

竜巻の通過に伴う飛散物の経路と構造物に作用する風力

河井宏允

要 旨

竜巻を 2 次元ランキン渦と仮定し、地上付近における竜巻通過時の風速・変化と竜巻に伴う物体の経路、竜巻通過時に構造物に作用する風力等を計算した。計算結果は、2006 年 12 月に佐呂間町を襲った竜巻による建物被害と飛散物の方向と比較し、被害の程度と風速との関係、竜巻の経路等を推定した。その結果、奥田らによる被害ランク 3,4,5 は、竜巻時の最大風速がそれぞれ 50,60,70m/s 程度に相当すると推定された。また計算の結果、飛散物は竜巻の進行方向右側では竜巻にほぼ平行に、進行方向左側では竜巻経路にほぼ直角に飛散すると推定された。この結果は、佐呂間町の竜巻による飛散物の方向と良く一致している。竜巻を模擬した渦糸が円柱に接近、通過する計算を行った結果、竜巻が構造物の右側を過ぎる時、竜巻は構造物に引き寄せられることが示されるとともに、構造物に作用する負圧の大きさは、竜巻の移動速度を加味した最大風速を基準とした速度圧を基準とした場合、同程度の台風等の強風の場合よりやや大きいと考えられる。

キーワード：竜巻、ランキン渦、飛散物、被害ランク、離散化渦糸モデル、負圧

1. はじめに

近年、竜巻を初めとする突風による被害によって、人的、物的被害が多発している。一昨年の 12 月 25 日に竜巻と見られる突風によって、山形県庄内町で竜巻と見られる突風によって JR 羽越本線の特急電車いなほ 14 号が脱線し 15 名の死者を出したのを初め、昨年の 9 月 17 日には台風 0613 号にともなう宮崎県延岡市に発生した竜巻によって JR 日豊本線の特急にちりん 9 号が脱線し、3 名の死者を出した。昨年の 12 月には、北海道佐呂間町を竜巻が襲い、仮設工事事務所が飛散し 9 名の死者を出している。

竜巻等の突風による被害は、狭い範囲に集中して生じるが、死者を含めて人的、物的に台風以上の大きな被害が生じることも多い。また、破壊された建物等の飛散物の衝突による 2 次被害も多い。竜巻は年間 20 個程発生するが、ある地点を襲う竜巻の頻度が極めて小さいことや竜巻通過時の風速等の観測結果が極めて少ないこともあって、建築基準法等の構造物の耐風安全性を規定する各種基規準では、

これまで竜巻に対する規定は作られてはおらず、半ば無対策の状況であった。

本研究では、竜巻を高さ方向に一樣に分布している 2 次元ランキン渦によって表し、その移動に伴って竜巻時の風速・風向がどのように変化するか、またそれによって物体がどのように飛散するかを調べるとともに、竜巻通過時に構造物に作用する風力を検討した。また、前述の列車の転覆に関連して、竜巻通過時の列車に作用する風力と、その転倒状況についても考察した。

飛散物の解析結果は、佐呂間町の竜巻による被害調査結果と比較した。

なお、既往の研究より、ランキン渦は地上付近の風速を良く近似できることが明らかとなっているが、地上から離れると中心付近の上昇流の影響が大きく、風速はランキン渦では表せなくなる。したがって、本解析結果を板のような竜巻によって巻き上げられ易いものに適用するためには、竜巻中心部の 3 次元風速分布などに関するより詳細な情報が必要となる。

2. 竜巻通過時の風速の変化と被害分布

Fig1 に示したように、反時計回転を持つ竜巻が左から x 軸上を風速 u_m で移動し、 $x = 0, y = Y, z = Z$ にある物体に近づき通り過ぎるものとする。この時、物体位置における風速は、 $d = \sqrt{x^2 + Y^2}$ とすると、(1)式によって表現することができる。

$$\begin{aligned} d \leq r \quad U &= -q_{\max} \frac{Y}{r} + u_m \quad V = -q_{\max} \frac{x}{r} \\ d > r \quad U &= -q_{\max} \frac{rY}{d^2} + u_m \quad V = -q_{\max} \frac{rx}{d^2} \end{aligned} \quad (1)$$

ここに、 $q_{\max}$ はランキン渦の最大風速、 r はランキン渦の半径である。なお、上式から分かるように、 $d \leq r$ では風速の x 方向成分は一定となる。

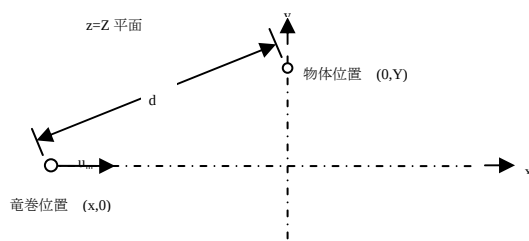


Fig.1 Positions of a tornado and an observation point

竜巻通過時の風速 $\sqrt{U^2 + V^2}$ の変化を Fig.2 に示す。図は、反時計回りのランキン渦による風速の変化を示している。横軸はランキン渦の中心位置であり、計測位置は $x = 0$ である。図には y 位置を変化した場合の風速の変化を示している。Fig.2 は、ランキン渦の最大風速が 60m/s、ランキン渦の最大風速半径 75m、ランキン渦の移動速度が 20m/s の場合を示したものである。これらの数値は、3 章で比較する佐呂間町を襲った竜巻に相当する。

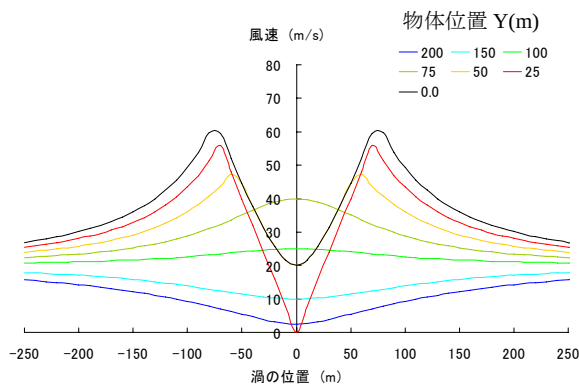


Fig.2 (a) Wind speed induced by tornado, left hand side

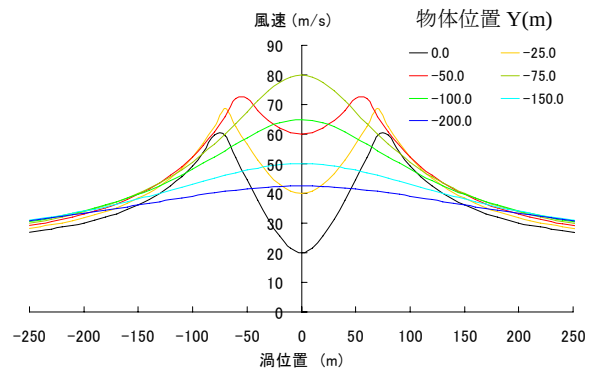


Fig.2 においては 20m が 1 秒に相当し、図は計測位置
Fig.2 (b) Wind speed induced by tornado, right hand side

で 25 秒間に観測される風速変化を表す。図の左から右に移動する半時計回りのランキン渦を仮定しているため、ランキン渦の中心が計測位置の下側 (Fig.2 (a)) を通る場合には、ランキン渦による風速と移動速度が相殺され風速は減少し、ランキン渦の中心が計測位置の上側 (Fig.2 (b)) を通る場合、ランキン渦による風速と移動速度が加算され、計測位置の風速はかなり大きくなる。ランキン渦の中心が計測位置より渦の最大風速半径だけ下側を通り場合、風速の変化はほとんどなく、それより下側を通る場合には、渦中心が計測位置に近づくにつれ風速は減少する。

ランキン渦の最大風速半径より中心に近い位置では、最大風速は竜巻が物体位置に到達する前後で極大値を持つ。この極大値はほぼ竜巻が物体から渦の半径分風上及び風下に達した時に生じる。これに対して、ランキン渦の最大風速半径の外側では竜巻が物体位置に達した時に風速が最大となる。

Fig.3 は、竜巻 (ランキン渦) 通過時の最大風速と計

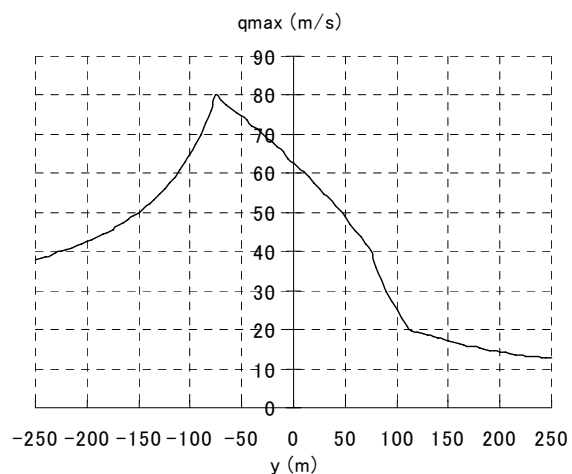


Fig.3 Maximum wind speed induced by a tornado.

Table 1 Rank of strong wind hazard

ランク	被害の程度	被害の状況（例）
1	極く軽微な被害	住宅のテレビアンテナが曲がる。樋が落ちる。小枝が折れ、葉が飛散する。
2	軽微な被害	瓦がずれる。軒先やケラバなどで部分的に瓦が飛散する。太い枝が折れる。
3	顕著な被害	屋根の広範囲で瓦が飛散し、野地板の広い面が見える。部分的に窓ガラス
4	甚大な被害	屋根の垂木や母屋が破損する。小屋組が壊れる。多くの窓ガラスが割れる。
5	壊滅的な被害	家屋が倒壊する。

測位置の関係を示したものである。Fig.2に示したように、竜巻が計測位置の上側（y 負）を通る方が最大風速は大きくなる。最大風速がもっとも大きくなるのは、竜巻がその最大風速半径分下側を通る場合である。

奥田ら(2005)は台風 0422 号による伊藤市の被害を詳しく分析し、被害の程度を Table1 に示すように、ランク 1 から 5 までの 5 つに分類し、それらを表す指標を示した。奥田らはこれらのランクと風速の関係については言及しなかったが、佐呂間の竜巻による被害 (Fig.4,

田村等)をこれらのランクに当てはめてみると、ランク 3,4,5 はそれぞれ最大風速が 50m/s,60m/s,70m/s 以上となる範囲に相当する。

3. 竜巻通過時の風向の変化と物体の飛散

Fig.5 は、(0,y)位置における風速が、竜巻（ランキン渦）が近づいてきた時にどのように変化するかをベクトルで示したものである。図中の赤丸が風速の計測位

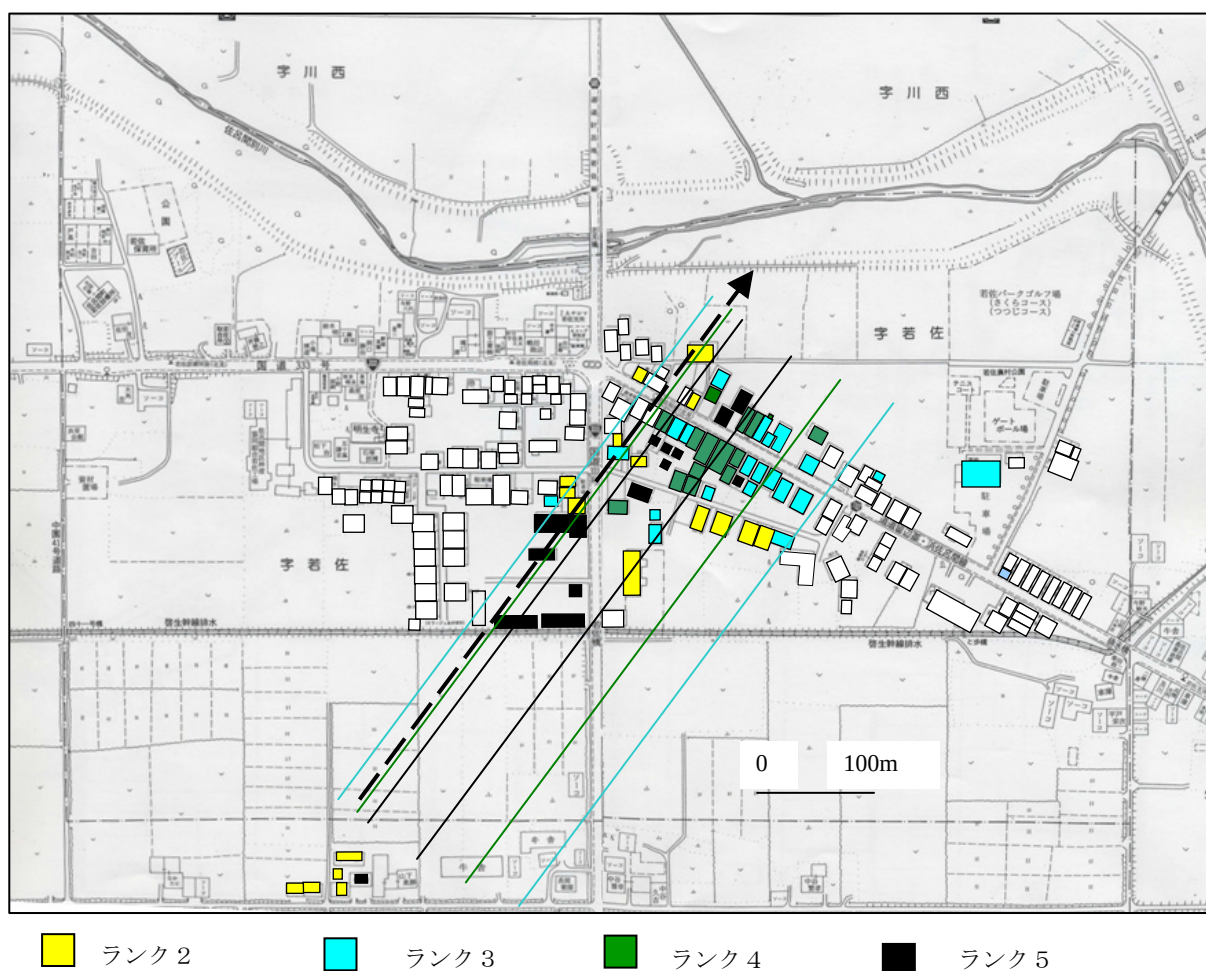


Fig.4 Map of damaged houses by tornado in Saroma chou.
Thick dotted line shows the expected pass of the tornado.

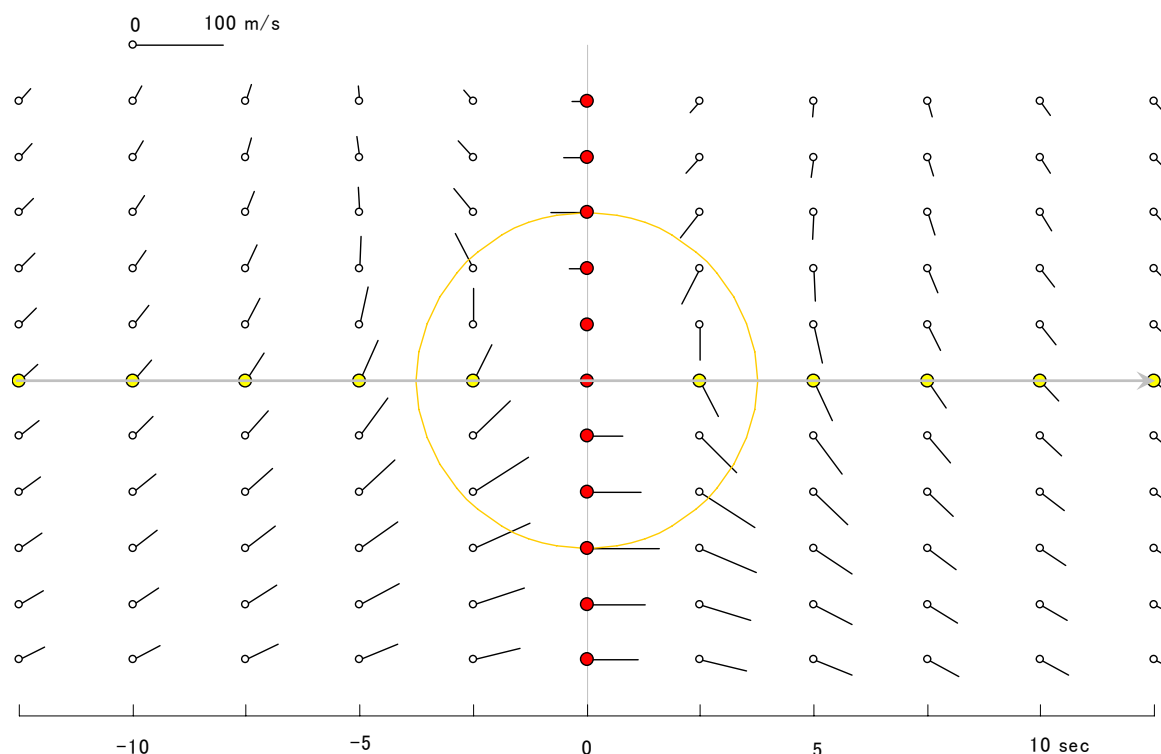


Fig.5 Vector of wind velocity at point (0,y) when a tornado is approaching to the point. The tornado moves from left to right.

置で、竜巻は図の黄色丸の位置を左から右に移動する。

図は黄色丸に竜巻がある時に、赤丸の位置で計測される風速ベクトルを黄色丸位置の縦に並んだ丸印の位置の風速ベクトルで示している。したがって、Fig.5 は計測位置での風速ベクトルの時間的な変化を表すものである。中央の大きな黄色丸は、ランキン渦の最大風速円を表している。図に示したベクトルは白丸印が起点である。したがって、竜巻が左端にある時、計測位置では斜め右上に向かって風が吹いている。Fig.5 中央の大きな黄色の丸はランキン渦の最大風速円である。竜巻が計測位置の下側を通る場合 (y 正)、計測位置における風向は 360 度半時計方向に回転するのに対して、竜巻が計測位置の上側を通る場合 (y 負) には、計測位置における風向の変化は小さく、竜巻の移動方向とほぼ等しい。なお、Fig.5 は、風向のみを逆にすると、竜巻が中央を通過する時の白丸点の風速ベクトルを表すことになる。

竜巻通過時の風速から、竜巻による物体の飛散物の経路を計算することができる。竜巻によって破壊された物体の運動は、物体の加速度と物体に作用する力の釣り合いから、(2)式によって表すことができる。

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{1}{2} \rho C A (U - u) \sqrt{(U - u)^2 + (V - v)^2 + (W - w)^2}$$

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = \frac{1}{2} \rho C A (V - v) \sqrt{(U - u)^2 + (V - v)^2 + (W - w)^2}$$

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = \frac{1}{2} \rho C A (W - w) \sqrt{(U - u)^2 + (V - v)^2 + (W - w)^2} - mg$$

(2)

ここに、 m は物体の質量、 C, A は風力係数と見付け面積、 U, V, W は X, Y, Z 方向の風速、 u, v, w は x, y, z 方向の物体の速度、 g は重力の加速度である。(2)式は、立方体や球のような固まり状の物体において、抗力のみ作用する場合を想定している。したがって、瓦な板のように揚力を伴うものや、回転によって見付け面積や風力が異なるものには適用できない。

物体の飛散速度は上式を解くことによって求めることが出来き、飛散経路は物体の飛散速度の積分によって計算することができる。上式が非線形であることから、物体位置の流速は物体と竜巻の相対位置によって変わることから、上式の解析解を求めることはできないが、数値計算によって物体の経路を追跡することができる。

想定した物体は一辺が 5cm、比重 0.5 の立方体の木片である。この木片が初速 0 で高さ 10m から飛散すると考え、前章に示した仮定から、ランク 3~5 に相当する 3つの風速で飛散を開始するものとして、その経路を計算した結果を Fig.6 に示す。竜巻は左回転で y 軸を左から右に移動する。竜巻の中央付近から竜巻の進行方向に向かって左側 (Fig.6 では正) では、飛散物は竜

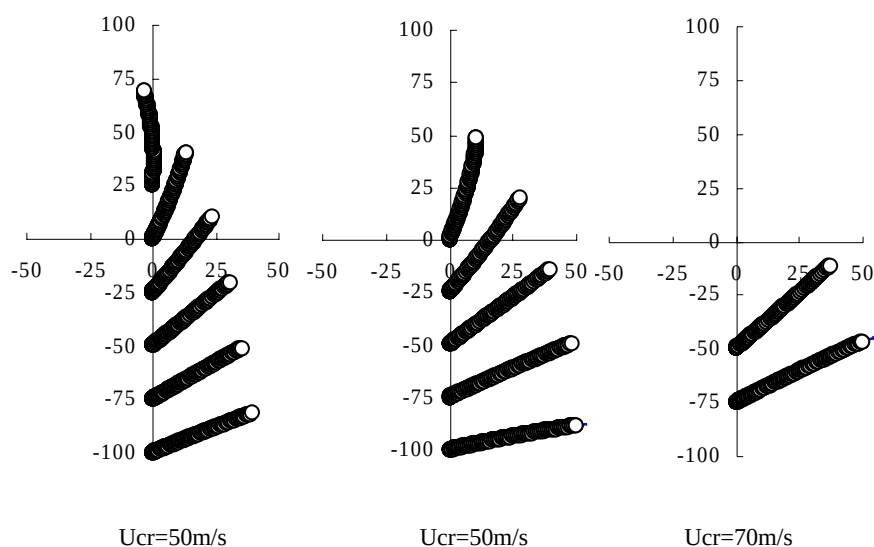


Fig.6 Tracks of flying objects, 5cm wooden cube

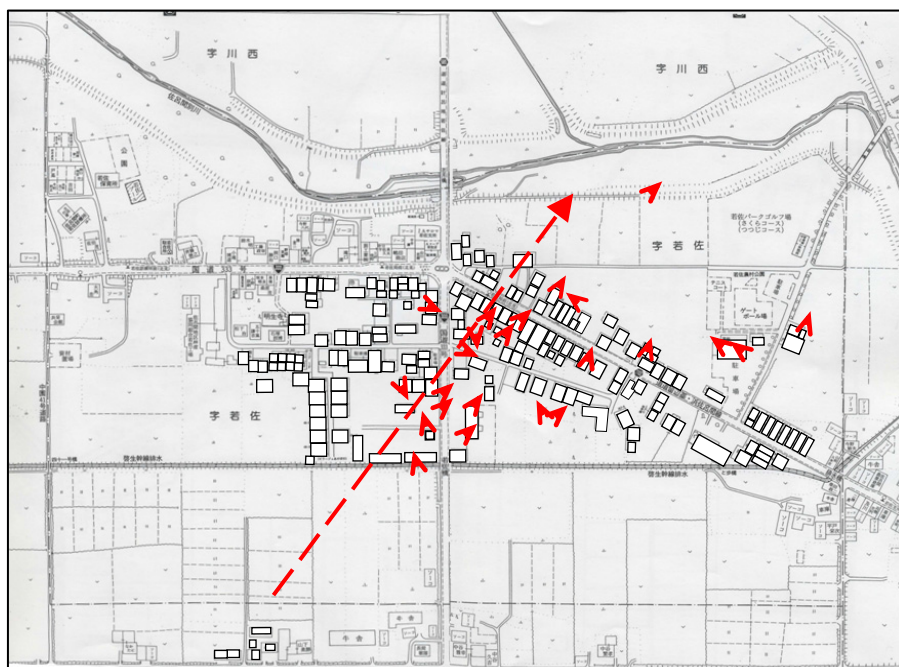


Fig.7 Direction of observed flying objects in Saroma chou.

巻の進行方向にほぼ直角方向に飛散するのに対して、進行方向から右側（Fig.6 では負）に向かうにつれ、飛散物は竜巻の経路と平行に飛散する。飛散物が飛ぶ方向は Fig.5 に示した風速ベクトルとの比較より、ほぼ飛散開始時の風向と一致することが分かる。これは、物体と竜巻による風速の差は飛散開始直後に最も大きく、物体が飛散するにつれて減少するため、物体は飛散開始時に最も大きな慣性力を得るためである。

Fig.7 は佐呂間竜巻において観測された飛散物の飛散方向を示したものである。解析で示されているように、竜巻の進行方向右側では竜巻と平行に飛散し、竜巻進行方向左側では、竜巻進路に向かって物体が飛散

している。なお、解析では、均一な風速分布を有するランキン渦を仮定しているため、飛散は竜巻が近く前に開始され、進行方向左側では竜巻から遠ざかるように物体が飛散することになるが、Fig.7 に示されているように佐呂間町を襲った竜巻の場合、進行方向左側の飛散物が竜巻に向かうように飛散しているところから、この竜巻の場合には風速分布が均一ではなく、物体の飛散は竜巻が通り過ぎてから起こったと考えられる。

飛散物の最終速さは、Fig.8 に示したように、飛散時の限界風速にほとんど左右されず、ほぼ竜巻時の最大風速の約半分程度になった。また、飛散物の飛散位置が竜巻経路に近づくとき若干減少する。

Fig.9 に竜巻時の流体粒子の軌跡を示す。非常に小さく軽い物体の場合には、Fig.9 に示したように、飛散物の軌跡はサイクロイドを描くと考えられる。このサイクロイドの回転数は竜巻の最大風速半径より内側では一定、外側では竜巻中心が離れるにしたがって小さくなる。

4. 竜巻通過時に構造物に作用する風力

本章では、竜巻通過に伴って構造物にどのような風力が生じるかを検討した。構造物が小さい場合、竜巻の進路等に構造物が及ぼす影響は小さいが、竜巻がその大きさと同等の大きさを持つ構造物を通り過ぎる時には、流れが構造物の周りを回るようにして通過するため、竜巻の進路が変化するとともに竜巻の渦度分布も大きく変化する。本章では、まず、単独渦を使って竜巻の経路に及ぼす構造物の影響を調べるとともに、

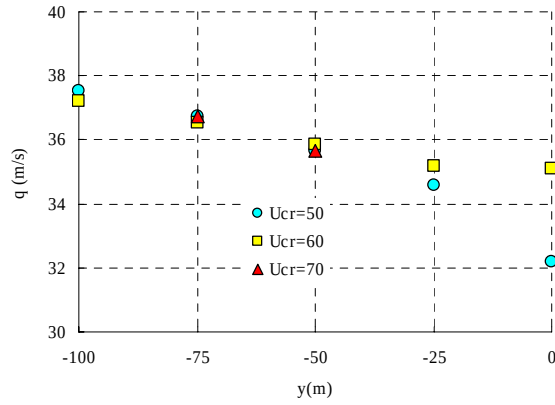


Fig.8 Final speed of a flying object from various positions, 5cm wooden cube.

離散化渦糸法によって、竜巻をランキン渦とした場合の構造物周りの渦糸分布とそれに伴う圧力分布を検討した。

4.1 単独渦による解析

(1) 解析モデル

竜巻が速度 u_m で円柱に近づいてくる場合を考える。Fig10 に示すように、竜巻を反時計周りの循環を持つ 1 つの渦糸で表し、流れ場をポテンシャル流れと仮定すると、この場合の円柱周りの流れ場は、速度 U の一様流中にある円柱周りの流れ場に、円柱の外部にある渦糸による流れ場の組合せによって表現できると考えられる。即ち、その複素速度ポテンシャル $W(z)$ は

$$W(z) = u_m \left(z + \frac{a^2}{z} \right) + i\kappa \log(z - Z) - i\kappa \log \left(z - \frac{a^2}{\bar{Z}} \right) + i\kappa \log z \quad (3)$$

で表すことができる。ここに、 a は円柱の半径、 κ は渦糸の強さに関係する定数、 Z は竜巻の中心位置、 $\bar{Z}$ は Z の共役複素数である。(3)式の第1項は竜巻の移動速度を表す一様流、第2項は竜巻を表す渦糸、第3項は、円柱表面の境界条件を満たすために円柱内部の鏡像位置に置かれた渦糸、第4項が全流れ場の渦度を調整するために円柱の中心に置いた渦糸を表している。

この渦糸を半径 r 、最大流速 $q_{\max}$ のランキン渦に対応するように κ の値を決めると、

$$\kappa = q_{\max} r = -\Gamma/2\pi \quad (4)$$

となる。ここに、 Γ は時計周りを正とした場合の渦糸の循環を表している。

(2) 円柱周りの流速

(3)式で表される複素速度ポテンシャルを微分する

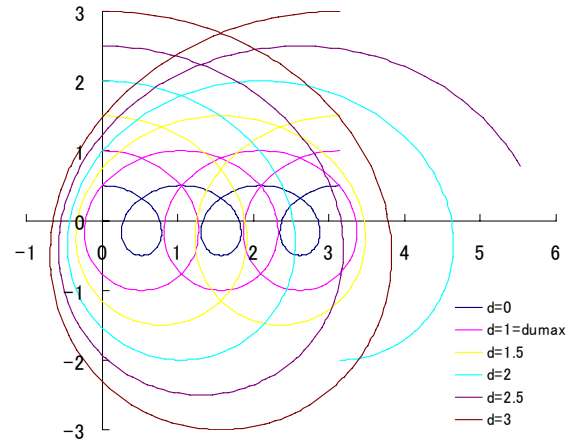


Fig9 Track of fluid particles

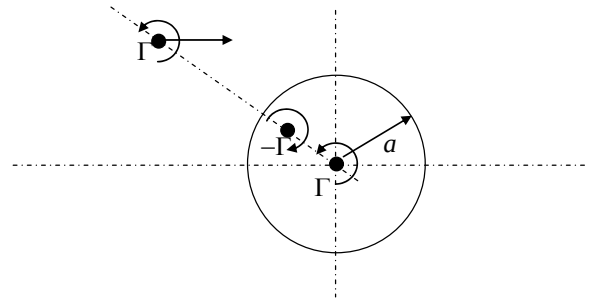


Fig.10 Simple model of a tornado approaching to a circular cylinder

ことによって、円柱周りの流速を求めることができる。即ち、

$$\begin{aligned} \frac{dW}{dz} &= u - iv \\ &= u_m \left(1 - \frac{a^2}{z^2} \right) + i\kappa \left(\frac{1}{z - Z} - \frac{1}{z - a^2/\bar{Z}} + \frac{1}{z} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

したがって、

$$\begin{aligned} u &= u_m \left\{ 1 - \frac{a^2(x^2 - y^2)}{(x^2 + y^2)^2} \right\} \\ &\quad + \frac{\kappa(y - Y)}{(x - X)^2 + (y - Y)^2} + \frac{\kappa y}{x^2 + y^2} \\ &\quad - \frac{\kappa(X^2 + Y^2) \{ (X^2 + Y^2)y - a^2 Y \}}{\{ (X^2 + Y^2)x - a^2 X \}^2 + \{ (X^2 + Y^2)y - a^2 Y \}^2} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} v &= -u_m \frac{2a^2 xy}{(x^2 + y^2)^2} + \frac{-\kappa(x - X)}{(x - X)^2 + (y - Y)^2} + \frac{-\kappa x}{x^2 + y^2} \\ &\quad + \frac{\kappa(X^2 + Y^2) \{ (X^2 + Y^2)x - a^2 X \}}{\{ (X^2 + Y^2)x - a^2 X \}^2 + \{ (X^2 + Y^2)y - a^2 Y \}^2} \end{aligned} \quad (7)$$

(3) 渦糸の軌跡

渦糸の軌跡は、(6)、(7)式の x, y に X, Y を代入し、渦糸位置における速度を求め、その勾配を積分することによって求めることができる。即ち、

$$f(Z_0, Z) = \int_{Z_0}^Z \frac{v(Z)}{u(Z)} dZ + F(Z_0) \quad (8)$$

ここに、 Z_0 は渦糸の初期位置である。

(8)式の積分の被積分項はかなり複雑であり、解析解を求めることは容易ではないので、ここでは、下記のように、ある初期から数値時間積分をすることにより渦糸の位置を追跡した。即ち、初期値 $Z_0 = X_0 + iY_0$ から始めて、時間間隔 Δt でオイラー法により順次時間積分をすることによって、渦位置の軌跡を追跡した。

オイラー法では、

$$X_i = X_{i-1} + u_{i-1} \Delta t \quad (9)$$

$$Y_i = Y_{i-1} + v_{i-1} \Delta t \quad (10)$$

$$u_{i-1} = u_m \left\{ 1 - \frac{a^2 (X_{i-1}^2 - Y_{i-1}^2)}{(X_{i-1}^2 + Y_{i-1}^2)^2} \right\} + \frac{\kappa Y_{i-1}}{X_{i-1}^2 + Y_{i-1}^2} - \frac{\kappa Y_{i-1}}{X_{i-1}^2 + Y_{i-1}^2 - a^2} \quad (11)$$

$$v_{i-1} = -u_m \frac{2a^2 X_{i-1} Y_{i-1}}{(X_{i-1}^2 + Y_{i-1}^2)^2} + \frac{-\kappa X_{i-1}}{X_{i-1}^2 + Y_{i-1}^2} + \frac{\kappa X_{i-1}}{X_{i-1}^2 + Y_{i-1}^2 - a^2} \quad (12)$$

(4) 竜巻通過時に円柱に作用する風力

円柱に作用する流体力は、円柱上における流速を利用して、拡張されたベルヌイの定理により求めることができる。即ち、円柱表面の圧力は、

$$p - P = \frac{1}{2} \rho (u_m^2 - q^2) + \rho \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (13)$$

$$\phi = \kappa \left\{ \frac{(x - X)v - (y - Y)u}{(x - X)^2 + (y - Y)^2} - \frac{(x - X^*)v^* - (y - Y^*)u^*}{(x - X^*)^2 + (y - Y^*)^2} \right\} \quad (14)$$

ここに、 P は一様流の圧力、 q は円柱表面の流速、 u, v は渦糸の x, y 方向の速度、 $*$ は円柱内のイメージ渦糸を表し、 X^*, Y^*, u^*, v^* はそれぞれ次式で表される。

$$X^* = \frac{a^2 X}{X^2 + Y^2} \quad (15)$$

$$Y^* = \frac{a^2 Y}{X^2 + Y^2} \quad (16)$$

$$u^* = \frac{a^2}{X^2 + Y^2} u \quad (24)$$

$$v^* = \frac{a^2}{X^2 + Y^2} v \quad (25)$$

(5) 竜巻の進路

Fig.10 は、円柱に近づく渦糸の軌跡を示したものである。本計算は、佐呂間の竜巻を最大風速半径を 75m、最大風速を 60m/s のランキン渦で表したとき、これと等価な循環を与える渦糸について行った。対象物体は、本竜巻で飛散した仮設現場事務所（幅 75m）とし、これを半径 37.5m の 2 次元円柱によって模擬した。渦糸の出発点は、円柱の中心から 450m 風上であり、図に示した各線は様々な位置から渦糸が出発した場合の渦糸の軌跡を表している。

竜巻の進行方向の右側に構造物がある場合（Fig.10 上側）、竜巻は円柱を避けるようにして進み、竜巻の進行方向の左側に構造物がある場合（Fig.10 下側）、竜巻は円柱に引き寄せられることが分かる。本項に示した渦糸では、渦糸は円柱に捉えられ円柱周りを回ることになるが、後節で述べるようにランキン渦を仮定した場合には、竜巻が構造物によって捉えられたとき、一旦は竜巻の渦度は構造物周りに分布し、その後、構造物の背後でまとまり一個の渦に戻り後方へと移動する。竜巻が構造物に捉えられる範囲は、ほぼ構造物の大きさに等しい。なお、竜巻が構造物によって捉えられた後の竜巻の進路は構造物により近づく。

4.2 複数渦（離散化渦糸法）による解析

前節では、竜巻を一つの渦糸でモデル化して、竜巻が構造物に接近・通過するときの竜巻の経路について考察した。しかし、竜巻を渦糸でモデル化した場合、渦糸の中心では風速が過大に大きくなるため、渦糸が円柱に接近・通過する時に円柱周りの流速が非現実的に大きくなる。一方、前章までに示したように、竜巻をランキン渦でモデル化する場合、被害分布や飛散物の飛散方向などについて、極めて良い一致が得られた。ランキン渦は、最大風速半径の円内を渦度が一様に分布し、その外側での渦度が 0 であるという渦モデルである。ここでは、ランキン渦を一様に分布する複数の渦糸によってモデル化し、それが接近する時の円柱周りの渦糸分布を離散化渦糸法により調べた。渦糸群が接近する時の複素ポテンシャルは、(3)式を拡張して以下のように表すことができる。

$$W(z) = u_m \left(z + \frac{a^2}{z} \right) + \sum \left\{ i\kappa \log(z - Z) - i\kappa \log \left(z - \frac{a^2}{Z} \right) + i\kappa \log z \right\} \quad (17)$$

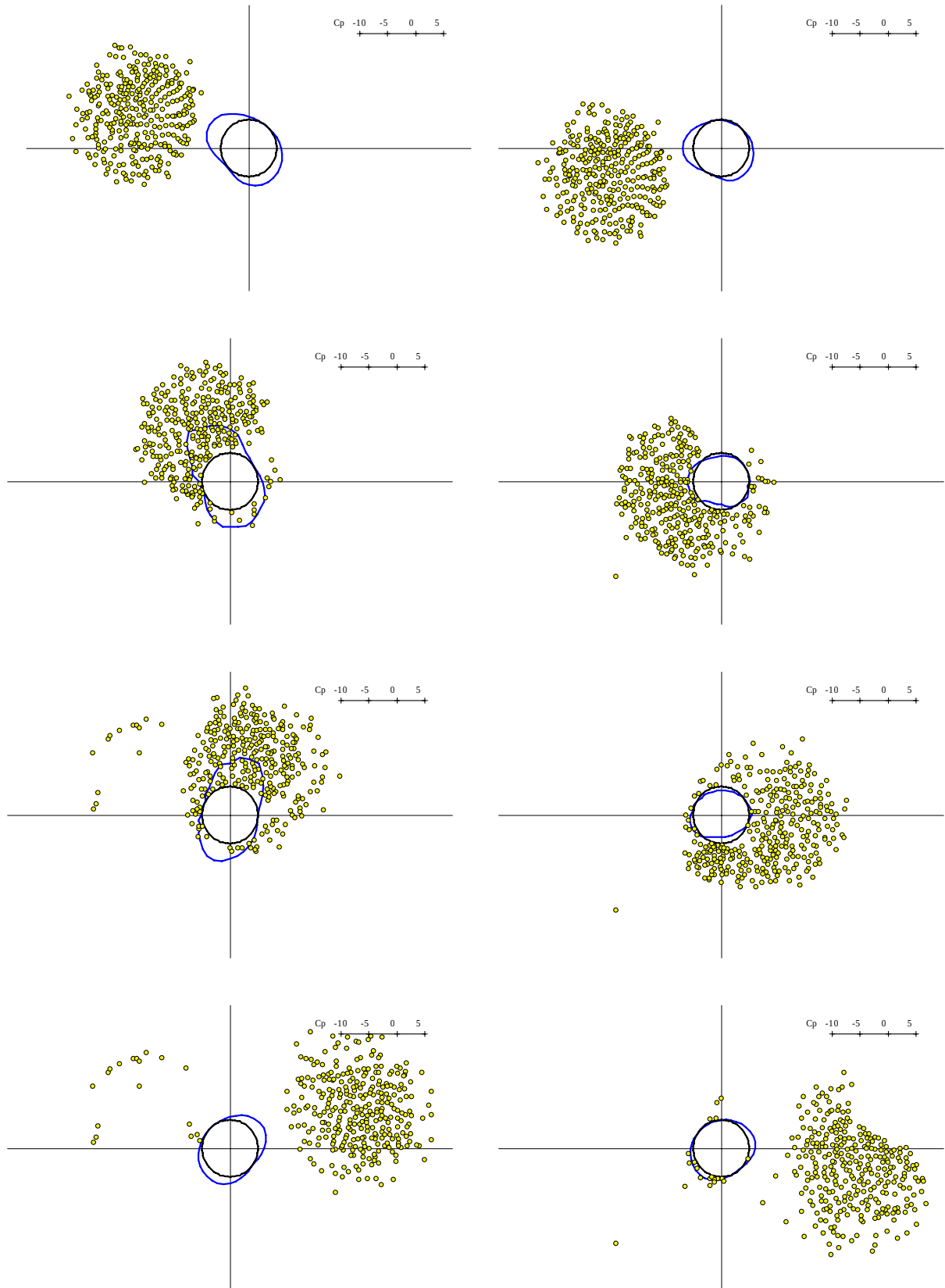


Fig.11(a) Distribution of discrete vortices and pressure distribution around a cylinder, initial position of a center of vortices is $y=a$, $r=2a$

Fig.11(b) Distribution of discrete vortices and pressure distribution around a cylinder, initial position of a center of vortices is $y=-a$, $r=2a$

Fig.11 は、円柱を通り過ぎる時の渦糸群の分布と、円柱に作用する風圧を表している。Fig.11(a)は、計算開始時に渦糸群の中心を $(10a, a)$ (a は円柱の半径) とした場合、Fig.11(b)は $(10a, -a)$ とした場合である。即ち、Fig.11(a)が竜巻が構造物の左側を通過する場合（竜巻の進行方向の右側に構造物がある場合）で、Fig.11(b)が竜巻が構造物の右側を通過する場合（竜巻の進行方向の左側に構造物がある場合）を表している。なお、渦糸群で模擬されているランキン渦の半径 r は、円柱の半径の2倍である。

図中の青線は円柱周りの風圧係数分布を表しているが、円柱に内側に向かう場合が正、円柱の外側に向かう場合が負である。図中の風圧係数は、(18)式に示したように、ランキン渦の最大風速を基準として計算した。したがって、移動速度を加味した竜巻来襲時の最大風速を基準とした場合には、図中の値を 0.56 倍する必要がある。

$$C_p = (p - p_\infty) / \left(\frac{1}{2} \rho q_{\max}^2 \right) \quad (18)$$

ここに、 C_p は風圧係数、 p は円柱表面の圧力、 p_∞ は渦糸群（竜巻）が無限遠方にある時の円柱表面の圧力、 ρ は空気密度、 $q_{\max}$ はランキン渦の最大風速である。

渦糸群（竜巻）の接近に伴い、円柱には、渦糸群によって生じる流れによって、渦糸群に近い部分とその反対側の部分の負圧が次第に大きくなる。竜巻が接近すると、建物が竜巻の強風によって押される印象があるが、本計算の結果、竜巻の接近に伴って、構造物の各部分には竜巻に引き寄せられるような力（負圧）が働くことが分かる。ただ、竜巻接近時は、Fig.11 に示されているように負圧は竜巻の進行方向に対称であり、円柱に働く抗力はそれほど大きくはない。

渦糸群が円柱を通り過ぎる時に、渦糸群がある側では、大きな負圧が作用し、円柱も渦糸群がある側へと引き寄せられる。計算では、反時計回転の竜巻を想定しているため、渦糸群が円柱の上側（渦糸群の進行方向の右側に円柱がある場合）を通り過ぎる時に、竜巻によって誘起される風速に竜巻の移動速度が加わり、円柱には大きな負圧が作用する。一方、渦糸群が円柱の下側を通り過ぎる時には、円柱にあまり大きな力は作用しない。

Fig.12 は、渦糸群の計算初期位置を変化した時に、円柱に作用する最小風圧係数（最大負圧係数）と初期位置との関係を調べたものである。図の縦軸が最小風圧係数を表しているが、図の見やすさを考慮して、符号を変えて示した。また、図の横軸は計算初期の渦糸の y 座標を円柱の半径 a で除した値である。

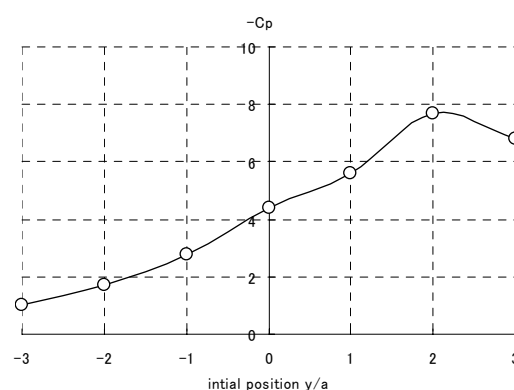


Fig.12 Minimum pressure coefficient on a circular cylinder when vortices pass around the cylinder.

渦糸群によって円柱に生じる負圧は、この場合、渦糸群の初期位置が円柱の半径の2倍程度円柱の上側にある場合に最大となり、その風圧係数は約-7.7（移動速度を加味した竜巻時の最大風速を基準とした場合には約-4.3）となった。一様なポテンシャル流場に置かれた円柱に作用する風圧係数の最小値(-3)と比較すると、竜巻時の最大風速を基準とした場合には、約 1.4 倍である。

5. まとめ

竜巻を2次元ランキン渦と仮定し、地上付近における竜巻通過時の風速・変化と竜巻に伴う物体の経路、竜巻通過時に構造物に作用する風力等を計算した結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) ランキン渦モデルによって、竜巻通過時の被害分布や飛散物の方向を推定することができる。
- (2) 奥田らによる被害ランク 3,4,5 は、竜巻時の最大風速がそれぞれ 50,60,70m/s 程度に相当すると推定される。
- (3) 竜巻が構造物の右側を過ぎる時、竜巻は構造物に引き寄せられる。
- (4) 構造物に作用する負圧の大きさは、竜巻の移動速度を加味した最大風速を基準とした速度圧を基準とした場合、台風等による同程度の強風の場合より大きいと考えられる。

参考文献

- 奥田泰雄・西村宏昭・喜々津仁密(2005),強風被災度ランクの提案,日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp. 123-124
- 河井宏允, 竜巻時の物体の飛散と構造物に作用する風力について—佐呂間竜巻を例にとって—(2007), 北海道佐呂間町で発生した竜巻による甚大な被害に關す

る調査研究, 平成 18 年度科学研究費補助金(特別研究促進費), 210-227
曹曙陽・小林文明・吉田昭仁・松井正宏・菊池浩利・佐々浩司・田村幸雄(2007), 北海道佐呂間町における竜巻にる建物被害, 北海道佐呂間町で発生した竜巻による甚大な被害に関する調査研究, 平成 18 年度科学

研究費補助金(特別研究促進費), 130-140
H. Kawai : A Discrete Vortex Simulation for Flow around a Cylinder with a Splitter Plate, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.33, pp.153-160, 1990.

Pass of Flying Objects Destroyed by a Tornado and Wind Force on Structures induced by a Tornado

Hiromasa KAWAI

Synopsis

The wind velocity and the pass of flying objects are calculated by the Rankin vortex model and the equation of motion when a tornado is approaching and moving away. The results are compared with the observed report of the damage of structures induced by the tornado, which attacked Saroma town in Hokkaidou prefecture in December 2006. The comparison the wind velocity with the damage shows that the wind speed corresponded with the hazard rank 3,4 and 5 proposed by Okuda are 50,60 and 70m/sec respectively. It is expected by the calculation that destroyed objects at the right hand side fly parallel to the moving direction and the objects at the left hand side fly normal to the direction when a tornado with anti-clockwise rotation is passing. This result can explain the direction of flying object observed in the Saroma tornado. The wind force on a structure is estimated by the discrete vortex model simulated the Rankin vortex. When the tornado is approaching and passing at left hand side of the structure, large suction act on the structure, of which pressure coefficient based on the maximum velocity in the tornado is smaller than -4.

Keywords: Tornado, Rankin vortex, Flying object, Hazard rank, Discrete vortex model, Suction