

弱い自然対流流れ場における
乱流モデルのベンチマークテスト

*A Benchmark Test of Turbulence Models
in Low Turbulent Natural Convection Field*

小野浩己 (明治大学)

プロフィール

専門分野

- ・ 建築環境工学

主として、建築室内・建物周辺の気流解析
温熱快適性などを扱う為、必然的に非等温浮力流れ

OpenFOAM

2008年秋ごろから使用。それまでは主に自作コードと商用コード。

- ・ 使用バージョン

1.4.1 → 1.5.x → 1.6.x → 1.7.x & 1.5-dev

最近は、移動格子や二相流にも手を...

はじめに

対流熱伝達計算の高精度化

CFDを用いて非等温室内気流を計算...

熱収支の再現精度

一般的な室内では対流熱伝達(特に自然対流)が支配的

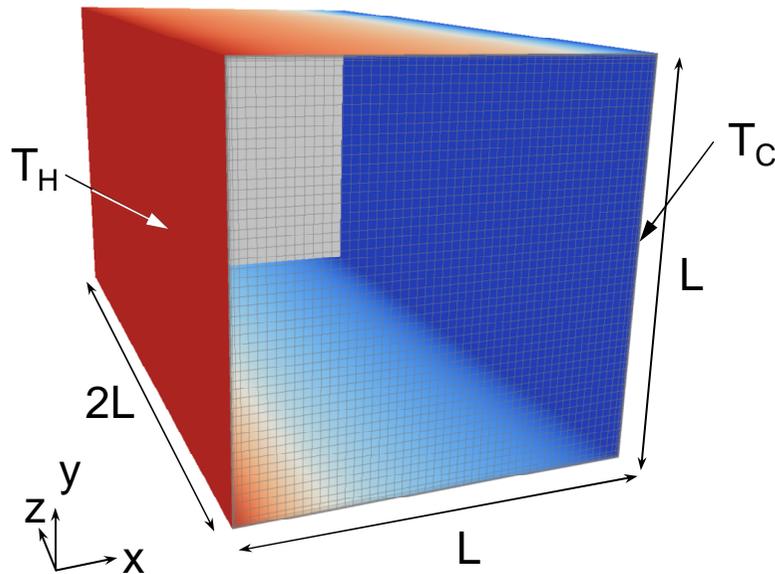
→ 自然対流場の解析精度は乱流モデルに大きく依存

細密な実験が行われた流れ場を用いて
様々な乱流モデルのベンチマーク

解析概要

対象領域

Tian, Karayiannisによって細密な実測が行われた密閉キャビティ



密閉キャビティのパラメータ

加熱壁温度 T_H	50°C
冷却壁温度 T_C	10°C
温度差 ΔT	40K
代表寸法 L	0.75m
プラントル数 Pr	0.71
レイリー数 Ra	1.58×10^9

既往の解析事例

Pengら (Dynamic Smagorinsky) , 露木 ($k-\varepsilon$ & Smagorinsky)
Hsieh, Lienによる $k-\varepsilon$ モデルの検討

解析概要

検討ケース

LES 6種類 RANS 2種類 × 2通りの格子分割

種別	略号	モデル	備考
RANS	LL	低 Re 数型 k- ϵ	Lien-Leschziner
	MKC	低 Re 数型 k- ϵ	Murakami-Kato-Chikamoto
LES	S	Smagorinsky	
	DS	Dynamic Smagorinsky	
	one	k _{SGS} 1 方程式	
	Done	Dynamic k _{SGS} 1 方程式	Pr _{SGS} は定数(0.5)
	M	Mixed Smagorinsky	Bardina 係数は定数(1)
	DM	Dynamic Mixed Smagorinsky	Bardina 係数は定数(1)

解析概要

検討ケース

LES 6種類 RANS 2種類 × 2通りの格子分割

種別	略号	モデル	備考
RANS	LL	低 Re 数型 k-ε	Lien-Leschziner
	MKC	低 Re 数型 k-ε	Murakami-Kato-Chikamoto
LES	S	$v_{SGS} = C_S \bar{\Delta}^2 \bar{S} $	
	DS		
	one		
	Done	Dynamic k _{SGS} 1 方程式	Pr _{SGS} は定数(0.5)
	M	Mixed Smagorinsky	Bardina 係数は定数(1)
	DM	Dynamic Mixed Smagorinsky	Bardina 係数は定数(1)

Dynamicモデル : Cを場, 時間の関数として算出できる。

OFデフォルトでは, 領域全体で平均 (一様乱流等用)
→ 平均操作はせず, 負になる場合強制的に0にする。

解析概要

検討ケース

LES 6種類 RANS 2種類 × 2通りの格子分割

種別	略号	モデル	備考
RANS	LL	低 Re 数型 k- ϵ	Lien-Leschziner
	MKC	低 Re 数型 k- ϵ	Murakami-Kato-Chikamoto
LES	S	Smagorinsky	
	DS	Dynamic Smagorinsky	
	one	k _{SGS} 1 方程式	
	Done	Dynamic k _{SGS} 1 方程式	Pr _{SGS} は定数(0.5)
	M	Mixed Smagorinsky	Bardina 係数は定数(1)
	DM	Dynamic Mixed Smagorinsky	Bardina 係数は定数(1)

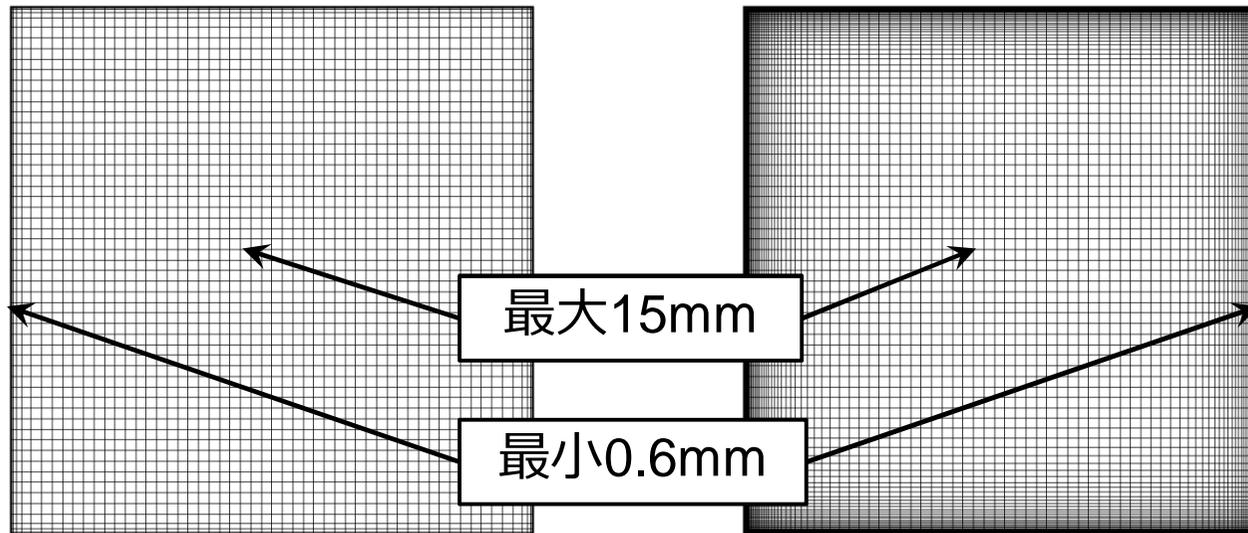
Dynamicモデル : Cを場, 時間の関数として算出できる。

OFデフォルトでは, 領域全体で平均 (一様乱流等用)
→ 平均操作はせず, 負になる場合強制的に0にする。

解析概要

検討ケース

LES 6種類 RANS 2種類 × 2通りの格子分割



62分割

隣り合う格子幅の比
1.5以下

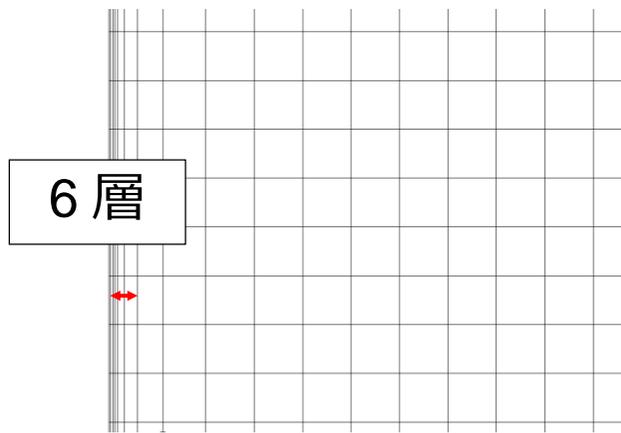
100分割

隣り合う格子幅の比
1.2以下

解析概要

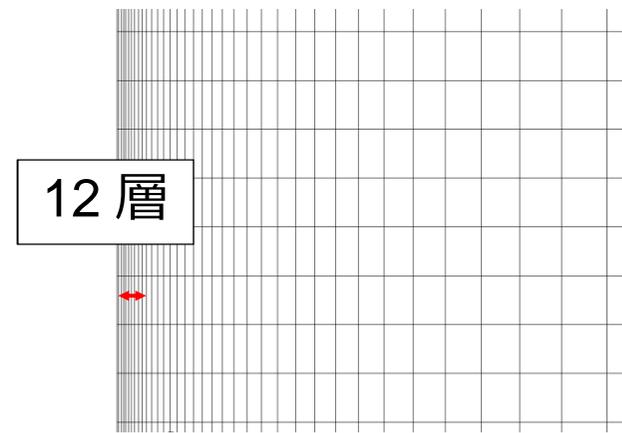
検討ケース

LES 6種類 RANS 2種類 × 2通りの格子分割



62分割

隣り合う格子幅の比
1.5以下



100分割

隣り合う格子幅の比
1.2以下

OpenFOAM

使用バージョン : 1.6.x (当時最新)

使用ソルバ

boussinesqPisoFoam (オリジナル)

pisoFoam + 浮力項 (boussinesq近似)

- * ν_t と α_t を別々に計算できるように, 関係するライブラリも改良。
- 将来の温度場乱流モデル対応を視野。

移流項スキーム

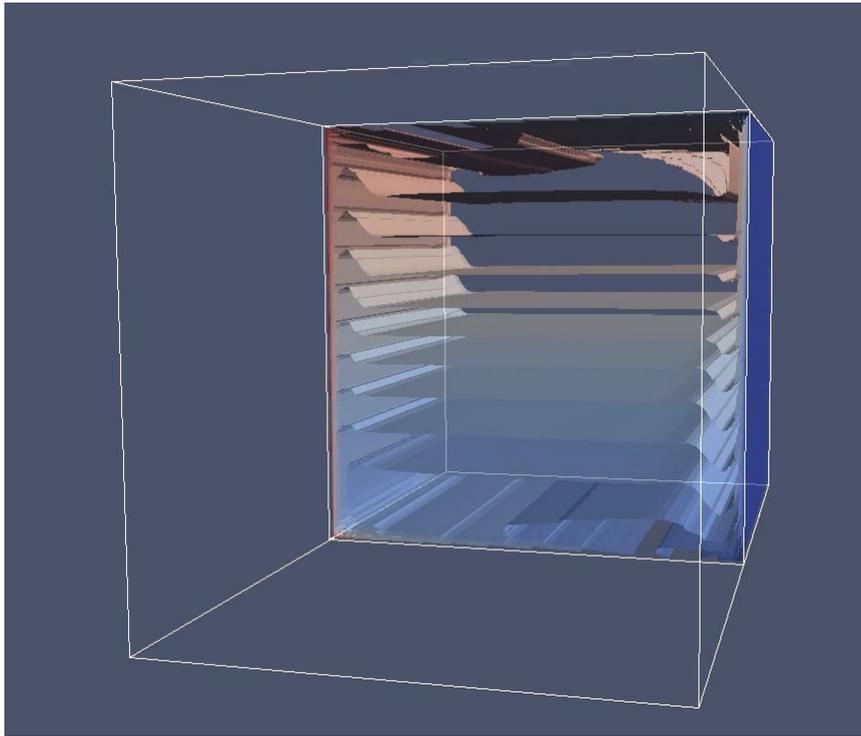
LES → すべて線形補間(Gauss linear)

RANS → 速度, 温度
乱流量

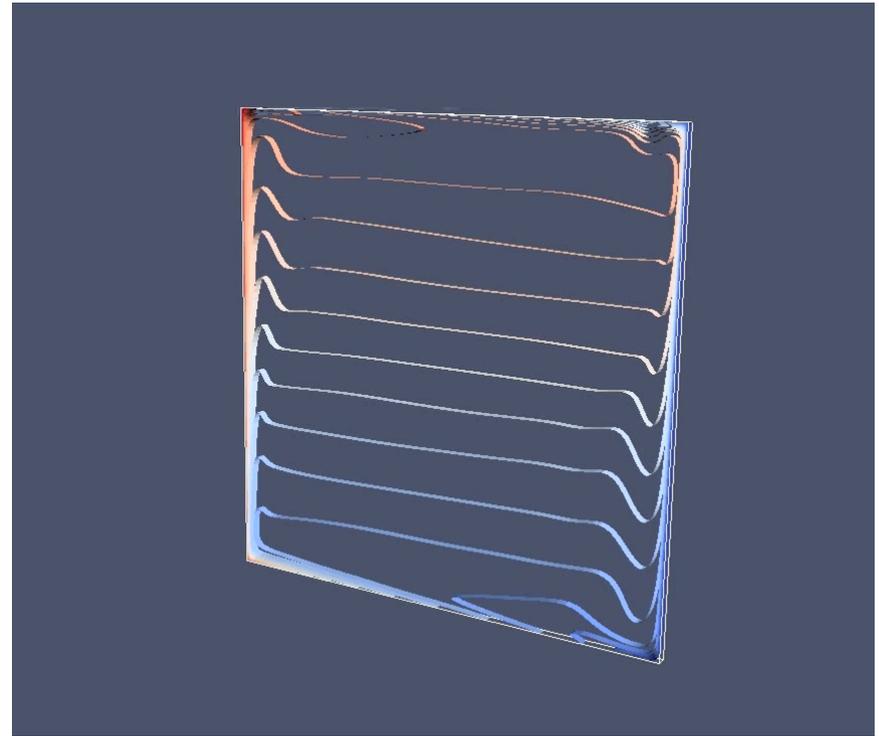
- TVD(Van Leerリミッタ)
- 風上補間(Gauss upwind)

解析結果

温度分布



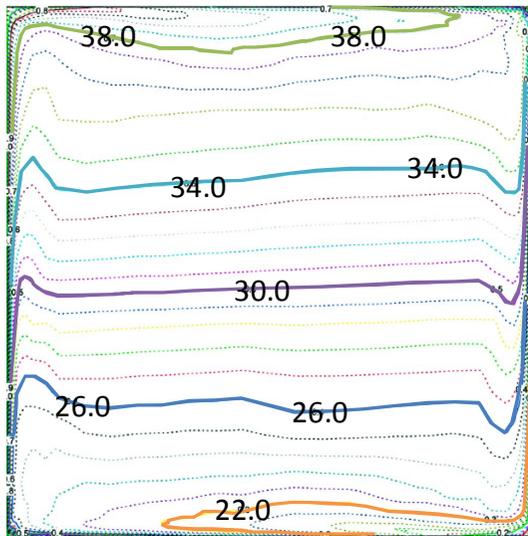
LES



RANS

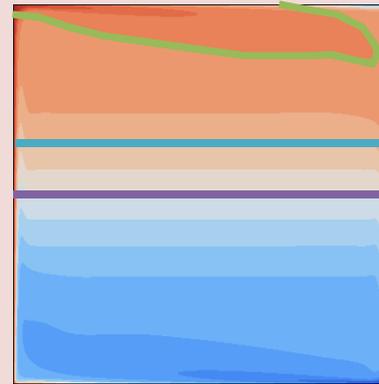
解析結果

温度分布

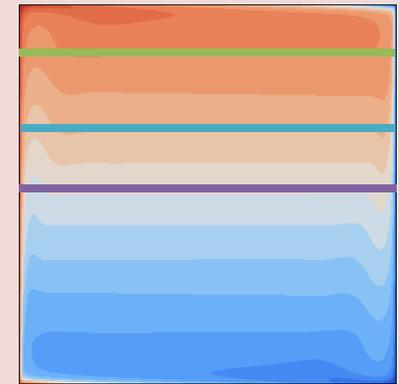


EXP

RANS

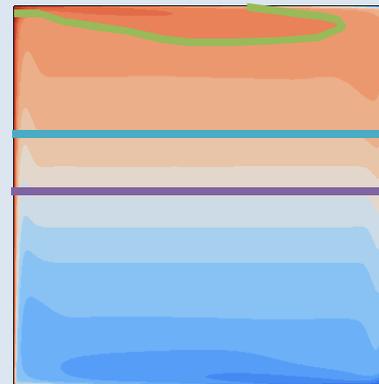


100LL

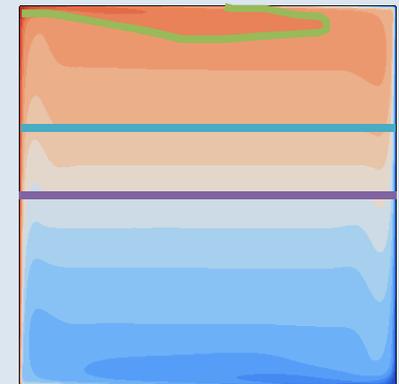


100MKC

LES



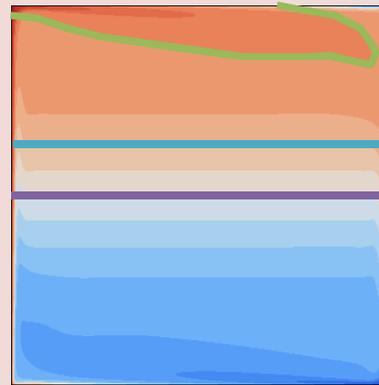
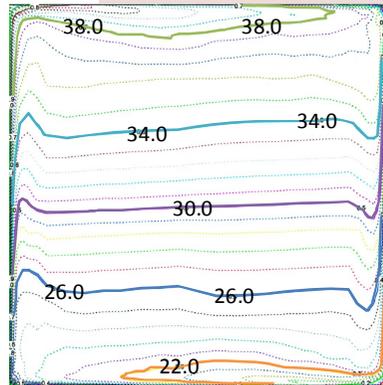
100one



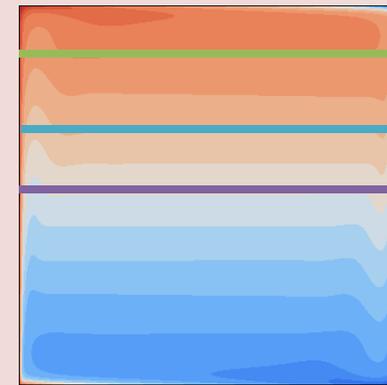
100Done

解析結果

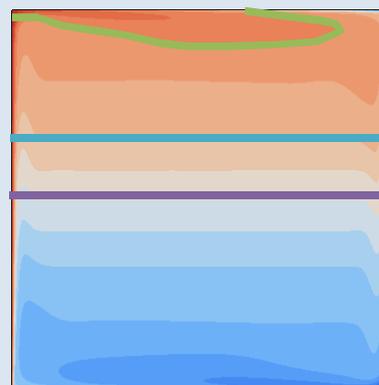
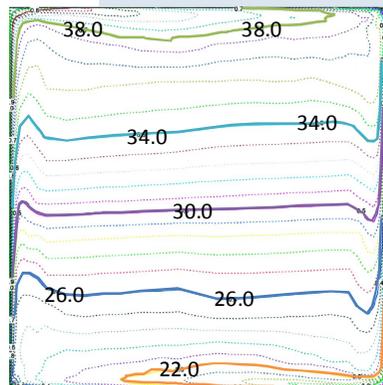
温度分布



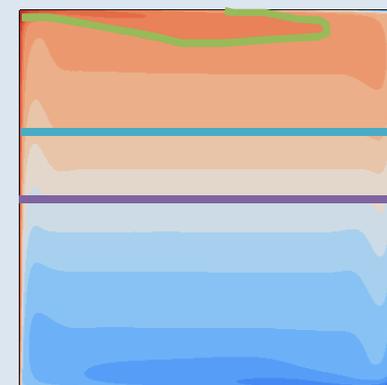
100LL



100MKC



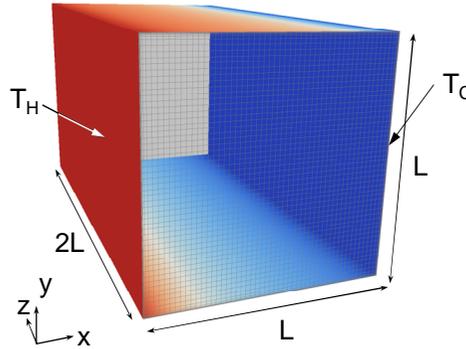
100one



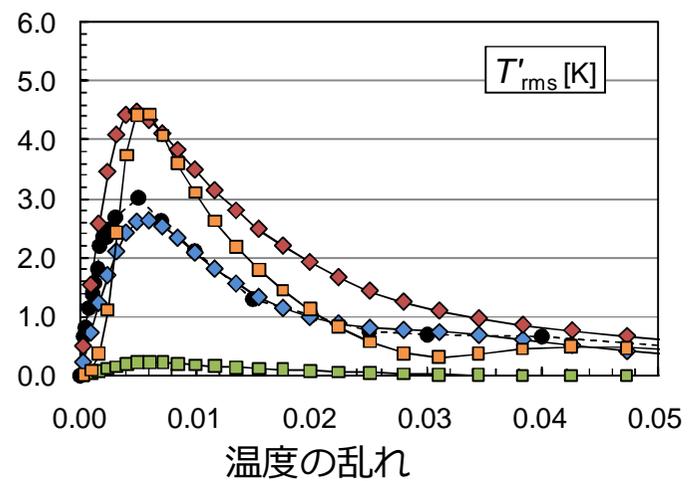
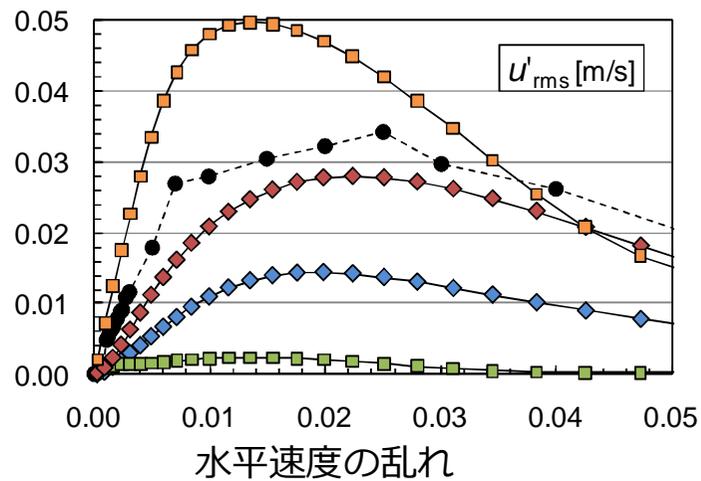
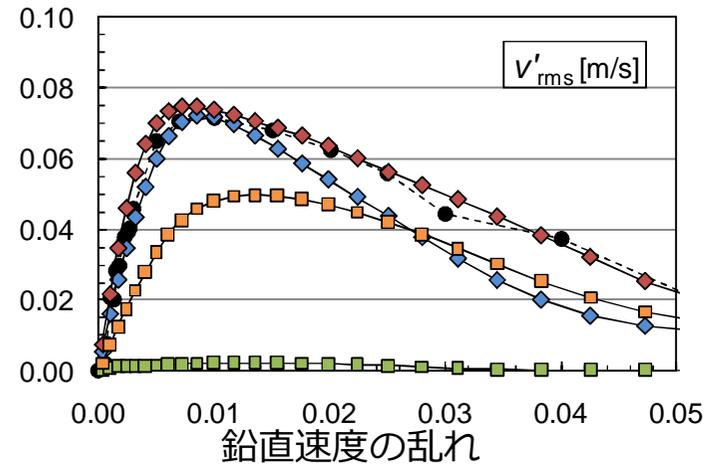
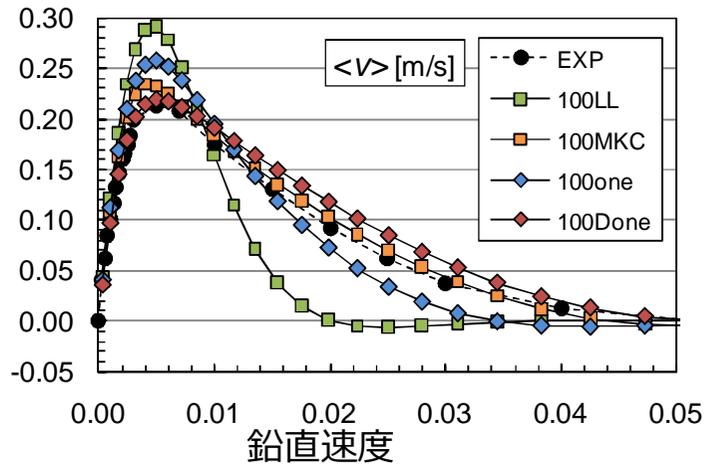
100Done

解析結果

加熱壁面近傍



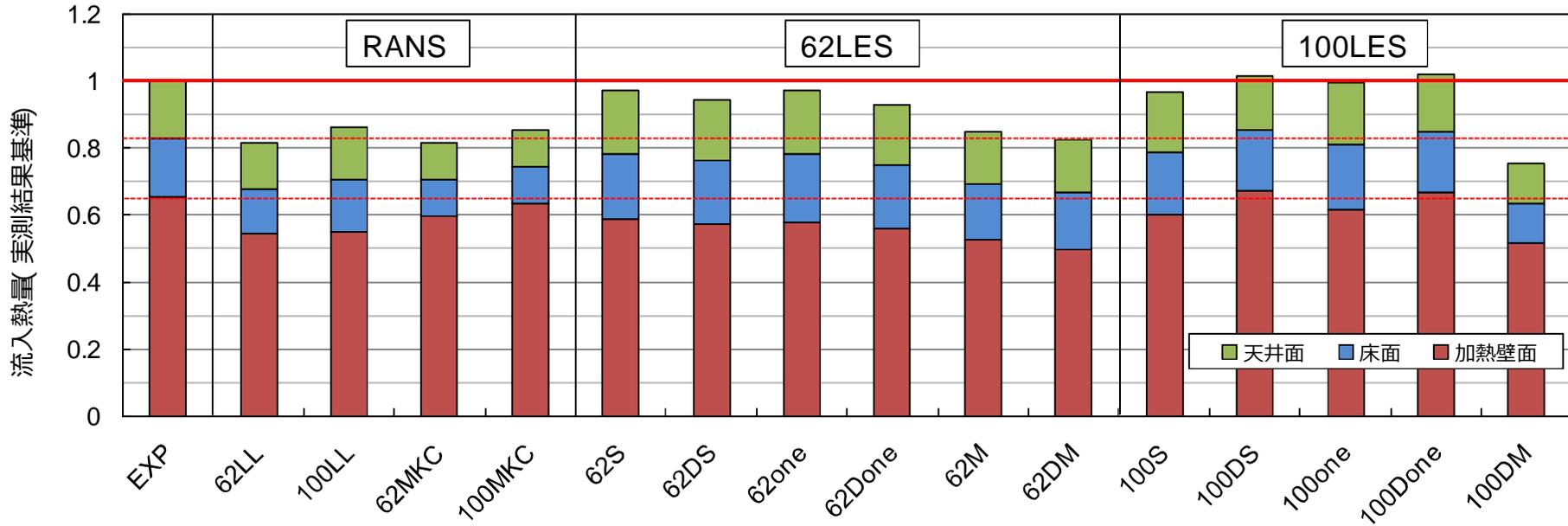
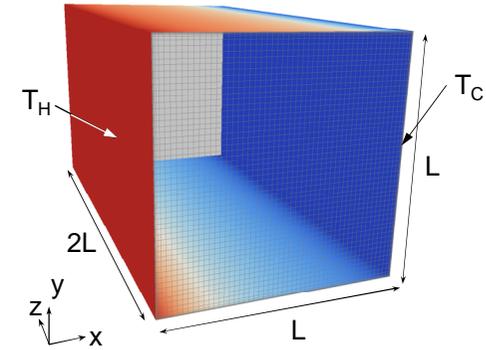
等方性 : $v_{rms} = u_{rms} \quad \left(= \sqrt{\frac{2}{3}(k)} \right)$
 異方性 : $v_{rms} \neq u_{rms}$



解析結果

熱収支の比較

キャビティに流入する熱量



RANS



20%程度の差異

62LES



5%程度の差異 (M, DMを除く)

100LES



1~5%程度の差異 (DMを除く)

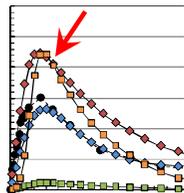
100one, 100Doneが最も実測結果に近い

まとめ

総合判定

速度場	→	100Done
温度場	→	100one, 100S
熱伝達	→	100Done, 100one
総合	→	100Done

Dynamic 1方程式モデルが最も対応が良いが...



温度場の乱れで差異 → 速度場だけでなく温度場についても
高度なモデルを導入

今後は...

Dynamic LES系の計算結果etc.をもとに,
RANSの予測精度改善