

二輪車用電子制御式油圧ステアリングダンパの開発

Development of Electronically Controlled Hydraulic Steering Damper for Motorcycles

若 林 威*
Takeshi WAKABAYASHI
山 田 慎 一*
Shinichi YAMADA

坂 井 清 孝*
Kiyotaka SAKAI
南 里 武 彦*
Takehiko NANRI

要 旨

走行中、常に最適な減衰特性を持つ世界初の二輪車用電子制御式油圧ステアリングダンパ、HESD (Honda Electronic Steering Damper)を開発した。ハンドリング特性およびキックバック現象の特徴を解析した結果、車体の速度・加速度に対して最適な減衰特性を持つステアリングダンパが必要であることが判明し、これを実現するために電子制御のリニアソレノイドを使用してダンパ内部の流動抵抗を変化させた。本システムにより、低速走行時の軽快なハンドリングを損なうことなく、キックバックを低減する技術が確立できた。

ABSTRACT

The world's first electronically controlled hydraulic steering damper for motorcycles, HESD (Honda Electronic Steering Damper), has been developed. That always gives optimum damping characteristics during running. Handling characteristics and "Kickback" phenomenon was analyzed using a motorcycle with or without a steering damper. The steering damper with optimum damping characteristics according to the speed and acceleration of vehicle is needed to reduce "Kickback" phenomenon. An electronically controlled linear solenoid is applied to alter flow resistance of the damper. The HESD reduced kickbacks maintaining sporty handling at the low speed running.

1. はじめに

二輪車の高速走行時の振動現象(車体挙動)の一つにキックバックがある。キックバックは路面の凹凸を通過する際に発生する操舵角の急激な変化であり、ライダーは不快に感じるとともに疲労の原因にもなっている。

キックバックを低減する手法としてはタイヤ特性、サスペンション特性やアライメントの設定などが一般的におこなわれているが、より積極的に低減させるデバイスとして、ステアリングダンパがある。ステアリングダンパは、操舵軸まわりに減衰力を付加しハンドルの急激な動きを抑制する装置である。減衰の方式としては油圧式が主流であるが、キックバックを低減させるために必要とされる減衰力を付加した場合、低速走行時の軽快なハンドリングを損なってしまう問題があり、これまではレース専用車や一部の市販モデルにしか採用されていない。

本稿では、ハンドリング特性およびキックバック現象の特徴を解析することで両者に要求されるステアリングダン



Fig. 1 Appearance of the HESD

パの減衰力特性を見出し、電子制御を用いた減衰力可変式ロータリダンパにより、低速走行時の軽快なハンドリングを損なうことなく、キックバックを低減する技術を確立したのでその内容を報告する。

なお、HESD : Honda Electronic Steering Damper 技術 (Fig. 1)は 2004 年型 CBR1000RR (Fig. 2)に適用した。



Fig. 2 Appearance of the CBR1000RR

2. 開発のねらい

本開発は量産車に適用することを前提とし、そのねらいを下記のように定めた。

- (1) 低速走行時の軽快なハンドリングを損なうことなく、キックバックを低減させること
- (2) 軽量・コンパクトであること

3. キックバック現象について

二輪自動車の操縦性および安定性の用語については JASO で定義されているが、その一つにキックバックがある。JASOではキックバックを、路面の凹凸により引き起こされる操だ角の急激な変化と定義している⁽¹⁾。

Fig. 3 にキックバック発生時の操だ角とフロントサスペンション挙動を示す。二輪車の前輪が路面の凹凸を通過する際、車体進行方向の荷重を受けるが、前輪の向きが荷重方向と同一でなかった場合、その角度および凹凸の大きさ、前輪の接地荷重などに応じて、操だ軸まわりにトルクが発生する。操だ系が回転すると、ライダーの保力やタイヤのセルフアライニングトルクにより、荷重を受ける前のポジションに戻ろうとするが、そのトルクが大きすぎると反対側にハンドルが切れてしまう。この繰り返して操だ角振幅は大きくなる。このとき、操だ角の作動周波数は5-10Hzであり、車重やアライメントなどによって決定されと考えられる。また、キックバック発生時のフロントサスペンションの作

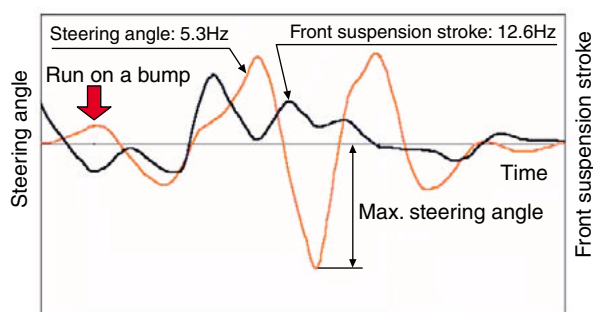


Fig. 3 Explanation for "Kickback" phenomenon

動周波数は操だ角の作動周波数の約2倍である。

凹凸が大きかったり、車速が高かったりすると、操だ系へ入力される車体進行方向の荷重が大きくなるので、大きいキックバックが発生しやすい状況となる。また加速時など前輪の接地荷重が小さくなる場合でも、入力される荷重に対して操だ系の回転角が大きくなり、大きいキックバックが発生しやすい。過大なキックバックが発生すると、腕に伝わる力が大きいので、ライダーは不快に感じたり、疲労しやすかったりする。

4. 実走テスト評価方法

本開発の全ての実走テストは大型スーパースポーツ車を用いておこなった。テスト車の諸元を Table 1 に示す。軽快なハンドリング(操だ重さ)や、キックバックを定量評価するための確立された一般的手法は未だ存在しないため、次に示すようなテスト手法を用いて評価することとした。

4.1. 低速操だ重さ評価方法

Fig. 4 のように 30km/h 等速直進状態でテスト路面に進入し、A地点から2m横方向にレーンチェンジして直進状態に戻る。このモードにおける切返し時の操だトルク変動幅を“低速切返し操だトルク変動”と定義して評価することとした(Fig. 5)。また、同時にライダーによる官能評価にて、操だ重さを評価する。官能評価の尺度は Fig. 6 のように定

Table 1 Major specifications

Item	Specifications	
Engine type	Liquid cooled 4-stroke DOHC 4-cylinder	
Engine displacement (cm ³)	998	
Transmission	6 speed constant mesh	
Vehicle dimension (mm)	2025 × 720 × 1120	
Wheel base (mm)	1410	
Vehicle mass (kg)	179	
Tire size	Front	120/70-17
	Rear	190/50-17
Suspension	Front	Telescopic
	Rear	Swing arm

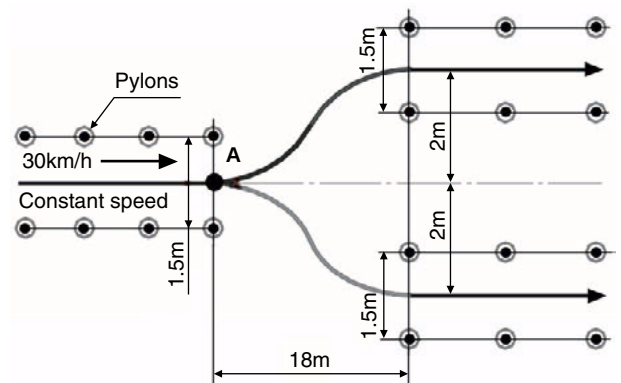


Fig. 4 Test condition of lane change at low speed

めた。以上のテスト手法を“低速レーンチェンジテスト”と定義した。

4.2. キックバック評価方法

Fig. 7 のように6速 120km/h 等速直進状態でコースに侵入，A地点からスロットルを全開にした状態で突起のある路面に侵入する。このとき発生する最大操だ角を“キックバック最大操だ角”と定義して評価することとした(Fig. 3)。同時にライダーによる官能評価もおこなう。低速レーンチェンジテスト同様，官能評価の尺度はFig. 6のように定めた。以上のテスト手法を“キックバックテスト”と定義した。なお，このテストはキックバック現象を再現させるために過酷な条件を用いた。

5. 目標減衰特性

目標とする減衰特性を決めるために実走テストを実施した。テストは手動操作により減衰特性を変更できるステアリングダンパを製作しておこなった。

5.1. 目標最小減衰特性

軽快なハンドリングは，油圧ステアリングダンパの発生減衰力を小さくすることで得られる。ステアリングダンパの減衰力を段階的に高めながら低速レーンチェンジテスト

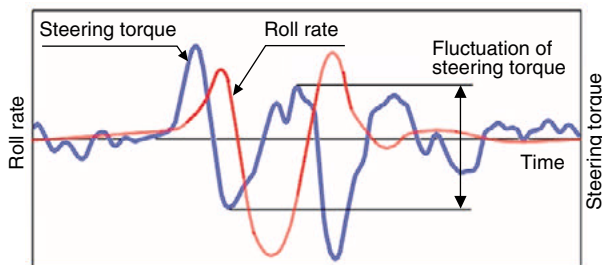


Fig. 5 Definition of steering torque fluctuation at low speed

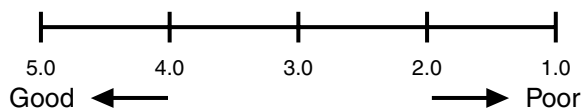


Fig. 6 Rating scale

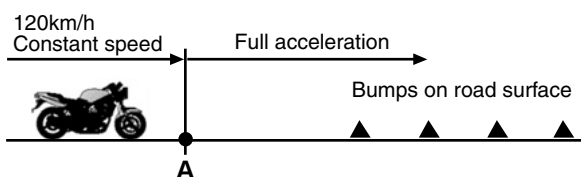


Fig. 7 Condition of Kickback test

を繰り返し，官能評価をおこなった。ステアリングダンパなしに対する低速切返し操だトルク変動の増加が，10%以内であれば，低速操だ重さについてライダーの官能評価が変化しないことが確認できた(Fig. 8)。また本テストにおいて，最大操だ角度付近での減衰力に対し，低速切返し操だトルク変動は比例的に増加することが確認できた(Fig. 9)。これらの解析結果により低速切返し操だトルク変動の目標値を非装着車の+10%以内とした。同時に目標を達成するための減衰特性が，Fig. 10 に示す線1であることが確認でき，これを目標最小減衰特性とした。

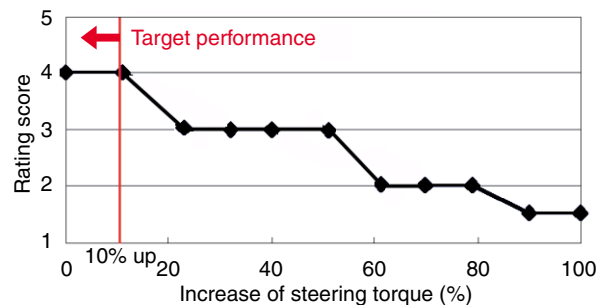


Fig. 8 Rating of handling heaviness

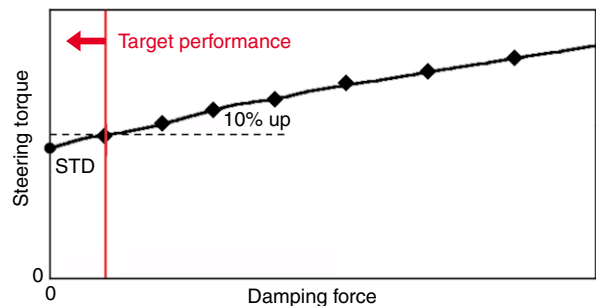


Fig. 9 Relationship between steering torque and damping force

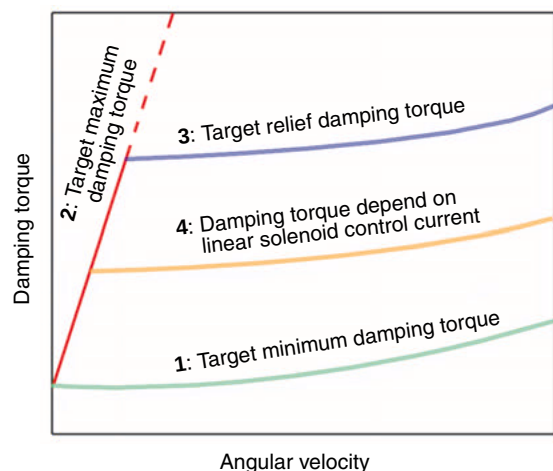


Fig. 10 Target characteristics on relationship between damping torque and angular velocity

5.2. 目標最大減衰特性

キックバックを低減するためには、大きな減衰力を発生させるステアリングダンパが必要である。ステアリングダンパの減衰力を段階的に高めながらキックバックテストを繰り返し、キックバックについての官能評価をおこなった結果、ステアリングダンパなしに対するキックバック最大操だ角の減少量を75%以上にする事で官能評価が4点以上に向上することがわかり、これを目標性能とした。(Fig. 11)また、減衰力を増加させると、キックバック最大操だ角が収束していくことが確認できた。(Fig. 12)

また、操だ角と操だ角速度が小さい領域から大きな減衰力を発生させた方が、キックバックをより効果的に低減できることがわかった。

しかし、低い操だ角速度領域の減衰力を大きくし過ぎると、直進安定性に悪影響を及ぼすことがテストからわかった。二輪車には車体がロールしたとき、その方向に前輪が回頭して車体を起こそうとする機能があるが、減衰力を大きくし過ぎた結果、ロールしたときの前輪の回頭を遅らせたことが原因と考えられる。

以上から、直進安定性に悪影響を与えない最大の減衰特性を実走テストにより求め、Fig. 10に示す線2を目標最大減衰特性とした。

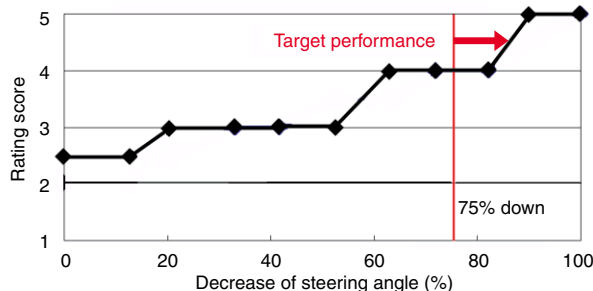


Fig. 11 Rating of kickback performance

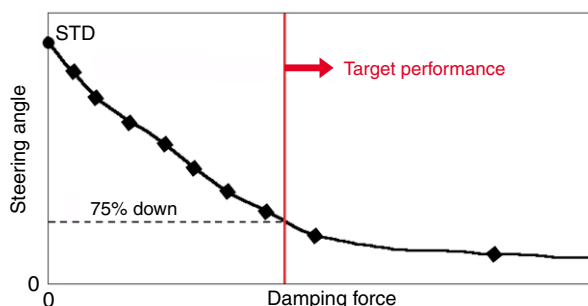


Fig. 12 Relationship between steering angle at kickback test and damping force

5.3. リリーフバルブ機構

5.2. 節で目標とした最大減衰特性で、操だ角速度の上昇に合わせて減衰力を上げてしまうと、ダンパ内圧が高まり過ぎてダンパ本体に高い強度が要求されるので本体が大きく重くなってしまう。しかし、低い操だ角速度領域で適正な減衰力を与えることができれば、小さい減衰力であっても十分にキックバックを低減できる。よって、開放圧力を調整可能なリリーフバルブを設け、一定以上の圧力を逃がし、減衰力の上昇を抑えることにした。

リリーフバルブ作動圧は、キックバック低減の目標を満足できる値をテストより求めた。その特性は Fig. 10 に示す線3であり、これを目標リリーフ特性とした。また、この要求特性からダンパ本体のサイズ・仕様を最適化した。

6. 車体速度・加速度による減衰制御

6.1. 制御機構の必要性

上記テスト結果より、ステアリングダンパの減衰力は、求める性能に応じて変化させなければならないことがわかった。市販のステアリングダンパにも、手動操作により減衰特性変更可能なものはあるが、本システムでは各走行状態に最適な減衰特性を発生させるため、電子制御による自動制御機構を設けることにした。

6.2. 制御パラメータ

ステアリングダンパにより操だが重くなる事象は低速走行において顕著である。これは、走行速度が低くなるほど、ライダーが自発的に操だ角を大きく変化させて操縦するためである。その結果、操だ角速度が大きくなる(Fig. 13)。一方、キックバックは、操だ系に入力される車体進行方向荷重が大きい高速走行時および、フロントタイヤの接地荷重が減少する加速時に発生しやすい。

そこで、減衰特性の制御パラメータとして車体の速度・加速度を採用した。制御マップの考え方は以下のとおりである。

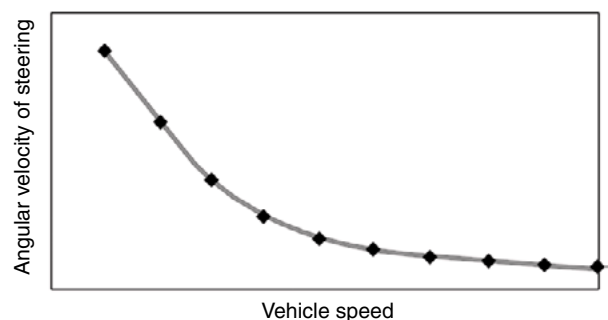


Fig. 13 Characteristics of angular velocity of steering

- ・低速走行時には、軽快なハンドリングとするため減衰特性を低くする。
- ・高速走行時および加速時には、キックバックを低減するために減衰特性を高める。

7. システムと制御

7.1. ダンパ方式

ステアリングダンパの減衰方式として、フリクション式・油圧式・電磁式が考えられる。本開発においては、各方式の特徴・特性を検討した結果、油圧式を採用した(Table 2)。油圧式ステアリングダンパは、作動油の流動抵抗による減衰機構を持ち、作動速度に応じた減衰力を得ることができる。

油圧式ステアリングダンパの構造は直動型と回転型に大別される。下記に本開発で採用した回転型の利点を示す。

- ・通常の作動においては作動油中と外部を往復する部位がないので、かき出しによる作動油消費が少ない。

- ・操だ軸とダンパ回転軸とを同軸に配置することで、操だ角に比例したダンパ作動角を得ることができる。

7.2. システムとダンパ構成

今回開発した HESD のシステム構成を Fig. 14 に示す。制御部の ECU は、車速センサからの情報を基に、ダンパに内蔵されるリニアソレノイドへの制御電流値を決定する。リニアソレノイドはメインバルブに取り付けられており、ECUにて決定された制御電流値に応じて押し付け力を変化させている。リニアソレノイドの採用理由は、車両の急加速や急減速時の作動応答性と、電流値変化に対してリニアな減衰特性変化を実現させるためである。

Fig. 15 に HESD の内部構造を示す。ダンパボデーは、ベーンで左右にしきられる油室と制御油路から構成され、内部に作動油を充填している。ダンパボデーは車体フレーム上に固定され、油室に配置されるベーンはリンクを介して操だ系に結合されている。操だ系とベーンは同一の回転軸を持ち、1:1で回転する。ベーンが回転すると、左右の

Table 2 Investigation of types

Types Items	Friction Type Use of mechanical friction	Hydraulic Type Use of fluid resistance	Electromagnetic Type Use of magnets and coils
Damping characteristics	Unsuitable	Suitable	Suitable
Generated damping force	Small	Large	Medium
Controllability	Low	Medium	High
Size	Small	Small	Large
Cost	Low	Medium	High

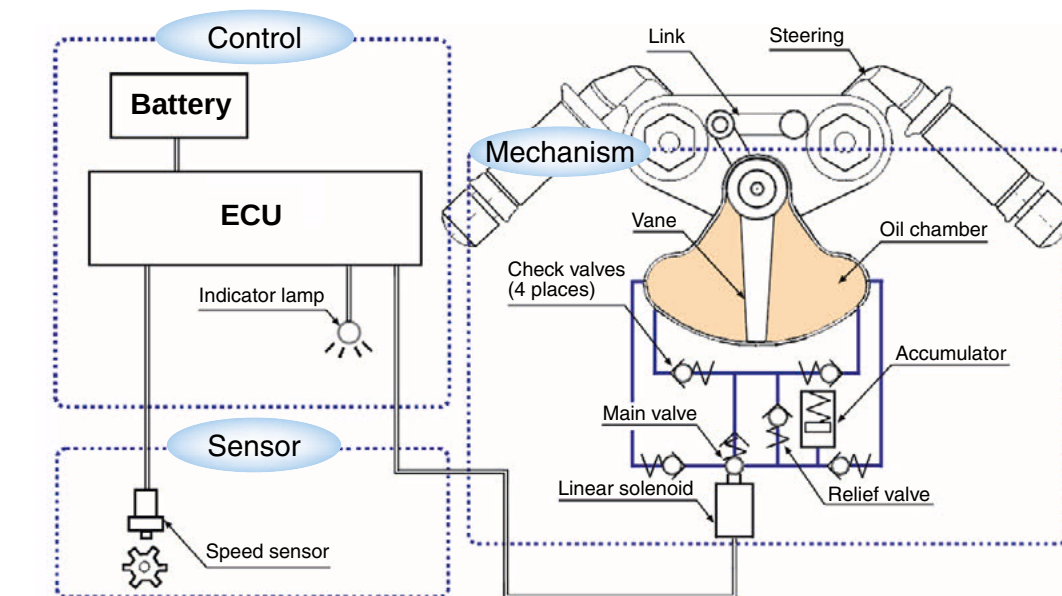


Fig. 14 System diagram of the HESD

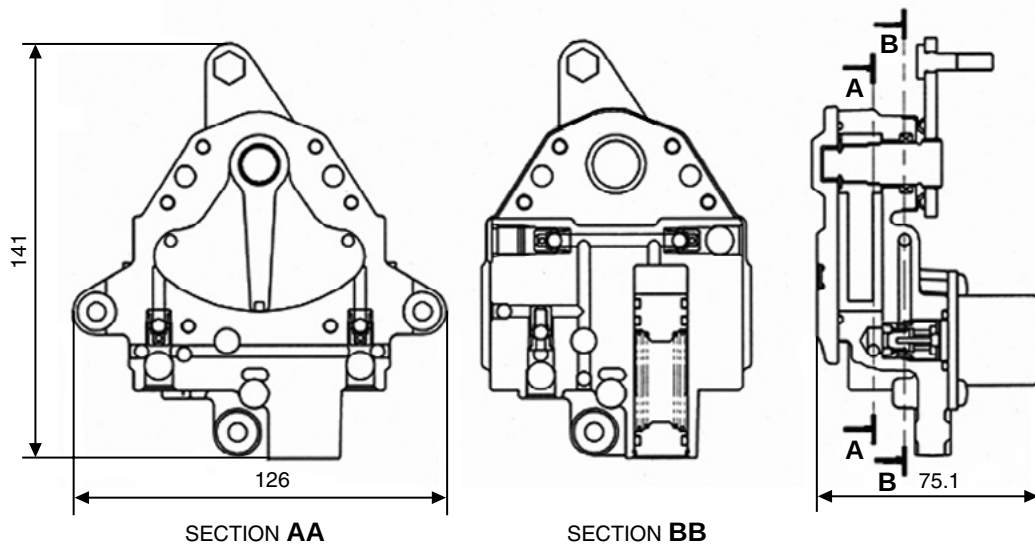


Fig. 15 Inner structure of the HESD

油室間を移動する作動油の流れが生じ、その際の流動抵抗とダンパ内部のフリクションが回転軸まわりの減衰トルクとして操だ系に伝達される。制御油路は軽量化・コンパクト化をねらい、スペース効率の良い立体配管とした。制御油路にはメインバルブ・チェックバルブ・リリーフバルブ・アキュムレータが配置されている。各部位の機能を説明する。メインバルブは、バルブ開口状態に応じて流動抵抗の大きさを変化させる。チェックバルブは、メインバルブへの作動油流入を一方に規制する。リリーフバルブはメインバルブと平行の油路に配置され、発生最大減衰力を制限する。アキュムレータは、温度による作動油の体積変化が生じても、ダンパの内圧を安定させるためのものである。

7.3. 減衰特性の制御

流動抵抗の大きさは、ペーンの角速度とメインバルブの開口面積によって変化する。メインバルブの開口面積は、リニアソレノイドからの押し力とメインバルブでの発生圧力による戻し力の釣り合いによって決定する。

7.3.1. 無通電減衰特性

無通電時は、バルブ内のスプリングによりメインバルブを全開放状態にすることで Fig. 10 の線1の特性を実現した。作動油の流動抵抗は主にメインバルブ部で生じ、操だ角速度に応じて増大する。

7.3.2. 通電時減衰特性

低い操だ角速度域では、リニアソレノイドの押し付け力に対して発生圧力による戻し力が小さいので、メインバルブは閉鎖状態を維持する。このとき、作動油は制御油路側に流れず、油室とペーン間の設定された隙間へと流入し、Fig. 10 の線2の特性を実現した。操だ角速度が増し、リニアソレノイドの押し付け力に対して発生圧力による戻し力が上回ると、メインバルブは開放され、

減衰特性は Fig. 10 の線2から制御電流値によって決定される線4へと変化する。

7.4. 電子制御

きめ細やかでかつ作動応答性に優れたダンパの制御性能を構築するために、電子制御システムを採用した。ECUは車速センサ信号から車体速度と車体加速度を演算し、3次元制御マップによりリニアソレノイド制御電流値を決定する。制御電流値の増加に応じてダンパ特性は Fig. 10 の線1から線3へと無段階に変化していく。Fig. 16に制御マップを示す。低車速時にはリニアソレノイド制御電流値を下げ、車速の上昇に応じて制御電流値を上げる。加速時には、その加速度に応じて制御電流値を上げ、減速時には等速時と同じ制御電流値とした。

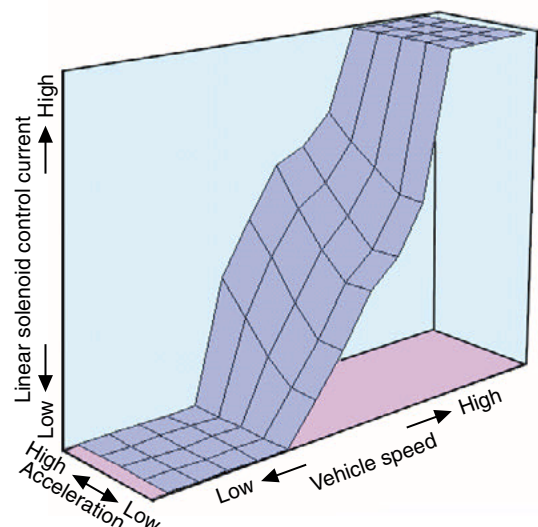


Fig. 16 Control mapping

8. 効果確認結果

これまでに述べた基本構造・制御仕様により得られた効果を検証するため、HESD 付車両にて以下のテストをおこなった。比較として、ステアリングダンパなしの車両と従来のステアリングダンパ付きの車両を計測した。従来のステアリングダンパは、開発の目標である低速切返し操だトルク変動を約 10%増やした(従来ダンパ仕様1)と、キックバック最大操だ角を約75%減らした(従来ダンパ仕様2)の二種類を使用した。

8.1. 低速レーンチェンジテスト

HESD 付車両が低速走行時に操だを重くしないことを検証した。Fig. 17は低速レーンチェンジテスト時の操だトルク分布を示している。横軸は切返し時の最大操だ角速度とした。各仕様における10回の平均値を横線で示す。HESD 付き車両の低速切返し操だトルク変動は、ステアリングダンパなしの車両と比較して8%増であった。これは、目標である従来ダンパ仕様1と比べても良い結果であった。これに対し、従来ダンパ仕様2付き車両の低速切返し操だトルク変動は52%増であった。官能評価結果をTable 3に示す。HESD 付き車両は、ステアリングダンパなしの車両と同じ評点を得ることができ、低速走行時に操だを重くしないことが検証できた。

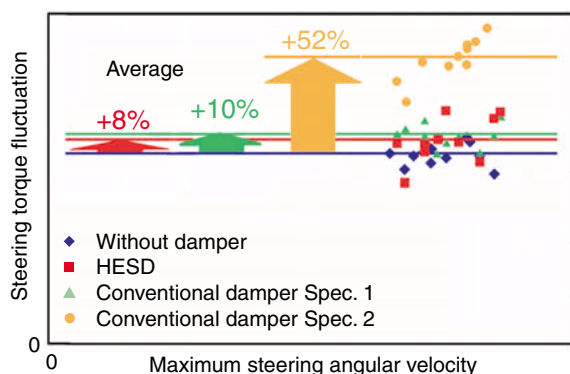


Fig. 17 Low speed lane change test results

Table 3 Steering heaviness evaluation result

	Rider A	Rider B	Rider C
Without damper	4.0	4.0	4.0
HESD	4.0	4.0	4.0
Conventional damper Spec. 1	4.0	4.0	4.0
Conventional damper Spec. 2	3.0	2.0	3.0

8.2. キックバックテスト

Fig. 18は試験車両が評価路面を通過したときの操だ角を時間軸で示したものである。HESDを装着することにより、評価路面におけるキックバック発生時の最大操だ角は約85%減少した。これは、目標である従来ダンパ仕様2と比べても良い結果であった。これに対し、従来ダンパ仕様1は19%の減少に留まった。官能評価結果をTable 4に示す。HESD 付き車両は、ステアリングダンパなしの車両に比べて、非常に高い評価を得ることができた。

上記の結果より、HESD は、常に走行条件に最適な減衰特性を持つことにより、従来のステアリングダンパではできなかった低速走行時の軽快なハンドリングと、高速走行時のキックバックの低減を両立できたと判断できる。

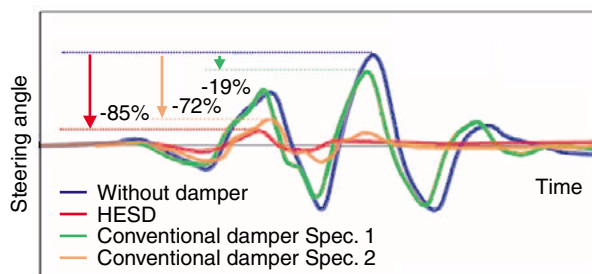


Fig. 18 Kickback test results

Table 4 Kickback performance evaluation result

	Rider A	Rider B	Rider C
Without damper	3.0	2.5	2.5
HESD	5.0	4.0	4.0
Conventional damper Spec. 1	3.0	2.5	3.0
Conventional damper Spec. 2	4.0	4.0	4.0

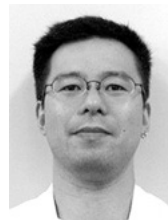
9. まとめ

- (1)ハンドリング特性およびキックバック現象の特徴を解析し、車体の速度・加速度に対する最適なステアリングダンパの減衰力特性を見出した。
- (2)電子制御のリニアソレノイドを使用してダンパ内部の流動抵抗を変化させることにより、低速走行時の軽快なハンドリングを損なうことなく、キックバックを低減させた。
- (3)最大減衰特性や油路のレイアウトを最適にし、軽量・コンパクトな二輪車用電子制御式ステアリングダンパを実現した。

参考文献

- (1) 社団法人 自動車技術会：JASO T803-96 二輪自動車の
操縦性及び安定性用語，p.22(1996)

■ 著 者 ■



若林 威



坂井 清孝



山田 慎一



南里 武彦