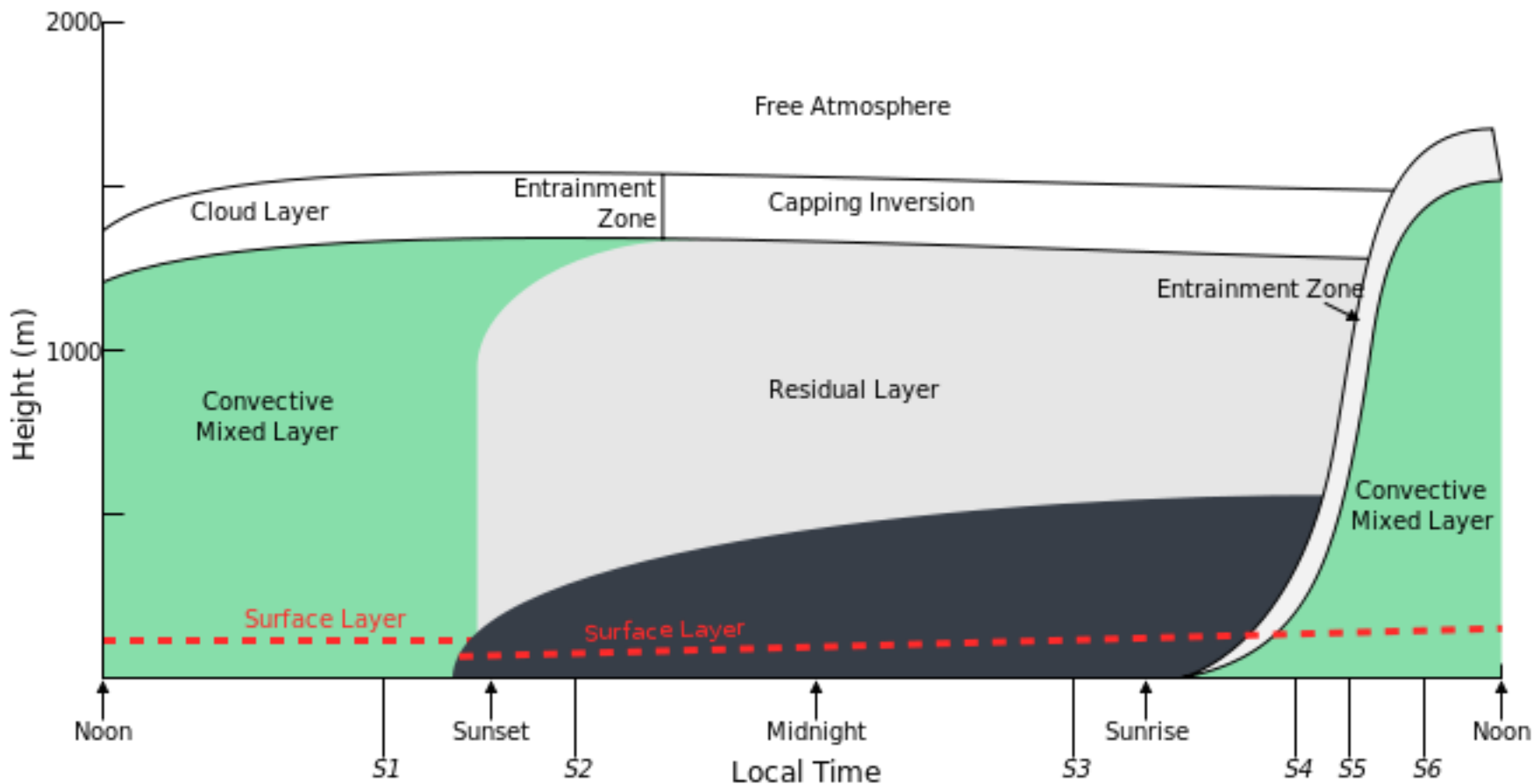


対流混合層の特徴と 普遍性

伊藤 純至

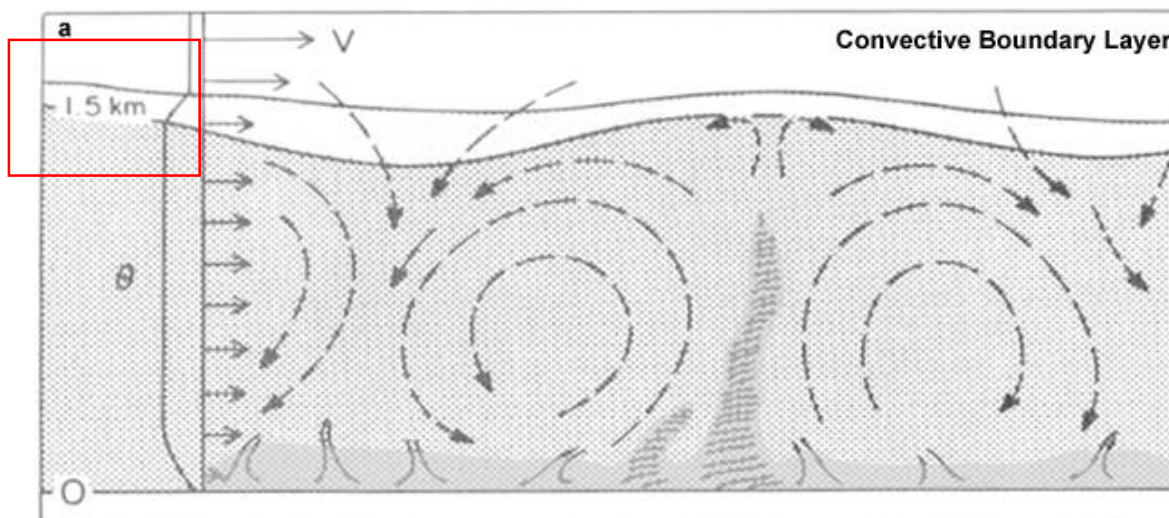
大気境界層の日変化



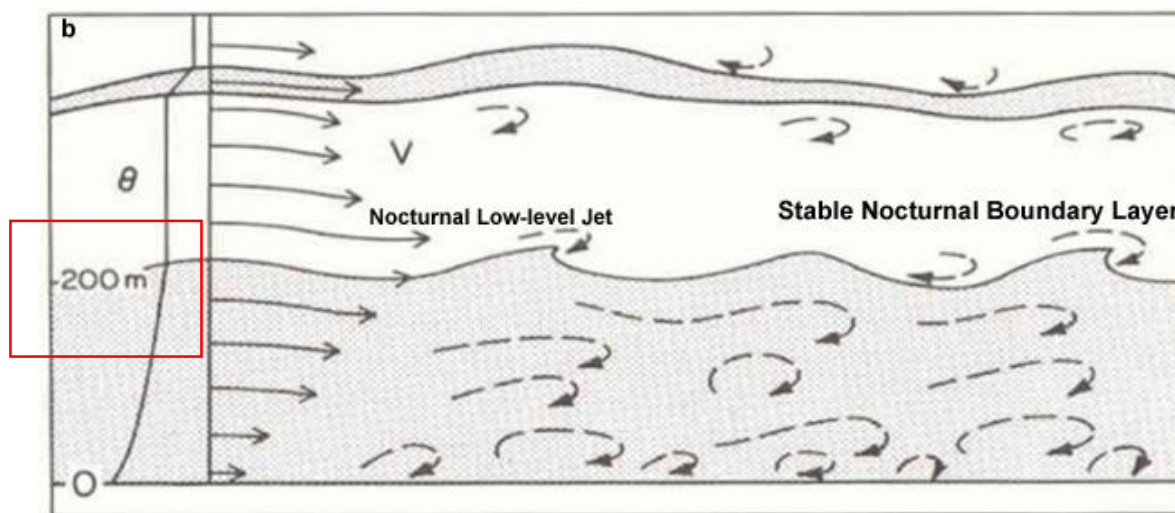
Wikipedia “atmosphseric boundary layer” より

大気境界層の「渦」

日中
(不安定成層)



夜間
(安定成層)



対流混合層の可視化例

- 地表面温度 $>40^{\circ}\text{C}$ →活発な対流



オクラホマ大学;火災
の煙で対流セルが可
視化(2011年8月)

- 寒気の吹き出し時のミシガン湖



霧で多角形型の対流セルが可視化
(Hess et al. 1988)

対流混合層の可視化：晴天積雲



@オクラホマ、2011



宇都宮付近上空
2018/8/23

日本海の寒気吹き出し

2018/01/25 03:00:00 (JST)

霧と混合層



@愛媛県大洲(2015)

霧層の下は対流混合層になっているはず

河川と対流混合層

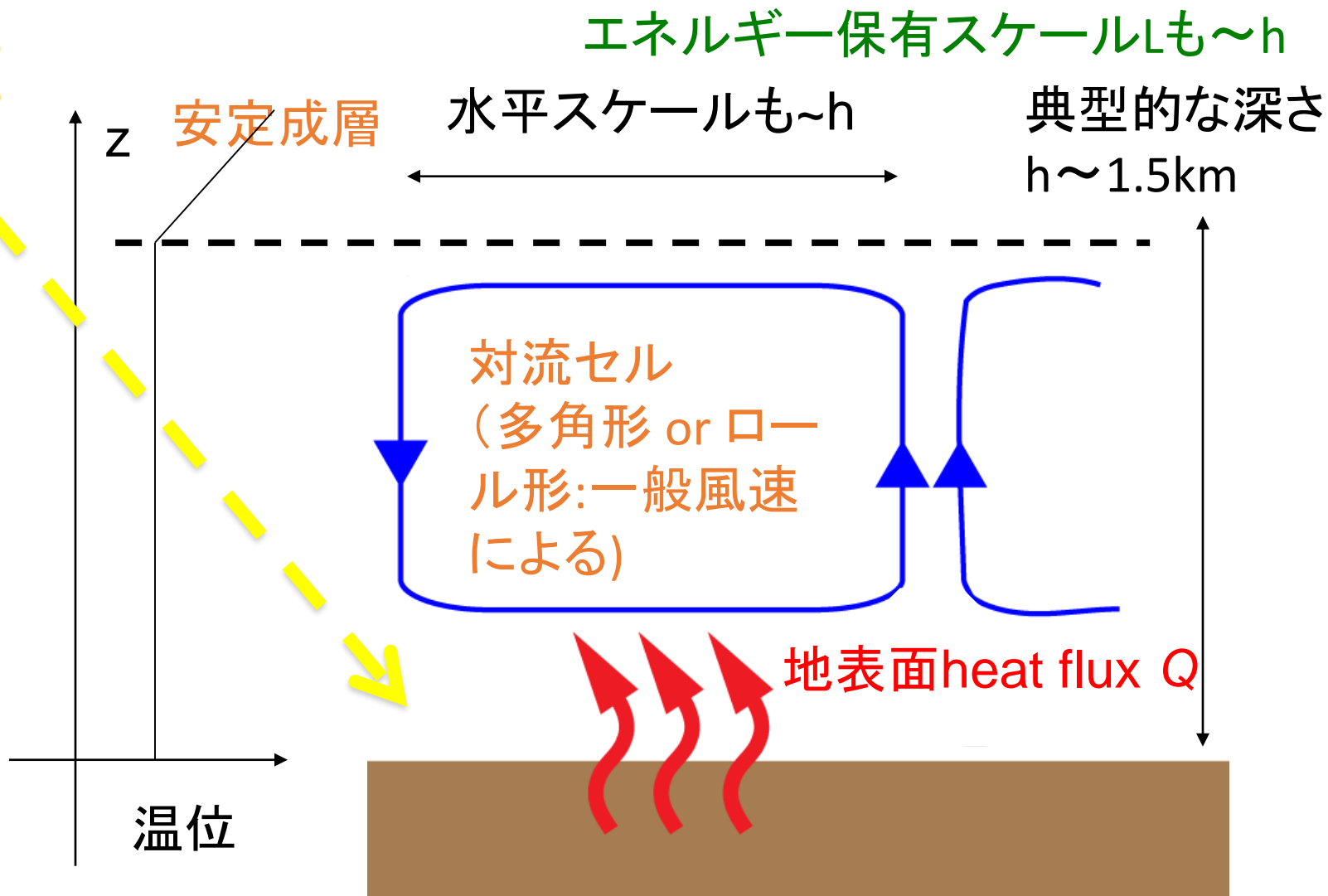
肱川河口



対流混合層の室内実験

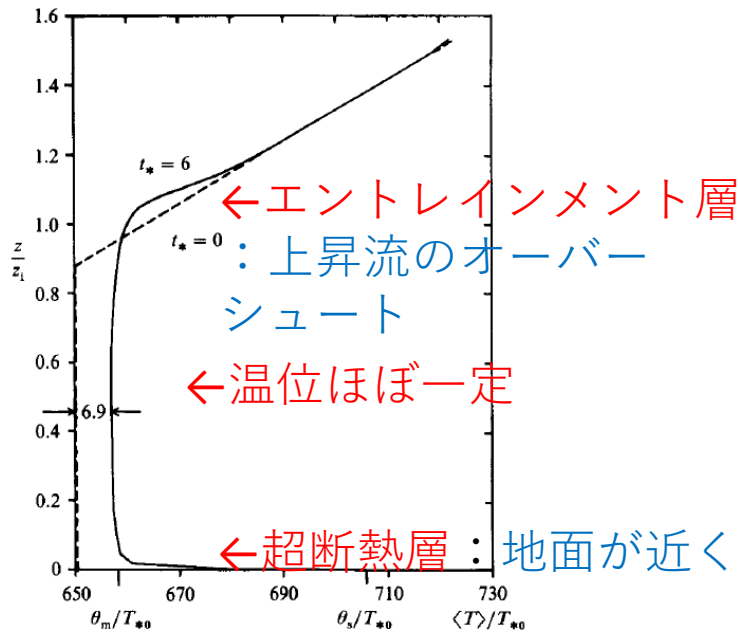


日中の対流混合層の概念図



対流混合層の普遍性

対流混合層の温位の鉛直プロファイル

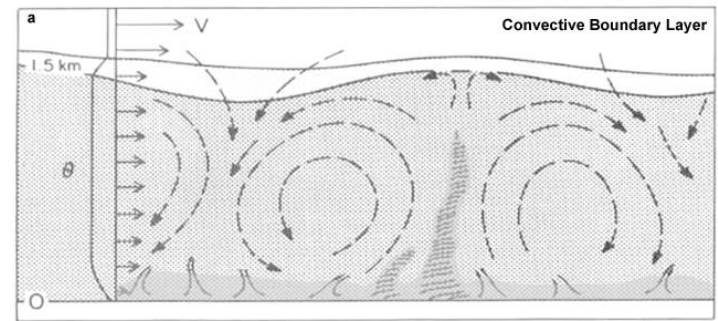


Γ : 初期温位傾度(K/m)
 h, z_i : 混合層高度

$$\int Q dt = \frac{1}{2} h \times \Delta\theta = \frac{1}{2} h^2 \Gamma = \frac{1}{2} \frac{\Delta\theta^2}{\Gamma}$$

Q が一定ならば $h \propto t^{1/2}$ 、 $\Delta\theta \propto t^{1/2}$

FIGURE 1. Mean temperature $\langle T(z) \rangle$ versus height at initial time (-----) and at time $t_* = tw_{*0}/z_{i0} = 6$ (—). For both profiles, the vertical coordinate is normalized with the inversion height z_i at time $t_* = 6$. The mean temperature θ_m of the mixed layer and the mean surface temperature θ_s are indicated for $t_* = 6$.



対流混合層の鉛直熱フラックス の鉛直プロファイル

520

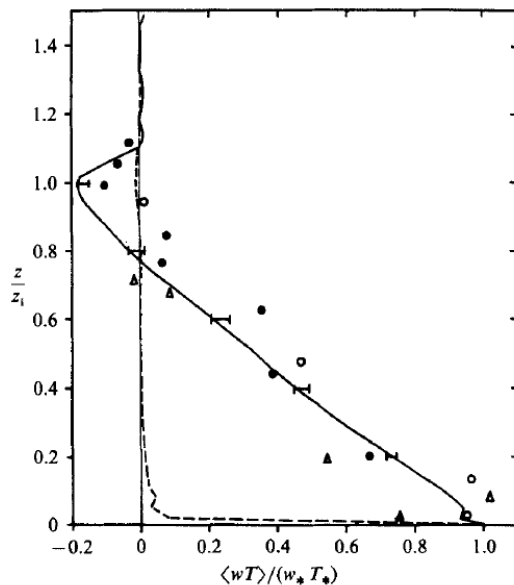


FIGURE 2. Normalized vertical heat flux versus height: —, LES-result; ----, SGS-part; both for $t_* = 6.5$. The error bars indicate the scatter of the mean profiles in the time period $t_* = 6-7$. Solid symbols denote laboratory measurements by Deardorff & Willis (1985), open symbols represent aircraft measurements by Lenschow *et al.* (1980) (○, 24 February 1975; △, 16 February 1975).

Schmidt and Schumann (1989)

室内実験、屋外観測、LESの結果を重ねる

熱フラックスの鉛直プロファイル

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial z} (\overline{w'\theta'})$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial \theta}{\partial z} \right) = - \frac{\partial^2}{\partial z^2} (\overline{w'\theta'})$$

↑
0

$$\overline{w'\theta'} = Az + B$$

* エントレインメントは無視
地上フラックスの0.2割程度

自由対流のスケーリング

h : 混合層高度 [L]

Q : 地表面熱フラックス [$K \cdot L \cdot T^{-1}$]

$\alpha \equiv g/\theta_0$: 熱膨張係数 [$L \cdot T^{-2} \cdot K^{-1}$]

基本変数3つ、次元3つ

→ π 定理より無次元パラメーターなし、
対流混合層は普遍

速度スケール $w_* = (\alpha Q h)^{1/3}$

温度スケール $\theta_* = (Q^2 / \alpha h)^{1/3}$

$\langle w'^2 \rangle$ の鉛直分布 (w_* と h でスケール)

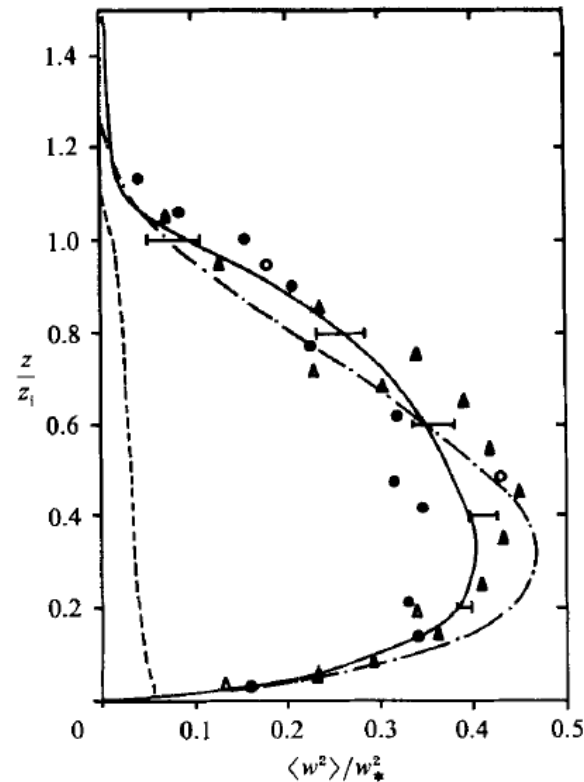


FIGURE 3. Vertical velocity variance versus height: —, LES result for $t_* = 6.5$, the error bars indicate the scatter of the mean profiles in the time period $t_* = 6-7$; ----, SGS part; solid symbols denote laboratory measurements of Willis & Deardorff (1974), case S1 (\blacktriangle) and of Deardorff & Willis (1985) (\bullet). The open symbols represent aircraft measurements of Lenschow *et al.* (1980) (\circ , 24 February 1975; \triangle , 16 February 1975); - · - · -, interpolation curve $\langle w'^2 \rangle / w_*^2 = 1.8(z/z_1)^{3/2}(1 - 0.8z/z_1)^2$ proposed by Lenschow *et al.* (1980).

$\langle w'^3 \rangle / \langle w'^2 \rangle^{3/2}$ (Skewness) の鉛直分布

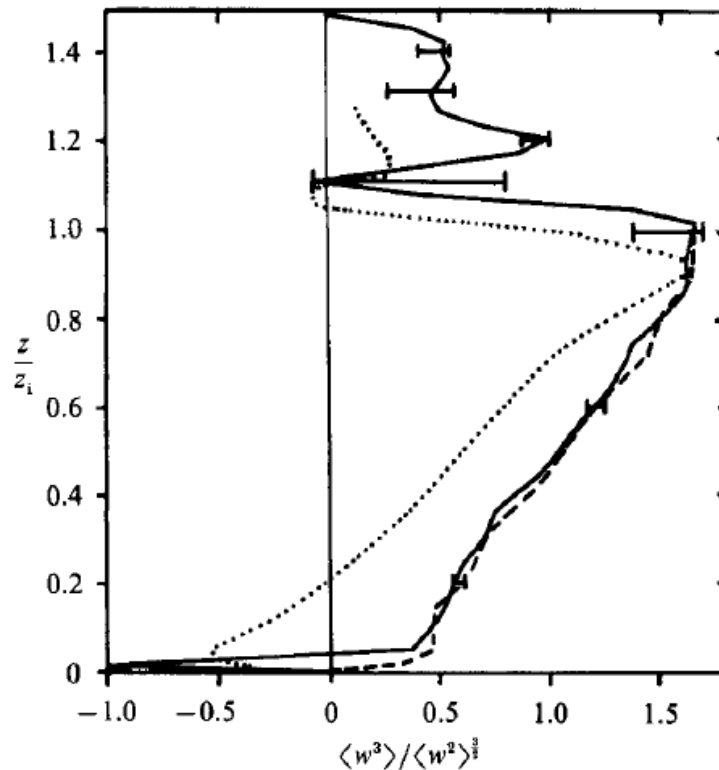


FIGURE 8. Skewness of vertical velocity fluctuations versus height (resolved part only). — (with error bars), present LES results; ·····, LES result by Deardorff (1974); - - - - -, present LES result for c_t enlarged as in figure 7.

Schmidt and Schumann (1989)

→強い上昇流の局在化

無次元化したTKE収支

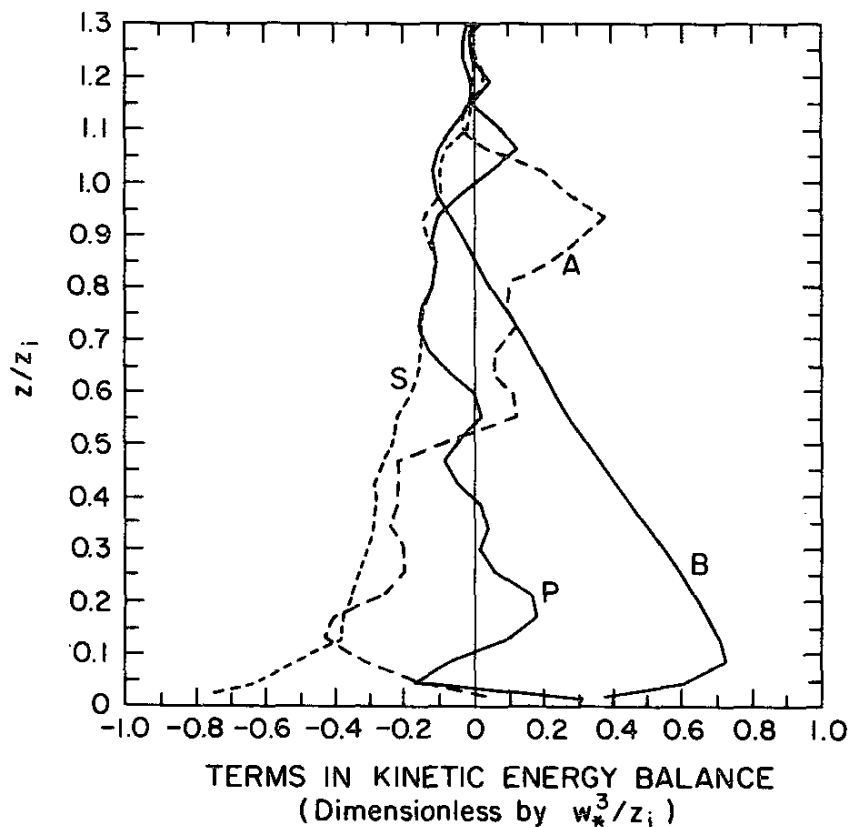
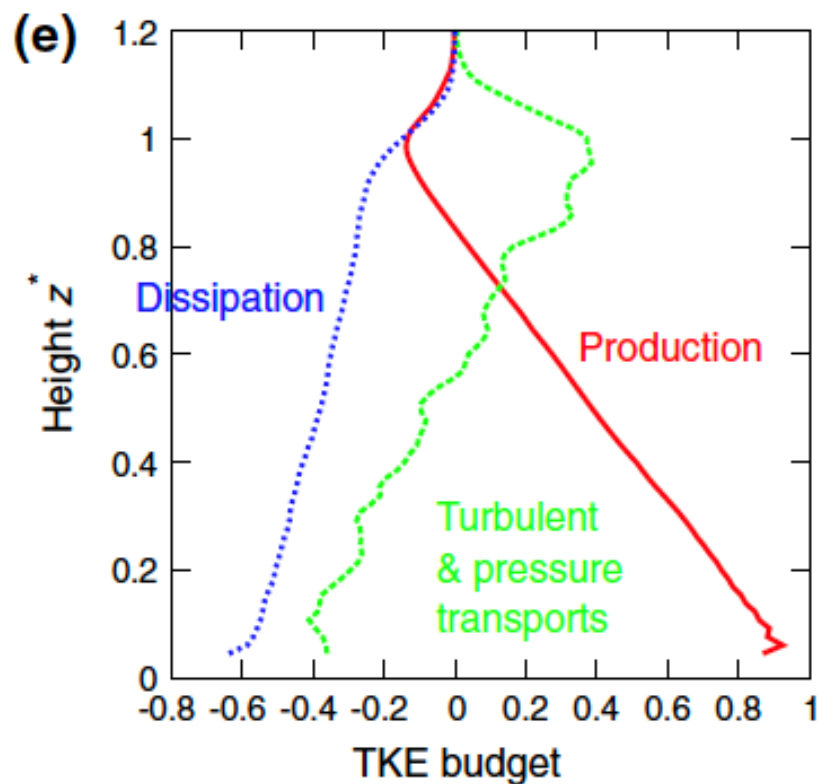


FIG. 9. Vertical profiles of the budget terms in the resolvable-scale turbulent energy balance. Curve B is the buoyancy term, curve P the pressure-related term, curve A the advection term, and curve S the subgrid-scale term.

Moeng (1994)のLES



Ito et al. (2015)のLES

海洋の混合層観測

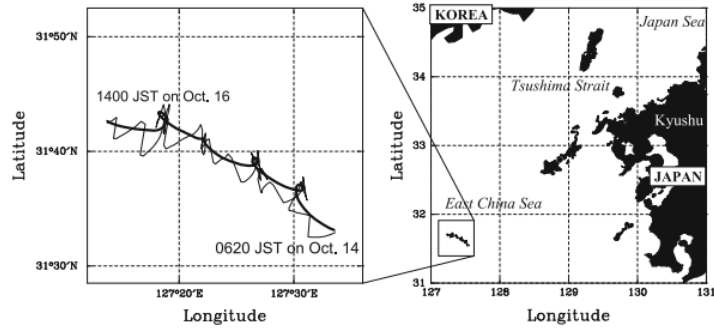
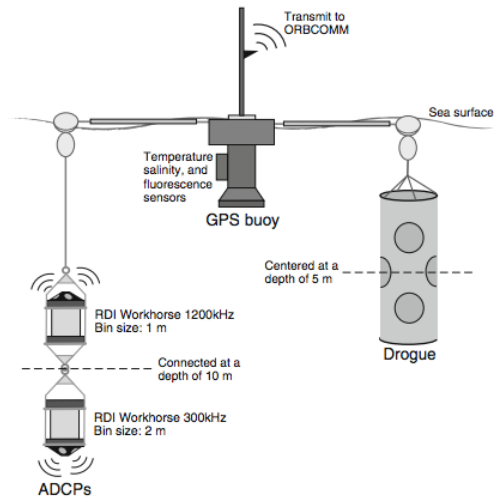


Fig. 1 Location of the observation site in the East China Sea. The *thick* and *thin* lines indicate the trajectory of the satellite-tracked drifter and the ship's track, respectively, during the time microstructure measurements were being made

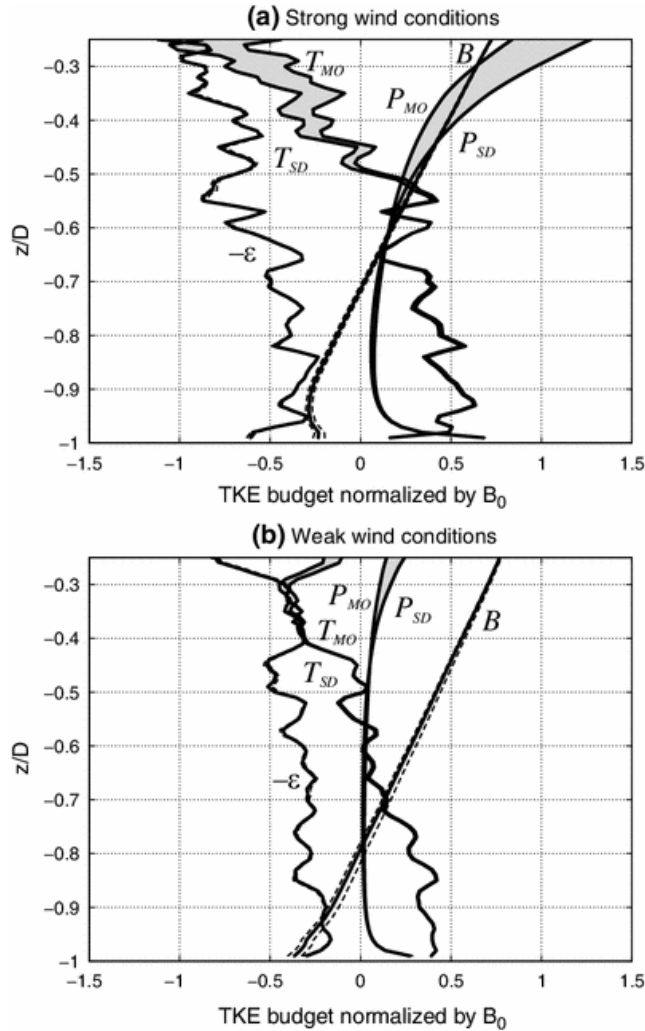
Springer

Fig. 2 Schematic drawing of the satellite-tracked drifter



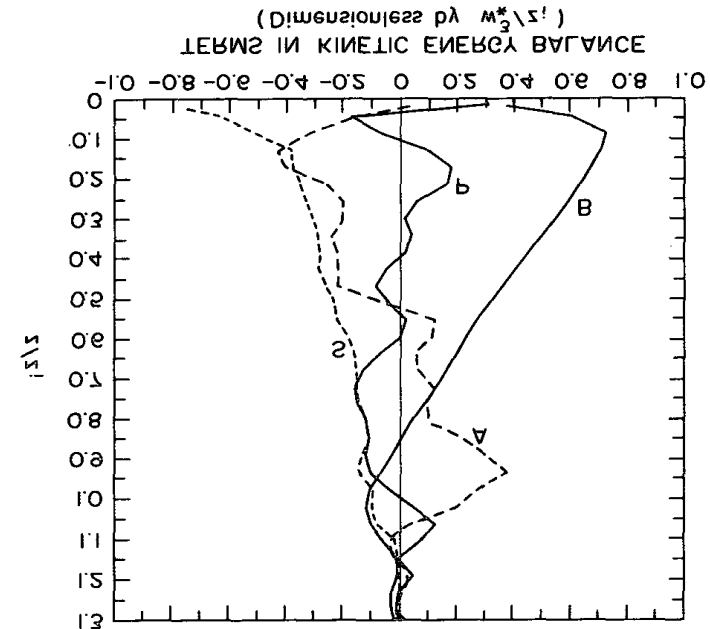
Endoh et al. (2014)

海洋の対流混合層のTKE収支



Moeng(1994)を上下逆に

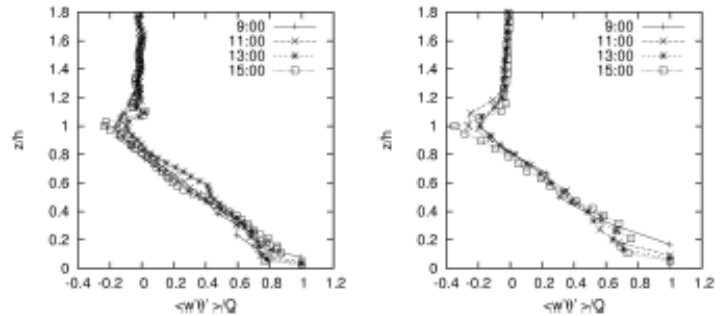
curve 2 the subgrid-scale term,
 curve 3 the pressure-related term, curve 4 the advection term, and
 scale turbulent energy balance. Curve B is the buoyancy term.
 FIG. 2. Vertical profiles of the budget terms in the resolvable-



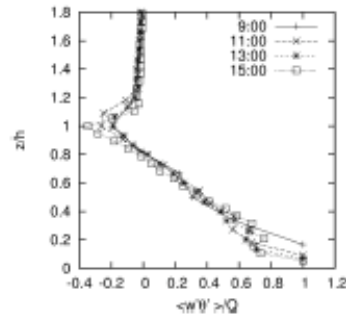
様々な時間のLES結果のスケーリング

日変化を導入したLES、 Ito et al. (2010)

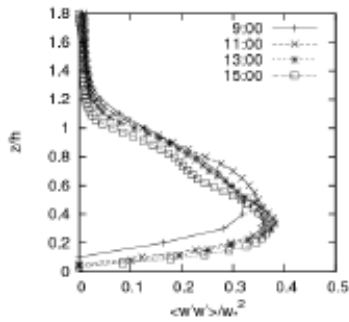
日変化する熱フラックス



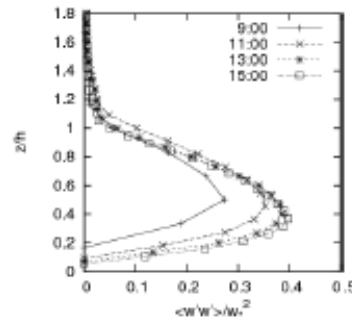
(a)



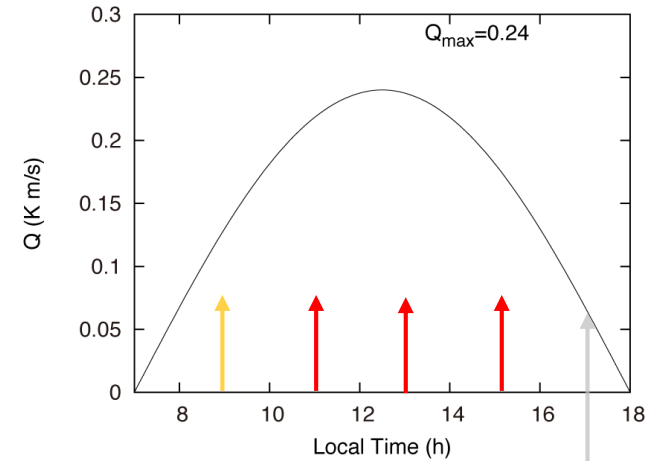
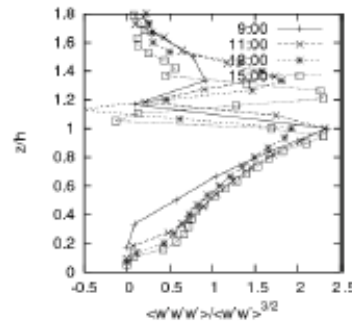
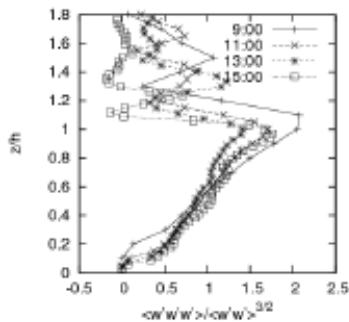
(b)



(c)



(d)



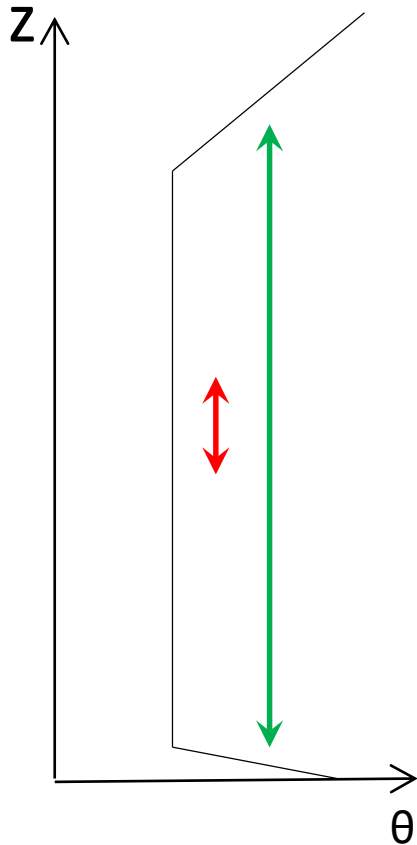
概ね一致（混合層発達初期を除く）

おそらくスケールできない？

対流混合層の特徴

Non-localな熱輸送

温位の鉛直分布



Localな輸送：局所的な勾配降下

$$w'\theta' = -C \frac{\partial \theta}{\partial z}$$

勾配がなければ→0になってしまう

Non-localな輸送：対流混合層全体に及ぶ乱流渦による輸送

$$w'\theta' = -C \frac{\partial \theta}{\partial z} + \boxed{\alpha}$$

Non-localな輸送の効果
を項を要追加

モニン・オブコフ則と地表面フラックスのパラメタリゼーション

Businger (1970) の観測に基づく経験則

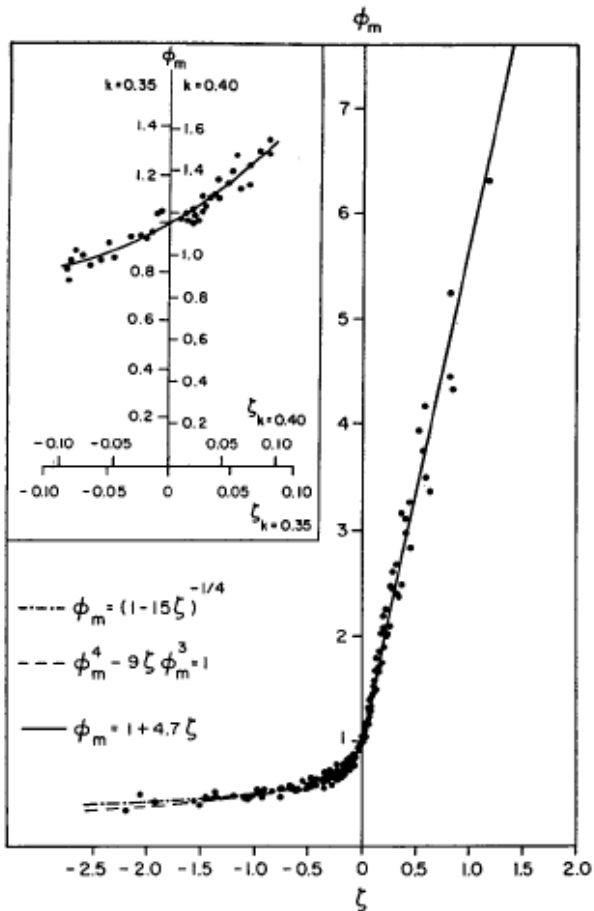


FIG. 1. Comparison of dimensionless wind shear observations with interpolation formulas.

無次元鉛直風速シア

$$\phi_m = \frac{ks \partial U}{u_* \partial z}$$

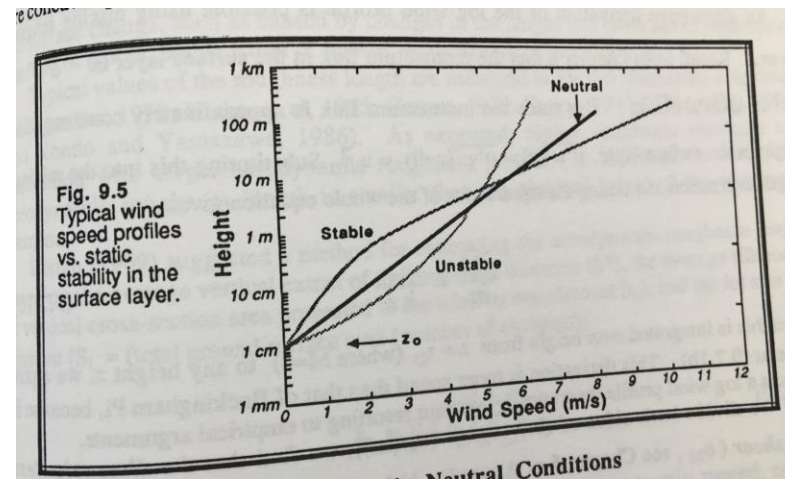
オブコフ長

$$L = \frac{-\theta_0 u_*^3}{kgw'\theta'}$$

安定度の関数

$$\zeta = \frac{z}{L}$$

定性的には...



Stull (1988)

地表面熱フラックスの診断の手順

Kitamura and Ito (2015) より

$$Q = -c_p \rho C_H |U| (\theta - \theta_s),$$

$$C_H = \frac{\kappa^2}{[\ln(z/z_0) - \psi_m(z/L) + \psi_m(z_0/L)][\ln(z/z_{0h}) - \psi_h(z/L) + \psi_h(z_{0h}/L)]},$$

$$L = -\frac{u_*^3}{\kappa(g/\theta_0)\overline{w'\theta'}|_s},$$

$$\psi_m(\zeta) = \begin{cases} -b(\zeta - c/d) \exp(-d\zeta) - a\zeta - bc/d & (\zeta \geq 0), \\ \log[(1 + \xi)^2(1 + \xi^2)/8] - 2 \tan^{-1} \xi + \pi/2, & (\zeta < 0), \end{cases}$$

$$\psi_h(\zeta) = \begin{cases} -b(\zeta - c/d) \exp(-d\zeta) - (1 + 2a\zeta/3)^{3/2} - bc/d + 1, & (\zeta \geq 0), \\ 2 \log[(1 + \xi^2)/2], & (\zeta < 0), \end{cases}$$

$$\overline{w'\theta'}|_s = Q/(c_p \rho),$$

→摩擦速度 $u_*^2 \equiv \overline{u'w'} = -C_p \rho C_M |U| U$ は L の関数なので
反復法によって解く

定性的には...

不安定成層時： 温度差大 → C_H 大 → 熱フラックス Q を大きく、温度差を減らす
する傾向

安定成層時： 温度差大 → C_H 小 → 熱フラックス Q の増減は不確定

対流混合層の構造： セル状対流・ロール状対流

→ 時間発展

鉛直流のパターン

セル状対流
(鉛直シアなし～弱)

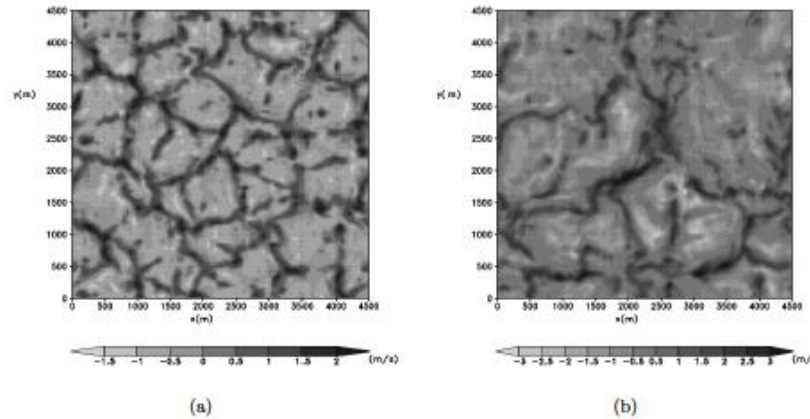
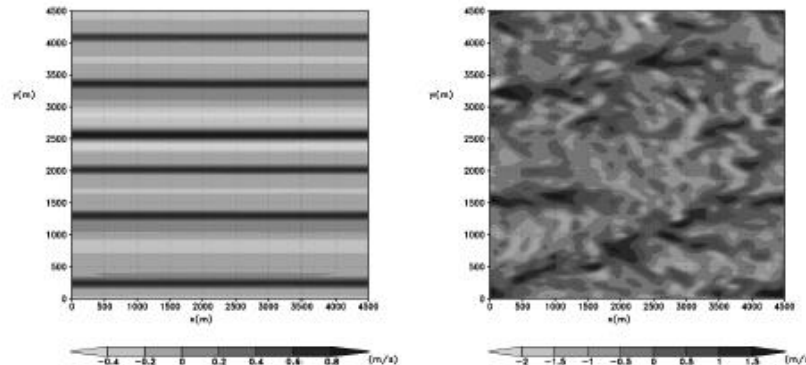


Figure 7: Horizontal distribution of vertical velocity at $z=200$ m for Exp. A1: (a) at 0900 LST and (b) 1400 LST.

→ 時間発展

ロール状対流
(鉛直シア強)



→
弱い熱フラックス・強い一様風

セル↔ロールの基準

TABLE 3. Categories of dominant eddy structure.

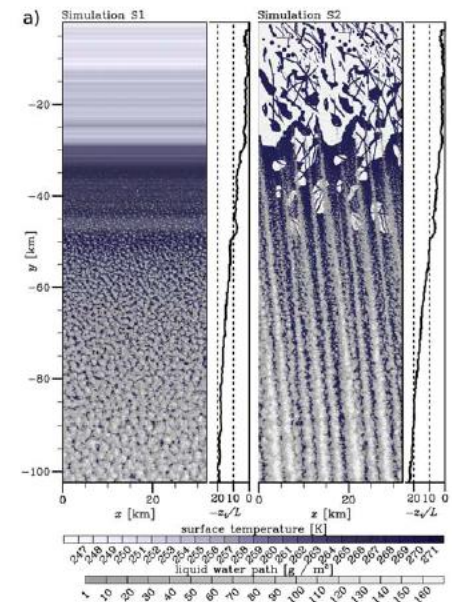
Category	Z_i/L parameter	Remarks
1	$-Z_i/L < 5.0$	Only roll vortex motion.
2	$-Z_i/L < 7.3$	Rolls coexist with convective cells and are necessary for their maintenance; rolls dominate.
3	$7.3 < -Z_i/L < 21.4$	Rolls coexist with random cells but are not necessary for their maintenance; random cells dominate.
4	$21.4 < -Z_i/L < 30^4$	Random cells only but shear important to cell structure and morphology.
5	$-Z_i/L > 30$	Random cells only; shear unimportant to cell structure and morphology.

境界層高度/オブコフ長で決まる (Christian and Wakimoto, 1989 など)

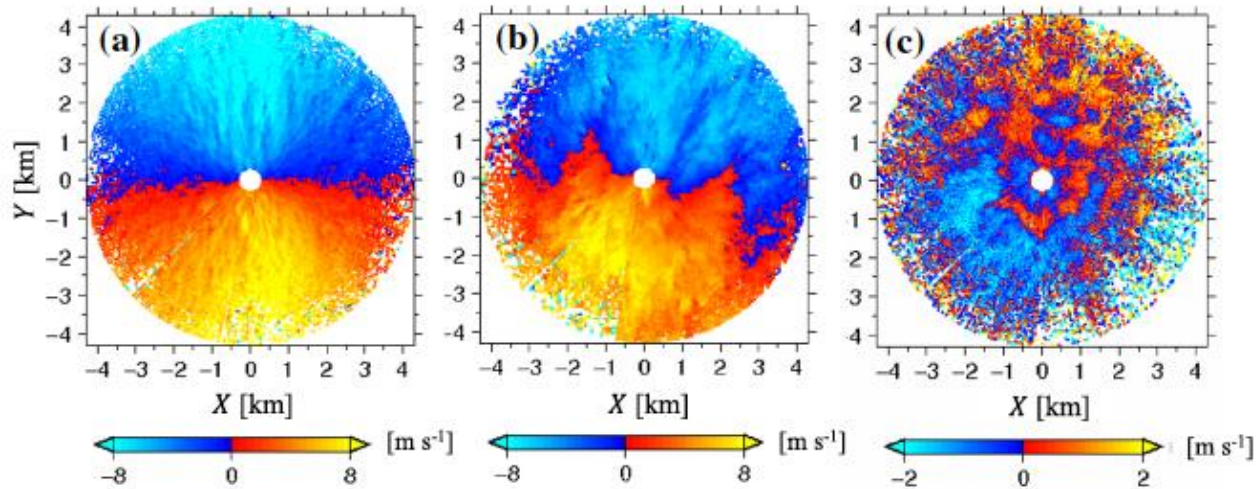
$$L = \frac{-\theta_0 u_*^3}{kgw'\theta'}$$

それ以外のメカニズム：地表面の非一様性がロールを形成

Gryshka et al. (2008)



ドップラーライダーによる観測



● *Streak* ● *Mixed* ● *Fishnet* ● *No streak* × *Others*

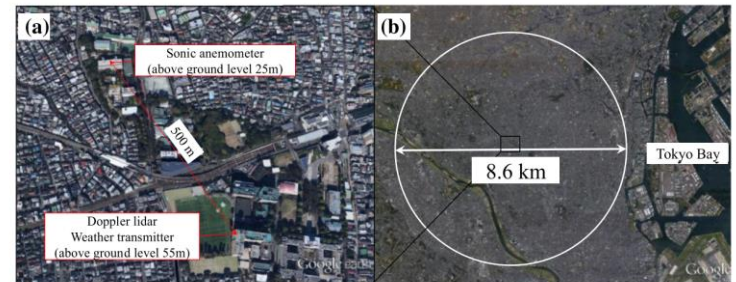
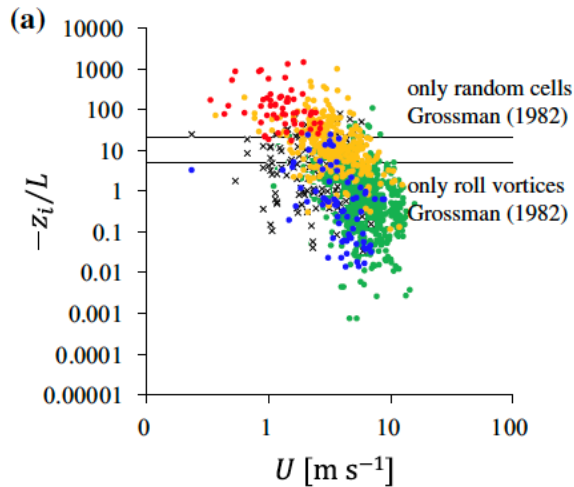


Fig. 1 Deployment of instruments: a view of the installation site (*agl* above ground level), b area covered by the Doppler lidar

東工大に設置したライダー、
Yagi et al. (2017, BLM)

鉛直シア環境下の成長モード

各リチャードソン数に対する成長率

Asai(1970)の
線形安定性
解析

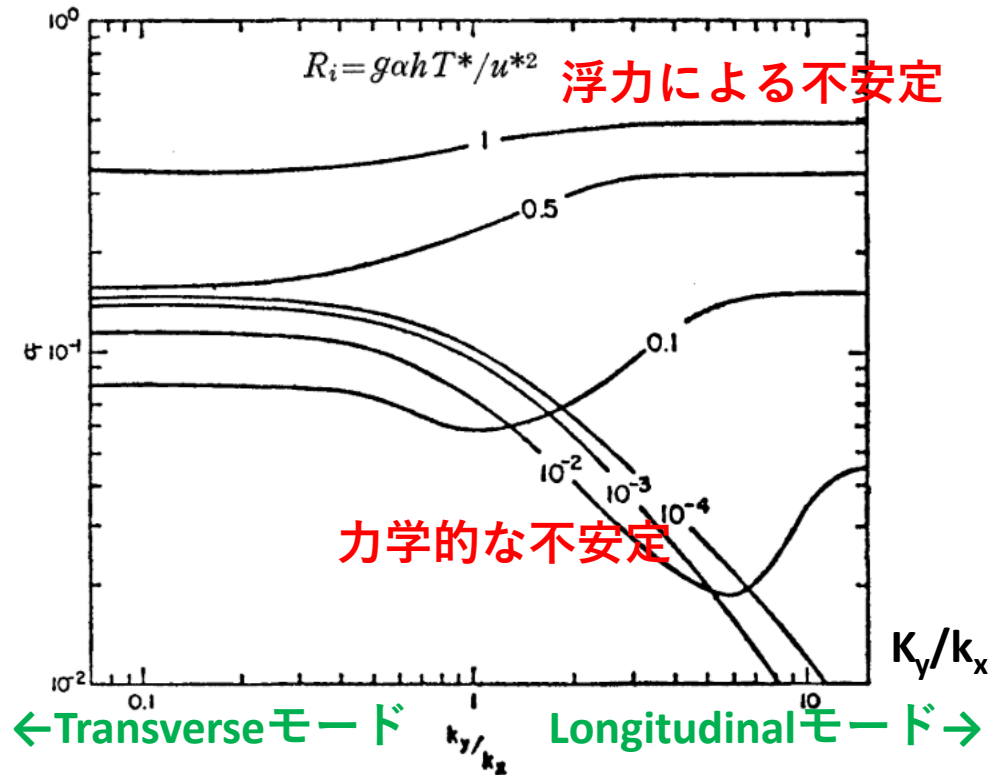


Fig. 7. Variations of amplification rates with the ratio between the wavenumber in the x and y directions k_y/k_x for different values of R_i . Here $R_a=10^4$ and $k=2\sqrt{2}$ are assumed.

TKE収支 (伊藤2010より)

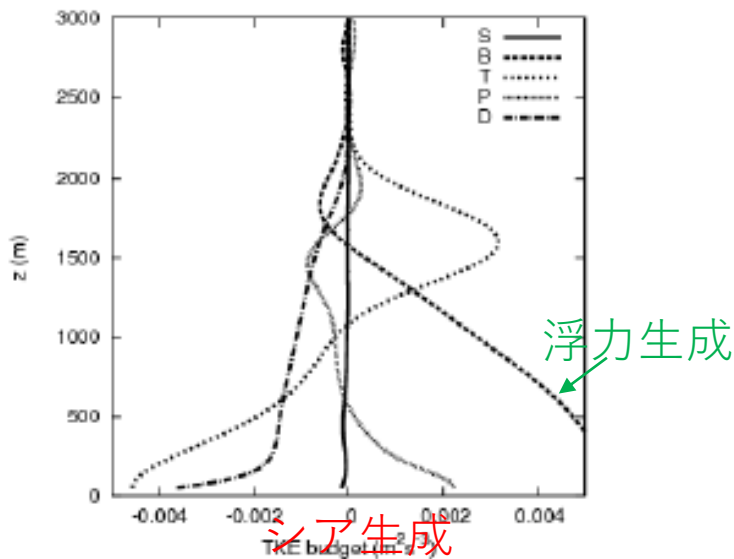
B: 乱流輸送 P: 圧力輸送

$$\frac{\partial \langle \bar{E} \rangle}{\partial t} = - \left(\underbrace{\langle u'w' \rangle \frac{\partial \langle \bar{u} \rangle}{\partial z}}_S + \underbrace{\langle v'w' \rangle \frac{\partial \langle \bar{v} \rangle}{\partial z}}_B \right) + \underbrace{\frac{g}{\theta_0} \langle w'\theta' \rangle}_B - \frac{\partial \langle w'E' \rangle}{\partial z} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \langle w'p' \rangle}{\partial z} - \langle \epsilon \rangle_D$$

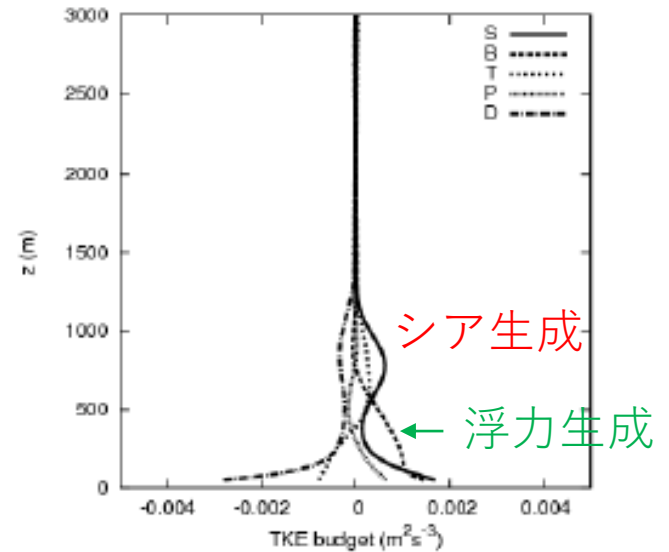
S: シア生成 B: 浮力生成 D: 散逸

セル状対流

ロール状対流

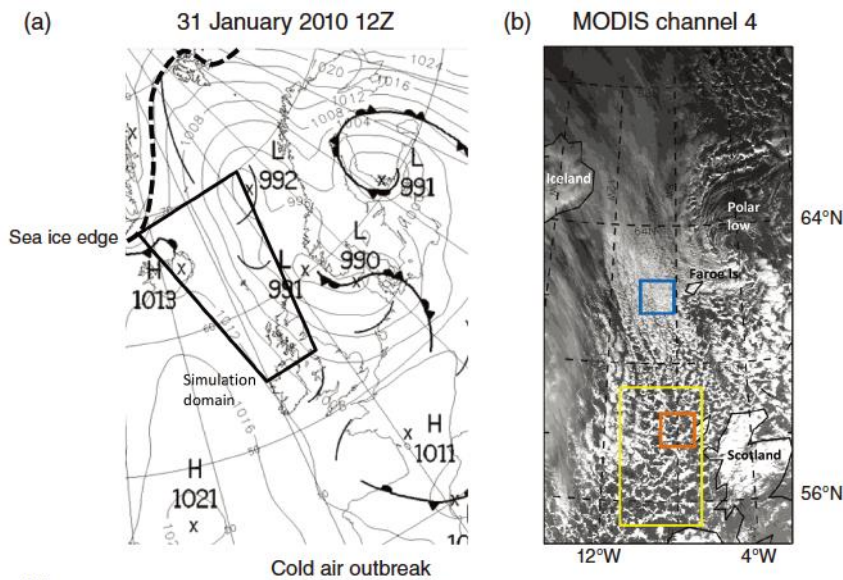


(a) Experiment A1 at 14:00



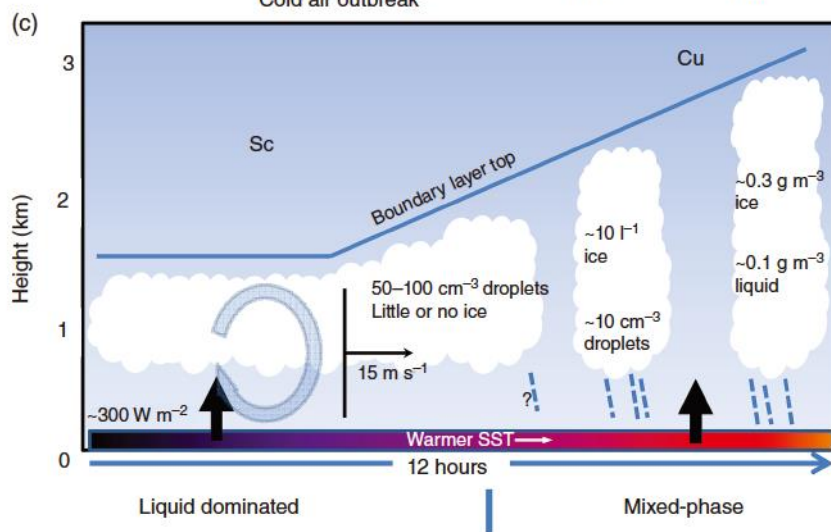
(b) Experiment B3 at 14:00

北海の寒気吹き出し

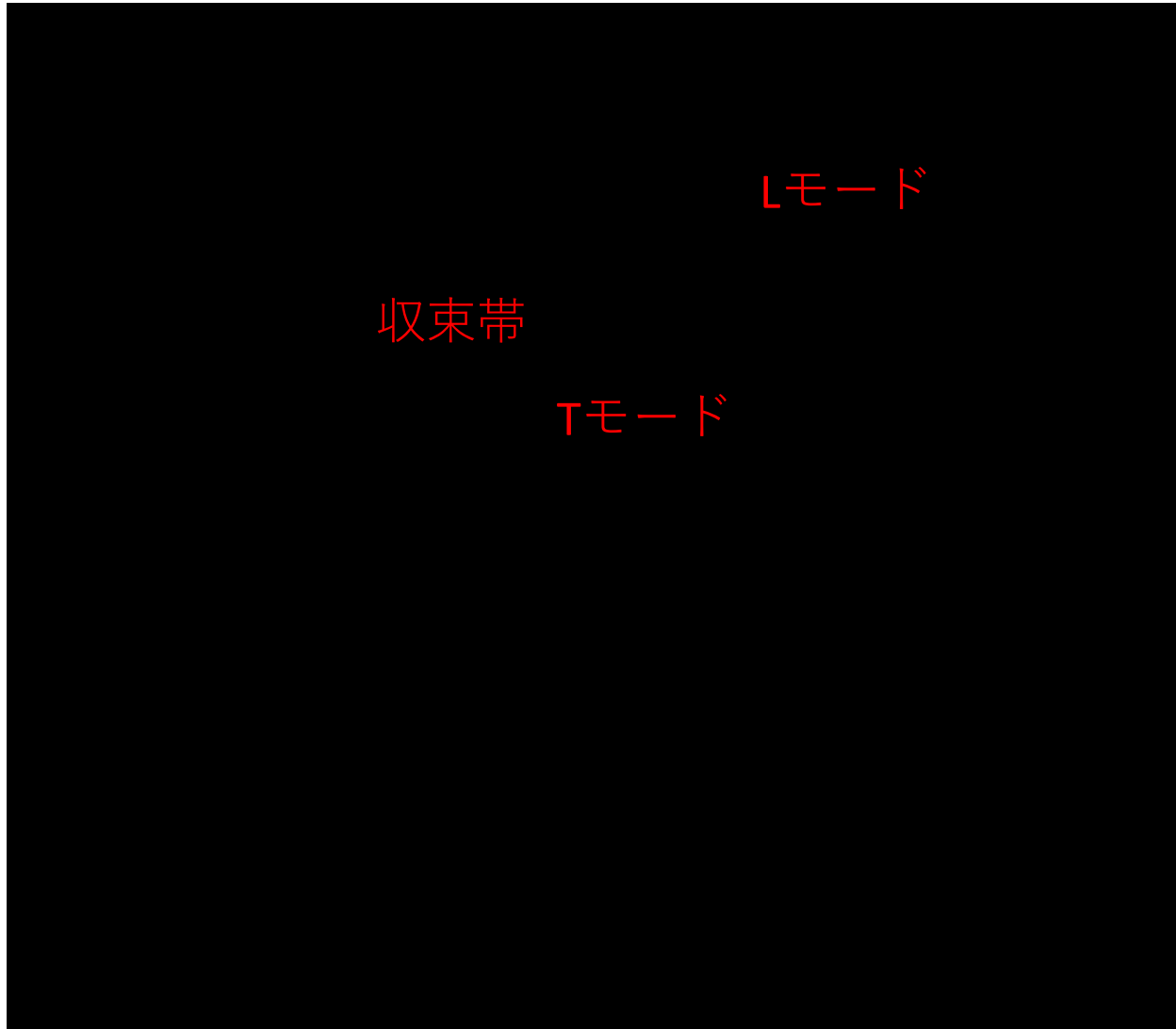


ロール状対流

セル状対流



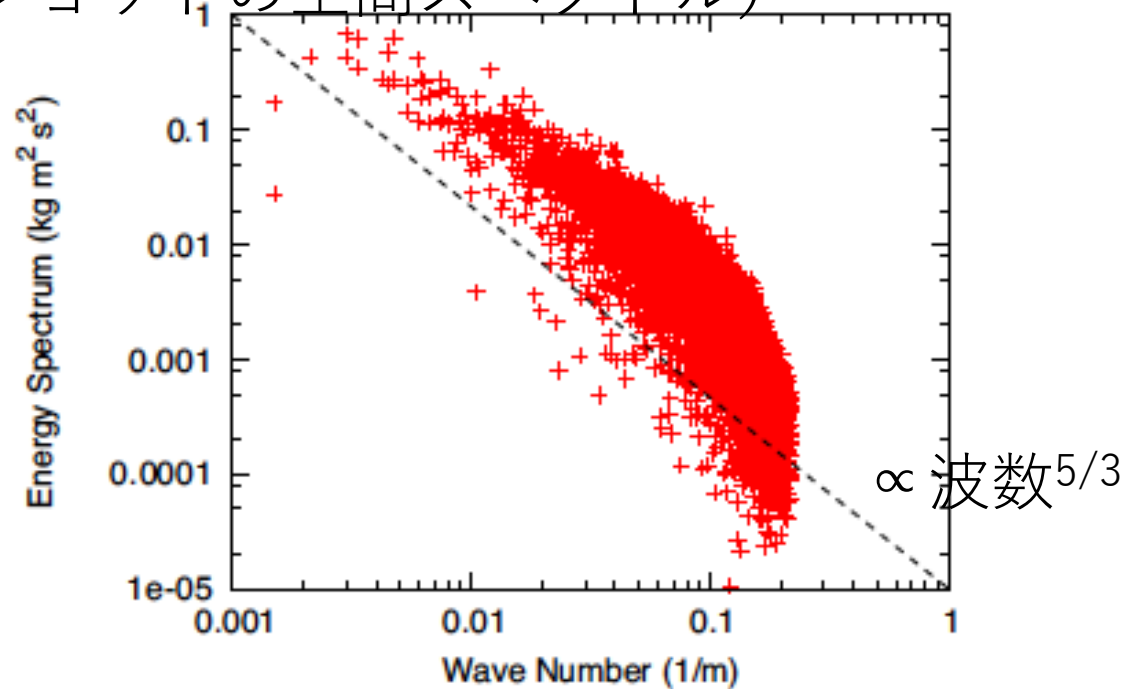
日本海の筋雲：Lモード・Tモード



LモードもTモードも強鉛直シア下のロール状対流で説明

対流混合層のエネルギースペクトル

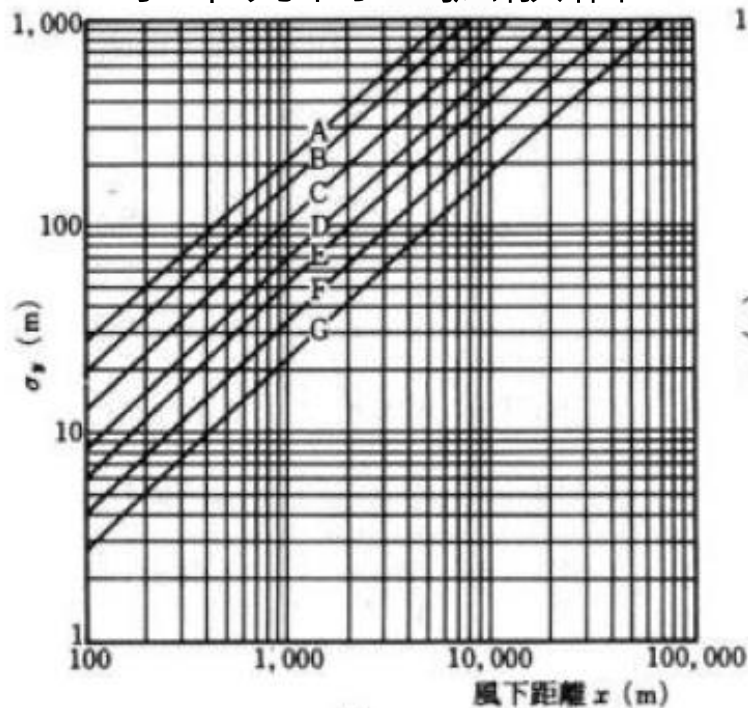
Ito et al. (2010)、解像度25mのLES
(スナップショットの空間スペクトル)



エネルギー注入領域と最小解像スケール間に約2桁分のレンジあり (約1桁分が「慣性小領域」)
→ LESが合理化・乱流が維持

対流混合層の拡散：パスキル図

水平方向の拡散幅



鉛直方向の拡散幅

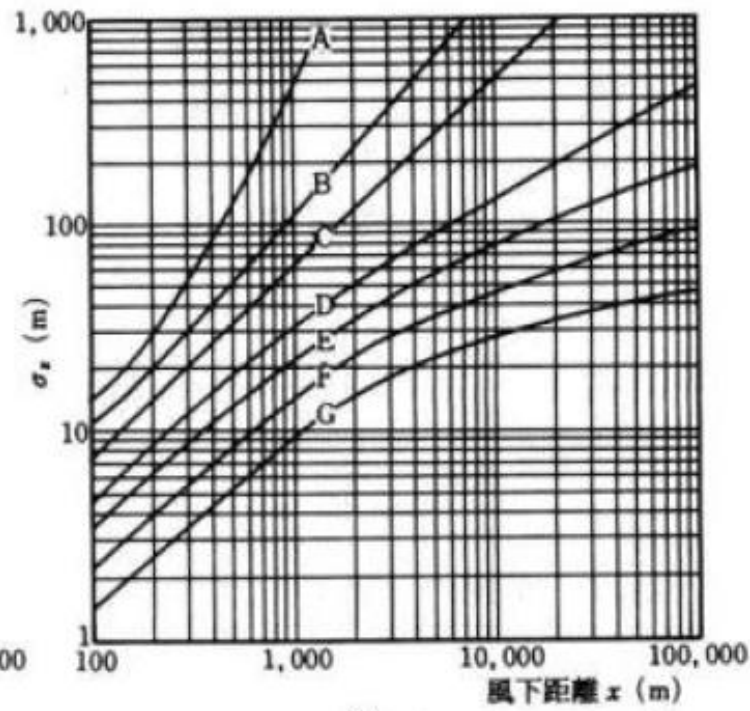


図 1-1 パスキル・ギフォード図

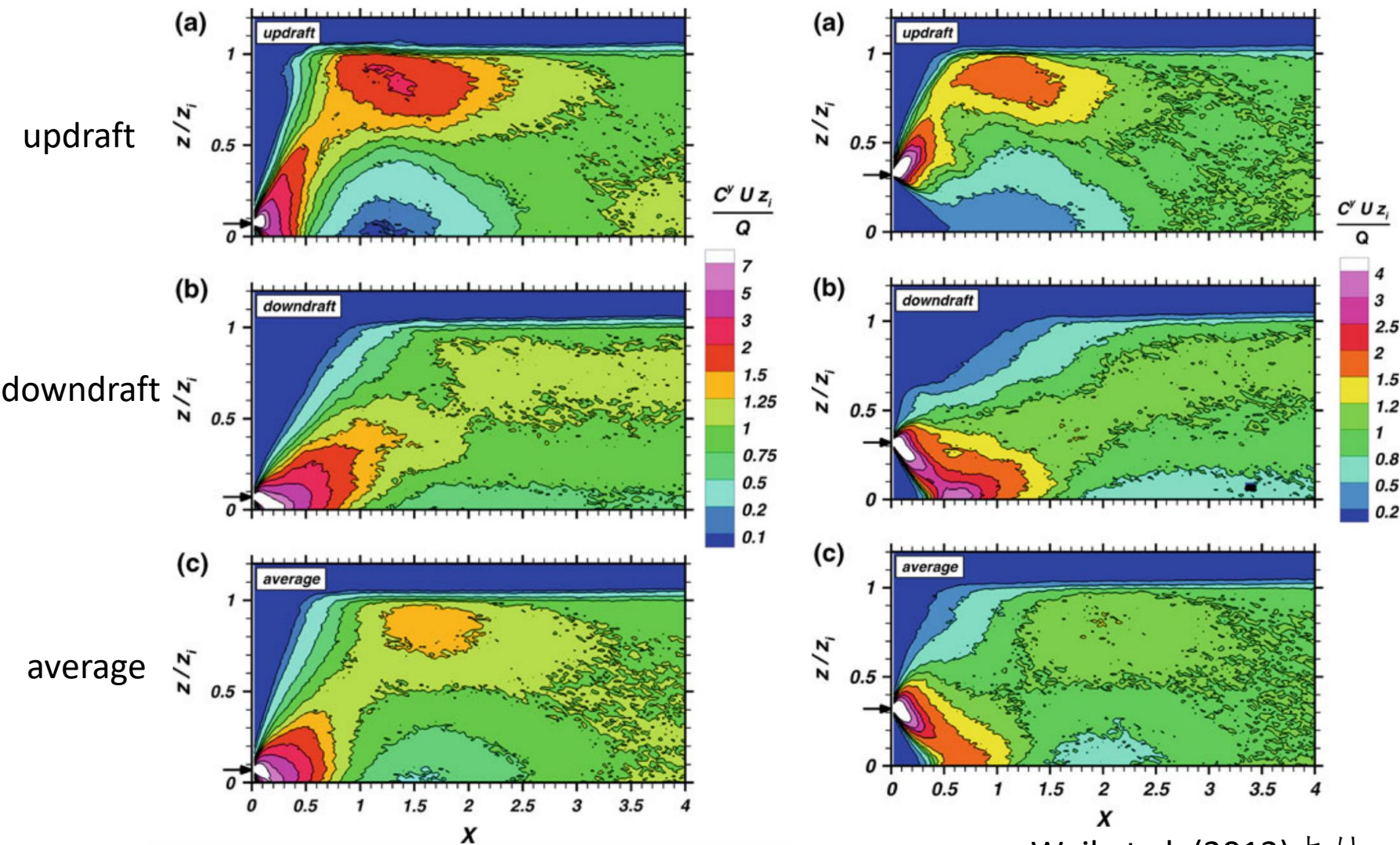
パスキル図の安定度の分類

表 1-2 パスキル安定度分類表（原安協報告-40、1973）

風速(u) m/s	日射量(T)kJ/m ² ・h				放射収支量(Q)kJ/m ² ・h		
	T≥2093	2093>T≥1042	1042>T≥521	521>T	Q>-75	-75≥Q>-150	-150≥Q
u<2	A	A-B	B	D	D	G	G
2≤u<3	A-B	B	C	D	D	E	F
3≤u<4	B	B-C	C	D	D	D	E
4≤u<6	C	C-D	D	D	D	D	D
6≤u	C	D	D	D	D	D	D

- 備考) 1. 本表は、原安協報告-40、1973 のパスキル安定度分類表をもとに、日射量、放射収支量の単位を kJ に換算したものである。
 2. 放射収支量は地面から上方へ向かう量を負とする。
 3. 日射量、放射収支量とも観測時前 10 分間の平均値をとる。
 4. 日中（日の出～日の入り）は日射量を用い、夜間（日の入り～日の出）は放射収支量を用いる。
 5. 風速区分はパスキル法（日本式）による。

点源付近の拡散、LESの結果



Weil et al. (2012) より

濃度の鉛直分布のアンサンブル ルスピレット

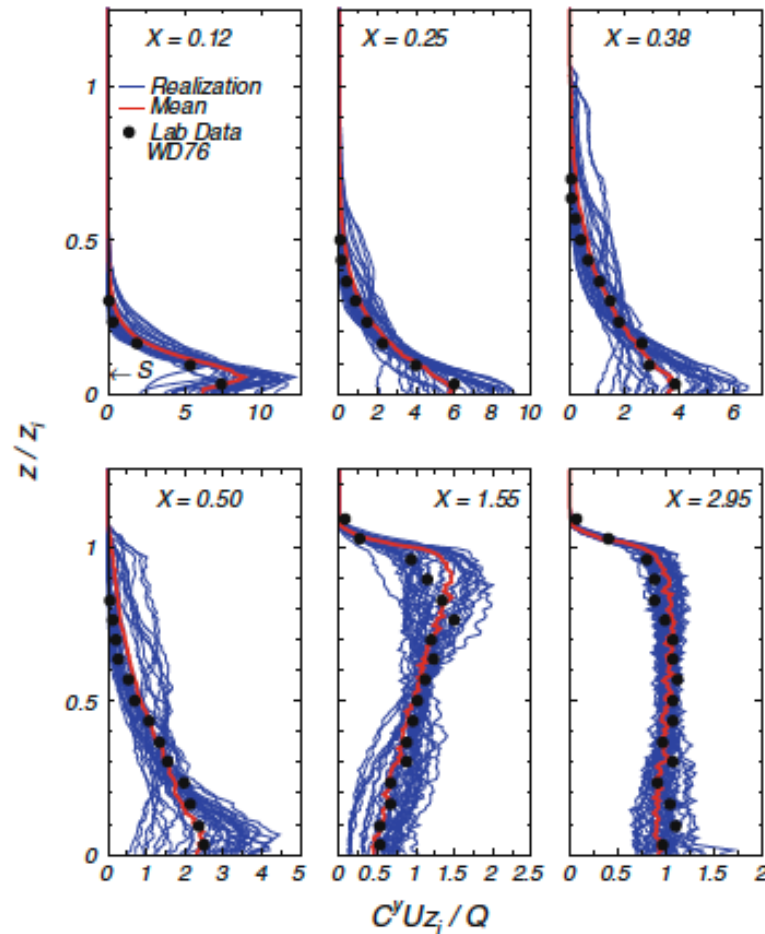


Fig. 4 Vertical profiles of the dimensionless CWIC versus the dimensionless downwind distance X for 30 LPDM realizations and the ensemble-mean CWIC; also shown are the Willis and Deardorff (1976) tank data of the mean CWIC. Source height is $z_s/z_i = 0.07$ and denoted by S in the $X = 0.12$ panel

Weil et al. (2012)

霧と混合層の発達

オランダChabauwタワーに
おける観測

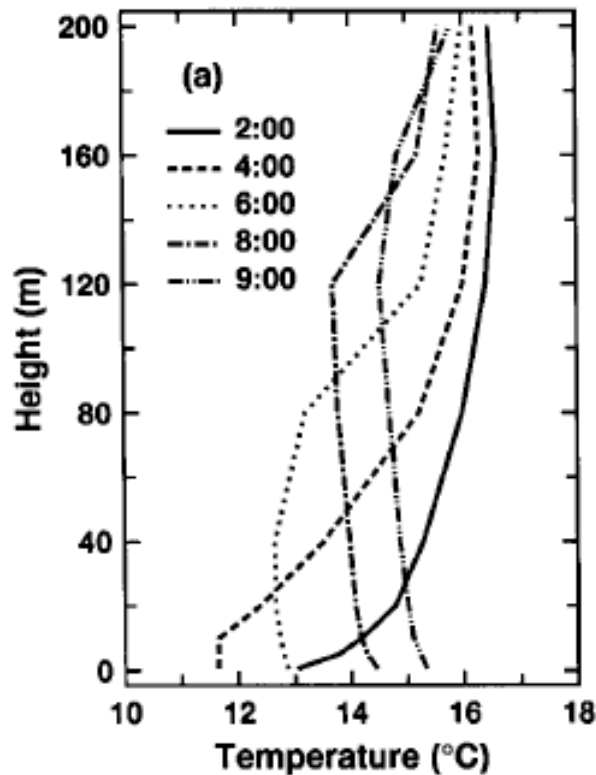


Figure 2. Vertical profiles of the observed (a) temper: 0400 (dashed line), 0600 (dotted line), 0800 (dot-das line) (reproduced from Figures 4a and 5a in Musson-C

Nakanishi(2000)のシミュレーション

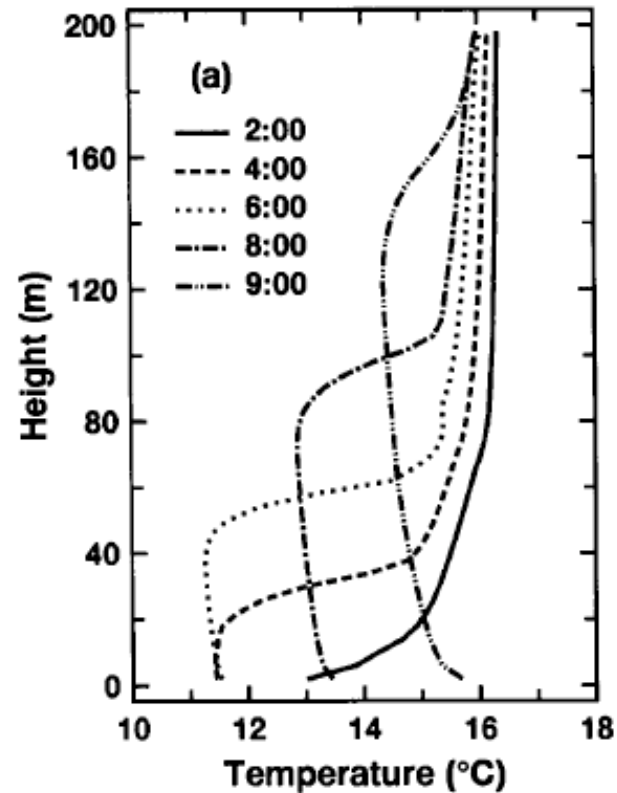


Figure 4. Same as Figure 2 exce

霧：潜熱と放射の寄与

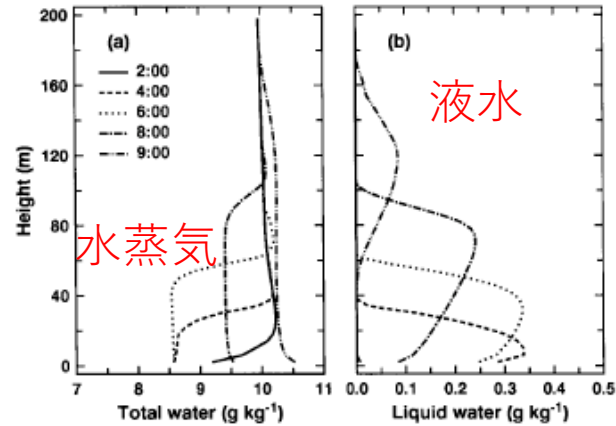
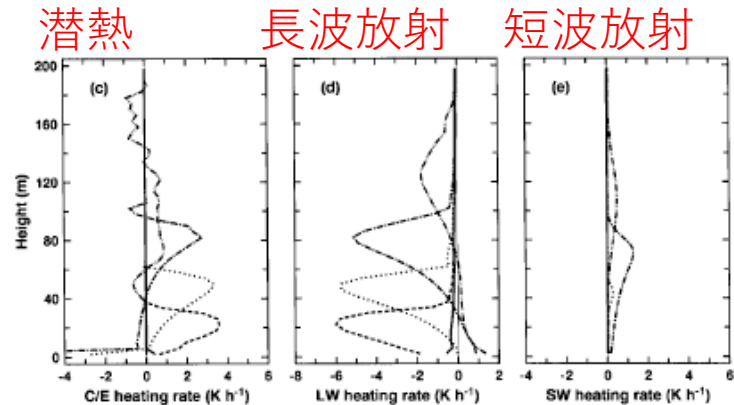
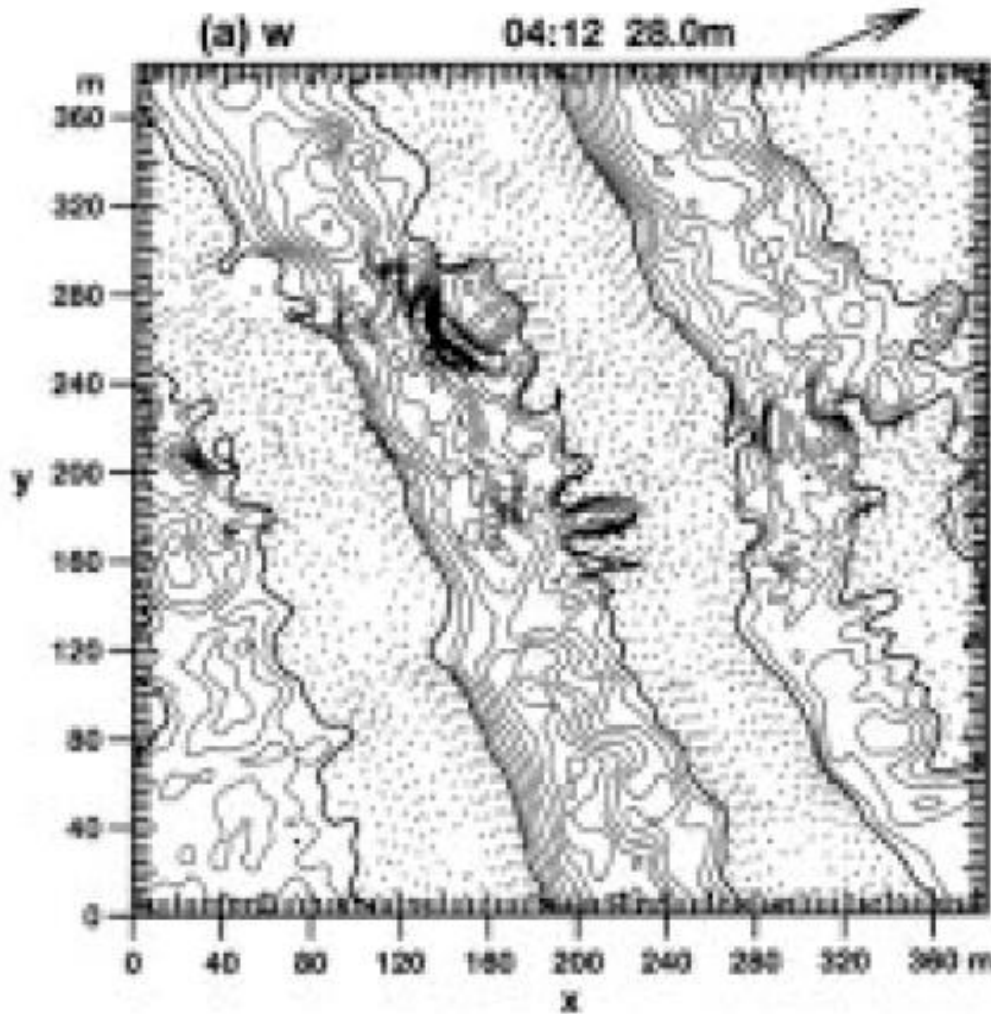


Figure 5. Vertical profiles of the simulated (a) total water content, (b) liquid water content, (c) heating rate due to condensation or evaporation, (d) longwave radiative heating rate, and (e) shortwave radiative heating rate. Lines to denote times are the same as in Figure 2.

fog layer. Evaporation begins to occur in the lowest part of the fog layer by 0600 UTC and the evaporative cooling with a considerable magnitude is seen there at 0600 and 0800 UTC. This cooling is compensated by the sensible heat flux from the surface. At 0900 UTC, the condensation continues nearly uniformly between



霧：地表面付近の対流構造



Nakanishi (2000)より

ロール状の構造、ただしシアには沿っていない

まとめ

- 「理想的な」対流混合層は普遍的(h , w_* , t_* によるスケーリング可能)
- 混合層全体に及ぶスケールの渦による輸送→勾配降下でない非局所的な乱流輸送
- 鉛直シアと浮力の兼ね合いにより、セル構造またはロール構造
- 地表付近の風速・熱フラックス、物質拡散の増強
- 日中の大気境界層だけでなく、海洋表層や夜間にも生じる