

DNS データベースに基づく自由表面近傍の乱流モデリングに関する考察

Discussion on the turbulent modeling near free-surface based on DNS database

山本義暢, 京大院・原子核, 京都市左京区吉田本町, E-mail: yyama@nucleng.kyoto-u.ac.jp
 功刀資彰, 京大院・原子核, 京都市左京区吉田本町, E-mail: kunugi@nucleng.kyoto-u.ac.jp
 芹澤昭示, 京大院・原子核, 京都市左京区吉田本町, E-mail: serizawa@nucleng.kyoto-u.ac.jp

Yoshinobu YAMAMOTO, Tomoaki KUNUGI and Akimi SERIZAWA,
 Department of Nuclear Engineering, Kyoto University, Yoshidahonmachi, Sakyo, Kyoto, JAPAN
 E-mail: yyama@nucleng.kyoto-u.ac.jp, kunugi@nucleng.kyoto-u.ac.jp, serizawa@nucleng.kyoto-u.ac.jp

In this study, Direct Numerical Simulations (DNS) were employed to investigate heat transfer in turbulent open-channel flows with constant temperature at the free-surface and the bottom wall. Numerical calculations were conducted for Prandtl number 5.0 with the neutral (passive scalar) or stable stratification ($Ri=27.6$) cases, while turbulent Reynolds number of 200, based on the friction velocity and flow depth. As the results, thermal mixing and the influence of buoyancy for turbulent structures and heat transfer mechanism were revealed. And, the evaluation of the reproduction of Large Eddy Simulation (LES) used the Buoyancy Smagorinsky model was carried out, via DNS database.

1. はじめに

自由表面を有する乱流場は広範囲な工学分野で頻繁に出現するので、その乱流構造及びそれに付随する熱物質輸送を解析することは工学上重要である。自由表面が穏やかでその変形が無視できるような開水路乱流場の場合、自由表面特有の乱流構造は水面近傍のみに現れ、壁近傍ではその影響を受けない壁乱流が形成される。そのため壁乱流支配のスカラ輸送については閉管路流(チャンネル流)で得られた知見がそのまま応用できると考えられる。一方、水面加熱による熱輸送においては、その輸送は水面近傍の乱流構造の影響を強く受けるので自由表面乱流場を対象とした独自の解析が必要となる。また一般にこの場合、高プラントル流体における安定成層乱流場を形成し、さらに複雑な乱流状態となる。そこで本研究ではこのような乱流場に対し、直接数値シミュレーション(Direct Numerical Simulation, DNS)を適用し、その乱流構造を解析するとともに LES (Large Eddy Simulation)を用いたモデル計算の適用可能性について考察をおこなう。

2. DNS の基礎方程式と計算手法

図1及び表1にDNSにおける計算領域及び座標系を示す。本研究における基礎方程式は、Boussinesq 近似を施した Navier-Stokes 方程式(1)、連続式(2)、そしてエネルギー方程式(3)であり、それぞれ以下のように表せる。

$$\frac{\partial u_i^*}{\partial t} + u_j^* \frac{\partial u_i^*}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{P^*}{\rho} \right) + \nu \frac{\partial^2 u_i^*}{\partial x_j \partial x_j} + b q^* \Delta T g d_{i2} \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i^*}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial q^*}{\partial t} + u_j^* \frac{\partial q^*}{\partial x_j} = a \frac{\partial^2 q^*}{\partial x_j \partial x_j} \quad (3)$$

ここで、 u_i^* は i 方向の速度成分($i=1,2,3$)、 $x_1(x)$ は流下方向、 $x_2(y)$ は鉛直方向、 $x_3(z)$ は横断方向、上付き添え字*は瞬間値、 P^* は静水圧を除いた圧力、 ρ は密度、 g は重力加速度、 ν は体積膨張率、 μ は動粘性係数、 $\beta = (T^* - T_b)/(T_s - T_b)$ で表される水面及び壁面における温度差により規格化した温度、 T^* は温度、 T_s, T_b は水面及び壁面における温度(ただし、 $T_s > T_b > 0$)、 α は熱拡散係数をそれぞれ示し、繰り返し添え字は

縮約規約に従うものとする。

数値解析手法は、時間進行に対しては、対流項に2次精度の Adams-Bashforth 法、粘性項に Crank-Nicolson 法(y 方向)、圧力項及び浮力項に Euler 陰解法を用いこれらを Fractional step 法¹⁾により解き、空間に対する離散化は2次精度の中心差分^{2),3)}を使用した。エネルギー方程式に対しては同様に、対流項に2次精度の Adams-Bashforth 法、拡散項に Crank-Nicolson 法(y 方向)を使用した。境界条件は、流体運動に対しては x, z 方向に周期境界条件、壁面においては no-slip 条件、水面においては鉛直方向の流速を0、その他に対称条件を用いた。温度に対しては、水面及び壁面で温度一定とし、水面で $\partial T^*/\partial y = 0$ 、壁面で $T^* = T_b$ 、 x, z 方向には同様に周期境界条件を課した。格子分割については Kawamura ら⁴⁾とほぼ同程度の格子解像度を確保し、時間刻み $dt^* = 0.096$ (この時、クーラン数は最大で0.5程度)で計算を行い、粘性時間で約1920の間の時空間平均により平均値及び乱流統計量等を算出した。

3. DNS の計算結果及び考察

以下においては、 U は x 方向の時間平均流速、 u, v, w は x, y, z 方向の時間平均からの乱れ成分、 P, p, \dots は圧力及び規格化した温度の時間平均値と乱れ成分、上付き - は時間平均、 $\langle \rangle$ は空間平均、上付き添え字 + は中立成層における摩擦速度、動粘性係数及び水面での時間平均の熱流束 $q^*|_{y|_y=h}$ により無次元化してあることを示す。

図2に平均流速の分布を示す。安定成層のケースでは、自由表面近傍において対数則分布から上方に逸れ、層流化が確認できるが、壁面近傍においては中立成層の場合との差異はあまり見られない。

図3に乱れ強度の分布を示す。各成分とも中立成層の場合と比べ、自由表面近傍で、乱れが抑制されている。

図4に Reynolds 応力の分布を示す。安定成層のケースでは、層流化に伴い Reynolds 応力が減少しており、粘性の効果はほぼ全域で確認できる。

図5に平均温度及び安定成層時における勾配リチャードソン数: $Ri_g = g \langle \theta' \rangle / (U' \langle \theta' \rangle)^2$ の分布を示す。一般に $Ri_g > 0.25$ の領域においては、浮力の効果が卓越しこれに伴う内部重力波が発生することが知られている。⁵⁾ また比較のために $Pr=1.0$ の中立成層の計算結果も併記している。同じプラントル数 5.0 の場合、安定成層が存在する方が、水面における温度勾配が緩やかになっていることが伺える。これは、

この領域では温度勾配により Ri_b が大きな値を示している。上述の浮力の効果(内部重力波等)により局所的な熱混合が促進され温度分布が平坦化したと考えられる。しかし、バルクの熱輸送自体は安定成層の場合が小さくなっている。

図6に温度の乱れ強度及び流下方向の乱流熱流束の分布を示す。速度勾配及び温度勾配に起因する極大値が、壁面及び水面付近に存在するが、安定成層が存在する方がその傾向がより顕著になることがわかる。これはプラントル数が高くなると、温度場において、熱拡散率が小さいために流体運動よりも細かいフィラメント状を呈した散逸時間の長い渦構造が存在すること、浮力の効果がさらにこの渦構造の対流を促進するためと考えられる。⁶⁾

図7に鉛直方向のスカラーフลักスの分布を示す。

$Pr=1.0$ の中立成層の場合、水面及び壁面に対しほぼ対称な分布をとっているのに対し、 $Pr=5.0$ の場合、中立成層の場合は水面側、そして安定成層の場合は壁面側に傾いた分布形をとっていることがわかる。これは上述の高プラントル数及び浮力による局所的な熱輸送と大きく関わりがあると考えられる。つまり、水面近傍においては、乱流による渦運動(表面更新渦等)が熱輸送の主因と考えられるが、安定成層の場合には、この渦の対流よりも浮力の効果が勝り、鉛直方向の浮力上昇による乱れは活性化されるものの、この場合 >0 より結果として、鉛直方向の熱輸送 v は抑制され、温度乱れ等は大きくなるという傾向を示すものと思われる。

図8にKolmogorov長の分布を示す。低レイノルズ数流れの開水路流の場合、水面近傍では鉛直方向の乱れが抑制され、また自由表面近傍での緩やかな速度勾配により、水平方向に長く伸びた水深規模に匹敵する大規模水平渦が形成され、この水平渦の効果により、水面近傍においてはKolmogorov長が急激に増加する。安定成層の場合はその効果がバルク域ではやや抑制されているが、水面近傍では大きくなっていることがわかる。

表2に本DNSによって得られた断面平均流速、摩擦抵抗係数、ヌッセルト数等の値を示す。これらの値は上述の安定成層の存在による乱流構造及び熱輸送特性の変化傾向と一致する。

図9にスパン方向の1次元エネルギースペクトルの分布を示す。どの成分においても高波数領域での極端な跳ね上がり等は見られず、本研究におけるDNSが適切に行われていることがわかる。安定成層の水面近傍のエネルギースペクトルにおいて、高波数領域において、浮力の効果により鉛直方向成分が流れ方向成分を上回っていることがわかり、上述の浮力の効果による鉛直方向乱れの活性化が確認できる。しかし高波数域における解像度の適切さについては本研究の手法では不確かさが残り、より高精度の手法(スペクトル法等)を用いての検証が不可欠と思われる。

4. LESによる数値解析

(1) LESの数値解析手法

本章においては、DNSの結果により明らかとなった、自由表面乱流場における熱輸送機構のLESによる再現性について考察を行う。本研究では、LESのSGS応力に標準型のSmagorinskyモデルを使用し、SGS乱流プラントル数は0.4とした。また安定成層のケースはMason⁷⁾によるBuoyancy Smagorinskyモデルを用いた。時間進行は、圧力項及び浮力項にEuler陰解法、その他の項に2次精度のAdams-Bashforth法を用いFractional step法⁸⁾により解き、空間に対する離散化は2次精度の中心差分^{2),3)}を使用した。エネルギー方程式に対しては同様に、2次精度のAdams-Bashforth法を使用した。表3にLESの計算条件を示す。但し、安定成層のDNSと同じ条件である $Ri=27.6$ のケースは、LESにおいては層流化が顕著となり計算を停止した。これはGragら⁹⁾による安

定成層の分類によると本研究の $Ri=27.6$ はかなり”Buoyancy control flow”に近い状態になっておりこれが、LESにおいて乱流状態を維持できなかった要因の一つと考えられるので安定成層の場合については、 $Ri=4.54$ の”Buoyancy affected flow”の場合の計算も行いDNSとの比較を行う。

(2) LESの計算結果と考察

図10-12に平均流速、乱れ強度、平均温度及び垂直方向の乱流熱流束の分布を示す。図10, 11より平均速度及び乱れ強度においては、中立成層の場合は、従来指摘されている傾向と同様の傾向が伺える。安定成層の乱れ強度においては、より強い非等方化指向が見られる。図12より安定成層の場合は Ri が低いにもかかわらず、浮力の効果をかなり過大評価しているが、中立成層の熱流束の分布はよくDNSと一致する。これは、自由表面近傍の渦は大規模水平渦の構造を呈しているため、LESのグリッドスケールにおいてもある程度解像できたためと思われる。また、図9のエネルギースペクトルの分布からも伺えるように高波数成分は全体のエネルギーバランスにおいては、ほとんど寄与しないためと考えられる。しかし、高プラントル流体の場合、LESにおいては、この大規模水平渦中のフィラメント状の細かい構造による浮力の効果を解像できないため、グリッドスケールにおいてその効果を過大評価することとなり、浮力の効果が大きく見積もられたものと思われる。

図13にある瞬間における中立成層状態における温度場のDNSデータとこれにフィルターをかけて作成した $32 \times 131 \times 32$ の擬似LESデータ、及びLESの計算結果を示す。これらは、DNSとLESの計算値の時間的相関性がないことや、擬似LESデータに鉛直方向の解像度の差が著しいため定量的な評価はできないが、定性的には、上記の考察とよく一致し、これらを裏付けているものと考えられる。

5. 結論

水面加熱に伴う自由表面乱流場の乱流構造及び熱輸送機構についてDNSを行い、そのデータベースに基づき、LESによる数値計算とその評価を行って以下の知見を得た。

- (1) 自由表面近傍の温度場においては、高プラントル数の影響によるフィラメント状の細かい渦構造と、自由表面特有の大規模水平渦からなる渦構造の存在が明らかとなったが、前者については、浮力の効果はこの渦構造に大きく作用するが、全体の熱輸送には直接的には大きな影響を与えないことが明らかとなった。
- (2) 従って、LESを用いた計算においては、浮力の効果を適切に評価できずに過大評価となる。

今後の課題として、この渦構造に作用する浮力の効果の定量的な評価を行いLESのモデル化の高精度化を図る必要があると思われる。

謝辞：本研究を行うにあたり富山大学の佐竹信一講師から有益なご助言を頂いた。また本研究の一部は、核融合科学研究所、及び科学技術振興事業団の計算科学技術活用型特定開発事業(研究代表：功刀資彰)の援助を受けて行われた。記して謝意を表す。

参考文献

- (1) J. Kim and P.J. Moin, J. Comput. Phys. 59, (1985), 308.
- (2) H. Kawamura, The Recent Developments in Turbulence Research, (1995), 54.
- (3) 梶島岳夫, 機論(B編), vol.60, 574, (1994), 2058.
- (4) H. Kawamura et al, International J. Heat and Fluid flow, 19, (1998), 482.
- (5) J. Lighthill, Waves in Fluids (Cambridge Univ. Press), (1978).
- (6) Y. Yamamoto et al. 3rd, ISHPC 2000, (2000), 502.
- (7) P. J. Mason, J. Atmos. Sci., 46, (1989), 1492.
- (8) A.J. Chorin, Math. Comp., 22, (1968), 745.
- (9) R. P. Grag et al., Physics of Fluids, 12, (2000), 2569.

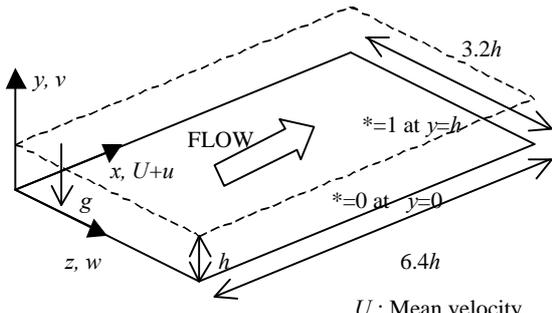


Fig.1 Computational domain and coordinate system

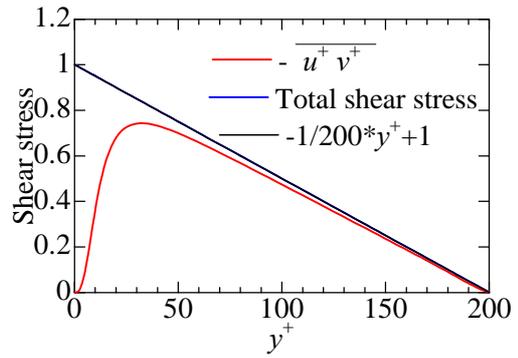


Fig.4 Shear stress profiles (a) Neutral case

Table 1 Numerical condition of DNS

	R	Grid Number (x, y, z)	Resolution (x^+, y^+, z^+)	Pr	Ri
DNS	200	256,131,256	5.0,0.26-2, 2.5	5.0	-
DNS	200	256,131,256	5.0,0.26-2, 2.5	5.0	27.6

$R = u h / \nu$: Turbulent Reynolds number, u : friction velocity of neutral stratification case, h ; flow depth, $Pr = \nu / \kappa$: Prandtl number, $Ri = g h / (u^2 \theta)$: Richardson number

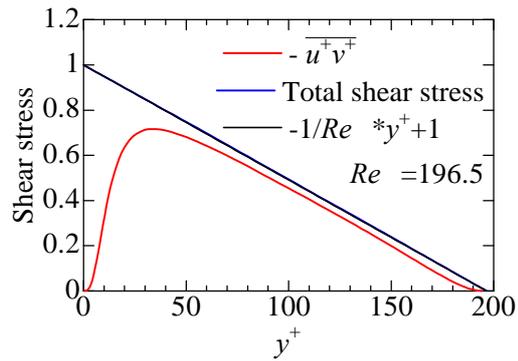


Fig.4 Shear stress profiles (b) Stable case

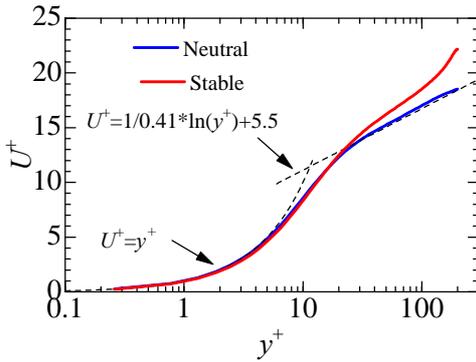


Fig.2 Mean velocity profiles

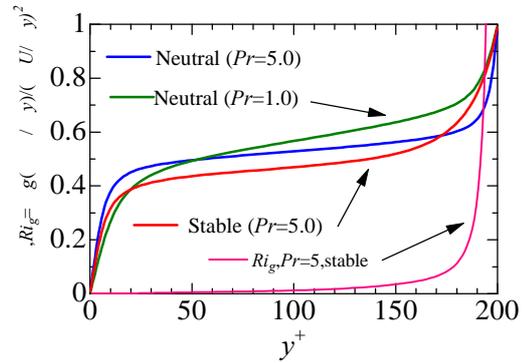


Fig.5 Mean scalar and Gradient Ri profiles

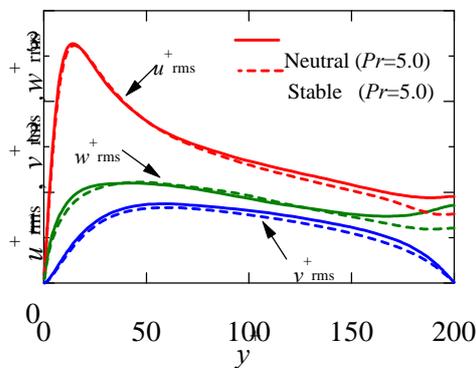


Fig.3 Turbulent intensity profiles

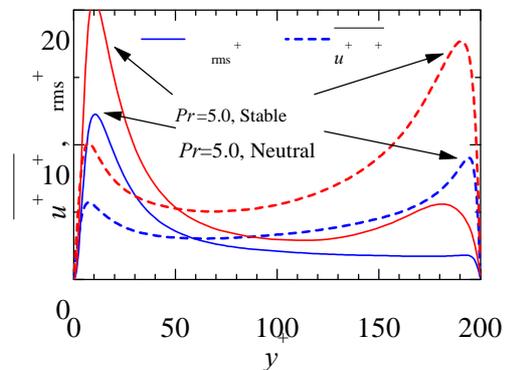


Fig.6 Scalar flux and fluctuation profiles

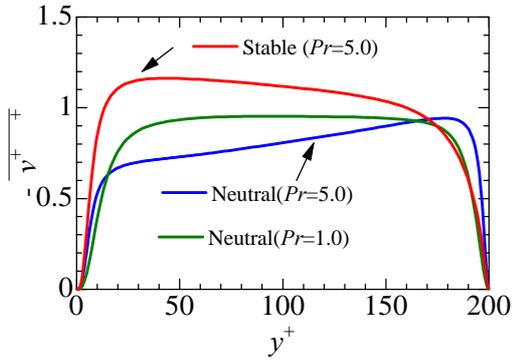


Fig.7 Wall-normal turbulent heat flux profiles

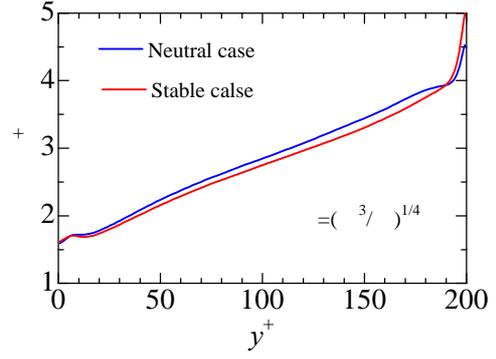


Fig.8 Kolmogorov length scale profiles

Table 2 Numerical results of DNS

	R	U_m^+	U_s^+	Re_m	Cf	Nu
Neutral	200	16.05	18.7	3211	7.607×10^{-3}	15.96
Stable	196.5	17.6	22.3	3523	6.223×10^{-3}	7.43

$R = u' h / \nu$: Turbulent Reynolds number, U_m : Bulk mean velocity, U_s : Mean velocity at the free-surface
 $Re_m = U_m h / \nu$: Bulk Reynolds number, Cf : Friction drag coefficient, Nu : Nusselt number

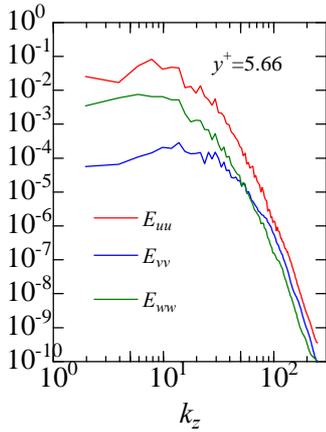


Fig.9-1 1D energy spectra (Near wall, spanwise, Neutral)

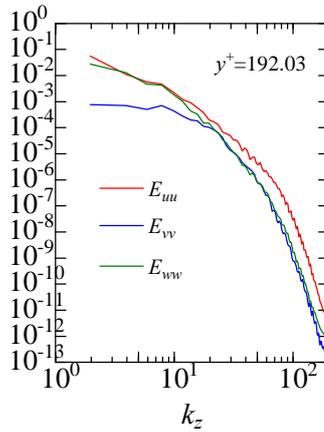


Fig.9-3 1D energy spectra (Near surface, Streamwise, Neutral)

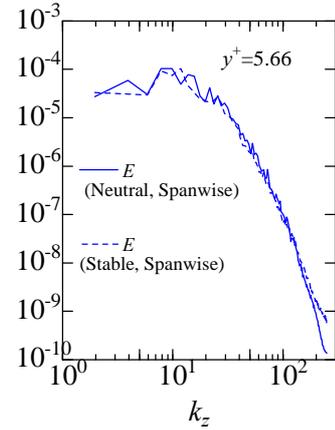


Fig.9-5 1D energy spectra (Near wall)

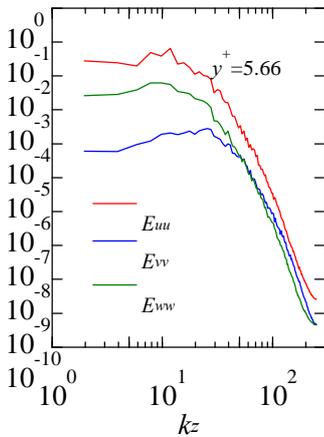


Fig.9-2 1D energy spectra (Near wall, spanwise, Stable)

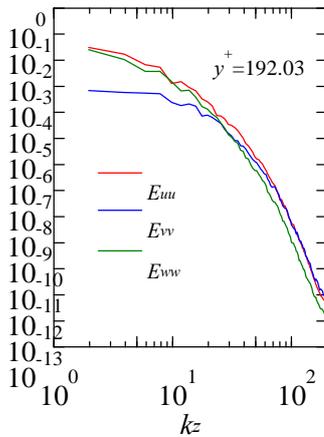


Fig.9-4 1D energy spectra (Near surface, Streamwise, Stable)

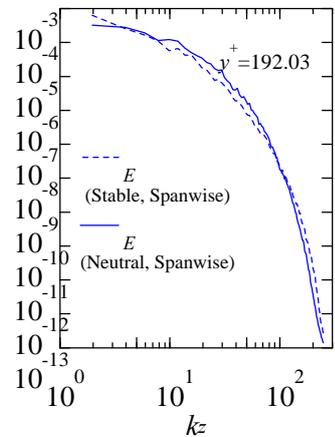


Fig.9-6 1D energy spectra (Near surface)

Table 3 Numerical conditions of LES

	R	Grid Number (x, y, z)	Resolution (x^+, y^+, z^+)	Pr	Ri
LES	200	32,40,32	40,1.0-13.8,20	5.0	-
LES	200	32,40,32	40,1.0-13.8,20	5.0	27.6
LES	200	32,40,32	40,1.0-13.8,20	5.0	4.54

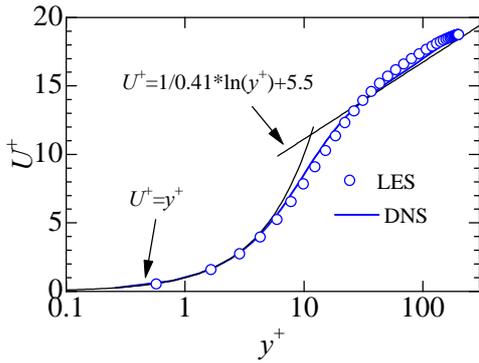


Fig.10-1 Mean velocity profile (Neutral case)

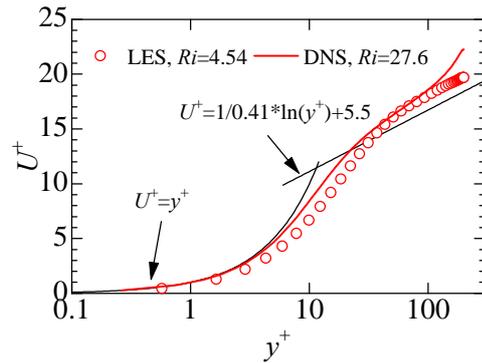


Fig.10-2 Mean velocity profile (Stable case)

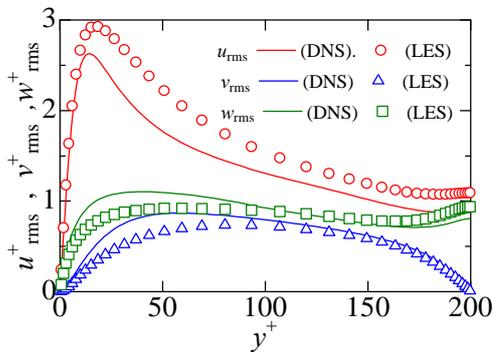


Fig.11-1 Turbulent intensity profiles (Neutral case)

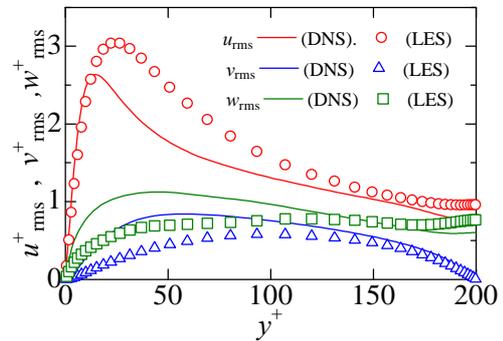


Fig.11-2 Turbulent intensity profiles (Stable case)

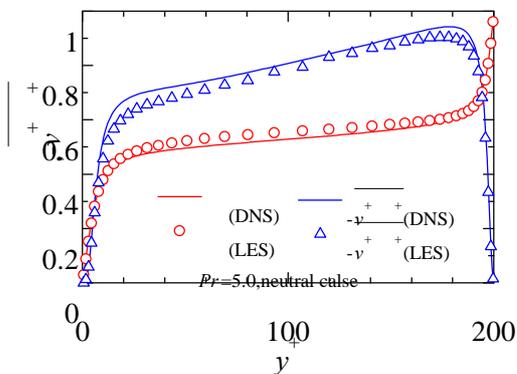


Fig.12-1 Mean scalar and wall-normal turbulent heat flux profiles (Neutral case)

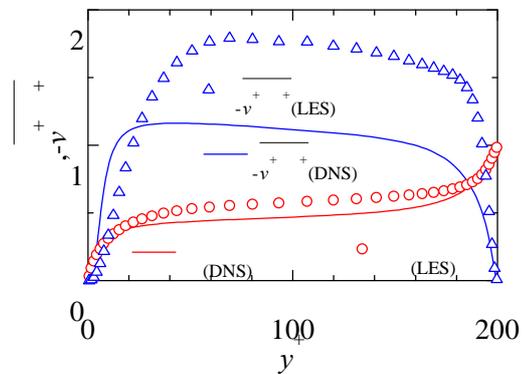
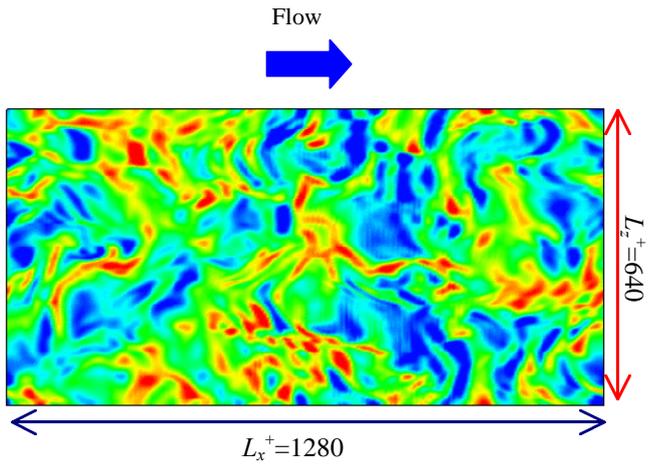
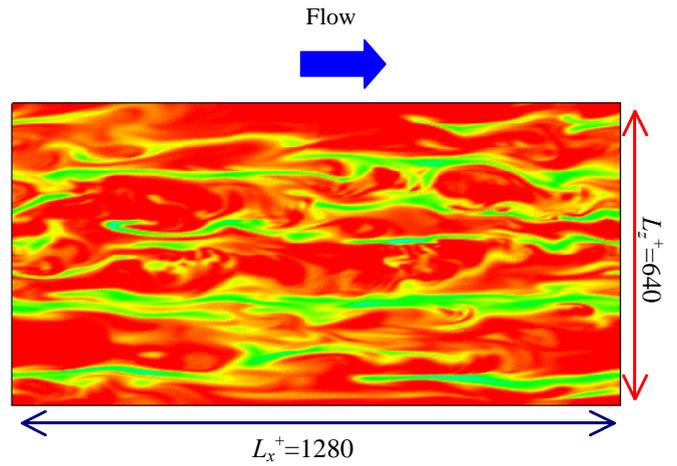


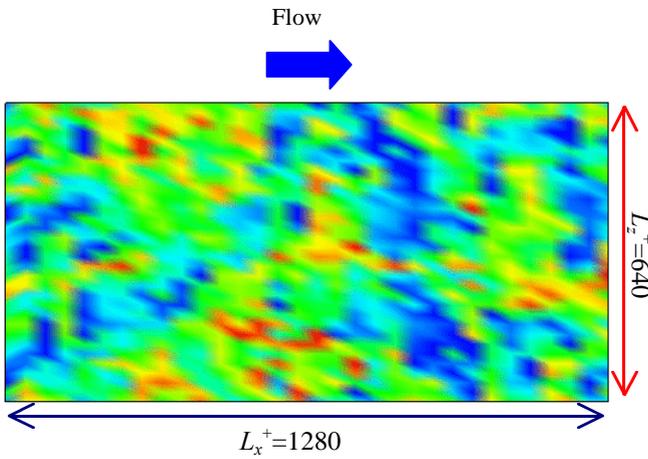
Fig.12-2 Mean scalar and wall-normal turbulent heat flux profiles (Stable case)



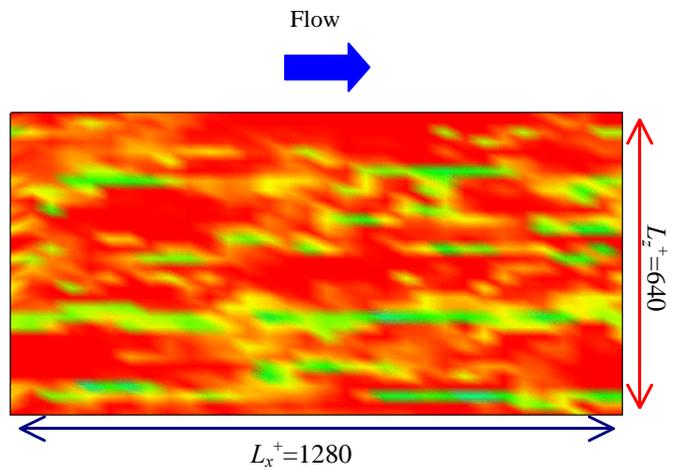
(1) Near free-surface, $y^+ = 192.03$, DNS data
 $0.5(\text{Blue}) < \theta^* < 1.0(\text{Red})$



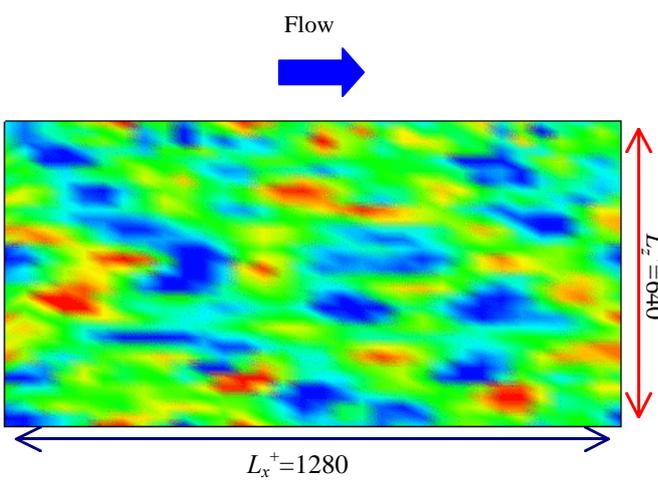
(4) Near wall, $y^+ = 14.37$, DNS data
 $0.0(\text{Blue}) < \theta^* < 0.5(\text{Red})$



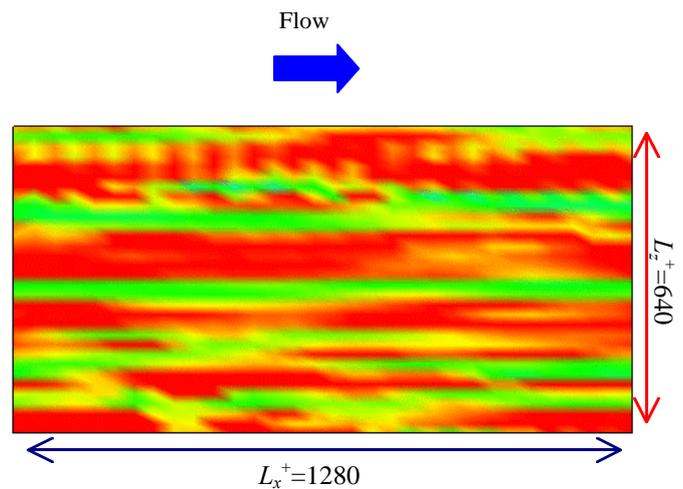
(2) Near free-surface, $y^+ = 192.03$, Filtered DNS data
 $0.5(\text{Blue}) < \theta^* < 1.0(\text{Red})$



(5) Near wall, $y^+ = 14.37$, Filtered DNS data
 $0.0(\text{Blue}) < \theta^* < 0.5(\text{Red})$



(3) Near free-surface, $y^+ = 192.45$, LES data
 $0.5(\text{Blue}) < \theta^* < 1.0(\text{Red})$



(6) Near wall, $y^+ = 12.39$, LES data
 $0.0(\text{Blue}) < \theta^* < 0.5(\text{Red})$

Fig.13 Instantaneous temperature field (Neutral case, top view)