

第4回：基礎論（海洋編）

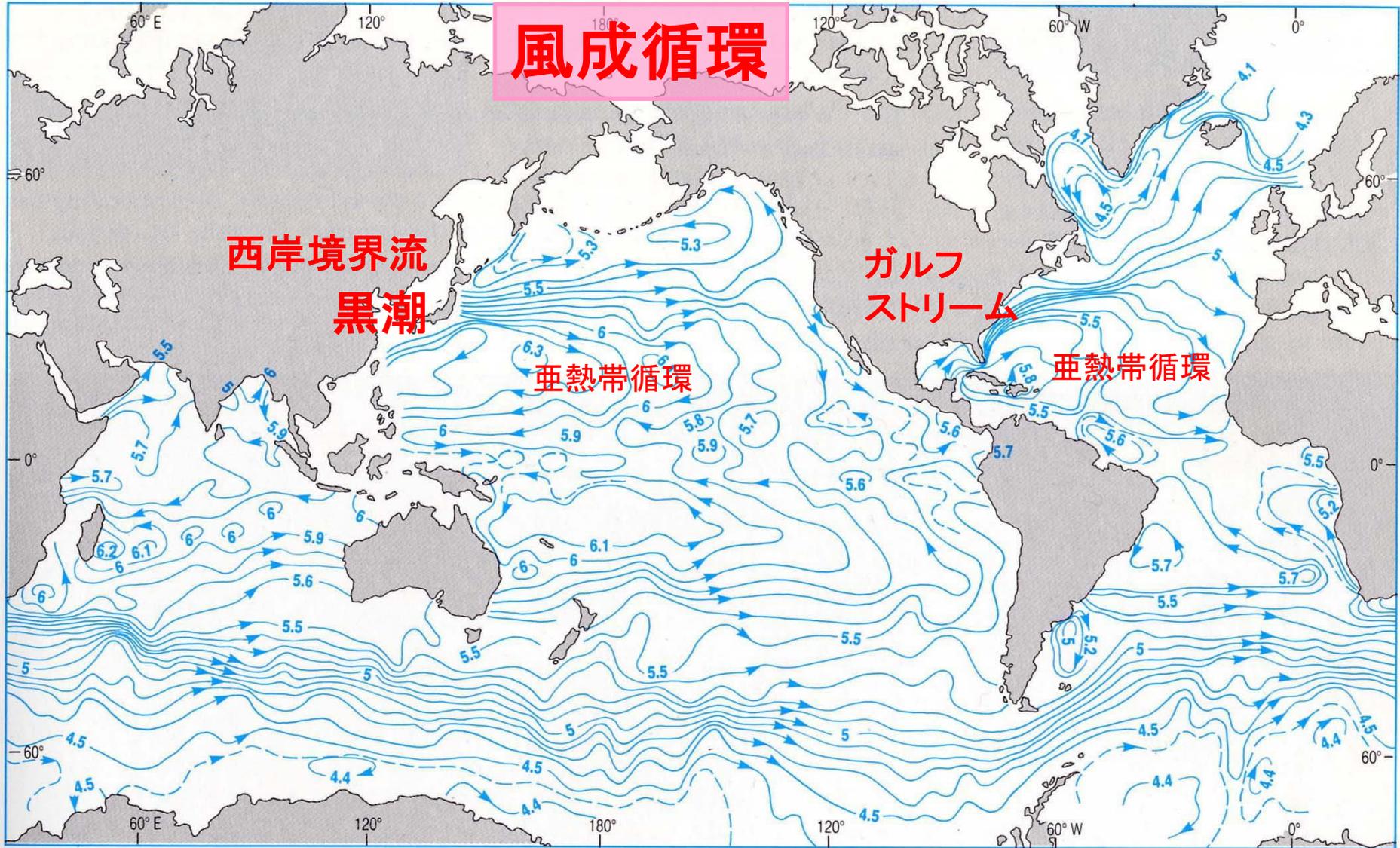
- 渦位保存則（＝淺水波方程式）
- 風成循環・西岸強化流
- 深層循環

海洋の大循環

- 熱塩循環：深層まで及ぶ
数cm/s程度の弱い流れ：2000年の時間スケール
密度差で駆動 ← 熱塩のやり取り
海水の性質・トレーサーからわかる
- 風成循環：表層～1000m位
0.5-1.5 m/sの強い流れ
風応力(そのcurl)で駆動 ← 運動量のやり取り
地衡流からわかる

地衡流から求まる表層流

風成循環



力学高度 (Geopotential anomaly)
(Dynamic depth)

1500dbar基準

浅水波方程式 (shallow water eq.)

大～中規模の海洋の運動を記述する

時間変化 コリオリ力 圧力傾度力

$$\left[\begin{array}{l} \frac{\partial u}{\partial t} - fv = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} \quad (= -g \frac{\partial \eta}{\partial x}) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + fu = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} \quad (= -g \frac{\partial \eta}{\partial y}) \\ \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(hu) + \frac{\partial}{\partial y}(hv) = 0 \end{array} \right]$$

水平方向の運動方程式

(u, v) : x, y 方向の流速
 f : コリオリパラメータ
 P : 圧力, ρ : 密度,
 η : 表面変位, h : 水深

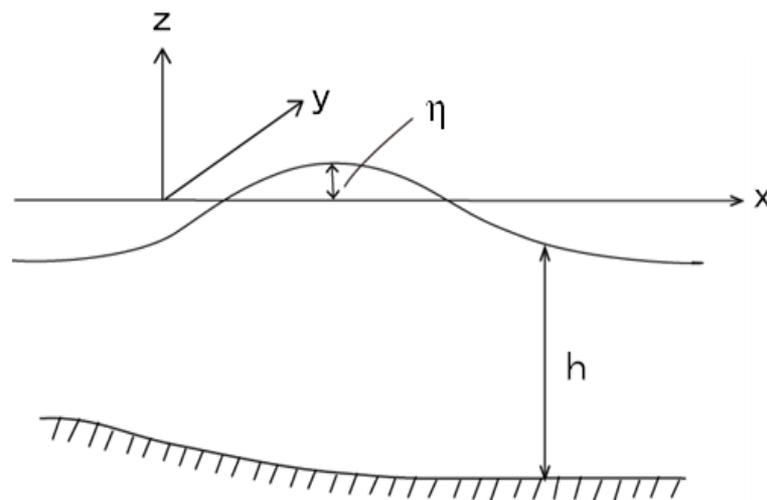
連続の式

上3つの式から下に示す渦位保存則が導かれる

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{f + \zeta}{h} \right) = 0 \quad \zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$$

渦位

f : 惑星渦度 (地球が自転するために持つ渦度)
 ζ : 相対渦度 (地球上から見た流体粒子の渦度)



浅水波方程式 = 渦位保存則
定常: 地衡流の関係式

渦位 (ポテンシャル渦度)
potential vorticity

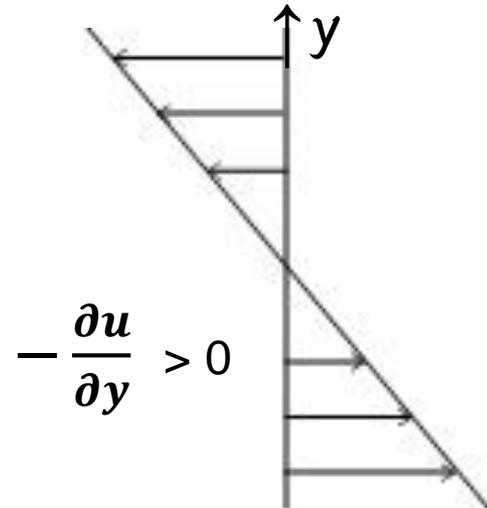
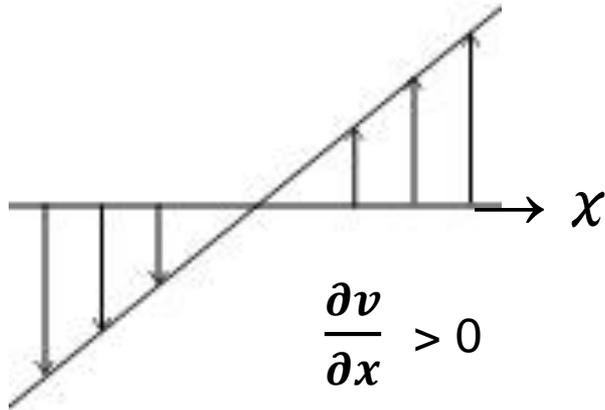
海洋の流れ (中～大規模スケール) は、この渦位 $(f+\zeta)/h$ が保存することで決まる
→ 海洋・大気力学の鉄則といってよい。

風成循環・西岸境界流も渦位保存から導かれる

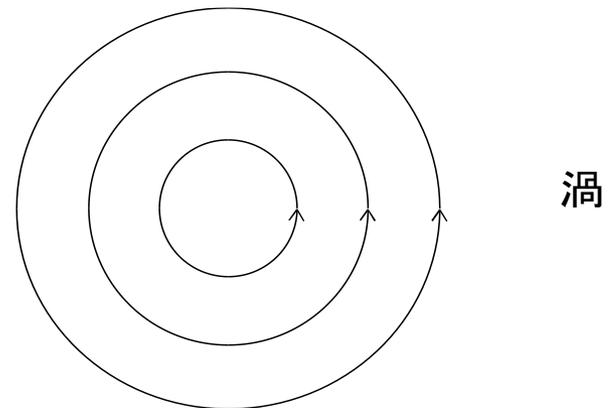
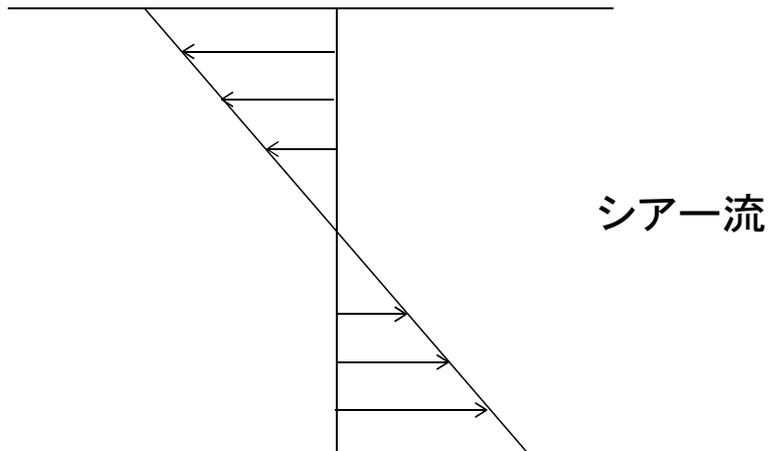
深層循環も渦位保存から導かれる

ロスビー波・地形成ロスビー波・ケルビン波・赤道波といった海洋波動も
渦位保存から導かれる

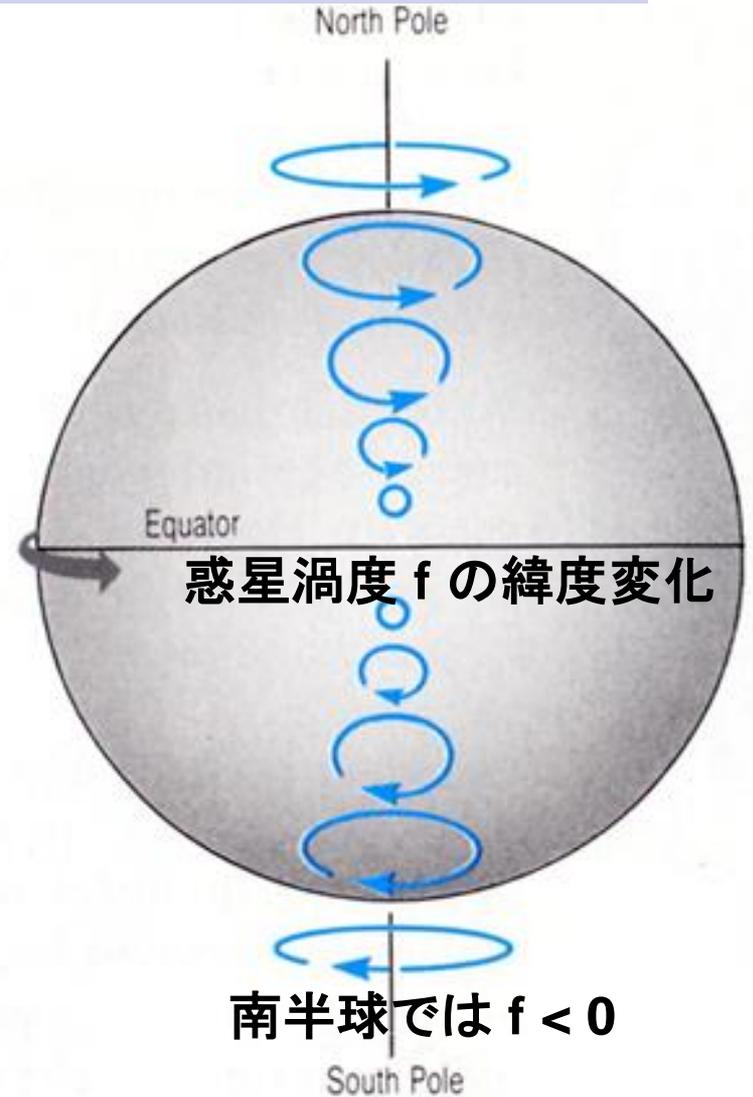
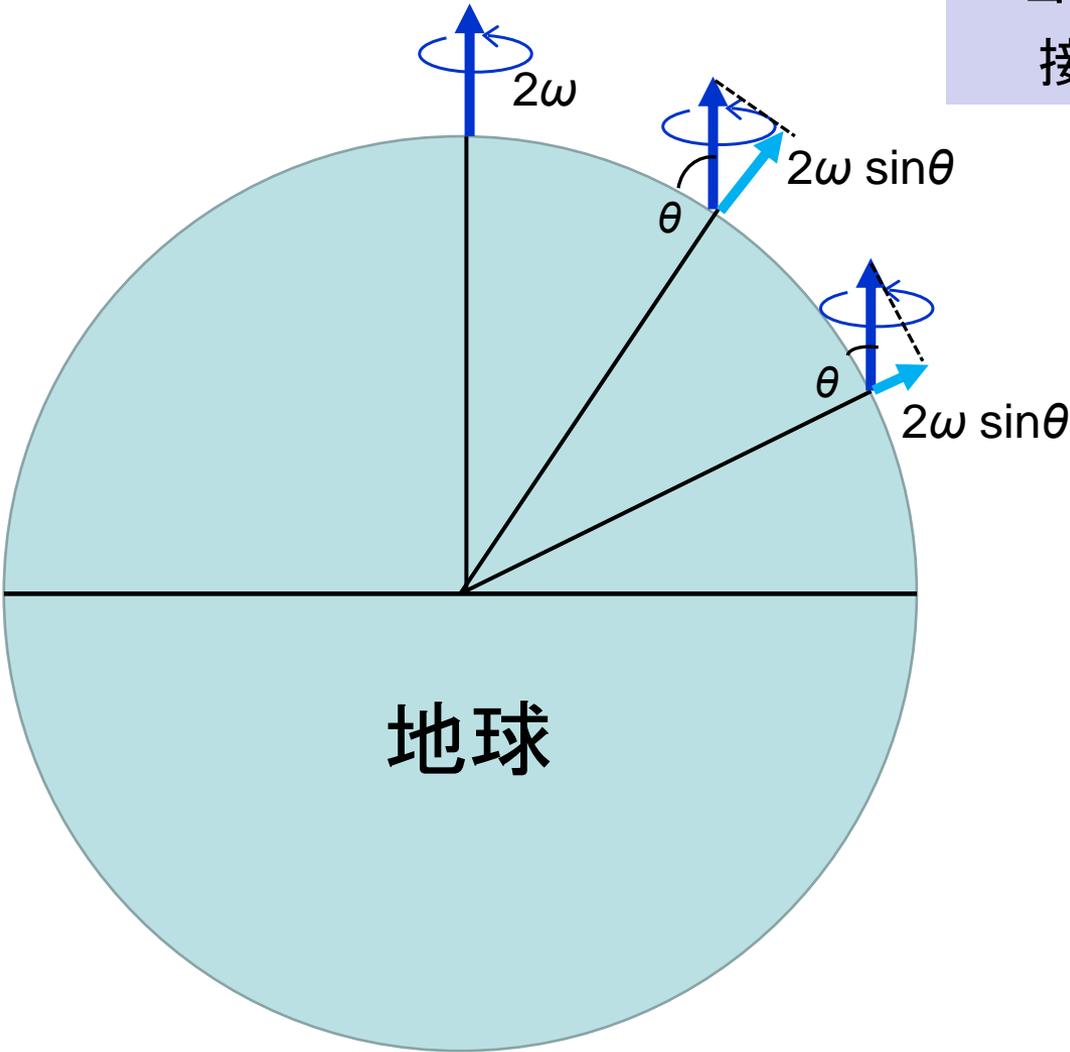
相対渦度 $\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$ とは \rightarrow 地球上の座標から見た渦度



正の渦度：反時計回り

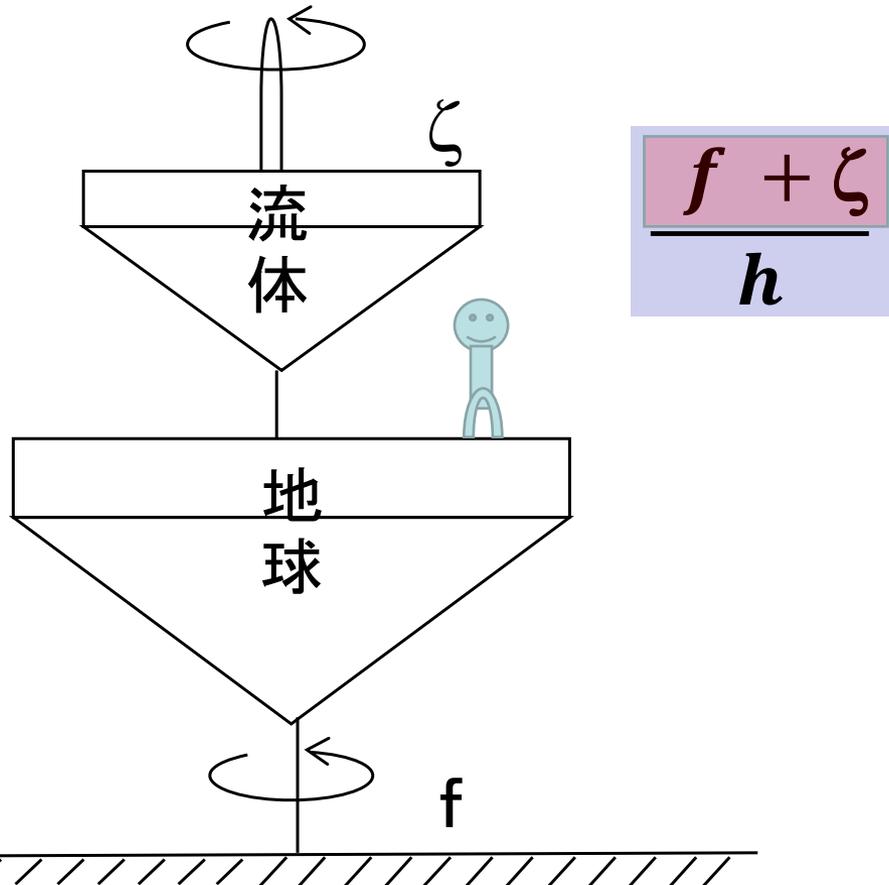


惑星渦度 f :
コリオリパラメータと同じ
接平面の回転角速度の2倍

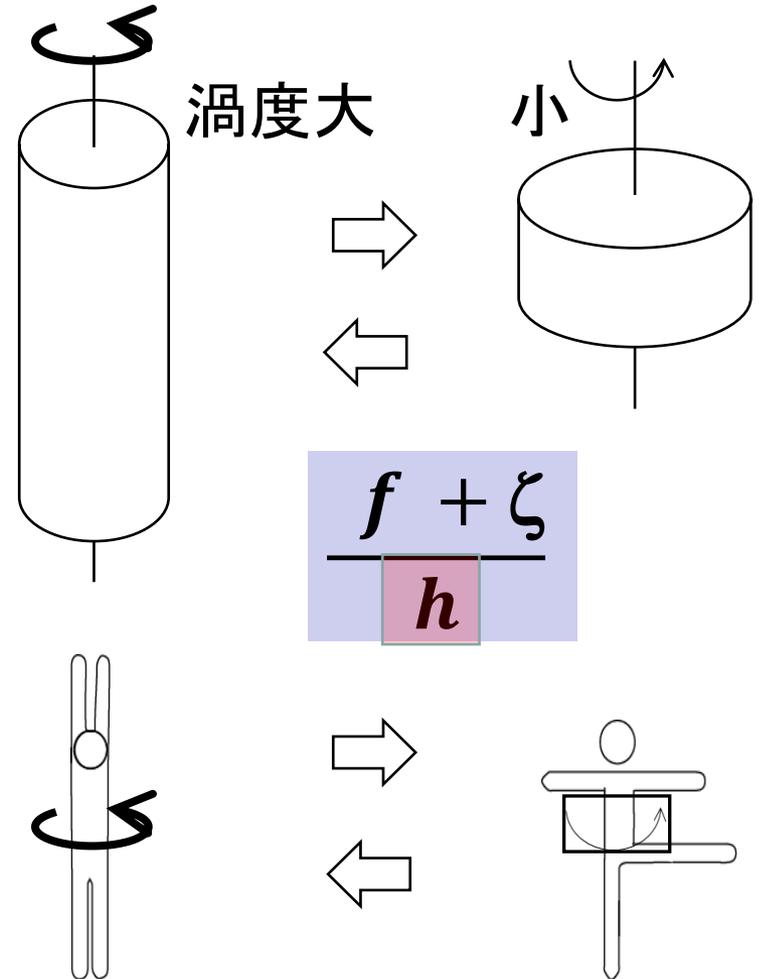


惑星渦度(f) と相対渦度(ζ)のイメージ

h を一定とすると $f + \zeta$ (絶対渦度)が一定
摩擦がないとすると、 f が小さくなると
(赤道に近づくと)、
地球上から見て ζ (相対渦度)は増加



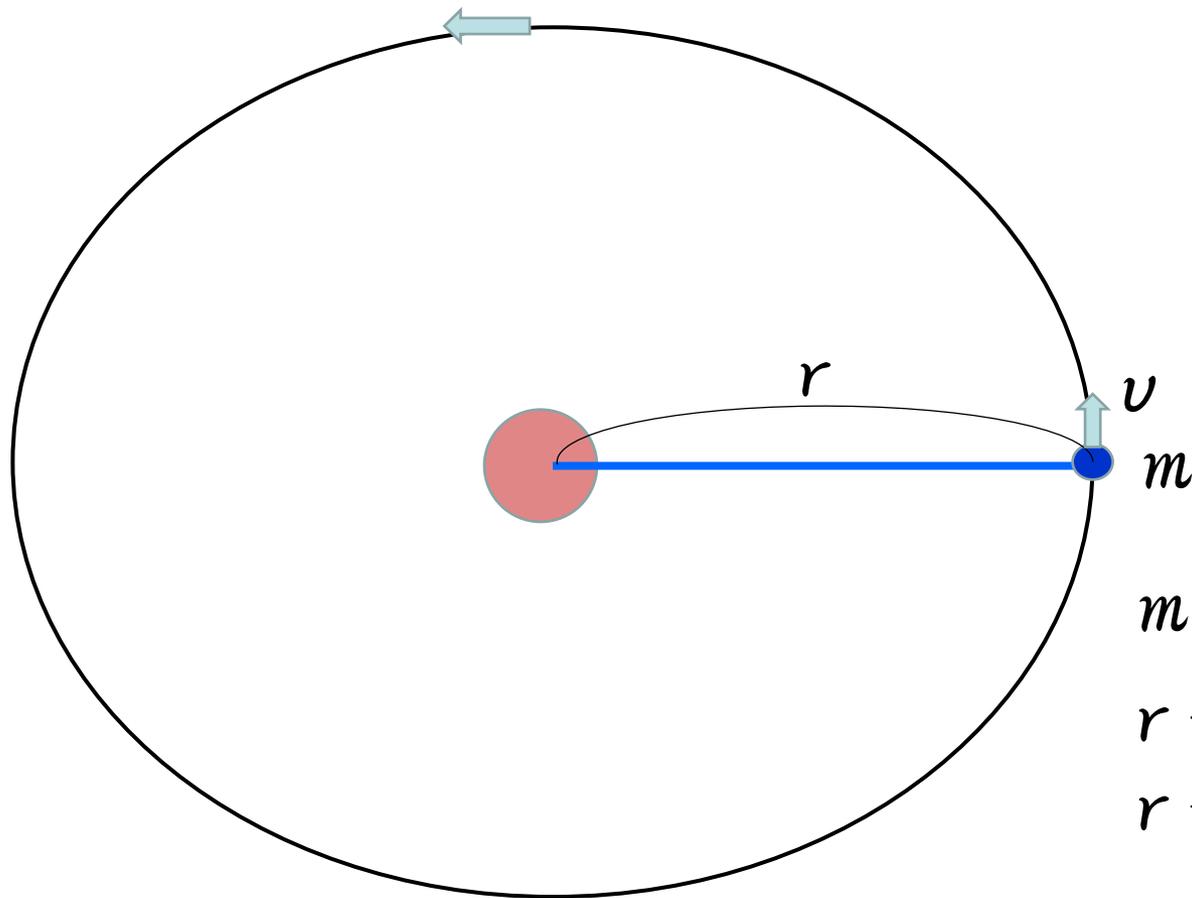
水柱の厚さ(h)と渦位($f + \zeta$)/ h が保存するイメージ



フィギアのスピンの同じ原理

渦位保存は角運動量保存のイメージ

惑星：人工衛星



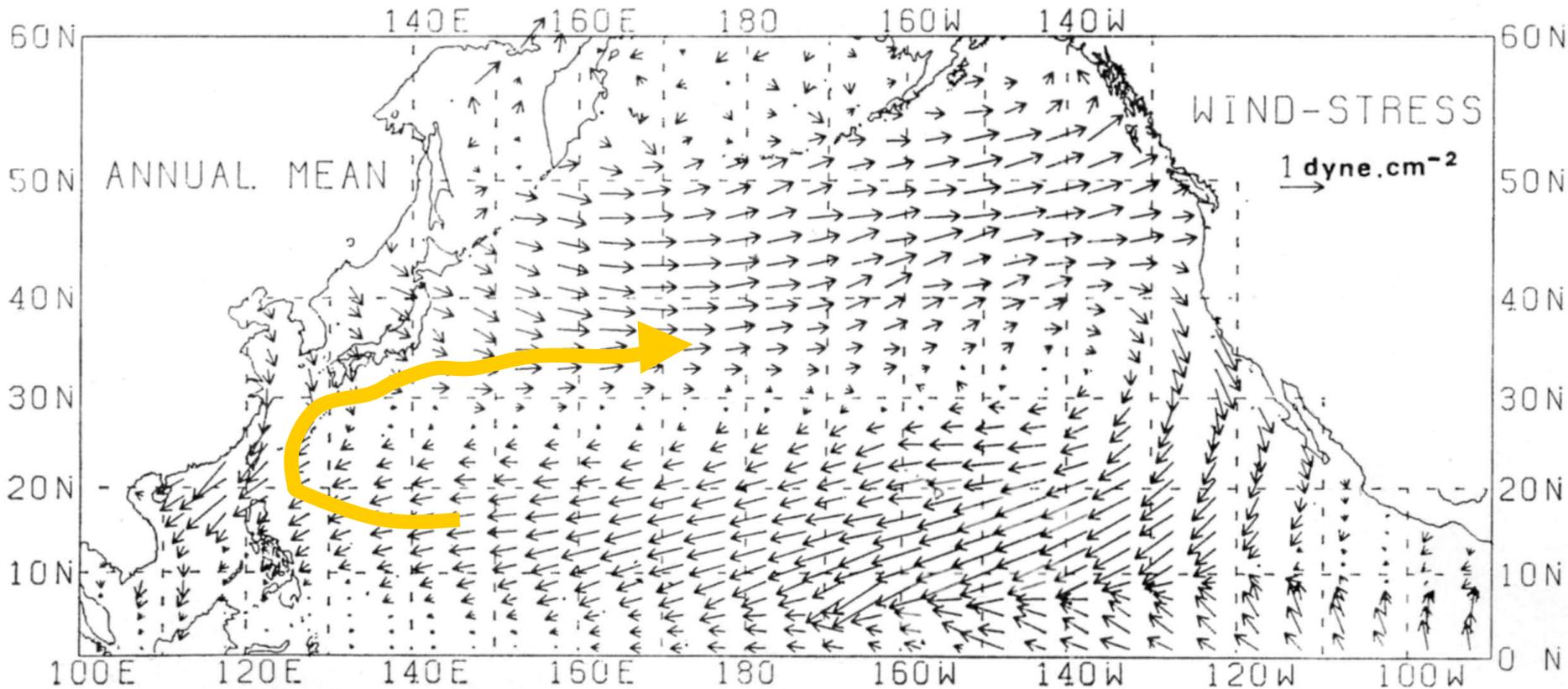


Fig. 3. Annual mean wind stress field.

年平均の風応力の分布

海流の流れの方向や強さは風とは必ずしも一致しない

- 一日以上の時間スケールで見ると、表層の水は風の方向に引っ張られて流されるのではない。
- 北半球では、表層の水は風下に向かって直角右方向に輸送される（南半球では直角左）。

エクマン輸送(Ekman transport)

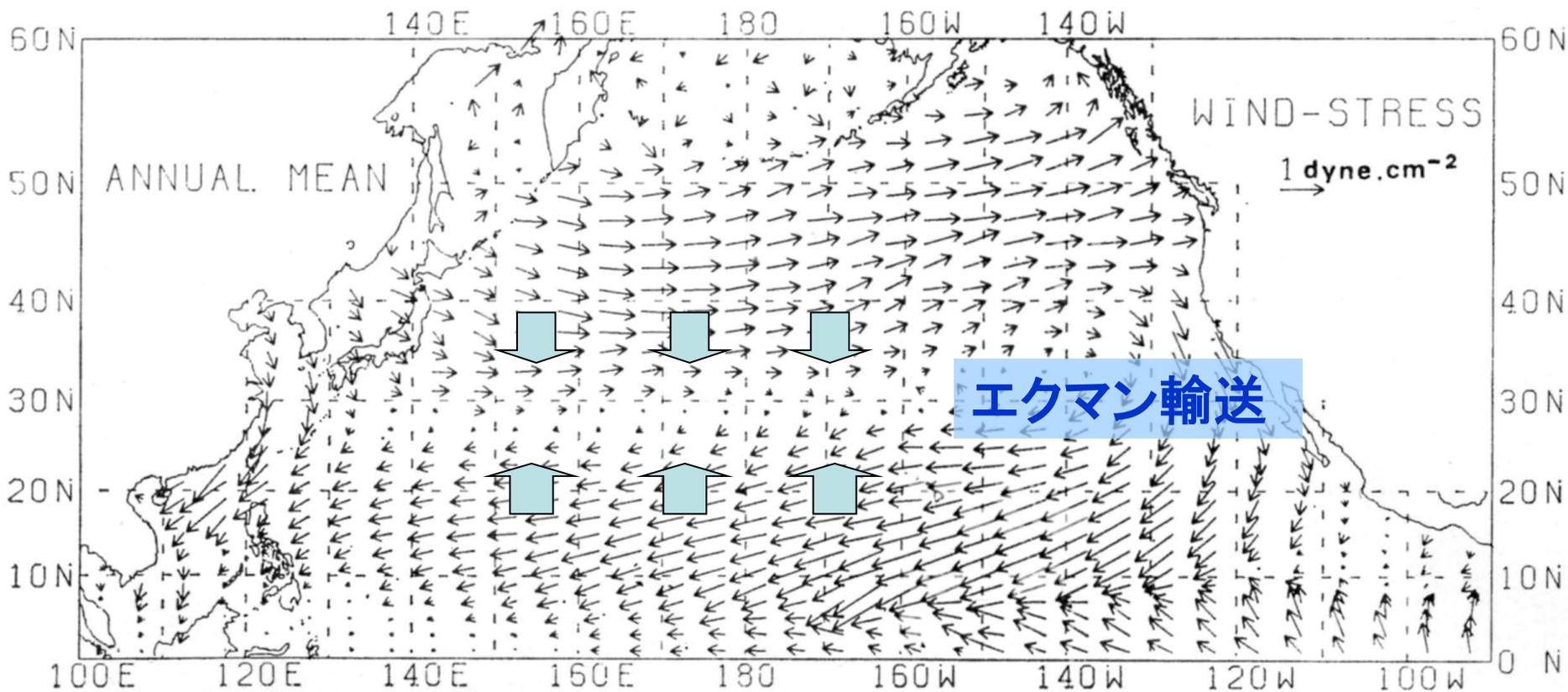
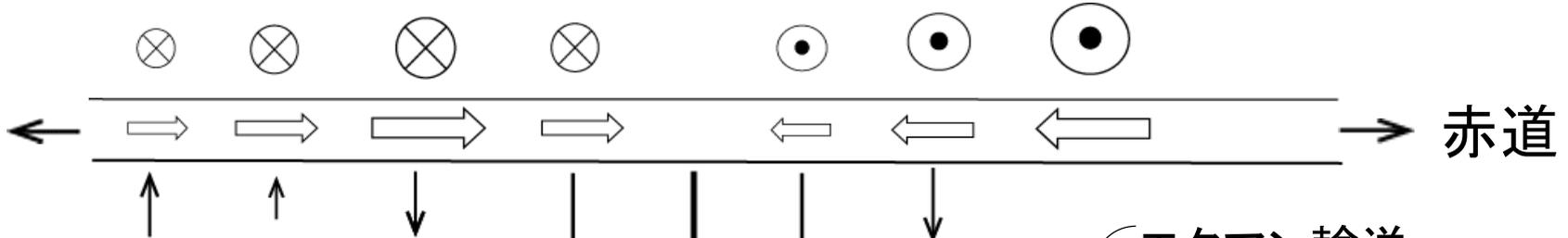


Fig. 3. Annual mean wind stress field.

年平均の風応力の分布

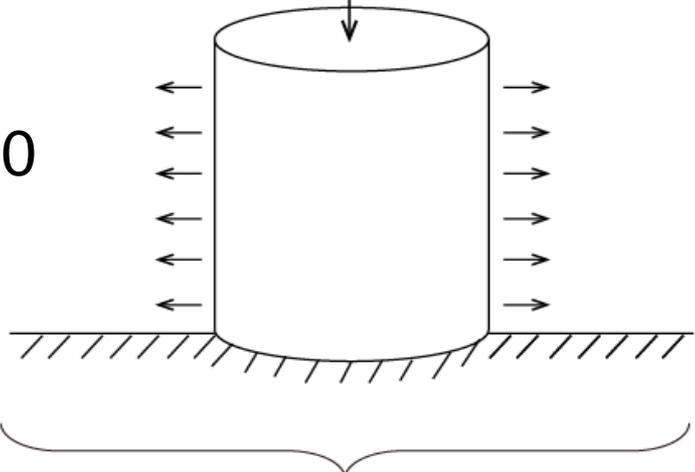
偏西風

貿易風(東風)



エクマン輸送
北半球では表層の水は
風に対して直通右方向に
運ばれる

北半球 $f > 0$



この領域(亜熱帯)では、
水柱は押し縮められる
($h \rightarrow$ 小の効果)

ζ に大きな変化がなく
 $\frac{f + \zeta}{h} = \text{一定}$ とするには、
 f を小さくする必要あり



そのためには f の小さい赤道方向へ
水柱が移動する必要がある

シェード＝エクマン輸送により表層水が収束する領域

Fig. 12. (continued)

＝水柱が押し縮められる＝渦位保存のためには南下

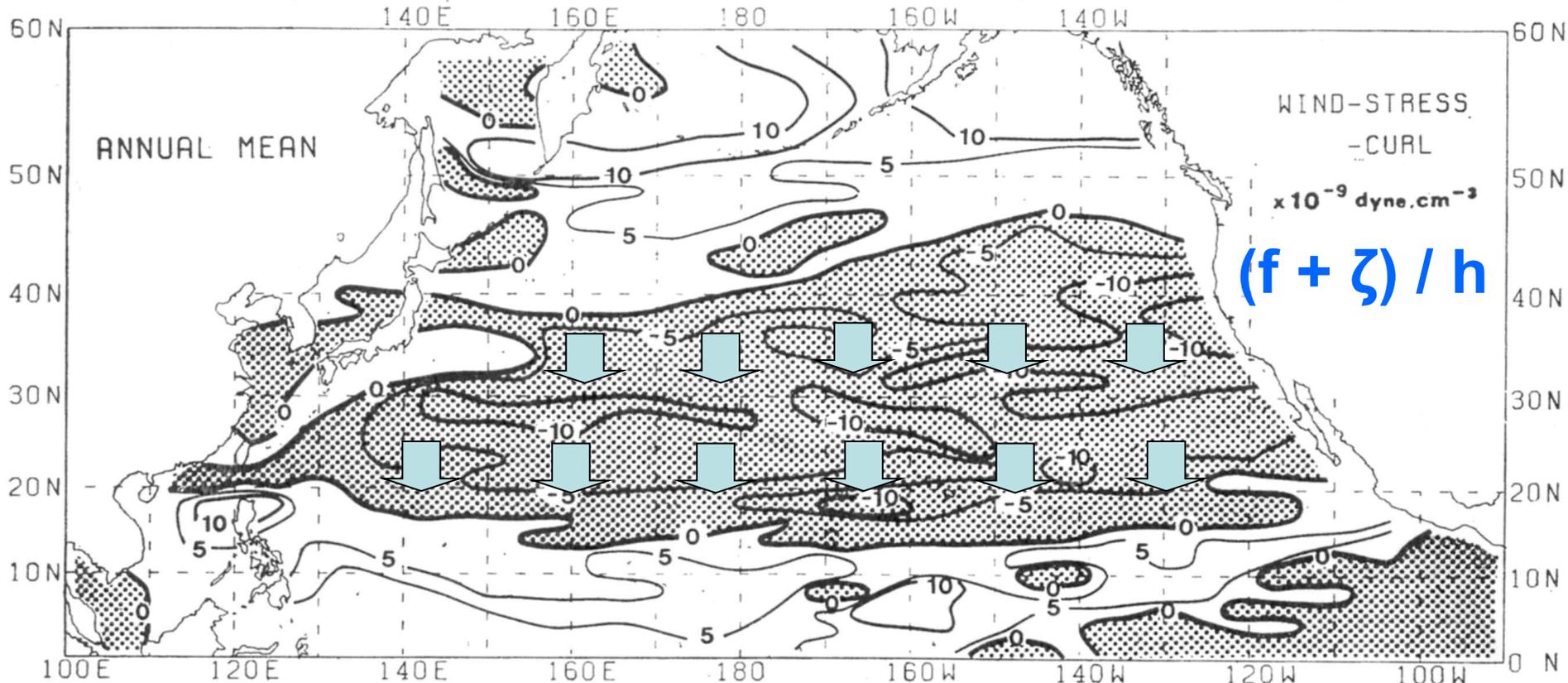
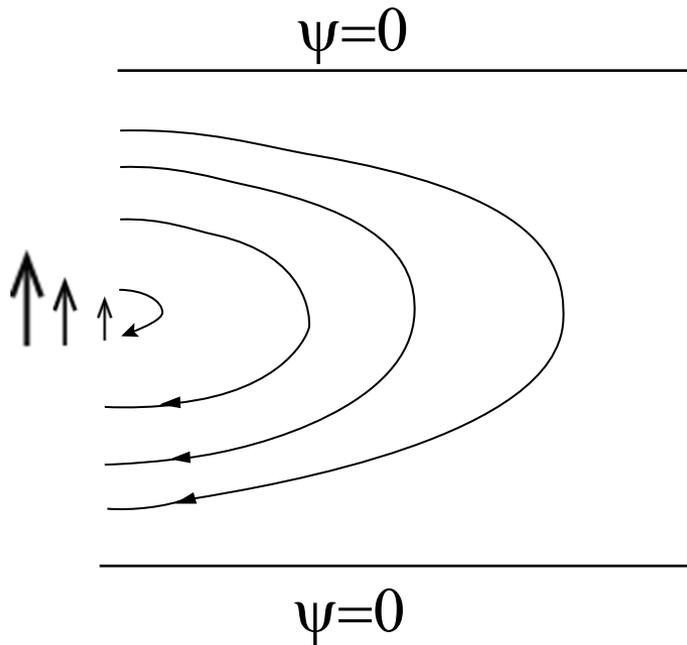


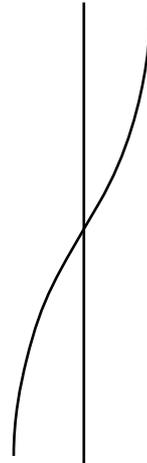
Fig. 13. The isopleths of wind stress curl computed from the annual mean wind-stress fields. The shaded area indicates negative curl (anticyclonic vorticity), while the rest is positive (cyclonic vorticity).

$$\text{Curl } \tau = (\partial \tau_y / \partial x - \partial \tau_x / \partial y)$$

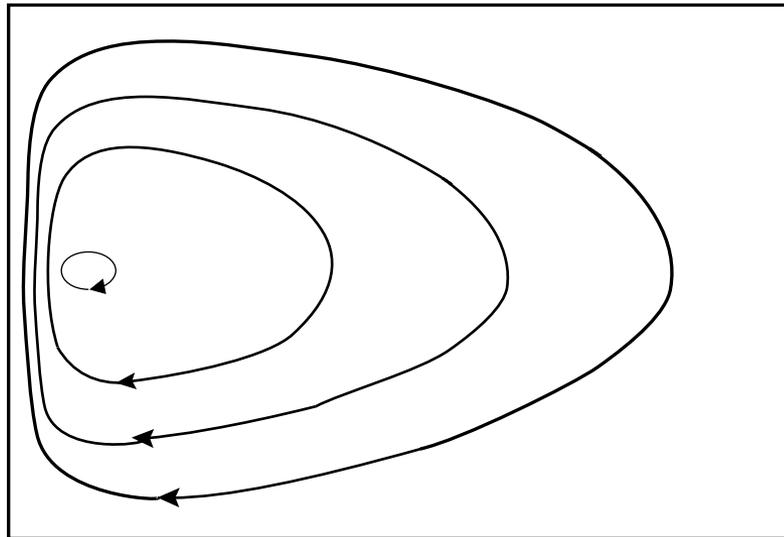
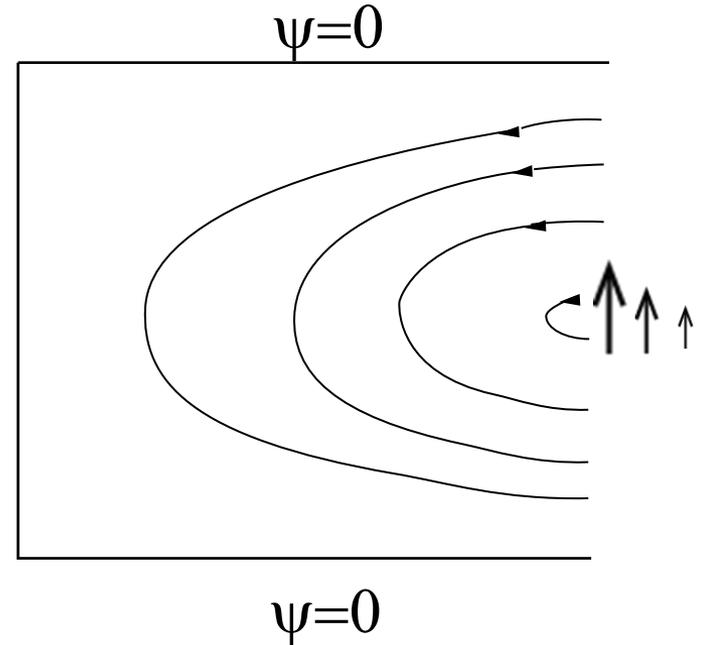
風応力カールの分布



$\psi=0$



$\psi=0$



Stommelの解

亜熱帯域では水は南へ移動する。
 その水を東か西の境界で北へ戻す必要あり。
 水が北へ行くと $(f+\zeta)/h = \text{一定}$ で
 f が大きくなるから $\zeta < 0$ になる必要あり
 (もとが $\zeta = 0$ とすると)
 下図でうまく解がつながるのは西岸に境界が
 ある場合(左上のケース)

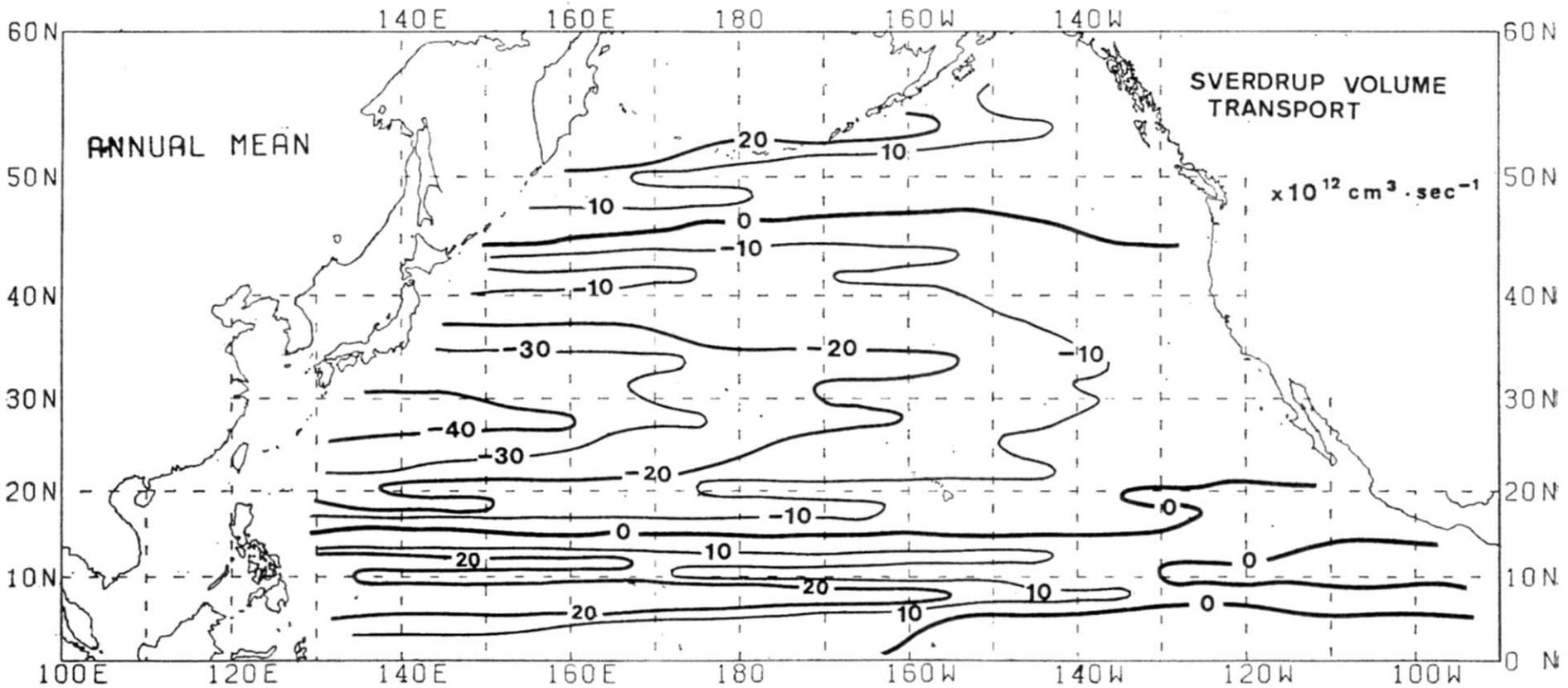
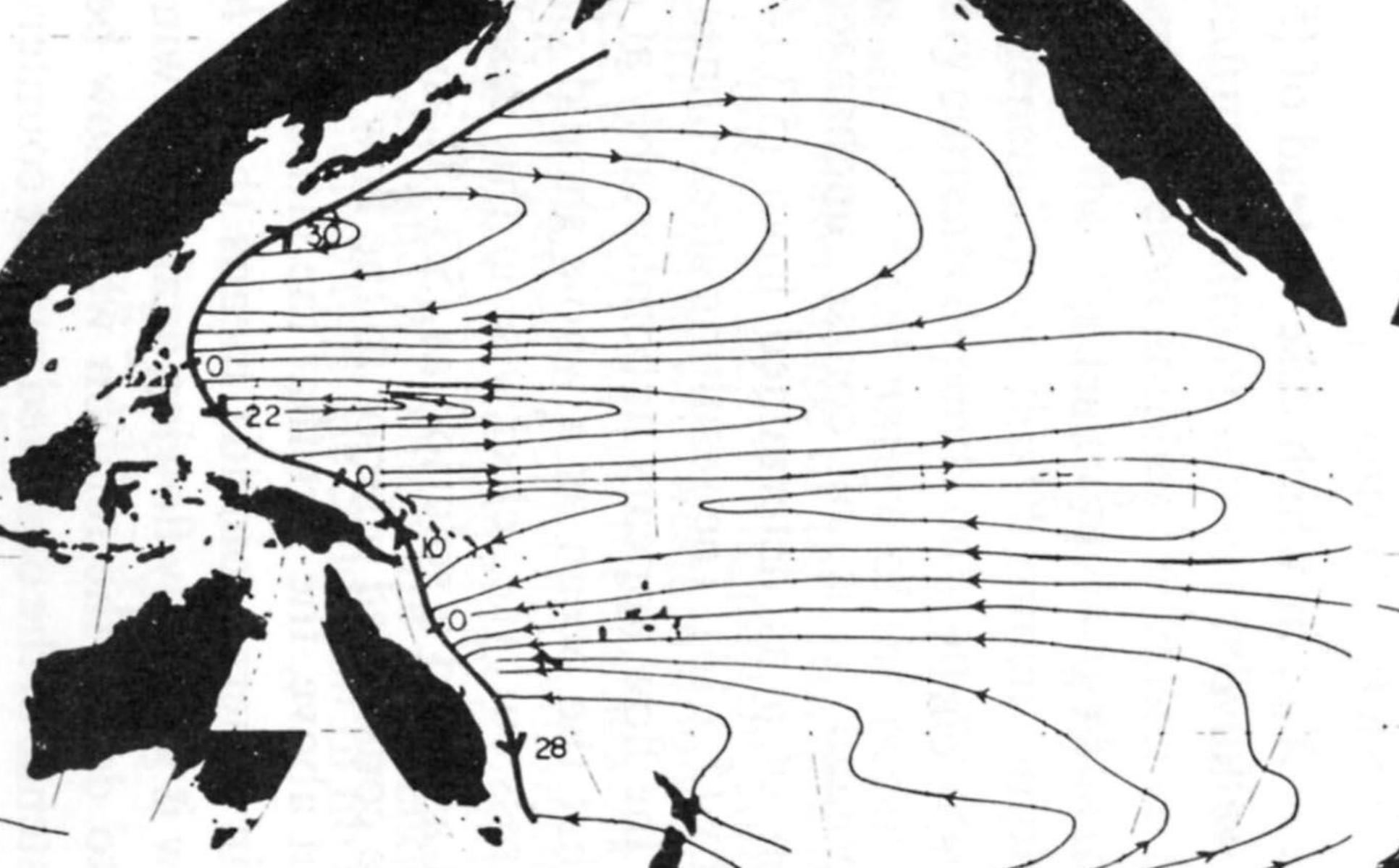


Fig. 15. The isopleths of the meridional Sverdrup volume transports integrated westward along each line of latitude from the eastern boundary. Positive values show northward transports and negative values southward transports.

Sverdrup volume transport (Sv)

正が北向き

緯度に沿って、渦位保存による南北輸送量を東海岸から積分したもの



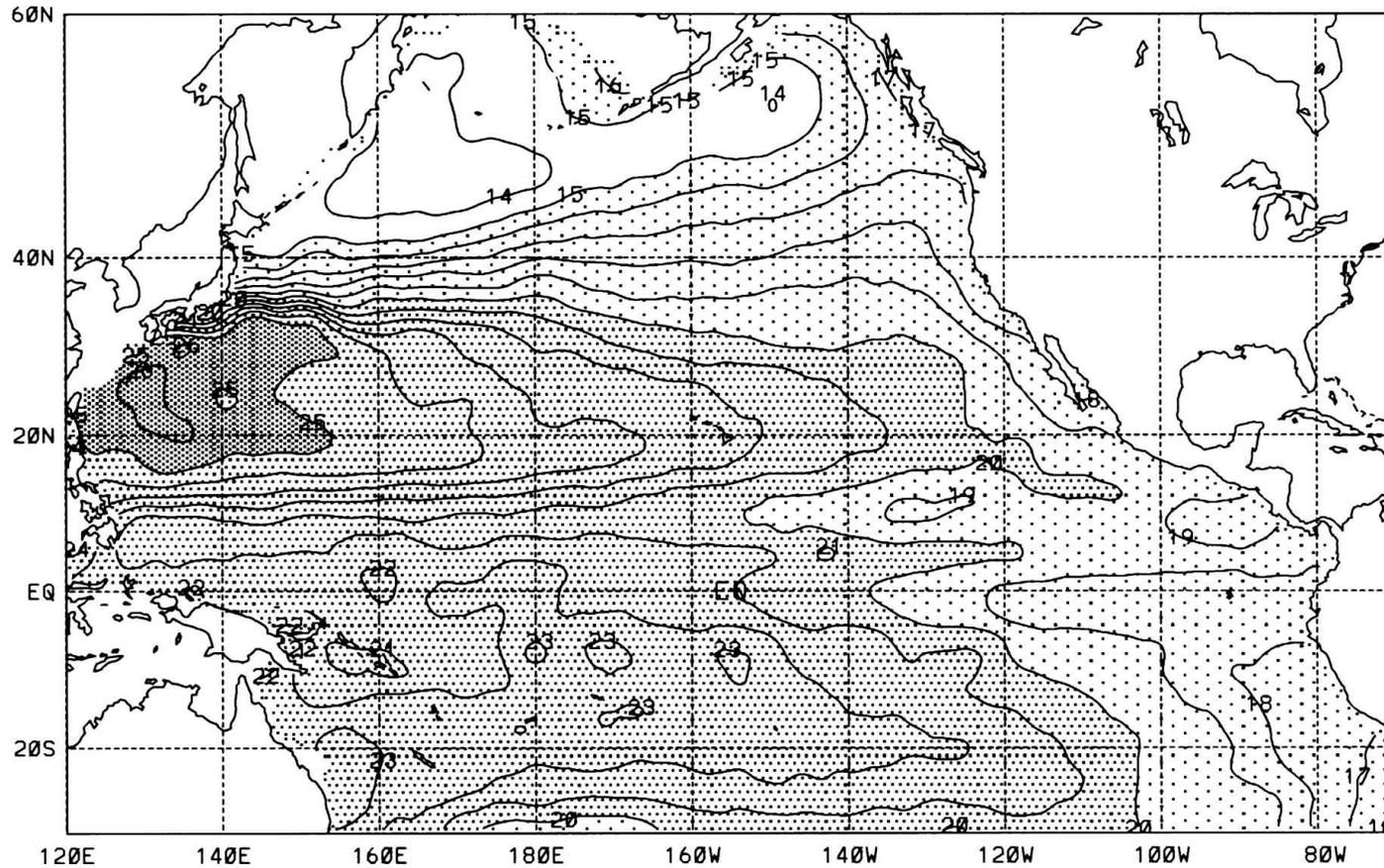
風から計算される、流れのパターン(流線)

Sverdrup streamfunction

Transport isolines are drawn

太平洋の年平均の力学的海面高度分布(単位:10 cm)

影が濃いほど海面高度が高い。



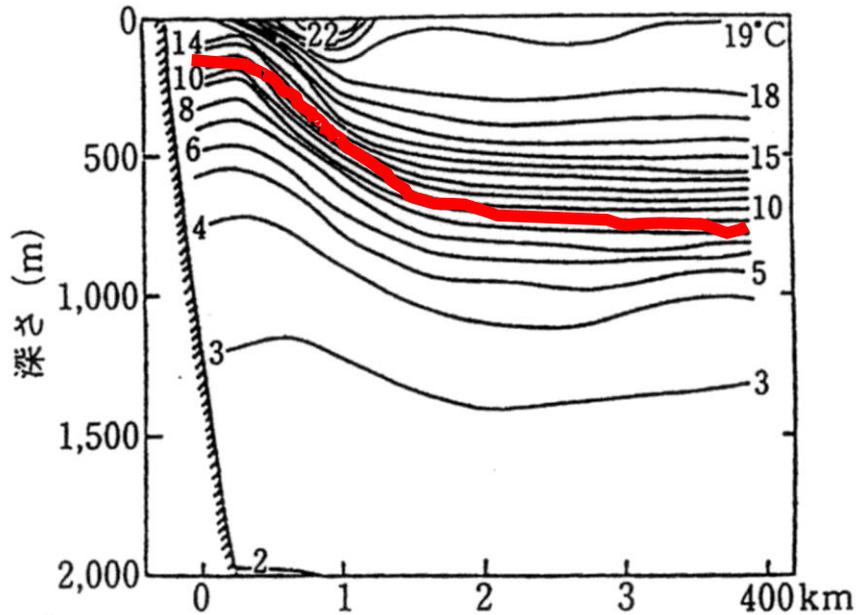
Kuragano & Shibata (1997, JO) より

現実の西岸境界流域(黒潮)の断面

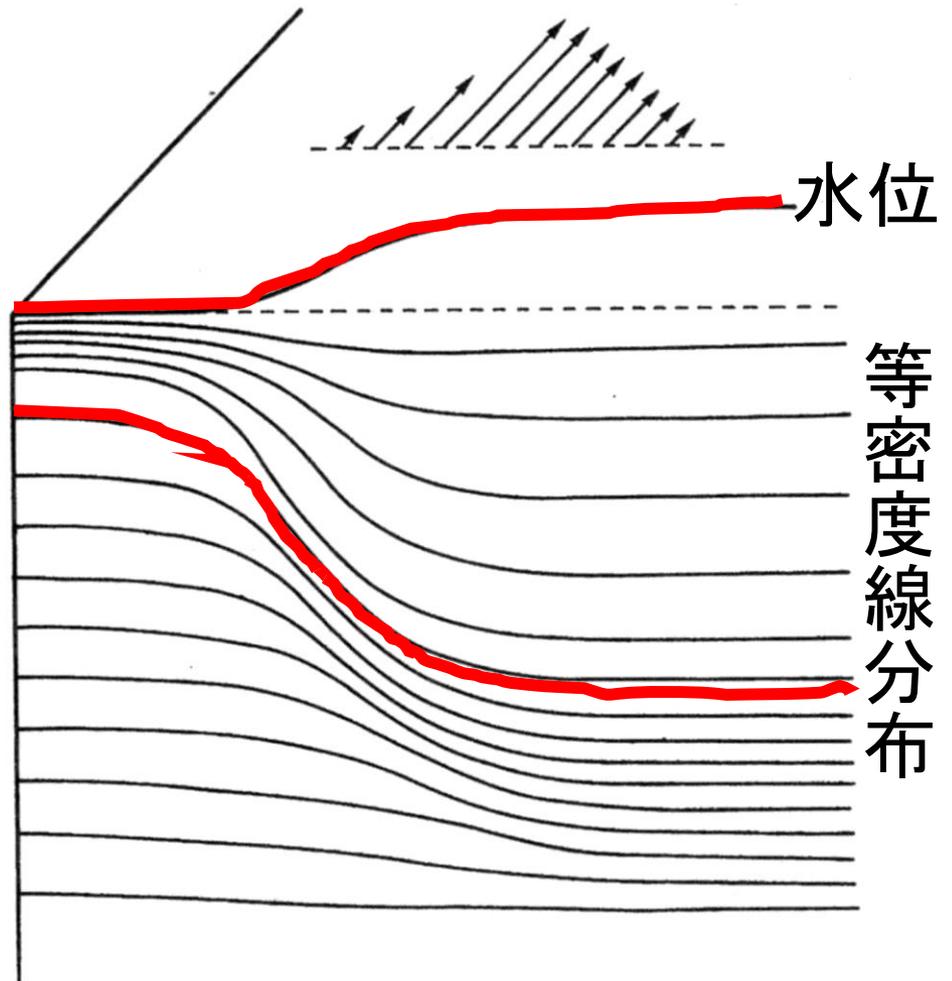
成層の存在

二層で近似する

黒潮の水温断面図



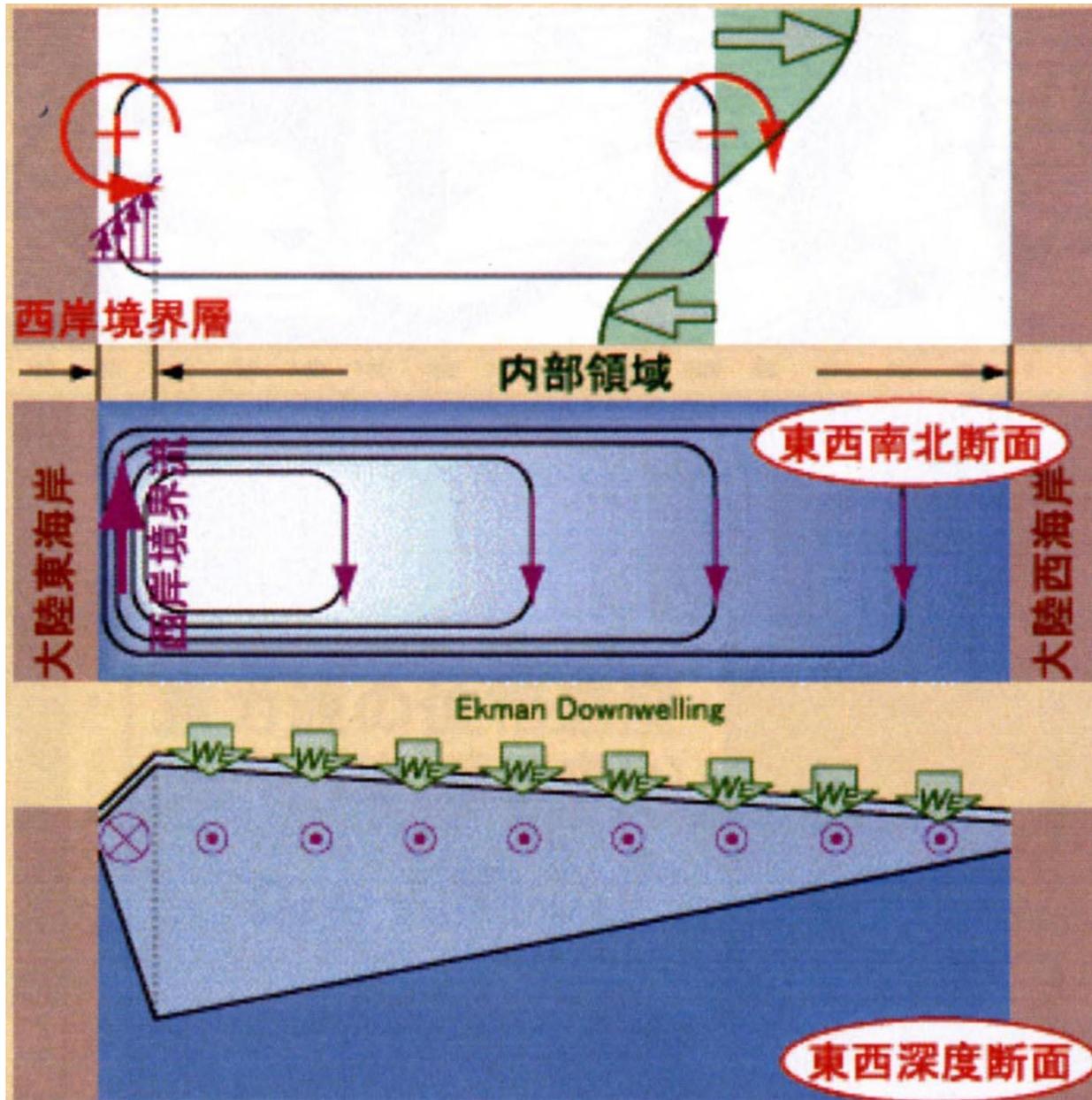
中低緯度では密度はほぼ水温で決まる



水位

等密度線分布

成層(二層で近似)を考えたときの亜熱帯循環と西岸境界流



山中康裕教授作成

海洋子午面循環：熱塩循環（百-千年スケール）

深層水・中層水形成

海水生成（塩分排出）
蒸発－降水

北大西洋深層水

高塩分水が
移流し冷却

蒸発大

海水生成

海洋の
コンベアベルト

南極底層水

海水生成 → 塩分排出

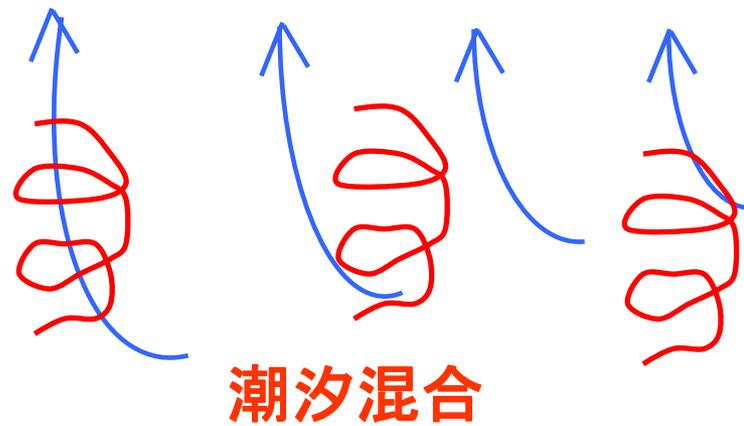
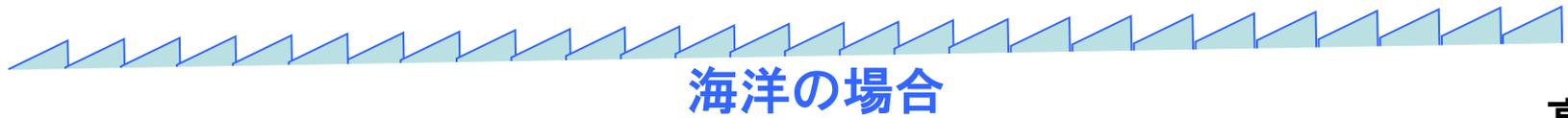
Modified from NOAA
and NASA website



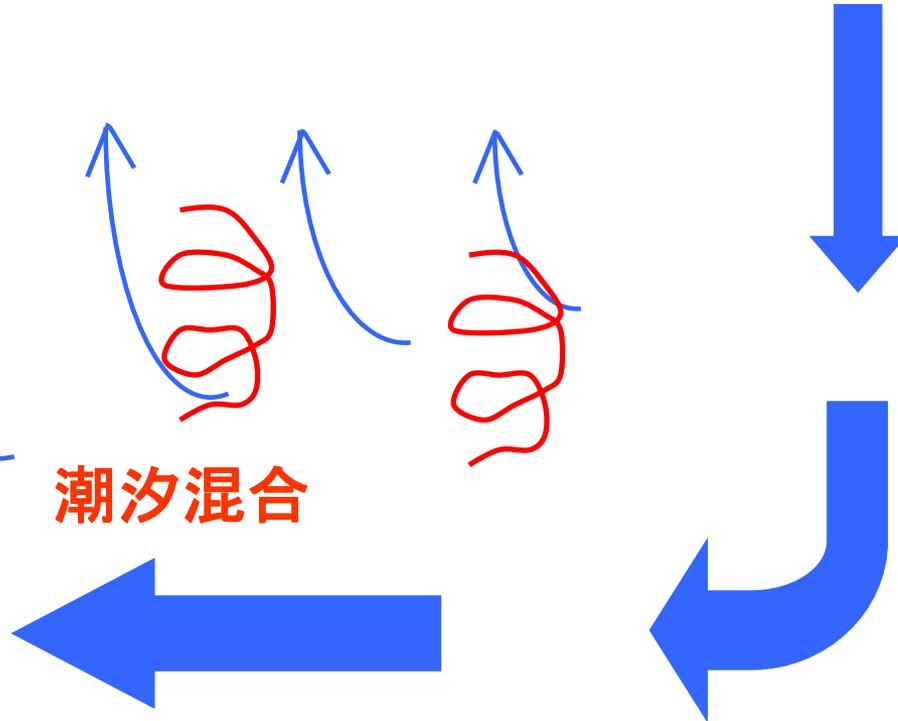
熱塩循環：深層循環

赤道

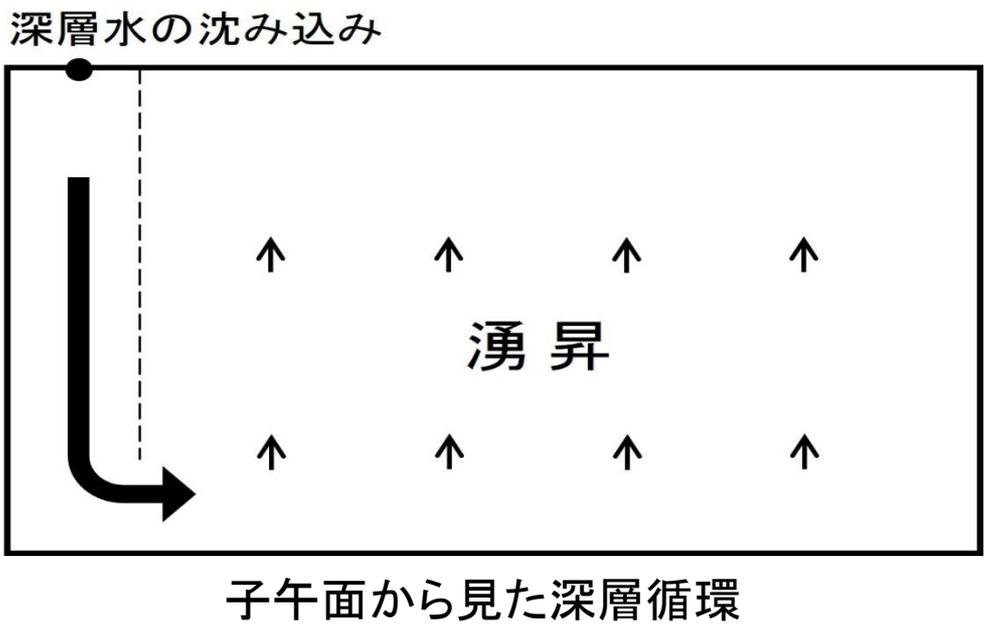
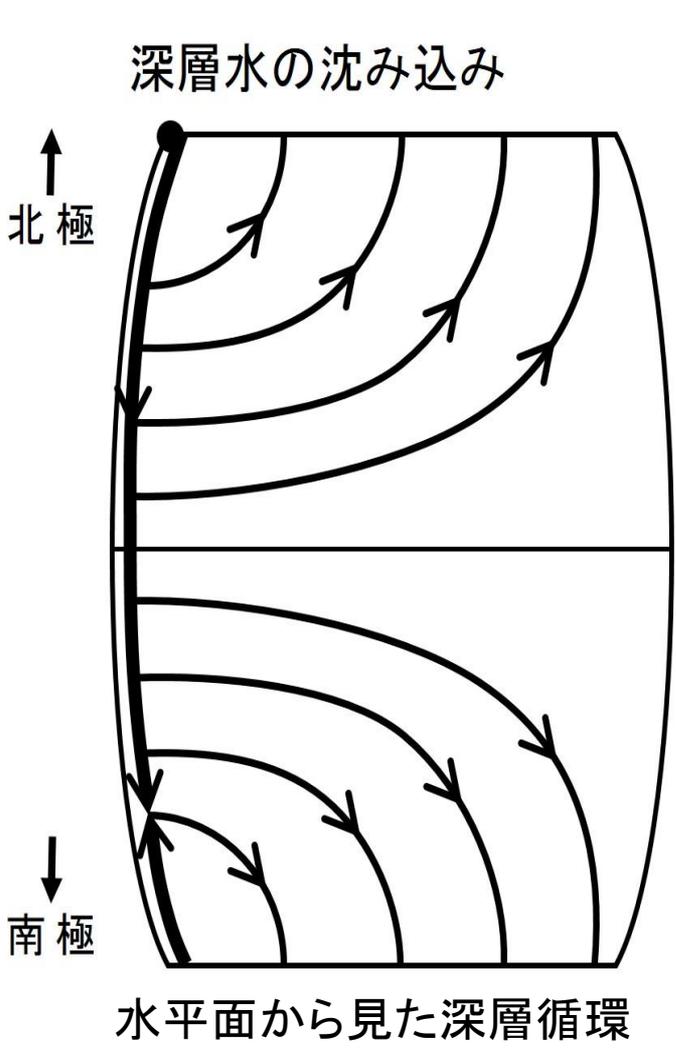
極



高密度水の沈み込み



鉛直拡散により下方が暖まる(軽くなる)
→ 浮力を得る → 上昇

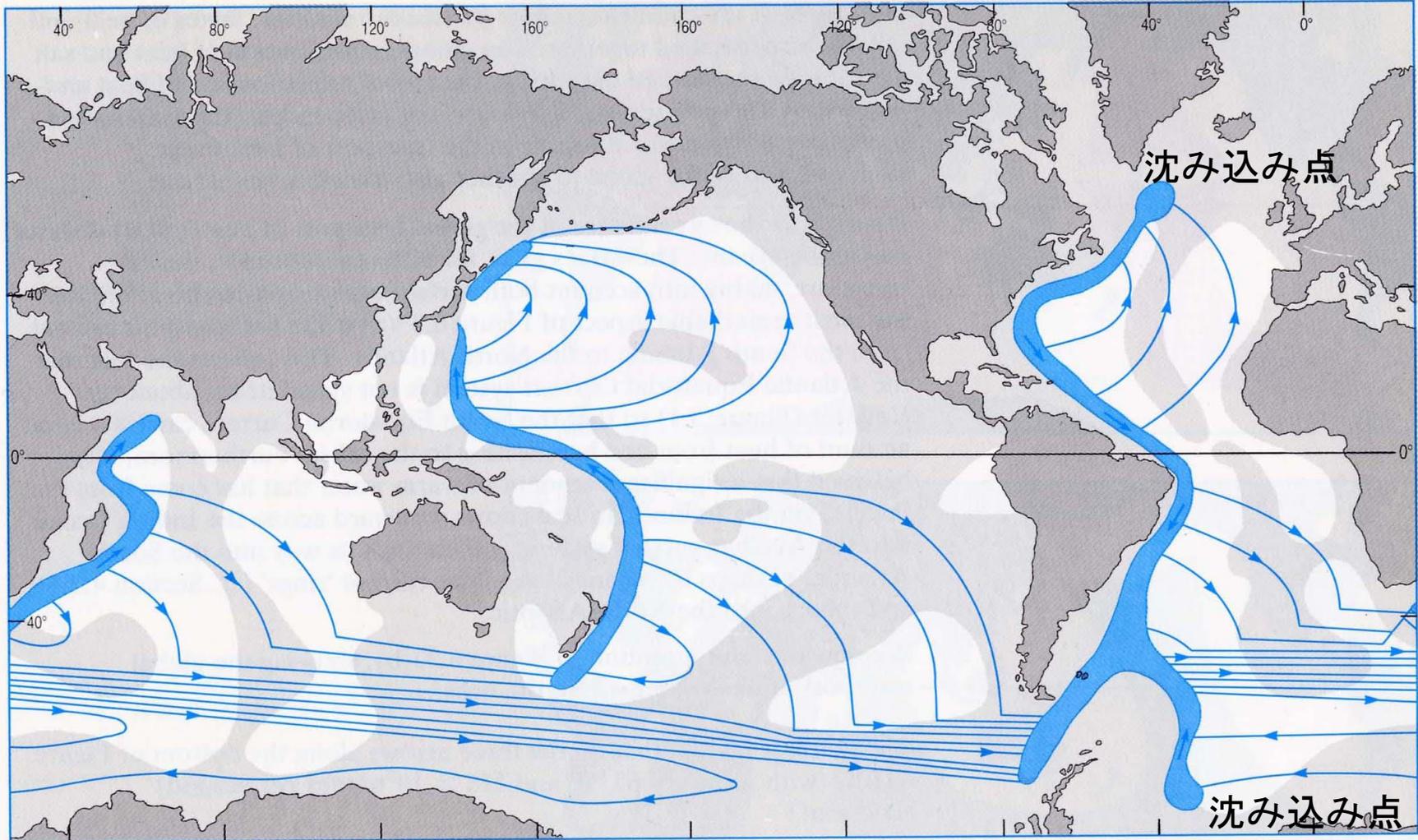


- 沈み込みが起こっている所以外は湧昇域となり、
↓ 水柱は引き延ばされる
- f/h (渦位) に対して $h \rightarrow$ 大の効果を生む
↓
- f/h (渦位) を一定に保つ (渦位保存) には、
↓ $|f|$ の大きいほうへ水柱が移動する必要有り
- 北・南半球とも $|f|$ の大きい極方向へ移動する

Stommel & Arons (1960) の解

Stommel による深層循環

Stommel (1958)



内部領域は湧昇域→極方向への移動(流れ)

ウェッデル海