オゾン層破壊と紫外線影響評価総論

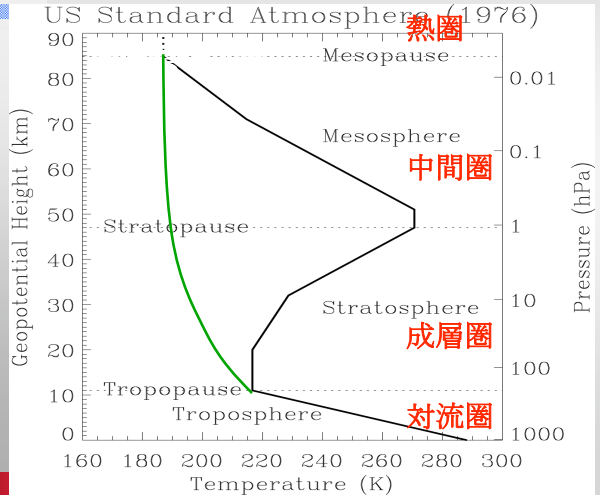
第1部第2講　大気圏の構造

2008年5月12日
地球圏科学部門 気候力学分野
環境起学専攻 大気オゾン課題
長谷部 文雄
f-hasebe@ees.hokudai.ac.jp

第2講　大気圏の構造

- 地球大気圏
  - 大気の鉛直構造
  - 大気の子午面構造
  - 等圧面上の水平分布
- 大気運動の記述
- 大気大循環と物質輸送
  - 対流圏の大気大循環
  - 成層圏の大気大循環

地球大気の鉛直構造



対流圏と成層圏

	対流圏	成層圏
高度領域	地表–高度約 15 km	高度約 15–50 km
温度構造	高度と共に温度が減少	増加
加熱源	表面における放射吸収	オゾンによる太陽紫外線吸収
鉛直安定度	不安定 活発な対流	安定 成層状態

局所直交座標系

- 地球上の基準点で地球に接する平面を考え、その平面上で座標と速度を次のように定義:

	位置の座標	速度
東向き	x	u
北向き	y	v
上向き	z	w

地球の丸みを無視する
->地球に対して十分小さい現象を考察する

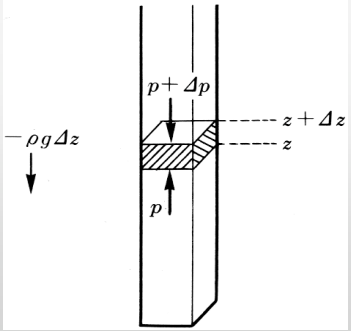
密度成層(鉛直方向の力のつり合い)

- 静水圧平衡

$$p \cdot 1 - \{(p + \Delta p) \cdot 1 + \rho \cdot 1 \cdot \Delta z \cdot g\} = 0$$

$$\frac{dp}{dz} = -\rho g$$

- pはzの減少関数
- p 〈-------〉 z
  1対1対応
- 鉛直座標として気圧を利用
  「気圧座標系」



気圧座標系

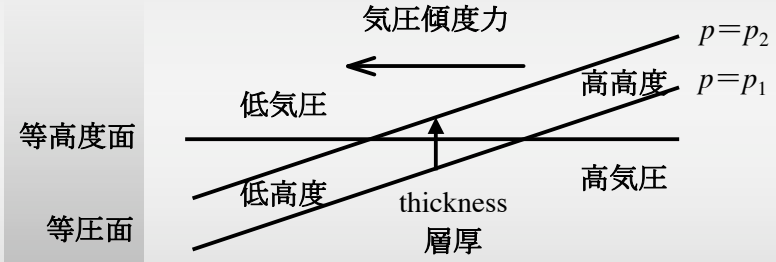
	位置の座標	速度
東向き	x	u
北向き	y	v
下向き	p	ω

等圧面の高さを geopotential Φ と geopotential height Z で表す:

$$\Phi = \int_0^z g\, dz, \quad Z = \frac{\Phi}{g_s}$$

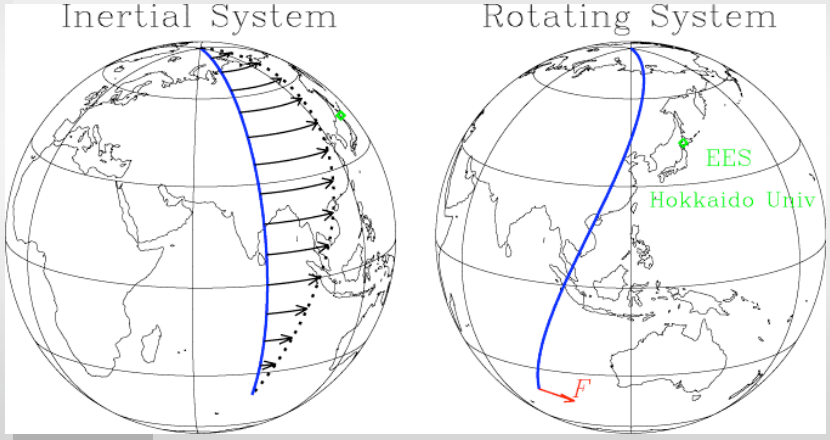
等高度面上の p の分布 $\longleftrightarrow$ 等圧面上の Z の分布

気圧座標系



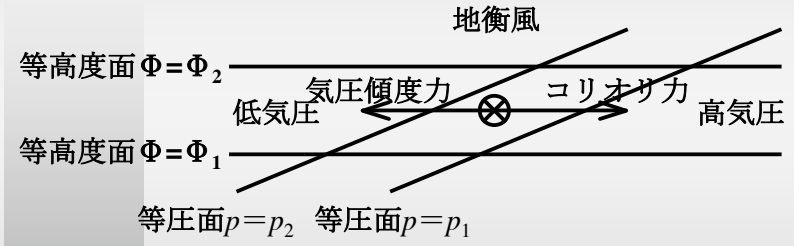
上空の天気図は等圧面の高度分布で表す

Coriolis（コリオリ）力



http://wwwoa.ees.hokudai.ac.jp/~f-hasebe/Coriolis.gif

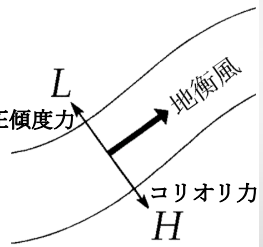
地衡風–水平方向の力のつり合い



北半球の例

地衡風–水平方向の力のつり合い

	気圧傾度力	コリオリ力
主要な力		
大きさ：	Φの水平勾配に比例	運動の速さに比例
方向：	H から L へ	運動と直角
東西成分	$\propto -\dfrac{\partial\Phi}{\partial x}$	$\propto v$
南北成分	$\propto -\dfrac{\partial\Phi}{\partial y}$	$\propto -u$



地衡風：気圧傾度力とコリオリ力とのつり合い

$$-\frac{\partial\Phi}{\partial x}+fv=0,\quad -\frac{\partial\Phi}{\partial y}-fu=0$$

$$\Longleftrightarrow\quad fu=-\frac{\partial\Phi}{\partial y},\quad fv=\frac{\partial\Phi}{\partial x}\quad (f:\text{コリオリ因子})$$

測高公式

Z を p で微分

$$\frac{dZ}{dp}=\frac{dZ}{dz}\frac{dz}{dp}=\frac{g}{g_s}\left(-\frac{1}{\rho g}\right)=-\frac{1}{\rho g_s}=-\frac{RT}{pg_s}$$

$Z=\dfrac{1}{g_s}\displaystyle\int_0^z g\,dz$

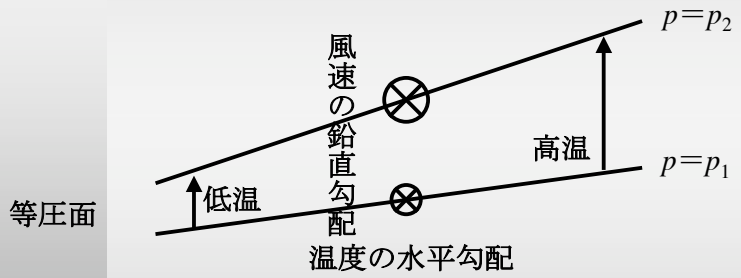
$p=\rho RT$

$\dfrac{dp}{dz}=-\rho g$

$$\Longrightarrow\quad \Delta Z=\frac{RT}{g_s}\cdot\frac{-\Delta p}{p}$$

高度の増加　　気圧の低下

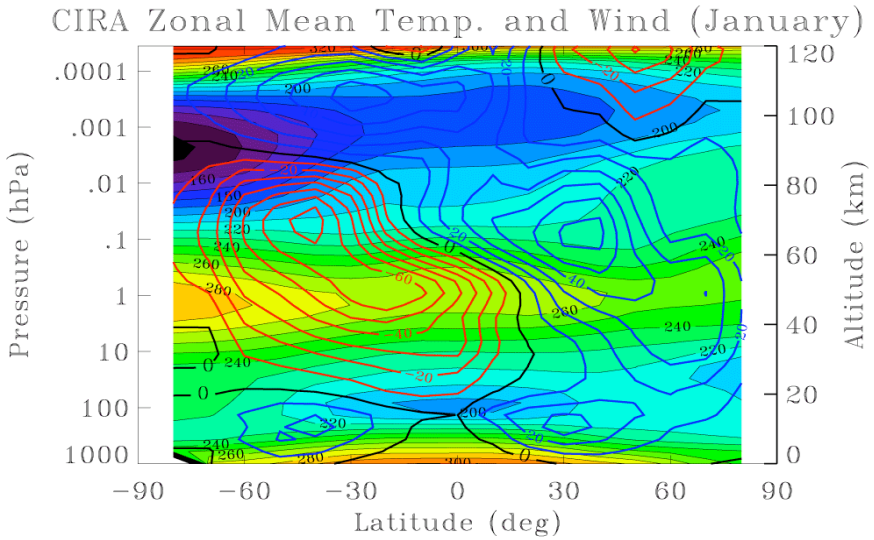
温度風



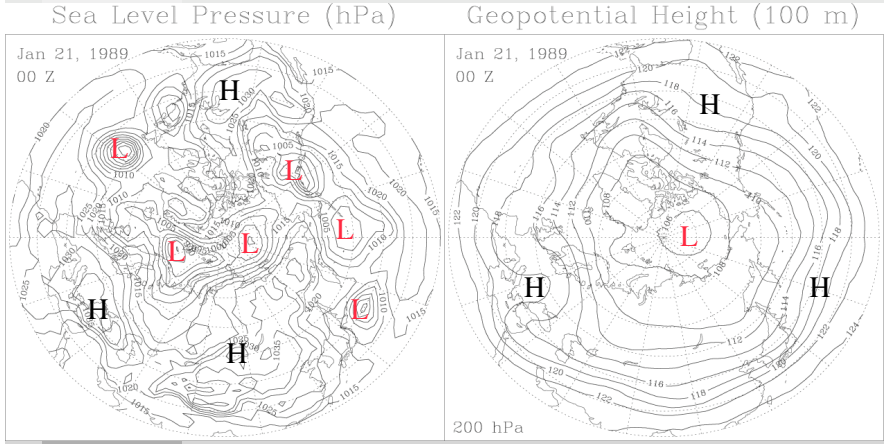
$$\frac{\partial u}{\partial \ln p} = \frac{R}{f}\left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)_p$$

温度風方程式

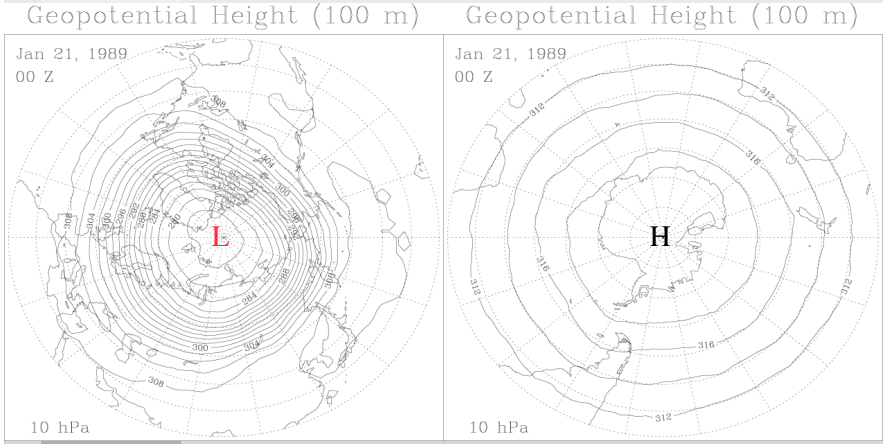
帯状平均気象場の緯度-高度断面



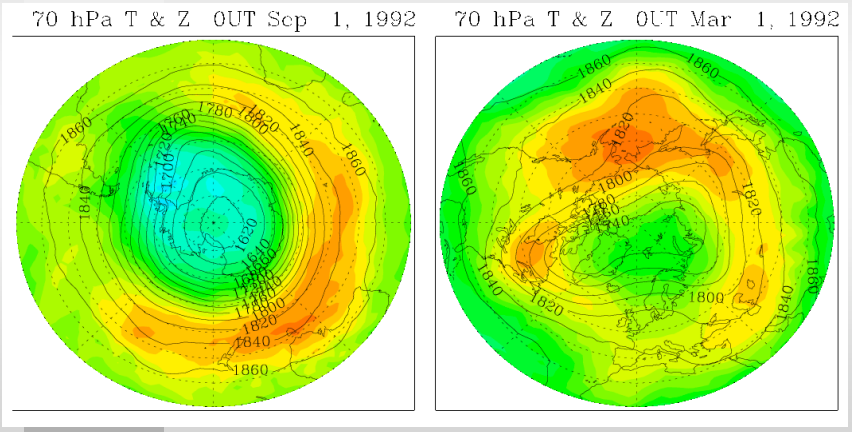
対流圏と成層圏の天気図



対流圏と成層圏の天気図



極渦と極夜ジェット



回転球面上における流体の運動

- 大気運動の支配方程式系
  - 運動量保存則・・・・・・・・運動方程式
  - 質量保存則・・・・・・・・・連続方程式
  - エネルギー保存則・・・・・熱力学方程式
- 非断熱加熱の記述
  - 放射エネルギー収支
  - 凝結の潜熱
- 大気大循環モデル

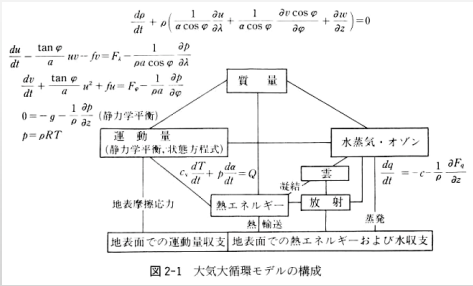
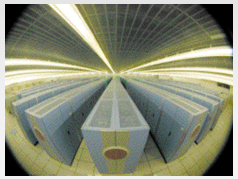


図2-1 大気大循環モデルの構成

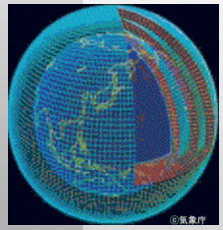
時岡ら(1993)

全球気象予報システム

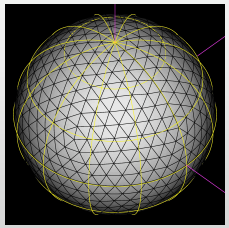
- 高速大規模計算
  - 大気大循環モデルの高解像度化
  - 過度のパラメタリゼーションの回避
  - 大気・海洋結合モデルへの発展



緯度経度格子法

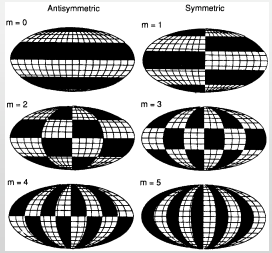


正二十面体格子法



Tomita et al.(2002)

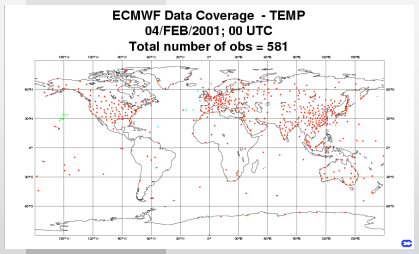
スペクトル法

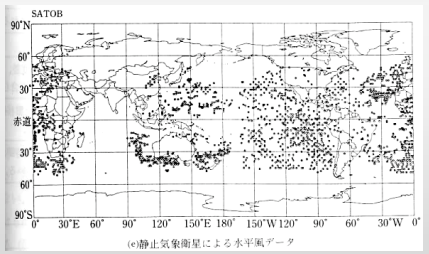


Washington & Parkinson(1986); Holton(2004)

全球気象予報システム

- 観測データの充実
  - 地上・高層気象観測網
  - 人工衛星データの利用

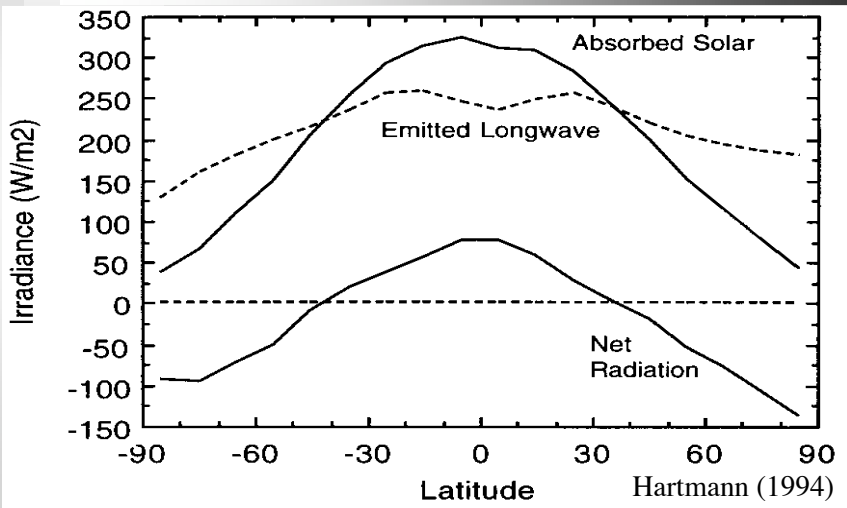




(c)静止気象衛星による水平風データ

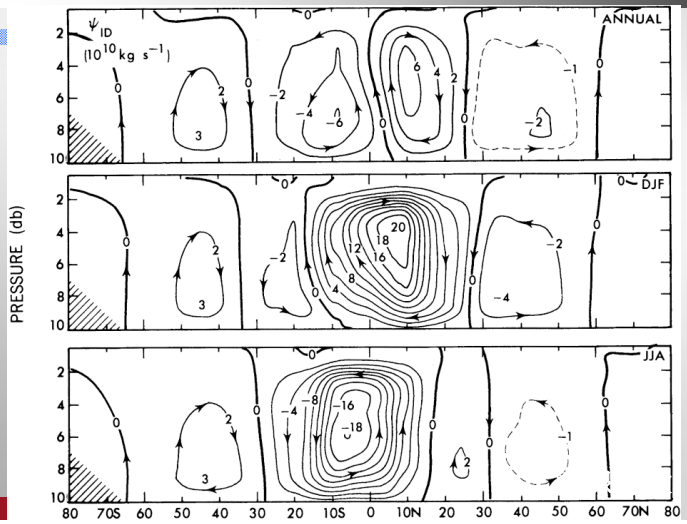
時岡ら(1993)

地球のエネルギー収支



Hartmann (1994)

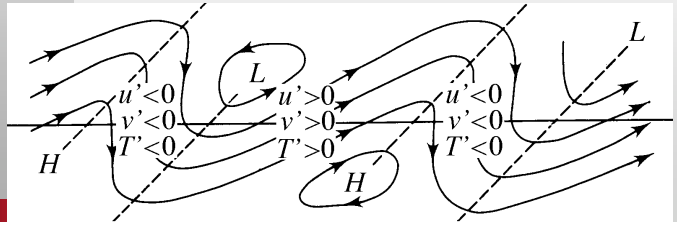
平均子午面循環（Hadley循環）



Peixoto and Oort (1992)

対流圏の大気大循環

- 3細胞循環
  - 低緯度の直接循環・・・・・・ハドレー循環
  - 中緯度の間接循環・・・・・・フェレル循環
  - 高緯度の直接循環・・・・・・・・極循環
- 間接循環の駆動メカニズム
  - 組織化された波動による熱と運動量の輸送



水蒸気の鉛直分布

Brewer (1949)

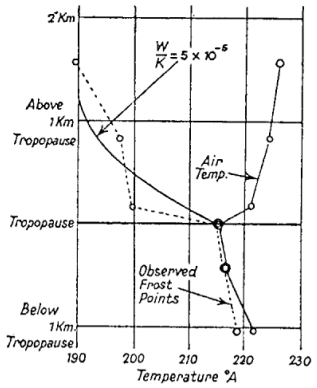
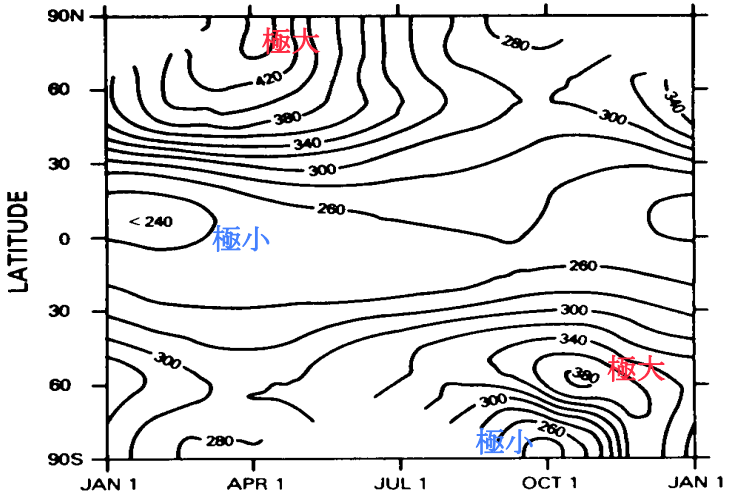


FIG. 1. 30 May 1945. Tropopause ht 33,400 ft.

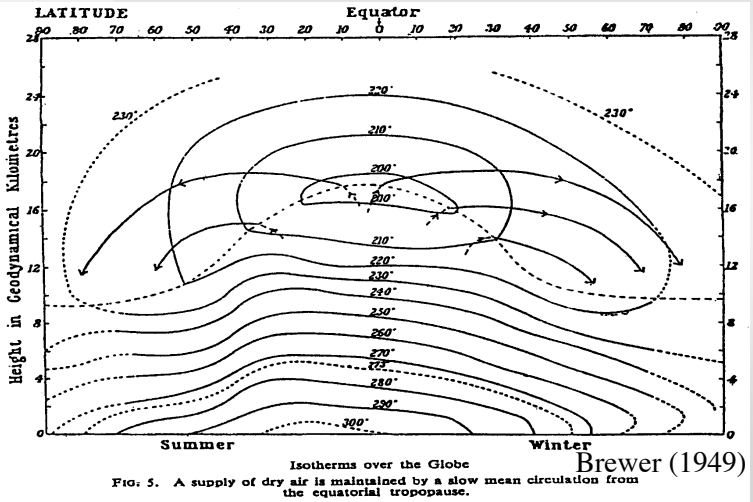
- 対流圏界面より上で水蒸気が減少している
- その場の対流で対流圏大気が成層圏へ流入したとは考えられない
- 赤道成層圏で生成されるオゾンが中緯度により多く存在する
- これらの観測事実を説明するために赤道域から高緯度へ向かいゆっくり下降する成層圏内循環の存在を推定

帯状平均オゾン全量の季節変動



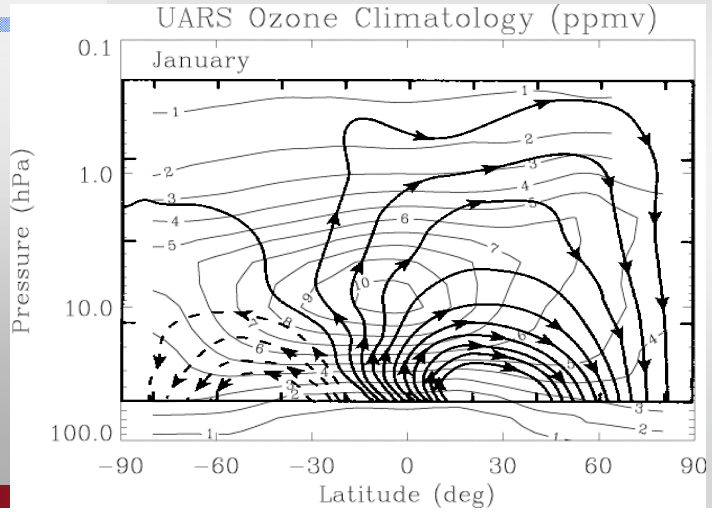
Bowman and Krueger (1985)

Brewer-Dobson循環

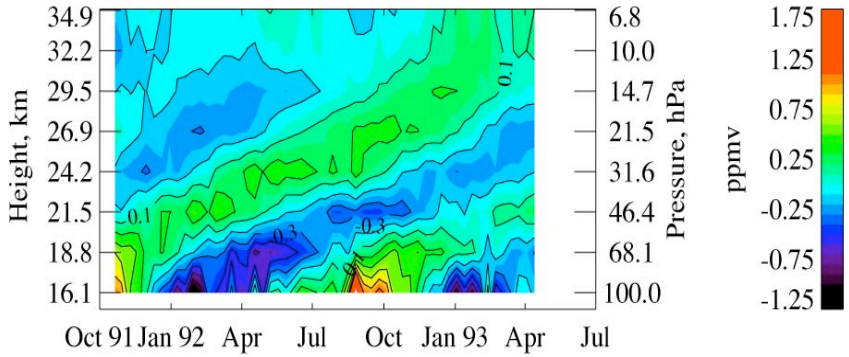


Brewer (1949)

オゾン鉛直分布と大気大循環

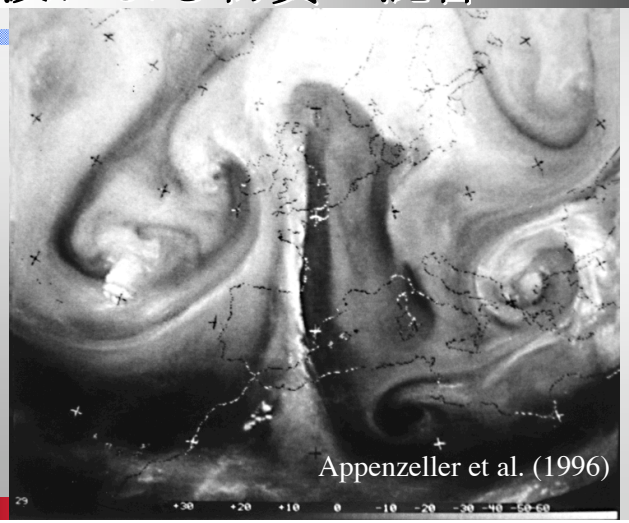


「大気のテープレコーダー」

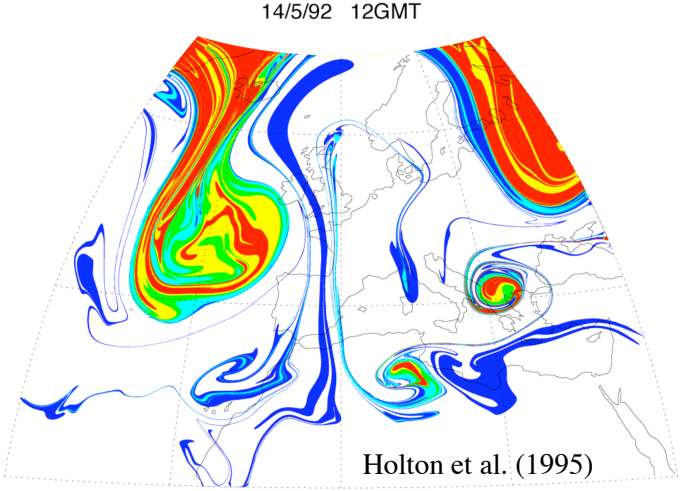


Mote et al.(1996)

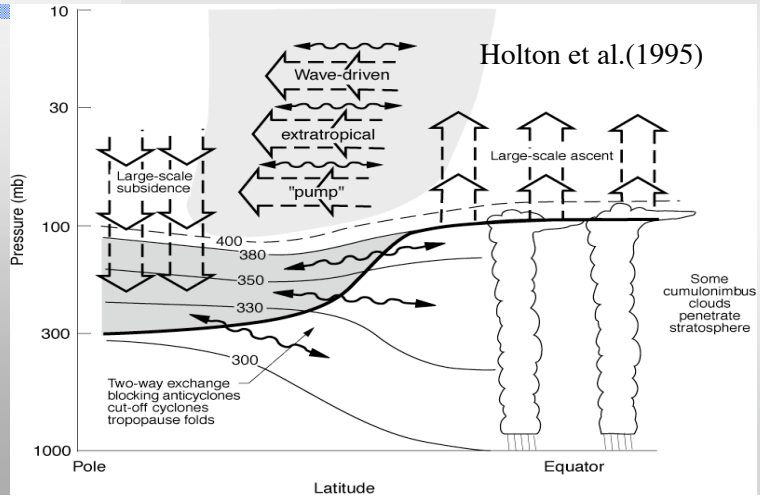
砕波による物質の混合



砕波による物質の混合



成層圏内の物質循環の駆動



大気圏の構造 – まとめ

- 地球大気圏
  - オゾン層と成層圏との対応
  - 静水圧平衡と地衡風
  - 気圧座標系と温度風方程式
- 大気運動の記述
  - 大気運動の支配方程式系
- 大気大循環と物質輸送
  - 対流圏と成層圏の大気大循環
  - 大気微量成分の全球分布
- 発展的内容の講義
  - 大気海洋物理学基礎論(前期前半:月水2講時)
  - 成層圏オゾン変動特論(前期後半:火3講時–後期前半:水4講時)