

学 位 論 文 題 名

中型ガスエンジンのノッキング低減と
高効率・高出力化に関する研究

学位論文内容の要旨

天然ガスを燃料とするガスエンジンは、天然ガスの単位発熱量あたりの低い CO₂ 排出量や、予混合希薄燃焼による NO_x および排気微粒子の低減により、環境負荷が小さいエネルギー変換機器として注目されている。さらに今後、天然ガスの自着火しにくい燃料特性を利用し、出力や熱効率を高めることによって、ガスエンジンの経済性、環境性を向上させて行くことが望まれている。本研究において、ガスエンジンを高出力化および高効率化した場合に問題となる火花点火予混合燃焼におけるノッキングについて解析を行い、燃焼システムおよびエンジンシステムをノッキングし難い諸元に適正化することで高出力、高効率ガスエンジンを具現化した。

まず、ガスエンジンのノッキング現象を理解するためにノッキングの可視化実験を行った。シリンダヘッドガスケットに組み込んだ複数の光ファイバから得られた燃焼発光から二次元の火炎発光分布を計算する Tomographic combustion analysis 法によりエンジン改造が非常に少ない状態でノッキングの可視化を行った。ガスエンジン実機運転において、自着火の発生と圧力波に起因すると考えられる一連の発光領域移動の様子を観測する事ができた。その結果、燃焼サイクル間において、自着火発生点および時間的な発光領域の移動は類似しているが、自着火点の発生時期、場所にはバラツキが存在し、ノッキング評価には燃焼サイクルにわたる平均処理が重要であることを明らかとした。

また、ピストン下方からの光学経路を有する可視化機関により、副室式希薄燃焼および単室式希薄燃焼の比較を行い、未燃混合気のおかれる状況の違いを解析した。特に副室式希薄燃焼において、未燃混合気が複数の副室噴口より噴出する火炎ジェットに囲まれる様子が観測され、未燃混合気は火炎による断熱圧縮と同時に火炎からの熱伝達やラジカルの供給等の直接的な影響を受けていることが推察できた。ノッキングの解析に重要な未燃混合気温度の計算において、火炎による断熱圧縮と熱伝達等の直接的な影響の両方を考慮するには、未燃混合気温度を筒内平均温度（実験）と断熱火炎温度（計算）から逆算にて求めることが有効であると考え、温度多領域燃焼モデルを考案した。

そして、副室式希薄燃焼のノッキング解析に温度多領域モデルを適用した。温度多領域モデルにより未燃混合気温度を計算し、さらに実測筒内圧力と未燃混合気温度を Livengood-Wu 積分に適用することで、副室諸元を変更して得られた燃焼形態のノッキングし易さを評価した。ここで、単に副室諸元の変更によるノッキング限界の変化を解析するのではなく、クランク角度により変化するノッキングし易さを解析することにより、初期抑制後期急速形の燃焼形態においてノッキングを発生させずに熱効率を向上できることを示した。副室噴口径、噴口角度の適正化により、初期抑制後

期急速形の燃焼形態を実現できることを明らかにした。

また、ガス機関のなかで、THC(未燃炭化水素)、CO、NO_x の同時低減が唯一可能である三元触媒付きガス機関のノッキング限界向上のために、化学量論比燃焼システムのノッキングし易さを温度多領域モデルおよび Livengood-Wu 積分により解析した。給気弁遅閉じは圧縮端の未燃混合気温度、圧力を低減し、ノッキング限界を向上させることを示した。さらに、点火プラグ直下の燃焼室突起により初期燃焼を抑制し、トップクリアランス縮小によるスキッシュ流強化により後期燃焼を急速化させることでノッキング限界を向上させることが出来た。ノッキング限界の向上により、高圧縮比化および点火進角が可能になり三元触媒付き機関の熱効率を向上させることが可能であった。

最後に、超希薄燃焼によりノッキングを発生させ難く、同時に低 NO_x 化が可能な副室式リーンバーン 6 気筒機関の高出力化、高効率化を行った。先に述べた燃焼形態の適正化によりノッキング限界を向上させる副室諸元を採用し、弁タイミング、過給システムを変更してノッキング試験を行った。弁タイミングの変更は、過給システムの変更を伴うが、これらの変更がエンジンの各行程においてどのように未燃混合気に影響し、更にノッキングに影響するのか解析した。具体的には、実験に供試したエンジンシステム(弁タイミング、過給システム等)をモデル化し、一次元流動計算と熱力学計算により給排気、圧縮、燃焼過程を通して未燃混合気温度を計算し、実測筒内圧とともに Livengood-Wu 積分に適用することでエンジンシステムのノッキングし易さを求めた。エンジンシステム諸元によって給排気行程におけるシリンダ内残留ガス量は変化し、さらに高温の残留ガスは未燃混合気温度およびノッキングに影響を与えることが分かった。

以上の知見を総合し、給気弁遅閉じ採用による圧縮端における未燃混合気温度、圧力の低減および排気管の適正な構成、過給機の高効率化による残留ガス量の低減を行った結果、ノッキング限界を大幅に向上することができ、正味平均有効圧力 1.1MPa、正味熱効率 38% の従来性能をそれぞれ 1.5MPa、43% にまで向上させたエンジンを開発することができた。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 近 久 武 美
副 査 教 授 小 川 英 之
副 査 教 授 藤 田 修
副 査 教 授 工 藤 一 彦

学 位 論 文 題 名

中型ガスエンジンのノッキング低減と 高効率・高出力化に関する研究

省エネルギー機器の一つであるコジェネレーションなどの動力装置として天然ガスを燃料とするガスエンジンが高効率低エミッション特性から広く用いられているが、ノッキングの発生によって出力や熱効率のさらなる向上が制限されている。そこで本研究は最も市場の大きな中型のガスエンジンを対象とし、そのノッキング現象の解明と実機における高効率・高出力化の具現化を行おうとするものである。

まず、中型ガスエンジンのノッキング現象を解明するために、エンジン内現象の可視化実験を行った。シリンダヘッドガスケットに組み込んだ多数の光ファイバから得られた燃焼発光強度を Tomographic combustion analysis 法を用いて解析し、二次元火炎発光分布を算出することを試みた。これによってエンジン改造が非常に少ない構造でノッキングの可視化が可能となり、その結果、シリンダー内を圧力波が周期的に反射を繰り返し、これに応じてノッキング領域が変動していることが明らかとなった。一方、ピストン下方からシリンダー内状態を可視化観察し、副室式希薄燃焼機関および単室式希薄燃焼機関における燃焼状態の比較を行った。その結果、単室式機関では点火プラグ部分から周囲に向かって火炎伝播し、端ガスが圧縮されているのに対して、副室式希薄燃焼機関においては複数の副室噴口より噴出する火炎ジェット間に存在する未燃混合気が火炎による断熱圧縮に加えて火炎からの熱伝達やラジカルの供給等の直接的な影響を受けていることが推察された。

これらの知見を基に、ノッキングの発生の程度を推定するためのノッキングナンバーの提案を行った。これは均一混合気の簡易な着火予測式である Livengood-Wu 積分式を用いたものであり、その計算に必要となる未燃混合気温度の推定として、温度多領域燃焼モデルと熱力学モデルの2つの手法を比較検討した。温度多領域モデルは比較的計算が簡便な特徴があるのに対して、熱力学モデルは計算精度が高い。この2つのモデルを要求に応じて使い分け、ノッキングのし易さを少ない実験で評価し得ることを確認した。そして、このノッキングナンバーの特性を分析した結果、初期抑制・後期急速形の燃焼形態がノッキングを発生させずに熱効率を向上する上で理想的な燃焼形態であることを示した。これらの知見を基に、自然給気副室式リーンバーン単気筒機関において副室

噴口径、副室容積比、噴口数および噴口角度等がノッキングナンバーに及ぼす傾向を分析し、これらの適正化により初期抑制・後期急速形の燃焼形態を実現できることを明らかにした。

次に、三元触媒付きのガス機関について、ノッキング限界向上のための手法について検討を行った。この三元触媒付き機関では燃料と空気の混合比率が最もノッキングし易い当量比1の条件設定とする制約があり、リーン燃焼が可能な他の機関と大きく異なっている。この機関においてノッキングナンバーを用いた種々の解析を行った結果、給気弁遅閉じがノッキング限界を向上させる上で有効なことを示した。さらに、点火プラグ直下の燃焼室突起により初期燃焼を抑制し、さらにピストン上部空間であるトップクリアランスの縮小によるスキッシュ流強化を加えることによって初期抑制・後期急速形の燃焼が実現でき、ノッキング限界を向上させることに成功した。この結果、高圧縮比化および点火進角が可能になり、三元触媒付き機関の熱効率を向上させることが可能となった。

最後に、過給機付きの副室式リーンバーン6気筒機関を対象としてその高出力・高効率化を行った。この過程において、給排気管内流動解析ならびに熱力学モデルによる未燃混合気温度の推定を行い、最適化実験の工数を効率化した。これらの結果、排気管の適正な構成、過給機の高効率化ならびに給気弁遅閉じの採用によって圧縮端における未燃混合気温度および圧力を低減できるほか高温の残留ガス量を最小とすることができ、ノッキング限界を向上することに成功した。これら一連の研究の結果、中型ガスエンジンのノッキング限界を大幅に向上することができ、従来の平均的な機関の性能が正味平均有効圧力1.1MPa、正味熱効率38%であったものをそれぞれ1.5MPa、43%にまで向上することができた。

以上、本研究により中型ガスエンジンのノッキング特性をよく表現できる指標としてノッキングナンバーの提案を行い、これを用いて三元触媒付き機関、自然給気副室式リーンバーン単気筒機関、過給副室式リーンバーン6気筒機関のそれぞれにおいてノッキングに影響する主要因子の解明とその最適化による大幅なノッキング限界の向上に成功した。その結果、市場でもトップクラスの高効率・高出力な中型ガスエンジンを開発することができた。

これを要するに、著者は、中型ガスエンジンのノッキング低減ならびに高効率・高出力化に必要な基礎的な知見を得たほか、実機関におい実証を行ったものであり、熱工学および内燃工学の発展に対して貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。