

大火災に伴う旋風について

光田 寧・文字 信貴

FIRE-INDUCED VORTICES

By *Yasushi MITSUTA*, and *Nobutaka MONJI*

Synopsis

The possibility of the occurrence of vortices associated with a large fire is discussed. Characteristics of the fire vortices which occurred in the past are reviewed, and necessary conditions to produce concentrated vortices over or around the fire is discussed. A laboratory simulation to investigate the criteria of the vortex core formation is carried out. It is found that either the high temperature of the ground surface or large inflow angle produces the concentrated vortices, and also that these conditions are probable in case of a large fire. It is also found that the core temperature of the produced vortex core increases with the inflow angle.

1. はじめに

大火災の際に旋風が発生するという現象については、古くは明暦3年(1657年)の振袖火事や天和2年(1682年)のお七火事の記録の中にそれらしい記述があるが¹⁾、一般に注目される様になったのは、1923年9月1日、2日の関東大震災の時に被服廠跡において旋風によって多数の死者が出た事によってであった。震災直後の調査によって、東京には旋風が100個以上、横浜には約30個、その他の都市にも発生していた事がわかった。地震に伴う火災以外に、第2次世界大戦中の爆撃による火災によっても多数の都市で旋風が生じたという記録があり、また、森林火災に伴って旋風が発生した事例は過去に数多く報告がなされている。

この様に、火災に伴って旋風が発生する場合がある事は確かであるが、大火の際に必ずしも常に旋風が発生しているとは限らず、また発生した旋風も竜巻級の強暴なものから、塵旋風程度の弱いものまで種々に及んでいる。さらに、発生地も都市の広域火災や、山の斜面など様々であり、発生する位置についても、火域全体が回転するもの、火域の風下側に発生するもの、火災によって生じた雲から下に伸びるもの、また、かなりの距離を移動するものがあるなど様々である。

この様に、火災に伴う旋風と言っても、それぞれ火災の性質や、その他の条件に応じて異なった性質を有するものが発生するため、旋風発生の可能性を論じる場合にも、一般的な解答を得るのは容易ではない。以下では、過去に火災などに伴って発生した個々の旋風について、その発生状況や性質を調べて、共通の性質を見出した。さらに、それに基づいた室内実験を試みて、発生限界や、発生した旋風の温度分布を求めたのでその結果を示す。

2. 過去に火災等に伴って発生した旋風

過去の文献に表われている火災などに伴って発生した旋風を **Table 1** にまとめて示す。種類別に見ると、大地震や空爆に伴う広域都市火災、森林火災、石油火災などのほか、火災や対流を起す実験においても旋風の発生が見られ、さらに、火災ではないが、火山の噴火に伴っても発生している。一覧表でも明らかな様に、旋風の性状は場合によって著しく相異している。渦の半径は数mから数十m、最大風速も 10 m/s 以下のもの

Table 1. The list of the fire-induced

Place (country)	Name	Date	Cause of fire	Geographical situation	Relative position of vortex
Tokyo	Great Kanto Earthquake	Sept. 1, 2 1923	earthquake	city	within 100 m from burning area
Yokohama					
Odawara					
San Luis Obispo (USA)		Apr. 7-12 1926	oil resevoir by lightning	coast	
Hakodate (Japan)		Mar. 21 1934		city	
Wakayama (Japan)		Jul. 9 1945	bombing W War II	city	
Pacific NW (USA)		1951~1953	forest fire	slope	lee side of ridge
Imbil (Australia)		Nov. 19 1957	scrub burning operation	slope	
Lannemezan (France)	Meteotron	Jun. 17 Aug. 31 1961	experiment	plateau	below smoke plume
Victoria (Australia)		Jan. 14 1962	forest fire	slope	fire front
Surtsey (Iceland)		Nov. 14 1963	volcano eruption	submarine volcano	
Santa Barbara (USA)		Mar. 7 1963	forest fire	slope	lee
Muroran (Japan)		May 1955	tanker	bay	from smoke plume
California (USA)	Project Flambeau	Sept. 29 1967	experiment		lee of burning area
Queensland (Australia)	Operation Euroka	Oct. 23 1969	experiment	gradual slope	lee of burning area
Arizona (USA)		Jun. 24 1973	brush fire	desert	
Texas (USA)	Texas A & M Bonfire		experiment		
Lannemezan (France)	Meteotron	May, Jun. 1979	experiment	plateau	various type (see text)

C: cyclonic

* estimated value

vortices in the past

Number	Diameter (m)	Height (m)	Max. hor. velocity (m/s)	Max. vert. velocity (m/s)	Life time	Distance moved (km)	Sense of rotation	Env. wind (m/s)	Ref.
>100									
30	5~50*		50*	30~50*	max 2 hr	max 2.2	more C	1~10	1) 2)
a few hundred						<5	more C	20~25	13)
		200						22	6) 7)
			30					2.5	3)
1~several	15~360	90~750			30s~2hrs			<7.5	8)
2	20*		25*				both	~5	11)
	10~40	200			1.5 4 min			1.2~1.5	18)
	6~8	80	5~12				C		9)
		400	>90*						14)
1						1.6			10)
									3)
		70~100*			15~20s		both	5~1	16)
		300	29.4	15				4	15)
	90	1900	7	13				weak	12)
			18				both		17)
	5~60	50~100			5s~4m		both	1~8	20)

のから数十 m/s に達するものもあり、回転方向や移動距離も様々である。ただし、一般風速については、一例を除いて強風下では発生していない。総括的な性質を記述する事は困難であるので、以下、個々の例について概略を述べる。

2.1 都市火災に伴う旋風

過去の大都市の火災に伴う旋風の中で最も著しいのは1923年の関東大地震に伴って、9月1日から2日にかけて東京、横浜、小田原などに発生したものである。寺田寅彦¹⁾ や藤原咲平²⁾ の調査によれば、発生した旋風の数では東京で100個以上、横浜で約30個に及んだ。地震の発生したのは正午頃であるが、火災に伴って旋風が発生し始めたのが13時頃からであり、火災が続いた翌日の夜まで旋風も発生し続けた。その時間別期の発生個所の変化を寺田寅彦が調査したものを Fig. 1 に示す。この図には発生個所のほか、燃焼域と燃焼の進行方向も示されている。この時の旋風に関する寺田と藤原の調査結果の主な点を要約すると次の様になる。

まず、発生位置については、

- 1) 一種の帯状分布をしており、例外もあるが、発生時刻は近くで燃焼があった時刻と一致する。これは Fig. 1 から明らかなである。ただし、火事が大きくても旋風が発生しなかった場合も多かった。
- 2) 火災が2方、3方から進み、火流の前線が合流し、まだ燃えていない場所が湾形を成していた場合に起り易かったように見える。
- 3) 広場や空地、四辻に多く発生し、河や堀に沿って移動したものが多い。

次に旋風の性状については、

- 1) 塵旋風程度のものから竜巻級のものまであった。
- 2) 上昇気流は、人や荷車を巻き上げる程度のものがあり、30~50 m/s と推定される。旋回風速は 50 m/s 以上と推定できる。
- 3) 回転方向はだいたい反時計まわり (cyclonic) であったが逆の場合もあった。
- 4) 直径は数m~数十mであり、大きな渦の中に数本の小さな急速にまわる渦を含むものもあった。

特に強暴な旋風が9月1日15時30分頃から16時頃の間避難場所となっていた本所区の被服廠跡 (Fig. 1 の右上の図の * 印) を襲い約4万人の死者を出した。死因についてはいろいろ考えられているが、多くは焼死する前に窒息死したためではないかと推測もなされている³⁾。旋風が発生しなければこれだけの惨事にはならなかったと結論してはいるが、これだけ大量の死者を出した真の理由については不明な点が多い。

都市火災で大きな規模となるものに空爆による火災がある。特に、第2次世界大戦末期の空爆による火災で、日本では和歌山市に旋風が発生した記録があり³⁾、ドイツの Hamburg, Kassel, Darmstadt, Dresden などでも発生していたとの報告がある⁴⁾。

Hamburg の空襲の場合の火災は激しいもので、火災範囲内のものを全て焼き尽し、火災がおさまってからその余熱が続いたため市内に入る事ができたのは2日後であったとされている⁴⁾。ただし、旋風の発生に関しては関東大震災の時とは様子を異にしている。多数の旋風が発生したかどうかは不明であるが、爆撃後の偵察飛行によれば、直径約 2.5 km の火柱が高さ約 4 km くらいまで達していた事が報告されている事や、地上の目撃者の報告を合わせると火災域全体が大きな旋回風系を形成していたのではないかと推定されている⁵⁾。なお、火災域周辺での風は直径 90 cm くらいのもを根こそぎにする程度であった。

普通の都市火災に際して旋風の発生が報じられているのは1934年3月21日の函館の大火の時である。この時は低気圧に伴う強風下の火災であったが、風がおさまりにかけた時に旋風が発生したとの報告がなされている⁶⁾。しかし、その強さがどの程度のものであったかは不明である。一方、函館山の地形と当日の強い風が原因で発生した旋風が出火点を襲って延焼を大きくしたとの説明もあり⁷⁾詳細は不明である。

2.2 森林火災に伴う旋風

最も多く発生する旋風は森林火災に伴うものであろう。例えば、米国北西太平洋岸の森林地帯では1953年の9月と10月の2ヶ月間に発生した山火事に伴って18個も旋風が発生している⁸⁾。平均して直径が十数mの小さなものであるが、中には直径が 360 m、高さが 700 m という大きなものも含まれている。一般風速はあ

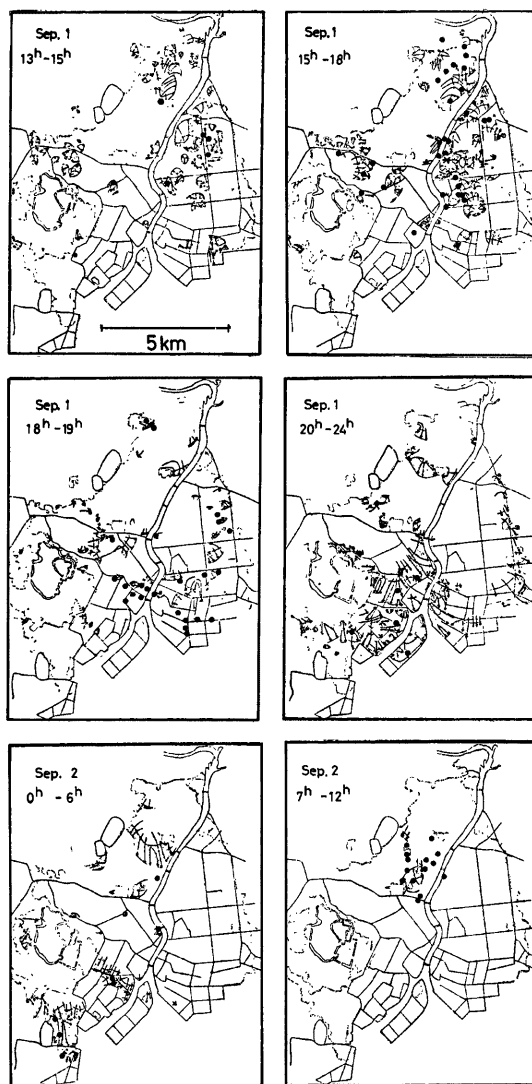


Fig. 1. Time sequence of the fire vortex distribution (black dots) associated with the Great Kanto Earthquake. The shaded areas indicate the burnt areas within the hours shown in the figures, and the arrows the direction of the fire streams (after Terada¹⁾). * indicates Hifukusho, the place of the greatest casualties.

まり強くない場合が発生しやすく、75%が 7.5 m/s 以下の場合であった。なお、風下側の斜面には強いものが発生する事が多く、地形が大きく関係しているものと考えられる⁹⁾。

最も良く観察されたものは、オーストラリアのビクトリア州の山火事に際して発生した旋風で、これは 16 mm 映画に収められている⁹⁾。解析の結果、この時の渦の直径は 6~8 m で旋回風速は 5~12 m/s である事がわかったが、この程度の風速では樹木が倒されるという様な被害が出る事はなかった。この時の旋風の写真を **Photo. 1** に示す。

森林火災に伴う旋風の中には強大なものもあって、米国カリフォルニア州サンタバーバラで発生したものは 4 人を負傷させ、家屋、自動車、果樹園などに風による被害を与えたものもある¹⁰⁾。この場合も山の風下側斜面で発生した。

この様な森林火災に伴うものは山の風下斜面に発生し易い事からもわかる様に地形と関係がある事が多いが、平坦な草原の野火によって発生した旋風もある。アリゾナ州の野火によって発生した旋風が、そこで塵旋風の観測を行っていた研究者によって撮影されたものを **Photo. 2** に示す¹²⁾。この旋風の直径は 90 m、旋回風速は 7 m/s、高さは 1900 m 程度にも達していた。この例と、前述のサンタバーバラの例はいずれも不安定な気象条件下で発生したものである。

2.3 石油火災に伴う旋風

石油基地の火災により強暴な旋風が発生した例が、1926年の米国カリフォルニア州、San Luis Obispo の例である¹³⁾。落雷によって発生した火災は貯蔵されていた 6×10^6 バレルの石油はほぼ全部を 5 日間かけて燃焼させた。この火災によって数100個の旋風が発生したが、多くの旋風は自然界の竜巻と同様の性質を有していたらしい(**Photo. 3**)。そのうち 1 つは、小屋を持ち上げ 50 m ほど運んで落下させ、中の 2 人を死亡させるほどのものであった。

一方、日本では1965年5月室蘭港においてタンカーが接岸に失敗して火災を起し、その時に風下に伸びる黒煙から海面に向かって旋風が発生した例が報告されている³⁾。

2.4 火山の噴火に伴う旋風

火山の噴火に伴う旋風がアイスランドで観測されている¹⁴⁾。1963年11月に海底火山 Surtsey が噴火して 100 m/s を越える速度で噴煙を出したが、その噴煙の下から 400 m 伸びて海面に達する旋風が発生した。旋風の風速は 90 m/s 以上と推定された。**Photo. 4** にその写真を示す。

2.5 火災実験及び対流実験に伴う旋風

野外において大規模な火災を発生させたり、大量の燃料を燃焼させた時に火の周辺がどのような変化を生じるかを調べるための実験がいくつか行われて来たが、その様な実験に伴って旋風が発生した場合がある。

その中でも最も放出エネルギーの大きな実験はオーストラリアのクィーンズランドで行われた Operation Euroka と米国カリフォルニアで行われた Project Flambeau である。前者は1969年10月に約 2 ha の範囲に 6000 ton もの乾燥した木材を集めて点火した¹⁵⁾。その周辺に207台の耐熱型の風速計を設置し、さらに放射計、温度計なども用いて種々の測定が行われた。旋風は点火後半時間から 1 時間に間欠的に風下側に発生し、いくつかは 300 m もの高さに達した。測定された最大瞬間風速は 29.4 m/s、最大鉛直風速は 15 m/s であった。

後者の Project Flambeau は、1962年から行われているもので¹⁶⁾、1967年の実験については Operation Euroka と同程度である。6800 ton ほどの木材を市街地に模して配し点火したもので火力も前者と同程度のものであった。点火 5 分後に旋風が発生し、燃料の木を 15 m ほどの高さに持ち上げて周囲に振りまいたりした。旋風は発生消滅を繰り返したが、その様子には一般の空気の流れと火災による気流との相互作用が原因である事がうかがえるように見えたと報告されている。

バーナーでオイルを燃焼させて対流を起させる実験が過去 3 回ピレネー山中の高原で行われた。この燃焼装置は Meteotron と呼ばれ、105個のバーナーを一辺が 140 m の領域に配置したものである。これを用い

て、1961～1964年の実験では積雲と竜巻状渦の発生に成功した¹⁸⁾。この装置は1971～1973年には対流ブルームの実験に用いられたが¹⁹⁾、最近では1978年に再び旋風発生の研究に用いられた²⁰⁾。1978年の実験では、フランスと米国が共同で研究を行い、風速計や温度計が42ヶ所に取付けられたほか、映画やレーダー、ドプラースーダー、飛行機も用いて観測が行われた。この時は幾種類かの異なる型の旋風の発生が認められている。それらは、3節で詳説するが、上昇ブルームが2つに分枝して渦となる型、燃焼の風下側に発生する塵旋風型、そして燃焼域全域が回転する型に分類された。風



Photo. 1. An example of a vortex spawned by a forest fire in Victoria, Australia (after King⁹⁾).

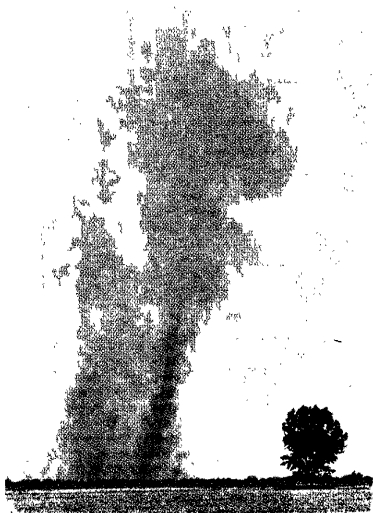


Photo. 2. A vortex due to a desert brush fire in Arizona, U.S.A. (after Idso¹²⁾)



Photo. 3. A vortex due to the oil fire at San Luis Obispo, California, U.S.A. (after Hisong¹³⁾)

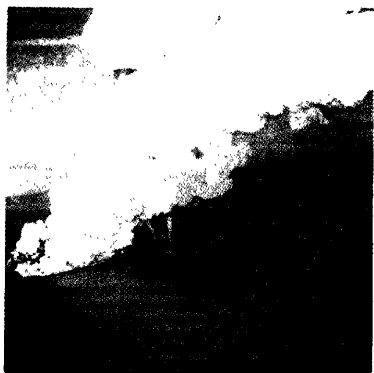


Photo. 4. A pair of vortices extending from the volcanic cloud to the ocean surface at Surtsey, Iceland (after Thorarinsson & Vonnegut¹⁴⁾).



Photo. 5. A vortex formed in the right downwind quadrant of the plume produced by the Meteotron experiment (after Church et al.²⁰⁾).

下側に形成された直径 2.5 m の例を **Photo. 5** に示す。

以上に述べて来た事から明らかな様に、火災などに伴って発生する旋風の種類にはその性質や強さには様々なものがある。これらの旋風にとって共通な事は、上昇流があるという事であるが、ここに示した各種旋風の相異点は、上昇流がいかに周辺の回転を取り込むかという機構によるものと考えられる。

3. 旋風の発生原理

前節で述べたとおり、火災など熱対流に伴う旋風の種類には様々なものがあり、それらを全て一般化した形で発生条件を求める事は現在の知識では困難である。しかしながら、竜巻の場合と同様、火災に伴う旋風の場合にも基本的な力学的要因は上昇流と周囲の回転である事には変りはない。さらに、地形や粗度、燃焼域の面積や形状などの幾何学的な要因のほか、大気安定度なども影響を与える事が予想される要因である。

まず、上昇流の原因と大きさを支配するものは、火災などによる直接の浮力であるが、火災が広域に長時間持続した場合には積雲や積乱雲が発達する事もあり、その場合は潜熱の放出が新たな対流活動を作り出す事になる。関東大震災の時には多数の巨大な積雲の写真が撮影されており、また、San Luis Obispo の石油火災の時には火災域から数 km も離れた所で竜巻級の旋風が発生した事、Surtsey 火山の場合には風下上空に形成された雲から漏斗雲が垂れ下っている場合もあるという様な事実などからこの事が見られる。上昇流の大きさに関しては、これが火災などの規模と直接に関係がある量ではあるが、どの程度の放出エネルギーを持つ火災がどの程度の対流活動を誘起し、どの程度の上昇流を作るか、さらに、どの様な条件下で積雲を発生させるのかについては現状では正確な事はわかっていない。

火災の放出エネルギーについては、前節に挙げた例のいくつかについて推定例がある。Surtsey 火山のエネルギー放出の割合は約 10^{11} W, San Luis Obispo の石油火災は 4×10^{10} W と推定されている。一方、森林火災は大きさによって異なるが、 4×10^{10} W/km² 程度であるとの推定がなされている¹⁹⁾。火災実験の場合は比較的精度が良いと考えられるが、Operation Euroka や Project Flambeau で $2.0 \sim 2.4 \times 10^{10}$ W¹⁵⁾、また Meteotron の1979年の場合が 10^9 W であり²⁰⁾、実験と言えども現実の大火災に近い放出エネルギーである。放出エネルギーが大きい場合に旋風が発生すれば、より強大なものが形成される事が予想されるが、旋風の発生限界を知るためにはもう一つの要因である風の場の回転（又は、水平シア）を考慮する必要がある。

風の場が鉛直軸を持つ回転を有するためには様々な原因が考えられるが、主なものは火災による対流と一般流との相互作用であり、要約すると以下の様になる²⁰⁾。1)火災に伴う強い対流系に横から風が当たると背後にはく離に似た状態を作り出して鉛直渦のペアーを生じる場合。この場合は、火災域の風下の左右どちらに形成されるかによって回転の方向が逆になる。**Photo. 4** や **5** はその結果生じた渦である。2)水平軸を持つ渦が、火災域での上昇流との相互作用で向きが変わり鉛直渦となる場合。地面近くでは水平風速は鉛直方向に増大するシアを有している、すなわち、水平の軸を持つ渦度領域があるが、その渦線の上昇流の領域が持ち上げられて渦の鉛直成分を有する様になる場合や、さらには、上昇流の渦輪が一般流との相互作用で鉛直成分を持つ様になる場合もある。3)火災域を含む広い範囲に水平シアが存在し、その渦度が上昇流によって中央で収束増大する場合。これは前述の Hamburg の場合の様に何らかの大きなスケールの気象現象が関与している場合や、地形などによって水平シアが形成される場合などが考えられる。

これらは、火災域が直接一般流と相互作用を引き起した結果起る回転であるが、上昇流が活発で上空に積雲が形成される場合は、その積雲の対流系と周囲との相互作用などで新たに回転が起る。これについては竜巻の発生機構と類似の問題に帰着するのであろう。

上に述べた様々な旋風の発生機構の間の相似性を明らかとし、野外実験もしくは室内実験を行う場合の境界条件を決定するためには火災に伴って起る大気の運動を支配する運動方程式、及びそれから導かれる渦度方程式を無次元化する際に得られる無次元パラメータを用いる事が有効である。

運動方程式を無次元化する場合に現れるパラメータは Reynolds 数 (Re), Froude 数 (Fr) 及び Rossby 数 (Ro) であり、これらは代表的なスケールを用いて

$$\text{Re} = \frac{W \cdot L}{\nu}, \quad \text{Fr} = \frac{W^2}{g \cdot \Delta T \cdot L}, \quad \text{Ro} = \frac{2\Omega \cdot L}{W}, \quad \dots\dots\dots(1)$$

の様に書ける。ここで、 W は鉛直方向の代表的な速度、 L は代表的な長さのスケール、 ΔT は火災域と周辺部との温度差の代表値、他は一般に用いられる記号である。Re は火災の様に十分に乱れた現象を表す場合には適当なパラメータとは言えず、Ro も火災の現象が、地球の自転の影響を直接の回転の要因と考えられるほどはスケールが一般には大きくないので特別な場合を除いて重要ではない。一方、Fr は慣性力と重力の作用の比を表すものであり、熱を伴う運動の相似性を考える場合には重要なパラメータである。従って、次節で述べる室内実験にはこの Froude 数を現実と模型の間で一致させる範囲に取る様にした。

一方、運動方程式を円筒座標系で表わした場合の動径 (r) 成分の鉛直方向 (z) 微分と鉛直成分の動径方向微分の組合わせから導かれる方程式を無次元化する事により Swirl 比

$$S = \frac{\Gamma_{\infty} \cdot R}{2 \cdot Q \cdot l} \quad \dots\dots\dots(2)$$

が無次元パラメータとして得られる²¹⁾。ここで Γ_{∞} は火災域周辺部における循環、 Q は単位長さ当りの流入量、 l は収束気流の高さ、 R は Γ_{∞} を測定する半径である。すなわち、上昇流に対する回転流の大きさの割合を表す量である。Swirl 比は $S = \tan \theta / 2a$ とも書ける。すなわち、流入角 (θ) の tangent をアスペクト比 $a = l/R$ で除した量である。旋風など渦の形成にとってこの swirl 比は最も重要なパラメータである事が知られている²²⁾。旋風の性質の多く、例えば、渦核の直径や中心の圧力降下量などは Swirl 比の関数として表わすことができ²³⁾、層流渦から乱流渦への遷移もこのパラメータに依存する。従って、渦の室内実験では Swirl 比を変化させる実験が多数行われている²⁴⁾。

このほかの条件としては、大気の安定度が旋風の形成に影響がある事が推測されており、また数値実験においても成層状態が安定なほど竜巻が発生しにくい事が確かめられている²⁵⁾。地表面の粗度の影響については、滑面上の方が旋風が発生しやすい事しかわかっていないが、形成された渦核については粗度が大きいほど直径が大きく、最大風速の弱いものができる事が室内実験で明らかとなっている²⁶⁾。このほか、燃焼域の形状、配置、大気の乱れなど様々な要因が考えられる。以下ではこれらの条件の中で最も重要であると考えられる2つの要素、加熱による浮力と周囲の回転の与え方によって、旋風の発生限界がどの様に変化するか、発生した旋風はどの様な性質を有するかを見るために行った室内実験の結果を示す。

4. 室内実験

旋風の発生を伴う様な大火災時に実際に野外において測定を行う事は不可能であるため、現実の火災に近い状態を野外実験で作り出す試みが行われる。しかしながら、大規模な野外実験を長時間、又は繰返して行う事は容易ではなく、測定にも大がかりな設備が必要である。従って、スケールを小さくして室内実験の手法により詳細な測定を行う事が問題を解明するためには有効な手段である。

旋風の室内実験は過去に、火災に伴うものを対象としたもの以外に、竜巻渦や塵旋風を対象とした実験が行われている。特に竜巻渦の実験に関しては種々の装置が開発されて来た²⁷⁾。竜巻は、渦の発生機構が積乱雲中にあると考えられるので、上昇流は装置の上層部で与える場合がほとんどである。火災に伴う旋風の場合にも活発な対流活動の結果積雲や積乱雲が形成されるような場合については竜巻の発生機構と共通な機構が考えられるので竜巻の室内実験の結果も利用できる。また塵旋風を対象とした室内実験は地面板を加熱している場合が多く、より火災の条件に近いと考えられる。

塵旋風の室内実験に関しては Fitzjarrald²⁸⁾ 及び Mullen & Maxworthy²⁹⁾ の研究があるが、いずれの場合も下面を加熱して上昇流を得、流入空気には guide vane を用いて接線成分を与えている。Fitzjarrald は煙による可視化によって渦を4つの型に分類した。それによると、ほとんど加熱しない時も顕著な渦が形成されており不合理な結果となっているが、これについては次節で著者らの実験結果と比較して検討する。一方、

Mullen & Maxworthy は渦核内の温度分布を測定し、上昇流域では温度の水平分布は山形 (A) となっているが、下降流域ではその部分だけ温度が低く M 型の分布となっている事を見出し、それに基づいて渦を 3 つのタイプに分類した。1 つは全域が上昇流、1 つは渦核の下部まで中心部の下降流が及んでいるもの、1 つはその中間で、下降流が途中まで及んでそれより下層の上昇流との間によみ点を作っている場合である。また、いずれの場合も上層部では回転が止って対流ブルーム状となる事が見出された。

実際に燃料を燃焼させて上昇流を作り出す実験も行われている。Emmons & Ying³⁰⁾ はアセトンを燃焼させて上昇流を得、回転は回転透過スクリーンを流入空気が通過する際に接線成分を得る方法で与える実験を行った。その結果、燃焼の割合は回転が大きいほど大きい事、また渦は、単なる対流ブルームと比較して乱流による混合が少い事、すなわち混合係数は回転が増加すると共に減少する事が明らかとなった。燃料を燃焼させる実験は我国でも行われており、山下⁹⁾ は高さ 3.6 m、直径 2.5 m の円筒の 4 ケ所に扉を設けた装置を用いて燃焼速度、流入空気の色度や半径方向の温度分布について測定を行った。山下は、さらに、風下斜面上に旋風が発生し易い事を高さ 50 cm 幅 2 m の山の模型にヘキサンを吹きかけて燃焼させて調べる実験を行っている。また、相馬⁹⁾ は非一様な燃焼域は旋風の発生を容易にするとの実験結果を得た。

Emmons & Ying や山下の実験のように中央の狭い範囲を燃焼させる場合は単独の火災の実験としては良いが、大震災のように広域同時火災の実験としては不適当なので、この研究では、塵旋風と同様、ある領域内を一緒に加熱する事によって上昇流を作り出す実験を行った。ただし、対象が火災による加熱として Fr が合致する様に加熱温度の範囲を決めた。この実験では、旋風の形成限界と、形成された旋風の温度特性に重点を置いたが、以下にその実験方法と結果について述べる。

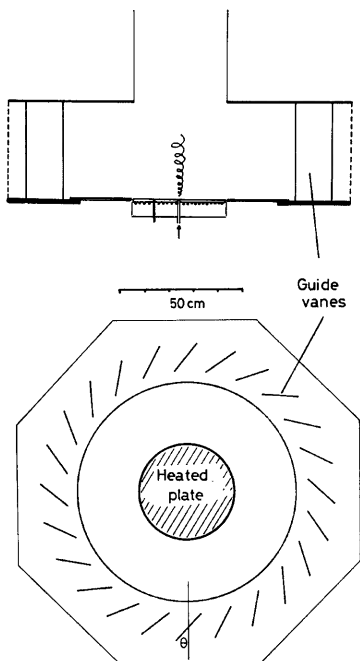


Fig. 2. The outline of the apparatus. The upper figure is the side view, the lower the top view.

4.1 実験装置

旋風の形成に必要な上昇流と周囲の回転のうち、上昇流は直径 38 cm の領域を加熱して作り出し、回転は 24 枚の guide vane を用いて流入流に接線成分を与えた。装置の概略を Fig. 2 に示す。加熱部分は 6 mm 厚のジェラルミンを用い、加熱はニクロム線によった。その周辺の地面板には直径 90 cm 厚さ 3 mm のジェラルミンを用いた。収束槽の高さは 40 cm で、中心から 55 cm の位置に高さ 40 cm、幅 15 cm、厚さ 1 mm のアルミの guide vane 24 枚を配した。収束

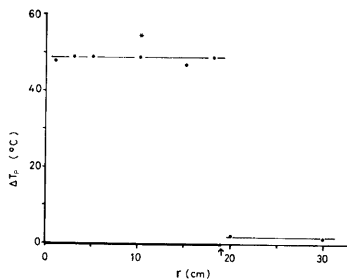


Fig. 3. Radial distribution of the surface temperature measured by the air temperature sensor pressed to the surface. * indicates the value of ΔT_p .

槽の頂部には加熱板と同口径の穴を開け、その上には長さ 37 cm の円筒を取付けた。加熱によって浮力を得た気流のほとんどはこの円筒から排出される。収束槽に周辺から流入する空気は guide vane によって接線成分を与えられる。

温度の測定は放射の影響を少なくするため細い直径 (100 μm) の銅-コンスタンタン熱電対を使用し、加熱の影響が無視できる場所 ($r=45$ cm) との温度差 ΔT を求める事によって行った。空気の温度変動が大きいので平均温度は時定数約 100 秒の平均化回路を介して記録する事によって求めた。

加熱板の温度は、同様の熱電対を加熱板の中央から 10 cm、表面から 1 mm の深さに埋めて $r=45$ cm の位置との差 (ΔT_p) として測定した。加熱板の温度としては、表面温度を用いる事が理想的であるが、現状では困難であったので、この様にして測定した温度差を加熱板の温度として使用する。Fig. 3 に ΔT_p と、空気温度 (ΔT) 測定用の感部を当てて地面板上の温度分布を測定したものの比較を示す。両者には差があるが、熱電対を表面に当てた温度は真の表面温度と空気温度の間の値を示す事を考えると、 ΔT_p と真の表面温度の誤差は小さいものと考えてよい。なお、この温度分布からは、加熱部分はほぼ一様の温度となっており、それより外側にはほとんど熱は伝っていない事がわかる。

風速の測定には温度補正回路組込みの熱線風速計 (日本科学工業製アネモマスター) を用いたが、感部の大きさの流れに及ぼす影響を考慮して、回転を与えない時の上昇流速の測定のみを行った。

旋風の形成条件を求めたり、形成された渦核がどのような形状を示すかを見るために流れの可視化を潤滑油を加熱して煙を発生させる装置 (TEM 社製) を用いて行った。作られた煙は金属のパイプを通して地面板の中央へ導いた。

4.2 実験条件

この装置が対象とする現象のスケールを、与えるべき力学的条件について考察してみる。対流に伴う旋風の室内実験において、与えるべき主な条件である加熱量、加熱範囲、流入角、収束層厚、収束槽頂部開口径のうち、今回の実験では加熱量と流入角を可変とし、他は前節に与えた値に固定した。加熱範囲は、現実の同時多発火災で同時にどの程度の範囲が燃焼するかに依存するが、これは火災などの状況によって大きく異なる事が予想される。Fig. 1 の関東大震災時の東京の場合は典型的には直径 1 km 程度の燃焼域が散在する形となっている。従って、ここでの加熱範囲は実験の縮尺が 1/2000 程度を考えている事になる。一方、収束層の高さは大気境界層の高さがこれに相当すると考え、1 km 程度のものを想定している。収束槽頂部の開口部の大きさについては、火災条件や、その時の気象条件によっても異なるので明確な値を与える事は困難であるが、ここでは仮に加熱域と同じ大きさを用いる事にしている。ただし、これは必ずしも開口部全域が上昇流となっている事を意味するわけではなく、上昇流域はむしろ加熱量など対流の力学的条件により左右される。

加熱温度をどの程度の範囲で変化させるかという基準は前節で述べた Froude 数の一致条件から求められる。(1)式の L は水平スケールなので、前述のとおり 1 km 程度と考え、その範囲の平均の温度が周囲より 200°C 高くなっていると仮定する。この仮定は、関東大震災時の燃焼域近傍の温度分布の推定値²⁾などを考慮しても不合理な値ではない。 W は上昇流速であるが、現実の大火災で中央付近で 10 m/s 程度の値を想定することにする。現実には火災域の上空の上昇気流は詳しくはわからないが、大火災の際の雲塊の形成速度からの推定²⁾や最近のドプラレーダーによる積乱雲の観測結果³¹⁾などからこの程度の値は妥当なものと考えられる。これらの値を用いれば、火災時の Fr は 1.5×10^{-2} 程度の値となる。これを $L=40$ cm, $W=10$ cm/s の模型と一致させると $\Delta T_p=50^\circ\text{C}$ 程度となる。Fig. 4 から、この関係に近い条件が得られる事がわかる。 Fr を両者一致する様にできる事は、両者を力学的に相似とみなす事ができるため一つの条件を満たしている事になる。ただし、火災のような自然対流では Froude 数の中の変数は互に独立ではなく、例えば Morton³²⁾等は plume 理論から $W^2 \propto \Delta T$ の関係を得ている。ここで ΔT は空気の温度であるが、これは ΔT_p と比例関係にある (Fig. 5 参照) と考えれば $W^2 \propto \Delta T_p$ と書ける。Fig. 4 の中にこの関係式を書き入れてみると、鉛直流速はほぼこの関係を満足している事がわかる。

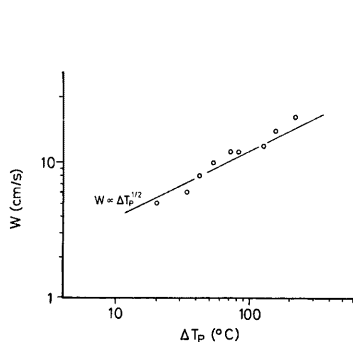


Fig. 4. Relation between the vertical velocity and the surface temperature at $r=0$ and $z=10$ cm.

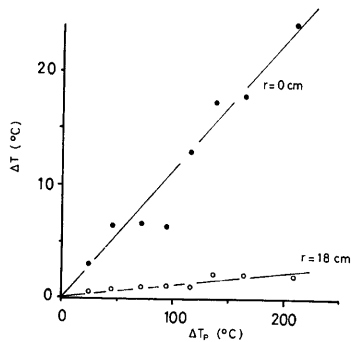


Fig. 5. Relation between the surface (ΔT_p) and the air temperature (ΔT) at two radial positions.

4.3 旋風の形成限界

旋風の形成にとって主要な条件は前にも述べたとおり上昇流と周囲の回転である。上昇流を与えるための地面板の加熱の程度は前節で述べた様に Froude 数に火災時に起る可能性のある範囲を与えたが、回転については、この実験を行う事によって渦核が形成され、旋風の発生する Swirl 比又は流入角の範囲を決定し、その範囲が、火災発生時に自然界が取り得る値であるかどうかを調べるという方法によった。

旋風が形成される場合は、それまで比較的広い範囲から上昇していた煙が急速に中央付近に絞られて渦核

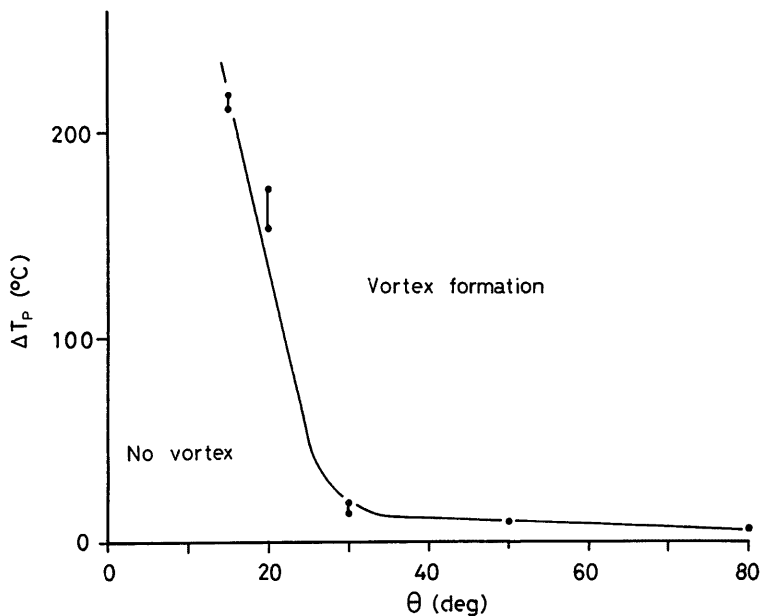


Fig. 6. The limit of the vortex formation.

が形成されるので比較的判断は容易である。渦核が形成される流入角と地面板温度の領域を **Fig. 6** に示す。この図から、渦核の形成されるのは、大きい流入角と高い加熱温度の範囲内である事がわかる。この結果によれば、たとえ大きな流入角を与えても加熱温度が小さければ渦は形成されない。この結果は Fitzjarrald²⁸⁾の結果と異っている。すなわち、彼は ΔT_p の小さな場合はどのような流入角に対しても剛体回転が現われるという実験結果を得たが、はたして明確な渦核が形成されたのかどうかは疑問である。

この実験結果では明確には区別はできなかったが、渦核が形成される臨界条件と、形成された渦核が消滅する臨界条件は同一の曲線では表わせない可能性がある。すなわち、一度形成された渦核は条件を変化させても消滅しにくいという性質を有する事が観察された。**Fig. 6** の渦の形成される領域とは、形成された渦が保持される条件の領域を示している。図からわかる様に、非常に小さな温度差 (ΔT_p) の場合でも θ が30度を越えれば旋風が発生する可能性がある事を示している。従って、 $\theta=30$ 度という値が火災や自然での程度発現する可能性があるという事が問題である。例えば、上昇速度が 10 m/s 程度の火災を考えると、Swirl 比の定義から 100 m につき 0.6 m/s 程度の平均風速の勾配があればこの条件を満足する事になる。これは少し起伏のある地形や、火災域で上昇流との相互作用がある領域では容易に起り得る条件であると考えられる。

この様にして形成された渦の性状を煙を用いて流れを可視化する事によって観察を行った。ここで条件としては **Fig. 6** を参考にして、数種類の加熱温度と流入角を選んで観察を行い、写真撮影を行った。一般的な変化の傾向としては送風器で上昇を与える竜巻状渦の室内実験の場合と同様に、流入角が大きいほど、すなわち、上昇流に比較して回転が大きいほど渦核の直径は大きくなる。しかし、加熱による旋風の特徴として、地面付近で乱れが大きい事がわかった。そのため流入角が小さい時は中央に形成された渦の周辺で回転を伴わない上昇流が活発になる場合があり、渦の位置もより不安定であり、渦の直径も激しく変化する。特に温度の低い時に変化が大きく、例えば $\Delta T_p=34^\circ\text{C}$ 、 $\theta=25$ 度の時などは直径が 2 cm 程度の層状渦から 5 cm 程度の乱流渦まで変動し、 $\theta=75$ 度ではさらに変化が激しかった。一般に高温になるほど θ の変化に伴う渦の性状の変化は明確であり、例えば、 $\Delta T_p=92^\circ\text{C}$ では $\theta=25$ 度で直径が 1.5 cm だったのが、 $\theta=50$ 度で 4 cm、 $\theta=75$ 度では 8 cm (全て収束槽の中ほどの高さでの値) になった。**Photo. 6** に $\Delta T_p=55^\circ\text{C}$ の場合の渦の状態を 3 種類の流入角について示す。 $\theta=25$ 度の場合 (**Photo. 6 (a)**) は 1 度収束槽の中ほどまでが層流状で上層が乱れた渦となっている。 $\theta=50$ 度 (同図 (**b**)) の場合に見られる形状の渦は広い温度、及び流入角の範囲で形成される典型的な渦である。さらに流入角を大きく ($\theta=75$ 度、同図 (**c**)) すると、さらに直径が大

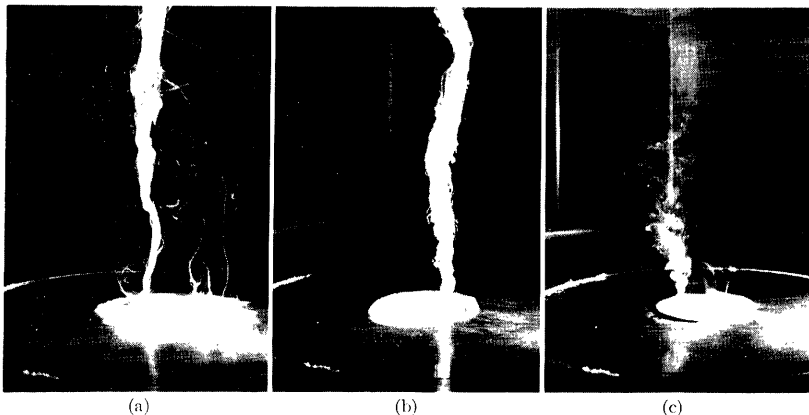


Photo. 6. Visualized vortices for the plate temperatures $\Delta T_p=55^\circ\text{C}$,
(a) $\theta=25$ deg., (b) $\theta=50$ deg., (c) $\theta=75$ deg.

きく、しかも直径が高さ方向に増加する渦が形成された。なお、この傾向(同図(c))は大きな流入角の場合には他の温度でも見られるものであった。

4.4 旋風の温度分布

火災の際の燃焼による熱量は、一部は対流エネルギーとして、一部は放射エネルギーとして使用され、残

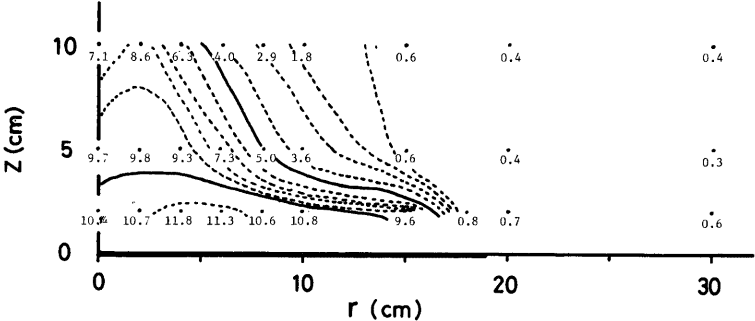


Fig. 7. The temperature (ΔT) distribution in the vertical plane with zero guide vane angle ($\theta=0$ deg.)

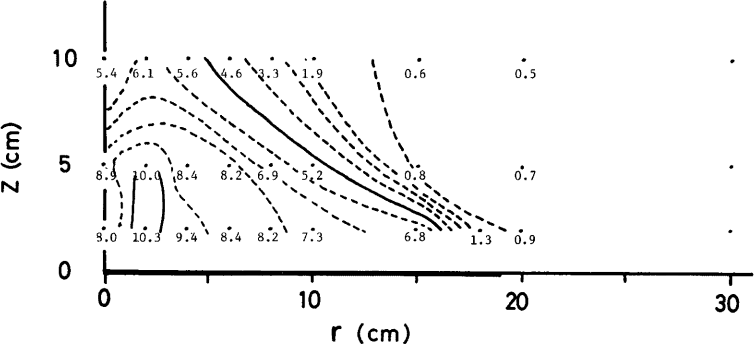


Fig. 8. Same as Fig. 13 with the vane angle increased to $\theta=25$ deg.

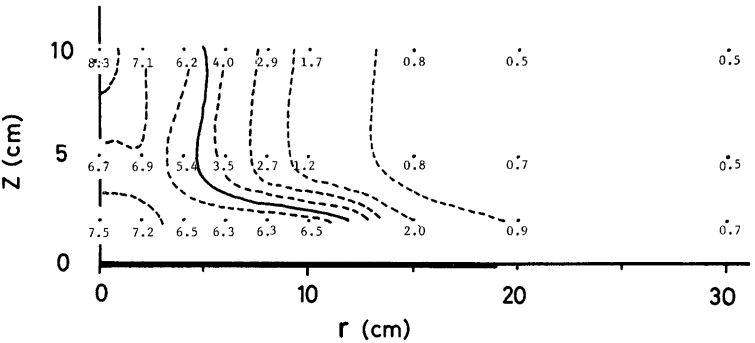


Fig. 9. Same as Fig. 13 with the vane angle increased to $\theta=50$ deg.

りは他面に吸収される。ここで行った実験において、与えた電力の一部は地面板のすぐ上の空気を温め、対流運動を起すが、その結果形成される鉛直面内 (r - z 面内) の温度分布を Fig. 7 に示す。Fig. 7 は回転を与えない場合 ($\theta=0$ 度) の温度分布であるが、地面近くの気層では加熱域内で、周辺部を除いてほぼ水平方向に一樣な温度 (10°C 前後) である事がわかる。また、周辺部 (例えば $r=15\text{ cm}$) では鉛直方向に大きな温度勾配が作られている。

この様な温度分布を持つ流れの場に回転を与えた場合の様子を次に示す。加熱板の温度は同じ $\Delta T_p=55^{\circ}\text{C}$ に保ち、流入角は Photo 6 の写真 (a), (b) の場合に示したものと同じ $\theta=25$ 度と $\theta=50$ 度について求めた。それぞれの温度の s - r 面内の測定結果を Fig. 8 及び 9 に示す。形成された旋風は、その水平位置が必ずしも安定しておらず、中心から 2 cm くらいの範囲内を動きまわるので、 $r=0$ の温度の値は正確に渦核の温度を示しているわけではなく、測定時間内 (約 2 分) の平均的な値である。測定結果から明らかな事は、 $\theta=25$ 度になると地面近くの温度の水平勾配はやや大きくなり、加熱部周辺の温度が下り、 $\theta=50$ 度になるとさらにこの傾向は大きくなり、高温部が中心付近に集中し、縦にのびる分布を形成する。この傾向をさらに良く示すために、Fig. 10 に温度と流入角の関係を中心からの距離 r の種々の値について示した。すなわち、渦核の温度が回転が大きくなるほど増大するのに対して、周辺部の温度は低下する。また、上昇流は中心部に集まっているので、熱量は渦核を通して上層に運ばれるわけであるが、渦核に熱が集中するため、渦核の温度 (ΔT) は回転の大きい場合には地面板の温度差 (ΔT_p) の半分程度の温度差にまで達する結果となっている。すなわち旋風が形成されると、火災域の温度に近い高温の渦核を持った旋風が形成される可能性を示している。

5. 結 び

大火災に伴って旋風が発生した例が過去に数多く認められるが、それらは様々な火災について発生し、様々な性状を示す。すなわち、竜巻の様に漏斗雲を伴った強暴なものから、小さな塵旋風程度の弱いものまで発生しており、一般的な性質を述べる事は困難である。しかしながら、発生に最低限必要な共通した条件は上昇流と周囲の回転であるので、発生限界がそれらのどの様な関数になるか、また発生した旋風がそれらの量の組合わせによってどの様に変化するかを相似法則を考慮した室内実験の手法によって調べた。

その結果、旋風の発生限界については、上昇流又は周辺部の回転の大きい場合に渦核が形成される事がわかった。実験における上昇流は Froude 数を合致させる条件下に下面を加熱して与え、その上昇流を埋めるために収束流入して来る気流に guide vane を用いて回転を与えた。その流入角を自然界のものと比較した場合、自然界に存在する、または火災の気流との相互作用によって作られる事が充分に予想される風速の水平シアの範囲内で旋風が発生する事がわかった。従って、上昇気流がある程度以上強い火災であれば、いつでも旋風が発生する可能性があると言えるが、ただし、量的な発生限界についてはさらに検討を加えなければならない。また旋風が発生した場合の温度分布を測定した結果、渦核の温度は流入角が大きいほど高くなり、周囲との温度差は加熱板と周辺との温度差の半分程度に達する事、すなわち、火災の温度と大気温度の半分程度の温度差を持つ旋風が形成される事が示された。

なお、ここで得た結果は、一般風のシアのみを問題とし、その平均値を考慮しない、すなわち平均流の存在しない時の結果である。一般風が非常に強い時には旋風は発生しにくいと言われているので、この事に

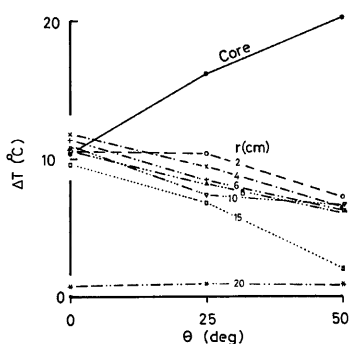


Fig. 10. The variation of the temperature at the height $z=2\text{ cm}$ with the inflow angle at various location from the center.

については、上昇流と一般流との相互作用の効果の検討を加える必要がある。しかし、水平流と回転とを同時に与える精度の高い実験を行うのは困難であるので今後の研究課題として残される。

この研究は文部省科学研究費、自然災害特別研究 No. 402520 および No. 00502017 の補助金によって行った。なお、本研究を始めた動機は大阪市防災会議によって与えられたものである事を記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 寺田寅彦：大正12年9月1日、2日の旋風について、震災予防調査会報告、第100号（戊），1924，pp. 185-227.
- 2) 藤原咲平編：関東大震災調査報告（気象編），中央气象台，1923，161 pp.
- 3) 相馬清二：被服廠跡に生じた火災旋風の研究，地学雑誌，Vol. 84, 1975，pp. 204-217.
- 4) Landsburg, H.: Fire storm resulting from bombing conflagrations, Bull. Amer. Met. Soc., Vol. 28, 1947, p. 72.
- 5) Ebert, C. H.: The meteorological factor in the Hamburg fire storm, Weatherwise, Vol. 16, 1963, pp. 70-75.
- 6) 山下邦博：火災旋風，火災，第24巻，1974，pp. 243-258.
- 7) 畠山久尚：気象と火災，全国加除法令出版，1978，239 pp.
- 8) Graham, H. E.: Fire whirlwinds, Bull. Amer. Met. Soc., Vol. 36, 1955, pp. 99-103.
- 9) King, A. R.: Characteristics of a fire-included tornado, Aust. Met. Mag., No. 44, 1963, pp. 1-9.
- 10) Pirsko, A. R., L. M. Sergius and C. W. Hickerson: Causes and behavior of a tornadic fire-whirlwind, Forest Serv. Res. Paper, PSW-61, 1965.
- 11) Whittingham, H. E.: Fire whirlwind at Imbil, Aust. Met. Mag., No. 25, 1959, pp. 59-72.
- 12) Idso, S. B.: Tornadic vortices spawned by a desert brush fire, Weather, Vol. 29, 1974, pp. 280-283.
- 13) Hissong, J. E.: Whirlwinds at oil-tank fire, San Luis Obispo, Calif., Mon. Weath. Rev., Vol. 5., 1926, pp. 161-164.
- 14) Thorarinsson, S. and B. Vonnegut: Whirlwinds produced by the eruption of Surtsey Volcano, Bull. Amer. Met. Soc., Vol. 45, 1964, pp. 440-444.
- 15) Adams, J. S., D. W. Williams, J. Tregellas-Williams: Air velocity, temperature and radiant heat measurement within and around a large fire, 14th Symposium on Combustion, 1972, pp. 1045-1052.
- 16) Bulter, C. P.: Operation Flambeau, Final Rep. OCD Work Unit No. 2561B, 1969.
- 17) Galsler, A. H.: Tornado studies, Contract Cwb 8696, Final Rep., 1956.
- 18) Dessens, J.: Man-made tornadoes, Nature, Vol. 193, 1962, pp. 13-14.
- 19) Bénech, B.: Experimental study of an artificial convective plume initiated from the ground, J. Appl. Met., Vol. 15, 1976, pp. 127-137.
- 20) Church, C. R., J. T. Snow and J. Dessens: Intense atmospheric vortices associated with a 1000 MW fire, Bull. Amer. Met. Soc., Vol. 61, 1980, pp. 682-694.
- 21) Lewellen, W. S.: A solution for three-dimensional vortex flows with strong circulation, J. Fluid Mech., Vol. 14, 1962, pp. 420-432.
- 22) Davies-Jones, R. P.: The dependence of core radius on swirl ratio in a tornado simulator, J. Atmos. Sci., Vol. 30, 1973, pp. 1427-1430.
- 23) Snow, J. T., C. R. Church and B. J. Barnhart: An investigations of the surface pressure fields beneath simulated tornado cyclones, J. Atmos. Sci., Vol. 37. 1980, pp. 1013-1026.

- 24) Church, C. R., J. T. Snow, G. L. Baker and E. M. Agee: Characteristics of tornado-like vortices as a function of swirl ratio: A laboratory investigation, *J. Atmos. Sci.*, Vol. 36, 1979, pp. 1755-1776.
- 25) Leslie, L. M. and R. K. Smith: The effect of vertical stability on tornadogenesis, *J. Atmos. Sci.*, Vol. 35, 1978, pp. 1281-1288.
- 26) Dessens, J. Jr.: Influence of ground roughness on tornadoes, *J. Appl. Met.*, Vol. 11, 1972, pp. 72-75.
- 27) 文字信貴：竜巻渦の室内実験，京都大学防災研究所年報，第25号A，1982，
- 28) Fitzjarrald, D. E.: A laboratory simulation of convective vortices. *J. Atmos. Sci.*, Vol. 30, 1973, pp. 894-902.
- 29) Mullen, J. B. and T. Maxworthy: A laboratory model of dust devil vortices, *Dyn. Atmos. Oceans*, Vol. 1, 1977, pp. 181-214.
- 30) Emmons, H. W. and S. J. Ying: The fire whirl, *Proc. 11th Symp. on Combustion*, The Combustion Institute, 1967, pp. 475-488.
- 31) Ray, P. S., B. C. Johnson, K. W. Johnson, J. S. Bradberry, J. J. Stephens, K. K. Wagner, R. B. Wilhelmson and J. B. Klemp: The Morphology of several tornadic storms on 20 May 1977, *J. Atmos. Sci.*, Vol. 38, 1981, pp. 1643-1663.
- 32) Morton, B. R., G. I. Taylor and J. S. Turner.: Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources, *Proc. Roy. Soc. London, Ser. A.* 234, 1956, pp. 1-23.