8. エル・ニーニョの（短時間）フィードバック

見延　庄士郎（海洋気候物理学研究室）

本日の内容

- 今回と次回とで，エルニーニョのメカニズムを，大気海洋の相互作用の結果生じるフィードバックの観点から学ぶ．
- エルニーニョのメカニズムでは３か月程度までの短期間に生じるフィードバックと，数年の長期間で生じるフィードバックが重要であり，今回は前者について扱う．
- これらのフィードバックがエルニーニョを非常に強力な気候変動現象とするとともに，その予測を可能とさせている．

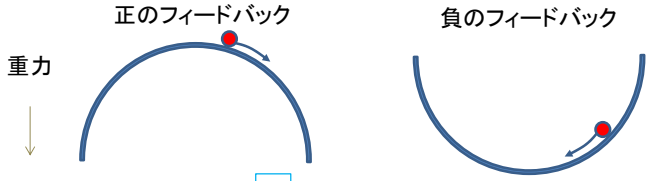
準備：フィードバックと平衡状態

なぜエルニーニョは変動が大きいのか？

- この問題を考えるのに，まず
  なぜ気候は，[　　]のか？
  つまり変動を[　　]とするのか
- を議論しよう．

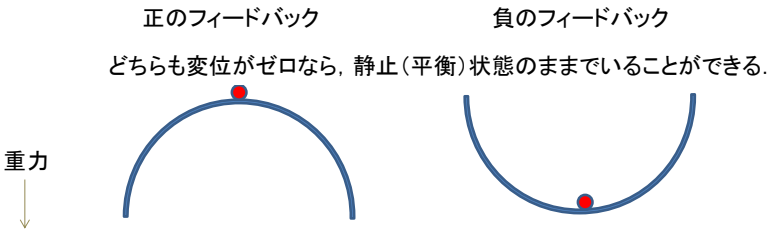
負のフィードバック，正のフィードバック

- フィードバックとは，結果（出力）が原因（入力）に影響することをいう．
- 結果が原因を強めるように働くのを，
- 結果が原因を弱めるように働くのを，　　という．



- $du/dt+bu=0$で，$b>0$なら　のフィードバック，$b<0$なら　 の フィードバックである．（ちょっと引っかけです）

平衡状態



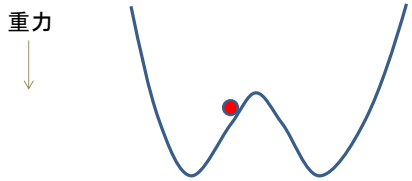
平衡状態とは，システムに外からまたは内部で働く力や作用が　　その結果，

　　状態である．

平衡状態の安定・不安定について考えると，正のフィードバックの平衡状態は一般に　　で，負のフィードバックの平衡状態は一般に　　である．

正のフィードバックと複数平衡状態

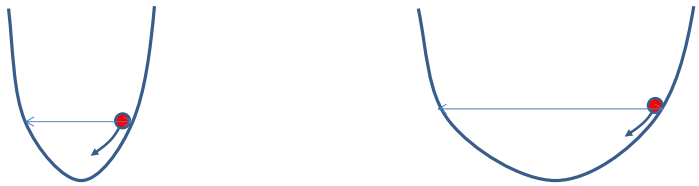
- 正のフィードバックは，それだけだと，変動がどんどん成長してやがては　　になってしまう．したがって，
  - 微小振幅 では　 のフィードバック，
  - 大振幅 では　 のフィードバックという組み合わせ，
- であることが必要．
- この場合，二つ（以上の）　　が生じる．
- この場合の振動現象は，このフォードバック以外の力や作用が働いて，　　することが一般的．



平衡状態である平衡点に印を付けてください．(1分)

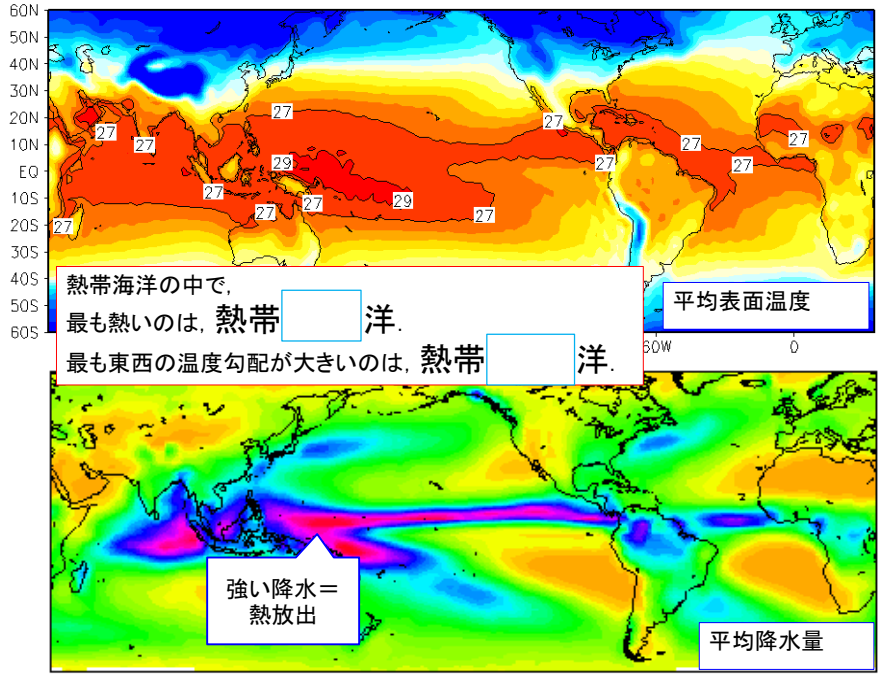
負のフィードバックと振動

- 負のフィードバックは，それだけでは振幅ゼロに落ち着いて，それ以降は変化しなくなる．
- しかし，現実には，システムに内在する　　や，　　が働いて変動することが一般的である．
- この時，負のフィードバックが大きいなら，振動の振幅は　　く，負のフィードバックが小さいなら，振動の振幅は　　くなる．



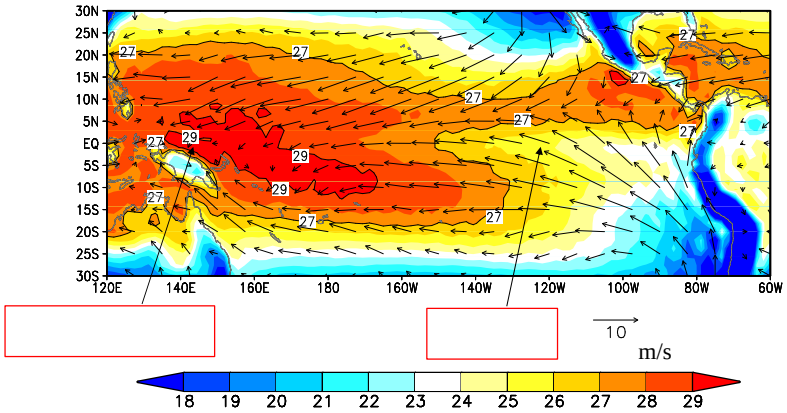
熱帯太平洋に働く大気海洋間のフィードバック：通常の状態

エルニーニョは熱帯太平洋で生じ，熱帯大西洋やインド洋にはこれほど大きな変動はない．何が熱帯太平洋を特別にしているのかを，フィードバックの観点から調べよう．



熱帯海洋の中で，
最も熱いのは，熱帯［　　］洋．
最も東西の温度勾配が大きいのは，熱帯［　　］洋．

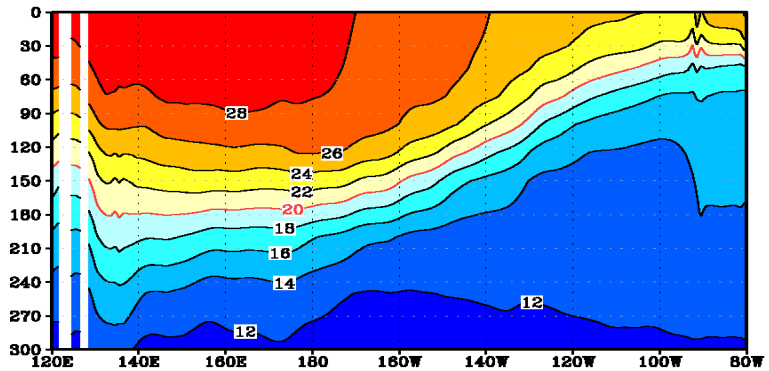
熱帯太平洋の平均的な状態



［　　］　［　　］

特徴：西で暖かく，東で冷たい表面水温．
⇒西部赤道太平洋で活発な降水活動と［　　］加熱．
⇒そこに生じる（上昇or下降 気流）
⇒太平洋上からそこに吹き込む西向きの風（［　　］風）

水温の東西鉛直断面



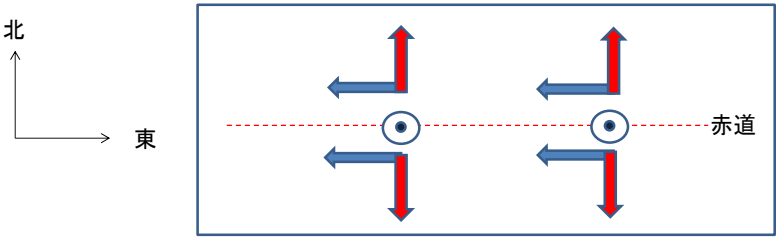
＊ 16度～22度くらいの等温線が密であり，そこでは鉛直方向に急に水温が変化している．これを［　　］という．

＊ 水温躍層は，西で深く東で浅い．これは西向きに吹く［　　］風によって，［　　］ためである．

赤道域でのエクマン流

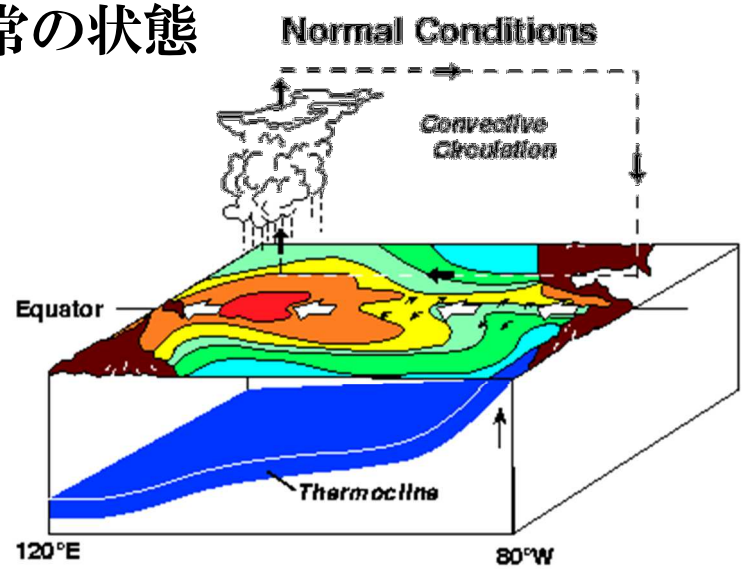
第5回スライド再掲

- 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ている．

通常の状態

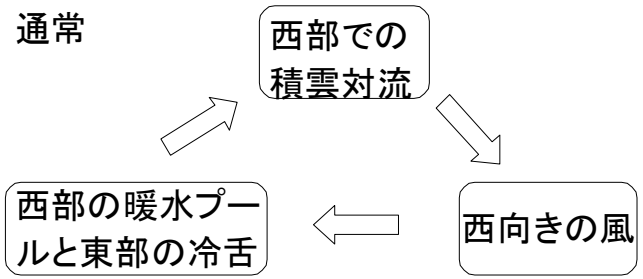


- エルニーニョに関して，最も有名な模式図．

NOAA, PMEL

赤道大気・海洋のフィードバック

通常



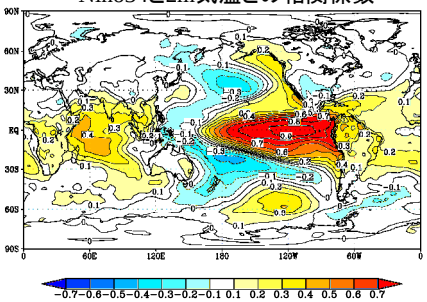
このフィードバックを，　　と呼ぶ．

ビヤークネス・フィードバックがエル・ニーニョに果たす役割

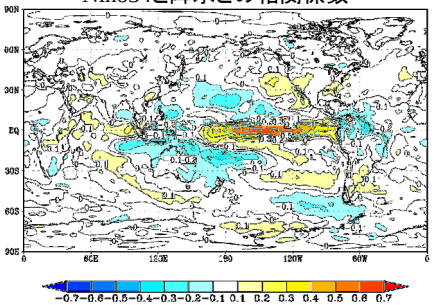
Nino3.4との相関係数

第一回の図再掲

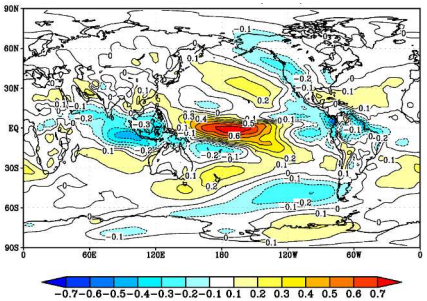
Nino34と2m気温との相関係数



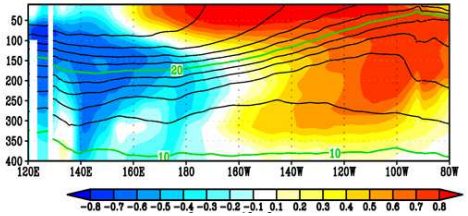
Nino34と降水との相関係数



Nino34と10m東向き風速との相関係数



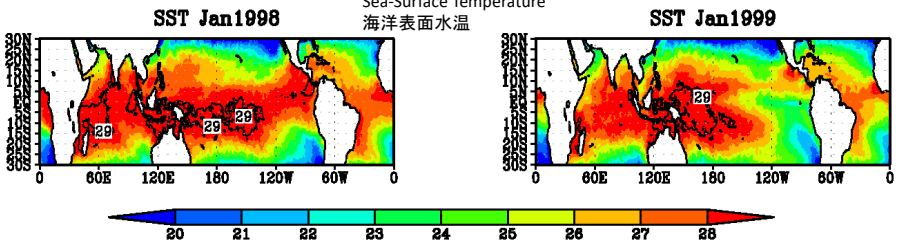
Nino34と赤道直下での水温との（同時）相関係数



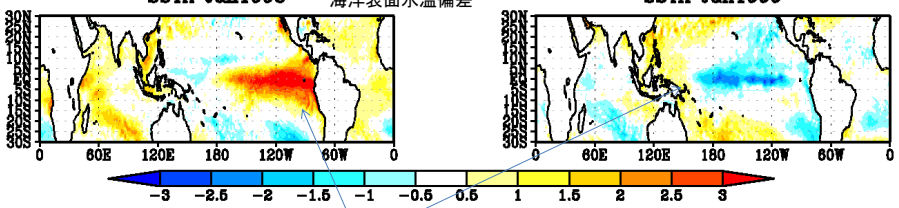
第5回スライド再掲

エクマン流はエルニーニョにも重要

1997/98年エルニーニョ　　Sea-Surface Temperature 海洋表面水温　　1998/99年ラニーニャ



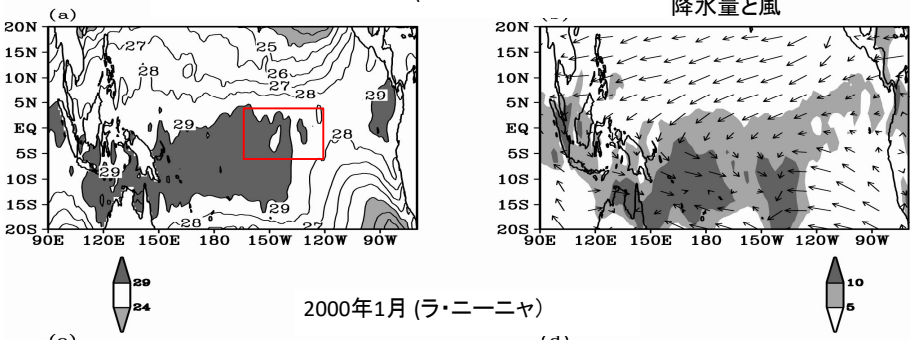
Sea-Surface Temperature Anomaly 海洋表面水温偏差



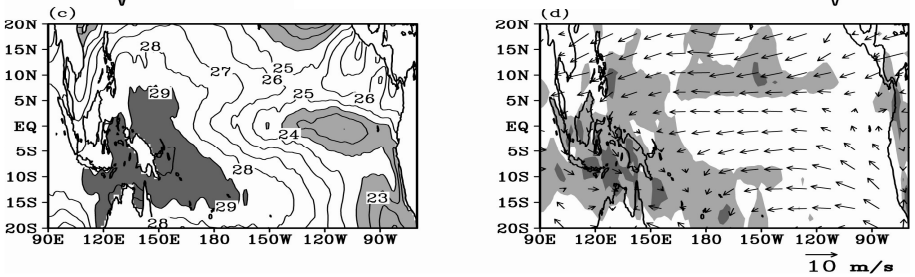
赤道に沿って温度変化が大きいのは，エクマン流がもたらす　　の変化による

第1回スライド再掲

表面水温　　1998年1月 (エル・ニーニョ)　　降水量と風

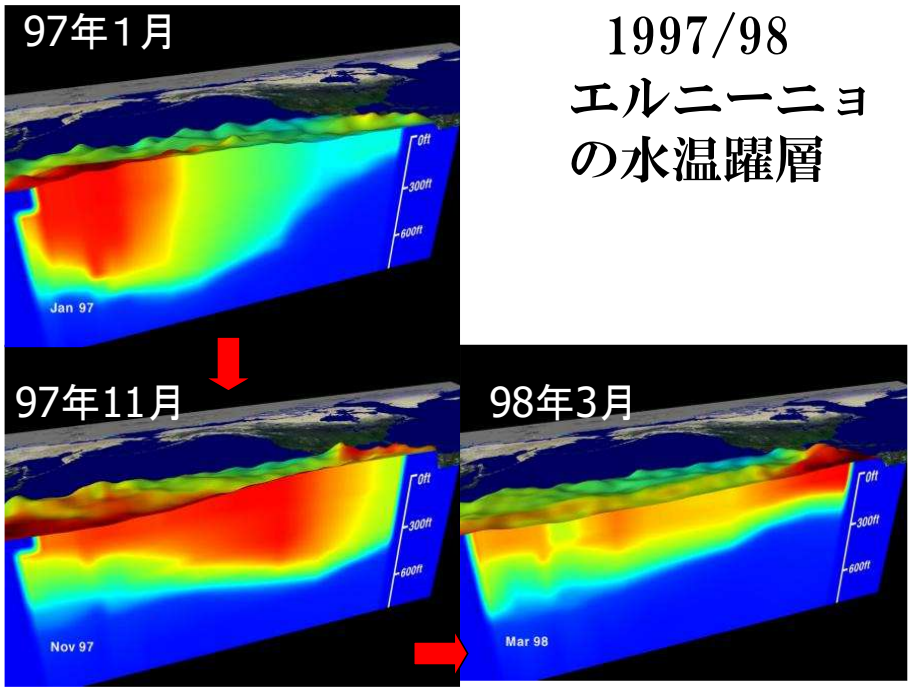


2000年1月 (ラ・ニーニャ)



見延 (2008, 地球と生命の進化学)

1997/98 エルニーニョの水温躍層



赤道大気・海洋のフィードバック

通常

西部での積雲対流

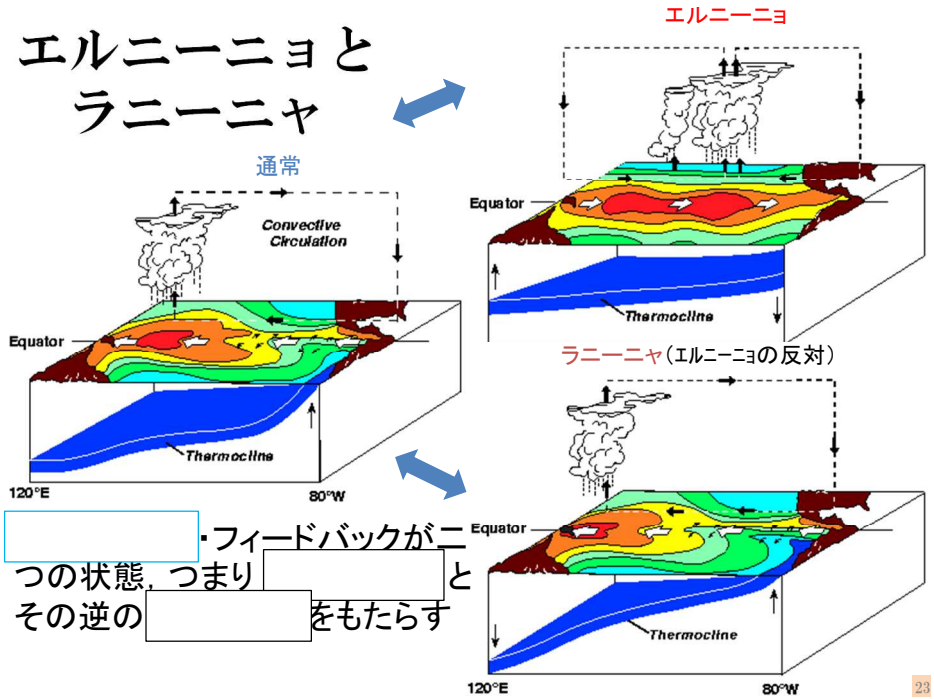
西向きの風

西部の暖水プールと東部の冷舌

Q. エルニーニョでは，ビヤークネス・フィードバックによる関係が強まるか弱まるかを答えよ.

A. [ ]

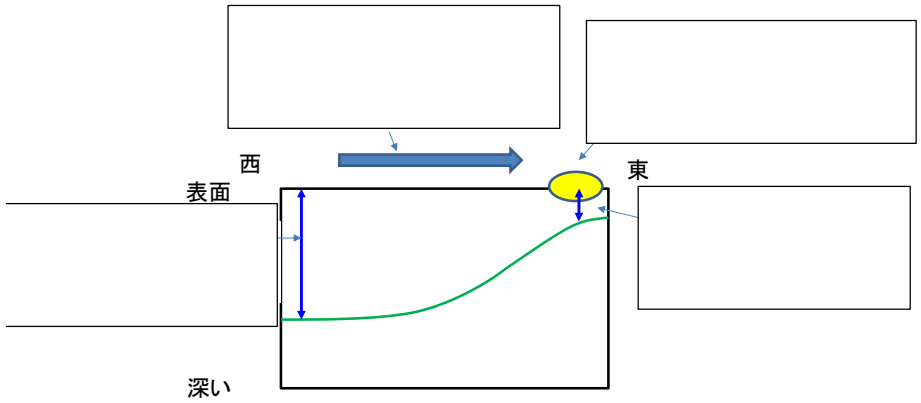
エルニーニョとラニーニャ



[ ]・フィードバックが二つの状態，つまり[ ]とその逆の[ ]をもたらす

ビヤークネス・フィードバックを式で表してみよう

モデル化で扱う変数



ビヤークネス・フィードバック

以下でa, b, c, rは比例係数（定数）である.

- 東太平洋の海面水温が上昇すると，太平洋上では西風偏差になる．（前回の大気応答）
- 西風偏差は，温度躍層の勾配を変える．
- 躍層深度の東西平均は変わらないとする．
- 東太平洋の躍層が深くなると，水温が上昇しようとする（h_EがdT_E/dtに影響する）一方，温度偏差を減衰させる効果も考える．
- Q. (1)-(4)からT_Eのみの式(1変数1式)を導き，フィードバックが正負いずれであるかを述べよ．

(1)

(2)

(3)

(4)

5分，正解は式で数行で導けるが，試行錯誤を入れるとその2・3倍は式を書く必要があるだろう

フィードバックが正になるのは，　，大小関係が逆なら負

比例係数を一つ求めてみよう

Q．風応力がある場合の運動方程式(2.5a)を，1.5層モデルについて書くと下のように書ける．

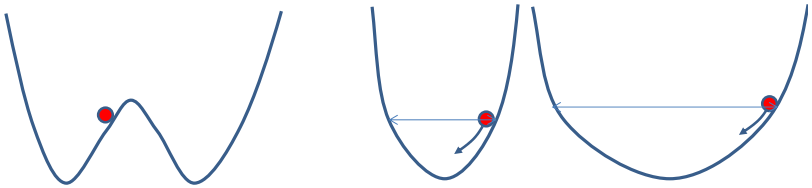
$$u_t - fv = -g'h_x + \tau^x/(\rho_0 H) \quad (2.5a')$$

赤道における準定常を仮定して時間変化項を無視し，太平洋の東西幅(L)で風応力と躍層の東西勾配は一定として，一つ前のスライドの(2)式，$h_E - h_w = b\overline{\tau}^x$，の比例係数$b$を求めよ．風応力は赤道上で一様とする．

正解は式で3行で導けるが，試行錯誤を入れるとその2・3倍は式を書く必要があるだろう

フィードバックで考えるエルニーニョ

- ビヤークネス・フィードバック自体は　　のフィードバック．
- しかし，一般に気候システムでは気候状態を維持しようとする負のフィードバックが卓越する．よって正味のフィードバックは，正のビヤークネス・フィードバック＋他の負のフィードバックで，これが正になるか負になるかは未解決．
- 全体として正のフィードバックなら，エルニーニョとラニーニャは二つの　　状態としての性質を持つ．
- 全体として負のフィードバックなら，ビヤークネス・フィードバックが負のフィードバックを　　めるために，エルニーニョの振幅は大きいものとなる．



地球温暖化に伴うフィードバックの変化

theguardian
Winner of the Pulitzer prize

Sunday 19 January 2014 18.11 GMT

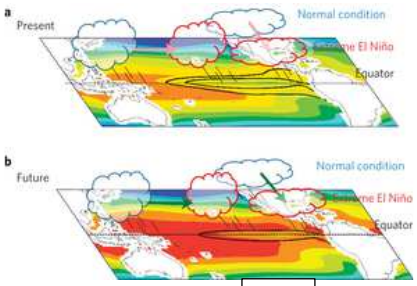
Unchecked global warming 'will double extreme El Niño weather events'

Research shows world's most devastating global weather phenomenon will occur once a decade under current emissions scenario

nature climate change LETTERS

PUBLISHED ONLINE: 19 JANUARY 2014 | DOI: 10.1038/NCLIMATE2100

Increasing frequency of extreme El Niño events due to greenhouse warming



温暖化によって　　が周辺よりも暖まり，水温変動が降水変動をもたらす効果が大きくなり，ビヤークネスフィードバックが　　なって，巨大エルニーニョが生じやすくなる．

次の疑問：なぜエル・ニーニョは数年毎に発生するのか？

- フィードバック・ループ：
  - 積雲対流⇒西向き風⇒西部の暖水プールと東部の冷舌
- このフィードバック・ループだけなら，行ったきりになりそうだ（□のフィードバックの場合）．
- ビヤークネス・フィードバックに要する時間は３ヶ月程度であり，これだけでは数年に一度エルニーニョが発生することは説明できない．
- 海洋中に保存される情報が数年毎の発生に役立っているに違いない⇒次回）．

第８回のまとめ　1/2

- フィードバックとは，□が□に影響することをいう．
- 結果が原因を強めるように働くのを，□のフィードバックという．
- 微小振幅で正のフィードバックが働く場合は，大振幅では□のフィードバックが働き，二つ以上の□状態が生じ得る．
- 一定の外力でも，負のフィードバックが弱いと，□い振幅が生じる．
- 熱帯太平洋は，西部の暖かい表面海水の□プールとそこでの強い降水・大気加熱，東部の冷たい表面水温の□そして東から西へ吹き込む□で特徴付けられる．
- 上記の特徴が強め合うフィードバックを，□フィードバックという．

第８回のまとめ　2/2

- ビヤークネス・フィードバックは，□のフィードバックである．
- ビヤークネス・フィードバックを構成する，因果関係の連鎖は，エル・ニーニョでは□り，一方ラ・ニーニャでは□る．
- 地球温暖化によって，エルニーニョで大きな水温偏差が生じる冷舌が周囲よりも急速に温暖化するために，□エルニーニョが生じる頻度が□倍に増加することが懸念されている．