(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2019年11月7日(07.11.2019)

WIPO | PCT

(10) 国際公開番号
WO 2019/211995 A1

(51) 国際特許分類:
F02D 45/00 (2006.01)　*F02D 41/02* (2006.01)
F02B 23/08 (2006.01)　*F02D 41/40* (2006.01)
F02B 23/10 (2006.01)　*F02P 9/00* (2006.01)
F02B 31/08 (2006.01)　*F02P 15/10* (2006.01)

(21) 国際出願番号：　PCT/JP2019/016876

(22) 国際出願日：　2019年4月19日(19.04.2019)

(25) 国際出願の言語：　日本語

(26) 国際公開の言語：　日本語

(30) 優先権データ：
特願 2018-088562　2018年5月2日(02.05.2018)　JP

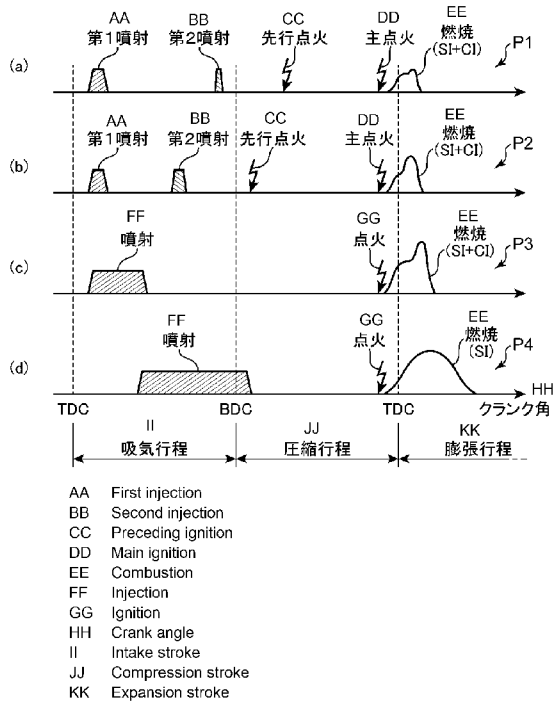
(71) 出願人: マツダ株式会社 (**MAZDA MOTOR CORPORATION**) [JP/JP]; 〒7308670 広島県安芸郡府中町新地３番１号 Hiroshima (JP).

(72) 発明者: 松本　浩太 (**MATSUMOTO, Kota**); 〒7308670 広島県安芸郡府中町新地３番１号 マツダ株式会社内 Hiroshima (JP). 漆原 友則 (**URUSHIHARA, Tomonori**); 〒7308670 広島県安芸郡府中町新地３番１号 マツダ株式会社内 Hiroshima (JP). 丸山 慶士 (**MARUYAMA, Keiji**); 〒7308670 広島県安芸郡府中町新地３番１号 マツダ株式会社内 Hiroshima (JP). 末岡 賢也 (**SUEOKA, Masanari**); 〒7308670 広島県安芸郡府中町新地３番１号 マツダ株式会社内 Hiroshima (JP). 大野 諒平 (**ONO, Ryohei**); 〒7308670 広島県安芸郡府中町新地３番１号 マツダ株式会社内 Hiroshima (JP). 原田 雄司 (**HARADA, Yuji**); 〒7308670 広島県安芸郡府中町新地３番１号 マツダ株式会社内 Hiroshima (JP). 宮本 亨 (**MIYAMOTO, Toru**); 〒7308670 広島県安芸郡府中町新地３番１号 マツダ株式会社内 Hiroshima (JP). 井上 淳 (**INOUE, Atsushi**); 〒7308670 広島県安芸郡府中町新地３番１号 マツダ株式会社内 Hiroshima (JP). 徳永 達広 (**TOKUNAGA, Tatsuhiro**); 〒7308670 広島県安芸郡府中町新地３番１号 マツダ株式会社内 Hiroshima (JP). 大浦 拓也 (**OHURA, Takuya**); 〒7308670 広島県安芸郡府中町新地３番１号 マツダ株式会社内 Hiroshima (JP).

(54) **Title:** CONTROL DEVICE FOR COMPRESSION IGNITION TYPE ENGINE

(54) 発明の名称： 圧縮着火式エンジンの制御装置

[図6]



AA First injection
BB Second injection
CC Preceding ignition
DD Main ignition
EE Combustion
FF Injection
GG Ignition
HH Crank angle
II Intake stroke
JJ Compression stroke
KK Expansion stroke

(57) **Abstract:** This control device for a compression ignition type engine is applied to an engine that enables partial compression ignition combustion in which SI combustion of part of an air-fuel mixture is caused by spark ignition and CI combustion of the rest of the air-fuel mixture is caused by self-ignition. An ignition control unit of the control device causes a spark plug to execute, while partial compression ignition combustion is executed, a main ignition for starting SI combustion by generating a spark and a preceding ignition for generating a spark at a timing before the main ignition. An injection control unit causes execution of fuel injection during an intake stroke. The ignition control unit sets the energy of the preceding ignition to be less than that of the main ignition, and causes execution of the preceding ignition after the fuel injection during the intake stroke, or in the early stage or intermediate stage of a compression stroke.

WO 2019/211995 A1

[続葉有]

河合 佑介(**KAWAI, Yusuke**); 〒7308670 広島県安芸郡府中町新地３番１号 マツダ株式会社内 Hiroshima (JP). 西田 智博(**NISHIDA, Tomohiro**); 〒7308670 広島県安芸郡府中町新地３番１号 マツダ株式会社内 Hiroshima (JP). 朴 啓太(**PAK, Gyetae**); 〒7308670 広島県安芸郡府中町新地３番１号 マツダ株式会社内 Hiroshima (JP). 山口 陽大(**YAMAGUCHI, Yodai**); 〒7308670 広島県安芸郡府中町新地３番１号 マツダ株式会社内 Hiroshima (JP).

(74) 代理人: 小谷 悦司, 外(**KOTANI, Etsuji** et al.); 〒5300005 大阪府大阪市北区中之島２丁目２番２号 大阪中之島ビル２階 Osaka (JP).

(81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) 指定国(表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類：

— 国際調査報告（条約第21条(3)）

(57) 要約：圧縮着火式エンジンの制御装置は、混合気の一部を火花点火によりＳＩ燃焼させるとともにその他の混合気を自着火によりＣＩ燃焼させる部分圧縮着火燃焼が可能なエンジンに適用される。制御装置の点火制御部は、部分圧縮着火燃焼の実行時に、火花を発生させてＳＩ燃焼を開始させる主点火と、主点火よりも早い時点で火花を発生させる先行点火とを点火プラグに実行させる。噴射制御部は、吸気行程において燃料噴射を実行させる。点火制御部は、先行点火のエネルギーを主点火のエネルギーよりも小さく設定し、且つ、前記先行点火を、吸気行程における燃料噴射の後、もしくは、圧縮行程の前期または中期において実行させる。

明　細　書

発明の名称 ： 圧縮着火式エンジンの制御装置

技術分野

[0001] 本発明は、混合気の一部を火花点火によりＳＩ燃焼させるとともにその他の混合気を自着火によりＣＩ燃焼させる部分圧縮着火燃焼が可能な圧縮着火式エンジンの制御装置に関する。

背景技術

[0002] 近年、空気と混合されたガソリン燃料を十分に圧縮された燃焼室内で自着火により燃焼させるＨＣＣＩ燃焼が注目されている。ＨＣＣＩ燃焼は、混合気が同時多発的に燃焼する形態であるため、通常のガソリンエンジンにおいて採用されるＳＩ燃焼（火花点火燃焼）に比べて、混合気の燃焼速度が速く、熱効率の面で非常に有利だと言われている。しかしながら、ＨＣＣＩ燃焼は、気温などの外部因子により混合気の燃焼開始時期（混合気が自着火する時期）が大きく変動するなどの問題があり、また、負荷が急変するような過渡運転時の制御が難しいという問題もあった。

[0003] そこで、混合気の全てを自着火により燃焼させるのではなく、混合気の一部については点火プラグを用いた火花点火により燃焼させることが提案されている。すなわち、火花点火をきっかけに混合気の一部を火炎伝播により強制的に燃焼（ＳＩ燃焼）させ、その他の混合気を自着火により燃焼（ＣＩ燃焼）させるのである。以下では、このような燃焼のことを部分圧縮着火燃焼という。

[0004] 上記部分圧縮着火燃焼に類似したコンセプトを採用したエンジンが、特許文献１に開示されている。特許文献１のエンジンは、補助燃料噴射によって点火プラグ（点火栓）周りに形成された成層混合気を、火花点火により火炎伝播燃焼させる。当該燃焼（火炎）の作用により高温化された燃焼室に主燃料噴射が行われ、この主燃料噴射により噴射された燃料を自着火により燃焼させる。

[0005] 一方で、圧縮着火燃焼を用いない別の方法によってエンジンの熱効率を向上させることも提案されている。例えば特許文献２には、点火プラグによる火花点火を１サイクル中に２回実行するようにした火花点火式エンジンが開示されている。前記火花点火式エンジンでは、燃焼室内の混合気全体が着火、燃焼しない程度の（局所的に火種が形成される程度の）小さい点火エネルギーを供給する先行点火が、圧縮行程中に実行される。この先行点火よりも遅れた適宜のタイミングで、先行点火よりも大きい点火エネルギーを供給する主点火が実行される。このように、主点火よりも早い段階で先行点火による火種を形成することにより、混合気の失火を防止できるだけでなく、燃焼速度を速めることができるとされている。

[0006] ここで、部分圧縮着火燃焼では、ＣＩ燃焼の燃焼速度が熱効率を左右する。ＣＩ燃焼は燃料成分が自発的に化学反応する現象であるので、火炎伝播により燃焼領域が徐々に拡大するＳＩ燃焼よりも本来的に燃焼速度は速いといえる。しかしながら、例えばＣＩ燃焼の前に燃料を反応性の高いものに改質することができれば、ＣＩ燃焼の燃焼速度がより速まって熱効率がさらに向上し、燃費性能とトルク性能とを両立することができると考えられる。

[0007] 反応性を高めるための燃料の改質は、例えば混合気の温度を所定の温度域まで高めることによって実現できる可能性がある。すなわち、混合気の高温化によって燃料成分（炭化水素）を開裂させることにより、反応性の高いＯＨラジカルを含む中間生成物を生成するのである。本願発明者は、このような燃料改質（中間生成物の生成）のための高温化の手段として、例えば上記特許文献２と同様に、火花点火を複数回実行すること、つまり主点火よりも前に補助的な先行点火を行うことによって混合気を高温化することを考えた。しかしながら、本願発明者の研究によれば、上記特許文献２のように混合気の一部が燃焼するようなエネルギーを先行点火によって付与した場合には、その燃焼によって中間生成物の多くが消費されてしまい、ＣＩ燃焼の燃焼速度を速める効果が十分に得られないことが分かった。

先行技術文献

特許文献

[0008] 特許文献1：特開２００９－１０８７７８号公報

特許文献2：特許第４６９１３７３号公報

発明の概要

[0009] 本発明の目的は、燃焼速度が速く熱効率に優れた部分圧縮着火燃焼を実現することが可能な圧縮着火式エンジンの制御装置を提供することにある。

[0010] 本発明の一局面に係る圧縮着火式エンジンの制御装置は、気筒と、気筒に燃料を噴射するインジェクタと、インジェクタから噴射された燃料と空気とが混合された混合気に点火する点火プラグとを備え、前記混合気の一部を前記点火プラグの火花点火によりＳＩ燃焼させるとともにその他の混合気を自着火によりＣＩ燃焼させる部分圧縮着火燃焼が可能な圧縮着火式エンジンを制御する装置である。当該制御装置は、前記インジェクタによる燃料の噴射動作を制御する噴射制御部と、前記点火プラグによる点火動作を制御する点火制御部と、を備える。前記点火制御部は、前記部分圧縮着火燃焼の実行時に、火花を発生させてＳＩ燃焼を開始させる主点火と、主点火よりも早い時点で火花を発生させる先行点火とを前記点火プラグに実行させる。前記噴射制御部は、吸気行程において燃料噴射を実行させる。前記点火制御部は、前記先行点火のエネルギーを前記主点火のエネルギーよりも小さく設定し、且つ、前記先行点火を、前記吸気行程における前記燃料噴射の後、もしくは、圧縮行程の前期または中期において実行させる。

[0011] 本発明の他の局面に係る圧縮着火式エンジンの制御装置は、気筒と、気筒に臨むように配設されたインジェクタおよび点火プラグとを備えたエンジンを制御する装置であって、前記インジェクタ及び前記点火プラグと電気的に接続され、前記インジェクタ及び前記点火プラグに制御信号を出力するコントローラを備える。前記コントローラは電気回路を有する。前記電気回路を有するコントローラは、前記インジェクタから噴射された燃料と空気との混合気が前記点火プラグによる火花点火により火炎伝播燃焼し、この火炎伝播燃焼の開始後に圧縮自己着火燃焼が起きる部分圧縮着火燃焼を実行させる燃

焼制御部と、前記部分圧縮着火燃焼の実行時に、前記インジェクタを駆動して、吸気行程において燃料を噴射させる噴射制御部と、前記部分圧縮着火燃焼の実行時に、火花を発生させて前記火炎伝播燃焼を開始させる主点火を行う第１点火制御部と、前記部分圧縮着火燃焼の実行時に、前記主点火よりも早い時点で火花を発生させる先行点火を行うものであって、前記先行点火のエネルギーを前記主点火のエネルギーよりも小さく設定し、且つ、前記先行点火を、前記吸気行程における前記燃料噴射の後、もしくは、圧縮行程の前期または中期において実行させる第２点火制御部と、を備える。

図面の簡単な説明

[0012] [図1]図１は、本発明の一実施形態にかかる圧縮着火式エンジンの全体構成を概略的に示すシステム図である。

[図2]図２は、エンジン本体の断面図とピストンの平面図とを併せて示す図である。

[図3]図３は、気筒およびその近傍の吸排気系の構造を示す概略平面図である。

[図4]図４は、エンジンの制御系統を示すブロック図である。

[図5]図５は、エンジンの運転領域を燃焼形態の相違により区分けした運転マップである。

[図6]図６は、エンジンの各運転領域で行われる燃焼制御を概略的に説明するためのタイムチャートである。

[図7]図７は、ＳＰＣＣＩ燃焼（部分圧縮着火燃焼）時の熱発生率の波形を示すグラフである。

[図8]図８は、エンジンの第１運転領域において設定される目標空燃比の具体例を示すマップ図である。

[図9]図９は、上記第１運転領域において設定される目標スワール開度の具体例を示すマップ図である。

[図10]図１０は、負荷が一定の条件下で回転速度を変化させた場合の目標スワール開度の変化を示すグラフである。

[図11]図１１は、スワール比を測定するリグ試験装置の概略を示す図である。

[図12]図１２は、スワール開度とスワール比との関係を示すグラフである。

[図13]図１３は、インジェクタから噴射された燃料（噴霧）の振る舞いをスワール流との関係で示す説明図である。

[図14]図１４（ａ）～（ｅ）は、スワール流と共に移動する混合気を、燃焼室の上方視で模式的に示す図である。

[図15]図１５は、エンジンの温間時の燃焼制御の具体例を示すフローチャートである。

[図16]図１６は、図１５のステップＳ１０の制御詳細を示すサブルーチンである。

[図17]図１７（ａ）、（ｂ）は、先行点火の基本点火エネルギー決定用のマップ図である。

[図18]図１８は、上記第１運転領域で先行点火および主点火が行われるときの点火プラグの電気的な状態を燃焼波形と併せて示したタイムチャートである。

[図19]図１９は、混合気温度と中間生成物生成量との関係を示すグラフである。

[図20]図２０は、先行点火の回数を増やした場合の具体例を示すタイムチャートである。

[図21]図２１は、先行点火の回数と燃費改善代との関係を示すグラフである。

[図22]図２２は、図７に相当する図であって、ＳＩ率の種々の定義方法を説明するための図である。

発明を実施するための形態

[0013] （１）エンジンの全体構成

図１は、本発明の制御装置が適用された圧縮着火式エンジン（以下、単にエンジンという）の好ましい実施形態を示す図である。図１に示されるエン

ジンは、走行用の動力源として車両に搭載された４サイクルのガソリン直噴エンジンであり、エンジン本体１と、エンジン本体１に導入される吸気が流通する吸気通路３０と、エンジン本体１から排出される排気ガスが流通する排気通路４０と、排気通路４０を流通する排気ガスの一部を吸気通路３０に還流する外部ＥＧＲ装置５０と、を備えている。

[0014] エンジン本体１は、気筒２が内部に形成されたシリンダブロック３と、気筒２を上から閉塞するようにシリンダブロック３の上面に取り付けられたシリンダヘッド４と、気筒２に往復摺動可能に挿入されたピストン５とを有している。エンジン本体１は、典型的には複数の（例えば４つの）気筒を有する多気筒型のものであるが、ここでは簡略化のため、１つの気筒２のみに着目して説明を進める。図２には、エンジン本体１の断面図と、ピストン５の平面図とが併せて示されている。

[0015] ピストン５の上方には燃焼室６が区画されている。燃焼室６には、ガソリンを主成分とする燃料が、後述するインジェクタ１５からの噴射によって供給される。供給された燃料が燃焼室６で空気と混合されつつ燃焼し、その燃焼による膨張力で押し下げられたピストン５が上下方向に往復運動する。なお、燃焼室６に噴射される燃料は、主成分としてガソリンを含有していればよく、例えばガソリンに加えてバイオエタノール等の副成分を含んでいてもよい。

[0016] ピストン５の下方には、エンジン本体１の出力軸であるクランク軸７が設けられている。クランク軸７は、ピストン５とコネクティングロッド８を介して連結され、ピストン５の往復運動（上下運動）に応じて中心軸回りに回転駆動される。

[0017] 気筒２の幾何学的圧縮比、つまりピストン５が上死点にあるときの燃焼室６の容積とピストン５が下死点にあるときの燃焼室の容積との比は、後述するＳＰＣＣＩ燃焼（部分圧縮着火燃焼）に好適な値として、１３以上３０以下、好ましくは１４以上１８以下に設定される。より詳しくは、気筒２の幾何学的圧縮比は、オクタン価が９１程度のガソリン燃料を使用するレギュラ

一仕様の場合には１４以上１７以下に設定し、オクタン価が９６程度のガソリン燃料を使用するハイオク仕様の場合には１５以上１８以下に設定することが好ましい。

[0018] シリンダブロック３には、クランク軸７の回転角度（クランク角）およびクランク軸７の回転速度（エンジン回転速度）を検出するクランク角センサＳＮ１と、シリンダブロック３およびシリンダヘッド４の内部を流通する冷却水の温度（エンジン水温）を検出する水温センサＳＮ２とが設けられている。

[0019] シリンダヘッド４には、燃焼室６に開口する吸気ポート９および排気ポート１０と、吸気ポート９を開閉する吸気弁１１と、排気ポート１０を開閉する排気弁１２とが設けられている。なお、当実施形態のエンジンのバルブ形式は、図２に示すように、吸気２バルブ×排気２バルブの４バルブ形式である。図３は、気筒２およびその近傍の吸排気系の構造を示す概略平面図である。吸気ポート９は、第１吸気ポート９Ａおよび第２吸気ポート９Ｂを有しており、排気ポート１０は、第１排気ポート１０Ａおよび第２排気ポート１０Ｂを有している。吸気弁１１は、第１吸気ポート９Ａおよび第２吸気ポート９Ｂに対しそれぞれ１つずつ設けられ、排気弁１２は、第１排気ポート１０Ａおよび第２排気ポート１０Ｂに対しそれぞれ１つずつ設けられている。

[0020] 図３に示すように、第２吸気ポート９Ｂには開閉可能なスワール弁１８が設けられている。スワール弁１８は、第２吸気ポート９Ｂにのみ設けられており、第１吸気ポート９Ａには設けられていない。スワール弁１８が閉方向に駆動されると、スワール弁１８が設けられていない第１吸気ポート９Ａから燃焼室６に流入する吸気の割合が増大する。このため、気筒軸線Ｚ（燃焼室６の中心軸）の回りを旋回する旋回流、つまりスワール流を強化することができる。逆に、スワール弁１８を開方向に駆動すればスワール流を弱めることができる。なお、当実施形態の吸気ポート９はタンブル流（縦渦）を形成可能なタンブルポートである。このため、スワール弁１８の閉時に形成されるスワール流は、タンブル流とミックスされた斜めスワール流となる。

[0021] 吸気弁１１および排気弁１２は、シリンダヘッド４に配設された一対のカム軸等を含む動弁機構１３，１４により、クランク軸７の回転に連動して開閉駆動される。吸気弁１１用の動弁機構１３には、吸気弁１１の開閉時期を変更可能な吸気ＶＶＴ１３ａが内蔵されている。同様に、排気弁１２用の動弁機構１４には、排気弁１２の開閉時期を変更可能な排気ＶＶＴ１４ａが内蔵されている。吸気、排気ＶＶＴ１３ａ（排気ＶＶＴ１４ａ）は、いわゆる位相式の可変機構であり、吸気弁１１（排気弁１２）の開時期および閉時期を同時にかつ同量だけ変更する。これら吸気ＶＶＴ１３ａおよび排気ＶＶＴ１４ａの制御により、当実施形態では、吸気弁１１および排気弁１２の双方が排気上死点を跨いで開弁するバルブオーバーラップ期間を調整することが可能である。また、このバルブオーバーラップ期間の調整により、燃焼室６に残留する既燃ガス（内部ＥＧＲガス）の量を調整することが可能である。

[0022] シリンダヘッド４には、気筒２内の燃焼室６に燃料（主にガソリン）を噴射するインジェクタ１５と、インジェクタ１５から燃焼室６に噴射された燃料と燃焼室６に導入された空気とが混合された混合気に点火する点火プラグ１６とが設けられている。シリンダヘッド４には、さらに、燃焼室６の圧力（筒内圧力）を検出する筒内圧センサＳＮ３が設けられている。

[0023] 図２に示すように、ピストン５の冠面には、その中央部を含む比較的広い領域をシリンダヘッド４とは反対側（下方）に凹陥させたキャビティ２０が形成されている。また、ピストン５の冠面におけるキャビティ２０よりも径方向外側には、円環状の平坦面からなるスキッシュ部２１が形成されている。

[0024] インジェクタ１５は、その先端部に複数の噴孔を有した多噴孔型のインジェクタであり、当該複数の噴孔から放射状に燃料を噴射することが可能である。図２中の符号Ｆの領域は、各噴孔から噴射された燃料の噴霧を表している。インジェクタ１５は、その先端部がピストン５の冠面の中心部（キャビティ２０の底部中央）と対向するように、燃焼室６の天井面の中心部に配置されている。

[0025] 点火プラグ１６は、インジェクタ１５に対し吸気側に幾分ずれた位置に配置されている。点火プラグ１６の先端部（電極部）の位置は、キャビティ２０と平面視で重複するように設定されている。

[0026] 図１に示すように、吸気通路３０は、吸気ポート９と連通するようにシリンダヘッド４の一側面に接続されている。吸気通路３０の上流端から取り込まれた空気（新気）は、吸気通路３０および吸気ポート９を通じて燃焼室６に導入される。

[0027] 吸気通路３０には、その上流側から順に、吸気中の異物を除去するエアクリーナ３１と、吸気の流量を調整する開閉可能なスロットル弁３２と、吸気を圧縮しつつ送り出す過給機３３と、過給機３３により圧縮された吸気を冷却するインタークーラ３５と、サージタンク３６とが設けられている。

[0028] 吸気通路３０の各部には、吸気の流量を検出するエアフローセンサＳＮ４と、吸気の温度を検出する第１・第２吸気温センサＳＮ５，ＳＮ７と、吸気の圧力を検出する第１・第２吸気圧センサＳＮ６，ＳＮ８とが設けられている。エアフローセンサＳＮ４および第１吸気温センサＳＮ５は、吸気通路３０におけるエアクリーナ３１とスロットル弁３２との間の部位に設けられ、当該部位を通過する吸気の流量および温度を検出する。第１吸気圧センサＳＮ６は、吸気通路３０におけるスロットル弁３２と過給機３３との間（後述するＥＧＲ通路５１の接続口よりも下流側）の部位に設けられ、当該部位を通過する吸気の圧力を検出する。第２吸気温センサＳＮ７は、吸気通路３０における過給機３３とインタークーラ３５との間の部位に設けられ、当該部位を通過する吸気の温度を検出する。第２吸気圧センサＳＮ８は、サージタンク３６に設けられ、当該サージタンク３６内の吸気の圧力を検出する。

[0029] 過給機３３は、エンジン本体１と機械的に連係された機械式の過給機（スーパーチャージャ）である。過給機３３の具体的な形式は特に問わないが、例えばリショルム式、ルーツ式、または遠心式といった公知の過給機のいずれかを過給機３３として用いることができる。

[0030] 過給機３３とエンジン本体１との間には、締結と解放を電気的に切り替え

ることが可能な電磁クラッチ３４が介設されている。電磁クラッチ３４が締結されると、エンジン本体１から過給機３３に駆動力が伝達されて、過給機３３による過給が行われる。一方、電磁クラッチ３４が解放されると、上記駆動力の伝達が遮断されて、過給機３３による過給が停止される。

[0031] 吸気通路３０には、過給機３３をバイパスするためのバイパス通路３８が設けられている。バイパス通路３８は、サージタンク３６と後述するＥＧＲ通路５１とを互いに接続している。バイパス通路３８には開閉可能なバイパス弁３９が設けられている。

[0032] 排気通路４０は、排気ポート１０と連通するようにシリンダヘッド４の他側面に接続されている。燃焼室６で生成された既燃ガスは、排気ポート１０および排気通路４０を通じて外部に排出される。排気通路４０には触媒コンバータ４１が設けられている。触媒コンバータ４１には、排気通路４０を流通する排気ガス中に含まれる有害成分（ＨＣ、ＣＯ、ＮＯｘ）を浄化するための三元触媒４１ａと、排気ガス中に含まれる粒子状物質（ＰＭ）を捕集するためのＧＰＦ（ガソリン・パティキュレート・フィルタ）４１ｂとが内蔵されている。なお、触媒コンバータ４１の下流側に、三元触媒やＮＯｘ触媒等の適宜の触媒を内蔵した別の触媒コンバータを追加してもよい。

[0033] 排気通路４０における触媒コンバータ４１よりも上流側の部位には、排気ガス中に含まれる酸素の濃度を検出するリニアO_2センサＳＮ１０が設けられている。リニアO_2センサＳＮ１０は、酸素濃度の濃淡に応じて出力値がリニアに変化するタイプのセンサである。リニアO_2センサＳＮ１０の出力値に基づいて、混合気の空燃比を推定することが可能である。

[0034] 外部ＥＧＲ装置５０は、排気通路４０と吸気通路３０とを接続するＥＧＲ通路５１と、ＥＧＲ通路５１に設けられたＥＧＲクーラ５２およびＥＧＲ弁５３とを有している。ＥＧＲ通路５１は、排気通路４０における触媒コンバータ４１よりも下流側の部位と、吸気通路３０におけるスロットル弁３２と過給機３３との間の部位とを互いに接続している。ＥＧＲクーラ５２は、ＥＧＲ通路５１を通して排気通路４０から吸気通路３０に還流される排気ガス

（外部ＥＧＲガス）を熱交換により冷却する。ＥＧＲ弁５３は、ＥＧＲクーラ５２よりも下流側（吸気通路３０に近い側）のＥＧＲ通路５１に開閉可能に設けられ、ＥＧＲ通路５１を流通する排気ガスの流量を調整する。ＥＧＲ通路５１には、ＥＧＲ弁５３の上流側の圧力と下流側の圧力との差を検出するための差圧センサＳＮ９が設けられている。

[0035] （２）制御系統

図４は、エンジンの制御系統を示すブロック図である。本図に示されるＥＣＵ１００（コントローラ）は、エンジンを統括的に制御するための電気回路によって構成されたマイクロプロセッサであり、周知のＣＰＵ、ＲＯＭ、ＲＡＭ等から構成されている。

[0036] ＥＣＵ１００には各種センサによる検出信号が入力される。ＥＣＵ１００は、上述したクランク角センサＳＮ１、水温センサＳＮ２、筒内圧センサＳＮ３、エアフローセンサＳＮ４、第１・第２吸気温センサＳＮ５，ＳＮ７、第１・第２吸気圧センサＳＮ６，ＳＮ８、差圧センサＳＮ９、およびリニアO_2センサＳＮ１０と電気的に接続されている。これらのセンサによって検出された情報（つまりクランク角、エンジン回転速度、エンジン水温、筒内圧力、吸気流量、吸気温、吸気圧、ＥＧＲ弁５３の前後差圧、排気ガスの酸素濃度等）は、ＥＣＵ１００に逐次入力される。

[0037] 車両には、当該車両を運転するドライバーにより操作されるアクセルペダルの開度を検出するアクセルセンサＳＮ１１が設けられている。このアクセルセンサＳＮ１１による検出信号も、ＥＣＵ１００に入力される。

[0038] ＥＣＵ１００は、上記各センサからの入力情報に基づいて種々の判定や演算等を実行しつつエンジンの各部を制御する。すなわち、ＥＣＵ１００は、吸気ＶＶＴ１３ａ、排気ＶＶＴ１４ａ、インジェクタ１５、点火プラグ１６、スワール弁１８、スロットル弁３２、電磁クラッチ３４、バイパス弁３９、およびＥＧＲ弁５３等と電気的に接続されており、上記演算の結果等に基づいてこれらの機器にそれぞれ制御用の信号を出力する。

[0039] ＥＣＵ１００は、所定のプログラムが実行されることによって、演算部１

０１、噴射制御部１０２、点火制御部１０３（第１点火制御部、第２点火制御部）、スワール制御部１０４、吸気制御部１０５、およびＥＧＲ制御部１０６を機能的に具備するように動作する。なお、噴射制御部１０２、スワール制御部１０４、吸気制御部１０５およびＥＧＲ制御部１０６は、本発明に係る「燃焼制御部」の一例である。

[0040] 噴射制御部１０２は、インジェクタ１５による燃料の噴射動作を制御するための制御モジュールである。点火制御部１０３は、点火プラグ１６による点火動作を制御するための制御モジュールである。スワール制御部１０４は、スワール弁１８の開度を制御するための制御モジュールである。吸気制御部１０５は、燃焼室６に導入される吸気の流量や圧力を調整するための制御モジュールであり、スロットル弁３２およびバイパス弁３９の各開度や電磁クラッチ３４のＯＮ／ＯＦＦを制御する。ＥＧＲ制御部１０６は、燃焼室６に導入されるＥＧＲガス（外部ＥＧＲガスおよび内部ＥＧＲガス）の量を調整するための制御モジュールであり、吸気ＶＶＴ１３ａおよび排気ＶＶＴ１４ａの各動作やＥＧＲ弁５３の開度を制御する。演算部１０１は、これら各制御部１０２～１０６による制御目標値の決定や、エンジンの運転状態の判定のための各種演算を実行する制御モジュールである。

[0041] （３）運転状態に応じた制御

図５は、エンジンの温間時に使用される運転マップであり、エンジンの回転速度／負荷に応じた制御の相違を示す図である。なお、以下の説明において、エンジンの負荷が高い（低い）とは、エンジンの要求トルクが高い（低い）ことと等価である。

[0042] 図５に示すように、エンジンが温間状態にあるとき、エンジンの運転領域は、燃焼形態の相違によって３つの運転領域Ａ１～Ａ３に大別される。これら運転領域Ａ１～Ａ３を、それぞれ第１運転領域Ａ１、第２運転領域Ａ２、第３運転領域Ａ３と呼ぶ。第３運転領域Ａ３は、回転速度が高い高速領域である。第１運転領域Ａ１は、第３運転領域Ａ３よりも低速側の領域から高負荷側の一部を除いた低・中速／低負荷の領域である。第２運転領域Ａ２は、

第１、第３運転領域Ａ１，Ａ３以外の残余の領域、つまり低・中速／高負荷の領域である。以下、各運転領域で選択される燃焼形態等について順に説明する。

[0043] （３－１）第１運転領域

低・中速／低負荷の第１運転領域Ａ１では、ＳＩ燃焼とＣＩ燃焼とを組み合わせた部分圧縮着火燃焼（以下、これをＳＰＣＣＩ燃焼という）が実行される。ＳＩ燃焼とは、点火プラグ１６から発生する火花により混合気に点火し、その点火点からその周囲へと燃焼領域を拡げていく火炎伝播により混合気を強制的に燃焼させる燃焼形態のことである。ＣＩ燃焼とは、ピストン５の圧縮により高温・高圧化された環境下で、混合気を自着火により燃焼させる燃焼形態のことである。これらＳＩ燃焼とＣＩ燃焼とを組み合わせたＳＰＣＣＩ燃焼とは、混合気が自着火する寸前の環境下で行われる火花点火により燃焼室６内の混合気の一部をＳＩ燃焼させ、当該ＳＩ燃焼の後に（ＳＩ燃焼に伴うさらなる高温・高圧化により）燃焼室６内の他の混合気を自着火によりＣＩ燃焼させる、という燃焼形態のことである。なお、「ＳＰＣＣＩ」は「Ｓｐａｒｋ Ｃｏｎｔｒｏｌｌｅｄ Ｃｏｍｐｒｅｓｓｉｏｎ Ｉｇｎｉｔｉｏｎ」の略である。

[0044] ＳＰＣＣＩ燃焼は、ＳＩ燃焼時の熱発生よりもＣＩ燃焼時の熱発生の方が急峻になるという性質がある。ＳＰＣＣＩ燃焼による熱発生率の波形は、例えば図６または図７に示すように、ＳＩ燃焼に対応する燃焼初期の立ち上がりの傾きが、その後のＣＩ燃焼に対応して生じる立ち上がりの傾きよりも小さくなる。言い換えると、ＳＰＣＣＩ燃焼時の熱発生率の波形は、ＳＩ燃焼に基づく相対的に立ち上がりの傾きが小さい第１熱発生率部と、ＣＩ燃焼に基づく相対的に立ち上がりの傾きが大きい第２熱発生部とが、この順に連続するように形成される。また、このような熱発生率の傾向に対応して、ＳＰＣＣＩ燃焼では、ＳＩ燃焼時に生じる燃焼室６内の圧力上昇率（ｄｐ／ｄθ）がＣＩ燃焼時のそれよりも小さくなる。

[0045] ＳＩ燃焼によって、燃焼室６内の温度および圧力が高まると、これに伴い

未燃混合気が自着火し、ＣＩ燃焼が開始される。図６または図７に例示するように、この自着火のタイミング（つまりＣＩ燃焼が開始するタイミング）で、熱発生率の波形の傾きが小から大へと変化する。すなわち、ＳＰＣＣＩ燃焼における熱発生率の波形は、ＣＩ燃焼が開始するタイミングで現れる変曲点（図７のＸ２）を有している。

[0046] ＣＩ燃焼の開始後は、ＳＩ燃焼とＣＩ燃焼とが並行して行われる。ＣＩ燃焼は、ＳＩ燃焼よりも混合気の燃焼速度が速いため、熱発生率は相対的に大きくなる。ただし、ＣＩ燃焼は、圧縮上死点の後に行われるため、熱発生率の波形の傾きが過大になることはない。すなわち、圧縮上死点を過ぎるとピストン５の下降によりモータリング圧力が低下するので、このことが熱発生率の上昇を抑制する結果、ＣＩ燃焼時のｄｐ／ｄθが過大になることが回避される。このように、ＳＰＣＣＩ燃焼では、ＳＩ燃焼の後にＣＩ燃焼が行われるという性質上、燃焼騒音の指標となるｄｐ／ｄθが過大になり難く、単純なＣＩ燃焼（全ての燃料をＣＩ燃焼させた場合）に比べて燃焼騒音を抑制することができる。

[0047] ＣＩ燃焼の終了に伴いＳＰＣＣＩ燃焼も終了する。ＣＩ燃焼はＳＩ燃焼に比べて燃焼速度が速いので、単純なＳＩ燃焼（全ての燃料をＳＩ燃焼させた場合）に比べて燃焼終了時期を早めることができる。言い換えると、ＳＰＣＣＩ燃焼では、燃焼終了時期を膨張行程内において圧縮上死点に近づけることができる。これにより、ＳＰＣＣＩ燃焼では、単純なＳＩ燃焼に比べて燃費性能を向上させることができる。

[0048] 上記のようなＳＰＣＣＩ燃焼の具体的形態として、第１運転領域Ａ１では、点火プラグ１６から火花を複数回発生させることとし、前記複数回のうちの最後の火花点火をきっかけにして、混合気をＳＰＣＣＩ燃焼させる制御が実行される。当実施形態の場合、火花点火の回数は２回とされる。このような２回点火によるＳＰＣＣＩ燃焼を実現するため、第１運転領域Ａ１では、ＥＣＵ１００によってエンジンの各部が次のように制御される。以下の説明では、燃料噴射や火花点火の時期を特定する用語として、～行程の「前期」

「中期」「後期」といった用語や、～行程の「前半」「後半」といった用語を用いることがあるが、これは、次のことを前提としている。すなわち、本明細書では、吸気行程や圧縮行程等の任意の行程を３等分した場合の各期間を前から順に「前期」「中期」「後期」と定義する。このため、例えば圧縮行程の（ｉ）前期、（ｉｉ）中期、（ｉｉｉ）後期とは、それぞれ、（ｉ）圧縮上死点前（ＢＴＤＣ）１８０～１２０°ＣＡ、（ｉｉ）ＢＴＤＣ１２０～６０°ＣＡ、（ｉｉｉ）ＢＴＤＣ６０～０°ＣＡの各範囲のことを指す。同様に、本明細書では、吸気行程や圧縮行程等の任意の行程を２等分した場合の各期間を前から順に「前半」「後半」と定義する。このため、例えば吸気行程の（ｉｖ）前半、（ｖ）後半とは、それぞれ、（ｉｖ）ＢＴＤＣ３６０～２７０°ＣＡ、（ｖ）ＢＴＤＣ２７０～１８０°ＣＡの各範囲のことを指す。

[0049] 第１運転領域Ａ１での運転時、点火プラグ１６（点火制御部１０３）は、圧縮上死点から十分に進角された時期に火花を発生させる先行点火と、先行点火よりも圧縮上死点に近い時期に火花を発生させる主点火とを実行する。先行点火は、圧縮行程前期または中期のいずれか（ＢＴＤＣ１８０～６０°ＣＡ）に実行される。主点火は、ＳＩ燃焼を開始させる点火であり、圧縮行程後期から膨張行程初期までの期間内（ＢＴＤＣ６０～ＡＴＤＣ６０°ＣＡ）に実行される。なお、燃料噴射後であれば、吸気行程において先行点火を実行させても良い。

[0050] 図６は、エンジンの各運転領域で行われる燃焼制御を概略的に説明するためのタイムチャートである。例えば、第１運転領域Ａ１における低負荷側の運転ポイントＰ１において、点火制御部１０３は点火プラグ１６を制御して、図６のチャート（ａ）に示すように、圧縮行程前期に先行点火を実行するとともに、圧縮行程後期に主点火を実行する。同様に、運転ポイントＰ１よりも負荷が高い運転ポイントＰ２において、点火制御部１０３は、図６のチャート（ｂ）に示すように、圧縮行程前期に先行点火を実行するとともに、圧縮行程後期に主点火を実行する。ただし、高負荷側の運転ポイントＰ２に

おける先行点火の時期は、低負荷側の運転ポイントＰ１における先行点火の時期よりも進角側に設定される。これは、後述する第２噴射（１サイクル中の最後の燃料噴射）の時期に連動したものである。すなわち、点火制御部１０３は、第２噴射の終了時期から先行点火までのクランク角期間が略一定に維持されるように、第２噴射の時期に連動して先行点火の時期が高負荷側ほど進角させる。つまり、噴射制御部１０２は、第２噴射の時期をエンジン負荷（エンジンの運転状態）に応じて変更し、点火制御部１０３は、第２噴射の時期変更の前後において、第２噴射の終了時期から先行点火の時期までの期間が略一定に維持されるように、先行点火の時期を変更する。

[0051] 上記のように圧縮上死点から十分に進角された時期に実行される先行点火は、混合気の火炎伝播を生じさせない。この先行点火は、火花（アーク）の周囲の混合気を８５０Ｋ以上１１４０Ｋ未満という狙いの温度にまで上昇させることにより、燃料成分（炭化水素）を開裂させてＯＨラジカルを含む中間生成物を生成することを目的として行われる。また、火炎伝播が生じるのを確実に防止するため、先行点火のエネルギーは、主点火のエネルギーよりも小さくされる。したがって、このような先行点火が行われても、混合気には実質的に火炎が形成されず、ＳＩ燃焼は開始されない。

[0052] 一方、圧縮上死点に比較的近い時期に実行されるエネルギーの大きい主点火は、混合気の火炎伝播を生じさせ、ＳＩ燃焼を引き起こす。ＳＩ燃焼が開始されると、燃焼室６が高温・高圧化し、そのことがＣＩ燃焼を引き起こす。すなわち、主点火をきっかけにＳＰＣＣＩ燃焼が開始され、燃焼室６内の一部の混合気が火炎伝播により燃焼（ＳＩ燃焼）し、その他の混合気が自着火により燃焼（ＣＩ燃焼）する。

[0053] インジェクタ１５（噴射制御部１０２）は、１サイクル中に噴射すべき燃料を複数回に分けて噴射するとともに、少なくとも一部の燃料を吸気行程中に噴射する。当実施形態の場合、燃料噴射の回数は２回とされる。すなわち、第１運転領域Ａ１での運転時、噴射制御部１０２はインジェクタ１５を制御して、上述した先行点火よりも早い所定の期間内に、第１噴射と第２噴射

との２回に分けて燃料を噴射させる。例えば、第１運転領域Ａ１における低負荷側の運転ポイントＰ１において、インジェクタ１５は、図６のチャート（ａ）に示すように、吸気行程前半（吸気行程の所定の時点）に第１噴射を開始するとともに、吸気行程後半（第１噴射よりも遅い時点）に第２噴射を開始する。同様に、運転ポイントＰ１よりも負荷が高い運転ポイントＰ２において、インジェクタ１５は、図６のチャート（ｂ）に示すように、吸気行程前半に第１噴射を開始するとともに、吸気行程後半に第２噴射を開始する。ただし、高負荷側の運転ポイントＰ２における第２噴射の開始時期は、低負荷側の運転ポイントＰ１における第２噴射の開始時期よりも進角側に設定される。言い換えると、第２噴射の時期は、第１運転領域Ａ１内で負荷が増大するほど進角されるようになっている。

[0054] 上記のような分割噴射によりインジェクタ１５から噴射される燃料の量（総量）および分割比は、エンジンの要求トルクに応じて可変的に設定される。具体的に、燃料の総量、つまり第１噴射による燃料の噴射量と第２噴射による燃料の噴射量との合計は、要求トルクが高くなる高負荷側ほど多くなるように設定される。また、第１・第２噴射の分割比、つまり、（第１噴射による燃料の噴射量）：（第２噴射による燃料の噴射量）は、高負荷側ほど第１噴射の割合が小さくなるように設定される。例えば、第１・第２噴射の分割比は、第１運転領域Ａ１内における低負荷側から高負荷側にかけて、概ね９：１から６：４まで変化するように設定される。このように、噴射制御部１０２は、第１噴射による燃料の噴射量の方が第２噴射による燃料の噴射量よりも多くなるように、インジェクタ１５を制御する。これにより、燃料が成層化され過ぎてエミッション性能が低下することを回避できる。

[0055] スロットル弁３２の開度は、理論空燃比相当の空気量よりも多くの空気が吸気通路３０を通じて燃焼室６に導入されるような開度に設定される。すなわち、吸気制御部１０５は、吸気通路３０を通じて燃焼室６に導入される空気（新気）と、上記第１・第２噴射によって燃焼室６に噴射される燃料との重量比である空燃比（Ａ／Ｆ）が、理論空燃比（１４．７）よりも大きくな

るように、スロットル弁３２の開度を比較的高めに設定する。これにより、理論空燃比相当の空気量よりも多くの空気が、吸気通路３０を通じて燃焼室６に導入される。このように、当実施形態では、第１運転領域Ａ１での運転時に、燃焼室６内の空燃比が理論空燃比よりも大きくなる環境（以下、これをＡ／Ｆリーン環境という）を形成しつつ、混合気をＳＰＣＣＩ燃焼させる制御が実行される。

[0056] 第１運転領域Ａ１における空燃比（Ａ／Ｆ）は、２０超３５未満の範囲内で可変的に設定される。図８は、第１運転領域Ａ１における空燃比（Ａ／Ｆ）の目標値である目標空燃比の設定例を示すマップ図である。第１運転領域Ａ１での目標空燃比は、概ね、第１運転領域Ａ１内で負荷（要求トルク）が高くなるほど大きくなるように設定されている。より詳しくは、目標空燃比は、第１運転領域Ａ１の上限負荷（つまり第１運転領域Ａ１と第２運転領域Ａ２との境界の負荷）の近傍に設定された領域ａ１において最も高い値（３１以上）をとり、当該領域ａ１から離れるほど小さい値をとるように設定されている。ただし、第１運転領域Ａ１内のいずれの位置においても、空燃比が２０以下になることはない。なお、当実施形態において、目標空燃比が最大になる領域ａ１は、第１運転領域Ａ１の上限負荷からやや低負荷側に離れかつ第１運転領域Ａ１の下限速度から高速側に離れた帯状の領域、つまり第１運転領域Ａ１内の中・高速／高負荷の領域に設定されている。領域ａ１が上限負荷に近いことから、第１運転領域Ａ１内で領域ａ１から最も遠いのは、回転速度および負荷が共に最低となるアイドル領域である。このアイドル領域での目標空燃比が最も小さくなる。

[0057] 過給機３３は、図５に示される過給ラインＴの内側領域でＯＦＦ状態とされ、過給ラインＴの外側領域でＯＮ状態とされる。過給機３３がＯＦＦ状態とされる過給ラインＴの内側領域、つまり第１運転領域Ａ１の低速側では、電磁クラッチ３４が解放されて過給機３３とエンジン本体１との連結が解除されるとともに、バイパス弁３９が全開とされることにより、過給機３３による過給が停止される。一方、過給機３３がＯＮ状態とされる過給ラインＴ

の外側領域、つまり第１運転領域Ａ１の高速側では、電磁クラッチ３４が締結されて過給機３３とエンジン本体１とが連結されることにより、過給機３３による過給が行われる。このとき、第２吸気圧センサＳＮ８により検出されるサージタンク３６内の圧力（過給圧）が、エンジンの運転条件（回転速度や負荷等の条件）ごとに予め定められた目標圧力に一致するように、吸気制御部１０５は、バイパス弁３９の開度を制御する。例えば、バイパス弁３９の開度が大きくなるほど、バイパス通路３８を通じて過給機３３の上流側に逆流する吸気の流量が多くなる結果、サージタンク３６に導入される吸気の圧力つまり過給圧が低くなる。バイパス弁３９は、このように吸気の逆流量を調整することにより、過給圧を目標圧力に制御する。

[0058] ＥＧＲ制御部１０６による制御下、吸気ＶＶＴ１３ａおよび排気ＶＶＴ１４ａは、ＳＰＣＣＩ燃焼に適した燃焼室６の温度（筒内温度）が実現されるように、第１運転領域Ａ１内の多くの領域において、燃焼室６に既燃ガスを残留させる内部ＥＧＲを実行可能なタイミングで吸気弁１１および排気弁１２を駆動する。すなわち、吸・排気ＶＶＴ１３ａ，１４ａは、排気上死点を挟んで吸・排気弁１１，１２の双方が開かれるバルブオーバーラップ期間が形成されるように各弁１１，１２を駆動し、排気上死点を過ぎるまで（吸気行程初期まで）排気弁１２を開弁させる。これにより、排気ポート１０から燃焼室６へと既燃ガスが引き戻されて、内部ＥＧＲが実現される。バルブオーバーラップ期間は、所望のＳＰＣＣＩ燃焼の波形（後述する目標ＳＩ率および目標θｃｉ）を得るのに適した筒内温度が実現されるように、言い換えれば当該温度を実現するのに必要な量の内部ＥＧＲガスが燃焼室６に導入されるように調整される。このようなバルブオーバーラップ期間の調整によって実現される内部ＥＧＲ率、つまり燃焼室６内の全ガス量のうち内部ＥＧＲガスが占める割合は、概ね、第１運転領域Ａ１内の低負荷側ほど大きくなる傾向にある。

[0059] ＥＧＲ制御部１０６はＥＧＲ弁５３を、ＳＰＣＣＩ燃焼に適した筒内温度が実現されるように、第１運転領域Ａ１内の多くの領域において開弁する。

すなわち、ＥＧＲ通路５１を通じて燃焼室６に排気ガスを還流する外部ＥＧＲが実現されるように、ＥＧＲ弁５３が開弁される。ＥＧＲ弁５３の開度は、所望のＳＰＣＣＩ燃焼の波形（後述する目標ＳＩ率および目標θｃｉ）を得るのに適した筒内温度が実現されるように、言い換えれば当該温度を実現するのに必要な量の外部ＥＧＲガスが燃焼室６に導入されるように調整される。このようなＥＧＲ弁５３の開度調整によって実現される外部ＥＧＲ率、つまり燃焼室６内の全ガス量のうち外部ＥＧＲガスが占める割合は、概ね、第１運転領域Ａ１内で回転速度または負荷のいずれかが高くなるほど大きくなる傾向にある。

[0060] スワール制御部１０４は、スワール弁１８の開度を、半開（５０％）よりも低い低開度に設定する。このようにスワール弁１８の開度が低減されることにより、燃焼室６に導入される吸気は、その大部分が第１吸気ポート９Ａ（スワール弁１８が設けられていない側の吸気ポート）からの吸気となり、燃焼室６内に強いスワール流が形成される。このスワール流は、吸気行程中に成長して圧縮行程の途中まで残存し、燃料の成層化を促進する。つまり、燃焼室６の中央部の燃料濃度がその外側の領域（外周部）に比べて濃くなるという濃度差が形成される。なお、具体的なスワール弁１８の開度設定については後述の（４）において詳しく説明する。

[0061] （３－２）第２運転領域

低・中速／高負荷の第２運転領域Ａ２では、１回の火花点火によって混合気をＳＰＣＣＩ燃焼させる制御が実行される。言い換えると、第２運転領域Ａ２では、上述した第１運転領域Ａ１における先行点火が省略されて、主点火のみが実行される。このような１回点火によるＳＰＣＣＩ燃焼を実現するため、第２運転領域Ａ２では、ＥＣＵ１００によってエンジンの各部が次のように制御される。

[0062] 点火プラグ１６は、圧縮行程後期から膨張行程初期までの期間内に１回の火花点火を実行する。例えば、第２運転領域Ａ２に含まれる運転ポイントＰ３において、点火プラグ１６は、図６のチャート（ｃ）に示すように、圧縮

行程後期に１回の火花点火を実行する。そして、この火花点火をきっかけにＳＰＣＣＩ燃焼が開始され、燃焼室６内の一部の混合気が火炎伝播により燃焼（ＳＩ燃焼）し、その他の混合気が自着火により燃焼（ＣＩ燃焼）する。

[0063] インジェクタ１５は、吸気行程中に少なくとも１回の燃料噴射を実行する。例えば、第２運転領域Ａ２に含まれる運転ポイントＰ３において、インジェクタ１５は、図６のチャート（ｃ）に示すように、１サイクル中に噴射すべき燃料の全量を供給する１回の燃料噴射を吸気行程中に実行する。なお、運転ポイントＰ３以外（例えば第２運転領域Ａ２内においてＰ３よりも低負荷側にある運転ポイント）では、吸気行程中に２回に分けて燃料が噴射されることもある。

[0064] スロットル弁３２の開度は、理論空燃比相当の空気量が吸気通路３０を通じて燃焼室６に導入されるような開度、つまり、燃焼室６内の空気（新気）と燃料との重量比である空燃比（Ａ／Ｆ）が理論空燃比（１４．７）に略一致するような開度に設定される。一方、後述するように、第２運転領域Ａ２では、ＥＧＲ弁５３が開弁されて外部ＥＧＲガスが燃焼室６に導入される。このため、第２運転領域Ａ２では、燃焼室６内の全ガスと燃料との重量比であるガス空燃比（Ｇ／Ｆ）は理論空燃比（１４．７）よりも大きくなる。このように、当実施形態では、第２運転領域Ａ２での運転時に、ガス空燃比（Ｇ／Ｆ）が理論空燃比よりも大きくかつ空燃比（Ａ／Ｆ）が理論空燃比に略一致する環境（以下、これをＧ／Ｆリーン環境という）を形成しつつ混合気をＳＰＣＣＩ燃焼させる制御が実行される。

[0065] 過給機３３は、過給ラインＴの内側領域と重複する低負荷かつ低速側の一部においてＯＦＦ状態とされ、それ以外の領域でＯＮ状態とされる。過給機３３がＯＮ状態とされて吸気が過給されているとき、バイパス弁３９の開度は、サージタンク３６内の圧力（過給圧）が目標圧力に一致するように制御される。

[0066] 吸気ＶＶＴ１３ａおよび排気ＶＶＴ１４ａは、内部ＥＧＲが実質的に停止されるようなタイミングで吸気弁１１および排気弁１２を駆動する。ＥＧＲ

弁５３は、第２運転領域Ａ２でのＳＰＣＣＩ燃焼に適した量の外部ＥＧＲガスが燃焼室６に導入されるように適宜の開度まで開弁される。このときのＥＧＲ弁５３の開度は、上述した第１運転領域Ａ１のときと同様、所望のＳＰＣＣＩ燃焼の波形（後述する目標ＳＩ率および目標θｃｉ）を得るのに適した筒内温度が実現されるように調整される。スワール弁１８の開度は、第１運転領域Ａ１での開度と同程度の値か、もしくはこれよりも大きい所定の中間開度に設定される。

[0067] （３－３）第３運転領域

上記第１・第２運転領域Ａ１，Ａ２よりも高速側の第３運転領域Ａ３では、比較的オーソドックスなＳＩ燃焼が実行される。このＳＩ燃焼の実現のために、第３運転領域Ａ３では、ＥＣＵ１００によってエンジンの各部が次のように制御される。

[0068] 点火プラグ１６は、圧縮行程後期から膨張行程初期までの期間内に１回の火花点火を実行する。例えば、第３運転領域Ａ３に含まれる運転ポイントＰ４において、点火プラグ１６は、図６のチャート（ｄ）に示すように、圧縮行程後期に１回の火花点火を実行する。そして、この火花点火をきっかけにＳＩ燃焼が開始され、燃焼室６内の混合気の全てが火炎伝播により燃焼する。

[0069] インジェクタ１５は、少なくとも吸気行程と重複する所定の期間にわたって噴射を噴射する。例えば、上記運転ポイントＰ４において、インジェクタ１５は、図６のチャート（ｄ）に示すように、吸気行程から圧縮行程にかけた一連の期間にわたって燃料を噴射する。なお、運転ポイントＰ４は、かなり高速かつ高負荷の条件であるため、１サイクル中に噴射すべき燃料の量がそもそも多い上に、所要量の燃料を噴射するのに要するクランク角期間が長期化する。運転ポイントＰ４における燃料の噴射期間が既述の他の運転ポイント（Ｐ１～Ｐ３）のいずれよりも長いのはこのためである。

[0070] 過給機３３はＯＮ状態とされ、過給機３３による過給が行われる。このときの過給圧は、バイパス弁３９によって調整される。スロットル弁３２およ

びＥＧＲ弁５３は、燃焼室６内の空燃比（Ａ／Ｆ）が理論空燃比もしくはこれよりもややリッチな値（λ≦１）となるように、それぞれの開度が制御される。スワール弁１８は全開とされる。これにより、第１吸気ポート９Ａだけでなく第２吸気ポート９Ｂが完全に開放されて、エンジンの充填効率が高められる。

[0071] （４）スワール制御

次に、第１運転領域Ａ１でのスワール制御の詳細について説明する。図９は、第１運転領域Ａ１において設定されるスワール弁１８の開度の目標値（以下、目標スワール開度ともいう）の具体例を示すマップ図である。図１０は、負荷が一定の条件下で（図９のラインＶに沿って）回転速度を変化させた場合の、目標スワール開度の変化を示すグラフである。これらの図に示すように、第１運転領域Ａ１では、目標スワール開度が概ね２０～４０％の範囲で可変的に設定され、その値は高速側または高負荷側ほど高くされる。

[0072] 具体的に、目標スワール開度は、第１運転領域Ａ１内における最も低速かつ低負荷の第１領域ｂ１において一律に２０％に設定され、この第１領域ｂ１よりも回転速度または負荷が高い第２領域ｂ２において、回転速度または負荷が高くなるにつれて漸増するように設定されている。第２領域ｂ２では、第１領域ｂ１に近い低速・低負荷側ほど目標スワール開度が２０％に近くなり、第１領域ｂ１から遠い高速・高負荷側ほど目標スワール開度が２０％より大きくされ、最大で約４０％まで増大される。例えば、第１領域ｂ１→第２領域ｂ２の順に横切るように（図９のラインＶに沿って）回転速度が増大した場合、目標スワール開度は、図１０に示すように、回転速度が第１領域ｂ１に含まれる間は２０％に維持され、第２領域ｂ２に移行した後は回転速度の増大とともに略一定の割合で増大する。

[0073] ＥＣＵ１００（スワール制御部１０４）は、第１運転領域Ａ１での運転時、上記のとおり設定された目標スワール開度のマップ（図９および図１０）に従ってスワール弁１８の開度を制御する。

[0074] スワール弁１８の開度が低いほど、燃焼室６には強いスワール流が生成さ

れる。上記図９および図１０のマップが使用される当実施形態では、第１運転領域Ａ１での運転時に、回転速度および負荷が低いほどスワール弁１８の開度が低くされるので、これに応じて（回転速度および負荷が低いほど）スワール流は強められる。これは、着火性の厳しい低速かつ低負荷の条件下で混合気の成層化を促進し、着火性を改善するためである。

[0075] すなわち、当実施形態では、燃焼室６の天井面の中心部に配置されたインジェクタ１５から放射状に燃料が噴射される。噴射された燃料の各噴霧は、スワール流によって運ばれて燃焼室６の中心部を指向するように移動する。このとき、スワール弁１８の開度が低いほど（言い換えるとスワール流の初期速度が速いほど）、圧縮行程のより遅い段階までスワール流が残存する。これにより、燃焼の開始直前まで燃焼室６の中央部に燃料濃度の濃い混合気が形成される結果、混合気の成層化が促進される。このことを利用して、当実施形態では、第１運転領域Ａ１の中でも低速かつ低負荷の条件であるほど、スワール弁１８の開度を低下させてスワール流を強化し、もって混合気の成層化および着火性の改善を図るようにしている。

[0076] ここで、スワール流の強さについて定義する。本明細書では、燃焼室６に生成されるスワール流の強さを、「スワール比」で表す。スワール比は、吸気流の横方向角速度をバルブリフト毎に測定して積分した値を、クランク軸の角速度で除した値として定義される。吸気流の横方向角速度は、図１１に示すリグ試験装置を用いた測定により特定することができる。前記リグ試験装置は、シリンダブロック２０３とシリンダヘッド２０４とを含む試験用エンジンを対象として吸気流の横方向角速度を測定するものであり、試験用エンジンの下側に配置される基台２１０と、試験用エンジンの上側に配置されるインパルスメータ２１１とを有する。試験用エンジンは、上下反転した姿勢とされ、そのシリンダヘッド２０４が基台２１０の上に載置される。シリンダヘッド２０４には吸気ポート２０５が形成されており、この吸気ポート２０５には図外の吸気供給装置が接続されている。シリンダブロック２０３の内部には気筒２０２が形成され、当該気筒２０２には、上記吸気供給装置

から供給される吸気が吸気ポート２０５を介して導入される。

[0077] インパルスメータ２１１は、シリンダブロック２０３の上面に取り付けられるハニカム状ロータ２１１ａと、ハニカム状ロータ２１１ａの上側に位置するメータ本体部２１１ｂとを有している。気筒２０２の直径であるシリンダボア径をＤとしたとき、インパルスメータ２１１の下面は、シリンダヘッド２０４とシリンダブロック２０３との合わせ面から１．７５Ｄだけ離れたところに位置している。上記吸気供給装置から吸気が供給されると、これに応じて気筒２０２の内部にスワール流（図１１の矢印参照）が発生し、このスワール流がハニカム状ロータ２１１ａに作用することにより、ハニカム状ロータ２１１ａに回転方向のトルクが発生する。このトルクは、メータ本体部２１１ｂによって計測されるとともに、計測されたトルクに基づいて吸気流の横方向角速度が求められる。

[0078] 図１２は、当実施形態のエンジンにおけるスワール弁１８の開度と、上記の定義によるスワール比との関係を示している。本図に示すように、スワール弁１８の開度が低くなるほど、スワール比は増大する（つまりスワール流が強化される）。例えば、スワール弁１８の開度が４０％であるとき、スワール比は１．５を少し超えた値をとる。これに対し、スワール弁１８が全閉（０％）まで閉じられると、スワール比は約６まで増大する。

[0079] ここで、当実施形態では、上述したとおり、第１運転領域Ａ１での運転時に、スワール弁１８の開度が概ね２０～４０％の範囲内で制御される（図９、図１０参照）。このことから、当実施形態では、第１運転領域Ａ１でのスワール弁１８の開度が、燃焼室６内のスワール比が１．５以上となるような値に設定されているといえる。

[0080] ＜スワール流による作用＞

上記の通りスワール比を１．５以上としてスワール流を強化したことによる作用について、説明を加える。気筒軸線Ｚ（図２）の回りを旋回するスワール流は、比較的多くの燃料を燃焼室６の中央部に集める役割を果たす。第１噴射および第２噴射の燃料は前記スワール流に向けて噴射され、当該スワ

ール流で点火プラグ１６の電極部に向けて搬送される。これにより、主点火の時点において、点火プラグ１６の周辺にリッチな混合気を形成し、このリッチな混合気中に火花点火によって確実に火炎核を形成することができる。従って、ＳＩ燃焼を確実に発生させることができるとともに、その後のＣＩ燃焼の開始時期の制御性を向上させることができる。この点を、図１３および図１４に基づいて説明する。

[0081] 図１３は、インジェクタ１５から噴射された燃料（噴霧）の振る舞いをスワール流との関係で示す説明図である。図１３の左端の斜視図は、燃焼室６の容積が比較的大きい吸気行程中の所定タイミングにおける燃焼室６の状態を模式的に示している。ここでは、スワール弁１８は実質的に閉弁され、燃焼室６に第１吸気ポート９Ａから空気が導入されている。気筒軸線Ｚの周りを旋回する強いスワール流が、図中に矢印で示されている。スワール流は、第１吸気ポート９Ａから燃焼室６の排気側の上部に向かって流れた後、燃焼室６の前側部分を斜め下向きに大きく旋回しながら通過し、燃焼室６の吸気側の下部へと到達する。さらに、スワール流は、燃焼室６の後側部分を斜め上向きに大きく旋回しながら通過し、燃焼室６の排気側の上部へと戻っていく。

[0082] 図１３の左端の斜視図における符号Ｄは、燃焼室６の内部をエンジンの前後方向（吸排気方向と直交する方向）に二等分する仮想面を示す。当該斜視図の右側に位置する状態（ａ）～（ｊ）の各模式図は、上記仮想面Ｄによって分けられた燃焼室６の前側と後側の状態をそれぞれ示している。図１３の上段の５つの状態（ａ）～（ｅ）は、燃焼室６の前側を流れるスワール流の上流側部分が、下段の５つの状態（ｆ）～（ｊ）は、燃焼室６の後側を流れるスワール流の下流側部分が、それぞれ燃料の噴霧に及ぼす影響を時系列で示している。

[0083] 図１３の状態（ａ）～（ｊ）における白抜き矢印は、燃焼室６の内部に発生した斜めスワール流の主流（勢いの強い流動の中心となる部分、以下、単にスワール流ともいう）を示している。図１３の状態（ａ）は、多噴孔型の

インジェクタ１５から燃料が噴射（上述の第１噴射または第２噴射）された直後における燃焼室６の前側の状態を示す。燃料噴射により、燃焼室６の前側には５つの噴霧ｆ１～ｆ５が同時に形成されるが、この時点ではいずれの噴霧ｆ１～ｆ５もスワール流には到達していない。なお、図１３において、噴霧ｆ１～ｆ５は、それぞれの噴霧の中心線Ｌ１～Ｌ５に沿った矢印として示している。同様に、後述する噴霧ｆ６～ｆ１０も、それぞれの噴霧の中心線Ｌ６～Ｌ１０に沿った矢印として示している。

[0084] 図１３の状態（ｂ）に示すように、噴霧ｆ１～ｆ５のうち、スワール流までの距離が最も短い噴孔から噴射された燃料の噴霧ｆ１が、最初にスワール流に到達する。次いで、図１３の状態（ｃ）に示すように、スワール流までの距離が２番目に短い噴孔から噴射された燃料の噴霧ｆ２がスワール流に到達する。噴霧ｆ２がスワール流に到達したとき、当該噴霧ｆ２は、スワール流とともに移動してきた噴霧ｆ１と合流する。以下同様に、図１３の状態（ｄ）、（ｅ）に示すように、噴霧ｆ３が噴霧ｆ１，ｆ２と合流し、噴霧ｆ４が噴霧ｆ１，ｆ２，ｆ３と合流する。また、噴霧ｆ５は、図１３の状態（ｄ）、（ｅ）に示すように、燃焼室６の壁面６ａに到達し、次いで当該壁面６ａに沿って下方に移動することでスワール流に到達する。このとき、噴霧ｆ５は、噴霧ｆ１，ｆ２，ｆ３，ｆ４と合流する。

[0085] このように、当実施形態では、スワール流が形成された燃焼室６の前側にインジェクタ１５から複数の燃料（噴霧ｆ１～ｆ５）が放射状に噴射される。これにより、スワール流に先に到達した燃料（例えば噴霧ｆ１）が当該スワール流に沿って下流側に移動した後、スワール流に遅れて到達した別の燃料（例えば噴霧ｆ２）と合流する。このようなメカニズムによって、噴霧ｆ１～ｆ５がスワール流上で合流する。このことは、燃料濃度の濃いリッチな混合気の形成につながる。

[0086] 次に、燃焼室６の後側に噴射された燃料の振る舞いについて説明する。図１３の下段の状態（ｆ）は、インジェクタ１５から燃料が噴射された直後における燃焼室６の後側の状態を示す。この燃料噴射により、燃焼室６の後側

には５つの噴霧ｆ６～ｆ１０が同時に（かつ上述した前側の噴霧ｆ１～ｆ５と同時に）形成されるが、この時点ではいずれの噴霧ｆ６～ｆ１０もスワール流には到達していない。

[0087] 図１３の状態（ｇ）に示すように、噴霧ｆ６～ｆ１０のうち、スワール流までの距離が最も短い噴孔から噴射された燃料の噴霧ｆ１０が、最初にスワール流に到達する。次いで、図１３の状態（ｈ）に示すように、スワール流までの距離が２番目に短い噴孔から噴射された燃料の噴霧ｆ９がスワール流に到達する。噴霧ｆ９がスワール流に到達したとき、先にスワール流に到達した噴霧ｆ１０は、スワール流と共に既に下流側に幾分移動しているので、噴霧ｆ９とは合流しない。図１３の状態（ｉ）に示す噴霧ｆ８も同様である。このように、噴霧ｆ８、ｆ９、ｆ１０は、互いに離れた状態を保持しつつスワール流に沿って移動する。なお、噴霧ｆ６，ｆ７については、燃焼室６の前側に噴射された噴霧ｆ１～ｆ５と合流する。

[0088] このように、燃焼室６の後側において複数の燃料（噴霧ｆ８～ｆ１０）がスワール流に対して放射状に噴射されることにより、噴霧ｆ８～１０が合流せずに互いに分離する。当実施形態では、インジェクタ１５から噴射された燃料の約３０％がこのメカニズムによって拡散させられる。このことは、燃料が薄く広がった均質な混合気の形成につながる。一方、インジェクタ１５で噴射された燃料の約７０％（噴霧ｆ１～ｆ７）が、スワール流上で合流する。

[0089] 図１３の右端の斜視図は、インジェクタ１５から噴射された燃料（噴霧ｆ１～ｆ１０）の全てがスワール流に到達した直後における燃焼室６の状態を模式的に示している。本図に示すように、インジェクタ１５から噴射された燃料の大部分（７０％）がスワール流上で合流する当実施形態では、スワール流に沿って十分に燃料濃度の濃い（リッチな）混合気が形成される。このリッチな混合気は、スワール流と共に燃焼室６内を周方向に移動しながら、次第に燃焼室６の中心側に向かっていく。

[0090] 図１４（ａ）～（ｅ）は、スワール流と共に移動する混合気を燃焼室６の

上方から見た図である。燃焼室６内に形成されるスワール流は、吸気行程の進行とともに十分に成長するが、その後は空気抵抗を受けて減衰し、次第に拡散しながら燃焼室６の中心側へと移動する。図１４（ａ）は、燃料の噴霧ｆ１～ｆ７が合流してリッチな混合気（微細ドットによる着色領域）が形成された状態を示している。図中に矢印で示すように、このリッチな混合気は、上記のように流動変化するスワール流と共に移動することにより、次第に拡散しながら燃焼室６の中心側に向かっていく。これにより、図１４（ｂ）に示すように、主点火による火花が発生する直前のタイミングにおいて、燃焼室６の中央部に比較的リッチな混合気が偏在するようになる。

[0091] 図１４（ｃ）は、互いに合流しない噴霧ｆ８～ｆ１０によって燃料濃度の薄い（リーンな）混合気が形成された状態を示している。図中に矢印で示すように、このリーンな混合気は、スワール流と共に移動することにより、十分に拡散しながら燃焼室６の中心側に向かっていく。これにより、図１４（ｄ）に示すように、燃焼が開始される直前のタイミングにおいて、燃焼室６の全体に拡がった比較的リーンな混合気が形成される。

[0092] 図１４（ｅ）は、同図（ｂ）（ｄ）に示した混合気を重ね合わせた状態を示している。互いに合流する噴霧ｆ１～ｆ７により形成された混合気（図１４（ｂ））と、互いに拡散する噴霧ｆ８～ｆ１０により形成された混合気（図１４（ｄ））とが合わさることにより、燃焼室６には、中央部の方が外周部よりも燃料濃度が濃くなる成層化された混合気が形成される。すなわち、燃焼室６の中央部に相対的に燃料濃度の濃いリッチな混合気が形成されるとともに、燃焼室６の外周部に相対的に燃料濃度の薄いリーンな混合気が形成される。

[0093] 以上説明したようなスワール流による作用は、吸気行程という比較的早いタイミングで燃料を２回に分けて分割噴射した場合でも、ＳＩ燃焼を開始させる主点火の時点での混合気をある程度成層化でき、燃焼室６の中央部に相対的にリッチな混合気を形成できることを意味する。このような混合気の成層化は、スワール流が強いほど顕著になる。そして、当該成層化は、主点火

後の火炎の成長に有利に働く。すなわち、点火プラグ１６による主点火は、燃焼室６の中央部の混合気に作用して火炎核を形成するが、上記のとおり当該中央部の空燃比が相対的にリッチであることにより、火炎核の成長が促進されて、その後の燃焼の進行が安定化するものである。

[0094] （５）ＳＩ率について

当実施形態では、ＳＩ燃焼とＣＩ燃焼とを組み合わせたＳＰＣＣＩ燃焼が、第１運転領域Ａ１および第２運転領域Ａ２において実行される。このＳＰＣＣＩ燃焼では、ＳＩ燃焼とＣＩ燃焼との比率を運転条件に応じてコントロールすることが重要になる。当実施形態では、上記比率として、ＳＰＣＣＩ燃焼（ＳＩ燃焼およびＣＩ燃焼）による１サイクル中の全熱発生量に対する、ＳＩ燃焼による熱発生量の割合であるＳＩ率を用いる。図７は、このＳＩ率を説明するための図であり、ＳＰＣＣＩ燃焼が起きたときの熱発生率（Ｊ／ｄｅｇ）のクランク角による変化を示している。

[0095] 図７の波形における点Ｘ１は、ＳＩ燃焼の開始に伴って熱発生率が立ち上がる熱発生点である。この熱発生点Ｘ１に対応するクランク角θｓｉを、ＳＩ燃焼の開始時期として定義する。また、同波形における点Ｘ２は、燃焼形態がＳＩ燃焼からＣＩ燃焼に切り替わるときに現れる変曲点である。この変曲点Ｘ２に対応するクランク角θｃｉを、ＣＩ燃焼の開始時期と定義する。そして、このＣＩ燃焼の開始時期であるθｃｉよりも進角側（θｓｉからθｃｉまでの間）に位置する熱発生率の波形の面積Ｒ１をＳＩ燃焼による熱発生量とし、θｃｉよりも遅角側に位置する熱発生率の波形の面積Ｒ２をＣＩ燃焼による熱発生率とする。これにより、

（ＳＩ燃焼による熱発生量）／（ＳＰＣＣＩ燃焼による熱発生量）

で定義される上述したＳＩ率は、上記各面積Ｒ１，Ｒ２を用いて、Ｒ１／（Ｒ１＋Ｒ２）で表すことができる。つまり、当実施形態では、ＳＩ率＝Ｒ１／（Ｒ１＋Ｒ２）である。

[0096] ＣＩ燃焼では、混合気が自着火により同時多発的に燃焼するため、火炎伝播によるＳＩ燃焼と比べて圧力上昇率が高くなり易い。このため、特に、負

荷が高く燃料噴射量が多い条件下で不用意にＳＩ率を小さくする（つまりＣＩ燃焼の割合を増やす）と、大きな騒音が発生してしまう。一方、ＣＩ燃焼は、燃焼室６が十分に高温・高圧化しないと発生しない。このため、負荷が低く燃料噴射量が少ない条件下では、ＳＩ燃焼がある程度進行してからでないとＣＩ燃焼が開始されず、必然的にＳＩ率は大きくなる（つまりＣＩ燃焼の割合が多くなる）。

[0097] このような事情を考慮して、当実施形態では、ＳＰＣＣＩ燃焼が行われる運転領域（つまり第１・第２運転領域Ａ１，Ａ２）において、ＳＩ率の目標値である目標ＳＩ率がエンジンの運転条件ごとに予め定められている。具体的に、目標ＳＩ率は、低負荷側の第１運転領域Ａ１において、概ね負荷が高いほど小さくなるように（つまり負荷が高いほどＣＩ燃焼の割合が増えるように）設定されている。一方、高負荷側の第２運転領域Ａ２での目標ＳＩ率は、概ね負荷が高いほど大きくなるように（つまりＣＩ燃焼の割合が低くなるように）設定されている。さらに、これに対応して、当実施形態では、目標ＳＩ率に適合する燃焼が行われた場合のＣＩ燃焼の開始時期である目標θｃｉが、やはりエンジンの運転条件ごとに予め定められている。

[0098] 上述した目標ＳＩ率および目標θｃｉを実現するには、点火プラグ１６による主点火の時期、インジェクタ１５からの燃料の噴射量／噴射時期、ＥＧＲ率（外部ＥＧＲ率および内部ＥＧＲ率）といった制御量を運転条件ごとに調整する必要がある。例えば、主点火の時期が進角されるほど、多くの燃料がＳＩ燃焼により燃焼することになり、ＳＩ率が高くなる。また、燃料の噴射時期が進角されるほど、多くの燃料がＣＩ燃焼により燃焼することになり、ＳＩ率が低くなる。あるいは、ＥＧＲ率の増大に伴って筒内温度が高くなるほど、多くの燃料がＣＩ燃焼により燃焼することになり、ＳＩ率が低くなる。さらに、ＳＩ率の変化はθｃｉの変化を伴うので、これらの各制御量（主点火時期、噴射時期、ＥＧＲ率等）の変化は、θｃｉを調整する要素となる。

[0099] 上記のような傾向に基づいて、当実施形態では、ＳＰＣＣＩ燃焼の実行時

に、主点火時期、燃料の噴射量／噴射時期、およびＥＧＲ率（ひいては筒内温度）等が、上述した目標ＳＩ率および目標θｃｉを実現可能な組合せになるように制御される。

[0100] （６）ＳＰＣＣＩ燃焼時の制御

図１５は、エンジンの温間時に実行される燃焼制御（主にＳＰＣＣＩ燃焼時の制御）の詳細を示すフローチャートである。本図に示す制御がスタートすると、ＥＣＵ１００の演算部１０１は、ステップＳ１において、アクセル操作状態に基づいてエンジンの要求トルクを算出する。すなわち、アクセルセンサＳＮ１１の検出値から特定されるアクセルペダルの操作量（踏込み量）と操作速度とに基づいて、エンジンから出力すべき目標トルクである要求トルクを算出する。要求トルクは、アクセルペダルの操作量および操作速度が大きいほど高く算出される。

[0101] 次いで、演算部１０１は、ステップＳ２において、エンジンの現運転ポイントが図５に示した第１運転領域Ａ１に含まれるか否かを判定する。すなわち、演算部１０１は、クランク角センサＳＮ１により検出されるエンジン回転速度と、上記ステップＳ１で算出された要求トルクとに基づいて、現時点のエンジンの運転ポイントを図５の運転マップ上で特定し、当該マップ中の第１運転領域Ａ１に現運転ポイントが含まれるか否かを判定する。

[0102] 上記ステップＳ２でＮＯと判定されてエンジンの現運転ポイントが第１運転領域Ａ１に含まれていないことが確認された場合、演算部１０１は、ステップＳ２０において、現運転ポイントが第２運転領域Ａ２に含まれるか否かを判定する。

[0103] 上記ステップＳ２０でＹＥＳと判定されてエンジンの現運転ポイントが第２運転領域Ａ２に含まれることが確認された場合、ＥＣＵ１００の各制御部１０２～１０６は、この第２運転領域Ａ２に対応する制御として、点火プラグ１６による１回の火花点火によって混合気をＳＰＣＣＩ燃焼させる制御（ステップＳ２１）を実行する。なお、その制御の内容は上記（３－２）項で説明したとおりであるので、詳細な説明はここでは省略する。

[0104] 一方、上記ステップＳ２０でＮＯと判定された場合、つまりエンジンの現運転ポイントが第３運転領域Ａ３に含まれることが確認された場合、ＥＣＵ１００の各制御部１０２～１０６は、この第３運転領域Ａ３に対応する制御として、ＳＰＣＣＩ燃焼ではなくＳＩ燃焼によって混合気を燃焼させる制御（ステップＳ２２）を実行する。なお、その制御の内容は上述した（３－３）で説明したとおりであるので、詳細な説明はここでは省略する。

[0105] 次に、上記ステップＳ２でＹＥＳと判定された場合、つまりエンジンの現運転ポイントが第１運転領域Ａ１に含まれることが確認された場合の制御について説明する。この場合、ＥＣＵ１００の演算部１０１は、ステップＳ３において、エンジンの要求トルク（負荷）および回転速度に基づいて、燃焼室６内の空燃比（Ａ／Ｆ）の目標値である目標空燃比を決定する。すなわち、演算部１０１は、上記ステップＳ１で算出したエンジンの要求トルクと、クランク角センサＳＮ１により検出されるエンジン回転速度と、図８に示した目標空燃比のマップとに基づいて、現運転ポイント（回転速度／負荷）に適合する目標空燃比を決定する。

[0106] 次いで、演算部１０１は、ステップＳ４において、上記ステップＳ１で算出されたエンジンの要求トルクに基づいて、インジェクタ１５から噴射すべき燃料の噴射量および噴射時期を決定する。なお、ここで決定される燃料の噴射量／噴射時期は、上述した目標ＳＩ率および目標θｃｉを実現するためにエンジンの運転条件ごとに予め定められた噴射量／噴射時期である。図６のチャート（ａ）（ｂ）に示したように、第１運転領域Ａ１では、第１噴射および第２噴射に分けて燃料が噴射され、かつ第１噴射の方が第２噴射よりも噴射量が多くなるように、燃料の噴射量／噴射時期が決定される。

[0107] また、演算部１０１は、ステップＳ５において、上記ステップＳ３で決定された目標空燃比に基づきスロットル弁３２の開度を決定する。すなわち、演算部１０１は、上記ステップＳ４で決定された量の燃料が燃焼室６に供給されることを前提に、この燃焼室６に対し上記目標空燃比に相当する量の空気（新気）が導入されるようなスロットル弁３２の開度を算出し、これをス

ロットル弁３２の開度目標値として決定する。

[0108] さらに、演算部１０１は、ステップＳ６において、エンジンの要求トルク（負荷）および回転速度に基づきスワール弁１８の開度を決定する。すなわち、演算部１０１は、上記ステップＳ１で算出したエンジンの要求トルクと、クランク角センサＳＮ１により検出されるエンジン回転速度と、図９に示したスワール開度のマップとに基づいて、現運転ポイント（回転速度／負荷）に適合するスワール弁１８の開度を特定し、これをスワール弁１８の開度目標値として決定する。

[0109] 第１運転領域Ａ１での運転中は、以上のような噴射量／噴射時期等の決定と並行して、火花点火やＥＧＲ（外部ＥＧＲ／内部ＥＧＲ）に関する制御目標値が決定される。すなわち、上記ステップＳ２でＹＥＳと判定されて現運転ポイントが第１運転領域Ａ１に含まれることが確認された場合、演算部１０１は、ステップＳ１０に移行して、点火プラグ１６による先行点火の時期およびエネルギーを決定する。

[0110] 既述の通り、先行点火の時期は、圧縮行程前期または中期（或いは、吸気行程における燃料噴射の後）の適宜なタイミングに設定される。また、第２噴射の終了時期から先行点火までのクランク角期間が略一定に維持されるように、先行点火の時期が設定される。さらに、先行点火のエネルギーは、当該先行点火によって混合気に火炎を発生させないように、主点火のエネルギーよりも小さく設定される。これらのコンセプトの下に実行される、先行点火の時期およびエネルギーの決定のプロセスは、図１６の制御フローに基づいて後述する。

[0111] 次いで、演算部１０１は、ステップＳ１１において、上記ステップＳ１で算出したエンジンの要求トルクに基づいて、目標ＳＩ率および目標θｃｉを決定する。上記（５）項で説明したように、第１運転領域Ａ１における目標ＳＩ率は、概ね、要求トルクが高い高負荷側ほど小さくなるように（つまり高負荷側ほどＣＩ燃焼の割合が増えるように）決定される。また、この決定された目標ＳＩ率に付随して目標θｃｉも決定される。

[0112] さらに、演算部１０１は、ステップＳ１２において、上記ステップＳ１１で決定された目標ＳＩ率および目標θｃｉに基づいて、点火プラグ１６による主点火の時期を決定する。演算部１０１は、目標ＳＩ率および目標θｃｉに適合する燃焼を実現するのに必要なＳＩ燃焼の開始時期（図７に示すθｓｉ）を特定する。そして、演算部１０１は、このＳＩ燃焼の開始時期θｓｉから所定の着火遅れ時間（主点火から着火までに要する時間）の分だけ進角させたクランク角を、主点火時期の目標値として決定する。なお、主点火は、点火プラグ１６の点火回路に含まれるコンデンサの電圧を最大電圧まで高めた上で行われる通常の火花点火である。このため、先行点火のときとは異なり、条件に応じて点火エネルギーを決定することは不要である。

[0113] その後、演算部１０１は、ステップＳ１３において、目標ＳＩ率および目標θｃｉを実現するために主点火の時点で必要とされる筒内温度を算出し、これを主点火時点の目標筒内温度として決定する。

[0114] 次いで、演算部１０１は、ステップＳ１４において、上記ステップＳ１３で算出された主点火時点の目標筒内温度に基づいて、燃焼室６の圧縮が実質的に開始される吸気弁１１の閉時期（以下、ＩＶＣともいう）において達成すべき筒内温度、つまりＩＶＣ時点の目標筒内温度を算出する。このＩＶＣ時点の目標筒内温度は、上記主点火時点の目標筒内温度と、ＩＶＣから主点火までの間のピストン５の圧縮代から推定される筒内温度の上昇量とに基づいて算出される。

[0115] さらに、演算部１０１は、ステップＳ１５において、上記ステップＳ１４で算出されたＩＶＣ時点の目標筒内温度に基づいて、ＥＧＲ弁５３の開度および吸・排気弁１１，１２のバルブタイミングを決定する。演算部１０１は、上記ＩＶＣ時点の目標筒内温度を実現するのに必要な外部ＥＧＲ率および内部ＥＧＲ率を、ＩＶＣ時点の目標筒内温度と第１吸気温センサＳＮ５による検出温度（つまり新気の温度）との差に基づいて算出する。そして、演算部１０１は、算出された外部ＥＧＲ率を実現するのに必要なＥＧＲ弁５３の開度を算出し、これをＥＧＲ弁５３の開度目標値として決定するとともに、

算出された内部ＥＧＲ率を実現するのに必要な吸・排気弁１１，１２のバルブタイミングを算出し、これをバルブタイミングの目標値として決定する。

[0116] 次いで、ＥＣＵ１００の各制御部（噴射制御部１０２、点火制御部１０３、スワール制御部１０４、吸気制御部１０５、ＥＧＲ制御部１０６）は、ステップＳ１６において、上述した各ステップで決定された種々の制御目標値に基づいて、インジェクタ１５、点火プラグ１６、スワール弁１８、スロットル弁３２、ＥＧＲ弁５３、および吸・排気ＶＶＴ１３ａ，１４ａを駆動する。

[0117] 例えば、噴射制御部１０２は、上記ステップＳ４で決定された量の燃料が、決定された時期にてインジェクタ１５から噴射されるように、インジェクタ１５を制御する。

[0118] 点火制御部１０３は、先行点火として、上記ステップＳ１０で決定されたエネルギーを有する火花が、決定された時期にて点火プラグ１６から発生するように、点火プラグ１６を制御する。また、この先行点火に続く主点火として、点火制御部１０３は、上記ステップＳ１２で決定された時期に点火プラグ１６から火花が発生するように、点火プラグ１６を制御する。

[0119] スワール制御部１０４は、スワール弁１８の開度が上記ステップＳ６で決定されたスワール開度に一致するように、スワール弁１８を制御する。吸気制御部１０５は、スロットル弁３２の開度が上記ステップＳ５で決定されたスロットル開度に一致するように、スロットル弁３２を制御する。ＥＧＲ制御部１０６は、ＥＧＲ弁５３の開度が上記ステップＳ１５で決定された開度に一致するようにＥＧＲ弁５３を制御するとともに、同じくステップＳ１５で決定されたバルブタイミングに一致するタイミングで吸・排気弁１１，１２が開閉されるように、吸・排気ＶＶＴ１３ａ，１４ａを制御する。

[0120] 以上のような各制御により、ステップＳ１６では、燃焼室６に噴射された燃料と空気との混合気が、先行点火および主点火を受けた後にＳＰＣＣＩ燃焼によって燃焼する。

[0121] （７）先行点火の時期／エネルギーの決定

次に、上述したステップＳ１０において先行点火の時期およびエネルギーを決定する際の具体的な手順について説明する。図１６は、上記ステップＳ１０の制御の詳細を示すサブルーチンである。この制御がスタートすると、ＥＣＵ１００の演算部１０１は、ステップＳ３１において、燃料の噴射時期に基づき先行点火の時期を決定する。例えば、演算部１０１は、上述したステップＳ４で決定された燃料の噴射量／噴射時期から、噴射時期が遅い第２噴射が終了する時期を特定し、この第２噴射の噴射終了時期から所定のクランク角が経過した時点を、先行点火の時期として決定する。

[0122] 次いで、演算部１０１は、ステップＳ３２において、先行点火のエネルギーの基本値である基本点火エネルギーを決定する。図１７（ａ）（ｂ）は、上記ステップＳ３２において基本点火エネルギーを決定する際に用いられるベースマップの具体例を示している。図示するように、基本点火エネルギーは、エンジンの回転速度および負荷（要求トルク）から特定されるものであり、概ね、エンジン回転速度および負荷が高いほど大きくなるように設定されている。なお、図１７（ａ）（ｂ）の各マップは、いずれも、エンジン回転速度、エンジン負荷、および基本点火エネルギーの三者の関係を規定しており、それぞれ同一の関係を表している。このため、図１７（ａ）（ｂ）のいずれかのマップがあれば足りるが、ここでは理解を容易にするために、横軸を負荷にした場合のマップ（図１７（ａ））と、横軸を縦軸にした場合のマップ（図１７（ｂ））とを併記している。

[0123] 具体的に、図１７（ｂ）のマップは、エンジン負荷を一定にした場合、詳しくは、エンジン負荷を第１運転領域Ａ１内の低負荷、中負荷、高負荷、極高負荷のいずれかの負荷に維持した場合の、エンジン回転速度と基本点火エネルギーとの関係を示している。図１７（ｂ）に示すように、エンジン負荷が一定の条件下では、エンジン回転速度が高くなるほど基本点火エネルギーも高くなる。この場合の回転速度と基本点火エネルギーとの関係は、略正比例の関係、つまり回転速度に応じて１次関数的に基本点火エネルギーが増大する関係とされる。このことは、エンジン負荷が低負荷、中負荷、高負荷、

極高負荷のいずれに保持された場合でも同様である。

[0124] また、図１７（ａ）のマップは、エンジン回転速度を一定にした場合、詳しくは、エンジン回転速度を第１運転領域Ａ１内の低速、中速、高速のいずれかの回転速度に維持した場合の、エンジン負荷と基本点火エネルギーとの関係を示している。図１７（ａ）に示すように、エンジン回転速度が一定の条件下では、エンジン負荷が極めて高い領域（第１運転領域Ａ１の上限負荷の近傍）を除いた大部分の負荷域において、負荷が高くなるほど基本点火エネルギーも高くなる。ただし、エンジン負荷が極めて高い領域では、逆に、負荷が高くなるほど基本点火エネルギーは低くなる。このような傾向は、エンジン回転速度が低速、中速、高速のいずれに保持された場合でも同様である。なお、極高負荷に限って負荷と基本点火エネルギーとの関係が逆転するという現象は、図１７（ｂ）において「極高負荷」の線図が「高負荷」の線図よりも下側に位置していることにも現れている。

[0125] 上記ステップＳ３２において、先行点火の基本点火エネルギーは、現時点のエンジン負荷（要求トルク）／回転速度を上記図１７（ａ）（ｂ）の各マップのいずれかに当てはめることにより、決定される。このとき、マップに規定のない基本点火エネルギーは、例えば線形補間により求めることができる。すなわち、図１７（ａ）では、エンジン回転速度が低速、中速、高速のいずれかである場合の基本点火エネルギーの特性（エンジン負荷と基本点火エネルギーとの関係）が規定されているが、エンジン回転速度が上記３つの回転速度のいずれでもない場合は、値が近い２つの規定値を用いた線形補間により、基本点火エネルギーを決定することができる。

[0126] 同様に、図１７（ｂ）では、エンジン負荷が低負荷、中負荷、高負荷、極高負荷のいずれかである場合の基本点火エネルギーの特性（エンジン回転速度と基本点火エネルギーとの関係）が規定される。エンジン負荷が上記４つの負荷のいずれでもない場合は、値が近い２つの規定値を用いた線形補間により、基本点火エネルギーを決定することができる。なお、この線形補間の精度を上げるために、図１７（ａ）において、上記３つのエンジン回転速度

（低速、中速、高速）とは異なる別の回転速度に対応する特性を追加してもよいし、同様に、図１７（ｂ）において、上記４つのエンジン負荷（低負荷、中負荷、高負荷、極高負荷）とは異なる別の負荷に対応する特性を追加してもよい。

[0127] ここで、先行点火の目的は、十分に圧縮される前の混合気に火炎伝播を生じさせない程度の小さな点火エネルギーを付与することにより、燃料を改質することである。この目的のためには、先行点火による火花（アーク）の周囲の混合気を８５０Ｋ以上１１４０Ｋ未満の温度にまで上昇させる必要がある。このような温度帯の混合気の層（以下、高温部ともいう）を形成することにより、燃料成分（炭化水素）を開裂させてＯＨラジカル等の中間生成物を生成することができ、その後の反応性を高めることができる。上記ステップＳ３２で用いられる基本点火エネルギーのマップは、このような先行点火の目的に合致するように、つまり火花の周囲に８５０Ｋ以上１１４０Ｋ未満の高温部が形成されるように予め定められたものである。

[0128] ＯＨラジカル等の中間生成物は、それが多い方がＣＩ燃焼時の熱効率が向上する。このため、先行点火のエネルギーは、火炎伝播が生じない範囲でできるだけ大きくすることが望ましい。しかしながら、火炎伝播の生じ易さは、燃焼室６の環境（温度や圧力等）によって変化するので、このことを考慮した上で先行点火のエネルギーを調整する必要がある。もちろん、上記ステップＳ３２で決定される先行点火の基本点火エネルギーは、エンジンの負荷／回転速度に応じて変化する燃焼室６の環境を予め考慮したものであるが、実際のエンジンでは、様々な要因によって燃焼室６の環境が想定よりもずれることが多々ある。そこで、このような変動があっても適切な先行点火のエネルギーが付与されるように、演算部１０１は、点火エネルギーの補正を行う（ステップＳ３３）。

[0129] 具体的には演算部１０１は、混合気の空燃比に応じた第１補正係数、エンジン水温に応じた第２補正係数、および筒内圧力に応じた第３補正係数を決定する。第１補正係数は、空燃比が大きいほど（つまり燃料リーンなほど）

大きい値に設定される。このことは、空燃比以外の種々の条件が同一である場合に、空燃比が大きいほど先行点火のエネルギーが大きくされることを意味する。第２補正係数は、エンジン水温が高いほど小さい値に設定される。このことは、エンジン水温以外の種々の条件が同一である場合に、エンジン水温が高いほど先行点火のエネルギーが小さくされることを意味する。なお、エンジン水温は筒内温度と比例するので、上記の第２補正係数を決定することは、筒内温度が高いほど先行点火のエネルギーを小さくすることと等価である。第３補正係数は、ＩＶＣ時点の筒内圧力が高いほど大きい値に設定される。このことは、筒内圧力以外の種々の条件が同一である場合に、ＩＶＣ時点の筒内圧力が高いほど先行点火のエネルギーが大きくされることを意味する。

[0130] 次いで、演算部１０１は、ステップＳ３４において、上記基本点火エネルギーと上記第１～第３補正係数とに基づいて先行点火のエネルギーを決定する。すなわち、演算部１０１は、上記ステップＳ３２で決定された基本点火エネルギーに対し、上記ステップＳ３３で決定された第１～第３補正係数をそれぞれ適用する演算を行い、当該演算により得られた値を最終的な先行点火のエネルギーとして決定する。このようにして決定される先行点火のエネルギーは、既に述べたとおり、主点火よりも小さくかつ燃料の改質（ＯＨラジカル等の生成）が起きるようなエネルギーとされる。より詳しくは、先行点火による火花（アーク）の周囲に、８５０Ｋ以上１１４０Ｋ未満の高温部が形成され、且つ、混合気の火炎伝播が生じないエネルギーに、先行点火のエネルギーが設定される。

[0131] （８）先行点火／主点火の具体的動作

上述の通り当実施形態では、第１運転領域Ａ１での運転時に、エネルギーの小さい先行点火とエネルギーの大きい主点火とが１サイクル中に実行される。このようなエネルギーの異なる２回の火花点火（先行点火および主点火）を点火プラグ１６に実行させるため、点火プラグ１６は例えば次のように制御される。

[0132] 当実施形態では、１つの気筒２に対し１つの点火プラグ１６が設けられ、１つの点火プラグ１６には、コイルやコンデンサ等を含むＬＣ回路からなる１つの点火回路が備わっている。このため、点火プラグ１６に２回の火花点火を行わせるには、コンデンサの充放電を繰り返す必要がある。

[0133] 図１８は、第１運転領域Ａ１で先行点火および主点火が行われるときの点火プラグ１６の電気的な状態を燃焼波形と併せて示したタイムチャートであり、チャート（ａ）はＳＰＣＣＩ燃焼による熱発生率の波形を、チャート（ｂ）は点火プラグ１６への通電指令の波形を、チャート（ｃ）は点火プラグ１６からの放電電流の波形を、それぞれ示している。図１８のチャート（ｂ）において波形Ｗ１，Ｗ２で示すように、先行点火および主点火の前には、それぞれ点火プラグ１６への通電が行われる。これらの通電時間（いわゆるドエル時間）を比較すると、先行点火のときの通電時間（波形Ｗ１）の方が、主点火のそれ（波形Ｗ２）よりも短い。また、図１８のチャート（ｃ）において波形Ｙ１，Ｙ２で示すように、点火プラグ１６からの放電（火花の発生）は、点火プラグ１６への通電を停止した時点で開始される。このとき、先行点火用の通電時間が主点火用の通電時間よりも短いことから、先行点火のときの放電エネルギー（波形Ｙ１）は、主点火のときの放電エネルギー（波形Ｙ２）よりも小さくなる。このことは、波形Ｙ１の面積が波形Ｙ２の面積よりも小さいことからも理解される。

[0134] 図１８の例では、先行点火用の通電（波形Ｗ１）により蓄えられたエネルギーが先行点火により全て放出されている。このことは、先行点火の後のコンデンサの電圧が実質ゼロまで低下していることを意味する。このため、主点火のための十分なエネルギーを点火プラグ１６に蓄えるには、主点火用の通電（波形Ｗ２）の際に、コンデンサの電圧がゼロから最大電圧まで上昇するように通電を比較的長く継続する必要がある。一方、小さいエネルギーしか要しない先行点火では、コンデンサの電圧が最大電圧に達するよりも前に通電を停止することができる。先行点火用の通電時間が主点火用の通電時間よりも短いのはこのためである。

[0135] ここで、少なくとも先行点火は、それ以前に蓄えたエネルギーを全て放出するものである必要はなく、蓄えたエネルギーの一部だけを放出するものであってもよい。すなわち、点火プラグ１６からの放電中に点火プラグ１６への通電を再開すれば、その時点で放電は停止されるので、本来必要なエネルギーよりも大きいエネルギーを通電により蓄えた上で、放電の途中で通電を再開する（それによって放電を停止させる）ことにより、蓄えたエネルギーの一部だけを点火プラグ１６から放出させるようにしてもよい。この方法による先行点火を実施した場合には、主点火用の通電時間を短くできるので、先行点火から主点火までの間隔が比較的短いケースにおいて有効である。

[0136] （９）作用効果

以上説明したように、当実施形態では、ＳＰＣＣＩ燃焼が行われる第１運転領域Ａ１において、火花を発生させてＳＩ燃焼を開始させる主点火と、主点火よりも早い時点で火花を発生させる先行点火とが行われる。そして、前記先行点火のエネルギーは、前記主点火のエネルギーよりも小さく設定される。このような構成によれば、燃焼速度が速く熱効率に優れたＳＰＣＣＩ燃焼を実現できるという利点がある。

[0137] すなわち、上記実施形態では、主点火よりも早いタイミングで先行点火が実行されて、この先行点火による火花（アーク）の周囲に８５０Ｋ以上１１４０Ｋ未満の高温部が形成される。このため、先行点火により混合気の火炎伝播を生じさせることなく、ＣＩ燃焼時の熱効率が高くなるように燃料を改質することができる。詳しくは、上記温度帯までの加熱により燃料成分（炭化水素）を開裂させて過酸化水素（H_2O_2）やホルムアルデヒド（CH_2O）を生成し、これらの成分から生じるＯＨラジカルを生成することができる。ＯＨラジカルは、酸化作用が強く反応性が高いので、このようなＯＨラジカルを含む中間生成物が先行点火後の燃焼室６に生成されることにより、燃料成分が自発的に化学反応する現象であるＣＩ燃焼の燃焼速度を速めることができ、熱効率を向上させることができる。

[0138] さらに、噴射制御部１０２は、吸気行程において燃料噴射を実行させ、点

火制御部１０３は、先行点火を、吸気行程における燃料噴射の後、もしくは、圧縮行程の前期または中期において実行させる。このように、吸気行程において燃料を噴射させておくことで、先行点火の時点において混合気を均質化させ、点火プラグ１６の周辺だけにリッチな混合気が存在するような状況の発生を抑制することが可能となる。従って、先行点火による混合気への着火および火炎形成が抑止され、前記中間生成物の生成期間を確実に確保することができる。

[0139] 図１９は、本願発明者らが行った数値シミュレーションから得られた、混合気の温度と中間生成物の生成量との関係を示すグラフである。このグラフに示すように、中間生成物の生成量は、総じて混合気の温度が高いほど多くなる。グラフの縦軸に表記された閾値αは、有意な効果を得るのに必要な中間生成物の生成量を表しており、この閾値α以上の中間生物が燃焼室に存在すれば燃焼速度に有意な差が生じることを表している。グラフより、閾値α以上の中間生成物を得る（つまり燃焼を有意なレベルで高速化する）には、混合気の温度を少なくとも８５０Ｋまで上昇させる必要がある。中間生成物の量は、混合気の温度が８５０Ｋを超えて以降も増加するが、温度が１１４０Ｋに達すると急激に（ほぼ垂直に）低下する。これは、混合気の温度が１１４０Ｋに達すると混合気が燃焼して火炎が発生し（つまり熱炎反応が起き）、中間生成物がほとんど消費されてしまうからと考えられる。

[0140] これに対し、上記実施形態では、先行点火のエネルギーが、火花（アーク）の周囲に８５０以上１１４０Ｋ未満の高温部が形成されるようなエネルギーに調整される。従って、この先行点火によって反応性の高いＯＨラジカルを含む中間生成物を確実に生成することができ、ＣＩ燃焼の燃焼速度を速めて熱効率を向上させることができる。図１８のチャート（ａ）には、このように適切なエネルギーに調整された先行点火を実行した場合の熱発生率の波形（実線）が、先行点火を実行しなかった場合の熱発生率の波形（破線）と比較する形で示されている。これら２つの燃焼波形の比較からも明らかなように、先行点火を実行したときの方が、先行点火を実行しなかった場合より

も、ＣＩ燃焼が開始されて以降の（点Ｘ’より遅角側での）熱発生率の立ち上がりが急になっており、ＣＩ燃焼の燃焼速度が速くなっていることが分かる。なお、先行点火により生成された中間生成物は、ＣＩ燃焼よりも前のＳＩ燃焼によってその一部が消費される。しかし、ＳＩ燃焼の開始時点では既に燃焼室６の広い範囲に中間生成物が分散しており、ＳＩ燃焼の領域の外側にも中間生成物は残存している。この残存した中間生成物の作用によりＣＩ燃焼の高速化は支障なく達成される。

[0141] 上記実施形態では、燃料噴射が２回に分けて実行される。すなわち、噴射制御部１０２は、吸気行程の所定時点で燃料を噴射する第１噴射と、この第１噴射よりも遅い時点で燃料を噴射する第２噴射とをインジェクタ１５に実行させる。そして、先行点火は、第２噴射の後に実行される。この構成を採用することで、第１噴射および第２噴射における燃料の噴射量／噴射時期を、エンジンの運転条件に応じて設定することが可能となる。従って、各運転条件において適切なＳＰＣＣＩ燃焼が実現されるように、混合気の成層度合（もしくは均質度合）を調整することができる。

[0142] 上記実施形態では、第１運転領域Ａ１での運転時に、スワール比が１．５以上確保されるような開度までスワール弁１８が閉じられる。このため、先行点火により生成された中間生成物を、強いスワール流によって短時間のうちに燃焼室６の広い範囲に分散させることができる。また、第１噴射および第２噴射の燃料は前記スワール流に向けて噴射され、当該スワール流で点火プラグ１６に向けて搬送される。これにより、主点火の時点において、点火プラグ１６の周辺にリッチな混合気を形成し、このリッチな混合気中に火花点火によって確実に火炎核を形成することができる。従って、ＳＩ燃焼を確実に発生させることができるとともに、その後のＣＩ燃焼の開始時期の制御性を向上させることができる。

[0143] また、上記実施形態では、第１運転領域Ａ１では、負荷の高低にかかわらず（運転ポイントＰ１，Ｐ２のいずれであっても）、第１噴射による燃料の噴射量の方が第２噴射による燃料の噴射量よりも多くされる。これにより、

燃料が過度に成層化されることがなく、良好なエミッション性能を確保することができる。

[0144] 上記実施形態では、点火制御部１０３は、第２噴射の終了時期から先行点火の時期までの期間が略一定に維持されるよう、先行点火の時期を変更する。このため、第２噴射の時期がエンジンの運転状態によって変更されたとしても、第２噴射の終了時期から先行点火の時期までの期間が略一定に維持される。従って、点火プラグ１６に燃料が到達するまでの時間を確保することができ、点火プラグ１６の周囲に存在する燃料に先行点火のエネルギーを確実に付与し、燃料を改質することができる。

[0145] また、先行点火および主点火は、気筒２ごとに、１つの点火回路を有する１つの点火プラグ１６によって実行される。このため、既存の点火プラグ１６を用いた簡単な方法により、先行点火および前記主点火を実行させることができる。

[0146] 上記実施形態では、ＳＰＣＣＩ燃焼の実行時（第１・第２運転領域Ａ１，Ａ２での運転時）に、１サイクル中の全熱発生量に対するＳＩ燃焼による熱発生量の割合であるＳＩ率が、エンジンの運転条件に応じて予め定められた目標ＳＩ率に一致するように、点火プラグ１６による主点火の時期が調整される。つまり、目標ＳＩ率に適合するＳＰＣＣＩ燃焼が実現されるように、主点火の時期を調整される。このため、例えば燃焼騒音が過大にならない範囲でできるだけＣＩ燃焼の割合を増やす（つまりＳＩ率を低くする）ことができる。このことは、先行点火による燃料の改質による効果（ＣＩ燃焼の高速化）と相俟って、ＳＰＣＣＩ燃焼による熱効率を可及的に高めることにつながる。先行点火は、ＯＨラジカルを含む中間生成物を生成する（それによってＣＩ燃焼の燃焼速度を速める）働きをするだけなので、先行点火のエネルギーや時期が変化しても、ＳＩ率もしくはＣＩ燃焼の開始時期（θｃｉ）は特に影響を受けない。これは、目標ＳＩ率を達成するための主点火の時期を、先行点火のエネルギーや時期とは独立して一義的に特定できることを意味する。すなわち、十分な中間生成物が生成されるように先行点火を行いつ

つ、目標ＳＩ率を実現するための主点火の時期を高い精度で特定することができる。

[0147] また、上記実施形態では、先行点火および主点火が実行される運転領域が、ＳＰＣＣＩ燃焼の実行領域（第１・第２運転領域Ａ１，Ａ２）における低負荷側の一部、つまり第１運転領域Ａ１のみに限定されており、高負荷側の第２運転領域Ａ２では先行点火が実行されない。このため、先行点火によるＣＩ燃焼の高速化によって異常燃焼が引き起こされる不具合を回避することができる。すなわち、高負荷側の第２運転領域Ａ２において、仮に先行点火を行ってＯＨラジカル等の中間生成物を生成したとすると、ＣＩ燃焼の燃焼速度が速くなり過ぎて、ノッキング等の異常燃焼が起きる可能性が高くなる。これに対し、上記実施形態では、高負荷側の第２運転領域Ａ２での先行点火が禁止されるので、ノッキング等の異常燃焼を有効に回避することができる。

[0148] 上記実施形態では、第１運転領域Ａ１でエンジンが運転されているときに、空燃比が２０超３５未満になるＡ／Ｆリーン環境を形成しつつ、混合気をＳＰＣＣＩ燃焼させる制御が行われる。これにより、先行点火によるＣＩ燃焼の高速化（それによる熱効率の向上）を図りながら、混合気の燃焼温度を低く抑えることができる。従って、燃焼に伴うＮＯｘの発生量を効果的に抑制することができる。

[0149] （１０）変形例

上記実施形態では、第１噴射および第２噴射による燃料噴射が完了した後、圧縮行程前期または中期に先行点火を実行する例を示した。先行点火の時期は、燃焼室６に燃料が存在するタイミングであればよく、例えば吸気行程中に先行点火を実行してもよい。さらに、先行点火の回数は１サイクル中に１回とは限られず、２回以上に増やしてもよい。

[0150] 例えば、図２０のチャート（ａ）に示すように、第１噴射および第２噴射による燃料噴射が完了した後、圧縮行程の前期から中期にかけて２回の先行点火を実行してもよい。或いは、図２０のチャート（ｂ）に示すように、第

１の噴射から第２噴射までの間に１回目の先行点火を実行し、かつ第２噴射が完了した後に２回目の先行点火を実行してもよい。いずれにせよ、先行点火は、燃焼室６に燃料が存在するタイミングであって、吸気行程中ないし圧縮行程の前期または中期に実行されればよく、その限りにおいて先行点火の時期および回数は適宜変更可能である。

[0151] ただし、先行点火の回数は３回以下とすることが望ましい。図２１は、先行点火の回数と燃料消費率（ｇ／ｋＷｈ）の改善代との関係を示すグラフである。図２１に示すように、先行点火を１回行えば燃料消費率は十分に改善するが、先行点火の回数を２回、３回と増やしていけば、少しずつではあるが燃料消費率はさらに改善する。しかしながら、先行点火の回数を３回から４回に増やしても、燃料消費率の値は実質同一である。このように、先行点火の回数を４回以上に増やしてもほとんど効果が得られないことから、先行点火の回数は３回以下とすることが望ましい。

[0152] 上記実施形態では、第１運転領域Ａ１でエンジンが運転されているときに、空燃比が２０超３５未満になるＡ／Ｆリーン環境を形成しつつ、混合気をＳＰＣＣＩ燃焼させる制御を例示した。これに代えて、理論空燃比相当の空気（新気）に加えてＥＧＲガスを燃焼室６に導入することにより、空燃比（Ａ／Ｆ）が理論空燃比に略一致しかつ燃焼室６内の全ガスと燃料との重量比であるガス空燃比（Ｇ／Ｆ）が理論空燃比よりも大きくなるＧ／Ｆリーン環境を形成し、その状態でＳＰＣＣＩ燃焼を実行するようにしてもよい。なお、このようにＧ／Ｆリーン環境下でＳＰＣＣＩ燃焼を実行する場合におけるガス空燃比（Ｇ／Ｆ）の値は、１８超５０未満とすることが好ましい。また、同じ第１運転領域Ａ１でＳＰＣＣＩ燃焼を実行する場合に、着火性が確保され易いエンジンの温間時はＡ／Ｆリーン環境を形成し、これより温度が低い条件（例えば準温間時）ではＧ／Ｆリーン環境を形成するというように、温度条件に応じて２種類の環境を使い分けるようにしてもよい。

[0153] 上記実施形態では、ＳＰＣＣＩ燃焼による全熱発生量に対するＳＩ燃焼による熱発生量の割合であるＳＩ率を、図７の燃焼波形における面積Ｒ１，Ｒ

２を用いて、Ｒ１／（Ｒ１＋Ｒ２）と定義し、このＳＩ率が予め定められた目標ＳＩ率に一致するように主点火の時期を調整するようにした。ＳＩ率を定義する方法は他にも種々考えられる。

[0154] 例えば、ＳＩ率＝Ｒ１／Ｒ２としてもよい。さらに、図２２に示すΔθ１、Δθ２を用いてＳＩ率を定義してもよい。すなわち、ＳＩ燃焼のクランク角期間（変曲点Ｘ２よりも進角側の燃焼期間）をΔθ１、ＣＩ燃焼のクランク角期間（変曲点Ｘ２よりも遅角側の燃焼期間）をΔθ２としたときに、ＳＩ率＝Δθ１／（Δθ１＋Δθ２）、もしくはＳＩ率＝Δθ１／Δθ２としてもよい。もしくは、ＳＩ燃焼の熱発生率のピークをΔＨ１、ＣＩ燃焼の熱発生率のピークをΔＨ２としたときに、ＳＩ率＝ΔＨ１／（ΔＨ１＋ΔＨ２）、もしくはＳＩ率＝ΔＨ１／ΔＨ２としてもよい。

[0155] ［上記実施形態に包含される発明］

なお、上述した具体的実施形態には以下の構成を有する発明が主に含まれている。

[0156] 本発明の一局面に係る圧縮着火式エンジンの制御装置は、気筒と、気筒に燃料を噴射するインジェクタと、インジェクタから噴射された燃料と空気とが混合された混合気に点火する点火プラグとを備え、前記混合気の一部を前記点火プラグの火花点火によりＳＩ燃焼させるとともにその他の混合気を自着火によりＣＩ燃焼させる部分圧縮着火燃焼が可能な圧縮着火式エンジンを制御する装置であって、前記インジェクタによる燃料の噴射動作を制御する噴射制御部と、前記点火プラグによる点火動作を制御する点火制御部と、を備え、前記点火制御部は、前記部分圧縮着火燃焼の実行時に、火花を発生させてＳＩ燃焼を開始させる主点火と、主点火よりも早い時点で火花を発生させる先行点火とを前記点火プラグに実行させるものであって、前記噴射制御部は、吸気行程において燃料噴射を実行させ、前記点火制御部は、前記先行点火のエネルギーを前記主点火のエネルギーよりも小さく設定し、且つ、前記先行点火を、前記吸気行程における前記燃料噴射の後、もしくは、圧縮行程の前期または中期において実行させることを特徴とする。

[0157] この制御装置によれば、部分圧縮着火燃焼の実行時に、火花を発生させてＳＩ燃焼を開始させる主点火と、主点火よりも早い時点で火花を発生させる先行点火とが行われる。そして、前記先行点火のエネルギーは、前記主点火のエネルギーよりも小さく設定される。このため、前記先行点火を利用して火花（アーク）の周囲を適切な温度まで上昇させることにより、混合気の火炎伝播を抑制しつつ、ＣＩ燃焼時の熱効率が高くなるように燃料を改質することができる。詳しくは、燃料成分（炭化水素）を高温化により開裂させて過酸化水素（H_2O_2）やホルムアルデヒド（CH_2O）を生成し、これらの成分から生じるＯＨラジカルを生成することができる。ＯＨラジカルは、酸化作用が強く反応性が高い。このようなＯＨラジカルを含む中間生成物が先行点火後の気筒内に生成されることにより、燃料成分が自発的に化学反応する現象であるＣＩ燃焼の燃焼速度を速めることができる。従って、熱効率を向上させることができる。

[0158] さらに、前記噴射制御部は、吸気行程において燃料噴射を実行させ、前記点火制御部は、前記先行点火を、前記吸気行程における前記燃料噴射の後、もしくは、圧縮行程の前期または中期において実行させる。このように、吸気行程において燃料を噴射させておくことで、前記先行点火の時点において混合気を均質化させ、点火プラグの周辺だけに燃料リッチな混合気が存在するような状況の発生を抑制することが可能となる。従って、前記先行点火による混合気への着火および火炎形成が抑止され、前記中間生成物の生成期間を確実に確保することができる。

[0159] 上記の圧縮着火式エンジンの制御装置において、前記噴射制御部は、前記燃料噴射として、前記吸気行程の所定時点で燃料を噴射する第１噴射と、この第１噴射よりも遅い時点で燃料を噴射する第２噴射とを前記インジェクタに実行させ、前記点火制御部は、前記先行点火を前記第２噴射の後に実行させることが望ましい。

[0160] この制御装置によれば、第１噴射および第２噴射における燃料の噴射量／噴射時期を、エンジンの運転条件に応じて設定することが可能となる。従っ

て、各運転条件において適切な部分圧縮着火燃焼が実現されるように、混合気の成層度合（もしくは均質度合）を調整することができる。

[0161] 上記の圧縮着火式エンジンの制御装置において、前記気筒に連通する吸気ポートに配置され該吸気ポートを開閉可能なスワール弁と、前記スワール弁の開度を制御するスワール制御部と、をさらに備え、前記スワール制御部は、前記先行点火および主点火が実行される運転領域では、前記気筒内のスワール比が１．５以上になるように前記スワール弁の開度を制御することが望ましい。

[0162] この制御装置によれば、スワール比が１．５以上とされることで、気筒内に強いスワール流を発生させることができる。第１噴射および第２噴射の燃料は前記スワール流に向けて噴射され、当該スワール流で点火プラグに向けて搬送される。これにより、前記主点火の時点において、前記点火プラグの周辺にリッチな混合気を形成し、このリッチな混合気中に火花点火によって確実に火炎核を形成することができる。従って、ＳＩ燃焼を確実に発生させることができるとともに、その後のＣＩ燃焼の開始時期の制御性を向上させることができる。

[0163] 上記の圧縮着火式エンジンの制御装置において、前記噴射制御部は、前記第１噴射による燃料の噴射量の方が前記第２噴射による燃料の噴射量よりも多くなるように前記インジェクタを制御することが望ましい。

[0164] この制御装置によれば、噴射時期の早い第１噴射による噴射量を相対的に多くすることで、燃料が成層化され過ぎてエミッション性能が低下することを回避できる。

[0165] 上記の圧縮着火式エンジンの制御装置において、前記噴射制御部は、前記第２噴射の時期を前記エンジンの運転状態に応じて変更するものであって、前記点火制御部は、前記第２噴射の時期変更の前後において、前記第２噴射の終了時期から前記先行点火の時期までの期間が略一定に維持されるよう、前記先行点火の時期を変更することが望ましい。

[0166] この制御装置によれば、第２噴射の時期が変更されたとしても、前記第２

噴射の終了時期から前記先行点火の時期までの期間が略一定に維持される。このため、点火プラグに燃料が到達した時点で前記先行点火が行われるようになり、前記点火プラグの周囲に存在する燃料に前記先行点火のエネルギーを確実に付与し、燃料を改質することができる。

[0167] 上記の圧縮着火式エンジンの制御装置において、前記先行点火のエネルギーは、前記点火プラグから発生した火花の周囲に８５０Ｋ以上１１４０Ｋ未満の高温部が形成され、且つ、混合気の火炎伝播が生じないエネルギーに設定されることが望ましい。

[0168] この制御装置によれば、十分な量の中間生成物を先行点火により生成しつつ、その中間生成物が主点火の前に、前記先行点火による意図しない火炎伝播によって消費されてしまうことを回避できる。

[0169] 上記の圧縮着火式エンジンの制御装置において、前記先行点火および主点火は、前記気筒ごとに、１つの点火回路を有する１つの点火プラグによって実行されることが望ましい。これにより、既存の点火プラグを用いた簡単な方法により、前記先行点火および前記主点火を実行させることができる。

[0170] 上記の圧縮着火式エンジンの制御装置において、１サイクル中の前記先行点火の回数は３回以下に設定されることが望ましい。

[0171] 前記先行点火の回数は１サイクル中に１回に限定する必要はなく、複数回の先行点火を実行してもよい。しかし、本願発明者らの研究によれば、３回を超えて先行点火を実行したところで、先行点火が３回である場合と比べて得られる効果はほとんど変わらない。上記の制御装置によれば、ＣＩ燃焼を高速化するという先行点火による効果を担保しつつ、点火プラグの電極の消耗を抑制することができる。

[0172] 上記の圧縮着火式エンジンの制御装置において、１サイクル中の全熱発生量に対するＳＩ燃焼による熱発生量の割合の目標値である目標ＳＩ率をエンジンの運転条件に応じて設定する設定部をさらに備え、前記点火制御部は、前記設定部により設定された目標ＳＩ率に基づいて前記主点火の時期を設定することが望ましい。

[0173] この制御装置によれば、目標ＳＩ率に適合する部分圧縮着火燃焼が実現されるように主点火の時期を調整することで、例えば燃焼騒音が過大にならない範囲でできるだけＣＩ燃焼の割合を増やす（つまりＳＩ率を低くする）ことができる。このことは、先行点火による燃料の改質による効果（ＣＩ燃焼の高速化）と相俟って、部分圧縮着火燃焼による熱効率を可及的に高めることにつながる。前記先行点火は、ＯＨラジカルを含む中間生成物を生成する（それによってＣＩ燃焼の燃焼速度を速める）働きをするだけなので、先行点火のエネルギーや時期が変化しても、ＳＩ率は特に影響を受けない。これは、目標ＳＩ率を達成するための主点火の時期を、先行点火のエネルギーや時期とは独立して一義的に特定できることを意味する。すなわち、上記の制御装置によれば、十分な中間生成物が生成されるように先行点火を行いつつ、目標ＳＩ率を実現するための主点火の時期を高い精度で特定することができる。

[0174] 上記の圧縮着火式エンジンの制御装置において、前記点火制御部は、前記部分圧縮着火燃焼が実行される運転領域における低負荷側の一部でのみ前記先行点火および主点火を実行することが望ましい。

[0175] この制御装置によれば、先行点火によるＣＩ燃焼の高速化によって異常燃焼が引き起こされる不具合を回避することができる。すなわち、部分圧縮着火燃焼の実行領域において一律に先行点火および主点火を実行した場合には、同領域の高負荷側において、ＣＩ燃焼の燃焼速度が速くなり過ぎて、ノッキング等の異常燃焼が起きる可能性が高くなる。これに対し、上記の制御装置では、部分圧縮着火燃焼の実行領域における低負荷側の一部でのみ先行点火が実行され、高負荷側では先行点火が禁止される。従って、ノッキング等の異常燃焼を効果的に回避することができる。

[0176] 上記の圧縮着火式エンジンの制御装置において、前記先行点火および主点火が実行される運転領域では、前記気筒内の空気と燃料との割合である空燃比が２０超３５未満となるＡ／Ｆリーン環境下で前記部分圧縮着火燃焼が実行されるか、もしくは、前記気筒内の全ガスと燃料との割合であるガス空燃

比が１８超５０未満となりかつ前記空燃比が理論空燃比に略一致するＧ／Ｆリーン環境下で前記部分圧縮着火燃焼が実行されることが望ましい。

[0177] この制御装置によれば、先行点火によるＣＩ燃焼の高速化（それによる熱効率の向上）を図りながら、混合気の燃焼温度を低く抑えることができる。従って、燃焼に伴うＮＯｘの発生量を効果的に抑制することができる。

[0178] 本発明の他の局面に係る圧縮着火式エンジンの制御装置は、気筒と、気筒に臨むように配設されたインジェクタおよび点火プラグとを備えたエンジンを制御する装置であって、前記インジェクタ及び前記点火プラグと電気的に接続され、前記インジェクタ及び前記点火プラグに制御信号を出力するコントローラを備え、前記コントローラは電気回路を有し、前記電気回路を有するコントローラは、前記インジェクタから噴射された燃料と空気との混合気が前記点火プラグによる火花点火により火炎伝播燃焼し、この火炎伝播燃焼の開始後に圧縮自己着火燃焼が起きる部分圧縮着火燃焼を実行させる燃焼制御部と、前記部分圧縮着火燃焼の実行時に、前記インジェクタを駆動して、吸気行程において燃料を噴射させる噴射制御部と、前記部分圧縮着火燃焼の実行時に、火花を発生させて前記火炎伝播燃焼を開始させる主点火を行う第１点火制御部と、前記部分圧縮着火燃焼の実行時に、前記主点火よりも早い時点で火花を発生させる先行点火を行うものであって、前記先行点火のエネルギーを前記主点火のエネルギーよりも小さく設定し、且つ、前記先行点火を、前記吸気行程における前記燃料噴射の後、もしくは、圧縮行程の前期または中期において実行させる第２点火制御部と、を備えることを特徴とする。

[0179] 本発明によれば、燃焼速度が速く熱効率に優れた部分圧縮着火燃焼を実現することが可能な圧縮着火式エンジンの制御装置を提供することができる。

請求の範囲

[請求項1] 気筒と、気筒に燃料を噴射するインジェクタと、インジェクタから噴射された燃料と空気とが混合された混合気に点火する点火プラグとを備え、前記混合気の一部を前記点火プラグの火花点火によりＳＩ燃焼させるとともにその他の混合気を自着火によりＣＩ燃焼させる部分圧縮着火燃焼が可能な圧縮着火式エンジンを制御する装置であって、

前記インジェクタによる燃料の噴射動作を制御する噴射制御部と、

前記点火プラグによる点火動作を制御する点火制御部と、を備え、

前記点火制御部は、前記部分圧縮着火燃焼の実行時に、火花を発生させてＳＩ燃焼を開始させる主点火と、主点火よりも早い時点で火花を発生させる先行点火とを前記点火プラグに実行させるものであって、

前記噴射制御部は、吸気行程において燃料噴射を実行させ、

前記点火制御部は、

前記先行点火のエネルギーを前記主点火のエネルギーよりも小さく設定し、且つ、

前記先行点火を、前記吸気行程における前記燃料噴射の後、もしくは、圧縮行程の前期または中期において実行させる、

ことを特徴とする圧縮着火式エンジンの制御装置。

[請求項2] 請求項１に記載の圧縮着火式エンジンの制御装置において、

前記噴射制御部は、前記燃料噴射として、前記吸気行程の所定時点で燃料を噴射する第１噴射と、この第１噴射よりも遅い時点で燃料を噴射する第２噴射とを前記インジェクタに実行させ、

前記点火制御部は、前記先行点火を前記第２噴射の後に実行させる、圧縮着火式エンジンの制御装置。

[請求項3] 請求項２に記載の圧縮着火式エンジンの制御装置において、

前記気筒に連通する吸気ポートに配置され該吸気ポートを開閉可能なスワール弁と、

前記スワール弁の開度を制御するスワール制御部と、をさらに備え、

前記スワール制御部は、前記先行点火および主点火が実行される運転領域では、前記気筒内のスワール比が１．５以上になるように前記スワール弁の開度を制御する、圧縮着火式エンジンの制御装置。

[請求項4] 請求項２又は３に記載の圧縮着火式エンジンの制御装置において、

前記噴射制御部は、前記第１噴射による燃料の噴射量の方が前記第２噴射による燃料の噴射量よりも多くなるように前記インジェクタを制御する、圧縮着火式エンジンの制御装置。

[請求項5] 請求項２～４のいずれか１項に記載の圧縮着火式エンジンの制御装置において、

前記噴射制御部は、前記第２噴射の時期を前記エンジンの運転状態に応じて変更するものであって、

前記点火制御部は、前記第２噴射の時期変更の前後において、前記第２噴射の終了時期から前記先行点火の時期までの期間が略一定に維持されるよう、前記先行点火の時期を変更する、圧縮着火式エンジンの制御装置。

[請求項6] 請求項１～５のいずれか１項に記載の圧縮着火式エンジンの制御装置において、

前記先行点火のエネルギーは、前記点火プラグから発生した火花の周囲に８５０Ｋ以上１１４０Ｋ未満の高温部が形成され、且つ、混合気の火炎伝播が生じないエネルギーに設定される、圧縮着火式エンジンの制御装置。

[請求項7] 請求項１～６のいずれか１項に記載の圧縮着火式エンジンの制御装置において、

前記先行点火および主点火は、前記気筒ごとに、１つの点火回路を有する１つの点火プラグによって実行される、圧縮着火式エンジンの制御装置。

[請求項8] 請求項１～７のいずれか１項に記載の圧縮着火式エンジンの制御装置において、

１サイクル中の前記先行点火の回数は３回以下に設定される、圧縮着火式エンジンの制御装置。

[請求項9] 請求項１～８のいずれか１項に記載の圧縮着火式エンジンの制御装置において、

１サイクル中の全熱発生量に対するＳＩ燃焼による熱発生量の割合の目標値である目標ＳＩ率をエンジンの運転条件に応じて設定する設定部をさらに備え、

前記点火制御部は、前記設定部により設定された目標ＳＩ率に基づいて前記主点火の時期を設定する、圧縮着火式エンジンの制御装置。

[請求項10] 請求項１～９のいずれか１項に記載の圧縮着火式エンジンの制御装置において、

前記点火制御部は、前記部分圧縮着火燃焼が実行される運転領域における低負荷側の一部でのみ前記先行点火および主点火を実行する、圧縮着火式エンジンの制御装置。

[請求項11] 請求項１～１０のいずれか１項に記載の圧縮着火式エンジンの制御装置において、

前記先行点火および主点火が実行される運転領域では、前記気筒内の空気と燃料との割合である空燃比が２０超３５未満となるＡ／Ｆリーン環境下で前記部分圧縮着火燃焼が実行されるか、もしくは、前記気筒内の全ガスと燃料との割合であるガス空燃比が１８超５０未満となりかつ前記空燃比が理論空燃比に略一致するＧ／Ｆリーン環境下で前記部分圧縮着火燃焼が実行される、圧縮着火式エンジンの制御装置。

[請求項12] 気筒と、気筒に臨むように配設されたインジェクタおよび点火プラグとを備えたエンジンを制御する装置であって、

前記インジェクタ及び前記点火プラグと電気的に接続され、前記イ

ンジェクタ及び前記点火プラグに制御信号を出力するコントローラを備え、

前記コントローラは電気回路を有し、

前記電気回路を有するコントローラは、

前記インジェクタから噴射された燃料と空気との混合気が前記点火プラグによる火花点火により火炎伝播燃焼し、この火炎伝播燃焼の開始後に圧縮自己着火燃焼が起きる部分圧縮着火燃焼を実行させる燃焼制御部と、

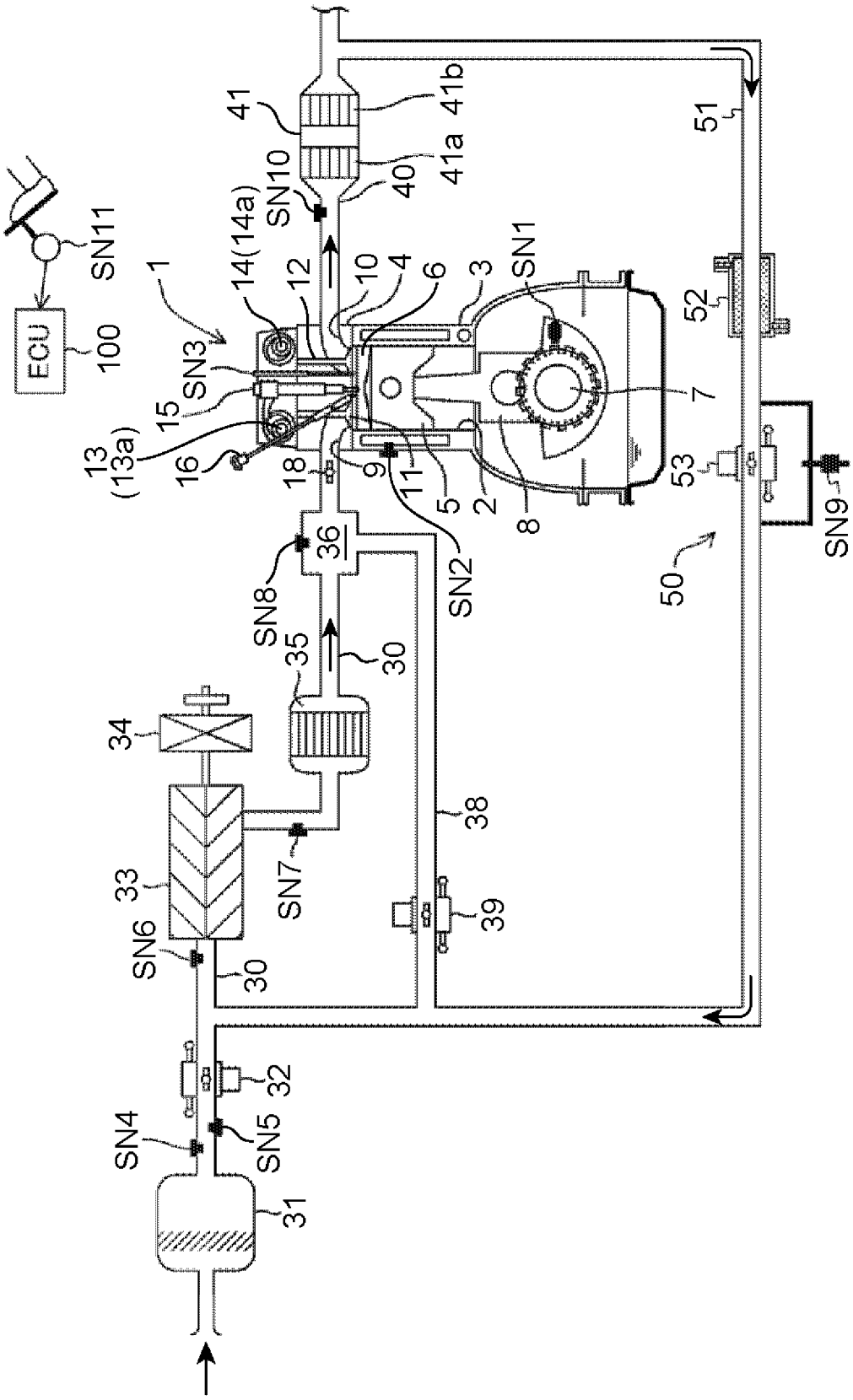
前記部分圧縮着火燃焼の実行時に、前記インジェクタを駆動して、吸気行程において燃料を噴射させる噴射制御部と、

前記部分圧縮着火燃焼の実行時に、火花を発生させて前記火炎伝播燃焼を開始させる主点火を行う第１点火制御部と、

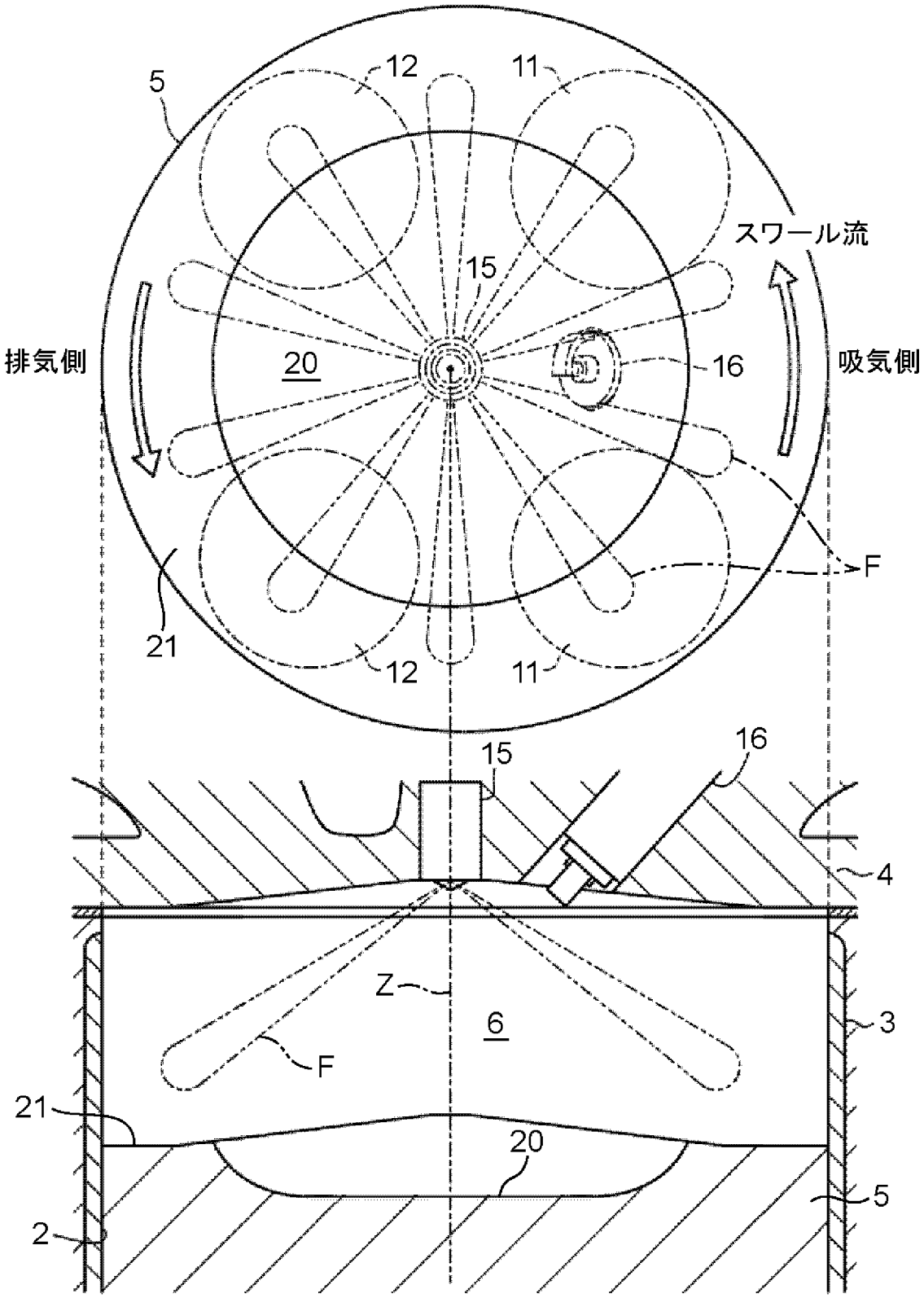
前記部分圧縮着火燃焼の実行時に、前記主点火よりも早い時点で火花を発生させる先行点火を行うものであって、前記先行点火のエネルギーを前記主点火のエネルギーよりも小さく設定し、且つ、前記先行点火を、前記吸気行程における前記燃料噴射の後、もしくは、圧縮行程の前期または中期において実行させる第２点火制御部と、

を備えることを特徴とする圧縮着火式エンジンの制御装置。

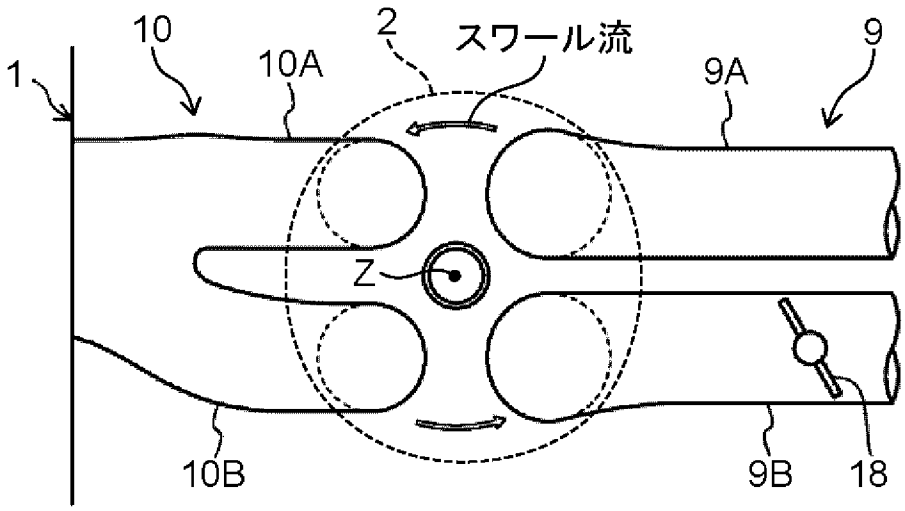
[図1]


ECU
100
SN11
SN10
14(14a)
41
41b
41a
40
51
1
12
10
4
6
3
SN1
52
SN3
15
13
(13a)
16
18
9
11
5
2
8
7
53
SN9
36
SN8
SN2
50
35
30
34
38
33
SN7
39
SN6
30
32
SN4
SN5
31

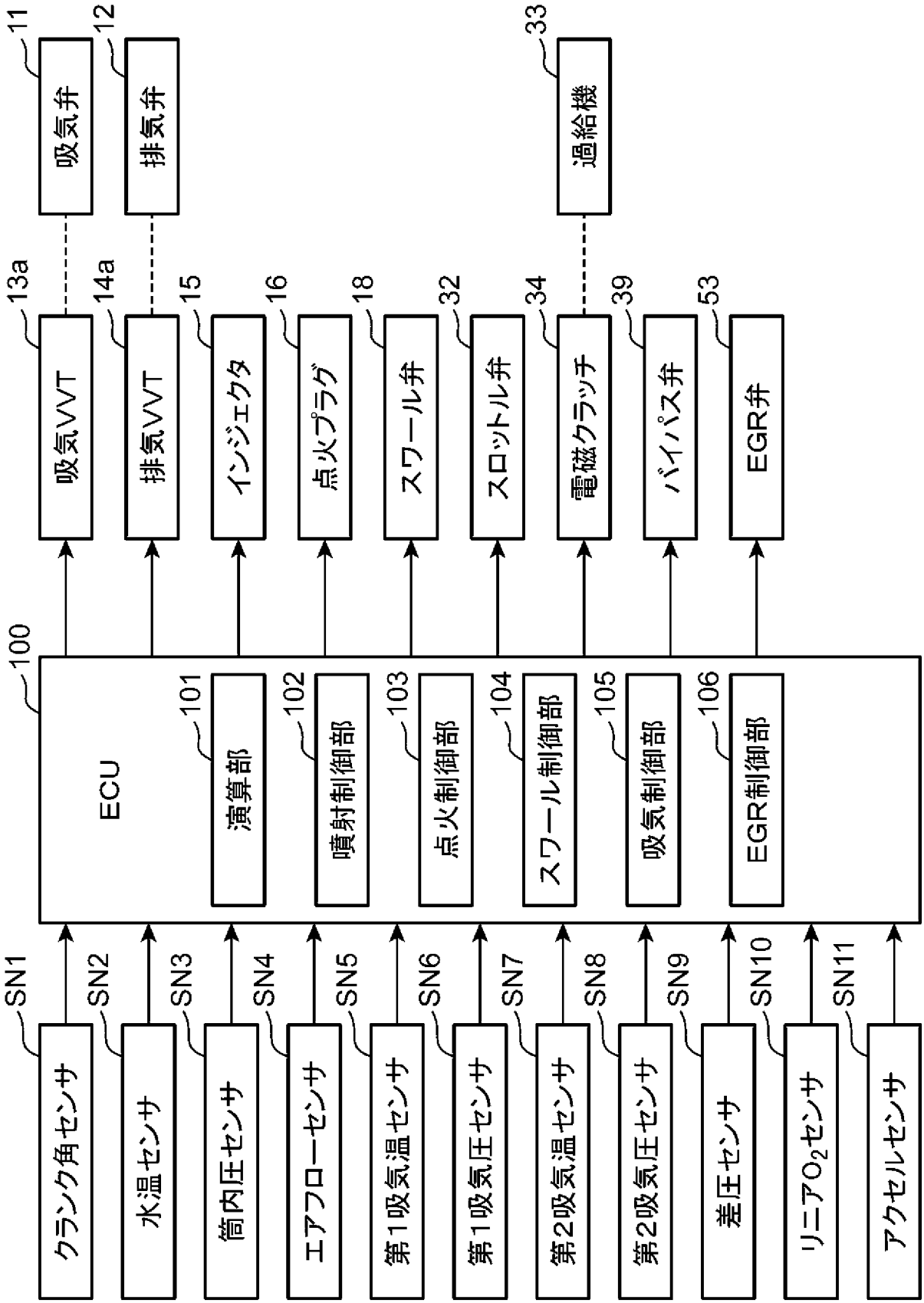
[図2]



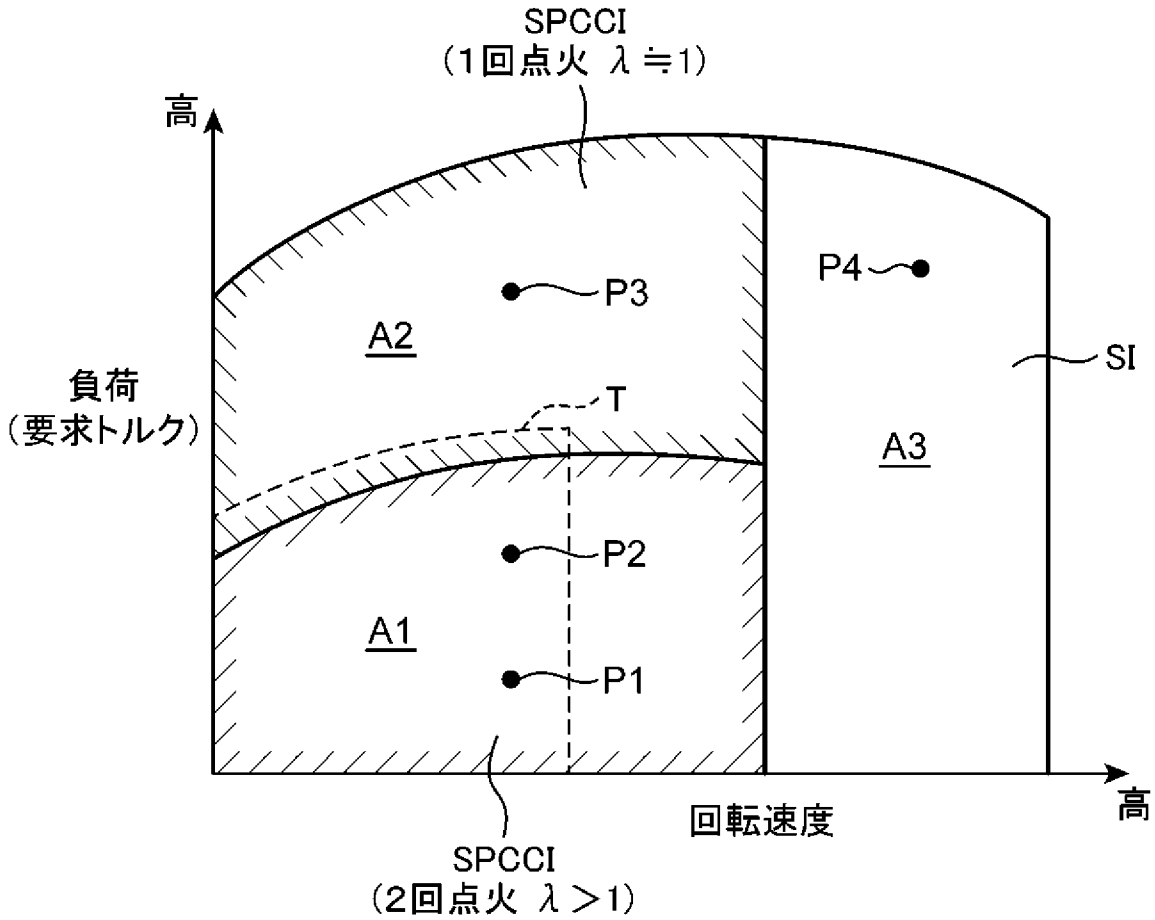
[図3]



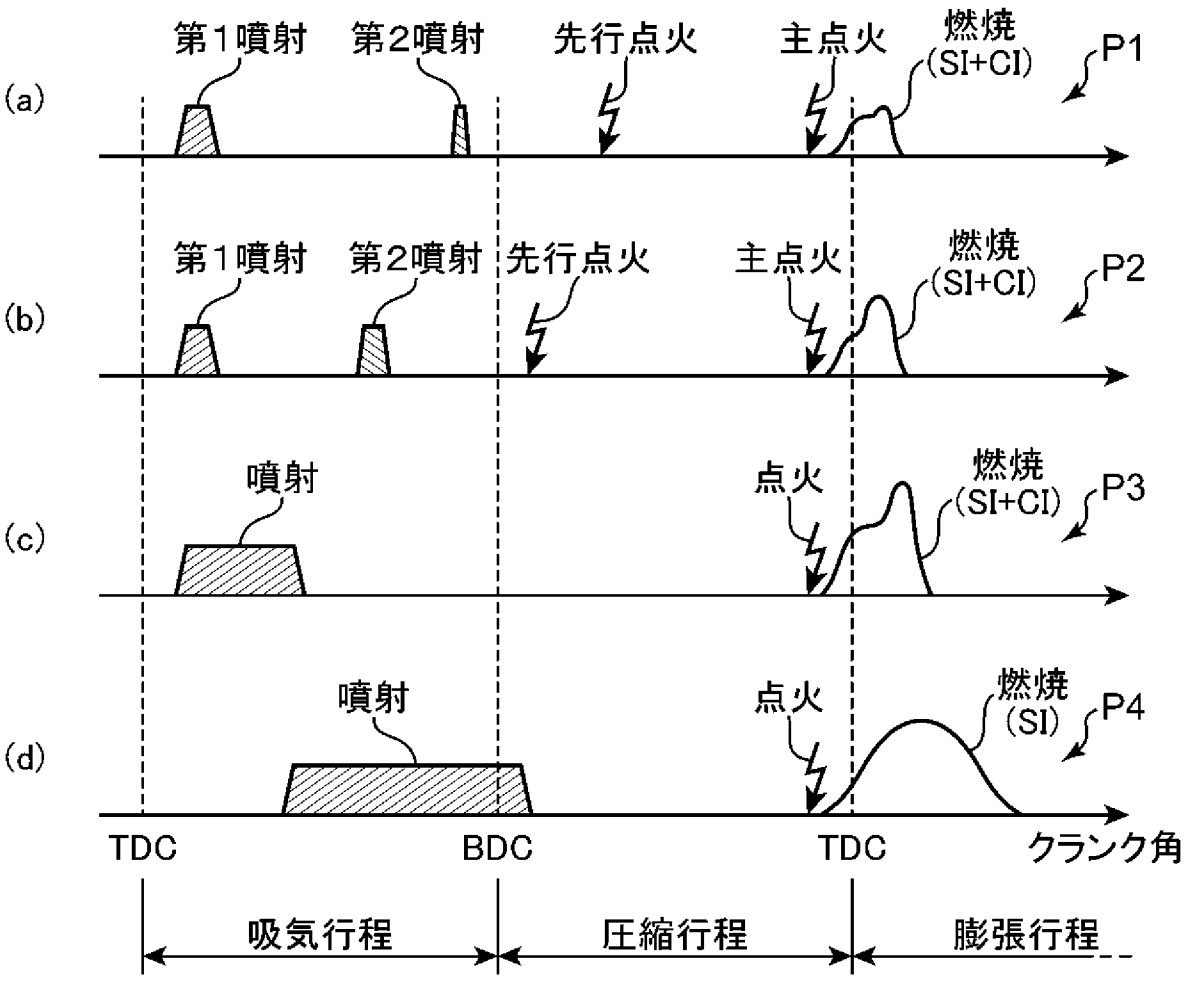
[図4]


11
吸気弁
12
排気弁
33
過給機
13a
吸気VVT
14a
排気VVT
15
インジェクタ
16
点火プラグ
18
スワール弁
32
スロットル弁
34
電磁クラッチ
39
バイパス弁
53
EGR弁
100
ECU
101
演算部
102
噴射制御部
103
点火制御部
104
スワール制御部
105
吸気制御部
106
EGR制御部
SN1
クランク角センサ
SN2
水温センサ
SN3
筒内圧センサ
SN4
エアフローセンサ
SN5
第1吸気温センサ
SN6
第1吸気圧センサ
SN7
第2吸気温センサ
SN8
第2吸気圧センサ
SN9
差圧センサ
SN10
リニアO_2センサ
SN11
アクセルセンサ

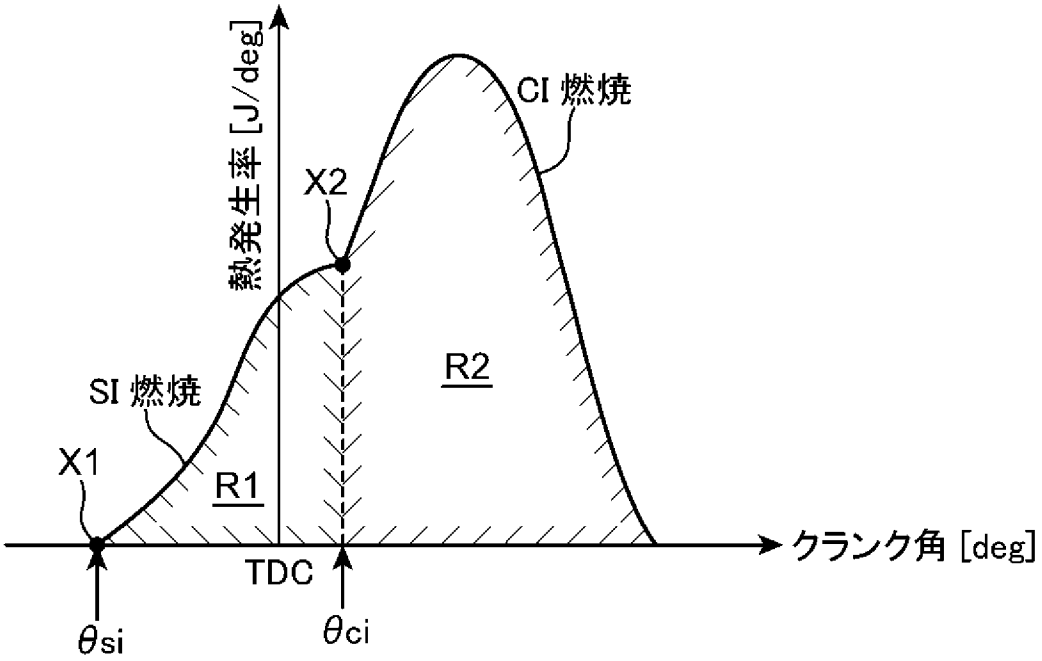
[図5]


SPCCI
（1回点火 λ≒1）
高
P4
P3
A2
SI
負荷
（要求トルク）
T
A3
P2
A1
P1
高
回転速度
SPCCI
（2回点火 λ＞1）

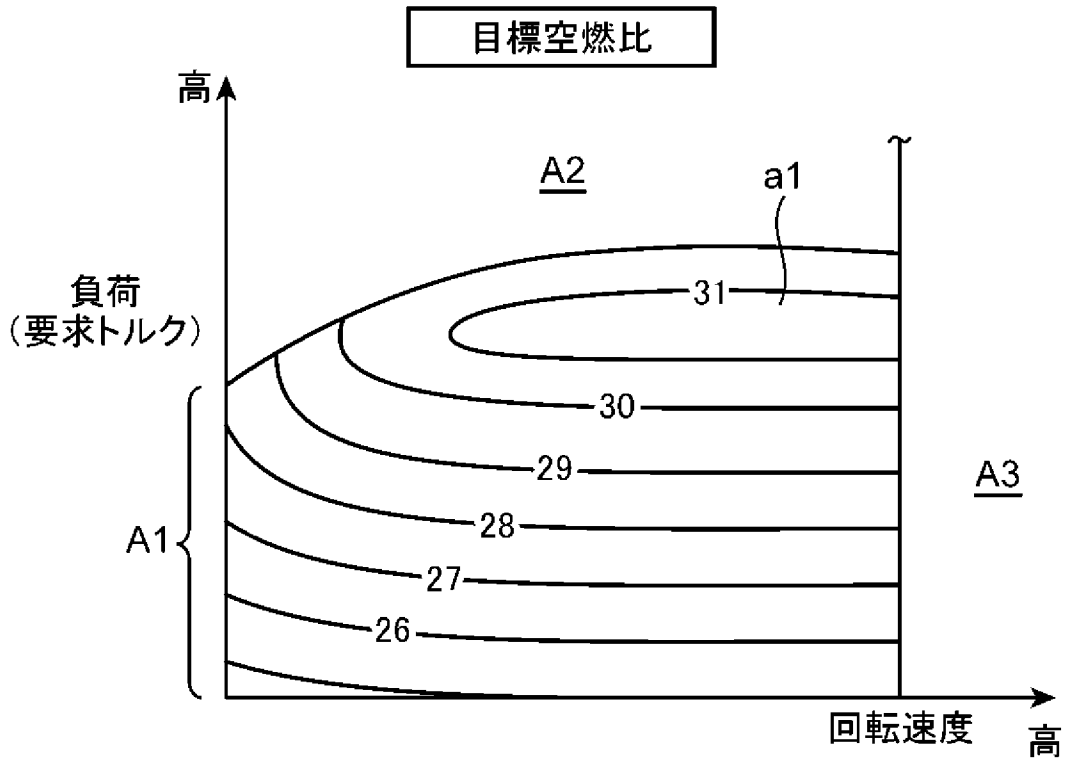
[図6]


第1噴射
第2噴射
先行点火
主点火
燃焼
(SI+CI)
P1
(a)
第1噴射
第2噴射
先行点火
主点火
燃焼
(SI+CI)
P2
(b)
噴射
点火
燃焼
(SI+CI)
P3
(c)
噴射
点火
燃焼
(SI)
P4
(d)
TDC
BDC
TDC
クランク角
吸気行程
圧縮行程
膨張行程

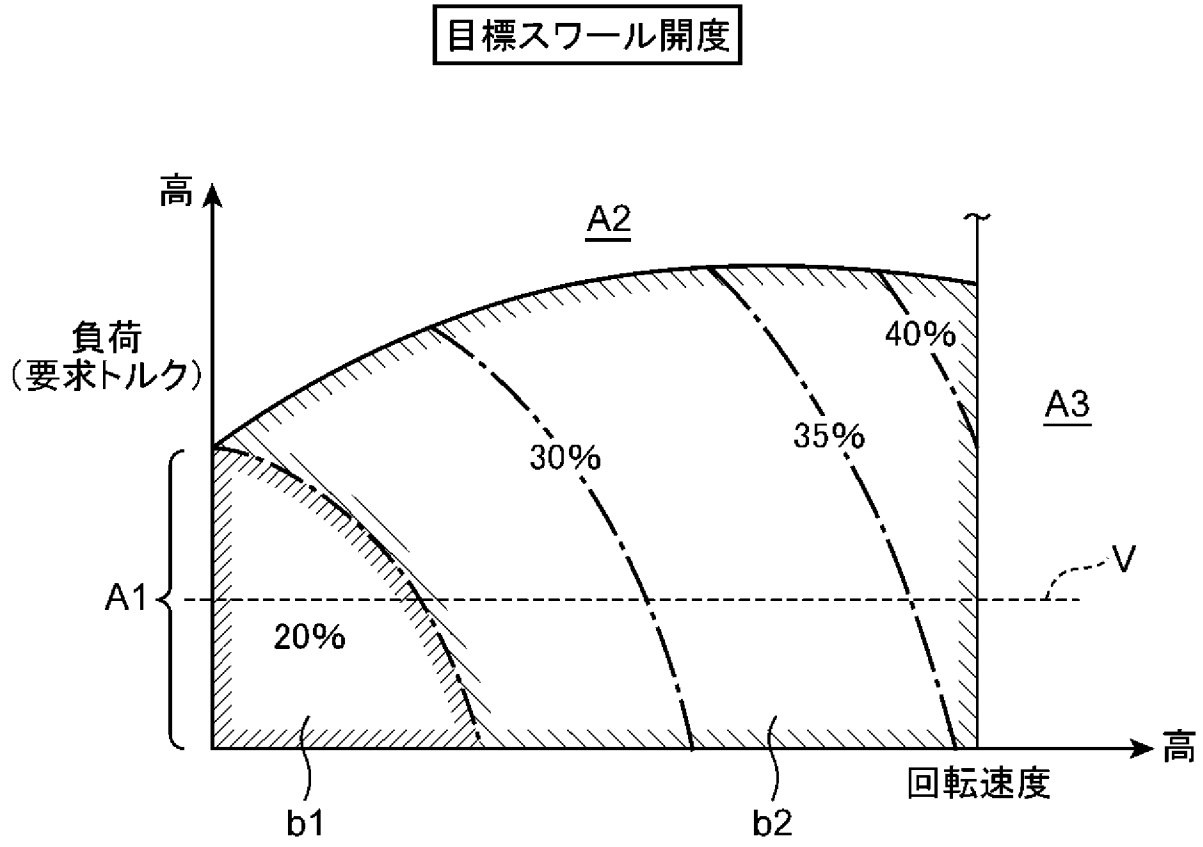
[図7]


熱発生率 [J/deg]
CI 燃焼
X2
R2
SI 燃焼
X1
R1
TDC
クランク角 [deg]
θsi
θci

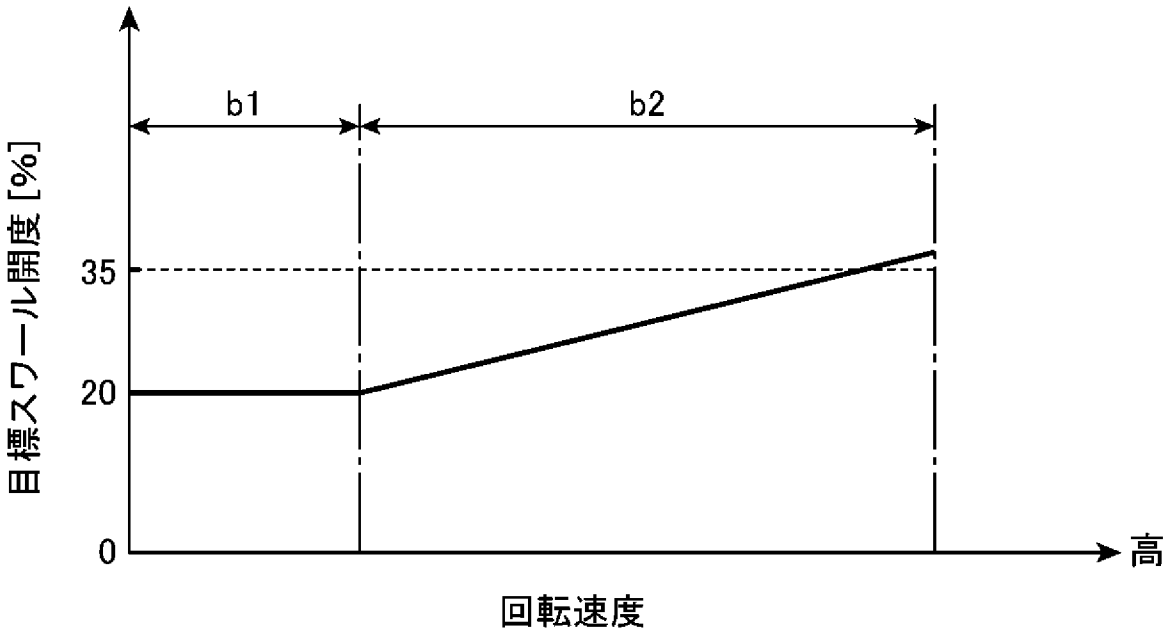
[図8]


目標空燃比
高
A2
a1
負荷
（要求トルク）
31
30
29
A3
28
A1
27
26
回転速度
高

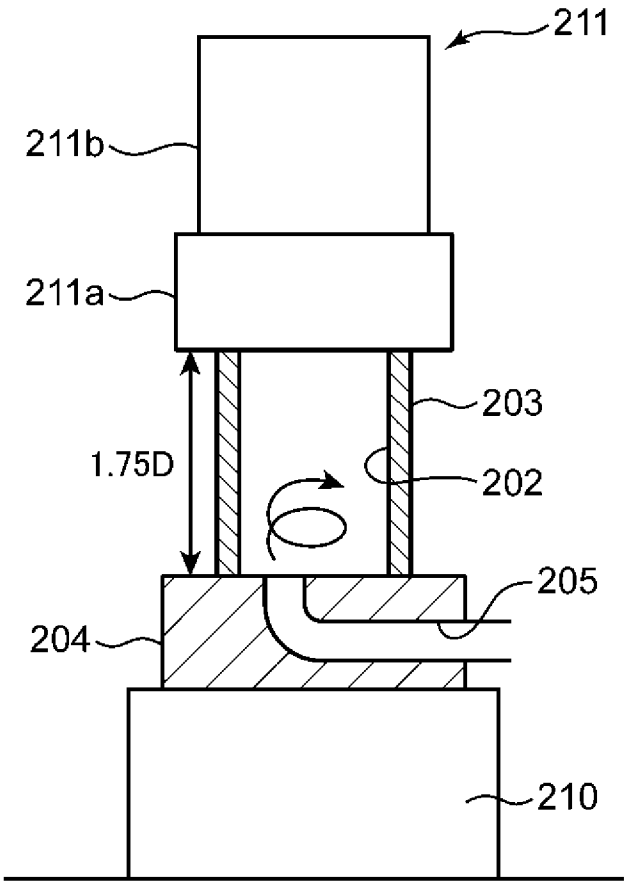
[図9]


目標スワール開度
高
負荷
（要求トルク）
A2
40%
A3
35%
30%
V
A1
20%
高
回転速度
b1
b2

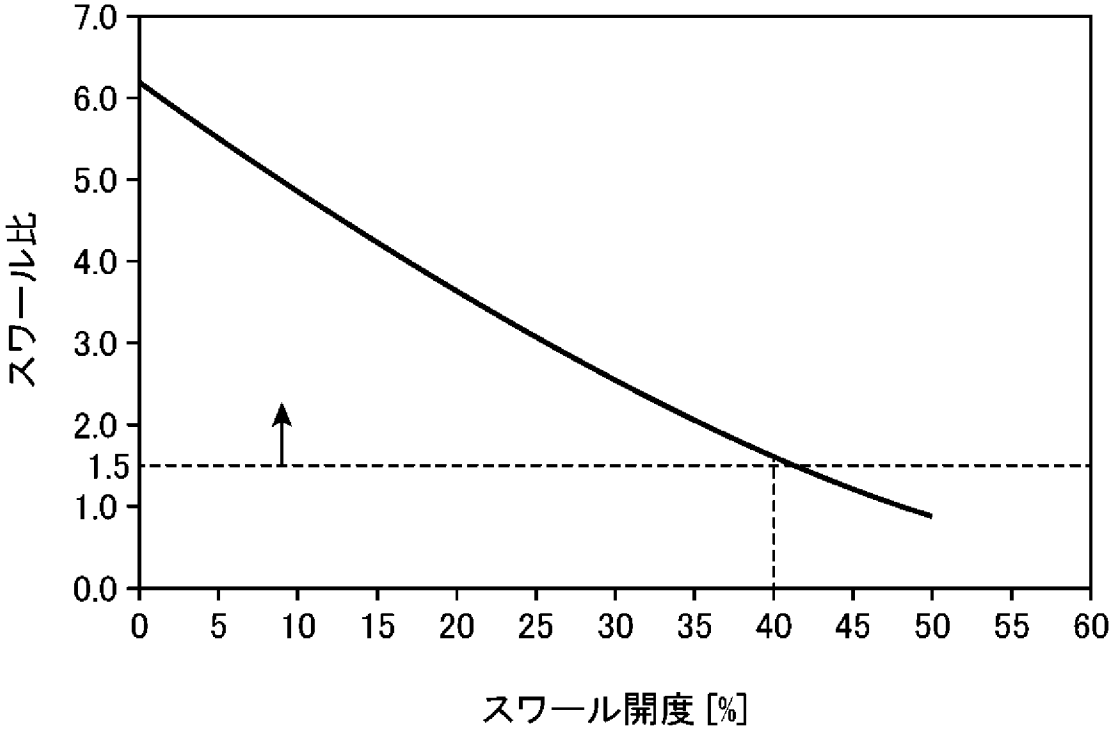
[図10]


b1
b2
目標スワール開度 [%]
35
20
0
高
回転速度

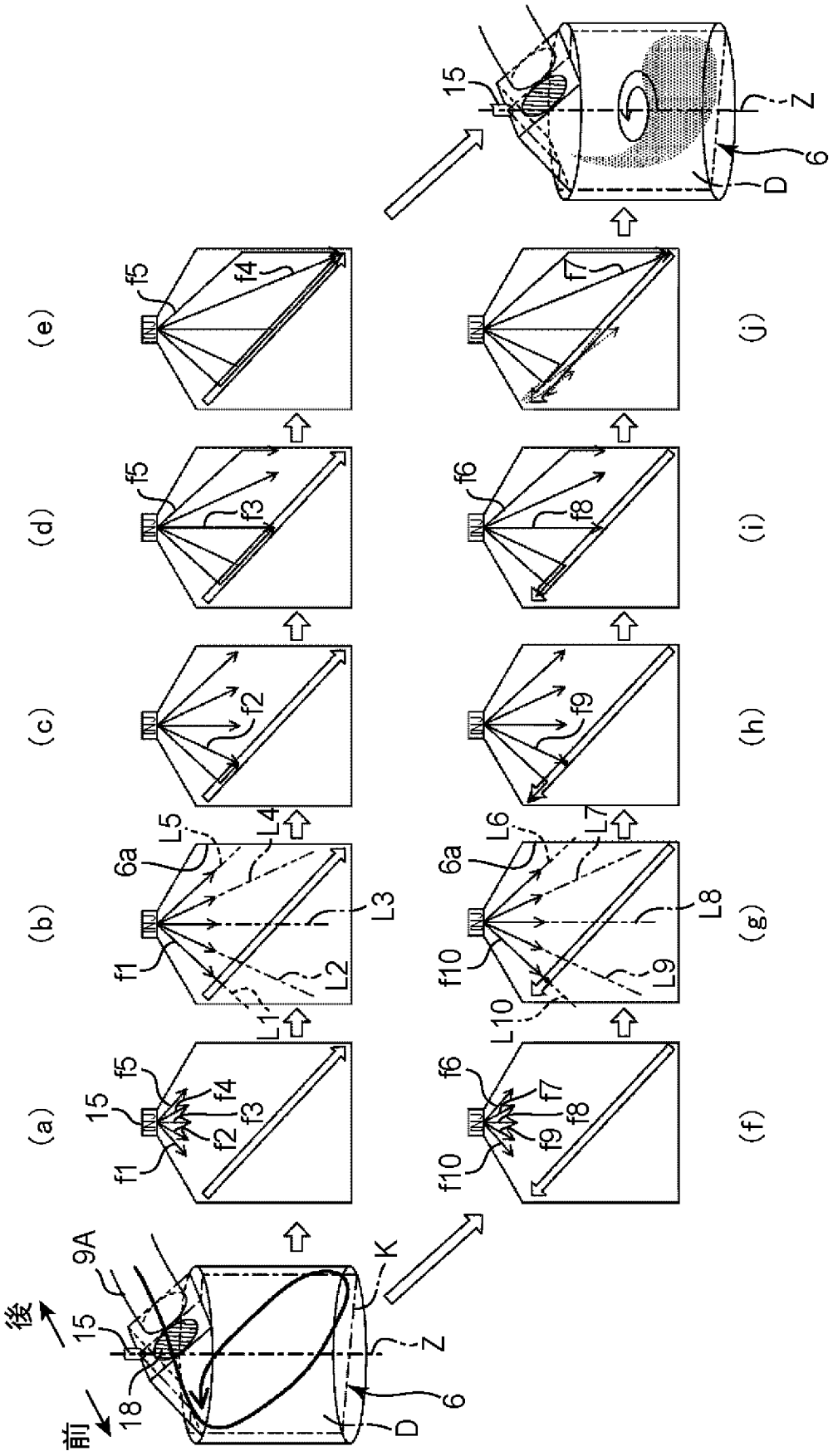
[図11]


211
211b
211a
203
1.75D
202
205
204
210

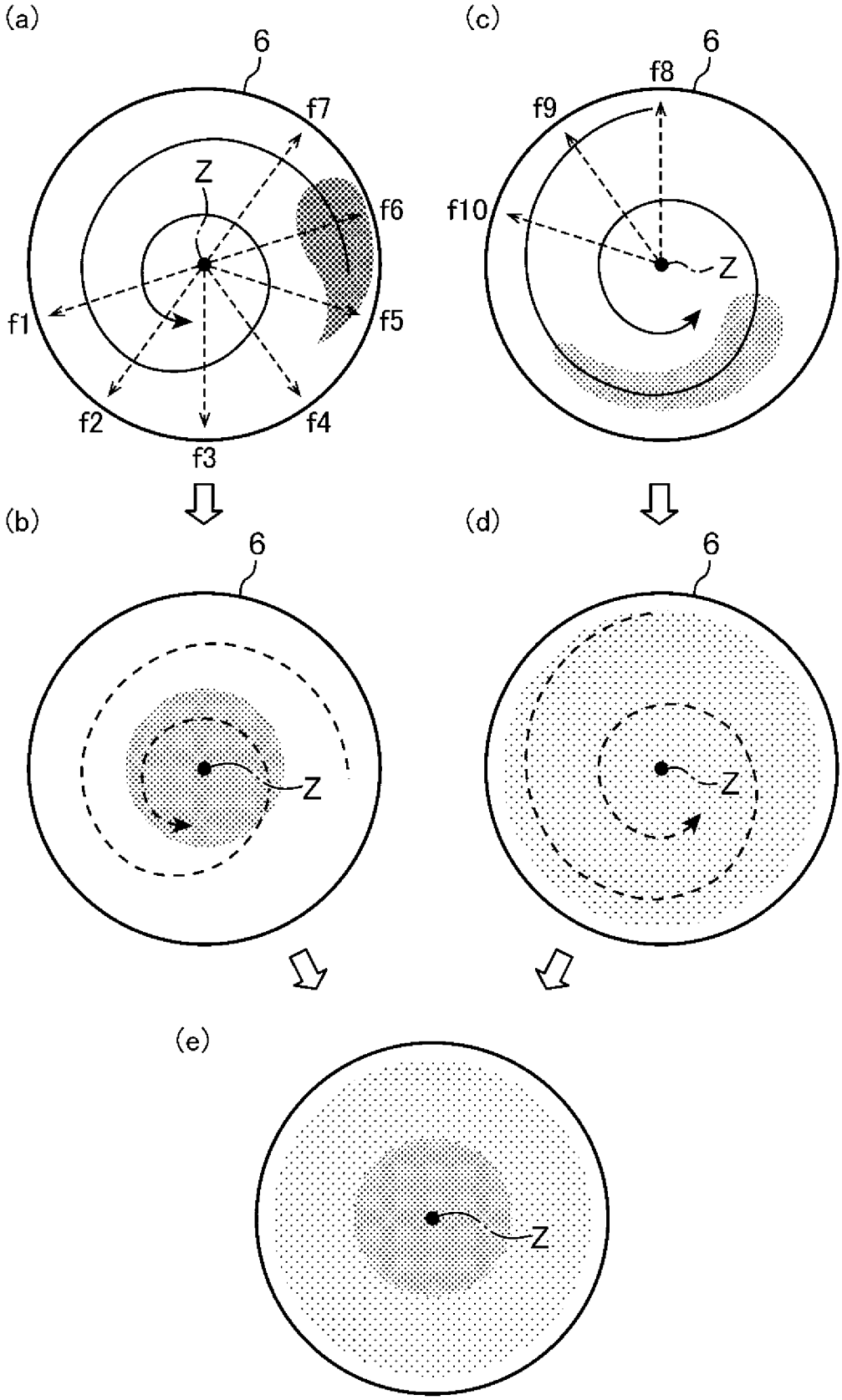
[図12]


7.0
6.0
5.0
4.0
3.0
2.0
1.5
1.0
0.0
スワール比
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
55
60
スワール開度 [%]

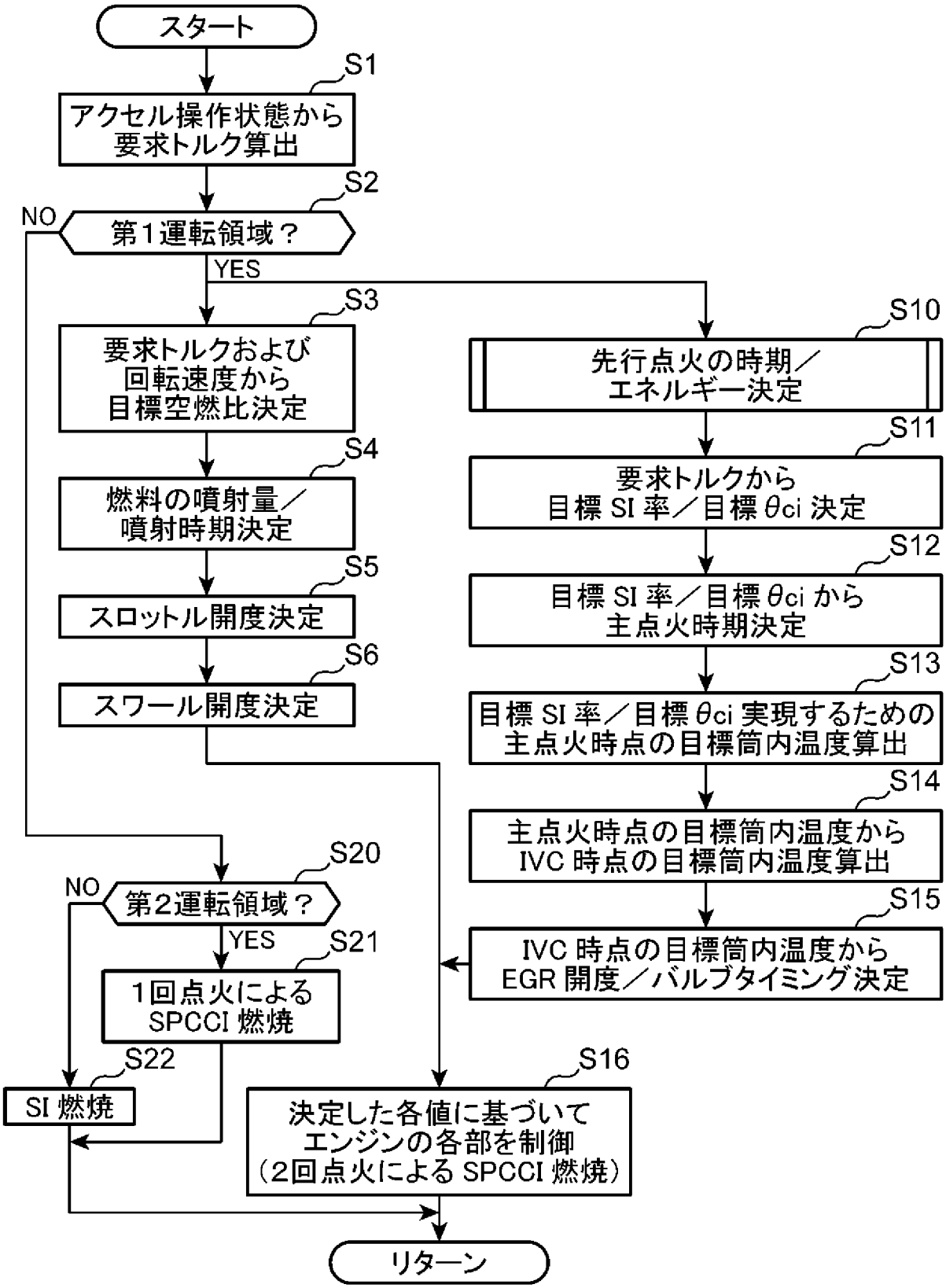
[図13]


後
前
9A
15
18
K
Z
6
D
(a)
(b)
(c)
(d)
(e)
(f)
(g)
(h)
(i)
(j)
f1
f2
f3
f4
f5
f6
f7
f8
f9
f10
6a
L1
L2
L3
L4
L5
L6
L7
L8
L9
L10

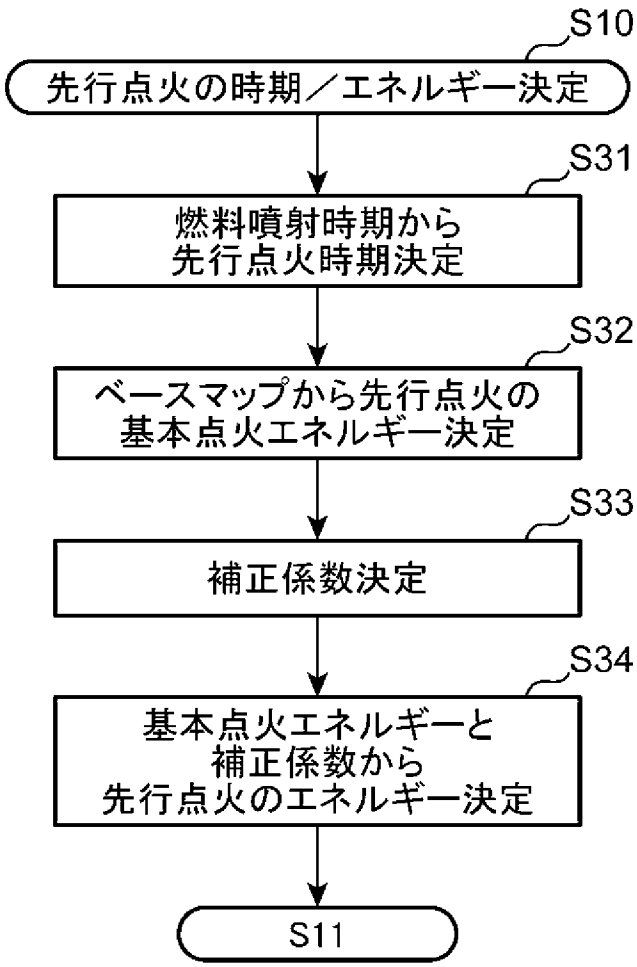
[図14]



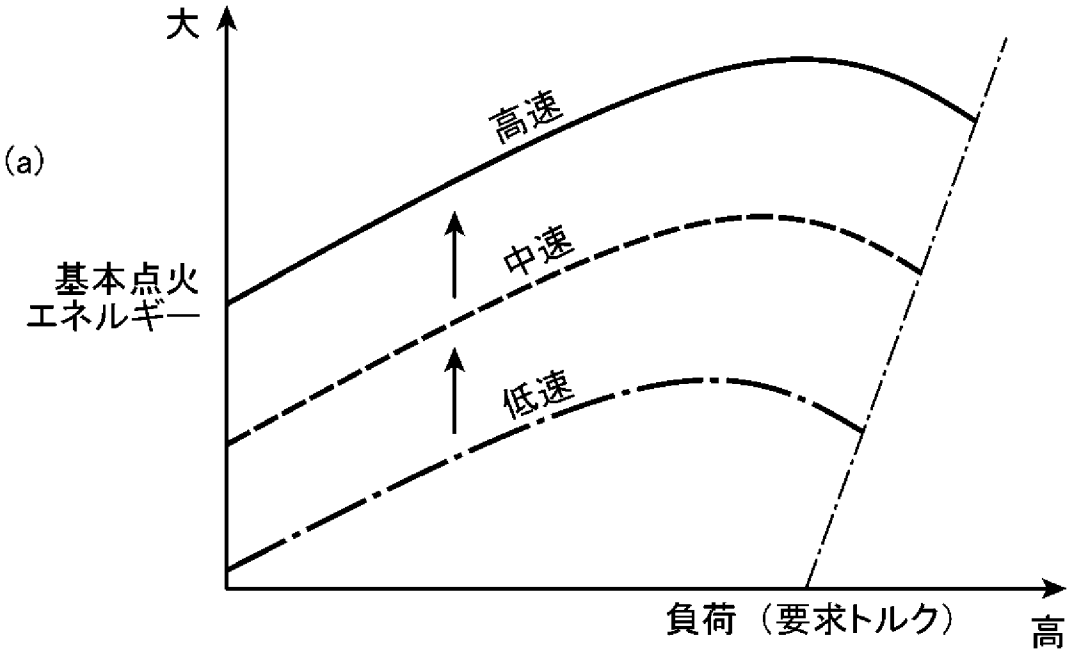
[図15]

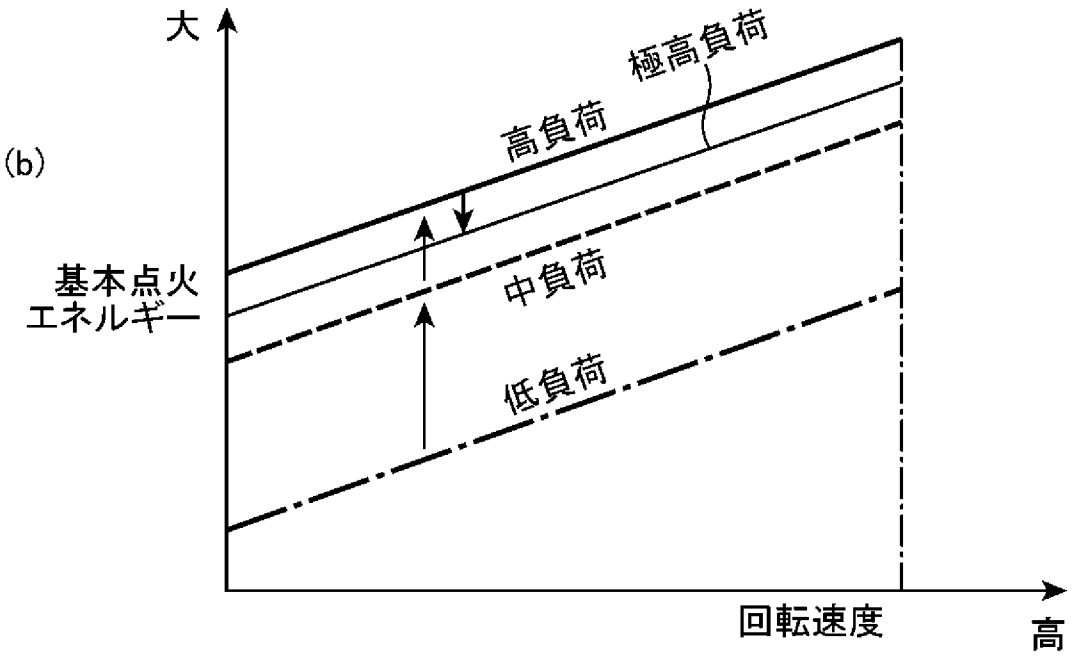

スタート
S1
アクセル操作状態から
要求トルク算出
S2
NO
第1運転領域？
YES
S3
要求トルクおよび
回転速度から
目標空燃比決定
S4
燃料の噴射量／
噴射時期決定
S5
スロットル開度決定
S6
スワール開度決定
S10
先行点火の時期／
エネルギー決定
S11
要求トルクから
目標 SI 率／目標 θci 決定
S12
目標 SI 率／目標 θci から
主点火時期決定
S13
目標 SI 率／目標 θci 実現するための
主点火時点の目標筒内温度算出
S14
主点火時点の目標筒内温度から
IVC 時点の目標筒内温度算出
S15
IVC 時点の目標筒内温度から
EGR 開度／バルブタイミング決定
S20
NO
第2運転領域？
YES
S21
1回点火による
SPCCI 燃焼
S22
SI 燃焼
S16
決定した各値に基づいて
エンジンの各部を制御
（2回点火による SPCCI 燃焼）
リターン

[図16]

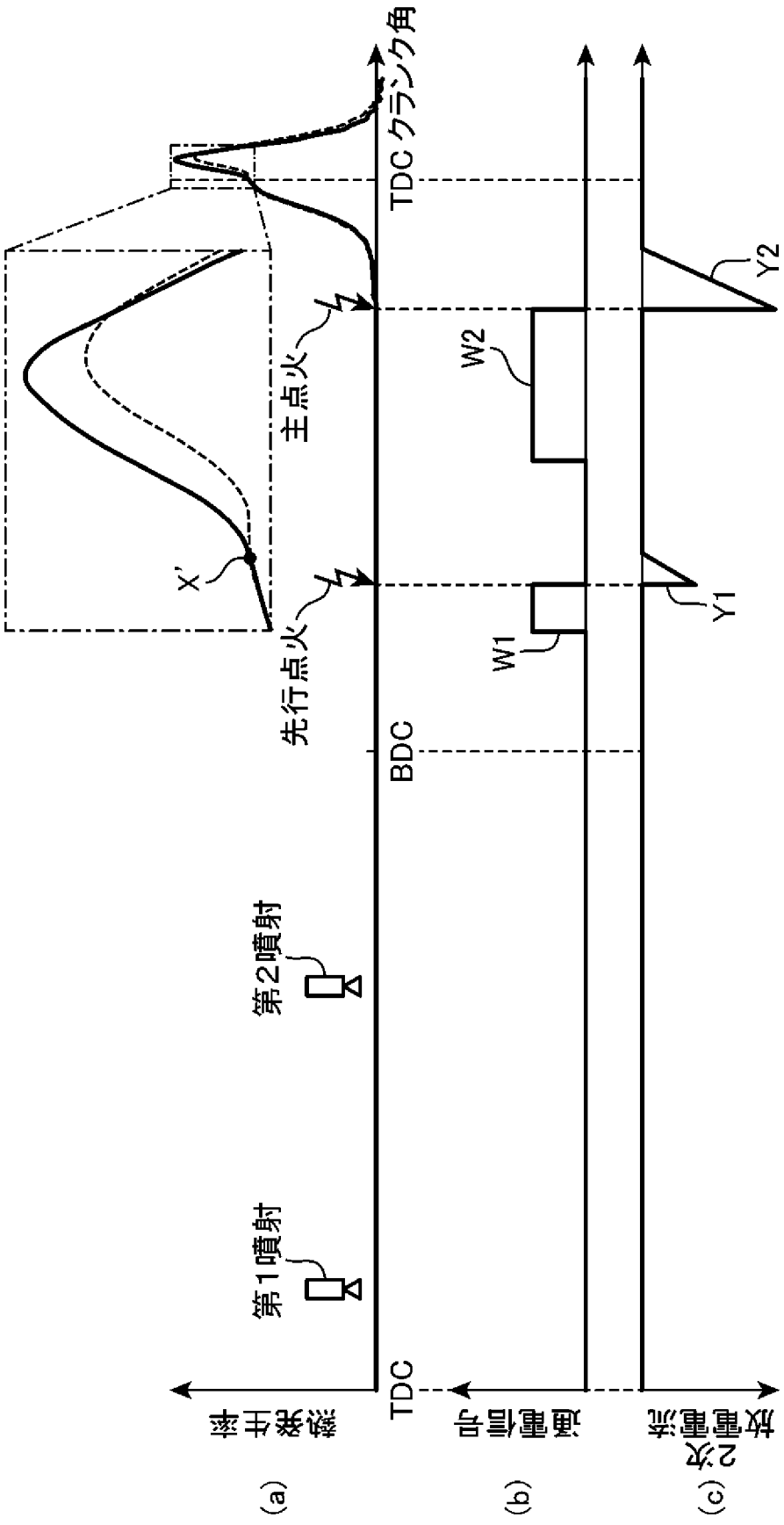

S10
先行点火の時期／エネルギー決定
S31
燃料噴射時期から
先行点火時期決定
S32
ベースマップから先行点火の
基本点火エネルギー決定
S33
補正係数決定
S34
基本点火エネルギーと
補正係数から
先行点火のエネルギー決定
S11

[図17]

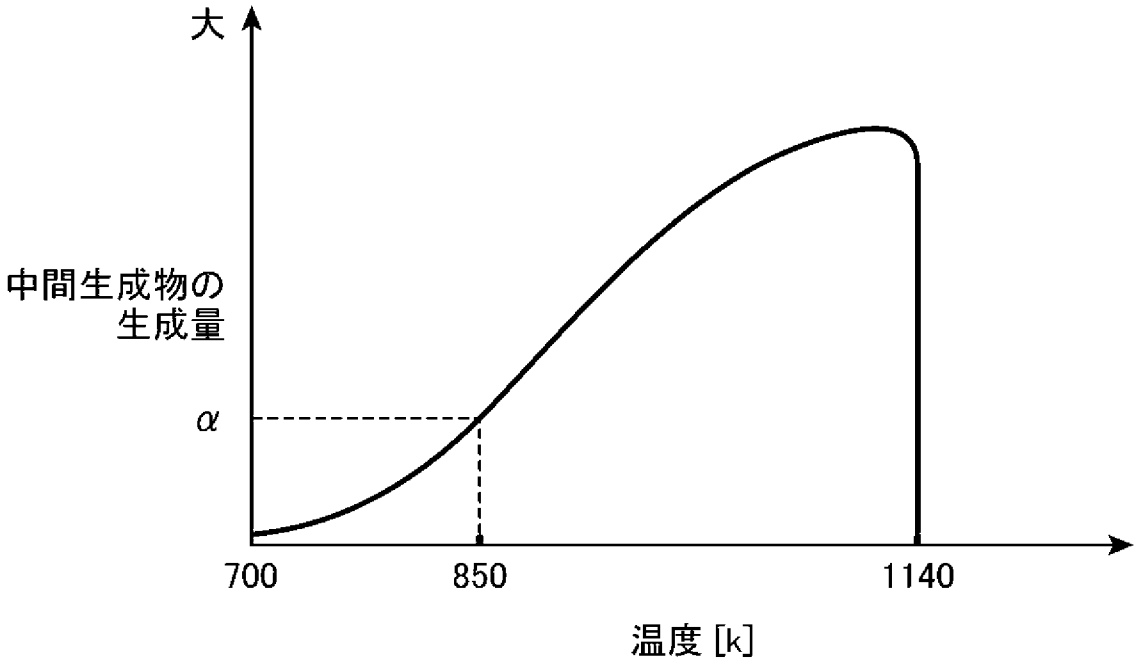

(a)
大
基本点火
エネルギー
高速
中速
低速
負荷（要求トルク）
高


(b)
大
基本点火
エネルギー
極高負荷
高負荷
中負荷
低負荷
回転速度
高

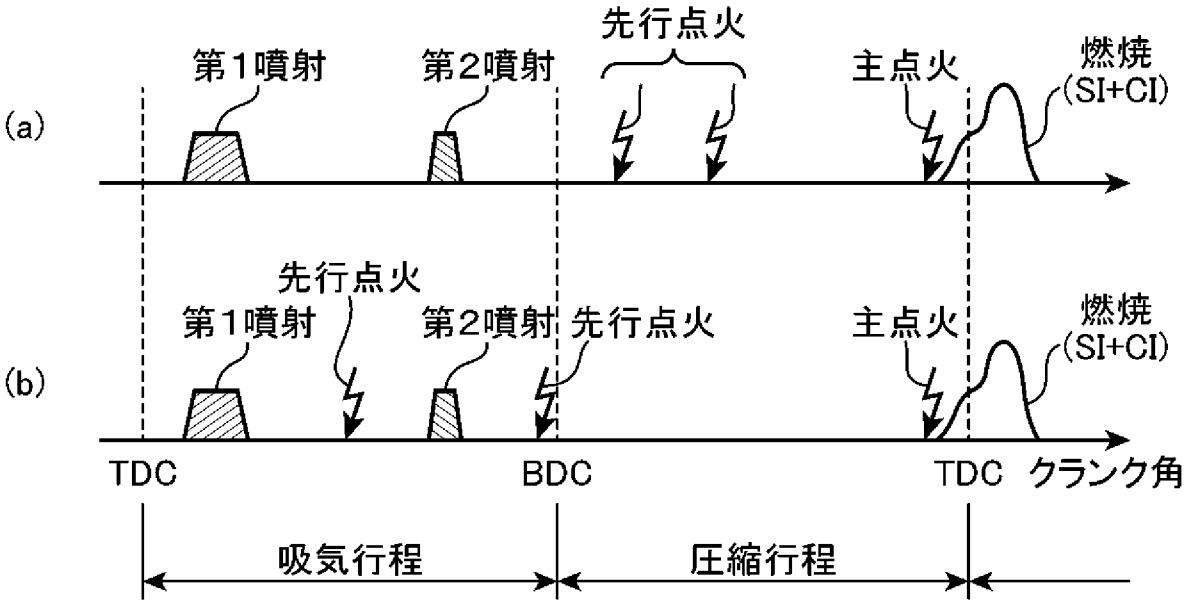
[図18]


TDC クランク角
TDC
BDC
熱発生率
通電信号
2次
放電電流
(a)
(b)
(c)
第1噴射
第2噴射
先行点火
主点火
W1
W2
Y1
Y2
X'

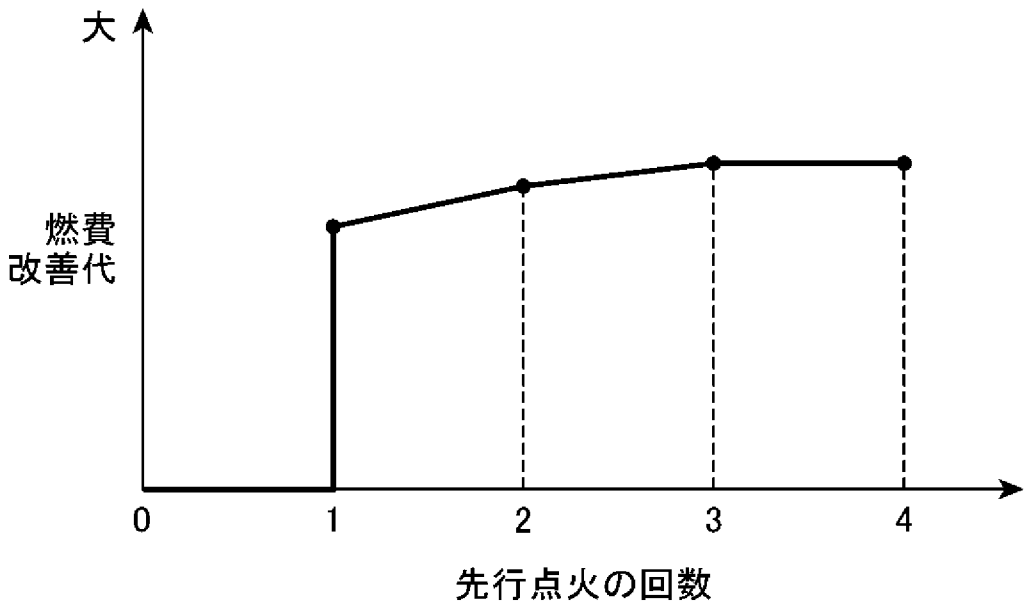
[図19]


大
中間生成物の
生成量
α
700
850
1140
温度 [k]

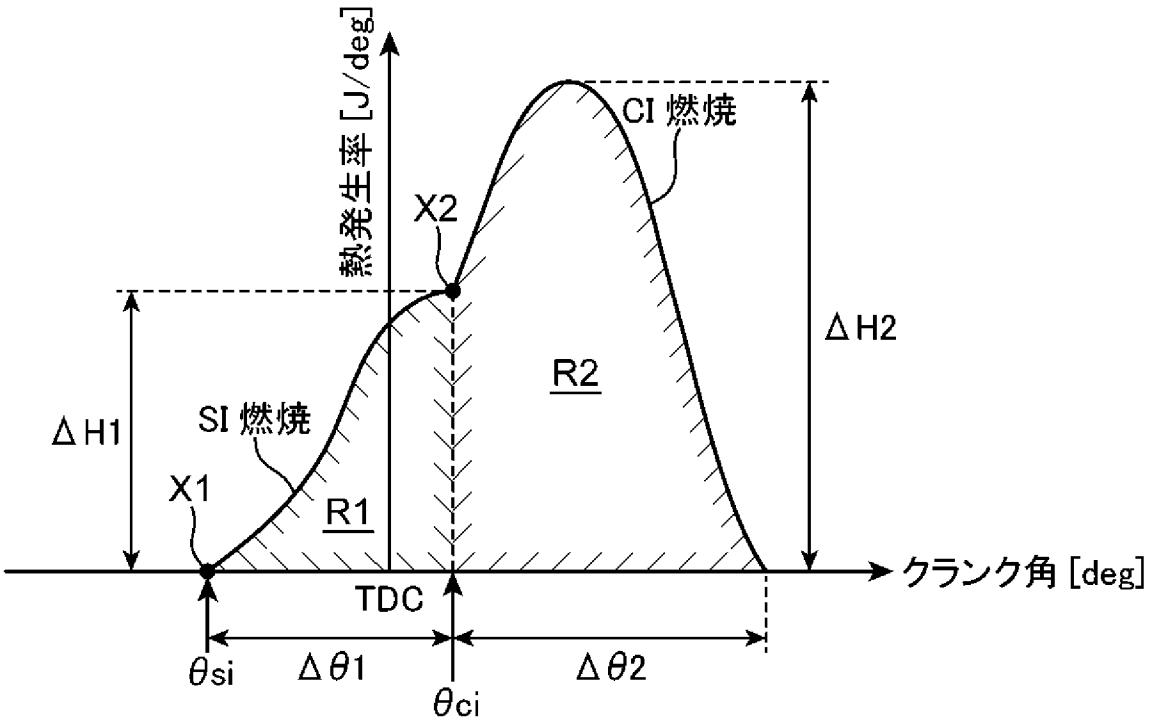
[図20]


先行点火
第1噴射
第2噴射
主点火
燃焼
(SI+CI)
(a)
先行点火
第1噴射
第2噴射
先行点火
主点火
燃焼
(SI+CI)
(b)
TDC
BDC
TDC
クランク角
吸気行程
圧縮行程

[図21]


大
燃費
改善代
0
1
2
3
4
先行点火の回数

[図22]


熱発生率 [J/deg]
CI 燃焼
X2
ΔH2
R2
ΔH1
SI 燃焼
X1
R1
クランク角 [deg]
TDC
θsi
Δθ1
θci
Δθ2

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP2019/016876

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
Int.Cl. F02D45/00(2006.01)i, F02B23/08(2006.01)i, F02B23/10(2006.01)i, F02B31/08(2006.01)i, F02D41/02(2006.01)i, F02D41/40(2006.01)i, F02P9/00(2006.01)i, F02P15/10(2006.01)i
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
Int.Cl. F02D41/00-45/00, F02P1/00-3/12, F02P5/145-5/155, F02P7/00-17/12, F02B1/00-23/10, F02B31/00-31/08

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Published examined utility model applications of Japan	1922-1996
Published unexamined utility model applications of Japan	1971-2019
Registered utility model specifications of Japan	1996-2019
Published registered utility model applications of Japan	1994-2019

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X A	JP 2011-241756 A (HONDA MOTOR CO., LTD.) 01 December 2011, paragraphs [0015]-[0059], fig. 1, 4-7, 9-11 (Family: none)	1, 6-12 2-5
A	JP 2003-3897 A (NISSAN MOTOR CO., LTD.) 08 January 2003, paragraphs [0021]-[0032], fig. 1, 3-5 (Family: none)	1-12

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed
"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search 03.06.2019	Date of mailing of the international search report 11.06.2019
Name and mailing address of the ISA/ Japan Patent Office 3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8915, Japan	Authorized officer Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP2019/016876

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 2010/0037858 A1 (GM GLOBAL TECHNOLOGY OPERATIONS, INC.) 18 February 2010, paragraphs [0017]-[0036], fig. 1-3 & US 2009/0205612 A1 & WO 2009/102744 A1 & DE 102010035481 A1 & DE 112009000320 B4 & CN 102003323 A & CN 101946074 A	1-12
A	JP 2006-2637 A (DENSO CORPORATION) 05 January 2006, paragraphs [0018]-[0047], fig. 1-3 (Family: none)	1-12

国際調査報告

国際出願番号　ＰＣＴ／ＪＰ２０１９／０１６８７６

Ａ．　発明の属する分野の分類（国際特許分類（ＩＰＣ））

Int.Cl.　F02D45/00(2006.01)i, F02B23/08(2006.01)i, F02B23/10(2006.01)i, F02B31/08(2006.01)i, F02D41/02(2006.01)i, F02D41/40(2006.01)i, F02P9/00(2006.01)i, F02P15/10(2006.01)i

Ｂ．　調査を行った分野

調査を行った最小限資料（国際特許分類（ＩＰＣ））

Int.Cl.　F02D41/00-45/00, F02P 1/00- 3/12, F02P 5/145-5/155, F02P 7/00-17/12, F02B 1/00-23/10, F02B31/00-31/08

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	１９２２－１９９６年
日本国公開実用新案公報	１９７１－２０１９年
日本国実用新案登録公報	１９９６－２０１９年
日本国登録実用新案公報	１９９４－２０１９年

国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）

Ｃ．　関連すると認められる文献

引用文献のカテゴリー＊	引用文献名　及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する請求項の番号
X A	JP 2011-241756 A (本田技研工業株式会社) 2011.12.01, 段落[0015]-[0059], 図 1,4-7,9-11 (ファミリーなし)	1,6-12 2-5
A	JP 2003-3897 A (日産自動車株式会社) 2003.01.08, 段落[0021]-[0032], 図 1,3-5 (ファミリーなし)	1-12

☑　Ｃ欄の続きにも文献が列挙されている。　　☐　パテントファミリーに関する別紙を参照。

＊　引用文献のカテゴリー
「Ａ」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
「Ｅ」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
「Ｌ」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）
「Ｏ」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
「Ｐ」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願の日の後に公表された文献
「Ｔ」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
「Ｘ」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
「Ｙ」特に関連のある文献であって、当該文献と他の１以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
「＆」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日	国際調査報告の発送日
０３．０６．２０１９	１１．０６．２０１９

国際調査機関の名称及びあて先
日本国特許庁（ＩＳＡ／ＪＰ）
郵便番号１００－８９１５
東京都千代田区霞が関三丁目４番３号

特許庁審査官（権限のある職員）　３Ｚ　１１７７
平井　功
電話番号　０３－３５８１－１１０１　内線　３３９５

C（続き）．　関連すると認められる文献

引用文献のカテゴリー＊	引用文献名　及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する請求項の番号
A	US 2010/0037858 A1 (GM GLOBAL TECHNOLOGY OPERATIONS, INC.) 2010.02.18, 段落[0017]-[0036], 図 1-3 & US 2009/0205612 A1 & WO 2009/102744 A1 & DE 102010035481 A1 & DE 112009000320 B4 & CN 102003323 A & CN 101946074 A	1-12
A	JP 2006-2637 A (株式会社デンソー) 2006.01.05, 段落[0018]-[0047], 図 1-3 (ファミリーなし)	1-12