流体地球科学 第５回

東京大学 大気海洋研究所 准教授
藤尾伸三
http://ovd.aori.u-tokyo.ac.jp/fujio/2017chiba/
fujio@aori.u-tokyo.ac.jp

2017/11/1

最終更新日　2017/11/02

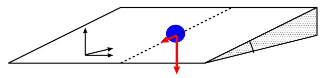
前回のポイント

- なぜ海洋の水温は，深いほど低いのか?
  - 混合層の下 (海面フラックスが影響しない) では，水温，塩分，ポテンシャル密度を保持して流れる ＝ 等温線等に沿った流れ
    → 低緯度の深いところの水は，高緯度側の海面の水が流れてきた．
    　より深い水ほど，より高緯度から (深海底付近は，極域)
  - 積み重なった暖かい水の層 ＝ 主水温躍層

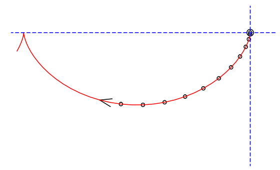
  ※ 実際には，周囲の水と徐々に混ざるので，値が変わる
- コリオリ係数 $f = 2\Omega \sin\phi$ (地球自転の角速度 $\Omega = 2\pi/T_E$, 緯度 ϕ)
  自分の自転角速度 (自分と地球の自転軸とずれ→ sin) の「2 倍」
- 鉛直＝重力 (地球自転の遠心力含む) の方向．水平面＝鉛直と直交する面
- 地球上の慣性運動 → 慣性振動 (等速円運動)
  - 北半球は，進行方向右向きに曲げられる (時計回り)
  - 円運動に伴う遠心力 mv^2/r とコリオリ力 fmv がバランス
    → $r = v/f$, $T = 2\pi r/v = 2\pi/f$ (速度 v, 半径 r, 慣性周期 T)
- 慣性周期は，自分の自転周期の半分 (北極で半日，北緯 30 度で 1 日)
  コリオリ力の重要性の指標は，運動の継続時間と慣性周期の比
- ベータ効果 ($\beta = df/dy = 2\Omega\cos\phi/a$, 地球の半径 a, 南北の距離 $y = a\phi$)
  南北方向の広い現象に重要 (低緯度ほど顕著で，西向きに移動させる)

斜面での運動

水平面から角度 α で傾いている　($s = \sin\alpha$)
斜面下方向にかかる重力…$F_y = -mgs$



● 静止状態から始める

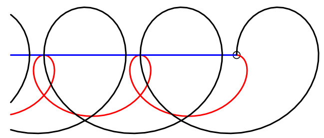


- 最初は，斜面の下方向に転がる．
  → コリオリ力が働いて，右に曲がる．
  → 元の高さに戻る
- 運動エネルギーと位置エネルギーの和が保存

● 落ちない速さ V で真横 ($-x$ 方向) に転がす

- 斜面を下る向きの重力 mgs と，上る向きのコリオリ力 fmV が釣り合う．
  $V = \dfrac{gs}{f}$ → 等速直線運動
- $g = 9.8$, $f = 8\times10^{-5}$, $s = 10^{-3}$ ($= 1\text{mm}/1\text{m} = 1\text{m}/1\text{km}$) とすると，
  $V = 120\ \text{m s}^{-1}$ (時速 440km，速すぎ)

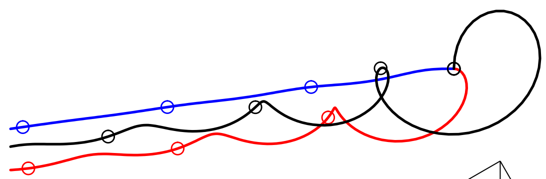
●どんな初速を与えても，1 慣性周期後に
最初の高さに戻る
→ V の直線運動＋慣性振動の円運動



抵抗が働く斜面での運動

物体に速度に比例する抵抗 rmv が働く場合を考える．
r: 抵抗の係数 (r^{-1} は，止まるまでの時間の目安．半減期 $\log 2/r$)

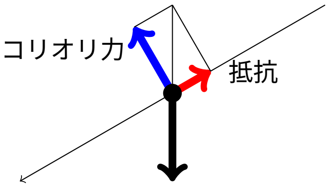
初期に与えた速度は，抵抗によって減衰する → 慣性振動が消える
十分に長い時間 ($rt \gg 1$) がたつと，初期条件によらず，等速直線運動になる



等速直線運動の速さ

$$u = -\frac{fgs}{f^2 + r^2}, \quad v = -\frac{rgs}{f^2 + r^2}$$

※ 横移動 ($r = 0$) と終端速度の落下 ($f = 0$)

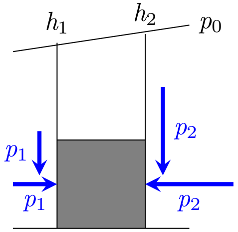


圧力傾度力

等圧面 (海面など) が水平面から傾いている
→ その下には, 静水圧により圧力の水平勾配ができる.

流体粒子 (直方体, Δx, Δy, Δz) を考える.

- 左と右の位置で, 等圧面までの高さ: h_1, h_2
  → 静水圧 $p_1 = p_0 + \rho g h_1$, $p_2 = p_0 + \rho g h_2$.
  - 密度 ρ が高さで異なるならば, 積分
  - h_1 を 0 にとれば, 等圧面上の運動
- 流体粒子は, 左から p_1, 右から p_2 で押される.
  $p_1 < p_2$ ならば, 全体として, 左向きの力
  ※ 上と下の圧力の差が「浮力」
- 力は, 圧力 × 面積: $F_G = (p_2 - p_1)\Delta y \Delta z$, 質量 $m = \rho \Delta x \Delta y \Delta z$ を使って,
  圧力傾度力 $F_G = \dfrac{m}{\rho}\dfrac{p_2 - p_1}{\Delta x} = mg\dfrac{h_2 - h_1}{\Delta x}$ ← 傾いた斜面上の重力



横から見た図

地衡流・地衡風…コリオリ力と圧力傾度力が釣り合い, 等圧線に沿う運動

$$fmV = F_G \rightarrow V = \frac{p_2 - p_1}{\rho f \Delta x} = \frac{1}{\rho f}\frac{dp}{dx}$$ (x は圧力が変化する向き)

地衡風

コリオリ係数 $f = 9.4\times10^{-5}\mathrm{s}^{-1}$ (40 度)
空気の密度 $\rho = 1.2\mathrm{kg\ m}^{-3}$
→ 北風 $V = \dfrac{\Delta p}{\rho f L} = 8.9\ \mathrm{m\ s}^{-1}$
北緯 35 度では, $\dfrac{1\mathrm{hPa}}{\rho f \times 1000\mathrm{km}}$=約 $1\mathrm{m\ s}^{-1}$

07121012.png

気圧の高い方を右に見て, (北半球)
等圧線に沿って風が吹く

- 低気圧は, 反時計回り (台風)
  強い低気圧 → 等圧線が込む
- 高気圧は, 時計回り
  強い高気圧は存在しない
- 冬型の気圧配置: 西高東低
  →西側が高気圧なので, 地衡風は北風 (南向きの風) → 寒い

地面の抵抗 (摩擦) を考えると, 低気圧側に傾く
(地面から離れるほど, 影響は小さくなる)

地上天気図

等圧線 4hPa 間隔
(太線: 20hPa 間隔)
{ 間隔が狭い → 勾配が大
  間隔が広い → 勾配が小

緯度 1 度は 111km

気圧の勾配を計算
北緯 40 度, 東経 140〜150 度

- 距離 L: 約 1000km
- 等圧線 2.5 本
  気圧差 Δp: 10hPa
- 勾配 $\dfrac{\Delta p}{L} = 10^{-3}\mathrm{Pa\ m}^{-1}$
  (L の間での平均)

07121012.png

気象庁発表の実況天気図

高層天気図

高層天気図は, 等圧面の高さと, 等圧面上の気温などを描いたもの

jma500.png

気象庁
500hPa (約 5000m 上空)
※ ほぼ地衡風

等圧面の高度が高い → 水平面で気圧が高い (上にたくさん載っている)

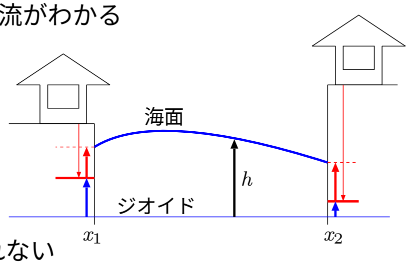
{ 低緯度 (5820m) より高緯度 (5100m) の方が高い
  等高線 (等圧線) は, ほぼ緯度線に沿う } → 西風 (東向きの風)

海流と海面高度

海面は等圧面 → 海面の高さを測れば，地衡流がわかる

検潮所 (験潮所)

- 検潮所ごとの基準面 (赤線) からの海面の高さを計測
- 基準面の高さは不詳.



ジオイドは水平面の基準 (静止海面)
海面がジオイドと一致すると，地衡流は流れない

- 検潮所の間の平均流速 $V = \dfrac{\Delta p}{\rho f L} = \dfrac{g \Delta h}{fL}$ (← 静水圧 $\Delta p = \rho g \Delta h$)

  f: 検潮所の中間の緯度のコリオリ係数; Δh: 潮位差，L: 距離 $(x_2 - x_1)$
- h の値そのものは不詳 → 流速はわからない
  h の時間変動はわかる (基準面は変化しない) → 流速の時間変動がわかる

人工衛星による海面高度

マイクロ波で衛星と海面の距離を求め，衛星の高さは GPS で求める.

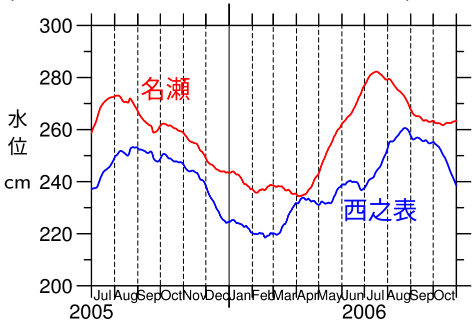
j1nrtssha_hmss_2004346.png

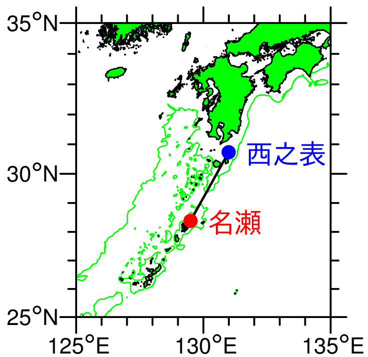
ジオイドが正確に分からないので，時間平均を除いた分布 (一時的な渦を表す)
※ 海流は含まれない

地衡流は，北半球では， $\begin{cases}\text{海面の高い (赤い) 部分を時計回りに流れる.}\\ \text{海面の低い (青い) 部分を反時計回りに流れる.}\end{cases}$

黒潮と潮位

名瀬 (奄美大島) と西之表 (種子島) の潮位
(30 日の移動平均→ 潮汐などを除く)





※ それぞれの基準面から高さ (名瀬の基準面の方が 1m ぐらい高い)
黒潮を挟んで (距離は約 300km) で 40cm 以上の潮位差の変動がある.

海峡間の平均流速の変動 $v = \dfrac{g\Delta h}{fL} = \dfrac{9.8 \times 0.4}{(7.3 \times 10^{-5}) \times (300 \times 10^3)} = 0.18\ \mathrm{m\ s^{-1}}$

- 名瀬の方が，より高い時期 → 海峡間の流れが速い時期

CTD による海面高度

wyrtki.png

Wyrtki (1975)

ジオイドからの海面のずれ
等値線は 10cm 間隔

1000m の深さに流れがない (水平面=等圧面) とし，水温・塩分の観測から密度を求めて，海面水位を推定

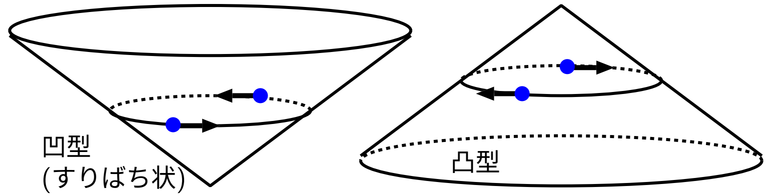
海面が高い → 軽い水

地衡流は…
$\begin{cases}\text{線に沿って流れる}\\ \text{北半球は高い側が右}\\ \text{線が込んでいると速い}\end{cases}$

日本の $\begin{cases}\text{南が黒潮}\\ \text{東が黒潮続流}\end{cases}$

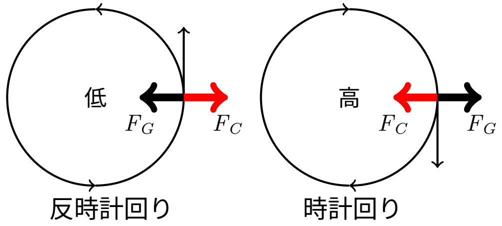
約 1m の高度差がある

低気圧・高気圧



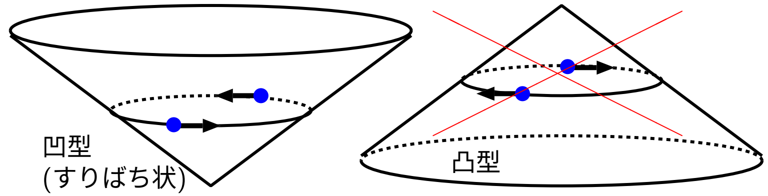
コリオリ力 F_C と重力 F_G がバランスすれば, 斜面から落ちずに, 回り続ける

重力を気圧傾度力とみれば,
「低気圧」「高気圧」に相当.



速度 V とすると,
コリオリ力 $F_C = fmV = F_G \rightarrow V = \dfrac{F_G}{fm}$

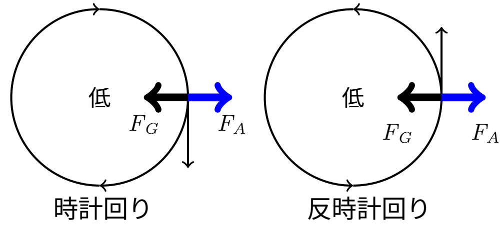
コリオリ力がない場合



遠心力 F_A と重力 F_G がバランスすれば, 斜面から落ちずに, 回り続ける

すりばち状のみ (ルーレット)
回転の向きはどちらでもよい

このような風を「旋衡風」
普通にいう「渦」



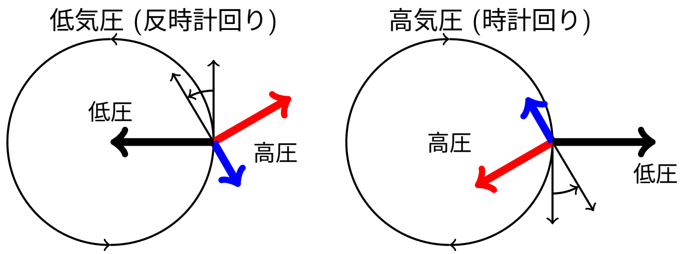
速度 V, 半径 R とすると,
遠心力 $F_A = \dfrac{mV^2}{R} = F_G \rightarrow V = \sqrt{\dfrac{F_G R}{m}}$

実際には, コリオリ力・遠心力・重力の 3 つのバランス

抵抗が働く場合の低気圧・高気圧

コリオリ力＋圧力傾度力＋抵抗　(※風は陸面・海面から抵抗を受ける)

風向に対して, 抵抗は逆向き, コリオリは右向き→ 合力は右後方
(物体は低圧部に動く → コリオリが右向き, 抵抗が逆向きにかかる)



※ 回りながら, 低気圧には吹き込み, 高気圧からは吹き出る

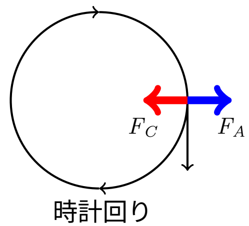
考え方: $\left\{\begin{array}{l}\text{地衡風と低圧部への運動の和}\\ \text{低圧部への運動がコリオリ力で右に曲がった}\end{array}\right.$

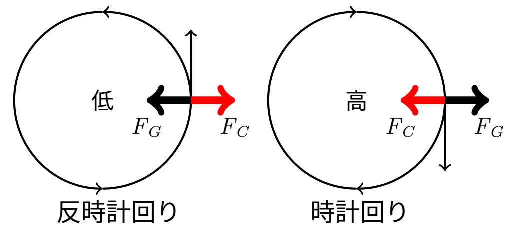
物体が斜面を転がれば, 山は低くなり, 谷は埋まる → 斜面が解消 → 運動なし
同様に, 空気の移動で気圧差が解消され, 低気圧・高気圧は消える.

力のバランス

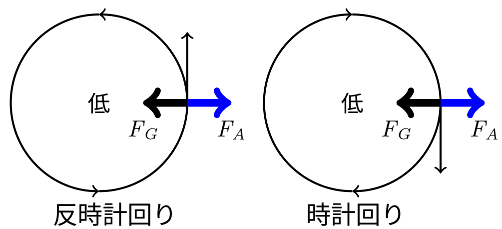
永遠に回れるバランス (以下, 北半球＝コリオリ力は進行方向の右向き)

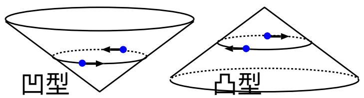
- 慣性振動: 遠心力＝コリオリ力
- 地衡風: コリオリ力＝圧力傾度力





- 旋衡風: 遠心力＝圧力傾度力

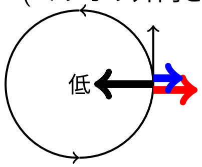
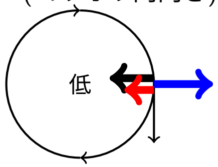
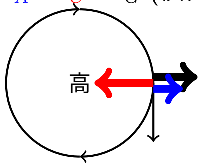




傾度風

遠心力 F_A ＋コリオリ力 F_G ＋圧力傾度力 F_G
コリオリ力と圧力傾度力がそれぞれ内向きか，外向きかで組合わせは 4 通り
合力のどちらが大きいかで，さらに 2 通り　　※ 速度や半径は図で異なる

(遠心力は常に外向き)

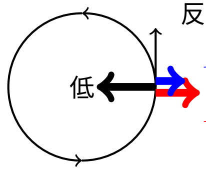
	反時計回り (コリオリ外向き)	時計回り (コリオリ内向き)
低気圧 (圧力内向き)	 $F_G \approx F_C > F_A$ (地衡風的) $F_G \approx F_A > F_C$ (旋衡風的)	 $F_A \approx F_G > F_C$ (旋衡風的) $F_A \approx F_C > F_G$ (慣性振動的)
高気圧 (圧力外向き)	なし すべての力が外向き	 $F_C \approx F_G > F_A$ (地衡風的) $F_C \approx F_A > F_G$ (慣性振動的)

- 反時計回りの高気圧は存在しない

台風

強風域: 風速 15m s^{-1} (54km/時) 以上 (黄線)
暴風域: 風速 25m s^{-1} (90km/時) 以上 (赤線)

大型の台風…強風域の半径が 500km 以上



反時計回り，低気圧

$F_A = \frac{V^2}{R}$, $T_A = \frac{2\pi R}{V}$

$F_C = fV$, $T_C = \frac{2\pi}{f}$

(m=1kg とする)

風速 V	15m s^{-1}	25m s^{-1}
半径 R	500km	200km?
遠心力 F_A	0.45×10^{-3}	3.12×10^{-3}N
コリオリ力 F_C	1.22×10^{-3}	2.04×10^{-3}N
回転周期 T_A	58 時間	14 時間
慣性周期 T_C	21 時間	21 時間
	地衡風的	旋衡風的

2007 年台風 4 号 (7 月 13 日)

fe_07071412.jpg

typhoon.png

傾度風の分類

圧力傾度力に対して，コリオリ力と遠心力のどちらが重要か．
(圧力傾度力が弱い＝慣性振動的なバランスを除く)

- 高気圧は必ず時計回りで，地衡風的
- 低気圧は時計回りならば，旋衡風的
  反時計回りならば，地衡風的なものと旋衡風的なものがある

力を比べてもよいが，周期を比べる (慣性周期は緯度のみで決まる)．

遠心力 $F_A = \frac{mV^2}{R}$　　コリオリ力 $F_C = fmV$

回転の周期 $T_A = \frac{2\pi R}{V}$　　慣性周期 $T_C = \frac{2\pi}{f}$

$$\begin{cases} F_A > F_C \quad (T_A < T_C) \cdots \text{旋衡風的 (1 周が慣性周期より速い)} \\ F_A < F_C \quad (T_A > T_C) \cdots \text{地衡風的 (1 周が慣性周期より遅い)} \end{cases}$$