

複数ファン風洞による竜巻を想定した非定常気流の作成と 基本断面への非定常作用

Reproduction of non-stationary stream intended for tornado by multiple wind tunnel
and effect on basic cross section

学籍番号 47-106760

氏名 帯刀 良之 (Tatewaki, Yoshiyuki)

指導教員 神田 順 教授

1. 序

平成23年11月18日鹿児島県徳之島町轟木での被害報告のように、日本においても竜巻とみられる突風被害は発生しており、この場合、全壊1棟・死者3名と報告されている。一般に、竜巻は陸上の一地点を襲う確率が非常に小さく、竜巻を考慮した耐風設計は行われていない。しかし、原子力発電所など、長期の供用期間を要する建築物に対しては確率の小さな竜巻を考慮した設計が必要と考えられる。一方米国では、原子力施設に関する竜巻関連の指針に見られるように、一定の指針が整備されている。これらの現状から、日本においても竜巻を考慮した建築物の耐風設計の実用化を検討する必要があると考えられる。

2. 研究目的

本研究では、日本で発生する竜巻の性質や、荷重評価の為の風速・風向変化の把握を目的とし、次の3項目について検討を行う。1) 過去の竜巻被害について統計的な分析を行い、日本における設計用の仮想竜巻モデルを提案する。2) 竜巻発生装置を使用し、竜巻状風の風速・風向分布の把握を行う。3) 複数ファン風洞を使用し、短時間での風向変化という性質を持つ気流の作成と、短時間での風向変化が基本断面に対してどのような影響を及ぼすかを検証する。

Table.1 設計用仮想竜巻モデルのパラメータ

model	F scale	Wind speed (m/s)	movement (m/s)	radius (m)
Toyohashi	3	81	16.2	28.3
Mobara	3	81	20.9	80.0
Urawa	3	81	8.6	8.4
Saroma	3	81	28.8	30.2
Nobeoka	2	60	32.4	38.0
VF2	2	60	15.5	14.7
VF3	3	81	20.6	22.5
VF4	4	105	25.6	36.2
VF5	5	130	30.7	60.1

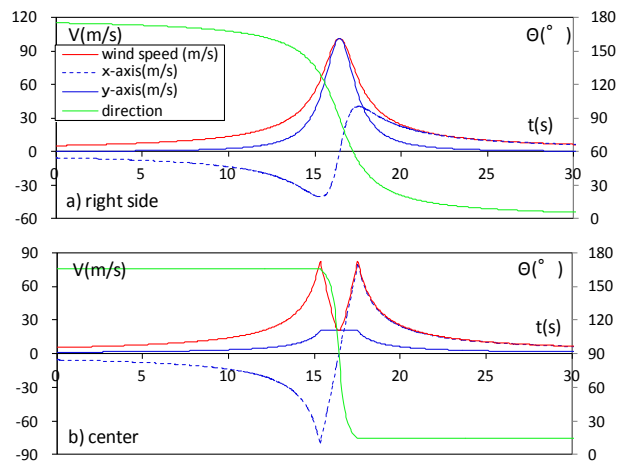


Fig.1 仮想竜巻モデルの時刻歴風速・風向変化

3. 日本における仮想竜巻モデルの提案

仮想竜巻モデルは帯刀ら(2011)が提案したモデルを使用する。これは1961年以降の竜巻等の突風事例について、統計的な被害調査結果が整備されている気象庁の気象統計情報「竜巻等の突風データベース」の記録を主に使用し、竜巻を左回りのRankine渦が円形状態を保った状態で、ある一定の速度を持って移動するものとしてモデル化したものである。

F スケールを基準尺度として日本における過去の竜巻被害の記録を反映させた仮想竜巻モデル(VF表記)を Table. 1 に示す。過去に記録的な被害を与えた竜巻のパラメータも併記する。

更に、提案した仮想竜巻モデルのパラメータを Rankine 渦に適用することにより、提案した竜巻モデル(VF3)の風速・風向の時刻歴変化を算出し、Fig. 1 に示す。これにより竜巻右側面が通過する最も風速が高い場合と、竜巻中心が通過する短時間で風速・風向が急激に変化する場合の 2 パターンが建築物に強く影響すると考えられる。

提案した竜巻モデルの強風域から、各都道府県の一年当たりの F2, 3 スケールの竜巻による甚大な被害が発生する確率を算出し、その確率の高いものから順に 10 例を Table. 2 に示す。

4. 竜巻状風の風速・風向分布の把握

竜巻状気流発生装置は、送風機を内蔵した「本体」と横方向に自走可能な「架台」から構成される。装置を Fig. 2 に示す。下降流に旋回性状を与えるガイドベーンが 18 枚送風機内に配置されており、法線方向に対する角度を任意に設定できる。架台の最大移動速度は 0.4m/s である。実験ではベーン角度 30° ファン回転数 8Hz、移移動速度;Vt をパラメータとして実験を行う。

渦静止時の Z-Z における風速分布を Fig. 5 に示す。渦のコア半径;R=100mm、最大接線風速;V_m=4.29m/s、進行方向に対して渦の中心は装置の中心から右側に 10mm ずれている事を把握した。

これらの値は相似則上、先に提案した仮想竜巻モデル VF3 に相当するものである。

Vt=0.1 時の風速・風向の時刻歴変化を

Table. 2 都道府県別の竜巻による被害発生確率

rank	place	probability			
1	Okinawa	1.85.E-05	6	Kochi	8.43.E-06
2	Miyazaki	1.51.E-05	7	Kanagawa	7.47.E-06
3	Chiba	1.13.E-05	8	Shizuoka	6.78.E-06
4	Aichi	1.13.E-05	9	Oita	6.49.E-06
5	Tokyo	1.10.E-05	10	Gunma	5.86.E-06

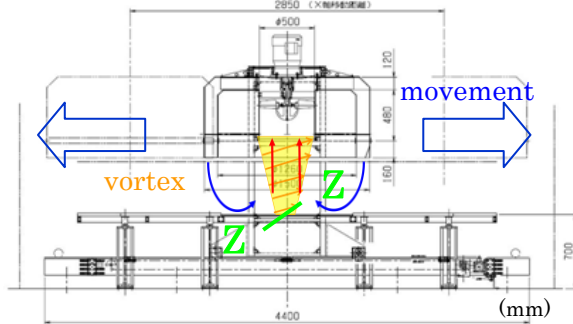


Fig. 2 竜巻状気流発生装置と渦生成の様子

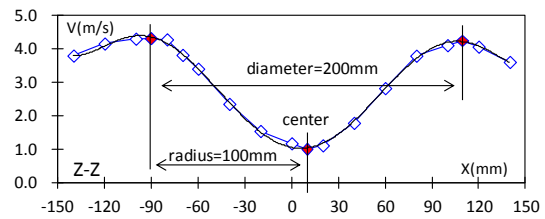


Fig. 3 Z-Z における風速分布

Fig. 4 に示す。実験の結果、Rankine 渦モデル(黒線)よりも、Shakeel (2009) らの理論式(以下 W. K モデル(赤線))の方が、より適切に竜巻状風の風速分布を再現している事を確認した。W. K モデルの理論式を式 (4. 1) ~ (4. 7) に示す。

$$\text{境界層厚さ; } \delta(r') = \delta_0 [1 - e^{-0.5r'^2}] \quad (4.1)$$

$$\text{中心距離係数; } r = r'/r_{\max} \quad \eta = z/\delta \quad (4.2)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{T;接線方向成分} \\ T(\eta, r) = f(r) = 1.4 \frac{V_{\max}}{r} [1.0 - e^{-1.256r^2}] \quad (4.3) \\ \text{W;鉛直方向成分} \\ W(\eta, r) = g(r) = 93.0r^3 e^{-5r} V_{\max} \quad (4.4) \end{array} \right\} \text{for } \eta > 1$$

$$\left. \begin{array}{l} T(\eta, r) = f(r) [1 - e^{-\eta}] \cos(2b\pi\eta) \quad (4.5) \\ \text{R=中心方向成分} \end{array} \right\}$$

$$R(\eta, r) = f(r) [0.672e^{-\eta} \sin\{(b+1)\pi\eta\}] \quad (4.6)$$

$$\left. \begin{array}{l} W(\eta, r) = g(r) [1 - e^{-\eta}] \cos(2b\pi\eta) \quad (4.7) \end{array} \right\} \text{for } \eta \leq 1$$

ここで δ_0 ;境界層高さ z ;地表面高さを示す。

5. 風速・風向変動による非定常作用

竜巻発生装置での実験結果より、Fig.4に示した風速・風向の時刻歴変化のうち、複数ファン風洞による風速・風向変動の部分的模擬気流を作成し、構造物への非定常作用を把握する。

複数ファン風洞は縦6段横3列の計18個の小型ファンを独立制御することで、測定洞内に風速・風向変動といった非定常性を有する気流を再現できる特殊な風洞である。風洞の概要をFig.5に示す。

風向変動を伴う気流を作成するには、複数ファンの上端と下端のファンをそれぞれ正回転・逆回転させることで風向を変化させる。その際の回転数のバランスを調整することで、測定点周辺で安定した風向の変化を可能にする。測定点の位置と風向変化のメカニズムをFig.6に示す。

本研究では最大風速5割程度の風速変化、風向変化 20° 程度として、定常流(st.1,st.2)、風速上昇のみ(st.3)、単純風向変化(st.4,st.5)、風速・風向の同時変化(st.6,st.7)、折り返し風向変化(st.8,st.9)の計9typeの気流を作成した。気流の一覧をTable.3に、例としてst.4の入力電圧と風速・風向の関係をFig.7に示す。測定は、1000Hzの30s計測とし、2回のアンサンブル平均結果を200個の移動平均として扱う。

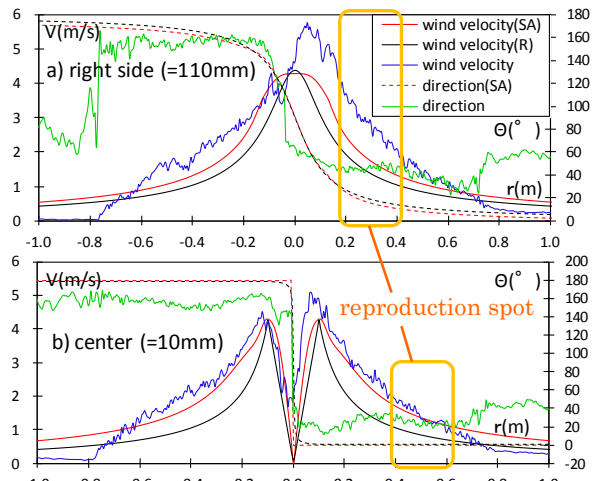


Fig. 4 渦モデルの比較と風速の時刻歴変化

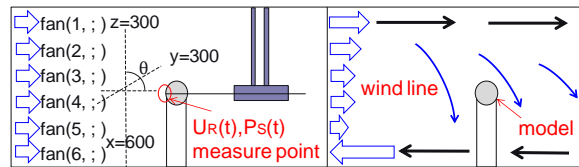


Fig. 6 測定点位置と風向変化のメカニズム

Table. 3 実験気流一覧

stream type	ΔU (m/s)	ΔD ($^\circ$)	Δt (s)	remarks
st.1	-	-	-	stationary (0.9m/s)
st.2	-	-	-	stationary (2.2m/s)
st.3	1.2	-	1	velocity only
st.4	-	23.4	1	direction only
st.5	-	24.7	1	direction only (reverse)
st.6	1.5	22.0	1	vel & dir
st.7	1.2	18.8	1	vel & dir (reverse)
st.8	-	21.0	2	direction only
st.9	-	21.8	2	direction only (reverse)

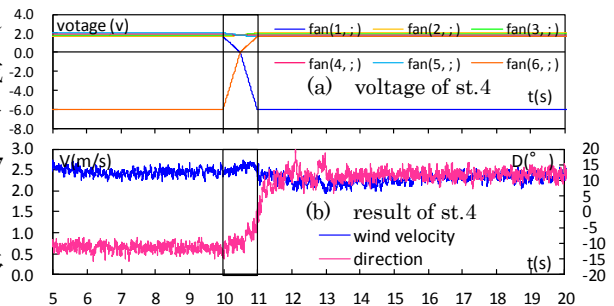


Fig. 7 実験気流例

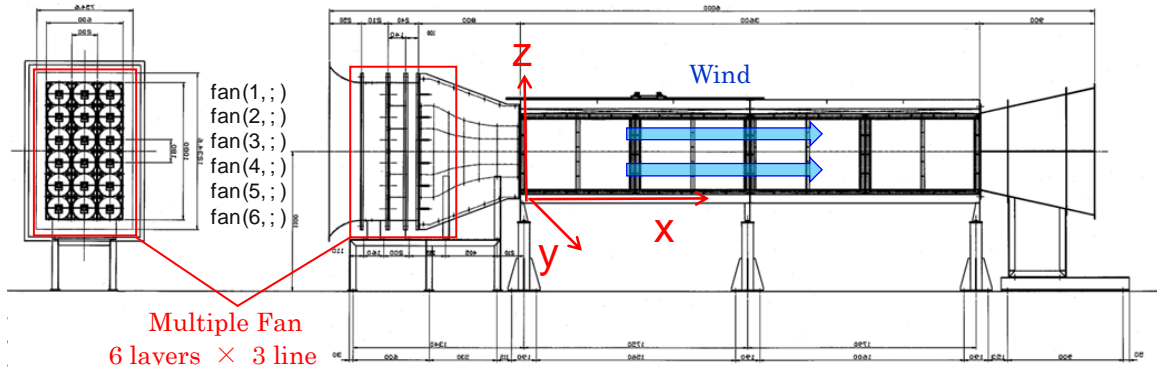


Fig.5 複数ファン風洞の図面と座標設定

6. 円柱・角柱模型による風圧測定

作成した気流による風圧測定実験を行う。設置する角柱模型の角度は $0\sim 45^\circ$ まで 5° 毎とし、計 90 通りの測定を行う。角柱模型の設置要領と角柱の風圧測定点について Fig.8 に示す。角柱模型において、風向が短時間で変化することで瞬間的に大きな負圧を計測した例の、気流変化前後の平均値と時刻歴変化の様子を Fig.9 に示す。

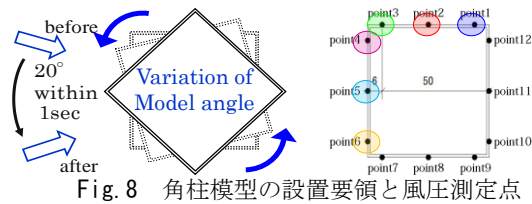


Fig. 8 角柱模型の設置要領と風圧測定点

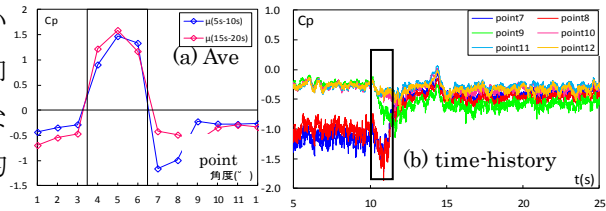


Fig. 9 模型角度 5° st.5 による風圧係数

次に風力係数を算出する。一般に風力係数は風方向に対して算出するが、本研究では非定常に風向が変化する事から、風圧模型を軸に x 方向風力係数、y 方向風力係数、捩じりモーメント係数という形で算出する。

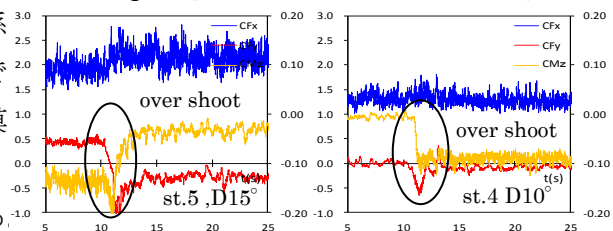


Fig. 10 オーバーシュート計測事例

気流変化前後でオーバーシュート現象を確認した例と、風向変化中に y 方向風力係数が大きく変動した例を Fig.11 示す。

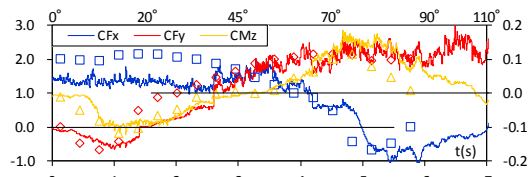


Fig. 11 風力係数の角度毎の推移

気流の風向変化と、模型の設置角度から、各時刻歴風圧係数を連続的に重ね合わせる事で、約 110° 風向が変化した場合の風力係数の推移が把握できる。算出した風力係数の角度毎の推移を Fig.12 に示す。

8. 竜巻による非定常作用の推定

これまでの結果から、竜巻が構造物に対して損害を与える際の、構造物と竜巻の位置関係を推定し、定常流と比較して竜巻による非定常作用がどの程度大きなものとなるか算出する。竜巻との位置関係を Fig.12 に、非定常作用評価を Table.4 に示す。

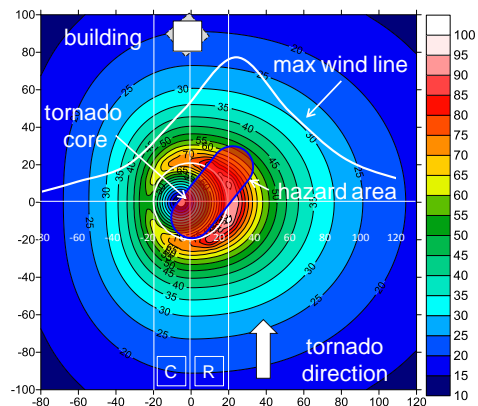


Fig. 12 竜巻風速分布と被害予測区域

9. 結

日本で起こる竜巻の風速場と被害の発生確率を算出し、竜巻により構造物が損傷する可能性が高い竜巻の風速域と、その非定常作用の程度を明らかにすることで、竜巻の非定常作用について、実現象に則した評価を行った。

Table. 4 非定常作用の評価

facter	tornado (over shoot)	stationary	rate	case
Cp	-1.97	-1.20	1.64	10° ,st.5,point7
CFx	1.59	1.18	1.35	40° ,st.4
CFy	-1.31	-0.05	26.20	10° st.5
CMz	-0.11	-0.04	2.75	0° ,st.4

【参考文献】

- 1) Ryo Terai, Jun Kanda, 2011, Non-stationary Wind Direction Simulation in Wind Tunnel with Computer-controlled Multiple Fans, ICWE13 Proceedings, 2) 喜々津仁密, 奥田泰雄, 河井宏允, 神田順“竜巻状気流発生装置の概要と基本特性”2010 年度日本建築学会大会(信州)