

平成 21 年 5 月 26 日現在

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2007～2008 年度

課題番号：19560193

研究課題名 (和文) 燃焼のサイクル変動予測モデルの開発

研究課題名 (英文) Developing a numerical prediction model for cycle-to-cycle variation on engine combustion

研究代表者 森吉 泰生 (Moriyoshi, Yasuo)
 千葉大学・大学院工学研究科・教授
 研究者番号：40230172

研究成果の概要：

熱機関内のガス流動、混合気分布や燃焼のサイクル変動を定量的にかつ、実用に耐える時間内で予測できる数学モデルを提案することを目的に、フリーの汎用流体解析プログラム FrontFlow/Red にレイノルズ平均乱流モデル(RANS)に基礎を置いたサイクル変動予測モデルの組み込みを行った。

その結果、ガス流動のサイクル変動ならびに燃料濃度場のサイクル変動を3次元に予測できるコードを完成させた。あわせて本コードの予測精度・信頼性の検査を実施し、エンジン流動場で十分に適用可能であることがわかった。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
平成 19 年度	2,700,000	810,000	3,510,000
平成 20 年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,670,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：エンジン内流動，サイクル変動予測，数値解析，RANS モデル

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化や大気汚染の問題が地球規模で深刻になっているが、エネルギーの殆どは化石燃料の燃焼によって行われている。バイオ燃料とはじめとするリニューアブルエネルギーの導入が急ピッチで進められているものの、その実用化や量的確保にはまだ 20 年以上の時間が必要とされている。それまでの間、豊かな生活を維持しつつ、また開発途上国においても生活レベルの向上が継続され

るためには、より多くのエネルギーが必要となり、上記の問題はますます深刻なものとなる。そこで、燃焼によって熱エネルギーから仕事を取り出す熱機関の熱効率の大幅な改善と排ガスの清浄化が不可欠である。

2. 研究の目的

熱機関の燃焼形態には大きく分けて 2 つ有り、一つは燃料と空気をあらかじめ混合し点火栓により点火し火炎伝播によって燃焼さ

せるものと、燃料を高圧高圧になった燃焼室内に噴射し拡散的な燃焼を行わせるものである。前者は燃料と空気を理論空燃比に保ち三元触媒との組合せにより、熱効率はやや劣るものの大気並みに清浄な排ガスレベルを実現できる。これに対し後者では、全体に空気過剰な状態であるにもかかわらず局所的にはきわめてリッチ（燃料過剰で空気不足）な運転しかできないために、熱効率は最大50%程度を実現できるものの排ガスの清浄化は困難である。後者の方が熱効率が高いのは、圧縮比を高くできることと平均的にみると空気過剰なリーンな状態で燃焼を行わせているためである。よって前者に対してもリーンな燃焼を行わせることができれば熱効率は改善される。しかし、中途半端なリーン化は窒素酸化物の増加と三元触媒の使用を不可能にするため、排ガスの清浄化が困難となる。そこで空気の過剰率を2倍以上の極リーン燃焼をさせると、熱効率が改善されると共に燃焼温度の低下により有害物質の発生も抑えられる。しかしながら、極リーン燃焼をさせると燃焼のサイクルごとの変動が大きくなり実用化が難しいという問題が生じてくる。このサイクル変動を予測する方法の開発が強く望まれているが、まだ具体的な方法は提案されていない。そこで本研究では、燃焼のサイクル変動を予測できる数学モデルを提案し、実験による検証を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

(1) コード開発

文部科学省次世代 IT 基盤構築のための研究開発プログラム 戦略的革新シミュレーションソフトウェアの研究開発において開発された汎用熱流体解析ソフトウェアである FrontFlow/red (以下 FFR と記す)を用いた。FFR は乱流変動などの非定常な現象の高精度予測を特徴にもつ乱流燃焼解析ソフトウェアであり、日本国内ではソースコードを含めてフリーで公開されている。

本研究では現在 web 上に公開されている FFR ver. 3 を用いた。FFR は有限体積法に基礎をおく非構造格子解析コードであり、ヘキサ・テトラセルなど多種類のセル形状を取り扱うことのできるマルチセルコードである。本研究ではエンジン稼働時のピストン運動をコード上で表現するために、ALE 法に基づく移動格子アルゴリズムを導入した。また乱流モデルとして実用的な解析時間で終了させることを念頭におき、 $k-\epsilon$ モデルを使用する。これに研究者代表者らが過去に開発した 2-scale $k-\epsilon$ モデル [1]も導入した。

(2) 計算体系

本研究で開発したコードを用いて以下に述べるモデルエンジン系 [2]での解析に適用した。このエンジンはパンケーキ型の燃焼室を有、圧縮比5で稼動するものである。詳細を表1に列挙する。

このモデルエンジンに対して図1に示すような非構造格子を生成した。解析手法として移流項を含む空間方向に2次精度中心差分に15%の風上成分をドープし、時間進行は Euler 法により陰的に時間進行した。また燃料気体は $Sc=1$ とした passive scalar として取り扱った。

また、流れの初期条件として、周方向に剛体渦分布をあたえ、軸方向にピストン速度を軸方向に線形補間した値を用いた。乱流特性量として、初期の積分スケールをボア径の2.5%、乱れ強さは平均ピストン速度の74%とした。計算は吸気弁閉時(圧縮上死点前150度)から圧縮上死点后90度までの区間について実施した。またスワール比は $r-\theta$ 断面内で剛体渦の角速度のエンジンクランク軸角速度に対する比として定義した。

表1 モデルエンジン仕様

Engine Specifications	Pancake-shaped combustion chamber
Displacement volume	402 cc
Bore x Stroke	80 x 80
Top-clearance	20 mm
Compression ratio	1:5.0
Air-intake valve Open	30BTDC
Close	30 ABDC
Exhaust valve Open	30 BBDC
Close	30 ATDC
Con-rod length	200 mm
Valve diameter	28 mm
Max. valve lift	6.0 mm
Engine Speed	320, 960 rpm

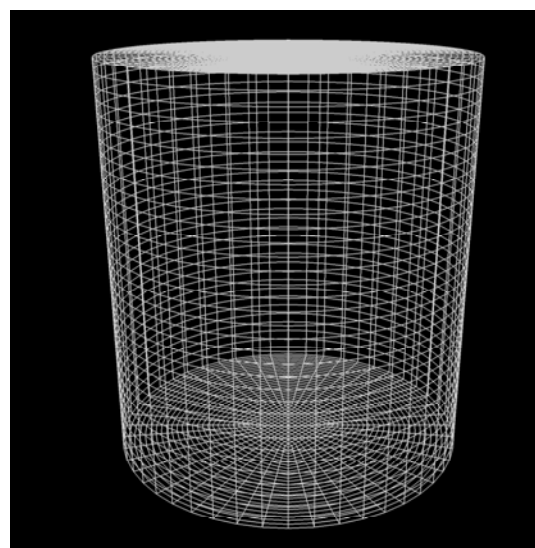


図1 解析格子 (約 50,000 セル)

4. 研究成果

はじめに、本研究で開発コードの実装の妥当性を評価するための解析を行なった。初期スワール比3とした場合の、乱れとサイクル変動を分離する周波数 f_0 と初期値で無次元化したサイクル変動強さならびに乱流強度のエンジン回転数を変更したときの影響を調べた。(10, 0, 10)における軸方向速度の変動強さと分離周波数を図2に示す。この図より、機関速度が増すと分離周波数は大きくなっている。乱れ強さは機関速度によらずほぼ一致している。また圧縮上死点を越えた膨張過程においては乱れ強さ、サイクル変動強さ共に機関速度の影響は小さい。これらの傾向は研究代表者らの過去の結果と一致するものであり、また圧縮上死点後 90 度後も計算を継続しても解析は破綻しなかった。これにより、ALE 移動格子アルゴリズムならびに 2-scale $k-\varepsilon$ モデルの実装が正しくできたことが確認された。

次に燃料ガスの乱流およびサイクル変動の挙動を調べた。燃料の初期分布は予混合燃焼状態を仮定し、ピストン面からシリンダヘッドに向けて濃度が線形に変化している状態とした。初期スワール比3、エンジン回転数を変化させたときの燃料の乱れ強さ F' ならびにサイクル変動 F_c を図3に示す。この図より、燃料の乱れ強さ分布は図2に示した速度変動分布と同様の傾向を示していることがわかる。これは燃料挙動がシリンダ内ガス流動に追従していることに符合する。

燃料の変動はガス流動の挙動に追従すると考えられ、高波数変動は流れの方向との関連は小さくなる（極限的には等方性を持つ）ことが予想され、一方、比較的低波数の変動であるサイクル変動は平均速度の影響を強く受けることが予想される。本条件の流動の場合、平均速度は周方向速度が大きく影響を及ぼすため、燃料のサイクル変動が速度のサイクル変動と違った挙動を示していることが考えられる。

次にエンジン回転数を 320 rpm とし、スワール比を 1, 3 と変化させたときの影響を調べた。乱れ速度は圧縮行程ではほぼ同程度であるが、スワール比が小さい方がその変動が少ない。エンジン設計上、燃焼の促進につながるために乱れは大きくするのがよいが、今回のように変動が大きい場合は注意が必要である。また、スワール比が小さい場合、膨張行程での乱れの減衰が大きい。これはスワールが小さいとその影響が早く消え、同時に渦の消散が早く進行するためと考えられる。サイクル変動を見るとスワール比が小さくなるとサイクル変動が大きくなることから、サイクル変動を抑制する意味でスワールを大きくすることは有効であると言える。

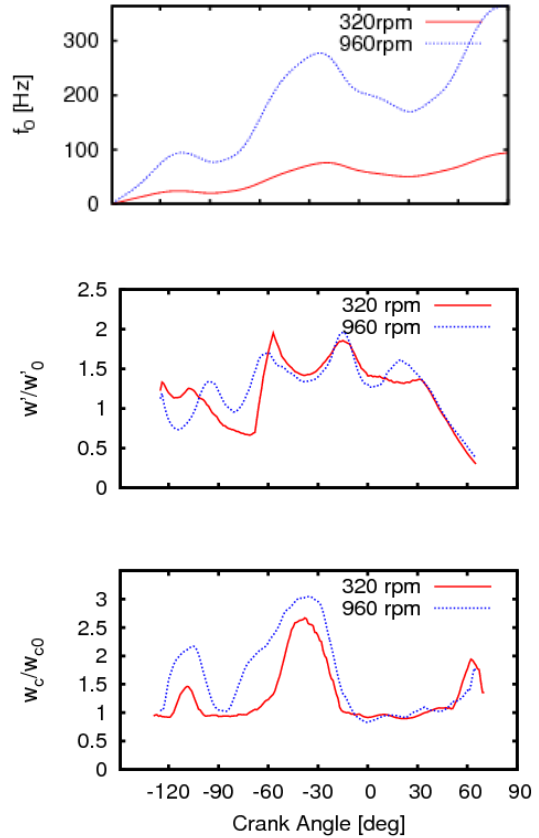


図2 エンジン速度の乱れ強さとサイクルの変動への影響 位置 (10, 0, 10), SR=3

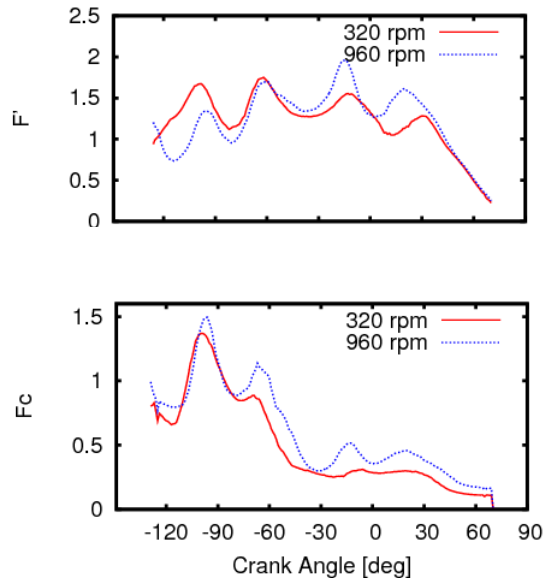


図3 燃料の乱流変動とサイクル変動

なお、全ての計算は1万、5万、10万のそれぞれのセル数で解析を実施し、格子解像度による影響が無いことを確認した。これらの全ての解析は本事業で導入したPCクラスタシステムで実行され、代表的なケースで3時間程度の時間で解析が終了する。この程度の計算時間であれば、工業用途における実用解析に十分利用可能である。

参考文献

[1] Moriyoshi, Y., Proc. Of COMODIA 94 (1994) 553.

[1] 森吉, 機論 B, Vol. 61, No. 10, (1995) 3446.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計0件)

[学会発表] (計1件)

伊藤裕一, 数値解析によるエンジンシリンダ内流動のサイクル変動の予測, 日本機械学会関東支部講演会, 2009年3月6日, 茨城県水戸市.

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

森吉泰生, 日本機械学会 RC238 研究報告書

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森吉 泰生, 千葉大学・大学院工学研究科・教授

(2) 研究分担者

伊藤 裕一, 木更津工業高等専門学校・機械工学科・講師

(3) 連携研究者

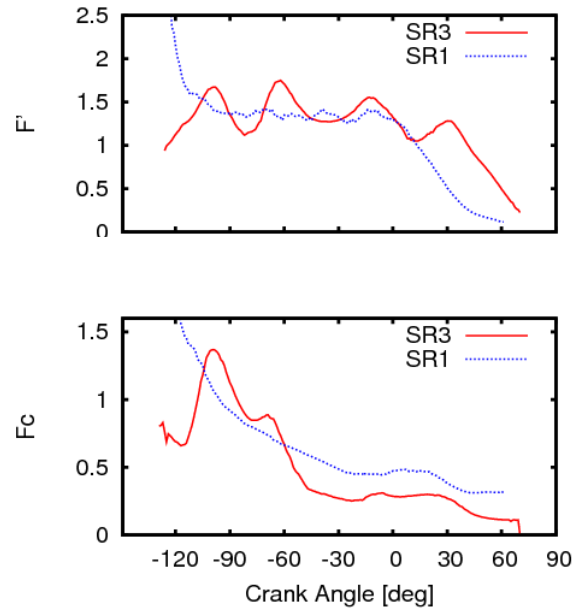


図4 スワール比の乱れ強さとサイクル変動への影響