

- 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

## 生成項の相対的寄与 (概算)

シアー生成：
$$-\overline{u'_h w'} \frac{\partial \overline{u_h}}{\partial z} \propto \frac{U_*^3}{H}$$

$$U_* = \left( \frac{\tau}{\rho_0} \right)^{1/2} : \text{摩擦速度}$$

ストークス生成：
$$-\overline{u'_h w'} \frac{\partial \overline{u_s}}{\partial z} \propto \frac{U_*^2 U_S}{H} = \frac{V_*^3}{H}$$

$$V_* = (U_*^2 U_S)^{1/3} : \text{ラングミュア速度スケール}$$

浮度変換：
$$+\overline{w' b'} \propto B_f = \frac{W_*^3}{H}$$

$$W_* = (B_f H)^{1/3} : \text{対流速度スケール}$$

## 無次元パラメター

$$\frac{\text{シアー生成}}{\text{ストークス生成}} = \frac{-U_*^3/H}{-U_*^2 U_S/H} = \frac{U_*}{U_S} \equiv La^2$$

$$\frac{\text{浮力生成}}{\text{ストークス生成}} = \frac{W_*^3/H}{-U_*^2 U_S/H} = \frac{B_f H}{-U_*^2 U_S} = \frac{H}{L_L} \equiv Ho$$

$La$  と  $Ho$  : 混合層内の混合因子の相対的な寄与を表現

Belcher et al. (2012) : 散逸率に着目

$$\epsilon(z) = \frac{U^3}{H} \mathcal{F}_\epsilon \left( \frac{z}{H}, La, Ho \right)$$

$U$  : 速度スケール ( $U_*$  or  $V_*$  or  $W_*$ )

$\mathcal{F}_\epsilon$  : 散逸率の鉛直構造とパラメータ依存性を表す無次元関数

$H$  : 混合層深度 (所与)

仮定

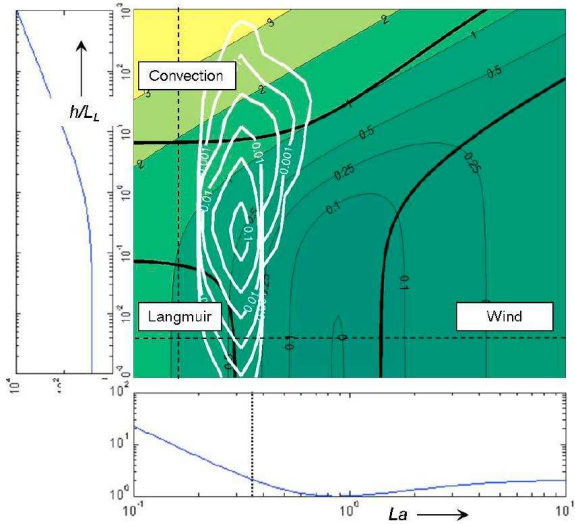
$$\epsilon \left( \frac{z}{H} = 0.5 \right) = \epsilon_{wind} + \epsilon_{wave} + \epsilon_{conv},$$

$$\epsilon_{wind} = 2 \left( 1 - e^{-La/2} \right) \frac{U_*^3}{H}, \quad \text{Grant and Belcher (2009)}$$

$$\epsilon_{wave} = 0.22 \frac{V_*^3}{H}, \quad \text{Grant and Belcher (2009)}$$

$$\epsilon_{conv} = 0.3 \frac{W_*^3}{H}, \quad \text{Moeng and Sullivan (1994)}$$

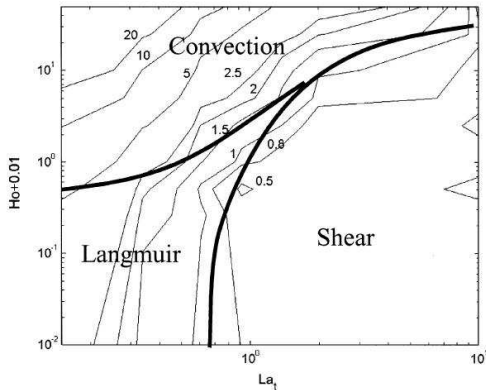
## 混合レジームの分類 (冷却時)



(Belcher et al. 2012)

混合レジームの分類 (冷却時) :  $\overline{w'^2}/U_*^2$

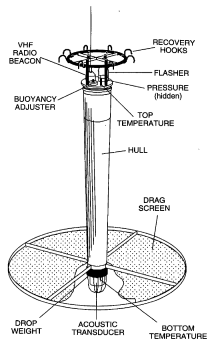
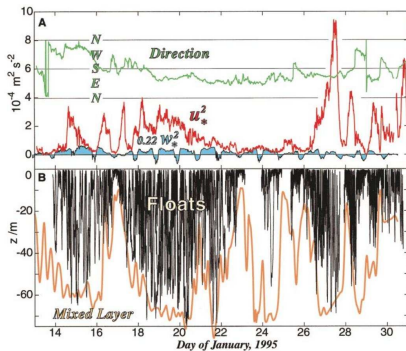
数値実験に基づく分類 ( $u'^2$ ,  $v'^2$ ,  $w'^2$  の大小関係から)



Li et al. (2005)

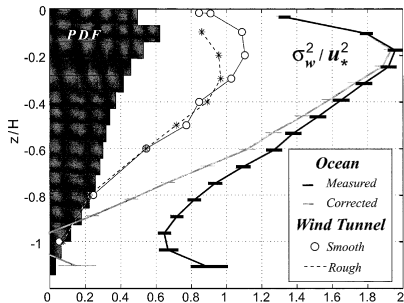
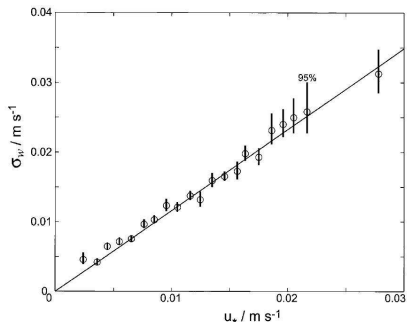


# 現場観測：乱流速度スケール



D'Asaro (2001)

# 現場観測：乱流速度スケール



(D'Asaro 2001)

- ▶  $\overline{w'^2}$  は  $U_*$  に比例
- ▶  $\overline{w'^2}$  は壁乱流より大きい

解釈：波成乱流が寄与、ただし  $U_S$  が  $U_*$  におよそ比例

D'Asaro (2014), Gargett and Grosch (2014)

## 問題意識：

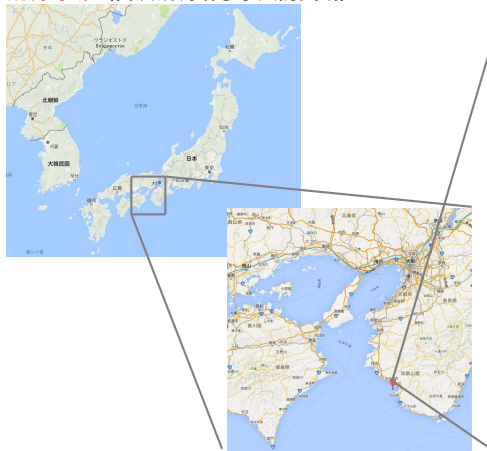
- ▶ 数値実験と現場観測に齟齬
- $(\overline{w'^2})^{1/2} \propto (U_*^2 U_S)^{1/3}$  ? or  $\propto U_*$  ?
- ▶ 波成乱流が弱いことを示唆するデータもある …
- ▶ 現場観測が不足（解像不足）

## 目的：

- ▶ 表層境界層での流動（乱流）構造（含むラングミュア循環）の実測
- ▶ 強制力（風・波・熱）に対する応答の評価  
⇒ 「どんな時に」の定量評価に向けて

# 波成乱流の解像：現場観測

## 観測海域（白浜観測塔@京大防災研）

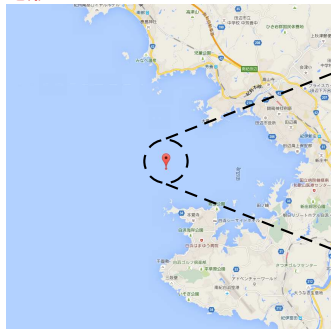


## 観測期間

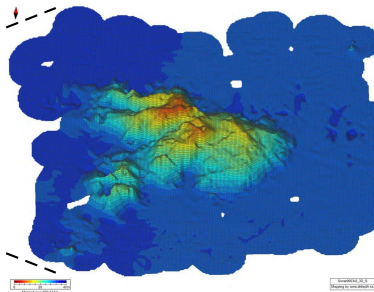
11-12月：2014年、2015年

# 海岸・海底地形

海岸地形



海底地形



水深：10 m @観測塔 (30 m 沖合)

**ADCP** (TRDI) : 毎時 20 分バースト

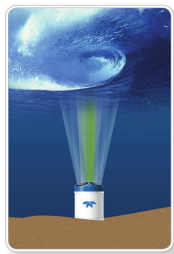
- Sentinel V (1000kHz) :  
 $u(z), v(z), w(z)$ 、波浪  
ピン発信間隔 : 3Hz  
層厚 : 0.3m  
設置水深 : 9m
- H-ADCP (600kHz) :  $u(r, \theta), v(r, \theta)$   
ピン発信間隔 : 1.3Hz  
層厚 : 1m  
設置水深 : 3m

**波高計** : 有義波高・周期 (毎時)

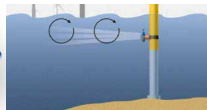
**水温計** : 水温 (海面~10M、毎時)

**気象計** : 風速、気温、日射 (毎時)

## Vertical Beam on Sentinel V ADCP

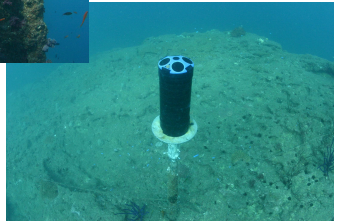


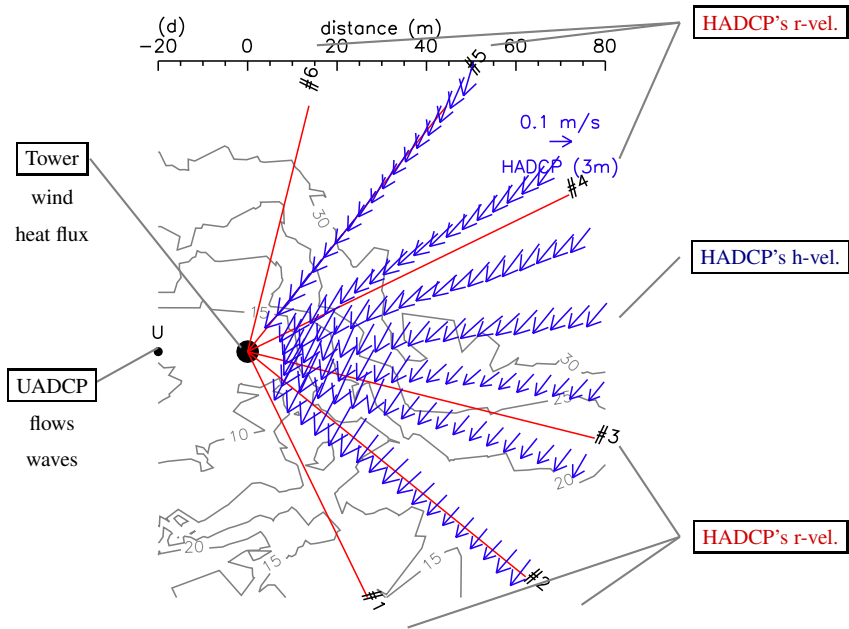
The Teledyne RDV 300-MHz Workhorse H-ADCP delivers up to 150m of horizontal profiling range.



TRDI HP

# 観測風景

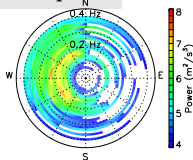




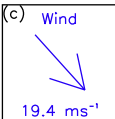
# 典型例 (DEC 4, 2015 04:00-04:20)

## Directional Wave Spectra

Wave:  
from W  
(1.7 m)



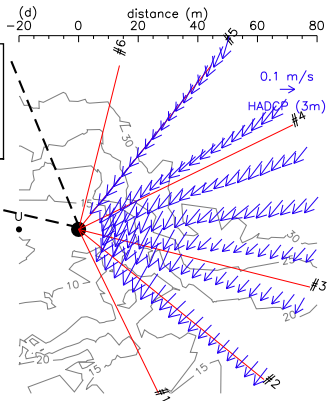
## Wind



## Heat

$778 \text{ W/m}^2$

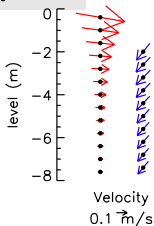
## Horizontal Velocity Distribution



## Vertical Velocity Profile

Stokes:  
from W  
(0.57 m/s)

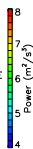
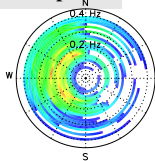
Euler:  
from NE  
(0.21 m/s)



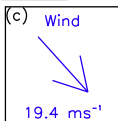
# 典型例 (DEC 4, 2015 04:00-04:20)

## Directional Wave Spectra

Wave:  
from W  
(1.7 m)



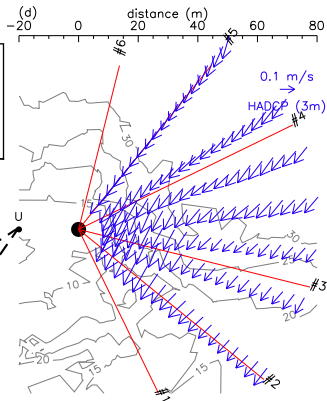
## Wind



## Heat

$778 \text{ W/m}^2$

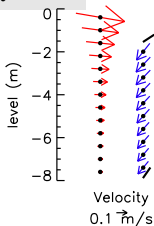
## Horizontal Velocity Distribution



## Vertical Velocity Profile

Stokes:  
from W  
(0.57 m/s)

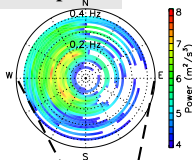
Euler:  
from NE  
(0.21 m/s)



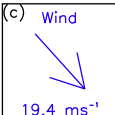
# 典型例 (DEC 4, 2015 04:00-04:20)

## Directional Wave Spectra

Wave:  
from W  
(1.7 m)



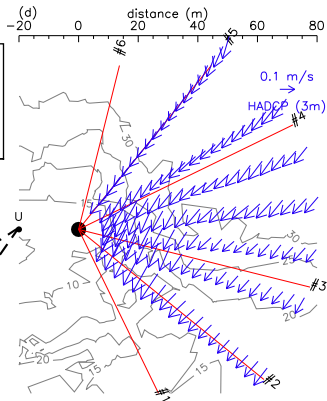
## Wind



## Heat

$778 \text{ W/m}^2$

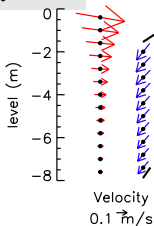
## Horizontal Velocity Distribution



## Vertical Velocity Profile

Stokes:  
from W  
(0.57 m/s)

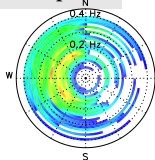
Euler:  
from NE  
(0.21 m/s)



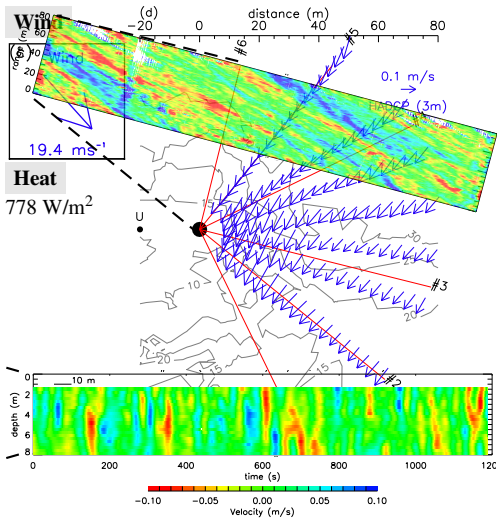
# 典型例 (DEC 4, 2015 04:00-04:20)

## Directional Wave Spectra

Wave:  
from W  
(1.7 m)



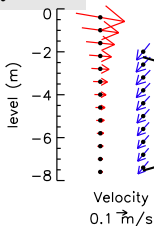
## Horizontal Velocity Distribution



## Vertical Velocity Profile

Stokes:  
from W  
(0.57 m/s)

Euler:  
from NE  
(0.21 m/s)

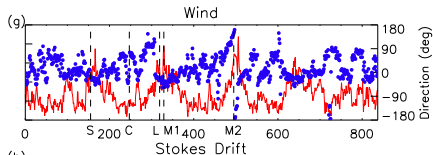
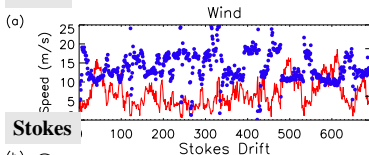


# 強制力の時系列 (毎時)

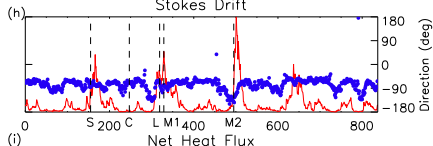
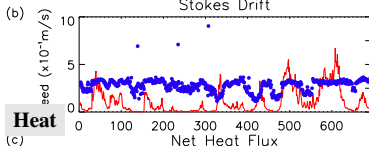
2014 実験

2015 実験

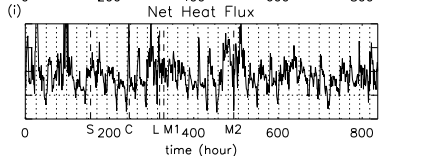
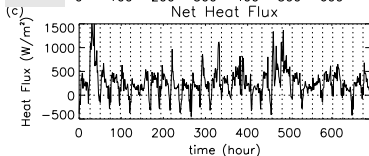
Wind



Stokes



Heat



(Yoshikawa et al. 2018)

# 無次元数と乱流強度 ( $\overline{w'^2}$ ) の時系列 (毎時)

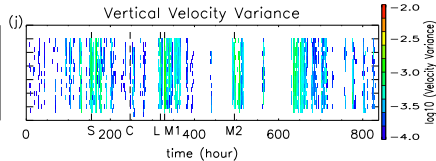
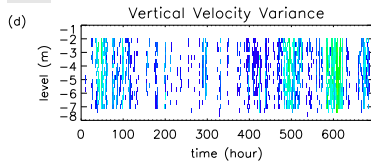
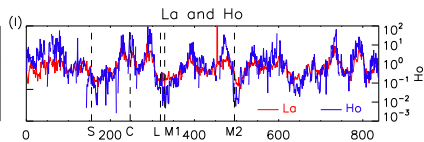
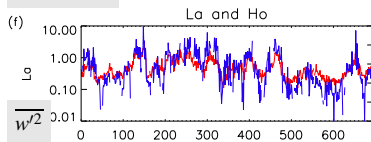
$$La = \left( \frac{U_*}{U_S} \right)^{1/2} = \frac{\text{風}}{\text{波}}$$

$$Ho = \frac{B_f H}{U_*^2 U_S} = \frac{\text{熱}}{\text{波}}$$

2014 実験

2015 実験

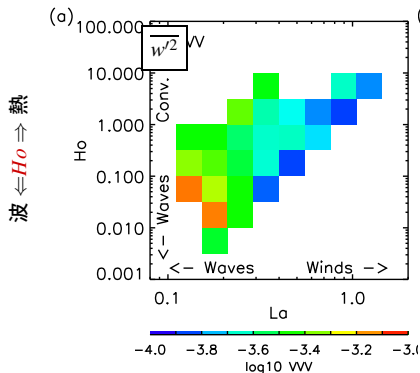
**La and Ho**



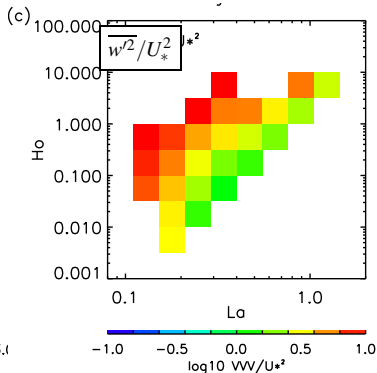
(Yoshikawa et al. 2018)



# $\overline{w'^2}$ の $La$ 、 $Ho$ 依存性



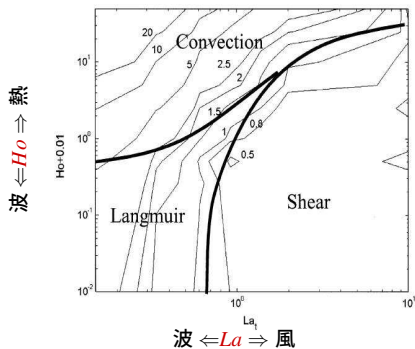
波  $\leftarrow La \Rightarrow$  風



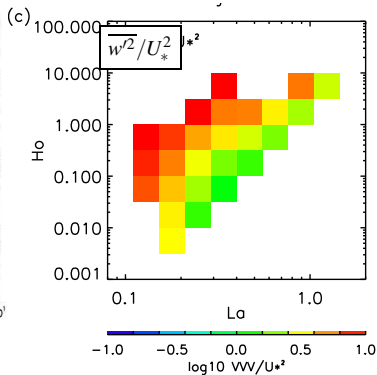
Wave  $\leftarrow La \Rightarrow$  Wind

(Yoshikawa et al. 2018)

# $\overline{w'^2}$ の $La$ 、 $Ho$ 依存性



Li et al. (2005)



Wave  $\leftarrow La \Rightarrow$  Wind

(Yoshikawa et al. 2018)

- ▶ 乱流強度 ( $\overline{w'^2}$ ) の無次元パラメーター ( $La$ 、 $Ho$ ) 依存性は数値実験と同様
- ▶ ラングミュア乱流が卓越していた

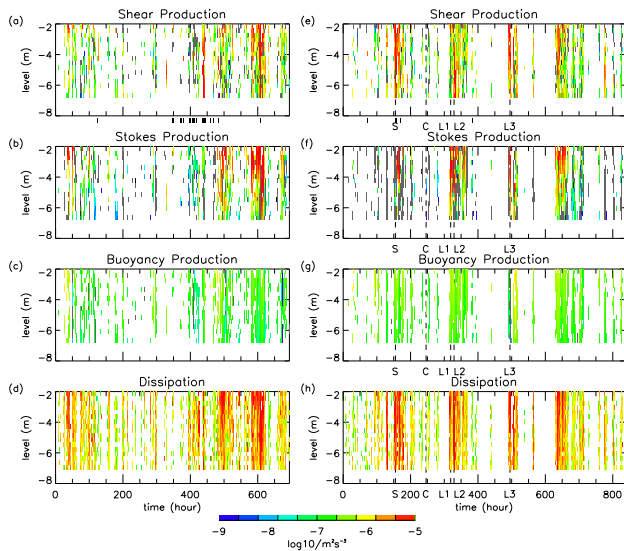
# 乱流運動エネルギー収支

**TKE 収支式** (e.g., Ardhuin and Jenkins 2006)

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dt} \underbrace{\frac{\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}}{2}}_{\text{TKE}} \\ &= \underbrace{-\overline{u'_H w'} \frac{\partial \overline{u_H}}{\partial z}}_{\text{シアー生成}} \underbrace{-\overline{u'_H w'} \frac{\partial \overline{u_S}}{\partial z}}_{\text{ストークス生成}} \underbrace{+ \overline{w' b'}}_{\text{浮度変換}} - \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \overline{w' e} + \frac{\overline{w' p}}{\rho_0} \right\} \underbrace{- \varepsilon}_{\text{散逸}} \end{aligned}$$

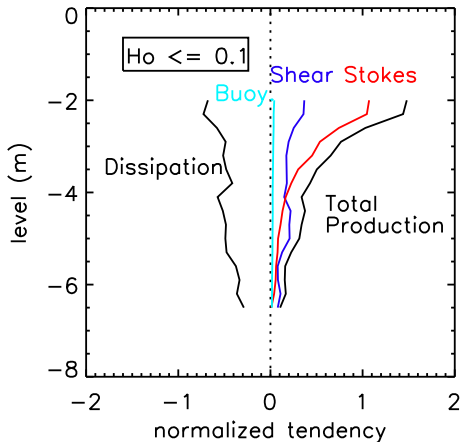
- ▶ 分散法 (e.g., Lohrmann et al. 1990)  
⇒ レイノルズ応力
- ▶ スペクトル法 (McMillan et al. 2016)  
⇒ 散逸率

# 乱流運動エネルギー収支



(Yoshikawa et al. 2018)

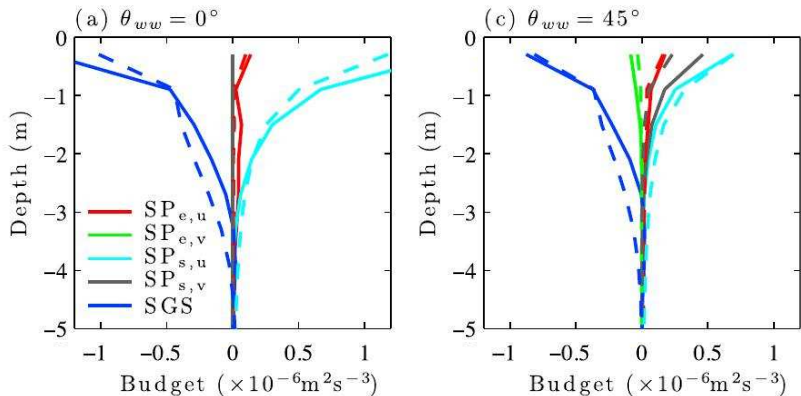
TKE 収支 ( $Ho < 0.1$ )



(Yoshikawa et al. 2018)

- ▶ ストークス（波）強制が最大、シア（風）生成も無視できない

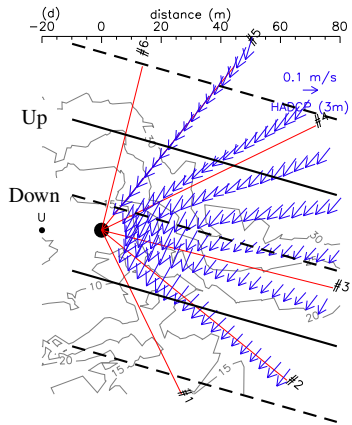
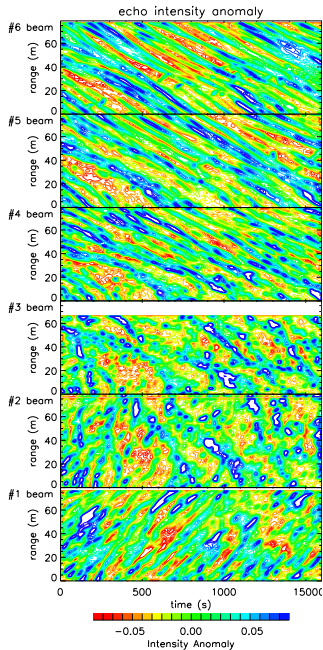
## TKE 収支 ( $Ho < 0.1$ )



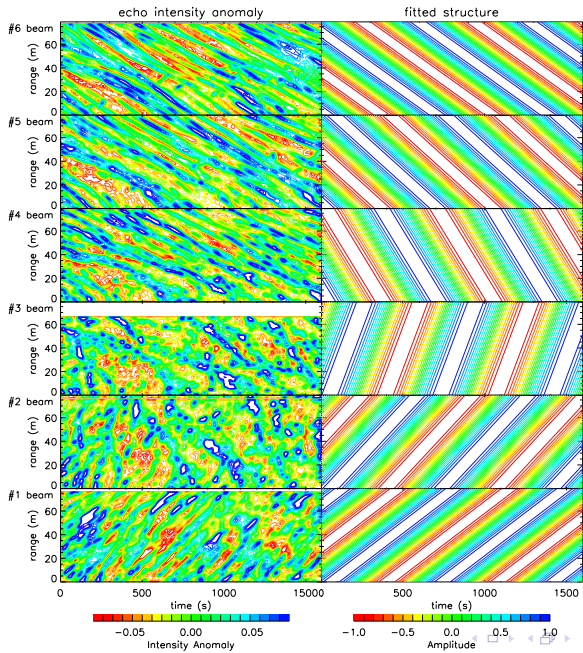
(VanRoekel et al. 2012)

- ▶ ストークス (波) 強制が最大、シアー (風) 生成も無視できない  
⇒ 風向と波向のずれが原因か (VanRoekel et al. 2012)

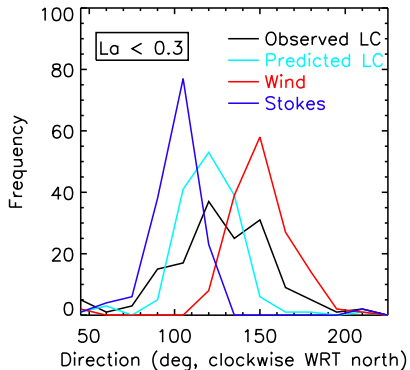
# Discussion: Orientation of LC



# Discussion: Orientation of LC



# Discussion: Orientation of LC



(Yoshikawa et al. 2018)

- ▶  $\text{Stokes dir} \leq \text{observed LC dir} \leq \text{Wind dir.}$
- ▶  $\text{observed LC dir} \sim \text{Lagrangian velocity shear dir}$   
suggested from LES (VanRoekel et al. 2012)

$$\theta = \tan^{-1} \left[ \frac{\partial}{\partial z} (U_E + U_S, V_E + V_S) \right]$$

# ラングミュア乱流の実測（解像）：まとめ

- 海洋表層境界層での波成・風成・熱成乱流の実測
- CL-LES と整合的
- 晩秋～初冬の白浜では波成（ラングミュア）乱流が卓越
- $\overline{w'^2} \propto U_*^2$  は強制力の  $U_*$  依存性を反映か
- 風向きと波向きのずれの影響が見えた