5．海洋と大気の
エクマン流，エクマン湧昇

見延　庄士郎（海洋気候物理学研究室）

本日の目的

- 前回と前々回の大気・海洋の波動の話題では，摩擦の効果を無視した．しかし，摩擦は非常に重要である．
- 大気が海洋を駆動する際に働く風応力も，大気海洋間の摩擦によっているし，大気もその底面（陸面・海面）では，摩擦の影響を大きく受ける．
- 摩擦は大気・海洋にエクマン流（または風）をもたらし，エクマン流は大気の低気圧下での悪天候や海洋の湧昇に本質的な役割を果たす．

摩擦力

- 大気にはその下面に働く［　　］が重要
- 海洋でも下面（海底）摩擦力が働くが，それ以上に風が海を引きずる力（［　　］）が，海を駆動する力が重要．
- これらの効果で生じる流れ，を［　　］と呼ぶ．
- その（水平）収束発散が，湧昇・沈降や上昇・下降気流を生む．

運動量の交換

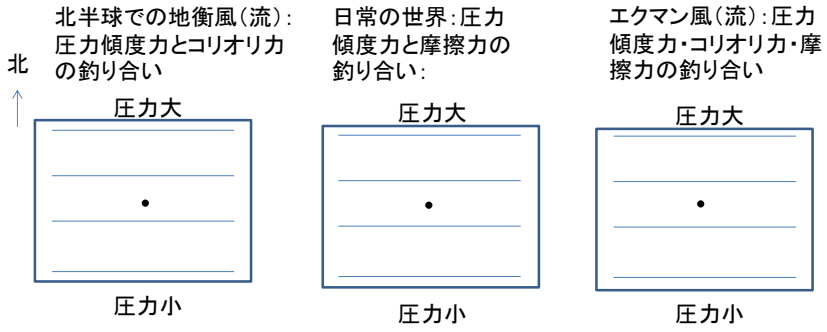
大気のエクマン風

地表面摩擦は低気圧の悪天候にも重要

- 雲ができ雨が降るのは，水蒸気が持ち上げられ，上空の低い気温で凝結するため
- つまり悪天候には上昇気流が必要で，逆に下降気流が卓越していると天気がよい．
- この上昇気流をもたらす重要な要因が，摩擦である．

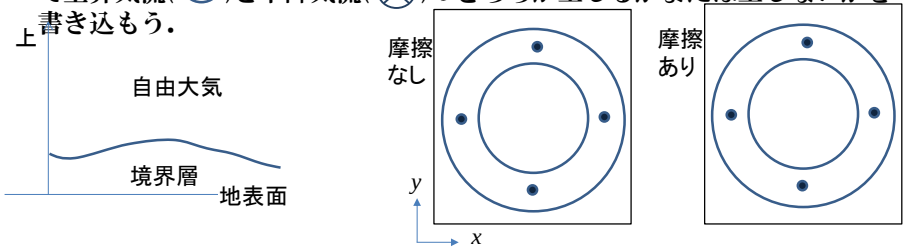
大気のエクマン風

以下の図の・を中心として，圧力傾度力 ⟶ ，コリオリカ ⟶ ，摩擦力 ⟶ ，風 ⟶ の矢印を書き込め．



大気の境界層内の流れ

- 大気の下層1 km程度は，[　　]と呼ばれ，そこでは下面との摩擦の効果が重要．その上は自由大気と呼ばれる．
- 右下図は低気圧について地上での気圧の等値線であり，中心の気圧は周辺よりも低いとする．摩擦がある場合とない場合で，風の向きと，境界層内で上昇気流(⊙)と下降気流(⊗)のどちらが生じるかまたは生じないかを書き込もう．



- 低気圧で天候が悪くなるのは，[　　]がもたらす[　　]気流が重要である．

気圧の曲率と上昇気流の関係

- 大気境界層の上面での上昇気流は$-H(u_x+u_y)$で表現できる．
- 一層流体の水平発散u_x+v_yを求めよう．摩擦がある場合の運動方程式(2.4a,b)で定常を仮定して，u, vの項を左辺に集めると

$$\cancel{u_t}+ru-fv=-\frac{p_y}{\rho_0} \quad (2.4a') \qquad \cancel{v_t}+rv+fu=-\frac{p_y}{\rho_0} \quad (2.4b')$$

- これをu, vについて解くために，行列式の形で書くと，

$$\begin{bmatrix} r & -f \\ f & r \end{bmatrix}\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}=\frac{-1}{\rho_0}\begin{bmatrix} p_x \\ p_y \end{bmatrix}$$

復習知識：2×2行列の逆行列は

$$\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}^{-1}=\frac{1}{ad-bc}\begin{bmatrix} d & -b \\ -c & a \end{bmatrix}$$

- 左辺の行列の逆行列を両辺にかけて解く．

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}=\frac{-1}{\rho_0}\frac{1}{r^2+f^2}\begin{bmatrix} \quad \end{bmatrix}\begin{bmatrix} p_x \\ p_y \end{bmatrix}=\frac{-1}{\rho_0(r^2+f^2)}\begin{bmatrix} \quad \end{bmatrix}$$

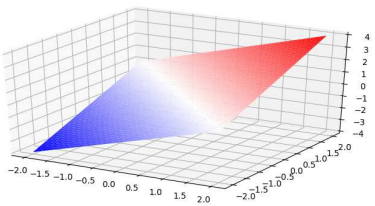
- したがって，

$$u_x+v_y=\frac{-1}{\rho_0(r^2+f^2)}\left((rp_x+\cancel{fp_y})_x+(-\cancel{fp_x}+rp_y)_y\right)=\frac{-r}{\rho_0(r^2+f^2)}\left(p_{xx}+p_{yy}\right)$$

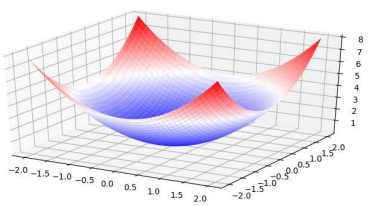
- となり水平収束$-(u_x+v_y)$は気圧のラプラシアン（曲率）$\Delta p=p_{xx}+p_{yy}$に比例する．

問題に出した関数の概形

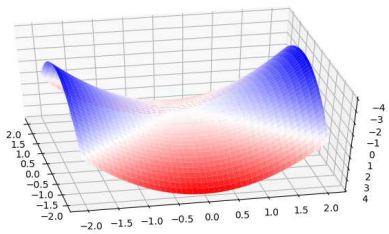
(1) $u(x,y)=x+y$



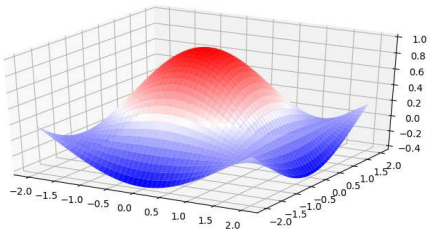
(2) $u(x,y)=x^2+y^2$



(3) $u(x,y)=x^2-y^2$



(4) $u(x,y)=\cos(x)\cos(y)$



ラプラシアンを求めよう.

問い：(x, y)空間における関数u(x,y)のラプラシアンは $\Delta u=\nabla^2 u=\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}=u_{xx}+v_{yy}$

で与えられる．以下の関数のラプラシアンを求め，(x,y)=(0,0) でラプラシアンがゼロ・正・負いずれであるかを答えよ（いずれも四角に書き込むこと）．ぱっと分からない人は次スライドの例題を見よう．

(1) $u(x,y)=x+y$ $u_{xx}+u_{yy}=$ ☐ $\Delta u(0,0)$は ☐

(2) $u(x,y)=x^2+y^2$ $u_{xx}+u_{yy}=$ ☐ $\Delta u(0,0)$は ☐

(3) $u(x,y)=x^2-y^2$ $u_{xx}+u_{yy}=$ ☐ $\Delta u(0,0)$は ☐

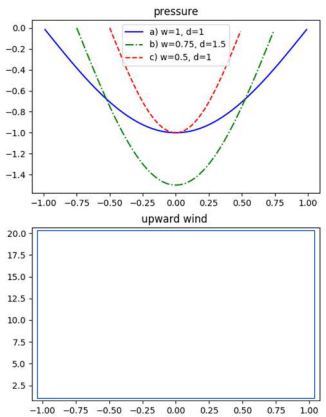
(4) $u(x,y)=\cos(x)\cos(y)$ $u_{xx}+u_{yy}=$ ☐ $\Delta u(0,0)$は ☐

問い：各関数の外形が次の次のスライドにある．それを参考にして，ある地点でのラプラシアンが正であるのは，そこでの値が周囲の値よりも低い（へこんでいる）場合か，高い（でっぱっている）場合かを答えよ．

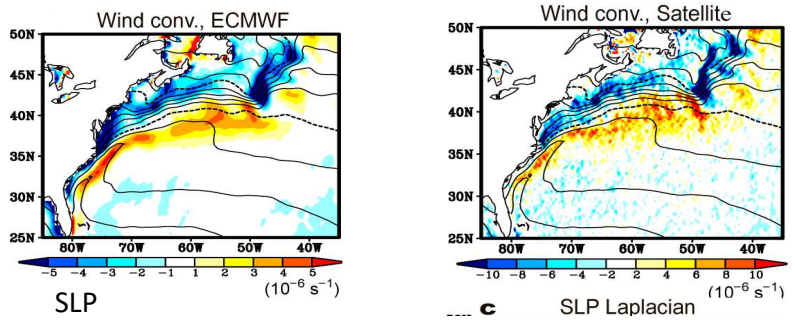
解答：ある地点でのラプラシアンが正であるのは，そこでの関数の値が周囲の値よりも ☐ 場合である．

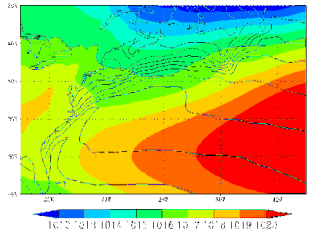
気圧と上昇気流の関係

Q. 以下の(a), (b), (c)の気圧分布がある場合（同心円状に分布しているものとする），上昇気流の最大値はどれが一番強いか？



メキシコ湾流上の風の水平収束と気圧



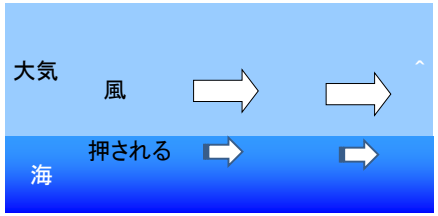


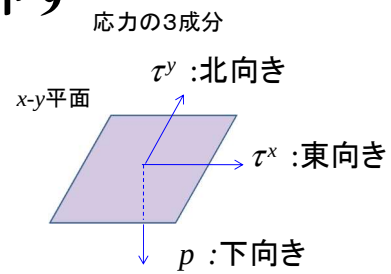
Minobe et al. (2008 Nature)

水平風収束と気圧の関係は直接は見て取り難いが，気圧のラプラシアンとの関係は明瞭

風応力

風が吹くと海を押す





- 一般に面にかかる力を□力 という
- 応力のうち面に直交する力(p)を□ ともいう
- 面に平行な力(τ^x, τ^y)は応力としかいわない
- 風による応力なので，□ という
  - 単位面積当たりの力として表し，単位は N(ニュートン，N = kg m/s^2)を使って □

風応力の式を考えよう：次元解析

- 風応力の単位は　N m^{-2}= kg m^{-1} s^{-2}　である．
- こうなるように，使える変数を組み合わせる．
- 一つは，風速 w で単位は□
- しかしこれだけでは，質量(kg)がない．質量を含む物理量は，□で，その単位は □
- 風速wと上を組み合わせて，風応力の単位になるようにしよう．つまり $\tau \propto w^? \rho_a{}^?$ の形になる．（3分考えよう）　$\tau \propto w$ □
- ただし，風応力はベクトル量で，方向は風速ベクトルに一致するので，絶対値記号を使って（一分考えよう）

$$\vec{\tau} \propto |\vec{w}| \square$$

風応力の式

$$\vec{\tau} = C_D \square \qquad (5.1)$$

- この式を風応力の，□（bulk おざっぱな）式という．
- C_Dは □ という無次元の比例定数である（～1.3×10^{-3}）．
- 問題：上のベクトル形式を，東向き風速u，北向き風速vを使って書き直そう，（1分考えよう）

$$\tau^x = \rho_a C_D \square \sqrt{\square}, \tau^y = \rho_a C_D \square \sqrt{\square} \qquad (5.2)$$

エクマン流と湧昇

エクマンが1902年に発見．
ナンセンが北極探検で，海氷が風向きからそれて流されるという発見にヒントを得た．

海洋のエクマン流

- 第二回に導入した，浅水方程式は風応力が働くと

$$\frac{\partial u}{\partial t} = fv - g\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\tau^x}{\rho_0 H} \quad \text{(2.5a再掲)} \qquad \frac{\partial v}{\partial t} = -fu - g\frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\tau^y}{\rho_0 H} \quad \text{(2.5b再掲)}$$

- これをできるだけ簡素化して（風応力に直接駆動される流れを議論したい）．どの項を無視する？
- この場合，u, v について解くと

$$u = \qquad v = \qquad \text{(5.3)}$$

- である．この流れを　　流 という

圧力傾度力を無視することの補足

- 前のスライドで無視した２項のうち，加速度項が無視できるのは，現象の時間スケールが　　よりも十分に長い場合でOK．一方，圧力傾度力が小さいことは考え難い．
- しかし線形重ね合わせから，運動方程式を，圧力傾度力に起因する地衡流と，エクマン流とに分けることができるので，エクマン流を議論する意味がある．
- Q　以下の①②式の和が③になることを証明せよ．ただし $v=v_g+v_E$ である

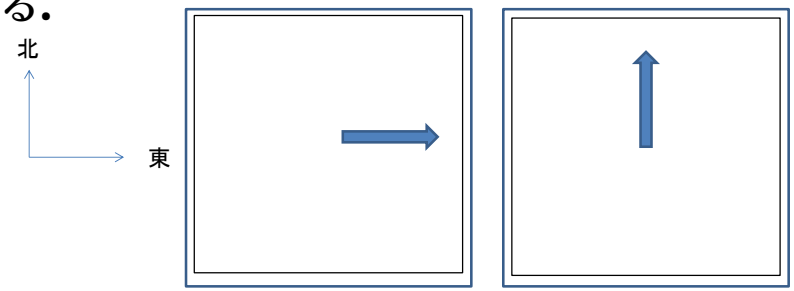
$$0 = fv_g - gh_x \quad ①$$

$$0 = fv_E + \tau^x/(\rho_0 H) \quad ②$$

$$0 = fv - gh_x + \tau^x/(\rho_0 H) \quad ③$$

流体の運動方程式にコリオリ力を入れる

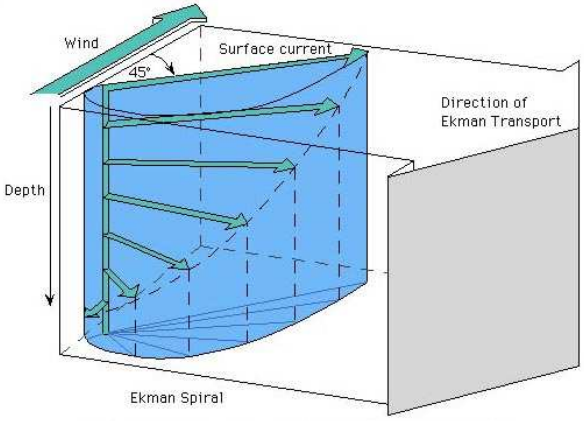
- (5.3)式から，風応力（　　）が東向きの場合と，北向きの場合の，それぞれに，流れの向き（　　）を描きこもう．（北半球f>0)とする．



- つまり，エクマン流は，風が吹いて行く方向に向かって，　　手の方向に流れる．（南半球では，　　手の方向）．

3次元構造

- 3次元的に流を考えると，[　　]という流れのパターンとなる．



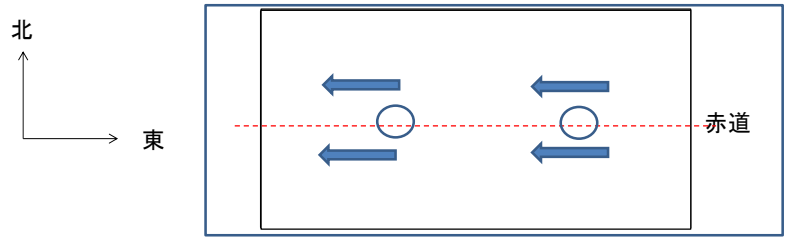
Adapted from Thurman, Harold V. **Essentials of Oceanography, 5th ed.** Prentice-Hall, Inc., 1996.

総流量は風向きの直角右向きで，層モデルの結果に一致．

このらせん流が存在する範囲（海洋表面から[　　]）を[　　]という

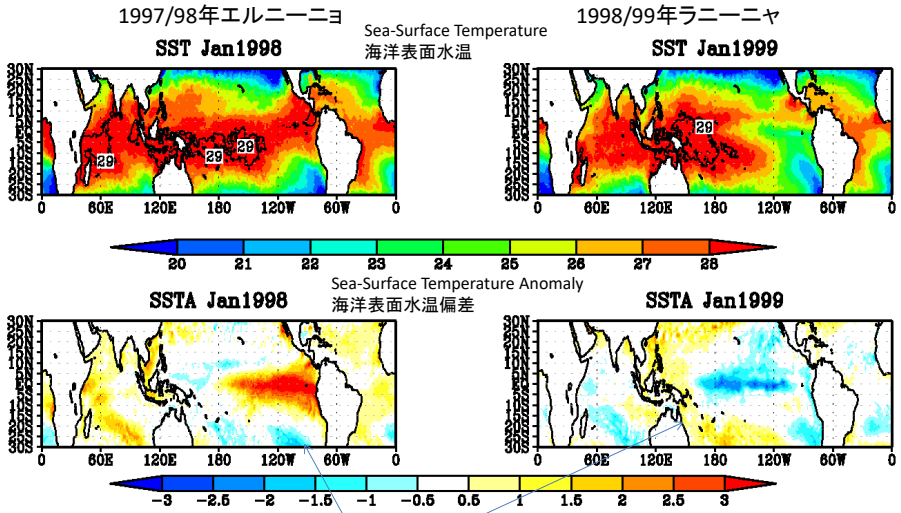
赤道域でのエクマン流

- 太平洋の赤道域では，東風（西向きの風）である，貿易風が卓越している．この場合のエクマン流（ ➡ ）を描きこもう．風応力を ➡ で示している．



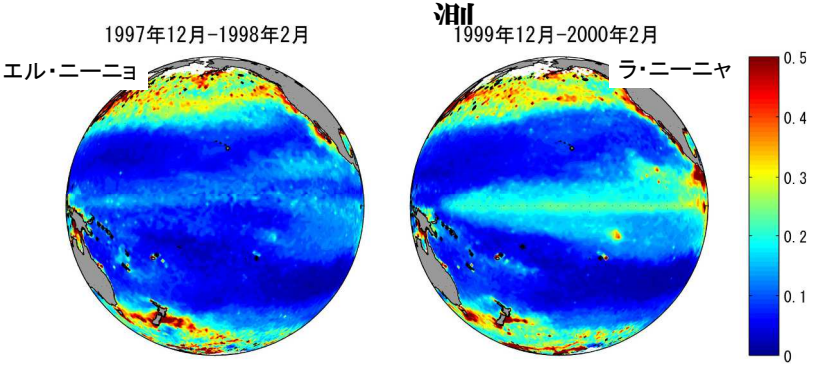
- またエクマン流の収束・発散を補うように，鉛直流が生じる．湧昇流なら ⊙ で，沈降流なら ⊗ で描きこもう．
- またエクマン流の収束・発散を補うように，[　　]流が生じる．これを[　　]といい，それによる栄養分輸送が赤道域での高い生物生産を支え，また[　　]にも重要．

エクマン流はエルニーニョにも重要



赤道に沿って温度変化が大きいのは，エクマン流がもたらす赤道湧昇の変化による

衛星による海色（植物プランクトン）観測

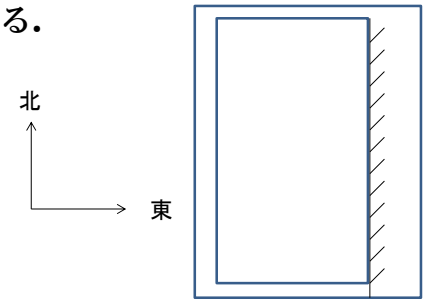


見延 (2008, 地球と生命の進化学)

上下の密度差が大きい亜熱帯海域(30S～30N)は，海面から100m程度の有光層への栄養素の供給が乏しい海の砂漠である．しかし，赤道湧昇によって栄養分が有光層により深い層から供給されるので，赤道に沿って植物プランクトンが多く，特に[　　]で多い．

東岸域でのエクマン流

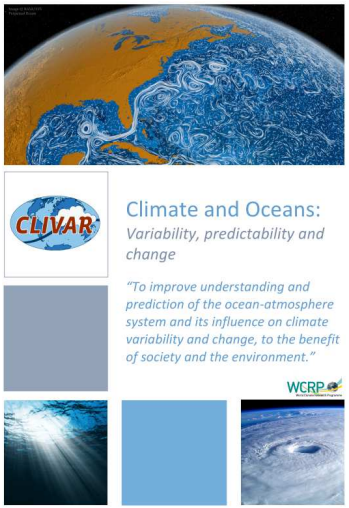
- Q.　大洋の東岸域では，岸に沿う風が吹くと，エクマン流が岸に直交するので，沿岸湧昇または沈降が生じる．有名な領域には，[　　]沿岸がある．カリフォルニア沿岸に，沿岸湧昇をもたらす風は，北風か南風かを答え，前のスライドと同様の図にまとめよ．
- A. [　]風である．

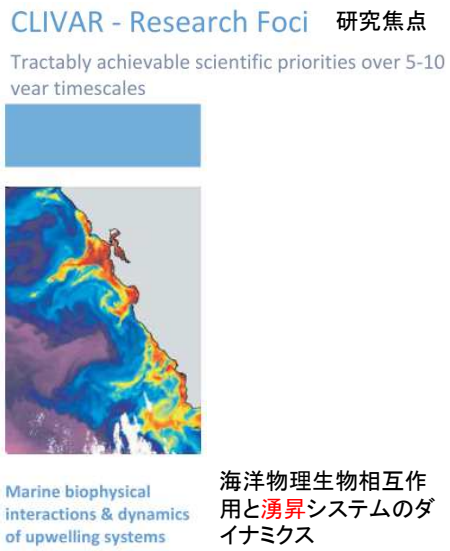


世界的に注目を集める湧昇

- 気候変動・変化を研究する，４つの主な国際的な研究プロジェクト（の集合体）が
- CLIVAR (ｸﾗｲﾊﾞｰ)
  - Climate and Ocean – Variability, Predictability and Change
  - 気候と海洋：変動・予測可能性・変化

CLIVAR パンフレット

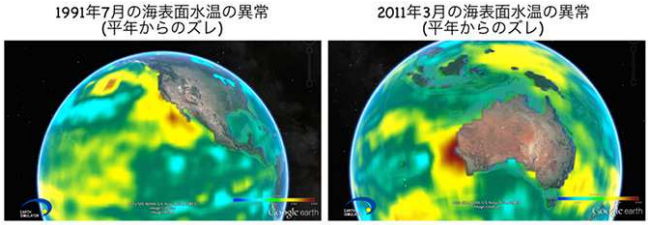




海洋物理生物相互作用と湧昇システムのダイナミクス

湧昇域ニーニョ

- [　　]に発生する[　　]である，ニンガルーニーニョ，カリフォルニアニーニョなどが2010年代半ばより続々と発見．
- 湧昇域では，海洋の変化が海面水温に影響し，そのため大気に影響しやすいことが重要．
- 現在のIPCC級モデルでは再現できない→今後の研究ネタに



観測データから得られた海の表面の水温異常(1983-2006年で平均した平年値からのズレ，単位は度)。暖色が水温が平年より異常に暖かいことを示す。左図:1991年7月の状況。カリフォルニア半島沖合が平年より暖かく、カリフォルニアニーニョが発生している。右図:2011年3月の状況。オーストラリア沖合が平年より暖かく、ニンガルーニーニョが発生している。

（研）海洋研究開発機構提供

第五回まとめ1/2

- 低気圧が悪天候をもたらす重要なひとつの要因は，[　　]により[　　]気流が生じるためである．
- 風が海を押す力を，風応力といい，　$\vec{\tau} =$ [　　]　(5.1再掲)
- 風応力が直接駆動する準定常な流れを，[　　]流といい，北半球では風下に向かって[　]手方向に流れる．

$u =$ [　　]　$v =$ [　　]　(5.3再掲)

- 赤道で東風が吹けば，エクマン流が[　]方向に流れ，赤道で発散 が生じるので，それを補うように[　　]が生じる．これを[　　]湧昇と呼ぶ．
- 赤道湧昇は，気候変動現象の[　　]にも重要

第五回まとめ2/2

- 東岸域では，[　]風がエクマン流を通じて湧昇をもたらす．これを[　　]湧昇と呼ぶ．
- 沿岸湧昇域での，局所的な大気海洋結合変動現象である[　　]ニーニョ，[　　]ニーニョなどが発見されている．