エタノール直接発電型固体高分子燃料電池の
アノード側流路形状の検討*

(遺伝的アルゴリズムを用いた数値流動解析による屈曲部形状の最適化)

谷中 悟史^{*1}, 高田 洋吾^{*2}, 脇坂 知行^{*2}
古市 紀之^{*3}, 梅 伸司^{*4}, 八賀 正司^{*5}Investigation of the Shape of the Anode Flow Channel in a Direct Ethanol
Polymer Electrolyte Fuel Cell
(Optimization of the Sharp Turn Corner Shape by Numerical Flow
Analysis with a Genetic Algorithm)Satoshi TANINAKA, Yogo TAKADA^{*6}, Tomoyuki WAKISAKA,
Noriyuki FURUICHI, Shinji TOGA and Tadashi HACHIGA^{**} Graduate School of Engineering, Osaka City University,
3-3-138 Sugimoto, Sumiyoshi-ku, Osaka-shi, Osaka, 558-8585 Japan

Polymer electrolyte fuel cells, which have been developed for mobile equipment, are mainly direct methanol fuel cells (DMFC). From the standpoint of safety to a human body, it is desirable to use ethanol as fuel. In order to improve the performance of direct ethanol fuel cells (DEFC), it is necessary to investigate the fuel flow pattern in the anode flow channel with many sharp turn corners in the fuel cell, and to improve the channel shape. So, in this study, the velocity distribution of the water flow in a micro-channel was numerically analyzed using the authors' GTT code and the calculated results were verified by the velocity measurement with a line LDV system. For reducing the pressure loss in consideration of the suppression of flow stagnation in the channel, it was attempted to optimize the sharp turn corner shape by three-dimensional numerical flow analysis with a genetic algorithm (GA) and a shape with less pressure loss was found.

Key Words: Fuel Cell, Ethanol, Micro-channel, LDV, Numerical Analysis, Genetic Algorithm, Pressure Loss

1. 緒言

モバイル機器用に開発が進められている固体高分子型燃料電池 (PEFC) は、今のところ、燃料としてメタノール水溶液を直接用いる燃料電池 (DMFC) が主であるが、人体への安全性を考えると、燃料としてはエタノールを使用することが望ましい。

著者らは、エタノール水溶液を直接用いる燃料電池 (DEFC) の研究を行ってきたが^{①②}、その性能向上策の一つとして、アノード側の屈曲を有する流路における液体燃料の流れについて流動状態を解明し、流路形状を改善することが必要である。そこで本研究では、屈曲流路におけるエタノール水溶液 (その濃度は 3wt% 程度) の流動状態を解明する第一段階として、著者らの熱流動解析コード (GTT コード^③) により、屈曲流路 (幅 1 mm のマイクロチャンネル) における

水の流動解析を行い、その結果をライン LDV システム^④による流速測定結果と比較・検証した。そして、流路の屈曲部について、流れの淀みを少なくしつつ圧力損失を極力低減できるように、遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm : GA) を用いて三次元数値流動解析を行うことにより、流路形状の最適化を試みた。このような三次元解析は、多大の計算時間を要するため、研究例はまだ数少ない。

2. 発電特性とセパレータ内流れ

燃料電池のセパレータ内の流路形状には、図 1(a) のサーペンタイン (蛇行) 型、(b) のパラレル型、(c) のグリッド型など、数多くの種類があるが、サーペンタイン型がよく用いられている。図 1 に、サーペンタイン型、パラレル型、そしてグリッド型流路 (いずれも溝幅 1.5 mm, 奥行き 1 mm) に水を流した場合の流動計算結果を示す。計算には GTT コード (解析手法は次章参照) を用いた。計算条件は表 1 に示すとおりであり、流入流量は 10 mL/min (断面平均流速 0.111 m/s) である。サーペンタイン型流路では、圧力損失が他の流路形状と比較して約 10 倍の 340 Pa と非常に大きな値が算出された。この原因としては、流路の分岐が無いために流路内全域で流速が速いこと、そして多数の

* 原稿受付 2005 年 12 月 21 日。

^{*1} 学生員、大阪市立大学大学院工学研究科 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138)。^{*2} 正員、大阪市立大学大学院工学研究科。^{*3} 正員、産業技術総合研究所 (〒305-8568 つくば市梅園 1-1-1 中央第 2)。^{*4} 正員、富山商船高等専門学校電子制御工学科 (〒933-0293 新湊市海老練合 1-2)。^{*5} 正員、富山商船高等専門学校商船学科。

E-mail: takada@mech.eng.osaka-cu.ac.jp

Table 1 Calculation condition

Temperature	293 K
Ambient pressure	1.01325×10^5 Pa
Average inlet flow velocity	0.111 m/s
Density	998.02 kg/m ³
Viscosity	1.002×10^{-3} Pa·s

Fig. 1 Pressure loss in three-type flow channels

屈曲部 (180° ターン) を有することが考えられる。また、圧力分布から、直線流路部に比べ屈曲部での圧力損失が大きいたことが確認できる。

次に、図 1 の各流路を持つアノード側セパレータを用いた DEFC において発電特性を計測し、流路形状が発電性能にどのような影響を及ぼすかを調べた。この実験には、図 2 に示す自作の単セル DEFC (寸法: 80×60×15 mm) を用いた (使用した MEA (30×30 mm) は既報⁹⁾参照)。燃料の 3 wt% エタノール水溶液は、流入流量 10 mL/min (断面平均流速 0.111 m/s) で供給した。酸化剤としては空気を使用し、室

温・大気圧下で、自然吸気により供給した。測定時の外部負荷抵抗は 2.2 Ω である。図 3 の測定結果から、流路形状が DEFC の発電性能に大きな影響を及ぼしていることが確認できる。サーペントライン型流路の場合に、最も高い発電性能を示しているが、その原因としては、流路内の流速が速いため、触媒反応を阻害する副生成物の排出能力が向上したことや、燃料の拡散性が向上したことが考えられる。しかし、この流路の場合、圧力損失が非常に大きく、流動させるのに必要なポンプの動力が大きくなるという問題がある。

流路の直線部分における圧力損失低減には、流路の壁面に特殊な摩擦低減加工を施すことなど以外には方法がないが、屈曲部については、その形状を工夫することにより圧力損失を低減することが可能と考えられる。屈曲部が複雑な曲線形状であると、セパレータ加工の際に問題になると思われるが、切削加工のために量産化が困難で高価な高密度カーボン (グラファイト) のセパレータに対して、プレス成型によって製作されたセパレータ (粉末カーボン製、ステンレス製など) が利用されつつあり、流路形状が複雑であっても加工上の問題は少なくなっている。むしろ今後は、燃料電池の発電性能を少しでも高めるために、圧力損失が小さい流路形状のセパレータが望まれるようになると思われる。

Fig. 2 Single cell DEFC

Fig. 3 Effect of flow channel shape on the DEFC performance

3. 解析モデル

屈曲部を有するマイクロチャンネル内における流体の流動を数値解析および測定するために、図4に示す流路を用いた。この流路は長さ4 mmの助走部と、長さ58.5 mm、幅・奥行きともに1 mmの直進部分、および長さ4 mm、幅1.5 mm、奥行き1 mmの屈曲部からなる。数値解析のために、図4の流路全域にわたる計算格子を作成した。格子分割数は $100 \times 24 \times 84$ で、屈曲部の拡大図(図4右)に示すように、壁面付近と流動変化の大きい箇所の計算格子間隔が細くなるようにした。

流体の基礎方程式は、式(1)の質量保存式および式(2)~(4)の運動量保存式である。本来、液体燃料を用いる燃料電池のセパレータ内の流れは、温度変化や化学反応による物質の濃度変化を伴うが、本研究においては、流動のみを解析対象とするので、マイクロチャンネル内の水の等温流れを対象とすることにした。現状のDEFCでは、水溶液中のエタノール濃度が低く、また燃料の反応度が低いため、発熱や水溶液の成分濃度変化を無視し、流体を温度一定の水として扱っても問題が無いと考えている。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{v} u - \mu \text{grad } u) = -\frac{\partial p}{\partial x} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{v} v - \mu \text{grad } v) = -\frac{\partial p}{\partial y} \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{v} w - \mu \text{grad } w) = -\frac{\partial p}{\partial z} \quad (4)$$

上式において、 t は時間、 x, y, z はデカルト座標、 u, v, w は速度ベクトル $\vec{v}$ の各成分、 ρ は密度、 μ は

Fig. 4 Micro-channel model and computational grid

粘性係数、 p は圧力である。本研究では、流体は非圧縮性粘性流体であるとし、流れは層流であるとする。GTTコードでは、境界適合構造格子による有限体積法に基づいて、解析対象の物理空間を任意形状の6面体の体積要素に分割し、これを一般曲線座標変換により、計算空間における立方体の体積要素に変換している。従属変数(圧力 p 、密度 ρ 、速度の3成分 u, v, w)の配置はRegular Grid法に基づいており、それらは全て、体積要素の中央に配置している。基礎方程式の離散化に際し、対流項はTVDスキーム、拡散項は中心差分法、非定常項は完全陰解法を適用した。

4. 数値計算結果とラインLDVによる計測結果の比較検討

4.1 数値計算結果 図4の流路における流速分布の計算結果(中央断面)を図5に示す。流入口における

Fig. 5 Calculated velocity distribution at the central section

Fig. 6 Water flow system

Fig. 7 Optical system for the line LDV

Fig. 8 Measuring positions of velocity with the line LDV system

Fig. 9 Calculated and measured velocity distributions between the sharp turn corners

流量は $40 \text{ mm}^3/\text{s}$ (断面平均流入速度 $\bar{V}_{in} = 0.04 \text{ m/s}$) で、層流の流速分布として放物面状分布を与えた。計算結果によると、屈曲部において、上方の右上と左上の角部分および下方の壁面近傍において、流れの淀みが発生していることが判る。この計算結果を検証するため、ライン LDV による流速測定を行った。

42 実験装置 図 6 に実験装置の概略図を示す。屈曲部を有するマイクロチャンネルのテストセクションは、図 4 と同じ形状・寸法であり、全面をガラスで作製した。その中をヘッドタンクから一定圧力で流れ出る水 (微量のシーディング材を混入) が通過するようになっている。

43 ライン LDV 実験に用いたライン LDV[®] の光学系を図 7 に示す。レーザ発光部の HeNe ガスレーザ (出力 30 mW 、波長 632.8 nm) から発せられたビームは偏光ビームスプリッタによって、ほぼ等強度の 2 本のビームに分けられる。分かれたビームはシリンドリ型レンズで集光し、テストセクション内で交差する。この集光過程において、ビームは円形から楕円形に変形するため、測定点における交差部分は点ではなく、線状になる。測定体積中の測定位置を通過する粒子により生じる散乱光信号は、アクロマチックレンズにより対物レンズの 0.38 mm 手前で一旦焦点が結ばれ、その後、ファイバアレイ (ファイバ素子数: 17 本) 上に再び焦点が結ばれる。散乱光信号は光ファイバを経由し、アバランシェフォトダイオード (APD) により検知される。本装置の空間分解能は $25 \mu\text{m}$ であり、このように高分解能で測定できることが、本計測では重要である。

44 比較検討 図 8 に示した各位置 (中央断面) での x 方向流速 u の測定結果と計算結果のスパン方向分布を図 9 に示す。局所的に計算結果が測定結果と一致しないところもあるが (例えば $x = 1.0 \text{ mm}$ における $y = 1.0 \text{ mm} \sim 1.5 \text{ mm}$ での流速など)、総じて両者における流速 u の分布傾向は良く一致している。このように、本コードによるマイクロチャンネル内の流動計算結果は、ほぼ妥当であることが確かめられたので、

研究目的である圧力損失低減に向けて、遺伝的アルゴリズムを用いた数値流動解析による流路形状の最適化を試みた。

5. 遺伝的アルゴリズムによる屈曲部形状の最適化

遺伝的アルゴリズム (GA) は、生物の遺伝と自然淘汰による進化のメカニズムを工学的にモデル化したものである。GA では、生物の進化過程における遺伝的操作、すなわち、個体の遺伝子の選択、交叉、突然変異により、比較的短時間で準最適解を得ることが可能である^{9,10)}。

GA により最適化する前に、図 10 に示す直角に屈曲した 2 種類の三次元流路モデル (図 4 の流路上部のモデルで、上下方向の直線部の長さは 3 mm 、その溝幅・奥行きは共に 1 mm) について、圧力損失がどの程度であるか、断面平均流入速度 $\bar{V}_{in} = 0.04 \text{ m/s}$ の場合について計算を行った。図 10 に圧力分布の計算結果

Fig. 10 Pressure loss in the standard shape flow channels (average inlet flow velocity: 0.04 m/s)

Fig. 11 Type A flow channel (tuning parameters in the curved part)

を示す。水平部の溝幅が1 mmの流路 (Standard 1) では、10.84 Paの圧力損失が発生した。一方、水平部の溝幅を1.5 mmと少し広げた流路 (Standard 2) では、9.08 Paの圧力損失が発生した。これらの流路の場合、角があるため流れが淀み、圧力損失が大きくなると考えられる。そこで、淀みの発生がないように、図11に示すような円弧で屈曲部を形成した流路モデル (Type A) を作成した (格子分割数: $22 \times 8 \times 68$)。この流路の場合、圧力損失の計算結果は8.92 Paであり、Standard 1での圧力損失に比べ、約2 Paの低減が見られるものの、Standard 2との比較ではほとんど差が見られない。

そこで、さらに圧力損失を低減するため、GAを用いて屈曲部流路形状の最適化を試みた。図11の屈曲部において、流路壁曲線を3次スプライン曲線で表し、各流路幅 A_1, A_2, A_3 および屈曲部の始点部と終点部における流路外周の接線の傾き S_1, S_2 の合計5個のパラメータをGAによりチューニングした。なお、屈曲部の内周形状は円弧状のままとし、外周形状のみを変化させた。また、 $A_1 \sim A_3$ については、0.5 mm～1.5 mmの範囲、 S_1, S_2 についてはその絶対値が 0.175 rad (10°)未満となるように、チューニングに拘束条件を付けている。各パラメータは8ビットの2進数で表現し、1世代あたり10個の染色体を生成させつつ、150世代まで計算した。なお、適応度関数 f_i は式(5)のように定義した。分母の P_L は定常状態における圧力損失の計算結果であり、 $\bar{V}$ は、ある ζ の断面内における流速平均値であり、 $\bar{V}_{\max}$ および $\bar{V}_{\min}$ は、それぞれ屈曲開始断面(ζ_s)から屈曲終了断面(ζ_e)までの $\bar{V}$ の最大値および最小値である。 $\bar{V}_{\max} - \bar{V}_{\min}$ は断面平均流速の変化の度合を表している。 $\bar{V}_{\max}$ と $\bar{V}_{\min}$ の差が大きくなるのは、溝の一部が著しく広くなるか、または著しく狭くなる場合である。つまり、GAによるチューニング過程において、凹凸の激しい形状が生き残るのを防ぐ働きがある。 α は圧力損失 P_L と断面平均流速の変化 $\bar{V}_{\max} - \bar{V}_{\min}$ に対する重み付け係数であり、本研究では数回にわたる試行の結果、 $\alpha = 0.9$ とするのが適切であると判断した。

$$f_i = \frac{1}{\alpha \left(\frac{P_L}{P_{L0}} \right) + (1 - \alpha) \left(\frac{\bar{V}_{\max} - \bar{V}_{\min}}{(\bar{V}_{\max} - \bar{V}_{\min})_0} \right)} \quad (5)$$

なお、 P_{L0} は、直角に屈曲した流路 Standard 2 で計算したときの圧力損失値であり、 $(\bar{V}_{\max} - \bar{V}_{\min})_0$ は、その流路における断面平均流速の変化値である。交叉確率は0.3、突然変異の確率は0.05とした。

Fig. 12 Transition of fitness value and flow channel shapes (average inlet flow velocity: 0.04 m/s)

Fig. 13 Semi-optimized result of the flow channel shape by GA (average inlet flow velocity: 0.04 m/s)

Table 2 Range of tuning parameters with the zooming method

Parameters for Type C	Range of tuning parameters
$A_1 = 1.211 \text{ mm}$	$A_1 = 1.1 \sim 1.3 \text{ mm}$
$A_2 = 1.424 \text{ mm}$	$A_2 = 1.3 \sim 1.5 \text{ mm}$
$A_3 = 1.321 \text{ mm}$	$A_3 = 1.2 \sim 1.4 \text{ mm}$
$S_1 = 0.151 \text{ rad}$	$S_1 = 0.131 \sim 0.166 \text{ rad}$
$S_2 = -0.168 \text{ rad}$	$S_2 = -0.183 \sim -0.148 \text{ rad}$

Fig. 14 Transition of fitness value and flow channel shapes with the zooming method (average inlet flow velocity: 0.04 m/s)

図 12 に適応度関数 f_i の世代ごとの変化を示す。最初の数世代で適応度が急速に向上した後、150 世代付近に至るまでは、徐々に上昇を続けた。なお、GA によるチューニング開始前の流路形状を Type A、チューニング開始後もまもなくの流路形状を Type B、150 世代までの準最適流路形状を Type C とする。図 13 (a),(b) に Type C の流路における圧力分布と流速分布の計算結果を示す。このチューニングにより、圧力損失は 7.72 Pa まで低減できた。また、流速分布図より明らかに、淀んだ箇所が存在しないことから、この流路形状を実際の燃料電池内の流路に採用した場合、化学反応によって生じた副生成物が、屈曲部に堆積することを防止できると考えられる。

Fig. 15 Optimized result of the flow channel shape by GA with the zooming method (average inlet flow velocity: 0.04 m/s)

さらに圧力損失を低減するために、ズーム法を用いて、流路形状の最適化を進めた。ズーム法とは、まず各パラメータを広範囲に変化させて大域的に準最適解を探索した後、その準最適解に対する各パラメータを新たな探索範囲の中心として、再度その周辺を限定的に細かく探索して、更なる最適解を特定するという手法である。

大域的探索により求められた準最適流路形状の Type C に対する各パラメータ値 (表 2 左) を新たな探索範囲のはじめ中心として、限定した領域から再度最適値を探し出した。各パラメータの変化範囲を $A_1 \sim A_3$ については 0.2 mm, S_1, S_2 については 0.035 rad と探索領域を狭めて (表 2 右), 再度 50 世代まで GA によるチューニングを行った。このズーム法のもとでの適応度関数 f_i の世代ごとの変化を図 14 に示す。探索の結果得られた最適流路形状 (Type D) における圧力分布と流速分布の計算結果を図 15 (a), (b) に示す。この結果より、圧力損失を更に小さくできていることが判る。

Fig. 16 Pressure and velocity distributions in the flow channels of various shapes (average inlet flow velocity: 0.167 m/s)

エタノール水溶液を燃料とする燃料電池において、燃料流路における流速は発電性能に影響を与えるため、上記で検討した低流速の場合（流入流量 2.4 mL/min, すなわち断面平均流入速度 $\bar{V}_{in} = 0.04$ m/s）に加え、それよりも約 4 倍流速が速い場合（流入流量 10 mL/min, すなわち $\bar{V}_{in} = 0.167$ m/s）についても、圧力損失低減に関する検討を行った。その結果を以下に示す。

直角に屈曲した 2 種類の流路（Standard 1, Standard 2）における圧力分布および流速分布の計算結果を図 16 (a)~(d) に示す。流入速度が約 4 倍に増加したことにより、低流入速度の場合より、圧力損失は Standard 1 の場合で 62 倍、Standard 2 の場合で 5.7 倍と非常に大きくなる。それは屈曲部で渦が発生していることが理由であろうと思われる。このように流速が速くなるほど、流路形状の最適設計が重要になる。

GA を用いた屈曲部形状の最適化は、高流入速度の場合も、低流入速度の場合と同様に、図 16 (e), (f) の円弧形状（Type A）から開始する。図 17 (a) のように、大域的探索によって、Type B の形状を経て、Type C の形状までチューニングし、その後、図 17 (b) のようにズームング法により、Type D の最適形状（図 16 (i), (j)）を得た。

低流入速度の場合（ $\bar{V}_{in} = 0.04$ m/s）、最適化された屈曲部は、右上側が膨らむ形状となった（ $A_3 > A_1$ ）のに対して、高流入速度の場合（ $\bar{V}_{in} = 0.167$ m/s）は、左上側が膨らむ形状となった（ $A_1 > A_3$ ）。このように、流入速度が速い場合、屈曲部の左上側において圧力が高くなりやすいことが、形状チューニングの過程で左上側を元の円弧よりも膨らませる要因になったと考えられる。

以上の結果より、流入速度によって屈曲部の最適形状が異なるため、使用時の流速に合わせて、形状最適化を行う必要があることが判る。

6. 評価結果

以上で検討した各屈曲流路モデルにおける圧力損失に関して、低流入速度（ $\bar{V}_{in} = 0.04$ m/s）の場合と、高流入速度（ $\bar{V}_{in} = 0.167$ m/s）の場合で評価を行った。 $\bar{V}_{in} = 0.04$ m/s の場合、図 18 に示すように Standard 1 の流路に対して、チューニング前の Type A の流路では、圧力損失が約 16 % 低減されたのに比較し、ズームングも含めた GA によって最適化された Type D の流路では、圧力損失が約 33 % 低減され、約 2 倍の改善が見られた。次に、 $\bar{V}_{in} = 0.167$ m/s の場合、図 19 に示すように Standard 1 の流路に対して、Type A の流路では、圧力損失が約 34 % 低減され、チューニング

Fig. 17 Transition of fitness value and flow channel shapes (average inlet flow velocity : 0.167 m/s)

Fig. 18 Reduction of pressure loss by the optimization of flow channel shape using GA (average inlet flow velocity : 0.04 m/s)

Fig. 19 Reduction of pressure loss by the optimization of flow channel shape using GA (average inlet flow velocity : 0.167 m/s)

の前から大きく改善された。Standard 1 および Standard 2 の流路では、屈曲部で渦が生じているため、圧力損失が非常に大きい状態にあり、流路から角部を無くすだけでも、圧力損失が大幅に低減されたものと考えられる。加えて、GA によって屈曲部形状を最適化することにより、更に 10 % 圧力損失が低減し、総じて圧力損失を 44 % 低減することができた。

なお、流路形状最適化に要した計算時間は、10 台の PC クラスタ (CPU: Pentium IV, 2.53~3.4 GHz) による MPI 並列計算で 2 日間であり、十分実用的な計算時間で最適化できた。

7. 結言

エタノール直接発電型固体高分子燃料電池のアノード側流路における液体燃料 (エタノール水溶液) の流れを解明する第一段階として、屈曲を有するマイクロチャンネル内の水の流動について、著者らの GTT コードによる流動解析とライン LDV による流速測定を行った。測定結果との比較により、流速分布の数値計算結果が、マイクロチャンネル内流れを概ね良好に再現できることを確かめた。

屈曲を有するマイクロチャンネル内流れについて、圧力損失を低減するため、遺伝的アルゴリズム(GA)を用いた数値流動解析により屈曲部形状を最適化した。最適化された流路の場合、直角に屈曲した基準流路に比べ、圧力損失が低流入速度の場合 ($\bar{V}_{in} = 0.04 \text{ m/s}$) には約 33 %、高流入速度の場合 ($\bar{V}_{in} = 0.167 \text{ m/s}$) には約 44 %、それぞれ低減され、ズーミングを含めた GA による形状最適化は、極めて有効であることが示された。

なお、流路への流入速度により、圧力損失低減に対して最適な屈曲部形状が異なるため、実際の燃料電

池の使用条件 (液体燃料の流量) に合わせて、流路形状を最適化することが必要である。

謝辞

本研究費の一部は、平成 16 年度マツダ財団研究助成金および平成 17 年度科学研究費 (基盤研究(C) 17560191) の援助を受けた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- (1) Wakisaka, T., Koike, G., Nishioka, K. and Takada, Y., Investigation on the Effects of the Making Process and Structure of a Membrane Electrode Assembly on the Performance of Polymer Electrolyte Fuel Cells, Proceedings of the Sixth KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference, CD-ROM, JJ08 (2005).
- (2) Taninaka, S., Ishii, T., Takada, Y. and Wakisaka, T., Analysis of Liquid Flow in the Anode-side Passage of a Direct Ethanol Polymer Electrolyte Fuel Cell, Proceedings of the 80th Annual Meeting of JSME Kansai Branch, No.054-1, (2005), pp.12-31-12-32 (in Japanese).
- (3) Wakisaka, T., Isshiki, Y., Shimamoto, Y. and Magarida N., Numerical Analysis of the Diffusion Process of Intake Mixture in Dual-Intake Valve Engines, JSME International Journal, Series B, Vol.38, No.2, (1995), pp.213-221.
- (4) Hachiga, T., Furuichi, N., Mimatsu, J., Hishida, K. and Kumada, M., "Development of a Multi-point LDV by Using Semiconductor Laser with FFT-based Multi-channel Signal Processing", Experiments in Fluids, Vol.24, No.1, (1998), pp.70-76.
- (5) Ishida, R., Murase, H. and Koyama, S., Fundamental Theories and Application Programs for Genetic Algorithms by Personal Computer, Morikita Publishing Co., (1997), (in Japanese).
- (6) Kim, S.-K., Ito, K. and Wakisaka, T., Application of a Genetic Algorithm to the Numerical Analysis of Combustion Process in a High-Pressure Injection Two-Stage Combustion Diesel Engine, Transactions of JSAE, Vol.36, No.3, (2005), pp.37-43 (in Japanese).