問題

一般に、大洋の西岸域では西岸境界流なる強い流れが存在する。この流れを駆動しているのは風であり、風成大循環として理解される。風成循環に関する以下の説明に対し、A, B, C, D, E, F, G, H に当てはまる言葉を書け（選択肢があるものはその中から選べ）。また、西岸境界流として典型的な海流を二つ挙げよ。

長い時間スケールで風に対する海洋の応答を考えた場合、表層の水は エクマン 輸送により、北半球では風に対して 直角右 方向に運ばれる。北太平洋の亜熱帯海域の内部領域では、北側に偏西風、南側に貿易風を持つので、表層の水は エクマン 輸送により、風に対して 直角右 方向に運ばれる。そのため亜熱帯領域では、表層の水は **C（北上、南下、収束、発散）**する。そのため、その下の水柱は **D（押し縮められる or 引き伸ばされる）**。そうすると、［｛（惑星渦度）＋（相対渦度）｝／（水柱の厚さ）］で表される渦位が保存されるためには、（相対渦度は大きく変化しないとすると）、惑星渦度 が **F（小さく or 大きく）**なる必要がある。そのためには水柱は **G（東、西、南、or 北）**へ移動しなければならない。　このようにして内部領域で移動した水は、西岸において、まとまって元の方向へ戻され、強い流れができる。このようにして亜熱帯循環及び西岸境界流が形成され、北太平洋亜熱帯では、**H（時計周り or 反時計周り）**の循環ができる。

エクマン輸送(Ekman transport)

- 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)

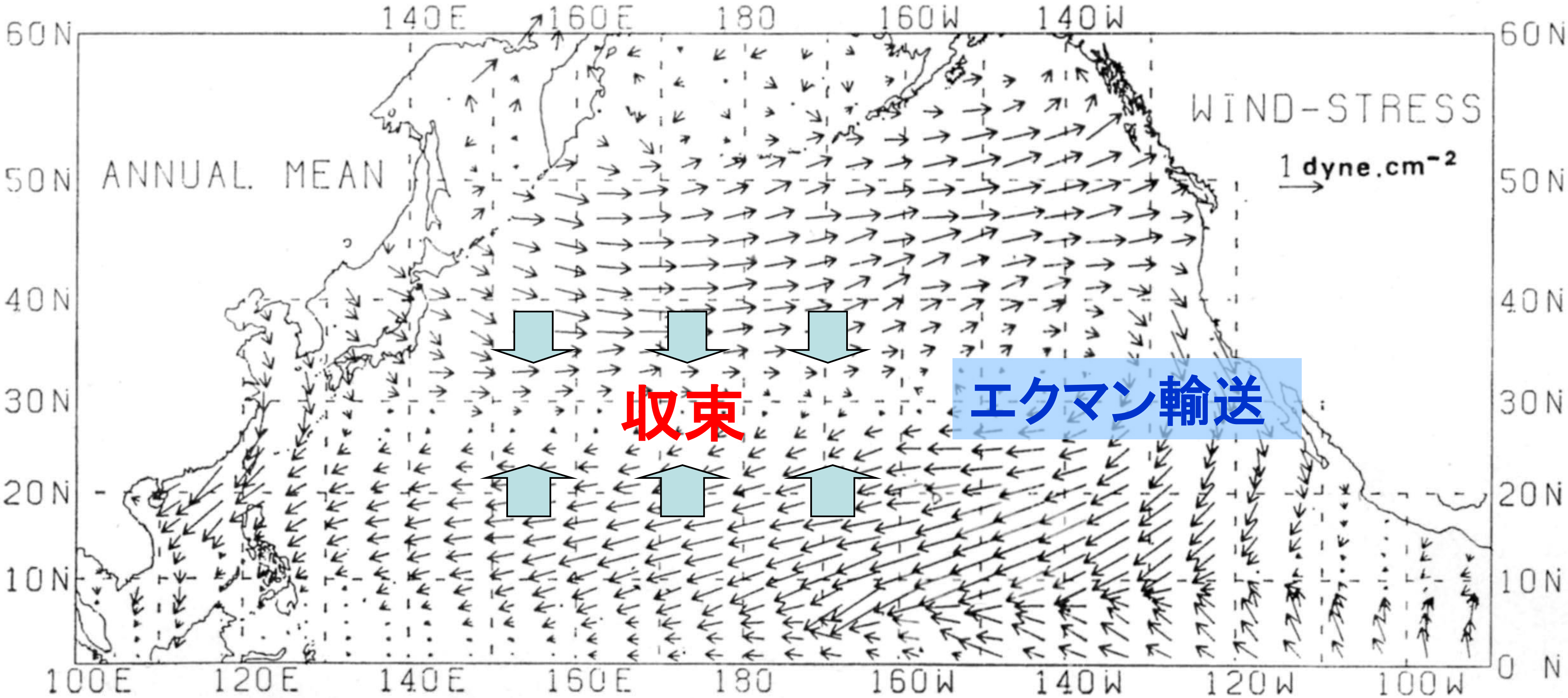
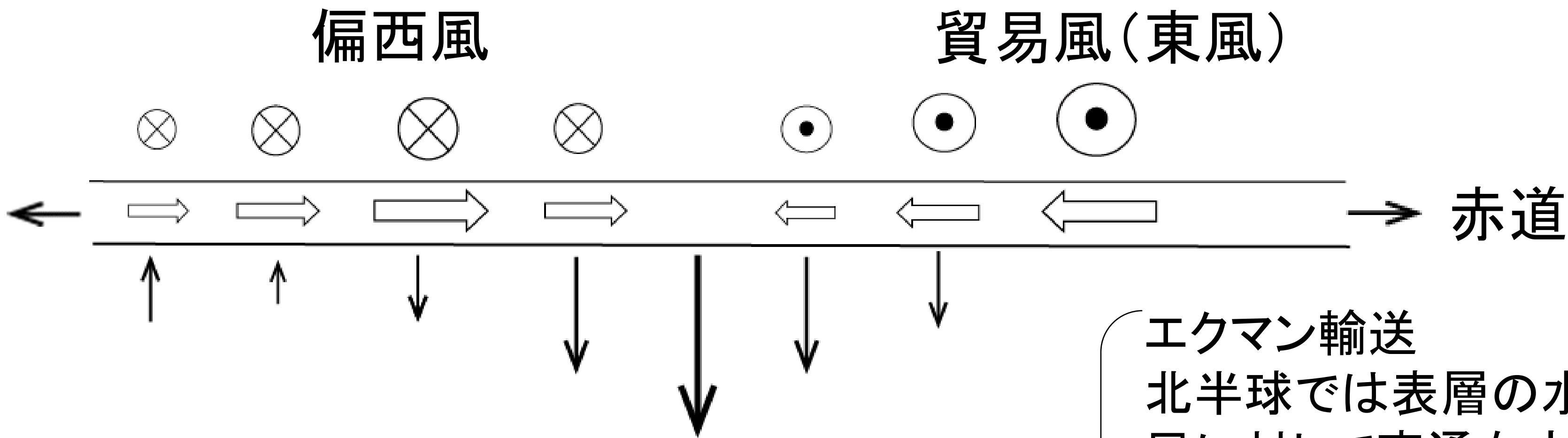


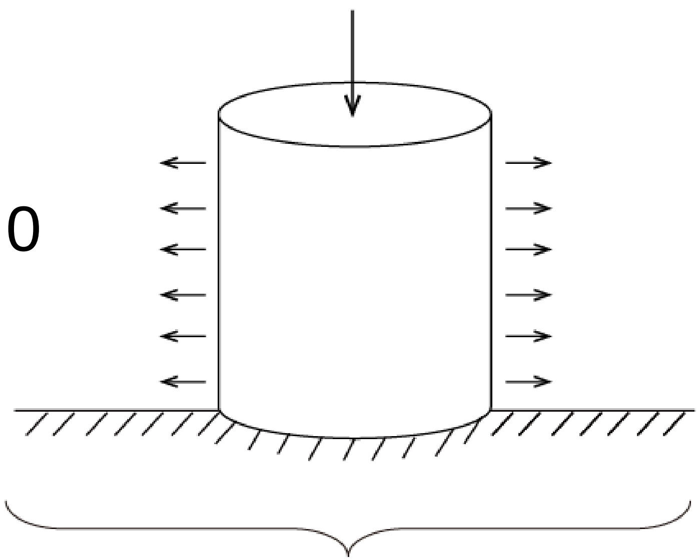
Fig. 3. Annual mean wind stress field.

年平均の風応力の分布



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



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

⇩

この領域（亜熱帯）では、
水柱は押し縮められる
（ｈ→小の効果）

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

渦位＝（惑星渦度＋相対渦度) / (水柱の厚さ)

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

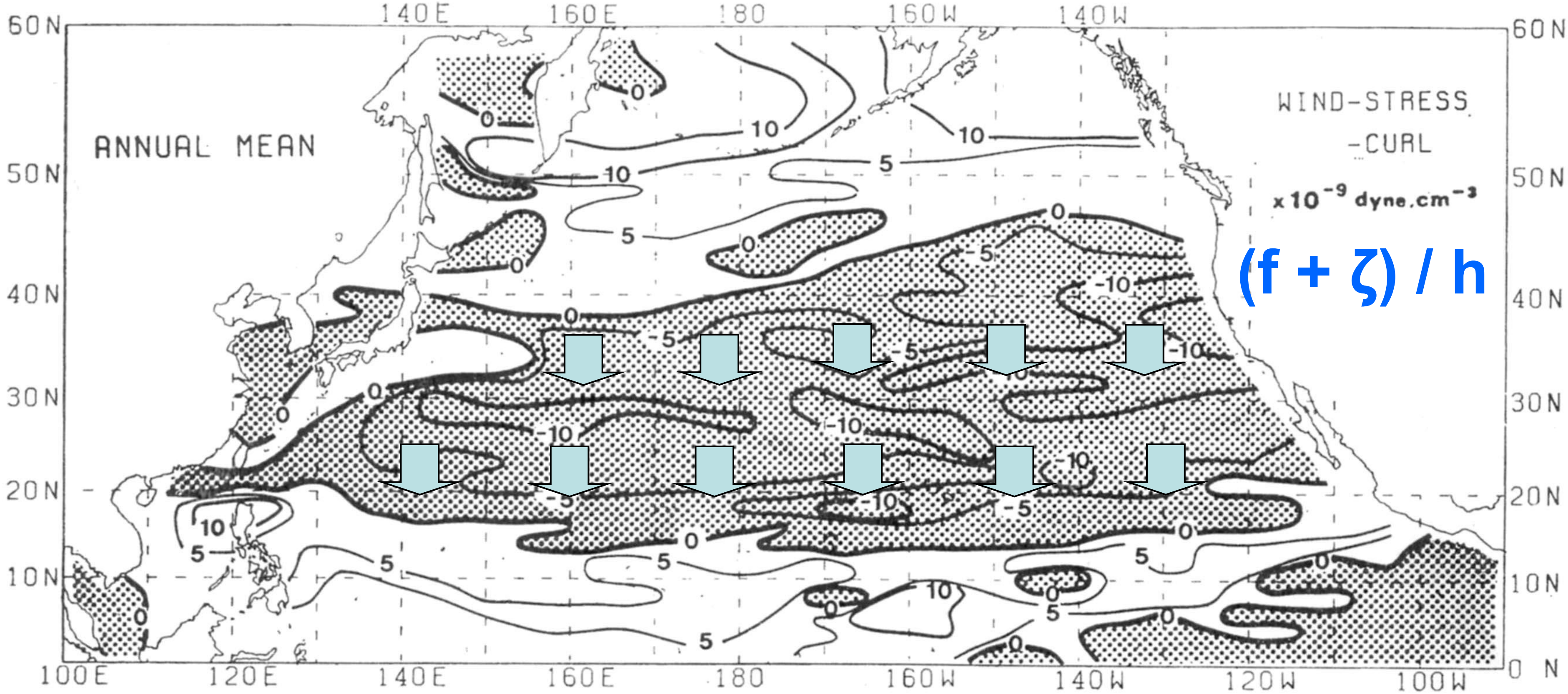
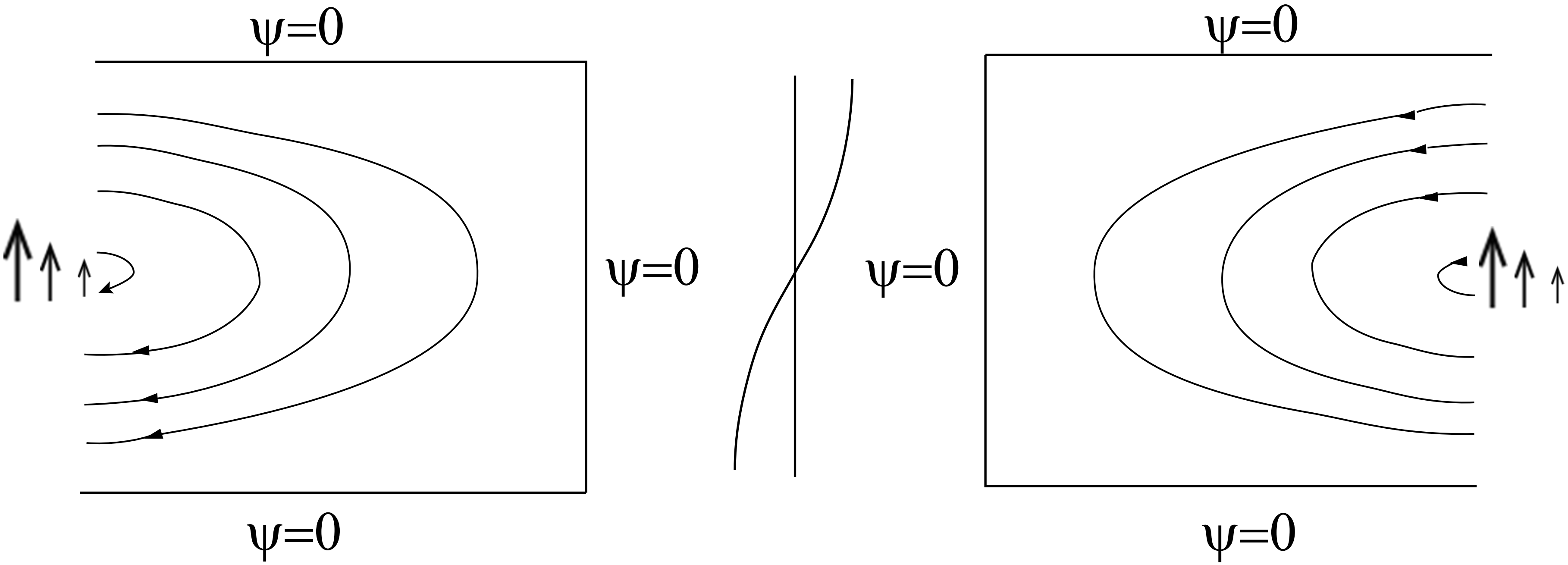
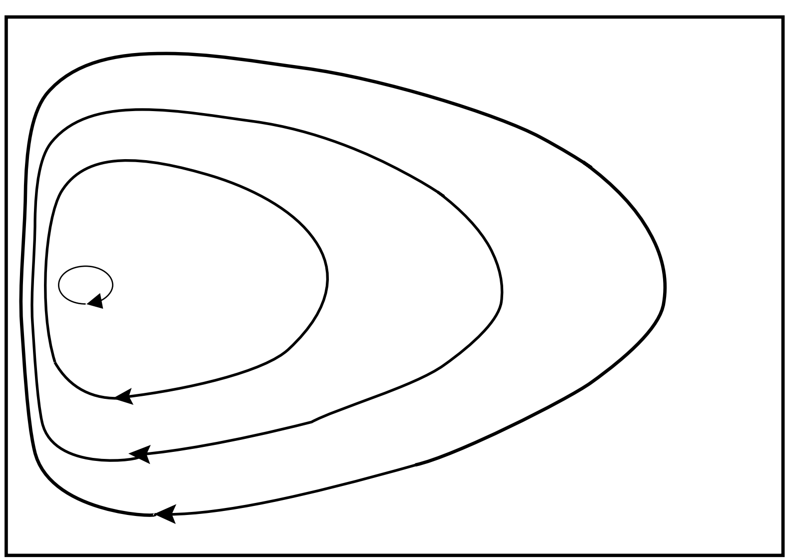


Fig. 13. The isopleths of wind stress curl computed from the annual mean wind-stress fields. The shaded area indicates negative curl (anticyclonic vorticity), while the rest is positive (cyclonic vorticity).

Curl (Rot) $\tau = (\partial \tau_y / \partial x - \partial \tau_x / \partial y)$

風応力カールの分布





Stommelの解

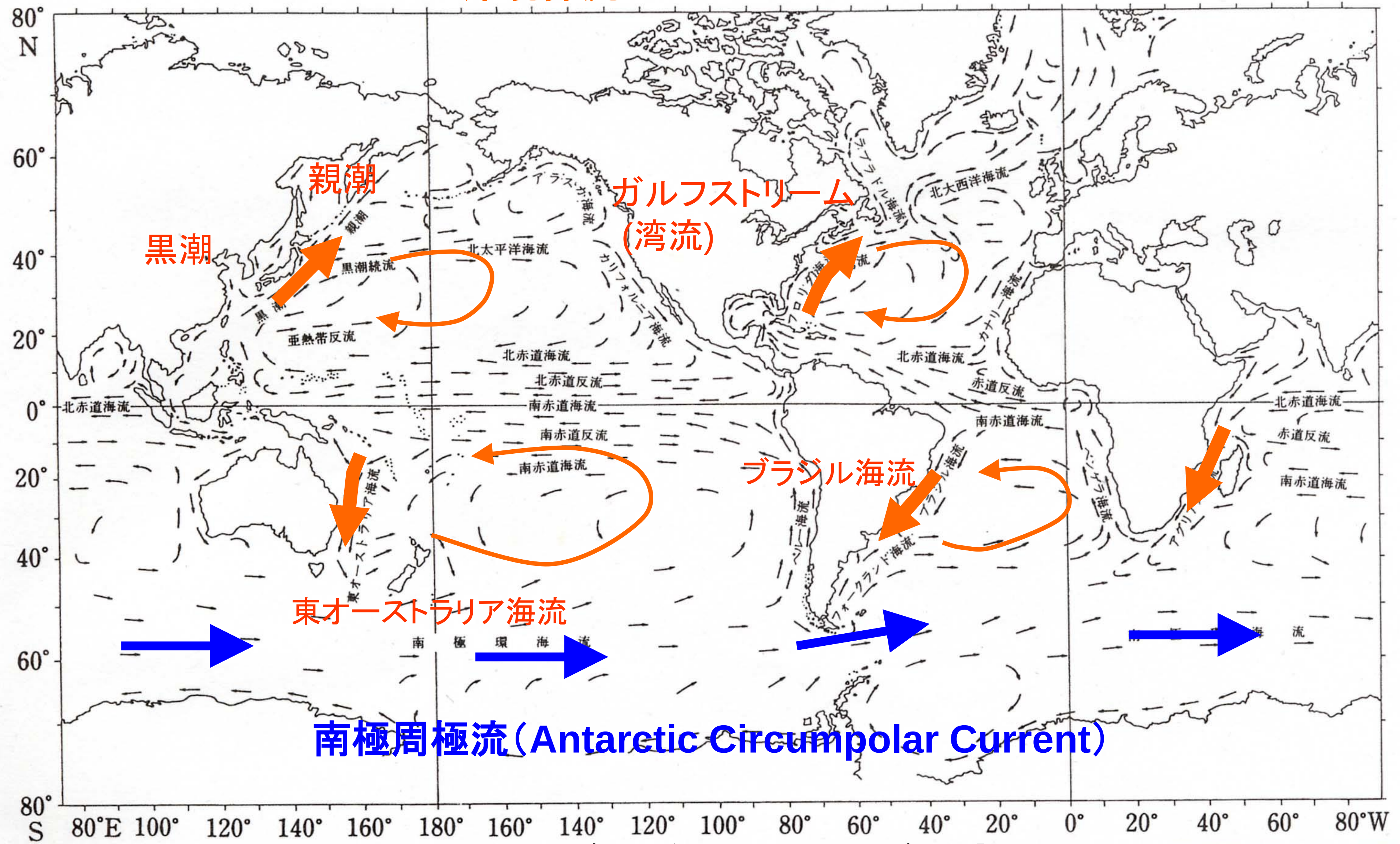
亜熱帯域では水は南へ移動する。
その水を東か西の境界で北へ戻す必要あり。
水が北へ行くと($f+\zeta$)/h=一定で
 f が大きくなるから $\zeta<0$になる必要あり
 (もとが $\zeta=0$とすると)
下図でうまく解がつながるのは西岸に境界が
ある場合(左上のケース)

$(f + \zeta) / h$

渦位＝（惑星渦度＋相対渦度) / (水柱の厚さ)

亜熱帯循環（subtropical gyre）

西岸境界流



世界の海洋の表層海流

- 一日以上の時間スケールでみると、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)

エクマン層の理論

無限に広がる海洋で，定常で一様な北向きの風応力 τ_y が海面に作用しているとする．このとき，この問題は次のように定式化できる．

$$-f_0 v = \mathrm{K}\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \tag{8.1}$$

$$f_0 u = \mathrm{K}\frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \tag{8.2}$$

ここで，K は乱流鉛直粘性係数（turbulent vertical viscosity）である．海面での境界条件は次式となる．

$$\rho\mathrm{K}\frac{\partial u}{\partial z} = 0 \tag{8.3}$$

$$\rho\mathrm{K}\frac{\partial v}{\partial z} = \tau_y \tag{8.4}$$

また，十分下層では運動はないものとして，次の境界条件をおく．

$$(u, v) \to (0, 0) \qquad z \to \infty \text{ のとき} \tag{8.5}$$

式 (8.1)，(8.2) の運動方程式を境界条件式 (8.3)〜(8.5) を用いて解くと，解として次式を得る．

$$u = \left(\frac{1}{\mathrm{K}f_0}\right)^{1/2}\frac{\tau_y}{\rho}\exp\left\{\left(\frac{f_0}{2\mathrm{K}}\right)^{1/2}z + \frac{\pi}{4}\right\}\cos\left\{\left(\frac{f_0}{2\mathrm{K}}\right)^{1/2}z + \frac{\pi}{4}\right\}$$

$$v = \left(\frac{1}{\mathrm{K}f_0}\right)^{1/2}\frac{\tau_y}{\rho}\exp\left\{\left(\frac{f_0}{2\mathrm{K}}\right)^{1/2}z + \frac{\pi}{4}\right\}\sin\left\{\left(\frac{f_0}{2\mathrm{K}}\right)^{1/2}z + \frac{\pi}{4}\right\}$$

ここで，海面（$z=0$）における流速を求めると次式となる．

$$u = \left(\frac{1}{\mathrm{K}f_0}\right)^{1/2}\frac{\tau_y}{\rho}\frac{\sqrt{2}}{2}$$

$$v = \left(\frac{1}{\mathrm{K}f_0}\right)^{1/2}\frac{\tau_y}{\rho}\frac{\sqrt{2}}{2}$$

エクマン層の厚さは15m程度

エクマン層内の輸送量を積分すると
風に直角右向き、風応力に比例
→ エクマン輸送(Ekman transport)

(北半球の場合)

↓Ekman spiral
(エクマンらせん)

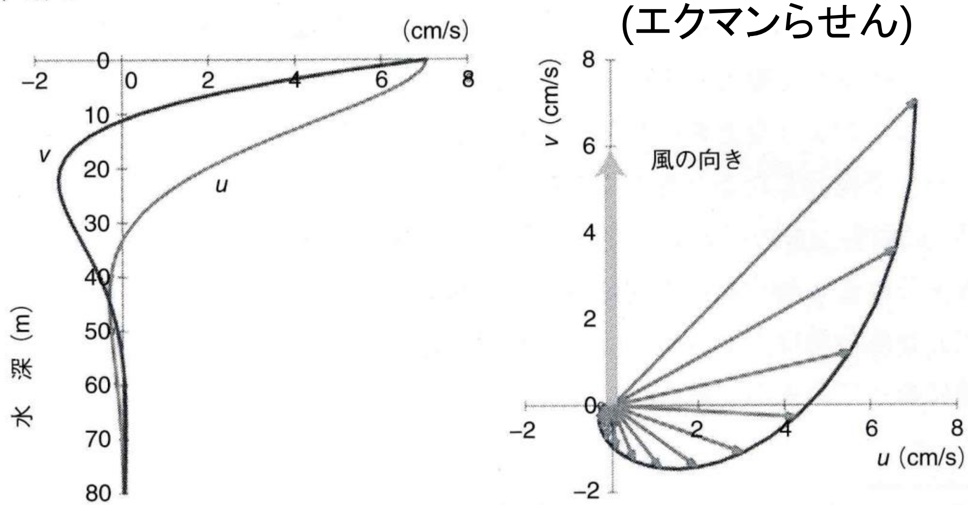


図 8.1　エクマン層の流速分布
(a) u と v の深さ方向の分布．(b) 流速ベクトルを平面に投影したときの分布（エクマンらせん）．