

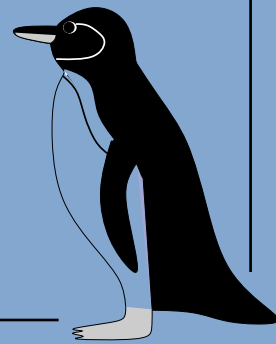
日本付近の流れとエクマン層

今週のポイント

- ◆ 日本付近の海流の変動
- ◆ エクマン層の式変形と物理的イメージ

今週のレポート問題

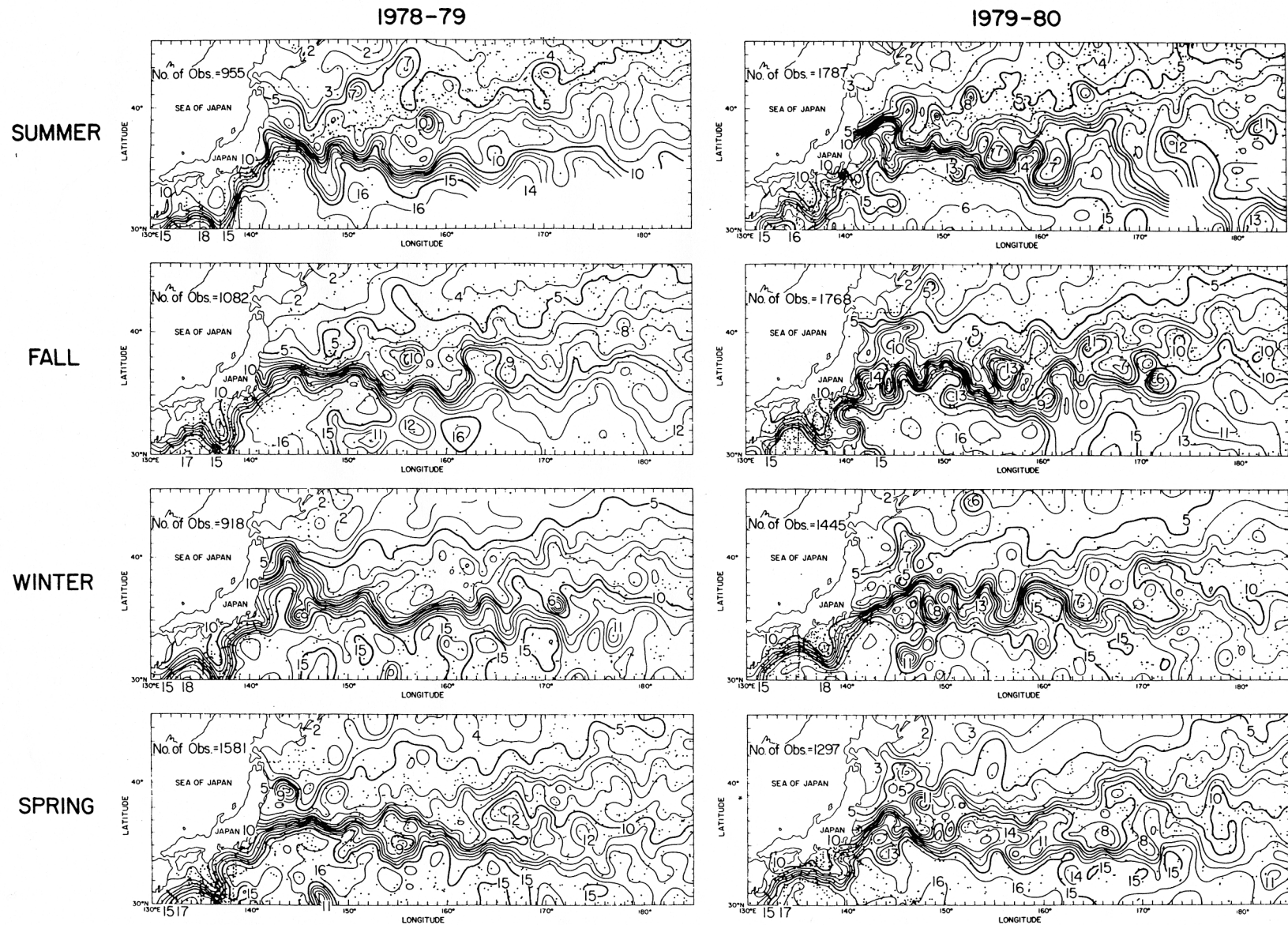
- 式[1][2]から[7]までの導出を確認せよ。
- 太平洋において 40°N で西風によって、 20°N で貿易風によって各々風応力 $0.1\text{N}/\text{m}^2$ が与えられると、その間の緯度帯での沈降流の総流量はどのくらいか？



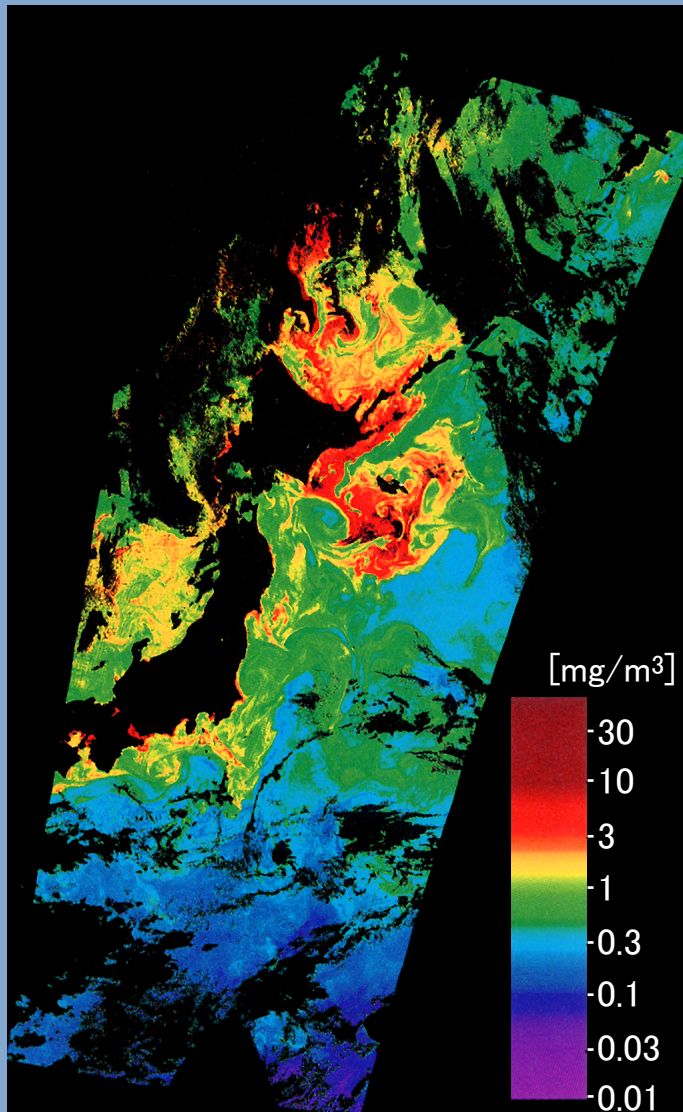
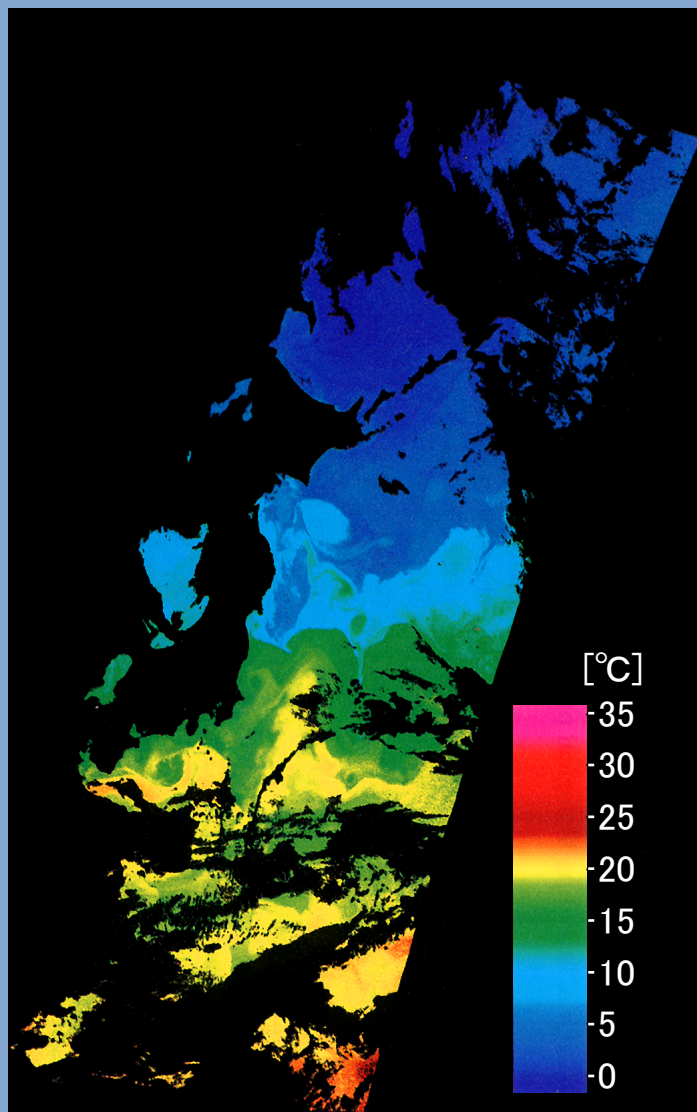
黒潮続流の変動

1978年夏から1980年春までの300m深での水温分布

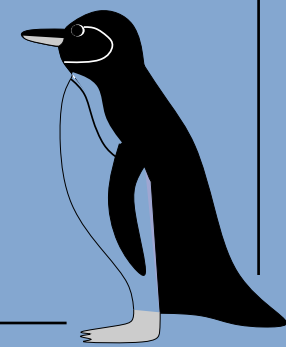
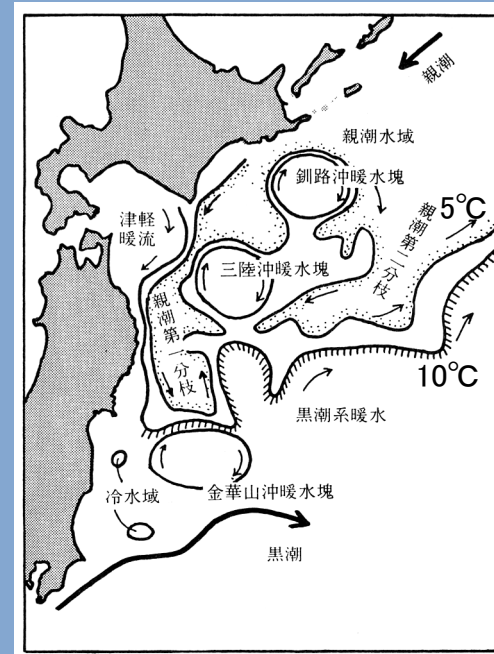
[Mizuno and White, J.P.O.,1983]



衛星データADEOS/OCTSによって得られた
1997年4月26日の日本近海の海面水温とクロロフィルa分布

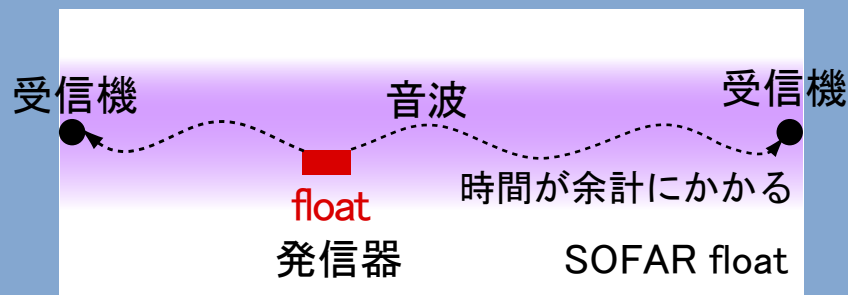


混合水域における親潮水(5°C以下)と黒潮水(10°C以上)の分布の概念図

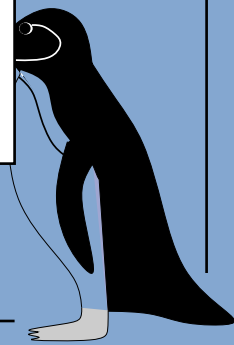
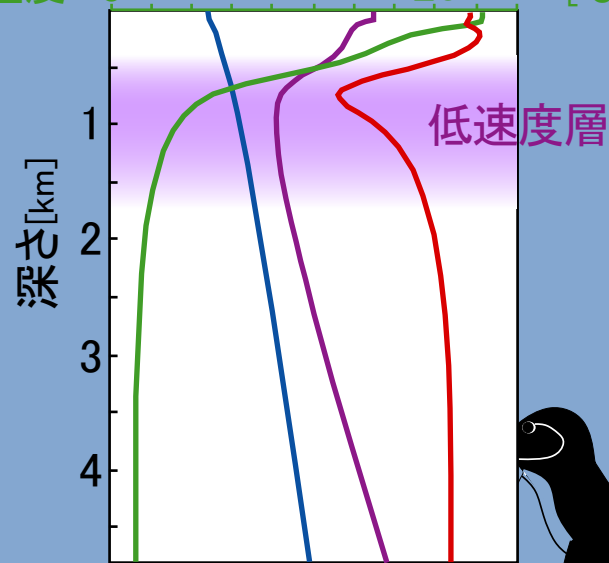
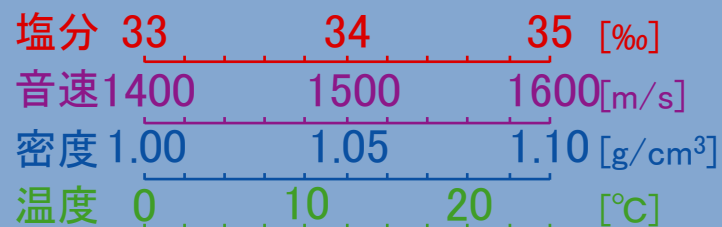
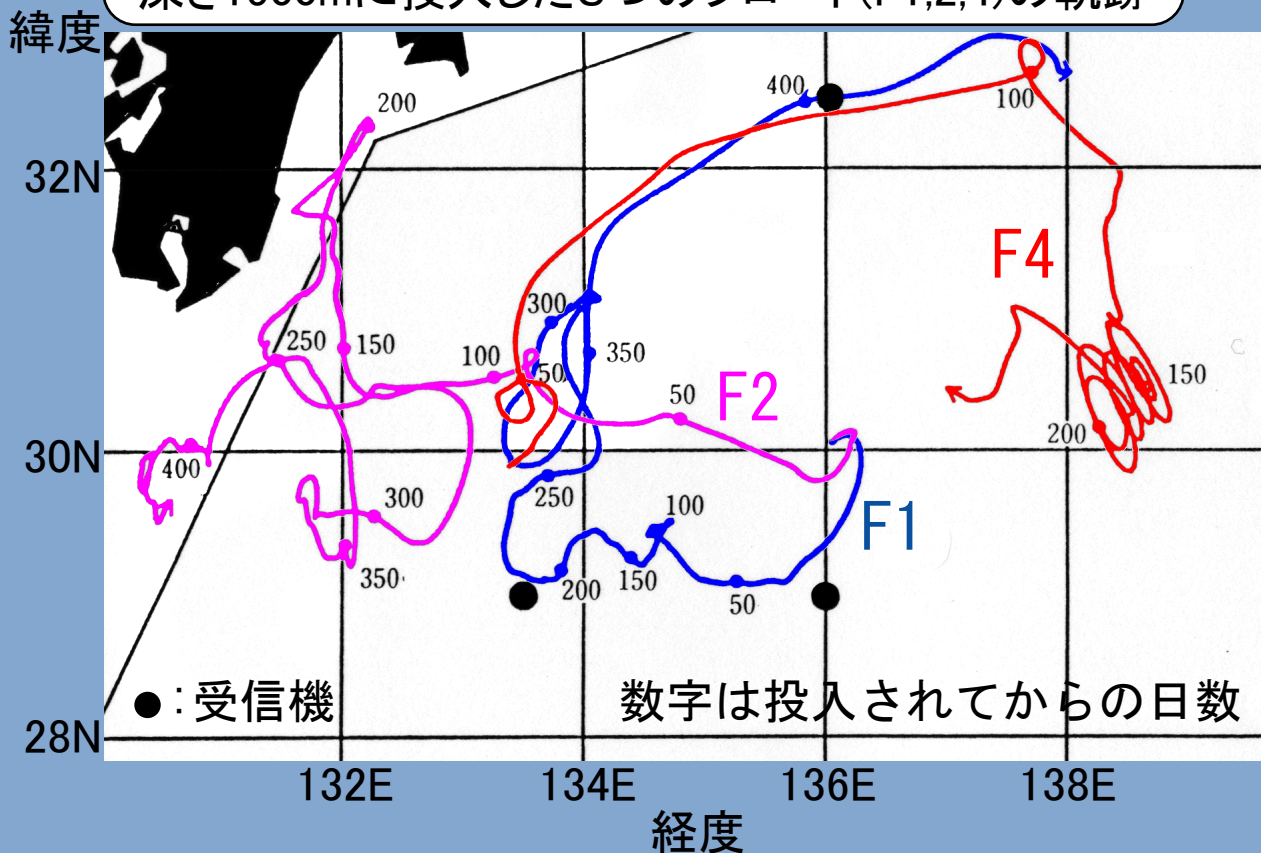


中深層での流速の直接測定

WOCEのひとつのプロジェクトとして、表層の流れを知るためにARGOS buoyが数多く放されている。中層の流れを知るために“Popup” floatも計画されている



深さ1500mに投入した3つのフロート(F1,2,4)の軌跡



エクマン境界層

$$\frac{\partial u}{\partial t} - f v = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad [1a]$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + f u = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad [1b]$$

時間変化項 コリオリ項 圧力傾度項

鉛直粘性項

$$A_z \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=0} = \frac{\tau_x}{\rho} \quad [2a]$$

$$A_z \frac{\partial v}{\partial z} \Big|_{z=0} = \frac{\tau_y}{\rho} \quad (=0 \text{ 簡単のため}) \quad [2b]$$

境界条件(外力)

風応力(東西方向)

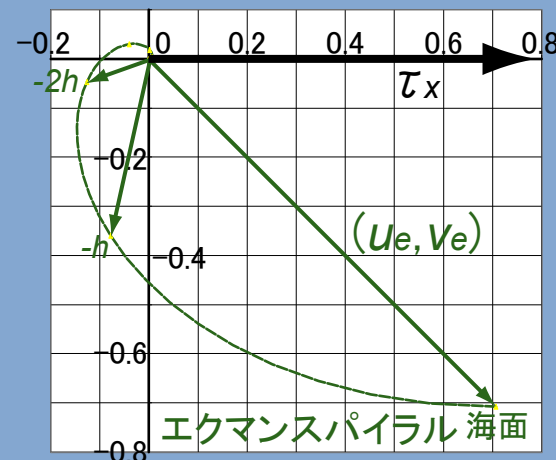
風応力(南北方向)

$$u \equiv u_g + u_e \quad [3a]$$

$v \equiv v_g + v_e$ [3b] を定義すると、[1]は下の2組に分けられる。

$$\frac{\partial u_g}{\partial t} - f v_g = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad [4a] \quad \frac{\partial u_e}{\partial t} - f v_e = \frac{\partial}{\partial z} \left(A_z \frac{\partial u_e}{\partial z} \right) \quad [5a]$$

$$\frac{\partial v_g}{\partial t} + f u_g = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \quad [4b] \quad \frac{\partial v_e}{\partial t} + f u_e = \frac{\partial}{\partial z} \left(A_z \frac{\partial v_e}{\partial z} \right) \quad [5b]$$



(u_g, v_g) が定常とすると地衡流バランス

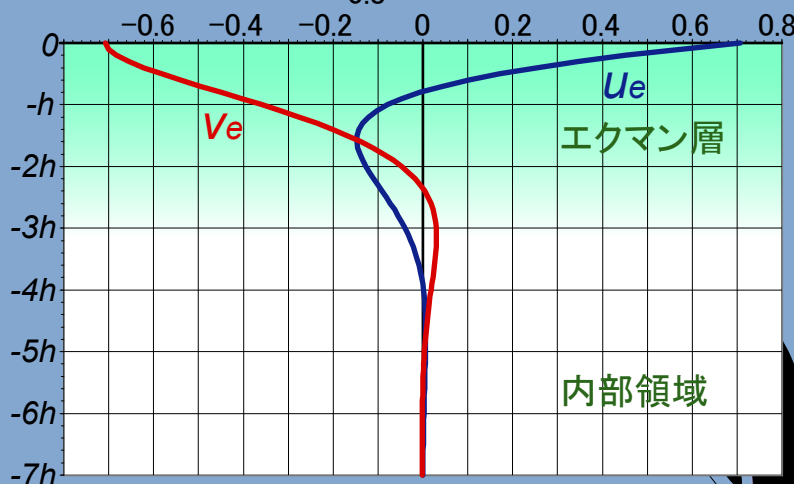
(u_e, v_e) が定常とするときの解は、

$$u_e = \frac{h \tau_x}{2 \rho A_z} \left[\sin \frac{z}{h} + \cos \frac{z}{h} \right] e^{\frac{z}{h}} \quad [6a]$$

$$v_e = \frac{h \tau_x}{2 \rho A_z} \left[\sin \frac{z}{h} - \cos \frac{z}{h} \right] e^{\frac{z}{h}} \quad [6b]$$

となる。ここで $h = \sqrt{\frac{2A_z}{f}}$ [7] エクマン層のスケール

粘性 ↑ or コリオリ ↓
⇒ エクマン層 ↑



エクマン輸送量

$$\text{Ekman Transport } (U_E, V_E) = \int_0^{-\infty} (u_e, v_e) dz \quad [8]$$

で定義され、[5]を鉛直積分すると

$$\frac{\partial U_E}{\partial t} - fV_E = \frac{\tau_x}{\rho} \quad [9a]$$

$$\frac{\partial V_E}{\partial t} + fU_E = \frac{\tau_y}{\rho} (=0) \quad [9b]$$

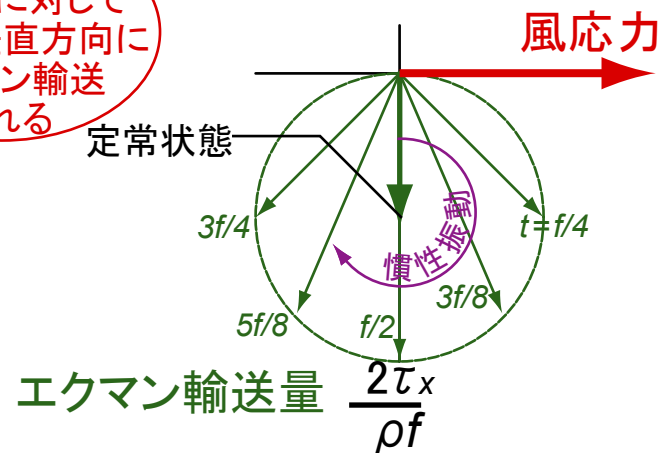
$$\text{定常のとき } (U_E, V_E) = \frac{1}{\rho f} (\tau_y, -\tau_x) \quad [10]$$

突然風が吹いた場合(東西風が0 → τ_x となる)

$$(U_E, V_E) = \frac{\tau_x}{\rho f} (\sin 2\pi ft, \cos 2\pi ft - 1) \text{ 慣性振動}$$

風応力 0.1 N/m^2 (典型的な大きさ) の風が東西幅 $10,000 \text{ km}$ の海上を吹くとき
 エクマン流の流量: $10 \text{ [Sv]} (= 10 \times 10^6 \text{ [m}^3/\text{s]})$

北半球では風応力に対して
 右向き垂直方向に
 エクマン輸送
 される

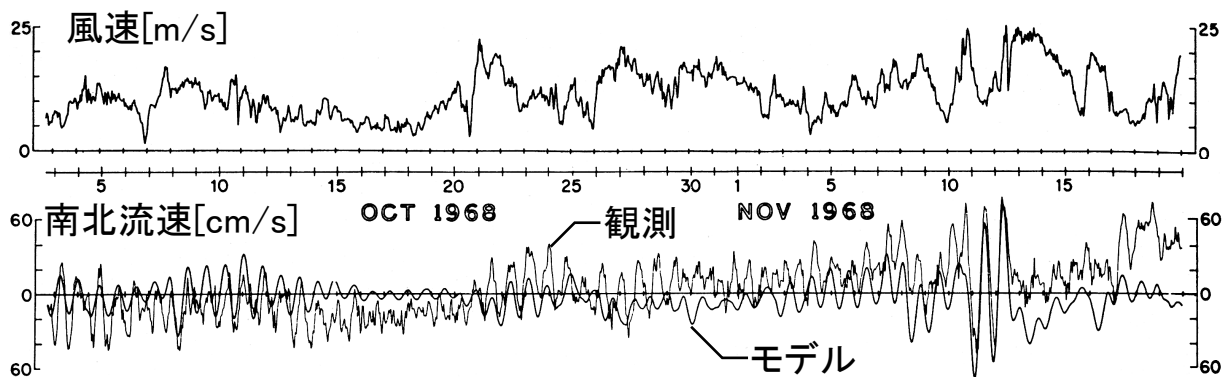


$$\frac{\partial U_E}{\partial t} - fV_E = -\gamma U_E + \frac{\tau_x}{\rho}$$

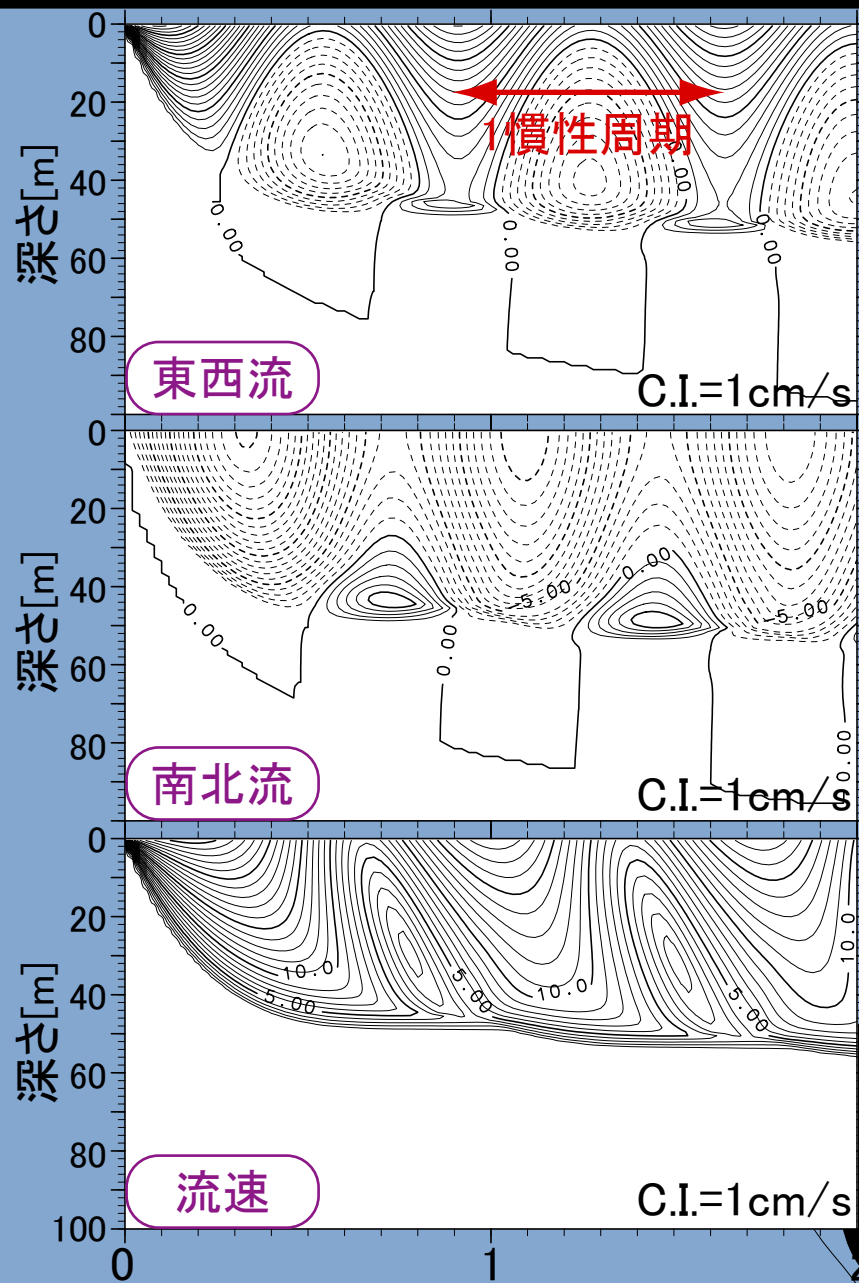
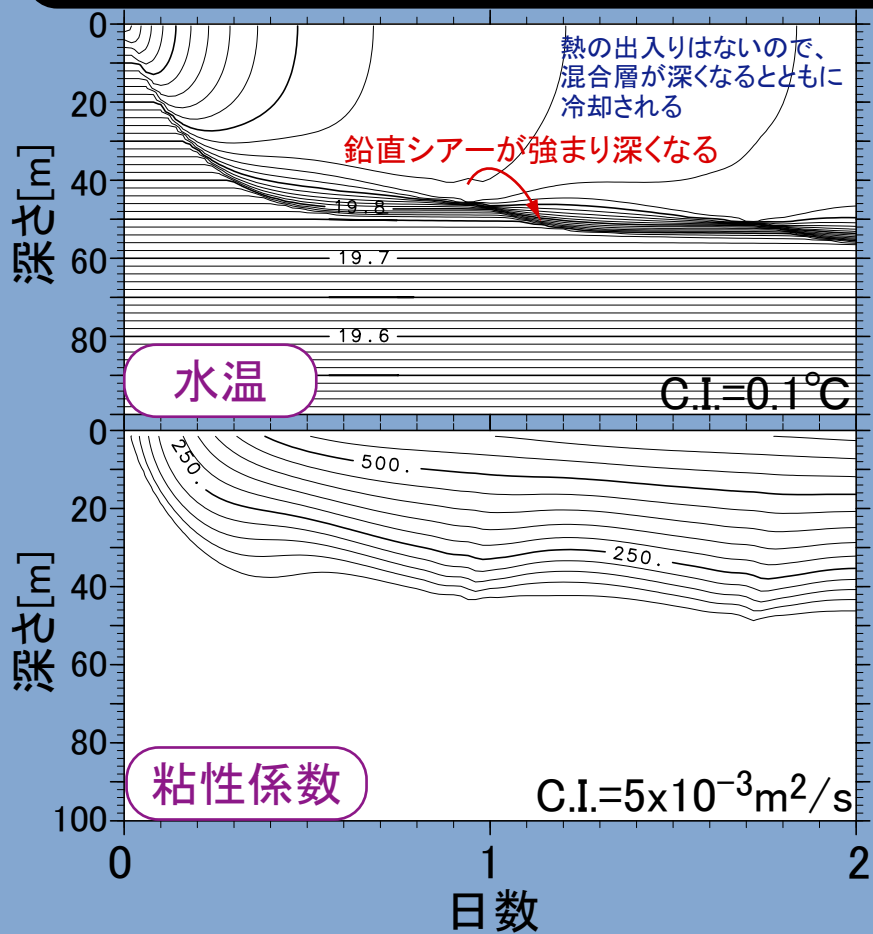
$$\frac{\partial V_E}{\partial t} + fU_E = -\gamma V_E + \frac{\tau_y}{\rho}$$

$$\gamma = 1/4 \text{ day}$$

[Pollard & Millard, 1970]



一様成層した状態から一定の西風を吹かせた場合(1次元海洋混合層モデルによる計算)



$$h = \sqrt{\frac{2A_z}{f}} \quad [7]$$

から見積もると...

混合層内
 $A_z = 0.1 \sim 1 [m^2/s]$
 $h = \sim 100 [m]$

混合層外
 $A_z = 10^{-5} \sim 10^{-4} [m^2/s]$
 $h = < 1 [m]$

Ekman Pumping

風応力が水平的に変化するとき、エクマン輸送量が変化し、エクマン層を出入りする鉛直流を生じる。

$$\text{連続の式 } \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

をエクマン層で鉛直積分し、
エクマン層下端の湧昇流を WE とすると

$$\frac{\partial UE}{\partial x} + \frac{\partial VE}{\partial y} - WE = 0 \quad \text{となるので[9]より}$$

$$WE = \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\tau_y}{f} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\tau_x}{f} \right) \right]$$

すなわち

$$WE = \frac{1}{\rho} \text{curl} \left(\frac{\boldsymbol{\tau}}{f} \right)$$

エクマン湧昇/下降流によって
内部領域の地衡流が作られる

渦度方程式

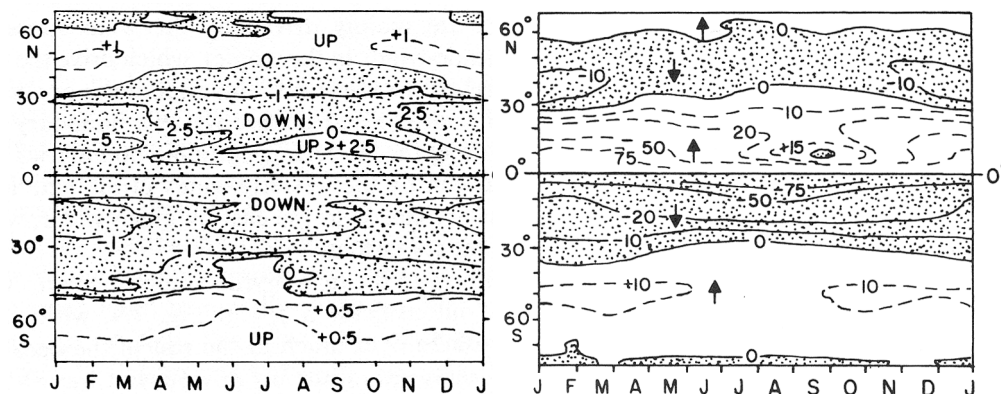
$$\beta v g = f \frac{\partial w}{\partial z}$$

緯度10度で風応力 0.1 N/m^2 が変化し
東西幅 $10,000 \text{ km}$ の海上を吹くとき

地衡流の流量: $50 \text{ [Sv]} (= 50 \times 10^6 \text{ [m}^3/\text{s]})$

地衡流速: 1 [cm/s] (深さ 500 m を仮定)

太平洋における東西積分した湧昇流量と南北エクマン輸送



南北幅 1° における湧昇流量 [Sv] 南北エクマン輸送 [Sv]

Levitus [1988]

大気と海洋の
質量エクマン輸送は
互いに打ち消す

$$\rho_a V E_a = \rho_o V E$$

