

## 薄膜型熱流束計の高精度化に関する研究 (エンジンピストン部での検討)

長瀬慶紀<sup>1)</sup>・中釜健斗<sup>2)</sup>・友松重樹<sup>3)</sup>・木村正寿<sup>4)</sup>

### Study on Improvement of Thin Film Type of Heat Flux Probe (Examination of Piston Part of Engine)

Yoshinori NAGASE, Kento NAKAGAMA, Shigeki TOMOMATSU, Masatoshi KIMURA

#### Abstract

An internal combustion engine is demanded to be higher efficiency from the viewpoint of environmental problem. For the high efficiency, the gas flow is introduced into combustion chamber. The introduction of the gas flow promotes combustion. But the gas flow increases the heat transfer between combustion gas and combustion chamber walls. It is said to measure correct heat fluxes in an engine, body material of a heat flux probe should be used same material as combustion chamber. However, it is proved that correct heat fluxes can be measured using probe material of a heat flux probes is different from a cylinder liner in the experiments with a constant volume vessel. But the experiments are not taken account of the stationary part of heat flux. Then, the heat flux measurements are carried out with the engine. The thermal conductivity of the material has a great influence on the surface temperature at the piston. As a result by S45C-Ni heat flux probes is same as that by the Cu-Con heat probes whose bodies are different from a combustion chamber wall of the engine.

#### Key Words:

Heat Flux Probe, Internal Combustion Engine, Thermal Efficiency

#### 1. はじめに

現在、地球温暖化等の環境問題のため高効率の内燃機関が求められている。熱効率向上のため内燃機関には、筒内ガス流動が積極的に導入されている。筒内ガス流動の導入は燃焼の高効率化には有効な技術であると考えられる。しかし、筒内ガス流動を導入した場合、燃焼は促進されるが燃焼ガスと燃焼室壁面との間の熱伝達も促進されるため筒内ガス流動の導入が必ずしも高効率化につながるとは一概には言えない<sup>(1)</sup>。そのため、筒内ガス流動と壁面への熱伝達の間を調べるた

めに、精度の良い熱流束計の開発が求められてきた。一般に熱流束計の母材には計測箇所と同じ素材を用いる必要がある<sup>(2)</sup>といわれている。しかし、これまでの研究で熱流束が燃焼室内で最も安定していると考えられるライナ部の熱流束をS45C-Ni熱流束計、Cu-Con熱流束計の二種類の熱流束計で計測した結果、ライナ部と母材が異なる材質であるCu-Con熱流束計がライナ部と同じ材質であるS45C-Ni熱流束計とほぼ同じ値を示した<sup>(3)</sup>。よって、ライナ部においては燃焼室壁面の材質と熱流束計の母材が異なっても正確な熱流束計測は可能であると証明されている。

本研究は燃焼室内でライナ部と比較して燃焼室表面と熱流束計の表面温度差が大きくなると考えられるピストン部の熱流束をS45C-Ni熱流束計とCu-Con熱流束計で計測する。そして、得られた熱流束値を比較し双方の結果が同等であれば計測箇所の材質と熱流束計の

1) 機械システム工学科准教授

2) 機械システム工学専攻大学院生

3) 機械システム工学科助教

4) 宮崎大学技術職員

母材を一致させる必要はなくなる。そのため、Cu-Con 熱流束計で燃焼室全体の熱流束計測は可能であることの実験的証明を目的としている。

## 2. 熱流束計測

### 2.1 熱流束計

熱流束とは、単位時間、単位面積当たりの熱の移動量 [ $W/m^2$ ] である<sup>(4)</sup>。内燃機関における熱流束は燃焼室壁面のように時々刻々に変化する非定常成分と、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からなる。この熱流束を本研究では自作した熱流束計を用いて計測する。

### 2.2 熱流束計の原理

本研究で製作し使用した熱流束計には、母材の表面と内部にそれぞれ表面接点、内接点と呼ばれる接点があり 2 組の熱電対が設けられている。2 組の熱電対により熱流束計の表面温度、内部温度が求まる。内燃機関の熱流束は急速に変化するため、熱流束計には速い応答性を確保するということから表面接点は電解メッキによる薄膜にて形成されている。

### 2.3 熱流束計の構造

図 1 と表 1 に熱流束計の構造と構成金属<sup>(5)</sup>を示す。母材は、長さ 10.0mm、 $\phi 3.2$ mm の垂直円柱とした。この母材に中心軸と平行で深さが異なる 2 つの穴と 1 つの貫通穴を設けた。表面接点は  $\phi 0.7$ mm の貫通穴に、 $\phi 0.65$ mm の素線を挿入した後、かしめることにより素線を固定している。貫通穴に挿入する素線には、母材の内部で導通し接点が形成されないように絶縁処理が施されている。固定後、素線の先端と母材表面を揃え、電解メッキを表面に施すことで表面接点を形成している。内接点は  $\phi 1.4$  mm、深さ 5.0 mm の穴を設け、底部と  $\phi 0.65$ mm の素線の先端を電氣的に点溶接することで内接点を形成した。この素線と母材間はセラミックの碍子で覆われており、溶接点以外では母材と電氣的絶縁状態になるので、表面から深さ 5.0mm の位置での温度を計測することができる。アースには、母材と同一または熱起電力の発生しない<sup>(6)</sup>  $\phi 0.65$ mm の素線を挿入し、表面接点と同様にかしめることで固定している。2 本の素線と母材により 2 組の熱電対を形成している。また、計測装置まで熱流束計の構成金属と同種類のケ

ーブルを使用することで表面接点と内接点以外で起電力が発生するのを防止した。

### 2.4 熱流束計の選別

使用する熱流束計は、自作のため個体差が発生する。熱流束計の個体差による出力のバラツキを極力少なくするために実験で使用する本数よりも多めに製作し、その中から同様の出力を示す熱流束計を必要本数分選別した。選別方法は実機の各計測位置の中で最も再現性がよく、安定した波形を出力するライナ部に順次取り付け、同一運転条件にて熱流束計測を行った。選別においては 100 サイクル分の平均値を出力とし、得られた熱流束波形のバラツキを調べ平均的な出力を持つ熱流束計を選別した。

表 1 熱流束計の構成金属

Type	Probe body	Wire	Plate (Thickness)
S45-Ni	S45C	Nickel	Nickel (6.5 $\mu$ m)
Cu-Con	Constantan	Copper	Copper (10 $\mu$ m)

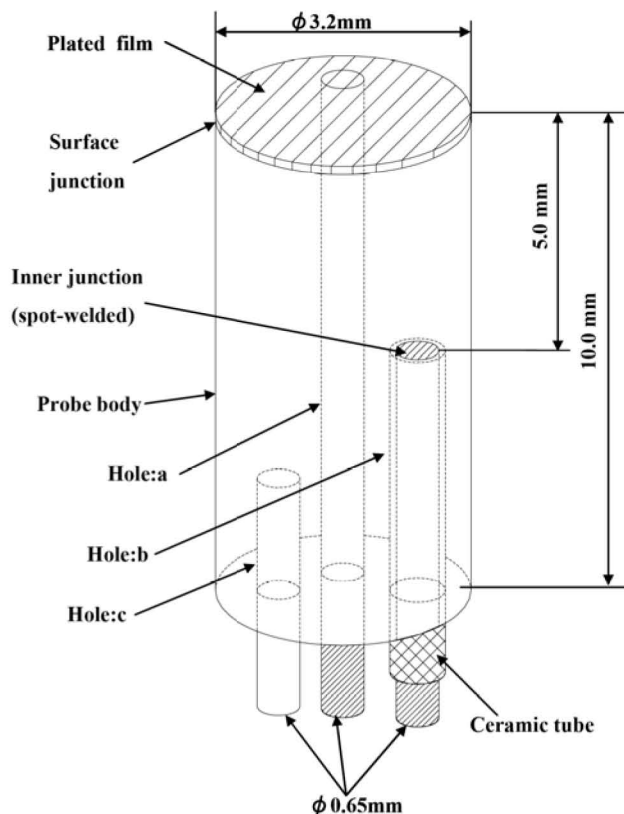


図 1 熱流束計の構造

2.5 供試機関

本研究で用いた供試機関は、多様な燃焼状態の解析が行えるように設計されている4サイクルOHV型単気筒試験用のガソリンエンジン(形式名:TRE-1)である。供試機関の主要諸元を表2に示す。吸排気系は2バルブ式であり、吸気バルブの傘部に図2に示す円弧状の覆い(シュラウド)を取り付けることで、燃焼室内に旋回流(スワール)を発生させている。シュラウド設置角は吸排気弁の中心を通る直線に対して90°に固定し、シュラウド角 $\theta$ は120°のものを用いた。燃料の気化には電子制御燃料噴射装置(EFI)を用いることで、空燃比の変更が容易となっている。また、吸入ポートに温度計を設けることで燃料気化装置のヒータにより暖められる吸入空気の温度を一定に保つよう管理している。

エンジン全体の熱平衡状態を保つため、供試機関の冷却系はポンプによる冷却水循環方式を採用し、外部ヒータにより水温調整を行っている。潤滑系はポンプによる潤滑方式でドライサンプ方式になっており、機関と別体のオイルタンク内にヒータを内蔵することで油温調整が行えるようになっている。これにより機関の熱的平衡状態を管理している。また、供試機関のピストンヘッドは、熱流束計測等の用途に応じて交換が可能となっている。本研究では、ピストンヘッドに熱流束計が取り付けられるように自作した。

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あり、プラグから電極をステンレス棒で延長することにより上死点での燃焼室中心にて点火させている。

圧力計には、ピエゾ式圧力計を採用している。

表2 供試機関主要諸元

Engine type	4stroke, OHV
Bore × Stroke	85.0 mm × 85.0 mm
Stroke volume	482 cc
Compression ratio	4.54
Combustion chamber	pancake type
Top clearance	24.0 mm
Valve timing	
In. open deg.	BTDC 16
In. close deg.	ABCD 58
Ex. open deg.	BBDC 54
Ex. close deg.	ATDC 12

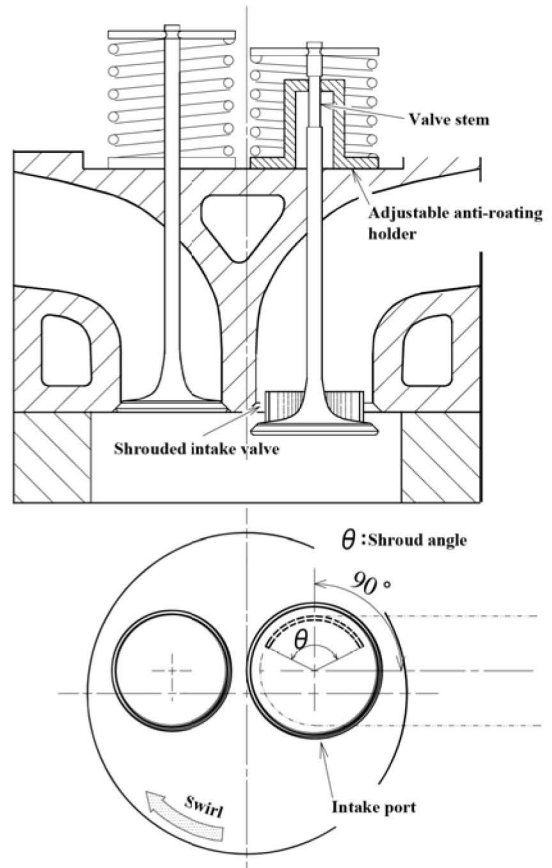


図2 シュラウドバルブ

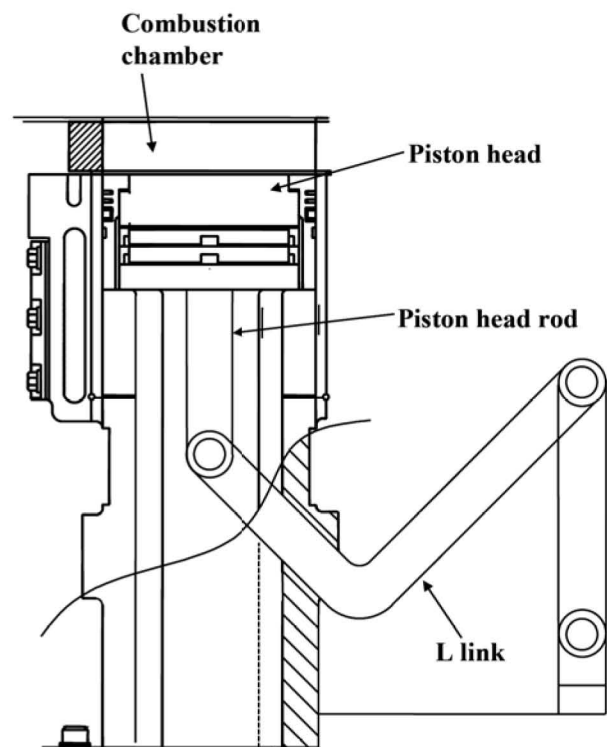


図3 リンク機構

ピストンヘッド部の熱流束計測において本研究では、図3のようなリンク機構を用いることで熱流束計から計測装置への補償導線に掛かる負荷は、ねじりのみとなっており往復運動による負荷を軽減している。

また、補償導線はグラスウールチューブやテフロンチューブの中に通すことで断線しにくくしている。

## 2.6 実験条件

熱流束計測位置を図4に示す。計測位置はシリンダヘッド部の半径比0.7の位置に2箇所、シリンダライナ部に4箇所、ピストンヘッド部の半径比0.6の位置に4箇所、中心部に1箇所の計11箇所となっている。表面接点電圧はバイアス電圧を差し引いた値を直流増幅器で1000倍に増幅し、ピエゾ式圧力計から得られる圧力信号とともにA/D変換器を介してコンピュータに取り込まれる。このことにより、急速に変動する表面接点電圧の変化に対応している。内接点電圧、バイアス電圧は、デジタルボルトメータで検出された値を直接読み取り記録する。また、機関の運転条件を表3に示す。計測はエンジンが定常状態になってから行う。また、1回の計測における計測データ数は100サイクル分とし、それをアンサンブル平均することで1回の燃焼ごとに発生する出力のバラツキをなくした。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 ピストンヘッドにおける熱流束について

これまでの研究ではS45C製ピストンヘッドは供試機関の構造上ライナ部と比較して冷却されておらず高温になり、熱流束計の表面メッキが破損することから、ピストン部の熱流束計測は困難な状況であった。そこで、本研究ではピストン部の熱流束計測を可能にするため下記に示す対策により熱流束計測を行った。

- ・ 空燃比を15から17に変更する。
- ・ 点火の回数を4回につき1回の点火にする。

ピストン部は半径比0.6で4箇所、中心部で1箇所、計5箇所熱流束計測を行ったが、熱流束計の破損と考えられる波形や明らかに小さい熱流束波形を示す計測箇所があった。しかし、半径比0.6の位置のP3とP5は出力が得られたため、この2箇所の計測結果を考察することにした。S45C製ピストンヘッドの熱流束波形を、図5に示す。

図5のいずれの計測点においても、ピーク値で約8%

の差が生じているがATDC60°までほぼ波形は重なっているため同様の出力を示していると考えられる。S45C-Ni熱流束計はATDC60°以降で波形が波打っている。これは、S45C-Ni熱流束計を構成する金属が強磁性体であるためリンク機構により補償導線がねじられることで発生した磁歪効果による影響と考えられる。

実験条件を変更することによりこれまで計測できなかったピストン部の熱流束計測が可能になった。また、計測できた2箇所の熱流束値はほぼ同様の出力を示した。ピストン部の熱流束を計測することで、S45C-Ni熱流束計には磁歪効果が発生することがわかった。よって、ピストン部の熱流束計測にはCu-Con熱流束計が計測に適していると考えられる。

表3 機関運転条件

Engine speed	1000 rpm
Charging efficiency	70 %
Ignition timing	BTDC19°(MBT)
A/F	17
Ignition number	1/4
Shroud angle	120°
Water and Oil temp.	80°C(±0.5°C)
Charge temp.	65°C(±0.5°C)
Measuring position	H1,H2,L1,L2,L3,L4 P1,P2,P3,P4,P5

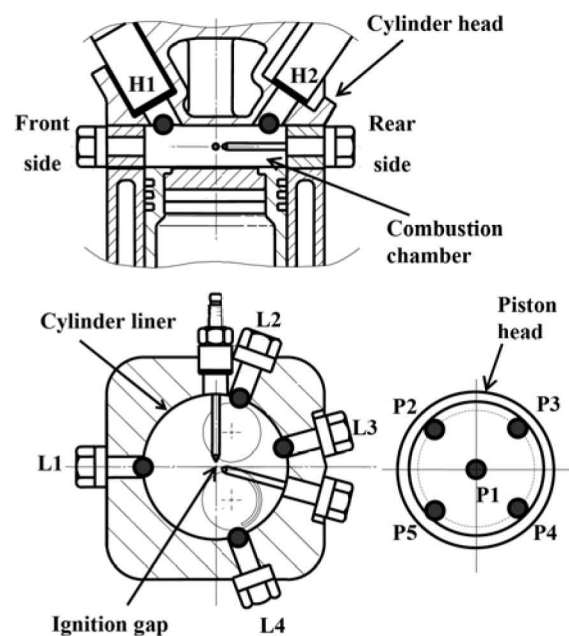


図4 計測位置

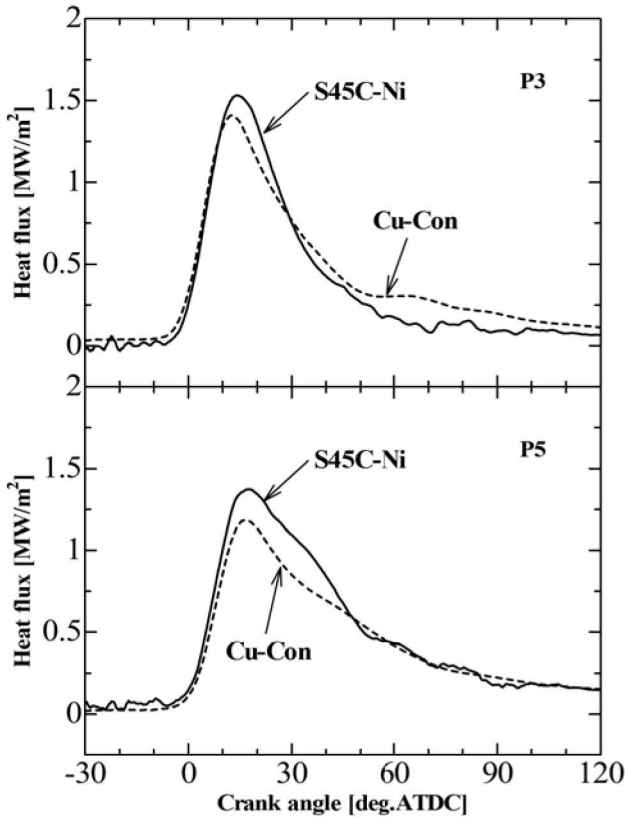


図5 ピストンヘッドの熱流束波形

3.2 ライナ部, ヘッド部の熱流束について

図6および図7にライナ部とヘッド部の熱流束波形を示す。ライナ部, ヘッド部の結果もピストン部と同じように, 明らかに波形の小さいものや熱流束計の破損と考えられる波形を示すものがあった。そのため, ライナ部ではL2, L4の2箇所, ヘッド部ではH1の1箇所の熱流束波形を考察することにした。

ライナ部, ヘッド部はピストン部と異なり熱流束計と計測器を結ぶ補償導線にねじれは起きないため磁歪効果が発生していないことがわかる。

ライナ部ではL2, L4ともにピーク値, ピーク位置では波形が重なっている。L2の減衰過程で出力に差が生じているが, これは熱流束計を選別する際の範囲内に十分に収まる差である。よって, この差は個体差によるものであると考えられる。

ヘッド部では1箇所しか計測できなかったため, H1の計測結果を検討した。同じような傾向の熱流束波形を示しているが減衰過程において約20%以上の差が生じているため, 個体差を考慮してもこの結果より二つの波形が同様の出力を示しているとは言い切れない。

以上の考察よりライナ部では二箇所の熱流束波形の出力を比較したところ L2, L4 においては同様の出力が

得られたと考えられる。しかし, ヘッド部においては計測箇所が少なく波形の差が大きいため熱流束値が同様の出力を示しているとは言い切れない。

全点計測はできなかったが, 表面温度差が最も大きくなると考えられるピストン部での考察より, Cu-Con熱流束計が熱流束計測に適していることがわかったためCu-Con熱流束計でライナ部, ヘッド部も含めたエンジン全体の正確な計測が可能だと考えられる。

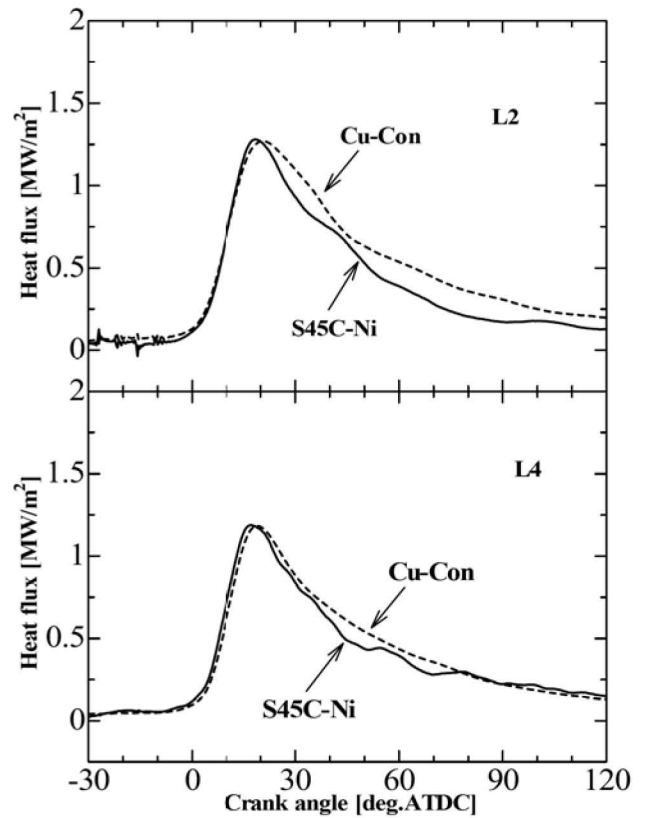


図6 ライナ部の熱流束波形

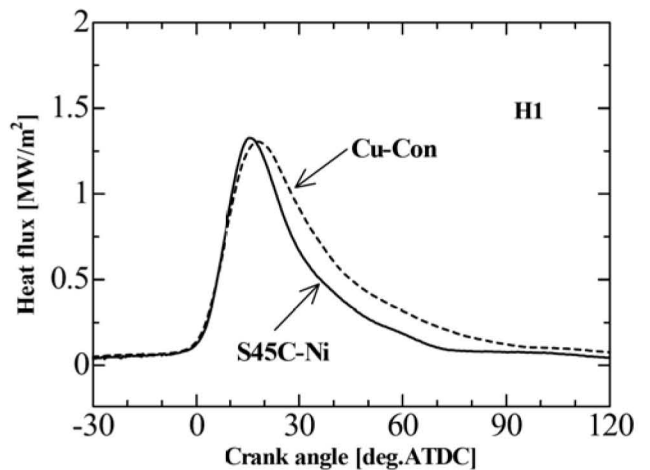


図7 ヘッド部の熱流束波形

#### 4. 結論

母材の材質が燃焼室壁面と同じであるS45C-Ni熱流束計と、母材が燃焼室壁面と異なるCu-Con熱流束計を用いて、ピストン部、ライナ部、ヘッド部の熱流束計測を計測し結果を比較したところ以下の結論を得た。

(1) ピストン部の熱流束計測では、S45C-Ni熱流束計とCu-Con熱流束計の結果を比較したところ出力が得られた箇所においては同様の熱流束値を示した。また、S45C-Ni熱流束計は、磁歪効果が発生するためピストン部の熱流束計測にはCu-Con熱流束計が計測に適していることがわかった。

(2) ライナ部、ヘッド部の熱流束を計測したところ、ライナ部においてはS45C-Ni熱流束計、Cu-Con熱流束計ともに同様の熱流束値を示した。また、ピストン部の結果よりCu-Con熱流束計がエンジンの熱流束計測に適していることがわかった。

#### 参考文献

- (1) 田坂英紀ほか; 火花点火機関における熱伝達に関する実験的研究, 日本機械学会論文集 62 巻 599 号, (1996), p. 362
- (2) 榎本, 古浜ほか; 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(第2報, 燃焼室壁面に埋めこまれた場合の検討), 日本機械学会論文集 52 巻 474 号, (1986), p. 680
- (3) 中野健二; エンジン燃焼室の熱伝達に関する研究(ピストン部の熱流束計測の検討), 宮崎大学大学院工学研究科修士論文, (2007)
- (4) 田坂英紀; 伝熱工学, 森北出版株式会社, (1996), p. 3
- (5) 長瀬, 田坂; 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 73 巻 732 号, (2006), p. 1753
- (6) 日本機械学会編; 伝熱工学資料 改訂第4版, 合金の物性値, (1986), p. 317