

次世代エンジンシステムの開発を支える 燃焼解析技術

助川 義寛
Sukegawa Yoshihiro

押領司 一浩
Oryoji Kazuhiro

石井 英二
Ishii Eiji

自動車エンジンの燃費や排気を改善するには、エンジン内で起こっているさまざまな物理現象を詳細に把握し、最適な燃焼制御方法やエンジンコンポーネント仕様を見いだす必要がある。日立は、グループ内の発電プラント分野で培った二相流や燃焼の数値解析技術をベースに、エンジン筒内の流れ、混合気形成、燃焼挙動をシミュレーションで予測する技術を開発した。この予測技術に、近

年、排出低減が強く求められているPM（ススなどの粒子状物質）の濃度予測モデルを導入した。このモデルでは、PMの生成過程を詳細な化学反応機構に基づいて計算する。開発した燃焼シミュレーション技術を用いて、エンジン冷機状態におけるエミッションを低減する燃焼制御コンセプトを提示した。

1. はじめに

エネルギー資源の有効利用と環境保全の観点から、自動車エンジンでは、排ガスの浄化と燃費低減が重点課題である。この課題を克服するためには、高効率に燃焼させるためのエンジン制御やコンポーネントの開発が必要である。

例えば、低燃費エンジンとして導入が進んでいる筒内直接噴射式ガソリンエンジン（以下、「直噴エンジン」と記す。）では、筒内の燃料噴霧や空気流れを緻密に制御し、燃焼に適した混合気を生成することで、燃費や排気の低減を図っている。最適化すべきパラメータは、燃料噴霧やガス流れの形態、噴射、点火や吸排気弁の開閉タイミングなど多岐にわたる。これら多くのパラメータの中から効率よく最適な条件を見いだすためには、数値シミュレーションによって燃料、空気、燃焼ガスの挙動を詳細に解析することが有効である。

エンジン内は、気体と液体の相互干渉、化学反応、乱流、移動境界などを伴う複雑な非定常現象となる。これらを精度よく取り扱うため、日立グループ内の発電プラント分野で培った二相流や燃焼の数値解析技術をベースにさまざまな改良を加え、エンジン解析に適用している。

ここでは、エンジン内の流れや燃焼、排気を予測するシミュレーション技術の計算手法、エンジン解析への適用事例について述べる。

2. 数値シミュレーションによる燃焼の解析方法

直噴エンジンを例にとると、エンジンの一行程内では以下の現象が発生する。

- (1) ピストンの下降によるガス流れの生成と、外部から筒内への空気流入
- (2) 筒内空気への燃料噴射
- (3) 燃料液滴から蒸発した燃料と空気による混合気形成
- (4) 混合気への点火による火炎伝播（ば）、および筒内の温度と圧力の上昇
- (5) 燃焼に伴うNO_x (Nitrogen Oxides：窒素酸化物) やPM (Particulate Matter：粒子状物質) などのエミッション生成

したがって、燃焼シミュレーションでは、ガス流れ、燃料噴霧挙動、液滴の蒸発、燃料と空気の混合、火炎伝播、エミッション生成などをモデル化して数値的に求める必要がある。以下、主要な現象を表す計算モデルと、その数値計算方法について述べる。

2.1 ガス流れと燃料噴霧のモデル

ガスの流れと混合は、混合気に対する質量、運動量、エネルギーの保存式、燃料成分と燃焼ガスに対する質量保存式を解くことで求められる。これらの保存式は式(1)の偏微分方程式で表される。

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial V_i F}{\partial x_i} + \frac{\partial q_i}{\partial x_i} + S = 0 \quad (1)$$

ここに、 t : 時間、 x_i : 座標、 V_i : ガス速度 ($i=1,2,3$) である。左辺第1項は時間変化を表す項、第2項は流れによる輸送を表す項、第3項は分子運動や乱流による拡散を表す項、第4項は生成や消滅を表すソース項である。 F は解くべき物理量から成るベクトルであり、具体的な成分は混合気の密度、運動量、内部エネルギー、燃料成分密度、燃焼ガス密度などである。 q_i は物理量の空間勾配によって生じる現象を表す量であり、伝導や拡散によって生じる流束や粘性によって生じる応力がこれに相当する。例えば、運動量保存式においては、分子粘性と乱流粘性によって生じる応力として式(2)で表される。

$$q_i = (\mu_m + \mu_t) \frac{\partial V_i}{\partial x_i} \quad (2)$$

ここに、 μ_m : 分子粘性係数、 μ_t : 渦粘性係数である。渦粘性係数については乱流モデルによって求められる。乱流モデルには大別して、時間平均乱流モデル(RANS: Reynolds Averaged Navier-Stokes Simulation)と空間平均乱流モデル(LES: Large Eddy Simulation)がある。LESでは過渡の乱流挙動を直接的に取り扱うことができ、RANSに比べてより詳細な解析が可能であることから、ここで扱う手法ではLESを適用した。

保存式に加え、ガスの圧力、温度を求めるためにガスの状態方程式を連成する。

$$P = \rho T \sum Y_j R_j \quad (3)$$

ここに、 Y_j : 成分 j の質量分率、 R_j : 成分 j のガス定数である。式(1)は、有限体積法¹⁾を用いて空間的な離散化を行う。有限体積法では図1に示すような微小な多面体から成る計算セルで流れ場を分割し、セルの界面を通過する流束とセル内部での生成量(消滅量)の収支を式(4)で示す

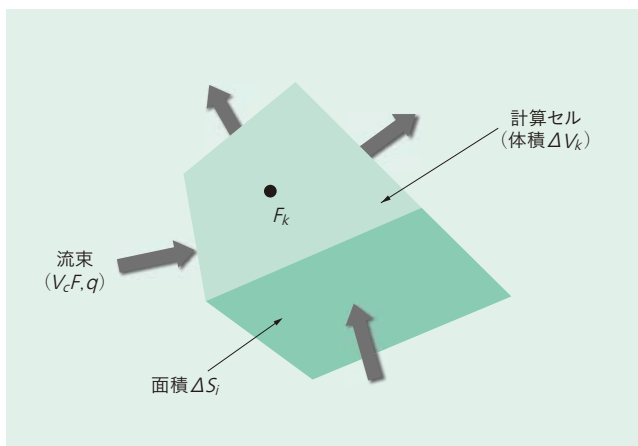


図1 | 有限体積法における計算セル
有限体積法における計算セルと、セル表面を通過する流束のモデル図を示す。

ように定式化する。

$$\frac{d}{dt} (\Delta V_k \cdot F_k) = -\sum_i V_{Ci} F_i \cdot \Delta S_i - \sum_i q_i \cdot \Delta S_i + \Delta V_k \cdot S_k \quad (4)$$

式(4)は時間に関する常微分方程式であるため、Euler法やRunge-Kutta法などの数値積分法を使うことで、時間ステップごとに解を求めることができる。

燃料噴霧の挙動は、ガス流れ場の中に液滴を模擬した粒子を投入し、この粒子の動きを追跡する離散液滴モデル(DDM: Discrete Droplet Model)²⁾を適用して求める。ただし、実際にエンジン内に存在する液滴の数は膨大であり、これらすべてを計算機で扱うのは現実的でない。そこで、初期条件(大きさ、速度、温度、座標)が同一と見なせる複数の液滴を包括したパーセルと呼ばれる粒子単位で挙動を追跡する(図2参照)。パーセルの運動方程式は式(5)で表される。

$$\frac{dV_d}{dt} = \frac{3\rho}{4\rho_d d} C_D |V - V_d| (V - V_d) \quad (5)$$

ここに、 V_d : パーセル速度、 V : ガス速度、 C_D : 抗力係数、 ρ_d : 液滴密度、 d : 液滴直径である。式(5)からパーセルの瞬時速度が求まり、この速度を時間方向に積分することで時々刻々のパーセルの軌道を得ることができる。

液滴とガスの間では、摩擦による運動量交換、伝熱による熱交換、蒸発による質量交換が行われる。これらは、式(1)のソース項を介してガス側に反映される。

DDMをエンジン内の燃焼解析に適用する場合には、パーセルのエネルギー保存式と、蒸発、分裂、抗力、壁面衝突、乱れなどを考慮するための各種サブモデルを加える。

DDMにおいてエンジン内への燃料噴射を扱うには、燃料インジェクタ噴孔部でのパーセル物理量(座標、速度、粒径)を境界条件として与える必要がある。これらは、燃料インジェクタノズル内の液体流れ、液膜形成、液滴への分裂過程を統一的に解析できる噴霧形成シミュレーション

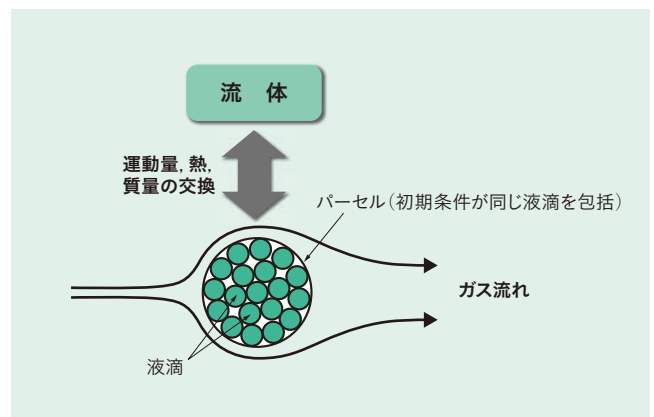


図2 | パーセルによる液滴のモデル化
パーセルにおける液滴のモデル概念を示す。初期条件が同じであると見なせる複数の液滴を1つのパーセルで代表させて取り扱う。

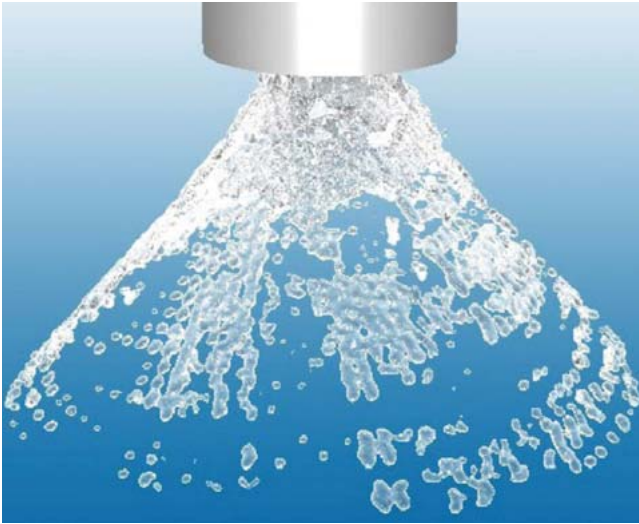


図3 | インジェクタの噴霧形成シミュレーション

スワール（旋回）式燃料インジェクタのノズルから噴射される燃料の挙動を粒子法を用いてシミュレーションした例を示す。ノズルにおける液膜の形成、液膜の分裂による液滴生成を統一的に取り扱うことができる。

ン³⁾によって求める（図3参照）。このシミュレーションにおいては、マイクロな気液界面の追跡にメッシュフリー法の1つである粒子法を適用することにより、比較的少ない計算負荷でインジェクタからの微粒化現象の解析が可能である。

2.2 燃焼のモデル

燃焼は燃料と酸化剤の化学反応であり、燃焼に伴う温度や圧力の変化は、化学反応に伴うガス組成変化の結果として計算される。

ガソリンの燃焼は式(6)の総括反応で近似的に表すことができる。



総括反応式の左辺から右辺への反応進み度合いを表す反応進行度 C ($=0 \sim 1$) を導入すると、ガス組成は反応進行度と燃料成分の分率 f を用いて求めることができる。例えば、燃料と空気が理論混合比で燃焼した場合、燃料 C_8H_{18} と酸素 O_2 の質量分率は式(7)で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} Y_{\text{C}_8\text{H}_{18}} &= f(1-C) \\ Y_{\text{O}_2} &= 0.233(1-f)(1-C) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

反応進行度 C に混合気密度 ρ を乗じると燃焼ガス密度となるため、反応進行度は式(1)の形で表される燃焼ガスの質量保存式を解くことによって求められる。

燃焼が進行する速さは燃焼ガス質量保存式のソース項によって決定されるが、このソース項をどのように表現するかが燃焼モデリングの要となる。エンジン筒内を想定すると、流れの強さは運転条件や空間位置によって幅広く変化

する。したがって、流れの状態に関わらず幅広く適用できる燃焼モデルが求められる。この要求を満たす燃焼モデルとして、HTA(Hyperbolic Tangent Approximation)モデル⁴⁾を採用した。火炎帯の中で反応進行度 C は0から1に変化するが、 C の分布形状にはある程度の普遍性があると考えられる。そこで、HTAモデルではその分布を式(8)で与える。

$$C = \frac{1}{2} \left[1 + \tanh \left[\frac{2x}{\delta} \right] \right] \quad (8)$$

ここに、 δ : 火炎帯厚さ、 x : 火炎厚さ方向距離である。一次元空間における燃焼ガス質量保存式を考え、 C の分布を式(8)で近似すると、燃焼ガスの生成速度 ω が解析解として求まり、式(9)で与えられる。

$$\omega = \frac{8\rho_u S_L C^2 (1-C)}{\delta} \quad (9)$$

このモデルは、流れの状態が層流、乱流のいずれであっても適用することができる。また、乱流モデルにも依存しないためRANSにもLESにも適用可能など、高い汎用性を有していることが特長である。

2.3 エミッションのモデル

エンジン燃焼において予測が必要なエミッションは主に NO_x 、未燃HC(Hydrocarbon:炭化水素)、CO(Carbon Monoxide:一酸化炭素)、PMなどである。ここでは、PMを例にエミッションの計算モデルについて説明する。

PMは、主に燃料の揮発成分が化学反応や凝集などによって粒子化したものである。世界的にPMの排出規制が強化されており、自動車エンジンにおいてもPM排出が少ない燃焼が強く求められている。

PMの生成・成長過程を図4に示す。生成・成長過程は、大きく2つの段階に分けることができる。まず、PMの前駆体が生成する気相反応が進み、続いて前駆体の衝突で生じたPMが大きくなる固相反応が進む。気相反応では、炭化水素燃料の熱分解で生成するアセチレンを出発点に、ベンゼン、およびベンゼンが多数つなごうた多環芳香族炭化水素(PAH:Polycyclic Aromatic Hydrocarbon)を生成する。このPAHがPMの前駆物質である。固相反応では、PAHの衝突によるPMの生成(核生成)、PMとPAHやアセチレンの衝突(表面反応)、PMどうしの衝突(凝集)が生じ、PMが生成・成長する。

固相反応のモデリングには2方程式モデル⁵⁾を適用した。2方程式モデルでは、PMの個数密度と質量の時間変化を解き、個数濃度および質量を予測する。個数濃度の時間変化は核生成と凝集、質量の時間変化は核生成と表面反応で変化すると仮定する。例えばPMの粒子個数濃度

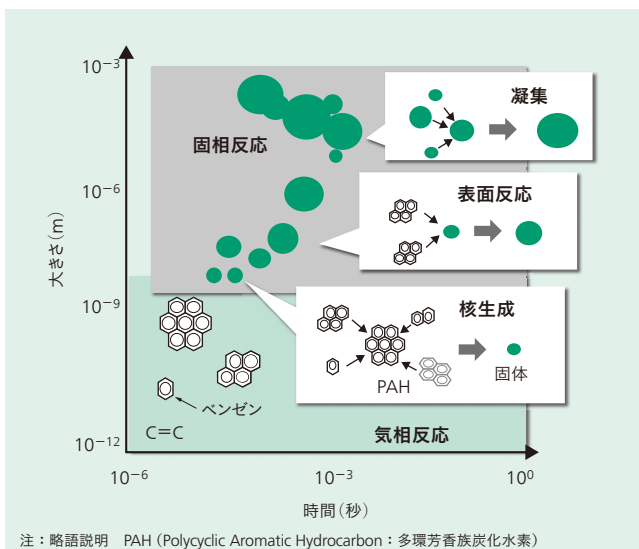


図4 PMの生成・成長過程

PM (Particulate Matter) の生成・成長過程について、横軸を経過時間、縦軸を大きさのグラフ上で示している。

(PN : Particulate Number) の生成速度は式 (10) のように表される。

$$\frac{d(PN)}{dt} = R + W - G \quad (10)$$

ここに、 R : 核生成速度、 W : 表面反応速度、 G : 凝集

速度であり、それぞれについてモデル化が必要である。例えば核生成速度については、アセチレンをPMの前駆物質と仮定し、式 (11) で求めるモデルが提案されている⁶⁾。

$$R = c_1 N_A \left[\frac{\rho Y_{C_2H_2}}{M_{C_2H_2}} \right] \exp \left[-\frac{21100}{T} \right] \quad (11)$$

ここに、 N_A : アボガドロ数、 $Y_{C_2H_2}$: アセチレン濃度、 $M_{C_2H_2}$: アセチレン分子量、 T : 温度、 c_1 : モデル定数である。アセチレンなどの微量化学種成分は式 (6) の総括反応式では考慮されないため、PMのモデル式を解くためには素反応式 (最小単位の化学反応式) を用いた詳細な化学反応を計算する必要がある。この研究ではガソリン燃焼に対して、イソオクタン、ノルマルヘプタンを主燃料成分とした化学種数781、反応式数2,247の素反応式を解いて微量化学種成分を求めた。

以上で述べた計算手法を適用することにより、エンジンの吸気行程から排気行程にわたる一連のガス流れ、燃料-空気混合気形成、火炎伝播、エミッション生成までをシミュレーションすることができる。直噴エンジンに適用した事例を図5に示す。

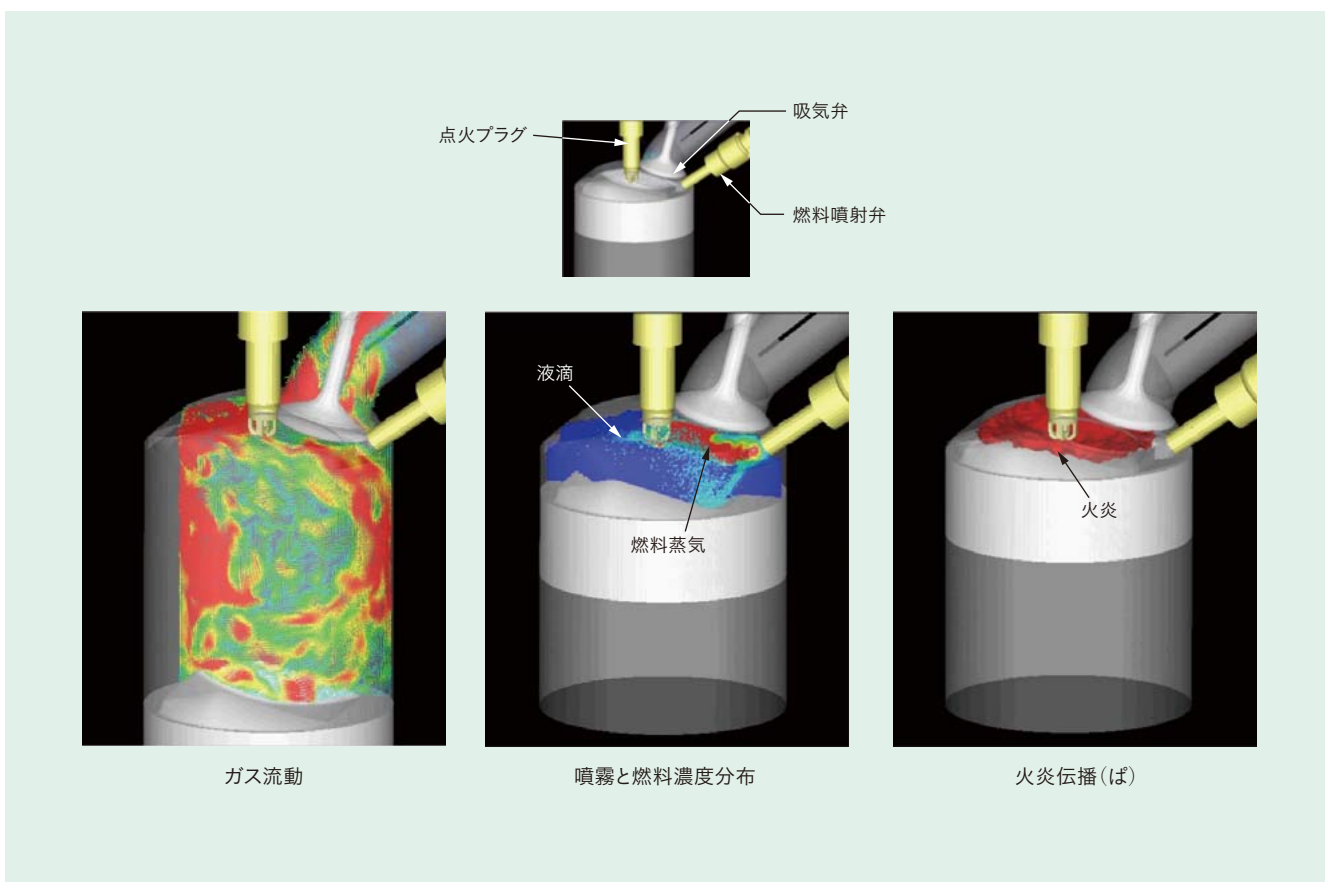


図5 直噴エンジンへの燃焼シミュレーション適用事例

直噴エンジンのシミュレーション例を示す。左は、吸気弁の中心を通る縦断面内における空気の流れベクトル図を示している。ベクトルの色は速度の大きさに対応しており、赤の流速が速い。中央は、シリンダ中心を通る縦断面における噴霧液滴分布と燃料濃度分布を示している。色は燃料濃度に対応しており、赤い部分の濃度が高い。右は、火炎の表面形状を三次元的に示している。

3. 実験によるシミュレーション検証

3.1 ガス流れと噴霧シミュレーションの検証

エンジンシリンダ内流れの実験結果とシミュレーション結果⁷⁾の比較を図6に示す。吸気弁の下方で生じる循環流の様子や速度の大きさなど両者はよく一致しており、シミュレーションで精度よく流れが再現されていることが分かる。

燃料噴霧の実験結果とシミュレーション結果の比較を図7に示す。解析に用いた燃料噴射弁は、燃料に旋回成分を与えることで微粒化するスワール式であり、雰囲気気圧が0.1 MPaの場合には中空コーン形状の噴霧を形成する。雰囲気気圧が0.5 MPaの場合には中空コーン形状の噴霧を形成する。雰

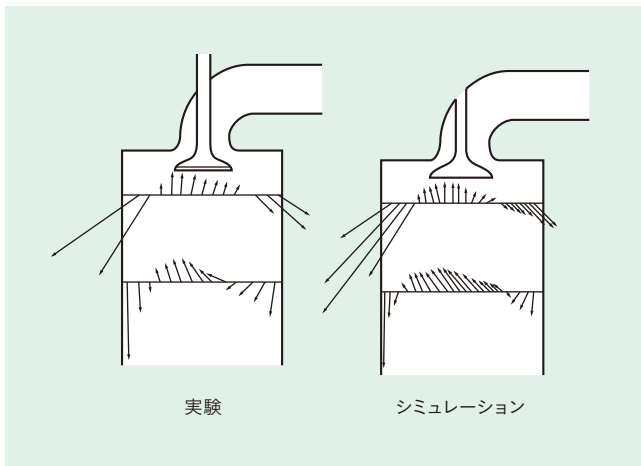


図6 | エンジンシリンダ内流れのシミュレーション結果と実験結果の比較

エンジンシリンダ内の空気速度ベクトルを示す。ベクトルの長さは速度の大きさに対応している。左はレーザードップラ流速計による計測結果、右はシミュレーション結果である。吸気弁の下では循環流が生じる。速度の向き、大きさともにシミュレーション結果は実験結果とよく一致している。

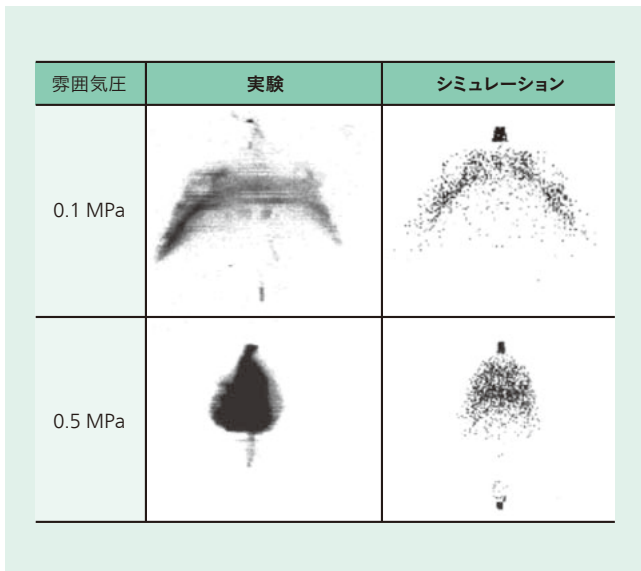


図7 | 燃料噴霧の実験結果とシミュレーション結果の比較

スワール式インジェクタを用いて静止空气中に噴射した噴霧の中心断面の形状を示す。噴射方向は図の上方から下向きである。左は実際の噴霧をスリット光で可視化した写真、右はシミュレーション結果である。空気圧力が0.1 MPa (大気圧) の場合と0.5 MPa (加圧) の場合の結果を示している。大気圧では噴霧は傘状に広がるが、加圧では空気抵抗の増加によって塊状となる。このような圧力違いによる噴霧挙動変化をシミュレーションで再現できている。

雰囲気圧が0.5 MPaになると周囲から噴霧中心に巻き込む流れが生じ、噴霧は塊状になる。このような雰囲気圧の違いによる噴霧形状の変化をシミュレーションではよく再現できている。

3.2 燃焼シミュレーションの検証

燃焼とPM生成シミュレーションの例を図8に示す。同図は直噴エンジンのシリンダ水平断面におけるシミュレーション結果をコンター図で示しており、上から順に火炎伝播状況 (燃焼率分布)、当量比分布、PM粒子密度分布を示している。筒内中心で点火プラグによって点火された火炎がシリンダ壁面に向かって伝播する様子がシミュレーションされている。当量比分布とPM粒子密度分布から、主にシリンダの排気側 (右側) に形成された燃料リッチ領域を起点としてPMが生成されていることが分かる。

エンジン筒内圧力時間履歴について実測とシミュレーションを比較した結果を図9に示す。また、エンジンから排出されるPM個数について実測とシミュレーションを比

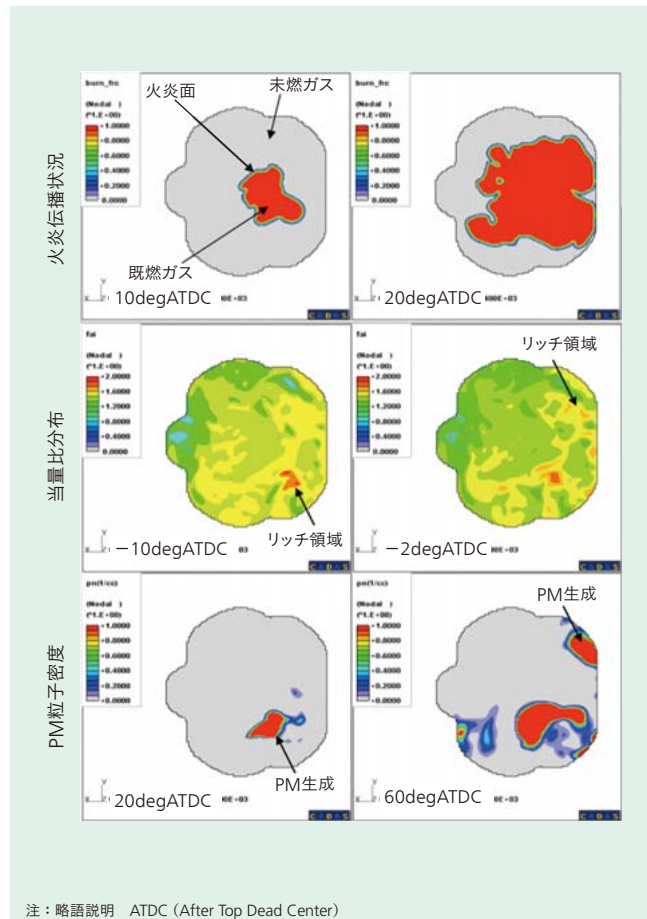


図8 | 燃焼とPM生成シミュレーションの例

直噴エンジン内の燃焼とPM生成のシミュレーション結果をエンジン筒内水平断面におけるコンター図で示す。上図は、燃焼ガスの濃度分布であり、赤い部分が既燃ガス、灰色の部分が未燃ガス、両者の境界が火炎面を表す。中央図は当量比 (燃料濃度) 分布であり、赤い部分は燃料リッチを示す。下図はPM粒子密度であり、赤い部分はPM濃度が高いことを示している。シリンダ内の燃料リッチ部分から高い濃度のPMが生成されていることが分かる。

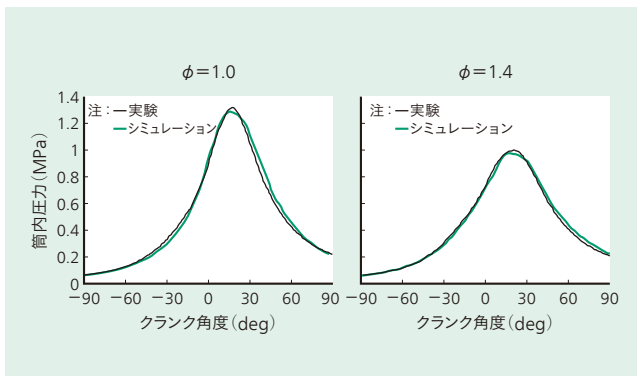


図9 | エンジン筒内圧力時間履歴の比較

エンジン筒内の圧力時間履歴の実験結果とシミュレーション結果の比較を示す。横軸はエンジンクランク角度で示しており、0度はピストン上死点のタイミングを表す。また、黒い線が実験結果、緑色の線がシミュレーション結果である。左はエンジン筒内の平均当量比を1(両論混合比)にした場合、右は平均当量比を1.4(燃料リッチ条件)にした場合の結果である。当量比によって燃焼の速度が変化し、筒内圧力に違いが現れる。この変化をシミュレーションで再現できている。

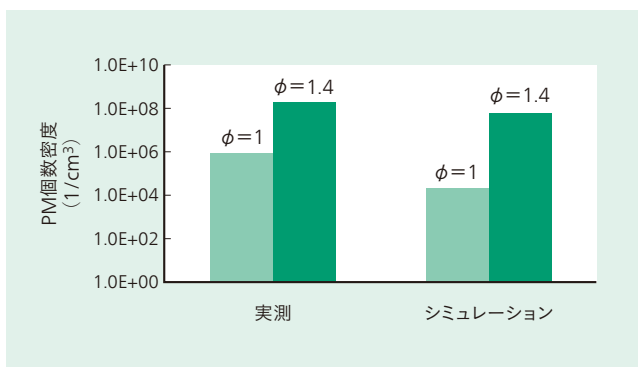


図10 | PM個数密度の比較

エンジンから排出されるPM個数密度の実験結果とシミュレーション結果を示す。左が実験結果、右がシミュレーション結果である。 ϕ は平均当量比を示す。PM濃度は当量比が高くなる(燃料リッチになる)と増加する。この傾向がシミュレーションで再現されている。

較した結果を図10に示す。当量比による燃焼圧力やPM排出量の変化挙動について、シミュレーション結果は実験結果を良好に再現できていることが分かる。

4. 火花点火エンジンへの適用

4.1 未燃HC低減への適用

冷機始動後の排気低減には、排気昇温による触媒の早期活性化と未燃HCの酸化促進が有効である。排気昇温には、点火時期を通常よりも遅くして燃焼を遅らせることが有効である。点火時期を遅くするほど排気温度は上昇するが、トルクのサイクル変動が増大するという問題がある。これを防ぐには混合気への着火性をよくし、特にサイクルばらつきが出やすい初期の燃焼を安定化する必要がある。そこで、数値シミュレーションを用いて、冷機始動直後の未燃HCを低減するための燃焼コンセプトを開発した。以下にその事例⁸⁾を紹介する。

この燃焼コンセプトでは、段差付きピストンを採用した(図11参照)。これはピストン冠面のほぼ中央部に微小な

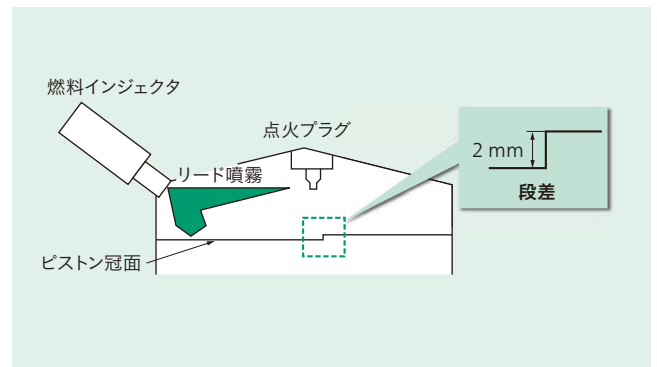


図11 | ピストン形状と噴霧方向

未燃HC(Hydrocarbon)を低減する燃焼コンセプトのためのエンジンピストン形状と噴霧形状を示す。このコンセプトでは、ピストン冠面の中央部に微小な段差を設けたピストンと、非対称形状の噴霧を生成するインジェクタを用いる。

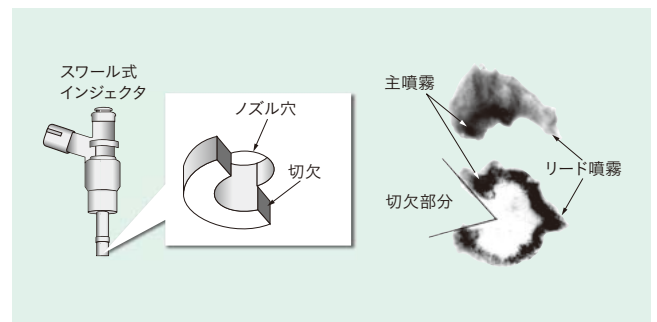


図12 | ノズル形状と噴霧パターン

非対称噴霧を形成するためのノズル形状と、生成された噴霧パターン(実観察結果)を示す。スワール式インジェクタのノズル先端に切欠を設けることで、貫徹力の強いリード噴霧と微粒化のよい主噴霧から構成される噴霧が形成される。

段差を設けたものである。また、燃料インジェクタには、点火プラグ方向とピストン方向に対して非対称な形状を持つ噴霧を形成可能なスワール弁⁹⁾を用いた(図12参照)。このインジェクタでは、噴口部にステップ状の切欠を設けることで非対称な噴霧を形成する。噴霧は、貫徹力の強い噴霧(リード噴霧)と、微粒化のよい噴霧(主噴霧)から構成され、雰囲気圧が高い条件でもリード噴霧の噴射方向が変化しないことが特徴である。この指向性のリード噴霧が点火プラグの電極下に向かうようにインジェクタ設置方向を決定した。

このようなピストン形状噴霧を用いて圧縮行程後期に燃料を噴射すると、リード噴霧が引き起こす高速のガス流れによって点火プラグ近傍の圧力が低下する。一方、主噴霧によって生じた流れはピストンの段差部で減速し、圧力は上昇する。この圧力差によって段差部から点火プラグへ向かう上昇流が生じ、ピストン冠面近傍の燃料が点火プラグ周りに集まる(図13参照)。

ガソリンなど多くの炭化水素燃料混合気では、理論混合比よりも若干燃料リッチ側において火炎伝播性がよくなる。したがって、このように点火プラグ周りに燃料を集めることで初期燃焼が安定化し、冷機始動直後の点火時期を

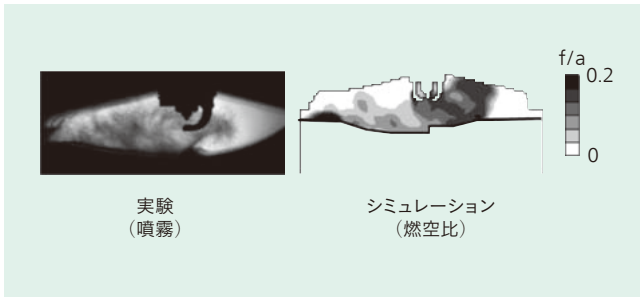


図13 | エンジン筒内の燃料挙動

未燃HCを低減する燃焼コンセプトにおける点火タイミング近傍のエンジン筒内燃料挙動を示す。左は可視化エンジン（透明エンジン）によって撮影した燃料噴霧の分布、右はシミュレーションによる燃料濃度（燃空比）分布を示す。ピストン中央部付近から点火プラグに向かう流れが生じて、点火プラグ近傍に燃料が集まる。

より遅らせることができる。シミュレーションを使うことで、例えば、最適なピストン形状を短期間で見いだすことができる。

噴霧形状を微小に変化させた場合に、点火プラグ近傍の混合気濃度がどのくらい変動するかを、ピストン形状を変えてシミュレーションした結果を図14に示す。この結果より、ピストンBにおいて混合気濃度のばらつきが少な

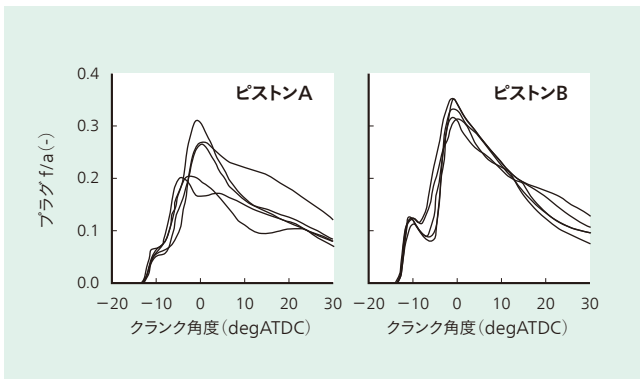


図14 | 噴霧形状の変化に対する点火プラグ近傍の混合気濃度ばらつき（シミュレーション結果）

燃料噴霧形状を微小に変化させた場合の、点火プラグ近傍の燃料濃度（燃空比）変化をシミュレーションで求めた結果を示す。安定に燃焼するためには、濃度のばらつきが小さいほうがよい。ロバストな混合気を作るためのピストン形状は、シミュレーションを用いて最適化した。

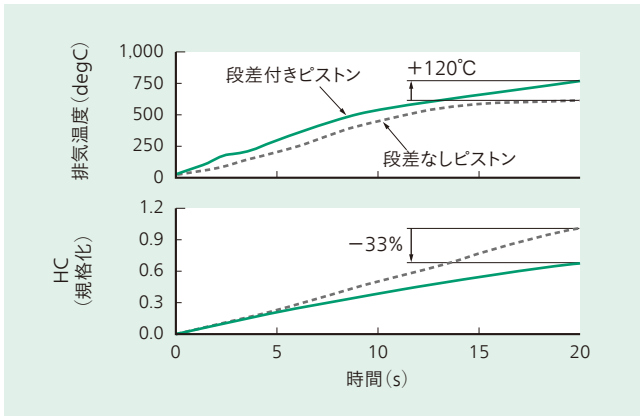


図15 | 冷機始動後の排気温度と積算未燃HC排出量（実測結果）

冷機始動直後の排気温度変化と積算未燃HCの実測結果を示す。この燃焼コンセプトによって排気温度の上昇、未燃HCの低減が確認できた。

く、よりロバストな混合気が形成できることが分かった。

冷機始動後の排気温度と積算未燃HC排出量の実測結果を図15に示す。ここで排気温度は排気管集合部、HCはテールパイプ（三元触媒の通過後）での計測値である。段差なしピストンと段差付きピストンの双方で試験を実施した。段差付きピストンでは燃焼の安定化によって点火時期をより遅角化できているため、段差なしピストンの場合に対して排気温度が120°C上昇し、未燃HCの積算量が33%低減した。未燃HCの低減は、排気温度上昇によって排気管内での未燃HCの酸化が促進されたこと、および三元触媒の活性化時期がより早くなったことが理由と考えられる。以上の検証結果から、この燃焼コンセプトが冷機始動後の未燃HCを低減に有効であることが確認できた。

4.2 PM低減への適用

冷機状態のガソリンエンジンにおいて、PMの発生原因は主にピストン表面やシリンダ壁に付着した燃料液滴である。壁面に付着した燃料は、空気との混合が妨げられるため局所的に燃料リッチな混合気が形成され、これがPMの生成源となる。直噴エンジンの壁面付着液滴のシミュレーション結果を図16に示す。

直噴エンジンでは、狭い筒内に高速度の燃料液滴が噴射されるため、噴霧自身が持つ貫徹力によって液滴が壁面に付着しやすい。噴霧の貫徹力を減らすには、噴射を複数回に分割するのが効果的である。分割噴射によって噴霧ペネトレーション（到達距離）が低減されることを示したシミュレーション結果を図17に示す。断続的に噴射をすることで、噴霧と空気の相互干渉が増え、空気抵抗による液滴の

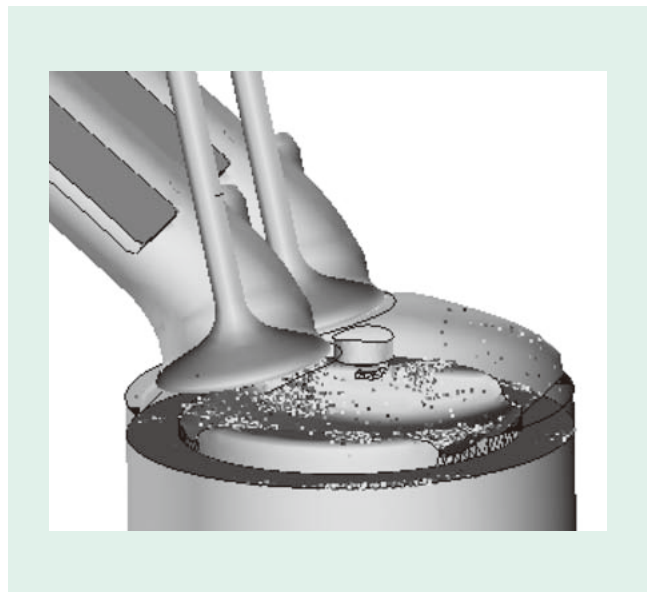


図16 | 壁面付着液滴のシミュレーション結果（分割噴射なし）

直噴エンジンにおける燃料液滴の壁面付着状況をシミュレーションで求めた結果を示す。このような付着燃料が冷機状態におけるPMの発生原因となる。

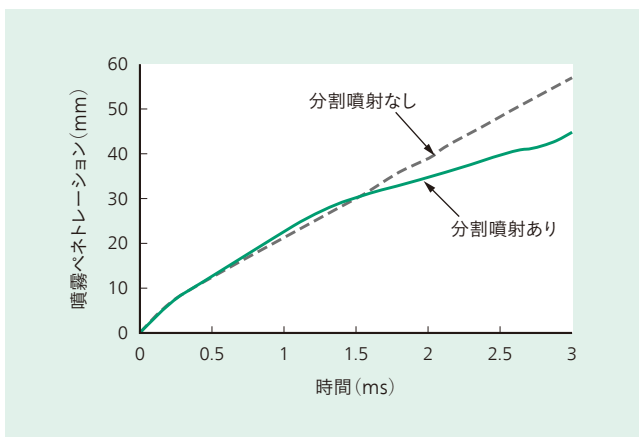


図17 噴霧ペネトレーションのシミュレーション結果

噴霧ペネトレーション（噴霧先端の到達距離）をシミュレーションで求めた結果を示す。分割噴射によって噴霧と空気の相互干渉が増加するため、ペネトレーションは短くなる。

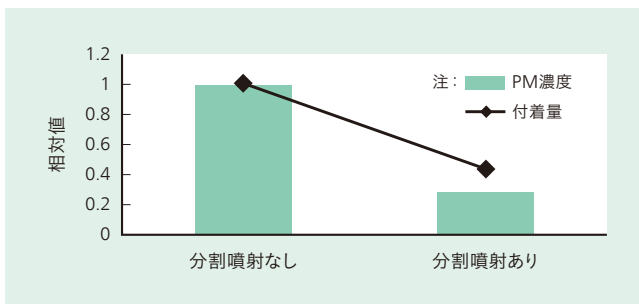


図18 分割噴射による付着、PM低減効果（シミュレーション結果）

分割噴射による燃料付着量の低減、PMの低減効果をシミュレーションで求めた結果を示す。分割噴射によってペネトレーションが短くなることで燃料の壁面付着量が減り、PMを低減できる。

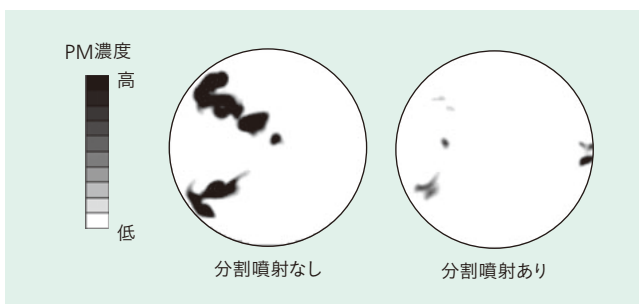


図19 PM濃度分布のシミュレーション結果

エンジンシリンダ横断面におけるPM濃度分布のシミュレーション結果を示す。黒はPM濃度が高い部分を示す。分割噴射によって、PM高濃度領域が狭くなっていることが分かる。

減速が大きくなる。分割噴射によってシリンダ壁面への燃料付着が減少し、その結果PM生成量を大幅に減らすことができる（図18、図19参照）。

5. おわりに

ここでは、エンジンシステム開発の支援を目的とした燃焼シミュレーション技術について述べた。

開発した技術では、エンジン筒内の流れ、燃料噴霧、混合気形成、燃焼などエンジンサイクル内の一連の物理現象

をシミュレーションによって予測することができる。また、燃焼に伴って生成されるPMなどのエミッションを詳細な化学反応メカニズムに基づいて予測することができる。

このようなシミュレーション技術を活用することで、多くの制御パラメータから成るエンジンシステムを効率よく開発することが可能である。また、シミュレーションによって筒内現象を見える化することで、より革新的な燃焼制御へのヒントを得られると考えられる。

エンジン内の現象は複雑であり、シミュレーションの課題はまだ多い。例えば、ノッキングやプレイグニッションといった異常燃焼、詳細な点火現象、壁面近傍での消炎や熱伝達、サイクル変動など、エンジン燃焼を突き詰めるとシミュレーションへの要求はますます高くなると思われる。今後もシミュレーション技術のさらなる高度化を図り、将来のエンジンシステム開発に貢献していく。

参考文献

- 1) J.H. Ferziger, et al.: Computational Methods for Fluid Dynamics, Springer-Verlag (1997)
- 2) Gosman, A. D., et al.: Computer Analysis of Fuel-Air Mixing in Direct-Injection Engines, SAE Technical Paper No.800091 (1980)
- 3) 石井, 外: 粒子法とグリッド法の結合によるマルチスケール気液界面解析, Thermal Science & Engineering, Vol. 14, No. 3 (2006)
- 4) 稲毛, 外: 新たな乱流燃焼モデルの提案とその評価 第1報, モデルの開発, 日本機械学会論文集, B編, 61巻, 586号, 2290~2297 (1995)
- 5) Z. Wen, et al.: Modeling soot formation in turbulent kerosene/air jet diffusion flames, Combustion and Flame Vol. 135, 323-340 (2003)
- 6) D. Carbonell, et al.: Implementation of two-equation soot flamelet models for laminar diffusion flames, Combustion and Flame, Vol. 156, 621-632 (2009)
- 7) 川添, 外: エンジン定常吸気流の数値予測, 日本機械学会第68期全国大会講演論文集, Vol. 68, Pt C, No. 500-9, 268~270 (1990)
- 8) 助川, 外: ガソリン直噴エンジンの冷機始動時におけるHC低減手法の検討, 自動車技術会論文集, 41巻, 5号, 1037~1042 (2010)
- 9) M. Abe, et al.: Fuel Spray Pattern Control Using L-Step Nozzle for Swirl-Type Injector, SAE Technical Paper, No. 2004-01-0540 (2004)

執筆者紹介



助川 義寛

日立製作所 日立研究所 情報制御研究センタ グリーンモビリティ研究部 所属
現在、エンジン燃焼システムの研究に従事
日本機械学会会員、自動車技術会会員、日本燃焼学会会員



押領 司一浩

日立製作所 日立研究所 情報制御研究センタ グリーンモビリティ研究部 所属
現在、エンジン燃焼システムの研究に従事
自動車技術会会員、日本燃焼学会会員



石井 英二

日立製作所 日立研究所 機械研究センタ 高度設計シミュレーション研究部 所属
現在、多相流、マルチスケール解析手法の研究開発に従事
工学博士
日本機械学会会員、日本混相流学会会員、米国機械学会 (American Society of Mechanical Engineers) 会員