



KYUSHU UNIVERSITY 100th 2011
知の新世紀を拓く

私の中層大気力学研究と今後の方向

宮原 三郎

九州大学大学院理学研究院
最終講義

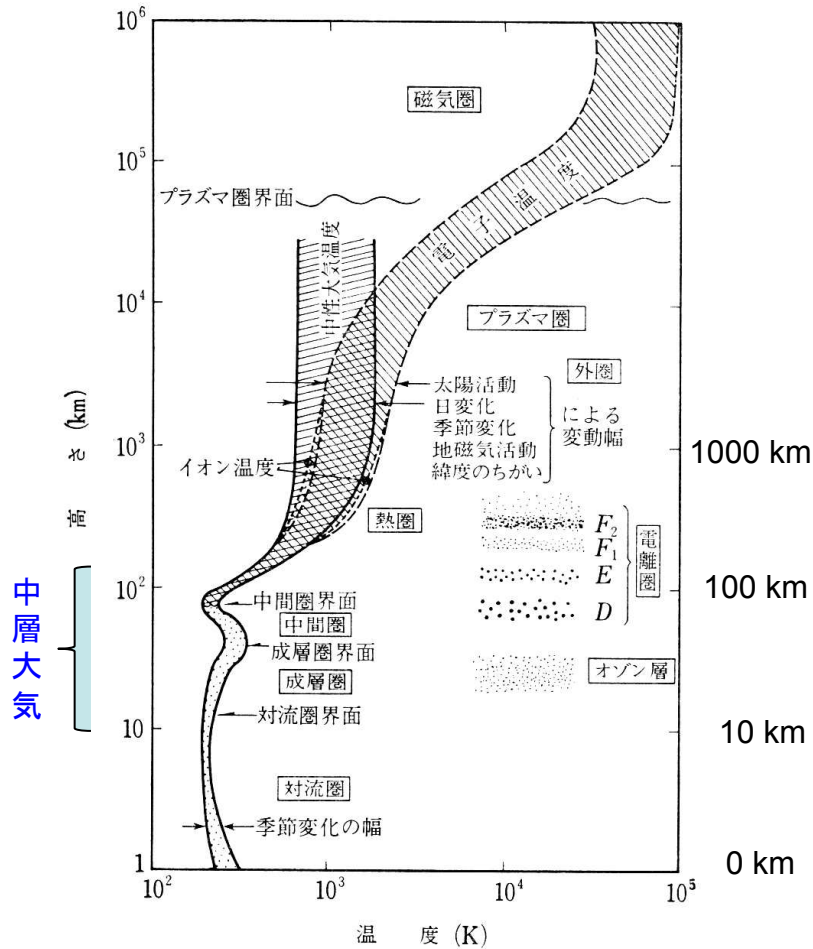
2012.3.15



九州大学
KYUSHU UNIVERSITY

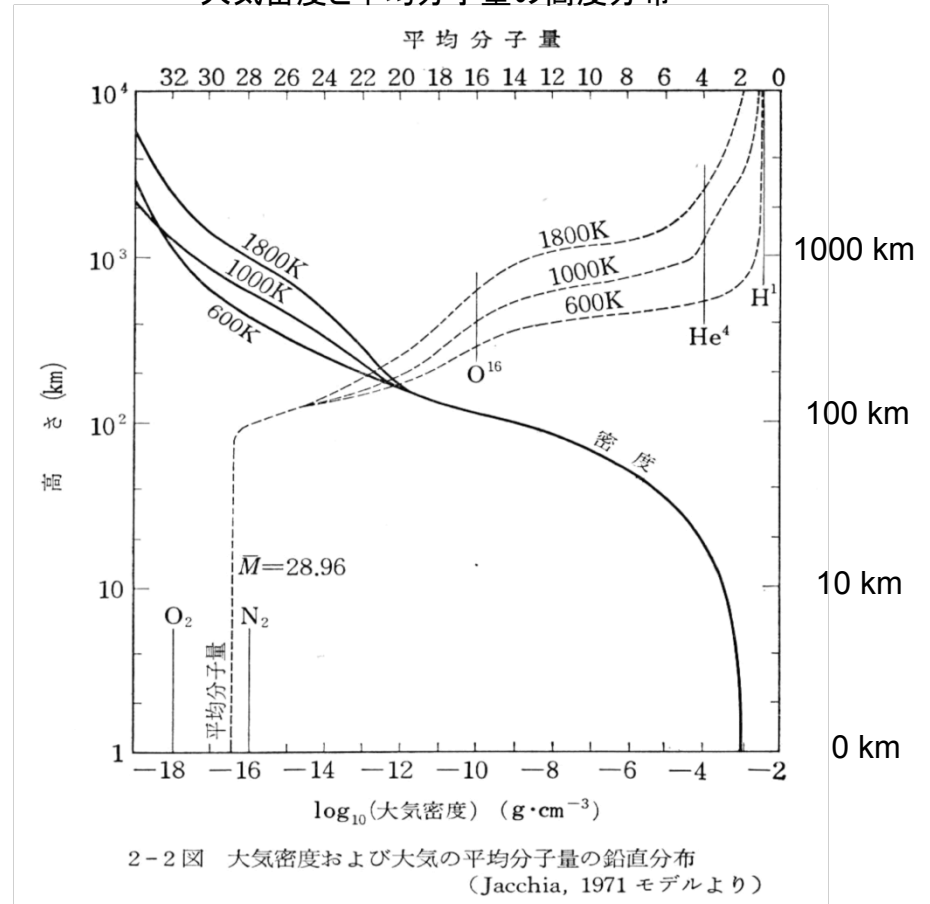
1. 大気力学が対象とする空間

大気温度の高度分布



2-1 図 地球大気温度の鉛直分布と各大気領域の名称

大気密度と平均分子量の高度分布



2-2 図 大気密度および大気平均分子量の鉛直分布 (Jacchia, 1971 モデルより)

緯度(带状)平均東西風(ms^{-1})と温度($^{\circ}\text{C}$)分布

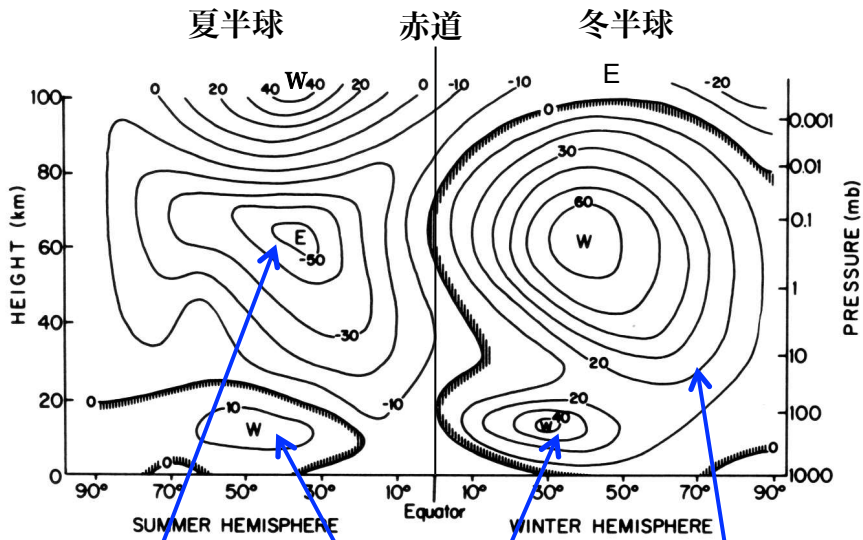


Fig. 1.4. Schematic latitude-height section of zonal mean zonal wind (ms^{-1}) for solstice conditions; W and E designate centers of westerly (from the west) and easterly (from the east) winds, respectively. (Courtesy of R. J. Reed.)

Andrews et al.(1987)

W: 西風
 E: 東風
 偏西風
 極夜ジェット
 西風
 東風

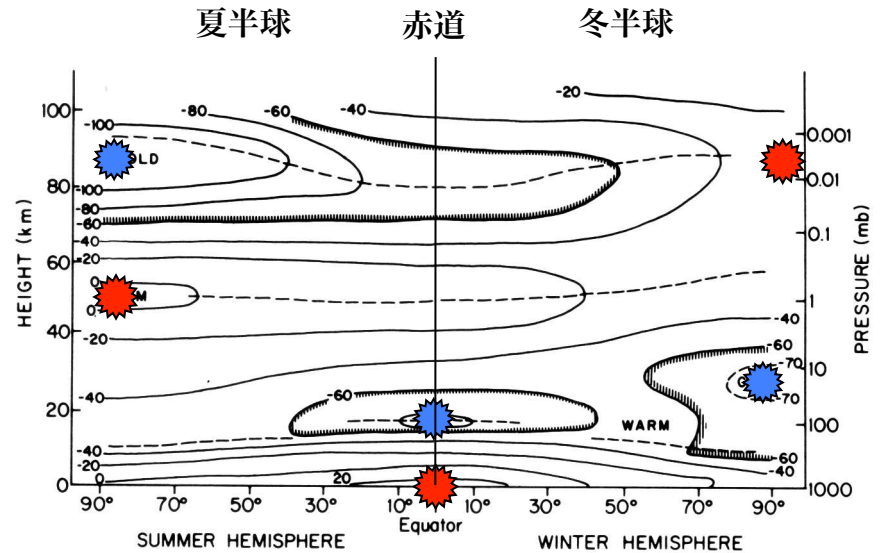


Fig. 1.3. Schematic latitude-height section of zonal mean temperatures ($^{\circ}\text{C}$) for solstice conditions. Dashed lines indicate tropopause, stratopause, and mesopause levels. (Courtesy of R. J. Reed.)

高温

低温

太陽放射エネルギーだけでは説明できない
 大気力学の効果

The Ionosphere Thermosphere System (Forbes, 2007)

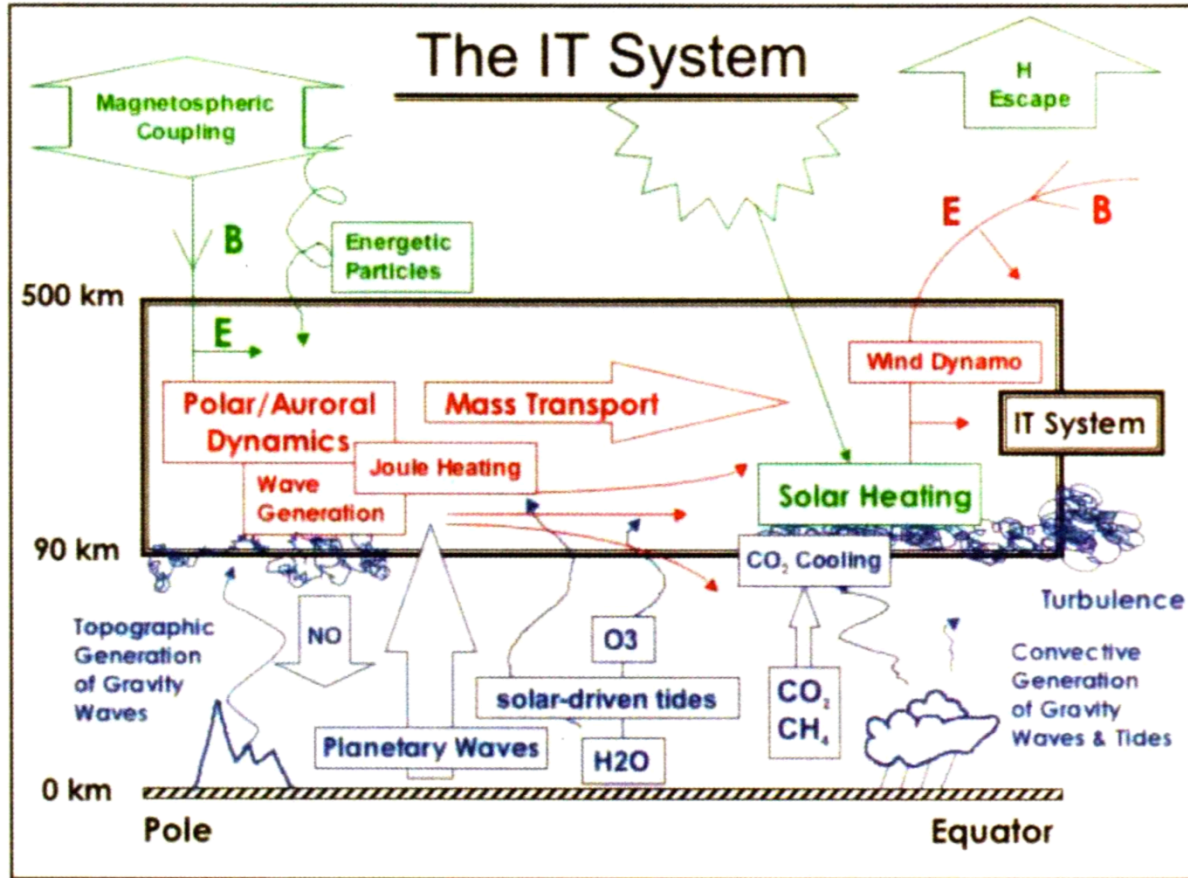


Fig. 1. Energy input, conversion and transport processes relevant to the Ionosphere-Thermosphere (IT) system. Green indicates energy sources from above the thermosphere, blue indicates influences of lower atmospheric regions on the thermosphere, and red indicates energy conversion and transport processes within the thermosphere.

General circulation
大気大循環

Atmospheric Tides
大気潮汐波

Gravity Waves
重力波

Planetary waves
プラネタリー波

Equatorial waves
赤道波
ケルビン波

2. 大気力学研究へ

理学研究科物理学専攻大気物理学講座入学：1970年

- ・大気潮汐を修士論文研究テーマとする（指導教官：澤田龍吉教授）

大気潮汐波動の熱圏に於ける分子粘性・分子熱伝導による散逸

解析的に解ける問題：分子粘性による散逸（変数分離不可：数値計算が必要）

大気潮汐波の分子熱伝導による散逸

球面上でも変数分離可能：手で解ける

熱圏での熱拡散による散逸解をベキ級数展開で表現

コンピューターを多用しなくても済む研究

デカルト座標系での分子粘性・分子熱伝導による波動の散逸

Lindzen(1971, 1972)で行われていた

情報を入手していなかった

- ・球面上の潮汐波の分子粘性・分子熱伝導による散逸

コンピュータによる数値計算が必要

新たな研究対象へと方向転換を決意

Wave-mean flow interaction (波動平均流相互作用) 研究へ

- ・ 帯状平均流中の波動伝播および帯状平均流へ波動が与える効果

Charney and Drazin (1961) : プラネタリー波の成層圏への伝播, 非加速定理

Eliassen and Palm (1960) : 波動に伴う運動量流束 (non-divergence of E-P flux)

Booker and Bretherton (1967): 重力波のクリティカルレベル吸収
(波に伴う運動量吸収と平均流加速)

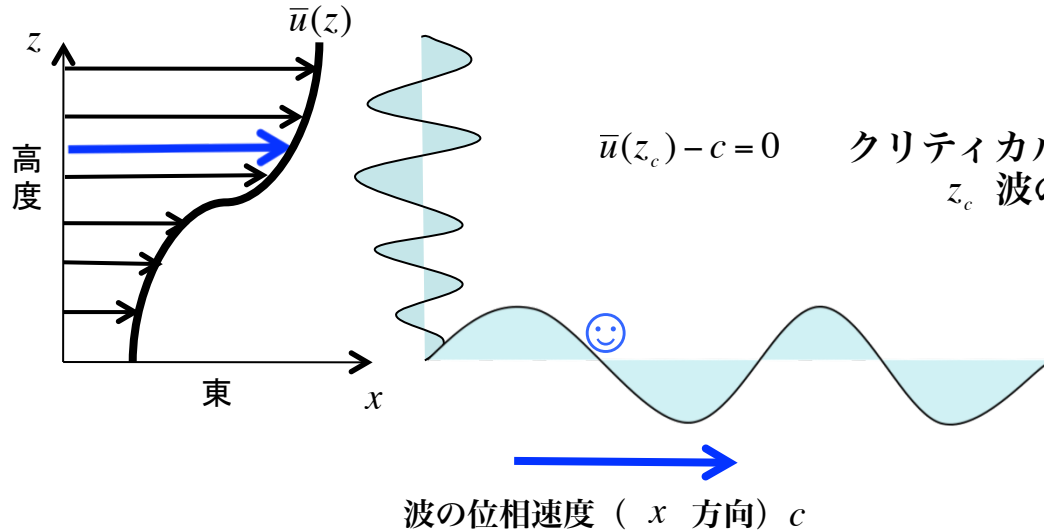
1970年(M1)時の研究室教官 : 澤田龍吉教授, 松野太郎助教授, 瓜生道也助手

Matsuno(1970): 現実的帯状平均流中でのプラネタリー波の成層圏への伝播

Matsuno(1971): 成層圏突然昇温をプラネタリー波に伴う運動量および熱輸送で説明

Uryu (1973, 1974)etc. : プラネタリー波に伴う運動量輸送の定式化

帯状平均流中の波動伝播 (不均質媒質中の波動伝播)



<http://www.gatag.net/02/21/2010/070000.html>

$$a(x, z, t) = A(z) \exp[i(kx - \omega t)] = A(z) \exp[ik(x - ct)]$$

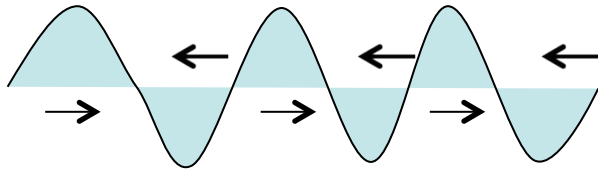
$$\frac{\partial a}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial a}{\partial x} = i(\omega - k\bar{u})a \equiv i\hat{\omega}a = ik(c - \bar{u})$$

流体と共に動く座標系からみた波の振動数がゼロ：振動していない波動を記述する微分方程式の特異点となる

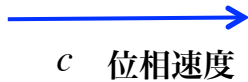
波は特別な振る舞いをする

波に伴う運動量吸収と平均流加速 (Booker and Bretherton, 1967)

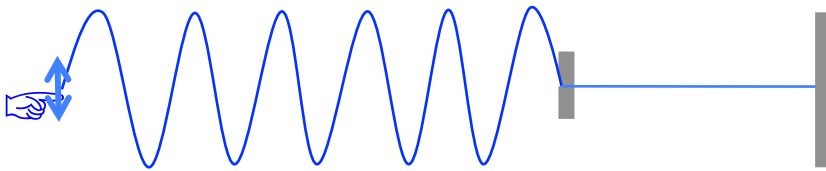
波に伴う運動量



流速は平均すればゼロ => 平均運動量はゼロ？



ひもを振動させる

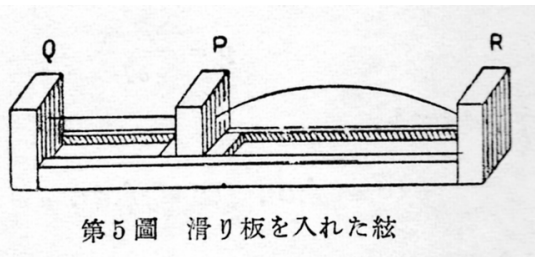


振動は平均しても壁に圧力を与える
振動は平均運動量を持っている

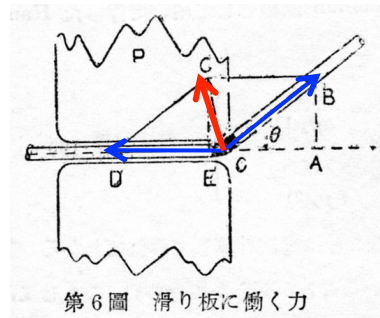
電磁波 (光)
輻射圧

固体の振動
擬運動量

流体力学
擬運動量
実際に流れるので運動量となる
部分が存在する



第5圖 滑り板を入れた絃



第6圖 滑り板に働く力

平均運動量 => 保存則は？

断熱不変量

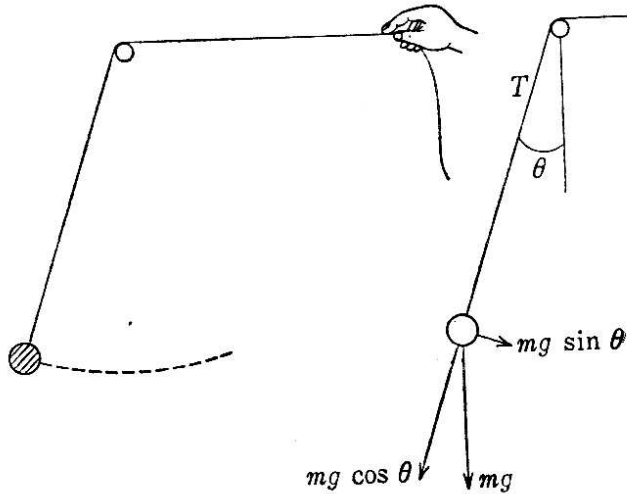


図7 振子の振動とその断熱変形

朝永(1952)

$\frac{E}{\omega}$ は不変：断熱不変量

周期運動する力学系：作用変数 $J = \oint pdq$
 q ：一般化座標
 p ：一般化運動量
 J ：action variable (作用変数)

断熱不変量

$\bar{u}(z)$ の場合に適用すると $\hat{\omega}(z) = \omega - k\bar{u}(z)$

$\frac{E}{\hat{\omega}} = const.$ Wave action (波活動度) 保存

$\frac{\text{波動のエネルギー密度}}{\text{波動の実質的振動数}}$ 保存

運動量の次元をもつ量で表すと

$\frac{E}{c - \bar{u}(z)} = const.$ 擬運動量保存

$\frac{\text{波動のエネルギー密度}}{\text{流体に相対的な位相速度}}$ 保存

平均流が空間的に（今の場合は鉛直方向）ゆっくり変化している場の中では，x方向の擬運動量を保ちつつ波動は鉛直伝播する（ただし，x方向に場は一様）

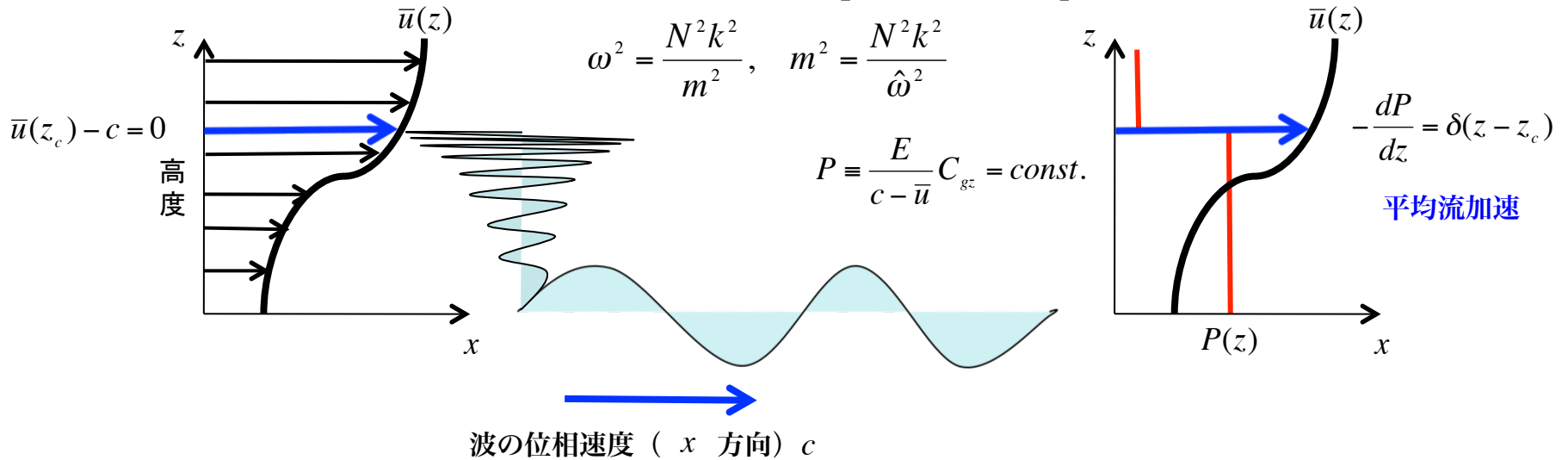
$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{E}{\hat{\omega}} \right) + \nabla \cdot \left(\mathbf{c}_s \frac{E}{\hat{\omega}} \right) = 0$$

クリティカルレベルでの波動吸収

$$a(x, z, t) = A \exp[i(kx + mz - \omega t)]$$

$$\omega^2 = \frac{N^2 k^2}{m^2}, \quad m^2 = \frac{N^2 k^2}{\hat{\omega}^2}$$

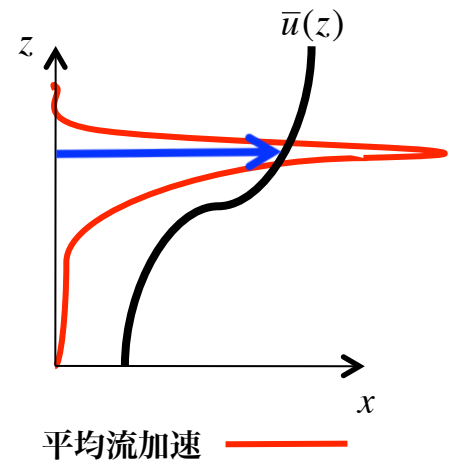
$$P \equiv \frac{E}{c - \bar{u}} C_{gz} = const.$$



流体と共に動く座標系からみた波の振動数がゼロ
波動を記述する微分方程式の特異点となる
波は特別な振る舞いをする

波に伴う運動量吸収と平均流加速
(Booker and Bretherton, 1967)

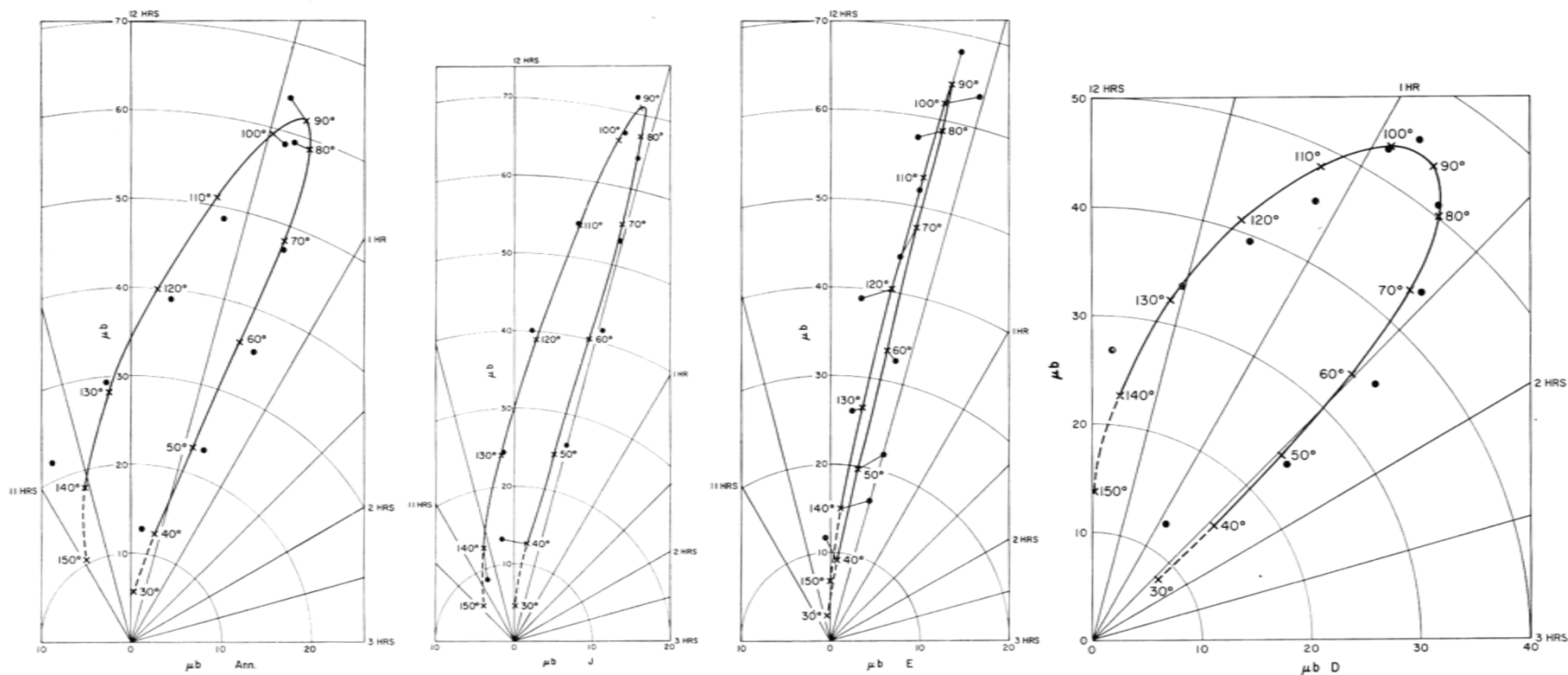
実際には、波動の散逸や非定常性により
波動の先端部で平均流加速が生じる
クリティカルレベルは無くても加速は生じる



3. 70年代は何を研究していたか

大気太陰潮汐

月の起潮力による大気振動：周期 12.4206時間 地表面圧力振動 ~ 0.05 hPa



SYDNEY CHAPMAN AND RICHARD S. LINDZEN

Fig. 2L.5. Harmonic dials showing $L_2(p)$ for the mean of the year (Figure 2L.5a) and for the seasons j , e , d (Figures 2L.5b, c, d respectively), as a function of colatitude from 30° (60° N) to 150° (60° S). The dots give the values obtained by harmonic analysis of the a_2 , b_2 read from maps of equilines. The crosses on the continuous curves indicate the values computed from three spherical harmonic terms, $P_{k,s}$, $s=2$, $k=2, 3, 4$. Corresponding dots and crosses are joined where their identity might seem uncertain. After Haurwitz and Cowley (1970).

・大気太陰潮汐波の帯状平均流中の伝播 (Miyahara, 1975)

プリミティブ方程式系での数値解を境界値問題として求める。
大気太陰潮汐波動の季節変動の原因を帯状平均流変動で説明。

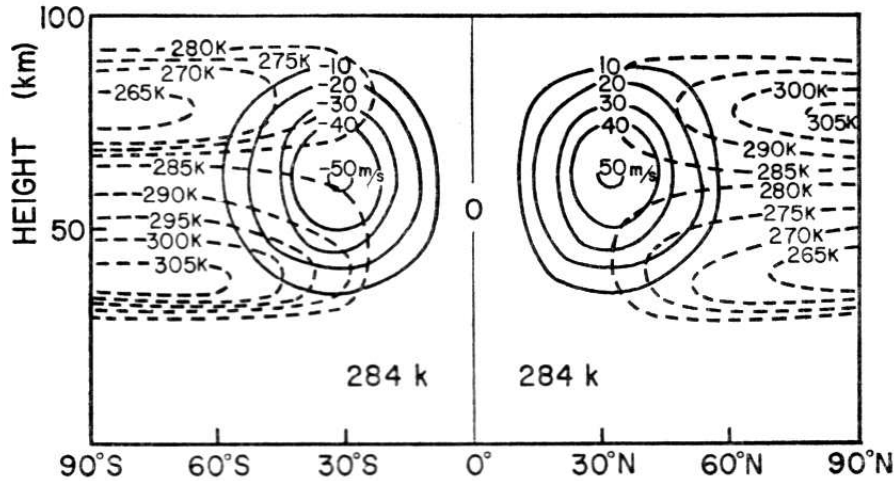


Fig. 2. Meridional cross section of E-W model atmosphere.
Solid lines: isotachs of the zonal wind.
Dashed lines: isotherms of the basic temperature.

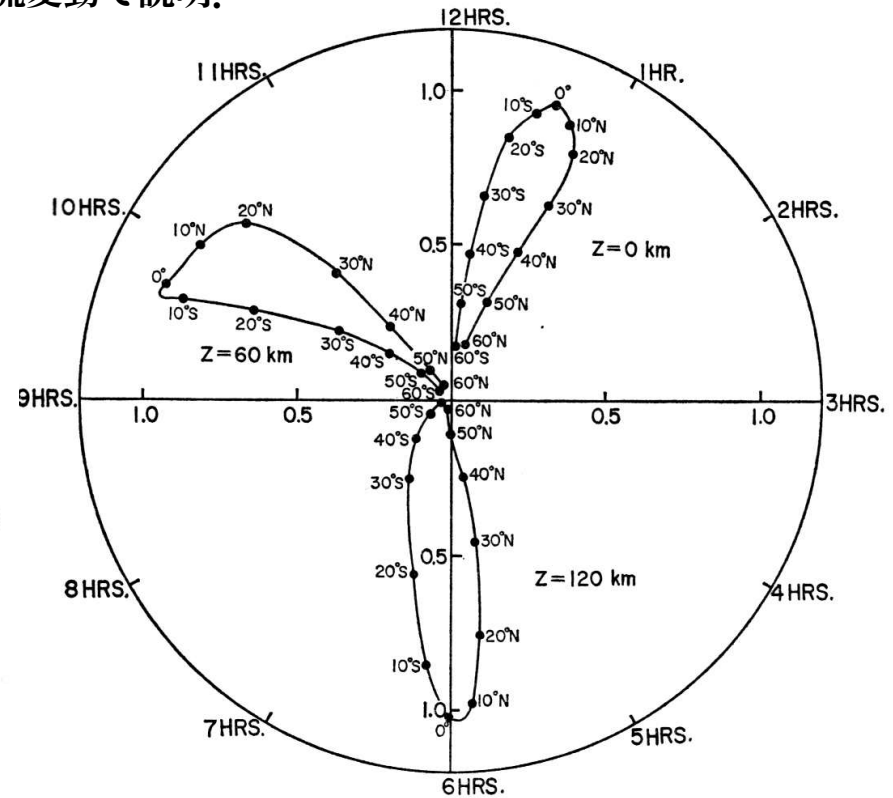


Fig. 3. Harmonic dial for the pressure oscillations: $\frac{\partial p}{\rho_0}$ at the heights of 0 km, 60 km and 120 km in E-W model. The amplitudes are normalized with the amplitudes at 3°S as an unit at each level. The amplitude at 3°S is $4.19 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{sec}^2$ at 0 km, $7.69 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{sec}^2$ at 60 km, $2.98 \times 10^7 \text{ cm}^2/\text{sec}^2$ at 120 km.

Fig. 3. through Fig. 5 show the results for the semidiurnal lunar tidal oscillation in E-W model.

Lindzen and Hong (1974):

同様なより現実的計算を大気潮汐全般にわたって展開

・回転系上のクリティカルレベル付近での波動の振舞について

$$c - \bar{u} = \pm \frac{f}{k}, \quad \hat{\omega}^2 = f^2, \quad \text{Jones' critical level} \quad \text{Jones (1967)}$$

f, k : コリオリの周期, 水平方向の波数

Lindzen (1970) Jones' critical levelでの波の振舞 :
Non-singular

Miyahara (1976)

$$N^2 \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + 4f\Lambda \frac{\partial^2 v}{\partial y \partial z} + (f^2 - \hat{\omega}^2) \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + \Lambda \left(\frac{df}{dy} - 2k\hat{\omega} \right) \frac{\partial v}{\partial z} - kN^2 \left\{ k - \frac{df/dy}{\hat{\omega}} \left(1 - \frac{\Lambda^2}{N^2} \right) \right\} v = 0. \quad (6)$$

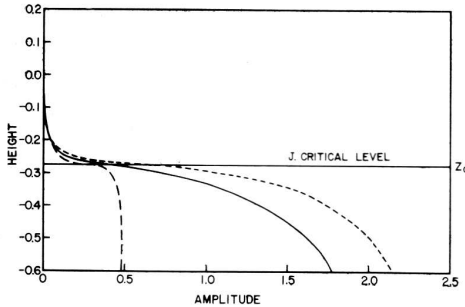


Fig. 4. Height distributions of amplitude of Φ , in the vicinity of J. critical level, for the case of $\beta = 0$. z_c is the height of J. critical level.

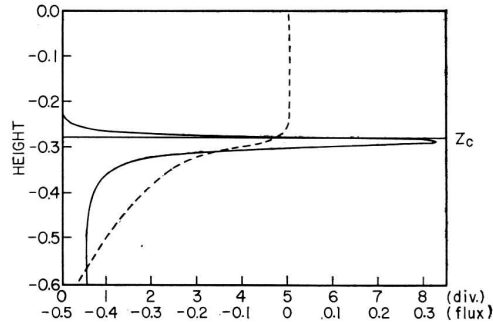


Fig. 6. Height distributions of zonal momentum flux and its divergence. ----- flux, ——— divergence.

回転系上の波動を表現する偏微分方程式の特異点
数値計算と解析 : Singular

Kitchen and McIntyre (1980)
Non-singular

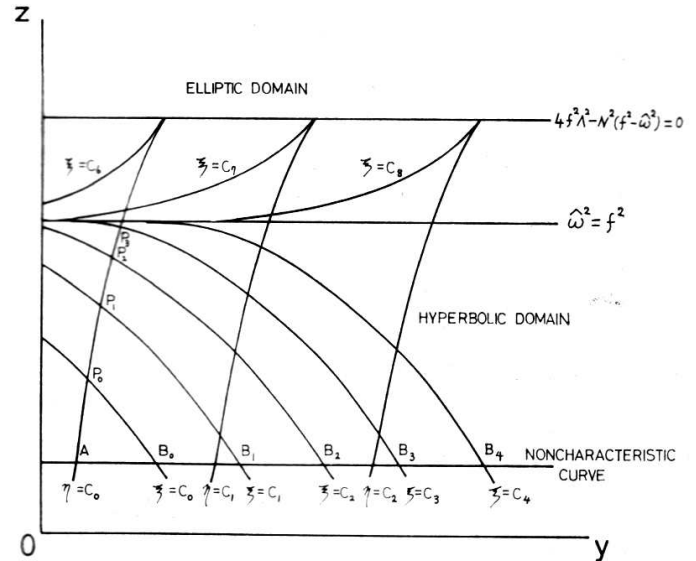


Fig. 1 The behaviors of characteristic curves in case of uniform rotation ($f = \text{constant}$).

特性曲線による解析
Non-singular

Miyahara (1981)

4. 70年代後半 - 80年代前半

Andrews and McIntyre (1976): EP-flux と Transformed Eulerian-Mean (TEM)方程式系の定式化

Andrews and McIntyre (1978): Lagrange mean 方程式系の定式化

Wave-mean flow interaction の定式化

大気潮汐による下部熱圏赤道域の帯状平均流加速研究

Miyahara (1978)以降一連の論文を発表

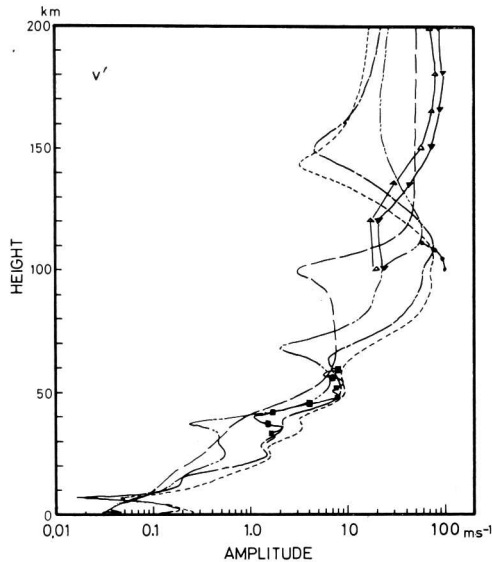


Fig. 4a Height distributions of amplitude of v' at 15°N(S) (.....), 30°N(S) (-----), 45°N(S) (-----) and 75°N(S) (—) in case that eddy diffusion-type parameterization is used, and observed results at Arecibo (18°N) (•—•—, Haper, 1977), at 30°N (■—■—■—, Reed *et al.*, 1969) and at St. Santin (44°N) (▼—▼—, spring, △—△—△—, fall, Amayenc, 1974).

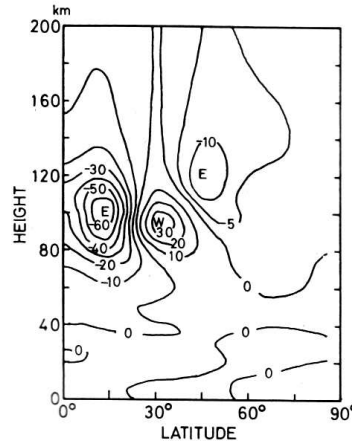


Fig. 10 Meridional cross section of induced mean zonal wind in case that eddy diffusion-type parameterization is used. The unit is m sec^{-1} .

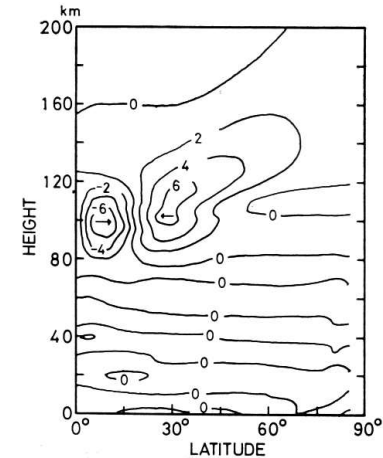


Fig. 11 As in Fig. 10 except for mean meridional wind.

Miyahara (1981)

大気潮汐波は高度100 km付近の低緯度域に平均として東風を作る

Hamilton も Princeton GFDLで同様の研究をおこなっていた

・ 中間圏大循環における内部重力波の役割
 中間圏界面付近での夏極冬極の温度逆転

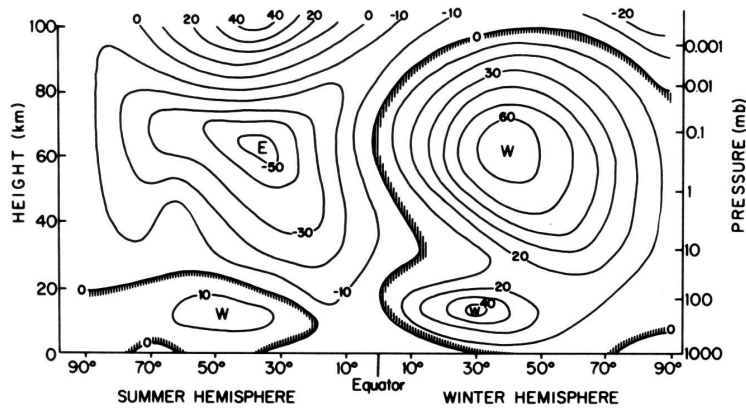


Fig. 1.4. Schematic latitude-height section of zonal mean zonal wind (m s^{-1}) for solstice conditions; W and E designate centers of westerly (from the west) and easterly (from the east) winds, respectively. (Courtesy of R. J. Reed.)

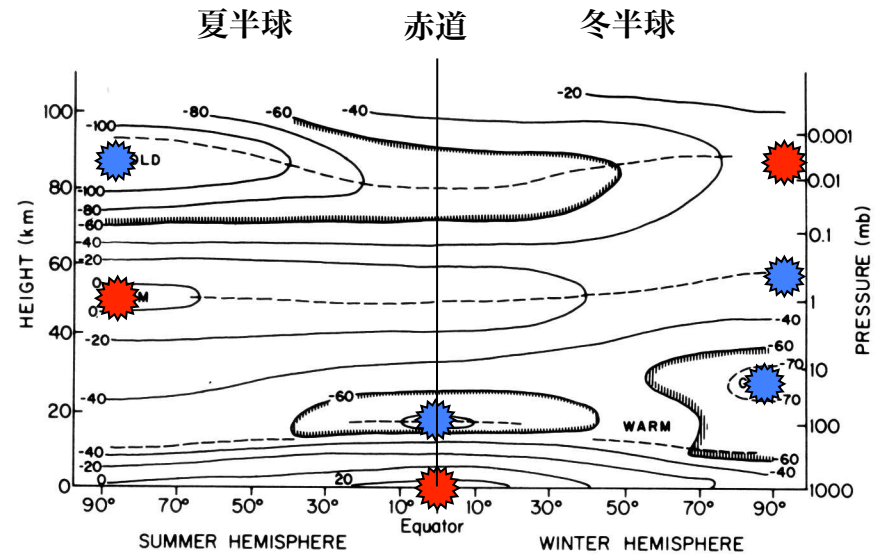
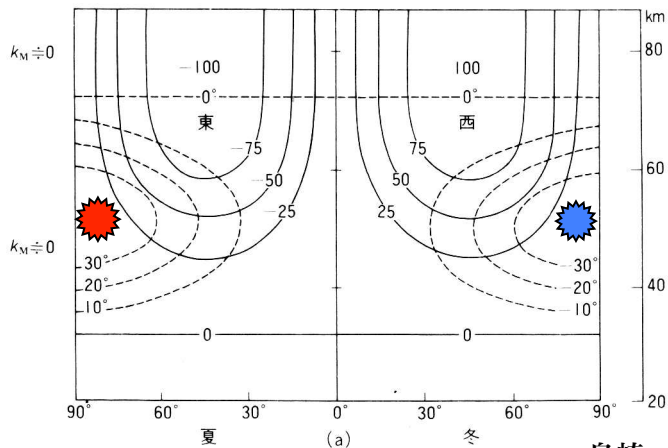


Fig. 1.3. Schematic latitude-height section of zonal mean temperatures ($^{\circ}\text{C}$) for solstice conditions. Dashed lines indicate tropopause, stratopause, and mesopause levels. (Courtesy of R. J. Reed.)

Leovy (1964): eddy fluxが摩擦として働くことによる
 子午面循環に伴う断熱加熱冷却



島崎・松野(1982)

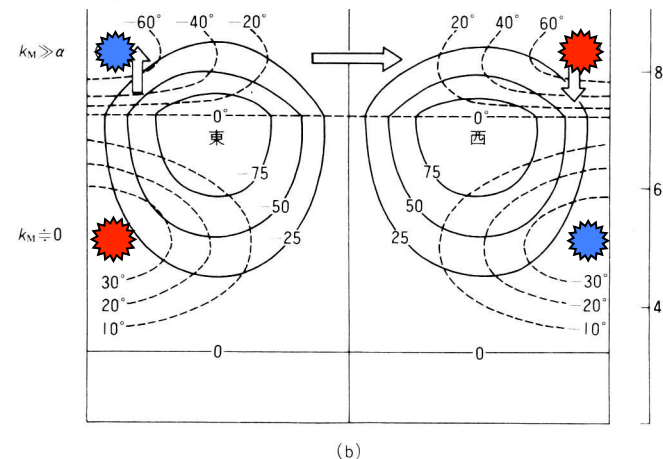
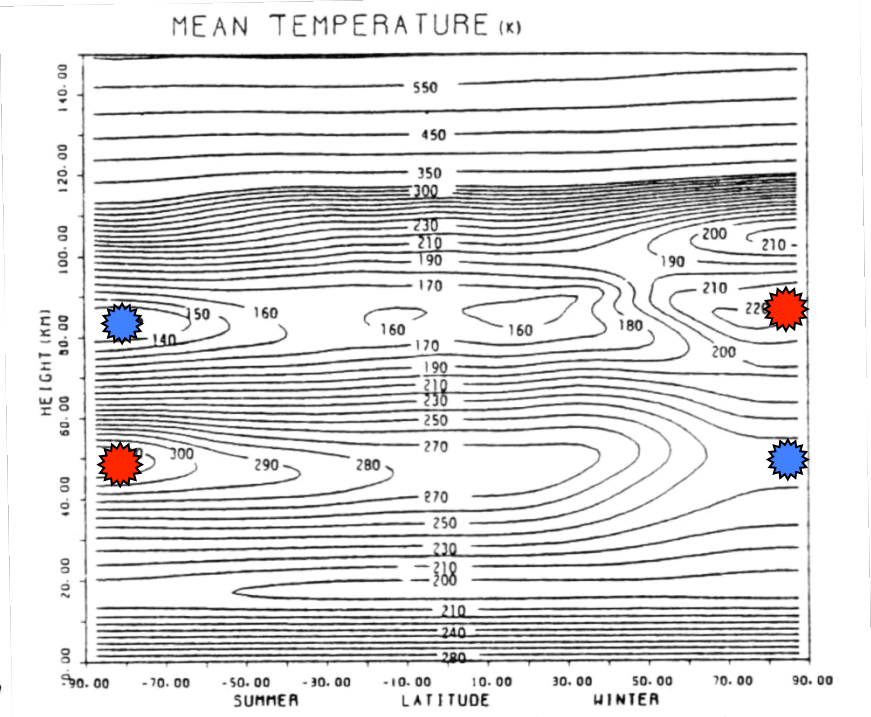
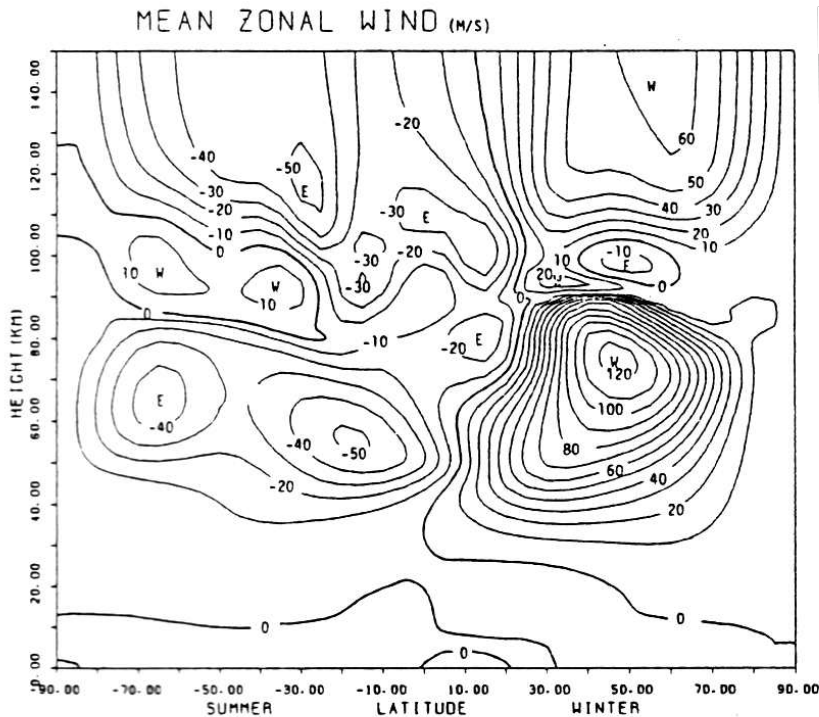


図 4.10 中層大循環の機構を説明するための模式図。実線は東西風速、破線は気温の偏差(同一高度内での)の等値線を示す。(a)は上部に摩擦層がない場合、(b)は摩擦層がある場合を示す。(b)では矢印で示すような子午面流・上下流がつけられ、逆センスの温度分布が生まれる(a)は Lindzen, 1968)。

摩擦を重力波に伴う運動量輸送で説明する論文
Lindzen (1981), Matsuno (1982)

- 重力波伝播に伴う中間圏界面の弱風層の生成と温度逆転シミュレーション
Miyahara (1984): 重力波パラメーターと大気潮汐を与えたメカニスティックモデル



重力波パラメーターを人為的に与える： 結果が出るべくして出るモデル。
より客観的な解析を行う必要がある。

中層大気大循環モデルによる重力波解析の必要性

大気大循環モデル (General Circulation Model, GCM)

流体力学方程式・熱力学方程式・太陽放射・赤外放射方程式・大気組成予測（水蒸気）・雪氷など
組み合わせてコンピューターシミュレーションを実行

境界条件

地形・海水面温度など

大気海洋結合モデル(CGCM)

大気大循環モデル(AGCM)と海洋大循環モデル(OGCM)を結合して解く

大気大循環化学モデル

化学反応方程式を導入

大気の微量成分等も変数として取り扱う

オゾン変動予測モデル

気候モデル

温暖化実験等

生物圏

数値予報

毎日の天気予報に初期値として観測値を使用し、未来を予測する

Miyahara et al. (1986): GFDL SKYHI GCM中の重力波の役割を解析

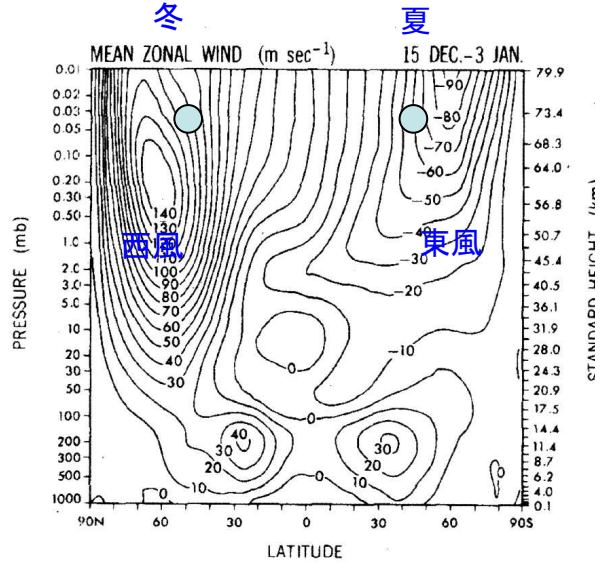


FIG. 1a. Latitude-height distribution of mean zonal wind ($m\ sec^{-1}$) averaged over the PI period. The standard height indicates the level of the finite-difference model.

Zonal mean zonal wind

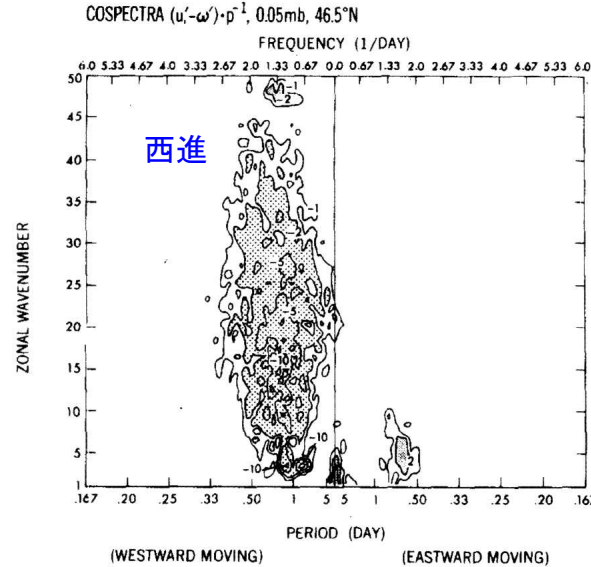


FIG. 3a. Zonal wavenumber-frequency spectral distribution (zonal wavenumber $1 \leq k \leq 50$, period ≥ 0.167 days) of the cospectral density ($10^{-6} m\ s^{-2} d$) of the vertical flux of zonal momentum ($-\overline{u'w'}$) at 0.05 mb (70.6 km) at $46.5^\circ N$.

$\overline{u'w'}$ at $46.5^\circ N$ and 70 km

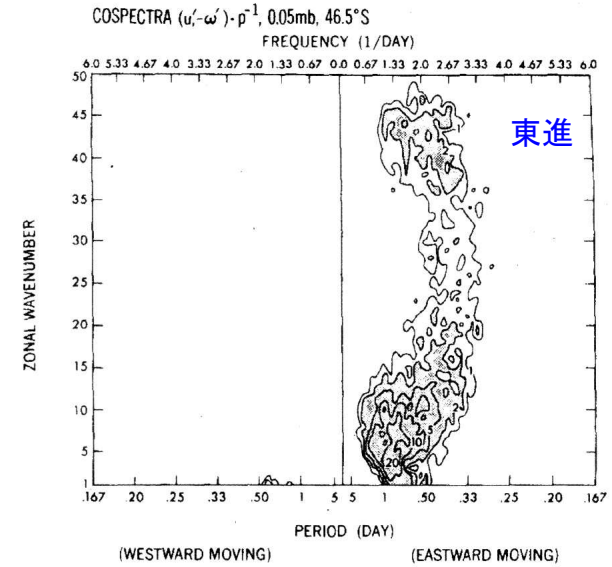


FIG. 3b. As in Fig. 3a except for the distribution at $46.5^\circ S$.

$\overline{u'w'}$ at $46.5^\circ S$ and 70 km

平均帯状風に逆らって進む重力波が卓越

東風加速

西風加速

E P Flux and div (EP flux)

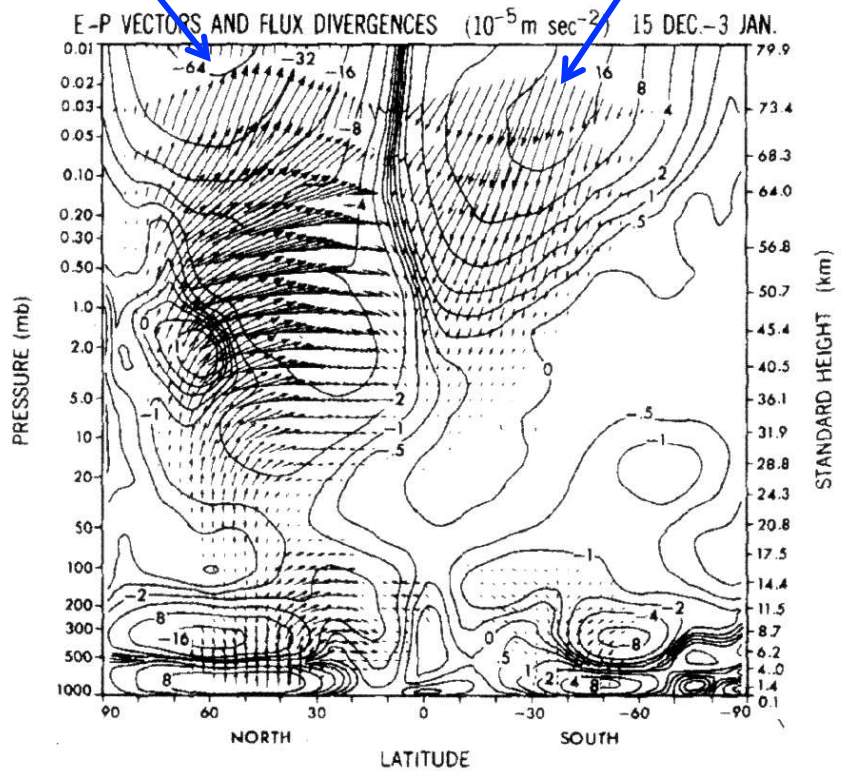


FIG. 7c. Latitude-height distributions of Eliassen-Palm flux vector divided by pressure and its divergence (EPFD) (10^{-5} m s^{-2}) consisting of all wavenumber components averaged over the PI period.

重力波の寄与 $\frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z}$

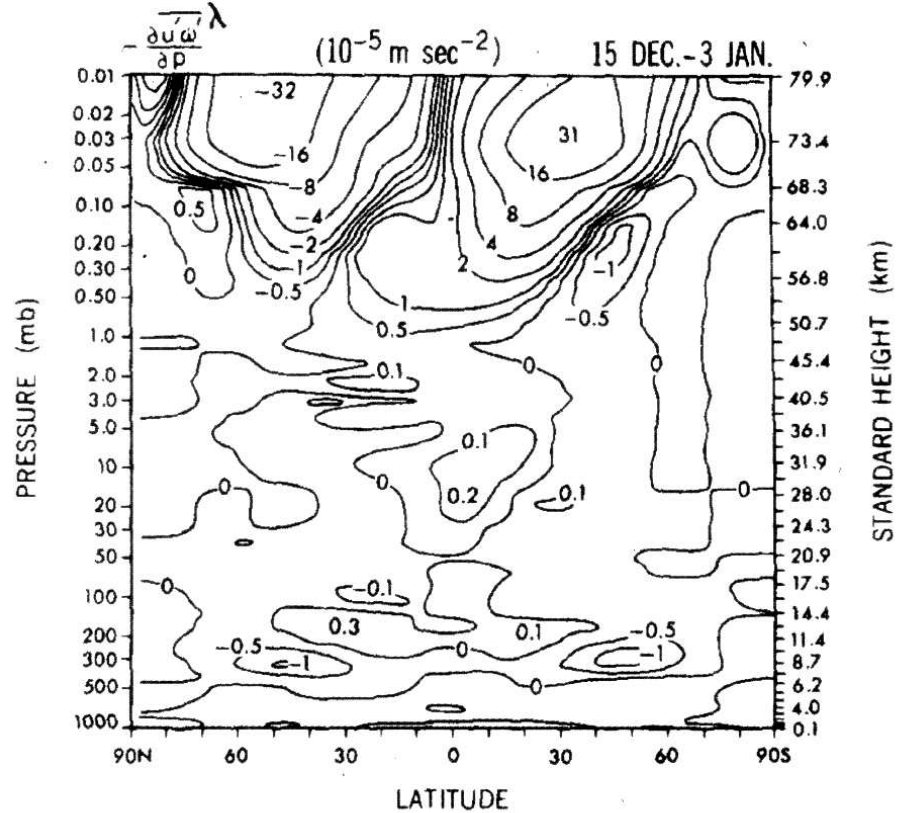


FIG. 7b. Latitude-height distribution of the convergence of vertical eddy momentum flux $-\frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial p} \lambda$ (10^{-5} m s^{-2}).

内部重力波が中間圏の大循環において重要な役割を果たしていることを示した
 定量的には問題があるが、理論的予測をGCMデータで検証した

5. その後の研究

- ・中層大気大循環モデルの開発: 当時はGFDL SKYHI以外には中間圏まで含んだ大循環モデルは存在しなかった
 地表面から下部熱圏までを対象とした大気大循環モデルを開発
 気象庁・東京大学の気候モデルをベースに、中層大気モデルに拡張：三好さんが主力となって開発
 太陽放射の日変化サイクルを含む：大気潮汐波の振る舞いもシミュレートする
 Non-migrating tideの解析

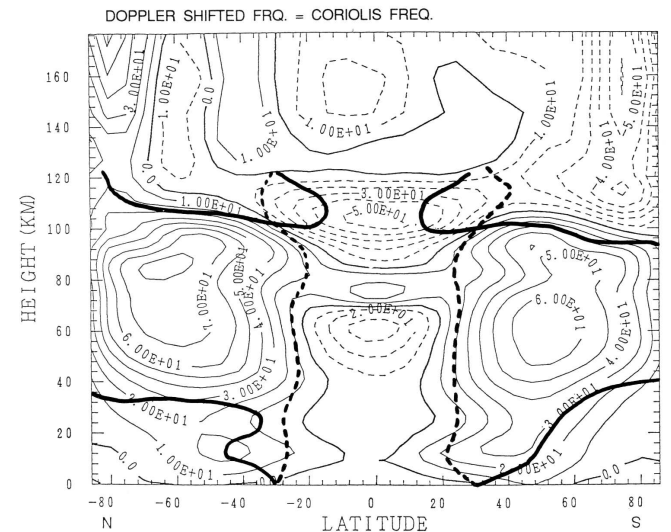
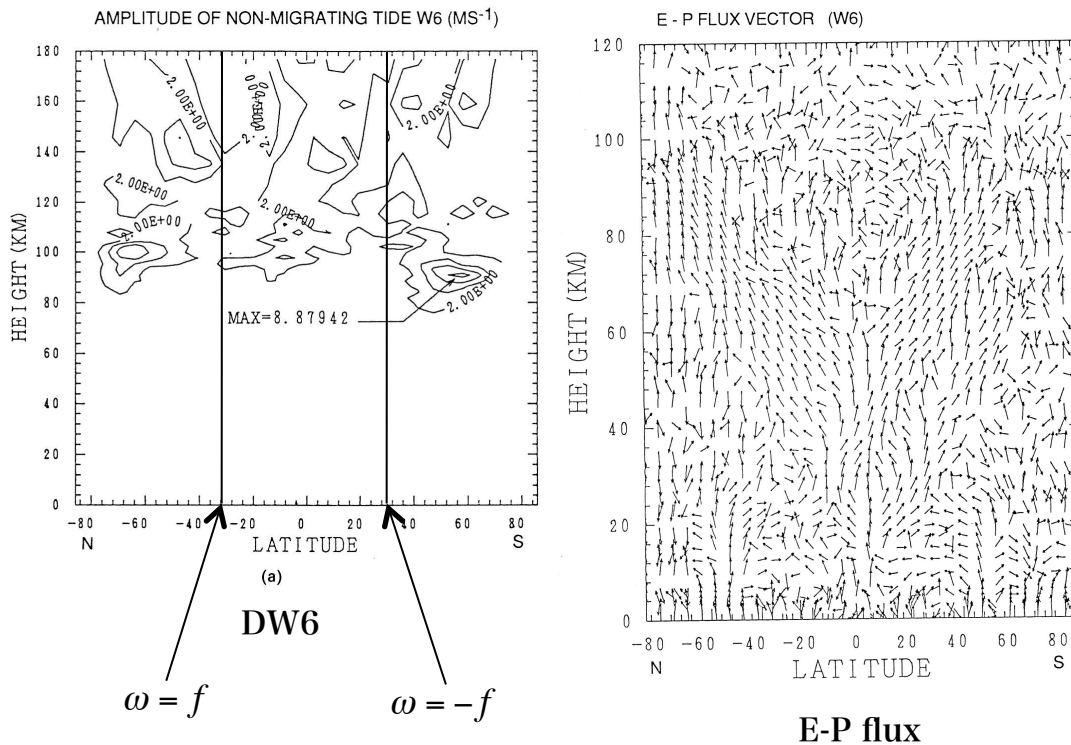


Fig. 12. Location where Doppler shifted frequency is equal to Coriolis Frequency for W6 (—) and E6 (---) waves. Lower latitude region than the location indicates internal region.

Doppler shifted Freq.=Coriolis Freq.

$$\hat{\omega}^2 \geq f^2$$

観測結果との比較 (1) :Diurnal non-migrating tides

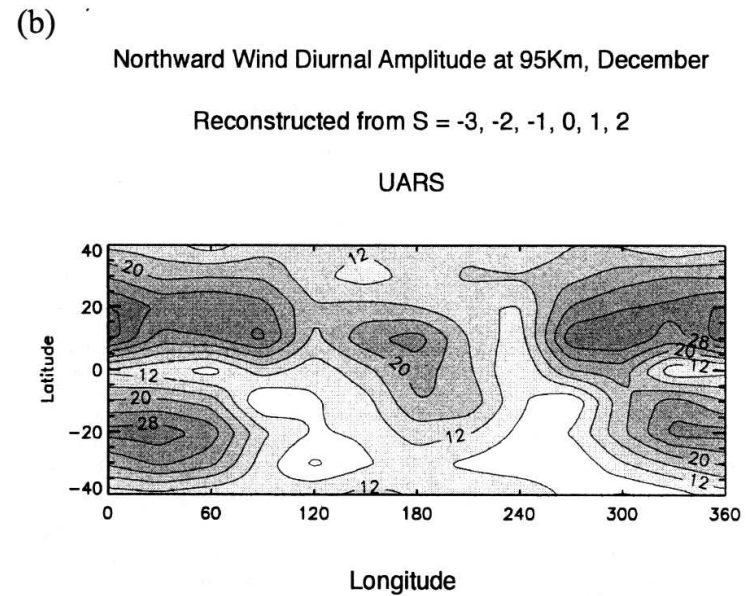
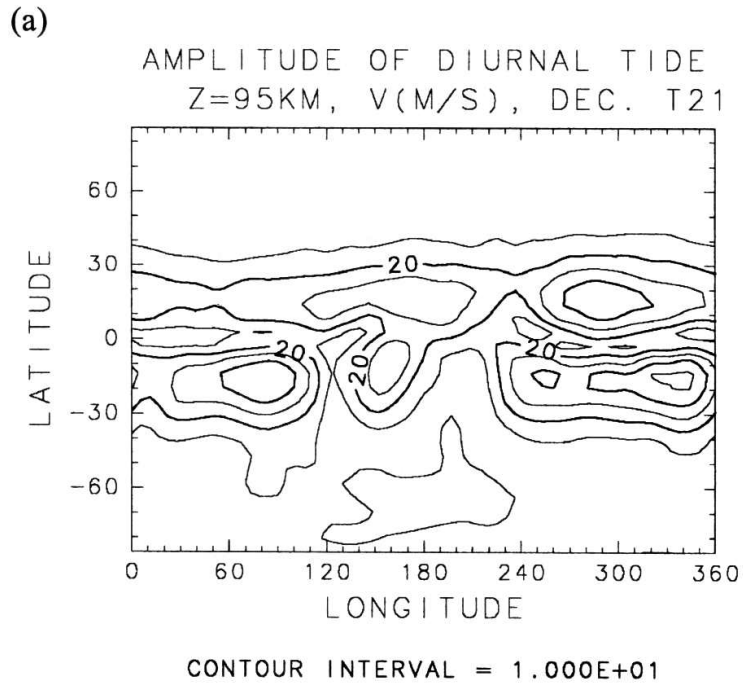
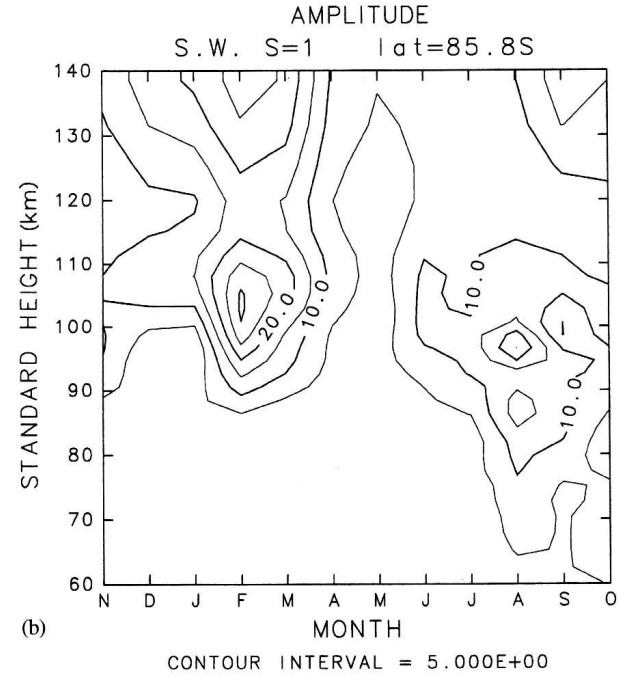
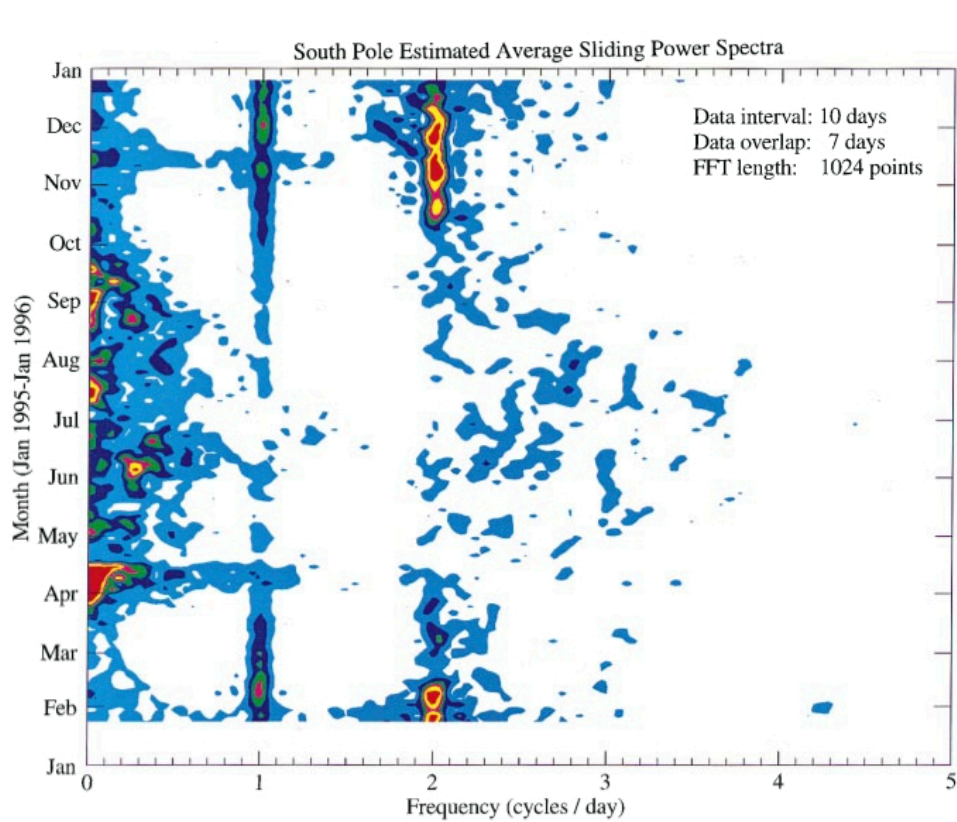


Fig. 6. Longitude-latitude distribution of diurnal amplitude of meridional wind at 95 km in December, (a) Kyushu-GCM, and (b) UARS observation (Forbes, personal communication). Contour interval is 10 m s^{-1} and 4 m s^{-1} , respectively.

Yoshikawa and Miyahara (2003)

観測との比較(2): SDW1

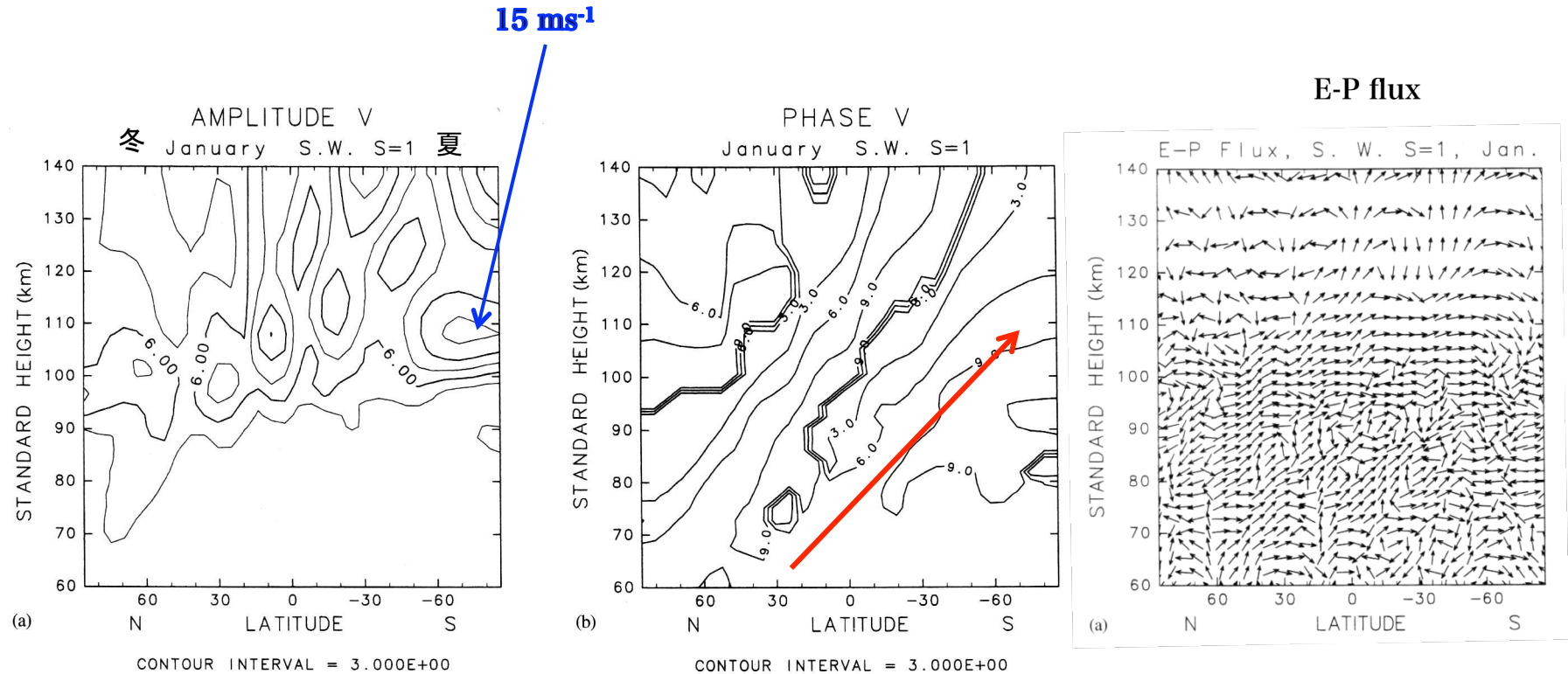


85.8°SにおけるSDW1の季節変化

Yamashita et al. (2002)

南極点での高度100 km 付近の風速観測

Portnyagin et al. (1998)



Yamashita et al. (2002)

SDW1とSDW3がS=1 定常プラネタリー波(SPI)とSDW2(migrating semidiurnal tide)の非線形効果によって励起されることを示した。

$$\sin(2x + \omega t) \cos x = \frac{1}{2} [\sin(3x + \omega t) + \sin(x + \omega t)]$$

SDW2

SPI

SDW3

SDW1

重力波の3次元分布 SKYHI (Miyahara et al., 1986)

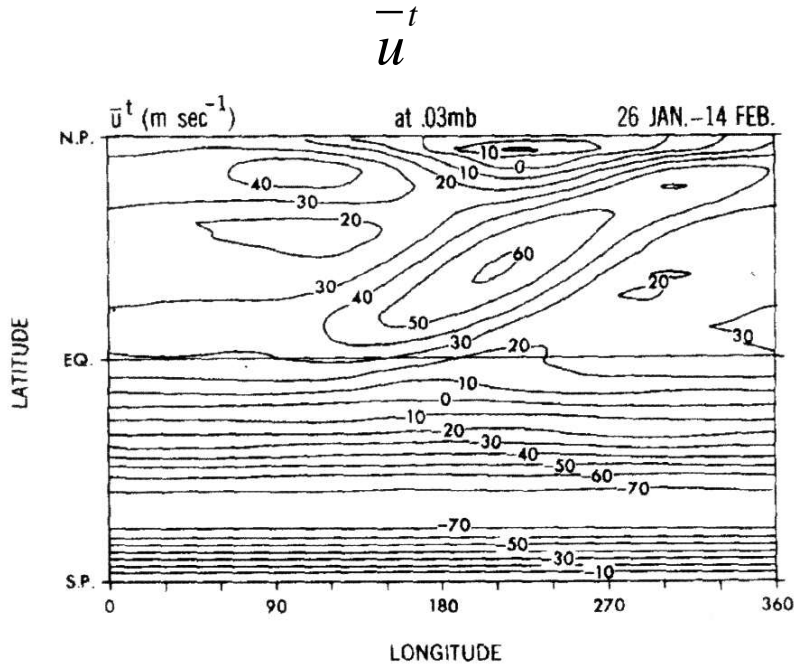


FIG. 15a. Longitude-latitude distribution of the time-mean zonal wind (m s^{-1}) at 0.03 mb, consisting of zonal wavenumbers 0-3 averaged over the PII period.

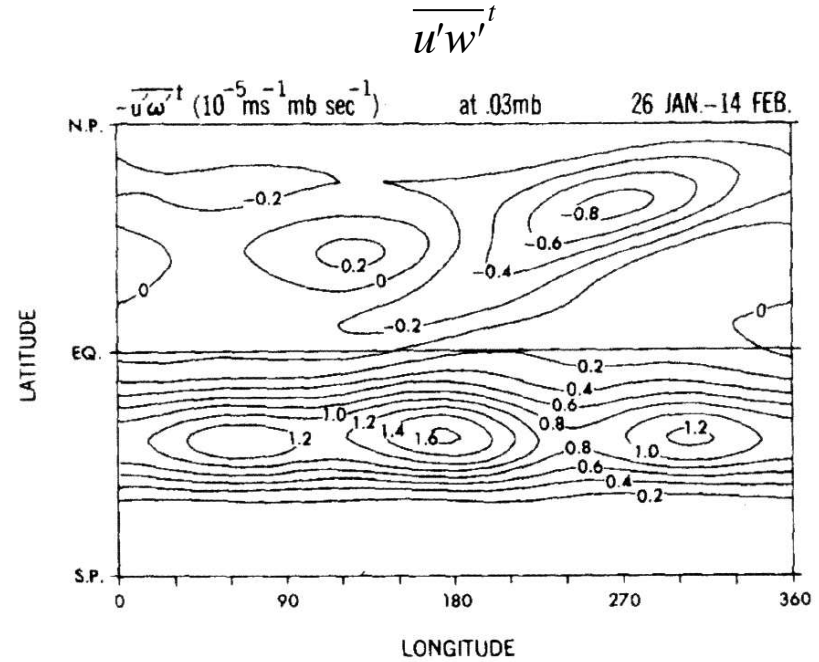


FIG. 15b. Longitude-latitude distribution of spatially smoothed time-mean vertical flux of zonal momentum ($10^{-5} \text{ m s}^{-1} \text{ mb s}^{-1}$) due to higher wavenumber components ($5 \leq k \leq 50$, $5 \leq l \leq 50$) at 0.03 mb. The spatial smoothing is accomplished by a wavenumber filter ($k = 0-3$).

GCM中では重力波は主に対流調節によって励起される

・対流からの内部重力波の発生伝播シミュレーション： Goya et al. (2003)

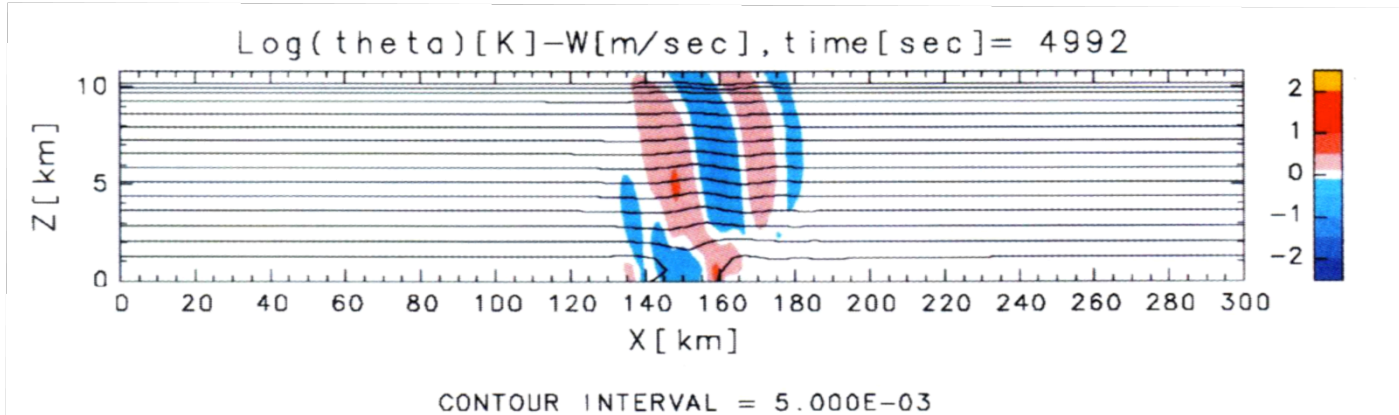
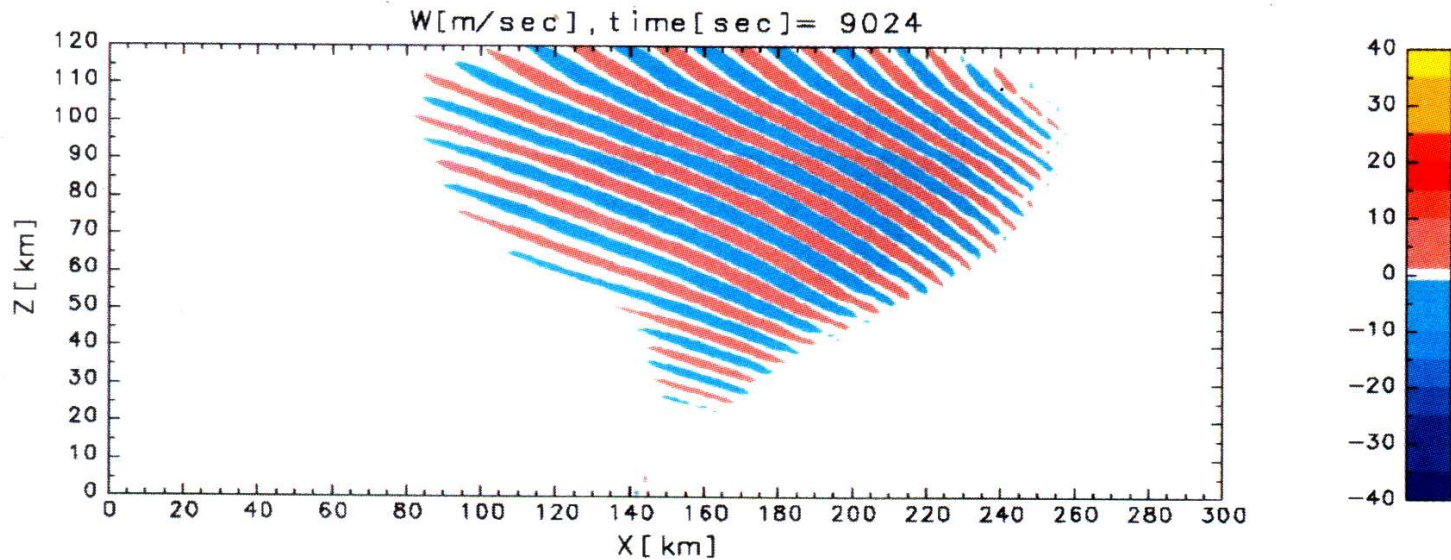
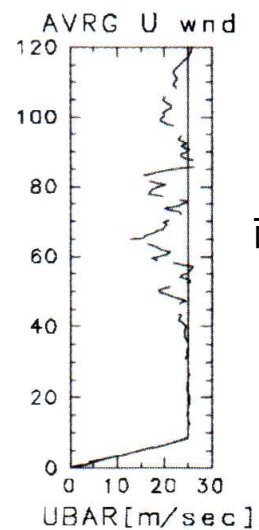
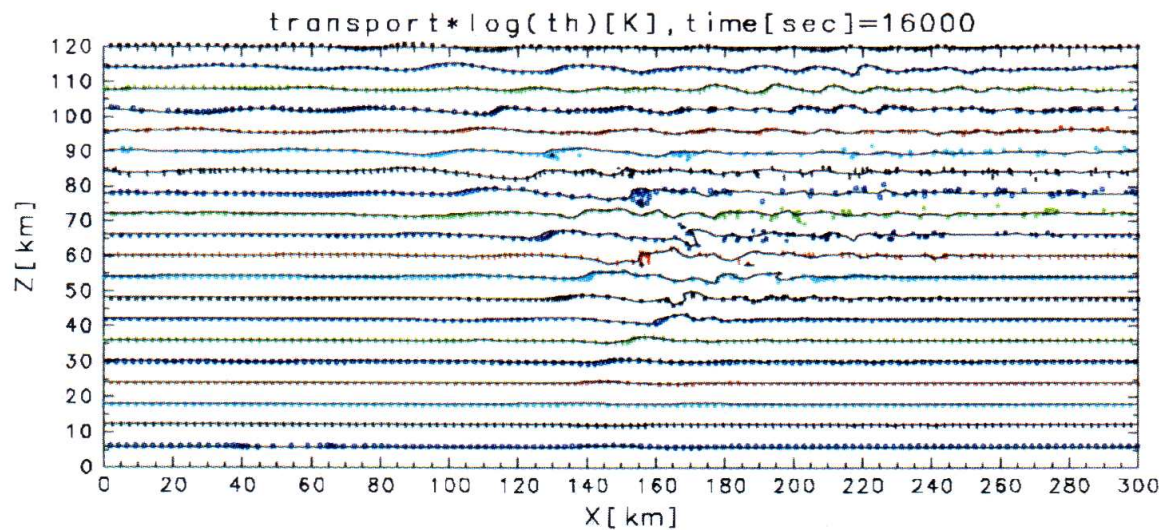
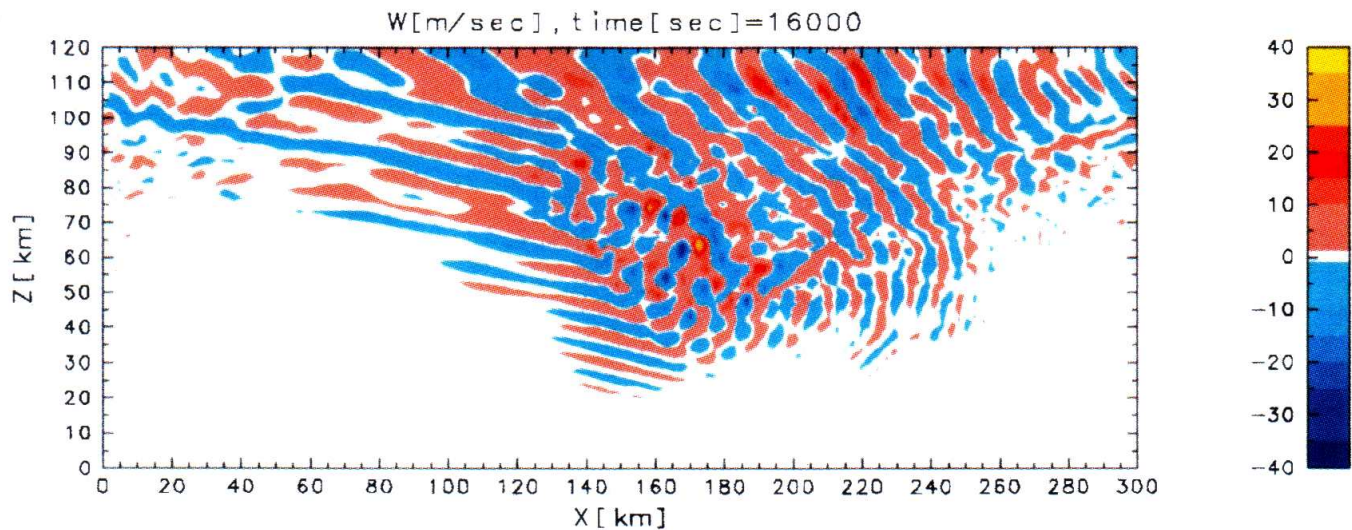


Fig. 1. Color tone plots of vertical wind w [m/s] and contour plots of logarithm of potential temperature $\text{Log}(\theta)$ below 10 km height at the time step of 4,992 s. Red tone means upward wind. Blue tone means downward wind. Contour interval of $\text{Log}(\theta)$ is $5.0\text{E}-03$.





下部熱圏中性大気運動と電離圏電流変動の研究

大気潮汐運動と電離圏E領域電流

Sq電流系と赤道エレクトロジェット

地表面での北向き磁場変動

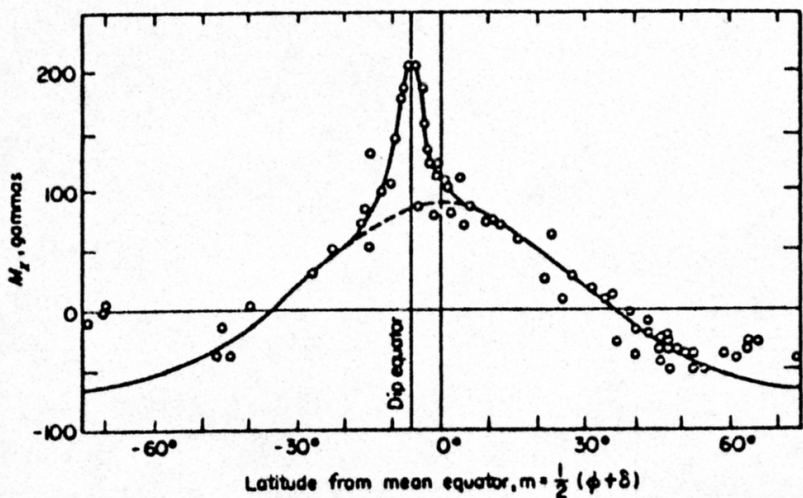
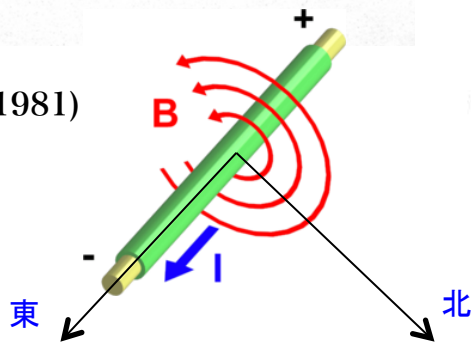


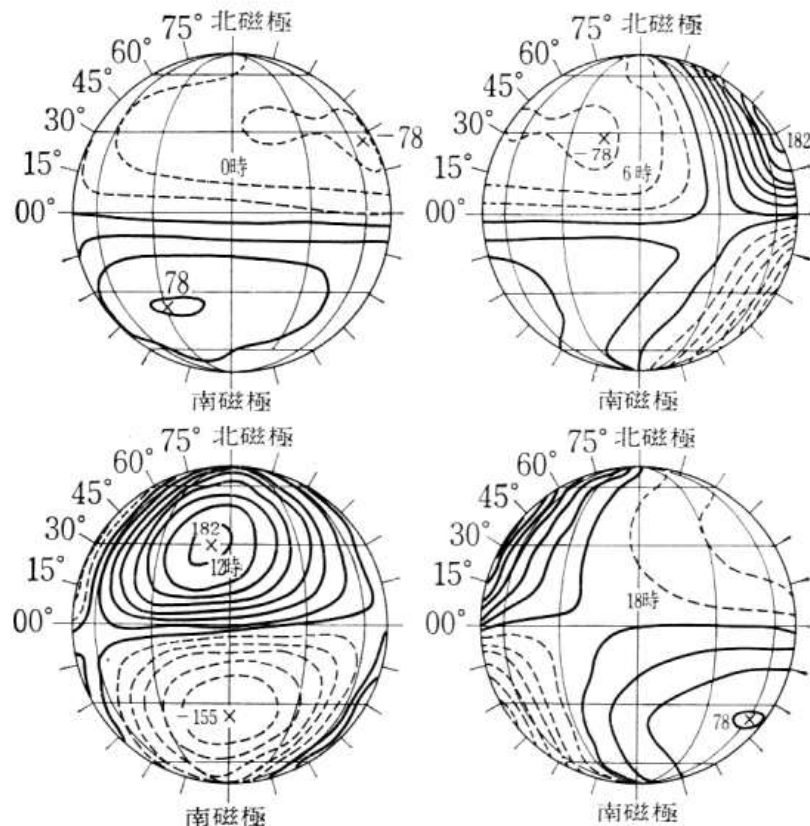
Fig. 3. Variation of the daily range of the ground northward magnetic component with latitude from the mean equator [Onwumechilli, 1964] on international quiet days during September and October 1958. (Figure is from Onwumechilli [1967]. Reprinted by permission of Academic Press.)

Forbes (1981)



Wikipedia 改訂

Sq 2次元等価電流系



6-12 図 地球外から見た地磁気 Sq 変化の等価電流系。実線は反時計まわり、点線は時計まわりの電流を表わす。×印のところの数字は対応する渦電流の強さを1000アンペアを単位として表わす (Matsushita, J.G.R. 70 (1965) 4395)

永田・等松(1973)

EEJの緯度高度分布 ロケット観測

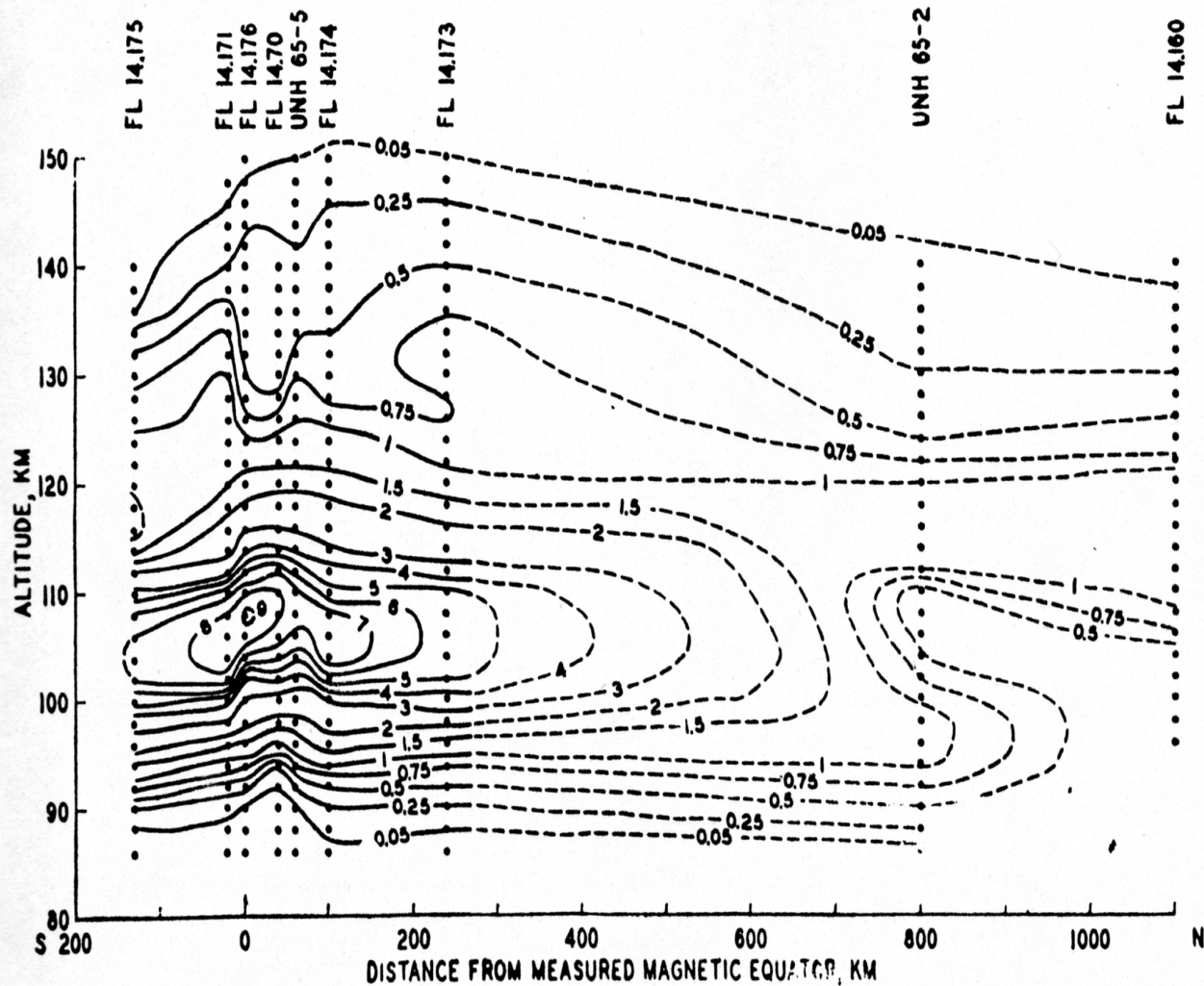


Fig. 10. Cross-sectional profile of the equatorial electrojet obtained from nine rocket flights off the coast of Peru in 1965, normalized to yield $\Delta H = 100 \gamma$ at Huancayo. Circles indicate locations of data points used to obtain the contours of current density in microamps per square meter. The right-hand portions of the contours are dashed to indicate uncertainty associated with the relative lack of data for this portion of the diagram. (Figure is from *Davis et al.* [1967].)

Equatorial Electrojet (EEJ) observed by CHAMP

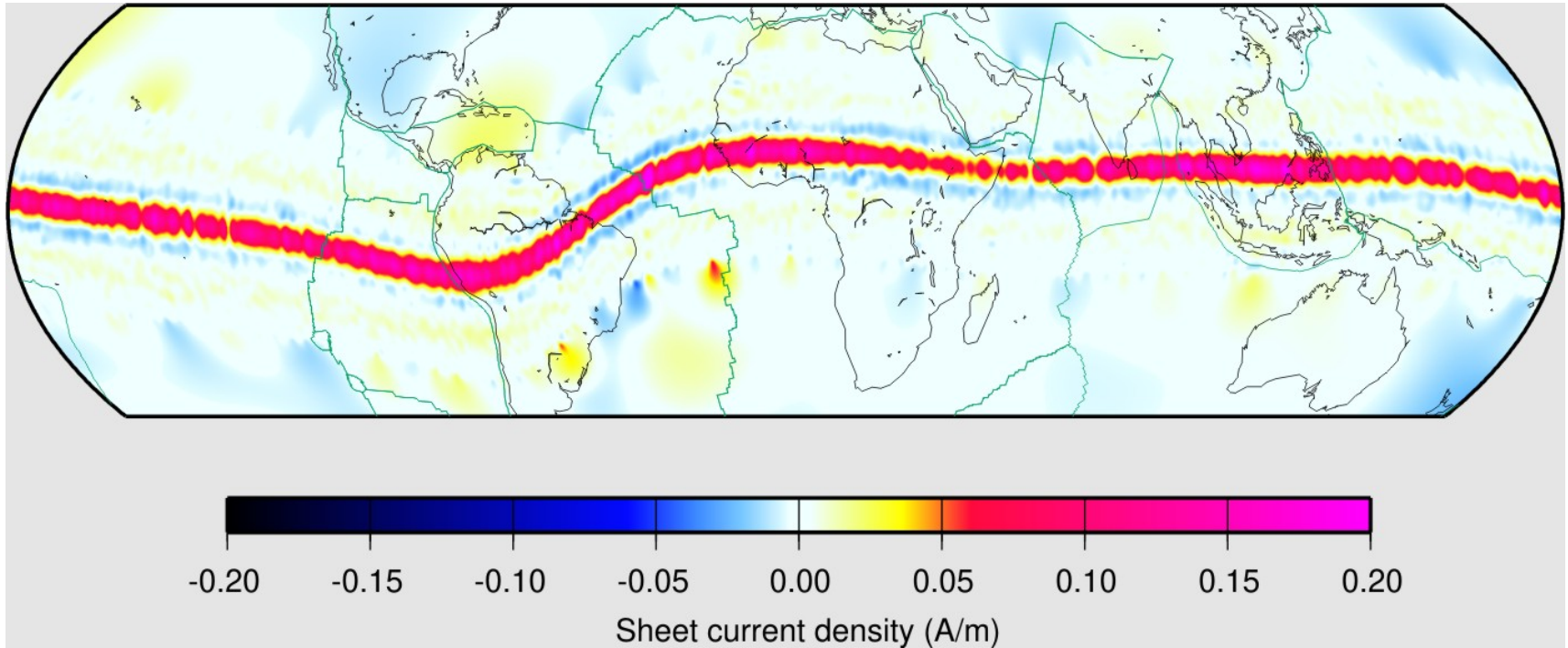


Fig 1: Electrojet current densities inferred from 2600 passes of the CHAMP satellite over the magnetic equator between 11:00 and 13:00 local time.

11:00 LT -13:00 LTの合成

2次元ダイナモモデルによるSq 電流系 Miyahara and Ooishi (1997)

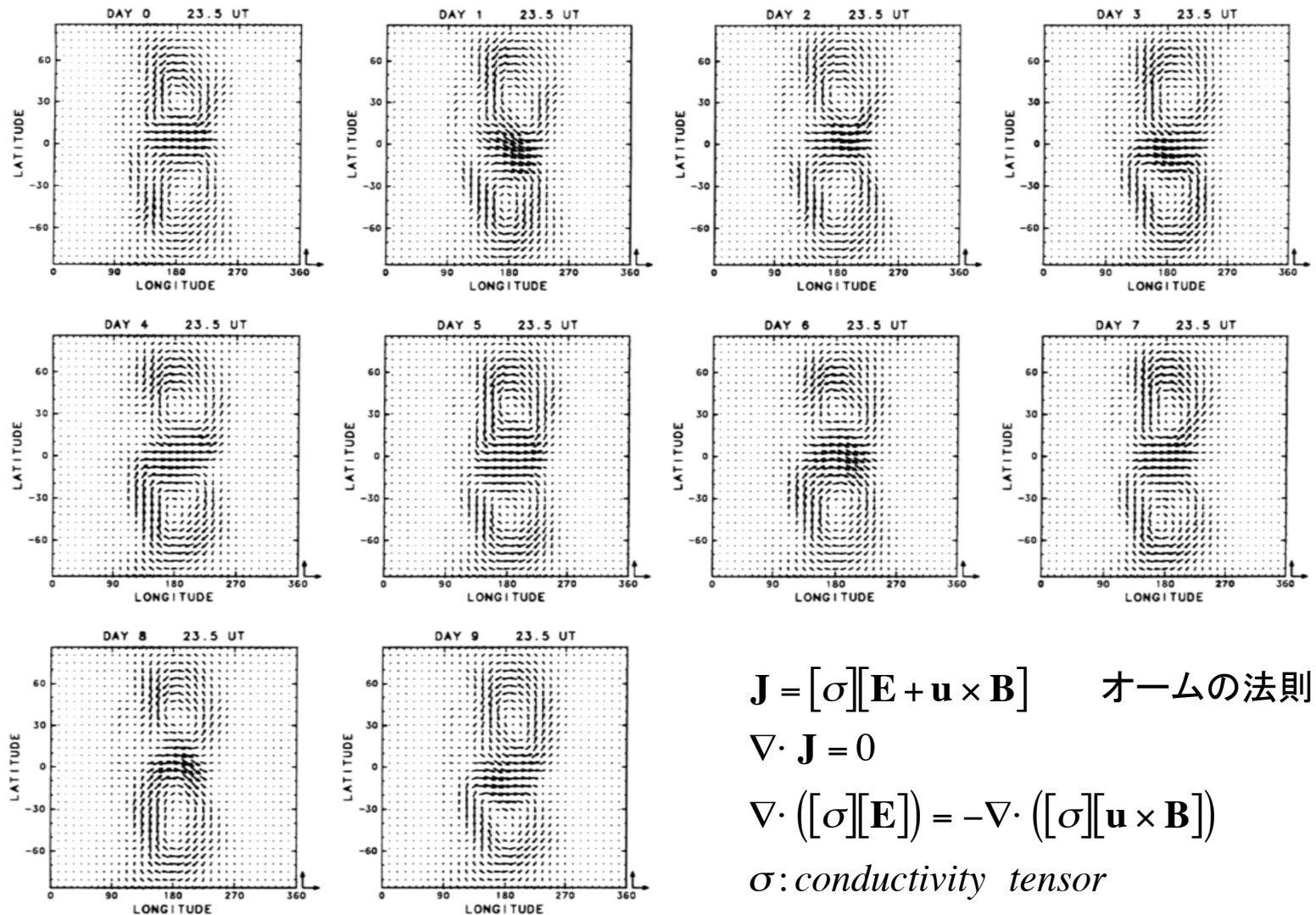


Fig. 4. Longitude-latitude distributions of height integrated Sq current systems induced by the simulated winds and the prescribed (1, -2) mode at 23.5 UT of day 0 through day 9. Unit vectors show $1 \times 10^{-1} \text{ Am}^{-1}$.

・赤道エレクトロジェット(EEJ)と中性大気風変動
 2次元モデルでは赤道エレクトロジェットは再現できない
 準3次元モデル
 Kawano-Sasaki and Miyahara (2008)

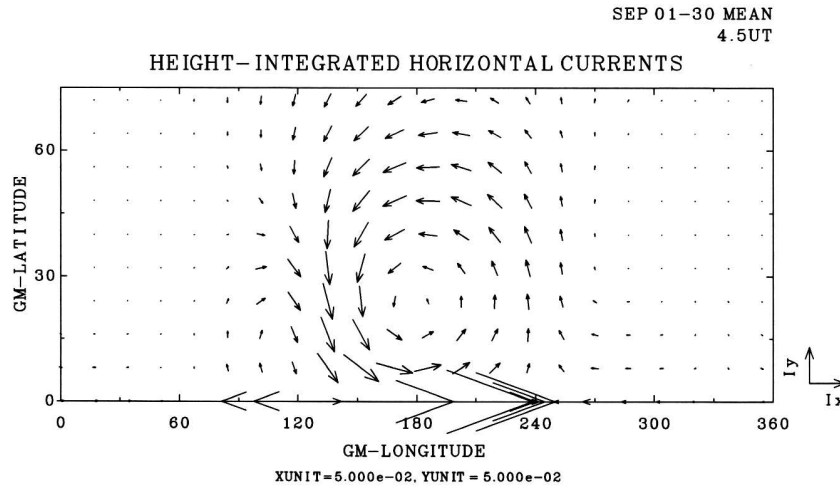


Fig. 4. Longitude-latitude distribution of the monthly averaged height-integrated horizontal current densities. The unit vectors show 0.05 A

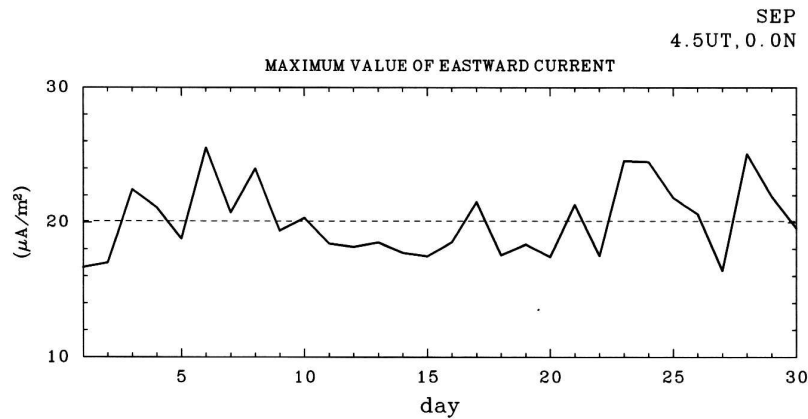
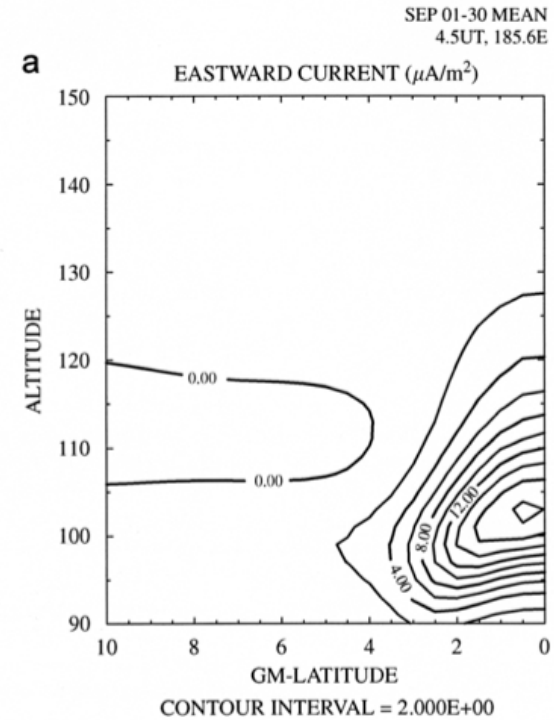


Fig. 16. Day-to-day variation of the maximum value of the equatorial electrojet at 4.5 UT in the 30-day simulation. Dashed line shows the monthly average.

風の変動でSqやEEJが大きく変動する
 SqやEEJの3次元構造を明らかにした

重力波の3次元分布 SKYHI (Miyahara et al., 1986)

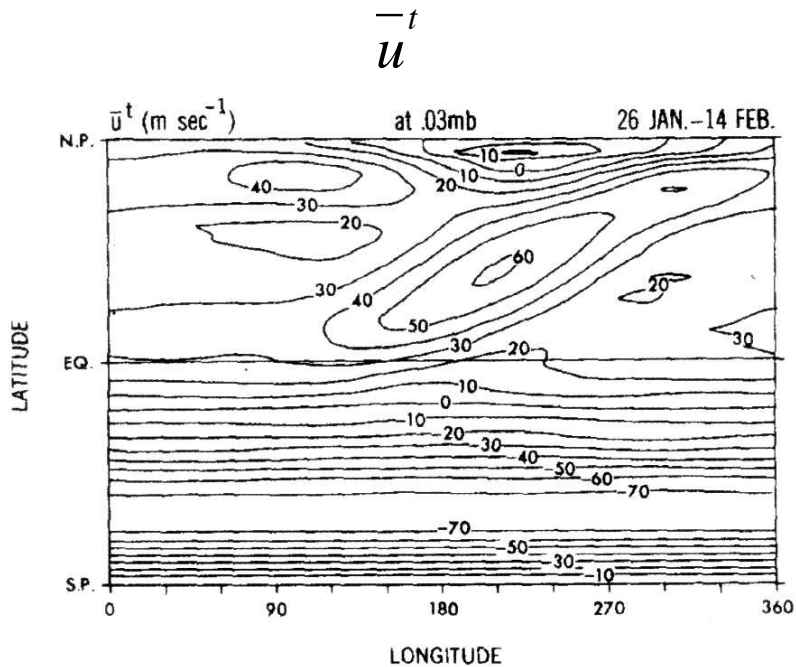


FIG. 15a. Longitude-latitude distribution of the time-mean zonal wind (m sec^{-1}) at 0.03 mb, consisting of zonal wavenumbers 0-3 averaged over the PII period.

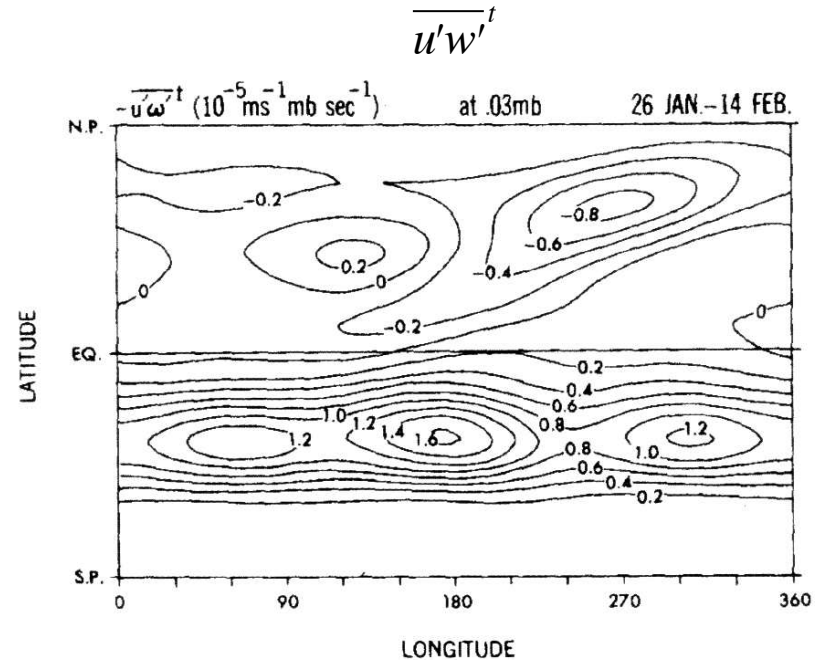


FIG. 15b. Longitude-latitude distribution of spatially smoothed time-mean vertical flux of zonal momentum ($10^{-5} \text{ m s}^{-1} \text{ mb s}^{-1}$) due to higher wavenumber components ($5 \leq k \leq 50$, $5 \leq l \leq 50$) at 0.03 mb. The spatial smoothing is accomplished by a wavenumber filter ($k = 0-3$).

$\overline{u'w'^t}$ を解析することの理論的背景は何か？

レイノルズストレスの R_{xz} 以上の意味を持たせられないか？

レイノルズストレス

流体の運動を平均場と擾乱に分離し，平均場についての方程式を導く

平均場の方程式に擾乱の2次の項が現れる． レイノルズストレス

$$\frac{D\bar{u}}{Dt} - f\bar{v} = -\frac{\partial\bar{\Phi}}{\partial x} - \frac{\partial\overline{u'u'}}{\partial x} - \frac{\partial\overline{u'v'}}{\partial y} - \frac{\partial\overline{u'w'}}{\partial z}$$

$$\frac{D\bar{v}}{Dt} + f\bar{u} = -\frac{\partial\bar{\Phi}}{\partial y} - \frac{\partial\overline{u'v'}}{\partial x} - \frac{\partial\overline{v'v'}}{\partial y} - \frac{\partial\overline{v'w'}}{\partial z}$$

$$\frac{\partial\bar{\Phi}}{\partial z} = -\bar{r}$$

$$\frac{D\bar{r}}{Dt} - N^2\bar{w} = -\frac{\partial\overline{r'u'}}{\partial x} - \frac{\partial\overline{r'v'}}{\partial y} - \frac{\partial\overline{r'w'}}{\partial z}$$

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \bar{u}\frac{\partial}{\partial x} + \bar{v}\frac{\partial}{\partial y} + \bar{w}\frac{\partial}{\partial z}$$

← レイノルズストレスの発散項

$$\nabla \cdot R$$

この方程式系を変形して擾乱の2次の項の物理的意味を明確化する

慣性重力波にも適用できる 3次元fluxと3-D TEM方程式系の提案 Miyahara (2006)

$$\begin{aligned}
 \frac{D\bar{u}}{Dt} - f\bar{v}^* &= -\frac{\partial\bar{\Phi}}{\partial x} - \nabla \cdot F_x \\
 \frac{D\bar{v}}{Dt} + f\bar{u}^* &= -\frac{\partial\bar{\Phi}}{\partial y} - \nabla \cdot F_y \\
 \frac{D\bar{r}}{Dt} - N^2\bar{w}^* &= -\frac{\partial\overline{r'w'}}{\partial z}
 \end{aligned}$$

$$F \equiv \begin{bmatrix} \frac{1}{2}\left(\overline{u'^2} - \overline{v'^2} - \overline{w'^2} + \frac{\overline{r'^2}}{N^2}\right) & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} + \frac{f}{N^2}\overline{v'r'} \\ \overline{u'v'} & \frac{1}{2}\left(\overline{v'^2} - \overline{u'^2} - \overline{w'^2} + \frac{\overline{r'^2}}{N^2}\right) & \overline{v'w'} - \frac{f}{N^2}\overline{u'r'} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
 \bar{u}^* &= \bar{u} + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\overline{u'r'}}{N^2}\right) + \frac{1}{f}\frac{\partial\bar{S}}{\partial y} \\
 \bar{v}^* &= \bar{v} + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\overline{v'r'}}{N^2}\right) - \frac{1}{f}\frac{\partial\bar{S}}{\partial x} \\
 \bar{w}^* &= \bar{w} - \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\overline{u'r'}}{N^2}\right) - \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\overline{v'r'}}{N^2}\right) \\
 \bar{S} &= \frac{1}{2}\left(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2} - \frac{\overline{r'^2}}{N^2}\right)
 \end{aligned}$$

$$= \begin{bmatrix} \hat{c}_{gx} \frac{E}{\hat{c}_x} & \hat{c}_{gy} \frac{E}{\hat{c}_x} & \hat{c}_{gz} \frac{E}{\hat{c}_x} \\ \hat{c}_{gx} \frac{E}{\hat{c}_y} & \hat{c}_{gy} \frac{E}{\hat{c}_y} & \hat{c}_{gz} \frac{E}{\hat{c}_y} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (c_{gx} - \bar{u})k & (c_{gy} - \bar{v})k & c_{gz}k \\ (c_{gx} - \bar{u})l & (c_{gy} - \bar{v})l & c_{gz}l \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \frac{E}{\hat{\omega}}$$

残差循環：ストークスドリフト補正
3次元物質輸送を近似的に表現

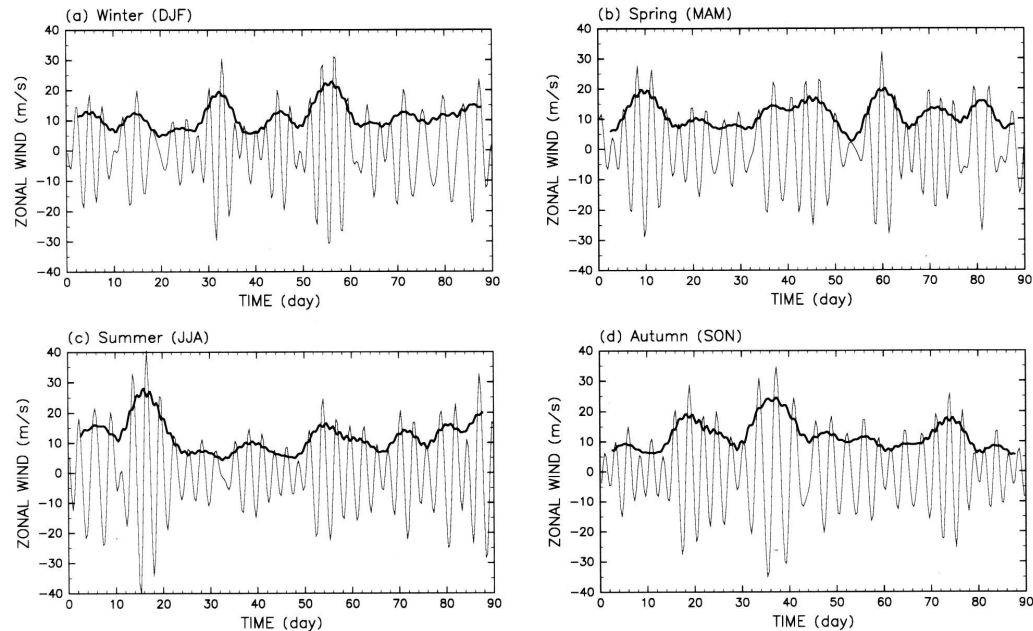
Zonal および meridional 擬運動量の
平均流に相対的な輸送 flux を与える

5. 今後の研究

中性大気と電離大気のカップリング: 中性大気風変動と電離圏電流変動

GCM中の2.5 - 4日周期のKelvin波の振幅変動

Time Series of Zonal Wind, 10N/S at 100KM

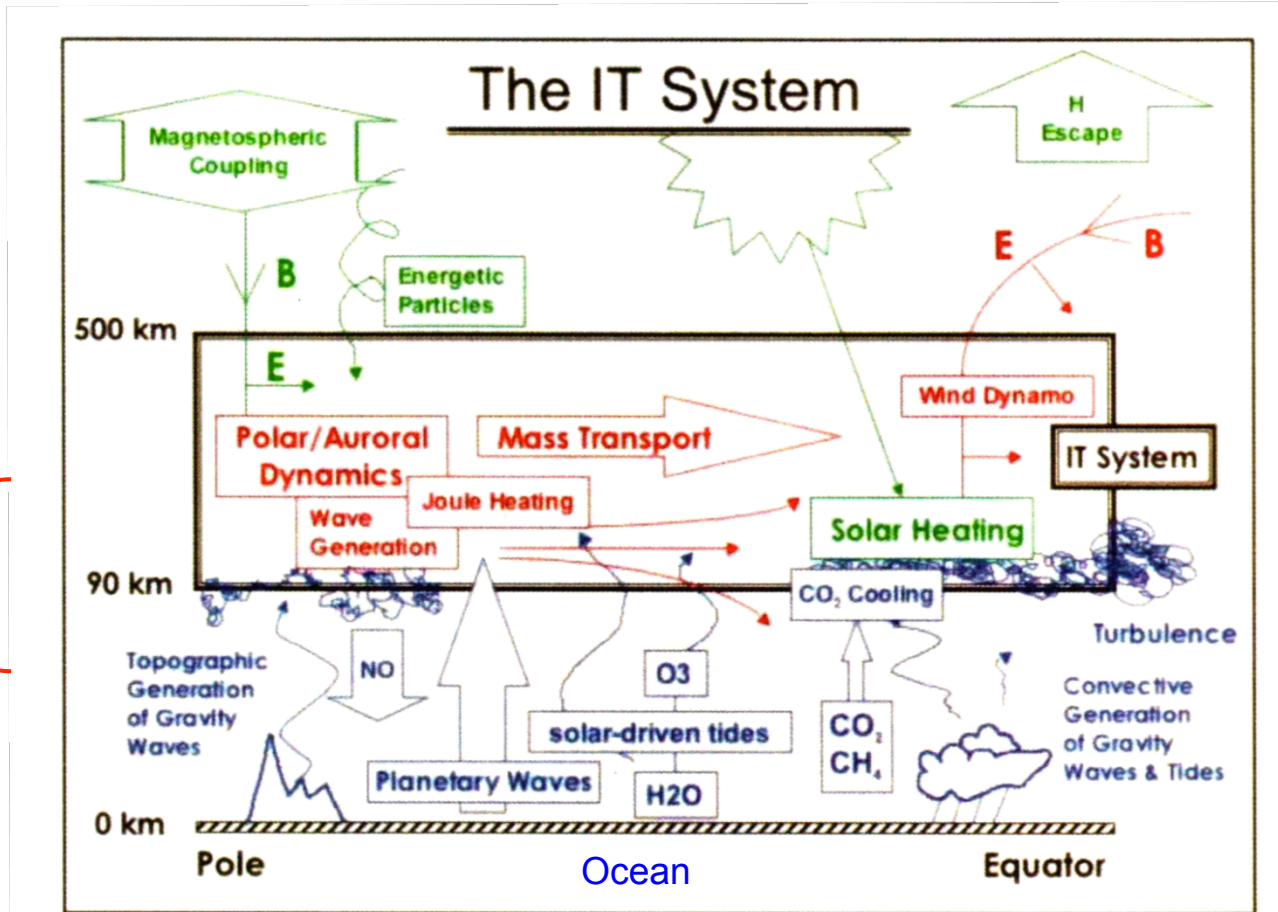


Chen and Miyahara (2012)

Kelvin波に対応した電離圏変動

突然昇温とEEJの関係の解明

The Ionosphere Thermosphere System (Forbes, 2007)



中性大気・電離圏結合

大気海洋結合

Fig. 1. Energy input, conversion and transport processes relevant to the Ionosphere-Thermosphere (IT) system. Green indicates energy sources from above the thermosphere, blue indicates influences of lower atmospheric regions on the thermosphere, and red indicates energy conversion and transport processes within the thermosphere.



大阪大学理学部

粕糟嘗勿 勿嘗糟粕

楽水 長岡半太郎 書

糟粕を嘗める

先人の残したものをまねるだけで、創意や進歩が見られない。

(広辞苑)

謝辞

この道を今日まで進むことに大きな力を与えていただいた、
先生・先達・同僚・共同研究者・友人・大学院生・学生・大学事務職員
など多くの方々に感謝致します。

私が入学した当時の大学は、学問のみならずあらゆる事柄に対して熱心に
立ち向かう精神に満ちていたように思います。そのような環境の中で学問
の道に進むことができたことは大変幸せでした。

1966年(昭和41年)理学部入学以来46年間、学生・院生・教員として伴に歩んで
きた九州大学理学部の更なる発展を願っています。