

特集：ガスタービンに関連するCFD技術の最前線

燃焼器内乱流燃焼場のCFD

黒瀬 良一*¹
KUROSE Ryoichi

キーワード：LES, 乱流燃焼モデル, Flamelet モデル, NO_x, すず, LES, Turbulent Combustion Model, Flamelet Model, NO_x, Soot

1. はじめに

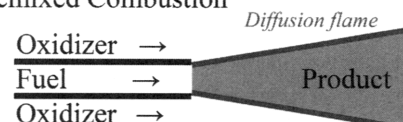
著者は5年前の2007年に、本誌の「特集：ラージエディシミュレーション (LES) の応用」において「乱流燃焼流れのLarge-eddy Simulation —噴霧燃焼流れへの適用—」と題した解説を執筆した⁽¹⁾。この解説では、「実機を対象」とする乱流燃焼数値シミュレーションには乱流燃焼モデルが不可欠であり、その導出過程および適用性は対象とする燃焼場の燃焼形態によって大きく、拡散燃焼、予混合燃焼、およびこれらの燃焼が共存する部分予混合燃焼の3つに分類されることに言及した。また、噴霧燃焼の主な燃焼形態が拡散燃焼であると考えられることから、拡散燃焼モデルに絞って解説し、拡散燃焼モデルの1つであるflamelet法⁽²⁾を用いたLESをシンプルな噴流噴霧火炎に適用した例を紹介した。

本解説では、拡散燃焼、予混合燃焼、および部分予混合燃焼のためのflamelet法⁽²⁾をベースにした乱流燃焼モデルについて概説し、これらのモデルを用いたLESを実機燃焼器内燃焼場等の複雑な燃焼場に適用した例を著者の研究成果を中心に紹介する。また、前解説⁽¹⁾ではその重要性を指摘するまでにとどまっていたNO_x生成やすず生成の予測を行った結果についても紹介する。

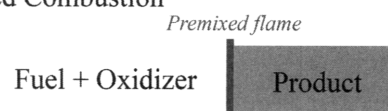
2. flamelet法をベースにした乱流燃焼モデルの概要

図1に、乱流燃焼モデルの分類と概念を示す。ガス乱流燃焼のプロセスは混合の観点から大きく3つに分類することができる。すなわち、燃料と酸化剤を別々に導入し拡散によって混合気を形成して燃焼させる拡散燃焼 (nonpremixed combustion もしくはdiffusion combustion)、あらかじめ燃料と酸化剤を混合した混合気を燃焼させる予混合燃焼 (premixed combustion)、およびこれらの燃焼が共存する部分予混合燃焼 (partially premixed combustion) である。例えば、ディーゼルエンジン内の燃焼は主に拡散状態、スパークイグニッションエンジンや希薄燃焼ガスタービン内の燃焼は主に予混合状態で起こり、さらに燃焼条件に

Nonpremixed Combustion



Premixed Combustion



Partially Premixed Combustion

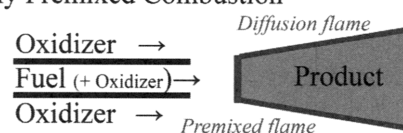


図1 乱流燃焼モデルの分類と概念

応じてそれらが共存する状態が少なからず生じる。次節以降では、flamelet 法⁽²⁾をベースにしたそれぞれのモデルと適用例を述べる。なお、flamelet法⁽²⁾の詳細については、他の論文 (例えば(3)-(5)や解説 (例えば(1),(6),(7))を参照されたい。

3. 拡散燃焼モデル

噴霧燃焼については、燃料液滴のサイズが極端に小さくなく、かつ当量比が低い場合、その燃焼形態は概ね拡散燃焼と見なせることが確認されている^{(5),(8),(9)}。そこで、乱流拡散燃焼モデルの1つであるflamelet/progress-variable法^{(4),(5),(8)}を組み込んだLESを、実際の航空機用ガスタービンエンジン燃焼器を模擬したサブスケールモデル内部の噴霧乱流燃焼場に適用した^{(10),(11)}。本計算および次節以降のLESには、全て、複雑な形状にも適用可能な非構造格子上で計算が行えるFrontFlow/red (FFR) を、京都大学、電力中央研究所および数値フローデザインにより改良したコードを用いている。

LESのためのフィルタリングを施された流れ場、およびラグランジェ的に解くことにより求める燃料液滴運動の支配方程式を以下に示す。

原稿受付 2012年9月28日

* 1 京都大学大学院工学研究科機械理工学専攻
流体理工学講座環境熱流体工学分野
〒606-8501 京都市左京区吉田本町

[流れ場]

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{\mathbf{u}}) = S_m, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{\mathbf{u}}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{\mathbf{u}} \tilde{\mathbf{u}}) = -\nabla \bar{p} + \nabla \cdot \tilde{\boldsymbol{\sigma}} + \nabla \cdot \tilde{\boldsymbol{\tau}} + S_u, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{Z}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{\mathbf{u}} \tilde{Z}) = \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{D}_Z \nabla \tilde{Z}) + \nabla \cdot \mathbf{q}_Z + S_Z, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{C}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{\mathbf{u}} \tilde{C}) = \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{D}_C \nabla \tilde{C}) + \nabla \cdot \mathbf{q}_C + \bar{\rho} \tilde{w}_C, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{h}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{\mathbf{u}} \tilde{h}) = \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{D}_h \nabla \tilde{h}) + \nabla \cdot \mathbf{q}_h + Q_{rad} + S_h, \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{Y}_{NO}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{\mathbf{u}} \tilde{Y}_{NO}) = \\ \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{D}_{Y_{NO}} \nabla \tilde{Y}_{NO}) + \nabla \cdot \mathbf{q}_{Y_{NO}} + \bar{\rho} \tilde{w}_{NO}. \end{aligned} \quad (6)$$

[液滴運動]

$$\frac{d\mathbf{x}_d}{dt} = \mathbf{u}_d, \quad (7)$$

$$\frac{d\mathbf{u}_d}{dt} = \frac{f_1}{\tau_d} (\tilde{\mathbf{u}} - \mathbf{u}_d), \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{dT_d}{dt} = \frac{Nu}{3Pr} \left(\frac{\tilde{c}_p}{c_{p,d}} \right) \left(\frac{f_2}{\tau_d} \right) (\tilde{T} - T_d) + \frac{1}{m_d} \left(\frac{dm_d}{dt} \right) \frac{L_V}{c_{p,d}} \\ + \frac{1}{m_d c_{p,d}} \left[A_d \epsilon_d \left(\int_{\Omega=4\pi} Id\Omega - 4\sigma_s T_d^4 \right) \right], \end{aligned} \quad (9)$$

$$\frac{dm_d}{dt} = -\frac{Sh}{3Sc} \frac{m_d}{\tau_d} \ln(1 + B_M). \quad (10)$$

ここで、 $\bar{}$ はフィルタ操作を施したLES用のGS内における物理量の平均値を、 $\tilde{}$ はFavre平均を意味する。式中の、 ρ は密度、 $\mathbf{u}$ は速度、 p は圧力、 Z は混合分率、 C は反応進行変数としての燃焼生成物の質量分率 ($Y_{H_2O} + Y_{H_2} + Y_{CO_2} + Y_{CO}$)、 h はエンタルピー、 Y_{NO} はNOの質量分率である。また、 $\mathbf{x}_d$ は液滴位置、 $\mathbf{u}_d$ は液滴速度、 T_d は液滴温度、 m_d は液滴質量である。 $\boldsymbol{\sigma}$ は応力テンソル、 D_Z , D_C , D_h および $D_{Y_{NO}}$ はそれぞれ Z , C , h および NO の拡散係数である。 $\boldsymbol{\tau}$ はSGS 応力項、 $\mathbf{q}_Z$, $\mathbf{q}_C$, $\mathbf{q}_h$ および $\mathbf{q}_{Y_{NO}}$ はスカラのSGS項であり、dynamic Smagorinskyモデル^[12]を用いて求められる。また、 Q_{rad} は輻射による生成項である^[13]。 S_m , S_u , S_Z および S_h は燃料液滴と気相の相互作用に関する生成項であり、particle-source-in-cell (PSI-Cell) 法を用いて、以下のように計算する。

$$S_m = -\frac{1}{\Delta V} \sum_N \frac{dm_d}{dt}, \quad (11)$$

$$S_u = -\frac{1}{\Delta V} \sum_N \frac{dm_d \mathbf{u}_d}{dt}, \quad (12)$$

$$S_Z = -\frac{1}{\Delta V} \sum_N \frac{dm_d}{dt}, \quad (13)$$

$$S_h = -\frac{1}{\Delta V} \sum_N \left[Q_d + \frac{dm_d}{dt} L_V + Q_{rad,d} \right]. \quad (14)$$

ここで、 ΔV はコントロールボリュームの体積、 N はコントロールボリューム内に存在する燃料液滴の個数である。また、 f_1 は燃料液滴の蒸発による抗力の修正係数、 τ_d は燃料液滴の応答時間、 Q_d は気相から燃料液滴に移動する熱量、 L_V は蒸発潜熱、 $Q_{rad,d}$ は輻射により気相から燃料液滴に移動する熱量である^{[13],[14]}。また、式(10)に関連して、燃料液滴の温度が沸点に達した場合は、沸騰蒸発モデル^[15]により蒸発速度を計算する。

上記の支配方程式に含まれない諸化学種濃度、および C , NO の反応生成項 $\tilde{w}_C$, $\tilde{w}_{NO}$ は FLAMEMASTER^[16] を用いて予め作成しておいた拡散火炎のデータベース、すなわち flamelet library から抽出する^{[11],[17]}。ここでは、燃料を Jet-A (航空燃料用ケロシン) とし、約 280 化学種、1600 反応を考慮して flamelet library を作成した。計算格子の節点数、セル数はそれぞれ約 140 万、750 万であり、燃料液滴のパーセル数は 30 万とした。すすの生成については論文^[13]中のモデルを用いた。

図 2, 3 に瞬間ガス温度の等値面と断面分布を燃料液滴分布と併せてそれぞれ示す。図より、バーナから噴射された燃料液滴が、燃焼室の外側に向かって広がる様子が確認できる。また、設定されたインナスワラおよびアウトスワラにより、燃焼室内には再循環流が形成されている。図 4 に時間平均のガス温度および NO 濃度の中心軸上分布を出口の実測値と比較したものを示す。図より、計算値は実測値と良く一致していること、また、輻射の考慮は特に NO 濃度の予測に不可欠であることがわかる。また、図 5 にすす濃度を可視化し^[13]、実験により直接撮影された写真と比較したものを示す。図より、計算により予測されたすす濃度の高い領域は実験のすす領域を表す輝炎領域より上流側に存在するものの、噴霧の蒸発がほぼ終了する後流においてすすが形成される傾向は双方で良く一致することがわかる。



図 2 瞬間ガス温度の等値面と燃料液滴の分布

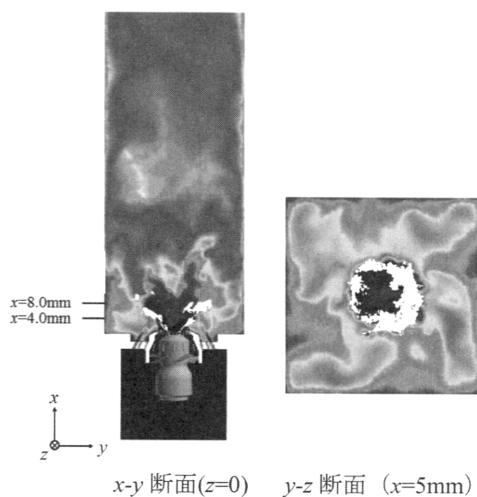
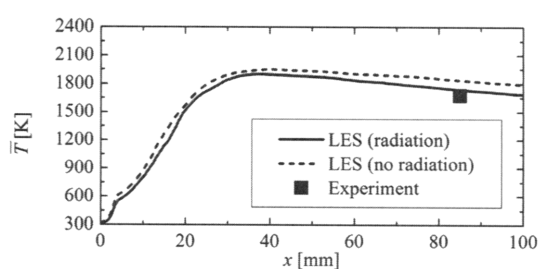
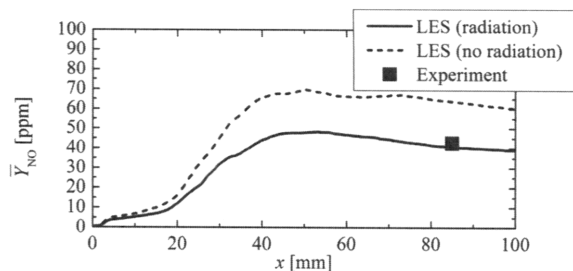


図3 瞬間ガス温度分布 (白点は燃料液滴)

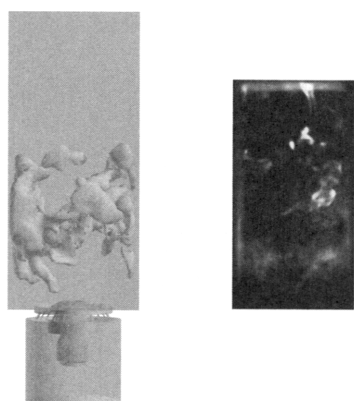


ガス温度



NO 濃度

図4 時間平均ガス温度・NO濃度の実測値との比較



LES

実験

図5 すすの可視化

4. 予混合燃焼モデル

Williams¹⁸⁾は予混合燃焼モデルとして, flamelet G -equation 法を提案している。この方法では, 予混合火炎面の挙動は以下の反応性を持たないスカラー G の方程式によって与えられる。

$$\frac{\partial \tilde{G}}{\partial t} + \tilde{\mathbf{u}} \cdot \nabla \tilde{G} = \frac{\rho_u}{\bar{\rho}} (S_T + D_t \bar{\kappa}) |\nabla \tilde{G}|, \quad (15)$$

$$|\nabla \tilde{G}| = 1. \quad (16)$$

ここで, S_T は乱流燃焼速度, D_t は乱流拡散係数, $\bar{\kappa}$ は火炎面の曲率であり, S_T は層流燃焼速度 S_L を用いてモデル化される¹⁹⁾。

上式を解くことにより G を求め, $G < 0$ を未燃領域, $G > 0$ を既燃領域と判別する。そして, 予混合火炎に対する火炎片方程式(2)を解くことによって予め作成しておいた予混合火炎のデータベースから既燃領域の温度 T と諸化学種濃度 Y_i を抽出する¹⁹⁾。なお, 層流燃焼速度 S_L の値についても火炎片方程式(2)を解くことによって求める。

このflamelet G -equation法をCambridge大学で実施された予混合燃焼実験²⁰⁾に適用した。この実験では, 燃焼器入口上流部に設置したラウドスピーカーにより予混合気体の注入速度に変動を与えることによって, 火炎の不安定性を詳しく調べている。燃料はエチレンであり, 本計算では約280化学種, 1600反応を考慮した。計算格子の節点数, セル数ともに約110万とした。

図6に計算領域および瞬間ガス温度の等値面の3次元挙動を, また図7に瞬間ガス温度の断面分布の時間変化をそれぞれ示す。詳細は省略するが, G 方程式を解くことにより得られる未燃領域と既燃領域の間の反応面挙動は実験と良く一致することが確認できた。



図6 計算領域および瞬間ガス温度の等値面

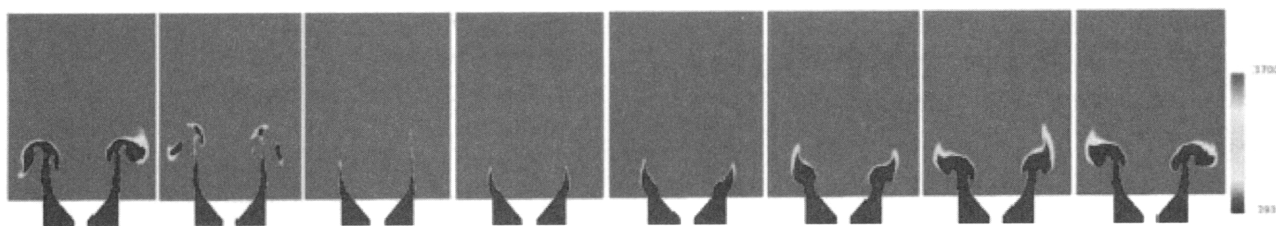


図7 流入速度の変動に伴う火炎挙動の変化

5. 部分予混合燃焼モデル

Muller *et al.* ⁽²¹⁾ は部分予混合燃焼モデルとして、上述した2つのモデルを結合したモデルを提案している。すなわち、 $G < 0$ を非燃焼領域、 $G > 0$ を燃焼領域と定義し、燃焼領域の物理量には拡散火炎のデータベースを与える⁽²²⁾。

この方法を、予混合燃焼と拡散燃焼が混在する複雑な乱流燃焼場を呈する三菱重工業(株)が研究開発中の1700℃級ガスタービン燃焼器^(23, 24)内の燃焼場に適用した。燃料はメタン、エチレン、プロパンの混合物とし、約280化学種、1600反応を考慮した。計算格子の節点数、セル数はともに約600万とした。解析は、Lean-Lean (L.L.) モードとRich-Lean (R.L.) モードの二つの燃焼モード⁽²⁴⁾ に対して行った。

図8に燃焼器形状および燃焼器内の瞬間ガス温度分布を示す。また、図9に時間平均ガス温度分布を測定値と比較して示す。図より、 G 方程式モデルの併用により予混合気体の未燃領域が再現され、計算値は実験値と定量

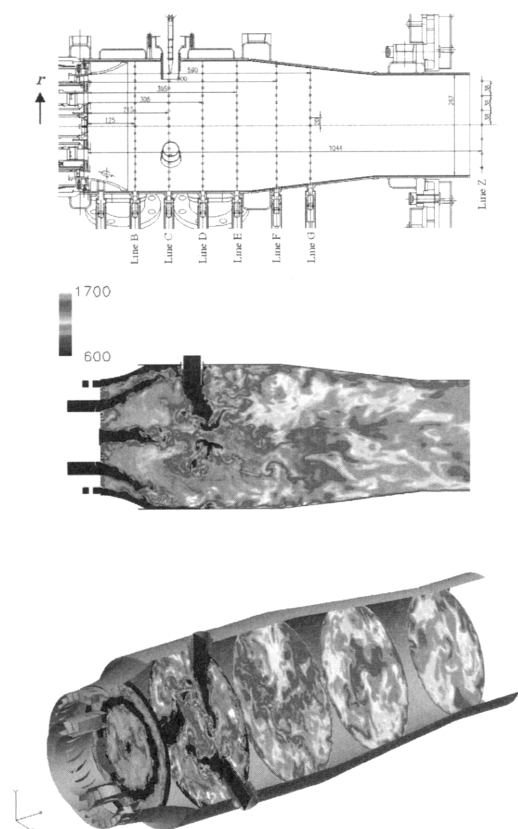


図8 燃焼器形状および瞬間ガス温度分布 (Rich-lean条件)

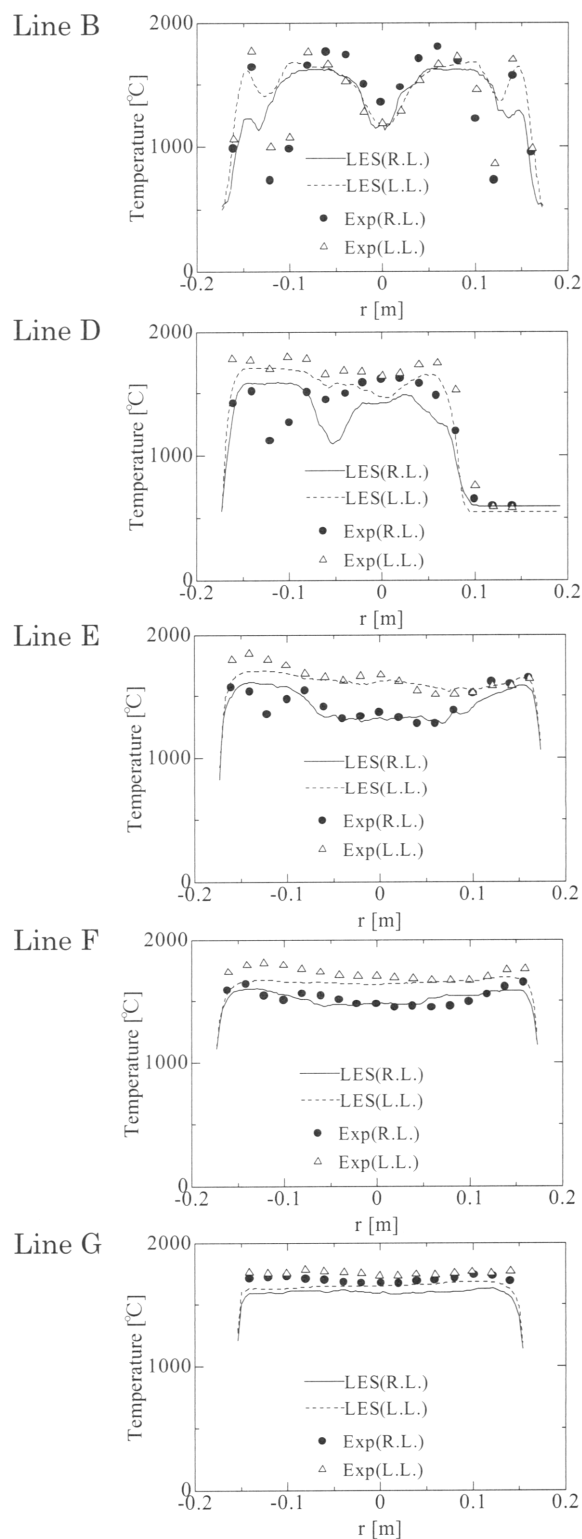


図9 時間平均ガス温度の実測値との比較

的にも比較的良く一致することが確認できる。なお、詳細は省略するが、本LESにより、燃焼器内ガス温度に及ぼす輻射や壁面からの熱損失の影響についても考察可能となっている²⁶⁾。

6. おわりに

本解説では、燃焼の3形態である拡散燃焼、予混合燃焼、および部分予混合燃焼のための乱流燃焼モデルについて概説し、これらのモデルを用いたLESを実機燃焼器内燃焼場等の複雑な燃焼場に適用した例を著者らの研究成果を中心に紹介した。

2011年11月に公開された第38回TOP500リストにおいて2期連続で世界最高速(LINPACK 性能は10.51 PFlops)と認定された「京」コンピュータの開発プロジェクトは、その一環として、「京」コンピュータを有効活用するための研究推進プログラム(HPCI戦略プログラム)が文部科学省により並行して進められている。著者らは、その中で取り組まれているテーマの1つである、「分野4 次世代ものづくり：次世代燃焼・ガス化装置設計システムの研究開発」に携わり、LESの高度化、実用化に関する研究を進めている^{26), 27)}。関係者各位から様々なご意見をいただければ幸いである。

謝 辞

本稿を準備するにあたり、京都大学北野智朗氏、林雅人氏、辻堯文氏、電力中央研究所渡邊裕章氏、数値フローデザイン張会来氏、西家隆行氏の協力を得た。また、3節は三菱重工業航空宇宙事業本部森合秀樹氏、大阪大学赤松史光教授、4節は三菱重工業高砂製作所佐藤賢治氏、5節は三菱重工業高砂研究所斉藤圭司郎氏、北海道大学大島伸行教授の協力を得た。ここに記して謝意を表す。本研究の一部は、文部科学省HPCI革新的ハイパフォーマンス・コンピューティング・インフラ計画事業「HPCI戦略プログラム(分野4 次世代ものづくり)」の補助を受けて実施されたものである。

参考文献

- (1) 黒瀬良一, 日本ガスタービン学会誌, 35 (2007), p. 243-252.
- (2) Peters, N., Turbulent combustion, (2000), Cambridge University press.
- (3) Pitsch, H., Steiner, H., Physics of Fluids, 12 (2000), p.2541-2554.
- (4) Pierce, C. P., Moin, P., Journal of Fluid Mechanics, 504 (2004), p.73-97.
- (5) Baba, Y., Kurose, R., Journal of Fluid Mechanics, 612 (2008), p. 45-79.
- (6) 黒瀬良一, 赤松史光, 日本燃焼学会誌, 50 (2008), p. 206-214.
- (7) 黒瀬良一, 日本燃焼学会誌, 52 (2010), p. 302-310.
- (8) Fujita, A., Watanabe, H., Kurose, R., Komori, S., Fuel, in press.
- (9) Kitano, T., Nakatani, T., Kurose, R., Komori, S., Fuel, in press.
- (10) 森合秀樹, 林潤, 王鵬, 中塚記章, 赤松史光, 黒瀬良一, 小森悟, 日本ガスタービン学会誌, 39 (2011), p. 125-130.
- (11) Moriai, H., Kurose, R., Watanabe, H., Yano, Y., Akamatsu, F., Komori, S., Fuel, submitted.
- (12) Moin, P., Squires, K., Cabot, W., Lee, S., Physics of Fluids. A. 3 (1991), p. 2746-2757.
- (13) Watanabe, H., Kurose, R., Komori, S., Pitsch, H., Combustion and Flame, 152 (2008), p. 2-13.
- (14) Nakamura, M., Akamatsu, F., Kurose, R., Katsuki, M., Physics of Fluids, 17 (2005), 123301.
- (15) Kuo, K.K.Y., Principles of Combustion, John Wiley and Sons, New York (1986).
- (16) Pitsch, H., A c++ computer program for 0-D combustion and 1-D laminar flame calculation, RWTH Aachen, 1998.
- (17) Ihme M, Pitsch H. Physics of Fluids, 20 (2008), 055110.
- (18) Williams, F. A., The Mathematics of Combustion (ed. J. Buckmaster), SIAM, 1985, p. 99-131.
- (19) Sato, K., Knudsen, E., Pitsch, H., Proc. of the ASME Turbo Expo 2009: Power for Land, Sea and Air, GT2009, 2009, GT2009-59132.
- (20) Balachandran, R., Ayoola, B. O., Kaminski, C. F., Dowling, A. P., Mastorakos, E., Combustion and Flame, 143 (2005), p. 37-55.
- (21) Muller, C. M., Breitbach, H., Peters, N., Proceedings of the Combustion Institute, 25 (1994), p. 1099-1106.
- (22) Baba, Y., Kurose, R., Journal of Fluid Science and Technology, 3 (2008), p. 846-856.
- (23) Saitoh, K., Yuasa, A., Ito, E., Tanimura, S., Tsukagoshi, K., In Proc. of the International Gas Turbine Congress 2007, 2007, CD-ROM.
- (24) Nishida, S., Yamamoto, T., Tsukamoto, K., Oshima, N., In Proc. of ASME International Design Engineering Technical Conference and Computers and Information in Engineering Conference 2, 2009, p. 285-293.
- (25) 西家隆行, 黒瀬良一, 渡邊裕章, 張会来, 小森悟, 第40回日本ガスタービン学会定期講演会講演論文集, 掲載予定.
- (26) 黒瀬良一, 日本燃焼学会誌, 54 (2012), p. 134-138.
- (27) <http://www.fluid.me.kyoto-u.ac.jp/members/kurose/hpci.html>