

流体地球科学 第7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/2019chiba/>
fujio@aori.u-tokyo.ac.jp

2020/1/24

最終更新日 2020/01/20

前回のポイント

傾度風 (圧力傾度力, コリオリ力, 遠心力のバランス)

- 一般の高気圧や低気圧は地衡風だが, 低気圧は旋衡風 (地衡風と同じ向き) に遷移する

エクマン流 (粘性とコリオリ力のバランス) (海底, 海面エクマン層)

- 実際の流れは, エクマン流+地衡流 (圧力傾度力とコリオリ力)
- 応力が加えられる場所から遠ざかるにつれ, $\left\{ \begin{array}{l} \text{速さは, 減衰} \\ \text{向きは, 時計回り (北半球)} \end{array} \right.$
- エクマン輸送 (エクマン流の鉛直積分. コリオリ力と応力がバランス)
 - 風応力に対して, エクマン輸送は, 直角右向き (北半球)
 - 海底 (エクマン流と地衡流が相殺) では, 地衡流の斜め後方 45 度で, 低圧向き
- エクマン湧昇: 水平流を補償するため, エクマン層に流入出する鉛直流

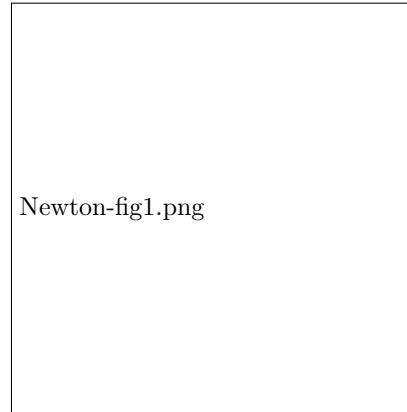
風成循環

- 表層の海流は, 風が作るが, 風と同じ向きに流れるわけではない.
- エクマン湧昇が作る海面高度が重要
 - 亜熱帯循環系 (貿易風と偏西風の間...黒潮) ← 負の湧昇, 海面は高い
 - 亜寒帯循環系 (偏西風と極偏東風の間...親潮) ← 正の湧昇, 海面は低い

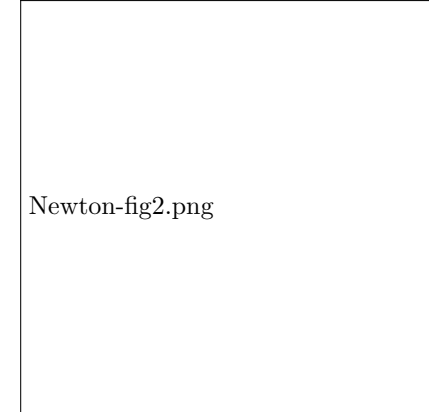
風成循環

もっとも一般的な説明 (たぶん, あまり正しくない)... 亜熱帯循環系の場合

- 偏西風と貿易風に挟まれた海域では, エクマン輸送で水が集まる
- 海面が盛り上がる → 外向きに水が動く → コリオリ力で右に曲がる
- 盛り上がった海面の周りに, 時計回りの地衡流ができる



Newton-fig1.png



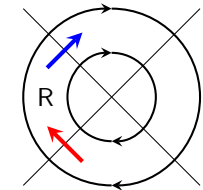
Newton-fig2.png

ニュートン別冊「海のすべて」

西岸強化

黒潮ができるには, 亜熱帯循環系が西側に寄ることが重要
ただし, あまり説明されない

西に寄る = 盛り上がった海面が西に動く



円錐状に海面が盛り上がっている (海面の勾配は一定)
→ 時計回り (高気圧と同じ) ※北半球

右図の領域 R (ドーナツの西側) に入出入りする水

- コリオリ係数が同じ → 流速はどこも同じ (等高線に沿う)
→ 赤矢印と青矢印が同じ値 → 海面の高さは変わらない
- コリオリ係数が北ほど大きい → 流速は南が大きい
→ 赤矢印が青矢印より大きい → 海面の高さが盛り上がる

循環系の $\left\{ \begin{array}{l} \text{西側の海面が上がる} \\ \text{東側の海面が下がる} \\ \text{北側, 南側は変化しない} \end{array} \right. \rightarrow \text{全体として, 西に動く}$

へこんだ海面 (反時計回り, 低気圧) でも, 南半球でも, 常に西に動く
※ ベータ効果

説明の問題点

力がバランスしていない (地衡流やエクマン流はバランス)
↓
最終的にどういう循環が形成されるか, 流速等が示せない

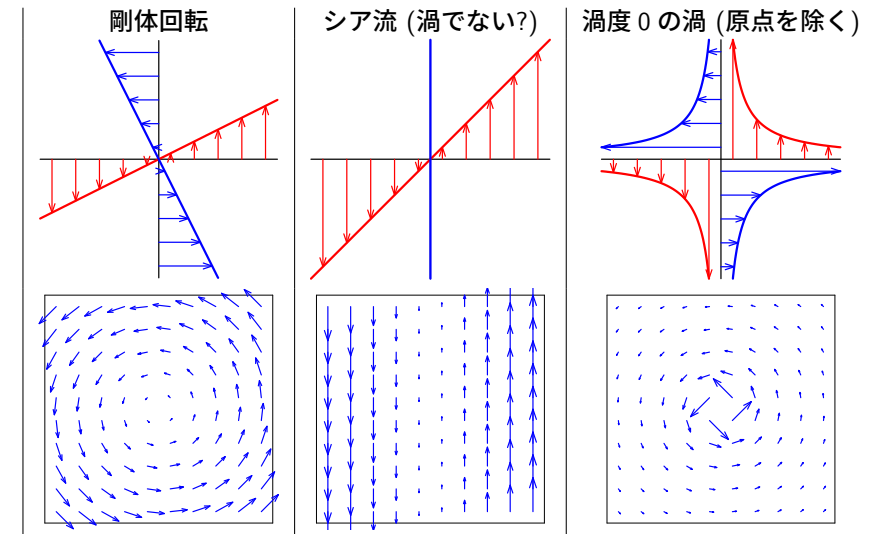
地衡流の場合

1. 高圧部から高圧部に動く
2. コリオリ力で右に曲がる
3. 等圧線に沿って動く (バランス→流速が計算できる)

海流は地衡流なので, すでに力はバランスしている
「渦度」(角運動量) を使う.

渦度の例

流体が自転しているかどうか → 水車が回る



渦度

- 地球が丸いため, 水平面での自転速度は緯度で異なる (コリオリ係数)
- 緯度が異なれば, 回っているように見える (コリオリ力はみかけの力)

流体の回り具合は「渦度」で調べる. 流速ベクトル $\mathbf{u} = (u, v, w)$ の回転

$$\zeta = \text{rot } \mathbf{u} = \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z}, \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right)$$

海洋や大気の場合, 水平面での回転が重要なので, z 成分を渦度と呼ぶ.

$\left\{ \begin{array}{l} \text{惑星渦度 } f = 2\Omega \sin \phi \text{ (地面の自転)} \cdots \text{慣性周期, 自転周期の半分} \\ \text{相対渦度 } \zeta \text{ (地面に対する自転)} \cdots \text{半回転に要する時間} \\ \text{絶対渦度 } f + \zeta \text{ (静止系からみた渦度) は, 保存する} \end{array} \right.$

- 剛体回転であれば, 渦度の大きさは周期を比べればよい
傾度風で行ったことと同じ (遠心力 \leftrightarrow 相対渦度)
亜熱帯循環系の1周 \cdots 数年~十年 \rightarrow 相対渦度は極めて小さい

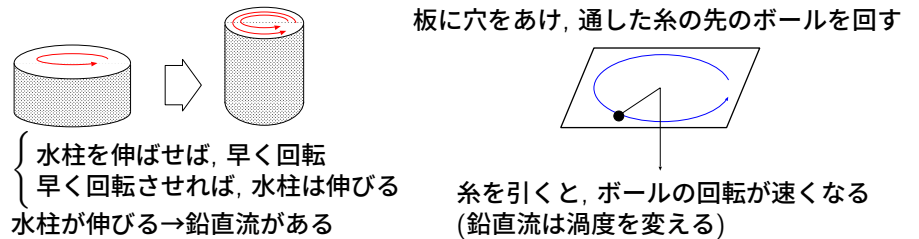
海洋では, 惑星渦度に比べて相対渦度は小さい
要するに, ほぼ地衡流であるということ
地衡流からのわずかなずれが相対渦度を作る

ポテンシャル渦度

ポテンシャル渦度 (渦位) \cdots 渦度を層厚で割ったもの $\frac{\omega}{h} = \frac{\zeta + f}{\eta + H}$
 η : 海面の高さ, H : 水深 (ジオイドからの上下の距離)

水柱のポテンシャル渦度は保存する (質量や回転が加わらない場合)

- 体積の保存と角運動量 (渦度) の保存から導かれる
- 時間が経っても別の場所に移動しても, 同じ値



普通の流体力学 (惑星渦度は相対渦度に比べて無視できる) では $f = 0$
「初期に渦度ゼロならば, ずっと渦度ゼロ」(流体の厚さは関係しない)

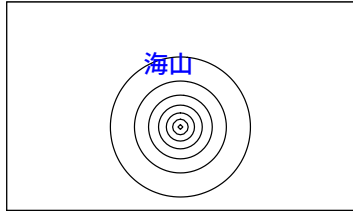
地衡流と f/H

ポテンシャル渦度は移動しても変化しない \Leftrightarrow 変化しないように移動する

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{海面の高さ変化 } \eta \text{ に比べて, 水深 } H \text{ が十分に大きい} \rightarrow \frac{\omega}{h} = \frac{\zeta + f}{\eta + H} \approx \frac{f}{H} \\ \text{相対渦度が惑星渦度よりも十分に小さい (地衡流)} \end{array} \right.$$

※ 地衡流は $\frac{f}{H}$ の等値線に沿って流れる. (等圧線と $\frac{f}{H}$ が一致する)

f が一定, H が変化

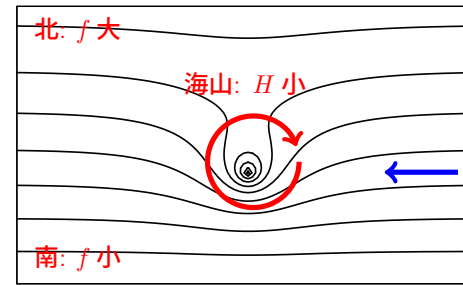


f が変化, H が一定



- f に比べて, H の変化が大きい \rightarrow 等深線に沿う
 - ※ 黒潮 (東シナ海, 日本南岸)
 - ・海底が盛り上がり, くぼんだりした場所を迂回して, 流れる
- f に比べて, H の変化が小さい \rightarrow 同じ緯度を流れる (緯線に沿う)
 - ※ 黒潮続流 (ほぼ東向き, 水温躍層の上)

西向きと東向きの違い



海山がある場合の f/H の等値線 (海山上は周囲よりも f/H が大きい)

水柱は, $\left\{ \begin{array}{l} f/H \text{ に沿うと, 海山の南側を流れる} \\ \text{海山に乗り上げると, 海山の回りに時計回りの循環 } (\zeta < 0) \text{ を作る} \end{array} \right.$

- 西向きの流れ \rightarrow 両者は整合的であり, スムーズな流れ
- 東向きの流れ \rightarrow うまく合わない (蛇行する)
 - ヒマラヤを越えるジェットストリーム
- ※ 窪地の場合や南半球の場合でも, 西向きは整合的, 東向きは合わない

相対渦度

$\frac{f + \zeta}{H}$ が変化しないとして ζ を計算.
(H は η に比べて十分に大きい)

- $\zeta = 0$ の水柱が水深 H_1 から水深 H_2 に移動
水柱のポテンシャル渦度は保存するので

$$\frac{f}{H_1} = \frac{f + \zeta}{H_2} \rightarrow \zeta = \frac{H_2 - H_1}{H_1} f$$

北半球 ($f > 0$) で深い側に移動すると, $\zeta > 0$

水柱は反時計回りに回転

(窪地では等深線に沿って反時計回りの流れ)

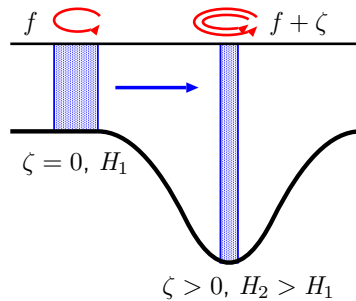
逆に, 海山では時計回りの流れ ※ 常に浅い側を右手に見る (南半球は逆)

- 水深一定で, 水柱が南北に移動する場合

$f + \zeta = \text{一定}$ なので, 北に移動する (f が増える) と $\zeta < 0 \rightarrow$ 時計回りの循環

逆に, 相対渦度が 0 でない水柱 (たとえば, $\zeta > 0$) が地衡流に変わるには

- 浅いところに移動
- 北に移動



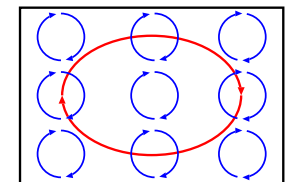
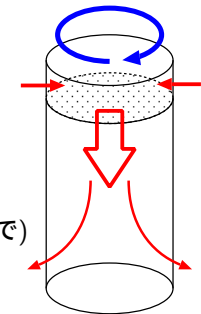
風が渦度を与える場合

海面に時計回りの風 (負の相対渦度) が吹く

ポテンシャル渦度 $\frac{\omega}{h}$ を考える (北半球)

- エクマン輸送の「収束」が起き, 負のエクマン湧昇 (下降流) が生じる
- 下層が縮む (横に広がる) $\rightarrow h$ が減少
- 下層のポテンシャル渦度は不変 (風応力は加わらないので) $\rightarrow h$ が減少しただけ, ω も減る (負の $\zeta \rightarrow$ 時計回り)

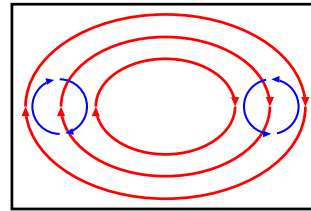
結局, 時計回りの風が時計回りの流れを作った



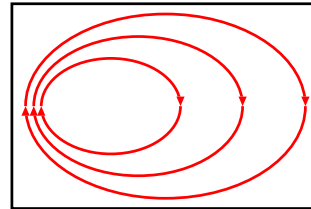
西岸強化

水柱が南北に移動すると惑星渦度に変化
→ 相対渦度が生まれる

- 海の東側: 南向き → 正の渦度 (風を打ち消す)
※ 風の渦度とバランス
- 海の西側: 北向き → 負の渦度 (風と同じ)
負の渦度が増加 → 強い流れができる
※ 海底摩擦が作る正の渦度とバランス



↓ 西岸強化



西側では強められ, 東側では弱められる
(流量は同じなので, 幅は西が狭く, 東が広い)
→ 循環は西に寄る (西岸強化)

南半球でも, 亜寒帯循環系 (正のエクマン湧昇) でも, 海の「西側」が強められる.

※ 西側の強い流れ: **西岸境界流**

黒潮は北太平洋の亜熱帯循環の西岸境界流 (親潮は亜寒帯循環).

黒潮は風が作るのではなく, 風で南に流された水が北に戻っているだけ.

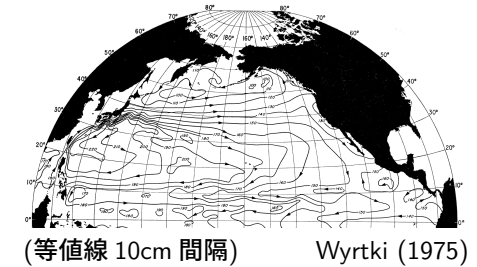
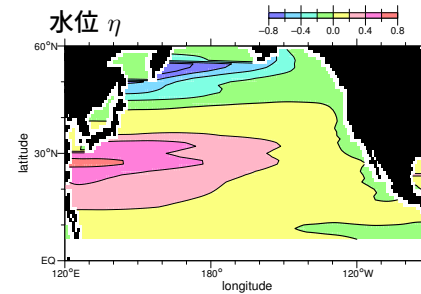
水柱は循環を一周すると, 惑星渦度はもとの値.

→ 風が与える渦度は, 西岸境界流の海底摩擦で失われる.

海面の高さの比較

風応力の分布から計算
(スベルドラップ平衡)

観測した水温・塩分から密度を求めて, 静水圧により海面圧力を計算



(等値線 20cm 間隔)

どちらも, 太平洋の西側は東側にくらべて, 80cm 高い

スベルドラップ平衡

エクマン湧昇による水柱の伸縮と, 南北移動による惑星渦度の変化がバランス

$$\frac{f}{H} = \frac{f + \beta \Delta y}{H + w_e \Delta t} \rightarrow v = \frac{\Delta y}{\Delta t} = \frac{f w_e}{\beta H}$$

$\beta = df/dy$ (コリオリ係数の南北勾配), w_e : エクマン湧昇

$f=10^{-4}$, $\beta=10^{-11}$, $w_e=10^{-6}$, $H=10^3$ とすれば, $v=0.01$ m/s

スベルドラップ輸送 ($vH=10$ m²/s) ⇔ エクマン輸送 (1 m²/s)

東西方向に積分すると, 循環の流量になる

- ⎧ 亜熱帯循環 $w_e < 0$ では, $v < 0$ → 海面の高さは西向きに増加
 - ⎧ 亜寒帯循環 $w_e > 0$ では, $v > 0$ → 海面の高さは西向きに減少
- 西端で元に戻る (西岸境界流)

スベルドラップ平衡の流れの幅 ← 海の幅 (太平洋: 1万 km)

西岸境界流の幅 (黒潮: 100km) → 流速 1m/s