



火花点火機関燃焼室壁面における熱伝達率算出式の
一般性の検討

| | |
|-------|--|
| メタデータ | 言語: Japanese 出版者: 宮崎大学工学部 公開日: 2020-06-21 キーワード (Ja): キーワード (En): S.I.engine, Heat transfer coefficient, Estimation, Combustion chamber, Heat flux 作成者: 戌亥, 太一, 長瀬, 慶紀, 友松, 重樹, 高濱, 智洋, 木村, 正寿, Inui, Taichi, Takahama, Tomohiro メールアドレス: 所属: |
| URL | http://hdl.handle.net/10458/5581 |

火花点火機関燃焼室壁面における熱伝達率算出式の一般性の検討

戌亥 太一^{a)}・長瀬 慶紀^{b)}・友松 重樹^{c)}・高濱 智洋^{d)}・木村 正寿^{e)}

Investigation of Generality of Estimation of Heat Transfer Coefficient on Combustion Chamber Wall Surface of S.I. Engine

Taichi INUI, Yoshinori NAGASE, Shigeki TOMOMATSU,
Tomohiro TAKAHAMA, Masatoshi KIMURA

Abstract

In order to solve an environmental problem, it is necessary to improve the thermal efficiency of an internal combustion engine. There is heat loss with an engine, which accounts for about 40% of thermal energy occurred in an engine. Therefore, in order to calculate the heat transfer from burned gases to the combustion chamber wall surface, it is necessary to evaluate the heat transfer coefficient on the combustion chamber wall surface. However, it is difficult to find the heat transfer coefficient. Therefore, the equation is required to estimate the heat transfer coefficient with generality. In this study, we made the T type thermocouple which is said the Cu-Con heat flux probe, and measured heat flux on the combustion chamber wall surface by setting the Cu-Con heat flux probe at various places (cylinder head, cylinder liner and piston head) of the combustion chamber of the engine (TRE-1). In addition, in order to confirm generality, heat flux was measured at the cylinder head and cylinder liner of the different engine (R52). Furthermore, the both measurement results were expressed by the number of no dimensions of Nusselt number (Nu) and Fourier number (Fo), and were compared every measurement point. As a result, the similar tendency was confirmed on both cylinder liners.

Keywords: S.I. engine, Heat transfer coefficient, Estimation, Combustion chamber, Heat flux

1. 緒論

私たちの身の回りには自動車が数多く普及しており、生活に必要不可欠なものとなっている。その一方で、化石燃料の枯渇や地球温暖化などの環境問題が課題となっている。この対策として、近年ではハイブリットカーや電気自動車の開発が盛んに行われてきている。しかし、自動車は未だガソリンエンジンが数多く使用されており、エンジンの熱効率をさらに向上させる必要がある。エンジンの熱効率を向上させる手段として、燃焼室内にスワールなどの流れの導入による燃焼促進があるが、同時に冷却損失が増大するため、必ずしも熱効率向上につながるとは言い切れない。また、この冷却損失はエンジンで発生する熱エネルギーの約40%を占めている。そのため、燃焼室壁面の熱伝達率の解明が、熱効率向上のための有用な手段である。

これまでに燃焼室壁面における熱伝達率を求める様々な研究が行われてきた。その中でも代表的なものがWoschniの研究¹⁾である。Woschniにより求められた熱伝

達算出式は、シリンダ内の温度変化を解析し、ガス温度、圧力、平均ピストン速度により熱伝達率を求める実験式である。しかし、これは平均ピストン速度で主流を考慮しているが、同じ平均ピストン速度でも燃焼室形状が異なれば、実際の主流は異なるため、精度良い熱伝達率の算出は困難である。そこで、本研究では、実際にシリンダ内の流速を計測し、熱伝達率とガス流動の関係式を提案している。しかし、この方法では主流が無視できるような低流速域では適用できない。そこで、熱伝達率の無次元数であるヌセルト数 Nu と時間の無次元数であるフーリエ数 Fo を用いた、熱伝達率算出のための無次元数整理式を提案している。しかし、その一般性はわかっていない。精度良い熱伝達率の算出のためには、主流の影響に関係なく、様々な形状の燃焼室に適用できる一般性を持った熱伝達率算出式が必要である。

本研究では、ガソリンエンジン燃焼室壁面の熱流束計測を行い、計測結果を Nu と Fo で整理する。求めた熱伝達率算出式を異なるエンジンに適用することにより熱伝達率算出式の一般性について検討する。

2. 薄膜型熱流束計

2.1 原理および構造

本研究では、図1に示す熱流束計²⁾という温度を計測するセンサーを用いる。熱流束計本体(以降「母材」)は

a) 機械システム工学専攻大学院生

b) 機械設計システム工学科准教授

c) 機械設計システム工学科助教

d) 機械システム工学専攻大学院生

e) 教育研究支援技術センター技術専門員

直径 3.2mm、長さ 10mm の円筒型でコンスタンタンを用いている。また、母材表面および表面からの深さ 5mm の位置で銅素線と接し、ゼーバック効果を利用した 2 組の T 型熱電対が形成されている。表面接点は、これまでは電解めっきにより厚さ 10 μ m の銅薄膜を成膜していたが、本研究では真空蒸着によって厚さ 3 μ m の銅薄膜を成膜した。その理由としては、真空蒸着で成膜した場合、表面接点の絶縁部(銅線の被覆)にも薄膜を成膜できるため、耐久性の向上が期待でき、1 μ m でも表面接点を形成できることから、より薄い薄膜を成膜できるためである。これにより、応答性の向上も期待できる。以上の理由より、真空蒸着により銅薄膜を成膜した。内接点については、素線と母材を点溶接することによって接合している。

熱流束は、表面接点から得られた表面温度変化から、調和解析により熱流束の非定常成分が求まり、表面接点と内接点の温度差の平均より熱流束の定常成分が求まる。

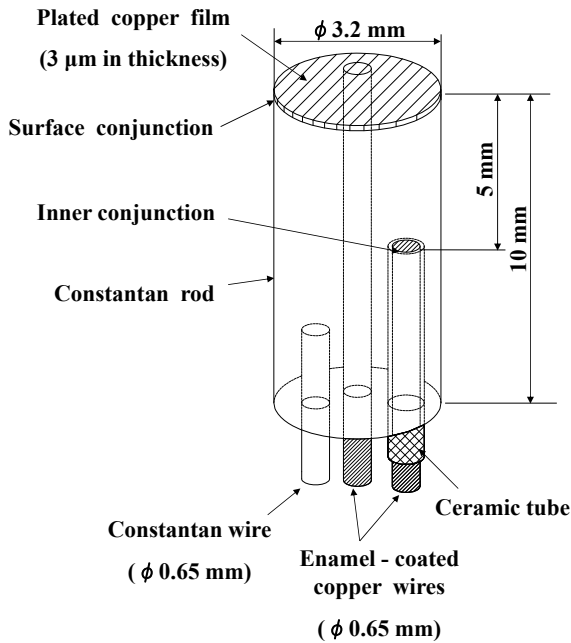


図 1. Cu-Con 薄膜型熱流束計.

2.2 熱流束計の選別

本研究で使用した熱流束計は、すべて内製のため、熱流束計それぞれに個体差が生じる。個体差がある場合、同じ条件で熱流束計測を行った場合でも、熱流束波形にばらつきが生じてしまい、実験の際、局所的に異なる熱流束を正確に計測することができない。そのため、できるだけ同じ熱流束波形を出力する熱流束計を使用する必要がある。選別された熱流束波形を図 2 に示す。図 2 より、個体差の少ない熱流束計を選別できたことがわかる。また、選別された熱流束波形の標準偏差を表 1 に示す。

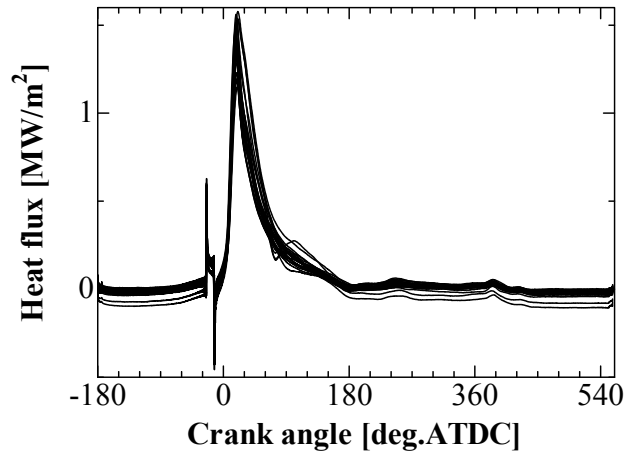


図 2. 選別された熱流束波形.

表 1 標準偏差

| Criterion item | Standard deviation σ |
|---|--------------------------------|
| Maximum value point [deg.] | 2.57 |
| Average value [MW/m^2] | 0.292 |
| Maximum difference [MW/m^2] | 0.166 |
| Maximum value [MW/m^2] | 0.154 |
| Value at BTDC 30° [MW/m^2] | 0.313 |
| Value at ATDC 30° [MW/m^2] | 0.154 |
| Value at ATDC 60° [MW/m^2] | 0.805 |
| Inner junction voltage [mV] | 0.5345 |

3. 熱流束計測実験

3.1 供試機関 (TRE)

本研究で使用する供試機関は、水冷式 OHV 型 4 サイクル単気筒の試験用ガソリンエンジン(型式名: TRE-1)であり、多様な燃焼状態で解析を行えるように設計されている。供試機関の燃焼室概略図を図 3 に、主要諸元を表 2 に示す。

表 2 主要諸元 (TRE)

| | |
|----------------------------------|--------------------------|
| Engine type | 4 cycle, OHV |
| Cylinder number | Single cylinder |
| Combustion chamber configuration | Pancake type |
| Bore \times Stroke | 85.0 mm \times 85.0 mm |
| Stroke volume | 482 cc |
| Compression ratio | 4.54 |
| Fuel | Gasoline |

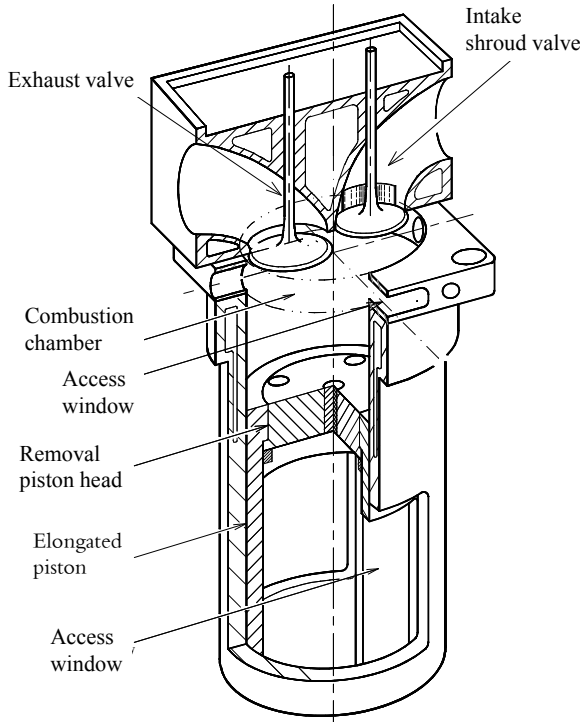


図3. 燃焼室概略図 (TRE) .

3.2 熱流束計の取り付け位置 (TRE)

熱流束計を圧入した熱流束計アダプタをエンジンに取り付ける。熱流束計の取り付け位置を図4に示す。シリンダヘッド部2点、シリンダライナ部4点、ピストンヘッド部5点の計11点に熱流束計を取り付け、計測を行う。また、熱流束計表面は、燃焼室壁面と面一となるように取り付ける。

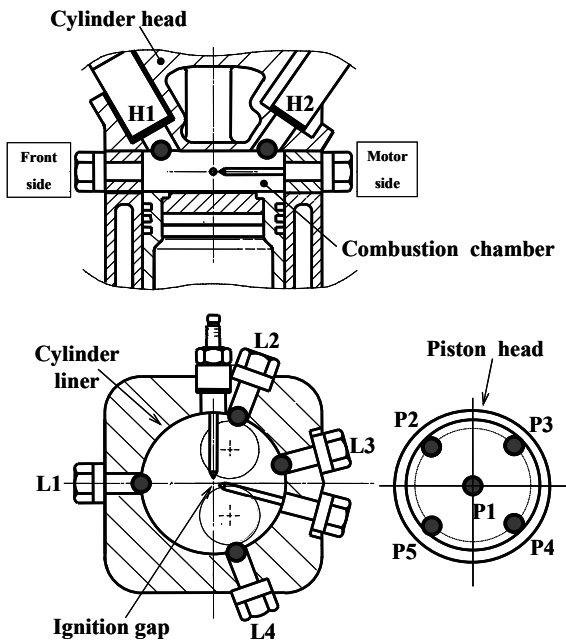


図4. 熱流束計取り付け位置 (TRE) .

3.3 供試機関 (R52)

本研究では、TRE から得られた結果を、別のエンジンでの結果と比較、検討を行うため、TRE 以外のエンジンにおいても熱流束計測を行う。

用いた供試機関は、実験用に改造を加えた水冷式サイドヘッドバルブ型4サイクル単気筒のエンジンである。このエンジンは、ガソリンを燃料とせず、プロパンやバイオガスなどのガスを燃料としているエンジンである。R52の燃焼室概略図を図5に、主要諸元を表3に示す。

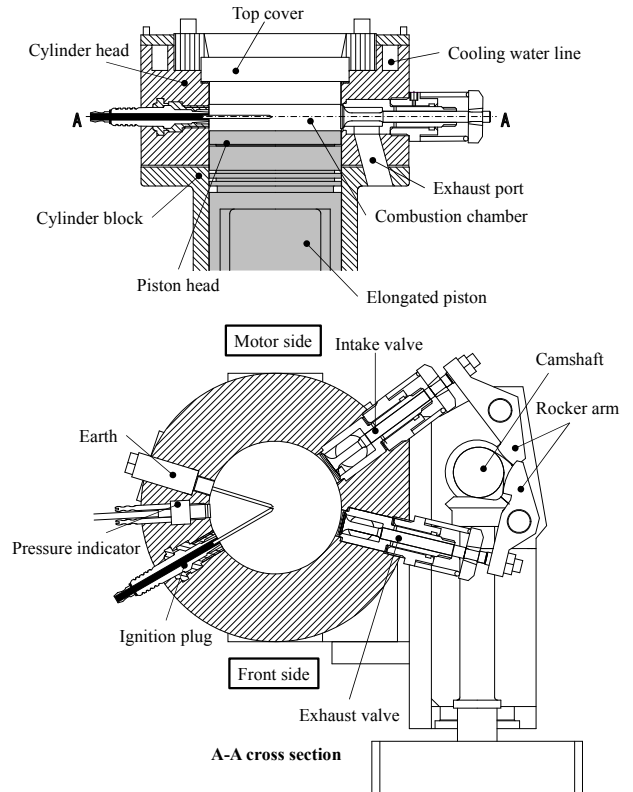


図5. 燃焼室概略図 (R52) .

表3 主要諸元 (R52)

| | |
|----------------------------------|-------------------|
| Engine type | 4 cycle, SHV |
| Cylinder number | Single cylinder |
| Combustion chamber configuration | Pancake type |
| Bore × Stroke | 84.0 mm × 90.0 mm |
| Stroke volume | 498.8 cc |
| Compression ratio | 6.0 |
| Fuel | Propane |

3.4 熱流束計の取り付け位置 (R52)

図5に示すように、R52には計測用の可視化シリンダヘッドが取り付けられている。計測用可視化シリンダヘッドの燃焼室上部および前方部、後方部は、取り外し可能と

なっており、石英ガラス製の観測窓を装着することによって、燃焼の可視化を行うことができるが、本実験では、熱流束計を取り付けることができるアルミ合金製の上蓋および横蓋を装着することで、熱流束計測を可能とした。熱流束計の取り付け位置を図6、図7に示す。図6、図7より、シリンダライナ部の取り付け位置は、燃焼室前方部（フロント側）と後方部（モーター側）に1点ずつの2点、シリンダヘッド部に9点の計11点の計測を行った。

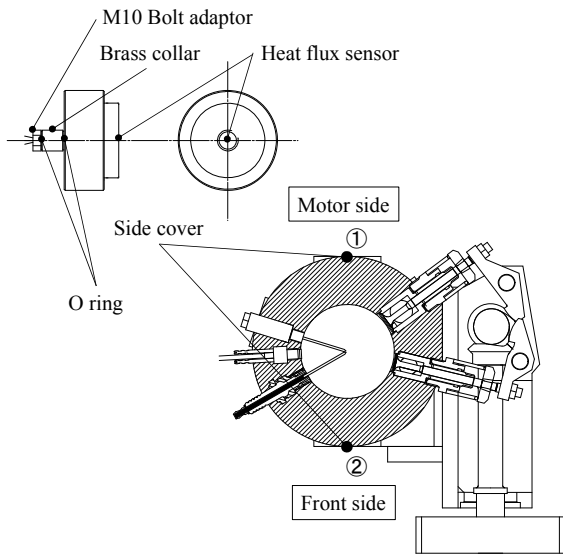


図6. ライナ部取り付け位置.

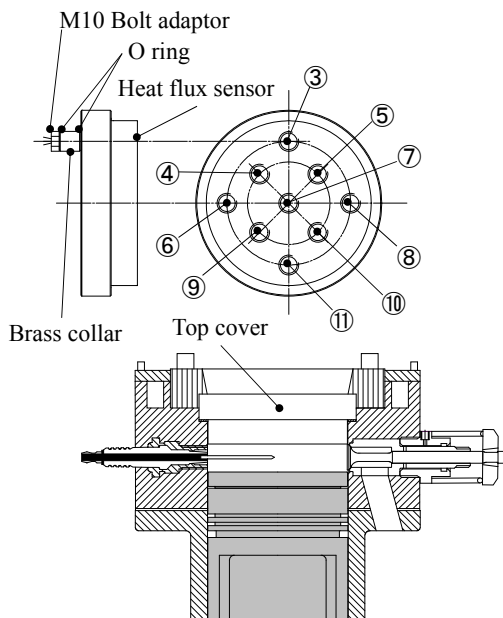


図7. ヘッド部取り付け位置.

3.5 熱流束計測システム

図8にTREおよびR52の熱流束計測システム概略図を示す。エンジン本体からは、フォトランジスタによってTDC（上死点）、IG（点火時期）、CA（クランク角度）、

GATE（吸排気行程と圧縮膨張行程の判別）のパルス信号が得られる。これら信号は、サーキットボックス（基準パルス発生装置）を介し、タコメーターやCDIなどの周辺機器に送られる。図のA/DボードにはBDC（下死点）信号がデータ取り込み用のトリガとして送られている。

表面接点電圧は、表面接点の温度変化を精度よく計測するため直流成分を除外し、変動成分をできる限り高増幅するため、バイアス電圧を付加している。表面接点電圧の変動成分を、OPアンプによる増幅回路で1000倍に増幅し、圧力計から出力される信号とともにA/Dボードによって、PCに取り込むことで表面温度、圧力波形を同時に計測することができる。

内接点電圧は、エンジンが十分に暖機されてから計測を行うことで、内接点電圧はほぼ一定の値を示す。内接点電圧とバイアス電圧は、表面接点電圧計測時にデジタルマルチメータで電圧値を測定する。

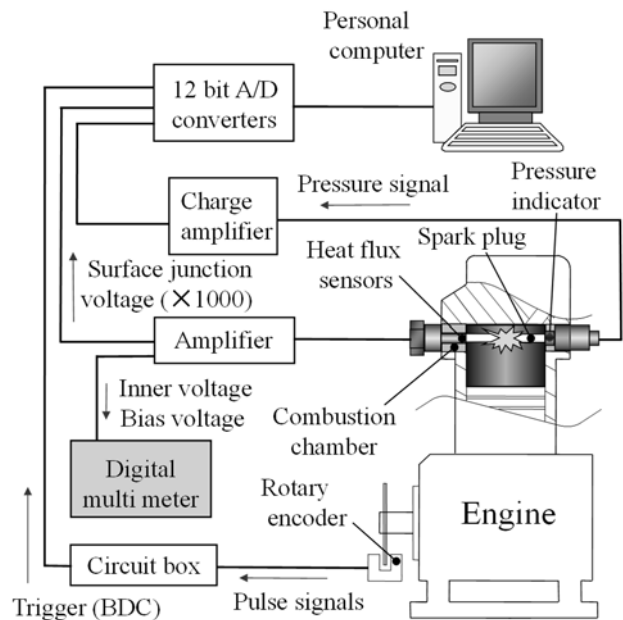


図8. 計測システム.

3.6 実験方法

着火運転開始後、10分間暖機を行う。その間に冷却水温度、潤滑油温度、吸入空気量、吸入空気温度をそれぞれ実験条件に調節し、内接点電圧、表面接点の出力波形、燃焼圧力が安定していることを確認し、熱流束計測を行う。

3.7 実験条件

TREでの実験条件を表4に示す。充填効率は、過去の研究によると、TREでは充填効率の変化が熱伝達率に大きな影響を与えないことがわかっているため1条件とし、点火時期は最大図示仕事を得られるMBTとした。

表 4 実験条件 (TRE)

| | |
|---------------------|---------------------|
| Fuel | Gasoline |
| Engine speed | 1000rpm |
| Charging efficiency | 70% |
| Equivalence ratio | 1.0 |
| Valve | Normal |
| Ignition timing | MBT (BTDC33deg.) |
| Measuring number | 11 |
| Water temperature | 80°C (±0.5°C) |
| Oil temperature | 80°C (±0.5°C) |
| Charge temperature | 65°C (±0.5°C) |
| Sampling interval | 60μs |
| Sampling cycles | 100cycles |

R52 での実験条件を表 5 に示す。R52 では、当量比 0.75 と希薄状態で燃焼させている。これは、当量比 1.0 の条件では、燃焼ガス温度が高く、熱流束計の耐熱温度 200°C を大きく上回ってしまい、熱流束計が壊れてしまうためである。そのため、オートサイクルを使用した理論計算³⁾により、実験が可能な当量比および充填効率を定めた。燃料はプロパンを使用し、点火時期は TRE 同様 MBT とした。また、R52 は、シュラウド付きバルブを使用しており、スワールが発生する条件となっている。

表 5 実験条件 (R52)

| | | |
|--------------------------------|---------------------|------|
| Fuel | Propane | |
| Engine speed | 1000rpm | |
| Charging efficiency | 55% | 60% |
| Equivalence ratio | 0.75 | 0.75 |
| Valve | Shroud valve (120°) | |
| Ignition timing | MBT (BTDC20deg.) | |
| Measuring points | 11 | |
| Water temperature | 80°C | |
| Oil temperature | 75°C | |
| Inhalation mixture temperature | 65°C | |
| Sampling interval | 60μs | |
| Sampling numbers | 2048 | |
| Sampling cycles | 1000cycles | |

3.8 実験結果

TRE の熱流束波形を図 9 に示す。熱流束計測は 11 点計測を行う予定だったが、実験中に熱流束計表面の薄膜が破損したため、図 4 に示すライナ部の L1、L4 の 2 点し

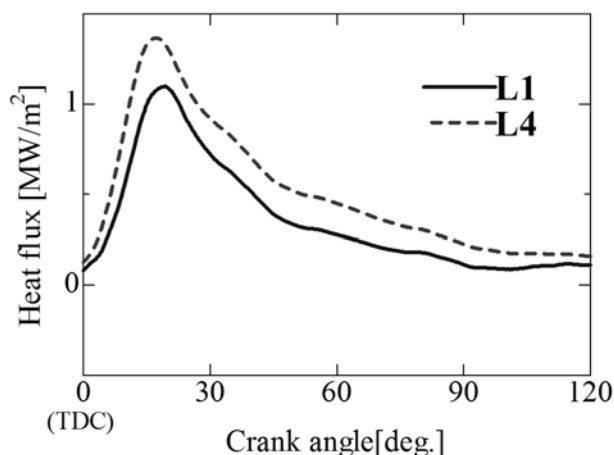
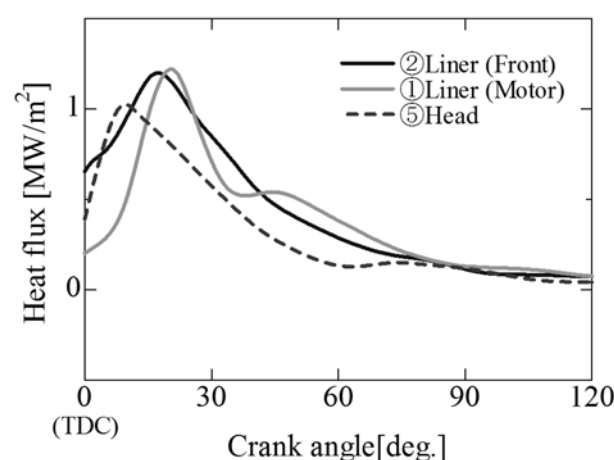
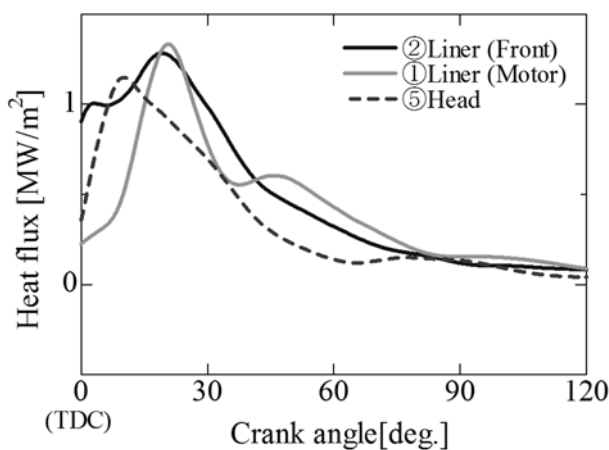


図 9. 熱流束波形 (TRE) .



(a) 充填効率 55%.



(b) 充填効率 60%.

図 10. 熱流束波形 (R52) .

か計測できなかった。今回の実験結果から、ライナ部だけの計測となったため、燃焼室全体ではなく、局所的な熱伝達現象しか解析できない。

R52 の熱流束波形を図 10 に示す。充填効率 55%での波形を(a)に、充填効率 60%での波形を(b)に示す。R52 では、ヘッド部 1 点、ライナ部 2 点の計 3 点の計測しか行うことができなかった。その他の計測点については熱流束計が高温になり破損してしまった。

R52 での熱流束計測実験は、今回が初めての試みであったため、出力された波形の妥当性を確かめられる比較対象は無いが、両グラフとも、熱流束のピークの時刻が、最初にヘッド部、次にライナ部という順番になっていることがわかる。これは、中心から火炎が伝播し、壁面までに到達するまでの時刻が早い並びになっていることがわかる、また、フロント側とモーター側で、同じライナ部でもピーク値が、充填効率 55%時では 0.02MW/m^2 、60%時では 0.05MW/m^2 程度ずれているが、これは、R52 はシュラウドでスワールが発生しているため、ガス流動が火炎伝播方向に影響を与えたためだと考えられる。

4. 無次元数整理式の一般性の検討

4.1 無次元数整理式

TRE での熱流束計測実験は、実験中に熱流束計が破損したため、ライナ部 2 点しか計測できていない。ピストン部とヘッド部は計測できなかったため、燃焼室全体ではなく、局所的な熱伝達現象しか解析できず、燃焼室全体の熱伝達率を求める算出式は得られない。よって、従来の研究において、TRE の実験結果から求められた算出式を用いて、TRE と R52 の比較を行うこととした。これを(1)式に示す。この式は TRE の燃焼室全体の平均熱流束から求められており、燃焼室全体の平均熱伝達率を算出する式となっている。

$$Nu = 1.5 Fo^{-0.5} \quad (1)$$

また、この式は点火後の時間が熱伝達率に関係するとして、熱伝達率の無次元数であるヌセルト数 Nu と点火後の時間を考慮した、時間の無次元数であるフーリエ数 Fo を用いている。ここで、無次元数の定義については(2)式、(3)式に示す。

$$Nu = \frac{\alpha D}{\lambda} \quad (2)$$

$$Fo = \frac{at}{D^2} \quad (3)$$

ただし、

α : 平均熱伝達率 [$\text{W/m}^2\text{K}$] D : シリンダ直径 [m]

λ : 熱伝導率 [W/mK] a : 熱拡散率 [m^2/s]

t : 点火後の時間 [s]

とする。

4.2 TRE と R52 の比較

R52 の熱流束計測実験によって得られたデータを Nu

と Fo で整理し、TRE から得られた算出式との比較を行った。結果を図 11 に示す。グラフより、R52 のプロットは算出式付近にあり、一般性がある可能性がある。また、グラフより R52 のプロットは、充填効率に関係なく、 Nu がほぼ同じ値をとった。これは、従来の研究において充填効率の変化にかかわらず、熱伝達率に大きな影響はないことがわかっており、結果は妥当だといえる。しかし、TRE の整理式は燃焼室全体から求められており、ピストン部を計測していない R52 の結果と比較を行うには、条件が一致していないため、TRE の無次元数整理を計測点 11 点それぞれで行い、計測点ごとの比較を行うことで、より詳細に比較を行った。グラフより、TRE と R52 のプロットはライナ部において同様な傾向を示した。

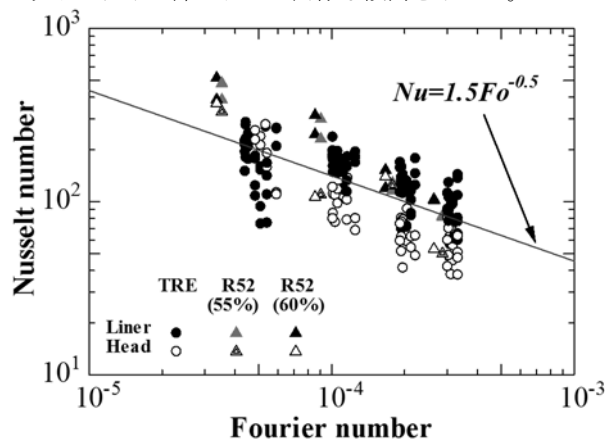


図 11. 両エンジンの比較。

5. 結論

Cu-Con 型熱流束計を用い、TRE で熱流束を計測し、結果を Nu と Fo の無次元数で整理することで得られた無次元数整理式と、異なるエンジンでの結果を比較し、一般性の検討を行った。

- 1) 無次元数整理式を導いたものとは異なるエンジン R52 で熱流束計測を行った。
- 2) TRE で得られた算出式と R52 の結果を比較し、ライナ部において同様な傾向を示した。

ただし、燃焼室全体で比較をしていないため、TRE で得られた無次元数整理式の一般性については、断言できない。

参考文献

- 1) G. Woschni, SAE.paper, pp.1-13, 1967
- 2) 榎本良輝、古浜庄一、四サイクルガソリン機関の局所熱伝達率に関する研究、日本機械学会論文集 (B 編)、53 巻 496 号、1987、pp.3835-3842.
- 3) 田坂英紀、内燃機関、森北出版株式会社、pp.14-81.