

赤外線を利用した燃焼室壁面の熱流束計測 (赤外線観測窓の検討)

濱田 真吾^{a)}・長瀬 慶紀^{b)}・友松 重樹^{c)}・木村 正寿^{d)}・大塚 晃則^{e)}

Measurement of Heat Flux on Combustion Chamber Wall by Infrared Rays (Examination of Infrared Rays Observation Window)

Shingo HAMADA, Yoshinori NAGASE, Shigeki TOMOMATSU,
Masatoshi KIMURA, Akinori OTSUKA

Abstract

It is important to measure the temperature on the combustion chamber wall surface of a spark ignition engine because of improvement for thermal efficiency in the engine. Temperature on the engine combustion chamber wall surface is usually measured by the film type of the thermocouple. However attaching a thermometer to an engine has many restrictions. In this study, the temperature and the heat flux measurements on the engine combustion chamber wall surface were carried out using infrared rays. In order to remove the influence of infrared from combustion gas, the sapphire glass for observation window evaporated a carbon film and an aluminum film was applied. Moreover the influence on the heat flux of the sapphire glass used for the infrared rays observation window by the simulation using the MSC software was investigated. At first the calibration was carried out. The calibration is the method to obtain a relation of temperature and infrared radiation. Next the temperature on the spark ignition engine wall was measured with the IR detector. The temperature and the heat flux of the same place were measured using the thermocouple of the film type, and they were compared with the results using the IR detector. As the result the instrument for in the heat flux measurement on the combustion chamber wall surface using infrared rays, is improved in response and reproducibility. Moreover change of the temperature of the infrared observation window was able to be predicted by the simulation using MSC.

Keywords: Engine, Heat flux, Infrared rays, Observation window

1. 緒論

近年、環境問題への関心の高まりにより環境負荷を軽減させようと様々な研究が行われている。特に内燃機関においては低燃費、排気ガスの低減が求められており、熱効率向上が重要な課題の一つとして挙げられる。熱効率向上のためには、燃焼室内の燃焼現象を詳しく調査する必要がある。

これまで内燃機関においては熱の逃げに着目し、熱の移動現象を調べるために薄膜型熱電対を用いた燃焼室内の熱流束計測に関する研究⁽¹⁾、⁽²⁾が行われている。しかし、薄膜型熱電対を代表とするような直接接触式の温度計測法では装置の取り付けが困難な場所や、壁

面に複数の異物を挿入していることから実際と熱の流れが異なることが予想される。そのため、非接触式の温度計測法が注目され、さまざまな研究が行われている。本研究室⁽³⁾ではサファイアガラスと赤外線検出器を用いた壁面温度計測法が提案され研究されている。この計測方法は燃焼室壁面に異物となるサファイアガラスを挿入するものの、熱物性値が燃焼室壁面と近いことから、実際と近い熱流束の算出を可能にしている。しかしながら、十分な応答性が得られておらず、加えて再現性に問題があるため改善・高精度化が求められている。

そこで本研究では、赤外線検出器を用いて燃焼室壁の表面温度計測および瞬時熱流束計測を行う。また、熱流束計測の計測精度を向上させるため、MSC ソフトを用いたシミュレーションによる温度解析によって赤外線透過材として使用したサファイアガラスによる熱流束算出への影響調査を行う。

a)機械システム工学専攻大学院生

b)機械システム工学科准教授

c)機械システム工学科助教

d)教育研究支援センター技術専門職員

e)機械システム工学専攻大学院生

2. 計測理論

赤外線とは $0.75\mu\text{m}\sim 1000\mu\text{m}$ の電磁波のことで、0K以上のあらゆる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。計測対象から放射される赤外線を計測することで温度を求めることが可能となる。

本研究では図1のように燃焼室壁面にカーボン膜、アルミ膜を蒸着したサファイアガラスを取り付け、燃焼により加熱されたサファイアガラス表面からの放射量を計測することで温度を計測する。温度と赤外線放射量の関係については予め校正実験を行い、温度校正曲線を求めることで計測対象からの赤外線放射量に対応する温度を求める。

熱流束に関しては、求めた表面温度から調和解析することで壁面熱流束の非定常成分を求め、熱移動がない時期、つまり壁面温度とガス温度が一致する時期を熱流束が $0\text{W}/\text{m}^2$ となるように補正することで求める。

3. 計測装置

今回の計測では計測装置として、図1に示すような赤外線検出ユニットを使用した。

3.1 赤外線検出器

赤外線検出器はエンジン燃焼室内に適用するためにクランク角度 1° まで計測できる応答性を兼ね備え、微量な赤外線を計測するための高い感度が必要となる。

そのため、高感度、低ノイズで計測が可能な InSb 光起電力素子とプリアンプ及び冷却コントローラを一体型とした検出素子を採用した。これにより、入射光量に比例した起電力が発生し、赤外線放射量に応じた電圧が出力される。

3.2 光学系

サファイアの平凸レンズを2枚使用しており、計測対象から放射される赤外線を1枚目で平行光にし、2枚目で赤外線検出器の受光面へと集光する。

3.3 チョップパ

本研究室で使用する InSb 光起電力素子の出力は直流であり、入射する赤外線の強度変化に応じて出力電圧が変化するが、赤外線放射量が一定となる場合は出力電圧を示さない。そのため、チョップと呼ばれるスリットの入った黒い遮光版を用いて検出器に入射する赤外線を周期的に変化させる。

3.4 カバー

計測対象以外からの放射を計測しないために円筒状のアルミ製のカバーを設ける。また、カバー内での反射を防ぐために内側に黒いスプレーを塗布している。

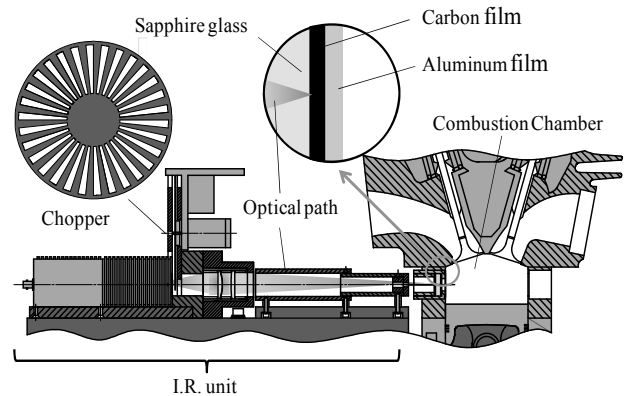


Fig.1 Measuring method for engine

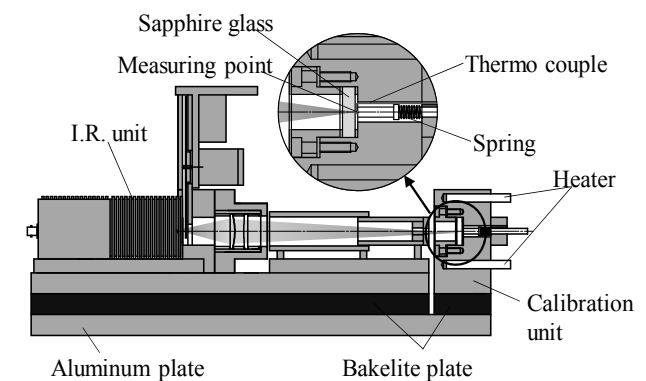


Fig.2 Calibration system

3.5 観測窓及び蒸着膜

観測窓には燃焼室壁面である S45C と熱物性値が近く、薄膜型熱電対とは異なり、内部に素線等の無い均一で透明な物質であるサファイアガラスを採用し、サファイアガラスの表面には、赤外線放射率の高いカーボン膜、熱拡散率の高いアルミ膜の順で真空蒸着法によって蒸着膜が施されている。

4. 赤外線検出器の温度校正

カーボン膜、アルミ膜を被膜としたサファイアガラス表面からの赤外放射と温度の関係を知るために図2に示す校正装置を用いて校正実験を行う。

4.1 校正実験装置

校正実験装置は計測対象である蒸着膜を形成したサファイアガラス表面の局所温度を2つのヒータによって間接的に加熱し、温度に対する赤外線出力電圧を計測する。また、温度計を蒸着膜の形成したサファイアガラス表面にばねを用いて押し当てる形で設置することで温度に対する赤外線出力を求めることができる。

4.2 校正実験方法

ヒータにより熱電対の温度が実際の壁面温度と予想される 200°C 付近になるまで加熱する。加熱後、校正

装置を空冷によって冷却する。この冷却中にデータロガーを用いて計測を行い、赤外線検出器の出力電圧と温度の関係を調査した。

4.3 校正式作成

校正実験の結果から、校正式を求める。今回計測した赤外線出力はチョッピングによってチョップの羽根からの放射とサファイアガラスの蒸着膜表面からの放射を交互に検出している。そのため、チョップの羽根からの放射を基準として基準からの出力電圧差を蒸着膜からの赤外線出力電圧とする。

校正式は赤外線出力電圧と温度によって求められ、温度 T に対する完全放射体の放射強度 L は、近似式として以下のように示される⁽⁴⁾。

$$L = kT^n$$

ただし、 k 及び n は定数とする。

放射強度と赤外線出力は比例関係にあるので、 L を検出器出力 E に置き換えると次式で表される。

$$T = \left(\frac{E}{k} \right)^{\frac{1}{n}}$$

式(2)が成立する定数 k と指数 n を最小二乗法により求めることで温度と赤外線検出器出力の校正式を作成した。最小二乗法により得られた校正曲線を図 3 に、温度校正式を以下に示す。

$$E = 3.36 \times 10^{-7} T^{2.67} \quad (3)$$

この結果により得られた校正式により、エンジンで計測した赤外線出力から温度を求めることが可能となった。

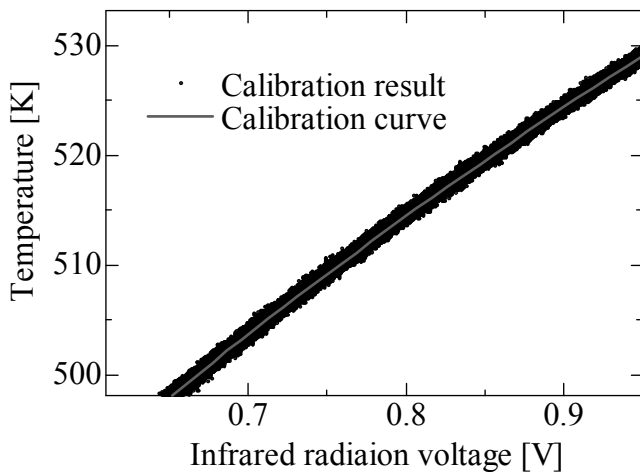


Fig.3 Calibration curve obtained from experiments

5. エンジンでの計測実験

エンジンでの壁面温度計測および熱流束計測において赤外線検出器を用いて計測するが、その評価のために熱流束計を用いて壁面温度、熱流束計測を行う。

5.1 供試機関および運転条件

本研究では空冷 4 サイクル単気筒エンジンを実験用に改造したものを使用する。このエンジンは吸入空気量、燃料噴射量を調整することができ、回転数をダイナモメータによって制御することで一定回転数に保つことができる。また、吸気バルブ側壁面と排気バルブ側壁面の 2 箇所計測を行うため、シリンダライナ部にはカーボン膜、アルミ膜で成膜されたサファイアガラスおよび熱流束計、圧力計を取り付けるためのアダプタが装着できるように加工している。

供試験機関の諸元を表 1 に、エンジンでの計測実験の運転条件を表 2 に示す。

Table 1 Specification of engine

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	φ79.0mm×71.2mm
Stroke volume	349cc
Compression ratio	3.61
Lubrication system	Dry sump

Table 2 Experimental conditions

Engine speed	1000rpm
Charging efficiency	56%
Ignition timing	BTDC35°(MBT)
A/F ratio	15
Charge temperature	70°C
Oil temperature	60°C

5.2 熱流束計による計測

赤外線による計測の評価のため、図4に示すような熱流束計を用いて温度及び熱流束を計測する。今回使用した熱流束計は、母材のS45Cロッドにアース線としてピアノ線、表面接点はニッケル素線を母材に貫通させ、表面でニッケルメッキにより接続し、内接点はメッキ面と反対方向から深さ5mmにニッケル素線を点溶接することで形成している。これより、表面接点と内接点の2組の熱電対となる。表面接点および内接点を形成するニッケル素線の側面はハマタイト樹脂により電氣的に絶縁されている。

熱流束計の表面接点にて表面温度を計測し、熱流束における非常成分を表面温度を調和解析することによって求める。また、表面温度と内接点温度の平均温度差から熱流束の定常成分を求めることで熱流束を算出する。

5.3 赤外線検出ユニットによる計測

エンジンでの計測実験に使用する実験装置を図5に示す。赤外線検出ユニットをエンジン周囲に組まれたやぐらの上に取り付け、チョップコントロールユニットにてチョップの回転数を制御し、周波数の調整を行う。チョップの周波数は3000Hzとし、吸気側および排気側の2ヶ所を計測した。

6. 実験結果及び考察

6.1 燃焼室壁面温度

エンジンでの実験において、図6に赤外線検出ユニットおよび熱流束計にて計測した壁面温度の結果を示す。図6より、赤外線検出ユニットで計測した温度とS45C-Ni熱流束計で計測した温度は一致していない。温度の正確さに関しては燃焼室壁面と同じ材質を母材にもつS45C-Ni熱流束計の値は正しいと考えられることから、赤外線検出ユニットの計測結果が燃焼室壁面の温度よりも50℃~60℃程高くなっていると考えられる。また、温度振幅に関しても赤外線検出ユニットにて計測したものが高いことが分かる。この原因としては、サファイアガラスとS45C(0.4C)の熱物性値⁴⁾が異なることが考えられる。特に表3に示すように熱拡散率がサファイアガラスよりもS45C(0.4C)の方が高いことから、この熱物性値の違いを受けて絶対温度と温度振幅に差が生じたのではないかと考えられる。

6.2 燃焼室壁面熱流束

エンジンでの実験において、図7に吸気側の赤外線検出ユニットおよび熱流束計で計測した燃焼室壁面熱流束の結果を示す。S45C-Ni熱流束計にて計測した熱流束よりも赤外線検出ユニットで計測した熱流束の方が立ち上がり、立ち下りともに速いことが分かる。

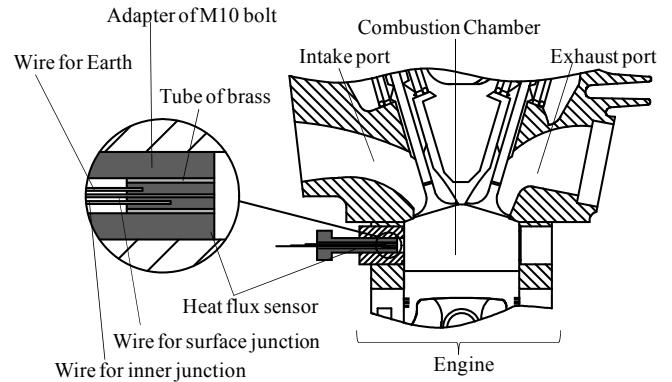


Fig.4 Location of heat flux measurements

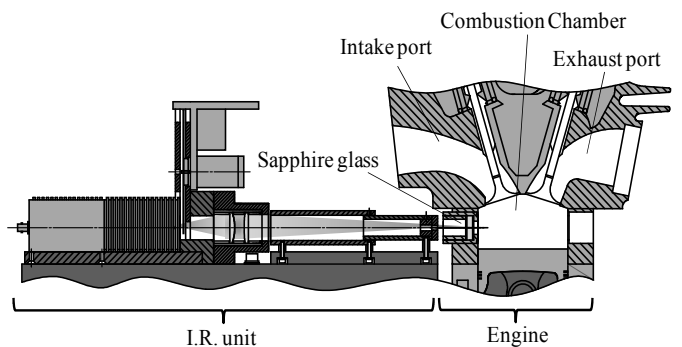


Fig.5 Experimental setup for engine

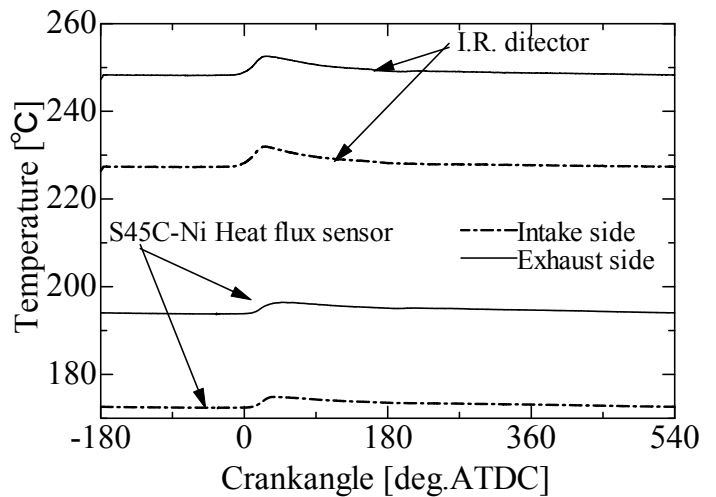


Fig.6 Temperature on combustion chamber wall

これはサファイアガラスを観測窓に使用した赤外線検出ユニットの応答性がS45C-Ni熱流束計よりも高いためであると考えられる。

また、ATDC 180°付近では赤外線検出ユニットで計測した熱流束がマイナスとなっている。これは熱流束算出の際に物質内の熱の流れが一次元流れのみであると仮定して算出していることから、サファイアガラスには一次元流れ以外の熱流束が存在したことによるものであると考えられる。

Table 3 Thermophysical properties

	S45C (0.4C)	Sapphire
	300K	500K
Thermal conductivity [W/(m・K)]	51.5	24.2
Thermal diffusivity [m ² /s]	11.8×10^{-6}	5.89×10^{-6}
Specific heat [J/(kg・K)]	473	1040
Density [kg/m ³]	7.85×10^3	3.95×10^3

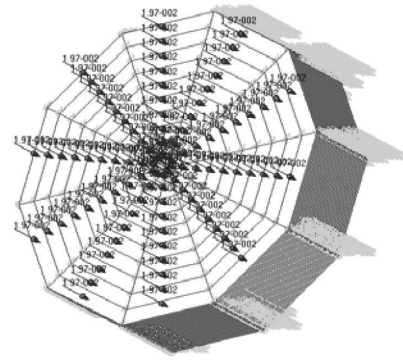


Fig.8 Analysis model

7.3 要素分割

今回は物性値の違いによる影響を調査することから、目視では要素境界が確認できないほどの非常に細かい間隔で要素分割を行う必要はないため、解析が円滑に行えるように適度に細かいメッシュ切りを行い、かつ解析結果が表示しやすいように考慮して解析のための要素分割を行った。

解析モデルの要素分割は半径方向 10mm に対して 10 分割、円周方向に対して 36° 間隔に 10 分割した。そのため、解析モデルの表面は 100 個の要素から構成される。また、厚さ方向 5mm に対して 50 分割し、計 5000 要素に解析モデルを分割して解析を行った。作成した解析モデルを図 8 に示す。

7.4 解析条件

解析条件としては、解析モデルに初期温度を与え、その表面に一次元熱流束を与えた。与える初期温度は実際のエンジンでの実験に近い状態を再現する必要があるため、本年度エンジンでの実験において計測した S45C-Ni 熱流束計の実験値を用いて、フーリエの式⁽⁶⁾より初期温度を算出し、解析条件として解析モデルに与えた。

また、熱流束に関しては本年度エンジンでの実験において S45C-Ni 熱流束計で計測したエンジン燃焼室壁面の排気側における 1 サイクル分の熱流束をサファイアガラス、S45C の各モデルの表面に与えて解析を行った。解析にはソルバーとして MSC.Nastran を用いた。

7.5 解析結果とエンジンでの実験結果との比較

解析結果の比較に関しては、校正実験およびエンジンでの実験の際と同じ計測点において、時系列でみた温度変化を比較した。また、解析結果とエンジンでの S45C-Ni 熱流束計と赤外線計測の実験結果を比較した。シミュレーションの解析結果とエンジンでの温度計測結果を図 9 に示す。今回は BTDC35° (MBT)を温度変化開始の基準として比較した。

S45C のシミュレーション結果と実験値の温度変化がほぼ一致していることから、このシミュレーションによる温度比較が可能であるといえる。また、S45C に

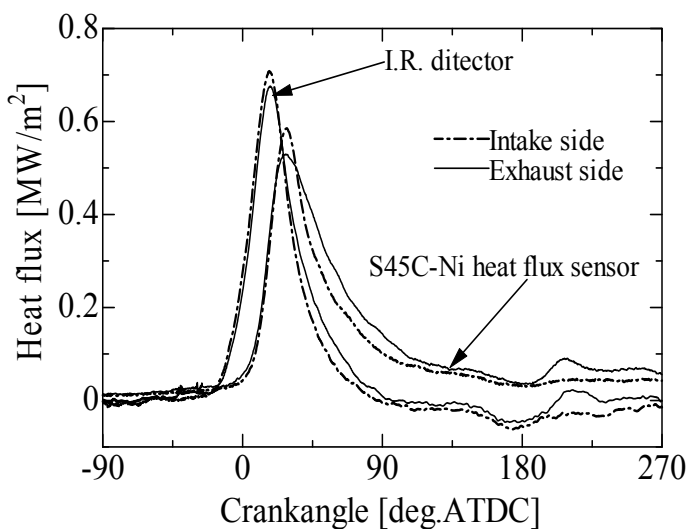


Fig.7 Heat flux on combustion chamber wall

7. 赤外線観測窓におけるシミュレーション

7.1 計測誤差の要因

計測誤差要因として、赤外線透過材として壁面用観測窓に用いているサファイアガラスそのものによる影響が考えられる。赤外線透過材の中では燃焼室の材質である S45C と近い熱物性値であるサファイアガラスであるが、同じ物質ではない。そのため、観測窓の物性値の違いによって計測誤差が生まれているのではないかと考え、燃焼室壁面と材質の違うサファイアガラスが物性値の違いによって計測にどのような影響があるのかをシミュレーションによって確認することにした。

7.2 解析モデル

解析モデルは実際に校正実験、エンジンでの実験の際に使用しているサファイアガラスと同じφ20で厚さ5mmの円柱形状をモデル化したものを作成した。モデルの作成はプリプロセッサに MSC.Patran を使用した。

比べて熱物性値の違い⁴⁾からサファイアの温度変化の方が大きくなる事が分かる。今回、赤外線観測窓としてサファイアガラスを用いたことで、燃焼室壁面との温度変化の差としては1~1.5°C程みられた。そのため、正確な熱流束計測のためには、より燃焼室壁面の材質に近い物質を窓材として選定することが計測精度向上の要素の一つであるということが言える。

また、赤外線検出ユニットの温度振幅に関しては、S45C-Ni 熱流束計よりも大きいことから、シミュレーションと同じ傾向が見られ、温度振幅に関しては、赤外線検出ユニットの実験結果は妥当な結果であることが言える。しかしながら、全体の温度変化としては、サファイアはシミュレーションの結果に一致するはずであるが、エンジンでの実験結果は立ち上がりが速く温度変化のピークがシミュレーションの結果よりも0.7°C程高くなっていることが分かる。これについて、立ち上がりが速くなっていることに関しては、今回のシミュレーションによる解析の際に与える熱流束としてS45C-Ni 熱流束計で計測した実験値を用いたことによるものである。今回の熱流束計測においてはS45C-Ni 熱流束計よりも赤外線検出ユニットの方が応答性は速いため、シミュレーションにおけるサファイアの解析結果はS45C-Ni 熱流束計に依存し、このような結果となったと考えられる。

ピーク値が異なることに関しては、実験においてのサファイアガラスが十分に断熱できていなかったことが原因であると考えられる。シミュレーションにおける解析においては、解析モデルに与えた条件としては一次元流れのみの完全に断熱された状態として定義している。対して、エンジンでの実験に用いたサファイアガラスは断熱対策を行っていないため、このような差が生じたのではないかと考えられる。

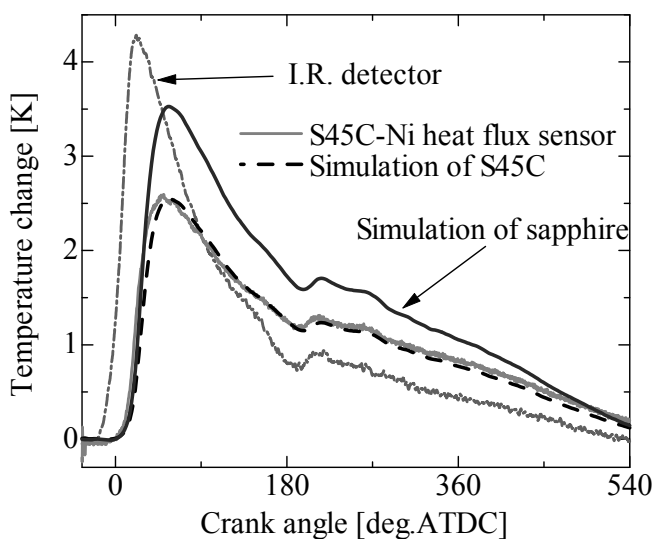


Fig.9 Comparison between simulation and experiments

8. 結論

燃焼室壁面の温度を計測するため、赤外線検出ユニットを改良し、サファイアガラスからの赤外線出力電圧と温度の校正実験を行った。次に実際にエンジンにおいて燃焼室壁面に赤外線観測窓を設置し、燃焼室壁面温度計測および壁面熱流束計測を行った。また、シミュレーションによって赤外線観測窓に採用したサファイアガラスの温度変化の傾向を確認し、以下の結論を得た。

- 1) 赤外線を利用した燃焼室壁面温度計測のため、温度校正装置及び壁面温度計測装置を製作した。
- 2) 赤外線観測窓として採用したサファイアガラスの表面にカーボン薄膜及びアルミ薄膜を真空蒸着法にて成膜することによって、赤外線放射率が高い状態で応答性の向上を図ることができた。
- 3) 解析モデルに初期温度と一次元熱流束を与えて解析することで、壁面温度を求めることができ、壁の材質の違いによる温度変化を予測することができた。
- 4) 赤外線検出ユニット、カーボン薄膜及びアルミ薄膜を成膜したサファイアガラスの観測窓を用いて、燃焼室壁面温度及び熱流束の計測を行い、応答性の向上、再現性の確保はできたが、実際の燃焼室壁面と同じ状態を再現できておらず、十分な精度での計測には至らなかった。正確な計測を行うためには、赤外線観測窓の一次元流れ確保のための改善が必要である。

参考文献

- 1) 長瀬慶紀, 友松重樹: 火花点火機関における熱流束計測の精度向上(エンジン計測での薄膜型熱流束計の条件), 機論B編 76(765), pp.859-864, 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), 機論B編 73(732), pp.1753-1758, 2010.
- 3) 大塚晃則, 長瀬慶紀: 赤外線を利用した壁面温度計測に関する研究(赤外線温度計の校正), 日本機械学会九州学生会第41回卒業研究発表講演会, No108-2, pp.355-356, 2010.
- 4) 日本機械学会: 伝熱工学資料改訂第4版, 日本機械学会, pp.314-320, 1986.
- 5) 棚沢一郎: 伝熱研究における温度測定法, 養賢堂, p126, 1985.
- 6) 田坂英紀: 伝熱工学, 森北出版, pp.8, 2007.