

—夏季大学講座内容①—

た つ ま き

北海道大学理学部地球物理学科助教授 上 田 博

1. はじめに

最近、ビデオカメラの普及で、「たつまき」を映像としても見る機会が多くなった。視覚的には、「たつまき」は強力な風の渦巻としてとらえられ、その被害の強さから規模が推定される。しかし、「たつまき」発生メカニズムにはまだ謎が多い。ようやく、ここ10年の間に急速に発達した気象用ドップラーレーダーによって「たつまき」の渦が直接観測される様になり、「たつまき」の構造と発生機構の解明の糸口がみいだされるようになった。

この、謎の多い「たつまき」について、これまでにわかっていることについてまとめ、札幌周辺で発生した「たつまき」を例にして竜巻の構造についての理解を深め、「たつまき」から逃れる術

(すべ) について考察する。

2. 「たつまき」についての知識

「たつまき」は強力な風の渦巻として知られる。しかし、その大きさ、強さ、及び持続時間などの量的な尺度を用いた簡単な定義はない。公の定義としては、気象庁の「地上気象観測法」の“大気現象の定義”のなかに、表1に示したような「たつ巻」の定義がみられる。「たつまき」についてのより詳しい説明は、「気象の辞典」の「たつまき」の項目にみられる。「たつまき」のことをもっとよく知りたかったら、藤田著の「たつまき上 - 渦の驚異 -」がわかりやすい。ここでは、多くの研究者の最近の研究成果も取り入れて、「たつまき」についての簡単な説明を試みる。

種 類	記号	定 義 解 説
たつ巻 Spout	⌈	激しいうず巻。柱状または漏斗状の雲が積乱雲の底から垂れ下がり、海面から巻き上げられた水滴、または海面から巻き上げられた塵、砂などが、尾のように立ち上がっている。 漏斗状の雲の軸は鉛直かまたは傾いている。ときには曲がりくねっていることもある。漏斗の先が、地面または海面からの「尾」とつながっていることが珍しくない。 たつ巻の中の空気は、低気圧性に急速に回転することが多い。積雲の下に弱いたつ巻が観測されることがある。

表1 気象庁「地上気象観測法」による「たつまき」の定義

(1) 「たつまき」の強さと被害

北海道の「たつまき」としては、1992年7月9日札幌市内に発生した「たつまき」が最も記憶に新しい。この「たつまき」では、図1のようにゴ

ルフ場のフェンスが倒れたり(図1上段)、家屋の屋根が飛ばされる(図1下段)などの被害がでた。このような「たつまき」の被害の程度から、「たつまき」の強さが推定される。強さの尺度と

しては、表2に示したような、藤田による「Fスケール（藤田スケール）」がよく用いられている。このスケールに従うと、1992年7月9日に札幌市内に発生した「たつまき」はF2の強い「たつまき」であったといえる。

日本の「たつまき」の強さはF3止まりであるが、アメリカ合衆国ではF5といった想像を絶する「たつまき」の記録がある。しかし、アメリカ合衆国に発生する9割の「たつまき」の強さは日本の「たつまき」の強さと変わらない。では、「なぜ、アメリカ合衆国ではF4やF5といった激烈で想像を絶するような「たつまき」が発生するのに、日本ではF4やF5といった「たつまき」がないのか？」という疑問が起きるが、このことについては、気象ドップラーレーダーを用いた積乱雲の観測が進んだおかげで答が出せそうなところまで研究が進んできた。

なお、水上の「たつまき」では、被害を調査することが困難なので強度の推定もむずかしい。そこで、以後は陸上の「たつまき」について説明する。

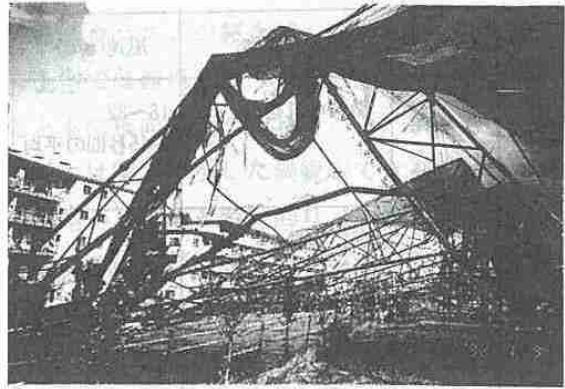


図1 1992年7月9日札幌市内に発生した「たつまき」の被害写真

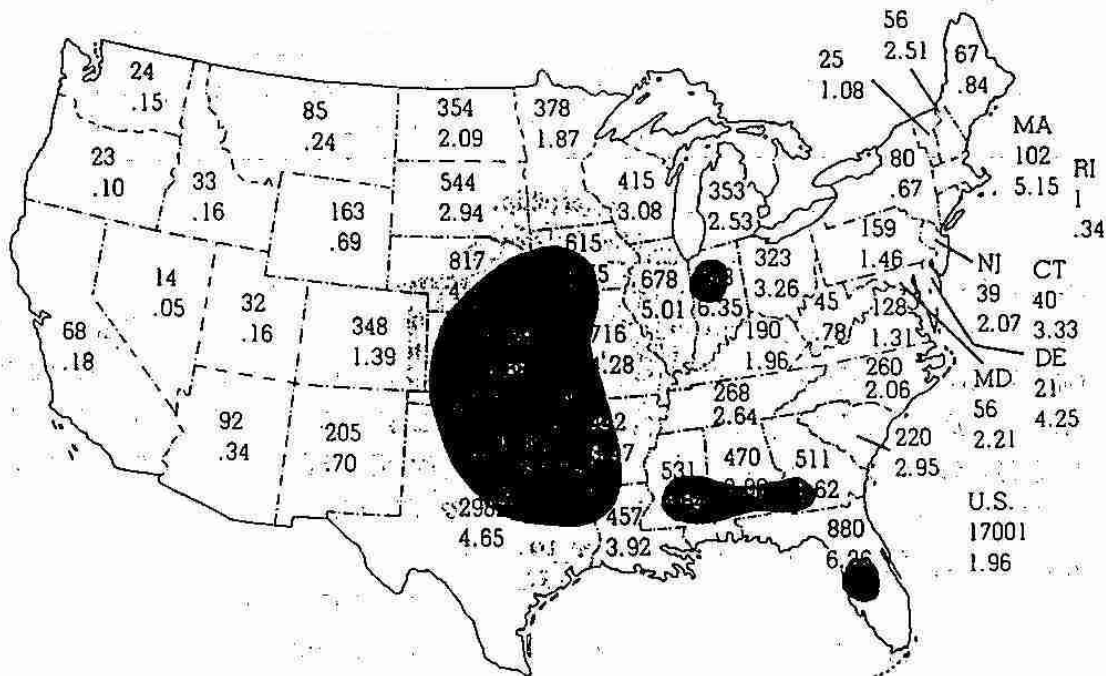


図2 1953年～1976年にアメリカ合衆国の各州で発生した「たつまき」の数(上)と10,000平方マイル(約25,900km<sup>2</sup>)当たりの年平均「たつまき」発生数(下)。〔「Meteorology Today」, Donald C. Ahrens 著より〕

スケール	名 称	風速(m/s)	被 害
F 0	微弱な竜巻	18~32 約15秒間の平均	煙突やテレビのアンテナがこわれる。小枝が折れ、また根の浅い木が傾くことがある。非住家がこわれるかもしれない。
F 1	弱い竜巻	33~49 約10秒間の平均	屋根瓦が飛び、ガラス窓はわれる。またビニールハウスの被害甚大。根の弱い木は倒れ、強い木の幹が折れたりする。走っている自動車が横風を受けると、道から吹き落とされる。
F 2	強い竜巻	50~69 約 7秒間の平均	住家の屋根がはぎとられ、弱い非住家は倒壊する。大木が倒れたり、またねじ切られる。自動車が道から吹き飛ばされ、また汽車が脱線することがある。
F 3	強烈な竜巻	70~92 約 5秒間の平均	壁が押し倒され住家が倒壊する。非住家はバラバラになって飛散し、鉄骨づくりでもつぶれる。汽車は転覆し、自動車が持ち上げられて飛ばされる。森林の大木でも、大半折れるか倒れるかし、また引き抜かれることもある。ミステリーがおこり始める。
F 4	激的な竜巻	93~116 約 4秒間の平均	住家がバラバラになってあたりに飛散し、弱い非住家は跡形もなく吹きとばされてしまう。鉄骨づくりでもペンション。列車が吹き飛ばされ、自動車は何十メートルも空中飛行する。一トン以上もある物体が降ってきて、危険この上もない。あちこちにミステリーがおこる。
F 5	想像を絶する竜巻	117~142 約 3秒間の平均	住家は跡形もなく吹きとばされるし、立木の皮がはぎとられてしまったりする。自動車、列車などが持ち上げられて飛行し、とんでもないところまで飛ばされる。数トンもある物体がどこからともなく降ってくるし、また被害地はミステリーにみちている。

表2 「たつまき」の藤田スケール

(2) 「たつまき」の発生分布と頻度

「たつまき」の構造を考える前に、「たつまき」の発生分布と頻度について述べる。日本では、太平洋岸や日本海岸及び平野部に多く発生し、年平均十数個が記録されている。一方、海外では、アメリカ合衆国、ヨーロッパ、オーストラリアなどの温帯の国々で多く、熱帯には少なく寒帯にはほとんどない。

世界の「たつまき」の大半はアメリカ合衆国で発生しているので、その発生頻度分布を図2に示す。1953年から1976年までの州別「たつまき」発生数(上の数字)と年平均発生数(下の数字)をみると、影の最も濃い部分に当たるオクラホマ州で、

約160km四方の面積(北海道の面積の約1/3)当たり年平均7.9個の「たつまき」が観測されている。中央平原、特にミシシッピー川の西側で発生頻度が高い。このことは、春の大気が不安定な時期にメキシコ湾から湿った空気がこの領域に流入することと関係があると考えられる。

(3) 「たつまき」の発生する気象条件

アメリカ合衆国の中央平原で「たつまき」の発生頻度が高いので、この地域に発生する「たつまき」の研究が最も進んでいる。「たつまき」が発生するときの気象条件を整理すると図3のようになる。「たつまき」が発生する領域の各高度面で



は次のような気象条件になっている。①地上は寒冷前線前面の暖域になっており、メキシコ湾からの暖かい湿った空気が南風で運ばれている。②850 mb (海拔約 1,500 m) 面では暖かい湿った空気の

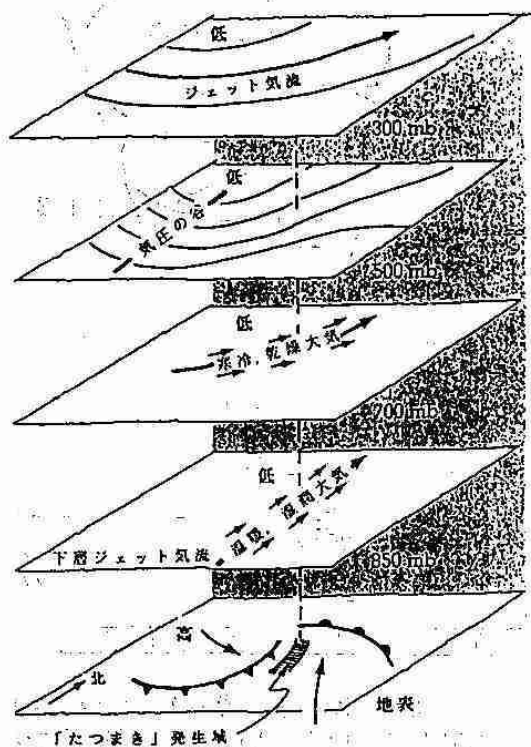


図3 「たつまき」伴う雷雲を発生させる気象条件の概念図 [「Meteorology Today」, Donald C. Ahrens 著より]

南からの強い流入がある。③ 700mbから500mbの間 (海拔約3,000~5,000 m) では、南西からの乾いた寒気の流入がある。④ 500mb (海拔約5,500 m) 面では、「たつまき」発生領域の西側に気圧の谷が存在する。⑤ 300mb (海拔約9,000 m) 面ではジェット気流が吹いている。このような状態の大気は非常に不安定で、大きな積乱雲が発達する条件が整っている。日本ではF 4, F 5規模の「たつまき」が起きないのは、地表の日射による加熱と③の乾いた寒気の流入が不十分なためかも知れない。

このような条件下で活発な積乱雲が発達したときに雲の中に作られる強い渦は「たつまき」のもとになると考えられる。積乱雲の中に強い渦が作

られるメカニズムの概念図を図4に示す。下層東風、上空では西風という図4のようなシアア (高さとともに風向風速が変わること) があると、地表付近には実線で示した渦線ができる。渦線回りの渦を南からみると時計回り (右巻き) になっている。この渦線 (少し大きくみると渦管) が地表付近に発生する上昇流によって持ち上げられると、雲の中では、上空からみると低気圧性 (左巻き、反時計回り) の渦と高気圧性 (右巻き、時計回り)

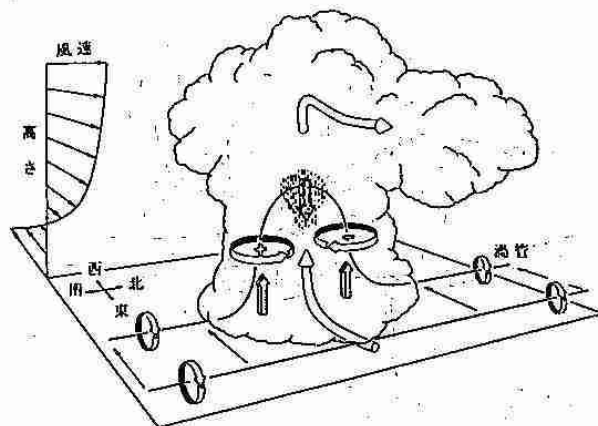


図4 一般風西風 (下層東風) の条件下で、積乱雲内の典型的な渦管が形成される仕組みを示す概念図。シリンダー状の矢印は雲に相対的な気流を示し、影を付けた四角の矢印は上昇流または下降流を示す。(+)印は低気圧性の渦を示し、(-)印は高気圧性の渦を示す。[R. Rotunno (1981) より]

の渦の組ができる。多くの場合、低気圧性の渦が発達する。ただし、左巻きが低気圧性だというのは北半球での話である。

#### (4) 「たつまき」の構造

雲の中にできた低気圧性の渦が地上に降りてきて強められたのが「たつまき」であると考えられる。もちろん、高気圧性の回転をもつ「たつまき」もわずかだが観測されている。雲の中にできた渦が上下に引き延ばされて、強まった渦が地上に達したものが「たつまき」であると考えられている。しかし、雲内の低気圧性の渦は直接「たつまき」のもとになるのではなく、積乱雲の進行方向後方

からの下降流を進行方向前方に運び、その結果、地表付近で新たに渦を生成し「たつまき」をつくるという説も有力になっている。この考えの概念的説明を図5に示した。冷たい下降流が地上に達して水平に広がり、北東から近づく別の下降流起源の冷気と衝突する地表付近の地点に「たつまき」が発生する様子が示される。いずれにしても、雲内に形成される低気圧性の渦は直接ないし間接的に「たつまき」生成に重要な役割をはたしていることには変わりない。

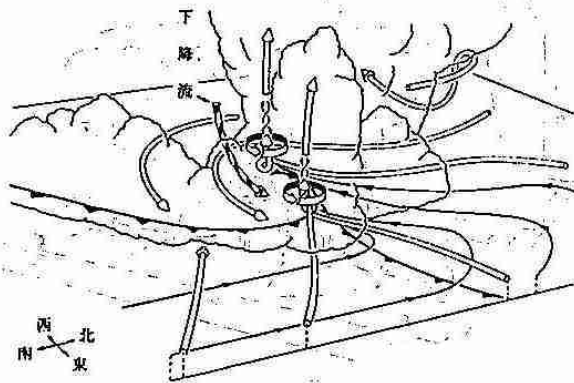


図5 発達した積乱雲の進行方向の後ろ脇からの下降流により、下層に「たつまき」の渦が形成される様子を示す概念図。  
〔J. B. Klemp(1987)より〕

このようにしてできた、「たつまき」の渦は通常漏斗(ろうと)雲として識別される。水蒸気が凝結して雲粒ができているので背景が暗いと白く見える。漏斗雲が渦巻いている様子を模式的に示すと図6のようになる。漏斗雲が地面に到達した地点では大きな被害の可能性がある。特に、進行方向右脇の被害が大きい。この部分では、「たつまき」回りの風速と「たつまき」全体の進行速度が重ね合わされる。台風の場合と同じ原理が働いている。

実際の「たつまき」では漏斗雲が2、3個組になり、図7のように「たつまき」の中心の回りを回転することがある。この証拠は草地や畑に痕跡として残され、「たつまき」の通った路の中に被

害程度の“むら”として表される。この構造は、地上の「たつまき」と雲内の渦とにつながりがあることを示している。

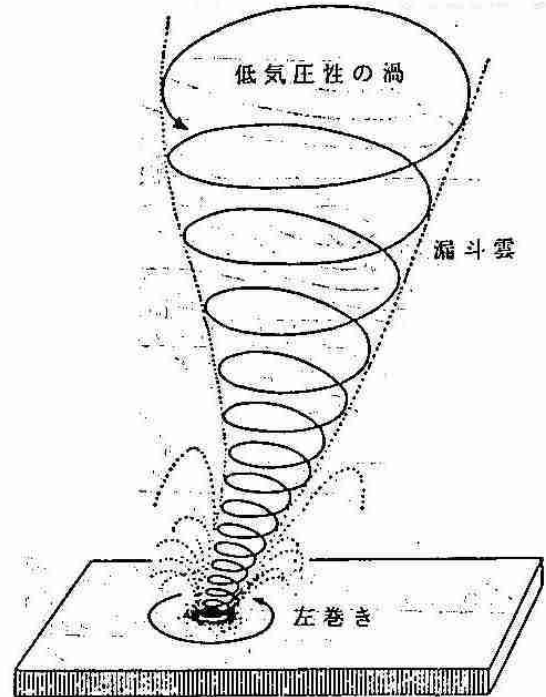


図6 低気圧性回転(左巻き)の「たつまき」の渦の回転方向の模式図。点線は漏斗雲を示す。地表では、漏斗雲のまわりで塵、土、水などが巻き上げられる。

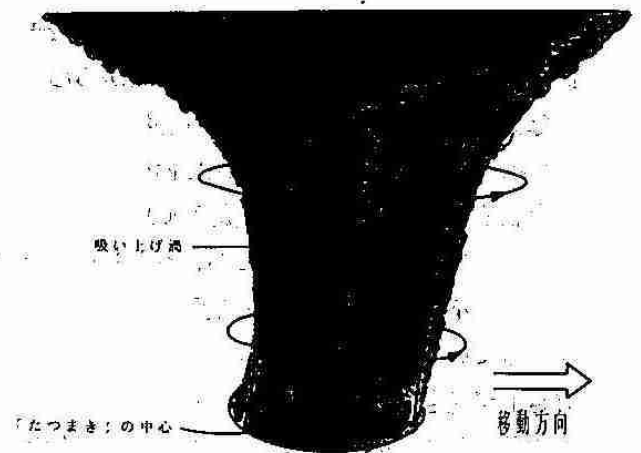


図7 3個の強い渦をもつ「たつまき」の概念図  
〔「Meteorology Today」, Donald C. Ahrens 著より〕

3. 「たつまき」の観測例

最近、気象ドップラーレーダーの発達により、積乱雲内の回転と「たつまき」の渦の構造を観測できるようになった。北海道大学理学部のドップラーレーダーで、1988年9月22日に千歳市周辺で

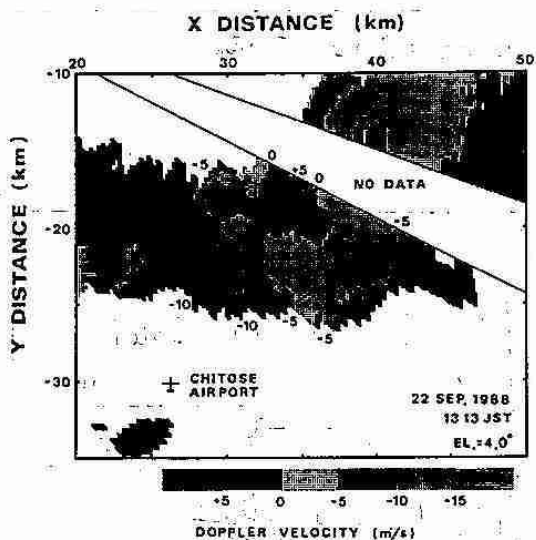


図8 1988年9月22日に千歳市周辺で発生した「たつまき」のドップラーレーダーの速度成分分布。正はレーダーに近づく成分を示し、負はレーダーから遠ざかる成分を示す。〔Shirooka and Uyeda (1991)より〕

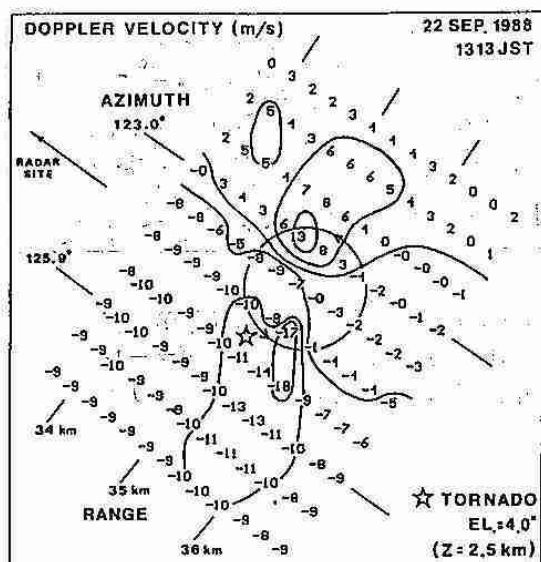


図9 図8の四角の領域の拡大図。数字は速度(m/s)を示し、正はレーダーに近づく成分、負はレーダーから遠ざかる成分を示す。☆印は地上の竜巻の位置を示す。〔Shirooka and Uyeda (1991)より〕

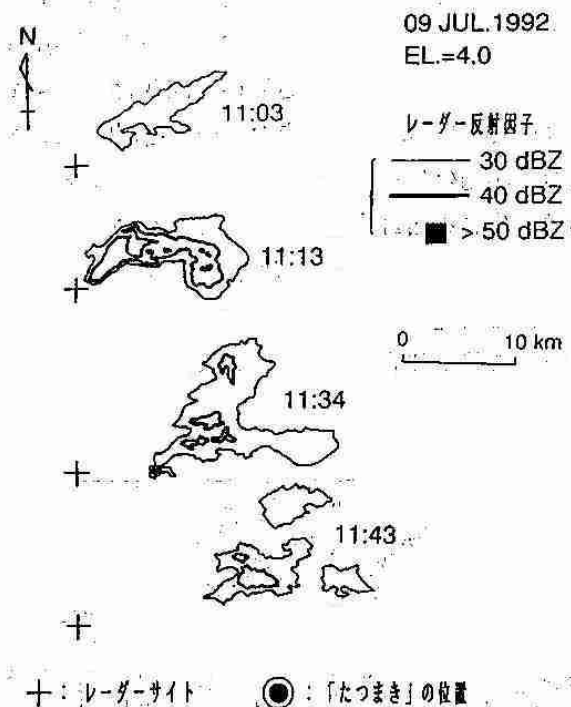


図10 1992年7月9日札幌市内に発生した「たつまき」をもたらした積乱雲のレーダーエコーの変化。〔木下他(1992)より〕

発生した「たつまき」について、日本ではじめて、ドップラーレーダーによる「たつまき」の観測に成功した。その後、気象庁気象研究所もドップラーレーダーによる「たつまき」の観測に成功し、また、北海道大学理学部のドップラーレーダーでは、1992年7月9日札幌市内に発生した「たつまき」の観測もなされた。

1988年9月22日に千歳市周辺で発生した「たつまき」の観測・解析例を図8と図9に示した。図8は北海道大学内に設置した北海道大学理学部のドップラーレーダーでみた、東南東方向の平面上の速度成分分布を示したもので、レーダーに近づく速度成分と遠ざかる速度成分の対のパターンから、直径約7~8 kmの低気圧性の渦の存在がわかる。図9は図8の四角の部分拡大したもので、速度成分測定値を数値で示してあり、円で示した直径約1 kmの地上の「たつまき」につながる地上高度約2.5 kmにある渦の存在を示す。

図10は1992年7月9日札幌市内に発生した「たつまき」の観測解析結果を示す。レーダー反射因子（レーダーエコーの強さ）の時間変化が示され、エコー（積乱雲）の進行方向の後方右側に「たつまき」が発生したことを示す。この「たつまき」の被害分布を図11に示す。最初の「たつまき」発生地点がレーダーに近すぎて、ドップラー速度から位置を特定することはできなかったが、「たつまき」の後半部分の位置は\*印に特定された。被

害分布とは少しずれているが、地上の「たつまき」の位置と上空のそれとはずれていても不思議はない。

このように、「たつまき」をドップラーレーダーで直接観測できるようになったばかりでなく、最近では、ドップラーレーダーを利用して「たつまき」の位置と強さを自動的に検出し、警報を出す方法の開発が進められている。

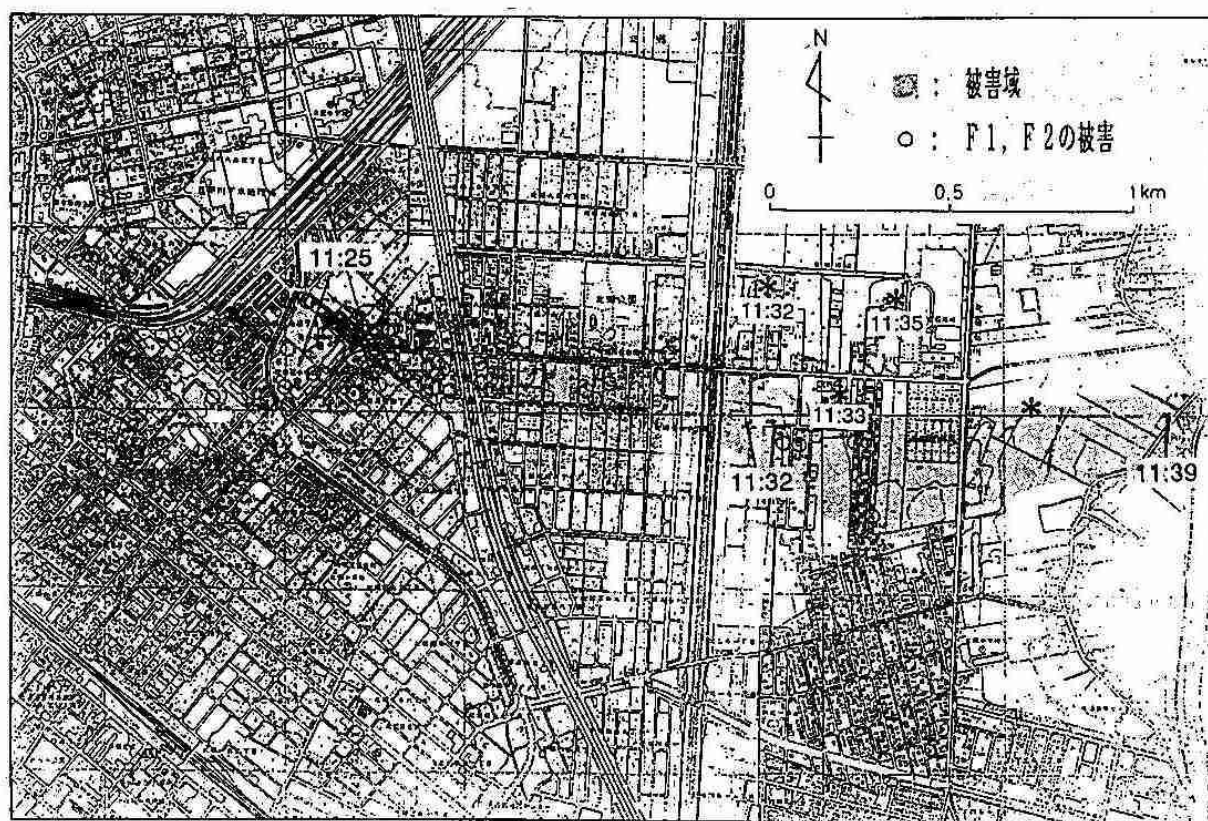


図11 1992年7月9日札幌市内に発生した「たつまき」の被害分布。陰の部分被害域で、F1またはF2規模の被害発生地点を○印で示した。\*印はドップラーレーダーで検出された「たつまき」の上空での位置を示す。〔菊地他(1992)より〕



#### 4. 「たつまき」対策

「たつまき」の理解がかなり進んだ現在でも、日本では「たつまき」の予報や警報を出す体制にはなっていない。やっど、ここ数年のうちに新大阪国際空港と成田空港に設置される気象ドップラーレーダーに、「たつまき」の自動検出システムが導入されることが期待される。

一方、世界で最も「たつまき」の被害の多いアメリカ合衆国では、百台以上のドップラーレーダーを展開して、「たつまき」をはじめ各種の気象擾乱を自動検出し予警報を出すシステムが展開され始めた。アメリカ合衆国では、十年も前からこのシステムに関する研究が始められていたばかりではなく、いくつかのテレビ局は独自のドップラーレーダーを所有していて、「たつまき」発生時には自局のレーダー観測画像を放送してきた実績がある。

ドップラーレーダーが開発される前から「たつまき」の被害防止軽減のための普及活動は非常に活発である。たとえば、図12に示したように（和訳を図13に示した）、アメリカ合衆国の気象庁は「たつまき」にあったときの注意書など各種のパンフレットを出している。どんなに頑張っても「たつまき」から遠くにのがれるか身を隠すかしか方法のないことは事実だが、とっさの時の行動を決めるには予備知識がものをいう。

日本の気象庁も「たつまき」などの小規模の気象擾乱の予報にも力をいれることになったので、そう遠くない将来「たつまき」予警報が出されるようになるかも知れない。

遠い将来「たつまき」をもたらす積乱雲を人工的につぶす時代がくるかも知れないが、それまでに解決しなければならない問題は余りにも多い。



**In Homes**, the basement offers the greatest safety. Seek shelter under sturdy furniture if possible. In homes without basements, take cover in the center part of the house, on the lowest floor, in a small room such as a closet or bathroom, or under sturdy furniture. Keep away from windows.

**In Shopping Centers**, go to a designated shelter area (not to your parked car).

**In Office Buildings**, go to an interior hallway on the lowest floor, or to the designated shelter area.

**In Schools**, follow advance plans to a designated shelter area, usually an interior hallway on the lowest floor. If the building is not of reinforced construction, go to a nearby one that is, or take cover outside on low, protected ground. Stay out of auditoriums, gymnasiums, and other structures with wide, free-span roofs.

**In Automobiles**, leave your car and seek shelter in a substantial nearby building, or lie flat in a nearby ditch or ravine.

**In Open Country**, lie flat in the nearest ditch or ravine.

**Mobile Homes** are particularly vulnerable and should be evacuated. Trailer parks should have a community storm shelter and a warden to monitor broadcasts throughout the severe storm emergency. If there is no shelter nearby, leave the trailer and take cover on low, protected ground.



図12 アメリカ合衆国の気象庁発行の「たつまき」に会ったときの注意書（パンフレット）



## 「たつまき」に会ったときの安全策

家にいるとき：地下室が一番安全です。できたら、丈夫な家具の下に避難して下さい。地下室のない家では、1階の家の中央の、クローゼットかトイレの様な小室、または、丈夫な家具の下に避難して下さい。決して窓に近づいては行けません。ショッピングセンターでは：指定避難場所に移動して下さい。（駐車場の自家用車は危険です）。職場では：ビル内で一番下の階の廊下か指定避難場所に移動して下さい。

学校では：事前の計画に従って、指定避難場所に移動して下さい。通常一番下の階の廊下が避難場所です。もし、建物の強度が不十分な場合には、すぐ近くの丈夫な建物か、身を守ることでできる低い場所に移動して下さい。講堂や体育館など梁の幅の長い大きな屋根の建物の中には留まらないで下さい。

自動車の中にいるとき：車から出て、近くの建物に避難するか、堀割りや谷間に身を伏せて下さい。開けた郊外では：堀割りや谷間に身を伏せて下さい。

モービルハウスでは：特に危険ですから避難して下さい。モービルハウスが集まっている場所では避難小屋を作り、気象擾乱発生時には気象情報を監視する人を配置して下さい。避難所が近くになれば、モービルハウスから離れ、少しでも身を守れる低い場所に避難して下さい。

図13 図12の注意書の和訳

## 5. まとめ

これまでの研究により、「たつまき」の被害の防止・軽減を考える上でわかっていることを整理すると次のようになる。

①「たつまき」の発生し易い気象条件は積乱雲の発達し易い気象条件とほぼ同じなので、「たつまき」発生の可能性を予報することは現在の技術でも可能である。②「たつまき」発生地点を1時間より前に予測することは、積乱雲の発達が急速であり、「たつまき」を発生させる積乱雲からの下降流の発生予測（発生タイミングの予測）が数分前に行うのがやっとなことなどを考えると、現在の技術では不可能である。③「たつまき」が発生した瞬間に自動的に検出し、警報と連動させることは、気象ドップラーレーダーシステムを用いることによって可能になった。④これまで「たつまき」を、ただ不思議なものとして見てきたが、

発生原因がわかってきた現在、科学的知識に基づいた「たつまき」の被害の防止・軽減策の啓蒙・普及活動を始めることが可能になった。

上記の過去の経験に基づいた知識では、藤田スケールでF4以上の激烈な「たつまき」や想像を絶する「たつまき」は日本では起きないことになっているが、将来も起きないという保証はあるだろうか？2章の「たつまき」の発生条件で述べたことを思いだして、大都市での膨大な熱の放出を考えると、安心してられない問題がある。たとえF3以下の強さの「たつまき」しか起きないとしても、急速につくられる新しい施設には、「たつまき」に襲われた場合のことが必ず考慮されているのだろうか、疑問が残る。

最近、テレビ等で日本に発生する「たつまき」の報道が多くなったように感じるのは、ビデオカメラの普及で多くの人が「たつまき」の映像を目にする機会が増えたためだけののだろうか。世界の気候が大きく変動していることを示す一つのシグナルとして注意しておく必要があるかも知れない。

## 参考文献

「たつまき 上 - 渦の驚異 -」, 藤田哲也著, 共立出版, 228頁, 1973年。

「気象観測法」, 気象庁著, 日本気象協会発行, 161, 1988年。

「気象の辞典」, 和達清夫監修, 東京堂出版, 323-326, 1993年。