

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、福富 慶樹（名大宇宙地球環境研究所）

菅野 湧貴（電力中央研究所）

尾形 友道（海洋研究開発機構）

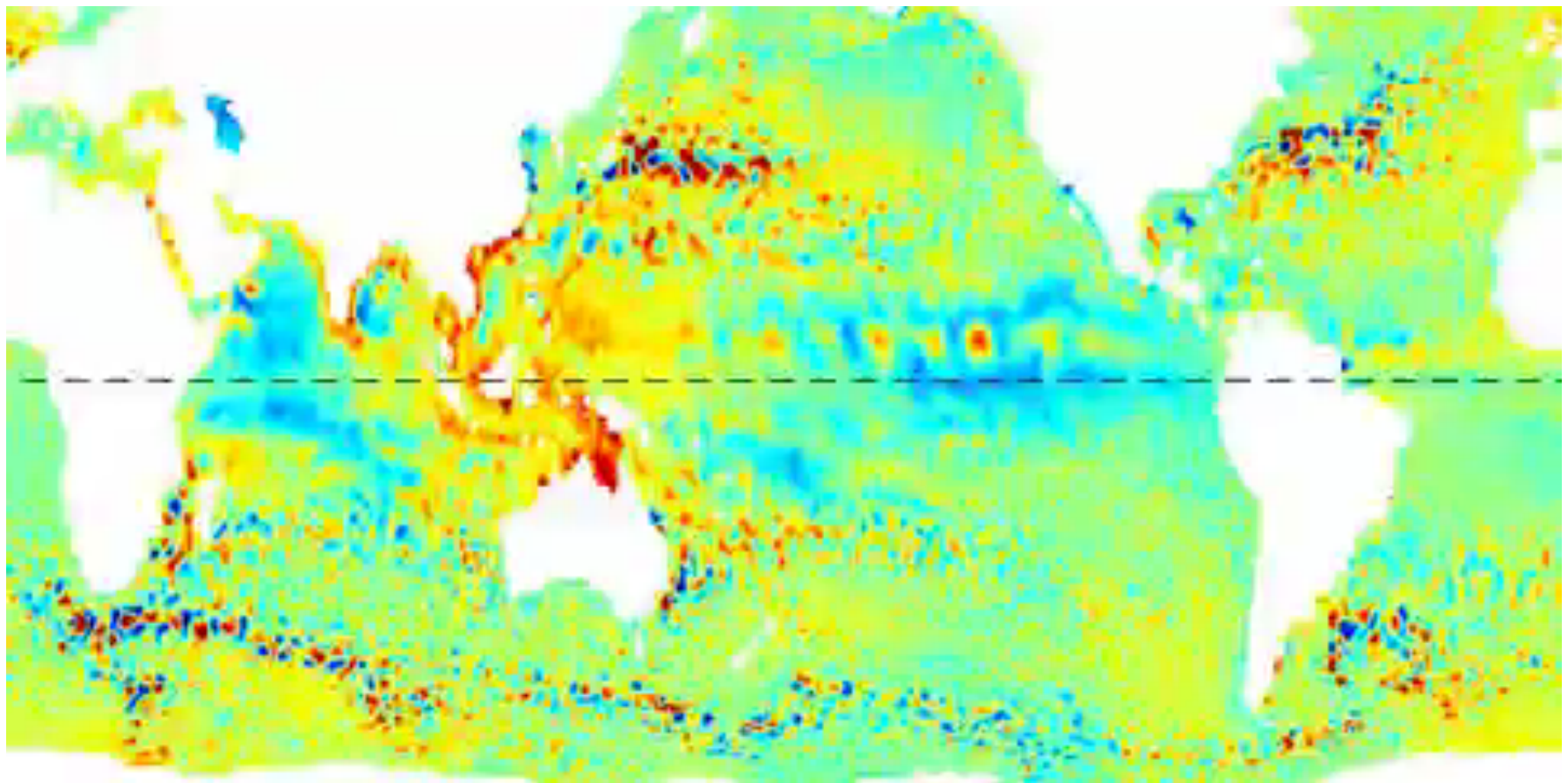
豊田 隆寛、中野英之（気象庁気象研究所）

2020.12.16 15:30-16:30

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

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

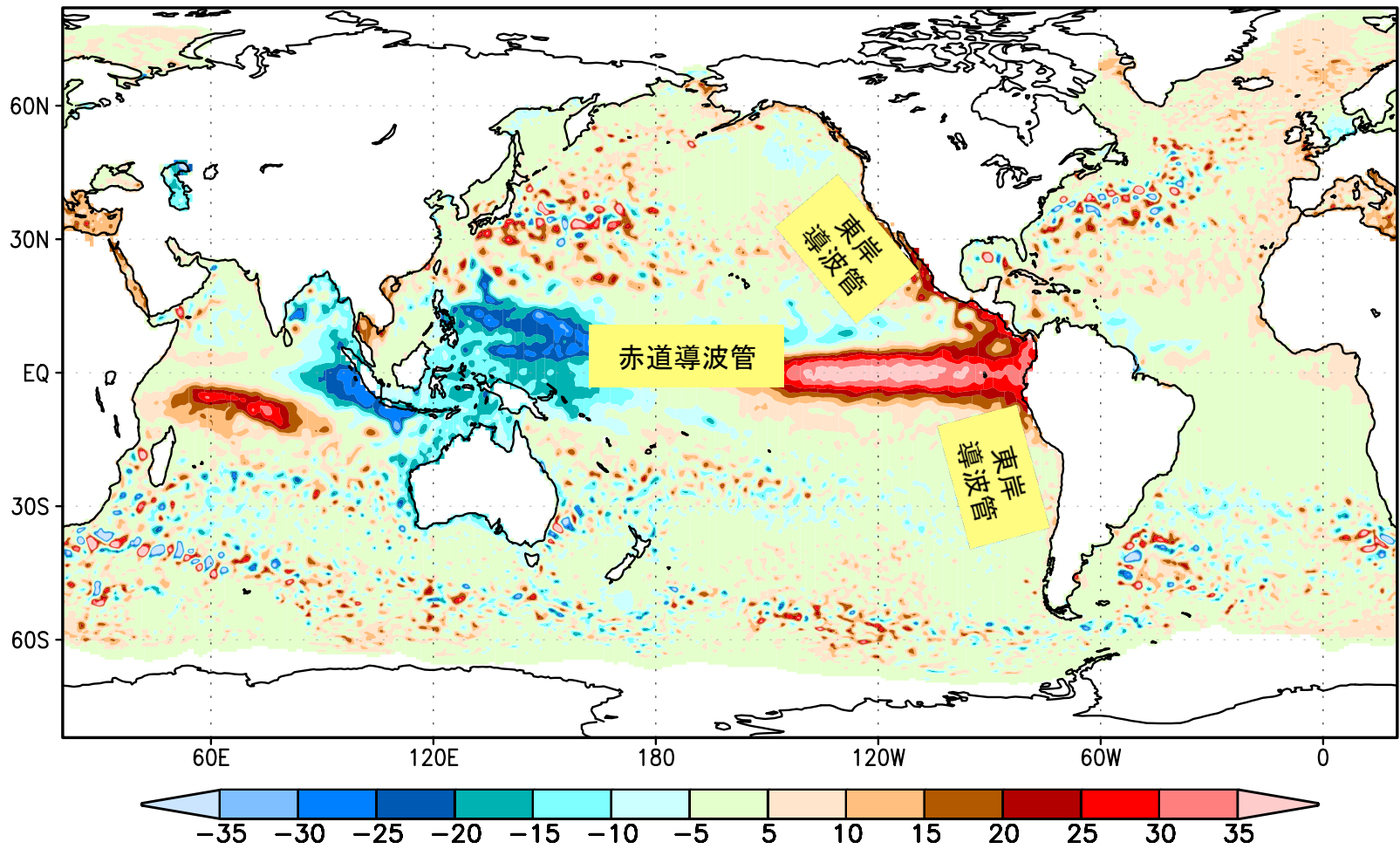


過去20年間のモデル診断研究：どこで擾乱が励起・減衰するのか？

- 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

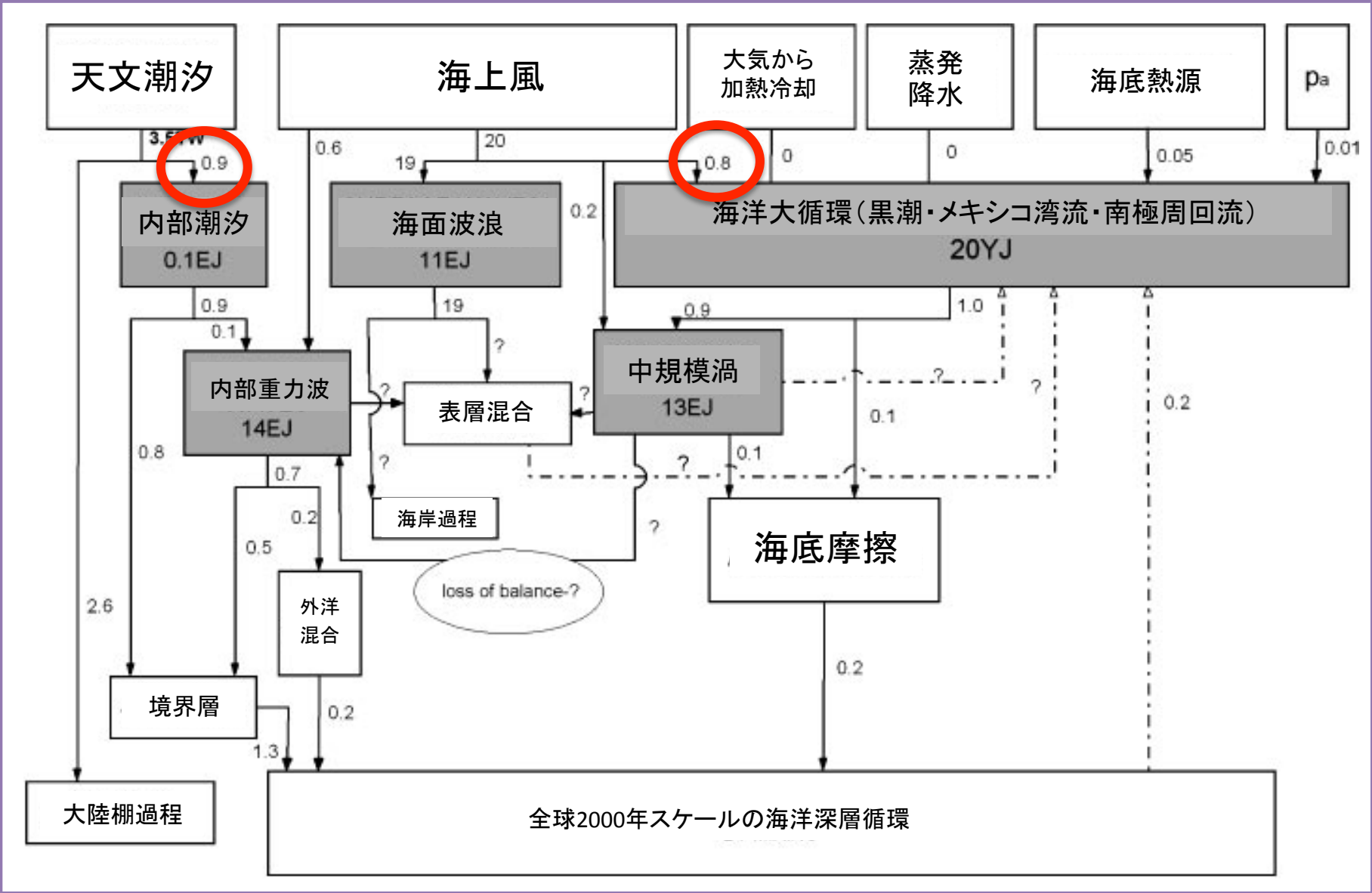


海洋のプロセス毎の全球エネルギー収支

YJ=10²⁴J=ヨットジュール
 EJ=10¹⁸J=イクサジュール

Wunsch and Ferrari, 2004 ARFM

TW=10¹²W=テラワット

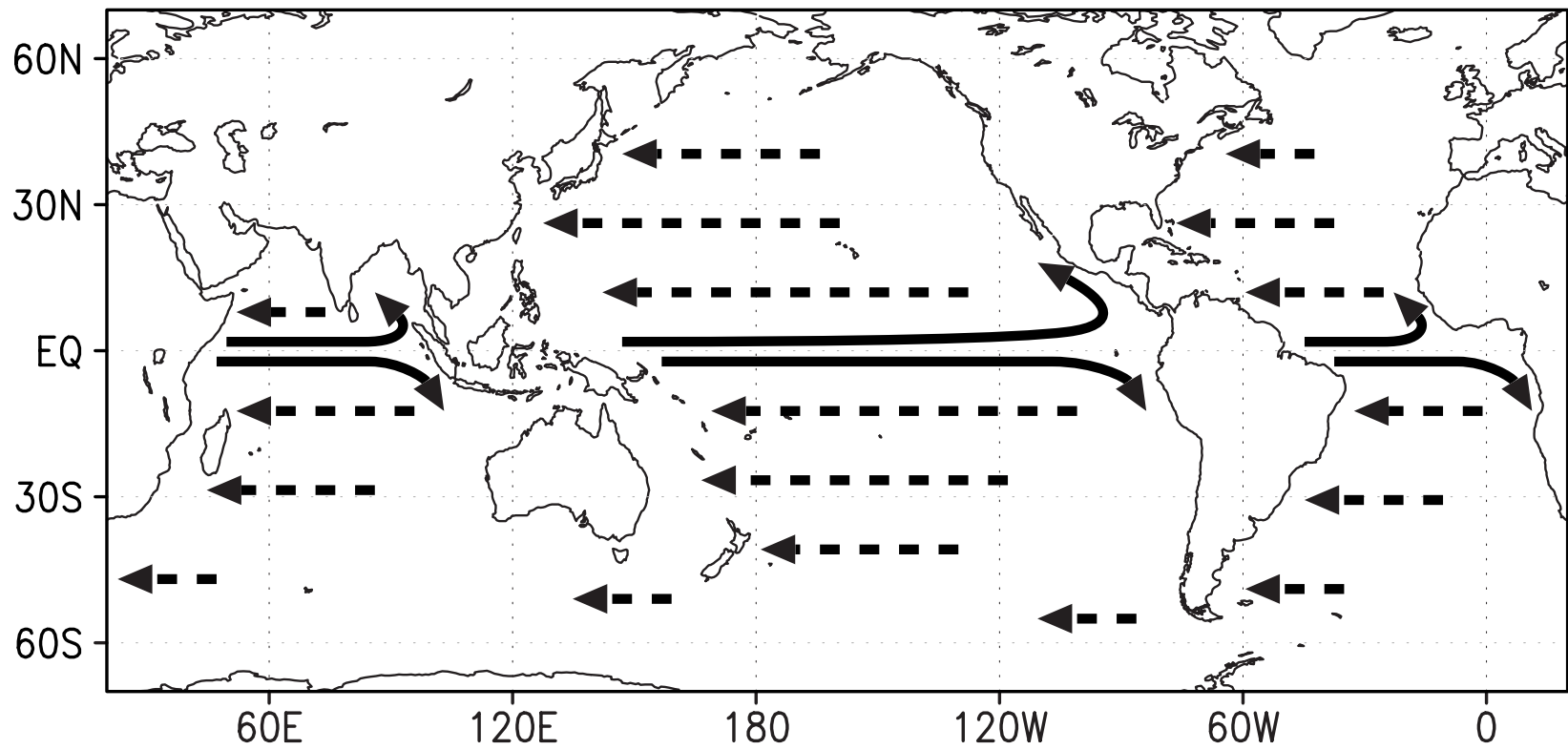


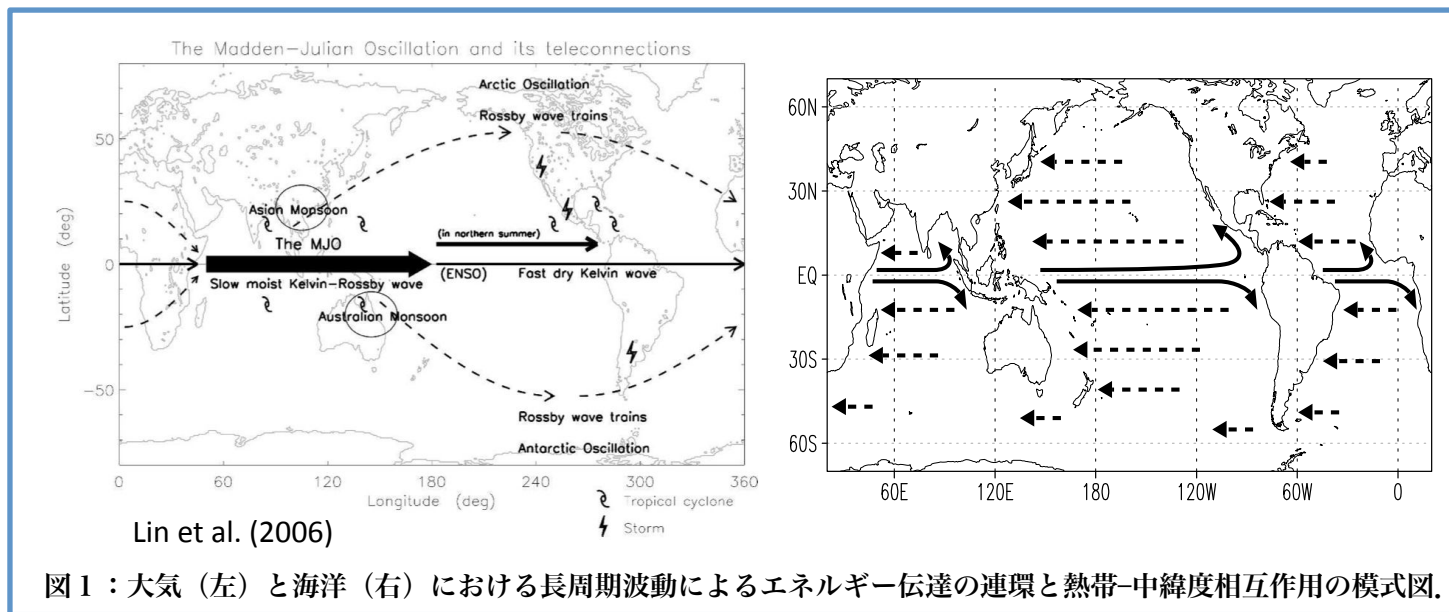
過去20年間のモデル診断研究：どこで擾乱が励起・減衰するのか？

- 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





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統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	$\langle E - \overline{v'v'}, \overline{v'u'} \rangle$	$\overline{u'p'} + \nabla \times [p'p'z / (2f)]$

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.

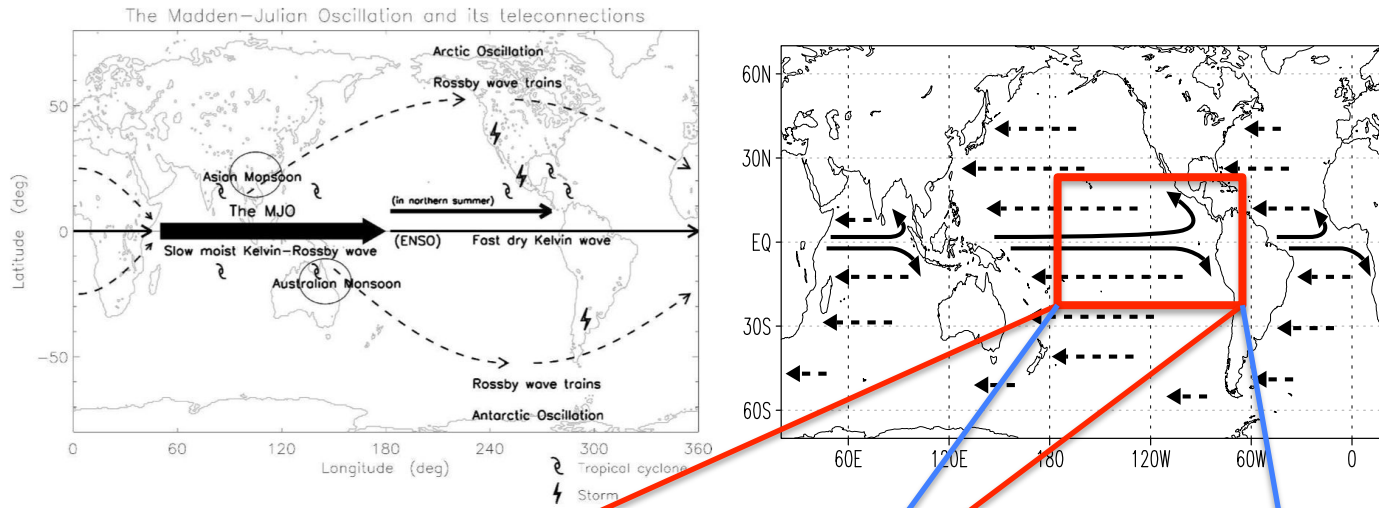


図1：大気（左）と海洋（右）における長周期波動によるエネルギー伝達の連環と熱帯-中緯度相互作用の模式図。左図はLin et al. (2006)より転載。上記のイラスト的に描かれた矢印を図2bのようなモデル解析結果におきかえて応用研究を展開するのが本研究の目的である。

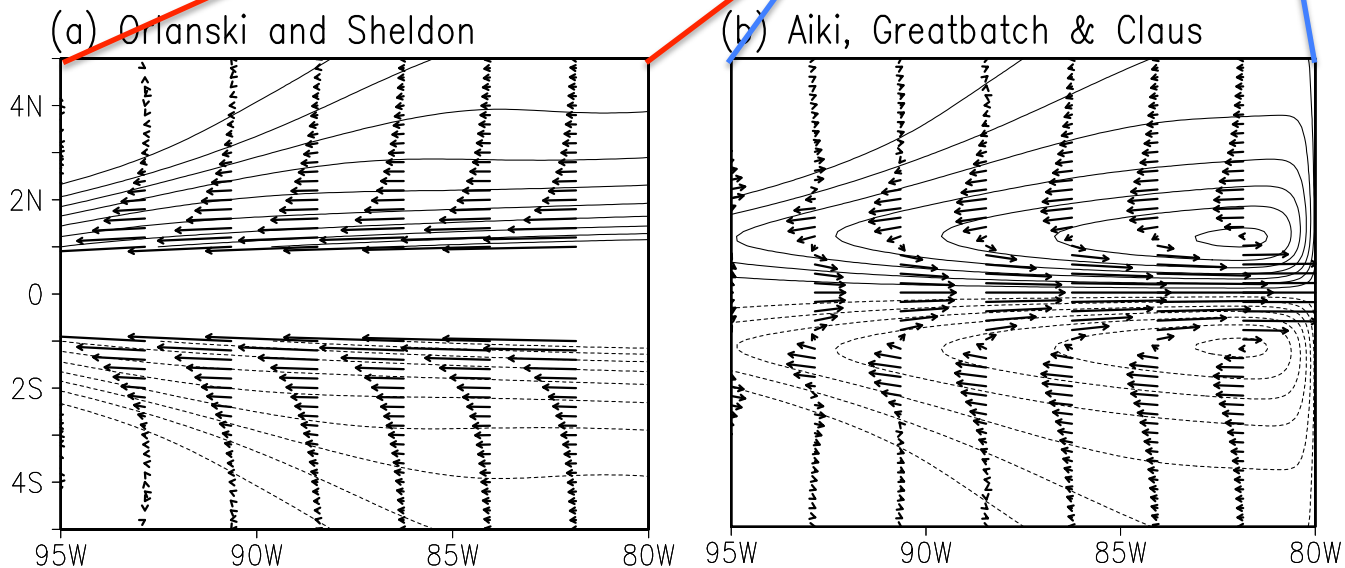


図2：熱帯海洋の理想実験でエネルギーフラックス（群速度ベクトル）を見積もった結果（西経80度が東岸）。(a) 従来の診断式を用いた場合（赤道近傍は適用不可）。(b) 新しい診断式を用いた場合（本研究で使用予定）。

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。

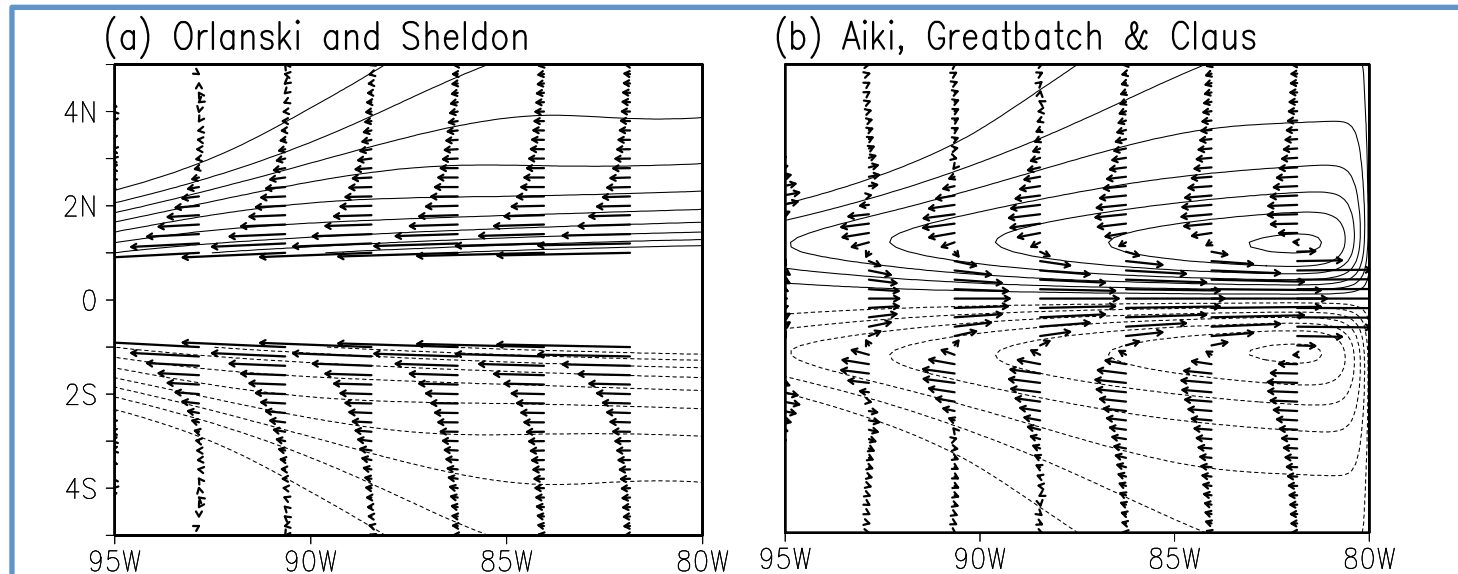


図2：熱帯海洋の理想実験でエネルギーフラックス(群速度ベクトル)を見積もった結果(西経80度が東岸)。(a)従来診断式を用いた場合(赤道近傍は適用不可)。(b)新しい診断式を用いた場合(本研究で使用予定)。

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

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

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)

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

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

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

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

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？
 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
 —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—

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

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

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)

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

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

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

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

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)

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

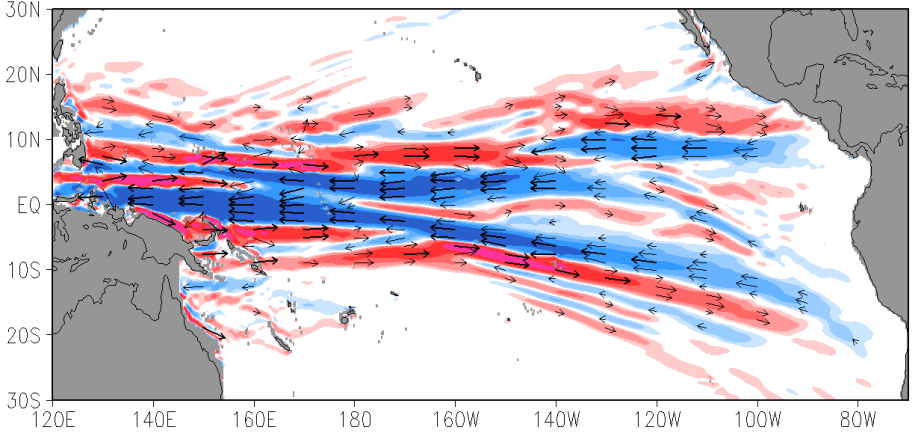
	Plumb (1986) , Takaya & Nakamura (2001) の系列	Orlanski & Sheldon (1993) の系列	<u>Aiki</u> et al. (2017)
対象	波活動度 (擬運動量)	エネルギー	エネルギー
定量的解析	不適	適	適
中緯度ロスビー波	○	○	○
中緯度慣性重力波	×	×	○
全ての種類の赤道波	×	×	○
中緯度と熱帯の接続	×	×	○
海岸線境界条件	×	×	○
前処理	必要なし	必要なし	Ertel渦位の インバージョン
フラックスの診断式	$\langle E - \overline{v'v'}, \overline{v'u'}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

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。

Comparison of 3 Schemes for diagnosing group-velocity-based transfer routes

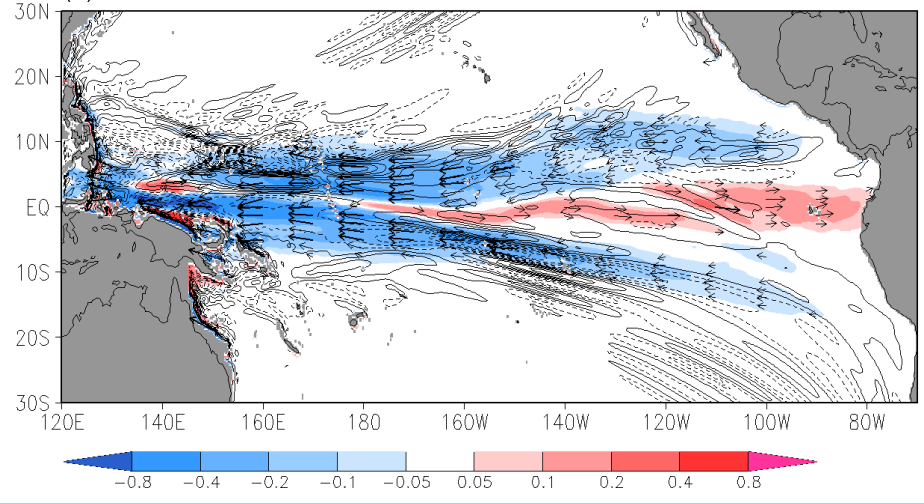
Gravity-wave scheme

(a) pressure flux: 1st BCM



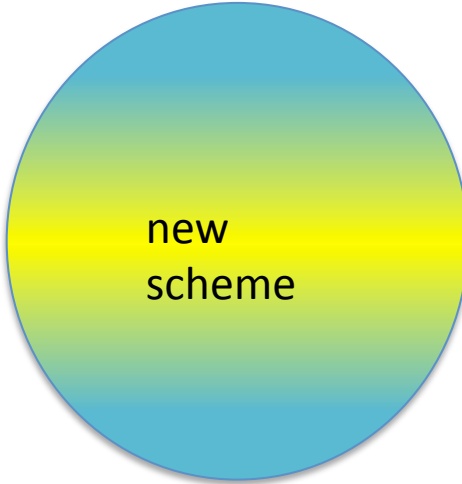
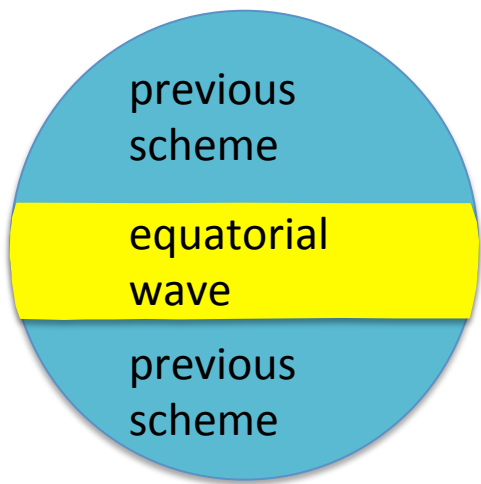
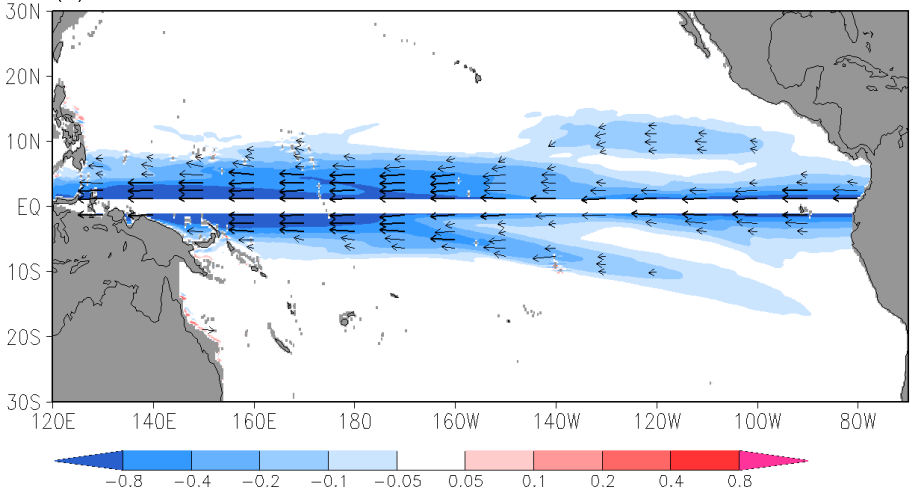
Aiki et al. scheme

(a) AGC-L2 flux: 1st BCM



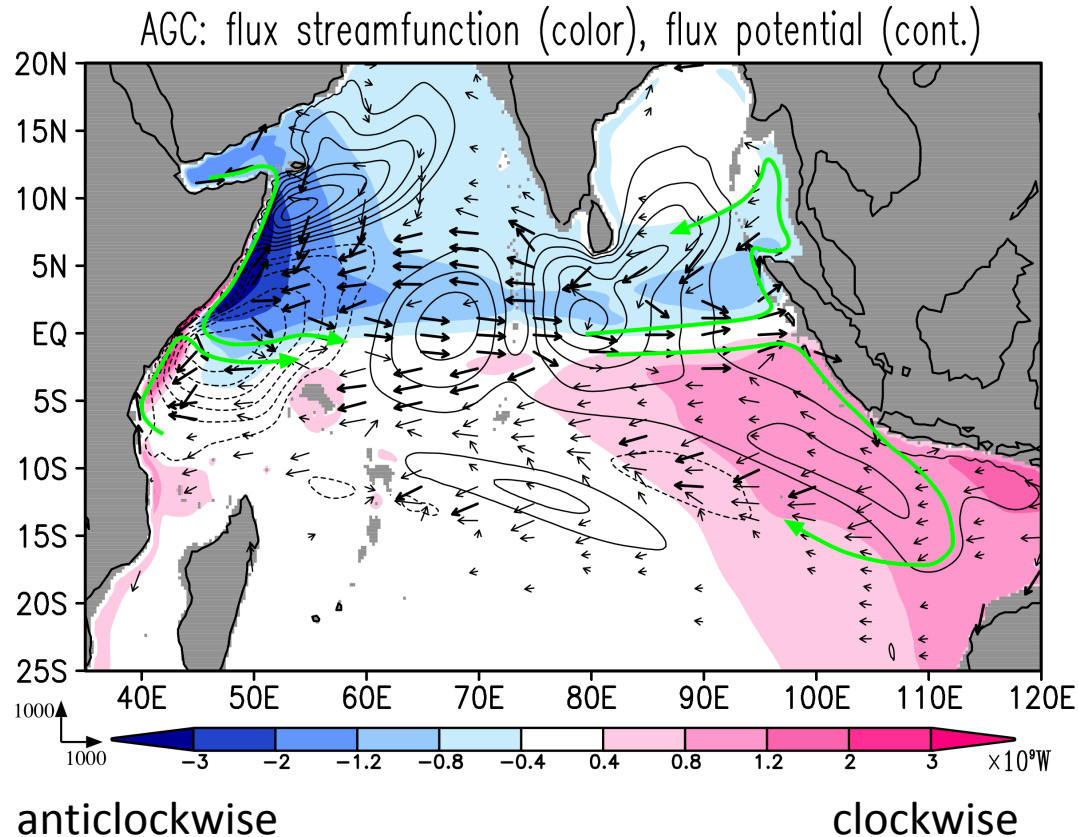
Quasi-geostrophic scheme

(b) OS93 flux: 1st BCM



color: zonal component of energy flux **arrows:** energy flux vector **contour:** energy input

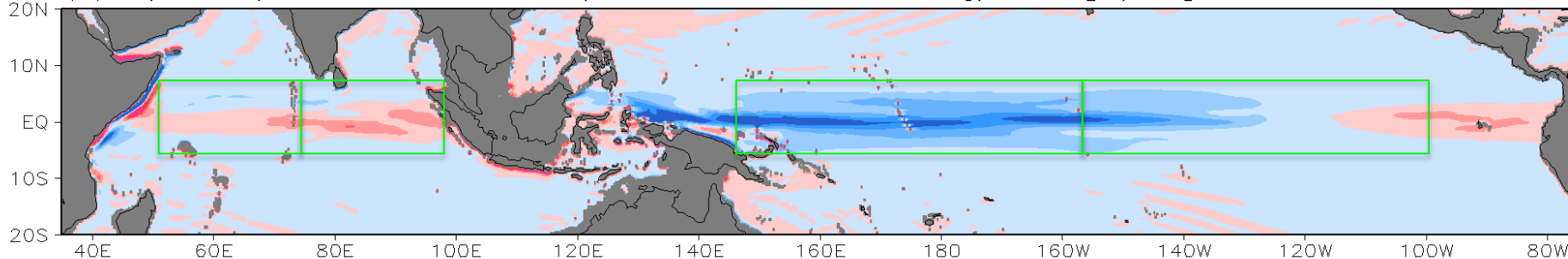
New (AGC-L2) energy flux visualized by Helmholtz decomposition



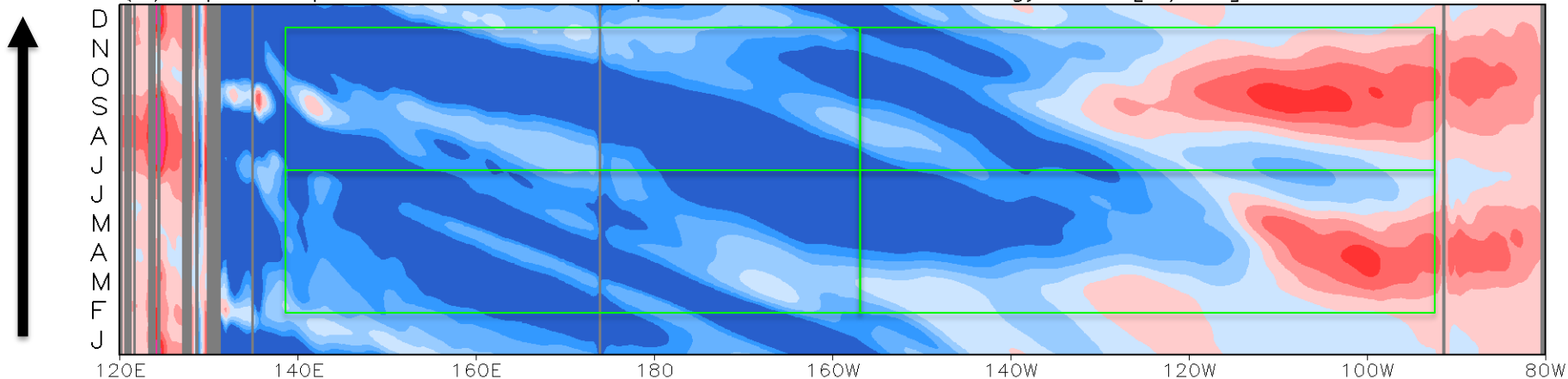
Li and Aiki 2020 GRL
Song and Aiki 2020 JGR
Ogata and Aiki 2019 SOLA

Fourier 解析における空間領域分割の概念図

(a) Open experiment: zonal component of AGC-L2 energy flux [W/m^2]



(a) Open experiment: zonal component of AGC-L2 energy flux [W/m^2]



線形プリミティブ方程式

アスタリスクは
次元付きを表す

$$\frac{\partial u^*}{\partial t^*} - f^* v^* + \frac{\partial \Phi^*}{\partial x^*} = 0,$$

$$\frac{\partial v^*}{\partial t^*} + f^* u^* + \frac{\partial \Phi^*}{\partial y^*} = 0,$$

$$\frac{1}{\rho_0^*} \frac{\partial}{\partial z^*} \left[\rho_0^* \underbrace{\left(\frac{-1}{N^{*2}} \frac{\partial^2 \Phi^*}{\partial z^* \partial t^*} \right)}_{\equiv w^*} \right] + \left(\frac{\partial u^*}{\partial x^*} + \frac{\partial v^*}{\partial y^*} \right) = 0,$$

$$\frac{\partial \Phi^*}{\partial z^*} = g^* \frac{\theta^*}{\theta_0^*},$$

$$N^{*2} = \frac{g^*}{\theta_0^*} \frac{d\theta_0^*}{dz^*},$$

EPV (Eulerian potential vorticity) の保存式

$$\frac{\partial}{\partial t^*} Q^* + v^* \frac{\partial}{\partial y^*} Q_0^* + w^* \frac{\partial}{\partial z^*} Q_0^* = 0,$$

$$Q^* \equiv \left(\frac{\partial v^*}{\partial x^*} - \frac{\partial u^*}{\partial y^*} \right) \frac{1}{\rho_0^*} \frac{d\theta_0^*}{dz^*} + \frac{f^*}{\rho_0^*} \frac{\partial \theta^*}{\partial z^*},$$

$$Q_0^* \equiv \frac{f^*}{\rho_0^*} \frac{d\theta_0^*}{dz^*},$$

EPVとIPV (isentropic potential vorticity) の関係式

$$q^* = \frac{1}{(1/\rho_0^*)(d\theta_0^*/dz^*)} \left[Q^* + \underbrace{\left(\frac{-1}{N^{*2}} \frac{\partial \Phi^*}{\partial z^*} \right)}_{\equiv \zeta^*} \frac{\partial}{\partial z^*} Q_0^* \right],$$

鉛直流速と鉛直変位

$$w^* \equiv \frac{\partial}{\partial t^*} \zeta^* = -\frac{1}{N^{*2}} \frac{\partial^2 \Phi^*}{\partial t^* \partial z^*},$$

$$\zeta^* \equiv -\frac{1}{N^{*2}} \frac{\partial \Phi^*}{\partial z^*} = -\frac{\theta^*}{(d\theta_0^*/dz^*)},$$

IPV の保存式

$$\frac{\partial}{\partial t^*} \left[\underbrace{\left(\frac{\partial v^*}{\partial x^*} - \frac{\partial u^*}{\partial y^*} + \frac{1}{\rho_0^*} \frac{\partial}{\partial z^*} \left(\frac{\rho_0^* f^*}{N^{*2}} \frac{\partial \Phi^*}{\partial z^*} \right) \right)}_{\equiv q^*} \right] + v^* \beta^* = 0,$$

波動エネルギーの保存式

アスタリスクは
次元付きを表す

中緯度慣性重力波, 赤道ケルビン波

$$\frac{\partial}{\partial t^*} \frac{\rho_0^*}{2} \left[\overline{u^{*2} + v^{*2} + \frac{1}{N^{*2}} \left(\frac{\partial \Phi^*}{\partial z^*} \right)^2} \right] +$$

$$\nabla^* \cdot \langle \langle \rho_0^* \overline{u^* \Phi^*}, \rho_0^* \overline{v^* \Phi^*}, \rho_0^* \overline{w^* \Phi^*} \rangle \rangle = 0,$$

$$\nabla^* \equiv \langle \langle \frac{\partial}{\partial x^*}, \frac{\partial}{\partial y^*}, \frac{\partial}{\partial z^*} \rangle \rangle$$

中緯度ロスビー波 (Orlanski and Sheldon, 1993)

$$\frac{\partial}{\partial t^*} \frac{\rho_0^*}{2} \left[\overline{u^{*2} + v^{*2} + \frac{1}{N^{*2}} \left(\frac{\partial \Phi^*}{\partial z^*} \right)^2} \right] +$$

$$\nabla^* \cdot \langle \langle \rho_0^* \left[\overline{u^* \Phi^*} + \frac{\partial}{\partial y^*} \left(\frac{\Phi^{*2}}{2f^*} \right) \right], \rho_0^* \left[\overline{v^* \Phi^*} - \frac{\partial}{\partial x^*} \left(\frac{\Phi^{*2}}{2f^*} \right) \right], \rho_0^* \overline{w^* \Phi^*} \rangle \rangle = 0,$$

波動エネルギーの保存式

アスタリスクは
次元付きを表す

中緯度慣性重力波, 赤道ケルビン波

$$\frac{\partial}{\partial t^*} \frac{\rho_0^*}{2} \left[\overline{u^{*2} + v^{*2} + \frac{1}{N^{*2}} \left(\frac{\partial \Phi^*}{\partial z^*} \right)^2} \right] +$$

$$\nabla^* \cdot \left\langle \left\langle \rho_0^* \overline{u^* \Phi^*}, \rho_0^* \overline{v^* \Phi^*}, \rho_0^* \overline{w^* \Phi^*} \right\rangle \right\rangle = 0, \quad \left[\nabla^* \equiv \left\langle \left\langle \frac{\partial}{\partial x^*}, \frac{\partial}{\partial y^*}, \frac{\partial}{\partial z^*} \right\rangle \right\rangle \right]$$

中緯度ロスビー波 (Orlanski and Sheldon, 1993)

$$\frac{\partial}{\partial t^*} \frac{\rho_0^*}{2} \left[\overline{u^{*2} + v^{*2} + \frac{1}{N^{*2}} \left(\frac{\partial \Phi^*}{\partial z^*} \right)^2} \right] +$$

$$\nabla^* \cdot \left\langle \left\langle \rho_0^* \left[\overline{u^* \Phi^*} + \frac{\partial}{\partial y^*} \left(\frac{\Phi^{*2}}{2f^*} \right) \right], \rho_0^* \left[\overline{v^* \Phi^*} - \frac{\partial}{\partial x^*} \left(\frac{\Phi^{*2}}{2f^*} \right) \right], \rho_0^* \overline{w^* \Phi^*} \right\rangle \right\rangle = 0,$$

中緯度と赤道域の全ての波 (Aiki et al. under revision in JAS)

$$\frac{\partial}{\partial t^*} \frac{\rho_0^*}{2} \left[\overline{u^{*2} + v^{*2} + \frac{1}{N^{*2}} \left(\frac{\partial \Phi^*}{\partial z^*} \right)^2} \right] +$$

$$\nabla^* \cdot \left\langle \left\langle \rho_0^* \overline{u^* \Phi^*} + \rho_0^* \frac{\partial}{\partial y^*} \left(\frac{\overline{\Phi^* \varphi^*}}{2} + \frac{1}{\beta^*} \frac{\partial^2 \overline{u^*}}{\partial t^{*2}} \varphi^* \right), \right. \right.$$

$$\left. \rho_0^* \overline{v^* \Phi^*} - \rho_0^* \frac{\partial}{\partial x^*} \left(\frac{\overline{\Phi^* \varphi^*}}{2} + \frac{1}{\beta^*} \frac{\partial^2 \overline{u^*}}{\partial t^{*2}} \varphi^* \right) - \frac{\partial(\rho_0^* R^*)}{\partial z^*}, \right.$$

$$\left. \rho_0^* \overline{w^* \Phi^*} + \frac{\partial(\rho_0^* R^*)}{\partial y^*} \right\rangle = 0,$$

赤道慣性重力波、混合ロスビー重力波、ロスビー波（無次元で表現）

$$\frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \left(\tilde{m}^2 \omega^2 - k^2 - \frac{k}{\omega} \right) v - \tilde{m}^2 y^2 v = 0, \quad \text{特性方程式}$$

$$v = \mathcal{A} \cos \mu \exp(-\tilde{m} y^2 / 2 + z / 2) H^{(n, \tilde{m})},$$

$$u = \frac{1}{\tilde{m}^2 \omega^2 - k^2} \left(\omega \tilde{m}^2 y v_\mu - k \frac{\partial v_\mu}{\partial y} \right),$$

$$\Phi = \frac{1}{\tilde{m}^2 \omega^2 - k^2} \left(k y v_\mu - \omega \frac{\partial v_\mu}{\partial y} \right),$$

$$w = -\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t \partial z} = \omega \frac{\partial \Phi_\mu}{\partial z} = \omega (-m \Phi + \Phi_\mu / 2),$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \omega}{\partial k} &= \frac{2k\omega + 1}{3\tilde{m}^2 \omega^2 - (k^2 + 2\tilde{m}n + \tilde{m})} && \text{群速度} \\ &= \frac{2k\omega^2 + \omega}{2\tilde{m}^2 \omega^3 + k}, \\ \frac{\partial \omega}{\partial m} &= \frac{(-2\tilde{m}\omega^2 + 2n + 1)\omega m / \tilde{m}}{3\tilde{m}^2 \omega^2 - (k^2 + 2\tilde{m}n + \tilde{m})} \\ &= \frac{-(\tilde{m}^2 \omega^3 + \omega k^2 + k)\omega m / \tilde{m}^2}{2\tilde{m}^2 \omega^3 + k}, \end{aligned}$$

中緯度慣性重力波、ロスビー波（有次元で表現）

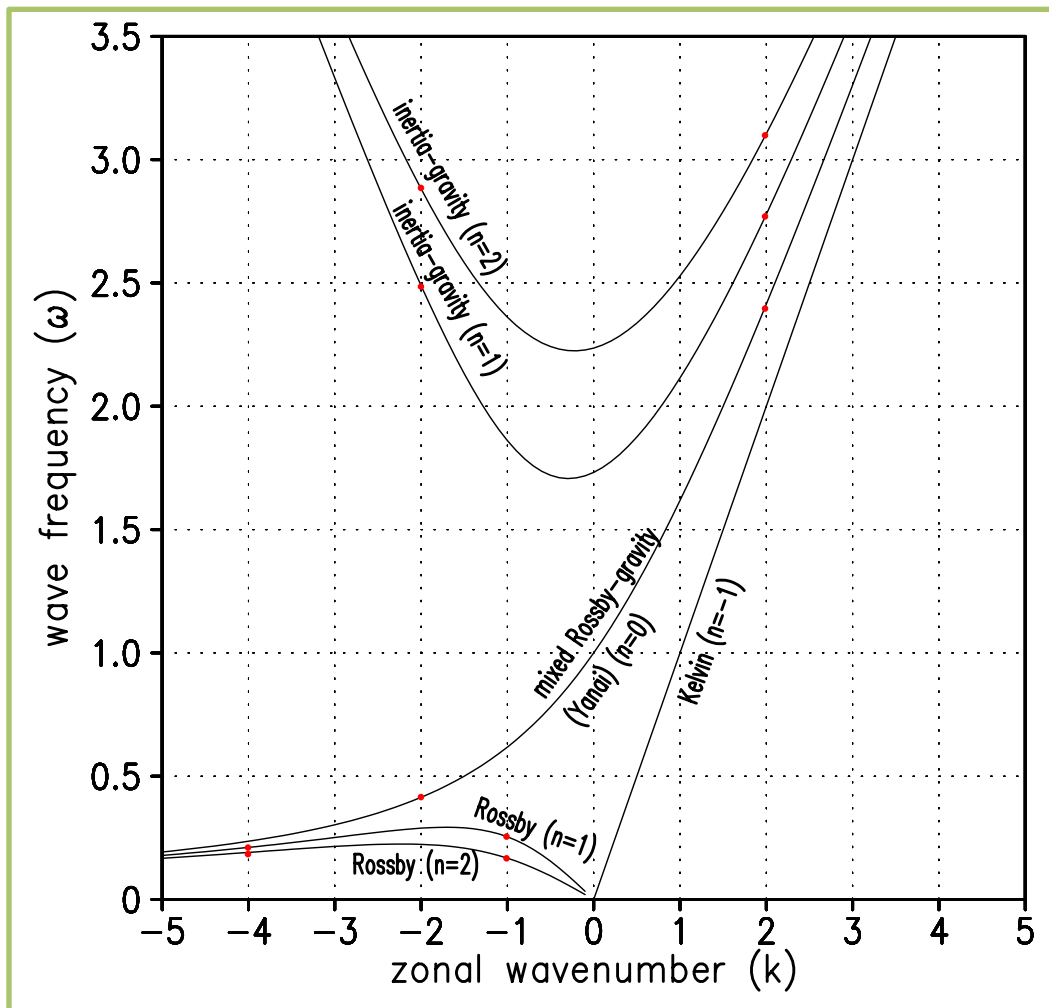
$$\begin{aligned} \frac{1}{\rho_0^*} \frac{\partial}{\partial z^*} \left[\frac{\rho_0^*}{N^{*2}} \frac{\partial}{\partial z^*} \left(\frac{\partial^3 v^*}{\partial t^{*3}} + f^{*2} \frac{\partial v^*}{\partial t^*} \right) \right] & \quad \text{特性方程式} \\ + \frac{\partial}{\partial t^*} \left(\frac{\partial^2 v^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 v^*}{\partial y^{*2}} \right) + \beta^* \frac{\partial v^*}{\partial x^*} &= 0, \end{aligned}$$

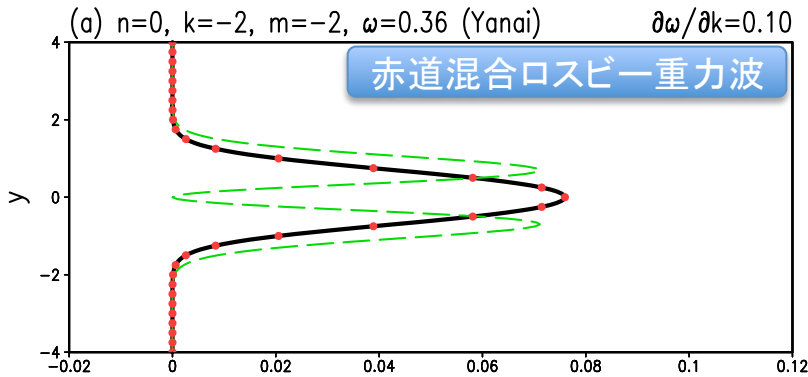
$$\begin{aligned} v^* &= \mathcal{A}^* \exp[i\mu] \exp[z^* / (2H^*)] \\ &= \mathcal{A}^* e^{i\mu + z^* / (2H^*)}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u^* &= \frac{f^* \tilde{m}^{*2} \omega^* v_\mu^* + N^{*2} k^* l^* v^*}{\tilde{m}^{*2} \omega^{*2} - N^{*2} k^{*2}}, \\ \Phi^* &= \frac{(f^* k^* v_\mu^* + l^* \omega^* v^*) N^{*2}}{\tilde{m}^{*2} \omega^{*2} - N^{*2} k^{*2}}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \omega^*}{\partial k^*} &= \frac{(2k^* \omega^* + \beta^*) N^{*2}}{(3\omega^{*2} - f_0^{*2}) \tilde{m}^{*2} - (k^{*2} + l^{*2}) N^{*2}} && \text{群速度} \\ &= \frac{(2k^* \omega^{*2} + \beta^* \omega^*) N^{*2}}{2\tilde{m}^{*2} \omega^{*3} + \beta^* N^{*2} k^*}, \\ \frac{\partial \omega^*}{\partial l^*} &= \frac{2l^* \omega^* N^{*2}}{(3\omega^{*2} - f_0^{*2}) \tilde{m}^{*2} - N^{*2} (k^{*2} + l^{*2})} \\ &= \frac{2l^* \omega^{*2} N^{*2}}{2\tilde{m}^{*2} \omega^{*3} + \beta^* N^{*2} k^*}, \\ \frac{\partial \omega^*}{\partial m^*} &= \frac{-2(\omega^{*2} - f_0^{*2}) m^* \omega^*}{3\omega^{*2} \tilde{m}^{*2} - [N^{*2} (k^{*2} + l^{*2}) + f_0^{*2} \tilde{m}^{*2}]} \\ &= \frac{-2(\omega^{*2} - f_0^{*2}) m^* \omega^{*2}}{2\tilde{m}^{*2} \omega^{*3} + \beta^* N^{*2} k^*}, \end{aligned}$$

各種赤道波の分散関係式



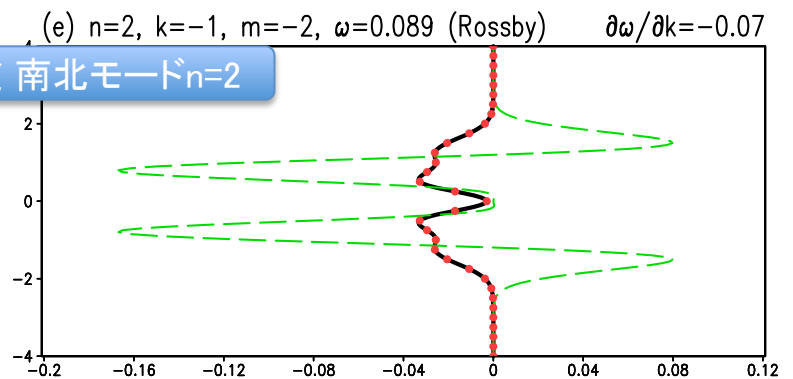
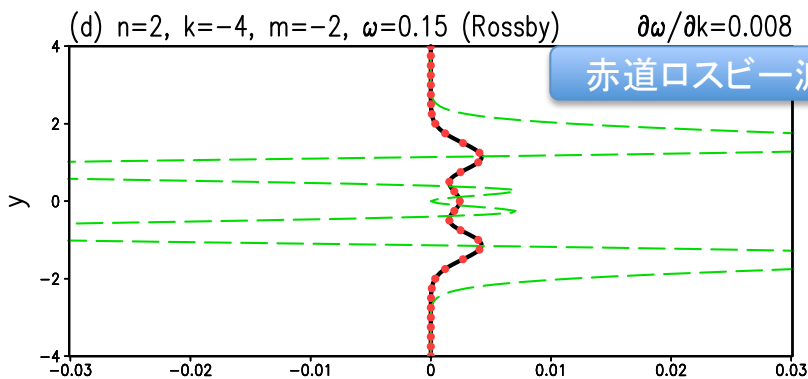
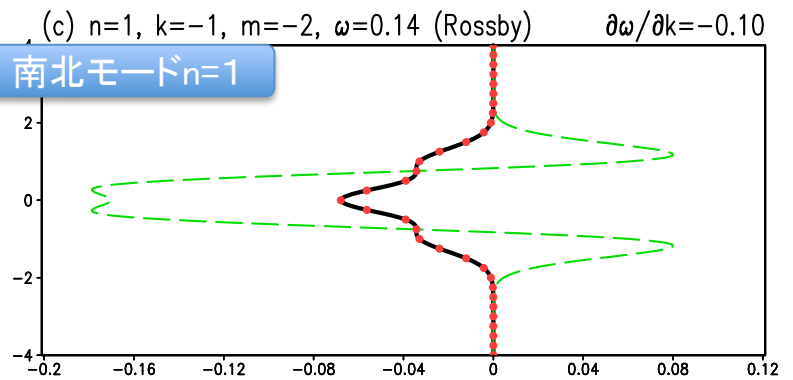
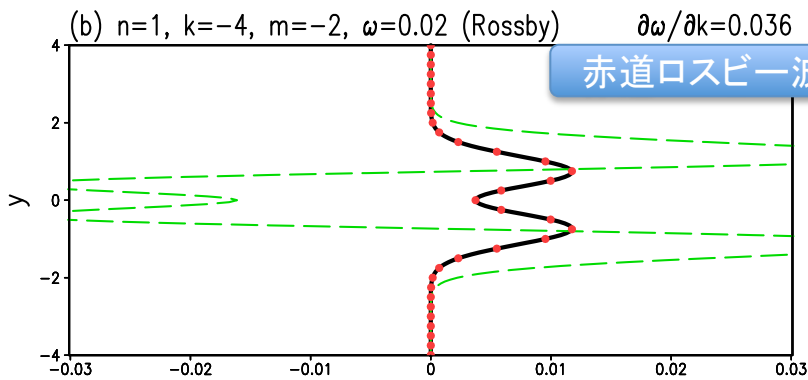


$$\int_{-\infty}^{+\infty} \overline{u\Phi} dy = \frac{\partial\omega}{\partial k} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{2} \left[\overline{u^2 + v^2 + \left(\frac{\partial\Phi}{\partial z}\right)^2} \right] dy.$$

$$\overline{u\Phi} \neq \frac{\partial\omega}{\partial k} \frac{1}{2} \left[\overline{u^2 + v^2 + \left(\frac{\partial\Phi}{\partial z}\right)^2} \right],$$

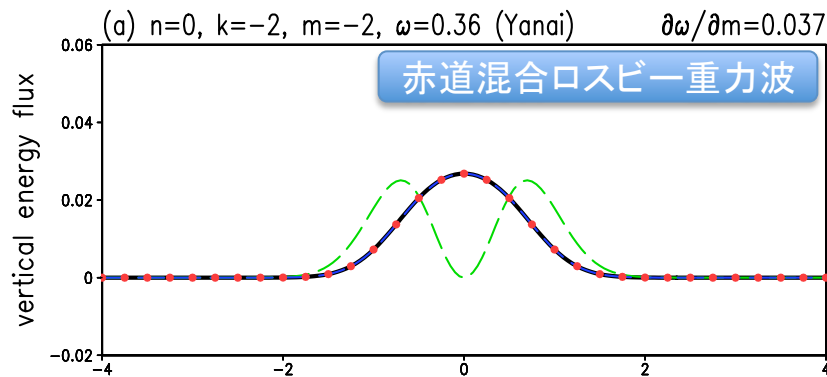
$$\frac{\partial\omega}{\partial k} \frac{1}{2} \left[\overline{u^2 + v^2 + \left(\frac{\partial\Phi}{\partial z}\right)^2} \right] = \overline{u\Phi} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\overline{\Phi\varphi}}{2} + \frac{\overline{\partial^2 u}}{\partial t^2} \varphi \right),$$

$$\varphi \equiv \frac{-v\mu}{k + 2\tilde{m}^2\omega^3},$$



zonal flux of wave energy

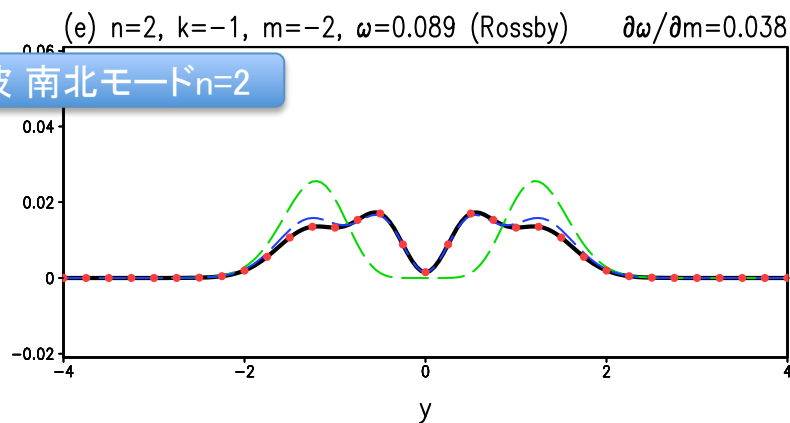
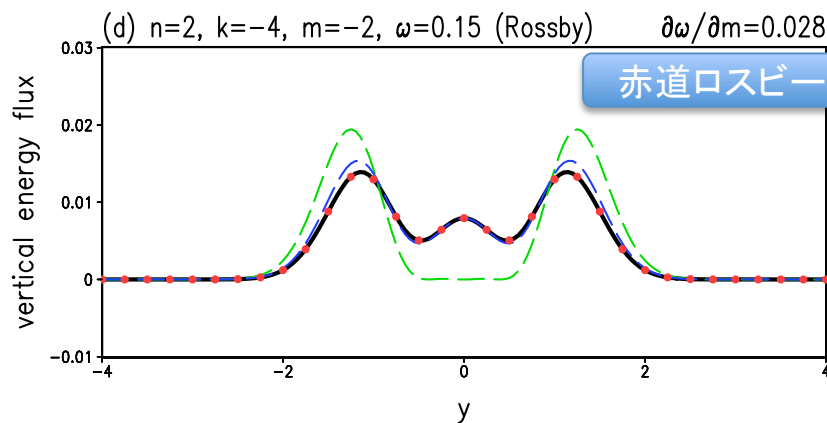
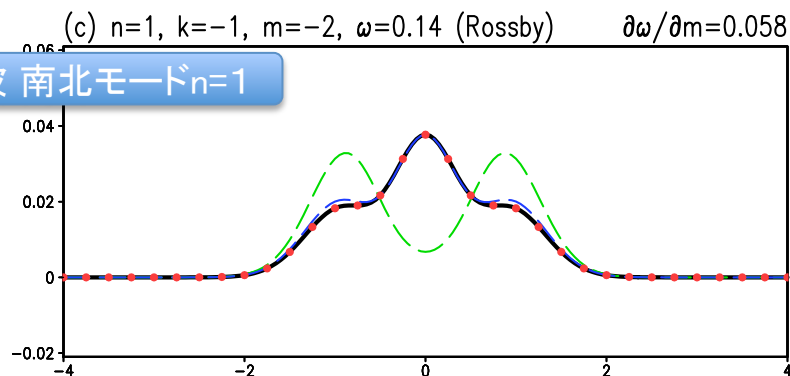
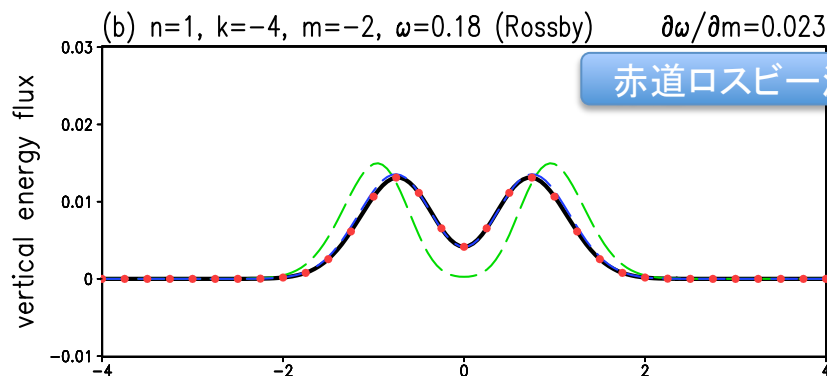
zonal flux of wave energy



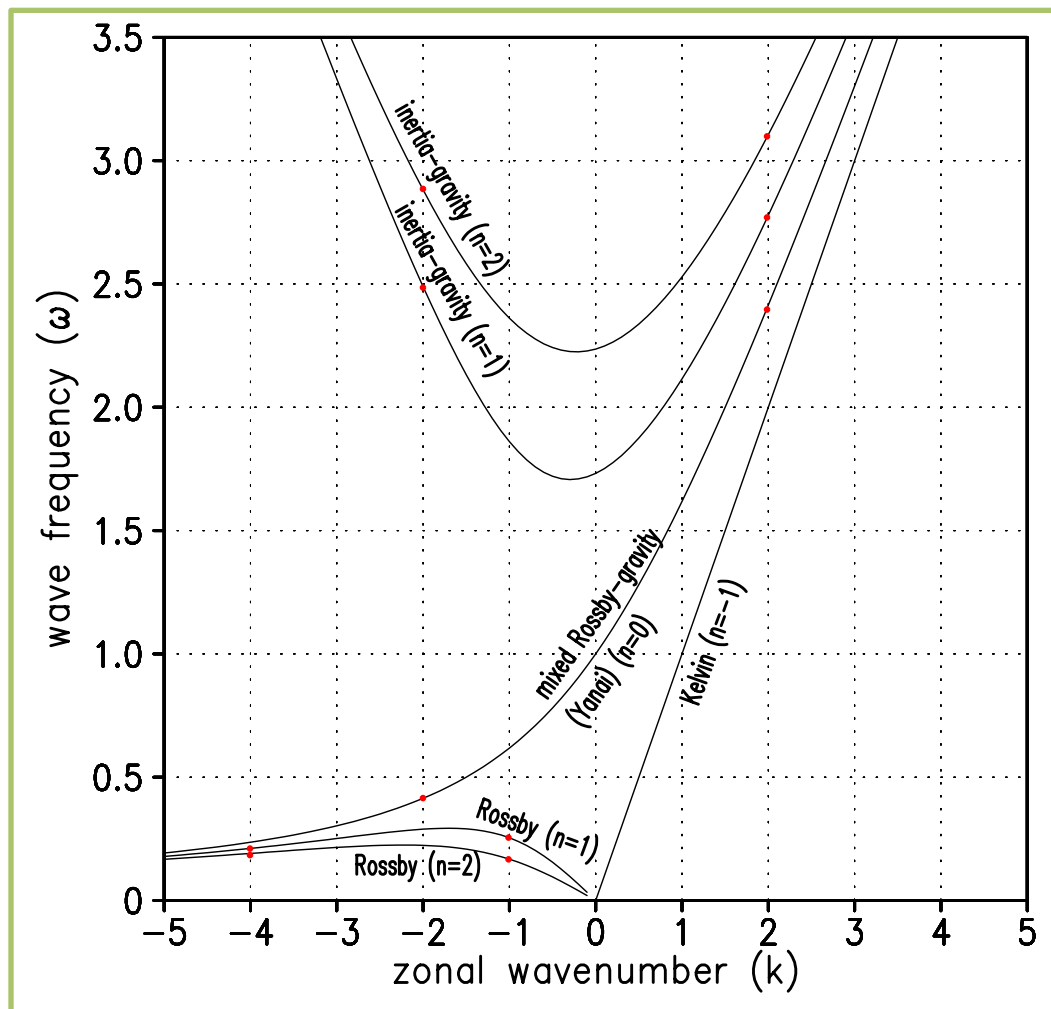
$$\int_{-\infty}^{+\infty} \overline{w\Phi} dy = \frac{\partial\omega}{\partial m} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{2} \overline{u^2 + v^2 + \left(\frac{\partial\Phi}{\partial z}\right)^2} dy.$$

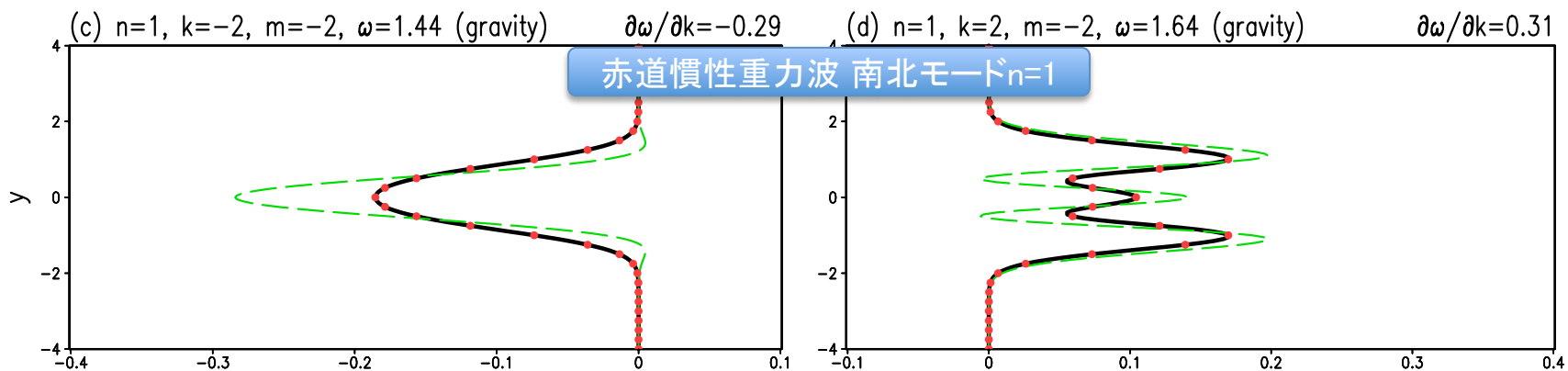
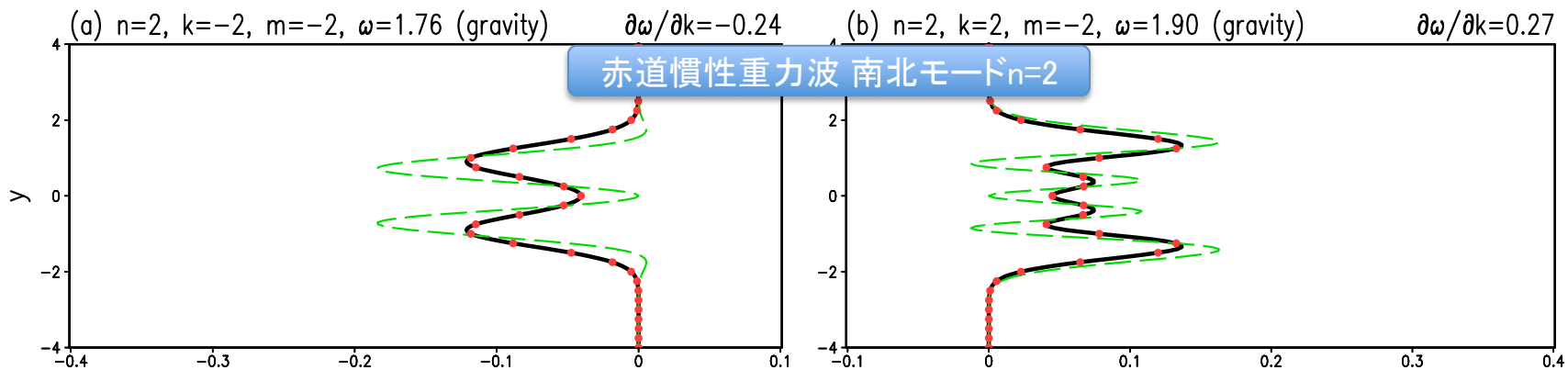
$$\overline{w\Phi} \neq \frac{\partial\omega}{\partial m} \frac{1}{2} \overline{u^2 + v^2 + \left(\frac{\partial\Phi}{\partial z}\right)^2},$$

$$= \overline{w\Phi} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 \overline{\varpi}}{\partial y \partial t} \frac{\partial \chi}{\partial y} - y^2 \frac{\partial^2 \overline{v}}{\partial z \partial t} \chi \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial^2 \overline{w}}{\partial t^2} \varphi \right) - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial^3 \overline{\varpi}}{\partial y \partial t^2} \varphi \right).$$



各種赤道波の分散関係式





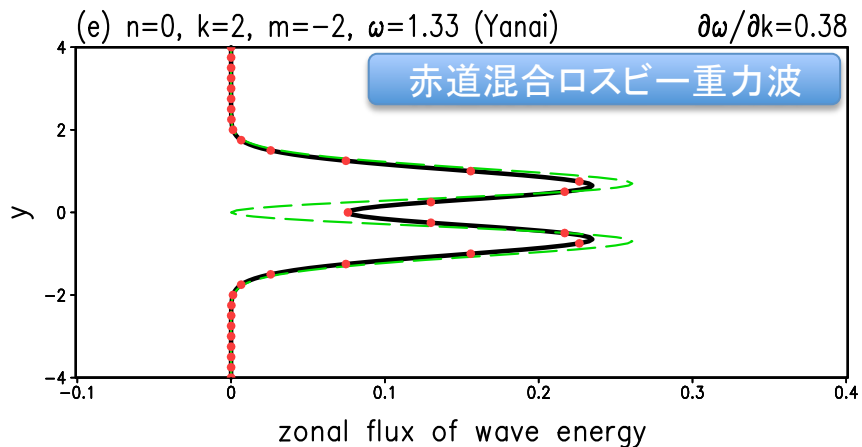
zonal flux of wave energy

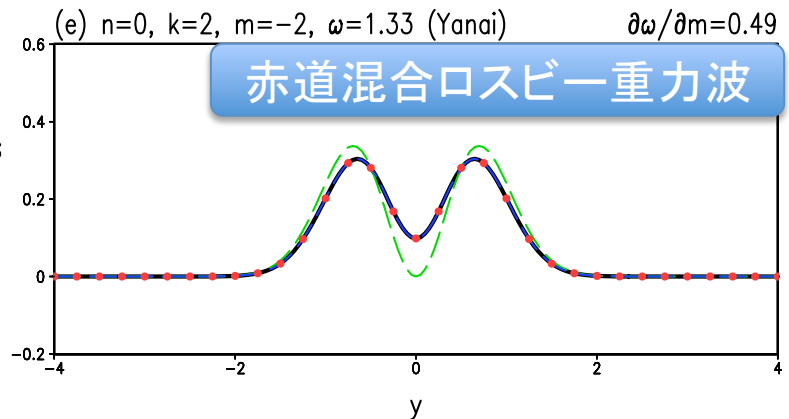
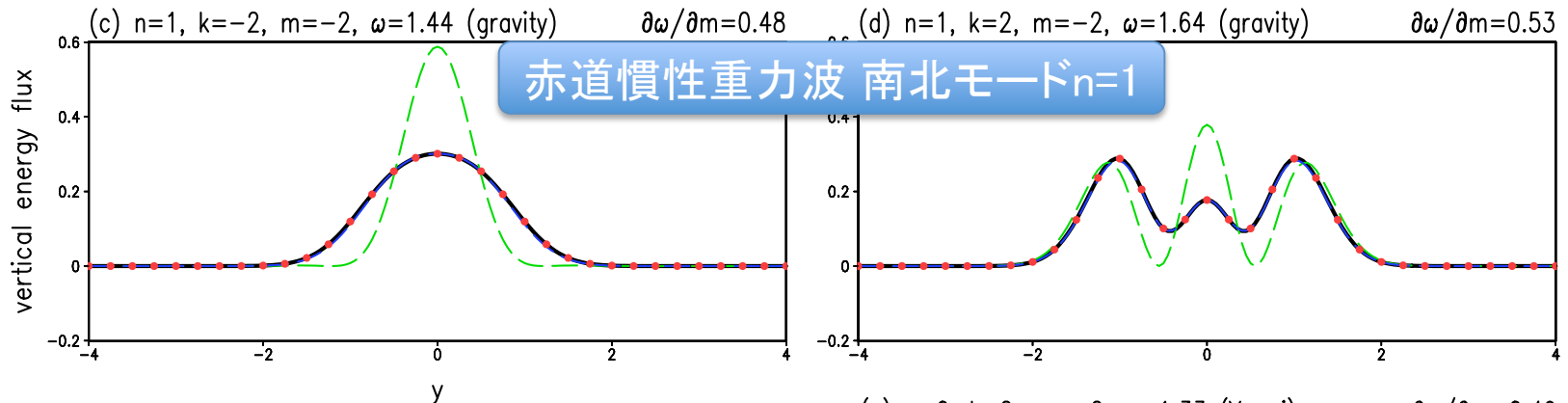
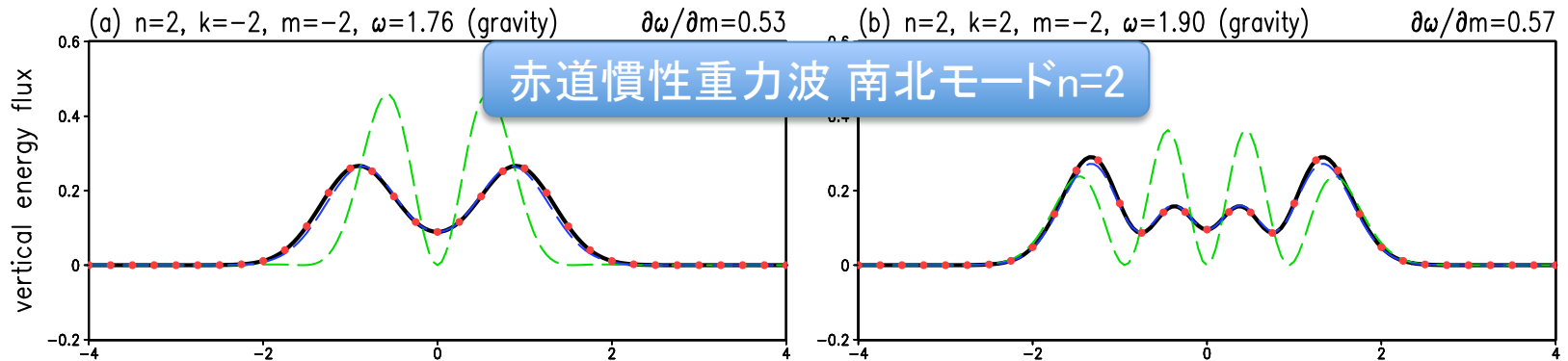
$$\int_{-\infty}^{+\infty} \overline{u\Phi} dy = \frac{\partial\omega}{\partial k} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{2} \left[\overline{u^2 + v^2 + \left(\frac{\partial\Phi}{\partial z}\right)^2} \right] dy.$$

$$\overline{u\Phi} \neq \frac{\partial\omega}{\partial k} \frac{1}{2} \left[\overline{u^2 + v^2 + \left(\frac{\partial\Phi}{\partial z}\right)^2} \right],$$

$$\frac{\partial\omega}{\partial k} \frac{1}{2} \left[\overline{u^2 + v^2 + \left(\frac{\partial\Phi}{\partial z}\right)^2} \right] = \overline{u\Phi} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\overline{\Phi\varphi}}{2} + \overline{\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \varphi} \right),$$

$$\varphi \equiv \frac{-v\mu}{k + 2\tilde{m}^2\omega^3},$$





$$\int_{-\infty}^{+\infty} \overline{w\Phi} dy = \frac{\partial\omega}{\partial m} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{2} \left[\overline{u^2 + v^2 + \left(\frac{\partial\Phi}{\partial z}\right)^2} \right] dy.$$

$$\overline{w\Phi} \neq \frac{\partial\omega}{\partial m} \frac{1}{2} \left[\overline{u^2 + v^2 + \left(\frac{\partial\Phi}{\partial z}\right)^2} \right],$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial\omega}{\partial m} \frac{1}{2} \left[\overline{u^2 + v^2 + \left(\frac{\partial\Phi}{\partial z}\right)^2} \right] \\ &= \overline{w\Phi} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 \overline{\omega}}{\partial y \partial t} \frac{\partial \chi}{\partial y} - y^2 \frac{\partial^2 \overline{v}}{\partial z \partial t} \chi \right) + \\ & \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial^2 \overline{w}}{\partial t^2} \varphi \right) - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial^3 \overline{\omega}}{\partial y \partial t^2} \varphi \right), \end{aligned}$$

vertical energy flux

中緯度と赤道域の全ての波の群速度ベクトルに平行なエネルギーフラックスの表現式

完全版 (実用化は長期目標)

$$\frac{\partial}{\partial t^*} \frac{\rho_0^*}{2} \left[\overline{u^{*2} + v^{*2} + \frac{1}{N^{*2}} \left(\frac{\partial \Phi^*}{\partial z^*} \right)^2} \right] +$$

$$\nabla^* \cdot \left\langle \left\langle \rho_0^* \overline{u^* \Phi^*} + \rho_0^* \frac{\partial}{\partial y^*} \left(\frac{\overline{\Phi^* \varphi^*}}{2} + \frac{1}{\beta^*} \overline{\frac{\partial^2 u^*}{\partial t^{*2}} \varphi^*} \right), \right. \right.$$

$$\left. \rho_0^* \overline{v^* \Phi^*} - \rho_0^* \frac{\partial}{\partial x^*} \left(\frac{\overline{\Phi^* \varphi^*}}{2} + \frac{1}{\beta^*} \overline{\frac{\partial^2 u^*}{\partial t^{*2}} \varphi^*} \right) - \frac{\partial(\rho_0^* R^*)}{\partial z^*}, \right.$$

$$\left. \rho_0^* \overline{w^* \Phi^*} + \frac{\partial(\rho_0^* R^*)}{\partial y^*} \right\rangle = 0,$$

アスタリスクは
次元付きを表す

$$\varphi^* = \frac{-v_\mu^*}{2\tilde{m}^{*2}\omega^{*3}/(\beta^*N^{*2}) + k^*},$$

$$\varpi^* = \frac{1}{\rho_0^*} \int_{z^*}^{\infty} \rho_0^* v^* dz^*,$$

$$\chi^* = \frac{v^*}{\tilde{m}^{*2}\omega^{*2}/N^{*2} - k^{*2}},$$

$$R^* \equiv \frac{1}{2} \int_0^{y^*} \left(\frac{\partial^2 \varpi^*}{\partial y^* \partial t^*} \frac{\partial \chi^*}{\partial y^*} - \frac{\partial^2 v^*}{\partial z^* \partial t^*} \chi^* \frac{f^{*2}}{N^{*2}} \right) G dy^* +$$

$$\frac{1}{\beta^*} \left(\frac{\partial^2 w^*}{\partial t^{*2}} \varphi^* \right) - \frac{1}{2\beta^*} \left(\frac{\partial^3 \varpi^*}{\partial y^* \partial t^{*2}} \varphi^* \right),$$

$$G = G(y^*) = \exp[-y^{*2} \beta^* \tilde{m}^* / (16N^*)].$$

水平のみ完全版 (実用化は中期目標)

$$\frac{\partial}{\partial t^*} \frac{\rho_0^*}{2} \left[\overline{u^{*2} + v^{*2} + \frac{1}{N^{*2}} \left(\frac{\partial \Phi^*}{\partial z^*} \right)^2} \right] +$$

$$\nabla^* \cdot \left\langle \left\langle \rho_0^* \overline{u^* \Phi^*} + \rho_0^* \frac{\partial}{\partial y^*} \left(\frac{\overline{\Phi^* \varphi^*}}{2} + \frac{1}{\beta^*} \overline{\frac{\partial^2 u^*}{\partial t^{*2}} \varphi^*} \right), \right. \right.$$

$$\left. \rho_0^* \overline{v^* \Phi^*} - \rho_0^* \frac{\partial}{\partial x^*} \left(\frac{\overline{\Phi^* \varphi^*}}{2} + \frac{1}{\beta^*} \overline{\frac{\partial^2 u^*}{\partial t^{*2}} \varphi^*} \right), \rho_0^* \overline{w^* \Phi^*} \right\rangle = 0,$$

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2}{\partial y^{*2}} \right) \varphi^* + \frac{1}{\rho_0^*} \frac{\partial}{\partial z^*} \left[\left(\frac{\rho_0^*}{N^{*2}} \right) \frac{\partial}{\partial z^*} \left(f^{*2} \varphi^* + 3 \frac{\partial^2 \varphi^*}{\partial t^{*2}} \right) \right] = q^*$$

近似版 (実用化試験中)

$$\frac{\partial}{\partial t^*} \frac{\rho_0^*}{2} \left[\overline{u^{*2} + v^{*2} + \frac{1}{N^{*2}} \left(\frac{\partial \Phi^*}{\partial z^*} \right)^2} \right] +$$

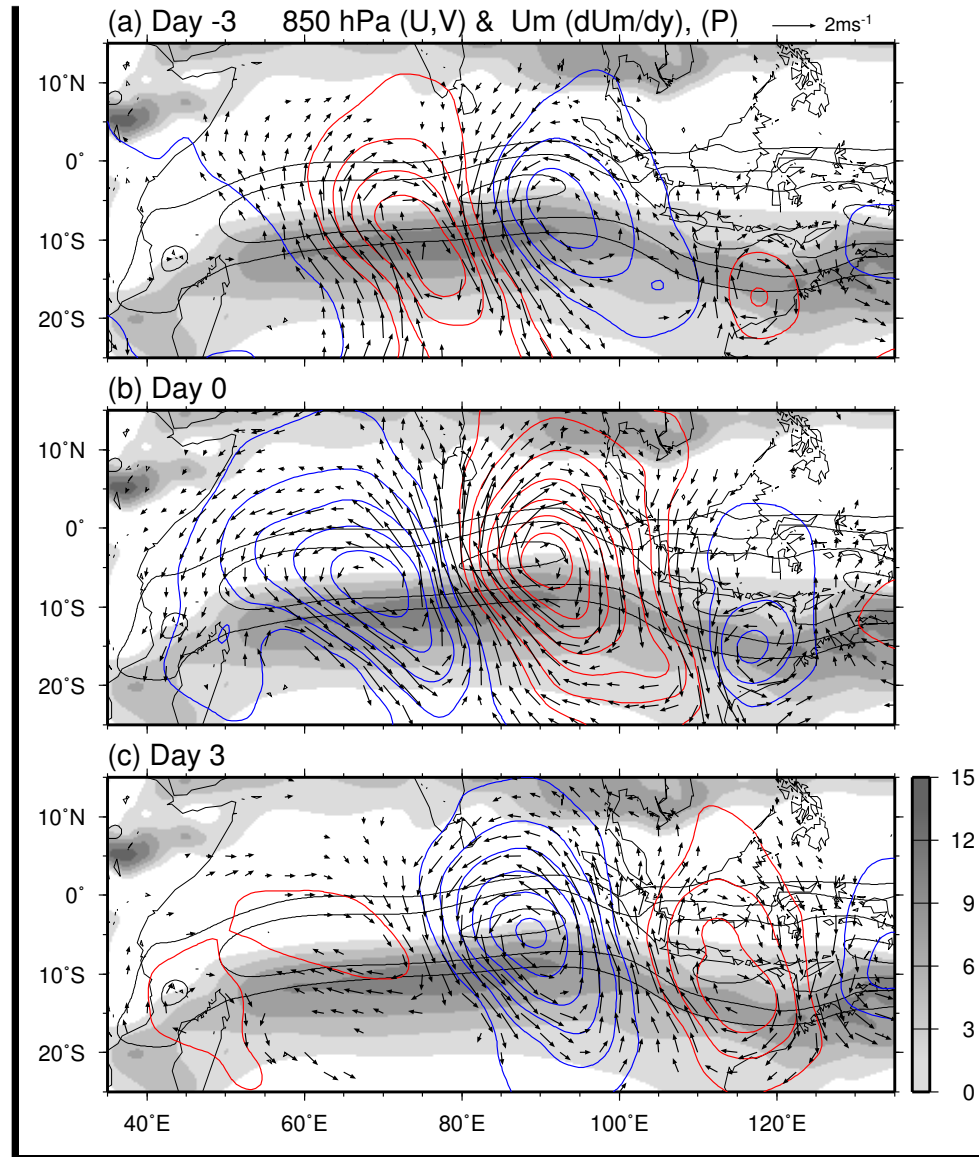
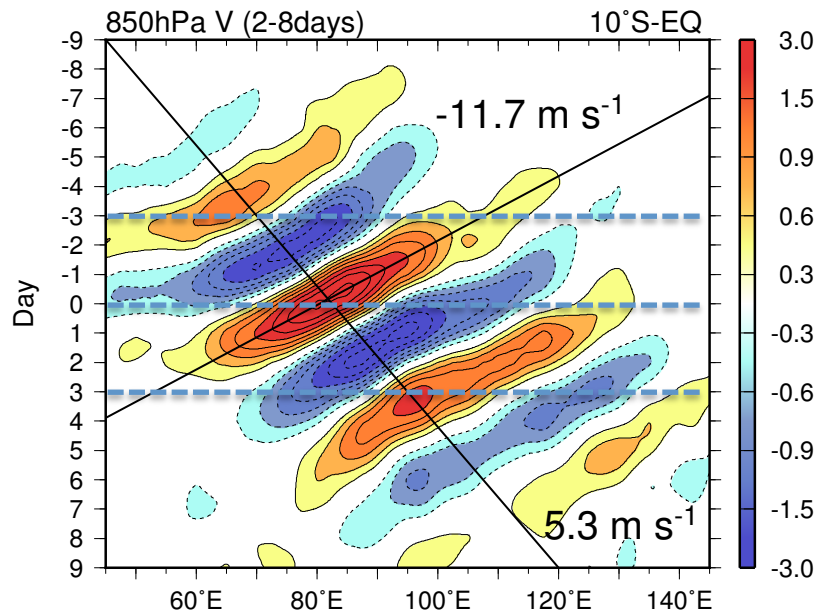
$$\nabla^* \cdot \left\langle \left\langle \rho_0^* \overline{u^* \Phi^*} + \rho_0^* \frac{\partial}{\partial y^*} \left(\frac{\overline{\Phi^* \varphi^{app^*}}}{2} \right), \right. \right.$$

$$\left. \rho_0^* \overline{v^* \Phi^*} - \rho_0^* \frac{\partial}{\partial x^*} \left(\frac{\overline{\Phi^* \varphi^{app^*}}}{2} \right), \rho_0^* \overline{w^* \Phi^*} \right\rangle = 0,$$

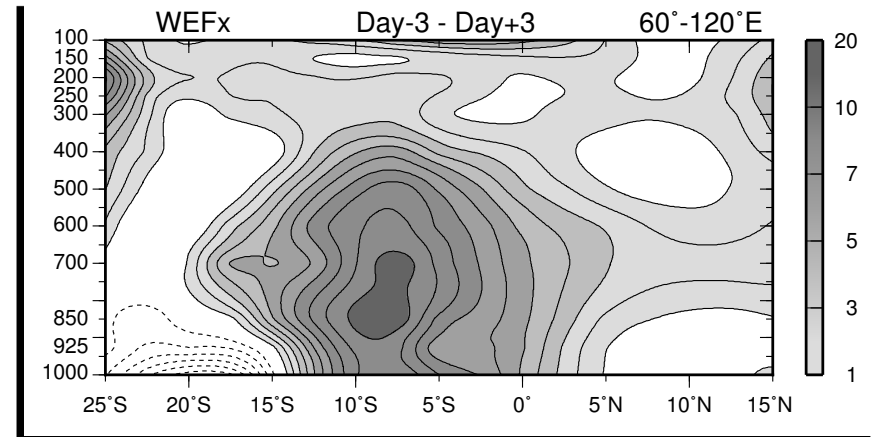
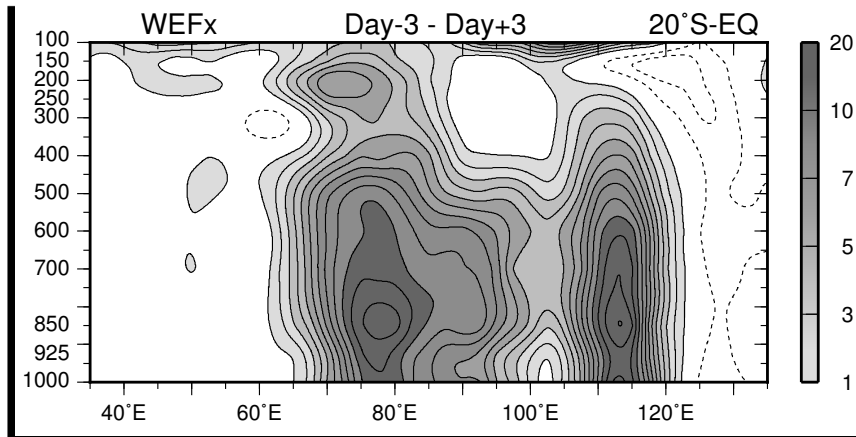
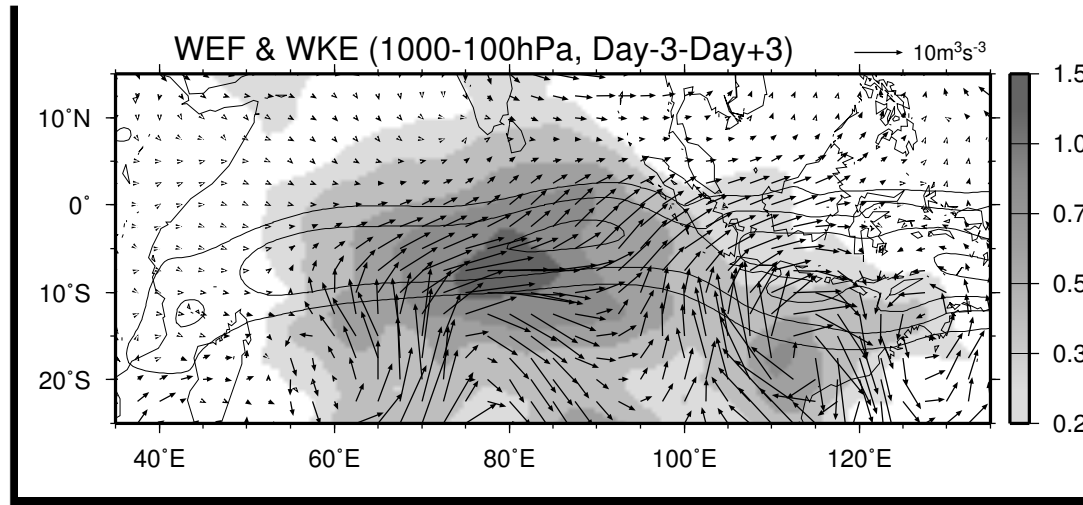
$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2}{\partial y^{*2}} \right) \varphi^{app^*} + \frac{1}{\rho_0^*} \frac{\partial}{\partial z^*} \left[\left(\frac{\rho_0^*}{N^{*2}} \right) \frac{\partial}{\partial z^*} \left(f^{*2} \varphi^{app^*} \right) \right] = q^*$$

JRA55の解析

(近似版を使用)



Wave Energy Flux (WEF) (近似版を使用)



まとめ

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

海洋では浅水方程式を使って事例研究

(Ogata and Aiki, 2019 SOLA; Li and Aiki, 2020 GRL; Song and Aiki, 2020 JGR;
Song and Aiki, JPO under revision; Toyoda et al, JC under revision)

気象ではJRA55を使って事例研究

(Fukutomi and Aiki, JGR under revision)

3次元の定式化がようやく終了、当面は近似版の診断式を使っていく

(Aiki et al, JAS under revision)

平均流・波動相互作用理論との連携は今後の課題

解析コードのダウンロードは…

<http://co2.hyarc.nagoya-u.ac.jp/labhp/member/aiki/invepv.html>

補助申請

(毎年1.15締め切り)

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



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

[ページトップへ▲](#)

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