

〔研究報告〕

学生フォーミュラ車両用エンジンの吸気システム に関する一考察

東 大輔・三根 達成・小場佐賢太
池田 秀・梶山項羽市・原田 節男

Study about the Intake System for the Student Formula Race Car Engine

Daisuke AZUMA, Tatsunari MINE, Kenta OBASA,
Shigeru IKEDA, Kouichi KAJIYAMA and Setsuo HARADA

Abstract

The Student Formula SAE Competition of Japan was started in 2003. To aim at the higher rank, high power and high torque of the engine are necessary. Therefore, we improved the engine system of our Formula race car by installing a turbocharger and intercooler. However, the characteristics of the suction pipe length were not sufficiently understood. The researcher investigated the improvement of the engine output and torque by the twin injection systems. Results show that by adopting a twin injection system, the vaporization heat of the fuel increased the mass flow of inhaled air. In addition, the engine horsepower and torque improved as well.

1. まえがき

全日本学生フォーミュラ大会は、1981年に米国で始まった Formula SAE に倣い、日本の将来のエンジニア育成を目的として2003年に発足した競技大会である。主催は公益社団法人自動車技術会であり、トヨタ自動車、日産自動車、本田技研工業を始めとする国内外の自動車関連企業がスポンサーについている。学生のものづくり実践教育の場でもあるこの大会はその評価方法にも特徴があり、単にフォーミュラカーの走行性能やタイムを競うだけでなく、企画から設計内容、生産コスト管理まで厳しく総合的に評価される。学生はレーシングカーの企画から設計、製作、性能試験、改良という一連のプロセスを通じて即戦力になる技術力を身に付けるのである。

学生フォーミュラ車両に使用されているエンジンは、単気筒・2気筒・4気筒の3種類だが^{1)・3)}、本学の2011年「全日本学生フォーミュラ大会参戦車両F111」(Fig. 1) は単気筒エンジンを搭載している。



Fig. 1 Kurume Institute of Technology Formula Race Car (2011 model year race car)

これは、学生フォーミュラ大会に使用されるコース (Fig. 2) が連続するコーナーで構成されるレイアウトであるため、低速域から大きなトルクを発生する単気筒エンジンが適していると判断したことによる。ただ、上位入賞を狙うにはエンジンの更なる高出力、高トルク化は必須課題であり⁴⁾、我々はこれ

^{*}交通機械工学科
平成24年2月6日受理

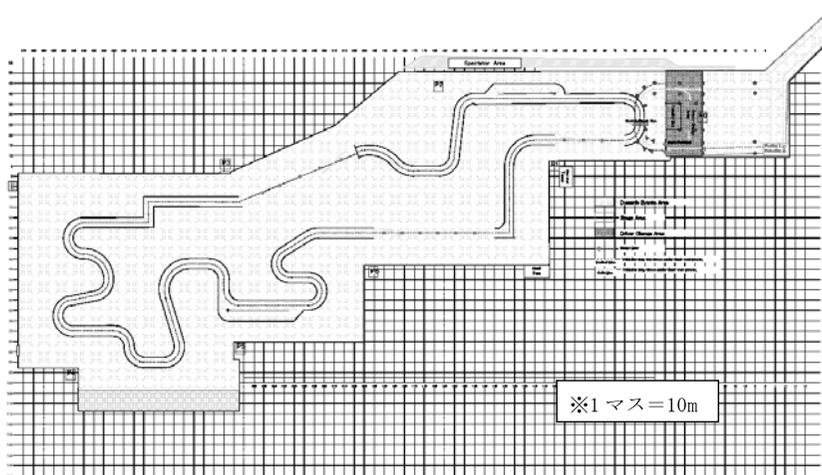


Fig. 2 Endurance course layout

までターボチャージャの搭載やインタークーラの装着などエンジン・システムの改良に注力してきた。しかし、吸気管長の特性など未だ十分に把握できていない課題点も多く存在するため、吸気や排気、過給機など各システムの分析を着実に実施し、それらの特性を十分に把握する必要がある。

そこで本研究では、比較的容易な設計変更でエンジンの出力・トルク特性の改善が期待できる吸気システムの特性分析を行う。はじめに車両レイアウト要件の制約を受けやすい吸気管長について、そのエンジン特性への影響を調べる。さらに、インタークーラのような重量物を用いずに、燃料の気化熱で吸入空気温度降下が期待できるツイン・インジェクタ・システムについて調査分析する。

2. 学生フォーミュラ規則

全日本学生フォーミュラ大会は、アメリカやイギリス、オーストラリアなど世界各国で開催されるフォーミュラ SAE シリーズとは独立した大会であるが、大会レギュレーションはフォーミュラ SAE シリーズのものに日本ローカルルールを加えたものであり、主要なルールはほぼ一致している。以下にその一部を記す⁵⁾。

2.1 車両規則

車両はオープンホイールのフォーミュラカー形式。エンジンは $610 \text{ [cm}^3\text{]}$ 以下の4ストローク1サイク

ルエンジンとする。

安全性に関わる設計ルールは厳しく規定されるが、その他の部分は大会の趣旨から設計自由度は大きい。日本大会ではスチールスペースフレーム製のシャーシにスポーツバイク用の4気筒 $600 \text{ [cm}^3\text{]}$ エンジンを搭載し、レース用のスリックタイヤを装着する車両が多く見られるが、中にはフレームにアルミハニカムモノコック、カーボンモノコックを採用するマシンもある。また、エンジンも単気筒エンジンや2気筒エンジンを搭載する車両など様々である。

2.2 エンジン周り規則

エンジン周りは多くのレギュレーションで厳しく規定されているが、ここでは本研究に関係するルールを中心に抜粋して記述する。

- エンジンは最大排気量 $610 \text{ [cm}^3\text{]}$ の4ストローク・ピストン・エンジンでハイブリットは禁止。
- ターボまたはスーパー・チャージャのようなコンプレッサーは標準装備のものでなければ認められない。
- コンプレッサーはリストリクタとエンジンの間にあること。
- 横転時の乗員安全性を確保するために、すべての燃料供給系や吸気系、燃料コントロールシステム(スロットルボディ、キャブレター、エア・インテーク・ダクト、エアクリーナ、エア・ボッ

クスを含む)は、ロールバーの上部とタイヤの外側の包括線の中に入っていること。

- エア・インターク・システムは地上高350[mm] (13.8in)未満の場合、側面衝突保護構造で保護されること。
- インターク・システム、リストラクタは変形しないこと。

前述のように、大会の主要イベントであるエンデュランス競技のコース・レイアウトは低～中速コーナーの占める割合が大きい。そのため、単気筒エンジンの特性である低回転域でのトルクをさらに増大し、フラットなトルク特性にして連続するコーナーの脱出加速時の失速を防ぐことが重要である。

3. 実験装置および供試エンジン

3.1 実験装置

本実験は実車を車軸直結型シャシダイナモに設置して行った (Fig. 3)。吸気管長 L は吸気ポートからターボチャージャのコンプレッサ出口までの距離



Fig. 3 Laboratory equipment

とし、 $L=510$ [mm]、 995 [mm]、 1405 [mm]の3ケースを用意。燃料を噴射する1stインジェクタは吸気ポートから $L_{i1}=70$ [mm]の位置、ツイン・インジェクタ時の2ndインジェクタは $L_{i2}=215$ [mm]の位置に設置した。吸入空気温度は2点で計測し、吸気ポートから T_1 計測点までの距離は $L_{t1}=115$ [mm]、 T_2 計測点までの距離は $L_{t2}=220$ [mm]とした (Fig. 4)。

なお、吸気管長やインジェクタ数を変更して測定を行う際、ECUのセッティングを調整せずに測定すると空燃比が狂って正確な測定が不可能になる。そのため、仕様を変更する際はその条件に合った空燃比になるよう ECU セッティングも調整している。なお、ECUには MoTeC を用いた。また、測定はエンジン回転速度 $4000 \sim 9000$ [min^{-1}]の範囲で行った。吸入空気量測定にはデジタル温度計 CHINO GB102 S 012と $0 \sim 2000$ [mmH_2O]までの差圧が測定可能なデジタルマノメータ OKANO WORKS POP 201を用いた。

3.2 供試エンジン

供試エンジンはスズキから提供された4輪バギー LT R450用単気筒エンジン L404である (Fig. 5)。このエンジンにターボチャージャと大会レギュレーションで指定されるリストラクタを装着して大会に参戦している。2011年大会参戦仕様の諸元を Table 1に、エンジン軸出力および軸トルク特性を Fig. 6にそれぞれ示す。

4. 結果および考察

4.1 吸気管長とエンジン特性

吸気管長とエンジン特性の関係を把握する目的で吸気管長 $L=510$ [mm]、 995 [mm]、 1405 [mm]の3ケースについてエンジン特性を測定した。Fig. 7の

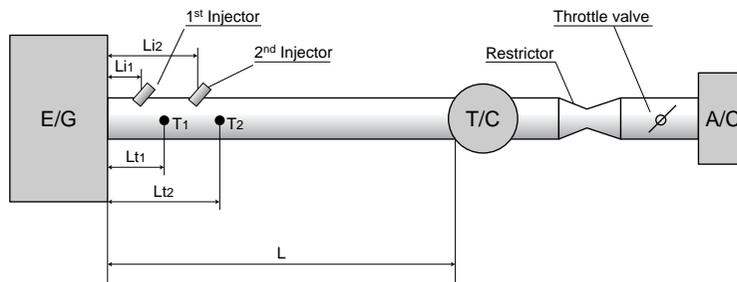


Fig. 4 Schematics of laboratory equipment

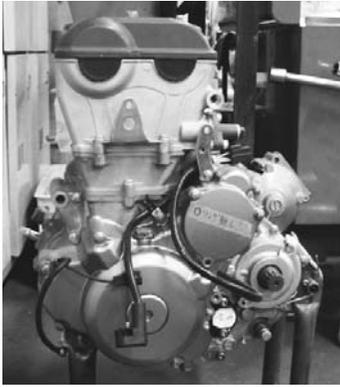


Fig. 5 Test engine (SUZUKI : L404)

Table 1 Specification sheet of the test engine

エンジン型式	SUZUKI LT-R450用エンジン L404(リストリクタ付)ターボ		
シリンダ数	1		
燃焼室形状	ペントルーフ型		
バルブ機構	DOHC 吸気2 排気2		
総排気量 [cm ³]	449.8		
ボア×ストローク [mm]	95.5×62.8		
圧縮比	11.7 : 1		
最高出力	35 [kW] / 9000 [min ⁻¹]		
最大トルク	42 [Nm] / 7000 [min ⁻¹]		
バルブ・ タイミング	吸気	開き	BTDC 35°
		閉じ	ABDC 105°
	排気	開き	BBDC 59°
		閉じ	ATDC 84°

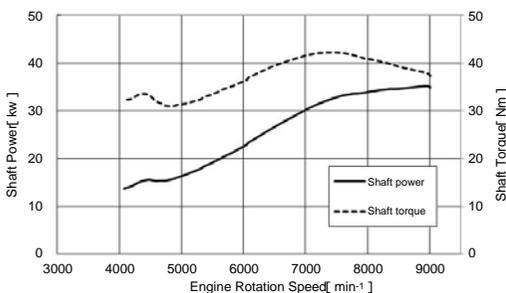


Fig. 6 Test engine performance

軸出力、Fig. 8の軸トルクともに、吸気管長を長くするとピーク回転速度が低回転側にシフトすることがわかる。これは、慣性効果すなわち最大トルクを

発生するエンジン回転速度 N [min^{-1}] が一般に吸気管長の平方根に反比例し、吸気管径に比例することと傾向が一致する。シンプルな吸気システムの場合、この慣性効果を発生するエンジン回転速度 N [min^{-1}] はヘルムホルツ共鳴振動数を考慮して次式によって与えられるが、エンジン特性を決める要素はエンジンの基本諸元や排気系、動弁系など様々であるため本式を単純に適用して議論することはできない⁶⁻¹⁰⁾。しかし、吸気管を長くすると最大トルクを発生する回転速度が低くなるという本式で与えられる傾向と、実際の計測結果の傾向が一致したことは興味深い。ここで、 a は音速 [m/s]、 S は吸気管の断面積 [m^2]、 V はシリンダ容積すなわち排気量 [m^3] である。

$$N = \frac{a\theta}{12\pi} \sqrt{\frac{S}{LV}}$$

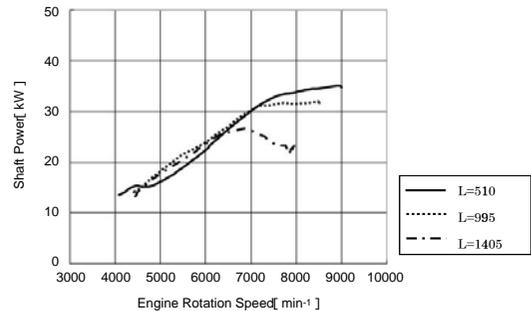


Fig. 7 Intake pipe length and shaft power

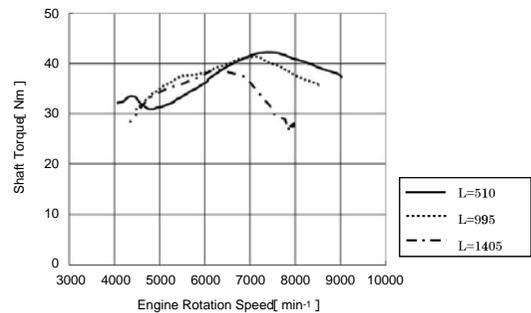


Fig. 8 Intake pipe length and shaft torque

4.2 ツイン・インジェクタとエンジン特性

吸入空気の温度を下げることでできれば空気密度が高くなり、吸入空気の質量流量が高まる。そのた

め、より多くの燃料を混合させる事ができ、出力が向上する。これまで我々はインタークーラを搭載して吸入空気温度を下げてきたが、軽量小型が特徴の単気筒エンジンにとって、インタークーラのような重量物の搭載は可能であれば避けたい。そこで、本研究ではツイン・インジェクタ方式による燃料の気化熱で吸入空気温度を低下させることを試みた。Fig .4 に示した位置に2nd インジェクタを設け、 T_1 、および T_2 の位置で吸入空気温度を計測した。

Fig .9 の T_{1S} はシングル・インジェクタ方式時の T_1 温度、 T_{1W} はツイン・インジェクタ方式時の T_1 温度である。Fig .9 から、 T_{2S} と T_{2W} の温度低下よりも T_{1S} と T_{1W} の温度低下が大きいたことが分かる。2nd インジェクタの下流に位置する T_1 の温度が大きく低下していることは、2nd インジェクタから噴射された燃料の気化熱でシリンダ直前の吸入空気温度が低下したことを示唆している。競技走行時に頻繁に用いるエンジン回転速度6000~9000 [min^{-1}] においては約20~30 [$^{\circ}\text{C}$] の冷却効果が見られた。

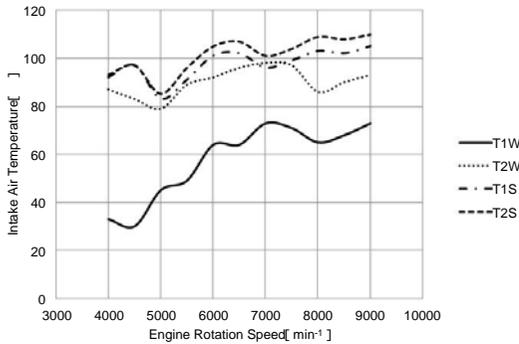


Fig. 9 Twin injection system and intake air temperature

ツイン・インジェクタ方式により吸入空気温度が低下したことを確認できたので、次に吸入空気の質量流量がどの程度増加したかを調べた。Fig .10 に示したシングル・インジェクタ方式時とツイン・インジェクタ方式時における吸入空気の質量流量から、5500 [min^{-1}] より上の回転速度でツイン・インジェクタ方式時の吸入空気量が有意に増加していることが分かる。流入空気の質量流量が増加すればエンジン軸出力と軸トルクの向上が期待できる。

次にこの吸入空気質量流量増加でエンジン特性がどの程度向上するかを調べた。Fig .11 にエンジン軸出力、Fig .12 に軸トルクの計測結果を示す。吸入空

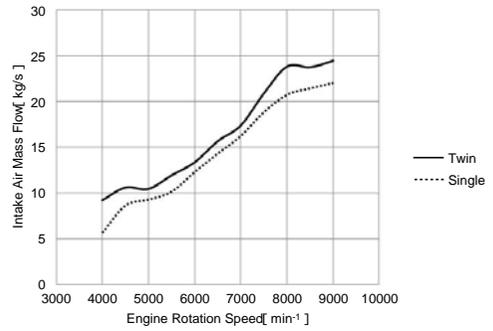


Fig. 10 Intake air mass flow

気質量流量増加による充填効率向上はシングル・インジェクタ方式に比べて最高軸出力で約12%、最高軸トルクは約10%の向上をもたらした。インタークーラのような重量物を用いずに軸出力や軸トルクを向上できたことは、今後のフォーミュラエンジン性能開発において大いに参考になる結果であった。

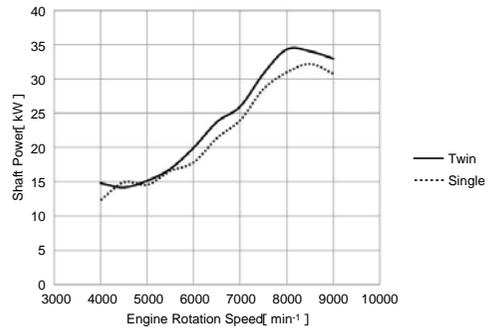


Fig. 11 Injection system and shaft power

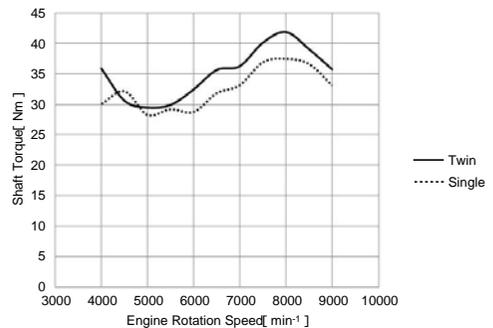


Fig. 12 Injection system and shaft torque

5.まとめ

学生フォーミュラ車両用エンジンの吸気システムに対し、吸気管長さとエンジン軸出力および軸トルク特性の関係と、ツイン・インジェクタ方式による流入空気質量流量増加とエンジン特性向上効果について調査した。以下に本研究で得られた知見をまとめる。

- (1) 吸気管長を長くするとトルクピークが低回転側にシフトする。
- (2) ツイン・インジェクタ方式を採用すると燃料の気化熱により吸入空気の質量流量が増加し、エンジン軸出力および軸トルクが向上する。

今後はサージタンクによるエンジン軸出力向上効果とスロットルレスポンスへの影響調査、ターボチャージャサイズの検討、インタークーラ効果の調査などを行い、更なるエンジン性能向上を図る。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、本学学生フォーミュラプロジェクト発足から今日まで多大なるご尽力とご指導を賜った本学ものづくりセンター長の渡邊孝司教授に心より深謝申し上げます。また、森和典教授をはじめ様々なご助言を頂いた交通機械工学科および、ものづくりセンターの各先生方に感謝致します。さらに、日頃より本学学生フォーミュラプロジェクトに対し、深いご理解とご支援を頂いている久留米工業大学と関係各位に心より感謝申し上げます。

なお、本学学生フォーミュラ活動の一部には私学事業団特別補助事業（H19～H21）の支援を受けた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 鈴木隆, フォーミュラ競技車両の設計製作教育について, 設計工学, Vol. 46, No. 10, pp. 543-548, 2011.
- (2) 川口隆史・狩野芳郎, 自動車システム開発工学科の設計製作教育, 設計工学, Vol. 46, No. 10, pp. 566-573, 2011.
- (3) 草加浩平, サイドエンジンフォーミュラカー優勝までの軌跡, 設計工学, Vol. 46, No. 10, pp. 556-565, 2011.
- (4) 大田竜司・榎本啓士, 第6回全日本学生フォーミュラ大会参戦車両への双対燃料噴射装置の設計・製作, 金沢大学学長研究奨励費研究成果論文集, pp. 69-74, 2008.
- (5) 2011 Formula SAE Rules[®] with Japan local rules
- (6) 村山正・常本秀幸, 自動車エンジン工学, 山海堂, 2006.
- (7) エンジン技術者教育研究会編, 初めて学ぶエンジン技術と機械工学, コロナ社, 2007
- (8) 林義正, レーシングエンジンの徹底研究, グランプリ出版, 2002
- (9) 自動車用ガソリンエンジン編集委員会, 自動車用ガソリンエンジン, 山海堂, 1990
- (10) 林義正, 乗用車用ガソリンエンジン入門, グランプリ出版, 1995