PIV 法によるブローダウン過給ガソリン HCCI 機関の筒内流動の可視化*

馬 躍^{*1}, 窪山 達也^{*1}, 森吉 泰生^{*2}
畑村 耕一^{*3}, 山田 敏生^{*4}, 高梨 淳一^{*5}

Visualization of In-Cylinder Flow of a Gasoline HCCI Engine Using Blowdown Supercharging System by PIV Method

Yue MA^{*1}, Tatsuya KUBOYAMA, Yasuo MORIYOSHI,
Koichi HATAMURA, Toshio YAMADA and Junichi TAKANASHI^{*1} Chiba University
1-33, Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba, 263-8522 JAPAN

The objective of this research is to investigate the effect of the EGR guide, employed to generate a strong in-cylinder thermal stratification, on the recharged EGR gas flow into the cylinder in a gasoline HCCI engine equipped with the blowdown supercharging (BDSC) system. The recharged EGR gas flow was visualized using an optical access engine. A steady gas flow and an unsteady gas flow in motoring from the exhaust port into the cylinder were visualized via PIV method. The effect of the pressure difference between the exhaust port and the cylinder and the geometry of the EGR guide on the recharged gas flow was investigated. The results indicate that the flow field pattern is largely affected by the EGR guide height, and that an increase in the EGR guide height is effective to generate a strong in-cylinder thermal stratification. And then, the reduction of maximum pressure rise rate ($dp/d\theta$) was investigated with a larger EGR guide height. Also, the in-cylinder thermal stratification was investigated by numerical simulation. The results indicate that thermal stratification gets stronger by a higher EGR guide. However, it was found that the reduction of maximum pressure rise rate takes a peak at a height of EGR guide.

Key Words : Gasoline Engine, Flow Measurements, HCCI Engine, Blowdown Supercharge, EGR Guide, PIV

1. 緒 言

地球環境保全と省エネルギーの観点から、内燃機関に対しては、環境負荷の低減と高効率化が求められている。予混合圧縮着火燃焼（以下 HCCI と称す）は大幅な熱効率向上と低エミッション化を両立できる有望な燃焼方式の一つである⁽¹⁾⁽²⁾。しかし、HCCI 運転の成立可能な運転範囲は極めて狭く、このままでは実用性に乏しい。これを解決するために多くの研究がなされ、HCCI 運転可能領域を高負荷側へ広げるためには、過給⁽³⁾や大量 EGR による作動ガス量の増大⁽⁴⁾、筒内温度分布の成層化⁽²⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾が有効であると報告されている。

著者らは、過給機無しで作動ガス質量を増加することのできるブローダウン過給（以下 BDSC と称す）と筒内温度成層化を組み合わせることで、高負荷運転時の圧力上昇率を下げ、高負荷限界を拡大できることを実証してきた⁽⁴⁾⁽⁶⁾。そこでは、EGR ガスのシリンダ内への流入方向を定める EGR ガイドを用いて、新気と EGR ガスの混合を弱めることで温度成層化を促進している。BDSC システムを用いて、更に強い温度成層化を実現できれば、

* 原稿受付 2013 年 1 月 31 日

^{*1} 正員, 千葉大学大学院 (〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町 1-33)^{*2} 正員, フェロー, 千葉大学大学院^{*3} 正員, (株)畑村エンジン研究事務所^{*4} 正員, (株)IDAJ^{*5} (株)本田技術研究所

E-mail: yueliang_1314@graduate.chiba-u.jp

更なる高負荷限界の拡大が期待できるが、このためには EGR ガイドの形状が EGR ガス流動に与える影響を明らかにすることが重要である。

そこで本研究は、筒内に強い温度分布を形成する EGR ガイドの設計指針を得ることを目的とする。ブローダウン過給によって筒内に再導入される EGR ガス流動計測に PIV 法を適用し、EGR ガイドの高さが再導入 EGR ガス流動に与える影響を調べると共に、数値解析を行って、EGR ガス流動の変化が筒内温度分布に与える影響を調べている。

2. ブローダウン過給システムと EGR ガイド

図 1 に BDSC システムにおける吸排気の開弁リフトを示す。本システムでは排気弁を 1 サイクル中に 2 回開く。すなわち、圧縮行程初期に排気弁を再開することで、位相が 360deg.異なる気筒の排気ブローダウン圧力波を利用して高温の EGR ガスをシリンダに再導入する。燃料と空気の混合気を充填した後に EGR ガスを導入するため、過給機を用いることなく作動ガス量を確保出来る。併せて、筒内温度分布の成層化を実現するため、図 2 に示す EGR ガイドを排気ポート外周部に設置している。排気ポートから筒内に流入する EGR ガスを排気ポート側に偏在させ、筒内温度分布の成層化を促進することが狙いである。システムの詳細については既報⁽⁴⁾を参照されたい。

Fig 1 Valve timing for the BDSC-HCCI Engine

Fig 2 Exhaust port equipped with the EGR guide

3. 再導入 EGR ガス流動が温度成層化に与える影響の数値解析

市販 CFD コードの Star-CD を使って数値計算を行い、再導入 EGR ガス流動と筒内温度分布の関係を調べた。表 1 に計算条件を示す。図 3 と図 4 に、EGR ガイドなしと EGR ガイドあり（高さ 3.0 mm）の場合における、圧縮上死点前 192 度で排気バルブ中心を含むシリンダ縦断面のシリンダ内温度分布及び流動分布を示す。

Table 1 Simulation condition

Displacement	500cc/cyl.
Bore × Stroke	86mm × 86mm
Connecting rod length	139mm
Intake valve diameter	φ 35mm
Exhaust valve diameter	φ 30mm
Initial condition	Temperature and pressure of the experiment
Boundary condition	Wall function
Intake pressure	Pulsation of the experiment
Exhaust pressure	
Solver	STAR-CD v3.26
Number of the lattices	Approximately 1000000
Turbulence model	k-ε/high Reynolds number
Differencing Schemes	MARS

Fig 3 Temperature distribution and velocity distribution by 3-D simulation without EGR guide

Fig 4 Temperature distribution and velocity distribution by 3-D simulation using EGR guide

図 3 と図 4 を比較すると、EGR ガイドがない場合、再導入 EGR ガスはシリンダヘッド壁面に沿いながら、吸気ポート側に向かって流れることがわかる。これに対して、EGR ガイドを取り付けると、再導入 EGR ガスの流入方向がシリンダの中心部へと傾き、排気バルブ下部に向かう流れが生じている、この流れによって排気バルブ付近に高温の EGR ガスが滞留し、強い温度成層が形成されることがわかる。

以上の結果から、再導入 EGR ガスの流入方向を観察することで、温度分布の形成に対する EGR ガイドの効果を概ね評価できると考えた。

4. 実験装置及び方法

4・1 可視化エンジン

実験に用いた可視化エンジンの諸元を表 2 に示す。可視化エンジンは、既報⁽⁴⁾の高負荷限界拡大効果を実証した試験エンジンと同じ直列 4 気筒ガソリン機関をベースに試作した 2 気筒エンジンであり、燃焼室形状、ボアなどの主要な諸元は既報で用いた試験機関と等しい。図 5 に実験に用いた可視化エンジンの概要を示す。1 番気筒はブローダウン圧力波を生成するために SI 運転する。2 番気筒は可視化気筒として、筒内計測をしている。図 6 に可視化気筒の概観を示す。延長ピストンを設置し、ピストンヘッドには石英ガラス窓が取り付けられており、ピストン内部に設置したミラーを介して光源をボトムから燃焼室内に入射することができる。シリンダも石英ガラス製でサイドビュー及びペントルーフ内の計測ができるようにした。本実験の計測断面は、EGR 再吸入と筒内流動を観察するため、図 7 に示した吸気・排気バルブ中心軸を通る断面とした。同図に示すように、ピストンに取り付けたガラス直径は 54mm で、バルブ中心軸上の計測で可視化できる幅は 36mm となる。

Fig 5 Experimental set-up and measurement system

Fig 6 Schematics of optical-access HCCI engine. (a) or (b):
Position of the camera used for PIV measurement

Table 2 Engine Specifications

Engine Type	4 valves, two-cylinder
Bore × Stroke	86mm × 86mm
Displacement	499.6cc/cyl.
Compression Ratio	9.1

Fig 7 Visualized cross-section

4・2 定常流実験の実験装置と光学系

実験では、可視化エンジンを定常流試験装置として使用した。図 8 に定常流計測システムの概要を示す。BDSC システムにおける再導入 EGR ガス流動を模擬した定常流に、PIV (Dantec Dynamic Studio version 1.45) 法を適用し、EGR ガイドの高さが再導入 EGR 流動に与える影響を調べた。可視化エンジンのピストンを取り外し、排気ポートからシリンダ内へ向けて空気を流すことで定常流試験ができるようにした。EGR ガスを筒内に再導入する

時の圧力を再現するため、外部コンプレッサを使って排気ポート内の圧力を高め、排気ポートと筒内の圧力差をブローダウン過給 HCCI 運転時相当に設定した。コンプレッサの入口に層流流量計（司測研：LFE-75B）を取り付け、空気の流量を計測した。排気ポート内圧力はピエゾレジスティブ絶対圧力変換器（Kistler 4005B）で測定し、温度はシース型熱電対で測定した。筒内に入る前にトレーサを排気マニホールドで空気と混合させるため、供給した空気にトレーサ粒子（セバシン酸ジオクチル）を混入させ、レーザシートで照射することで流れ場を 2 次元的に可視化した。トレーサ粒子からの散乱光は、高速度ビデオカメラ（FASTCAM APX-RS, Photron 社製）を用いて撮影した（撮影速度は 3000 fps, 撮影画像数は 1024×1024 pixels, 露光時間：333 μ s）。照明には、Nd:YLF ダブルパルスレーザー（New Wave Research 社製, PEGASUS PIV, 波長：527 nm）を用いた。

表 3 に実験条件を示す。排気バルブのリフト量は 1.0 mm と 2.0 mm とした。既報⁽³⁾において実現した高負荷限界付近での HCCI 運転時のバルブリフトを参照すると、排気ポートに到達するブローダウン圧力波が最大となるクランク角度におけるリフト量が 1.0 mm である。また、EGR ガイド高さは、既報⁽⁴⁾で用いた 3.0 mm を基準として、高さを 0.5 mm ずつ高めた 3.5 mm と 4.0 mm の 3 種類に設定した。排気ポート内の圧力はゲージ圧で 5 kPa, 10 kPa, 25 kPa とした。

Fig 8 Experimental set-up for steady flow PIV measurement

Table 3 Experimental conditions

Pressure difference(kPa)	5, 10, 25
Valve lift(mm)	1.0, 2.0
EGR guide height(mm)	0.0, 3.0, 3.5, 4.0

4・3 非定常流の実験装置と光学系

図 9 に非定常流計測システムの概要を示す。試験機関回転数は 1500r/min 一定とし、モータリング運転で実験を行った。2 番気筒の筒内の圧力はピエゾ式圧力変換器（Kistler 6052C）で測定した。吸気ポート入口と排気ポート出口の圧力はピエゾレジスティブ絶対圧力変換器（Kistler 4005B）で測定し、温度はシース型熱電対で測定した。排気をスロットルで絞り、排気ポートと筒内の圧力差をブローダウン過給 HCCI 運転時相当に設定した。気流へのトレーサ粒子には、流体の追従性を考慮して粒径の小さな固体のトレーサ粒子 MSF（マイクロスフェリカルフェザー）を用いた。吸気流中にトレーサを混入させ、トレーサと空気と共に模擬 EGR ガスとして再導入され、レーザシートで照射することで流れ場を 2 次元的に可視化した。トレーサ粒子の散乱光をガラスシリンダ側面から高速カメラ（FASTCAM APX-RS Photron 社製）を用いて（撮影速度：3000 fps, 撮影画像数：1024×1024 pixels,

露光時間：333 μ s)，459~604deg.ATDC の区間（EGR ガス再導入期間）で 6deg.毎に撮影した．各時刻において連続する 40 サイクルの画像を取得し，アンサンブル平均の解析に供した．カメラ及びレーザの同期にはクランクアングル信号を用いた．

Fig 9 Experimental set-up for unsteady flow PIV measurement

5. EGR ガス流動過程の可視化

5・1 排気管と筒内の圧力差が再導入 EGR ガス流動に与える影響

EGR ガイドが再導入 EGR ガス流動に与える影響を調べるため，定常流及び非定常流再導入 EGR ガス流動を PIV 計測した．流れ場の平均的な特徴を抽出するため，50 組の瞬時速度分布から平均流速分布を求めた．まず，排気ポート内の圧力が筒内流動に与える影響を調べた．

図 10 と図 11 に，定常流で排気ポート圧力を 5 kPa，10 kPa，25 kPa と変化させた場合のガイド高さが 3.0mm と 4.0mm の測定結果を示す．バルブリフト量一定のもと，EGR ガイドの高さに関わらず排気ポート圧力を高めると流速が速くなるが，定性的な流動分布は変化しない．図 12 に，非定常流でバルブリフト量が 1.0mm (519deg. ATDC)，EGR ガイド高さが 4.0mm，排気スロットルを絞り，排気圧力を 130kPa，160kPa と変化させた場合の測定結果を示す．定常流の測定結果と同様に，排気圧力を高めると流速は変わるが定性的な流動分布は変化せず，EGR ガスの流入方向も変化しないことがわかる．排気ポート圧力が再導入 EGR ガスの流入方向に与える影響は小さいことが分かったので，以降の実験は圧力差を 5 kPa 一定として，EGR ガイド高さが再導入 EGR ガスの流入方向に与える影響を調べた．

Fig 10 Effect of pressure difference between cylinder and exhaust port on recharged EGR gas flow with constant valve lift of 1.0 mm and EGR guide height of 3.0 mm (PIV)

Fig 11 Effect of pressure difference between cylinder and exhaust port on recharged EGR gas flow with constant valve lift of 1.0 mm and EGR guide height of 4.0 mm (PIV)

Fig 12 Effect of exhaust pressure on in-cylinder flow (PIV)

5・2 定常流 EGR ガイド高さが再導入 EGR ガス流動に与える影響

図 13 と図 14 に EGR ガスと筒内圧力の圧力差が 5kPa で一定のもと、バルブリフト量が 1.0mm と 2.0mm, EGR ガイドの高さが 0.0mm, 3.0mm, 3.5mm と 4.0mm の場合の平均流動分布を示す。バルブリフト量に関わらず, EGR ガイドの高さが高くなるほど EGR ガス再導入方向がシリンダの中心方向に向くようになることがわかる。更に, EGR ガイドが 4.0mm の場合, 数値計算の結果と同様に, 再導入 EGR ガスにより排気バルブ下部に向かう流れが生じていることが分かる。以上の結果は, EGR ガイドの高さが高いほど, シリンダ内の温度成層を効果的に促進できること, 高さ 4.0mm の EGR ガイドを用いることで, 高さ 3.0mm の EGR ガイドを用いた従来よりも, 強い温度成層を実現できる可能性を示している。

Fig 13 Effect of EGR guide height on in-cylinder flow with pressure difference ΔP of 5kPa and valve lift of 1.0mm (PIV) Fig 14 Effect of EGR guide height on in-cylinder flow with pressure difference ΔP of 5kPa and valve lift of 2.0mm (PIV)

5・3 非定常流 EGR ガイド高さが再導入 EGR ガス流動に与える影響

非定常流で EGR ガイド高さ 4.0mm の効果を検証するため、排気スロットルを絞り、排気ポートと筒内の圧力差をブローダウン過給 HCCI 運転時相当に設定したモータリング実験を行った。

図 15 にバルブリフト量が 0.0mm (472deg. ATDC), 1.0mm (519deg. ATDC) と 2.0mm (537deg. ATDC), EGR ガイド高さが 0.0mm, と 4.0mm の場合の平均流動分布を示す。472deg. ATDC のバルブリフト量が 0.0mm の場合はまだ EGR ガスが再導入されていないため、EGR ガイド高さに関わらず、筒内ガス流動の様子は殆ど同じである。流動分布 519deg. ATDC と 537deg. ATDC のバルブリフト量が 1.0mm と 2.0mm の場合は定常流実験結果と同様に、EGR ガイドの高さが 4.0mm の場合は再導入 EGR ガスにより排気バルブ下部に向かう流れが生じていることが確認できた。

Fig 15 Effect of EGR guide height on in-cylinder flow (PIV)

以上の結果は、非定常流でも EGR ガイドの高さが高いほどシリンダ内の温度成層を促進できることを示唆している。

6. 実機による圧力上昇率低減効果の検証

EGR ガイド高さが再導入 EGR ガス流動に与える影響を調べた PIV 測定の結果を踏まえ、高さが 4.0mm の EGR ガイドを実機に装着し、圧力上昇率低減効果の確認実験を行った。図 16 に図示平均有効圧力 570kPa で EGR ガイド高さは 0.0mm, 3.0mm と 4.0mm の場合の燃焼重心位相 (CA50) と最大圧力上昇率 ($dp/d\theta$ max) の関係を示す。この結果より、EGR ガイド高さが 3.0mm の場合は EGR ガイド高さが 0.0mm より $dp/d\theta$ max が凡そ 80kPa/deg 低減された。EGR ガイド高さが 4.0mm の場合は EGR ガイド高さが 3.0mm に比べ $dp/d\theta$ max の低減は確認できなかった。その理由を調べるため、EGR ガイド高さ 4.0mm の場合と EGR ガイド高さ 3.0mm の温度成層変化を数値解析で調べることにした。

Fig 16 Effect of EGR guide height on pressure rise rate ($dp/d\theta$) maximum difference using HCCI engine

7. EGR ガイド高さが筒内現象に与える影響の数値解析

7・1 数値解析の精度検証

最初に数値解析精度検証のため、定常流で実験との比較を行った。解析対象と解析条件を図 17 と表 4 に示す。

Fig 17 Calculation model

Table 4 The outline of a model

Virtual domain of the inlet	Length	55mm
	Boundary condition	Wall function
Virtual domain of the outlet	Length	250mm
	Boundary condition	Wall function
Lattice shape		trim
Number of the lattices		2200000
Pressure difference		5kPa

Fig 18 Comparison of an experiment and calculation

図 18 に EGR ガイド高さが 3.0mm, 4.0mm の実験結果と数値解析結果の比較を示す. 再導入する EGR ガスの主流の角度は実験結果と数値解析結果共に EGR ガイド高さが 3.0mm の場合は 60° になり, EGR ガイド高さが 4.0mm の場合は 25° になることを確認できた. 以上の結果から, 本数値計算のモデリングが定常流実験を再現できることが分かった. そこで, 次に実機における温度成層の様子の予測を行った.

7・2 筒内温度分布の数値解析

シリンダ内の温度差を定量的に評価する項目として, 温度について統計的にシリンダ内の総質量を等質量で 5 つの領域に分割された領域のうち, 温度が一番高い領域 (Zone5) と 4 番目に高い領域 (Zone2) の平均温度の温度差を用いた. 図 19 は 20deg. BTDC における 5 つに分けた領域の質量割合を示す. クランク角度ごとの平均温度の温度差変化を図 20 に示す. なお, 領域内の平均温度が最も低い領域 (Zone1) の平均温度は EGR ガスの偏在化よりも壁面の熱損失の影響が大きいと考えられるので, ここでは除外した.

図 20 に示すように EGR ガイド高さを高くすると 5 つの領域の温度差は拡大していく, 上死点において, EGR ガイド 0.0mm の時の温度差は 10K に満たないのに対し, EGR ガイド高さを 4.0mm にした時の温度差は 45K を越えていた. この結果から, EGR ガイドを 4.0mm に高くすることで再導入 EGR ガスの流動が変化し, 温度成層化の効果が強まることが分かる.

Fig 19 Image of temperature zone

Fig 20 Effect of EGR guide height on temperature difference between the highest temperature zone (Zone5) and the second lowest temperature zone (Zone2)

一方、EGR ガイド高さを 0.0mm から 3.0mm にした時は約 35K の温度差に対し、EGR ガイド高さを 3.0mm から 4.0mm にした時の温度差は上死点で 5K しか拡大出来なかった。

7・3 筒内流動分布の数値解析

EGR ガイドの高さが 4.0mm に高くしても上死点での温度差が拡大出来なかった理由を調査するため、図 21 に非定常流でバルブリフト量 2.0mm、EGR ガイド高さが 0.0mm、3.0mm、4.0mm の数値解析結果の比較を示す。再導入する EGR ガスの主流の角度は EGR ガイド高さが 0.0mm の場合は 70° になり、EGR ガイド高さが 3.0mm の場合は 30° になり、EGR ガイド高さが 4.0mm の場合は 25° になることを確認できた。以上の結果から、EGR ガイドの高さが 0.0mm の場合と 3.0mm の場合では主流の角度に大きな違いがあり、これが 5 領域温度差に大きな違いが出た原因と考えられる。一方で EGR ガイドの高さが 3.0mm の場合と 4.0mm の場合では主流の角度に大きな違いはなかった。その理由として、非定常ではピストンがあるため、ピストンで反射される流れがあり、その流れが主流にぶつかるため、EGR ガイド高さ 3.0mm は擬似的に EGR ガイドの効果が高められ、5 領域温度差に大きな違いが出なかったと考えられる。

Fig 21 Comparison of guide height on calculation

EGR ガイドによって排気再導入時にシリンダ内で渦が生成されることで高温の領域が形成されるが、その効果はガイドの高さをある程度以上大きくしても飽和することが分かる。これが、実機で EGR ガイド高さを 4.0mm にしても EGR ガイド高さが 3.0mm の場合に比べ $dp/d\theta$ max の低減が確認できなかった原因と考えられる。すなわち、EGR ガイド高さを 3.0mm より大きくしても、温度成層の効果は頭打ちとなることが分かった。

8. 結 言

ブローダウン過給システムを用いたガソリン HCCI エンジンにおける再導入 EGR ガス流動を模擬した定常流及びモータリングで実験した非定常流を対象に、PIV 計測を行った。得られた流動分布を数値解析より求めた流速分布、温度分布と比較し、EGR ガイド高さが EGR ガスの流れとシリンダ内温度分布に与える影響を調べた結果、以下の知見を得た。

- (1) バルブリフト量が一定のとき、排気ポートとシリンダ内の圧力差が高いほど流速は速くなるが、流動分布は定性的に変化しない。
- (2) 定常流で排気ポートとシリンダ内の圧力差が一定の時、EGR ガイド高さを高くすると、再導入 EGR ガスの導入方向がシリンダ中心側に向かう。
- (3) 数値計算からガイドの高さによって温度差が拡大することが分かったが、ガイドの高さを 0.0mm から 3.0mm に変えた時に比べ、3.0mm から 4.0mm に変えた時にはピストンから反射される流れがあり、その流れが主流に干渉するため、温度差の拡大が約 5K と低くなった。このことが、実機でガイドの高さを 3.0mm から 4.0mm に変えても $dp/d\theta$ max の低減がみられなかった原因と考えられる。

謝 辞

本研究費の一部は、「エネルギー使用合理化技術戦略的開発」事業の一つとして実施する NEDO 技術開発機構の補助金による。日本キスラー（株）からは、圧力測定に関わり多大なる協力を頂いた。実機での実験を行うに

際し、千葉大学の後藤俊介氏の協力を得た。また計算を行うに際し、千葉大学の宮崎浩司氏の協力を得た。ここに記し、謝意を表する。

文 献

- (1) Aoyama, T., Hattori, Y., Mizuta, J., and Sato, Y., “An Experimental Study on Premixed-Charge Compression Ignition Gasoline Engine”, *SAE Technical Paper*, No.960081(1996).
 - (2) Liu, H., Yao, M., Zheng, Z., and Wang, Y., “An Investigation of Different Ported Fuel Injection Strategies and Thermal Stratification in HCCI Engines Using Chemiluminescence Imaging”, *SAE Technical Paper*, No.2010-01-0163(2010).
 - (3) Hyvöne, J., Haraldsson, G., and Johansson, B., “Super Charging HCCI to Extend the Operating Range in a Multi Cylinder VCR-HCCI Engine”, *SAE Technical Paper*, No.2003-01-3214(2003).
 - (4) Kuboyama, T., Moriyoshi, Y., Hatamura, K., Yamada, T., Takanashi, J., “An Experimental Study of a Gasoline HCCI Engine Using the Blow-Down Super Charge System”, *SAE Technical Paper*, No.2009-01-0496(2009).
 - (5) Sjöberg, M., Dec, J., Babajimopoulos, A., and Assanis, D., "Comparing Enhanced Natural Thermal Stratification Against Retarded Combustion Phasing for Smoothing of HCCI Heat-Release Rate", *SAE Technical Paper*, No.2004-01-2994(2004).
 - (6) Hatamura, K., "A Study on HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition) Gasoline Engine Supercharged by Exhaust Blow Down Pressure ", *SAE Technical Paper*, No.2007-01-1873(2007).
-