

赤外線によるガソリンエンジン燃焼室壁面の温度計測

大塚 晃則¹⁾・長瀬 慶紀²⁾・長友 宏昌³⁾・木村 正寿⁴⁾・友松 重樹⁵⁾

Temperature Measurement on Combustion Chamber Wall of S.I. Engine Using Infrared Rays Detector

Akinori OHTSUKA, Yoshinori NAGASE, Kousuke NAGATOMO, Masatoshi KIMURA, Shigeki TOMOMATSU

Abstract

It is important to measure the temperature of burnt gas and combustion chamber wall surface of a spark ignition engine because of improvement for thermal efficiency in the engine. The engine combustion chamber wall temperature is usually measured by the thin film type of thermocouple. However there are many restrictions for the thermometer to install the engine. In this study, measurements of temperature and heat flux on spark ignition engine combustion chamber wall using infrared rays were developed. At first the calibration was carried out by detecting infrared rays from a material at given temperature with an IR detector. The calibration is the method to obtain a relation of temperature and infrared radiation. As a result temperature of a measuring object was calculated from measured infrared radiations with the obtained calibration curve. Next infrared rays from spark ignition engine wall were measured with the IR detector. At the same time pressure measurement was also carried out with pressure indicator. To eliminate the influence of infrared radiation from burnt gas, a sapphire glass for observation window sprayed black paint was applied. Therefore the measuring object was the outer surface of the black paint on the sapphire glass. Heat flux was calculated to estimate crank angle where heat flux becomes 0 W/m^2 . On the crank angle combustion chamber wall temperature and burnt gas temperature were equal. The burnt gas temperature was calculated from measured pressure and equation of state for perfect gas. Generally the result of infrared thermometer agrees with the result of heat flux sensor in average temperature. But improvement for response of infrared thermometer is necessary to apply the engine combustion chamber.

Keywords: Infrared radiation, Engine, Combustion chamber wall temperature, Measurement

1. 諸論

近年の環境問題への関心の高まりから、内燃機関には低燃費化、および低公害化が求められており、少ない燃料からこれまでと同等以上のエネルギーを取り出すことで、結果として汚染物質の排出低減が可能となる内燃機関の熱効率向上が重要である。内燃機関における熱効率は、燃焼ガスから燃焼室壁面への熱の逃げを減らすことで向上させることができるが、その熱の逃げを調べるには燃焼ガスの温度¹⁾および、燃焼室壁面の温度を計測することが重要となる。

燃焼室内の温度については熱流束計測という形で薄膜型熱電対を用いた研究^{2,3)}がなされているが、取り付けの問題から計測できる場所が限られ、温度計の大

きさにより計測箇所を多くとれない等により、燃焼室内全ての温度計測が困難となっている。この問題の解決手段として非接触式温度計測法のエンジンへの適用があげられる。

これまでに非接触式温度計測法をエンジンへ適用したのものとして、感熱燐光体を用いたディーゼル燃焼における燃焼室壁面温度の二次元瞬時計測⁴⁾や、二次元赤外線温度計と狭帯域バンドパスフィルタを用いた壁面温度分布計測法⁵⁾等の研究が行われている。しかしながら、燐光体を用いた計測では燃焼ガスからの自然発光の影響を受けてしまうことが報告されており、二次元赤外線温度計による計測においては、燃焼ガスからの赤外線放射の影響をバンドパスフィルタで除去できるという証明はなされておらず、特定のクランク角度の時間的な平均温度分布を計測しているため、1サイクルの連続的な温度計測には適用することができない。

そこで本研究ではサファイアガラス表面に黒色塗料を塗布することで燃焼ガスからの赤外線放射の影響を除去し、その塗料からの放射を赤外線検出器により計測することで1サイクルの温度変化をとらえ、赤外線

- 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) 機械システム工学専攻大学院生
- 4) 宮崎大学技術職員
- 5) 機械システム工学科助教

を利用した燃焼室壁面の温度計測を行った。また、求めた燃焼室壁面温度と圧力計により計測した筒内圧力を用い、燃焼室壁面における局所熱流束を算出した。

2. 理論

2.1 赤外線による温度計測原理

赤外線とは電磁波のうち $75\mu\text{m}\sim 1000\mu\text{m}$ 波長をもつものである。赤外線は 0K 以上の全ての物質から放射されており、温度に応じてその放射量は変化する。また、あらゆる温度において反射、透過がなく、放射量が最大となる理想的な物質として黒体があり、黒体からの赤外線放射量に関してプランクの法則、およびステファン-ボルツマンの法則⁶⁾として、それぞれ式(1)、(2)が成り立つ。

$$M_\lambda = \frac{c_1}{\lambda^5 \exp(c_2 h / \lambda k T) - 1} \quad (1)$$

$$M = \sigma T^4 \quad (2)$$

ただし、

M_λ : 分光放射発散度 [$\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \mu\text{m})$]

λ : 波長 [μm]

h : プランク定数= 6.62621×10^{-34} [$\text{W} \cdot \text{s}^2$]

T : 絶対温度 [K]

k : ボルツマン定数= 1.3807×10^{-23} [$\text{W} \cdot \text{s}/\text{K}$]

c_1 : 第一放射定数= 3.7418×10^4 [$\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \mu\text{m}^4)$]

c_2 : 第二放射定数= 1.4388×10^4 [$\mu\text{m} \cdot \text{K}$]

M : 放射発散度 [W/cm^2]

σ : ステファン-ボルツマン定数

$$= 5.6705 \times 10^{-12} \text{ [W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K}^4)]$$

である。

通常の物体からの放射量は黒体の放射量に対し、放射率 ϵ をかけたものとなる。ただし、 $0 \leq \epsilon \leq 1$ である。よって、物体の放射率がわかれば赤外線放射量を計測し、式(1)および式(2)から温度を求めることができるが、物体の放射率は表面状態や温度により変化するため、単純に放射率を与えることが困難であり、この計測法は適用できない。

そこで、本研究では燃焼室壁面の温度と赤外線放射量を同時計測し、温度と赤外線放射量の関係を求める校正を行い、求めた校正曲線を利用し、燃焼室壁面から放射される赤外線を温度に換算することで、温度計測を行った。

2.2 燃焼ガス対策

燃焼ガスは計測対象とする燃焼室壁面に比べはるかに高温であり、放射量が極めて大きい。これにより、図1に示すように、観測窓を通して対向する燃焼室壁面からの赤外線を計測する場合、燃焼ガスと燃焼室壁面からの放射を同時に計測することになり、燃焼室壁面からの放射のみを抽出することが困難となる。

そこで、本研究では図2に示すように、観測窓の燃焼ガスが当たる面に耐熱性の黒色塗料を塗布することで燃焼ガスからの放射を塞ぎ、塗料の薄さにより、観測窓表面と同じ温度になっている塗料表面から放射される赤外線を計測することにした。

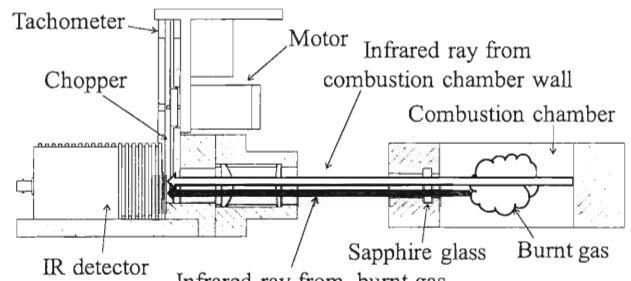


図1. 観測窓を透過する赤外線.

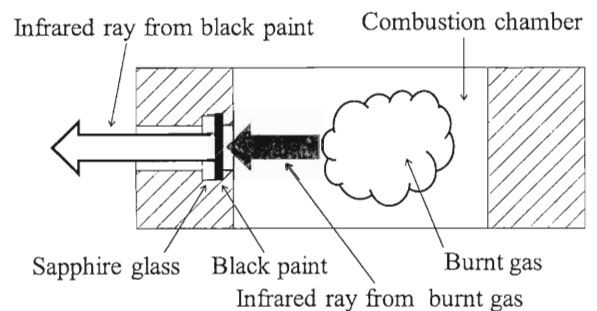


図2. サファイアガラス表面に黒色塗料を塗った計測.

2.3 熱流束計測原理

熱流束は図3に示す熱流束計により計測される。熱流束計は表面温度を計測する薄膜型の表面接点と表面から 5mm の深さにおける温度を計測する内接点の2組の熱電対からなる。熱電対は2種類の金属で閉回路を作ると、その両接点の温度差に応じた電流が流れるというゼーベック効果を利用した温度計である。片方の接点を一定温度に保ち、起電力を計測することでもう片方の温度が求まる。エンジンにおける燃焼室壁面の熱流束は伝熱現象を1次元非定常熱伝導と仮定し、非定常熱伝導方程式より非定常成分と定常成分の和として表現され、熱流束計により表面接点と内接点温度を計測することで非定常成分、および定常成分を算出し求められる。

しかし、本研究における赤外線による温度計測では内接点温度を計測できないため、同じ方法で熱流束が計測できない。そこで、赤外線により求めた表面温度から熱流束の非定常成分を算出し、熱流束が $0\text{W}/\text{m}^2$ 、すなわちガス温度と壁面温度が等しくなるクランク角度を、計測した圧力履歴、完全ガスにおける状態方程式によりもとめ、そのクランク角度における非定常成分と熱流束 $0\text{W}/\text{m}^2$ の差を定常成分とし、非定常成分に定常成分を加算することで熱流束を求めた。

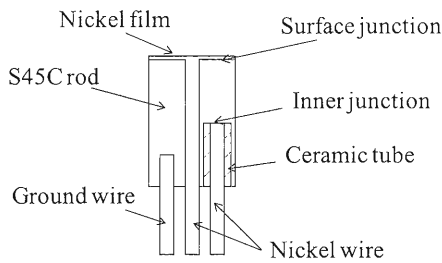


図3. 熱流束計.

3. 温度校正

3.1 校正実験装置

図4に温度校正の実験装置を示す。校正実験装置は、赤外線検出器、薄膜型熱電対、加熱装置、光学系、カバー、およびチョップからなり、計測対象は薄膜型熱電対に塗布された黒色塗料の表面となる。以下に詳細を示す。

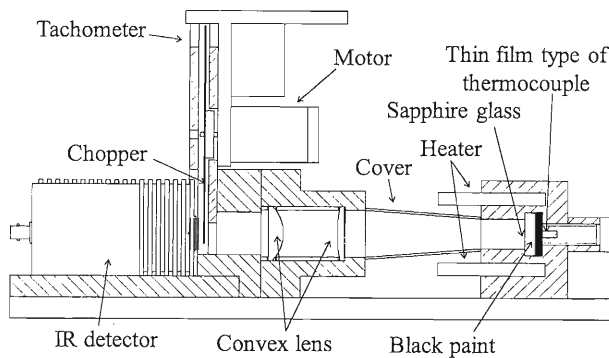


図4. 校正実験装置.

3.1.1 赤外線検出器 本研究では InAs 光起電力型素子とプリアンプ及び冷却コントローラーを一体化した赤外線検出器を採用した。感度波長範囲は $1\sim 3.5\mu\text{m}$ 、最大感度波長 $3.25\mu\text{m}$ 、受光面直径 1mm 、視野角 110° により赤外線を検出し、 $1.2\mu\text{s}$ の時間分解能を持つ。エンジンの回転数 1000rpm においてクランク角度 1° の間隔が約 $166\mu\text{s}$ であるため、クランク角度 1° の赤外線変化を計測することができる。

3.1.2 薄膜型熱電対 エンジン燃焼室壁面の温度計測と計測対象をそろえるためにはサファイアガラス表面に塗布された黒色塗料の温度を直接計測することが望ましいが、熱抵抗により正確な温度計測が困難であるため、薄膜型熱電対の表面に黒色塗料を塗布し、薄膜型熱電対の手前にサファイアガラスを設置した。これにより、温度を計測している表面と赤外線放射を計測する表面が異なるが、黒色塗料の厚さは数 μm と薄いため、厚み部分における温度勾配の影響は無視した。

3.1.3 加熱装置 計測対象となる黒色塗料の塗布

された薄膜型熱電対が、計測範囲である $180\sim 220^\circ\text{C}$ の範囲で変化するように、熱伝導率の高いアルミブロックにはんだごて用のセラミックヒータを取り付け、ヒータの電源電圧を変圧させ温度制御を行った。

3.1.4 光学系 放射エネルギーの微弱な赤外線を検出できるようにレンズを用い検出器に集光させることで出力を増やし、背景放射の入射を防いだ。なお、赤外線の計測は検出器の感度波長の範囲で行うものの単一波長ではないため、色収差により局所ではなく直径 3mm 程度の面積からの放射を計測しているものと考えられる。

また、サファイアガラスの赤外線透過率は 80% であり、設置の有無で出力が変化するため、エンジンでの計測と実験条件が合うよう黒色塗料の塗布されていないサファイアガラスを薄膜型熱電対の前に置き、窓蓋で軽く押さえつけた。

3.1.5 カバー 加熱装置により計測対象以外も高温となるため、レンズにより集光した光路以外からの入射が計測精度において問題となる。そのため熱拡散率が低く、温度変化しにくい、紙で出来たカバーで光路の周りを覆い、外からの赤外線を遮った。カバーの外側は赤外線の放射を反射させるように、吸収率の低い白、カバーの内側はカバーを透過した赤外線が中で反射しないよう吸収率の高い黒とした。

3.1.6 チョップ 計測に使用する赤外線検出素子の特性により、入力される赤外線の変化に対してのみ出力を行うため、図5に示すチョップにより計測対象からの放射を遮断し、交流入力により計測した。なお、計測対象からの放射とチョップからの放射が等しいとき出力 0V となる。

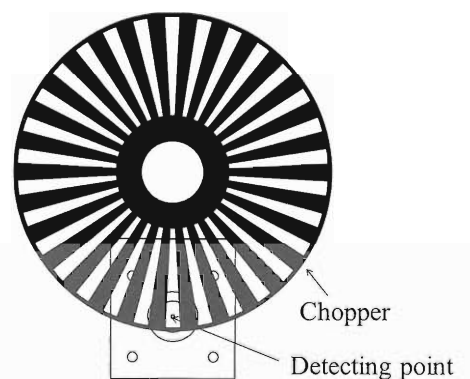


図5. 機械式チョップ.

3.2 校正実験

図4の装置において、ヒータにより薄膜型熱電対ごと黒色塗料の温度を $180^\circ\text{C}\sim 220^\circ\text{C}$ まで変化させ、表面温度を薄膜型熱電対、表面から放射される赤外線を赤外線検出器により計測し、データロガーに取りこんだ。計測は10回行った。実験条件を表1に示す。

表 1. 校正実験条件.

| | |
|------------------------------|------|
| Chopping frequency (Hz) | 28 |
| Number of slits | 10 |
| Sampling interval (μ s) | 200 |
| Sampling number | 6000 |

得られたデータは連続的に変化する温度と交流出力の電圧であるため、交流出力における振幅を赤外線出力とし、その間の平均温度と対応させた。求めた校正式、および校正曲線を図 6 に示す。

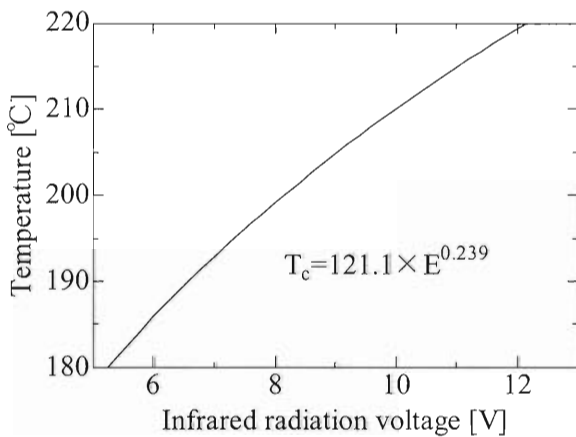


図 6. 校正曲線.

校正式は式(1)を温度変化に対する赤外線放射強度の変化を分かりやすくした近似式⁷⁾の式(3)を光学系の影響を考慮し、式(4)とした。

$$M = kT^n \quad (3)$$

$$T_c = \alpha E^\beta \quad (4)$$

ただし、

M : 分光放射発散度 [$W/(cm^2 \cdot \mu m)$]

T : 絶対温度 [K]

k : 定数 [1]

n : 指数定数 [1]

T_c : セ氏温度 [$^{\circ}C$]

E : 赤外線出力電圧 [V]

α : 校正係数 [1]

β : 校正指数係数 [1]

である。

赤外線出力電圧はチョッパからの放射と計測対象からの放射の差であるため、出力が 0V になるのはチョッパからの放射と計測対象の放射が等しくなるときである。しかし、今回の計測において低温域での外挿は行わないため発生しうる影響は無視している。よって校正曲実験結果を最小二乗法により温度校正係数 α と β を求め、校正式を算出した。

4. エンジン燃焼室壁面温度計測

エンジンの壁面温度および熱流束計測を図 7 の装置で行った。供試諸元を表 2、実験条件を表 3 に示す。

表 2. 供試機関の主要諸元.

| | |
|----------------------------------|---|
| Engine type | 4stroke · gasoline |
| Cylinder number | Single cylinder |
| Fuel supply system | Fuel injection |
| Combustion chamber configuration | Pent roof type |
| Valve mechanism | SOHC Intake valve 1 Exhaust valve 2 |
| Bore×Stroke | $\phi 79.0mm \times 71.2mm$ |
| Stroke volume | $349cm^3$ |
| Compression ratio | 3.61 |
| Lubrication system | Dry sump |

表 3. エンジン実験条件.

| | |
|---------------------|-------------------------|
| Engine speed | 1000rpm |
| Charging efficiency | 56% |
| Ignition timing | BTDC35 $^{\circ}$ (MBT) |
| A/F | 15 |
| Charge temperature | 70 $^{\circ}C$ |
| Oil temperature | 60 $^{\circ}C$ |

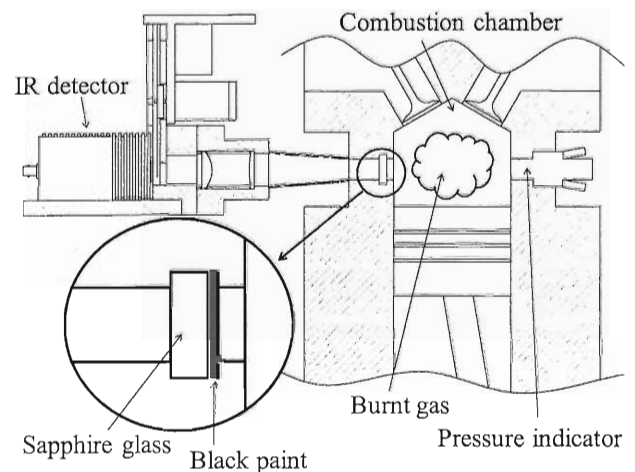


図 7. エンジン燃焼室での計測.

供試機関は空冷 4 サイクル単気筒エンジンの燃焼室に観測窓が取り付けられるよう改造したものを使用し、シリンダライナ部に校正実験で使用したのと同じ赤外線検出器を取り付け、赤外線出力を計測した。計測は吸気側、排気側の 2 箇所です十分な暖機を行った後に、サイクル変動の影響を除ける 100 サイクル分の計測を

を行い、アンサンブル平均したものを出力結果とした。また、ひずみゲージ式圧力計を赤外線検出器と逆側にとりつけ、圧力計測を行った。

5. 実験結果および考察

実験により得られた出力電圧を図 6 の校正曲線を用いて温度に換算した、燃焼室壁面温度計測の結果を図 8 に示す。グラフには壁面温度計測の妥当性を評価するために、燃焼室壁面の正確な温度計測が可能とされている燃焼室壁と同じ母材で構成された薄膜型熱電対である、熱流束計による燃焼室壁面温度計測結果も載せてある。

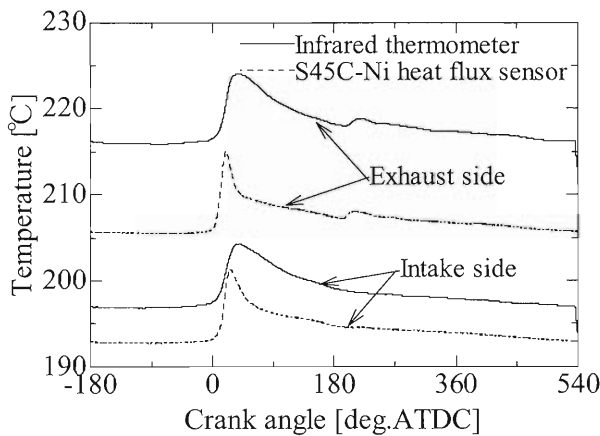


図 8. 両計測点での燃焼室壁面温度.

図 8 において、赤外線温度計の結果は熱流束計の結果に近いことが分かる。燃焼ガスは高温であり、燃焼室壁面に比べ極めて高い放射があるが、燃焼による温度上昇が熱流束計の結果とほぼ同じであるため、燃焼ガスの放射の影響を受けず壁面温度を計測できたと考えられる。

また、平均温度における赤外線温度計と熱流束計の差は 10°C 程度で、赤外線温度計の結果が高くなっており、吸気側よりも排気側の差が大きいたことが分かる。この原因として背景放射の影響が考えられ、排気側においては、高温の排気管からの放射熱により赤外線温度計を構成しているカバーが温められ、カバー内部からの放射が校正時よりも増えていることが考えられる。

次に、応答性について評価するため、点火時期である ATDC-35°からの温度変化を吸・排気側それぞれ図 9、図 10 に示す。熱流束計の結果は図 9 のものと同じである。吸気側、排気側のどちらも赤外線温度計の結果は熱流束計の結果に比べ最大温度変化量が小さく、ピーク位置が遅れていることから応答性が悪いことが分る。この原因として、サファイアガラスに黒色塗料を塗布したことが考えられたため、熱流束計の表面にも同様

に黒色塗料を塗布し温度を計測したところ、図 11 に示すように温度変化の立ち上がりとピーク位置が遅れ、応答性が下がることを確認できた。

これは表 4 に示す各材料の熱拡散率から分かるように、黒色塗料の成分であるシリコン樹脂の熱拡散率が、燃焼室壁の材質である S45C に比べ極めて低いため、温度

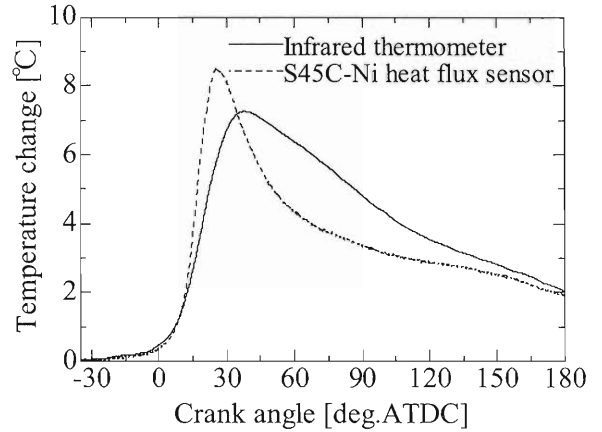


図 9. 吸気側での燃焼室壁面温度の比較.

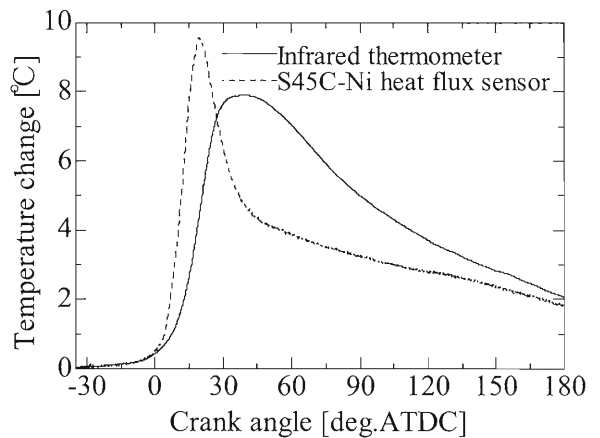


図 10. 排気側での燃焼室壁面温度の比較.

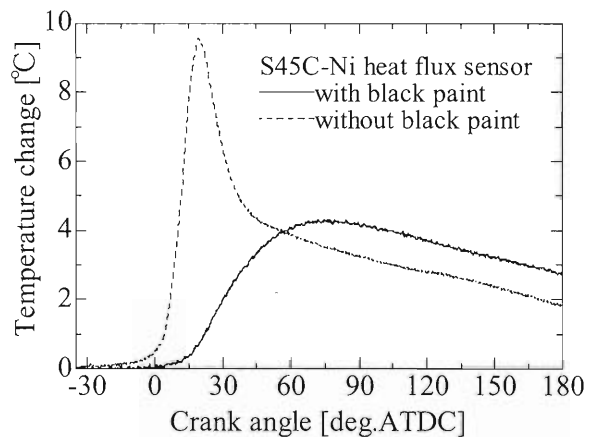


図 11. 黒色塗料の影響 (排気側).

波形における応答性が悪くなったものと考えられる。

熱流束計測に関して、圧力履歴より算出した結果の妥当性を評価するため、過去に Cu-con 熱流束計で計測し、内接点より計算した熱流束の結果と比較を行った。排気側における各熱流束の計算方法による比較結果を図 12 に示す。

図 12 より、両者はほぼ一致していることが分かり、今回の計算法は妥当な結果を得ることが出来ると考えられる。よって、赤外線による燃焼室壁面温度計測結果を用い、圧力波形と状態方程式により熱流束を計算した。熱流束における吸気側の結果を図 13 に示す。

表 4. 熱物性値⁸⁾

| Material | Thermal diffusivity (mm ² /s) | |
|----------------------------|--|---------|
| | at 300K | at 500K |
| Middle carbon steel (0.4C) | 13.9 | 11.9 |
| Sapphire | 14.9 | 5.89 |
| silicone resin | 0.05~0.06 | no data |

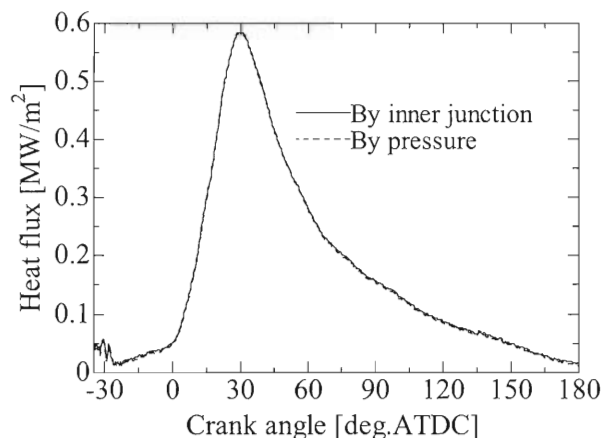


図 12. ガス温度から定常成分を求めた熱流束。

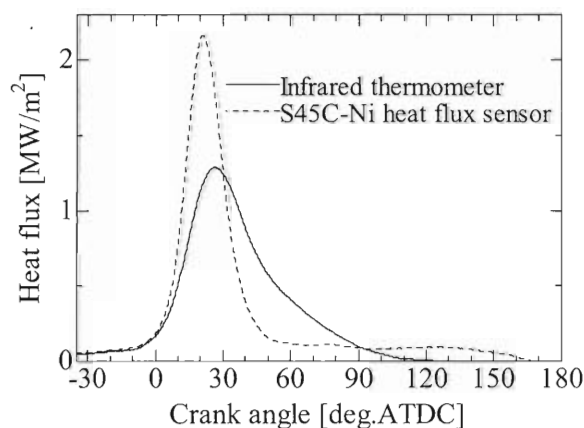


図 13. 熱流束計測結果の比較 (吸気側)。

図 13 より、赤外線の結果の方が熱流束計の結果よりもピークが遅く熱流束の変化量が小さいことが分かる。これは応答性の悪さを表しており、燃焼室壁面と熱拡散率の異なる黒色塗料を計測したため、熱流束に関しては精度よく計測できなかったと考えられる。

6. 結論

赤外線検出器を用い、黒色塗料を塗布したサファイアガラスからの赤外線による温度計測のための温度校正を行った。また、エンジンにおいて赤外線検出器により燃焼室壁面温度の温度および熱流束計測を行い、以下の結論を得た。

1. エンジンでの実験条件を再現した校正装置を製作し、赤外線検出器の温度校正曲線を求めることができた。
2. 黒色塗料を塗布したサファイアガラスからの赤外線を計測することにより、燃焼ガスの影響を受けずに燃焼室壁面の温度を計測できた。
3. 燃焼室壁面の温度計測において、赤外線温度計と熱流束計の平均温度の差違は 10℃程度であった。ただし、応答性を上げるためには燃焼室壁面と熱拡散率の近いものを表面に塗布する必要がある。
4. 赤外線検出器により燃焼室壁面の表面温度を計測し、熱流束の非定常成分を求め、計測した圧力から定常成分の値を算出することでエンジン燃焼室における熱流束を計測した。

参考文献

- 1) 長瀬慶紀, 長友宏昌, 木村正寿, 友松重樹: 赤外線によるガソリンエンジン燃焼室内燃焼ガスの温度計測, 日本機械学会論文集(B編)76巻 765号, p.865-870, 2010.
- 2) 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, p.169-174, 2007.
- 3) 長瀬慶紀, 中釜健斗, 友松重樹, 木村正寿: 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), 宮崎大学工学部紀要 38巻, p.265-270, 2009.
- 4) 小酒英範, 河内陽平, 大西毅, 相澤哲哉: 感熱燐光体を用いたディーゼル機関燃焼室壁面温度の画像計測, 日本機械学会論文集(B編)74巻 738号, p.490-497, 2008.
- 5) 後藤雄一: 超希薄燃焼における火炎速度と燃焼室壁面二次元温度分布測定法の研究, 日本機械学会論文集(B編)57巻 539号, p.238-243, 1991.
- 6) 久野治義: 赤外線工学, コロナ社, p.14-16, 1994.
- 7) 温度計測部会編: 温度計測, 社団法人計測自動制御学会, p.178-189, 1981.
- 8) 日本機械学会: 伝熱工学資料, 丸善株式会社, p.284-286, 2009.