
上海交通大学（中国） 研修報告書

二色法 PIV を用いた噴霧流れと霧困気導入流れの同時計測

工学研究科 機械システム工学専攻 嶋崎 汀

1. はじめに

2015年8月31日から同年9月25日の間、中国の上海交通大学にて研究を行った。以下にその報告内容を示す。

2. 共同研究テーマ

上海交通大学では、直噴ガソリンエンジンにおける燃料噴霧の挙動についての研究を行っている。今回は、それらの研究の一つである噴霧とその周囲の外気の流れ場を同時に測定する二色法PIVの実験を行った。また、自分の大学にて行っている実験への適応性についても議論を交えた。

3. 共同研究スケジュール

8月30日 出国
8月31日～9月25日 研究、プレゼンテーション
9月27日 帰国

4. 共同研究派遣先の概要

大学名: 上海交通大学

所在地: 中国 上海

指導教員: 許 敏

5. 共同研究内容

5.1 背景・目的

現在までの自動車産業は、ガソリン車とディーゼル車を中心に私たちの生活を大きく支えてきた。しかし近年自動車産業は二つの大きな問題を抱えている。一つ目は大量の二酸化炭素排出による地球温暖化の問題である。この問題を改善すべく、1997年に世界各国が協調し地球温暖化の防止に取り組むため、気候変動枠組条約第3回締結国会議(地球温暖化防止京都会議,COP3)が開催され、温暖化の原因の一つとなっている二酸化炭素などの温室効果ガスを2008年から2012年の期間中に、先進国全体で1990年に比べて平均で5.2%削減する目標が設定された。これにより、自動車産業は二酸化炭素の排出源の一つである自動車の燃費規制を強いられることとなった。二つ目は自動車に搭載される内燃エンジンに必要とされるエネルギー源の枯渇問題である。近年、経済発展著しい、新興国々の自動車の重要が急激に伸びている。2011年において自動車所有台数世界一はアメリカで、2億4100万台で、二位が日本の7600万台であり、そして中国はその日本に次いで2009年で6280万台である。これは78年の136万台から46倍に増えているということになる。そして、2020年までには2億台になると見込まれている。このまま自動車台数が増え続けると、この20年の間に石油生産量はアメリカ、中国の自動車の石油消費に追いつかないだろうと言われている。このため、エネルギー源問題への対応、排ガス規制がより厳格化され、今後さらなるエンジン性能の向上が求められている。

直噴ガソリンエンジンに用いられる筒内直接噴射式では、吸気行程または圧縮行程に燃料をシリンダ内に直接噴射する。この噴射方式の利点は成層混合気によって安定した燃焼を実現し、エンジンの燃費向上、高トルク出力など様々な性能を改善することが可能な点である。また、均質混合気の形成もでき、必要に応じてこれらの混合気形成を切り替えることができる。このような利点があげられる中、一方で筒内直接噴射式では燃料と空気との混合をシリンダ内で行うため、混合気がシリンダ壁面やピストンの頂面に衝突しやすく、また予混合燃焼と比べ、均質混合気の形成が難しいなどの欠点がある。燃料付着低減のための混合気のコントロールが必要となる。よ

って、成層混合気形成における燃料噴霧と筒内空気流動の関係性の解明は非常に重要である。そこで、本研究では噴霧とその周囲の外気の流れ場を同時に測定する二色法 PIV の実験を行った。また、自分の大学にて行っている実験への適応性についても議論を交えた。

5. 2 PIV 計測

種々ある PIV 測定法のうち、本研究で用いたダブルフレーム相互相関 PIV の基本的な測定原理について述べる。

PIV 法の原理を図 2. 16 に模式的に示す。流れに微細なトレーサ粒子 (tracer particle) を混入させ、これをパルスレーザなどの光源で瞬間的にシート状に照明する。照明は流れの面内で少なくとも 2 時刻 (時刻 t_0 と時刻 t_1) で行われる。トレーサ粒子からの散乱光は、CCD 素子などの撮影装置を介して記録媒体に 2 時刻の瞬間的な粒子画像として記録される。連続する 2 時刻の画像上のトレーサ粒子像からその画像上の移動量 ΔX を求めこれと画像入力の時間間隔 $\Delta t (=t_1 - t_0)$ および画像の変換係数 (conversion force) α とから、流れ空間の局所速度 u を次式のように求める。

$$u = \alpha \frac{\Delta X}{\Delta t} \quad (2. 1)$$

ここに、画像の変換係数 $\alpha = (\alpha' / M)$ で与えられる。M は撮像系の横倍率 (magnification) で、 α' は単位換算係数である。このとき流れ空間のトレーサ粒子は局所の流速で流れと共に移動すると仮定する。これが PIV の速度計測の基本原則である。

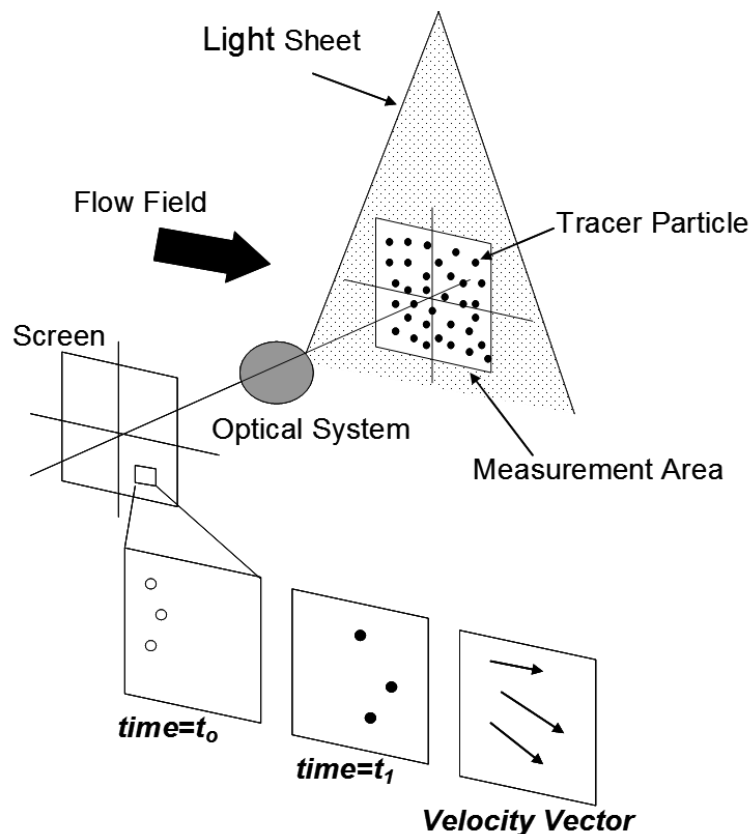


Fig 1. Principle of PIV.

二枚の画像の取得には図 2. 17 に示すようにカメラの連続フレームを挟むように各フレームの前後にパルス照明をするフレームストラドリング (frame straddling) という方法が用いられる.この方法では, 二枚の画像の時間間隔をレーザの発光間隔に依存させることができる. なお, 照明とカメラの同期はシンクロナイザ (synchronizer) によってとることができる.

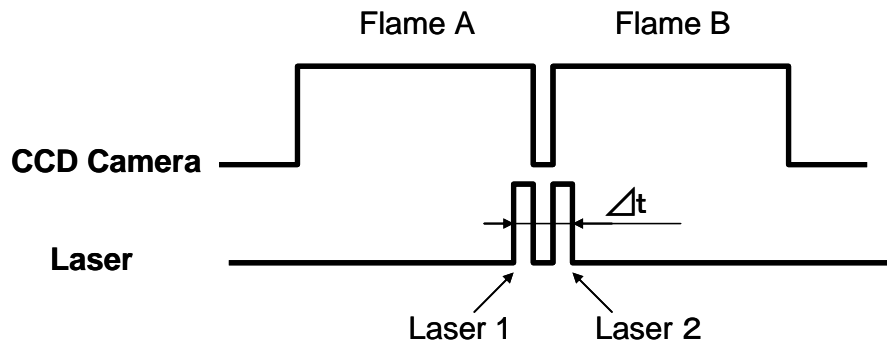


Fig 2. Principle of PIV.

5. 3 二色法 PIV

二色法 PIV では, 高速度ビデオカメラの先端に Doubler という光学装置をとりつけ, 光源を YIF レーザとして定容容器内に蛍光染料をまくことで, 噴霧の流れ場と周りの外気の流れ場の同時撮影を可能にする. まず, YIF レーザにより得られる噴霧のミー散乱による波長を獲得し, 次に, レーザの波長をほとんど吸収する蛍光染料の波長を獲得する. それぞれの波長は異なるため, それを二枚のフィルタ (バンドパスフィルタ, ロングパスフィルタ) を取り付けた Doubler を用いて, 片方のフィルタで噴霧の流れ場を計測, もう片方のフィルタで外気の流れ場を計測する. 計測した後は, Davis ソフトウェアを用いて分析し, それぞれで得られた流れ場のイメージ画像を合わせこんで二つの流れ場を導き出す. それにより得られたデータから, まずは外気の流れ場に注目してそれらの流れが噴霧によってどのように影響されているのかを調査する.

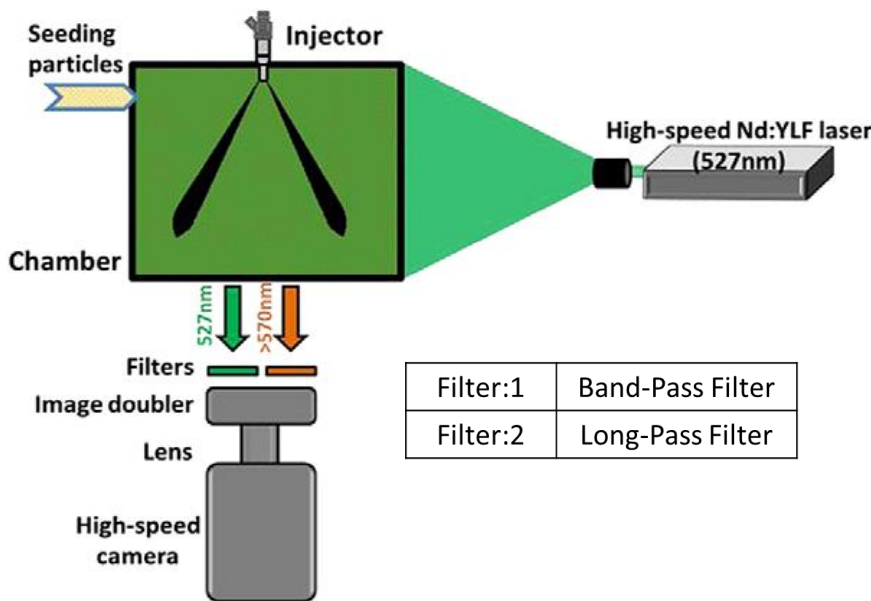


Fig 3. Principle of Two-color PIV.

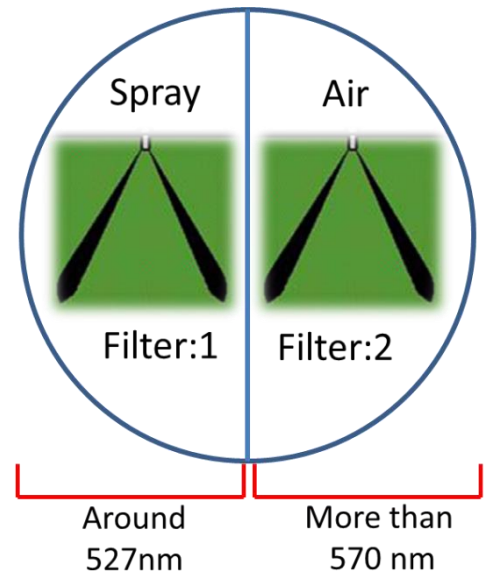


Fig 4. Filters in the image doubler.

図 5 に、噴霧の流れ場と周りの外気の流れ場の同時撮影を行うまでの流れを示す。噴霧の流れ場やその周りの流れ場は広島大学でも計測を行ってきたが、同時計測を行うには今回用いた Two-color PIV を用いる必要がある。

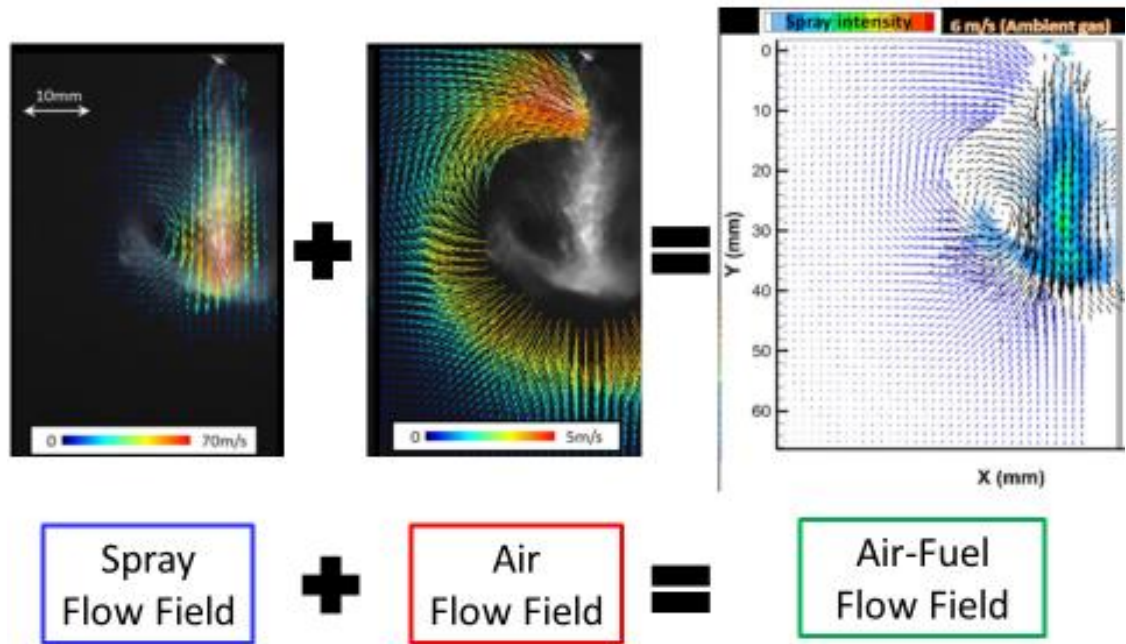
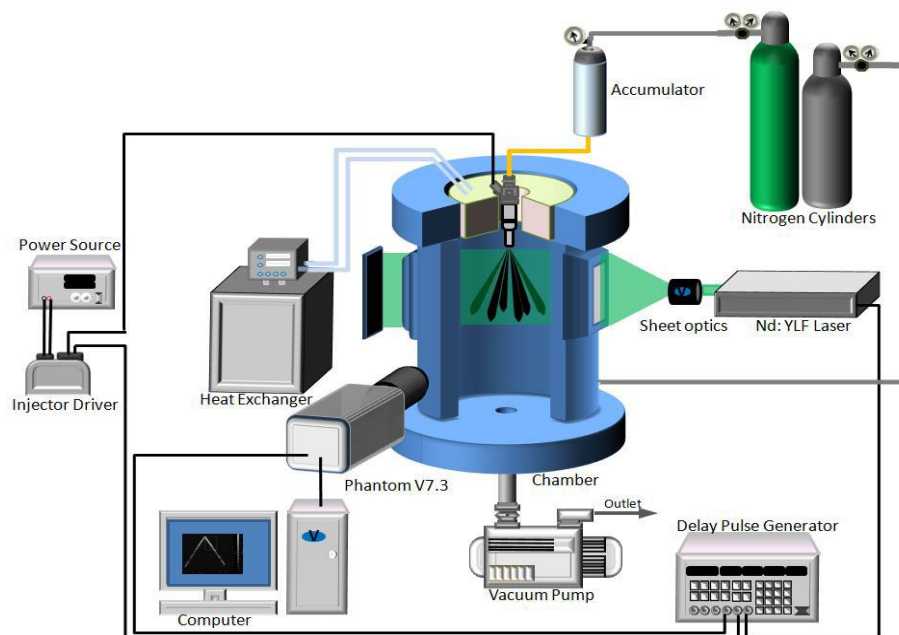


Fig5. How to make Air-fuel field.

5.4 二色法 PIV による噴霧とその周囲の流れ場の計測

今回用いた実験装置を図 6 に示す。今回は定容容器を用いて、噴霧の様子を高速度ビデオカメラを用いて撮影し、その後 image doubler を用いて二色法 PIV 計測を行った。今回トレーサ粒子としては、噴霧の流れ場においては噴霧そのものをトレーサ粒子に、周囲の流れ場については、ローダミン水溶液を圧力によって微粒化させ、トレーサ粒子とした。



5.5 実験条件

Fig 6. Experimental equipment.

実験条件を表1に示す. 今回は8噴孔のステップホールインジェクタにnヘキサンの燃料を用いて実験を行った. また, 今回はパラメータ無次元圧力比 P_a/P_s を変化させて, 噴霧の挙動及び周囲気体の流れ場を計測した. ここで, P_a は雰囲気圧力, P_s は飽和蒸気圧を示す.

Table 1. Experimental equipment

| Nozzle | Step Injector (8 holes) |
|------------------------------------|-------------------------|
| Nozzle Hole Diameter [mm] | 0.2 |
| Fuel | n-Hexane |
| Injection Pressure P_{inj} [MPa] | 5 |
| Injection Duration ID [ms] | 0.2 |
| Ambient Pressure P_{amb} [kPa] | 20-100 |
| Ambient Temperature T_{amb} | Room Temperature |

また, 図7に無次元圧力比を変化させたときの噴霧の挙動を調べた結果を示す. これを見ると, 無次元圧力比を小さくすると噴霧の8方向への拡散が抑制され, ノズル中央軸に噴霧が集中することがわかる. この現象において, 噴霧とその周囲の流れ場がどのようなになっているかを今回調査した.

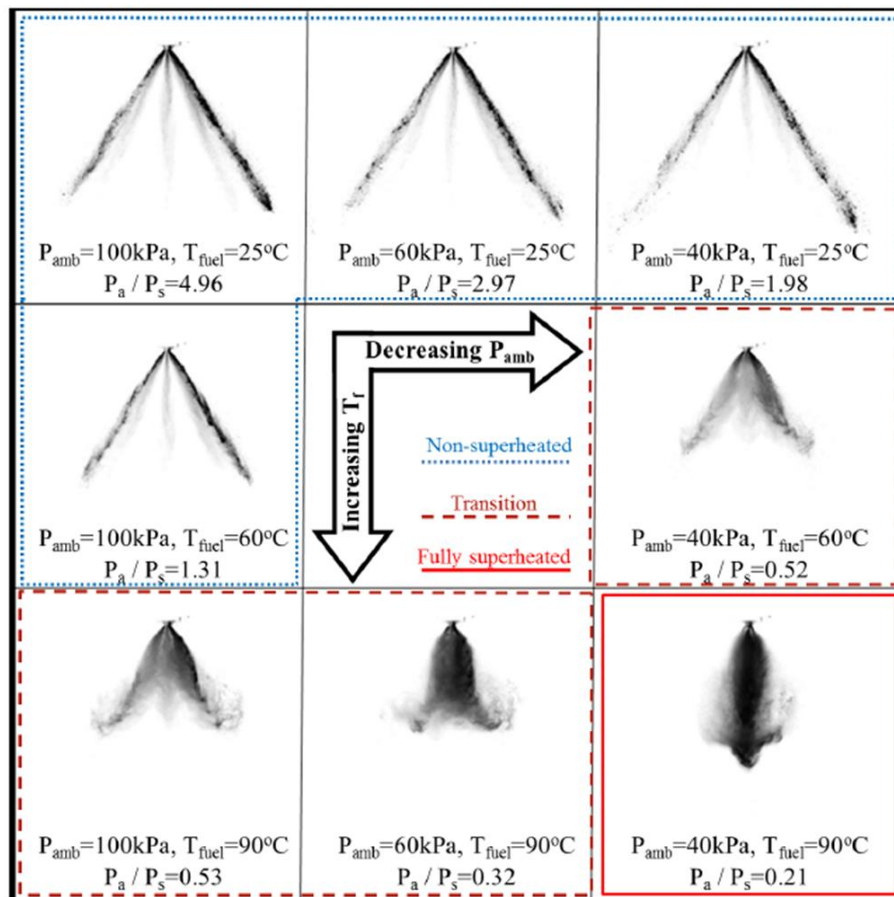


Fig 7. Fuel Spray Structures.

5.6 実験結果

図8に $Pa=0.21$ における噴霧の流れ場とその周囲の流れ場を計測した結果を示す。流れ場の図においては、噴霧は左右対称であるとしているため、流れ場も対称的であるとして片側のみの計測を行っている。(より拡大して流れ場を計測するためでもある。これを見ると、噴霧の発達に伴い噴霧の左側に噴霧の周囲気体による渦が発生していることがわかる。これは噴霧の発達によって引き起こされた雰囲気導入流れである。

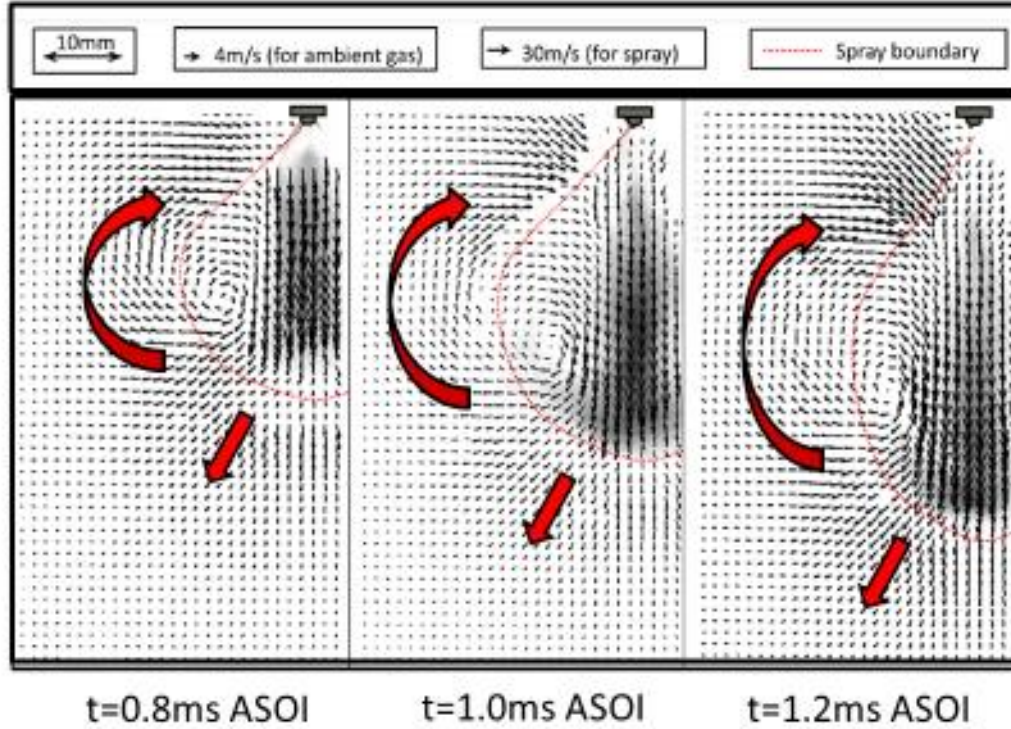


Fig 8. Air-fuel flow field.

ここで、雰囲気導入流れは、図9のように次の三つの領域に分けることができる。図9は雰囲気導入流れの進行方向をベクトルの示す角度ごとに色分けし、領域分けしたものである。領域1は、噴霧内部と周囲の圧力の差により周囲の気体が噴霧に流入する Entrainment Zone, 領域2は噴霧に流入した周囲気体が噴霧液滴と一緒に動く Recirculation Zone, 領域3は噴霧先端で周囲の気体が押し流される Head Vortex Zone である。

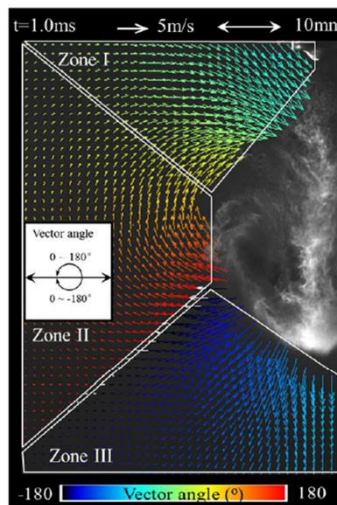


Fig 9. Air entrainment .

図 10 に各無次元圧力比における噴霧流れと雰囲気導入流れの計測結果を示す．これを見ると， $Pa/Ps=0.73$ より大きい噴霧の周りの雰囲気は噴霧の両側を軸として雰囲気導入流れが発生していることがわかる．一方，無次元圧力比が小さい噴霧ではノズル中心軸側の雰囲気導入流れの流れの軸はなくなり，雰囲気導入流れの速度が増加していることがわかる．これによって，無次元圧力比が小さくなると，噴霧に対する雰囲気導入流れが活発化することが分かった．

6. まとめ

従来行っていた噴霧液滴粒子のみの速度計測とは異なり，噴霧液滴粒子とその周囲気体の流れ場の同時計測を，二色法 PIV(Two-Color PIV) を用いて行った．得られた知見を以下にまとめる．

- 1) 噴霧の周囲において，噴霧の発達に伴い周囲気体による流れ，渦が発生する．
- 2) これらの流れは主に **Entrainment Zone, Recirculation Zone, Head Vortex Zone** に分類できる．
- 3) 無次元圧力比 Pa/Ps の増加に伴い周囲気体の流れは活発化する．

7. 最後に

広島大学にて行っていた PIV 装置を用いた噴霧の流れ場計測に対して，上海交通大学では二色法 PIV 装置を用いた噴霧の流れ場と周りの外気の流れ場の同時撮影という高度な技術について実際の実験を通して学ぶことができ，また広島大学で行っている実験への適応性についても議論を行い，自分の実験との違いなどを考察することで自分の実験を見直す良い機会となりました．今回得られた二色法 PIV の実験の経験を生かして広島大学でもこの技術を移転して，上海交通大学で行った実験や，その解析の続きなども行っていきたいと思います．

研究を行うにあたり，今回このような機会を与えてくださった西田先生，尾形先生並びに現地で指導および世話して下さった許敏先生に深く感謝します．皆様のおかげで 1 ヶ月充実した日々を過ごすことができました．本当にありがとうございました．最後に全面的に応援，サポートしてくれた家族にも感謝の意を表します．
