

龍巻による建物の被害について

——1973年 5 月21日石川県押水町を襲った竜巻の被害調査——

石崎 潑雄・河井 宏允・成 仁煥・森 武雄

ON THE DAMAGE TO THE STRUCTURES CAUSED BY TATSUMAKI

By *Hatsuo* ISHIZAKI, *Hiromasa* KAWAI, *In Whan* SUNG, *Takeo* MORI

Synopsis

In the evening of May 21st 1973, a Tatsumaki caused severe damage in country area in Ishikawa Prefecture, Japan. The maximum wind speed in the Tatsumaki estimated from the structural damage was about 60 m/sec and the mean width of damaged area was about 100 m and the path length was about 2 km. The authors investigated the damage to structures and assessed the wind force caused by the Tatsumaki. Some interesting results on the wind force were found.

1. ま え が き

日本における強風災害のうちで、竜巻は規模こそ小さいけれどもその激しい破壊力等により大きな社会的影響を与えるものとして重要である。本稿は、1973年 5 月21日石川県押水町を襲った竜巻の被害調査に基づいて竜巻による建物破壊の状態と竜巻に対する防災対策という観点から考察したものである¹⁻⁷⁾。

2. 概 要

1973年 5 月21日16時30分頃石川県押水町で竜巻が発生し今浜、竹生野両住居地域を通り末森山へと抜けた。その間約 2km にわたって民家等に多大の被害を与えた。金沢地方気象台農業気象災害速報によれば、この竜巻は 5 月21日16時から17時頃能登半島沖を通過した小低気圧に伴って発達したもので、竜巻に加え押水町を中心にした能登半島中部では16時すぎから約40分にわたって降ひょうにみまわれた。竜巻の発生した押水町の南方 10km のところにある宇ノ気農業気象観測所での風向、風速、気湿、気温の変化を **Fig-1** に示した⁸⁾。

目撃者の話によれば、竜巻の渦が地表に達した地点は押水町今浜地域の沖合約 100m の海上であり被害分布から推定した竜巻の進行方向はほぼ東である。(Fig-2)

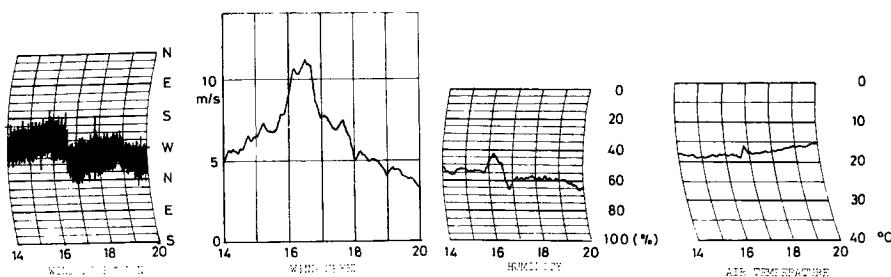


Fig. 1 The records of wind direction, wind speed, air humidity and air temperature observed at Unoke, May 21st, 1973.

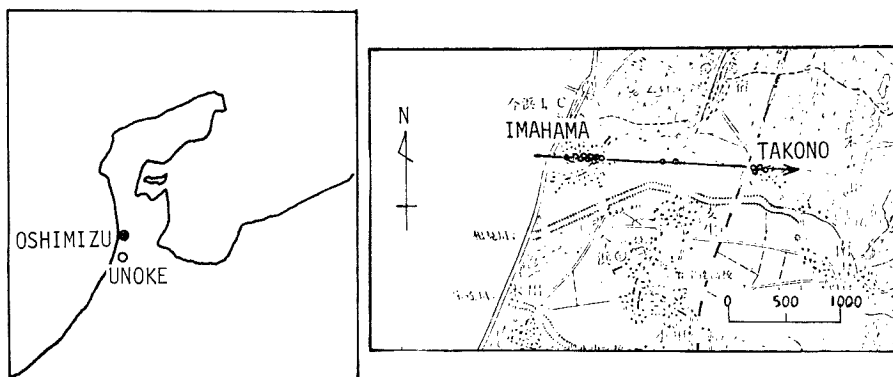


Fig. 2 Locations of Oshimizu and Unoke (left). The path of the Tatsumaki (right).

3. 被害状況

竜巻による被害は主に住宅の密集していた今浜、竹生野の両住居地域と国道169号線付近に集中している。

Table 1 Casualty and damage summary

(昭48.5.22現在 石川県警察本部調べ)

(1) 人的被害	軽傷	1人	
(2) 建物被害	住家	今浜地区	53棟
		麦生	1
		竹生野	5
	非住家	今浜地区	49
		麦生	2
		竹生野	2
(3) 車両被害		今浜地区	2両
		麦生	11
(4) 電柱倒壊			1本
(5) 樹木			14
(6) 罹災者世帯		今浜地区	51世帯
		麦生	1
		竹生野	5
(7) 損害額			1,000万円

被害巾は約100m, 長さは約2kmであった。石川県警察本部の調べた被害をTable-1に示した。また今浜、竹生野、国道169号線付近の個々の被害状況をPhoto 1からPhoto 7までに示した。ここでは被害の最も激しかった今浜地域における被



Photo. 2 Damage to a wooden house.



Photo. 1 Damage to a tree.



Photo. 3 Damage to structures.



Photo. 4 Local damage to a wooden house.



Photo. 5 A wooden house blown off into rice field by the Tatsumaki.



Photo. 6 Damage to the sign tower (1).



Photo. 7 Damage to the sign tower (2).

害分布と被害の特徴について述べる。

3.1. 今浜地域における被害分布と被害の特徴

Fig-3 は今浜地域における被害分布図である。図中太線で囲んだ家が被害をうけたと報告された家、また×印は屋根瓦の被害、斜線は（垂木）または（母屋）ごと飛ばされた屋根、矢印は窓、戸等が飛んだ方向を示している。また印のない家は今回調査できなかった家で詳しい被害状況はつかめていない。被害は今浜地域の西から東へ直線分布をなし、中心から周囲に向かうに従って被害程度が弱まり被害巾は約 100m 程度である。

被害は屋根、窓、戸等であるが特に屋根部分の被害が著しい。また屋根部分の被害のなかでも棟部分の浮き上がりによる被害も目立っている。屋根瓦の被害では飛散した瓦が少なく屋根上でたたきつけられたような破壊状態を示しているものが多い。大被害は納屋、倉庫等の非住家に多く、屋根が（垂木）あるいは（母屋）ごと吹き飛んだといった程度である。また切妻の片方の部分のみに大被害をうけた建物も多い。窓、戸等は家の外の方へ向かって飛び出しているものが多い。

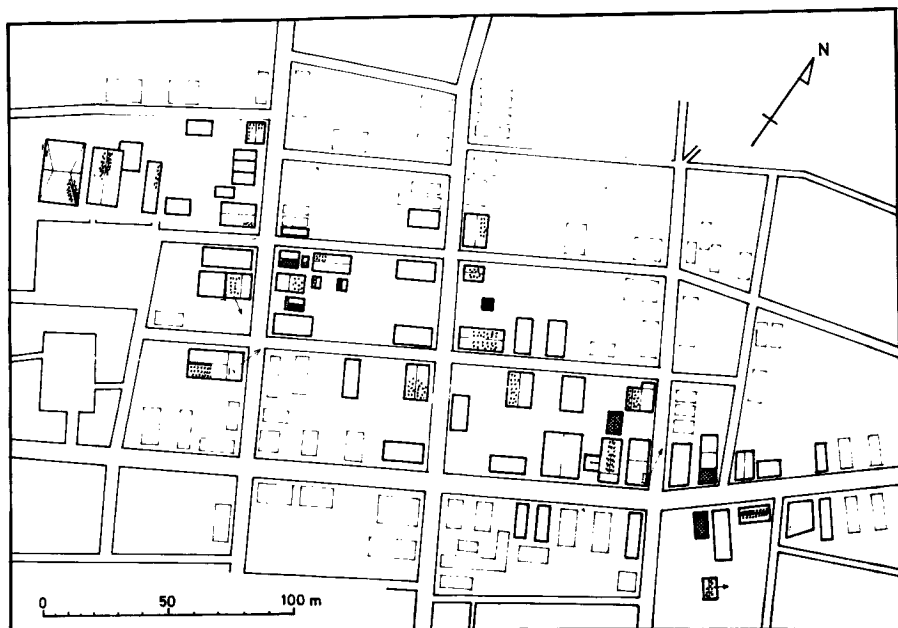


Fig. 3 Distribution of buildings damaged by the Tatumaki in Imahama area.

4. 最大風速の推定

竜巻襲来時の風速がどの程度であるかを知ることは竜巻の機構の解明及び竜巻に対する防災対策上重要な問題である。しかしながら台風と違って竜巻は規模が小さいためその進路上に風速計等の測定計器が設置されている場合はきわめてまれで、竜巻の研究が最もさかんなアメリカでさえそのような記録は非常にめずらしい。そのような事情から竜巻襲来時の風速は建物等の破壊程度によって知るという間接的な方法をとらざるを得ない。また間接的方法によって風速を推定する場合でも、破壊された物体の構造及び材料の性質がはっきりしているものでなければならず木造建物等の破壊等からの推定ではかなり不確かな値しか求められない。そのような理由から対象物を捜した結果、国道169号線沿いのドライブインの2つの広告塔が見つかったので、これらの破壊荷重により竜巻がこの付近を通った時の風速を推定することにした。なお風速を計算したこれらの2つの広告塔は竜巻の進行経路に直角に45m離れて向い合い竜巻経路の内側に向かって倒れていた。

計算例1. 広告塔(I)

この広告塔は Fig-4 に示したように 90φ の鋼管で基礎から片持梁形式で支えられていたものであるが、竜巻により根本で完全に折れてしまった。(Photo-6) 計算ではこの広告塔は静的な風圧力によって倒れ、破壊部分で部材は全断面降伏、部材の耐力は破壊応力度 $\sigma_B = 4100 \text{ kg/cm}^2$ と仮定した。また風力係数は1.2と仮定した¹¹⁾。

以上の仮定により広告塔に加わる力 F は次のように表わすことができる。

$$F \geq \frac{Z \cdot \sigma_B \cdot S}{l} = 227 \text{ kg}$$

$$U = \sqrt{\frac{2F}{\rho \cdot A \cdot C}} > 40 \text{ m/sec}$$

但しここで F は広告塔に加わる力、 Z は部材の断面係数； $Z = 12.45 \text{ cm}^3$ 、 S は降伏点モーメントと全塑性モーメントの比； $S = 1.27$ 、 l は広告塔底部から F までの距離； $l = 285 \text{ cm}$ 、 A は看板の面積； $A = 19320 \text{ cm}^2$ 、 C は

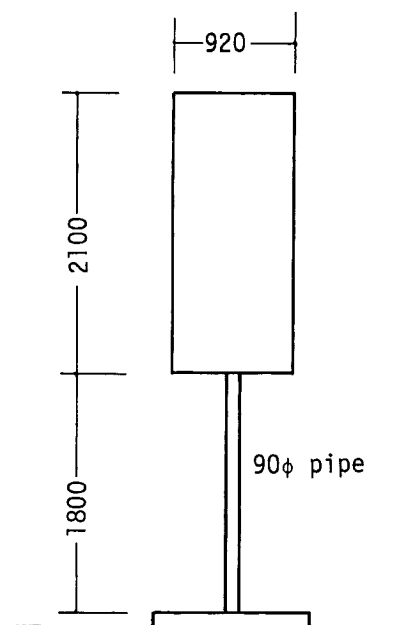


Fig. 4 Dimension of the sign tower (1).

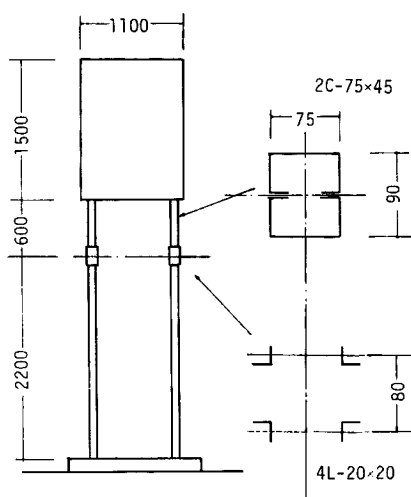


Fig. 5 Dimension of the sign tower (2).

風力係数; $C=1.2$, ρ は空気密度 ; $0.125\text{kg}\cdot\text{sec}^2/\text{m}^4$, U は竜巻時の風速である。

計算例2. 広告塔(Ⅱ)

この広告塔は Fig-5 で示したように 2 本の支柱で片持梁形式で支えられていたもので支柱の中央部の軽量チャンネル 2 個を組合せた箱形柱の継ぎ目 (4L-20×20) のところで約 30° 折れまがっていた。(Photo-7) このアングル部の歪は計算によると 10^{-1} 程度となり、この部材は歪硬化域に入っているため鋼材の耐力としては破壊応力度 $\sigma_B=4100\text{kg}/\text{cm}^2$ を用い曲げ破壊と仮定して計算した。なお風力係数は例 1 と同様に 1.2 と仮定した。

$$F \geq \frac{2\sigma_B \cdot Z \cdot S}{l} = 464\text{kg}$$

$$U = \sqrt{\frac{2 \cdot F}{\rho \cdot A \cdot C}} > 61\text{m/sec}$$

但しここで $Z=6.82\text{cm}^3$, $S=1.12$, $l=135\text{cm}$, $A=16500\text{cm}^2$ とした。

従ってこの付近では地上 3m で $40\text{m/sec} \sim 60\text{m/sec}$ 程度の風は吹いていたと思われる。なおこの付近の被害は今浜地域よりやや弱いように思われる。

5. 竜巻襲来時に建物がうける力

従来から竜巻による被害の主要な原因が風速による過大な風圧力と竜巻通過時の気圧の急激な降下であることはよく知られている事実である。今回の被害でも広告塔や大木の倒壊等は 4 節で示したように竜巻襲来時にかなり強い風が吹いていた事実を裏づけるし、竜巻襲来時に家の中の戸、ふすま等が倒れたという報告や屋根部分の被害が目立った事、戸や窓が家の外側へ向かって飛び出した事等はかなり大きな外向きの力が建物に加わった事を示している。以下に上記の 2 つの力について更に詳しく述べる⁹⁾。

5.1. 竜巻襲来時の強風に伴う力

4 節で述べたように竜巻襲来時の風速はかなり大きなものである。従ってこれによる風圧力は非常に大きなものになり建物破壊の要因の一つといえる。M. Jensen の風洞実験結果 Fig-6 と 3 節 Fig-3 で示した屋根面

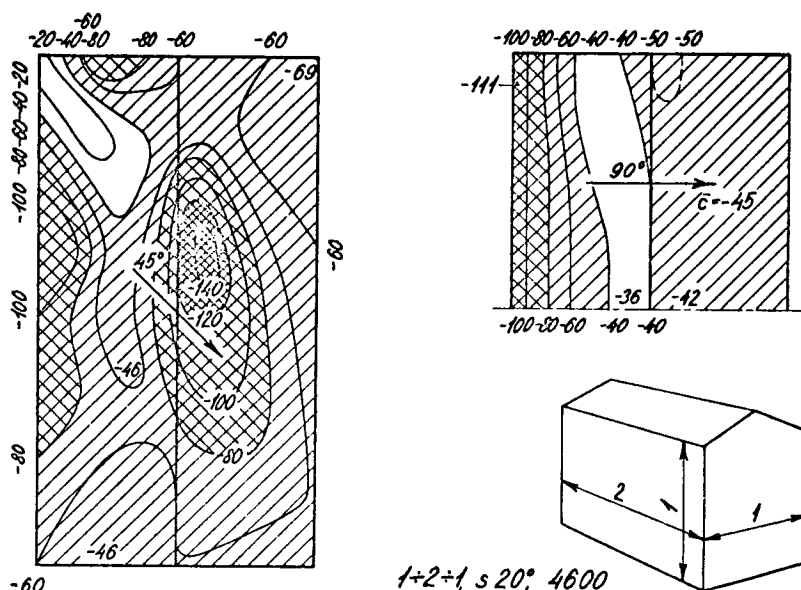


Fig. 6 Wind load on a roof (by M. Jensen).

の被害状況を比較すると、棟部分の浮き上がりによる被害、切妻の片方の屋根部分のみの大被害、軒庇付近での破壊と風圧分布の間にはかなりの対応があり、風速による風圧力が破壊の一要因であることがわかる。また竜巻の進行速度がそのスケールに比べて大きいので風速、風向の時間的変化が著しく、従って建物に加わる風圧力の時間的変化も激しいと考えられる¹⁰⁾。

5.2. 竜巻襲来時の気圧の急激な降下に伴う力

竜巻襲来時の気圧の急激な降下によって建物がうける力は、竜巻のスケール、竜巻の進行速度及び建物の気密度に大きく関係すると思われる。以下に竜巻時の気圧降下によって建物にいかなる力が作用するかをある仮定に基づいて算出した。

建物内外の気圧差によって単位時間に建物から流出する空気量は式(1)で与えられるものと仮定する。

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = B \times \sqrt{\frac{2|P_{in} - P_{out}|}{\rho}} \quad \dots\dots\dots(1)$$

但し P_{in} は建物内部の圧力、 P_{out} は建物外部の圧力、 ρ は空気密度、 B は流出に関する係数、 ΔV は流出する空気量である。

ΔV の空気の流出によって生じる建物内部の圧力の変化は式(2)で与えられる。

$$\Delta P_{in} = -\frac{\Delta V}{V_0} P_{in} \quad \dots\dots\dots(2)$$

但しここで ΔP_{in} は建物内部における圧力の変化、 V_0 は建物の容積である。

(1), (2)より

$$\frac{\Delta P_{in}}{\Delta t} = -\frac{B}{V_0} P_{in} \sqrt{\frac{2|P_{in} - P_{out}|}{\rho}} \quad \dots\dots\dots(3)$$

竜巻時の気圧降下は大気圧の5%~10%位であるから竜巻通過時に空気密度が一定であると仮定して(3)式の Δt を0に近づけると

$$\frac{dP_{in}}{dt} = -\frac{B}{V_0} P_{in} \sqrt{\frac{2|P_{in} - P_{out}|}{\rho}} \quad \dots\dots\dots(4)$$

式(4)を竜巻襲来時の最大気圧降下 $\Delta P_{\max}$, 竜巻のスケール R , 竜巻の進行速度 u で無次元化すると (5) 式のように表わされる。

$$\frac{dP_{in}^*}{dt^*} = -\frac{R}{u} \frac{B}{V_0} \cdot \sqrt{\frac{2\Delta P_{\max}}{\rho}} \cdot P_{in}^* \sqrt{|P_{in}^* - P_{out}^*|} \quad \dots\dots\dots(5)$$

但し $P_{in}^* = \frac{P_{in}}{\Delta P_{\max}}$, $P_{out}^* = \frac{P_{out}}{\Delta P_{\max}}$, $t^* = \frac{t \cdot u}{R}$ である。

ここで $\frac{R \cdot B}{u \cdot V_0} \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P_{\max}}{\rho}} = K$ とし, $t \rightarrow \infty$ の時 $P_{in} = P_{out} = P_0$, $P_0 / \Delta P_{\max} = P_0^*$ とすると竜巻襲来時に建物に加わる力 $\Delta P^* = \frac{\Delta P}{\Delta P_{\max}}$ は式(6)で与えられる。

$$\Delta P^* = P_{in}^* - P_{out}^* = f(K, P_0^*, t^*) \quad \dots\dots\dots(6)$$

竜巻をランキン渦にモデル化すると, その通過時 ($t=0$ が丁度渦中心が通る時とする。)の気圧の変化 ΔP_0 は式(7)で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} ut \geq R \quad \Delta P_0^* &= \frac{\Delta P_0}{\Delta P_{\max}} = \frac{1}{2t^{*2}} \\ ut < R \quad \Delta P_0^* &= -\frac{1}{2}t^{*2} + 1 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(7)$$

但し R は渦の半径, u は渦の進行速度である。

最大気圧降下 $\Delta P_{\max}$ を 500 mmAq (この気圧降下に対応する最大風速 $U_{\max}$ は 63 m/sec である。) $\frac{P_0}{\Delta P_{\max}} = 20$ として式(7)で気圧変化を与え, 式(5)を使って様々の K に対して建物に加わる力を求めたのが **Fig-7** である。図中点線は式(7)により求めた気圧降下を表わし, 実線は建物に加わる圧力を表わす。また **Fig-7** の右上の四角の中に気圧変化に対応する風速の変化を示した。建物に加わる圧力は負が外向き正が内向きである。

普通の民家は完全に閉めきった状態で $B/V_0 = 2 \sim 5 \times 10^{-6} \text{cm}^{-1}$ 程度であるが, 窓, 戸等の開口部を少しあけると気密度は急激に下がり $B/V_0 = 2 \times 10^{-5} \text{cm}^{-1}$ 以上となる。しかしこの場合でも天井裏等では依然として B/V_0 はかなり小さいものと思われる。また竜巻の移動速度とスケールの比 R/u は $0.2 \sim 2 \text{sec}$ 程度であるから, 普通の民家の場合 K は 2.5×10^{-3} から 6.3×10^{-2} 位であろうと思われる。

気圧降下によって建物に加わる圧力は竜巻の性質と建物の気密度に関係する定数に K 大きく関係することが **Fig-7** よりわかる。またその最大外向き圧力は **Fig-8** に示したように K 増大により急激に減少する。3 節

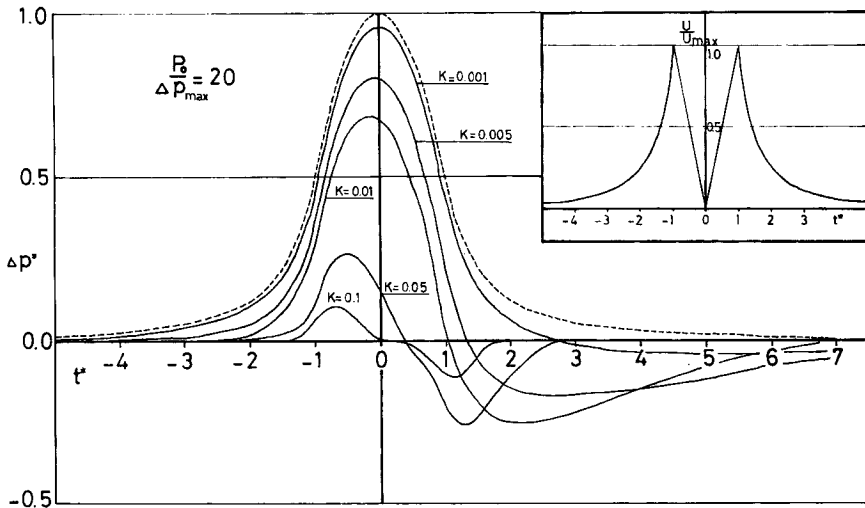
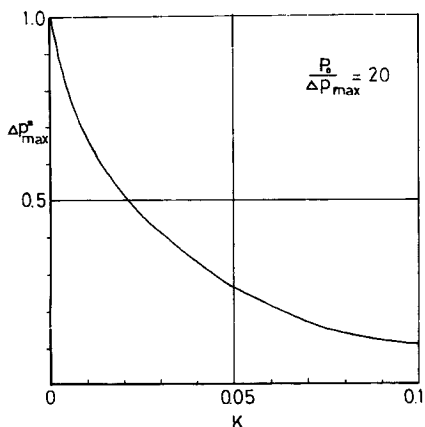


Fig. 7 Time variation of explosive pressure.

Fig. 8 Variation of explosive pressure by K .

で述べたように屋根部の大被害が窓等の少ない倉庫等の建物に多かったのはこれらの建物の気密度が住家より高いせいであるかも知れない。また Fig-7 によると竜巻の中心が通りすぎた後建物には内向きの力が作用することになる。

6. 竜巻に対する建物の防災対策

3 節で指摘したように今回の被害の場合、屋根瓦があまり飛散せず屋根で碎けていたという事実は他の被害報告にはなかった点である。これはこの地方の瓦が雪によってずれ落ちるのを防ぐため 1 枚 1 枚木のさんに径 0.9mm の銅線によって止められていたためではないかと推察される。立川は瓦の飛散実験を行い日本瓦の飛散風速は 35m/sec 程度であるが釘止めしたケラバ瓦の場合は 40m/sec 程度の風速でも飛散しないと報告している¹²⁾。風圧係数 C_p を -1.0 とした著者の略算によると銅線止めをしない場合は 27m

/sec, 径 0.9mm の銅線 2 本で端を止めた場合は 55m/sec 程度となる。

今回の被害だけでなく一般に竜巻による被害は屋根、壁面等の引き抜きによるものが多い。従って竜巻に対する建物の防災対策としてはこのような引き抜き力に対処することがきわめて重要であると思われる。この地方の瓦が雪に対処するために用いていた瓦の銅線止めはそのような意味でかなり有効であると思われる。また(垂木)や(母屋)ごと屋根が吹き飛んだという事実は、木造の場合これらの部分の工作も十分考える必要があることを示している。

また 5 節でも述べたように、竜巻襲来時の気圧降下に伴う力は建物の気密度に大きく関係し気密度の低下により急激に弱まる。従って竜巻襲来時には、開けることができれば窓戸等を開けて気密度を減らすのが効果的であると考えられる。

謝 辞

この被害調査を行うにあたり協力して頂いた押水町の方々、および資料を提供して頂いた押水町役場、金沢地方気象台、ならびに写真を提供して頂いた北国新聞社に深く感謝する。

参 考 文 献

- 1) 藤田哲也：たつまき，共立出版，昭和48年
- 2) Fujita, T. T.: Proposed Characterization of Tornadoes and Hurricanes by Area and Intensity, SMRP Research Paper No. 91, 1971. 2.
- 3) Fujita, T. T.: Tornadoes Around the World, Weatherwise, Vol. 26, No. 2, 1973, 4.
- 4) 相馬清二：竜巻とその研究の概況，超高層タワ気象資料，第5号，1973. 3.
- 5) 横尾義貫他4名：竜巻による建築物の被害調査，JSSC, Vol. 6, No. 50, 1970.
- 6) 藤本盛久他5名：竜巻による建築物の被害調査，JSSC, Vol. 8, No. 76, 1972.
- 7) 石崎澄雄他5名：1969年2月7日豊橋市を襲った「たつまき」に関する調査研究，京大防災研究所年報，第14号A，A，1971，pp. 481-500.
- 8) 金沢地方気象台：農業気象災害速報（昭和49年5月21日の降ひょうとたつまき）昭和48年5月30日。
- 9) Chang, C. C.: Tornado Wind Effects on Buildings and Structures with Laboratory Simulation, Proceedings of the Third International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures, Tokyo, 1971, pp. 231-240.

- 10) Jensen, M. & N. Frank: Model-Scale Tests in Turbulent Wind, Part I, Part II, The Danish Technical Press, 1965.
- 11) Sachs, P.: Wind Forces in Engineering, Pergamon Press, 1972.
- 12) 立川正夫：強風による屋根瓦の飛散について，日本建築学会大会学術講演梗概集，昭和46年11月，pp. 921-922.