

ガソリンエンジン燃焼室壁面の熱流束計測に関する研究 (アルミ製燃焼室での検討)

岩崎 洋介¹⁾・長瀬 慶紀²⁾・友松 重樹³⁾・木村 正寿⁴⁾

Study on Measuring Heat Flux in Combustion Chamber of S.I. Engine (Examination in Combustion Chamber by Aluminum)

Yosuke IWASAKI, Yoshinori NAGASE, Shigeki TOMOMATSU, Masatoshi KIMURA

Abstract

In order to improve the combustion chamber efficiency of an engine, the gas flow is introduced into the combustion chamber. However the heat loss from the burned gas to the combustion chamber wall surface increased. Therefore it is necessary to know the relations between gas flow and heat transfer coefficient from the burned gas to the combustion chamber wall surface of S.I. engine. A method to measure the heat loss to measure heat flux with the heat flux probe. In this study, the requirements for the material of heat flux probe is investigated. First the difference between the material of probe body and thin film is investigated by simulation whether heat flux measurement would be affect. It is probed that the material of probe body and thin film need to have to use the same thing. Next, the material of probe body is investigated. It is said that the same material as measurement part must be used for the body material of heat flux probe. But in the study using the constant combustion vessel even if the material of the probe body is different from the chamber wall, it is probed that correct heat flux measurement is possible on an unsteady component. Therefore experiments for investigation of the steady component of heat flux using an engine were carried out. As a result, it is probed that the heat flux is measured precisely even if the material of the probe body is different from the material of the measurement part.

KeyWords: Heat flux probe, Temperature, Internal combustion chamber, Heat transfer coefficient

1. はじめに

ガソリンエンジンの燃焼効率を高める手段の 1 つとして、筒内ガス流動が導入されている。筒内ガス流動は燃焼を促進させ、内燃機関の高効率化に繋がると考えられる。しかし、ガス流動は同時に燃焼室壁面への冷却損失も促進させてしまうため、必ずしも燃焼効率が向上しているとはいえない。そのため、内燃機関の燃焼ガスと燃焼室壁面への熱伝達率との関係を明らかにする必要がある。内燃機関の燃焼室壁面の伝熱現象を計測する方法としては熱流束計を用いる計測がある。本研究では熱流束計の計測精度を高めるために、熱流束計の構成材料の条件の検討を行った。はじめに、熱流束計の表面接点を形成する素線と薄膜の材料が異なる場合に、正確な熱流束計測が可能であるかどうかシミュレーションを用いて調査した。次に母材の検討を行った。一般に精度の良い熱流束計の定義としては「計測箇所と熱流束計の母材は同じ材質を用いるべきである」と言われている。しかし、過去の研究¹⁾で定容燃焼容器を用いた実験では、非定常成分において母材の材質に関わらず、正確な熱流束計測が可能であることが証明さ

れている。そこで、本研究では、ガソリンエンジン燃焼室において計測箇所の材質と熱流束計の母材が異なっても正しい熱流束計測は可能であるかガソリンエンジンで調査した。

2. 熱流束計測

2.1 熱流束計測の原理

単位時間・単位面積あたりの熱の移動量を瞬時熱流束 [MW/m^2]といい、熱流束を計測する装置のことを熱流束計という。熱流束計は表面接点と内接点で 2 組の熱電対が形成されており、表面接点で燃焼室壁面の表面温度を、内接点で燃焼室壁表面から 5 mm の位置の温度を計測している。

本実験ではガソリンエンジン燃焼室壁面の熱流束を計測する。エンジンの熱流束は非定常成分と定常成分から成る。非定常成分は内燃機関の圧縮や燃焼の影響を受けて時々刻々と変化するもので、エンジンでの燃焼室壁面への瞬時熱流束において火炎到着時や膨張行程において顕著な増分を示す。定常成分とは内燃機関の各工程での影響を受けず、常に一定の値を示す。熱流束の非定常成分は表面接点温度を調和解析することで求め、熱流束の定常成分は表面接点と内接点の差より求め、これらを足し合わせることでエンジンの燃焼室壁面の熱流束を算出している。

1) 機械システム工学専攻大学院生

2) 機械システム工学科准教授

3) 機械システム工学助教

4) 教育研究支援技術センター技術専門職員

表 1. 熱流束計に使用した材料.

	Al-Ni Heat flux probe	Cu-Con Heat flux probe
Probe body	A5052	Constantan
Wire	Nickel	Copper
Plate (thickness)	Nickel (6.5 μ m)	Copper (10 μ m)

2. 2 熱流束計の構造

本実験では Al-Ni 熱流束計と Cu-Con 熱流束計の 2 つの熱流束計を製作した。表 1 に Al-Ni 熱流束計と Cu-Con 熱流束計の構成材料を、図 1 に熱流束計の構造について示す。熱流束計は、直径 3.2mm、長さ 10mm の母材金属において、表面及び表面から 5mm の内部の 2 箇所熱電対を構成している。表面は電解めっきにより表面接点を形成しており、めっきの厚さは応答性を考慮して Cu めっきで 10 μ m、Ni めっきで 6.5 μ m とした。内接点は母材の表面から 5mm の位置まで穴をあけ、そこに接点以外で導通しないようにセラミックチューブで覆い、点溶接で固定することで、内接点を形成した。Al-Ni 熱流束計のアースの材料としては、本来母材と同じ材料を使用すべきであるが、代わりに熱物性値に近い A1020 の素線を用いて、アースを形成した。A5052 と A1020 の熱起電力について、実験により確認したところ、発生した熱起電力は微小であり熱流束計測には影響はないことは確認している。

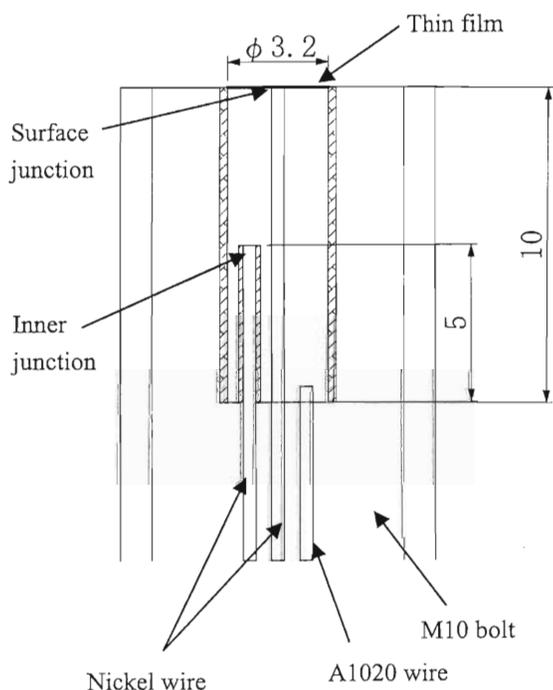


図 1. 熱流束計の構造.

表 2. 供試機関の主要諸元.

Engine Type	4-Stroke, OHV
Cylinder number	Single cylinder
Firing system	Full transistor ignition
Fuel supply system	Electric fuel injection
Combustion chamber configuration	Pancake type
Bore \times Stroke	85 mm \times 85 mm
Stroke volume	482 cc
Top clearance	24.0 mm
Compression ratio	4.54

2. 3 供試機関

本研究では 4 サイクル OHV 型単気筒試験機関 (型式名 TRE-1) を使用している。表 2 に供試機関の主要諸元を、図 2 に供試機関を示す。燃焼室は直径 85mm、トップクリアランス 24mm のパンケーキ型の形状をしている。吸排気系は 2 バルブ方式で、吸気バルブの傘部にシュラウド (覆い) を設けることで、燃焼室内に旋回流を発生させた。機関の点火方法は、トランジスタを用いた誘導コイルによるもので、シリンダボア中心で点火した。燃料の噴射量の調節にはインジェクタを用いて行い、気温、湿度などの気象条件によって調節している。また、エンジン燃焼室の熱流束を計測するうえで、エンジンの熱平衡を保つことは重要である。そのため、機関の水温、油温が 80 $^{\circ}$ C、吸入空気温度が 65 $^{\circ}$ C になるように厳密に制御した。

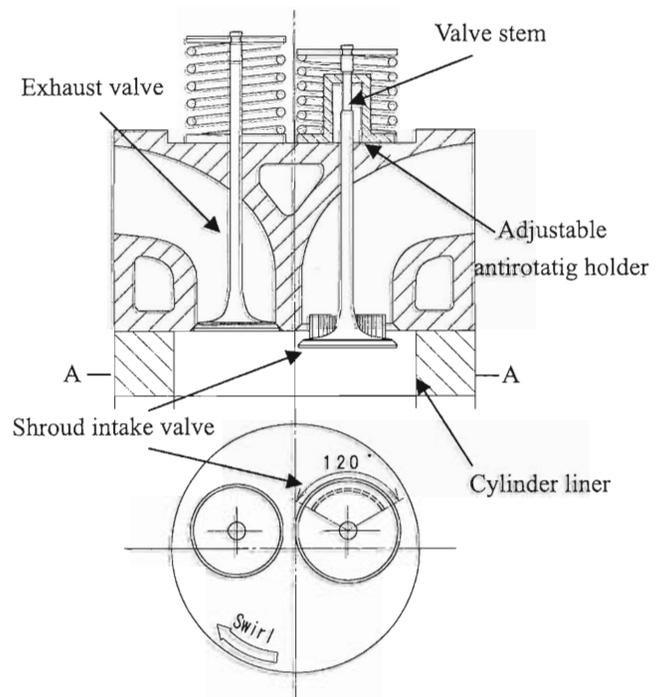


図 2. 供試機関.

2. 4 熱流束計のエンジンへの取り付け

熱流束計は機関への着脱を容易にするため、熱流束計用アダプタを用いた。アダプタはアルミニウム M10 ボルトに穴を開け、熱流束計を圧入しエンジンに装着した。アダプタと熱流束計間の漏れを防ぐためには真鍮カラーを用いた。真鍮カラーが潰れることにより熱流束計とアダプタからの漏れを防いでいる。図3に熱流束計用アダプタの構造を示す。

2. 5 熱流束計測システム

図4に熱流束計測システムの概略図を示す。供試機関のTDCとクランクアングルをフォトトランジスタで計測し、それらの信号により圧縮開始時のBDC(下死点)より燃焼圧力と熱流束計測を開始している。圧力はピエゾ式圧力

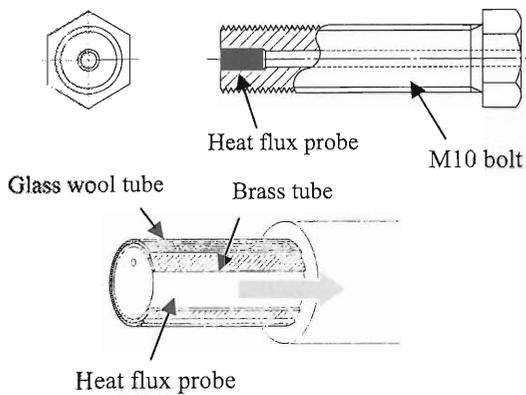


図3. 熱流束計用アダプタ.

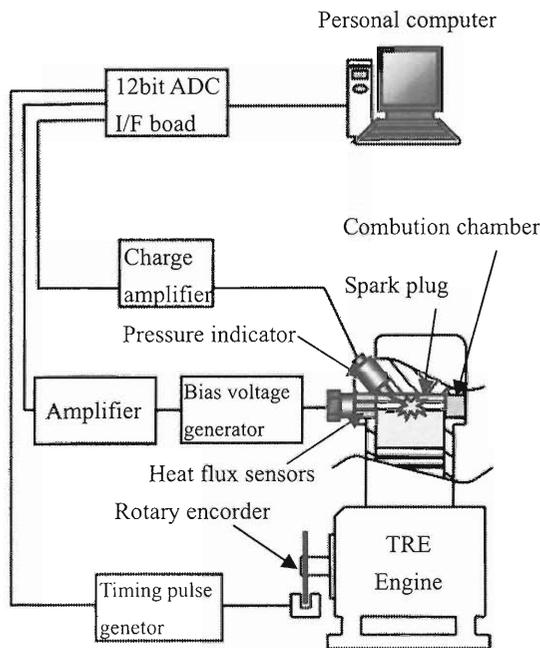


図4. 熱流束計測のための実験装置.

表3. 実験条件.

Engine speed	1000rpm
Charging efficiency	70%
Ignition timing	BTDC19°
A/F	15
Shroud angle	120°
Water and Oil temp	80°C (±0.5°C)
Charging temp	65°C

計より計測し、取得した圧力データを A/D ボードを介してパーソナルコンピュータにデジタル信号として記録している。熱流束計からの出力は表面接点と内接点の熱起電力を計測する必要がある。表面接点電圧は時々刻々と変化するため、応答性や計測精度を考慮して A/D ボードを介して、パーソナルコンピュータに記録している。内接点電圧に関しては、機関が十分に暖機された状態になると一定値を示すため、出力が安定したらデジタルマルチメータの値を記録している。1回の計測には1サイクルを1データとして、100サイクル分のデータを記録し、サンプリング間隔は60μs、サンプリング数は2048となっている。

2. 6 実験条件および実験条件

熱流束計測は、機関の計測箇所であるシリンダライナ部の4箇所熱流束計を取り付けを行った。熱流束計の取り付け位置を図5に示す。また、実験はエンジンの回転数、吸入空気量、吸入空気温度、冷却水温度、潤滑油の温度を表3に示した実験条件に合わせて、実験を行った。

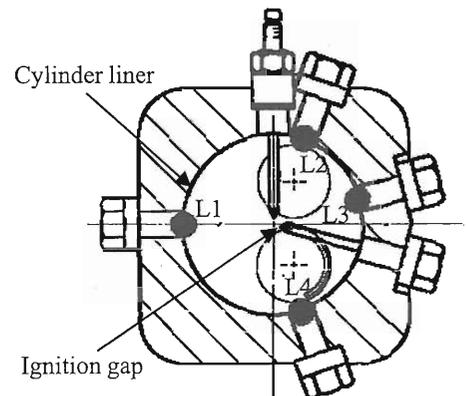


図5. 熱流束取り付け位置.

2. 8 実験結果及び考察

図6に各計測時の圧力波形を、図7に熱流束波形を示す。代表例として、安定していたL2(図5参照)での熱流束を示している。図6より圧力波形を比較してみると、Cu-Con熱流束計での計測時とAl-Ni熱流束計での計測時ではほぼ同じ値を示している。各計測時の機関の運転

状況が一致していると考えられるため、これらのデータを用いて各熱流束計の出力を比較した。

図7より、熱流束の立ち上がり、ピーク値、減衰行程において出力が一致していることがわかる。この結果からガソリンエンジンにおいて、計測位置と熱流束計の母材の材質が異なっても熱流束計測が可能であることがわかった。

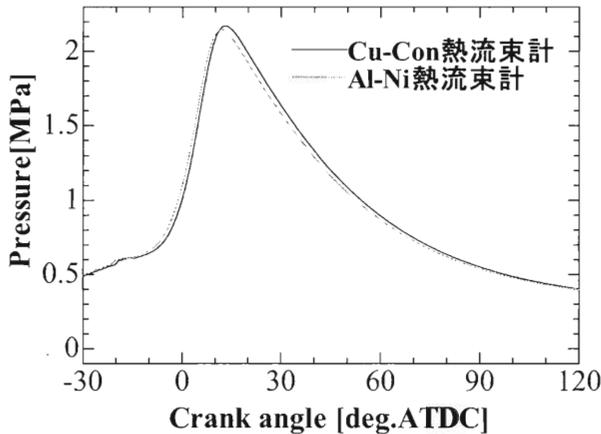


図6. エンジンシリンダ内ガス圧力.

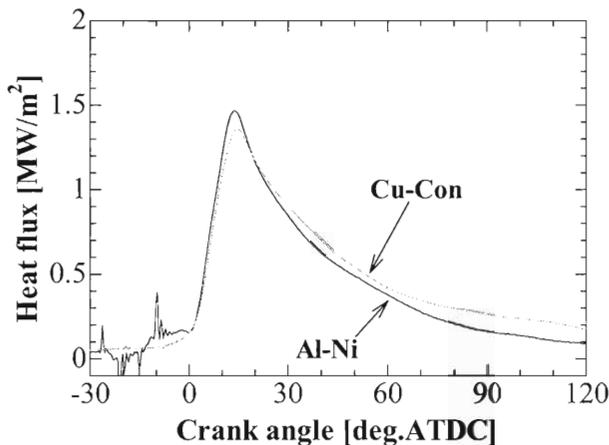


図7. エンジン燃焼室表面の熱流束計測結果.

3. 表面温度の予測

これまでの研究において、正確な熱流束を計測するためには、表面接点を形成する素線とめっきが同じ金属である2種類の金属で構成するべきである⁽²⁾といわれている。表面接点を形成する素線とめっきの材質が異なる3種金属で構成された熱流束計では、素線とめっきの材質が異なるため、熱物性値の違いにより素線と母材の表面に温度差が生じる。これにより表面接点を形成する素線と母材の間で熱起電力が生じ、計測誤差を生じることが考えられる。よって、今回、シミュレーションソフトを用い、熱流束計の簡易モデルを製作し、熱流束計の表面温度分布について解析した。

3. 1 誤差につながる要因について

熱流束計測は、熱起電力を測定することにより温度を算出し求める。今回、3種金属の熱流束計が計測の誤差につながると思った要因は、素線とめっき面で温度差が生じ、熱起電力が発生していることが予想されるからである。以下に3種金属および2種金属の熱流束計における熱起電力の算出方法を示す。

1) 3種金属の熱流束における熱起電力算出

熱流束計の母材金属をA、素線金属をB、薄膜金属をCとする。この熱流束計から得られる熱起電力をEとし、各金属の白金に対する熱起電力をそれぞれ σ_A 、 σ_B 、 σ_C とする。母材の表面温度を T_h 、素線の表面温度を $T_{h'}$ 、冷接点温度を T_c とする。熱電回路全体の熱起電力は、微小要素での微小熱起電力を積分したものとなるので以下の式を得る。

$$E = \int_{T_c}^{T_h} \sigma_A dT + \int_{T_{h'}}^{T_c} \sigma_B dT + \int_{T_h}^{T_{h'}} \sigma_C dT \quad (1)$$

熱起電力を一定として

$$E = (\sigma_A - \sigma_B)(T_h - T_c) + (\sigma_B - \sigma_C)(T_h - T_{h'}) \quad (2)$$

となる。

2) 2種金属の熱流束における熱起電力算出

めっきと素線の材質は同じであるため、 $\sigma_B = \sigma_C$ となるので式(2)は

$$E = (\sigma_A - \sigma_B)(T_h - T_c) \quad (3)$$

となる。式(2)と式(3)の違いは第2項のみである。式(2)および式(3)の第1項は、計測値となる母材と素線間で発生する熱起電力である。式(2)の第2項は素線とめっきの材質の違い、素線と母材の表面温度差から生じるもので、誤差の原因となるものである。これらの式から素線と母材の表面温度に差が生じると誤差につながり、熱流束計測に影響を与えられらる。

3. 2 解析モデル

図8に製作したS45C-Con熱流束解析モデルを示す。解析モデルは、内接点素線及びアース線は省略し、表面接点素線のみ母材に挿入している構造とした。解析モデルの製作はプリプロセッサとしてMSC.Patranを用い、解析にはソルバーとしてMSC.Nastranを用いた。また、熱流束計の母材は $\phi 3.2\text{mm}$ で長さ10mmのS45Cを用いる。母材の中央には表面接点を形成するための $\phi 0.65\text{mm}$ のコンスタンタン素線を挿入し、 $10\mu\text{m}$ の銅薄膜で熱接点を形成している。素線には表面接点以外で電気的導通しないように耐熱接着剤が塗布されている。この耐熱接着剤はフェノールを多く含むため、接着剤の物性値としてフェノールを採用し、厚さを0.5mmとした。表4に解析モデルに用いた

材料の物性値を示す。モデルのメッシュには、解析の精度および解析の結果が表示しやすいように考慮して行った。

表 4. 熱物性値.

Material	Thermal conductivity λ (W/m K)	Thermal diffusivity a (mm ² /s)
S45C	51.5	13.9×10^{-6}
Constantan	23.3	6.37×10^{-6}
Copper	398	117×10^{-6}
Phenol	0.19	0.895×10^{-6}

メッシュは、半径方向に 5 分割、円周方向に 22.5° 間隔に 16 分割した。軸方向には厚さ 10mm の解析モデルを間隔 0.5mm 間隔に 20 等分した。図 9 に格子分割した解析モデルを示す。解析モデルの要素数は 1680 となっている。

3. 3 解析条件

解析の条件は、解析モデルのめっき部分に時間依存の熱流束を与えた。この熱流束出力は過去の定容燃焼容器の熱流束値を用いた。図 10 に与えた熱流束について示す。また、熱流束計モデルの初期温度はモデル全域を 80°C とした。

3. 4 解析結果

図 11 に解析した結果を示す。図 11 は母材とコンスタンタン素線の温度差が最大となった 0.08 秒時の熱流束計の表面温度分布を示している。母材の表面温度は 85.6°C、素線の表面温度は 88.0°C となり、2.4°C の温度差が生じた。この結果から素線と母材に温度分布が生じることがわかった。

次に解析結果を用いて、実際に計測されると考えられる時間における表面温度を式(2)を用いて算出した。まず、解析結果より 3 種金属で構成された S45C-Con(めっき Cu) 熱流束計で発生する熱起電力を計算した。次に S45C とコンスタンタンのみで形成された熱電対として、熱起電力を表面温度に換算した。この計算を 0 秒から 0.4 秒の間で 41 箇所行った。図 12 に解析結果による母材および素線の表面温度変化と計算から算出した母材の表面温度変化を示す。解析結果と計算で算出した母材の表面温度では約 2°C の差が出ている。表面の温度変化が 8°C しか変化しないことに対して 2°C の差は大きく、母材の表面温度を計測できていない。また、素線（解析結果）と計算で算出した母材の表面温度は近い温度を示している。めっきと素線の材質が異なる S45C-Con 熱流束計は、母材の表面温度ではなく、素線の表面温度を計測している。表面温度から熱流束に換算時に、めっきと素線の材質が異なる熱流束計ではコンスタンタン素線の表面温度を計測しているため熱流束計測に誤差が生じている。表 4 からわかるように、S45C とコンスタンタンでは 2 倍近く熱伝導率が異なるため、熱流束

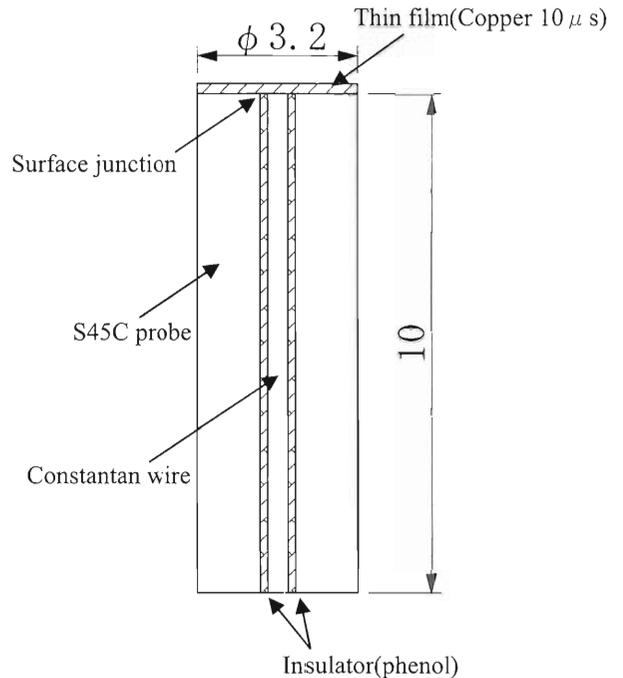


図 8. 熱流束計の計算モデル.

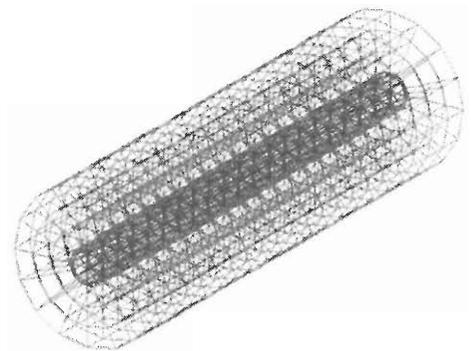


図 9. 解析モデル.

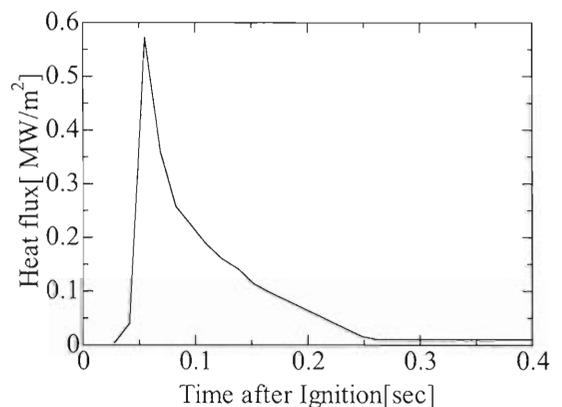


図 10. 解析における熱流束の入力値.

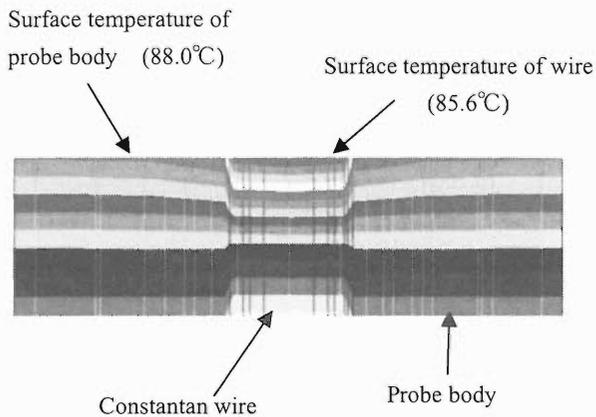


図 11. 温度分布の解析結果.

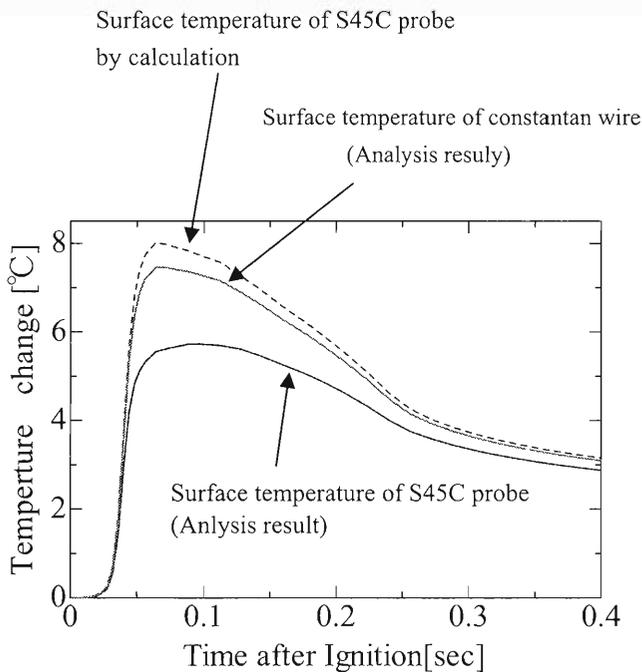


図 12. 熱流束計表面温度の解析結果.

の出力に差が生じることが考えられる。よって、3種金属での熱流束計では正確な熱流束計測が行えないことがわかった。

4. 結論

ガソリンエンジンで熱流束計測を行いAl-Ni熱流束計とCu-Con熱流束計の熱流束出力の比較し、また、めっきと素線の材質が異なる熱流束計の表面温度分布のシミュレーションを行った。これらの結果から熱流束計の構成材料について以下の結論を得た。

- 1) ガソリンエンジン燃焼室において、熱流束計の母材と計測箇所の材質が異なっても正確な熱流束計測は可能である。
- 2) 正確な熱流束を計測するためには、めっきと素線の材質が等しい熱流束計を用いるべきである。

参考文献

- 1) 長瀬慶紀、田坂英紀、火花点火機関における熱流束計測の精度向上(薄膜型熱流束計構成材料の条件)日本機械学会論文集(B編)73巻732号(2007)
- 2) 榎本良輝、古浜庄一ら、内燃機関の燃焼室表面瞬間温度測定用熱電対に関する研究、日本機械学会論文集(B編)50巻453号(昭59-5) pp.1353~1361(1984)
- 3) 榎本良輝、古浜庄一、内燃機関表面瞬間温度計測用熱電対に関する研究、日本機械学会論文集(B編)50巻432号(1984)
- 4) 日本機械学会伝熱工学資料(改定第4版)合金の物性値 pp.314~315、pp.321
- 5) 吉田、針谷、佐藤ら 予燃焼室ディーゼル機関燃焼室各部の熱の流れ(第2報、シリンダヘッド燃焼室面における熱の流れ)日本機械学会論文集(B編)47巻419号(昭56-7) pp.1418~1423