

# コリオリ力のない宇宙から見た台風の風

## - 教科書への提言 -

斎藤吉彦

大阪市立科学館

### 概要

よく知られているように、熱帯性低気圧(台風)の風向分布は北半球で左まわりとなる。この気象現象について、高校地学教科書は「左まわりとなっている傾度風の整合性」を、力学教科書は「左まわりとなる起源」を、それぞれ、「回転系によるコリオリ力」で説明している。高校地学教科書は「左回りの起源」を説明しているのではないことに注意すべきである。ところが、そのことに気がつかず、高校地学教科書の記述を起源の説明と誤解する場合がある。その誤解は力学教科書の記述における暗黙の了解を見落としていることに起因する。その誤解のために正しい教育指導がなされていない惧れがある。本稿では、両者に対する正しい理解を与え、さらに、左まわりの起源の説明は、慣性系での記述(コリオリ力を用いない説明)が単純明快である事を与える。

### 1. はじめに

熱帯性低気圧の風向分布が北半球では左まわり(南半球では右まわり)となる要因は2つある。地球の自転とともに回転する系では、中心方向への運動がコリオリ力で左まわり方向へそらされること、初期条件(空気が静止している)、であり、宇宙から地球を観測した場合、すなわち、慣性系では、角運動量保存則、初期条件(空気が地球とともに回転している)、である。慣性運動に関する力学の原理的なものであり、は空気が地球の自転とともに剛体回転しているという初期条件で、きわめて自然な仮定である。しかし、この2つの要因を明白に知る機会は非常に少ない。気象学の教科書は言及はしているものの[1]、気象学を学ぶ機会は稀である。また、高校地学教科書も力学の教科書もこのことを明らかにしていない。そのため、以下のように、誤解あるいは初期条件を無視することが通説として広く普及しているようである。

高校地学教科書の場合[2]は、空気塊に作用する3力(コリオリ力、気圧傾度力、遠心力)と、定常状態となった左まわり風向分布との整合性を記述しているだけであるにもかかわらず、この記述が「なぜ、左巻きとなるの

か?」に答えるものとして解釈されることが多いようである[3]。大学教養レベルの力学教科書の場合は、コリオリ力が実際に作用する例として、低気圧の風向分布が形成される過程を取り上げているが、の初期条件は暗黙の了解としている[4][5][6]。しかし、この初期条件が左まわりの要因であることを理解しているのは稀であろう。実際、著者が接した範囲ではあるが、初期条件の重要性を理解していた者はいなかった。著者自身も「宇宙から台風を見たら、コリオリ力がないので、渦を巻かないのか?」と市民から質問され応えられなかった。この質問を機に、慣性系での記述を考察し、初めて初期条件の重要性に気づいたのである。また、上記のような高校地学教科書記述に対する誤解、および力学教科書の不十分な理解が、通説として大多数の理科教育に携わる者に浸透し信念化しているため、エッセンスだけの紹介記事や口頭による議論では、正しい理解の普及は極めて困難である。例えば、慣性系での記述を紹介したものの[7]、同意が得られず、一年近くも科学館のメーリングリストで議論が続いた。そして、この議論は立ち消えとなったままである[3][8]。「教科書とは異質」、「今まで聞いたことがない」、「提唱者に権威がな

いなどの理由で、信念から翻意できないものと思われる。

そこで、本稿では、正しい理解の普及を目的とし、高校地学教科書の誤読誤用を明らかにし、低気圧の風向分布が北半球では左まわり(南半球では右まわり)となる要因について、回転系、慣性系それぞれでの記述を与え、さらに、慣性系での記述が初学者に直感的に訴え得る簡単な表現であることを示す。また、角運動量保存による台風中心付近の強風に関する解釈について言及する。

## 2. コリオリ力

慣性系でのニュートンの運動方程式は次式で与えられる。

$$m\vec{a} = \vec{F} \quad (1)$$

一方、角速度  $\vec{\Omega}$  で慣性系に対して回転する系での運動方程式は

$$m\vec{a}' = \vec{F} - 2\vec{\Omega} \times \vec{V}' - \vec{\Omega} \times (\vec{\Omega} \times \vec{r}') \quad (2)$$

ここで、 $\vec{a}'$ 、 $\vec{V}'$ 、 $\vec{r}'$  はそれぞれ回転系での加速度、速度、位置ベクトルを表す。

右辺第2項がコリオリ力、第3項が遠心力である。これらの2つの和が回転系での慣性運動を保障するもので、それぞれ慣性力とも呼ばれる。(2)式からも明らかに、コリオリ力は質点の速度に、遠心力は質点の位置に依存する。地球上の気象現象は地球とともに回転する系で記述されるので、台風や低気圧によって運動する空気にはコリオリ力が働き、北半球では運動方向に対して右向き、南半球では左向きに作用する。以降、文章の煩雑さを省くため、北半球での現象を扱う。

## 3. 高校地学教科書

高校地学教科書は低気圧における風向分布を次のように記述している。

「<傾度風> 地表の摩擦の及ばない上空で、円形の等圧線に沿って吹く風を傾度風という。この場合には、気圧傾度力と転向力に加えて、円運動による遠心力がはたらく。この3つの力の関係は、図1に示すようになる。台風のように等圧線が同心円状に分布している低気圧の場合が、図1(下)に相当する。このとき、低圧部の中心に向かう気圧

傾度力と外側に向かう転向力と遠心力の合力がつり合っている。その結果、北半球では低圧部を中心に反時計まわりに風が吹くことになる。」

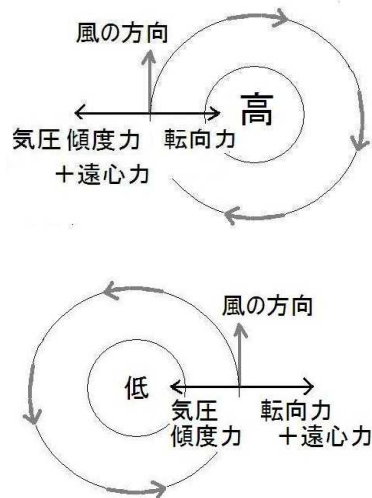


図 1

ここで、転向力とはコリオリ力のことである。

この記述は、回転系に立って、左回りに等速円運動する空気塊に作用する3力を次のように与えているのである。  
気圧傾度力 = 転向力 + 遠心力 (3)

また、式(3)は、気圧分布から傾度風の大きさを求めるための重要な式でもある。高校地学教科書の説明を要約すると次のようになる。

[説明1. 高校地学教科書の記述]

低気圧で生じる傾度風は気圧傾度力とコリオリ力の作用の下に左回りに等速円運動する空気塊である。

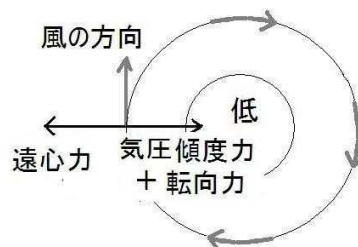


図 2

さて、以上の論理からは図2のような右巻きも可能である。つまり、この説明は左まわり起源の理由とはならない

のである。実際、稀ではあるが右巻きに吹くこともある [1]。

問題は「その結果、北半球では低圧部を中心に反時計まわりに風が吹くことになる。」という表現であり、論理を吟味しないで読む者には、図や式(3)を左まわり起源の理由と解釈させるおそれがある。

ここで、図1や図2は近似的なものであることを強調しておく。実際は、空気塊の速度は中心方向への成分も有するのである。この中心方向への移動が後章で詳述するように、左回転を理解するための重要な因子である。この図を厳密なものとして解釈してしまうと、後章での議論が理解できないので、注意が必要である[3][8]。

#### 4. 台風の説明(力学教科書)

力学教科書は台風や低気圧の風の左まわり起源を次のように説明している。

[説明2.力学教科書の記述]

気圧傾度力で中心へ向かう空気にはコリオリ力が右方向へ作用し、図3のように左まわりの風となる。物理学を専攻したものには、この説明は一般的と思われる。以下は力学教科書からの抜粋である。

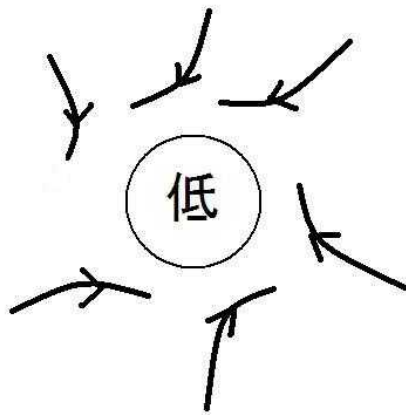


図3

「……風の渦巻く方向を決めているのが、まさにこの効果である(図3)。……この座標の回転がコリオリ力を引き起こし、低気圧の中心に引き込まれる風の回転方向を決めているのである。」[4]、「コリオリ力がないとすれば風の方向は理想的には……等圧線に垂直である。しかしながらコリオリ力は図に示されているように風を

この方向に向かって右向きに偏らせる。右への偏りは風のベクトルが等圧線が平行になるまで続き……」[5]、「北半球で考えると、コリオリ力は……進行方向を右側に曲げるような効果をもつ。このため台風の目に流れ込む空気(風)は右の方に曲がり、……結果的に風は目を中心として反時計回りに吹くことになる。」[6]。

ただし、これらの記述で、初期条件として空気塊が地面に対して静止している、あるいは中心方向へ移動していることが暗黙の了解となっている。もし、初期条件として、右回りに速度成分を持っていた場合は、左回りとなるかどうかは明らかでない。実際、北極点に低気圧の中心が存在する場合を考えれば、初期条件によって右回りの解が存在することは明らかである。一般の場合も、次章で明らかになるが、左回りか右回りかを決定するのは初期条件である。

左回りとなる要因は、コリオリ力と、初期条件として空気塊が静止していることなのである。

#### 5. 慣性系での記述

まず、力学教科書の記述を慣性系に座標変換して考察する。その後、角運動量の保存則を考察する。

低気圧の中心  $\vec{r}_0$  から空気塊への変位ベクトルを  $\vec{r}_1$  とし、

低気圧の中心位置での水平面内で、 $\vec{r}_1$  の回転系での極座標表示を  $(r_1', \phi_1')$  とすると、[説明2.力学教科書の記述]の空気塊の運動は、

$$\dot{r}_1' < 0, \dot{\phi}_1' = 0 \Rightarrow \ddot{\phi}_1' > 0, \quad (4)$$

と表せる。これを、ある時刻で低気圧が静止する慣性系へ座標変換すると、<sup>1</sup>

$$\dot{r}_1 < 0, \dot{\phi}_1 = \Omega_n \Rightarrow \ddot{\phi}_1 > 0, \quad (5)$$

ここで、 $\vec{r}_1$  の慣性系での極座標表示を  $(r_1, \phi_1)$ 、地球が自転する角速度を  $\vec{\Omega}$  とし、その鉛直成分を  $\Omega_n$  とした。

したがって、慣性系での記述は次のようになる。

<sup>1</sup> 低気圧は自転軸を中心として等速円運動しているため、有限の時間間隔で低気圧を静止させる慣性系は存在しない。

[説明3 . 慣性系での記述]

もともと地球の自転により、地球表面とともに回転していた空気が、台風や低気圧による気圧傾度力で中心方向へ引き込まれると、地球表面よりも角速度が大きくなり左まわりとなる。

座標変換をせず、直接、慣性系だけで考察しても、上記のことは演繹できる。しかし、面倒な考察が必要である。回転系での記述も、慣性系での記述も同等であるので、力学教科書の記述を慣性系で表現するためには、この導出だけで十分である。

[説明3 . 慣性系での記述]は直感的に理解しやすく、また、角運動量保存則で、内側に吸い込まれた空気塊は角速度も速度も大きくなると推測できる。じっさい、北極点以外では低気圧の中心が地球表面とともに回転しているものの、ある近似で、空気塊の角運動量の地球自転軸方向の成分が保存することが証明できる(付録参照)。しかし、次のような近似を採用していることに注意が必要である。空気塊に作用する垂直抗力は、空気塊が地球表面に対して静止している時に等しいとしたもので、地球表面に対する運動や、気圧傾度力を中心力としたときに生じる垂直抗力の変動  $\Delta \vec{N}$  を無視したものである(付録(A 4))。この変動は、地球表面の速度に対する空気塊の運動や、地球引力に対する気圧傾度力の法線成分は僅かなので、正当なもののように思われる。しかし、台風を扱う長い時間スケールにおいては、 $\Delta \vec{N}$  は無視できなくなる。それを以下に示す。

地球表面に対する空気塊の速度を  $\Delta \vec{V}$  とし、これによる垂直抗力の変動  $\Delta \vec{N}$  を回転系で見積もる。この運動による垂直抗力の変動はコリオリ力の法線成分

$$\Delta N_1 = O(\Omega \Delta V), \quad (6)$$

と、曲面(地球表面)を  $\Delta \vec{V}$  で運動するために必要な向心力を与えるもの

$$\Delta N_2 = O(\Delta V^2 / R), \quad (7)$$

である。ここで、地球の半径を  $R$  とした。これらは、角運動量の時間変化に対して、

$$\Delta \dot{L}_1 = O(r_1 \Omega \Delta V), \quad (9)$$

$$\Delta \dot{L}_2 = O(r_1 \Delta V^2 / R), \quad (10)$$

の程度の寄与を与える。一方、初期状態としての角運動量は

$$L = O(r_1^2 \Omega), \quad (11)$$

の程度である。したがって、近似として成り立つ時間は

$$\Delta T \ll L / \Delta \dot{L}, \quad (12)$$

であるので、

$$\Delta T_1 \ll r_1 / \Delta v, \quad (13)$$

$$\Delta T_2 \ll r_1 R \Omega / \Delta v^2, \quad (14)$$

が、それぞれ(6)、(7)を無視してよい条件である。(12)は空気塊が中心付近まで移動するまでの運動を考察する場合、コリオリ力の法線成分を単純に無視できないことを示している。また、(13)は低気圧の中心から100km、風速5m/sの空気塊を扱うとしても、近似が成り立つのは1日程度ということが分かる。したがって、[説明2 . 力学教科書の記述]や[説明3 . 慣性系での記述]は低気圧出現による初期段階で左巻きとなることは説明できるが、台風の中心部が強風になることを、角運動量の保存則で理解するのは推測の域を脱していないのである。つまり、図3から安直に台風の強風をイメージできないのである。たとえば風速が東向きの成分を持つ場合は、(7)は等速円運動をしていた空気塊の軌道面を変える作用をするので、空気塊を南側へ押す効果を持つのである。回転系で記述する場合でも、コリオリ力の水平成分を扱うだけでは不十分で、「垂直抗力の変動がトルクを与える。」ということを経験しなければならぬのである。

自転軸と  $\vec{r}_0$  とのなす角  $\theta_0$  が小さいとする近似では

付録(A 41)より、(8)(9)は

$$\Delta \dot{L}_1 = O(\theta_0 r_1 \Omega \Delta V), \quad (8)$$

$$\Delta \dot{L}_2 = O(\theta_0 r_1 \Delta V^2 / R), \quad (9)$$

とすることができる。気圧傾度力を中心力としたことから補正はまだ吟味していないが、 $\theta_0 < 10^{-1}$  ならば、「角運動量保存側で中心付近では強風となる。」と結論してもよさそうである。しかし、これは北極から600kmほどに位

置する低気圧であって、上の近似は実際的な議論には使えない。角運動量保存則の適用については、さらに吟味を加えて、場を改めて報告することとする。

しかし、短時間であれば、自転軸方向の角運動量保存則が使えるので、初期条件により、風向が右回りになりうることは理解できるであろう。すなわち、台風や低気圧とは逆向きの解(右まわりの解)も存在するのである。実際、右まわりの風も吹くのである[1]。

以上のことから次のことを本章の結論とする。台風や低気圧の左まわり起源は、初期条件「空気が地球表面に張り付いて左回転している。」ことが要因であり、もし、慣性系に対して、もともと空気が十分な速度を持って右まわりに回転していたら、右まわりとなる。ただし、角運動量保存則で台風の中心部付近が強風になるということは、まだ推測の域を脱していない。

## 6 . 中心への移動

粘性流体は非常に現実味のある台風を記述する。すなわち、流れ込みがある場合、その周りで内側ほど角速度が大きく、また、回転方向の速度が中心付近で極大となる定常状態

$$\omega(r) = \text{const.} \cdot \frac{(1 - \exp((-A/2\nu)r^2))}{r^2}, \quad (15)$$

$$V(r) = \text{const.} \cdot \frac{(1 - \exp((-A/2\nu)r^2))}{r}, \quad (16)$$

を与える[9]。<sup>2</sup>ここで、Aは流れ込み量を表すパラメータ、 $\nu$ は粘性係数である。また、流れ込みとしてポテンシャル流

$$\vec{V}_0 = (-Ax, -Ay, 2Az),$$

が仮定されている。

もし、流れ込みがなければ、粘性により相対運動がなくなり、剛体回転に落ち着く。<sup>3</sup>粘性がない場合( $\nu = 0$ )

<sup>2</sup> 渦度を、原点を中心とする円盤上で面積積分することで得られる。

<sup>3</sup> (15)(16)は無限量の流体を扱っているため、 $A = 0$ を代入すれば、 $\omega = V = 0$ と静止状態となる。

は、式(15)(16)は中心に近いほど、角速度も、回転方向の速度も大きく、中心で発散する回転運動となることを示している。粘性がある場合は、中心で有限の運動となるので、粘性が中心付近の運動を妨げていることが理解できる。また、角運動量は $L = rV = \text{const.}$ となり、 $r$ に依存しない事が分かる。つまり、角運動量を保存しながら、流れ込むのである。渦を作るには、流れ込みだけで十分であり、粘性は必要ないと考えられる

さて、上記の解は流れ込みを仮定しているのである。また、説明2も中心への移動が仮定されている。説明3は気圧傾度力による中心への移動を採用しているが、常に中心へ移動することは保障されていない。なぜなら、一般に中心力による質点の運動はケプラー運動のように、中心に近づいたり遠ざかったりと振動するのである。すなわち、説明3は十分時間がたった後の運動には触れていないのである。<sup>4</sup>常に左回転を主張するためには、少なくとも、中心への移動を仮定しなければならない。この中心への移動という仮定が基で、我々の主張が受け入れられなかった経緯があるので[8]、ここでは、中心への移動を議論する。

中心への移動は摩擦によるエネルギー損失で理解できそうであるが、粘性のない場合でも、上記で述べたように、渦を形成するので、摩擦により空気塊が中心へ移動すると解するのは不適當であろう。実際、粘性のない流体が、静止していた状態から、一点で吸い込み( $\nabla \cdot \vec{V} < 0$ 、あるいは上昇気流による流体の消失)が生じると、流体は一様に吸い込み点に向かって流れ込むことは明らかである。一方、初期条件として、吸い込み点の周りに回転していたら、吸い込み点の出現により、圧力勾配に変化が生じ、吸い込み点方向へ流れ込みが生じることは明らかである。このとき、粘性がないので角運動量を保存したまま中心へ移動することになるので、中心ほど角運動量の大きな

<sup>4</sup> 前章で述べたように、低気圧や台風のように中心が等速円運動している場合、角運動量保存則が成立することは、まだ推測の域を脱していない。しかし、中心への移動がなければ、渦はできないであろう。渦を理解するには、角運動量保存の可否に関わらず、なぜ、中心への移動が起こるかを理解する必要がある。

状態が実現される。もし、吸い込み量に対して流れ込み量が大きくなった場合は、吸い込み点の近傍で流体表面が盛り上がるなどして、吸い込み点から外向きの流れが生じるであろう。

しかし、吸い込みが続くので、やがて、外向きの流れは、また逆転し、吸い込み点へ向かって流れ込むであろう。局的に、または短時間、外向きの流れが生じることもあろうが、いずれにせよ、グローバルには、または、長時間のスケールでは、吸い込みにより、中心へ流れ込み、粘性がないので中心ほど角速度が大きくなり、中心部では発散する状態が実現されることが推測される。これは、初期条件として回転0の極限を考慮に入れると、理にかなった解釈であることが裏付けられる。粘性のある場合は、この運動に摩擦によるエネルギー損失が加わり、流れ込みが加速され、また、角速度の大きい内側は減速され、外側は加速され、中心部では有限の角速度が実現されることが推測される。この描像は式(15)(16)と一致している。

一方、中心力の下で1質点が運動する場合、ケプラー運動のような振る舞いをせず、中心方向へ常に移動するのは、特殊な中心力の場合に限られる。このような中心力が実現されるのは、空間を埋め尽くす空気塊群と吸い込みから理解できる。

吸い込み点で空気塊が消失することで、各空気塊は内側から外側に押される力は弱まるので、外側の空気塊に中心方向へ押される。これが、上昇気流出現による気圧傾度力であり、中心力である。この力で中心方向へ移動をはじめますが、やがて、ケプラー運動のように、ある空気塊は中心方向への運動から、中心から遠ざかる運動へと転じようとするであろう。しかし、外側の空気塊によって内側へ押されるのである。一方で、中心付近の空気塊は上昇気流によって常に消失しているので、内側から外へ押す力は以前より減少している。したがって、内側へ押され、外向きへの運動に転ずることができないと考えられる。これが、まさに流れ込みを実現させる気圧傾度力であって、特殊な中心力である。気圧は中心への移動を保つように分布されると考えられる。粘性のない場合、(15)、(16)で与えられる回転運動はこの推測を裏付けるものである。すなわち、粘性のない場合、空気塊に作用する向心力が気圧傾度力であ

り、大きさが $\sim r^{-3}$ である。このような中心力は、常に中心へ向かう運動を与え、決してケプラー運動のようにはならないのである。<sup>5</sup>

これが粘性のない場合の運動を質点系で定性的に理解したものである。また、粘性により、中心付近の回転速度や角速度が減じるのは、内側と外側の空気塊同士の非弾性衝突により、内側の空気塊は減速され、一方、外側の空気塊は加速されるからと考えられる。

これらのことから、「台風は、もともと回転していた空気が、上昇気流による吸い込みで、中心部へ流れ込み、渦を描きながら強風となる。」という説明が正当であることが推測できるであろう。

ところで、地学教科書は、形成された後の渦の状態を記述したもので、流れ込みについては触れていないことに注意が必要である。

高エネルギー天体である降着円盤は台風と似た渦現象である。この現象も、定常状態としての渦を理解するには、ガスの中心部への降着(流れ込み)が必要である。[10]。

渦が形成される要因は、流れ込みであって、流れ込みを実現するのは吸い込みであることを強調しておく。

## 7. まとめ

「回転系ではコリオリ力が働くので、低気圧の風は左まわりに吹く。」と、広く説明されているが、本稿では、初期条件、「低気圧が出現するまでは、空気は地球の自転とともに剛体回転している。」も要因であり、初期条件次第では右まわりも可能となることを明らかにした。不十分な説明が広く普及しているのは、傾度風の特徴を解説した地学教科書の記述を左回りの理由についての記述と誤解していること、力学教科書では暗黙の了解とされた初期条件に読者が気付かないこと、この2点が背景にある。

「なぜ、台風の風が左まわりになるか?」という疑問は自

<sup>5</sup> この場合、半径方向の保存則は

$$\dot{r}^2 = (c - h^2)r^{-2} + \text{const.}$$

となり、常に $\dot{r} < 0$ 、あるいは $\dot{r} > 0$ となることが分かる。ここで $c$ は中心力の大きさを決めるパラメータ、 $h$ は角運動量である。

然に発せられるものであり、理科教育に携わるものは正確に  
 応え得ることが理想である。しかし、高校地学教科書の  
 理解ではこの疑問に応えることができない。また、力学教  
 科書を精読できれば可能であるが(暗黙の了解の重要性に  
 気付くことすら希である)、コリオリ力という概念が初学  
 者の理解を困難にする。ところが、力学教科書の記述を慣  
 性系へ座標変換することで、直感に訴える簡単な理解が得  
 られるのである。すなわち、「もともと地球の自転とともに  
 左回転していた空気が低気圧の中心へ引き込まれ、低気  
 圧に対して、左まわりの回転となる。」との説明が可能と  
 なるのである。ただし、「台風の中心付近で強風となるの  
 は、角運動量を保存して中心部へ流れ込むからである。」  
 というのは、垂直抗力の変動を吟味することが課題であっ  
 て、まだ推測の域を脱していない。

すでに、次のような解説が試みられている。

「台風発生の前には、もともと空気は地面に対して静止  
 している。すなわち地球自転にあわせて(北半球では)左回  
 りに回転している。低気圧が発生すると、空気は低気圧に  
 吸い込まれていく。吸い込まれるにつれて回転速度が増し  
 ていく。つまり、空気は地面に対して左回りに回転するこ  
 とになる」 わかりにくい方は次のイメージで。「円形の  
 皿(たらい)に水が入っている。底の中央に排水口がある。  
 排水口の栓を抜くと水は吸い込まれていく。栓を抜く前に、  
 水が全体としてゆっくり左回りに回転していたとすると  
 (盤じたいが水を入れたまま、水と一緒にゆっくり左回りに  
 回転していると思ってもよい)栓を抜いたとき、水は左  
 回りの回転を増しながら吸い込まれていく」 ここで「な  
 ぜ排水口の周囲の水は左回りなのか?」と問われれば「も  
 ともと左回りに回転していたからだ」ということになりま  
 す。台風の場合も同様です。空気はもともと地面と一  
 緒に左回りに回転していますから、低気圧に吸い込まれる  
 につれて、左回りの回転が激しくなります。つまり、台風  
 の周囲の空気は地面に対して左回りに回転することにな  
 ります。([11])

今後、このような説明を普及させ、蔓延した誤解を払拭  
 したいものである。少なくとも、教科書などに左まわりの  
 記述がなされるときは、この説明が付け加えられることを  
 希望するものである。

## 謝辞

本稿は灘高等学校の浜口隆之氏との議論の成果がほと  
 んどで、現段階での斎藤の見解をまとめたものである。本  
 来なら浜口氏との共著として執筆すべきであるが、まだ議  
 論が収束していないので、共著とすることができなかった。  
 斎藤一人を著者として掲載することについては、浜口氏に  
 快諾をいただいた。その上、浜口氏には本稿の下書きを何  
 度も詳しく検討していただき、上梓間際まで、多くの著者  
 の思い違いや間違いの指摘と有益なコメントをいただい  
 た。浜口氏には多大なる感謝の意を表したい。

また、本稿執筆のきっかけとなったのは、大阪市立科学  
 館メーリングリスト「科学談話室」の議論である。ここで  
 は一年近くに及ぶ長期間の議論がなされた。そこで、著者  
 は、台風・低気圧に関して、理解を深めることができた。  
 ここに、「科学談話室」で議論していただいた方々に謝意  
 を表す。

## 付録 角運動量の保存

空気塊の位置ベクトルを

$$\vec{r} = \vec{r}_0 + \vec{r}_1, \quad (A1)$$

とする。

空気塊は気圧経度力  $\vec{f}_1$  の他に引力  $\vec{f}_e$  と地球表面に拘  
 束するための垂直抗力  $\vec{N}$  が作用している。

さて、運動方程式は

$$\ddot{\vec{r}} = \vec{f}_1 + \vec{f}_e + \vec{N}, \quad (A2)$$

ここで、煩雑さを避けるため空気塊の質量を1とした。

$\vec{r}_0$  は自転軸の周りに一定角速度  $\vec{\Omega}$  で等速円運動してい

るので、(A1)より、

$$\ddot{\vec{r}} = \vec{\Omega} \times (\vec{\Omega} \times \vec{r}_0) + \ddot{\vec{r}}_1, \quad (A3)$$

ここで垂直抗力を、空気塊が地球表面とともに回転してい  
 るときの値とする。

$$\vec{f}_e + \vec{N} = \vec{\Omega} \times (\vec{\Omega} \times \vec{r}). \quad (A4)$$



本来、垂直抗力は、外力と速度に依存するのであるが、外力や速度変動は小さいとして、ここでは、この近似を採用する。力学教科書で説明されるのもこの近似を採用している。図3などの考察で使用する近似である。

さて、(A 2)(A 3)(A 4)より、

$$\ddot{\vec{r}}_1 = \vec{\Omega} \times (\vec{\Omega} \times \vec{r}_1) + \vec{f}_1 . \quad (\text{A } 5)$$

$$\vec{r}_1 \times \vec{f}_1 = 0 \text{ なので}$$

$$\dot{\vec{L}}_1 = \vec{r}_1 \times \ddot{\vec{r}}_1 = \vec{r}_1 \times (\vec{\Omega} \times (\vec{\Omega} \times \vec{r}_1)) . \quad (\text{A } 6)$$

したがって、自転軸(z軸)方向の成分は、

$$\dot{L}_{1z} = 0 . \quad (\text{A } 7)$$

ゆえに、

$$L_{1z} = \text{const.} . \quad (\text{A } 8)$$

また、自転軸と $\vec{r}_0$ とのなす角 $\theta_0$ が小さいとする近似で

も、次のように(A 8)を示すことができる。(A 4)で無視した垂直抗力の変動分を $\Delta\vec{N}$ とすると、

$$\ddot{\vec{r}}_1 = \vec{\Omega} \times (\vec{\Omega} \times \vec{r}_1) + \vec{f}_1 + \Delta\vec{N} , \quad (\text{A } 9)$$

なので、上記と同じ計算をすることで、

$$\dot{L}_{1z} = (\vec{r}_1 \times \Delta\vec{N}) \cdot \vec{k} , \quad (\text{A } 10)$$

ここで、 $\vec{k}$ は自転軸方向の単位ベクトルである。 $\vec{n}$ を鉛直方向の単位ベクトルとすると、

$$(\vec{r}_1 \times \vec{n}) \cdot \vec{k} = O(\sin \theta_0) = O(\theta_0) , \quad (\text{A } 11)$$

であるので、これを無視すれば、(A 7)(A 8)が得られる。

## 参考文献

- 1 . 小倉義光「一般気象学」東京大学出版会
- 2 . 「高等学校地学 B」啓林館
- 3 . <http://www.sci-museum.kita.osaka.jp/~saito/job/others/gokai.html>
- 4 . 和田純夫「力学のききどころ」岩波書店
- 5 . ゴールドスタイン「古典力学・上」吉岡書店
- 6 . 阿部龍蔵「力学・解析力学」岩波書店

7 . 斎藤吉彦「月刊うちゅう」 2002 Vol.18 No.10  
<http://www.sci-museum.kita.osaka.jp/~saito/job/writing/utyu/taihu/taihu.html>

8 . 大阪市立科学館ホームページ科学館談話室  
 「台風雲」<http://www.sci-museum.kita.osaka.jp/news/text/kadan/dan011007a.html>

「高気圧の地衡風」<http://www.sci-museum.kita.osaka.jp/news/text/kadan/dan020210a.html>

「台風が左回りである理由」<http://www.sci-museum.kita.osaka.jp/news/text/kadan/dan020518a.html>

9 . 恒藤敏彦「弾性体と流体」岩波書店

10 . 高原文郎「天体高エネルギー現象」岩波書店

11 . 浜口隆之「月刊うちゅう」2002 Vol.19 No.4 (投稿欄)