

論文の内容の要旨

論文題目 KIVAによる燃焼器解析とその応用に関する研究

氏名 謝 正海

ガスタービン燃焼器の設計、開発段階で設計者が自らその設計業務の一部として数値解析を行う時代になりつつある。しかし、実機への適用例としては、現状では燃料の混合等を含め燃焼反応を含まない計算は設計支援に役立っているが、燃焼を含んだ解析は実用レベルにあるとは言い難い。現在までの燃焼器開発は、リグテスト装置等を用いた燃焼計測データによって実施されてきている。当面、実験を基本にした開発が継続すると考えられるが、今後の、より効率的で計画的な開発を行うために、燃焼計測技術と共に実用的な燃焼解析ソフトの早期開発が期待される。従って、精度の良い実用的な燃焼解析ソフトが利用できれば、現在多くの資源と期間をかけて行われている新しい燃焼器開発等を、短時間で効率的に実施できる可能性が高い。

KIVAは米国 Los-Alamos 国立研究所 T3 グループにより、内燃機関の筒内流れ解析を目的として開発してきた。多成分流れにおける液体燃料噴霧粒子の飛散、蒸発、混合、点火、化学反応、熱伝達など3次元の非定常過程に合わせたさまざまな機能を組込まれ、全サイクルのエンジン筒内の流動計算を行うものである。しかしながら、基本となるプロセス構造はモジュール化されており、主なオプション（燃料噴射、蒸発、化学反応、乱流モデルなど）の多くは個々に選択できるようになっている。安価な上にソースコードで入手できるため、それぞれの使用目的に合わせたモデルの改造や付加が可能であることから、エンジン以外の実用燃焼問題に適用できると考えられる。ガスタービン燃焼器とエンジン燃焼室との共通点から、KIVAで燃焼器へのCFD解析も可能と判断される。

近年、窒素酸化物（NO_x）を有効に削減するため、希薄予混合燃焼方式の普及が拡大している。LPC (Lean Premixed Combustor) 燃焼器の研究について実験的にかなりなされているが、燃焼を含む複雑流れ現象を数値的に予測するこ

とは世界の研究者に悩ませているところである。現時点で KIVA コードを用いる LPC 燃焼器における解析報告はまだ見当たらない。本研究はコジェネレーションシステムの原動機に用いられる小型のガスタービンを対象に、KIVA-3V のソースコードに基づき、一般燃焼器解析向けの修正と新たな機能の追加により希薄予混合燃焼法を用いた都市ガスを燃料とするガスタービン燃焼器解析方法を確立し、さらに設計ツールを開発しようとするものである。

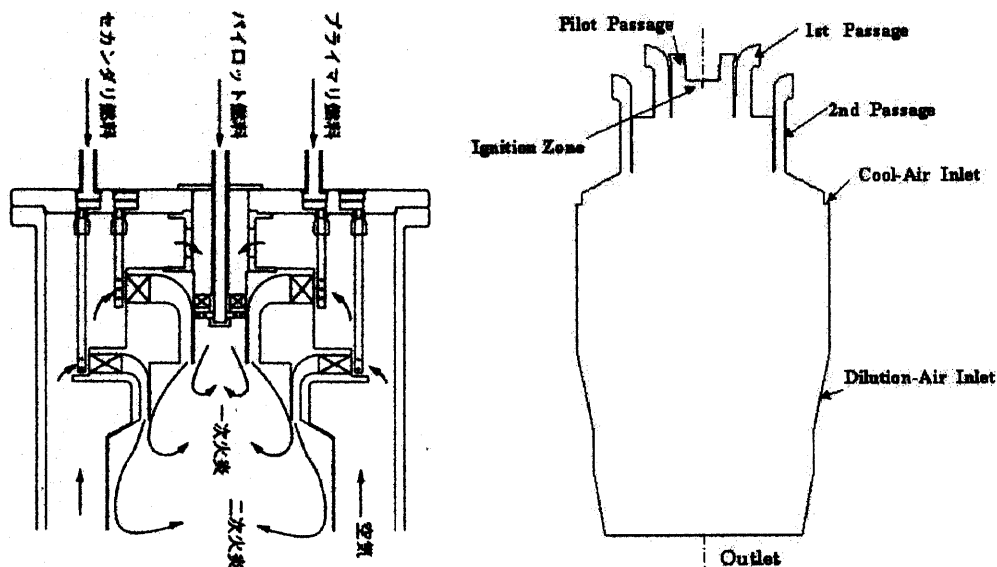


Fig. 1 ダブルスワラー燃焼器概念と解析モデル

Fig. 1 に示している研究対象となる実用 2MW 級ダブルスワラー燃焼器は、希薄予混合二段燃焼方式を採用しながら、広い燃焼範囲において低 NOx と安定燃焼が実現できる新型 LPC 燃焼器である。燃料系統はパイロット、一次(プライマリ)、二次(セカンダリ)の 3 系統からなり、それぞれ半径流型スワラを持つ一次、二次の予混合ノズルが同心二重環の構造で、各自 12 枚、16 枚羽根の半径流型スワラを設けられ、その上流から羽根の間に燃料ガスが周方向に噴射される。ノズルの内側には軸流スワラを持つパイロットノズルが配置され、その中心には点火栓が組み込まれている。パイロット火炎は一次希薄予混合火炎の燃焼を維持し、中心の一次希薄予混合気の空気比は、安定燃焼が得られ、かつ NOx 排出量が大きくない一定の値 (1.4~2 程度) に設定する。一次火炎の周囲に噴出する二次混合気は、一次よりさらに希薄な空気比範囲 (2 以上) でガス量を制御する。単独では火炎を伴う燃焼が不可能なほど希薄な二次混合気は、一次火炎と接触し、熱活性基等の供給を受けて燃焼反応が可能となる。二次火炎は非常に希薄なためほとんど NOx を生成せず、また一次火炎も希薄な二次によって冷やされるため、一次火炎から NOx 生成量も抑制される。このように広い範囲において負荷対応ができ、低 NOx と安定燃焼が得られる。

本研究で Unix, Linux 系のワークステーションおよび Windows 系のパソコンでの研究環境において KIVA の適用修正を行って現存コードに幾つのバグを直した。コード信頼性を確かめるため、3 つの実用問題について数値解析を行った。まず、HSDI ディーゼルエンジンについて解析を行い、燃焼様子、筒内圧力変化の解析結果は実験と定性的に合うことが分かった。Fig. 2 に +6ATDC 時点で燃焼室の縦断面での温度分布と筒内圧力変化を示している。エンジン設計の観点から燃焼室形状による空気流動スワールの変化特性にも評価した。それからティーポット問題を対象とし、はじめて Chen $k-\epsilon$ 乱流モデルをエンジン解

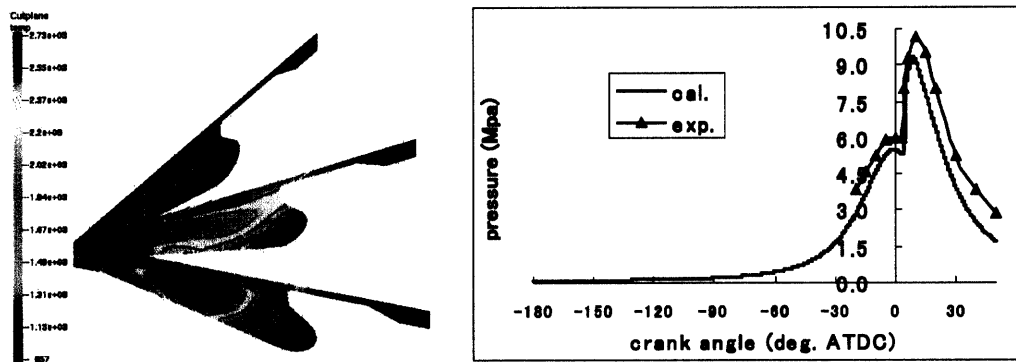


Fig. 2 温度コンター(左, K)と筒内圧力変化(右)

析適用することを確認し、レイノルズ応力モデル (SSG モデル)、RNG $k-\epsilon$ および $k-\epsilon$ モデルなどでの解析結果と比較した。続いて実用燃焼器解析における KIVA-3V 適用版を用いて、F. K. Owen の同軸噴流実験を対象にしてシミュレーションをした。Fig. 3 には計算速度ベクトルと流線を示しており、その中 CRZ (Corner Recirculation Zone) と CTRZ (Central Toroidal Recirculation Zone) という二つの循環区域が鮮明に現れ、計算と実験の流れ様子はよく似ていることが分かった。軸流速度成分の実験対照から、実験と定量的に一致することも示した。以上から、KIVA の燃焼器解析適用は相対的によい予測精度を持ち、実用燃焼器に応用できると考えられる。

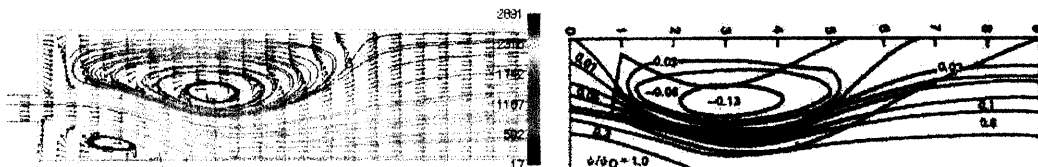


Fig. 3 計算速度ベクトル(cm/s)と流線(左:計算値;右:実験値)

本研究ではガスタービン燃焼器における燃料噴射、冷却と希釈空気流入或いは予混合気流入など多数個入口対応など機能を KIVA に加えることにより、ガスタービン燃焼器の複雑反応流解析に適用できるようになり、燃焼器の一般解析

手法を確立した。

本研究では、軸対称 (Fig. 1) モデルと 3 つの 3 次元モデル (パイロット燃料噴射、希釈流方式により分ける) で燃焼器の解析を行い、燃焼器解析上の一般方法とコードの有効性を確立した。計算中、燃焼反応に関与している化学種として、 CH_4 , O_2 , N_2 , CO_2 , H_2O , H , H_2 , O , N , OH , CO , NO の 12 成分を考慮することとした。定常計算結果を求めるため、計算上初期からある時間ステップまで流れ計算を行い、計算領域の上流側流れがおおよそ安定してから、点火モデルによって点火領域で (Fig. 1 参照) 着火させ、十分な燃焼が広がるまで火を消さないよう配慮した。Fig. 4 には一つの 3 次元モデルで計算した温度、密度と縦中心断面での速度ベクトルを示している (cgs 単位)。燃焼器の入口では旋回器によって旋回流を発生させ、中心部に生じる負圧による循環渦 (CTRZ) で燃焼ガスを戻して火炎を安定させることと、1 次ノズルから流れが急激に拡大され、1 次燃焼室に入って生成される循環渦 (CRZ) によって高温燃焼ガスを巻き込み、火炎の安定化を行うことは、Fig. 4 に示している。または、2 次ノズルで燃料が希薄過ぎて燃焼は主に中心部に集中して膨張され、希釈流の影響にも下流側の温度、密度など分布から分かった。

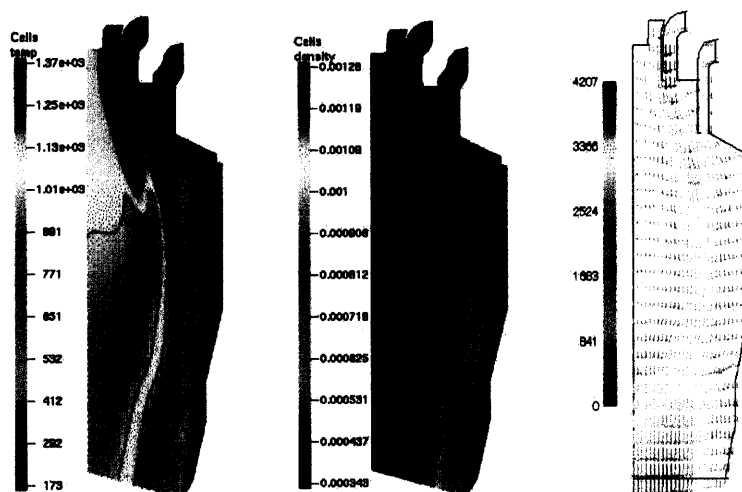
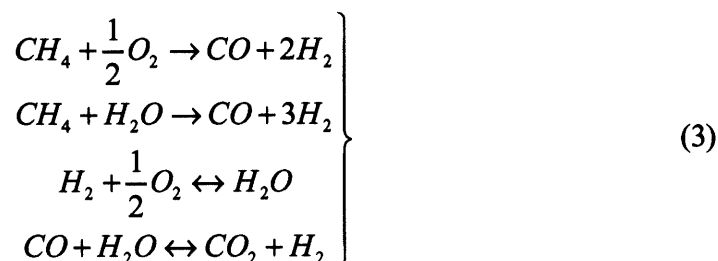
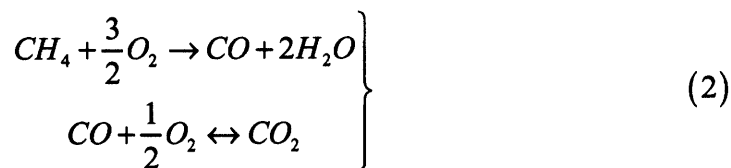


Fig. 4 三次元モデル計算結果 (左：温度；中：密度；右：速度ベクトル)

本研究はメタンの燃焼反応機構に着目して、下記の 1 段階反応 (式 1)、2 段階反応 (式 2) と 4 段階反応 (式 3) を用いて燃焼解析を行った。計算結果と参考実験値を比較しながら、LPC 燃焼器について数値解析上の問題点を検討した。

本研究での燃焼器解析は実験に示した燃焼火炎面の位置をよく予測していることを確認した。3 つのメタン反応機構において、4 段階が一番予測精度を持ち、それに続いて 2 段階、1 段階の順である。4 段階反応機構は燃焼反応中 H_2 、 CO の役割を強調した結果、予測温度は実験に近いもので、燃焼器解析に適切な

反応機構と考えられる。



本研究で燃焼器の解析精度を向上させるため、乱流モデルを中心とし、旋回流に対応する幾つの RANS 乱流モデルを用いて解析を行った。従来 KIVA に使われている $k-\varepsilon$ モデル、RNG $k-\varepsilon$ のほかに、LPS $k-\varepsilon$ 、Chen $k-\varepsilon$ 、陽的代数応力モデル (EASM) を KIVA コードへ組み込み、燃焼器旋回流の流れと燃焼解析を行い、乱流モデルが予測温度分布に与える影響を考察し、次の知見を得た：LPC 燃焼器の数値シミュレーションは、流体力学だけの問題と違って燃焼モデル、化学反応機構が致命的になる可能性がある。それらの使用において特に注意を払わなければならない。

本研究で反応流と旋回流を主眼にして燃焼反応機構と乱流モデルの両面から燃焼器解析精度に与える影響を考察した後、数値解析手法を用いるパラメータ設計への一歩を踏み出した。設計パラメータ (入口空気旋回数、負荷、空気希釈量) の値を動かした時の特性への影響調査を机上ででき、即ち、燃焼器の出口排ガス CO, NO_x、出口温度の均一化評価 MWSD (mass-weighted standard deviation) 或いは PF (pattern factor) など性能を定量的に評価することができた。

環境保存の観点から、LPC 燃焼器は今後益々使われるようになり、その燃焼器内の燃焼現象をよく表す乱流予混合燃焼モデルとその検証データの蓄積が必要である。燃焼器内反応速度が有限で燃料、空気等乱流スカラーは不均質性を持ち、これを考慮する確率密度関数 (PDF) 燃焼モデルを燃焼器解析へ導入することは今後の課題の一つである。または、できる限り多くの化学種、素反応レベルの化学反応機構で燃焼解析を期待しており、今後 CHEMKIN コードと組みあわせて燃焼器における一層実用的に精度高い解析ソフトを開発し続けることとする。