

指向流で追う台風移動*

石 島 英**

1. まえがき

周知のとおり、年々台風襲来に脅かされる熱帯海洋にあい向う南の諸国では台風移動の話題は古くから最大関心事の一つである。北大西洋海域のハリケーンについては、前世紀半ばすでにかなりのデータの集積があり、西欧、米国社会ではボイスバロットの法則が知られていた。この法則は1857年にオランダの気象学者クリストファー ボイスバロットによって提唱されたもので、一般には「風を背にして立ち、右に45度向きを変えたのち左腕を突き出した方向に台風の中心がある」として知られたものである。観測技術のなかった時代、この法則は台風進路を素手で追跡する手段として珍重され利用された。その後、飛行機や近代兵器の気象レーダー、ゾンデ、衛星などの各種遠隔機器が登場し、台風の移動をもたらす総観場の流れについて経験的知識がふえた。

一方、北の国々では温帯低気圧の襲来に悩まされてきた。温帯低気圧はその生い立ち、構造、移動等の性格が台風とは非常に違う。高層観測網が整備充足されるようになって、両者の相違は上層風との関連で理解された。温帯低気圧については、地表の寒暖気団の接触に端を発して生成され、その構造はバロクリニク的で鉛直シアが重要であり、その移動については、偏西風波動伝搬が基本であることがわかった。一方、台風は、赤道近くを除いて、水平方向に比較的温度が一樣で風の鉛直シアのないバロトロピックの熱帯大気中に生育する。したがって、その移動はかなり上層に広がるほぼ一樣な指向流に支配されることがわかった。

しかし、指向流が何であるか、どのように台風移動に関与するかについて多々知られてはきたが、なお十

分な知識がえられていない。ここでは過去をふりかえりながら、指向流を軸に台風移動の研究の跡を追ってみたい。

2. 台風は指向流で運ばれる

指向流概念の出始めの1940年代の後半頃はリール著「熱帯気象学」(Mc Graw-Hill Book Co., 1954)にも見られるように、台風移動速度は指向流で置き換えられ、台風は指向流と同じ方向に同じスピードで移動すると考えられていた。

指向流は台風を浮かべて移動させる大規模の流れであるという考えに立てば、台風から遠く離れた台風の影響をうけないところの流れとして指向流が把握できる筈である。流体力学で一樣流の中の回転剛体運動を扱う場合は一樣流をこうとらえている。しかし、実際の気象では、台風から遠く離れたところに川のような流れはない。あったとしても台風を流すと期待される流れとは変わった流れとなっていることが多い。したがって、回転剛体運動のアナロジーだけでは指向流を把握することはできない。

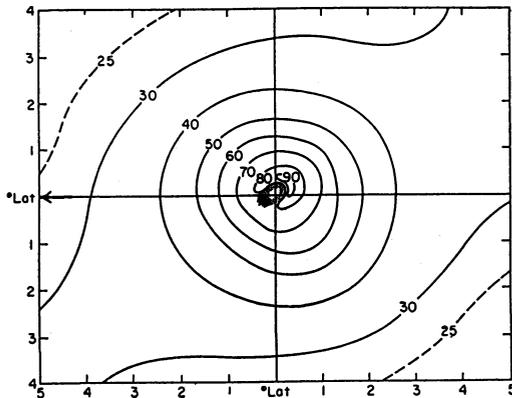
ヒュージは1953年、13個の大型台風の飛行機観測データを用いて、台風の合成風速場を二つの座標系に対して解析している。一つは地球に固定した座標系での風速場 V 、もう一つは台風中心を座標原点とし台風とともに移動する座標系での風速場、つまり、台風中心に対する相対的風速場 V_R であった。後者はベクトル的に移動速度 V_C を加えれば前者になるものである。

ヒュージが相対風速場に関心をもった第一の理由は空気塊の台風中心に対する相対的な動きを見ることであったが、もう一つの理由は航海者たちの間でずっと以前から知られていた経験則「移動方向の右は危険半円(強風域)、左は可航半円(弱風域)」を検証することではなかったかと思われる。すなわち、指向流発想に立って、「台風の移動方向の右半円では指向流と等し

* Typhoon motion in relation to steering wind.

** Suguru Ishijima, 琉球大学教養部.

© 1995 日本気象学会



第1図 台風域内の約 300 m 高度面の水平風速分布(単位は m/s). 矢印は台風移動の方向を示す(ヒュージ, J. Met., 9, 422-428 (1952)).

い移動速度が加算され、左半円ではそれだけ減殺される」という仮説をチェックすることであった。ヒュージが得た地球に固定した座標系での風速場の分布は第1図のとおりである。その図はそれほど顕著ではないが移動方向に右に強風、左に弱風の非軸対称傾向を示している。

ところでヒュージは、台風移動方向に平行な風速成分を台風全域に積分し平均した量はほぼ台風の移動スピードになると見込んでいたようである。しかし、彼の得た値は意外に小さかったと報告している。彼は、その理由を多数の台風の合成による風速場を作成したことに帰着させているが、今から考えると、移動速度が即指向流でなかったこと(あるいは得られた相対風速場が対称風速場でなかったこと)が理由であったと思われる。

3. 台風は指向流の左側へずれる

台風は水平に 500-1000 km, 鉛直方向に 10-12 km の広がりをもつ現象である。熱帯大気はバロトロピックだとはいっても厳密には大規模な範囲にシアなしの状態は考えられない。しかし、指向流は少なくとも台風規模の水平および鉛直空間に広がりをもつものと考えられた。したがって、台風移動と指向流との関係も台風中心を囲むかなりの広がりでの水平、鉛直空間で探求された。気象庁予報関係者の間で、一時期、どの高度が台風を流す指向面を最も代表しているか話題になったが、このような背景があったからだと思う。

そういう視点から、ジョージとグレイは、1976年、

台風移動と指向流との関連を調べた。彼らは30箇所の西太平洋に散在する高層観測所で得られる10年間(1961-1970)の資料の中から、毎年20個程度ずつ発生するタイフーンクラス(最大風速 33 m/s 以上)の台風について、移動スピード V_c および地球に固定した座標系での合成風速場 V について解析した。彼らは台風中心のまわりに幅 2° 緯度距離のリングバンドを中心から 15° 緯度距離遠方まで設け、鉛直方向には 50 hPa 等圧面高度までの18の大気層について、次の解析を行った。

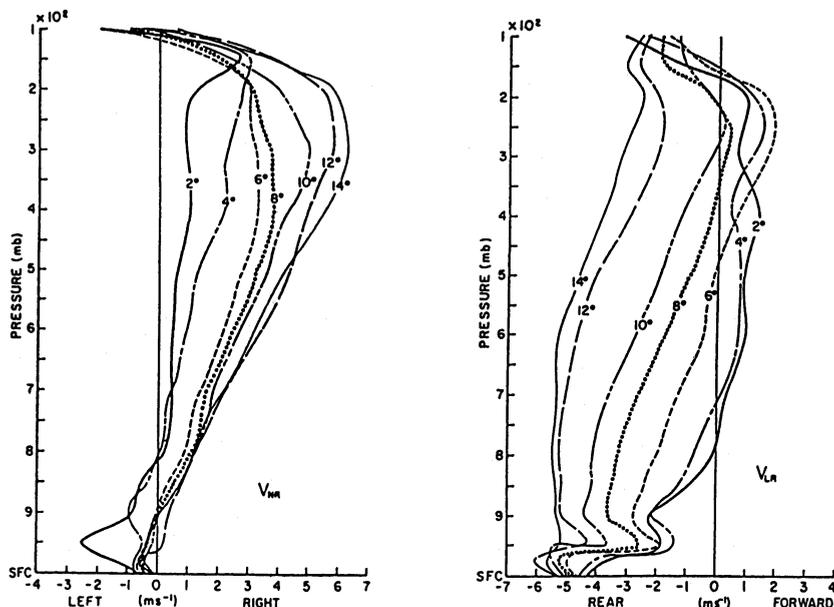
- 解析1: V の移動方向に平行な成分 V_L およびそれに垂直な成分 V_N を求める、
 解析2: V_R の移動方向に平行な成分 $V_{LR} = V_L - V_c$ およびそれに垂直な成分 $V_{NR} (=V_N)$ を求める、
 解析3: 移動速度と指向流との関係を各リングバンドおよび各層について求める。

その結果、 V_{NR} を各リングバンドで平均した量は、第2図左に示すように上端と下端近くの薄い層を除いて移動方向に対して右向き(正)の値となった。すなわち、ほとんどの高度レベルで指向流は移動方向の右にずれた方向に向かうことを示した。したがって、移動方向は指向流の左にあることがわかる。また、 V_{LR} を各リングバンドで平均した量は、第2図右のようにほとんどのレベルで後向き(負)の値になる。すなわち台風の移動スピードの方が指向流の速度より大きいことがわかる。

このような解析結果をジョージとグレイは第1表のようにまとめている。すなわち、台風移動と指向流との関係は指向流を台風中心からどの距離、どの高度で見るとかによって変わる。しかし、 $1^\circ-7^\circ$ のリングバンド全体について平均して見たとき、各層の指向流の中で、最も台風移動の方向と一致のいいのは 500 hPa 面で、そこでは移動の方向は指向流の左側 16° の方向となり、また、台風移動のスピードと一致のいいのは 700 hPa 面で、そこでは移動のスピードの指向流のスピードに対する比は 1.16 である。また、移動の方向は移動の遅速、移動方向、強度の違い、発達衰弱段階の違い等によっても異なる。しかし、どの場合も台風は指向流の左側にずれ指向流より速いスピードで移動する。

4. ベータ効果で台風は指向流の西側へずれる

ここでは、理論的な考察の結果について述べる。理解を助けるために、最も単純な一様指向流の場合を考えよう。これは大気全体にわたって一様な流れを仮想



第2図 北緯20度以上の台風についてリングバンド平均の台風移動方向に垂直な相対風速成分 V_{Nr} (左) および台風移動方向に平行な相対風速成分 V_{Lr} (右) (ヒュージ, J. Met., 9, 422-428 (1952)).

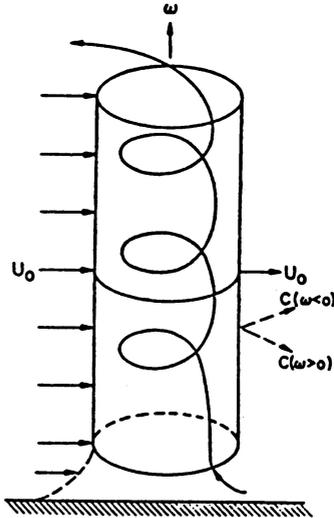
第1表 台風の移動速度と台風中心から1~7度緯度距離内平均の指向流との関係。風向(単位は度)については500 hPa面, 風速(単位はm/s)については700 hPa面をとる (ジョージとグレイ, J. Appl. Met., 15, 1252-1264 (1976) の表から一部抜粋)。

区分	台風移動の方向(速さ)	500 hPa (700 hPa) 面 1-7 緯度距離内の平均風向(風速)	台風移動速度の指向流からのずれ 方向差(速さの比) L=左へ
スピード			
遅い (0~3 m/s)	338(2.43)	001(2.19)	23L (1.11)
中程度 (3~7 m/s)	326(5.19)	344(4.37)	18L (1.19)
速い (>7 m/s)	006(10.1)	018(8.71)	12L (1.16)
移動型			
西進 (250°~310°)	285(6.16)	300(4.96)	15L (1.24)
西北進 (310°~350°)	324(5.32)	341(4.39)	17L (1.21)
北-北東進 (350°~060°)	27(7.08)	42(6.59)	15L (1.07)
強度階級			
弱い (980~1000 hPa)	319(4.87)	331(4.07)	12L (1.20)
中程度 (950~980 hPa)	326(5.03)	343(4.22)	17L (1.19)
強い (<950 hPa)	319(5.17)	341(4.34)	22L (1.19)
成長段階			
発達期	304(4.89)	317(4.31)	13L (1.13)
衰退期	360(5.69)	017(5.13)	17L (1.11)

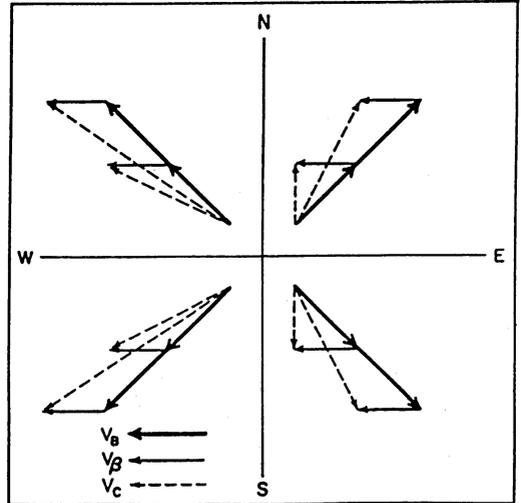
することである。

クオは1969年に回転円柱渦に働くマグナスの効果や摩擦効果を調べた(第3図)。マグナスの効果とは、大きな一様な流れの中に浮かべた回転物体に、回転流と

一様な流れとの相乗効果によって、低気圧性回転なら一様流の直角右向きに揚力が働くことである。クオはこのようなマグナスの効果と地表の台風移動に抗する摩擦効果で台風は一様流の右側にずれ、それより遅い



第3図 平均流および地面摩擦影響下の円柱渦移動の概念図 (クオ, J. Atmos. Sci., 26, 390-398 (1969)). u_0 は一様流速, c は円柱渦の移動の速さ, $\omega > 0 (< 0)$ は低 (高) 気圧回転の渦.



第4図 北西, 北東, 南東, 南西方向に向かう指向流と台風移動速度の関係 (ホランド, J. Atmos. Sci., 40, 328-342 (1983)). E, W, S, N は東西南北方向. 太い実線 V_B (点線 V_C) は指向流 (台風移動) の速度ベクトル. 細い実線はベータ効果によって誘出される西向き速度ベクトル.

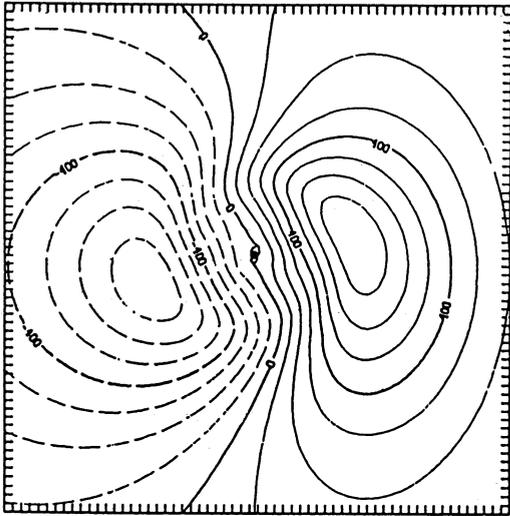
スピードで移動すると報告した。また、ジョーンズが1977年に行った数値シミュレーションも同じような結果であった。マグナスの効果や摩擦効果は古典流体力学の基礎ではあるが、これらの効果の台風移動へもたらす影響についてははっきりしていなかったので、多くの人が知りたいところであったと思う。

一方、バロトロピック渦度方程式を用いたホランド等の台風移動についての理論考察の結果はむしろ正反対であった。バロトロピックの渦度方程式は数学的な取扱いが比較的容易であることから解析解や数値解が追求され、その結果、台風移動に伴う指向流と移動速度間関係が明らかになった。バロトロピック渦度方程式による取扱いは大気挙動がバロトロピック的であると仮定している弱点はあるものの、熱帯大気中の台風移動の本質を見せてくれると思われる。

ホランドは1983年、コリオリ因子 ($=2\omega \sin\phi$, ω は地球の自転の角速度) の値が緯度によって変わること、すなわち、ベータ効果によって台風の移動方向が次のようにずれることを示した(第4図)。すなわち、通常よく見るような北西や北東に向かう指向流の場合、台風は指向流の左にずれ指向流より速いスピードで移動する。しかし、ごくまれにある南東や南西に向かう

指向流の場合、指向流の右へ指向流より遅いスピードで移動する。ベータ効果は北(南)向き指向流に対しては指向流の速度より速(遅)いスピードで、いずれの場合も台風が指向流の西側にずれて進むように働いている。そして、これは前節のジョージとグレイの観測解析結果を裏付けていることがわかる。

ところで1970年代半ば以後、詳細な熱や運動を総合記述した台風数値モデルによる数値シミュレーションによって思いがけない現象が発見された。数名の科学者が示したように、台風渦以外何も無い状態、すなわち、指向流が無い(ゼロ)場合から台風が西-北へ移動することであった。日本では、1980年、北出氏が始めてそれを示した。このメカニズムは、バロトロピック渦度方程式を用いてホランドが詳しく解析したところではこうである。すなわち、初期におかれた台風対称渦度が、時間がたつにつれて、その台風中心の西(東)側では高(低)緯度地方からの地球渦度移流による渦度増加(減少)が生じ、そのために低(高)気圧のジャイロが形成するので台風は西に移動する。そして後、この一対のジャイロが中心付近に作る流れによって台風は北向成分をとり、その結果台風は全体として西-北へ移動する。



第5図 バロトロピック渦度方程式を用いたシミュレーションによる24時間後の台風非対称部分の流線関数(フィオリノとエルスベリ, J. Atmos. Sci., 46, 975-990 (1989)). 流線関数の単位は m^2/s . 負(正)値は低(高)気圧性の流線関数.

5. 非一様な指向流の場合についての推論

前節で述べたのは指向流が一様な場合についてであった。指向流が非一様な場合はどう考えたらよいだろうか。移動速度と指向流はいずれも空間的に一様でなく、台風の中心からの距離と方位角に依存する。こういう一般的な場合を考察するには、台風渦を浮かべた流れから一定の強さの対称風速場を差し引いた残りの風速場を指向流と考えるほうがすっきりする。リールの「熱帯気象学」等によると、もともと指向流はこう定義されていたようである。

このような指向流の定義に立つて、地球に固定した座標系に対する風速場を台風対称風速場(台風渦)と非軸対称である指向流の和と考え、次の二つのことに関心をはらう。一つは指向流の非軸対称風速場がどうして発生するか、またもう一つは、この非軸対称風速場と台風対称風速場がどう影響しあって台風が移動していくかを見ることである。

これまでの経験から、非軸対称風速場の生成にはいろいろなパラメーター、すなわちベータ効果や台風周辺の総観場、メソスケールの現象、気温傾度場等がはずかると考えられる。とりわけベータ効果については、既に述べたように、中心の西側と東側に低気圧と高気圧のダイポールをもつ非軸対称風速場(2つのジャイ

ロをもつ)ができる(第5図)。これはホランド等による理論考察に負うものであるが、最近の観測データの解析結果からも示唆されている。

このように、ベータ効果等で非軸対称風速場が生成されると、さらに次の二つのことが推論される。一つは、指向流の非軸対称渦度が台風の対称風速場によって移流され台風中心のまわりを回転すること、もう一つは、台風の対称渦が指向流の非軸対称風速場の移流によってある方向へ移動することである。前者は通常われわれが台風経路にみる蛇行運動や振動現象に対応するのに対し、後者は台風の移動速度に対応するものと考えることができる。こういう推論に立つことによって、非一様な指向流の場合についても台風移動の問題が論ぜられている。

6. まとめ

台風移動を理解しようとする機運はボイスバロットの法則が登場したときに始まった。その後、指向流思潮が台風移動を考えるときの基本となった。

指向流即台風移動(移動速度)と考えられた時代には、台風移動予報は即指向流予報とみなされたりした。しかし、移動速度を差し引いた相対風速場に非軸対称性があり、台風の移動速度と指向流は一般にはずれることがわかった。観測では台風は指向流の左へずれ、それより速い足で進むことが示された。また、理論では台風は指向流の西側にずれ、北へ向かう指向流に対しては足は速く、南よりの指向流に対しては鈍い足で進むことがわかった。この「ずれ」の発生の原因はおもにベータ効果によるものであることがわかった。また、ベータ効果以外の要因が働く場合の台風移動と指向流の関係についての考察も行われつつある。

あとがき

台風移動は古いようで新しく、平易のようで難しいテーマと思う。長く興味を持ってはきておりながら、十分深くこのテーマを研究しまとめることができなかった。その足らなさのために読者を混乱させてはと気になる。せめて、読者が台風移動の問題に関心と興味をもつ契機にでもなれば幸いと思う。

最後に、台風の勉強のために沖縄職業能力開発短期大学の重信洋一氏、琉球大学理学研究科のバルトロラン君と台風ゼミを昨年夏から持つようになったが、これがこの談話のきっかけになり励みになったことを記し、感謝の意を表したい。