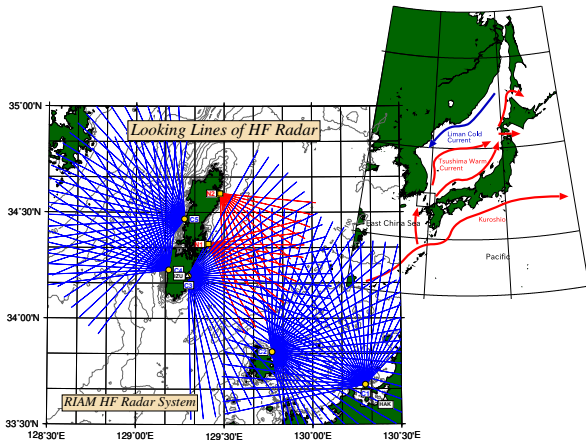
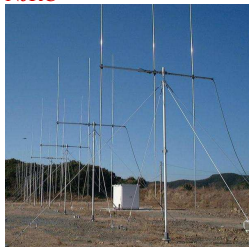
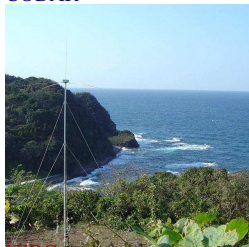


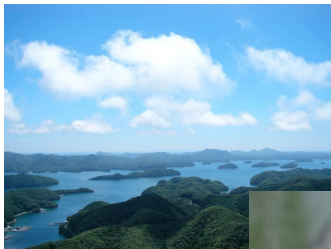
- 風成乱流 ・ 熱成乱流 (対流)
 - ▶ シアー乱流・熱対流 (先行研究の振り返り)
 - ▶ **新知見** (大気境界層との相似性、海洋境界層の独自性)
- **波成乱流** (海洋境界層の独自性)
 - ▶ (A) 碎波
 - ▶ (B) **波・流れ相互作用**
 - ~~波浪・ランダムリア循環・ラグランジュ流速~~
 - ~~理論 (Craig and Leibovich 1976) と検証・実測~~
 - ▶ (C) **非碎波混合**
 - ~~メカニズムの解明・混合評価~~

対馬海峡海洋レーダシステム (九大応力研)

CODAR

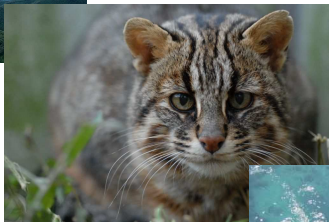


URL:<http://le-web.riam.kyushu-u.ac.jp/radar/current-map.html>



対馬（長崎県です！）

自然も文化も豊富

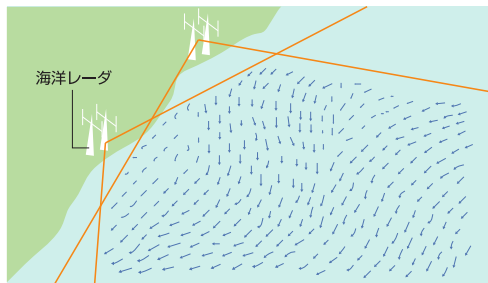


観光客も少ないし

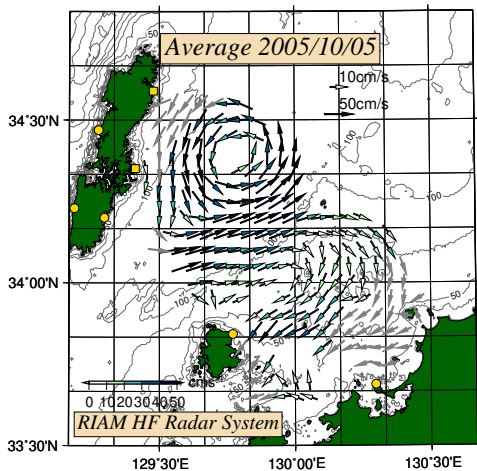


計測原理

- ▶ 地上から送信し海面で反射された電磁波の変調から海流を推定
 - ブラッグ散乱 (散乱波の特定)
 - ドップラーシフト (散乱波の移動速度特定)
 - 微小振幅深水波 (散乱波の位相速度推定)
- ▶ 海面近くの水平流速を測る



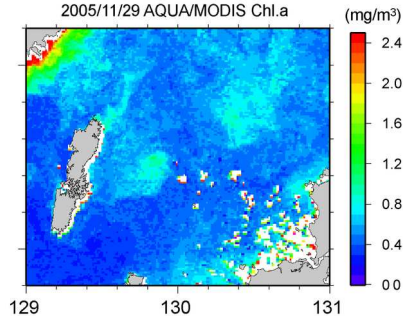
海洋レーダー観測結果例



海洋レーダの活用：渦と海洋生態系

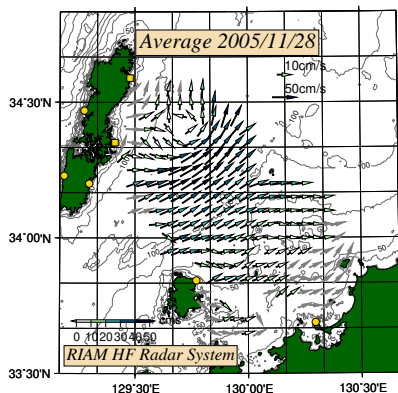
人工衛星 (MODIS) による海色画像

2005/11/29 AQUA/MODIS Chl.a

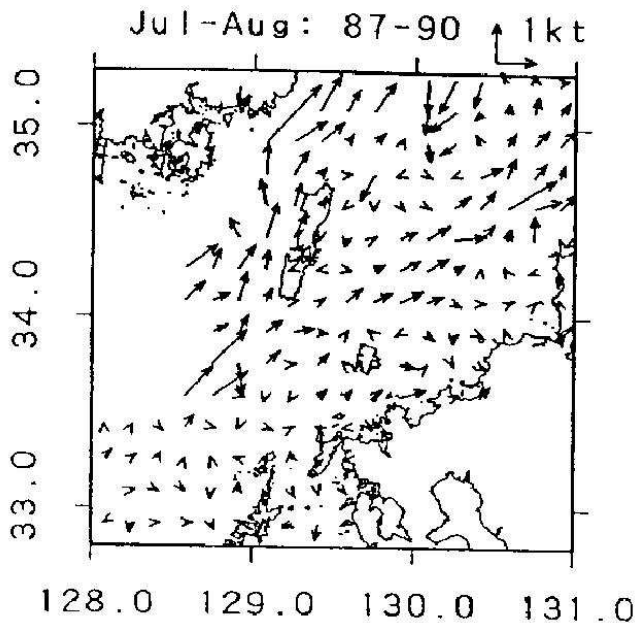


Onitsuka et al. 2009

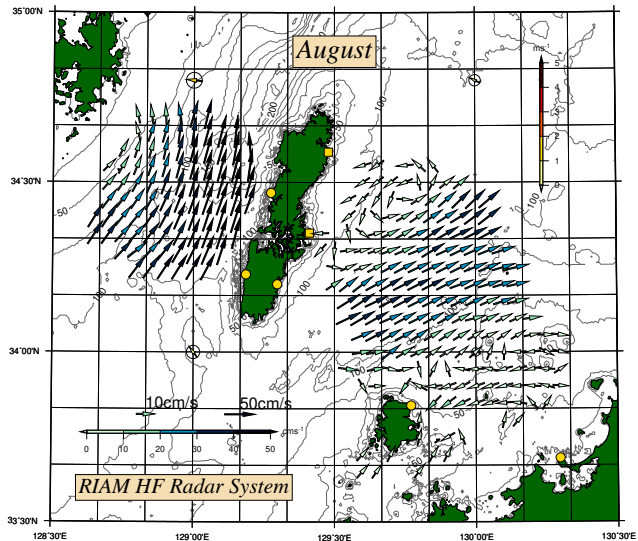
渦 ⇒ 海洋中の植物プランクトンを刺激



先行研究との比較 (船舶搭載 ADCP, Egawa et al. JO 1993)

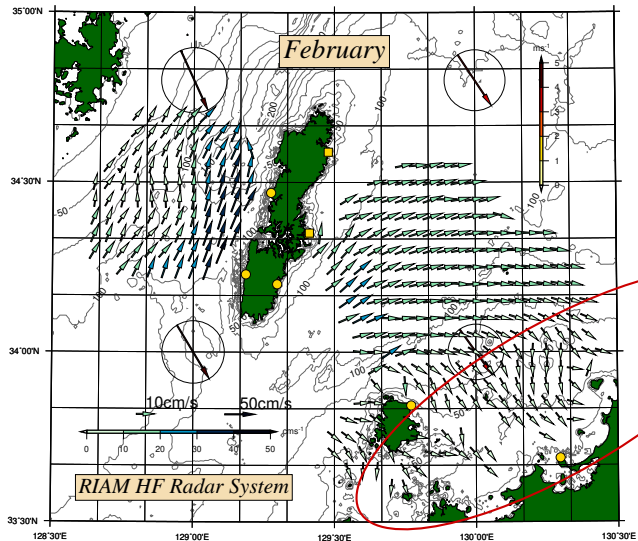


観測例：8月



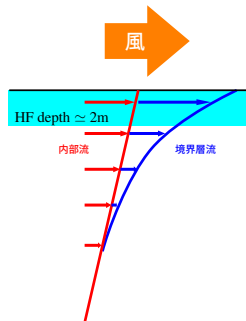
(Yoshikawa et al. 2010)

観測例：2月



海洋レーダ観測固有の問題

表層流 (計測流) = 地衡流+潮流 (内部流) + 吹送流 (境界層流)



⇒ 海洋レーダは何を見ているのかという問題

- ▶ 内部流を見たい
- ▶ 変動要因を切り分けたい

⇒ 吹送流の推定

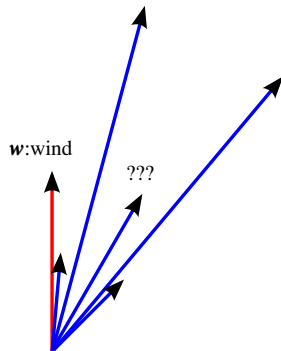
吹送係数：風力係数と吹送偏角

定義

- ▶ 風力係数： $\alpha = \frac{\text{flow speed}}{\text{wind speed}} \times 100$
- ▶ 吹送偏角： $\theta = \text{flow dir} - \text{wind dir}$

先行研究

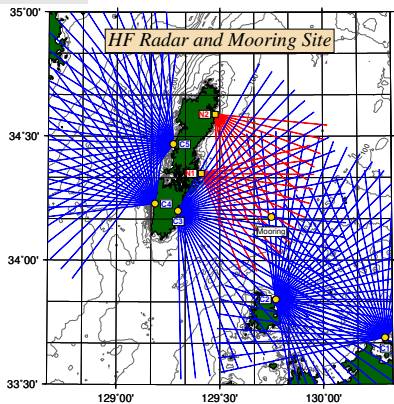
	α (%)	θ (deg)
理論値 (Ekman 1905)	1.7	45
実験値 (LES)	1.3	29
典型値 (俗説)	2 - 3	20 - 30
実測値	1 - 5	5 - 45
(e.g., Cushman-Roisin 1994)		



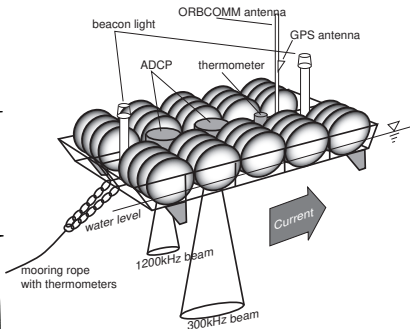
吹送係数是不確定：推定不可能

吹送流の鉛直構造の検出

観測地点

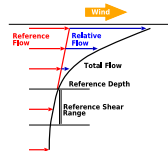
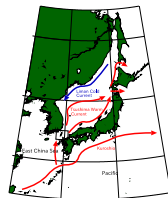
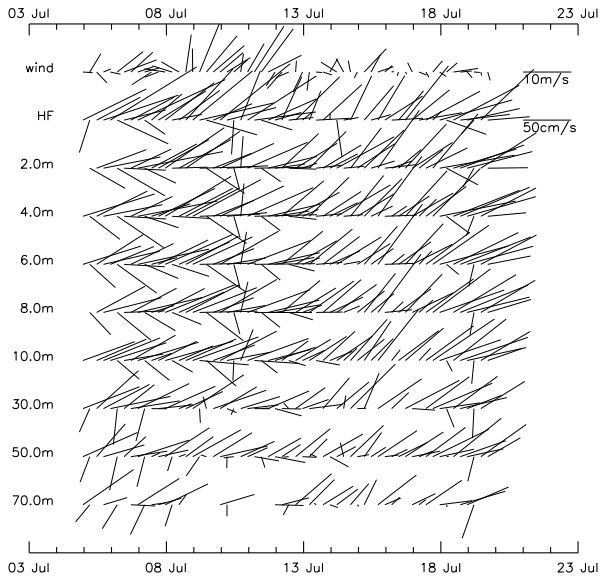


観測機器



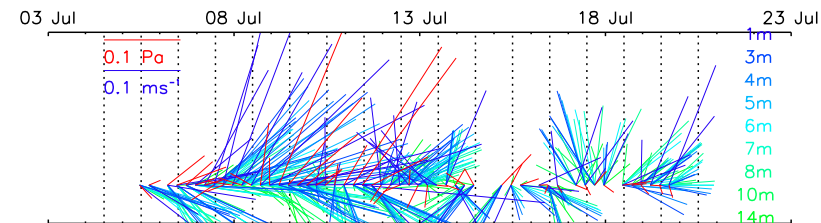
(Yoshikawa et al. 2007)

観測期間：2005年 7月5日～



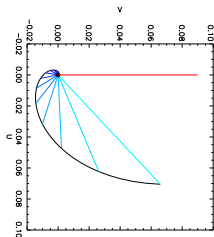
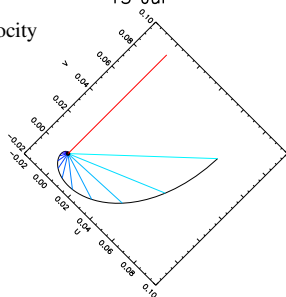
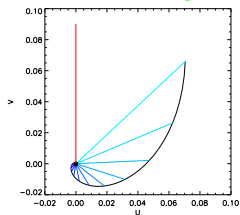
(Yoshikawa et al. 2007)

風と境界層流の時系列



03 Jul 08 Jul 13 Jul 18 Jul 23 Jul

red: wind stress blue-green: velocity



(Yoshikawa et al. 2007)

複素主成分解析 (CEOF)

$$C = W^* W$$

$$W = (w_1, w_2, \dots, w_K)$$

$$w_1 = \frac{K-1}{\text{RMS}(\tau_x^{n'}, \tau_y^{n'})} \begin{pmatrix} \tau_x^{1'} + i\tau_y^{1'} \\ \tau_x^{2'} + i\tau_y^{2'} \\ \vdots \end{pmatrix}$$

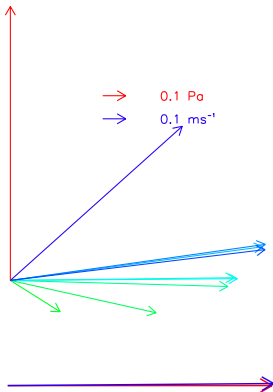
$$w_2 = \frac{1}{\text{RMS}(u_{1m}^n, v_{1m}^n)} \begin{pmatrix} u_{1m}^1 + iv_{1m}^1 \\ u_{1m}^2 + iv_{1m}^2 \\ \vdots \end{pmatrix}$$

$$w_3 = \frac{1}{\text{RMS}(u_{1m}^n, v_{1m}^n)} \begin{pmatrix} u_{2m}^1 + iv_{2m}^1 \\ u_{2m}^2 + iv_{2m}^2 \\ \vdots \end{pmatrix}$$

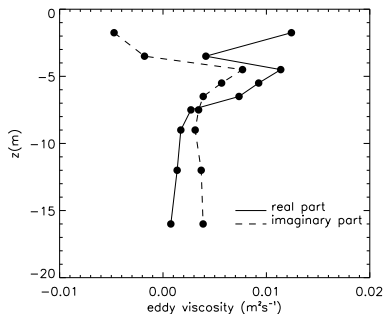
- ▶ 風応力と相対流速を同時に
- ▶ 風応力に大きな重み
- ▶ 風応力と相対流速にラグ

統計処理による鉛直螺旋構造の抽出 (複素主成分分析)

第一主成分



- ▶ **応答時間** (深さ依存)
レーダ計測層: $\approx 1 \text{ hour}$
エクマン層全体: $\approx 11\text{--}13 \text{ hours}$
- ▶ **粘性係数** (非一様)

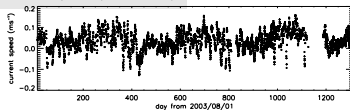


(Yoshikawa et al. 2007)

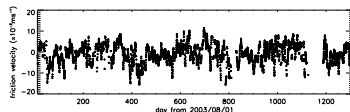
吹送流の季節変動

$$\text{吹送流} = \text{表層流レーダ} - \text{表層地衡流水位差} \propto \text{風解析値}$$

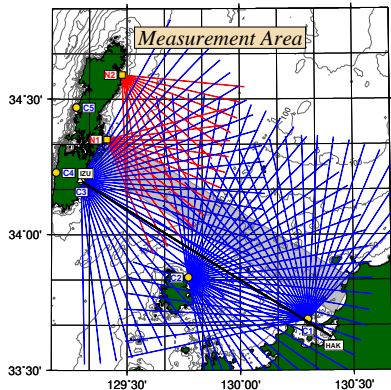
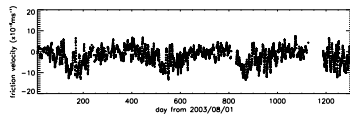
$$u'_a = u_s - g/fL(\eta_1 - \eta_2)$$



$$u_w$$



$$v_w$$



(Yoshikawa and Masuda 2009)

Ageostrophic flow and **Wind-driven flow** (along-strait comp.):

u_s^n = surface velocity (= HF radar velocity)

u_g^n = geostrophic velocity (\propto sea level difference)

$$= \frac{g}{fL} (\eta_1^n - \eta_2^n + \Delta\eta) = \frac{g}{fL} (\eta_1^n - \eta_2^n) + c$$

u_{agf}^n = ageostrophic velocity

$$= u_s^n - u_g^n = u_{agf}^n - c$$

u_{wdf}^n = wind-driven flow (\propto wind)

$$= \alpha^m \cos \theta^m w_x^{n-h} + \alpha^m \sin \theta^m w_y^{n-h} = a^m w_x^{n-h} + b^m w_y^{n-h}$$

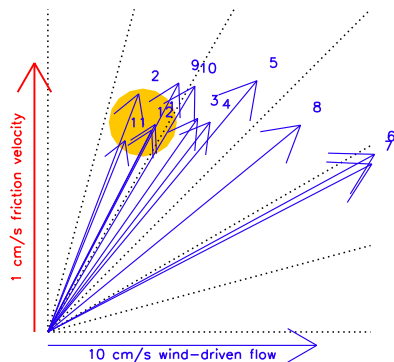
Unknown parameters :

$\alpha^{m(n)}$ = speed factor in m 's group (e.g., season)

$\theta^{m(n)}$ = deflection angle in m 's group

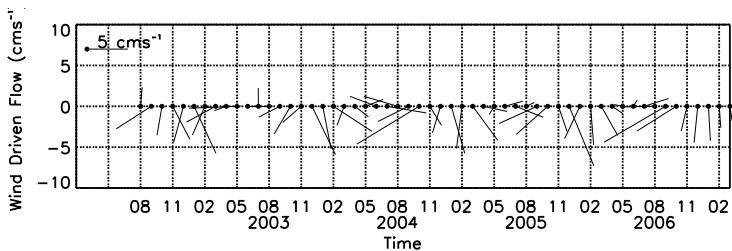
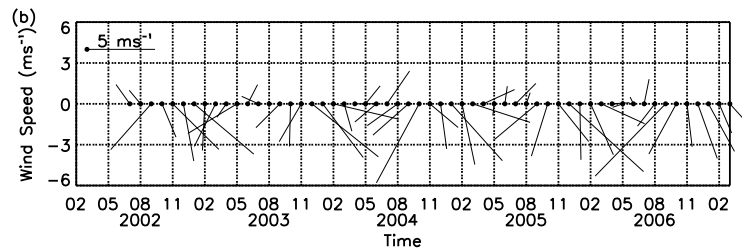
$\Delta\eta$ = difference in heights of two sea level gauges

吹送係数の季節変化



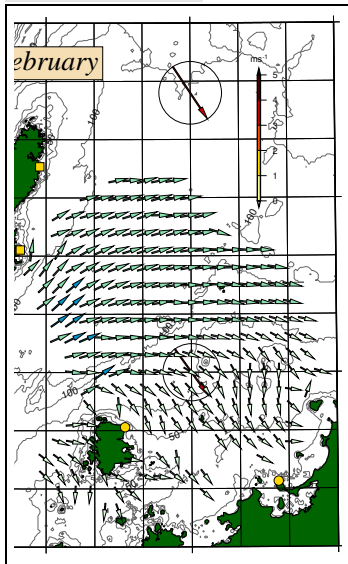
	理論値	典型値	実測値	YM2009	
	Ekman (1905)			夏季	冬季
流速 (%)	1.7	2 - 3	1 - 5	0.98-1.17	1.55-1.84
流向 (deg)	45	20 - 30	5 - 45	50.0-7.8	15.8-28.1

風と吹送流

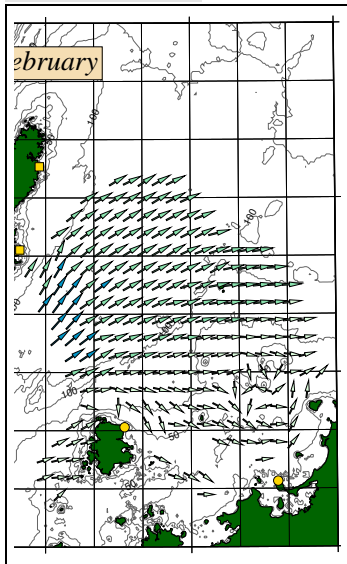


(Yoshikawa et al. 2010)

実測表層流 (2月)

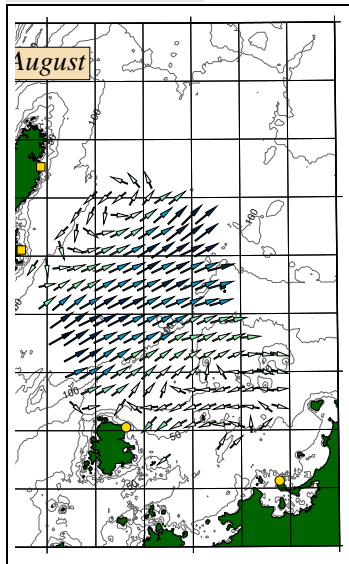


推定地衡流 (2月)

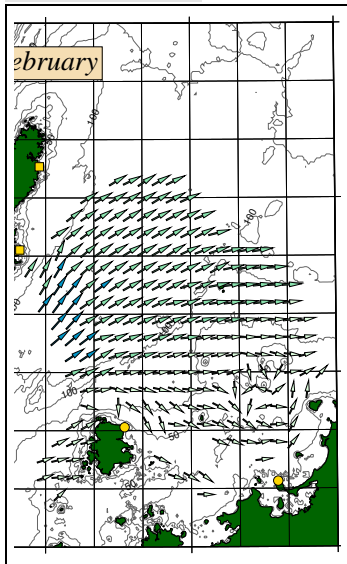


(Yoshikawa et al. 2010)

推定地衡流 (8月)

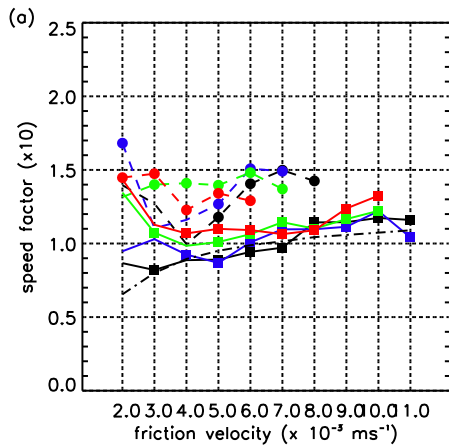


推定地衡流 (2月)



(Yoshikawa et al. 2010)

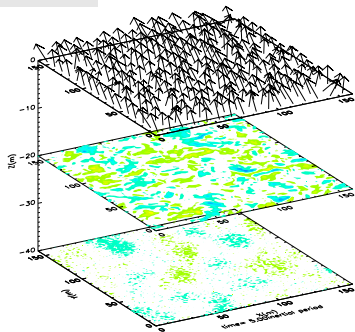
風力係数の摩擦速度依存性



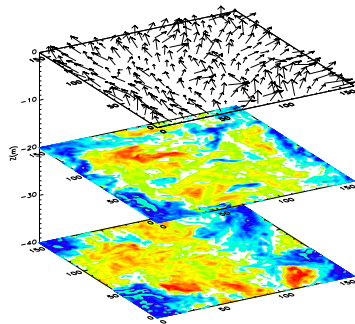
(Yoshikawa and Masuda 2009)

季節変動要因の考察：数値実験

夏 (加熱)

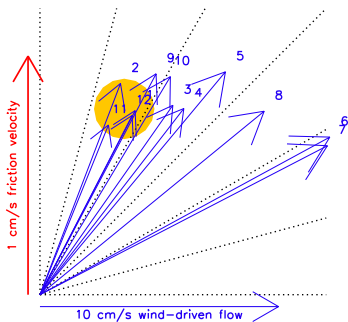


冬 (冷却)

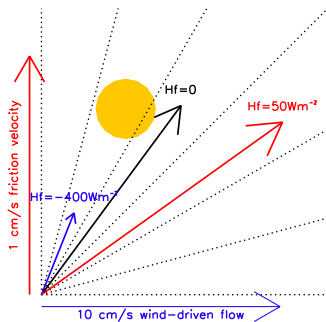


季節変動要因の考察

観測結果

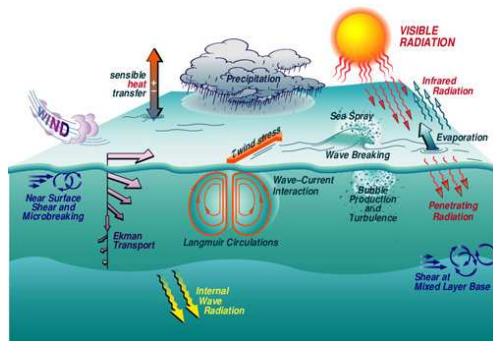


実験結果



現場観測と数値実験が意味すること

密度は混合しているが運動量は混合していない。
⇒ 何か（大事な）プロセスが LES に抜けている。



<https://www.whoi.edu/science/AOPE/dept/CBLASTmain.html>

抜けているプロセス

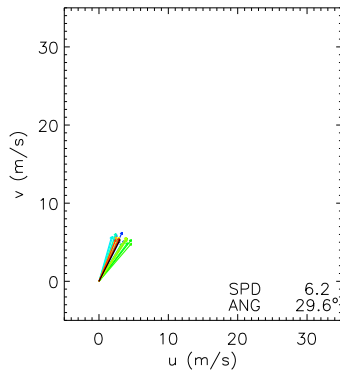
- ▶ 波浪？
- ▶ 風の時間変化×
- ▶ 熱フラックスの日変化

熱フラックスの日変化の影響

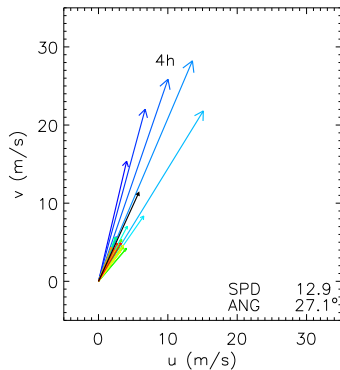
冬季においても、海面は日中（短時間であるが）加熱される。

LES 結果

日変化無し



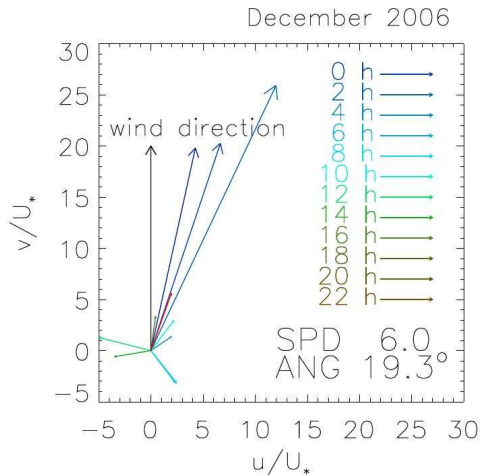
日変化有り



(Ide and Yoshikawa 2016)

熱フラックスの日変化の影響 (Ide and Yoshikawa 2016)

海洋レーダ流に見える日変化

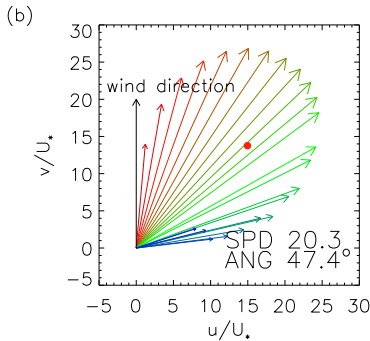
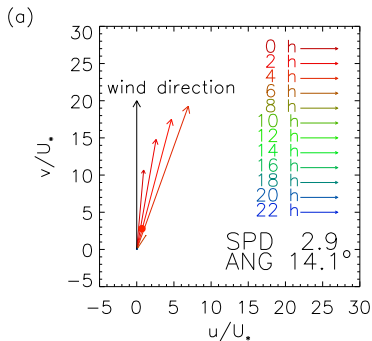


(Ide and Yoshikawa 2016)

熱フラックスの日変化：解析解

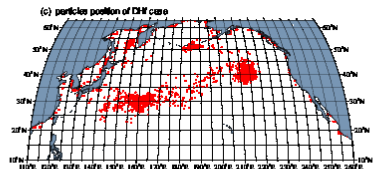
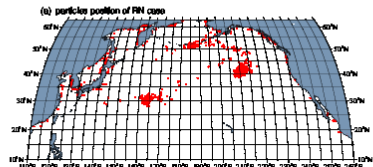
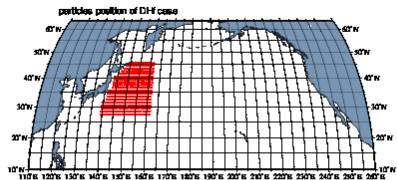
- ▶ 加熱時：Fredholm（渦粘性係数一定）
- ▶ 冷却時：鉛直一様化

$$U = W \frac{\sinh \left\{ (1+i)(z' + D'_\delta) \right\}}{\cosh \left\{ (1+i)D'_\delta \right\}} - \frac{2W}{(1+i)D'_\delta} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{1+R_n^2} \exp \left\{ - \left(\frac{P_n^2}{T_\mu} + \frac{i}{T_f} \right) t \right\} \cos \left(\frac{z'}{D'_\delta} P_n \right).$$



(井手 2016)

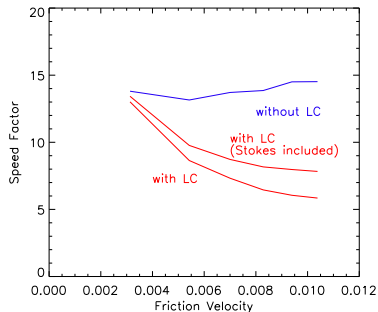
漂流に及ぼす影響



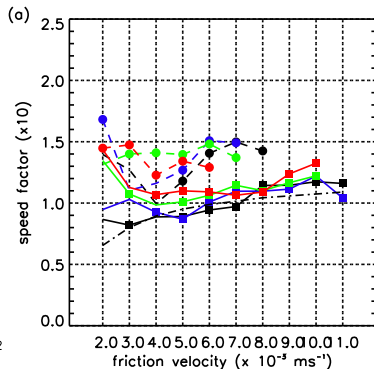
(井手 2016)

熱フラックスの日変化：吹送係数

LES 結果



観測結果



(Yoshikawa and Masuda 2009)

▶ 数値解・解析解とも

$U = U_*$ \Leftarrow PWP 模型とは異なる。(∵ 吹送流は鉛直に非一様)

鉛直一様化なら PWP 模型と一致 \Leftarrow PWP 模型は暗黙に波成乱流を想定

(Price et al. (1986) の観測では波成乱流が卓越していた?)

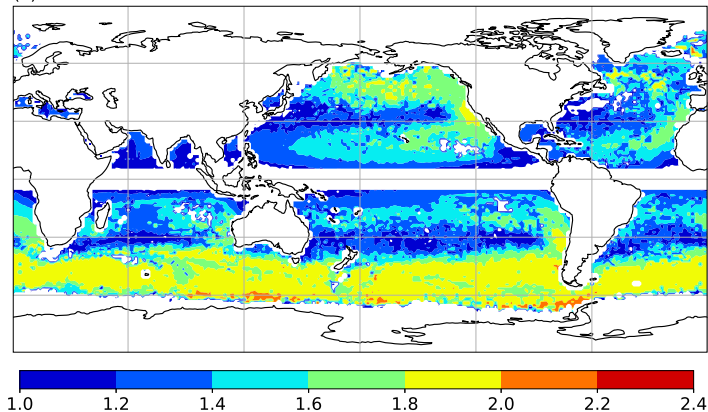
▶ 対馬海峡では波成乱流は卓越しない?

- 吹送流（境界層流）の実測
- 乱流混合の季節変動・日変動に起因して、吹送流構造も変動
- 波成乱流により鉛直一様化してなければ、吹送流速 \propto 風速
 - 対馬海峡では波成乱流の影響は弱いかな...
 - PWP 模型のバルクリチャードソン数混合は波成混合を表現
- 漂流には熱フラックスの日変化も効く

波の影響：CL-LES で評価

H/H_w : ラングミュア乱流の効果

(a)



(Kikkawa et al., in revision)

海洋表層境界層

- 現象の解像化（測器・数値模型の進展）
 - 波成乱流・波成混合
 - 風成乱流・熱の効果の見直し
- 乱流クローザー模型へ

課題

- さらなる解像
 - 加熱期（大気への影響大）
 - エントレイメントの実態（波の影響）
- 相似則の整理・模索
 - 波成乱流
- 力学の詳細