

小型四輪競技車両の空燃比と動的性能の関係*

位田 晴良^{*1}, 漁 佑一郎^{*2}, 牧田 俊太郎^{*2}, 宮崎 真央^{*2}, 磯松 弥司^{*3}

Relations between Air-Fuel Ratio and Dynamic Performance of Small Race Cars

Haruyoshi IDA^{*1}, Yuichiro SUNADORI, Syuntaro MAKITA, Manaka MIYAZAKI
and Yatsuka ISOMATSU

^{*1} Department of Mechanical Engineering

It goes without saying that engine output power characteristics greatly affect the dynamic performance of the race car. One of the methods of changing the output power of the engine is to adjust the set amount of fuel supply. This method changes the air-fuel ratio of the air fuel mixture supplied to the engine. In this study, a slalom test run of a small race car was used to examine dynamic performance with attention to the air-fuel ratio changed by adjusting the set amount of fuel supply. The results led to the proposal of shortening the running time of the small race car by measuring the average air-fuel ratio in the target running section.

Key Words : Small Race Car, Air-Fuel Ratio, Dynamic Performance, Slalom Run

1. 緒 言

自動車の運動は、加速、旋回、制動等の車両走行に関する要因が複合的に作用し、競技車両における動的性能向上の目的は走行時間の短縮である。また、一般的な乗用車と異なり競技車両の場合は、変化する走行条件に対して最適な動的性能となるように、その都度、関連要素に変更を施すことが多い。しかし、性能に影響する要素の最適な設定を決定する作業は多大な労力を要し、とくに小型の競技車両を用いることが多いアマチュアカテゴリの競技においては、メカニックおよびドライバの経験や感覚に頼りながら試行錯誤的に最適な設定を模索することが少なくない。

一方、自動車を構成する重要な要素としてエンジンがあるが、当然ながらエンジンの出力特性は動的性能に大きく関係する。エンジン出力の絶対値が高いと、その車両が直線路を走行する場合の最高速度は高くなるが、公道走行および多くの自動車競技においては直進のみではなく旋回を伴う。また、旋回中に最大出力を必要とする状況は多くなく、ドライバのアクセルペダル操作に対するエンジン回転数の応答性などの過渡特性が重要であると考えられる。エンジンの出力特性には多様な要因が影響するが、比較的容易に任意の変更を加えられる方法として、吸入空気量に対する燃料供給量の調整（以下、燃調）について設定を変更する方法が挙げられる。これにより、エンジンに供給する混合気において空気と燃料の質量比、すなわち空燃比が変更されることになる。

そこで本研究では、小型四輪競技車両の動的性能に関する設定選択の指針を得ることを目的として、学生フォーミュラ大会出場車両を用い、燃調設定を変更して左右交互に旋回を行うスラローム走行において、走行時間および空燃比を計測する走行試験を実施し、空燃比と動的性能の関係を把握する。

2. 空燃比

空燃比は、混合気中の燃料に対する空気の質量比であり、混合気中の燃料が過不足なく完全燃焼する場合の空

* 原稿受付 2017年2月28日

^{*1} 工学部 機械工学科

^{*2} 工学部 機械工学科4年

^{*3} センター管理課

E-mail: h-ida@fukui-ut.ac.jp

燃比を理論空燃比とよび、その空燃比は 14.7 である。理論空燃比よりも空燃比が小さい場合は混合気中の燃料が吸入空気に対して多い状態である。一般に最大出力が発生するとされる空燃比は 12~13.5 であり、この空燃比を出力空燃比という。また、出力は小さいものの、燃費に有利である空燃比は理論空燃比よりもやや燃料が少ない 16~18 であり、これを経済空燃比という⁽¹⁾。

3. 実験方法

3.1 走行試験の概要

走行試験は全日本学生フォーミュラ大会出場車両を使用し、十分な面積が確保できる平坦な舗装路面において燃調設定を変更し、走行時間の計測および空燃比変化の記録を実施する。本研究では、自動車の動的性能を総合的に評価するため、走行中に加速、旋回、制動が含まれ、さらにドライバの運転技量による影響を極力低減することをねらい、他の旋回パターンを含まない、左右交互旋回（スラローム）のみの走行試験とする。一般にスラローム走行は、操縦安定性の試験方法として広く利用され、通過最高車速で限界走行のレベルの高さや制御性を評価し、規定車速で操舵力、横加速度、ヨーレート、ロールなどのレベルや遅れなどが評価される。パイロン間隔によって車速、操舵量を調整でき、操縦性、応答性、安定性の評価目的に応じて調整される。

走行試験は乾燥路面のみならず、湿潤路面においても実施する。この場合の走行時間は路面上の水膜の厚さに影響を受けるが、路面条件を一定にすることは非常に困難であり、とくに半湿潤状態であると路面条件は常に変化していることになる。したがって、湿潤路面における走行試験は、路面上に一切の乾燥部分がなく、少なくとも走行時にタイヤが水沫を跳ね上げる程度の水膜がある場合のみ実施し、極力、実験条件の均一化を図る。

スラローム走行において複数名のドライバにより実施した予備実験より、燃調設定の変更によって走行時間は顕著に変化し、燃調設定の変更による走行時間の変化と比較すると、ドライバの運転技量による影響は十分小さいことを確認している。また、タイヤの摩耗量をはじめ路面温度などが常に変化するため走行試験の条件を一定に保つことは困難である。したがって、本研究では、燃調設定が同じであっても異なる日、異なる時間帯における複数回の走行試験を実施することにより、走行時間が変化する傾向の把握を図る。走行試験は天候の影響を受けるため、実験条件毎に走行回数は異なるが、それぞれの実験条件において最少でも 20 回の走行試験を実施し、得られる結果より走行時間の平均値を求める。

3.2 スラローム走行における走行時間の計測

走行試験は、乾燥路面および湿潤路面において実施し、走行時間の変化から旋回性能を検討するためスラロームコースを用いる。スラロームコースにおいては、旋回中心の目安としてパイロンを設置し、パイロン間隔は 7.62m（全日本学生フォーミュラ大会の競技要件に規定されているパイロン間隔の最小値）とする⁽²⁾。このスラロームコースにおいて左右の旋回を交互に各 4 回行った場合の走行時間を計測する。走行試験に使用するスラロームコースを Fig. 1 に示す。なお、検討の煩雑化をさけるため、走行試験は最初に左旋回を行う旋回パターンのみで行う。

また、実験車両の条件変更によりドライバが順応するまで操作ミスが発生する可能性があるため、予めスラロームコースにおける十分な慣熟走行を実施する。さらに、発進時の加速による計測値の変動を無くすため、左右の旋回を各 1 回通過した走行状態から計測を開始する。

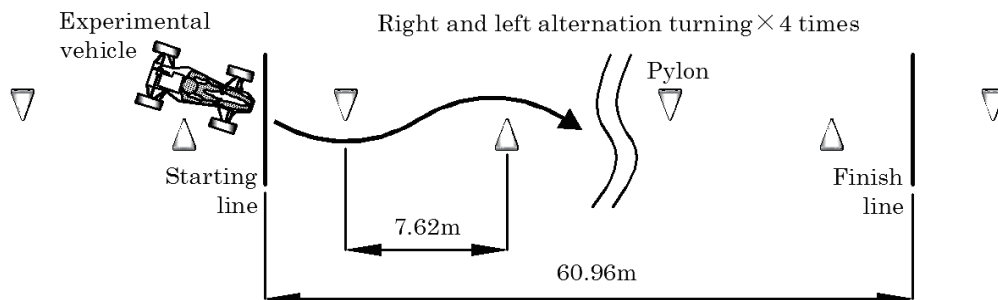


Fig. 1 Schematic of slalom course used in this examination

3.3 実験車両

本研究の走行試験は、平成 23 年度に FUT フォーミュラプロジェクトにより製作された全日本学生フォーミュラ大会出場車両を使用する。実験車両の諸元を Table 1 に示す。Table 1 に示すように実験車両は、全長 2570mm、ホイールベース 1720mm、前後のトレッドはそれぞれ 1440mm、1320mm、車重 322kg であり、総排気量 599cm³ のオートバイ用 4 サイクル 4 気筒エンジンをミッドシップしたフォーミュラスタイルの小型四輪競技車両である。車体はフォーミュラスタイルの競技車両に多く用いられる鋼管スペースフレームである。モノコック構造の車両に比べて軽量で剛性が高いため旋回中の車体の変形が少なく、スラロームコースにおける走行試験に適しているといえる。

また、実験車両の排気管には、走行中の空燃比変化を記録するためのセンサが取り付けられている。このセンサは大気中の酸素濃度に対して、排ガス中の残存酸素濃度を比較することにより空燃比を検出する。センサによる検出信号を記録するデータログは運転席に設置される。なお、用いたデータログは空燃比の他に複数の信号入力が可能であるため、走行中のエンジン回転数およびアクセルペダルの踏み込み量（スロットルバルブ開度）を同時に記録し、燃調設定の変更が及ぼす影響を検討する。

Table 1 Specification of experimental vehicle

Overall length / Overall width / Overall height [mm]	2570 / 1440 / 1100
Wheel base [mm]	1720
Front track width / Rear track width [mm]	1440 / 1320
Front axle weight / Rear axle weight [kg]	144 / 178
Engine type	HONDA CBR600RR PC37E 4 cylinders
Suspension type	Double unequal length A-Arm with spring and damper
Frame construction	Tubular steel space frame
Body work	Glass fiber reinforced plastics
Differential type	Clutch pack limited slip
Brake system	Floating, cast Iron, hub mounted, 140mm dia. vented
Wheel type	RAYS ENGINEERING TE37 13 inch, 1 pc. Al Rim, 45mm neg. offset
Tire type (for race cars)	YOKOHAMA ADVAN A048 175 / 50R13 72V

3.4 燃調設定の変更

燃調設定の変更は、走行前に専用ソフトウェアがインストールされたパソコンをエンジンの ECU と接続することにより実施する。本研究の実験車両においては、搭載エンジンのメーカーより、電子制御燃料装置の燃調設定が変更可能となる専用ソフトウェアが用意されている。この燃調設定ソフトウェアを用い、エンジンメーカーによってプログラムされた標準の燃調設定に対して、任意の範囲に区切ったエンジン回転数およびスロットルバルブ開度における供給燃料を増量または減量するよう変更を施す。本稿では、燃調設定変更の程度を燃料噴射量増減率として表わす。

4. 実験結果および考察

4.1 燃調設定と走行時間の関係

乾燥路面および湿潤路面において燃調設定を変更した場合の走行時間の変化をそれぞれ Fig. 2 に示す。走行時間の変化は、乾燥路面または湿潤路面それぞれにおいて得られた全ての走行時間の平均値に対する各走行時間の増減率により示される。走行時間増減率が小さくなる場合、走行時間は短縮し、走行速度が上昇したことを表す。なお、乾燥路面と比較すると湿潤路面で実測された走行時間の平均値は約 25% 大きい。また、乾燥路面において

は、燃料噴射量増減率が-20%を下回る場合は著しく走行時間が延長し、30%を上回る場合は走行困難となる（燃料噴射量増減率-20~30%において検討）。湿潤路面においても燃料噴射量増減率を過度に変更すると乾燥路面と同様に走行試験に適さなくなるが、さらに、天候により走行試験の実施が制限されたため、乾燥路面よりも検討対象とする燃調設定数は少ない（燃料噴射量増減率-20~20%において検討）。とくに湿潤路面で燃料噴射量増減率0%とした走行試験においては、路面状況の影響を受け、再現性のある結果が得られなかったため、検討対象としていない。この理由により、後述の4.2~4.4節においても湿潤路面で燃料噴射量増減率0%とした走行試験の結果を示していない。

Fig. 2 (left) より、乾燥路面においては、燃料噴射量増減率を20%とした場合に走行時間は最も短縮することがわかる。したがって、標準の燃調設定は、直進および旋回を含めたあらゆる走行条件において概ね良好な出力特性となるものと思われるが、スラローム走行における走行時間は最小とはならないため、この運転条件においては混合気中の燃料が不足しているといえる。

Fig. 2 (right) より、湿潤路面においても燃料噴射量増減率を20%とした場合に走行時間は最も短縮することがわかる。乾燥路面と比較すると、燃調設定の変更による走行時間への影響は乏しいが、路面が滑り易くスロットル開度が小さくなる運転条件においても、乾燥路面と同様に燃料噴射量増減率を20%とした場合が走行時間短縮に有効であるといえる。

また、乾燥路面および湿潤路面において、平均走行時間が最大となる（燃料噴射量増減率を-20%とする）場合と比較すると、平均走行時間が最小となる（燃料噴射量増減率を20%とする）場合は、走行時間の最大値と最小値の差が小さいことがわかる。これは、その走行状態をドライバが維持し易いことを示しており、走行時間が増大する場合と比較すると、走行時間が減少する場合は車両の操作性が良好であるといえる。

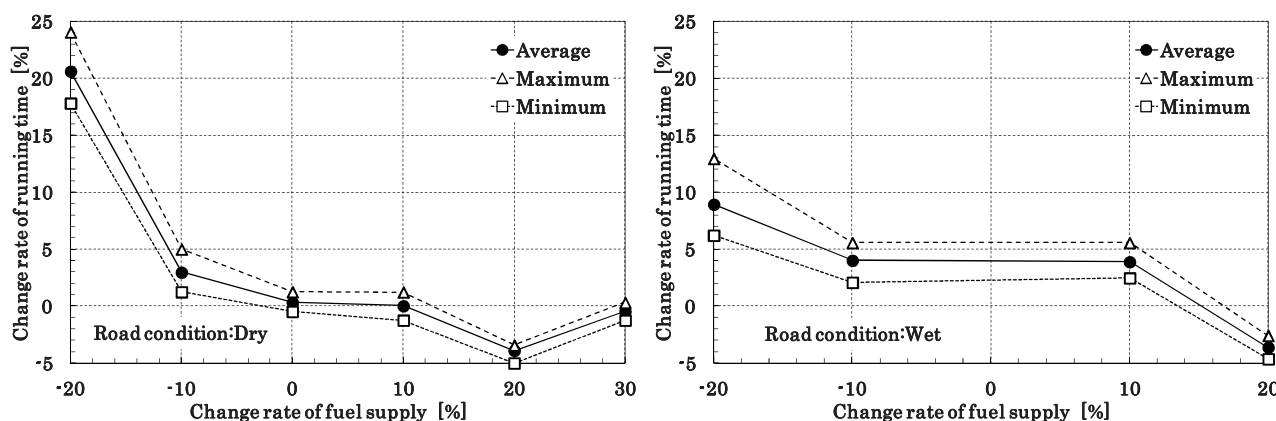


Fig. 2 Variations of change rate of running time with change rate of fuel supply on dry road (left) and wet road (right)

4.2 燃調設定と空燃比の関係

乾燥路面および湿潤路面において燃調設定を変更した場合の空燃比の変化をそれぞれ Fig. 3 に示す。

Fig. 3 (left) より、乾燥路面においては、燃調設定の変更に伴う空燃比の変化が確認できる。また、前述（4.1節）したとおり、燃料噴射量増減率が20%の場合に走行時間は最小となるが、この場合の平均空燃比は出力空燃比付近となることがわかる。つまり、スラローム走行においては、エンジン回転数およびスロットル開度は絶えず変化し、空燃比も変化するが、平均空燃比を出力空燃比に近づける燃調設定が走行時間短縮に有効であると考えられる。また、平均空燃比を出力空燃比に近づけると最大空燃比と最小空燃比の差が小さくなることがわかる。これは、スラローム走行のようにエンジンの運転条件が著しく変化する場合においても安定して出力が発生するものと考えられ、この出力特性が走行時間短縮に寄与している可能性が高い。

Fig. 3 (right) より、湿潤路面においては燃調設定の変更に伴う空燃比の変化は僅かであることがわかる。湿潤路面走行時は、乾燥路面走行時と同等の実験条件にすることをねらって車両には雨天時用の変更を加えていない。このことにより、吸気条件の影響の受け易い競技車両のエンジンが、湿度によって完全燃焼を抑制されているこ

とが考えられる。つまり、供給燃料が増加しても不完全燃焼により酸素消費量が増加しないため、排ガス中の残存酸素濃度ならびに空燃比の変化が小さいものと考えられる。したがって、湿潤路面において燃調設定の変更による走行時間の変化を明確にするためには、乾燥路面走行時の実験条件と異なっても、雨天走行に適した変更を車両に施す必要があるといえる。

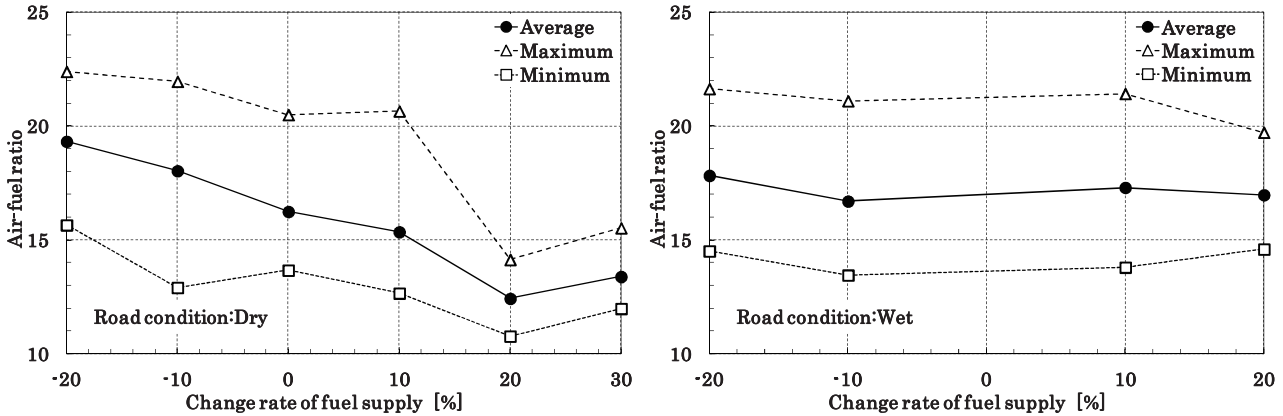


Fig. 3 Variations of air-fuel ratio with change rate of fuel supply on dry road (left) and wet road (right)

4.3 燃調設定とスロットルバルブ開度の関係

乾燥路面および湿潤路面において燃調設定を変更した場合のスロットルバルブ開度の変化をそれぞれ Fig. 4 に示す。スロットルバルブ開度は全閉を 0%，全開を 100%とする。Fig. 4 より、乾燥路面および湿潤路面いずれにおいても、燃料噴射量増減率を増加すると、平均スロットルバルブ開度は概ね小さくなるのがわかる。これは、供給燃料の増量に伴って発生出力も増大するため、ドライバが発生出力を低減させるアクセルペダル操作をしているものと考えられる。また、最大スロットルバルブ開度は、乾燥路面においては 30%以下、湿潤路面では 60%以下であり、全開にならないことがわかる。つまり、本研究のスラロームコースにおける燃調設定は、スロットルバルブ開度の全範囲に対してではなく、使用する範囲のみを対象とすればよいといえる。

乾燥路面走行時 Fig. 4 (left)と湿潤路面走行時 Fig. 4 (right)を比較すると、湿潤路面走行時の最大スロットルバルブ開度が大きいことがわかる。一般に湿潤路面では、タイヤとの摩擦係数が低下するため、アクセルペダルの踏み込み量は減少する傾向がある。しかし、前述 (4.2 節) したとおり、雨天走行時に混合気が不完全燃焼して発生出力が低下することに対して、ドライバが発生出力を増大させるアクセルペダル操作をしているものと考えられ、やはり、燃調設定の変更の他に、吸気中の湿度が空燃比に影響しているといえる。

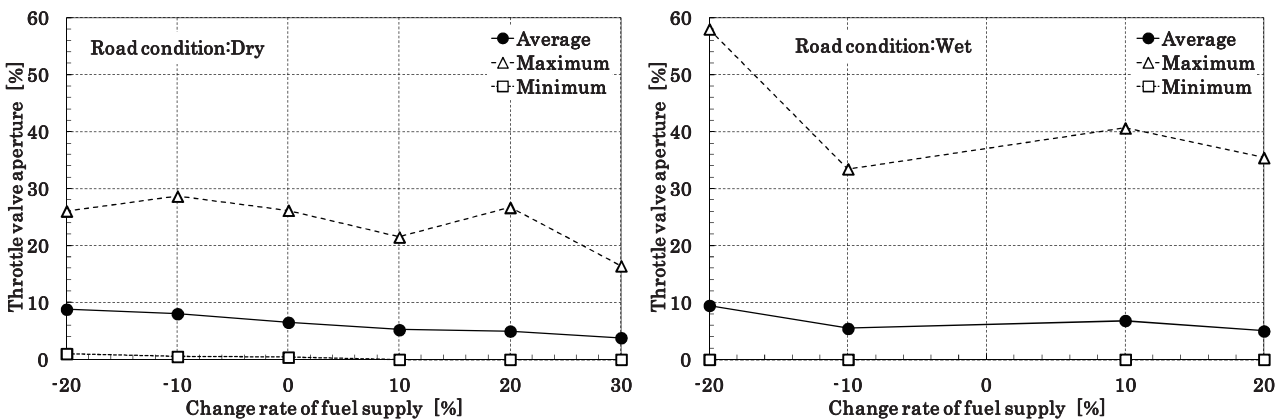


Fig. 4 Variations of throttle valve aperture with change rate of fuel supply on dry road (left) and wet road (right)

4.4 燃調設定と平均エンジン回転数の関係

乾燥路面および湿潤路面において燃調設定を変更した場合の平均エンジン回転数の変化をそれぞれ Fig. 5 に示す。Fig. 5 (left) より、乾燥路面においては、燃料噴射量増減率を 20% とした場合、最も平均エンジン回転数は上昇することがわかる。これは平均空燃比が出力空燃比に近づく場合であり、走行時間が最小となるため、当然、平均車速および平均エンジン回転数は高くなる。一方、燃料噴射量増減率を 20% の状態から増減した場合、平均エンジン回転数は低下することがわかる。これは、ドライバのアクセルペダル操作に対してエンジン回転数の応答性が低下し、エンジン回転数が十分上昇しない状態で次の旋回を開始するため、平均エンジン回転数が低下するものと考えられる。つまり、平均空燃比を出力空燃比に近づける燃調設定は、短時間のアクセルペダル操作に対して、エンジン回転数の応答性を向上させるものと考えられる。

前述 (4.3 節) したとおり、湿潤路面においては乾燥路面走行時と比較すると、最大スロットルバルブ開度は増大するが、Fig. 5 (right) より、平均エンジン回転数は約 1000min^{-1} 低下することがわかる。さらに燃調設定の変更に対する平均エンジン回転数の変化は僅かである。これは、やはり前述 (4.2 節) の不完全燃焼の発生を示しているといえる。

また、いずれの路面条件においても、燃料噴射量増減率を -20% とする場合と比較すると、燃料噴射量増減率を 20% とする場合のエンジン回転数の最大値と最小値の差が小さいことがわかる。このことから前述 (4.1 節) したとおり、走行時間が短縮する場合は車両の操作性が良好であるといえる。

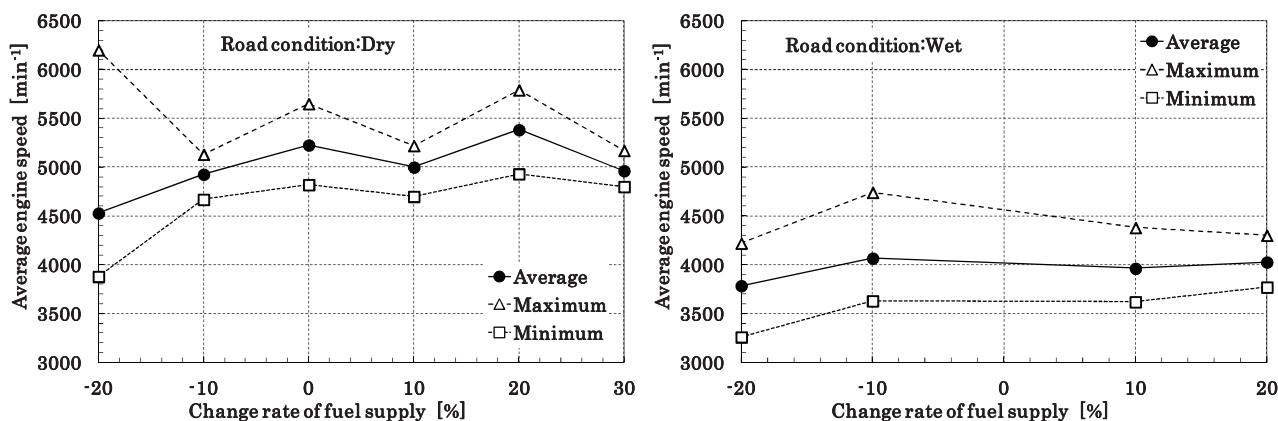


Fig. 5 Variations of average engine speed with change rate of fuel supply on dry road (left) and wet road (right)

5. 結 言

本研究では、小型四輪競技車両の動的性能に関する設定選択の指針を得ることを目的として、学生フォーミュラ大会出場車両を用い、燃調設定を変更してスラローム走行における走行時間を計測し、空燃比が動的性能に及ぼす影響を検討した。

その結果、燃調設定の変更に伴う空燃比の変化とともに走行時間が増減することを確認した。また、走行時間を短縮するために、競技コース内の対象とする走行区間（本研究ではスラローム走行区間）において空燃比変化の記録および確認をし、平均空燃比を出力空燃比に近づけるように燃料供給量を調整する手法が提案できる。

さらに、雨天時における混合気の不完全燃焼が発生した場合は、燃調設定の変更に対して空燃比の変化が減少することがわかった。

なお、本研究において提案する手法が、他の車両や競技コースにおいても有効であるか確認する必要がある。

文 献

- (1) 藤沢英也, 小林久徳, 電子制御ガソリン噴射, (1987), p.5, 山海堂.
- (2) 自動車技術会, “全日本 学生フォーミュラ公式サイト”, <http://www.jsae.or.jp/formula/jp2/index.html> (参照日 2017 年 1 月 31 日).

(平成 29 年 3 月 31 日受理)