

燃焼室内旋回流の熱伝達に関する研究 (旋回流定容燃焼容器実験)

長瀬 慶紀¹⁾・小林 聖²⁾・田坂 英紀³⁾

Study on Heat Transfer from Swirl Gas to Combustion Chamber Wall (Combustion Experiments by using Constant Volume Vessel)

Yoshinori NAGASE , Kiyoshi KOBAYASHI , Hidenori TASAKA

Abstract

For global environmental improvement, it is necessary to promote the efficiency of an internal combustion engine. Introduction of the gas flow is performed positively to improve the combustion characteristics in an internal combustion engine. However, combustion is promoted thereby, but it does not always lead to improve the thermal efficiency from the viewpoint of heat loss. Therefore it is necessary to be investigated how influences the gas flow in an engine gives to heat transmission to a wall surface. In this study, it is investigated how influences the gas flow after the combustion end gives to heat transmission with constant volume vessel which is modeled an engine. In the constant volume vessel, the swirl gas is generated by opening and shutting of a valve, and ignited. When the combustion ended, the flow velocity and heat flux were measured for 0.4s. As the results, the heat transfer coefficient of the circumference wall was higher than the outer flat walls.

Key Words:

Engine, Heat transfer coefficient, Constant volume vessel, Thermocouple, Heat flux

1. はじめに

現在、環境問題の改善のために内燃機関の高効率化が望まれおり、その実現のために旋回流などの筒内ガス流動の導入がされてきた。

筒内ガス流動の導入により燃焼が促進されているが、同時に燃焼室壁面への熱伝達も促進されてしまい、必

1) 機械システム工学科助教授

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教授

ずしも筒内ガス流動の導入が内燃機関の熱効率の向上に繋がるとは現状では言い切れていない。

これまで、内燃機関における燃焼室壁面と燃焼ガスの熱伝達に関する研究は長期にわたり行われてきた^{1, 2)}。特に近年は圧縮着火機関を対象とする報告は数多くされているが、火花点火機関についての報告はほとんどされておらず、火花点火機関においてシリンダ内ガス流動が壁面に及ぼす影響を明確にすることは内燃機関の高効率化に欠かせないことといえる。

しかし、実機における着火運転時の伝熱現象は非常

に複雑であり、壁面温度の制御やピストン頂面でのガス流動、熱流束計測が困難であることから、火花点火機関の燃焼室壁面と燃焼ガスの熱伝達の間接関係を明確にするのは非常に困難である。

そこで燃焼室の構造を簡略化し、かつ容積変化がない容器にガス流動を発生させることの出来る、定容燃焼容器を設計・製作することにより、エンジンをモデル化した状態において、壁面温度均一な容器内の予混合気に旋回流を発生させ、燃焼終了後のガス流動が熱伝達にどのような影響を及ぼしているのかを調査することを目的とする。

2. 旋回流容器

本研究では、燃焼容器本体と吸気ポートをつなぐシユラウド付き吸気バルブを開閉させることによって容器内に一定方向の旋回流を発生させることができる定容燃焼容器を使用する。この定容燃焼容器の概略図を図1に示す。

燃焼容器本体の形状は外径 160mm 内径 80mm 高さ 40mm のドーナツ状で、熱流束の計測位置を 21 点設けてある。点火は左右 2 カ所、燃焼容器本体の断面の中心に設けられた放電隙間から行っている。また、燃

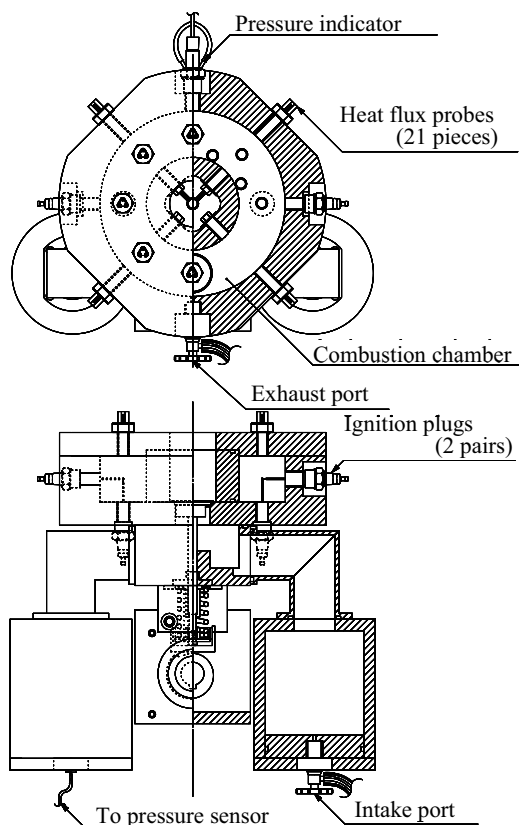


図1 旋回流容器

焼実験時において、熱流束と同時に燃焼圧力も取り込むための圧力計を取り付けてある。

その他に、燃焼容器本体を真空状態にするための真空引き用バルブ、吸気ポートには、燃料となるプロパン (C_3H_8) と空気の混合気を充填するバルブ、混合気充填圧を計測する半導体圧力計が設けてある。

また、塩ビ製の熱線プローブ取り付け用上蓋により熱線流速計による駆動運転の流速計測と、アクリル製の燃焼流速計測用の上蓋により容器内の可視化撮影を可能としている。

3. ガス流動計測

ガス流動の計測方法として、熱線流速計を用いて、非燃焼時にある一点を通過する空気の流速を長時間計測し、非燃焼時の最大流速及び、時間と減衰の関係を調査した後に火花追跡法による燃焼後のガス流動計測を行う。

熱線流速計の後に火花追跡法を選択する理由として、本実験では燃焼後のガス流動と熱伝達との関係を明らかにするため燃焼後のガス流動計測が必要であり、火花追跡法はそれが可能なためである。

3. 1 熱線流速計の原理

熱線流速計は、電流を流すことで加熱された細い抵抗線の流れの中におくと、流れによって抵抗線が冷却されて電気抵抗が変化する性質を利用した流速計である。熱線の冷却と流速の関係式には、流速の大きさ、熱線の抵抗およびこれに流す電流により表される King の式が一般によく用いられる。この式では流速の変化に伴い抵抗と電流の両者がともに変化するため、流速が変化しても抵抗あるいは電流が変化しないように制御することで、流速を電流のみあるいは抵抗のみの関数とすることができる。このように、熱線流速計には熱線抵抗を一定に保つ定温度型と熱線電流を一定に保つ定電流型とがある。

今回の計測には熱線とそれに電流を供給する CTA (Constant Temperature Anemometer) ユニットから成る定温度型熱線流速計を用いた。CTA ユニットは熱線の抵抗変化に対し、熱線に流す電流を制御することにより、熱線の温度、つまりは熱線の抵抗値を一定に保つ装置である。実際には、熱線を含む全体の回路内の一部にかかる電圧値を出力として取り出し、この値が

ら熱線自体に流れる電流値を求め、流速値に変換する。この時の出力は補正を行う必要があり、あらかじめ行っておいた風洞検定の検定値を用いて補正を行い、実際の流速を得た。

熱線流速計の計測位置を図2および表1に示す。

3. 2 火花追跡法の原理

計測したい流体中に電極を配置し、これに高周波・高電圧放電装置により適当な時間間隔で繰り返し高電圧パルスを加える。すると、最初の放電によりイオン化された経路が作り出され、この経路は流れと共に下流へと移動していく。

この放電によって生じたイオン化経路は約0.1~1msの間継続しており、その間は周囲の流体に比べて高い導電性を保持している。そこで、この時間内に2番目の高電圧パルスを加えると、イオン化された1番目の経路を通して放電が行われ、その経路を照らし出す。

このようにして、3, 4, …, n番目と高電圧パルスを送ることで順次、流れに乗って移動しているイオン化された経路を通して放電され、火花線はタイムラインをトレースする。そして、この火花線の間隔と放電時間間隔を用いて流速を求めることができる。今回は

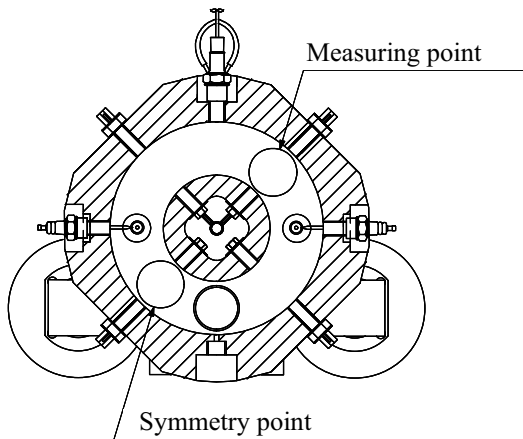


図2 計測位置

表1 計測位置

Experiment conditions	Point	Radius ratio
Non-burning flow velocity	Measuring points	0.90
		0.75
		0.60
	Symmetry point	0.75
Combustion flow velocity	Measuring point	0.75

2回の放電を行い、2本の火花線の間隔と放電時間間隔から流速を求めた。火花追跡法の計測位置を表1に示す。

4. 熱流束計測

4. 1 熱流束計

燃焼ガスから燃焼室壁面への熱伝達は、火炎到達時・膨張行程において顕著な増減を示す非定常成分と、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却へと伝えられる定常成分からなっている。非定常成分は燃焼室壁面の表面温度の時間的変化から計算により求められ、定常成分は燃焼室壁面の表面温度と壁面内部の温度の2点の平均温度差から求められる。

燃焼室壁面の表面温度は、燃焼室壁面に設けた熱接点（表面接点）の出力を計測することで求められる。急速な温度変化に対する時間的な応答性と振幅の忠実性を確保するため、接点部の熱容量を小さくすると表面接点が形成される部分をできる限り表面に近づけることが求められる。

往復動内燃機関への適用には、更に以下のような要件を考慮する必要がある。

- ・燃焼室壁面の表面温度変化に対する応答性や忠実性に優れていること。
- ・燃焼室壁面内部にも熱接点があり、定常熱伝導成分が計測されていること。
- ・熱流束計内部の熱伝導の1次元性が確保されていること。
- ・表面接点が高温・高圧下の燃焼状態に対する耐久性を有すること。

このような要件を満たすため、表面接点として母材表面に薄膜状の金属膜を形成し、導線や熱流束計本体の計測部への装着は絶縁接着剤を介して行うものが主流となっている。

また、その他の条件として挙げられることは、機関での熱流束計測において複数の計測点で同時計測を行うため、被計測部（燃焼室）に対して小型であり、取付けが容易であること等がある。

本研究で使用した熱流束計の構造を図3に示す。

本研究では熱流束計母材にS45C、素線およびメッキにニッケルで構成されたS45C-ニッケル熱流束計を採用した。熱流束計の母材はS45C丸棒の両端部を平行な平面に仕上げ、φ3.2mm、長さ10.0mmの垂直円柱

とした。この母材の片面より中心軸に平行で深さが異なる3つの小孔 a, b, c がそれぞれ端面に垂直に設けられており、そこに挿入されたニッケル線によって表面、内接点を形成している。以下に各接点について述べる。

表面接点：小孔 a に 0.65mm の表面接点用ニッケル素線を挿入し、かしめて固定してある。ニッケルメッキと素線は同材料であり、ニッケルメッキと母材とで表面接点が形成されている。

内接点：直径 1.4mm, 表面からの深さ 5.0mm の小孔 b に 0.65mm の内接点用ニッケル素線を挿入し、点溶接によって形成されている。

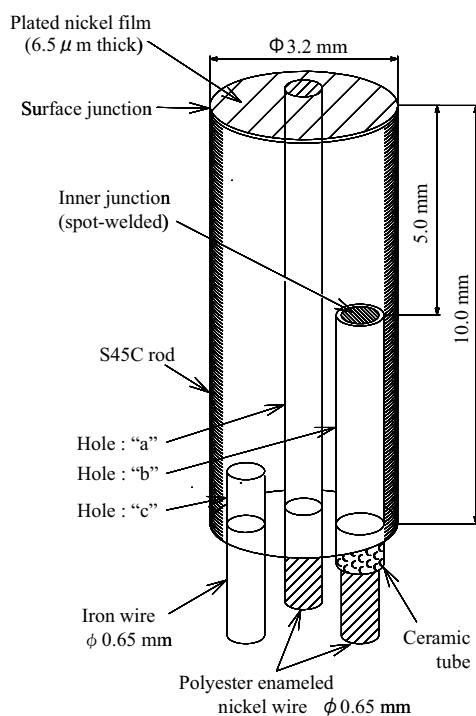


図3 熱流束計の構造

両接点ともに、小孔 c に挿入され、かしめられたアース用鉄素線との間に冷接点を持っている。それによって1つの熱流束計内に2組の熱電対を形成している。

4. 2 熱流束計測システム

熱流束計測システムを図4に示す。

予混合気は定容燃焼容器とは別に専用のタンクを使用し、十分に攪拌・混合された後、真空ポンプにて真空状態にした補助タンクに充填できるようになっており、予混合気の充填圧は半導体圧力計により計測している。熱流束計表面の温度変化

の取り込み及び記録には、熱流束計からの起電力を自作オペアンプによって10200倍に増幅し、12bitA/Dボードを介してコンピュータに取り込むことで、21点の表面温度波形と燃焼圧力をそれぞれデータサンプリング間隔 $200 \mu s$ で2048データまで計測している。

熱流束計測実験は点火時に予混合気が静止している場合と回転している場合の2条件を行い、各条件の有効実験回数を100回とする。

5. 実験結果及び考察

5. 1 流速計測結果

時間ごとの非燃焼時の流速計測結果を図5, 6に、半径比ごとの非燃焼時と燃焼時の流速計測結果を図7に示す。図6の対称位置の流速がほぼ等しいことから、容器内には一様な流れが出来ていることが確認でき、図5, 7から、容器内には容器中心、つまり半径比0を渦の中心とする剛体渦的な流れがあることが確認できる。

図5より、減衰の段階で半径比0.60及び0.90はそれぞれが同様に0.75に比べ早く減衰していることがわかる。これは、半径比0.60と0.90の壁面からの距離が等しく、同じように壁面摩擦の影響を受けているものと考えられる。

また、図7の○印は燃焼時の計測結果である。燃焼時の流速計測については特定の条件しか行っていないが、これまでの研究³⁾で、半径比が変わっても非燃焼時と燃焼時の流速は同じ割合で上昇することは確認されており、本実験での半径比0.75の燃焼時の流速は非燃焼時の流速の115%であった。この結果を元に非燃焼

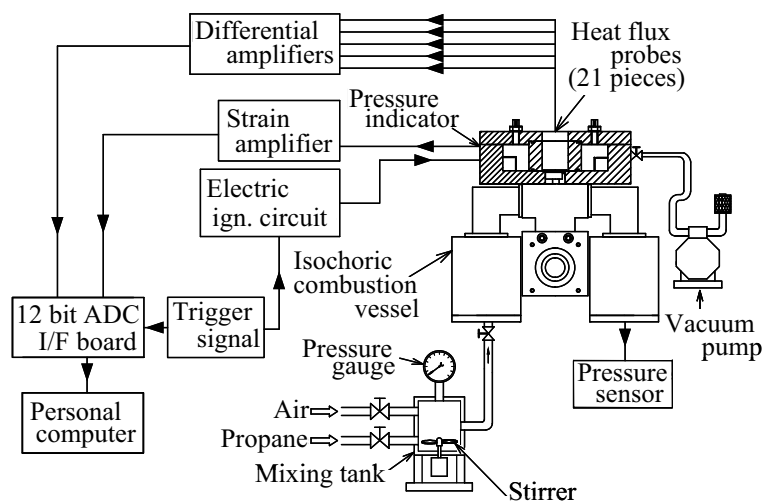


図4 熱流束計測システム

時の流速から燃焼時の流速の分布を予測し、予測した流速をその半径比の流速とした。予測した燃焼時の流速は×印で示す。

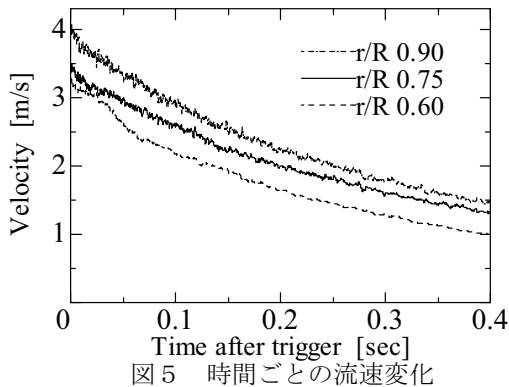


図5 時間ごとの流速変化

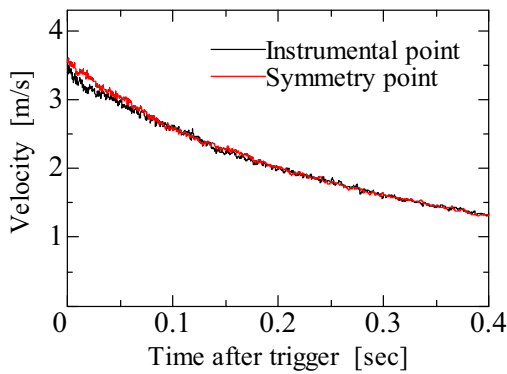


図6 対称位置での流速変化

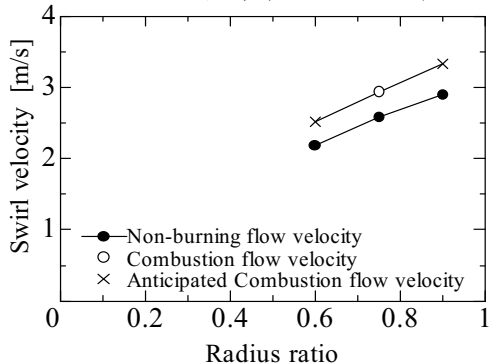


図7 半径比毎の流速分布

5. 2 熱流束計測結果

燃焼圧力経過を図8に示す。図8より旋回している場合の圧力は静止状態よりも立ち上がりが早くなり、ピーク値も大きくなっていることがわかる。これより実機と同じくこの容器でも、流速を与えることにより燃焼が促進されていることが分かる。

次に予混合気静止状態と旋回状態のライナ部とピストン部についての壁側熱流束を図9に示す。静止状態でピークが複数あらわれるのは、容器がドーナツ型で、2ヶ所点火のため、燃焼中は火炎面が時間差で各々の熱流束計に接触し、燃焼後は自然対流が起こるためだと考えられる。旋回状態では、ガス流動によりこの

現象は顕著には現れないと考えられる。

図9の減衰過程において、予混合気静止状態のライナ部とピストン部は同じ傾向を示している。しかし、旋回状態はライナ部の方がピストン部よりも減衰が緩やかとなっている。

ここで、ライナ部とピストン部の表面温度変化を図10に示す。図より旋回状態において、ライナ部の方がピストン部より表面温度の減衰が緩やかで、表面温度が下がりにくいことがわかる。また既燃ガスが旋回することで、ライナ部では表面温度が約1°C程度上昇しているが、ピストン部ではほとんど変化していない。このため、ライナ部の方がピストン部よりも旋回流の影響を受けやすく、熱流束はライナ部の方が大きくなっている事がわかる。

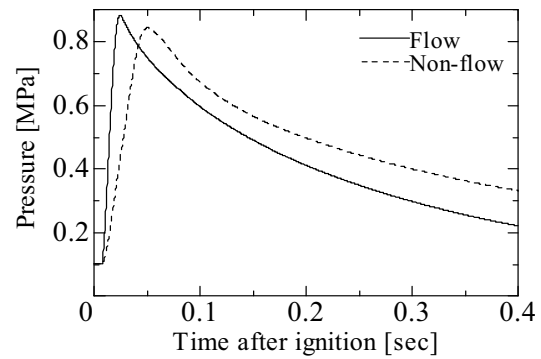


図8 燃焼圧力

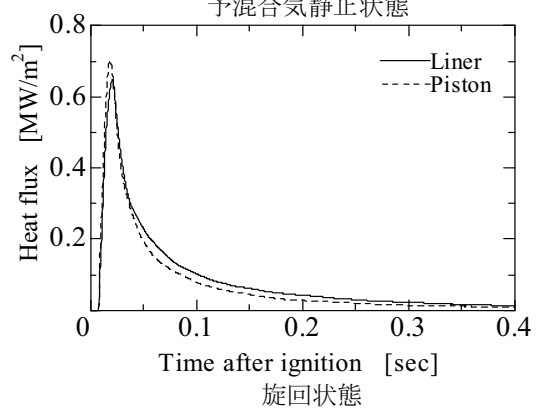
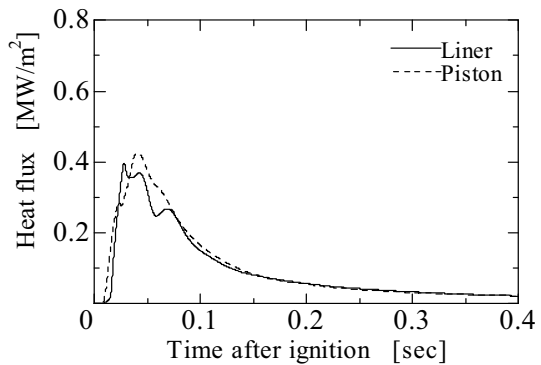


図9 ピストン部とライナ部の熱流束

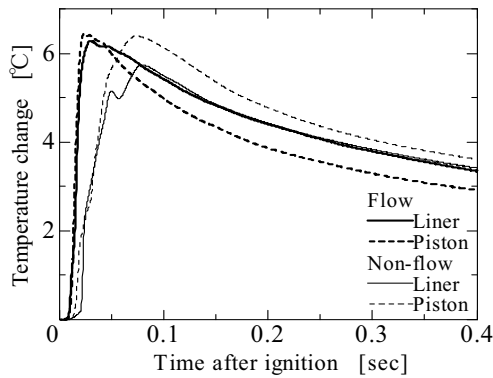


図10 壁面温度変化

5. 3 ガス流動と熱伝達の関係

図11に燃焼時の流速と熱伝達率の関係を示す。

本実験では容器内の流れの全体を見るために、旋回流容器中の最大流速である最外周流速を代表速度とし、流速は代表速度で整理した。また、ピストン部、ライナ部それぞれの傾向を見るために、それぞれについて最小二乗法を用いて直線近似を行った。

図11より、同時刻においてピストン部よりもライナ部のほうが熱伝達率は高くなった。また、近似式の傾きの違いを見ても、ライナ部のほうがピストン部よりも急になった。

流体と個体間の熱伝達率は固体表面に出来た温度境界層の厚さに強く左右されることを考えると、今回の場合、流速があがることで温度境界層が薄くなり、熱伝達量が増えと考えられる。これだけならば、流速が同じ時に熱伝達量は同じということになるが、熱伝達は流速が同じでもライナ部のほうがより促進されている。これは、旋回流容器内のピストン部壁面には壁面に沿うだけの流れが起こり壁面の境界層を薄くし、ライナ部ではそれに加え凹面を流れる主流の遠心力の影

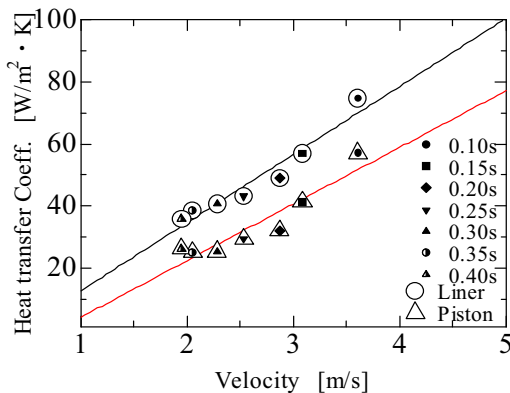


図11 燃焼時流速と熱伝達率

響で流れが不安定になり、境界層内にゲルトラ渦⁴⁾が発生し、境界層をかき乱すためではないかと考えられる。だが、今回の実験では流速が極端に低かったため傾向が顕著に現れることはなく、実験的に十分な証明が出来ていない状態である。今後、さらに流速をあげる必要がある。

6. 結論

新しく旋回流容器を製作し、壁面温度均一のもと容器内に旋回流を発生させ、流速および熱流束計測を行うことで、ガス流動が熱伝達にどのような影響を及ぼしているのか調査した。その結果以下の結論を得た。

- 1) 非燃焼時の流速より、容器内には旋回流が発生していることがわかった。
- 2) 表面温度波形、壁側熱流束波形より、減衰過程においてピストン相当部とライナ相当部ではライナ部のほうが旋回流の影響を受けやすく、熱流束が大きくなることが分かった。しかし、流速が極端に低かったために傾向が顕著に現れなかった。その為、今後さらに流速をあげる必要がある。

謝辞

本研究を進めるにあたり、ご助言を頂いた木村正寿氏、友松重樹氏ならびに、協力していただいた上甲哲士氏、吉岡孝氏に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 一色ほか；密閉容器内の燃焼による熱伝達
日本機械学会論文集, 39巻 328号, P3760～, 1973
- 2) 榎本, 古浜ほか；4サイクルガソリンエンジン機
関の局所熱伝達率に関する研究
日本機械学会論文集, 53巻 496号, P3835～, 1987
- 3) 寺嶋ほか；旋回流容器を用いたピストン頂面の熱
伝達に関する研究 宮崎大学修士論文, 2005
- 4) 辻；容器内流れ, 日刊工業新聞社, P28, 1984