

ショックアブソーバにおける動的摩擦特性を特徴づける 評価指標の検討

Study of Evaluation Index Characterizing Dynamic Friction Characteristics in Shock Absorber

加藤 慎治・佐々木 信也*
KATO Shinji・SASAKI Shinya

要 旨

自動車の操縦安定性や乗り心地といった運動性能に対し、サスペンションの構成部品であるショックアブソーバの動特性が及ぼす影響は大きい。ショックアブソーバの制振力は、流体の圧損による油圧減衰力とオイルシールなどのしゅう動部で発生する摩擦力が合算されたものである。この摩擦力は、油圧減衰力と比べて発生力が小さいものの応答性が高いため、制振機能に果たす役割は大きい。

ショックアブソーバにおける摩擦部位の潤滑状態は多様に変化し、作動油添加剤の効果も複雑に影響するため摩擦挙動は動的かつ複雑に変化する。これまで工業的な観点から十分な解明は行われておらず、ショックアブソーバ特有の作動に着目し、基礎的な観点より動的摩擦特性について研究された例はない。

今回、着目する摩擦の速度特性では、静摩擦から動摩擦へ動的な状態変化が繰り返されるため、従来の測定方法では実際に必要な特性を得ることが困難であった。そこで、ショックアブソーバに適した動的摩擦特性の把握を目的に、摩擦の速度依存性を高精度で計測可能な装置を開発し、測定方法を確立した。その測定データの解析から、従来の平均摩擦力のみによる評価では不十分であるため、動的摩擦特性の特徴を抽出する方法として評価指標の創出を試みた。

本報では、新たに提案した3つの評価指標を用い、その有効性を検討した結果、それぞれの特徴を定量化できることが確認された。

Abstract

The dynamic characteristics of shock absorbers, as components of the suspension, have a large effect on dynamic performance, i.e., on automobile maneuverability, stability, and ride comfort. The damping force of a shock absorber is the sum of the hydraulic damping force due to pressure loss of the fluid and the frictional force generated at the oil seal and other sliding parts. This frictional force plays an important role in damping function because its response is quick, even though the generated force is smaller than the hydraulic damping force.

Since the lubrication state of the friction part of the shock absorber changes in diverse ways and the effectiveness of the hydraulic fluid additive also has complex effects, friction behaviour changes in a dynamic and complex way. This has never been adequately elucidated from an industrial perspective, and there are no cases of fundamental research on dynamic friction characteristics with a focus on the behaviour typical of shock absorbers.

This paper focuses on the speed dependence characteristic of friction. In this case, there are repeated dynamic state changes between dynamic and static friction, and therefore the conventional measurement method was not sufficient for obtaining the actually needed characteristic. Therefore, in order to ascertain dynamic friction characteristics suitable for shock absorbers, we developed a

*東京理科大学 教授

device that can measure the speed dependence of friction at high accuracy, and thereby established a measurement methodology. Based on analysis of the measurement data, the previous evaluation using only the average friction force was inadequate, and thus we attempted to create evaluation indices for extracting features of the dynamic friction characteristics.

Validity was examined by using the three newly proposed evaluation indices, and as a result it was confirmed that the features of friction are quantifiable by using the indexes.

1 緒言

自動車の操縦安定性や乗り心地といった運動性能に対し、サスペンションの構成部品であるショックアブソーバの動特性が及ぼす影響は大きい。運動性能の決め手となるショックアブソーバの制振力は、バルブ部で発生する油圧減衰力とピストンロッドとオイルシールやピストンとシリンダのしゅう動部で発生する摩擦力が合算されたものである。これまで、ショックアブソーバのしゅう動部に対しては、摩擦を極力下げることが要求されてきた¹⁾。しかしながら、必ずしも摩擦力を小さくすることが運動性能の向上に対して良いとは限らないということが、実車試験におけるテストドライバーの指摘により明らかとなりつつある。

サスペンションが作動する際、ショックアブソーバのピストンが移動することにより制振力が発生するが、大きな油圧減衰力が立ち上がるまでには時間差が生じてしまう。一方でショックアブソーバにおける摩擦力は、発生力そのものは小さいものの応答性が高いため、サスペンションの作動に対して有効な制振力を発生させる上で重要な役割を果たすと考えられる。ショックアブソーバにおける摩擦部位の潤滑状態は、1 mm以下の微小振幅から数十mmの大振幅までの様々な速度域における往復運動において多様に変化し、作動油の添加剤の効果も複雑に影響する。そのため、摩擦挙動は動的かつ複雑に変化するため、これまで工業的な観点からは十分な解明は行われてこなかった。また、ショックアブソーバ特有の作動に着目し、基礎的な観点より動的摩擦特性について研究された例はない。そこで本研究では、ショックアブソーバに適した動的摩擦特性を把握することを目的として、往復運動状態での摩擦の速度依存性を高精度で計測可能な装置を開発し、その測定データから動的摩擦特性の特徴を抽出する方法と

して評価指標の創出を試みた。本報では、新たに提案した3つの評価指標を用い、摩擦データを解析することによってその有効性について検討した結果を報告する。

2 動的摩擦特性の測定方法

2.1 ショックアブソーバにおける動的摩擦特性

摩擦の速度特性 (μ - V 特性) は、図1に示すように一定摩擦速度における摩擦係数を測定し、各速度における摩擦係数をプロットすることで求められることが一般的である²⁾。また、静止摩擦特性は、長時間の停止状態から動き出す瞬間の最大摩擦力を測定することによって評価されることが多い。しかし、往復動摩擦の場合には、静摩擦から動摩擦への動的な摩擦状態の変化を繰り返すため、十分な静止状態を置かずに、動き出す瞬間の最大摩擦力の大きさを評価することになる。

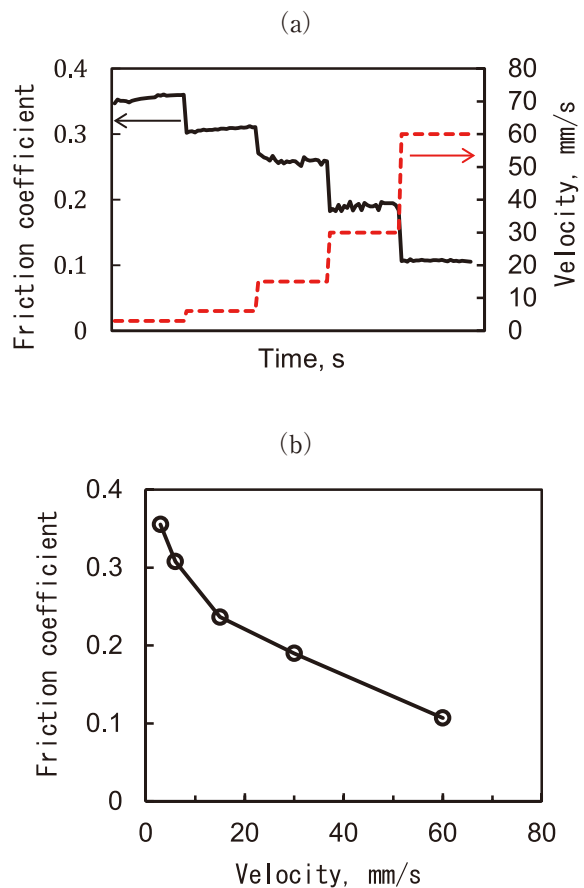


図1 Conventional friction monitoring data (a) experimental data, (b) μ - V characteristic chart

ショックアブソーバにおける往復動摩擦では、図2に示すように静摩擦から動摩擦への動的な摩擦状態変化が繰り返されるため、従来の μ - V 特性測定方

法では実際に必要とされる動的摩擦特性は得られない。具体的には、微小振幅での往復動の場合には、摩擦界面から潤滑油が排除され易いため、十分な油膜形成が難しいなど特殊な潤滑状態となっている可能性がある。そのため、実際のショックアブソーバにおいては、行程切り返し時の停止や動き出し時にスパイク状の摩擦変化が生じたり、 μ - V 特性に往復周波数依存性などが見られたりするが、これらの挙動を計測・評価するためには、新たな動的摩擦挙動計測システムの開発が必要となる。

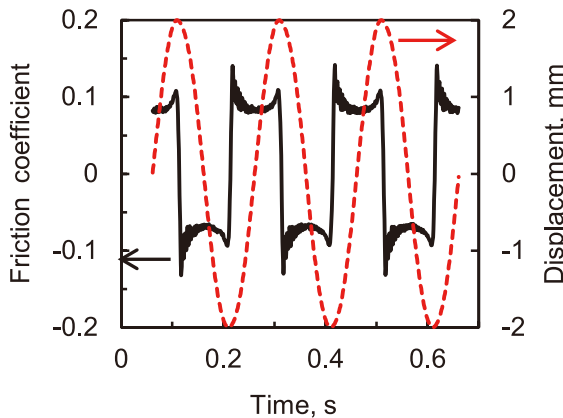


図2 Example of dynamic friction behavior

2.2 動的摩擦計測システム

往復運動においては、速度方向反転時に静摩擦から動摩擦への移行が繰り返される。これを摩擦試験装置で実現する場合は、変位の時間依存性を正弦波関数とすることが一般的である。また、実際のショックアブソーバにおける変位の時間変化も、正弦波関数に近いことが知られている³⁾。そこで、本研究で使用する往復動摩擦試験装置においては、変位の時間変化を正弦波関数で与え、振幅と周波数を変化させることにより動的摩擦特性を計測・評価することとした。開発した往復動ピン・オン・ディスク型の摩擦試験装置概略図を図3に示す。スライドベアリング上に固定したディスク試験片を電磁加振機によ

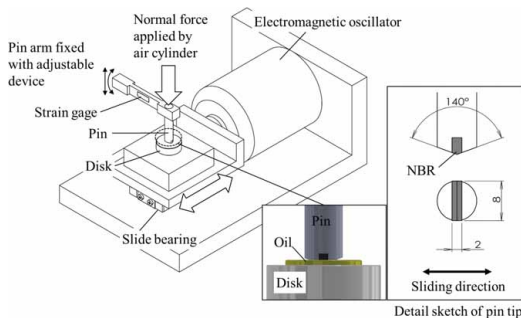


図3 Schematic of reciprocating tribo-tester

り往復運動させ、これにピン試験片を押し当ててしゅう動させる仕組みとなっている。摩擦力は、ピン試験片固定軸に取り付けたひずみゲージを用いて計測した。摩擦部の温度は、温調器により一定温度に制御する構造となっている。

2.3 計測方法

ショックアブソーバにおいて、摩擦力が運動特性に大きく影響を与えるのは、上下死点近傍の微低速領域や微振幅状態にあると考えられる。そこで、摩擦測定条件は表1に示すように、微低速から60mm/s程度までの摩擦速度域において、振幅 $\pm 0.1\text{mm} \sim \pm 2.0\text{mm}$ 、周波数5.0Hzと設定した。測定に際しては、振幅を $\pm 2.5\text{mm}$ で300回(60sec)の予備摩擦を実施することにより、定常状態となるように作動油と摩擦面をなじませた。また、摩擦状態を安定させるため、測定前には試験片を一度持ち上げてしゅう動界面に作動油が存在する状態とし、150回(30sec)の予備摩擦後に摩擦力の測定を開始した。

表1 Sliding test conditions

Normal force	20 N
Temperature	30 °C
Amplitude	$\pm 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0$ mm
Frequency	5 Hz
Oscillating mode	Sine wave
Maximum velocity	3.14~62.8 mm/s
Pin sample	Nitrile Butadiene Rubber (NBR) Edge angle: 140° Contact length: 8 mm
Disk sample	Hard chromium plating Surface roughness Ra 0.01 μm

2.4 評価サンプル

ショックアブソーバの摩擦特性は、作動油とオイルシールの組合せによって大きく変化する⁴⁾。そこで本実験では、オイルシール材料として、ショックアブソーバに使用されているアクリロニトリル・ブタジエンゴム (NBR) を用いた。摩擦実験には、オイルリップ形状を模擬して先端を140°の角度となるようにカットしたものを、ピン試験片として供試した。ディスク側試験片には、ピストンrod表面に使用されている硬質クロムめっき膜を用いた。ディスク表面には研磨仕上げを施し、表面粗さをRa=0.01 μm 以下とした。潤滑油には、4種類のショックアブソーバ用作動油を用いた。作動油の粘度と元素分析結果を表2に示す。4種類の作動油はほぼ同じ動粘度を示しているが、Oil-1, 2, 3にはり

表2 Properties of test oils

	Density at 1°C (g/cm ³)	Viscosity at 40°C (cSt)	Chemical composition		
			Sulfur (ppm)	Phosphorus (ppm)	Zinc (ppm)
Oil-1	0.86	10.9	121	1090	0
Oil-2	0.86	11.3	77	526	0
Oil-3	0.86	11.2	204	347	0
Oil-4	0.85	12.6	1900	896	690

ン系添加剤, Oil-4にはZn系添加剤が添加されている。

3 実験結果および考察

3.1 動的摩擦挙動の測定結果

動的摩擦特性には、作動油およびしゅう動条件による違いが見られた。これらの中から代表例として振幅±2.0mmにおける動的摩擦挙動を図4に示す。Oil-1の場合は、速度の影響を受けず一定の摩擦力を示した。また、動き出しや停止時も摩擦力に変化は見られなかった。Oil-2の場合は、動き出し時に摩擦力にスパイク波形の発生が見られた。ただし、摩擦力の速度依存性は見られなかった。Oil-3の場合は、動き出しと停止時の両方において、スパイク波形が確認された。また、摩擦力は変位0mm付近の最大速度時において最小値を示した。Oil-4の場合は、変位0mmの最大速度時において摩擦力が最大値を示した。また、摩擦力は速度に対して正勾配を示した。

各作動油にて振幅を変化させた場合の摩擦挙動を図5に示す。この図は、各振幅の波形を重ねたものである。Oil-1の場合は、振幅を変えても摩擦力に変化は見られなかった。Oil-2の場合には、振幅の増加とともに摩擦力も大きくなる傾向を示したが、最大振幅±2.0mmでは摩擦力が低下し、振幅±0.2mmと同等の値を示した。Oil-3の場合は、振幅が小さいほど摩擦は大きくなる傾向を示した。一方で、Oil-4の場合は、振幅が小さいほど摩擦力も小さくなる傾向を示した。

3.2 往復しゅう動における動的摩擦特性の指標

4種類の作動油による摩擦挙動の特徴を整理すると、①行程切り替わり時の停止や動き出しに発生するスパイク波形、②動摩擦領域における摩擦の速度特性、③振幅に伴う摩擦力の変化に特徴的な違いが現れることがわかった。これより、ショックアブソーバの特性に及ぼす摩擦の影響を検討するに際しては、従来の平均摩擦力のみによる評価では不十分であることは明らかである。そこで、動的摩擦挙動の特徴を抽出し定量化するため、ショックアブソーバにお

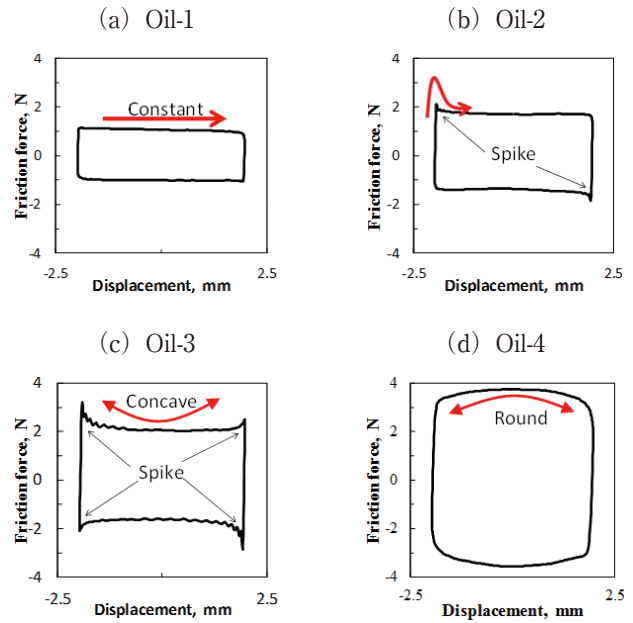


図4 Dynamic friction patterns measured by using each lubricant at an amplitude of ±2.0 mm

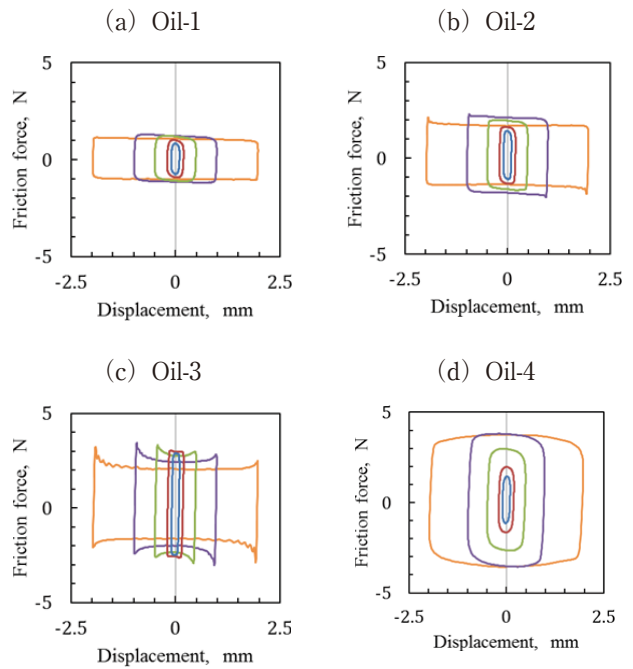


図5 Friction characteristic in different amplitude

ける特性との関連付けを行うことを目的に、新たに次の3つの評価指標を提案し、動的摩擦特性の解析に用いることとした。

3.2.1 計測方法

行程切り返し時の停止や動き出し時に生じるスパイク波形を定量化するため「スパイク指標, SI」を定義した。なお、止まる直前に発生するスパイク波形と行程が切り替わり動き出す瞬間に発生するスパ

イク波形は必ずしも同じとならないため、加速側と減速側とを区別し評価することとした。図6に変位と摩擦の時間波形におけるスパイク指標を抽出する区間を示す。加速側のスパイク指標は、動き出してから位相が $\pi/4$ rad進んだ区間、すなわち正弦波形の上下死点 $\pi/2 \sim 3\pi/4$ radの最大値を F_{sa} とし、これと平均摩擦力の差を平均摩擦力で除することで一般化し、式(1)を用いて算出した。同様に、停止時の挙動は $5\pi/4 \sim 3\pi/2$ の区間とし、式(2)を用いて SI_d を算出した。

$$SI_a = (F_{sa} - F_{ave}) / F_{ave}, \quad \pi/2 \leq \theta \leq 3\pi/4 \quad (1)$$

$$SI_d = (F_{sd} - F_{ave}) / F_{ave}, \quad 5\pi/4 \leq \theta \leq 3\pi/2 \quad (2)$$

ここで、 SI_a は加速側のスパイク指標、 SI_d は減速側のスパイク指標、 F_{sa} は動き出し（加速側） $\pi/2 \sim 3\pi/4$ rad区間の最大摩擦力、 F_{sd} は停止時（減速側） $5\pi/4 \sim 3\pi/2$ rad区間の最大摩擦力、 F_{ave} は $3\pi/4 \sim 5\pi/4$ rad区間の平均摩擦力、 θ は変位の位相である。

このスパイク指標は、正に大きくなるほど大きなスパイク状の摩擦を発生し、負の場合には摩擦力の立ち上がりが遅いことを意味する。

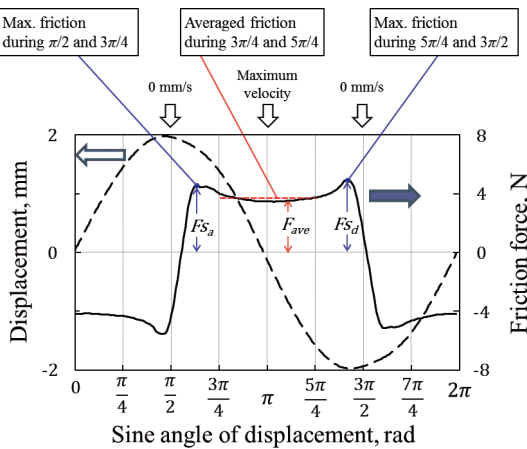


図6 Calculation concept of the spike index

3.2.2 丸さ指標

動摩擦領域における摩擦の速度特性を定量化するため「丸さ指標、 RI 」を定義した。なお、加速側と減速側で速度特性の特徴が異なる場合があるため、区別して評価することとした。図7に変位と摩擦の時間波形における丸さ指標に用いる区間を示す。最大速度に達するまでの $3\pi/4 \sim \pi$ rad区間を加速側、 $\pi \sim 5\pi/4$ rad区間を減速側とした。変位の変化に対する摩擦力の傾きは最小二乗法により、式(3)ならびに(4)より算出した。また、加速及び減速側ともに速度に対して μ - V 特性が正勾配になる場合を正とするために、減速側の傾きは符号を反転させた。

$$RI_a = \frac{\sum (F - \bar{F}) (\theta - \bar{\theta})}{\sum (\theta - \bar{\theta})^2}, \quad 3\pi/4 \leq \theta \leq \pi \quad (3)$$

$$RI_d = -\frac{\sum (F - \bar{F}) (\theta - \bar{\theta})}{\sum (\theta - \bar{\theta})^2}, \quad \pi \leq \theta \leq 5\pi/4 \quad (4)$$

ここで、 RI_a は加速側の丸さ指標、 RI_d は減速側の丸さ指標、 F は摩擦力、 \bar{F} は平均摩擦力、 θ は変位の位相である。

この指標は正に大きくなるほど正勾配速度特性であり、負の場合には負勾配速度特性を示す。0となる場合は摩擦の速度特性依存性がないことを意味する。

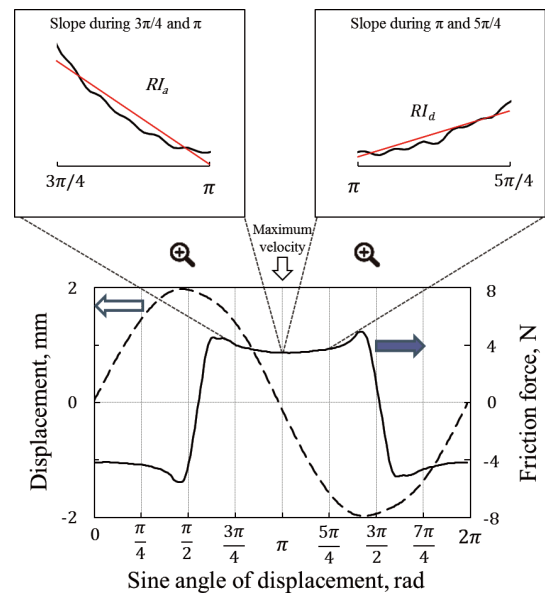


図7 Calculation concept of the roundness index

3.2.3 振幅依存指標

図8に示すように振幅の変化による摩擦力の変化を定量化するため、微振幅時 (± 0.1 mm) の最大摩擦力を ± 2.0 mmの平均摩擦力で割った値を「振幅依

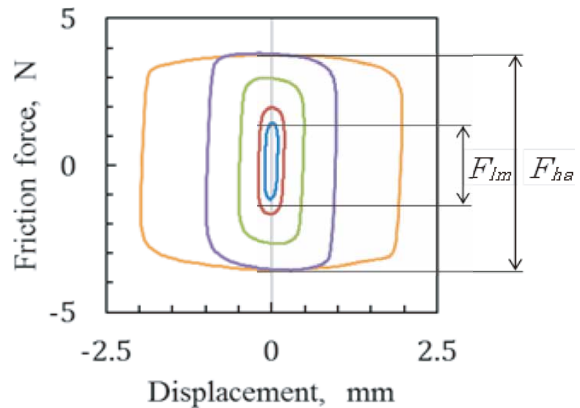


図8 Calculation concept of the amplitude index

存指標, AI] と定義式(5)より求めた.

$$AI = (F_m - F_{ha}) / F_{ha} \quad (5)$$

ここで, AI は振幅依存指標, F_m は微振幅時 ($\pm 0.1\text{mm}$) の最大摩擦力, F_{ha} は振幅 $\pm 2.0\text{mm}$ の平均摩擦力である. AI は, 微振幅時 ($\pm 0.1\text{mm}$) と $\pm 2\text{mm}$ の振幅の摩擦力が同じ場合 0 となり, 微振幅時の摩擦力が大きくなる場合は正, 小さくなる場合は負の値となる.

3.3 各指標による動的摩擦挙動の解析結果

4種類の作動油による動的摩擦挙動について, 各指標を用いて解析した結果を図9に示す. Oil-1の場合は摩擦力は小さいが, 動き出し時にスパイク波形がわずかに発生し, 停止時には摩擦力が若干下がる特徴がスパイク指標 (図9(d)) に反映されている. また, 動摩擦の速度依存性がない特徴は, 丸さ指標の SI_a と SI_d とともに 0 となることに表れている. Oil-2の場合, 摩擦力はOil-1より大きく速度依存性がないが, 動き出し時にのみにスパイク波形が表れている. これらの特徴は, SI_a が大きく SI_d と RI_d が 0 となることに表れている. Oil-3の場合, 摩擦力はOil-1, 2より大きく, 停止と動き出しの両方にスパイク波形が生じた. 動き出し時に平均摩擦に対し約60%大きいスパイク波形が発現する特徴は, 解析により SI_a が約+0.6として数値化されている. また, 加速と減速時の速度特性が負勾配となる特徴は, RI_a と RI_d の値が負の値となって示されている. さらに, 微振幅時に摩擦が大きくなる特徴は, AI が正の値となることに示されている. Oil-4の場合, 摩擦力はOil-1, Oil-2, Oil-3の中で最も大きく (図9(a)), スパイク波形が現れない特徴は, SI_a と SI_d の値がともに負となって示されている. また, 他の作動油と異なり摩擦の速度特性が正勾配となる特徴は, RI_a と RI_d が正の値となることに示されている.

以上のように, 提案した3つの指標を用いることにより, それぞれの動的摩擦挙動の特徴を定量的に抽出できることが確認された. この指標を動的摩擦挙動の解析に適用することにより, 実車におけるショックアブソーバの特性との相関を定量的に検討することが可能になると考えられる.

4 結言

ショックアブソーバの性能に及ぼす動的摩擦特性の影響を把握することを目的として, 摩擦の速度依存性を高精度で計測可能な装置を開発し, 動的摩擦特性の特徴を抽出するための評価指標について検討した.

- (1) 往復しゅう動における動的特性を評価するため, 正弦波形変位制御による動的摩擦挙動を計測す

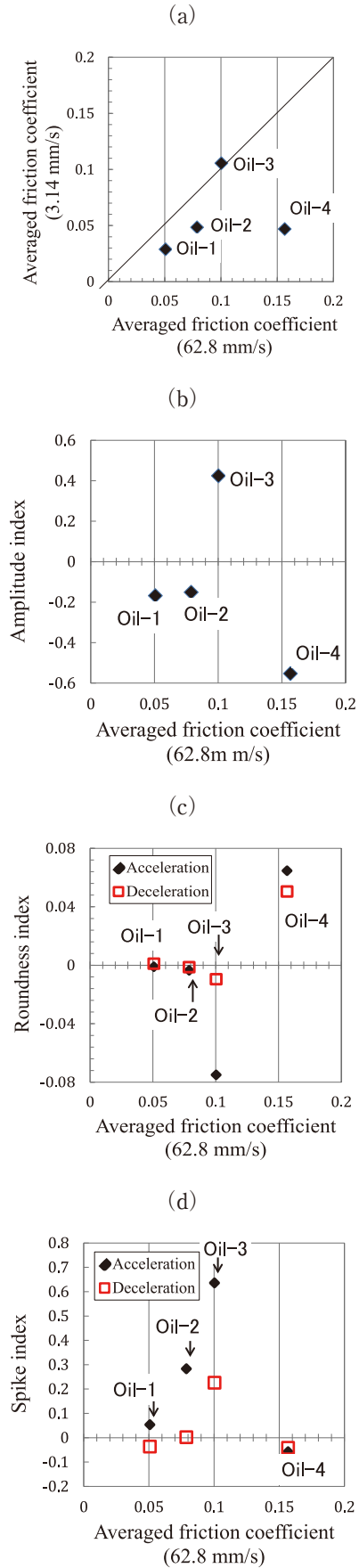


図9 Correlation between each index and the friction index at 62.8mm/s
 (a) Friction index, (b) Amplitude index,
 (c) Roundness index, (d) Spike index.

る装置を製作して4種類の作動油を評価した結果、動的摩擦挙動に特徴的な動摩擦挙動が発現することが確認された。

- (2) 動的摩擦挙動より特徴的な摩擦特性を抽出して定量化するため、新たに3つの指標（スパイク指標、丸さ指標、振幅依存指標）を提案した。
- (3) 3つの指標を用いて作動油の動的摩擦挙動を解析した結果、それぞれの特徴を抽出して定量化できることが確認された。

参 考 文 献

- 1) 中西: ショックアブソーバの技術動向とトライボロジー, トライボロジスト, 54, 9, P. 598 (2009)
- 2) H.Spikes: The history and mechanisms of ZDDP, Tribology Letters, 17, 3, P.469 (2004)
- 3) A.Simms & D.Crolla: The influence of damper properties on ehicle dynamic behavior, SAE Technical Paper 2002-01-0319 (2002)
- 4) 加藤: ショックアブソーバのトライボロジー, KYB technical review, 46, P.8-12 (2013)

著 者



加藤 慎治

1987年入社, オートモーティブコンポーネンツ事業本部技術統轄部専任部長基盤技術研究所 材料研究室長を経て現職.



佐々木 信也

東京理科大学 工学部 機械工学科教授 佐々木研究室 (トライボロジー研究室教授)