

中国における台風の室内実験*

魏 鼎 文**・王

允 寛**・文 字 信 貴***

1. はじめに

台風を実験室内に発生させ、それを自由自在に発達、移動させ、適当な陸地に上陸させたり、また消滅させる事ができれば台風の研究は大きく前進するにちがいないというのが実験気象研究者の夢であろう。実験室内に台風に似た渦を作り出すにはいくつかの困難がある。その1つは地球の回転を表すため地面を回転させる必要があり装置が複雑になること、もう1つは台風のエネルギー源となっている潜熱の放出をどのような手段で表現するかという問題があることである。中国科学院の大気物理研究所では、台風の室内実験装置を開発し、1973年から研究を進めている。この度、著者のひとり(文字)が大気物理研究所を訪問し台風の室内実験を共同で行った。これを機会に中国で開発された台風のシミュレーターを紹介すると同時に、今回共同で行った実験とあわせて、これまで行われてきた台風の実験結果の概要について述べたいと思う。過去に公表されている熱帯低気圧の室内実験としては Hadlock・Hess (1968) によるものがある。作業流体に液体を用い、化学反応の発熱で浮力を発生させているため実験条件のコントロールに困難がある様に思われる。中国科学院大気物理研究所の台風シミュレーターは作業流体に空気を用い、熱源となっている潜熱の放出をシミュレートするには煙に赤外線を当て、厚さを持った気層が浮力を得る方法を用いている。回転台は大型にしてその上には5, 6人の実験員が乗って装置と一緒に回転することにより実験がやり易いようにした。

これまでにこの実験装置を用いて行ってきた実験は、台湾や青藏高原などの地形が台風の構造や進路に及ぼす影響、また熱源が2つ以上ある場合の台風発生や移動への効果に関するものである。今回は、さらに基礎実験を

重ね、実験室内で形成される台風状渦の性質を様々な観点から調べたのでその結果も含めて以下にのべる。

2. 台風シミュレーター

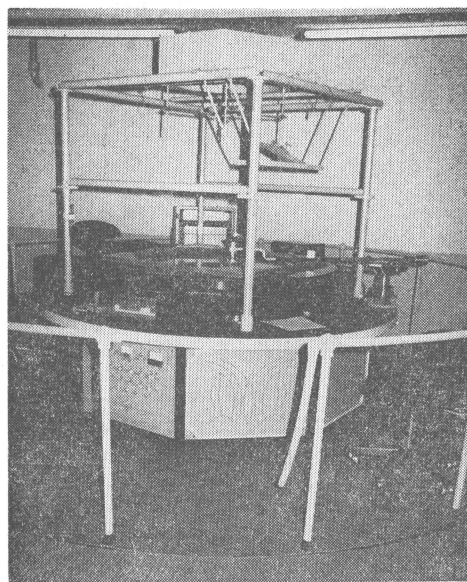
台風状の渦を実験室内で発生させるためには少なくとも2つの要素が必要である。1つは流体に浮力が与えられ対流が起こること、もう1つは流体に回転が与えられることである。ここで述べる装置では浮力を得るための加熱の方法として、煙草の煙に赤外線を当てる方法を用いている。SiO₂を加熱し波長3.7 μm の赤外線を発生させ、反射板を用いて下向きの光線を作り、測定部に導いた煙に当てる様にしている。これによって気層全体を加熱することができる。赤外線熱源の出力は0~20Wの範囲で変化させられるが、これによって発生する中心と外部との温度差は0~5°Cである。流体の回転については装置全体を直径3.5mのターンテーブルに乗せて装置全体を回転させる方法を用いている。回転の速度はその周期が180~20秒(即ち、3~0.33 rpm)の範囲で連続可変である。全体の様子を第1図に、また装置の概要は第2図に示す。作業流体の空気は直径120cm、厚さ4cmの浅い円筒の中に閉ざされた状態にあり、下の境界は表面が滑らかなアクリルで、上の境界は用いた赤外線を透過する薄いプラスチック膜を用いている。流れは煙に水平および鉛直の幅6mmのスリット光を当てる事によって可視化を行い、それを写真に撮影する。風速については測定計器は備えていないが、煙の状態が多数の塊状になっている時に一定間隔で連続撮影を行う方法によって測定する。

大気現象をシミュレートするには3つの種類の相似性、すなわち、力学的相似性、幾何学的相似性および境界条件の相似性を考慮しなければならない。力学的相似性を考える場合のパラメータについては、運動方程式の無次元化によって得られる様々な無次元量のうち、台風の実験に関しては、熱ロスビー数(R)

* Laboratory simulation of typhoon vortex in China.

** Wei Dingwen, Wang Yunkuan, 中国科学院大気物理研究所.

*** Nobutaka Monji, 京都大学防災研究所.



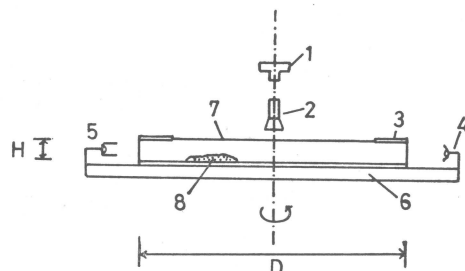
第1図 台風渦の実験装置

$$R = \frac{4T}{T} \cdot g \cdot \frac{H}{f^2} D^{-2}$$

が最も重要と思われる。ここで、 $4T$ は台風の中心と外部との温度差、 T は平均温度、 f はコリオリのパラメータ、 H は台風の高さ、 D は台風の直径、 g は重力の加速度である。

$4T, T, H, D, f$ の自然界での値をそれぞれ 10°C 、300 K、15 km、1000 km および 10^{-4} sec^{-1} と考え、一方、実験室内での値を 2°C 、300 K、4 cm、50 cm、及び 10^{-1} sec^{-1} に選べば R の自然界での値 R_n と実験室内での値 R_m はそれぞれ 0.5、1.0 となってほぼ同じオーダーとなる。他のパラメータについて、たとえばレイノルズ数などを一致させることが困難な点は一般の風洞実験と同じである。ここで行った実験は十分に発達し、定常状態になった台風であるが、台風の発生発達をシミュレートしようと思えば時間スケールを考慮したパラメータを導入しなければならない (Wei and Wang, 1982)。

幾何学的相似については、台風の渦は $D \gg H$ という条件が必要であるが、これについては後の結果で述べる様に満たすことができる。境界条件については、実験装置の測定部は滑面を持ったプラスチックで囲まれる状態となっている。自然界には実験装置にある様な蓋がないのでこれが両者の相違点ではあるが、台風の場合も一般的には境界面が上限として作用していると考えればそれほどかけはなれていない。ただし、上面の摩擦の影響に



第2図 実験装置の概略図。1. カメラ、2. 赤外線熱源、3. 測定容器、4. 水平スリット光源、5. 鉛直スリット光源、6. ターンテーブル、7. プラスチックフィルム、8. 地形模型。 $H=4.0 \text{ cm}$ 、 $D=1.2 \text{ m}$ 。

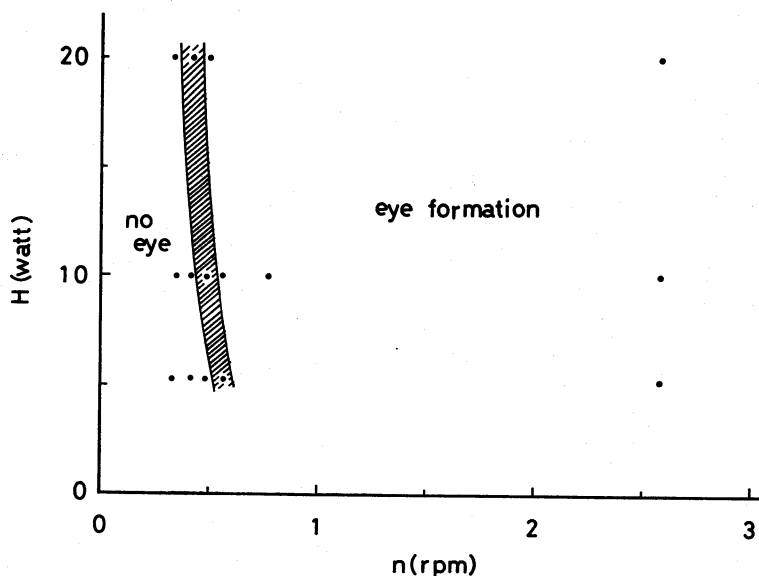
ついては検討を要する問題として残る。尚、下面の粗度の影響については実験で確める。

3. 基礎的実験

3.1 台風状渦の構造

台風の構造を決定する2つの重要な要素は浮力の原因になる熱、及び地球の回転であろう。この2つの要素の組み合わせによって様々な形の渦が形成される。そこで赤外線熱源の出力とターンテーブルの回転数の両者を変化させて実験室内の渦の構造がどの様に変化するかを調べてみた。

形成される渦の直径は条件によって異なるが、ここで与えた条件では直径がほぼ30~50 cmの渦となった。回転数が充分大きいと渦は中央に明確な空洞を持つ。この空洞は円形で、煙はその周囲を回転し中には浸入できない。回転数が小さいと中央の空洞は形成されず、全域が上昇流となる。加熱の大きさの影響については、加熱が大きい場合には全体がより大きく広がるが、中央の空洞の直径は小さくなる現象が認められた。加熱を小さくすると中央の空洞は大きくなるが、その輪郭が明確でなくなり、加熱が小さく回転が弱い場合は空洞は消滅する。この中央の空洞は、形状が明確な場合はその中心付近が下降流となっており、台風の眼に相当すると思われる。その眼がどのような条件の時に形成されるかを調べた結果を第3図に示す。座標軸は無次元化された外部パラメータで表すことができればより一般的な関係となるものと考えられるが、ここでは仮に赤外線熱源の出力と装置の回転数で示した。これから明らかな様に眼の形成は回転数が大きいほど、または、加熱量が大きいほど明確である。然しながら、回転の影響の方がはるかに大



第3図 赤外線熱源の加熱量(縦軸)と装置の回転数(横軸)で表した眼の形成される範囲。斜線の部分は眼の形成が不明確な領域。

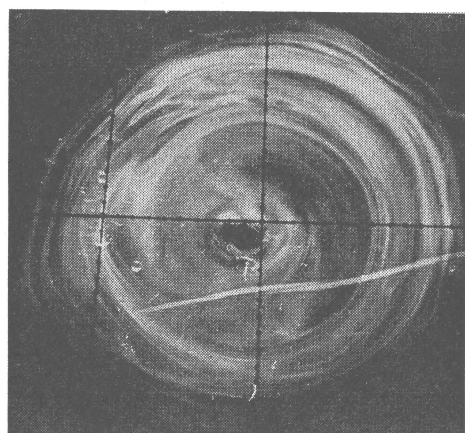
きいことがわかる。この傾向は竜巻状渦の室内実験において得られた結果、すなわち、流入流量よりも流入角の方が渦の形状の決定に重要な役割を果たすという結果(Monji, 1985)と考え合わせた場合、渦に流入する対流成分よりも回転の方が渦の発達にとって重要であるということがいえよう。

これらの条件の中から2つのケース、加熱量が10 Wで回転数が2.5 rpmの場合と加熱量が同じく10 Wで回転数が0.2 rpmの場合の渦の状態を第4図に示した。上層、中層、下層はスリット光源の中央が下面からそれぞれ3.1 cm, 1.6 cm, 0.5 cmの層である。第4図(a)は強い加熱と大きい回転の場合の上層部の水平断面であり、中央付近は反時計回り(サイクロニック)であるが吹き出した流れは時計回りに変化していく。同じく(b)は中層の断面であるが軸対称で、円形に近い流れが見られる。第4図(c)の下層では眼は明確ではなく収束流を示す流れが認められる。一方、第4図(d)~(f)には加熱は同じで回転が小さい時の水平断面を示したが、この場合は眼は不明確である。明確な眼が形成されている条件下での鉛直断面を第5図に示す。中央には上に行くほど広がった眼状の領域がある。上層部には逆の方向に回転する小さなセルが認められ、中心部は下降流となっている事がわかる。

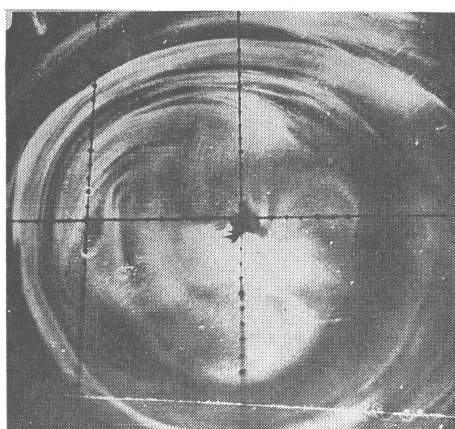
次に、明確な台風状渦が形成されている時の温度分布の例を第6図に示す。自然界の台風内の温度分布との完全な相似性を得る事は困難であるものの、中心付近のしかも低い層よりも高い層で高温となっているという点では類似点を有していることがわかる。

3.2 下部の境界条件

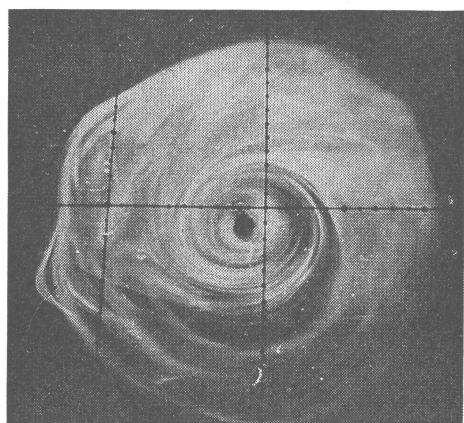
次に、下部境界面を変えた場合に境界層にどのような変化が起こるか、また、渦全体がどのような影響を受けるのかを調べてみた。用いた粗度は滑面のほかに2種類である。1つの粗度はサンドペーパーの粗いもので、1つの粒が直径0.7 mm程度のものであり、もう1つの粗度は直径3~5 mm程度の角ばった小石を一様に敷き詰めたものである。小石の間隔は小石の大きさと同程度とした。渦の条件としては加熱が20 Wで回転が2.5 rpmという比較的強い渦について行った。結果は、風速の測定を行っていないので厳密なことは分らないが、小さい方の粗度については渦の形状はほとんど滑面の場合との差が認められず、この程度の粗度であれば空気力学的には滑面であり、この装置で渦の形状に関する実験を行う限りその影響は考慮しなくても良いことが推測された。一方、大きい方の粗度に関しては中層程度まで流入角などに变化がある可能性が認められた。しかし、この影響を定量的に表すためには風速の正確な測定が必



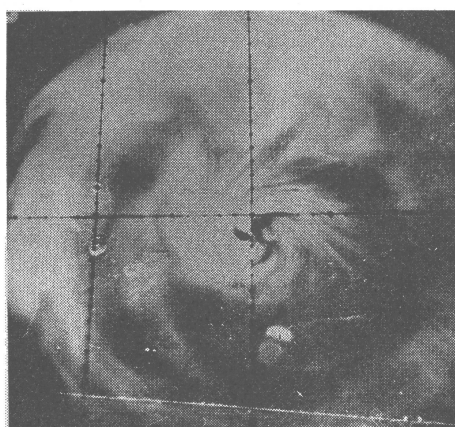
(a)



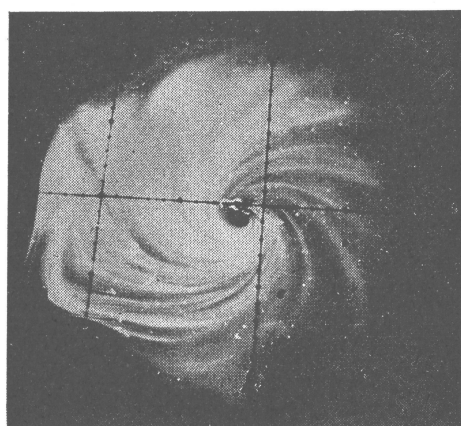
(d)



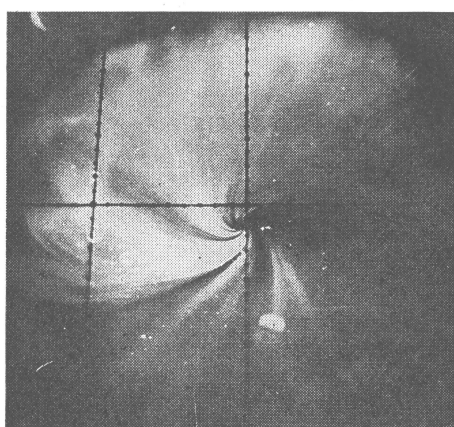
(b)



(e)

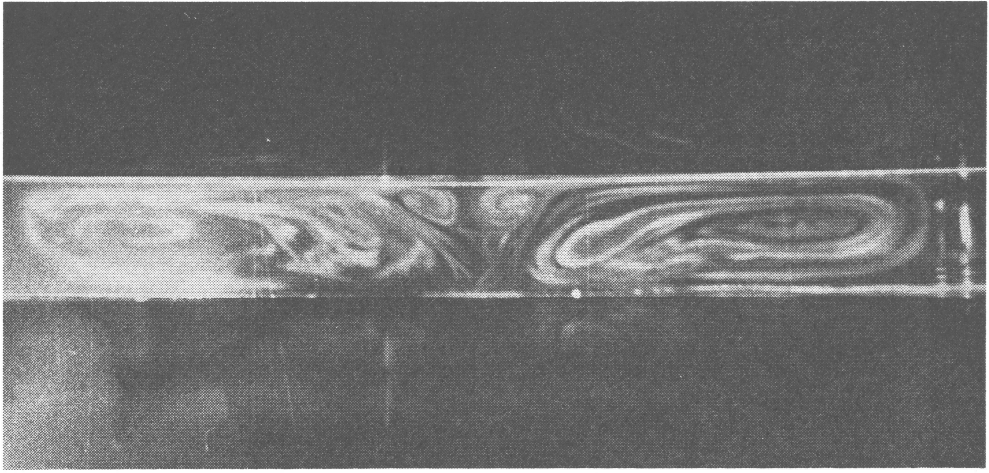


(c)

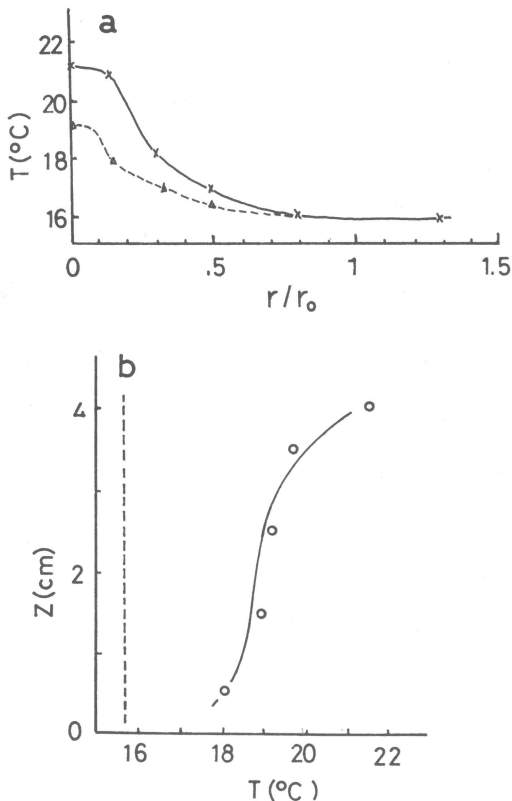


(f)

第4図 速い回転 (2.5 rpm) の場合の明確な眼を持つ渦 (左) と、遅い回転 (0.2 rpm) の場合の不明確な眼を持つ渦 (右). 上段が上層部, 中段が中層部, 下段が下層部. 加熱はいずれも 10 W.



第5図 強い加熱と大きな回転を与えた場合の渦の断面図 (魏と葉, 1979).



第6図 明確な台風状渦が形成されている時の温度の (a) 水平分布と, (b) 鉛直分布. 水平分布の実線は高さ 4 cm, 破線は 2.5 cm (魏と葉, 1979).

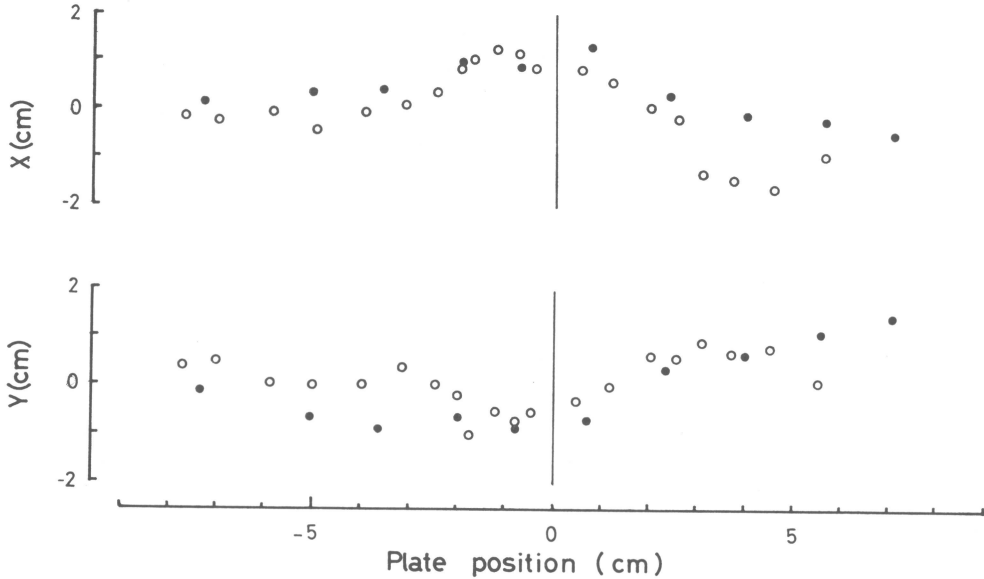
要であり, それは今後の課題である.

4. 地形模型を用いた実験

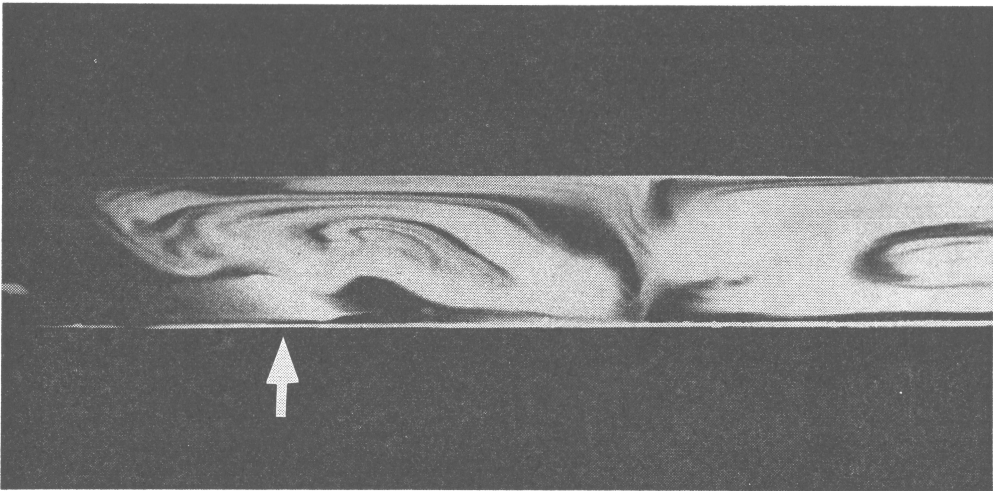
大規模な地形の上に台風が進んで来るときに, その進路や渦の構造にどのような変化が現れるのかを調べる事は, 台風の子報にとって有益であると考えられる. しかし, 台風の渦の移動を室内実験でシミュレートする事は様々な困難があるため, 現在では地形の模型の方を移動させる方法を用いている.

4.1 単純な地形による台風渦の変化

最も単純な地形として最初に台風が大陸に接近, 上陸する場合を想定し, 平板を選んだ. 厚さ 6 mm, 幅と奥行き 40 cm の合板を一定の速度で移動させ, 台風状渦に接近, 上陸させる. 移動速度は 1.2 mm/s と 3.7 mm/s の2種類を用い, 回転は 2.5 rpm と 1.2 rpm の2種類を選んだ. 著しい傾向の1つは眼と平板の端が接近すると眼は平板に向かって移動する事である. 即ち, 台風の陸地への接近は加速される. もうひとつの性質は上陸前後からコースが右へずれる事である. 前者は大陸効果と呼ばれ, 台風が大陸や大きな島に接近する場合に急に陸の方へ寄せられるので予報上注目されている現象である. 後者の効果もよく観測される事実である (魏と張, 1978). 第7図に測定結果を示す. 移動速度や渦の強さを変化させてもこの傾向は変わらず, 条件の違いによる系統的な変化は明確ではなかった. これらは眼の動きについてであるが, 台風渦全体として右へ移動する事, それが, 移動速度が大きいほど, また, 回転が大きいほどその傾向が強い事が魏と張 (1978) によって見出されて



第7図 陸地が渦に接近した場合の渦の移動. X方向（上段の図）は正の方向が陸地へ向かって渦の移動が加速される事を, Y方向（下段の図）は正の方向が陸地に向かって右へ渦の移動が加速される事を表す. 両者とも横軸は渦の中心と陸地との距離を表し, 中央付近の縦線は渦の中心が陸地に達した点を示す. 白丸は模型の移動速度が1.2 mm/s, 黒丸は3.7 mm/s.

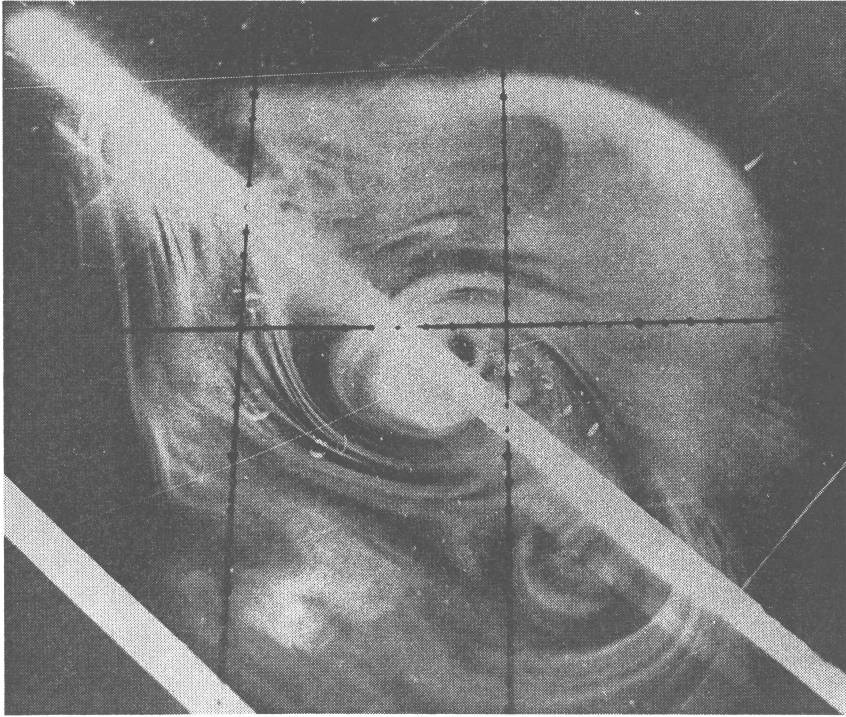


第8図 三角形断面を持つ2次元山脈模型（矢印）によって渦の中層部に発生した波動を示す断面図.

いる. また, 魏と張は装置の回転方向を逆にして, すなわち, 南半球の状態にして実験を行い, 進路も逆に左へずれる事を確めた.

次に, 平行する2つの2次元的山脈, すなわち, 断面が底辺3 cm, 高さ1 cmの三角形の単純な山脈に向か

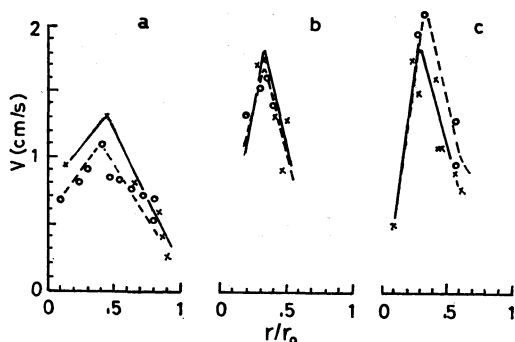
って台風状渦が進行して行く場合の渦の変化を調べた. 実験条件は平板の場合と同じである. 2つの山脈の間隔を変化させて渦の変化の観察を行った結果, 大きな特徴としては, 台風が山を越える時は眼の移動が加速され, その進行方向側斜面では滑り降りる様な形で眼が伸びる



第9図 2列の山脈模型に向かって直角に移動すると渦の変形、ある条件下では右下にアンチサイクロニックな渦が発生する。



第10図 台湾の地形模型（図の中心付近）に接近して南北に分裂する渦（Wei, 1980）。



第11図 チベット高原の地形模型による風速水平分布の変化。破線は地形が遠い場合、実線は近い場合。地形が近くにある場合には上層(a)の風速は増大し、中層、(b)は変わらず下層、(c)の風速は減少する(王他, 1986)。

こと、さらに眼の移動方向は台風の進行方向に向かって右へずれること、また、山越え気流状の波が中層に発達すること(第8図)などが認められた。また、2つの山脈の間隔を山脈断面の底辺の4倍に取った時、台風の進行方向に向かって左に山脈の背後(台風の移動方向側)にアンチサイクロニックな渦が形成される事も判った(第9図)。

4.2 地形模型を用いた実験

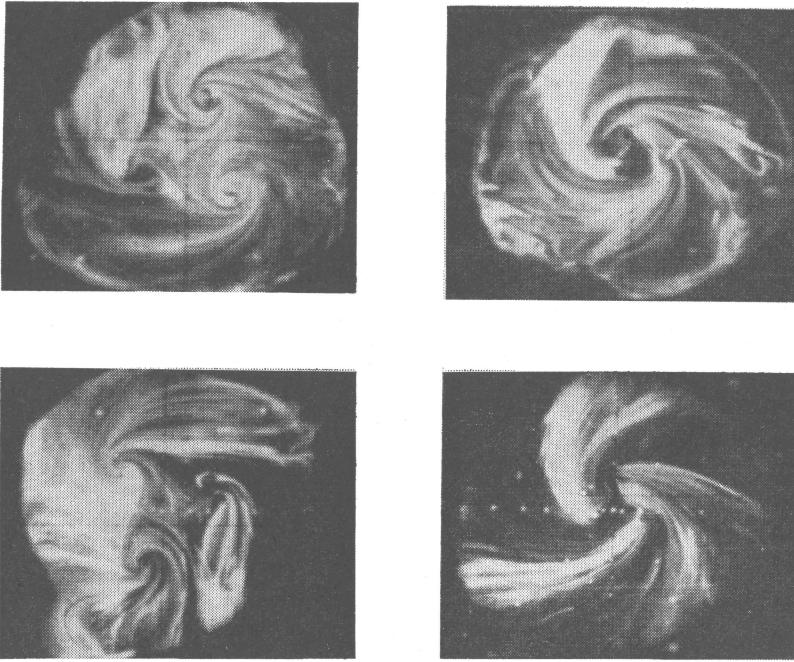
大きな島や山脈、高原は台風の進路や構造にどのような影響を与えるかを調べるために具体的な地形模型を用いた実験を行っている。これまで対象として取り上げて来た地形は台湾、チベット高原及び海南島である。台湾は標高3950 mを最高に急しゅんな地形であり、これまで台風の進路に重大な影響を与えて来た。たとえば、1965年から1968年の間に台湾を横断した8個の台風のうち5個までが中心が2つに分れるという現象を生じている。実験で調べて見るとこの現象は進路によって異なった性質を持ち、眼が分裂する事もあれば(第10図)、一方では、急速に異なる位置に眼が移る現象も認められた(Change *et al.*, 1975; Wei, 1980)。日本列島についても1/4000000の地形模型を用いてその地形の影響を様々な台風の進路を想定して調べる事は試みてはみたが、台湾付近の条件とは異なり、台風が日本列島へ近づく頃には北側の寒気の影響で台風が非対称に変形するという効果を実験に取り入れる事など容易ではない問題を含んでおり、現時点では有意義な実験は困難であると考えられる。

チベット高原に大雪をもたらすと考えられているベンガル湾のサイクロンが北上した時、チベット高原の地形でどのように変形を受けるかを調べた実験(王他, 1986)では、高原状の地形が風速分布に著しい影響を及ぼすことがわかった。即ち、第11図に示す様に、渦が地形から遠い時は上層より中層、中層より下層で風速が大きいが、高原状地形に近づく(中心から高原の南端までが約500 km)と上層の風速は増大し下層の風速は減少するという結果が現れている。

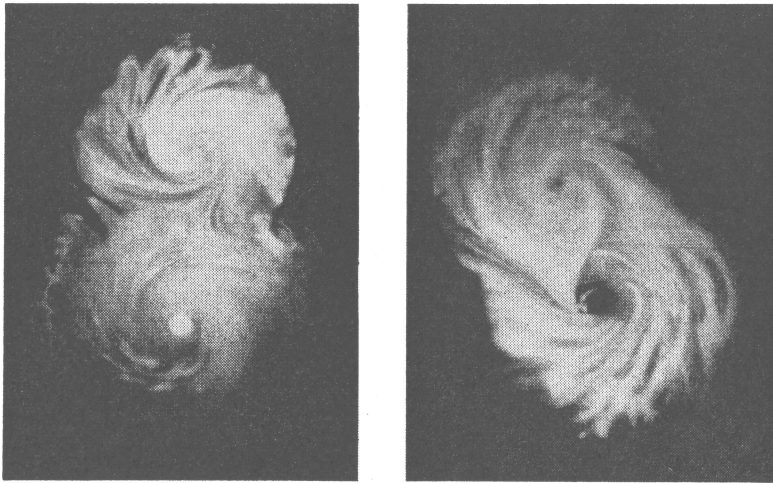
5. 複数の熱源による実験

台風の発生、発達に関して個々の積雲とさらに大きな場との関連がどのようなになっているかという議論が多く行われている(例えば Gray, 1968; Yamasaki, 1977)。この点に関する1つの見方を与えるために、以前に行った実験について述べる。この実験では小さな弱い赤外線熱源を3つ用いた。それら熱源の間隔を大きく保って加熱した場合には、その下に発生する小さな対流現象は、あたかも熱帯の積雲を思わせる様な形状をしている。熱源の間の距離がある程度以上のときは、そのまま小さな対流現象が個々に起こっており、弱く渦巻いているだけであるが、ある距離以下に接近させると3つの対流は1つの大きな流れを形成し、さらに近づけると台風状の渦が発生する。そして風速や中心付近と周囲との温度差は初期の値より大きくなる。従って、この状態になると、さらに正のフィードバックが働いて渦は強められる結果となる。第12図にその様子を示す。Wei and Wang (1982)はこの現象をAEVTA (Amplification Effect of the Vortex in the Tropical Atmosphere)と呼び、台風の発生メカニズムの解明にひとつのヒントを与えるものであると考えた。なお、1つの強い渦が形成された後も3つの熱源の影響はレインバンド状となって残っている。

自然界に2つ以上の台風がある場合、それらがある距離以内に近づくと互いの周囲を回転することがある。これをシミュレートするため Wei・Chang (1982)は2つの比較的強い熱源を与え、2つの台風状渦を発生させる実験を試みた。2つの台風状渦は互いの間の距離が大きい時は2つの独立した渦として振舞っているが、ある距離以下になると互いの周囲を回転し始める(第13図)。回転が始まると、渦の中心を追って熱源を移動させた。その結果、回転角周波数(ω)と2つの間の距離を台風の半径で割った y の間には $\omega = 236 \cdot (50 - y - 3.3)$



第12図 3つの熱源によって形成された渦。左側が熱源間距離が大きく、3つの独立した渦が認められる場合、右側は距離が小さく、一つの大きな渦が形成された場合。上段が中層、下段が下層 (Wei and Wang, 1982)。



第13図 互いの周囲を回転する2つの台風状渦 (Wei and Chang, 1982)。但し、左側は2つの渦の間の距離が大きく、回転が起こらない場合。

deg/12 hr で表される関係があること、即ち、2つの渦の間の距離が小さいほど回転周期が小さいことが分かった。この関係は観測事実 (Brand, 1970) と同様に類似して

いる。さらに実験によれば、この現象が起こると、温度場については1つの中心を持つ分布が形成されることが明らかとなった。

6. 今後の課題

流体力学の実験においては流れの可視化が重要な役割をはたすが、一方、定量的な測定も欠かす事ができない。この解説のなかで述べてきた内容は可視化に重点を置くものであり、紹介した装置の中では流速などの測定はあまり精度を高く行っていない。流速測定を困難にしている理由は、測定空間が小さいことと、流速が 10 cm 以下と大変小さい事である。これを解決するためには可視化による測定方法を改良するか、さらに好ましい測定としたとえばレーザー流速計などの導入を検討する事が必要であろう。温度測定も場を乱さずに行う方法に改良されなければならないが、圧力分布の測定ともなれば、極端に小さな値を検出しなければならないため大変な困難が予想される。

実験が困難なテーマも多くあり、例えば、一般流がある場合の台風渦との相互作用の実験もそのひとつである。また、渦の移動の実験に際しても、これまでは台風の渦のかわりに地形を動かしているが、本来は渦の方を移動させねばならない事、その方法の開発の必要があることなどいずれも容易ではない問題が残されている。しかしながら、これにもまして重要な基本的な問題として、温度分布や風速分布、海面からの水蒸気の補給や凝結の際の潜熱の放出などを台風のものにより近づける努力も同時に続けなければならない。そして次に、台風渦の発生、発達、衰弱という時間スケールも含めたテーマに発展させることができれば理想的である。

この解説中の資料で引用文献の付していないものは今回の共同研究で得られたものである。日中の共同研究を可能にして頂いた中国科学院大気物理研究所所長 曾慶存教授ならびに京都大学防災研究所 光田寧教授に感謝致します。尚、実験に当たっては、大気物理研究所の劉俊清、黄中華、魯海牛各氏の技術的協力を得ました。

文 献

Brand, S., 1970: Interaction of binary tropical

cyclones of the western north Pacific Ocean, J. Appl. Meteor., 9, 433-441.

Chang, C.C., Wei Dingwen and Ho Huhua, 1975: An experimental simulation on the structure and topographical influence of typhoon, Scientia Sinica, 18, 381-395.

Gray, W.M., 1968: Grobal view of the origin of tropical disturbances and storms, Month, Wea. Rev., 96, 669-700.

Hadlock, R.K. and S.L. Hess, 1968: A laboratory hurricane model incorporating an analog to release of latent heat, J. Atmos. Sci., 25, 161-177.

Monji, N., 1985: A laboratory investigation of the structure of the multiple vortices, J. Meteor. Soc. Japan, 63, 703-713.

姚 增樞, 魏 鼎文, 1985: 冷空氣对台風影響の流体力学模擬実験研究, 氣象学報, 43, 53-62.

Yamasaki, M., 1977: A preliminary experiment of the tropical cyclone without parameterizing the effects of cumulus convection, J. Meteor. Soc. Japan, 55, 11-31.

王 允寬, 劉 俊清, 黄 中華, 1986: 青藏高原地形对孟加拉湾熱帶氣旋動力影響的模擬実験研究, 大気科学, 10, 27-34.

Wei D., 1980: Suggestions for the forcast of typhoon track from the experimental similarity, Collected Oceanic Works, 3, 7-16.

魏 鼎文, 張 捷迂, 1978: 台風路徑的某些模擬実験研究, 大気科学, 2, 290-296.

Wei D. and C.C. Chang, 1982: Laboratory simulation on the interaction between binary typhoons with hydrodynamic model experiments, Scientia Sinica (B), 25: 881-889.

—— and Wang, Y., 1982: Some basic problems in the formation of the tropical cyclone -A research with hydrodynamic model, Collected Ocean Works, 5: 23-40.

魏 鼎文, 葉 篤正, 1979: 熱帶風暴の結構及其螺旋雲帶的形成—模擬実験研究, 氣象学報, 32, 16-27.