

論文・解説

25

# DISIエンジン噴霧モデルの最適化手法の開発

## Development Optimization Techniques of Spray Model for DISI Engine

佐藤 圭峰\*1 横畑 英明\*2 山川 正尚\*3  
 Kiyotaka Sato Hideaki Yokohata Masahisa Yamakawa  
 西田 恵哉\*4 大瀧 康宏\*5  
 Keiya Nishida Yasuhiro Otaki

### 要約

直噴エンジンの開発ではインジェクタから噴射された燃料の噴霧挙動が燃焼を左右するため、実運転条件に近い高温および高圧条件下における蒸発特性や混合気特性を精度良く予測できるかどうかが重要である。そのため、最適化技術を組み合わせた噴霧シミュレーションの計算手法を開発するとともに、蒸気量と液滴量を定量的に計測が可能な2波長レーザー吸収散乱法を用いた噴霧の可視化計測で詳細な検討を行い、効率的かつ精度良い噴霧予測が可能になった。

### Summary

Because the atomization behavior of the fuel injected from the injector controls combustion, it is important whether the evaporation and the mixture properties under a high temperature and a high-pressure condition nearing to the engine operating condition can predict in accuracy in the development of the DI engine. The highly accurate and effective atomization prediction in high efficiency and accuracy became possible by the development of atomization behavior prediction techniques of 3D-CFD that combines the optimization technology and the visualization measurement of atomization using Laser Absorption Scattering technique, which is quantitative measuring method of the mass of liquid and vapor.

## 1. はじめに

直噴ガソリン機関のエミッション低減などを目的としたコンセプトの一つに、マルチホールインジェクタを採用した燃焼方式<sup>(1)-(4)</sup>があり、多くの研究が行われている。特に圧縮行程中に燃料を噴射する成層燃焼においては、高温および高圧雰囲気における噴霧自身の蒸発特性や混合気特性が重要である。

また、直噴ガソリンエンジン開発の効率化<sup>(5)(6)</sup>のためには、シミュレーション技術の活用が必要であり、噴霧の蒸発特性や混合気特性に関して、噴霧モデルのパラメータ最適化などによって計算精度を向上させる必要がある。

マツダでは内製の3次元噴霧シミュレーション(3D-CFD)ツールを活用し、直噴エンジンの量産開発に適用<sup>(7)</sup>

している。この方法は高精度ではあるが合わせ込みに時間がかかる等の問題を抱えていた。

そこで本研究では、多目的遺伝的アルゴリズムを適用した最適化ツールと3D-CFDツールを組み合わせた計算手法を開発した。高温高圧雰囲気中に噴射した蒸発噴霧の当量比分布等を計測し、その実験結果である蒸気相到達距離、液相および蒸気相質量の時間変化を目的関数とし、入力関数である噴射初期パラメータや噴霧サブモデルパラメータの最適化を行った。

## 2. 蒸発過程にある噴霧と混合気の測定

### 2.1 実験方法

Fig.1に示すような、紫外光と可視光を光源とした透過光減衰率画像の解析により噴霧の混合気形成過程を定量的

\*1~3 パワートレイン先行開発部  
 Powertrain Advance Development Dept.

\*5 (株)シーディーアダプコジャパン  
 CD-adapco JAPAN Co.,LTD.

\*4 広島大学大学院  
 Graduate School of Engineering, Hiroshima University

に計測する2波長レーザ吸収散乱 (Laser Absorption Scattering : LAS) 法<sup>(8)~(12)</sup>を用い、高温高压容器に単噴孔ホールインジェクタから噴射したガソリン噴霧の液相および蒸気相当量比分布を測定した。高温高压容器を窒素で加圧し、試験燃料には物性値がガソリンに近く、紫外光を強く吸収し、可視光を吸収しないパラキシレンを用いた。ディレイパルスジェネレータから噴射制御信号をインジェクタドライバに送り、インジェクタから燃料を高温高压容器中に噴射した。この噴霧を波長266nmの紫外光と波長532nmの可視光の2波長レーザ光で照明、噴霧中でレーザ光が減衰することによる透過光減衰画像を紫外光と可視光に分離し、CCDカメラに取り込んだ。

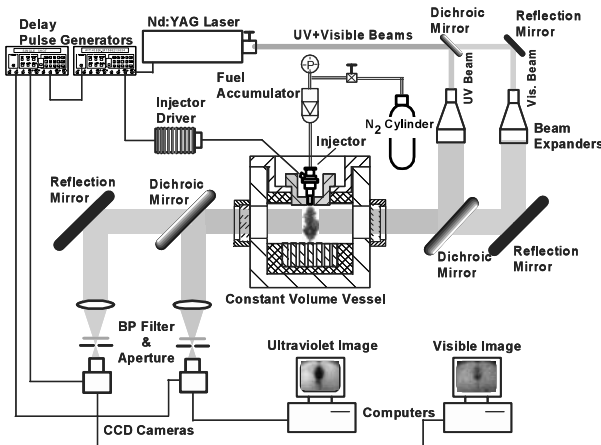


Fig.1 Experimental Apparatus

2.2 実験条件

Table 1 に雰囲気条件と噴射条件を示す。高温高压容器内を温度500K-圧力1MPa、温度550K-圧力1.5MPaに昇温昇圧し、実際の直噴ガソリン機関の圧縮行程噴射を想定した条件を設定した。噴孔径が0.15mmの単噴孔ホールインジェクタを用い、噴射圧を15MPa、噴射量を1.6mgとした。Fig.2に噴射期間と撮影時刻のタイミングチャートを示す。実噴射終了時期を0msとした。

Table 1 Experimental Conditions

Ambient condition	
Ambient gas	Nitrogen
Temperature: $T_a$ [K]	500      550
Pressure: $P_a$ [MPa]	1          1.5
Injection condition	
Fuel	P-xylene
Injector	Hole type
Number of hole	1
Hole diameter [mm]	0.15
L/D	2.0
Injection duration [ms]	1.16
Injection pressure [MPa]	15
Injection quantity [mg]	1.6

2.3 液相および蒸気相の当量比分布

Fig.3に噴霧の液相および蒸気相の当量比分布を示す。

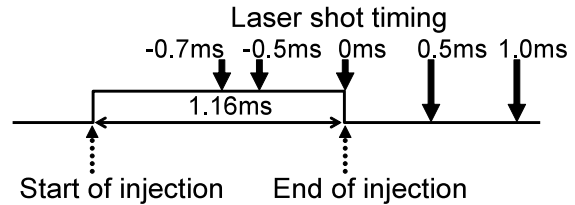


Fig.2 Relationship between Injection Duration and Laser Shot Timing

撮影時期は噴射終了後 (AEOI)  $t = 0ms, 0.5ms$  である。液相当量比分布を見ると、 $t = 0ms$  (AEOI) においてインジェクタ先端から噴霧軸方向の中央付近までは蒸発が進んでおらず、高い液相当量比 ( $\phi_L > 1.5$ ) の領域が存在している。 $t = 0.5ms$  (AEOI) ではインジェクタ先端から噴霧軸方向の中央付近まで高い液相当量比領域が存在せず、噴霧軸方向の中央付近から噴霧先端で液相当量比 ( $\phi_L < 0.5$ ) の領域が存在する。

一方、蒸気相当量比分布を見ると、 $t = 0ms$  (AEOI) において、噴霧軸方向の中央付近から噴霧先端近くまで、蒸気相当量比 ( $0.5 < \phi_V < 1.0$ ) の領域が存在する。そして、 $t = 0.5ms$  (AEOI) では噴霧軸方向の中央付近に高い蒸気相当量比 ( $\phi_V > 1.0$ ) の領域が存在する。この領域は  $t = 0ms$  (AEOI) において液相当量比が高い領域であり、この領域に存在している液相が蒸発したと考えられる。

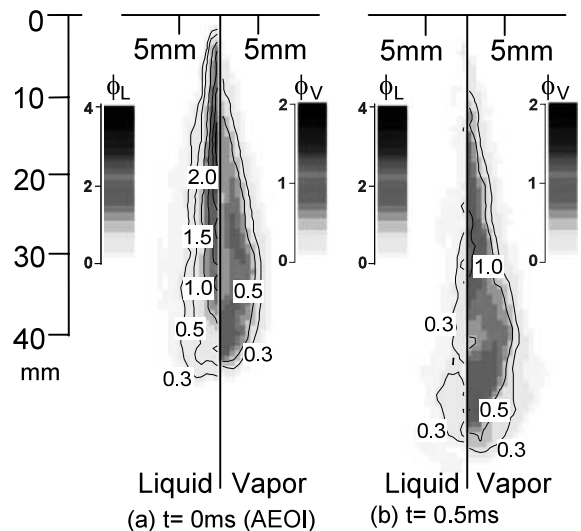


Fig.3 Liquid and Vapor Phase Equivalence Ratio Distributions in Evaporating Gasoline Spray Measured by LAS

3. 蒸発噴霧の計算手法および計算条件

3.1 計算手法

混合気に関する計算には最適化ツールとの組み合わせを考慮し汎用3D-CFDツールSTAR-CDを用いた。乱流モデルとしては標準k-εモデルを使用し、燃料噴霧は離散液滴モデルDDM (Discrete Droplet Model) に基づいて解析する。液滴代表粒子 (液滴パーセル) の挙動はラグランジェ2相

流機能を用いて模擬する。分裂モデルにはHsiang-Faethモデル<sup>[4]</sup>を適用した。

### 3.2 計算条件

本研究で用いた計算格子をFig.4に示す。計算空間はデカルト座標系で定容器を想定した75mm × 75mm × 100mmである。計算格子数は約75,000格子、格子幅2.5mm（インジェクタ近傍は1.25mm）間隔格子とした。計算条件は2章で述べたLAS法による蒸発噴霧実験を模擬したものであり、高温（500K，550K）の窒素ガスで満たされた高圧（1MPa，1.5MPa）容器内に単噴孔ホールインジェクタから噴射圧力15MPaで、パラキシレン<sup>[5]</sup>を噴射している。

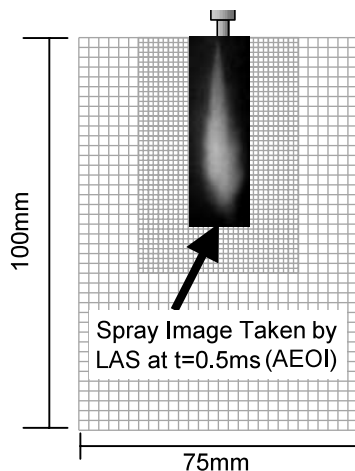


Fig.4 Computational Grid

### 3.3 噴霧モデルパラメータの最適化手法

解析手法としては、大幅な計算時間の効率化を考え、3D-CFDツールSTAR-CDと最適化ツールmodeFRONTIERを組み合わせ、実測結果から得られた蒸気相到達距離、液相および蒸気相質量を目的関数とし、入力変数である噴射初期パラメータや噴霧サブモデルパラメータを最適化した。最適化手法としては多目的遺伝的アルゴリズムMOGA-II<sup>[6]</sup>を用いた。Fig.5に処理の流れを示す。

まず、初期の入力変数を設定し、初期集団を形成。与えられた変数にて3D-CFD計算を行い、目的関数と計算結果を評価する。計算結果が目的関数と一致した場合は計算が終了するが、そうでない場合は親となる2個体を選択し、交叉にて子を作る。また、ある確率で突然変異を行う。この[選択][交叉][突然変異]を繰り返し、世代交代を行い次世代の入力変数集団を決定し、再び3D-CFD計算にて評価する。

### 3.4 噴霧モデルパラメータおよび計算方法の概要

Table 2に入力変数、入力変数の上下限值、刻み幅を示す。具体的には単噴孔ホールインジェクタによる噴射期間中の流量の時間的変動に基づく噴射速度や平均粒径（SMD：Sauter Mean Diameter）の時間変動値、液滴分裂モデル係数である臨界We数、安定直径定数の乗数、特性

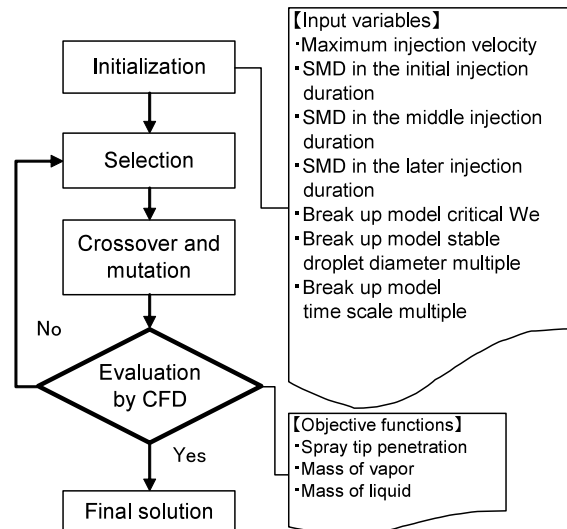


Fig.5 Flowchart of GA by modeFRONTIER

Table 2 Input Variables

Input Variables	Max. value	Min. value	Δ value
* Maximum injection velocity [m/s]	200	100	5
* SMD in the initial injection duration [mm]	150	20	5
* SMD in the middle injection duration [mm]	30	5	5
* SMD in the later injection duration [mm]	150	20	5
Break up model critical We	8	6	0.5
Break up model stable droplet diameter multiple	8	5	0.2
Break up model time scale multiple	4	1	0.5

分裂時定数の乗数を入力変数とする。

入力変数である噴射速度やSMDの時間変動値は噴射初期 - 中期 - 後期の3つの時間に分けた。このうち噴射速度は理論値を参考に噴射中期に最大噴射速度を置き、SMDは実験式<sup>[7]</sup>を参考に下に凸の時間変動とした。噴射期間中の粒度分布には実測結果に最も近い値を示した抜山 - 柵沢の粒度分布関数<sup>[8]</sup>を適用した。

計算方法としては、二つのパターンで行った。一つはTable 2の各入力変数を対象に最適化計算を実施した（パターン1）。もう一方は同じくTable 2の各変数を対象に最適化計算を行うが、\*印の変数には流量の時間的変動に基づき、噴射速度とSMDに時間変動を与えた（パターン2）。理論的には後者で行うべきだが、計算数が膨大になるため、両パターンを比較して精度と計算時間の面から実用性を検討した。

## 4. 計算結果

### 4.1 噴霧モデルパラメータに一定値を与えた計算

Fig.6にパターン1で入力変数を最適化したt = 0ms，0.5ms（AEOI）の液相および蒸気相当量比分布を示す。液

相当量比分布をみるとインジェクタ近傍および噴霧先端で多くの液相が存在している。蒸気相当量比をみると、蒸気の発生位置が噴霧の先端領域のみとなっている。Fig.3と比較すると液相および蒸気相当量比分布が大きく異なっている。Fig.7(a)の蒸気相到達距離の時間変化とFig.7(a)の液相および蒸気相質量の時間変化から明らかなように、目的関数の一つである蒸気相到達距離を合わせようとすると、液相および蒸気相質量は大きく外れる。つまり、蒸気相到達距離と液相および蒸気相質量を同時に満たす結果は得られず、パターン1では最適解を見つけることは困難であることがわかった。

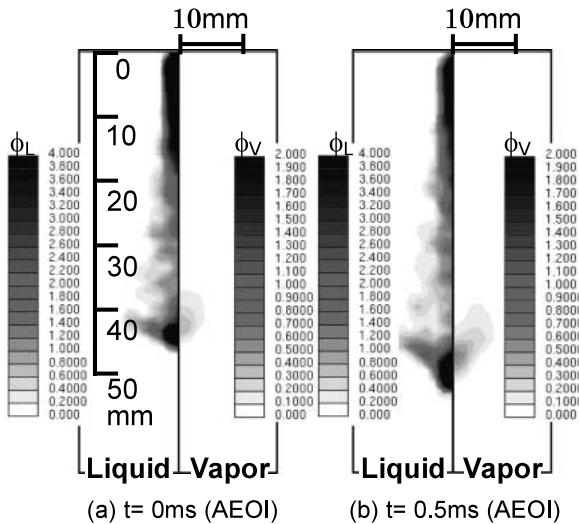


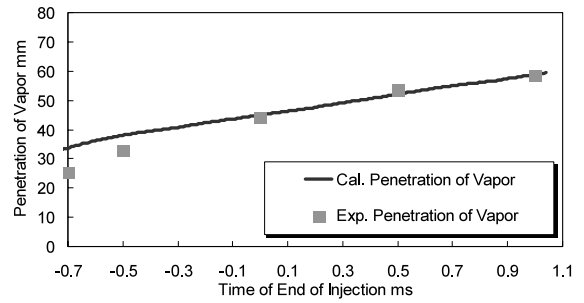
Fig.6 Liquid and Vapor Phase Equivalence Ratio Distributions in Evaporating Gasoline Spray Calculated by CFD, Pattern 1

4.2 噴霧モデルパラメータに時間的変動を与えた計算

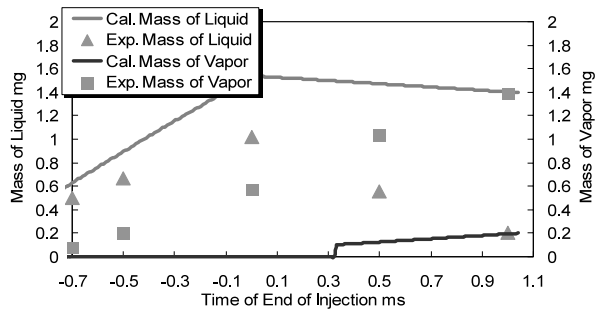
Fig.8にパターン2で入力変数を最適化した時の実験結果(目的関数)と計算結果の比較を示す。Fig.8(a)の蒸気相到達距離の時間変化とFig.8(b)の液相および蒸気相質量の時間変化はともに実験結果にほぼ合っていることがわかる。

Fig.9にt = 0ms, 0.5ms (AEOI)における液相および蒸気相当量比分布を示す。液相当量比分布を見ると、t = 0.5msではインジェクタ近傍には液相はほとんど存在していない。一方、蒸気相当量比分布を見るとインジェクタ近傍から噴霧全体で蒸気相が存在し、Fig.3の実測当量比分布に近いものとなっている。これらの結果からパターン2のパラメータを採用することで最適解を見つけることが可能であることがわかった。したがって、液相および蒸気相の当量比分布の計算結果を実験結果と一致させるためには噴射初期条件である噴射速度やSMDに時間的変動を与える必要がある。

更に、雰囲気圧力および温度を変化させた場合も検証した。Fig.10にFig.8で示した最適化した入力変数と同等の値を用いた場合の雰囲気計算結果と実験結果を示す。Fig.10

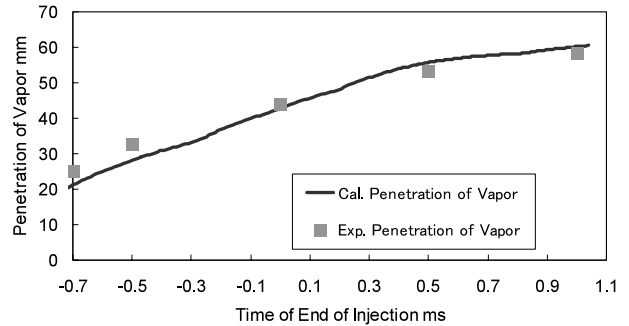


(a) Spray Tip Penetration

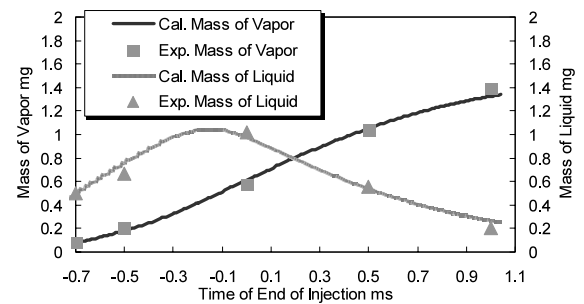


(b) Mass of Vapor and Liquid

Fig.7 Comparison of Experimental and Calculation Results Pa=1.0MPa, Ta=500K, Pattern 1



(a) Spray Tip Penetration



(b) Mass of Vapor and Liquid

Fig.8 Comparison of Experimental and Calculation Results Pa=1.0MPa, Ta=500K, Pattern 2

(a)に蒸気相到達距離の時間変化、Fig.10(b)に液相および蒸気相質量の時間変化を示す。いずれも実験結果にほぼ合っており、雰囲気温度および圧力を変更してもこの手法が適用できることがわかる。

従来、以上のような合わせ込み計算に約1か月を要した

が、今回の手法を用いることにより効率化を図ることが可能になった。総計算数130ケースでほぼ収束し、計算時間は16CPUの並列計算で10時間に短縮できた。

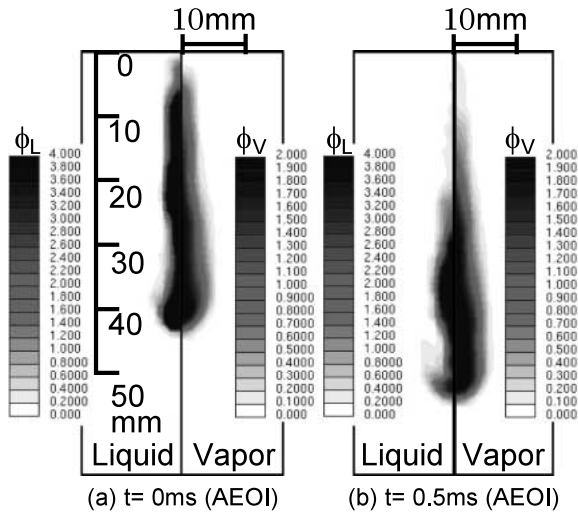
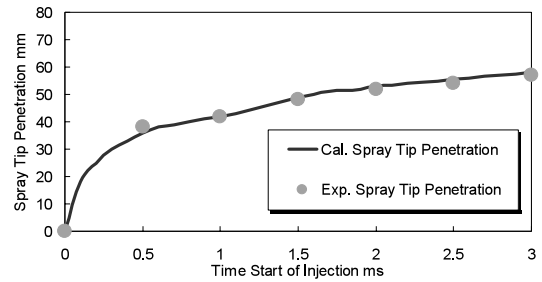
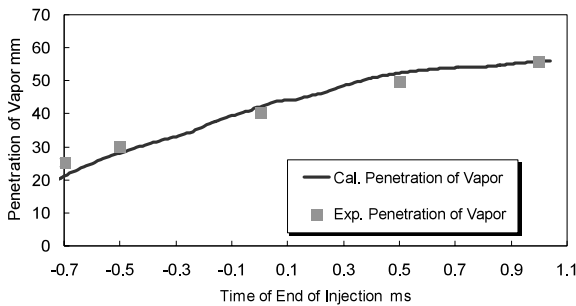


Fig.9 Liquid and Vapor Phase Equivalence Ratio Distributions in Evaporating Gasoline Spray Calculated by CFD, Pattern 2

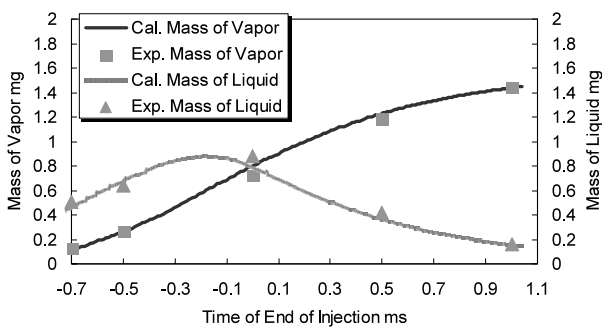
相噴霧到達距離, Fig.11(b)に噴射開始後 (ASOI)  $t = 1.5\text{ms}$  における実機計測結果と計算結果を示す。実機計測結果は直接撮影写真であり、計算結果は液相粒子を示している。つぎに、噴霧レイアウトおよび噴孔数を変更したインジェクタBの結果をFig.12に示す。このインジェクタBでも良い一致を示すことが確認できた。今回の実機結果は常温高圧下であるため実機条件と厳密な比較はできないが、マルチホールインジェクタでも最適化が可能であることがわかった。実機の高温高圧下での検証は今後の課題とする。



(a) Spray Tip Penetration of Multi-hole Injector A



(a) Spray Tip Penetration



(b) Mass of Vapor and Liquid

Fig.10 Comparison of Experimental and Calculation Results  $P_a=1.5\text{MPa}$ ,  $T_a=550\text{K}$ , Pattern 2

### 5. 実機用マルチホールインジェクタへの適用

これまで行ってきた単噴孔ホールインジェクタを実機マルチホールインジェクタに適用した。高温高圧下にて最適化を行った値を参考に、入力変数を最適化した時の実機マルチホールインジェクタの実験結果 (目的関数) と計算結果の比較をFig.11に示す。Fig.11(a)にインジェクタAの液

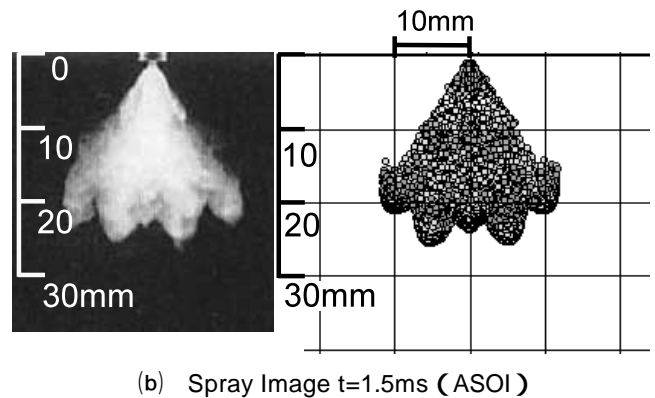


Fig.11 Comparison of Experimental and Calculation Results of Multi-hole Injector A  $t=1.5\text{ms}$  (ASOI),  $P_a=0.6\text{MPa}$ ,  $T_a=300\text{K}$

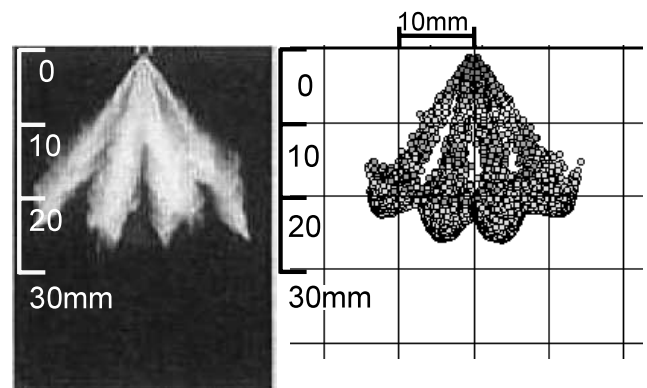


Fig.12 Comparison of Experimental and Calculation Results of Multi-hole Injector B  $t=1.5\text{ms}$  (ASOI),  $P_a=0.6\text{MPa}$ ,  $T_a=300\text{K}$

### 6. おわりに

直噴ガソリン機関の圧縮行程噴射を想定した高温高圧条

件の雰囲気中に噴射した燃料噴霧を2波長レーザー吸収散乱 (Laser Absorption Scattering : LAS) 法によって測定した。その実験結果に基づき3D-CFDによる噴射初期および噴霧サブモデルパラメータを多目的遺伝的アルゴリズムによって最適化を行う噴霧予測手法を開発した。

得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 入力変数として噴射速度, SMD, 液滴分裂モデル係数 (臨界We数, 安定直径定数の乗数, 特性分裂時定数の乗数) を用いた。更に, 噴射速度とSMDに時間変化を加えることで液相および蒸気相の当量比分布の実験結果と計算結果が良く一致することが確認された。
- (2) 最適化技術を適用することで1週間から1か月かかっていた合わせ込みを短縮することが可能となった。実験に協力して頂いた広島大学大学院の田所正氏に深く感謝の意をあらわします。

### 参考文献

- (1) Skogsberg, M. et al. : Effects of Injector Parameters on Mixture Formation for Multi-Hole Nozzles in A Spray-Guided Gasoline DI Engine, SAE Paper , 2005-01-0097 , p.1-16 (2005)
- (2) Honda, T. et al. : A Study of Mixture Formation and Combustion for Spray Guided DISI, SAE Paper , 2004-01-0046 , p.1-9 (2004)
- (3) Hiraya, K. et al. : A Study of a DISI Engine with a Centrally Located High-pressure Fuel Injector, SAE Paper , 2004-01-2944 , p.1-10 (2004)
- (4) Szekely, A. G. et al. : Combustion Characteristics of a Spray-Guided Direct-Injection Stratified-Charge Engine with a High-Squish Piston, SAE Paper , 2005-01-1937 , p.1-19 (2005)
- (5) 栗山 : 開発期間短縮を目的とする戦略的CAEの展開 - パワーCAEとライトCAE - , 自動車技術 , Vol.51 , No.4 , p.79-85 (1997)
- (6) Stefan, T. et al. : The Effect of Front-Loading Problem-Solving on Product Development Performance, Journal of Product Innovation Management , vol.17 , No.2 , p.128-142 (2000)
- (7) Shimo, D. et al. : EM Reduction by a Large Amount of EGR and Excessive Cooled Intake Gas in Diesel Engines, Proceedings of 31th FISITA World Automotive Congress , No.F2006P372 (2006)
- (8) Suzuki, M. et al. : Simultaneous Concentration Measurement of Vapor and Liquid in an Evaporating Diesel Spray, SAE Paper, No930863 , p.1-23 (1993)
- (9) Zhang, Y. et al. : Imaging of Droplets and Vapor Distributions in a Diesel Fuel Spray by Means of a Laser Absorption-Scattering Technique, Applied Optics, SAE Paper , Vol.39 , No.33 , p.6221-6229 (2000)
- (10) Zhang, Y. et al. : Quantitative Measurement of Droplet and Vapor Concentration Distributions in Diesel Spray by Processing UV and Visible Images, SAE Paper , 2001-01-1294 , p.1-14 (2001)
- (11) Yamakawa, M. et al. : Quantitative Measurement of Liquid and Vapor Phase Concentration Distributions in a D.I. Gasoline Spray by the Laser Absorption Scattering (LAS) Technique, SAE Paper , 2002-01-1644 , p.1-13 (2002)
- (12) Li, T., Zhang et al. : Characterization of Mixture Formation Processes in DI Gasoline Engine Sprays with Split Injection Strategy via Laser Absorption and Scattering (LAS) Technique, SAE Trans. J. Fuels Lubricants , Vol.112 , No.4 , p.2296-2306 (2003)
- (13) 日本液体微粒化学会 : アトマイゼーション・テクノロジー , 森北出版 , p.85-87 (2001)
- (14) Hsiang, L. -P. et al. : Near-limit drop deformation and secondary breakup, Int. J. Multiphase Flow , vol.18 , No.5 , p.635-652 (1992)
- (15) Poling, B.E. et al. : The properties of gases and liquids, fifth edition, McGraw Hill, New York (2001)
- (16) Kanazaki M. et al. : Multiobjective Design Optimization of Merging ConFIGuration for an Exhaust Manifold of a Car Engine, Proceedings of PPSN, the 7th international conference on parallel problem solving from nature , p.281-287 (2002)
- (17) Hiroyasu, H. et al. : Empirical equations for the sauter mean diameter of a diesel spray, SAE Spray , 890464 , p.868-877 (1989)
- (18) 日本液体微粒化学会 : アトマイゼーション・テクノロジー , 森北出版 , p.41-43 (2001)

### 著者



佐藤圭峰



横畑英明



山川正尚



西田恵哉



大瀧康宏