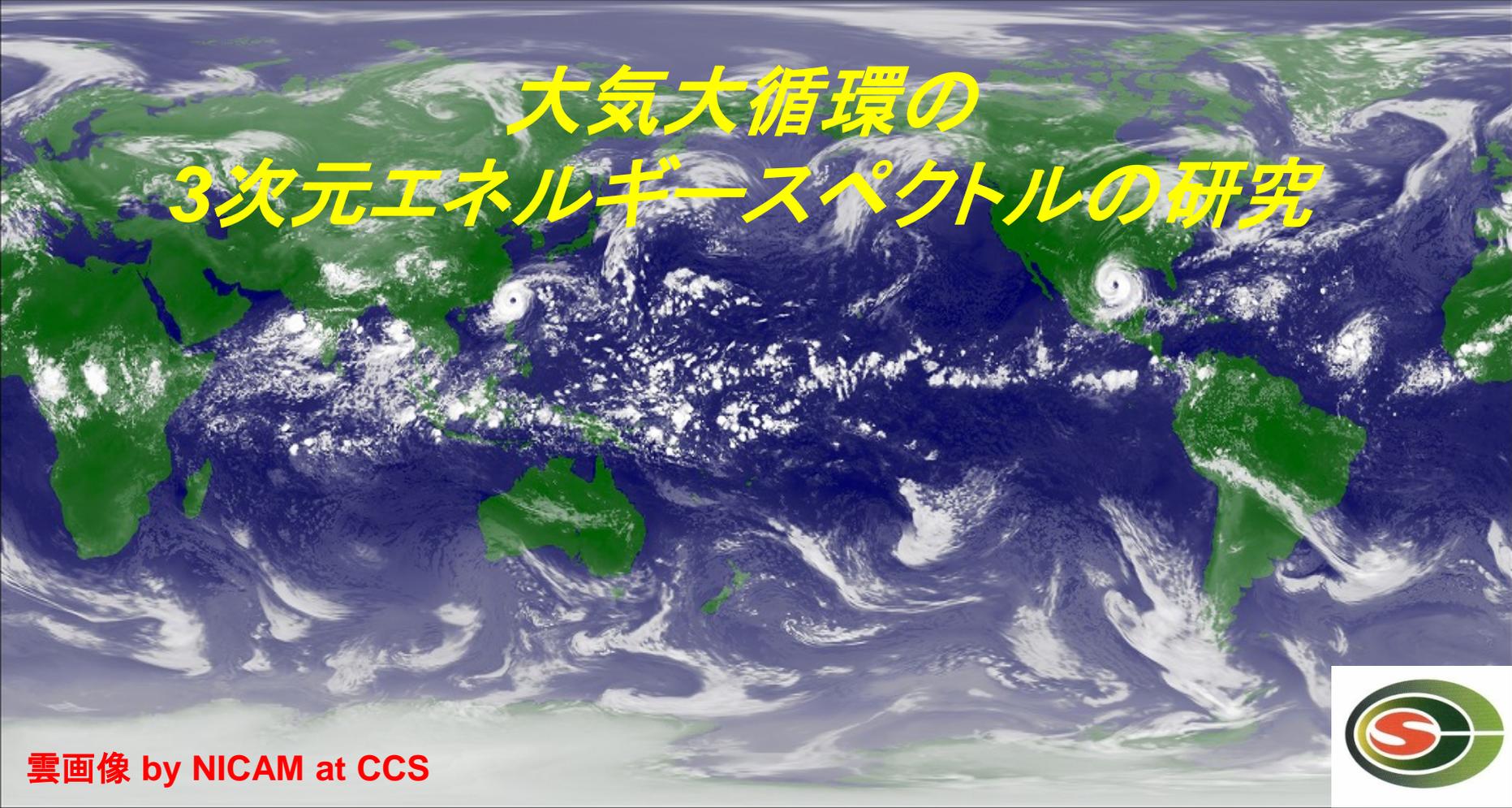


CCS25周年記念シンポ
2017年10月11日

NICAM glevel-10
2008091300 Z

コンピュータ大気モデル
で再現した雲の分布



大気大循環の
3次元エネルギースペクトルの研究

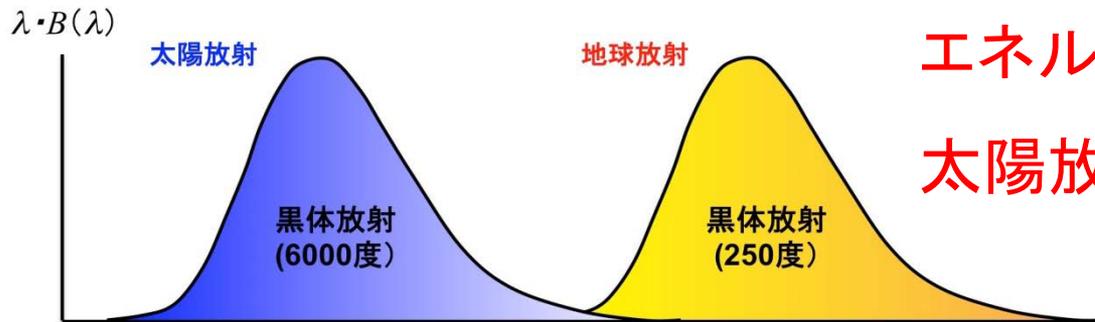
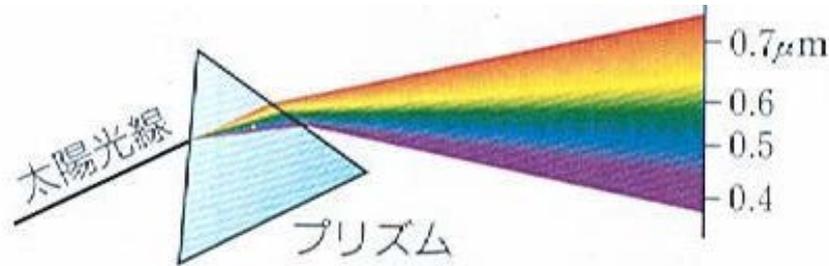
雲画像 by NICAM at CCS



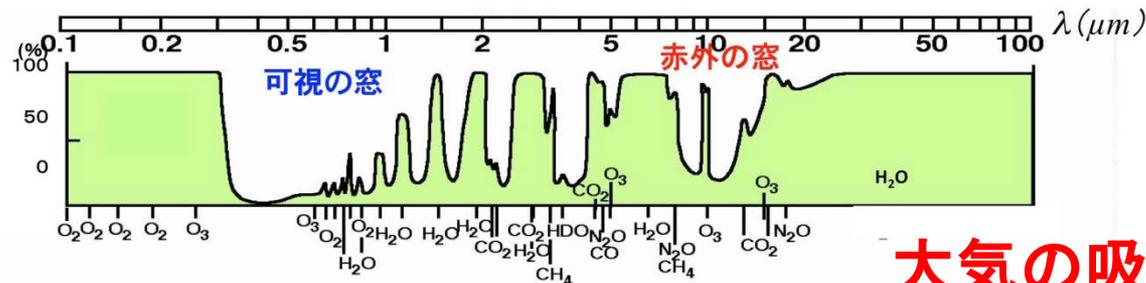
筑波大学CCS 地球環境研究部門・教授
講演 田中 博

スペクトルの概念

入力波を波長別に分解



エネルギースペクトル
太陽放射と地球放射



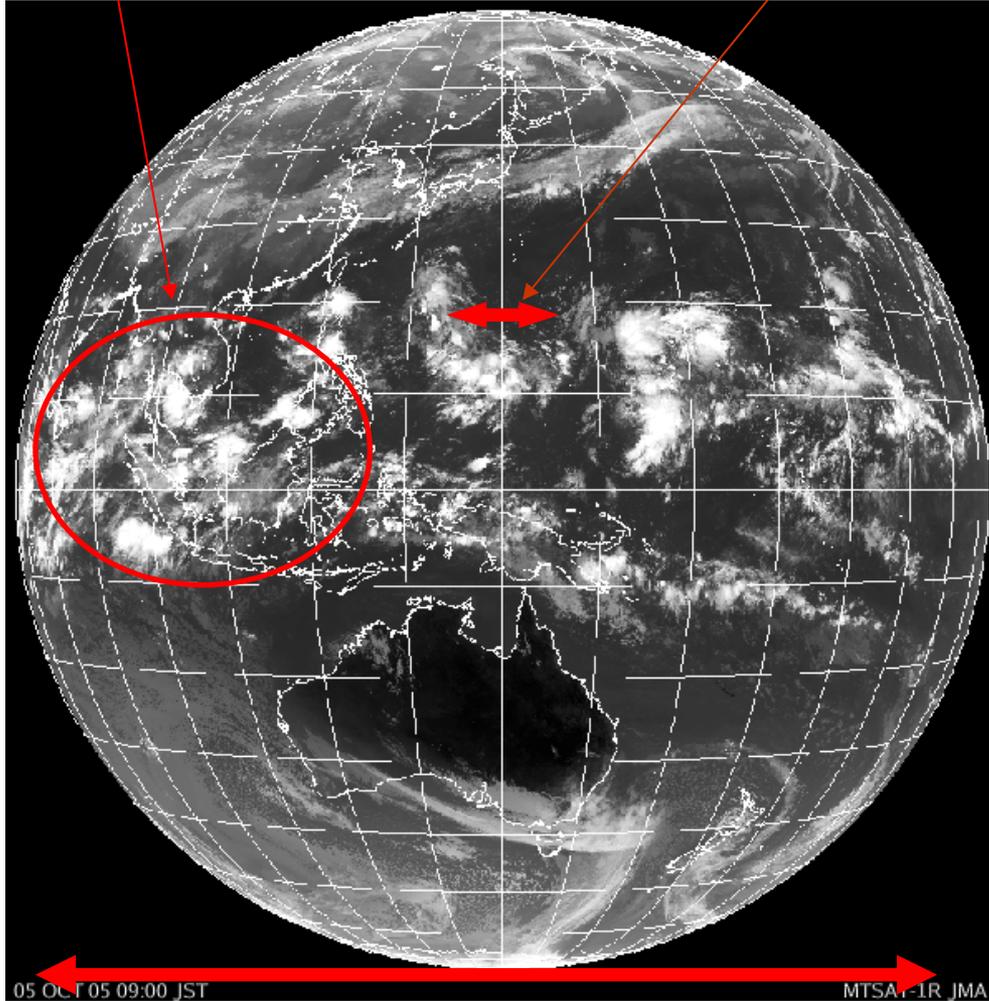
大気の吸収スペクトル

大気のスケーल相互作用

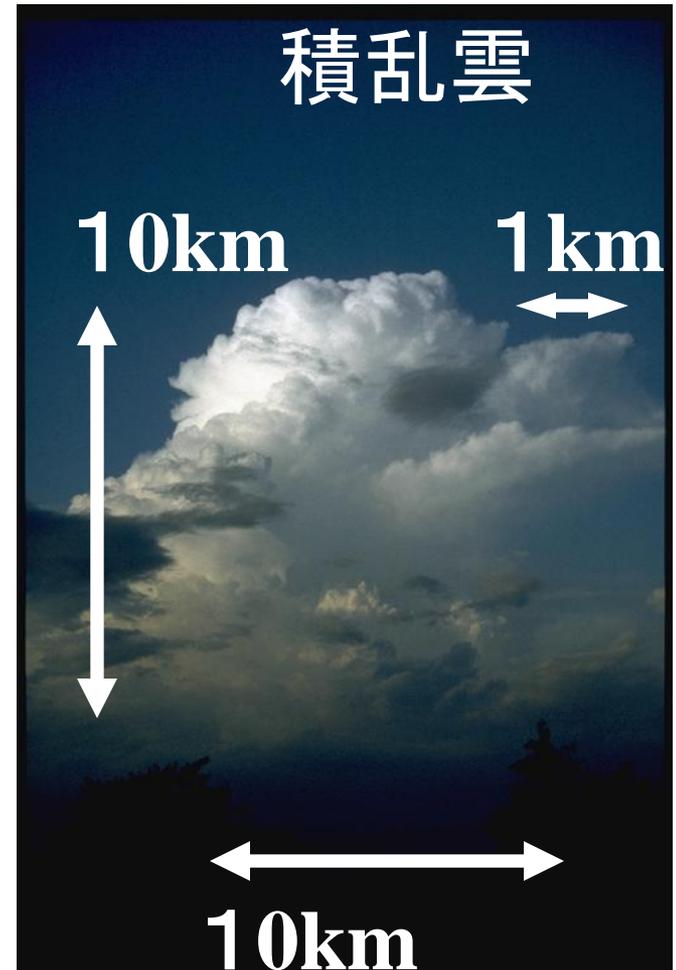
スーパークラウドクラスタ ~ 数1000km → MJO

クラウドクラスタ ~ 数100km

どのスケールがどれだけのエネルギーを持つか

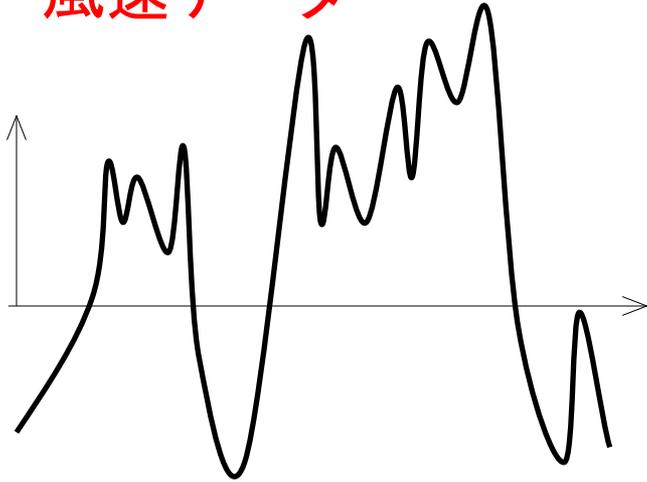


Earth 12740km

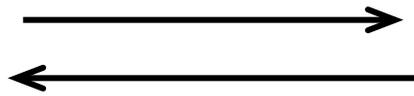


大気大循環のエネルギースペクトル

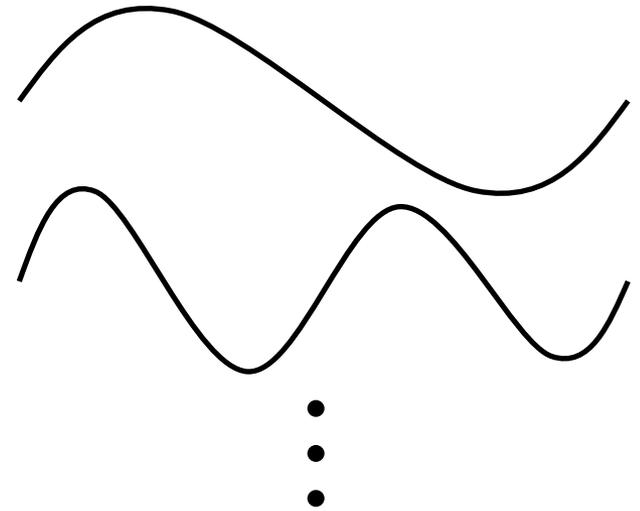
風速データ



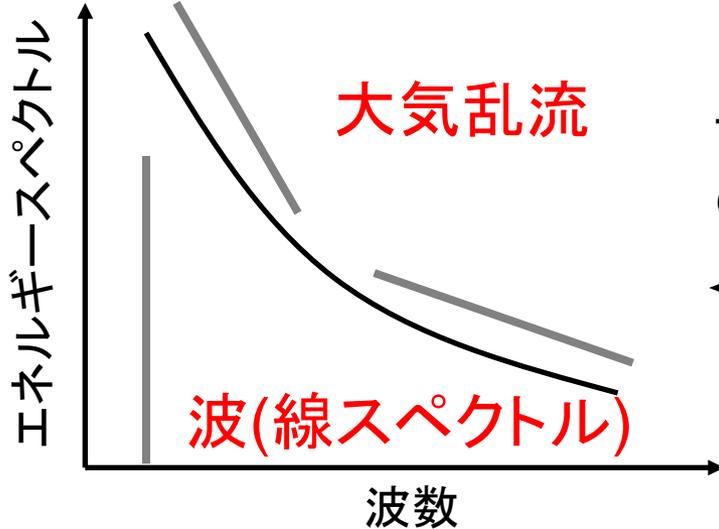
フーリエ変換



フーリエ逆変換



波数に分解



大気乱流

波(線スペクトル)

波数

フーリエ成分 $X(k)$
の2乗の波数分布



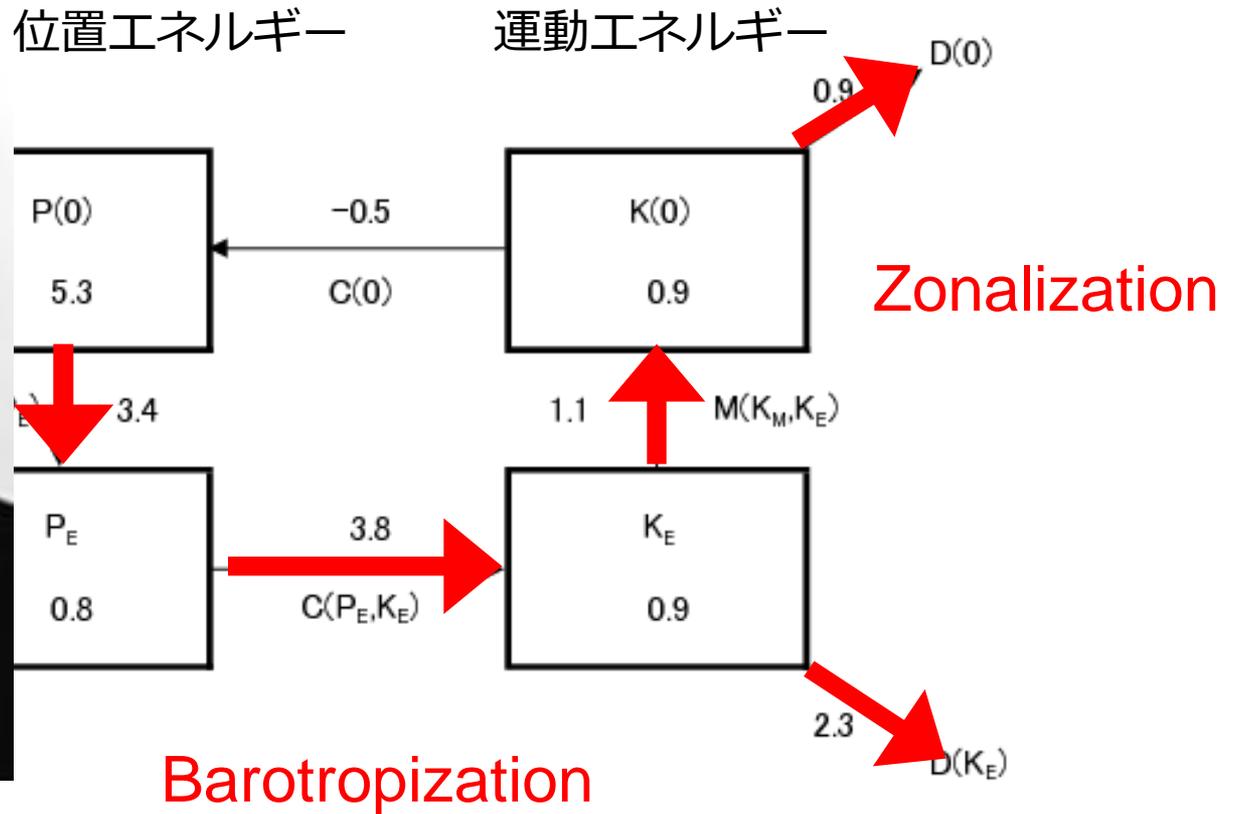
風速の2乗は運動
エネルギーに相当

波数 k に対する

フーリエ成分 $X(k)$

大気大循環のエネルギー収支 ローレンツサイクルの4ボックス

東西波数0のKにエネルギーが溜まる

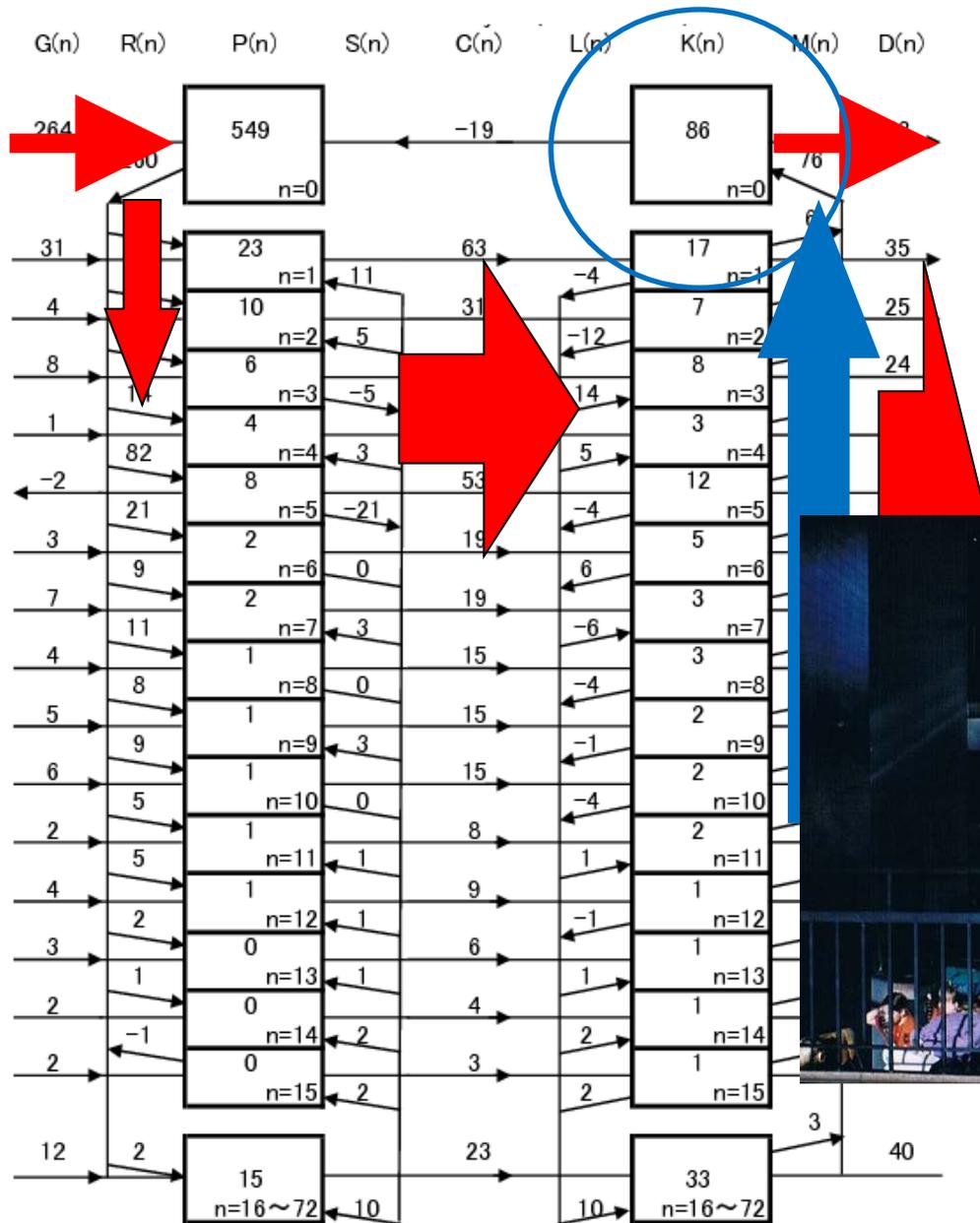


(Edward Lorenz 1955)

鉛直波数0のKにエネルギーが溜まる

(Kung and Tanaka 1983)

ソルツマンサイクル

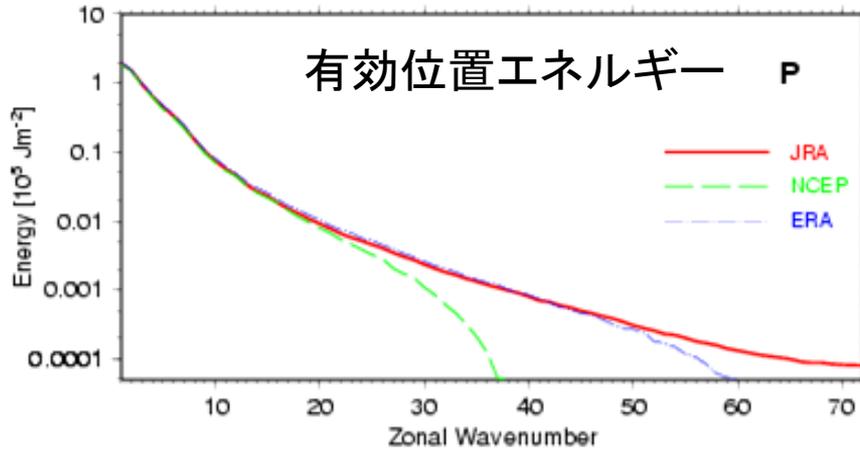


- G: 有効位置エネルギーの生成
- R: 有効位置エネルギーの zonal-wave interaction
- P: 有効位置エネルギー
- S: 有効位置エネルギーの wave-wave interaction
- C: 有効位置エネルギーから 運動エネルギーへの変換
- L: 運動エネルギーの

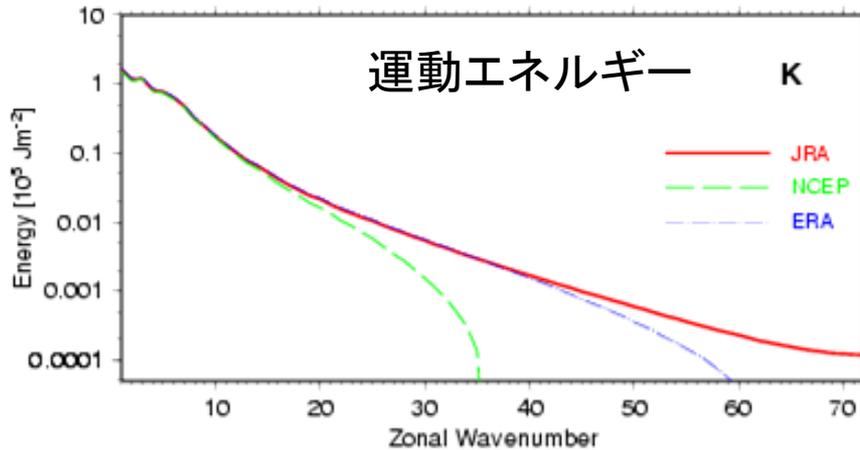


(Saltzman, 1957 & 1970)
 (Kung and Tanaka 1983)

有効位置エネルギー(P) 運動エネルギー(K)



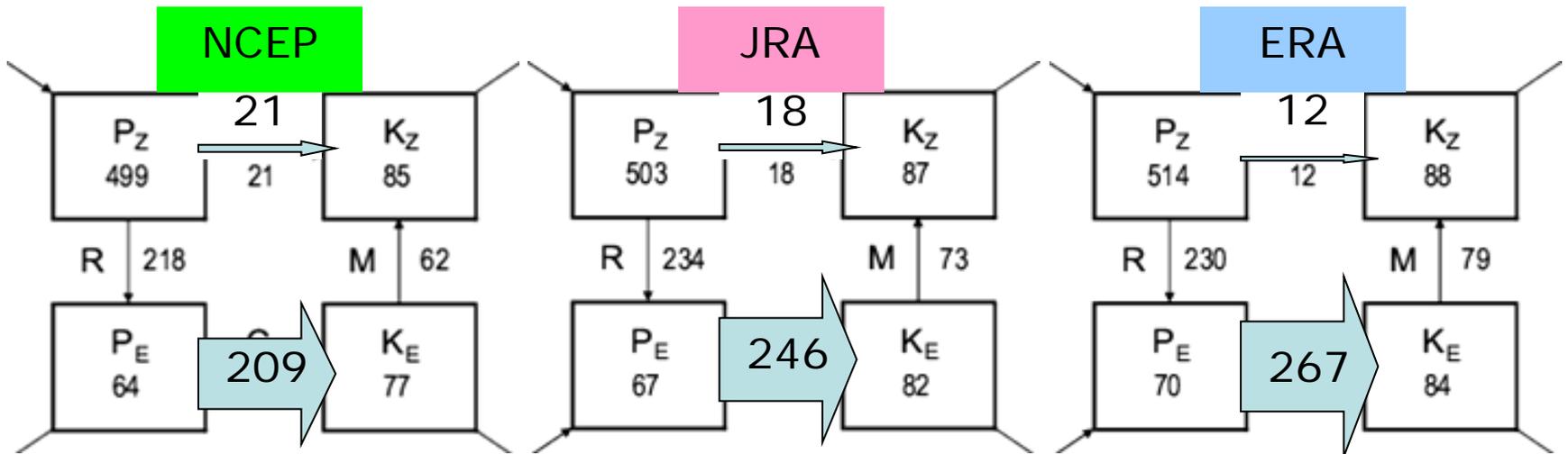
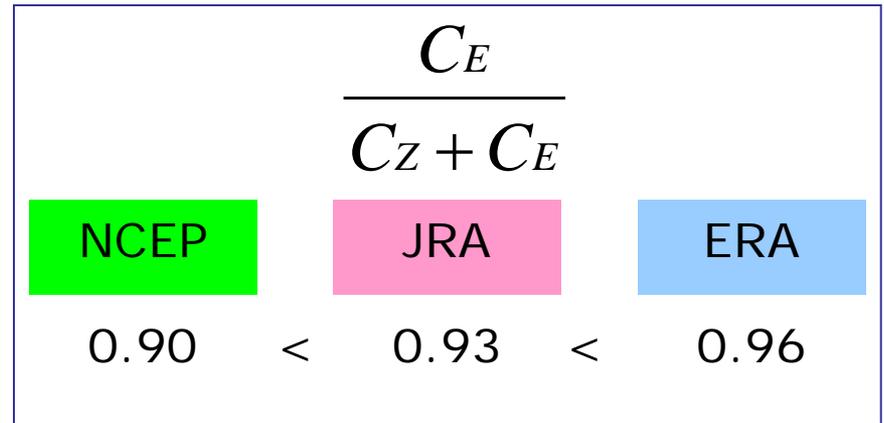
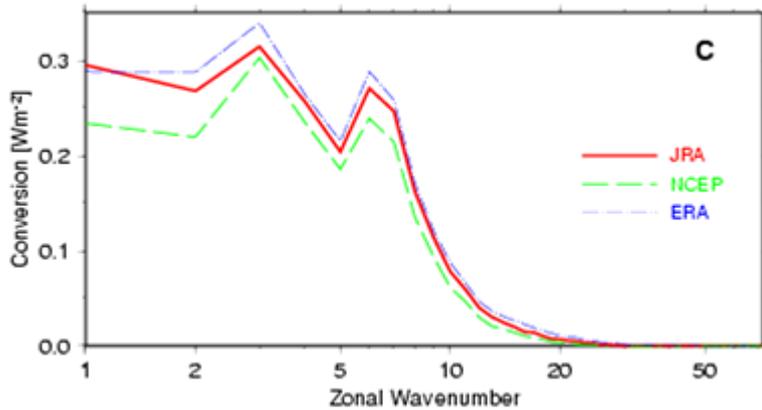
- NCEPは東西波数35、ERAは60以上の高周波成分が落とされている。



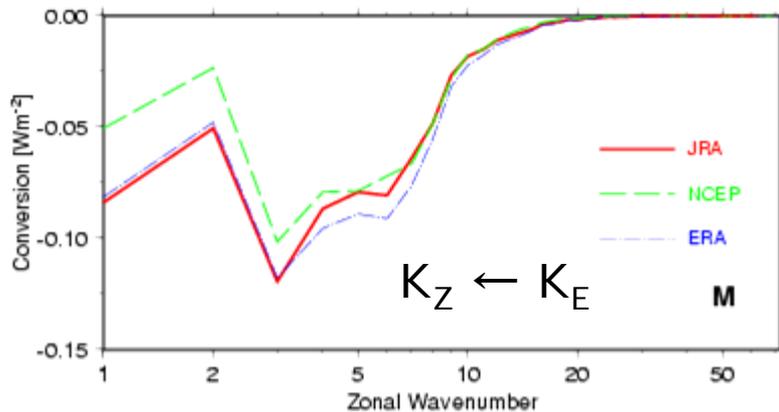
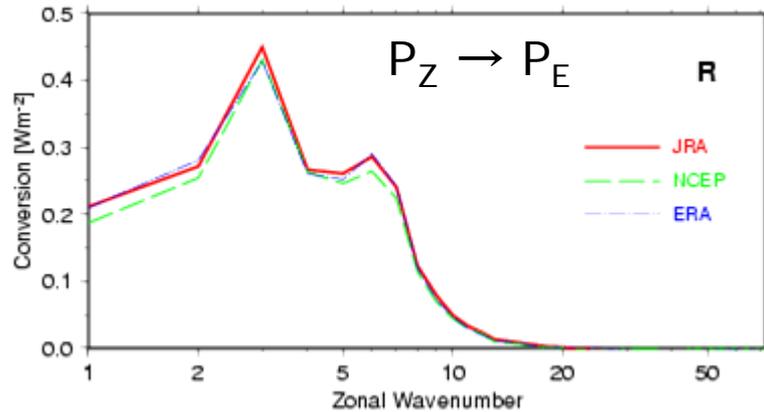
全波数 total [10^4 Jm^{-2}]

	NCEP	JRA	ERA
P_E	64	67	70
K_E	77	82	84

$$P_E \Leftrightarrow K_E (C_E)$$



平均流と波の相互作用(R, M)



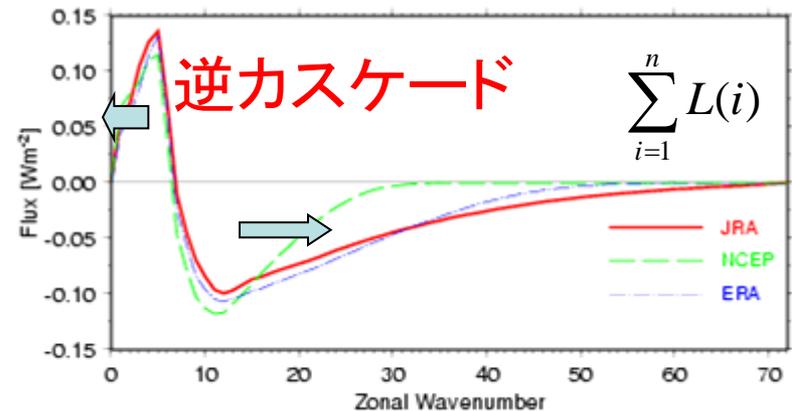
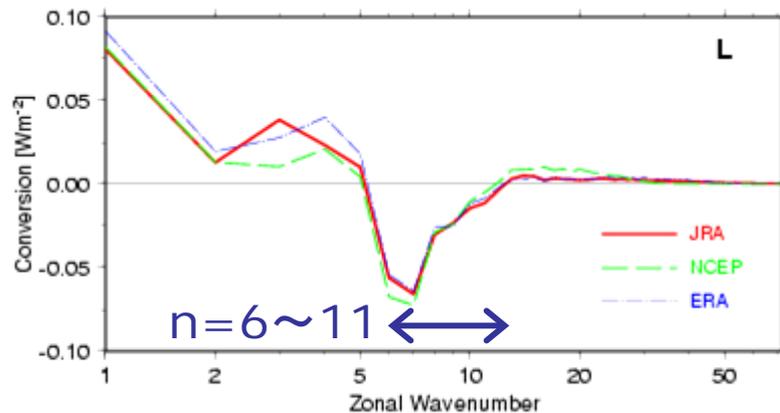
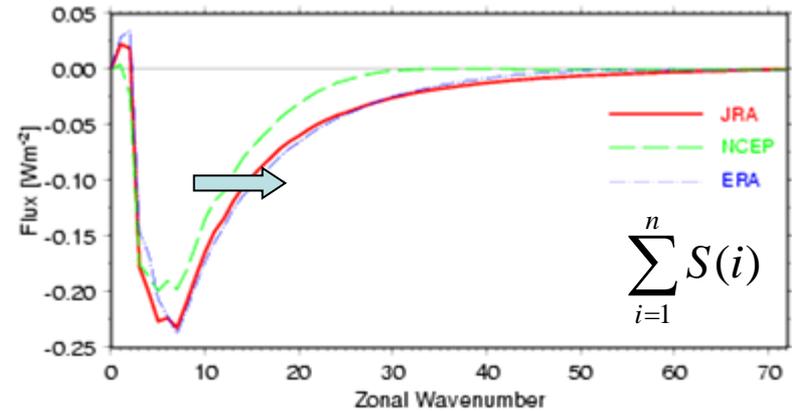
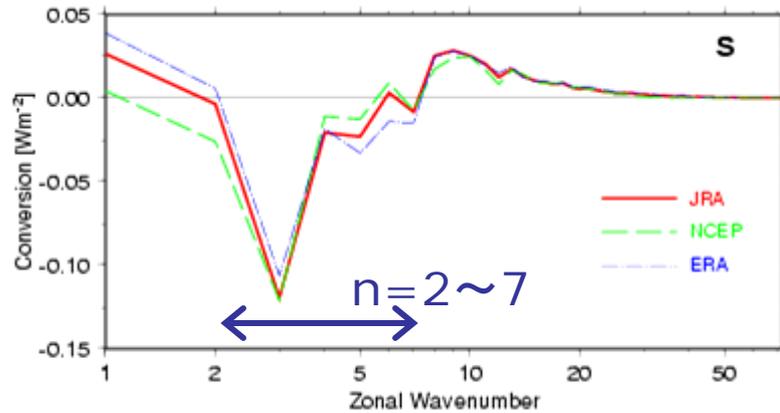
- 全波数にわたって $P_Z \Rightarrow P_E$ 、 $K_E \Rightarrow K_Z$
- ピークは有効位置エネルギー(R)、運動エネルギー(M)ともに波数3

全波数 total [10^{-2} Wm^{-2}]

	NCEP	JRA	ERA
R	218	234	230
M	62	73	79

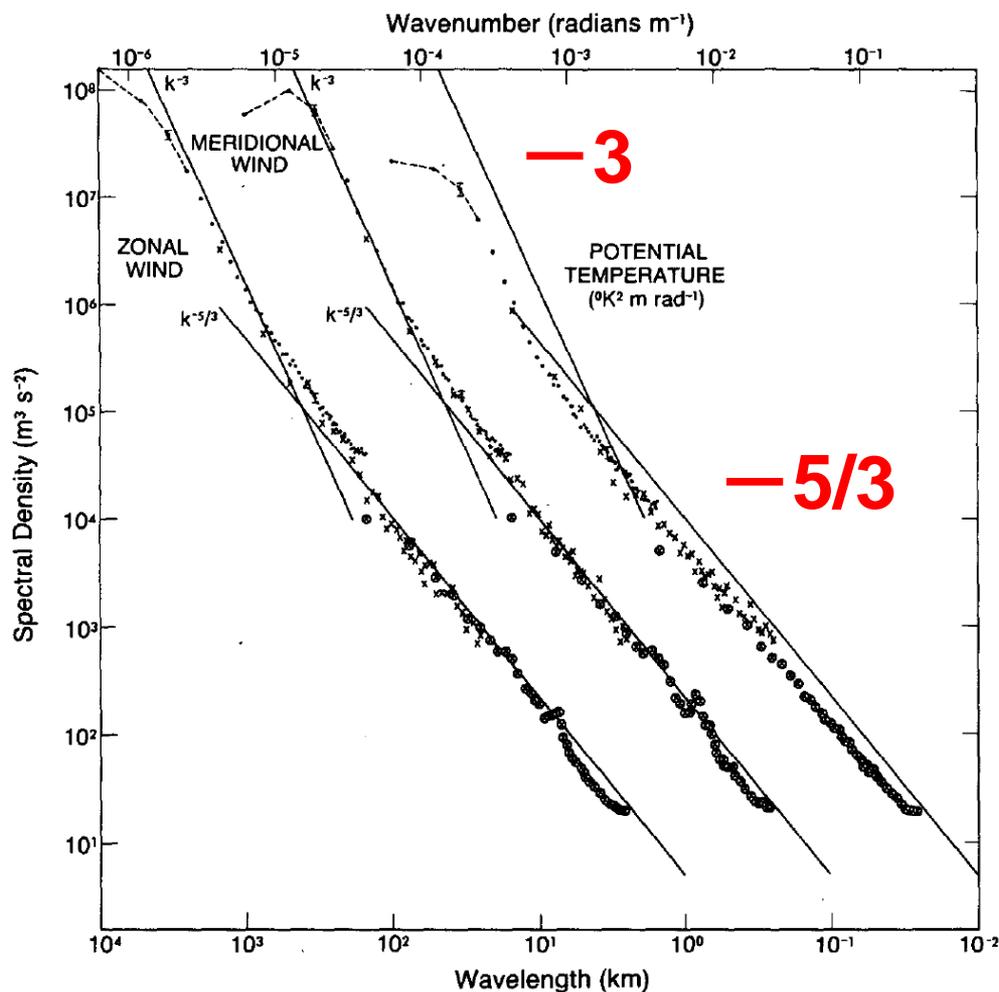
波と波の相互作用 (S, L)

波数空間のフラックス



- 渦運動エネルギーに逆カスケードがみられる

風速と温位のNastrom-Gage スペクトル

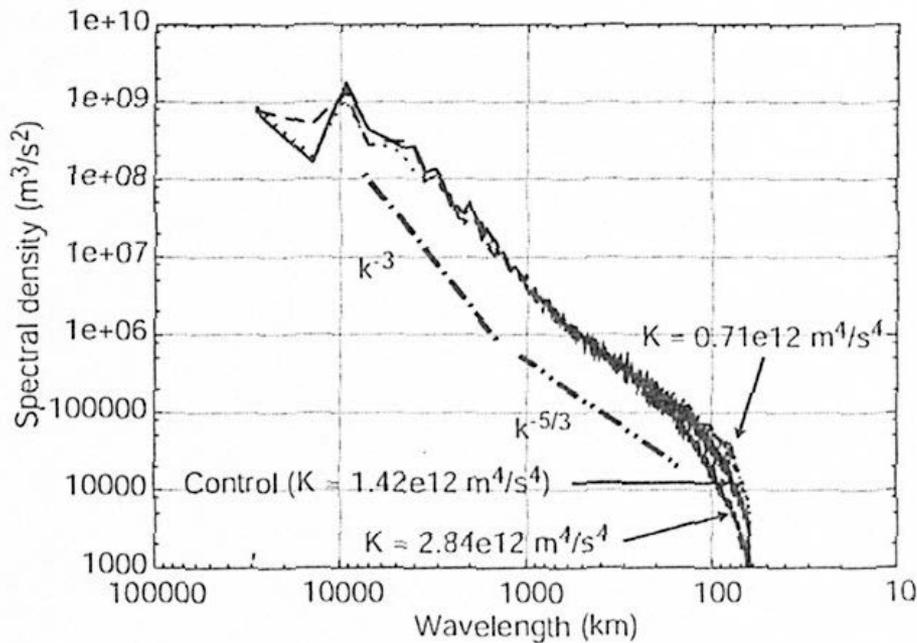


- 航空機観測による大気のエネルギースペクトルの実測

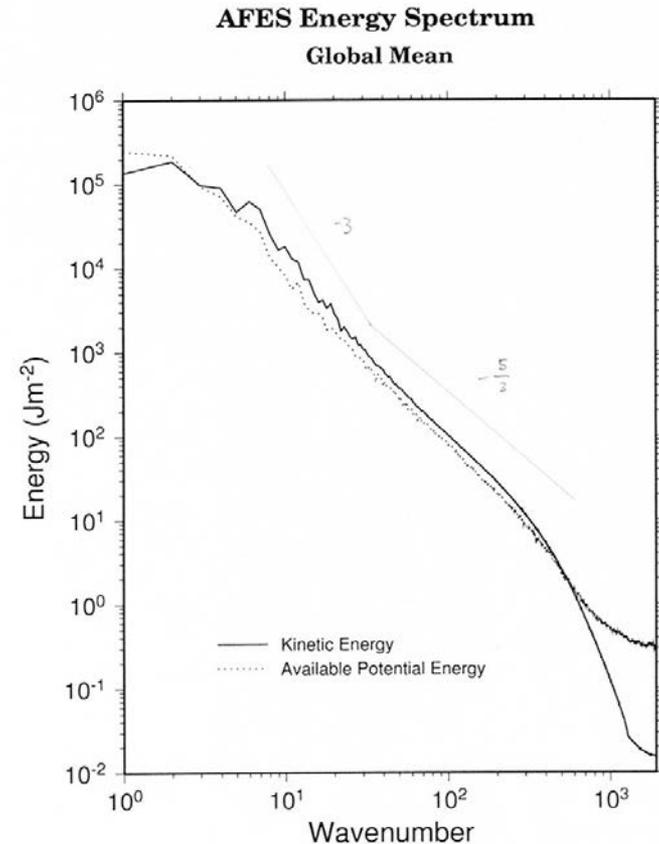
- -3乗則域と-5/3乗則域が500kmスケールで別れる

Nastrom-Gage (1985)

地球シミュレータを用いた 大気モデルの解析



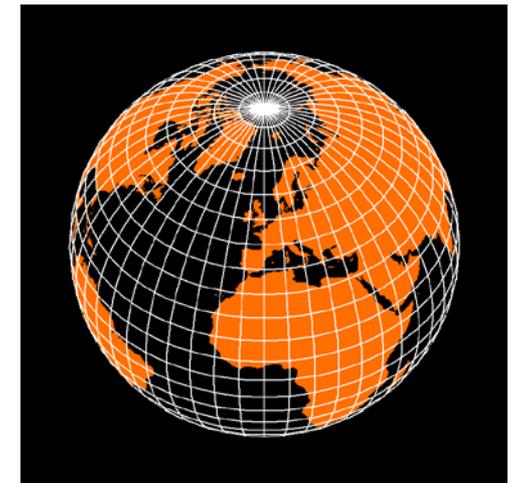
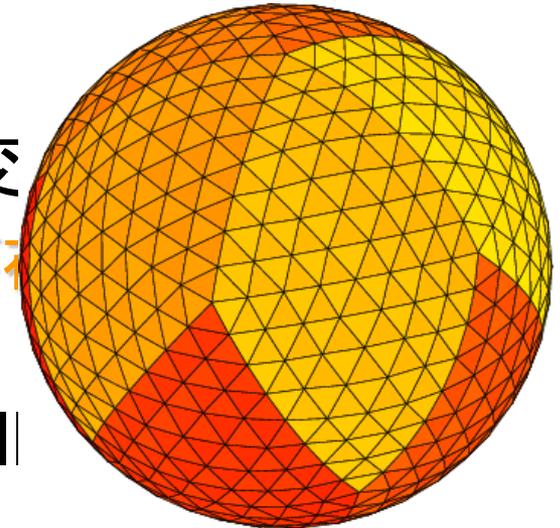
Takahashi and Ohfuchi (2004)



高解像度計算を従来の方法で行うと？

Glevel-3

- スペクトル法（球面調和関数）
 - 経度方向はFFTを使って高速変換
 - 緯度方向は高速ルジャンドル変換が不利
 - 高解像度化にとってボトルネック
 - 超並列コンピュータ上でall-to-all
- 緯度経度格子法
 - 極問題
 - 両極で経線が集中する
 - e.g. 赤道10km、極10m

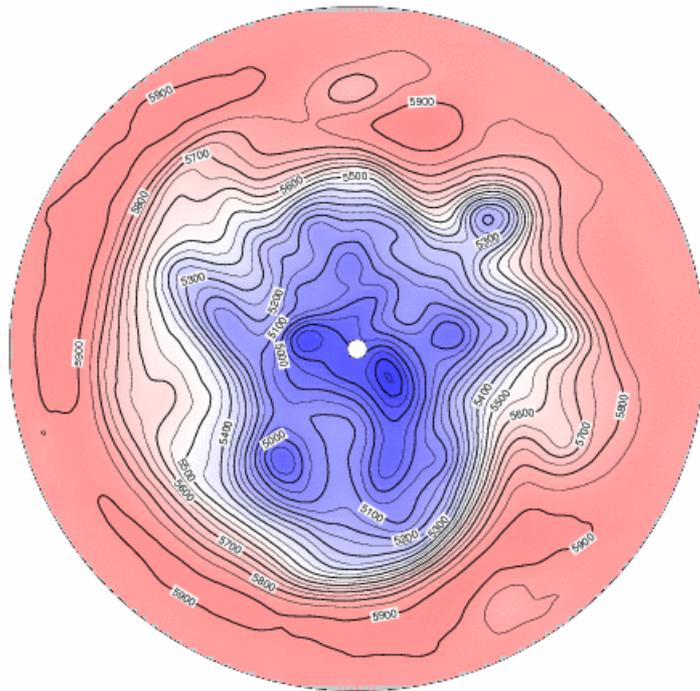


抜本的な解決に球面準一様格子に
基づくNICAMを用いる

Oakforest-PACSを用いたNICAMの数値計算

500 hPa Height

NICAM 2007060100Z+0HR



数値計算期間

2007年1月1日0000 UTC
~1月30日1800 UTC

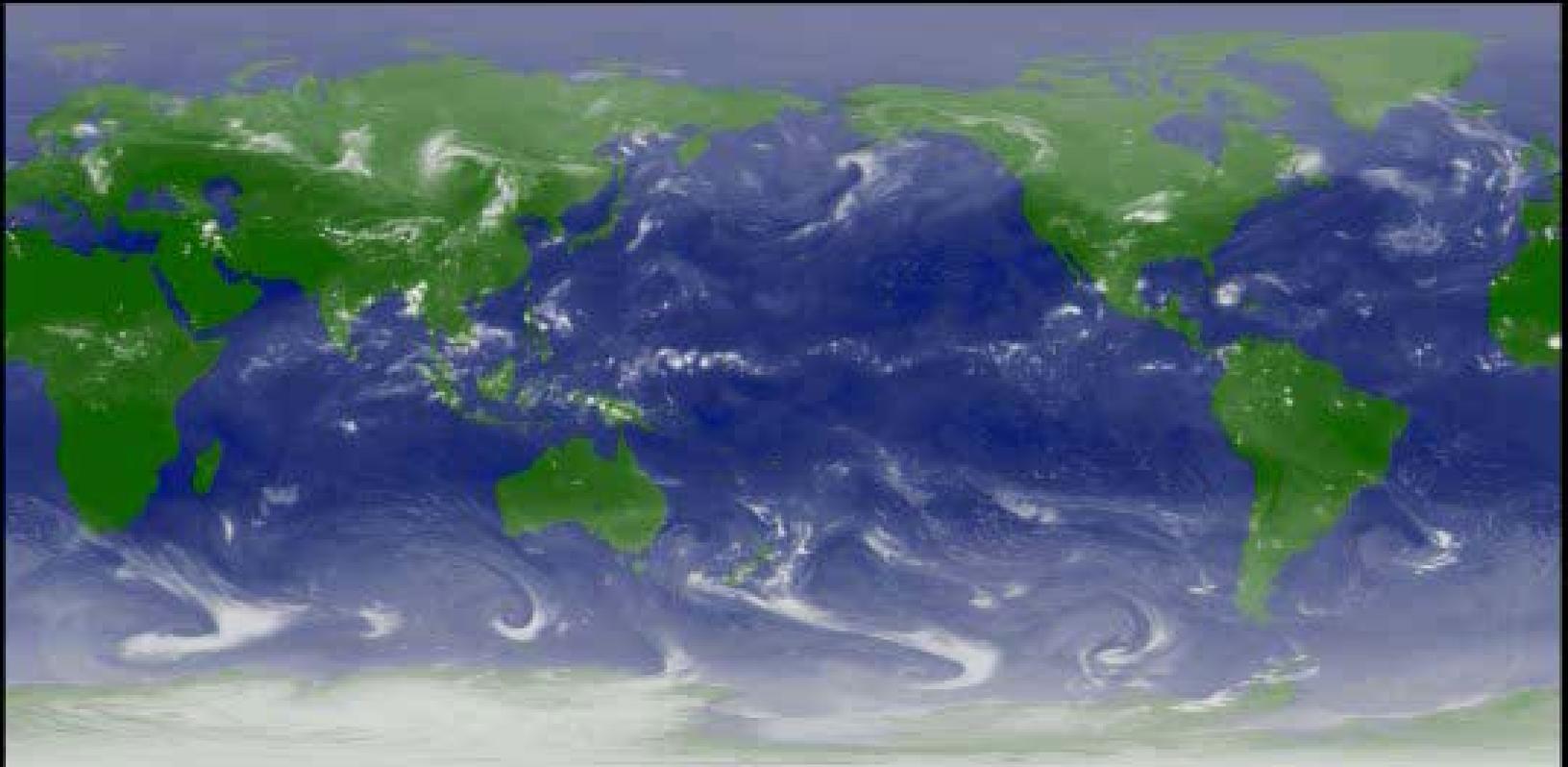
解像度 G-level 5 (224km)
R-level 0 (並列領域 10)

対象 : 500 hPa 順圧高度場

➡ 最新版NICAM(2015年)
へ移行中

NICAM glevel-10

2008090812 Z



NICAM glevel-10
2009011512 Z



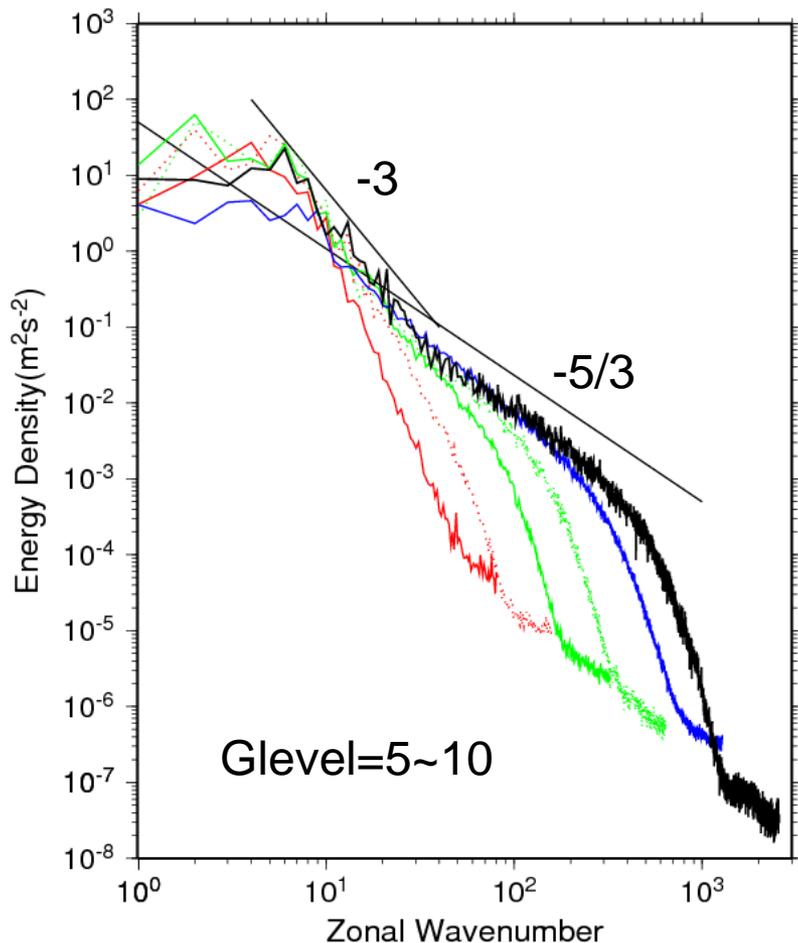
NICAM glevel-10
2008090812 Z



NICAM解像度とエネルギースペクトルの変化

Zonal Energy Spectrum

45 degree North, 200 hPa



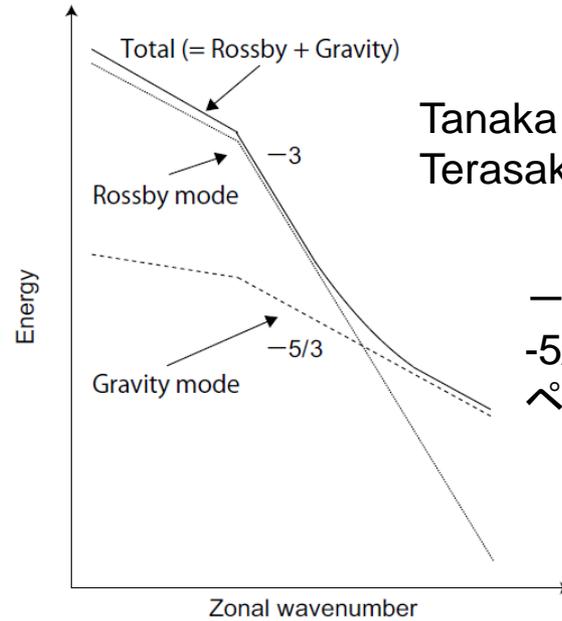
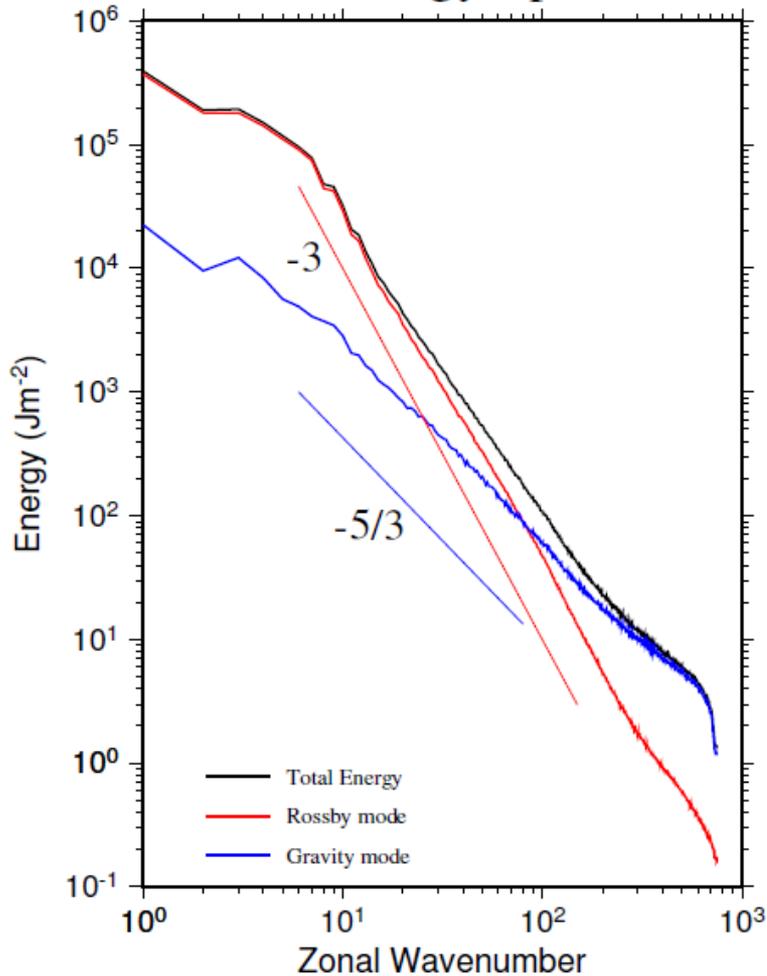
Terasaki and Tanaka (2011)

glevel	Δx	南北 グリッド数
5	224 km	80
6	112 km	160
7	56 km	320
8	28 km	640
9	14 km	1280
10	7 km	2560
11	3.5 km	5120

エネルギースペクトル

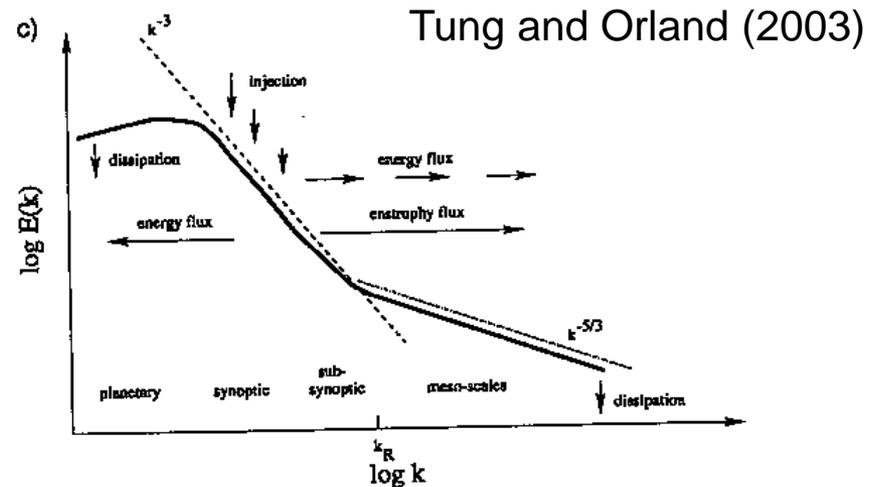
NICAMの結果をCOMAで解析

Zonal Energy Spectrum



Tanaka (1985)
Terasaki and Tanaka (2011)

—3乗則はロスビー波、
—5/3乗則は重力波のスペクトル



Tung and Orland (2003)

気象力学理論

運動方程式
熱力学の式
質量保存則
状態方程式

$$\frac{\partial u}{\partial t} = F(u) + S$$

3次元スペクトルモデルの開発

3Dスペクトルプリミティブ方程式の導出

$$M \frac{\partial U}{\partial t} + L U = N + F, \quad (1)$$

where

$$U = (u, v, \phi')^T, \quad (2)$$

$$M = \text{diag}(1, 1, -\frac{\partial}{\partial p} \frac{p^2}{R\gamma} \frac{\partial}{\partial p}), \quad (3)$$

$$L = \begin{pmatrix} 0 & -2\Omega \sin\theta & \frac{1}{a \cos\theta} \frac{\partial}{\partial \lambda} \\ 2\Omega \sin\theta & 0 & \frac{1}{a} \frac{\partial}{\partial \theta} \\ \frac{1}{a \cos\theta} \frac{\partial}{\partial \lambda} & \frac{1}{a \cos\theta} \frac{\partial(\cdot)\cos\theta}{\partial \theta} & 0 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

$$N = \begin{pmatrix} -V \cdot \nabla u - \omega \frac{\partial u}{\partial p} + \frac{\tan\theta}{a} uv \\ -V \cdot \nabla v - \omega \frac{\partial v}{\partial p} - \frac{\tan\theta}{a} uv \\ \frac{\partial}{\partial p} \left(\frac{p^2}{R\gamma} V \cdot \nabla \frac{\partial \phi}{\partial p} + \omega p \left(\frac{p}{R\gamma} \frac{\partial \phi}{\partial p} \right) \right) \end{pmatrix}, \quad (5)$$

$$F = (F_u, F_v, \frac{\partial}{\partial p} \left(\frac{pQ}{C_p \gamma} \right))^T. \quad (6)$$

U 大気変数

N 非線形項

F 外力

M 鉛直微分行列

L 水平微分行列

3Dスペクトルプリミティブ方程式

- 3次元ノーマルモード関数を用いて、方程式を波数空間で表す

- プリミティブ方程式 (物理空間、ベクトル表記)

$$M \frac{\partial U}{\partial \tau} + LU = N + F$$

- 時間変化項
- 線形項
- 非線形項
- 外力項

3次元ノーマルモード関数 $\prod_{nlm} (\lambda, \theta, p) = G_m(p) \Theta(\theta) \exp(in\lambda)$

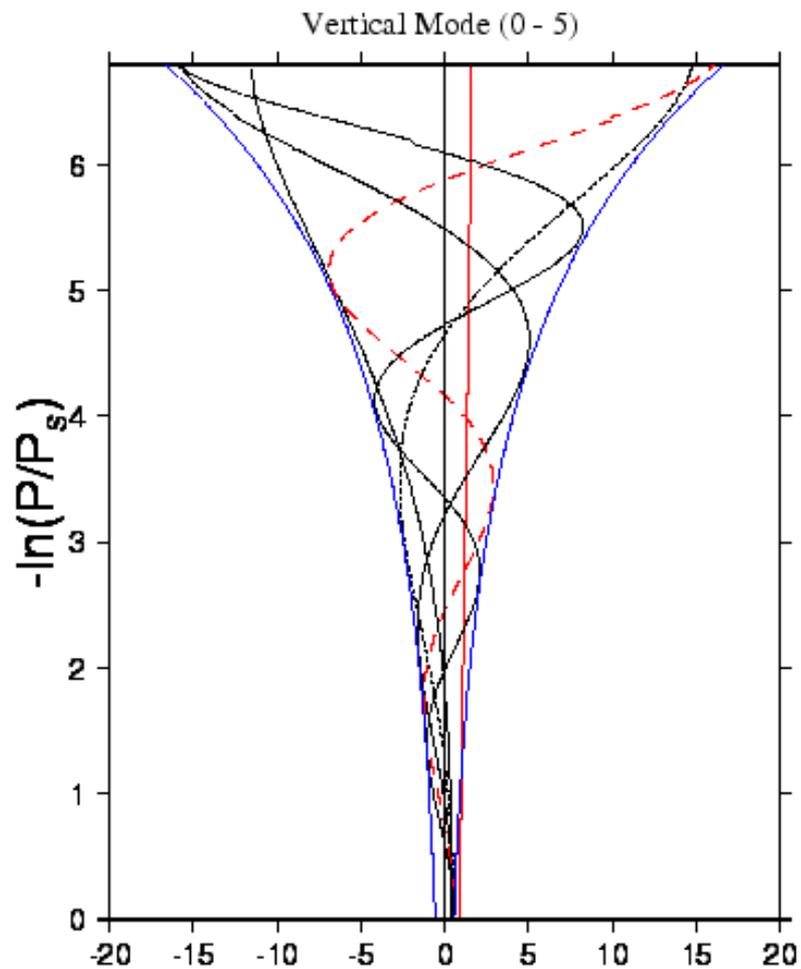
鉛直構造関数 水平構造関数

- スペクトルプリミティブ方程式 (波数空間)

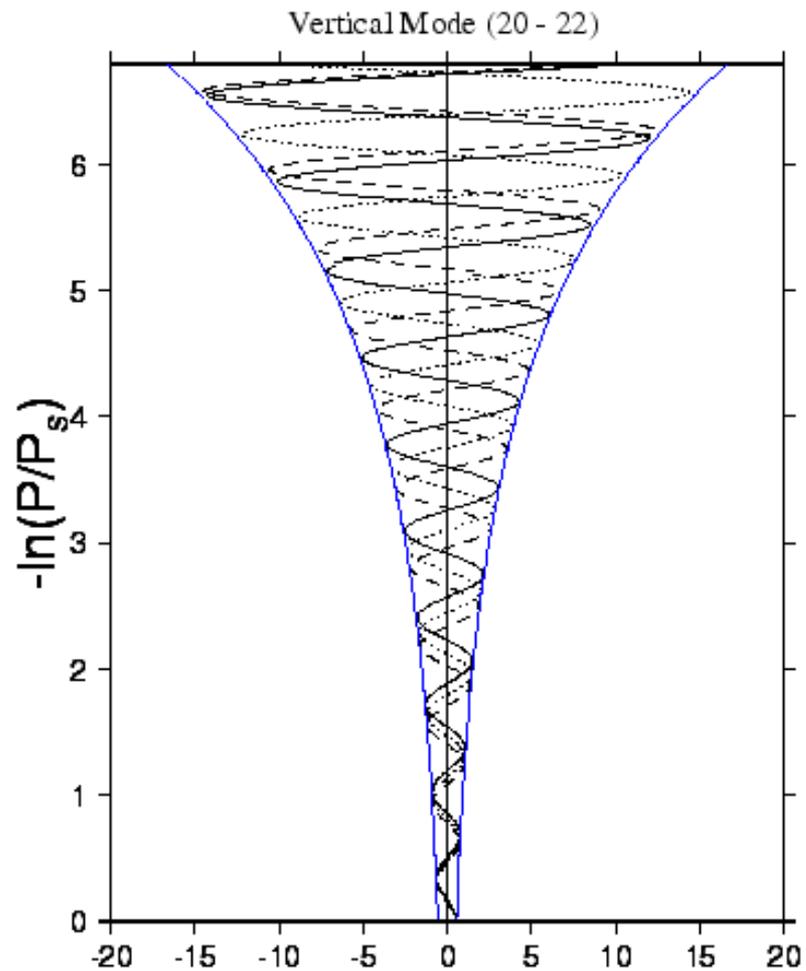
$$\frac{dw_i}{d\tau} = -i\sigma_i w_i + i \sum_{jk=1} r_{ijk} w_j w_k + f_i$$

鉛直構造関数

Vertical Structure Function



Vertical Structure Function



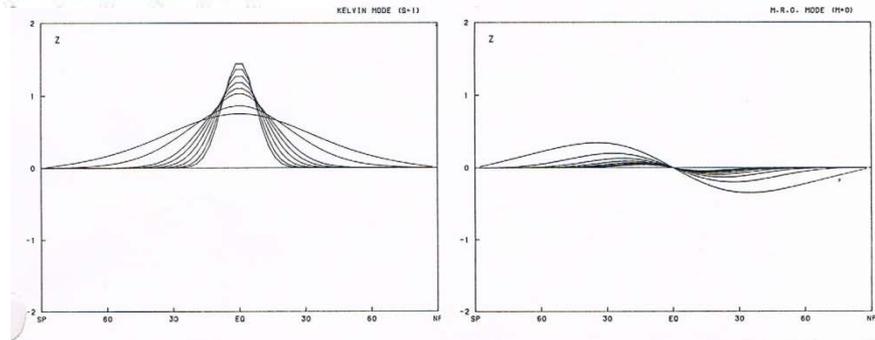
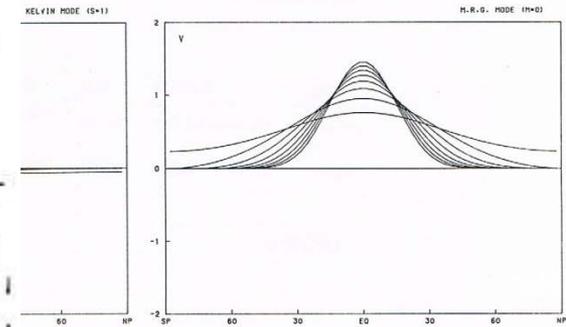
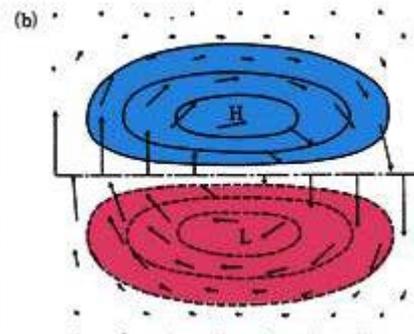
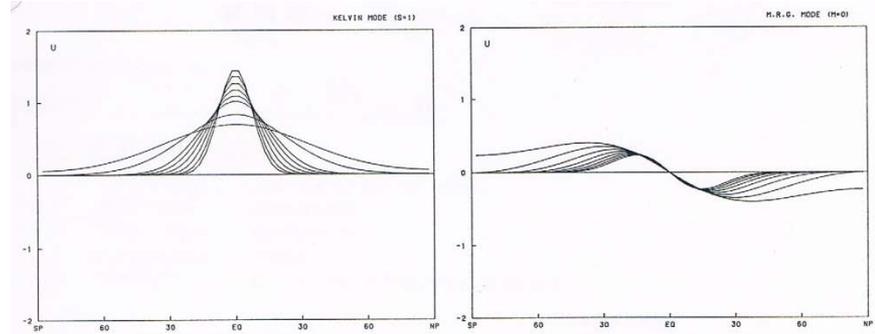
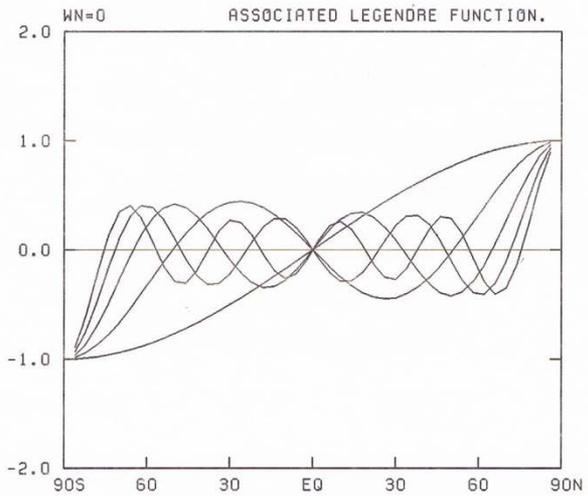
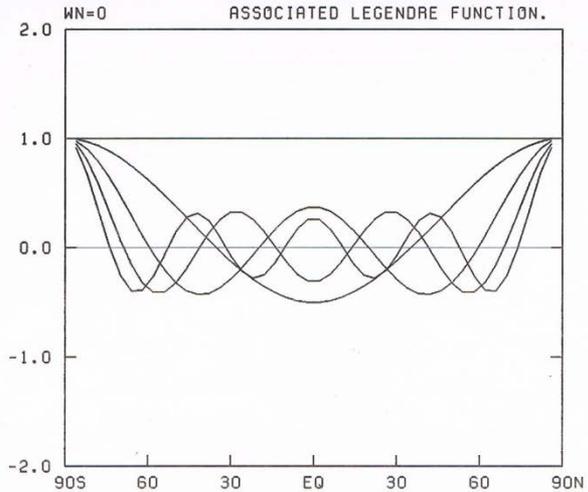
3次元スペクトルモデルの開発

球面調和関数 ($n=0$)

水平構造関数 (Hough関数)

Kelvin mode

Mixed Rossby-gravity mode



鉛直エネルギースペクトル

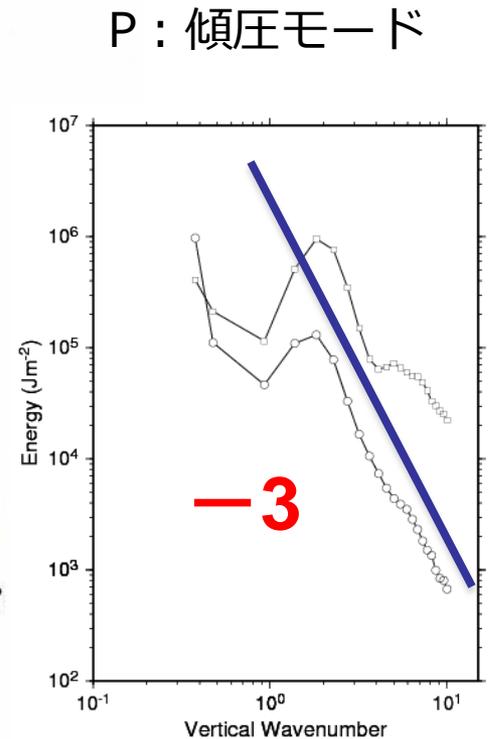
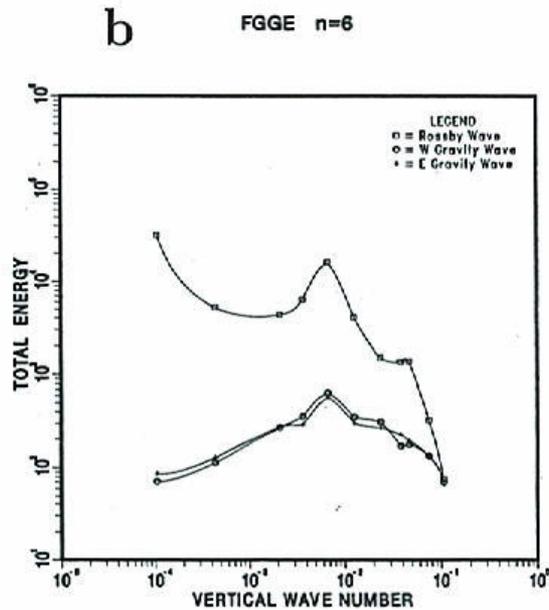
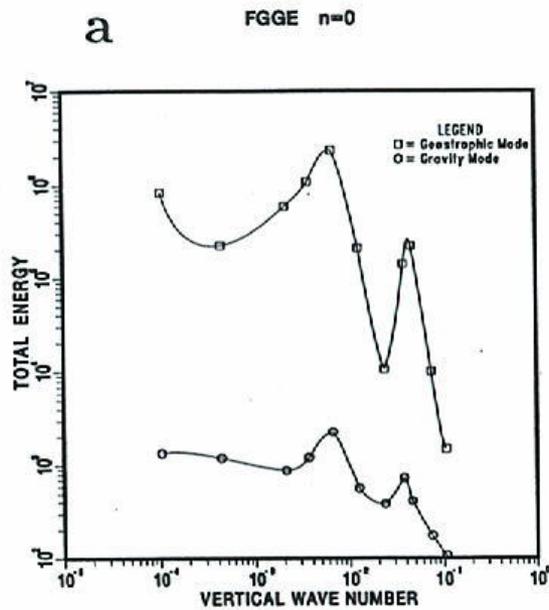


図 2 FGGE 全球観測データを用いて解析した (a) 東西波数 $n=0$ と (b) $n=6$ についてのエネルギーの鉛直スペクトル (J m^{-2})。横軸の鉛直波数は等価深度 (m) の逆数で定義した。四角はロスビー波、白丸と十字は西進と東進の重力波を表す。一番左の値が等価深度約 10000 m の順圧モードで、中央のピークは等価深度約 200 m の傾圧モードである (Tanaka and Sun 1990 から引用)。

Tanaka (1985)

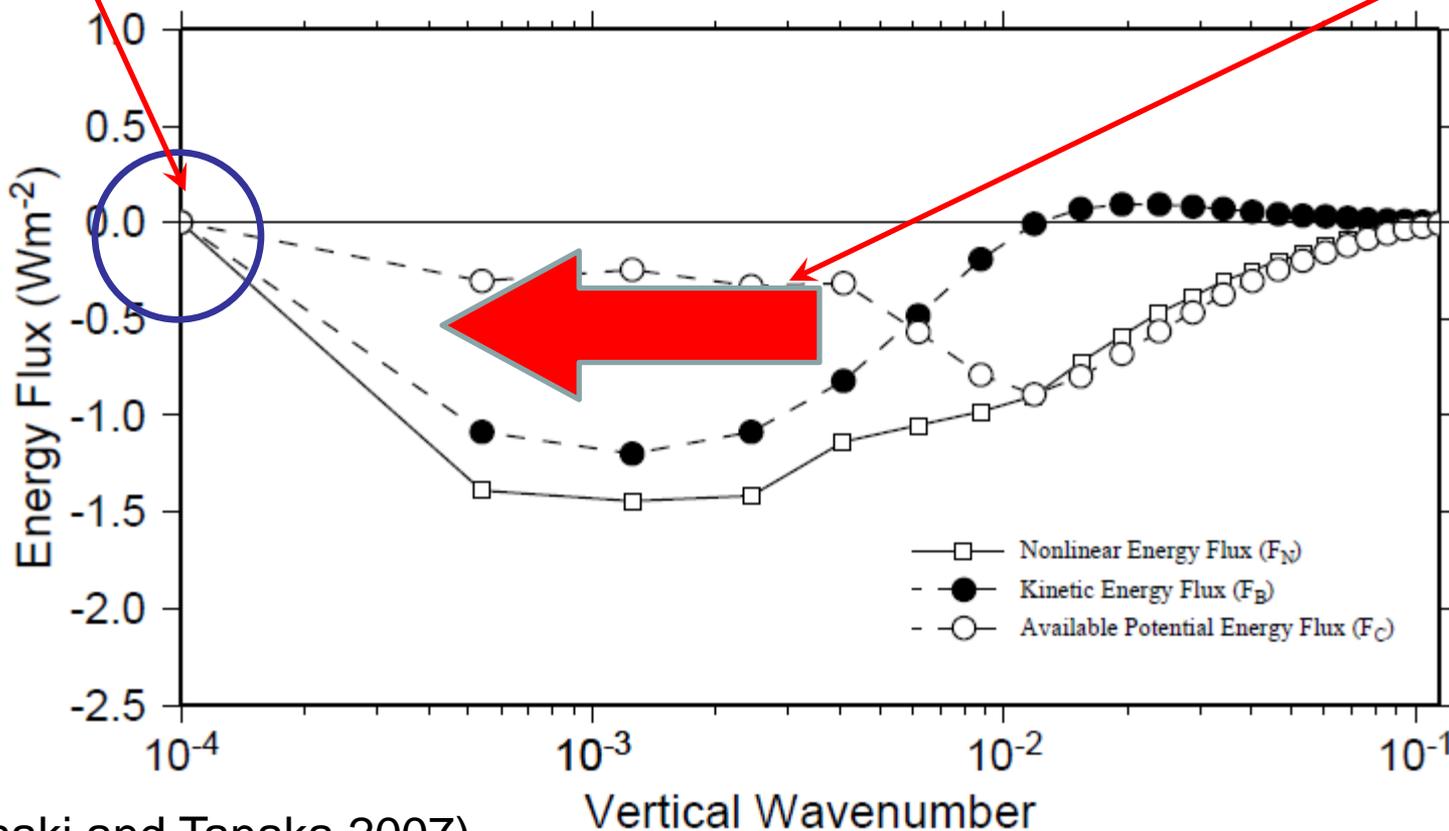
Terasaki and Tanaka (2011)

Barotropization (順圧化) 傾圧不安定の役割

順圧モード

Energy Flux (DJF climate)

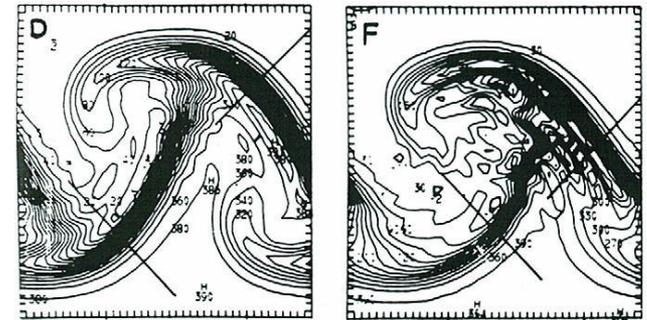
運動エネルギー
フラックス



(Terasaki and Tanaka 2007)

Hoskins (1983)

Baroclinic
structure



Barotropic
structure

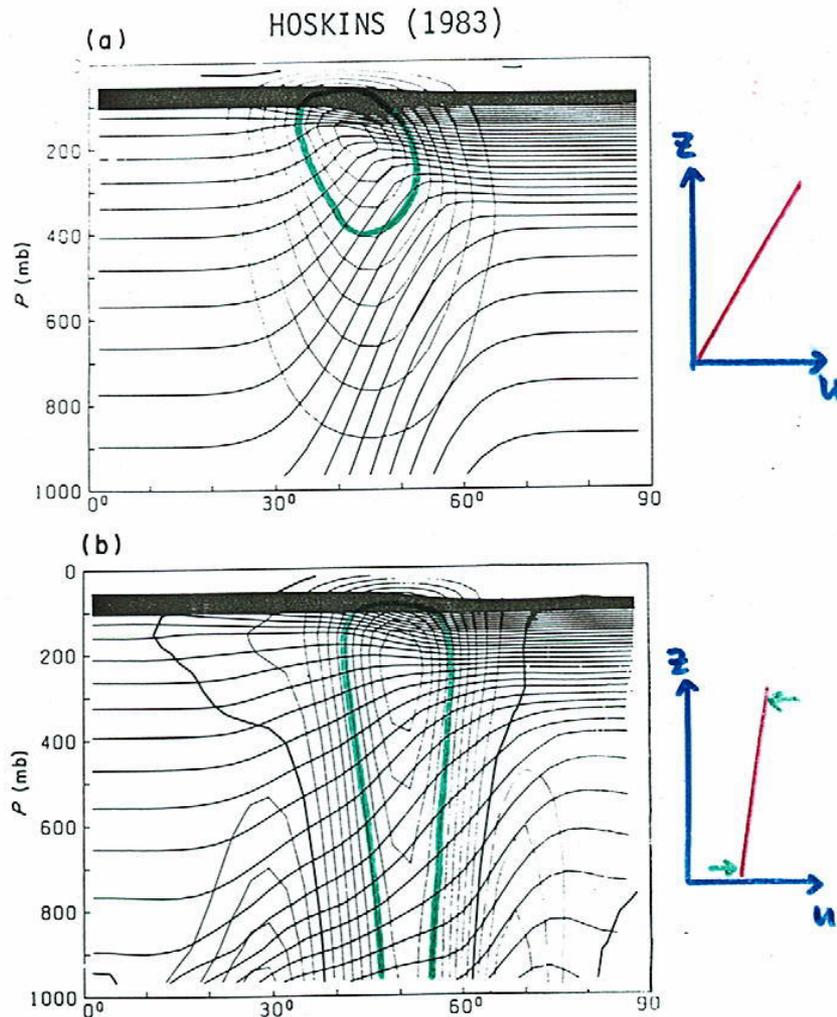


Fig. 7.4. Latitude–height sections showing potential temperature and zonal velocity in a baroclinic wave life-cycle experiment. Shown in (a) is the basic state and (b) the zonally averaged flow at day 15. Potential temperature contours, every 5 K, are drawn as solid lines. Zonal velocity contours, every 5 m s^{-1} , are drawn as lighter lines except that the zero contour is heavy.

Energy is transferred from
baroclinic to barotropic.

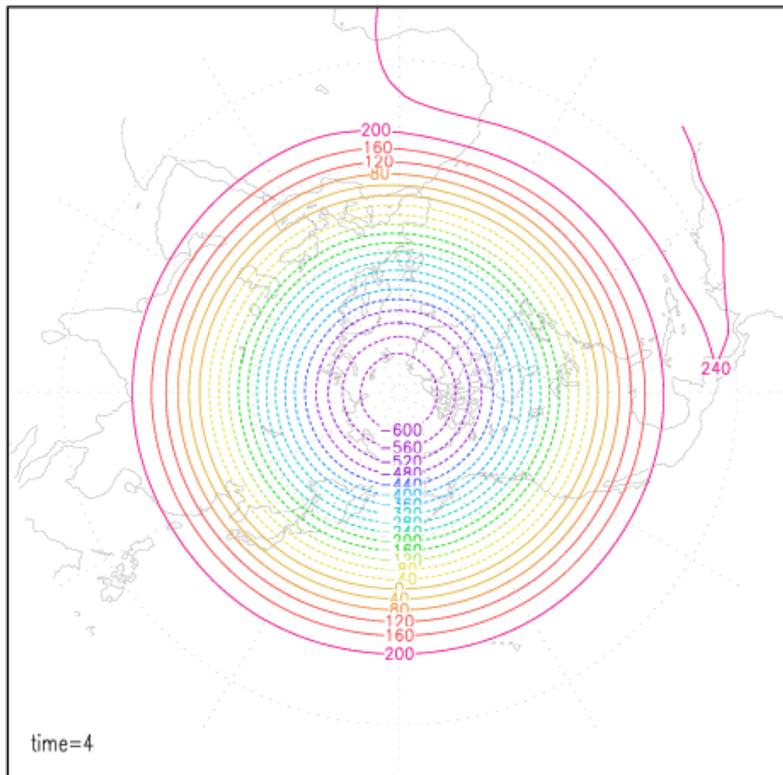
順圧化

Zonalization (帯状化)

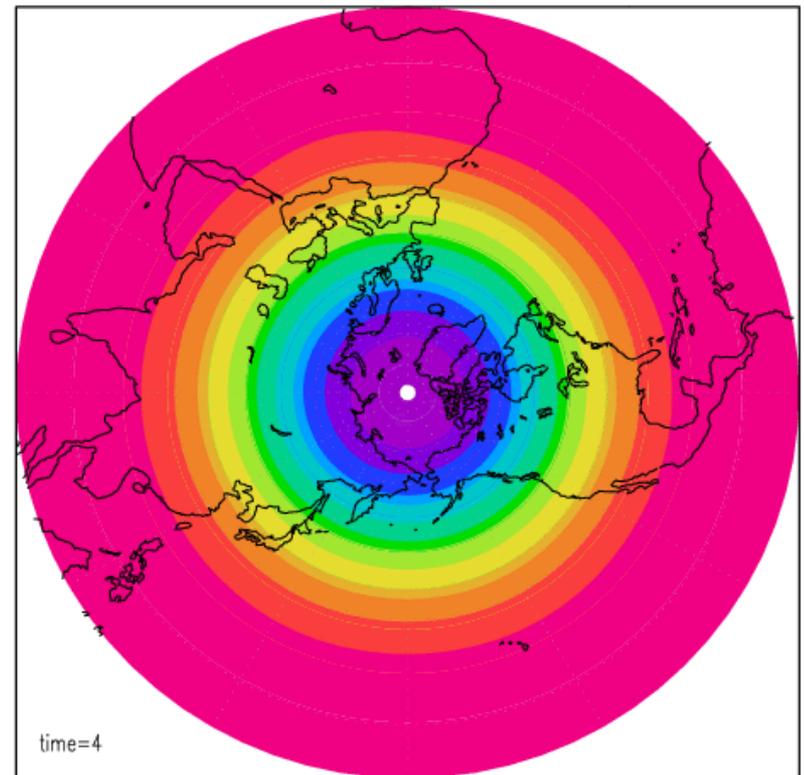
波数6のロスビー波砕波実験

増幅率 1.7倍

Barotropic Height
Wavenumber 6

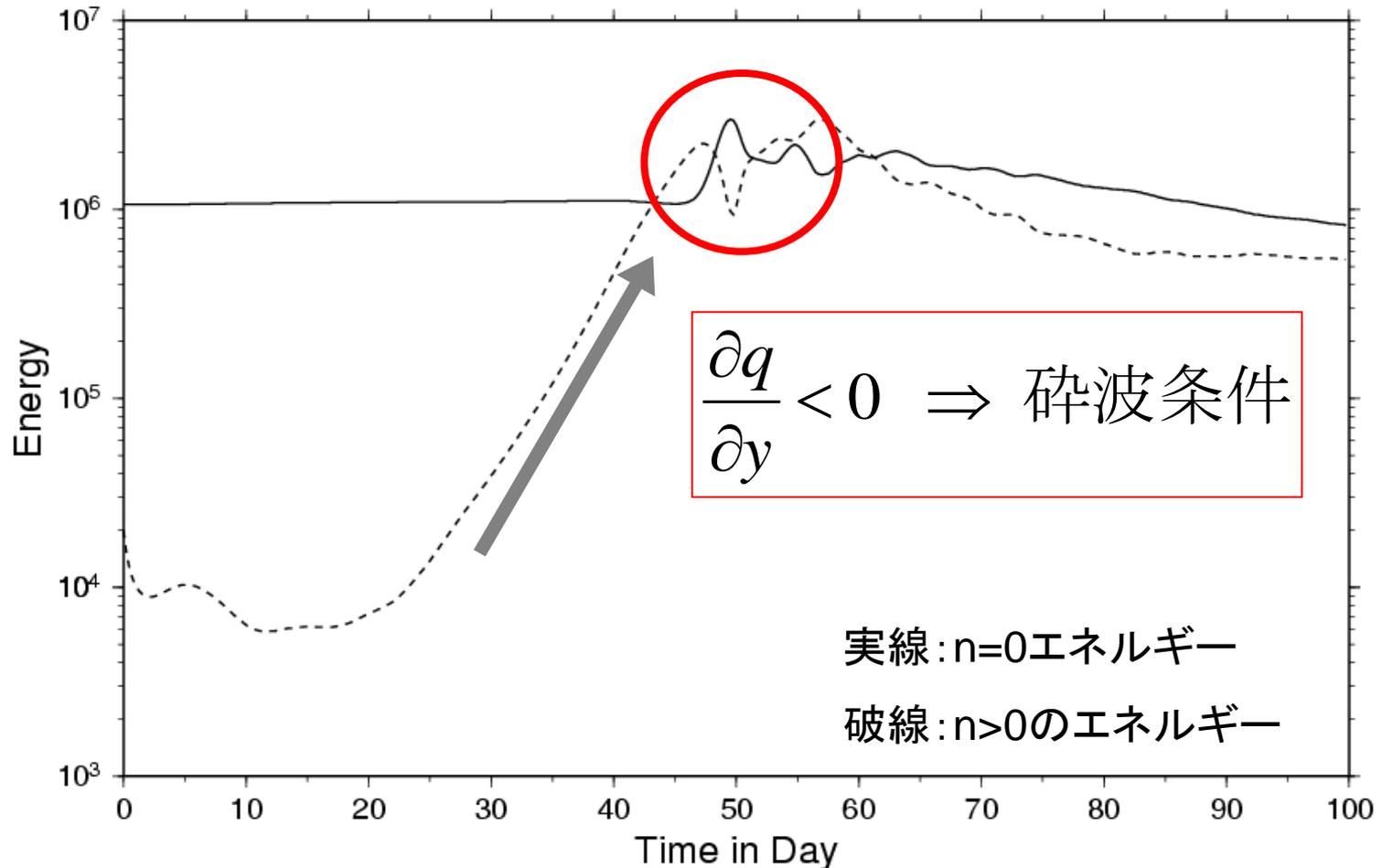


Barotropic Height
Wavenumber 6



増幅と砕波によるエネルギーの時間変化

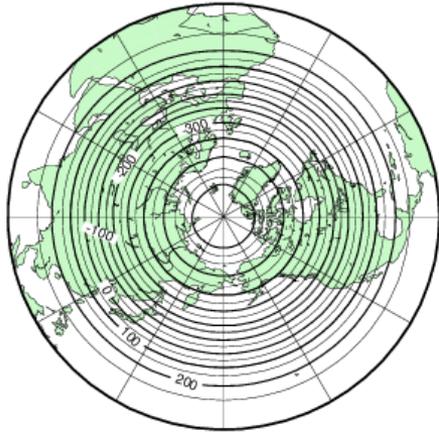
Time Serie



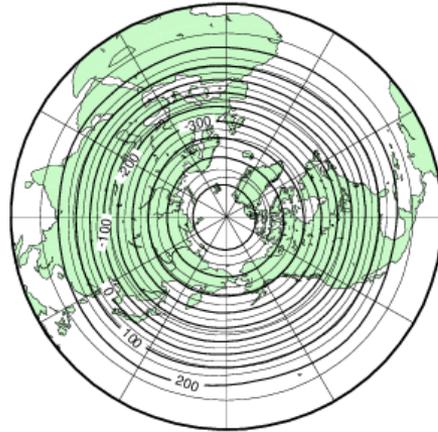
- 渦のエネルギーが指数関数的に増幅し、東西流のエネルギーと同じになったところで砕波が起こり、東西流と波の相互作用が見られる。

ジオポテンシャル高度の時間変化

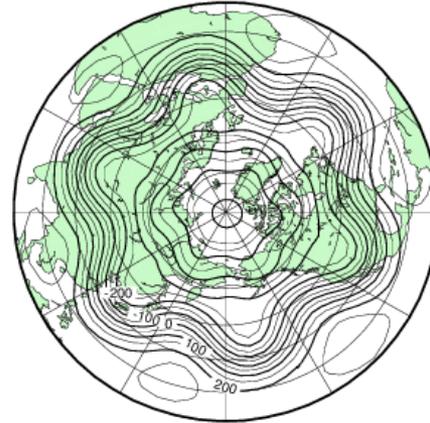
Initial data +0 day



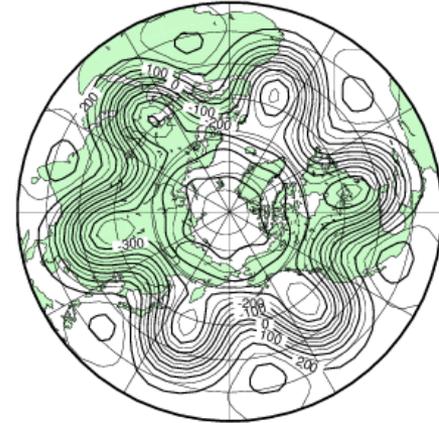
Initial data +10 day



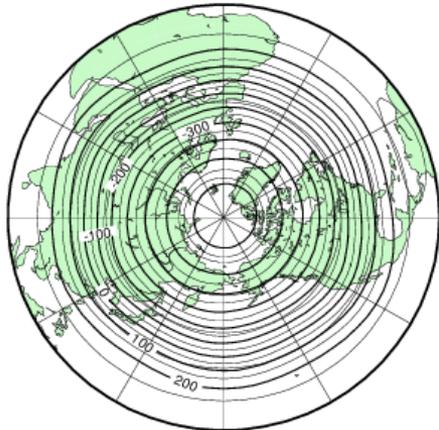
Initial data +40 day



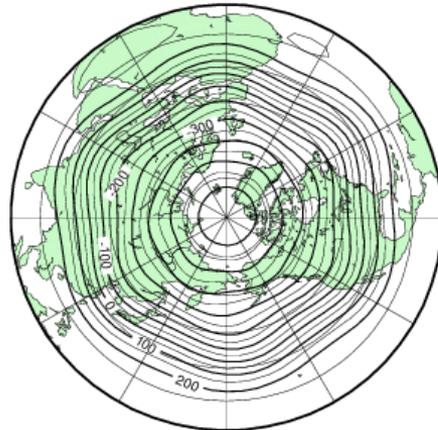
Initial data +45 day



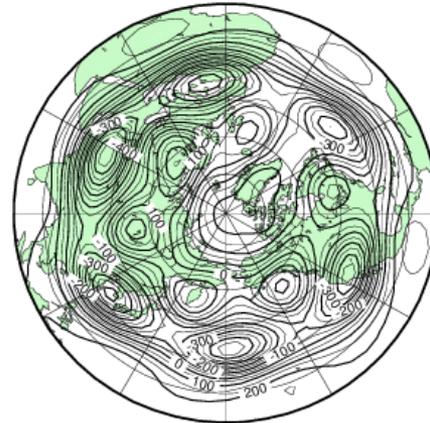
Initial data +20 day



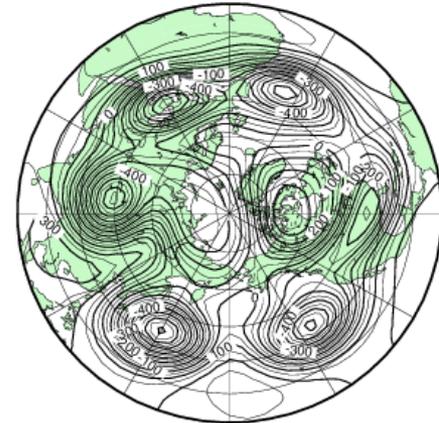
Initial data +30 day



Initial data +50 day



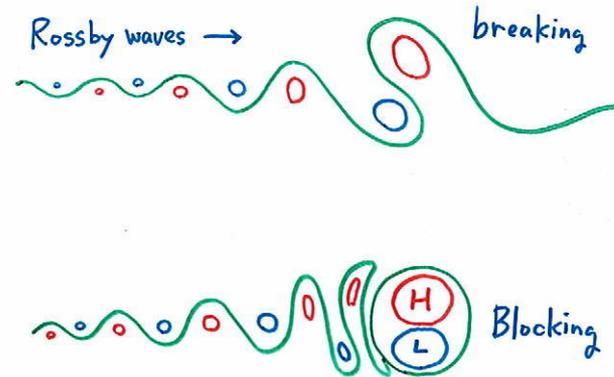
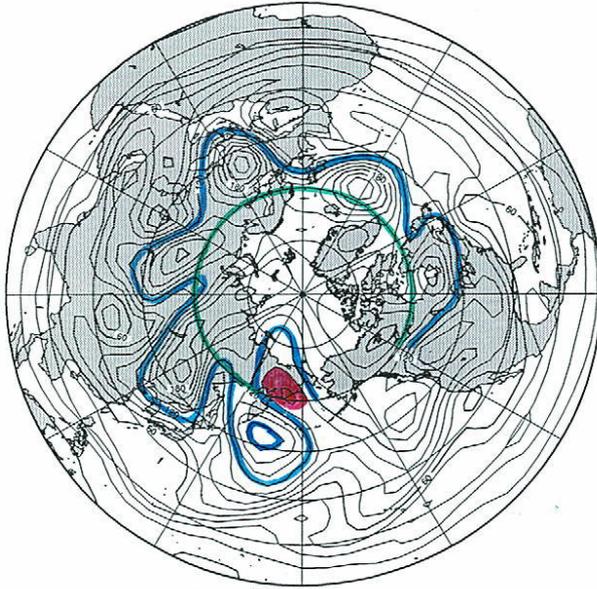
Initial data +55 day



Potential Vorticity

Day 79

ロスビー波砕波でブロッキングが形成される



(Tanaka and Watarai 1999)

Blocking

Breaking Rossby Waves



ブロッキングシステム

ローカルな異常気象

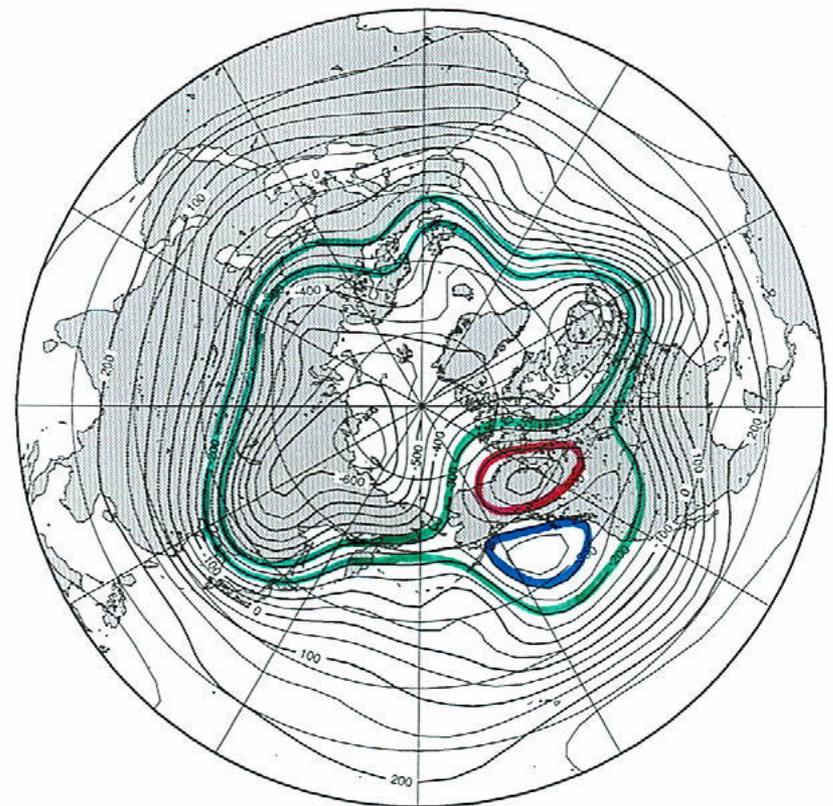
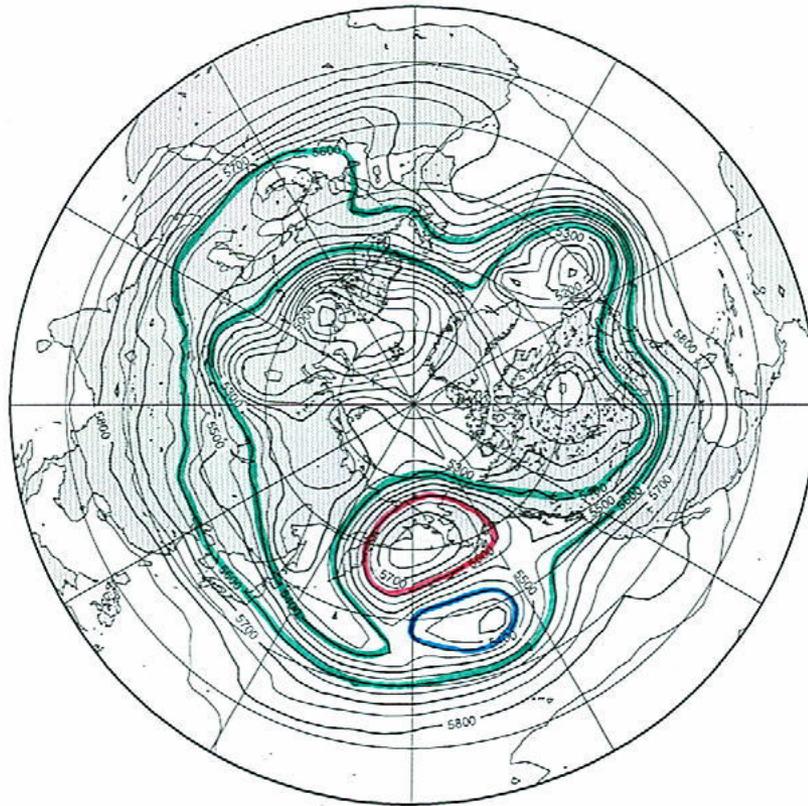
位相速度が0の停滞性ロスビー波が波波相互作用で碎波する

500 hPa Height

JMA GPV 97031412+00

Geopotential Height

Run-02 Day 955



Zonalizationで起こる北極振動

世界規模の異常気象

A0 プラス



日本暖冬

A0 マイナス



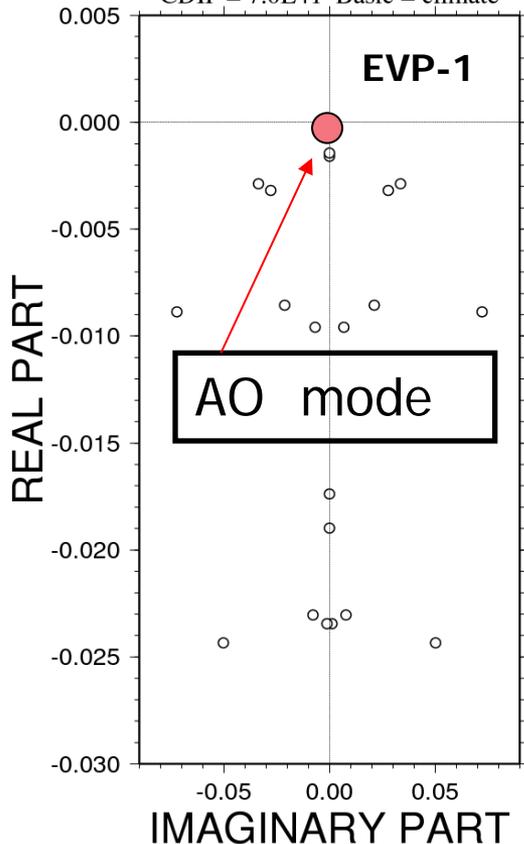
日本寒冬

北極振動の特異固有解理論

固有値が0の固有解が帯状波相互作用で励起する

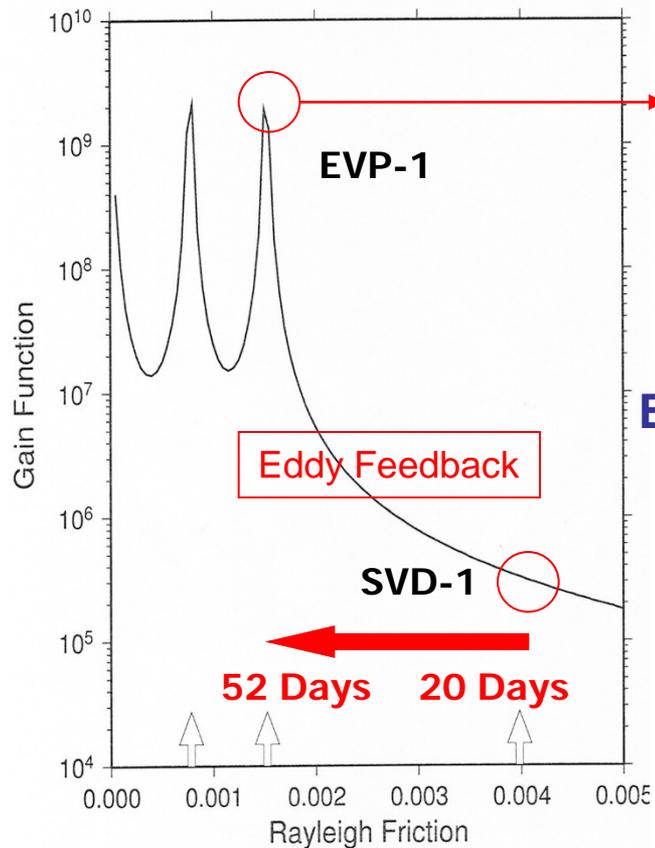
EIGENVALUE

CDIF = 7.0E41 Basic = climate

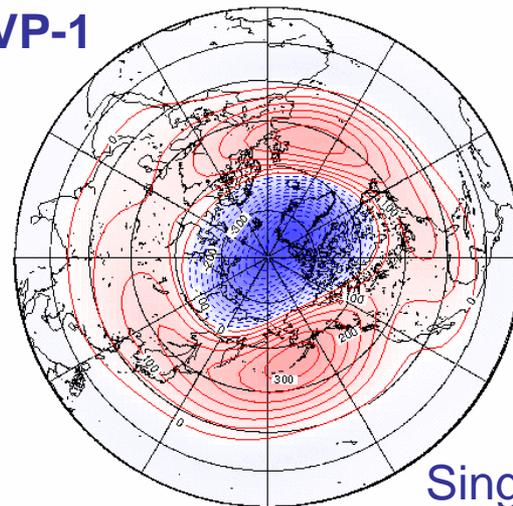


SVD Analysis

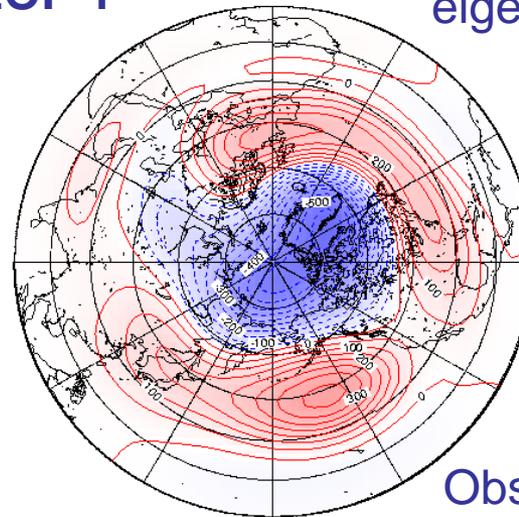
(Diffusion only)



EVP-1



EOF-1

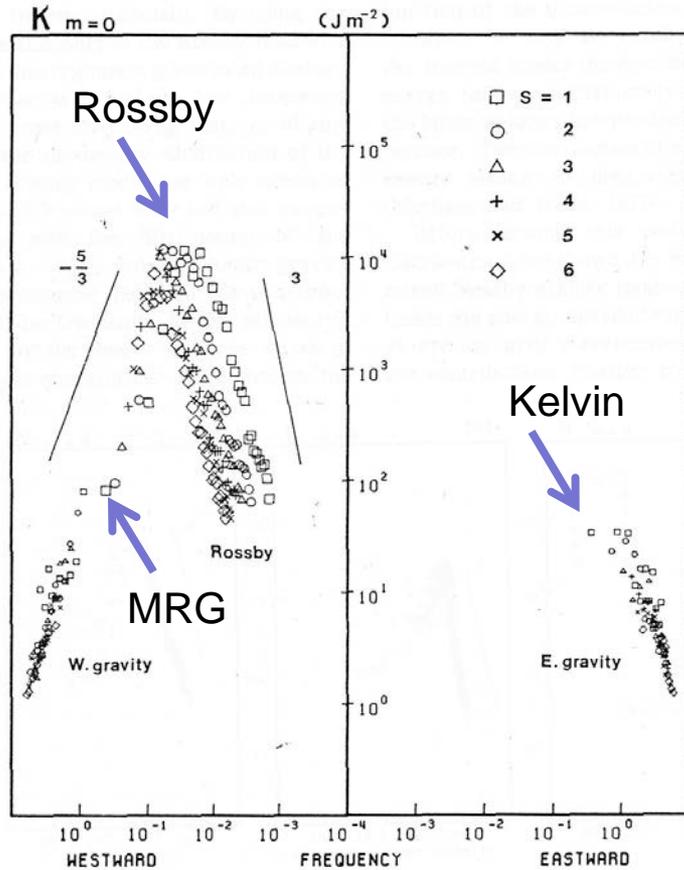


(Tanaka and Matsueda 2005)

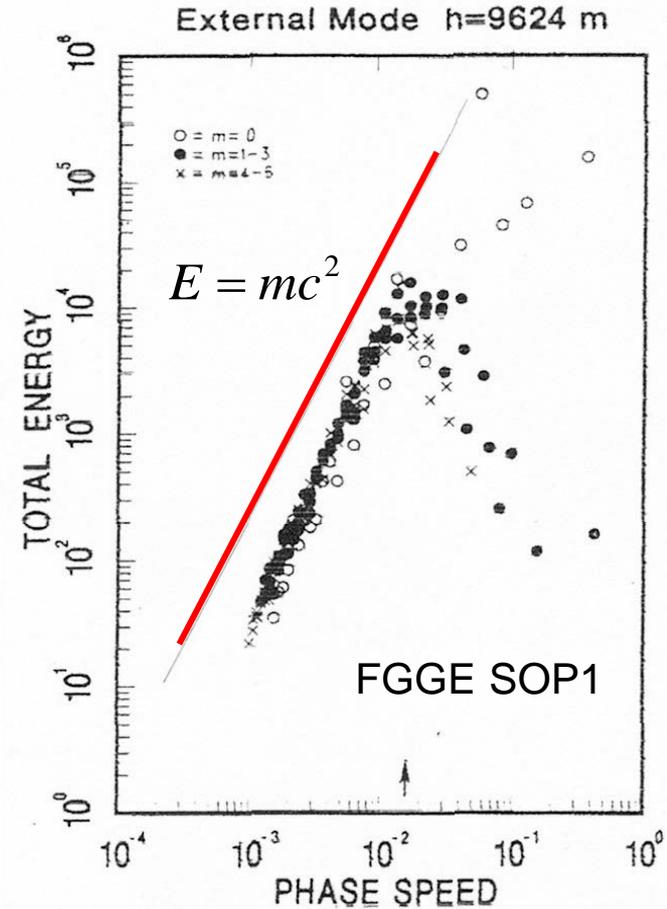
3D-スペクトル

ロスビー波位相速度 c でスケール表示

$$c = \frac{\sigma}{n} = -\frac{\beta}{n^2 + l^2 + m^2} = -\frac{\beta}{k^2}$$



Tanaka (1985)

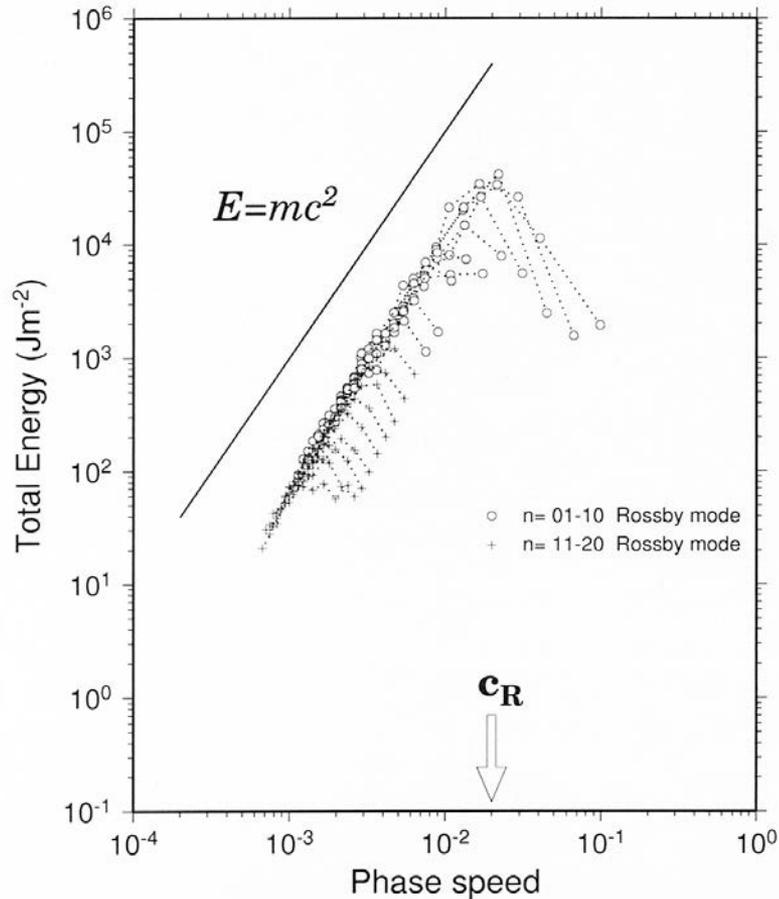


Tanaka and Kasahara (1992)

ノーマルモード展開

Total Energy Spectrum

JMA/GPV (DJF 2002/03)



順圧成分の 乱流スペクトル

$$E_i = \frac{1}{2} p_s h_m |w_i|^2$$

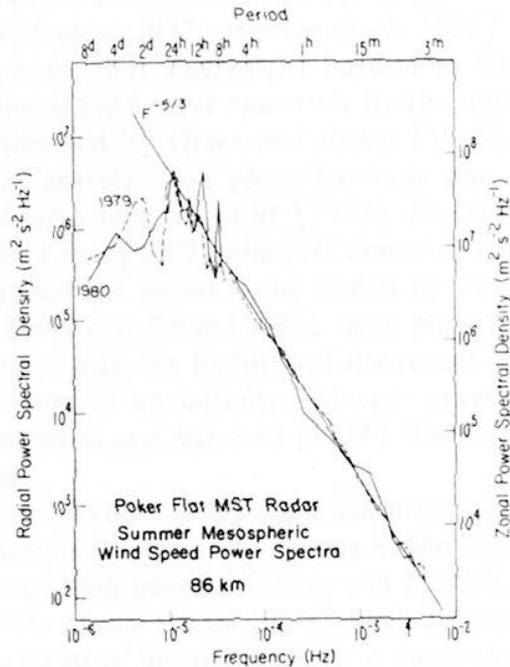
$$m = \frac{p_s}{g}, \text{ (kg/m}^2\text{)}$$

$$C_i = \frac{\sigma_i}{n} = \frac{-\beta}{n^2 + l^2 + 1/\lambda^2}$$

Tanaka et al. (2004)

重力波の砕波と飽和理論

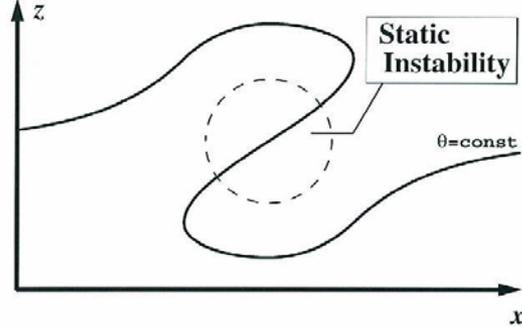
重力波の飽和スペクトル



-5/3乗則

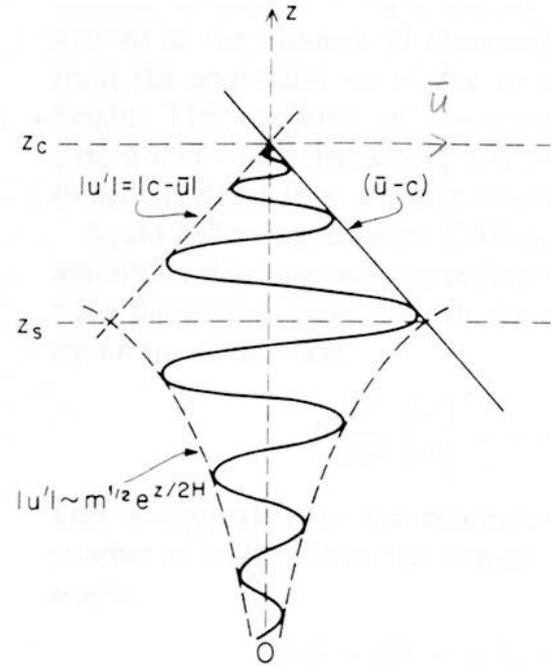
重力波の砕波

• Gravity Wave



温位の転倒

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} < 0$$



Fritts (1984)

ロスビー波の碎波と飽和理論

$$\frac{\partial q}{\partial y} < 0, \quad q = \nabla^2 \psi + f$$

Tanaka and Watarai (1999)

非発散順圧渦位

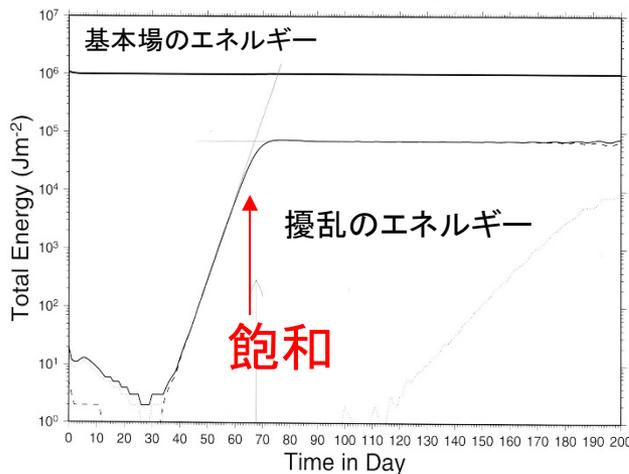
$$\frac{\partial}{\partial y} (\nabla^2 \psi + f) = -\nabla^2 u + \beta < 0$$

$$u < -\frac{\beta}{n^2 + l^2} = c$$

碎波条件

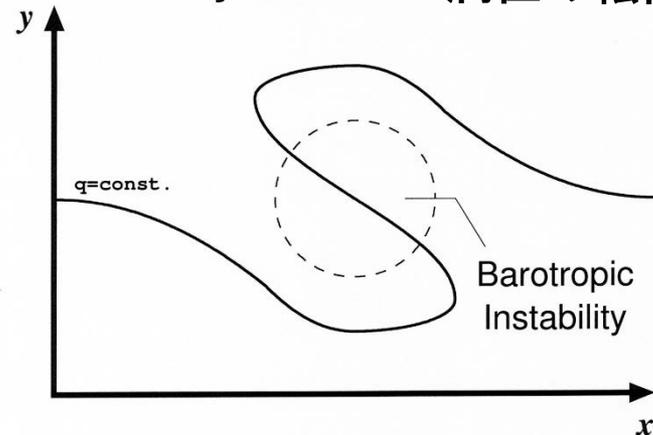
$$\frac{\partial q}{\partial y} < 0$$

Time Series



Rossby Wave

渦位の転倒



飽和エネルギースペクトル

$$u < -\frac{\beta}{n^2 + l^2} = c$$

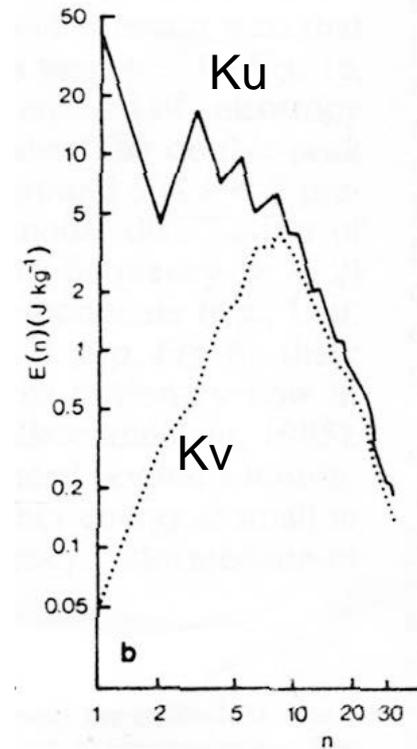
$$|u| \approx |v| \quad (\text{Tanaka and Kasahara 1992})$$

$$E = \frac{1}{g} \int_0^{p_s} \frac{1}{2} (u^2 + v^2) dp$$

$$= \frac{p_s}{g} c^2 = mc^2 \quad m = p_s / g$$

空気の質量

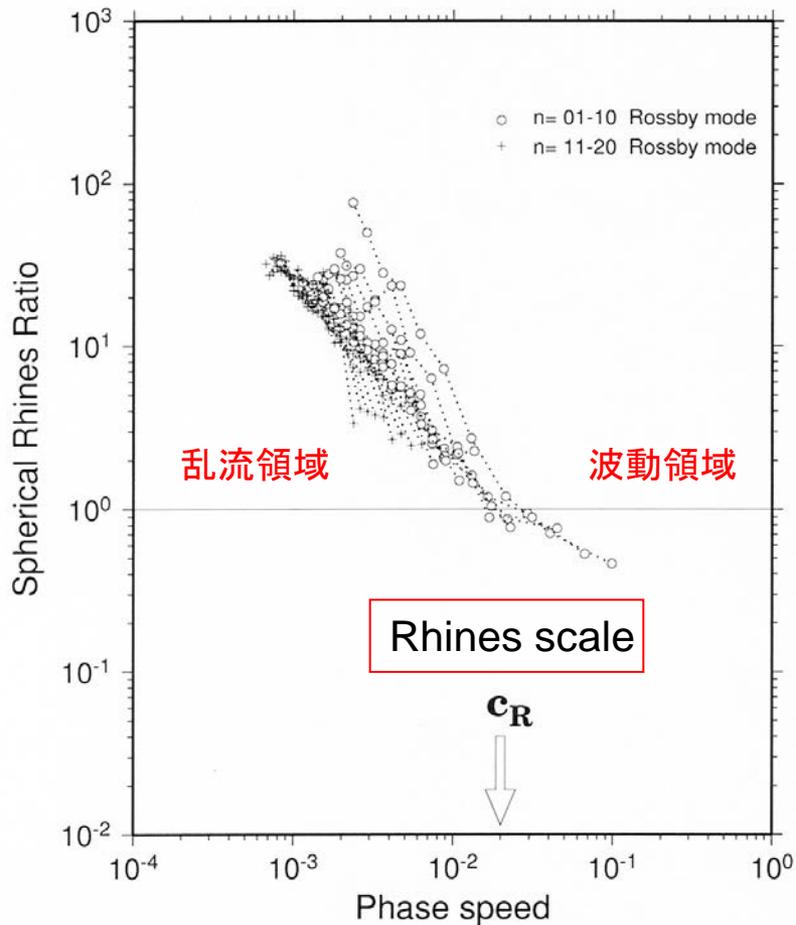
$$\frac{\partial q}{\partial y} < 0 \quad \Rightarrow \quad E = mc^2$$



Shepherd (1987)

Rhinesスケール(位相速度 c_R)

Spherical Rhines Ratio
JMA/GPV (DJF 2002/03)



$$\frac{dw_i}{d\tau} = -i\sigma_i w_i - i \sum_{jk} r_{ijk} w_j w_k + f_i$$

$$R_i = \frac{|\sum r_{ijk} w_j w_k|}{|\sigma_i w_i|} \quad \text{球面 Rhines 比}$$

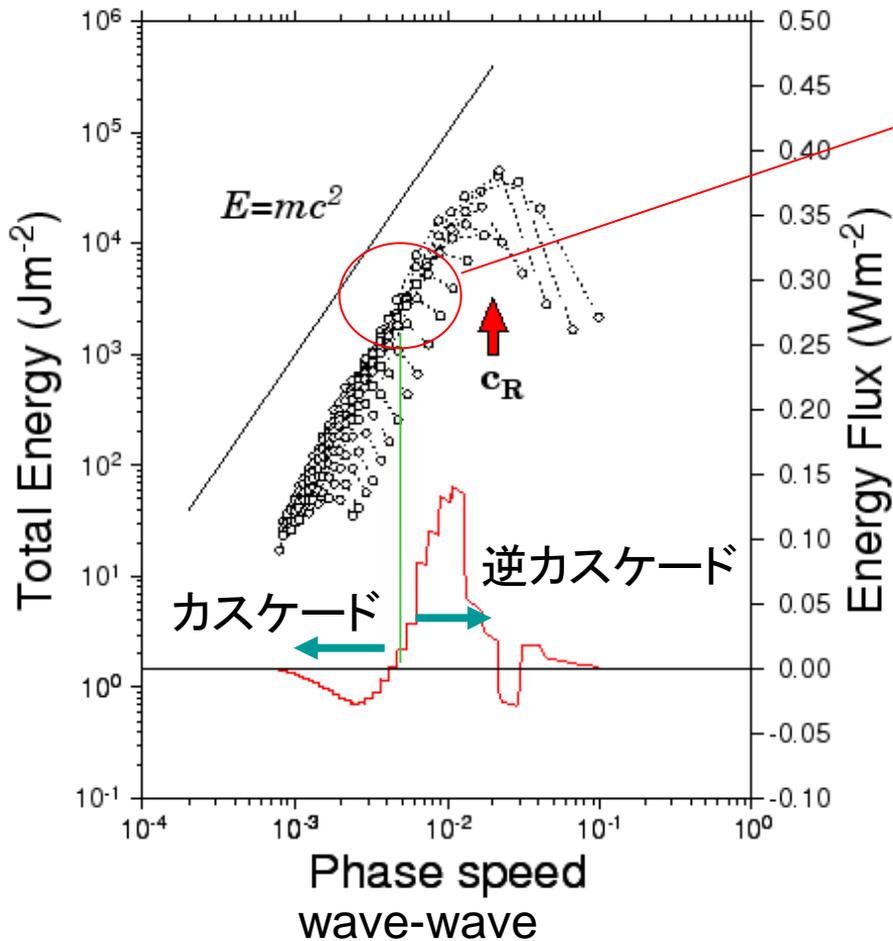
乱流領域 $R_i > 1$

波動領域 $R_i < 1$

Rhines scale $R_i = 1$

Energy flux in c-domain

Total Energy Spectrum
Climate (DJF 1950/2003)



エネルギーソース

乱流スペクトルのほぼ中央に総観規模擾乱によるエネルギーソースがあるので、慣性小領域理論では乱流スペクトルの説明はできない。



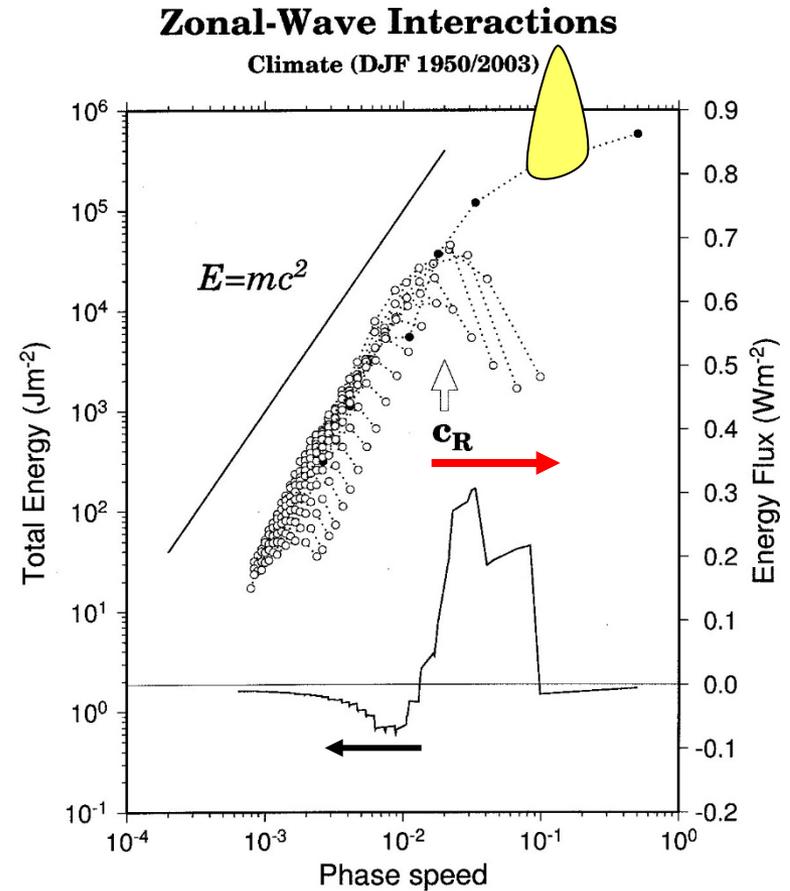
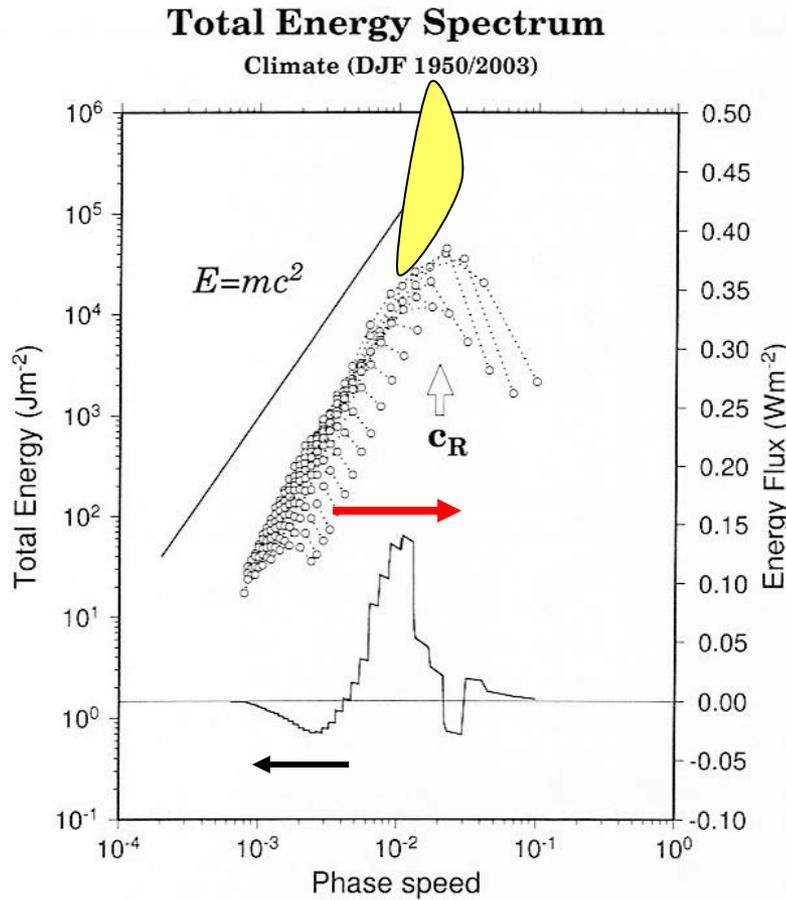
ロスビー波の飽和理論

$$\frac{\partial q}{\partial y} < 0 \quad \Rightarrow \quad E = mc^2$$

Excitation of blocking and AO by the inverse energy cascade

ブロッキング

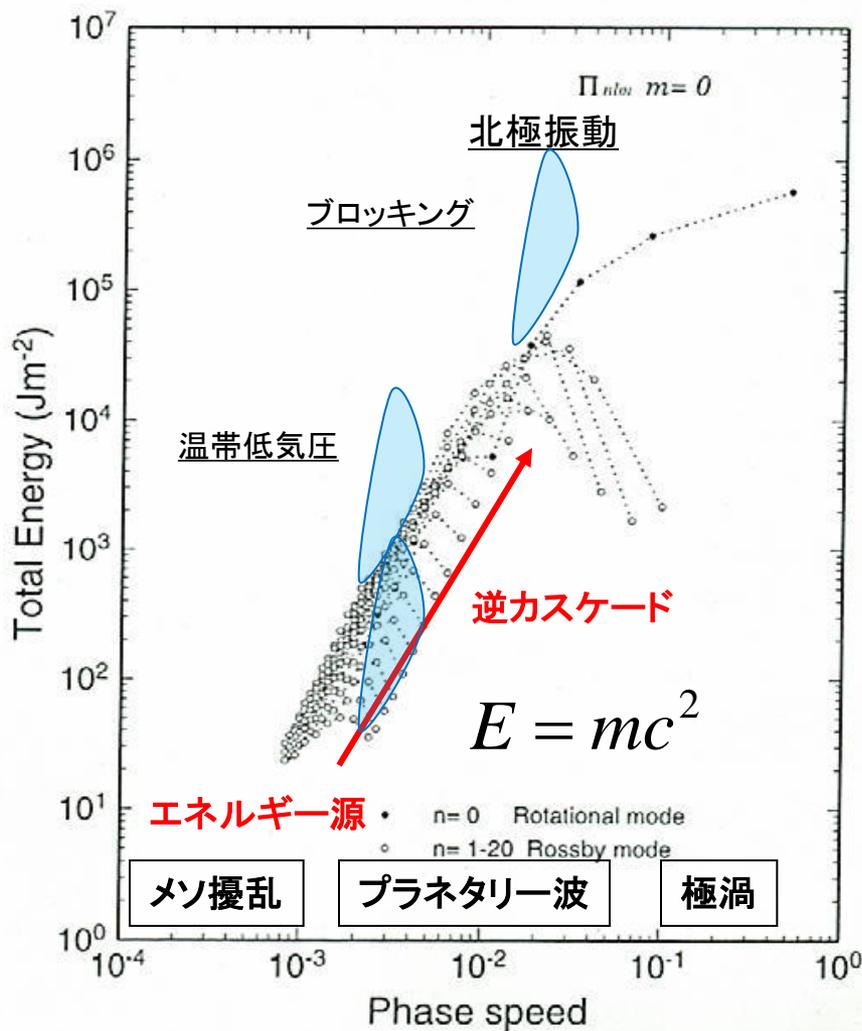
北極振動



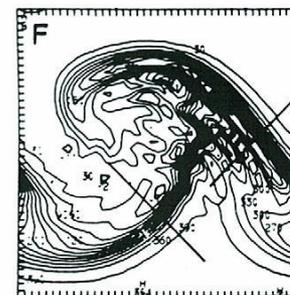
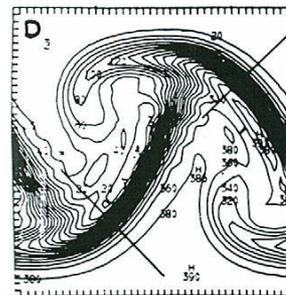
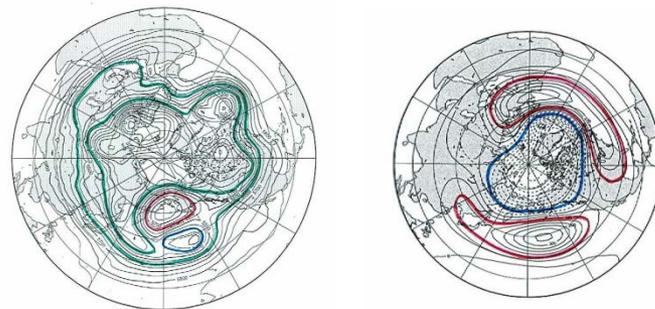
(Tanaka and Terasaki 2004)

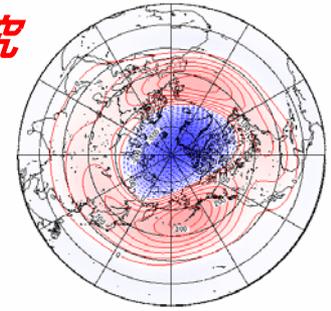
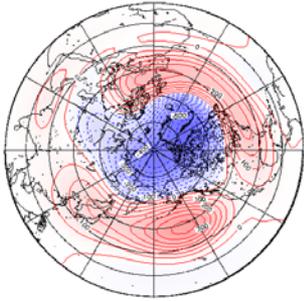
Total Energy Spectrum

NCEP/NCAR DJF 1950-1999



地球規模の 乱流エネルギー スペクトル まとめ





まとめと考察

- (1) 傾圧不安定の結果、Barotropization により鉛直波数0(順圧成分)にエネルギーが溜まる。
- (2) 順圧成分での2次元乱流の結果、Zonalization により、東西波数0にエネルギーが溜まる。
- (3) エネルギーの逆カスケード(Wave-wave)で位相速度0のRhinesスケールにエネルギーが溜まりブロッキングが発生する。
- (4) エネルギーの逆カスケード(Zonal-wave)で固有値0のAOモードにエネルギーが溜まり北極振動が励起される。
- (5) 大気の順圧成分は、2次元乱流として長周期の自律的な内部変動を引き起こす。気候変動の自然変動成分となる。