

自動車用動力伝達技術研究組合 (TRAMI : Transmission Research Association for Mobility Innovation) におけるトライボロジー研究

自動車用動力伝達技術研究組合

専務理事

藤井 透

■著者連絡先

〒105-0022 東京都港区海岸1-9-11 マリンクスター 8F

TEL 03-5843-8639

URL <https://trami.or.jp/>

1. 自動車用動力伝達技術研究組合とは

複数の企業・大学・独法等が協同して試験研究を行うことにより、単独では解決できない課題を克服し、技術の実用化を図るために主務大臣の認可により設立される法人の一つとして自動車用動力伝達技術研究組合（略称：TRAMI）は、2018年4月に設立された（<https://trami.or.jp>）。2025年11月1日現在、組合員は、主要自動車会社・サプライヤー11社および一般財団法人の計12法人で構成されている（図1）。また、TRAMIの活動に賛同しTRAMI活動を支える賛助会員には、現在35社が名を連ね、内24社が共同研究企業としてTRAMIの研究にも参画している。

TRAMIの理念は、産学連携を通じ我が国

の電動モーターを含む駆動系（power train）技術の発展と、それを担う人財が育つ環境を提供することにあり、この理念のもと、以下の事業を行っている。

- (1) 自動車用動力伝達（driveline）システムの伝達効率、音・振動低減、軽量化技術、電動化に関する基礎・基盤研究
- (2) 自動車用動力伝達システムに関する合同調査
- (3) MBD（Model Based Development：モデルベース開発）推進のための自動車用動力伝達システムのモデル化

当初TRAMIが取り扱う技術範囲は車両の動力伝達系技術であり、車の動力源（内燃機関エンジン・バッテリー）からタイヤに至る動力／エネルギーの伝達に関わる一切の要



図1 TRAMIを構成する組合員



図2 TRAMIの技術検討範囲

素および総合/統合システムである（図2）。TRAMIではその技術範囲のさらなる発展を促し、エネルギー損失等を減らすことによりカーボンニュートラル達成に貢献するとともに、車両から発する音や振動の抑制技術の追求も行っている。得られた技術はモデル化され、MBD環境の充実を加速し、研究機関や企業における迅速・最適設計に活用される。

設立当初の3カ年は、上述のように主に内燃機関およびハイブリッドシステムを対象とした動力伝達系技術に関する研究を進めてきた。しかし、カーボンニュートラル実現のため、また我が国としても2035年に販売される乗用車（新車）については動力源として100%の電気モーターを採用するとの目標が設定されたことを受け、2022年度から電動モーターを含んだ駆動系に関する課題を主たる研究テーマとして取り上げ、活動を活発化させている。特に、2023年度からは50,000rpm超で超高速回転する乗用車用電動モーターの開発を目標とする『モーターの超高回転化による自動車用電動駆動システムの省資源化』とするテーマでNEDO（国立研究開発法人新エネルギー・産業技術開発機構）の2023年度エネルギー・環境新技術先導研究プログラムに採択された。

本プログラムでは、モーターやインバータの大幅な小型・軽量化による省資源化と、システムの高性能化を対象としている。具体的には、ロータおよびステータの磁気・コイルおよび構造設計、高次振動・電蝕抑制に加えて、高速スイッチングを含む駆動電力制御などに關し広範囲で革新的な技術開発や実証検証に総合的/多角的に取り組み、自動車駆動用モーターの超高回転化に必要な基礎・基盤技術を確立し、環境車の普及につなげることを目的としており、2025年度が最終年度で、試作モーターによる実証試験を予定している。

2. TRAMIにおけるトライポロジー研究

TRAMIが発足した2018年4月以降、これまでのトライポロジー関係の研究を表1に示す。

本稿では、紙面の都合で、特に歯車および軸受にとってトライポロジー的に興味深く、また互いに連携しながら研究が進められた以下の三つのテーマを取り上げ、その内容を紹介する。

- (1) ①表面テクスチャによる摩擦特性の解析
→②トライポフィルムおよび表面テクスチャによる摩擦特性解析)
- (2) 歯車要素の解析：歯面テクスチャの幾何学的特性がかみ合い摩擦に及ぼす影響の調査・考察→かみ合い摩擦に及ぼす歯面テクスチャの幾何学的特性の影響の解析→かみ合い摩擦に及ぼす歯車歯面テクスチャの影響に関する研究
- (3) 接触部の油膜状態解析→接触部の境界～混合潤滑領域の検証

上記三つの研究テーマは、動力伝達系における損失低減、伝達容量アップ、耐久性等に寄与する重要なテーマであり、TRAMIとしても重点的に取り組む分野の一つである。

3. 表面テクスチャに取り組んだ背景

自動車を中心とした駆動系では、1～3%の効率向上が燃費およびCO₂排出量に大きな影響を与えるため、歯車伝動での摩擦の低減は産業的に重要な技術課題である。しかし、歯車の摩擦係数の推定は経験式に依存し、混合潤滑領域における油膜形成や微小損傷の発生・進展機構は体系化されていない。これに応える方策として、近年すべり面の表面テクスチャ研究が大いに注目されてきた。

表面テクスチャリングに関する研究は、2000年代にレーザー表面加工技術の発展とともに体系的に進展したが、その起源は1960年代の油溝（oil grooves）による油膜保持の基礎研究や、1970～80年代に報告

表1 TRAMI発足時から現在までのトライボロジー研究

記号（年度）	テーマ名	担当
18A3-1-01	表面テクスチャによる摩擦特性の解析	東京理科大学・佐々木研究室
19A3-1-01	同上	
20A3-1-01	同上	
21A3-1-01	トライボフィルム及び表面テクスチャによる摩擦特性解析	
22A3-1-01	同上	
23A3-1-01	高速歯車におけるトライボフィルム及び表面テクスチャの摩擦特性解析	
24A3-1-01	高速回転歯車の信頼性確保へ向けた摩擦／摩耗影響因子の解明	
25A-A01-0	同上	
18A3-1-02	接触部の油膜状態解析	九州工業大学・西川研究室
19A3-1-02	同上	
20A3-1-02	接触部の境界～混合潤滑領域の検証	
21A3-1-02	同上	
22A3-1-02	高回転化における摺動部発熱及び潤滑油量に着目したトライボ基礎研究	
23A3-1-02	超高回転化における摺動部発熱および潤滑油量に着目したトライボ基礎研究	
24A3-1-02	同上	
18A3-2-01	無段変速部の損失寄与度解析（軸間力と損失の関係解析）	室蘭工業大学・成田研究室
19A3-2-01	摩擦伝達要素の損失解析	
20A3-2-01	同上	
21A3-2-01	摩擦伝達要素のトライボコントロール理論検証	
18A3-2-02	無段変速部の変速特性解析	同志社大学・大塙研究室
19A3-2-02	摩擦伝達要素の拳動解析	
20A3-2-02	摩擦伝達要素の摩擦ペクトルを加味したPV特性解析	
21A3-2-02	摩擦伝達要素の摩擦ペクトルを加味した面圧、滑り状態解析	
18A3-2-03	トラクションローラの高回転時における動力伝達特性に関する研究	東海大学・山本研究室
19A3-2-03	同上	
20A3-2-03	同上	
21A3-2-03	同上	
22A3-2-03	同上	
23A3-2-03	トラクション伝達による高減速比機構に関する研究	
24A3-2-03	同上	
25A-A02-03	同上	
20A3-2-04	トラクションローラの高回転伝達におけるミクロ領域の解明	東海大学・落合研究室
21A3-2-04	トラクションローラの高回転時における油膜形成、油流れに関する研究	
22A3-2-04	トラクションローラの高回転時における動力伝達特性に関する研究	
23A3-1-03	高回転環境における有効な潤滑供給に関する研究	
24A3-1-03	同上	
25A-A01-03	同上	
18A3-3-01	歯車要素の解析：歯面テクスチャの幾何学的特性がかみ合い摩擦に及ぼす影響の調査・考察	鳥取大学・本宮研究室
19A3-3-01	かみ合い摩擦に及ぼす歯面テクスチャの幾何学的特性の影響の解析	
20A3-3-01	かみ合い摩擦に及ぼすギヤ歯面テクスチャの影響に関する研究	
21A3-3-01	高速回転・高PVギヤのかみ合い摩擦・スカッフィング摩耗に関する研究	
22A3-3-01	同上	
23A3-3-01	同上	
24A3-3-01	同上	
25A-A03-01	高速で駆動される歯車のマイクロピッチング防止設計方法の研究	
23A2-2-01	歯車嚙合部の油膜形成と破断を評価する計測手法の開発	横浜国立大学・中野研究室
24A2-2-01	同上	
24A3-5-02	高回転歯車へのオイルジェット潤滑の有効性	弘前大学・城田研究室
25A-C04-02	同上	
23A3-4-04	潤滑液飛沫の研究	東京大学・渡村研究室
24A3-4-04	同上	
25A-C04-04	同上	
25A-C04-03	高回転下における軸心給油潤滑に対する影響パラメータの研究	神戸大学・宋研究室
25A-G12-01	歯車嚙合部の油膜形成と破断を評価する計測手法の開発	横浜国立大学・大久保研究室
25A-C04-02	高回転ギヤへのオイルジェット潤滑の有効性	弘前大学・城田研究室

は現在進行中のテーマである。

された異方性研磨 (directional honing) と摩擦係数の関係に関する研究にまで遡ることができる。1990年代には、摺動表面の機能を積極的に制御する表面機能化 (surface functionalization) の概念が提案され、摩擦・摩耗特性を表面形状によって制御する試みが行われるようになった。

2000年代初頭になると、レーザー加工技術の普及により、従来の機械加工では困難であった微細な表面テクスチャを高い再現性で形成することが可能となり、マイクロディンプルを代表とする表面テクスチャの体系的研究が進展した。Wakudaら²⁾は、セラミックスと鋼の潤滑すべり条件下において、表面テクスチャが摩擦低減に寄与することを実験的に示し、表面テクスチャ効果の有効性を明確にした代表的研究として位置づけられる。さらにKovalchenkoら³⁾は、レーザー表面テクスチャによる摩擦低減効果が、特に混合潤滑領域において顕著であることを示し、ディンプル寸法や面積率と摩擦特性との関係を整理した。

これらの研究成果を踏まえ、Etsion⁴⁾は、それまでに報告されていたレーザー表面テクスチャ (Laser Surface Texturing : LST) に関する実験的知見を包括的に整理し、LSTを工学的手法として体系化した。これにより、表面テクスチャ研究は、個別の現象報告の段階から、実機条件を念頭に置いた設計指針の議論へと発展する契機が与えられたと考えられる。

一方、テクスチャ形状の方向性に着目し、摩擦係数の異方性を利用して摩擦挙動を制御しようとする研究も2000年代以降に報告されている。Ping Luら⁵⁾は、「異方性テクスチャを用いることで摺動方向に応じた摩擦制御が可能である」ことを示し、実用展開に向けた基礎的知見を提供した。

ただし、これらの先行研究の多くは、単純なすべり試験片や軸受モデルを対象としたも

のであり、歯車のように転がりとすべりが共存し、負荷・速度・潤滑状態が時々刻々と変化する機械要素に対して、表面テクスチャが摩擦、油膜形成、耐久性、さらにはNVH特性に及ぼす影響を体系的に検証した研究は限られている。このような研究ギャップが存在することが、歯車を含む自動車用動力伝達要素において表面テクスチャを対象とした研究が求められる背景となっている。

—歯車特有の研究ギャップ—

歯車にテクスチャを直接適用した研究例としては Chiu (2010), Martins (2015), Deng (2016), Yuan (2017) などがあるが、実用条件での摩擦、油膜、耐久性、NVHへの影響を詳細に検証した体系的研究は極めて少ない。

—CVTと摩擦係数制御—

CVTが欧米で生まれ、わが国で実用化、発展し、現在も小型車に広く使われ、成熟した技術ともなっている押し式および引き式 (チェーン) 金属Vベルト式CVTの伝動効率アップが歯車の効率、耐久性アップ、摩擦係数同定とともにテクスチャ研究の動機の一つとなっていた。CVTの場合、V溝のブーリー中でベルトが接線方向だけでなく、半径方向にも滑る。もし、半径方向の滑りに対して摩擦が小さく、接線方向に対しては大きな摩擦力を発生できるテクスチャをブーリー表面に施すことができれば、伝動効率のみならず、変速速度なども向上するのではと期待された。

このような背景から、テクスチャによる摩擦の異方性に関する基礎研究がTRAMIの重要な研究の一つとして浮かび上がり、摩擦係数の精確な推定方法の研究を含めた上記の三つの研究が開始されることとなった。

4. 研究成果の概要

4.1 ①表面テクスチャによる摩擦特性の解析、および②トライボフィルムおよび表面テクスチャによる摩擦特性解析(東京理科大学・佐々木信也研究室)

①の研究は3カ年続いた。その目的は、CVTの効率向上を図るために、表面テクスチャおよび潤滑油添加剤の最適化による任意の摩擦係数およびその異方性発現技術を確立することである。また、ここで得られた摩擦・摩耗・潤滑に関する知見を歯車動力伝達機構にも展開することも狙った。

はじめに、表面テクスチャリングによる摩擦異方性発現とそのメカニズムを明らかにするため、図3に示すような表面テクスチャ(レーザ加工)を有する試験体を用意し、パウデン・レーベン型往復動摩擦試験機を用い、シリンドラ・オン・ディスク方式で摩擦試験を行っている。図4に示すように、上下、左右だけでなく、斜め方向にも摺動させ、摩擦係数を測定した。これにより、摩擦係数に及ぼすテクスチャの影響、異方性について明らかにしている。

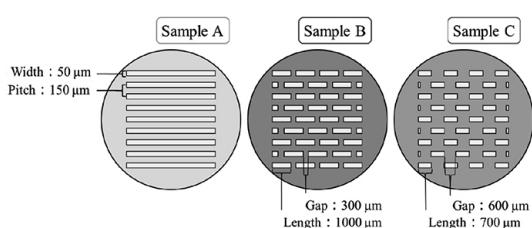


図3 テクスチャ試験片の模式図

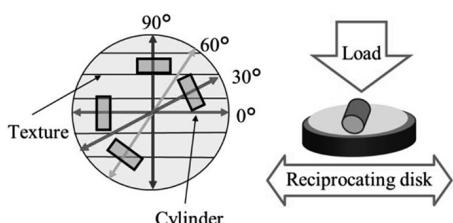


図4 摺動状態と摺動方向の模式図

表面テクスチャ(摩擦係数の異方性)効果をCVTに展開するにあたっては、CVTのエレメントとプーリとの摺動を模擬した図5の装置を開発し、摩擦試験を行っている。プーリ面には、先の成果を反映させ、当初、図4に示すような溝を設けて、その効果を見極めている。本研究は、テクスチャ効果を詳細に明らかにする基礎研究的要素と、その成果を近い将来実働部品に取り入れができる極めて実用的な側面も有しており、产学連携ならではの研究活動でもある。

プーリ摺動面に施された同心円状の溝によるテクスチャ(図6)により、プーリ半径方向と接線方向で摩擦係数が確認されたことを受け、後年度には、5種類テクスチャパターン(ディンプル2種、放射状テクスチャ、サークル2種)をプーリに加工し、摩擦特性に及ぼすテクスチャの影響を調査した。さらには、学-学連携の具体化として3種類のテクスチャを施したプーリセットについて、室蘭工大で実性能評価を実施し、テクスチャ付与による実用的効果の検証へと発展させた。

テクスチャ効果とそのメカニズムをより深

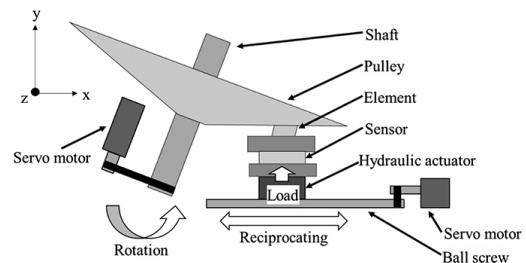


図5 CVTプーリを用いた摩擦試験装置

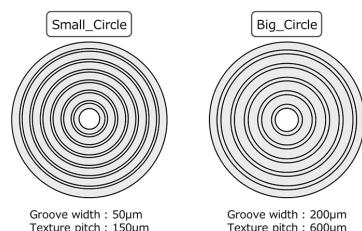


図6 CVTプーリに設けた同心円テクスチャ

掘するため、佐々木研究室では2021年度から2カ年にわたって②の研究を進めた。本研究では、高速回転する歯車ならびにトラクションドライブ（2018年度より東海大学・山本研究室でトラクションドライブに関する研究を実施中）の動力損失低減（効率向上）を目指している。そのため、表面性状（粗さとテクスチャ）やトライボフィルムの性状を把握し、摩擦係数 μ コントロールおよび摩擦・摩耗制御のためのメカニズム解明しようとするもので、①境界潤滑領域の摩擦異方性の発現メカニズムをもとに固体接触理論に基づく摩擦計算基礎式を提案し、②MTM（Mini Traction Machine）試験機を用いて混合～EHL領域での表面テクスチャによる摩擦異方性発現効果を評価するとともに、③表面反応膜と界面油膜の観察システムを開発し、表面テクスチャによる摩擦異方性発現メカニズムの解明を狙っている。本研究ではCVTお

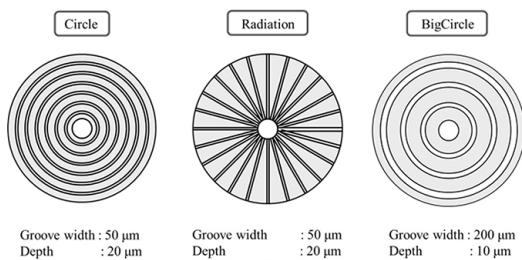


図7 CVTプーリに設けた種々のテクスチャ

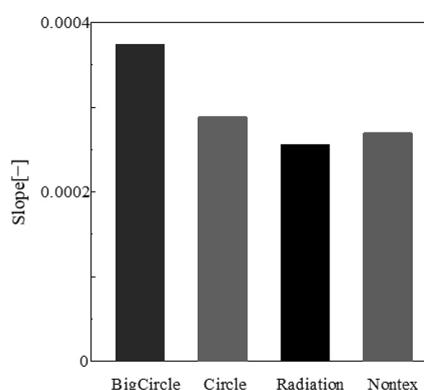


図8 各種テクスチャと摩擦係数の比較

および歯車への成果の展開に関して以下の成果を得ている。

–表面テクスチャによる摩擦異方性の発現–

摩擦異方性の発現に対する表面テクスチャの影響を調べるために、LSTによりCVTプーリに図7に示すテクスチャを施し、摩擦異方性を調べた。図8に示すように、周方向に沿う溝を有する【Circle】プーリでは、【Nontex】プーリと比較して傾きが大きく、摩擦異方性が大きいことが確認された。一方、径方向に沿う溝を有する【Radiation】プーリでは、【Nontex】プーリと比較して傾きが小さく、摩擦異方性が小さいことが確認された。また、溝幅が大きい同心円状の溝を有する【BigCircle】プーリでは、【Circle】プーリと比較して傾きがさらに大きく、最も大きい摩擦異方性を示した。

–MTM試験機を用いた混合～流体潤滑域でのテクスチャの影響–

LST法によりSUJ2鋼ディスクに4種類のディンプルテクスチャを付与し、摩擦特性を評価した結果、図9に示すように、ディンプルテクスチャの付与は摩擦係数を上昇させることができた。また、ディンプルの深さと

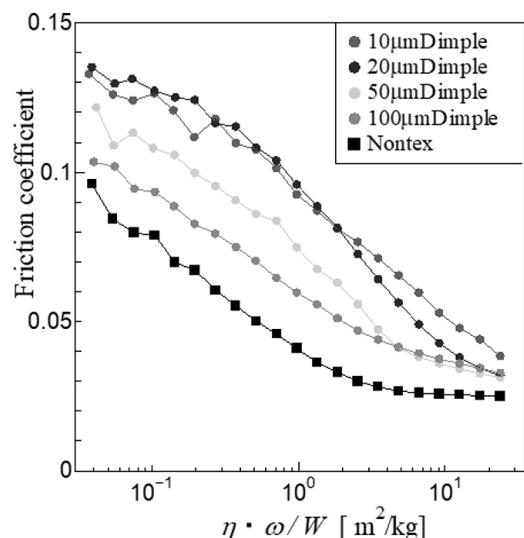


図9 ディンプルテクスチャと摩擦係数の関係

面積率が一定の条件においては、ディンプル径が小さいほど摩擦係数の上昇が顕著であった。テクスチャ付与による摩擦係数の上昇は、接触面積の減少による接触圧力の上昇と、ディンプルエッジでの固体接触頻度の増加によるものと考えられる。

上記二つの成果に加え、光干渉法を応用した油膜・摩擦係数同時計測システムを開発し、境界・混合潤滑域では、テクスチャにより潤滑油が接触面に供給され膜厚が増加し、金属同士の直接接触が緩和され摩擦係数が減少すること、流体潤滑域においては、溝形状(ParallelとVertical)において、高い摩擦係数が現れることを見いだし、その理由として、溝端部から界面油膜を形成する潤滑油が排除され、油膜厚さが減少したことによるものとの仮説を打ち立てている。

一連の研究により、テクスチャ効果は“貧潤滑”状態において最も顕著に現れると考えられ、シミュレーション技術の一層の進展のためには、貧潤滑状態における潤滑状態の解析手法を確立することが今後の大きな課題であることを浮き彫りにした。

4.2 歯車要素の解析：歯面テクスチャの幾何学的特性がかみ合い摩擦に及ぼす影響の調査・考察→かみ合い摩擦に及ぼす歯面テクスチャの幾何学的特性の影響の解析→かみ合い摩擦に及ぼす歯車歯面テクスチャの影響に関する研究（鳥取大学・本宮潤一研究室）

初年度は、仕上げ工法の異なる2種の試験歯車(図10)を用い、その歯車歯面の摩擦特性を明らかにした。試験には本宮研究室で有している写真1に示す動力循環式歯車運転試験機を用いて歯車の効率測定試験を行った。歯車創成の工法種別として、研削歯車を研削B(Ground B)、ポリッシュ仕上げ歯車をポリッシュ(Polished)と区別し、駆動歯車と被動歯車の区別はそれぞれDV/DVNと区別している。二次元フーリエ解析を用い、歯面テクスチャの定量化を行っている。回転数も500, 1,500, 3,000 rpmと変化させている。潤滑油についても3種類(AT-F, MT-F, CVT-F)を用い、それぞれを使った場合の摩擦係数等を明らかにした。本研究の結果、異なる仕上げ工法で製作された歯車では線粗さの他に、歯面テクスチャの空間周波数特性が異なり、確かに歯面テクスチャは歯面の摩擦係数に大きな影響を及ぼす可能性のあるこ

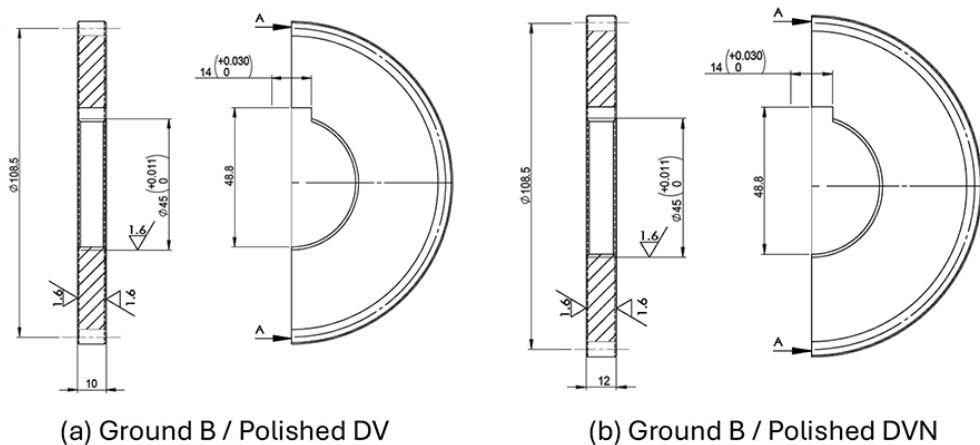


図10 歯車図面(研削B/ポリッシュ)

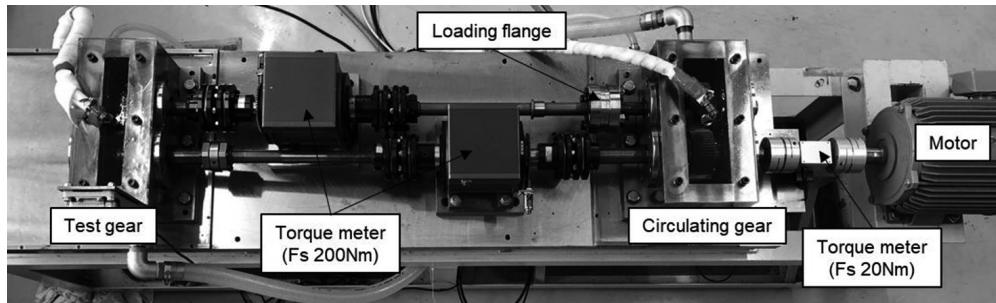


写真1 動力循環式歯車試験機（鳥取大学に設置）

とを見いだした。

上記の結果を受け、翌年度は「これまで明らかにされてこなかったかみ合い摩擦損失に及ぼす歯面テクスチャの影響を明らかにし、動力伝達用歯車の伝達効率向上につながる知見を見いだすこと」を目的として、仕上げ工法の異なる5種の試験歯車（研削1種、ショット4種）を用いて、歯車伝動に及ぼすテクスチャの効果を詳細に検討した。表2にショットA, B, C, Dのショット条件および表面性状をまとめる。歯車歯面には、回転切削・回転研削などの工法に依存したある周期性、法則性、規則性を持ったテクスチャが形成される。本研究では、各種工法で製作された歯車歯面のレプリカを採取し、線粗さおよび面粗さを測定した。また、歯面の三次元データを取得し、得られたデータからISOに順ずる表面性状パラメータを算出している。

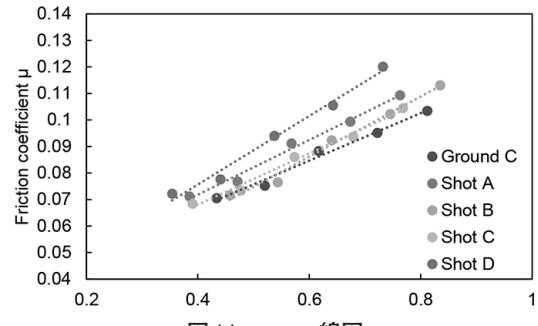
研究成果の一部を図11に示す。摩擦係数 μ の算出にあたっては、次式で示す松本式を用いた。松本式では、歯面の最大高さ粗さ Rz_1 , Rz_2 、油膜厚さ h 、境界潤滑の摩擦係数 f_s 、流体潤滑の摩擦係数 f_L を式(1)に代入することで、歯面の摩擦係数を推定している。

$$\begin{cases} \mu = f_L(1-\alpha) + f_s\alpha \\ \alpha = 0.5 \log D \\ D = \frac{Rz_1 + Rz_2}{h} \end{cases} \quad \dots \quad (1)$$

上式からわかるように、 α は油膜厚さで無

表2 ショット条件と表面性状

	Shot A	Shot B	Shot C	Shot D
Injection material	SBM-44C	FeCrB30	WA#1000	WA#600
Injection material shape	Spherical		Irregular	
Particle size (μm)	45	30	15.5	24
Pressure (MPa)	0.1	0.2	0.4	0.2
Coverage (%)			100	
$Rz_1 + Rz_2$ (μm)	1.378	1.920	1.413	1.196

図11 μ - α 線図

次元化（規準化）した値であり、表面性状のマクロ的指標と言える。図11から明確になったように、 α が同じであっても、表面テクスチャが異なれば摩擦係数が異なる。すなわち、歯車歯面の摩擦係数は、その表面テクスチャによって制御することができる（効率アップにつなげられる）ことを示している。

昨年度は既存の試験機を用いて、歯車伝動の効率測定を行ったが、絶対精度並びに高速回転の点で課題があり、動力損失の絶対値精度の向上を目指し、国際標準に対応した新試

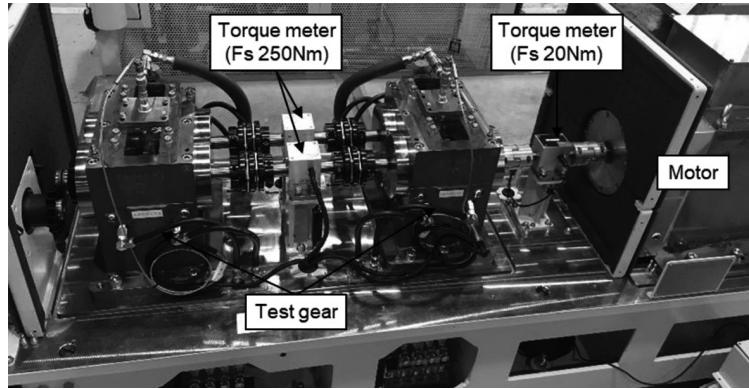


写真2 新試験機

験機（写真2）の製作も進めた。この新しい試験機は高回転領域（～10,000 rpm）の効率測定にも対応している。

上記装置が完成・成熟運転ができるようになったこともあり、2020年度は、かみ合い摩擦に及ぼす歯車歯面テクスチャの影響に関する一層深堀：これまで明らかにされてこなかったかみ合い摩擦損失に及ぼす歯面テクスチャの影響を明確にし、動力伝達用歯車の伝達効率向上につながる知見を見いだすとともに、精度の高い実用的な摩擦係数推定式の確立を目指して研究を進めた。そのため、使用した歯車も12種（過去分を含む）と広げ、幅広い表面テクスチャを対象として、摩擦係数との関係を調べた。その結果を図12に示す。図から、 α の小さい領域（表面性状：凹凸等に対して油膜が厚い→流体潤滑に近い方に寄る）では摩擦係数に及ぼすテクスチャの影響は小さい。これは確かに直感的にも理解される。しかし、固体潤滑に近い混合潤滑領域（貧潤滑領域とも解釈できる）では摩擦係数に及ぼすテクスチャの影響は顕著である。この結果を受け、本宮らは従来の松本式を発展させ、より汎用的に使える摩擦係数推定式を得ている。

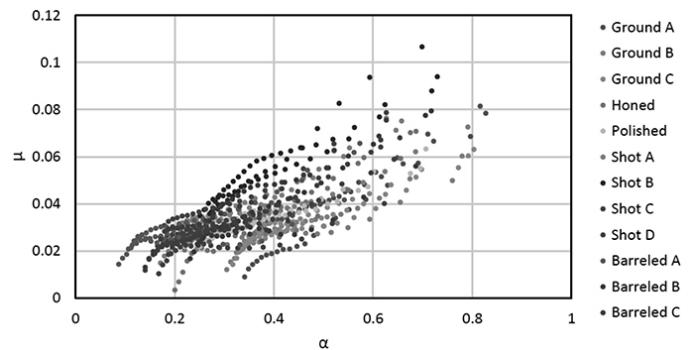


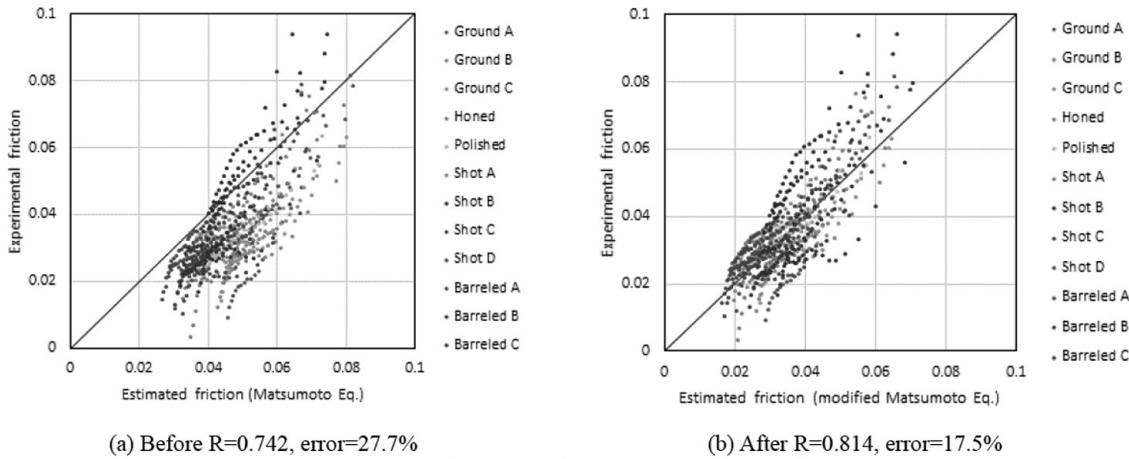
図12 各種仕上げ工法で製作された歯車の摩擦特性

<修正松本式>

摩擦に影響を及ぼすと考えられる Rz 以外の粗さパラメータを用いて、既存の松本式に補正係数をかけることで、仕上げ工法に依存する歯面摩擦係数を包括的に取り扱える修正松本式（式（2））の構築を試みる。ここでは、歯面摩擦係数に影響する因子として三つの粗さパラメータ Rsk , Str , Std を選定した。

$$\begin{cases} f = f_L \alpha' + f_s (1 - \alpha') \\ \alpha' = 0.5 \log D' \left(1 - \frac{Rsk}{K_{Rsk}} \right) \\ D' = \frac{Rz_1 + Rz_2}{h'} \\ h' = h \left\{ 1 - \frac{(1 - Str)}{K_{Str}} \right\} \left(1 - \frac{Std}{K_{Std}} \right) \end{cases} \quad (2)$$

式中、 K_{Rsk} , K_{Str} , K_{Std} は、粗さパラメータ Rsk , Str , Std に掛かる係数であり、摩擦

図13 歯面摩擦係数の推定値と実験値の比較 ($K_{Rsk} = 29$, $K_{Str} = -0.5$, $K_{Std} = 50$)

係数の実験値と予測値の相関係数が最大化するように最適問題を解くことで算出する。摩擦係数の推定値と実験値を比較した結果を図13に示す。図中、左グラフは修正前のもの、右グラフは修正後のものである。図より、修正前の松本式では、推定値と実験値の相関係数 $R=0.742$ 、誤差27.7%に対して、修正後の松本式(2)では相関係数 $R=0.814$ 、誤差17.5%に向かっている。

本研究の結果、異なる仕上げ工法で製作された歯車間では、摩擦特性に差異のあることを確認した。また、最大高さ粗さ Rz 以外の三つの表面性状パラメータ Rsk , Str , Std を用いて松本式を修正することで、摩擦係数の推定値と実験値の相関係数を改善できる可能性のあることを示した。

4.3 接触部の油膜状態解析→接触部の境界～混合潤滑領域の検証（九州工業大学・西川宏志研究室）

潤滑部の摩擦に関する知見を深めることは、トライボロジー分野でも極めて重要である。先の二つの研究では、すべり面のテクスチャに焦点を当て、摩擦係数に及ぼす効果を定量的に明らかにするとともに、積極的にその効果を取り入れるための方策を与えてくれ

ている。本研究では「自動車駆動系における動力伝達機械要素は、潤滑下で運転され、流体潤滑状態と境界潤滑状態を同時に有する混合潤滑領域で運転されている。機械要素では速度や荷重など運転状態、表面微細形状によって摩擦係数の変化が生じる。接触面の摩擦コントロールは重要であるがその指針は未確立である」との背景に、荷重や速度接触面のマクロ的形状からナノレベルまでの微細形状、潤滑油性状などから摩擦係数を予測できるモデルを確立することを最終目的として、油膜挙動の直接観察によって油膜状態を解析し、表面微細形状の異なる試験片の摩擦特性を調査し、摩擦係数推定式の検証を行っている。その成果は本宮らとも共有し、摩擦科学の基礎・基盤からTRAMIのトライボロジー研究を支えている。

本研究の基本は、潤滑状態の可視化と、それに対応した摩擦係数の測定であり、図14の装置を駆使して研究を進めた。その主たる成果の一部を以下に示す。

- 精度の高い摩擦係数推定式確立：固体潤滑の終盤と、流体潤滑領域の始まりを繋ぐ混合潤滑領域での摩擦係数と引き込み速度(Entrainment speed)との関係に関して、実験結果とよく一致する（図15参照）松

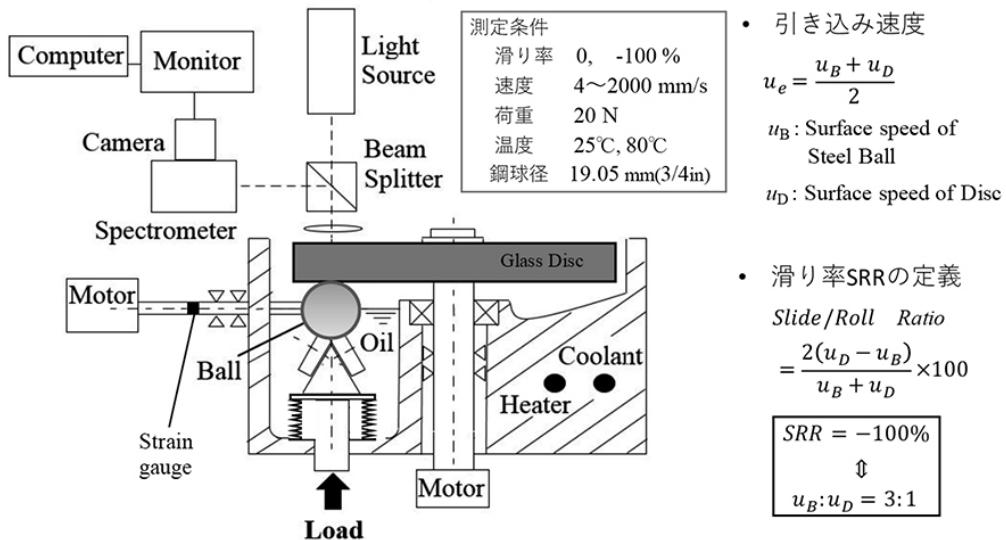


図14 実験装置 (PCS EDH)

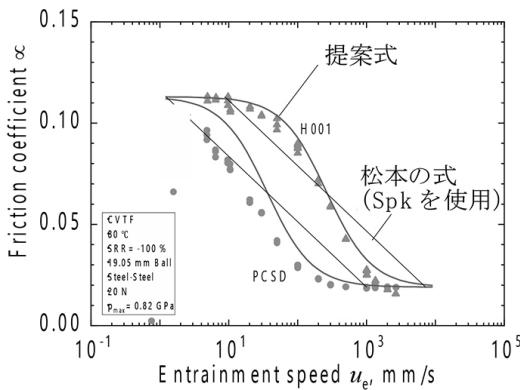


図15 提案した摩擦推定式の適用

本式の修正式 (式 (3)) を提案.

$$f = \frac{f_s - f_L}{2} \tanh(\alpha) + \frac{f_s + f_L}{2}$$

$$\alpha = -3\{1 - \log(0.75D)\} \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

$$D = \frac{S_{pk_1} + S_{pk_2}}{h_0}$$

S_{pk} : ベアリングカーブから求まる面粗さ
パラメータ, h_0 : 2面間の弾性流体潤滑最小油膜厚さ

②両表面粗さ摩擦: 研削面などでは、両表面の粗さを S_{pk} の和で評価する提案式と実測が近くなる. 図16は両表面にレーザー

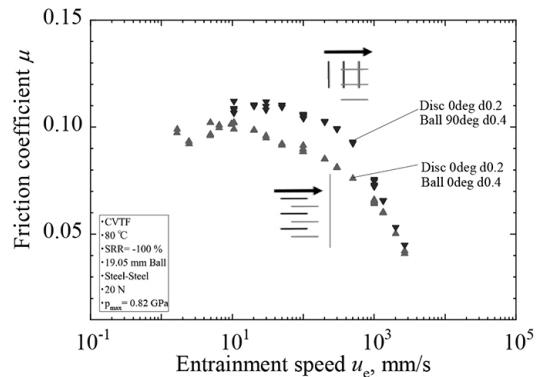


図16 両表面に溝がある場合

加工溝がある場合を示す. 溝幅と間隔が 15 μm, 深さが 0.2 μm と 0.4 μm で運動方向溝の組合せと運動方向溝と直角方向溝の組合せの結果である. 運動方向直角溝を有する場合の摩擦が大きくなる. 運動方向に溝がある場合は, 平坦部 (溝外) に形成された油膜が移動しても維持されるためと考えられる. すなわち, 表面微細形状による摩擦コントロールのためには推定式の改良が必要であることがわかった.

③摩擦に及ぼすCVTエレメントの形状の影響の解明: CVTエレメントのブーリ接觸面や

歯車歯面接触時の閉じ込め油膜の影響を調査するため、鋼球表面に深さやピッチが異なる溝をレーザー加工で形成し、ガラス面へ垂直衝突させた結果を写真3に示す。溝ピッチ100 μm以上では平滑面と同等の閉じ込め膜厚が形成されることが確認できた。

九州工業大学の西川研究室では、上記の研究を発展させ、2020年度から「接触部の境界～混合潤滑領域の検証」を進めた。本研究では、摺動面の形状、表面粗さ、荷重や速度、潤滑油特性などから摩擦係数を予測できるモデルの確立を最終目的とし、摩擦計測、表面性状、油膜挙動の直接観察などによって接触部の状態を解析し、2020年度提案摩擦推定式の拡張、粗さの方向性の影響等の調査を実施した。その成果を以下に示す。

- ①精緻な摩擦推定式の提案：新摩擦推定式では最大で12%の誤差にとどまり（図17参照）、両表面粗さ条件においても使用可能であることが確認した。
- ②図18に示すように表面粗さの方向性の影響については研磨面、複列溝、正弦波形状断面に対する速度と方向性を明らかにした。
- ③弾性変形の影響：図19に正弦波状断面となるよう表面を加工した鋼球を用いた実験結果を示す。図中の干渉像はガラスに対

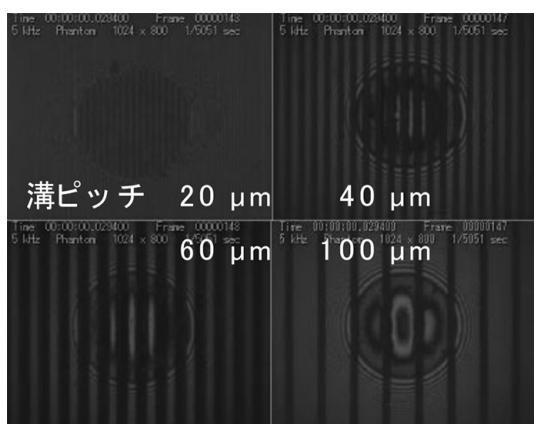


写真3 閉じ込め膜厚への溝ピッチの影響

して接触させて得た。荷重が大きい50 Nでは弾性変形のため接触域が一体となり、5 Nでは三つに分離した接触域となる。このため50 Nでは方向性の影響がほとんどないが、5 Nでは速度低下とともに方向性による差が拡大し、弾性変の考慮が重要であることがわかった。

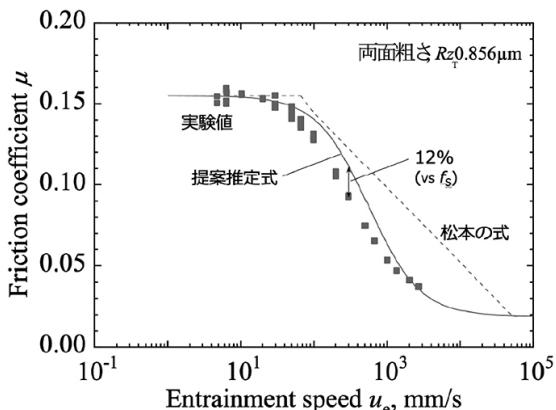


図17 摩擦推定式の両表面粗さへの適用



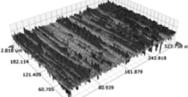
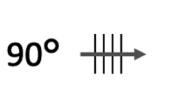
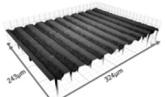
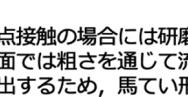
速度 膜厚	低速域 薄膜 (数10nm)	中速域 (粗さの1/10)	高速域 厚膜 (粗さと同じオーダー、 接触・非接触の境界)
研磨面	 <p>90° </p> <p>0°では山部が連続接触するため反応膜が破壊され境界潤滑摩擦が大</p>	 <p>90° </p> <p>流体圧力大 →厚膜化 →摩擦低下</p>	 <p>0° </p> <p>サイドリークを防ぎ 厚膜化→摩擦低下</p>
複列溝 正弦波状断面	 <p>0° </p> <p>油膜が維持され低摩擦 ただし、ある程度の接触 幅が確保され、その面が 十分滑らかな必要あり</p>	 <p>点接触の場合には研磨 面では粗さを通じて流 出するため、馬てい形 薄膜部で薄膜化 →接触→摩擦大</p>	

図18 低摩擦となる方向性、速度等の関係

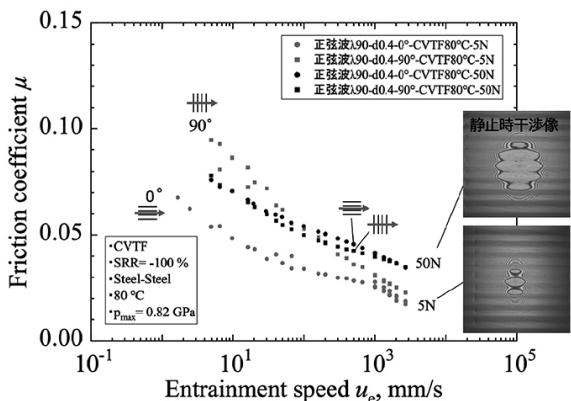


図19 摩擦に及ぼす弾性変形の影響

5. 今後の TRAMI における トライボロジー研究

50,000 rpm超ともなる高回転では、解決すべき機械的課題も少なくない。モーター本体の軸受のみならず、乗用車では車軸の回転数は~2,000 rpm程度となることから、効率の高い減速系が求められる。その減速比は30:1程度が見込まれ、それを実現できる減速機の開発もモーター本体と並んで重要な課題である。20,000 rpm程度であれば、すで

に実用化されている要素技術を使うことができる。しかし、入力回転数が50,000 rpm超で、1段目として仮に5:1の歯車減速を導入した場合でもピニオンがたとえ小径であったとしてもその潤滑が極めて難しいと想像される。また、歯車径にもよるが歯面の滑り速度は30 m/secを優に超えると考えられる。長期耐久性を担保しなければならない乗用車用の減速機では、従来のPVによるデータ整理法を援用することはできない。例えば、潤滑状態そのものが変わってしまう。滑り速度からすれば、50,000 rpm超では流体潤滑で、また、歯面の発熱も潤滑=摩擦係数、エネルギー損失に極めて大きな影響を及ぼすと想像される。振幅は小さくとも超高回転に伴う振動は周波数が高く、マイクロピッチングの加速やミクロなレベルでのキャビテーションも起こるかもしれない。すでに述べたが、超高速回転に伴う遠心力、気流等により潤滑油が歯面に供給されない事態も想像され、喫緊に解決すべき課題である。

表1には、超高速回転に伴いTRAMI内で想定し、優先的に解決すべきと考える課題が

示されている。TRAMIでは産-官-学連携で、今まさにこれらの課題に取り組みつつある。しかし、超高回転では従来にない現象が多く予見される。しかし、軽負荷の場合を除いて1トン以上を超える車両を駆動するほどの大きな動力で、かつ長期間にわたって品質を維持しなければならないパワートレインに関してトライボロジー分野のみならず、幅広い領域での知識・知見が欠乏している。そのため、新たな課題を解決する研究者、技術者の結集が重要である。自動車産業がわが国の根幹であり続けるために本目標を達成するためには、日本のトライボロジー関係者の協力が欠かせない。ぜひ、皆様方のTRAMIの活動に参加をお願いしたい。

<参考文献>

- 1) 山口 賢一:「TRAMI(Transmission Research Association for Mobility Innovation)の考えるカーボンニュートラルシナリオと現状」, 潤滑経済, No. 706 (2024) 18
- 2) Wakuda, M., Yamauchi, Y., Kanzaki, S., Yasuda, Y. : "Effect of surface texturing on friction reduction between ceramic and steel materials under lubricated sliding contact", Wear v. 254 n. 3-4(2003) pp.356-363
- 3) Kovalchenko, A., Ajayi, O., Erdemir, A., Fenske, G., Etsion, I. : "The effect of laser surface texturing on transitions in lubrication regimes during unidirectional sliding contact", Tribology International, v. 38 n. 3 (2005) pp.219-225
- 4) Etsion, I. : "State of the art in laser surface texturing", Journal of Tribology v. 127, n. 1 (2005) pp.248-253
- 5) Ping Lu, Robert J. K., Mark G. Gee, Ling Wang, Wilhelm Pfleger : "The use of anisotropic texturing for control of directional friction", Tribology International v. 113 (2017) pp.169-181