7．降水・大気加熱・大気応答

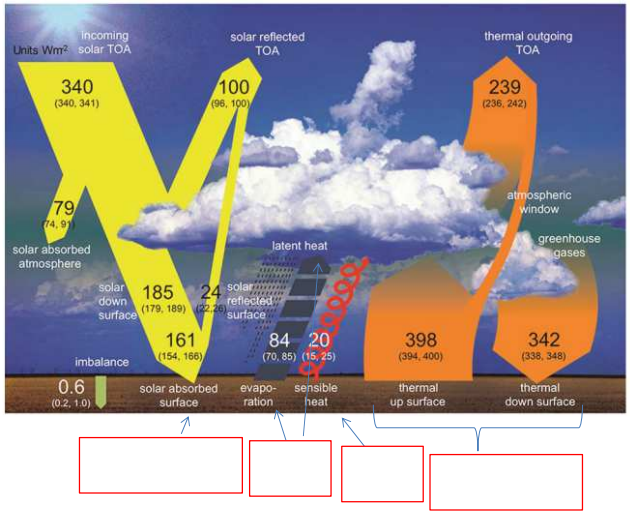
見延　庄士郎（海洋気候物理学研究室）

本日の内容

- エルニーニョで海が大気に大きく影響するのは，海洋が供給した水蒸気が大気中で凝結して大気を加熱するためである．
- これに関連して，大気海洋の熱交換の概要を学び，またエルニーニョ時には，なぜ西風偏差が生じ，また赤道外で低気圧性循環になるのか？
  - この低気圧性循環はエルニーニョの2大メカニズム仮説である，遅延振動子と充填放出振動子でも重要な役割を果たす．
    http://www.sci.hokudai.ac.jp/~minobe/elnino/index.html
- さらに地球温暖化でどのような降水変化が生じることが予想されているのかを，紹介しよう．

海洋と大気の熱交換

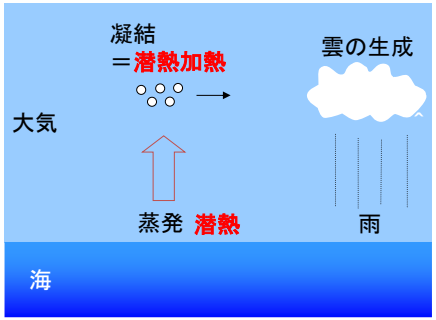
大気・地表との熱のやりとり



IPCC 第五次報告書

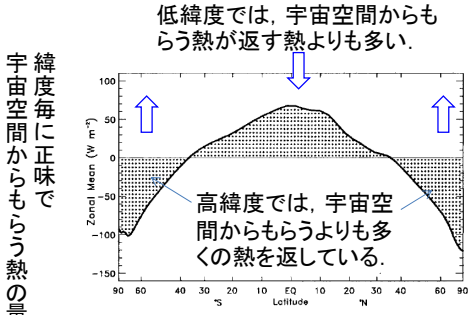
潜熱と顕熱

- 液体の水が気体の水蒸気になる＝[　　]
  - 周囲から熱をもらう（海洋の熱を奪う）
  - この熱が[　　]
- 水蒸気が液体の水になる＝[　　]
  - 周囲に熱を与える（大気に熱を与える）
  - これを[　　]ともいう
  - 雲をつくり雨を降らせる
  - 蒸発だけでなく，凝結してはじめて大気が暖まる（すぐには顕在化しない）
- 海が直接大気を温める＝[　　]



地球の熱バランス

- 地球全体では，宇宙空間からもらう熱と，宇宙空間に返す熱は同じ．



Trenberth and Caron 2001 (J. Climate)

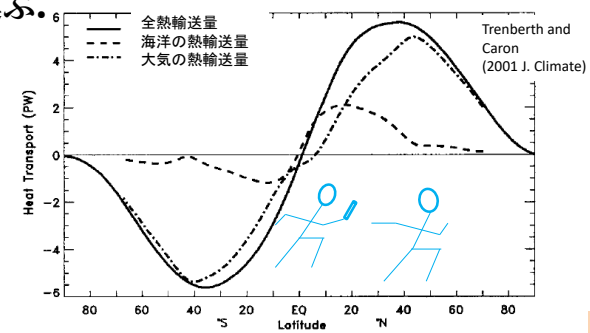
- 熱帯で多くもらった熱を高緯度に運んで，そこから宇宙に返している．
- 熱を運ぶのは，大気と海洋．

大気と海洋の南北熱輸送

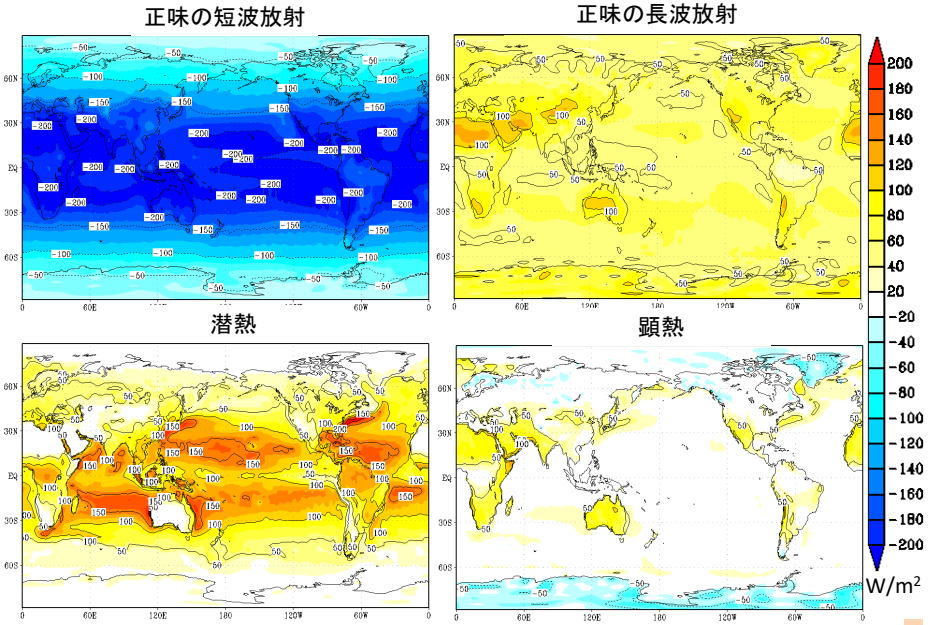
＊　下図を見て，下の四角に「大気」または「海洋」を入れよう．

- 全体としては，[　　]による熱輸送＞[　　]による熱輸送
  - 低緯度では，[　　]による熱輸送＞[　　]による熱輸送
- 20-40Nでは，[　　]の熱輸送量が減少する分だけ，[　　]の熱輸送量が増加している．
  - つまり[　　]が運んだ熱が[　　]に放出され，[　　]がさらに極方向に運ぶ．

＊[　　]から[　　]へのリレー．

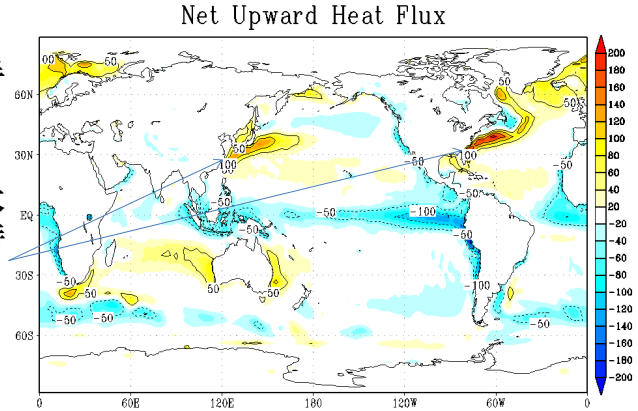


熱フラックス４成分（上向き正）



正味の上向き(海洋→大気)熱フラックス

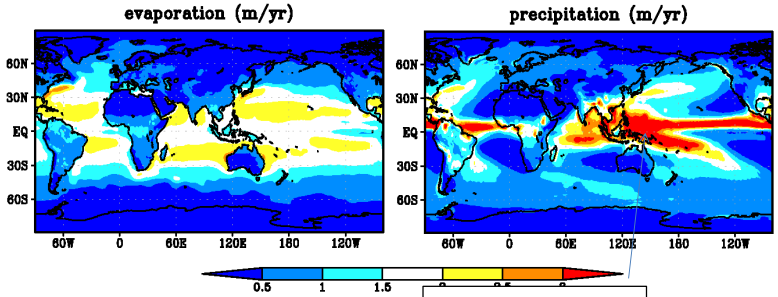
- 熱帯で負　　前スライドの４成分の和
  - 大気→海洋
- 中高緯度(特に北半球)で正
  - 海洋→大気
  - 北太平洋と北大西洋の西部で特に強い
  - この熱輸送を担う海流は第６回に登場した，[　　]と[　　]



上向きの正味熱フラックス．等高線は±50, 100, 150, 200 W/m²示す．

蒸発と降水の分布

- 熱帯域では[　　]よりも[　　]ははるかに 局在化 した分布を示す

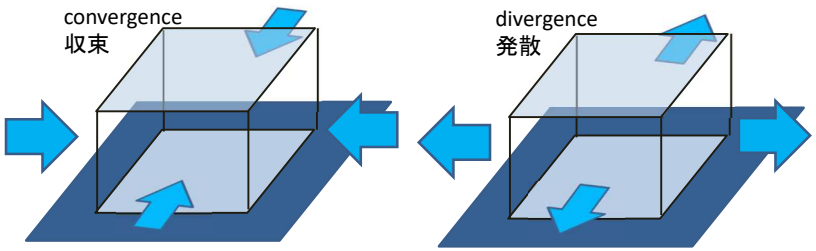


[　　]で最大であることはエルニーニョに重要．

水蒸気収支と大規模な降水パターン

水蒸気収支

$$\iint 降水 - 蒸発 \; ds$$
$$= 水蒸気収束$$
$$= \iint 入ってくる風速 \times 水蒸気量 \; dl\, dz$$



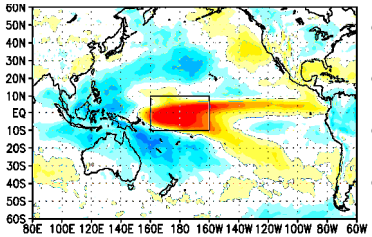
- 後で見るように，大気加熱（降水）があれば，そこで上昇気流＝水平収束が生じるので，ますます降水が集中しやすくなる．

熱帯の２層（傾圧）応答および渦位保存

熱帯降水変動が対流圏上・中・下層にもたらす影響

熱帯降水量変動との相関・回帰係数

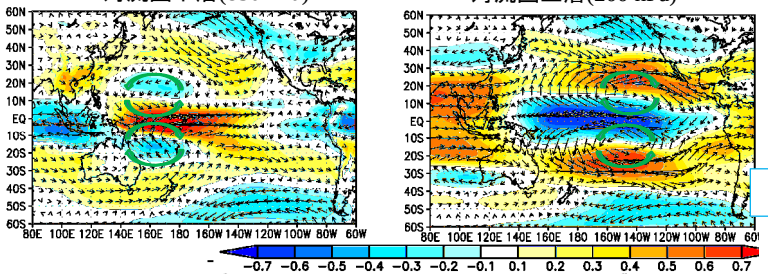
対流圏中層（500 hPa）上向き風速との相関



- 降水増加→
- 対流圏中層で　　気流
- 対流圏上層で　　気圧性回転
- 対流圏下層で　　気圧性回転

東西風との相関（カラー）＆東西南北風との回帰係数（矢印）

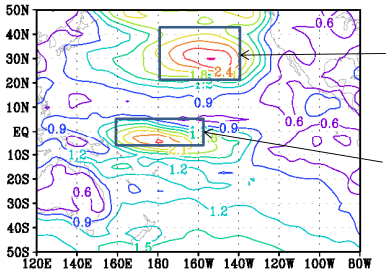
対流圏下層(850 hPa)　　対流圏上層(200 hPa)



熱帯では対流圏上下層で運動が，　　になる傾向

中高緯度と低緯度とで異なる運動モード

冬平均の１０００ hPaでの東西風速の標準偏差(m/s)



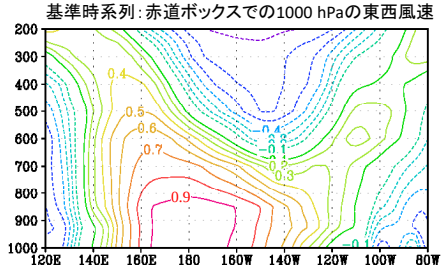
中緯度ボックス 20-40N, 180-140W

赤道ボックス 5S-5N, 160E-160W

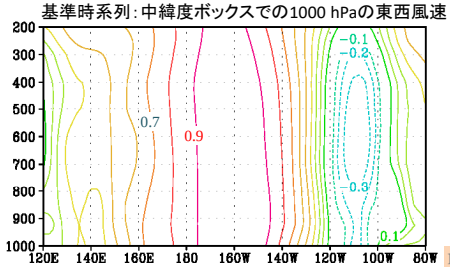
- 赤道では上下が　　動く　　運動が卓越
- 中緯度では上下が　　に動く　　運動 が卓越

ボックス内で水平平均した各高度の東西風速の相関係数の鉛直分布

基準時系列：赤道ボックスでの1000 hPaの東西風速

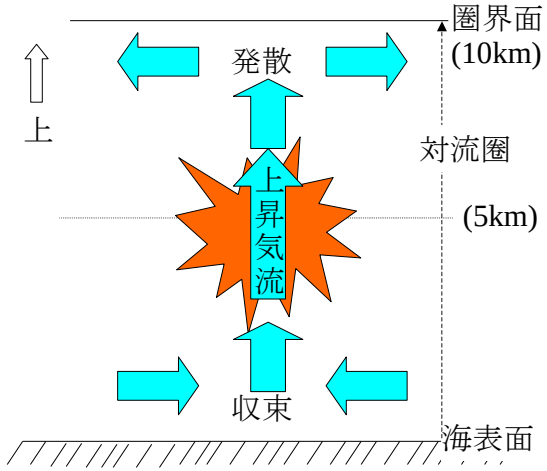


基準時系列：中緯度ボックスでの1000 hPaの東西風速



熱帯の上下逆向き運動

熱帯の大気運動には，水蒸気凝結（＝降水・潜熱加熱）が重要．



- しかしこれだけでは，回転成分を説明できない．

保存量

-
-
-
- →渦位（地球流体）

- 保存量が重要なのは
  - 非線形でも使える頼もしい奴
  - 多くの物理的な解釈を生み出す

渦位

- 一般的な力学における角運動量保存に，地球流体で相当する保存量が，[　　]である．

渦位＝[　　]　(7.1)

- f ＝[　　]を[　　]と呼び，北で大きく，南で小さい．
- ζ＝[　　]を[　　]と呼び，反時計回りで正．
- $|f| \gg |\zeta|$
- したがって，北半球で流体柱が鉛直に**収縮**すると，
  - f でバランスするなら，流体は（南or北）に移動
    - 流体柱の厚さが一定なら，流体は同じ緯度にとどまろうとする．実はこの働きが，ロスビー波をもたらしている．
  - ζでバランスするなら，流体は（時計回りor反時計回り）に回転　⇒[　　]気圧性回転

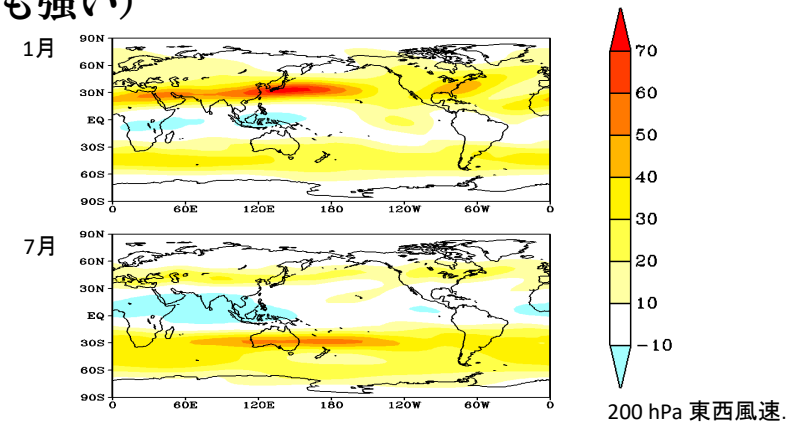
渦位保存で理解する熱帯大気の回転成分

$$\text{渦位} = \frac{\text{惑星渦度}+\text{相対渦度}}{\text{流体柱の高さ(厚さ)}} = \frac{f+\zeta}{h}$$

- 赤道を中心として，上昇気流があるとする．
- すると上層の大気柱が収縮する(hが[　　]くなる)ので，渦位の分母が[　　]くなろうとする．
- 渦位保存によって，相対渦度が変化する．
- 北半球ではもともとの渦位が正なので，[　　]の相対渦度，つまり[　　]気圧性循環が生じる．
- 南半球ではもともとの渦位が負なので，[　　]の相対渦度，つまり[　　]気圧性循環が生じる．

渦位保存はジェット気流にも重要

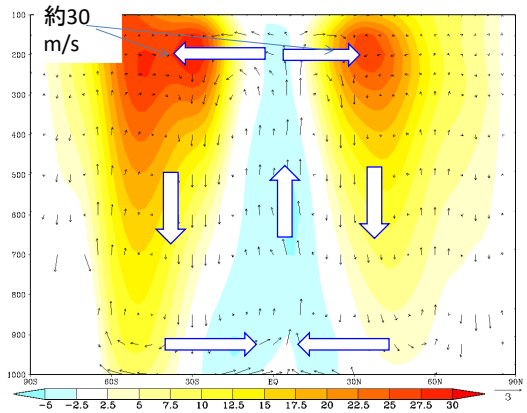
- ジェット気流大陸から海に出たところで強い
- 冬に強い←温度の[　　]勾配が強い(→圧力勾配も強い)



200 hPa 東西風速.

ジェット気流と[　　]循環

気候値の東西平均した年平均東向き風速（カラー,m/s）と上向きと(0.01 Pa/s)北向き風速(m/s)（矢印）.



南北風速は小さく渦位は

$$\frac{f+\cancel{v_x}-u_y}{h}$$

赤道で静止している空気が北に移動すると

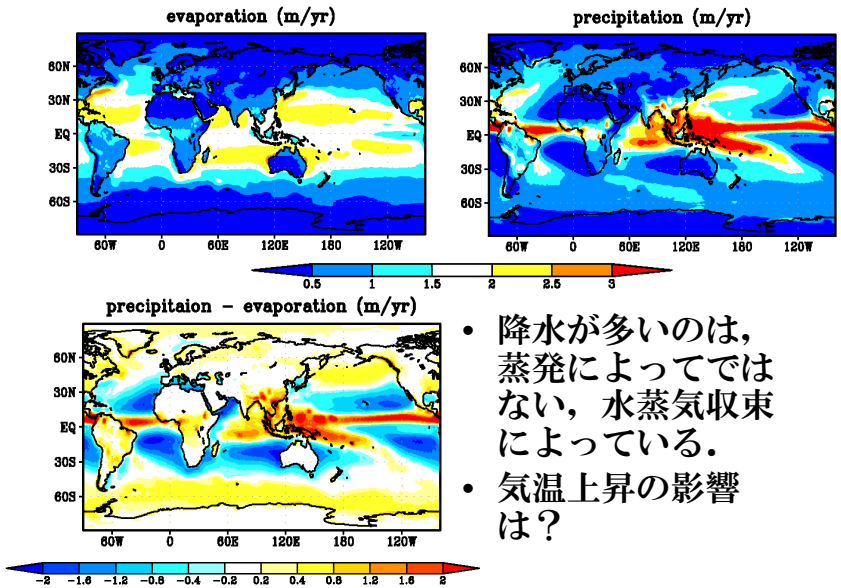
$$\frac{0}{h}=\frac{f-u_y}{h} \Rightarrow u_y = f$$

したがって，北半球では北に向かって速度が増加する．

渦位の保存から，[　　]は，上空のハドレー循環の[　　]にできる．

地球温暖化と降水変化

Precipitation − evaporation 降水-蒸発

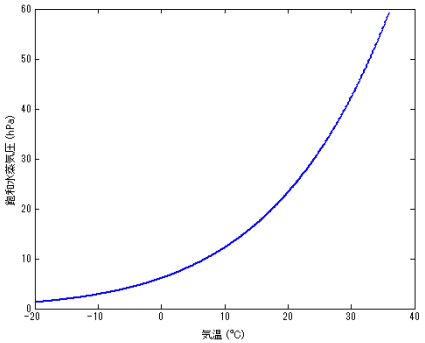


- 降水が多いのは，蒸発によってではない，水蒸気収束によっている．
- 気温上昇の影響は？

飽和水蒸気量と相対湿度

- 飽和水蒸気圧は，気温が高いほど［　　］い．
- 温暖化でも相対湿度は，［　　］と予想されている．
- このため，温暖化は，大気中に保持される水蒸気量を［　　］させる．
- したがって，たとえ大気循環が変化しなくても，水蒸気の収束発散の振幅は大きくなり，水循環が［　　］る．

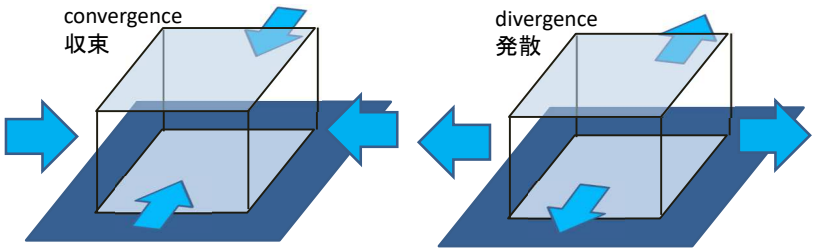
$$\text{相対湿度}(\%) = \frac{\text{実際の水蒸気圧}}{\text{飽和水蒸気圧}} \times 100$$



水蒸気収支と大規模な降水パターン再掲

水蒸気収支

$$\iint \text{降水} - \text{蒸発}\ ds$$
$$= \text{水蒸気収束}$$
$$= \iint \text{入ってくる風速} \times \text{水蒸気量}\ dl\ dz$$

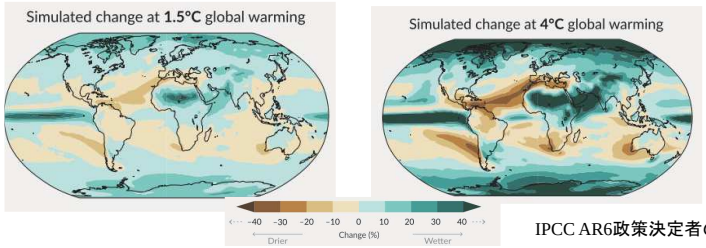


- 大気中の水蒸気量が増加すると，大気循環（風）が同じでも，水蒸気の収束域つまり P-E［　　］0 の地域では，降水量-蒸発量が［　　］する．一方，水蒸気の発散域では，降水量-蒸発量が［　　］する．

Wet (will) get wetter, dry get drier.

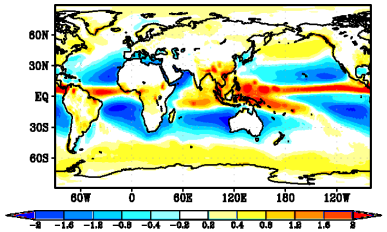
1850-1900年平均に対する降水量変化.
1.5℃上昇の場合（温暖化小）

4℃上昇の場合（温暖化大）



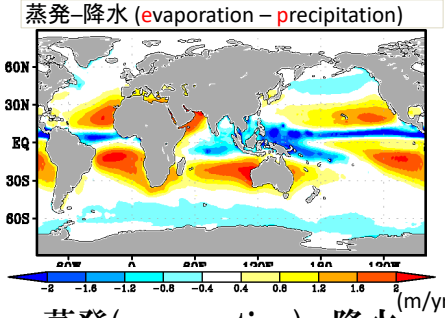
IPCC AR6政策決定者のための要約

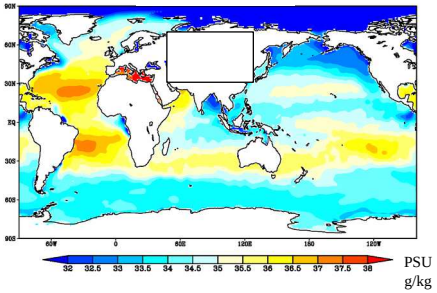
precipitaion − evaporation (m/yr)



水循環が強まると現在湿潤な地域は，[　　]となり，乾燥している地域は[　　]することが懸念されている．このパターンを，[　　]という．

蒸発−降水 (evaporation − precipitation)



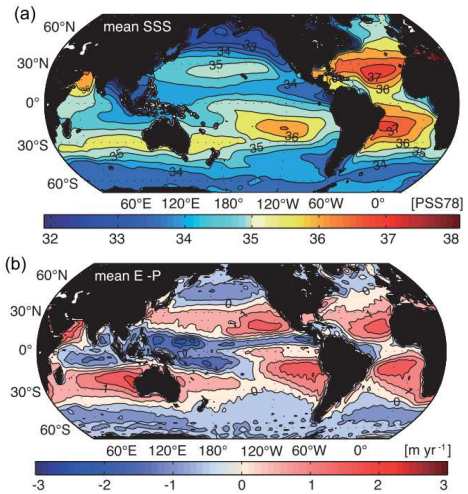


- 蒸発(evaporation) −降水(precipitation)を，[　　]と言う．
- 温暖化でE-Pの振幅が，[　　]することが予想されている．
- しかし蒸発を正確に測定することは難しい．そこでE-Pの変わりに海洋の[　　]を測ることで，モニターしようとしている．

SMOS (Soil Moisture & Ocean[　　])
衛星，2009年11月~

IPCCも注目！

- 海洋表面塩分は，降水が蒸発よりも多い地域で[　　]く，蒸発が降水よりも多い海域で[　　]い．
- したがって水循環が強まれば現在塩分が高い海域では塩分が[　　]くなり，塩分が低い海域では塩分が[　　]くなるはず．



IPCC AR5, WG1, Chap 3

SSPシナリオと放射強制力

SSPシナリオ

- IPCC-AR6では，[　　]Shared Socioeconomic Pathways（[　　]）シナリオが使われている．
- SSPシナリオは，”–”で結ばれる二つの数値で示され，最初の数値が[　　]と[　　]における位置づけ，二つ目の数値は放射強制力である（1.9 新設）．

図 1　SSP1-5のシナリオのコンセプト。

国立環境研究の解説
https://www.nies.go.jp/whatsnew/20170221/20170221.html
より(2021/11/12アクセス)

主要4シナリオ

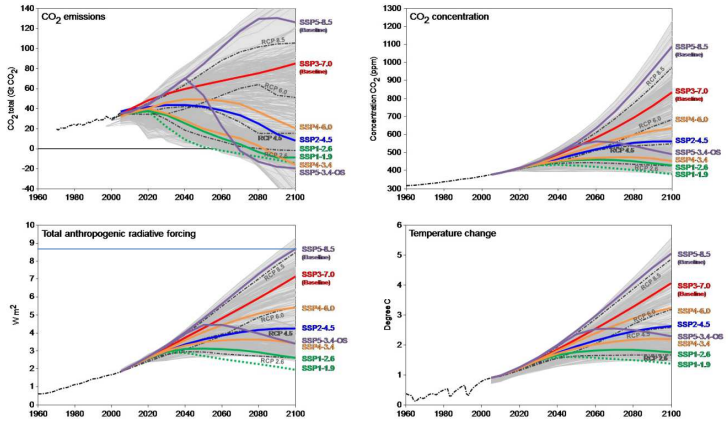
全国地球温暖化防止活動推進センターの解説
https://www.jccca.org/global-warming/trend-world/ipcc6-ssp　より(2021/11/12アクセス)

放射強制力

- 地球温暖化についての放射強制力は，一番簡単な場合については，次のように求める．
  - (1)まず，気候変化が起こる前（[　　]時）の[　　]と大気の[　　]，[　　]濃度を与えて，大気上端での[　　]を求める
  - (2)次に，地表面温度と大気の温度構造はそのままで，[　　]濃度を増加させて，同様に大気上端での地球放射を求める．
  - ここで(2)の地球放射は，温室効果ガスによる吸収が増えるので，(1)よりも[　　]して，正味では(2)では(1)よりも下向きの放射が[　　]る．これが放射強制力である．

温室効果ガスと放射強制力

- SSPシナリオと，AR-5で用いられたRCPシナリオでは，同じ放射強制力の値が付けられていても，[　　]は異なる．
- また放射強制力のラベル値が同じでも，SSP5-8.5の全放射強制力は，RCP8.5の値よりも若干大きくなっている．

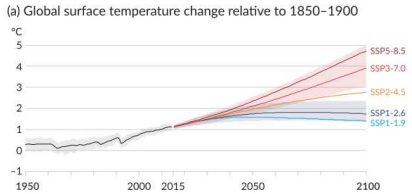


気温はシナリオ評価用の簡易モデルによる

O'Neill et al. (2016)

シナリオ毎の気温変化

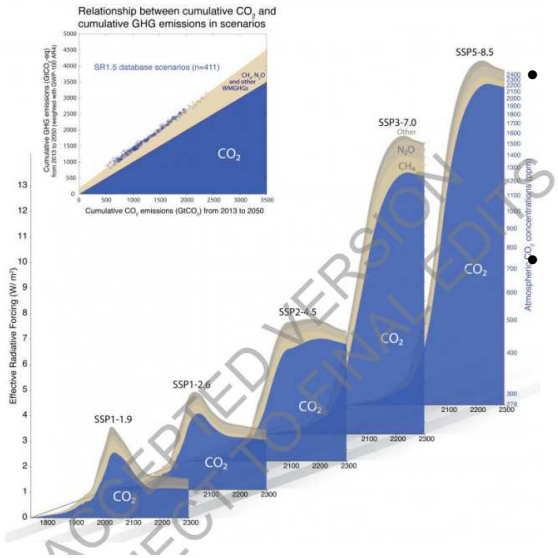
[　　]年に合意，[　　]年に発行したパリ協定はの目標である，全球表面気温の上昇を[　　]℃未満に抑えるには，基準評価で少なくとも[　　]が，努力目標である[　　]℃未満に抑えるには[　　]に従うことが必要である．



	Near term, 2021–2040		Mid-term, 2041–2060		Long term, 2081–2100	
Scenario	Best estimate (°C)	*Very likely* range (°C)	Best estimate (°C)	*Very likely* range (°C)	Best estimate (°C)	*Very likely* range (°C)
SSP1-1.9	1.5	1.2 to 1.7	1.6	1.2 to 2.0	1.4	1.0 to 1.8
SSP1-2.6	1.5	1.2 to 1.8	1.7	1.3 to 2.2	1.8	1.3 to 2.4
SSP2-4.5	1.5	1.2 to 1.8	2.0	1.6 to 2.5	2.7	2.1 to 3.5
SSP3-7.0	1.5	1.2 to 1.8	2.1	1.7 to 2.6	3.6	2.8 to 4.6
SSP5-8.5	1.6	1.3 to 1.9	2.4	1.9 to 3.0	4.4	3.3 to 5.7

IPCC AR6政策決定者のための要約

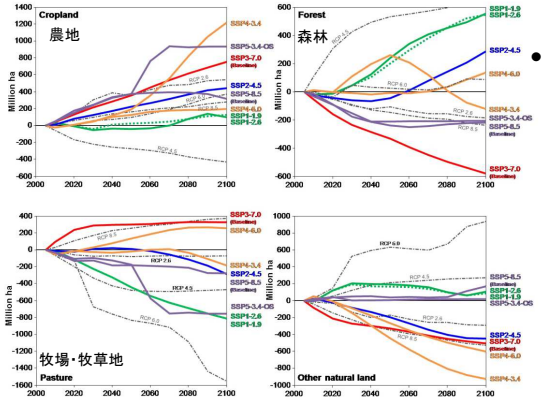
IPCC-AR6でのSSPシナリオの図



- 温室効果ガスは，二酸化炭素だけでなく，
  - CH_4 [ ]
  - N_2O [ ]
- もシナリオで規定されている．

土地利用

- SSPシナリオ・RCPシナリオでは，温室効果ガスの排出量のみならず，[ ] [ ] なども規定している．



- ビヨンド・ミートなど代替肉産業の躍進の背景にあるのは，[ ] の減少が見込まれていることである．

O'Neill et al. (2016)

第７回まとめ 1/2

- 大気海洋間の熱交換は，[ ]，[ ]，[ ]，[ ] の４種類がある．
- 潜熱は，[ ] によって海洋から大気に供給された水蒸気が，大気中で [ ] することにより，大気を [ ] する．この際，[ ] が生じる．
- 気候時間スケールで降水を決定するのは，蒸発の他に，水蒸気の [ ] である．
- 熱帯大気では上下が逆方向に運動する [ ] 圧運動が卓越し，中高緯度では同じ方向に運動する [ ] 圧運動が卓越する．
- 熱帯での大気加熱に伴い，対流圏上層で [ ] 気圧性循環が生じる．これは [ ] の保存から大気柱の [ ] を，[ ] 渦度でバランスする傾向があるためである．
- 渦位保存は大気の [ ] 循環にも重要である．

第７回まとめ 2/2

- 地球温暖化では，[ ] 湿度があまり変わらない一方，[ ] 圧が増加するので，大気中の水蒸気量が増加する．そのため，全体的に [ ] 循環が強化され，湿潤地域で降水量が増加，乾燥地域で減少する [ ] と呼ばれる降水変化が生じることが懸念されている．
- 蒸発－降水の変化を直接モニターすることが難しいので，海の [ ] をモニターすることで，水循環の変化を理解しょうとしている．
- IPCC-AR6で用いられている主要シナリオは，SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5で，後の数値は [ ] を 表している．
- パリ協定は [ ] 年に合意，[ ] 年に発行．その目標は，全球表面気温の上昇を [ ] ℃未満に抑えることで，上の４シナリオの中では，SSP [ ] が必要である．