

研究種目：若手研究 (B)
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19760107
 研究課題名 (和文) ターボ機械におけるマルチスケール流れの統合数値解法に関する研究
 研究課題名 (英文) Study on Unified Numerical Simulation Method of Multiscale Flows in Turbomachinery
 研究代表者
 山田 和豊 (Yamada Kazutoyo)
 九州大学・大学院工学研究院・助教
 研究者番号：00344622

研究成果の概要 (和文)：一般にターボ機械内の乱流解析に用いられる LES (Large Eddy Simulation) では、微細な乱流の渦粒子が発生する壁面近傍で結果の信頼性に欠ける。ターボ機械内の大小様々な渦を高精度に予測するためには、スケールに応じた計算手法で解析を行うマルチスケール解析が有効であるといえる。そこで、本研究では格子ボルツマン法を利用して、マルチスケール解析を実現する計算手法の構築を試みた。

研究成果の概要 (英文)：LES (Large Eddy Simulation), which has become used for turbulent flow simulation even in turbomachines, has a problem with near-wall treatment. In order to capture eddies with different scale in turbomachines, it is suitable to apply a multi-scale analysis that changes the calculation method according to eddy scales. The goal is to develop a numerical method for such multi-scale analysis by taking advantage of the lattice Boltzmann method.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	700,000	0	700,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,100,000	420,000	2,520,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：ターボ機械, マルチスケール, 数値流体力学, 流体工学

1. 研究開始当初の背景

電力産業や航空機産業, 宇宙開発の分野など幅広い分野にわたって, ガスタービンやロケットエンジンなどのターボ機械に代表される各種流体機械が使用されている。電力産業は, 基幹産業と呼ばれるように我々の生活に必要な産業であり, 世界人口の爆発的な増加に伴って地球規模でエネルギー需

要が高まる結果, 今後さらに飛躍的に成長していくことが予想される。また, ターボ機械が必要不可欠である航空機産業や宇宙開発の分野についても, 近い将来大きく発展することが期待される。しかしながら, これらの成長や発展の一方で, 地球資源の枯渇化, 環境問題等はますます深刻化することは必至である。代替エネルギー産業における技術革

新の見通しが見つからない現在においては、これらの問題に対して、超小型・高効率・高性能・高信頼性のターボ機械を達成するための研究開発に努力が注がれており、新しい技術開発が求められている。特に、産業用ガスタービンや蒸気タービンに関しては、数パーセントの効率向上でも、化石燃料や温室効果ガスの排出量の削減に貢献度が大きい。このため、圧縮機やタービンのターボ機械要素に関して、更なる効率の向上を目指した研究が続けられている。

現在、ターボ機械は定常流れに基づいた設計により開発されている。この定常流れに基づいた設計法では今以上の性能向上が期待できないため、GA（遺伝的アルゴリズム）等による最適化設計が試みられている。一方で、新しい高性能ターボ機械の創出を目的として、流れの非定常効果を積極的に利用する研究が進められている。これまで解析が困難で、設計において経験的に決定される領域に関して、より詳細な調査が行われるようになってきている。より詳細な乱流解析を実現するためには、モデルの影響が小さい高精度な数値計算が求められる。乱流解析に信頼性の高いLES（Large Eddy Simulation）においても、普遍的なSGS（Sub-Grid Scale）モデルがないことや、特に壁面近傍での解析結果に関して、モデルの信頼性に問題があるといわれる。

2. 研究の目的

ターボ機械内では様々な大規模渦が形成される。これらの大規模渦は、より小さな多数の渦から構成されている。レイノルズ数は、この流れ場を支配する最大の渦と粘性散逸する最小渦とのスケール比を表わす。したがって、高レイノルズ数流れの乱流現象を正確に再現するには、非常に高い空間解像度および時間解像度を必要とする。LESでは流れ場に依存しない小さな渦についてSGSモデルとしてモデル化するが、GS以下の微小規模の渦についてもモデル化せず解析できれば、より高精度で詳細な乱流解析が行えることになる。

微小規模渦の解析を流れ場全体で行えば計算負荷は劇的に増大するため、必要に応じて局所的に行う必要がある。また、微小規模渦の運動については、大規模渦のそれと時間スケールが異なるため、高速かつそれに適した計算手法で解析することが望ましい。したがって、このような大規模渦と微小規模渦とで異なるスケールで異なる計算手法で解析を行うマルチスケール解析が高精度乱流解析に有効であると考えられる。マルチスケール解析では微小スケールの物理現象がより大きなスケールのそれへ影響を及ぼすようなものが対象とされるが、ターボ機械内の乱流解析もまた微小規模渦が大規模渦に影響

を与えるためマルチスケール解析といえる。本研究の目的は、マルチスケール乱流解析を実現できる計算手法を新たに開発し、ターボ機械流れに適用することである。

3. 研究の方法

本研究では、乱流の微小規模渦が発生する領域において格子ボルツマン法（Lattice Boltzmann Method: LBM）を適用することを企図した。格子ボルツマン法は、従来行われるNavier-Stokes解析に比べて、アルゴリズムが簡単であり、高速に計算できることが期待される。しかし、比較的新しい計算手法であり、ターボ機械の乱流解析に応用された実績はほとんどない。そこで、マルチスケール乱流解析手法を開発するに当たって、ターボ機械の乱流解析における格子ボルツマン法の信頼性および有用性についても調査した。

(1) 格子ボルツマン法

はじめに、格子ボルツマン法について簡単に述べる。本研究では、一般に用いられる次式の格子BGKモデルを使用した。

$$f_i(\mathbf{x} + \mathbf{e}_i \Delta t, t + \Delta t) = f_i(\mathbf{x}, t) - \frac{1}{\tau} (f_i - f_i^{eq}) \quad (1)$$

ここで、 f は粒子分布関数、 \mathbf{e} は粒子速度ベクトル、 τ は単一時間緩和係数、 f^{eq} は局所平衡分布関数を表す。また、添え字 i は離散化された粒子速度方向に対応した整数である。

格子ボルツマン法では、粒子は格子点上を移動するため、粒子速度と格子は直接関係する。したがって、格子ボルツマン法に用いる格子は等方性を保つために規則的な等間隔格子である必要がある。本研究では粒子速度モデルとして、二次元計算ではD2Q9モデル、三次元計算ではD3Q15を使用した。式(1)からChapman-Enskogの展開方法を用いてNavier-Stokes方程式を導く過程で、動粘性係数と単一時間緩和係数の関係および局所平衡分布関数が決まる。その結果、レイノルズ数 Re は次式のように表される。

$$Re = \frac{3NU}{\tau - \frac{1}{2}} \quad (2)$$

ここで、 N は代表長さ中に含まれる格子数、 U は代表速度を表す。ある代表速度と緩和係数において、レイノルズ数は N と比例関係にあるため、三次元計算ではレイノルズ数の増加とともに計算格子数は爆発的に増加することが分かる。

(2) 有限体積格子ボルツマン法

格子ボルツマン法は、上述のとおり直交等間隔格子を一般的に用いるため、格子配置に自由度がない。そのため、物体形状に沿った境界適合格子を用いて計算する有限差分格子ボルツマン法や有限体積格子ボルツマン

法が提案されている。本研究では、ターボ機械の乱流解析における信頼性および有用性について調査するために、有限体積格子ボルツマン法を用いて Navier-Stokes 解析と同じ計算格子で計算を行い、その結果を比較した。計算対象には、後述する低圧タービン翼列を用いた。

有限体積格子ボルツマン法 (Finite Volume Lattice Boltzmann Method : FVLBM) では、次に示す離散ボルツマン方程式を基礎方程式とする。

$$\frac{\partial f_i}{\partial t} + \mathbf{e}_i \cdot \nabla f_i = -\frac{1}{\phi} (f_i - f_i^{eq}) \quad (3)$$

ここで、 ϕ は緩和時間を表す。上式の第 1 項および第 2 項には任意の差分近似が適用でき、粒子速度とは独立に格子点を分布させることができる。

本研究では、比較のために Navier-Stokes 計算と同様に LES を実施し、計算スキームについても Navier-Stokes 計算と同じにした。式(3)の離散ボルツマン方程式を、時間方向には対流項および衝突項を陰的に、空間にはセル中心型の有限体積法に基づいて離散化した。対流項の評価には、Jameson 型数値粘性を付加した 4 次精度中心スキームを用いた。時間積分には、Gauss-Seidel 法を用い、各時間ステップで 10 回のニュートン反復を行った。時間精度は最大 2 次精度となる。SGS モデルには、WALE モデルを採用した。

(3) マルチスケールモデル

マルチスケールモデルでは、離散速度の大きさが異なる粒子を導入することによって、格子解像度の違う格子を組み合わせる計算を行う。微小規模渦が発生する壁面近傍など、格子解像度の必要な部分に細かい格子を配置し、壁面から遠く離れた領域では格子解像度を粗くするなどして、計算を効率的に行う。本研究では、(2)と同様に低圧タービン翼列を計算対象として、マルチスケールモデルを検証した。以下に手法の概要を述べる。

マルチスケールモデルでは、格子幅に応じて緩和係数が異なる。粗い格子の格子幅と細かい格子の格子幅との比を n とすると、細かい格子における緩和係数は、粗い格子と細かい格子が重なる境界において物性値(粘性係数)が一致するという条件から、粗い格子における緩和係数を用いて次式で表される。

$$\tau_f = \frac{1}{2} + n \left(\tau_c - \frac{1}{2} \right) \quad (4)$$

また、粗い格子、細かい格子であっても、2 つの格子が重なる点ではマクロな物理量は等しくなければならない。したがって、両者の平衡分布は等しい。さらに、1 次の非平衡

が粗い格子と細かい格子との境界で連続的であることから、次式の関係が導かれる。

$$f_i' = \tilde{F}_i^{eq} + (\tilde{F}_i' - \tilde{F}_i^{eq}) / \Omega$$

$$F_i' = f_i^{eq} + (f_i' - f_i^{eq}) \Omega \quad (5)$$

ここで、大文字 F は粗い格子、小文字 f は細かい格子での分布関数を表し、上付き文字' は衝突後の粒子の分布関数を表している。また、 Ω は粗い格子および細かい格子の緩和係数と n で定義されるパラメータである。上式の関係を用いて、異なる格子間で分布関数のやりとりが行われる。

(4) 解析対象

計算対象は、岩手大学の低圧タービン直線翼列とした。この翼列に関しては、翼面圧力分布や境界層速度分布など豊富な実験データがある。実コード長と翼列出口平均流速で定義されるレイノルズ数は 57,000 である。実験から、このレイノルズ数では翼負圧面上の境界層は層流剥離し乱流に遷移した後再付着することが分かっている。

4. 研究成果

(1) 格子ボルツマン法の検証

ターボ機械の乱流解析における格子ボルツマン法の信頼性および有用性を調査した結果について述べる。低圧タービン翼列周りの流れに関して、有限体積格子ボルツマン法による計算結果と Navier-Stokes 計算結果を比較した。計算には同じ格子を用いた。計算格子の総セル数は 700 万セルである。

表 1 に FVLBM と Navier-Stokes 計算で計算時間を比較したものを示す。Core2Duo (2.4GHz) プロセッサ、メモリ 2GB のコンピュータを 8 台 1000 BASE-T のネットワークで接続した PC クラスタ使用して、並列計算を行った。FVLBM は Navier-Stokes 計算に比べて 5 倍高速に計算できることが分かる。

表 1 計算時間の比較

	FVLBM	Navier-Stokes
CPU time/100 step	100[min]	500[min]

図 1 に翼面圧力係数 (C_p) 分布の比較を示す。上述のとおり、本タービン翼列の負圧面上には層流剥離泡が形成される。 C_p 分布が平らになり始める $x/Cx \approx 0.6$ が剥離開始点に相当する。また、急激な圧力回復が見られる $x/Cx = 0.8$ 付近が遷移開始点、 $x/Cx = 0.85$ 付近が再付着と考えられる。FVLBM および Navier-Stokes 計算は、共に負圧面上の層流剥離泡を再現することができており、実験と定性的に良い一致を示している。しかし、圧力回復開始点で示される遷移開始位置や境界層の再付着点については、どちらの計算結果も実験と比べて下流側に評価している。

FVLBM と Navier-Stokes 計算で結果を比較すると、FVLBM でより実験に近い結果が得られている。図2は、翼負圧面上における層流剥離泡付近の速度分布を比較したものである。剥離開始点 ($x/Cx=0.6$) までは、どちらの計算結果も実験と良く一致している。しかし、剥離後では計算結果と実験値で差異が見られる。実験では剥離泡の最大高さが約1.2[mm] ($x/Cx=0.8$) であるのに対して、FVLBM では約 1.7[mm] ($x/Cx=0.8$)、Navier-Stokes 計算では約 1.7[mm] ($x/Cx=0.85$) である。また、再付着点についても、実験 ($x/Cx=0.85$) に比べ、FVLBM ($x/Cx=0.9$)、Navier-Stokes 計算 ($x/Cx=0.95$) とも下流側に評価されている。以上のように、FVLBM および Navier-Stokes 計算はともに剥離泡を過大に評価した。しかし、FVLBM では、同じ計算格子を用いたにも関わらずより実験に近い流れ場が得られた。これには、支配方程式の違いによる離散化誤差の差異の影響が原因のひとつとして考えられる。また、FVLBM によって、実験と良く一致した乱流境界層の速度分布が再現されることが示された。

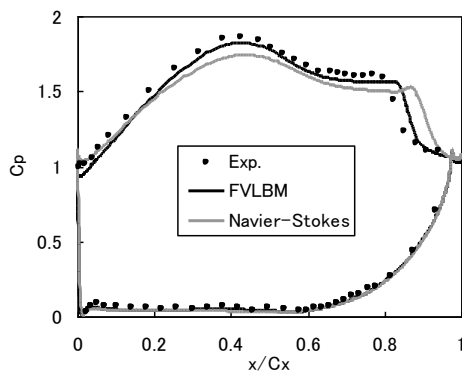


図1 翼面圧力分布の比較

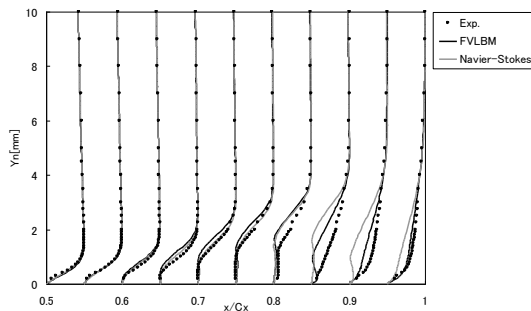


図2 翼負圧面上の速度分布の比較

(2) マルチスケール格子ボルツマン法による解析結果

マルチスケール格子ボルツマン法 (Multi-LBM) について、キャビティー流れで検証を行った後に、低圧タービン翼列流れの計算に適用した。図3のグレーで示されるタービン翼周りの領域に一段階細かい格子を配置し、計算を行った。粗い格子での計算において、

緩和係数をあまり小さくできなかったために、計算格子の総数は 2,300 万点となった。三次元計算を行うには格子点数が大きくなり過ぎたため、形状の二次元性を考慮して二次元計算を実施した。

図4は、タービン翼周りの圧力係数分布を実験結果と比較したものを示している。同図には LBM による LES 解析 (LBM-LES) の結果が比較のためにあわせて示されている。上述したように、翼負圧面上では剥離泡が形成されるが、Multi-LBM によってそれが再現されているのが分かる。しかしながら、剥離点は実験とほぼ一致しているが、剥離以降の圧力回復開始点や再付着位置が下流側にずれている。これは LBM-LES でも同様であるが、Multi-LBM には剥離泡内の再循環領域において LBM-LES の結果に見られるような圧力分布の「こぶ」はなく、より実験に近い流れ場が再現されているといえる。本計算は二次元計算であるために、再付着後の乱流境界層を再現できず実験と差異が見られるが、定性的には実験と良い一致を示しているといえる。

$x/Cx=0\sim 0.5$ の翼列前半部において、圧力分布に振動が見られる。これは、LBM では直交等間隔格子が用いられるために、翼形状を正確に再現できていないためである。これには、埋め込み境界法 (immersed boundary method) 等の導入が必要である。また、三次元計算を実施するには、壁面から離れた主流部の格子幅をもっと大きくし、翼列間の格子点数を減らすことが必須となる。それには、粗い格子領域での緩和係数が小さくなり過ぎず安定に計算できるように、乱流モデル等を導入するなどの工夫が必要となる。以上が今後の課題である。

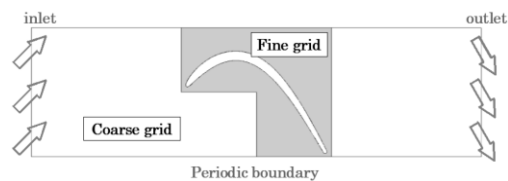


図3 マルチスケール格子の配置

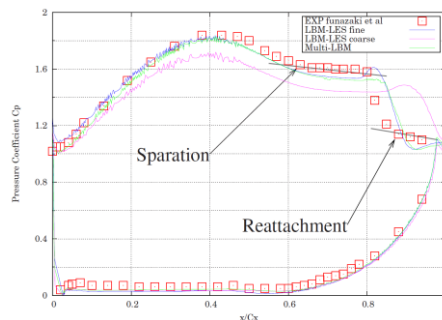


図4 翼面圧力分布の比較

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)

〔学会発表〕(計8件)

高見健司, 船崎健一, 山田和豊, 格子ボルツマン法による高レイノルズ数流れの乱流解析, 日本機械学会東北支部第38回学生員卒業研究発表講演会, 2008年3月7日, 八戸市

藤沼沙知, 船崎健一, 山田和豊, マルチスケール格子ボルツマン法による高レイノルズ数流れ場の数値解析, 日本航空宇宙学会北部支部2008年講演会, 2008年3月10日, 北海道大学

千葉康弘, 船崎健一, 山田和豊, 主流乱れを伴う低圧タービン翼周りのLES解析, 日本航空宇宙学会北部支部2008年講演会, 2008年3月10日, 札幌市

藤沼沙知, 船崎健一, 山田和豊, マルチスケール格子ボルツマン法を用いた高レイノルズ数流れの数値解析, 日本機械学会2008年度年次大会, 2008年8月6日, 横浜市

山田和豊, 船崎健一, 藤沼沙知, マルチスケール格子ボルツマン法による高負荷低圧タービン翼周りの流れ解析, 第22回数値流体力学シンポジウム, 2008年12月18日, 国立オリンピック記念青少年総合センター・東京

高見健司, 船崎健一, 山田和豊, 有限体積格子ボルツマン法による円柱まわりの流れのLES解析, 日本機械学会東北支部第44期総会・講演会, 2009年3月13日, 仙台市

高見健司, 船崎健一, 山田和豊, 有限体積格子ボルツマン法を用いた流れのLES解析, 2009年ターボ機械・航空宇宙の空力伝熱セミナー, 2009年9月29日, 三菱重工伊豆高原クラブ・静岡県伊東市

遠藤広唯, 船崎健一, 山田和豊, 格子ボルツマン法を用いた混相流解析, 2009年ターボ機械・航空宇宙の空力伝熱セミナー, 2009年9月28日, 三菱重工伊豆高原クラブ・静岡県伊東市

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山田 和豊 (Yamada Kazutoyo)
九州大学・大学院工学研究院・助教
研究者番号: 00344622