

研 究 解 説

次世代流体解析システム

Fluid Dynamics Simulation: The Next Generation

谷 口 伸 行*・加 藤 千 幸**・寛 雅 行***・張 会 来****

Nobuyuki TANIGUCHI, Chisachi KATO, Masayuki KAKEI and Huilai ZHAUG

1. は じ め に

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、CO₂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。

本プロジェクトでは、「次世代流体解析システム」の開発として、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主な対象にLESを基礎とする数値解析法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。ここでは、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代表的な工学問題として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、新しい設計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. ラージ・エディ・シミュレーション (LES)

2.1 サブグリッドスケール (SGS) モデル

ラージ・エディ・シミュレーション (LES) は、現在のところ、乱流 DNS の最も有力な近似モデルと考えられている。LES では格子フィルターサイズにより、乱流場を GS (Grid Scale) 成分と SGS 成分に分けて解析する。すなわち、GS 成分は直接数値計算できる成分であり、SGS 成分はその影響をモデル化すべき成分である。フィルター操作した運動方程式、つまり GS 成分の輸送方程式と連続方程式は、

$$\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_j}{\partial x_j^2} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad \dots\dots\dots (2)$$

と書ける。ここで、SGS 応力項 $\tau_{ij} = \bar{u}_i \bar{u}_j - \bar{u}_i \bar{u}_j$ がモデル化すべき項であり、たとえば、渦粘性仮定に従えば、

$$\tau_{ij} = 2\nu_{SGS} \bar{S}_{ij} + \frac{1}{3} \tau_{ii} \delta_{ij} \quad \dots\dots\dots (3)$$

とかかれ、渦粘性係数は代表的な SGS モデルであるスマゴリスモデル¹⁾により

$$\nu_{SGS} = (C_s \Delta)^2 (2\bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij})^{1/2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

*東京大学生産技術研究所 情報・システム部門

**東京大学生産技術研究所 人間・社会部門

*** (株) 富士総合研究所

****アドバンスソフト (株)

と与えられる。このモデル化は、長さスケールに格子サイズ Δ を導入することを除いては、一見して時間平均 (RANS) の渦粘性モデルと類似している。しかし、時間平均における渦粘性が乱流拡散の効果を代表しているのに対して、LES においては GS スケールから SGS スケールへの乱流エネルギー散逸を定めていることが大きな違いである。それらの値は実際に数 10 倍ほどの違いがある。

SGS モデルのもう一つの重要な提案として Bardina ら²⁾ のスケール相似モデルがある。ここでは、SGS 成分 u' をそのフィルタ値 $\bar{u}' = \bar{u} - \bar{u}$ で近似すると、(時間平均と異なる) 空間フィルタの性質から 0 ではないこの値は GS 解から直接算出できる。この近似を SGS 応力に適用すると、

$$\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j \dots\dots\dots (5)$$

を得る。DNS データによるアプリオリテストでは、スマゴリンスキーモデルでは表現できない瞬時 SGS 応力に対しても良い近似を与えることが示されている。しかし、実際の解析にスケール相似モデルを直接適用すると SGS 応力によるエネルギー散逸を適切に予測できないため、スマゴリンスキーモデルと組み合わせた混合モデルとして用いられる必要がある。スケール相似モデル $\bar{u}' = \bar{u} - \bar{u}$ が SGS 変動速度の適切な近似であることは確かであり、乱流と連成するようなスカラー輸送や反応モデルを導出する際の変動スケールの評価に際しては有効なモデルといえる³⁾。

ここで、SGS モデルの最近の有力な研究成果の一つとしてダイナミック SGS モデルを取り上げておく。上述の SGS モデルはその基礎として発達した一様乱流を仮定している。しかし、壁面を含む実際の流れでは必ずしもすべての領域でこの仮定は成り立たず、たとえば、モデル係数 C_s の最適値も流れ場に依存して必ず定数ではないことが指摘されている。これらの問題に対して Germano ら⁴⁾ はモデル係数 C_s を数値解から算定するダイナミック SGS モデルを提案した。ダイナミック SGS モデルはチャンネル乱流、自由せん断流、格子乱流などに適用されスマゴリンスキーモデルの欠点を改善することが確かめられている。

2.2 ラージ・エディ・シミュレーションの工学的意味

非定常性、3次元性の強い乱流場や、回転系や浮力場に生じる外力効果、圧縮性の影響などを一般的に数値シミュレーションで扱おうとすると、流れの基礎方程式—Navier-Stokes 方程式—に基づいた直接計算 (DNS) にかかる期待は大きい。しかし、工学設計が必要としている流れに関する情報—主に統計平均的な特性や特定の周波数応答—に対して DNS の扱う自由度 (空間、時間の解像度を考慮すると Re 数の 3 乗のオーダー) はあまりにも大きすぎ、将来コンピュータ性能の飛躍的な向上を見たとしても、コスト

パフォーマンスを考える限り何らかの近似モデルが有用であることは間違いない。

ラージ・エディ・シミュレーション (LES) は、現在のところ、乱流 DNS の最も有力な近似モデルと考えられている。この観点から、LES モデリングへの要求は、

- ・充分な解像度の格子では DNS に収束すること、
- ・充分高い Re 数において要求される解像度が、DNS より低いオーダーであること、

といえる。格子に対する収束が速いほど、 Re 数に対する指数が低いほど優れたモデルと評価できる。スマゴリンスキーモデルが風上差分のみを用いた解析モデルよりも優れると考える根拠もここにある。

一方、予測すべき対象が統計平均場のみであるならばレイノルズ平均モデル (RANS) が原理的に優る。実際に、工学設計のパラメータスタディには有効な適用例が多数報告されている。これに対して本来 DNS の近似である LES には

- ・時間・空間変動が直接的に解析できる、
- ・モデル定数の数が少なく、適用範囲が広い、

の特徴がある。従来、LES の研究は主に基礎的な流れ場での検証に行われてきたが、工学的な応用を考えた場合には、その特徴を必要とする対象にこそ LES の適用が期待される。反応流、混相流、電磁性流などの複雑乱流や流体音の解析では物理現象の基本的メカニズムが不明確であるため、原理モデルにさかのぼった解析 (いわゆる、DNS (Direct Numerical Simulation) = 直接数値解析) が試みられている。LES では、これらの解析法を数学的に近似する直接的なモデリングが可能であるため、様々な対象に同じアプローチで展開できると考えられる。また、ファン

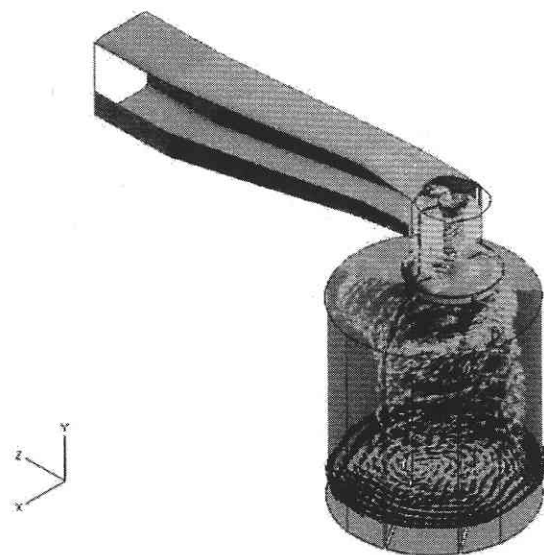


図1 エンジン気筒内の流れの LES 解析例⁶⁾
(瞬時の断面速度分布)

や物体後流の流体音⁵⁾や、ピストンエンジンのサイクル変動⁶⁾(図1)など、本質的に非定常な問題に対しては時間平均型モデルの適用が制約されることから、乱流 LES の実用化が期待される。

しかしながら、乱流 LES を現在提案されている物理モデルに忠実に(すなわち、良い予測精度を保って)解析を行うと DNS の 1/10 程度の計算負荷を要する。これは、DNS に対しては十分小さいが、工学応用として高 Re 数への展開を考えるとまだ過大である。そのボトルネックとして、

- ・壁面の近似モデル、
 - ・流入境界、エントレイメント境界での乱れの評価、
 - ・高 Re 数での数値不安定に対する計算スキーム、
- などが挙げられる。予測すべき物理現象の特定とその数学的検討にブレークスルーの道があると考えられる。

壁面近傍における乱流の非等方性や粘性効果はダイナミック SGS モデルや乱流構造を考慮した SGS モデルの改良によって評価されうるが、それが有効であるのは壁面粘性底層スケールの渦構造が GS 成分として格子解像できる場

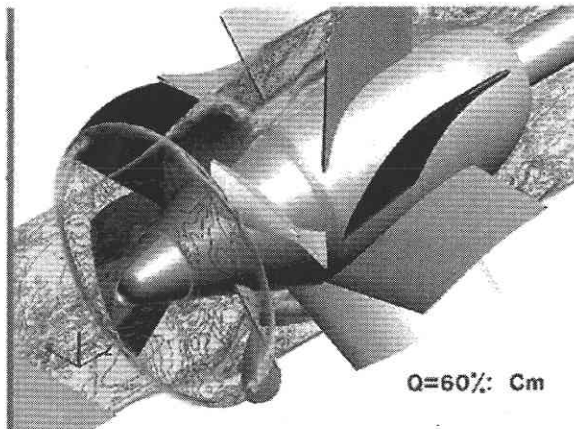


図2 斜流ポンプ内流れの LES 解析例⁸⁾
(瞬時の渦度分布)

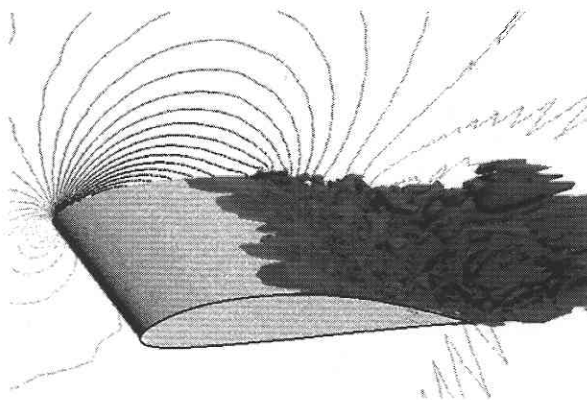


図3 層流翼の剥離流れの LES 解析例
(瞬時の渦度等値面分布)

合に限られる。航空機翼のような高レイノルズ数の乱流境界層を LES で再現することは現時点ではほとんど現実的でない。そこで、境界層流れに対して高精度に検証された時間平均(RANS)モデルを壁面近傍に適用する試みが検討されている⁷⁾。

一方、剥離流れや噴流など自由せん断層の予測について LES は実用問題に対してもかなり有望と思われる。たとえば、斜流ポンプの低負荷時の旋回失速⁸⁾(図2)や、境界層が層流剥離する条件での風車翼回りの剥離流れ⁹⁾(図3)に対して LES による良い予測が報告されている。これらの問題では、壁近傍のような平衡流れと異なり乱流エネルギーの散逸の予測精度が流れ全体の性状にあまり影響を及ぼさないと考えられる。そのため、GS 成分の比較的大きなスケールの変動が精度良く捕らえられるならば LES は良好な結果を与える。

しかし、自由せん断流れは外乱に対して敏感であり、数値解析においても計算不安定を招きやすい。たとえば、角柱回りの流れでは前縁の角点から圧力振動が伝播して数値不安定の原因となるため、非常に細かい格子解像度か人工的な安定化スキーム(=数値散逸)を必要とする¹⁰⁾。後者は、しばしば、本来の LES モデルの散逸を超え、統計平均解にも影響を与える。これらの問題に対する一般的かつ合理的な答えはまだない。精度を要求しない領域では計算の堅牢性を重視するならば、低い解像度においてレイノルズ平均型モデルに漸近させるハイブリッドモデルなどが検討に価しよう。また、流入条件の合理的な設定方法も重要な課題として残されている。¹¹⁾

3. 複雑な非定常流れの解析モデル

3.1 流体音響の解析モデル

流れから発生する空力音の低減は、航空機や流体機械、高速鉄道車両などにおける主要な開発課題の一つとなっている。近年の計算機性能の向上と流れの数値解析手法の高

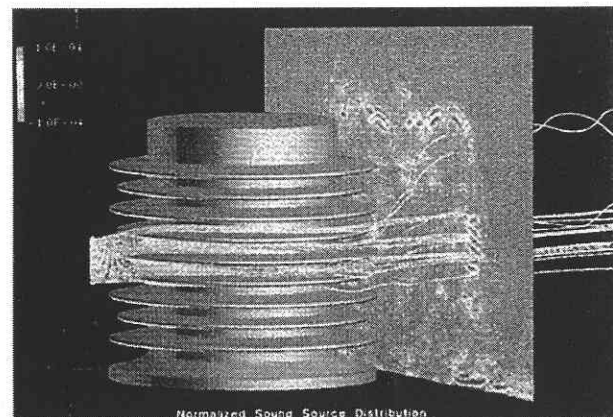


図4 LES による高速車両パンタグラフの碍子周り流れと流体音源の解析¹²⁾(瞬時流線と断面音源分布)

度化に伴って、空力音の数値予測が可能となりつつあり、低騒音設計の重要なツールとして実用化が期待されている。¹²⁾

空力音の数値予測手法は、圧縮性 Navier-Stokes 方程式の直接計算に基づく直接解法と、Lighthill¹³⁾ により導かれた音響学的類推に基づいた分離解法の二種類に分けることができる。直接解法は流れ場と音場の解を同時に求めることができ、実用化されれば工学的な意義は大きい。しかし、変動および空間スケールが大きく異なる流れ場と音場の解析を同時に行うために、極めて高精度・大規模な計算を必要とすることから、現状では適用範囲が限られている。その一方で、分離解法では、音源（流れ場）と音場を分離して解析するため、流れ場と音場が干渉する場合には適用できないものの、直接解法に比べて計算負荷を大幅に軽減することが可能である。

分離解法の基礎式は、圧縮性 Navier-Stokes 方程式から導かれた Lighthill の式である。これに対して流れ中に境界面（物体）が存在する場合の一般解が Curle の式¹⁴⁾ および Ffowcs Williams-Hawkings の式¹⁵⁾ として求められている。両式は基本的に等価な式であり、音の観測点に対して物体が静止している場合には前者、運動（移動）している場合には後者の式となる。さらに、この両式において、実用的には多くの場合に成立する、i) 音に対する物体近傍の圧力場の影響が無視できる遠方場（acoustic far field）である、ii) 音源領域（物体）が音の波長に対して十分小さいコンパクト（acoustically compact）な音源である、という二つの仮定をおくことによって式を簡略化することができ、流れの解析で求めた物体表面の静圧変動を音源として与えることによって空力音を求めることができる。（図 4）

空力音は、低レイノルズ数の層流渦放出（vortex shedding）によるピーク性の音と、高レイノルズ数の乱流現象による広帯域の音に分けることができるが、低マッハ数の流れにおける層流渦放出による音、および、比較的大規模な流れの剥離により発生する音に対しては、非圧縮性 Navier-Stokes 方程式の Large Eddy Simulation (LES) により物体表面の静圧変動を求め、これを音源として、前述の二つの仮定をおいた Curle の式あるいは Ffowcs Williams-Hawkings の式に与えることで、発生する空力音のスペクトルを数値的に予測することが可能となっている。

しかし、例えば流れの乱流現象に起因する広帯域音の高周波成分に対しては、前述したコンパクト音源の仮定が成り立たなくなる。音源の非コンパクト性が無視できなくなる場合には、分離解法でも音源（流れ場）の解析あるいは音場の解析どちらかの段階で、物体近傍場における流体の圧縮性が音に及ぼす影響を考慮した解析を行う必要がある¹⁶⁾。音源の非コンパクト性が問題となる典型的な例は、平板や翼などの後縁から発生する音（trailing edge noise）

であるが、このような、高周波の広帯域音に対する汎用的な数値解析手法はまだ確立されていないため、今後、有効な手法を開発していく必要がある。

3.2 燃焼流れの解析モデル

多くの工学的な燃焼流れでは、流れの変動に対して化学反応素過程の時間スケールが数桁小さく、燃焼反応に関しては準平衡として一段階の簡略化した反応モデルが有効とされる。さらに、レイノルズ数が大きいときには乱流中でも層流火炎がしわ状に変形するとみなす flamelet（層流火炎片）モデル¹⁷⁾ が成り立ち、燃焼状態は主に乱流変動によって支配されると考えられる。ここで、flamelet モデルは燃焼反応が火炎面のみで生じると仮定しているので、このモデルに従えば火炎面の移動を追跡することで燃焼場が予測できる。予混合火炎の場合には、火炎面の追跡に反応進行率を変数とした微分方程式を解く計算法を適用して層流や乱流 DNS がいくつかの基本的な燃焼場で検証されている。たとえば、保存スカラー式と予測 PDF モデルを用いた乱流拡散火炎 LES に関する研究^{18,19)} が行われており、同軸噴流バーナなどの拡散火炎に対してその有用性が示されている。一方、予混合火炎に対しては、火炎面の反応進行率を表す G 方程式 flamelet モデルが Park²⁰⁾ により検証され、乱流予混合火炎の予測に良好な結果を得ている。

しかし、実際の大型燃焼器などに見られるように火炎が浮き上がりを伴うような場合、このタイプのモデルは混合即燃焼を表現するため火炎基部に存在する部分予混合火炎を表現できず、実機バーナ火炎の保炎の問題に対する適用性に乏しい。火炎の浮き上がりにおいて、噴流の未燃領域と既燃領域を表現するモデルの拡張が必要になる。Müller²¹⁾ はこの問題に対し火炎基部の部分予混合火炎の火炎伝播性を再現するため予混合火炎解析モデルである G 方程式を追加し、混合分率方程式と G 方程式により浮き上がり火炎の再現を試み、時間平均モデルにおいて浮き上がり距離の予測に成功している。このように拡散火炎と予混合火炎の双方の性質を持つ複合火炎に対し、2つの火炎方程式を解く手法（ここでは 2 scalar flamelet モデルと呼ぶ）は、LES においても有効な解析モデルであり、弘畑²²⁾ によって吹き上がりバーナ火炎の予測がなされている。（口絵）また、このアプローチは燃空費の異なる多段ステージの燃焼流れなど様々な複合火炎へも適用可能である²³⁾。（図 5）

これらの flamelet モデルの利点は、燃焼反応の詳細に関わらず乱流燃焼速度の評価が正確であれば火炎状態の基本的形状（たとえば、浮き上がり距離）の予測が可能であることで、LES と組み合わせれば比較的簡便な解析モデルによって乱れと火炎の干渉による動的な保炎状態の再現や火炎振動の直接的な予測も期待できる。一方、燃焼反応の詳細スケールは予測された火炎内部構造として局所的に準平

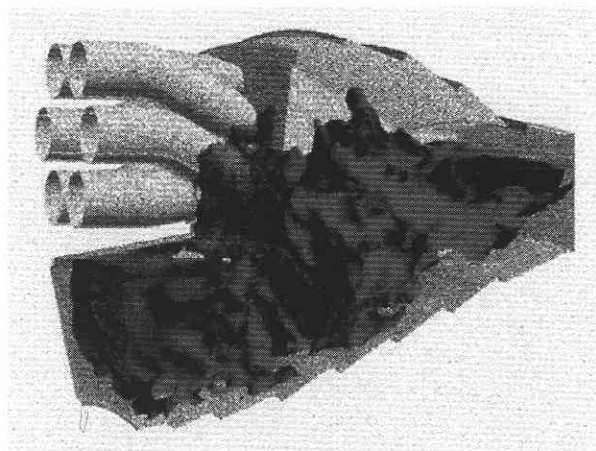


図5 ガスタービン燃焼器の乱流予混合火炎の LES 解析
(火炎面の瞬時分布)

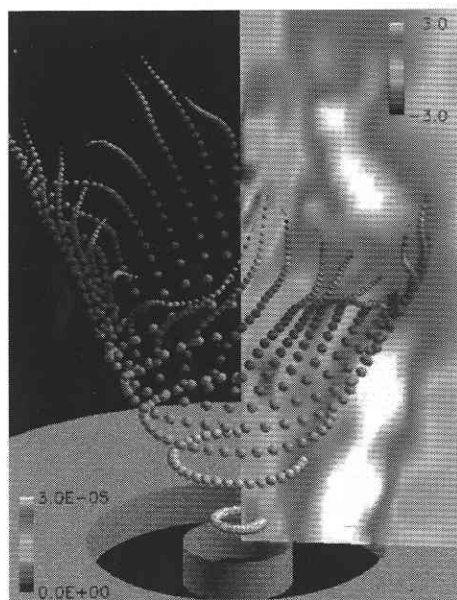


図6 LESによる旋回流中の噴霧液滴の挙動の予測
(瞬時の粒子分布と断面主流速度)

衡を仮定して解析することができ、理想化された実験や直接シミュレーションの結果をデータベースとして用いて flamelet モデルの改良が図られる。

本プロジェクトでは、この考え方を複合乱流火炎の LES モデルとして採用して、その有用性の検討を行っている。

3.3 粒子混相流の解析モデル

スプレー流れ、固気混相流、気泡流などの小さく多数の分散系粒子が混相する流れに対しては、粒子運動を Lagrange 的に取り扱う手法が有効である。LES との連成モデルとしては、雷²⁴⁾ が粒子-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 法を提案し、ダイナミック SGS に基づく定式化を示した。このアプローチは同様の運動力学に従う分散系粒子の解析法として有効であり、たとえば、分裂、蒸発、燃焼などの局所モデルを取り入れることで液滴燃焼流（スプレー流れ）の予測モデルが導出される。

LES 解析の一例として、燃料噴霧にしばしば用いられるホローコーン型噴霧と旋回を持つ流れにおける噴霧液滴の挙動の様子を示す。ここでは粒子の運動には抗力のみ考慮し、蒸発は準定常的に起こるとして D^2 則に従うと仮定している。雰囲気より速い速度で噴射された液滴は最初は液滴自身の速度によって運動しているが、下流において速度と粒径が減少するに従い雰囲気の影響を強く受けて旋回しながら蒸発していく様子が捉えられている。(図6)

4. 次世代流体解析システムの基本設計

4.1 LES 解析コードのコンセプト

実際の流れは、上に述べた乱流、燃焼流や流体騒音に典型的にみられるような非線形、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。(図7)

- 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

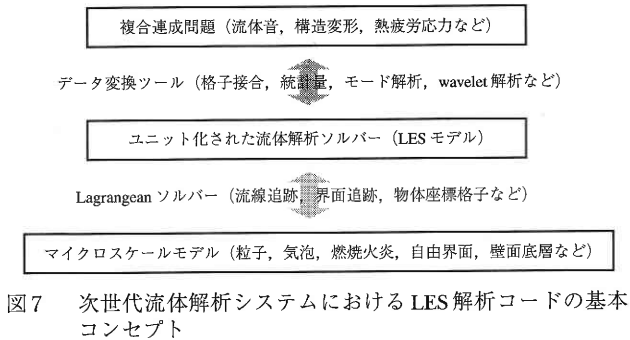


図7 次世代流体解析システムにおける LES 解析コードの基本コンセプト

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研究され、有用な LES モデルが開発検証されている。
- 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、物体近傍の境界層底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。
- 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、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。ただし、燃焼・混相流に伴う密度空間変化や流体音伝播などを扱うための解法、モデルの拡張を行う。

4.2 開発システムの内容

上記の開発目標を満たす解析システムとしてラージ・エディ・シミュレーション (LES) 法を基礎とする非定常解析法およびその実行に必要なプログラムツールを実装する。実用問題への広範囲な適用を想定し、本プロジェクトで開発する解析コードは、

- 1億格子点相当の非定常流れ数値計算を実現することで、機器開発において CAD データと同程度の解像精度

表1 次世代流体解析システムの LES 解析ソルバーの主な機能 (2003 版)

コード名 (バージョン, 公開予定)	FrontFlow - blue (Ver.1.0 2003.5)	FrontFlow - red (Ver.1.0 2003.5)
対象流れ	非圧縮性流れ	非圧縮性流れ (低マッハ数近似)
離散化法 (要素形状)	有限要素法 (六面体)	有限体積法 (六面体、三角柱、四角錐、四面体)
計算アルゴリズム	フラクショナルステップ法 時間安定化スキーム 領域分割並列解法	フラクショナルステップ法 /改良 SIMPLE 法 領域分割並列解法
乱流モデル	LES (ゲイミック ストロング)	LES (ゲイミック ストロング, ゲイミック ストロング flux) k-ε 法
解析モデル	音場解析 Lighthill-curl 連立方程式 構造連成 剛体運動との耦合能力プリング	燃焼 総括反応/素反応/混合モデル flamelet 火炎 構造熱伝達

をもった流れ場の予測と先行設計を可能とし、

- 流れの非定常性の適切なモデル化によって、従来予測設計の困難であった複雑系の問題—特に、動力・エネルギー機器の設計において多くの応用ニーズがある燃焼流・混相流、および、車両・ターボ機械・建築構造などに重要な流体音や流れ—構造干渉—の数値予測を可能とする。

ことを目標とする。

本プロジェクトで開発する解析システムでは流体解析のみならず、構造・振動・伝熱・疲労などの関連シミュレーションと連成解析、および、実験データベースや設計システムと協調した運用を技術者が容易に実施できることを設計の基本指針とする。そのため、解析アルゴリズムやデータ入出力に関してはできる限り汎用性、公開性を重視した設計を行う。また、工学における実証問題を扱うことを前提として、大規模計算を効率よく実施する基本的な計算機環境として並列計算資源と分散的データベースを想定した設計を行う。想定する計算機環境は以下のとおり、

- 小・中規模問題においては SMP 型、大規模問題においては分散型のメモリ仕様を有した汎用並列計算機
- オペレーションシステムとしては Linux または、それと同等の機能をもつシステム
- プログラム言語は Fortran90 および C++, 並列計算には MPI を標準的に用いる

上記の仕様に従って、本プロジェクトでは「次世代流体解析システム」の核となる 2 種の解析ソルバーを開発している²³⁾。それらの機能概要を表に示す。

5. お わ り に

本稿で紹介した流体解析ソフトウェアの開発では、高度な流体シミュレーション・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。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。そのために、本プロジェクトでは、次世代流体解析ソフトウェア研究会を発足し、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て LES 実用化に関しての情報交換、データ蓄積を進めている²⁵⁾。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。

(2003 年 3 月 24 日受理)

参 考 文 献

- 1) J. Smagorinsky, Mon. Weather Rev. 91 (1963) 99-164
- 2) J. Bardina, "Improved turbulence models based on large eddy simulation of homogeneous, incompressible turbulent flows" Ph. D. Thesis, Stanford Univ. (1983)
- 3) 坪倉, 小林, 谷口, 生産研究 52-1 (2000) 43-46
- 4) M. Germano, U. Piomelli, P. Moin and W. H. Cabot, Phys. Fluids A 3 (7) (1991) 1760-1765
- 5) 加藤ほか, 生産研究 53-1 (2000) 37-40
- 6) H. Zhang, et. al., Large Eddy Simulation of Motored Engine, FISITA World Automotive Congress, A 008 (2000)
- 7) 小林, 谷口, 小林, 機械学会論文集 B 66-651, 2780-2787 (2000)
- 8) 加藤ほか, 生産研究 53-1 (2000) 37-40
- 9) 木枝ら, 機械学会論文集 B 68-676, pp. 3302-3309, (2002)
- 10) Kogaki T. 他, (1995), Math. Modelling of Turbulent Flows, 211-216, Japan Soc. of Comput. Fluid Dynamics 小垣ら, 機械学会論文集 B 65-633, pp. 1559-1567, pp. 1568-1576 (1999)
- 11) 村田ら, 機械学会 2001 年次大会 (2001)
- 12) 加藤, 生産研究 52-1 (2000) 3-8
- 13) M. J. Lighthill 1952 *Proceedings of the Royal Society A* 211, 564-587.
- 14) N. Curle 1955 *Proceedings of the Royal Society A* 231, 505-514.
- 15) J. E. Ffowcs Williams and D. L. Hawkings 1969 *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 264, 321-342.
- 16) M. S. Howe 1999 *Journal of Sound and Vibration* 225 (2), 211-238.
- 17) S. Menon (1996). Large-eddy simulation of combustion instabilities. In proceedings of the Sixth International Conference on Numerical Combustion. New Orleans, Louisiana, March 4-6
- 18) Pitsch, H. and Steiner, H., Phys. Fluids 12, (2000), pp. 2541-2533
- 19) Hirohata, M., Itoh, Y., Tsubokura, M., Taniguchi, N. and Kobayashi, T, Proc. of The 4th JSME-KSME Thermal Engineering Conference, (2000), Kobe, vol. 3, pp. 151-156
- 20) 朴, 小林, 谷口, 機械学会論文集 B 67-659, 1609-1616 (2000)
- 21) Müller, C. M., Breibach, H. and Peters, N., 25 th Symp. of Combustion (1994), pp. 1099-1106.
- 22) 弘畑, 谷口, 小林, 生産研究 54-1, (2002), pp. 13-17
- 23) T. Tsuru, et. al, (2002) "Numerical simulation of flame propagation in a staged combustor" ASME Turbo Expo 2002 (Amsterdam).
- 24) 雷, 谷口, 小林, 機械学会論文集 B 68-666, 62-69 (2002)
- 25) <http://www.fsis.iis.u-tokyo.ac.jp/theme/dynamics/users/>