

地球赤道域の大気波動に関する研究

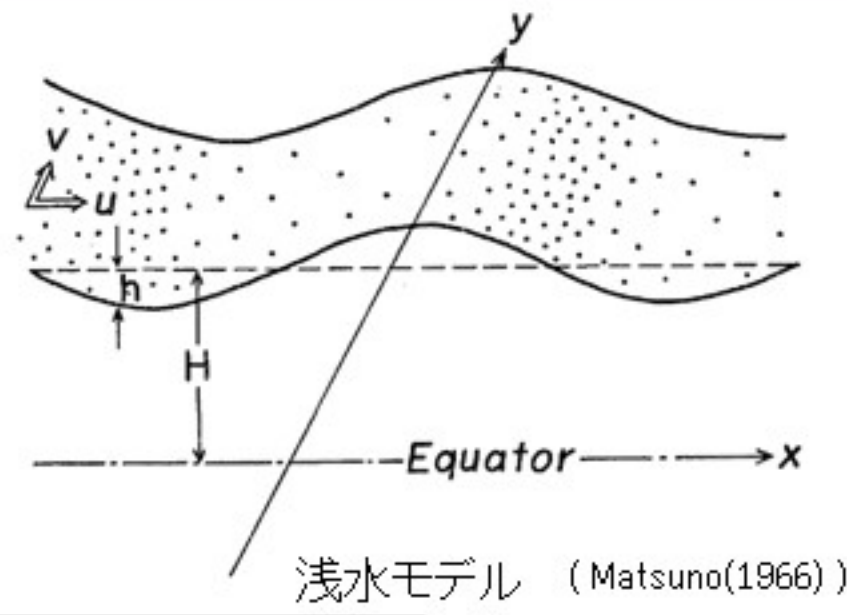
地球および惑星大気科学研究室 須賀 友也

1. はじめに

赤道域の雲発生は中高緯度と比べて特徴的である。その周期性は風など他の物理量の周期的変動と関係があり、そのような変動にはENSOやモンスーン、MJO、海陸風など様々な周期の長さの変動が存在している。さらにそれらの周期的変動にはコリオリ力が小さい赤道大気固有の波動(赤道波)が影響していることが分かっている。本研究では赤道大気に関する研究の第一歩として、Matsuno(1966)を基に赤道波に関する基礎力学について考えた。

2. 基本モデル

- 局所直交座標系
 - 回転系のある地点において直交座標系を考える
 - X軸: 経度, Y軸: 緯度, Z軸: 地上からの高度
- 浅水方程式系
 - 密度一定の非圧縮流体
 - 静水圧平衡が成立
 - 水平方向の流体運動を考える
 - 単層
- 赤道ベータ平面近似
- 赤道付近において東西方向に伝播する波を考える
 - u, v, ϕ が y の変数と $e^{i(\omega t + kx)}$ による関数とする
 - 赤道から離れると振幅が0になるような境界条件を取る



$$\frac{\partial u}{\partial t} + f \mathbf{k} \times \mathbf{u} + g \nabla h = 0$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + c^2 \nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

$$f(\theta) = 2\Omega \sin \theta \quad (\phi = gh, c = \sqrt{gH})$$

$$\approx f + \beta y$$

$$f \approx \beta y \quad (\theta \rightarrow 0 \text{ のとき})$$

$$\begin{cases} u = u(y)e^{i\omega t + ikx} \\ v = v(y)e^{i\omega t + ikx} \\ \phi = \phi(y)e^{i\omega t + ikx} \end{cases}$$

$$v \rightarrow 0; \text{ when } y \rightarrow \pm\infty$$

$$\begin{cases} [U] = \left(\frac{1}{c\beta}\right)^{1/2} \\ [L] = \left(\frac{c}{\beta}\right)^{1/2} \end{cases} \begin{cases} i\omega u - yv + ik\phi = 0 \\ i\omega v + yu + \frac{d\phi}{dy} = 0 \\ i\omega\phi + ik u + \frac{dv}{dy} = 0 \end{cases}$$

$$\frac{d^2 v}{dy^2} + \left(\omega^2 - k^2 + \frac{k}{\omega} - y^2\right)v = 0$$

$$v(y) = Ce^{-\frac{1}{2}y^2} H_n(y)$$

($H_n(y)$: エルミート多項式)

$$\omega^2 - k^2 + k/\omega = 2n + 1 \quad (n = 0, 1, 2, \dots)$$

$u = (u, v)$: 流体の速度, f : コリオリパラメータ
 k : 鉛直方向の単位ベクトル, g : 重力加速度,
 h : 波面の基準高さからの偏差, H : 波面の基準高,
 θ : 緯度, Ω : 自転速度, $\beta = 2\Omega/R$,
 R : 地球半径, ω : 振動数, k : 波の波数

3. 分散関係

振動数と波数の関係を求めることで、振動数ごとの波の速度場 (u, v) と圧力場 (ϕ) が決まる

$$n \geq 1$$

$$\omega \approx -\sqrt{k^2 + 2n + 1} : \text{東進慣性重力波}$$

$$\omega \approx \sqrt{k^2 + 2n + 1} : \text{西進慣性重力波}$$

$$\omega \approx \frac{k}{k^2 + 2n + 1} : \text{ロスビー波}$$

- $n \geq 1$ の場合
 - 大規模な運動 k が大きいとして、 ω の近似解を得る
- $n=0$ の場合
 - u と ϕ が発散するような解 $\omega = k$ は解として除外する
- $v=0$ の場合(特殊解)
 - 仮に元の式において $n=-1$ とした場合に含まれる解と等しいので、 $n=-1$ の解と考えてもよい

$$n=0$$

$$\omega = -\frac{k}{2} - \sqrt{\left(\frac{k}{2}\right)^2 + 1} : \text{東進慣性重力波}$$

$$\omega = \begin{cases} -\frac{k}{2} + \sqrt{\left(\frac{k}{2}\right)^2 + 1} & (k \leq 1/\sqrt{2}) \\ -k & (k \geq 1/\sqrt{2}) : \text{不適} \end{cases} : \text{西進慣性重力波}$$

$$\omega = \begin{cases} -k & (k \leq 1/\sqrt{2}) : \text{不適} \\ -\frac{k}{2} + \sqrt{\left(\frac{k}{2}\right)^2 + 1} & (k \geq 1/\sqrt{2}) \end{cases} : \text{ロスビー波}$$

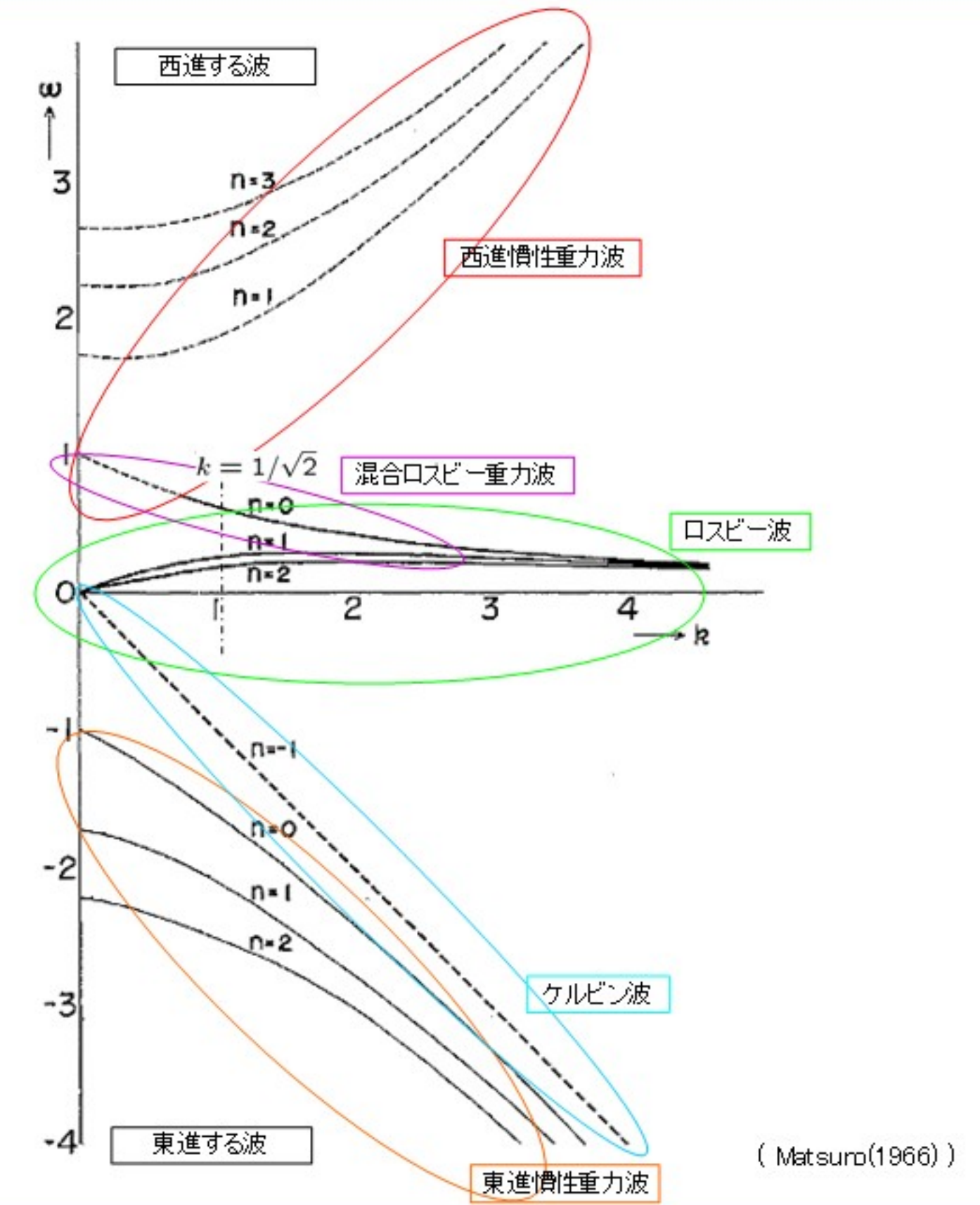
- 各振動数に対する波の種類
 - 慣性重力波とロスビー波
 - 慣性重力波の振動数はロスビー波の振動数よりも大きい
 - 波の進行方向
 - 東進する波か西進する波か
 - 慣性重力波とロスビー波以外の波
 - 西進慣性重力波とロスビー波が、波数について連続的に変化する波
 - 混合ロスビー重力波
 - $v=0$ の場合の特別な波
 - ケルビン波

$$v=0 \quad (n=-1)$$

$$\omega = -k : \text{ケルビン波}$$

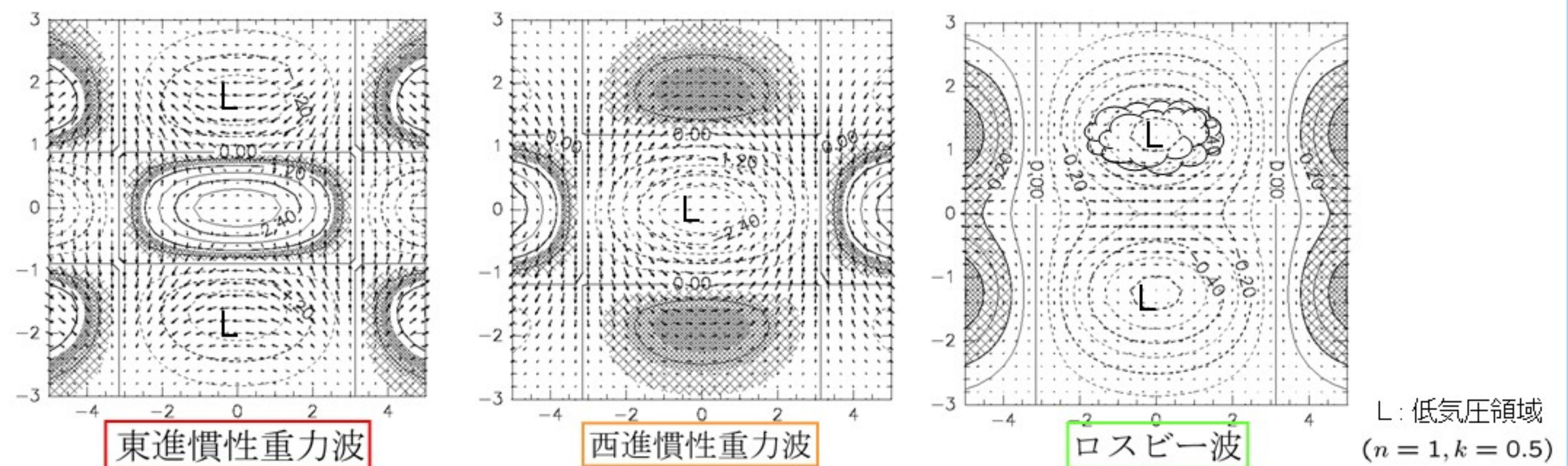
4. 分散曲線

- モード n の値毎の振動数と波数の関係をグラフに表したもの
- モードが大きい ($n \geq 1$) 場合は東進・西進重力波とロスビー波はそれぞれはっきりと分かれている
- $n=0$ のときは西進重力波とロスビー波が連続的につながっている
- ケルビン波 ($n=-1$) は波数によってロスビー波の性質に近い部分と慣性重力波の性質に近い部分がある



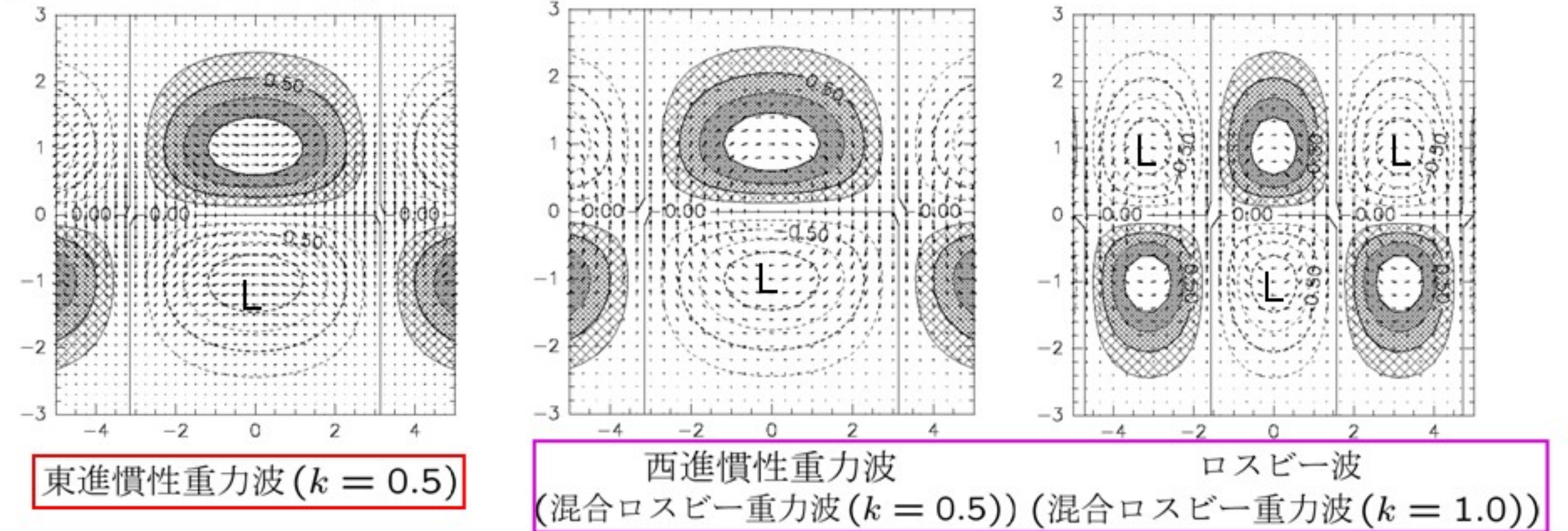
5. モードごとの速度・圧力場の関係図

$n \geq 1$ のとき



それぞれの波で速度・圧力場の違い(特に慣性重力波とロスビー波の違い)が明確

$n=0$ のとき

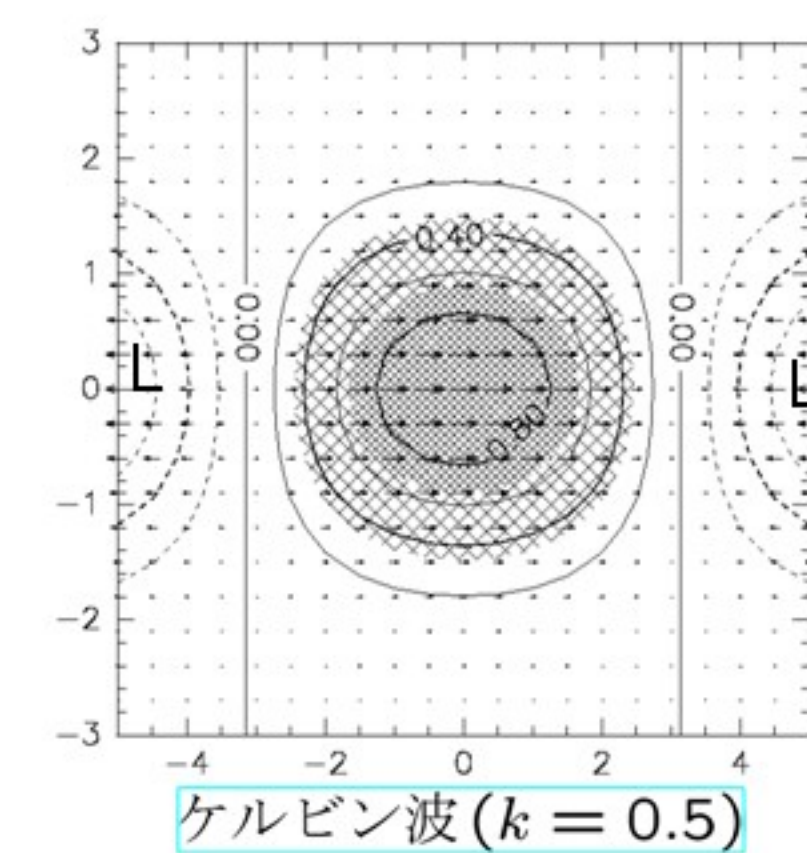


南北間での西進慣性重力波とロスビー波の速度場のパターンが類似している

→ 分離できない1つの波(混合ロスビー重力波)と考える

$v=0$ ($n=-1$) のとき

- 圧力場に関係なく領域全体で速度場が東西方向に平行に向いている(準地衡風平衡が成り立っている)

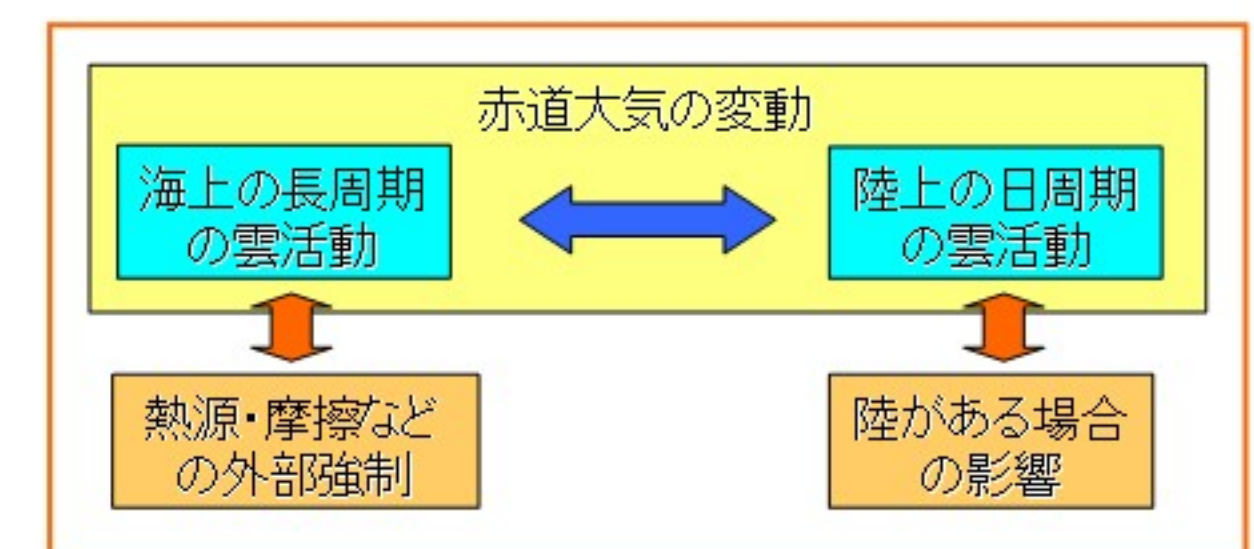


まとめ

- 中高緯度と同様に慣性重力波とロスビー波が存在する
- 赤道域固有の混合ロスビー重力波と赤道ケルビン波が卓越する

今後の課題と目標

- 陸域の影響を含めた赤道大気の強制問題について考える
- 海上の長周期変動と陸上域の日変化の間での降水パターンの相互作用について考える



参考文献
 Matsuno, T., 1966: Quasi-geostrophic motions in the equatorial area, *J. Meteor. Soc. Japan*, 44, 25-42
 松野太郎・島崎達夫, 1981: 大気科学講座 3 成層圏と中間圏の大気, 東京大学出版会, pp.279
 木村竜治, 1983: 地球流体力学入門, 東京堂出版, pp.247