

赤道域の大気・海洋中に存在する大規模波動の考察: 自由振動問題

1143426s 藤島 美保 地球および惑星大気科学研究室

要旨

本研究では、地球の赤道域に存在する大気海洋中の大規模波動の特性を理論的に検討した。まず、線形化された浅水方程式系に対して東西方向に伝播する波動解を与え、振動数についての固有値問題として解いた。その結果得られた固有関数はエルミート多項式を用いて表された。固有値は特別な場合を除いて3つ得られ、速度場と圧力場で表される解の形と振動数から、それらは東進慣性重力波、西進慣性重力波、ロスビー波であることが分かった。特別な場合には混合ロスビー重力波や赤道ケルビン波が得られた。したがって、赤道域には中高緯度でもみられる慣性重力波とロスビー波、そして赤道域特有の波である混合ロスビー重力波と赤道ケルビン波が存在していることが分かった。

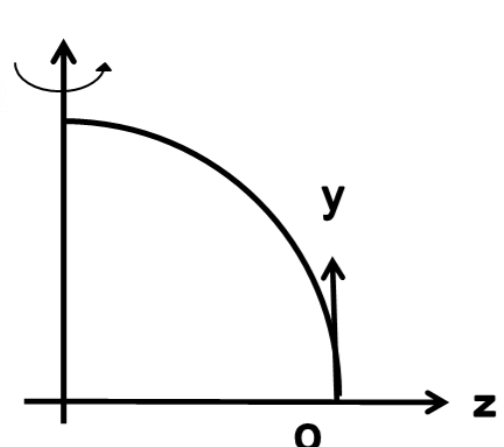
1. はじめに

熱帯域の大気海洋中の変動であるエルニーニョ・南方振動 (El Niño - Southern Oscillation; ENSO) やマッデン・ジュリアン振動 (Madden - Julian Oscillation; MJO) に赤道波が関与している可能性が示唆されている(升本, 安藤, 2013; Masunaga, 2007)。そこで本研究では赤道波に着目し、赤道域の大規模波動の理論的な研究である Matsuno (1966) のレビューを行った。

2. 基礎方程式系

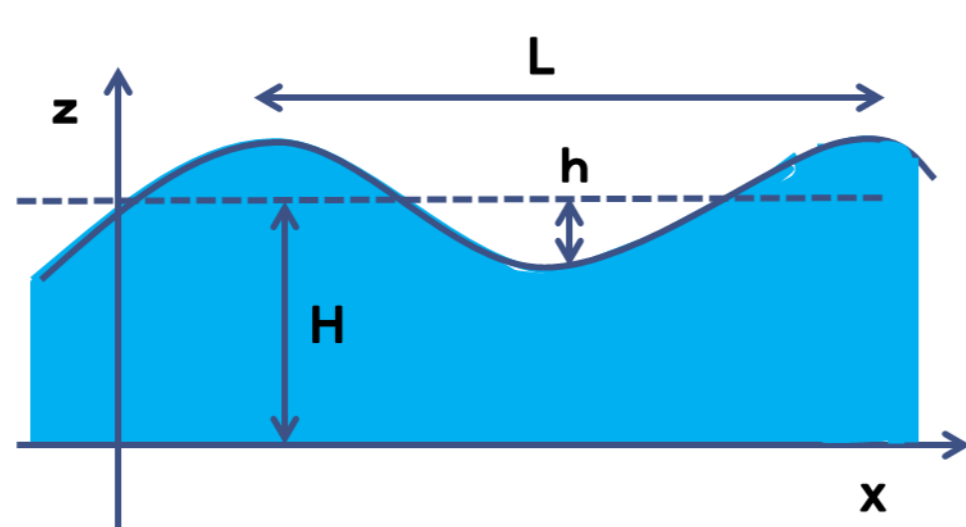
■ 座標系

- 赤道を中心とする直交直線座標系
- 原点O: 平均海面上
- x軸: 東向き
- y軸: 北向き
- z軸: 鉛直上方



■ 浅水方程式系

- 均質非圧縮性流体
- $L \gg H$



線形化された浅水方程式系

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} - \beta y v + g \frac{\partial h}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \beta y u + g \frac{\partial h}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial h}{\partial t} + H \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) &= 0 \end{aligned}$$

■ β 平面近似

- 地球が回転する球である効果を一次近似で表す

■ 無次元化

h : 微小変位 H : 平均の深さ L : 水平の長さ g : 重力加速度 β : ベータパラメータ
 u : 速度の東西成分 v : 速度の南北成分 $\phi(=gh)$: ジオポテンシャル
 $c(=\sqrt{gH})$: 重力波の速度 k : 波数 ω : 振動数

3. 分散関係

■ 波動解

$$(u, v, \phi) = (\hat{u}(y), \hat{v}(y), \hat{\phi}(y)) e^{i(kx + \omega t)}$$

■ v に関する式

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

■ 境界条件

$$y \rightarrow \pm\infty \text{ のとき } v \rightarrow 0$$

— 調和振動子についてのシュレディンガー方程式と同じ形

■ 分散関係式

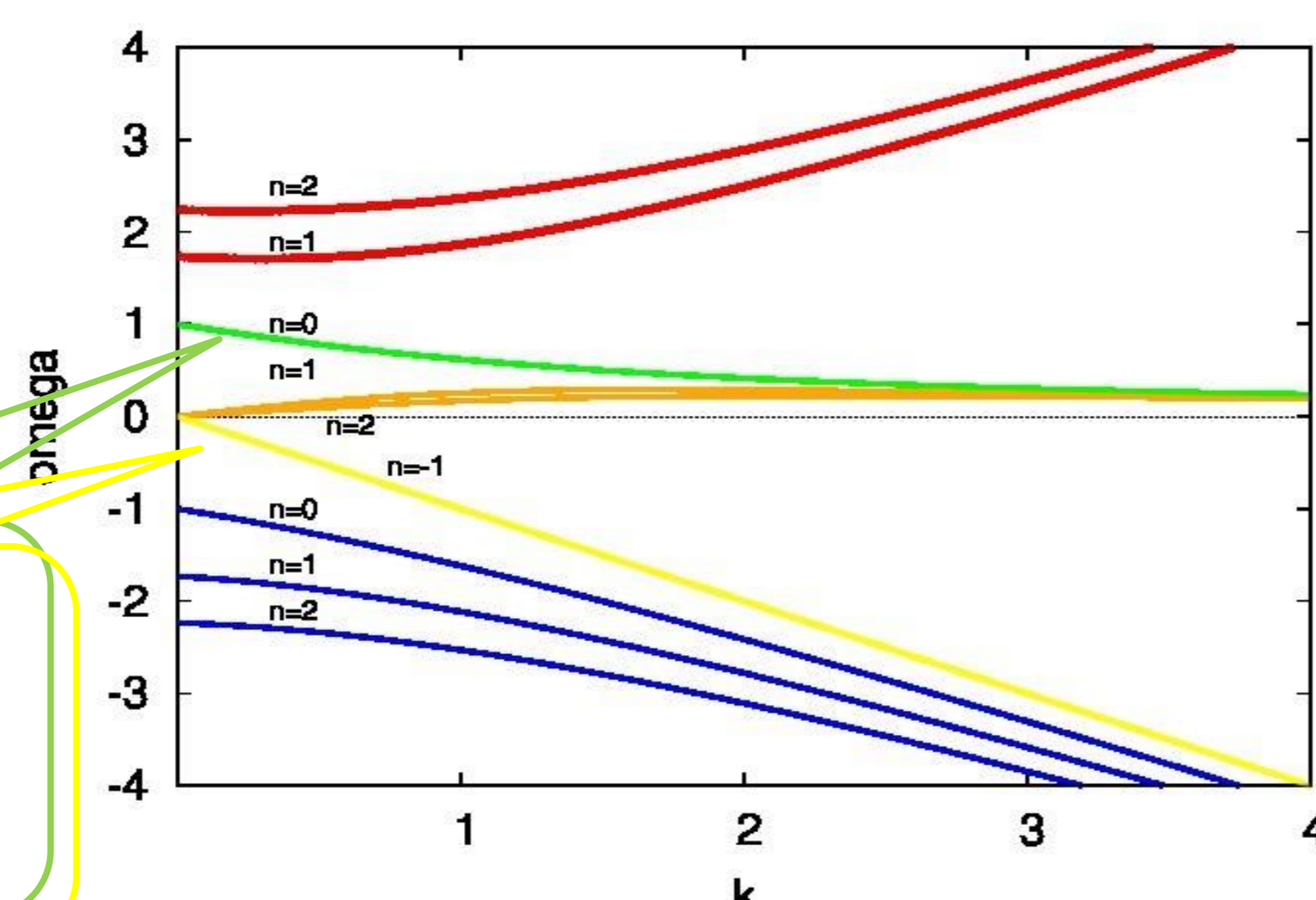
$$\omega^3 - (k^2 + 2n + 1)\omega + k = 0 \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \quad (**)$$

■ (*) の解

$$v(y) = C e^{-\frac{1}{2}y^2} H_n(y) \quad n: \text{南北方向のモード} \quad H_n(y): n\text{次のエルミート多項式}$$

■ 分散曲線

- 東進慣性重力波
- 西進慣性重力波
- ロスビー波
- 混合ロスビー重力波
- 赤道ケルビン波



▲ 各モードごとの分散関係

波数によって慣性重力波の性質とロスビー波の性質に近い部分がある

■ (**) を解くと3つの解が得られる

I. $v \neq 0$ の場合

◆ $n \geq 1$ のとき

波の種類	復元力	伝播方向	存在領域
東進慣性重力波	重力, コリオリ力	東向き	中高緯度にも存在
西進慣性重力波	重力, コリオリ力	西向き	
ロスビー波	β 効果	西向き	

— 振動数は慣性重力波の方がロスビー波よりも大きい

◆ $n = 0$ のとき

境界条件を満たす解は2つ

波の種類	特徴	存在領域
東進慣性重力波		赤道域特有の波
混合ロスビー重力波	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	

II. $v = 0$ の場合

境界条件を満たす解は1つ

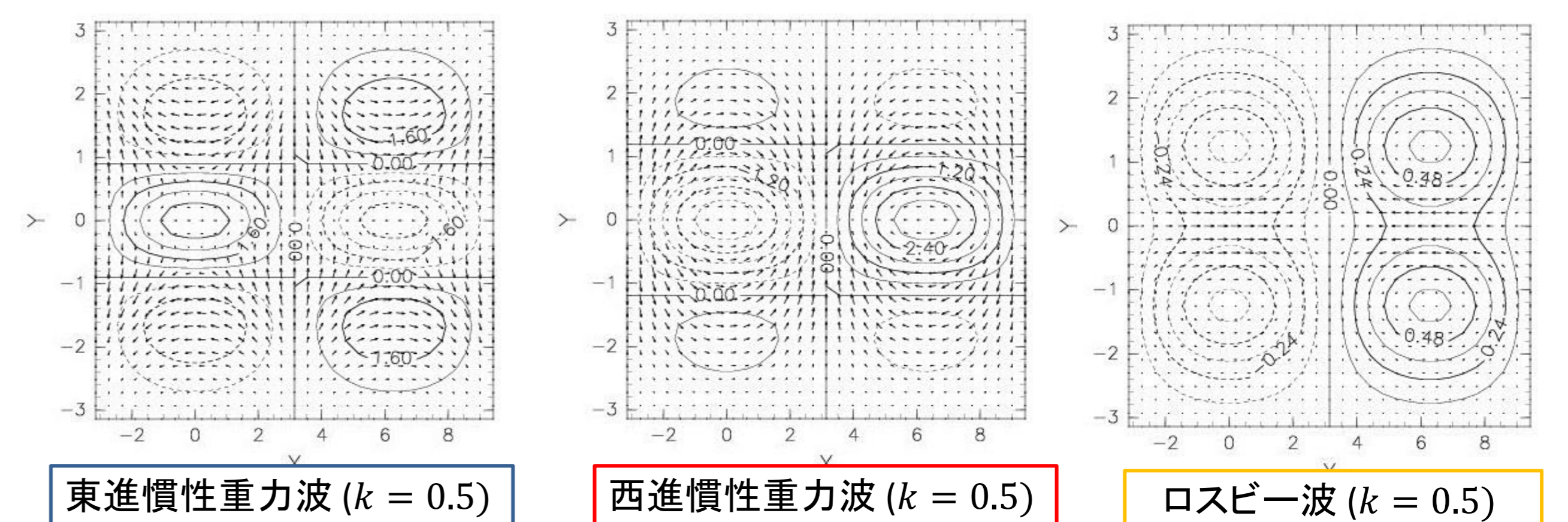
波の種類	特徴	存在領域
赤道ケルビン波	回転系において重力波の一種で、赤道に沿って進む波	赤道域特有の波

— (**) で $n = -1$ としたときに得られる解の一つなので、 $n = -1$ の解と分類する

4. 各モードの空間構造

I. $v \neq 0$ の場合

◆ $n \geq 1$ のとき (図は $n = 1$ のとき。図の矢印は水平ベクトル, 等値線は圧力を示す。)

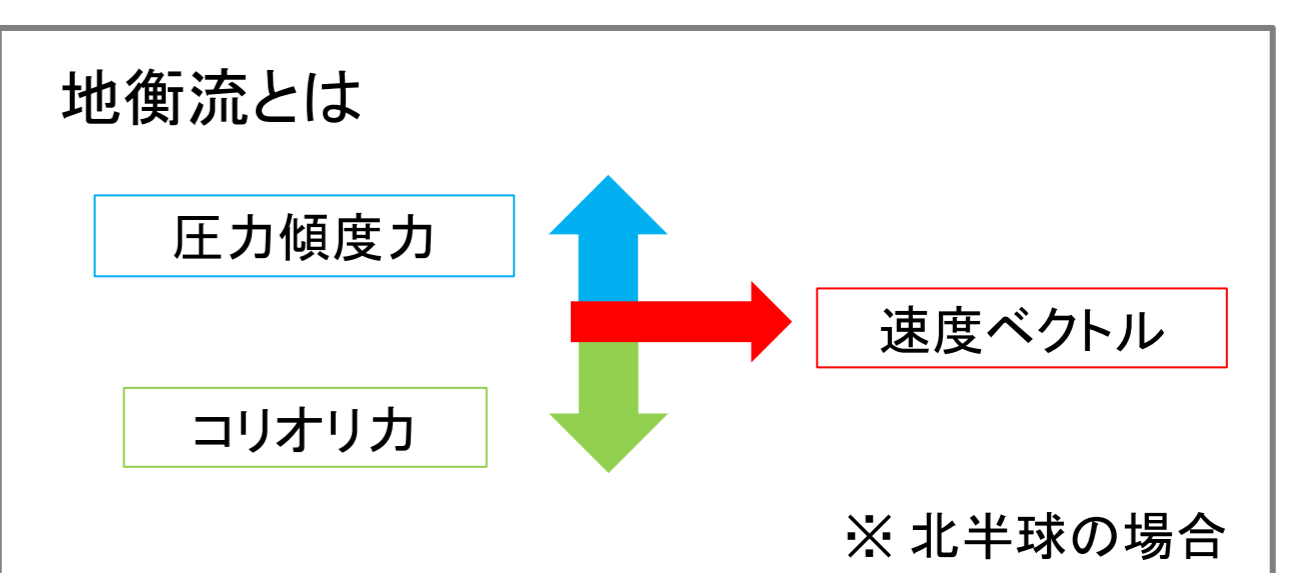


東進慣性重力波 ($k = 0.5$)

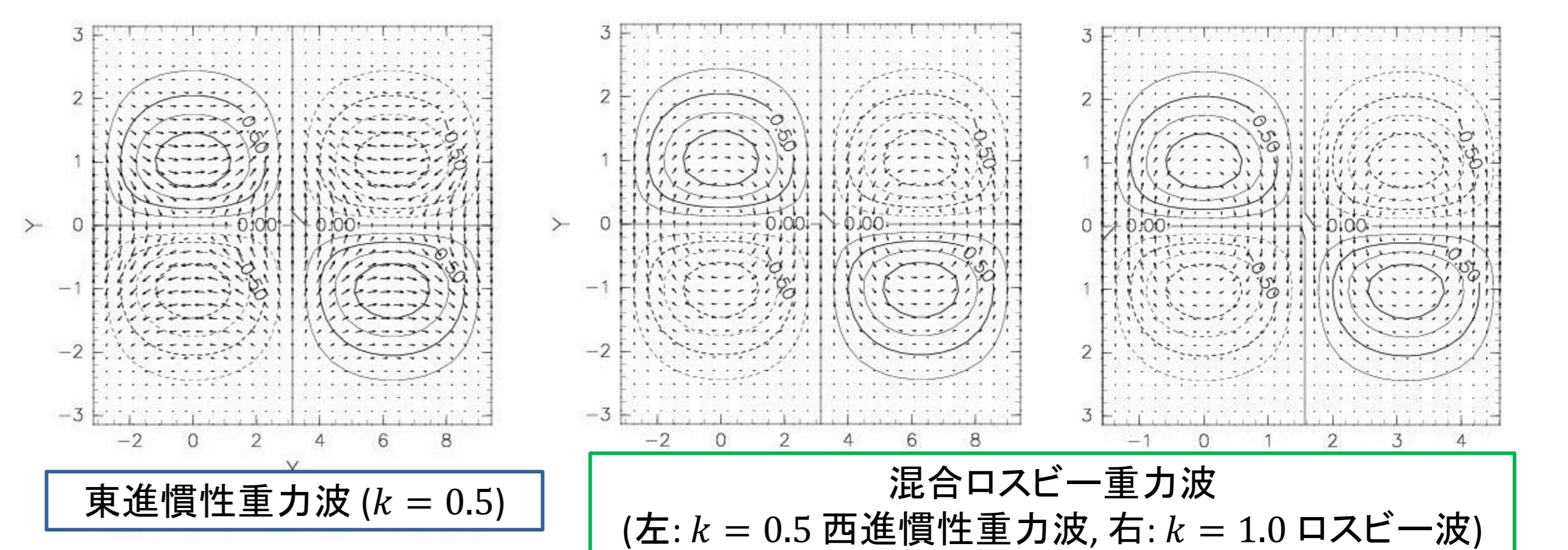
西進慣性重力波 ($k = 0.5$)

ロスビー波 ($k = 0.5$)

《 慣性重力波 》
 ・収束・発散が生じている
 ⇒ この繰り返りで波が伝播する
 《 ロスビー波 》
 ・地衡流的である



◆ $n = 0$ のとき



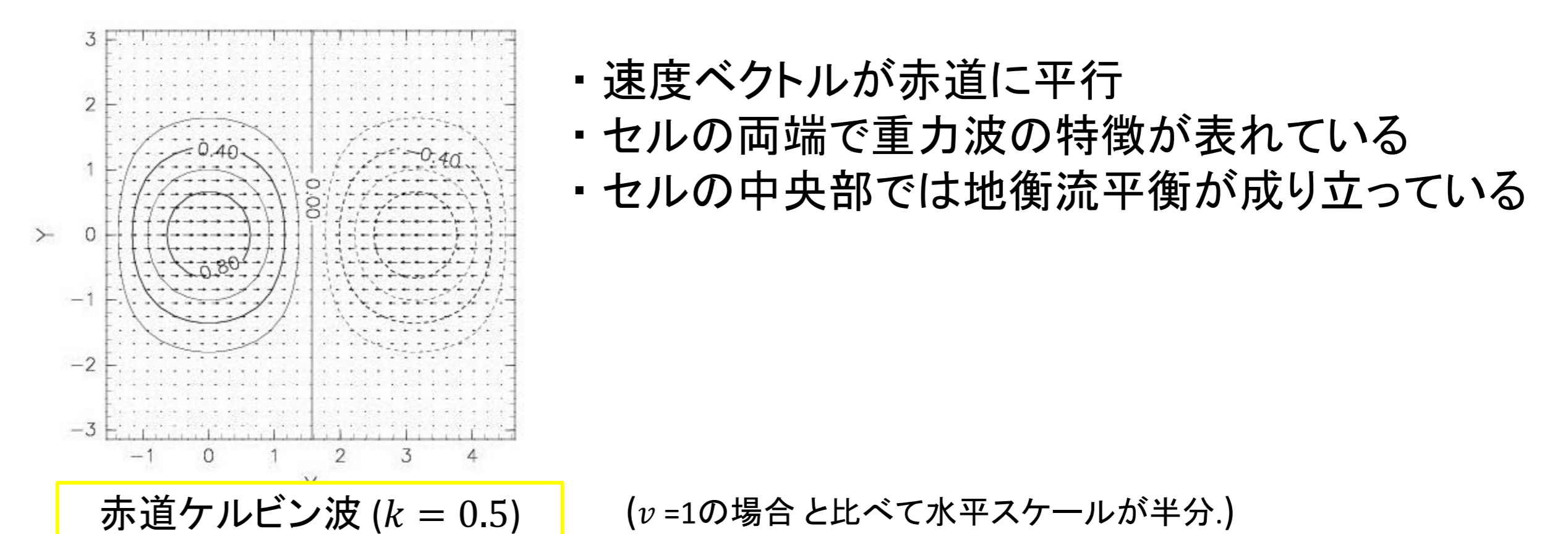
東進慣性重力波 ($k = 0.5$)

混合ロスビー重力波
 (左: $k = 0.5$ 西進慣性重力波, 右: $k = 1.0$ ロスビー波)

($k = 1.0$ のときは $k = 0.5$ のときと比べて水平スケールが半分。)

《 東進慣性重力波 》
 ・ $n \geq 1$ のときとほぼ同じ
 《 混合ロスビー重力波 》
 ・ $k = 0.5$ と $k = 1.0$ の場合で空間構造に違いがみられない
 ・高緯度では地衡流平衡が成り立っており、低緯度では非地衡流的で慣性重力波の速度場と類似している
 ⇒ 西進慣性重力波とロスビーの両方の特徴を持った波

II. $v = 0$ の場合 ($n = -1$ のとき)



赤道ケルビン波 ($k = 0.5$)

($v = 1$ の場合と比べて水平スケールが半分。)

- 速度ベクトルが赤道に平行
- セルの両端で重力波の特徴が表れている
- セルの中央部では地衡流平衡が成り立っている

参考文献

- Matsuno, T., 1966: Quasi-geostrophic motion in the equatorial area, J. Meteor. Soc. Japan, 44, 25 - 42.
- 小倉 義光, 1978: 気象力学通論, 東京大学出版会, 249pp
- 升本 順夫, 安藤 健太郎, 2013: ENSO の観測, 気象研究ノート 第228号エルニーニョ・南方振動(ENSO)研究の現在, 日本気象学会, 9 - 19.
- Masunaga, H., 2007: Seasonality and Regionality of the Madden-Julian Oscillation, Kelvin Wave, and Equatorial Rossby Wave, J. Atmos. Sci., 64, 4400-4416.
- 須賀 友也, 2009: 地球赤道域の大気波動に関する研究, 神戸大学卒業論文, 1-32.