

ガスタービン燃焼器の高精度シミュレーション — RANS 法, U-RANS 法および LES 法の評価 —

Simulation Method for Gas Turbine Combustor with High Precision

— Evaluation of RANS, U-RANS and LES —

内 田 正 宏	技術開発本部基盤技術研究所熱・流体研究部	博士 (工学)
RIECHELMANN Dirk	技術開発本部基盤技術研究所熱・流体研究部	主幹 博士 (工学)
須 田 俊 之	技術開発本部基盤技術研究所熱・流体研究部	課長 博士 (工学)
藤 森 俊 郎	技術開発本部基盤技術研究所熱・流体研究部	部長 博士 (工学)

CAN 型燃焼器を対象に RANS 法, U-RANS 法および LES 法を用いた数値解析を行い, 実験における出口温度分布との比較からその解析精度を評価した. 解析の結果, 燃料とスワラ空気との混合や希釈空気との混合など, せん断力が大きい部分での混合状況が計算手法によって異なることが示された. 混合による温度の均一化を最も精度良く評価できたのは LES 法であり, 次いで U-RANS 法であった. この結果, 実験結果とのパターンファクタの比較においても, LES 法の精度が最も良いことが示された.

The gas turbine can combustor is simulated with three different methods, namely RANS, U-RANS and LES. The accuracy of the results is evaluated by comparing the exhaust temperature distributions with experimental data. The results reveal that the mixing of fuel with swirling air and/or dilution air is differently reproduced by the various methods, especially in regions of strong shear. The LES approach shows best performance in reproducing the effect of mixing on the temperature distribution, and the U-RANS method follows. Consequently, LES shows the best agreement with the pattern factor determined experimentally.

1. 緒 言

近年の計算機性能の大幅な向上によって, 大規模数値計算が研究開発の有効な手段として活用されている. 従来, 実用的な規模の計算では, 時間平均的な流れ場を仮定したレイノルズ平均モデルによる RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) 法数値計算が行われてきた. 一方, より高精度な計算手法の適用によって予測精度を向上させる取り組みも行われており, 注目を集めている. 最近の適用事例としては, RANS 法による非定常計算 (Unsteady-RANS 法: 以下, U-RANS 法と呼ぶ) によって, RANS 法ではとらえられない非定常現象をとらえることで精度を向上させる取り組み⁽¹⁾や, より高精度なモデリングに基づく LES (Large Eddy Simulation) 法によって予測精度を向上させる取り組み⁽²⁾などがある. 特に LES 法の適用事例は多く, 気体, 液体および固体などの各種燃料について, ささまざまな燃焼場に適用した事例が報告されている^{(2)~(5)}.

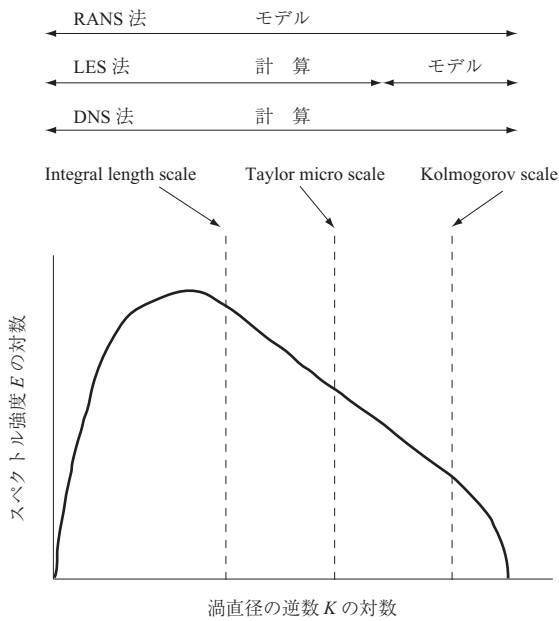
一方で, 大規模かつ複雑な形状をもつ実燃焼機器への適

用事例は依然として少なく, また実験結果との対比による十分な精度の検証がなされているとはいいがたい. 今後, 高精度な計算手法を燃焼機器の研究開発へ適用するためには, ささまざまな燃焼機器への適用による精度検証の蓄積が重要になる.

本稿では, ガスタービンの CAN 型燃焼器を対象として, RANS 法, U-RANS 法, LES 法を用いて燃焼数値計算を実施し, 実験結果との比較から各解析手法の精度について検証した結果を報告する.

2. 乱流場の解析手法

乱流場の解析手法は, 数値計算で解像される渦スケールとモデル化の手法によって, 3 種類の代表的なモデルに分類される. 乱流場中の渦スケール (直径の逆数 K) と流れ場の局所的な乱流エネルギー (変動流速 V' がもっているエネルギー $(V')^2/2$) のスペクトル強度 E の関係を **第 1 図**に示す. RANS 法では, すべてのスケールの渦に対して, そのエネルギーをモデルによって記述する. LES



第 1 図 乱流場における渦スケールと乱流エネルギー
 Fig. 1 Turbulent energy vs. eddy size in turbulent flow field

法では、Taylor micro scale 程度の渦まで直接計算し、それより小さな渦に対してのみモデルを使用する。

一方で DNS (Direct Numerical Simulation) 法では、すべてのスケールの渦を直接計算するため、モデルを必要としない。各計算手法間の差異は、渦スケールとエネルギーの相関の記述にモデルを必要とするかの点にあるが、計算では解像する渦スケールによって必要とされる格子サイズが異なるため、計算格子数に大きな違いが生じる。RANS 法では、すべてのスケールの渦をモデル化しているため、積分スケール程度の格子サイズでの計算が可能である。しかし、LES 法、DNS 法では、それぞれ Taylor micro scale、Kolmogorov scale の渦を解像する必要があるため、それぞれのスケールよりも小さなサイズの格子を使用する必要がある。この違いによって LES 法や DNS 法では RANS 法に比べて格子数が増加し、計算コストが大きくなる。近年の計算機性能の向上によって LES 法については実用的な燃焼機器に適用できる程度の計算コストに収まるようになってきた。しかし、DNS 法では格子数が飛躍的に増大するため、実用的な燃焼機器の数値解析に適用するのは依然として困難である。

渦スケールのモデル化に関しては、RANS 法と LES 法に相違がある。LES 法が非定常計算を前提としているのに対し、RANS 法では支配方程式を時間平均化しているため、乱流渦によって生じる流れ場の変化を計算することができない。しかし、この定式化によってすべての非定常な変化を平均化できるわけではない。そこで RANS 法で

は記述できない非定常な変化をとらえる必要がある場合には、流れ場の時間変化についても現象を再現することができる U-RANS 法が使用される。U-RANS 法は非定常現象の解析に対して優れた利点があるが、計算時間は増大する。

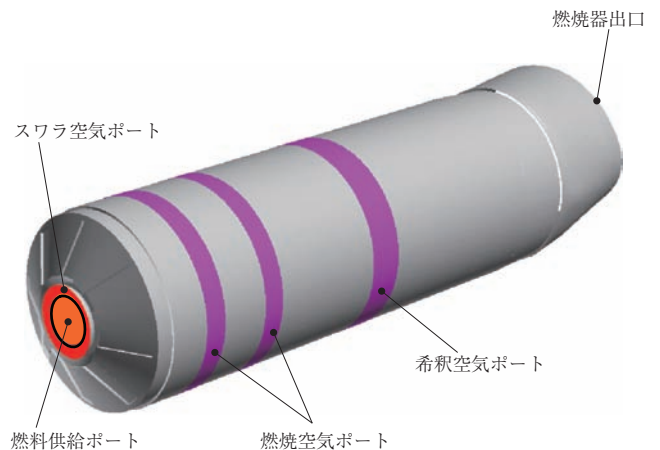
3. 数値計算手法

本研究ではすべての数値計算を汎用熱流体解析コード FLUENT によって実施した。RANS 法、U-RANS 法に使用した解析手法は同一であり、乱流モデルに Standard $k-\epsilon$ モデルを使用し、反応モデルには Eddy Break Up モデルを使用した。LES 法については、サブグリッドスケールモデルに Dynamic Smagorinsky-Lilly モデルを使用し、反応モデルには Eddy Break Up モデルを使用した。

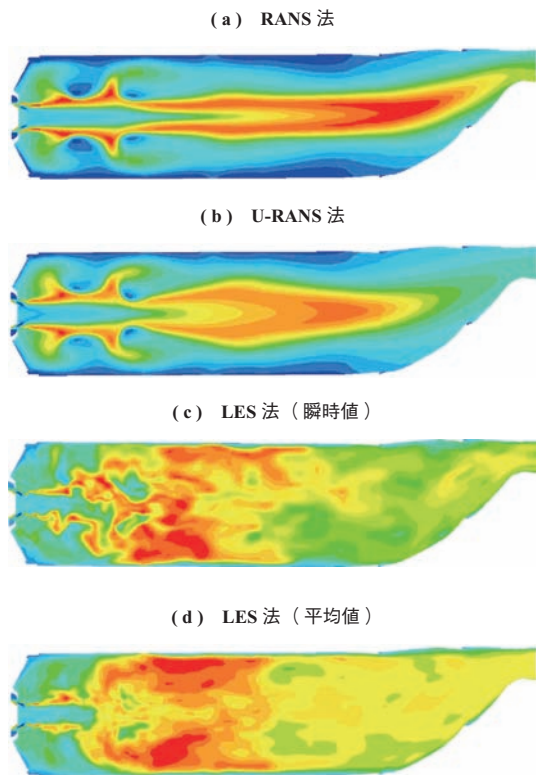
本研究で解析対象とした CAN 型燃焼器の概略形状を第 2 図に示す。燃焼器に流入する燃料と水蒸気の混合気は燃料供給ポートから供給され、スワラ空気ポートおよび燃焼空気ポートから供給される空気と水蒸気の混合気と混合して燃焼する。下流には、燃焼ガス希釈のための希釈空気ポートが設けられており、空気と水蒸気の混合気が供給される。

4. 解析結果

中心断面の温度分布を第 3 図に示す。解析の結果、非定常計算を実施した U-RANS 法と LES 法では非定常性の影響が異なった。U-RANS 法では、時間的な温度場の変化は小さいが、LES 法では特に燃料供給ポート周辺で時間的な変動が大きくなった。このため、LES 法の解析結果では、瞬時の温度分布と時間平均化した温度分布の



第 2 図 燃焼器概略形状
 Fig. 2 Outline of combustor geometry



第 3 図 中心断面温度分布の比較

Fig. 3 Comparison of temperature distribution in central cross-section

両方を示した。図に示されるように RANS 法, U-RANS 法および LES 法で異なる温度分布が得られた。RANS 法と U-RANS 法では、非定常性の考慮を実施していること以外に計算方法に差異はないが、温度分布は異なる結果になっている。温度分布の違いが大きいのは、燃料とスワラ空気の混合部や、燃焼空気の混合部と下流の希釈空気との混合部から燃焼器出口までであり、各空気供給ポート付近などからの流れの速い部分となっている。

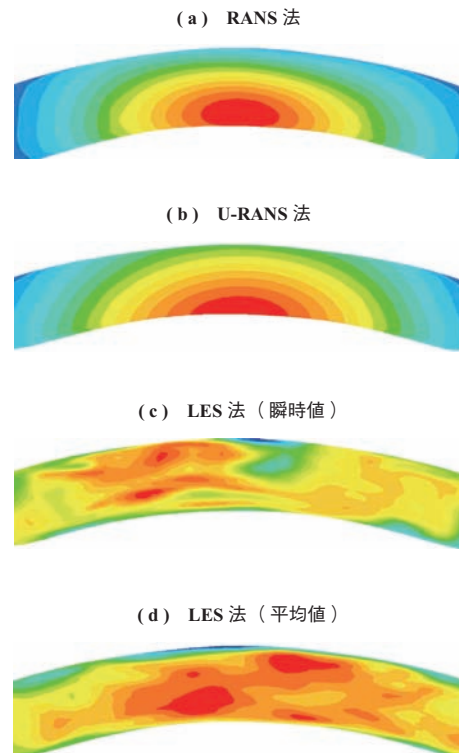
また、RANS 法よりも U-RANS 法による結果では低いピーク温度となっており、燃焼器全体にわたって空気との混合が促進されている。これは、U-RANS 法の方が、流れのせん断が強い部分での混合をより強くとらえているためと考えられる。

LES 法については、流れ場の乱れが大きく、瞬時温度分布と平均温度分布の差異が大きい。最も非定常な変化が大きいのは、燃料とスワラ空気の混合部であり、流れのせん断によって反応帯が上下左右方向に変動する。この変動の影響は下流まで及ぶため、燃焼空気との混合や希釈空気との混合にも大きく影響し、高温部も変動する。この結果を時間平均して、非定常な影響を排した温度分布を見ると、変動が除去され上下方向により対称に近い温度分布が得られる。LES 法では、RANS 法や U-RANS 法と比較

すると、燃料とスワラ空気との混合部の温度分布の差が大きく、燃料ノズル側に巻き返る高温部が見られず、燃焼はより下流で起こっている。また、燃焼空気との混合部については、RANS 法, U-RANS 法に比べ、より壁面付近に高温部が位置している。下流の希釈空気との混合については、U-RANS 法よりもさらに拡散の影響が大きく、希釈空気ポートより下流の流れ場はほぼ一般的な温度分布となっている。

このような燃焼場の特性は出口温度分布にも大きく影響する。出口温度分布を第 4 図に示す。出口温度分布については、RANS 法と U-RANS 法で同様の傾向が得られた。どちらの解析結果でも中心軸上下側壁面付近が最も温度が高く、そこから同心円状の温度分布となっている。ただし、温度変化は RANS 法のほうが急激に生じており、中心断面上で見られた希釈空気との混合状況の違いが影響していると考えられる。

一方、LES 法では出口温度分布についても、高温部の左右方向への非定常的な変化が確認された。また、この変動を時間平均化しても、出口温度は均一にはならず、左下壁面付近と右上壁面付近に高温部が存在することが確認された。この結果は、RANS 法や U-RANS 法による計算結果と大きく異なっている。また、RANS 法や U-RANS 法



第 4 図 出口温度分布の比較

Fig. 4 Comparison of temperature distribution at outlet

第 1 表 実験結果と解析結果のパターンファクタの比較

Table 1 Comparison of experimental and numerical pattern factors

出口温度分布	パターンファクタ
実験結果	0.136
RANS 法	0.440
U-RANS 法	0.285
LES 法	0.137

で見られた左右壁面付近の低温部が表れないことが分かった。このように出口温度分布の均一化が進んだのは、中心断面上で確認された希釈空気との混合が LES 法では最も大きかったためと考えられる。

解析結果の評価のため、第 4 図に示される燃焼器出口温度分布を実験結果と比較した。比較に当たって、温度分布における均一化の度合いを評価するパターンファクタを使用した。パターンファクタの定義は次式で与えられる。

$$PF = \frac{T_{max} - T_{average}}{T_{average} - T_{inlet}} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 T_{max} 、 $T_{average}$ 、 T_{inlet} はそれぞれ出口温度の最高値、出口温度の平均値、スワラ空気ポートにおける空気温度を表す。パターンファクタの実験結果および各計算結果を第 1 表に示す。実験結果のパターンファクタ 0.136 に対して、すべての計算結果はより大きな値となっているが、RANS 法、U-RANS 法、LES 法の順に実験結果に近づいていることが分かる。特に LES 法では、実験結果との差異が約 1% 以下まで改善されており、実施した三つの計算手法のなかで、最も精度が良いことが示された。これまでの研究で、バーナ近傍のような強旋回、強せん断流れ場に対しては LES 法が有効であることが示されている^{(2),(3)}。本計算結果においてもそのような特長が示されたと考えられる。LES 法では、バーナ近傍の流れ場や空気との混合のようなせん断をより正確に評価できるため、RANS 法による結果よりも、より混合が促進された結果が得られた。このため、実験結果に最も近い均一な出口温度分布が得られたものと考えられる。

5. 結 言

ガスタービンの CAN 型燃焼器を対象に RANS 法、U-RANS 法および LES 法を用いた数値解析を行い、実験における出口温度分布との比較からその解析精度を評価した。解析の結果、燃料とスワラ空気との混合や希釈空気との混合など、せん断力が大きい部分での混合状況が計算手法によって異なることが示された。混合による温度の均一化を最も良く評価できたのは LES 法であり、次いで U-RANS 法であった。各実験結果とパターンファクタの比較から、LES 法の精度が最も良いことが示された。

参 考 文 献

- (1) J. Froehlich and D. von Terzi : Hybrid LES/RANS methods for the simulation of turbulent flows Progress in Aerospace Sciences 44 (2008) pp. 349 - 377
- (2) H. El-Asrag and S. Menon : Large eddy simulation of bluff-body stabilized swirling non-premixed flames, Proc. Combust. Inst. 31 (2007) pp. 1 747 - 1 755
- (3) H. Watanabe, R. Kurose and S. Komori : Large-eddy simulation of swirling flames in a pulverized coal combustion furnace with a complex burner Trans. JSME Ser. B 73-725 (2007) pp. 342 - 349
- (4) N. Patel, M. Kirtas, V. Sankaran and S. Menon : Simulation of spray combustion in a lean-direct injection combustor Combust. Flame 153 (2008) pp. 228 - 257
- (5) P. E. Desjardin and S. H. Frankel : Large eddy simulation of a nonpremixed reacting jet : Application and assessment of subgrid-scale combustion models Phys. Fluids 10-9 (1998) pp. 2 298 - 2 314