

## 渦巻について\*

木村 竜 治\*\*

## 1. プロローグ

私たちがその頂上に坐っている岬にちょうど向き合っていて、5、6マイルほど離れた沖に、荒れ果てた小島（ヴァラー島）が見えた。もっとはっきり言えば、果てしない波濤の彼方に、それに取り囲まれてその位置が見分けられた。それから約2マイルばかり陸に近いところに、（モスケーと呼ばれる）それより小さい島がもう一つあった。岩石でゴツゴツした不毛の島で、一群の黒い岩がその周囲に点々として散在している。

海の様子は、この遠い方の島と海岸とのあいだのところでは、何かしらひどく並々でないところがあった。……その島と海岸とのあいだだけは、規則的な波のうねりらしいものが全然なく、ただ、あらゆる方向に——風に向かった方にもその他の方向と同じように——海水が短かく、急速に、怒ったように、逆にほとぼしっているだけであった。泡は、岩のすぐ近いところのほかはほとんど見えない。私たちは、ヘルゼッケン（岬の名）の頂上に10分ばかりいた。ここに来るには、ロフォーデンの奥からやってきたので、途中では海がちっとも見えなくて、絶頂に来て初めて海がぼっと眼の前に展開したのである。……私は、アメリカの大草原における野牛の大群の咆哮のようなだんだん高くなっていく騒々しい物音に気がついた。と同時にまた、眼の下に見えていた船乗りたちのいわゆる狂い波（逆波）が急速に東の方へ流れる潮流に変わりつつあることに気がついた。みるみるうちに、この潮流はすさまじく速くなった。刻一刻と速さを増し——せつかな激しさを加えた。5分もたつと、ヴァラー（島）までの海は一面に抑えきれぬ狂瀾怒濤を巻き上げた。が、怒濤の一番ひどく猛り狂っているのはモスケー（島）と海岸との間であった。そこでは、広々と

たたえている海水が、裂けて割れて無数の衝突しあう水路になったかと思うと、たちまち狂おしく座撃し、——高まり、湧き立ち、ざわめき、——巨大な無数の渦となって旋回し、まっさかさまに落下する急流のほかはどこにも見られぬような速さで、渦まきながら、突進しながら、東の方へ流れていく。

それからさらに4、5分たつと、この光景にまた一つの根本的な変化が起こった。海面は一般にいくらか穏やかになり、渦巻は一つ一つ消えて、不思議な泡の縞がいままでも何もなくあったところに現われるようになったのだ。この縞は終いにはずっと遠くの方まで広がっていき、互いに結び合って、一旦鎮まった渦巻の旋回運動を再び始め、さらに巨大な渦巻の萌芽を形作ろうとしているようであった。突然——まったく突然に——これがはっきり定まった形をとり、直径1マイル（1.6 km）以上もある円をなした。その渦巻の縁は、白く光っている飛沫の幅の広い帯となっている。しかし、その飛沫の一滴さえもこの恐ろしい漏斗の中に落ち込まない。その漏斗の内側は、眼のとどく限り、なめらかな、きらきら輝いている黒玉のように黒い水の壁であって、水平線に対して約45度の角度で傾斜し、揺らぎながら恐ろしい速さで目まぐるしくぐるぐる回り、なかば号泣し、なかば咆哮し、かのナイアガラの大瀑布が天に向かってあげる苦悶の声さえかなわないような、すさまじい声を風に向かってあげているのだ（ポー、1841、「メールストロムの旋渦」、佐々木直次郎訳、新潮文庫より）。

「私」は、ノールウェー北部の海岸に生じる大渦巻を観察した後、渦に巻き込まれながらからくも一命を取り止めた漁師の体験談を聞くのだが、その漁師の鴉のように真黒だった髪は、一夜にして白髪になったそうである。

\* On vortices.

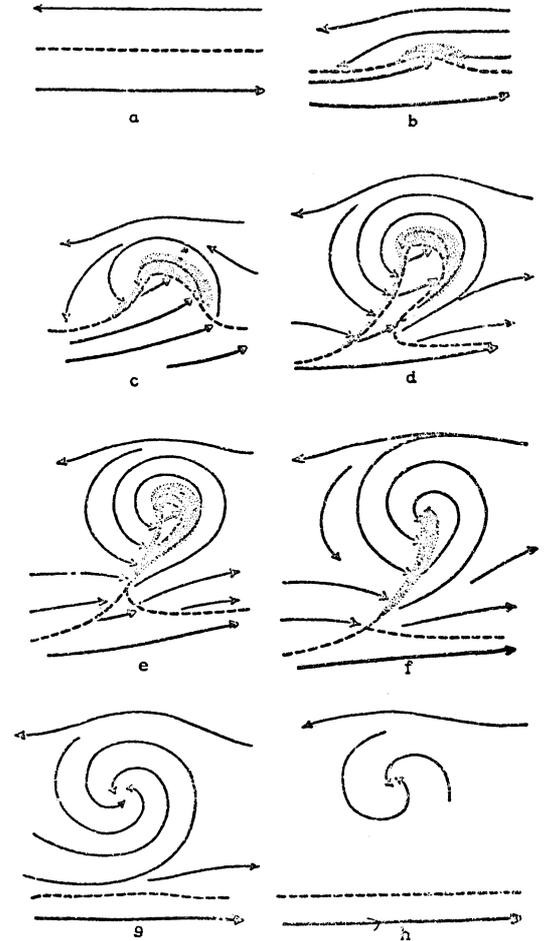
\*\* R. Kimura, 東大海洋研究所.

## 2. 大気中の渦巻

私は、赤道上 34,000km の高さから静止衛星によって撮影された北半球の映画を見て、ポーの短編小説を思い出さずにはいられなかった。赤外線によって、夜中でも昼間と同じように映し出された雲の分布は、生き物のように変化してやまない。ある物は同じ場所に周期的に現われては消える。ある物は巨大な蛇のように中緯度をのたうちまわる。そしてある物は渦巻く。音こそ聞こえないが、メールストロームの大渦巻もかくやと思われる程の渦巻が生じるのだ。

第1図は、1975年10月8、9、10日の東部太平洋の雲の写真を16mm映画のスクリーン (Hurricane-1, 1976) から再録したものである。画面の上にある時刻からわかるように、ほぼ6時間毎の雲の変化を示す。8日の午前0時には、まだ、渦と呼ぶ雲の形は見られない。北米西岸沖から南西にかけて太い雲の帯が見られるが、この付近には、しばしばバンド状の雲が形成される。8日の夜明けには、バンドの北端の雲が西方に伸び始める。しかし、1,000km 程西に進むと、そこで止まり、その日の夕方には、東西方向の帯が南西方面に向きを変えた。既に渦巻が形成され、雲がそれに乗って回転しているのだろうか。9日の午前0時には、積雲クラスターによって渦の中心位置が明確になり、早朝には、直径3,000kmにも及ぶ巨大な渦巻の構造が浮かび上がってきた。中心部は雲のある所とない所がはっきり分かっているが、雲頂はそれ程高くない。しかし、東側に背の高い積雲群があり、次第に北米西岸に近づいてくる。サンフランシスコは既に雨だろう。もしも、西岸の住民がとぐろを巻いて接近してくる巨大な渦を目撃できたなら、さぞ気味の悪い思いがしたと思う。しかし、渦はあまりにも大きくて、地上からでは空間構造を観察する事ができない。住民は、ただ天気の変化を感じとるばかりである。

渦の中心は、9日の0時から10日の0時まで、24時間ではほぼ 1,000km 東に移動した。その後、渦の勢力は徐々に弱まり、10日の夕方には、それ以前の3日間の現象が幻であったかのごとくあっさり消えてしまうのである。これが、天気図でおなじみの温帯低気圧 (extratropical cyclone) である。その立体構造とライフサイクルは、ノールウェーの気象学者 J. Bjerknes (1919, 1921, 1922) のデータ解析によって初めて明らかにされた。1922年の論文の図を第2図に再録する。16mm 映画の画面は、ライフサイクルの後半とよく対応していないだろうか。まだ高層観測も十分でなく、気象衛星も存在しない



第2図 温帯低気圧のライフサイクルのイメージ。Bjerknes(1922)より。点々部は雨域を表わす。

時代に、これだけ具体的な構造を描いて見せた Bjerknes の脳裏には、ノールウェーでは有名なメールストロームのイメージが天気図と重なって渦巻いていたような気がしてならない。

1977年11月19日、インド南東部の海岸を襲ったサイクロンの被害について、28日付の朝日新聞は次のように報道している。

「[ニューデリー-27日=蜷川特派員発] 2万人を超える死者を出したインド南部のサイクロンはやっと収まり、軍と民間による救出作業が本格的に始まった。インドにとって今世紀最大の災害に対し、国際赤十字をはじめ、米、英、西独、パキスタンなど各国も援助に乗り出した。現地は人間と家畜の死臭が漂い、視察したレディ大



1-1 1975.10.8 00:45



1-5 1975.10.9 00:45



1-2 1975.10.8 06:15



1-6 1975.10.9 06:15



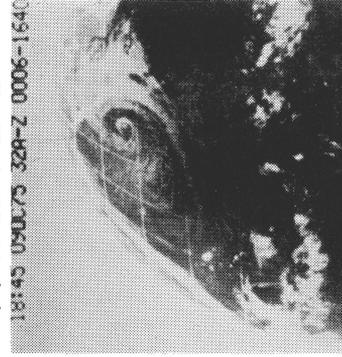
1-3 1975.10.8 12:45



1-7 1975.10.9 12:45



1-4 1975.10.8 18:45



1-8 1975.10.9 18:45



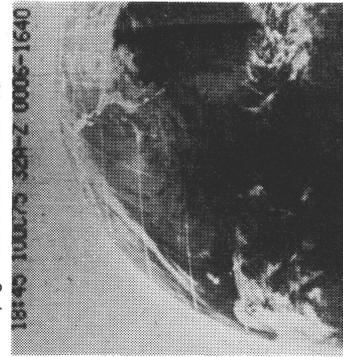
1-9 1975.10.10 00:45



1-10 1975.10.10 06:15

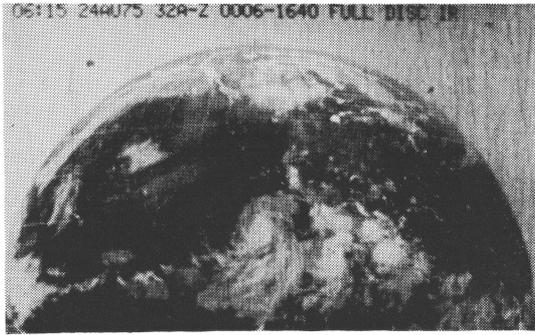


1-11 1975.10.10 12:45

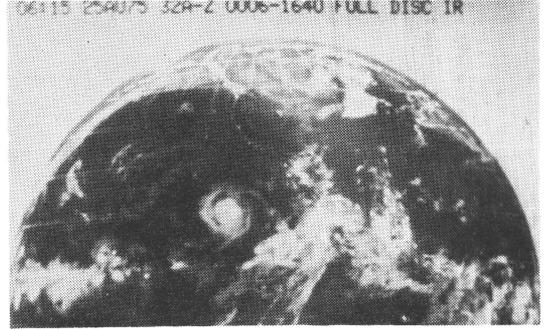


1-12 1975.10.10 18:45

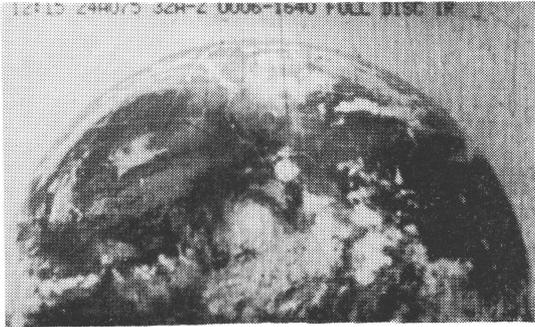
第1図 温帯低気圧の渦巻，静止衛星，静止衛星(SMS-2)より撮影された赤外線映像の16mm映画より，「天気」第25巻第3号221頁222頁をこれと差し換えて下さい



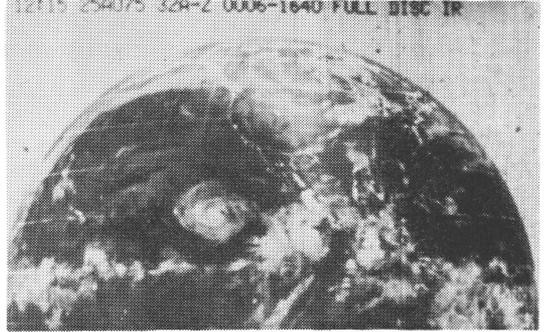
3-1 1975. 8. 24 06 : 15



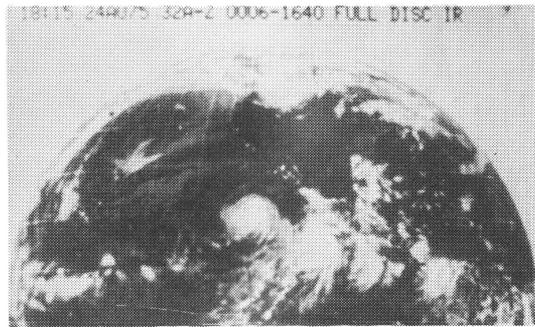
3-5 1975. 8. 25 06 : 15



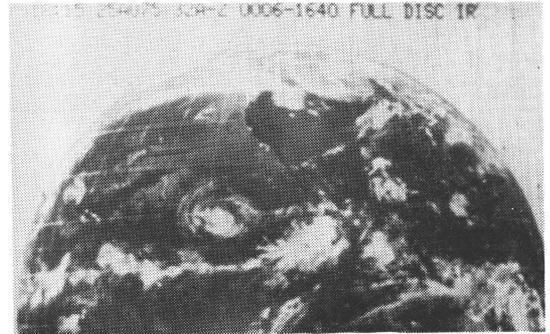
3-2 1975. 8. 24 12 : 15



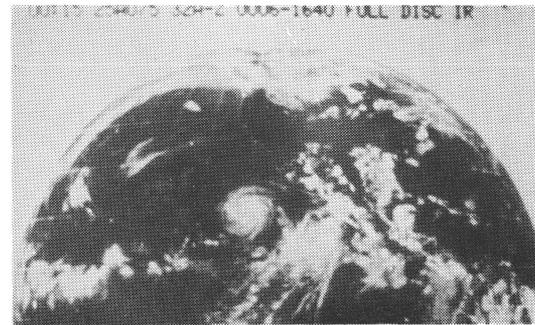
3-6 1975. 8. 25 12 : 15



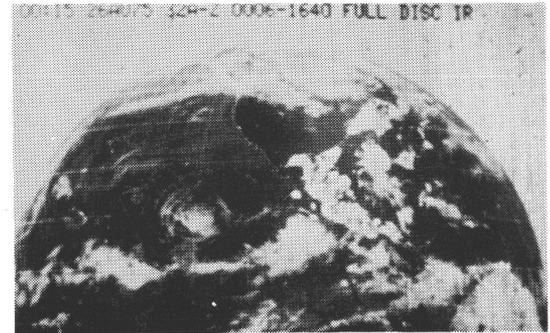
3-3 1975. 8. 24 18 : 15



3-7 1975. 8. 25 18 : 15



3-4 1975. 8. 25 00 : 15



3-8 1975. 8. 26 00 : 15

第3図 熱帯性低気圧の渦巻。静止衛星(SMS-2)より撮影された赤外線映像の16mm映画より、熱帯収束帯 (ITCZ) の活動がよくわかる。

統領は『死体より、まず生きている人間を助けよう』と指示した。避難所は妻や子供を捜してうめく泣き声が夜も絶えず、水不足からコップ一杯が数十円というインドでは考えられない高値につり上がっている。全容が明らかになれば、被害は死者だけでも十万人近くになるのではないかとの予想も一部にあり、対策は困難を極めそうだ。

インド通信が伝えるところによると、サイクロンによる高波が襲ったアンドラプラデシュ州のクリシナ地区に、初めて報道陣が徒歩で入り、同地区に生存者が殆どいないことを確認した。ババデバラバリ村の場合、家も人間も全く消えてなくなっていた。この村の奥にさらに約40の村があるが、連絡は途絶え、これらの村に住む約5,000人は絶望とみられる。クリシナ海岸約500km<sup>2</sup>には生存者は殆どいないと伝えている。同地区当局は、通信が復活して被害の様子がわかれば、死者の数は急増するといっている。

アンドラプラデシュ州政府はこれまで明らかになった数字として、死者は7,804人、田畑や家屋の被害は約3,000億円と公式に発表している。海岸の家は竹や土造だが、竹の家は家族が中からヒモで踏んばって押さえても風で空中にあおられ、たたき落とされて崩れ、土造の家も7mの高波に洗われて流され、海岸数十kmにわたって人の住んだ気配が見られなかった、と現地からの報道は伝えている。

アスリバトナム港に停泊していた4.5万トンの貨物船約30隻は陸に打ち上げられた。4.5km内陸まで打ち上げられた船もある。海岸のココナツの林は一本も残らずへし折られているという。そしてところどころに牛や馬の死体に混じって人間の死体がころがっている。死体の収容は一体600円で業者に請け負われ、州政府はもっぱら生きている人たちの救出に当たっている。」

インドのサイクロン、アメリカのハリケーン、日本の台風、名前は違っても素性は同じ大気の渦巻で、総称して熱帯性低気圧 (tropical cyclone) と呼ばれる。静止衛星の16mm映画には、ハリケーンが東太平洋に発生する様子が見事に映し出されている。1975年には、この領域で15個のハリケーンが発生した。その一例を第3図に再録しよう。第1図と同じで、6時間毎の雲のパターンである。赤道より少し北側に積雲活動が著しい領域が存在し、東西方向に地球を取り巻いている。熱帯収束帯 (ITCZ—Intertropical Convergence Zone) と呼ばれ、大気エンジンのボイラー釜に当たるところだ。個々の積

雲のスケールは1~10kmなのに、この地帯では積雲が水平スケール100km以上の群となって発生消滅を繰り返している。そして、いかにも偶然に、時々、積雲の一群がハリケーンに変身する。一度、渦巻が組織化されると、熱帯収束帯から放出されて北に向かう。1975年8月に東太平洋で発生したハリケーンについて、Dickson (1975) は次のように述べている。

「この月の最初の storm である Georgette は、8月12日に tropical storm の強度に達したが、次の日には弱まった。続いて、Hilary (8月13日)、Ilse (8月18日)、Jewell (8月26日)、Katrina (8月29日) が生まれた。これらの tropical storm の中で、Ilse と Katrina のみが hurricane の強度に達した。Ilse はかなり長期間持続した storm で、8月18日から26日まで、tropical storm ないしは hurricane の強度を保ち続けた。」

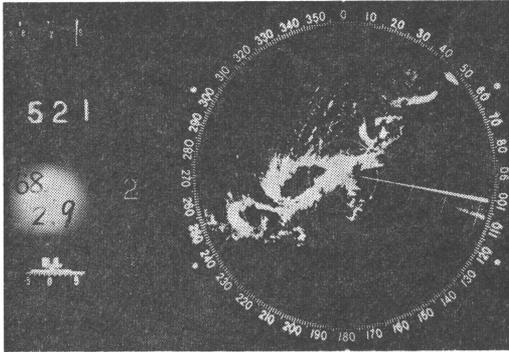
この文面から察するに、第3図に再録したハリケーンが Ilse である事はまちがいないだろう。

第4図は、冬期の北陸沿岸に現われる渦巻のレーダ写真で、渦状エコーと呼ばれている。寿命が短かく、まだ発生メカニズムは十分にわかっていないようであるが、その性質は、宮沢氏 (1968) の論文要旨に簡潔にまとめられている。すなわち、「北陸地方の集中豪雨雪時に、水平規模50~80kmの渦性の擾乱がレーダ解析などによって認められることがある。これらは、直径数百kmの台風と数百m以下の竜巻の中間の規模をもち、低気圧性循環をもつことから、メソサイクロンとして分類される。中規模の渦性擾乱は、明瞭なスパイラルバンドまたはリング状エコーを示し、眼状の中心域の直径は約20km程度である。擾乱は、北陸沿岸沖で発生し、ほぼ700mbの風に流され、平野部を通過して山地で消滅し、寿命は数時間以内と考えられる。擾乱の通過によって、局地の短時間の降雨雪強度、地上風、地上気圧などの急変をもたらすが、特に強雨雪には渦性降雨も卓越しているようである。」

以上に述べた渦は、いずれも、背の高さに比べて、水平の広がりが大きく、極端に言えば、レコード盤のような渦である。それに対し、竜巻、砂塵旋風などは縦長の渦巻だ。いつ発生するか予測ができず、寿命も短かいので、正体を見極めるのが非常に難しい。特に、竜巻は極めて個性のはっきりした現象にもかかわらず、不思議なほど発生メカニズムがわかっていない。

### 3. 渦巻と気圧

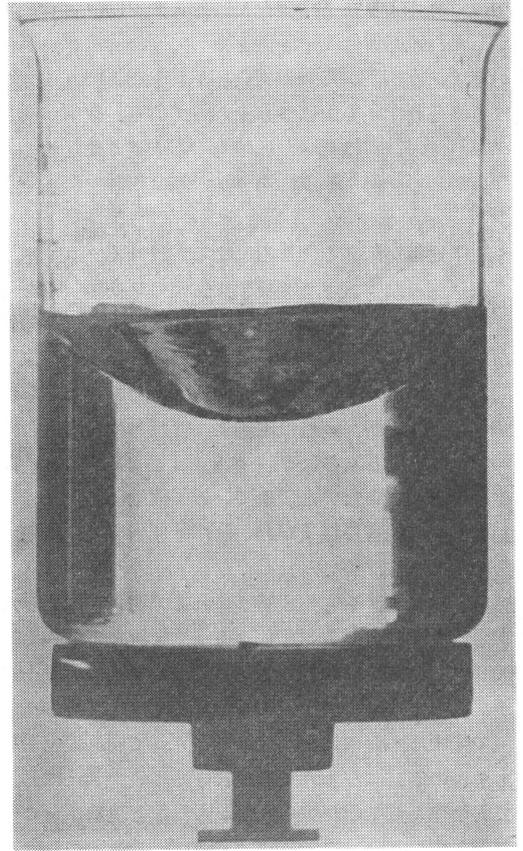
「水の低きに就くごとし」とは、止めがたい自然のな



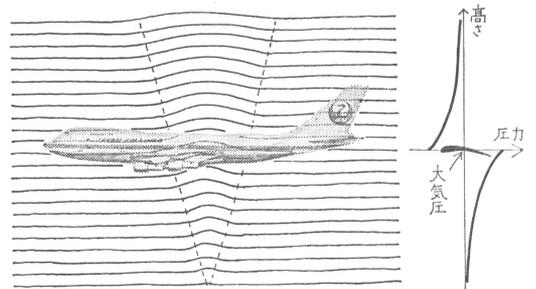
第4図 渦状エコーの渦巻. 1968年2月9日午前5時21分, 福井東尋坊のレーダで撮影された.

りゆきを指すととえてあるが, 渦巻の特徴は, 「低きに就かない」点にある. 第5図は, 回転台の上に乗って毎秒3回転の速度で回転しているビーカーの水を横から見た写真である. 水面は回転放物面となり, ビーカーの底で水圧を測れば, 中心部が周辺部より低圧になるだろう. しかし, 高圧部から低圧部に水は流れ込まない. 水は, 等圧線に沿ってぐるぐる回っているだけだから, 高圧部と低圧部がいつまでも保たれている. この例に見るごとく, 渦巻く流れは, 中心に向かうほど圧力が低くなる. その性質を巧みに利用したのが飛行機である. 第6図は, 飛行機の翼の上下の気流の様子を模式的に示したものである. 2本の破線に囲まれた部分が渦巻(の一部)になっている. 渦の部分には, ビーカーの水と同じで, 渦の中心部ほど気圧が低くなる. したがって, 翼の上面近くの気圧は, 翼の上面よりもずっと上の大気圧より低く, 翼の下面近くの気圧は, 翼の下面よりはるか下の大気圧より高くなる. しかし, 翼より十分離れた場所の気圧は, 翼の上でも下でも同じだから, 翼の下面の気圧が上面より高く保たれる事になり, この圧力差が飛行機を空中に支えているのだ\*).

ビーカーの回転を止めると, 水面は水平面にもどり, ビーカーの底にかかる水圧はどこでも同じになる. いっぽう, 新聞の地上天気図を毎日見ている, 地上気圧がどこでも同じになる日は一日としてない. それは, 大気が常に渦巻いているからだ. 自由大気中の気流が等圧線に沿って進む(地衡風)のは, ビーカーの渦巻が等圧線に沿って回転しているのと力学的に同じ現象である, と書いても, あまり実感はわかないでしょう. ビーカーの



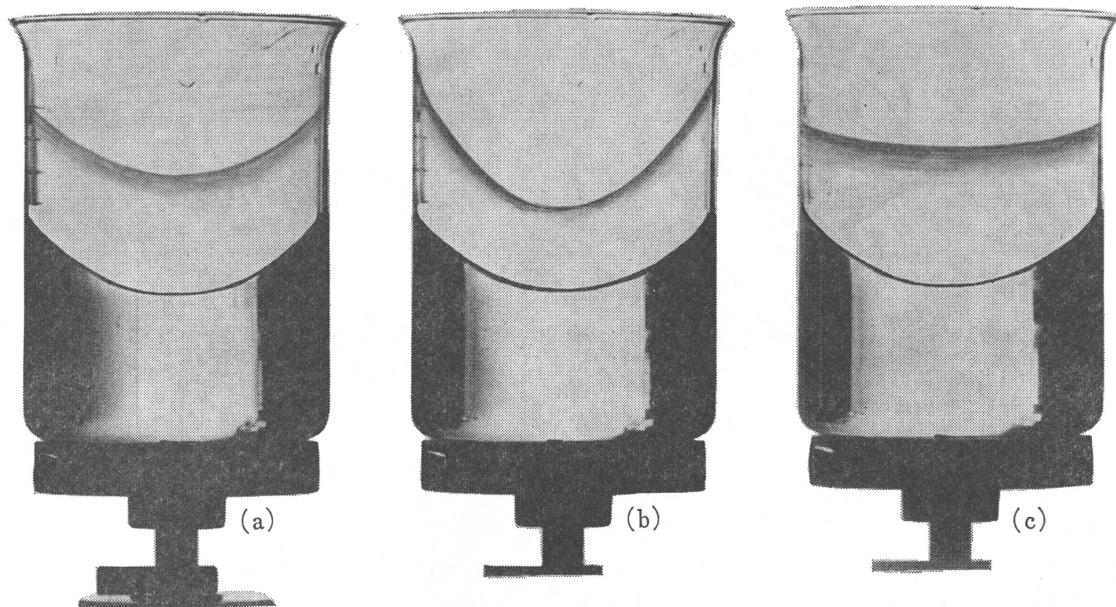
第5図 水を入れたビーカーを回転すると, 水面は回転放物面になる.



第6図 飛行機の翼の近くの気流は渦巻(の一部)と考えられる. 渦巻は外側ほど圧力が高くなるから, 翼の上下の圧力分布は右図の大線のようになり, 翼が上方に押し上げられる. この力で, 飛行機は空中に支えられている.

\* この説明は, 今井功氏(1964)(ロゲルギスト)による.

渦と天気図を比較すると, 次の二点でひどく違って見える. (1) ビーカーでは, 反時計回りの渦も時計回りの

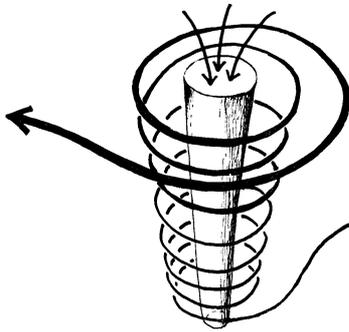


第7図 下半分に海水、上半分に真水を入れたビーカーが回転している状態（写真と絵を合成したもの）。（a）海水と真水の回転数が同じ場合、（b）真水の方が速く回転している場合、（c）真水の方が遅く回転している場合。海水面をジオイド面、真水を大気とみなせば、（a）無風（b）低気圧性の渦（c）高気圧性の渦に対応する。

渦も低気圧（とあえて呼ぼう、正しくは低水圧というべきだが）なのに、北半球では時計回りの渦は中心が高気圧になる（2）ビーカーの渦の中心は回転軸上にあるが、天気図の渦は極以外にも存在する。まず、（1）について考察しよう。天気図で高気圧性渦が生じるのは、気圧を測る基準面（海水面）がジオイド面だからである。ジオイド面については、メールストロームの渦に巻き込まれた生死の境にある漁師が次のように描写している。「初めはあまり心が乱れていたのに、何も正確に眼にとめることはできませんでした。突然眼の前に現われた恐るべき荘厳が私の見たすべてでした。しかし、いくらか心が落ち着いたとき、私の視線は本能的に下の方へ向きました。船が淵の傾斜した表面にかかっているのです。その方面は何のさえぎるものもなく見えるのです。船はまったく水平になっていました——というのは、船の甲板が水面と平行になっていた、ということです——が、その水面が45度以上の角度で傾斜しているのです。私どもは横ざまになっているのです。しかしこんな位置にありながら、まったく平らな面にいるのと同じように、手がかりや足がかりを保っているのが難しくありません。気がつかずにはいられません。これは船の回転している速さのためであつたらうと思います。（掲掲

書より引用）

第7図は、下半分に海水、上半分に真水を入れたビーカーが回転している状態を示す。真水が海水と同じ回転をしている場合、海水面を基準に圧力を測れば、どこでも気圧は同じであろう（第7図（a））。回転するビーカーに乗ってみると海面の上は無風である。第7図（b）は、真水だけ、海水よりも速く回転している場合で、海面気圧は、低気圧になる。第7図（c）は、真水だけ、海水よりも遅く回転している場合で、海面気圧は、高気圧になる。この時、ビーカーに乗ってみると渦は時計回りになっている。これが、時計回りの渦が高気圧性循環になる理由である。（2）の違いは一見極端であるが、もしも、ビーカーの渦が容器の回転軸の位置を《感じて》いないのなら、その違いは力学的には重要でないだろう。中心軸の位置を渦が感じているかいないかは、読者自身がメールストロームの渦に巻き込まれた事を想像すれば理解できよう。もしも、渦の直径が1.6kmもあって、しかもまわりが濃霧で包まれていたとすれば、読者は、45度傾いた回転放物面上にいるのか、水平面上にいるのか、果たして区別する事ができるだろうか。ジオイド面が曲面であることを認識できなければ、それは不可能であろう。そして、ジオイド面を水平面と違ってし

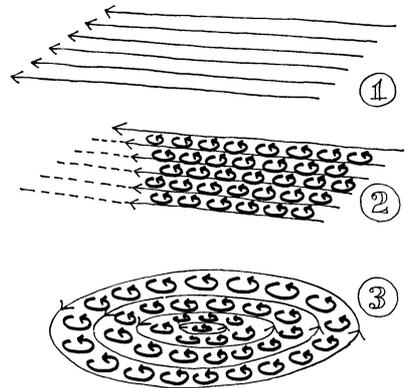


第8図 渦巻は円筒型の壁と同じ機能を持つ。壁を通して空気は中に入る事はできないが、上部は筒抜けになっている。

まったら、容器の回転軸がどこにあるのか力学的な手段で見つける事はできない。自分が回転系にいる事は、コリオリの力を感じるなのでわかる。すなわち、渦が反時計回りであれば、船の上で歩くと、歩く方向にかかわらず、右側に力を受ける。しかし、コリオリの力は容器の中心位置に関係しないので、コリオリ力から回転軸の位置を検出する事は不可能なのだ。読者が中心軸を感じないとすれば、渦も感じないだろう。という事は、渦が回転軸にあろうがなかろうが、性質は同じという事である。

以上の考察から、高気圧性の渦と低気圧性の渦には本質的な違いがある事がわかる。渦の中心気圧はいくらでも低くなりうるが、いくらでも高くなるわけにいかないのだ。ピーカーの例でいえば、第7図(c)で水面が平らになった状態(水だけ静止した状態)が最高気圧に対応する。地球上でいえば、北半球の無風時の空気は、絶対空間に対して、ジオイド面に直交する軸のまわりを  $\Omega \sin \phi$  rad/sec ( $\Omega$ =固体地球の自転角速度、 $\phi$ =緯度)の角速度で回転しているから、地球上から見て、 $\Omega \sin \phi$  rad/sec で回転する高気圧渦が最高気圧を与える事になる。それ以上に渦が強くなると、再び気圧は下がり始め、渦が十分強くなると、時計回りであっても低気圧になる(例:時計回りの竜巻)。

それでは、低気圧性の渦はどこまで気圧が低くなり得るのだろうか。渦の気圧が低く保たれているのは、遠心力が渦の外側の方向に空気を排除しているからだ。その機能は、第8図に示すような円筒型の壁で置き換える事ができる。この壁は、水平方向にはいくらでも空気を排除できるのだが、上方には筒抜けである。そこで、筒が大気圏の外まで伸びている場合には真空(ゼロ気圧)になれるのであるが、もしも筒の上に空気がある場合に



第9図 マクロな流れとマイクロな渦巻(渦度)との関係。①渦なしの流れ ②シア一流 ③渦巻。

は、筒の内部の空気をいくら排除しても上から空気が落ち込んでくる。したがって、渦の背の高さが対流圏だけに限られるような場合には、低圧にも限りがある。筒の上にある空気が乾燥断熱減率で筒内を満たした場合に生じる気圧以下に低くなる事は(過渡の状態を除いて)不可能であろう。

#### 4. ミクロな渦

小川の水面に散った桜の花びらを観察すると、岸の近くの水面に落ちた花びらが回転しながら流されていくのに気がつく。花びらの上にたまたまアリが乗っていたとすれば、このアリは、渦巻の上に落ちてしまったと思うだろう。しかし、岸から見れば水は渦巻いていない。すべての水は、下流に向かって流れている。このような場合、マクロな渦巻はないが、ミクロな渦が川の水に分布していると考えるべきだろう。流体力学では、花びらの回転角速度の2倍を《渦度》と定義して、ミクロな渦の強さの程度を表わす。水面のどこに落ちてても花びらが回転しない場合、その川の流れば《渦なし》であると呼ぶ<sup>\*</sup>。メールストロームに巻き込まれた船はジオイド面上にあるから、船上から見ると、船はあたかも水平面上に静止しているように思える。しかし、流れは渦なしではない。一見船が静止しているように思えても、羅針盤の針が回転している事から船が回っている事を知る。同様に、無風の空気も絶対空間に対して渦度を持っている。地球が自転しているからだ。その大きさは、 $f=2\Omega$

<sup>\*</sup> 簡単のために、ここでは、小川の流速は水平方向にだけ変化して、鉛直方向には変化しないと考える。

$\sin \phi$  ( $\Omega$ =地球の自転の角速度,  $\phi$ =緯度)で、《惑星渦度 (planetary vorticity)》と呼ぶ。これに対し、メー ルストローム内の船の位置における流れの渦度 (羅針盤の回転角速度の2倍)は、地球に相対的な渦度なので《相対渦度》と呼ぶ。相対渦度+惑星渦度は、船の位置における流れが絶対空間に対して持つ渦度なので、《絶対渦度》と呼ぶ。もしも、マイクロな渦の背の高さが一定ならば、外的なトルクや摩擦が働かない限り絶対渦度は保存される性質がある (絶対渦度保存則)。

マイクロな渦の存在を考慮すると、流れは三種に分類できる。第9図に示すように、(1)渦なしの流れ (2)マイクロな渦はあるがマクロな渦巻がない流れ (3)マクロな渦巻がある流れである。流れのパターンを見ると、(1)と(2)は似ており、(3)は(1)(2)と極端に異なっている。しかし、流体力学では、(1)と(2)の違いを重要視する。なぜなら、(1)の流れは渦度保存則が成立する限り、(2)(3)に変化できないのに対し、(2)の流れはマイクロな渦の配置が変わる事によって容易に(3)に変化できるからだ。大気の流れは、無風であっても(2)であるから、マクロな渦巻がよくできる下地があるといえるだろう。

私達の関心は、マクロな渦巻にあるのだが、マイクロの渦について述べたのは、渦巻 (マクロな渦巻の意味)の発生を考える上で、マイクロな渦が重要な役割を持つからである。

## 5. 渦巻の発生

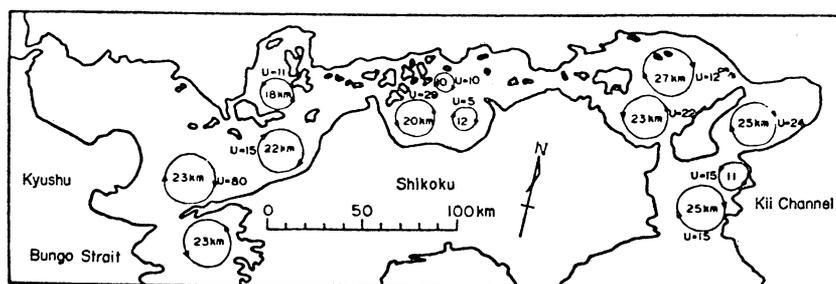
渦巻の生じるメカニズムは、(1)外的なトルク (2)マイクロの渦の配置換え (3)スピナーアップの三種類に大別される。それぞれについて説明しよう。

### 5-1 外的なトルクが働いてできる渦巻

紅茶をスプーンでかき回すときにできる渦がこの例である。静止した紅茶は、スプーンのトルクによって角運

動量を与えられる。海洋上で台風が長時間停滞すれば、台風の下下の海水中に渦が誘発されると思うのだが (実際に観測された例があるのかどうかは不勉強で知らない)、この場合は、風が海水にトルクを与えているわけだ。その反作用として、風は海面から抵抗を受ける。この例のように、トルクを与えるものの正体をはっきりしている渦巻は理解しやすい。しかし、渦巻の中には、トルクの正体をはっきり見えないものがある。たとえば、湾に囲まれた海水が湾内を循環する現象が知られている (第10図)。風が吹かなくとも循環流が形成される。その原因は、潮汐にあると考えられている。湾内の海水は、潮の満ち干に従って1日2回往復運動をしている。この振動流が、湾の地形や摩擦の効果でトルクを生み出しているのだ。

もう一つの例として、パズルを一題。ビーカーに水を入れ、アルミフォイルなどでふたをする。これを机の上に置き、全くビーカーに手を触れずに内部に渦巻 (軸は鉛直方向)を作る事ができるだろうか。答えは可である。ガスバーナーで、ビーカーの側壁 (の一部)をあぶればよいのだ。同じ場所をあぶっているだけでは対流が生じるだけで渦はできない。ところが、あぶる位置を側壁に沿ってぐるぐる回転させると、ビーカーの内部に次第に渦巻が形成されてくる (moving-flame problem と呼ばれる)。バーナーの炎によって流体にトルクを与える事は不可能なのであるが、加熱で生じた対流運動が非線形効果 (レイノルズ応用) でトルクを生み出しているのだ (その反作用はビーカーの壁に与えられる)。このメカニズムは金星大気に応用できるのではないかと、という説がある。金星大気には、固体部分よりはるかに大きな角速度を持った帯状流 (広義の渦巻といえるだろう)が存在するので、角運動量を大気を与えるメカニズムを考えなければいけないからだ。

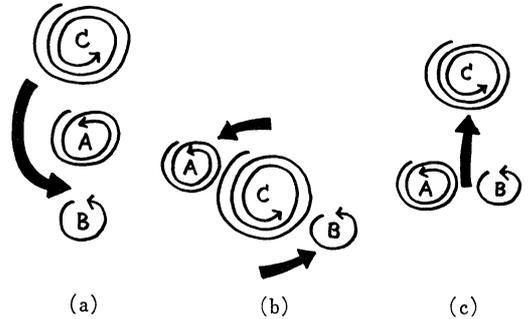


第10図 瀬戸内海の水理模型で生じた潮汐残差流。Sugimoto (1975) より。円内の数字は渦のスケール、 $U$ の値は渦に伴う流速 (cm/sec)を表わす。

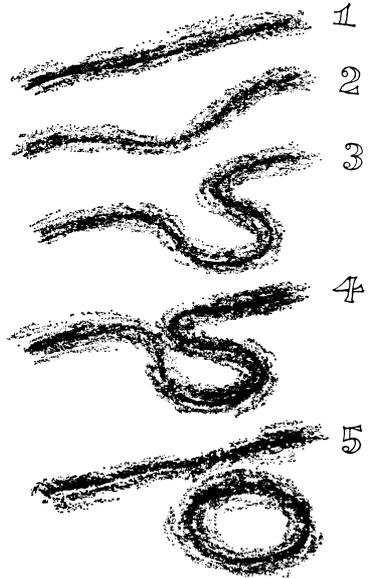
地球の成層圏の帯状流の速度が対流圏から加速減速効果を受ける現象が、極渦の崩壊現象であるが、これも、トルクによる渦巻の加速(減速)の例であろう。一般に、何も力が働かないのに渦が発生してくる場合には、渦に重なった別の種類の流れ(潮汐, 対流, 波動等)がトルクを生み出している可能性を考えてみるべきである。

5-2 ミクロの渦の配置換えによって生じる渦巻

水平シアのある流れの中に生じる渦巻は、まずこのメカニズムで生じると考えてよい。第9図(b)に示すように、シアのある流れの中にはミクロの渦が分布しているからだ。シア流れ中に渦巻が形成される過程は、《不安定現象》として扱われる事が多い。すなわち、第9図(b)のような配置にあるミクロの渦をほんの少しかき回してみる。そして、かき回した後に、ミクロの渦の分布が、元のシア流れの分布にもどるか、別の分布になるか(この場合に渦巻が発生する)見よう、という問題の設定である(順圧不安定の問題)。これに関連して、《シア流れ中のミクロの渦の強さ(渦度の大きさ)が流れを横切る方向に一方向的に増加する(または減少する)流れは安定である》という重要な性質がある。その理由は単純だ。いま、第11図(a)に示すような上方(y方向)ほど渦度の強さが大きくなるシア流れを考え、何かのはずみで、渦度の大きなミクロの渦が一つ、渦度の小さい領域に紛れ込んだ状態を考えよう(第11図(a))。この時、シア流れを形成していたミクロの渦は、紛れ込んだミクロの渦に乗って回転するだろう(第11図(b))。この図では、紛れ込んだミクロの渦の上方にあったシア流れ中のミクロの渦は紛れ込んだミクロの渦の左側に、下方にあったシア流れ中のミクロの渦は右側に移動する。いっぽう、紛れ込んだ渦自身は、自分が移動させたシア流れ中のミクロの渦に乗っていると考えられる。すなわち、左側にあるミクロの渦は紛れ込んだ渦を上方に回転させようとし、右側にあるミクロの渦は下方に回転させようとする。ところが、左側の渦の強さの方が大きいから、結果としては、紛れ込んだ渦は上方に押しもどされる(第11図(c))。本来あるべき方向にもどるから、シア流れは安定というわけだ。一般に、流速  $U(y)$  のシア流れ中の渦度は、 $2\omega = \frac{dU(y)}{dy}$  で与えられるから、渦の強さが一方向的にy方向に増加するという事は、 $\frac{d}{dy}(2\omega) = \frac{d^2U}{dy^2} > 0$  という事である。逆に、流れの中に、 $\frac{d^2U}{dy^2} = 0$  となる場所があると、不安定になって渦が生じる可能性が出てくる。これが、《速度プロファイルに変曲点がないシア流れは安定である》というレーリーの定理の



第11図 ミクロの渦の強さ(渦度)が上方ほど大きい流れは安定である事を示す図。(a)何かの原因でCがAとBの間に入り込んだ。(b)Cに乗ってAとBが回転する。(c)AとBの合力によって、Cは元の位置に押し戻される。



第12図 基本流の蛇行が大きくなって渦巻が作り出される過程。

物理的意味である。

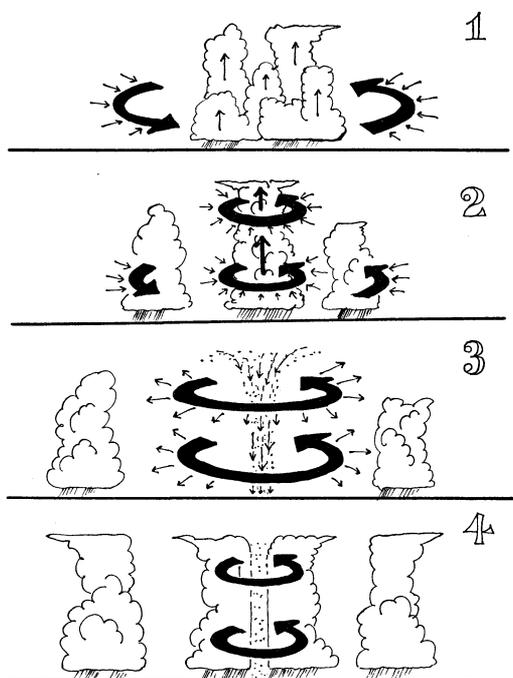
大気中のジェット気流、海洋の西岸境界流(黒潮や湾流など)等の、幅の狭いシア流れ中に渦巻ができる過程は、順圧不安定には違いないが、上に述べた無限小振幅の擾乱に対する不安定理論のイメージとは程遠いものである。第12図は、基本流の蛇行が次第に大きくなって、ついに渦巻が切り離される過程を示したものである。この図は、模式的であるが、ジェット気流の蛇行から生ま

れるブロッキング高低気圧、黒潮統流に発生する冷暖水塊、湾流の蛇行から生まれる gulf-stream ring に適用できるイメージである。

第2図に示した Bjerkness の温帯低気圧発生過程のモデルは、マイクロの渦の配置換えの例である。しかし、前線の両側の空気に温度差があり、冷たい空気は暖かい空気にもぐり込もうとする性質があるので、平面的なマイクロの渦の配置換えより複雑である。現在では、温帯低気圧の発生は、南北方向に温度差を持つ鉛直シア流（水平シアはない）の不安定が重要であると考えられ、順圧不安定に対し、傾圧不安定と呼ばれている。

### 5-3 スピニアップによって生じる渦巻

上記の二つのメカニズムは、渦巻のない所に渦巻を作るメカニズムである。これに対し、スピニアップは、既に存在している渦巻を強めるメカニズムと考えるべきだ。水を溜めた流しや風呂桶の栓を抜いた時に、栓の近くに渦巻が生じる。栓を抜く前の水に弱い渦がある場合は、水の各部分は、栓のまわりに角運動量を持つ。単位体積の水に着目すると、角運動量は  $\rho \cdot v r$  ( $\rho$  = 密度,  $v$  = 着目した流体部分と栓とを結ぶ方向に直交する方向の速度成分,  $r$  = 流体部分と栓との距離) で表わされ、水は角運動量をほぼ保存しながら栓に近づく ( $r$  が小さくなる) から、 $v$  が大きくなって渦が強まる。一般に、渦巻の中心に流体が集まる仕掛けがあれば、渦はどんどん強くなる。台風、竜巻などの激しい渦は、このメカニズムが本質的であると考えてよいだろう。第13図は、台風が次第に強くなる過程 (のイメージ, Carrier, 1971) を模式的に示したものである。渦の中心に生じる積雲群に伴う上昇流が、渦巻く空気を中心に吸い寄せ、渦を強化する。台風の特徴は中心に眼ができる事である。これは、積雲群による吸い上げ効果が同じ強さで接続しないで、時として弱まるために生じる。吸い上げ効果が一時的に弱まると、吸い寄せられた渦は遠心力の効果で外側にもどる。この時、渦の中心に上層の乾燥した暖かい空気が吸い込まれる。一度、渦の中心部が乾燥空気で占められたら、もうここでは積雲が発達しない。したがって、渦を再び中心部に集める事はできなくなるのだ。いっぽう、眼に侵入した空気は暖かいので気圧は十分低い。したがって、眼の外側の渦巻く空気は、それ以上外側に広がらないで、渦巻は持続する。この時、地面摩擦の効果で、眼のすぐ外側に強い上昇流が生じ、積雲対流群の発達を助長する。「積雲活動が激しくなれば、渦の吸い寄せ効果により、渦はますます強まる仕掛けになっ



第13図 台風の眼ができる過程。Carrier (1971) による説明。太い矢印は渦巻を表わし、そばの小さな矢印は渦巻く空気が動く方向を表わす。1) 積雲の上昇流が空気を集め、渦度の集中が生じる。2) 遠心力による外向きの力より積雲の上昇流が作る低圧作用が強力で、渦は次第に中心部に集められ強くなる。3) 中心部の積雲が弱まると、遠心力の作用で渦は外側にもどる。この時、渦の中心部に上層の乾いた空気が吸い込まれる。4) 渦の中心部が乾いた暖い空気 (したがって、地上気圧は低い) で占められたので、もう積雲は生じない。CISK メカニズムで、強い渦巻がそのまわりに形成される。

ている。このような摩擦による上昇流と積雲の助け合いは、CISK (Conditional Instability of the Second Kind, 第2種条件付不安定) メカニズムと呼ばれる。

竜巻のような強い渦巻では、スピニアップ効果が極端に働いている事は容易に想像できるが、母雲の中に生じる竜巻発生過程はまだ解明されていない。

渦巻の消滅過程のメカニズムは、既に述べた (木村, 1977) ので省略する。

### 謝辞

原稿を読んでいただき、有益なコメントをいただいた、東大海洋研究所の遠藤昌宏氏、原稿の清書をしてい

ただいた、大久保千名美さんに感謝いたします。

### 文 献

- Bjerknes, J., 1919: On the structure of moving cyclones, *Geofysiske Publikationer*, 1, No. 2, 1~8.
- and H. Solberg, 1921: Meteorological conditions for the formation of rain, *Geofysiske Publikationer*, 2, NO. 3, 2~61.
- and H. Solberg, 1922: Life cycle of cyclones and the polar front theory of atmospheric circulation, *Geofysiske Publikationer*, 3, No. 1, 3~18.
- Carrier, G.F., 1971: The intensification of hurricanes, *J. Fluid Mech.*, 49, 145~158.
- Dickson, R.R., 1975: Weather and circulation of August, 1975, *Mon. Wea. Rev.*, 103, 1027~1031.
- Hurricane-1 1976: 16mm Time-lapse motion picture of clouds by Satellite (SMS-2) distributed by the California Institute of Earth, Planetary and Life Sciences.
- 木村竜治, 1977: スピンアップの話, *海洋科学*, 10月号, 38-44.
- Logergist, 1964: 統物理の散歩道, 岩波書店, 157~162.
- Miyazawa, S., 1967: On vortical mesoscale disturbances observed during the period of heavy snow or rain in the Hokuriku district, *J. Met. Soc. Japan*, 45, 166~176.
- Sugimoto, T., 1975: Effects of boundary geometries on tidal currents and tidal mixing, *J. Oceanog. Soc. Japan*, 31, 1~14.

## 昭和53年度の学会財政の見通しについて

### 会計委員会

昭和53年度、当学会の運営方針は、学会活動を通じ、国際交流を計るとともに、国内的には支部活動を容易にし、かつ、活動の成果を会員に幅広く伝えることに努める方針が打ち出されている。

上記した方針を実施するに当たり、下記のような企画が考えられている。

#### (1) 気象集誌、天気の内容の充実

天気については、“研究へのアドバイス”“英文論文についての注意”“入門講座”等の新しい企画がある。

#### (2) 教育および普及の分野に力を入れる。

#### (3) 秋季大会の運営費の増額。

#### (4) 支部活動を容易にするための交付金の増額。

上記したような活動を、幅広く行なうためには、事務上の諸経費の節約を行なってもなおかつ多くの支出を伴なうので、常任理事会で討議を重ねた結果、A・B会費とも500円程度の値上げをせざるを得ないという結論に達した。

また、現在、当学会の基本金は65万円と僅少なので、基礎を強固にする目的もあり、昭和52年度までの繰越金

の中から、500万円を基本金に繰り入れたい（この案は5月の総会で説明予定）。

会計委員会では、以上の諸点をふまえ予算原案作成を行なった。この予算案は、本年2月27日開催された常任理事会で審議・了承された。以下、予算案の主な科目についての説明を行なう。

#### 支出の部

##### 1. 集誌、天気 の 印刷、編集、発送費 (2,157万円)

周知のように、当学会では2種類の機関誌を刊行しているが、内訳は、集誌736万円、天気1,421万円で、おのおの本年度実績の約1割増しとなっている。この額は、会費収入にほぼ見合う支出となり、会費のみでは当学会を運営できないことを示している。

##### 2. 学会運営費 (1,160万円)

###### a. 会議費 (143万円)

各部委員会費、大会費等を含む科目であり、予算案では、地方大会費を40万円増額し80万円とし、講演企画委員会費を4万円、選挙管理費を4万円増額したほかはすべて据え置いた。