

高性能新電磁クラッチを用いた第3世代電子制御 AWD カップリングの開発

Development of Gen3 Electronically-Controlled AWD Coupling with New High Performance Electromagnetic Clutch

安藤淳二 J. ANDO 安藤寛之 H. ANDO 津田拓也 T. TSUDA
鈴木邦彦 K. SUZUKI 新川喜弘 Y. NIIKAWA

A new, third generation (Gen3) of our electronically-controlled AWD coupling has been developed, drastically improving drag torque performance and torque accuracy at low temperatures and contributing to higher fuel efficiency associated with weight reduction in the driveline. Generally, electronically-controlled AWD couplings need to address an inevitable torque increase attributable to an increase in viscosity of lubricant at low temperatures, especially below zero degrees Celsius, because the clutches slide with the lubricant sealed inside the couplings. The Gen3 electronically-controlled AWD coupling developed in this study focuses on surface texture of electromagnetic clutches to address this need. The Gen3 coupling also restricts the torque increase by actively utilizing dynamic pressure between the clutches and increasing clearance of the clutches at low temperatures where viscosity increases. This enables further weight reduction in the driveline. In order to reduce drag torque at low temperatures, macroscopic sliding surface profile in the order of tens of micrometers is provided on the electromagnetic clutches under fluid lubrication. Meanwhile, to reduce control torque at low temperatures when current is applied, the microscopic sliding surface profile in the order of several micrometers on the electromagnetic clutch is optimized under boundary lubrication, which results in stable torque accuracy within both low and high temperatures.

Key Words: All-Wheel Drive System, Gen3 ITCC, Electromagnetic Clutch, Surface Texture

1. はじめに

近年、地球環境保護の観点から、自動車用駆動部品の分野においても、走行安定性や安全性を確保しつつ、低燃費につながる製品開発が急務となっている。なかでも図1に示す全輪駆動(AWD: All-Wheel Drive)車において、ドライブラインの軽量化や効率向上による低燃費化への貢献が重視されている。

このような背景の中、乗用車のシャシをベースにしたミニバンやSUV (Sports Utility Vehicle) が特に北米や日本を中心に世界的に広く普及しており、AWD システムとしては図2に示すような伝達トルクを完全に電子制御できるカップリングの採用が拡大している。当社の電子制御AWDカップリングITCC (Intelligent Torque Controlled Coupling) は、必要に応じて最適なトルク配分ができるため、優れたAWD性能や低燃費化を実現できるだけでなく、ブレーキ制御や横すべり

防止制御など他の制御システムとの高次元でのマッチングも可能である。しかしながら、AWD性能を高いレベルで確保しながら、さらなる低燃費化を実現するためには、ITCCの大幅な性能向上が期待されている。特に、低温環境下でのトルクの安定化が重要であり、この性能の向上がドライブラインの軽量化につながる。ITCCの制御電流を印加しない場合(クラッチ押付け無し)のクラッチ引きずりによるトルクおよび、制御電流を印加した場合(クラッチ押付け有り)の制御トルクは、低温環境下においては、必然的に潤滑油の粘度増加に起因して増大するが、このトルクの増加が改善できれば、ドライブラインの強度設計面からの見直しにより、さらなる軽量化が可能となる。

今回開発した第3世代(Gen3)ITCCは、これらのニーズに対処するために電磁クラッチの表面テクスチャーに着目し、潤滑油の粘度が増加する低温域において、積極的にクラッチ間動圧を利用することで、クラッチす

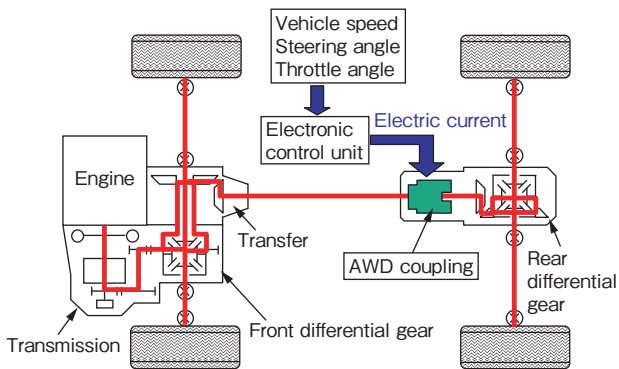


図1 ITCCの搭載例
Example of ITCC application

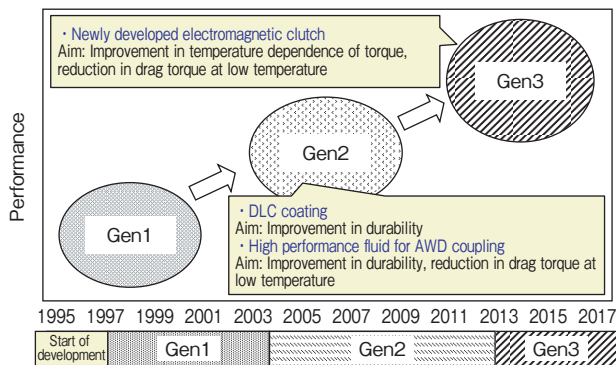


図3 ITCCの歴史
History of ITCC

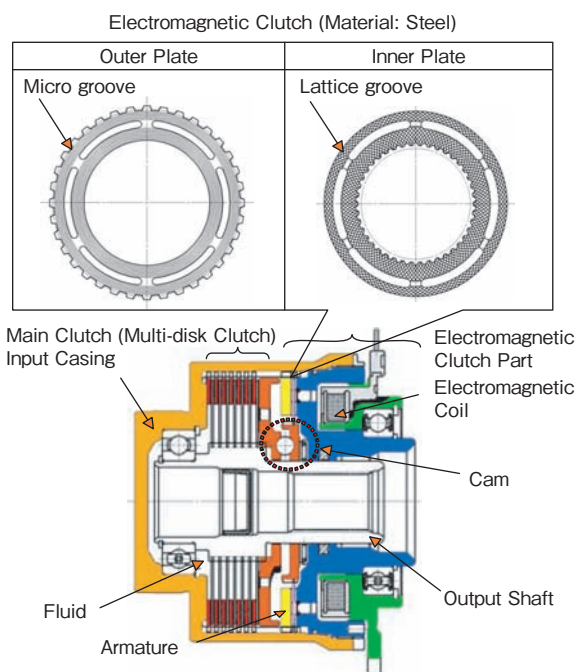


図2 ITCCの構造
Structure of ITCC

きまを広げ、過大なトルクの増大を抑制する。これにより、ドライブラインの軽量化が可能となり、低燃費化に貢献できる。本報では、Gen3 ITCCに用いられている電磁クラッチの高性能化技術について述べる。

2. ITCCの開発の歴史

ここで、ITCCの開発の歴史について図3に示す。当社は1997年、世界に先駆けて電磁クラッチを用いた電子制御式のGen1 ITCC¹⁾を開発し、その後、2004年に電磁クラッチへのDLC (Diamond-Like Carbon) コーティング^{2)~4)}や、専用潤滑油⁵⁾によって、大幅に耐久性能を向上させたGen2 ITCCを市場投入した。この

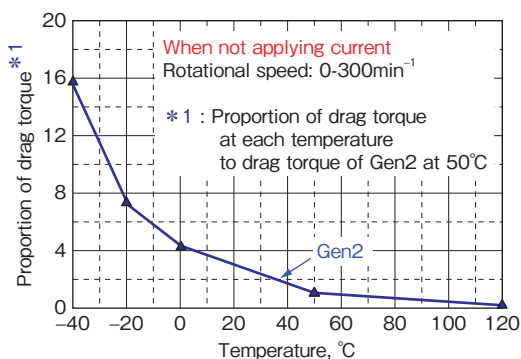


図4 ITCCの引きずりトルクの温度依存性
Temperature dependence of drag torque of ITCC

Gen2 ITCCにより、AWDカップリングの限界使用領域も広がり、信頼性と商品力が大きく向上した。また耐久性能向上に伴い、クラッチが高容量化した。これにより、クラッチ枚数の削減が可能となり、小型・低コスト化にも貢献してきた。

そして、今回電磁クラッチの表面テクスチャーの改良により、低温引きずりトルク性能および低温トルク精度を大幅に向上させたGen3 ITCCを開発した。なお、開発品のGen3 ITCCは、現在量産中である。

3. 高性能化技術

3.1 低温引きずりトルクの低減

ITCCは、図4に示すように必然的に低温環境下において引きずりトルクが増大する。これは、潤滑油粘度の増加に起因するものである。Gen2 ITCCでは、先に述べたように専用潤滑油を採用している。この潤滑油の基油には合成油を用いているために低温環境下での粘度増加は、一般的な鉱物系の潤滑油と比較すると小さいが、さらなる引きずりトルクの低減には、しゅう動面の改良が必要である。

図5にストライベック線図を示す。本検討の潤滑領域は、図5に示す流体潤滑領域である。ここで、ITCCの引きずりトルクに与える各要素の影響を図6に示す。ITCCの引きずりトルクは、電磁クラッチ単体では、5%程度の寄与であるものの、カム機構により増幅され、電磁クラッチが全体の88%に影響することになる。これにより、引きずりトルクの低減には、電磁クラッチの改善が大きく寄与することが分かる。

電磁クラッチの引きずりトルクの低減に際して、クラッチ表面のテクスチャーに着目した。図7は、一般的な粘性の式であり、引きずりトルク低減の方策を示している。特に低温環境下においては、粘度が増加して引きずりトルクが増大するが、クラッチすきまを広げることで、引きずりトルクの低減が可能となる。そこで図8、9に示すようにインナプレート表面のランド部に数十μm単位のクラウニングを付与した。その結果、図10に示すようにクラウニング量の増加に伴い、-40℃における引きずりトルクが直線的に低減することが分かった。特に低温環境下で粘度が増加した場合に、顕著な効果を示すのでクラウニングにより、高粘度流体を積極的に利用し、クラッチを離間させる方向の油圧反力を有効活用する。一方、常温域以上の環境下では、この油圧反力が

背反とならない範囲で調整している。つまり、すべり速度増加に伴う、過剰な油圧反力の増大は、 $\mu - v$ 負勾配(耐振性の指標：摩擦係数の速度依存性)につながり、シャッターの発生を誘発するためである。

図11にGen2とGen3 ITCCの引きずりトルクの比較を示す。特に0℃以下において、引きずりトルクが約50%低減可能となっている。

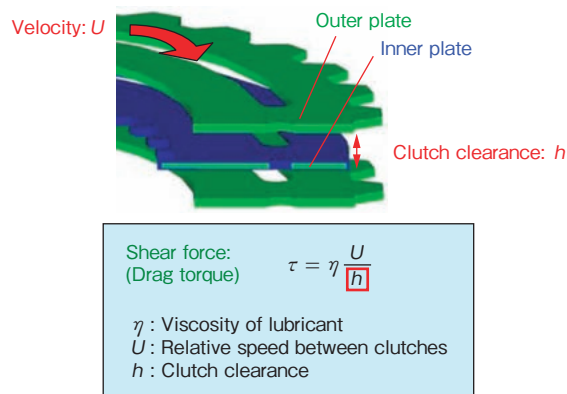


図7 引きずりトルク低減の方策
Method to reduce drag torque

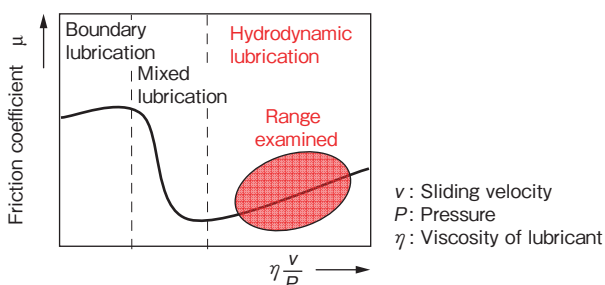


図5 ストライベック曲線による検討領域の説明
(引きずりトルク)

Illustration of range examined using Stribeck curve (drag torque)

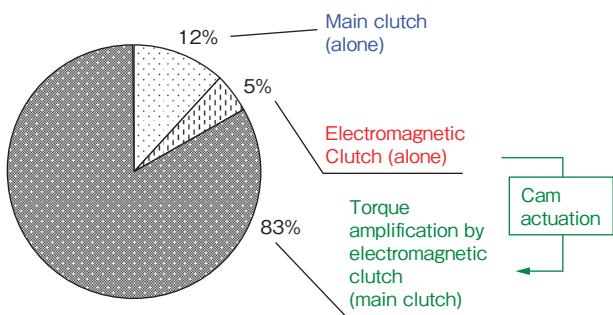


図6 引きずりトルクに及ぼすITCCの要素別寄与
Contributions to drag torque by ITCC components

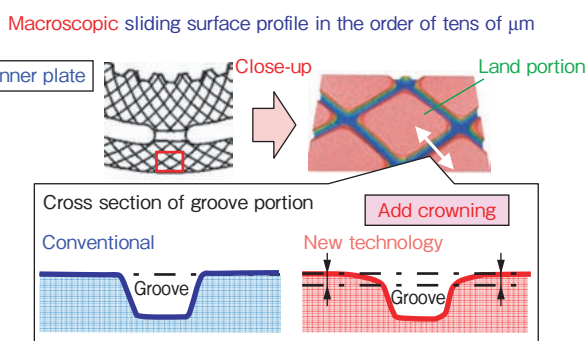


図8 巨視的しゅう動面形状(クラウニング)による引きずりトルクの低減

Reduction in drag torque by the use of macroscopic sliding surface profile (crowning)

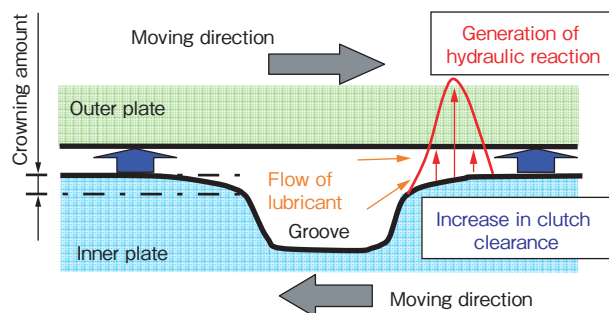


図9 クラウニングによる低温引きずりトルク低減のメカニズム

Mechanism of reduction in drag torque at low temperatures with crowning

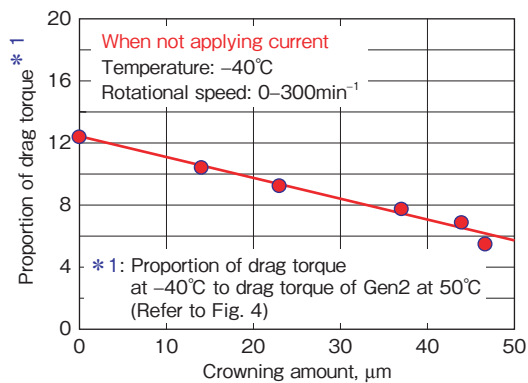


図10 クラウニングによる低温引きずりトルク低減の効果
Effect of crowning on reduction in drag torque at low temperatures

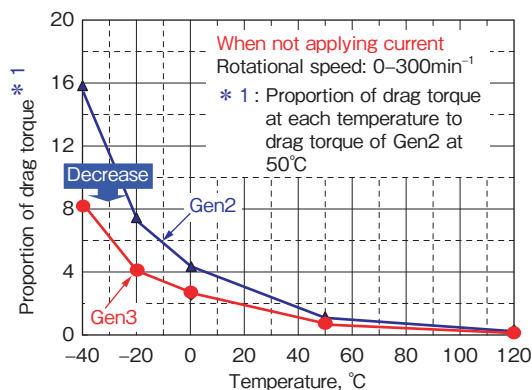


図11 実機における引きずりトルク比の温度依存性
Temperature dependence of drag torque proportion on actual units

インナプレート表面に付与したクラウニングにより、引きずりトルクを大幅に低減させることが可能となった。

3.2 低温トルク精度の向上

本検討の潤滑領域は、図12に示すストライベック線図上の境界潤滑領域である。この境界摩擦を制御するため、電磁クラッチの微視的なしゅう動面形状の最適化を理論的および実験的に検討した。本しゅう動材料の油中での摩擦は、図13に示すイメージで表され、潤滑油のせん断抵抗による流体摩擦と固体接触による境界摩擦が混在すると考えられる⁶⁾。

図14、15には、理論解析のために、アウトプレートとインナプレートの摩擦界面を簡略化したモデルを示す。

クラッチ押し付け力 F_0 による境界摩擦部の垂直抗力 F_1 は、式(1)で表される。

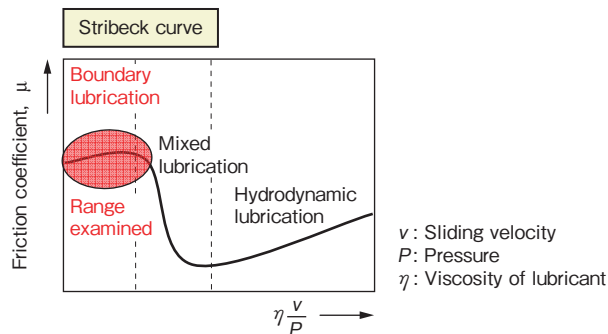


図12 ストライベック曲線による検討領域の説明 (制御トルク)
Illustration of range examined using Stribeck curve (control torque)

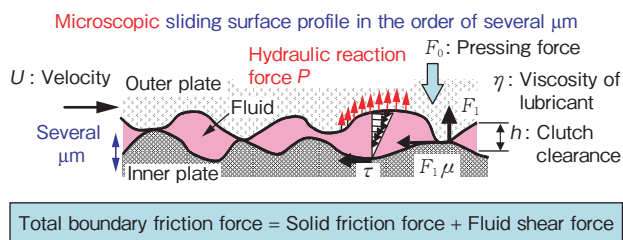


図13 微視的しゅう動面形状における境界摩擦の制御
Control of boundary friction on microscopic sliding surface profile

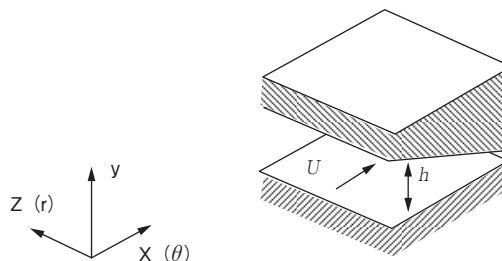


図14 くさび形すきま
Wedge-shaped clearance

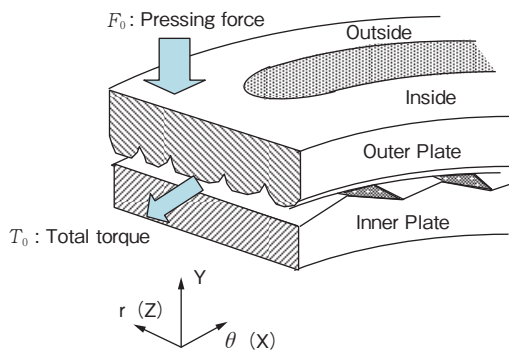


図15 電磁クラッチの摩擦面形状モデル
Friction surface profile model of electromagnetic clutch

$$F_1 = F_0 - \iint Pdrd\theta \tag{1}$$

P は潤滑油の油圧反力を、 r および θ は、それぞれ図14に示すようなしゅう動方向の半径方向、および円周方向（しゅう動方向）を表す。

固体摩擦によるトルク T_F は式(2)で表される。

$$T_F = \int \frac{2\pi r^2 F_1 \mu_b}{A} dr \tag{2}$$

A は、しゅう動部の見かけの接触面積を、 μ_b は固体同士の境界摩擦係数を表す。

次に、潤滑油の粘性によるトルク T_f は

$$T_f = \iint \tau r dr d\theta \tag{3}$$

τ は、壁面に働く潤滑油のせん断応力を表し、 P は簡略化した流体運動方程式から、 τ はニュートンの粘性の式から、それぞれ次式で表される。

$$h^3 \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + h^3 \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = 6MU \frac{dh}{dx} \tag{4}$$

$$\tau = \frac{h}{2} \frac{dP}{dx} + M \frac{U}{h} \tag{5}$$

M は、潤滑油の粘度を、 U は、すべり速度を表す。したがって全トルク T_0 は

$$T_0 = T_F + T_f \tag{6}$$

となり、油圧反力を考慮した境界摩擦と、潤滑油のせん断抵抗による流体摩擦を含めた最適なトータル摩擦を検討した。

潤滑油粘度が増加する低温環境下では、積極的に油圧反力を利用して微視的な油膜を増大させることで、過剰な制御トルクの増大を抑制する。図16に、アウトプレートに付与している微細溝の3次元形状を示す。この微視的なしゅう動面形状により、境界摩擦を制御している。

上記の理論解析によって得られた、最適なアウトプレートの微細溝ピッチを検討する。図17に微細溝ピッチと、ITCCの50℃の制御トルクに対する-40℃の制御トルクの比をトルク変化率として示す。実線が計算値であり、プロットが実験値である。なお、本実験および解析には、インナプレートへのクラウニングを付与（固定）した状態で検討した。図17より、計算値は実験値を精度良くシミュレートできており、アウトプレートの微細溝ピッチの増加に伴い、トルクの変化率が減少し、おおよそ500μmピッチで50℃と-40℃の制御トルクが等しく（トルク変化無し）になっている。また、微細溝

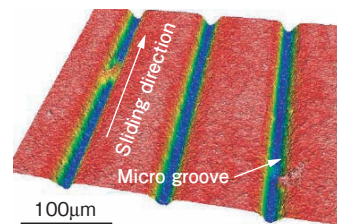


図16 微細溝の3次元イメージ
Three-dimensional image of micro groove

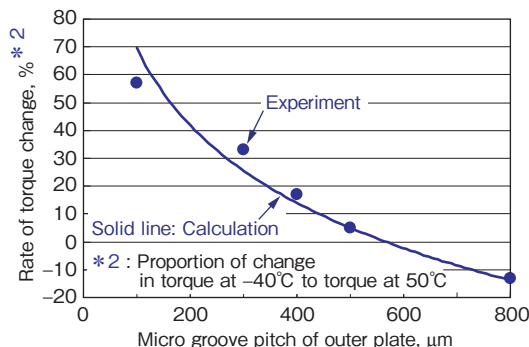


図17 トルク変化率に及ぼす微細溝ピッチの影響
Effect of micro groove pitch on rate of torque change

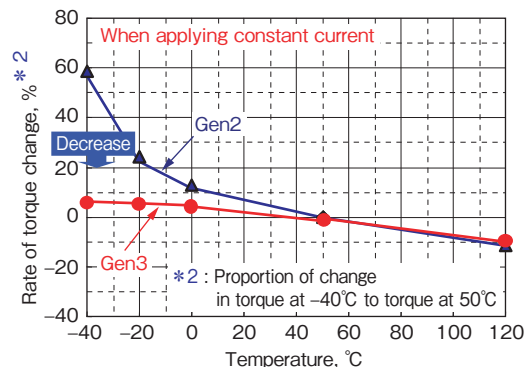


図18 実機におけるトルク変化率の温度依存性
Temperature dependence of rate of torque change on actual unit

ピッチがさらに拡大すると、すべり速度増大に伴う巨視的な油膜厚さが過大となり、 $\mu - v$ 負勾配となることで、シャダーが発生する。この結果より、Gen3ではアウトプレートの微細溝ピッチは500μmを採用している。また、Gen2によるDLC-Si被膜の効果でクラッチの耐磨耗性が大きく向上したために、微細溝ピッチの拡大が適用可能となっている。

図18にGen2とGen3 ITCCの50℃を基準にした際の、各温度域の制御トルク比を示す。特に0℃以下において、制御トルクの増大を大幅に抑制しており、Gen2と基準点50℃を-40℃と比較すると約85%改善している。

4. おわりに

図19に Gen2 クラッチと Gen3 クラッチの表面形状の比較を示す。インナプレートでは、数十 μm 単位の巨視的な形状であるクラウニングを付与し、アウトプレートでは、数 μm 単位の微視的な形状である微細溝のピッチ調整により低温引きずりトルクおよび低温トルク精度を大幅に改善した。

このように、電磁クラッチの表面テクスチャーを最適化することで、ITCC の性能を画期的に向上することが可能となった。今後、Gen3 ITCC によるドライブラインの小型・軽量化により、さらなる地球環境保護に寄与できれば幸いである。

本研究開発において得られた主な知見は、以下に述べるとおりである。

- (1)巨視的しゅう動面形状による油圧反力に着目し、しゅう動面にクラウニングを付与することで低温引きずりトルクを約 50% 低減させた。
- (2)微視的しゅう動面形状で境界摩擦力の制御を行う。つまり、しゅう動面の微細溝ピッチを最適化することでトルク温度依存性を約 85% 改善した。
- (3)低温引きずりトルク性能および低温トルク精度を大幅に向上させ、ドライブラインの軽量化にともなう低燃費化に貢献可能な Gen3 ITCC を開発した。

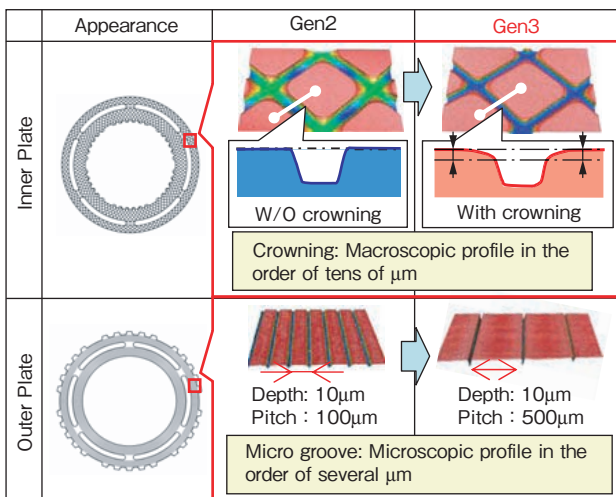


図 19 Gen2 および Gen3 電磁クラッチの表面形状比較

Comparison of surface profiles of electromagnetic clutches between Gen2 and Gen3

* 1 ITCC は、株式会社ジェイテクトの登録商標です。

参考文献

- 1) 宅野 博, 酒井俊文, 酒井直行, 池田暁彦: 自動車技術会学術講演会前刷り集, vol. 5, (1998)95.
- 2) J. Ando, T. Saito, N. Sakai, T. Sakai, H. Fukami, K. Nakanishi, H. Mori, H. Tachikawa, T. Ohmori: SAE Paper, 2006-01-0820(2006).
- 3) J. Ando, T. Ohmori, A. Murase, N. Takahashi, T. Yamaguchi, and K. Hokkirigawa: Wear, 266, (2009) 239-247.
- 4) T. Yamaguchi, J. Ando, T. Tsuda, N. Takahashi, M. Tohyama, A. Murase, T. Ohmori, and K. Hokkirigawa: Tribology International, vol. 44 (2011) 1296-1303.
- 5) J. Ando, N. Sakai, K. Nishi, H. Kuwabara, T. Ohmori, A. Murase, Y. Esaki: Japanese Society of Automotive Engineers Review, vol. 29, no. 1, (2008) 89-95.
- 6) 江口正夫, 武居正彦, 山本隆司: トライボロジスト, vol. 36, no. 7(1991)535.

筆者



安藤淳二*
J. ANDO



安藤寛之**
H. ANDO



津田拓也**
T. TSUDA



鈴木邦彦**
K. SUZUKI



新川喜弘**
Y. NIIKAWA

* 自動車部品事業本部 第2駆動技術部 博士(工学)

** 自動車部品事業本部 第2駆動技術部