

排出ガス・燃費試験に用いる電気慣性式シャシダイナモメータの動的性能評価手法

理事 *野田 明 環境研究領域 鈴木 央一、石井 素
交通システム研究領域 林田 守正 自動車審査部 河合 英直
元自動車審査部 佐々木 義春 (株)明電舎 鈴木 雅彦

1. 背景

排出ガスと燃費の公式試験では、試験車の重量に応じた等価慣性質量をシャシダイナモメータ（以下、CHDY）に設定する規定がある。モード試験で加速抵抗に対するエンジン仕事は、総発生仕事の中でかなりの割合を占め、結果的に排出ガスや燃費に大きく影響するので、慣性質量は正確に設定されなければならない。モード試験で従来から使われてきた機械慣性式CHDY（図1(a)）では、フライホイール（FW）を用いて等価慣性質量を設定する。正確な慣性モーメント値を持つFWが、CHDYの回転軸に確実に固定されていれば、慣性設定量には疑問の余地がなく、経年変化の心配もなかった。しかし機械慣性式では、試験車等価慣性質量の設定範囲に応じて種々のサイズのFWとそれらの選択・固定機構を備える必要があり、また各FWの製作には精密な加工技術を要した。またローラ軸とFWの間に増速機構を設ける場合には、機械損増加の問題もあった。さらに慣性量の設定区分は段階的であって、FW群の構成により最小設定の分解能にも限界があった。

最近になり、台上で加減速度を検出し演算により慣性抵抗負荷をダイナモメータから与える電気慣性式CHDY（図1(b)）が普及してきた。しかし電気慣性式の場合は、慣性設定量を直接的に確認できないため、制御装置に故障や誤作動、経年変化が生じて慣性負荷が正しく与えられなくなっても、それを判断する手段が無かった。そのため国内の排出ガス・

燃費の認証試験では正式採用されてこなかった。

しかし電気慣性式CHDYは、設置面積や製造コストの面で有利な上、マイナス側も含む無段階の慣性設定ができ、さらに4WD車用CHDYへの展開も期待されるなど、有望かつ今後に不可欠な技術である。

そこで本発表では、2WD車用及び4WD車用の電気慣性式CHDYの制御機能の良否を、モード試験後に評価可能な新手法を示して前記の課題を解決し、電気慣性式CHDYを公式の排出ガス・燃費試験で用いる際の適用方法と採用可否の判定基準を示した。

2. 本分野の研究調査の実施体制と経緯

電気慣性式CHDYの性能評価法を検討するため、当研究所の自主取り組みとして、環境研究領域、自動車審査部及びCHDYメーカー主要3社代表のメンバーによる「電気慣性シャシダイナモ勉強会」を平成13年度に発足させ、以下の調査検討を行った。

- (1) 現用されている電気慣性式CHDYの技術調査
- (2) 機械慣性式と電気慣性式のCHDYの違いの把握
- (3) 国内での電気慣性式CHDYの確認方法の調査
- (4) 海外での電気慣性式CHDYの規定等の調査
- (5) 電気慣性式CHDYの性能評価法の基本案策定

一方、自動車工業会でも、電気慣性式CHDYを公式試験に適用可能か（財）日本自動車研究所に調査委託して検討していた。双方の検討グループが互いの成果を持ち寄り協議した結果、官民共同の検討会議体として「電気慣性シャシダイナモ性能基準検討

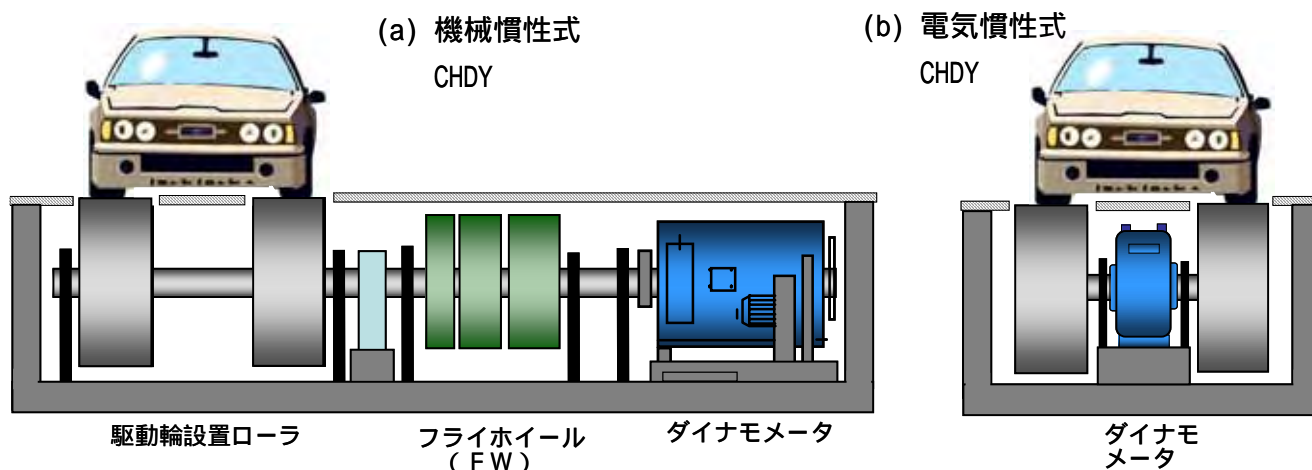


図1 機械慣性式CHDYと電気慣性式CHDYの構造的な違い

ワーキング」(以下、WG)を平成16年度から立ち上げ、各社が保有するCHDY設備を使って実験検討を重ねた。その結果、2WD車試験用電気慣性式CHDYを公式試験に適用する際の性能評価法と評価基準を16年度末に策定し、JASO規格として提案した⁽¹⁾。

引き続き同WGメンバーは、排出ガス・燃費試験に4WD車用シャシダイナモメータが適用可能か、その評価基準をどうするかについて検討することにした。そのため「4WDシャシダイナモ性能基準検討ワーキング」を平成17年度から立ち上げ、以下に関して検討作業を進めているところである。

- (1)2WD電気慣性式CHDYの評価方法をベースにして、4WD車の排出ガス・燃費を4駆状態のままに認証審査できる4WD車用CHDYの性能基準の策定
- (2)4WD試験車の走行抵抗設定法、CHDY台上固定方法など試験実施に必要な各項目についての基準

3. 電気慣性式CHDYの性能評価法の要件

CHDY単体の確認方法では、電気慣性制御のもとで動力計に定トルクを与え、ローラの加速度値から慣性設定の良否を調べる方法がある。ただこの方法は、設備単体の性能変化をチェックするのが目的である。電気慣性式CHDYのモード試験への適用性を評価するには、車両試験時の実際の慣性効果を判定すべきであり、以下の要件を満たす必要がある。

- (1)試験車をCHDY上で運転させた時に、設定した等価慣性質量による慣性抵抗がモード運転中に正確に与えられていたかを試験直後に確認できること
- (2)電気慣性制御の動特性及び負荷精度が数値的に確認でき、評価基準と比較した判定が可能なこと
- (3)同じ評価方法を機械式CHDYでのモード負荷検証にも適用でき、両者の比較検証が可能なこと。すなわち機械式との負荷同等性が確認できること
- (4)負荷設定量の適否の証拠が数値で残せること
- (5)評価理論上問題がなく、先進的かつ実用的な方法として、関係者に広く認められること

4. 電気慣性式CHDY(2WD用)の性能評価方法

提案したCHDYの動的性能評価法は、台上における車両モード運転状態において、各瞬間の目標駆動力という演算目標値を設定し、CHDYのトルク値から求めた検出駆動力と比較して、その一致度を定量的指標で表すことにより、CHDYの負荷(トルク)吸収能力の良否をモード全体で判定する方法である。

4.1 路上走行抵抗と慣性抵抗の設定

現状の排出ガス・燃費試験法では、コース上での惰行試験等で計測した路上走行抵抗(N)を車速V(km/h)の2次式で表し、最小二乗法によりその係数a、bを求める。次にこれを大気条件で補正した係数 a_0 【N】、 b_0 【N/(km/h)²】を算出し、CHDYに(1)

式で示す走行抵抗 F_{RL} として設定する。⁽²⁾⁽³⁾

$$F_{RL} = a_0 + b_0 V^2 \quad (1)$$

CHDYではこの走行抵抗に加えて、設定した等価慣性質量と加速度の積(慣性抵抗)が、駆動輪設置ローラを介して試験車に与えられるようにする。等価慣性質量Mは、以下のような形で設定される。

$$M = M_{fix} + M_e \quad (2)$$

ここで、M; 設定した等価慣性質量(kg)

M_{fix} ; CHDYの固定慣性質量(kg)

M_e ; 電気慣性分の慣性質量(kg)

固定慣性力 $M_{fix} \cdot dV/dt$ は、台上運転する試験車へ自動的に付加される。そこで電気慣性式CHDYでは、下記の走行抵抗 F_v が試験車への負荷として作用するように、動力計のトルク制御を行う。

$$F_v = a_0 + b_0 V^2 + M_e \cdot dV/dt \quad (3)$$

試験車を台上運転する時には、車両側の動力伝達ロス、タイヤの接地抵抗、CHDYの機械損失が発生する。これらの合計値をメカロスと定義し、これをローラ駆動力(N)に換算した値 F_M で表す。動力計が吸収すべきトルク値(ローラ表面駆動力換算値) F_{DY} は、目標値である F_v からメカロス分の F_M を差し引いた(4)式となる。

$$F_{DY} = F_v - F_M \\ = a_0 + b_0 V^2 - F_M + M_e \cdot dV/dt \quad (4)$$

ここで、 F_{DY} ; 動力計が吸収すべき合計トルクをローラ表面駆動力に換算した値(N)

F_M ; メカロスの駆動力換算値(N)

メカロス値 F_M はモード試験の前に測定しておく必要がある。 F_M は、台上に設置した車両を動力計から定速駆動する際の所要トルク、あるいは台上で車両を惰行させた時の減速時間から算出できる。

4.2 CHDYの負荷吸収機能の検証方法の概念

電気慣性式CHDYでは、モード中の負荷吸収機能の検証法が課題となる。そこで、排出ガス、燃費試験法で規定された方法を基礎に、各瞬間の目標駆動力という演算目標値を設定し、CHDYのトルク検出値から求めた実測駆動力と比較して、CHDYの負荷吸収能力の良否を判定する手法を提案した。

試験法の負荷設定の規定に拠れば、CHDY上の試験車に与える走行抵抗の目標値Fは、(5)式となる。

$$F = a_0 + b_0 V_R^2 + M \cdot dV_R/dt \quad (5)$$

ここで、 V_R はローラ表面速度(km/h)

dV_R/dt はその加速度(m/sec²)

M; 等価慣性質量設定値(kg)

試験車ごとに設定する a_0 、 b_0 と、モード中に実測した V_R を(5)式に代入すれば、各瞬間のFの目標値が決定される。(5)式のFを目標負荷と称する。

一方、台上運転中に試験車に与えられた走行抵抗Fは、(6)式によって算出することができる。

$$F = F_{DY} + M_{fix} \cdot dV_R/dt + F_M \quad (6)$$

ここで F_{DY} ; 動力計トルク値の駆動力換算値(N)
 M_{fix} ; CHDYの固定慣性質量 (kg)
 F_M ; 全メカロスのローラ表面力換算値(N)

なお、上記の動力計トルク駆動力換算値 F_{DY} には、電気慣性により与えられる負荷分も含まれる。
 F_M を前述の方法で測定して速度の関数形で与え、 F_{DY} 及び V_R の各測定値とローラ回転速度から求めた dV_R/dt 値を(6)式に代入すれば試験車の実負荷 F が計算できる。(6)式の F を実測負荷と称す。

モード運転中に(5)式による目標負荷 F と(6)式による実測負荷 F の関係を一次回帰し、両者の相関係数等を求めれば、電気慣性式に限らず機械式も含めてCHDYの負荷吸収特性を統一的に評価できる。

4.3 評価のための具体的な計算方法

4.3.1 駆動力算出のための車速微分法及びサンプリング周期

目標負荷及び実測負荷を算出する上で、(1)式と(6)式の子速微分項 dV_R/dt を求める必要がある。電気慣性式CHDYの多くは、多数個のローラ回転パルスを高速デジタル処理して得た瞬時加速度検出値をトルク制御に用いている。しかし今回示す検証法は、装置固有の機能に依存しない汎用手法とするために、装置が出力するローラ速度信号を周期サンプリングし、演算で各点の dV_R/dt を求める方法とした。そのため、位相遅れがなくノイズ除去効果の高い方法として、以下に示す微分計算法を採用した。

車速信号のサンプリング周期 t は、装置に要求される応答特性をカバーするものとして50ms(20Hz)とし、対象の X_0 点とその前後各3点の合計7点を2次式で近似する。その係数を最少二乗法で求めて、対象点の微分値 X'_0 を加速度値とする。最終的には、 X'_0 は以下の(7)式から計算できる。

$$X'_0 = (-3X_{-3} - 2X_{-2} - X_{-1} + X_{+1} + 2X_{+2} + 3X_{+3}) / 28t \quad (7)$$

4.3.2 電気慣性CHDYの評価項目および判定基準

米国EPAでは、(8)式を用いて電気慣性式CHDYが与えた総慣性量 M の瞬時値を計算し、モード中の M の平均値が目標とした設定慣性量 M とどの程

度一致しているかで判定する手法を採用している。

$$M = (F - a_0 - b_0 V^2) / V \quad (8)$$

この方法の欠点は、原理的に車速がゼロ付近や加速度がゼロ近傍では M が計算できないため、処理対象として除外せざるを得ないこと、目標値を中心とした正負への制御バラツキが、(8)式の積分処理によってうち消され評価できないことが問題である。

そこで検討WGでは、対象となる電気慣性CHDYの基本仕様、適用範囲を定めた上で、モード運転中の目標駆動力 F と検出駆動力 F の各々の瞬時値をX-Yの座標系にプロットし、両者の1次回帰式を求めて、統計的な評価指標を算出することにした。

(1) 排出ガス・燃費試験に用いるCHDYの基本条件
 CHDYの制御能力と負荷吸収特性の関係をシミュレーション解析した結果(図2)等を参考に、以下の条件で使われるCHDYのみを対象と定めた。

(a) 電気慣性の割合は、装置の固定慣性量に対して -60% ~ +200% の範囲内で設定する。

(b) DYの制御応答遅れは0.1sec以下のもの。

(2) 性能評価方法と判定基準

モード区間にわたり F と F の1次回帰式の傾斜、Y切片、標準偏差、相関係数などを計算する。運転中の電気慣性式CHDYの負荷制御の適否は、下記の判定基準を満たすかどうかにより判定する。

A) 標準偏差%

= (標準偏差 / (駆動力の平均値 + 3)) × 100
 5%以内であること。なお平均値 + 3 は実験から最大駆動力近い代表数値として規定

B) 相関係数 0.98以上であること

C) 回帰直線傾き 1.00 ± 0.02 以内

D) 回帰直線切片 ± 20 N 以内

E) 回帰計算の対象とする試験データの範囲

CHDYのトルク制御の範囲外は評価の対象外。また確実な判定精度を確保するため、CHDYの制御以外の要因が働く以下の範囲も評価対象外。

評価車速範囲

ローラ回転パルスで算出されるCHDY車速分解能を考慮して、3 km/h未滿は評価の対象外。

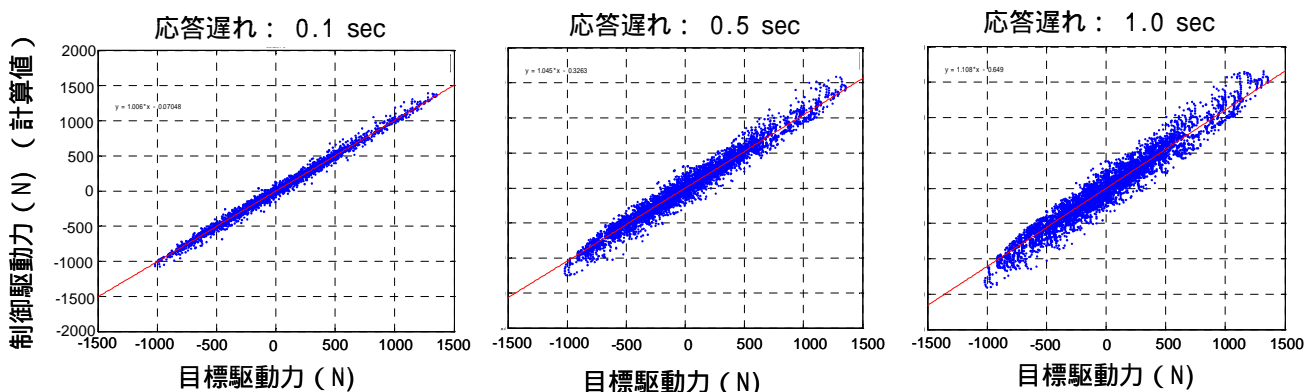


図2 電気慣性応答遅れが制御駆動力に及ぼす影響のシミュレーション解析 (JC08モード、 $I_w=800\text{kg}$)

MT車の評価車速範囲

MT車ではに加え、クラッチ操作時のショックの影響が大きいため、発進時は2秒、変速時は-1秒から+2秒をそれぞれ評価対象外とする。

(3) 国内で使われている電気慣性CHDYの検証結果
WGでは、自工会各社の電気慣性CHDY 3機種、試験車11車種(うちMT車6車種)を用いて、変速機の違いや、電気慣性割合を要件範囲に振って10・15モード及びJC08モード運転での結果を一次回帰法で評価した。その結果、CHDY制御の応答性能がより厳しいマイナス慣性時において、一部のCHDYでは設定基準を超えたが、その他は性能基準を満足していることを確認した。すなわち検証試験方法及び基準値は実態に合っており、妥当と判断した。

(4) 交通安全環境研究所の電気慣性CHDYの検証結果
当研究所(調布)にある電気慣性CHDYの制御性能を表1のA車、C車を2WD状態で運転して調査した結果(10・15モード)を図3に示す。前述の評価判定基準を十分余裕を持って達成し、極めて優れた制御性能を有する装置であることが実証できた。

5. 電気慣性式の4WD車用CHDYの性能評価方法

RV車を中心に広く普及している4輪駆動車(4WD車)の排出ガス、燃費を評価する際には、実際の走行条件と同じ4輪駆動状態で測定するのが望ましい。しかし4WD車用CHDYの性能要件および評価基準が無いため、現状では4WD車の動力伝達系を2駆に改造し2WD用CHDY上で試験を行っている。しかしこうした試験結果が、実際の4WD条件での燃費と一致する保証は無い。そこで、4WD運転のまま排出ガス・燃費が試験できる2ローラ型電気慣性式CHDYの性能要件とその評価方法の検討も行った。

5.1 4WD用CHDYの制御性能に係る要件

路上走行時と等価な条件を台上で与えるため、4WD用CHDYは、次の3要件を満たすべきと考える。
[要件1] 実走行時の路面の役割をCHDYのローラが担う意味から、あらゆる運転条件のもとで前後ローラの回転速度が常に一致(同期)するように回転制御しなければならない。もし前後ローラに速度差が生じると、路面との同等性が保持できない上に、試験車のパワートレイン接続系に無用な回転差を与えるので、車両内部の損失を増加させる要因となる。
[要件2] 4WD車の全走行抵抗がCHDYの前後ローラから付加される。すなわち(5)式のFが4WD車の前後輪の合計値として試験車に作用するように、前後ローラに繋がる2台の動力計のトルク制御を行う。
[要件3] 台上での前後輪への負荷配分を、実走行時の車両特性と一致させる。すなわち、どのような走行条件下でも、前輪側ローラで吸収する F_F と後輪側の F_R の比率が、4WD車の駆動力分配特性と一

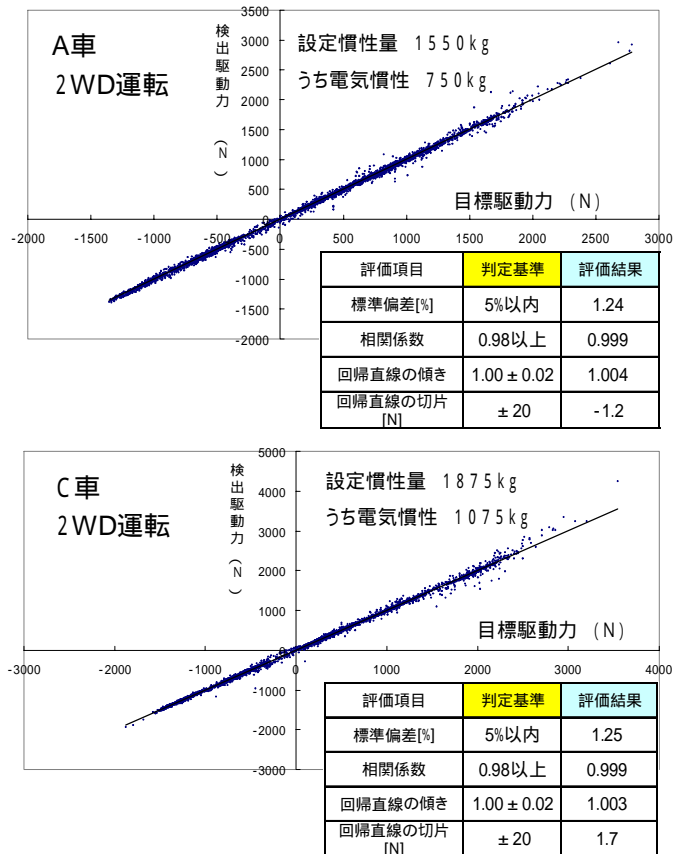


図3 当研究所の電気慣性CHDYの負荷制御性能(2WD時)

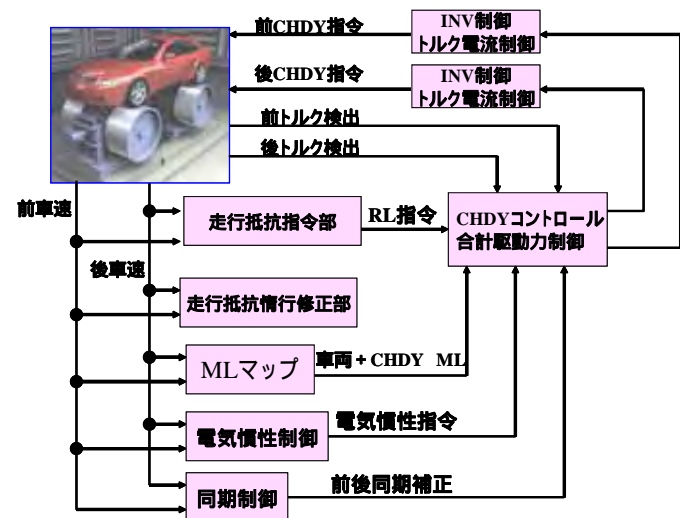


図4 実験に用いた4WD車用CHDYの制御フロー

致するよう前後動力計のトルク吸収比を制御する。

なお [要件1] と [要件2] を同時に満たすには、走行中の試験車の前後発生駆動力比に応じて、CHDYの F_F と F_R の吸収力分担比が常に自動調整されていなければならない。したがって、試験車ごとに [要件3] の機能検証を行う必要はないと考える。

5.2 4WD用CHDYの制御要件の実験検証

上記要件の適合性を検証するため、最新型の4WD車用CHDYを使って、前後輪ローラ系の回転同期制御特性並びに負荷吸収機能を実験的に検証した。

(1) 使用した4WD車用CHDYの概要

用いたCHDYは、総重量3.5トン以下の4WD車、2WD車が試験できる当所調布地区の設備で、図4にその制御ブロックを示す。前後に直径48インチのシングルローラを備え、軸間を車両ホイールベースに応じて調整できる。トルク制御の90%応答が0.1秒の交流式電気動力計2機が前後の各ローラに接続されている。4WD試験では、2台の動力計で与える実測負荷の前後合計 F を(5)式の目標負荷 F に一致させつつ、前後ローラの回転位相差をゼロにするという2要素対象デジタルフィードバック制御を行う。各動力計の最大容量は定格吸収95kW、過負荷吸収220kW、定格駆動70kW、過負荷駆動160kWである。固定慣性量は前後系で各800kgあり、電気慣性を併用して2WD試験時で454kg～2700kgの範囲(4WD車ではその倍)の範囲の慣性質量が設定可能である。

(2) 供試4WD車

実験に使用した3台の4WD車の仕様を表1に示す。試験車は4WDのトルク分割機構の代表的な3方式の中から選択したもので、A車は速度差感応型のPassive方式、B車は電子制御式のActive方式、C車はLSD付センターデフ方式の4WD車である。

(3) 実験および解析結果

図5(a)～(c)は、各4WD車で15モードを運転した時の前後差速度の高速デジタル検出値である。ゼロを中心とした細かな変動があるが、これは前後ローラの回転位相差を検出し前後の動力計の吸収トルク配分比を調整するCHDYの制御機構に起因する。ピーク変動はMTの変速点やモードの変わり目で生じるが、これはクラッチ断・接操作や素早いアクセル操作により車両の発生駆動力が急激に変化した際に、CHDYの回転同期制御が完全には追従できないことが原因である。ただしピーク値でも0.2km/h以下の低レベルで、優れた同期制御性を示している。

次に目標負荷 F と実測負荷 F の各瞬時値の一次回帰式から試験中のCHDYのトルク吸収特性を評価した。10・15モードを4WD状態で運転した時の3車の解析結果を図6に示す。瞬時データは1:1の線上に集中しており、表2で示すように2WD用電気慣性式CHDYの性能基準も容易に達成している。つまり2台の動力計による負荷制御がモード全般に渡ってほぼ目標通り正確に実行されていることがわかった。以上の結果から、4WD用CHDYに組み込まれた2系統動力計システムの統合制御は、1系統のみの2WD電気慣性CHDYの制御性能と遜色ない水準と言える。

表1 実験に用いた4WD試験車の仕様

仕様	試験車コード	A車	B車	C車
4WD車両仕様項目		パッシブ車両(PASV)	アクティブ車両(ACTV)	センターデフ車両
エンジン		4気筒ガソリンNA	4気筒ガソリンNA	4気筒ガソリンNA
エンジン排気量		1769cc	1998cc	1995cc
エンジン出力		90kW/5600min-1	110kW/6000min-1	107kW/6000min-1
最高トルク		165Nm/4400min-1	200Nm/4000min-1	193Nm/4000min-1
ミッション		マニュアルトランスミッション	マニュアルトランスミッション	マニュアルトランスミッション
ミッション比		2.861/1.562/1.0/0.697	3.416/1.944/1.258/0.947/0.772	4.550/2.357/1.695/1.242/1.000
最終減速比		4.072	4.687	3.909
4WD機構		FFベース差速度感応型 オートトルクコントロールカップリング 機械式配分方式	FFベース多板クラッチ式 カップリング 電子制御配分方式	FRベースセンターデフ トルク感応型センターLSD付
車重(空車)(kg)		1250	1500	1530
前/後車重分担(kg)		790/760	908/841	894/981
試験時車重(kg)		1550	1749	1875

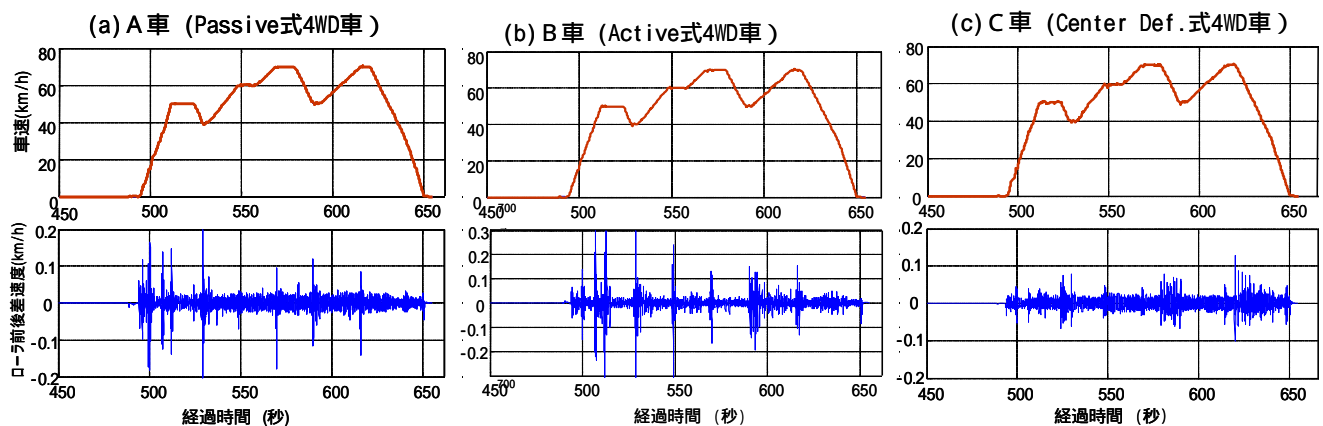


図5 各方式4WD車を台上で15モード運転した時の前後ローラ差速度の挙動

6. まとめ

排出ガス・燃費試験に適用可能な電気慣性式シャシダイナモメータ (CHDY) の性能評価方法と性能要件につき検討した結果、以下の結論を得た。

まず2WD車用電気慣性式CHDYに関しては、

(1)CHDYの制御性能と負荷吸収能力の関係をシミュレーション検討した結果、以下の条件で用いられ

るCHDYのみを公式試験の対象とすることとした。

(a)電気慣性の割合は、固定慣性分に対して - 60 % ~ + 200 % の範囲内で設定することとする。

(b)DYの制御応答性は0.1sec以下のものとする。

(2)性能評価方法と性能要件

モード運転期間中に、走行抵抗と慣性抵抗の合計目標駆動力 $F (= a_0 + b_0 V^2 + M \cdot dV/dt)$ とダイナモトルク、メカロスおよび固定慣性抵抗から求めた検出駆動力 F' の関係を1次回帰式で表し、下記の特性値からCHDYの動力制御の適否を判定する。

A) 標準偏差%

$$= (\text{標準偏差} / (\text{駆動力の平均値} + 3)) \times 100$$

: 5%以内であること

B) 相関係数: 0.98以上であること

C) 回帰直線傾き: 1.00 ± 0.02 以内

D) 回帰直線切片: ± 20 N 以内

次に4WD用の電気慣性CHDYに関しては、上記(1)、

(2)に加えて、以下の性能要件が必要と考える。

(3)運転中に前後ローラの回転速度差が極力発生しないよう2台の電気動力計の回転同期制御を行う。

(4)ローラの回転同期性を保ちつつ、試験車の走行抵抗と慣性抵抗の合計目標駆動力 F が前後輪合計の検出駆動力 F' に等しくなるように、2台の電気動力計のそれぞれのトルク制御を行う。

上記の性能要件、基準に基づき当所の電気慣性CHDYを2WD、4WDモード運転条件で評価した結果、上記の性能基準を容易に達成する性能が実証された。

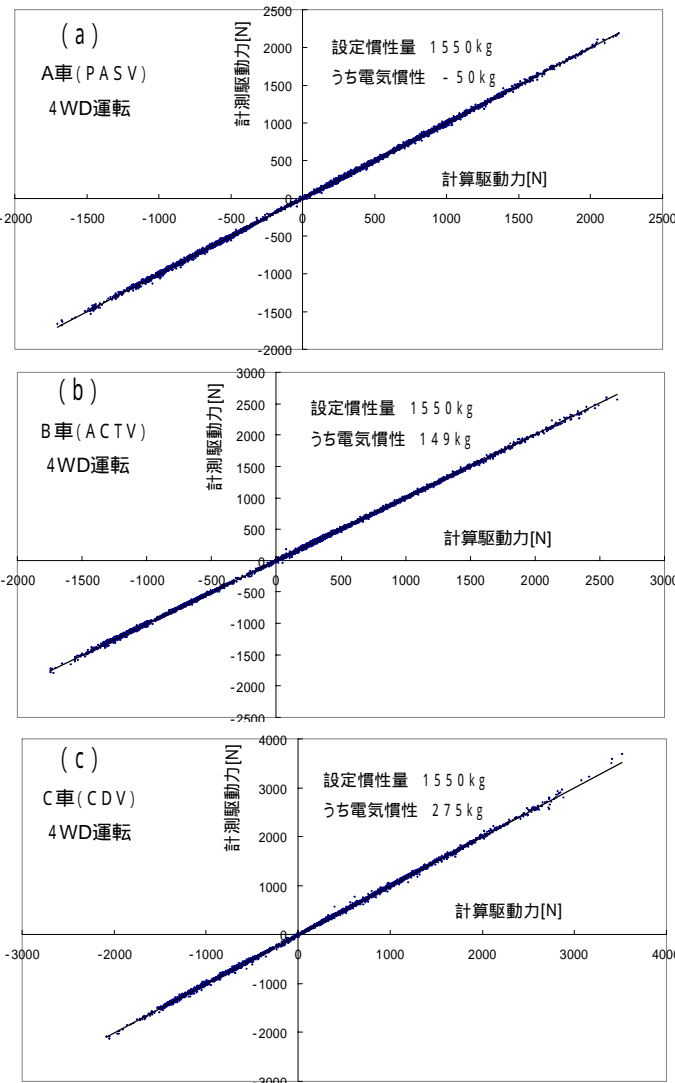


図6 電気慣性4WD-CHDYの制御性能の回帰解析結果

7. 参考文献

(1)JASOテクニカルペーパー JASO TP-06001

電気慣性シャシダイナモ性能基準の検討

(2)TRIAS23-4-1991

ガソリン自動車10・15モード排出ガス試験方法

(3)TRIAS5-3-1991

ガソリン自動車10・15モード燃料消費試験方法

(4)K.Yoshihara, K.Itoh, Y.Kita, M.Takimoto, T.Satonaka

Study on Chassis Dynamometers for 4 Wheel Rollers

Synchronizing System on the Power Distribution

SAE TECHNICAL PAPER 920251

表2 各方式4WD車による4WD-CHDYの制御精度評価値(10・15モード)

供試4WD車		(a) A車	(b) B車	(c) C車
		パッシブ4WD	アクティブ4WD	センターデフ4WD
2WD-CHDYの評価基準				
評価項目	判定基準	評価結果	評価結果	評価結果
標準偏差[%]	5%以内	0.62	0.57	0.64
相関係数	0.98以上	0.999	0.999	0.999
回帰直線の傾き	1.00 ± 0.02	1.000	1.002	1.002
回帰直線の切片 [N]	± 20	0.1	-0.8	-1.5