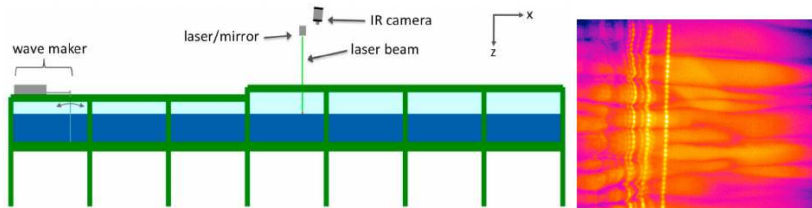


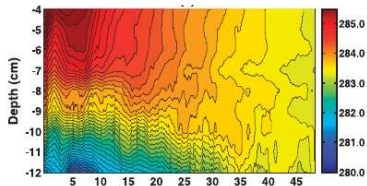
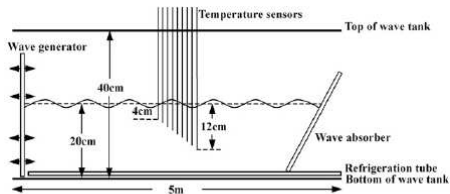
海洋表層境界層

- 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)~~
 - ▶ 新発見 (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・ラダランジュ流速~~
 - ~~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**

波成乱流：風は必要か？



Savelyev et al. (2012)



Dai et al. (2010)

室内実験：無風下でも波があれば混合

無風波成混合のメカニズム 1 : 軌道運動による局所混合

仮説：軌道運動流速がその場の渦を増幅

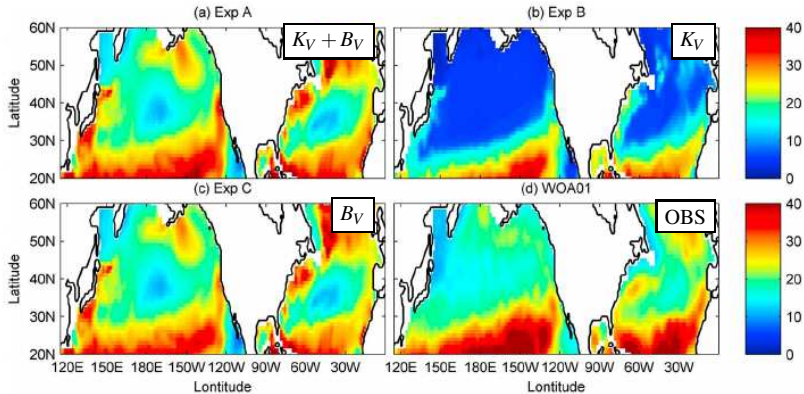
B_V パラメタリゼーション (Qiao et al. 2004)

$$B_V(z) \propto \underbrace{L}_{\text{軌道運動変位}} \times \underbrace{L \frac{dV}{dz}}_{\text{軌道運動速度差@軌道運動変位}}$$
$$= \alpha \int_{\vec{k}} E(\vec{k}) \exp(2kz) d\vec{k} \frac{\partial}{\partial z} \left[\iint \omega^2 E(\vec{k}) \exp(2kz) d\vec{k} \right]^{1/2}$$
$$K \Rightarrow K + B_V$$

SWM パラメタリゼーション (Ghantous and Babanin 2014)

$$W = bk \left(\frac{\omega H_s}{2} \exp(kz) \right)^3$$
$$\frac{\partial TKE}{\partial t} = \dots + \overline{-u'w'} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} - \overline{v'w'} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} + W + \dots$$

B_V パラメタリゼーションの効果



(Qiao and Huang et al. 2012)

無風波成混合のメカニズム2 : 波・流れ相互作用 (CL 機構) 波解像数値実験 (Tsai et al. 2017、Fujiwara et al. 2020)

- 無風下でも、波の粘性減衰に伴う波から流れの運動量輸送 (仮想波応力)
↓
シアー流が形成
↓
波・流れ相互作用 (CL 機構) で渦対形成

問題

- ▶ Tsai et al. (2017) : 初期渦対形成まで (混合は未確認)
- ▶ Fujiwara et al. (2020) : 低レイノルズ数実験

問題意識

- 波成混合に風は必要か？

アプローチ

- 無風波成混合の直接数値計算
- ▶ 波成混合の力学機構と特性の整理
- ▶ 混合強度の評価
- 水槽実験による追検証
- 外洋域で評価
- 沿岸域で検討

支配方程式

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial T^{xx}}{\partial x} + \frac{\partial T^{yx}}{\partial y} + \frac{\partial T^{zx}}{\partial z} + F_u,$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial T^{xy}}{\partial x} + \frac{\partial T^{yy}}{\partial y} + \frac{\partial T^{zy}}{\partial z},$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial z} + b + \frac{\partial T^{xz}}{\partial x} + \frac{\partial T^{yz}}{\partial y} + \frac{\partial T^{zz}}{\partial z} + F_w,$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0,$$

$$\frac{\partial b}{\partial t} + u \frac{\partial b}{\partial x} + v \frac{\partial b}{\partial y} + w \frac{\partial b}{\partial z} = \kappa \left(\frac{\partial^2 b}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 b}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 b}{\partial z^2} \right),$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h_r + \eta^B}^{\eta} u dz + \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h_r + \eta^B}^{\eta} v dz = F_\eta.$$

(Imamura et al. 2025)

数値実験設定概要

計算領域

水平： $L_x = 30\text{cm} = \lambda$ $L_y = 30\text{cm} = \lambda$

水深： $h = 20\text{cm}$

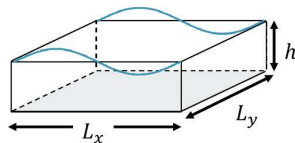
x, y, z 方向の格子数： $256 \times 256 \times 256$

($\Delta x = \Delta y \sim 1.2\text{mm}$, $\Delta z \sim 0.8\text{mm}$)

時間刻み幅： $\Delta t = T_w/200 \sim 2.1 \times 10^{-3}\text{s}$

(T_w ：波の周期)

積分時間： $600T_w \approx 4\text{min}$



境界条件

水平(x, y)方向：周期境界条件

鉛直(z)方向：水面 風なし・トレーサーは水面で常に1

・浮力加速度フラックスなし

底面 摩擦なし・トレーサー、浮力加速度のフラックスなし

初期条件

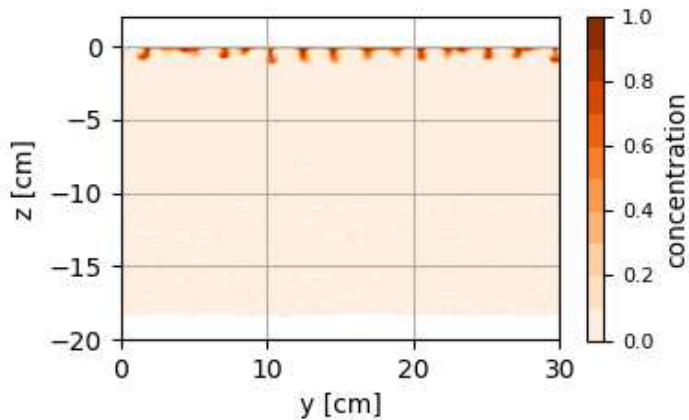
流速・水位：波長 $\lambda = 30\text{cm}$, 振幅 $a = 1.0\text{cm}$ ($ak = 0.21$, $T_w = 0.43\text{s}$) の
3次のストークス波 (弱非線形波)

トレーサー：海面以外では0、海面では1

水温成層：深さ8cmで 5°C の水温変化

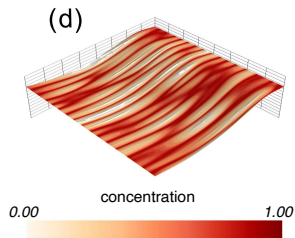
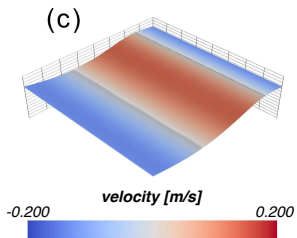
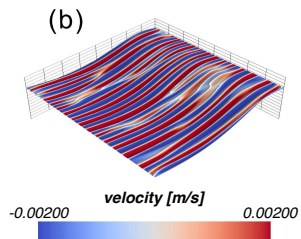
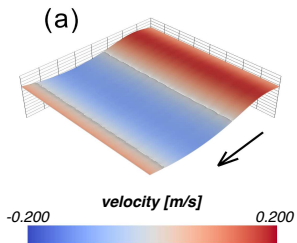
※初期の加速度の場に乱数で初期擾乱を与える

波解像直接数值計算結果



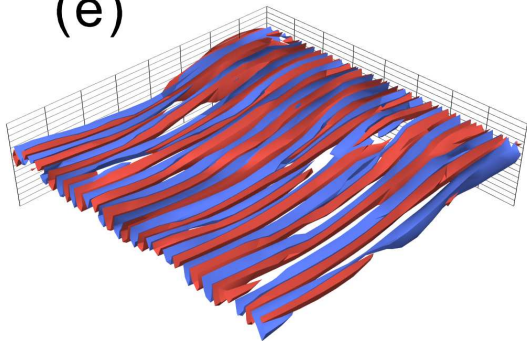
(Imamura et al. 2025)

波解像直接数值計算結果

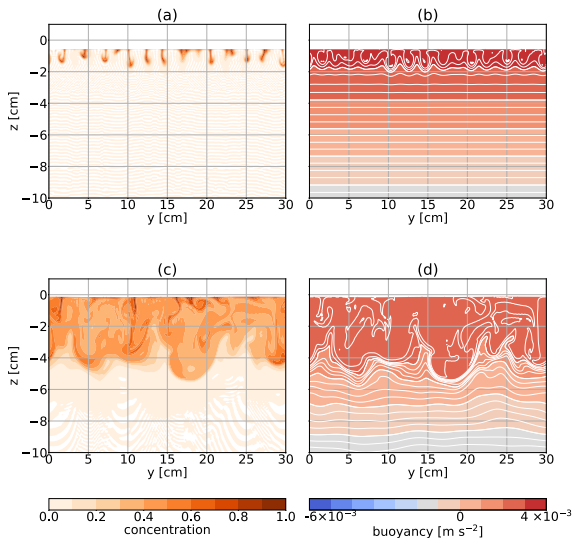


(Imamura et al. 2025)

(e)

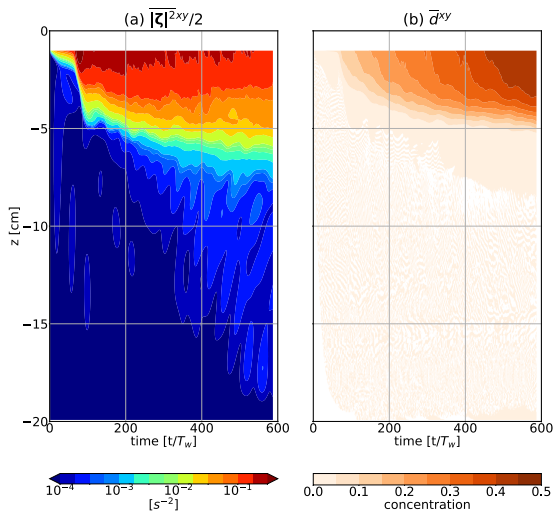


波解像直接数值計算結果



(Imamura et al. 2025)

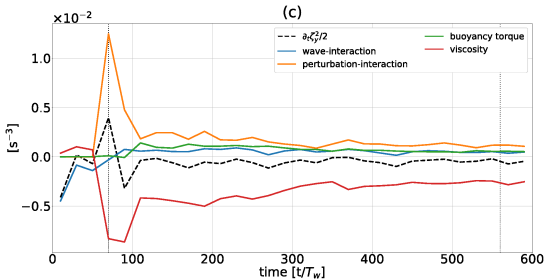
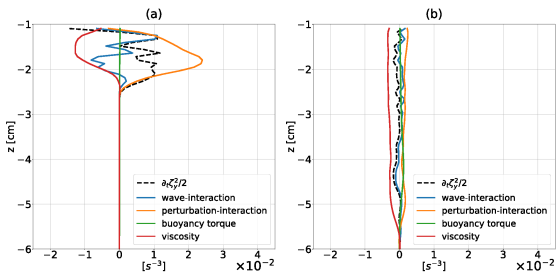
波解像直接数值計算結果

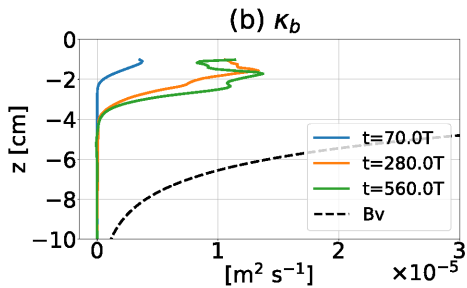


(Imamura et al. 2025)

$$\begin{aligned}
 \partial_t \frac{\zeta_x^2}{2} &= \underbrace{\zeta_x [\nabla \times (\tilde{\mathbf{v}} \times \boldsymbol{\zeta})]_x}_{\text{wave-interaction}} + \underbrace{\zeta_x [\nabla \times (\mathbf{v}' \times \boldsymbol{\zeta})]_x}_{\text{perturbation-interaction}} + \underbrace{\zeta_x \partial_y b}_{\text{buoyancy torque}} + \underbrace{\zeta_x [\mathbf{v} \nabla^2 \boldsymbol{\zeta}]_x}_{\text{viscosity}}, \\
 \partial_t \frac{\zeta_y^2}{2} &= \underbrace{\zeta_y [\nabla \times (\tilde{\mathbf{v}} \times \boldsymbol{\zeta})]_y}_{\text{wave-interaction}} + \underbrace{\zeta_y [\nabla \times (\mathbf{v}' \times \boldsymbol{\zeta})]_y}_{\text{perturbation-interaction}} + \underbrace{(-\zeta_y \partial_x b)}_{\text{buoyancy torque}} + \underbrace{\zeta_y [\mathbf{v} \nabla^2 \boldsymbol{\zeta}]_y}_{\text{viscosity}}, \\
 \partial_t \frac{\zeta_z^2}{2} &= \underbrace{\zeta_z [\nabla \times (\tilde{\mathbf{v}} \times \boldsymbol{\zeta})]_z}_{\text{wave-interaction}} + \underbrace{\zeta_z [\nabla \times (\mathbf{v}' \times \boldsymbol{\zeta})]_z}_{\text{perturbation-interaction}} + \underbrace{}_{\text{buoyancy torque}} + \underbrace{\zeta_z [\mathbf{v} \nabla^2 \boldsymbol{\zeta}]_z}_{\text{viscosity}},
 \end{aligned}$$

(Imamura et al. 2025)



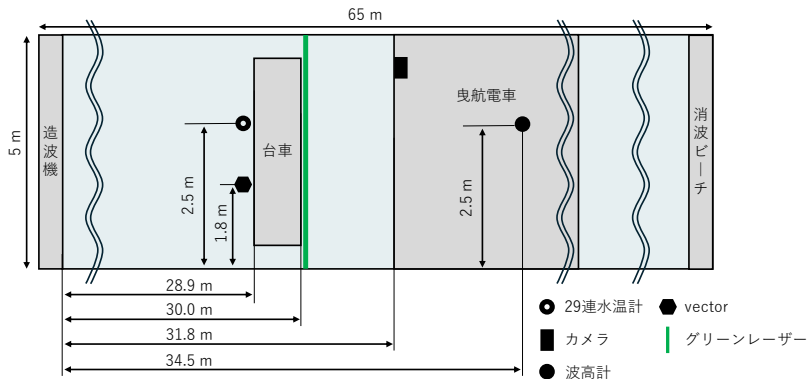


(Imamura et al. 2025)

無風波成乱流の直接数値計算：まとめ

- 無風波成乱流：波・流れ相互作用
波の粘性減衰 \Rightarrow 仮想波応力 \Rightarrow シアー流
シアー流と波の軌道運動流との相互作用 (LC)
- 海面下の軌道運動が直接 (local) に渦度を増幅することは確認されず。
 \Rightarrow B_v 、SWM パラメタリゼーションの妥当性は得られず。
- 拡散係数で $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ 程度の混合

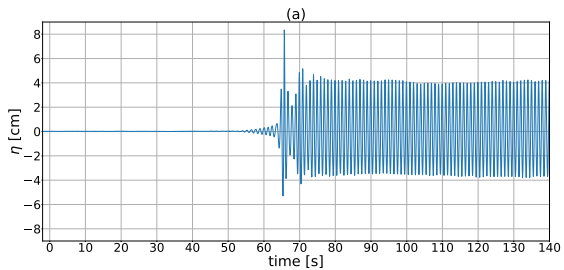
実験装置・計測機器配置図



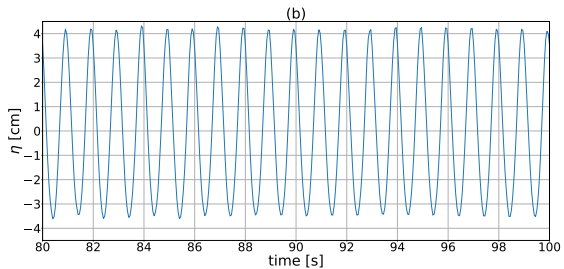
(今村 2026)

波高時系列

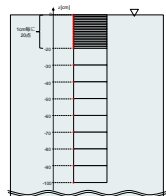
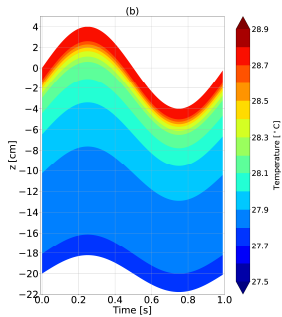
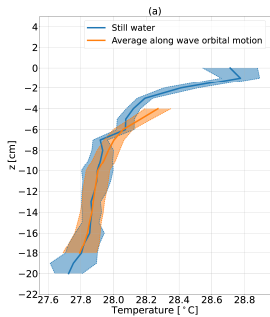
全期間



拡大図

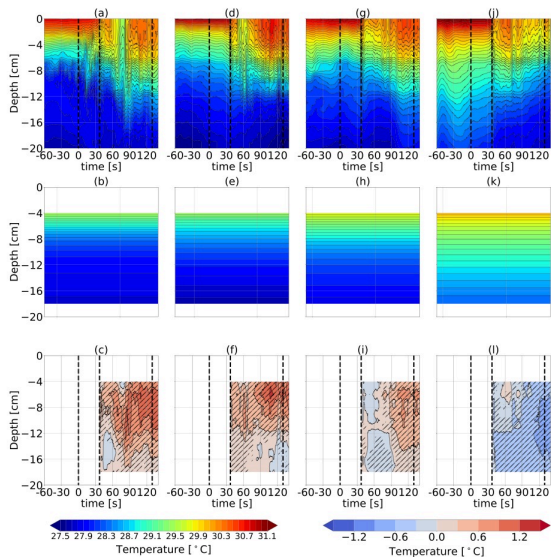


水温計配置図と水温変化



(今村 2026)

検証：室内実験@九大応力研

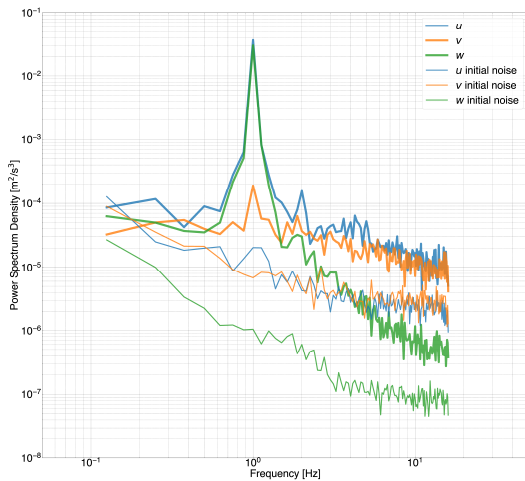


(今村 2026)

検証：室内実験@九大応力研

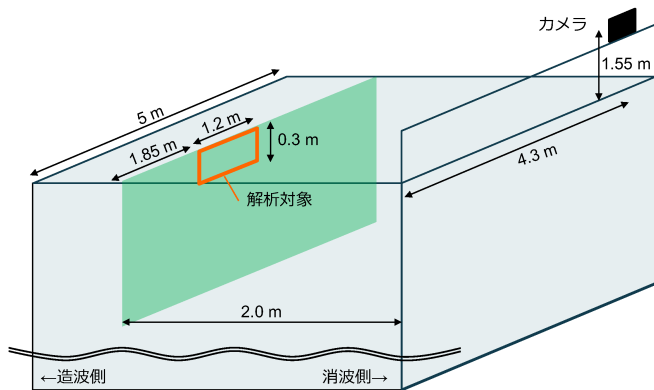


検証：室内実験@九大応力研

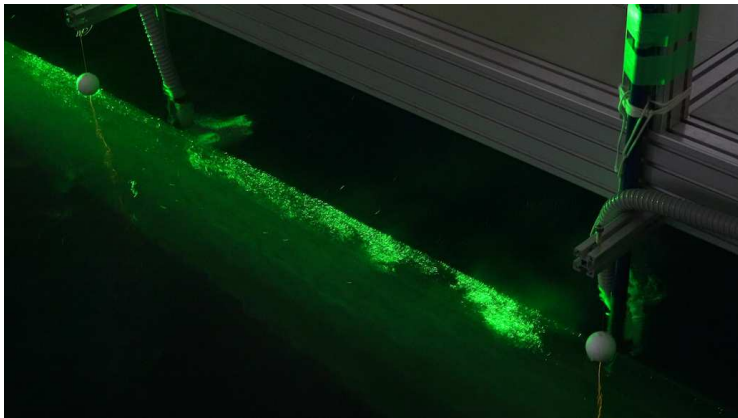


(今村 2026)

検証：室内実験@九大応力研

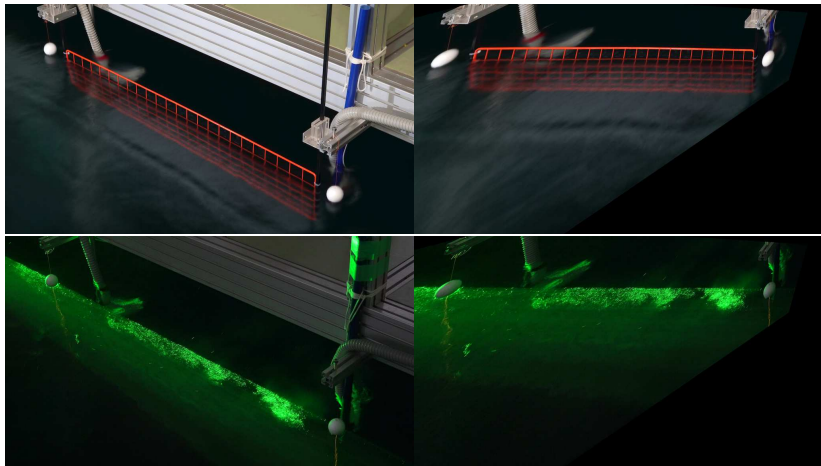


(今村 2026)



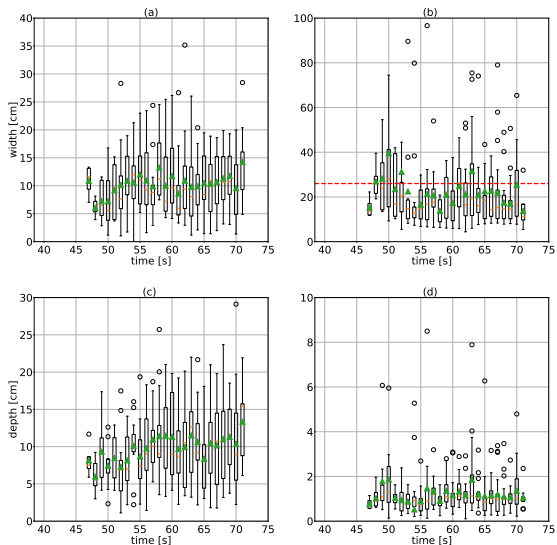
(今村 2026)

検証：室内実験@九大応力研



(今村 2026)

検証：室内実験@九大応力研



(今村 2026)

まとめ

■ 波成乱流の生成機構

- ▶ (A) 碎波
- ▶ (B) 波・流れ相互作用
- ▶ (C) 非碎波混合

↓

- ▶ (A) 碎波
- ▶ (B) 波・流れ相互作用
 - (B 1) ラングミュア乱流・混合
 - (B 2) 非碎波混合 ⇒ 別名にすべき

■ 統一のパラメタリゼーションで表現可

■ 乱流特性=非局所的

- ▶ 強度は $V_* D = (U_*^2 U_S)^{1/3} D$ に概ね比例
 $U_*^2 = \tau_{wind} / \rho + \tau_{VWS} / \rho$
(ただし風向 \neq 波向の場合は未評価)
- ▶ D の評価は今後の課題

■ 外洋では微々たるものかもしれない (熱波には効くかも)

■ 沿岸域の碎波帯では有意に大きい。(碎波に加算)