

# 竜巻被害風速推定に及ぼす気圧降下の影響に関する研究

高瀬 賢佑

## 1. 序

2012年5月6日に茨城県つくば市で発生した竜巻被害は国内では4例目となるフジタスケール F3と判定され、被害直後からさまざまな調査分析<sup>1,2)</sup>が行われた。とくに、国内ではこれまで記録がない RC べた基礎を引き連れた木造住家の転倒が注目され、その被害風速がいくつか推定されているが、風速が113m/s<sup>3)</sup>に及ぶとするものもあり、気象庁が判定したフジタスケール F3 (70-92m/s) を超えるものもある。現地での観測値が無い状況では、風速や気圧降下、あるいは転倒に至るまでの骨組の変形や挙動のいくつかの仮定のもとで、被害実態に相当する水平方向の定常風速を推定することは現実的であり、フジタスケールの判定にも必要である。しかしながら、竜巻通過時の急激な気圧降下が建物上屋を持ち上げる可能性を被害状況の分析から示した報告<sup>4)</sup>や、さらに10数秒の短時間内に起きた100hPa 程度の急激な気圧降下の観測例<sup>5)</sup>があり、竜巻による急激な風速や気圧の変化による非定常な外力の発生が構造物の被害風速の推定に及ぼす影響は小さくないと考えられる。本研究は、短時間での急激な気圧降下を考慮した被害風速を再算出し、その結果を比較・整理することで、気圧降下の影響の検討を行う。

## 2. 竜巻のモデル化

### 2.1 Rankine 渦モデルによる近似

米国原子力規制委員会 NRC の規制ガイド<sup>6)</sup>では、竜巻を Rankine 渦で簡易的にモデル化する方法が用いられている。Rankine 渦は、完全流体の2次元流れで外力のポテンシャルは重力のみの場合に成立するような理想的な渦モデルである。このとき、竜巻中心から  $r$  離れた位置の接線風速  $T(r)$  とその位置での気圧降下量  $\Delta P(r)$  は渦中心からの距離  $r$  と最大接線風速  $V_{Rm}$  および最大風速半径  $R_m$  を用いて次式(1)と式(2)で表せる。

$$T(r) = \begin{cases} V_{Rm} \frac{r}{R_m} & (r \leq R_m) \\ V_{Rm} \frac{R_m}{r} & (r \geq R_m) \end{cases} \quad (1)$$

$$\Delta P(r) = \begin{cases} -\frac{1}{2} \rho V_{Rm}^2 \left[ 2 - \left( \frac{r}{R_m} \right)^2 \right] & (r \leq R_m) \\ -\frac{1}{2} \rho V_{Rm}^2 \left( \frac{R_m}{r} \right)^2 & (r \geq R_m) \end{cases} \quad (2)$$

### 2.2 Wen のモデルによる近似

大気境界層が存在すると、Rankine 渦のような理想的な渦のバランスが保てなくなる。Wen の報告<sup>7)</sup>によると、竜巻の風速分布は境界層上下の領域で異なり、境界層高さ  $\delta$  を竜巻中心からの距離  $r$  を用いて次式(3)で定義する。

$$\delta(r) = \delta_0 [1 - \exp(-0.5r'^2)] \quad (3)$$

ここで、 $r' = r/r_{max}$ 、 $r_{max}$  は境界層上部領域での接線風速が最大となる竜巻中心からの距離、 $\delta_0$  は  $r' \gg 1$  のときの境界層高さである。

竜巻本体の接線方向、法線方向および鉛直方向の風速  $T$ ,  $R$ ,  $W$  は境界層上下の領域でそれぞれ次式(4)と式(5)で求められる。ただし、式(1)の  $T$  とは異なる点に注視が必要である。

- 境界層上部領域 ( $\eta = z/\delta > 1$ ) の場合

$$\begin{aligned} T(\eta, r') &= f(r') = 1.4 \frac{V_{max}}{r'} [1.0 - \exp(-1.256r'^2)] \\ R(\eta, r') &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

$$W(\eta, r') = g(r') = 93.0r'^3 \exp(-5r') V_{max}$$

- 境界層下部領域 ( $\eta = z/\delta \leq 1$ ) の場合

$$\begin{aligned} T(\eta, r') &= f(r') [1 - e^{-\pi\eta} \cos(2b\pi\eta)] \\ R(\eta, r') &= f(r') \{0.6721e^{-\pi\eta} \sin[(b+1)\pi\eta]\} \\ W(\eta, r') &= g(r') [1 - e^{-\pi\eta} \cos(2b\pi\eta)] \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 $z$  は地表面からの高さ、 $V_{max}$  は境界層上部領域での最大接線風速、 $b(r') = 1.2 \exp(-0.8r'^4)$  である。なお、 $r_{max}$  や  $V_{max}$  は、式(1)と(2)の  $R_m$  や  $V_{Rm}$  と意味するところが異なる場合があるため、同一の記号を用いなかった。境界層上部領域では  $T$  及び  $W$  とともに、 $z$  に因らず  $r$  のみによって定まる分布となり、Rankine 渦によく似た性質を持っている。

また、Wen の報告では、竜巻の気圧降下量に関する記述がされていない。そのため、本研究においては、気圧降下量  $\Delta P(r, z)$  を、Rankine 渦の式(2)を変形した次式(6)によって算出した。

$$\Delta P(r, z) = \begin{cases} -\frac{1}{2} \rho V_{Hmz=i}^2 \left[ 2 - \left( \frac{r}{R_{mz=i}} \right)^2 \right] & (r \leq R_{mz=i}) \\ -\frac{1}{2} \rho V_{Hmz=i}^2 \left( \frac{R_{mz=i}}{r} \right)^2 & (r \geq R_{mz=i}) \end{cases} \quad (6)$$

ここで、 $V_{Hmz=i}$  は高さ  $z=i$  における最大水平風速 (接線風速  $T$  と法線風速  $R$  の合成風速の最大値)、 $R_{mz=i}$  は高さ

$z = i \text{ m}$  で  $V_{Hmz=i}$  となる点の竜巻中心からの距離である。式(6)は、境界層上部領域では式(2)に一致する。

### 2.3 Rankine 渦モデルと Wen のモデルの比較

竜巻を Wen のモデルで近似し、 $V_{max} = 100\text{m/s}$ 、 $r_{max} = 50\text{m}$ 、 $\delta_0 = 460\text{m}$  とした場合の接線風速分布と気圧分布に加えて、法線風速分布をそれぞれ図 1(a)~(c)に示す。法線風速は水平風速算出に必要となるため併載した。このとき、 $\Delta P = 0$  は大気圧(1013hPa)を示している。次に、竜巻を Rankine 渦モデルで近似し、 $V_{Rm} = 100\text{m/s}$ 、 $R_m = 50\text{m}$  とした場合の接線風速分布と気圧分布を図 2(a)と図 2(b)に示す。なお、図 1 と図 2 中の濃淡は風速と気圧の大きさを示すもので図 1 のインデックスに従う。図 1(a)と図 2(a)に示すように Wen のモデルと Rankine 渦モデルの接線風速分布ともに、竜巻中心からの距離  $r$  がある値に近づくにつれて大きくなる点は同じであるが、Rankine 渦モデルはそのときの  $r$  が  $R_m$  であるのに対し、Wen のモデルはそのときの  $r$  が高さによって異なり、その  $r$  は  $r_{max}$  より小さい値となった。Rankine 渦モデルで  $V_{Rm} = 100\text{m/s}$  を設定すると接線風速が  $100\text{m/s}$  を超える箇所は存在しないが、Wen のモデルでは、 $V_{max} = 100\text{m/s}$  を設定した場合の接線風速が  $115\text{m/s}$  に及ぶ箇所も存在した。また図 1(c)に示すように法線風速は接線風速に比べると小さい。次に、図 1(b)と図 2(b)を比較すると、Wen のモデルと Rankine 渦モデルともに、竜巻中心で最も気圧が低くなり、Wen のモデルの場合は高さにおいても違いがみられた。また、Rankine 渦モデルで  $V_{max} = 100\text{m/s}$ 、 $R_m = 50\text{m}$  とした場合の最大気圧降下量は  $118\text{hPa}$  となり、Wen のモデルで  $V_{max} = 100\text{m/s}$ 、 $r_{max} = 50\text{m}$ 、 $\delta_0 = 460\text{m}$  とした場合の最大気圧降下量は  $160\text{hPa}$  となった。最大接線風速と最大気圧降下量ともに Wen のモデルの方が大きくなったが、Wen のモデルは高さでの変化が大きいため地表付近では Rankine 渦モデルの方が大きくなっている。

実際の竜巻は移動を伴うので、竜巻と建物の位置によって風速に移動速度が加算されたり、減算されたりする。竜巻は旋回流が反時計回りで、 $X$  軸上を正の方向に速度  $u$  で移動するとし、 $Y$  軸上に建物位置  $y_{min}$  をとった場合の竜巻中心と建物のなす角度を  $\theta$ 、風向角を  $\alpha$ 、と設定した場合は図 3 のようになる。このとき、水平風速  $V_H(r)$  の各風速成分( $v_x, v_y$ )は竜巻の移動速度をベクトル合成した次式(7)のように与えられる。

$$V_H(r) = \begin{cases} \begin{pmatrix} T(r)\cos(\frac{\pi}{2}+\theta) - R(r)\cos\theta \\ T(r)\sin(\frac{\pi}{2}+\theta) + R(r)\sin\theta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} u \\ 0 \end{pmatrix} & (y_{min} \neq 0) \\ \begin{pmatrix} T(r)\cos(\frac{\pi}{2}+\theta) - R(r)\cos\theta \\ T(r)\sin(\frac{\pi}{2}+\theta) - R(r)\sin\theta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} & (y_{min} = 0) \end{cases} \quad (7)$$

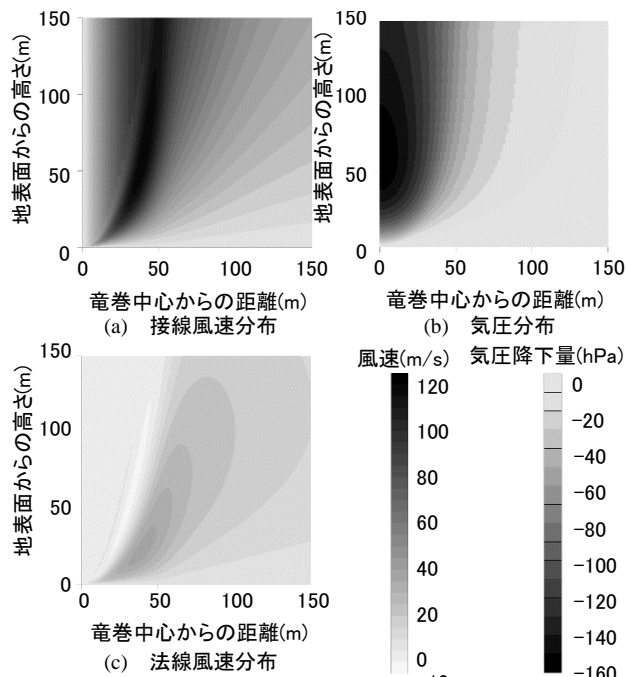


図 1 Wen のモデル

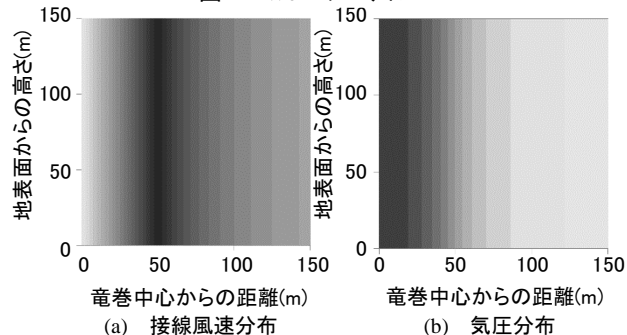


図 2 Rankine 渦モデル

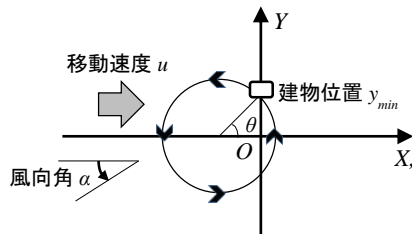


図 3 竜巻と建物の位置関係となす角度  $\theta$

また時間を  $t$  ( $t=0$  は竜巻が建物に最接近する時刻) とすると、建物位置  $y_{min}$  は竜巻が最接近する距離であるので、 $y_{min} = 0$  は  $t=0$  に竜巻中心が通過することを示している。Rankine 渦モデルで  $V_{Rm} = 100\text{m/s}$ 、 $R_m = 50\text{m}$  を設定した場合の  $V_H(r)$  時刻歴波形と、WEN のモデルで  $V_{max} = 100\text{m/s}$ 、 $r_{max} = 50\text{m}$ 、 $\delta_0 = 460\text{m}$ 、 $z = 10\text{m}$  と設定した場合の  $y_{min} = -25\text{m}$  における  $V_H(r)$  時刻歴波形を代表して図 4(a)と(b)にそれぞれ示す。このとき、竜巻中心からの建物位置の距離  $r$  は次式(8)により求めた。

$$r = \sqrt{(ut)^2 + y_{min}^2} \quad (8)$$

図 4 に示すように、Rankine 渦モデルでは風速と風向ともに  $t=0$  軸に対称となるが、Wen のモデルでは対称とならない。また、Rankine 渦モデルでは建物地点が最大風速半径内に入ると  $v_x$  が一定となる性質を持つ。

### 3. 被害風速推定に及ぼす気圧降下の影響

#### 3.1 被害風速推定手順の整理

1. 序で述べた転倒木造住宅は、梁間方向に転倒した。既往の報告<sup>3)</sup>から建物諸量は表1のように設定する。また、周辺を舗装していない地業の上に防湿シートのみを挟んだ基礎であったことから建物の固定度は1（すなわち、自重以外に上下方向の拘束力はない）とした。

さらに、ビデオカメラなどで撮影された動画の解析<sup>8,9)</sup>などから、竜巻の移動速度を  $u = 15\text{m/s}$  として、竜巻経路と被害建物の位置関係は図5に示すものとした。図5より、被害の中心線と竜巻経路の距離が35mであるので、当該地域最多の平均屋根高さ（約6~10m）での竜巻中心からの最大水平風速位置までの距離が35mであったと推定した。このとき、Rankine 渦モデルでは高さでの風速の違いがないため  $R_m = 35\text{m}$  と設定した。また、当該地域の地表面粗度区分IIであるため  $\delta_0 = 350\text{m}$  とすると、Wen のモデルでは  $R_{mz=6-10} \doteq 35\text{m}$  となる  $r_{max} = 90\text{m}$  とした。竜巻の中心経路を図3のX軸とすると、竜巻が建物に最接近する距離は  $y_{min} = -17\text{m}$  で、建物の向きは梁間方向がY軸方向となるような向きであった。

当該建物の被害風速を転倒開始風速と呼ぶことにするが、本推定では、図6に示すモデルを使用して一様流を想定した田村ら<sup>3)</sup>の梁間方向の転倒モーメントの釣合式を参考にし、気圧降下による転倒モーメントの項を取り入れた次式(9)~(15)から転倒開始風速  $v_{OT}$  を算出する。しかしながら、図4にも示したように竜巻襲来時の建物位置における風向角は時々刻々と変化するため、本研究ではさらに桁行方向の転倒モーメントの釣合式も設定し、水平風速  $V_H(r)$  を  $v_x$  成分と  $v_y$  成分ベクトル分解した風速をそれぞれ  $v_{OT}$  に当てはめた。

$$M_F(t) + M_A(t) = M_W \quad (9)$$

$$M_F(t) = F_{DY}(t) \frac{H}{2} + F_{L1Y}(t) \cdot l + F_{L2Y}(t) \cdot l \quad (10)$$

$$M_A(t) = -\Delta P(t) BD \cdot l \quad (11)$$

$$M_W = W \cdot l \quad (12)$$

$$F_D = 0.6v_{OT}^2 C_D A_D \quad (13)$$

$$F_{L1} = 0.6v_{OT}^2 C_{L1} A_{L1} \quad (14)$$

$$F_{L2} = 0.6v_{OT}^2 C_{L2} A_{L2} \quad (15)$$

ここに、 $M_F(t)$ は風力による転倒モーメントで、 $M_A(t)$ は気圧降下による転倒モーメントで、 $M_W$ は転倒抵抗モーメントである。 $F_D$ 、 $F_{L1}$ 、 $F_{L2}$ は風力で、 $l$ は転倒中心軸からの応力作用点までの距離、 $A_D$ は受風面積、 $A_{L1}$ と $A_{L2}$ はそれぞれ風上側と風上側の鉛直投影屋根面積、 $C_D$ は抗力係数、 $C_{L1}$ と $C_{L2}$ はそれぞれ風上側と風上側の寄棟屋根面風圧係数である。東京工芸大学の空力データ

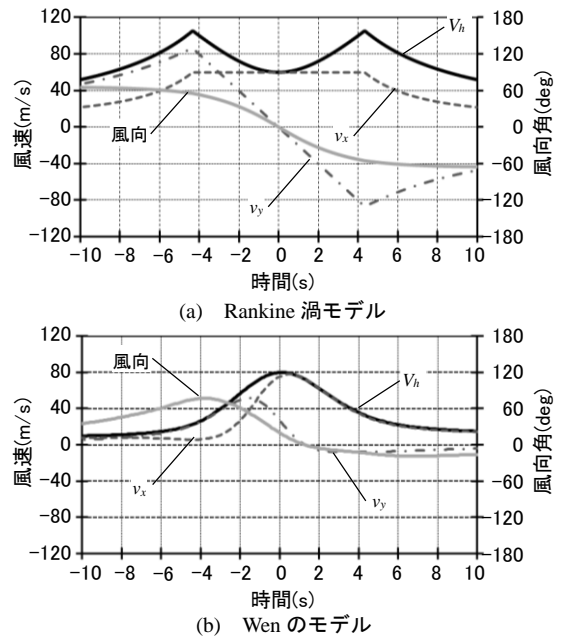


図4 建物の位置の風速の時刻歴波形 ( $y_{min} = -25\text{m}$ )

表1 建物の諸量一覧<sup>3)</sup>

建物寸法	桁行長さ: $B = 9.0\text{m}$ , 梁間長さ: $D = 6.3\text{m}$ , 建築物地盤面からの平均屋根高さ: $H = 6.4\text{m}$
屋根形状	寄棟屋根, 三寸勾配
建物重量	$W = 630.5\text{kN}$



図5 建物と竜巻の位置関係<sup>10)</sup>

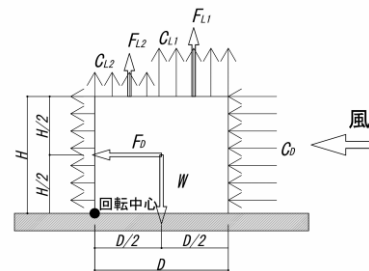


図6 田村らの使用したモデル<sup>3)</sup>

ベースから、風向が梁間方向(図3のY軸方向)時の  $C_{Dy} = 1.0$ ,  $C_{L1y} = 0.49$ (負圧)と  $C_{L2y} = 0.31$ (負圧), 風向が桁行方向(図3のX軸方向)時の  $C_{Dx} = 0.8$ ,  $C_{L1x} = 0.70$ (負圧)と  $C_{L2x} = 0.40$ (負圧)を用いた。本推定では、 $V_{Rm}$  または  $V_{max}$  を式(1), (2), (7), (8)または式(4)~(8)に漸的に与えて得られる建物位置の  $v_x(r)$  と  $\Delta P(r)$  からつくられる桁行方向の転倒モーメント, または  $v_y(r)$  と  $\Delta P(r)$  からつくられる梁間方向の転倒モーメントのどちらか一方が対応する転倒抵抗モーメントに達することで転倒を始めるものと仮定し、その時の風速  $v_x$  または  $v_y$  を転倒開始風速  $v_{OT}$

とした。なお、鉛直成分の風速は考慮していない。

気圧降下の影響を無視し(式(11)の $\Delta P(t) = 0$ )、風力のみを考慮して算出した梁間方向に転倒する場合の転倒開始風速 $v_{OTy}$ は113m/s(既報<sup>3)</sup>の $W = 630.5\text{kN}$ (換算値に一致)で、桁行方向に転倒する場合の転倒開始風速 $v_{OTx}$ は134m/sとなった。

### 3.2 Rankine 渦モデルに近似した場合の被害風速推定

気圧降下を考慮した転倒モーメントの時刻歴波形を図7に示し、そのときの風速と気圧降下量の変化を図8に示す。このとき、転倒開始風速 $v_{OTx} = 60\text{m/s}$ と気圧降下量 $\Delta P = 90\text{hPa}$ でつくられる転倒モーメントが転倒抵抗モーメントに達することで桁行方向に転倒し、その時刻は竜巻が建物に最接近する時刻である。気圧降下の影響を考慮することで、風力のみを考慮した桁行方向の転倒開始風速134m/sから60m/sへと小さくなった。しかし、転倒方向は実際の梁間方向とは一致しなかった。

### 3.3 Wen のモデルに近似した場合の被害風速推定

Wen のモデルでは高さによって風速が異なるため、本推定では地盤面からの平均屋根高さの $z = 6.4$ での風速を用いた。気圧降下を考慮した転倒モーメントの時刻歴波形を図9に示し、そのときの風速と気圧降下量の変化を図10に示す。このとき、転倒開始風速 $v_{OTy} = 84\text{m/s}$ と気圧降下量 $\Delta P = 50\text{hPa}$ でつくられる転倒モーメントが転倒抵抗モーメントに達することで梁間方向に転倒し、その時刻は竜巻が建物に最接近する1.9秒前である。気圧降下の影響を考慮することで、風力のみを考慮した梁間方向の転倒開始風速113m/sから84m/sへと小さくなった。また、転倒方向は実際の状況と一致し

た。

## 4. まとめ

2つの竜巻モデルを比較し、それらを用いて竜巻の急激な気圧降下を考慮した被害風速推定を行い、水平風のみを考慮した被害風速との比較を行ったところ以下の知見を得た。

- (1) Rankine 渦モデルで気圧降下の影響を考慮すると、桁行方向に転倒し、その転倒開始風速は水平風のみを考慮した134m/sから60m/sとなった。
- (2) Wen のモデルで気圧降下の影響を考慮すると、梁間方向に転倒し、その転倒開始風速は水平風のみを考慮した113m/sから84m/sとなった。
- (3) 被害風速推定に及ぼす竜巻の急激な気圧降下と風向変化の影響は大きい。

### 参考文献

- 1) 2012年5月6日に北関東地方で発生した広域突風災害について、日本風工学会誌、第32巻第3号、pp.210-221,2012.
- 2) 平成24年度文科省科学研究費補助金(特別研究促進費24900001)、平成24年5月6日に北関東で発生した竜巻の発生メカニズムと被害実態の総合調査(課題番号:24900001)、研究成果報告書(代表:前田潤滋)、2013.
- 3) 田村幸雄, 松井正宏, 吉田昭仁, 岡田玲, 荒川尚美, 金井義雄, 柳澤泰男, 落合小太郎:基礎ごと転倒した2階建て木造住宅, 文献2)のpp.186-194, 2013.
- 4) 石崎潑雄, 林泰一, 谷池義人:急激な気圧変化に対する室内圧の応答, 京都大学防災研究所年報, 第26号B-1, pp.323-329, 1983.
- 5) Julian, L., et al.: Pressure Measurements at the ground in an F-4 tornado, Preprints of the 22nd Conference on Severe Local Storms, American Meteorological Society, 2004.
- 6) U.S. code of Federal Regulation, Title 10, Part 50, "Domestic Licensing of Production and Utilization Facilities", U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C.
- 7) Wen, Y.K.: Dynamic tornadic wind loads on tall buildings, Journal of the Structural Division, 169-185, 1975.
- 8) 佐々浩二, 宮城弘守, 若月泰孝:被害調査と画像解析結果に基づくつくば竜巻の特性の変化, 文献2)のpp.65-73, 2013.
- 9) 奥田泰雄, 深井敦夫, 榎本敬大, 壁谷澤寿一, 喜々津仁密, 石井儀光, 中井貴文, 荒木康弘, 永井渉, 吉田昭仁:茨城県つくば市, 常総市で発生した建築物等の竜巻被害について, 文献2)のpp.97-104, 2013.

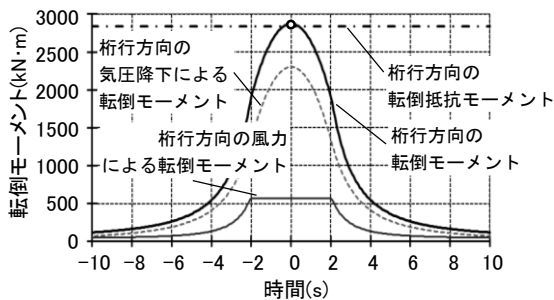


図7 転倒モーメントの時刻歴変化 (Rankine 渦モデル)

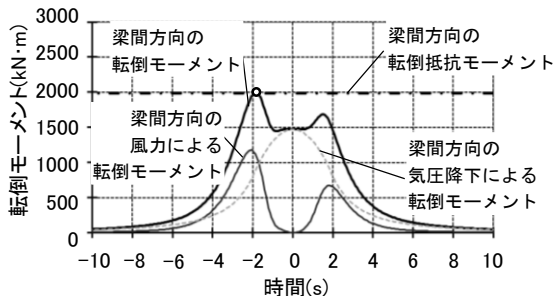


図9 転倒モーメントの時刻歴変化 (Wen のモデル)

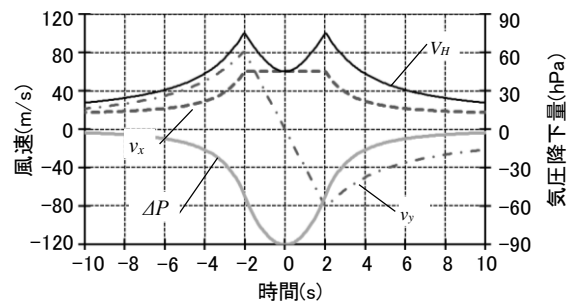


図8 風速と気圧降下量の時刻歴変化 (Rankine 渦モデル)

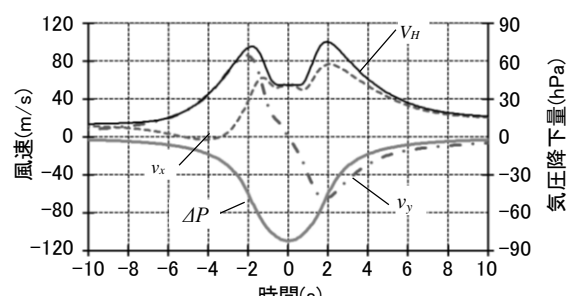


図10 風速と気圧降下量の時刻歴変化 (Wen のモデル)