

1章 竜巻

1.1 竜巻とつむじ風（大気中の渦）の違い

竜巻の定義

昔から竜巻は珍しい大気現象として記述されてきました。身近な現象としては、つむじ風なども存在します。竜巻もつむじ風も大気中の鉛直渦であり、渦が立つ^{キリッ}という現象自体が珍しいために、注目されてきたのでしょう。

竜巻は、積乱雲に伴う上昇流の渦であり、雲底から地面（海面）までつながったものをいいます。竜巻の中心は気圧が低くなるため、周囲の空気がらせん状に集まり渦が形成され、竜巻渦は凝結した雲（漏斗雲）や巻き上げられた塵や砂により可視化されます。日本では、陸上で発生するもの、海上で発生するもの、すべてを総称して「竜巻」といいますが、アメリカでは、スーパーセルに伴う竜巻をトルネードとよぶのに対して、積雲系の雲に伴う陸上竜巻や海上竜巻をスパウトとよぶことがあります。スーパーセル型トルネードでは、積乱雲内に直径約10km



つむじ風と竜巻の最大の違いは上空に積乱雲があるかどうかということだね。

なぜ竜巻は家や車を破壊するほど強力なパワーを持っているのでしょうか？
竜巻の渦の謎を紐解いていきましょう。



* つむじ風

親雲が存在せず、地上付近で形成された渦は、竜巻と区別して、つむじ風あるいは、塵旋風（じんせんぷう）とよばれる。英語では、whirlwind（旋風）あるいはtornado（ダストデビル）。つまり、親雲の中にメソサイクロンが存在する竜巻（トルネード）とは構造が異なる。世の中には、つむじ風のように竜巻ではないが竜巻に似た渦がさまざまな形態で存在する。例えば、ガストフロント上の2次的竜巻（ガストネード）、火山の噴火に伴う竜巻（火山の噴火に伴う上昇流で発生した竜巻のような漏斗雲が報告されている。また火山の噴火では火山雷も発生する）、火災旋風、山竜巻などが知られている。竜巻のような鉛直方向の渦（鉛直渦）は、何らかの外力によって水平渦が立ち上がる必要があるため、自然界では珍しい現象として認識される。



のメソサイクロン*が形成されるのが特徴です。なぜメソサイクロンが生じるのか、なぜ雲の下で強い渦が生まれるのか、竜巻の謎なのです。

積乱雲に伴う竜巻と、上空に雲を伴わないつむじ風とは学術的には明確に区別されます。よく、「晴れた日の運動会で竜巻のような突風が生じてテントが飛ばされた」というニュースを目にしますが、多くの場合、積乱雲のない状況で発生しています。このように、親雲が存在せず、地上付近で形成された渦は、つむじ風 (whirlwind) あるいは、塵旋風* (じんせんふう) とよばれます。英語では、ダストデビル (dust devil) といいます。塵旋風の発生原因は、強い日射で暖められた地上付近の空気の塊が、上昇する際に周囲の風の変化を受け渦が形成されることですから、親雲の中にメソサイクロンが存在する、竜巻 (トルネード) とは発生原因が大きく異なっています。

世の中には、つむじ風のように竜巻ではないが竜巻に似た渦*が存在します。例えば、火山の噴火に伴う竜巻 (volcano tornado)、火災旋風* (fire whirlwind)、山竜巻* (mountainado) などが知られています。これらの竜巻に似た鉛直渦は、地表面付近における何らかの外力*によって渦が形成され、自然界で珍しい現象として認識されるのです (図1・1)。

つむじ風

日射の影響で発生するつむじ風 (ダストデビル) は、比較的風が弱く晴れた日中に発生するため、空が急に暗くなって降る雨とは違い、前兆現象や予測は不可能といえます。強いて挙げるなら、日射が強く上昇気流が発生しやすい日、地上付近の空気が乾いている、すなわちカラッとした天気が続いた日に発生しやすいといえます。つむじ風は、校庭などその場で発生し、渦は砂ばかりで確認されます。では、なぜ運動会でつむじ風がよく発生するのでしょうか。その理由としては、晴れた日に行うことが多く、広い運動場が存在し、周囲には風に変化を与える校舎が存在し、被害を受けやすいテントが数多く存在するなどの要因が考えられます。しかし、スマートフォン*の普及により目撃者によって動画や写真などでその証拠が残されること、一番の理由ではないでしょうか。つむじ風は、寿命が短く、それほど移動しませんが、地上付近では複雑な動きをしますので、運動会などでは気が付いたら直ちにテントから離れてけがを防ぐことが大事です。つむじ風の風速は20m/s程度であり、弱い竜巻 (FO) と同じクラスです。

強い日射が原因で発生するつむじ風は、広大な砂漠で強い日射などの条件が整えば、おそらく1日で何十個、何百個と日中多数観察することができるでしょう。木枯らしが吹き、枯葉が渦巻く現象もつむじ風です。ビル風や走行する車の後方にてきる渦は、発生原因は異なりますが、現象としては、広義のつむじ風といえます。広大な砂漠で発生するつむじ風は、日射による加熱、上昇流の発生が主な原因となり、わずかな風の乱れで渦が発生すると考えられます。校庭で発生するつむじ風は、日射の影響と校舎など構造物で生じる渦*の両方が効いているといえます。また、木

*鉛直渦

自然界に存在する渦は、連続した管 (筒) 状の構造を有し、流体力学では渦管あるいは渦糸とよぶ。渦管が水平になっている状態を水平渦、垂直に立っている状態を鉛直渦とよぶ。

*凝結

気体である水蒸気が液体である水滴になること。凝結時には相変化に伴う潜熱 (凝結熱) が放出される。

*スーパーセル (supercell)

日本語では単一巨大積乱雲とよぶ。スーパーセルの形成には、気温、水蒸気、周囲の風の場という環境条件が重要である。スーパーセル内には、強い上昇流と下降流が住み分ける結果、衰弱することなく長続きする。メソサイクロンを有する積乱雲をスーパーセルと定義することもある。

*スーパーセル型トルネード

スーパーセル型の竜巻は、雲内に存在するメソサイクロンが親渦となり、そこから発生する。トルネードという場合、スーパーセル型トルネードを指すことが多い。

*メソサイクロン

積乱雲内に存在する直径数kmから10km程度の渦 (鉛直渦)。竜巻の親渦 (parent vortex) に相当することから、「竜巻低気圧」とよばれる。

*塵旋風

広義には「つむじ風」と同じであるが、熱的な原因 (地表面の加熱) で発生するものを指す場合もある。運動会の校庭でしばしば発生するように、強い日射で温められた地上付近の空気塊が、上昇する際に周囲の風の変化を受け渦が形成される。

*火災旋風 (fire whirlwind)

大規模な火災に伴う渦。森林火災や油田の火災時などしばしば発生する。関東大震災時には巨大な火災旋風が複数発生し、多くの人が犠牲になった。

*山竜巻 (mountainado)

山の斜面で発生する大規模な渦。地形の影響で発生すると考えられているが、実態は不明。滑落事故の原因にもなる。

*何らかの外力

加熱による浮力、地形による上昇流などにより、渦の形成や水平渦の立ち上がり、竜巻に似た鉛直渦が形成される。

*つむじ風の風速

地上付近の回転速度は、10〜30m/s程度。ただし、渦の中には飛散物が存在しているため、つむじ風の中に入るのは危険。

*構造物で生じる渦

建物や車の後面で生じる渦。孤立した建物や島の風下では規則的な渦が発生し、カルマン渦とよばれる。



枯らしで枯葉が舞うような渦は、構造物で生じる渦のみで発生すると考えられます。砂漠で発生するつむじ風は、スケールが大きく寿命も長い一方で、構造物で生じるつむじ風はスケールが小さく、寿命は短いと考えられます。つむじ風の回転方向は、構造物の影響などがなければ、右回り（高気圧性）と左回り（低気圧性）が五分五分となります*。

火災旋風

火災旋風とは、火災による加熱、上昇流の発生により渦が形成されることです。個々の火災で生じる上昇流は小規模ですが、大規模な火災になると個々の上昇流がまとまり、周囲の風の影響で巨大な渦に成長していきます。海上油田施設の火災時に、竜巻のような渦が発生したという報告や、火山の噴火時に発生した竜巻の事例もあります。

巨大地震による大規模な火災では、巨大な火災旋風の可能性があります。有名なのは、関東大震災時の火災旋風であり、逃げ遅れた多くの人が犠牲になりました。これは、地震直後に同時多発的に発生した火災が巨大な火災旋風となり、さらにいくつもの火災旋風が各地で生じたためです。当時の目撃者から、「積乱雲と

火災の煙と火災旋風が相まって異様な光景だった」、「地震より火災旋風の方が怖かった」という証言があるほどです。今後発生が予想される首都直下型地震でも、火災旋風が防災上の課題のひとつとしてクローズアップされていますが、どのような条件で火災旋風が発生するかなど、詳細はよくわかっていません。

1.2 竜巻を生むスーパーセル

アメリカ中西部で暖候期に発生する巨大な竜巻は、トルネード (tornado) とよばれます。巨大な竜巻を生み出すのは、組織化され巨大に発達

オクラホマでは日本よりかはるかに大きな竜巻が発生するけど、人が多く住んでいないから竜巻の規模の割に人的被害は少ないんだよ。



した特別な積乱雲(図1・2)であり、スーパーセル (supercell) とよばれます。スーパーセルは、積乱雲自体が回転するのが特徴で、この雲内の回転は直径10kmのスケールを持ち、メソサイクロン (竜巻低気圧) とよばれます。言い換えると、スーパーセル型トルネードは、「親雲内にメソサイクロンを有するもの」と定義することができます。スーパーセルから生まれるトルネードを、スーパーセルトルネード (supercell tornado) / そうでない竜巻を非スーパーセルトルネード (non-supercell tornado) と区別するにしましょう。

スーパーセル内では、どのようにしてメソサイクロンが形成されるのでしょうか。一般に、積乱雲の雲底下では風の鉛直シ



図1.1 竜巻のような渦

*つむじ風の回転方向
台風や巨大積乱雲など数百kmから千km程度の規模な大気現象には、地球の自転の効果であるコリオリ力(転向力)が働く。コリオリ力は、北半球では運動する物体の右向きに働き、南半球では逆(左向き)に働き、赤道ではゼロとなる。北半球と南半球で台風の回転方向が逆(赤道では台風は発生しない)などの効果による。北半球では、竜巻低気圧(メソサイクロン)の回転方向は反時計回り(左回り)であり、その結果トルネードも大部分が左回りとなる。それに対して、スケールの小さなつむじ風にはコリオリ力が働かないため、回転方向は、右回り、左回りどちらでも起こり得る。

*特別な積乱雲
アメリカでは大規模な雷雨を、サンダーストーム (thunderstorm) とよぶ。サンダーストームの中で、「直径2センチ以上の雷」、「時速93キロメートル(58マイル)以上の風」、または「竜巻」の一つ以上が伴った場合に、「激しい(severe)」と判定される。日本語訳は正確には「雷雨風」だが、一般には「雷雨」と訳される場合が多い。



アー*により、車軸のような水平渦*が形成されま
す。積乱雲の強い上昇流が水平渦を持ち上げ、
渦を立ち上がらせるわけです。その結果、立ち
上がった水平渦は鉛直渦として雲内で存在し、
竜巻の親渦（メソサイクロン）となります。こ
のような力学的なメカニズムは、1980年代
以降さまざまな観測や数値実験により明らか
なっています。ただし、この直径10km程度のス
ケールを有するメソサイクロンから、直径
100mの竜巻渦がどのようなメカニズムで形
成されるのか、あるいはどのタイミングで発生
するのかが、未だに不明な点が残されており、
「竜巻の謎」です。

一方、非スーパーセル竜巻のメカニズムは大き
く異なります。地上付近で風がぶつかり風の
水平シア*が生じると、このシアーライン上は、不
安定になって（シアー不安定）いくつもの渦が地
上付近で形成されます。たまたまそこに通りか
かった、発達中の積雲・積乱雲の上昇流とこの

渦がカップリングすると、渦は上昇流により引き伸ばされて、竜巻（鉛直渦）となり
ます。数ある積雲・積乱雲と数ある渦が、積雲の発達段階で偶然出会うことが非ス
ーパーセル竜巻に必要な条件です。自分の中で渦を作って自分の上昇流で竜巻を生み出
すスーパーセルと違って、非スーパーセル竜巻の誕生は、他力本願、確率の問題とい
えます。陸上でも、海上においても、このような条件が整えば、非スーパーセル竜
巻は発生し、同時に複数本の竜巻が形成される可能性もあるといえます。

古典的なスーパーセル竜巻発生理論は、渦の起源は上空の雲内にあり、積乱雲自
身が渦を作り、積乱雲の上昇気流がその渦を立ち上がらせる効果が主なメカニズム
です。それに対して、非スーパーセル竜巻は、渦の起源は地上にあり、その渦とは
無関係な積雲・積乱雲がたまたま渦と手を取り合った時に、渦が引き延ばされる（ス
トレッチ）効果で発生するという違いがあります。最近の観測研究からは、スーパ
セル内に複数の親渦（メソサイクロン）が存在する、竜巻渦そのものの構造が多重
渦として変化していく、スーパーセルの構造にもいくつかの型があることなどが報
告され、スーパーセル竜巻がより複雑であることが理解されています（図1・3、
1・4）。さらに、スーパーセル竜巻が発生するためには、上空のメソサイクロン
の存在だけでなく、地上の渦（ガストネード）の存在が重要であることが指摘され、
複雑なメカニズムが明らかにされています。

アメリカのトルネードに関しては、このようなメカニズムが提唱され、理解されて
いますが、日本の竜巻はどうでしょうか。親雲であるスーパーセル自体のスケールが

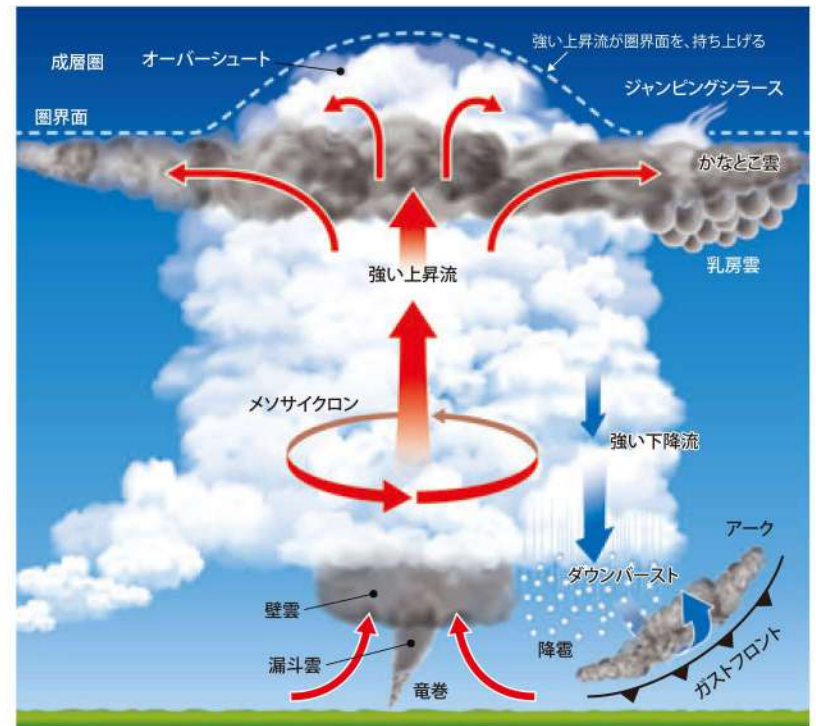


図1.2 積乱雲（スーパーセル）の模式図

*風の鉛直シアー
高度方向に風向・風速が変化すること。一般に、
風向・風速が変化することを、ウィンドシアア
(wind shear) とよぶが、高度方向に風が変化
する場合「鉛直シアア」、同一高度で変化する
場合を「水平シアア」とよぶ。

*水平渦
渦管には水平渦と鉛直渦が存在。

*風の水平シアア
同一高度で異なった風向・風速の風が存在する
状態。特に地表付近で形成されるウィンドシ
アアは、「低層ウィンドシアア」とよばれ、航
空機の離着陸に大きな影響を与える。低層ウィ
ンドシアアの原因は、積乱雲「ダウンバースト」
以外にも、地形の影響や局地前線などさまざま
である。

僕たち積乱雲の
エサは「熱」と「水蒸気」なの。
この2つが揃う環境になると
大きくなっちゃうんだ。



スーパーセルは日本語で、単一巨大積乱雲とよばれます。では、なぜ1個の積乱雲が巨大化して長続きするのか、スーパーセルの組織化とはどのようなメカニズムなのでしょう。スーパーセルの組織化には、気温、水蒸気ともうひとつ、周囲の風の影響が重要になります。大気が不安定になり、上昇気流が生じて地上付近の大量の水蒸気が凝結して雲が鉛直方向に発達すると積乱雲が組織化されやすい環境になります。ただ、これだけではスーパーセルにはなりません。さらに、高さ方向に風が変化（風の鉛直シア）すると、うまく上昇流と下降流が分離されることになり、積乱雲は衰弱することなく長続きし、発達するのです。

スーパーセルとなる積乱雲の周辺では、地上付近で南風、

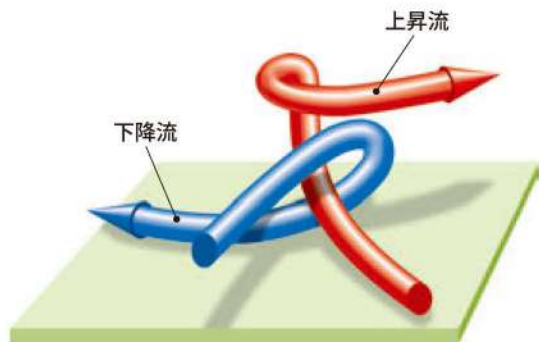


図1.4 スーパーセルの3次元気流

1.3 竜巻が生まれる “最大の謎”

スーパーセルは日本語で、単一巨大積乱雲とよばれます。では、なぜ1個の積乱雲が巨大化して長続きするのか、スーパーセルの組織化とはどのようなメカニズムなのでしょう。スーパーセルの組織化には、気温、水蒸気ともうひとつ、周囲の風の影響が重要になります。大気が不安定になり、上昇気流が生じて地上付近の大量の水蒸気が凝結して雲が鉛直方向に発達すると積乱雲が組織化されやすい環境になります。ただ、これだけではスーパーセルにはなりません。さらに、高さ方向に風が変化（風の鉛直シア）すると、うまく上昇流と下降流が分離されることになり、積乱雲は衰弱することなく長続きし、発達するのです。

日本とアメリカとは異なり、渦の直径が数kmあるような巨大なトルネードは日本ではほとんど発生しません。また、多くの竜巻が海上で発生していますので、日本の「竜巻」とアメリカ中西部で観測される「トルネード」とは同じものか？ という疑問があります。日本では、竜巻の研究者数がアメリカに比べて少なく、詳細な観測事例も少ない状況ですので、日本の竜巻研究はこれからといえます。

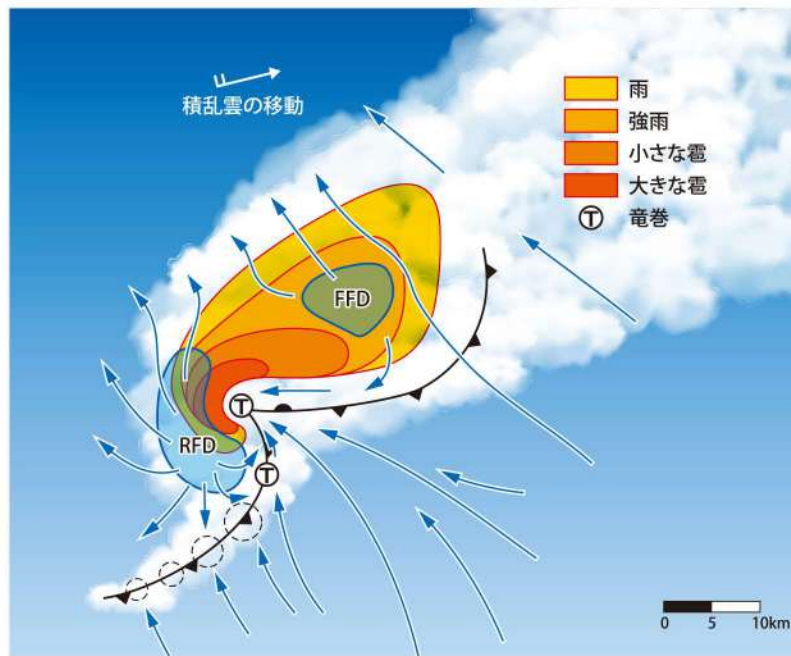
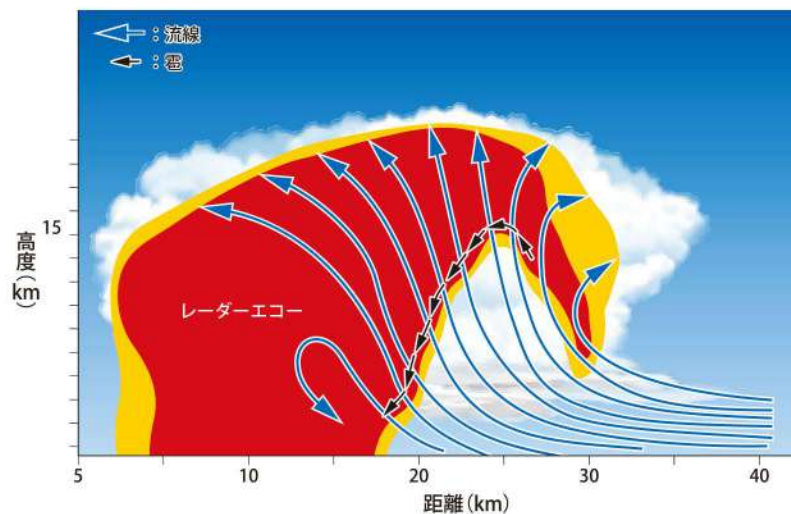


図1.3 上：断面図，下：降水分布と気流場
FFD (Forward Flank Downdraft：前方側面下降流) と、RFD (Rear Flank Downdraft：後方側面下降流) のうち、RFDが作るガスフロント上で竜巻が発生すると考えられている。



中層（高度3〜5 km）で南西から西風、それより高い高度では、西から北西風が卓越します。このパターンは日本でも、西にロッキー山脈を越えるアメリカ中西部でも同じです。アメリカ中西部では、トルネードが発生しやすい春先に低気圧が発達すると、下層ではメキシコ湾からの湿った南風が吹き込み、中層ではロッキー山脈越えの乾いた南西〜西風が、上層では偏西風が吹くという、風向が高度とともに時計回りに変化する環境場が存在します。関東平野でも、太平洋、相模湾からの海風（南風）、西側の山地を越える南西風、上空の偏西風という環境は、低気圧の発達時に生じて、しばしば竜巻（スーパーセル）の発生しやすい条件が生じます（図1・5）。このような風の鉛直シアが存在しないと、どんなに積乱雲が発達しても、上昇流は降水による下降流で打ち消されてしまい、継続的な雲の発達には期待できないのです。

風向が高度とともに時計回りに変化する環境が存在すると、南東から入り込んだ多量の水蒸気を含んだ暖かい空気は、ガストフロントで上昇し、そのまま上空圏界面まで達し、

その気流は前面（東方向）に抜けます。一方、中層で西から積乱雲に入り込んだ乾いた気流は、上昇流を邪魔しないように、上昇流の隣で下降気流と一緒に地面に達します。このように、周囲の風がねじれる影響で、積乱雲内部の気流もねじれるのです。乾いた空気が入り込むと、降水域では蒸発が進み、蒸発による冷却*で空気が重くなり、下降流速は増します。下降流は、①上昇流を打ち消さない、②強められた下降流は地上でガストフロントの収束*を強める、③その結果、強い上昇流が生じるのがスーパーセルのポイントです（図1・6）。スーパーセルは自分自身が衰弱することなく、上昇流と下降流が住み分け、お互いに強め合って著しく成長します。

強い上昇流と強い下降流が背中合わせで存在するのが、スーパーセルの特徴であり、30 m/sとか50 m/sに達する上昇流域では竜巻が発生し、強い下降流域では、ダウンバーストや降雹・豪雨が観測されます。日本でもときどき、雹が観測されますが、大きくてピンポン玉やみかんくらい、直径5〜10 cmくらいです。アメリカでは、サッカーボール大の雹が降ったという記録があるほど大きな雹が降ります。つまり、雹も特別な環境下で形成されるスーパーセルに伴う現象であり「トルネードストーム」だけでなく、「ヘイル（雹）ストーム」ともよばれています。昔の教科書では、雹の成長は、積乱雲の中で上昇・下降を何回も繰り返して成長するという説明もありましたが、実際はそうではありません。スーパーセルの上昇流はあまりにも強いいため、たとえ雹粒ができて吹き飛ばされてしまいます。一方で、上昇流

内陸部で竜巻が発生する仕組み

→ 海からの暖かく湿った空気 ← 山からの冷たい空気



図1.5 アメリカ（中西部）と日本（関東）の環境場

*蒸発による冷却
ダウンバーストの発生原因。

*収束 (convergence)
気流が1点に集まること。竜巻の気流に関しては、地上付近において旋回しながら渦の中心に向かって集まっていく。前線は収束帯であり、低気圧や台風は下層で収束、上空で発散の構造を有する。

*雹
直径5 mm以上の氷粒子を雹、5 mm未満を霰（あられ）として分類。



域から離れてしまうと、重力で落下します。上昇流の中心から少し離れた所、重力と上昇流がうまくバランスして雹が漂っていられる場所では雹は成長を続けます(図1・7)。成長して重くなると、落下してしまいますが、もう少し上昇流のコアに近い場所でバランスします。スーパーセルでは、雲自体が回転しているため、雹は上昇流のコアの周りを回転しながら漂い、成長を続けるのです。巨大なスーパーセルであればあるほど、上昇流が強く、結果として雹も大きくなります。

平面的にスーパーセルを観ると、上昇流域では降水がなく、その周りに降雹域、その外側に強雨域が存在するという構造を示します。気象レーダーで観測すると、ドーナツの真ん中のようにエコーのない領域の北側に、取り囲むような強エコー

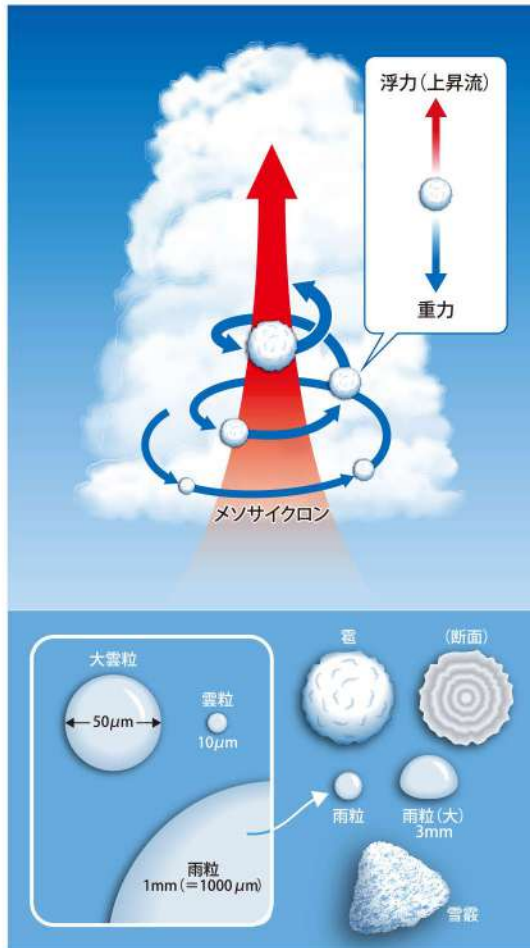


図1.7 スーパーセル内部における巨大雹の成長(上)と降水粒子(下)

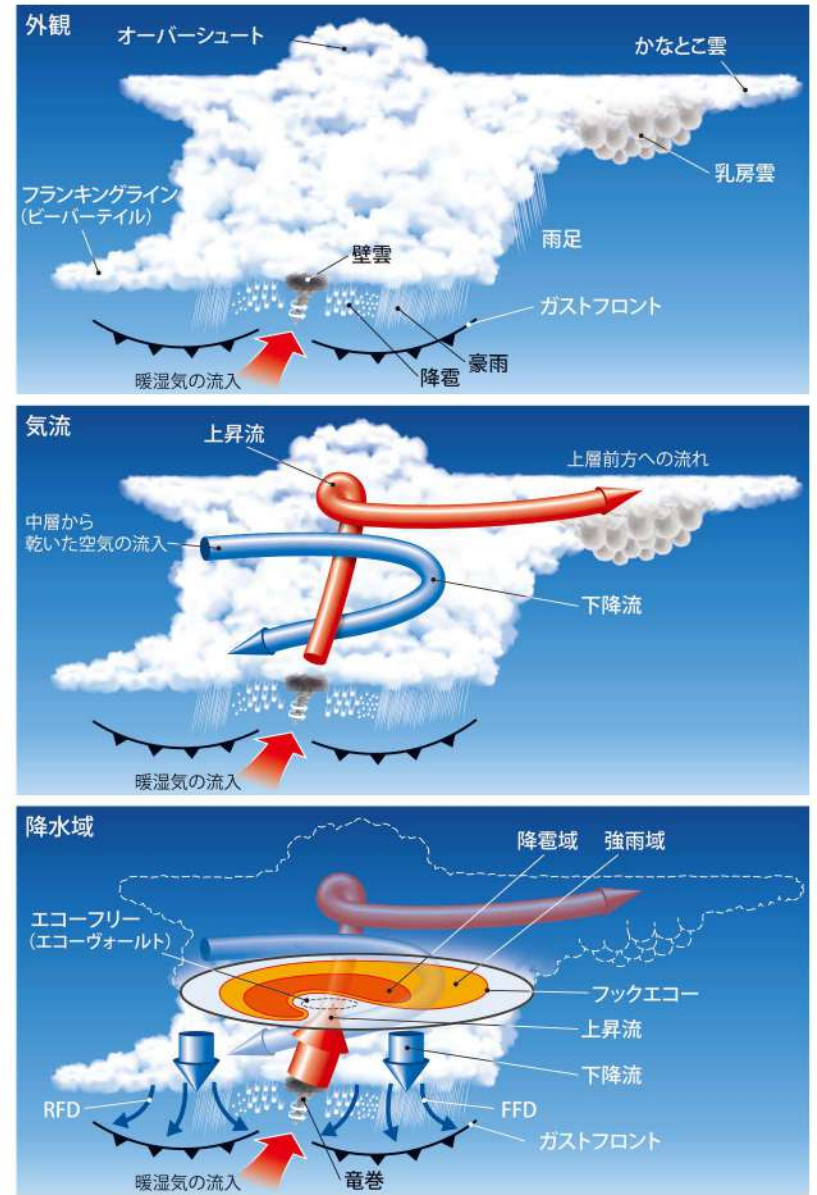


図1.6 スーパーセル

スーパーセルの中にメソサイクロン
という激しい渦のモトができるから
漏斗雲ができて竜巻が
発生するんだよ。



肉眼で見ても、スーパーセルの雲底には、竜巻の漏斗雲とは別に、ひと回り大きな親渦が存在することがわかります(図1・8)。このように、スーパーセル竜巻は複雑な構造を示すことが多く、メソサイクロンからどのように竜巻が発生するのか、最大の謎といえます。また、メソサイクロンから竜巻が発生する場合としない場合の違いなど、十分に解明されていない点も残されています。



図1.8 漏斗雲(直径100m)と雲底の親渦(Kobayashi et al.1996)

メソサイクロン (mesocyclone)

スーパーセルは、鉛直方向に風が変化しうまくねじれる影響で、雲自体が回転する特殊な積乱雲です。この雲内の回転は直径10kmのスケールを持ち、メソサイクロン(竜巻低気圧)とよばれます。スーパーセル竜巻は、雲内に存在するメソサイクロンが親渦となり、そこから発生します。直径100mの竜巻を観測的に捉えることは難しいですが、雲内のメソサイクロンはドップラーレーダーで観測することが可能です。

さらに最近の研究では、フック状強エコー域の中で進行方向前面側面と後方側面の2か所に下降流域が存在することがわかってきました。前者をF F D (Forward Flank Downdraft: 前方側面下降流)、後者をR F D (Rear Flank Downdraft: 後方側面下降流)とよびます。特に、R F Dが作り出すガストフロントが竜巻発生に必要な役割を果たしていることもわかってきました。地上における、R F Dによるガストフロント上の渦(ガストネード)と上空のスーパーセル内で形成されるメソサイクロンがカップリングして初めて地上から上空まで渦がつながるとい考え方がです。ガストフロント上の渦は2次的なものです。スーパーセル竜巻の形成にも重要な役割を担っています。

*フックエコー (hook echo)
通常レーダーで観測できる竜巻のサイン。