

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号

特許第7180304号
(P7180304)

(45)発行日 令和4年11月30日(2022.11.30)

(24)登録日 令和4年11月21日(2022.11.21)

(51)国際特許分類

F I

F 0 2 B 23/10 (2006.01)

F 0 2 B 23/10 G

F 0 2 B 1/12 (2006.01)

F 0 2 B 1/12

F 0 2 B 11/00 (2006.01)

F 0 2 B 11/00 A

F 0 2 F 3/26 (2006.01)

F 0 2 B 11/00 B

F 1 6 J 1/09 (2006.01)

F 0 2 B 23/10 3 2 0

請求項の数 4 (全29頁) 最終頁に続く

(21)出願番号 特願2018-215642(P2018-215642)

(22)出願日 平成30年11月16日(2018.11.16)

(65)公開番号 特開2020-84797(P2020-84797A)

(43)公開日 令和2年6月4日(2020.6.4)

審査請求日 令和3年7月20日(2021.7.20)

(73)特許権者 000003137

マツダ株式会社

広島県安芸郡府中町新地3番1号

(74)代理人 100115381

弁理士 小谷 昌崇

(74)代理人 100127797

弁理士 平田 晴洋

(72)発明者 今村 悟志

広島県安芸郡府中町新地3番1号 マツ

ダ株式会社内

(72)発明者 福馬 真生

広島県安芸郡府中町新地3番1号 マツ

ダ株式会社内

(72)発明者 中原 康志

広島県安芸郡府中町新地3番1号 マツ

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 エンジンの燃焼室構造

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

吸気ポート及び排気ポートの開口を有し、ピストンの冠面と、前記ピストンが摺動可能に収容される気筒の内壁面と、ペントルーフ型の天井面とによって区画される燃焼室を有し、混合気の一部を火花点火によりS I燃焼させると共にその他の混合気を自着火によりC I燃焼させる部分圧縮着火燃焼を行うエンジンの燃焼室構造であって、

前記冠面には、

椀状に凹設されてなるキャビティと、

前記キャビティと前記ピストンの外縁部との間の外周領域において気筒軸方向に突設され、前記天井面のペントルーフ形状に沿った山型形状を有する一対の第1隆起部と、

前記外周領域の、前記吸気ポートと対向する側であって前記一対の第1隆起部の間の位置に突設され、前記第1隆起部の稜線延在方向と立ち上がり方向が直交する第2隆起部と、を備え、

前記キャビティの最深部の高さ位置に対する前記第1隆起部の高さをH1、前記第2隆起部の高さをH2とすると、前記第1隆起部の高さH1と前記第2隆起部の高さH2との比であるH1/H2が、1.79以上3.29以下の範囲に設定されていることを特徴とするエンジンの燃焼室構造。

【請求項2】

吸気ポート及び排気ポートの開口を有し、ピストンの冠面と、前記ピストンが摺動可能に収容される気筒の内壁面と、ペントルーフ型の天井面とによって区画される燃焼室を有し

10

20

、混合気を火花点火により燃焼させるS I 燃焼と、混合気の一部を火花点火によりS I 燃焼させると共にその他の混合気を自着火によりC I 燃焼させる部分圧縮着火燃焼とを併用して行うエンジンの燃焼室構造であって、

前記冠面には、

椀状に凹設されてなるキャビティと、

前記キャビティと前記ピストンの外縁部との間の外周領域において気筒軸方向に突設され、前記天井面のペントルーフ形状に沿った山型形状を有する一対の第1隆起部と、

前記外周領域の、前記吸気ポートと対向する側であって前記一対の第1隆起部の間の位置に突設され、前記第1隆起部の稜線延在方向と立ち上がり方向が直交する第2隆起部と、を備え、

10

前記キャビティの最深部の高さ位置に対する前記第1隆起部の高さをH1、前記第2隆起部の高さをH2とすると、前記第1隆起部の高さH1と前記第2隆起部の高さH2との比である $H1/H2$ が、1.92以上2.75以下の範囲に設定されていることを特徴とするエンジンの燃焼室構造。

【請求項3】

請求項1又は2に記載のエンジンの燃焼室構造において、

前記気筒の幾何学的圧縮比が1.5以上の高圧縮比に設定されている、エンジンの燃焼室構造。

【請求項4】

請求項1～3のいずれか1項に記載のエンジンの燃焼室構造において、

前記キャビティは、前記冠面の上面視において、前記稜線延在方向に幅広の楕円形状を備える、エンジンの燃焼室構造。

20

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、混合気の一部を火花点火によりS I 燃焼させるとともにその他の混合気を自着火によりC I 燃焼させる部分圧縮着火燃焼が可能なエンジンの燃焼室構造に関する。

【背景技術】

【0002】

ガソリンエンジンの燃焼態様として、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(S I 燃焼)させ、その他の混合気を自着火により燃焼(C I 燃焼)させることを企図した部分圧縮着火燃焼(S P C C I 燃焼)が知られている。また、火花点火式エンジンの燃焼室構造として、例えば特許文献1には、燃焼室天井面をペントルーフ形状とし、燃焼室底面となるピストン冠面にキャビティを設ける構造が開示されている。当該燃焼室構造は、燃料噴射弁に向けて斜め上方に流れるタンブル流を形成することが可能である。

30

【先行技術文献】

【特許文献】

【0003】

【文献】特開2016-223411号公報

40

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

S P C C I 燃焼では、燃焼性の向上のため、スワール流が可及的に圧縮行程後期まで維持されることが望ましい。しかし、S P C C I 燃焼に好適な高圧縮比エンジンにおいて、スワール流を圧縮行程後期まで維持させることは容易ではない。また、実際のエンジンでは、エンジン回転数や負荷に応じて、例えば一般的なS I 燃焼と、S P C C I 燃焼とが併用される。S I 燃焼では、タンブル流が可及的に圧縮行程後期まで維持されることが望ましい。しかし、従来の燃焼室構造では、タンブル流とスワール流との双方を圧縮行程後期まで十分に維持できないという問題があった。

50

【 0 0 0 5 】

本発明の目的は、S P C C I 燃焼を行うエンジンにおいて、スワール流を圧縮行程後期まで維持できるエンジンの燃焼室構造を提供すること、並びに、S I 燃焼とS P C C I 燃焼とを併用するエンジンにおいて、タンブル流及びスワール流の双方を圧縮行程後期まで維持することができるエンジンの燃焼室構造を提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【 0 0 0 6 】

本発明の一局面に係るエンジンの燃焼室構造は、吸気ポート及び排気ポートの開口を有し、ピストンの冠面と、前記ピストンが摺動可能に収容される気筒の内壁面と、ペントルーフ型の天井面とによって区画される燃焼室を有し、混合気の一部を火花点火によりS I 燃焼させると共にその他の混合気を自着火によりC I 燃焼させる部分圧縮着火燃焼を行うエンジンの燃焼室構造であって、前記冠面には、椀状に凹設されてなるキャビティと、前記キャビティと前記ピストンの外縁部との間の外周領域において気筒軸方向に突設され、前記天井面のペントルーフ形状に沿った山型形状を有する一対の第1隆起部と、前記外周領域の、前記吸気ポートと対向する側であって前記一対の第1隆起部の間の位置に突設され、前記第1隆起部の稜線延在方向と立ち上がり方向が直交する第2隆起部と、を備え、前記キャビティの最深部の高さ位置に対する前記第1隆起部の高さをH1、前記第2隆起部の高さをH2とすると、前記第1隆起部の高さH1と前記第2隆起部の高さH2との比であるH1/H2が、1.79以上3.29以下の範囲に設定されていることを特徴とする。

【 0 0 0 7 】

この燃焼室構造によれば、ペントルーフ形状に沿った山型形状を有する前記第1隆起部が、これと直交する方位に位置する前記第2隆起部よりも、所定の範囲($H1/H2 = 1.79$ 以上 3.29 以下)で高く設定される。すなわち、前記第1隆起部と前記第2隆起部との高さ比が大きくなりすぎないようにH1/H2が設定されているので、スワール流を前記第2隆起部の領域でもガイドさせることができ、スワール流をキャビティ内において維持させ易くなる。従って、部分圧縮着火燃焼(S P C C I 燃焼)を行わせる場合において、燃焼室の容積が狭くなる圧縮行程後期までスワール流を維持させることができる。なお、H1/H2が1.79未満になると、前記第1隆起部が相対的に低くなって当該第1隆起部によるスワール流のガイド効果が低減する傾向が顕著となる。また、H1/H2が3.29より大きいと、スワール流が前記第1隆起部に対して相対的に低すぎる前記第2隆起部の領域で旋回できないようになり、当該スワール流を維持できない傾向が顕著となる。

【 0 0 0 8 】

本発明の他の局面に係るエンジンの燃焼室構造は、吸気ポート及び排気ポートの開口を有し、ピストンの冠面と、前記ピストンが摺動可能に収容される気筒の内壁面と、ペントルーフ型の天井面とによって区画される燃焼室を有し、混合気を火花点火により燃焼させるS I 燃焼と、混合気の一部を火花点火によりS I 燃焼させると共にその他の混合気を自着火によりC I 燃焼させる部分圧縮着火燃焼とを併用して行うエンジンの燃焼室構造であって、前記冠面には、椀状に凹設されてなるキャビティと、前記キャビティと前記ピストンの外縁部との間の外周領域において気筒軸方向に突設され、前記天井面のペントルーフ形状に沿った山型形状を有する一対の第1隆起部と、前記外周領域の、前記吸気ポートと対向する側であって前記一対の第1隆起部の間の位置に突設され、前記第1隆起部の稜線延在方向と立ち上がり方向が直交する第2隆起部と、を備え、前記キャビティの最深部の高さ位置に対する前記第1隆起部の高さをH1、前記第2隆起部の高さをH2とすると、前記第1隆起部の高さH1と前記第2隆起部の高さH2との比であるH1/H2が、1.92以上2.75以下の範囲に設定されていることを特徴とする。

【 0 0 0 9 】

この燃焼室構造によれば、H1/H2を上記の範囲に設定することで、S I 燃焼とS P C C I 燃焼とを併用するエンジンにおいて、タンブル流及びスワール流の双方の維持効果

10

20

30

40

50

を高めることができる。すなわち、ペントルフ型の天井面を備える燃焼室では、吸気は前記稜線延在方向と直交する方向に流入し、タンブル流を形成する。従ってタンブル流は、前記キャビティの側部に位置し前記第2隆起部よりも高い前記第1隆起部によってガイドされる。このため、タンブル流が前記キャビティに集まり易くなり、タンブル流を圧縮行程後期まで維持することができる。一方、前記第1隆起部と前記第2隆起部との高さ比が大きくなりすぎないように $H1/H2$ が設定されているので、スワール流を前記第2隆起部の領域でガイドさせることができ、スワール流をキャビティ内において維持させ易くなる。従って、燃焼室の容積が狭くなる圧縮行程後期までスワール流を維持することができる。なお、 $H1/H2$ が1.92未満になると、前記第1隆起部の高さが不足することに起因して、当該第1隆起部によるタンブル流のガイド効果が低減する傾向が顕著となる。また、 $H1/H2$ が2.75より大きいと、タンブル流が前記第1隆起部に対して相対的に低すぎる前記第2隆起部の領域でガイドされ難くなり、当該タンブル流を維持できない傾向が顕著となる。

10

【0010】

上記の燃焼室構造において、前記気筒の幾何学的圧縮比が15以上の高圧縮比に設定されていることが望ましい。

【0011】

この燃焼室構造によれば、燃料の一部を圧縮着火させるSPCCI燃焼を行わせるのに好適な燃焼室とすることができる。

【0012】

上記の燃焼室構造において、前記キャビティは、前記冠面の上面視において、前記稜線延在方向に幅広の楕円形状を備えることが望ましい。

20

【0013】

この燃焼室構造によれば、タンブル流の流動方向においてキャビティが幅広となる形状を有しているので、前記第1隆起部にてタンブル流をよりガイドさせ易くすることができる。

【発明の効果】

【0014】

本発明によれば、SPCCI燃焼を行うエンジンにおいて、スワール流を圧縮行程後期まで維持できるエンジンの燃焼室構造を提供すること、並びに、SI燃焼とSPCCI燃焼とを併用するエンジンにおいて、タンブル流及びスワール流の双方を圧縮行程後期まで維持することができるエンジンの燃焼室構造を提供することができる。

30

【図面の簡単な説明】

【0015】

【図1】図1は、本発明に係る燃焼室構造が適用された部分圧縮着火式エンジンの全体構成を示すシステム図である。

【図2】図2は、前記エンジンが備える1つの気筒の模式的な斜視図である。

【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分けした運転マップである。

40

【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、ピストンの斜視図である。

【図9】図9は、ピストンの冠面の平面図である。

【図10】図10は、図9のX-X線断面図である。

【図11】図11は、図9のXI-XI線断面図である。

【図12】図12は、キャビティに関連する各種パラメータを付記した、ピストンの斜視

50

図である。

【図 1 3】図 1 3 (A) ~ (D) は、吸気行程におけるタンブル流の流動を模式的に示す図である。

【図 1 4】図 1 4 (A) ~ (D) は、圧縮行程におけるタンブル流の流動を模式的に示す図である。

【図 1 5】図 1 5 (A) は、図 1 4 (D) の状態に相当する、燃焼室の模式的な断面図、図 1 5 (B) は、圧縮 T D C における燃焼室の模式的な断面図である。

【図 1 6】図 1 6 (A) ~ (D) は、吸気行程におけるスワール流の流動を模式的に示す図である。

【図 1 7】図 1 7 (A) ~ (D) は、圧縮行程におけるスワール流の流動を模式的に示す図である。

10

【図 1 8】図 1 8 (A) は、図 1 7 (D) の状態に相当する、燃焼室内におけるスワール流の発生状態を示す模式図、図 1 8 (B) は、圧縮 T D C での燃焼室内におけるスワール流の発生状態を示す模式図である。

【図 1 9】図 1 9 は、本実施形態を採用した場合における、タンブル流及びスワール流の維持効果を示すグラフである。

【図 2 0】図 2 0 (A) は、H 1 / H 2 を適正範囲に設定した場合におけるタンブル流を示す模式図、図 2 0 (B) は、H 1 / H 2 が適正範囲を下回る場合におけるタンブル流を示す模式図である。

【図 2 1】図 2 1 (A) は、H 1 / H 2 を適正範囲に設定した場合におけるスワール流を示す模式図、図 2 1 (B) は、H 1 / H 2 が適正範囲を上回る場合におけるスワール流を示す模式図である。

20

【発明を実施するための形態】

【 0 0 1 6 】

[エンジンの全体構成]

以下、図面に基づいて、本発明の実施形態について詳細に説明する。先ず、図 1 に示すシステム図を参照して、本発明に係る燃焼室構造が適用された部分圧縮着火式エンジン（以下、単にエンジンという）の全体構成を説明する。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 3 0 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 4 0 と、排気通路 4 0 を流通する排気ガスの一部を吸気通路 3 0 に還流する外部 E G R 装置 4 5 と、エンジン本体 1 にガソリンを主成分とする燃料を供給するフューエルシステム 1 5 0 と、を備えている。

30

【 0 0 1 7 】

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 内に收容されたピストン 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、図 1 では簡略化のため、1 つの気筒 2 のみを図示している。図 2 には、1 つの気筒 2 を模式的な斜視図にて示している。ピストン 5 は、気筒 2 のボア径 B に応じた外径を有し、所定のストローク S で往復摺動可能に気筒 2 内に收容されている。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 の往復運動に応じて中心軸回りに回転駆動される。

40

【 0 0 1 8 】

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、後述するインジェクタ 1 5 からの噴射によって前記燃料が供給される。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。燃焼室 6 を区画する燃焼室壁面は、気筒 2 の内壁面、ピストン 5 の上面である冠面 5 0、及び、シリンダヘッド 4 の底面である燃焼室天井面 6 U（吸気弁 1 1 及び排気弁 1 2 の各バルブ面を含む）からなる。燃焼室天井面 6 U は、上向きに凸のペントルーフ

50

型の形状を有している。

【 0 0 1 9 】

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 6 の容積との比は、後述する S P C C I 燃焼（部分圧縮着火燃焼）に好適な値として、15 以上 30 以下、好ましくは 15 以上 18 以下の高圧縮比に設定される。幾何学的圧縮比を 15 以上の高圧縮比に設定することで、燃焼室 6 内において混合気に圧縮着火が発生し易い環境とすることができる。

【 0 0 2 0 】

シリンダブロック 3 には、クランク角センサ S N 1 及び水温センサ S N 2 が組み付けられている。クランク角センサ S N 1 は、クランク軸 7 の回転角度（クランク角）及びクランク軸 7 の回転速度（エンジン回転速度）を検出する。水温センサ S N 2 は、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。

10

【 0 0 2 1 】

シリンダヘッド 4 の燃焼室天井面 6 U には、燃焼室 6 に向けて開口する吸気ポート 9 及び排気ポート 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。本実施形態のエンジンのバルブ形式は、図 2 及び図 3 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 及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 9 A 及び第 2 吸気ポート 9 B を有し、排気ポート 10 は、第 1 排気ポート 10 A 及び第 2 排気ポート 10 B を有している。吸気弁 11 は、第 1 吸気ポート 9 A 及び第 2 吸気ポート 9 B 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 10 A 及び第 2 排気ポート 10 B に対しそれぞれ 1 つずつ設けられている。

20

【 0 0 2 2 】

図 3 に示すように、第 1、第 2 吸気ポート 9 A、9 B のうち、第 2 吸気ポート 9 B には、当該第 2 吸気ポート 9 B を開閉可能なスワール弁 17 が設けられている。スワール弁 17 が閉方向に駆動されると、スワール弁 17 が設けられていない第 1 吸気ポート 9 A 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 A X（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 17 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、本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 17 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。

30

【 0 0 2 3 】

吸気弁 11 及び排気弁 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 V V T 13 a が、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 V V T 14 a が、各々内蔵されている。吸気、排気 V V T 13 a、14 a 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。

40

【 0 0 2 4 】

シリンダヘッド 4 には、インジェクタ 15 及び点火プラグ 16 が組み付けられている。インジェクタ 15 は、フューエルシステム 150 から供給される燃料を燃焼室 6 に噴射する。点火プラグ 16 は、インジェクタ 15 から燃焼室 6 に噴射された燃料と、吸気ポート 9（9 A、9 B）を通して燃焼室 6 に導入された空気とが混合された混合気に点火する。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 S N 3 が設けられている。図 2 に示されているように、インジェクタ 15 は、燃焼室天井面 6 U の径方向中央部であって、ペントルーフの頂部付近に先端部（噴孔）が表出するように配置されている。また、点火プラグ 16 は、燃焼室天井面 6 U におけるペントルーフの斜面部であって、一対の吸気ポート 9 A、9 B 間において先端部（電極部）が表出するよ

50

うに配置されている。

【 0 0 2 5 】

インジェクタ 1 5 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 G 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。後記で詳述するが、ピストン 5 の冠面 5 0 には、その径方向中央領域をシリンダヘッド 4 とは反対側（下方）に凹没させてなるキャビティ 5 1 が形成されている。インジェクタ 1 5 の先端部はキャビティ 5 1 と対向しており、このキャビティ 5 1 に向けて前記噴孔から燃料が噴射される。

【 0 0 2 6 】

インジェクタ 1 5 に燃料を供給するフューエルシステム 1 5 0 は、フューエルタンク 1 5 1、フューエルポンプ 1 5 2、フューエルレール 1 5 3 及びパージ通路 1 5 4 を含む。フューエルタンク 1 5 1 は燃料を貯留するタンクである。フューエルポンプ 1 5 2 は、インタンク式のポンプであり、燃料をフューエルタンク 1 5 1 からフューエルレール 1 5 3 へ送り出す。フューエルレール 1 5 3 は、各気筒 2 に備えられているインジェクタ 1 5 に燃料を分配する。パージ通路 1 5 4 は、フューエルタンク 1 5 1 内で気化した燃料を回収し、吸気通路 3 0 に導入して燃焼させるための通路である。

【 0 0 2 7 】

吸気通路 3 0 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 3 0 の上流端から取り込まれた空気（新気）は、吸気通路 3 0 及び吸気ポート 9 を通じて燃焼室 6 に導入される。吸気通路 3 0 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 3 1 と、吸気の流量を調整する開閉可能なスロットル弁 3 2 と、吸気を圧縮しつつ送り出す過給機 3 3 と、過給機 3 3 により圧縮された吸気を冷却するインタークーラ 3 5 とが設けられている。

【 0 0 2 8 】

吸気通路 3 0 の適所には、吸気の流量を検出するエアフローセンサ S N 4 と、吸気の温度を検出する第 1 ・第 2 吸気温度センサ S N 5、S N 7 と、吸気の圧力を検出する第 1 ・第 2 吸気圧センサ S N 6、S N 8 とが設けられている。エアフローセンサ S N 4 及び第 1 吸気温度センサ S N 5 は、吸気通路 3 0 におけるエアクリーナ 3 1 とスロットル弁 3 2 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 S N 6 は、吸気通路 3 0 におけるスロットル弁 3 2 と過給機 3 3 との間であって、後述する E G R 通路 4 5 1 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 吸気温度センサ S N 7 は、吸気通路 3 0 における過給機 3 3 とインタークーラ 3 5 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 S N 8 は、吸気通路 3 0 におけるインタークーラ 3 5 と吸気ポート 9 との間の吸気の圧力を検出する。

【 0 0 2 9 】

過給機 3 3 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 3 3 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 3 3 として用いることができる。過給機 3 3 には、締結と解放を電氣的に切り替えることが可能な電磁クラッチ 3 4 が付設されている。電磁クラッチ 3 4 が締結されると、エンジン本体 1 から過給機 3 3 に駆動力が伝達されて、過給機 3 3 による過給が行われる。一方、電磁クラッチ 3 4 が解放されると、上記駆動力の伝達が遮断されて、過給機 3 3 による過給が停止される。

【 0 0 3 0 】

吸気通路 3 0 には、過給機 3 3 をバイパスして吸気を流通させるためのバイパス通路 3 6 が付設されている。バイパス通路 3 6 には、当該バイパス通路 3 6 を開閉可能なバイパス弁 3 7 が設けられている。バイパス通路 3 6 は、過給機 3 3 よりも上流側で吸気通路 3 0 から分岐し、インタークーラ 3 5 の下流側において吸気通路 3 0 に合流する合流部 3 8 を形成している。この合流部 3 8 は、図略のサージタンクの近傍に配置される。なお、バイパス通路 3 6 は、後述する E G R 通路 4 5 1 と前記サージタンクとを接続する通路でも

10

20

30

40

50

ある。

【 0 0 3 1 】

排気通路 4 0 は、各気筒 2 の排気ポート 1 0 と排気マニホールド 4 1 を介して連通している。各燃焼室 6 で生成された既燃ガスは、排気ポート 1 0、排気マニホールド 4 1 及び排気通路 4 0 を通じて外部に排出される。排気通路 4 0 には、排気ガスの流通方向における上流側、下流側に、各々上流触媒コンバータ 4 2、下流触媒コンバータ 4 3 が設けられている。上流触媒コンバータ 4 2 には、三元触媒 4 2 1 及び G P F (ガソリン・パティキュレート・フィルタ) 4 2 2 が備えられている。三元触媒 4 2 1 は、排気通路 4 0 を流通する排気ガス中に含まれる有害成分 (H C、C O、N O x) を捕集する。G P F 4 2 2 は、排気ガス中に含まれる煤に代表される粒子状物質を捕集する。下流触媒コンバータ 4 3 は、三元触媒や N O x 触媒等の適宜の触媒を内蔵した触媒コンバータである。

10

【 0 0 3 2 】

排気通路 4 0 における上流触媒コンバータ 4 2 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 O₂ センサ S N 9 が配置されている。リニア O₂ センサ S N 9 は、酸素濃度の濃淡に応じて出力値がリニアに変化するセンサであり、そ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。また、三元触媒 4 2 1 と G P F 4 2 2 との間には、排気中の N O x 濃度を計測する N O x センサ S N 9 が配置されている。

【 0 0 3 3 】

外部 E G R 装置 4 5 は、排気通路 4 0 と吸気通路 3 0 とを接続する E G R 通路 4 5 1 と、E G R 通路 4 5 1 に設けられた E G R クーラ 4 5 2 及び E G R 弁 4 5 3 とを有している。E G R 通路 4 5 1 は、排気通路 4 0 における上流触媒コンバータ 4 2 よりも下流側の部位と、吸気通路 3 0 におけるスロットル弁 3 2 と過給機 3 3 との間の部位とを互いに接続している。E G R クーラ 4 5 2 は、E G R 通路 4 5 1 を通して排気通路 4 0 から吸気通路 3 0 に還流される排気ガス (外部 E G R ガス) を、熱交換により冷却する。E G R 弁 4 5 3 は、E G R クーラ 4 5 2 よりも下流側の E G R 通路 4 5 1 に配置され、当該 E G R 通路 4 5 1 を流通する排気ガスの流量を調整する。

20

【 0 0 3 4 】

[制御系統]

続いて、上述したエンジンの制御系統について説明する。図 4 は、エンジンの制御系統を示すブロック図である。制御系統は E C U 2 0 を備える。E C U 2 0 は、エンジンを統括的に制御するためのマイクロプロセッサであり、周知の C P U、R O M、R A M 等から構成されている。

30

【 0 0 3 5 】

E C U 2 0 には各種センサによる検出信号が入力される。E C U 2 0 は、上述したクランク角センサ S N 1、水温センサ S N 2、筒内圧センサ S N 3、エアフローセンサ S N 4、第 1・第 2 吸気温センサ S N 5、S N 7、第 1・第 2 吸気圧センサ S N 6、S N 8、リニア O₂ センサ S N 9 及び N O x センサ S N 1 0 と電氣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、排気ガスの酸素濃度、N O x 濃度等) は、E C U 2 0 に逐次入力される。また、車両には、図略のアクセルペダルの開度を検出するアクセルセンサ S N 1 1 が設けられている。このアクセルセンサ S N 1 1 による検出信号も、E C U 2 0 に入力される。

40

【 0 0 3 6 】

E C U 2 0 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、E C U 2 0 は、吸気 V V T 1 3 a、排気 V V T 1 4 a、インジェクタ 1 5、点火プラグ 1 6、スワール弁 1 7、スロットル弁 3 2、電磁クラッチ 3 4、バイパス弁 3 7、および E G R 弁 4 5 3 等と電氣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。

【 0 0 3 7 】

50

E C U 2 0 は、所定のプログラムが実行されることによって、演算部 2 1、噴射制御部 2 2、点火制御部 2 3、スワール制御部 2 4、吸気制御部 2 5、E G R 制御部 2 6 及び全体制御部 2 7 を機能的に具備するように動作する。

【 0 0 3 8 】

噴射制御部 2 2 は、インジェクタ 1 5 による燃料の噴射動作を制御する制御モジュールである。点火制御部 2 3 は、点火プラグ 1 6 による点火動作を制御する制御モジュールである。スワール制御部 2 4 は、スワール弁 1 7 の開度を制御する制御モジュールである。吸気制御部 2 5 は、燃焼室 6 に導入される吸気の流量や圧力を調整する制御モジュールであり、スロットル弁 3 2 及びバイパス弁 3 7 の各開度や電磁クラッチ 3 4 の O N / O F F を制御する。E G R 制御部 2 6 は、燃焼室 6 に導入される E G R ガスの量を調整する制御モジュールであり、吸気 V V T 1 3 a および排気 V V T 1 4 a の各動作や E G R 弁 4 5 3 の開度を制御する。

10

【 0 0 3 9 】

演算部 2 1 は、上記の各制御部 2 2 ~ 2 6 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。全体制御部 2 7 は、エンジンの運転シーン等に応じて演算部 2 1 及び各制御部 2 2 ~ 2 6 を統括的に制御し、必要な演算及び制御を実行させる。

【 0 0 4 0 】

[運転状態に応じた制御]

図 5 は、本実施形態の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。

20

【 0 0 4 1 】

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 A 1 ~ A 3 に大別される。これら運転領域 A 1 ~ A 3 を、それぞれ第 1 運転領域 A 1、第 2 運転領域 A 2、第 3 運転領域 A 3 と呼ぶ。第 3 運転領域 A 3 は、回転速度が高い高速領域である。第 1 運転領域 A 1 は、第 3 運転領域 A 3 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 A 2 は、第 1、第 3 運転領域 A 1、A 3 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。

30

【 0 0 4 2 】

< 第 1 運転領域 >

低・中速 / 低負荷の第 1 運転領域 A 1 では、S I 燃焼と C I 燃焼とを組み合わせた部分圧縮着火燃焼 (以下、これを S P C C I 燃焼という) が実行される。S I 燃焼とは、点火プラグ 1 6 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。C I 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 S I 燃焼と C I 燃焼とを組み合わせた S P C C I 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 S I 燃焼させ、この S I 燃焼の後に (当該 S I 燃焼に伴うさらなる高温・高圧化によって)、燃焼室 6 内の他の混合気を自着火により C I 燃焼させる燃焼形態である。なお、「S P C C I」は「Spark Controlled Compression Ignition」の略である。

40

【 0 0 4 3 】

S P C C I 燃焼は、S I 燃焼時の熱発生よりも C I 燃焼時の熱発生の方が急峻になるという性質がある。図 7 は、S P C C I 燃焼時の熱発生率の波形を示すグラフである。当該波形における点 X 1 は、S I 燃焼の開始に伴って熱発生率が立ち上がる熱発生点 (クランク角 $\theta_{s i}$) である。熱発生点以降、S I 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 C I 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っている。すなわち、S P C C I 燃焼時の熱発生率の波形は、S I 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 R 1 と、C I 燃焼に基づく相対的に立ち上がりの傾きが大きい第

50

2 熱発生部 R 2 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、S P C C I 燃焼では、S I 燃焼時に生じる燃焼室 6 内の圧力上昇率 ($dp/d\theta$) が C I 燃焼時のそれよりも小さくなる。

【0044】

S I 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、C I 燃焼が開始される。この C I 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、S P C C I 燃焼における熱発生率の波形は、C I 燃焼が開始するタイミングで現れる変曲点 (図 7 の点 X 2 = クランク角 θ_{ci}) を有している。

【0045】

C I 燃焼の開始後は、S I 燃焼と C I 燃焼とが並行して行われる。C I 燃焼は、S I 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、C I 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、C I 燃焼時の $dp/d\theta$ が過大になることが回避される。このように、S P C C I 燃焼では、S I 燃焼の後に C I 燃焼が行われるという性質上、燃焼騒音の指標となる $dp/d\theta$ が過大になり難く、単純な C I 燃焼 (全ての燃料を C I 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。

【0046】

C I 燃焼の終了に伴い S P C C I 燃焼も終了する。C I 燃焼は S I 燃焼に比べて燃焼速度が速いので、単純な S I 燃焼 (全ての燃料を S I 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、S P C C I 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、S P C C I 燃焼では、単純な S I 燃焼に比べて燃費性能を向上させることができる。第 1 運転領域 A 1 における S P C C I 燃焼の実行の際、E C U 20 の全体制御部 27 は、各制御部 22 ~ 26 を次のような制御を実行させる。

【0047】

火花点火に関し全体制御部 27 は、点火プラグ 16 から火花を 2 回発生させ、2 回目の火花点火をきっかけにして、混合気を S P C C I 燃焼させる制御を実行する。具体的には、点火プラグ 16 (点火制御部 23) 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 (B T D C 180 ~ 60 ° C A) に実行される。主点火は、S I 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 (B T D C 60 ~ A T D C 60 ° C A) 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。

【0048】

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。第 1 運転領域 A 1 における低負荷側の運転ポイント P 1、P 2 において、点火制御部 23 は点火プラグ 16 を制御して、図 6 のチャート (a)、(b) に各々示すように、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 P 2 における先行点火の時期は、低負荷側の運転ポイント P 1 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 23 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。噴射制御部 22 は、第 2 噴射の時期をエンジン負荷 (運転状態) に応じて変更し、点火制御部 23 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。

【0049】

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

10

20

30

40

50

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 850 K 以上 1140 K 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、S I 燃焼は開始されない。

【0050】

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、S I 燃焼を引き起こす。S I 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 C I 燃焼を引き起こす。すなわち、主点火をきっかけに S P C C I 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（S I 燃焼）し、その他の混合気が自着火により燃焼（C I 燃焼）する。

10

【0051】

インジェクタ 15 は、1 サイクル中に噴射すべき燃料を 2 回に分けて、吸気行程中に噴射する。第 1 運転領域 A 1 において噴射制御部 22 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。運転ポイント P 1、P 2 において、インジェクタ 15 は、図 6 のチャート（a）、（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 P 2 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 P 1 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。

20

【0052】

第 2 噴射の時期は、第 1 運転領域 A 1 内で負荷が増大するほど進角される。分割噴射によりインジェクタ 15 から噴射される燃料の総量は、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（噴射量は第 1 噴射 > 第 2 噴射）。例えば、第 1・第 2 噴射の分割比は、第 1 運転領域 A 1 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。

【0053】

30

第 1 運転領域 A 1 での運転時、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 25 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（A / F リーン）。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。

【0054】

全体制御部 27 は、過給機 33 を、図 5 に示される過給ライン T の内側領域（第 1 運転領域 A 1 の低速側）では OFF 状態とし、過給ライン T の外側領域（第 1 運転領域 A 1 の高速側）では ON 状態とする。第 1 運転領域 A 1 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共に、バイパス弁 37 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、第 1 運転領域 A 1 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 S N 8 により検出される過給圧が、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 25 は、バイパス弁 37 の開度を制御する。

40

【0055】

E G R 制御部 26 は E G R 弁 453 を、S P C C I 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 A 1 内の多くの領域において開弁する。すなわち、E G R 通路 45

50

1 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 453 が開弁される。EGR 弁 453 の開度は、所望の SPCCI 燃焼の波形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。

【0056】

スワール制御部 24 は、スワール弁 17 の開度を、半開 (50%) よりも低い低開度に設定する。スワール弁 17 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 (図 3) 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 の径方向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。

10

【0057】

< 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。換言すると、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、ECU 20 の全体制御部 27 によってエンジンの各部が次のように制御される。

【0058】

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。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。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。インジェクタ 15 は、運転ポイント P3 において、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。

20

【0059】

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 ($\lambda = 1$)。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。EGR 弁 453 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。スワール弁 17 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間開度に設定される。

30

【0060】

< 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、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、全体制御部 27 によってエンジンの各部が次のように制御される。

【0061】

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 内の混合気的全てが火炎伝播により燃焼する。

40

【0062】

インジェクタ 15 は、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

50

ント（P 1 ～ P 3）のいずれよりも長いのはこのためである。

【 0 0 6 3 】

過給機 3 3 は ON 状態とされ、過給機 3 3 による過給が行われる。このときの過給圧は、バイパス弁 3 7 によって調整される。スロットル弁 3 2 および E G R 弁 4 5 3 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（ $\lambda > 1$ ）となるように、それぞれの開度が制御される。スワール弁 1 7 は全開とされる。これにより、第 1 吸気ポート 9 A だけでなく第 2 吸気ポート 9 B が完全に開放されて、エンジンの充填効率が高められる。

【 0 0 6 4 】

〔各燃焼態様における望ましい筒内流動〕

本実施形態の燃焼室 6 内では、筒内流動として、少なくともタンブル流とスワール流とが発生する。すなわち、上記で説明した通り、本実施形態の吸気ポート 9（9 A、9 B）は、タンブル流を形成可能なタンブルポートである。また、スワール弁 1 7 の開閉により、スワール流を形成することができる。本実施形態のエンジンは、S I 燃焼と S P C C I 燃焼とが併用されるが、前者の燃焼態様ではタンブル流が肝要となり、後者の燃焼態様ではスワール流が肝要となる。

【 0 0 6 5 】

S I 燃焼では、専ら高回転高負荷領域での燃焼であるため、熱効率を向上させることが求められる。熱効率の向上には、タンブル流を吸気行程から圧縮行程後期（圧縮上死点付近）まで維持させ、維持されたタンブル流を圧縮上死点付近で一気に乱流に変換することが望ましい。タンブル流の可及的な維持により、S I 燃焼の火炎伝播を高速化することができ、熱効率の向上を実現することができる。

【 0 0 6 6 】

一方、S P C C I 燃焼では、前段の S I 燃焼により発生させた点火プラグ 1 6 付近の火炎（火種）を、燃焼室 6 の周縁の領域へ速く運ぶことが求められる。火種の前記周縁領域への運搬に貢献するのは、専らスワール流である。従って、スワール流を吸気行程から圧縮上死点付近で維持させることが望ましい。スワール流による火種の運搬効果により、筒内温度が高められ、後段の C I 燃焼における圧縮着火を促進させることができる。以上の観点より、S I 燃焼と S P C C I 燃焼とを併用する本実施形態に係るエンジンでは、通常のガソリンエンジンやディーゼルエンジンとは異なり、タンブル流及びスワール流を、吸気行程から圧縮上死点付近まで維持させることが望ましい。

【 0 0 6 7 】

〔ピストンの詳細構造〕

続いて、図 8 ～ 図 1 1 を参照して、ピストン 5 の構造、とりわけ冠面 5 0 の構造について詳細に説明する。本実施形態では、冠面 5 0 に、上述したタンブル流及びスワール流の双方を圧縮上死点付近まで維持させることを可能とする形状的工夫が施されている。図 8 は、図 1 及び図 2 に示されたピストン 5 の斜視図、図 9 は、冠面 5 0 の平面図、図 1 0 は、図 9 の X - X 線断面図、図 1 1 は、図 9 の X I - X I 線断面図である。図 8 ～ 図 1 1 では、説明の明確性を担保するため、X Y Z の方向表示を付している。Z 方向は気筒軸 A X 方向、X 方向はクランク軸 7 の延伸方向であるエンジン本体 1 の前後方向、Y 方向は Z 方向及び X 方向の双方と直交する方向に各々相当する。各図には、エンジン本体 1 の設置方向におけるフロント側、リア側という意味において F 側（+ X 側）、R 側（- X 側）と、吸気ポート 9 及び排気ポート 1 0 と各々対向する側であるという意味において I N 側（+ Y 側）、E X 側（- Y 側）との表記が付されている。

【 0 0 6 8 】

ピストン 5 は、ピストンヘッド 5 A と、ピストンヘッド 5 A の下方（- Z 側）に連設されたスカート部 5 S とを含む。ピストンヘッド 5 A は円柱体からなり、燃焼室 6 の壁面の一部（底面）を形成する冠面 5 0 を上面に備えると共に、気筒 2 の内壁面と摺接する側周面 5 C とを備える。側周面 5 C には、ピストンリングが嵌め込まれるリング溝が複数備えられている。スカート部 5 S は、ピストンヘッド 5 A の + Y 側及び - Y 側に配置され、ピ

10

20

30

40

50

ストン 5 の往復運動の際の首振り揺動を抑制する。ピストンヘッド 5 A の下方には、X 方向に延びるピン孔を区画するピストンボス 5 B が設けられている。ピストンボス 5 B の前記ピン孔には、コネクティングロッド 8 との連結のためのピストンピンが挿通される。

【 0 0 6 9 】

冠面 5 0 は、燃焼室天井面 6 U と Z 方向に対向する面である。冠面 5 0 は、その径方向（X 方向及び Y 方向）の概ね中央部分に配置された椀状のキャビティ 5 1 を含む。キャビティ 5 1 は、インジェクタ 1 5 から燃料の噴射を受ける部分であって、冠面 5 0 が下方（- Z 側）に凹設された部分である。なお、ここでの「凹設」とは、ペントルーフ型の燃焼室天井面 6 U に沿う冠面形状を想定した場合において径方向中央部分が凹没している意味合いであって、必ずしも冠面 5 0 においてキャビティ 5 1 が最も低い部分を構成していなくても良い。

10

【 0 0 7 0 】

+ Z 側からの平面視において、冠面 5 0 におけるキャビティ 5 1 を囲む外周部分には、F 側凸部 5 2 F、R 側凸部 5 2 R、IN 側平面部 5 3、EX 側平面部 5 4、IN 側斜面部 5 5 及び EX 側斜面部 5 6 が配置されている。F 側凸部 5 2 F はキャビティ 5 1 の + X 側に、R 側凸部 5 2 R は - X 側に、各々隣接する凸面である。IN 側平面部 5 3 はキャビティ 5 1 の + Y 側に、EX 側平面部 5 4 は - Y 側に、各々位置する平面である。IN 側斜面部 5 5 は、キャビティ 5 1 の + Y 側端縁と IN 側平面部 5 3 との間に配置された斜面である。EX 側斜面部 5 6 は、キャビティ 5 1 の - Y 側端縁と EX 側平面部 5 4 との間に配置された斜面である。

20

【 0 0 7 1 】

F 側凸部 5 2 F 及び R 側凸部 5 2 R（一对の第 1 隆起部）は、冠面 5 0 におけるキャビティ 5 1 とピストン 5 の側周面 5 C（外縁部）との間の外周領域において + Z 方向（気筒軸方向）に突設されている。F 側凸部 5 2 F 及び R 側凸部 5 2 R は、一对の斜面部 5 2 1 と稜線部 5 2 2 とによって各々構成されている。一对の斜面部 5 2 1 は、燃焼室天井面 6 U のペントルーフ形状に沿う山型の傾斜面を形成している。稜線部 5 2 2 は、一对の斜面部 5 2 1 の頂部において、X 方向に帯状に延びる平面である。図 9 に示すように、+ Z 側からの平面視（冠面 5 0 の上面視）において、キャビティ 5 1 は X 方向が長軸である楕円形状を有している。つまり、キャビティ 5 1 は稜線部 5 2 2 の延在方向に幅広の楕円形状を備えている。また、F 側凸部 5 2 F 及び R 側凸部 5 2 R は、キャビティ 5 1 の長軸と交差する略 U 字型の形状を有している。F 側凸部 5 2 F の外周側及び R 側凸部 5 2 R の外周側に各々隣接して、円弧形の帯状平面からなる F 側平面部 5 2 3 F 及び R 側平面部 5 2 3 R が、各々配置されている。

30

【 0 0 7 2 】

IN 側平面部 5 3 は、冠面 5 0 の + Y 側外周縁（側周面 5 C）を弧とし、X 方向に延びる直線を弦とする弓形の平面である。IN 側平面部 5 3 は、ピストン 5 が圧縮上死点に向かう際、スキッシュ流が形成されるスキッシュエリアである。EX 側平面部 5 4 は、冠面 5 0 の - Y 側外周縁を弧とし、X 方向に延びる直線を弦とする弓形の平面である。本実施形態では、EX 側平面部 5 4 よりも IN 側平面部 5 3 の方が広面積に設定されている。この面積差に応じて、F 側、R 側凸部 5 2 F、5 2 R の - Y 側斜面部 5 2 1 の裾野が、+ Y 側斜面部 5 2 1 よりも長くなっている。なお、IN 側平面部 5 3、EX 側平面部 5 4、F 側平面部 5 2 3 F 及び R 側平面部 5 2 3 R は、ほぼ同じ高さ位置にある平面である。これら平面のうち IN 側平面部 5 3 は、冠面 5 0 の加工時において各部の高さ位置を定める基準面とされる。

40

【 0 0 7 3 】

IN 側斜面部 5 5（第 2 隆起部）及び EX 側斜面部 5 6 は、冠面 5 0 におけるキャビティ 5 1 の外周領域において、稜線部 5 2 2 の延在方向（X 方向）と直交する方向（+ Y、- Y 方向）の位置に突設されている。IN 側斜面部 5 5 は、IN 側平面部 5 3 の弦の位置を立ち上がり位置として、冠面 5 0 の径方向内側（- Y 側）に向かって + Z 側にせり上がり、キャビティ 5 1 の + Y 側端縁に至る傾斜面である。EX 側斜面部 5 6 は、EX 側平面

50

部 5 4 の弦の位置を立ち上がり位置として、冠面 5 0 の径方向内側（+ Y 側）に向かって + Z 側にせり上がり、キャビティ 5 1 の - Y 側端縁に至る傾斜面である。

【 0 0 7 4 】

各斜面部 5 2 1 の裾野部分に対して、I N 側斜面部 5 5 及び E X 側斜面部 5 6 は高い位置に存在しており、両者の境界には段差部 5 2 4 が形成されている。この段差部 5 2 4 の形成によって凹没した部分は、吸気弁 1 1 及び排気弁 1 2 との干渉を防止するバルブリセスとなる。換言すると、I N 側斜面部 5 5 は、一対の吸気弁 1 1 用のバルブリセス間に形成された隆起部、E X 側斜面部 5 6 は、一対の排気弁 1 2 用のバルブリセス間に形成された隆起部である。

【 0 0 7 5 】

図 1 1 に示されているように、I N 側斜面部 5 5 及び E X 側斜面部 5 6 のせり上がり高さ（最も + Z 側に突出した高さ位置）よりも、F 側凸部 5 2 F 及び R 側凸部 5 2 R の稜線部 5 2 2 の高さは高い位置にある。また、I N 側斜面部 5 5 よりも E X 側斜面部 5 6 の方が、Y 方向の長さが長い。両斜面部 5 5、5 6 の傾斜角度は概ね同一であり、Y 方向の長さが長い分だけ、E X 側斜面部 5 6 の方が + Z 側への突出高さも高い。

【 0 0 7 6 】

キャビティ 5 1 は、底部 5 1 1、F 側周壁 5 1 2 F、R 側周壁 5 1 2 R、I N 側周壁 5 1 3 及び E X 側周壁 5 1 4 を備えている。底部 5 1 1 は、椀状に凹設されたキャビティ 5 1 の下方領域を構成する部分である。底部 5 1 1 は、- Z 方向に緩く凹没した曲面からなり、その外周縁は + Z 側からの平面視で円形の形状を有している。底部 5 1 1 の径方向中央に、キャビティ 5 1 において - Z 側に最も凹没した地点である最深部 5 1 B が位置している。最深部 5 1 B は、ピストン 5 の径方向の中心に対してやや E X 側にシフトした位置に存在している。F 側周壁 5 1 2 F は、底部 5 1 1 の + X 側周縁から F 側凸部 5 2 F に向けて立ち上がる曲面である。R 側周壁 5 1 2 R は、底部 5 1 1 の - X 側周縁から R 側凸部 5 2 R に向けて立ち上がる曲面である。F 側周壁 5 1 2 F 及び R 側周壁 5 1 2 R の高さは、各稜線部 5 2 2 の位置において最も高く、斜面部 5 2 1 の裾野に向かうに連れて徐々に低くなっている。また、F 側周壁 5 1 2 F 及び R 側周壁 5 1 2 R が有する曲面の曲率半径 R_f 、 R_r は、底部 5 1 1 の曲面の曲率半径 R よりも小さい。

【 0 0 7 7 】

I N 側周壁 5 1 3 は、底部 5 1 1 の + Y 側周縁から I N 側斜面部 5 5 に向けて立ち上がる曲面である。E X 側周壁 5 1 4 は、底部 5 1 1 の - Y 側周縁から E X 側斜面部 5 6 に向けて立ち上がる曲面である。I N 側周壁 5 1 3 及び E X 側周壁 5 1 4 が有する曲面の曲率半径 R_{in} 、 R_{ex} もまた、底部 5 1 1 の曲面の曲率半径 R よりも小さい。I N 側のバルブリセス間の間隔が E X 側よりも広いことから、I N 側周壁 5 1 3 の方が E X 側周壁 5 1 4 よりも周方向幅が長くなっている。

【 0 0 7 8 】

〔キャビティの各種パラメータ〕

図 1 2 は、キャビティ 5 1 に関連する各種パラメータを示す図である。図中には、F R 周壁高さ H_1 （第 1 隆起部の高さ）、I N 側周壁高さ H_2 （第 2 隆起部の高さ）、キャビティ径 D 、F R 間周壁長さ L 、ボア径 B 及びストローク S が示されている。F R 周壁高さ H_1 は、F 側凸部 5 2 F 又は R 側凸部 5 2 R の高さ、換言すると R 側周壁 5 1 2 R 又は F 側周壁 5 1 2 F の高さである。I N 側周壁高さ H_2 は、I N 側斜面部 5 5 のせり上がり高さ、換言すると I N 側周壁 5 1 3 の高さである。これらの高さ H_1 、 H_2 は、キャビティ 5 1 の最深部 5 1 B（所定の基準高さ位置）からの高さである。

【 0 0 7 9 】

キャビティ径 D は、キャビティ 5 1 における、最深部 5 1 B を含む一定の曲率を有する領域の外周縁の直径、本実施形態では底部 5 1 1 の直径である。F R 間周壁長さ L は、F 側凸部 5 2 F と R 側凸部 5 2 R との間の間隔、換言すると R 側周壁 5 1 2 R の最上部（稜線部 5 2 2 の内側エッジ）と F 側周壁 5 1 2 F の最上部との間の間隔である。ボア径 B は、図 2 に示した通り気筒 2 の内径であって、ピストン 5 の直径に相当する長さである。ス

10

20

30

40

50

トローク 5 は、T D C（上死点）～ B D C（下死点）間にピストン 5 が Z 方向に移動する長さである。

【 0 0 8 0 】

図 1 0 及び図 1 1 には、キャビティ 5 1 の曲面形状に関するパラメータも示されている。これらの図中には、半径 R、R f、R r、R i n、R e x が示されている。半径 R は、キャビティ 5 1 の底部 5 1 1 を形成する曲面の半径である。この半径 R にて凹没する領域の外周縁が、底部 5 1 1 と他の周壁 5 1 2 R、5 1 2 F、5 1 3、5 1 4 との境界であって、上面視で円形形状（その直径 = キャビティ径 D）を有している。半径 R f は F 側周壁 5 1 2 F、半径 R r は R 側周壁 5 1 2 R を各々形成する曲面の半径である。キャビティ 5 1 の X 方向断面においては、半径 R の領域（底部 5 1 1）の + X 側及び - X 側端部に、各々半径 R f、R r の領域（F 側周壁 5 1 2 F、R 側周壁 5 1 2 R）が連設されている。また、半径 R i n は I N 側周壁 5 1 3、半径 R e x は E X 側周壁 5 1 4 を各々形成する曲面の半径である。キャビティ 5 1 の Y 方向断面においては、半径 R の領域（底部 5 1 1）の + Y 側及び - Y 側端部に、各々半径 R i n、R e x の領域（I N 側周壁 5 1 3、R E X 側周壁 5 1 4）が連設されている。

10

【 0 0 8 1 】

本実施形態では、ペントルーフ形状に沿った山型形状を有する F 側凸部 5 2 F 及び R 側凸部 5 2 R（一对の第 1 隆起部）が、これと直交する方位に位置する I N 側斜面部 5 5（第 2 隆起部）よりも、所定の範囲で高く設定される。具体的には上掲のパラメータにおいて、F R 周壁高さ H 1 と I N 側周壁高さ H 2 との比である $H 1 / H 2$ が、専ら S P C C I

20

$$H 1 / H 2 = 1 . 7 9 \sim 3 . 2 9 \cdots (1)$$

の関係を満たすように設定される。なお、「1.79 ~ 3.29」は、1.79 以上 3.29 以下を示す（以下同じ。但し、「より大きい」と付されている場合を除く）。

【 0 0 8 2 】

$H 1 / H 2$ が上記（1）式の範囲に設定されることにより、ペントルーフ形状に沿った山型形状を有する F 側凸部 5 2 F 及び R 側凸部 5 2 R が、これと直交する方位に位置する I N 側斜面部 5 5 及び E X 側平面部 5 4 よりも、所定の範囲（ $H 1 / H 2 = 1 . 7 9$ 以上 3.29 以下）で高く設定される。すなわち、F 側凸部 5 2 F 及び R 側凸部 5 2 R と I N 側斜面部 5 5 及び E X 側平面部 5 4 との高さ比が大きくなりすぎないように $H 1 / H 2$ が設定されている。このため、スワール流を F 側凸部 5 2 F 及び R 側凸部 5 2 R（F 側周壁 5 1 2 F 及び R 側周壁 5 1 2 R）によってガイドさせることができ、スワール流をキャビティ 5 1 内において維持させ易くなる。従って、S P C C I 燃焼を行わせる場合において、燃焼室 6 の容積が狭くなる圧縮行程後期までスワール流を維持させることができる。なお、 $H 1 / H 2$ が 1.79 未満になると、F 側凸部 5 2 F 及び R 側凸部 5 2 R が I N 側斜面部 5 5 に対して相対的に低くなって、F 側周壁 5 1 2 F 及び R 側周壁 5 1 2 R によるスワール流のガイド効果が低減する傾向が顕著となる。また、 $H 1 / H 2$ が 3.29 より大きいと、スワール流が F 側凸部 5 2 F 及び R 側凸部 5 2 R に対して相対的に低すぎる I N 側斜面部 5 5 の領域で旋回できないようになり、当該スワール流を維持できない傾向が顕著となる。

30

40

【 0 0 8 3 】

次に、S I 燃焼と S P C C I 燃焼とを併用し、S P C C I 燃焼においてスワール流を圧縮行程後期まで維持させると共に、高回転の S I 燃焼においてタンブル流を圧縮行程後期まで維持させるという観点からは、 $H 1 / H 2$ は、

$$H 1 / H 2 = 1 . 9 2 \sim 2 . 7 5 \cdots (2)$$

の関係を満たすように設定される。

【 0 0 8 4 】

ペントルーフ型の燃焼室天井面 6 U を備える燃焼室 6 では、吸気は F 側凸部 5 2 F 及び R 側凸部 5 2 R の稜線部 5 2 2 が延在する方向（X 方向）と直交する方向（Y 方向）に流入し、タンブル流を形成する。従ってタンブル流は、キャビティ 5 1 の + X、- X 側部に

50

位置し、上記の $H1/H2$ の関係式の範囲で IN 側斜面部 55 (IN 側周壁 513) よりも高い F 側凸部 52F 及び R 側凸部 52R (F 側周壁 512F 及び R 側周壁 512R) によってガイドされる。このため、タンブル流がキャビティ 51 に集まり易くなり、タンブル流が圧縮行程後期まで維持することができる。一方、 F 側凸部 52F 及び R 側凸部 52R と IN 側斜面部 55 との高さ比が大きくなりすぎないように $H1/H2$ が設定されている。このため、スワール流を IN 側斜面部 55 (IN 側周壁 513) の領域でガイドさせることができ、スワール流をキャビティ 51 内において維持させ易くなる。従って、燃焼室 6 の容積が狭くなる圧縮行程後期までスワール流を維持することができる。なお、 $H1/H2$ が 1.92 未満になると、 F 側凸部 52F 及び R 側凸部 52R の高さが不足することに起因して、当該 F 側凸部 52F 及び R 側凸部 52R によるタンブル流のガイド効果が低減する傾向が顕著となる。また、 $H1/H2$ が 2.75 より大きいと、タンブル流が F 側凸部 52F 及び R 側凸部 52R に対して相対的に低すぎる IN 側斜面部 55 の領域でガイドされ難くなり、当該タンブル流を維持できない傾向が顕著となる。

10

【0085】

上記の $H1/H2$ の他、スワール流及びタンブル流の維持に関して好ましい他の設定は次の通りである。まず、 FR 周壁高さ $H1$ とキャビティ径 D との関係について、専ら $SPCCI$ 燃焼におけるスワール流の維持を考慮する場合には、

$$H1/D = 0.05 \sim 0.36$$

の関係を満たすことが望ましい。上記の関係を満たすことで、キャビティ 51 の開口径と F 側凸部 52F 及び R 側凸部 52R の高さとの関係が適正化され、スワール流のガイド効果を高めることができる。また、 SI 燃焼と $SPCCI$ 燃焼との併用においてスワール流及びタンブル流の維持を考慮する場合には、

20

$$H1/D = 0.050 \sim 0.235$$

の関係を満たすことが望ましい。 $H1/D$ を上記の範囲に設定することで、タンブル流も、適度な高さ $H1$ を有する F 側凸部 52F 及び R 側凸部 52R によってガイドされ易くし、タンブル流の維持効果を高めることができる。

【0086】

キャビティ径 D とボア径 B との関係については、専ら $SPCCI$ 燃焼におけるスワール流の維持を考慮する場合には、

$$B/D = 1.19 \sim 2.94$$

30

の関係を満たすことが望ましい。また、 SI 燃焼と $SPCCI$ 燃焼との併用においてスワール流及びタンブル流の維持を考慮する場合には、

$$B/D = 1.19 \sim 2.20$$

の関係を満たすことが望ましい。

【0087】

FR 間周壁長さ L とボア径 B との関係については、専ら $SPCCI$ 燃焼におけるスワール流の維持を考慮する場合には、

$$B/L = 1.0 \text{ より大きい} \sim 2.86$$

の関係を満たすことが望ましい。また、 SI 燃焼と $SPCCI$ 燃焼との併用においてスワール流及びタンブル流の維持を考慮する場合には、

40

$$B/L = 1.0 \text{ より大きい} \sim 1.52$$

の関係を満たすことが望ましい。

【0088】

キャビティ 51 の底部 511 の半径 R と、ボア径 B 及びストローク S との関係については、専ら $SPCCI$ 燃焼におけるスワール流の維持を考慮する場合には、

$$R/B = 0.0 \text{ より大きい} \sim 2.42$$

の関係を満たすことが望ましい。また、 SI 燃焼と $SPCCI$ 燃焼との併用においてスワール流及びタンブル流の維持を考慮する場合には、

$$R/B = 1.06 \sim 2.42$$

の関係を満たすことが望ましい。

50

【 0 0 8 9 】

キャピティ 5 1 の底部 5 1 1 の半径 R と、F 側周壁 5 1 2 F の半径 R_f 及び R 側周壁 5 1 2 R の半径 R_r との関係については、専ら S P C C I 燃焼におけるスワール流の維持を考慮する場合には、

$$R / R_f = R / R_r = 1 \text{ より大きい } \sim 6.4$$

の関係を満たすことが望ましい。また、S I 燃焼と S P C C I 燃焼との併用においてスワール流及びタンブル流の維持を考慮する場合には、

$$R / R_f = R / R_r = 1 \text{ より大きい } \sim 1.2$$

の関係を満たすことが望ましい。

【 0 0 9 0 】

また、半径 R と、I N 側周壁 5 1 3 の半径 R_{in} 及び E X 側周壁 5 1 4 の半径 R_{ex} との関係については、専ら S P C C I 燃焼におけるスワール流の維持を考慮する場合には、

$$R / R_{in} = R / R_{ex} = 1 \text{ より大きい } \sim 7.8$$

の関係を満たすことが望ましい。また、S I 燃焼と S P C C I 燃焼との併用においてスワール流及びタンブル流の維持を考慮する場合には、

$$R / R_{in} = R / R_{ex} = 1 \text{ より大きい } \sim 1.4 \sim 1.5$$

の関係を満たすことが望ましい。

【 0 0 9 1 】

〔 筒内流動についての説明 〕

以下、本実施形態に係るキャピティ 5 1 を有するピストン 5 が用いられた場合の筒内流動について、図 1 3 ～ 図 1 8 を参照して説明する。図 1 3 ～ 図 1 5 では、図 5 の第 3 運転領域 (S I 燃焼) において肝要となるタンブル流が維持される状況が示されている。図 1 6 ～ 図 1 8 では、第 1、第 2 運転領域 (S P C C I 燃焼) において肝要となるスワール流が維持される状況が示されている。図 1 3、図 1 4、図 1 6、図 1 7 では、気筒 2 が簡略的に示されていると共に、ピストン 5、インジェクタ 1 5 及び点火プラグ 1 6 の位置関係が示されている。

【 0 0 9 2 】

< タンブル流 >

図 1 3 (A) ～ (D) は、S I 燃焼の吸気行程におけるタンブル流の流動を模式的に示す図である。ここでは、タンブル比 = 2 (排気 T D C ～ 圧縮 T D C の間にタンブル流が 2 回転する) である例を示す。図 1 3 (A) は、ピストン 5 が排気 T D C の位置にある状態を示している。この状態では、吸気弁 1 1 は開いておらず、吸気ポート 9 から新気は気筒 2 (燃焼室 6) に流入していない。

【 0 0 9 3 】

図 1 3 (B) は、ピストン 5 が排気 T D C から 4 5 d e g 程度下降した状態を示している。この状態では吸気弁 1 1 は開かれ、ピストン 5 の下降に伴う圧力低下により、新気が吸気ポート 9 から気筒 2 (燃焼室 6) に流入する。既述の通り吸気ポート 9 はタンブルポートの形状を有しているので、前記新気の流入によって気筒 2 内にはタンブル流 F_t が発生する。タンブル流 F_t は、中央タンブル流 F_{tc} と外縁タンブル流 F_{te} とを含む。中央タンブル流 F_{tc} は、キャピティ 5 1 の径方向中央領域に向かう比較的強い流動である。外縁タンブル流 F_{te} は、中央タンブル流 F_{tc} の両サイドに発生する流動であって、キャピティ 5 1 の径方向周縁領域に向かう比較的弱い流動である。S I 燃焼ではスワール弁 1 7 が全開とされるので、新気は 2 つの吸気ポート 9 A、9 B から気筒 2 に流入する。これらの 2 つの新気流入の干渉により、径方向中央領域では比較的強い中央タンブル流 F_{tc} が発生するものである。

【 0 0 9 4 】

図 1 3 (C) は、ピストン 5 が排気 T D C から 9 0 d e g 下降した状態である。タンブル流 F_t は、キャピティ 5 1 内に入り込んでいる。詳しくは、中央タンブル流 F_{tc} はキャピティ 5 1 の径方向中央領域に入り込み、外縁タンブル流 F_{te} は径方向周縁領域に入り込んでいる。図 1 3 (D) は、ピストン 5 が排気 T D C から 1 3 5 d e g 程度下降した

10

20

30

40

50

状態である。中央タンブル流 F_{tc} 及び外縁タンブル流 F_{te} の双方共、キャビティ 51 にガイドされるようにして、流動方向を上方向に反転させている。なお、インジェクタ 15 は、図 6 に例示した通り、吸気行程において運転シーンに応じたタイミングで、燃料を噴射する。

【0095】

図 14 (A) ~ (D) は、圧縮行程におけるタンブル流 F_t の流動を模式的に示す図である。図 14 (A) は、ピストン 5 が吸気 BDC の位置にある状態を示している。吸気 BDC 付近で吸気弁 11 は閉じられ、燃焼室 6 内の混合気は圧縮され始める。この段階ではタンブル流 F_t は、燃焼室天井面 6U に向かうように流動している。

【0096】

図 14 (B) は、ピストン 5 が吸気 BDC から 45 deg 程度上昇した状態を示している。タンブル流 F_t は、燃焼室天井面 6U にガイドされるようにして、流動方向を下方向に反転させている。再び、中央タンブル流 F_{tc} はキャビティ 51 の径方向中央領域に、外縁タンブル流 F_{te} は径方向周縁領域に、各々向かっている。

【0097】

図 14 (C) は、ピストン 5 が吸気 BDC から 90 deg 上昇した状態である。中央タンブル流 F_{tc} はキャビティ 51 の径方向中央領域に、外縁タンブル流 F_{te} は径方向周縁領域に各々入り込み、キャビティ 51 でガイドされている。図 14 (D) は、ピストン 5 が吸気 BDC から 135 deg 程度上昇した状態である。圧縮行程の後期に至っても、キャビティ 51 が広い面積及び容積を具備し、且つ、上記 (2) 式の H_1 / H_2 の関係を満たす高さの F 側凸部 52F 及び R 側凸部 52R を具備していることから、タンブル流 F_t は維持される。但し、燃焼室 6 の容積が小さくなることに伴い、外縁タンブル流 F_{te} は消失気味となり、専ら中央タンブル流 F_{tc} が残存する。なお、点火プラグ 16 は、図 6 に例示した通り、圧縮行程において運転シーンに応じたタイミングで、混合気に点火する。

【0098】

図 15 (A) は、図 14 (D) の状態に相当する、燃焼室 6 の気筒軸方向の模式的な断面図である。図 15 (B) は、図 14 (D) の状態からピストン 5 の上昇がさらに進んだ、圧縮 TDC における燃焼室 6 の気筒軸方向の模式的な断面図である。図 15 (A) に示す圧縮行程の後期の状態では、上述の通り、タンブル流 F_t は維持されている。

【0099】

その後、図 15 (B) に示すように、圧縮 TDC に至ると、タンブル流 F_t が一気に乱流 T_u に変換される。乱流 T_u は、タンブル流 F_t の形態で層流を為していた混合気が、燃焼室 6 空間の縮小に伴って行き場を失い、混合気的各ガス成分がランダムな方向に移動することによって生じる。この時点では、ほぼタンブル流 F_t は消失している。タンブル流 F_t を可及的に維持して圧縮 TDC 付近で一気に乱流 T_u に変換することで、SI 燃焼の火炎伝播が高速化され、熱効率が向上する。このようなタンブル流の可及的な維持に、上記 (2) 式の H_1 / H_2 の関係を満たす本実施形態に係るキャビティ 51 は貢献している。

【0100】

<スワール流>

図 16 (A) ~ (D) は、吸気行程におけるスワール流の流動を模式的に示す図である。図 16 (A) は、ピストン 5 が排気 TDC の位置にある状態を示している。この状態では、吸気弁 11 は開いておらず、吸気ポート 9 から新気は気筒 2 (燃焼室 6) に流入していない。既述の通り、SPCCI 燃焼においてスワール流の形成が必要とされる際、スワール弁 17 の開度が制限され、新気は専ら吸気ポート 9A から導入される (図 3)。

【0101】

図 16 (B) は、ピストン 5 が排気 TDC から 45 deg 程度下降した状態を示している。この状態では吸気弁 11 は開かれ、ピストン 5 の下降に伴う圧力低下により、新気が吸気ポート 9A から気筒 2 に流入する。このため、燃焼室 6 内でスワール流 F_s が生じる

10

20

30

40

50

。ここで、吸気ポート 9 はタンブルポートであるので、スワール流 F_s はタンブル流の影響を受けて斜め下方向に下降する斜めスワール流となる。

【 0 1 0 2 】

図 1 6 (C) は、ピストン 5 が排気 T D C から 9 0 d e g 下降した状態である。スワール流 F_s は、斜め下向きに大きく旋回しながら、キャビティ 5 1 に向かって進行している。図 1 6 (D) は、ピストン 5 が排気 T D C から 1 3 5 d e g 程度下降した状態である。スワール流 F_s の一部は、キャビティ 5 1 内に入り込み、当該キャビティ 5 1 にガイドされながら旋回している。

【 0 1 0 3 】

図 1 7 (A) ~ (D) は、圧縮行程におけるスワール流 F_s の流動を模式的に示す図である。図 1 7 (A) は、ピストン 5 が吸気 B D C の位置にある状態を示している。吸気 B D C 付近で吸気弁 1 1 は閉じられ、燃焼室 6 内の混合気は圧縮され始める。この段階ではスワール流 F_s は、キャビティ 5 1 によるガイド効果も相俟って、旋回しながら燃焼室天井面 6 U に向けて斜め上方向に流動している。

【 0 1 0 4 】

図 1 7 (B) は、ピストン 5 が吸気 B D C から 4 5 d e g 程度上昇した状態を示している。スワール流 F_s は、燃焼室天井面 6 U にガイドされるようにして、流動方向を斜め下方向に反転させて旋回している。これにより、再びスワール流 F_s はキャビティ 5 1 に向かうことになる。

【 0 1 0 5 】

図 1 7 (C) は、ピストン 5 が吸気 B D C から 9 0 d e g 上昇した状態である。この圧縮行程中期まで、スワール流 F_s は斜めスワール流の状態を維持している。スワール流 F_s の一部は、キャビティ 5 1 に入り込み、当該キャビティ 5 1 でガイドされている。図 1 7 (D) は、ピストン 5 が吸気 B D C から 1 3 5 d e g 程度上昇した状態である。圧縮行程の後期に至ると、燃焼室 6 の容積が小さくなることに伴い、スワール流 F_s は斜め成分がほぼ消失した横スワール流の状態となる。

【 0 1 0 6 】

図 1 8 (A) は、図 1 7 (D) の状態に相当する、燃焼室 6 内におけるスワール流 F_s の発生状態を示す模式図である。図 1 8 (B) は、圧縮 T D C での燃焼室 6 内におけるスワール流 F_s の発生状態を示す模式図である。図 1 8 (A) に示す圧縮行程の後期の状態では、キャビティ 5 1 内及びキャビティ 5 1 の外周側においてスワール流 F_s が維持されている。

【 0 1 0 7 】

その後、図 1 8 (B) に示すように、圧縮 T D C に至ると、キャビティ 5 1 の外周側のスワール流 F_s は消失するものの、キャビティ 5 1 内においてはスワール流 F_s が維持される。スワール流を圧縮 T D C 付近まで維持することで、前段の S I 燃焼を企図して点火プラグ 1 6 付近で生じさせた火種を燃焼室 6 の周縁領域へ運搬させ、後段の C I 燃焼における圧縮着火を促進させることができる。このようなスワール流 F_s の維持に、少なくとも上記 (1) 式の H_1 / H_2 の関係を満たす高さの F 側凸部 5 2 F 及び R 側凸部 5 2 R と I N 側斜面部 5 5 とが貢献している。

【 0 1 0 8 】

[タンブル流及びスワール流の維持効果]

図 1 9 は、本実施形態を採用した場合における、タンブル流及びスワール流の維持効果を示すグラフである。当該グラフの横軸は、 H_1 / H_2 の値を、縦軸はタンブル流及びスワール流の存続度合いを示す評価値であるスワール比及びタンブル比の値を各々示している。ここでは、 H_1 / H_2 の値を、

3 . 0 0 ; $H_1 = 7 . 0 0 \text{ mm}$ 、 $H_2 = 2 . 3 4 \text{ mm}$ 、

2 . 1 2 ; $H_1 = 1 1 . 5 0 \text{ mm}$ 、 $H_2 = 5 . 1 3 \text{ mm}$ 、及び

1 . 9 3 ; $H_1 = 8 . 4 9 \text{ mm}$ 、 $H_2 = 4 . 3 9 \text{ mm}$ 、

に設定したときの、スワール比及びタンブル比の値がプロットされている。なお、ボア径

$B = 83.5 \text{ mm}$ 、ストローク $S = 91.2 \text{ mm}$ である。さらに図 19 には、各々のプロットに基づいた近似曲線である、スワール比特性 C_s 及びタンブル比特性 C_t が示されている。スワール比特性 C_s 及びタンブル比特性 C_t は、 H_1 / H_2 とスワール比及びタンブル比との関係を示す曲線である。

【0109】

エンジンの低回転領域から高回転領域まで、良好な $SPCCI$ 燃焼を実現するためには、スワール比が 3.45 以上必要である。スワール比が 3.45 未満であることは、燃焼室 6 内において $SPCCI$ 燃焼を実現するための水平旋回するスワール流 F_s が十分ではないことを示す。スワール比 = 3.45 のラインと、スワール比特性 C_s との交点が、 $H_1 / H_2 = 1.79$ 及び $H_1 / H_2 = 3.29$ の 2 点であって、上記 (1) 式の下限值及び上限値である。

10

【0110】

また、図 5 の運転マップに例示するように、低～中回転領域では $SPCCI$ 燃焼を、高回転領域では SI 燃焼を実行させる場合、良好な SI 燃焼を実現するためには、タンブル比が 1.79 以上必要である。タンブル比が 1.79 未満であることは、燃焼室 6 内において SI 燃焼を実現するための縦旋回するタンブル流 F_t が十分ではないことを示す。タンブル比 = 1.79 のラインと、タンブル比特性 C_t との交点が、 $H_1 / H_2 = 1.92$ 及び $H_1 / H_2 = 2.75$ の 2 点であって、上記 (2) 式の下限值及び上限値である。

【0111】

上記の実証例に加えて、タンブル流及びスワール流の維持効果について、図説する。図 20 (A) は、 H_1 / H_2 を適正範囲に設定した場合におけるタンブル流を示す模式図である。ここでは、筒内流動として、図 13 及び図 14 で示した中央タンブル流 F_{tc} 及び外縁タンブル流 F_{te} を示している。 H_1 / H_2 が適正化されている場合、タンブル流 F_t はキャピティ 51 の形成領域に集められるようになり、当該キャピティ 51 の空間を利用して圧縮行程後期に至っても存続する。すなわち、中央タンブル流 F_{tc} は、キャピティ 51 の底部 511 にガイドされるように流動し、外縁タンブル流 F_{te} は F 側凸部 52F 及び R 側凸部 52R の隆起によって形成される F 側周壁 512F 及び R 側周壁 512R でガイドされるように流動する。このため、圧縮行程後期まで、タンブル流 F_t を存続させ易くすることができる。

20

【0112】

これに対し、図 20 (B) は、 H_1 / H_2 が上記 (2) 式の下限を下回る場合におけるタンブル流 F_t を示す模式図である。 H_1 / H_2 の値が小さいということは、 F 側周壁 512F 及び R 側周壁 512R の高さが小さいことを意味し、外縁タンブル流 F_{te} のガイド面としての機能が不足することになる。この場合、図 20 (B) に示すように、外縁タンブル流 F_{te} は冠面 50 におけるキャピティ 51 の形成領域内に導かれ難くなり、中央タンブル流 F_{tc} と外縁タンブル流 F_{te} とが共にキャピティ 51 内に収斂されることに伴う強いタンブル流 F_t が形成され難くなる。このため、タンブル流 F_t の存続性が低下する (タンブル比が低下する) ようになる。なお、 H_1 / H_2 が上記 (2) 式の上限を上回る場合、 IN 側斜面部 55 を形成する IN 側周壁 513 が低すぎて、中央タンブル流 F_{tc} に向けてガイドする効果が稀薄となり、やはりタンブル比が低下する。

30

40

【0113】

図 21 (A) は、 H_1 / H_2 を適正範囲に設定した場合におけるスワール流を示す模式図である。ここでは、筒内流動として、図 16 及び図 17 で示したスワール流 F_s を示している。 H_1 / H_2 が適正化されている場合、スワール流 F_s は、 F 側周壁 512F、 R 側周壁 512R、 IN 側周壁 513 及び EX 側周壁 514 にガイドされ、大口径のキャピティ 51 内で流動を維持する。このため、圧縮行程後期まで、スワール流 F_s を存続させ易くすることができる。

【0114】

一方、図 21 (B) は、 H_1 / H_2 が上記 (1) 式の上限を上回る場合におけるスワール流を示す模式図である。 H_1 / H_2 の値が大きいということは、 F 側周壁 512F 及び

50

R側周壁512Rと、IN側周壁513及びEX側周壁514との高低差が大きいことを意味する。このため、スワール流Fsは、IN側周壁513及びEX側周壁514の領域でガイドされ難くなり、キャビティ51から径方向外側へ抜け出し易くなる。つまり、IN側周壁513及びEX側周壁514の高さが低すぎるため、F側周壁512FとR側周壁512Rとの間の隙間から外周側へスワール流Fsが漏れ出すようになる。このため、スワール流Fsの存続性が低下する（スワール比が低下する）ものである。なお、H1/H2が上記（1）式の下限を下回る場合、F側周壁512F及びR側周壁512Rの高さが不十分となって、当該F側周壁512F及びR側周壁512Rによるスワール流Fsのガイド効果が低下し、スワール比が低下する。

【0115】

10

〔変形例〕

以上、本発明の実施形態につき説明したが、本発明はこれに限定されるものではなく、種々の変形実施形態を取ることができる。例えば、上記実施形態では、上記（1）式及び（2）式のほか、H1/D、D/B、B/F、R/B、R/Rf及びR/Rr、R/Rin及びR/Rexについても数値範囲を示した。これらについては、H1/H2の数値範囲が上記（1）式及び（2）式の範囲を満たしている限りにおいて、上記で例示した数値範囲から外れるものであってもよい。

【符号の説明】

【0116】

1 エンジン本体

20

2 気筒

5 ピストン

5C 側周面（外縁部）

50 冠面

51 キャビティ

51B 最深部

511 底部

52F F側凸部（一对の第1隆起部）

52R R側凸部（一对の第1隆起部）

522 稜線部

30

55 IN側斜面部（第2隆起部）

6 燃焼室

6U 燃焼室天井面（ペントルーフ型の天井面）

AX 気筒軸

Fs スワール流

Ft タンブル流

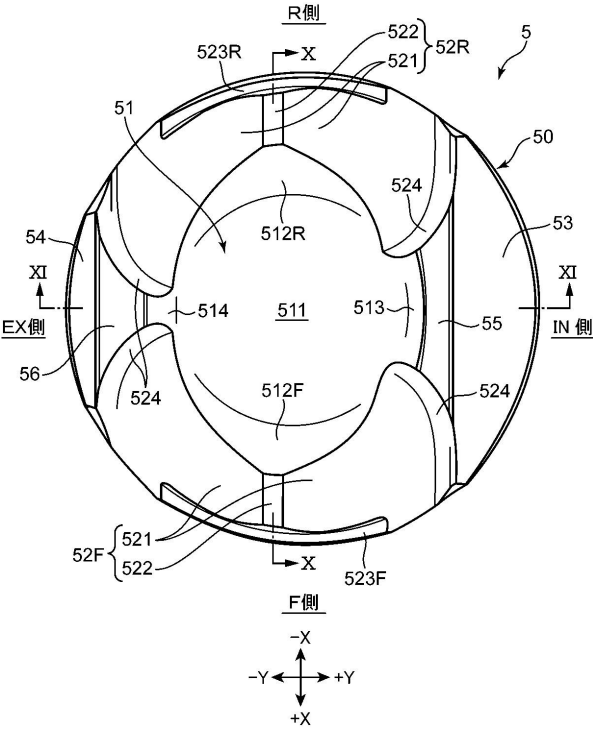
H1 FR周壁高さ（第1隆起部の高さ）

H2 IN側周壁高さ（第2隆起部の高さ）

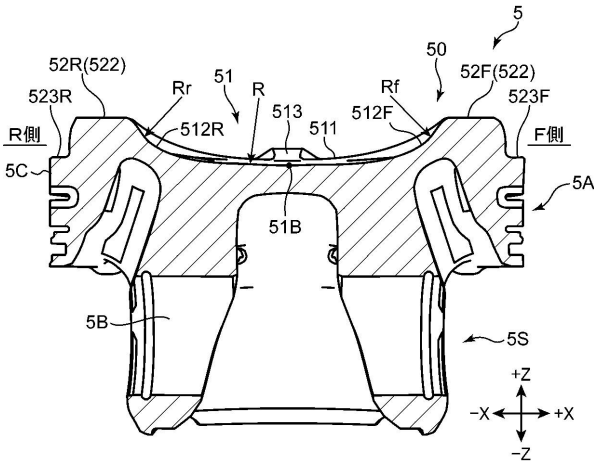
40

50

【図 9】



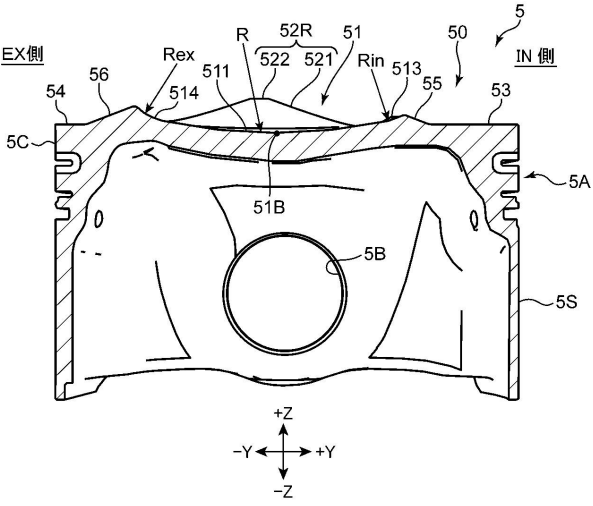
【図 10】



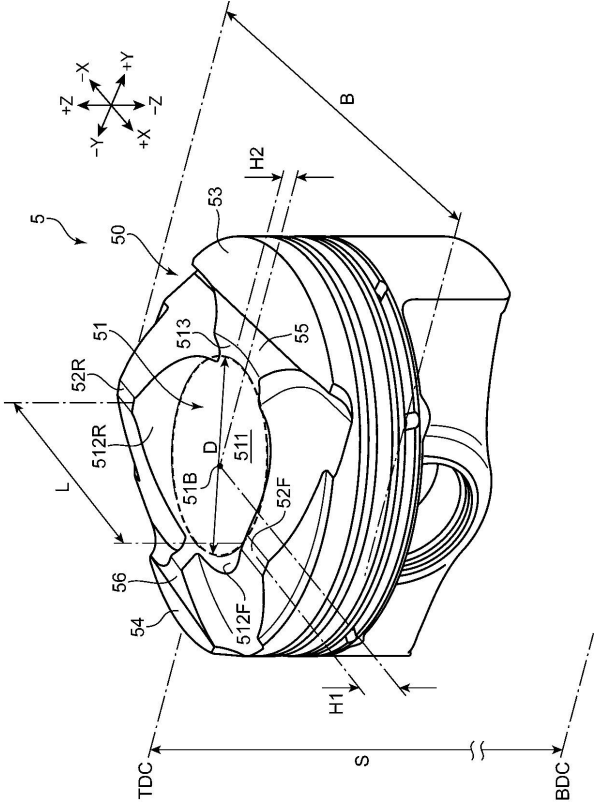
10

20

【図 11】



【図 12】

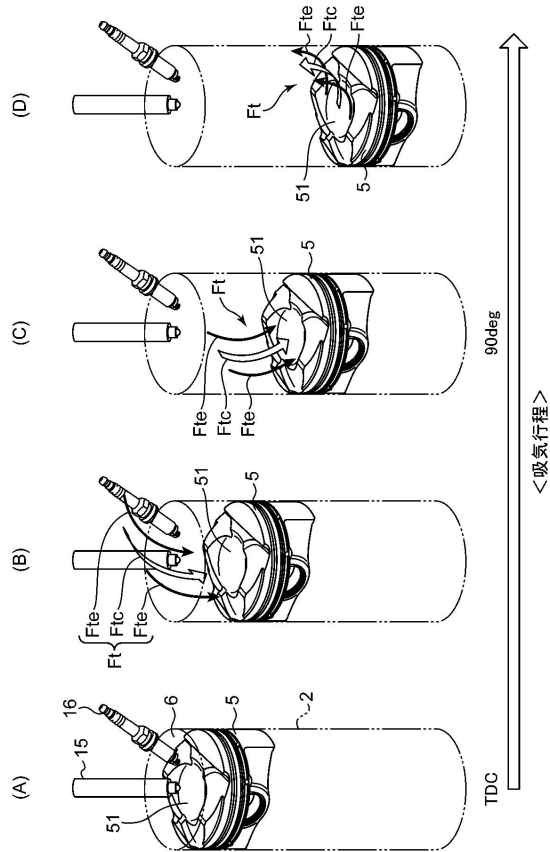


30

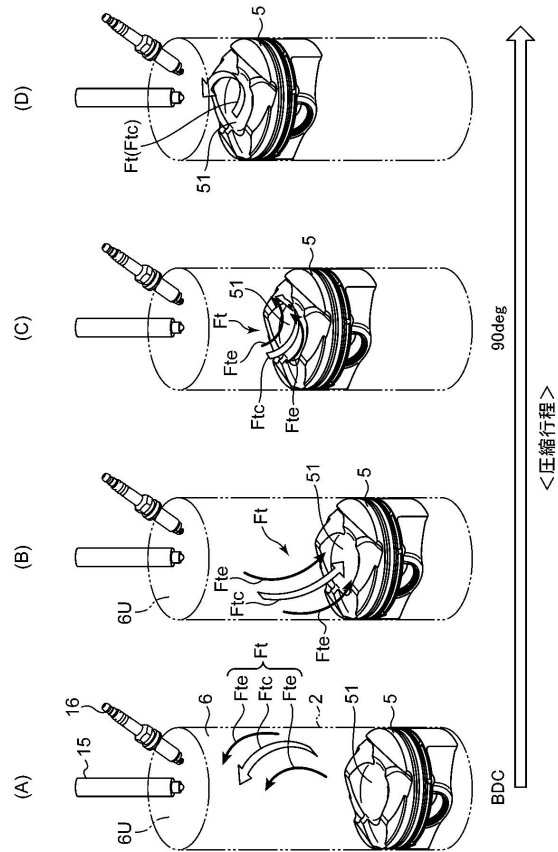
40

50

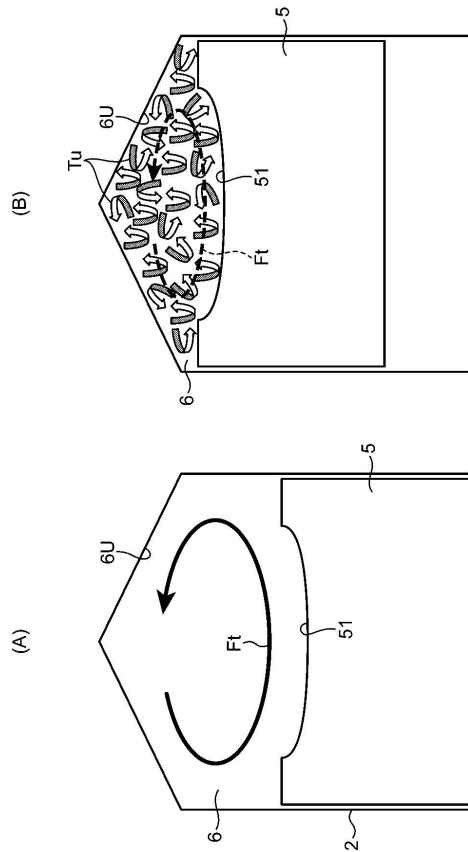
【図 1 3】



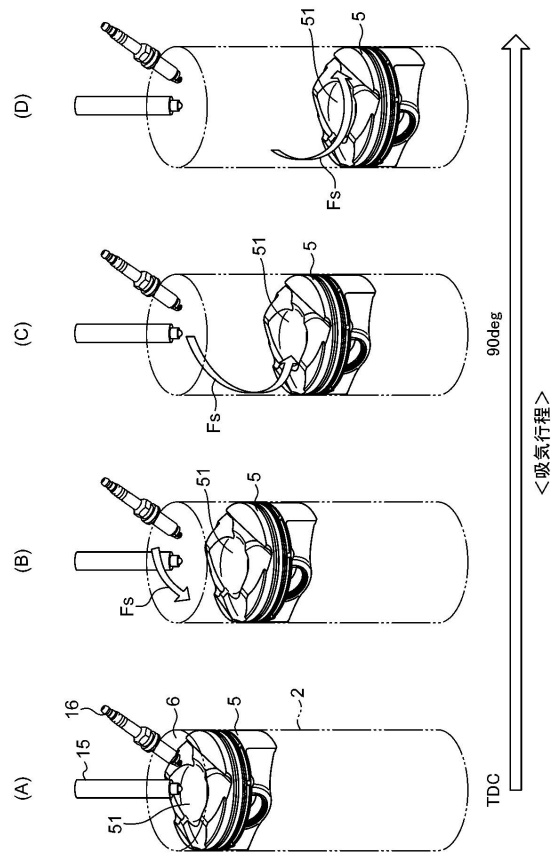
【図 1 4】



【図 1 5】



【図 1 6】



10

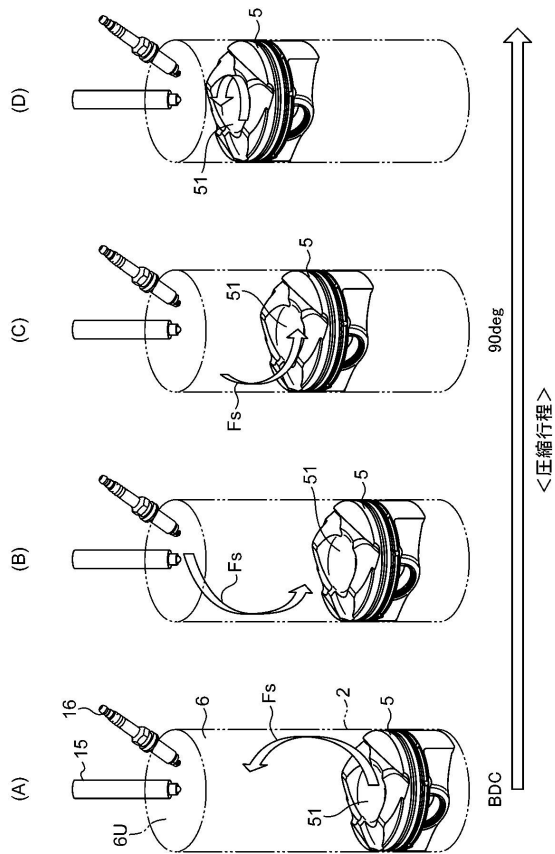
20

30

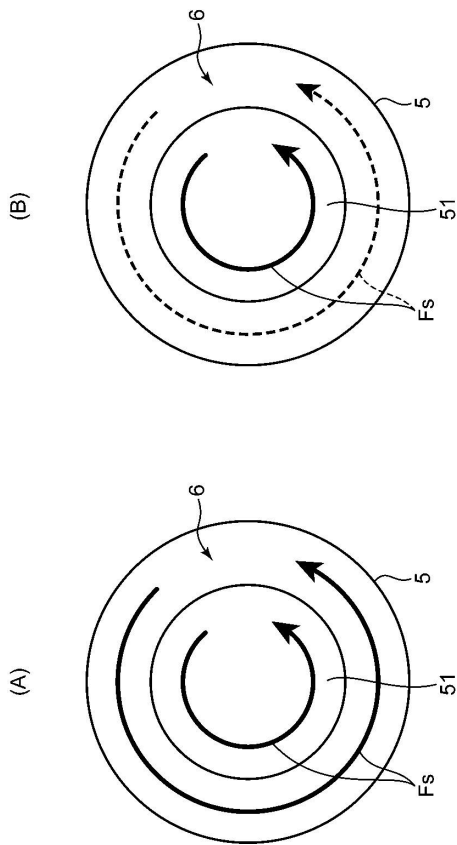
40

50

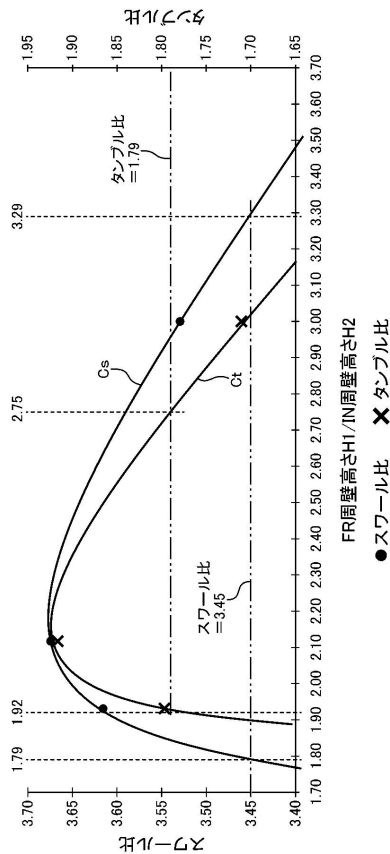
【図 17】



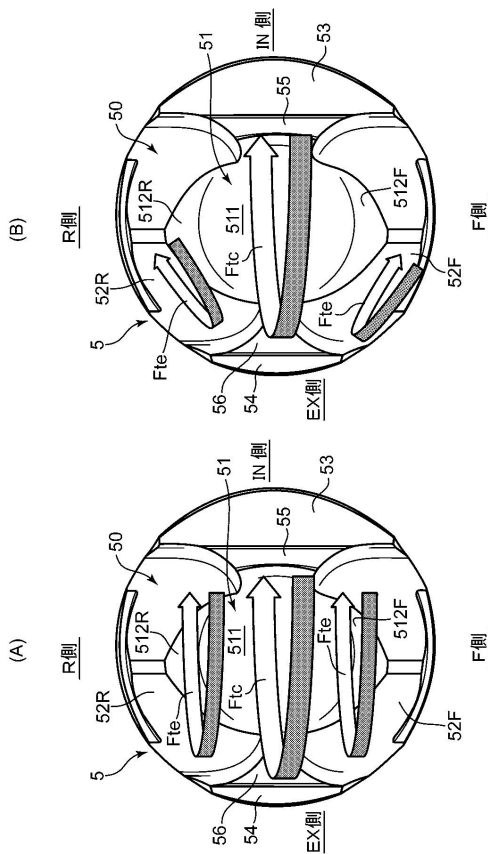
【図 18】



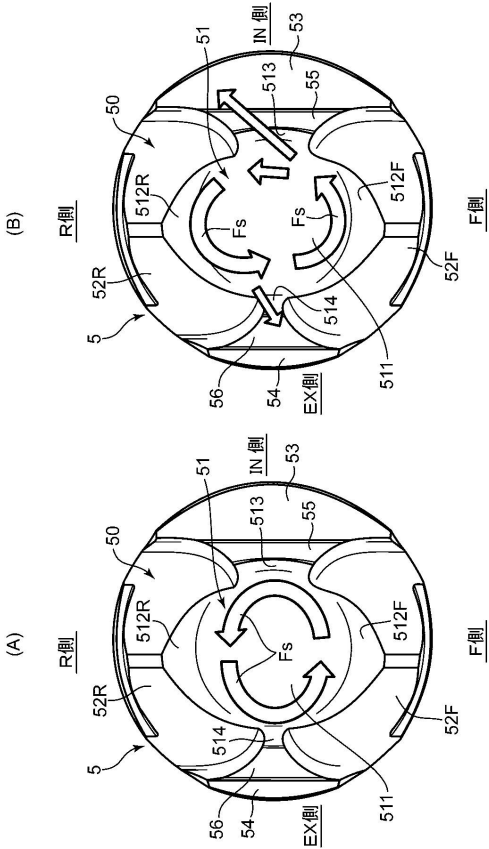
【図 19】



【図 20】



【図 2 1】



10

20

30

40

50

フロントページの続き

(51)国際特許分類

F I

F 0 2 B	23/10	3 1 0 E
F 0 2 B	23/10	3 1 0 A
F 0 2 B	23/10	V
F 0 2 F	3/26	B
F 0 2 F	3/26	C
F 1 6 J	1/09	

マツダ株式会社内

- (72)発明者 井上 淳
広島県安芸郡府中町新地 3 番 1 号 マツダ株式会社内
- (72)発明者 松本 浩太
広島県安芸郡府中町新地 3 番 1 号 マツダ株式会社内
- (72)発明者 河野 通治
広島県安芸郡府中町新地 3 番 1 号 マツダ株式会社内
- (72)発明者 本田 雄哉
広島県安芸郡府中町新地 3 番 1 号 マツダ株式会社内
- (72)発明者 西 風太
広島県安芸郡府中町新地 3 番 1 号 マツダ株式会社内

審査官 鶴江 陽介

- (56)参考文献 特開 2 0 1 8 - 0 8 7 5 6 5 (J P , A)
特開 2 0 1 6 - 1 2 1 6 3 0 (J P , A)
特開 2 0 1 6 - 1 2 1 5 6 4 (J P , A)

(58)調査した分野 (Int.Cl. , D B 名)

F 0 2 B	2 3 / 1 0
F 0 2 B	1 / 1 2
F 0 2 B	1 1 / 0 0
F 0 2 F	3 / 2 6
F 1 6 J	1 / 0 9