

有限要素法によるマルチスケール乱流解析コードの開発

背景

機器・設備の設計等で評価すべき流動の多くは流速や温度が時間的・空間的に大きく変動する流れ（乱流）であり、数値解析手法を用いる評価では、境界形状の複雑さと流れの非定常性を精度良く再現する必要がある。そのためには時間平均化を施さない大渦乱流解析（LES：Large Eddy Simulation）が有効であるが、複雑形状での流動問題に汎用的に適用できる普遍的な乱流のモデル式はこれまでのところ提案されていない。近年、乱流が広範囲のスケール（大きさ）の渦で構成されることに着目したマルチスケール流動解析法が研究されており、普遍的な乱流のモデル化が試みられているが、これまでの研究で利用された解法（スペクトル法）は単純形状のみに限定される。

目的

複雑形状でのマルチスケールLES解析を目的として、既往研究ではほとんど取り扱われていない有限要素法をベースとしたマルチスケールLESの定式化を行い、この定式化をコンピュータ・コードとして構築する。

主な成果

1. マルチスケール有限要素法の定式化

まず、図-1に模式的に示すように、熱流動現象を記述する流速・圧力・温度の各変数を、大スケール解像成分・小スケール解像成分・解像不可成分の3成分に分解する。次に、大スケールと小スケールの解像成分をそれぞれ1次関数と2次関数で近似し、各変数を大スケールおよび小スケールの弱形式（大スケールおよび小スケールの近似関数を重み関数とした基礎方程式の領域積分式）に代入する。各スケールの弱形式には解像不可成分（数値解析では求められないもの）が存在するので、弱形式が物理的には空間平均化の意味をもつことに着目して、各スケールの弱形式ごとに適切と考えられる乱流モデル式で解像不可成分を表現した。

2. 数値解析技法の考案

1. で得られたマルチスケール有限要素式では、流速や温度の大スケール成分と小スケール成分が連成する連立一次方程式（行列方程式）が現れる。この行列方程式を直接解くと計算負荷は膨大となるので、両成分を分離して行列解法を不要とする技法（複合質量行列集中化法）を独自に考案した。

3. 定式化・解析コードの検証

開発したマルチスケール有限要素コードの妥当性を確認するために、図-2に示す2次元矩形容器内の乱流自然対流を解析した。その結果、図-3 (a) (b) に示す大スケール・小スケールの温度分布や図-4 (a) (b) に示す大スケール・小スケールの流速ベクトル分布を得た。温度分布よりヌッセルト数（無次元熱流束）を計算したところ、既往の詳細数値解析の結果 [P. Le Quere and M.Behnia, J. Fluid Mech., 359, pp.81-107, 1998] とほぼ同等であることが確認された。これにより、有限要素法によるマルチスケールLES解析法の定式化およびコンピュータ・コードの妥当性が検証され、複雑形状にも適用できる高精度の汎用乱流解析コードが完成した。

今後の展開

3次元平行平板内の乱流現象を対象として本解析コードの検証を深めるとともに、3次元の冷温水合流配管内の熱流動現象などへ適用し、解析コードの実用性を評価する。

主担当者 地球工学研究所 流体科学領域 上席研究員 江口 譲

関連報告書 「マルチスケールLES熱流動解析コードMISTRALの開発」電力中央研究所報告：U03036 (2004年3月)

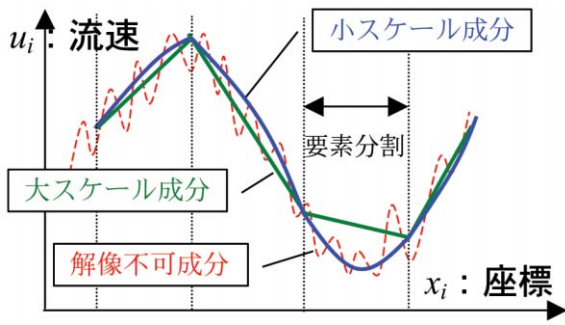


図-1 マルチスケール解析での乱れを含む流速の各成分への分解（1次元での模式図）

大スケール成分を1次関数で、小スケール成分を2次関数で補間し、残りを解像不可成分とする。

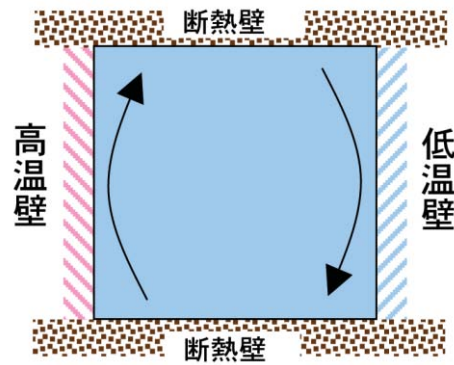


図-2 検証解析に用いた矩形容器内自然対流問題

高温壁付近の流体は高温となり上向きの浮力を、低温壁付近では逆向きの浮力を受け、容器内に時計回りの循環が発生する。

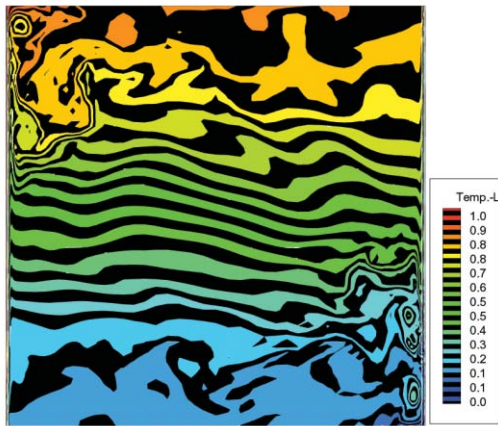


図-3 (a) 大スケール温度（壁面温度差で規格化した無次元温度）の分布

高温壁上部および低温壁下部で大小の渦が発生していることがわかる。

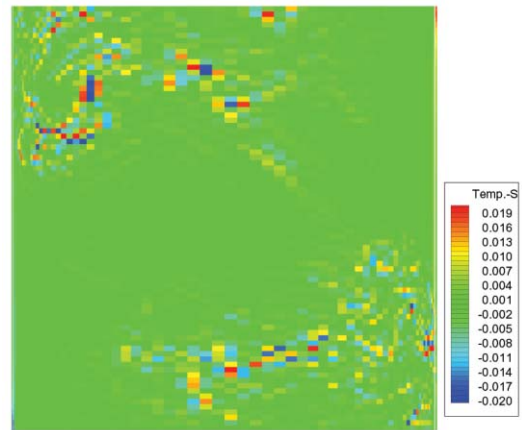


図-3 (b) 小スケール温度（規格化後）の分布

高温壁上部および低温壁下部で非ゼロの小スケール温度が発生しており、大スケールのみでは十分解像できないことを意味している。

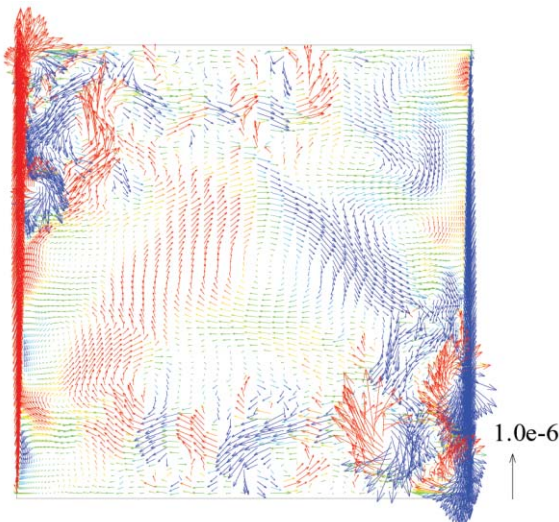


図-4 (a) 大スケール流速ベクトルの分布

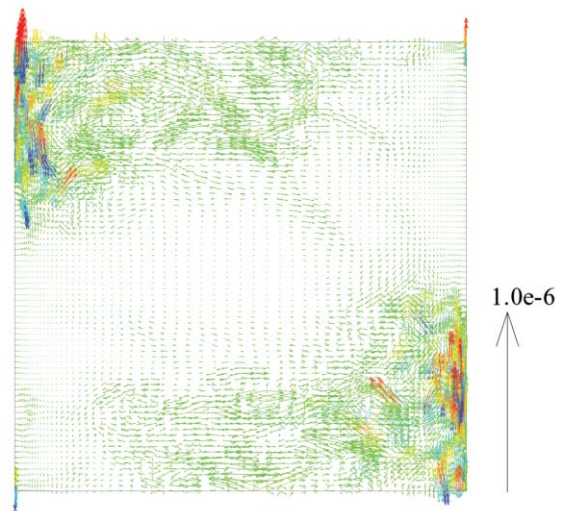


図-4 (b) 小スケール流速ベクトルの分布

図-4 (a) (b) の矢印は解析で得られた流速ベクトル（代表流速で規格化した無次元流速）を表しており、上向き流れを赤色で下向き流れを青色で表示している。温度分布と同様に、高温壁上部および低温壁下部で渦が発生しており、小スケール流速も比較的大きくなる。