大気と海洋の波動エネルギーのライフサイクル解析による熱帯気候変動メカニズムの解明

相木秀則（名大宇宙地球環境研）

1. 全ての緯度帯の全ての種類の波（重力／惑星）に適用可能なエネルギーフラックス（群速度ベクトル）のモデル解析スキームの開発（Aiki et al. 2015, 2017）
2. <u>熱帯太平洋の表層季節波動のライフサイクル解析</u>
3. **<u>熱帯インド洋の表層季節波動のライフサイクル解析</u>**
4. 海洋経年変動解析
5. 大気変動解析

Aiki, H., K. Takaya, and R. J. Greatbatch, 2015: A divergence-form wave-induced pressure inherent in the extension of the Eliassen-Palm theory to a three-dimensional framework for all waves at all latitudes, J. Atmos. Sci., 72, 2822-2849.
Aiki, H., R. J. Greatbatch, and M. Claus, 2017: Towards a seamlessly diagnosable expression for the energy flux associated with both equatorial and mid-latitude waves, Prog. Earth Planet. Sci., 4.

共同利用機器のご案内
（毎年1.15締め切り）

名古屋大学
宇宙地球環境研究所
Institute for Space-Earth Environmental Research

http://www.isee.nagoya-u.ac.jp/co-re.html

共同利用・共同研究

- 共同利用・共同研究申請
- 採択課題リスト
- 共同利用機器
- 共同利用・共同研究成果報告書
- ISEE Award（宇宙地球環境研究所賞）

MOA データベース	阿部文雄
SuperDARN 北海道-陸別第1・第2短波レーダー（陸別）	西谷 望
運動論プラズマシミュレーションコード	梅田隆行
雲解像モデル（CReSS）	坪木和久
衛星データシミュレータ（SDSU）	増永浩彦
ISEEリオメータネットワークデータ（海外の多点観測）	塩川和夫
大気海洋中の波動エネルギー伝達経路解析コード	相木秀則

ページトップへ▲

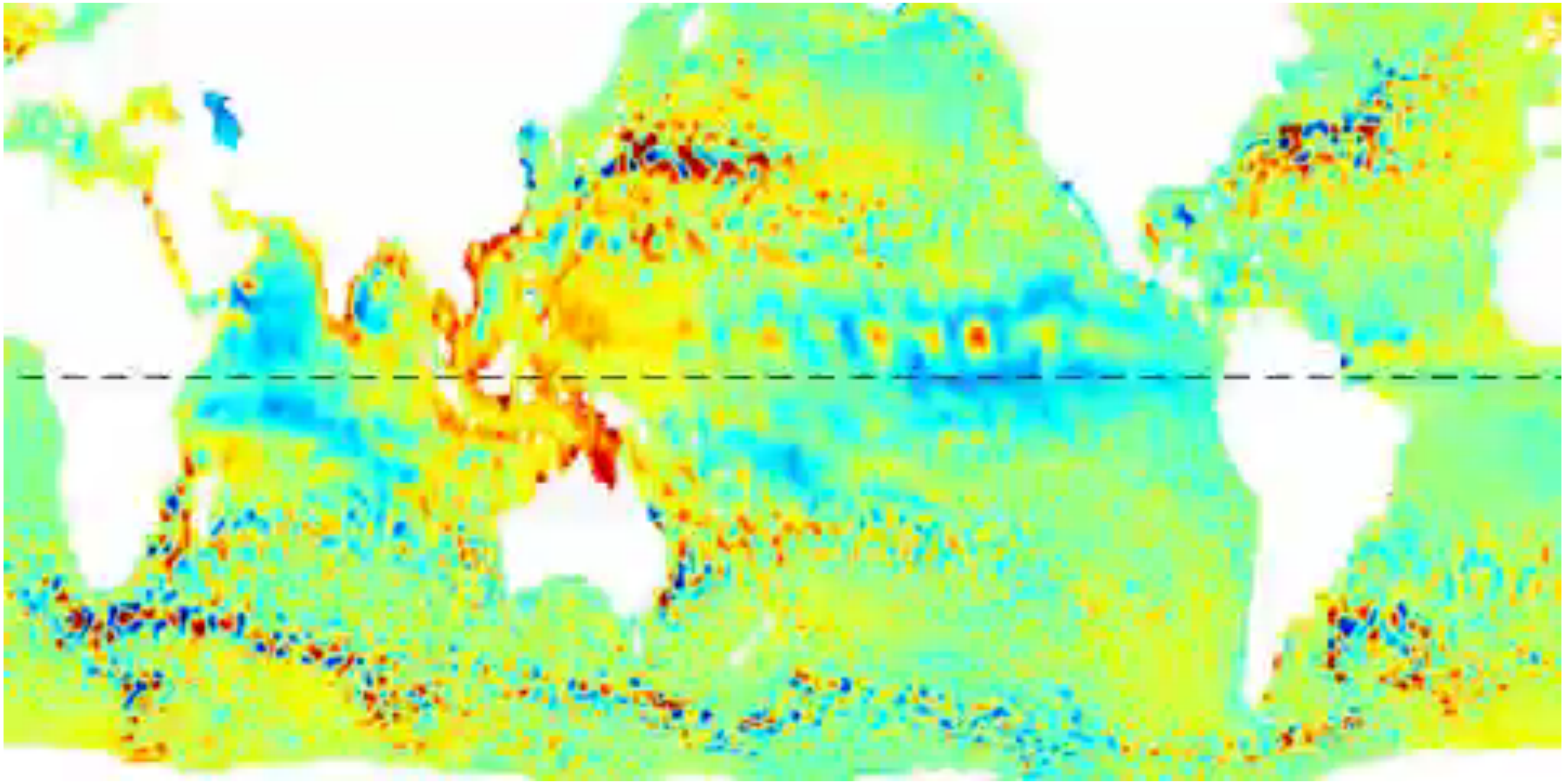
詳細は…
http://co2.hyarc.nagoya-u.ac.jp/labhp/member/aiki/invepv.html

中緯度惑星波と赤道波のエネルギーフラックスの全球シームレス解析に向けて

Aiki et al. 2017 PEPS

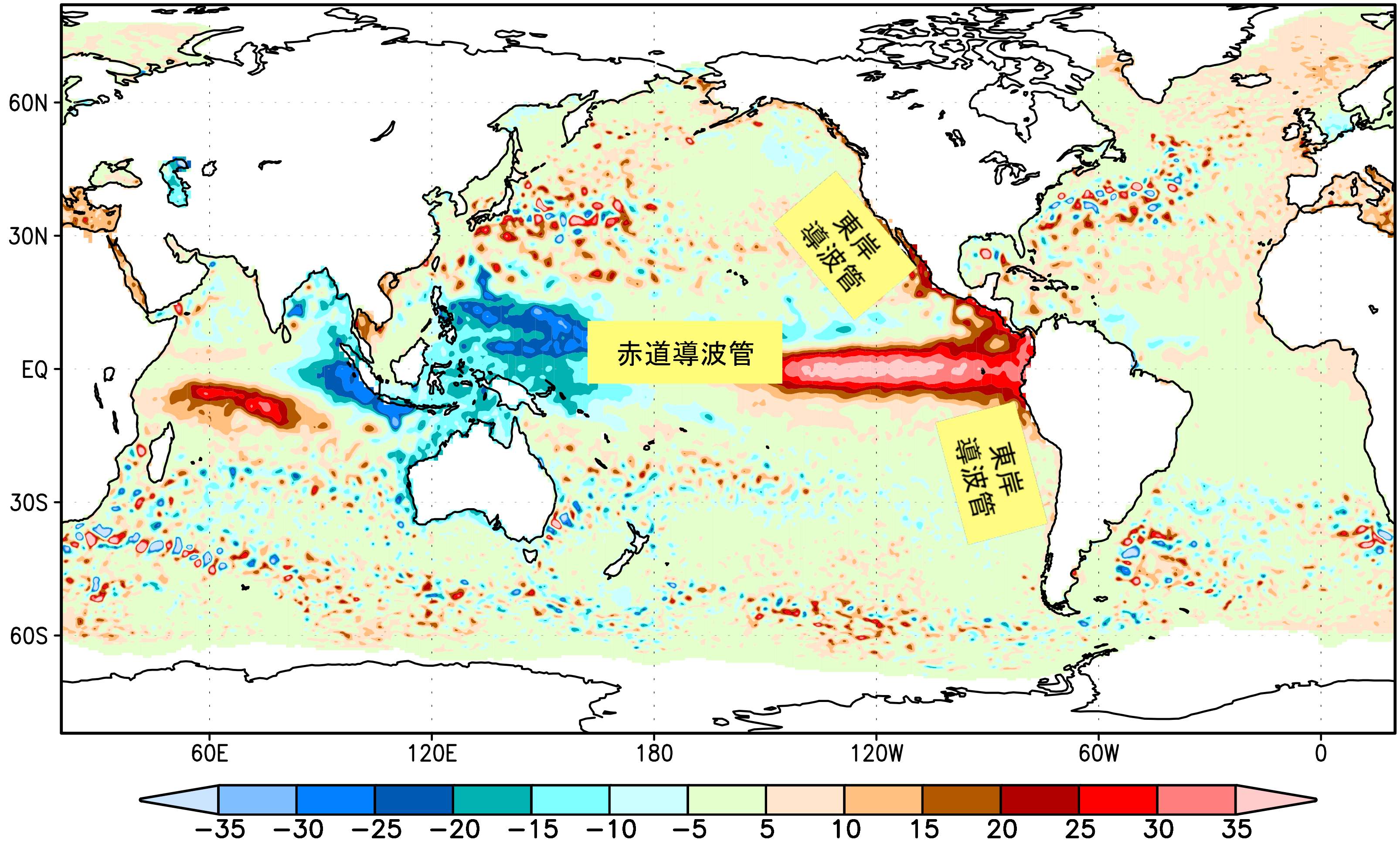
相木秀則 名古屋大 宇宙地球環境研究所

衛星観測海面高度偏差10年分



過去20年間のモデル診断研究：どこで擾乱が励起・減衰するのか？
- エネルギー変換率の全球分布の診断

将来のモデル診断研究：どこからどこへ「何が」擾乱を運ぶのか？
- 慣性重力波のエネルギーフラックスはモデル診断研究が豊富
- 中緯度惑星波や赤道波のエネルギーフラックスはあまり研究されていない

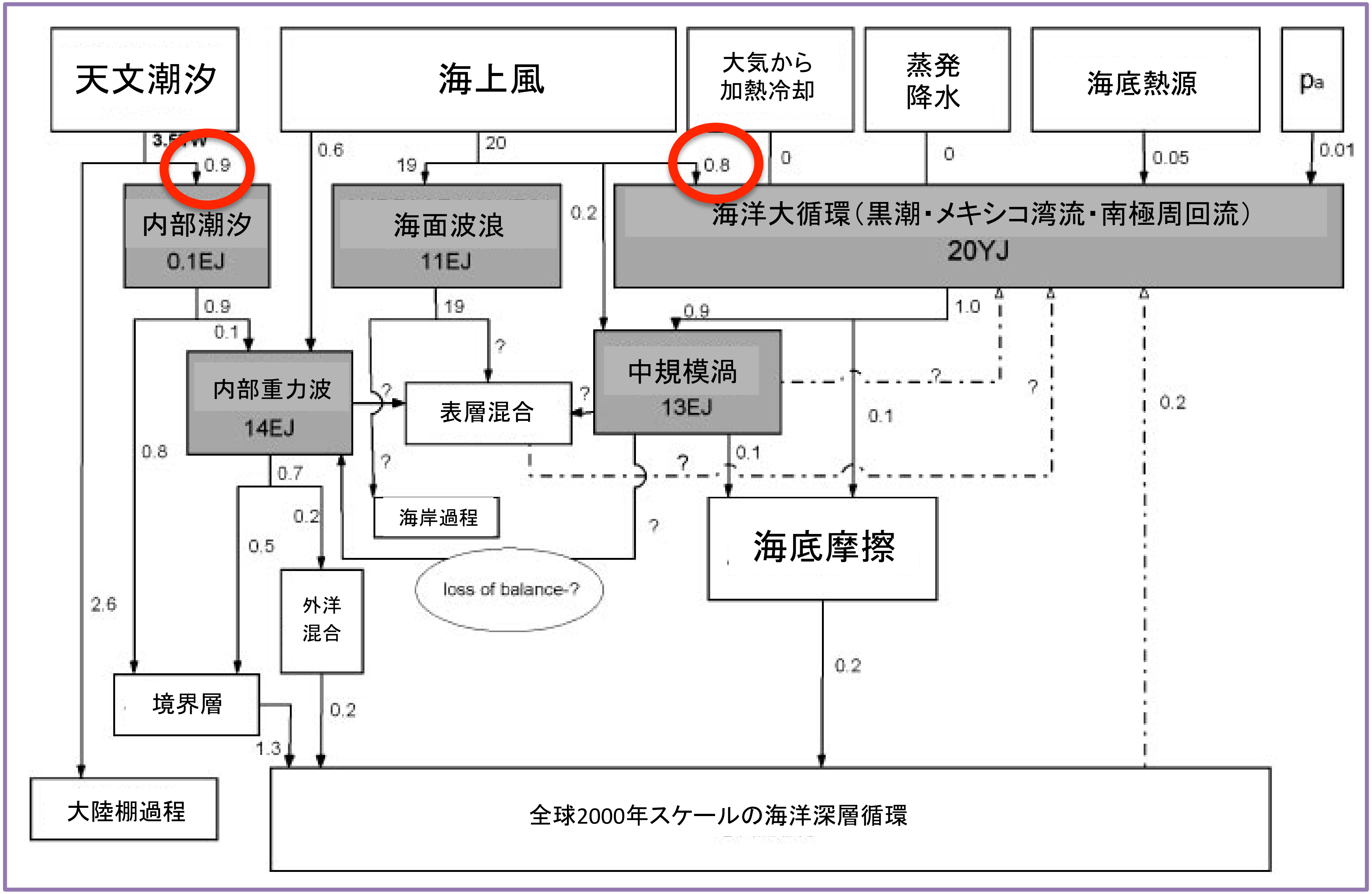


海洋のプロセス毎の全球エネルギー収支

YJ=10^{24}J=ヨッタジュール
EJ=10^{18}J=イクサジュール

TW=10^{12}W=テラワット

Wunsch and Ferrari, 2004 ARFM

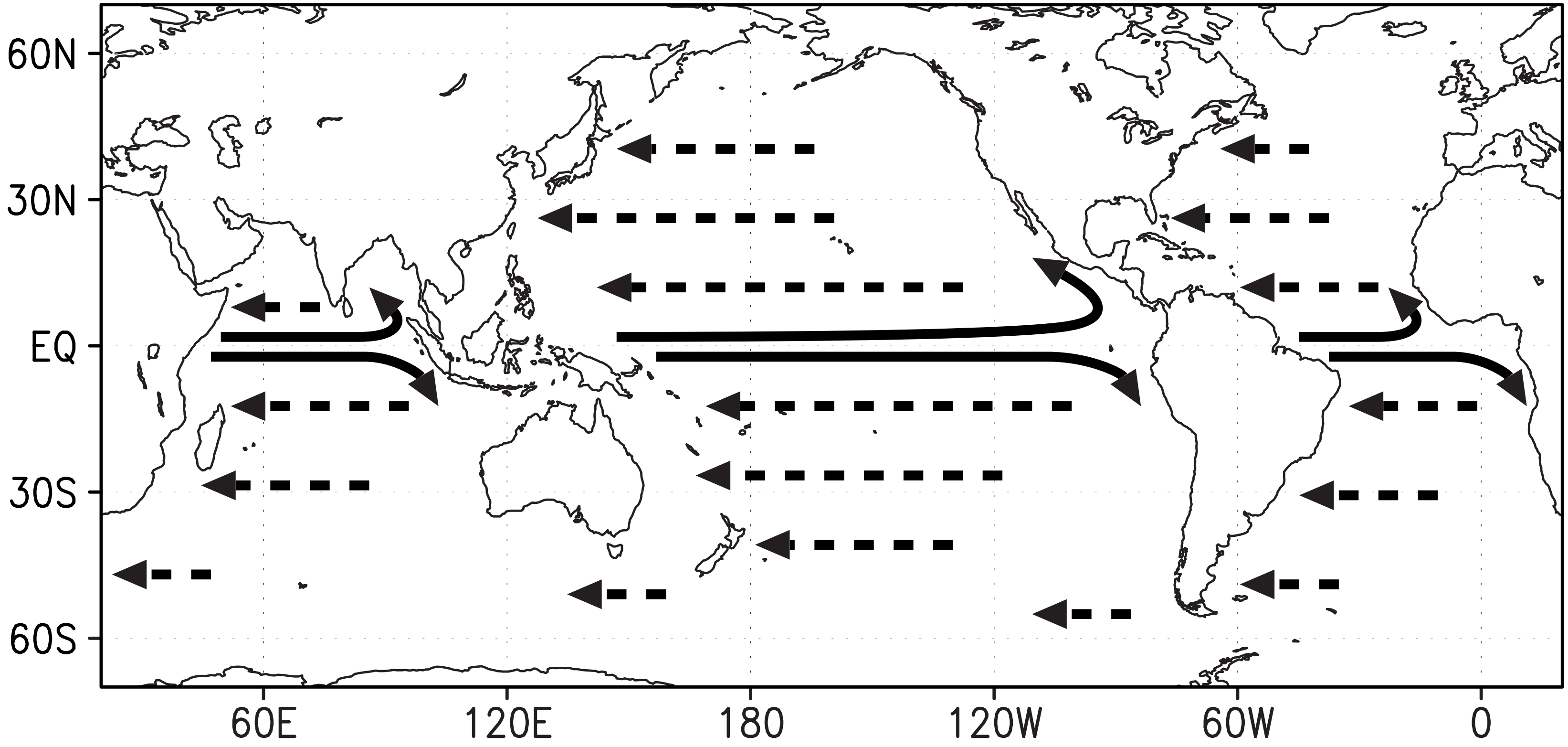


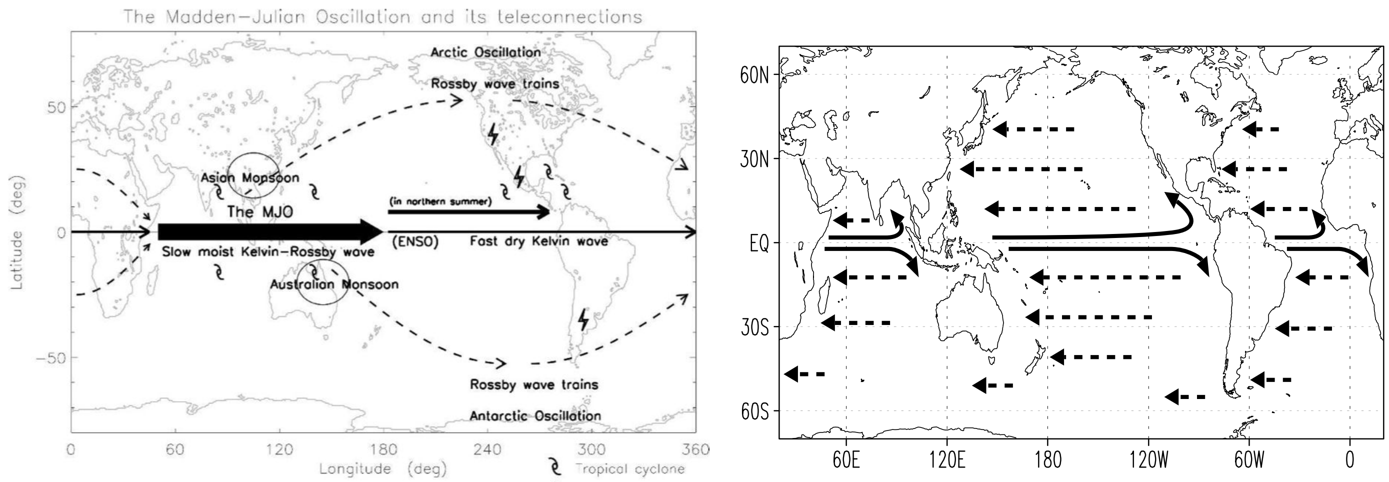
過去20年間のモデル診断研究：どこで擾乱が励起・減衰するのか？

- エネルギー変換率の全球分布の診断

将来のモデル診断研究：どこからどこへ「何が」擾乱を運ぶのか？

- 慣性重力波のエネルギーフラックスはモデル診断研究が豊富
- 中緯度惑星波や赤道波のエネルギーフラックスはあまり研究されていない





Lin et al. (2006)

図１：大気（左）と海洋（右）における長周期波動によるエネルギー伝達の連環と熱帯−中緯度相互作用の模式図.

大気と海洋の様々な長周期（季節内～季節間スケール）波動は熱帯域の気候変動現象(MJO/ENSO/IOD)の発達・終息において重要な役割を担う

これらの波動を解析する際に従来の準地衡流近似に基づく診断理論は中緯度域と熱帯域の接続を整合的に取り扱えないという問題があった

A/OGCMの出力から群速度ベクトルを計算するための診断表式

	Plumb (1986), Takaya & Nakamura (2001) の系列	Orlanski & Sheldon (1993) の系列
対象	波活動度（擬運動量）	エネルギー
定量的解析	不適	適
中緯度ロスビー波	○	○
中緯度慣性重力波	×	×
全ての種類の赤道波	×	×
中緯度と熱帯の接続	×	×
海岸線境界条件	×	×
前処理	必要なし	必要なし
フラックスの診断式	$\left\langle E-\overline{v'v'}, \overline{v'u'} \right\rangle$	$\overline{\mathbf{u}'p'} + \nabla \times [\overline{p'p'}\mathbf{z}/(2f)]$

表１：A/OGCMのアウトプットから群速度ベクトルを計算するための診断式の比較.

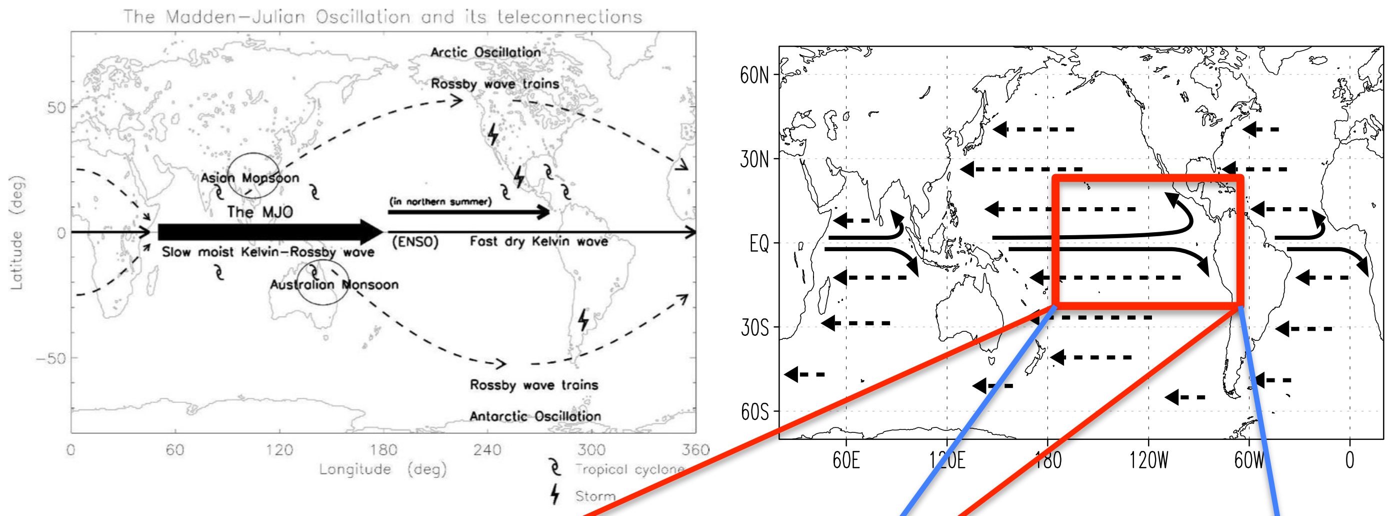


図１：大気（左）と海洋（右）における長周期波動によるエネルギー伝達の連環と熱帯–中緯度相互作用の模式図. 左図はLin et al. (2006) より転載. 上記のイラスト的に描かれた矢印を図２bのようなモデル解析結果におきかえて応用研究を展開するのが本研究の目的である.

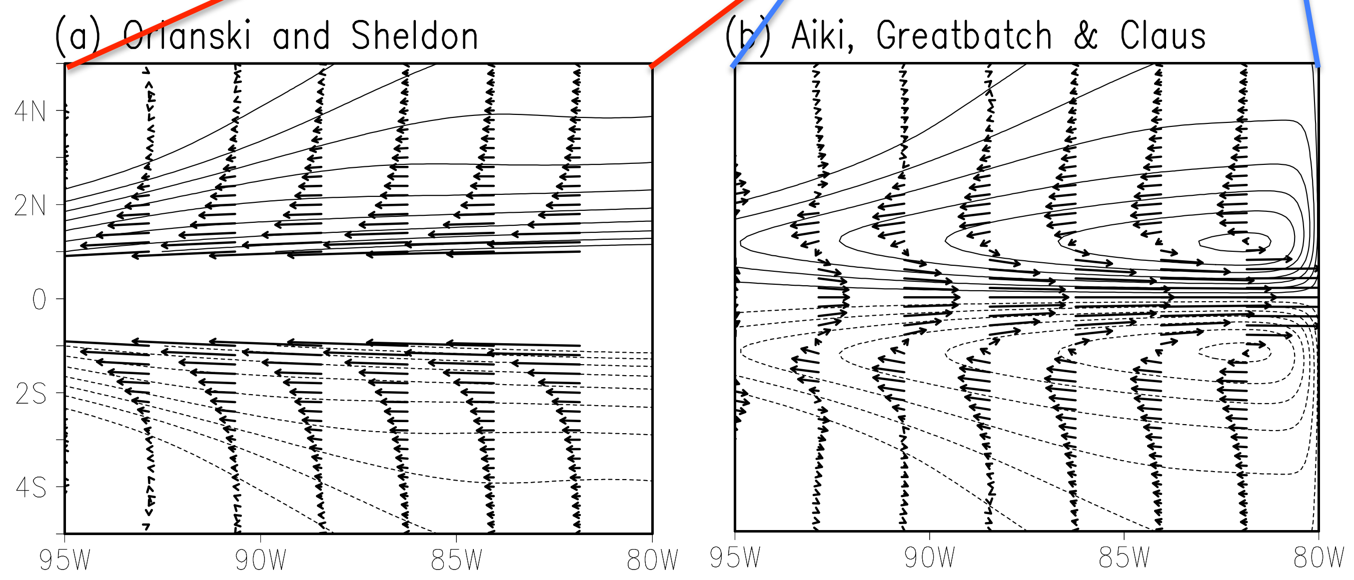


図２：熱帯海洋の理想実験でエネルギーフラックス（群速度ベクトル）を見積もった結果（西経80度が東岸）. (a) 従来の診断式を用いた場合（赤道近傍は適用不可）. (b) 新しい診断式を用いた場合（本研究で使用予定）.

Aiki et al. (2017, PEPS)によってエネルギーフラックスの診断式のブレークスルーがもたらされた。これは大気海洋中の擾乱エネルギーのライフサイクル(発達・伝達・消散過程)を緯度帯の制限なくトレースするための強力なツールである。

これによって擾乱エネルギーの流れを可視化して定性的に理解するだけでなく、厳密な定量化により各力学過程の最重要なものを明確化することができる。

熱帯と中緯度の波動をその相互作用も含めて連続的にトレースすることで、熱帯の主要な気候変動イベントの発達・終息メカニズムを解明する。

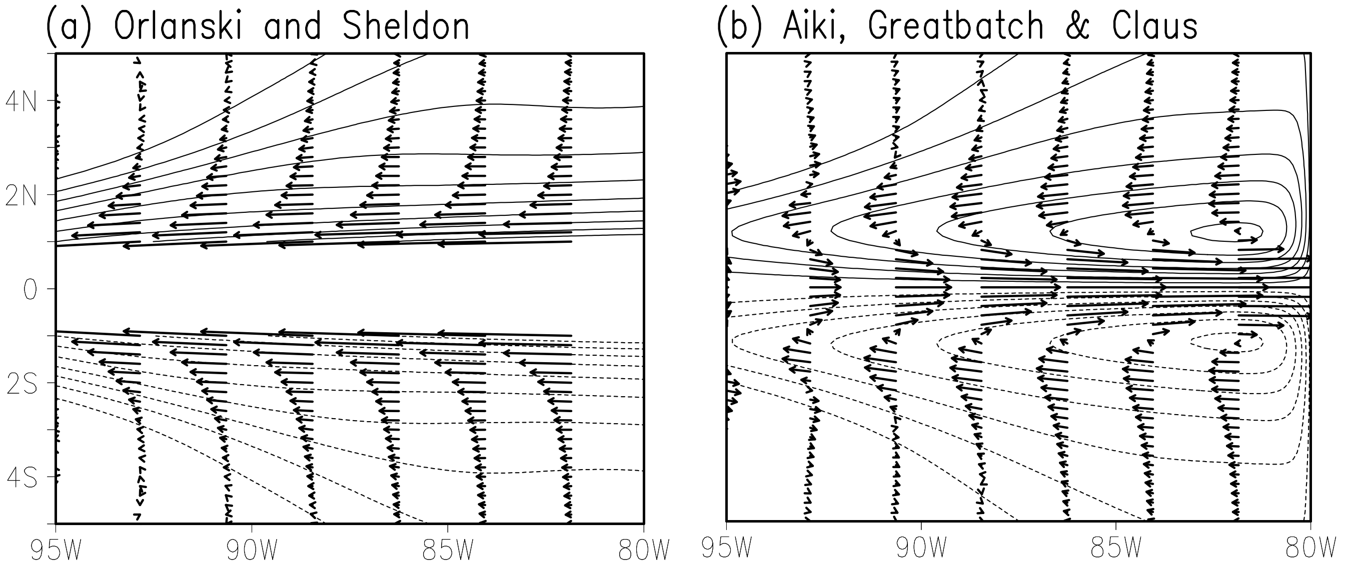


図２：熱帯海洋の理想実験でエネルギーフラックス（群速度ベクトル）を見積もった結果（西経80度が東岸）．(a) 従来の診断式を用いた場合（赤道近傍は適用不可）．(b) 新しい診断式を用いた場合（本研究で使用予定）．

線形中立波
(平均流なし1層)

$$u'_t - fv' + p'_x = 0$$
$$v'_t + fu' + p'_y = 0$$
$$p'_t + c^2(u'_x + v'_y) = 0$$

$$E \equiv [u'^2 + v'^2 + (p'/c)^2]/2$$
$$q' \equiv v'_x - u'_y - (f/c^2)p'$$

中緯度慣性重力波についての群速度×エネルギーの診断式

$$\partial_t \overline{E} + \nabla \cdot \langle\!\langle \overline{u'p'}, \overline{v'p'} \rangle\!\rangle = 0$$

回転成分が
謎めいた表現

(赤道域で破綻)

中緯度惑星波についての群速度×エネルギーの診断式 (Orlanski and Sheldon, 1993 JAS)

$$\partial_t \overline{E} + \nabla \cdot \langle\!\langle \overline{u'p'} + [\overline{p'^2}/(2f)]_y, \overline{v'p'} - [\overline{p'^2}/(2f)]_x \rangle\!\rangle = 0$$

中緯度と赤道域のすべての中立波 (Aiki et al. 2017 PEPS)

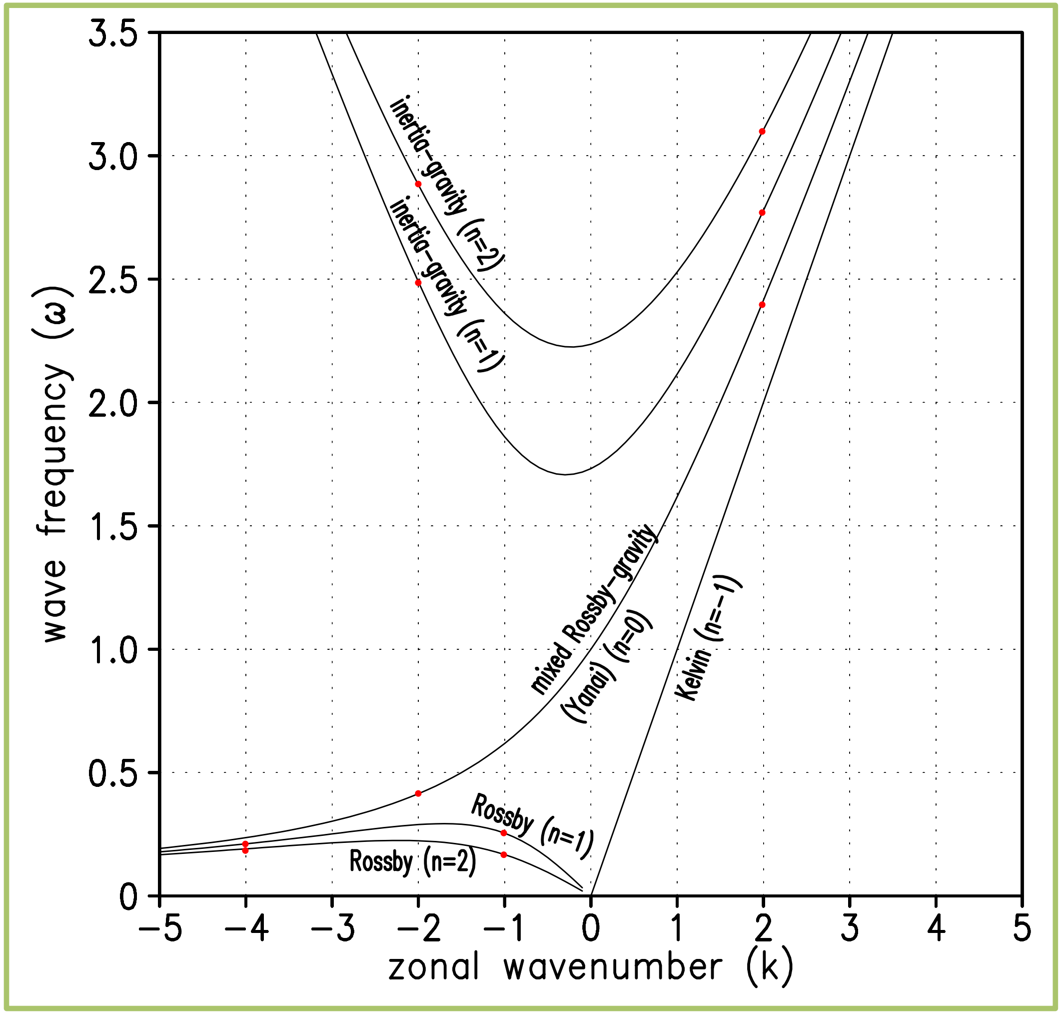
$$\nabla^2\varphi - (f/c)^2\varphi - (3/c^2)\varphi_{tt} = q'$$
$$\partial_t \overline{E} + \nabla \cdot \langle\!\langle \underbrace{\overline{u'p'} + (\overline{p'\varphi}/2 + \overline{u'_{tt}\varphi}/\beta)_y, \overline{v'p'} - (\overline{p'\varphi}/2 + \overline{u'_{tt}\varphi}/\beta)_x}_{=c_g \overline{E}} \rangle\!\rangle = 0$$

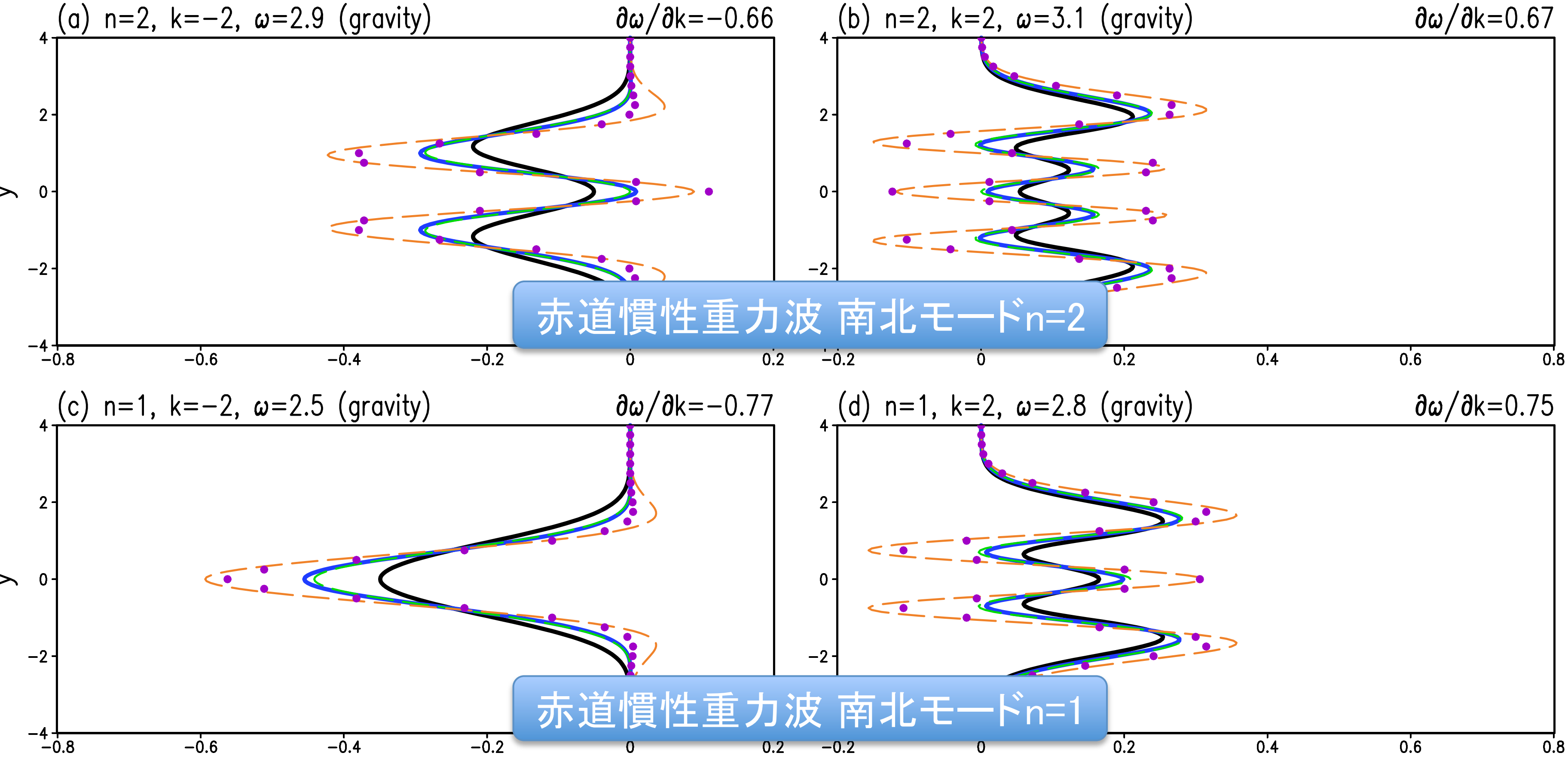
A/OGCMの出力から群速度ベクトルを計算するための診断表式

	Plumb (1986), Takaya & Nakamura (2001)の系列	Orlanski & Sheldon (1993)の系列	Aiki et al. (2017)
対象	波活動度（擬運動量）	エネルギー	エネルギー
定量的解析	不適	適	適
中緯度ロスビー波	○	○	○
中緯度慣性重力波	×	×	○
全ての種類の赤道波	×	×	○
中緯度と熱帯の接続	×	×	○
海岸線境界条件	×	×	○
前処理	必要なし	必要なし	Ertel渦位のインバージョン
フラックスの診断式	$\left\langle E-\overline{v'v'},\overline{v'u'}\right\rangle$	$\overline{\boldsymbol{u}'p'}+\nabla\times[\overline{p'p'}z/(2f)]$	$\overline{\boldsymbol{u}'p'}+\nabla\times(\overline{p'\varphi'}z/2)$

表1：A/OGCMのアウトプットから群速度ベクトルを計算するための診断式の比較．Eは波のエネルギー，φはErtel渦位のインバージョン（逆計算）によって得られる流線関数を表す．

各種赤道波の分散関係式





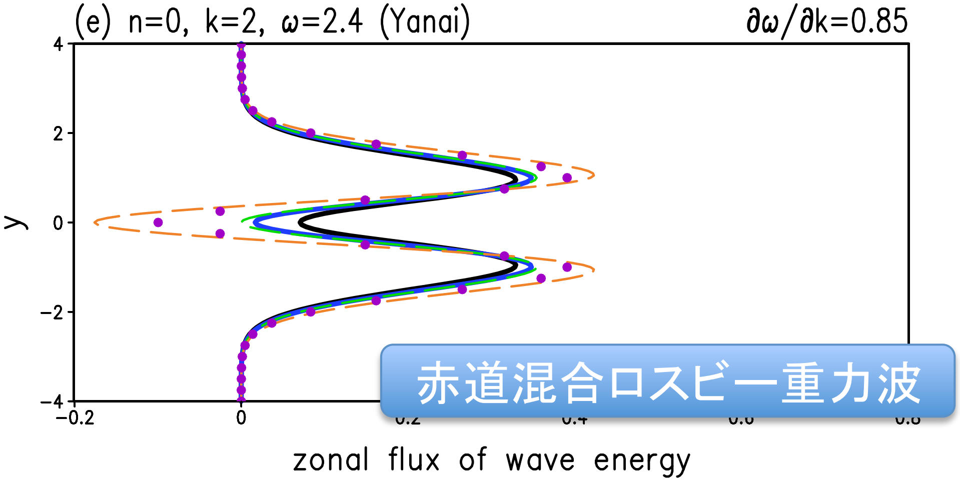
$$\int_{-\infty}^{+\infty} c_g \overline{E}\ dy$$ 群速度×エネルギー（知りたい情報）

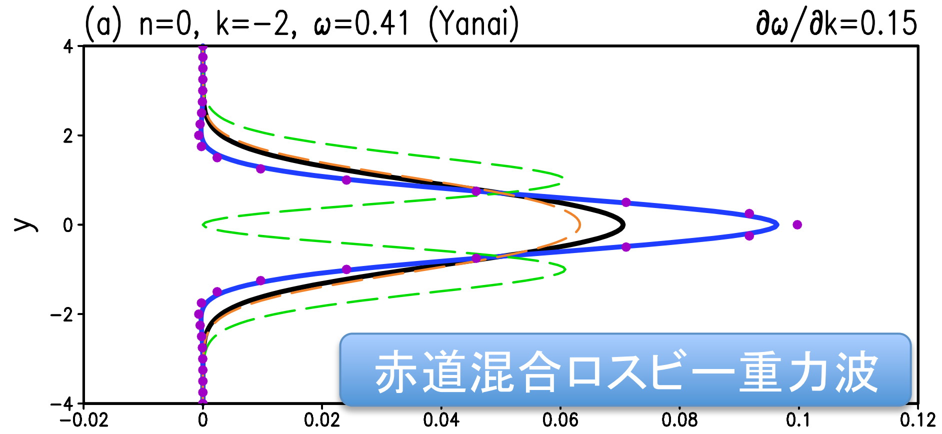
$$= \int_{-\infty}^{+\infty} \overline{u'p'}\ dy$$ 圧力フラックス

$$= \int_{-\infty}^{+\infty} [\overline{u'p'} + (\overline{p'\varphi^{app}}/2 + \overline{u'_{tt}\varphi^{app}}/\beta)_y]\ dy$$ 暫定

$$= \int_{-\infty}^{+\infty} [\overline{u'p'} + (\overline{p'\varphi^{app}}/2)_y]\ dy$$ 推奨近似式

Plumb/Miyaharaフラックス





群速度×エネルギー（知りたい情報）

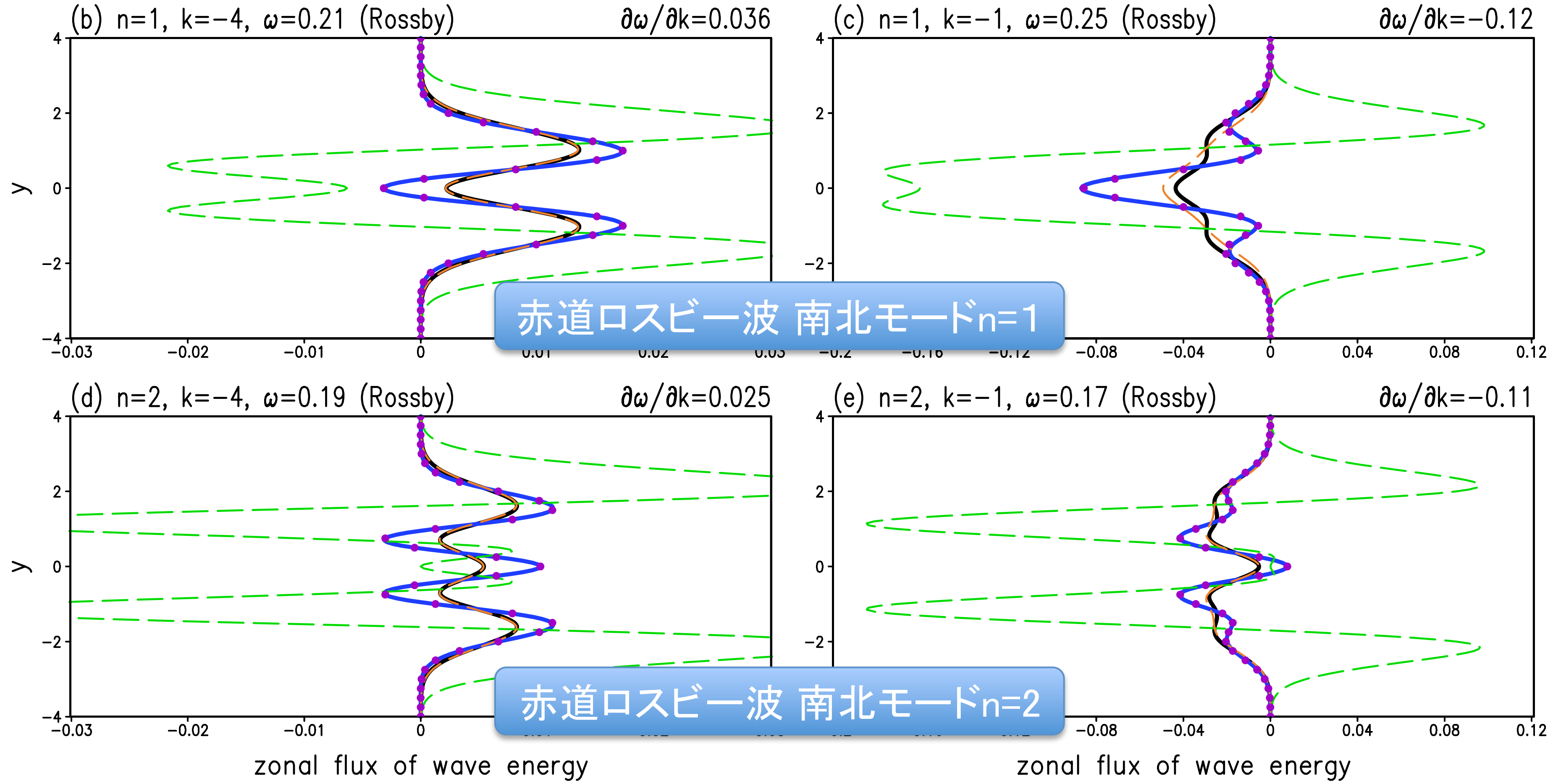
$$\int_{-\infty}^{+\infty} c_g \overline{E}\, dy$$

$$= \int_{-\infty}^{+\infty} \overline{u'p'}\, dy$$ 圧力フラックス

$$= \int_{-\infty}^{+\infty} [\overline{u'p'} + (\overline{p'\varphi^{app}}/2 + \overline{u'_{tt}\varphi^{app}}/\beta)_y]\, dy$$ 暫定

$$= \int_{-\infty}^{+\infty} [\overline{u'p'} + (\overline{p'\varphi^{app}}/2)_y]\, dy$$ 推奨近似式

Plumb/Miyaharaフラックス



1.5層海洋モデルを用いた表層季節波動のライフサイクル解析

$$u'_t - fv' + p'_x = \alpha^{(n)} \frac{\tau^x}{\rho_0 \sqrt{h_{mix} H_{bottom}}}$$

$$v'_t + fu' + p'_y = \alpha^{(n)} \frac{\tau^y}{\rho_0 \sqrt{h_{mix} H_{bottom}}}$$

$$p'_t + \left(c^{(n)}\right)^2 \left(u'_x + v'_y\right) = 0$$

水平渦粘性はSmagorinskyスキーム

外力：ERA40の風速から作った風応力の
月別気候値から年平均値を引いたもの

定常場はスベルドラップ理論や
Luyten-Pedlosky-Stommel理論などで
別途独立に説明されていると仮定

海洋：傾圧第１、２、３モードの浅水方程式
モード分解: Wold Ocean Atlas 熱帯インド洋年平均気候値

各傾圧モードへの風外力の配分
混合層深さ 45.5m（ARGO年平均気候値）
水深 4100m

$$c^{(1)} = 2.63m/s \qquad \alpha^{(1)} = 0.39$$

$$c^{(2)} = 1.57m/s \qquad \alpha^{(2)} = 0.41$$

$$c^{(3)} = 0.95m/s \qquad \alpha^{(3)} = 0.27$$

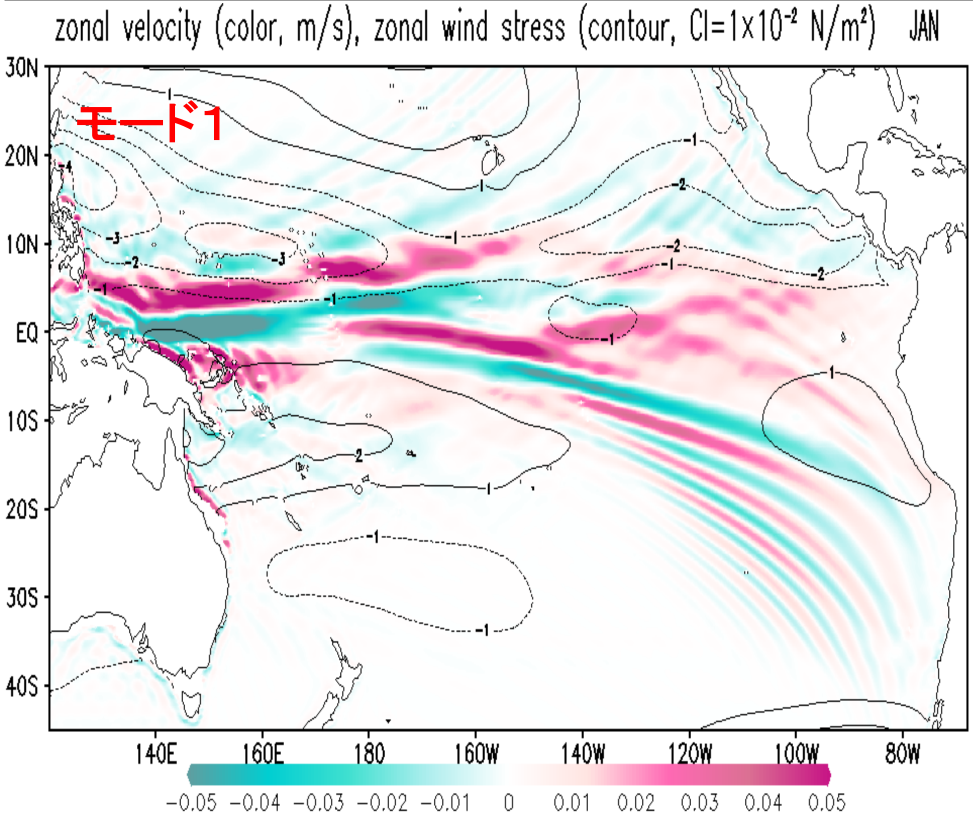
地形：実際の海岸線

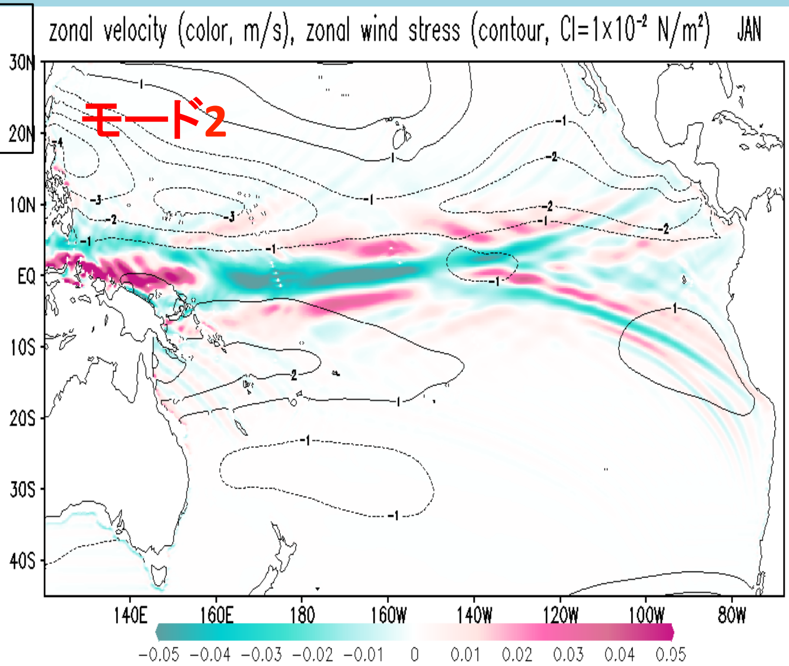
積分期間：２０年

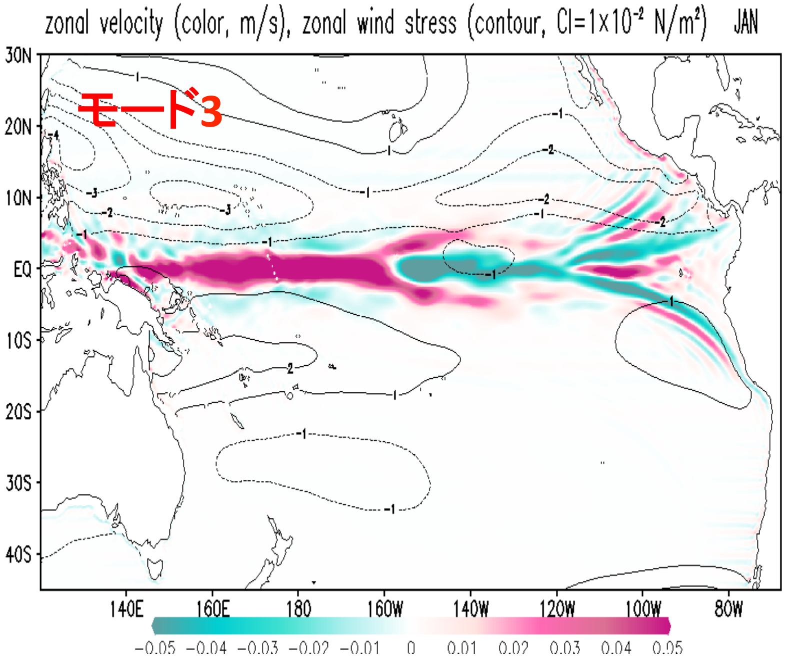
解析：最後の１年の年内変動シグナルを波動とみなして１年平均

実験結果（各傾圧モードについて個別に実施）

カラー：東西流速
コンター：東西風応力（実線が正、破線が負）

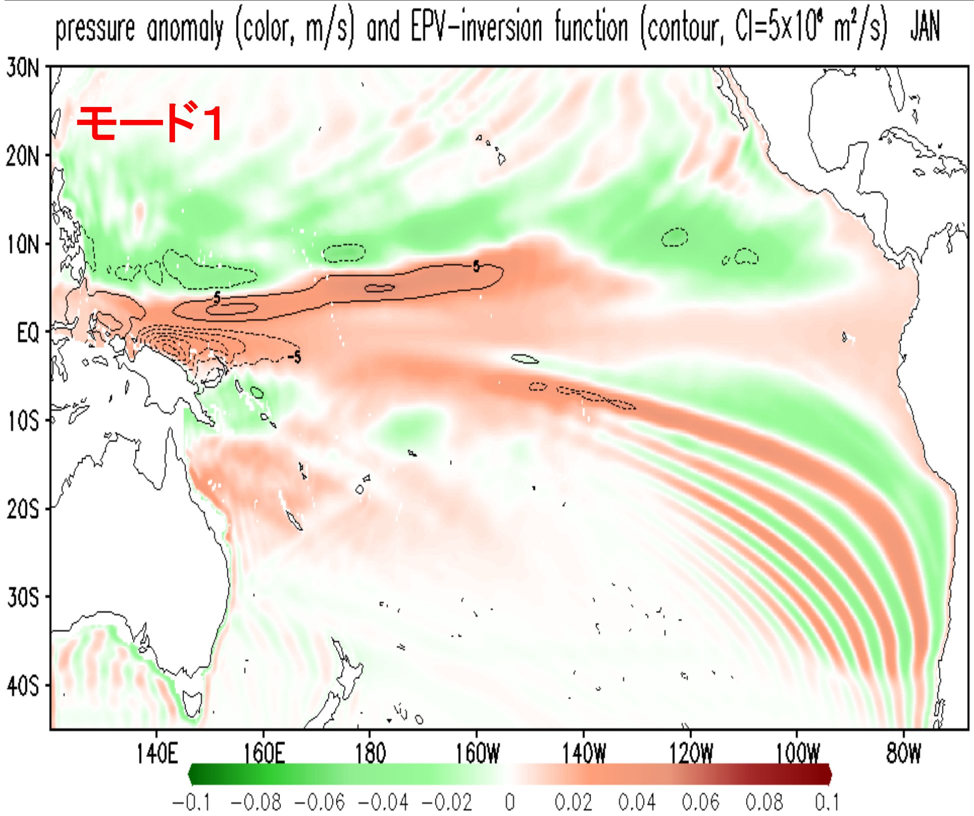


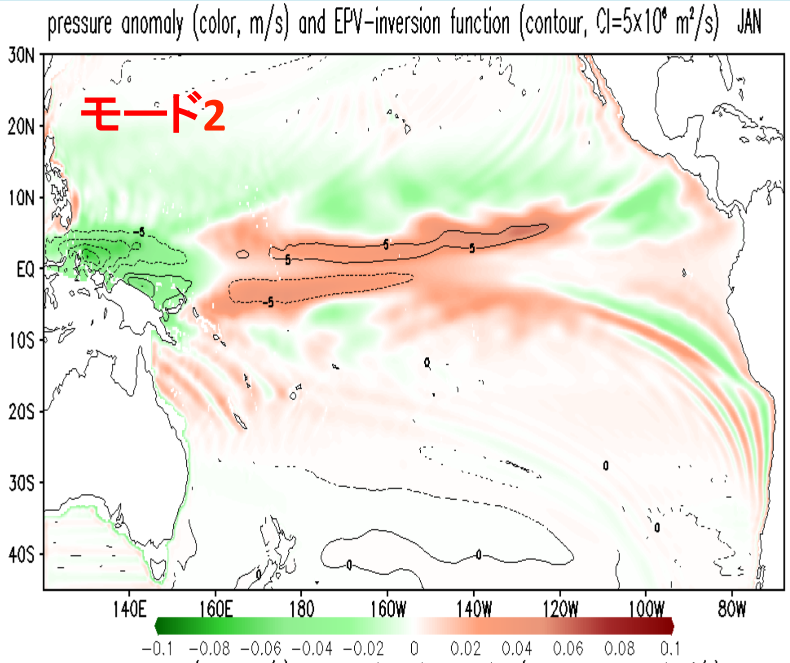


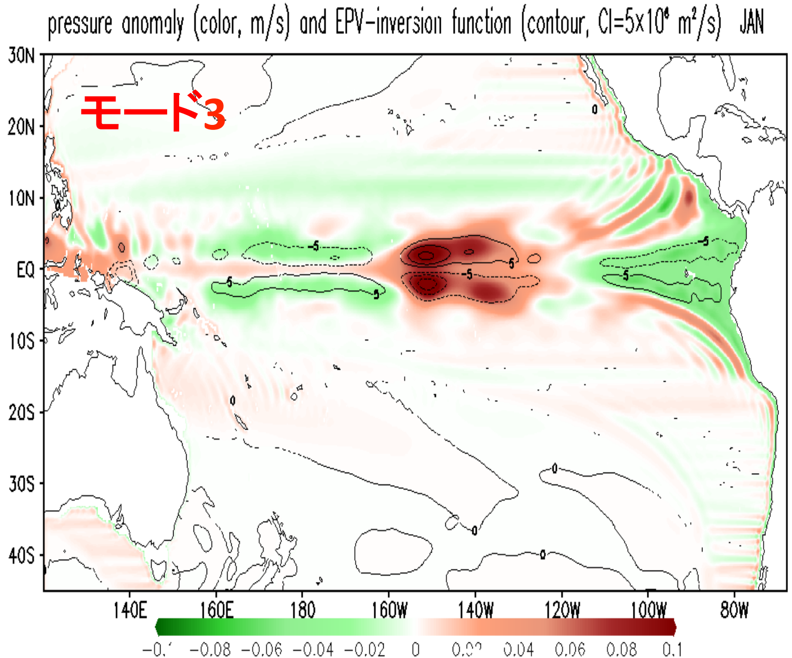


実験結果（各傾圧モードについて個別に実施）

カラー：圧力偏差（層厚偏差）
コンター：流線関数（実線が正、破線が負）







線形中立波
(平均流なし1層)

$$u'_t - fv' + p'_x = 0$$
$$v'_t + fu' + p'_y = 0$$
$$p'_t + c^2(u'_x + v'_y) = 0$$

$$E \equiv [u'^2 + v'^2 + (p'/c)^2]/2$$
$$q' \equiv v'_x - u'_y - (f/c^2)p'$$

中緯度慣性重力波についての群速度×エネルギーの診断式

$$\partial_t \overline{E} + \nabla \cdot \langle\langle \overline{u'p'}, \overline{v'p'} \rangle\rangle = 0$$

回転成分が
謎めいた表現

（赤道域で破綻）

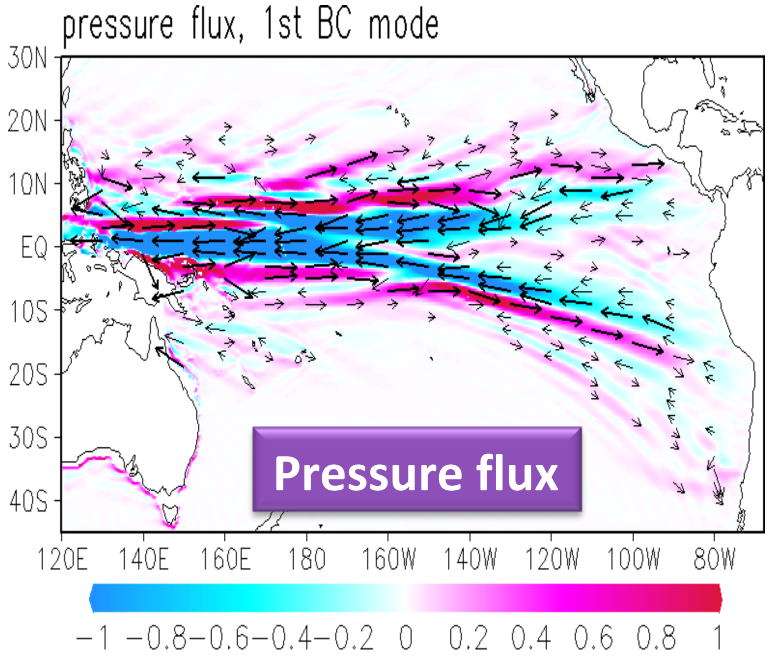
中緯度惑星波についての群速度×エネルギーの診断式 (Orlanski and Sheldon, 1993 JAS)

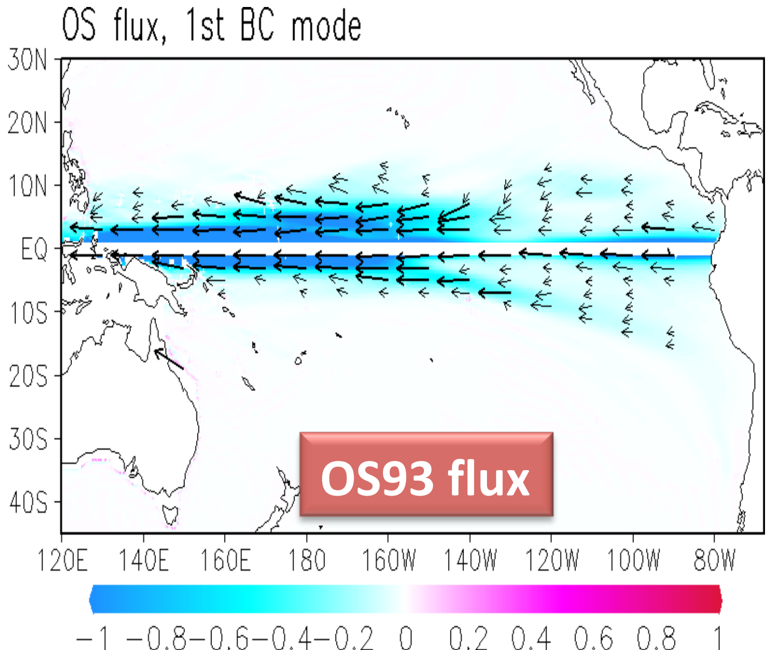
$$\partial_t \overline{E} + \nabla \cdot \langle\langle \overline{u'p'} + [\overline{p'^2}/(2f)]_y, \overline{v'p'} - [\overline{p'^2}/(2f)]_x \rangle\rangle = 0$$

中緯度と赤道域のすべての中立波 (Aiki et al. 2017 PEPS)

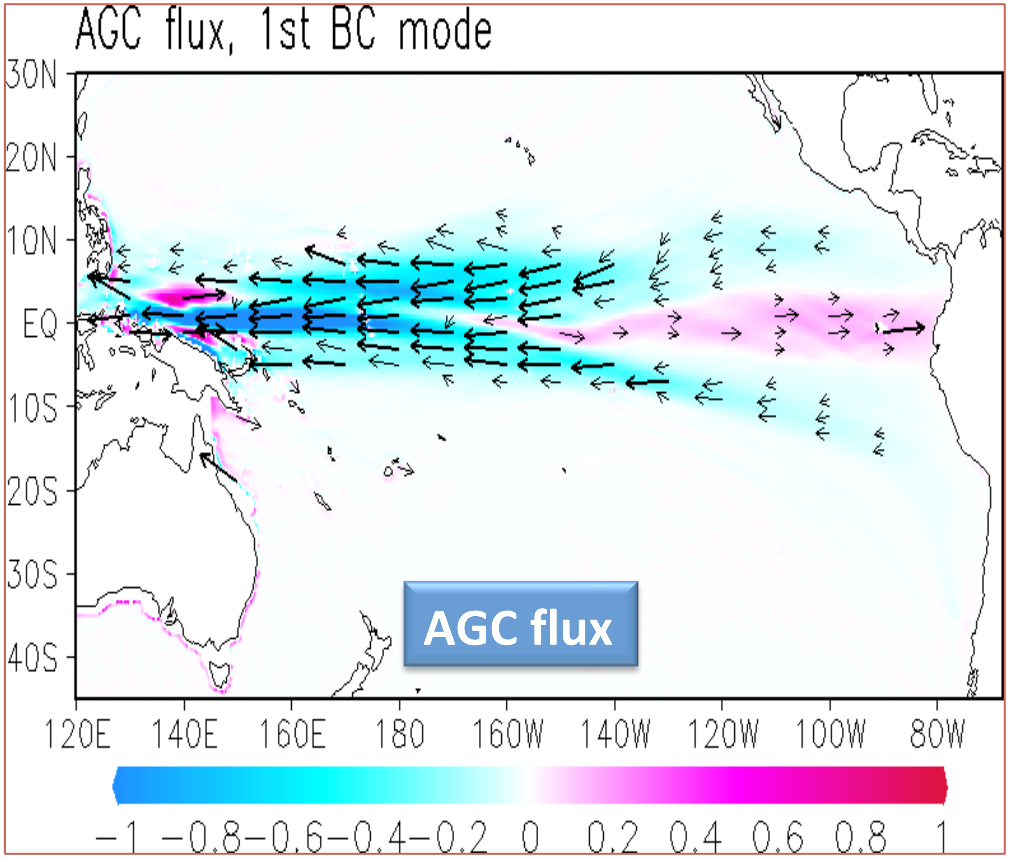
$$\nabla^2\varphi - (f/c)^2\varphi - (3/c^2)\varphi_{tt} = q'$$
$$\partial_t \overline{E} + \nabla \cdot \langle\langle \underbrace{\overline{u'p'} + (\overline{p'\varphi}/2 + \overline{u'_{tt}\varphi}/\beta)_y, \overline{v'p'} - (\overline{p'\varphi}/2 + \overline{u'_{tt}\varphi}/\beta)_x}_{=c_g\overline{E}} \rangle\rangle = 0$$

解析結果（従来のスキームとの比較）





カラー：エネルギーフラックスの東西成分
ベクトル：エネルギーフラックスの大きさと向き



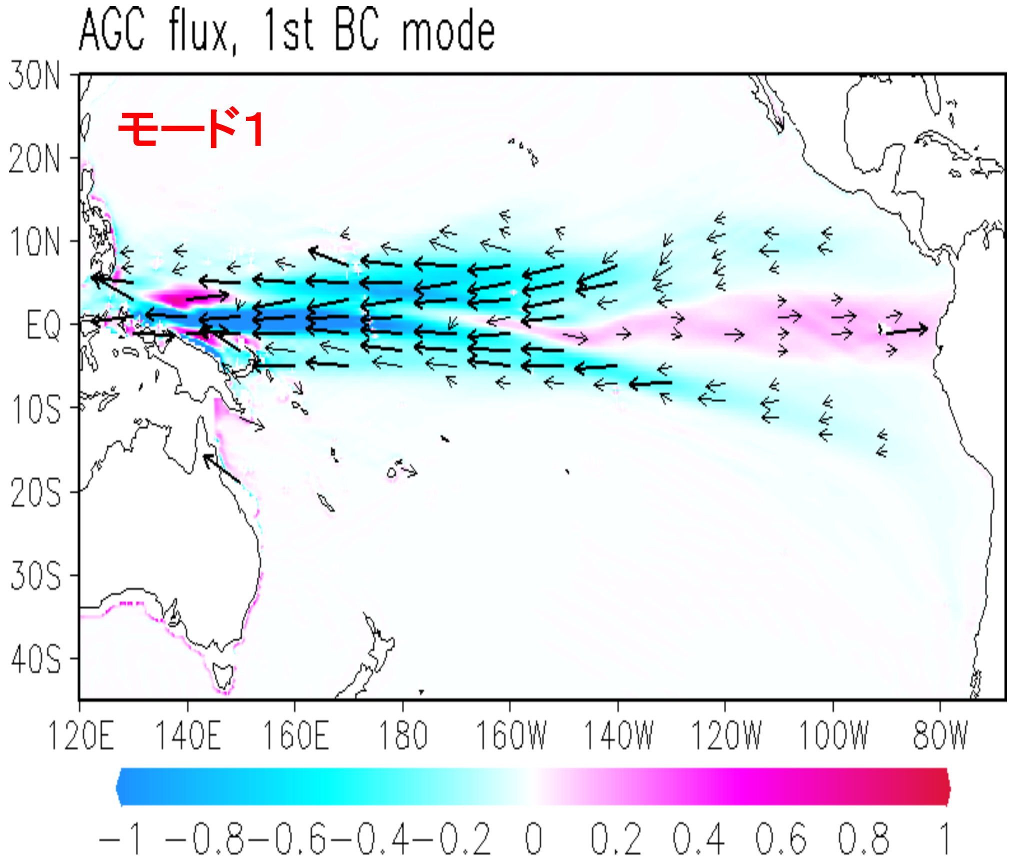
左の図は従来の診断スキーム、右がAiki et al. 2017の診断スキーム

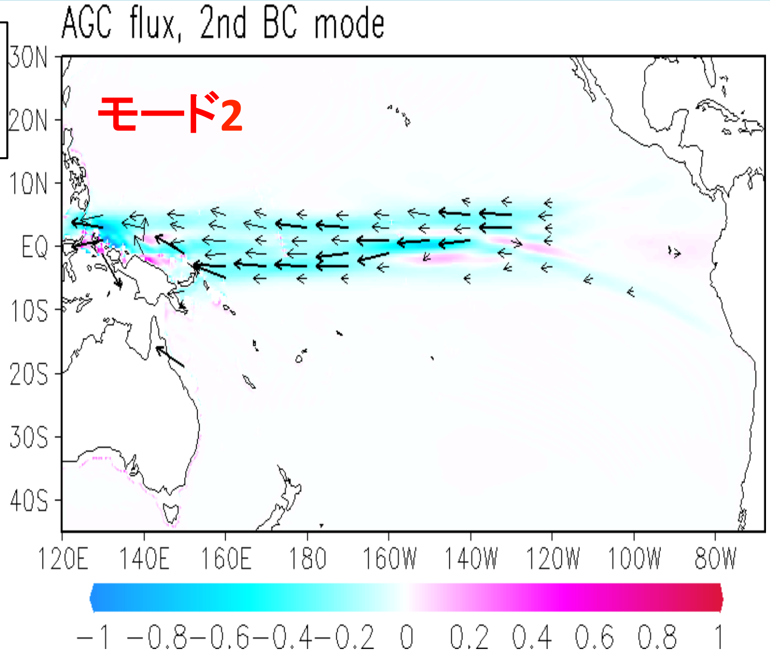
単位はW/m^2

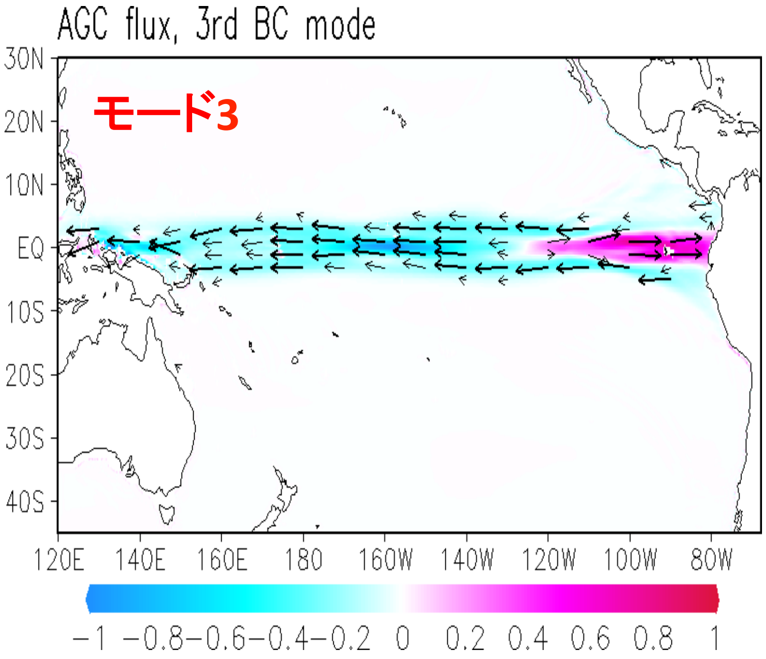
0.2 W/m^{2}以上のベクトルは太くし、長さを統一

解析結果

カラー：エネルギーフラックスの東西成分
ベクトル：エネルギーフラックスの大きさと向き





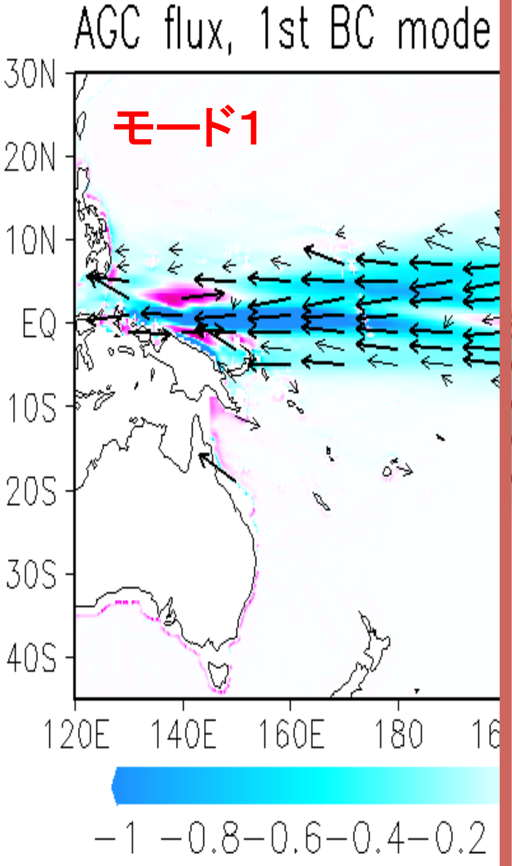


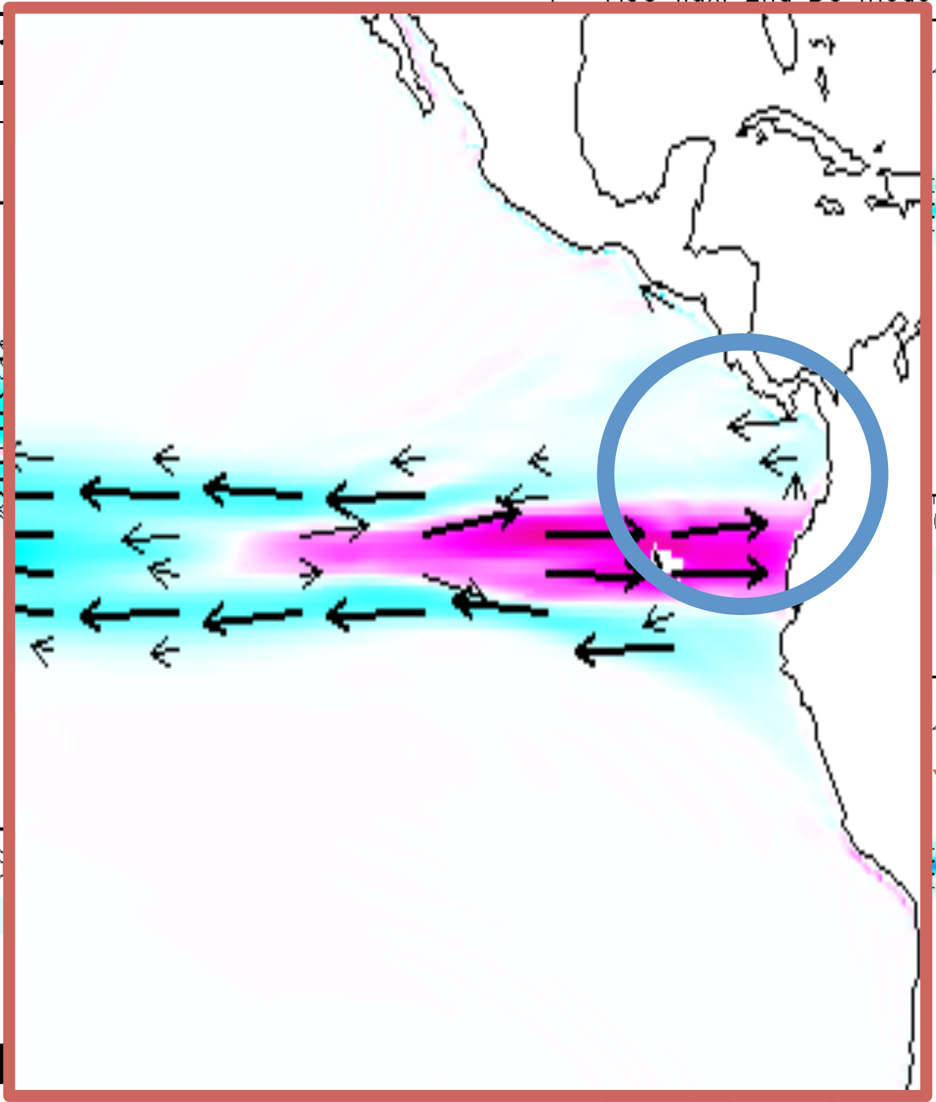
第3モードで強い東向きエネルギーフラックス

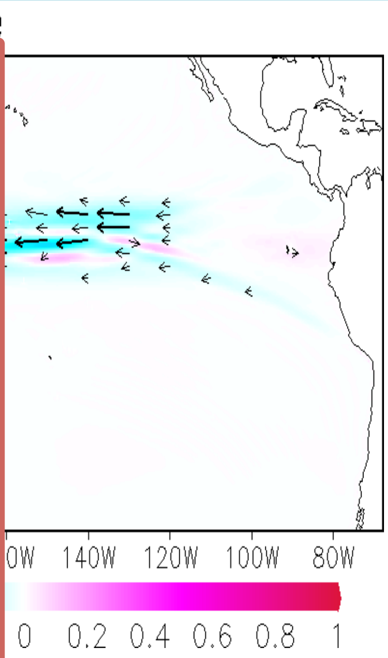
単位はW/m^2
0.2 W/m^2以上のベクトルは太くし、長さを統一

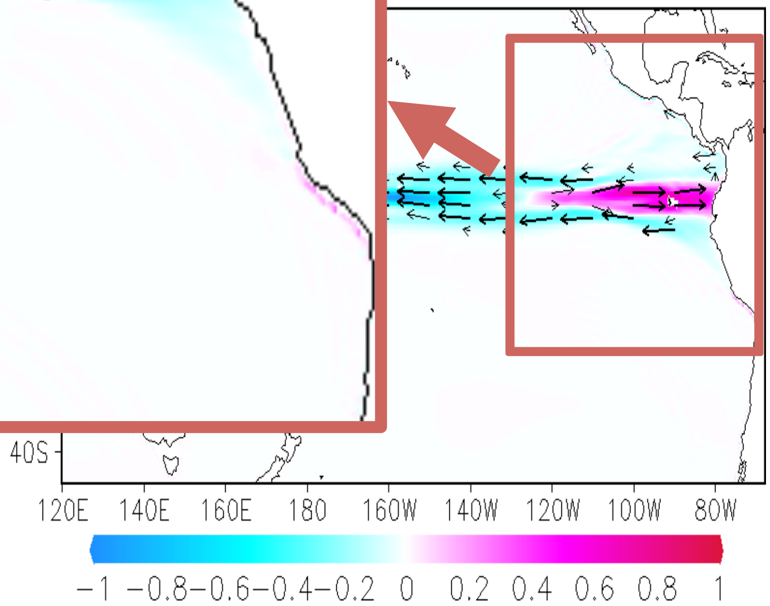
解析結果

カラー：エネルギー
ベクトル：エネルギー





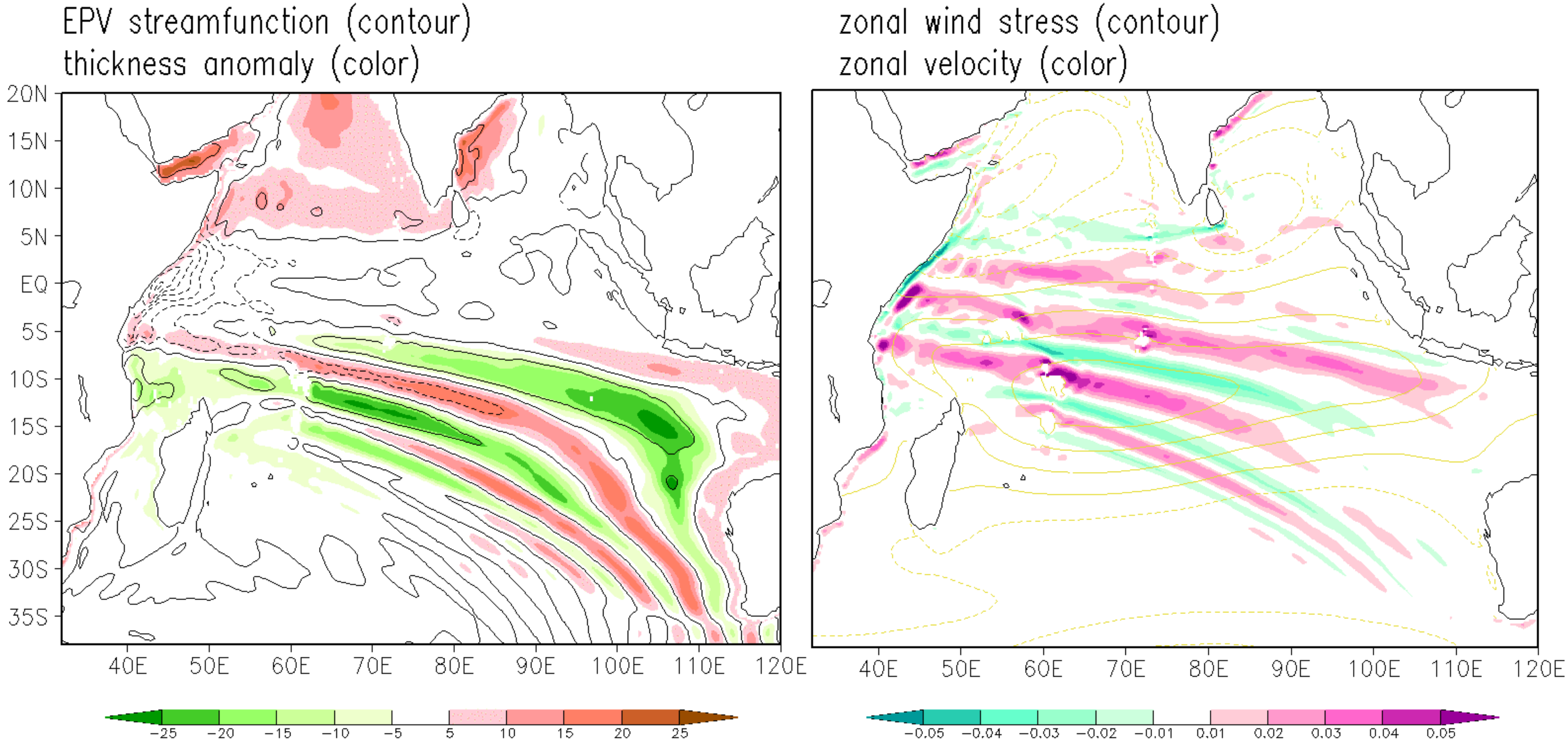




第3モードで強い東向

単位はW/m²
0.2 W/m²以上のベクトルは太くし、長さを統一

実験結果(積分20年目)

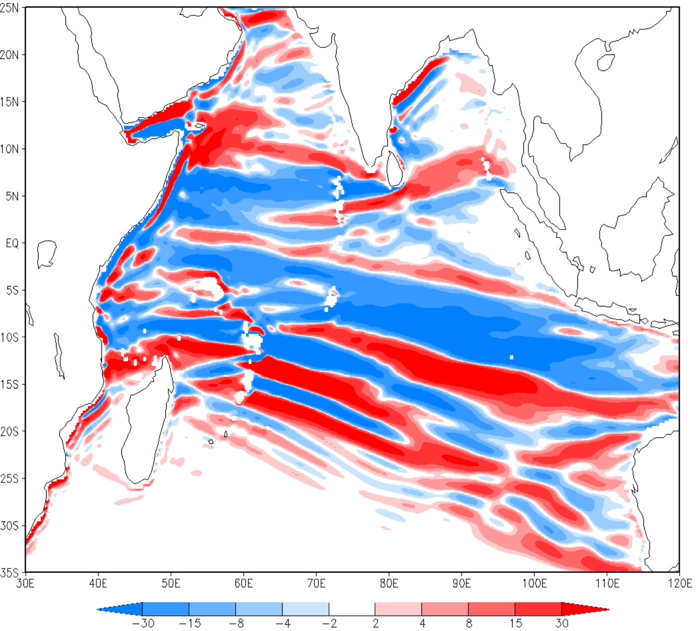


$$\nabla^2\varphi - (f/c)^2\varphi - (3/c^2)\varphi_{tt} = q'$$

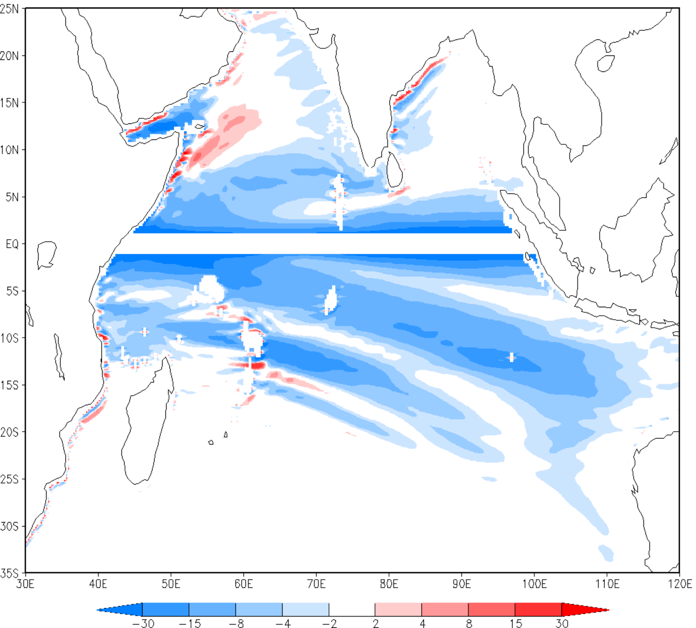
解析結果（波相関量の年平均）

色：エネルギーフラックス（群速度ベクトル）の東西成分
矢印：AGC17に基づくエネルギーフラックス

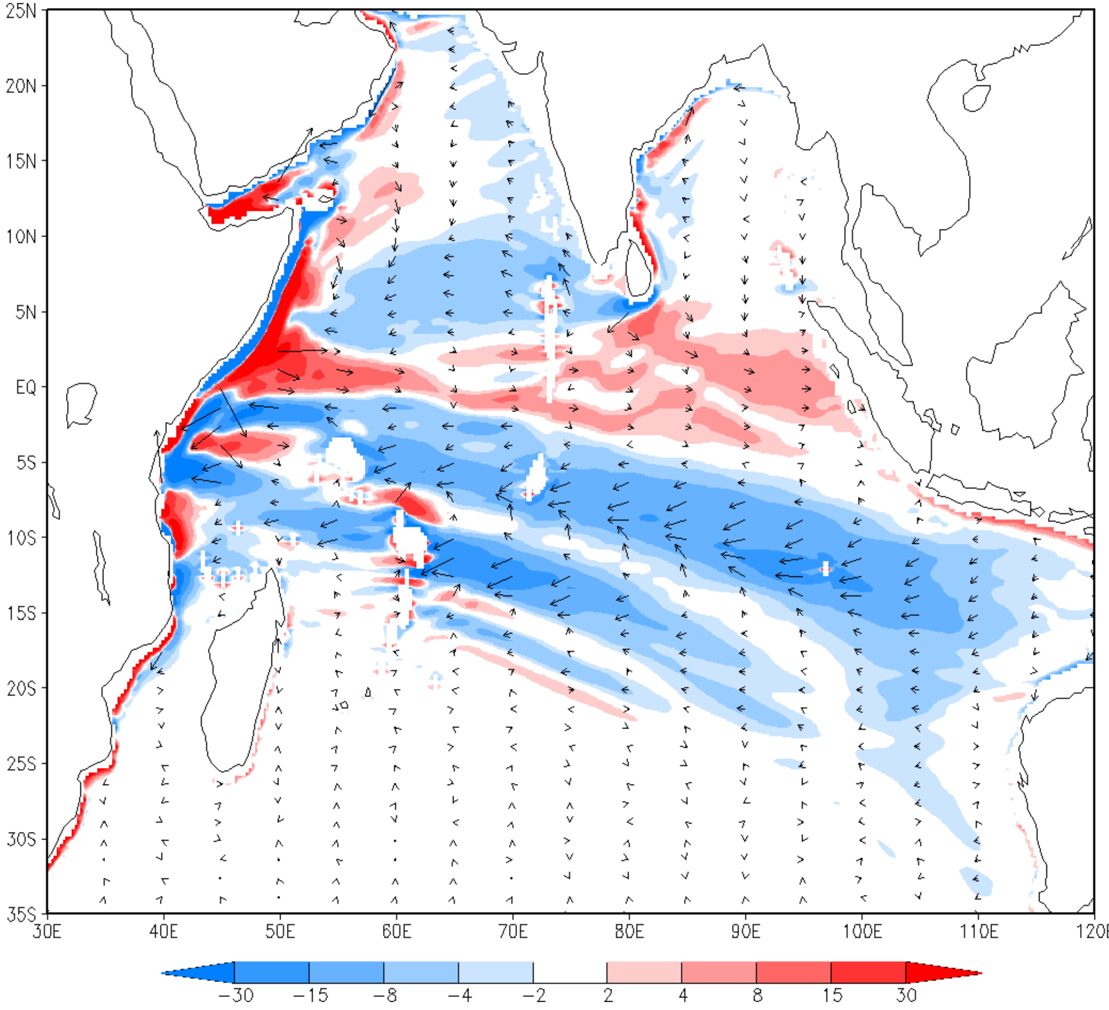
圧力フラックス



Orlanski and Sheldonフラックス



Aiki, Greatbatch and Clausフラックス



線形中立波
(平均流なし1層)

$$u'_t - fv' + p'_x = 0$$
$$v'_t + fu' + p'_y = 0$$
$$p'_t + c^2(u'_x + v'_y) = 0$$

$$E \equiv [u'^2 + v'^2 + (p'/c)^2]/2$$
$$q' \equiv v'_x - u'_y - (f/c^2)p'$$

中緯度慣性重力波についての群速度×エネルギーの診断式

$$\partial_t \overline{E} + \nabla \cdot \langle\langle \overline{u'p'}, \overline{v'p'} \rangle\rangle = 0$$

回転成分が
謎めいた表現

(赤道域で破綻)

中緯度惑星波についての群速度×エネルギーの診断式 (Orlanski and Sheldon, 1993 JAS)

$$\partial_t \overline{E} + \nabla \cdot \langle\langle \overline{u'p'} + [\overline{p'^2}/(2f)]_y, \overline{v'p'} - [\overline{p'^2}/(2f)]_x \rangle\rangle = 0$$

中緯度と赤道域のすべての中立波 (Aiki et al. 2017 PEPS)

$$\nabla^2\varphi - (f/c)^2\varphi - (3/c^2)\varphi_{tt} = q'$$
$$\partial_t \overline{E} + \nabla \cdot \langle\langle \underbrace{\overline{u'p'} + (\overline{p'\varphi}/2 + \overline{u'_{tt}\varphi}/\beta)_y, \overline{v'p'} - (\overline{p'\varphi}/2 + \overline{u'_{tt}\varphi}/\beta)_x}_{= c_g \overline{E}} \rangle\rangle = 0$$

Aiki et al. 2017 PEPS

波のエネルギーの水平伝達経路を群速度に基づいて気候学的に同定するには？

フーリエ解析やレイの式に頼らない「モデル診断手法」の提案

ー赤道導波管と東岸導波管の接続問題（熱帯亜熱帯相互作用）にも適用可ー

中緯度慣性重力波についての群速度×エネルギーの診断式

$$\partial_t \overline{E} + \nabla \cdot \langle\langle \overline{u'p'}, \overline{v'p'} \rangle\rangle = 0$$

回転成分が謎めいた表現

（赤道域は無理）

中緯度惑星波についての群速度×エネルギーの診断式 (Orlanski and Sheldon, 1993 JAS)

$$\partial_t \overline{E} + \nabla \cdot \langle\langle \overline{u'p'} + [\overline{p'^2}/(2f)]_y, \overline{v'p'} - [\overline{p'^2}/(2f)]_x \rangle\rangle = 0$$

本研究：各種赤道波だけでなく中緯度惑星波や中緯度惑星波についての診断式

$$\nabla^2 \varphi - (f/c)^2 \varphi - (3/c^2)\varphi_{tt} = q'$$

$$\partial_t \overline{E} + \nabla \cdot \langle\langle \underbrace{\overline{u'p'} + (\overline{p'\varphi}/2 + \overline{u'_{tt}\varphi}/\beta)_y,}_{=c_g \overline{E}} \overline{v'p'} - (\overline{p'\varphi}/2 + \overline{u'_{tt}\varphi}/\beta)_x \rangle\rangle = 0$$

シームレス機能（全ての緯度帯）　　オートフォーカス機能（全ての種類の波）

大気と海洋の波動エネルギーのライフサイクル解析による熱帯気候変動メカニズムの解明

相木秀則（名大宇宙地球環境研）

本研究で使用する波動エネルギーフラックス診断式の利点は、中緯度から熱帯まで連続的かつ等価に波動エネルギーの伝達経路を群速度ベクトルという意味付けを伴いながら定量的に評価できることである。つまり（ロスビー波・慣性重力波・ケルビン波のような）波動種類の違いを問わず共通の尺度で統一的に記述できる

特に海洋においては海岸線における境界条件も満たすので西岸と東岸で波が反射／回折する過程を群速度ベクトルに沿ってトレースして、消散領域までのエネルギー循環を地図上で定量的に特定することが初めて可能となった

平均流・波動相互作用理論との連携は今後の課題

2018-2021年度プロジェクト研究（基盤研究A）　　　（代表：相木、分担：福富・豊田・中野・尾形・菅野）

応用研究

エネルギーの気候学的伝達経路を同定

３次元EPVインバージョンソルバーの開発

原理研究

オートフォーカス機能の本質を探る

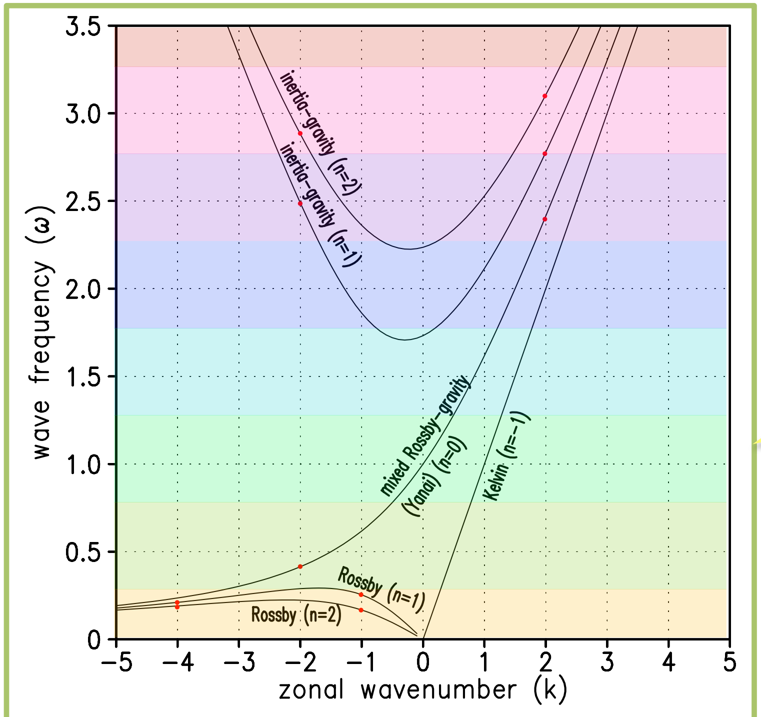
応用研究:O/AGCM結果の解析

A new 3D inversion equation for EPV in a continuously stratified fluid

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2}\varphi + \frac{\partial^2}{\partial y^2}\varphi + \frac{\partial}{\partial z}\left[\frac{(f^2 - 3\omega_b^2)}{N^2}\frac{\partial}{\partial z}\varphi\right] = \frac{\rho_z(f + v_x - u_y) - \rho_x v_z + \rho_y u_z}{\overline{\rho}_z} - f$$

seamless
at all latitudes

Fourier decomposition at each point in horizontal space



repeat EPV inversion
to cover
all frequency bands

全ての緯度帯の線形中立波の支配方程式（高さ座標系における時間平均からのずれ）

$$
\begin{aligned}
&u'_t - (f_0 + \beta y)v' = -p'_x,\\
&v'_t + (f_0 + \beta y)u' = -p'_y,\\
&\rho'_t + w'\overline{\rho}_z = 0,\\
&u'_x + v'_y + w'_z = 0,\\
&\langle\!\langle u', v', w' \rangle\!\rangle = \langle\!\langle \xi'_t, \eta'_t, \zeta'_t \rangle\!\rangle,
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
&A' = A - \overline{A}\\
&\nabla = \langle\!\langle \partial_x, \partial_y, \partial_z \rangle\!\rangle
\end{aligned}
$$

$$q' \equiv v'_x - u'_y - f\zeta'_z$$

$$
\begin{aligned}
&\zeta' \equiv -\rho'/\overline{\rho}_z = -p'_z/N^2,\\
&K = (u'^2 + v'^2)/2, \quad G = (N^2/2)\zeta'^2,
\end{aligned}
$$

Classical Energy-based (CE) 擬運動量の時間発展式

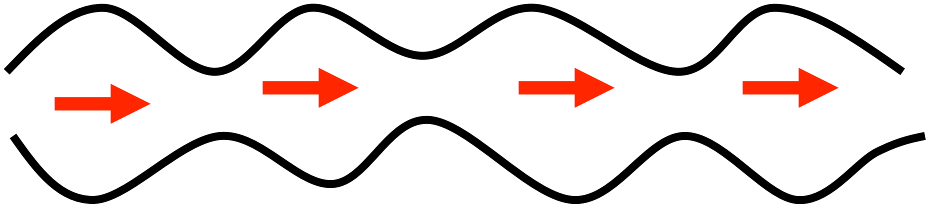
$$\underbrace{(K+G)}_{E}{}_t + \nabla\cdot\langle\!\langle u'p', v'p', w'p' \rangle\!\rangle = 0, \qquad c_p \equiv \omega/k, \qquad c_g \equiv \partial\omega/\partial k$$

$$(E/c_p)_t + \nabla\cdot\langle\!\langle u'p'/c_p, v'p'/c_p, w'p'/c_p \rangle\!\rangle = 0,$$

Impulse-Bolus (IB) 擬運動量の時間発展式 （Ripa, 1982; Haynes, 1988）

$$\partial_t(\zeta'_z u' + q'\eta'/2) + \nabla\cdot\langle\!\langle u'u' - K + G, v'u', \zeta'p'_x \rangle\!\rangle = 0,$$

ボーラス速度（重力波成分）　インパルス（惑星波成分）



ボーラスという用語は, 蛇が卵を丸呑みした時の運動を表し,Peter Rhines 博士が 1982 年に WHOI-GFD 夏の学校で講義をした際に層モデル 内の輸送を説明する為に初めて使った.

Classical Energy-based (CE) 擬運動量の時間発展式

$$(E/c_p)_t + \nabla \cdot \langle\!\langle u'p'/c_p, v'p'/c_p, w'p'/c_p \rangle\!\rangle = 0,$$

中緯度慣性重力波
についてのみ
群速度と並行

相互
関係
？

中緯度慣性重力波
中緯度ロスビー波
の両方について
群速度と並行

Impulse-Bolus (IB) 擬運動量の時間発展式 （Ripa, 1982; Haynes, 1988）

$$\partial_t(\zeta'_z u' + q'\eta'/2) + \nabla \cdot \langle\!\langle u'u' - K + G, v'u', \zeta' p'_x \rangle\!\rangle = 0,$$

Classical Energy-based (CE) 擬運動量の時間発展式

$$(E/c_p)_t + \nabla \cdot \langle\langle u'p'/c_p, v'p'/c_p, w'p'/c_p \rangle\rangle = 0,$$

前処理

$$\pi' \equiv \int^t p' dt,$$
$$u' - f\eta' = -\pi'_x,$$
$$v' + f\xi' = -\pi'_y,$$

$$E \equiv K + G$$
$$= (u'^2 + v'^2 + N^2\zeta'^2)/2$$
$$= (u'\xi'_t + v'\eta'_t - \zeta\pi'_{zt})/2,$$

ゲージ変換 (Aiki et al., 2015 JAS)

$$\overbrace{(-u'\xi'_x - v'\eta'_x + \zeta'\pi'_{zx})/2}^{E/c_p} = \zeta'_z u' + q'\eta'/2 + \nabla \cdot \langle\langle -v'\eta', u'\eta', \zeta'\pi'_x \rangle\rangle/2$$

CE擬運動量 IB擬運動量 何かの3次元発散

相互関係

Impulse-Bolus (IB) 擬運動量の時間発展式 (Ripa, 1982; Haynes, 1988)

$$\partial_t(\zeta'_z u' + q'\eta'/2) + \nabla \cdot \langle\langle u'u' - K + G, v'u', \zeta'p'_x \rangle\rangle = 0,$$

Classical Energy-based (CE) 擬運動量の時間発展式

$$(E/c_p)_t + \nabla\cdot\langle\langle u'p'/c_p, v'p'/c_p, w'p'/c_p\rangle\rangle = 0,$$

前処理

$$\pi' \equiv \int^t p'dt,$$
$$u' - f\eta' = -\pi'_x,$$
$$v' + f\xi' = -\pi'_y,$$

$$E \equiv K + G$$
$$= (u'^2 + v'^2 + N^2\zeta'^2)/2$$
$$= (u'\xi'_t + v'\eta'_t - \zeta\pi'_{zt})/2,$$

相互関係

ゲージ変換 (Aiki et al., 2015 JAS)

$$\overbrace{(-u'\xi'_x - v'\eta'_x + \zeta'\pi'_{zx})/2}^{E/c_p} = \zeta'_z u' + q'\eta'/2 + \nabla\cdot\langle\langle -v'\eta', u'\eta', \zeta'\pi'_x\rangle\rangle/2$$

CE擬運動量 IB擬運動量

東西フラックスの相互関係(南北構造の違いの種)は？

$$\overbrace{(\overline{\xi'p'_x} - \overline{u'\pi'_x})/2}^{\overline{u'p'}/c_p} = \overline{u'u'} - \overline{K} + \overline{G} + \underbrace{[\overline{(\xi'p')_x + (\eta'p')_y + (\zeta'p')_z}]/2}_{\equiv\overline{\Lambda}}$$

CEフラックス IBフラックス

Λ=−E （中緯度ロスビー波） Λ=0 （中緯度慣性重力波）

Impulse-Bolus (IB) 擬運動量の時間発展式 (Ripa, 1982; Haynes, 1988)

$$\partial_t(\zeta'_z u' + q'\eta'/2) + \nabla\cdot\langle\langle u'u' - K + G, v'u', \zeta'p'_x\rangle\rangle = 0,$$

波のエネルギーの水平伝達経路を群速度に基づいて気候学的に同定するには？

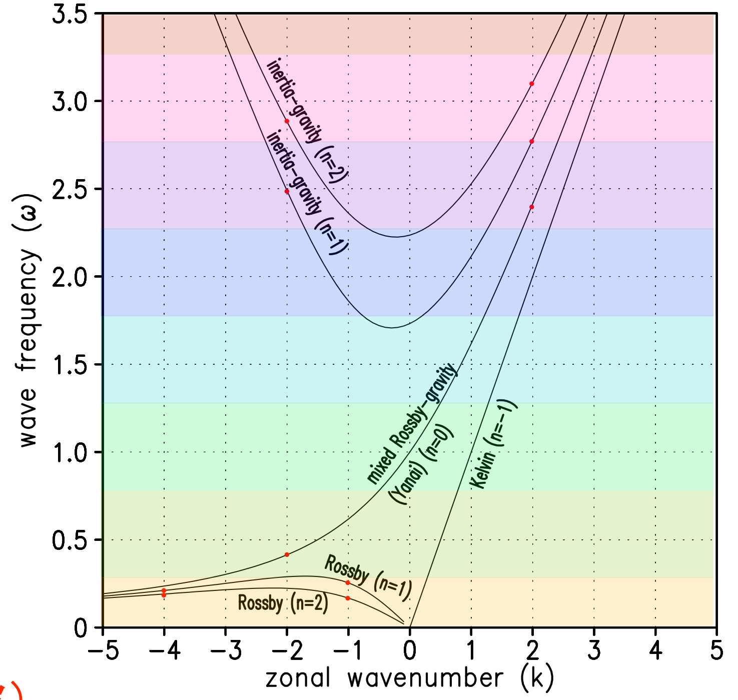
水平フーリエ解析やレイの式に頼らない「モデル診断手法」の提案
ー赤道導波管と東岸導波管の接続問題（熱帯亜熱帯相互作用）にも適用可ー

シームレス機能（全ての緯度帯）　オートフォーカス機能（全ての種類の波）

$$\nabla^2\varphi - (f/c)^2\varphi - (3/c^2)\varphi_{tt} = q'$$

$$\partial_t \overline{E} + \nabla\cdot\langle\!\langle \underbrace{\overline{u'p'} + (\overline{p'\varphi}/2 + \overline{u'_{tt}\varphi}/\beta)_y}_{=c_g\overline{E}}, \overline{v'p'} - (\overline{p'\varphi}/2 + \overline{u'_{tt}\varphi}/\beta)_x \rangle\!\rangle = 0$$

GCM出力を時間フーリエ展開して各周波数帯でEPVインバージョン



３次元版のEPVインバージョン式

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2}\varphi + \frac{\partial^2}{\partial y^2}\varphi + \frac{\partial}{\partial z}\left[\frac{(f^2 - 3\omega_b^2)}{N^2}\frac{\partial}{\partial z}\varphi\right] = \frac{\rho_z(f + v_x - u_y) - \rho_x v_z + \rho_y u_z}{\overline{\rho}_z} - f$$

原理の追求（擬運動量のゲージ変換に出てくる謎のΛ）

$$\underbrace{\overline{[(\xi'p')_x + (\eta'p')_y + (\zeta'p')_z]/2}}_{\equiv\overline{\Lambda}}$$

Λ=−E （中緯度ロスビー波）　Λ=0（中緯度慣性重力波）

線形中立波
(平均流なし)

$$u'_t - fv' + p'_x = 0$$
$$v'_t + fu' + p'_y = 0$$
$$p'_t + c^2(u'_x + v'_y) = 0$$

$$E \equiv [u'^2 + v'^2 + (p'/c)^2]/2$$
$$q' \equiv v'_x - u'_y - (f/c^2)p'$$

中緯度惑星波についての群速度×エネルギーの診断式(Orlanski and Sheldon, 1993 JAS)

$$\partial_t \overline{E} + \nabla \cdot \langle\langle \overline{u'p'} + [\overline{p'^2}/(2f)]_y, \overline{v'p'} - [\overline{p'^2}/(2f)]_x \rangle\rangle = 0$$

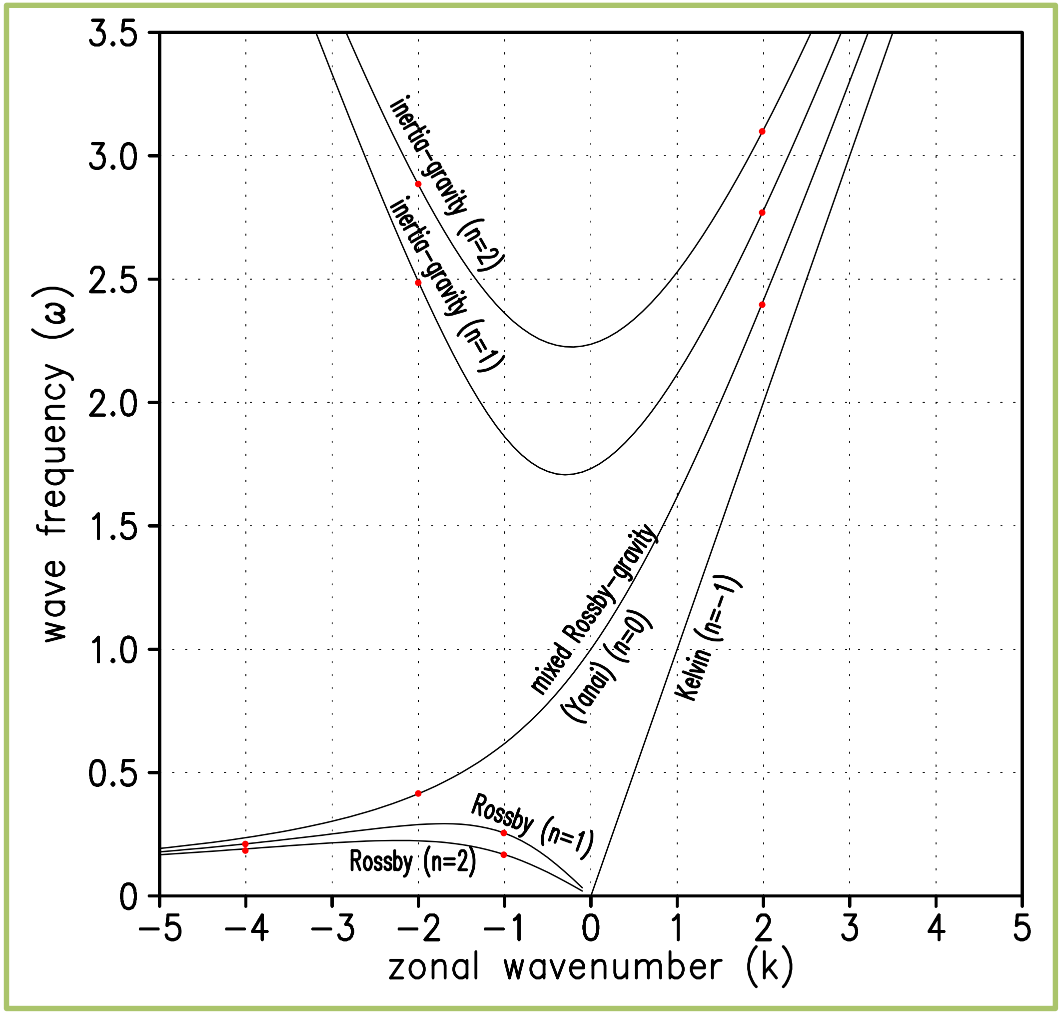
各種赤道波についての群速度×エネルギーの診断式(本研究)

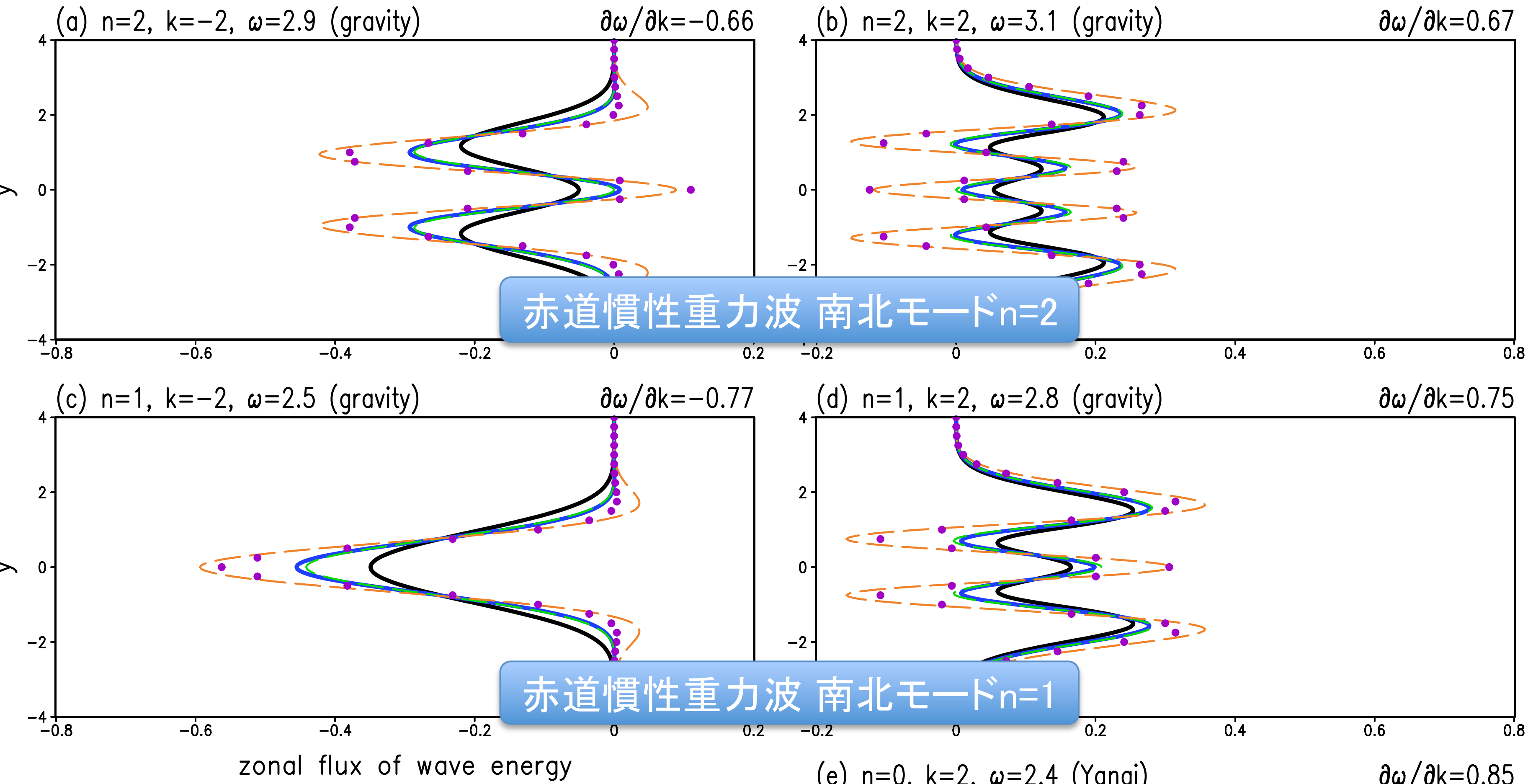
$$\nabla^2\varphi - (f/c)^2\varphi - (3/c^2)\varphi_{tt} = q'$$
$$\partial_t \overline{E} + \nabla \cdot \langle\langle \underbrace{\overline{u'p'} + (\overline{p'\varphi}/2 + \overline{u'_{tt}\varphi}/\beta)_y}_{=c_g\overline{E}}, \overline{v'p'} - (\overline{p'\varphi}/2 + \overline{u'_{tt}\varphi}/\beta)_x \rangle\rangle = 0$$

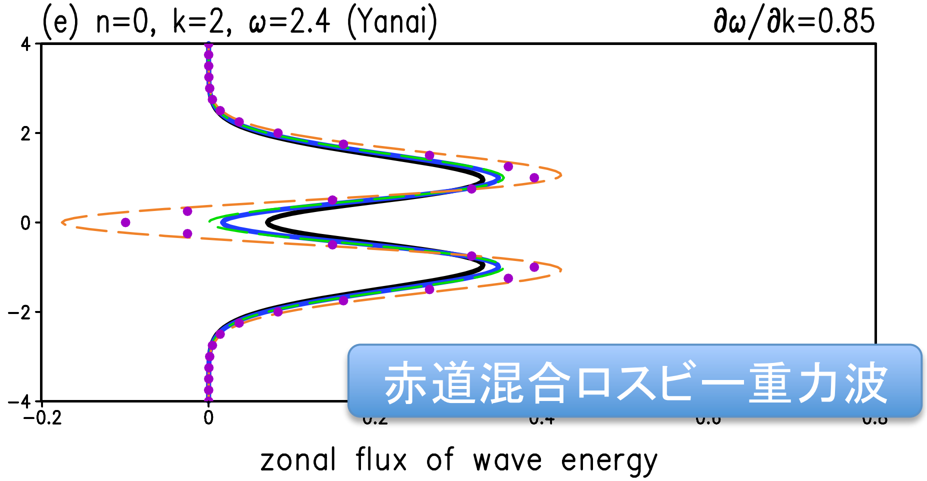
上記の推奨近似式(本研究)

$$\nabla^2\varphi^{app} - (f/c)^2\varphi^{app} = q'$$
$$\partial_t \overline{E} + \nabla \cdot \langle\langle \underbrace{\overline{u'p'} + (\overline{p'\varphi^{app}}/2)_y}_{\simeq c_g\overline{E}}, \overline{v'p'} - (\overline{p'\varphi^{app}}/2)_x \rangle\rangle = 0$$

各種赤道波の分散関係式







$$\int_{-\infty}^{+\infty} c_g \overline{E}\, dy$$

群速度×エネルギー
（知りたい情報）

$$= \int_{-\infty}^{+\infty} \overline{u'p'}\, dy$$

圧力フラックス

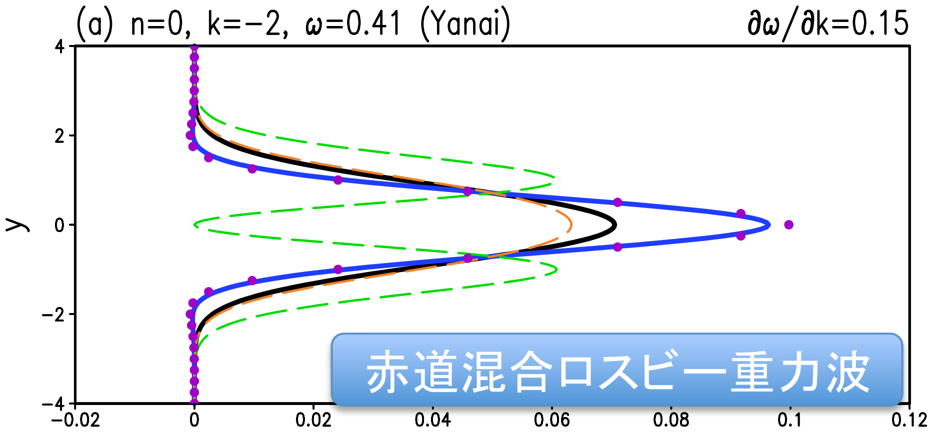
$$= \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\overline{u'p'} + \left(\overline{p'\varphi^{app}}/2 + \overline{u'_{tt}\varphi^{app}}/\beta\right)_y\right] dy$$

暫定

$$= \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\overline{u'p'} + \left(\overline{p'\varphi^{app}}/2\right)_y\right] dy$$

推奨近似式

Plumb/Miyaharaフラックス



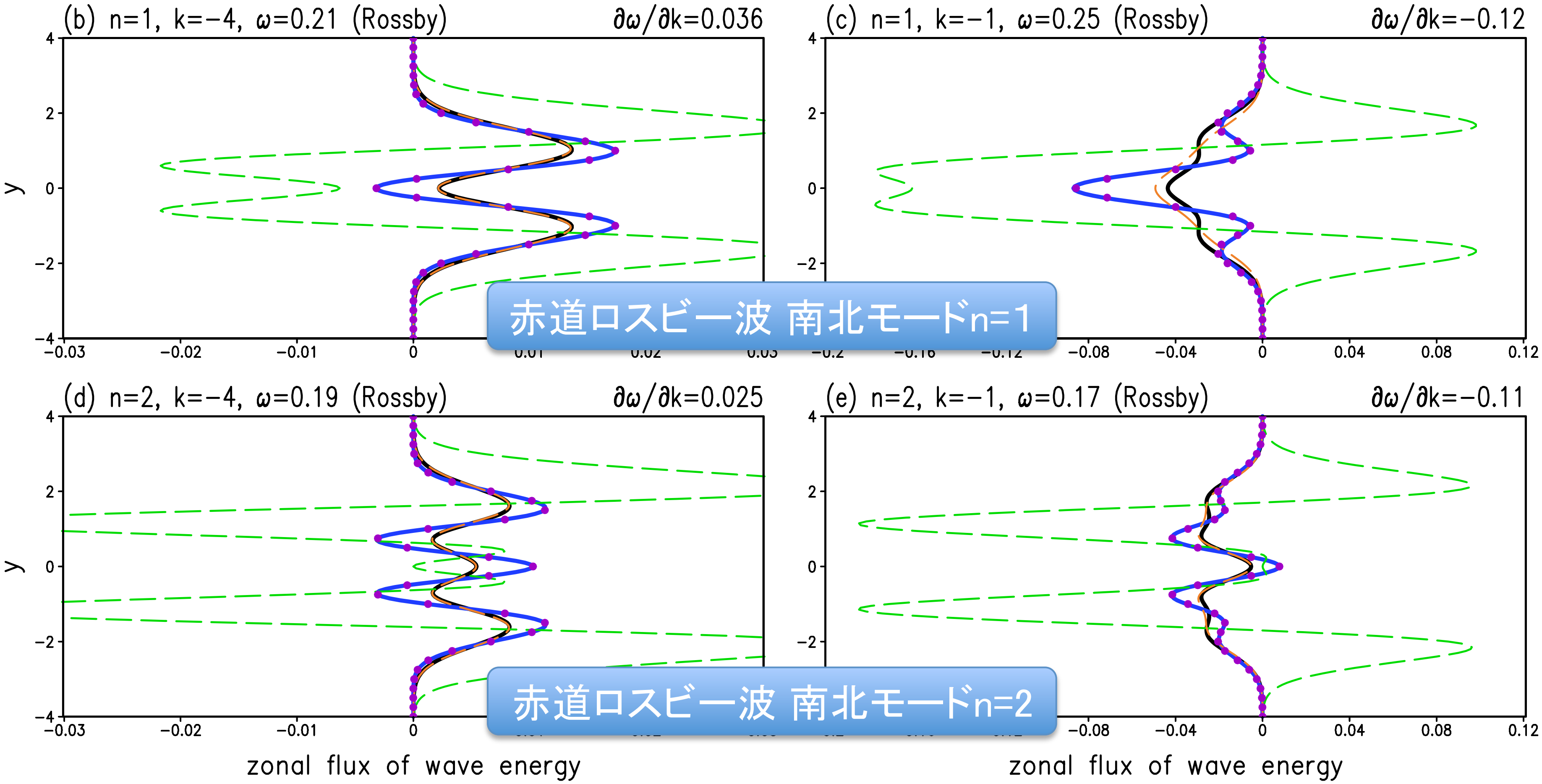
$$\int_{-\infty}^{+\infty} c_g \overline{E}\, dy$$

$$= \int_{-\infty}^{+\infty} \overline{u'p'}\, dy$$

$$= \int_{-\infty}^{+\infty} [\overline{u'p'} + (\overline{p'\varphi^{app}}/2 + \overline{u'_{tt}\varphi^{app}}/\beta)_y]\, dy$$

$$= \int_{-\infty}^{+\infty} [\overline{u'p'} + (\overline{p'\varphi^{app}}/2)_y]\, dy$$

群速度×エネルギー
（知りたい情報）
圧力フラックス
暫定
推奨近似式
Plumb/Miyaharaフラックス



応用研究

エネルギーの気候学的伝達経路を同定

３次元EPVインバージョンソルバーの開発

原理研究

オートフォーカス機能の本質を探る

FAQ1：EPVインバージョンの完全表現に含まれる係数３は何か？

各種赤道波についての群速度×エネルギーの診断式（本研究）

$$\nabla^2\varphi - (f/c)^2\varphi - (3/c^2)\varphi_{tt} = q'$$

$$\partial_t \overline{E} + \nabla\cdot\langle\!\langle \underbrace{\overline{u'p'} + (\overline{p'\varphi}/2 + \overline{u'_{tt}\varphi}/\beta)_y}_{=c_g\overline{E}}, \overline{v'p'} - (\overline{p'\varphi}/2 + \overline{u'_{tt}\varphi}/\beta)_x \rangle\!\rangle = 0$$

各種赤道波の分散関係式と群速度（無次元表現）

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

$$\frac{\partial\omega}{\partial k} = \frac{2k\omega+1}{3\omega^2-(k^2+2n+1)}$$

各種中緯度波の分散関係式と群速度（有次元表現）

$$\omega^{*3} - c^{*2}(k^{*2}+l^{*2})\omega^* - f_0^{*2}\omega^* - \beta^* c^{*2} k^* = 0,$$

$$\frac{\partial\omega^*}{\partial k^*} = \frac{2c^{*2}k^*\omega^* + \beta^* c^{*2}}{3\omega^{*2} - c^{*2}(k^{*2}+l^{*2}) - f_0^{*2}}$$

FAQ2：EPVインバージョンの完全表現は本当に診断的に解けないのか？

各種赤道波についての群速度×エネルギーの診断式（本研究）

$$\nabla^2\varphi - (f/c)^2\varphi - (3/c^2)\varphi_{tt} = q'$$

$$\partial_t\overline{E} + \nabla\cdot\langle\!\langle \underbrace{\overline{u'p'} + (\overline{p'\varphi}/2 + \overline{u'_{tt}\varphi}/\beta)_y}_{=c_g\overline{E}}, \overline{v'p'} - (\overline{p'\varphi}/2 + \overline{u'_{tt}\varphi}/\beta)_x \rangle\!\rangle = 0$$

フーリエ解析やレイの式に頼らない「モデル診断手法」の提案
ー赤道導波管と東岸導波管の接続に着目してー

その心は、海岸線の近くで水平方向の波数展開をしたくない。

時間方向のフーリエ分解ならば海岸線を気にしなくてよい。

AGCM/OGCMのスナップショット出力に対して、
時間方向にフーリエ分解し、各振動数毎に
上記のEPVインバージョンの式を診断的に解けばよいのではなかろうか？