

PDPA による噴霧計測の信頼性向上

Improvement of Reliability of Measurement of Spray by the Phase Doppler Particle Analyzer

金 島 一 也* 田 原 敏 広* 柄 沢 隆 夫**
Kazunari KANESHIMA Toshihiro TAHARA Takao KARASAWA

要 旨

インジェクタ噴霧の粒径計測装置である Phase Doppler Particle Analyzer(PDPA)は、非接触かつ高い空間分解能で粒子径および速度の同時計測が可能であり、噴霧性状の評価において有効な計測手法である。しかし、計測条件の最適化については、現状では明確になっておらず、計測結果が計測条件によって大きく影響されるため、噴霧性状を十分に評価できていない。

本研究では、計測条件による計測結果への影響の要因を PDPA 計測法の原理・構成から検討し、また群馬大学工学部の協力の下に、凍結法による粒径計測との比較検証を行なった。

その結果、PDPA 粒子計測の光学的ノイズの低減と大径粒子の捕捉を重視して、フォトマル印加電圧および粒径測定範囲を最適化することにより、計測の信頼性を向上させることができた。

ABSTRACT

The Phase Doppler Particle Analyzer (PDPA) is used to simultaneously measure particle size and velocity in an injector spray with nonintrusive and high spacial resolution, and can be used to evaluate the spray characteristics.

However, as the technique of optimizing the measurement conditions is not established and the results of measurement widely vary according to the measurement conditions, it is not an adequate instrument for precise evaluation. Thus the influence the measurement conditions have on the results of measurement with PDPA was analyzed considering the theoretical and structural characteristics of PDPA. In the process, comparison was made between the spray as estimated with PDPA and that measured by the freezing method, in cooperation with Department of Technology, Gunma University. The result was the improvement of the spray PDPA measurement reliability by optimizing sensitivity of the photomultiplier and measurement diameter range through reduction of the optical noise and selective catch of large droplets in the spray.

1. まえがき

近年、排ガスエミッション規制の強化に伴い、ポート内噴射ガソリンエンジンの燃料供給形態の見直しが行われてきている。インジェクタ噴霧の性状評価においても、平均粒径だけでなく、局所粒径分布・流速分布・流量分布等、より詳細な計測評価が必要となっている。

Phase Doppler Particle Analyzer(PDPA, エアロメトリクス社)は、位相ドップラ法によるレーザ光学計測装置であり、非接触・高い空間分解能で粒子径および速度の同時計測が可能であり、噴霧の性状や構造の評価において有効な計測手法である。しかしながら、光学系

セッティングパラメータ、計測範囲等、多くの条件を設定する必要がある。それらの最適設定については、現状では明確になっておらず、計測結果が計測条件に非常に大きく影響されるため、噴霧性状を十分に評価できていない。

そこで本稿では、PDPA と凍結法による計測結果の比較検証とともに、PDPA 計測法の原理・構成から計測条件による計測結果への影響の要因を明確にし、計測条件を最適化することにより、計測信頼性の向上がはかれたことについて述べる。

* 栃木研究所

** 群馬大学工学部

2. PDPA 粒子計測

2.1. PDPA 粒子計測原理概要

Fig. 1 に示すように、二本のレーザ光を交差させることによって、交差部に干渉縞を形成させ、計測プローブを構成する。レーザ光束の径は約 0.6mm であるため、形成されるプローブは非常に小さく、高い空間分解能が得られる。

粒子が計測プローブを通過するとき、Fig. 2 に示すように、干渉縞による散乱光は粒子の運動と同期して空間を走査する。二つの検出器（フォトマル）をある間隔で離して配置すると、同周波数で位相差のあるドップラバースト信号が検出される。この信号の周波数により粒子速度を、位相差により粒子径を算出する¹⁾。

2.2. PDPA 粒子計測フローと信頼性について

Fig. 3 に、ドップラ信号の信号処理フローチャートを示す。PDPA は、粒子径・粒子速度の算出に加えて、計測不可能な粒子の除外原因を表示する機能を持っている。

計測から除外される信号は、以下の三つに大別される。

- (1) 信号解析装置の処理能力を超えたもの
- (2) 非球形粒子、複数の粒子がプローブを同時に通過するときを生じるドップラ信号の干渉など、計測原

理が適用できないもの

- (3) 設定された計測粒子速度、粒子径範囲を超えたもの

さらにそれらは、発生原因別に Fig. 3 に示す様に、解析許容振幅オーバ(S)、ドップラバースト信号異常(KU, KO)等に分類される。この機能は、計測がどのような環境の下に実施されたかの指標となり、次のように計測の信頼性を評価できる。

$$\text{計測粒子有効率} = \frac{\text{有効粒子数}}{\text{通過粒子数}} \times 100 [\%]$$

計測除外信号のうち、(2)の非球形粒子を原因とするものは、計測原理上避けることのできないものであるが、その他のものについては、計測条件設定の最適化によって改善できるものである。

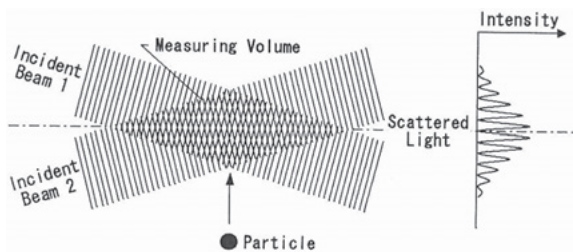


Fig. 1 Schematic of Measuring Volume

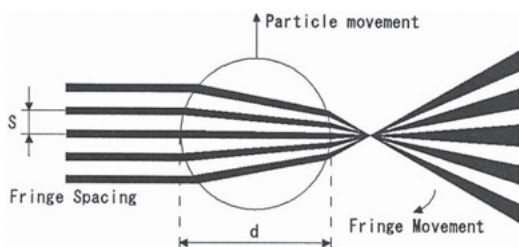


Fig. 2 Schematic of Fringe Movement

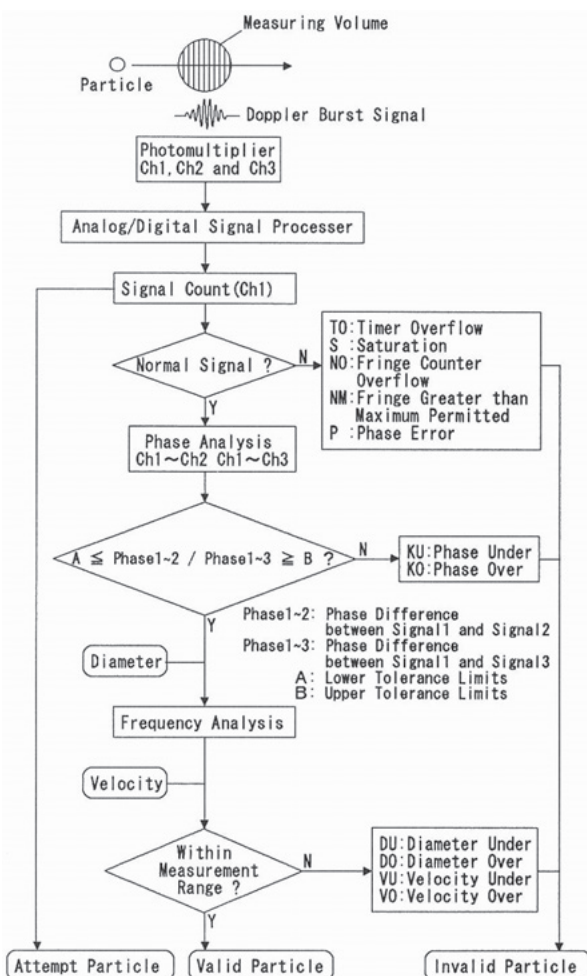


Fig. 3 Flow Chart of Signal Process

2.3. 凍結法粒子計測について

PDPA による粒子計測結果の評価基準として、群馬大学工学部システム工学科柄沢研究室の協力を得て凍結法による粒子計測を行った。Fig. 4 に凍結法粒子計測装置の概略を示す²⁾。

凍結法の特徴は、噴射燃料を全て凍結させ、粒子径を直接計測できることにある。さらに雰囲気温度が -190°C 前後であるため、燃料の蒸発の影響が小さく噴射ノズルの純粋な微粒化レベルを評価できる。これらの理由から本研究において、燃料噴霧計測の評価基準とした。

凍結法での粒子計測は、ノズルより約 2000mm 下にセットされた 35mm 版コピーフィルムで凍結粒子を捕集し、上部の豆電球で焼き付け、現像後 20 倍に引き延ばして計数する。そのため噴霧粒子の実体を計測できるが、PDPA 粒子計測と比較して、以下のことを考慮しておく必要がある。

- (1) 燃料を凍結させるために、計測位置までに長い距離が必要
- (2) 捕捉粒子の重合を防止するために、計測ショット数が制限され、計測粒子数が少ない
- (3) 固体粒子をフィルムで受けるため、粒子の跳ね返り等により局所粒子分布評価の分解能に劣る

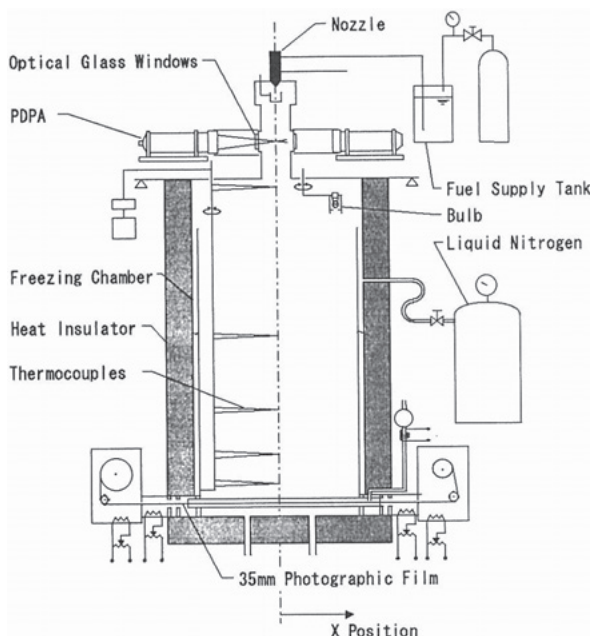


Fig. 4 Experimental Apparatus of Freezing Method

3. PDPA 粒子計測の現状と問題点

PDPA 粒子計測において設定すべき計測条件は、主として、以下の三つである。

- (1) フォトマル印加電圧 (High Voltage)
- (2) 計測粒子径範囲 (Diameter Range)
- (3) 計測粒子速度範囲 (Velocity Range)

(1) の項目は、ドップラ信号の入力レベルを決定するもので、後の信号処理において、その信号の品質を左右する重要なパラメータである。(2) および (3) の項目は、信号解析システムの能力上制約されるもので、その範囲はダイナミックレンジで計測粒子径は 35 倍程度、速度は 100 倍程度である。これらの制約の下で従来では、以下のよう設定していた。

- | | |
|--------------------|----------------------|
| (1) High Voltage | :350V |
| (2) Diameter Range | :9~315 μm |
| (3) Velocity Range | :0~27m/sec |

現状の計測条件での問題点を明確にするために、燃料性状の異なるガソリン、クレンゾルを量産ピントルタイプインジェクタで噴射させて計測比較を行った。凍結法による計測結果を Fig. 5 に示す。クレンゾルはガソリンに比べて粘性が高いため、平均粒径は顕著に大きくなる傾向にある。

次に、従来の計測条件での PDPA による計測結果を Fig. 6 に示す。ガソリンに比べてクレンゾルでは、X-Position 0~10mm でザウタ平均粒径 (SMD) は大きく計測されているものの、噴霧全体を平均すると同等レベルである。また、計測粒子有効率に注目すると 50~70% と低い値での評価となっている。

従来条件での PDPA と凍結法の計測結果を比較すると、従来条件での PDPA の計測では、異なる燃料での噴霧性状の差異を十分評価できていないことは明らかである。この問題は、粒子有効率の低さから、PDPA での計測で除外された粒子の影響であると考えられる。

PDPA の計測中に生じた計測除外原因は、Fig. 3 の信号処理フロー中で以下の三つが主である。

- (1) 解析許容振幅オーバー (S)
- (2) ドップラバースト信号異常 (KU, KO)
- (3) 許容範囲外 (VU, VO, DU, DO)

この中でも (2) が最も多く発生している。

このことから、従来の PDPA の設定条件では、ドップラバースト信号の入力状態が悪く、ひずんだ信号が多く

生じており、また計測範囲も適正でないと考えられる。

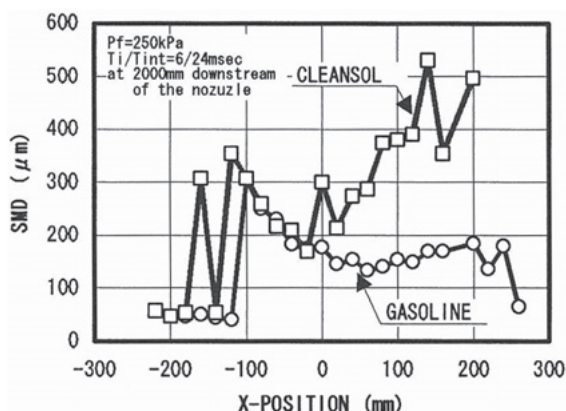


Fig. 5 Comparison of Local SMDs of Gasoline with those of Cleansol by the Freezing Method

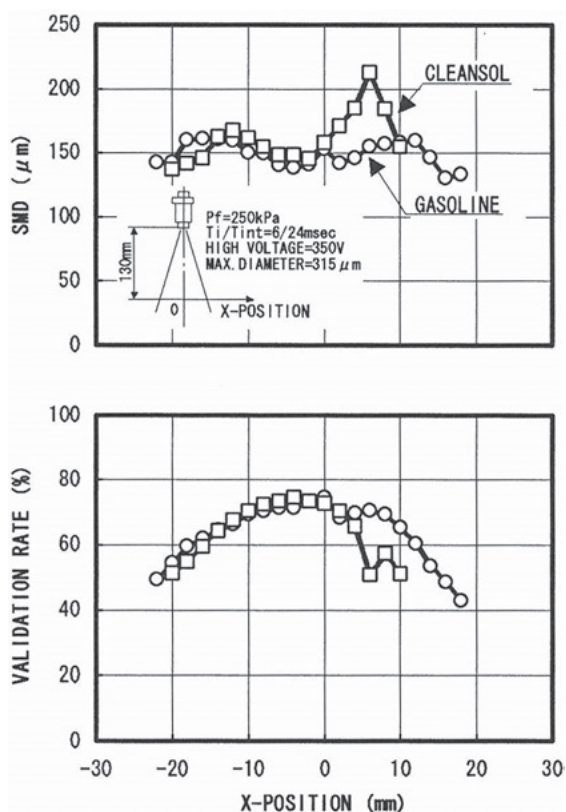


Fig. 6 Comparison of Local SMDs and Validation Rate of Gasoline with those of Cleansol by the PDPA in the Case of Conventional Condition

4. フォトマル印加電圧と 計測除外信号発生率

Fig. 7 にフォトマル印加電圧と計測除外信号発生率の関係を示す。フォトマル印加電圧の増大とともに、計測除外信号発生率は増大する。これは、ドップラバースト信号振幅許容値オーバー (S) によるものより、ドップラバースト信号異常 (KU+KO)、計測範囲外 (DU+DO) によるものの割合の方が大きい。このことは、過剰なフォトマル印加電圧設定によって、正規のドップラバースト信号に影響し、信号のひずみ、周波数・位相差の誤計測を引き起こしていることを示している。

この第一の原因として、電氣的ノイズの干渉によるドップラバースト信号の品質低下が考えられる。しかし、これを確認するために、噴霧のない状態で信号の観察を行ったが、影響を与えるようなノイズは認められなかった。

第二の原因として、レーザ光路中での多数の通過粒子による光学的ノイズ (反射光や計測プローブ以外での散乱光) の干渉が考えられる。この光学的ノイズを確認するために、Fig. 8 に示す構成により計測を行った。PDPA は、前述の通り、プローブ中の干渉縞を粒子が通過する時の散乱光によるドップラバースト信号を解析する。本来であれば、Fig. 8 のように 2 本のレーザ光のうち一方を遮断した場合は、干渉縞は形成されず、従ってドップラバースト信号も計測されることはない。ところが、フォトマル印加電圧を増大させていくと、この状態においてもドップラバースト信号に類似した信号が計測される。Fig. 9 に、正規のプローブで入力されたドップラバー

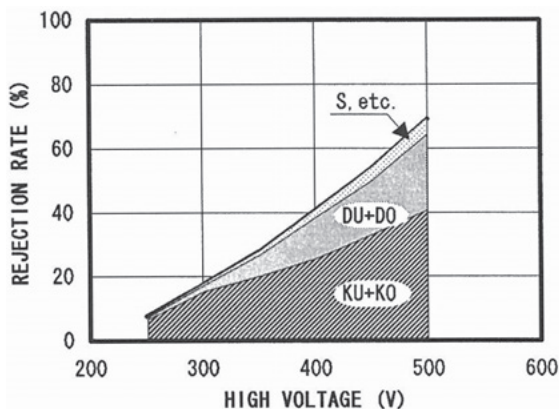


Fig. 7 Influence of High Voltage on the Rate of Rejection

スト信号数と、干渉縞を形成しない状態でドップラバースト信号として入力された信号数(光学的ノイズ信号)の割合を示す。このことから、計測除外信号の増大は、光学的ノイズによるドップラバースト信号の品質低下、誤計測によるものであることが明らかになった。また、従来のフォトマル印加電圧 350V では、X-Position 0mm において、約 20% の信号が光学的ノイズの影響を受けていたことが判明した。光学的ノイズの影響を除くためには、この噴霧の場合図より、250V~300V にフォトマル印加電圧を設定し、干渉縞からのドップラバースト信号のみを選択するように調整すればよい。

ただし、光学的ノイズの信号強度は、発生原因から考えて、計測噴霧の濃度、レーザ光の強度に依存するため、①粒子濃度の異なる計測ポイント、②燃料性状の異なる噴霧、③PDPA の光学系構成が異なる場合、④レーザ光路中の強度減衰要素(ガラス、雰囲気流体等)が変化した場合には最適フォトマル印加電圧は変化することを考慮しておく必要がある。

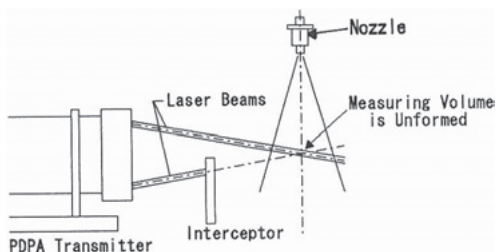


Fig. 8 Method of Confirmation of Optical Noise

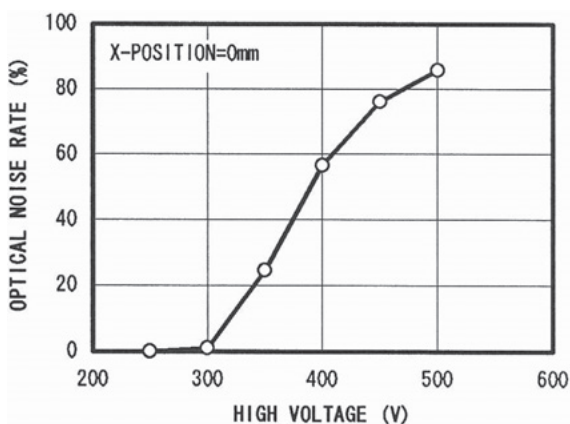


Fig. 9 Influence of High Voltage on the Rate of Optical Noise

5. 計測粒子径範囲

計測粒子径範囲のダイナミックレンジが限定されるPDPA 粒子計測では、計測範囲の設定はSMDの算出に大きな影響を及ぼす。ゆえに、計測範囲の設定において、小径粒子と大径粒子のどちらを重視するかという問題が生じる。ここで、SMDの算出式は次式で表される。

$$SMD = \frac{6 \times V}{S}$$

V : 計測粒子総体積
S : 計測粒子総表面積

通過粒子全体のSMDを考えると、その信頼性の面では、計測粒子総体積が噴霧の局所流量と等しくなることが望ましい。すなわち、PDPAでの計測においては、計測された粒子の累積体積が最も多くなる計測粒子径範囲が最適となる。ダイナミックレンジが35倍の場合、最小粒径と最大粒径の体積比は1:42875であり、最大粒子径1個の計測もれは最小粒径42875個分に相当する。従って、大径粒子の計測もれは計測粒子総体積に大きな影響を与えるため、最大粒子径を重視することが妥当であると考えられる。

Fig. 10に凍結法において計測された最大粒子径を示す。凍結法により計測された最大粒子径は、ガソリンで400 μm、クレンゾルで600 μm程度であることがわかる。計測最大粒子径を315 μmとしている従来のPDPA計測条件では、実際に存在している大径粒子の計測もれがあることは明らかである。

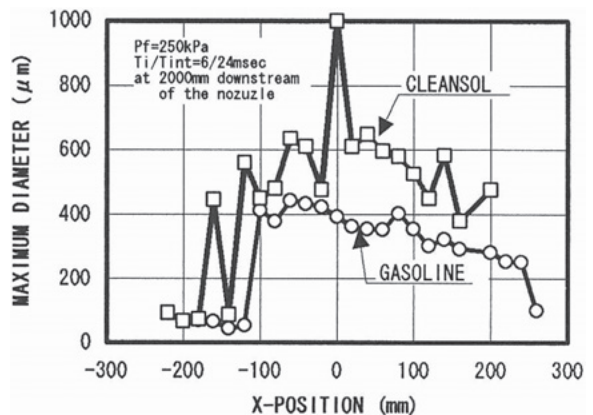


Fig. 10 Comparison of Maximum Droplet Sizes of Gasoline with those of Cleansol by the Freezing Method

6. 計測条件改善による

PDPA 粒子計測結果

4、5章の結果より、PDPA 粒子計測条件について、フォトマル印加電圧を光学的ノイズが発生し始める限界に設定し、粒子径測定範囲を $570\ \mu\text{m}$ まで拡大して、量産ピントルタイプインジェクタの噴霧を計測した。改善した計測設定条件を Table 1 に、計測結果を Fig. 11 に示す。

計測条件設定の変更により、計測粒子有効率はガソリン、クレンゾル共に $80\sim 90\%$ に向上した。SMD の分布はクレンゾルの方が明らかに大きく、凍結法での計測結果と良く一致している。また、従来の PDPA 計測では評価不可能であったガソリンとクレンゾルの流量分布 (Volume Flux) の差異の評価も可能になり、クレンゾル噴霧はその分散度が狭く、ガソリン噴霧に現れる噴霧中心部分の流量の減少があまり見られないことが判った。

7. まとめ

ポート内噴射ガソリン噴霧の解析に有効な PDPA による粒径計測において、従来採用してきた計測条件設定では、以下の原因により計測精度を悪化させていたことが明らかになった。

- (1) 過大なフォトマル印加電圧に起因する、光学的ノイズ信号による計測信号のひずみ。
- (2) 不適切な粒子径測定範囲設定による、大径粒子の計測もれ。

また、光学的ノイズの除去と大径粒子の影響を考慮して、計測条件を以下のように設定することで、計測結果の精度向上をはかることができた。

- (1) フォトマル印加電圧を、光学的ノイズが発生し始める限界値に設定する。
- (2) 大径粒子を重視した粒子径測定範囲に設定する。

Table 1 Improved Measurement Conditions of the PDPA

	Conventional Condition	Improved Condition
Collimating Lens	300mm	160mm
Velocity Range	0~27 m/sec	0~54 m/sec
Diameter Range	9~315 μm	16~570 μm
High Voltage	350V	250~300V (set each position)

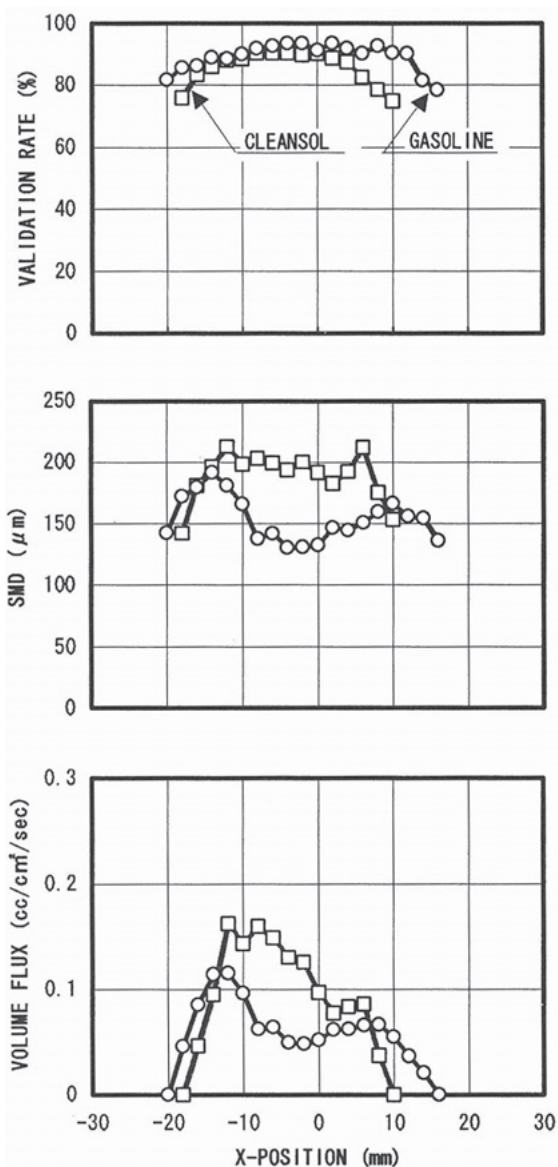


Fig. 11 Comparison of Measurement Results of Gasoline with those of Cleansol by the PDPA in the Case of Improved Condition

謝 辞

本研究にあたり、凍結法による粒子計測について多大な御協力を頂いた群馬大学工学部システム工学科柄沢研究室の方々に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 小保方富夫、「位相ドップラ法による測定」エアロゾル研究、第7巻、第1号
- 2) Takao KARASAWA, Kiyoshi KAWABATA, Tamotsu NAGASAKA, Seiichi SHIGA and Toshio KURABAYASHI
「Simultaneous Measurement for Comparison of Droplet Sizes Measured by Freezing Method with those by Laser Light Scatter Detection Methods」, Proc. ICLASS-94

■著 者■



金 島 一 也



田 原 敏 広



柄 沢 隆 夫