

定容燃焼容器によるエンジン用熱流束計の評価 (熱流束計の精度向上と適用範囲の検討)

長瀬 慶紀¹⁾・根井 郁拓²⁾・田坂 英紀³⁾

Evaluation of Heat Flux Probe for Engine by Constant Volume Combustion Bomb (Accuracy improvement of heat flux probe and examination of coverage)

Yoshinori NAGASE, Ikuhiro NEI, Hidenori TASAKA

Abstract

As for an internal combustion engine, making to highly effective has been demanded. Then the gas flow in the cylinder is introduced, in spite of promoting the heat transfer between burnt gas and combustion chamber wall. Therefore, it is necessary to clarify the interrelation of the gas flow in the cylinder and the heat transfer. In this study several kinds of heat flux probes were produced and examined by using the constant volume combustion bomb is made of iron. By these examinations, we improved accuracy and reliability of heat flux probe. Furthermore, we decided the heat flux probe for experiment of engine by these quantitative tests. Additionally coverage concerning material of the combustion bomb was examined by the heat flux probe.

Keywords:

Heat flux probe, Constant volume combustion bomb, Quantitative heat flux authorization, Applicability

1. はじめに

内燃機関は、環境問題が深刻化し従来にも増して高効率化が要求されてきた。そのため自動車用火花点火機関においてスワール等の筒内ガス流動が導入され熱効率や燃焼性の向上が図られてきた。しかし、ガス流動により、既燃ガスと燃焼室壁面との間の熱伝達も促進され、燃焼室壁面への熱流束、冷却損失（熱損失）や熱負荷が増大し出力の低下などを引き起こすため、内燃機関の高効率化を図る上で最良の方法とは一概には言いがたい。従来より、スワール等の筒内ガス流動と熱伝達の相互関係を明らかにすることで高効率化の向

上につながると考え、自作熱流束計を用いて多くの着火運転条件下での燃焼室内各部の瞬時熱流束計測が行なわれてきたが、着火運転時のガス流動計測の困難さと熱流束計の精度の問題により十分な結果は得られていない。

よって本研究テーマは、着火運転時の機関壁面への熱流束を計測する熱流束計を数種類製作し、供試機関と同じ材質の鉄製定容燃焼容器を用い、予混合気を燃焼させ定量的な熱流束検定を行うことで、熱流束計の信頼性の向上と熱流束計測の精度向上を図り、エンジンの熱流束計測に用いる熱流束計を決定すること、また、特定部分が鉄と熱物性値の異なる定容燃焼容器を用いて定量的な熱流束検定を行うことにより熱流束計の燃焼容器材料に関する適用範囲についての検討を目的とする。

1) 機械システム工学科助教授

2) 機械システム工学専攻院生

3) 機械システム工学科教授

2. 実験装置及び計測方法

2.1 熱流束計構造

図1に定容燃焼容器の熱流束計測に使用した熱流束計の構造を示す。熱流束計の本体は $\phi 3.2\text{ mm}$ のコンスタンタン製丸棒の両端を平行な平面に仕上げた長さ 10 mm の垂直円柱である。この本体の片側端面より中心軸に平行で深さの異なる3つの小孔a, b, cが設けられている。表面接点は小孔a, 内接点は小孔bに銅素線をそのアース用として小孔cにコンスタンタン素線を挿入し, 上記2本の銅素線と対をなしている。これら2組の熱電対から得られる熱起電力から表面接点と内接点の温度が求められる。

なお, 表面接点は, 厚さ $10\ \mu\text{ m}$ の電解銅メッキを施すことで形成し, 内接点は電氣的に溶接(点溶接)することで形成した。

2.2 絶対値検定

熱流束計の良否を確認するため定容燃焼容器を用いて定量的な熱流束検定を行った。絶対値検定のシステムを図2に示す。実験方法は, 初めに予混合気生成タンクに空気とプロパンの当量比 1.0 で 0.7 MPa の混合気を入れ十分に攪拌する。真空引きした燃焼容器に予混合気を注入する。なお, 充填圧は 0.1 MPa とする。充填後容器内の混合気が静止したと考えられる1分経過後, 容器中心で

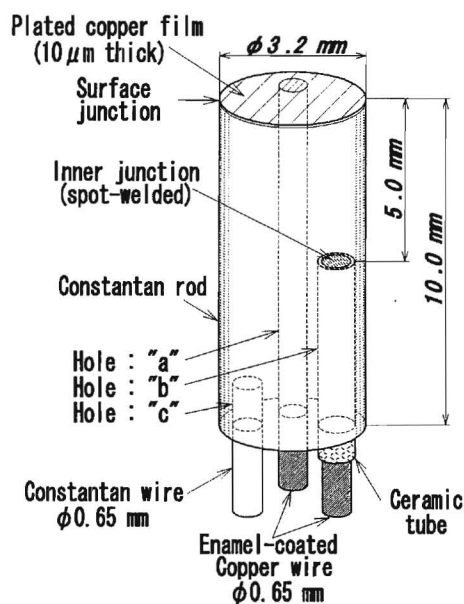


図1 熱流束計の構造

点火させ容器内圧力, 全32点の熱流束計より表面温度の計測を行う。

熱力学第一法則より圧力から容器全体の熱流束(以後, ガス側熱流束)が, 熱流束計表面温度から各計測点の熱流束が算出される。各計測点の熱流束計が出力する熱流束に代表面積を掛け合わせ, その総和を燃焼室壁面の総面積で除したものを壁側熱流束とし, 圧力より算出されるガス側熱流束と比較し熱流束計を評価する。なお, 点火後圧力のピーク時点までは燃焼状態にあるため熱発生と熱損失が同時に発生することから, 評価区間はガス側熱流束波形より判断できる燃焼が終了し単純な熱損失の状態と考えられる減衰過程とした。

熱流束計検定実験につき有効データを100データとした。

3. 熱流束計の構造の検討

昨年, 一昨年と熱流束計の真偽確認のため2種類の熱流束計を比較対象とし実験を行ってきた。1つは被測定部と同種金属であるFeを母材をとしたFe母材Fe-Con熱流束計でもう一方は, 被測定部と異種金属であるCon母材Cu-Con熱流束計である。しかし, 昨年, 一昨年の出す測定結果には相違が見られ, 熱流束計の真偽確認の結果としては不十分であった。よって本年度は, Fe母材Fe-

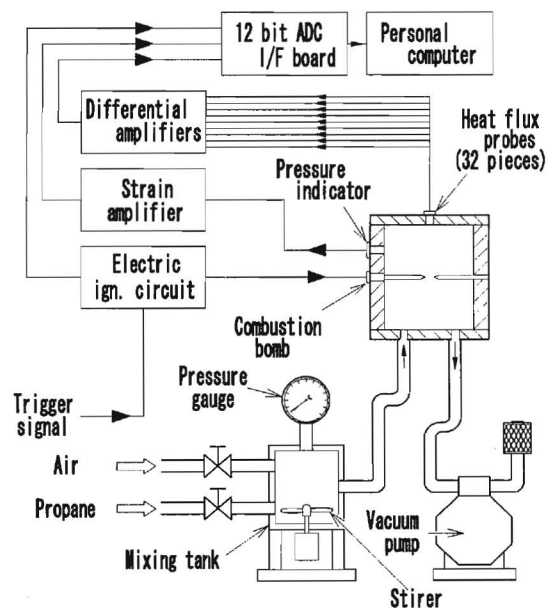


図2 絶対値検定システム

Con 熱流束計と Con 母材 Cu-Con 熱流束計の比較を行い、実験の際にどちらの熱流束計をエンジンで用いるべきかを決定することとした。

また、昨年、一昨年の絶対値検定の Fe 母材 Fe-Con 熱流束計、Con 母材 Cu-Con 熱流束計の結果より、熱流束計は単純に熱電対であると共に、Fe 母材 Fe-Con 熱流束計および Con 母材 Cu-Con 熱流束計は、温度計として正しい出力を示すため、あくまで熱電対として考えると両熱流束計間に 2 倍近くの差が出るのは理解し難い。そのため、温接点の温度変化は接点付近の負脚側の物性値に依存しているものと考え、熱流束を求めるために使用する物性値は、負脚のものを用いるべきであると仮定した¹⁾。このことから実験に用いる熱流束計は母材が電氣的に負極となる金属の組み合わせが良いと考え本研究では仮説確認のため、Fe 母材 Fe-Con 熱流束計、Con 母材 Cu-Con 熱流束計の他に Con 母材 Fe-Con 熱流束計の製作をおこなった。この仮説に伴いどの熱流束計でも大きな差が無いということが示された場合、極性を考慮するという前提で、ある程度自由な要求の仕様が製作可能となりさらに厳密な選別を行うことにより、より高精度の実験が可能となる。

4. 熱流束計の適用範囲の検討

本年度の絶対値検定結果より、ガス側熱流束に対し最も近い値を示した熱流束計を用いて、定容燃焼容器の上蓋の熱物性値を異なるものに変更し絶対値検定と同様の定量的な熱流束検定を行い熱流束計の燃焼容器材料に関する適用範囲について

表 1 各種材料の熱伝導率

材 料	熱伝導率 λ [W/(m·K)]
鉄	80.3
アルミニウム	237
塩化ビニール	0.16
銅	383
コンスタンタン	23.3

の検討を行う。実験は、上蓋を鉄、アルミニウム(以後アルミ)、塩化ビニール(以後塩ビ)の順で変更し実験を行う。表 1 に各上蓋、熱流束計の構成金属熱伝導率²⁾を示す。

5. 実験結果及び考察

5.1 絶対値検定結果

5.1.1 ガス側熱流束 絶対値検定では、圧力より算出されるガス側熱流束を基準とするため、予混合気生成及び圧力計測には、十分な精度を要する。

実測したデータの採用方法については、100 データ以上確保している場合、それ以降には平均値に発生する差は微小であるという一昨年の実験的な根拠³⁾に基づき、各熱流束計検定実験につき有効データを 100 データとした。また、それぞれの平均値を比較したところ 3 者の差は 2% 未満であるため 3 種類を平均して 1 つのガス側熱流束波形にすることとした。図 3 に各熱流束計絶対値検定におけるガス側熱流束波形を示す。図より十分な再現性と精度が確認出来る。またこれにより絶対値検定において基準となるガス側熱流束の正確

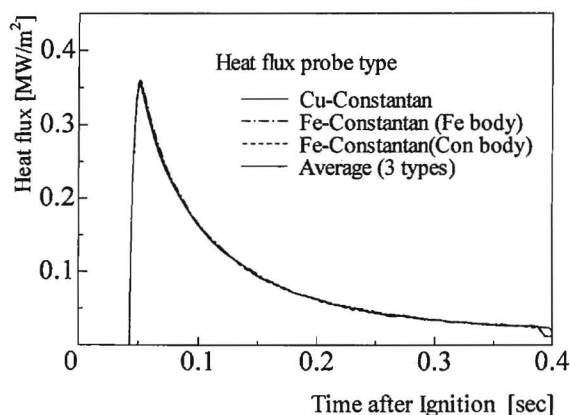


図 3 ガス側熱流束

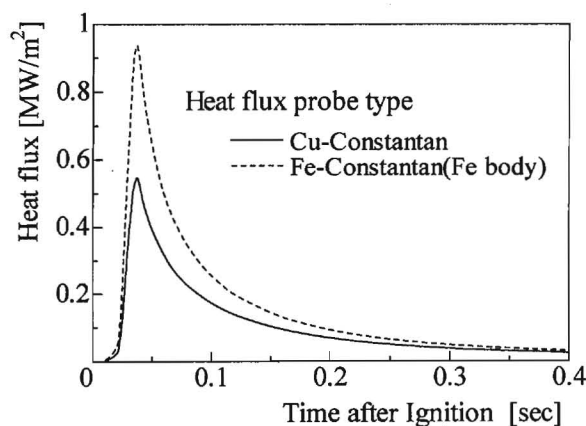


図 4 母材の熱物性値から求めた壁側熱流束

な値を得ることが出来た。

5.1.2 壁側熱流束 Con母材Cu-Con熱流束計とFe母材Fe-Con熱流束計について、絶対値検定での壁側熱流束において、2倍近くの差が発生しており、本年度も図4に示すように同様の結果が見られた。しかし、熱流束計があくまで単純な熱電対であると考えたとこの差は理解し難い。よって本年度はこの点の検討を行う。まず構造について見ると同一構造になっているが、構造的な相違点を見ると構成金属の違いがある。そこで上記でも述べたように熱流束計はあくまで単純な熱電対であることを考慮し、図5に示すように熱流束の換算する以前の表面温度変化の比較を行った。この温度変化の算出には各熱流束における熱起電力のみを用いているため、熱物性値の影響は受けないので、温度の絶対値には約1℃の差があるが温度勾配には大差は無く熱流束の定義より2倍以上の差が発生すると考えるのは難しい。このことよりこの差は熱流束算出時に発生していると考えられる。

熱流束算出には表面接点における瞬時熱流束と実機にて計測を行う表面温度及び内接点との温度差により求められる母材内の定常熱流束を考慮するため、母材に用いる金属の熱伝導率及び熱拡散率を用いている。この母材の物性の取り方は、2種類の熱流束計間の熱起電力発生時の母材の電位に着目すると、Con母材Cu-Con熱流束計の母材(Con)の電位は負であり、Fe母材Fe-Con熱流束計の母材(Fe)の電位は正となる。このことより、各熱流束計を構成している2種類の金属の物性値を用いて、実際に熱流束を算出し金属の物性値が熱流束に及ぼす影響を検証した。算出結果を図6に示す。

図6が示す結果より、Con母材Cu-Con熱流束計にConの物性値を用いた時と、Fe母材Fe-Con熱流束計にConの物性値を用いた時では非常に類似した熱流束値を示した。しかしCon母材Cu-Con熱流束計にCuの物性値を用いた時には熱流束値が従来の計算結果より4倍近く大きく算出するという結果となった。また熱流束波形から算出される熱損失量で比較を行った。熱損失量の算出は、上述した評価区間で行った。具体的に熱損失量を算出し比較すると、図6に示す様に、Con母材Cu-Con熱流束計においては6486Jと予混合気の持つ

理論総発熱量3311Jの2倍近くになっており明らかに誤っていると考えられる値を示している。以上の結果より、熱流束の算出には電位的に負になる側の熱物性値を用いる必要があると考えられる。

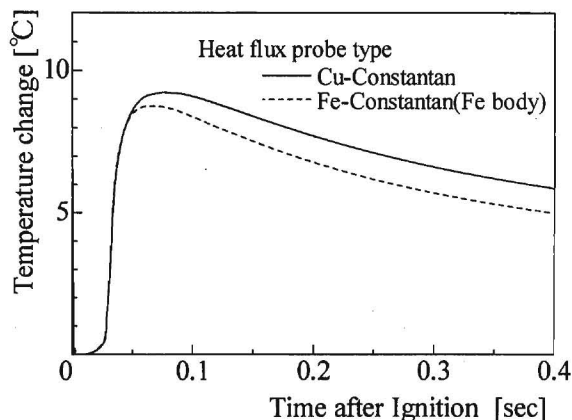


図5 熱流束計の表面温度変化

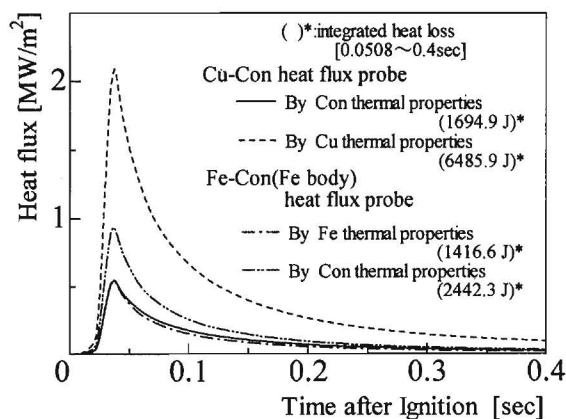


図6 熱物性値の壁側熱流束への影響

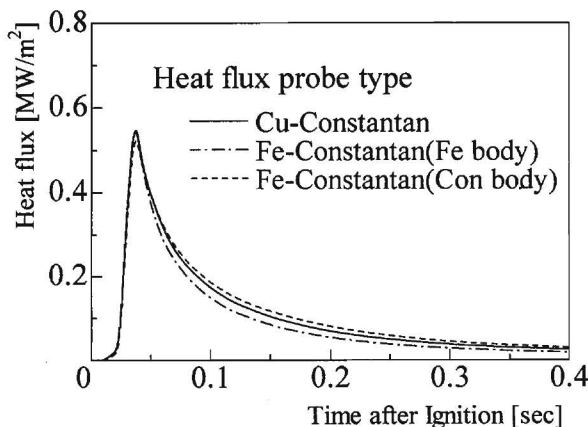


図7 各熱流束計の壁側熱流束

しかし、Fe 母材 Fe-Con 熱流束計の結果は表面接点素線である Con の物性値を用いているが、これは熱流束計の使用目的や構造上の点を考慮すると上述での母材となる金属の物性値を用いるという条件とは異なる為、結果の真偽の判断は困難である。そこで、本年度は実際に Fe 母材 Fe-Con 熱流束計とは別に Con 母材 Fe-Con 熱流束計を製作し計測及び検討を行った。図 7 に計測結果を示す。図 7 の結果より上記の検討を行った Con 母材 Cu-Con 熱流束計、Fe 母材 Fe-Con 熱流束計（物性値 Con 使用）と近い熱流束値を示したため、負になる側の熱物性値を用いる算出方法は信頼性があると考えられる。

5.1.3 熱流束計評価 図 8 にガス側熱流束と壁側熱流束の比較を示す。同図に示す様に Con 母材 Cu-Con 熱流束計より計測され算出された壁側熱流束が壁側熱流束にし、109%前後を保ちながら減衰し、定容容器内の温度変化に良い追従性を有していることがわかる。またこの結果を基に評価区間における熱損失量を求めガス側熱流束に対する比率の評価を行ったが Con 母材 Cu-Con 熱流束計、Fe 母材 Fe-Con 熱流束計に大きな差は無かった。しかし各時間における熱損失の割合が最も安定している熱流束計は Con 母材 Cu-Con 熱流束計であることがわかった。

以上の結果より、Con 母材 Cu-Con 熱流束計の忠実性が最も高いことがわかった。

5.2 適用範囲の検討結果

評価区間は前述同様、燃焼状態にある圧力のピーク時点以前では熱発生と熱損失が同時に発生する為、ガス側熱流束波形より判断できる燃焼が

終了し単純な熱損失の状態と考えられる減衰過程で行った。

5.2.1 ガス側熱流束波形 図 9 に圧力波形及び圧力より算出される各ガス側熱流束の時間経過を示す。

圧力波形の波形間差が 1%以内となっており、図の様に 3 種共にほぼ一致する結果となった。また各時間の平均圧力値、最大および最小値を算出し比較したが 3 種ともに大差は無い。またガス側熱流束において圧力同様大きな差は無いと判断できる。このことから圧力波形及びガス側熱流束波形に上蓋変更による影響がないことが判る。さらに今回の絶対値検定の再現性は十分な精度であることが確認できた。

5.2.2 壁側熱流束実験結果 図 10 に各上蓋の時間経過における壁側熱流束を示す。

図より、上蓋変更による大差は見られずほぼ一致する結果となった。壁側熱流束波形のみで評価すると各上蓋変更による壁側熱流束波形に計測誤差と判断できる程度の差しか見られなかった。また、壁側熱流束波形を部分的に見ても上蓋変更による壁側熱流束の場所による影響は見られなかった。

5.2.3 熱流束波形に対する検討 図 11 にガス側熱流束に対する各壁側熱流束を示す。なお、各壁側熱流束については 100 データをアンサンブル平均したものであり、ガス側熱流束は全 300 データをアンサンブル平均したものである。

3 種平均ガス側熱流束に対し壁側熱流束は 3 種共に 109%前後の差を保ち減衰を行っており、ガス側熱流束に対する壁側熱流束を見ても上蓋の影

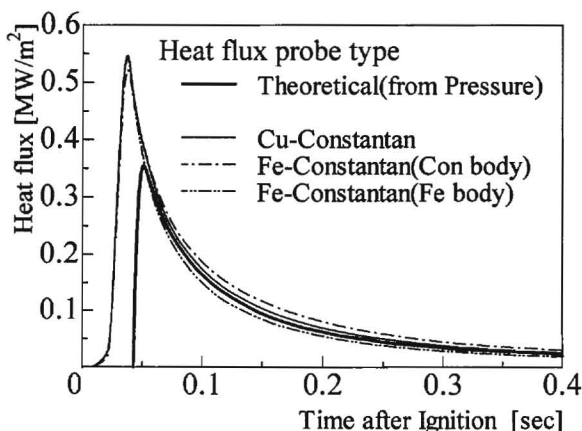


図 8 ガス側熱流束と壁側熱流束の比較

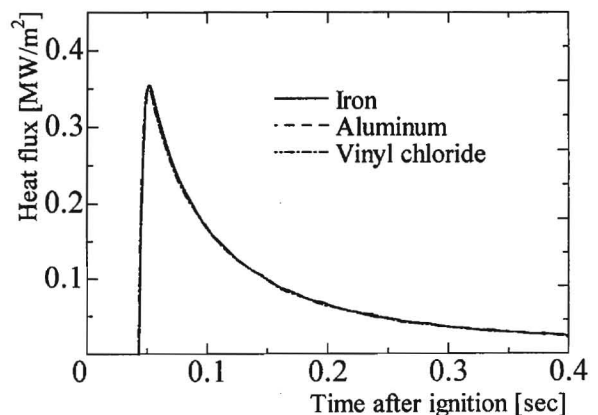


図 9 ガス側熱流束の時間経過

響は無いことがわかった。

5.2.4 総熱損失についての検討 表2に各上蓋の全32点での総熱損失量を示す。各上蓋の容器全体の総熱損失量やガス側熱流束総熱損失量に対する比率を見ても差はあまり大きくないことがわかる。よって全体の15%の表面積に相当する部分の熱物性値を変えただけでは瞬時熱流束波形への影響は誤差に含まれると考える。しかし実機を用いた過去の研究において熱物性値が熱流束へ影響を及ぼすという報告があったことや、熱力学的にみても容器の熱伝導率が熱流束に影響与える場合

表2 上蓋の違いによる総熱損失量の変化

上蓋材料	総熱損失量 (J)	ガス側熱流束との比率 (%)
鉄	1737	109
アルミニウム	1754	110
塩化ビニール	1721	108

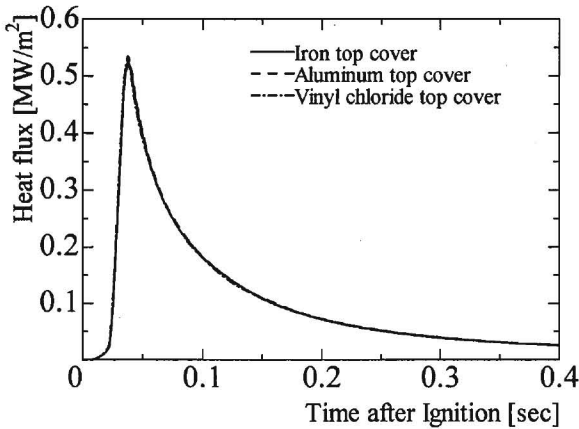


図10 壁側熱流束の時間経過

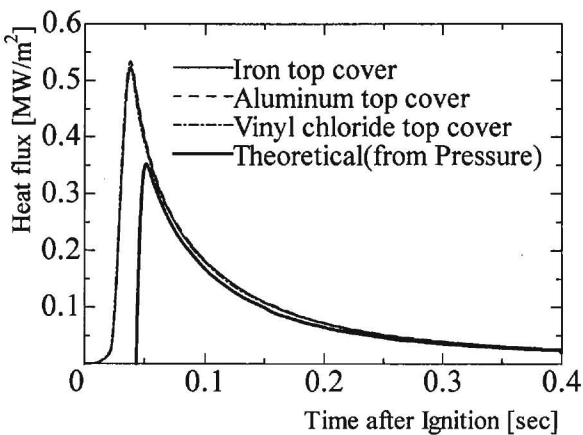


図11 容器上蓋の壁側熱流束への影響

があることなどを考慮した上で、今回の壁側熱流束波形及び熱損失量の微小な差をみると、従来の考えのように熱伝導率が大きい順に熱流束が大きく現れるという傾向が、数値及び波形上には現れている。よって今回の絶対値検定のような単発現象ではない、エンジンの様な繰り返し現象については更なる検討が必要と考えられる。

6. まとめ

熱流束計の信頼性向上と熱流束計測の精度向上を図り、エンジンの熱流束計測に用いる熱流束計を決定と熱流束計の燃焼容器材料に関する適用範囲についての検討をおこなった結果以下の結論を得た。

- (1) 従来行われてきていた定容燃焼容器を用いた絶対値検定における問題点を解決し、実験精度向上を図り熱流束計の定量的な検定を行った結果、コンスタンタン母材 銅-コンスタンタン熱流束計が入力に対して忠実性を有していることが判明した。
- (2) 燃焼室材質の一部変更による圧力及び熱流束への影響は微小な為、瞬時熱流束計測において熱流束計と熱流束計を取り付ける部材の違いによる影響は無視出来ることがわかった。

ただし、エンジンの様な繰り返し現象については更なる検討が必要と考えられる。

謝辞

本研究を進めるあたり協力して頂いた友松重樹助手、木村正寿技官に記して感謝の意を示す。

参考文献

- 1) 長瀬慶紀ほか、火花点火機関における熱流束計測の精度向上、機講論No.028-1, P189, 2002
- 2) 熱物性値ハンドブック編集委員会、熱物性値ハンドブック、日本熱物性学会編P22, 1985
- 3) 木原俊紀、ガソリンエンジンの熱伝達に関する実験的研究、P51, 宮崎大学大学院修士論文, 1998
- 4) 榎本良輝ほか、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 機論B編, 50巻, 453号, P1353-1364, 1984