

# 旋回流定容燃焼容器の設計と流動場の計測

友松重樹<sup>1)</sup>野崎真仁<sup>2)</sup>田坂英紀<sup>3)</sup>

## Design of Constant Volume Combustion Bomb with Swirling Flow and Measurement of Flow Field

Shigeki TOMOMATSU, Masahito NOSAKI, Hidenori TASAKA

### Abstract

One of the means to solve the environment problem is to improve of high degree of thermal efficiency in internal combustion engines. It is necessary to elucidate the relation between gas flow and combustion about thermal efficiency improvement. The purpose of this research is to evaluate flow field by developing the constant volume combustion chamber which was able to change the condition of mean velocity and turbulence intensity and to measure gas flow by LDV. Wide change of the combination of mean velocity and turbulence intensity became possible. Moreover, the flow with a peculiar point in the frequency was able to be produced consequently.

Key words: Constant Volume Combustion Bomb, Flow Field, LDV, Internal Combustion Engine

### 1. まえがき

内燃機関の熱効率向上を図るためには、ガス流動と燃焼との関係を解明する必要がある。しかし、内燃機関における燃焼室の内部構造は複雑であり、極めて解析が困難である。そこで、燃焼室の構造を簡略化し、かつ容積変化のない燃焼容器を用いることにより、現象を単純化する必要がある。また、ガス流動と燃焼の関係を解明するには、平均流速と乱れ強さを広い範囲で変更可能な装置が必要である。定容燃焼容器内におけるガス流動の変更を行うことは容易ではなく、ファンの形状や流路の格子だけでは平均流速と乱れ強さの条件を広い範囲で変更する事が困難であることが過去の実験より分かっている。そこで、平均流速と乱れ強さの条件の組み合わせが多く作り出せる定容燃焼

容器を開発し、流れ場に影響を与えない LDV(レーザドップラ流速計)によりガス流動計測を行うことで、定容燃焼容器内でどのような流れ場を形成しているかを評価することを研究目的とする。

### 2 定容燃焼容器概要

#### 2-1 定容燃焼容器

本研究で使用した定容燃焼容器概略図を図 1 に示す。定容燃焼容器は主室、副室の2つに区分することができる。主室はエンジンシリンダ内を仮定したものであり、容器側面には燃焼やガス流動の計測を行えるように、レーザ入射側と対面して平行な観測窓が設けられており、容器上面には火炎断面の撮影を行うための観測窓が設けられている。

主室寸法は内径 120mm、側方観測窓間距離 104mm、主室上面から下面までの高さは 120mm、容積は約 1260cm<sup>3</sup>となっている。側方観測窓寸法は幅×高さが 60 mm×70mm である。また、容器上面の可視化用観測窓には光学的に歪みの少ない石英ガラスを

1) 機械システム工学科助手

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

使用している。容器のレーザ入射窓に対して垂直方向にある側面にはプラグホールが片側に3個ずつ設けてあり、燃焼実験時に点火プラグや歪みゲージ式圧力インジケータ等を設置できる構造である。

副室は、主室の真下に位置し、内径120mm、深さ45mm、容積500cm<sup>3</sup>の円筒状になっている。副室内には、散乱粒子供給装置とガス流動発生装置を設置している。散乱粒子供給装置は、LDVによるガス流動計測時や、火炎断面撮影時にレーザシートを形成するために必要な散乱粒子を発生させるための装置であり、オイルを加熱することにより、オイルスモークを発生させる方法を用いる。また、副室側面には、吸排気口、水銀マンオメータの取り付け口がある。

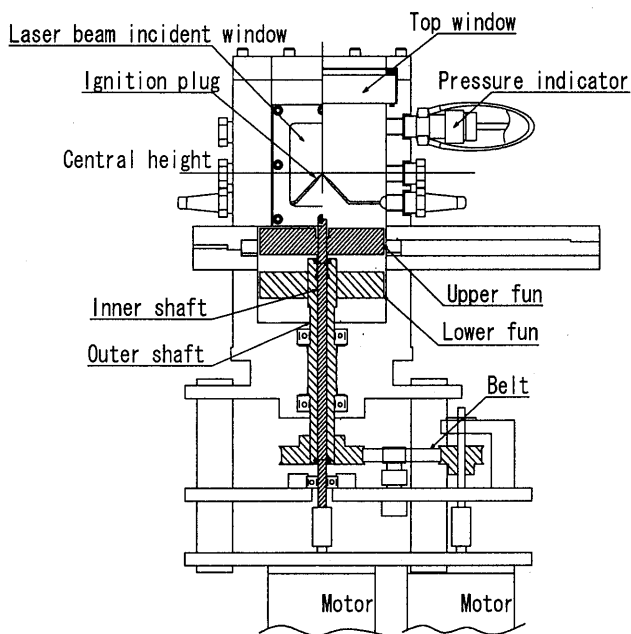


図1 定容燃焼容器概略図

## 2-2 ガス流動発生装置

本研究で、従来用いられていたガス流動発生装置は、モータ駆動による四枚羽根(以下ファン)により、旋回流を発生させることができる。また、ファン上方には、固定翼を設置できる構造になっている。ファン形状や固定翼を変えることにより、ガス流動を変更することを目的としている。しかし、目的の流れ場を作り出すことは容易ではなく、これまで数多くのファンや固定翼の検討が行われてはいたが、期待するほどの効果が得られなかった。

新たに設計・製作を行ったガス流動発生装置の概略図を図2に示す。従来のガス流動発生装置と比べ、

ファンが二段になっており、回転数を別々に制御できるのが特徴である。上段ファンは、固定位置を上下に変更できる構造である。また、上・下段のファンはそれぞれ内軸、外軸に固定されており、内軸は逆回転可能な直流モータにカップリングを介して連結されている。外軸は、ベルト駆動により動力を得ており、減速比2にすることで、安定した回転数を得ることができる。最高回転数は共に3500rpmであり、上・下段ファンの回転差は最高7000rpmとなっている。また、ファンの形状により流れ場を変更するため、ファンの交換を容易に行える構造になっている。また、燃焼時の漏れをなくすため、外軸、内軸にそれぞれOリングを設置する事で漏れへの対策を行った。

本研究では、新たに開発を行ったガス流動発生装置と従来のガス流動発生装置との相対的な比較を行う。また、比較の行いやすいノーマルファンを使用している過去の条件との比較を行うこととした。

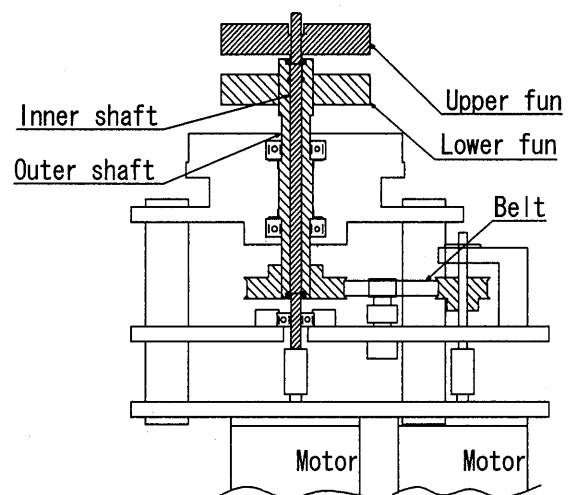


図2 ガス流動発生装置概略図

## 3 ガス流動測定方法

ガス流動測定には、周波数シフトシステムを併用したLDVを用いて行った。ガス流動測定システム概略図を図3に示す。容器周方向及び軸方向計測には前方散乱方式を採用し、容器半径方向の流速測定には容器底部に観測用窓がないため、後方散乱方式を採用した。測定方法として、定容燃焼容器の底部に設置してある散乱粒子供給装置によりオイルスモークを発生させ、ガス流動発生装置を使用し、オイルスモークを容器内に均一に分布するよう攪拌を行う。

その後、上・下段ファンをそれぞれ設定回転数で回転させている状態で、流速の測定を行った。1回の測定で取り込む流速データは、サンプリング周波数 20kHz (50μsec 間隔) とし、0.8192sec にあたる 16384 データを記録した。容器内におけるガス流動測定位置概略図を図4に実験条件を表1に示す。定容燃焼容器中心を原点としてレーザを入射する方をレーザ入射側とし、スライドバルブの位置する方向をスライドバルブ側とした。レーザ入射側の周方向流速を原点から45mmまで5mmおきに計測を行った。また、容器形状の影響を確認するため、スライドバルブ側の周方向流速を20, 40mmで計測した。

表1 実験条件

Direction of velocity	Measuring point (mm)
Circumferential	0~45
Axial	0~40, 45
Radial	0~40

Upper fan (rpm)	Lower fan (rpm)
0	1000
0	3000
0	3500
3000	1000
3000	2000
3500	3000
3500	3500

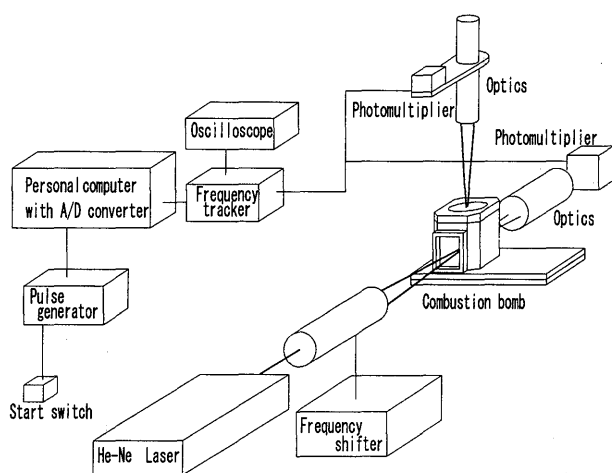


図3 ガス流動測定システム概略図

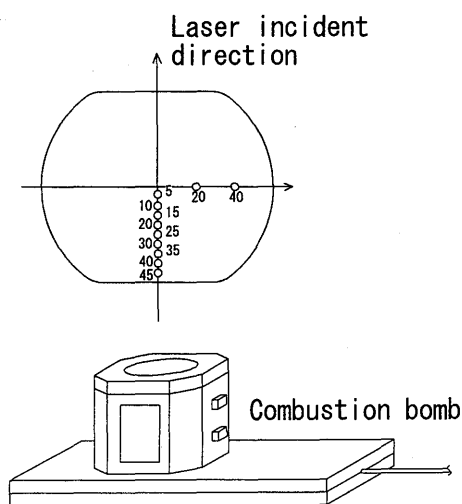


図4 ガス流動測定位置概略図

### 3-1 データの評価方法

本年度のガス流動計測は、ファン回転数が一定である定常状態での測定を行った。平均流速は、取り込んだ流速データの単純平均により算出した。ファンの回転数が一定である定常状態の流れ場では、流速データの取り込み時間においてほぼ流速値が一定であることから、1データごとにおける瞬時流速を測定した回数で平均し、取り込んだ流速データを単純平均することにより、平均流速とした。乱れ強さは瞬時流速と主流速の差のRMS値を20データで平均した。また、乱れ成分の評価方法として、FFTを用いた周波数解析を行った。サンプリング定理より離散時間信号のFFTにおいて、ナイキスト周波数は、サンプリング周波数の1/2であり、本実験におけるサンプリング周波数が20kHzであることから、ナイキスト周波数は10kHzとなる。FFTによるスペクトル推定は、データ長を長くすれば、その区間における全体としての周波数を検出するが、時間的に変化する周波数は正しく検出されにくくなる。しかし、本実験ではファン回転数がほぼ一定であるため、周波数が時間的に変化するような場ではないと考えられるので、サンプリング周波数20kHzで0.8192secにあたる16384データを取込んでいる。この場合、周波数分解能は約1.22Hzとなる。

4 流速測定結果

4-1 レーザ入射側周方向流速分布

図5(b)に上下段ファンの回転数をパラメータとしたレーザ入射方向の周方向平均流速の流速分布を示す。図において縦軸は平均流速、横軸は測定位置としている。レーザ入射側では、容器中心より35mm付近まで、ファン回転数を上げるとそれに伴い、平均流速が増加していることが確認できる。また、この区間においては、ほぼ直線的に増加しており、剛体渦を形成していると予想されるが、35mmから45mmにかけて容器側壁側の平均流速の増加率が低くなっている。原因として、容器側壁との摩擦の影響と、レーザ入射側には観測窓を設置しているため、容器内が完全な円筒になっていないことが周方向の流れに影響を及ぼし、平均流速が低くなっていると考えられる。

図6(b)に上下段ファンの回転数をパラメータとしたレーザ入射方向の周方向乱れ強さの流速分布を示す。図において縦軸は乱れ強さ、横軸は測定位置としている。乱れ強さに関しては、下段ファンのみが回転する場合、容器中心付近と容器側壁付近の乱れ強さは、ほぼ同じ値であるのに対し、上・下段のファンが回転する条件では、容器中心より20mmから30mmにかけて乱れ強さが高くなっており、乱れ強さが側壁付近においても高いことが確認できた。

また、軸方向、半径方向の流速は周方向の平均流速と比較すると低い値であり、周方向の流れが軸方向、半径方向の流れに対し支配的であることが確認でき、二段ファンの上・下段に回転数差をつけ回転させることで乱れ強さが大きくなることが確認できた。また、スライドバルブ側は、容器形状の影響は受けているものの、旋回流を壊すことなく流れ場を形成していることが確認できた。

4-2 従来のガス流動発生装置を用いた流速測定結果との比較

本研究において、従来のガス流動発生装置を使用した定容容器内でも、周方向流速が支配的であることが流速測定結果より確認できている。よって、支配的である周方向の平均流速、乱れ強さにて容器内ガス流動の比較を行い、開発を行ったガス流動発生装置による流れ場の評価を行った。

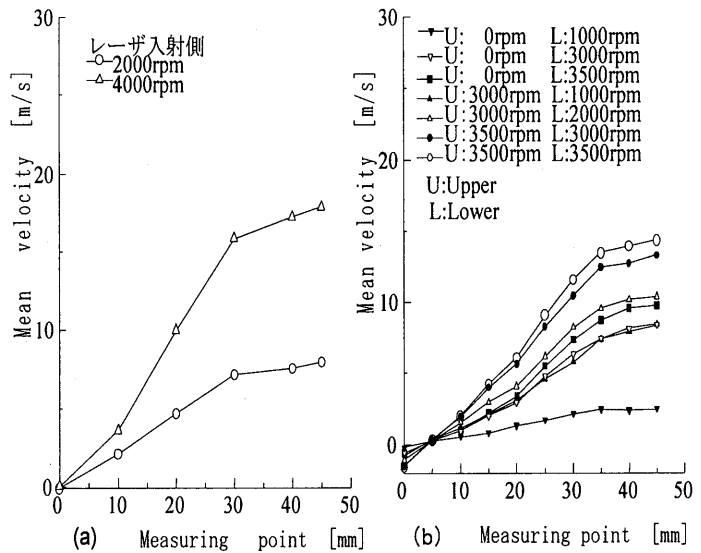


図5 周方向平均流速測定結果の比較

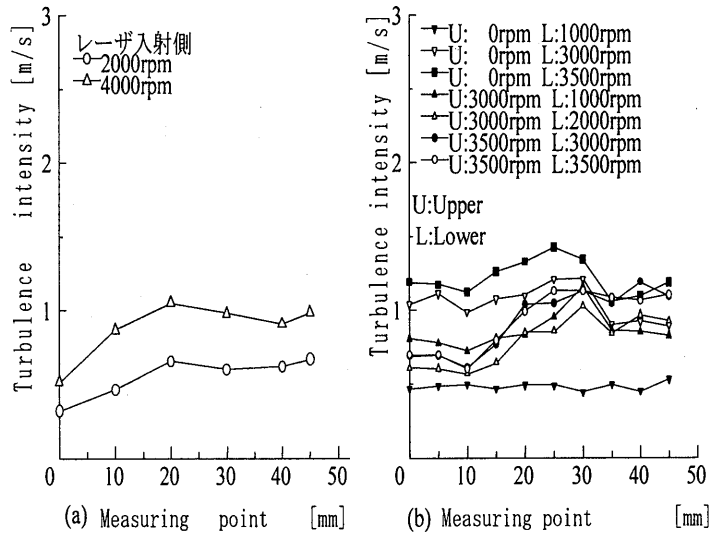


図6 周方向乱れ強さ測定結果の比較

従来のガス流動発生装置によるレーザ入射方向の周方向平均流速を図5(a)、本年度のガス流動発生装置によるレーザ入射方向の周方向平均流速を図5(b)に示す。図において、縦軸は平均流速、横軸は測定位置としている。両方の図より、容器中心から外側に向かって平均流速は増加する傾向にあり、ファン回転数が高くなると平均流速も増加することが分かる。従来のガス流動発生装置を使用した際の周方向平均流速の最大値は、ファン回転数 4000rpm で約 18m/s であり、本年度のガス流動発生装置を使用した際の平均流速の最大値は、上・下段のファン回転数

が共に 3500rpm の条件で 14m/s である。

従来のガス流動発生装置によるレーザ入射方向の周方向乱れ強さを図6(a)、本年度のガス流動発生装置によるレーザ入射方向の周方向乱れ強さを図6(b)に示す。図において縦軸は乱れ強さ、横軸は測定位置としている。従来のガス流動発生装置では、容器中心付近での乱れ強さは小さく、容器中心より 20mm から外側では、あまり変化が見られなかった。本年度のガス流動発生装置では、上・下段ファンの回転数を変えることにより、約 0.5~1.4m/s の間で乱れ強さを変更可能になっているのが分かる。

以上の流速測定結果より、平均流速に関しては、従来のガス流動発生装置との違いが見られなかったが、乱れ強さに関しては、広範囲で変更が行えたと考えられる。

図7に容器内ガス流動周方向の平均流速分布と乱れ強さの割合を示す。縦軸は乱れ強さ、横軸は平均流速とした。また、従来のガス流動発生装置のファン回転数 2000rpm, 4000rpm の流速測定結果と本年度のガス流動発生装置の流速測定結果を比較した。

本年度のガス流動発生装置によって作り出された流れ場を見ると、上段ファン 0rpm 下段ファン 1000rpm では平均流速と乱れ強さが共に小さい場を上段ファン 0rpm 下段ファン 3500rpm では平均流速が小さく乱れ強さの大きい場を形成できたことが分かる。また、上段ファン 3500rpm 下段ファン 3500rpm では、平均流速と乱れ強さが共に大きい場を形成できたことが分かる。ここで、従来のガス流動発生装置によって作り出された流れ場を見ると、平均流速が小さく乱れ強さの小さい場、または、平均流速が大きく乱れ強さの大きい場に位置していることが分かる。

従来のガス流動発生装置と本年度のガス流動発生装置の比較を行うと、従来のガス流動発生装置は、乱れ強さと平均流速が比例的であり、平均流速と乱れ強さの割合を変更するには至っていない。本年度のガス流動発生装置は、図より、平均流速と乱れ強さが広い範囲で分布していることが確認できた。以上のことより、本年度のガス流動発生装置を用いることで、

- (1) 平均流速が小さく乱れ強さも小さい場
  - (2) 平均流速が小さく乱れ強さが大きい場
  - (3) 平均流速が大きく乱れ強さの大きい場
- というように、平均流速と乱れ強さの組み合わせの条件を幅広く変更することができた。

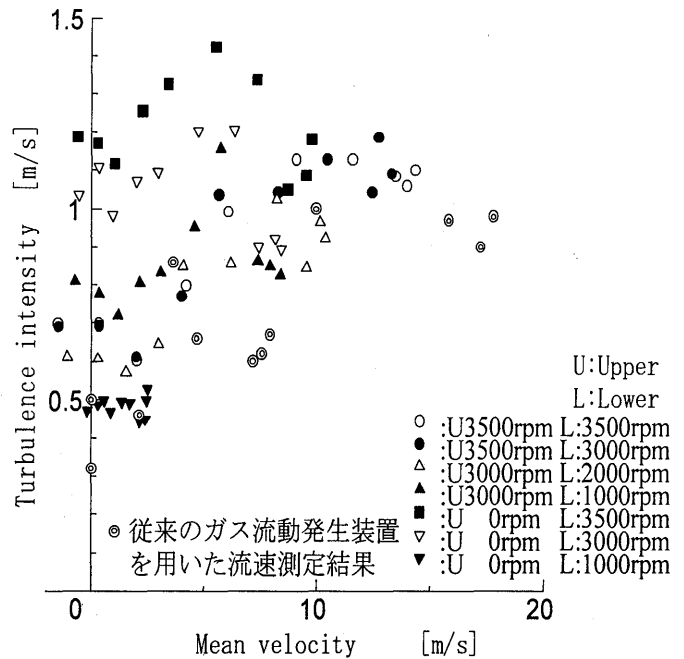


図7 周方向の平均流速分布と乱れ強さの割合

#### 4-3 乱れ周波数解析結果

ファン回転数の条件による乱れの周波数解析結果の代表的な例を図8, 9に示す。図において、上から順に測定位置 0, 10, 20, 30, 40, 45mm の周波数解析結果であり、縦軸に相対パワースペクトル密度、横軸は周波数となっている。この表示しているデータは、各回転数の条件ごとの、傾向を比較しやすいように 20 データでアンサンブル平均したものを表している。また、グラフからも分かるように 1000Hz 以上の乱れ成分については極めて小さいため、グラフには 1000Hz までの表示としてある。

上段ファン固定の条件では、周波数解析結果に違いをほとんど見ることが出来ないが、上段ファン 0rpm 下段ファン 3500rpm の条件と、上・下段ファンが回転している条件において特異な点があるが分かった。

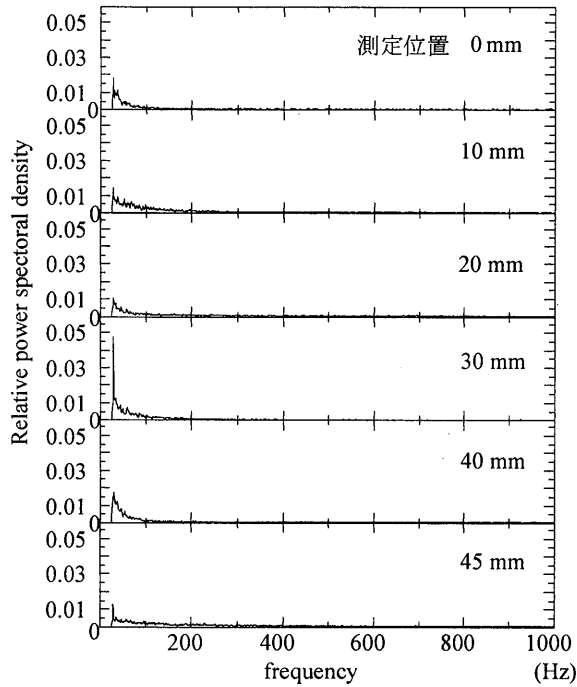


図8 上段ファン 0rpm 下段ファン 1000rpm

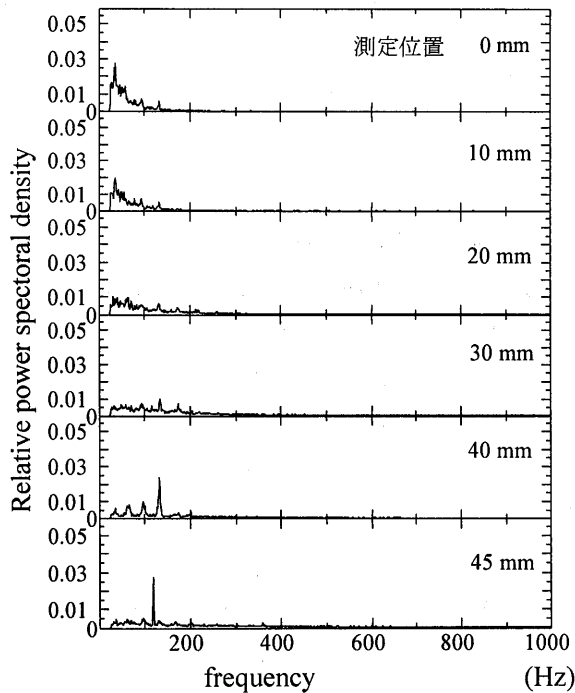


図9 上段ファン 3000rpm 下段ファン 2000rpm

## 5 結論

予混合気燃焼の基礎的な研究を行うため、新たに2段ファンを用いたガス流動発生装置を製作した。この定容燃焼容器内の流れ場をLDVにより計測し、以下の結論を得た。

- (1) 新たに開発を行ったガス流動発生装置は、従来の装置と比べて平均流速と乱れ強さの組み合わせの条件を幅広く変更することが可能となった。
- (2) また、このガス流動発生装置を用いて、結果的に周波数に特異な点を持つ流れを作り出すことができた。

## 参考文献

- 1) 加塩剛, 旋回流を伴う容器内予混合気燃焼の実験的研究(ガス流動計測結果と燃焼火炎の関連), 平成14年度宮崎大学工学部機械システム工学科卒業論文
- 2) 浜本ら他2名, 日本機械学会論文集, 火炎写真の解析による密閉容器内乱流予混合気火炎の研究, 54巻 504号 P2214, 昭和63
- 5) 古川ら他2名, 第39回燃焼シンポジウム, 乱流予混合火炎における火炎と流れの相互作用, A113, 2001年