内燃機関のセラミック燃焼室壁面への熱伝達*

榎本良輝**, 古浜庄一**

Heat Transfer to Wall of Ceramic Combustion Chamber of Internal Combustion Engine

by Yoshiteru ENOMOTO and Shoichi FURUHAMA

Thin film thermocouples have been successfully produced, using ceramics as the body material, through the application of the technique used to make thin film thermocouples previously developed by the authors. The measurement of instantaneous temperature and instantaneous heat flux, on the surface of the ceramic plate fixed on top of the piston, was accomplished using the thin film thermocouples thus developed. As the results, conditions of the heat transfer to the ceramic wall of high temperature have been determined.

Key Words: Internal Combustion Engine, Ceramics, Heat Transfer, Piston, Thin Film Thermocouple

1. ま え が き

セラミックスを燃焼室壁に使用したいいわゆる断熱エンジンは冷却損失の低減および排気エネルギーの増大を目的として開発されている^{(1)~(5)}が、その際最も重要な因子の一つとして燃焼ガスから燃焼室壁面への瞬時熱伝達率 α_g が従来の金属で比較的低温面への α_g と同様な値であるかどうかは確認されないでそのまま計算に使われている⁽¹⁾⁽⁶⁾。そこで本報はその実測をピストン頂点で行い、興味ある結果を得たので報告する。

2. 実験装置および測定方法

供試機関は日産自動車製 CA-18 S 形水冷四サイクル四気筒ガソリン機関、ボア×行程=83 mm×83.6 mm、総排気量 1809 cc、圧縮比 8.8:1 である。

2.1 セラミック母材の薄膜形熱電対 セラミックスの表面温度および瞬時熱流束を測定するための薄膜形熱電対は著者らの既報の熱電対^{(7)~(9)}と基本的には同様である。しかし母材に使用するセラミックス自身は電気の不導体であるため、熱接点および冷接点用

熱電対を2対使った。熱接点はめっきにて形成させ、冷接点はあらかじめ形成した接点を所定の位置に埋めこみ、両接点の差温および冷接点温度を測定した。

図1はその薄膜形熱電対を示す。今回使用したセラミックスは窒化けい素〔熱伝導率 $\lambda=10.0 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 、

図1 セラミック母材の薄膜形熱電対

* 昭和60年3月31日 第62期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和59年11月5日。

** 正員、武蔵工業大学 (〒158 東京都世田谷区玉堤 1-28-1)。

熱容量 $C_V = 833.52 \text{ Wh}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ である。ダイヤモンド砥粒を使用した超音波加工により母材外径 7.5 mm の形状にし、その部分の中央および外周付近に熱接点用の内径 0.3 mm の穴、また外周側面に表面から l の位置に 0.6 mm の穴加工をした。めっきに耐熱性のあるニッケルを用いたので、熱電対の組合せは鉄、ニッケルとした。その線径は鉄が 0.15 mm、ニッケルが 0.18 mm で、熱起電力は 500~1000 K の間で $18.13 \mu\text{V}/\text{K}$ である。これらの素線を 0.3 mm の穴にセラミック系接着剤アロンセラミックで固定し、表面を平滑化した後に前処理を行いめっきを施した。めっき法については、被めっき面のほぼ全体が電気の不導体であるため、センシタイザ処理により塩化第一すズイオン

を付着させ、その後アクチベータ処理により塩化第一すズイオンと酸化還元反応させ表面に微量の金属パラジウムを析出させる。この表面に化学ニッケルめっきを約 $1 \mu\text{m}$ 施し、鉄線とニッケル線を導通させ熱接点を形成させた。さらに電解めっきにより $10 \mu\text{m}$ のニッケルめっき厚さとした。

ピストンのトップランド外径および燃焼室形状と同じ窒化けい素の円板 (板厚 4.5 mm) を作り、その中央部に内径 8 mm の穴を超音波加工によりあけ、その穴に薄膜形熱電対をアロンセラミックで固定した。ピストン側は図 2 に示すように直径 30 mm で深さ 0.3 mm のくぼみをつけ熱伝導率の低い空気層を作った。この理由は窒化けい素板と Loex ピストンとを密着させると、窒化けい素表面に流入する熱量は Loex のみのピストンに近い値となるとともに表面温度も Loex の影響を受け、数 10 K 程度しか高くならなかったためである。

2.2 測定方法 エンジン運転中は、機関出口冷却水温 80°C および潤滑油ストレーナ入口温度 90°C 一定に保つ。ピストンからの熱電対素線はリンク装置により機関外部に切断せずに導出される。導出された熱

図 2 薄膜形熱電対を埋めこんだ窒化けい素円板のピストンへの取付け図

図 3 ピストンに固定された薄膜形熱電対

図 4 各回転速度における窒化けい素壁表面瞬間温度測定結果 ($l=2.5 \text{ mm}$)

電対素線は電氣的ノイズを防ぐためにシールドする。熱接点と冷接点の差温による熱起電力をオシロスコープで1 div. が12 K になるように直流増幅器で増幅しデータレコーダで記録する。同時に燃焼室内ガス圧力および下死点におけるタイムマークも記録する。また冷接点温度もペン書記録計により記録する。

3. 測定および解析結果

図4に各回転速度全負荷時における窒化けい素板の表面温度変動、冷接点温度および燃焼圧力を示す。

図5 3000 rpm 全負荷時に窒化けい素に流入する瞬時熱流束 (Loex の同一測定点との比較)

図6 実測による熱伝達率とEichelbergの式から求めた熱伝達率 (3000 rpm 全負荷)

1 div. は12 K および2 MPa である。温度振幅は約35~50 K とかなり大きな値を示し、熱接点温度も4000 rpm において表面平均で約800 K に達していることがわかる。また、いずれの回転速度においてもピストン表面温度が高くなったため燃焼圧力は本来のものより小さくなっている。

図5に3000 rpm 全負荷時の窒化けい素に流入する瞬時熱流束を同一測定点におけるLoex ピストンの場合と比較して示す。作用行程前半でLoex の場合以上の熱が流入していることがわかる。しかし、行程全体の平均ではLoex の半分以下である。 $\bar{q}$ は平均熱流束である。

図6にLoex および窒化けい素における3000 rpm 全負荷時の各々の燃焼圧力より気体の状態方程式を使って求めたガス温度 T_g および測定値である各々の瞬時熱流束 q 、壁表面温度変動 T_w より得られた熱伝達率の各クランク角ごとの瞬時値 α_q を示す。また下方に平均ピストン速度 c_m 、燃焼圧力 P_g 、およびガス温度 T_g よりEichelbergの式⁽¹⁰⁾を使って求めた熱伝達率も示す。窒化けい素の場合、表面平均温度がLoex より約200 K 高く、燃焼圧力⁽⁸⁾は低くなっているにもかかわらず、実測値は作用行程において大きい値を示している。この原因として窒化けい素壁表面の高温により壁付近の境界層内の熱伝導状態が良くなり熱伝達率が増加したものと思われる。

図7は全負荷時において窒化けい素に各行程ごとに

図7 窒化けい素へ行程ごとに流入する平均熱流束

図 8 2000 rpm 全負荷時における点火時期の室化けい素壁表面瞬間温度変動に対する影響 ($l=2.5$ mm)

流入する平均熱流束を示す。前報⁽⁹⁾の排気弁の場合と同様に全行程に流入する平均熱量は作用行程より小さくなっている。また作用行程以外の行程では熱流束は負になり、燃焼室内ガスへ放熱されていることがわかる。

図 8 に 2000 rpm 全負荷時における点火時期の室化けい素壁表面瞬間温度変動に対する影響を示す。点火時期が MBT よりわずかに進んだかすかなノックによっても熱伝達率が増大し表面温度変動の振幅は MBT の約 2 倍にもなり、作用行程での熱流入が増大していることがわかる。

図 9 に点火時期の違いによる各行程ごとに流入する平均熱流束を示す。

図 10 は圧縮、作用行程中の瞬時熱流束への点火時期の影響を示す。また MBT の Loex ピストンの場合も示す。図 5 のときと同様に燃焼による圧力上昇始まり直後に、MBT および BTDC 20°とも急上昇し、Loex の場合より多量の熱が流入していることがわかる。

図 11 は熱伝達率への点火時期の影響を示す。上死点直後に MBT, BTDC 20°とも急増している。特に BTDC 20°はかすかなノックの影響で異常な上昇を示している。また Eichelberg の式より求めた熱伝達率も示すが、実測値に比べると非常に小さい値となっている。未発表ではあるが著者らの Loex ピストンにおける測定結果では、熱伝達率実測値および Eichelberg の式から求めた熱伝達率は MBT でほぼ一致しており、ノックの度合によって実測値のほうが増大する傾向にあるが、この室化けい素のように顕著な差は現れなかった。

以上の結果から判断するとセラミックスのような高温壁面における熱伝達、特に燃焼による圧力上昇始まり

図 9 点火時期の違いによる室化けい素に流入する各行程ごとの平均熱流束

り直後から作用行程前半にかけての熱伝達率は想像以上に大きくなっている。この原因として考えられることは、まず高温壁面であること、次にセラミックスという材質によるものの 2 点である。そこで金属燃焼室壁面で高温となる排気弁〔耐熱鋼 SH 36, 熱伝導率 21 W/(m·K), 熱容量 1000 Wh/(m³·K)〕についての前報⁽⁹⁾における測定結果から全負荷時の瞬時熱流束を求めたものが図 12 である。これは排気弁中央測定点の 1 の結果である。図 12 中に各運転条件の壁表面温度 $\bar{T}_w$ とサイクル中の平均熱流束 $\bar{q}$ も示した。いずれの回転速度においても圧力上昇始まり直後の上死点前で熱流束の立ち上がりが急である。

図13は3000 rpm 部分負荷時の瞬時熱流束を示す。1/4の低負荷以外は上死点前での熱流束の上昇率はいずれの負荷も急である。

図14は燃焼圧力から求めた T_g および表面瞬間温度 T_w と q より得られた全負荷時の熱伝達率 α_g を示す。また Eichelberg の式より求めた計算値も示す。いずれの条件も熱流束上昇と同時に熱伝達率が急昇している。しかしその減衰の仕方はセラミックスの場合と比較すると急で、上死点后 20° 付近で計算値より小さくなっている。これは空気層有無による違いか、材質による違いかは現時点では判定できないが、いずれに

しても高温壁面においては燃焼による圧力上昇始まりとともに熱流束も急昇し、同時に熱伝達率も急増していることがわかる。

図15は3000 rpm 部分負荷時の熱伝達率を示す。低負荷では上死点以前にピークがありその値は小さいが、全負荷においては上死点直後にピークが発生し、そのピーク値も他の負荷に比べ増大している。

4. 結 論

著者らが開発した薄膜形熱電対の手法をセラミックスに応用し、電気不導体の被めつき面への耐久性あるニッケルめつき法を開発したことによって窒化けい素

図10 点火時期の瞬時熱流束への影響 (2000-full)

図12 全負荷時における排気弁中央の瞬時熱流束

図11 点火時期の熱伝達率への影響 (2000-full)

図13 3000 rpm の部分負荷時における排気弁中央の瞬時熱流束

図 14 全負荷時における排気弁中央の熱伝達率

図 15 3000 rpm 部分負荷時における排気弁中央の熱伝達率

を母材とした窒化けい素表面の瞬間温度および表面に流入する瞬時熱流束を測定できる薄膜形熱電対を製作することに成功した。ピストン頂面に固定された窒化けい素円板にその薄膜形熱電対を埋めこみ四サイクルガソリン機関におけるセラミック燃焼室壁面にサイクル中に流入する熱量を計測することができた。その結果以下のことがわかった。

(1) 窒化けい素表面平均温度は Loex ピストンの場合より約 150~260 K 高温になった。その場合作用行程の熱流入は従来使われていた Eichelberg の式などから予想される α_g よりはるかに大きい α_g で熱が壁面に入ることが示された。

(2) このことは断熱材によってガスと壁面の温度差を小さくしても、作用行程初期には逆に熱損失が増大し、熱損失の一部をピストン仕事に回収する目的にはそわないことがわかった。

(3) この現象はセラミックスのもつ材質の特性のみではなく、壁面温度が高いことによる影響も大きいことが排気弁表面への熱流束からもわかった。

(4) 一サイクル中の熱損失の低減もしたがって元の値の約 50 % 減少にとどまった。

(5) またかすかなノック発生によっても熱伝達率は急増し、作用行程において多量の熱損失があることがわかった。これは高温の燃焼室壁表面付近の温度境

界層がわずかな衝撃でも破壊されるためと推定される。

(6) 高温壁面およびセラミック壁への熱伝達率の特殊性の解明が今後の重要課題となった。

終わりに、本研究はピストンリング(株)、厚木自動車部品(株)、日産自動車(株)、富士バルブ(株)、(株)常盤製作所、(株)三立の各社の援助を受け実施され、本学表面工学研究室の松本誠臣教授の指導を受けた。また昭和 59 年度卒論学生 朝倉一浩、加藤道浩、高井元也、古木康晴、千ヶ崎浩行、山田久年の諸君の協力を得た。ここに、これらの方々に深甚なる謝意を表す。

文 献

- (1) Kamo, R. and Bryzik, W., SAE Paper 780068 (1978), 213.
- (2) Kamo, R. and Bryzik, W., SAE Paper 810070 (1981), 263.
- (3) Woods, M. E. and Oda, I., SAE Paper 820429 (1982).
- (4) Tovell, J. F., SAE Paper 830316 (1983), 55.
- (5) Wilsted, H. D., SAE Paper 820432 (1982).
- (6) Yoshimitsu, T., ほか 3 名, SAE Paper 820431 (1982).
- (7) 榎本・古浜, 機論, 50-453, B (昭 59), 1353.
- (8) 榎本・古浜, 機論, 50-456, B (昭 59), 1972.
- (9) 榎本・古浜, 機講論, No. 840-14, (昭 59-10), 176.
- (10) Eichelberg, G., Engineering, (1939), 463.

討 論

〔質問〕 鈴木 孝幸〔日野自動車工業(株)〕

独特な薄膜形熱電対を開発され、これを用いて今までに例のないセラミックピストン頂面の熱伝達について解析された点に敬意を表す。

(1) セラミックスには通常いくらかの気孔が存在する。このため、Niめっき実施時にはこの気孔内にNiが浸透し、めっき厚さが不均一になることが考えられる。また運転中に気孔内の空気が膨張してNiめっきを押し上げ、接着を不確実なものとする心配がある。セラミックス中の気孔がNiめっきに与える影響について説明して頂きたい。

(2) 作用行程において、Loexより窒化けい素のほうが熱伝達率が高い原因として窒化けい素壁表面の高温により壁付近の境界層内の熱伝達状態がよくなり熱伝達率が増加したものと思われるとあるが、もう少し詳しく説明して頂きたい。また今後の計画があればお教え願いたい。

〔回答〕 (1) 窒化けい素の気孔について詳しいデータを入手できなかったが、ご指摘のような懸念がある。確認できる手段として表面あらさ計で測定したところ最大3 μm 程度のあらさで検知できた。この程度の気孔であれば電解めっきの不可能なセラミックスの表面に無電解めっきを施す際に密着性に関して逆に有利であると考え。まためっき厚さが問題になる箇所は熱接点(鉄線)まわりであり、この付近については鉄線まわりのアロンセラミック内に気孔、くぼみなどが生じないように処理し、めっき厚さが所定の厚さになるよう心がけた。

めっきのはく離については、実験後局部的なはく離を確認している。これはお説のごとく気孔のためか、金属とセラミックスの熱膨張率の違いと繰返しの熱負荷によるものか現時点では断定できない。

今後は気孔内をセラミック系のペーストで充てんし焼成後めっきをすることによりご指摘のような問題を解決しようと思っている。

(2) このことについては引き続き研究中であるが、単に窒化けい素壁表面の高温によるものだけではなく窒化けい素の物性値などの因子が関係しているものと思われるので、今後ジルコニアなどの物性値の異

なるセラミックスおよび高温金属壁面での測定を行い、この原因を明確にしたいと思っている。

〔質問〕 鈴木 孝〔日野自動車工業(株)〕

世界的に貴重な実験をなされたことに深い敬意を表す。

(1) 燃料噴射時期の遅延に伴い α が増加し、さらにトレースノックによって急増しているが、メタルエンジンでもその傾向は同じと思われる。例えば圧縮始め温度をそろえるなどして行った計測結果があればご教示願いたい。またそれについてのできればご見解も合わせて伺いたい。

(2) Eichelbergの式から計算した値と実験値とは大幅に違っているが、Woschniの式ではどうか。またそれらの計算値に対するご見解も合わせて伺いたい

〔回答〕 (1) 未発表(次期通常総会に投稿予定)であるが、本研究と同じ供試エンジンでAl-合金ピストンにおけるノッキング発生時の瞬時熱流束および熱伝達率についての測定結果では、圧縮始めの温度を厳密にそろえることは行っていないが、点火時期の影響について見るとMBTよりクランク角で15°進角して作用行程中の熱伝達率の増大は約50%にとどまり、本研究結果のごとくわずか3°進めて2倍以上になるような激増はなかった。したがって低温であるメタルエンジンと比べセラミックエンジン壁面付近の温度境界層はかなり敏感になっていると考えている。

(2) Woschniの式はEichelbergの式と比べ、ガス流動、燃焼による影響などの項が追加されかなり複雑になっている。しかしながら両方の式から計算した α_g はピーク値のわずかな違い、ピークの位相がわずかにずれる、ピーク後Eichelbergのほうが大きな値を示すなど相違点はあるが、実験値と比較した場合両者は大差ないと言える。またAl-合金ピストンにおける α_g の実測値および上記2式からの計算値を種々検討した経験から、両式ともガス側からのみ表していることにより、実験値と大きな差が出ているものと思われる。今後は受熱側から、関係する因子の抽出、その影響度合の調査などについて実験的に検討を加えていきたいと思っている。