



技術論文

モーターサイクルエンジン開発における 過渡シミュレーションベンチの活用

A Motorcycle Engine Development System Utilizing a Test Bed with Simulation Technology

鳥越 昌樹 荒木 裕次 加藤 隆輔

Abstract

With the aim of achieving efficient and sophisticated motorcycle engine development, an engine test bed that can simulate vehicle running conditions using an ultra-low inertia motor and high response load control system was constructed and applied to the development of engines. By combining an exhaust gas analyzer, an exhaust gas constant volume sampler (CVS), and a data processing system, mass emissions could be measured in various test cycles. We were able to confirm this system's advantages for data repeatability and test efficiency compared with a chassis test using a vehicle were confirmed. An acceleration test was conducted to assess running performance, and good agreement with actual driving values was confirmed. In addition, by measuring and evaluating engine response to throttle manipulation, it was possible to evaluate driveability on the test bed. These test findings indicate that this test bed can simulate vehicle driving tests using only the engine and that it will be a useful tool in engine development.

要旨

モーターサイクルエンジン開発の高効率化のため、超低慣性モーター、高応答負荷制御システムを用いて車両走行状態を模擬できる過渡シミュレーションベンチ（以下、過渡ベンチと称す）を構築し、実際のエンジン開発に適用した。過渡ベンチ、排ガス分析計、排ガス定容量試料採取装置（CVS）、データ処理システムと組み合わせることにより、様々なテストサイクルのマスエミッション計測が可能となり、データの再現性、テスト効率の点で車両を用いたシャーシテストに対する優位性を確認した。また、走行性能評価のために追い越し加速試験を実施し、実走行値と良好な一致を確認した。さらに、スロットル操作に対するエンジンレスポンスを計測評価することによる、過渡ベンチ上でのドライバビリティ評価への可能性を示した。これらの試験を通じて、エンジン単体で車両の走行試験を模擬できるこの過渡ベンチが効果的なエンジン開発ツールであることを示した。

1 はじめに

環境保護への関心の高まりとともに、世界各国ではモーターサイクルの排出ガス規制が強化されてきている。近年、これらの厳しい規制への対応はもちろん、多様化する消費者ニーズへの迅速な対応のため開発効率の向上が求められており、限られた開発期間の中でエミッション、出力特性、ドライバビリティなどの多くの要求に応えるエンジン性能を達成することが非常に重要な課題となっている。また、モーターサイクルのエンジン制御システムは、例えば燃料噴射装置、電子制御スロットルの導入、可変機構の付加によって複雑化し、開発工数は増加する傾向にあり、開発期間短縮は容易ではない。

その一方で、コンピューター・シミュレーション技術の進歩は著しく、モデル上で実際のマシンの特性を再現させるモデルベース開発（MBD）は開発期間を短くするために効果的な方法と考えられている¹⁻⁴⁾。

そこで我々は、実エンジンとコンピューター上の車両モデルを融合させることにより、エンジン単体で車両走行試験が可能となる過渡ベンチを構築し、開発効率向上について評価した。過渡ベンチの利点は、

- ①テストデータの良い再現性
- ②テストサイクルの高周期化
- ③車両では実施困難な試験への適用可能性

であり、以下に過渡ベンチの詳細および開発事例を紹介する。

2 過渡シミュレーションベンチ概要

過渡ベンチは、図1に示すとおり主に次の装置で構成されている。

・超低慣性ダイナモ

エンジンへの負荷を高速に制御するために、超低慣性水冷式永久磁石DCモーターを採用した。このモーターはインバーターにより制御される。

・排ガス計測装置

排ガス計測は排ガス分析計を用いて、次の2つの方法で行うことが可能である。ひとつは排気管から直接ガスをサンプリングして計測する方法、もうひとつは、CVSを用いて希釈した後の濃度を計測する方法である。

・排ガス試験制御装置

世界各国のレギュレーションに合せた試験が可能となるよう、車速パターン、変速タイミング、CVSバッグ開閉時期、車速トレランスなどを任意に設定でき、試験中はそれら設定値に基づき、DSP UnitとCVSに指令が送られる。走行開始から排ガス値算出まで全自動で実行可能である。

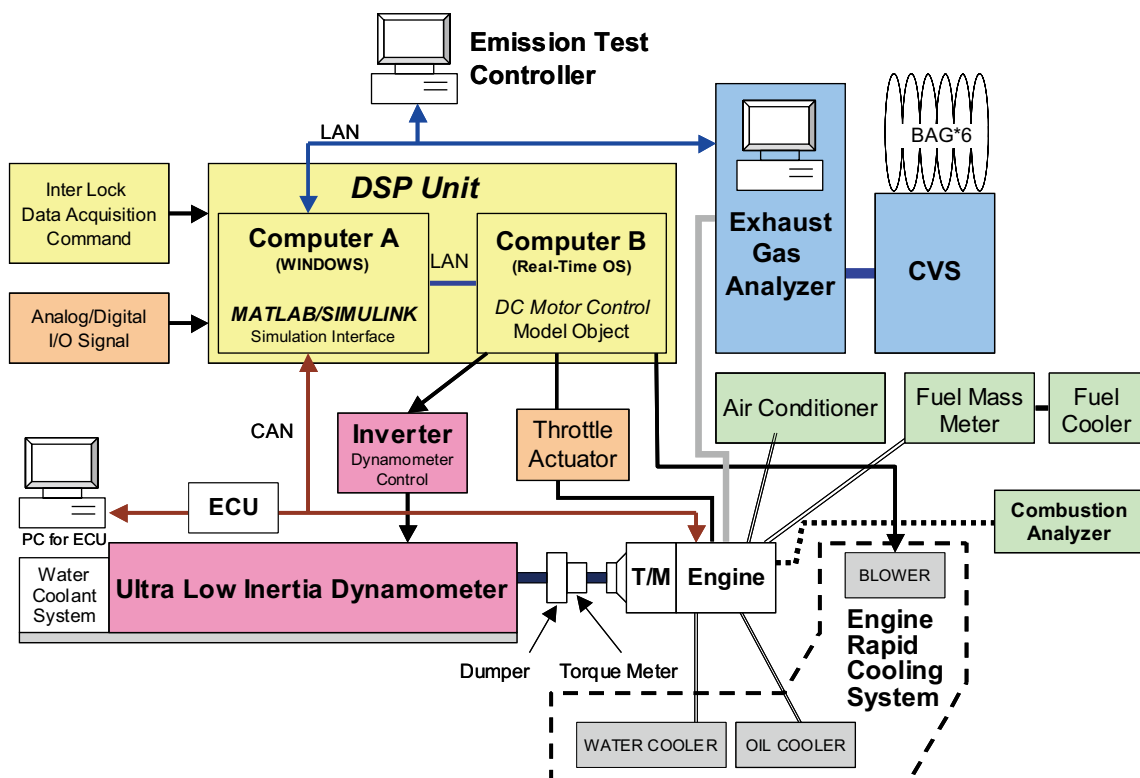


図1 過渡シミュレーションベンチの概要

3 車両モデル

過渡ベンチは、車両の走行状態をリアルタイムでシミュレートし、エンジンに加わる負荷の演算結果を用いてダイナモ吸収トルクを制御することで、実走行相当の負荷をエンジンに加えることができる。リアルタイム制御を行うため制御部はリアルタイムOS上のモデルにより動作し、モデル作成やモニタリングなどのインターフェイス部はLANで接続されたWindowsPC上で動作する。負荷設定のために必要な、重量、慣性値、ギヤ比、伝達効率などの車両データは予め入力し、車両モデルに反映される。シフトチェンジは、実際のギヤチェンジを行うのではなく、予め入力されたギヤ比情報をもとに演算し、負荷と回転速度に反映することによりギヤチェンジが模擬される。また、エンジン回転速度、スロットル開度とトルクの関係性を予めシステムに学習させておくことで、適切に車速をコントロールすることができる。これにより、図2に示すようなNew European Driving Cycle (NEDC)やWorldwide Motorcycle Test Cycle(WMTC)など、各国の排ガス規制の走行パターンを正確に走行することが可能となる。

エンジン単体で車両走行をシミュレートするために、トランスミッションからタイヤ、車体をモデル化した。モデルは、各軸まわりの回転系のバネマスモデルとした。慣性力はモデルの簡素化のため後輪接地点にかかるものとしている。図3にモデルの概要を示す。

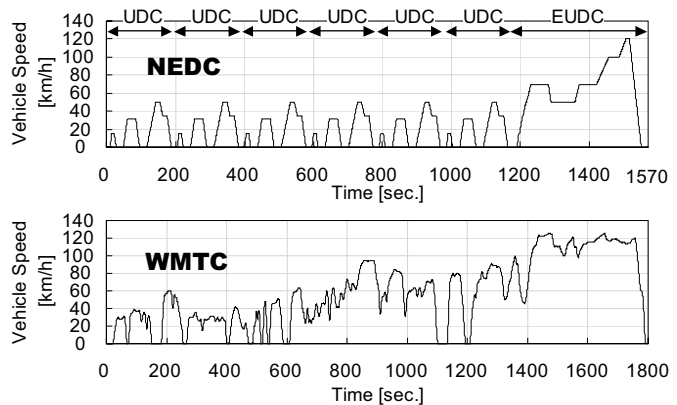


図2 NEDCとWMTC走行パターン

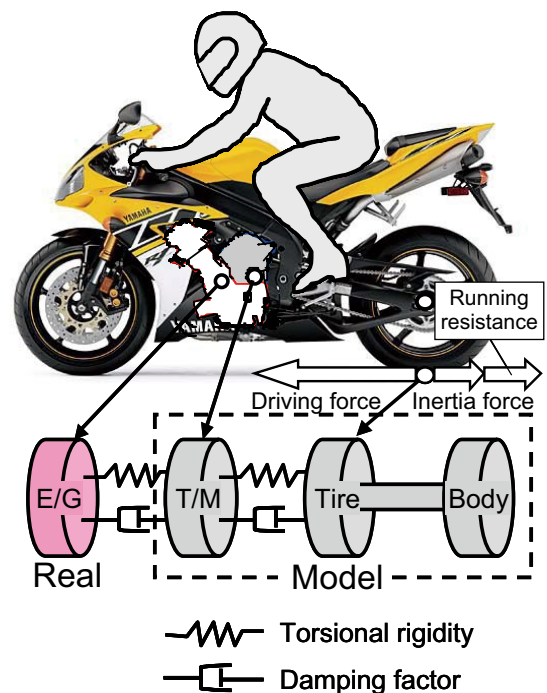


図3 車両モデル

4 排ガス開発

エミッション低減はモーターサイクルエンジンにとって重要な課題である一方、エンジン性能とのトレードオフの関係にある場合が多いため、両者のバランスを取りつつ効率的に開発することが求められている。エンジン単体でマスエミッション計測試験が可能であることは、排ガス開発を商品開発工程のより上流へ移すことが可能となり、開発効率改善に大きな意味を持つ。ここでは、過渡ベンチを用いたマスエミッション計測の概要および特長、シャーシダイナモとの比較について論じる。

ダイナモ負荷制御、スロットル制御は全てDSPがリアルタイム演算して行うため、再現性が極めて良いことが過渡ベンチの特長のひとつである。今回、1.3L 水冷4気筒研究用エンジンを用いNEDCによるマ

スエミッション計測を行い、実車両を用いたシャーシダイナモ試験との比較を行った。

図4にNEDC試験時のスロットル開度とそのときの车速を、過渡ベンチとシャーシダイナモでそれぞれ5回計測した結果の一部を示す。過渡ベンチ試験の方が、ベテランのテストライダーによるシャーシダイナモ試験よりもスロットル開度、车速のバラツキが小さいことが分かる。

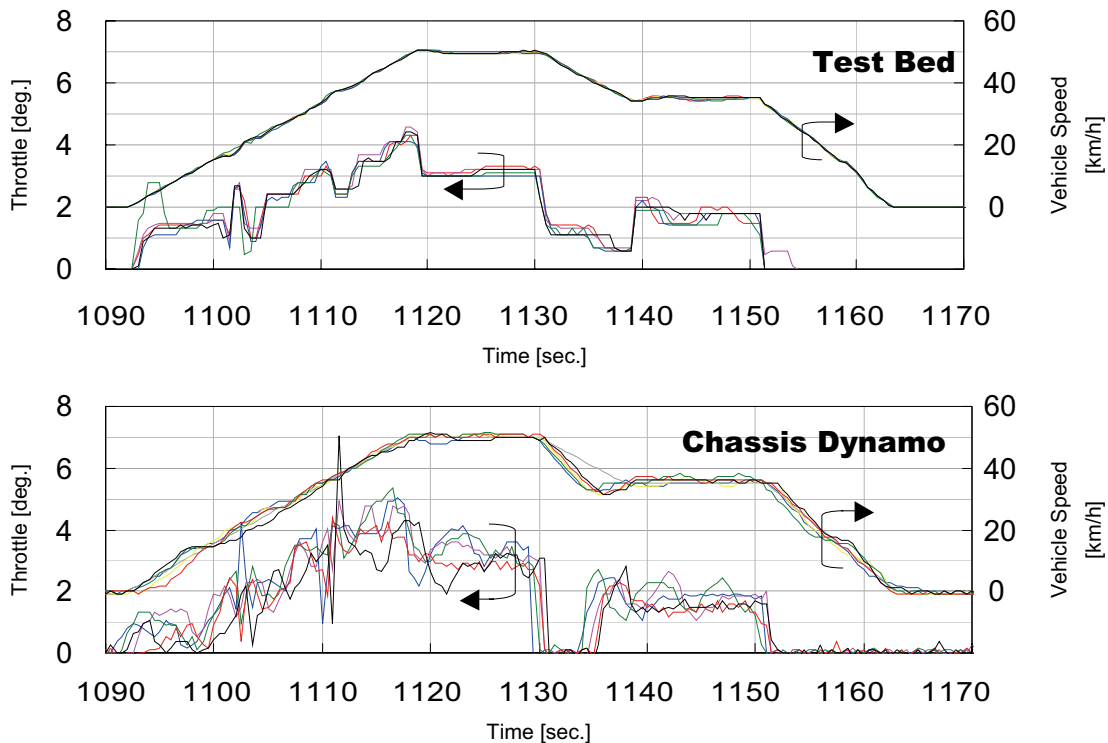


図4 スロットル操作と车速の再現性

排ガス値の再現性を調べるために、過渡ベンチとシャーシダイナモでそれぞれ3回NEDCマスマスエミッション計測試験を行った。平均値に対するバラツキの結果を図5に示す。THCは±約2%以内と極めて再現性が良く、COも±10%以内にあり、シャーシ試験結果よりも再現性が良い。一方NOxは、A/Fによって急激に排出特性が変化するため、ストイキをまたいでA/Fが変動する場合には良好な再現性を得るのが難しい場合もあった。

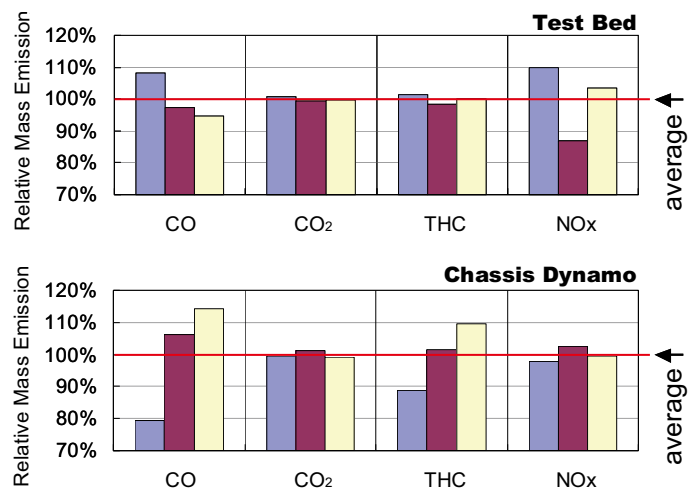


図5 NEDC 排ガスの再現性

5 過渡ベンチを用いた開発事例

5.1 減速比の影響評価

過渡ベンチは、上述のとおり車両をモデル化しているため、モデル部分については実際の部品を交換せずにその効果を確認することができる。その一例として、ギヤ比を変更した場合の排ガス、燃費への影響を調べた。車両モデルの2次減速比を5%、8%それぞれハイギヤードに変更した場合の、NEDCマス

エミッション計測を実施した。時系列のNOx排出履歴を図6に、標準仕様を100%としたときの、各成分の排出量を図7に示す。ハイギヤード化によりエンジン回転速度が低下するため、CO、CO₂は減少傾向にあり、結果として燃費も約5%程度向上することが分かった。また、NOxは増加傾向にあり、5%ハイギヤードにした場合、後半の高速運転の領域(EUDC)で増加すること、8%ハイギヤードにした場合、後半の高速運転の領域(EUDC)で増加すること、8%ハイギヤードにした場合、テストサイクル全域で排出量が増加しトータルで約40%増加することが分かった。このように、実際に減速ギヤを組み換えることなく試験が可能であり、現象を詳細に計測・評価することができるため、効率的かつ低コストでエンジン開発を行うことができる。

5.2 冷機始動評価

モーターサイクルにおいても、冷機始動時のHC低減はエミッション低減のため重要かつ困難な課題であり、様々な対応技術が提案されている。冷機始動時の排ガスを低減するためには、点火時期や燃料噴射量、エンジン回転速度制御など各種パラメーターの最適化が重要であり、できるだけ短時間で繰り返し計測できることが望まれる。この過渡ベンチでは、外部から冷却水を取り込み、エンジンを冷やすことが可能であるため、計測完了後約30分でエンジンを冷機状態まで冷やすことができ、シャーシダイナモを用いた試験と比較して大幅に試験回数を増やすことができる。

冷機始動時の制御パラメーターの最適化を行った際の、NEDCの最初の390秒に排出されるHC排出量の開発履歴を図8に示す。制御パラメーターの最適化を行うことにより、最適化前後でHC排出量を約70%低減できた。

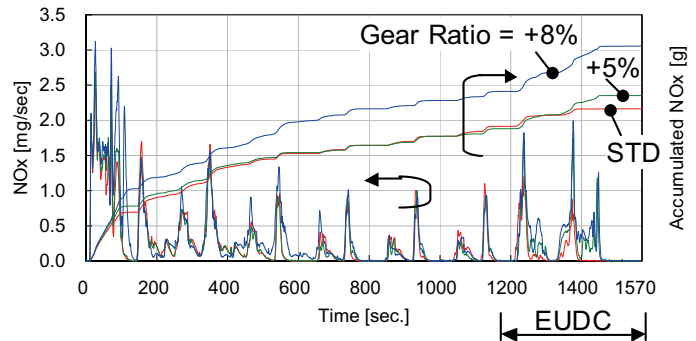


図6 減速比のNOx排出量への影響

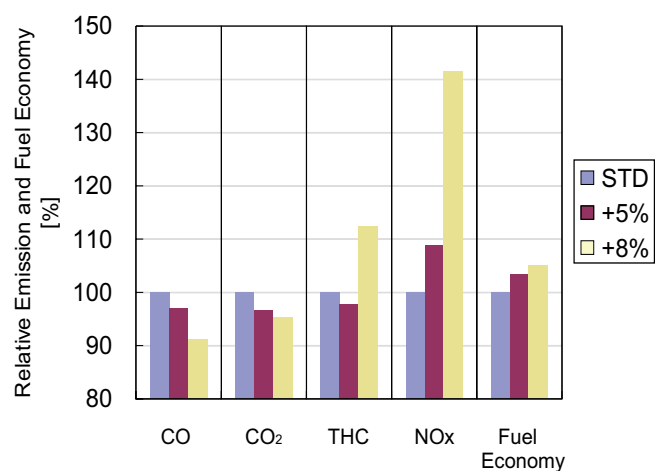


図7 減速比のモード排出量とモード燃費への影響

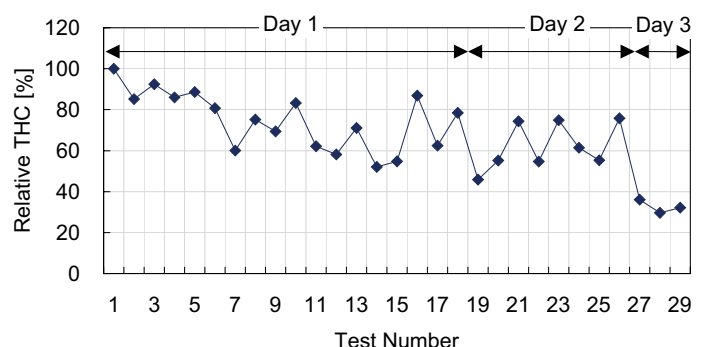


図8 冷機始動時HC削減開発履歴

最適化前の仕様と、最適化後の仕様それぞれの2次空気流量、点火時期、燃料噴射量、触媒内部温度の時系列データを図9に示す。このように、過渡ベンチでは詳細にデータを解析しながら、高頻度で試験が可能のため、冷機始動時の適合を高精度かつ高効率に行うことができ、エンジン開発効率向上に大きく寄与することができる。

5.3 ドライバビリティー開発

全開性能のみならず部分負荷域でのエンジンレスポンス、加速力、減速フィーリング、回転安定性など、モーターサイクルは運転者がエンジン特性を敏感に感じ取れることが多く、ドライバビリティーは、ほとんどの場合車両を用いて開発が行われている。そこで、エンジンのみでドライバビリティーを定量的に評価することができれば開発期間短縮に結びつくと考えられ、過渡ベンチを用いて、ドライバビリティー評価の可能性を探った。

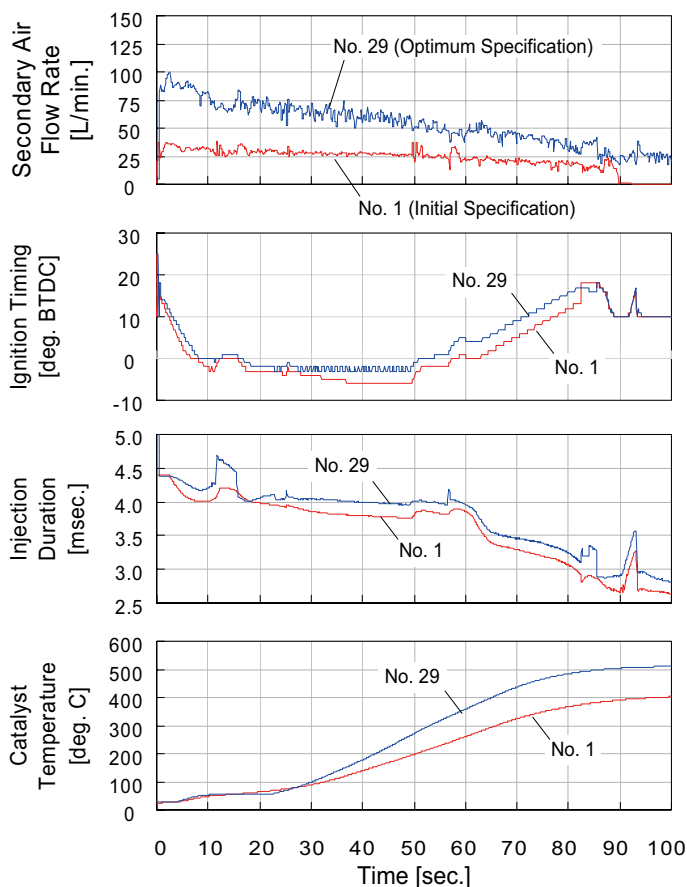


図9 冷機始動時の各種パラメーター例

5.3.1 加速試験による実走行試験結果との相関調査

過渡ベンチ上にて定常走行状態からスロットルを全開にしたときの加速能力を、距離に対する到達時間で評価し、実走行試験結果と比較した結果を図10に示す。初速はそれぞれ60、80、100、120km/hで、スロットル全開にした地点から50、100、200mの距離に到達するまでにかかる時間をそれぞれ計測した。初速60km/hから加速した場合、200mに要する時間は約7.5秒で、実走行と過渡ベンチの差は2.9%であった。

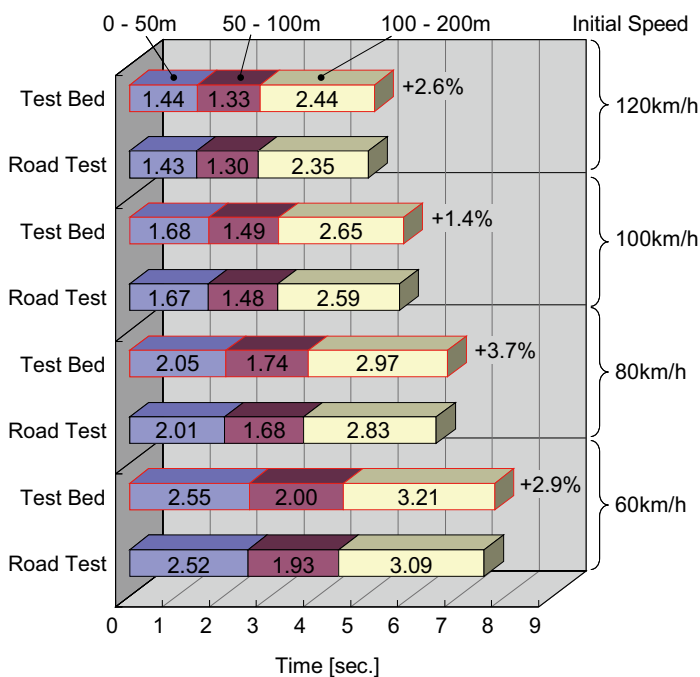


図10 実走行試験との比較

5.3.2 ドライバビリティー評価

モーターサイクルは、後輪にかかる駆動力でバランスをとって走る乗り物であるため、スロットル操作によって運転者の意図するとおりに駆動力がかかることが、極めて重要である。過渡ベンチを用いて、スロットル変化に対するエンジンレスポンスを計測することによるドライバビリティー評価の可能性を探った⁵⁾。

1,000ccの水冷4気筒エンジンを用いて、2速、2,000rpm定常走行状態からスロットルを10度ステップ状に開けたときのトルク変化を計測し、制御仕様を変えて比較した例を図11に示す。仕様Aは筒内のA/Fを約13にし、加速時燃料増量、非同期噴射などの過渡制御を行った仕様、仕様Bは筒内のA/Fをストイキにフィードバック制御し、過渡制御を行わない仕様である。また、計測したデータを10Hzのローパスフィルターで処理したデータを重ねている。このベンチでは周波数応答が5kHzのトルクメーターを使用しており、各気筒の爆発によるトルク変化もデータに現れている。時刻0でスロットルを開け、仕様Aでは約50msec.でエンジンが反応しているのに対し、仕様Bでは、約100msec.反応が遅く、また一旦マイナス側へトルクが振れ、その後のトルクの立ち上がりが急峻であることが分かる。

この時系列データからドライバビリティーを定量的に評価するにはスカラー量を抽出することが必要である。ギヤ、エンジン回転速度、スロットル開度変化量を変えて8条件で計測し、トルク瞬時値を10Hzのローパスフィルター処理して2つのスカラー量を抽出した例を図12に示す。仕様Aに対し仕様Bはタイムラグ、オーバーシュート量ともに大きい傾向があり、仕様Bは仕様Aに対してスロットルを開けたときのレスポンスが遅く、トルクの出方が急峻であり、ドライバビリティー上好ましくない特性であることが分かる。このような評価が簡単に行えるのが過渡ベンチの特長のひとつであり、効率的な開発のために有効な装置といえる。

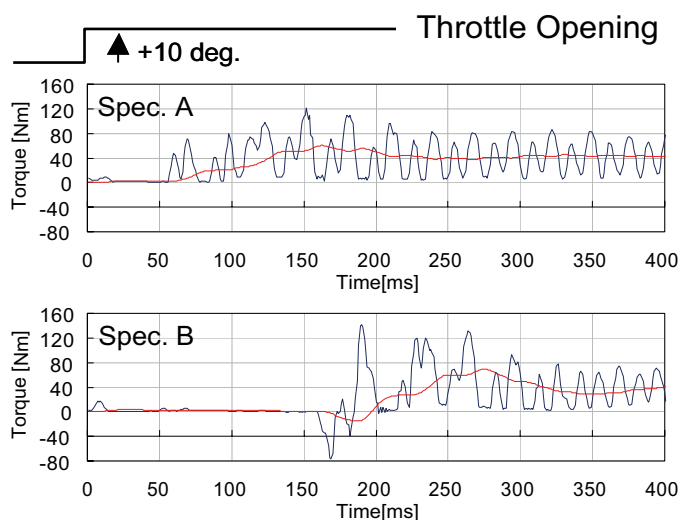


図 11 エンジンレスポンスの評価

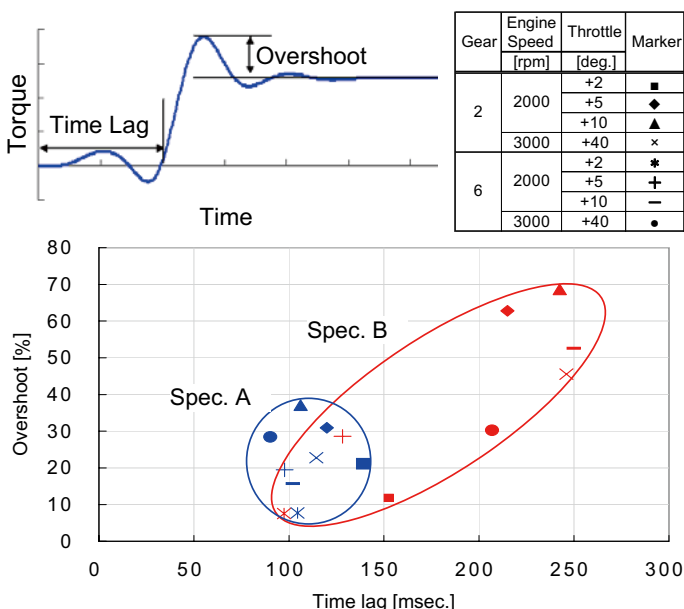


図 12 ドライバビリティー評価例

6 おわりに

シミュレーション技術を応用することにより、エンジン単体で車両走行を模擬できる過渡シミュレーションベンチを構築し、排ガス低減開発、エンジン性能開発へ適用した事例を紹介し、モーターサイクルの開発効率向上へ有効であることを示した。過渡ベンチの特長と今後の課題を以下にまとめる。

6.1 特長

- ・ エンジン単体で世界各国の排ガス規制に対応した試験が可能であり、冷機状態の早期再現、部品の組替えが簡単であるため、時間あたりのテスト回数を増やすことができ、実車両を用いた試験と比較して排ガス開発の効率が非常に高い。
- ・ 自動運転が可能であるため、エンジンの運転操作を精度よく再現でき、テスト結果の再現性が非常に高い。
- ・ 過渡時のエンジントルクといった、実走行試験では計測が困難な事象を高精度かつ、再現性よく計測することができるため、モーターサイクルにとって非常に重要である過渡時におけるエンジン特性を、定量的に評価することが可能である。

6.2 今後の課題

- ・ 排ガス低減とエンジン性能・ドライバビリティ向上の両立には、過渡を含めたエンジン適合が重要であり、過渡ベンチの特長を活かした効率的な適合方法の開発が課題である。
- ・ ドライバビリティ開発において、ドライバビリティ評価値の算出方法、その評価値とテストライダーによる評価値との相関調査、タイヤモデルやサスペンションモデルなど車両モデルの高度化が今後必要になってくると考えられる。

■参考文献

- 1) Dorey, R.E. et al., Transient Calibration on the TestBed for Emissions and Driveability. SAE 2001-01-0215, 2001.
- 2) Koji Shirota et al., "Virtual dynamic load" testing system for engine. JSAE 20005204, 2000
- 3) T. Serizawa, I Tan, H. Tanaka Catalyst Evaluation System using a Virtual Vehicle. JSAE 9840621
- 4) N. Yabe MotoGP Racing Engine Development – approach to the Demanded Character. JSAE SYMPOSIUM No.07-06
- 5) K. Senryo et al., Development of Vehicle Automatic Tuning System using Automatic Learning Method. JSAE 20065071, 2006

■著者

鳥越 昌樹 Masaki Torigoshi
コーポレートR&D統括部 コア技術研究部

荒木 裕次 Yuji Araki
コーポレートR&D統括部 コア技術研究部

加藤 隆輔 Ryusuke Kato
コーポレートR&D統括部 コア技術研究部