宮崎大学学術情報リポジトリ
University of Miyazaki Academic Repository

火花点火機関燃焼室壁面における熱伝達の研究(主流が無視できる場合の検討)

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, Combustion chamber, Heat flux, Heat transfer coefficient, Estimation 作成者: 山口, 陽大, 長瀬, 慶紀, 戌亥, 太一, 友松, 重樹, 木村, 正寿, Yamaguchi, Yodai, Inui, Taichi, Tomatsu, Shigeki メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10458/5872

火花点火機関燃焼室壁面における熱伝達の研究（主流が無視できる場合の検討）

山口　陽大 a)・長瀬　慶紀 b)・戌亥　太一 c)・友松　重樹 d)・木村　正寿 e)

Study on the Heat Transfer in the Combustion Chamber Wall of S.I. Engine (Investigation of Negligible Mainstream)

Yodai YAMAGUCHI, Yoshinori NAGASE,
Taichi INUI, Shigeki TOMOMATSU, Masatoshi KIMURA

Abstract

In order to solve an environmental problem, it is necessary to improve the thermal efficiency of an internal combustion engine. In addition, understanding of the heat transfer on the combustion chamber wall from the burnt gas is necessary. Therefore, in order to calculate the heat transfer from the burned gas to the combustion chamber wall, it is necessary to evaluate the heat transfer coefficient on the combustion chamber wall surface. However, it is difficult to calculate the heat transfer coefficient. Therefore, the equation is required to estimate the heat transfer coefficient with generality. In this study, we measured the heat flux on the combustion chamber wall by setting the thin film type heat flux probe at various places, cylinder head, cylinder liner and piston head, of the combustion chamber of the test engine (TRE). Furthermore, the measurement results were expressed by dimensionless numbers of Nusselt number (*Nu*) and Fourier number (*Fo*). And the heat flux calculated by an expression of relation was compared with the heat flux calculated by the expression of Woschni in each measurement points. As a result, the calculated of the heat transfer coefficients were closed to experimental value.

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

1.　緒論

近年、環境に考慮した電気自動車や化石燃料に代わる代替エネルギーの自動車が開発されている。電気自動車は多くの企業によって実用化されているが、走行距離が短い、充電スポットが少ないなど問題がある。また、充電スポットの設置も急速に進んではいるが十分に普及するまでにはまだ時間が必要である。その他にも代替エネルギーとして、水素を使用する自動車が実用化されたがまだ普及には時間がかかる。

ディーゼルエンジンの研究も多くおこなわれているが、現在の内燃機関の主流はガソリンエンジンであり、環境に考慮したガソリンエンジンとモーターを使用したハイブリッド自動車が注目され、多くのハイブリッド自動車が製造され急速に普及している。しかし前述した環境問題、電気自動車や代替エネルギーなどの新しい技術の普及までの時間を背景に、ガソリンエンジンの熱効率を向上させることを追求していく必要がある。熱効率はスワールなどの流れをつくることで、燃焼状態が活性化されることで向上する。しかし、同時に燃焼室壁面への熱伝達も大きくなり、壁面での冷却損失が大きくなる。言い換えると、燃焼室壁面からの熱の逃げを理解し、スワールなどの流れをつくり、燃焼状態を活性化させつつ壁面からの熱の逃げを抑制ができると熱効率は向上する。したがって、燃焼室壁面への熱伝達を解析することが熱効率向上ための一つの要因である。

燃焼ガスより熱伝達率を求める方法として、代表的な研究成果は Woschni[1)]の実験式がある。これは、シリンダ内の燃焼室壁面温度変化を解析しガス温度、ガス圧、平均ピストン速度にて熱伝達率を求める実験式であり、今でも一般的に数値解析に用いられる代表的な式である。しかし、この実験式は平均ピストン速度でガス流動を考慮しており、同じ平均ピストン速度でもエンジンによってシリンダ内のガス流動が異なるため、熱伝達率算出式としては不十分であると考えられる。

そこで、本研究室では、内燃機関の燃焼ガスの燃焼室壁面への熱伝達を計測する方法として、薄膜型熱流束計を用いた熱流束計測が行われてきた。また、求めた熱流束から燃焼室全体の平均熱伝達率を算出するための整理式も検討されている。中釜[2)]は、燃焼室内におけるガス流動と熱伝達の関係を熱伝達率の無次元数であるヌセルト数 *Nu* と流速の無次元数であるレイノルズ数 *Re* で提案している。しかし、シリンダ内にガス流動が無いときの実験データを取り入れていないため、ガス流動が無い場合での平均熱伝達率を算出する式としては不十分だと考えられる。また、燃焼室全体の熱流束計測ができおらず、燃焼室全体の熱流束を計測する必要がある。

本研究では、計測箇所 11 点全点でのガソリンエンジンの燃焼室壁面の瞬時熱流束を計測し、計測結果を熱伝達率の無次元数 *Nu* と時間の無次元数 *Fo* で整理する。熱伝達率算出のための無次元数整理式について流れが無視できる場合の検討を行うことを目的とする。

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) 機械システム工学専攻大学院生
d) 機械設計システム工学科助教
e) 教育研究支援技術センター技術専門員

2.　薄膜型熱流束計

2. 1　原理および構造

本研究では、図 1 に示す薄膜型熱流束計 [3]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」）は直径 3.2 mm、長さ 10 mm 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 5 mm の位置で銅素線と接し、ゼーベ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、電解めっきにより厚さ 10 μm の銅薄膜を成膜している。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。

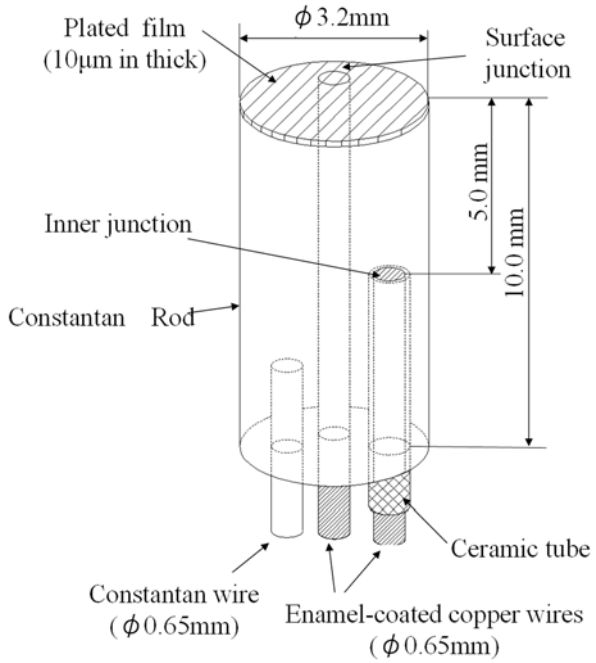

図 1.　薄膜型熱流束計.

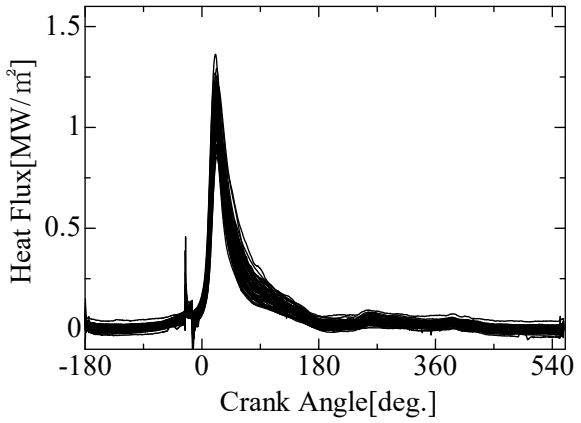

図 2.　選別された熱流束波形.

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。

2. 2　熱流束計の選別

本研究で使用した熱流束計は、すべて内製したため、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用がある。そこで，特定の燃焼室位置で熱流束計測を行い, 選別を行った. 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 σ を表 1 に示す。

表 1　選別された熱流束波形の偏差

Criterion item	σ
Maximum value point [deg.]	5.392
Average value [MW/m^2]	0.03
Maximum difference [MW/m^2]	0.197
Maximum value [MW/m^2]	0.179
Value at BTDC 30 deg. [MW/m^2]	0.022
Value at ATDC 30 deg. [MW/m^2]	0.178
Value at ATDC 60 deg. [MW/m^2]	0.116
Noise [mV]	0.143
Inner junction voltage [mV]	0.4

3.　熱流束計測実験

3. 1　供試機関

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（TRE）であり、伝熱量を正確に計測できるように冷却水，潤滑油，吸気の温度管理が容易で，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

Engine type	4 cycle, OHV
Number of cylinder	Single cylinder
Combustion chamber configuration	Pancake type
Bore × Stroke	85 mm × 85 mm
Stroke volume	482 cm^3
Compression ratio	4.54
Fuel	Gasoline

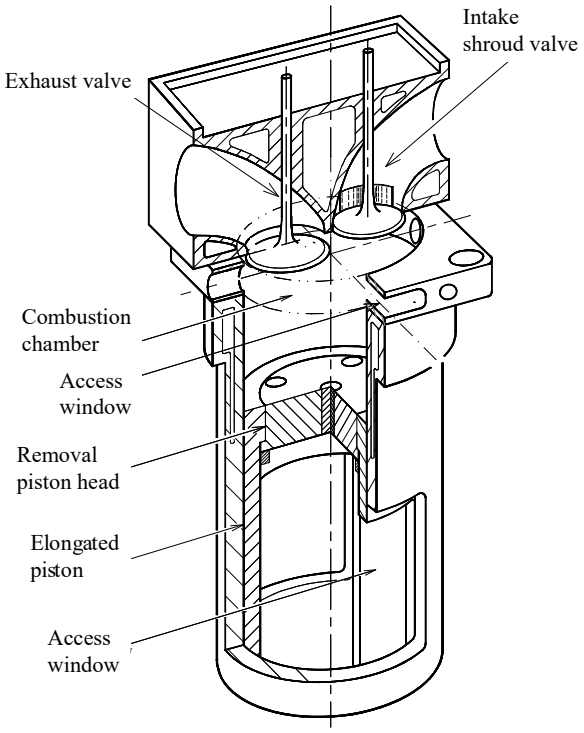

図 3.　燃焼室概略図.

3．2　熱流束計の取り付け位置

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 の●で示す。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る。

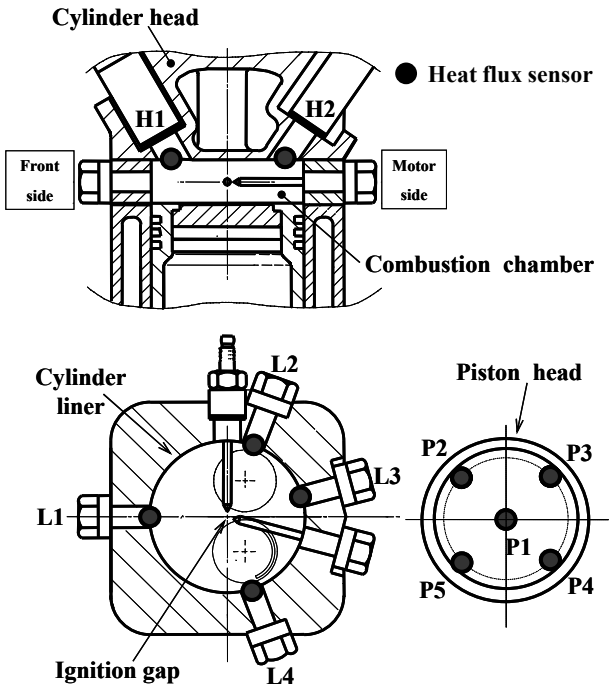

図 4.　熱流束計取り付け位置.

3．3　熱流束計測システム

図 5 に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（点火装置）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。

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測定する。

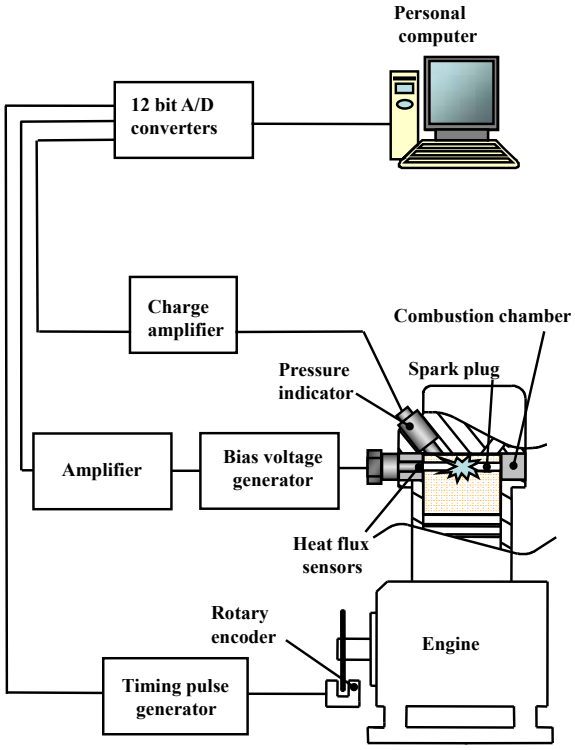

図 5.　計測システム.

3．4　実験方法

ピストンヘッド部の熱流束計を取り付けた後、エンジンの暖機を30分間行う。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できれば、シリンダライナ部、シリンダヘッド部の熱流束計を取り付けてから再度10分間運転する。その間に冷却水温度、潤滑油温度、吸入空気量、吸入空気の温度をそれぞれ実験条件に整え、すべてが安定したところで熱流束計測を行う。

3．5　実験条件

実験条件を表4に示す。充填効率は、岩崎[4]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ので1条件とし、点火時期は最も図示仕事が得られるMBT(Minimum advance for the Best Torque)とした。また、当量比は1.0と0.75の2条件とした。

表 4　実験条件

Engine speed	1000rpm	
Charging efficiency	70%	
Equivalence ratio	1.0	0.75
Shroud angle	Shroud 0°	
Ignition timing	MBT	
Measurement points	11	
Cooling water temperature	80℃(±0.5℃)	
Lubricant Oil temperature	80℃(±0.5℃)	
Charge temperature	65℃(±0.5℃)	
Sampling interval of AD converter	60μs	
Number of sampling cycles	100 cycles	

3．6　燃焼圧力

AFR15 の実験データは平成 26 年 12 月 26 日に同時に 9 点分のしかとれていないため、不足している実験データは平成 27 年 1 月 22 日のデータを引用している。2 つの実験データは燃焼圧力のピーク値の差が約 4.4 %と小さく、膨張行程の燃焼圧力は一致していた。そのため、燃焼状態は同等だと仮定して比較を行うこととした。AFR20 の計測時 MBT 検定前と比べて圧力が低くなっていた。そのため、無次元数整理を行う ATDC 30°で燃焼が完全に終了していないと考えられたため熱発生率の確認を行うこととした。図から ATDC 60°でほぼ 0 J/deg.になっており燃焼が終了していることがわかった。また、燃焼圧力は ATDC 60°では MBT 検定前と圧力が同じになっているため ATDC 60°から無次元数整理図を行うこととした。燃焼圧力を図 6，図 7 に、熱発生率を図 8 に示す。

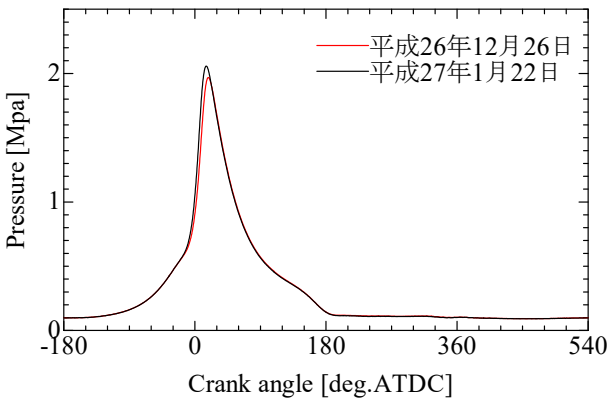

図 6.　AFR15 の燃焼圧力.

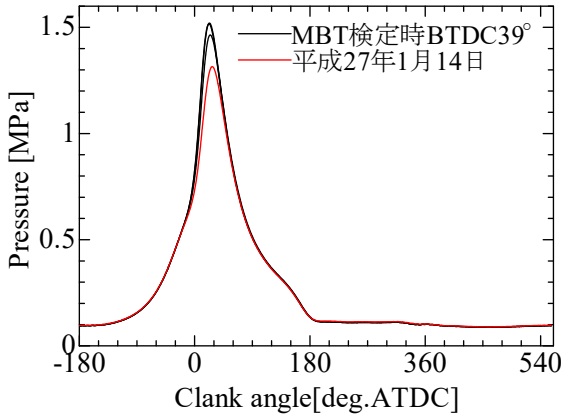

図 7.　AFR20 の燃焼圧力.

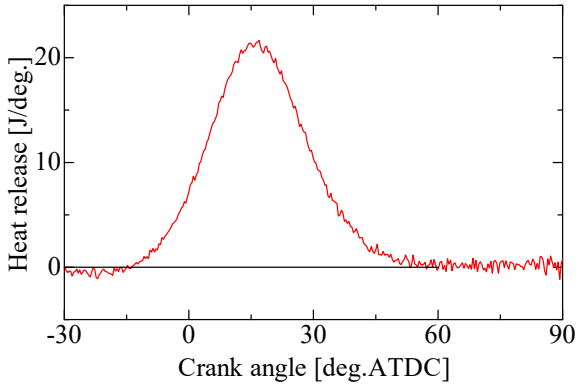

図 8.　熱発生率.

3．7　実験結果

熱流束計測は 11 点熱流束計を装着して、実験中に熱流束計の表面薄膜が破損したため全点計測はできなかったが、AFR15 では、同時に計測点 9 点、AFR20 では、計測点 8 点で熱流束を計測することができた。各空燃比の熱流束波形を図 9、図 10 に示す。

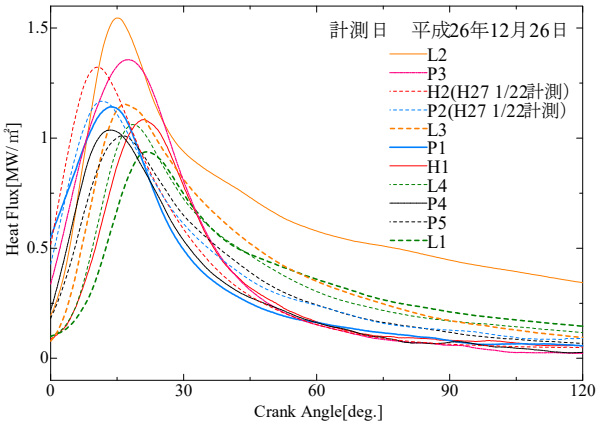

図 9.　AFR15 の熱流束波形.

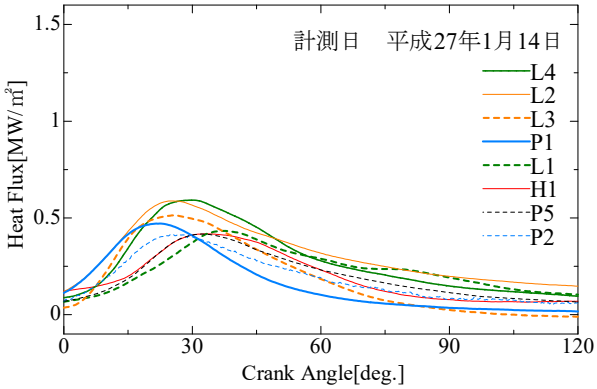

図 10.　AFR20 の熱流束波形.

4.　無次元数整理

4. 1　整理方法

燃焼室全体の熱伝達現象を解析し、熱伝達率算出ための無次元数整理式について流れが無視できる場合の検討を行うことが目的であるため、点火後の経過時間を無次元数としたフーリエ数*Fo*とヌセルト数*Nu*で熱伝達率の整理式を提案することにした。無次元数整理式に使用する無次元数の定義を式(1)、式(2)に示す。

$$Nu = \frac{\alpha D}{\lambda} \tag{1}$$

$$Fo = \frac{at}{D^2} \tag{2}$$

ただし、

α：平均熱伝達率 [W/m² K]　D：シリンダ直径 [m]

λ：熱伝導率 [W/m・K]　a：熱拡散率 [m²/s]

t：点火後の時間 [s]

とする。

4. 2　無次元数整理に使用した実験条件

提案する無次元数整理式に汎用性を持たせるために、さまざまな燃焼状態での計測データを使用し整理式を作成した。また、本実験で行った条件以外は過去に行われた実験の計測データを使用する。実験条件を表5に示す。

表 5　無次元数整理に使用した実験

Engine speed	1000rpm			
Charging efficiency	70%			
Air fuel ratio	15			
Shroud angle	240°	180°	120°	0°
Ignition timing (MBT)	BTDC20°	BTDC20°	BTDC19°	BTDC27°

Engine speed	1000rpm			
Charging efficiency	70%			
Air fuel ratio	20			
Shroud angle	240°	180°	120°	0°
Ignition timing (MBT)	BTDC30°	BTDC28°	BTDC31°	BTDC39°

4. 3　熱伝達率算出式

実験データを*Nu*数と*Fo*数に整理した。整理結果を図10に示す。また、得られた無次元数整理式を式(3)に示す。

$$Nu = 1.01Fo^{-0.53} \tag{3}$$

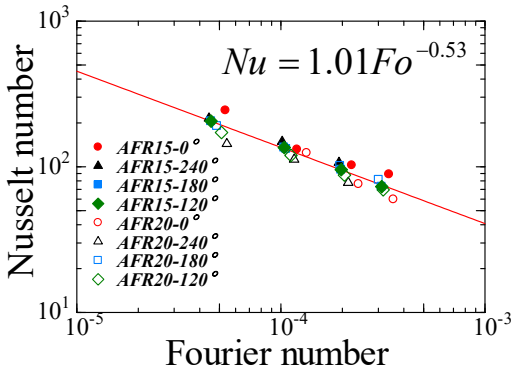

図 11.　無次元数整理結果.

4. 2　熱伝達率の比較

実験値、無次元整理式およびWoschniの式と熱伝達率の比較を行った。Woschniの式を式(4)に、今年度計測を行った各条件での熱伝達率の比較を図12～図19に示す。

$$\alpha = 12.3D^{-0.214}\left(C_m \cdot p\right)^{0.786} T^{-0.525} \tag{4}$$

図 12～図 19 より、主流が無視できない場合の比較を過去に行われた実験の計測データ [5] Shroud-120°、180°、240°において行ったが多くの条件で Woschni の式よりも実験値に近い結果となった。

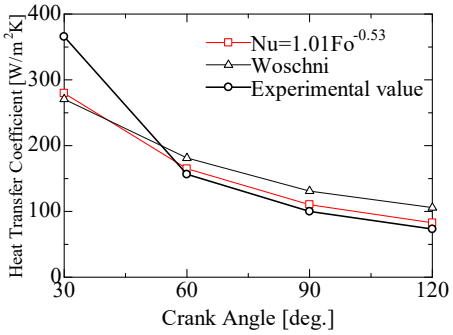

図 12.　AFR15,Shround 0°　における比較.

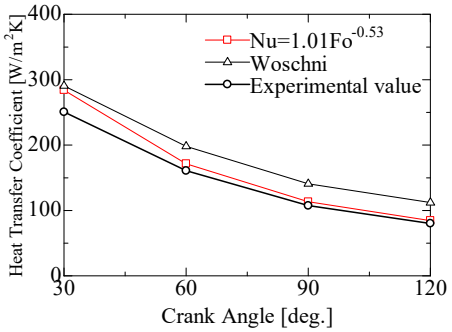

図 13.　AFR15,Shround-120°　における比較.

5. 結論

薄膜型熱流束計を製作し、シリンダ内に主流が無視できる条件で熱流束計測を行った。また、その計測結果に主流がある場合の結果を加えてヌセルト数*Nu*とフーリエ数*Fo*で整理した。その結果、以下の結論を得た。

1) TREで瞬時熱流束計測を行って、AFR15の条件では同時に計測点9点、AFR20の条件では同時に計測点8点で熱流束を計測することができた。
2) ヌセルト数とフーリエ数での整理式は、燃焼室全体の熱伝達率をWoschniの式より実験値に近い値で算出できた。

ただし、整理式からより正確に熱伝達率を算出するには、全点での熱流束計測が必要である。

参考文献

1) G.Woschni、 SAE. paper、 pp.1-13、 1967
2) 中釜健人、宮崎大学大学院 工学研究科 機械システム工学専攻、平成 21 年度修士論文
3) 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、日本機械学会論文集（B 編）、73 巻 732 号、2007、pp. 1753-1758.
4) 岩崎洋介、宮崎大学大学院 工学研究科 機械システム工学専攻、平成 23 年度修士論文
5) 亀園淳二、宮崎大学 工学部 機械システム工学科、平成 14 年度卒業論文

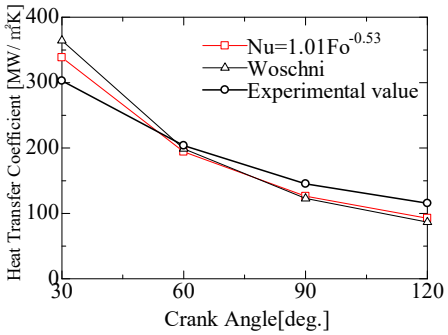

図 14. AFR15,Shround 180° における比較.

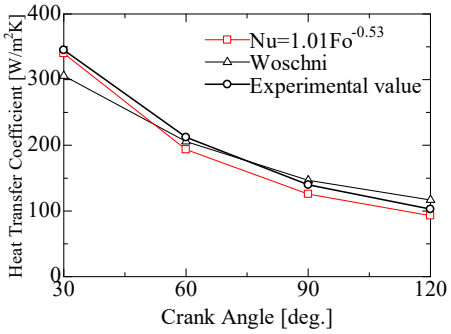

図 15. AFR15,Shround 240° における比較.

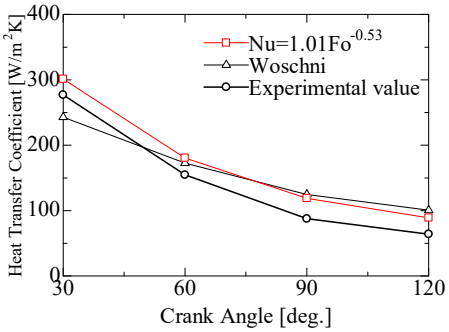

図 16. AFR20,Shround 0° における比較.

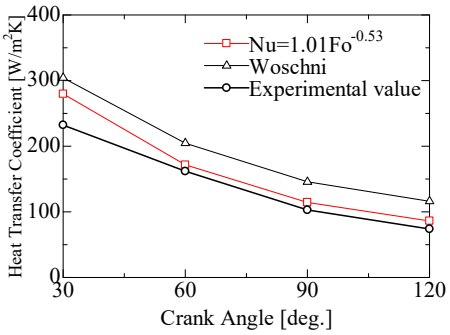

図 17. AFR20,Shround 120° における比較.

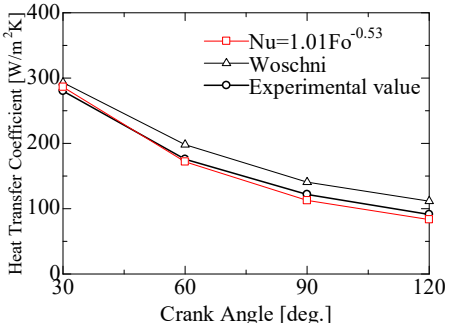

図 18. AFR20,Shround 180° における比較.

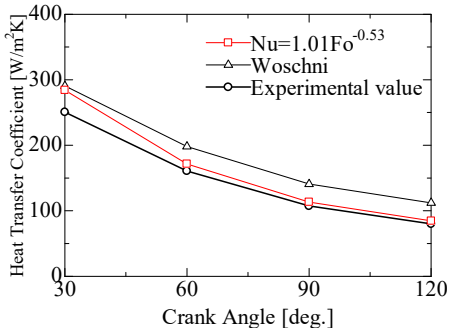

図 19. AFR20,Shround 240° における比較.