

238-20095176 実路走行における駆動力測定手法に関する研究*

佐藤 進¹⁾ 山本 敏朗²⁾ 小川 恭弘³⁾ 佐々木 裕⁴⁾ 菊入 広⁵⁾ 金子 克也⁶⁾

Study on Measurement Method of Driving Force in On-road Driving

Susumu Sato Toshiro Yamamoto Yasuhiro Ogawa Hiroshi Sasaki Hiroshi Kikuri Katsuya Kaneko

Exhaust emissions behavior from a vehicle under road driving condition is affected by the driving force of a vehicle. It is impossible to measure the driving force by the existing torque meter under this road driving condition. This study reports the development and verification of the wheel torque meter which is possible to measure driving force under the on-road driving condition and have enough strength and accuracy. As a result of verification, the wheel torque meter developed in this study has high accuracy under both the chassis dynamometer test and the on-road driving condition.

Key Words: Road test, Analysis, Environment / On-board measurement system, Driving force, Driving resistance, Wheel torque meter ⑨

1. ま え が き

車載型計測システムを用いて実路走行自動車の排出ガス挙動を計測する場合、その挙動はエンジンのトルクおよび車両の駆動力に依存する。必要駆動力は、車両にかかる走行抵抗の値を求めることができれば、推定することが可能である。ここで車両にかかる走行抵抗は、空気抵抗、転がり抵抗、加速抵抗、勾配抵抗の4つで構成される⁽¹⁾。筆者らは、これまで特にその計測が困難とされている勾配抵抗の計測手法について研究を行ってきた⁽²⁾。これにより勾配抵抗の正確な把握および走行抵抗の評価が可能となったが、直接的に走行抵抗、駆動力を計測する手法も求められる。

実際に車両にかかる駆動力は、路面と接するタイヤ、ホイール部分にかかるトルクを測定することで計測可能である。しかし現存するトルクメータは、ホイール外側部分に装置が設置されるような形状をしており、路上走行での使用は不可能である⁽³⁾。また最近では、ホイール内側部分を加工して計測装置を設置するタイプのトルクメータも開発されているが、ホイール本体の強度の問題で、やはり路上走行時に使用することはできない⁽⁴⁾。

本研究では、路上走行時でも装着可能であり、かつ十分な強度と計測精度を備えたホイールトルクメータの開発を行った。開発するホイールトルクメータは、その内側に歪みゲージを有し、ハブとホイールの間に挟んで装着可能なものとす

る。この装着方法を採用することで、従来のトルクメータで起こるような取り付けに関わる問題は解決される。

本研究では、シャシダイナモメータ上で上述のホイールトルクメータを装着した車両を走行させトルクを計測し、シャシダイナモメータ上で計測されるトルクと比較することで、その精度検証を行うことを第一の目的とする。次に、4つの抵抗分を計測できる車両にホイールトルクメータを装着して実路を走行させ、それぞれの抵抗分を合計することで算出される走行抵抗と、実際に車両にかかる駆動力を比較、検証することを第二の目的とする。

2. ホイールトルクメータについて

2.1. ホイールトルクメータの構成

本研究で開発したホイールトルクメータは、図1に示すようにトルク変換器を含むトルク検出部、テレメータ受信部およびデータロガーで構成される。トルク検出部のひずみゲージ式トルク変換器は車両の駆動輪のハブとホイールの間に挟み込んで装着される。これは本装置に使用するトルク変換器が、従来のトルク変換器に比べて幅が非常に狭いことにより実現される。つまりこの特長故に、車両に装着した際の車幅増加率を極力抑えることが可能である。ハブとホイールとの間にボルト、ナットで簡単に設置固定出来ることから、大幅な改造をすることなく車両への装着が可能である。また従来使用されているトルク変換器のように車幅からはみ出す部材がないため、公道走行も可能となる。

2.2. ホイールトルクメータの特長

(1)トルク測定の流れ

ホイールトルクメータのトルク測定の流れは以下の通りである。

*2009年5月21日自動車技術会春季学術講演会において発表。

1)・2)・3) 独立行政法人交通安全環境研究所(〒182-0012 東京都調布市深大寺東町7-42-27)

4) 株式会社小山ガレージ(〒230-0071 横浜市鶴見区駒岡1-28-36)

5)・6) 東洋測器株式会社(〒223-0057 横浜市港北区新羽町964-24)

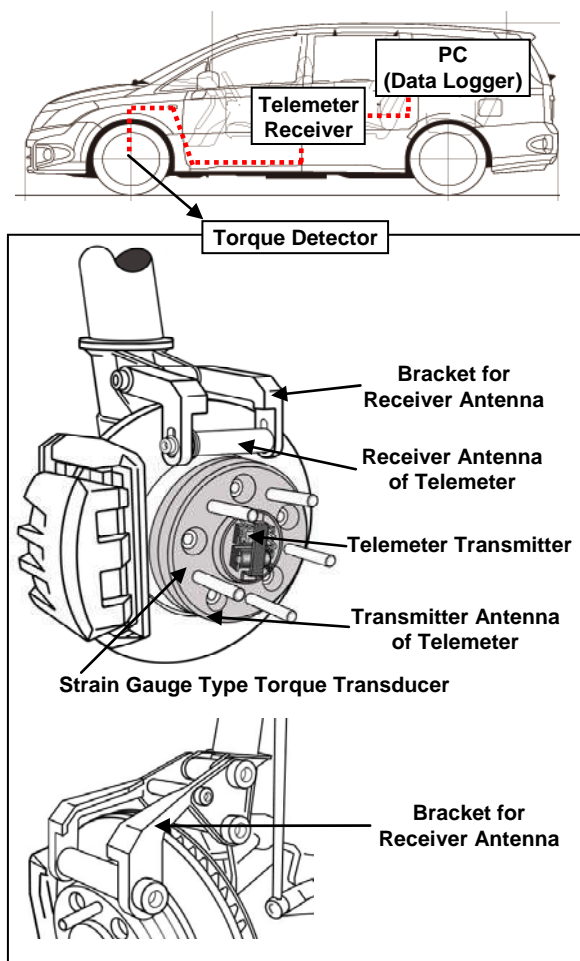


Fig. 1 Device configuration of the wheel torque meter

- ①ひずみゲージ式トルク変換器にテレメータ送信部を介してバッテリーより電圧が加えられる。
- ②トルクの発生によりトルク変換器は電圧を出力する。
- ③出力された電圧をテレメータ送信部が受け取る。
- ④テレメータ送信部からテレメータ受信部に電圧を無線送信。
- ⑤テレメータ受信部にて受け取った電圧を増幅。
- ⑥増幅された電圧をPCにて受け取る。
- ⑦PCにて電圧をトルク値に換算。

(2)ひずみゲージ式トルク変換器の原理

図 2 に本装置に使用するひずみゲージ式トルク変換器の構造を、また図 3 にこの変換器の原理図を示す。変換器は円筒の両端にフランジを有する構造で、両端にかかるトルクがフランジを介して円筒部に伝達される。円筒部にかかるトルクは、円周方向の 45° 方向に最大ひずみを発生するため、この方向に対して円筒内面にひずみゲージを接着する。計測誤差を出来るだけ軽減するため、円周上のなるべく多くの箇所に接着することが望ましい。今回は 45° ピッチにて 8 枚のひずみゲージを接着した。

このひずみゲージをホイートストンブリッジが形成されるように配線作業を行う。トルクの発生により、ひずみゲージ

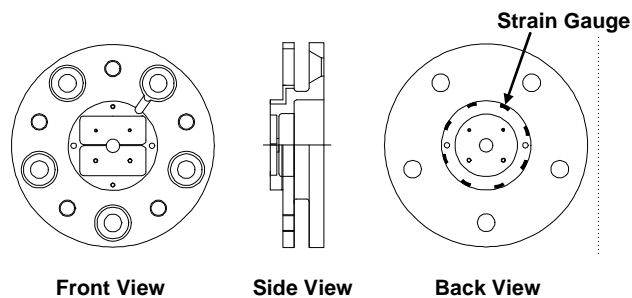


Fig. 2 Apparatus of the strain gauge type torque transducer

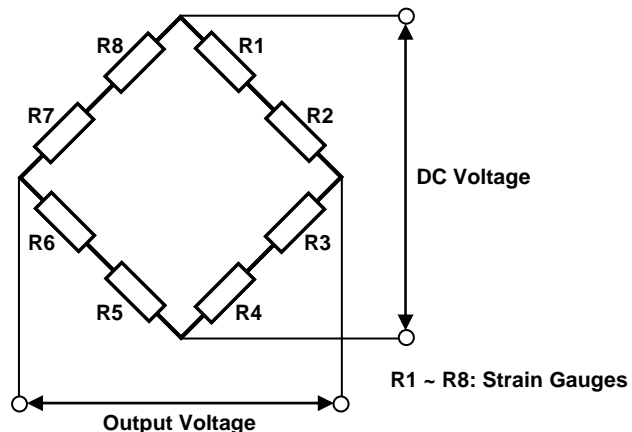


Fig. 3 Principle of the strain gauge type torque transducer (Wheatstone bridge)

は伸び縮みを起こすが、伸びることにより抵抗値が大きくなり、縮むことにより抵抗値が小さくなる。ホイートストンブリッジに一定の電圧を印加すると、抵抗値の変化がホイートストンブリッジを介することにより、電圧として出力される。トルクと出力される電圧とは正比例関係にあるため、これを利用して、出力電圧をトルクの換算値としている。この換算値は、トルク変換器にトルクを负荷させた際に発生する電圧を測定することにより求められる。

(3)ひずみゲージ式トルク変換器の強度

車両の走行時にトルク変換器にかかる力としては、軸の回転方向にかかるトルク、軸に対して垂直方向にかかる力、すなわち車重や路面から受ける反力、軸にかかる軸力の 3 方向への力である。図 4 にトルク変換器の強度シミュレーションを行った結果を示す。このシミュレーションの解析結果は、トルク変換器に対して、定格 1 kN・m のトルク（円周方向の矢印）がかかった状態で、なおかつ下から 20 kN の力（下からの矢印）がかかった状態でのトルク変換器の応力状態である。最大発生応力は約 107 N/mm²であり、使用材質の弾性領域のかなり低い値、つまり破断することのない安全な状態であることを確認している。また極所的に応力が発生していないことも確認できる。この結果より、軸に対して垂直にかかる力、軸にかかる軸力は、想定される力に対して十分な強度が確保

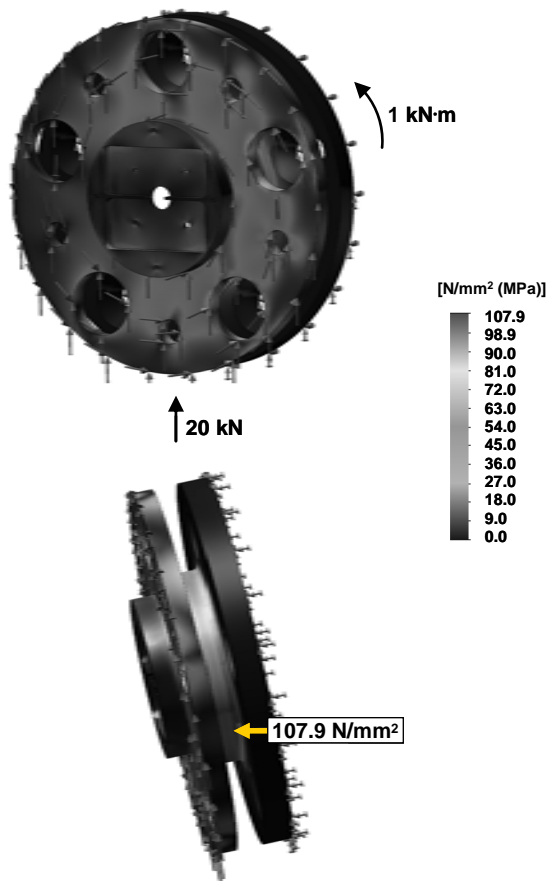


Fig. 4 Strength test result of the strain gauge type torque transducer (Simulation)

出来る構造となっていることが分かる。これらの力がかかった際のトルクに対する干渉値は測定値に対して影響がでないような構造としている。具体的にはトルク変換器に対して垂直方向にかかる力、すなわち車重がかかった状態で回転をさせると、干渉値が発生する。これを解消するため、ひずみ発生部の円周方向に対して8枚のひずみゲージを接着している。また実走行時は高速で回転することとなり、測定分解時間もそれほど短くないことから、測定値に対しての干渉値の影響は極めて小さい。

実際にテストコース上にて、ホイールトルクメータを車両に装着した状態で、急加速、急減速、スラローム等の実走行を行い、損傷等の無いことも確認している。

3. ホイールトルクメータの計測性能および精度

前章で説明したホイールトルクメータを試験車両に実装し、シャシダイナモメータおよびテストコースにて走行試験を実施し、その検証を行った。なお試験車両には、排気量 2499 cc、前輪駆動のガソリン乗用車を使用し、右前輪、左前輪にそれぞれひずみゲージ式トルク変換器を装着させて計測を行った。

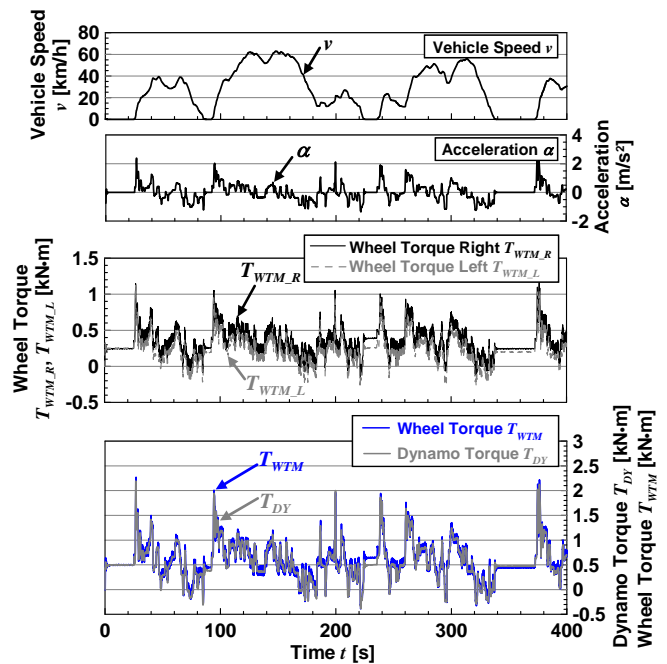


Fig. 5 Profiles of vehicle speed, acceleration, wheel torque and dynamo torque in JC08 mode test (Chassis dynamometer test)

3.1. シャシダイナモメータ試験での検証

シャシダイナモメータ試験では、試験車両の後輪を固定し前輪駆動状態で試験を行った。ここではJC08モード(ホットスタート)の条件下での結果について説明する。図5にJC08モード走行時の車両速度 v 、加速度 α 、ホイールトルクメータで検出される右前輪ホイールトルク $T_{WTM,R}$ 、左前輪ホイールトルク $T_{WTM,L}$ 、ホイールトルクの合計値 T_{WTM} およびシャシダイナモメータ上で検出されるダイナモトルク T_{DY} の履歴を示す。図にはJC08モードがスタートしてから400秒間のデータを示した。まず加速度 α と左右のホイールトルク $T_{WTM,R}$ 、 $T_{WTM,L}$ を比較すると、加速度の変化とホイールトルクの変化の波形が一致していることが分かる。また右前輪ホイールトルク $T_{WTM,R}$ と左前輪ホイールトルク $T_{WTM,L}$ を比較すると、基本的に履歴が一致する。しかし一致するのは $v > 0$ km/hの範囲においてであり、 $v = 0$ km/hのとき、つまり車両が停止している状態においては一致していない。本研究で開発したひずみゲージ式トルク変換器の内側には8枚のひずみゲージが貼られており、車両が停止したときに、どのひずみゲージの位置で駆動輪が停止したかにより検出されるトルクが変化することがその原因である。

次に左右のホイールトルクを合計した求めた値 T_{WTM} とシャシダイナモメータで検出されるダイナモトルク T_{DY} を比較すると、その値はほぼ一致していることが分かる。ただし $v = 0$ km/hのときには、その値が一致しない箇所がある。これは上述した原因と同じである。これら2つの値の相関をとったのが図6である。図6に示したプロットはJC08モード一走行の全データを対象に車速0 km/hにおけるデータは除外したもの

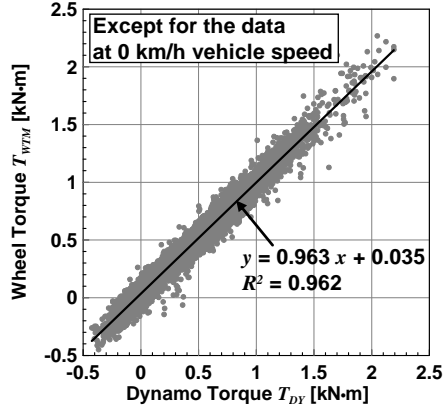


Fig. 6 Comparison between the wheel torque and the dynamo torque in JC08 mode test (Chassis dynamometer test)

である。またプロットに対して最小二乗法により近似直線を表記した。近似直線の傾きは0.963、決定係数は0.962という値が得られており、ホイールトルクメータで使用するひずみゲージ式トルク変換器は、高い計測精度を確保できていることが明らかになった。

3.2. テストコース走行試験での検証

前節の結果よりホイールトルクメータが高い精度でホイールトルクを計測可能なことが明らかとなった。その結果を受け、テストコースにて走行試験を行い駆動力計測の検証を行った。交通安全環境研究所自動車試験場のテストコースにおいて、シャシダイナモメータ試験時と同じ車両を用いて走行試験を行った。またこの車両には、著者らが開発した手法により道路勾配を計測するために、ジャイロセンサーおよびハイトセンサーを搭載している。この手法では、まずジャイロセンサーによって走行する車両のピッチ角を計測する。同時に車両の前後に装着された2つのハイトセンサーにより車両下面と路面との距離を計測し、その計測値をもとに車両の瞬時の傾きを算出する。得られたピッチ角から車両の傾きを差し引くことで道路勾配を求める⁽²⁾。

上記手法により得られた道路勾配から勾配抵抗を算出し、また同時に車両速度、加速度等のパラメータをもとに、加速抵抗、空気抵抗、転がり抵抗を算出することで、走行抵抗の値を得ることが可能である。一方で、車両の前輪に装着されたホイールトルクメータによりホイールトルクを計測し、その値を元に算出される駆動力を走行抵抗と比較することで検証を行った。走行抵抗 R および駆動力 F の算出式は以下の通りである。

$$R = R_c + R_a + R_r + R_e \quad (式 1)$$

$$R_c = (W + W_r)\alpha \quad (式 2)$$

$$R_a = C_d(\rho/2)Av^2 \quad (式 3)$$

$$R_r = \mu Wg \quad (式 4)$$

$$R_e = Wg \sin \theta_r \quad (式 5)$$

$$F = (T_{WTM_R} + T_{WTM_L})/r \quad (式 6)$$

ここで、

A : 前面投影面積[m²], C_d : 空気抵抗係数[N·s²/(g·m)], F : 駆動力[N], g : 重力加速度[m/s²], v : 車両速度[m/s], r : タイヤ半径[m], R : 走行抵抗[N], R_a : 空気抵抗[N], R_c : 加速抵抗[N], R_e : 勾配抵抗[N], R_r : 転がり抵抗[N], T_{WTM_L} : 左前輪のホイールトルク[N·m], T_{WTM_R} : 右前輪のホイールトルク[N·m], W : 車両重量, W_r : 回転部分相当質量[g], α : 加速度[m/s²], μ : 転がり抵抗係数[N·s²/(g·m)], θ_r : 道路勾配[deg.], ρ : 空気密度[g/m³]

なお空気抵抗 R_a および転がり抵抗 R_r については、試験車両を用いて惰行試験を行い、その結果を元に算出した。また駆動力 F を求める際に使用するタイヤ半径 r は固定値を用いている。

(1) 平坦路での検証試験

最初に平坦路での走行試験を行った。図7に平坦路走行時の車両速度 v 、道路勾配 $\sin \theta$ 、加速度 α 、左右前輪で検出されるホイールトルク T_{WTM_R} 、 T_{WTM_L} 、加速抵抗 R_c 、勾配抵抗 R_e 、空気抵抗 R_a 、転がり抵抗 R_r 、走行抵抗 R および駆動力 F の履歴を示す。この走行試験では車両速度の履歴が示すように、20 km/h 以下の低速での加減速走行および急加速急減速の走行を2回行った。

平坦路での走行であるため、道路勾配 $\sin \theta$ はほぼ0%である。シャシダイナモメータでの試験時と同様に、車両の加減速に合わせてホイールトルク T_{WTM_R} 、 T_{WTM_L} の値が増減している。その加減速によって生じる加速抵抗 R_c が、走行抵抗 R の大半を占めていることも図より見て取れる。またホイールトルクから算出した駆動力 F は、走行抵抗 R と比較すると履歴の増減を再現できており、値がほぼ一致していることが分かる。しかし2回の急減速時 ($t = 36 \text{ s} \sim 42 \text{ s}$, $78 \text{ s} \sim 84 \text{ s}$) において、走行抵抗 R に対して駆動力 F の値が乖離している。これは駆動力 F の算出の際、ホイールトルクをタイヤ半径 r で除しているが、このタイヤ半径に固定値を用いていることが原因と考えられる。つまり試験車両は前輪駆動車であり、急激な減速の際にはその荷重の多くが駆動輪である前輪側に移動する。そのときタイヤは荷重によって変形することとなり、実際のタイヤ半径は通常の走行状態と比較して小さくなる。つまりタイヤ半径の動的な変化まで考慮できれば、急減速時

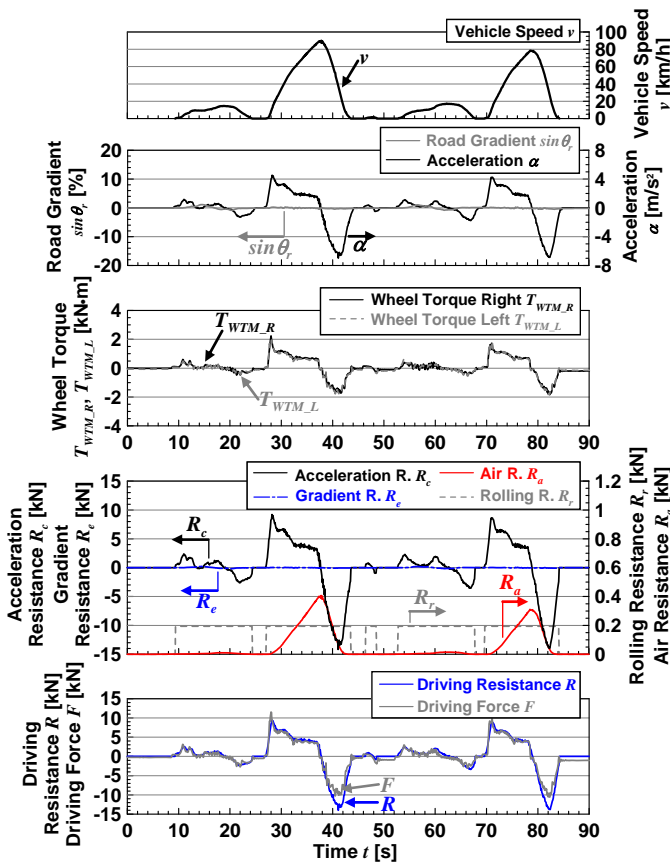


Fig. 7 Profiles of vehicle speed, road gradient, acceleration, wheel torque and each resistance, and the relationship between driving resistance and driving force, under the flat road driving condition

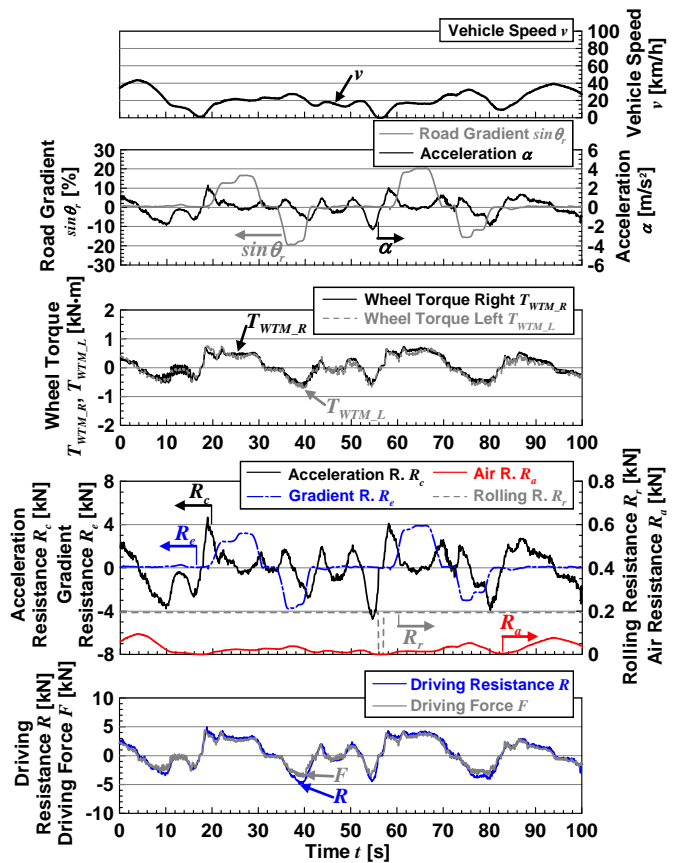


Fig. 7 Profiles of vehicle speed, road gradient, acceleration, wheel torque and each resistance, and the relationship between driving resistance and driving force, under the gradient road driving condition

でも駆動力の正確な把握が可能となることが示唆される。

(2) 勾配路での検証試験

平坦路での試験では、走行抵抗のうち加速抵抗がその大半を占めていた。加速抵抗以外の抵抗成分の割合が増加した場合にも走行抵抗に対して、駆動力が正しく評価できるかを次に検証した。勾配抵抗の割合を増加させるために、テストコース内に設置されている駐車ブレーキ試験路において走行試験を行った。これは、道路勾配 15%と 20%の路面を持つ試験路である。図 8 に駐車ブレーキ試験路走行時の車両速度 v 、道路勾配 $\sin\theta$ 、加速度 α 、左右前輪で検出されるホイールトルク $T_{WTM,R}$ 、 $T_{WTM,L}$ 、加速抵抗 R_c 、勾配抵抗 R_g 、空気抵抗 R_a 、転がり抵抗 R_r 、走行抵抗 R および駆動力 F の履歴を示す。

平坦路走行時の結果と比較して、計測されるホイールトルクの履歴の形状が、加速度 α とは一致しない。これは各走行抵抗成分の履歴から見ても分かる通り、道路勾配 θ によって生じる勾配抵抗 R_g の変化が大きいためである。この試験においては、車両速度 v も低く加速度 α の変化も大きくないため、特に勾配抵抗 R_g の走行抵抗 R に対する寄与率が高い。ホイールトルクから算出した駆動力 F と走行抵抗 R を比較すると、平坦路での試験結果と同じように、それらの履歴はほぼ一致す

る。ただし道路勾配 θ がマイナス側、つまり下り勾配の路面を走行する際に値が一致していないことが分かる。これは平坦路での結果にも見られた、荷重が車両の前輪側に移動することにより生じるタイヤの変形と、それによるタイヤ半径の減少が原因である。

以上の結果より、動的なタイヤ半径の把握という点が課題として残るものの、本研究で開発したホイールトルクメータにより車両にかかる駆動力を正しく評価可能なことが明らかになった。

4. 結論

本研究では、路上走行時でも装着可能であり、かつ十分な強度と計測精度を備えたホイールトルクメータの開発を行い、シャシダイナモメータ試験とテストコース走行試験による検証を行った。

- (1) 本研究で開発したホイールトルクメータに含まれるひずみゲージ式トルク変換器は、路上走行でも使用可能な十分な強度を持つ。
- (2) シャシダイナモメータ試験において、ホイールトルクとダイナモトルクの比較検証を行った結果、本研究で開発したホイールトルクメータは高い精度でトルクを計測可

能であることが明らかになった。それは両者の相関を取った場合の近似直線の傾きが 0.963, 決定係数は 0.962 となったことにも表れている。

- (3) テストコース走行試験において、平坦路および勾配路での試験を行った結果、いずれの路面の走行においても高精度で駆動力を評価できることが明らかになった。ただし車両の荷重移動により生じるタイヤ半径の変化を捉えることができれば、より精度の向上が見込まれる。
- (4) 今後は開発したホイールトルクメータを装着した状態で実路走行試験を行い、リアルワールドエミッションの解析等に役立てる予定である。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、ホイールトルクメータの開発に際して東洋測器株式会社、串田 武氏、松田 敦氏、久保田栄一氏にご尽力いただいた。また実験、解析に際して交通安全環境研究所環境研究領域、袋 宣子氏、常山順子氏、大槻俊也氏にご尽力いただいた。ここに記し、謝意を表す。

参 考 文 献

- (1) 田中美緒, 高田典史, 高田寛, 飯田訓正, “沿道局所に対して適用可能な NOx, PM, CO₂ 排出係数推計モデルに関する研究”, 自動車技術会論文集, Vol.37, No.2, pp.191-196 (2006)
- (2) 佐藤 進, 山本敏朗, 小川恭弘, “実路走行による道路勾配および標高計測手法に関する研究”, 自動車技術会論文集, Vol.39, No.5, pp.163-168 (2008)
- (3) http://www.kistler.co.jp/pro/pro_9/0002.html
- (4) http://www.tml.jp/product/automotive_ins/automotive_ins_sub/ltwnd.html