて ESDU74031⁸⁾ の算定式(式(2))より算定した値を併記しているが、実測値と算定値はよく対応することがわかる。

$$\tilde{R}_{uw}^c(0,0) = -\frac{0.16}{F_u F_w} \left[1 - \frac{f \cdot \bar{z} \cdot \sin \alpha_G}{\bar{V}_G (V_* / \bar{V}_G)^2} \right] \quad (2)$$

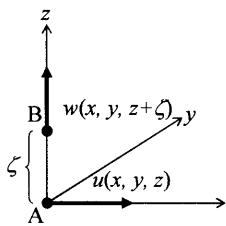


図9 2点 A, B の位置関係

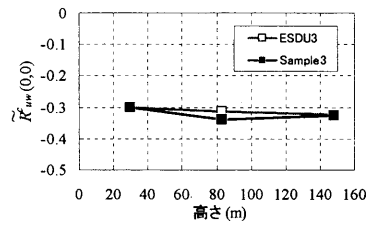
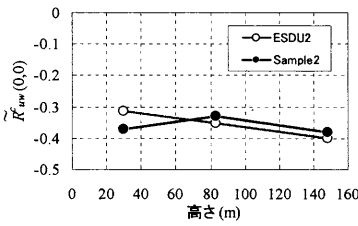
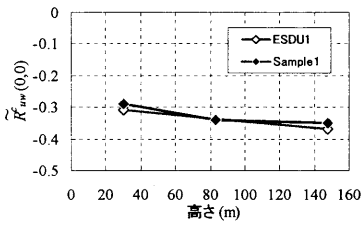


図10 u 成分と w 成分の相関係数(左から Sample1, 2, 3)

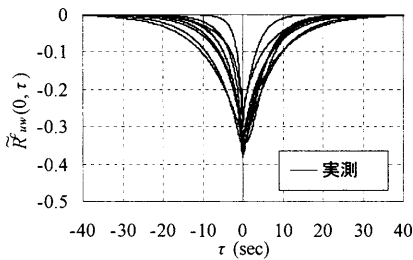


図11 $u-w$ の同一点の相互相関係数

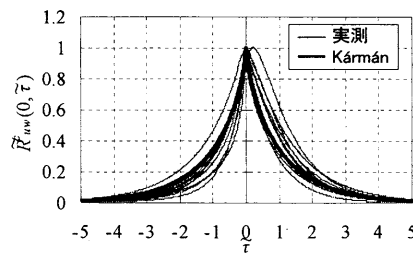


図12 無次元 time lag に対する $u-w$ の同一点の相互相関係数比

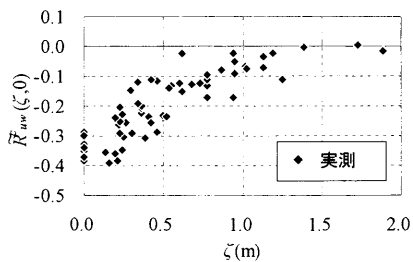


図13 $u-w$ の鉛直横方向 2 点間の空間相関係数

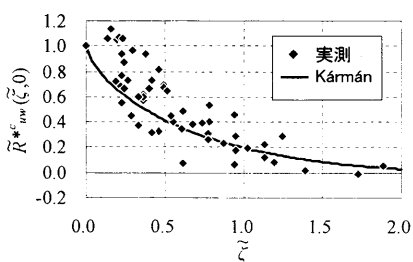


図14 無次元距離に対する $u-w$ の鉛直横方向 2 点間の空間相関係数比

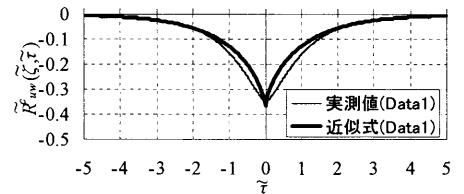


図15 実測値と近似式の比較(Data1)

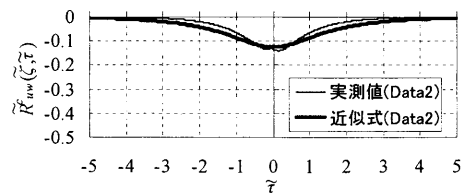


図16 実測値と近似式の比較(Data2)

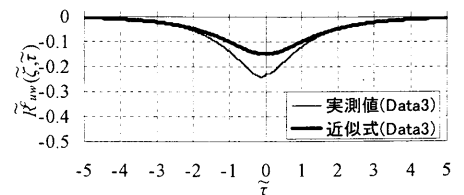


図17 実測値と近似式の比較(Data3)

表3 比較データの諸元

DataNo.	SampleNo.	u成分	w成分	ζ
1	1	U4	U4	0.00
2	3	U3	U6	0.55
3	1	U4	U6	0.50

ここに、

$$F_u = [0.867 + 0.556 \log \bar{z} - 0.246(\log \bar{z})^2] \cdot \lambda,$$

$$F_w = 0.381 + 0.172 \log \bar{z} - 0.062(\log \bar{z})^2,$$

$$\lambda = 0.76/z_0^{0.07}, \quad V_s/\bar{V}_G = (0.31/\log Ro) - 0.012,$$

$$\alpha_G = 58 - 5 \log Ro, \quad Ro = \bar{V}_G/(fz_0),$$

\bar{z} : ゼロ面変位からの高さ(=観測点の地上高 h m), \bar{V}_G : 境界層高さの平均風速(=U2 風速計の平均風速), z_0 : 粗度長(=0.1m)¹⁸⁾, f : コリオリ因子である。

4.2 同一点の相互相関係数 $\tilde{R}_{uw}^c(0, \tau)$

u 成分と w 成分の同一点の相互相関係数 $\tilde{R}_{uw}^c(0, \tau)$ を図 11 に示す。なお、相互相関係数は AR 法を用いて算出し、AR 次数は最小 FPE 基準により決定した⁴⁾。図より、同一点の相互相関係数は $\tau = 0$ に関してほぼ対称であることがわかる。さらに、相互相関係数の統計的性質を評価するために、式(3)で定義する相互相関係数比 $\tilde{R}_{uw}^{*c}(0, \tau)$ を無次元 $time\ lag\ \tilde{\tau} = \bar{U}\tau/L_u$ ⁶⁾ に対してプロットしたものを図 12 に示す。また、図中に無次元 $time\ lag$ に対する Kármán 型の縦方向の空間相関係数⁴⁾を示す。

$$\tilde{R}_{uw}^{*c}(0, \tau) = \tilde{R}_{uw}^c(0, \tau) / \tilde{R}_{uw}^c(0, 0) \quad (3)$$

図 12 より、 u 成分と w 成分の同一点の相互相関係数比は、無次元 $time\ lag$ 算定に用いる縦方向の乱れのスケールに u 成分の縦方向の乱れのスケールを用いれば、統計的性質を統一的に評価でき、Kármán 型の縦方向の空間相関係数に非常によく対応することがわかる。

4.3 空間相関係数 $\tilde{R}_{uw}^c(\zeta, 0)$

u 成分と w 成分の空間相関係数 $\tilde{R}_{uw}^c(\zeta, 0)$ を図 13 に示す。図 13 には $\tilde{R}_{uw}^c(\zeta, 0)$ も併せてプロットしている。空間相関係数 $\tilde{R}_{uw}^c(\zeta, 0)$ は 2 点間距離が増大するにつれて 0 に近づくことがわかる。さらに、空間相関係数の統計的性質を評価するために、式(4)で定義する空間相関係数比 $\tilde{R}_{uw}^{*c}(\zeta, 0)$ を無次元距離 $\tilde{\zeta} = \zeta/L_u$ ⁶⁾ に対してプロットしたものを図 14 に示す。図 14 には $\tilde{R}_{uw}^{*c}(\zeta, 0)$ も併せてプロットしている。ここで、算定に用いる縦方向の乱れのスケールは、2 点の平均値を用いた。また、図中に無次元距離に対する Kármán 型の横方向の空間相関係数⁴⁾を示す。

$$\tilde{R}_{uw}^{*c}(\zeta, 0) = \tilde{R}_{uw}^c(\zeta, 0) / \tilde{R}_{uw}^c(0, 0) \quad (4)$$

図 14 より、 u 成分と w 成分の空間相関係数比は、ばらつきはあるが無次元距離増大とともに減少する傾向がみられる。無次元距離が 0 より大きくて空間相関係数比が 1 を超えているデータがいくつかあり、これらは主に U6

風速計 w 成分と U5 風速計 u 成分の相関を示したものであるが、1 を超える原因は明らかではなく、原因究明は今後の検討課題の一つである。また無次元距離算定に異なる 2 点の u 成分の縦方向の乱れのスケールの平均値を用いた場合、無次元距離に対する Kármán 型の横方向の空間相関係数は、実測値のほぼ中央値を捉えていることがわかる。

4.4 相互相関係数 $\tilde{R}_{uw}^c(\zeta, \tau)$

4.2 節と 4.3 節の考察結果より、無次元量算定に u 成分の縦方向成分の乱れのスケールを用いれば、変動風速の u 成分と w 成分の相関係数に ESDU の算定式を、同一点の相互相関係数比および鉛直横方向 2 点間の空間相関係数比に Kármán 型の空間相関係数式を適用できるので、変動風速の u 成分と w 成分の相互相関係数 $\tilde{R}_{uw}^c(\zeta, \tau)$ は、次式のように近似できると考えられる。

$$\tilde{R}_{uw}^c(\zeta, \tau) = \tilde{R}_{uw}^c(0, 0) \alpha \left\{ |a\tilde{r}|^{1/3} K_{1/3}(|a\tilde{r}|) - 0.5 \times |a\tilde{r}| K_{-2/3}(|a\tilde{r}|) \right\} \quad (5)$$

ここに、 $\alpha = 0.5926$, $a = 0.7468$, $\tilde{r} = (\tilde{\tau}^2 + \tilde{\zeta}^2)^{0.5}$, $K_\mu(z)$: μ 次の第 2 種変形 Bessel 関数である。

u 成分と w 成分の相互相関係数の実測値と近似式を比較した例を図 15~17 に示す。なお相関係数は 2 点の平均値を用い、比較データの諸元を表 3 に示す。無次元距離が 0 の場合、近似式は実測値をよく捉えている。一方、無次元距離が約 0.5 の場合、Data2 では近似式が実測データをよく捉えているが、Data3 では捉えられていない。このことは図 14 に示す鉛直横方向 2 点間の空間相関係数比の実測値のばらつきを反映したものであると考えられる。

5. まとめ

島しょ部に位置する高さ 200m の送電鉄塔で行った強風観測記録から上空 200m までの乱流構造の鉛直分布特性を強風成因別に検討し、以下の所見を得た。

- (1) 同一観測点での乱れの強さや乱れのスケールおよび相関係数の大きさは台風時と非台風時で差が見られるが、変動風速 3 成分の構成比は台風時と非台風時でほとんど差が見られなかった。
- (2) 平均風速と最大瞬間風速のべき指数は非台風時の方が大きく、観測高度内では非台風時の乱れの強さは地上高約 100m を境に鉛直分布形状が異なり、非台風時の乱れのスケールが高さと共に増大するなど、強風成因によって鉛直分布特性に違いが見られた。また、観測結果から相関係数の絶対値が大きいと確認された変動風速の u 成分と w 成分の相互相関関係を検討し、以下の所見を得た。
- (3) u 成分と w 成分の相関係数は ESDU 算定式によく対応した。

- (4) 無次元 *time lag* 算定に u 成分の縦方向の乱れのスケールを用いれば、同一点の相互相関係数比は Kármán 型の縦方向の空間相関係数によく対応した。
- (5) 鉛直横方向 2 点間の空間相関係数比は無次元距離の算定に 2 点の u 成分の縦方向の乱れのスケールの平均値を用いれば、Kármán 型の横方向の空間相関係数によく対応した。
- (6) 実測値の鉛直横方向 2 点間の空間相関係数比のばらつきを考慮すれば、以上の検討結果より提案した u 成分と w 成分の相互相関係数の近似式は実測値をよく捉えていると言え、本報告で提案した近似式を用いれば 3 成分変動風速場を生成シミュレートすることが可能となる。

参考文献

- 1) 漆原育男, 石川智巳, 清水幹夫, 三上康朗, 中村秀治, 本郷栄次郎, 箕田義行: 特殊地形における送電用鉄塔・架渉線連成系の耐風設計に関する研究, その 4 送電鉄塔・架渉線連成系の風応答特性と風荷重算定法, 日本風工学会誌, 第 83 号, pp.129-140, 2000 年 4 月.
- 2) Fujimura, M., Maeda, J., Morimoto, Y. and Ishida, N.: Aerodynamic damping properties of a transmission tower estimated using a new identification method, 12th International Conference on Wind Engineering Preprints-Vol.1, pp.1047-1054, 2007.7.
- 3) 森本康幸, 前田潤滋: 球状飛来物の到達距離に及ぼす風速変動パラメータの影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1, pp.101-102, 2007 年 8 月.
- 4) 前田潤滋, 牧野稔: 変動風速のスペクトル計算法について—自己回帰法の利点と問題点—, 日本建築学会論文報告集, 第 300 号, pp.19-29, 1981 年 2 月.
- 5) 前田潤滋, 牧野稔: 大気乱流の平均流方向成分の統計的性質に関する研究—従来の提案式の等方性乱流理論に基づく分類とその基本的性質の比較検討—, 日本建築学会論文報告集, 第 287 号, pp.77-87, 1980 年 1 月.
- 6) 前田潤滋, 吉村健, 牧野稔: 強風時自然風の平均流方向変動風速の空間構造に関する実測的研究, 日本建築学会論文報告集, 第 311 号, pp.11-21, 1982 年 1 月.
- 7) Maeda, J. and Makino, M.: POWER SPECTRA OF LONGITUDINAL AND LATERAL WIND SPEED NEAR THE GROUND IN STRONG WINDS, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 28, pp.31-40, 1988.8.
- 8) Engineering Sciences Data Unit 74031: Characteristics of Atmospheric Turbulence near the Ground Part II: Single point Data for Strong Winds(neutral atmosphere), Item 74031, 1974.10.
- 9) 藤村真弓, 前田潤滋, 森本康幸, 石田伸幸: いくつかの同定手法を組み合わせた鉄塔—送電線連成系の空力減衰特性の分析, 都市・建築学研究 九州大学大学院人間環境学研究院紀要, 第 12 号, pp.77-82, 2007 年 7 月.
- 10) 前田潤滋, 今村義人, 森本康幸, 川島裕治, 矢沢麻由美, 石田伸幸: 強風時風速変動と高層鉄塔の動的応答との相互相関について—大戸ノ瀬戸海峡横断鉄塔による強風観測記録に基づいて—, 第 15 回風工学シンポジウム論文集, pp.251-256, 1998 年 12 月.
- 11) 前田潤滋, 矢沢麻由美, 川島裕治, 荊尾治邦: 大戸ノ瀬戸海峡横断鉄塔での T9612 号観測報告(その 1)—観測鉄塔周辺の風況特性—, 日本風工学会誌, 71, pp.19-20, 1997 年 4 月.
- 12) 川島裕治, 荊尾治邦, 矢沢麻由美, 前田潤滋: 大戸ノ瀬戸海峡横断鉄塔での T9612 号観測報告(その 2)—直接変位計測による鉄塔の強風時応答変位特性の考察—, 日本風工学会誌, 71, pp.21-22, 1997 年 4 月.
- 13) 前田潤滋, 森本康幸: 大戸ノ瀬戸海峡横断鉄塔での T9612 号観測報告(その 3)—直接計測変位による送電鉄塔用動的応答解析コードの検証—, 日本風工学会誌, 71, pp.23-24, 1997 年 4 月.
- 14) Counihan, J.: Adiabatic Atmospheric Boundary Layers, Atmospheric Environment, vol.9, pp.871-905, 1975.10.
- 15) 竹内清秀, 近藤純正: 地表に近い大気, 東京大学出版会, 1981 年 7 月.
- 16) Shiotani, M. and Iwatani, Y.: Correlations of Wind Velocities in Relation to the Gust Loadings, Proceedings of the 3rd International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures, Tokyo, Saicon Shuppan Co., pp.57-67, 1971.9.
- 17) 大熊武司, 丸川比佐夫, 百村幸男, 本郷栄次郎, 伊澤健: 山岳地における送電鉄塔の風応答—山岳地の風の性状, 第 12 回風工学シンポジウム論文集, pp.7-12, 1992 年 12 月.
- 18) 社団法人日本鋼構造協会: 構造物の耐風工学, p.375, 1997 年 11 月.

(受理:平成 20 年12月 4 日)