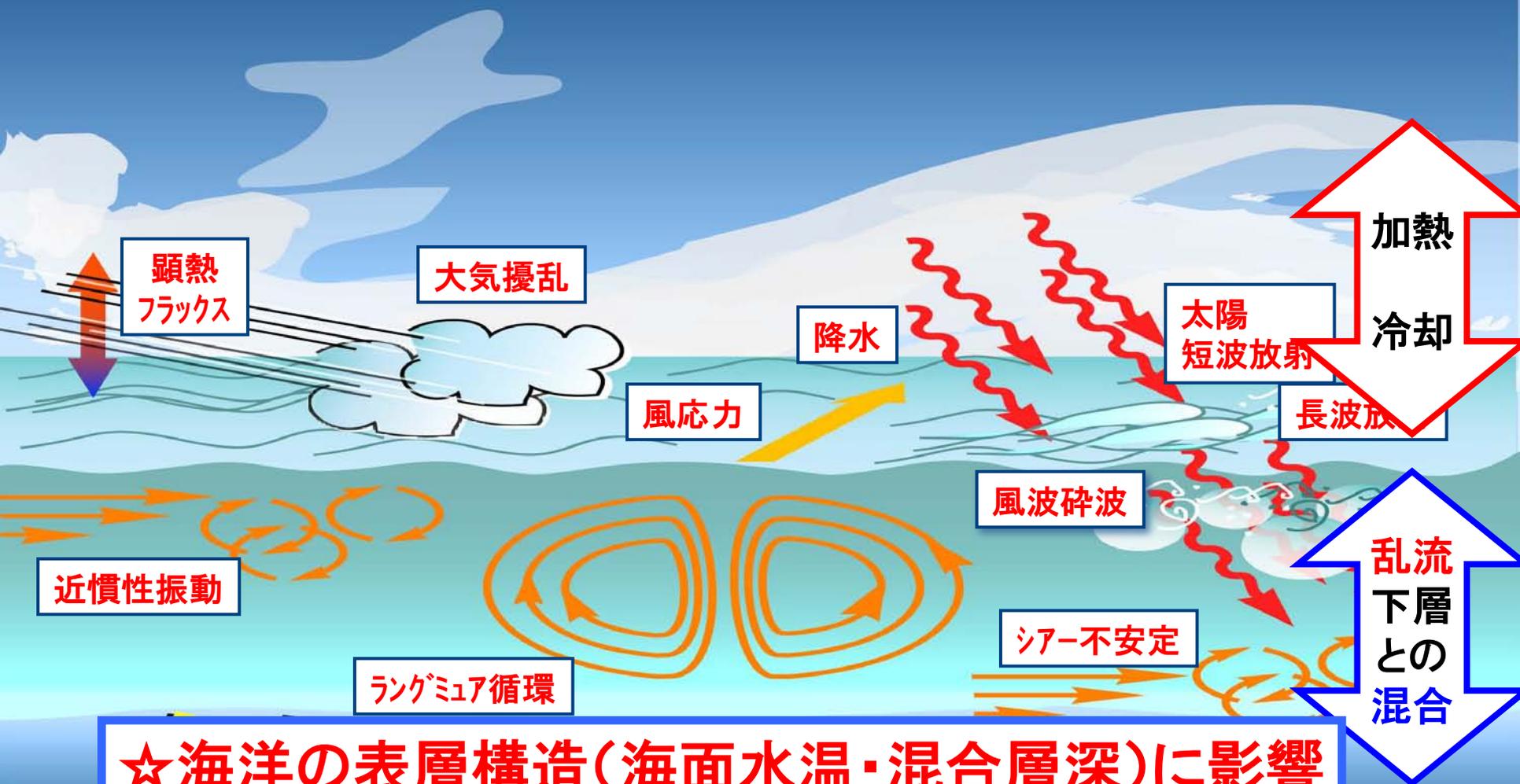


LESによる海洋微物理過程の 高精度パラメタリゼーション

日比谷 紀之・丹羽 淑博・古市 尚基・渡辺 路生
・尹 宗煥

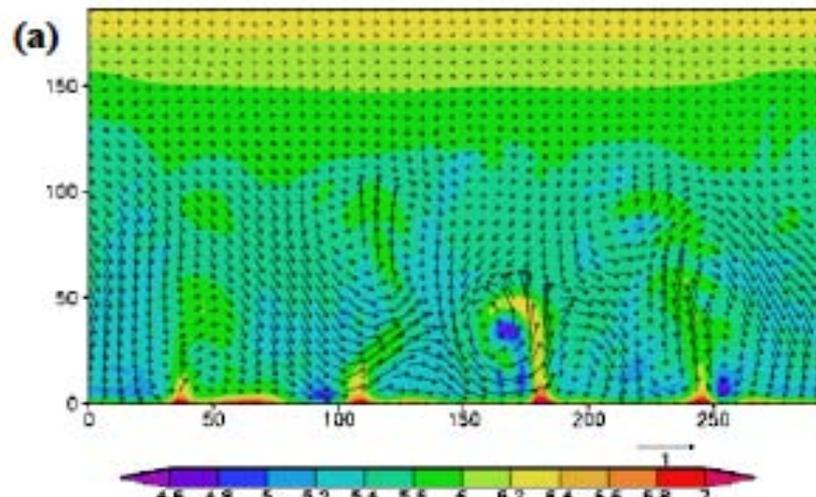
東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻
九州大学 応用力学研究所 東アジア海洋大気環境研究センター

乱流混合 と 海洋表層混合層



☆海洋の表層構造(海面水温・混合層深)に影響
→詳細の理解・パラメータ化が不可欠

LESを用いた大気境界層の乱流モデルの改良



LES

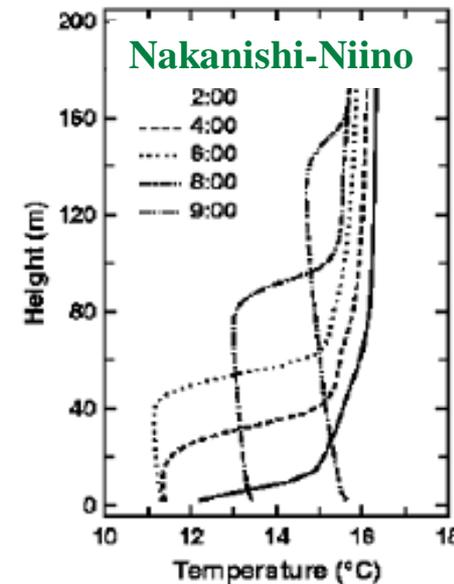
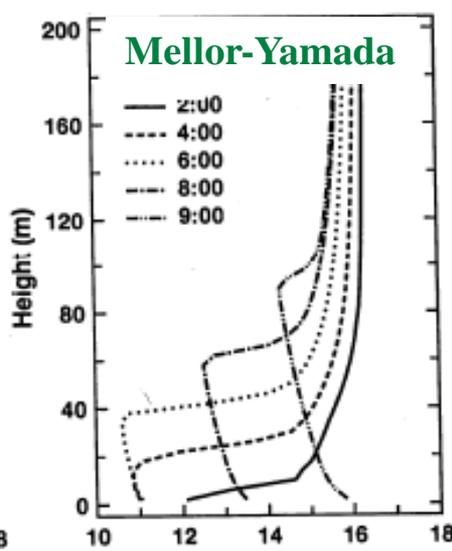
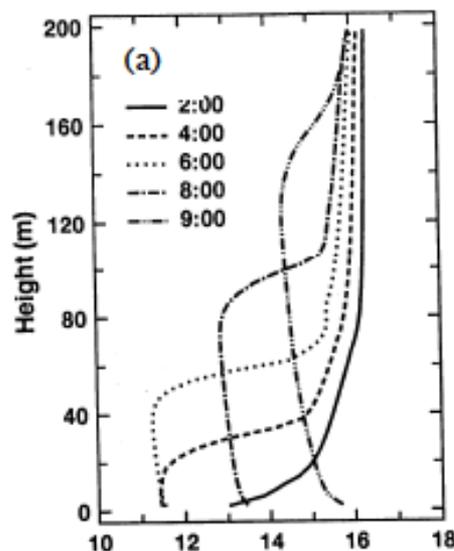
従来の乱流モデル

改良版乱流モデル

左: LESで再現された
大気温度(陰影)と流速(→)の
鉛直断面

下: LES/境界層モデルで
再現された
温度構造の時間変化

Nakanishi and Niino (2004, 2009)



☆ 大循環モデルへの組み込み・大気境界層の再現性向上

研究目的:

気候変動予測の精度向上に貢献するための 海洋混合層乱流モデルのバージョンアップ

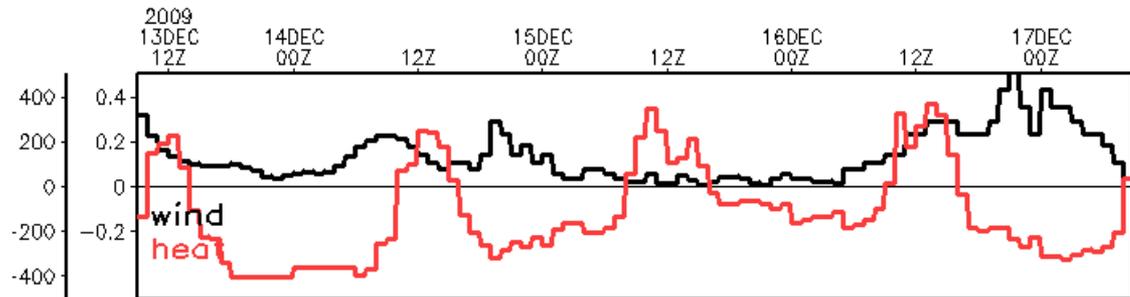
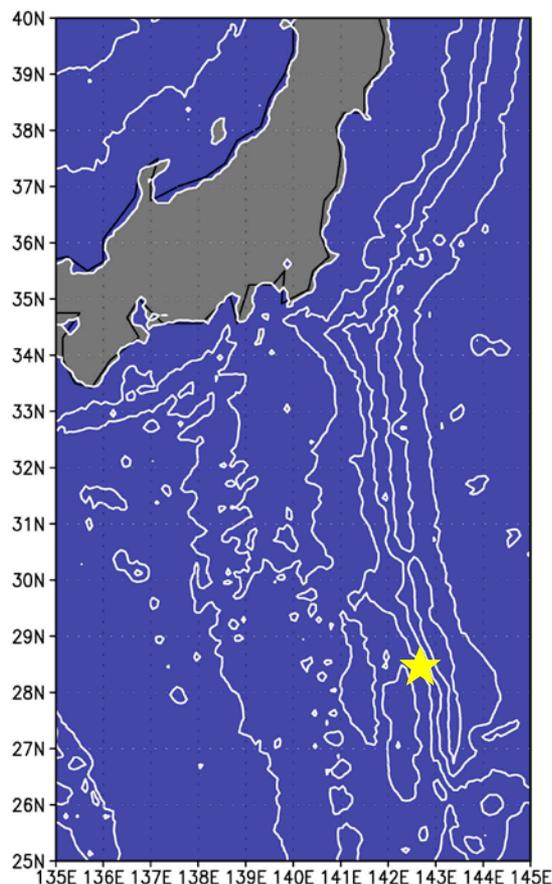
- ★ 海洋表層を対象としたLESモデルを開発し、乱流観測に基づき、その有効性を検証する
- ★ 開発した LESモデルを駆動して、様々な外力場の下での海洋混合層の応答を調べる
- ★ LESモデルによる結果との比較を通じて、海洋混合層モデルの検証・改良を行う
- ★ 大循環モデルに組み込み、海洋混合層モデルのパフォーマンスを確認する

乱流観測に基づくLESモデルの有効性の検証

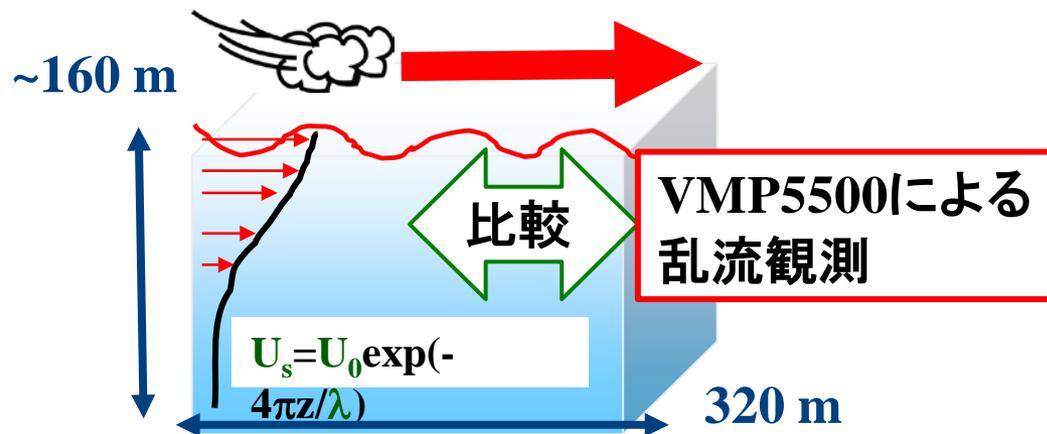
北海道大学水産学部付属練習船 おしよろ丸

父島近海(☆印)

2009年12月&2010年6月



◇ Flux: 船上気象データから 太陽入射: 父島気象観測所から



◇ $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 1.25\text{m}$
(256×256×128)

◇ SGS: Ducros et al. 1996

◇ 水平 Cyclic B.C.

◇ 鉛直 Sponge Layer
Rigid-lid B.C.

◇ ストークス流も考慮

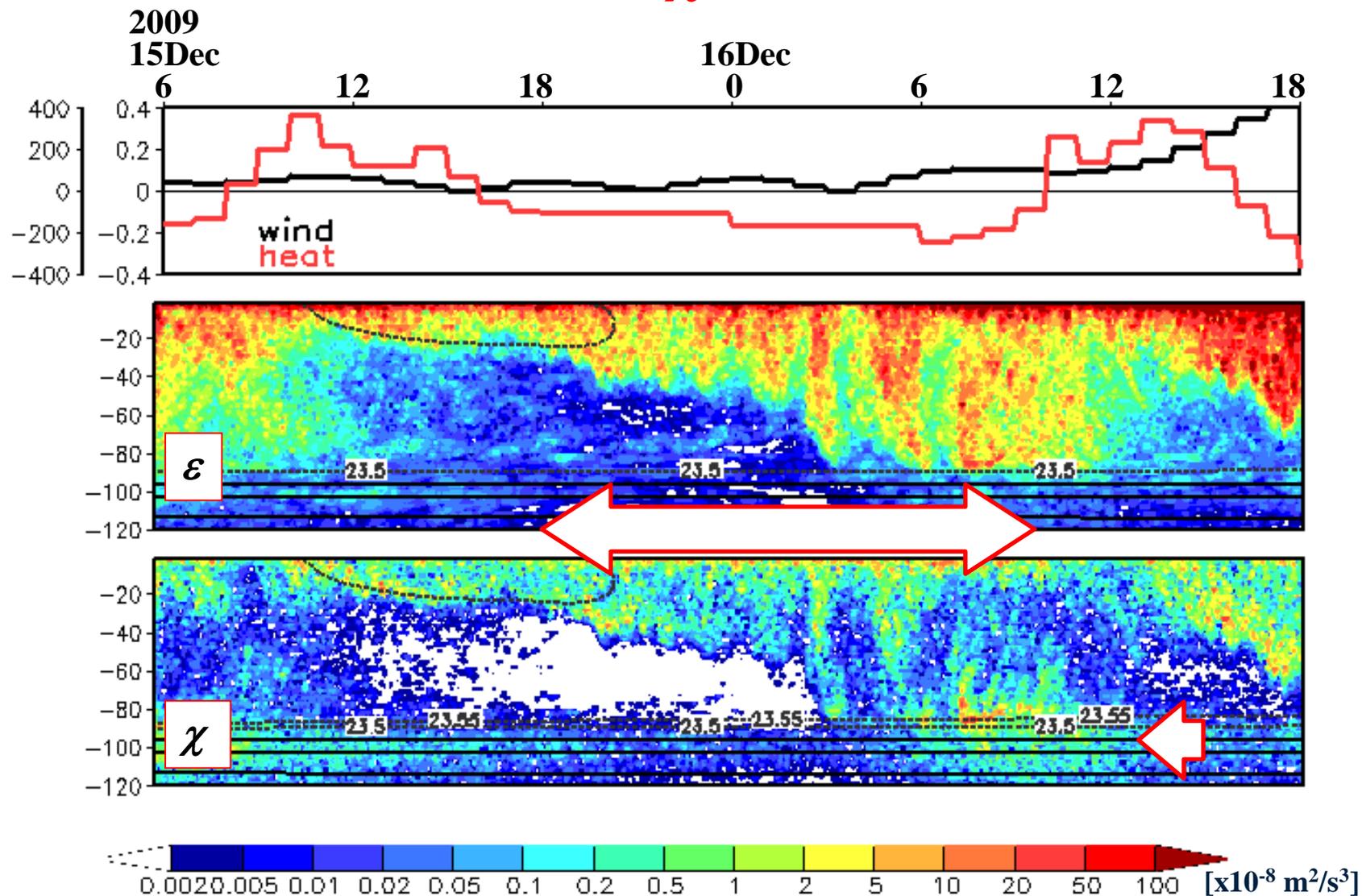
(Skylingstad et al. 1999)

◇ 初期温度構造: CTDから

塩分: 一定と仮定

◇ 計算: 12/13から4日間

LES結果: 乱流強度 ε , χ の時間-深度分布



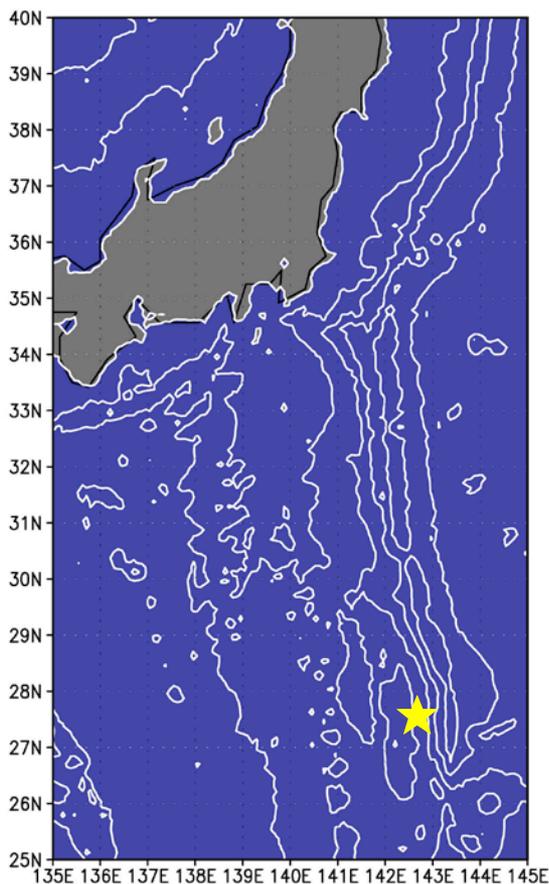
海面冷却によって ε , χ が増大 温度勾配の強い混合層底部で χ が増大

父島近海における乱流直接観測

北海道大学水産学部附属練習船 おしよろ丸

2009.12.15-16 && 2010.06.09 (27.1°N, 142.3°E) 付近

超深海乱流計VMP5500



- ◇ 深度約200mまでの乱流観測
- ◇ 日没後および日出後に重点
- ◇ 21 鉛直データを取得
- ◇ 流速擾乱データ・水温擾乱データ
→ エネルギー消散率 (ε)
温度擾乱消散率 (χ) , 4m毎
Nasmythスペクトル,
Batchelorスペクトルでチェック

乱流観測の実施風景（動画）

8

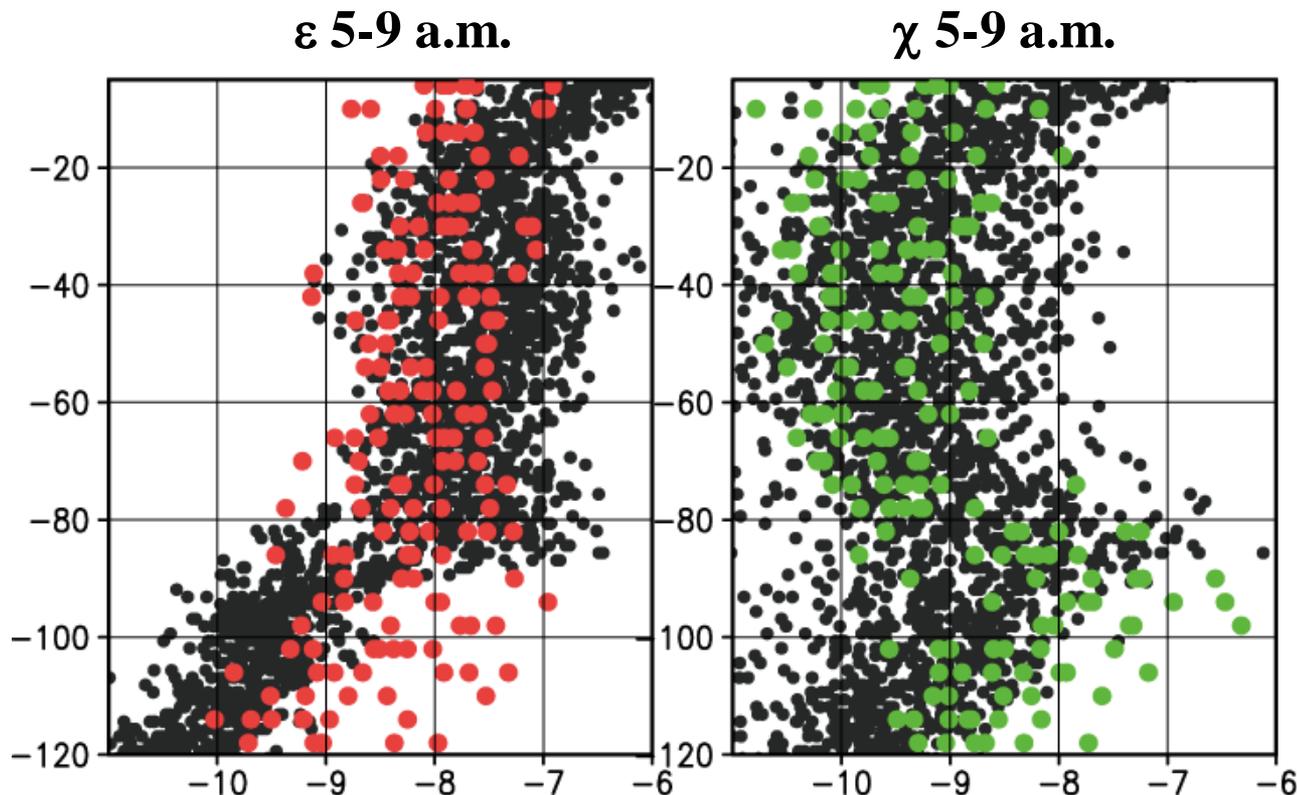


LES計算と乱流観測の比較

LES(黒点) 1点の鉛直分布(12分毎)

9

乱流観測 赤 (ε) 緑 (χ)



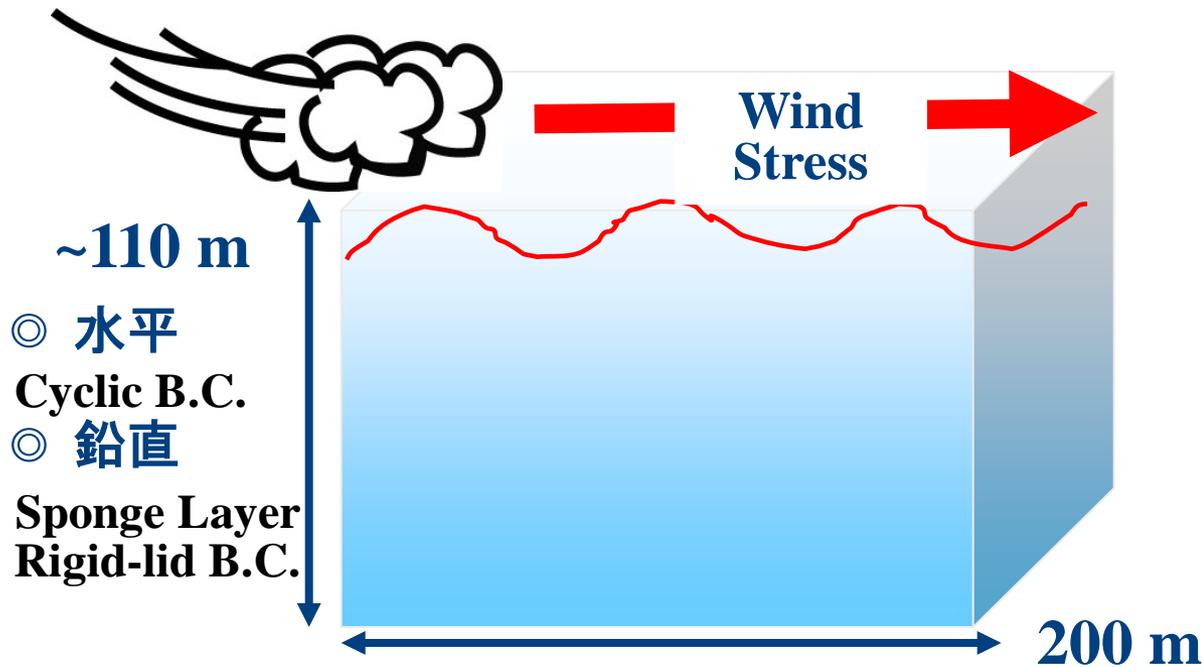
乱流エネルギー消散率(ε) : 混合層内でほぼ一様
温度擾乱消散率(χ) : 混合層底で急激に増加

LES結果は乱流観測結果をよく追隨している

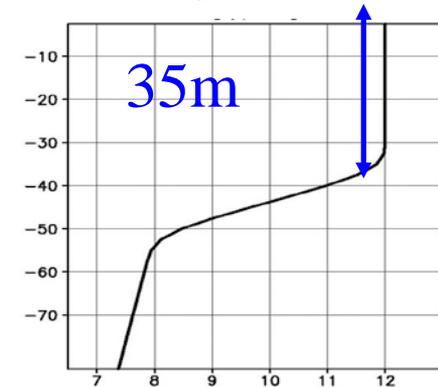
→ 開発したLESの有効性を確認

LESに基づく海洋混合層モデルの検証

☆ 近慣性振動(台風などの大気擾乱によって励起)に関するLES
活発な乱流混合→海面水温の変動

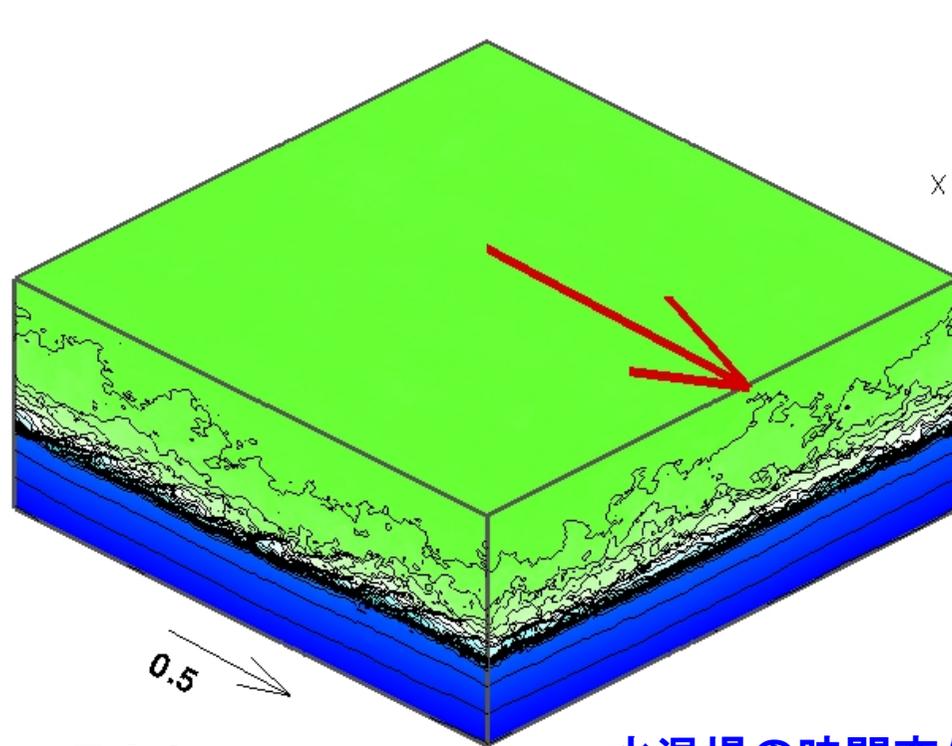


- ◇ $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0.8 \text{ m}$
(250×250×135)
- ◇ SGS: *Ducros et al. 1996*
- ◇ 計算: 24時間
- ◇ 初期温度構造



☆ 近慣性振動 ← 風応力場を慣性周期(~17時間)で回転(1.4 Nm^{-2})

風起源の近慣性振動に関するのLES

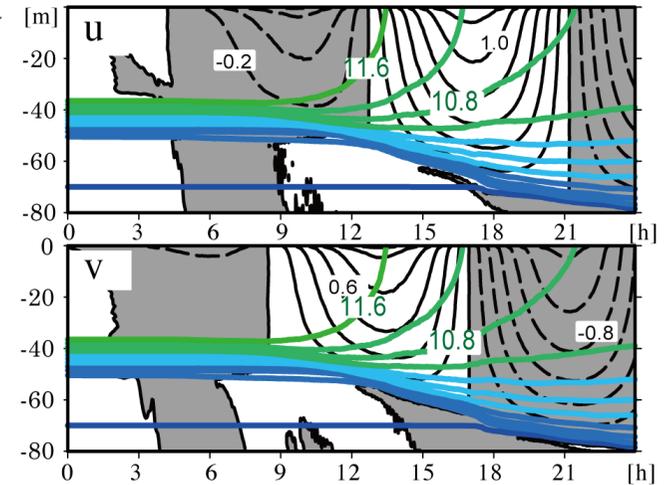


風応力[N/m²]

水温場の時間変化

表示領域: 水平 200m 鉛直 80m
表示期間: 24h

Large Eddy Simulation



東西流速 [上図・陰影]
南北流速 [下図・陰影]
水温 [等値線]

流速 0.2cm/s毎;
温度 0.4°C毎

台風・ハリケーンが通過するときの強い風外力を想定

→ 混合層の深まり・海面水温の低下

LESに基づく海洋混合層モデルの有効性の検証

Mellor-Yamada モデル (Mellor and Yamada 1982, Mellor 2001; M01)

◆ 平均量

サブグリッドスケール
乱流フラックス

運動方程式・温度方程式

$$\frac{\partial U}{\partial t} - fV = \frac{\partial}{\partial z} \left(- \langle w' u' \rangle \right), \quad \frac{\partial V}{\partial t} + fU = \frac{\partial}{\partial z} \left(- \langle w' v' \rangle \right), \quad \frac{\partial \Theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(- \langle w' \theta' \rangle \right)$$

◆ 乱流諸量

乱流エネルギーの方程式

◇ q^2 の時間発展方程式

$$\frac{\partial q^2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_q \frac{\partial q^2}{\partial z} \right) + 2(P_S + P_B - \epsilon)$$

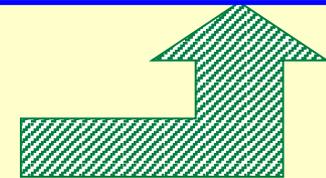
$$\begin{pmatrix} - \langle w' u' \rangle \\ - \langle w' \theta' \rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_m \\ S_h \end{pmatrix} \times ql \times \begin{pmatrix} \partial U / \partial z \\ \partial \Theta / \partial z \end{pmatrix}$$

◇ 乱流長さスケール l のパラメタリゼーション

◇ その他様々な擾乱量をパラメータ化

→ 多数の連立方程式の解として安定関数 $S_m \cdot S_h$ を求める

$$S_m = S_m(q, l, \partial U / \partial z, \partial V / \partial z, N^2) \quad S_h = S_h(q, l, \partial U / \partial z, \partial V / \partial z, N^2)$$

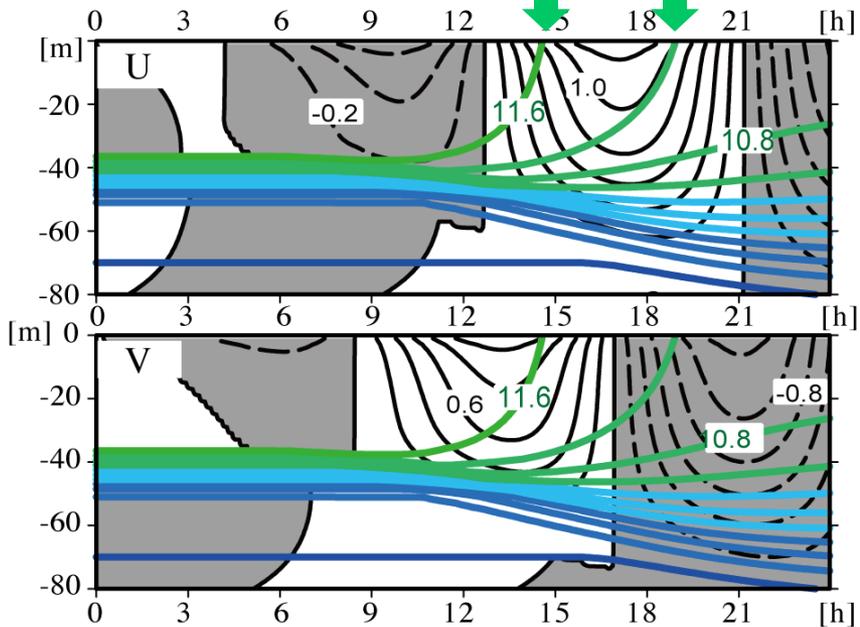


LESに基づく海洋混合層モデルの有効性の検証

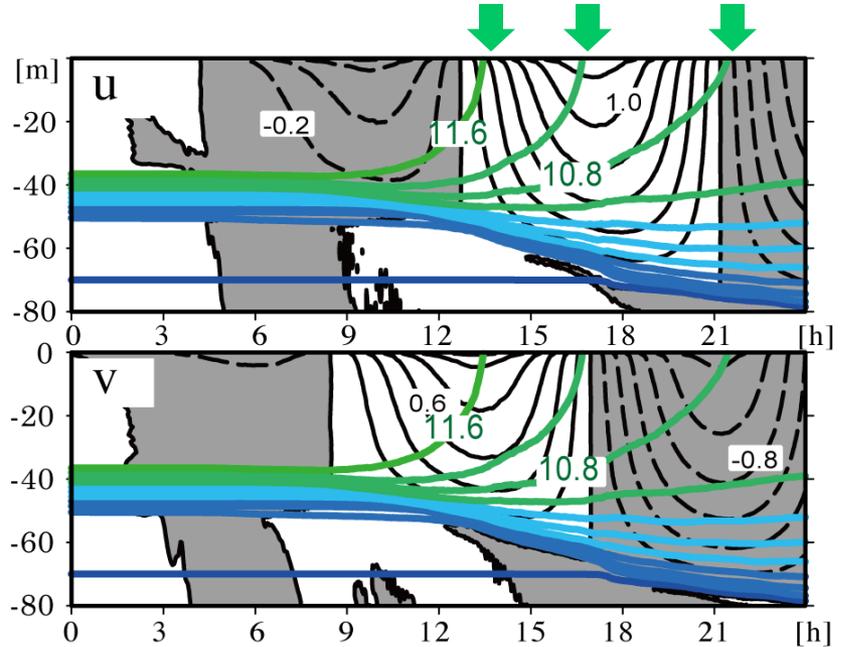
ストーム通過時の海洋の近慣性応答

鉛直1次元モデル

[Mellor-Yamada モデル; M01]



Large Eddy Simulation



東西流速 [上図・陰影]、南北流速 [下図・陰影]、水温[等値線]

流速 0.2cm/s毎; 温度 0.4°C毎

従来モデル(M01)では海面水温の低下を十分に再現できない
→乱流モデルの改良が必要

海洋混合層モデルの改良

改良版Mellor-Yamada乱流モデル (Nakanishi and Niino 2009; NN09)

◇ q^2 の時間発展方程式

$$\frac{\partial q^2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_q \frac{\partial q^2}{\partial z} \right) + 2(P_S + P_B - \varepsilon) \quad \begin{pmatrix} -\langle w' u' \rangle \\ -\langle w' \theta' \rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_m \\ S_h \end{pmatrix} \times ql \times \begin{pmatrix} \partial U / \partial z \\ \partial \Theta / \partial z \end{pmatrix}$$

◇ 乱流長さスケール l のパラメタリゼーション

$$l = (l_T^{-1} + l_S^{-1} + l_B^{-1})^{-1} \quad \begin{array}{l} \text{深度に依存} \\ \text{混合層厚に依存} \end{array} \quad l_S = \begin{cases} \kappa z / 3.7 & \xi > 1 \\ \kappa z (1 + 2.7\xi)^{-1} & 0 < \xi \leq 1 \\ \kappa z (1 - 100\xi)^{0.2} & \xi \leq 0 \end{cases} \quad l_T = 0.23 \frac{\int_0^D qz dz}{\int q dz}$$

$$\zeta = z/L_M; L_M \text{ はオブコフ長} \quad \begin{array}{l} \text{成層強度に依存} \\ l_B = 0.53q/N \\ \text{Galperin et al. (1988)} \end{array}$$

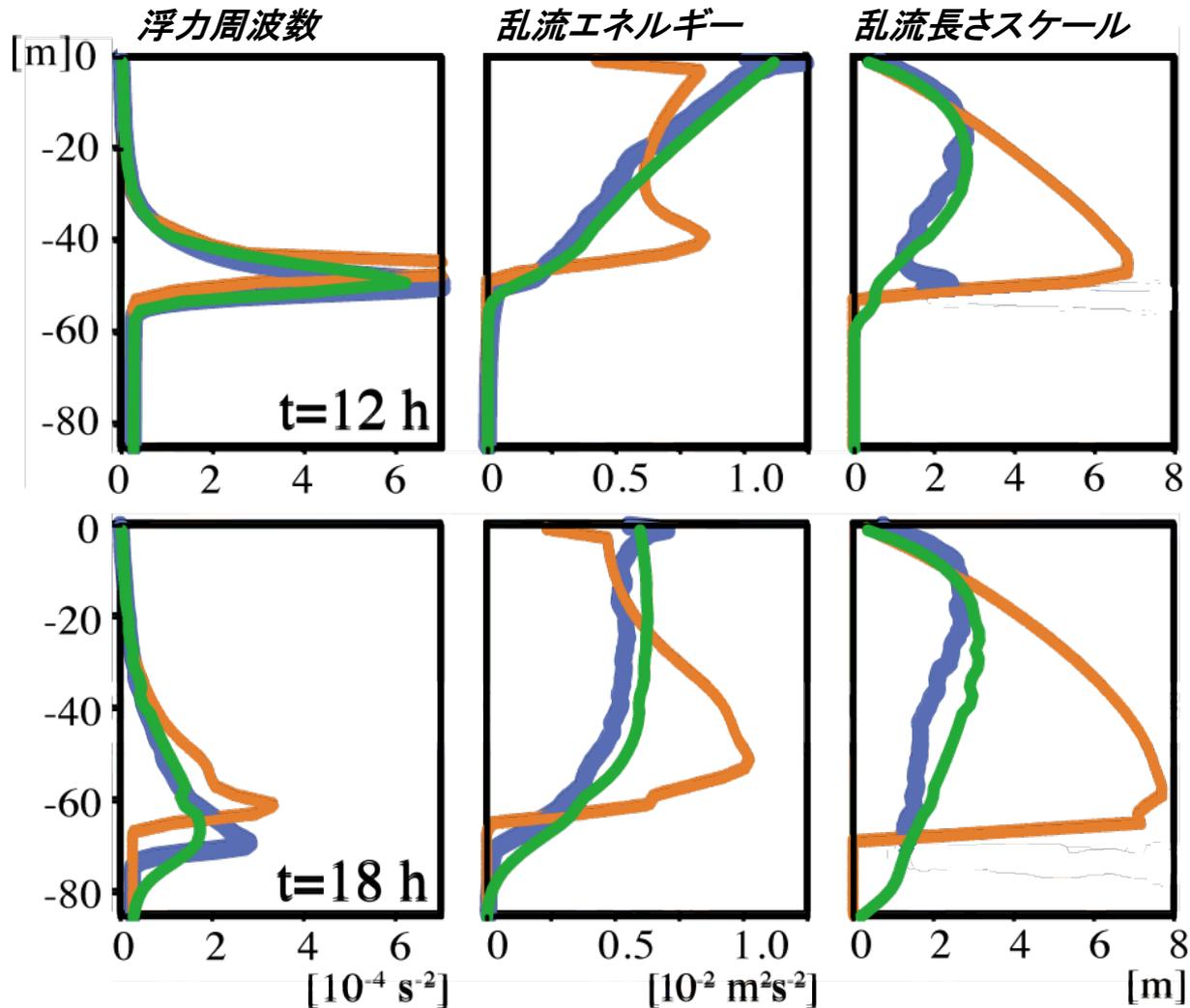
◇ 普遍定数の変更 → 安定関数 S_m, S_h の変更

$$\text{例: } \left\langle \frac{p'}{\rho_0} \left(\frac{\partial u'}{\partial z} + \frac{\partial w'}{\partial x} \right) \right\rangle = -\frac{q}{3A_1 l} \langle u' w' \rangle + C_1 q^2 \frac{\partial U}{\partial z} + C_2 \frac{g}{\rho_0} \langle w' \rho' \rangle \quad S_h = S_h(q, l, S^2, N^2)$$

$$(A_1, C_1, C_2) = (0.92, 0.08, 0) \rightarrow (1.18, 0.137, 0.75) \rightarrow S_m = S_m(q, l, S^2, N^2)$$

乱流諸量の鉛直分布の比較

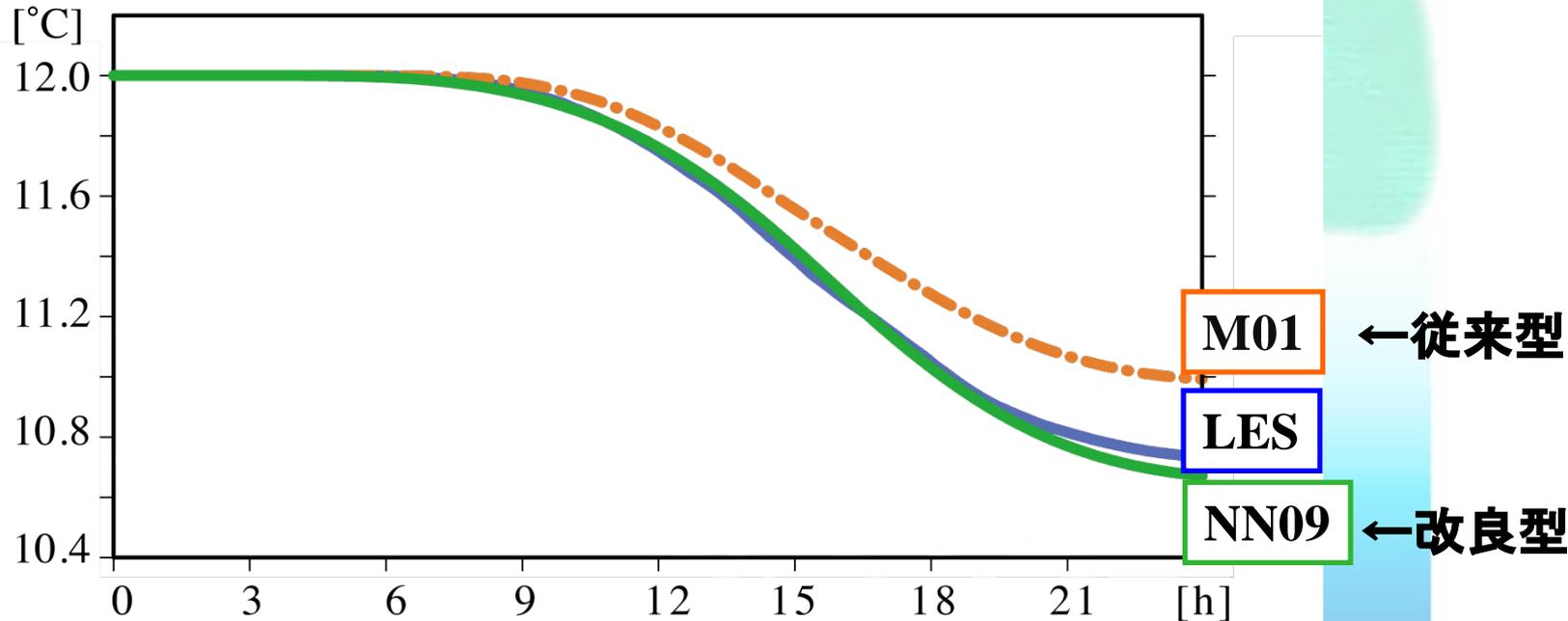
— LES
— M01 — NN09



NN09を用いることで乱流諸量の鉛直構造が大幅に改善

ストーム通過に対する海面水温の応答

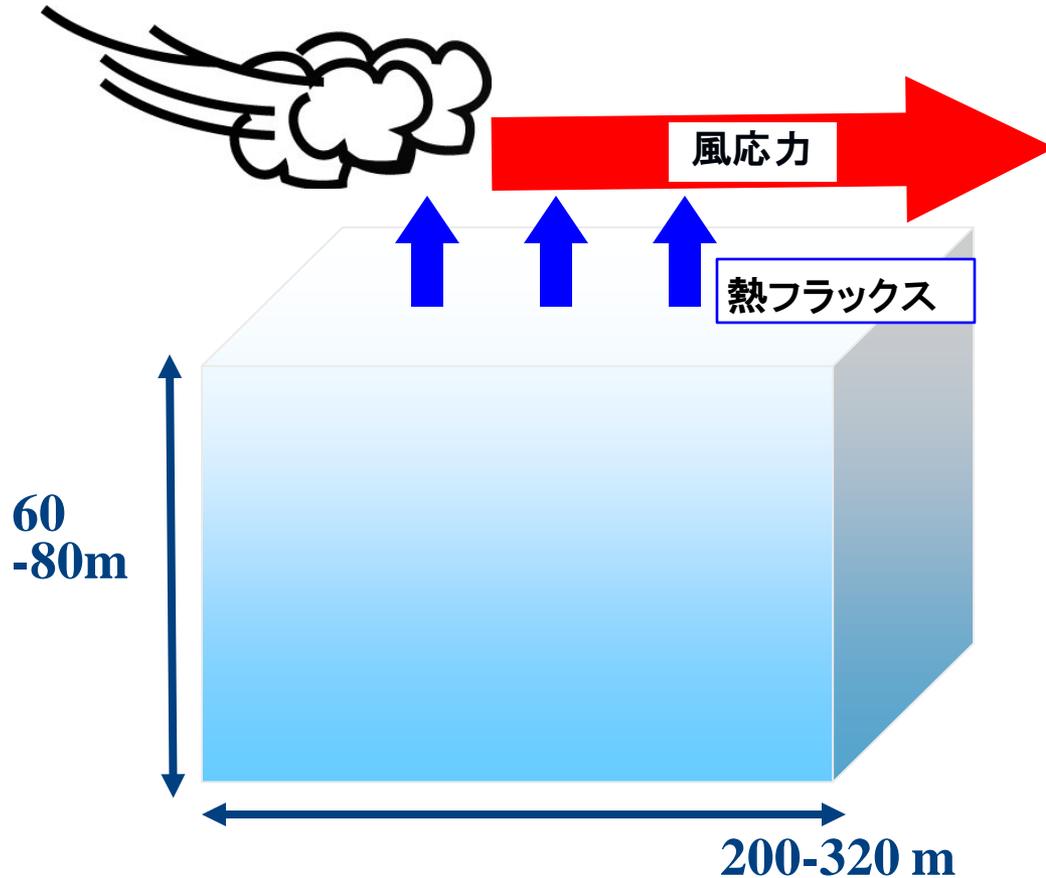
※同一の大きさの風応力



従来の乱流モデル: 乱流強度を十分に再現できない
改良型乱流モデル: LESに匹敵する良好な結果

<Nakanishi and Niino 2009 >

海面冷却・海面加熱時の海洋応答のLES



海面冷却

風応力: 0.15, 0.4 N/m²

初期混合層: 50 m

$\Delta = 0.8$ m

-160 W/m²

-320 W/m²

海面加熱

風応力: 0.15, 0.4 N/m²

初期: 一様成層

$\Delta = 0.5$ m

160 W/m²

300 W/m²

cf. Skillingstad et al. 1995

Skillingstad et al. 2000

◇ 非静水圧方程式

◇ $\Delta x = \Delta y = \Delta z \sim 0.5-1$ m

◇ SGS: *Ducros et al. 1996*

◇ 計算: 16-24時間

◇ 水平
◇ 鉛直

Cyclic B.C.

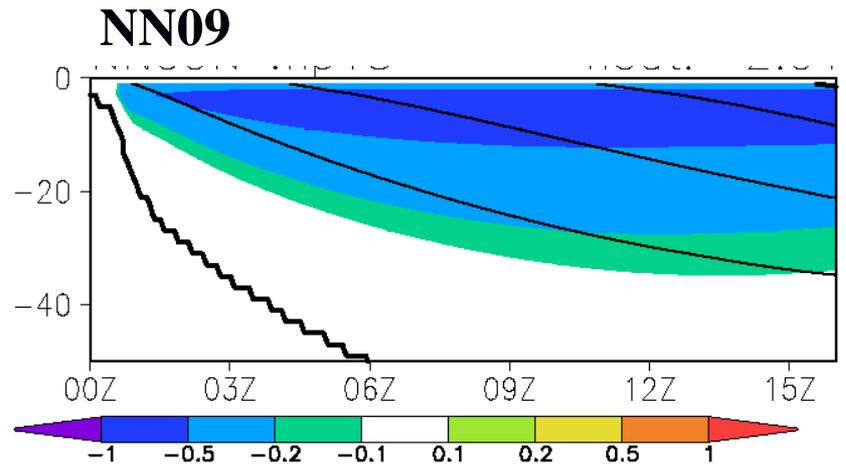
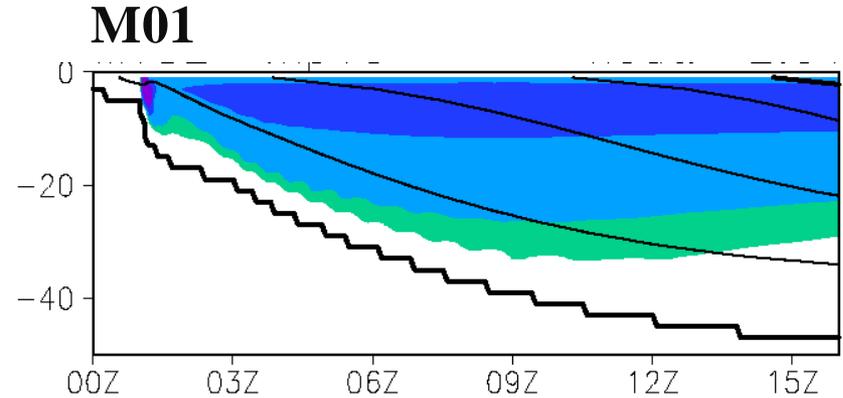
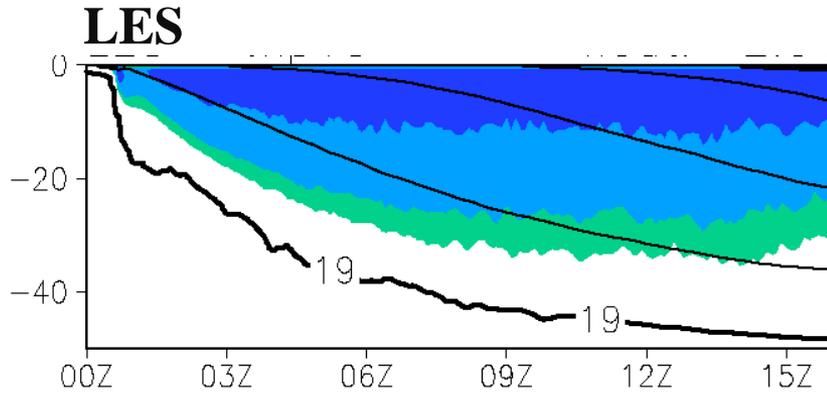
Sponge Layer

Rigid-lid B.C.

LESと海洋混合層モデルとの比較(加熱)

160 W/m²

等値線:水温 [0.02°C] 陰影:乱流熱フラックス [$w'\theta: 2 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{Cm/s}$]

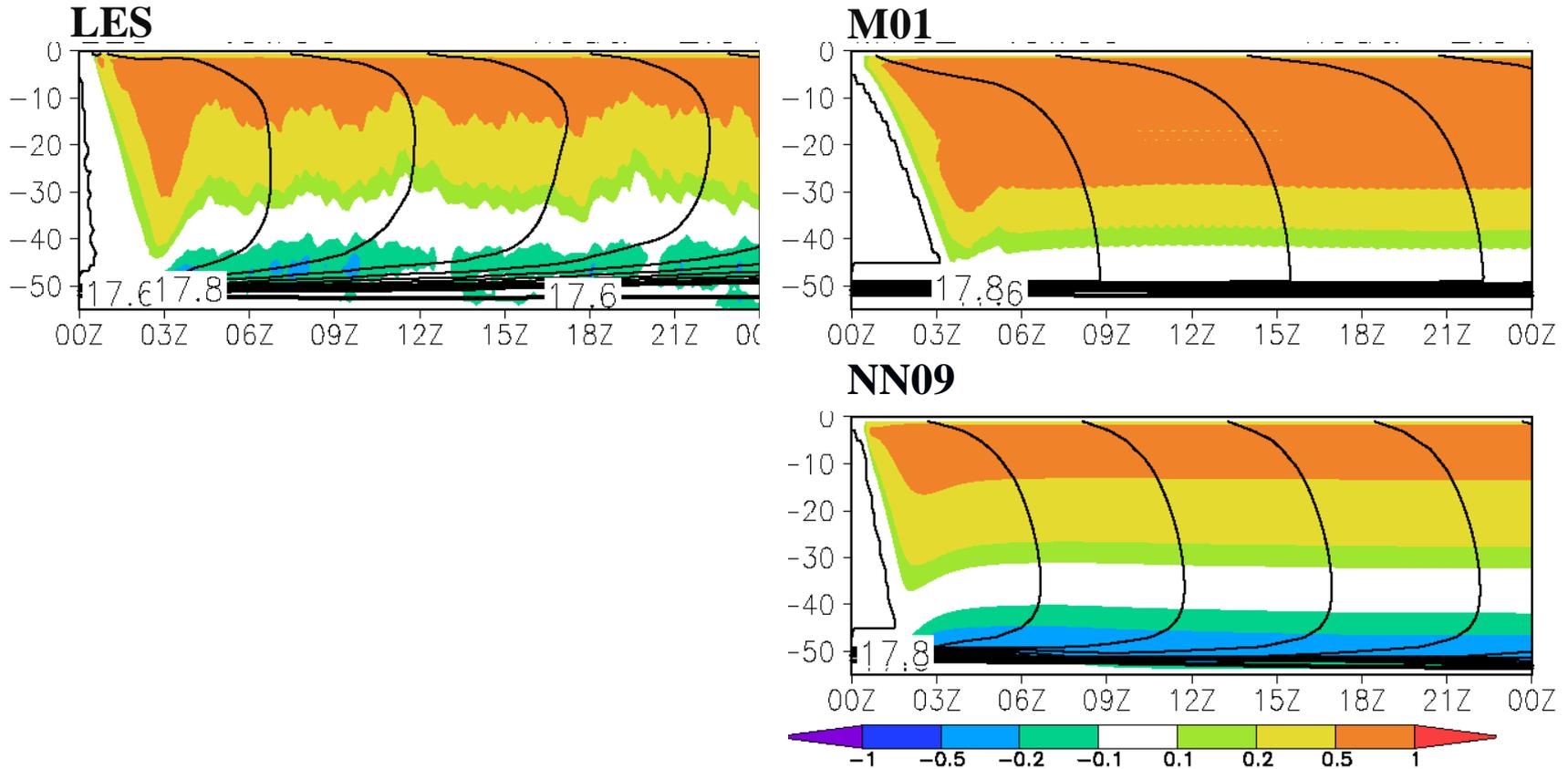


LES/M01/NN09: 水温上昇の様子がほぼ同一

LESと海洋混合層モデルの比較(冷却)

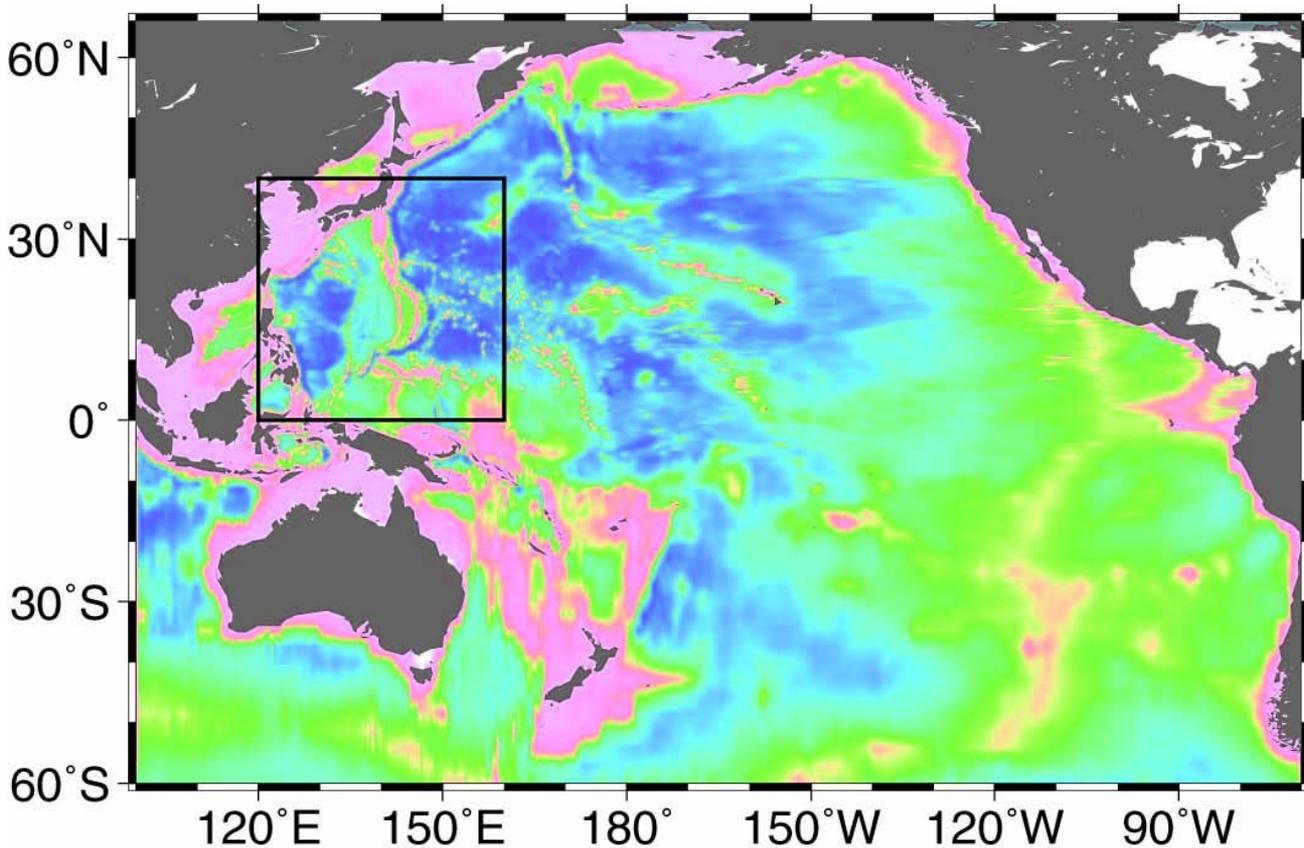
-160 W/m²

等値線:水温 [0.02°C] 陰影:乱流熱フラックス [$w'\theta: 2 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{Cm/s}$]



NN09: LESから得られた水温場の発達過程に近い結果を再現

海洋大循環モデルにおける混合層モデルの パフォーマンスチェック



MITgcm

グリッド:

水平0.1°(最小)

鉛直45層

海面フラックスデータ:

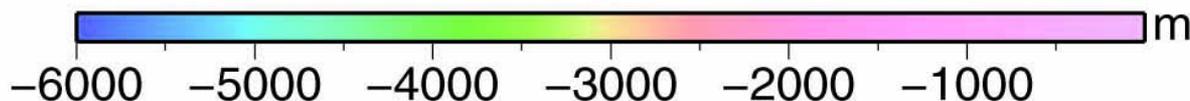
JRA-25 (6時間毎)

混合層モデルM01&NN09

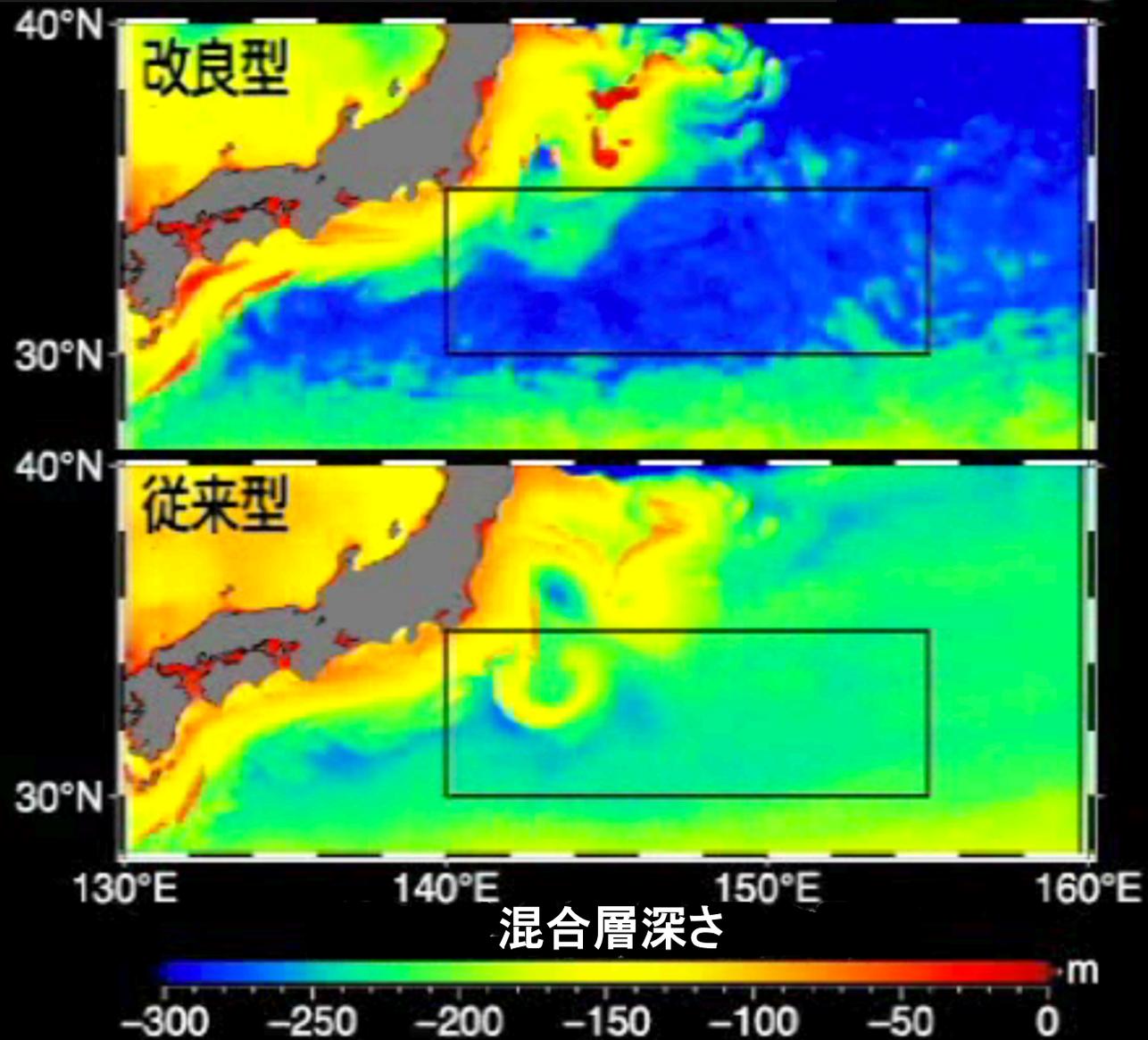
を組み込み1年間計算した

→北西太平洋

冬季の混合層の発達

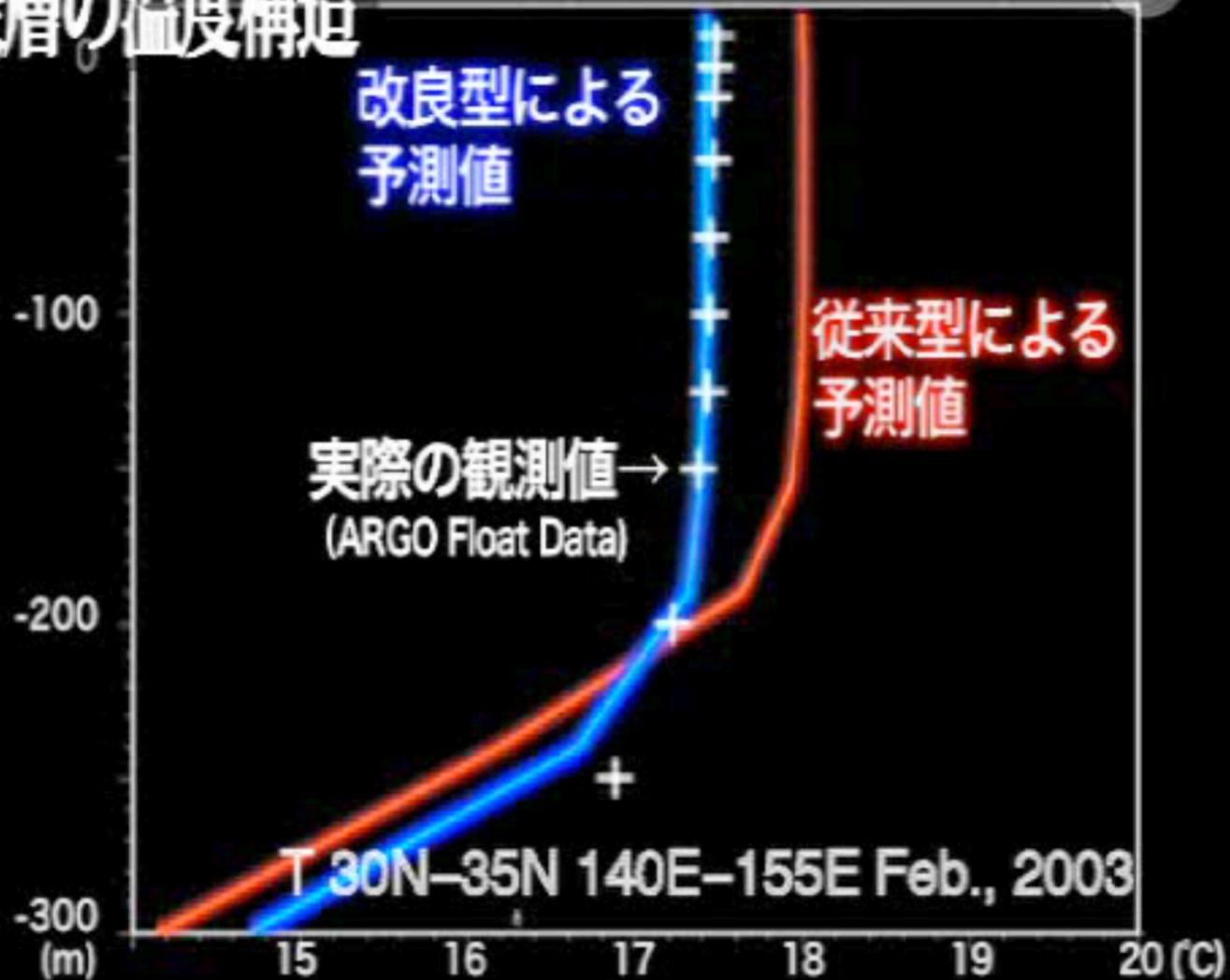


海洋表層のシミュレーション(動画)



海洋表層の温度構造

KAKUSHIN



まとめ:

気候変動予測の精度向上に貢献するための 海洋混合層乱流モデルのバージョンアップ

1. 乱流観測に基づくLESモデルの有効性の検証

乱流エネルギー消散率 ε ・温度擾乱消散率 χ と
比較した結果、開発されたLESモデルの有効性を確認

2. LESに基づく海洋混合層モデルの有効性の検証

様々な外力下における海洋表層の応答過程:
NN09 (Nakanishi and Niino 2009)が
M01 (Mellor 2001) に比べて良好な結果

3. 海洋大循環モデルにおける海洋混合層モデルの パフォーマンスチェック

北太平洋を対象とした数値シミュレーション:
NN09 がM01に比べて良好な結果