

特集 超高回転域における火炎挙動解析技術の開発*

Development of Combustion Behavior Analysis Technique in the Ultra High Engine Speed Range

加藤 毅彦
Takehiko KATO

中島 樹志
Tatsushi NAKASHIMA

秋山 清和
Kiyokazu AKIYAMA

清水 里欧
Rio SHIMIZU

In order to clarify the combustion behavior in the ultra high engine speed range, a new technique has been developed. This technique is composed of ionization current detection and flame observation, and is highly heat-resistant, vibration-resistant, and has a quick response. From analyzing the flame front propagation in the high-speed research engine, it was found that the flame propagated throughout the entire cylinder over almost the same crank angle period irrespective of the engine speed introduction.

Key words: Ultra high engine speed range, Flame propagation, Ionization current detection, Flame observation

1. 緒言

レースエンジンの開発において、高出力化は優先度の高い課題の一つである。レース規定により排気量や気筒数などが制限される中でエンジン出力を向上するには、高回転化、吸入空気量の増大、燃焼の高効率化が有効である。16,000 r/min を超える超高回転化に向けて、エンジンはショートストローク化し、また、吸入空気量増大に向けてバルブエリアが拡大することから、燃焼室形状は広く薄いディスク形状となる。つまり、燃焼に不利な表面積 / 容積比の高い燃焼室内で、非常に短時間で燃焼を終了させなければならない。燃焼の高効率化に向けた改良手法を検討する上で、超高回転域での燃焼挙動を把握することが重要であるが、これまで詳細に解析した事例は無い。

我々は、超高回転域での燃焼挙動の把握に向け、二つの火炎伝播挙動の計測技術を開発した。一つは、従来から火炎伝播時期の計測法として用いられるイオン電流検出法に、高耐熱性・高応答性を備えた、超高回転エンジンに対応する火炎伝播計測システムである。もう一つは、超高回転エンジンに適用可能な火炎の直接観察技術である。両計測手法のデータ比較により、計測技術の検証を行った。

本論文では、開発した超高回転域対応の火炎伝播解析技術を紹介すると共に、研究用に仕立てた超高回転エンジンにて解析した火炎伝播挙動について述べる。

2. 火炎伝播挙動解析技術

2.1 イオン電流検出法

火炎先端の伝播時期を検出する手法として、イオン電流検出法は一般的な手法である。これまでに、シ

リンダヘッドガスケットへのイオンセンサの搭載、点火プラグをイオンセンサとして併用した例¹⁾⁻³⁾が報告されている。しかし、レースエンジンでは、シート状ガスケットではなくリングタイプのメタルシールが使用されているため、ガスケットへのイオンセンサの装着は困難である。また、点火プラグ部のみのイオン電流情報では、燃焼室全体の火炎伝播挙動を把握できないことから、従来と異なるセンサ開発が必要となる。また、超高回転域への対応として、燃焼ガスにさらされても耐えうる耐熱性と、高速燃焼に追従しうる高応答性が要求される。

上記の課題を考慮し、設置する電気ケーブルの芯線を電極、芯線周囲のエンジン壁面を接地電極とするイオンセンサ方式を選択した (Fig. 1)。シリンダヘッドの燃焼室壁面への搭載性と耐熱性を確保するため、イオンセンサとして、インコネル材質の外径φ1.0 mm 外皮と直径φ0.3 mm 芯線の間、マグネシアの絶縁層を形成するφ1.0 mm のケーブル線を用いた。ケーブル先端にて、芯線と周辺のシリンダヘッド壁面間には非エポキシ系セラミック接着剤を塗布し、バイアス電圧印加時の絶縁性を確保すると共に、イオンセンサ設置に

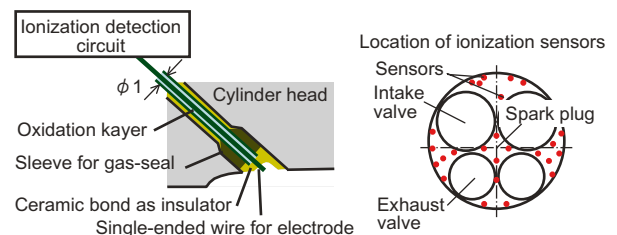


Fig. 1 Ionization sensor

* (社)自動車技術会の了解を得て、「2004年秋季大会学術講演会前刷集」No. 107-05 より、一部加筆して転載

よる燃焼室容積の増大を抑えた。本構成により、イオンセンサとして1200℃の耐熱性を確保している。また、超高回転エンジン特有の扁平な燃焼室形状への対応として、ケーブル芯線先端の位置をシリンダヘッド壁面と同一の高さになるように管理し、ケーブル芯線とピストンとの接触によるショートや破損を抑えた。燃焼室全体における火炎先端面の伝播挙動を明確にするため、本センサをシリンダヘッド壁面に計25点設置した。

イオン電流の信号処理回路として、Fig. 2に示す出力回路を考案した。本回路は、イオンセンサに高電圧をバイアスとして印加する電源部と、イオン電流を電圧として取り出すための検出抵抗、検出抵抗間の電位変動から交流成分のみを取り出すACカップリング、後段のデータ収集回路への過大出力を防止するための出力電圧制限部から構成される。

イオンセンサとなるケーブル芯線にはマイナス電圧(-300 V)を印加した。従来は、センサの検出感度を上げるために、センサ部にプラス電圧を印加し、エンジン壁面を接地電極とすることで、移動量の小さい陽イオンを表面積の広い燃焼室壁面に捕獲する手法がとられている。今回は、検出感度よりも局所での検出性を優先し、センサ部にマイナス電圧を印加する方式とした。Fig. 3に、入力周波数に対する出力応答性を示す。高周波変動に対する遅れのない追従性、減衰特性を有していることが分かる。本回路からの出力信号を、燃焼解析装置(AVL製Indiset Advanced)にて200 kHzのサン

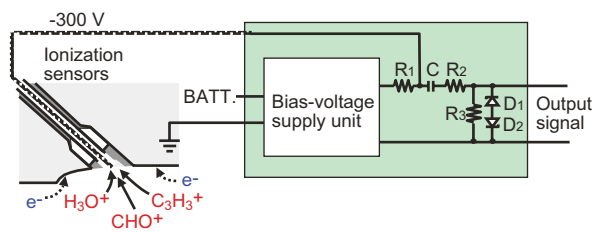


Fig. 2 Ionization current detection circuit

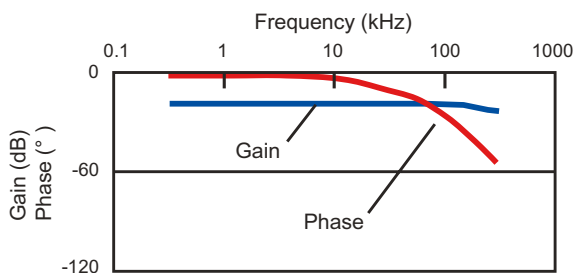


Fig. 3 Response of ionization current detection circuit

プリングレートでデータ収集することで、高周波の信号検出を可能とした。

2.2 直接観察法

火炎伝播挙動を把握する手法として、観察法は有効であるが、超高回転エンジンの火炎伝播を直接観察した事例は無い。今回、前述のイオン電流検出法と併用して、火炎の直接観察を試みた。

乗用車用エンジンでの筒内火炎観察では、シリンダライナ、又はピストンを透明ガラスで製作して観察した例⁴⁾⁵⁾がある。しかし、超高回転領域では、高速移動するピストンや、ピストンと高速にしゅう動して高い振動を伴うシリンダライナへのガラス部材の使用は、耐久性の面で不可能であると共に、燃焼室の壁温が車両運転時と異なるため、火炎伝播挙動を変化させる可能性がある。また、別手法として、エンジン燃焼室壁面の一部に小径の貫通穴を設け、観察窓と小型カメラを内挿する筒内観察手法も検討されているが⁶⁾、燃焼室からの熱負荷が高く、カメラの信頼性を確保することができない。

今回、エンジンの限られたスペースを活用し、エンジン駆動部の変更無しで筒内を観察する手法を考案した。Fig. 4に観察システム構成を示す。シリンダヘッドに小径の貫通穴を設け、ガスシールを兼ねた観察窓を設置し、後方に配置した内視鏡を介して筒内像を撮影機材に転送した。観察窓は、サファイア材の円形窓とインコネル材の筐体からなる。燃焼ガスにさらされる観察窓の熱的応力の低減と、視野範囲の確保のため、観察窓諸元、エンジンへの搭載位置、内視鏡の視野角を最適化した。内視鏡(三菱電線工業(株)製)は、石英製レンズとSUS製筐体とからなり耐熱性確保のため、ガス冷却方式を採用している。内視鏡内部に流入した冷却ガスがレンズ群に直接触れながら先端の対物レンズに向けて流れ、内視鏡先端より流出し、更に、内視鏡と筐体の隙

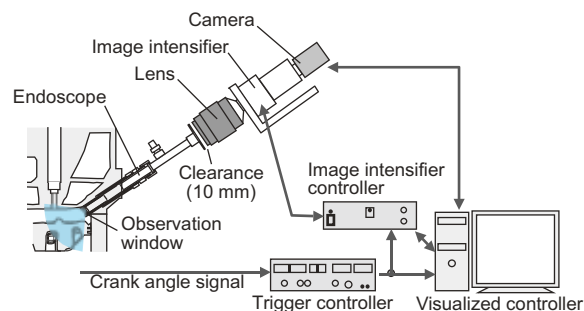


Fig. 4 Apparatus of flame observation

間を経てエンジン外に排出する経路構成とすることで、高い冷却性を確保している。また、一般の内視鏡にて使用されている光学系接着剤を用いず、筐体となる金属部材のみで内部レンズ群の配置と位置管理する構造とした (Fig. 5)。

内視鏡の後方に配置する撮影機材は、内視鏡を介してエンジンの振動が伝達しないよう、内視鏡と 10 mm の空間を設け、独立して固定した。撮影部は、イメージンテンシファイア (浜松ホトニクス社製) と外部トリガ駆動カメラ (PCI 社製) からなる。エンジンクランク角度に同期して撮影するためのトリガパルス制御回路は、エンジンから 1° CA 間隔で出力されるクランク角度信号を基に、1° CA 単位でパルス出力時期を変更可能である。また、カメラの画像取得レート (40 frame/s) 内に撮影周波数を制御するよう、特定の燃焼サイクルのみにトリガパルスを出力する間引き機能を有している。本回路にて、イメージンテンシファイアのゲート、カメラのシャッターを制御することで、撮影感度と撮影時期の制御性を確保した。

3. 実験結果と考察

3.1 火炎伝播解析技術の検証

研究用の単気筒エンジンに、前記 2 種類の火炎挙動解析手法を適用し、超高速回転での火炎伝播挙動を解析した。

各回転数にて、燃料噴射量は最大トルクを発生する空燃比 12.5 に、点火時期は MBT (6000 r/min では 45° CA BTDC, 10,000 r/min 以上では 60° CA BTDC) に設定した。燃料は市販の RON100 ガソリンを用いた。

Fig. 6 に、燃焼 1 サイクル分のイオン電流波形の例を示す。点火プラグとイオンセンサとの距離が長くなる程、波形の立ち上がりが遅れることが分かる。また、プラグ横で検出する波形には二つのピークが発生するのに対し、プラグから遠のくに従って一つのピークに変

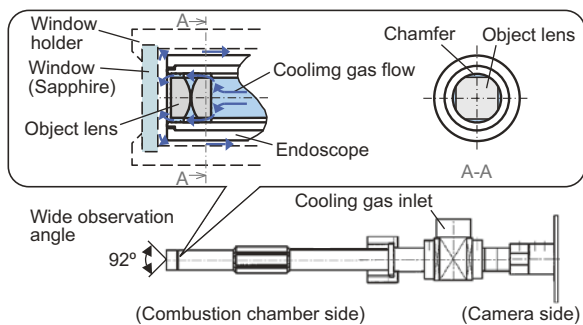


Fig. 5 High heat-resistance endoscope

化する。これは、一つ目のピークは火炎面が電極を通過する際に発生する C_3H_3, H_3O, CHO 等のケミカルイオン、二つ目のピークは高温の燃焼ガス中にて N_2 が熱解離した際に発生するサーマルイオンと考えられ、¹⁾ 火炎の伝播が遅いボア端部では二つのイオン発生時期が明確に分離されないためと推定している。

今回、本出力波形の立ち上がり点を、イオンセンサへの火炎先端面の到達時期とみなした。燃焼 50 サイクル分について 25 点のイオンセンサへの火炎到達時期を求め、イオンセンサの座標データと平均火炎到達時期より補間計算し、クランク角度毎の火炎先端面の輪郭形状を算出した。

また、今回は、シリンダヘッドの燃焼室壁面でイオン検出するために、厳密には、壁面近傍の火炎伝播挙動の計測となるが、燃焼室の空間的な厚みが薄いレースエンジンの TDC 付近での計測では、燃焼室空間での火炎伝播挙動との違いは少ないと考える。

Fig. 7 に、16,000 r/min での、イオン電流検出法による平均火炎伝播挙動と、直接観察法により撮影した火炎画像を示す。火炎伝播挙動の図中の数字は、推定した火炎先端面となるクランク角度 (° CA ATDC) である。一方、画像は、同一クランク角度にて撮影した 50 サイクル分の火炎画像の内から平均的挙動の画像を選定してある。イメージンテンシファイアのゲート期間は約 1° CA に相当する $10 \mu s$ であり、瞬時の火炎挙動を撮影している。内視鏡はシリンダヘッドの燃焼室端面付近に設置し、90° の視野角のために像は湾曲するが、燃焼室内の広範囲を観察可能にしている。画像に明るく見えるのが火炎であり、その端を火炎先端として破線で示してある。

画像から、火炎は点火プラグを起点にして、時間経過と共に視野手前方向に進行しているのが分かる。

両計測手法のデータは共に、火炎の検出開始時期がおおよそ -30° CA ATDC、撮影機材が配置されたサイド側

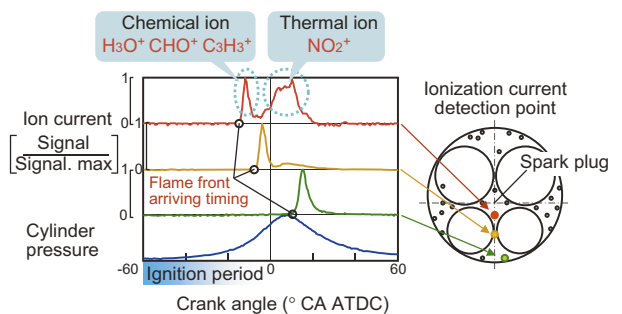


Fig. 6 Typical ionization current signal

ボア端部への火炎到達時期がおよそ 10° CA ATDC と一致していることから、本手法にて得られた火炎伝播挙動は妥当なものであると判断する。

3.2 エンジン回転数による火炎伝播挙動への影響

エンジン回転数変更時の平均火炎伝播挙動を Fig. 8 に、その結果に基づいてボア水平断面全体を 100% とした際の火炎伝播面積割合の増加傾向を Fig. 9 に示す。燃焼は点火プラグを起点とした火炎伝播により進行しており、ノッキング等の自着火現象は検出されなかった。火炎がボア全体に伝播する時間は、エンジン回転数の上昇に伴い短縮している。横軸をクランク角度として整理すると、エンジン回転数に関わらず、約 50° CA と一定期間にてボア全体に火炎が伝播することが分かる。

火炎伝播挙動の計測結果から、燃焼室内のインテーク方向、エキゾースト方向へ向かう火炎伝播速度を算

出した (Fig. 10)。エンジン回転数の上昇に伴い、伝播速度は増大し、また、インテーク方向、エキゾースト方向に向かう伝播速度差が減少し、均等化する傾向であった。

Fig. 11 の 16,000 r/min における火炎画像の拡大写真からも分かるように、高速回転域でも、しわ状の火炎面構造になっており、乱れの影響を強く受けながら火炎は伝播している。つまり、吸気流速、ピストン移動速度の増大により、点火時期以降、燃焼室内に残留する乱れが増大し、乱れ強度に依存したしわ状火炎の伝播促進が得られたものと考えられる。

その確認として、熱線流速計により筒内の乱れを計測した。Fig. 12 のように、燃焼室内の点火プラグ電極位置に熱線流速計を 2 本交差して設置し、一方はインテーク-エキゾースト方向、他方はフロント-リアサイド方向の流速を測るよう配置した。流速を求める際に、筒内圧センサの信号を基にした筒内圧力、温度変

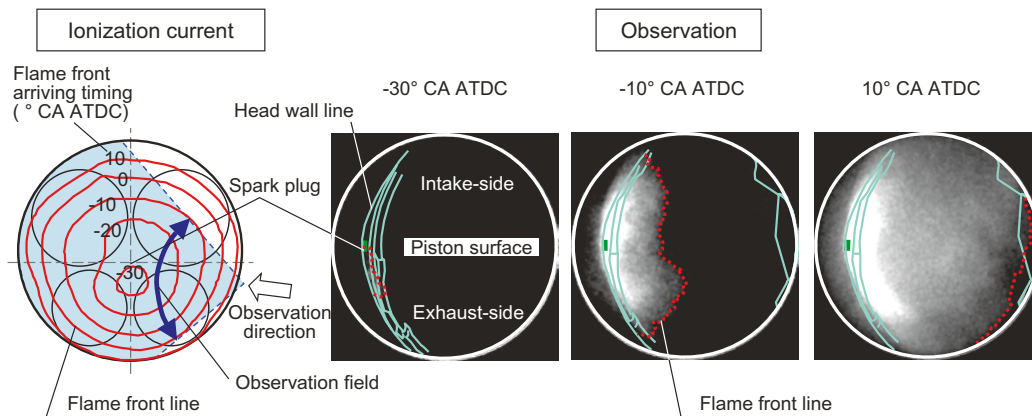


Fig. 7 Flame propagation at 16,000 r/min measured by ionization current sensors and flame observation method

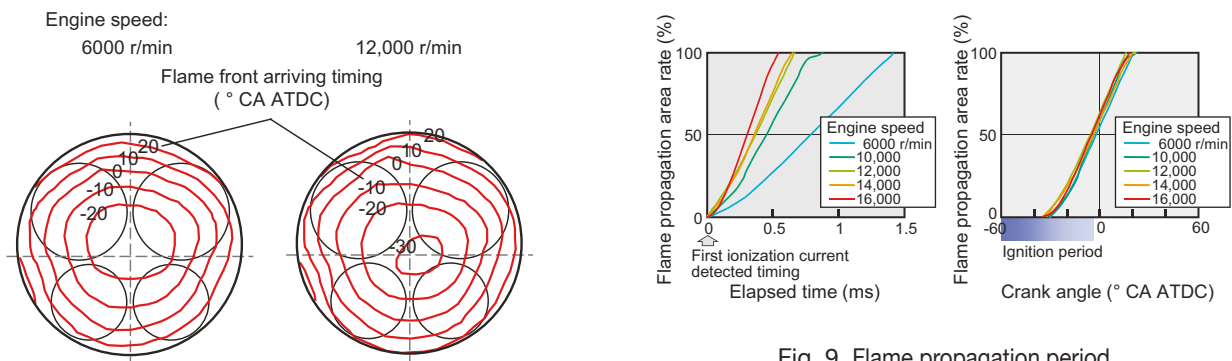


Fig. 8 Flame propagation

Fig. 9 Flame propagation period

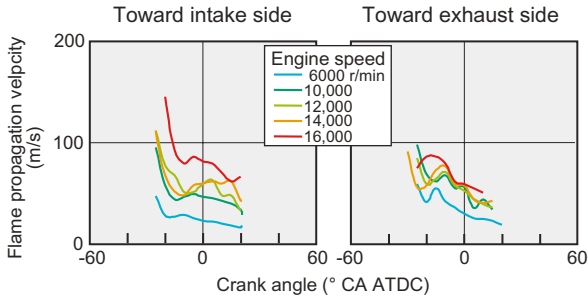


Fig. 10 Flame propagation velocity

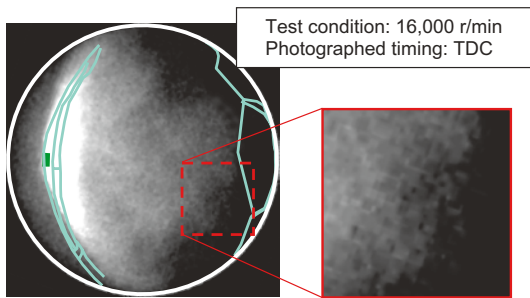


Fig. 11 Flame front shape

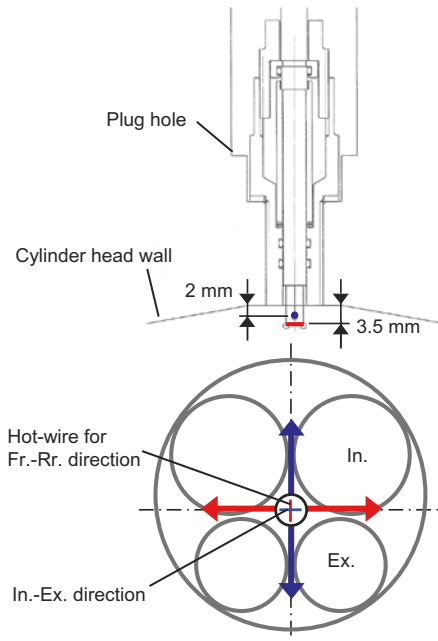


Fig. 12 Hot-wire anemometers

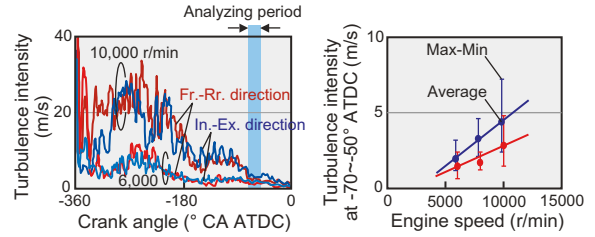


Fig. 13 Turbulence intensity at plug gap

化より、気流の熱伝導率、粘性係数、密度を算出し、補正した⁷⁾流速の1 kHz以上の周波数成分を抽出し、10サイクル分の実効値RMSを乱れと定義した。計測結果をFig. 13に示す。熱線流速計の耐久性から10,000 r/minまでの計測であり、また、熱線流速計の応答性不足により真値を十分にはとらえていない可能性があるが、エンジン回転数の上昇に伴い、吸気流に含まれる乱れ、圧縮行程で生成する乱れが増大する傾向が確認された。このエンジン回転数の上昇に伴い増大する乱れが、火炎伝播を促進している主要因と考える。

また、乱流燃焼速度が、乱れ強度により支配され、燃焼室壁面温度の影響を受ける層流燃焼成分の影響が相対的に減少するため、均等な速度分布になったと推定する。

4. 結言

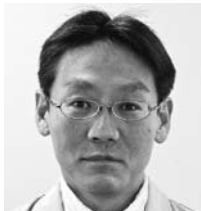
- (1) 超高回転域での燃焼挙動解析技術として、耐熱性耐振動性、高応答性を有する、イオン電流検出法、直接観察法からなる火炎伝播計測技術を開発した。
- (2) 研究用に仕立てた超高回転エンジンに適用し、超高回転域での火炎伝播挙動を解析した結果、火炎伝播速度は、エンジン回転数の上昇に伴い増速し、ボア全体に火炎が伝播する期間は、エンジン回転数に関わらず、ほぼ一定のクランク角期間となることを確認した。
- (3) エンジン回転数の上昇に伴い増速する火炎伝播の要因解析として、筒内乱れを計測した結果、エンジン回転数の上昇に伴い、吸気流に含まれる乱れ、圧縮行程で生成する乱れが増大する傾向が確認された。

<参考文献>

- 1) 島崎勇一：フォーミュラ1エンジンの燃焼状態検出システムの研究（第1報），自動車技術会，学術講演会前刷集，20045649，No. 107-04（2004），pp. 19-22.
- 2) 北脇俊輔：点火電極イオンプローブ法による燃焼診断法の基礎的研究，自動車技術会，学術講演会前刷集，20045290，No. 34-04（2004），pp. 7-10.
- 3) 吉山定見：ガスケット型イオンセンサによる火花点火機関の燃焼診断（第3報），自動車技術会，学術講演会前刷集，20055244，No. 20-05（2005），pp. 1-6.
- 4) 清水里欧：新コンセプト直噴ガソリンエンジン（第3報），自動車技術会，学術講演会前刷集，20005250，No. 21-00（2000），pp. 1-4.
- 5) 佐々木隆：筒内現象解析用可視化エンジンの紹介，Honda R&D Technical Review，Vol. 10（1998），pp. 78-89.
- 6) 中島樹志：新コンセプト直噴ガソリンエンジン（第4報），自動車技術会，学術講演会前刷集，20005141，No. 21-00（2000），pp. 5-8.



<著 者>



加藤 毅彦
(かとう たけひこ)
(株)日本自動車部品総合研究所
研究1部
燃焼の計測，解析に従事



中島 樹志
(なかしま たつし)
パワートレイン機器事業グループ
特定開発室
エンジン開発に従事



秋山 清和
(あきやま きよかず)
(株)日本自動車部品総合研究所
研究2部
通信システム開発に従事



清水 里欧
(しみず りおう)
トヨタ自動車(株)
パワートレイン制御開発部
ガソリン燃焼開発に従事