

# 蛍光体を用いた高温場での二次元温度・速度同時計測法の開発

47-086689 内田 光則  
指導教員 染矢 聡 准教授

In order to improve an engine performance, it is important to understand the temperature and velocity field information in a flow field at high temperature such as a combustion chamber in the engine. In such the field, it has been hard to apply the conventional technique. A new combined velocity and temperature measurement approach is proposed, using a high speed camera, a single-pulsed UV laser and temperature sensitive phosphor particles (TSParticles). TSParticles, the powders of rare earth-doped ceramics are utilized as tracer particles of particle image velocimetry (PIV). The purpose of the present study was to establish this technique in a flow field at high temperature. In the present report, thermal properties of TSParticles were investigated. At first the phosphor material was painted on the solid wall in an engine cylinder, and the instantaneous temperature was measured. Then, the gas velocity-temperature measurement in an engine cylinder was tried by this technique. 2-D velocity and temperature in an engine cylinder was visualized for the first time.

Key words: Combined measurement, TSP, PIV, phosphor, high temperature

## 1 緒言

環境問題や石油資源の枯渇問題を緩和しうる手法の一つとして、高効率かつ低公害な内燃機関を実現する燃焼方式である予混合圧縮自己着火 (Homogeneous Charge Compression Ignition : HCCI) 燃焼が注目されている。この燃焼方式は、空気と燃料の予混合気を燃焼室内に導入し、ピストンの圧縮によって高温・高圧とすることで多点同時に自己着火させる機関であり、その実用化が求められている。しかし、高負荷時にノッキングが発生し、運転領域が限られるという問題を抱えている。ノッキングの回避のためにはエンジン筒内の圧力上昇率を低減させる必要があり、これには温度成層化が効果的である。温度成層化によって、意図的にエンジン筒内ガス温度を不均一にし、ガスの自着火のタイミングを空間的にずらすことで圧力上昇率を緩和させることができる。従って、着火直前の温度分布を把握することが重要である。また速度場情報を同時に得ることで、エンジン筒内ガス流動が温度成層化に与える影響も検証することができる。しかし、エンジン筒内の二次元断面温度・速度を同時に計測した例はまだない。

そこで本研究では、温度依存性を持った燐光を発する無機質蛍光体を用いた温度計測法に着目し、高温環境でも利用できる感温性無機質蛍光体を PIV のトレーサ粒子として適用することで、LIF や赤外線サーモグラフィ等の従来手法では困難であったエンジン筒内の任意二次元断面温度・速度の同時計測を可能とする新手法の開発を行った。この手法は1台の高速度カメラを利用したシンプルな計測系で、任意の二次元断面の温度場・速度場を同時に、長時間・空間分解能で計測できる。また、極低温から約1300°Cまであらゆる作動流体に適用できるといった特徴を持っている。そのため、エンジン筒内の温度・速度同時計測に限らず、蒸気タービン内の流動など従来手法では可視化が困難であった高温環境場での温度・速度同時計測を可能とする手法として期待される。

本研究ではまず、高温で応答性の高いであろう蛍光体を選定し、その燐光強度、寿命、スペクトル変化を取得し、データベースの構築を行った。次に、高温場での温度計測手法確立のために、エンジン筒内の壁面温度計測を行った。本研究では、励起光強度のむらに左右されない、燐光寿命法を用いた温度計測を採用した。この手法により、筒内壁

面瞬時温度分布を計測し、最適な解析手法の検討や精度の検証を行った。そして、最後に PIV と燐光寿命法による温度計測法を組み合わせた高温流動場での温度場・速度場の同時計測を行い、エンジン筒内ガスの二次元温度・速度情報を可視化した。

## 2 燐光特性調査

蛍光体を用いた高温場での温度計測では、使用する蛍光体により発光強度やスペクトル、減衰率、温度応答域など、燐光特性が大きく異なるため、計測を行う上で燐光特性を十分に把握しておく必要があり、温度計測を行う前に最適な蛍光体を選定するためのデータベースを構築する必要がある。そこで本研究ではより高温条件でも温度依存性を示し、汎用的に利用できる蛍光体について調査し、その中から、MFG(3.5MgO・0.5MgF<sub>2</sub>・GeO<sub>2</sub>:Mn<sup>4+</sup>)等の13種類の蛍光体について、その燐光寿命・スペクトル変化について調査した。その結果、MFGは広範囲(100~800°C)、特に高温域で温度応答性が高く発光強度も高いためエンジン筒内ガス温度・速度同時計測に、Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>S:EuSm, La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>S:Eu はエンジン筒内壁面の予測温度域である100~180°Cで温度応答性が高いため壁面温度計測に、それぞれ適用することとした。

## 3 エンジン筒内壁面瞬時温度計測

### 3.1 寿命法による温度解析

本項では、高速度カメラを用いた寿命法による温度計測の原理について説明する。まず、高速度カメラで撮影した燐光輝度の変化の様子を16×16 pixelsの領域に区切り、各領域を75%ずつオーバーラップさせて輝度の平均値を算出した。こうして得た画像数枚の輝度比の変化から、減衰係数 $\tau$ を求めた。燐光減衰を表す近似式には、一般的に指数関数が用いられるが、燐光減衰は複数の発光プロセスを持つために、必ずしも簡単な関数とはならない。従って、燐光減衰をできるだけ詳細・正確に近似することが、温度解析の精度に大きく影響する。減衰初期では単純指数関数からのずれが大きいため、本研究では定数係数 $C$ を加えた式(1)を用いて、燐光減衰にフィッティングを行い、減衰係数 $\tau$ を求めた。ここで、 $I$ はある時刻 $t$ にセンサが感じる総燐光強度、つまりあるフレームでの16×16 pixelsの領域の平均輝度値、 $I_0$ は温度解析に用いる1フレ

ーム目での  $16 \times 16$  pixels の領域の平均輝度値である。

$$\frac{I}{I_0} = C \exp(-t/\tau) \quad (1)$$

式(1)より、温度を  $10^\circ\text{C}$  ずつ変化させながら、温度一様場の燐光減衰を撮影し、各温度場での減衰係数  $\tau$  を求めた。次に、温度と減衰係数の関係を表す校正曲線を作成し、これを適切な校正関数で近似する。La<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S:Eu、Y<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S:Eu はどちらも三次式で決定係数が高く近似できたので、校正関数には三次式を用いた。そして、温度を算出したい画像の減衰係数を同様にして求め、三次近似で得た校正関数に当てはめ温度を算出した。

### 3.2 実験装置及び測定方法

単気筒可視化エンジンを使用し、エンジン筒内に挿入したアルミニウムターゲットブロックの表面瞬時温度の計測を行った。この可視化エンジンには吸気ポート部に気体加熱ヒータが設置されており、吸気加熱を行える。燃焼室側部には、内部を観察するための石英ガラス製の観察用サイドウィンドウを設置し、この観察ウィンドウの正面（筒内反対側）にアルミニウムターゲット（直径 24mm）を挿入した。このターゲットは、中心に熱電対が取り付けられており、計測値と本手法による算出結果を比較した。ターゲットの表面には、接着剤に混入させた蛍光体を塗布し、観察ウィンドウ側から UV レーザー (355nm, 80mJ/pulse) を一様に拡散させて照射し、燐光減衰の様子を高速カメラ (Photron Ltd. Fastcam S.A.1.1) で撮影した。蛍光体は La<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S:Eu、Y<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S:EuSm の二種類を使用した。本稿では誌面の都合上、La<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S:Eu の結果についてのみ示した。撮影は、エンジン回転数とタイミングが合うように励起光源、カメラを同期させ、12.5Hz で動作させた。高速カメラの撮影速度は 40,000fps とし、電子シャッターは用いずに各フレームの露光時間は 25 $\mu\text{s}$  とした。フレーム間の撮影デッドタイムは約 150ns であり、蛍光体を励起する 20 $\mu\text{s}$  前から撮影を開始し、連続して 20 枚の画像を取得した。これを 1 サイクルとし、一条件につき 300 サイクル、合計 6000 フレームの画像を取得した。画像は 4096 階調 (10 ビット) の輝度値情報を持ち、512  $\times$  256 pixels の空間解像度で、観察領域はターゲットの約 3/4 を含む、広さが 30  $\times$  15mm<sup>2</sup> に相当するエリアである。この 300 サイクルの画像を用いて温度場解析を行った。

実験は、校正試験、エンジン運転時の瞬時温度場計測に分けて行った。校正試験では温度定常状態を作り出し、80 $^\circ\text{C}$  から 160 $^\circ\text{C}$  の範囲で 10 $^\circ\text{C}$  ずつ撮影を行い、La<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S:Eu を用いて校正用データを取得した。また、事前に取得した外校正データを使用しての温度場解析も行った。瞬時温度場計測では、エンジン回転数  $N_e[\text{rpm}] = 1500$  とし、撮影クランクアングル、エンジン運転条件（吸気加熱の有無（室温、200 $^\circ\text{C}$ ）、スロットル開度）を変えて撮影を行った。スロットルは負圧開閉式であり、 $P_b[\text{mmHg}]$  はスロットルの開閉度合いを示す指標である。（スロットル全開時は  $P_b = 0$ 、全閉時は  $P_b = -490$ ）。

### 3.3 計測精度の比較

減衰係数を利用する寿命法では、 $I_0$  で輝度を規格化することにより、励起光強度の時間・空間的な非一様性による影響を排除できる。しかし、高速カメラの CMOS セン

サの非線形性やセンサノイズは減衰係数の算出結果に影響を与える。また、励起された蛍光体は接着剤成分にもエネルギーを与えながら基底状態にもどるため、場所による接着剤濃度の不均一性も、減衰係数の算出結果に影響を与える。よって、より正確な温度計測を行うためには、温度一様と仮定している校正画像もエリア毎に減衰係数を算出する必要がある。そこで、計測系を瞬時温度場計測実験と同じ条件にした、その場校正のデータを用いて、本手法による温度計測の精度評価、その場校正と外校正との精度の比較等を行った。外校正データではエンジン筒内の実験とは対応する空間が異なっている。そこで、温度一様場では減衰係数はどの領域をとっても一様であると仮定し、画像全領域で同じ係数を持った校正関数を使用した。つまり、外校正では場所によるピクセルごとの非線形性や接着剤濃度の不均一性を考慮していない。Fig.1 には、その場校正と外校正との減衰係数の違いを示した。図の横軸は温度の逆数、縦軸には減衰係数の逆数を対数で表した。この表記法はアレニウスプロットと呼ばれ、温度と減衰係数の関係を示す時に一般的に用いられる。図中の黒線がその場校正から得た減衰係数、赤角(■)は 40,000fps で撮影した事前実験より得た減衰係数、青丸(●)は PIN フォトダイオードより得た減衰係数を示している。図を見ると、赤角と青丸は良く一致していることがわかる。その場校正では、センサまでの光路に観察ウィンドウを挟んでいるが、赤角と青丸にはセンサまでの光路を遮るものは何もなかった。このことから、その場校正と外校正での減衰係数のずれは、実験時の光路の影響によるものが最も大きいと考えられる。一方、その場校正から得た減衰係数は、赤角に補正項として定数を加算したもの（図中赤線）と比較的良く一致した。ここで行った補正は、ある温度に対応する減衰係数を補正点とし、その補正点を通るように校正関数の定数係数部分をシフトさせたものである。

解析に使用する画像枚数が計測精度に与える影響についても調査した。前述したように、燐光減衰が完全に単純指数関数に一致しているわけではないので、減衰係数の算出に用いる画像枚数、つまり、測定の時間分解能によって減衰係数の算出結果が変わる。高い時間分解能で瞬時温度計測を行うためには、減衰係数の算出に用いる画像枚数は少ない方がよい。そこで、画像使用枚数  $n = 2, 4, 10$  とした場合の計測精度の比較を行った。計測精度の検証は、校正関数を算出するために用いた既知の温度場 (80 $\sim$ 160 $^\circ\text{C}$ ) に対して、その場校正で得た三次近似の校正関数を用いて温度場解析を行い、その誤差を比較した。計測精度は、90 $^\circ\text{C}$  のときに  $n = 10$  の算出結果が -9.65 $^\circ\text{C}$  の誤差と大きかった。これは、 $n$  を大きくした時に、比較的低温側では減衰係数の変化が小さいため、校正関数からの減衰係数のわずかなずれが大きな誤差になってしまったためである。減衰係数の変化の大きい高温側では、どの場合でも高い精度で温度を算出できていた。 $n = 2, 4, 10$  の中では、 $n = 4$  のときに 80 $\sim$ 160 $^\circ\text{C}$  の全範囲を通じて最も誤差が小さく、その誤差は -2.47 $\sim$ 1.02 $^\circ\text{C}$  であった。空間標準偏差も 0.37 $^\circ\text{C}$  と小さく、高い精度で温度を算出できている。エンジン筒内の計測ではクランク回転角 1deg. の分解能が要求され、時間分解能で表すと約 100 $\mu\text{s}$  (エンジン回転数  $N_e = 1500$ ) に相当する。 $n = 4$  で温度場解析を行うと、この要求時間分解能を満たし、計測精度も高い。よって、減衰係数の算出に使用する画像枚数は 4 枚とする。

解析使用枚数が決定したところで、次に、その場校正と外校正の計測精度の比較を行った。外校正では、低温側で誤差が大きくなった。この結果は、Fig.1 に示すように、低温側では減衰係数の変化率が小さいために、本来の校正曲線とのわずかなずれでも温度算出結果に大きく影響してしまうためである。減衰係数の変化率の大きい高温側では誤差が小さくなっている。全体の誤差は、外校正を用いた場合、 $-9.513\sim 7.103^{\circ}\text{C}$ であり、その場校正よりも誤差が大きくなっている。また、空間標準偏差も $3.840^{\circ}\text{C}$ となり、その場校正の結果よりも増大している。これは、前述したように、外校正では場所によるピクセルごとの非線形性や接着剤濃度の不均一性を考慮していないためである。より正確な温度計測を行うためには、その場校正による校正関数の算出が必要である。次に、類似の先行研究と計測精度の比較を行い、まとめたものを Table. 1 に示した。これらの類似研究と比較すると、本研究のその場校正を用いた算出結果は、クランク角  $1\text{deg.}$ の時間分解能で4枚と少ない画像枚数、小さい画像処理負荷で、計測精度も高い。他の研究では外校正データを用いて温度評価を行っているのに対し、本研究では、エリアごとに校正関数を作成した点や、少ない枚数ながらもある程度の露光時間で画像を取得し、比較的 SN 比の高いデータを得た点などの複数の工夫が、表の結果につながったものと考えられる。

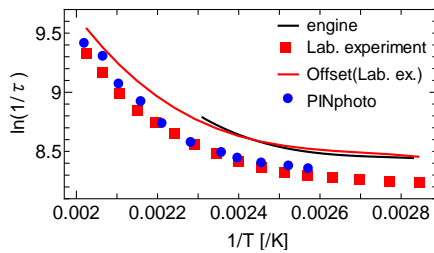


Fig. 1 comparison between on-site calibration and external calibration

Table. 1 Comparison with previous researches

	蛍光体	撮影速度 / 解析使用枚数	時間分解能	計測精度 [°C]	温度レンジ [°C]
その場校正	La <sub>2</sub> O <sub>2</sub> S:Eu	40kfps / 4	100μs	-2.47~1.02	80~160
外校正	La <sub>2</sub> O <sub>2</sub> S:Eu	40kfps / 4	100μs	-9.51~7.10	80~160
Kissel <sup>[2]</sup>	MFG	150kfps / 15000	100ms	±1~5.5	27~627
Omrane <sup>[2]</sup>	MFG	10kfps / 8	1.3ms	±1~5	25~600
Khaid <sup>[3]</sup>	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :Eu	1Mfps / 100	100μs	±80	300~700

3.4 温度場解析実験結果

Fig.2 にモータリング運転時の温度解析結果を示した。この結果は La<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S:Eu を用いて、その場校正より得た校正関数を用いて解析したものである。黒丸(●)は Pb=0, 吸気加熱なしの温度解析結果、青丸(●)は Pb=-490, 吸気加熱なしの温度解析結果、赤丸(●)は Pb=0, 吸気加熱あり (200°C) の温度解析結果である。この図の黒丸に注目すると、圧縮行程に入り徐々に温度が上昇していき、-30deg.ATDC を過ぎたところで温度が減少し始めている。その他の運転条件でも、定性的に同様の結果が表れている。薄膜熱電対の参考値と比較してみると、薄膜熱電対では温度変化幅は最大でも 5°C 程度であるが、解析結果は最大で 30°C 程度変化している。また、温度の時間応答も、クランクの角度変化に対して解析結果の方が早く応答して

いることがわかる。本手法では、ガスに直接接触している表面の燐光を計測して温度を算出しているため、温度の緩和時間はほとんど考えなくてよい。一方、薄膜熱電対は 10μs の時間分解能を持つが、蛍光体塗布面の背部に設置されており、蛍光体塗布厚の影響で若干の温度緩和時間が生まれる。今回、蛍光体の塗布に際して、特に塗布厚の制御は行っておらず、およそ 0.1~1mm の厚さであった。また、接着剤と混合させた蛍光体塗布膜は熱伝導率が金属に比べて小さく、そこで生じる温度勾配の影響も無視できない。これらの影響により、温度解析結果と薄膜熱電対計測値を比較した際に、薄膜熱電対では温度変化率が小さく、時間遅れも大きくなったと考えられる。数値解析では瞬時壁面温度の計算は境界条件の設定が難しく、事実上困難であり比較を行えなかったが、以上の理由を考えると、本手法によって妥当な瞬時温度を算出することができたと考えられる。運転条件による違いについて見てみると、スロットルを絞ることにより壁面温度が下がっていることがわかる。また、吸気加熱をすることで壁面温度も上昇している。これらの結果は薄膜熱電対による計測値と定性的に一致している。スロットルの開閉による温度の変化は、Pb=-420 のときは、Pb=0 時よりも空気流入量が減るため筒内圧力が減少し、空気密度低下による気体と壁面の間の熱伝達係数の減少が影響したと考えられる。

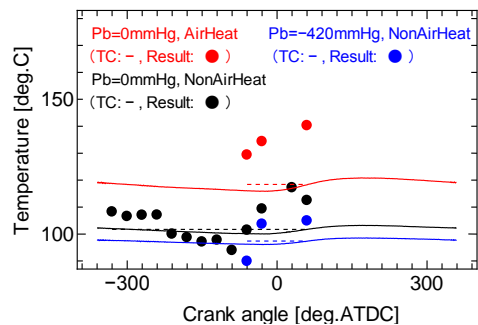


Fig. 2 Instantaneous temperature

4 エンジン筒内ガス温度・速度同時計測

エンジン筒内ガス温度・速度同時計測は、前章と同じ可視化エンジンを用いて、回転数やスロットル開度などのエンジン運転条件を変化させ、Fig.3 に示すように垂直断面、水平断面の2種類の撮影を行った。

Fig.4 は、上死点の垂直断面で Ne=700, 吸気加熱を行わずにスロットル開度を (a)Pb=-490, (b)Pb=-300, (c)Pb=0 と変化させて撮影した解析結果を示している。図中のカラーコンターは、青から赤に変化するに従いガス温度が高温になっていることを表している。また、ベクトルは速度情報を示している。図中の速度ベクトルをしてみると、いずれの条件でも縦旋回流が確認できた。Fig.4(a)から(c)を比較すると、空気流入量が多い(c)がより高温で流速が小さい。筒内ガス温度は、筒内壁面の温度境界層を除くエンジン筒内中心部のガスは断熱変化と考えられ、可逆断熱の式(2)で推算できる。

$$T_{gas}(t_i) = T_{gas}(t_{i-1}) \left( \frac{P(t_i)}{P(t_{i-1})} \right)^{\frac{n-1}{n}} \quad n = \frac{\ln(p_0/p_1)}{\ln(V_0/V_1)} \quad (2)$$

ここで、 $t$ は圧縮開始からの時間、 $n$ はポリトロップ指数(断熱指数)であり初期圧力 $p_0$ 、体積 $V_0$ と、上死点での圧力 $p_i$ 、体積 $V_i$ より運転条件ごとに計算した。 $T_{gas}(t_i)$ は $t_i$ 時における筒内ガス温度、 $P(t_i)$ は $t_i$ 時における筒内ガス圧力である。垂直断面実験時の筒内圧力履歴と吸気時初期温度から式(2)により算出した推算値を Fig.6 に示した。この図を見ると推算値でも空気流入量の変化に応じてガス温度が変化している。温度の変化は、筒内圧力・吸気温度の実測値から算出した推算値と、解析結果で同じ傾向が見られ、本手法により妥当な温度場が得られていることがわかる。また、流速が低減したことは、ベルヌーイの定理より、内圧の上昇によって流速が低減されたと考えられる。

Fig.5は上死点の水平断面温度・速度分布を示しており、図中(a)は $Ne=700, Pb=0$ 、(b)は $Ne=1500, Pb=0$ の吸気加熱を行わないモータリング運転時の解析結果である。回転数の違いによっては通常温度の違いはほとんど表れないが、結果は(b)がより高温で流速も大きかった。図中(b)は、吸気加熱を試した後に行ったため、ガスの初期温度が高く(50°C)、初期温度の違いにより推算値でも同様の結果を得た。このことから内部温度に応じた解析結果が算出できていることがわかる。速度の増大は、エンジン回転数が上昇し筒内の乱流強度が増大したことで水平方向成分の速度も増大したためである。また、筒内では縦旋回成分が強く、横旋回成分は小さい。Fig.4, Fig.5の速度解析結果からもこの特徴が確認できた。

Fig.6には式(2)より推算したガス温度と、本手法による温度解析結果の筒内中心部付近の平均ガス温度を示した。本手法による解析結果と式(2)より算出したガス温度はずれが大きいが、本実験では筒内ガスの温度一様場を作り出すことができなかつたため、校正関数の補正点が取れなかつた。そこで、補正を行わずに外校正で得た校正関数を適用したため、絶対的な温度にずれが生じているが定性的な評価は行える。また、式(2)より算出したガス温度も初期温度の取り方により算出結果が変わるので、必ずしも正しい筒内ガス温度を算出できているとはいえないが、定性的に比較を行う上では十分参考にできる結果である。この図を見るとクランクアングルの違いによって温度が変化していることがわかり、瞬時温度が算出できていることがわかる。

### 5 結論

本研究では、無機質蛍光体を用いた燐光寿命法による温度計測と PIV を組み合わせた高温流動場での温度・速度同時計測を可能にする新手法の開発を行った。本手法による計測精度は、瞬時壁面温度計測では $-2.47 \sim 1.02^\circ\text{C}$ の誤差で瞬時温度を算出することができた。エンジン筒内ガス流動の温度・速度同時計測では、運転条件やクランクアングルの変化に応じて定性的に正しい温度・速度算出結果が得られ、エンジン筒内の二次元断面温度、速度の計測に初めて成功した。

### 文献

- (1) Kissel T., Baum E., Dreizler A. and Brubach J., , *Appl. Phys. B*, Vol.96(2009), pp. 731-734
- (2) Alaa Omrane, Frederik Ossler, Marcus Alden, *Exp. The. Flu. Sci.*, 28, pp.669-676 (2004)
- (3) A.H.Khalid, K.Kontis, *Meas. Sci. Tech.*, Vol.20 (2009), Paper No. 025305

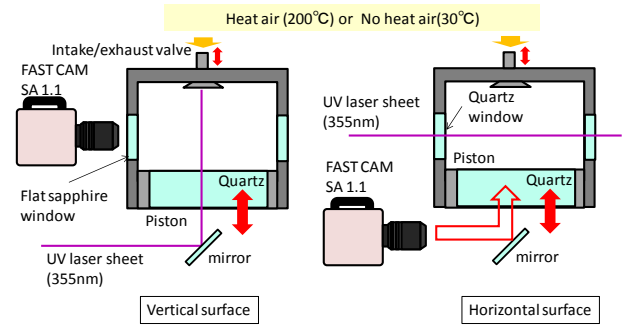


Fig. 3 Experimental apparatus

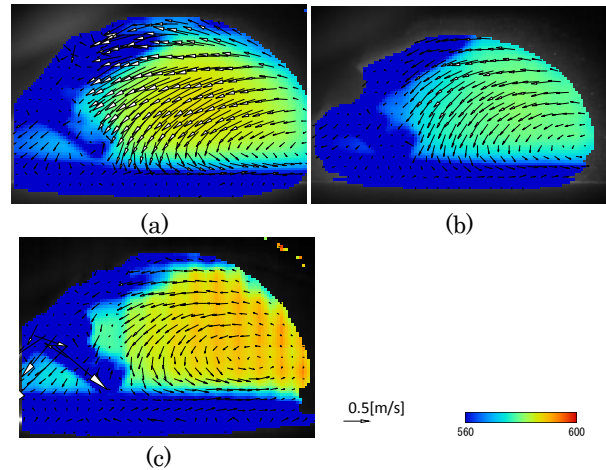


Fig. 4 Temperature-velocity distribution at TDC on the vertical surface ((a) $Ne=700, Pb=-490$ , (b) $Ne=700, Pb=-300$ , (c) $Ne=700, Pb=0$ )

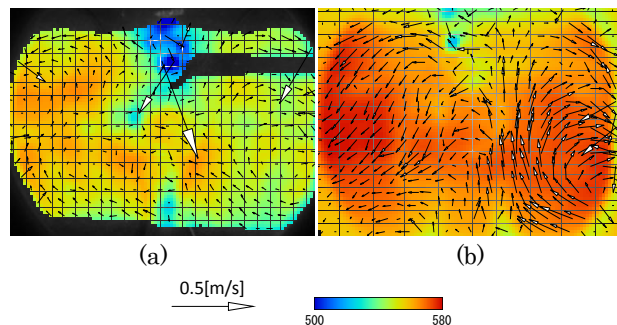


Fig. 5 Temperature-velocity distribution at TDC on the horizontal surface ((a) $Ne=700, Pb=0$ , (b) $Ne=1500, Pb=0$ )

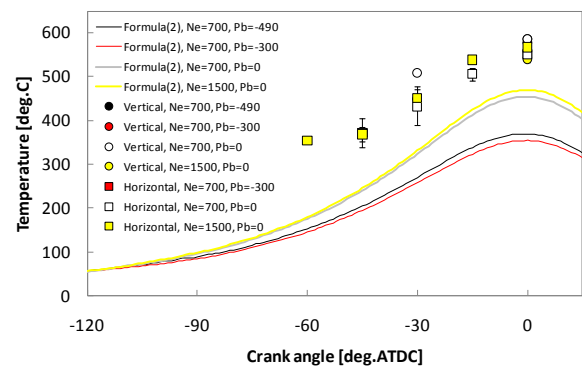


Fig. 6 Respective average gas temperature