



関東平野の竜巻発生メカニズムに関する研究 ～竜巻再現実験装置の開発を通して～

沖縄県立球陽高等学校

1年 又吉 真子 1年 奥間 夢翔 1年 石川 ひな子

1 研究目的

竜巻は積乱雲の下で地上から雲へと細長く伸びる高速な渦巻き状の上昇気流である。突風の一種で規模が小さく、寿命が短い割に猛烈な風を伴うのが特徴である。地上で強い竜巻が発生すると、暴風によって建物などに甚大な被害をもたらすことがあり、災害をもたらす典型的な気象現象の一つとされている。また、竜巻が発生する可能性のある積乱雲を観測することはできるが、実際に発生する竜巻の確率は約5%とされている。

竜巻再現実験としては、回転する気流を上昇気流で吸い上げる方法や数値実験が多く知られている。また、最近では工学的竜巻シミュレーター（東京工芸大学）、マルチファン・マルチベーン式トルネードシミュレータ（徳島大学）などが大学において開発されている。しかし、従来広く行われている実験方法は、安価ではあるが竜巻の発生条件を最初から与えて再現しているため、実際の自然状況下での竜巻発生条件の解明に役立たない。大学で開発されているシミュレータは、竜巻発生条件を与えずに竜巻を発生させているが、制作に数百万円が必要とされるため一般的な実験とは言い難い。

そこで、本研究では竜巻発生条件を初めから与えない竜巻再現装置を身近で安価な材料を用いて開発することを目指す。そして、自然状況下でどのような過程で竜巻が発生するのかを解明することを目的とする。

2 研究方法

(1) 関東平野で発生した竜巻の調査

以下の竜巻について、被害状況及び気象状況を調べる。

- ① 2012年5月6日 12:30 茨城県つくば市で発生した竜巻
- ② 2013年9月2日 14:05 埼玉県越谷市で発生した竜巻

(2) 身近で安価な材料を用いた竜巻再現装置の開発

本校の理科教室にある物や身近な素材を用いて、(1) ①②の竜巻発生時の風を再現できる安価な竜巻再現装置を開発する。

(3) 竜巻発生実験

(2) で作成した竜巻再現装置で、(1) で調べた風・気温差をモデル化し、竜巻が発生するかを検証する。

3 得られた結果

(1) 関東平野で発生した竜巻の調査

- ① 2012年5月6日 12:30 茨城県つくば市の竜巻
 - i) 被害 被害写真より、猛烈な風が吹いていたことが分かる（図 3-1,2）。



図 3-1 つくば市ホームページより



図 3-2 国土技術政策総合研究所より

ii) 天気図と衛星画像および概況（気象庁 HP 日々の天気図より）

（概況） 6日（日）関東北部、福島県で竜巻。上空の寒気と下層の暖かく湿った空気により関東・東北は激しい雷雨。茨城県つくば市で F3 の竜巻発生、関東北部で大きな被害。水戸で直径 28mm、盛岡で 5mm のひょう観測。

天気図（図 3-3）より、関東平野では日本海の低気圧に向かって暖かく湿った南西の風が吹いていたことが分かる。

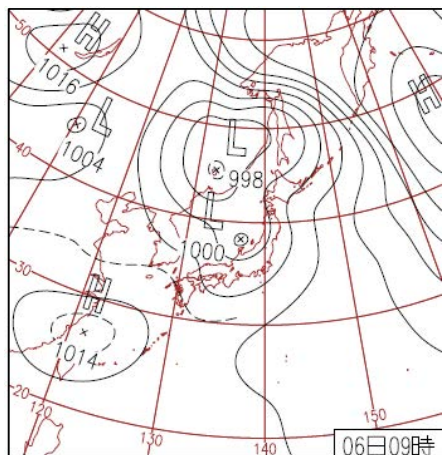


図 3-3 天気図（気象庁 HP より）



図 3-4 気象衛星画像 (tenki.jp より)

iii) 竜巻発生時前後の気象レーダー画像

気象レーダー画像（図 3-5,6）の赤や黄色の激しい雨～猛烈な雨の場所は積乱雲と対応する。竜巻発生地点を☆印で表す。積乱雲が関東平野を西から東へ発達しながら通過したことが分かる。



図 3-5 気象レーダー画像 (tenki.jp より)



図 3-6 気象レーダー画像 (tenki.jp より)

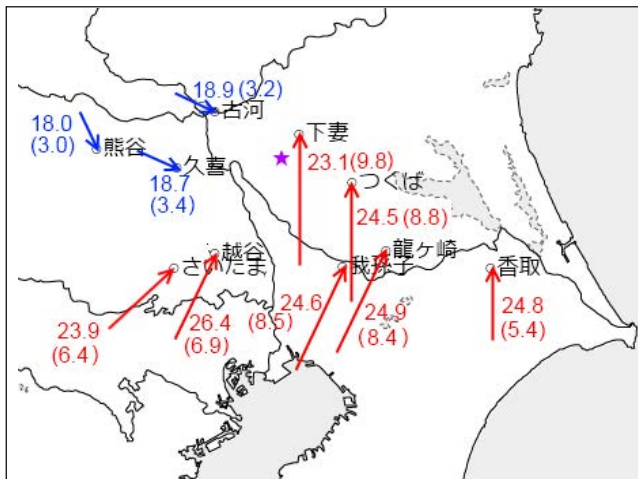


図 3-7 竜巻発生時刻 12:30 のつくば周囲における
風向・風速・気温（気象庁のアメダスデータより作成）

表 3-1 竜巻発生までの気象

時刻	日照時間 (前 1 時間)	気温
6:00	0.4	15.5
7:00	1.0	17.4
8:00	1.0	18.5
9:00	1.0	21.2
10:00	0.3	21.0
11:00	0.4	23.5
12:00	0.8	24.9
13:00	0.7	25.6
(12:30 竜巻発生)		

iv) 12:30 の周囲における風向・風速・気温

図 3-7 の矢印の長さは風速の比率、赤は南寄りの風、青は北寄りの風、星印は竜巻発生地点を表す。竜巻発生地点東側の 23℃以上の暖かい 6 ～ 10 m の南西の風に対し、西側から 18℃の冷たい 3 m の北西の風が横からぶつかっていることが分かる。

v) 竜巻発生時刻までのつくば（館野）の日照時間・気温（アメダス）表 3-1 によると、つくばは朝から晴れていて、竜巻が発生した 12:00 台も 42 分の日照時間があったことから、積乱雲は 10 ～ 15 分程度で通過したことが分かる。

② 2013 年 9 月 2 日 14:05 埼玉県越谷市の竜巻

i) 被害 被害写真（国土技術政策総合研究所より）（図 3-8）より、猛烈な風が吹いていたことが分かる。

ii) 天気図と衛星画像および概況（tenki.jp の日々の天気図より）（概況） 2 日（月）埼玉～千葉で竜巻発生。東シナ海で台風第 17

号発生。停滞前線に暖かく湿った空気が入り、西日本や東北を中心に雨。東海や関東南部は晴れて気温上昇し大気の状態が不安定、埼玉～千葉県境付近で竜巻。
天気図（図 3-9）より、関東平野では北に横たわる停滞前線に向かって、暖かく湿った南寄りの風が吹いていたことが分かる。



図 3-8 国土技術政策総合研究所より

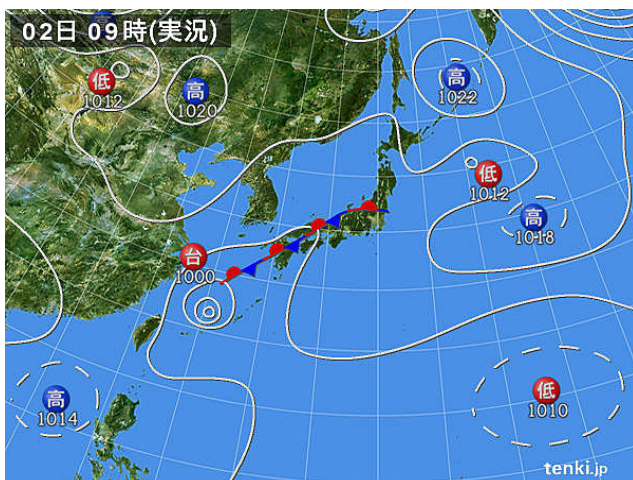


図 3-9 天気図（2013 9/2 9:00）（tenki.jp より）



図 3-10 気象衛星画像（2013 9/2 9:00）（tenki.jp より）

iii) 竜巻発生時前後の気象レーダー画像

気象レーダー画像（図 3-11,12）の赤や黄色の激しい雨～猛烈な雨の場所は積乱雲と対応する。竜巻発生地点を☆印で表わす。積乱雲が関東平野を西から東へ発達しながら通過したことが分かる。

iv) 14:00 の周囲における風向・風速・気温

図 3-13 の矢印の長さは風速の比率、赤は南寄りの風、青は北寄りの風、星印は竜巻発生地点を表す。竜巻発生地点東側の 32℃以上の暖かい 4 m 程度の南の風と、西側の 26℃の相対的に冷たい 3 m の北の風がすれ違うように吹いていることが分かる。

v) 竜巻発生時刻までの越谷の日照時間・気温（アメダス）（表 3-2 省略）

越谷は曇り時々晴れのような天気が続いていたことが分かる。竜巻発生前の 13:00 台は日照時間が 0.7 時間に増え、竜巻通過後には気温が約 4℃下がったことが分かる。

③ 関東平野の地形

図 3-14 右☆印がつくば、左☆印が越谷の竜巻発生地点である。つくば、越谷の両竜巻とも関東平野の中央付近で発生していることが分かる。



図 3-11 気象レーダー画像（2013 9/2 13:00）
（tenki.jp の画像に加筆）



図 3-12 気象レーダー画像（2013 9/2 14:00）
（tenki.jp の画像に加筆）

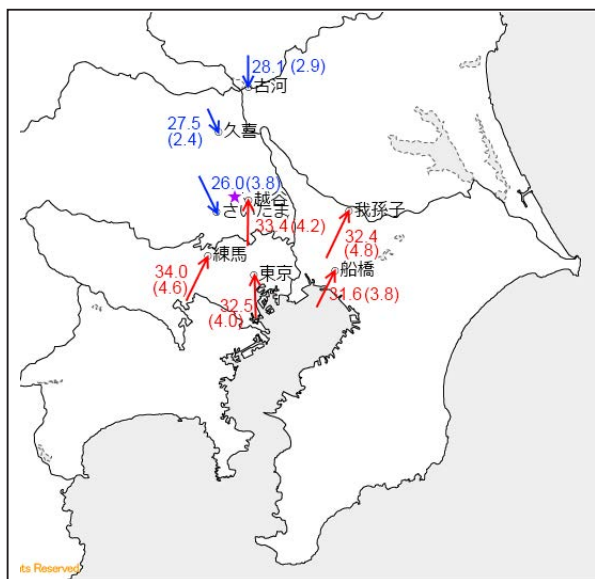


図 3-13 竜巻発生時刻 越谷周囲における風向・
風速・気温（気象庁のアメダスデータより作成）

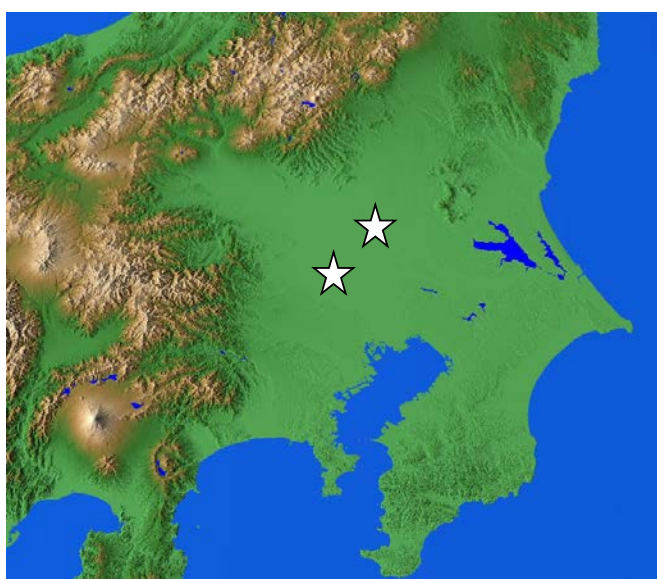


図 3-14 関東平野の CG 画像（Wikipedia の画像に加筆）

(2) 身近な材料を用いた安価な竜巻再現装置の開発

(1) より、つくば、越谷の竜巻の共通点は以下の通りであることが分かった。

- i) 竜巻発生時刻は、気温の高い日中の時間帯である。
- ii) 竜巻発生地点は、南寄りの暖気と北寄りの寒気の境界付近である。
- iii) 竜巻発生地点は、関東平野の中央付近の平坦な地形である。
- iv) 竜巻発生時刻に、その場所の上空を積乱雲が通過している。

そこで、以下の i) ~ iii) を満たす竜巻再現装置を開発することにした。

- i) 寒気と暖気をぶつけることができる。
- ii) 上昇気流の位置を動かすことができる。
- iii) 地形の再現ができる。

- ① 風の通路 (図 3-15): 180cm×45cmの断熱材の長編に 30cm×90cmの亚克力板 2 枚をつけたもの (2011 年度津波に関する研究で制作した水槽の一部)。関東平野の平坦な地形に相当する。
- ② 冷却装置 (図 3-16): 煙発生装置 (V1 Fogger 1 台、単 1 形アルカリ乾電池 (1.5V) 4 個、ファン小: 最大 12VDC・44.0 立法フィート / 分) の煙は加熱されて発生するため、噴出後すぐに上昇してしまう。そこで、煙を冷却する装置を制作した。発泡スチロールの箱 (39.7cm×26.7cm×19.6cm 2 個) を用いて、煙の入り口と出口の穴を対角上にそれぞれあけ、煙が蛇行するように仕切りを設けて、ペットボトル (500ml 角型ペットボトル 7 個) を加工した氷入れと水入りペットボトルを凍らせたものを入れ冷却する。
- ③ 積乱雲モデル (図 3-17,18,19): 段ボール箱 (23cm×23cm×23cm) の下部に穴をあけ、箱の上部にファン大 (回転数 2000・風量 93 立法フィート / 分・最大 12VDC1 個)、箱の側部にファン小 (最大 12VDC・44.0 立法フィート / 分 1 個) を取り付けて空気を吸い上げる装置を制作した。電源装置に接続し、吸い上げる力を変化可能とした。なお、下部にあけた穴にはペットボトルの先端を切り取ったものを取り付けた。板 (2 本: 3cm×1.2cm×90.7cm) と鉄棒 (70cm 2 本 44.5cm 2 本) とゴム紐 (60cm 2 本) を用いて積乱雲モデルを風の通路の上に浮かし、前後左右上下自在に動くようにした (図 3-17,18 中矢印)。
- ④ 通路の密封 (図 3-20): 風の通路内の空気はほんのわずかなことで乱れてしまうので、風の通路内に外部から風が侵入しないように隙間を発泡スチロールで密封し、上部は透明な亚克力板で蓋をした。
- ⑤ 暖気と寒気: 図 3-20 の右側の冷却装置からフォグの煙を写真の奥側から左に向けて放出する (暖気に相当)。左側の冷却装置は氷の量を多くして、フォグの煙より相対的に冷たい空気を写真の手前から右に向けて放出する (寒気に相当)。風の通路調整板 (高さ 6.9cm×幅 6.5cm 4 個) を置き、寒気と暖気のぶつかる角度を調整する。

装置の特徴

- ① 左右の冷却装置に入れる氷の量を調整することにより、左右から温度の違う風を送ることができる。
 - ② フォグマシンの煙により、風を可視化できる。(従来のようにドライアイスを準備する必要がない)
 - ③ 風の通路調整板により、風のぶつかり具合を変化させることができる。
 - ④ 積乱雲モデルを固定していないことにより、上昇流の位置を縦横、上下自由自在に動かすことができる。
 - ⑤ 電源装置の電圧により、上昇流の強弱を調整できる。
 - ⑥ 風の通路に障害物を置くことにより、建物など地形の影響を調べることができる。
- ①~⑥より、様々な自然状況 (風の温度差、風の衝突角度、積乱雲の位置と高さ、上昇流の強さ、地面の条件) を再現でき、竜巻発生メカニズム解明に役立つ装置ができた。



図 3-15



図 3-16

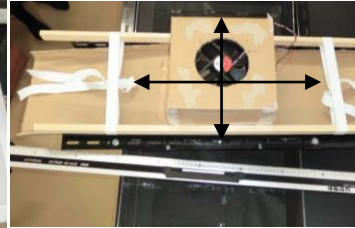


図 3-17



図 3-18

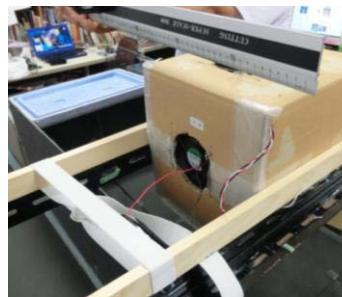


図 3-19



図 3-20

(3) 竜巻発生実験

竜巻再現装置で、3 (1) ①②で調べた風・気温差・積乱雲の位置をモデル化し、竜巻が発生するかを検証する。

① 2012 年 5 月 6 日 12:30 茨城県つくば市の竜巻の再現

つくば市で発生した竜巻をモデルとして、暖気に対して寒気を横方向からぶつける。寒気と暖気のぶつかる位置と積乱雲モデルの位置関係を変化させて、どこで竜巻が発生するかを確かめた。

実験①－1 横からぶつかっている寒気の真上に積乱雲モデルがあるとき

結果 竜巻は発生しなかった (図 3-21)。暖気に回転運動が見られ、その回転中心と積乱雲モデルの位置が大きくずれている (図 3-22)。

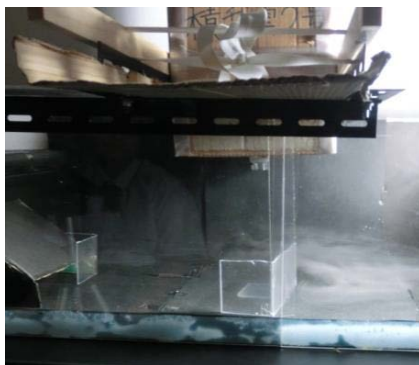


図 3-21 実験①－1

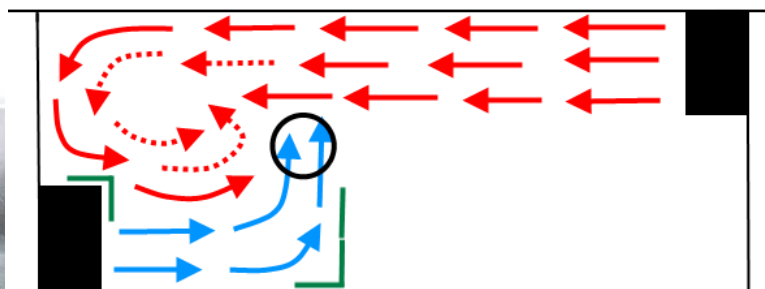


図 3-22 実験①－1 の動画から読み取った空気の流れ模式図
(赤色の矢印は暖気の方、青色の矢印は寒気の方、破線矢印は推定、○は積乱雲モデルの位置、緑色は風の流路調整板)

実験①－２ 寒気と暖気がぶつかっている場所の真上に積乱雲モデルがあるとき

結果 積乱雲モデルは図 3-23 のように暖気を吸い上げたが、竜巻状にはならなかった。暖気に回転運動が見られ、その回転中心と積乱雲モデルの位置が少しずれている（図 3-24）。



図 3-23 実験①－２

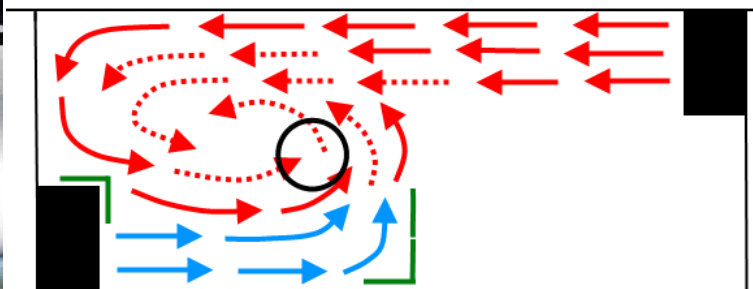


図 3-24 実験①－２の動画から読み取った空気の流れ模式図

実験①－３ 暖気の回転中心の真上に積乱雲モデルがあるとき

結果 暖気を吸い上げ竜巻が発生した（図 3-25）。暖気に回転運動が見られ、その回転中心と積乱雲モデルの位置が合っている（図 3-26）。



図 3-25 実験①－３

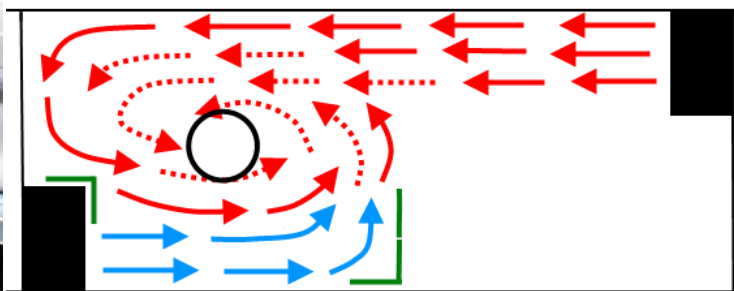


図 3-26 実験①－３の動画から読み取った空気の流れ模式図

② 2013 年 9 月 2 日 14：05 埼玉県越谷市の竜巻の再現

越谷で発生した竜巻をモデルとして、寒気と暖気がすれ違うようにする。積乱雲モデルを寒気側から暖気側へ移動させて、どこで竜巻が発生するかを確かめた。

実験②－１ 寒気側の上に積乱雲モデルがあるとき

結果 竜巻は発生しなかった（図 3-27）。暖気に回転運動が見られ、その回転中心と積乱雲モデルの位置が大きくずれている（図 3-28）。



図 3-27 実験②－１

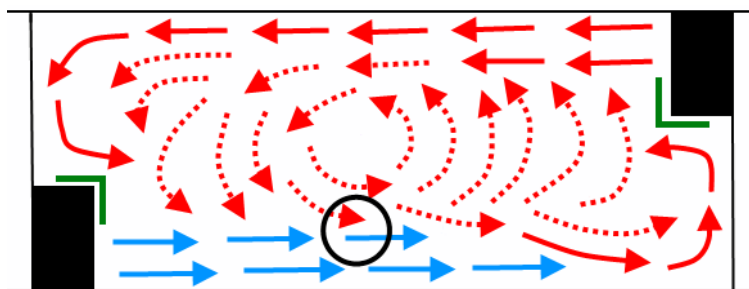


図 3-28 実験②－１の動画から読み取った空気の流れ模式図

実験②-2 暖気の回転中心の真上に積乱雲モデルがあるとき

結果 暖気を吸い上げ細い竜巻が発生した（図 3-29）。暖気に回転運動が見られ、その回転中心と積乱雲モデルの位置が合っている（図 3-30）。



図 3-29 実験②-2

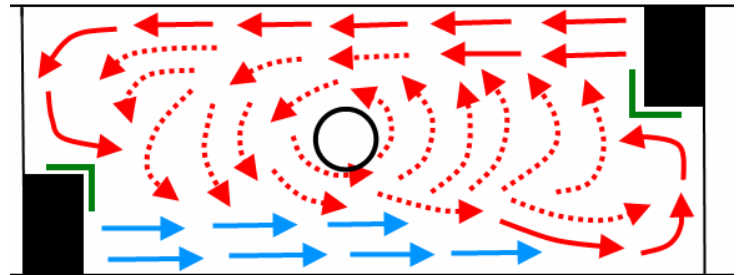


図 3-30 実験②-2の動画から読み取った空気の流れ模式図

実験②-3 寒気側の上に積乱雲モデルがあるとき

結果 竜巻は発生しなかった（図 3-31）。暖気に回転運動が見られ、その回転中心と積乱雲モデルの位置が大きくずれている（図 3-32）。



図 3-31 実験②-3

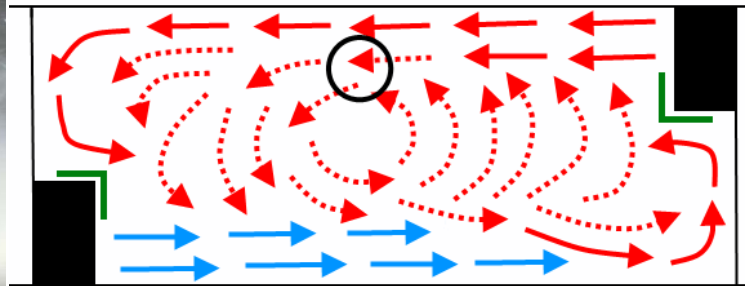


図 3-32 実験②-3の動画から読み取った空気の流れ模式図

4 考察

実験①、②より、地表面で暖気に対して寒気が横からぶつかったり、暖気と寒気がすれ違ったりすると、暖気回転運動が発生することが分かった。そして、その地表面の暖気の回転中心の位置と上空の積乱雲モデルの位置がずれているときには竜巻は発生せず、地表面の暖気の回転中心の位置と上空の積乱雲モデルの位置が丁度重なったときだけ竜巻が発生することが分かったこの結果を基に 2012 年 5 月 6 日つくば及び 2013 年 9 月 2 日越谷で竜巻が発生したメカニズムを考察する。

(1) 2012 年 5 月 6 日 つくばで発生した竜巻

① 地表面の暖気の回転の有無

竜巻の位置と気温の関係を調べるために、竜巻発生地点周辺の等温線解析を行った（図 4-1）。モデル実験による空気の流れ図（図 4-2）と竜巻発生地点周辺の等温線解析図（図 4-3）を比較すると、竜巻発生地点（★印）の南側で寒気が暖気側に侵入したため、暖気の回転が生じたと推定できる。

② 暖気の回転中心真上の積乱雲の有無

竜巻発生時前後の気象レーダー画像によると、12:00 には寒気と暖気の境界の西側 A の位置に積乱雲があった。積乱雲は 13:00 には B の位置に移動した。積乱雲が寒気と暖気の境界を通過した場所は竜巻発生地点と重なり、時刻も竜巻発生時刻の 12:30 と重なった。したがって、寒気と暖気の境界の上を積乱雲が通過するタイミングで竜巻が発生したと考えられる。

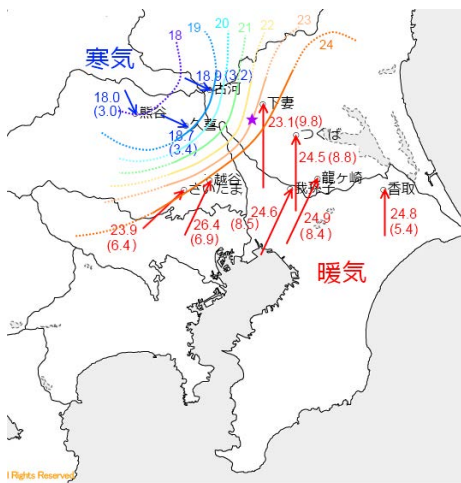


図 4-1 茨城県つくば市の等温線解析結果
(気象庁のアメダスデータより作成)

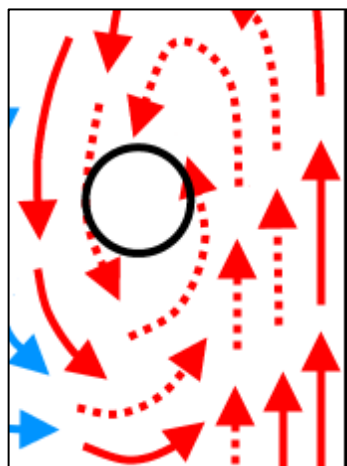


図 4-2 実験の空気の流れ

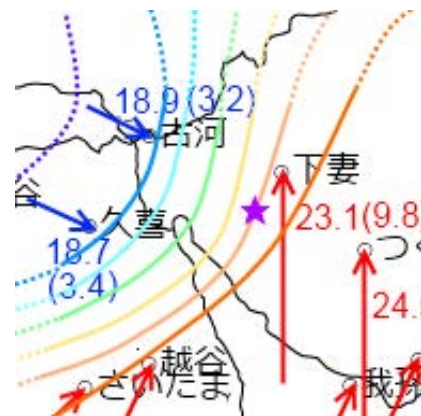


図 4-3 解析結果拡大図

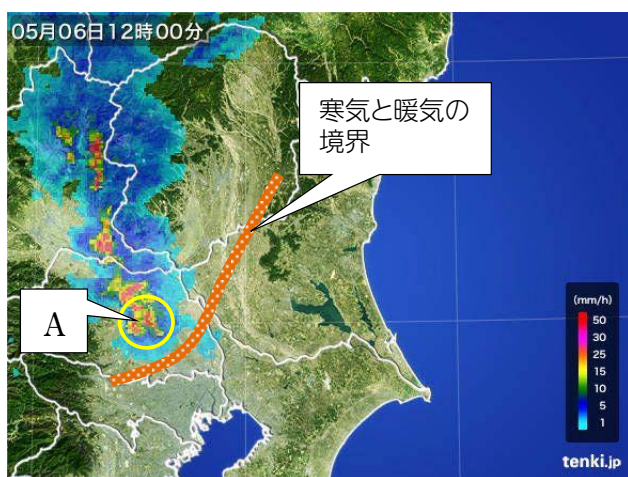


図 4-4 気象レーダー画像 (2012 5/6 12:00)
(tenki.jp の画像に加筆)

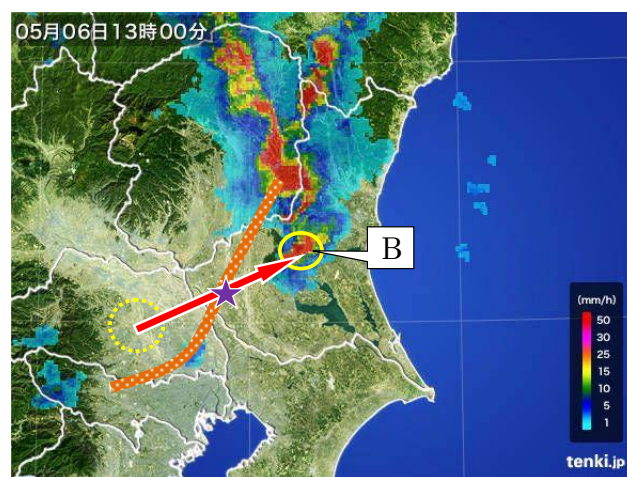


図 4-5 気象レーダー画像 (2012 5/6 13:00)
(tenki.jp の画像に加筆)

(2) 2013年9月2日 越谷で発生した竜巻

① 地表面の暖気の回転の有無

竜巻の位置と温度の関係を調べるために、竜巻発生地点周辺の等温線解析を行った(図4-6)。モデル実験による空気の流れ図(図4-7)と竜巻発生地点周辺の等温線解析図(図4-8)を比較すると、竜巻発生地点(★印)を東西から挟むように寒気と暖気がすれ違ったため、暖気の回転が生じたと推定できる。

② 暖気の回転中心真上の積乱雲の有無

つくば市と同様に、Cの位置にあった積乱雲が寒気と暖気の境界を通過した場所と時刻は、ともに竜巻発生地点及び時刻と重なった。したがって、寒気と暖気の境界の上を積乱雲が通過するタイミングで竜巻が発生したと考えられる。

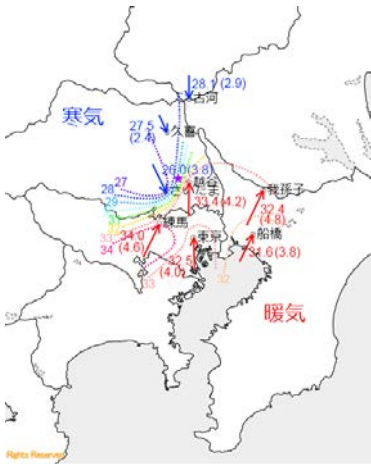


図4-6 埼玉県越谷の竜巻の等温線解析結果

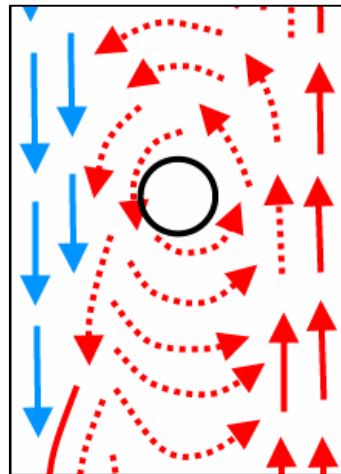


図4-7 実験の空気の流れ

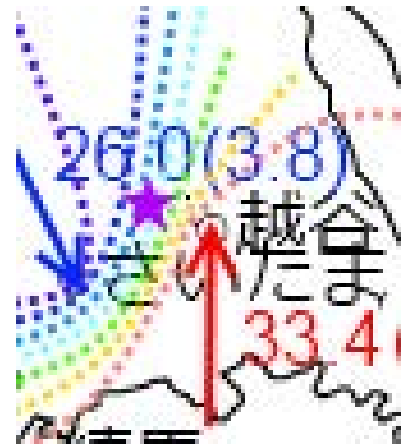


図4-8 解析結果拡大図

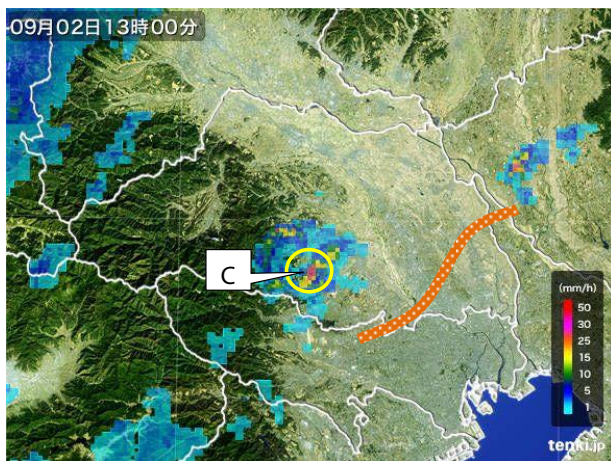


図4-9 気象レーダー画像(2013 9/2 13:00
(tenki.jpの画像に加筆)

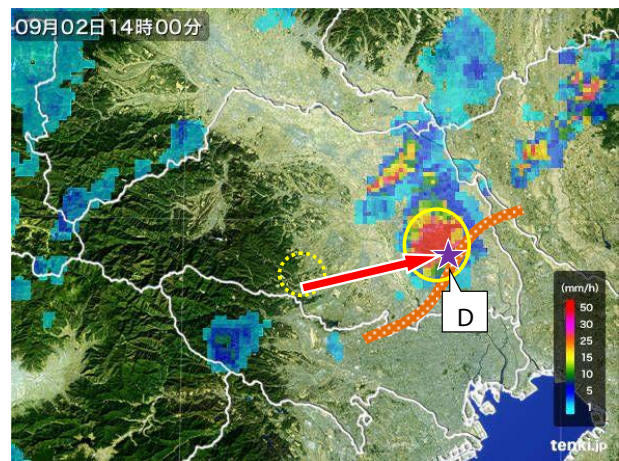


図4-10 気象レーダー画像(2013 9/2 14:00
(tenki.jpの画像に加筆)

5 結論

2012 年 5 月 6 日つくば及び 2013 年 9 月 2 日越谷で竜巻が発生したメカニズムは以下の通りである。

- ① 関東平野の地表面で南からの暖気と北からの寒気が横からぶつかる、または、すれ違い、地表面で暖気の回転が発生した。
- ② 関東山地方面で発生した積乱雲が、発達しながら関東平野を東へ横切った。
- ③ ①で発生した地表面の暖気の回転中心と②で発達しながら移動してきた積乱雲が丁度重なった。
- ④ 地表面の回転している暖気が吸い上げられ、竜巻が発生した。

「竜巻」といえば、積乱雲だけに目が向きがちであったが、今回の研究により、関東平野での竜巻の発生には、地表面における寒気と暖気の相互作用による暖気の回転と、上空の積乱雲の通過のタイミングが合うことが必要であることが分かった。寒気と暖気の境界付近の住民に対して、積乱雲の通過のタイミングを事前に予測し、竜巻注意情報を発表することができれば、事前避難につながり、人的被害を軽減できるであろう。

一方、実験では、風の通路内の空気はほんのわずかなことで乱れてしまうので、竜巻再現装置の風の通路には密閉の壁がある。そのため、実際の自然状況を完全に再現できていない。今後は、その点を改良し、より自然の状況を再現できる装置にしたい。また、風の通路に建造物に見立てた模型などを置いて、地形や建造物が竜巻の発生や維持にどのような影響を及ぼすかを調べたい。

6 謝辞

本研究を行うにあたって、放課後や休日など日々のお時間を割いていただき、実験やレポート作成のご指導をしてくださった沖縄県立球陽高等学校地球科学部顧問の永井秀行先生に深謝の意を表する。

7 参考文献

- ・ウィキペディア「竜巻」
<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%AB%9C%E5%B7%BB> アクセス日：2014.6.12
- ・Wind Effects News Vol.22 August 2009
http://wind.arch.t-kougei.ac.jp/news_report/NewsletterVol22.pdf#search='wind.arch.tkougei.ac.jp%2Fnews_report%2FNewsletterVol22.pdf' アクセス日：2014.8.7
- ・科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書
<http://kaken.nii.ac.jp/pdf/2011/seika/C-19/16101/21560503seika.pdf#search='kaken.nii.ac.jp%2Fpdf-f%2F2011%2Fseika%2FC19%2F...%2F21560503seika.pdf'> アクセス日：2014.8.7
- ・風工学シンポジウム論文集－J－ Stage
「マルチファンマルチベーン式竜巻シミュレータによる竜巻状流れ場の制御に関する研究」
<https://www.jstage.jst.go.jp/browse/kazekosymp/-char/ja/> アクセス日：2014.8.7
- ・風速 75 メートルの衝突解明へ ミニ竜巻の発生装置
http://www.nikkei.com/article/DGXNASGG1800F_Y0A111C1000000/ アクセス日：2014.7.18
- ・ハロウィン 2008：パート 1
<http://minkara.carview.co.jp/userid/388790/car/334134/1136813/photo.aspx> アクセス日：2014.6.17

講 評

発生した竜巻の再現実験装置の製作という着眼点が素晴らしいものでした。気象庁データを利用・分析しながら、再現装置を使って行った実験、比較分析、考察までの一連の流れが見やすくまとめられており高く評価されました。

しかしながら、竜巻は1年間に陸上で30個程度発生しており、沖縄県内での発生件数は4個程度発生しています。代表的な竜巻についてを事例として取り上げたことは理解できますが、F2、F3をそれぞれ1個ずつしか分析できなかったため、残念ながら若干考察に物足りなさを感じました。ぜひデータが集められる分の再現実験・分析を行って欲しいものです。そこから何か別の視点から得られる事があるかもしれません。今後の研究に期待します。