

β 面上の強制 **2**次元乱流の数値実験的研究

地球および惑星大気科学研究室 村上真也

地球流体と **2**次元乱流のかかわり

地球上の流体の大規模な運動の特徴

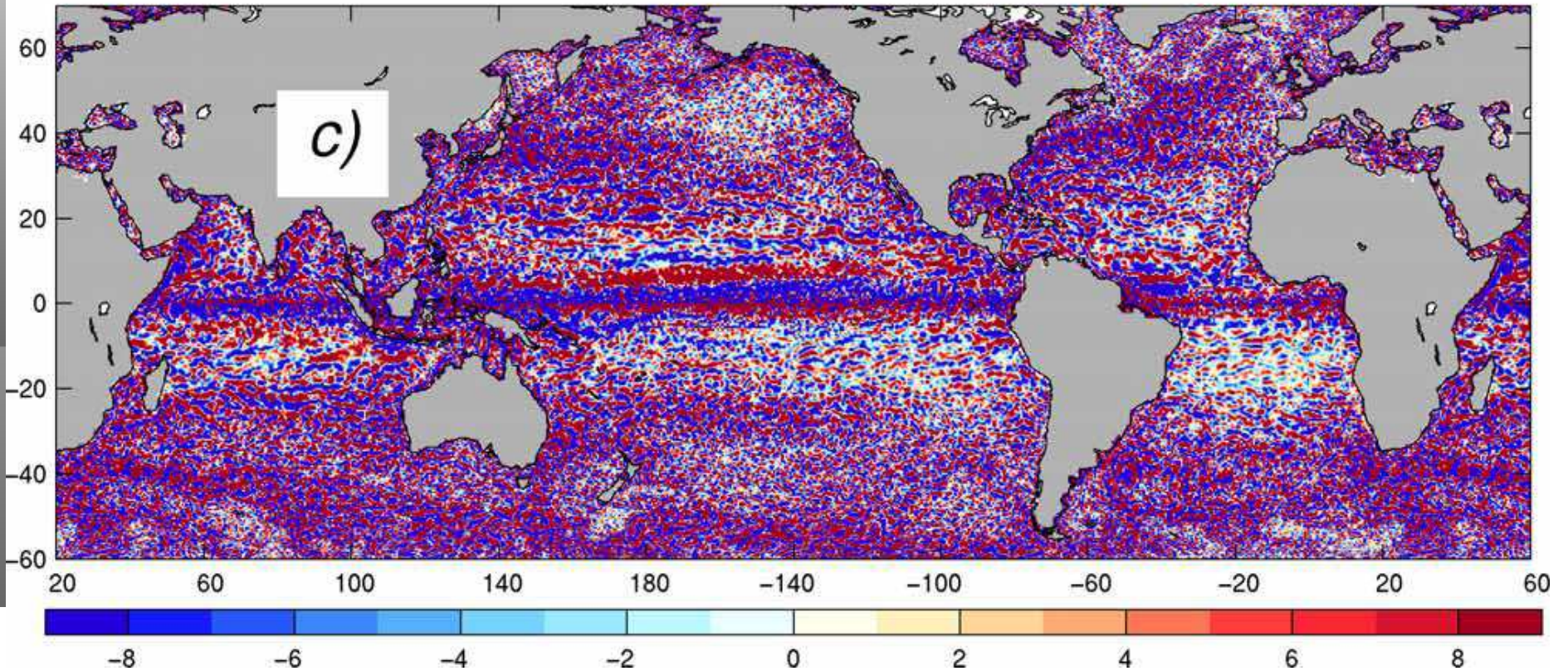
- 回転球殻中の運動
- 安定成層しており, 水平 **2**次元
- 乱流的

地球流体の運動の特徴を調べるために,
回転球面上の **2**次元乱流の研究が多くなされて来た.

回転球面上の **2**次元乱流では 帯状流が形成される.

Rhines(1975), Holloway & Hendershott(1977), Williams(1978),
Yoden & Yamada(1993), Vallis & Maltrud(1993), Sukoriansky, et al.(1996),
Nozawa & Yoden(1997), Danilov & Gryanik(2004), Danilov & Gurarie(2004),
Lee & Smith(2007), Ishioka, et al.(2007), Hayashi, et al.(2007), etc.

海洋における帯状流



Maximenko, et al.(2005)

回転球面の効果を考慮した**2次元乱流**の 分類

系の幾何学

- 球面
- 球面の接平面 (β 面)

乱流の与え方

- 減衰性乱流

初期時刻にある波数にピークを持つエネルギースペクトルを与えて時間発展

- 強制乱流

常にある波数で渦度を与えて強制する

本研究では, β 面上の強制 2次元乱流について調べた.

非圧縮性流体, 順圧, β 面の渦度方程式

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{\partial \psi}{\partial y} \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \beta \frac{\partial \psi}{\partial x} = F + D\zeta \quad (1)$$

$\zeta(x, y, t) = \nabla^2 \psi$: 相対渦度, $\psi(x, y, t)$: 流れ関数,

$f(y) = f(0) + \beta y$: コリオリパラメータ

F : 強制 (等方的にある波数範囲にだけ与える)

$D := -\lambda_n (-\nabla^2)^{-n} - \nu_m (-\nabla^2)^m$: 散逸演算子

- 初期条件: エネルギー, 渦度はどこでもゼロ.
- 領域: $2\pi \times 2\pi$
- 境界条件: x, y 方向ともに周期境界

β 面上の強制 2次元乱流の特徴

β 面上の強制 2次元乱流の特徴 (Danilov & Gryanik, 2004; 他)

- 帯状流が卓越
- 東向きの流れと西向きの流れが南北に交互に並ぶ

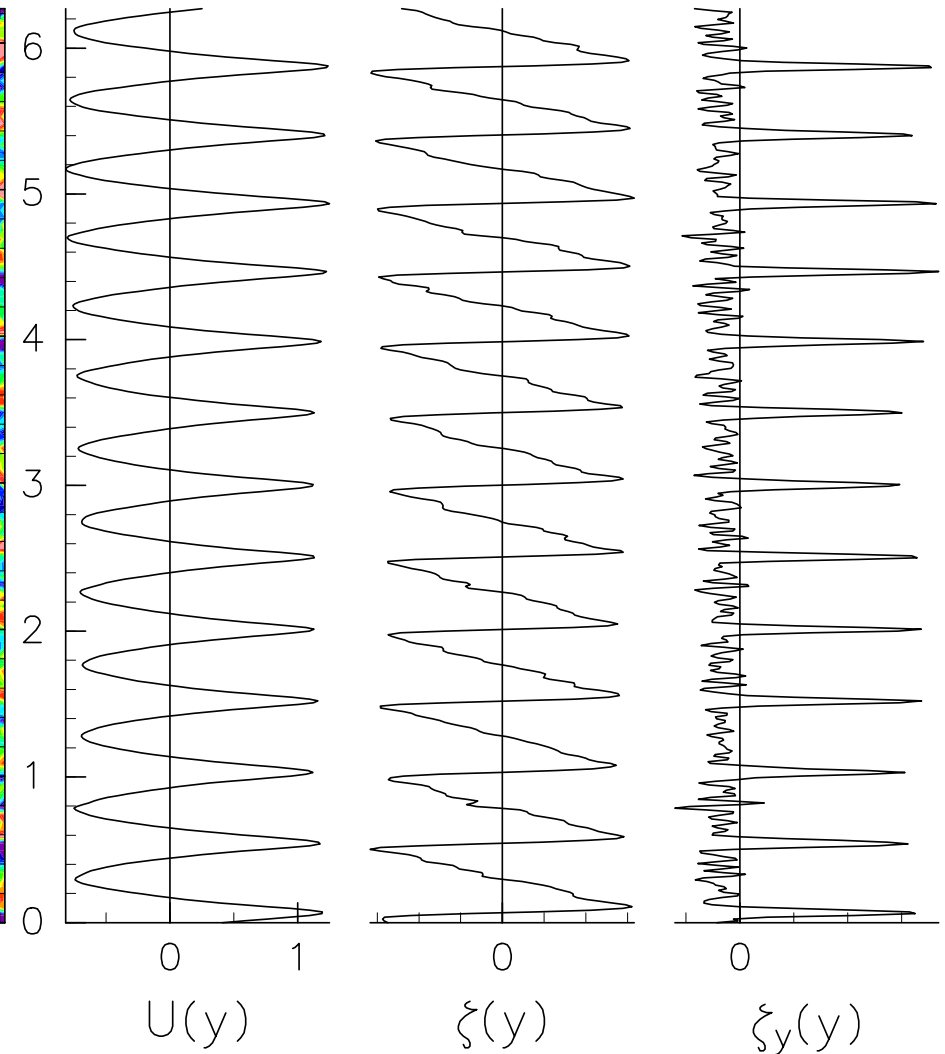
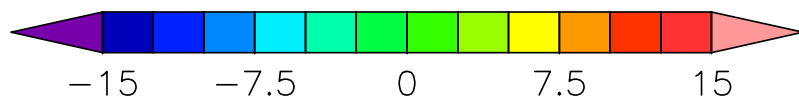
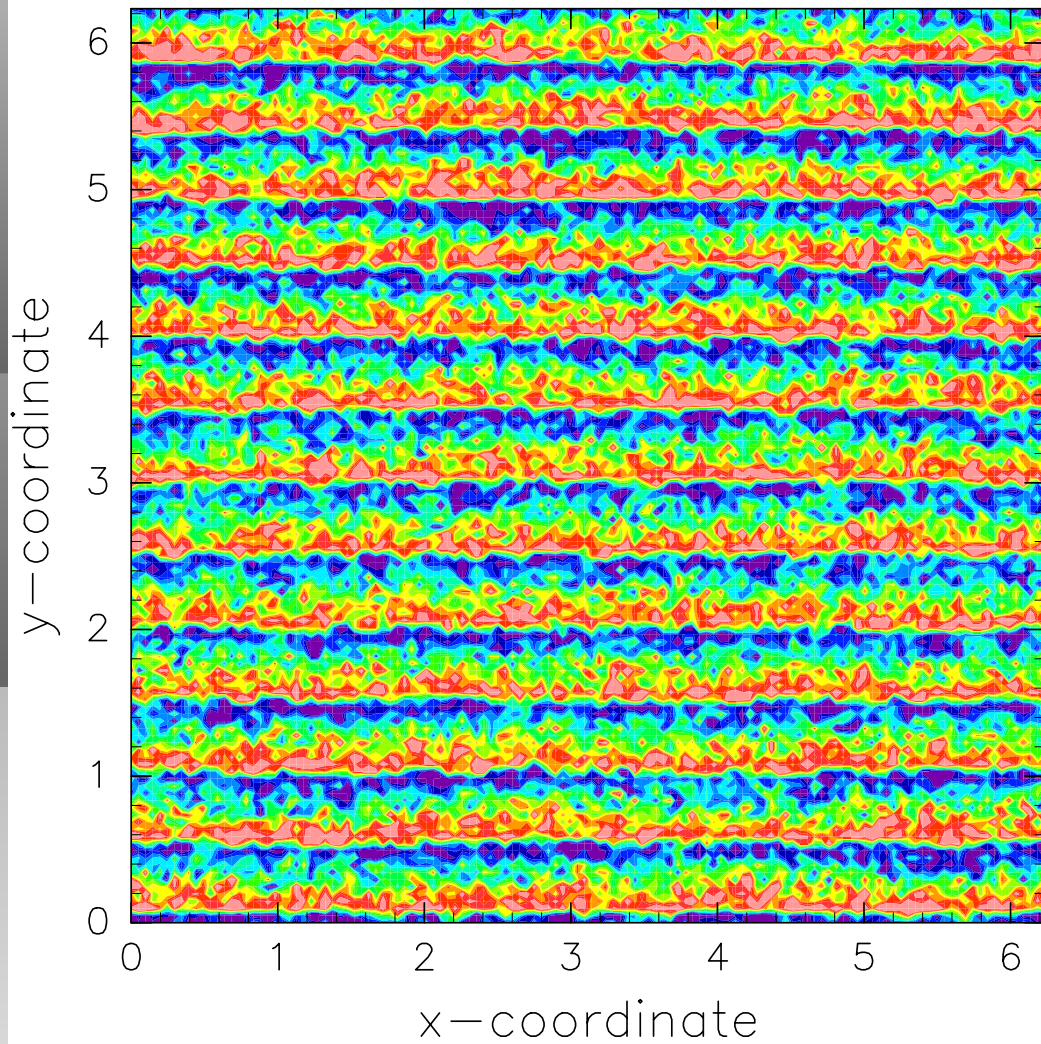
β が大きいとき

- 東向き流れの速さ $>$ 西向き流れの速さ
- 東向き流れの幅 $<$ 西向き流れの幅

渦度勾配が正である領域の幅が強制の長さスケール程度になることがある. (Danilov & Gurarie, 2004)

渦度場と東西平均量

vorticity field at $t=1500$



- どのようなメカニズムで帯状流が形成されるか?
→ まだ分かっていない.
- 帯状流はどのように β パラメタに依存するか?
→ 帯状流全体の幅: Rhines スケール $2\pi\sqrt{U_{\text{rms}}/\beta}$ (Rhines, 1975).
- 帯状流の東西非対称な構造は β にどう依存するか?
→ まだ分かっていない.

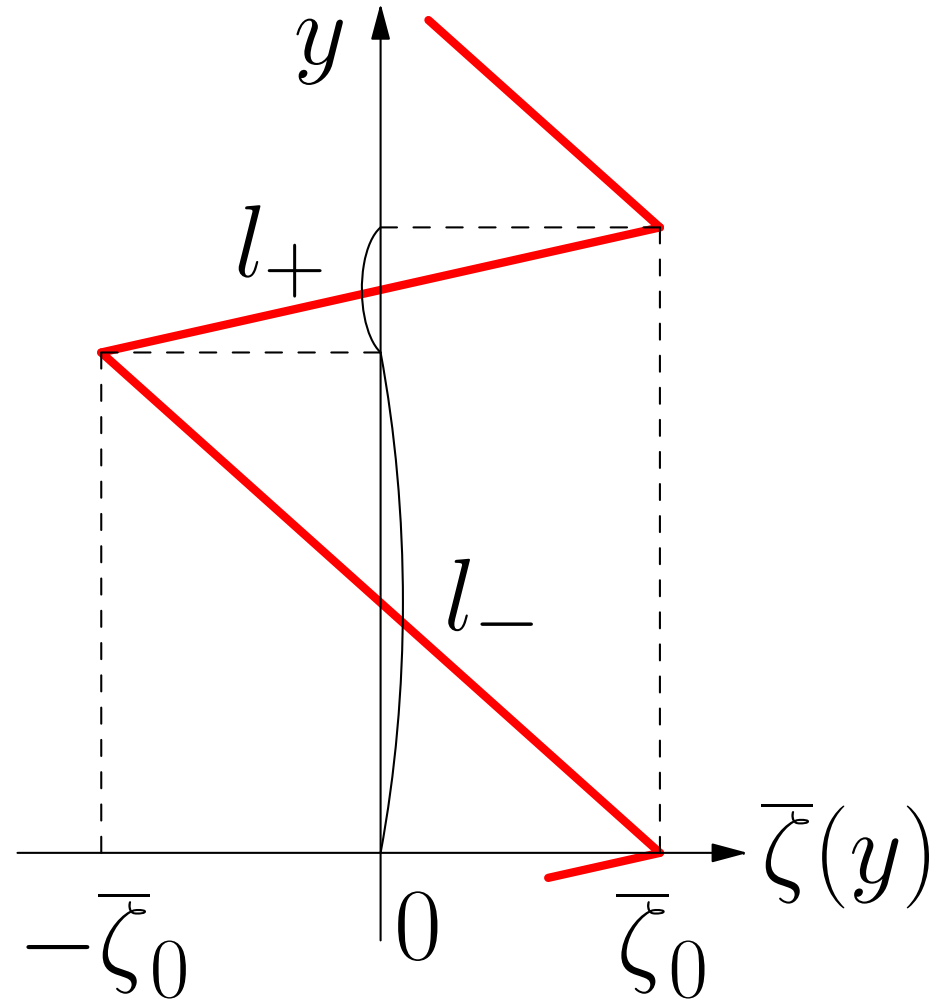
帯状流の東西非対称な構造の β パラメタ依存性を数値実験によって調べた.

- 低波数の散逸の係数 $\lambda_2 = 50, 123, 300$
- $\beta = 0$ から 600 まで変化させる.
- その他のパラメータは Danilov & Gryanik(2004) に近い設定
- 空間微分: スペクトル法
- 時間積分: 2 次の Adams-Bashforth 法
- 格子点数: 512^2 , 切断波数: 170

東西非対称構造の特徴付け

右図は帯状流の波一つ分を取り出した渦度

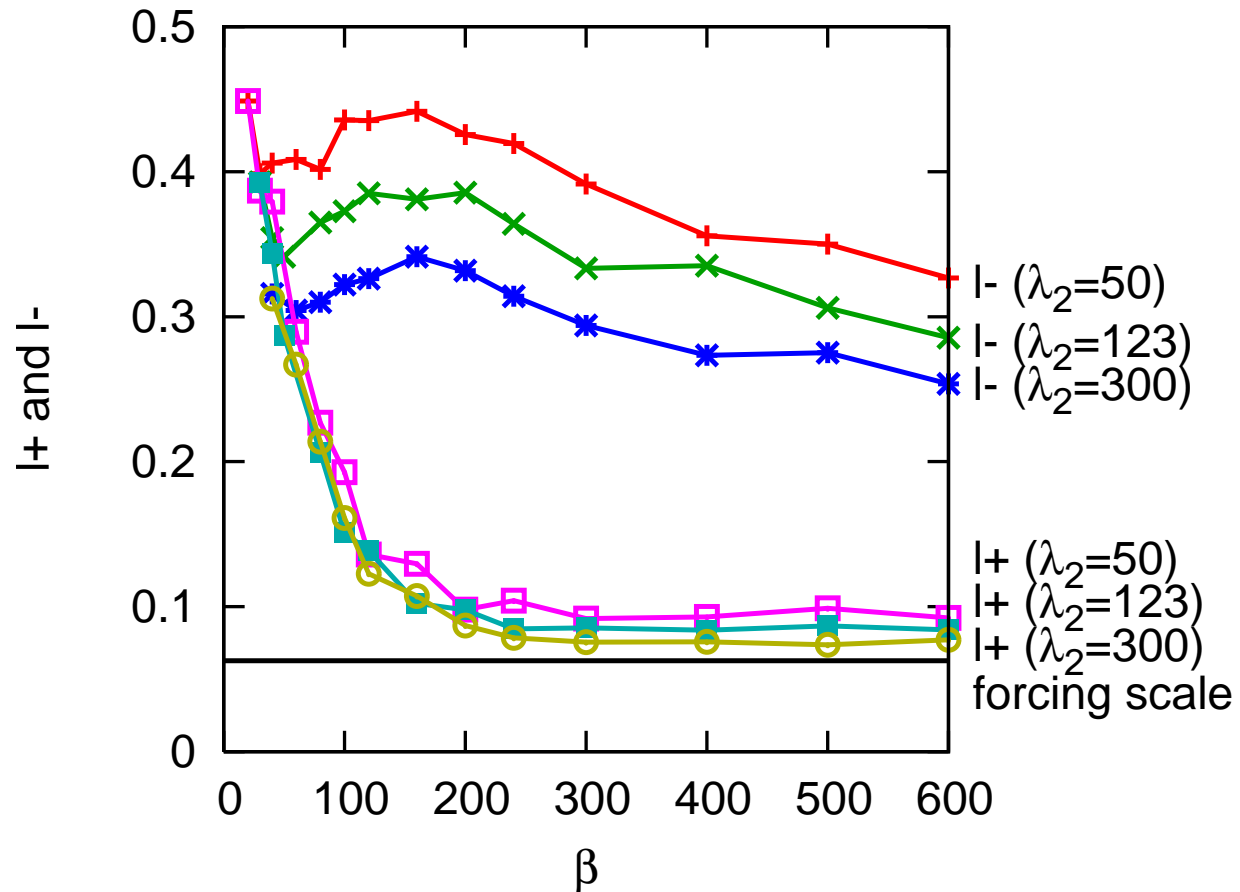
- l_+ 渦度の南北勾配が正となる幅
- l_- 渦度の南北勾配が負となる幅
- $r := \frac{l_-}{l_+}$ 東西非対称度



結果: 正負の渦度勾配幅 l_+ , l_- の β 依存性

特徴:

- $\beta \leq 200$ では l_+ はほぼ β に比例して減少
- $\beta \geq 200$ で l_+ はほぼ一定で強制の長さスケールに近い
- $\beta \geq 200$ で l_- は緩やかに減少

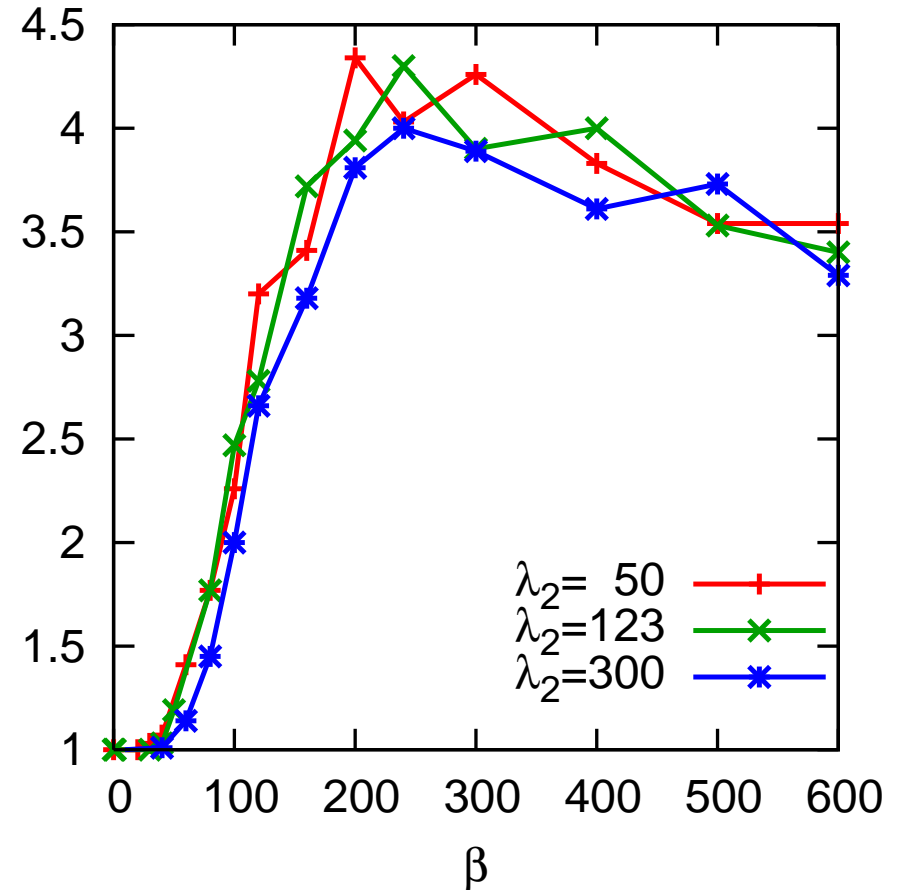


結果: 東西非対称度 r の β 依存性

特徴:

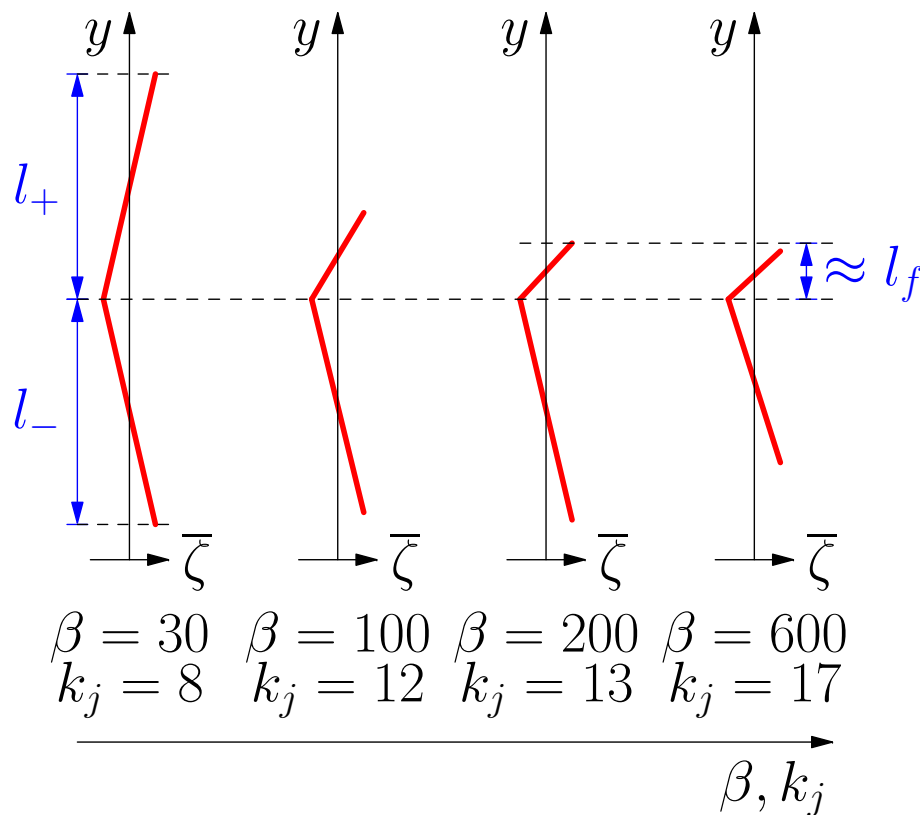
- $\beta \leq 30$ 東西対称
- $\beta \geq 40$ 東西非対称
- $40 \leq \beta \leq 200$ で r は β に比例して増加
- $\beta \geq 200$ で r は減少傾向
- r は単調に増加しない.

β dependence of vorticity gradient ratio



r, l_+, l_- の振る舞いをまとめると...

- $l \propto \beta^{-1/2}$ (Rhines, 1975)
- β が増えるとジェット 1 組あたりの幅 l が減る
- $\beta \leq 200$ では l_+ のみが大きく減る
 - 東西非対称度 r は増加
- $\beta \geq 200$ で $l_+ \approx l_f$
- l_+ は減らず, l_- のみが減る
 - 東西非対称度 r は減少



β 面上の強制 2 次元乱流における帯状流の β 依存性

- β が小さいと東西対称, 大きいと東西非対称.
- 東西非対称度 r
 - $\beta \leq 200$ で β に比例して増加
 - $\beta \geq 200$ で減少傾向
 - r が最大値を持つことは, $l_+ \approx l_f$ となることに
対応
- 正の渦度勾配の幅
 - β が大きいときに, Danilov and Gryanik(2004) で
既に指摘されている, 強制の長さスケールに近い
値をとる.

これから：東西非対称な帯状流形成メカニズム

- 帯状流形成
 - 乱流と波のタイムスケールの不整合 (Vallis & Maltrud, 1993)
 - 三波準共鳴 (Lee & Smith, 2007; Newell, 1967)
 - 新しく発見された断熱不変量 (Balk, 1991; Balk, 2005)
- 東西非対称性: 帯状流と波の相互作用で非対称化. 散逸項が重要.
 - 減衰性乱流における東西非対称性 (Ishioka, et al., 2007)
 - 単一ジェットに入射する波による帯状流の東西非対称化 (Benilov, et al., 1992)