

エンジン用熱流束計の高精度化に関する研究 (熱流束計構成材料の検討)

長瀬 慶紀¹⁾・寺嶋 豊明²⁾・田坂 英紀³⁾

Study on Improvement of Heat Flux Probe for Engine (Examination of Heat Flux Probe Materials)

Yoshinori NAGASE , Toyoaki TERASHIMA , Hidenori TASAKA

Abstract

Internal combustion engines are required for efficientization more than the former for the earth environmental improvement. To improve the thermal efficiency and combustibility, the gas flow in cylinder of engine is introduced. However, it is difficult to say to make the internal combustion engine highly effective as the best way. The purpose of this research is paid attention to the ratio of electrical resistivity of wire by body of heat flux probe and surface thermophysical property of constituent. The heat flux probes are produced and carried out the quantitative experiments. The heat flux probe used for an internal combustion engine is determined by improvement of the measurement accuracy and reliability.

Keywords:

Heat flux probe, Constant volume combustion bomb, Quantitative heat flux experiment, Ratio of electrical resistivity, Thermophysical property of constituent

1. はじめに

内燃機関は、環境問題が深刻になっている現在、従来にも増して高効率化を求められるようになった。火花点火機関において、熱効率や燃焼性を向上させるために筒内ガス流動の積極的な導入が行われているが、筒内ガス流動を導入することは、燃焼室壁面への伝熱現象の促進や熱損失、燃焼室各部の熱負荷の増大など、機関全体の高効率化を図る上で最良の方法とは言い難い。

本研究の目的は、筒内燃焼における燃焼室壁面への熱流束を計測する熱流束計から得られる熱流束に影響を与え

る因子として、熱流束計表面の母材と素線の電気抵抗値の割合、また熱流束計の構成材料の熱物性値に着目し、種々の熱流束計を製作し、定容燃焼容器を用い、燃焼を単純化させた定量的な検定を行うことにより、熱流束計の計測精度及び信頼性を向上させ、内燃機関に用いる熱流束計を決定することである。

2. 実験装置及び計測方法

2.1 熱流束計構造

今年度製作した熱流束計の構造を図1に示す。以下、コンスタンタン: Con, 銅: Cu, 鉄: Fe, クロメル: Chr, アルメル: Alu と略記する。Con 母材 Con-Cu 熱流束計, Chr 母材 Chr-Alu 熱流束計, Chr 母材 Chr-Fe 熱流束計は内接

1) 機械システム工学科助教授

2) 機械システム工学専攻院生

3) 機械システム工学科教授

点なしの構造を、Chr 母材 Chr-Cu 熱流束計は内接点ありの構造をしている。

熱流束計の母材はφ3.2mmの丸棒の両端を平行な平面に仕上げ、長さ10.0mmの垂直円柱としたもので、この母材の片側端面より中心軸に平行で深さが異なる3つの小孔a, b, cを設けている。

小孔aにはφ0.65mmの素線を挿入し、母材の表面と揃え、厚さ10.0μmの銅薄膜によって表面接点を形成した。小孔bは母材表面からの距離が5.0mmになるように開けられ、φ0.65mmの素線先端と底部を電気的に溶接する。小孔cには、φ0.65mmの素線を挿入し、前述の2本の素線と対を成している。これら2組の熱電対から得られる熱起電力から表面接点と内接点の温度を計測する。

2.2 絶対値検定

絶対値検定計測システム図を図2に示す。

絶対値検定は、定容燃焼容器に取付けた熱流束計より求めた熱流束(以後、壁側熱流束)を高圧インジケータから取込んだ圧力より算出される容器全体の熱流束(以後、ガス側熱流束)を基準とし、比較することで定量的に検定を行うものである。

壁側熱流束は、熱流束計表面温度から各計測点の熱流束が算出され、その各計測点の熱流束に代表面積を掛け合わせ、その総和を燃焼室壁面の総面積で除したものとする。

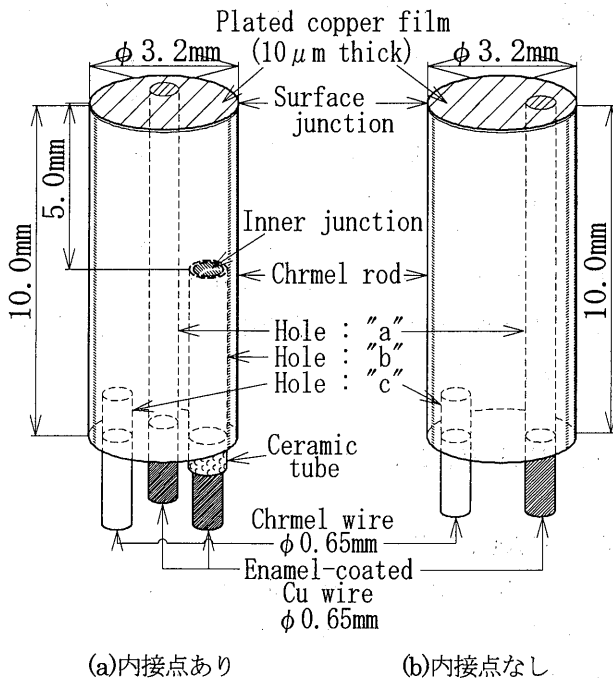


図1 熱流束計の構造

ガス側熱流束は圧力より算出されるが、予混合気燃焼中は熱発生と熱損失が同時に起こっているため、正確な熱流束を求めることができない。しかし、燃焼終了後は既燃ガスについての単純な熱損失のみになるので、熱力学第1法則より壁面への熱流束を求めることができる。そのため、ガス側熱流束ピーク値以降の減衰過程を評価する。

実験方法は、予め予混合気生成タンクに当量比1のプロパンと空気の予混合気を充填し、十分に攪拌する。真空ポンプにより定容燃焼容器内を真空状態にし、予混合気を充填圧0.1MPaになるように充填する。予混合気充填後、容器内の混合気が静止したと考えられる時間(約1分間)放置し、容器中心で点火を行い、高圧インジケータから圧力を、全32点の熱流束計から表面接点温度を同時に取り込む。計測終了後は、容器内の既燃ガスを真空ポンプにより充分排出し、その後大気開放を行う。

以上の操作を1サイクルとして、それぞれの熱流束計に対して100回の実験を行う。

3. 絶対値検定結果

3.1 ガス側熱流束

絶対値検定では、圧力より算出されるガス側熱流束を基準とする。

実験データの母集団が100個以上では、平均値に発生する差は微小であるという実験的な根拠¹⁾に基づき、各熱流束計の実験有効データ数を100個とした。

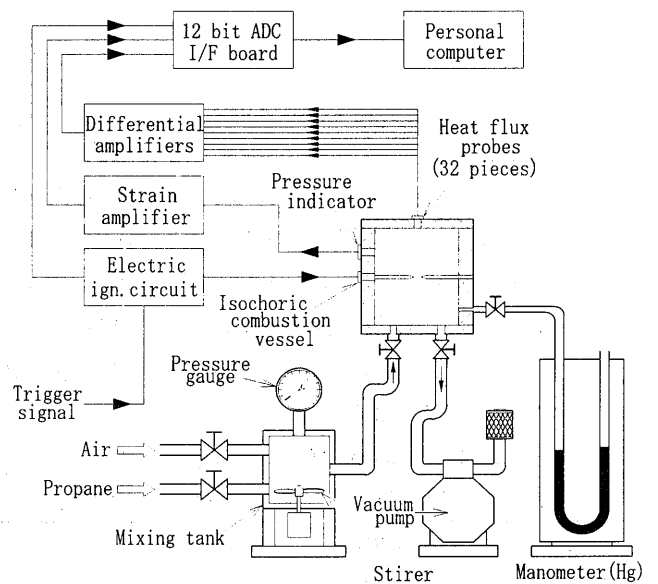


図2 絶対値検定計測システム図

本年度製作した3種の熱流束計の本検定時の圧力・ガス側熱流束及び昨年度の本検定における圧力・ガス側熱流束を比較した。結果を図3に示す。図より、それぞれの圧力・熱流束波形の形状はほぼ一致しており、圧力のピーク値での差も1.2%以内に収まっている。よって、本検定の再現性と精度を十分に確認することができた。

以上のことより、昨年度の4種と今年度の3種を併せた7種類の平均波形を基準とし、ガス側熱流束波形に決定することにした。

3.2 電気抵抗値の割合について

3.2.1 熱流束計の内接点の有無の影響

熱流束計の内接点の有無の影響を調査するため、昨年度製作したCon母材Con-Cu熱流束計の定常成分を取除いた熱流束と内接点を取除いたCon母材Con-Cu熱流束計の熱流束を比較した。その結果、両熱流束計の平均熱流束波形は近い波形を示していることがわかった。従って、内接点を無くしたことによる熱流束波形への影響はないことが判明した。

3.2.2 実験用熱流束計

前述したように、内接点を取除いたことによる熱流束波形への影響はないことがわかったため、ここで製作した熱流束計は内接点を取除いた構造をしている。

昨年度の絶対値検定において、Fe母材Fe-Con熱流束計とCon母材Con-Fe熱流束計の結果は、同じ構成材料の組み合わせの熱流束計であるにもかかわらず壁側熱流束波形に相違がみられた。しかし、熱流束計の構造・構成材

表1 各種材料の熱物性値

Material	Thermal conductivity λ [W/(m·K)]	Thermal diffusivity a [m ² /s]
Con	23.3	6.040×10^{-6}
Fe	67.4	18.62×10^{-6}
Chr	13.8	3.757×10^{-6}
Alu	29.4	6.281×10^{-6}

料は同一であり、熱流束計が単純な熱電対と考えると、単に母材と素線を入れ換えただけであるため、このような差が出るのは考えにくい。そこで、この2種類の熱流束計の相違について検討してみたところ、熱流束計表面の母材と素線の電気抵抗値の割合が異なっていた。そのため、今年度は、熱流束計表面の母材と素線の電気抵抗値の割合が壁側熱流束波形に影響しているのではないかと考え、この仮説を確認するためにChr母材Chr-Alu熱流束計を、また、一般的に熱流束計は測定対象物の材料を使用したほうがよいと言われていることから定容燃焼容器と同材料である鉄を使用したChr母材Chr-Fe熱流束計を製作し、絶対値検定を行った。なお、ここで各熱流束計の熱流束算出に用いた熱物性値は、昨年度の本研究²⁾において、母材と素線の電気的極性を見たときに、負脚側の熱物性値を用いるべきだという結論より、負脚側の熱物性値を用いている。表1に壁側熱流束算出に用いる熱物性値³⁾を示す。この仮説確認のため、母材と素線の電気抵抗値の割合と壁側熱流束に相関関係があることが示された場合、電気抵抗値の割合を考慮することで、より高精度の熱流束計測が可能となる。

3.2.3 ガス側熱流束と壁側熱流束

熱流束計の構成材料のChrに着目しAlu母材Alu-Chr熱流束計、Chr母材Chr-Alu熱流束計、Chr母材Chr-Fe熱流束計の3種類の熱流束計の絶対値検定結果を比較した。結果を図4に示す。また、熱流束計の構成材料のConに着目しCon母材Con-Fe熱流束計、Fe母材Fe-Con熱流束計、Con母材Con-Cu熱流束計の3種類の熱流束計の絶対値検定結果を比較した。結果を図5に示す。

図4より、電気抵抗値の割合が異なる種々の熱流束計とガス側熱流束の間には、電気抵抗値の割合が1から離れていくとガス側熱流束に近づいていくことがわかる。しかし、図5からは、電気抵抗値の割合が異なる種々の熱流束計とガス側熱流束の間には明確な関係がみられない。

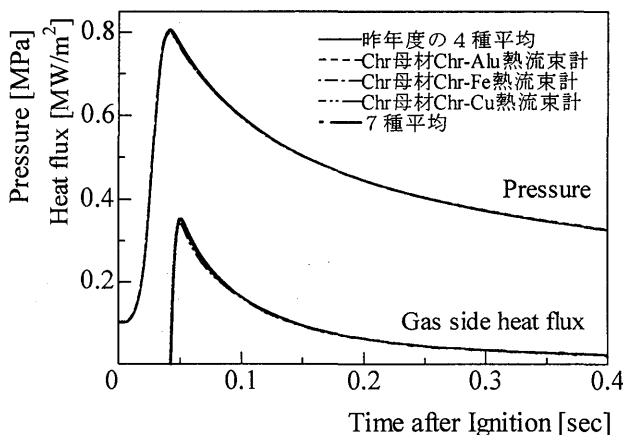


図3 再現性の確認（圧力とガス側熱流束）

よって、熱流束計表面の母材と素線の電気抵抗値の割合は壁側熱流束に影響していないことがわかる。

3.3 壁側熱流束算出時に用いる熱物性値

図4のChr母材Chr-Fe熱流束計の壁側熱流束に着目してみると、負脚側の熱物性値を用いて壁側熱流束を算出しているにも関わらず、これまでの絶対値検定において最もガス側熱流束により一致を示しているCon母材Con-Cu熱流束計の壁側熱流束よりピーク値で約2.5倍の差が発生している。これは、熱流束計があくまで単純な熱電対と考えると理解しがたい。

昨年度の本研究において、同様の問題が発生している。そこで、母材の熱物性値が近く、素線の材料が同じであるCon母材Con-Fe熱流束計とChr母材Chr-Fe熱流束計で比較を行うことにした。まず、Con母材Con-Fe熱流束計とChr母材Chr-Fe熱流束計をFeの熱物性値を用いて壁側熱流束の比較を図6に示す。図より、両熱流束計の壁側熱流束は近い波形を示していないが、ガス側熱流束よりも明らかに大きい波形を示している。

ここで、Con母材Con-Fe熱流束計においてConの熱物性値を用いると壁側熱流束がガス側熱流束に近づいたことを考えると、Chr母材Chr-Fe熱流束計もConに熱物性値の近いChrの熱物性値を用いれば壁側熱流束がガス側熱流束に近づくのではないかと考えた。そこで、Con母材Con-Fe熱流束計にConの熱物性値を用いたときとChr母材Chr-Fe熱流束計にChrの熱物性値を用いたときの壁側熱流束との比較を図6に示す。図より、両熱流束計の壁側熱流束がガス側熱流束に近づき、非常に類似した熱流束波形を示していることがわかる。このことは、Alu母材Alu-Chr熱流束計とChr母材Chr-Alu熱流束計においても、同様のことが言える。

よって、熱流束算出には、熱流束計の母材と素線の電気的極性を見たときの負脚側の熱物性値を用いるのではなく、母材と素線の熱物性値を比較し、小さい方の熱物性値を用いる必要があると考えられる。

3.4 熱物性値について

3.4.1 実験用熱流束計

電気抵抗値の割合以外にも様々な因子を検討したが、熱流束に影響する因子を見つけるには至らなかった。そこで、これまでの絶対値検定実験結果より、ガス側熱流束に最もよい一致を示しているCon母材Con-Cu熱流束計を基準と

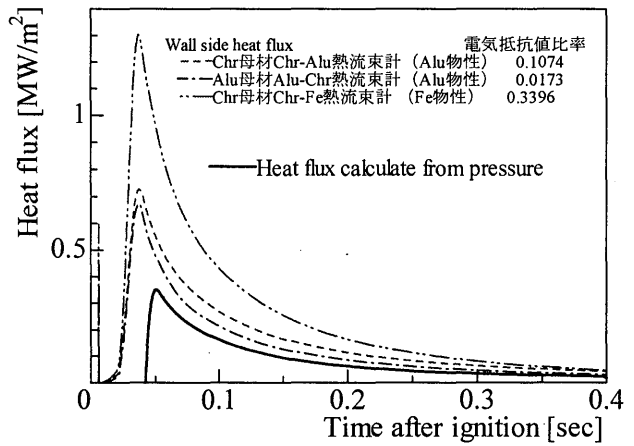


図4 電気抵抗値の割合変化
(熱流束計構成材料Aluに着目)

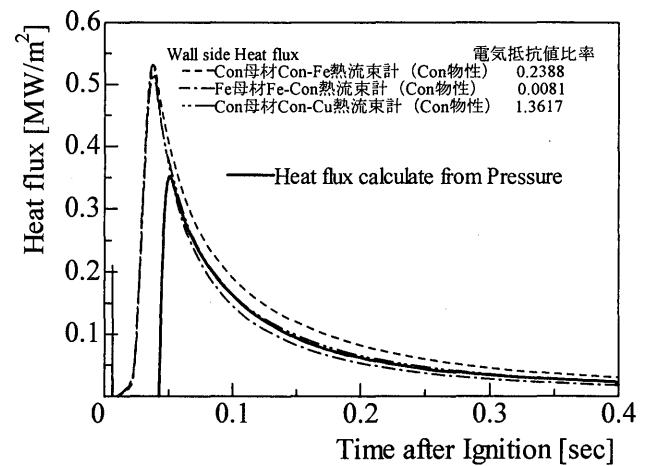


図5 電気抵抗値の割合比較
(熱流束計構成材料Conに着目)

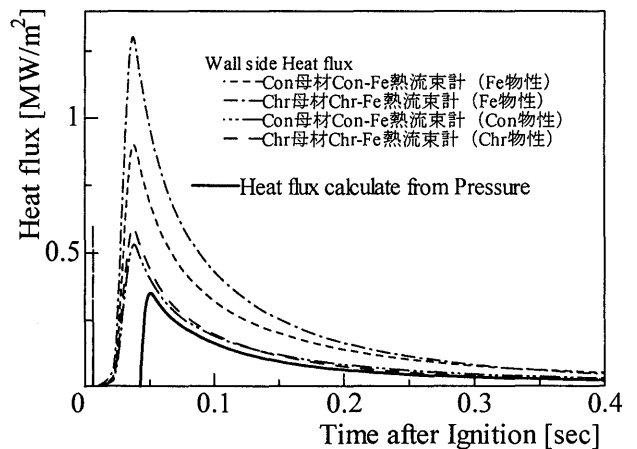


図6 物性値を変更した場合の壁側熱流束

し、壁側熱流束に影響する因子を見つけることができると考えた。そこで、熱流束計の表面薄膜と素線に同材料を用い、母材に比較的近い熱物性値を有する材料を用いることで、母材の変化が壁側熱流束に与える影響及び熱流束計の構成材料の電気的極性について確認することにした。製作した熱流束計は、Con に比較的近い熱物性値を有する Chr を用いた Chr 母材 Chr-Cu 熱流束計である。

3.4.2 ガス側熱流束と壁側熱流束

Chr 母材 Chr-Cu 熱流束計と Con 母材 Con-Cu 熱流束計の絶対値検定結果を図7に示す。図より、両熱流束計は非常に類似した熱流束波形を示しており、熱流束計の素線と表面薄膜に同材料を用い、母材に比較的近い熱物性値を有する材料を用いた熱流束計では、壁側熱流束に大きな差が見られず、ガス側熱流束によい一致を示すことがわかった。よって、母材の熱物性値の差がConとChrで異なっても母材の影響は少ないことがわかる。また、両熱流束計の電気的極性をみた場合、Chr母材Chr-Cu熱流束計は、母材が正側になる。それに対しCon母材Con-Cu熱流束計は、母材が負側になる。従って、熱流束計の構成材料の電気的極性を考慮しなくても壁側熱流束に影響がないことも確認できた。

3.4.3 熱損失量

ガス側熱流束の熱損失量を基準とし、Con母材Con-Cu熱流束計、Chr母材Chr-Cu熱流束計の熱損失量を比較した。結果を表1に示す。

表より、Con母材Con-Cu熱流束計の熱損失量は、ガス側熱流束の熱損失量に対して約2%大きく、Chr母材Chr-Cu熱流束計の熱損失量は、ガス側熱流束の熱損失量に対して約2%小さくなっている。

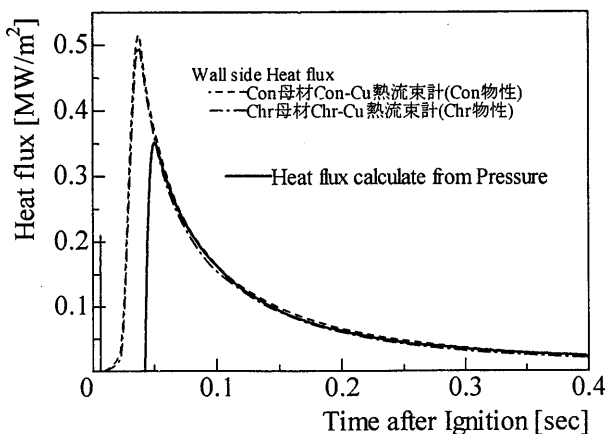


図7 ガス側熱流束に対する壁側熱流束

表2 熱損失量

Type of heat flux probe	Con body Con-Cu	Chr body Chr-Cu
Amount of heat loss calculated from probe	1606 J	1487 J
Amount of heat loss calculated from pressure	1569 J	1519 J
Ratio	102.4 %	97.9 %

しかし、この差が減衰過程において、実験による誤差なのか、熱流束計による計測誤差なのか明確になっていないが、両熱流束計ともガス側熱流束の熱損失量に対して3%以内に収まっている。そのため、両熱流束計は非定常の入力には十分な精度を有していると考えられる。

4. まとめ

熱流束計から得られる熱流束に影響する因子の検討を行い、定量的検定を行った結果、以下の結論を得た。

1. 熱流束計表面の母材と素線の電気抵抗値の割合に着目し定量的な検定を行ったが、熱流束計表面の母材と素線の電気抵抗値の割合が壁側熱流束に影響していないことが判明した。
2. Con母材Con-Cu熱流束計とChr母材Chr-Cu熱流束計で絶対値検定を行った結果、両熱流束計ともガス側熱流束によい一致を示した。同時に、母材がクロメルとコンスタンタンで異なっても母材の熱物性値の違いが壁側熱流束に与える影響は少ない。
3. 熱流束計の構成材料の電気的極性を考慮しなくても壁側熱流束に影響がないことが判明した。

謝辞

本研究を進めるにあたり、協力していただいた友松重樹助手、木村正寿技官に感謝の意を示す。

参考文献

- 1) 木原俊紀, ガソリンエンジンの熱伝達に関する実験的研究, P51-57, 宮崎大学大学院修士論文, 2000
- 2) 西 邦紘, エンジン燃焼室の熱伝達に関する研究, P29-33, 宮崎大学大学院修士論文, 2002
- 3) 千輝淳二, 伝熱計算法, 工学図書, P290-291, 1981