

旋回流定容燃焼容器による熱伝達に関する研究 (燃焼時の流速および熱流束計測)

長瀬慶紀¹⁾・関根正浩²⁾・江島誠²⁾・友松重樹³⁾・木村正寿⁴⁾

Study on Heat Transfer from Swirl Gas to Combustion Chamber Wall (Measurements of Burnt Gas Velocity and Heat Flux)

Yoshinori NAGASE, Masahiro SEKINE, Makoto ESHIMA, Shigeki TOMOMATSU, Masatoshi KIMURA

Abstract

It is necessary to promote the efficiency of the internal combustion engine to a global environmental improvement. The gas flow is used to promote the combustion of the internal combustion engine. However, it cannot be asserted that the improvement of thermal efficiency is promoted by introducing the gas flow. Then, it is necessary to clarify the interrelation between the gas flow in the cylinder and the heat transfer for the thermal efficiency improvement of the internal combustion engine. In this study, how influences the gas flow after the combustion end gives to heat transmission to the wall of the constant volume vessel which is modeled an engine. In the constant volume vessel, the swirl gas is generated by using the shroud valve, and ignited. When combustion ended, flow velocity and the heat flux were measured for 0.4s. The heat fluxes of inside and outside surroundings wall of the vessel and the upper and the lower walls are compared, respectively. As the results, it was understood that the heat flux is not influenced the shape nor position of the wall.

Key words:

Engine, Constant volume vessel, Thermocouple, Heat flux, Gas velocity

1. はじめに

現在、化石燃料の使用量増加による急激な化石燃料の不足や環境悪化が問題とされる中、これらの改善のために内燃機関の高効率化が望まれている。

筒内ガス流動を用いる技術は高効率化には大変有効であると考えられており、進んでこの技術が取り入れられている。しかし、強い筒内ガス流動は燃焼室壁面と既燃ガスとの熱伝達を促進させ冷却損失を増大させるため、一概に熱効率の向上には繋がらないと考えられる。

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)}。しかし、圧縮着火機関を対象とする例は数多く報告されているが、これまで、火花点火機関を対象としたものは少なく、火花点火機関において筒内ガス流動と燃焼室壁面の熱伝達との関係を明らかにすることは熱効率の向上を実現させるのに重要な要素であるといえる。

そこで、ピストンが上死点の位置で燃焼したときの燃焼室の構造を簡略化した定容燃焼容器にガス流動を発生させることで、温度と容積変化の影響を受けないガス流動と熱伝達との関係を調査することとした。

よって本研究は、実機の燃焼室内の状態に近づけるために流速を上げ、燃焼後の流速計測の改良を行うことで旋回流容器の流速と熱流束を計測し、流速と熱伝達率の関係を調べる。また、燃焼室の中央に内円筒を

1) 機械システム工学科准教授

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助教

4) 宮崎大学技術職員

設置し外周壁面部 (Outer wall : 実機ではライナ部に相当) と内周壁面部 (Inner wall) を比較することで、ライナ部の熱流束がガス流動から受ける影響の検討と実機におけるピストン部のガス流動と熱流束の関係がライナ部と同様の傾向が見られない原因を検討することを目的とする。

2. 旋回流容器

2.1 旋回流容器

旋回流容器を図1に示す。燃烧容器本体の形状は外径160mm内径80mm高さ40mmのドーナツ状で、熱流束の計測位置は31点設けてある。点火は左右2カ所、燃烧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おり、燃烧実験時において、熱流束と同時に燃烧圧力を取り込むための圧力計の設置穴も設けてある。また、燃烧容器本体と吸気ポートをつなぐ覆い(シュラウド)付き吸気バルブを開閉させることによって燃烧容器本体に一定方向の旋回流を発生させられるようになっている。

2.2 流速向上のための容器改良

これまでの研究³⁾の旋回流容器の構造では、流速の最高値は3~4m/sであり、実機の流速の最高値は約20m/sであるため、実機の流速域をカバーできておらず、低い流速域での実験・検討を行っていた。そこで、より実機に近い流速域での流速と熱流束との比較を行うことは実機のモデル化をおこなっている旋回流容器の目的を達成するための重要要素であると考えた。

まず、旋回を起こすためにバルブに装着したシュラウドの改良を行った。図1よりシュラウドはこれまでの240°を本実験では270°に変更し主流方向への流れを統一することで流速を上げる対策をおこなった。

次に、吸気ポート内圧力を上げることにより、燃烧室へ予混合気を吸入する際の圧力差を大きくし、それにより流速を上げようと考えた。圧力を上げて吸気すると、規定吸入圧力より高く吸気されるのを防ぐために、吸気ポート容量を減らし、バルブの開閉時間を短くすることで対策を施した。バルブの開閉時間を短くするために、カムの変更とカムの回転速度を変更し、燃烧室への吸入量の調整はカム駆動用ステッピングモータのコントローラに送る信号をPICにより微調節す

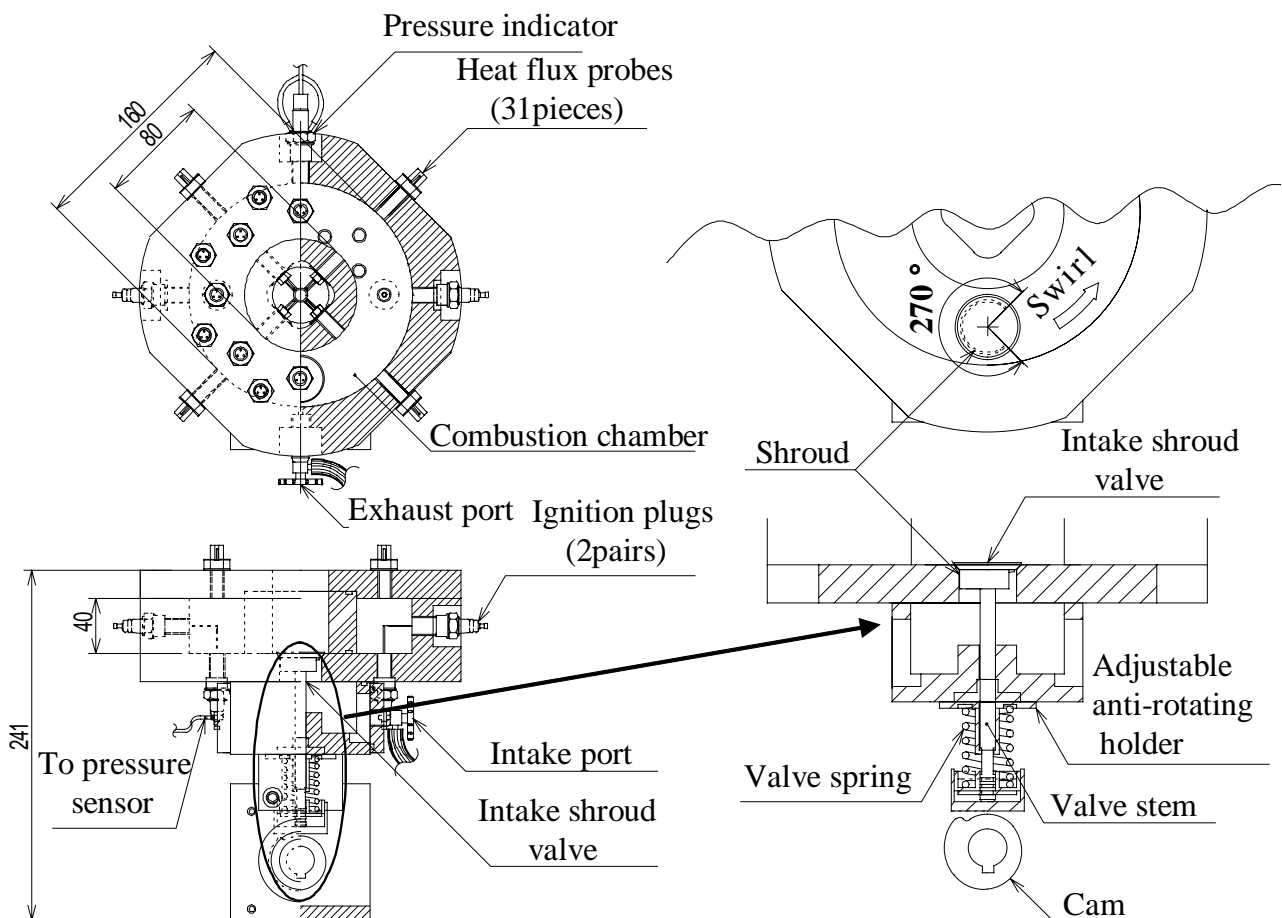
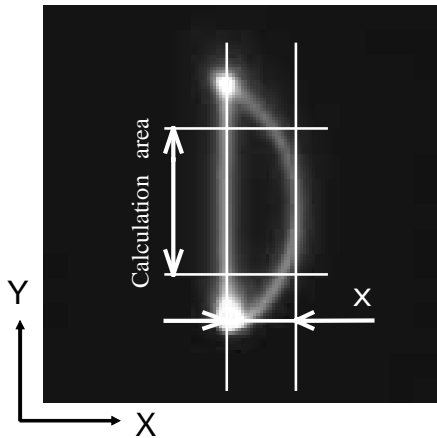


図1 旋回流容器 .

3. ガス流動計測

3.1 火花追跡法の原理

本研究では、可視化計測による火花追跡法を採用し、旋回流容器内のガス流動を計測した。火花追跡法解析画像を図2に示す。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(図2では右)へと移動していく。



$$\text{Velocity} = \frac{\text{Distance between both sparks}}{\text{Time interval between both sparks}} = \frac{x}{t}$$

図2 火花追跡法解析画像 .

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。

そして、この火花線の間隔 (x) と放電時間間隔 (t) を用いて流速を求めることができる。

火花追跡法の計測装置の概要を図3に示す。遅延装置からの信号が CDI (Capacitor Discharge Ignition) 型放電装置に入り、コンデンサと一次コイルとの間に設けたサイリスタを導通させることで一次、二次からなる点火コイルにコンデンサで蓄えられた電流が流れ、観測用アクリル蓋に固定された電極間で放電が行われる。

3.2 火花追跡法の装置改良

これまでの研究では火花追跡法による燃焼時の流速計測を行うことが困難であったため、装置の改良を行った。

まず、点火プラグの変更を行った。様々なプラグを検討し最もスパークの飛びやすかったプラスチックボルトの中心にステンレス線を通し焼入れをしたものを点火プラグとした。プラグ先端は、最初のスパークが直線上に飛びやすくなるように正極側、負極側ともに尖らせ、プラグ先端が一直線になるように形状を変更し、計測誤差を小さくした。

次に、点火系配線の変更を行った。プラグコードを抵抗値の高い自動車用ハイテンションコードに変更し、ノイズ低減を図った。

最後に、制御装置の改良を行った。点火、カメラ等に指示を出すトリガーを発信するコントローラユニットを PI (Peripheral Interface Controller) で制御できるようにし、トリガーをプログラムで自由に変更できるようにした。その際、本実験では 1 度の燃焼で 2 回 1 組の放電を 6 組行い、各組における 2 本の火花線の間隔と放電時間間隔から流速の時系列を求めた。

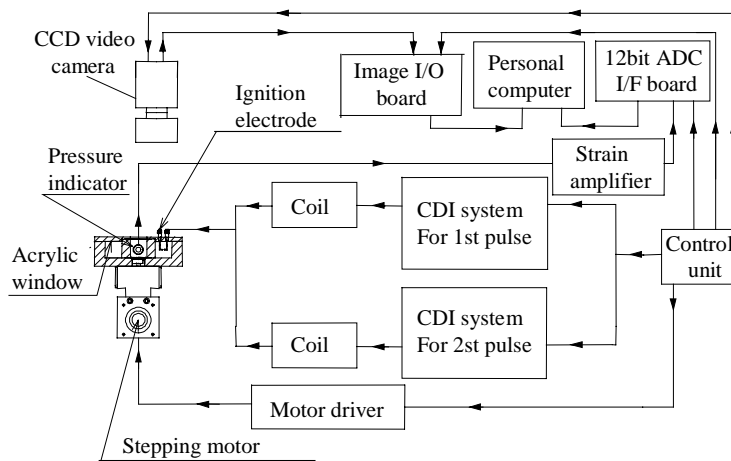


図3 火花追跡法装置概要 .

4. 熱流束計測

4.1 熱流束計の構造

本研究の目的はガス流動と熱伝達率との相互関係を解析することである。この熱伝達率を算出するには瞬時熱流束(以後熱流束とする)を計測する必要がある、この計測器が熱流束計である。本研究で使用した熱流束計は、母材・アース・表面接点・内接点・表面メッキ薄膜の6つの部品で形成されている。熱流束計の構造を図4に示す。

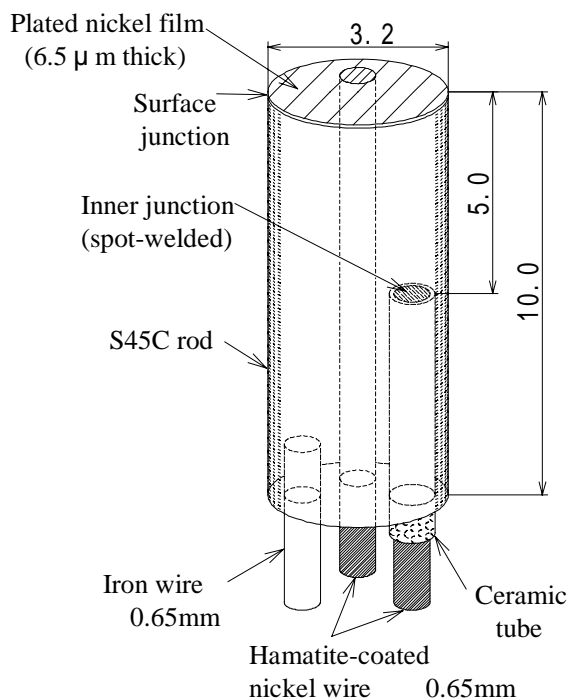


図4 熱流束計の構造。

本研究では S45C の熱流束計母材とニッケルの素線およびメッキで形成された 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、3.2mm、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 つの小孔がそれぞれ端面に垂直に設けられ表面接点、内接点、アースを形成している。アースは、S45C 母材と鉄素線をかしめることで形成している。表面接点は、耐熱接着剤（ハマタイト）によって電氣的絶縁皮膜を形成したニッケル素線を S45C 母材に貫通させ、母材表面に電解メッキすることで厚さ $6.5\mu\text{m}$ のニッケル薄膜を施し形成している。内接点は母材面にあけられた深さ 5.0mm の穴に内接点用のニッケル素線を

挿入し、その先端を母材と点溶接することで形成している。その際、素線にはハマタイトによる絶縁皮膜を形成させ、ニッケル素線と孔側面の間にセラミックチューブ（ガイシ）を覆うことで、溶接点以外を電氣的に絶縁している。

本研究で使用した熱流束計では、表面接点と内接点の 2 組の熱電対からそれぞれ表面接点温度と内接点温度を計測でき、熱流束を算出することが可能である。

4.2 熱流束計の選別方法

熱流束計は自作したものであるため、製作の各工程においてメッキ薄膜のような微小要素や絶縁層の厚さ等を厳密に統一することは極めて困難であり、各熱流束計間の個体差が生じてしまう。個体差をできるだけ少なくするため、数多くの熱流束計を製作し、その中から選別を行って、選別された熱流束計を旋回流容器に用いた。選別方法は実機の各計測位置の中で最も再現性がよく、安定した波形を出力する特定位置に順次取り付け、同一運転条件にて熱流束計測を行った。100 サイクル分の平均値として得られた熱流束波形に対し特定点でのバラツキを調べ安定した性能を持つ熱流束計を選別した。

4.3 熱流束計測の実験方法及び実験条件

熱流束計測実験は吸気ポート充填圧 0.5MPa の条件で行い、有効データ数を 100 個とする。

予め予混合気生成タンクに、空気とプロパンを当量比 1.0 になるようにして予混合気を生成し、十分に攪拌・混合しておく。

実験方法は、燃焼室、吸気ポート内を真空ポンプにより真空状態にし、充填圧が絶対圧 0.5MPa になるように予混合気を吸気ポート内に充填する。その後、燃焼室に吸気圧が約 0.1MPa になるようにステッピングモータを用いて吸気バルブを 0.05 秒間開閉させ混合気を充填し、吸気バルブが閉じてから 0.0002 秒後に点火を行い、点火と同時に計測を開始する。

5. 実験結果及び考察

5.1 ガス流動計測結果

ガス流動計測結果について、図5に同半径比における対称位置での流速計測結果、図6に半径比毎の燃焼時の流速計測結果、図7に流速分布の時間変化を示す。

図5より同半径比の対称位置でほぼ等しい値を示していることから、容器内には一様な流れが出来ていることが確認できる。

図6より燃焼終了直後は、燃焼により主流方向の流れが乱され、加えて設置してある内円筒の影響を受け、24.8ms と 90.8ms で流速分布の逆転が起こったと考えられる。

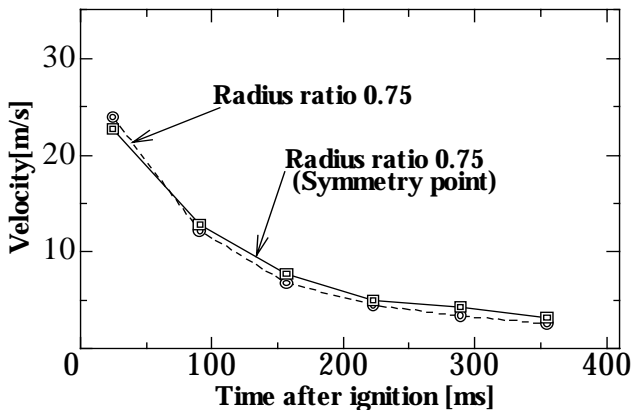


図5 同半径比における対称位置での流速計測結果

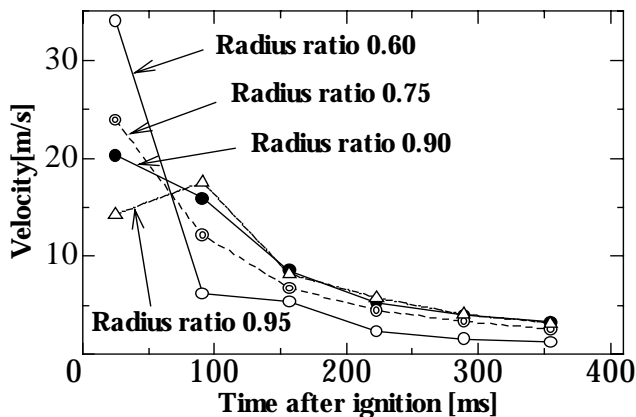


図6 半径比毎の流速計測結果

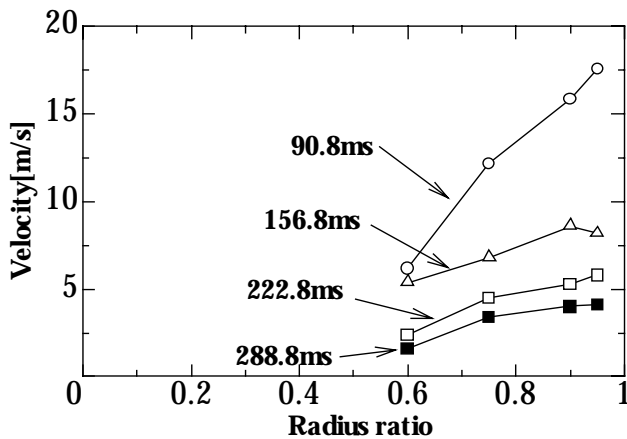


図7 流速分布の時間変化

図7より、90.8ms以降では半径比が大きくなるほど流速が高くなっている。また、どの半径比の流速も単調な減衰になり、燃焼直後の容器内の大きな乱れによる流速への影響はなくなったと考えられる。この結果より点火後 90.8ms 以降で実験の検討を行うこととした。

5.2 熱流束計測結果

5.2.1 壁面の違いにおける熱流束の比較

図8に半径比 0.75 における上壁面部と下壁面部の熱流束の比較のグラフを示す。

流速が同じであると考えられる半径比 0.75 の上下壁面部での熱流束値の比較検討を行った。図8において燃焼終了直後は上壁面部の熱流束が下壁面部の熱流束より高くなっている。一方燃焼直後は上壁面部と下壁面部の熱流束ピーク値に違いがあるが、減衰過程ではほぼ一致した。これにより半径比が同じであれば上下壁面に関係なく熱流束はほぼ一致するといえる。

また、半径比 0.95 の上壁面部と外周壁面部、半径比 0.6 の下壁面部と内周壁面部の流速は、それぞれの半径比で計測された流速と等しいと仮定し、内外周壁面部の熱流束の比較を行うことで、壁面形状による流れの違いが熱流束にどのような影響を与えるのかを検討した。半径比毎の側壁面部と上下壁面部の熱流束比較を図9に示す。

結果は同半径比において、熱流束の減衰過程での傾向はほぼ一致した。

この結果より、壁面形状によるガス流動の違いが熱伝達に与える影響は小さく、流速が同じであれば、上下壁面、側壁面に区別されず熱流束の傾向は一致することがわかった。

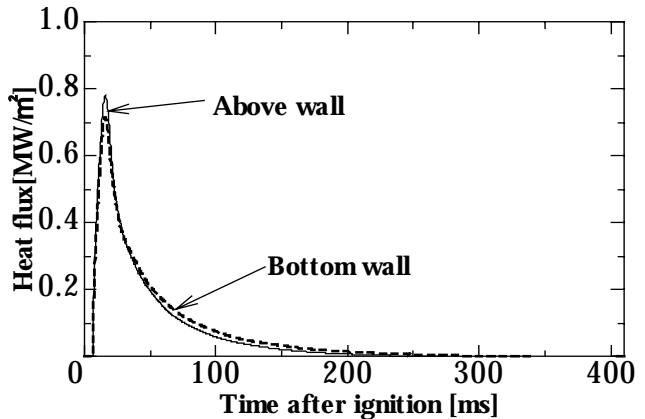


図8 半径比 0.75 における上下壁面部の熱流束比較

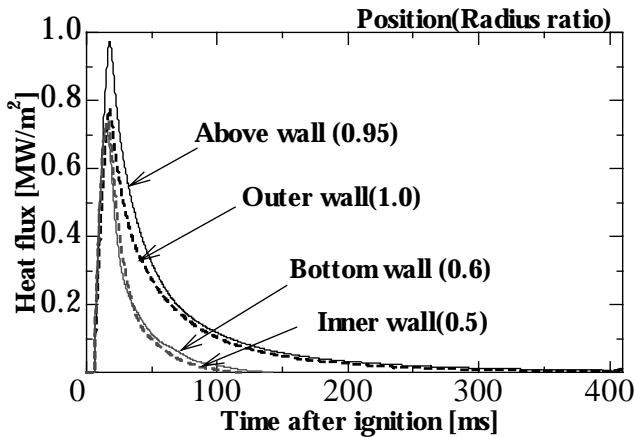


図9 側壁面部と上下壁面部の熱流束比較.

5.2.2 半径比毎の熱流束の比較

図9より上下壁面部の半径比毎の熱流束の傾向は一致していると考えられるため、上下壁面部の半径比0.6, 0.75, 0.95の熱流束値を比較する。半径比毎の熱流束の比較結果を図10に示す。図10より半径比が大きくなるほど熱流束値は高くなっていることがわかる。図6の流速結果より90.8ms以降は、半径比が大きくなるほどそれに対応して流速も高くなっているため、この結果より熱流束はガス流動に大きな影響を受けていることがわかった。

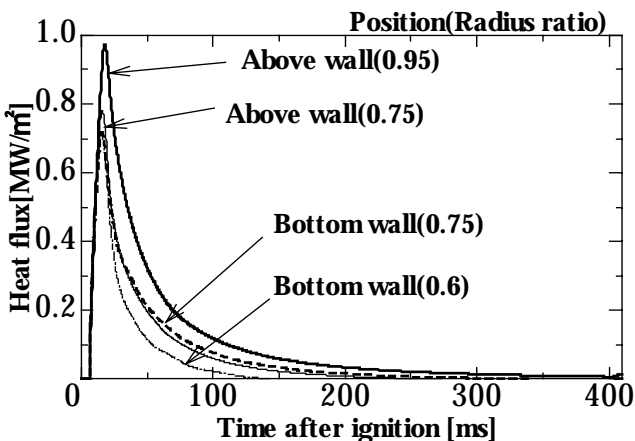


図10 半径比毎の熱流束比較.

5.2.3 流速と熱流束の関係

これまでに計測した半径比、時間毎の流速と、壁面毎の熱流束の関係を図11に示す。図11より流速と熱流束は計測壁面毎に差はあるものの、一定の傾向が表れた。計測壁面毎に差が生じたのは、各半径比の流れが安定していると考えられる容器下壁面からの高さ20mmの流速を、計測地点に最も近い壁面の流速としていたため、実際の各壁面部の流速の差がグラフに表れたと考えられる。壁面部の流速をより正確に計測でき

ればグラフは1つの傾向に収束していくと考えられる。

これらの結果より、容器壁面温度が同じであれば内外周壁面、上下壁面に関係なく、熱流束は同様に流速から影響を受けることがわかった。

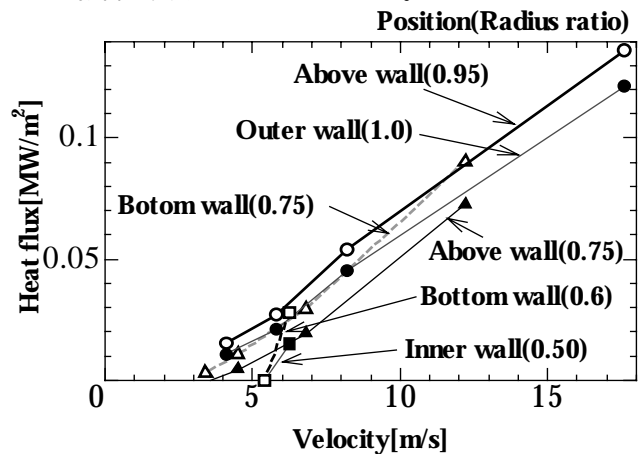


図11 流速と熱流束の関係.

6. 結論

実機をモデル化した旋回流容器を使用し、壁面温度均一な容器内に旋回流を発生させ、流速及び熱流束計測を行うことで、各計測箇所におけるガス流動と熱伝達の関係性を調査した。その結果以下の結論を得た。

- 1) 旋回流容器の改良を行うことで、これまでの最大流速の約5倍の流速を得た。
- 2) 火花追跡法を用いた計測装置を改良することで、容器内の流速分布を時間経過毎に計測できるようになった。
- 3) 内外周壁面部、上下壁面部の熱流束を比較した結果、容器壁面温度が均一であれば熱流束は側壁面、上下壁面に区別されることなく、流速に対応して同様の影響を受けることがわかった。

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) 石井，江見ほか5名；鋳鉄製燃焼室壁面への瞬時熱流束測定用薄膜形熱電対の開発 自動車技術会論文集，Vol. 33，Nb. 3，P61～，2007 5.
- 3) 小林ほか；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） 宮崎大学工学部紀要，第36号，2007.