

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：34416

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760166

研究課題名(和文) 渦要素からの速度場再構築に基づく境界連結型マルチスケールLESの開発と応用

研究課題名(英文) Development of Multi-Scale Large Eddy Simulation Based on Velocity Reconstruction by Vortex Elements on the Domain Interfaces

研究代表者

小田 豊 (ODA, YUTAKA)

関西大学・システム理工学部・准教授

研究者番号：50403150

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：ジェットエンジンのタービン翼内部の冷却流は複雑な乱流伝熱場である。本研究ではこの複雑な熱流動現象を高効率に予測・解明するための解析手法の開発に取り組んだ。当初導入を計画していた渦要素からの速度場再構築モデルは完成に至らなかったものの、より上位の目標である境界連結型LESの機能を実現する代替策として、三次元補間法に基づく境界連結法を導入したLES解析コードを構築した。その結果、Concurrent Simulationと呼ばれる乱流解析法を新たに提案し、衝突噴流と乱流促進リブから成る複雑乱流場に適用し、リブ高さの微小な違いが剥離・再付着領域の乱流構造に及ぼす影響を解析することに成功した。

研究成果の概要(英文)：In this study, a numerical simulation method for predicting complex turbulent heat transfer fields was developed based on a LES (Large Eddy Simulation) method. Contrary to my initial expectations, the development of a velocity reconstruction method, which is based on vortex elements near the domain interfaces, was not accomplished perfectly. Instead, a multi-block LES method was newly developed based on three-dimensional interpolation techniques. By applying this method, a new concept of turbulent flow simulation, "concurrent simulation" was proposed and developed. The concurrent simulation technique was applied to investigate the effect of a slight change in the shape of turbulence promoters on the resultant turbulent heat transfer fields downstream the turbulators under the completely same fluctuating inflow fields for each turbulator.

研究分野：熱流体工学

キーワード：乱流伝熱の数値予測

1. 研究開始当初の背景

流れの剥離・再付着や旋回に加えて、複数の吹出しや吸い込みを伴う複雑乱流場における乱流熱輸送現象は、例えば高温・高圧の燃焼ガスで駆動されるジェットエンジンの高温タービン部における翼列間流れや、翼内外の冷却流（フィルム冷却、衝突噴流冷却、リブ冷却）の熱流動場を支配しており、その現象解明は基礎学理および応用の両面から重要な課題である。このような複雑乱流熱場では局所の乱流形態（壁面、自由剪断）に応じて、乱流熱輸送を支配する渦スケールの異なる領域が、系内に複数かつ局在して存在する。その現象解明には高精度な乱流解析手法である **Large Eddy Simulation (LES)** が有効であるが、通常は必要に応じて解析領域各部の格子解像度が異なることから、これらの解析領域間の境界連結部において渦運動のスケール間相互作用を適切にモデリングすることが重要であった。

2. 研究の目的

本研究では、差分法に基づく **LES** の境界連結部における渦間相互作用を合理的に扱うため、ピオ・サバル則に基づく渦法から着想を得て渦要素からの速度場再構築法を連結部に導入し、異なる渦スケールを持つ領域間で整合性のある **LES** を可能とする「境界連結型マルチスケール **LES**」の開発を目指した。

3. 研究の方法

初年度にあたる平成 24 年度には上記の計算モデルの考案とアルゴリズムの検討を行い、2 年目にあたる平成 25 年度では、上記の計算モデルを流体解析コードに実装する方法の検討を行った。最終年度にあたる平成 26 年度には、大規模解析に適したアルゴリズム実装方法の検討を引き続き行った。しかしながら、当初計画していたピオ・サバル則に基づく渦要素からの速度場再構築モデルでは大規模解析における計算負荷が大きく実用的でないとの判断に至った。そこで、本研究の目標に立ち返って再検討を行い、境界連結型 **LES** の機能を実現する代替策として、三次元補間法に基づく境界連結法を導入した **LES** 解析コードを新たに構築した。その結果、解析領域内に複数の計算領域を埋め込んで互いの境界情報をやり取りしながら各領域で **LES** を同時並行的に実行する解析コードを開発することができた。また、この解析コードを元に複雑乱流場を解析する手法として **Concurrent LES** と呼ぶ乱流解析手法を新たに提案し、風洞実験では原理的に実施不可能である乱流熱流動場の解析を行うことができた。以下ではその適用例として、二次元衝突噴流場において熱伝達が急激に低下してしまう壁噴流域において、異なる高さの乱流促進リブを設置した場合にリブ上流および下流の乱流構造が受ける影響を検討した例に

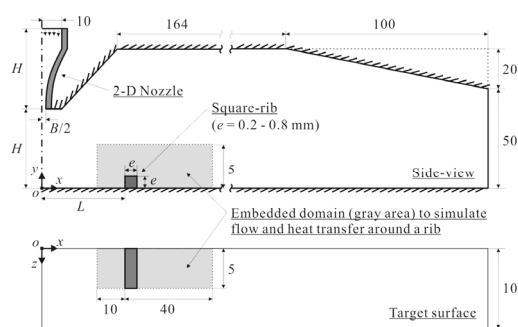


図1 解析領域の概要

ついて述べる。

4. 研究成果

本研究では、先行実験においてナフタレン昇華法により取得した時間平均熱伝達率の詳細な分布との比較を念頭に置き、その二次元衝突噴流に関する実験系を模擬した解析系を対象に **LES** 解析を実施した。図1に解析領域の xy 断面と主要な寸法を示す。二次元ノズル出口の幅 $B (= 4 \text{ mm})$ を基準とした衝突距離は $H = 10B$ であり、ノズル出口幅と出口流速を基準とした Re 数は 5000 とした。また、リブの位置を噴流衝突点から $L = 20 \text{ mm}$ に固定し、リブ高さ e を 0.2 mm から 0.8 mm まで 0.1 mm 刻みで変化させて解析を行った。なお、**LES** 解析にはマルチブロック構造格子系を適用可能な内製コードを用いた。これにより、各リブ高さに応じて形成した構造格子から成る複数の構造格子ブロックを重ねて配置することにより、複数のリブ高さに対する解析を同時並行的に実行し、計算時間を大幅に短縮した。この際、リブ上流側に位置する構造格子ブロックの流入境界条件が必要となる。このため、本研究では基本となる背景流れとして（リブ無しの）平板面に対する **LES** 解析を併せて実行し、リブ上流での流入境界条件を基本背景流れから補間により時々刻々と与えて計算を行った。この方法により、各リブ上流の瞬時乱流構造を全く同一にすることができ、実験では実施不可能な解析が可能となった。本研究ではこれを **Concurrent LES** と名付けた。

基礎式には、一般座標系におけるフィルタ平均された非圧縮性 Navier-Stokes 式、連続の式、エネルギー式を用いた。SGS 応力モデルには混合時間スケールモデル（モデル）を用いた。SGS 熱拡散係数の導出に際しては、SGS プラントル数一定を仮定して 0.5 を与えた。なお、解析手法には改良型二次精度コロケート格子に基づく Fractional Step 法を適用し、時間発展には分子粘性項以外には二次精度 Adams-Bashforth 法を、分子粘性項にはオイラー陰解法を適用した。移流項の空間差分には自乗量保存型の二次精度中心差分を適用した。速度場の境界条件としては、 $x = 0$ で対称条件、ノズル入口で一様流速条件、壁面で

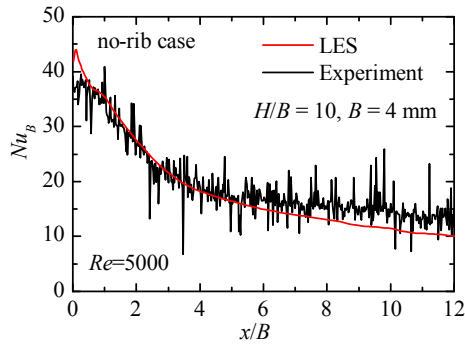


図2 リブ無し面上の熱伝達率分布の比較

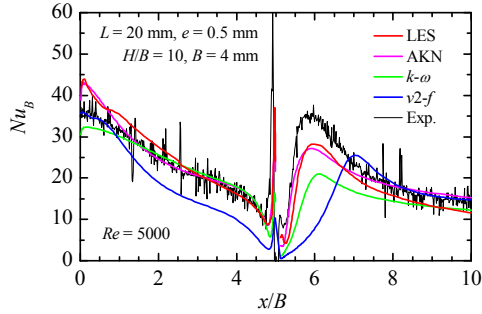


図3 リブあり面上の熱伝達率分布の比較

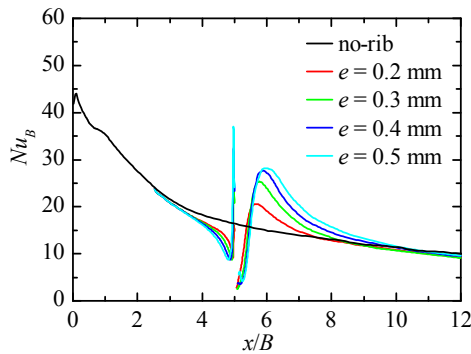


図4 リブあり面上の熱伝達率分布の比較

滑り無し条件，流出境界では対流流出条件を用いた．温度場については，ノズル入口で一様温度 300K，比較実験でナフタレン層を形成した底面（リブ表面は除く）では 330K の等温条件を与え，リブ表面を含むその他の壁面は断熱条件とした．

図2は，リブ無しの平板に対する二次元衝突噴流の平均 Nu 分布について，LES と実験の結果を比較したものである．噴流衝突点付近において LES が実験結果を過大に予測しているものの，両者の値は概ね良い一致を示しており，LES 解析の妥当性が確認できる．噴流衝突点上の過大予測は， $x=0$ で課した対称条件が境界面を横切る流体運動を阻害していることが原因と思われる．

図3は，リブ高さが $e=5\text{ mm}$ の場合について，FLUENT を用いた RANS による平均 Nu 分布の予測結果と LES の結果を比較したもので

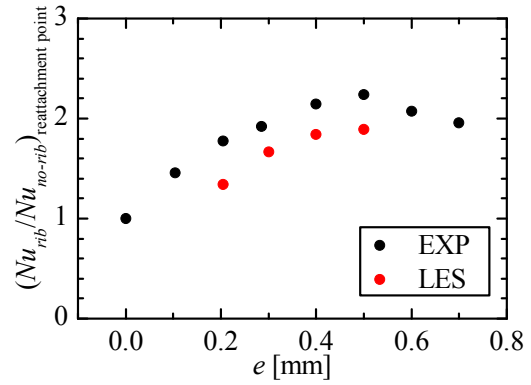


図5 再付着点での熱伝達率上昇率

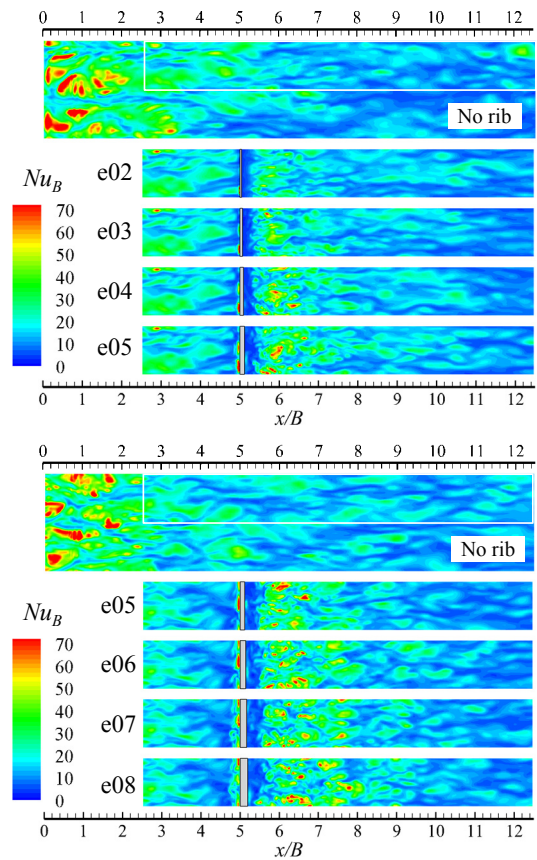


図6 衝突面上の瞬時熱伝達率分布

ある．RANS モデルの中では，AKN モデルがリブ後方の再付着点における熱伝達率のピーク位置とその値を最も精度良く予測している．一方，本研究の LES は全体として AKN モデルと同程度の予測を与えているほか，再付着点下流における Nu の減少傾向については AKN モデルに比べて特徴を良く捉えている．

図4はリブ高さが平均 Nu 数分布に与える影響を示している．これより，リブ高さが大きくなるにつれ，リブ後方の平均 Nu の極大値を与える位置が下流側にシフトするととも

に、その値も増加していることが分かる。これは、リブ高さの増加に応じてリブ上面で剥離した流れの再付着点が下流に移動するためと考えられる。また、リブ上流ではリブ上流で生じる循環領域の影響で Nu が低下する傾向にある。

図5は、リブを付設した際の再付着点における平均 Nu の極大値を、リブが無い平板衝突面での同一位置の値で除したものである。既に図3で見たように本LES解析ではリブ後方の再付着点位置における平均 Nu の極大値を実験よりも過小に評価する傾向にあることから、全てのリブ高さにおいて実験よりも低い値を示すことが分かる。しかし一方で、その分布傾向は実験とほぼ同様であり、今回のLES解析がリブ周りの渦運動の特徴を良く再現していると思われる。また、実験ではリブ高さ 0.5 mm を境に再び減小に転じるという興味深い結果が得られている。リブ付近を流れる壁噴流の境界層厚さが同程度であることから、リブによるせん断が最も有効に働いて乱れが促進されるためと考えられる。

図6は、LESで得られた噴流衝突面上の瞬時ヌセルト数分布を各リブ高さについて示したものである。なお、背景流れとして同時に計算しているリブの無い平板面上の同時刻における瞬時ヌセルト数も併せて示す。また、平板面上の白枠で囲んだ領域が各リブ周辺の熱流動場の解析に利用した解析領域を示している。計算の実行に際して、使用した計算機で利用可能なメモリ使用量に制限があったため、Group A ($e = 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 \text{ mm}$) と Group B ($e = 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 \text{ mm}$) の2グループに分けて、各リブに対するLESを同時並行的に実行した。図より、まず平板面上の瞬時ヌセルト数分布に注目すると、噴流が衝突する淀み点付近でスポット的に非常に高いヌセルト数の分布が確認できる。これは、ノズルからの噴流が衝突するまでの間に噴流外縁における流体力学的な不安定性(ケルビン・ヘルムホルツ不安定)に起因して生じた渦構造が衝突したものであり、淀み点領域の至る所でこのようなヌセルト数の高いスポット領域が間欠的に発生する。これらは次第に壁噴流を形成しつつ衝突面に沿って流れるが、リブが無い平板面上においては乱れの減衰が進行するのに伴って、下流域でヌセルト数が次第に減衰する様子が見て取れる。次に、各リブ高さにおける瞬時ヌセルト数の分布に注目すると、 $e = 0.2 \text{ mm}$ の場合にはリブ後流の再付着点付近においても高いヌセルト数を持つ領域が存在せず、比較的短い距離でリブ無しの場合の平板面上における分布と類似したヌセルト数分布へと推移することが分かる。その後、リブの高さを増すに従って再付着点付近における局所的に高いヌセルト数を持つスポット領域は、次第にその数を増すとともに、より下流側の広い領域にわたっ

て存在するようになる。また、Group A と Group B に分けて見ると、同時並行的に計算しているリブの上流側の瞬時ヌセルト数分布は、リブの極近傍を除いてリブ高さには依らず、ほぼ同じ構造を有することが分かる。逆に、リブの下流側ではリブ高さによって完全に異なる分布を呈しており、異なる高さを持つリブによって大小様々なせん断変形を受ける結果、リブ下流の乱流構造が大きく変化していることが分かる。

以上で述べたように、本研究では境界連結型LESの機能を実現するため、三次元補間法に基づく境界連結法を導入したLES解析コードを新たに構築した。その結果、複雑乱流場を解析する手法としてConcurrent LESと呼ぶ手法を新たに提案し、衝突噴流と乱流促進リブから成る複雑乱流場に適用し、リブ高さの微小な違いが剥離・再付着領域の乱流構造に及ぼす影響を解析することに成功した。新たに構築した解析手法は乱流伝熱機構の解明に寄与するものと考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

① 小田 豊, 武石 賢一郎, 乱流促進リブによる二次元衝突噴流冷却の伝熱促進機構に関するLES解析, スマートプロセス学会誌, 査読有, 2巻, 2013, 272-279
<http://doi.org/10.7791/jspmee.2.272>

[学会発表] (計7件)

① Yutaka Oda, Numerical Study of Curvature Effects on Film Cooling of a First-Stage Stationary Vane, The 25th International Symposium on Transport Phenomena, 2014年11月04日~2014年11月07日, Krabi (Thailand)

② Yutaka Oda, Concurrent Large-Eddy Simulation of Wall-Jet Heat Transfer Enhanced by Systematically-Deformed Turbulence Promoter, International Heat Transfer Conference 15, 2014年08月10日~2014年08月15日, 国立京都国際会館(京都府京都市)

③ Yutaka Oda, Large Eddy Simulation of Two-Dimensional Jet Impingement Heat Transfer Enhanced by Submilli-Scale Ribs, 11th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels, 2013年06月16日~2013年06月19日, 北海道大学(北海道札幌市)

④ Yutaka Oda, Large Eddy Simulation of Film Cooling with Swirling Coolant Air,

23rd International Symposium on Transport Phenomena, 2012年11月19日～2012年11月22日, Auckland (New Zealand)

⑤ 小田 豊, エントロピー生成に着目したフィルム冷却流れのLES解析, 第90期日本機械学会流体工学部門講演会, 2012年11月17日～2012年11月18日, 同志社大学(京都府京都市)

⑥ Yutaka Oda, LES of Film Cooling Upstream an Airfoil/Endwall Junction to Suppress Horseshoe Vortex and Endwall Heat Transfer, 7th International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer, 2012年09月24日～2012年09月28日, Palermo (Italy)

⑦ 小田 豊, 対称翼前縁付け根部のフィルム冷却が馬蹄渦と熱伝達に及ぼす影響に関するLES, 第49回日本伝熱シンポジウム, 2012年05月30日～2012年06月01日, 富山国際会議場(富山県富山市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小田 豊 (ODA, Yutaka)

関西大学・システム理工学部・准教授

研究者番号: 50403150

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし