(19)日本国特許庁(JP)　(12)特　許　公　報(B2)　(11)特許番号
特許第4246798号
(P4246798)
(45)発行日　平成21年4月2日(2009.4.2)　(24)登録日　平成21年1月16日(2009.1.16)

(51)Int.Cl.　　F I
F02D 41/14 (2006.01)　　F02D 41/14 310J
F02D 45/00 (2006.01)　　F02D 45/00 368Z

請求項の数 22　(全 20 頁)

(21)出願番号　特願平10-536931
(86)(22)出願日　平成10年2月20日(1998.2.20)
(65)公表番号　特表2002-514284(P2002-514284A)
(43)公表日　平成14年5月14日(2002.5.14)
(86)国際出願番号　PCT/US1998/003435
(87)国際公開番号　WO1998/037322
(87)国際公開日　平成10年8月27日(1998.8.27)
審査請求日　平成17年2月17日(2005.2.17)
(31)優先権主張番号　60/037,973
(32)優先日　平成9年2月20日(1997.2.20)
(33)優先権主張国　米国(US)
(31)優先権主張番号　09/025,988
(32)優先日　平成10年2月19日(1998.2.19)
(33)優先権主張国　米国(US)

(73)特許権者　508266649
アドレナリン　リサーチ　インコーポレイテッド
アメリカ合衆国　０１７４９　マサチューセッツ，ハドソン，ブレント　ドライブ　３
(74)代理人　100067817
弁理士　倉内　基弘
(74)復代理人　110000523
アクシス国際特許業務法人
(72)発明者　バン　ダイン，エドワード
アメリカ合衆国　０１７２１　マサチューセッツ，アシュランド，キングス　ロウ　４４

最終頁に続く

(54)【発明の名称】イオン化測定を使用して空燃比を制御するための装置及び方法

(57)【特許請求の範囲】
【請求項１】
エンジンの排出物を低減させ且つエンジン効率を増大させるための、内燃機関のための空燃比制御システムであって、
エンジンの燃焼チャンバ内のイオン化を測定し、イオン化測定に基づきイオン化信号を発生するためのイオン化装置と、
イオン化装置に連結された空燃比制御体にして、入力されたイオン化信号の第２のローカルピークによりＮＯｘの情報を決定し、決定した当該ＮＯｘ情報に基づき燃焼チャンバの空燃比を適切に制御するための空燃比制御体と、
を含み、
前記第２のローカルピークが、燃焼プロセス中に創出されるＮＯｘ分子又はＮＯｘ排出量に関連するものである空燃比制御システム。
【請求項２】
制御体が、イオン化信号の第２のローカルピークを実質的に最大化することに基づき空燃比を更に制御する請求項１の空燃比制御システム。
【請求項３】
内燃機関の燃焼チャンバが複数のシリンダを含み、各シリンダが、シリンダ内のイオン化を測定し、イオン化測定に基づきイオン化信号を発生するためのイオン化装置に個別に連結される請求項１の空燃比制御システム。
【請求項４】

制御体が、各シリンダにおいて測定されたイオン化信号の第２のローカルピークの比較に基づき、複数のシリンダの空燃比を更に制御する請求項３の空燃比制御システム。
【請求項５】
燃焼チャンバの排気側に位置付けられ且つ制御体に連結された酸素センサを更に含んでいる請求項４の空燃比制御システム。
【請求項６】
制御体が複数のシリンダの各々に連結され、各シリンダに相当するイオン化信号に基づき、各シリンダの空燃比を個別に制御する請求項３の空燃比制御システム。
【請求項７】
点火ギャップを有する点火プラグを含んでいる請求項１の空燃比制御システム。
【請求項８】
イオン化装置がイオン化プローブを含んでいる請求項１の空燃比制御システム。
【請求項９】
エンジン排出物を低減し且つエンジン効率を増大させるための、内燃機関のための空燃比制御システムであって、
エンジンの燃焼チャンバ内のイオン化を測定し、イオン化測定に基づきイオン化信号を発生するためのイオン化装置と、
イオン化装置に連結され、入力されたイオン化信号の第２のローカルピークによりＮＯｘの情報を決定し、決定した当該ＮＯｘ情報に基づき燃焼チャンバ内の空燃比を適切に制御するための空燃比制御体と、
該空燃比制御体に連結された排気ガス再循環システムとを含み、
前記空燃比制御体が、入力されたイオン化信号の第２のローカルピークに基づき、排気ガス再循環水準を制御し、
前記第２のローカルピークが、燃焼プロセス中に創出されるＮＯｘ分子又はＮＯｘ排出量に関連するものである空燃比制御システム。
【請求項１０】
制御体に連結された不点火検出装置を更に含み、制御体が更に、エンジンにおいて検出された不点火数に基づき、排気ガス再循環水準を制御する請求項９の空燃比制御システム。
【請求項１１】
イオン化装置に連結され且つイオン化信号をコンディショニングするために空燃比制御体に連結されるプロセッサを含んでいる請求項１の空燃比制御システム。
【請求項１２】
イオン化信号を統計的に分析するためのソフトゥエアを含んでいる請求項１１の空燃比制御システム。
【請求項１３】
イオン化信号を統計的に分析するためのソフトゥエアが、複数のエンジンサイクルに渡りイオン化信号を平均化する請求項１２の空燃比制御システム。
【請求項１４】
プロセッサが、所望の空燃比からの既知のオフセットに対してイオン化信号を分析するソフトゥエアを含み、制御体が、オフセットされた所望のイオン化信号の最大化に基づき空燃比を制御する請求項１１の空燃比制御システム。
【請求項１５】
内燃機関のエンジン排出物を低減させ且つエンジン効率を増大させるための方法であって、
エンジンの燃焼シリンダ内のイオン化をイオン化装置を使用して検出すること、
イオン化検出に基づきイオン化装置を使用してイオン化信号を発生させること、
入力されたイオン化信号の第２のローカルピークによりＮＯｘの情報を決定し、決定した当該ＮＯｘ情報に基づき、シリンダ内に射出する空気/燃料混合物を制御すること、
を含み、
前記第２のローカルピークが、燃焼プロセス中に創出されるＮＯｘ分子又はＮＯｘ排出量

に関連するものである方法。
【請求項１６】
入力されたイオン化信号の第２のローカルピークによりＮＯｘの情報を決定し、決定した当該ＮＯｘ情報に基づき、シリンダ内に射出する空気/燃料混合物を制御することが、イオン化信号の第２のローカルピークの最大化に基づいて実施される請求項１５の方法。
【請求項１７】
入力されたイオン化信号の第２のローカルピークによりＮＯｘの情報を決定し、決定した当該ＮＯｘ情報に基づき、シリンダ内に射出する空気/燃料混合物を制御することが、イオン化信号の第２のローカルピークの最小化に基づいて実施される請求項１５の方法。
【請求項１８】
空燃比制御体が、空燃比を、イオン化信号における第２のローカルピークが実質的に最大化される空燃比から所定量オフセットされるように制御するための所定のオフセットを使用する請求項１の空燃比制御システム。
【請求項１９】
空燃費制御体が、空燃比を、イオン化信号における第２のローカルピークが実質的に最小化される空燃比から所定量オフセットされるように制御するための所定のオフセットを使用する請求項１の空燃比制御システム。
【請求項２０】
空燃比制御体が、イオン化信号の第２のローカルピークを実質的に最小化するように排気ガス再循環水準を制御する請求項９の空燃比制御システム。
【請求項２１】
エンジン排出物を低減し、エンジン効率を増大させるための内燃機関のための空燃比制御システムであって、
エンジンの第１の燃焼シリンダ及び第２の燃焼シリンダの各内部のイオン化を測定し、前記第１の燃焼シリンダ及び第２の燃焼シリンダの各イオン化測定に基づき、第１のイオン化信号及び第２のイオン化信号を発生するためのイオン化装置と、
イオン化装置に連結された空燃比制御体にして、入力された第１のイオン化信号の第２のローカルピークによりＮＯｘの情報を決定し、入力された第２のイオン化信号の第２のローカルピークによりＮＯｘの情報を決定し、決定した各ＮＯｘ情報を比較することに基づき、第１の燃焼シリンダ及び第２の燃焼シリンダの各空燃比を適切に制御する空燃比制御体と、
を含み、
前記第２のローカルピークが、燃焼プロセス中に創出されるＮＯｘ分子又はＮＯｘ排出量に関連するものである空燃比制御システム。
【請求項２２】
燃焼チャンバの排気側に位置付けられ且つ空燃比制御体に連結された酸素センサを更に含み、空燃比制御体が、該酸素センサからのデータに基づき第１の燃焼シリンダ及び第２の燃焼シリンダにおける各空燃比を更に制御する請求項２１の空燃比制御システム。
【発明の詳細な説明】
（発明の分野）
本発明は一般に内燃機関における着火システムに関し、詳しくは、空燃比制御のためにイオン化測定を使用してエンジン排出物を低減させ、エンジン効率を増大させるための装置及び方法に関する。
（従来技術）
排出物制御、エンジン効率、触媒コンバータ効率、触媒コンバータ寿命、エンジン出力、を含む多くの理由のために内燃機関のシリンダ内に導入する空燃比を制御する必要がある。従来、特に、特定の排出物を減らすための政治的な圧力に照らした、空燃比を制御するための数多くの方法及び装置がある。現在の内燃機関は、エンジン速度、吸入マニホルド圧、冷却材温度、スロットル位置、排気ガス中の酸素濃度のような種々のエンジン運転パラメータの読み取りをその総合的制御を行う前提条件としている。これらのパラメータは

、エンジンが、基準エンジンにより決定したような最大効率及び最小排出物を達成するよう、エンジンの着火タイミング、燃料射出時間、排気ガス循環（“ＥＧＲ”）を選択するために、基準エンジンにより較正した所定の基準マップと共に使用される。
現在のエンジン制御システム、詳しくは空燃比制御システムは、最大効率及びより少ない排出物を達成するようには内燃機関を適切に制御しない。例えば、米国特許第４，５４３，９３４号によれば、各エンジンシリンダのピーク燃焼圧時の角度位置の、各サイクル間での揺れを監視することに基づく燃料－空気混合物希釈制御が提供される。この制御システムは、安定及び不安定の各状況間においてエンジンの安定性が変化するに際しての空燃比を決定する。制御体は、エンジンをエンジン安定点で連続的に運転させ、エンジンが不安定となり始めるまで燃料－空気混合物混合物を希薄化し、エンジンが再度安定し始めるまで燃焼－空気混合物を富化しようとする。このエンジン安定点はしばしば、最大効率点を超え、また同じくしばしば、最小排出物点を越える。米国特許第４，７３，７２４号に記載されるようなその他の制御システムは、各エンジンシリンダにおける燃焼時間を測定することで空燃比を制御する。この燃焼時間は所定速度及び負荷でのエンジンのための希薄限界を決定する適応エンジンマップと比較される。次いでエンジンは、所望のエンジン安定性のために可能である最大希釈点で運転されるように制御される。しかしこの最大希釈点は最大効率点をしばしば超え、またしばしば、最小排出物点を超えてしまう。米国特許第４，６２１，６０３号には、圧力比制御を使用して燃料－空気混合物希釈水準を制御する別の方法が記載される。第１のシステムが、エンジン速度及び負荷の関数としての仕様値での希釈量を制御し、第２のシステムが、燃焼比或いは燃焼時間を調整するための希釈量を制御する。そして第３のシステムがサイクル間変動を、各燃焼チャンバへの燃料送りを均衡させるため及び安定性制御のための両方法として使用し、希釈量を制御する。この圧力比制御方法では簡単なアルゴリズムを使用することができる。しかしやはり、エンジンを完全に制御するために十分な情報を持つエンジン制御体とはなり得ない。なぜなら、特定点においてのみ圧力値を読み取るのでは制御体はエンジンの安定性しか評価し得ず、従って先に言及した各システムと同じ限界があるからである。米国特許第４，６２１，６０３号のシステムは、基準マップに従い較正した特定空燃比下に使用することができるものの、適応アルゴリズムを使用してさえも、その圧力比は、システムが最大効率及び最小排出物の両方を提供し得るようにするための十分な情報を提供しない。例えばこの米国特許第４，６２１，６０３号に記載される装置は、仮に着火タイミングが大きく変動した場合はエンジンの平均有効圧を算出するのは極めて困難である。そうした計算は、高希釈混合物下における最大効率及び最小排出物を実現するためには必須である。
空燃比制御技法における重要な考慮事項は、触媒コンバータの性能である。触媒コンバータの性能を最適化するためには理論空燃比（ガソリンでは約１４．７対１）が望ましい。それは、空燃比が濃厚（即ち１４．７対１未満）であると燃料は完全燃焼せず、発生した排出物が触媒コンバータを詰まらせる傾向があるからである。理論空燃比に対置するものとしての希薄混合物（即ち１４．７対１よりも大きい）では排出物内の酸素（O_2）量が過剰となり、結局、触媒コンバータの運転温度が上昇し、窒素－酸素複合物（ＮＯｘ）の変換量が減少されあるいは防止される。触媒コンバータは高温に晒されるとその作用寿命は急減する。結局、触媒コンバータは、エンジンシリンダ内で理論空燃比が使用される場合に最も効率的に使用される。
大抵の空燃比制御方法では、エンジンの排気系内で酸素センサを使用して排気中の酸素量を測定する。排気中の酸素はエンジンが理論混合物下に運転されているか否かを示す。酸素センサは排気マニホルドか或いは排気管の何れかにおいてエンジンの排気中の酸素量を測定する。排気マニホルド或いは排気管内で酸素センサを使用することの１つの欠点は、センサがエンジンシリンダのための全体的な空燃比を測定することである。例えば、仮にあるシリンダが燃料射出装置が詰まったために希薄混合物下に運転されると、酸素センサに基づく空燃比制御体が他のシリンダをもっと濃厚な混合物下に運転させそれにより、所望の全体空燃比を維持する。そうしたシステムは、所望されざる濃厚な或いは希薄な混合物下に個々のシリンダが運転され得る場合でさえも、全てのシリンダのための平均理論空

燃比を実現する。
酸素センサを使用して、上述の排出物の全体的制御を個別のシリンダの空燃比制御に代替させようとする数多くの試みが実施された。空燃比個別制御のための最も一般的な方法は、高速型の酸素センサを使用して各シリンダからの排出酸素を識別するものである。この方法の主たる欠点は、酸素センサがシリンダの下流側にあることである。燃焼の起きるシリンダと、燃焼特性を測定するセンサとの間の物理的距離が時間差を導入し、エラー及び制御の難しさをもたらす。この形式の空燃比制御システムを、全てのエンジン速度における時間差及びエラーに対処するべく較正するのは極めて困難である。更に、幾つかの最新型エンジンではこの形式での制御のために４つ以上の酸素センサが必要とされそれが実装コストを大きくしている。
比較的最近の開発により、特定のシリンダ内燃焼特性を監視することが可能となった。この監視技術は、シリンダ内のガスを燃焼前、燃焼中そして燃焼後に電気的に分析することを中心においている。シリンダ内に出現するガスには、燃焼反応によって生じた自由イオンが含まれる。
こうした自由イオンは導電性を有し、従って、イオン化プローブを横断して、あるいは点火プラグの先端部を横断して電圧を印加することにより測定することができる。印加された電圧がイオン化ガス内に電流を誘起し、この電流を測定することで分析のためのイオン化信号が提供される。点火プラグ先端を使用するイオン化検出方法の例は１９９８年７月７日発行の米国特許第５，７７７，２１６号を参照されたい。
従来、イオン化信号を空燃比に関連付けようとする幾つかの試みが実施されている。しかしながら、従来技術によれば、イオン化信号データに基づいて内燃機関の空燃比をフィードバック制御することは不可能であることが強く示唆される。“Ｉｇｎｉｔｉｏｎ Ｓｅｎｓｏｒｓ ｆｏｒ Ｆｅｅｄｂａｃｋ Ｃｏｎｔｒｏｌ ｏｆ Ｇａｓｏｌｉｎｅ Ｅｎｇｉｎｅｓ”と題するＮ．Ｃａｌｌｉｎｇｓ他の、ＳＡＥ技術論文１９８８年の連続番号第８８４７７１号の第４３～４７頁及び、“Ｉｎ－Ｃｙｌｉｎｄｅｒ Ｍｅａｓｕｒｅｍｅｎｔ ｏｆ Ｃｏｍｂｕｓｔｉｏｎ Ｃｈａｒａｃｔｅｒｉｓｔｉｃｓ Ｕｓｉｎｇ Ｉｏｎｉｚａｔｉｏｎ Ｓｅｎｓｏｒｓ”と題するＲ．Ｌ．Ａｎｄｅｒｓｏｎの、ＳＡＥ技術論文１９８８年の連続番号第８６０４８５号の第１１３～１２４頁とを参照されたい。
（発明が解決しようとする課題）
内燃機関のシリンダ内に導入される空燃比を調節するための改良制御システム及び方法を提供することであり、
少なくとも部分的にイオン化検出に基づいて内燃機関の空燃比を制御する改良制御システム及び方法を提供することであり、
イオン化検出装置から得られたイオン化信号に基づいて内燃機関の空燃比を制御するための制御システム及び方法を提供することであり、
安価で且つ効率的な、内燃機関の空燃比を制御するための方法を提供することである。
（課題を解決するための手段）
本発明によれば、排出物を低減させ且つエンジン効率を増大させるための内燃機関のための空燃比制御システムが提供される。本発明の空燃比制御システムには、その１様相において、エンジンの燃焼チャンバ内のイオン化を測定し、イオン化測定に基づくイオン化信号を発生するためのイオン化装置が含まれる。このイオン化装置と電気的に連通する空燃比制御体も含まれる。空燃比制御体は、イオン化信号を受け、少なくとも部分的にイオン化信号に基づき、エンジン内の空燃比を制御する。
空燃比制御システムの別の実施例においては、制御体がイオン化信号の第１のローカルピークに基づき、空燃比を制御する。別の実施例では、制御体はイオン化信号における第１のローカルピークを最大化することに基づき、空燃比を制御する。空燃比制御システムの別の変更例では制御システムに、イオン化信号をコンディショニングするためのプロセッサが含まれる。制御体はコンディショニングされたイオン化信号に基づき、空燃比を制御する。

他の実施例では制御体は、イオン化信号における第２のローカルピークを実質的に最大化或いは最小化するように空燃比を制御する。
更に他の実施例では、内燃機関の燃焼チャンバに複数のシリンダが含まれる。各シリンダはシリンダ内のイオン化検出のためのイオン化装置に個別に連結されそれにより、イオン化測定に基づくイオン化信号を発生する。制御体は２つ以上のシリンダの空燃比を個別に制御することができる。イオン化測定装置は更に、イオン化信号を発生させるための点火プラグ或いはシリンダ内のイオン化プローブを含み得る。
内燃機関における排出物を低減させエンジン効率を上げるための方法もまた開示される。本方法には、エンジンの燃焼シリンダ内でのイオン化をイオン化装置を使用して検出し、イオン化検出に基づき、イオン化装置を使用してイオン化信号を発生することが含まれる。本方法には更に、イオン化信号に基づき、シリンダ内に射出する空気/燃料混合物を調節することが含まれる。
本方法のこの調節段階はイオン化信号の数多くの特徴に基づくものであり得る。そうした特徴には、第１のローカルピーク、第１のローカルピークの最大化、第２のローカルピーク或いはこの第２のローカルピークの最大化及びあるいは最小化、が含まれる。本方法には更に、第１のシリンダのイオン化信号の第１のローカルピークを第２のシリンダのイオン化信号の第１のローカルピークと比較することが含まれ得る。また、第１及び第２の各ローカルピークを実質的に等振幅に維持することにも基づき得る。
【図面の簡単な説明】
図１は、代表的内燃機関のための、種々の排出物（特に、CO_2、ＮＯ及びＨＣ）対余剰空気係数（“λ”以下に定義する）をグラフ化した図である。
図２は、本発明の空燃比制御システムの概念図である。
図３は、本発明の空燃比制御システムのブロックダイヤグラム図である。
図４は、種々のエンジン負荷条件のためのイオン化電流対エンジンピストンクランク角を示す実験データのグラフである。
図５は、種々のエンジン負荷条件のためのシリンダ圧力対エンジンピストンクランク角の実験データのグラフである。
図６は、余剰空気係数（λ）及びイオン化と、数多くのエンジン負荷条件のためのイオン化との間の相関を示す実験データのグラフである。
図７は、種々の値での余剰空気係数（λ）のための、イオン化対エンジン負荷を示す実験データのグラフである。
（実施例）
先ず、図１を参照するに、代表的な運転条件下における代表的なエンジンのための、種々の排出物ガス対余剰空気係数（“λ”）のグラフが示される。図１はＢｏｓｈ　Ａｕｔｏｍｏｔｉｖｅ　Ｈａｎｄｂｏｏｋの１９８６年版、第４３９頁に示されるものである。ここで、余剰空気係数（λ）とは、空燃比が理論混合比（例えばガソリンのための１４．７対１）以上或いは以下であることを示す単なる係数である。かくして、例えばλ＝１であるときに相当する空燃比は理論空燃比であり、λ＝１．２の時に相当する空燃比は理論空燃比の１２０％であり、λ＝０．８の時に相当する空燃比は理論空燃比の８０％、そしてλ＝２の時には理論空燃比の２倍（例えばガソリンのための２９．４対１）に相当する。図１から、ＮＯ濃度は理論空燃比よりも若干希薄（λ>１）な値の時にピークとなることが分かる。ＮＯの発生はＮＯｘが発生したことの代表資料である。
先に説明したように、イオン化の検出及び測定は斯界に既知である。イオン化を検出し測定するためのイオン化検出装置の１つの形式は、電圧がそこを横断して印加される点火ギャップを利用する点火プラグを含んでいる。点火ギャップを横断する電圧が燃焼中及び燃焼後におけるイオン化ガスに電流（点火ギャップを横断する）を誘起する。電流は回路により検出され、分析されて燃焼特性が決定される。例えば、“Ｉｇｎｉｔｉｏｎ　Ｓｙｓｔｅｍ　Ｗｉｔｈ　Ｉｏｎｉｚａｔｉｏｎ　Ｄｅｔｅｃｔｉｏｎ”と題する１９９８年７月７日発行の米国特許第５，７７７，２１６号を参照されたい。他のイオン化検出装置では、その一次機能がイオン化ガスを検出することであることを除き点火プラグと類似する

プローブが使用される。
図２を参照するに、本発明に従う制御システム１０が示される。内燃機関（図示せず）がシリンダ１２と、ピストン１４と、吸気弁１６と、排気弁１８とを有している。吸気マニホルド２１が吸気弁１６を介してシリンダ１２と連通される。排気マニホルド２２が排気弁１８を介し、シリンダ１２からの排気ガスを受ける。点火ギャップ２２を有する点火プラグ２０がシリンダ１２内の空気及び燃料混合物に着火する。
従来のエンジン制御体３０が、代表的には、種々のエンジン運転パラメータ及び、燃料射出装置３２及びアイドル空気弁３４を含む構成部品を制御する。エンジン制御体３０は、スロットル弁３６に連結したスロットル位置センサ（図示せず）からの位置データ及び、マニホルドセンサ３８からのマニホルド圧データをも受ける。スロットル弁３６は吸気マニホルド２０内に設けられ、シリンダ１２への空気流れを制御する。エンジン制御体３０はまた、代表的には、排気マニホルド２２内或いは排気弁１８の下流側のどこかに位置付けした酸素センサからのデータをも受ける。
イオン化検出装置５０はイオン化検出装置を含み、イオン化検出装置は、図２に示されるように、シリンダ１２内のイオン化を検出するためにシリンダ内部に部分的に位置付けられた点火プラグ２０を含んでいる。この点火プラグあるいはイオン化検出装置２０により検出したイオン化情報はイオン化装置５０に送られる。イオン化装置５０はイオン化検出装置（点火プラグ２０あるいはイオン化プローブ或いは、イオン化検出用の任意のその他の従来装置）からのイオン化データを受け、イオン化信号５２をエンジン制御体３０に送る。
エンジン制御体３０は燃焼射出装置３２を制御しまた、スロットル弁３６を制御して空気及び燃料を所望の比率下にシリンダ１２に送ることができる。エンジン制御体３０はイオン化装置５０からのイオン化信号５２の形態でのフィードバックを受けて空燃比を調節するようになっている従来からの任意の制御体とすることができる。
図３には、本発明に従う制御システム１０のブロックダイヤグラムが示される。エンジン１１が点火プラグ２０を含み、この点火プラグが、本実施例ではイオン化検出を提供する（イオン化プローブのようなその他のイオン化検出装置を使用しても良い）。イオン化装置５０が点火プラグ２０からのイオン化検出データを受け、受けたデータをイオン化信号５２に変換する。イオン化信号５２は、プロセッサ５０ｂ内でプロセス処理され且つ、統計的分析（以下に説明する）を含み得る分析にかけられる。プロセス処理されたイオン化信号５２ａ及び５２ｂはエンジン制御体３０（今後、エンジン制御ユニットあるいは“ＥＣＵ”とも称する）に送られ、このエンジン制御体３０が結局、イオン化装置５０に、エンジン速度、点火あるいは着火タイミング及び着火時間を含むその他のエンジンデータを信号５６を介して提供する。エンジン制御体３０は、エンジン速度及び酸素センサデータのような、その他のエンジンセンサからのデータをも受ける。エンジン制御体３０は、運転パラメータの中でも、燃料射出装置３２及び燃料ポンプ３３を介してエンジン１１内に導入される燃料を制御する。エンジン制御体３０はエンジン（図３には示されない）内に導入される空気をも制御することができる。エンジン制御体３０（あるいはＥＣＵ）はそれにより、少なくとも部分的にイオン化信号５２に基づいて空燃比を制御することができる。
イオン化装置５０はイオン化回路５０ａを含み、また、プロセッサ５０ｂをも含み得る。プロセッサ５０ｂは、イオン化信号５２を分析するための統計的分析ルーチンを含む分析ソフトゥエアをも含み得る。イオン化装置は更に、イオン化信号５２とプロセス処理信号５２ａ及び５２ｂを記憶するためのバッファ及びメモリをも含み得る。
図４には、特定のエンジンに関する５段階の負荷水準での１００回の燃焼サイクルにおけるイオン化データの統計的平均値を含む実験データが示される。図４の番号１、２、３、４、５で示す曲線は、異なる且つ増大するエンジン負荷のためのピストンのクランク角度（上死点を３６０度とする度数での）の関数としてのイオン化信号（ミリアンペアでの電流としての）を表す。
一般に、イオン化データが測定される主要な原因となっているのは、火炎帯域での化学－

イオン化である。しかしながら、これらの曲線には２つのローカルピーク１１及び１２が見られる。第１のローカルピーク１１は主にエンジンシリンダ内の火炎速度に関係している。空気と燃料とが燃焼するとシリンダチャンバ内のイオン数が化学反応によって急増し、イオン化検出も増える。

図４の幾つかの曲線に見られる第２のローカルピーク１２は温度及び圧力に基づくイオン化及び濃度に関連している。この第２のローカルピーク１２は主に、燃焼プロセス中に創出されるＮＯｘ分子あるいはＮＯｘ排出量に関連する。燃焼直後にシリンダ内の温度及び圧力が上昇すると、その上昇分に比例してＮＯｘの濃度及び発生量が増大する。低負荷水準に相当する曲線１及び２は図示されるように第２のローカルピークを有していない。これは、負荷水準が低すぎて、ＮＯｘの量及び濃度を増大させ、イオン化信号における第２のローカルピーク１２を生じさせるに十分な温度及び圧力が発生しないからである。曲線３、４、５では負荷が増大されそれにより、燃焼プロセスに基づく圧力も増大しそれが温度及びＮＯｘ発生量を増大させるので、シリンダ内のイオン化は増大（イオンの濃度も増大する）しそれが、イオン化曲線における第２のローカルピークを生じさせている。

図５を参照するに、第２のローカルピーク１２がシリンダ内のピーク圧力を（燃焼サイクル内で）正確に位置付けている。図５の各曲線は１ａ、２ａ、３ａ、４ａ、５ａの番号で示され、異なる且つ増大するエンジン負荷のためのピストンのクランク角度（上死点を３６０度とする度数での）の関数としての１００回の燃焼サイクルにおける相対的な平均的圧力を表している。これらの曲線は図４に曲線として示すと同一の試験に直接相当し且つそうした試験から得た測定値である。図５には、シリンダ内のピーク圧力がほぼ３９５°の位置で生じることが示される。これは、図４に示す曲線３、４、５の第２のローカルピーク１２と概略同じ位置である。かくして、イオン化データから第２のローカルピーク１２の位置を決定することにより、イオン化データからピーク圧力を導出することができる。

図４のイオン化情報を統計的にプロセス処理し且つ分析することにより、数多くの燃焼サイクルにおける平均化されたデータを提供することが可能であり、サイクル間の変動によるノイズはろ別され得る。統計的プロセス処理及び分析においては、全体的なイオン化データに関して数多い従来の統計的方法の任意のものを使用することが可能である。そうした統計的プロセス処理及び分析は、第１のローカルピーク１１（火炎拡張部分）を分析する上で、のみならず、第２のローカルピーク１２の強さ及び位置（圧力及び温度部分）を分析する上でも特に有益である。

図６を参照するに、λの関数としてのイオン化信号の第１のローカルピークを測定した実験データが示される。測定されたイオン化は電圧でのイオン化信号に変換される。曲線６ａとして示されるデータはイオン化信号の第１のローカルピーク１１（火炎イオン化部分）対λ（即ち、種々の空燃比条件）である。曲線６ａは各データポイントを粗く結んだものであり、最大値はλ＝０．９及びλ＝０．９５の間となっている。

同様の曲線６ｂはλの関数としてのイオン化信号の第２のローカルピークを表している。曲線６ｂの最大値はλ＝１．００から１．１０となっている。

かくして、数多くのエンジンサイクルに渡り空燃比が変動（図４及び図５におけるようにピストンのクランク角度の関数としてではなく）するに従い、イオン化信号の第１のローカルピークはλ＝０．９からλ＝０．９５の範囲内の最大値に達し、イオン化信号の第２のローカルピークはλ＝１．００から１．１０の範囲内の最大値に達する。先に議論したように、第２のローカルピークを出現させるためにはエンジンに対する負荷を十分に大きくし、シリンダ内の温度及び圧力を上昇させてＮＯｘ分子の創出及び集中を促進させる必要がある。この効果は、第２のローカルピークが、検出されるべき十分な大きさを有するように十分大きなものであるべきである。

第２のローカルピークの測定がより困難であることから、イオン化信号の第１のローカルピークは、空燃比制御のために使用するべき２つのローカルピークの中でより信頼性が高い。図４及び図６に示されるデータによれば、イオン化曲線１、２、３、４、５における第１のローカルピークの大きさをλ及び負荷の両方の関数として変化させることが可能で

あることは明らかである。従って、統計的平均値を収集して空燃比を分析及び最適化する場合の負荷変動を確実に最小化することが重要である。これは、最適化プロセスに関連して空燃比を変化させる間の着火タイミングと、質量空気流れ及び毎分当たりのエンジン回転数（ｒｐｍ）とが一定に保持されることを保証することにより達成され得る。一度にただ１つのシリンダのみを変化させることで、エンジン全体の負荷に影響を与えることなく、このシリンダのための統計的情報を決定することも可能である。

図７には、３つの異なる空燃比のためのイオン化信号対負荷の第１のローカルピークのグラフが示される。最も上方の曲線７はλ＝１のためのものである。別の曲線８及び９は夫々、λ＝１．２及びλ＝０．７のためのものである。図７からは、ある範囲のシリンダ負荷条件下では理論空気/燃料混合物のためのイオン化水準は、λ＝１．２及び０．７に相当する空気/燃料混合物のためのそれよりもずっと高い（ある程度まではそうである）。

各シリンダにおける理論空気/燃料混合物を達成するための好ましい方法は、単一の酸素センサと、各シリンダにおけるイオン化信号に基づく空燃比制御とを利用するものである。触媒コンバータを備えたエンジンでは、エンジンの排気系に少なくとも１つの酸素センサがおそらく必要である。排気ガスを全体的に（シリンダ毎にではなく）決定することが必要であり得る。なぜなら、エンジンの排気系の触媒コンバータは通常１つだからである。排気系内の酸素センサはエンジンの全体的なあるいは総合的な理論混合物を決定するために使用される。

次いで、エンジン制御体は各シリンダにおけるイオン化信号の第１のローカルピークの振幅あるいは位置（あるいは両方）を等化させるための方法論を使用する。酸素センサに基づき、空気/燃料混合物が理論値である状態での各シリンダにおける統計的等化が達成された場合、理論混合物に関するイオン化信号の第１のローカルピークの傾斜を知ることで、エンジンは均衡状態となる。この形式のシステムではイオン化は、多数の排気酸素センサを利用する最新のプロダクションシステムと比較して、混合物を全てのシリンダにおいて理論値に近づけた状態に維持することにより触媒効率を改善するための均衡化用メカニズムとして使用されそれにより、各シリンダのみならずエンジンの総合的な空燃比に対する感度を得ている。

各シリンダのための理論混合物を制御するための好ましい１つの方法は、所定のエンジン運転条件のための全てのシリンダにおけるイオン化信号の統計的な第１のローカルピークを概略等化することである。イオン化曲線の傾斜により、理論空燃比が濃厚から希薄に変動したことが即座に検出される。希薄空燃比条件下のシリンダの（イオン化信号の）第１のローカルピークの振幅は濃厚空燃比条件下のシリンダのそれと比較して著しく相異する。この相異が、濃厚空燃比条件下に運転されているシリンダを、また、希薄空燃比条件下に運転されているシリンダを明示しそれにより、システムは、各シリンダからの全体的な空燃比をより一層均衡化することが可能となる。次いで、各シリンダの空燃比を制御自在に調節し、各シリンダのイオン化信号の各第１のローカルピークの相対的等化を達成することができる。この調節は、統計的情報がエンジン制御体により収集され且つ分析され得るよう、非常に安定したエンジン運転条件下に比較的ゆっくりと行われる。次いで、エンジン制御体は異なるシリンダ間における概略の等化を達成するために、各燃料射出装置のオフセット値（及び燃料量）を決定する。このオフセット値は、全ての運転条件下での各シリンダの空燃比を維持あるいは一様に均衡化させるためにエンジンの全運転範囲において使用される。

特定のエンジンの理論空燃比に関するオフセットピークイオン化を決定するためにエンジンモデリングを使用することができる。この方法論は、各シリンダの空燃比制御が理論混合物に対して最適化され得るよう、各シリンダにおいて個別に達成され得る。各シリンダの、基本エンジンマップからのオフセットが決定され得、次いでこのオフセット値が、特定のシリンダの理論空燃比を維持するために利用され得る。

製造上の欠陥その他の運転上の変数のために、各シリンダに送られる空気及び燃料は少なくとも若干相異する。図２及び図３に示されるような空燃比制御システムを使用することで、各シリンダの理論空燃比のための正しい射出時間を較正することができる。エンジン

の較正は、エンジンにおいて達成される排出物水準にとって極めて重要である。エンジンのパラメータの中で最も較正するのが困難なものは、各サイクル中に各シリンダに吸入され得る空気量である。この吸入量は吸気マニホルドの設計形状、バルブタイミング、カムプロフィール、のみならず、エンジンに固有のＥＧＲを変化させる背圧の条件、により大きく左右される。各サイクル中に各シリンダに吸入され得る空気量のこうした差異、のみならず、各シリンダに吸入され得る空気量対近接する各シリンダに吸入され得る空気量が相異することが、従来システムによる各シリンダのための理論混合物の正確な決定を困難なものとしている。

エンジン制御システムは、イオン化信号データを使用して理論混合物前後に適応制御する能力を用い、各シリンダでの吸気量の相異を収受するための燃料制御上の正確なオフセットを実現する。この方法論はエンジンの寿命に渡る変化、例えば燃料噴射装置の詰まりその他の、各特定のシリンダのための空気及び燃料条件を変化させ得、あるいはその送りを変化させ得る摩損状況をも収受することができる。

ある種のエンジン、例えば芝刈り機用エンジンや小型の汎用エンジンは、最新の自動車製造用エンジンに要求される触媒コンバータのための排出物基準あるいは条件と同じ基準あるいは条件を有していない。これらのエンジンのためには、空燃比制御のためのイオン化方法論は幾つかの自動車の適用例におけるよりもずっと有用なものである。そうしたエンジンでは着火システムが必要であるが、酸素センサの使用は、これらのエンジンが大抵の場合触媒コンバータ無しで排出物基準に適合するという事実から見て最適な方策ではない。これらのエンジンは、濃厚過ぎる混合比条件下に運転されて汚染物を大量に発生するのみならず、希薄過ぎる混合比条件下に運転されてエンジンをオーバーヒートさせることがないように空燃比を正確に制御する必要がある。

こうした小型の汎用エンジンの最適運転範囲はλ＝０．９～０．９５の水準付近であり、この範囲では効率的に運転され、排出される一酸化水素及び一酸化炭素はかなり低水準であることが判明した。こうしたエンジンの制御方策はイオン化検出方法論にとって理想的なものである。なぜなら、そうしたエンジンは必然的に、エンジンの全ての運転条件下においてイオン化信号の第１のローカルピークの最大化を必要とするのみだからである。極めて単純な制御システムを着火システム（イオン化装置を含む）と共に使用し、低コストの、正確な且つ有効な空燃比制御システムを実現することができる。

別の工業的エンジン用途において、不点火検出を使用して特定のエンジンの希薄運転限界を決定することができる。希薄運転限界は、イオン化信号の不点火検出能力を使用して決定することができる。エンジン不点火は、全燃焼時間枠を横断してのイオン化信号の振幅がわずかかあるいは全くない場合として検出される。エンジンが不点火を生じる直前に空燃比を希薄化する制御方策を利用して、イオン化検出回路を使用するエンジンの燃料効率を最大化することができる。使用され得る制御方法は以下の如くである、つまり空燃比を、総合的方法においてはシリンダの１つにおいて、あるいは個別のシリンダの不点火が検出されるまで徐々に希薄化して各シリンダの希薄不点火限界を決定し、次いで、不点火を生じないことが幾分余裕を持って保証されるある安定条件下で運転するために、その不点火空燃比からある特定の係数をバッキングオフ（ｂａｃｋｉｎｇ　ｏｆｆ）する。特定の小型エンジン用途においては、２つの方策を有益に使用することができる。これら２つの方策の１つは特定の高速及び高負荷条件下に用いられる最大化方策であり、他の１つは、上述した希薄運転限界である。これら２つの方策は、高負荷条件下でのエンジンの排出物と適正な運転との間における最良の均衡化を実現するためのエンジン運転条件下に用いられ得る。

あるエンジン用途においては制御システムが調整能力を有することが、単に、イオン化信号とイオン化信号の第１のピークあるいは第２のピークとを最大化すること、あるいはイオン化信号を積分すること（あるいはそれらの組み合わせ）により、所望の空燃比を実現可能とする。このことにより、各シリンダにおける所望の空燃比を実現するために必要なアルゴリズムは著しく簡略化される。

上述したイオン化検出及び分析、並びに、イオン化及び空燃比間の相関関係を使用するこ

とで空燃比制御システムにフィードバックが提供され得る。各シリンダは理論空燃比かあるいは、エンジン制御体の望む運転条件のための適宜の空燃比の何れかに対して最適化され得る。

シリンダ間の空燃比制御のためにイオン化検出を使用することで、イオン化信号のその他の使用可能性が拓ける。本明細書に添付する付録Ａを参照されたい。イオン化信号は燃焼チャンバ内の事象及び状況に関する多数の情報をもたらし得る。例えば、イオン化信号は不点火やノッキングの各状況を判定し得るのみならず、エンジンのシリンダ圧力の変動をも判定し得る。更には、イオン化信号は排気ガス再循環（ＥＧＲ）システムを制御するために使用することもできる。イオン化信号の、第２のローカルピーク近辺における対ＮＯｘ感度をＥＧＲシステムで使用することにより、ＮＯｘ排出量を減少させることもできる。ＥＧＲシステムは、匹敵するイオン化値を使用することにより、不点火を発生させることなくＮＯｘ水準を低下させることができる。イオン化信号の第２のローカルピークの大きさと、不点火発生時の統計的大きさとを組み合わせることにより、各運転条件下においてエンジンの達成し得る最大許容ＥＧＲを制御することも可能である。

ＮＯｘが燃焼によって生じるガスの中でも最も導電性のものであることから、イオン化信号の第２のローカルピークは、入手し得るＮＯｘ分子の関数として増大することが示される。イオン化信号とＮＯｘ分子発生との間の相関関係はエンジンの負荷に追随し、イオン化信号測定値が高いとＮＯｘ排出量は増大する。

イオン化信号の第２のローカルピークとＮＯｘ排出量とは直接相関することから、イオン化検出及び分析を使用してＮＯｘ排出量を最小化することができる。従って、イオン化信号の第２のローカルピークに基づき、燃焼チャンバ内に出現するＮＯｘ量及びその濃度に関する情報を決定することができる。ある範囲の空燃比に渡り、ＮＯｘ排出量は空燃比が濃厚混合物から理論混合物に増大するに従い増大する。ＮＯｘ排出量は理論空燃比よりも若干高い空燃比下にピークとなり、次いで約１６対１の空燃比（ガソリンの場合）となった後、再度減少する。この空燃比（λが約１．００～１．１０の間）は、ＮＯｘ排出量が最大であるときの代表的なものである。図１を再度参照されたい。

この概念、即ち、ＮＯｘ排出量のピークが理論空燃比よりも若干高い空燃比で生じ、このピークがイオン化信号の第２のローカルピークに相当すると言う概念を使用することにより、イオン化信号に基づいて空燃比を適切に制御することができる。イオン化信号の振幅の相対的増大を、イオン化信号内のその他の情報に対する感度と共に使用することにより、各シリンダのための空燃比を最適化することができる。エンジン全体の全体的な酸素水準を測定する酸素センサとの組み合わせにおいて、各シリンダ内のイオン化信号を、各シリンダの空燃比を変更するための可変のフィードバック制御を提供させるために使用することができる。

以上、本発明を実施例を参照して説明したが、本発明の内で種々の変更をなし得ることを理解されたい。

付録Ａ

980166

In-Cylinder Air/Fuel Ratio Approximation Using Spark Gap Ionization Sensing

Eric N. Balles, Edward A. VanDyne, and Alexandre M. Wahl
Adrenaline Research, Inc.

Kenneth Ratton and Ming-Chia Lai
Wayne State University

Copyright © 1998 Society of Automotive Engineers, Inc.

ABSTRACT

Experiments were conducted on a single cylinder engine to measure the ionization current across the spark plug electrodes as a function of key operating parameters including air/fuel ratio. A unique ignition circuit was adapted to measure the ion current as early as 300 microseconds after the initiation of spark discharge.

A strong relationship between air/fuel ratio and features of the measured ion current was observed. This relationship can be exploited via relatively simple algorithms in a wide range of electronic engine control strategies. Measurements of spark plug ion current for approximating air/fuel ratio may be especially useful for use with low cost mixture control in small engine applications. Cylinder-to-cylinder mixture balancing in conjunction with a global exhaust gas oxygen sensor is another promising application of spark plug ion current measurement.

INTRODUCTION

Sensors perform a critical role in the control of modern, highly developed internal combustion engines. A wide variety of information ranging from ambient conditions, to engine operating conditions (e.g., speed, throttle position, intake manifold pressure, etc.), to chemical composition (e.g., exhaust oxygen concentration) are interpreted by the vehicle's engine management system which in turn controls functions such as spark timing and fuel injection. The sophistication of today's engine systems allow passenger cars to operate with low pollutant emissions and high thermal efficiency. On the other hand, small utility engines, which have seen little or no regulation in the past, pose extra challenges for meeting future emission levels due to the size, weight, and cost constraints imposed by their unique applications.

Because of these constraints, sensors and control strategies that are appropriate for passenger cars frequently do not translate well to small engines. Continued development of new and advanced sensors, corresponding control algorithms, and actuators is required to meet the increasingly stringent worldwide emission standards and fuel economy mandates for passenger cars and other internal combustion engine applications.

The ability to obtain useful information about the combustion event via the measurement of in-cylinder ionization current has been known for decades and continues to be studied for use with modern engine control strategies.[1,2,3,4] There are several examples of the use of ionization current sensing in production engine applications. Saab implements a version of spark plug ionization sensing for misfire detection to meet on-board diagnostic requirements. Caterpillar, in one of its lean burn natural gas engines, uses an ionization probe (non-firing spark plug) in the combustion chamber opposite the ignition spark plug. The ionization probe detects the flame arrival time which is then used to maintain a target overall flame propagation time by controlling the air/fuel ratio. This strategy works well because of the strong correlation of air/fuel with flame speed.

To further study the use of spark plug ionization current sensing as a method for air/fuel ratio approximation, an experimental program was conducted at Wayne State University on a small single cylinder overhead valve production engine. A Dual Energy Ignition system, developed by Adrenaline Research, Inc., and patented by the Massachusetts Institute of Technology,[5] was used in these experiments. This ignition circuit was adapted to sense the ion current at the spark plug gap and patented separately by Adrenaline.[6] Results described in this paper focus on the relationship between air/fuel ratio and the ion current measurements.

IGNITION AND ION CURRENT SENSING SYSTEM

CIRCUIT DESIGN OVERVIEW – The ignition and ion current sensing system used in this experimental program was based on Adrenaline's Dual Energy Ignition (DEI) circuit. This circuit is the combination of a capacitive discharge ignition circuit and a strobe light circuit, which allows for both high voltage and high current discharges across the spark plug gap for improved ignition.[7,8] After the Dual Energy circuit is discharged, the secondary capacitor (seen in Figure 1) is recharged to present a high voltage across the spark gap electrodes for ionization sensing. A zener diode and parallel resistor between the secondary capacitor and ground allow this portion of the circuit to deliver the high current for ignition and to perform the ion current sensing function. The zener diode provides the circuit path for charging and discharging of the high voltage capacitor for ignition purposes. The sensing resistor provides a measurable voltage drop proportional to the ion current flowing across the spark gap.

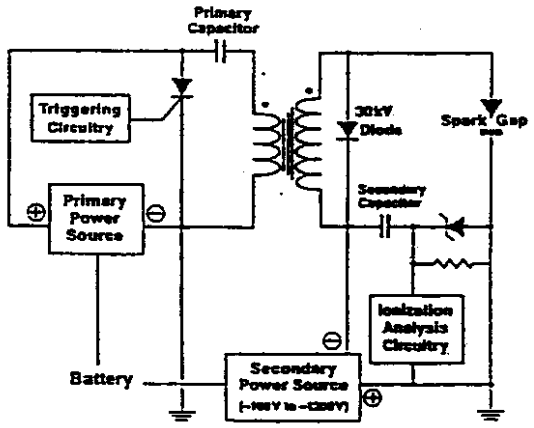


Figure 1. Schematic diagram of the basic Dual Energy Ignition circuit combined with an ionization sensing circuit.

SYSTEM DESIGN FEATURES WHICH ENHANCE IONIZATION SENSING – Implementation of this combined approach has several significant advantages for spark gap ionization sensing.

1. Short duration spark discharges (typical of CD ignition systems) allow for ionization sensing to begin within 300 μs after the initial spark has occurred. This is a significantly shorter time delay period than an inductive ignition can provide which has typical spark duration of 1.5 to 3 ms. Beginning ionization sensing within a few hundred microseconds after spark provides data during the chemi-ionization phase (primarily flame propagation in the vicinity of the spark gap). This information would otherwise be missed with longer duration ignition systems.
2. The large secondary capacitor used in the DEI circuit for high current spark discharge is also used to hold the voltage across the spark plug electrodes for ion current measurement. This large capacitor retains most of its charge during the ionization portion of the combustion process – the ionization current is approximately 30 to150 μA out of a capacitor that can sustain 100 A for 3 μs when discharging in the ignition phase. This feature therefore provides essentially a constant voltage throughout the ion current measurement phase.
3. Another benefit is the low resistance of the capacitive discharge coil's secondary winding that allows for a higher current flow through the secondary windings during the ionization phase. The ability to present a high, negative voltage across the gap also improves the ionization signal-to-noise ratio.
4. A major cost benefit is derived from using the same circuit to produce both the high-energy ignition that assists combustion, especially in the lean burn mode, as well as the diagnostic ionization feedback. The combination of improved lean burn ignition plus ionization feedback for misfire purposes is especially useful in cold starting engines and operating just inside the misfire limit for leanest possible cold starts in a closed loop fashion. Another benefit of the combined circuits is that it can be used to detect pre-ignition as well as diagnose ignition problems like improper discharge of the ignition, primary or secondary, as well as improper charging of the capacitor itself, giving us a complete diagnostic tool for the total system.

CRITICAL CIRCUIT DESIGN ISSUES – The most important issue for reliability of an ionization circuit is the conductivity of the contacts made between the coil and the spark plug in order to maintain a reliable path for the ion current which is only between 30 and 150 μA. It is also important to have a 12-bit analog-to-digital converter for measuring the voltage drop across the sensing resistor in order to get sufficient resolution of the signal to calculate misfire, knock, and other information. In order not to leave a high voltage at the gap after the ignition has been turned off, a bleed resistor is incorporated in the charge circuit to prevent the secondary capacitor from maintaining a high voltage charge. This bleed resistor results in a zero offset during ion current measurement. This needs to be taken into account when analyzing the signal and determining the zero ion current level which can be affected by the secondary capacitor voltage.

EXPERIMENT DESCRIPTION

ENGINE AND DYNAMOMETER SETUP – Experiments to measure spark plug ion current and to correlate with engine operating conditions were conducted on a small production engine in a controlled laboratory environment. The test engine was a 219 cc VanGuard 9 hp Briggs and Stratton engine (model 185432). This overhead valve, air-cooled engine was originally supplied with a gasoline carburetor which was converted to propane fuel for

these experiments. A surge tank was added to the intake system to improve the air mass flow measurement accuracy. The exhaust system was modified to allow for a lambda sensor but retained the factory muffler which exhausted to atmospheric pressure.

Table 1 Test Engine Specifications

displacement	219 cc
bore x stroke	59 mm x 80 mm
compression ratio	8.1
rated power (gasoline)	6.7 kW (9 hp)
peak torque (gasoline)	7.5 Nm (13 ft-lbs)
peak torque (propane conversion)	6.6 Nm (11.5 ft-lbs)

The dynamometer and engine control, as well as the data acquisition was carried out using a PC-based LabVIEW system.[9] The configuration is shown schematically in Figure 2.

KEY INSTRUMENTATION – This experiment used a heated Bosch lambda sensor, LSM11, for exhaust air/fuel ratio determination. The sensor was connected to a Bosch LA2 amplifier and heater control unit. This was the primary measurement used to correlate with measured spark plug ion current.

The ionization sensing portion of Adrenaline's ignition system was configured by running an empirical set of experiments. Configuration consisted basically of setting the voltage applied across the spark gap for ion current measurement and the time delay between the initiation of the spark discharge (ignition) and the recharge of the secondary capacitor (see Fig 1). The best voltage and delay time settings, determined empirically, translated to values of approximately 200 volts and 300 μs delay (i.e., ion current data within approximately five crank degrees after ignition at an engine speed of 2800 rev/min).

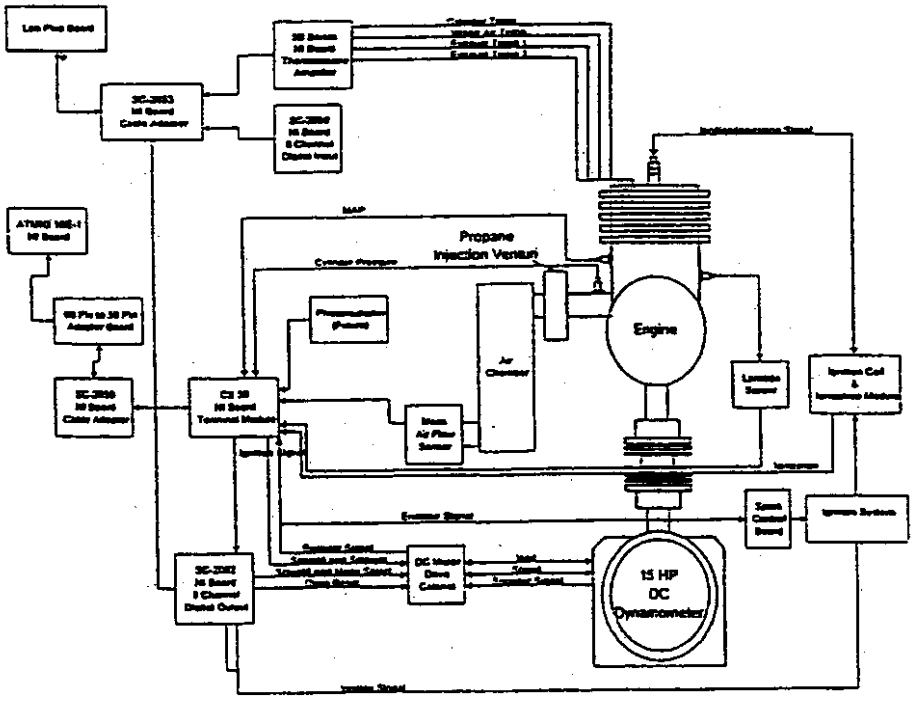


Figure 2. Schematic diagram of dynamometer, engine control, and data acquisition systems.

RESULTS

Spark plug gap ion current data was collected over a range of air/fuel ratio and torque set points. In these experiments speed was held constant at 2800 rev/min while air/fuel ratio traverses (λ = 0.85 to λ = 1.10) were conducted at discrete torque set points (approximately 40% to 60% of full load). Throttle angle was adjusted to maintain the torque set point as air/fuel ratio was varied. Spark timing was fixed for all experiment test points (spark set point at approximately 29 degrees BTC).

Characteristic features of the ion current changed in a well-behaved manner as air/fuel ratio changed. Figures 3a through 3d show the spark plug gap ion current as a function of crank angle. The ionization curves shown are 40 cycle averages and each curve represents a distinct air/fuel ratio. Each graph represents a different load condition. Overall, the characteristic shape of these ionization curves indicate that chemi-ionization (from species in the reacting flame zone) is primarily responsible for the measured ion current across the spark gap under these test conditions. Other researchers working with production automotive engines have shown that the chemi-ionization portion of the ion current signal is a strong function of air/fuel ratio.[2] The results presented here for a small utility engine also show that certain features of the ion current may be used in conjunction with the appropriate algorithms or neural network to approximate overall air/fuel ratio.

Several straightforward characteristics of the ionization waveform were analyzed as a function of air/fuel ratio. Figure 4 shows how the peak spark gap ion current is influenced by air/fuel ratio. The peak current decreases significantly as a function of air/fuel ratio as the mixture is leaned out past λ=0.95 (approximately). Ion current appears to peak in the range of λ = 0.90 to 0.95 for these conditions. This was confirmed by other data from this engine (partial data set taken earlier in the experimental program) which showed a dramatic fall-off in ion current as the mixture was made very rich (e.g., λ = 0.7).[3] Figure 5 illustrates how the crank angle location of peak ion current changes with air/fuel ratio. In general, the peak current location moves closer to top center as the mixture becomes richer. Figure 6 is an example of the ionization curve integral from different air/fuel ratios at fixed torque. The ion current integral provides similar information to the peak current because of the characteristic shape of the curves and the fact that the majority of the measured current is due to the chemi-ionization (flame front) effect. Peak ion current, location of peak ion current, and ion current integral are three simple examples that correlate in some way with overall air/fuel ratio.

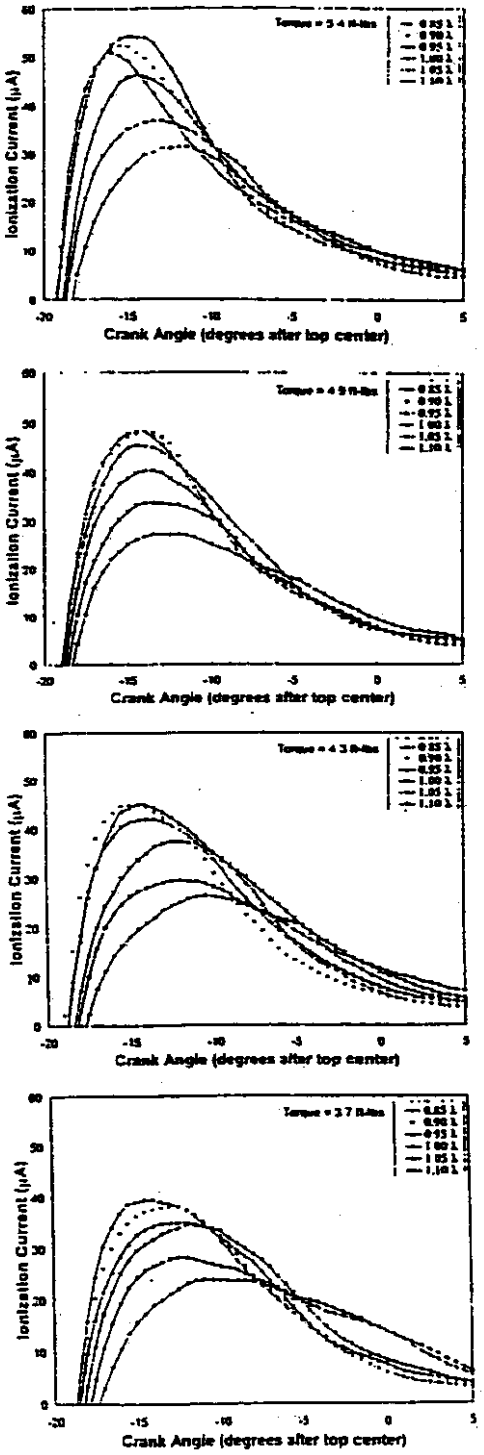


Fig 3a – 3d. Ion current waveforms (40 cycle averages) as a function of air/fuel ratio at discrete load points

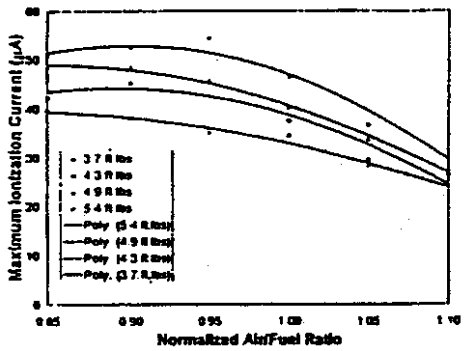


Figure 4. Peak ion current as a function of air/fuel ratio

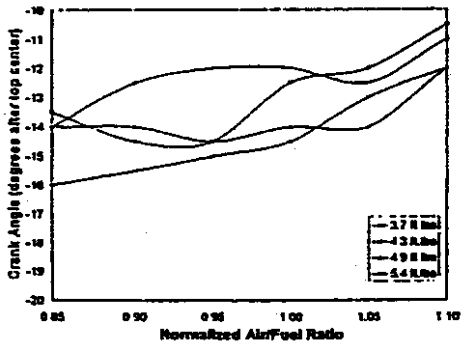


Figure 5. Crank angle location of peak ion current as a function of air/fuel ratio

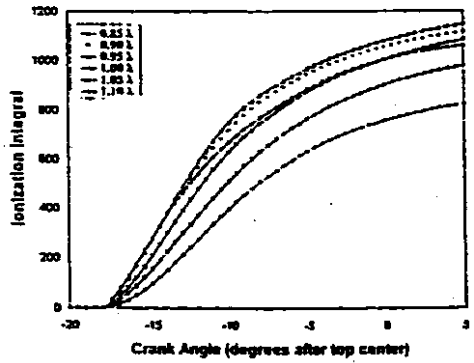


Figure 6. Integral of the ion current for different air/fuel ratio test conditions at a fixed load (5.4 ft-lbs)

APPLICATION TO ENGINE CONTROL

SMALL UTILITY ENGINES – Spark gap ionization sensing can be applied to achieve the lower hydrocarbon emission requirements of small utility engines. These engines as a class emit high levels of unburned hydrocarbon for several reasons. For example, very rich air/fuel mixtures are typically used for piston cooling which may be critical at high power conditions but may not be required at lower power conditions. The relationship between air/fuel ratio and spark gap ion current can be used to control small engines at leaner than typical air/fuel ratios (which results in lower hydrocarbon emissions) while at the same time running rich enough to provide proper piston cooling. When rich mixtures are not required for cooling or full power, the ignition system with ionization sensing can control an engine to run near the lean burn limit to minimize hydrocarbon emissions and maximize fuel economy. At full power conditions or when additional cooling is required (based on a lookup map or other sensor input), the engine can be controlled to run at richer mixtures again using ionization sensing for feedback control.

In the experiments presented here using a production utility engine, peak ion current appeared to exhibit a relative maxima between approximately $\lambda = 0.90$ and $\lambda = 0.95$. This allows for an easy control strategy to operate within this air/fuel ratio range by maximizing the ion current peak. When richer mixtures are desired, the fuel system would control to the rich side of this region (perhaps using a predetermined offset). Alternatively, the engine could be controlled to the lean side of the peak ion current using ionization sensing in a partial fire / misfire detection mode as the key feedback parameter to operate near the lean limit.

STATIONARY ENGINES – Large stationary spark ignited engines (frequently natural gas fueled) can also use ionization sensing for air/fuel ratio control. These engines, which already operate lean of stoichiometric for good efficiency and overall low emissions, are being pushed even leaner to meet stringent NOx emission requirements. Open loop air/fuel ratio control is typically used with pre-programmed safety margins to keep the engines out of lean misfire and detonation conditions. Ionization sensing, on the other hand, can be used for feedback control of air/fuel ratio, on an individual cylinder basis, with correspondingly smaller safety margins to operate closer to the lean limit resulting in lower NOx emission levels.

AUTOMOTIVE ENGINES – Ionization sensing could also be applied to automotive engines for air/fuel ratio control – specifically cylinder-to-cylinder mixture balancing. Today's passenger cars require precise air/fuel ratio control for proper catalytic converter function. Exhaust gas oxygen sensors (one or more depending on engine application) are used as part of the engine management system that keeps the overall air/fuel ratio at stoichiometric conditions. While this control strategy works well for catalyst operation, it does not ensure that each cylinder is operating at the proper air/fuel ratio. Ionization sensing and its relationship to in-cylinder air/fuel ratio could be incorporated in a feedback loop on a cylinder-to-cylinder basis to maintain proper mixture balance across the engine. A global oxygen sensor will likely be required to maintain the air/fuel ratio precision required for the catalyst.

The use of ionization sensing for cylinder-to-cylinder mixture balancing supplements other potential uses of the ion current signal. The ignition and ionization feedback system used in this small engine experiment continues to be developed for OEM passenger car applications. Detection of specific cylinder events such as misfire and knock has been demonstrated using the ion current signal. The ability to detect these abnormal conditions using engine-wide measures (e.g., block vibration, crankshaft speed fluctuation, etc.) is often complicated by external factors whereas ionization sensing provides a more robust detection technique due to its fundamental tie to the combustion event. In addition, MBT spark timing may be controlled using the ion current data because of its relationship to peak cylinder pressure, location of peak cylinder pressure, and indicated mean effective pressure. Historical and/or statistical ionization data can be used to slowly adjust for changes during the life of the engine or to diagnose problems. For example, an injector problem that would cause one cylinder to either run extremely rich or extremely lean could be detected with ionization sensing with the proper historical knowledge assimilated by an advanced engine management system. These are only a few examples of how the information rich ion current data can be implemented in automotive engine control strategies.

SUMMARY AND CONCLUSIONS

A Dual Energy Ignition system which includes circuitry for ionization sensing, developed by Adrenaline Research, Inc., was successfully used in an experimental program at Wayne State University to study the relationship between engine operating conditions and the in-cylinder ion current flowing across the spark plug electrodes. Empirical data show that there is a strong relationship between features of the cycle averaged ion current waveform and the overall (time averaged) air/fuel ratio. Specifically, peak ion current, crank angle location of peak ion current, and the ion current integral are example characteristics that correlate with air/fuel ratio.

Ionization sensing is already used for engine control in a few limited applications. Techniques to measure the ion current with greater sensitivity, higher signal to noise ratio, and over the entire combustion event continue to be developed. The authors continue to study and refine the correlation of ion current with key engine parameters. It is expected that ionization sensing will be applied more broadly and in a wider range of engine control strategies in the near future.

ACKNOWLEDGMENTS

We wish to acknowledge the support of Wayne State's financial sponsors (Robert Bosch Corporation funded Kenny Ration's thesis work). We also acknowledge Adrenaline's licensee, Standard Motor Products, Inc., who continues to fund the development of Dual Energy Ignition with Ionization Feedback for automotive applications. The support of MTS-PowerTek in donating a 15 hp DC motor is also appreciated.

CONTACT

Dr. Eric N. Balles
Adrenaline Research, Inc.
Three Brent Drive
Hudson, MA 01749
978/568-8770 phone
978/568-8786 fax
eric_balles@alum.mit.edu

or

Prof. Ming-Chia Lai
Mechanical Engineering Department
College of Engineering
Wayne State University
Detroit, MI 48202
313/577-3893 phone
313/577-8789 fax
lai@eng.wayne.edu

REFERENCES

1. Saitzkoff, A., R. Reinmann, F. Mauss, M. Glavmo, "In-Cylinder Pressure Measurements Using the Spark Plug as an Ionization Sensor", SAE 970857, Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale, Pennsylvania, 1997.

2. Reinmann, R., et al., "Local Air-Fuel Ratio Measurement Using the Spark Plug as an Ionization Sensor", SAE 970856, Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale, Pennsylvania, 1997.

3. Saitzkoff, A., R. Reinmann, T. Berglind, M. Glavmo, "An Ionization Equilibrium Analysis of the Spark Plug as an Ionization Sensor", SAE 960337, Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale, Pennsylvania, 1996.

4. Eriksson, L., L. Nielsen, "Closed Loop Ignition Control by Ionization Current Interpretation", SAE 970854, Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale, Pennsylvania, 1997.

5. Porreca, P., E. VanDyne, "Duel Energy Ignition System", U.S. Patent No. 5,197,448, March 1993.

6. VanDyne, E., P. Porreca, "Ignition System with Ionization Detection", U.S. Patent Pending, 1997.

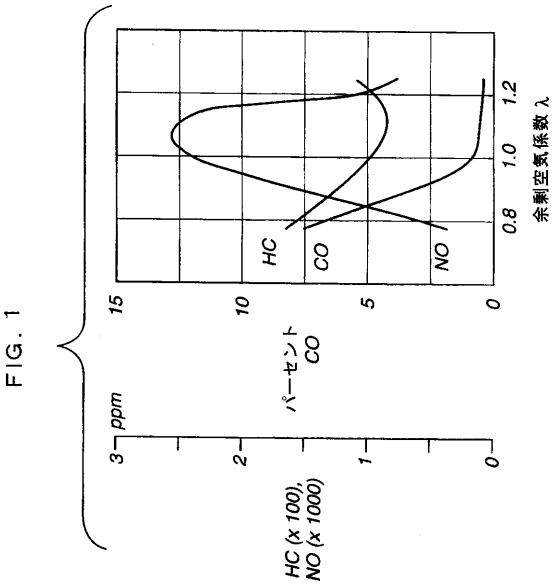
7. VanDyne, E., A. Wahl, D. Gardiner, B. Warshow, "The Science Behind Today's High Energy Capacitive Discharge Ignition Systems", presented at the SuperFlow Advanced Engine Technology Conference, Jan 1997.

8. VanDyne E., Porreca P., "Performance Improvement from Dual Energy Ignition on a Methanol Injected Cosworth Engine", SAE Paper 940150, Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale, Pennsylvania, 1994.

9. Ratton, K. L., "In-Cylinder Method for Measuring Instantaneous Local Air-Fuel Ratio Using the Spark Plug as a Sensor", M.S. Thesis, Mechanical Engineering Department, Wayne State University, 1997.

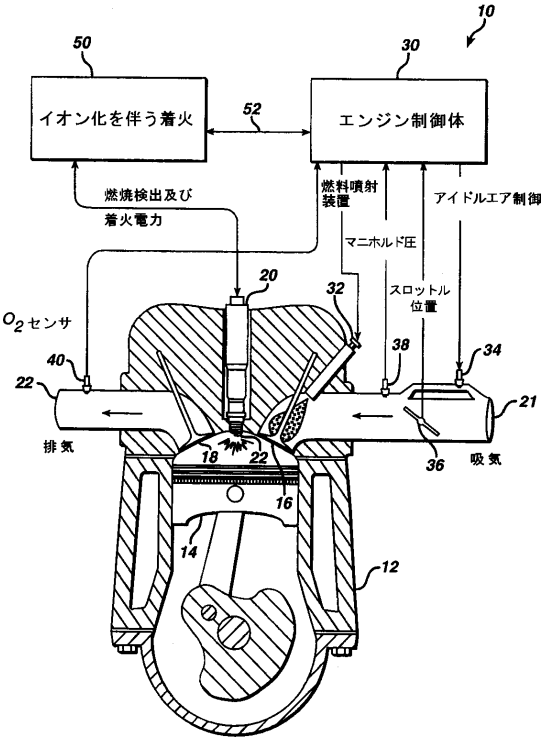
【図１】

FIG. 1



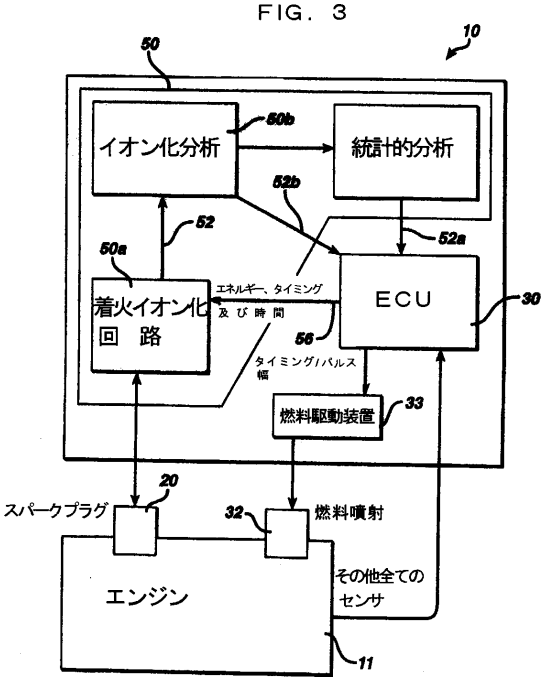
【図２】

FIG. 2



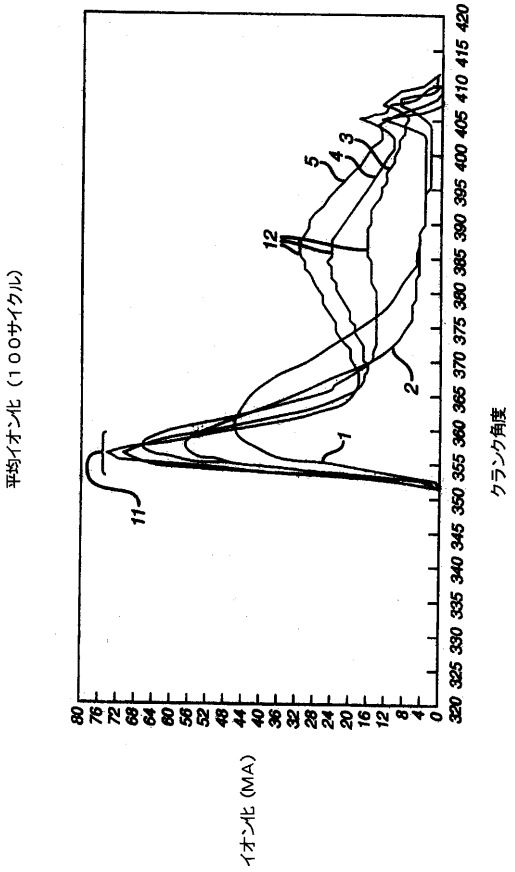
【図３】

FIG. 3



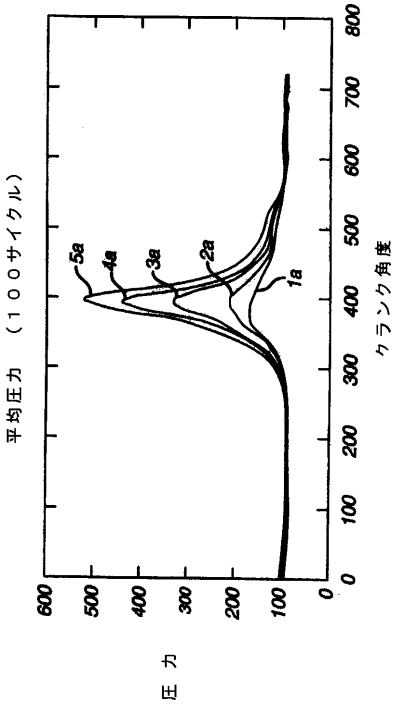
【図４】

FIG. 4



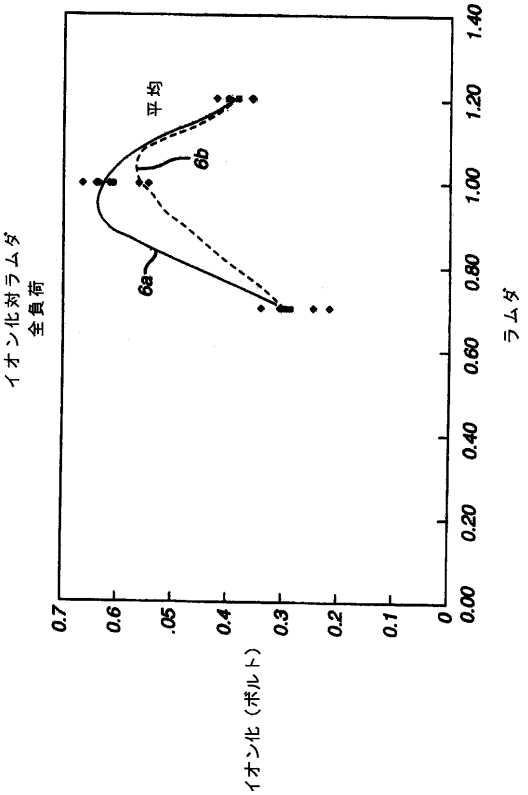
【図５】

FIG. 5



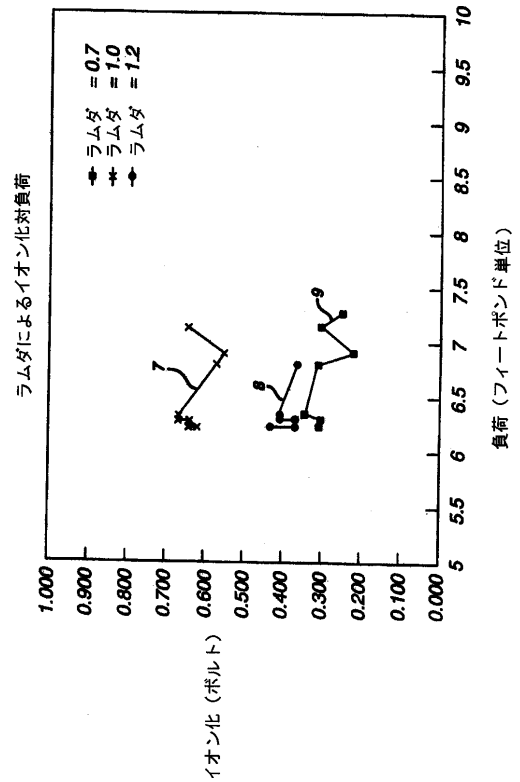
【図６】

FIG. 6



【図７】

FIG. 7



フロントページの続き

審査官　佐々木　正章

(56)参考文献　特開平０７－２９３３０６（ＪＰ，Ａ）
特開平０６－２７２６０８（ＪＰ，Ａ）
特開平０７－２７９７４３（ＪＰ，Ａ）

(58)調査した分野(Int.Cl.，ＤＢ名)
F02D 41/00
F02D 45/00