

# LES による流体解析ソフトウェアと自動車分野への応用

## —RR2002 プロジェクト 戦略的基盤ソフトウェアの開発—

CFD software based on Large Eddy Simulation – Development of Simulation Software  
for Frontier Fields of Science and Technology, Research Revolution 2002

小林 敏雄、谷口 伸行、加藤千幸  
東京大学生産技術研究所

Toshio Kobayashi, Nobuyuki Taniguchi, Chisachi Kato  
Institute of Industrial Science, University of Tokyo

E-mail:Kobaya@iis.u-tokyo.ac.jp

### 1 はじめに

2002 年度より開始された文部科学省リサーチ・レボリューション計画 (RR2002) における情報科学技術分野の重点開発研究の一環として[1]、「戦略的基盤ソフトウェアの開発」が東京大学生産技術研究所を中心とする産学連携プロジェクトとして実施される[2]。ここでは、わが国の科学技術重点分野において次世代の基盤技術となる実用レベルのシミュレーション・ソフトウェアを 5 カ年計画 (2002~2006 年度) で開発する。開発対象としては次の 5 つの物理化学シミュレーション — 1) 有機高分子の量子化学計算、2) タンパク質-化学物質の相互作用解析、3) ナノスケールの物質・材料シミュレーション、4) LES による流体解析、5) 連成現象を伴う大規模構造解析、および、それらの大規模計算を将来のコンピュータ・ネットワーク環境で効果的に運用するための基盤情報技術 — 6) 統合プラットフォーム、7) HPC ミドルウェアの実用化を計画している。

本稿では、このうちの「LES による流体解析ソフトウェア開発」の実施計画の概要を紹介し、また、想定される代表的な応用分野として自動車設計における諸課題への適用例を考える。

### 2 LES による流体解析ソフトウェアの開発

#### 2.1 LES による流体解析の目的

エネルギーや環境資源の有限性を前提とすることが 21 世紀を迎えて必須の条件となりつつある。工学のパラダイムにも大きな転換が求められており、新しい評価基準の下で、新しいタイプの技術開発が進むであろう。そこで起こりうる様々な事象に対しては、従来にもまして、的確で、総合的、かつ、迅速な予測と対策が重要になると考えられる。特に、CO<sub>2</sub> 対策などにおいて既に見られるように、エネルギーと環境の関わる課題ではシミュレーションのもつ役割がますます高いと

考える。最近、流体シミュレーション研究の一つの大きな壁であった**乱流予測モデリング**に関して大きなブレイクスルーが為されつつある。すなわち、膨大な演算量を必要とする原理方程式に基づく乱流の直接数値シミュレーション (DNS: Direct Navier-Stokes Simulation) が実際に実行され、乱流研究に多くの知見を与えたことにある。数値実験として DNS の有用性が広く認識され、また、その近似解析モデルといえる**ラージ・エディ・シミュレーション** (LES: Large Eddy Simulation) が開発されたことで、乱流数値シミュレーションを本格的に工学問題に適用していくことが可能となってきた。[3]

本プロジェクトでは、**乱流現象の予測と制御が重要な課題であることの多いエネルギー流動(流れ、熱、音など)の予測シミュレーション**を対象に、LES を基礎とする数値解析モデリングを実用化レベルのソフトウェアとして確立し、実際の工学設計への展開普及と関連するシミュレーション技術の発展を図る。本プロジェクトでは解析プログラムの開発と同時に、その工学応用の事例解析を系統的に実施し、実際の解析方法の確立と検証データベースの構築を行う。これらのソフトウェアを公開資料とすることにより、工学設計における LES 流体解析予測の信頼性と実用性を与えることを目指す。本プロジェクトの成果の適用が期待される工学問題として代表的なものとして、**1)熱エネルギー流動、2)流体騒音／流体振動、3)複雑な流体現象(ex. 混相流、反応流など)**が挙げられる。LESに基づく非定常乱流解析は、これらの最近の工学設計における共通の課題に対して、より普遍的、汎用的な予測法を提供し、新しい課題に対しての先行的な技術開発を可能にすることが期待される。

## 2.2 LES コードの基本コンセプト

乱流に代表されるように「流れ」は**非線形、非定常なマルチスケール**現象であるため、それらの複雑な現象全てを一括して取り扱うことは、予測精度からも、計算負荷の観点からも非現実的で非合理的といえる。そこで、乱流をスケール分離して取り扱う解析法として有望視されている**ラージ・エディ・シミュレーション** (LES: Large Eddy Simulation) を中心に、様々な連成現象を**スケール分離**してモデル化して連成することで複雑現象を合理的に数値シミュレーションすることができると考えられる。すなわち、乱流予測においてはマクロスケールの現象(=乱流拡散の効果)と、乱流の内部構造に関わるマイクロスケールの現象(=エネルギー散逸の効果)をスケール分離することで、工学設計で主に対象となる前者については直接的な数値計算により解が与えられる。しかしながら、従来の市販 CFD コードの多くが採用している時間平均乱流モデル(RANS: Reynolds Averaged Navier-Stokes)と比較して当然ながら多くの計算時間コストを要する。それに代わるものはなにか? 予測の普遍性と一貫性、言い換えれば、「必要とするアприオリな情報の少ない予測」が期待できる。

**スケール分離モデル**を数値シミュレーションにおいて実現する方法として、本プロジェクトでは以下の基本コンセプトを採用する。

- LES 乱流解析ソルバーについては、これまでの基盤研究で開発された複数のコードを統一した形式に合わせてユニット化して、各コードの比較選定や連成解析を容易となるようなプログラム・ライブラリーを構築する。その際、LES 乱流解析に生じる大規模な非定常流れデー

タの補間、統計処理を並列計算機環境で自由に行えるソフトウェアツールが有用である。構造解析や音響解析との連成もこの機能によって統一的に扱うことができる。ここでは、外部のソフトウェアと連携も考慮した汎用的なデータフォーマットやデータ変換ツールの設計が必要である。

- 乱流と連成するマイクロ現象の多くは、特定の界面座標や、流線に沿った **Lagrange** 系で記述することで、平衡式や簡潔な近似理論で表される。そこで、乱流の代表的な速度変動場を直接解析できる **LES** に連成した界面追跡、流線追跡シミュレーションを行い、それらの解を用いることで間接的にマイクロ現象と乱流場の相互干渉を精度良く近似できる。たとえば、乱流火炎に対しては **flamelet** アプローチが、粒子混相流に対しては **Lagrangian** 粒子シミュレーションが申請者らにより研究され、**LES** モデルが開発検証されている。また、自由界面における相互作用モデルへの展開も可能と考える。
- 同様のスケール分離モデルの考え方によって、実質的に解像困難な微小乱流スケールに対しても局所マイクロスケールに平衡式や近似理論を適用することで、**LES** 解析の応用範囲を広げることが期待できる。たとえば、物体近傍の境界層低層に局所平衡モデルの適用が高レイノルズ数乱流の壁境界条件の近似として有効であることが示されており、多孔質物の流動や複雑微小構造物の後流などの近似解析モデルとしても適用を図る。

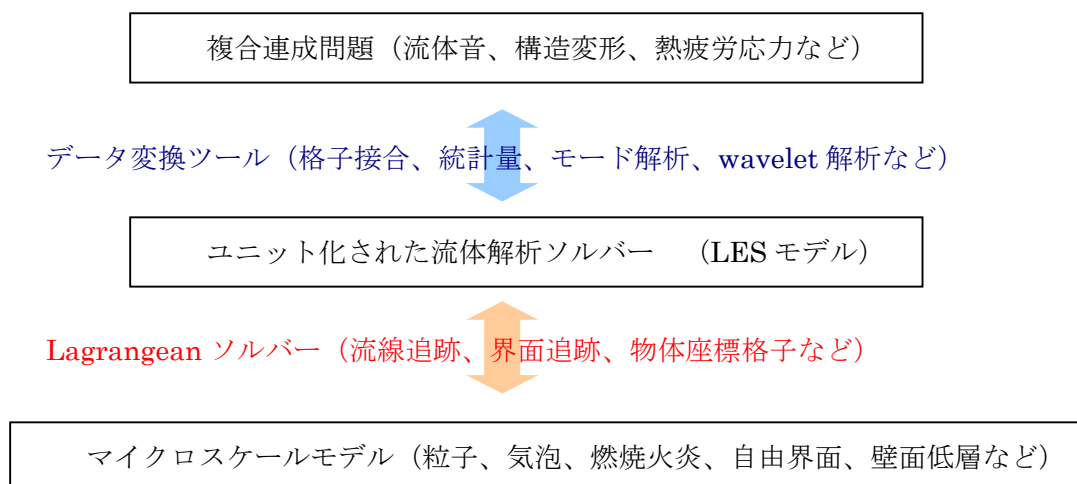


Fig.1 Basic concept of LES code for applying complex problems

### 2.3 LES モデリングと計算技術

本プロジェクトで開発すべきソフトウェアの基本モデルとしては、これまでの **LES** 実用化研究の成果から以下のように考えている。流れ場のタイプとしては、乱流の影響が顕著に現れる領域である、高レイノルズ数、低マッハ数（非圧縮性流れ）を主たる対象とする。

**乱流モデル** 基本モデルとしてラージ・エディ・シミュレーション(**LES: Large Eddy Simulation**)

を採用する。LES では乱流の大きなスケールの渦変動は直接解析し、格子で解像できない小スケール変動のみをサブグリッド(SGS)応力としてモデル化する。ここで、近年 Germano ら[4]の提案した**ダイナミック SGS モデル**は LES における乱流モデルパラメータを計算解の情報からダイナミックに最適化する考えに基づくもので、格子解像度に応じて DNS へ適切に漸近すること、各種乱流モデルに展開できることなど汎用モデルとしての利点を持つ。差分法 (FDM) や有限要素法(FEM)を用いた実用的計算法が提案され、剥離など複雑な工学問題への適用性が示されている。[5]

**燃焼流モデル** 燃焼流など主な対象とした複雑乱流場へのラージ・エディ・シミュレーション法の構築に関する基礎的研究[6]の成果として、予混合火炎および拡散火炎に対する基本的な乱流 LES モデルの提案と、数値検証が示されている。

マルチスケールを分離して乱流 LES を適用するとき、化学反応効果は直接解像されないサブグリッドスケールを通して流れ場に反映される。このとき、火炎のミクロスケール構造を flamelet 概念で近似し、マクロスケールへの効果を保存的なスカラー量の輸送モデルで表すのが効果的と考える。この解析モデルは予混合火炎や単純拡散火炎では個々に有効性が確認されているが、一般的な非予混合火炎の特徴を表現するには混合率と反応進行度の少なくとも 2 つの指標を同時に必要とする。その基本的な解析モデルの一つとして、理論燃空費を基準とし物性値を PDF モデルで評価する保存スカラー方程式と[7]、反応進行を flamelet 火炎面の伝播で似する G-方程式[8]の連成解析モデルを採用する。これらの乱流火炎 LES は、バックステップにより保持される予混合火炎[9]や円筒バーナ拡散火炎などの基礎的な問題では温度や流速の平均分布、乱れ分布の予測や、化学素反応に基づくデータベースを適用して得られる NOx などの反応生成物の分布予測[10]において有効性が検証された。また、中規模な実用 LES の事例としては、**吹き上がりバーナ火炎**[11]や、ガスタービン燃焼器の不均一燃空費分布をもつ**予混合燃焼**[12]に適用され良好な結果を得ている。しかし、サブグリッドスケールの flamelet 構造の間欠的分布や、ミクロスケールの火炎内部構造に対するグリッドスケールの影響については未解決な点が多いため、基礎的 DNS 研究の成果や時間平均モデルにおける理論検討を参考にいくつかの可能性を試行しつつある。

**粒子混相流モデル** 分散系混相流動に適用しうる普遍的な知見として、特に、気泡流、および、固気混相流に関して以下の知見を得ている。[13]

- 1) 気泡運動の詳細モデリングと LES 空間平均における分散相への寄与を考慮した気泡乱流

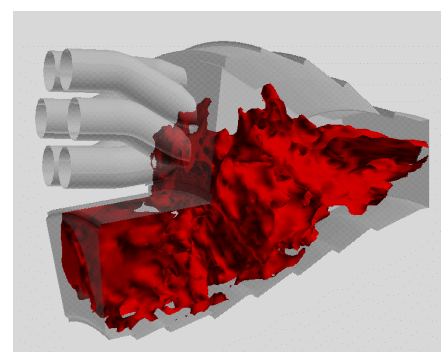
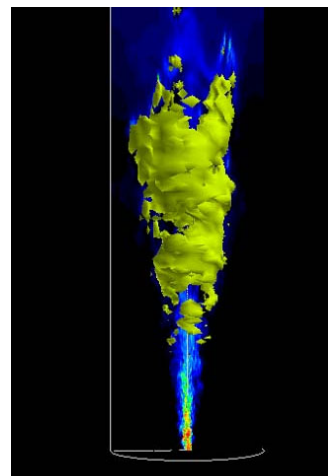


Fig.2 LES applications to combustion flows (above: lift-up burner flame, below: premixed d flame in a gas-turbine combustor)

LES モデルにより、気泡径の違いが乱流渦気泡輸送や浮力効果にあたえる影響が解析される。

2) 固気相間の相互干渉を考慮した乱流 LES モデリングによりサブグリッドスケールにおける散逸は適切にモデル化されている一方、グリッドスケール散逸機構については従来の粒子モデルでは必ずしも再現されない。

これらの結果から分散粒子混相乱流の LES モデリングの有効性が確認されるとともに、乱流現象と粒子分布生成の時間スケール、空間スケールの比が粒子-流体カップリングモデルとその解析法の最適化において考慮されるべきことが示された。そこで、雷ら[14]は粒子-流体カップリングにおいて異なるスケールや粒子間干渉などをも考慮した総合的な固気混相流解析モデルとして Full Way Coupling 法を提案するに至り、ダイナミック SGS に基づく定式化を示した。さらに、同様の運動力学に従うと考えられる液滴混相流（スプレー流れ）に対して蒸発と燃焼のモデル化を取り入れた液滴燃焼流予測モデルへの展開を図る。

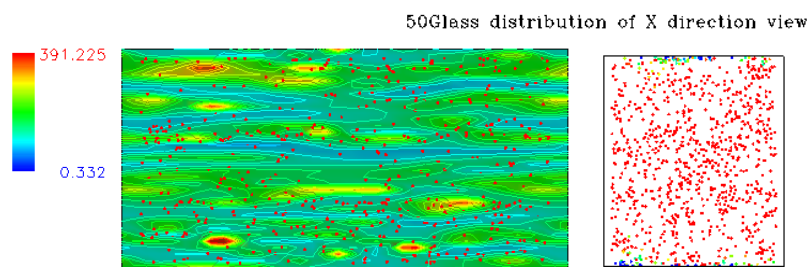


Fig.3 LES of Particle-laden turbulent channel flow

### 流体音モデル

空力騒音は流れの変動（渦の変形）から発生する、密度・圧力などの微弱な変動であり、原理的には流体の基礎方程式であるナビエ・ストークス方程式を直接数値積分することにより予測することが可能である。このような方法は空力騒音の直接計算と呼ばれている。しかしながら、ファンや自動車車両などから発生する空力騒音の場合、音として伝播する変動は、音源となる流れの変動に較べて遥かに小さく、かつ、流れの変動の空間スケールと伝播する音波の空間スケールも桁違いに異なるため、空力騒音の直接計算を工学問題に適用することは実用上不可能である。そこで、音源となる流れの変動と音の伝播とを分離して計算する手法を用いる必要がある。加藤ら[15]は、1990 年頃から LES による空力騒音解析手法の開発を行い、LES により計算された物体表面圧力変動、および、音の伝播を表す波動方程式の解(Curle の式)を用いて、遠距離場における空力騒音を予測する手法を提案した。特に、円柱等の二次元形状物体周りの流れから発生する空力騒音の予測に対しては、物体表面圧力変動の相関を考慮することが重要であること、ならびに、この相関を考慮した流体音の予測手法を提案し、円柱等の流れから発生する騒音スペクトルの定量的予測が可能であることを世界に先駆けて示した。

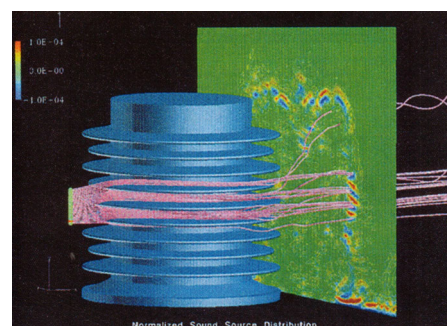


Fig.4 LES application for separated flow noise analysis

さらに、1995 年頃からは、分散主記憶型の超並列計算機による大規模な LES 解析を実現すべく、領域分割法に基づく、計算効率の高い並列流れ解析手法を開発した。この開発により、500 万要素から 1,000 万要素に及ぶ大規模 LES 計算を実用的な計算時間内で実現することが可能となると同時に、空力騒音の発生に大きく寄与する物体近傍の渦運動を選択的に解像する手法を開発した。[16] これらの開発により、新幹線車両に用いられるパンタグラフ碍子などの実機周りの流れに関する空力音源や発生する騒音スペクトルの予測が可能となっており、本プロジェクトに展開する基礎技術は構築されている。さらに、境界層から発生する騒音など、より空間スケールの小さい乱れから発生する空力騒音の予測を可能にすべく研究を進めている。

### 3 自動車分野における応用

#### 3.1 非定常乱流解析のニーズ

70 年代後半に車両空力設計に風洞試験を系統的に用いた先駆者である Ahmed と Hucho[17] は自動車車両の設計において考慮すべき流れの問題として、1) 空力特性を与える自動車周りの流れ、2) その他の諸機能（騒音、汚れなど）に影響を与える局所流れ、3) エンジンルームの熱流動、4) 車室内環境、を挙げている。また、エンジン設計においては 80 年代後半から主に可視化的手法によってシリンダ内の流れを直接観察する技術が開発され、ディーゼルエンジンの燃焼室形状の最適設計や GDI エンジンの噴霧制御法の開発などに応用されてきた。90 年代後半になって CFD コードが実用化され、これらの実験的手法に取り換わりつつある現在も、流れの予測・制御の主な対象はほぼ同じといえる。

本プロジェクトでは、LES に基づく非定常乱流解析の実用化コードを開発する。その最も重要な目的は、実車試験に先行する数値実験の実現といえる。乱流の 3 次元で非定常な非線形現象を直接的に数値計算する LES では、経験データベースに頼らない「予測」を行いうる。設計の CAE 化のなかで、従来の平均場モデル CFD が経験データベースの一部として組み込まれていくのに対して、LES 解析は現在も行われている風洞試験や実機試験のニーズに換わりうる可能性がある。その対象として、自動車を例とすれば、厳しい環境規制に対するエンジン内の燃焼流れの制御や、車室内環境に関わる空力音の低減、などの新しい技術開発や、新しい技術ニーズが強く求められる領域分野で、特に期待される。以下にこれらの課題を例にとって LES 適用の有用性を考えてみる。

#### 3.2 流体音

自動車走行の高速化や、空調ファンの小型・高流量化などに伴い、空気の流れから発生する騒音、すなわち、空力騒音の低減が、自動車室内の居環境を維持する上で解決すべき重要な技術課題となっている。これは、代表的な流れの速度の増大に伴い、空力騒音が急激に増大するためである。例えば、代表流速が 2 倍になっただけでも空力騒音は 100 倍近く増大する。このような低騒音化の要求に対して、これまでは主として実験的なアプローチにより対応が図られてきたが、このようなアプローチによる空力騒音の低減は限界に近づきつつあり、数値シミュレーションによる流体騒音の予測と低減に大きな期待が集まりつつある。自動車設計に関わる流体音の問題としては、1) 風きり音、2) 共鳴音、3) 空調ファン音 などがあげられる。



**風きり音**に関しては、A ピラーおよびドアミラー周囲流れの最適化のニーズが高い。これは、運転者、同乗者に近いサイドウィンドを通した音で、ユーザの要求が厳しいためである。このような剥離流れの非定常特性の予測については上記に述べたように LES の有用性は高い。一方、車両外装の流れは実験による要素試験やスケールモデル試験が難しく、特に、流体音を計測可能な実車スケール風洞試験が可能なケースは極めて限られる。よって、車両設計の CAE 化に際して、ある程度の計算コストを考慮しても、予測の信頼性が確保されるならば LES 非定常計算を採用する価値がある。実際の設計に際しては、従来の時間平均 (RANS) モデルによる平均流れ予測からの経験的な形状最適設計と、数値実験としての LES 非定常解析を補完的にこなうことになるだろう。

サンルーフ隙間やドアスリットなどの流れによる**共鳴音**の問題は、流れと音響場の干渉を解析せねばならず単純なせん断流れよりも予測が難しい。スケール分離の基本コンセプトに従えば、渦と壁面の干渉などの特徴的なメカニズムを抽出してモデル化することで、流れ場の非定常特性から音響場との相互作用を推定することが現実的な手法と考えられる。これに対しても LES の利点は大きい。

**空調ファン**に関しては、要素試験データを実機性能とを相関づけることができる程度でいう。よって、個々の設計に際しては経験データベースやそれに基づいた簡易予測モデルが有効であり、高価な詳細シミュレーションは常には必要ではないと思われる。一方で、一般機器としてのファン騒音の低減化はこの要素分野の主要な課題であり、LES はそのための基礎研究ツールとして期待できる。

### 3.3 エンジン内の流れ

自動車の心臓部であるエンジン設計において CFD 応用が積極的に行われてきたのは当然のことといえる。工学一般にも普及した CFD コード (STAR-CD、FIRE など) のいくつかは自動車エンジンを主な対象として開発されてきた。現在では、エンジン気筒、ピストン、吸排気ポート、バルブなどの諸要素を含む実機形状を再現した解析モデルが計算可能となり、噴霧や燃焼の解析モデルも導入が試みられつつある。ほかの CFD 応用例と同様、これらのエンジン流れの解析手法の現在の主流は RANS モデルに基づくものである。エンジンサイクルの解析に適用する際には、サイクル平均 (アンサンブル平均) された解を得ているものとする。実験においても、実機エンジン内の瞬時の 3 次元流れ分布を観察することは極めて困難であり、計測データの信頼できるサイクル平均値を予測評価の対象することは、従来の一般的なエンジン設計においては妥当であったといえる。

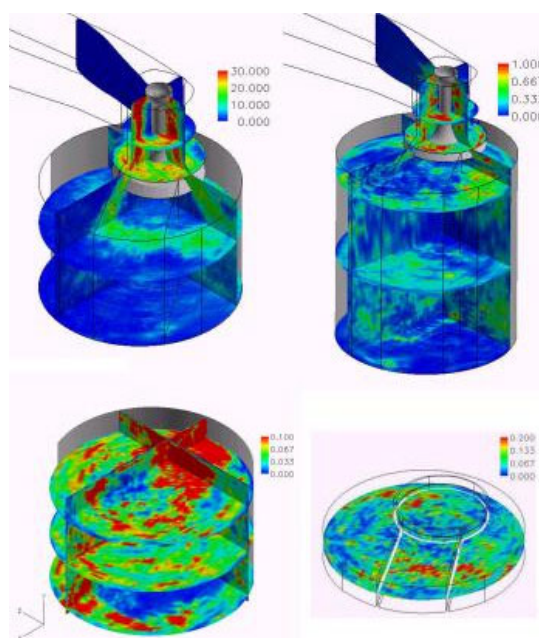


Fig.5 LES application of flows in motored engine (turbulent intensity development in the intake-compression process) [18]

最近、ディーゼルエンジンの燃焼室形状や GDI エンジンの噴霧制御などによって、エンジン内の流動分布と燃料混合状況を制御して、燃費向上と有害排気ガスの低減を両立する技術開発が行われている。一方で、PIV(粒子画像流速計測)や LIF(レーザ誘起蛍光法)などの可視化的手法によってシリンダ内の流れや燃焼・噴霧の分布を直接観察する技術が開発されてきた。これらの状況で、LES による非定常流れ解析は、新技術開発のニーズと、比較すべき計測データの高度化の両面から支持されていると考える。特に、エンジン流れに LES を適用する利点としては、

- ・ エンジン内流れをサイクル平均ではない非定常流れとして直接解析できる。これにより、ノッキングなどのサイクル変動に起因する現象メカニズムの解明につながる。
- ・ 乱流中の噴霧、燃焼過程を普遍性のある物理モデルで表すことができる。流れパターンや乱れ分布に依存しない一貫した予測モデルを使うことで、新しい機構・制御法や、アルコールなど代替燃料の導入に際しても適用可能となる。
- ・ NO<sub>x</sub>、すすなどの微量有害物質の生成予測に対しては、瞬時、局所の温度(濃度)分布の予測が比較的精度よく可能となる。
- ・ 吸排気系との連成解析や、アクセル急加減時の過渡応答解析など、より高度なエンジン性能設計への展開が容易。

などが挙げられる。エンジン流れ解析では、従来の RANS モデルに基づく手法においても、移動変形する複雑な流路形状と、燃焼にともなう複雑な物理現象を再現するために大きな計算負荷を要している。LES ではこれらの複雑現象のモデリングは単純化できることから、非定常計算のために計算負荷が大きいという欠点は、エンジン流れへ適用する際にはむしろ緩和すると期待される。

#### 4 おわりに

本稿で紹介した流体解析ソフトウェアの開発を含め、本プロジェクト「戦略的基盤ソフトウェアの開発」では、高度なシミュレーション・ソフトウェアが実際の工学設計や教育研究の現場において普及、実施されることを最大の目的と考えている。そこで、本プロジェクトで開発されるプログラムや技術資料などは公開を前提とし、それらを活用した民間企業・大学・研究所などによる実用化、商業化についても強くこれを期待している。また、ソフトウェア技術開発においては、技術者の養成、知識の伝達・継承が重要と考えており、多様な分野、世代、立場から本プロジェクトへの参加を広く求めたい。これらの趣旨に、多くの賛同をいただけることを切望する。

#### 参考文献

- [1] 文部科学省ホームページ <http://www.mext.go.jp/>
- [2] 東京大学生産技術研究所 計算科学技術連携研究センター ホームページ <http://www.iis.u-tokyo.ac.jp/research/renkei.html>
- [3] 「乱流解析」数値流体力学シリーズ 3、東京大学出版会、pp
- [4] Germano, et. al. (1991) Phys. Fluids A3(7), pp1760-1765



- [5] 大島、小林、谷口 (1998) 生産研究 (東京大学生産技術研究所報) 50-1, pp. 31-34
- [6] 小林敏雄、科学研究費補助金 (11305017) 「LES による乱流燃焼火炎解析法の開発とその評価」報告書(2002)
- [7] Peters, N. (1986) 21<sup>st</sup> Symposium of Combustion, pp. 1231-1250
- [8] Muller, C. M. et. al. (1994) 25th Symposium of Combustion, pp. 1099-1106
- [9] Park, N. (2001) Turbulence and Shear Flow Phenomena 2<sup>nd</sup> Intern. Symposium, pp. 291-296
- [10] 谷口ほか(2001) 第 17 回数値流体力学シンポジウム, C10-4
- [11] Hirohata, M. (2001) 3<sup>rd</sup> Intern. Symposium on Advanced Energy Conversion System & Related Technologies (RAN2001, Nagoya)
- [12] 今村ほか(2001) 第 16 回ガスタービン秋季講演会
- [13] 小林敏雄、科学研究費補助金 (08405017) 「LES モデルによる混相流数値解析法の開発と評価」報告書(1998)
- [14] LEI, N. (2001) Turbulence and Shear Flow Phenomena 2<sup>nd</sup> Intern. Symposium, pp. 111-116
- [15] 加藤ら、(1994) 機械学会論文集 B60-569, pp. 126-132
- [16] 加藤、(2000) 生産研究 (東京大学生産技術研究所報) 52-1, pp. 3-8
- [17] Ahmed, S. R. & Hucho, W. H. (1976) SAE Paper 770390
- [18] Zhang, H. et. al. (2000) FISITA World Automotive Congress (Seoul) F2000A008