

フォーミュラスタイルの小型四輪競技車両における タイヤ空気圧と旋回性能の関係*

位田 晴良^{*1}, 西端 将人^{*2}, 三好 清隆^{*3}

Relationship between Tire Inflation Pressure and Turning Performance of Formula-style Small Race Cars

Haruyoshi IDA^{*1}, Masahito NISHIBATA and Kiyotaka MIYOSHI

^{*1} Department of Mechanical Engineering

The performance of tires and suspensions is an important factor that influences the turning characteristic of a car. Moreover, it requires great effort to decide the optimal settings of those factors relating to the turning characteristic. In this research, driving tests were conducted with a formula-styled small race car to confirm the influence on the turning performance caused by the change in the tire inflation pressure and the damping force of its shock absorber. As a result, appropriate tire inflation pressure for running the race cars which weighted around 300kg on dry roads was found. In addition, it was confirmed the turning speed was influenced by the change in the damping force of the shock absorber.

Key Words : Formula-style Small Race Car, Turning Performance, Tire Inflation Pressure

1. 緒 言

自動車の走行において、車両はドライバの操作により進行方向が変えられ旋回運動を行う。この旋回の性能は、乗用車の安全性、快適性をはじめ競技車両の旋回速度にも関係する。したがって、自動車の旋回性能を向上させるためには、車両の旋回特性を把握し改善を行う必要がある。旋回性能は、自動車の操舵装置のみならず緩衝装置、駆動装置など多くの部品の動作特性とそれらの車両における構成方法により変化することに加え、車両の走行条件に左右される。この中でタイヤおよびサスペンションの性能は自動車の旋回性能に影響する重要な要因である。また、タイヤの性能はタイヤが元来有する材質や強度などの特性の他に、タイヤの使用条件によっても左右される。タイヤの使用条件としてタイヤの空気圧は旋回性能に大きく影響すると同時に、そのタイヤ空気圧に適したサスペンションのショックアブソーバ減衰力の設定が求められる。

一般的な乗用車と比較すると競技車両の場合、刻々と変化する車両の走行条件において最短の走行時間となるように、その都度最適な旋回特性に変更する必要がある。しかし、旋回性能に関係する要因の最適な設定を決める作業は大変な労力を要し、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、ドライバおよびメカニック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。

本研究では、タイヤ空気圧およびサスペンションのショックアブソーバ減衰力の変更が旋回性能に与える影響を明らかにし、小型四輪競技車両の旋回に関係する要因の設定における指針を得ることを目的としている。そこで全日本学生フォーミュラ大会出場車両を使用し、タイヤ空気圧およびショックアブソーバ減衰力の変更が旋回性能に与える影響を走行試験により確認する。

* 原稿受付 2015年2月27日

^{*1} 機械工学科

^{*2} 機械工学科学生

^{*3} 学務課

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

2. コーナリングフォースおよびタイヤ接地面における現象

2.1 コーナリングフォース

本研究において、旋回性能の変化を確認するためにコーナリングフォースの発生を検討する。自動車が旋回する場合、速度の上昇に伴って遠心力が作用するため旋回円の外側に向かって横滑りしながら進行する。その結果、タイヤと路面の摩擦力によりタイヤが変形し、旋回半径の中心方向に作用する力がコーナリングフォースである。また、コーナリングフォースは、タイヤとの路面摩擦によって生じるため、駆動力や制動力と密接な関係があり、タイヤの性能に大きく左右される。とくにタイヤ空気圧や接地面積などが影響する。コーナリングフォースは、車両質量および旋回速度が大きいほど、また旋回半径が小さいほど増加する。

2.2 タイヤ接地面の摩擦機構⁽¹⁾

コーナリングフォースの発生は、タイヤ接地面のゴムの摩擦機構が大きく影響する。金属のように接触面において主に塑性変形が起こる物質と、ゴムのように主に弾性変形が起こる物質とでは、摩擦の発生機構が大きく異なる。一般に金属のような剛体については、摩擦係数（摩擦力/荷重）は垂直荷重や見かけの接触面積、滑り速度などに関係なく一定である一方、ゴムの場合は接触面で弾性変形が起こるため摩擦現象は複雑となり、荷重や接触面積、滑り速度といった要因によってゴムの摩擦特性は大きく影響を受ける。

路面には大小の凹凸があり、実際に接触している面積（真実接触面積）は見かけの接触面積よりはるかに小さく、この真実接触部では分子結合のせん断破壊に必要な力が働いている。これは粘着摩擦と呼ばれており、ゴムの摩擦は主に粘着摩擦から成り立っていると考えられている。この摩擦力は分子の結合数に比例するため、金属のような剛体の場合、荷重を増やすと真実接触面積の増加に比例して摩擦力も大きくなり摩擦係数はほぼ一定であるが、弾性変形を生じるゴムの場合、真実接触面積は比較的大きいため、荷重が増加すると見かけの接触面積に近付くが、それ以上は荷重に比例して増加しなくなり、摩擦係数は減少することになる。したがってゴムの場合、荷重（接地面圧）が増加すると摩擦係数は減少する特性になる。

2.3 湿潤路面におけるタイヤ接地面

自動車は雨天による湿潤路面を走行することがある。自動車競技においても危険な降雨量であると判断されない場合、競技は実施される。したがって、湿潤路面における旋回性能の変化を確認する必要がある。

路面上に多量の水膜がある状況において車両が高速で走行する場合、ある速度以上になるとタイヤにより路面上の水を排除する作用が不十分となり水上を滑走する状態となる（ハイドロプレーニング現象）。ハイドロプレーニング現象に陥ると操舵や減速がほとんど行えなくなる。これを防ぐために公道走行用のタイヤや競技用のレインタイヤではタイヤ接地面の溝に一時的に水分を保持し、タイヤの接地圧や回転による遠心力を利用して水分を排出することでハイドロプレーニング現象を防止している。したがって、タイヤ空気圧の変更は接地圧に影響するため、湿潤路面における旋回性能を左右する。

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タイヤ空気圧およびサスペンションのショックアブソーバ減衰力を四カ所とも等しく変更して実施する。本走行試験では、タイヤ空気圧およびショックアブソーバ減衰力の変更による旋回性能の変化のみ確認することを目的としており、ドライバの運転技量による影響を極力なくすことをねらって定常円旋回における走行試験とする。舵角を一定に保持し、一定の速度で運動する自動車はある一定の半径で旋回を行う。このような速度一定、舵角一定（あるいは旋回半径一定）の旋回を定常円旋回とよぶ。定常円旋回ではタイヤが滑り出す速度により旋回速度の限界が決まるものと考えられる。定常円旋回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、タイヤ空気圧およびショックアブソーバ減衰力の変更による旋回性能への影響と比較すると、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、タイヤ空気圧およびショックアブソーバ減衰力の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、旋回性能の変化の把握を図る。

3.2 円周路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、円周路の走行時間の変化から旋回性能を検討する。タイヤ空気圧およびショックアブソーバ減衰力の変更に走行時間に及ぼす影響を確認するため、直径 15.25m（全日本学生フォーミュラ大会の競技種目の一つであるスキッドパッドに用いられる円周路の直径）の円周路（以下、低速旋回円）および、この低速旋回円よりも高い走行速度による旋回を想定した直径 30.50m の円周路（以下、高速旋回円）を使用し、このコースを 5 周する走行時間を計測する。走行試験に使用する円周路を Fig. 1 に示す。なお、検討の煩雑化をさけるため、実験は一方（反時計回り）の旋回のみで行う。

また、実験車両の条件変更によりドライバーが順応するまで操作ミスが発生する可能性があるため、予め円周路における十分な慣らし走行を実施する。さらに、スタート時の加速による計測値の変動を無くすため、慣らし走行が安定した状態から計測を開始する。計測開始時期は走行中のドライバーの合図をもとに決定する。

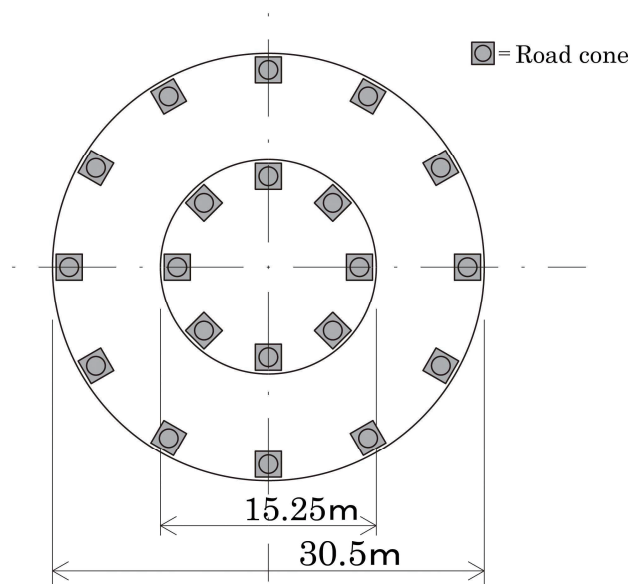


Fig. 1 Schematic of circumference course used in this examination

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、実験車両の外観を Fig. 2 に示す。Table 1、Fig. 2 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、タイヤ空気圧およびショックアブソーバ減衰力の変更による旋回性能の変化を確認する走行試験に適しているといえる。サスペンション形式はダブルウィッシュボーン形であり、比較的容易にショックアブソーバ減衰力の変更が可能である。また、使用するタイヤ（YOKOHAMA ADVAN A048）は、合法的に公道で使用することが可能であるが、競技走行に最適な性能を有する。一般に普及している乗用車のタイヤと比較すると、接地面の溝が少なく湿潤路面における排水性は劣るものの乾燥路面において発生する摩擦力は大きい。

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



Fig. 2 Photograph of experimental vehicle

3.4 タイヤ空気圧の変更

タイヤ空気圧が旋回性能に及ぼす影響を確認するためタイヤ空気圧の変更を行う。

一般に公道で使用される乗用車用タイヤは旋回における動的性能の他に、耐摩耗性、燃費、騒音、コストなど多くの要件をバランス良く満たすように設計されている。これに対し競技用タイヤは、動的性能の向上が優先されており、コーナリングフォースおよび路面に伝達する最大駆動力を増大させるため、乗用車用タイヤよりもタイヤの剛性が高い。したがって、一般に乗用車用タイヤの空気圧は、200kPa程度であることが多いが、競技用タイヤはそれよりも低い空気圧で使用される場合が多い。また、全日本学生フォーミュラ大会に出場する各チームの車両は、それぞれの設計方針に基づいて製作されているため、車両の質量や寸法、使用するタイヤなどその他の条件が異なることに加え、最適なタイヤ空気圧を選定できていない例も多いが、競技用タイヤを用いる場合が多いため、概ね乗用車用タイヤよりも低いタイヤ空気圧を適用することが多い。

本研究の走行試験では、タイヤ空気圧を50kPa~250kPaとして50kPa毎に四カ所とも等しく変更し、走行時間を計測する。なお、タイヤ空気圧は走行によるタイヤの発熱に伴い変化するが、予備走行を実施してタイヤの温度を上げながらタイヤ空気圧の微調整を繰り返し、タイヤ空気圧が設定値から変化しなくなったことを確認して計測を開始する。

3.5 サスペンションのショックアブソーバ減衰力の変更

サスペンションの緩衝特性を調整するために変更する要因はいくつかあるが、本研究においてはショックアブソーバの減衰力を変更する。実験車両に搭載されるショックアブソーバの外観をFig. 3に示す。Fig. 3に示すように車体を支え、路面からの衝撃を吸収するコイルスプリングおよびコイルスプリングの振動を収束させるための減衰力を発生するダンパから構成される。競技車両のショックアブソーバ減衰力の調整は、乗員の乗り心地を快適にすることを目的として振動の収束が図られることはほとんどなく、減衰力の大小によって走行中のサスペ

ンションの作動特性が変化するため、タイヤの路面追従性や車体の安定性、各車輪の荷重変化特性が走行条件に対して最適となるように調整し、走行時間を短縮することが目的とされる。

本研究に用いるショックアブソーバは、圧縮時および伸張（リバウンド）時の減衰力調整が可能であり、それぞれの減衰力を最大または最小とする。また、減衰力の絶対値は、計測することが困難であることに加えて公表されていないために不明であるが、調整機構により設定を変更した場合、3.6節に示す加速度の計測において、車両の上下方向の加速度、すなわち、路面の凹凸から受ける振動が増減することを確認している。したがって、ショックアブソーバの調整機構の設定を反映した減衰力が得られているといえる。本稿における減衰力設定の表記法を Fig. 4 に示す。Fig. 4 は圧縮側の減衰力を最大、リバウンド側の減衰力を最小に設定した例である。したがって、これらを組み合わせることにより減衰力設定は Table 2 に示す 4 パターンとなり、この減衰力設定を四カ所のショックアブソーバに等しく適用する。



Fig. 3 Photograph of shock absorber used in this examination



Fig. 4 Notation of damping force set in this work

Table 2 Settings of damping force applied in this examination

	Notation	
	Minimum	Maximum
Rebound side damping force		
Compression side damping force		
Minimum	S-S	S-H
Maximum	H-S	H-H

3.6 加速度の計測

自動車における旋回性能は、コーナリングフォースを増大させることにより向上する。定常円旋回をする場合、車両に働く遠心力とコーナリングフォースが釣り合っているため、遠心力を発生させている半径方向の加速度を計測することにより、コーナリングフォースの変化が確認できるものと考えられる。したがって、コーナリングフォースの把握を目的として、実験車両に加速度センサを搭載する。また、車両のその他の挙動変化も把握するために 3 次元の加速度計測を行う。

なお、簡易的な加速度計測を試みるため、スマートフォン（Apple iPhone5s）およびスマートフォン用アプリケーションソフトウェア（REGREX 加速度センサーロガー v1.2）を使用し、車両に発生する加速度を計測し、車両の挙動を把握する。スマートフォンを車両に水平に搭載することにより、車両左右方向の加速度は X 軸の値、前後方向の加速度は Y 軸の値、上下方向の加速度は Z 軸の値として出力される。すなわち、X 軸の値は旋回時の遠心力、Y 軸の値は車両の加減速、Z 軸の値は路面の凹凸等による車両の上下振動を意味する。

4. 実験結果および考察

4.1 タイヤ空気圧と円周路走行時間の関係

乾燥路面および湿潤路面においてタイヤ空気圧を変更した場合の走行時間の変化をそれぞれ Fig. 5, Fig. 6 に示す。なお、湿潤路面における減衰力設定は、天候の影響を受けたため十分な走行試験の遂行が可能であった 2 パターンである。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、旋回速度が上昇したことを表す。

乾燥路面における結果を示す Fig. 5 より、低速旋回円および高速旋回円いずれの場合も、タイヤ空気圧を一般的な乗用車のタイヤ空気圧よりも低下させると走行時間は減少し、空気圧 100kPa の場合に最短となることがわかる。すなわち、定常円旋回の場合、旋回速度が異なっても最適なタイヤ空気圧は変わらないといえる。ゴムの摩擦係数は、接地面圧の上昇に伴って減少することが知られている⁽¹⁾。したがって、タイヤ空気圧の減少に伴い接地面積が増加（接地面圧が減少）し、摩擦係数の増加とともにコーナリングフォースが増加したため旋回速度が上昇したものと考えられる。また、本研究で使用した車両の質量が競技車両としても軽量であるため、一般的なタイヤ空気圧と比較すると低い 100kPa が最適となったが、さらに空気圧を低減させて 50kPa とすると走行時間は増加する。これは、過度にタイヤ空気圧を低減させるとタイヤ剛性の低下とともにコーナリングフォースの発生に必要なタイヤの復元力が低下するため走行時間は減少しなくなるものと考えられる。

湿潤路面における結果を示す Fig. 6 より、タイヤ空気圧を増加させると走行時間は減少する傾向にあることが

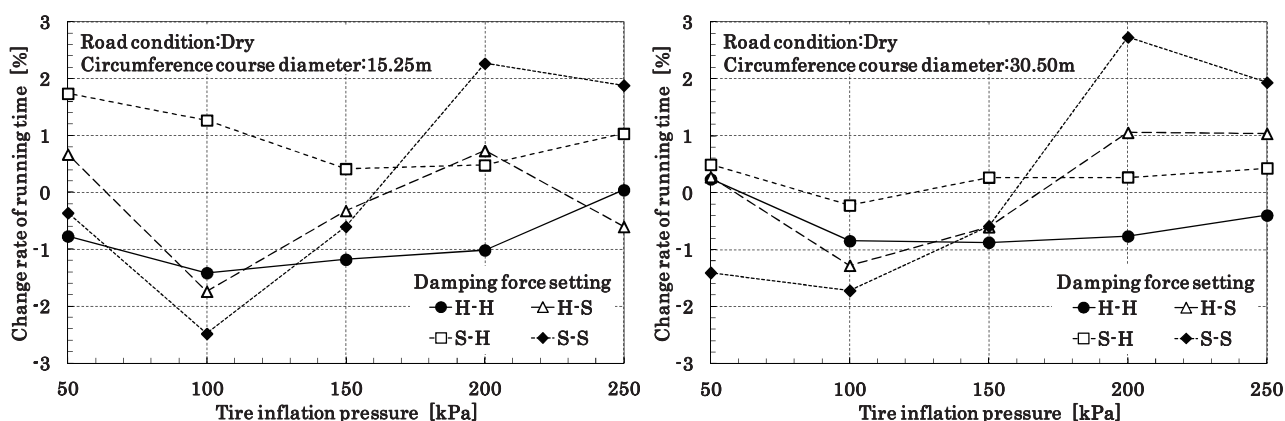


Fig. 5 Variations of change rate of running time with tire inflation pressure measured by application of four damping force settings at circumference courses 15.25m and 30.50m in diameter on dry road

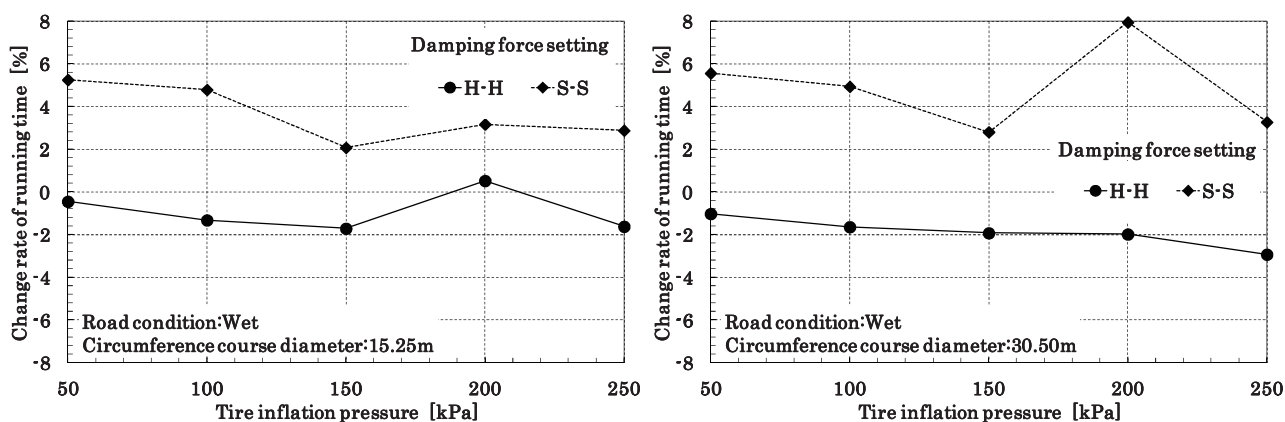


Fig. 6 Variations of change rate of running time with tire inflation pressure measured by application of four damping force settings at circumference courses 15.25m and 30.50m in diameter on wet road

わかる。また、旋回速度が異なってもこの傾向は変わらない。乾燥路面の場合、空気圧の増加とともに接地面圧が増加すると走行時間は減少しないが、湿潤路面の場合、タイヤの空気圧の増加に伴い接地面積が減少（接地面圧が増加）し、タイヤ接地面と路面との間にある水膜の排水性が向上するため旋回速度が上昇するものと考えられる。

4.2 ショックアブソーバ減衰力と円周路走行時間の関係

乾燥路面における結果を示す Fig. 5 より、タイヤ空気圧により最適なショックアブソーバの減衰力が異なり、最小走行時間となるタイヤ空気圧が 100kPa の場合、ショックアブソーバ減衰力を圧縮側、リバウンド側ともに最小（S-S）とすると走行時間が短縮することがわかる。これは、4.1 節のとおり、タイヤ空気圧を減少させることにより、コーナリングフォースが増加することに加え、ショックアブソーバ減衰力が減少することにより路面追従性が向上するためであると考えられる。

Table 3 Comparison of change rate of running time by changing tire inflation pressure and damping force on dry road

Road condition: Dry					
Damping force setting: S-S			Tire inflation pressure: 100kPa		
Tire inflation pressure	Change rate of running time		Damping force setting	Change rate of running time	
	Circumference course diameter			Circumference course diameter	
	12.25m	30.50m		15.25m	30.50m
250kPa	1.88%	1.94%	H-H	-1.42%	-0.85%
200kPa	2.27%	2.73%	S-S	-2.49%	-1.72%
150kPa	-0.60%	-0.59%	S-H	1.27%	-0.22%
100kPa	-2.49%	-1.72%	H-S	-1.75%	-1.28%
50kPa	-0.36%	-1.41%			
Maximum difference	4.76%	4.45%	Maximum difference	3.76%	1.50%

Table 4 Comparison of change rate of running time by changing tire inflation pressure and damping force on wet road

Road condition: Wet					
Damping force setting: H-H			Tire inflation pressure: 250kPa		
Tire inflation pressure	Change rate of running time		Damping force setting	Change rate of running time	
	Circumference course diameter			Circumference course diameter	
	12.25m	30.50m		15.25m	30.50m
250kPa	-2.93%	-1.62%	H-H	-2.93%	-1.62%
200kPa	-1.98%	0.52%	S-S	3.27%	2.88%
150kPa	-1.93%	-1.71%			
100kPa	-1.64%	-1.32%			
50kPa	-1.02%	-0.45%			
Maximum difference	1.91%	2.23%	Maximum difference	6.20%	4.50%

そこで、タイヤ空気圧の変更およびショックアブソーバ減衰力の変更が走行時間に及ぼす影響を比較する。乾燥路面および湿潤路面において最小走行時間となるタイヤ空気圧および減衰力とし、相互の条件を変更した場合の走行時間増減率の比較をそれぞれ Table 3, Table 4 に示す。

Table 3 より、乾燥路面において、減衰力の変更と比較するとタイヤ空気圧の変更が走行時間に及ぼす影響は大きいといえる。一方、Table 4 より、湿潤路面においては、タイヤ空気圧の変更よりも減衰力の変更の影響が大きいことがわかる。乾燥路面と比較すると旋回速度が低いいため、条件変更による影響が顕著にならないことが予想されながら走行時間の差が大きいことから、この傾向は雨天走行時の降雨量の変化が影響している可能性もあり、さらに検討が必要である。

4.3 タイヤ空気圧と車体における加速度の関係

タイヤ空気圧を変更した場合のコーナリングフォースの変化を把握するため、旋回時の車体に働く遠心力の変化を加速度計測により確認した。乾燥路面における半径方向加速度の変化を Fig. 7 に示す。Fig. 5, Fig. 7 より、走行時間の変化と遠心力を発生させる加速度の変化がほぼ対応していることがわかる。すなわち、旋回速度およびコーナリングフォースの変化を加速度計測により確認できるといえる。

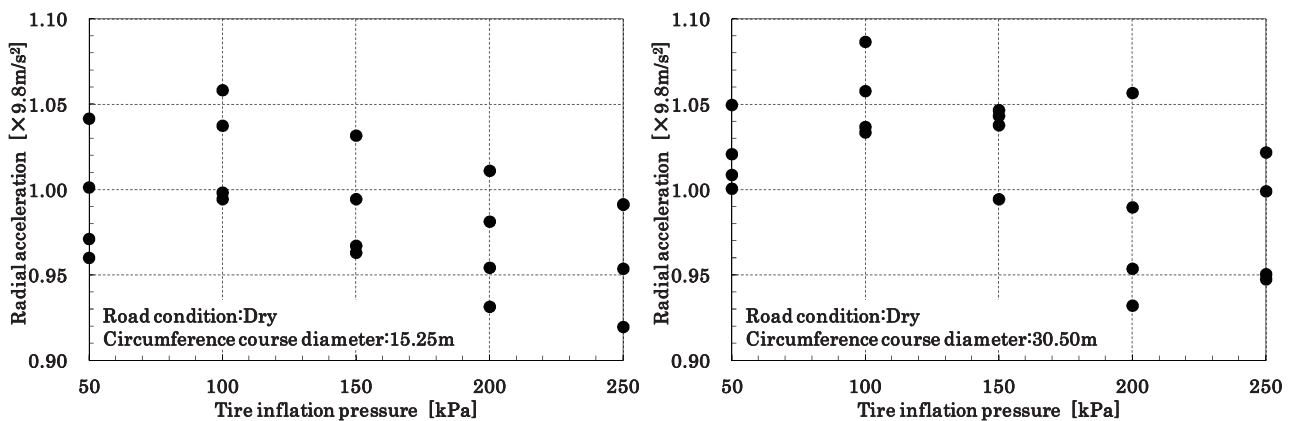


Fig. 7 Variations of radial acceleration with tire inflation pressure measured at circumference courses 15.25m and 30.50m in diameter on dry road

5. 結 言

本研究では、小型四輪競技車両の旋回に関する要因の設定における指針を得ることを目的として、全日本学生フォーミュラ大会出場車両を使用した走行試験を実施し、タイヤ空気圧およびサスペンションのショックアブソーバ減衰力の変更が旋回性能に与える影響を検討した。その結果、乾燥路面の定常円旋回において比較的軽量の質量 300kg 程度の競技車両に適しているタイヤ空気圧を明らかにした。また、この空気圧にタイヤの路面追従を優先したショックアブソーバ減衰力を適用することにより走行時間の短縮を図ることができるといえる。しかし、乾燥路面の定常円旋回においてはタイヤ空気圧の変更による影響が大きく、ショックアブソーバ減衰力の変更はタイヤ空気圧の変更と比べるとその影響は僅かであることがわかった。湿潤路面の旋回においては、乾燥路面に適したタイヤ空気圧よりも高くすることにより走行時間の低下が抑制できるが、減衰力変更に対する旋回性能の変化についてはさらに検討が必要である。さらに、簡易的な手法によりコーナリングフォースの変化の確認を試み、その結果は旋回速度を反映することから旋回性能の把握に有効であることを明らかにした。

文 献

- (1) 松田勇治, “タイヤの変形と“グリップ力””, モータファン・イラストレーテッド, Vol.34(2009), pp.28-29, 三栄書房.

(平成 27 年 3 月 31 日受理)