火花点火機関のノックと燃焼室壁温度との因果関係*

志賀 聖一^{*1}, John B. Heywood^{*2}, Kwang M. Chun^{*3}

Variation of Knocking Characteristics with the Chamber Wall Temperature in a Spark-Ignition Engine

Seiichi SHIGA, John B. HEYWOOD and Kwang M. CHUN

This study aims to clarify the importance of chamber wall temperature in the knocking characteristics of a spark-ignition engine. To vary the chamber wall temperature, two procedures were used, one is to change the coolant temperature and the other is to raise the exhaust valve surface temperature by substituting a ceramic surface layer for the original steel layer. Although the coolant temperature change had no influence on the flame propagation process, it fairly affected the knocking process, such as mean knock intensity and mean knock occurrence timing. This is caused by both the change of bulk mixture temperature of the end gas and the temperature uniformity within the end gas region. Cycle-by-cycle based knocking behaviour can also be influenced by the coolant temperature, which is considered to be based on the temperature uniformity in the whole chamber region. Exhaust valve surface temperature change did not affect any knocking characteristics. It suggests the importance of the wall temperature in the end gas region.

Key Words: Internal Combustion Engine, Knock, Knock Intensity, Coolant Temperature, Temperature Uniformity, End Gas

1. 緒 言

火花点火機関の重要な問題であるノックが、末端ガスの自発点火に基づくガス振動であることが明らかにされ、最近の計測技術の進歩に伴い、新たな研究ステップを歩み出しつつある。著者の一人もかつて、急速圧縮機による実験的研究⁽¹⁾と、熱力学モデルによる理論的研究⁽²⁾とによって、ノックの新しい側面をいくつか明らかにした。しかしながら、実際の機関においては、実験技術の問題などから、ノックとはどのような要因によってどの程度影響されるかなどのいわゆるノックの特性付けすら明解であるとは言えない。

そこで著者らは、この特性付けを目的として、実際の機関を用いた実験的研究を行い、ノック発生挙動とそれ以前の火炎伝播過程との因果関係を中心とした新たな側面を明らかにした⁽³⁾。さらに、Keck⁽⁴⁾の反応速度論的モデルを用いて、末端ガスの自発点火時期を予測し、実際の機関におけるノック発生時期と極めて

良い一致の得られることなどを見いだした⁽⁵⁾。前報⁽³⁾において、各サイクルごとのノック発生挙動は、それまでの火炎伝播過程と強い相関のあること、すなわちこれは、末端ガスの温度、圧力の時間履歴がノック発生を決定付けることを意味することなどを示した。さらにこのサイクルごとの挙動は、残留ガスを除去し均一混合気を使用することで著しく影響されることも明らかとなった。すなわち、燃焼室内での混合気分配の不均一性は、火炎伝播過程によって一義的にノック発生が決定しないことの一因である。

これらの背景の下に、本研究では、燃焼室内におけるもう一つの不均一性として温度分布に着目し、これとノック特性との関係を明らかにすることが目的である。そのために、燃焼室壁面温度を二つの方法で制御し、その効果を著者らのノック特性付けの手法によって明らかにした。

2. 実験装置および方法

本研究に用いた実験用機関 (Ricardo Hydra Mk III) の寸法諸元を表 1 に、燃焼室概略を図 1 に示す。図 1 には、本実験範囲内での代表的ノック時末端ガス割合のときの火炎面位置を模式的に示してある。圧力変換器は、燃焼室末端部から離れているために、検出さ

* 平成元年 8 月 25 日 東北支部盛岡地方講演会において講演。原稿受付 平成元年 9 月 28 日。

^{*1} 正員、群馬大学工学部 (〒376 桐生市天神町 1-5-1)。

^{*2} Massachusetts Institute of Technology (Cambridge MA 02139, USA)。

^{*3} Yonsei Univ.(Seoul, Korea)。

れるガス振動振幅は最大位置でのものよりも低いと思われるがこれは装置の都合による。

図2に、ノック特性を表す各種パラメータの定義を示す。ノックの特性付けを行ううえで著者らがやってきた手法は指圧線図の解析である。図2に示したようなパラメータは1サイクルごとの指圧波形を解析することによって求められるが、ここではデータ収集システムのメモリの制約と計算時間の都合から、1条件当たり369～378サイクルを採取した。火炎伝播による燃焼質量割合を求めるには、著者らが開発した1領域モデルによる熱発生解析を用いた⁽⁶⁾。ノック強さの定義にはいくつかあり、目下決定的なものはない。本研究では、多数サイクルの処理と、前報との関連から、原指圧波形を5～10 kHzの帯域フィルタ処理し、得られたガス振動波形の最大振幅値をもってそのサイクルのノック強さとした。

運転条件は従来の研究との関連から、絞り弁全開、

回転速度1500 rpm一定である。燃料にはRON 94のPRFを用い、予混合気として供給した。

燃焼室壁温度を変化させるために、ここでは二つの方法を用いた。一つは冷却液温度の変更である。本実験範囲内で、冷却液出口において30°Cの変化が可能であった。冷却液温度の上昇は、燃焼室壁温度を全体的に増大させ、ガスの温度分布をより均一にすることが期待される。もう一つの方法は、燃焼室の中で最も高温であると考えられる、排気弁表面にセラミック層を形成しさらに高温とすることである。オリジナルの排気弁表面を1.3 mm厚さ分切断削除し、同厚さに安定化ジルコニアを溶射して製作した。伝熱モデルを含む簡単な燃焼シミュレーションによれば⁽⁷⁾、このようなセラミック層の添付により、表面で約200°Cの温度上昇が期待された。排気弁の交換により、弁開閉時期をオリジナルのものと同一になるよう注意深く調整し、モータリング時体積効率、モータリング最高圧力のいずれもが測定精度内に納まるだけの再現性を得た。

3. 結果および考察

ノック特性を表すパラメータは、多数サイクルを平均して得られるものと、個々のサイクルの異なったパラメータ同志の相関などのサイクルベースのものに大別される。図3～9に平均値パラメータの結果を、図10～12にサイクルベースのものを示す。

図3は、先に述べた熱発生解析から得られた、50%質量燃焼期間と冷却液温度との関係を示す。これは火炎伝播過程を表すパラメータの一つとして示したが、本研究で設定した実験条件の範囲内においては点火時期を問わず明らかに冷却液温度の影響を受けない。初

表1 供試機関の寸法諸元

Bore, mm	85.7
Stroke, mm	86.0
Compression ratio	8.29
Connecting rod length, mm	15.79
Displacement volume, cm ³	496
Intake valve;	
Maximum lift, mm	10.0
Opens at	4 deg BTDC
Closes at	132 deg BTDC
Exhaust Valve;	
Maximum lift, mm	10.2
Opens at	105 deg ATDC
Closes at	24 deg ATDC

図1 燃焼室形状と圧力変換器および点火栓配置

図2 指圧線図から得られる各種燃焼パラメータの定義

期火炎伝ば過程や上死点圧力などの、他の火炎伝ば過程を表すパラメータもすべて同様であった。30°Cの冷却液温度変化は1.5%の体積効率変化をもたらし、大まかには圧縮おわりで約15°Cの混合気温度変化に相当する。この程度の平均温度変化は、結果的に火炎伝ば過程に現れてこないことが明らかである。

図4～9は、平均値パラメータのうちノック過程を表すものを示す。図4から、ノック強さは冷却液温度によって極めて大きく影響されることが明らかである。これは、火炎伝ば過程に対するのとは全く対照的である。図5に、このときのノック時末端ガス質量割合に及ぼす冷却液温度の効果を示す。ノック強さが冷却液温度上昇に伴って大きく増大することの原因の一

つは、自発点火で燃焼する混合気の質量割合の増大にあることは明らかである。さらに、ノック発生圧力が冷却液温度によってほとんど変化しない事実を示した図6から、冷却液温度は何らかの形で末端ガス温度に影響し、それがノック過程に現れているものと考えられる。このことは、ノック発生時期を示した図7からも明らかで、冷却液温度の上昇がノック発生を早め、自発点火で燃焼する末端ガスの質量割合を増大させる。しかしながら、図4のノック強さの変化は、図5の燃焼質量割合の変化の程度よりもかなり大きい。このことに関連して、ノック発生に伴う急激な圧力上昇のはじめの立上りを示す“pressure jump”を図8に、最高圧力とノック発生圧力との差DELPTOTを図9に示す。実際の機関におけるノックでは、圧力振動を伴いながら最高圧力に達することが多く、はじめの立上りでそこに達することはまれである。これは、末端ガ

図3 火炎伝ば過程(50% 質量燃焼期間)に及ぼす冷却液温度の影響

図5 ノック時末端ガス質量割合に及ぼす冷却液温度の影響

図4 平均ノック強さに及ぼす冷却液温度の影響

図6 ノック発生圧力と冷却液温度

スの自発点火が不均一に発生することに起因すると考えられる。さらにこの不均一性は、残留ガスの影響などに基づく混合の不均一性と、本研究が着目する、温度分布の不均一性とから成る。著者の一人も、混合の不均一性を排除した急速圧縮機によるノックの研究で⁽⁸⁾、同様な現象を確認しており、温度分布の不均一性も少なからず影響を持つものと考えている。

さて図8、9から明らかなように、冷却液温度の上昇に伴い、各パラメータとも場合によっては2倍以上の増大を示している。このことは、先のノック強さ増大が、単に末端ガス質量割合の増大のみならず、自発点火そのものの挙動、すなわち見掛けの化学反応速度の増大にもよることを意味している。この見掛けの反

応速度増大は、先に評価した混合気平均温度上昇と、末端ガス内温度分布の均一化とによるものであると考えられる。

図10に、採取した全サイクルのうちノックが発生した割合の冷却液温度による変化を示す。各点火時期とも、冷却液温度の上昇に伴って発生率は単調に増大している。28°BTDCという比較的臨界的な条件においては、30°Cの変化で約2倍もの発生率変化となっており、冷却液温度の影響力の大きさがわかる。このように大きな効果が現れるのは、先の混合気平均温度の上昇もさることながら、ノック発生時の末端ガスは極めて壁近傍の薄い層となっていることから、この壁近くに末端ガスがさらされることも重要であると考えら

図7 冷却液温度によるノック発生時期の変化

図9 ノック発生圧力と最高圧力との差に及ぼす冷却液温度の影響

図8 ノック発生に伴うはじめの急激な圧力上昇と冷却液温度との関係

図10 冷却液温度によるノック発生率の変化

れる。これは、後述する排気弁表面温度の効果とも関連しており、末端ガスにさらされる壁面という点がノックにとって重要な意味を持つてくる。

図 11, 12 に、各サイクルベースでのノック特性の例を示す。図 11 は、火炎伝ば過程を表すパラメータである 50 % 質量燃焼期間と、ノック過程を表すパラメータであるノック発生時期との相関である。火炎伝ばが速いほど末端ガスの温度、圧力上昇も速やかで、これらの積分で決まるノック発生時期も早まるという正の相関の極めて強いことが明らかである。このようなサイクルベースでの相関については別報⁽³⁾に詳述してあるが、他のいくつかのパラメータについても同様の

図 11 各サイクルベースでの 50 % 質量燃焼期間とノック発生時期との相関(冷却液温度: 高, 点火時期: 32° BTDC, ノック発生率: 100 %, サンプルサイクル数: 378)

図 12 各サイクルベースでの火炎伝ば過程を表すパラメータ(50%質量燃焼期間)とノック過程を表すパラメータ(ノック発生圧力および発生時期)との相関係数に及ぼす冷却液温度の影響

ことが言える。図 12 には、これらの相関係数に及ぼす冷却液温度の影響を示した。いずれの相関係数も、冷却液温度の上昇に伴って若干ながら増加していることが明らかである。これは、火炎伝ば過程によって、すなわち末端ガスの温度、圧力履歴によってノック発生が決定されるということの程度が、冷却液温度の上昇によって強くなることを意味している。したがって、偶発的に末端ガスの自発点火に影響する要因である混合気の不均一性、この場合燃焼室全体にわたって存在すると考えられる温度分布の不均一性が、冷却液温度の上昇に伴って減少することによるものと考えられる。

図 13~15 に、排気弁にセラミック層を添付した場合の結果を示す。ノック強さが最高燃焼温度付近の混合比で最大値をとり、末端ガス質量割合も同様であること、そしてノック発生時期もこの付近で最小値となることなどがこれから明らかに示されており、いずれの傾向も互いに整合している。しかしながら、元の排気弁を使用した場合と、セラミック層添付のもの

図 13 セラミック層添付排気弁使用時のノック強さ

図 14 セラミック層添付排気弁使用時の末端ガス質量割合

図 15 セラミック層添付排気弁使用時のノック発生時期

の間には全く有意差が認められない。前述のように簡単な燃焼シミュレーションによれば、1.3 mm 厚のセラミック層添付により約 200°C の表面温度増加が期待されるのにもかかわらず、ノックに何の影響も現れないのは、わずか 30°C の冷却液温度の効果とは全く対照的であり、主にノック発生時付近の末端ガスが排気弁表面にさらされることがないことによるものと考えられ、このように大きな温度変化も、結果的にノック発生に至る末端ガスの温度、圧力履歴に影響するほどでないことが現れている。

4. 結 論

実際の機関を用いて二つの方法で燃焼室壁温度を制御し、ノック特性を調べた結果以下の諸点が明らかとなった。

(1) 約 30°C の冷却液温度変化は、本実験範囲内において、火炎伝ば過程に何らの影響も与えず、ノック特性のうちノック強さ、ノック発生時期などの平均値パラメータを著しく変化させる。これは末端ガスの温度が変化するためであり、体積効率変化から示される平均温度変化のみならず、末端ガスが壁面のごく近傍で発生することに基づくものと考えられる。

(2) 上述のノック特性の変化は、自発点火で燃焼

する混合気質量割合変化のみではなく、末端ガス温度分布の一様性変化に伴う自発点火時の見掛けの化学反応速度の変化にもよることが示された。

(3) 冷却液温度の変更はサイクルベースでのノック特性にも影響を及ぼし、火炎伝ば過程を表すパラメータとノック発生を表すパラメータとの相関の強さを若干ながら変化させる。これは、末端ガスの温度、圧力履歴によって自発点火の発生が決定されることに影響する偶発的要因のうち、燃焼室全体にわたる温度分布の均一性が変化することに基づくものと考えられる。

(4) 排気弁材料の変更により、比較的大きな表面温度変化を与えたと考えられるにもかかわらず、いかなるノック特性にもその影響は現れない。これは、末端ガスがノック発生時付近においては排気弁表面に接することがないと考えられるためであり、ノックにあずかる末端ガスの温度、圧力履歴に影響せず、末端ガス領域の壁面温度の重要性を意味するものと言える。

本研究は、著者の一人が文部省在外研究員として M.I.T. に滞在する期間に行われた。研究費の一部は、"M.I.T. Sloan Automotive Laboratory's Consortium for Engine Research" によった。最後に、研究遂行上有益な助言を賜った Sloan Laboratory Manager, Dr. V. W. Wong および実験装置の製作等に格別の助力を賜った Sloan Laboratory Technician, Mr. Don Fitzgerald に感謝する。

文 献

- (1) 志賀・ほか 2 名, 機論, 51-465, (1985), 1582.
- (2) Shiga, S., ほか 4 名, *Proc. COMODIA 85*, Tokyo, (1985) 343.
- (3) Chun, K. M. and Heywood, J. B., *Proc. 1st KSME-JSME Thermal Fluids Eng. Conf.*, Seoul, (1988), 1-406.
- (4) Hu, H. and Keck, J., *SAE Paper*, No. 872110 (1987).
- (5) Chun, K. M. and Heywood, J. B., *Proc. 22nd (Int.) Symp. Combust.*, in press.
- (6) Gatowski, J. A., ほか 2 名, *SAE Paper*, No. 841359 (1984).
- (7) Assanis, D. N., M. I. T. Ph D Thesis, (1985-9).
- (8) 志賀・ほか 2 名, 機論, 51-465, (1985), 1591.