

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⁾・上甲 哲士²⁾・田坂 英紀³⁾

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

Yoshinori NAGASE, Satoshi JYOKOU, Hidenori TASAKA

Abstract

Internal combustion engines are required to be higher efficiency and to decrease air pollution by exhaust gas. So the gas flow in cylinder of an engine is introduced to improve the thermal efficiency and combustibility. But, it is difficult to say that the in-cylinder flow is the best way to make the internal combustion engine highly efficiency, because it leads to increase the heat transfer to the combustion chamber wall from the burnt gas. Although heat flux is measured using a thin film type of heat flux probe, there is a difference among experimental results measured by probes which different constituent materials. Consequently the materials of wire, body and thin plate of probe are paid attention to improve the heat flux measurement on combustion wall. Therefore different kinds of constituent metals of heat flux probes were produced and the quantitative experiments were carried out using combustion chamber made of iron. By these experiments, it is found that a heat flux probe for an internal combustion engine should be consist of two kinds of metals.

Keywords:

Heat flux, Sensor, Constant volume combustion vessel, Heat transfer, Thermo-couple, S.I. Engine, Measurement

1. はじめに

内燃機関は地球環境への負荷を最小限にいとめるため、高効率化や有害排出物の低減が求められている。このような要求に対し、内燃機関の火花点火機関においては、これまでの均質燃焼のみの燃焼から、成層燃焼や希薄燃焼といった新しい燃焼方式が実用化されている。そして、これらの新しい燃焼方式の採用には、筒内ガス流動の導入が行われている。しかし、筒内ガス流動は燃焼自体を促進されるが、それと同時に燃焼室壁面への熱伝達も促進させてしまい、単に高効率化に繋るとは言い難い。そこで、筒内ガス流動と熱

損失との関係を明らかにすることが必要となり、そのためには、燃焼ガスから燃焼室壁面への熱損失¹⁻²⁾を計測できる高精度な熱流束計が必要となる。これまで機関着火運転時におけるガス流動と熱損失の関係を明らかにするために、熱流束計の精度を上げるための研究³⁾がなされてきたが、燃焼室内ガス流動の解析の困難さと急速な変動を見せる熱流束の計測の困難さから熱流束計の決定に至っていないのが現状である。

よって、本研究の目的は、熱流束計から得られる熱流束に影響する因子を明確にするため、熱流束計を構成する金属、特に、熱流束計に用いられる母材と素線の金属の熱物性値の差に着目し、数種類の熱流束計を製作し、鉄製定容燃焼容器を用いた定量的な検定を行うことで熱流束計の良否を判定し、熱流束計の精度向上を図ることである。

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

2. 熱流束計

2.1 エンジン熱流束計測のための必要条件

筒内ガスから燃焼室壁面への熱伝達は、その大部分が点火後の膨張行程に集中する非定常で周期的な現象であり、その間の熱流束は火炎到達時・膨張行程において顕著な増減を示す非定常成分と、その変化が壁面内部で減衰しほぼ一定の温度勾配で機関冷媒へと伝えられる定常成分とに分けられる。

非定常成分は、燃焼室壁面の表面温度の時間的変化から数値計算により求められるが、表面温度の計測には、燃焼室壁面に設けた熱流束計の表面接点の出力から求まる急速な熱流束変化に対する応答性を確保するため、熱接点部の熱容量を小さくし、表面接点が形成される部分をできる限り浅くすることが要求される。

定常成分は、表面接点以外の熱接点（内接点）を燃焼室壁面内部に設け、表面接点と内接点の2点間の平均温度より求められる。ここでは、表面接点と内接点との間に1次元熱伝導が成立していることが解析を容易にし、熱流束算出精度を確保する上で必要であるため、両接点間の半径方向の距離をできるだけ小さくし、熱流束計を周辺壁と熱的に絶縁する等の対策が必要となる。

このような要件を満たすため、近年では表面接点として母材表面に金属薄膜を形成し、導線や熱流束計本体の計測部への装着は絶縁接着剤を介して行うものが主流である。

また、その他の要件としては、実機での計測の際には多点同時計測を行うため、各熱流束計の個体差が小さく、機関への取付けが容易なこと等が挙げられる。

2.2 熱流束計の構造

図1に熱流束計の基本構造を示す。熱流束計の基本構造は熱電対であり、表面接点、内接点用の素線にはホルマルまたは耐熱接着有機溶剤によって電気的絶縁皮膜が形成されている。また、それぞれの隙間にはシリコン系接着剤、ガラスウールチューブを用いて固定・電気的に絶縁する方法を用いた。

内燃機関の燃焼室壁面の温度変化は非常に速いことから、応答性に優れ、精度の高い計測を行うために表面接点の熱電対を薄膜状にすることで計測を可能にした。また、熱流束計に使用される金属と同種金属で出来た接続部、導線を持つケーブルを製作し、接続点に異種金属を含まない接続法をとり、表面接点と内接点以外での起電力の発生を防止した。

熱流束計製作には多くの工程が存在し、各工程での微細なずれ、製作者の技術により個体差が生まれる。この個体差は大きなものではないが、高い計測精度の実現のために多くの熱流束計を製作した後に選別を行い、出力のバラツキが少ないものを実際の計測に使用

し、個体差による計測精度への影響を少なくした。

本研究では熱流束計を用いて、定容燃焼容器壁面の表面温度変化を計測する。表面温度の記録はA/D変換器を通してパソコンに取込むことで、高速で変動する各計測点の表面温度の同時計測を可能にした。計測後に、記録した各表面接点の出力値から熱流束値を算出する。

3. 絶対値検定

絶対値検定とは、鉄製定容燃焼容器に熱流束計を取り付け、容器内で空気とプロパンの理論混合気を燃焼させ、圧力変化から求めたガス側熱流束を基準として、熱流束計からの求めた熱流束（以下、「壁側熱流束」と表す）を評価し、熱流束計の良否を判定する実験のことである。

3.1 供試熱流束計

実験のために製作した熱流束計は以下の2種類である。

3.1.1 NiメッキFe母材Fe-Ni熱流束計（以下、「Fe-Ni熱流束計」と表す） これまでの絶対値検定において、CuメッキCon母材Cu-Con熱流束計（以下、「Cu-Con熱流束計」と表す）、CuメッキChr母材Chr-Cu熱流束計（以下、「Chr-Cu熱流束計」と表す）から求められた壁側熱流束が基準となるガス側熱流束によい一

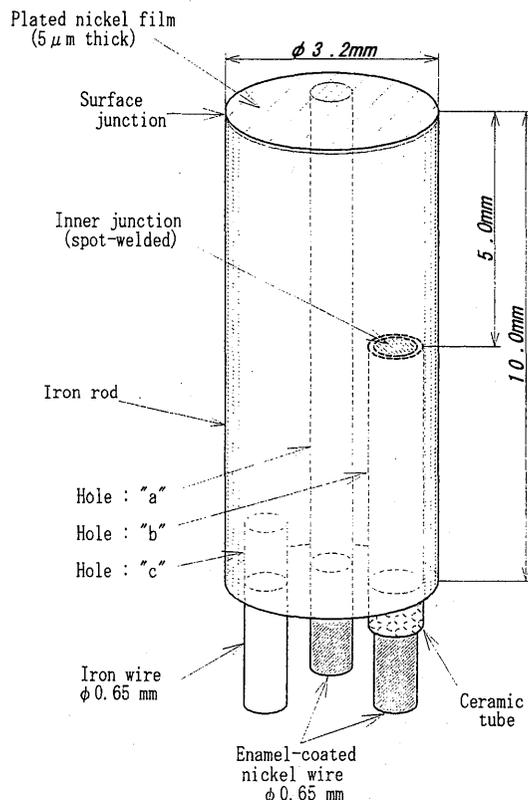


図1 熱流束計構造

致を示した。図2にこれらの熱流束形から求めた壁側熱流束とガス側熱流束との比較を示す。この2つの熱流束計の共通点として、構成材料に用いられている金属の種類が二種類のみであることが挙げられる。熱流束計表面に温度分布が生じているとしても、熱流束計構成材料と表面薄膜材料に同材料を用いることで、表面接点は母材表面のみとなり、より単純な熱電対を構成し、ガス側熱流束によい一致を示したものと考えた。このことから、「熱流束計の母材、素線間に中間金属を介在しない二種金属で構成された熱流束計が精度の良い熱流束計である」という仮説が得られた。そこで、熱電対としての実績はあまりないが、電解Niメッキによる、Fe母材Fe-Ni熱流束計を採用した。また、熱流束計は一般的に測定対象物の材料を使用した方がよいと言われていることからエンジン燃焼室と同材料であるFeを使用している熱流束計を製作することで、より高精度の熱流束計測が可能となると考えられる。

3.1.2 CuメッキCon母材Alu-Con熱流束計（以下、「Alu-Con熱流束計」と表す） これまでの絶対値検定において、Chr-Alu熱流束計の壁側熱流束もガス側熱流束によい一致を示した。この熱流束計は、母材、素線、メッキがそれぞれ異なる種類の金属であるが、母材と素線の熱物性値が他の熱流束計と比べ差が小さかった。このことより、熱流束計表面に温度分布が生じているとしても、熱物性値の差が小さいことから表面に発生する温度差は小さくなり、熱電対の中間金属の法則がある程度成り立って壁側熱流束がガス側熱流束に追従しているものと考え、「母材と素線の熱物性値が等しいものが精度の良い熱流束計である」という仮説が得られた。本年度はこの仮説からChr-Alu熱流束計よりも母材と素線の熱物性値の差が小さいCon-Alu熱流束計を採用した。

3.2 実験方法

これまでの研究において、同一熱量流入時にも関わ

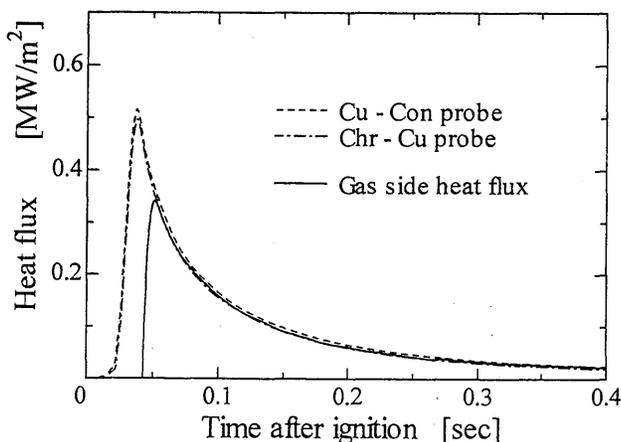


図2 Cu-Con, Chr-Cu熱流束計絶対値検定結果

らず構成材料の違いにより熱流束計が異なる出力を示していた。このため、この現象の原因を明らかにし、内燃機関に用いるべき熱流束計はどれが最適であるかを判断することが重要な課題となっている。

絶対値検定は、定容燃焼容器を用いて、充填されたプロパン (C₃H₈) と空気の予混合気ガス（当量比：1）を燃焼させて熱流束を求めることにより、内燃機関より構造と燃焼現象が単純で再現性のよい実験を行うものである。データの収録には、予混合気点火と同時に高圧インジェクタから圧力、熱流束計から表面温度を、それぞれデータサンプリング間隔 200 μs で 0.4sec まで取り込んでいる。

その後、圧力波形から算出されるガス側熱流束と各熱流束計から算出される壁側熱流束の平均値を比較することで、熱流束計が出力する熱流束値を定量的に検定する。ガス側熱流束は定容燃焼容器全体の熱流束分布を平均化したものとし、本検定では予混合気の燃焼圧力の時間的変化より求めたガス側熱流束を基準とすることで、熱流束計から得られる壁側熱流束に評価を与えることが可能である。

また、壁側熱流束は燃焼状態を単純化しても実験毎に火炎伝播の形状は変化するため、熱流束の空間分布は大きくなってしまいます。そこで、定容燃焼容器の寸法を大きくすることや、複数の計測点で計測すること、実験回数を増やすこと、更に、全計測位置で同時計測をおこなうことにより壁側熱流束の空間分布による計測誤差の低減を図った。

実験データの母集団については、100データ以上では平均値は変化しないという実験的な根拠に基づき、実験有効データ数を100個とし、アンサンブル平均したものをガス側熱流束および壁側熱流束とした。

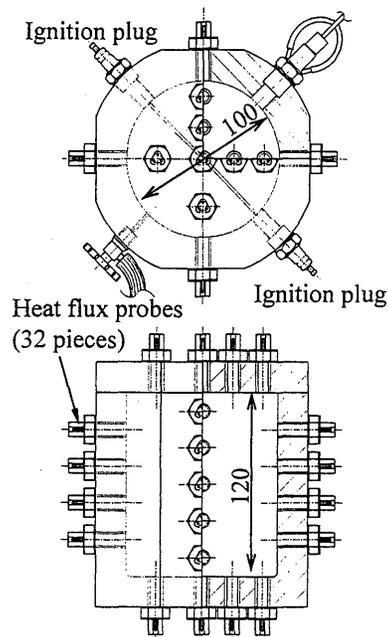


図3 鉄製燃焼容器

3.3 絶対値検定実験装置及び実験方法

定容容器燃焼室形状は図3に示すとおりで、直径100mm、高さ120mmの円筒状で、熱流束の測定位置は上下面に各7箇所、側面に90°おきに4列、4-5-4-5カ所の18カ所の計32点設けてある。燃焼時において、熱流束と同時に燃焼圧力も取込むため、圧力計の設置穴も設けてある。その他、点火プラグ用の穴がアース用を含めて2ヶ所、容器内を真空引きするためのバルブ、燃料となるプロパンと空気の予混合気を充填するバルブ、また、予混合気の充填圧を計測する水銀マンメータ用のバルブが設けてある。また、点火は燃焼室中心に設けられた放電間隔から行っている。

全体の計測システムを図4に示す。予混合気は専用の生成タンクにおいて十分に攪拌・混合された後に、真空ポンプにて真空状態にした定容燃焼容器に充填できるようになっている。予混合気の充填圧は水銀マンメータにより計測している。熱流束計表面の温度変化の取込み及び記録装置は、熱流束計からの起電力を自作オペアンプにより10200倍に増幅し、12bit A/Dボードを介してコンピュータに取り込み、32点の熱流束と燃焼圧力を同時に計測している。

4. 絶対値検定結果

4.1 ガス側熱流束

絶対値検定では、ガス側熱流束を基準とするため、ガス側熱流束算出の元となる定容燃焼容器内の燃焼形態と圧力経過には十分な再現性が求められる。そのため、予混合気生成過程や予混合気充填過程など、絶対値検定を行う各過程を慎重に行った。

実験データの採用方法としては、100データ以降では、それ以降の平均値に発生する差は微小であるという実験的な根拠に基づき、各熱流束計の実験有効データ数を100個とし、全ての実験データから1つのガス側熱流束波形にすることとした。

図5に各熱流束計の絶対値検定におけるガス側熱流束

東波形を示す。図5のように、各熱流束計の絶対値検定でのガス側熱流束のばらつきは2%以内に収まっており、本検定の再現性と精度を十分に確認することができた。

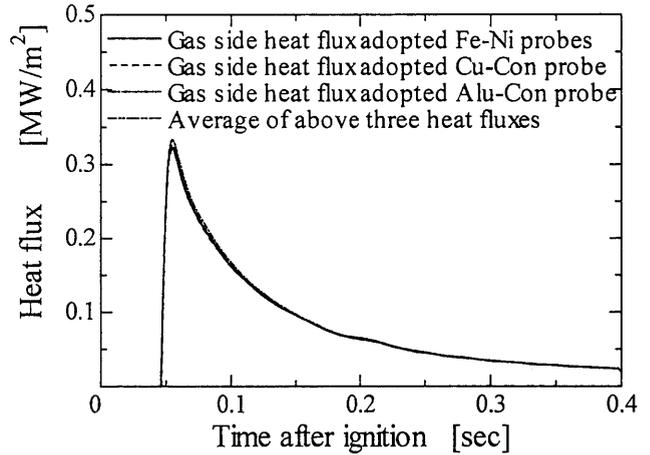


図5 絶対検定におけるガス側熱流束

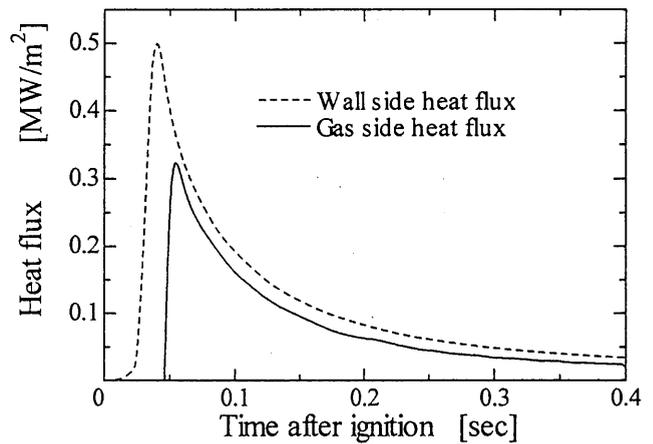


図6 Fe-Ni 熱流束計の絶対値検定結果

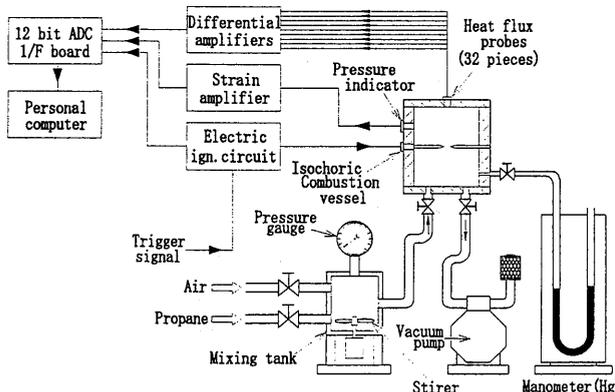


図4 絶対値検定システム

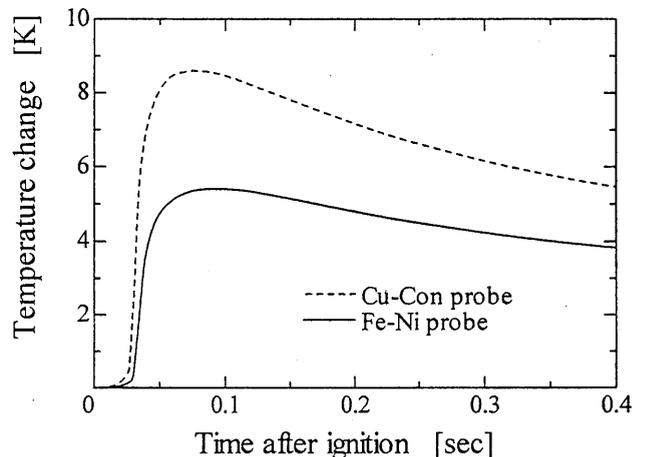


図7 熱流束計の表面温度波形

4.2 Fe-Ni 熱流束計の評価

Fe-Ni 熱流束計の絶対値検定結果を図6に示す。二種金属のみで製作したFe-Ni 熱流束計は減衰開始からガス側熱流束に対し135%程度の差を保ちつつ減衰し、減衰後半に進むにつれてさらにガス側熱流束に対し離れる結果となった。

壁側熱流束の算出には、熱流束計の表面温度波形が用いられるため、熱流束のもとになる表面温度について見たところ、図7に示すように、Fe-Ni 熱流束計はこれまでガス側熱流束に良く追従しているCu-Con熱流束計に比べ波形自体が小さく、温度勾配も緩やかなものであった。また、Feの熱物性値についても、加熱周期応答法を用いて熱伝導率の確認を行ったが、既存値(67.4[W/K/m])⁴⁾と比べて問題ない結果が得られた。

一方、Fe-Ni 熱流束計の壁側熱流束がガス側熱流束に一致しない原因について、表面温度波形がFe-Ni 熱流束計だけ小さく、温度勾配が緩やかであることに着目すると、応答遅れが考えられるが、Niメッキの厚さは理論解析では応答性に問題ないことを確認している。実際はNiメッキの精度がCuメッキに比べ劣っているためにFe-Ni 熱流束計の表面温度を正確に計測できていないのではないかと考え、Niメッキの純度、

厚さについて調査を行った。しかし、今回熱流束計に使用したNiメッキには問題が見られなかった。

また、図8に示す、過去に製作されたFe母材Fe-Con熱流束計の絶対値検定結果をみると、Fe-Ni熱流束計のほうが比較的ガス側に近く、ガス側熱流束との差も全体的にみて一定を保つような傾向にあることから、二種金属で熱流束計を構成したほうが、計測精度としては高いことがわかった。

4.3 Alu-Con 熱流束計の評価

Alu-Con 熱流束計の絶対値検定結果を図9に示す。三種金属構成における熱流束計では熱流束計表面に温度分布が発生していることが予想される。仮に母材、素線、メッキの金属がすべて異なる三種金属構成で熱流束計を製作するのであれば、Alu-Con熱流束計のように、母材と素線の熱物性値を近づけ、熱接点にあたる面積のほとんどを占める母材には素線より熱物性値の低いものを用いて、母材の表面温度と、熱接点での母材と素線の平均温度との差を小さくすることで、計測精度が向上することがわかった。

5. 結論

熱流束計から得られる熱流束に影響する因子を明確にするため、熱流束計を構成する金属による影響、熱流束計に用いられる母材、素線、表面メッキの金属の熱物性値の差に着目し、数種類の熱流束計を製作し、定容燃焼容器を用いた定量的な検定を行い、以下のような結果を得た。

1. 三種金属構成の熱流束計よりも、熱電対の法則に沿った二種金属構成の熱流束計のほうが熱流束の計測精度が向上することがわかった。
2. 三種金属構成の熱流束計を製作する場合は、母材と素線に用いる金属の熱物性値を近づけて、母材には素線より熱物性値の低いものを用いることで計測誤差の低減に繋がることがわかった。

本研究を進めるにあたり、協力していただいた木村正寿氏、友松重樹氏に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 一色尚次ほか、密閉容器の燃焼による熱伝達、機論B編、39巻、328号、pp3760-3769、1973
- 2) 榎本良輝ほか、四サイクルガソリン機関の燃焼室壁への直接熱損失、機論B編、50巻、456号、pp1972-1980、1984
- 3) 長瀬慶紀ほか、火花点火機関燃焼室による熱流束計測の向上、機構論NO.048-1、pp173-174、2004
- 4) 千葉淳二、伝熱計算法、工学図書、pp291、1981

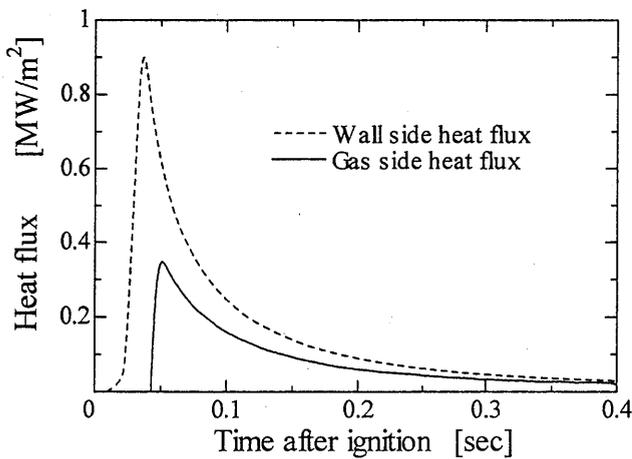


図8 Fe-Con 熱流束計の絶対値検定結果

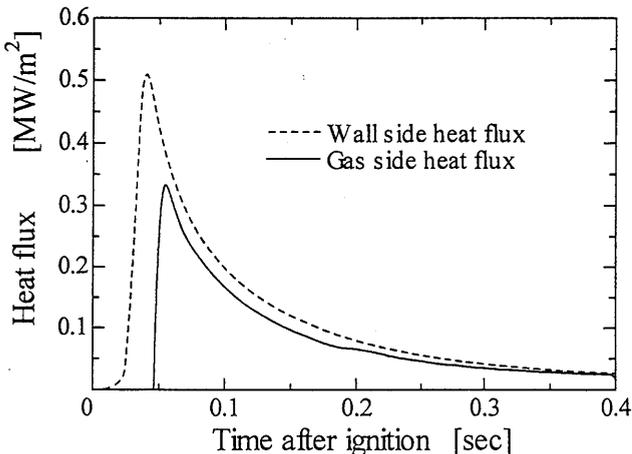


図9 Alu-Con 熱流束計の絶対値検定結果