

博士論文

光技術を利用した表面加工による 新規クラッチ用摩擦材の開発と 開発効率化手法の構築

2016 年 6 月

光産業創成大学院大学
光産業創成科

八木 慎太郎

博士論文要旨

八木慎太郎

光技術を利用した表面加工による新規クラッチ用摩擦材の開発と 開発効率化手法の構築

本論文は、自動車用クラッチメーカーに所属する筆者が、クラッチ市場におけるシェア拡大と競争力の獲得を目標とした、光技術を応用した新しいクラッチ用ペーパー摩擦材の開発と、技術開発を効率化する手法の構築への取り組みについて論じている。

自動車産業を取り巻く情勢の変化の中で、クラッチメーカーにとって、自動車用クラッチ市場におけるシェア拡大、および将来に対する競争力を獲得することは至上命題である。この命題に対し、市場調査の結果から本論文の目的(1)として、シェアの拡大に寄与し、競争力の源となる自動車向け湿式クラッチ用ペーパー摩擦材の新技術の開発と、目的(2)として、環境の変化に素早く対応し、技術開発を推進するための技術開発の効率化手法の構築を設定した。

目的(1)の技術開発においては、レーザー加工技術により湿式ペーパー摩擦材の表面を加工することで、これまでにない表面性状の実現を試みた。適切なレーザー種類、加工条件を設定することで、任意の形状の表面テクスチャを形成できることがわかり、テクスチャの形成により動摩擦係数が変化することを示した。すなわち、表面テクスチャの形状の制御により、動摩擦係数を高い自由度で制御できることを初めて明らかにした。本方法を応用することで、これまでにない材料の配合や、ペーパーの3次元構造が実現できるようになる。よって、従来の材料及び構造では実現できなかった新しい特性を持ったペーパー摩擦材の開発が可能になり、摩擦係数向上によるクラッチの軽量コンパクト化（省燃費）と良好な変速フィーリング（スムーズなギヤの切り替え）の両立が可能となる。このような新たな特性を持ったペーパー摩擦材を実現することにより、クラッチ市場における競争力の獲得が期待できる。

目的(2)の技術開発効率化の手法構築においては、プロダクト・ジェネアロジ（製品系譜学）を用いて湿式クラッチ用摩擦材の開発の中の暗黙知の発掘を試みた。プロダクト・ジェネアロジは系譜学の手法を製品開発に適用し、ある製品の開発の歴史を辿ることで、ポイントとなった製品、技術を抽出する方法である。その歴史を辿るための情

報収集の手法として、ナラティブ・インタビューを採用した。これは、インタビューにナラティブ（物語／語り）を語ってもらうことで、その視点をありのままに把握し、予め設定された質問では得られない情報を得ることが可能となることから、データやマニュアルで表現し難い知識の抽出に有効な手法である。プロダクト・ジェネアロジーにより、摩擦材の形式化されていない知識を抽出し、系統的に整理することができた。さらに、系譜図を基に、担当開発者にナラティブ・インタビューを行うことで、効率的な情報収集が可能になることが明らかになった。開発型製造業においてその技術的蓄積を競争力としていくためには、過去の開発の中に暗黙知として埋没した知識を発掘、蓄積していくシステムが求められる。上記の手法を用いて発掘した知識を活用することで、今後の開発の効率化につながることを示した。

これらを踏まえて、将来に対する競争力を獲得するための考え方を技術及び開発手法の点から提示した。技術においては、自社技術であるペーパー摩擦材に外部の光（レーザー）技術の導入によって新技術の開発に成功し、他分野の技術との融合によりブレークスルーの起点が創られることを示した。開発手法においては、過去の暗黙知の発掘手法を応用し、現在進行形で暗黙知の表出化手法を構築することの必要性を示した。さらにはそれらの知識を活用し、新たな知識創造へつなげるシステムの構築、また、新たな知識創造を促進する独自の組織文化を育むことが、競争力の獲得し得る技術開発につながることも示した。

以上のように、本研究における取り組みから、自動車向け湿式クラッチ用ペーパー摩擦材の新技術の開発、技術開発の効率向上のための手法の構築が達成され、それらを基に自動車用クラッチ市場におけるシェア拡大、および将来に対する競争力の獲得という目標に対する考え方を提示することができた。

さらには、新事業を創成し、目標を実現していくために、レーザーを用いた摩擦材表面加工技術の量産展開、プロダクト・ジェネアロジーを用いた暗黙知の発掘手法の社内展開、および光技術のその他用途への活用案を提案した。

最後に、これらの研究成果を活用し、発展の可能性が高い光技術を今後も積極的に取り入れ、競争力を持った新事業を開発していくことで、今後の自動車部品産業の発展に寄与する展望を示した。光技術を利用した新技術開発とその開発効率化手法の構築は、競争力獲得の手法提案の観点から光産業創成に貢献するものと考えられる。

Abstract

Shintaro Yagi

Development of a new friction material for automobile clutches via surface treatment using optical technology and a technique for promoting technical development

The competitive and environmental situation of the global automotive industry keeps fluctuating; therefore, automobile clutch manufacturers who supply various automobile parts are highly recommended to expand the market share of automobile clutches and improve their competitiveness. Based on market research, it was observed that development of a new technology and methods to promote the efficiency of technical development were effective levers to improve the market share of the automobile clutches, and thereby improve competitiveness. This thesis aims to discuss the following: (1) The development of a new paper-based friction material for manufacturing automobile clutches using optical technology and (2) the development of a technique for promoting technical development. These are important to expand the market share of automobile clutches and improve their competitiveness. A subject chosen for this thesis is ‘wet clutch used in passenger cars for automatic transmissions’ which has a large global market.

To address the first aim, the surface of the paper-based friction material used for the wet clutch was treated using laser processing technology. This technology enabled the creation of a microtexture pattern comprising grooves, which was successfully processed on the surface of the paper-based friction material. This was achieved following the appropriate laser processing conditions. The dynamic friction coefficient of the paper-based friction material was particularly improved by the microtexture pattern formed on this surface. This result indicates for the first time that the formation of microtexture patterns on surfaces of paper-based friction materials can flexibly control dynamic friction coefficients. Furthermore, control of dynamic friction coefficients by microtexture patterns enables development of new paper-based friction materials having new compositions and structures. This achievement is expected to increase the competition in the automobile clutch market.

To address the second aim, we attempted to discover the tacit knowledge of

paper-based friction materials that has remained unknown in the history of their development, by using the product genealogy. Product genealogy is a method which applies a genealogical science-based technique for product development. Tracing back to the history of a product's development, it is possible to understand the flow of the previous developments and the newly developed products and the technology which became its part. Narrative interview is used for gathering information in tracing back the history of products as the interview method. By using a narrative interview, it is possible to grasp the opinions of an interviewee more precisely and honestly as compared with a structured interview wherein the narratives are used as data. Detailed technical knowledge of paper-based friction materials, which was not formalized, was discovered using product genealogy. This information was systematically organized. It was indicated that using the narrative interview based on a genealogical view, it is possible to accurately and efficiently collect the experience and memories of developers. The validity of these two methods to discover the tacit knowledge which remained unknown in the history of a product's development was confirmed. The discovery of tacit knowledge and systematic arrangement is expected to promote more efficient development. Based on the results, it is proposed that these methods will ensure the future competitiveness of automobile clutch manufacturers.

With respect to the technical aspects, a new technology was developed by processing the paper-based friction material using the laser processing technology. This technique originates from a different technology field than that for the paper-based friction material. Therefore, the technical breakthrough was achieved by combining an existing technology with a technology from a different field. With respect to the methods for promoting development efficiency, it is necessary to design a method to continually express and gather tacit knowledge from past product developments. It was found that the construction of a system to utilize the discovered knowledge contributes to the creation of a new knowledge which then leads to continual technical development for achieving improved competitiveness.

Based on these research results, the objectives of this thesis were achieved and a concept for the market share expansion of automobile clutches and competition improvement was suggested.

Further, developments in optical technology and its application to new technical developments are expected in the near future. Implementation of this optical technology should contribute in the market share expansion of the automotive and automobile parts industry. In addition, the development of a new paper-based friction material for automobile clutches using optical technology and the design of a technique for promoting technical development is expected to contribute to increase competitiveness and create a new photonics industry in future.

目次

第1章 序論.....	1
1.1 本論文の背景.....	1
1.2 本論文の目的.....	3
1.3 研究対象部材：湿式クラッチ用ペーパー摩擦材.....	4
1.4 本論文の構成.....	5
第2章 自動車およびクラッチ市場	9
2.1 はじめに.....	9
2.2 自動車市場とクラッチ市場の推移.....	9
2.3 部品調達のグローバル化	15
2.4 クラッチメーカーの市場戦略について	17
第3章 自動車向湿式クラッチ用ペーパー摩擦材の技術	21
3.1 はじめに.....	21
3.2 自動車の発展.....	21
3.2.1 内燃機関と変速機.....	23
3.2.2 変速機の種類と機構.....	24
3.3 湿式クラッチ用ペーパー摩擦材	26
3.3.1 湿式クラッチの構造.....	27
3.3.2 ペーパー摩擦材の変遷と技術	27
3.3.3 ペーパー摩擦材の要求性能.....	30
3.4 まとめ.....	33
第4章 レーザーを用いたペーパー摩擦材の表面加工手法の開発.....	35
4.1 はじめに.....	35
4.2 摩擦と表面技術	35

4.3	ペーパー摩擦材と表面技術.....	37
4.4	レーザーを用いた摩擦材加工.....	40
4.4.1	レーザープロセッシング.....	40
4.4.2	レーザーの分類（媒質、波長、パルス幅）	41
4.4.3	ペーパー摩擦材のレーザー加工.....	44
4.5	まとめ.....	48
第 5 章	新規フリクションディスク開発のためのレーザーを用いた摩擦材表面加工	53
5.1	はじめに.....	53
5.2	フリクションディスクへのテクスチャ加工.....	53
5.3	摩擦特性試験.....	55
5.3.1	試験概要	55
5.3.2	試験条件、試験サンプル.....	57
5.3.3	試験結果	60
5.3.4	考察.....	65
5.4	まとめ.....	67
第 6 章	プロダクト・ジェネアロジーを用いた暗黙知の発掘	71
6.1	はじめに.....	71
6.1.1	暗黙知の定義.....	71
6.2	ナレッジマネジメントの先行研究.....	72
6.3	調査対象としての暗黙知	74
6.4	手法	75
6.4.1	プロダクト・ジェネアロジー	75
6.4.2	ナラティブ・インタビュー.....	76
6.5	調査概要.....	77
6.6	結果	78
6.6.1	湿式摩擦材開発の系譜	78
6.6.2	各摩擦材における開発ナラティブ	80

6.7 分析と考察	84
6.8 まとめ.....	86
第 7 章 本研究の発展性についての考察.....	89
7.1 はじめに	89
7.2 新技術の発展性	90
7.3 開発手法の発展性	91
7.4 将来に対する競争力の獲得.....	93
第 8 章 結論.....	97
8.1 本論文のまとめ	97
8.2 今後の事業開発の方向性	100

第1章 序論

1.1 本論文の背景

輸送機器産業は日本における主要製造業の製造品出荷額の約2割を占める（図1-1-1 参照）[1]。その中心となり、出荷額の大半を占める自動車産業では、貿易黒字額においても日本の産業をけん引し、関連産業において多くの雇用を創出する。さらには、研究開発により新たなイノベーションや技術を生み出すことで、経済成長において大きな役割を果たし、他の産業へも高い波及効果を有する（図1-1-2 参照）[2]。

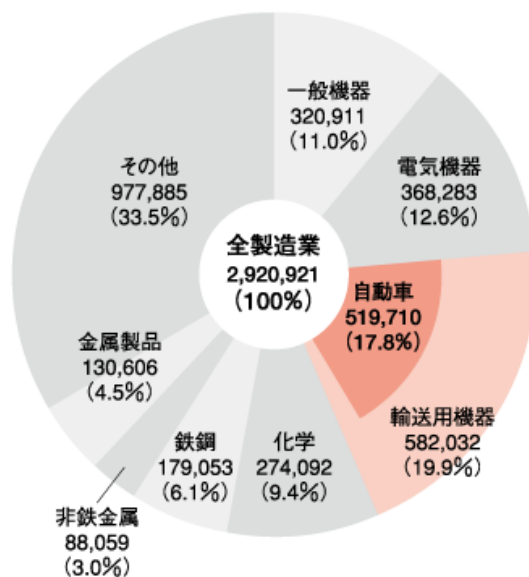
日本の自動車産業の特徴として、約3万点にも及ぶ自動車の構成部品のおよそ7割が外部のサプライヤー（部品メーカー）によって生産され、完成車メーカーに納入する分業体制をひいていることがある。特に、一次サプライヤーとなる部品メーカーでは自動車の設計段階から開発に参加し、完成車メーカーと技術の摺合せを行いながら、得意分野に特化した独自の研究開発により技術を進化させ、高性能、低コストの機能部品を完成車メーカーに供給する[3]。

しかしながら、2008年のリーマンショックおよびそれに端を発した金融危機と世界同時不況によって、世界の自動車産業における競争環境は大きく変化した[4]。国内の完成車メーカーにおいても、先進国における自動車販売台数の回復の遅れと市場の縮小傾向や、中国やインド等の新興国における市場の急激な拡大とローカル（現地）メーカーの競争力の高まりなど、市場の構造変化が戦略に大きな影響をもたらしている。

一方で、世界的な環境問題を背景とした省エネルギー、CO₂削減の要求が自動車産業にも大きく影響する。完成車メーカーにおいては環境負荷低減の取り組みを本格化させ、すでに十分に普及したハイブリッド車（HEV）をはじめ、電気自動車（EV）、プラグインハイブリッド車（PHEV）、燃料電池車（FCV）を含む「次世代自動車」の開発を強力に推進している。

このような完成車メーカーの市場戦略、環境戦略の変化が関連する自動車部品メーカーの戦略にも大きな影響を及ぼす。具体的には完成車メーカーのグローバルな生産ネットワークの再編により自動車部品にも海外生産が求められ、部品メーカーに現地メーカーを含む世界規模でのコスト競争を引き起こす。また、モーターで駆動する次世代自動車においては、駆動系部品を中心に自動車の構成材料が大きく変化するとともに、今

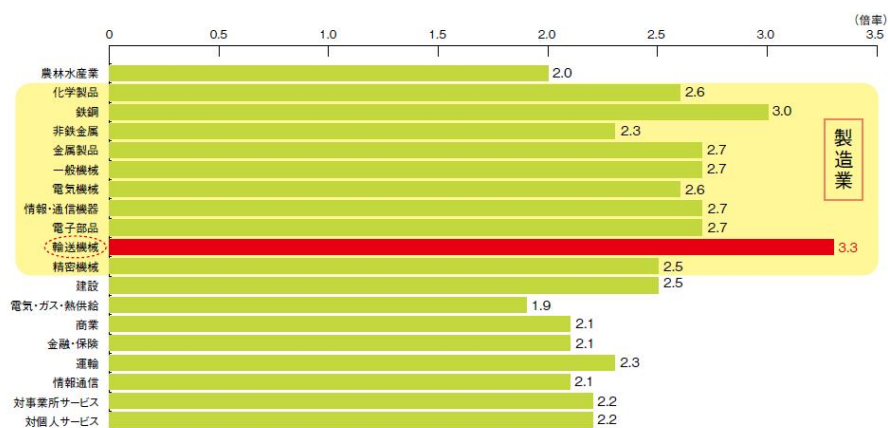
単位:億円



自動車製造業製造品出荷額等の内訳

・自動車製造業（二輪車を含む）	203,394
・自動車車体・付随車製造業	5,271
・自動車部分品・付属品製造業	311,045

図 1-1-1 主要製造業の製造品出荷額等（2013 年）
 （出典：一般社団法人日本自動車工業会（JAMA）HP）
http://www.jama.or.jp/industry/industry/industry_3g1.html



備考：1. 当該部門の国内需要が1単位増える場合に、経済全体の生産額がどの程度増えるかを示す。生産増加額の国内需要増加額に対する倍率。
 2. 算出方法は付注1-1-2参照。
 資料：平成17年産業連関表（34部門）より作成

図 1-1-2 主な産業別の生産波及効果倍率[2]
 （出典：2013 年版ものづくり白書）

http://www.meti.go.jp/report/whitepaper/mono/2013/pdf/honbun01_01_00.pdf

まで以上の軽量化の必要性から使用する原材料にも変化が生じ、上流から下流まで多くの部品メーカーが影響を受けると考えられる[5]。

現在、自動車部品メーカーにはこれらの自動車産業を取り巻く情勢の変化に対応し、既存のシェアを維持するとともに、将来的な競争力を確保するための取り組みを強化する必要性が生じている。

筆者は所属企業において自動車用クラッチの研究開発を業務としている。所属企業はクラッチの摺動部材である摩擦材の開発から、組み立てまで一貫生産するクラッチメーカーとして、2 輪車用クラッチでは世界トップクラスのシェアを有する。さらに、自動車（4 輪車）用クラッチ分野においても世界展開し、多くの完成車メーカーやトランスミッションメーカーに製品を納入している。

前述のように、自動車産業全体の変化は、自動車部品のサプライヤーである筆者の所属企業にも大きく影響する。特に自動車用クラッチ分野においては、世界的な競争の激化に加えて、次世代自動車へのシフトが進み、駆動系部品であるクラッチが不要になっていくことで、将来的な市場の縮小が予想される。それらの状況の変化に対応するためには、シェアを維持、拡大すること、将来的な競争力を持ち続けることが必要となる[6]。

1.2 本論文の目的

自動車部品サプライヤーであるクラッチメーカーにとって、自動車用クラッチ市場におけるシェア拡大、および将来に対する競争力を獲得することが至上命題であり、シェアの拡大に寄与し、競争力の源となる新技術の開発と、環境の変化に素早く対応し、技術開発を推進するための開発の効率化手法の構築が強く求められる。また、本研究における「競争力」とは顧客が満足する製品を開発する技術と技術革新を推進する組織の力を示す。

そこで、自動車用クラッチ市場におけるシェア拡大、および将来に対する競争力を獲得することを目標とした、本論文の目的として以下の 2 つを設定した。

- (1) 自動車向け湿式クラッチ用ペーパー摩擦材の新技術の開発
- (2) 技術開発の効率向上のための手法の構築

これらの目的の導出に至る、自動車市場及びクラッチ市場を取り巻く課題については、2 章にて論じる。

1.3 研究対象部材：湿式クラッチ用ペーパー摩擦材

本論文において研究対象となる、自動車向け湿式クラッチ用ペーパー摩擦材について説明する。湿式クラッチは自動変速機（オートマチックトランスミッション/AT）の中で、エンジンの動力をトランスミッションおよび駆動輪に伝達する役目をもつ。ペーパー摩擦材は、その湿式クラッチの摺動部材であり、性能を左右する最も重要な要素である。

図 1-3-1 に 2 輪車および自動車向けクラッチのラインナップと湿式クラッチ用ペーパー摩擦材を示す。各種クラッチにおいて種々の摩擦材が使用されており、2 輪車用多板クラッチ、自動車（AT）用多板クラッチ、ロックアップクラッチなどでペーパー摩擦材が用いられる。湿式クラッチおよびペーパー摩擦材の概要と特徴については 3 章にて説明する。



図 1-3-1 2 輪車および自動車用クラッチのラインナップと湿式ペーパー摩擦材
(出典：(株)エフ・シー・シー HP より引用、一部加筆)
<http://www.fcc-net.co.jp/>

1.4 本論文の構成

1章では、序論として本研究の背景及び目的、研究対象部材、および本論文の構成を述べる。

2章では、自動車およびトランスミッションの世界規模での市場について調査した結果から明になったクラッチの市場動向の推移およびクラッチの市場に存在する課題について述べる。また、完成車メーカーの生産、調達、販売戦略の変化が、サプライヤーである部品メーカーに及ぼす影響と、課題について議論し、本論文の目的(1)、(2)を設定した。

3章から5章においては、本論文の目的(1)の新技術の開発について論じる。

3章では、本論文における研究対象製品である自動車の自動変速機用湿式クラッチおよびペーパー摩擦材について、自動車と変速機の成り立ちから、湿式クラッチ用ペーパー摩擦材の技術的な背景について解説し、それらに対する課題を論じる。

4章では、ペーパー摩擦材の新規加工技術として、レーザーを用いた摩擦材表面への微細テクスチャの形成手法について記述する。トライボロジー特性に対する表面技術の位置づけとペーパー摩擦材の表面技術および、各種レーザーを用いてペーパー摩擦材加工を実施し、加工状態を観察することで、ペーパー摩擦材の加工に適したレーザーの選定と加工条件の設定を行った。

5章では、レーザーによりペーパー表面に微細なテクスチャを形成した、湿式クラッチ用のフリクションディスクを用いて、摩擦特性に与える効果について論じる。

6章では、本論文の目的(2)の開発の効率化手法の構築について論じる。プロダクト・ジェネアロジー（製品系譜学）の手法を用いて、ペーパー摩擦材の過去の開発に埋もれた暗黙知の発掘と、技術的なポイントの抽出を行うことで、開発の効率化手法としての有用性を検証した。

7章では、これまでに述べたレーザーによる摩擦材表面へのテクスチャの形成およびプロダクト・ジェネアロジーを用いた暗黙知の発掘の発展性について述べ、それらを基にした、継続的に競争力を獲得するための技術開発に向けた考察の結果について論じる。

8章では、本研究を総括し結論を述べるとともに、今後の課題と展開について述べる。

図 1-4-1 に本論文の構成を示す。

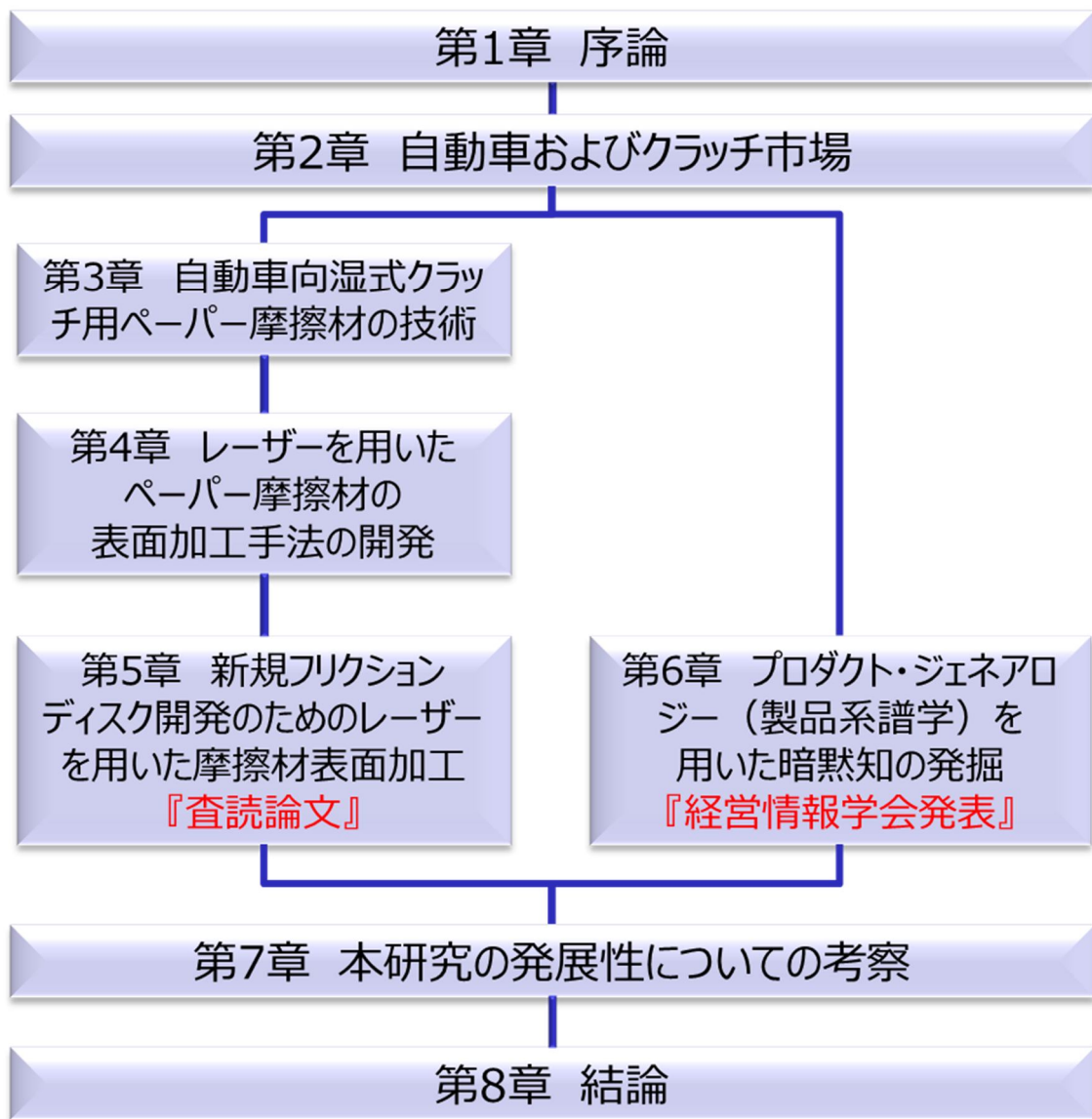


図 1-4-1 本論文の構成

第1章 参考文献

1. 一般社団法人日本自動車工業会（JAMA）HP,
http://www.jama.or.jp/industry/industry/industry_3g1.html（参照 2016.2.11）
2. 経済産業省,「2013 年版ものづくり白書」,
http://www.meti.go.jp/report/whitepaper/mono/2013/pdf/honbun01_01_00.pdf
（参照 2016.2.11）
3. 経済産業省,「2015 年版ものづくり白書」,
http://www.meti.go.jp/report/whitepaper/mono/2015/honbun_pdf/index.html
（参照 2016.2.11）
4. 経済産業省,「次世代自動車戦略 2010」,
<http://www.meti.go.jp/committee/summary/0004630/pdf/20100412002-3.pdf>（参
照 2016.2.11）
5. 丹下 英明,「自動車産業の構造変化と部品メーカーの対応 ―新興国低価格車市場
の出現によるサプライチェーン変化に中小モノづくり企業はどう対応すべきか―」,
日本政策金融公庫論集 第 13 号（2011 年 11 月）,
https://www.jfc.go.jp/n/findings/pdf/ronbun1111_03.pdf（参照 2016.2.11）
6. 西岡 正,「自動車産業を取り巻く環境変化と中小部品メーカー」,信金中金月報
2010 年 11 月, <http://www.scbri.jp/geppo6.htm>（参照 2016.2.11）

第2章 自動車およびクラッチ市場

2.1 はじめに

2章では、自動車市場及びクラッチ市場を取り巻く課題について論じる。これにより、1章にて本論文の目的として設定した、(1) 自動車向け湿式クラッチ用ペーパー摩擦材の新技术の開発、及び(2)技術開発の効率向上のための手法の構築、を設定した背景を示す。

2-2節では自動車およびトランスミッションの世界規模での市場について調査した結果から、将来におけるクラッチの市場動向の推移およびクラッチの市場に存在する課題について述べる。2-3節では自動車産業のグローバル化に伴う自動車メーカーの生産、調達、販売戦略の変化が、サプライヤーである部品メーカーに及ぼす影響と、求められる事について述べる。2-4節では上記の2点を基にして、クラッチメーカーが自動車用クラッチ市場におけるシェア拡大、および将来に対する競争力を獲得するという目標に向けて直面する課題を抽出し、本論文の目的となる今後の戦略および対応手法を導出する。

2.2 自動車市場とクラッチ市場の推移

今後の世界の自動車市場は、これまでにないペースで大きくなっていくことが予測される。その背景には新興国における人口の増加や所得の向上がある[1]。図2-2-1に示されるように、世界の人口は新興国を中心に増加し、2025年には81億人に達すると見込まれる。それと同時に、新興国では個人所得（国民一人当たりのGDP）も急速に拡大する見込みで、2025年以降2035年頃までに、中国を含む複数の新興国では、現在の先進国の水準に近づくとの予想もある。予想通りに推移するとすれば、世界の自動車市場は今後当面の間、過去に経験したことがない急速なペースで成長することが見込まれる。

現在、国内自動車メーカーの世界シェアは31%（2014年）となり国別では世界最大となっているが、中国、欧州諸国など十分なシェアを確保できていない国や、市場獲得に着手できていない地域も少なくない。一方で、今後の自動車市場の拡大の中、中国やインドをはじめとした新興国の重要性は一層高まっていくと考えられている[2]。

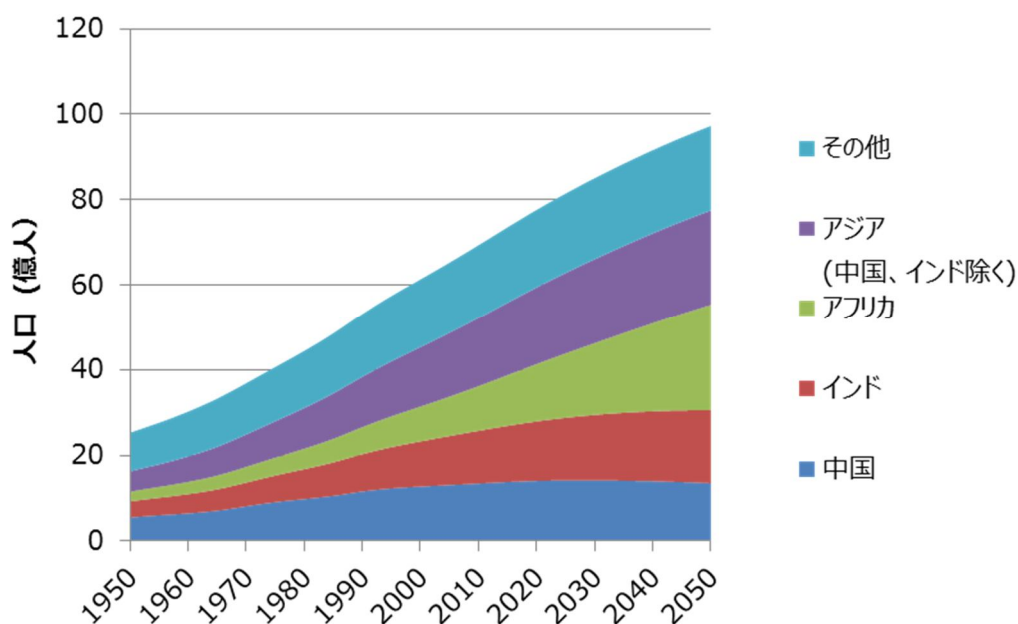


図 2-2-1 世界の人口推移

(出典：UN world population prospects The 2015 Revision 「Population by Age and Sex - Annual」をもとに作成)

図 2-2-2 に 2050 年までの世界市場における自動車のパワートレイン別の販売台数を示す。地球温暖化問題の解決に向け、CO₂ 排出量の約 15%を占める自動車において、CO₂ 排出量の大幅削減のための技術革新を含めた積極的な取組が求められる[2]。また、世界のエネルギー需要についても今後さらに増加していく見通しがある。資源獲得競争の激化や、地域紛争、経済情勢により資源価格は不安定になり、地域差はあるが燃費の向上、脱石油を求める圧力が強まっていくと考えられる。以上のように、環境・エネルギー規制が強化される見通しの中で、燃料電池車 (FCEV)、電気自動車 (EV) といった次世代自動車はその解決策として有効であることから、その販売台数は 2020 年では約 2%の予測から 2030 年では約 10%、2050 年には 30%以上となるまで増加していくことが予想されている。

しかしながら、逆説的には 2050 年においても、およそ 70%の自動車には内燃機関 (エンジン) が搭載されていることも示されている。エネルギー密度が高く取り扱いも容易なガソリン等を使用する内燃機関自動車が、特に新興国ではかわらず主流となり、ハイブリッド車 (HEV)、プラグインハイブリッド車 (PHEV) など多種多様なパワートレ

インがそれぞれの地域の特徴に応じて求められていくと考えられる。

ただし、近年の米国におけるシェール革命の影響などから、FCEVの普及率の予想が2010年の予想に対し大幅に下方修正されるなど、既存の内燃機関が主流となる時代がしばらく続くという予測もある[3]。内燃機関の動向は、政治的、環境的な世界情勢により刻々と変動していくことが考えられることから、自動車産業の動向には今後も予断を許さない[3]。

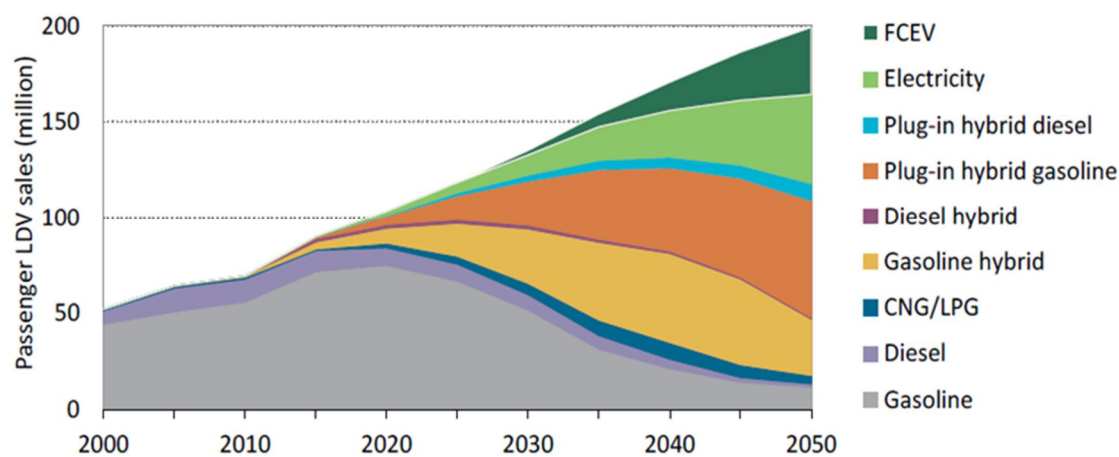


図 2-2-2 世界市場における自動車のパワートレイン別販売台数
(出典：自動車産業政策 2014、元データ：IEA/ETP (Energy Technology Perspectives) 2012)

一方で、クラッチの市場も自動車市場の変化とともに大きく変わっていくことが予測される。図 2-2-3(a)に IHS Automotive の予測した 2021 年までのパワートレイン別の世界自動車販売台数を、図 2-2-3(b)にトランスミッションの種類別の販売台数を示す[4]。クラッチはトランスミッションの中で動力の伝達および切り離しの役割を持つ部品であり、その販売台数は基本的にはトランスミッションの販売台数とリンクする。図 2-2-3(a)について、2021 年までの自動車の販売台数の推移は先述の図 2-2-2 と大きな差は見られない。(a)に示されるように自動車販売台数は右上がり増加していく。図 2-2-3(b)に示されるように、トランスミッションに関してはマニュアル・トランスミッション (MT)、無段階変速機 (CVT)、デュアルクラッチ・トランスミッション (DCT) が増加しているのに対して、従来型のオートマチック・トランスミッション (AT、ステップ AT) はほぼ横ばいとなっている。

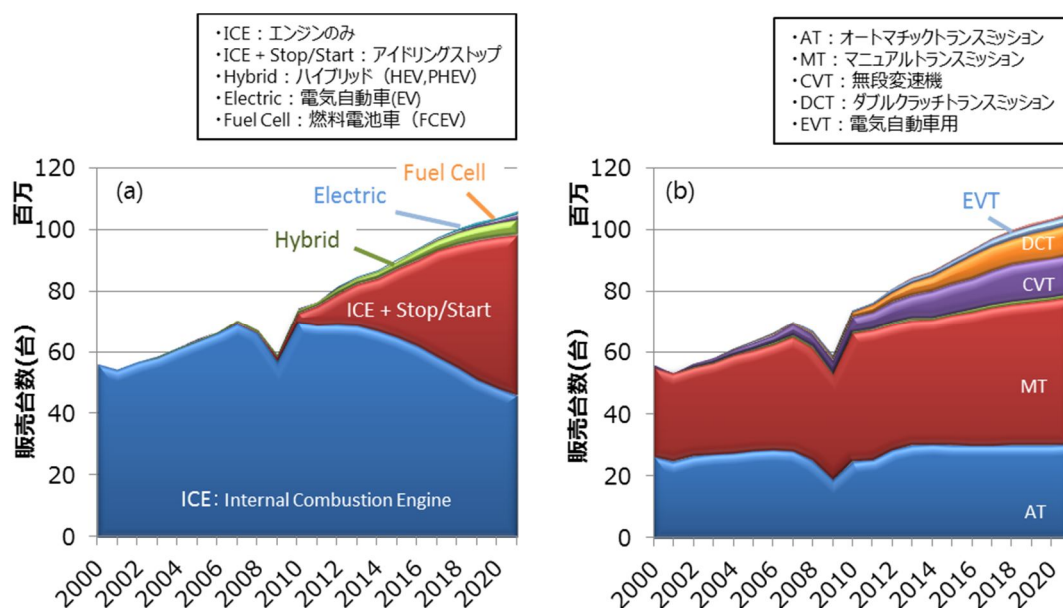


図 2-2-3 (a) パワートレイン別の世界自動車販売台数の推移
(b) トランスミッションの種類別の販売台数の推移
(出典：IHS Automotive「世界パワートレインディクショナリー（2013 年 8 月）」より作成)

図 2-2-4 にトランスミッション販売台数の地域別の推移を示す。

欧州では現状、MT が主流であり、今後は DCT の数が徐々に増加していく傾向がみられる。北米においては AT、CVT がほとんどを占め、その数は 2021 年まで大きく変化しない。

欧州、北米において自動車そのものの販売台数は微増であるのに対し、中国、アフリカをはじめとする新興国では 2021 まで自動車販売台数は右上がりに増加していく。新興国において主流となるトランスミッションは現状では MT がほとんどであり、今後も主流となっていく予想だが、中国では徐々に AT、CVT へと移り変わっていく動きもみられる。

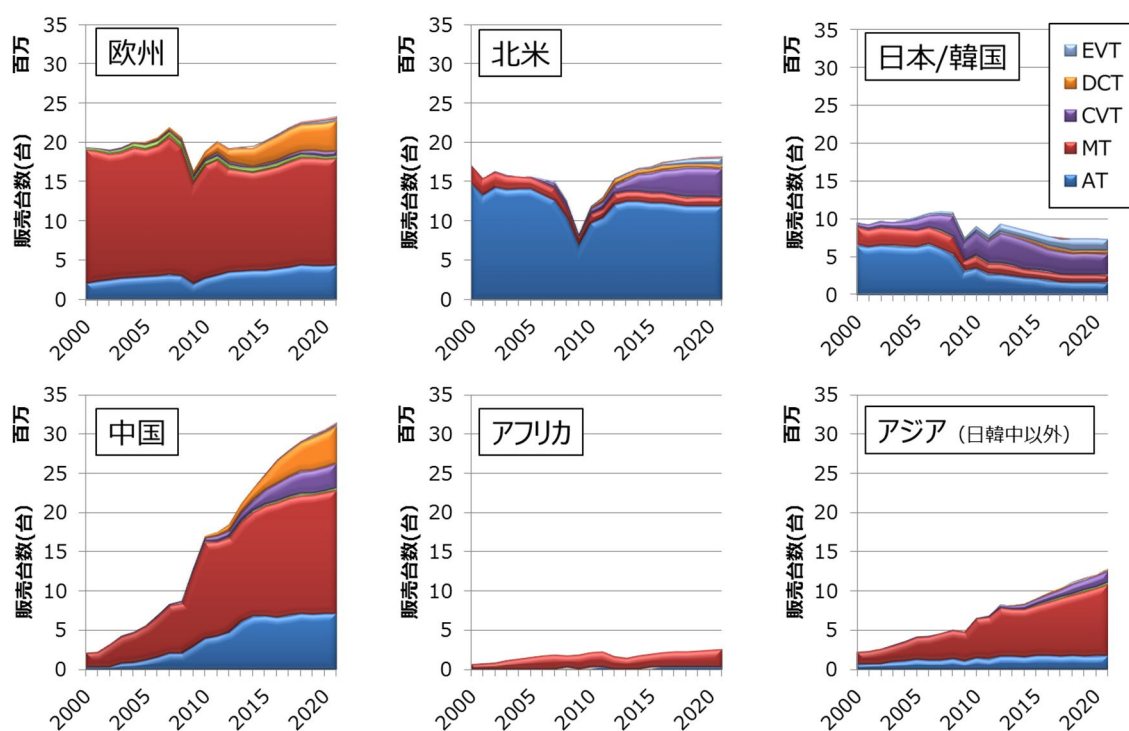


図 2-2-4 トランスミッション販売台数の地域別推移
(出典：IHS Automotive「世界パワートレインディクショナリー（2013 年 8 月）」より作成)

日本の現状では自動変速機（AT、CVT）が主流であり CVT の普及率が高い。また将来においてはその他の地域と比べて次世代自動車用のトランスミッションの増加が大きい。反面、自動車販売台数の総数は減少し、市場は縮小していく予想となっている。

このように、地域の違いによって、主流となるトランスミッションの種類は異なり、特に欧州と北米においてその差異は顕著に見られる。その要因は、地域ごとの「運転する」ということに対する考え方の違いによるものと考えられている。北米、特に米国では、ドライバーは運転中に車内で快適に過ごすことを好み、クラッチ操作やギアチェンジなどの細かい操作を自ら行いたいという欲求が小さいことから、変速機も自動変速機（AT および CVT）が望まれる。しかし、欧州ではモータースポーツを軸に自動車が発展したことも背景にあり、ドライバーの多くは自ら自動車をコントロールすることを好み、自動車を操作することが運転の楽しみの一つと考える。そのため、MT や、変速感が MT に近い DCT を好むと考えられ、これらの傾向は今後も大きく変化しないと考えられる[5]。

一方で、新興国（中国、アジア（日韓除く）、アフリカ）において現状 MT が主流となっているのは、コストの安さとメンテナンスの容易さによるところが大きいと考えられる。将来的には GDP の増加とともに AT および CVT に移り変わっていくことが予測され、今後の市場の拡大が期待される。

以上のように、自動車市場が今後大きく変動し、トランスミッション市場もその影響を受ける中で、クラッチメーカーが既存シェアの維持およびシェア拡大するためには、それぞれの地域の特徴を考慮した戦略が求められる。

2.3 部品調達のグローバル化

前節でも述べたように、自動車産業およびその市場は大きな変化を示している[6]。

その中で日本の自動車メーカーの生産体制のグローバル化は進行している[7]。図 2-3-1 に国内自動車メーカーの海外生産台数を示す。ここから、1990 年では 326 万台であった国内メーカーの自動車海外生産台数は 2014 年には 1747 万台に増加している。これらの動きには中国やインドをはじめとする新興国の自動車市場の拡大による影響が大きく、また近年における急激な円安の進展がその動きをより加速させたと考えられる。

新興国市場において小型の低価格車のニーズが拡大しており、国内自動車メーカー各社が新興国向けの低価格車を開発し市場に投入している。新興国で低価格車を販売するためにはこれまで以上に低コストな生産体制を構築し、グローバルな価格競争に対応しなければならない。そのため、日本の完成車メーカーは新興国に生産拠点を設立し、海外展開を加速している。

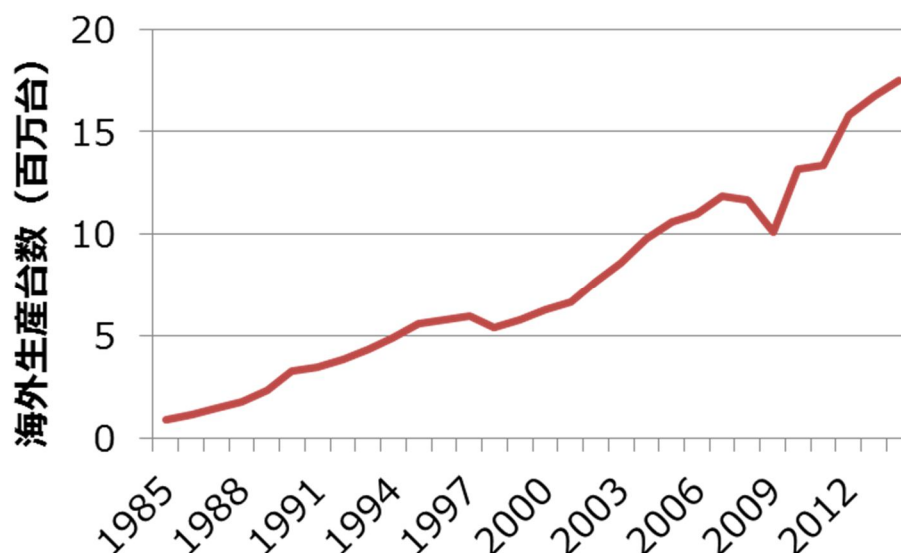


図 2-3-1 国内自動車メーカーの海外生産台数

(出典：自動車工業会 HP をもとに作成)

http://www.jama.or.jp/world/foreign_prdct/foreign_prdct_2t1.html

一方で、完成車メーカーの海外展開の動きが自動車部品メーカーの戦略にも影響を及ぼす。図 2-3-2 に国内自動車部品メーカーの海外法人数の推移を示す。図より生産コストの更なる低減を実現するため、部品メーカーも海外展開を推進し、海外生産比率は年々増加している。

海外生産の拡大と同時に、完成車メーカーの調達戦略にも変化が生じている。国内生産、輸出を中心としていた生産システムにおいては、部品調達は国内系列の部品メーカーを中心に行っており、海外進出後もこれまでは主に現地に進出した日系メーカーからの調達する傾向があった。しかし、新興国市場における低コスト化の推進のため、現地メーカーからの部品調達が多くなり調達のグローバル化が進む。したがって、部品メーカーにおいても現地メーカーとの競争は激しくなり、その中で部品提供を維持していくための戦略の構築、対応手法が求められる。

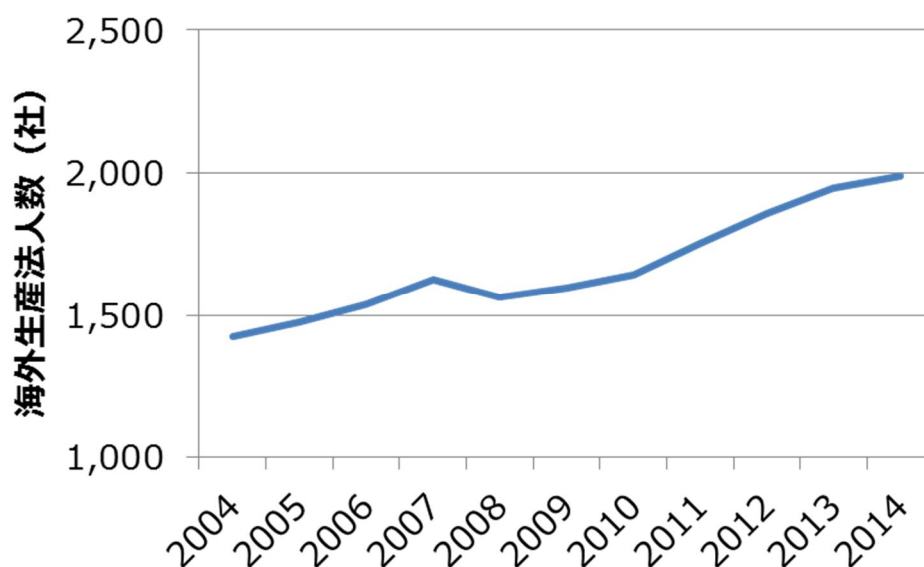


図 2-3-2 国内自動車部品メーカーの海外法人数の推移
(出典：自動車部品工業会「海外事業概要調査報告書」をもとに作成)

2.4 クラッチメーカーの市場戦略について

前節までに述べたように、今後の世界において自動車およびトランスミッションを取り巻く環境は大きく変化していくと予想される。また、自動車、自動車部品の生産および調達のグローバル化の動きによって、部品メーカーに対して国際的なコスト競争の激化が引き起こされる可能性を秘めている。

自動車およびトランスミッションの市場動向の変化、グローバル調達化の動きを受けて、クラッチメーカーが自動車用クラッチ市場におけるシェア拡大、および将来に対する競争力を獲得するという目標に向けて直面する課題として以下を抽出することができる。

◎自動車用クラッチ市場における世界シェア拡大に対する課題

~2030 年代	<p>① AT の生産量が横ばい、新システムのトランスミッションの増加</p> <ul style="list-style-type: none">・世界全体における自動車生産台数は増加。・AT および CVT の生産数は大きな変化無し。・既存シェアの維持と同時に、新興国市場における AT 市場の拡大。・各メーカー間でシェアの奪い合い。・新システムのトランスミッションに対応したクラッチの開発要求。 <p>② 海外生産の拡大と競争激化</p> <ul style="list-style-type: none">・完成車メーカーのグローバル調達化を受け、国際的な競争が激化。・過剰なコスト競争が進むことによる収益性の低下。・既存顧客以外への拡販による、開発機種増と開発工数の増加。
2030 年代以降	<p>③ 次世代自動車の拡大とトランスミッションの衰退</p> <ul style="list-style-type: none">・内燃機関の減少によるクラッチ市場の縮小。

上記の課題に対するクラッチメーカーがとるべき対応戦略として、以下のことが挙げられる。

- (1)自動車向け湿式クラッチ用ペーパー摩擦材の新技術の開発
- (2)技術開発効率向上のための手法の構築

以上の 2 点を、本論文の目的として設定し、(1)については、シェア拡大に寄与し、競争力の源となる新技術として、光技術を用いてペーパー摩擦材の表面に微細なテクスチャを形成することによる、摩擦特性の向上手法について研究を行う。(3 章～5 章)
(2)については、環境の変化に素早く対応し、技術開発を推進するための開発の効率化手法として、保有する知識を活用し、新たな知識創造へつなげる手法を構築する(6 章)。

第2章 参考文献

1. UN world population prospects The 2015 Revision 「Population by Age and Sex - Annual」
<http://esa.un.org/unpd/wpp/Download/Standard/Population/>, (参照:2016.2.12)
2. 経済産業省 自動車産業政策 2014
<http://www.meti.go.jp/press/2014/11/20141117003/20141117003-A.pdf>, (参照:2016.2.12)
3. 清水 直茂 「自動車ロードマップ 2050 FCV の普及率は2%にとどまる」 日経 BP 社 日経 Automotive 2015 年 12 月号 (第 57 号) (2015 年 11 月 11 日発行)
4. IHS Automotive 「世界パワートレインディクショナリー (2013 年 8 月)」
5. Le Club PEUGEOT - Peugeot Official Web Magazine 「Peugeot Technical Tips」
http://web.peugeot.co.jp/web_magazine/backnum_0504/tips/, (参照:2016.2.12)
6. 丹下 英明, 「自動車産業の構造変化と部品メーカーの対応 -新興国低価格車市場の出現によるサプライチェーン変化に中小モノづくり企業はどう対応すべきか-」, 日本政策金融公庫論集 第 13 号 (2011 年 11 月),
https://www.jfc.go.jp/n/findings/pdf/ronbun1111_03.pdf (参照 2016.2.11)
7. 一般社団法人日本自動車工業会 (JAMA) HP 「表 1 : 日本メーカーの海外生産台数の推移」
http://www.jama.or.jp/world/foreign_prdct/foreign_prdct_2t1.html, (参照:2016.2.12)
8. 一般社団法人日本自動車部品工業会 「海外事業概要調査 (2002~2015 年)」
<http://www.japia.or.jp/research/seaover.html>, (参照:2016.2.12)

第3章 自動車向湿式クラッチ用ペーパー摩擦材の技術

3.1 はじめに

2章では自動車及びトランスミッションの市場動向調査から、クラッチ市場の直面する課題について述べた。また、自動車メーカーのサプライチェーンの変化によりクラッチメーカーが受ける影響について議論した。その結果から、本論文の目的の1つとして自動車向け湿式クラッチ用ペーパー摩擦材の新技术の開発を設定した。

特に大きな市場を有する自動変速機（AT）用クラッチとして使用されている湿式クラッチの摺動部材であるペーパー摩擦材は、湿式クラッチの性能を左右する最も重要な要素である。それと同時に、クラッチに求められる特性は多岐にわたり、それらの特性を満足するため、ペーパー摩擦材にもきわめて複雑な特性が求められる。また、ペーパー摩擦材の気孔特性、弾性などの機械的な物性、表面性状等の性能因子が、互いに複雑な相関関係を有する。クラッチに求められる特性に応じた性能因子間のバランス取りが、摩擦材メーカーにとっての重要なノウハウとなる。

本章では、自動車及びトランスミッション、クラッチの発展の歴史、および湿式ペーパー摩擦材の技術と今後の課題について論じる。

3.2 自動車の発展

自動車の誕生がどの時点を示すのかは、その解釈の仕方により諸説存在するが、1769年にフランスのキュニョーが発明した蒸気自動車（図 3-2-1）が馬車に代わる移動手段としての自動車の出発点であると考えられている。

現在、主流となっているガソリンエンジン車がドイツのダイムラーとベンツにより同じ1886年に開発され、それが本格的な自動車の発達につながっていく。自動車が大衆化したのは1908年に発売されたフォード社のT型フォードが発端であると考えられている。フォード社は初めてベルトコンベアを製造ラインに用い（図 3-2-2）、大量生産により自動車の販売価格を下げることで自動車を広く大衆に提供した。これが今日の世界的なモータリゼーションの進展の大きなきっかけとなったと考えられている。

近年では、ハイブリッド自動車（HV）や電気自動車（EV）をはじめとする、環境に

配慮したエコカーが普及し、究極のエコカーと呼ばれる燃料電池車（FCV）も販売が開始された。今後も環境や安全の観点から自動車の進歩や、自動車産業の成長と発展も、とどまらずに進んでいくことが予想される。



図 3-2-1 キュニョーの蒸気自動車[1]
（「自動車デザインにおける普遍性と新規性」より引用）



図 3-2-2 T 型フォード生産ライン[1]
（「自動車デザインにおける普遍性と新規性」より引用）

3.2.1 内燃機関と変速機

自動車の発展に関わる大きな要素の一つに内燃機関（エンジン）の発達がある。軽量で大出力という特徴を持つエンジンは自動車に搭載し移動することに対し非常に適した特性を持っている。その反面、エンジンは常に回転し続けており、回転数により出力およびトルクが変動する。図 3-2-1-1 にガソリンエンジンとモーターの出力特性比較を示す。これが示すように、電気で作動するモーターと異なり、停止状態から力を出すことができず、回転数の小さい条件では出力、トルクが急激に小さくなり、特定の回転数（アイドリング）以下になると停止してしまう。

このようなエンジンの特性を自動車として使いやすい形に変えるためにクラッチや変速機（トランスミッション）が考案され、使用されてきた。クラッチは自動車の走行時にはエンジンの動力をトランスミッションに伝達し、停止時には回転し続けるエンジンの動力を遮断する役割を持つ。また、トランスミッションによる変速時には一時的に動力を遮断することでスムーズな走行を可能とする。トランスミッションの役割は刻々と変化する自動車の走行状態にあわせてギア比を変化させることで、エンジンが力を発揮しやすい回転数を維持したまま、タイヤに伝わる力と速さをコントロールする。

内燃機関が自動車に用いられている限り、変速機、クラッチの必要性がなくなることはなく、内燃機関の進化とともに変速機、クラッチにも進化が求められていく[2]。

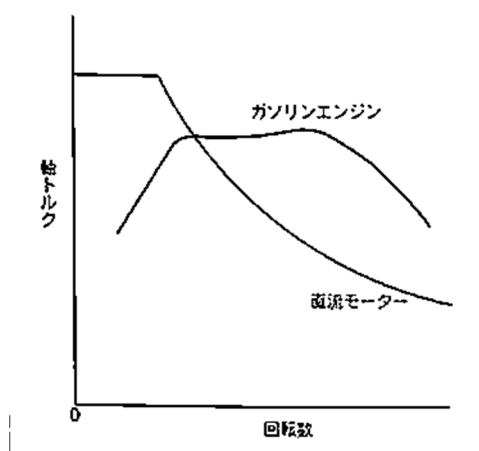


図 3-2-1-1 ガソリンエンジンとモーターの出力特性比較[2]
（「オートマチック・トランスミッション入門」より引用）

3.2.2 変速機の種類と機構

トランスミッションには様々な種類が存在するが、大きくは手動変速機（マニュアル・トランスミッション/MT）と自動変速機（オートマチック・トランスミッション/AT）に分けることができる。

マニュアル・トランスミッション（MT）は自動車の発進、停止、および変速時のクラッチ操作とギアチェンジをドライバーが自ら行うことを特徴とする。その長所は構造がシンプルなことにより軽量で低コストであり、クラッチペダルおよびシフトレバーをドライバーが操作することでダイレクトな変速感と高い燃費性能が得られることである。一方、短所はスムーズに発進や変速を行うにはドライバーに熟練が必要になることである。発進時のエンジンとタイヤの回転差を摩擦によって吸収させるための半クラッチ操作や、走行状態に応じて最適なトルクと速度を得るためのシフトチェンジなど、運転中は常に操作をし続ける必要があることから、煩雑さを感じることもある。

オートマチック・トランスミッション(AT)（図 3-2-2-1 参照）は簡単に言うとクラッチ操作とギアチェンジを自動的に処理するシステムである。その特徴は MT における発進時の半クラッチ操作をトルクコンバーターが代行することにある。トルクコンバーターは図 3-2-2-2 に示すように、2 枚の羽根車の間でエンジンの回転数をオイルの流れによりトランスミッションに伝達する。流体を介して力の受け渡しをすることから、入出力間の回転数差は吸収され、アクセルを踏むだけで停止状態から発進することができる。また、エンジン側と出力側の回転差によりトルクの増幅作用が発生することで発進加速に優れる。ただし、流体により動力を伝達した場合、エンジンの動力が 100%伝達されることはなく、損失が発生する。そのためトルクコンバーターの作用の必要のない領域ではエンジンと出力側を直結することで伝達効率を向上させる。このエンジン側と出力側を直結させる機構をロックアップ機構と呼び、ほとんどの AT 車で用いられている（図 3-2-2-3 参照）。

もう一つの特徴としては、変速（ギアチェンジ）を自動的に行うことである。変速機構としては様々な方式があるが、基本的には走行状態に応じて、自動的に最適なギア比に対応した変速用クラッチを切断および締結し、動力伝達経路を変更することで変速を行う。

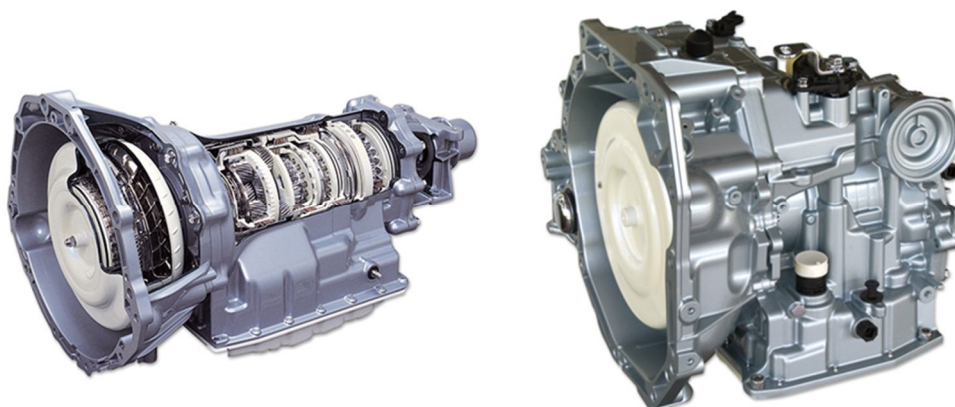


図 3-2-2-1 オートマチック・トランスミッション

左：中・大型 FR 車用 5 速 AT JR507E/JR509E

右：小型 FF 車用 4 速 AT JF414E

(出典：ジャトコ株式会社 HP, <https://www.jatco.co.jp/products/>)

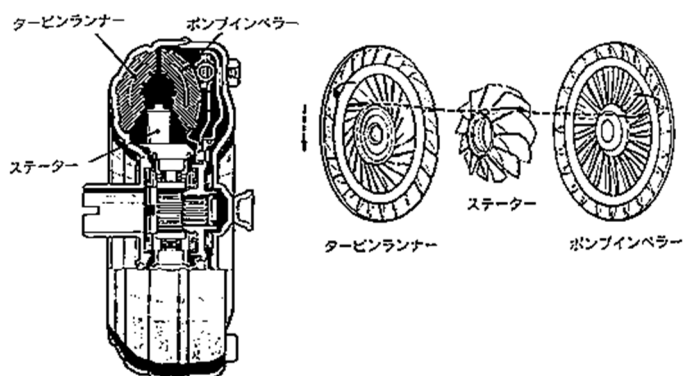


図 3-2-2-2 トルクコンバーターの構造[2]
(「オートマチック・トランスミッション入門」より引用)

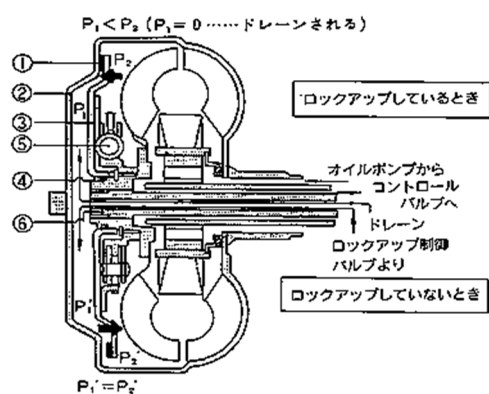


図 3-2-2-3 ロックアップ機構[2]
(「オートマチック・トランスミッション入門」より引用)

AT の長所は電子制御によりクラッチを制御し、自動的にかつスムーズに変速することで、幅広い層のドライバーに快適さと、安定した高い燃費性能を提供することである。一方、短所は、構造が複雑でサイズ、重量が大きくなりやすく、コスト高なこと、MT と比較し損失が大きいことが挙げられる。しかしながら近年では変速の多段化、ロックアップ領域の拡大により、AT の動力伝達効率は MT と遜色のないレベルまで向上してきている。

現在広く普及している無段変速機（CVT）は AT の一形態である。2 つのプーリーとベルトを用いる。プーリーの幅を変化させることにより連続的（無段階的）に変速比を変化させる。常にエンジンの回転数に合わせた変速比に設定できるため、省燃費につながる。短所としてベルトを用いた動力伝達であることから、すべりのロスはなくならず、走行条件によって、特に高速走行を長時間続けるような条件では AT よりも燃費が悪化することがある。

近年増加しつつある機構としてデュアルクラッチトランスミッション（DCT）がある。DCT は MT の機構をベースに制御を自動化することで、AT と同じ操作で MT 同等のダイレクト感の高い走行と省燃費を実現する。前後進の切り替えや、低速での発進停止などにおいて動きがスムーズでないなどの問題はあるが、欧州を中心に搭載が増えている[3]。

3.3 湿式クラッチ用ペーパー摩擦材

トランスミッションには MT、AT を問わず、そのほとんどにクラッチが用いられている。AT で用いるクラッチは湿式クラッチであり、常に油で潤滑した状態で用いられる。クラッチは摩擦を利用して動力を伝達するため、その摺動（しゅうどう）部に用いられる摩擦材の性能がクラッチそのものの性能を大きく左右し、クラッチメーカーのノウハウが集中している。AT 用の湿式クラッチの摩擦材には一般に紙が用いられており、湿式ペーパー摩擦材と呼ばれる。

3.3.1 湿式クラッチの構造

図 3-3-1-1 に湿式多板クラッチの模式図を示す。金属製の板にペーパー摩擦材を接着したフリクションディスクとその相手材となるスチールプレートが交互に配置した構造になっており、クラッチの係合時にはフリクションディスクとスチールプレートが油圧ピストンにより押し付けられることで摩擦が発生し、動力を伝達する。クラッチの解放時にはディスク間が接触しないようにスプリングによって押し戻される機構となっている[4]。

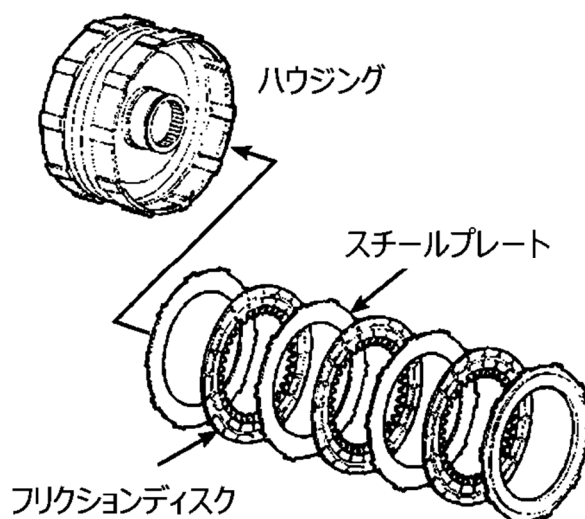


図 3-3-1-1 湿式多版クラッチの模式図[4]
(「Numerical and Physical Experiments on Drag Torque in a Wet Clutch」より引用、
一部改訂)

3.3.2 ペーパー摩擦材の変遷と技術

湿式ペーパー摩擦材は一般の紙と同様に湿式抄造法により製造される（図 3-3-2-1 参照）。しかしながら、湿式クラッチ用ペーパー摩擦材は最大 400 °C にもなる使用環境の中で、剥がれたり焼けたりすることなく内燃機関のトルクを伝達し続けることが求められる。すなわちペーパー摩擦材は、配合材料、構造など様々なノウハウが存在する特殊な紙であり、これまでも多くの研究がおこなわれてきた[5-9]。本項ではペーパー摩擦材の開発の変遷と用いられる技術について述べる。



図 3-3-2-1 ペーパー摩擦材抄造ライン

湿式クラッチに用いられる摺動材料の変遷を図 3-3-2-2 に示す。1950 年代にエンジンの高出力化が進んだことにより、摩擦材の高摩擦係数化が求められ、ペーパー摩擦材が初めて開発された。初期のペーパー摩擦材はセルロース繊維を基材とし、フェノール樹脂を含浸したものであった。ペーパー摩擦材は柔軟で高弾性であることから高い摩擦係数を示すとともに、繊維の絡み合いによる特有の気孔構造を持つこと、大量生産が容易でコストにも優れることから、湿式クラッチ用の摩擦材として広く用いられるようになっていく。1960 年代に入ると更なるエンジンの高出力化により耐久性、耐熱性を高めた摩擦材が必要とされ、アスベスト繊維が用いられるようになった。しかしながら、1970 年代にアスベスト繊維の使用が規制され、ノンアスベスト化が検討された。1980 年代に入るとセルロース繊維に加えて耐熱性の高いアラミド繊維が用いられるようになり、摩擦特性の調整や熱伝導性の向上を目的にカーボン粉末をはじめとする様々な充填材が添加された。1990 年代には更なる耐熱性の向上のため、耐熱性が高く高弾性な炭素繊維が用いられるようになり、アラミド繊維の配合量は増加し、アラミド繊維のみを使用した摩擦材も開発された。

近年では、摩擦調整材として用いられる充填材を摺動面側に集中させ、高摩擦係数と良好な変速フィーリング（スムーズなギヤの切り替え）を実現するための $\mu \cdot V$ （摩擦係数・摺動速度）特性を両立させるなどの取り組みがなされている[11]。

年代	主な摩擦材、摩擦材の開発動向	自動変速機開発の流れ
1900 ～1920	皮革、木片、 乾式織布材（乾式ウーブン材） 乾性油含浸厚紙	
1930	アスベストモールド材 焼結合金材 織布材	
1940	セミメタリック材 コルク材、コルクフェライト材 レジン含浸アスベスト厚紙材	初期の自動変速機 2 速 AT
1950	ペーパー摩擦材	3 速 AT
1960	ペーパー摩擦材の多様化 レジングラファイト化	4 速 AT、FF 化
1970	ノンアスベスト化	高容量化、電子制御化
1980	ノンアスベストペーパー摩擦材 の多様化	高容量化、省燃費化 ロックアップ機構の採用
1990	ペーパー摩擦材への合成繊維利用 （セルロース繊維からの置換え）	いっそうの省燃費化 小型化 多段化（5 速化） 高容量化、高度な電子制御 スリップロックアップ機構

図 3-3-2-2 湿式クラッチ用摩擦材の変遷[10]
 (「自動車用自動変速機の 50 年を振り返る-摩擦材,油剤のトライボロジー技術-」より引用)

3.3.3 ペーパー摩擦材の要求性能

近年の自動車の高品質化、燃費向上への要求は、トランスミッションに対しても変速品質、高効率化の要求としてますます高まっている[12]。湿式クラッチに求められる特性としては大きく以下の4点となる。

① 高容量：

クラッチ容量が大きくなることにより、小型、軽量化が可能となり、省スペース、省燃費につながる。

② 高寿命：

湿式クラッチは容易に交換ができる部品ではないため、メンテナンスフリーである必要がある。

③ 省燃費（低ドラグ）：

クラッチ解放時に自動変速機油（ATF）の粘性によって伝達されるトルクをドラグ（DRUG）トルクと呼び、ドラグトルクが大きいと燃費低下の原因となる。

④ 変速フィーリング：

発進、変速時にショックや振動、異音が発生しないこと。ドライビングの走行感に影響する。

これらの要求性能とそれに対応したペーパー摩擦材への要求性能を図3-3-3-1に示す。

クラッチの高容量化のためには摩擦材の摩擦係数の向上と経時変化（劣化）を小さくすることが必要となる。

高寿命化に対しては、摩擦材そのものの耐熱性、耐剥離性の向上、高容量化と同様に摩擦係数の劣化が少ないことが求められる。

低ドラグに対しては、引き摺り、張り付きの低減と油溝の形成が効果的である。

変速フィーリングに対しては摩擦係数の安定化、 μ - V 特性のフラット化が求められる。

以上のように湿式クラッチに求められる特性は多岐にわたり、それらの特性を満足するため、ペーパー摩擦材にもきわめて複雑な特性が求められる。摩擦材に用いられる繊維、樹脂等の種類や配合比、ペーパー摩擦材の気孔特性、弾性などの機械的な物性、表面性状等がペーパー摩擦材の性能に対する影響因子として挙げられる。しかし、それら

の因子は互いに複雑な相関関係を有し、すべてを同時に満足することは非常に難しいことから、求められる特性に応じて性能のバランスを取る手法が、摩擦材メーカーにとっての重要なノウハウということができる。

例えば、図 3-3-3-2(a)のような現状の摩擦材に対し、高容量化の要求により摩擦係数を向上させた時、現状の手法では各性能のトレードオフによって、(b)のようにペーパーの耐久性や μ 安定性が低下してしまう。そのような問題に対応し、(c)のようにその他の性能を満足したうえで高摩擦係数を実現すること、すなわち各性能間のバランスをとる技術を開発することが、新しいペーパー摩擦材を開発するためには非常に重要になる。

それに加えて相手材の材質、表面性状、ATF の性状と各種添加剤も摩擦特性に大きく影響することから、材料メーカー、オイルメーカーなどクラッチ関連メーカーも含めた湿式ペーパー摩擦材のトライボロジー特性の解析が求められる。

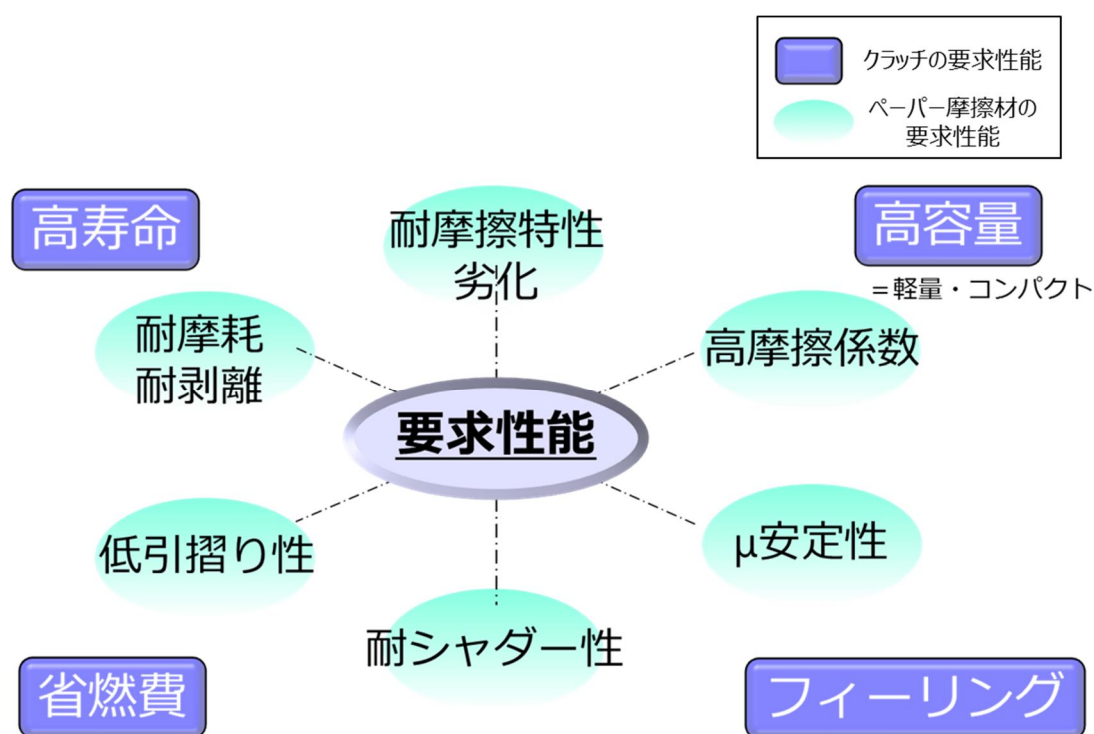


図 3-3-3-1 ペーパー摩擦材への要求性能

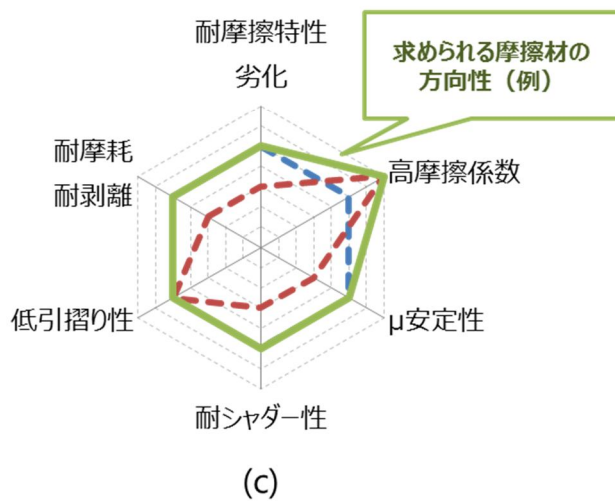
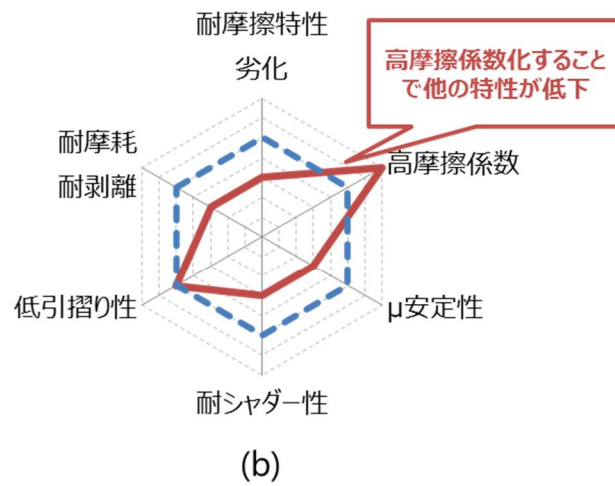
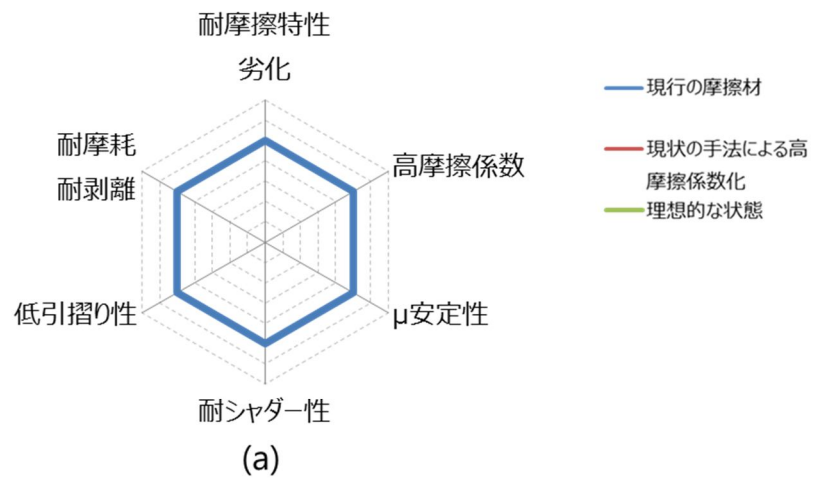


図 3-3-3-2 摩擦材の開発方向性について

3.4 まとめ

本章では自動車、内燃機関、クラッチ及びトランスミッションの発展の歴史について調査した。自動車の発展には内燃機関の発展が寄与する部分が大きく、内燃機関の性能向上にはクラッチおよびトランスミッションの高性能化が求められる。

今後も厳しくなる自動車の要求性能に対し、AT に用いられる湿式クラッチ用ペーパー摩擦材に求められる特性も過酷なものになってく。その中で、複雑な相関関係を持つペーパー摩擦材の要求性能に対し、各性能間のバランスをとる技術を開発することが、新しいペーパー摩擦材を開発するためには非常に重要になり、トライボロジー特性の解析が求められる。

クラッチ関連メーカーが、これらの要求に対応し、今後のクラッチシステムの変化に追随することにより競争力を維持していくためには、湿式クラッチの性能を左右する最も重要な要素であるペーパー摩擦材を進化させていくことが求められる。

そこで、本研究では湿式クラッチ用ペーパー摩擦材について、光を用いた新技術の開発を行った。その結果を次章以降に示す。

第3章 参考文献

1. 吉村 等, 「自動車デザインにおける普遍性と新規性」, 静岡文化芸術大学研究紀要, VOL. 14. 87-95. 2013
2. 坂本 研一, 「オートマチック・トランスミッション入門」, グランプリ出版, 1995
3. 高根 英幸 「メカニズム基礎講座 第4回 DCT (デュアル・クラッチ・トランスミッション)」 日経 BP 社 日経 Automotive Technology 第46号 (2015年1月1日)
4. Takagi, Y., Okano, Y., Miyagawa, M., Katayama, N., “Numerical and Physical Experiments on Drag Torque in a Wet Clutch,” Tribology Online, 7, 4, 2012, 242-248.
5. 北原 志暲, 松本 堯之, 「湿式摩擦材の現状と将来」, トライボロジスト, 第39巻, 第12号, (1994) 1020-1025
6. A. E. Anderson, ”Friction and Wear of Paper Type Wet Friction Elements”, SAE paper 720521, 1972.
7. Ohnuma, H., “The Effect of Groove Pattern of Paper Friction Plate on its Life,” SAE paper 910804, 1991.
8. 佐野 春信, 武居 正彦, 「湿式クラッチの動的摩擦係合過程における潤滑特性」, トライボロジスト, 第39巻, 第12号, 1089-1096 (1994)
9. 松本 堯之, 「湿式ペーパー摩擦材の多孔性と実用性能」, トライボロジスト, 第41巻, 第10号, 816-821 (1996)
10. 村上 靖宏, 「自動車用自動変速機の50年を振り返る・摩擦材, 油剤のトライボロジー技術」, トライボロジスト, 第50巻, 第9号, (2005), 665-670
11. ロバート・シー・ラム, 混合堆積層摩擦材料, 特許第4886978号, 特許権者: ボーグワーナー インコーポレーテッド, 出願日: 平成16年10月4日
12. 加藤 芳章, 柴山 尚士, 「自動変速機の構造・機能と湿式クラッチ」, トライボロジスト, 第39巻, 第12号, (1994), 1008-1013

第4章 レーザーを用いたペーパー摩擦材の表面加工手法の開発

4.1 はじめに

3章にて述べたとおり、湿式クラッチに用いられるペーパー摩擦材は湿式抄造により製造される。湿式抄造法とは一般的な紙の製造方法であり、大量生産が容易であること、比較的安定し、均一な品質を実現可能であることから、湿式クラッチ用摩擦材のほとんどが湿式抄造により製造されている。

一方で、機械部品に求められるトライボロジー特性は工業技術の進歩とともに過酷になっており、湿式クラッチにおいても例外ではなく、これまで以上の高い精度の制御が求められる。これまで、湿式抄造により形成されていたペーパー摩擦材の表面に対して、更なる性能の向上が必要となり様々な表面加工手法が試みられている。

本章では、摩擦に代表されるトライボロジー特性と表面技術の関係性を示すとともに、湿式ペーパー摩擦材に対する従来の表面加工手法の課題を示す。それを踏まえ、レーザー加工技術によって湿式ペーパー摩擦材の表面を加工することで、これまでになく表面性状の実現を試みた。各種レーザーを用いてペーパー摩擦材表面に加工を実施し、加工状態を検証することで、ペーパー摩擦材の加工に適したレーザーの選定と加工条件について調べた。

4.2 摩擦と表面技術

摩擦、摩耗に代表されるトライボロジー特性に対し、表面の制御は非常に重要な役割を持つ。特に近年では摩擦性能と、摩耗をはじめとする耐久性を満足するために、基材となる材料そのものは変えずに表面を改質した機能性表面が強く求められている。その機能性表面を創成する技術のトライボロジーへの応用例として、温度による組織の制御や内部への元素の拡散などの「熱処理」、基材とは異なる材料を被覆することで新たな機能を発現させる「コーティング」、表面に新たな表面微細形状を付与する「テクスチャリング」などが代表的である[1]。

例として金属材料などへの熱処理では、焼き入れ、浸炭、窒化などが古くから用いられ、主に表面の硬度向上による耐摩耗の向上や、耐熱性、耐食性の向上効果が得られる

[2,3]。

コーティングでは、めっきや蒸着などが代表的であり、表面の化学的な安定化や、耐熱、耐摩耗性の向上、低摩擦係数化などの効果が得られる。近年では DLC（ダイヤモンドライクカーボン）のコーティングにより大幅な摩擦係数の低減効果が期待され、研究がおこなわれている[4]。

表面テクスチャリングはトライボロジー特性の制御手法として古くから広く用いられている。階段のすべり止めやタイヤの溝（図 4-1-1）なども広義の表面テクスチャリングと表すことができる。微細な表面テクスチャリングの代表例としては、エンジンコンロッドのすべり軸受けのグルーブ加工などが実用に用いられている[5,6]（図 4-1-2）。近年では、レーザー加工やリソグラフィ加工、マイクロブラスト加工などの表面微細加工技術の進化によって、規則的かつ微細な表面テクスチャを形成することが可能となっている[7]。



図 4-1-1 自動車用タイヤの溝

左：ブリヂストン REGNO ZR-XI, 右：横浜タイヤ GEOLANDAR M/T+

（出典：左:<http://tire.bridgestone.co.jp/regno/product/gr-xi/index.html>

右:http://www.yokohamatire.jp/ycr/japan/tire/brand/geolandar/geolandar_g001d.html）

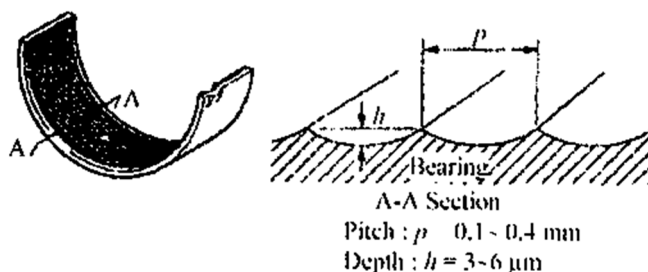


図 4-1-2 すべり軸受けのマイクログルーブ加工[6]

（出典：Performance of Plain Bearings with Circumferential Microgrooves より引用）

摺動部品に過酷な使用条件が求められる中で、微細な表面テクスチャリングの形成技術はトライボロジー特性改善の手法として注目を集めており、同時に理論的な体系化を推進する動きも活発で、テクスチャの形状やスケールの影響など、解決すべき課題を残すとともに大きな発展の可能性が期待できる技術であると考えられている[8]。

4.3 ペーパー摩擦材と表面技術

湿式クラッチに用いられるペーパー摩擦材においても、表面粗さや気孔特性といった表面性状は摩擦特性、耐久性、引き摺りなどのトライボロジー特性に大きく影響する[9]。

フリクションディスクおよびペーパー摩擦材に対する表面テクスチャリングについても研究が行われている。代表的なものとしては図 4-2-1 に示すようなマクロな油溝の形成があり、種々の形状、サイズ、配置の油溝を形成することによって、動的摩擦特性の変化[10]、耐熱性の向上[11,12]、ドラグトルクの低減[13]など、湿式クラッチの摺動特性の制御が試みられている。

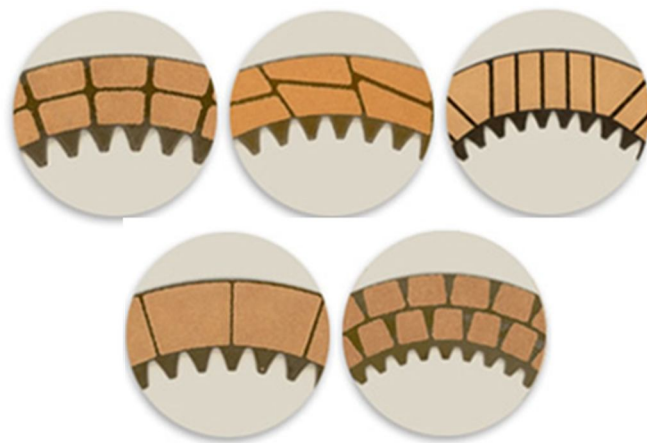


図 4-2-1 湿式クラッチ用フリクションディスクの油溝形状
(出典：(株)エフ・シー・シー HP より引用)
<http://www.fcc-net.co.jp/technical/segmentdisk.html>

フリクションディスクおよびペーパー摩擦材表面へのテクスチャの形成方法として、現状では以下のような方法が用いられている。

- ・切削：機械加工により溝を加工する。
- ・型押し：金型を用いて（主に熱）プレスにより溝を転写する。
- ・セグメント（抜型）：セグメント状にコマを打ち抜き接着することで、コマの形状に応じた油溝を形成する。

それぞれの溝形成手法の特徴を表 4-2-1 にまとめる。

切削による溝加工では、主にペーパーを芯板に接着後、刃具等により加工を行う。NC 等の制御により加工を行うことで、溝深さ、レイアウトは比較的自由に設定可能であるが、溝巾は刃具のサイズに依存するため、微細な加工は難しい。また、1 枚毎に加工を行うため、量産性はやや低い。機械的に加工を行うため、繊維材料の毛羽立ちや材料の脱落が起こりやすく、摩擦材へのダメージが大きくなる。

型押しでは、ペーパーを芯板に接着すると同時、または接着後に再度プレスを行うことで金型の溝をペーパーに転写する。溝巾、溝深さともに金型の形状に依存し、アスペクト比の高い溝の形成は難しい。レイアウトも金型に依存するため、コストの面からも多様な形状を形成するのは難しいが、接着工程にて同時に溝を形成できることから、量産性は比較的良好である。

セグメントでは芯板にペーパーを貼り付ける際に、ペーパーを所定の形状に打ち抜くことで溝を形成する。切削による溝及び型溝はペーパー表面に形成された溝であるが、セグメント溝はそれぞれのコマが溝によって完全に切り離され、独立した状態になる。溝巾、レイアウトは打ち抜き型に依存するため、極端に複雑な形状は形成できない。工程内に組み込むことができ、ペーパーの歩留まりを向上する効果もあることから、量産性は高い。

これらの現状用いられている手法にはそれぞれに利点も存在するが、ペーパー摩擦材は種々の繊維、充填材、樹脂などを含む複合材料であり、配合された材料はそれぞれ形状や硬度、機械強度が異なるため、加工面の毛羽立ち、材料の脱落やペーパーの強度低下などが発生し、きれいな加工ができないという問題もある。また、加工のスケールに関しても、溝巾が 100 μm 以下の微細な加工、特にアスペクト比の大きい加工は困難である。

3 章で述べたように、ペーパー摩擦材には複数の要求性能があり、それら性能のバラ

ンスをとることが求められる。例えば、ペーパー摩擦材の摩擦係数と摺動部における真実接触面積との間には関係性があり[14]、溝巾の大きいテクスチャを形成した場合、真実接触面積が低下し、摩擦係数が低下することが問題となる。そこで、従来の手法では形成できない微細な溝を形成することで、真実接触面積を低下させず、その他の特性を向上させることができると期待される。すなわち、ペーパー摩擦材表面にマイクロメートルオーダーでアスペクト比の高いテクスチャを形成することで、その他の性能に影響を与えることなく、摩擦特性が向上した新規フリクションディスクが開発できる可能性を秘めている。

表 4-2-1 フリクションディスクへの溝形成手法の特徴①

加工方法		形状			量産性	摩擦材 への影響
		溝巾 _{※1}	溝深さ _{※2}	レイアウト 自由度		
切削	フライス加工や研削などの機械加工により溝を形成する	×	○	○	△	×
型押し	溝を形成した金型を摩擦材表面に押し付けることで溝を形成する	×	△	△	○	△
セグメント	抜型により打ち抜いた摩擦材をセグメント状に接着し溝を形成する	×	-	△	◎	○

※1 巾 100 μm 以下の溝の形成可否

※2 溝巾以上の深さでの加工可否

4.4 レーザーを用いた摩擦材加工

レーザーを用いた表面テクスチャリング (Laser Surface Texturing : LST) はミクロンレベル以下の微細なテクスチャの形成手法として用いられ、濡れ性の改善や、摩擦の低減などのトライボロジー特性の改善[15, 16]、シール部材の特性改善[17]、近年ではフェムト秒レーザーにより形成したナノレベル周期構造のトライボロジー特性への影響等[18-20]、研究がなされている。レーザーを用いたペーパー摩擦材への加工も試みられており、レーザーを用いることで摩擦材表面に微細な細孔や溝の形成が可能であることが知られている[21-23]。しかしながら、微細なテクスチャ（溝）の形状と摩擦特性の関係性に対する詳細な研究はなされていない。

そこで、本章では、レーザーによるペーパー摩擦材表面にマイクロメートルオーダーの微細な溝の形成を試みた。種々のレーザーを用いて、摩擦材への溝加工を実施し、摩擦材加工に適したレーザーの選定と摩擦材へのダメージを小さくするレーザー加工条件を明らかにした。次章では、微細な溝の形状の摩擦特性の関係性について研究を行った。

4.4.1 レーザープロセッシング

レーザープロセッシング（レーザー加工技術）の工業利用の歴史は古く、レーザーが発明された 1960 年からほどなくして、1965 年にはルビーレーザーによるダイヤモンドダイスの穴あけが実用化されている。今日では穴あけ、切断、溝加工などの除去加工や、溶接、ろう付け等の接合加工、露光、アニーリング、ピーニング等の改質加工、CVD、PLD などを利用した薄膜堆積、3 次元造形などの付加加工等、様々なプロセスが各種産業において幅広く適用されている[24]。

レーザープロセッシングの利点としては、

- 1) 材料の硬さや強度に関係なく加工できる。
- 2) 幅の狭くシャープな加工が可能で、複雑形状が得意。
- 3) 熱による影響が小さく、歪も小さい。
- 4) 工具を用いないため摩耗などの心配がなく、音や振動も少ない。

等が挙げられる。一方で難点としては、

- 1) 設備のコストが高くなる。
- 2) 加工スピードがその他の加工法と比較し遅い。
- 3) 熱加工であるため、表面に熱変性が起こる可能性がある。

などがある。

上記のような特徴をもつレーザープロセッシングは、様々な材料の複合材であるペーパー摩擦材の表面への微細テクスチャ加工に対して優位な点が多いと考えられるが、熱の影響については注意が必要である。そのほかにも、非接触で高精度の加工をする手法として電子ビームを用いた加工もあるが、真空雰囲気であればならないため、連続加工に不向きであることから、本研究ではレーザー加工を選択した[25]。レーザープロセッシングにおける基本的なパラメータとして、波長、出力（平均出力、ピーク出力）、繰り返し周波数、パルス幅などのレーザー発振器の条件や、加工送り速度、スポット径などの光学系の条件がある。加工対象物や加工内容により適切な条件を設定することが重要になる。

4.4.2 レーザーの分類（媒質、波長、パルス幅）

レーザーの特徴として、空間的および時間的コヒーレンスの高さがあるといえる。空間的コヒーレンスが高いことで、長距離を拡散せずにエネルギーを保ったまま伝播させることができる。またレンズなどを用いて微小な領域まで集光しエネルギーを集中させることで、ごく微細な領域の加工が可能となる。さらに、時間的コヒーレンスが高いことで周波数が安定した様々な波長の単色性の光を利用することができる。

もう一つの特徴として、パルス発振がある。短パルス発振することで時間的にもエネルギーが集中され高ピーク出力を得ることができる。現在ではフェムト秒（fs）パルスレーザーが実用化され、アト秒のパルス幅も実現している[26]。

表 4-3-2-1 に代表的なレーザーの種類と特徴を示す。レーザーには様々な種類が存在し、媒質、波長、パルス幅などにより分類することができる。

表 4-3-2-1 代表的なレーザーの種類

	媒体	波長帯域
CO ₂ レーザー	CO ₂	9.6 μm 帯 10.6 μm 帯
エキシマレーザー	XeCl	308 nm
	KrF	248 nm
	ArF など	193 nm
固体レーザー	Nd : YAG Yb : YAG Nd : YVO ₄ など	1064 nm (第 2 高調波) 532 nm (第 3 高調波) 355 nm
ファイバーレーザー	希土類添加 光ファイバー	約 1 μm
半導体レーザー	GaAs-AlGaInP 系	赤色～1 μm
	InP-GaInAsP 系	1.3～1.6 μm

◎媒質による分類

レーザーはレーザー発振する媒質（光源）の種類により分類されることが多い。代表的なレーザーとその特徴を以下に示す。

・CO₂ レーザー

CO₂ レーザーは CO₂ ガスを媒体にレーザー発振をするガスレーザーであり、主に赤外領域の約 9 μm 帯から 10 μm 帯の波長で発振する。連続、パルス発振のいずれも可能であり、現在工業用として最もよく用いられているレーザーである。

・エキシマレーザー

希ガス（Ar、Kr、Xe）、ハロゲン（F、Cl）の混合ガスを媒体にレーザー発振する。波長は紫外領域であり、赤外領域のレーザーと異なり熱が発生しにくいことから微細な

加工が可能となる。代表的な混合ガスの種類とその波長は以下のとおり。

・ XeCl 308 nm ・ KrF 248 nm ・ ArF 193 nm ・ F₂ 157 nm

・ 固体レーザー

ルビーや YAG などを代表とした固体結晶中にドーパされた Cr、Nd、Yb 等を媒体にレーザーを発振する。発振波長は約 1 μm であるが、非線形光学結晶を用いることで可視から紫外への波長変換が可能。励起光源はフラッシュランプ、または半導体レーザー (LD) が用いられる。

・ ファイバーレーザー

固体レーザーのうち固体結晶をファイバー状にしたものを媒体として用いる。光ファイバーによるビーム伝送が容易であることから、産業用レーザーとして 2000 年以降広く普及している。シングルモードでは高品質、高安定な特徴を持ち、マルチモードでは高出力が得られる。

・ LD

半導体の pn 接合間の電子の遷移を利用してレーザー発振を得る。代表的な材料としては、GaAs-AlGaInP 系や InP-GaInAsP 系がある。連続発振による溶接などの熱加工や、固体、ファイバーレーザーの励起光源として用いられる。

◎波長による分類

レーザーに用いられる光の波長は赤外 (約 10000 nm) ～紫外 (約 200 nm) という範囲があり、ほとんどが光源の種類に依存するが、固体レーザーの赤外光 (例:Nd:YAG/1064 nm)を非線形光学結晶として用いることで、可視グリーン光(532 nm)や紫外レーザー光(355 nm、266 nm)に波長変換することもできる。

概ね波長が長い領域では熱的加工が支配的であり、波長が短くなるにつれレーザーの持つエネルギーが大きく、また様々な材料に吸収されやすくなることでアブレーション (Ablation : 蒸発、昇華) が起こりやすくなる。

◎パルス幅による分類

大きく分けて連続発振（CW：Continuous Wave）とパルス発振レーザーに分類される。CW レーザーは出力値を連続的に発振し、熱加工が基本となり高出力を得られやすい特徴がある。パルスレーザーは出力値をパルス状に分割し発振する。熱的な影響を抑えることができるとともに、エネルギーを時間的に集中させることにより大きなピーク出力を得ることでアブレーション加工を可能にする。ピーク出力にはレーザーのパルスエネルギーが関係し、パルスエネルギーは平均出力を繰り返し周波数で除することにより算出できる。パルス幅としてミリ秒～フェムト秒までが実用化されており、パルス幅が短くなれば相対的に加工量は小さくなるが、熱が拡散するのに要する時間よりもパルス幅が狭くなるため、加工周辺部への熱影響を抑制することが可能となる。

4.4.3 ペーパー摩擦材のレーザー加工

4.4.3.1 試験摩擦材

試験摩擦材（3 種類）および配合材を表 4-3-3-1-1 に示す。配合した材料は一般の摩擦材に用いられる材料を使用している。

表 4-3-3-1-1 試験摩擦材一覧

	基材	充填材	樹脂
摩擦材 A	アラミド繊維	-	フェノールレジ
摩擦材 B	アラミド繊維	珪藻土	フェノールレジ
摩擦材 C	セルロース繊維	-	フェノールレジ

4.4.3.2 使用レーザー

加工に用いたレーザーの一覧およびスペックの一部を表 4-3-3-2-1 に示す。光源の種類、波長、パルス幅の異なる、4 種類のレーザーを使用して加工を行った。

各レーザーにおいて加工条件を変更して溝加工を行い、各摩擦材に対し、溝巾、溝深さ、加工品質として加工部付近の炭化の有無の観点から評価した。

表 4-3-3-2-1 使用レーザー一覧

レーザー	媒体	波長(nm)	パルス幅
CO ₂	CO ₂	9,600	8～100 μs
ピコ秒	固体 (YAG)	1,064	12 ps
グリーン	固体 (Nd : YVO ₄)	532	8 ns
UV	固体 (Nd : YVO ₄)	355	12 ns

4.4.3.3 各種レーザーによる加工結果

それぞれのレーザー（表 4-3-3-2-1 参照）を使用し、各ペーパー摩擦材への溝加工を実施した。加工外観の観察、および溝巾の計測にはデジタルマイクロスコープ（Hirox KH-7700）を用いた。溝深さの計測にはレーザー顕微鏡（キーエンス VK-9510）を用いた。

・図 4-3-3-3-1 に摩擦材 A のレーザー種類による加工結果を示す。使用するレーザーの種類によって溝巾、加工品質（炭化の有無）が変化した。摩擦材 A においては、ピコ秒レーザーを用いることで最も小さい溝巾での加工が可能であった。

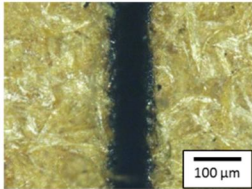
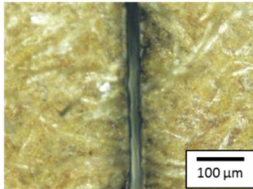
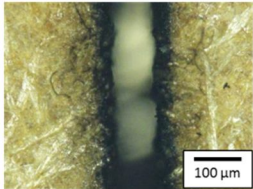
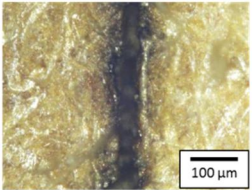
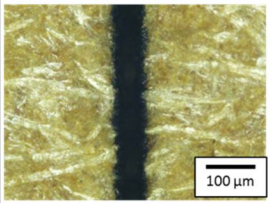
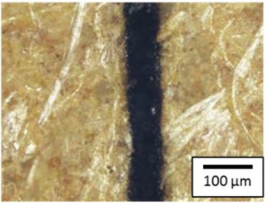
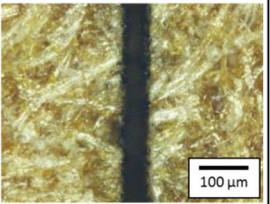
摩擦材A	CO ₂	ピコ秒	グリーン	UV
外観				
溝巾	91 μm	30 μm	103 μm	45 μm
溝深さ	377 μm	412 μm	359 μm	126 μm

図 4-3-3-3-1 摩擦材 A のレーザー種類による摩擦材加工結果（外観、溝巾、溝深さ）

・図 4-3-3-3-2 にペーパー摩擦材種類違いによる加工結果を示す。同一のレーザーによる加工において、摩擦材種類により加工品質、加工深さが変化した。ピコ秒レーザーでは摩擦材 C に対し、摩擦材 A、B は加工されやすく、CO₂ レーザーでは逆に摩擦材 C が加工されやすい傾向を示した。摩擦材種類によって、加工しやすいレーザーが存在し、対象となる材料に応じて適切なレーザーを選択する必要があると考えられる。

CO ₂	摩擦材A	摩擦材B	摩擦材C
外観			
溝巾	70 μm	72 μm	64 μm
溝深さ	93 μm	104 μm	180 μm

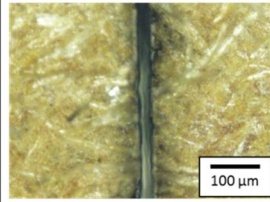
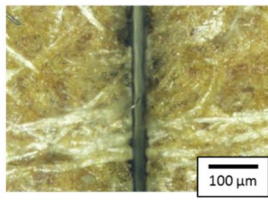
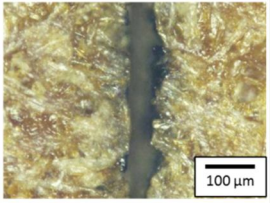
ピコ秒	摩擦材A	摩擦材B	摩擦材C
外観			
溝巾	30 μm	26 μm	49 μm
溝深さ	412 μm	407 μm	172 μm

図 4-3-3-3-2 ペーパー摩擦材種類違いによる加工結果
(上：CO₂レーザー、下：ピコ秒レーザー)

・図4-3-3-3に摩擦材Aのピコ秒レーザーにおける加工条件違いでの加工結果を示す。
加工条件を変更することで、加工品質の良好な（加工部周辺の炭化の無い）加工が可能であり、また溝深さを変えることが可能であった。

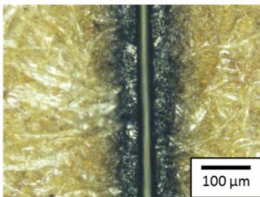
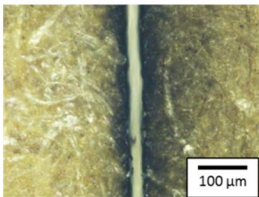
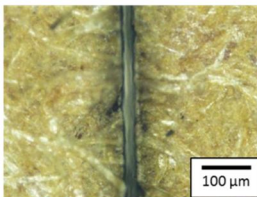
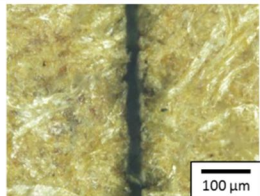
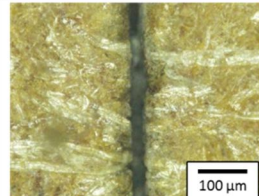
ピコ秒	条件①	条件②	条件③
外観			
溝巾	35 μm	36 μm	30 μm
溝深さ	426 μm	428 μm	412 μm
ピコ秒	条件④	条件⑤	
外観			
溝巾	31 μm	31 μm	
溝深さ	147 μm	97 μm	

図 4-3-3-3 ピコ秒レーザー加工条件違いによる摩擦材 A の加工結果

以上の結果より、使用するレーザーによって、加工品質（炭化の有無）、溝巾が変化し、溝深さは、レーザーの加工条件により変化させることができた。ペーパー摩擦材の種類によって、それぞれのレーザーによる加工品質および加工深さが異なった。対象となる材料に応じて適切なレーザーを選択し、加工条件を設定することで、加工部への熱の影響が比較的少ない加工が可能となる。

レーザーを用いた加工により、ペーパー摩擦材の表面に溝巾 100 μm 以下、深さ 100 μm 以上の、従来の手法では形成できなかった微細かつアスペクト比の高い溝を形成することができた。従来の手法との比較を表 4-4-2 に示す。レーザーを用いた加工により、ペーパー摩擦材の表面に溝巾 100 μm 以下、深さ 100 μm 以上の、従来の手法では作れなかった微細かつアスペクト比の高い溝を、ペーパー摩擦材にダメージを与えることなく形成可能である。

表 4-4-2 フリクションディスクへの溝形成手法の比較②

加工方法		形状			量産性	摩擦材 への影響
		溝巾 _{※1}	溝深さ _{※2}	レイアウト 自由度		
切削	フライス加工や研削などの機械加工により溝を形成する	×	○	○	△	×
型押し	溝を形成した金型を摩擦材表面に押し付けることで溝を形成する	×	△	△	○	△
セグメント	抜型により打ち抜いた摩擦材をセグメント状に接着し溝を形成する	×	-	△	◎	○
レーザー	レーザーにより摩擦材表面に直接溝を形成する	○	○	○	△	○

※1 巾 100 μm 以下の溝の形成可否

※2 溝巾以上の深さでの加工可否

4.5 まとめ

種々のレーザーによるペーパー摩擦材に対する溝加工を行い、マイクロスコープおよびレーザー顕微鏡による加工品質の評価を行った。

加工条件を変更することでペーパー摩擦材の表面に溝巾 100 μm 以下、深さ 100 μm 以上の、従来の手法では形成できなかった微細かつアスペクト比の高い溝をペーパー摩擦材にダメージを与えることなく形成することができた。

種々の配合のペーパー摩擦材表面に対して最適なレーザー種類及び加工条件を設定することにより、任意の形状の表面テクスチャを形成することが可能となり、これまでの摩擦材では実現不可能であった摩擦特性の発現が期待できる。

次章ではフリクションディスク上に接着したペーパー摩擦材に対し、レーザーを用いて表面テクスチャを形成し、摩擦特性との関係性について論じる。

第4章 参考文献

1. 梅原徳次, 「トライボロジー特性改善のための機能性表面の創製」, J. Vac. Soc. Jpn., Vol. 58, No. 6 (2015)
2. 鮎谷清司, 「機能部品の表面改質技術の現状」, 表面技術, vol.43, No.6, 543-549, (1992)
3. 水谷嘉之, 志村好男, 「レーザ表面改質によるトライボロジー特性の改善」, 表面技術, vol.47, No.2, 113-116, (1996)
4. 加納眞, 「DLC コーティングの適用技術と課題」, トライボロジスト, 第 52 巻, 第 3 号, 186-191 (2007)
5. 佐藤和弘, 「表面テクスチャリングによる焼結材料の性能向上」, トライボロジスト, 第 60 巻, 第 3 号, 184-189 (2015)
6. Y. KUMADA, K.HSHIZUME, Y.KIMURA: Performance of Plain Bearings with Circumferential Microgrooves, Tribol. Trans., 39, 1 (1991) 1.
7. 是永敦, 「サーフェステクスチャの形状寸法とトライボロジー特性」, トライボロジスト, 第 55 巻, 第 2 号, 101-106 (2010)
8. 佐々木信也, 「表面テクスチャリングによるトライボロジー特性の向上」, 表面技術, Vol. 65, No. 12, 568-572 (2014)
9. 李辰宇, 高橋仁, 「動力伝達クラッチの表面テクスチャ」, トライボロジスト, 第 48 巻, 第 9 号, 703-708 (2003)
10. 佐野春信, 武居正彦, 「湿式クラッチの動的摩擦係合過程における潤滑特性」, トライボロジスト, 第 39 巻, 第 12 号, 1089-1096 (1994)
11. 顧曉明, 三好達朗, 「湿式クラッチ摩擦材における熱的問題とその対策」, トライボロジスト, 第 50 巻, 第 1 号, 33-38 (2005)
12. Ohnuma, H., "The Effect of Groove Pattern of Paper Friction Plate on its Life", SAE paper 910804, 1991.
13. Takagi, Y., Okano, Y., Miyagawa, M., Katayama, N., "Numerical and Physical Experiments on Drag Torque in a Wet Clutch," Tribology Online, 7, 4, 2012, 242-248.
14. Eguchi, M., Yamamoto, T., "Shear characteristics of a boundary film for a

- paper-based wet friction and real contact area measurement”, *Tribology International* 38 (2005) 327-335
15. Yamakiri, H., Sasaki, S., Kurita, T., Kasashima, N., “Effects of laser surface textureing on friction behavior of silicon nitride under lubriaction with water”, *Tribology International* 44 (2011) 579-584
 16. Wakuda, M., Yamauchi, Y., Kanzaki, S., Yasuda, Y., “Effect of Surface Textureing on Friction Reduction between Ceramic and Steel Materials under Lubricated Sliding Contact.”, *Wear* 254 (2003) 356-363
 17. Tokunaga, Y., Inoue, H., Okada, K., Shimomura, T., Yamamoto, Y., “Effects of Cavitation Ring Formed on Laser-Textured Surface of Mechanical Seal”, *Tribology Online*, 6, 1 (2011) 36-39
 18. 沢田 博司, 二宮 孝文, 「フェムト秒レーザによる表面微細加工」, トライボロジスト, 第 55 巻, 第 2 号, (2010) 71-76
 19. Mizuno, A., Honda, T., Kiuchi, J., Iwai, Y., Yasumaru, N., Miyazaki, K., “Friction Properties of the DLC Film with Periodic Structures in Nano-scale” *Tribology Online* 1, 2 (2006) 44-48
 20. Kawahara, K., Sawada, H., Mori, A., “Effect of Surface Periodic Structures for Bi-directional Rotation on Water Lubrication Properties of SiC”, *Tribology Online* 3, 2 (2008) 1881-2198
 21. 高倉 則雄, 表面に細孔を施した湿式摩擦板, 特開平 10-331889, 出願人: 株式会社ダイナックス, 出願日: 平成 9 年 5 月 29 日
 22. 井ノ原 忠彦, レーザ加工方法及びレーザ加工装置, 特開 2014-133242, 出願人: 株式会社リプス・ワークス, 出願日: 平成 25 年 1 月 9 日
 23. 梅澤 栄記, 村松 史昌, 矢部 明, 新納 弘之, 田中 章浩, 摩擦材の摩擦面の加工方法, 特許 4771322 号, 特許権者: N S Kワーナー株式会, 独立行政法人産業技術総合研究所, 出願日: 平成 13 年 3 月 29 日
 24. 次世代レーザプロセッシングとその産業応用 調査専門委員会編, 「最新レーザープロセッシングの基礎と産業応用」, 電気学会 2007 年 3 月 30 日
 25. 山城 隆夫, 木村 睦子, 児玉 尊嗣, 湿式摩擦材及びその表面処理方法, 特開 2013-119600, 出願人: 株式会社ダイナックス, 出願日: 平成 23 年 12 月 8 日

26. Eiji J. Takahashi, Pengfei Lan, Oliver Muecke, Yasuo Nabekawa, Katsumi Midorikawa, "Attosecond nonlinear optics using gigawatt-scale isolated attosecond pulses" *Nature Communications*, 4:2691 doi: 10.1038/ncomms3691 (2013)

第 5 章 新規フリクションディスク開発のためのレーザーを用いた摩擦材表面加工

5.1 はじめに

第 4 章では、レーザーを用いた湿式クラッチ用ペーパー摩擦材表面への微細加工手法について研究を行った。加工に使用するレーザー種類やペーパー摩擦材種類によって加工品質が異なる結果を示したが、ペーパー摩擦材表面にわずかな熱影響で微細なテクスチャを形成する条件が見出された。

本章では、湿式クラッチ用フリクションディスクに接着されたペーパー摩擦材表面にレーザーを用いて微細な溝形状テクスチャを形成し、テクスチャの形状パラメータ（溝巾、溝深さ）が摩擦特性へ及ぼす効果について調べた[1]。なお本研究は筆者自らがサンプルの試作から試験までを実施した。

5.2 フリクションディスクへのテクスチャ加工

湿式クラッチ用ペーパー摩擦材に対するテクスチャの形成による摩擦特性への影響を確認する。

摩擦特性の評価サンプルとしては一般に用いられるフリクションディスクを用いた。その仕様および外観写真をそれぞれ、表 5-2-1、および図 5-2-1 に示す。フリクションディスクにはセグメント接着方式を採用し、セグメントピース（コマ）数は 20 個、放射状の油溝を有する。試験摩擦材の配合は量産される湿式クラッチ用ペーパー摩擦材を参考に設定した。配合材料として、アラミド繊維、珪藻土、フェノール樹脂が所定の比率で含有される。フリクションディスクは円盤状の芯板にセグメント方式で打ち抜いた摩擦材を熱プレスにより接着することで作成される。

テクスチャの形成には 4 章での結果を基に加工品質の観点からピコ秒レーザーを選定した。ピコ秒レーザーは 4 章にて用いられたものと同設備を使用している。テクスチャの加工方法の概要を図 5-2-2 に示す。加工においては、フリクションディスク上の摩擦材に対し、ガルバノスキャナによりレーザーをライン状に走査することで溝形状のテ

クスチャ（微細溝）を形成した。微細溝のピッチはガルバノスキャナのプログラムにより、溝深さは同一ライン状を走査する繰り返し回数により変化させた。

表 5-2-1 フリクションディスク仕様

ディスク寸法 [mm]	外径 119.5 内径: 94.5
油溝形状	放射溝
溝巾 [mm]	外径側: 2.40 内径側: 1.70
セグメント数	20
摩擦材面積 [mm ²]	3,740

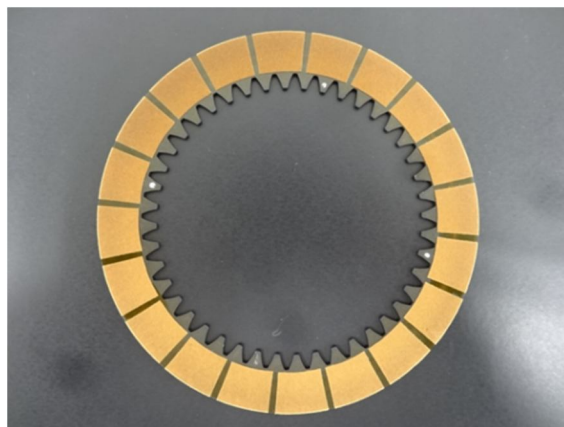


図 5-2-1 フリクションディスクの外観写真

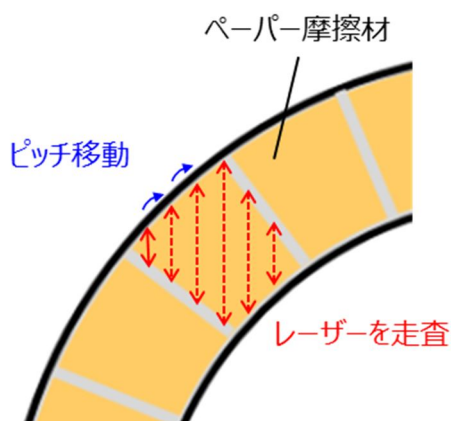


図 5-2-2 フリクションディスクのレーザー加工手法

5.3 摩擦特性試験

5.3.1 試験概要

本研究では動的摩擦係合過程の摩擦特性を評価する代表的手法である SAE#2 摩擦試験機を用いて、フリクションディスクの摩擦特性に対する微細溝の影響を評価した。試験方法は自動車規格『JASO M348:2012（自動変速機油摩擦特性試験方法）』を基にして条件を設定した[2]。

本評価に使用した SAE#2 試験機の外観写真を図 5-3-1-1(a)に設備の概略図を(b)に示す。SAE#2 試験機は駆動モーター、イナーシャ（慣性マス）、押付・解放ピストン、油圧・温度コントロール部、ロードセル、試験槽により構成される。試験槽内にはフリクションディスクがスチールプレートに挟まれるような形で取り付けられ、試験槽内はテスト油で満たされる。図 5-3-1-2 に SAE#2 試験の代表的な測定例を示す。

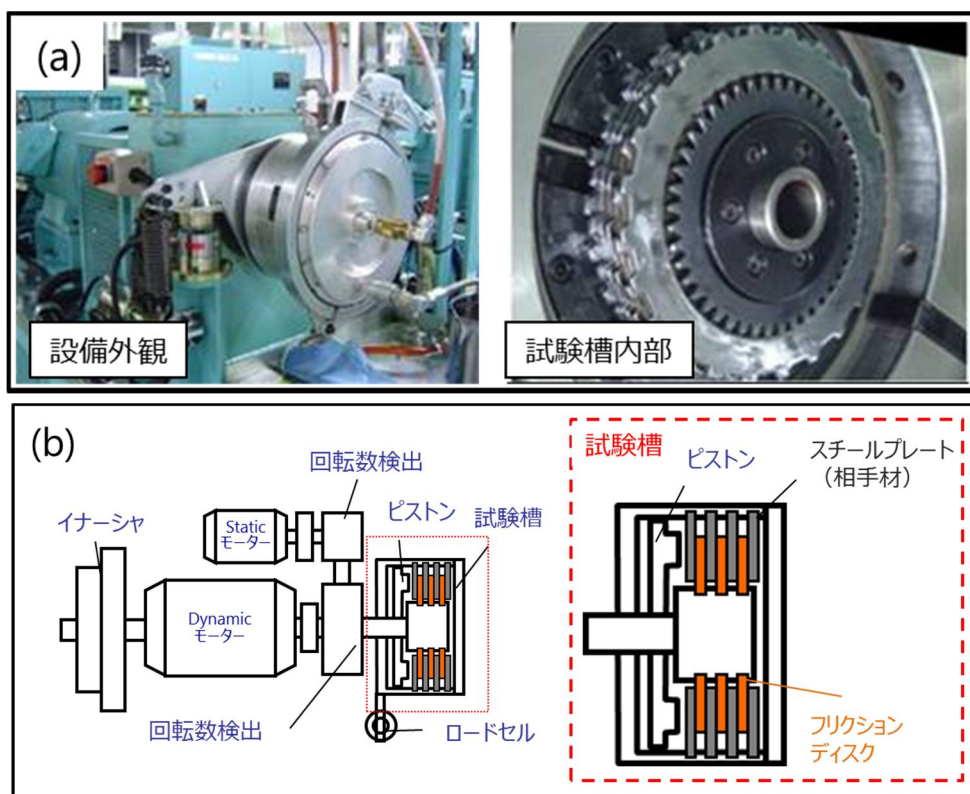


図 5-3-1-1 SAE#2 試験機概要 (a)外観写真, (b)設備概要

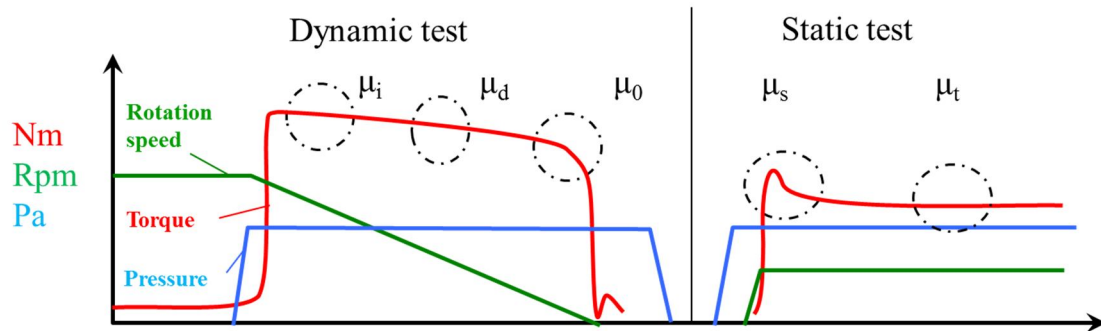


図 5-3-1-2 SAE#2 代表波形

動的試験では、試験槽内が所定の油温となるように制御されたのち、フリクションディスクは駆動モーターのシャフトに同軸になるように取り付けられたイナーシャとともに回転し、一定の回転数に保たれる。駆動モーターの電源を切ると同時に押し付けピストンが作動し、フリクションディスクとスチールプレートを一定荷重で押し付ける（係合させる）。回転が停止するまでに発生するトルク（摩擦力）をロードセルにより測定し、トルクと押し付け荷重から摩擦係数を計算で求める。任意の回転数に対応した摩擦係数を求めることにより、 μ - V 特性を評価することができる。

静的試験は動的試験と連続して実施され、あらかじめ任意の荷重で押し付けた状態からモーターを駆動し、引き摺り時のトルクより摩擦係数を算出する。

動的試験における各回転数での動摩擦係数（ μ_i 、 μ_d 、 μ_0 ）、静的試験における静摩擦係数（ μ_s 、 μ_t ）の定義を以下に示す。

μ_i ：動的試験における係合初期のトルクから計算される摩擦係数

μ_d ： " 係合中期のトルクから計算される摩擦係数

μ_0 ： " 係合終期のトルクから計算される摩擦係数

μ_s ：静的試験における引き摺り開始後のピークトルクから計算される摩擦係数

μ_t ： " 引き摺り開始 2 秒後の安定トルクから計算される摩擦係数

本研究では回転数 2000 rpm における摩擦係数を μ_i 、1200 rpm、200 rpm における摩擦係数をそれぞれ μ_d 、 μ_0 として用いる。

5.3.2 試験条件、試験サンプル

SAE#2 摩擦特性試験の試験条件を表 5-3-2-1 に示す。テスト油には JASO 標準油 RTF1 を用いた。イナーシャおよび回転数は JASO M348:2012 における単位面積当たりの吸収エネルギー (Q/A) と同等になるようにフリクションディスク上の摩擦材面積から計算し設定した。耐久試験条件において 3000 cycle の当たりつけを行った後、性能試験条件にて摩擦特性を評価した。性能試験条件では表 5-3-2-1 に示される油温および面圧においてそれぞれ試験を行い、摩擦特性の温度、面圧依存性を確認した。

表 5-3-2-1 SAE#2 試験条件

	耐久試験条件	性能試験条件
試験油	JASO RTF1	
ディスク枚数	1	
イナーシャ [$\text{kg}\cdot\text{m}^2$]	0.147	0.147
回転数 [rpm]	3200	3000
油温 [$^{\circ}\text{C}$]	100	60, 80, 100, 120, 140
面圧 [MPa]	0.79	0.35, 0.59, 1.07, 1.34
Q/A [J/cm^2]	110.3	97
サイクル数	3000	-

試験に用いたフリクションディスクの外観写真および微細溝パラメータをそれぞれ図 5-3-2-1 および表 5-3-2-2 に示す。溝ピッチはデジタルマイクロスコープ、溝深さはレーザー顕微鏡を用いて測定した。図 5-3-2-2 に Disk A のレーザー顕微鏡による断面像と微細溝の形状プロファイルを示す。図 5-3-2-1 より微細な巾の溝が規則的に形成されていることが確認できる。図 5-3-2-2 より、微細溝は連続的に形成され、溝の断絶等、深さの大きな変化はほとんど見られなかった。溝深さは 1 サンプルに対し 10 点以上測定し、その平均値を用いた。Disk A、B、C については溝深さが約 150 μm 、それぞれ溝ピッチが 251 μm 、501 μm 、1010 μm となる微細溝が形成されている。Disk D、E においては溝ピッチが約 250 μm 、溝深さがそれぞれ 79 μm 、46 μm の微細溝が形成されている。レーザーの走査条件を変更することでほぼ狙い通りに微細溝を形成することができた。溝巾はすべてのディスクで 20~25 μm であった。比較サンプルとして溝加工無しの Disk F についても試験を実施した。

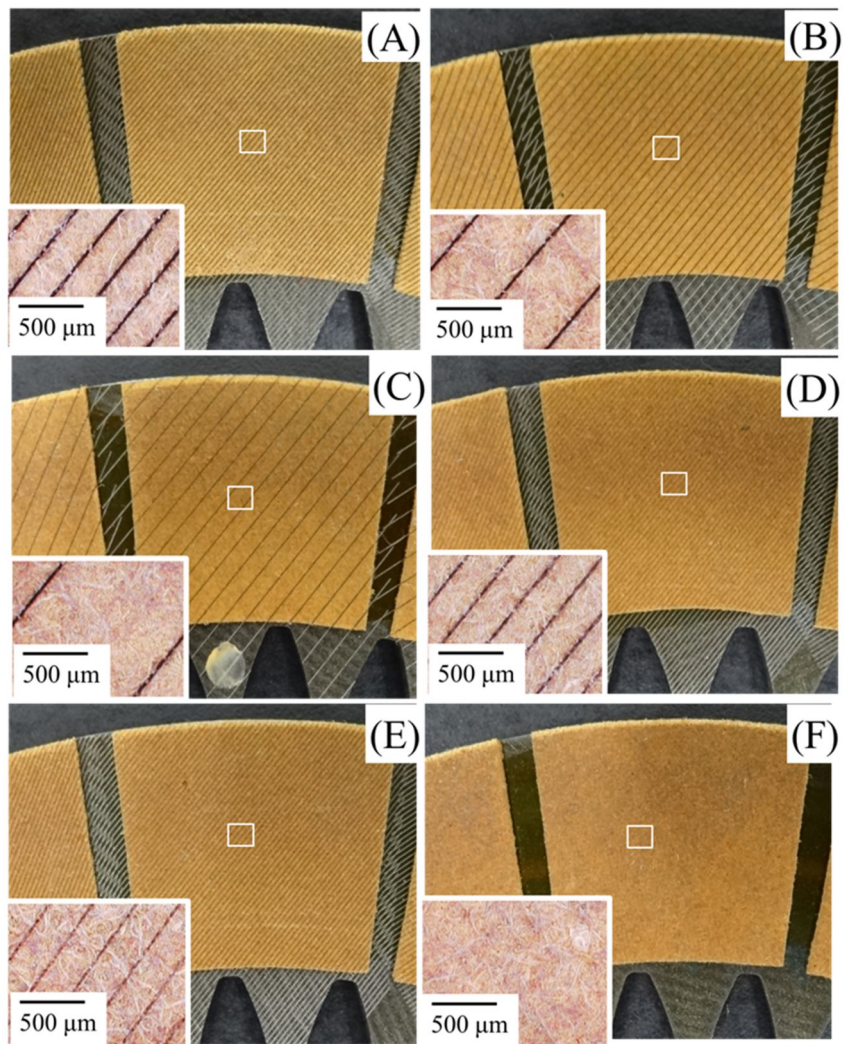


図 5-3-2-1 加工ディスクの外観

表 5-3-2-2 加工ディスクの溝パラメータ

Disk	溝巾 [μm]	溝深さ [μm]	溝ピッチ [μm]
A	20	140	251
B	21	146	501
C	23	148	1010
D	24	79	255
E	23	46	251
F	無し		

各フリクションディスクの摩擦材表面におけるオイルの浸透性を評価するために、オイル浸透時間（OPT）を測定した。OPT の試験方法としては 24 °C に保たれたテスト油を、マイクロシリンジを用いて摩擦材表面に 4 μL 滴下し、油滴が摩擦材内部まで完全に浸透するまでの時間を計測する。測定値は各ディスクに対して 5 点以上測定した平均値を用いた。

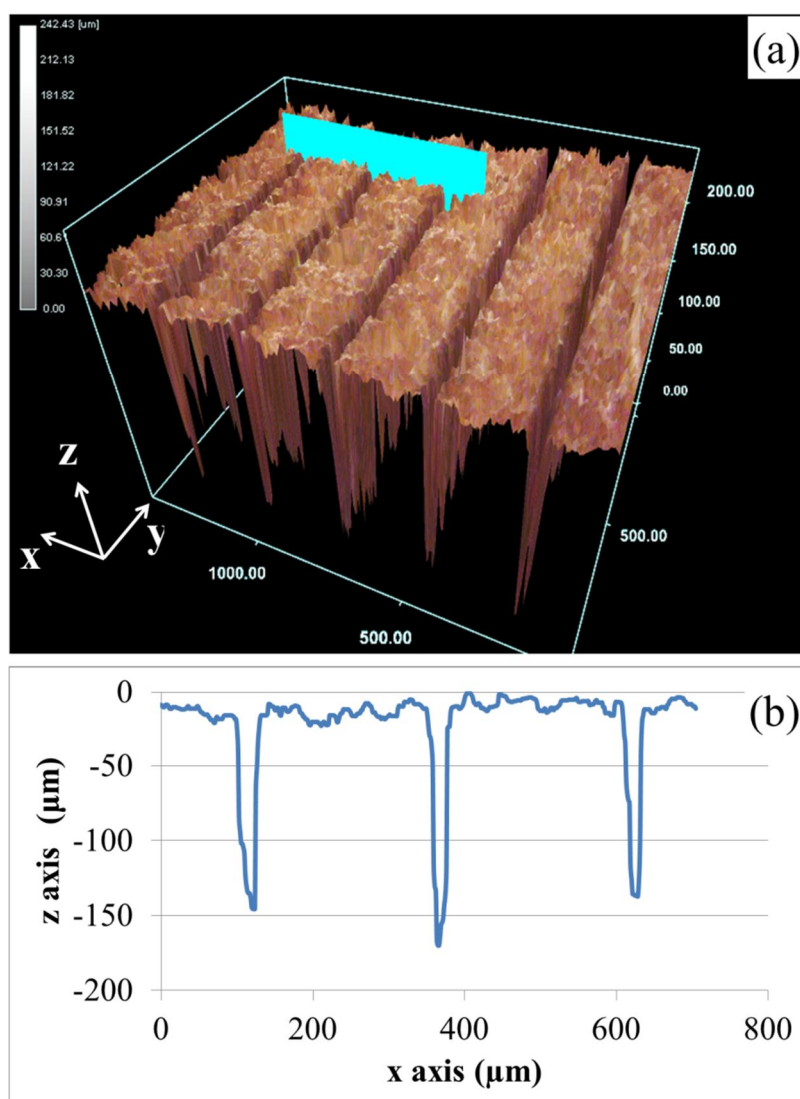


図 5-3-2-2 Disk A のレーザー顕微鏡による断面像(a)と微細溝の形状プロファイル(b)

5.3.3 試験結果

図 5-3-3-1(a)に試験油温 140 °C、図 5-3-3-1(b)に 60 °Cにおける Disk F の SAE#2 動的試験のトルクカーブの面圧による変化をそれぞれ示す。試験油温 140 °Cにおいて、押し付け面圧が大きくなるにつれて発生するトルクが大きくなり、回転停止時間が短くなっているのがわかる。試験油温 60 °Cにおいても同様に押し付け面圧が高くなると発生トルクが大きくなる傾向がみられるが、低面圧条件（0.35 MPa、0.60 MPa）において係合初期（高回転数領域）のトルクの立ち上がりが遅く、特に 0.35 MPa では回転停止時間が長くなっている。すべりが発生していることが確認できる。

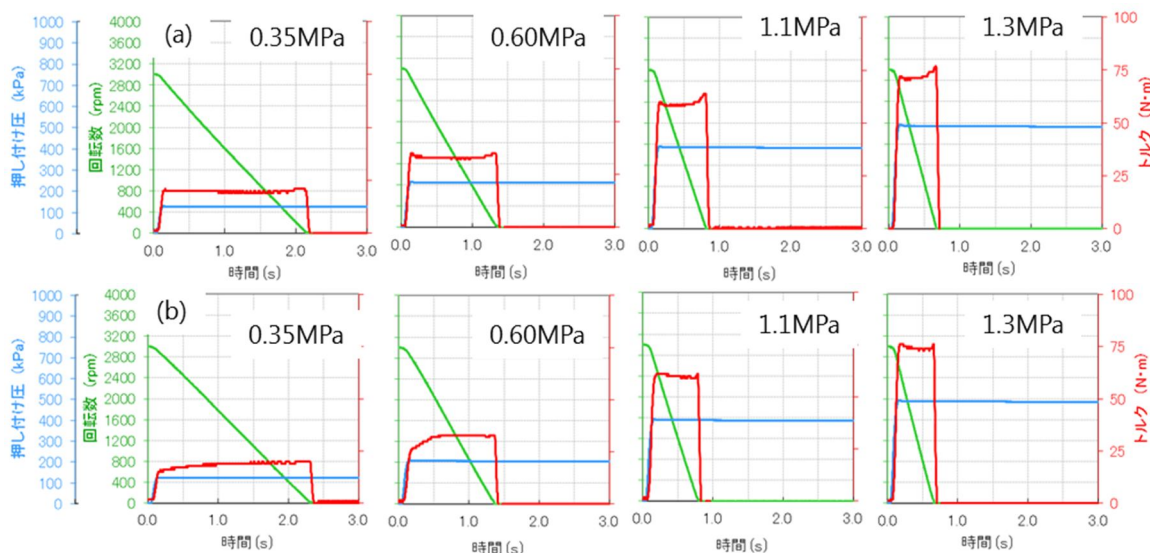


図 5-3-3-1 Disk F のトルクカーブの面圧変化(a)140°C(b)60°C

図 5-3-3-2 (a)に Disk A および Disk F の低温／低面圧（60 °C、0.35 MPa）におけるトルクカーブ、および(b)に高温／高面圧（140 °C、1.3 MPa）のトルクカーブの比較をそれぞれ示す。低温／低面圧において溝無しの Disk F では回転数の低下に対してトルクが上昇するトルクカーブとなっていることから、高回転数領域ですべりが発生するとともに異常振動の原因となりやすい。それに対し、微細溝有りの Disk A では高回転数領域でのトルクの立ち上がりが早く、回転数の低下とともにトルクがやや低下する良好なトルクカーブを示し、回転の停止時間も短くなっている。高温／高面圧においては微細溝の有無によりトルクカーブの大きな違いは見られなかった。

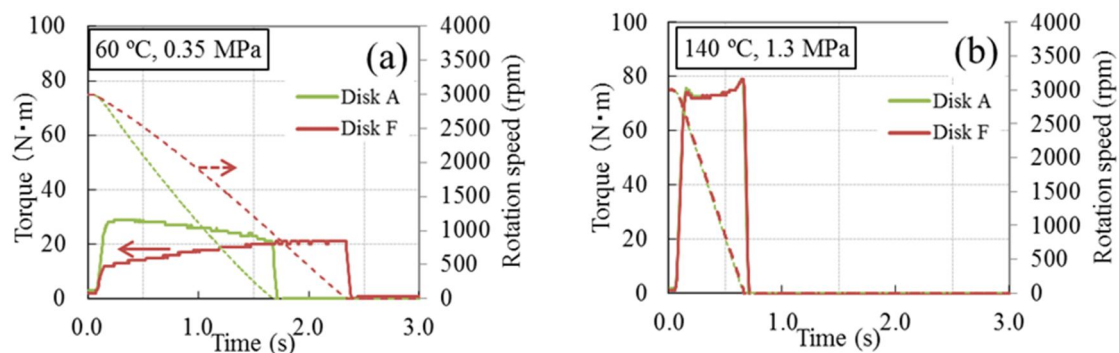


図 5-3-3-2 (a)Disk Aおよび Disk Fの低温／低面圧（60 °C、0.35 MPa）におけるトルクカーブ
(b)高温／高面圧（140 °C、1.3 MPa）のトルクカーブ

図 5-3-3-3 に低温／低面圧（60 °C、0.35 MPa）における微細溝深さ違いでのトルクカーブの変化を示す。微細溝の深さが大きくなるにつれて、係合初期のトルクの立ち上がりが早く、停止時間が短くなっている。しかしながら、Disk D（深さ 79 μm ）と E（46 μm ）の間の差は、Disk A（140 μm ）と D（79 μm ）の差および Disk E（46 μm ）と F（溝無し）の差と比べて大きい。これは溝の深さに対して立ち上がりのトルクが非線型的に大きくなっていることを示している。

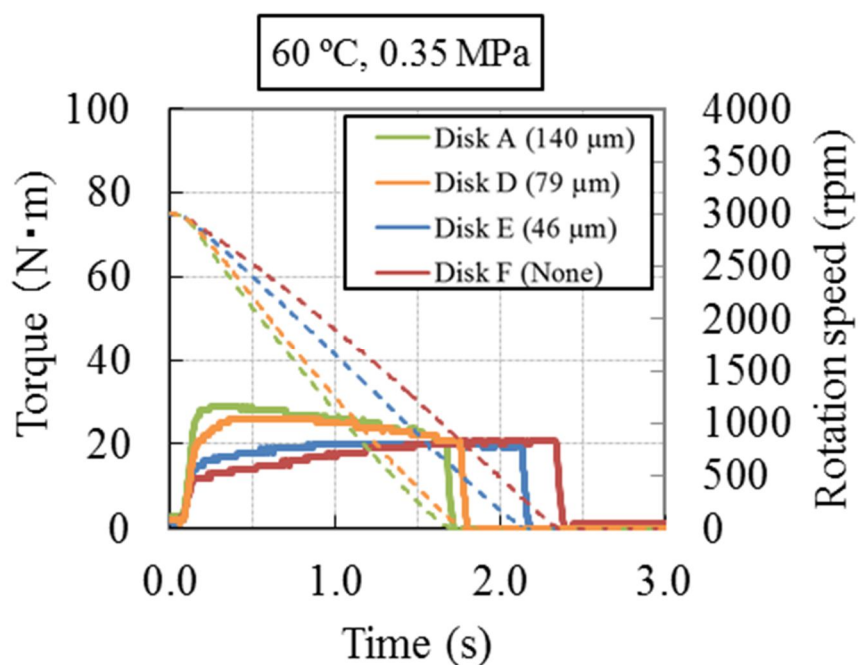


図 5-3-3-3 微細溝深さ違いでのトルクカーブの変化

図 5-3-3-4 に低温／低面圧（60 °C、0.35 MPa）における微細溝ピッチ違いでのトルクカーブの変化を示す。微細溝のピッチが小さくなるにつれて、係合初期のトルクの立ち上がりが早く、ストップタイムが短くなっている。Disk B（ピッチ 501 μm ）と C（1010 μm ）の間の差は、Disk A（250 μm ）と B（501 μm ）の差および Disk C（1010 μm ）と F（溝無し）の差と比べて大きい。溝深さと同様に、溝のピッチに対しても立ち上がりのトルクが非線型的に大きくなっており、溝ピッチが 500 μm と 1000 μm の間で変曲点がある可能性が考えられる。

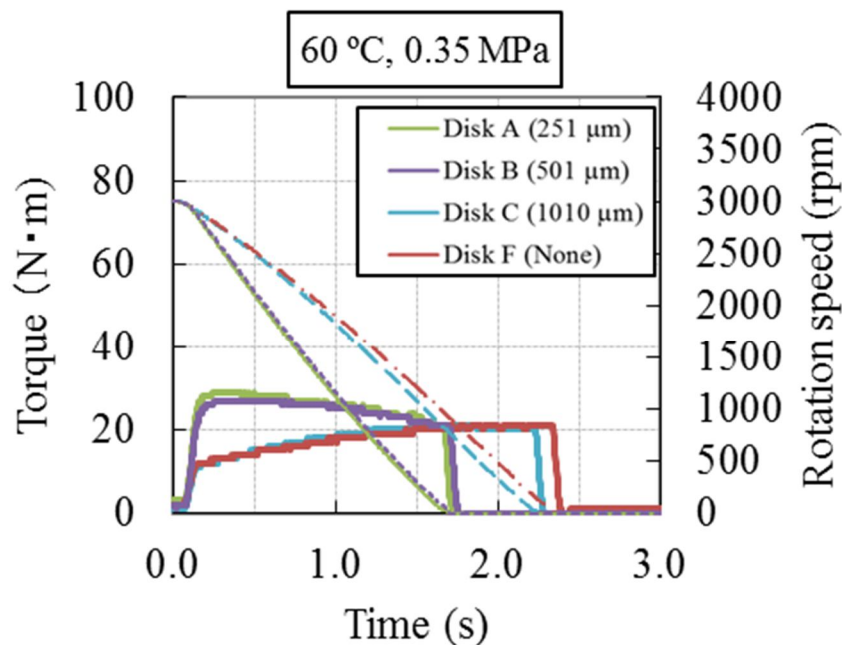


図 5-3-3-4 微細溝ピッチ違いでのトルクカーブの変化

図 5-3-3-5 に各溝加工ディスクにおける油温および面圧（押し付け荷重）の動摩擦係数（ μ_i 、 μ_d 、 μ_0 ）および静摩擦係数（ μ_s ）に対する影響を示す。溝深さが大きくなるにつれて、また溝ピッチが狭くなるにつれて動摩擦係数（ μ_i 、 μ_d ）が大きくなる傾向があり、微細溝による動摩擦係数の変化は低温／低面圧で大きい。また、動摩擦係数の変化は $\mu_0 < \mu_d < \mu_i$ の順に大きくなることから、係合初期（高回転数領域）において特に微細溝の影響が大きいといえる。静摩擦係数（ μ_s ）については微細溝のパラメータによる変化が見られなかった。

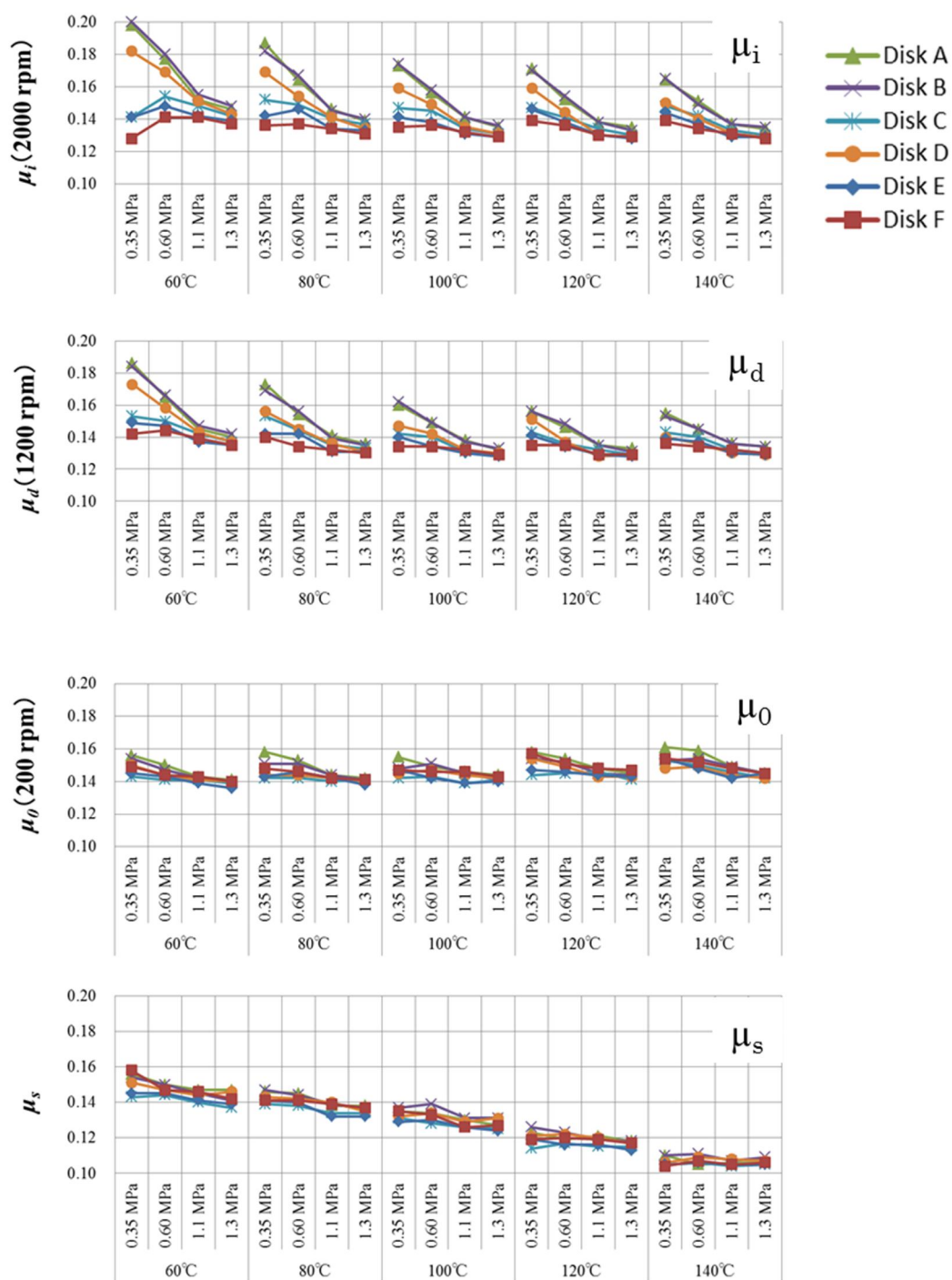


図 5-3-3-5 動摩擦係数 (μ_i , μ_d , μ_0) および静摩擦係数 (μ_s) の面圧依存性

微細溝を施したフリクションディスクにおける OPT と動摩擦係数の関係を図 5-3-3-6 に示す。 μ_i と OPT の間には関係性がみられ、 μ_i は OPT が短くなるにしたがって大きくなっている。

動摩擦係数は微細溝のパラメータ（深さ、ピッチ）によって変化し、その効果は特に低温／低面圧で顕著に見られた。また、その効果は油温、面圧に依存し、高温／高面圧条件では効果が小さい。

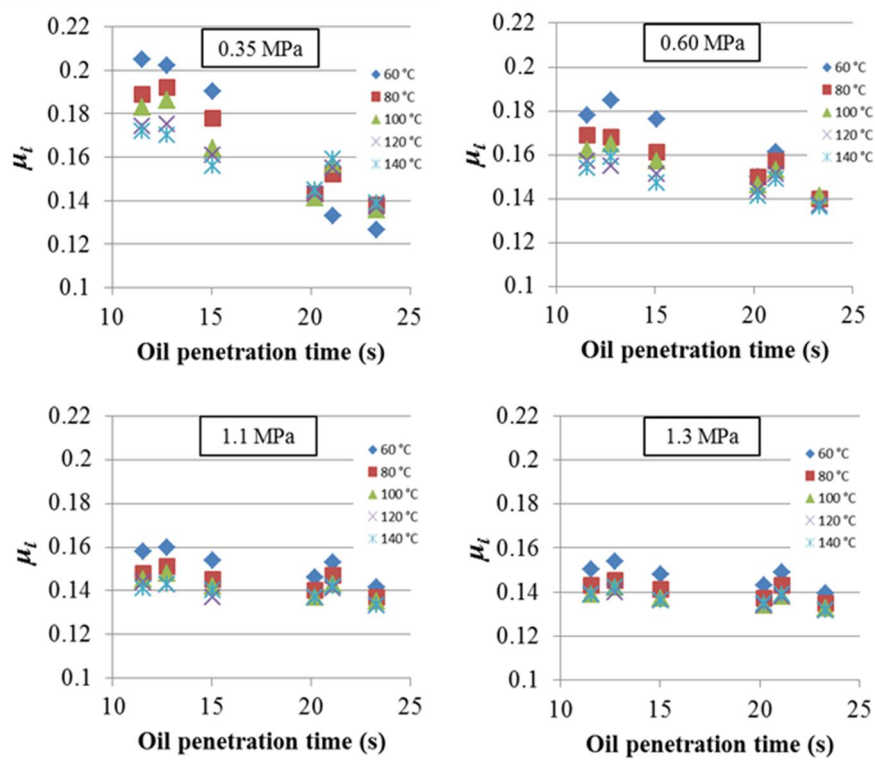


図 5-3-3-6 OPTと動摩擦係数の関係

5.3.4 考察

以上の結果から、動摩擦係数は微細溝のパラメータ（深さ、ピッチ）によって変化し、その効果は特に低温／低面圧で顕著に見られた。また、その効果は油温、面圧に依存し、高温／高面圧条件では効果が小さいことが示された。

湿式クラッチの係合初期における動摩擦係数は係合面における油膜の影響を大きく受けることが知られている[3,4]。係合過程において摩擦材表面と相手材表面は、ピストンにより押し付けられ接触しようとする。しかしながら、湿式クラッチでは摩擦材表面と相手材表面の間にはオイルが充満し、油膜が存在する。係合過程では押し付け圧が発生するとともに、係合面にオイルが充満した「流体潤滑」の状態から、一部が接触した「混合潤滑」状態を経て、油膜が排除された「境界潤滑」が支配的になることで、摩擦係数が増大し、トルクの伝達が行われる。溝加工ディスクにおいては、係合過程で摩擦材表面の油膜が、微細溝を介して排出されやすくなることにより、流体潤滑状態から境界潤滑が支配的な状態に早く遷移することで、係合初期の動摩擦係数が向上したと考えられる。また、高温条件ではオイルの粘度が低く、高面圧条件では押し付け圧が大きくなることで摩擦材表面からオイルを強制的に排除することができるため、微細溝の効果が小さくなり、逆に低温／低面圧ではオイルの粘度が高く、表面からオイルが排除されにくい条件であるため、微細溝の有無による差が大きくなったと考えられる。

また、係合面からのオイルの排除性と摩擦材のオイル浸透性の間に関係性が存在することは報告されている[5]。上述したように摩擦材表面に微細溝を形成させることで、係合面からオイルが排除されやすくなり、OPT が短くなる。それにより、係合初期の動摩擦係数（およびトルク）が大きくなると考えられる。よって、図 5-3-3-3 および図 5-3-3-4 でみられた、溝深さおよび溝ピッチの変化に対するトルクカーブの非線形的な変化は OPT の非線形的な変化によるものと考えられる。

図 5-3-4-1 に OPT と微細溝の体積率の関係を示す。微細溝の体積率は図 5-3-4-2 のように算出された。微細溝の断面形状は矩形に近似している。図 5-3-4-1 より微細溝の体積率が大きくなるにつれて、OPT が短くなっていることがわかる。したがって、本研究のような、微細溝巾が同じである条件においては、微細溝の体積率（溝深さおよびピッチ）を変化させることにより OPT を変化させることができる。すなわち、湿式クラッチにおける動摩擦係数は微細溝の体積率によりコントロールすることが可能であると

示唆される。しかしながら、実際の使用条件下では、微細溝の形状変化および耐久性に対する摩耗の影響を調査することが必要と考えられる。

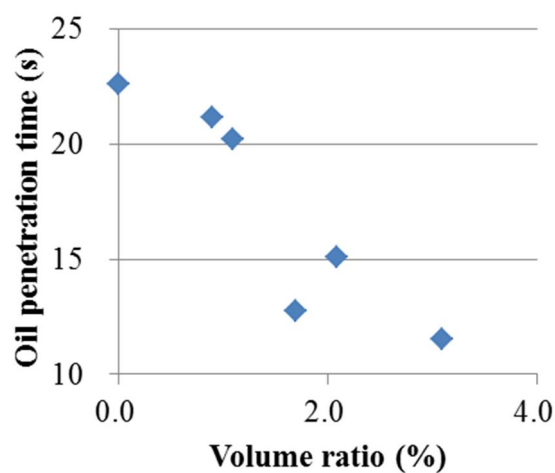
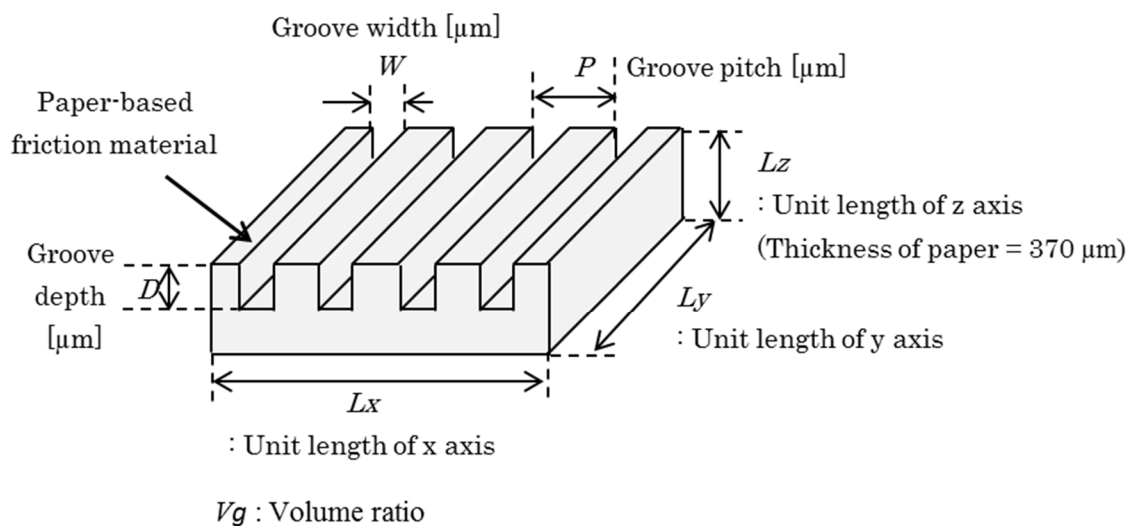


図 5-3-4-1 OPTと微細溝の体積率の関係



$$V_g = (W \cdot D \cdot L_y) \times \frac{L_x}{P} \times \frac{1}{L_x \cdot L_y \cdot L_z} = \frac{W \cdot D}{P \cdot L_z}$$

図 5-3-4-2 微細溝加工のイメージ

一方で、静摩擦係数 (μ_s) は微細溝の形成によって大きな変化は見られなかった。静摩擦係数 (μ_s) には摩擦材と相手材との真実接触面積が大きく影響することが知られているが、本研究のような巾数十 μm の微細溝では真実接触面積の低下が少ないことから、静摩擦係数 (μ_s) が低下しなかったと考えられる。

以上のことから、摩擦材表面にマイクロメートル (μm) オーダーのテクスチャを形成することで、静的摩擦係数を低下させることなく動的摩擦係数をコントロールし、 μ - V 特性を改善することができると考えられる。これは、高摩擦係数 (軽量コンパクト化) と良好な変速フィーリング (スムーズなギヤの切り替え) を実現するための技術として応用可能である。

また、これまでは気孔率が低い材料は高摩擦係数を示すが、オイル浸透性が悪いため μ - V 特性が悪化するという問題を有していた。本研究で明らかになった技術を応用することで、これまで使用できなかった低気孔率の材料を用いて、高摩擦係数かつ良好な μ - V 特性を有した新たなペーパー摩擦材が実現可能となる。また、複雑かつ微細な 3 次元構造を形成することも可能であり、新たな特性を持ったペーパー摩擦材の実現が期待できる。

5.4 まとめ

湿式クラッチ用ペーパー摩擦材の表面にピコ秒レーザーを用いてマイクロメートルオーダーのテクスチャを形成し、SAE#2 試験により摩擦特性への影響を検証した。その結果、以下のことがわかった。

- ・ピコ秒レーザーを用いて加工することでペーパー系摩擦材の表面に溝巾約 $20\mu\text{m}$ 、深さ $50\sim 150\mu\text{m}$ の規則的な溝形状のテクスチャを形成することができた。
- ・テクスチャ加工を施すことで、特に低面圧条件において係合初期 (高回転数領域) の動摩擦係数が向上した。
- ・高回転数領域での動摩擦係数の向上はペーパー系摩擦材におけるオイル浸透時間 (OPT) との相関性が高く、オイル浸透時間は、摩擦材単位体積あたりに存在する微細溝の体積によりコントロールすることが可能であった。
- ・溝加工を施したことによる静摩擦係数の低減は見られなかった。

以上のことから、摩擦材表面にマイクロメートルオーダーのテクスチャを形成するこ

とで、静的摩擦係数を低下させることなく動的摩擦係数をコントロールし、 μ - V 特性を改善することができると考えられる。これにより、摩擦係数向上によるクラッチの軽量コンパクト化（省燃費）と良好な変速フィーリング（スムーズなギヤの切り替え）を実現可能である。また、本研究の手法は現行の量産材に対し、後加工により効果を付与し差別化を図ることができるため、特に既存顧客に対してはこれまでの実績を活かすことにより顧客内でのシェア拡大に優位性を持つと考えられる。

さらに、これまでは気孔率が低い材料は高摩擦係数を示すが、オイル浸透性が悪いために μ - V 特性が悪化するという問題を有していた。本研究で明らかになった技術を応用することで、これまで使用できなかった低気孔率の材料を用いて、高摩擦係数かつ良好な μ - V 特性を有した新たなペーパー摩擦材が実現可能となる。また、複雑かつ微細な3次元構造を形成することも可能であり、このような新たな特性を持ったペーパー摩擦材を実現することにより、クラッチ市場における競争力の獲得が期待できる。

第 5 章 参考文献

1. Shintaro Yagi, Nobuyuki Katayama, Hiroaki, Hasegawa, Hiroshi Matsushita, Shin-ichiro Okihara, Toshiyuki Kusumoto and Akihiko Tsuboi, “Effects of Microscale Texture on the Tribological Behavior of Paper-Based Friction Materials for a Wet Clutch”, Tribology Online, Vol. 10, No. 5, 390-396 (2015)
2. 自動車規格, 「自動変速機油摩擦特性試験方法」, JASO M348:2012
3. 松本 堯之, 「湿式ペーパー摩擦材の多孔性と実用性能」, トライボロジスト, 第 41 巻, 第 10 号, 816-821 (1996)
4. 李 辰宇, 高橋 仁, 「動力伝達クラッチの表面テクスチャ」, トライボロジスト, 第 48 巻, 第 9 号, 703-708 (2003)
5. 佐野 春信, 武居 正彦, 「湿式クラッチの動的摩擦係合過程における潤滑特性」, トライボロジスト, 第 39 巻, 第 12 号, 1089-1096 (1994)

第6章 プロダクト・ジェネアロジーを用いた暗黙知の発掘

6.1 はじめに

2章において述べたように、近年、自動車業界においてグローバルな部品調達が進む中で、自動車部品メーカーにおいても国際的な競争力が求められ、製品開発についてもこれまで以上に効率化が要求される。

開発の効率化を実現するためには、企業の保有する知識（ナレッジ）を活用し、新たな知識創造につなげることが重要になる。しかしながら、部品メーカーのような開発型製造業の保有する知識は、開発者個人や限られたグループの中に「暗黙知」として埋没してしまいやすいという側面を持っており、知識を活用するためには、埋もれた暗黙知を効率的に発掘し、蓄積していくシステムの構築が求められる。

本章では、プロダクト・ジェネアロジー（製品系譜学）の手法を用いて、企業が開発した製品の系譜を遡ることにより、過去の開発の中に埋没した暗黙知の発掘を試み、過去の経験に埋もれた知識の発掘手法としての有効性を検証した。

6.1.1 暗黙知の定義

「暗黙知」には様々な解釈が存在する。その提唱者である Polanyi は暗黙知を「言語化できない」知識として定義した[1]。例えば、たくさんの人の中から特定の人の顔を見分けることや、自動車を上手く運転することなどの、人が無意識に行い言葉で説明することができない知識がそれにあたるとしている。

経営学の分野では、Nonaka and Takeuchi は暗黙知を「経験や勘に基づく知識のことで、言葉などで表現が難しいもの」として定義している[2]。Nonaka and Takeuchi は、経験や勘、ノウハウといった暗黙知が数値化可能なデータや方程式、マニュアルのような形式知に変換され、組織内での共有を経て再び暗黙知に戻ることで組織の知識が創られると述べている。大西は Polanyi と Nonaka and Takeuchi の暗黙知を比較し、言語化することのできない「技術的暗黙知」（熟練の技能や癖）と言語化、形成化の途上である「認知的暗黙知」（ひらめき、アイデアやそれを生み出す能力）を定義した。また、「ひらめき」を鍵概念とした改定 SECI モデルを提示することで Nonaka and

Takeuchi の知識創造の考え方を実態化した[3]。

本研究において発掘する対象は、Polanyi の考えを含む広義の暗黙知の中で「言語化できなくはないが、これまで語られていなかった知識」を指す。製造業の過去の製品開発の中にある、開発の狙いや意図、背景や開発時の状況などの、データ、マニュアルとして表現することが困難な知識に加え、データやマニュアルに変換可能であるが、表現されていない知識がそれにあたる。このような開発者の経験により育まれた知識は非常に重要であるが、表現することが難しいため開発者個人の中に埋没してしまいやすい側面を持つ。本論文ではこのような知識を発掘することを目的とし、以降「暗黙知」と表記する。

6.2 ナレッジマネジメントの先行研究

企業における知識の活用と知識創造は、Nonaka and Takeuchi をはじめとする先行研究により理論化がなされている。彼らが提唱した SECI モデル（図 6-2-1 参照）において、暗黙知を形式知に変換する表出化のプロセスは「知識創造の真髄（エッセンス）」として示されている。また、暗黙知の共有における「場」の重要性や、メタファー、アナロジーを用いたコンセプト創造など、現在進行形での暗黙知の表出化手法についても詳しく述べている[2]。そのほかにも、熟練工の持つ技術を伝承する手法[4]や、組織的に知識を表現するシステムの構築[5]、また、企業がその社員個人の知識を活用する手法である「ナレッジマネジメント」に関しては、企業を中心に様々な研究がおこなわれてきた[6-8]。

しかし、過去の製品開発に埋没した知識に焦点を置いた暗黙知の発掘に関しては、明確な手法は述べられていない。製造業における知識として過去に開発された製品は非常に重要な意味を持ち、製品に関する情報（仕様、製造条件、開発コンセプト等）は企業内に蓄積され、開発ツールの一つ、あるいは将来の開発戦略のヒントとして活用される。開発型製造業においては、開発された製品の図面や仕様、製造条件などに代表される形式知に対し、設計思想や開発の狙い、開発時点での顧客の要求や社会情勢などの背景は、暗黙知として開発の中に埋没しやすい側面を持っている。製品開発の効率化のためにはこれらの過去の開発の中に埋没した暗黙知を表出化し、知識として活用する手法が求められる（図 6-2-2 参照）。



図 6-2-1 : SECI モデル

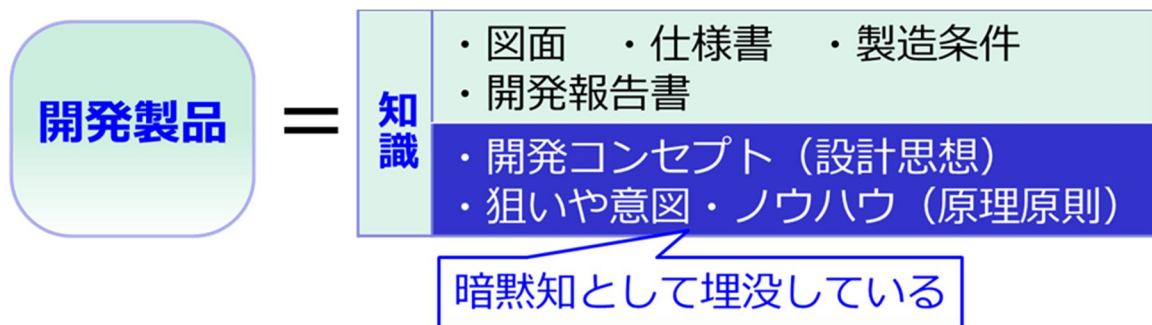


図 6-2-2 : 開発製品と知識

6.3 調査対象としての暗黙知

本研究では、自動車用湿式クラッチの摩擦材について過去の開発に埋没した暗黙知の発掘を試みる。3章でも述べたように、本調査の対象とした自動車用湿式クラッチの摩擦材は、主にオートマチック車の自動変速機内において、走行時にはエンジンからの動力（回転）をトランスミッションに伝達し、また変速時には動力の切り離し、再締結をスムーズに行う役割を持つ。摩擦材の基本的な構成としては、各種繊維素材、有機/無機充填材、レジンの混合材料であり、その構造、および製造方法が一般的な紙と同様であることから、ペーパー摩擦材と呼ばれる。クラッチの摺動部となるフリクションディスクはこの摩擦材を鉄板に接着し作成される。摩擦材はその使用環境から、高い動力伝達効率、耐久性能と良好な変速フィーリングを同時に求められる極めて複雑な特性を有した材料である。したがって、摩擦材の設計思想も複雑化し、形式化した知識として表現することが難しいノウハウが暗黙知として埋没しやすいと考えられる。（図 6-3-1 参照）

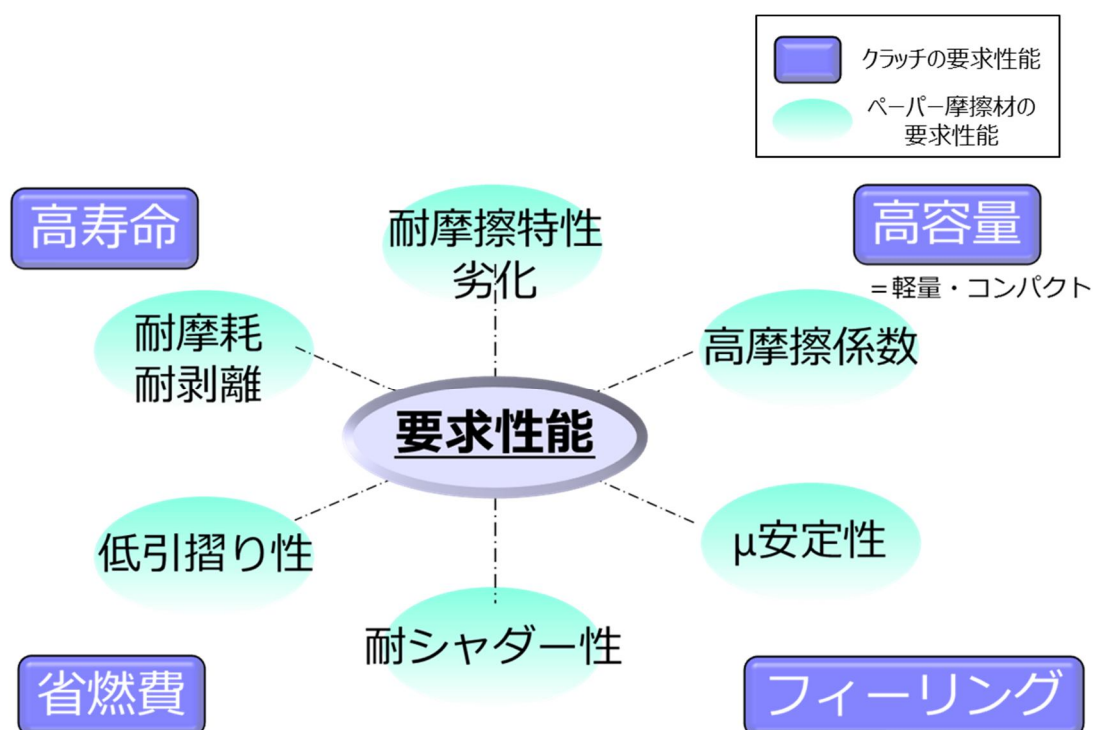


図 6-3-1：摩擦材の要求性能（図 3-3-3-1）

6.4 手法

過去の開発（経験）の中の暗黙知の発掘手法として、プロダクト・ジェネアロジーを用いた。プロダクト・ジェネアロジーの手法により過去の開発の流れを把握するとともに、ポイントとなった開発製品、技術を抽出する。また、その抽出手法としては文献調査やインタビューが用いられるが、本研究では、まずグループインタビューにより系譜図の作成を実施し、次に担当開発者にナラティブ・インタビューを行うことで、経験の中にある暗黙的な知識を発掘した。

6.4.1 プロダクト・ジェネアロジー

ジェネアロジー（系譜学）とは元々は家族の家系を明らかにし、家系図を作成する学問であるが、民俗学や歴史研究、芸術など様々な分野においても、その成り立ちや関係性を分析する方法として用いられている。他の分野へ展開した例として、Nietzsche の『道徳の系譜』[9]、Foucault の『狂気の歴史』[10]、『監獄の誕生—監視と処罰』[11]などが挙げられ、相澤は『ミシェル・フーコーの方法論：系譜学の導入について』[12]の中でフーコーの系譜学の方法論について解説している。

また増田は『生の現場の「語り」と動機の詩学』[13]で語りと物語の系譜を辿る手法について議論を展開している。増田は『環境保全型「水道と農業」を可能にする 3R マテリアル「ポリシリカ鉄」の研究 —変容する経営情報としての「語り」の視座から—』[14]ではその手法を経営分野、技術開発分野に適用している。これはプロダクト・ジェネアロジーの考え方に通じるものである。深澤・増田はこの考え方を製品開発に適用し、ある製品の開発から現在に至る歴史を辿り、ターニングポイントとなった事象を分析することで、マーケティング戦略立案に反映した[15]。

6.4.2 ナラティブ・インタビュー

Flick によると、ナラティブ・インタビューは「人間が経験する世界へと開かれた調査手法の一つ」(p.122)である。他の構造化されたインタビューでは、予め設定された質問に対する回答が得られるのみだが、ナラティブ・インタビューではインタビューにナラティブ（物語／語り）を語ってもらうことで、インタビューの視点をありのままに把握することが可能となる[16]。その他のインタビュー手法の例との比較を図 6-4-2-1 に示す。

本研究では、ナラティブ・インタビューを暗黙知のうちデータやマニュアルで表現し難い知識を抽出するための手法として有効であると考え採用した。なお、プロダクト・ジェネアロジーに基づいたナラティブ・インタビューにおいては、インタビュアーもその対象となる製品についてある程度の知識を有した内部の人間であることが、インタビューの効率を高くするためには望ましいと考えられる。

	インタビュー	手法	概要	質問例
量的研究	構造化インタビュー	アンケート	一問一答式	「AとBのどちらがお好みですか？」
質的研究	半構造化インタビュー	焦点インタビュー 問題中心インタビュー etc.	回答の自由度の高い質問を用いる	「この映画で何が最も印象に残りましたか？」 「『健康に対するリスク』から何を思い浮かべますか？」
	ナラティブ・インタビュー	ナラティブ・インタビュー エピソード・インタビュー	物語/語りをデータとして用いる	「あなたの人生の物語がどのように進んできたかをお話してください」 「あなたのテクノロジーとの最初の出会いの状況をお話してください」

図 6-4-2-1：インタビュー手法の一覧

6.5 調査概要

初めに摩擦材の開発者 2 名に対しグループインタビューを実施し、摩擦材の開発系譜図を作成した。次に作成した系譜図を基にそれぞれ個別にナラティブ・インタビューを実施し、個々の摩擦材の開発ストーリー(ナラティブ)をほぼ時系列で語ってもらった。それらの結果を基に分析を実施した。インタビュー手法、インタビュイー、および実施日と検討の流れをまとめたものを図 6-5-1 に示す。インタビューおよび分析は摩擦材の開発者である筆者自らが行った。

実施したインタビューは以下のようになり、インタビュー内容は録音及びメモにより記録した。

インタビュー手法	インタビュイー	実施日 (時間)
グループインタビュー	A 社開発担当 B, C	2015 年 8 月 26 日 (1 時間)
ナラティブ・インタビュー	A 社開発担当 B	2015 年 9 月 17 日 (1 時間) 2015 年 9 月 21 日 (1 時間半)
	A 社開発担当 C	2015 年 10 月 14 日 (1 時間半)

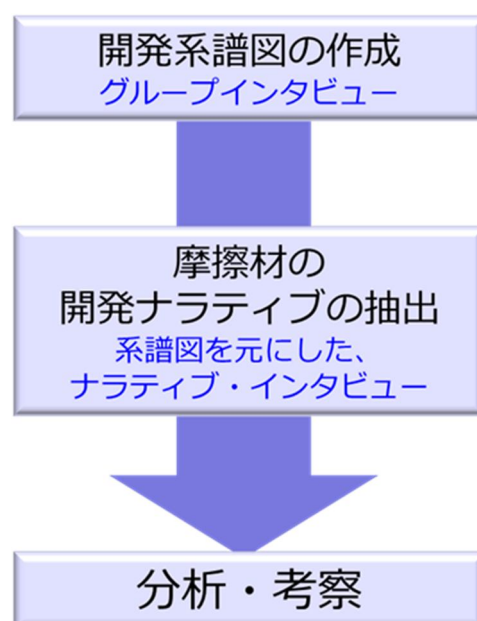


図 6-5-1 : 検討の流れ

6.6 結果

6.6.1 湿式摩擦材開発の系譜

グループインタビューを基に 1980 年代以降の摩擦材の開発系譜図を作成した。作成した系譜図を図 6-6-1-1 に示す。

1970 年代にアスベスト繊維の使用が制限され、摩擦材においてもアスベスト繊維が使用されなくなった。A 社においては 1980 年初頭にその後の開発のベースとなる AT 変速用クラッチ（※1 以下 AT 用）向けの摩擦材（A-1 材）が開発されている。

1983 年～84 年に開発された A-2 材は AT 用だけでなく、ロックアップクラッチ（※2 以下 LU 用）にも用いられた。その後 1980 年代後半からは AT 用と LU 用では求められる特性の違いから、別々の材料が使用されるようになっていった。

AT 用途では 1992 年に A-5 材が開発され、その後 10 年にわたり主力材として用いられた。

1990 年代になると無段変速機（CVT）が普及し、それに伴い CVT スタートクラッチ用（※3 以下 CVT 用）の摩擦材が開発される。スタートクラッチはトルクコンバーター式と比べ燃費に対する優位性があったため、その後も開発が進んだが、LU 運転領域の拡大によるトルコン式の燃費向上やスタートクラッチの振動の問題などにより、2000 年代後半で数が減少し、開発は終了した。しかし、そのコンセプトは、2000 年半ばに開発された A-6 材に活かされ、その後の開発にも引き継がれている。近年でも AT の多段化への対応に伴い AT 用の新しい摩擦材の開発が進められている。

LU 用では D-1 材が長く主力材として使用されたが、その後耐久性、耐振動性の向上した D-2 材が開発されている。

また、4WD 車の DIFF 用クラッチ（※4）（E-1～4）などその他の用途にもバリエーションが増えている。

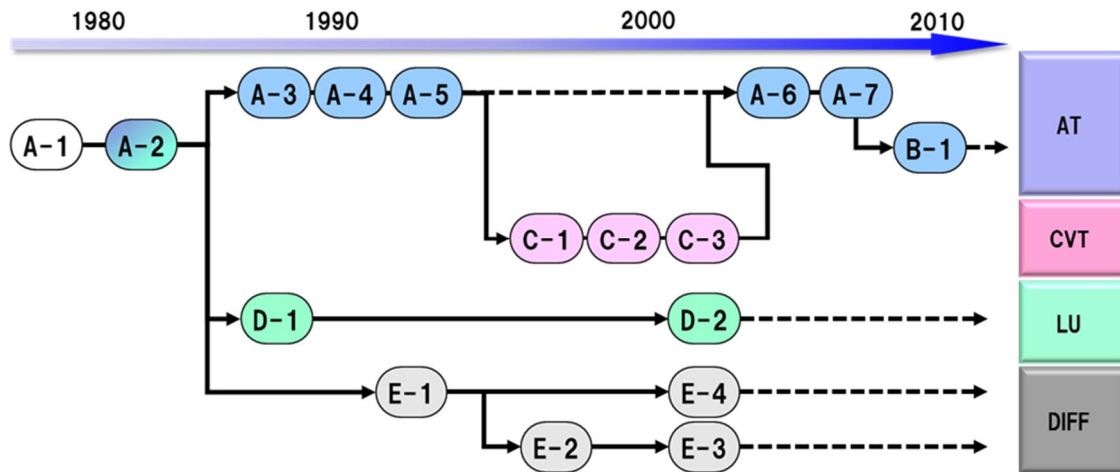


図 6-6-1-1 : ペーパー摩擦材の開発系譜

- ※1 AT : オートマチックトランスミッション。従来式の多段式自動変速機。無段階変速と区別するためステップ AT とも呼ばれる。
- ※2 LU : ロックアップクラッチ。AT のトルクコンバーターの中で、伝達効率を向上させるため変速作用が必要ない領域でエンジン側と駆動側の回転軸を直結するためのクラッチ。
- ※3 CVT : 無段階変速機。変速比を連続的に変化させるトランスミッション。ベルトプーリー式が主に用いられる。
- ※4 DIFF : デファレンシャル・ギア・ユニット。4WD 車の前輪と後輪の回転差を制御するための差動歯車ユニット。例としてリミテッド・スリップ・デフの一形式に多板クラッチが用いられる。

6.6.2 各摩擦材における開発ナラティブ

次に系譜図を基にして開発者に対しナラティブ・インタビューを実施した。ナラティブ・インタビューでは、摩擦材の開発ナラティブから以下の観点について特に着目し、ナラティブを引き出した。インタビューは摩擦材の開発者である筆者が行い、インタビューと対話をしながらナラティブの導出を促す働き掛けを行った。

- ① その材料の開発の背景、目的
- ② 開発に当たり実際に行ったこと（開発元となった摩擦材からの変化点等）、その狙い
- ③ 開発の結果（狙い通りの結果が得られたか）
- ④ 特にポイントとなったことや、思い通りにならなかったこと

ナラティブ・インタビューは B 氏、C 氏に対して行ったが、ポイントとなったナラティブが主に B 氏から得られたことと C 氏のナラティブには機密事項が多くあったため、インタビューの内容は B 氏のみ記載する。

(1) A-2 材（AT 用、LU 用）に関するナラティブ

① A-2 材の開発の背景、目的

B 氏：「耐熱、耐久性、要するに、温度が上がってすぐぼろぼろになる、摩耗が多くなることを回避するために（開発が必要になった）」

「（耐熱性が必要となった理由としては）使われ方とそこから LU をやるようになった…（中略）…A-1 材では耐久性が足りなくて、LU を視野に入れるとなると、A-2 材が必要になった」

② A-1 材からの変化点

B 氏：「耐久性をアップする手法としては、耐熱繊維を入れたことと、無機充填材を A-1 材では、（材料 Z）であったのを A-2 材では（材料 Y）を使った」

③ 開発の結果

B 氏：「熱的にも強くなったし、摩耗性も上がった」

④ ポイントとなったこと

B氏：「(耐熱繊維を) 何%入れるかが一番の課題、(耐熱性繊維は価格が) 高いので、あまり (摩擦材のコストを) 高くしたくない… (中略) …できるだけ (耐熱繊維の) 量を減らしながらも耐熱耐久性を上げるということを考えてやった」

・ A-2 材についての分析

以上をまとめると以下ようになる。

- ・ クラッチの使用環境が厳しくなってきたこと、LUで使用されることで、摩耗や焼けの発生が問題となった。
- ・ 摩擦材としては初めて耐熱性の高い合成繊維を使用し、耐摩耗性を向上させるために無機充填材を変更した。
- ・ 狙い通り性能は向上したが、耐熱性繊維は高価であったため、配合量をそれほど多くはできなかった。

(2) A-5 材 (AT 用) に関するナラティブ

① A-5 材の開発の背景、目的

B氏：「(A-4 材での問題点が多く出てきて、完成車メーカーからの要求もあり) ガラッと (配合を) 変えようとして A-5 材にシフトしていった」

② A-4 材からの変化点

B氏：「耐熱耐久性を含めここで耐熱繊維の量を一気に増やした… (略；その他配合、製法の変更点に言及)」

③ 開発の結果

筆者：「(A-5 材)は自分が入社した 2005 年にも使っていましたが、ここから 15 年近く使っていたということですね」

B氏：「そうなるね」

④ ポイントとなったこと

B氏：「(1993年から本格的に A-5 材の量産がはじまったが) そのころからセグメント (摩擦材の新接着手法) が本格的に適用されだして、耐熱繊維をたくさん使っているのだけど、コストが上がらないようにできてきた… (中略) …それがないとそんなに広がらなかったと思う」

・ A-5 材についての分析

以上をまとめると以下のようなになる。

- ・ A-5 材の開発に先立って、新しい摩擦材の接着手法が開発された。図 6-6-2-1 にセグメント接着法を示す。従来の接着法では摩擦材をリング状に打ち抜き、ディスクへ接着していたが、スクラップとして無駄になる材料が多く、材料歩留まりは 15% 程度であった。セグメント接着法では、テープ状の摩擦材をカットまたはコマとして打ち抜き接着することで、60%以上の高い歩留まりを達成した。
- ・ 新手法により摩擦材の歩留りが大幅に向上し、高価な耐熱繊維を大量に使用することが可能となった。
- ・ これまでの開発で得られた知見を集約することで、AT 用として長期にわたり主力となる摩擦材の開発につながった。

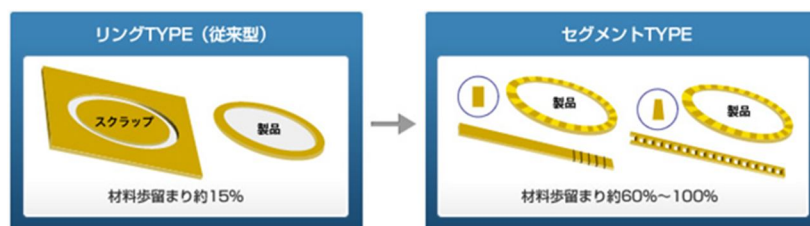


図 6-6-2-1 : セグメント接着法

(3) C-1 材 (CVT 用) に関するナラティブ

① C-1 材の開発の背景、目的

B氏：「CVT 普及のかなり前から (完成車メーカーで CVT スタートクラッチの) 開発

は始まっていた」

「(CVT スタートクラッチは) 耐熱的に使い方が荒く、… (中略) …当初は摩擦材の耐熱性を上げることを考えた、A-5 材ではもたなくて」

② A-5 材からの変化点

B 氏：「計算上すぐに摩擦材の耐熱温度を超えてしまう、実際にすぐにもたなくなった… (中略) …どうしたかという、(摺動面の冷却) を試みた」

「(計算上では十分冷却できるはずだが) 従来の設計レイアウトではうまく冷却できない (よってクラッチの設計変更を行った)」

「当然、接着形状も冷却しやすい形状にしなければいけない、… (中略) …接着形状も色々検討した」

④ ポイントとなったこと

B 氏：「かなり早い段階で、(計算上) 熱がこのくらい出るから、クラッチが持たないことがわかっていた… (中略) …完成車メーカーもすぐに対応してくれて、(冷却手法の検討を始めた)」

・ C-1 材についての分析

以上をまとめると以下ようになる。

- ・ CVT のスタートクラッチの開発に伴い、摩擦材の選定が行われた。
- ・ しかし、これまでの AT と異なり、CVT のスタートクラッチでは発生する熱量が極めて大きく、熱解析を行った結果、摩擦材の耐熱性能では対応不可能なレベルであった。
- ・ そこで完成車メーカーと共同でクラッチの差動条件を変更し、摺動面の冷却を試みた。
- ・ しかし、従来のクラッチ設計レイアウトでは十分に冷却ができなかったため、クラッチパックおよび、摩擦材の接着形状の設計変更を行うことで、耐熱性を確保することに成功した。

6.7 分析と考察

開発系譜を基にしたナラティブ・インタビューにより抽出された、各摩擦材の開発ナラティブを整理することで、以下の知見が得られた。

A-2 材、C-1 材にも見られるように、クラッチの使用される環境、顧客要求の変化に伴い、摩擦材もそれに対応すべく開発され進化してきた。これはクラッチに限らずほぼすべての工業製品に当てはまる事象と考えられるが、逆説的には、それらの環境の変化に遅れないこと、また変化を予測し、顧客に対しコンセプト提案をしていくことが今後の開発では求められることを示している。図 6-7-1 に環境の変化による影響を記載した系譜図を示す。

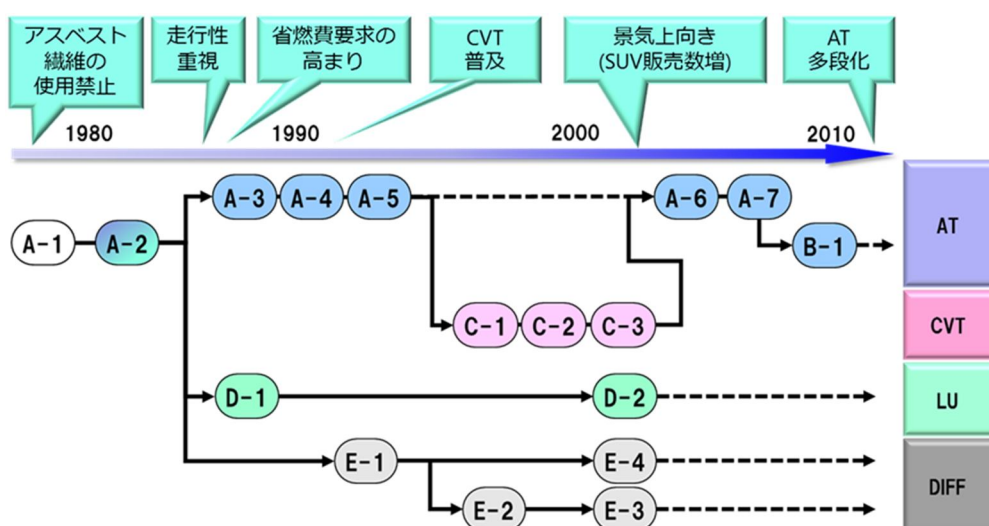


図 6-7-1：環境の変化の影響

また、摩擦材の技術的な発展には周辺技術の進歩が影響したと考えられる。例えば、A-5 材の開発時には歩留まり向上の接着製法が開発されたことで、高価な耐熱性繊維の配合量を大きくすることができ、高耐熱性の部材の開発に成功している。また、その後も接着製法の更なる進化とともに長く主力材として使用された。C-1 材の開発時には摩擦材単独ではなく、システム全体に対し完成車メーカーと共同で技術の摺合せを行うことで、新しいクラッチシステムに対応した摩擦材を創出した。図 6-7-2 に周辺技術による影響を記載した系譜図を示す。

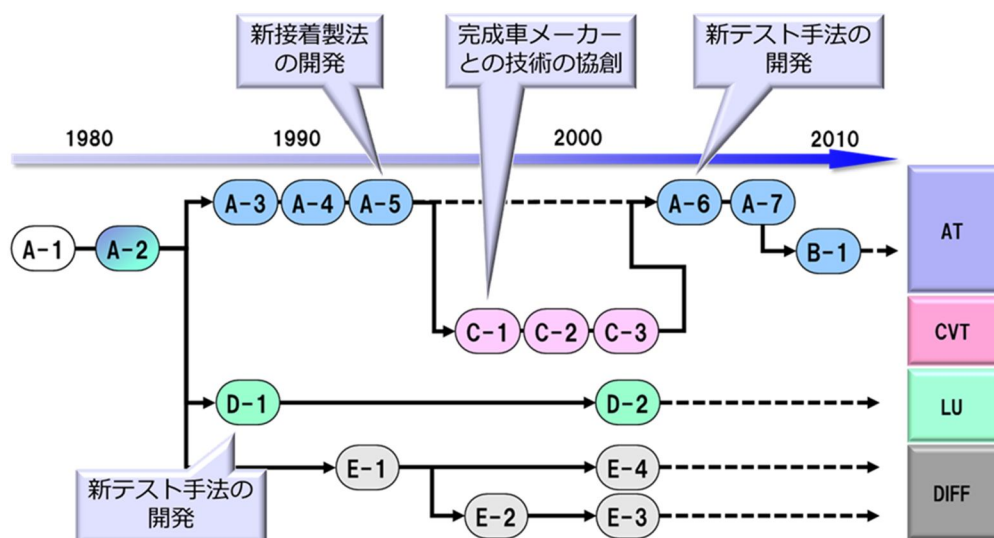


図 6-7-2：周辺技術の影響

加えて本報告では詳細を示すことができないが、摩擦材の技術面での形式化されていない知識、例えば配合の狙いや変遷、製造技術に関するノウハウなどが多く抽出され、系譜図を用いることで系統的に整理することができた。

本研究を通して見出されたこれらの事実は、担当した開発者とその周辺の限られた範囲にのみ認知されていた「開発に埋もれた暗黙知」であり、摩擦材の技術の進化と、クラッチ、およびトランスミッション全体の技術の進化とが相互に影響を与え合ったことを示している。すなわち、摩擦材の開発者が材料のみに着目するのではなく、顧客を含めた周辺技術と連携を取りながら技術開発を進めたことで、摩擦材の進化を促進したことが明らかになった。

以上のように経験に基づく知識である暗黙知の発掘手法として、ナラティブ・インタビューが有効であった。系譜図を基にすることで開発者の過去の経験（記憶）が整理されやすくなり、効率的に精度の高い情報の収集が可能になると考えられる。

また、今後は摩擦材のみでなくそのほかの分野においても研究を進めたいと考える。また、過去の発掘のみでなく、継続的に知識を蓄積していくシステムを構築するために本手法の応用方法が求められる。

6.8 まとめ

プロダクト・ジェネアロジーの手法を用いて湿式クラッチ用摩擦材（摩擦材）の開発の中の暗黙」の発掘を試みた。

経験に基づく知識である暗黙知の発掘手法として、ナラティブ・インタビューが有効であった。系譜図を基にすることで開発者の過去の経験（記憶）が整理されやすくなり、効率的に精度の高い情報の収集が可能になると考えられる。

さらに、「周辺技術との連携」が過去の摩擦材の発展に大きく寄与し、技術的なブレイクスルーの起点となったことが明らかになり、環境の変化に対して、先を見据えた「コンセプト提案」とともに今後の開発にとって重要になることが示された。

また、本報告では詳細を示すことができないが、摩擦材の技術面での形式化されていない知識、例えば配合の狙いや変遷、製造技術に関するノウハウなどが多く抽出され、系譜図を用いることで系統的に整理することができた。

以上より、過去の開発の中に埋没した知識の発掘において、これらの手法の有効性が示唆された。暗黙知となっていた過去の知識を発掘し、整理することで、ノウハウを伝承するとともに開発の効率化を図ることができると考えられる。

今後は摩擦材のみでなくそのほかの分野においても研究を進めたいと考える。また、過去の発掘のみでなく、継続的に知識を蓄積していくシステムを構築するために本手法の応用方法が求められる。

第6章 参考文献

1. Michael Polanyi, 「暗黙知の次元一言語から非言語へ」 佐藤敬三訳, 紀伊國屋書店 (1980)
2. Nonaka, Ikujiro, Takeuchi, Hirotaka (1995), 『The Knowledge-Creating Company』 梅本 勝博訳 『知識創造企業』 東洋経済新報社, 1996
3. 大西 幹弘, 「暗黙知とは何か(3)」日本ナレッジマネジメント協会東海部会季報, Jul, (2007)
4. 山田 裕昭、福田 康明、早川 周, 「知識構築のメカニズムにおける暗黙知の表出化を目指して」 日本生産管理学会論文誌 Vol.13 No.2 2007.2
5. 大崎 紘一、加藤 鴻介, 「ナレッジマネジメントにおける構造化知識構成法」 日本経営工学会論文誌 Vol.53 No.6 (2003)
6. 黒瀬 邦夫, 「競争力を生み出すナレッジ・マネジメント」 情報の科学と技術 49 巻 9 号, 448-453, (1999)
7. 藤澤 康雄, 「わが国産業界におけるナレッジ・マネジメント (KM) の事例ー(株)大林組技術研究所のナレッジ・マネジメントー」 管理 Vol.46 No.11 February 2004
8. 江上 慎、依田 哲也、伊藤 義武, 「社内 Wiki を活用したコラボレーション・ネットワーク構造と生産性の相関運関」 日本経営工学会論文誌 Vol.65 No.3 (2014)
9. Nietzsche, Friedrich(1964) 『道徳の系譜』 木場 深定訳 岩波文庫
10. Foucault, Michel (1975) 『狂気の歴史ー古典主義時代における』 田村 俣訳 新潮社
11. Foucault, Michel (1977) 『監獄の誕生ー監視と処罰』 田村 俣訳 新潮社
12. 相澤 伸依(2005) 『ミシェル・フーコーの方法論：系譜学の導入について』 実践哲学研究 (2005), 28:1-20
13. 増田 靖 (2013) 『生の現場の「語り」と動機の詩学ー観測志向型理論に定位した現場研究＝動機づけマネジメントの方法論』 ひつじ書房
14. 増田 靖 (2010) 『環境保全型「水道と農業」を可能にする 3R マテリアル 「ポリシリカ鉄」の研究ー変容する経営情報としての「語り」の視座からー』 経営情報学会誌 Vol.19 No.3 pp.203-219
15. 深澤 宏仁、増田 靖(2014) 『プロダクト・ジェネアロジー (系譜学) によるマーケティング戦略』 経営情報学会 2014 年秋季全国研究発表大会
16. Flick, Uwe(2002) 『Qualitative Forschung』 小田博志・山本則子・春日常・宮地 尚子訳『質的研究入門』 春秋社、2002

第7章 本研究の発展性についての考察

7.1 はじめに

本論文では、自動車用クラッチ市場におけるシェア拡大、および競争力の獲得を背景にして以下の2つの目的を設定した。

目的(1) 自動車向け湿式クラッチ用ペーパー摩擦材の新技術の開発

目的(2) 技術開発の効率向上のための手法の構築

また、それぞれの目的に対し以下の研究を行った。

◆項目①：光技術を利用した湿式クラッチ用ペーパー摩擦材へのテクスチャ形成による摩擦特性の向上

3章から5章において、レーザーを用いた加工により、ペーパー摩擦材表面にこれまでに無い微細なテクスチャを形成することが可能になり、テクスチャの形状を制御することによるペーパー摩擦材の動摩擦係数の制御手法が示された。

◆項目②：保有する知識の活用、新たな知識創造へつなげる手法の構築

6章では、プロダクト・ジェネアロジの手法を用いて湿式クラッチ用ペーパー摩擦材の過去の開発に埋没した暗黙知の発掘を試みた。系譜図を作成することにより技術の流れが整理され、系譜図を基にしたナラティブ・インタビューにより効率的に暗黙知が収集できる手法を見出した。過去の知識を埋もれさせることなく活用することで、開発の効率化につながることを期待できる。

さらには、ペーパー摩擦材の開発の流れの中で、「環境の変化」が技術の進化の方向性を定め、摩擦材の材料技術ではなく、その「周辺技術の進化」が製品開発におけるブレークスルーの起点として、大きく影響することが見出された。

この手法に関しては、経営情報学会にて発表し、他の研究者から肯定的なコメントを受けた。

これらの研究により、本論文の背景にある、自動車用クラッチ市場におけるシェア拡大、および競争力の獲得に対して一定の成果が得られたと考えられる。得られた知見が

今後の事業の発展に活かされることが期待できる

本章では、それらの研究の発展性について述べるとともに、将来に向けて継続的に競争力を持ちうる技術開発を行っていくことについて考察する。

7.2 新技術の発展性

3章から5章より、レーザーを用いてペーパー摩擦材表面にマイクロメートルオーダーの微細なテクスチャを形成することで、摩擦材の動摩擦係数が変化し、また、微細なテクスチャの深さとピッチを変更することで、動摩擦係数をコントロールすることができることが示された。3章にて述べたように、湿式クラッチにおいてペーパー摩擦材は、様々な要求性能が同時に求められ高度にバランスを保つことが求められる複雑な特性を有している。その中の1つの特性である、動摩擦係数はこれまで主にペーパーの気孔特性によって制御されてきたが、そのほかの特性とのトレードオフの関係から、任意にコントロールすることは難しかった。

しかしながら、本研究による手法では、ペーパー摩擦材への非常に微細な加工により特性を制御することから、ペーパーそのものの配合組成や構造を変えることなく動摩擦係数のみをコントロール可能であり、そのほかの特性への影響を小さくできると考えられる。さらには、これまで使用できなかった低気孔率の材料を用いて、高摩擦係数かつ良好な μ - V 特性を有した新たなペーパー摩擦材が実現可能となる。また、複雑かつ微細な3次元構造を形成することも可能であり、新たな特性を持ったペーパー摩擦材の実現が期待できる。

さらには、レーザーによる摩擦材加工技術が、摩擦材の材料技術にとっての「周辺技術の進化」に該当するとも言うことができる。6章で述べたように、周辺技術の進化は過去の摩擦材の開発におけるブレイクスルーの起点となっており、本研究の結果についてもペーパー摩擦材の進化に寄与する可能性が十分にあると考えられる。

また、今後も光技術を含めたそのほかの技術を積極的に取り込んでいくことで、ペーパー摩擦材の更なる進化を促進していくことが期待できる。図 7-1-1-1 にペーパー摩擦材の今後の発展性を系譜図として示す。

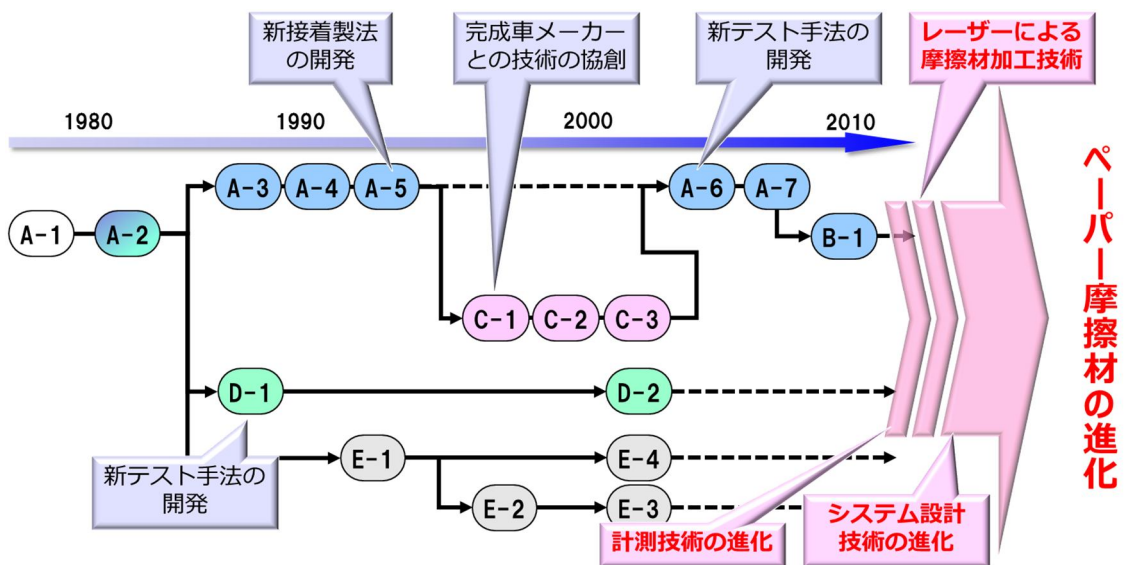


図 7-1-1-1 ペーパー摩擦材の今後の発展性

7.3 開発手法の発展性

6章における研究では、ナラティブ・インタビューを中心に据えたプロダクト・ジェネアロジによる過去の開発に埋没した知識の発掘手法を提案した。以下にその理想的な実施手順を説明する。

インタビューでは実際の対象となる製品及び部品（本研究では摩擦材）の開発者をインタビューイとする。また、インタビュアーもその対象となる製品についてある程度の知識を有した、内部の人間であることがインタビューの効率を高くするためには望ましいと考えられる。

① 開発系譜図の作成

対象となる製品の開発者（複数人）に対し、グループインタビューを行うことで製品の開発系譜図を作成する。開発系譜図は、可能な限り実際の開発の流れを正確に反映したいため、複数の開発者とインタビュアーが議論をしながら作成することが効率的である。

② 開発系譜図を基にした、ナラティブ・インタビュー

作成した系譜図を基にしながら、ナラティブ・インタビューを行う。インタビューは、できる限り開発の流れに沿って時系列で行うことで、後にインタビュアーがまとめやすくなる。ナラティブ・インタビューではインタビュイーに実際の開発時のナラティブを語ってもらい、その中から暗黙的になっていた知識を抽出する。暗黙的な知識とは、例えば、報告書に残されていないような、開発に至る背景、開発の狙いや意図、失敗の経験などが該当する。インタビュアーは開発系譜図における開発元の製品（系譜図の上流の製品）からの変化点を意識するとともに、インタビュイーとの対話により、ナラティブの導出を手助けすることで、開発の流れが整理されやすくなる。

③ 分析・考察

インタビューにより得られた知識を整理する。すでに報告書などにまとめられた（表出化された）知識と照らし合わせ、そこに新たに明らかになった知見を加えてまとめる。系譜図を基にまとめた内容から、キーとなる製品やターニングポイントとなった技術、または複数の製品における共通点などを抽出し、考察することで今後の開発の効率化手法につながる事実が見出されることが期待できる。

このように、本研究における手法を用いることで、過去の知識を埋もれさせることなく活用でき、開発の効率化につながることを期待できる。本研究では自動車向け湿式クラッチの摩擦材に適用したが、自社のその他の部品についても同様に実施することができ、また、それ以外の製造業においても広く応用することができると考えられる。また、それ以外の応用方法として、作成した系譜図及び表出化された知識が整理されることで、新人の教育用資料や部門間での情報共有のために使用することも有効であると考えられる。さらには筆者のような開発者がインタビュアーとなり分析を行うことで、開発者自身が、発掘された知識以上の経験を得ること（自身の成長）ができ、その経験が新たな知識の創造につながっていくことが期待できる。

しかしながら、過去の知識の発掘に対して本手法は効果的であると考えられるが、実際は今このタイミングにも新しい製品が開発され、知識が生まれている。それらの知識を埋没させずに蓄積する仕組みを構築することで、更なる開発の効率化が期待できることから、今後の課題として研究を進めていきたい。

7.4 将来に対する競争力の獲得

以上の研究により、自動車用クラッチ市場におけるシェア拡大、および将来に対する競争力を獲得するという目標に対して技術開発を推進する 1 つの方法論が得られたと考えられる。しかしながら、1 章および 2 章でも述べたとおり、現在、自動車産業は大きな変化が進んでおり、次世代自動車の急速な普及など、自動車部品サプライヤーにとっても情勢の変化に対応するための戦略を構築し、長期的な視点で競争力を持ち続けることが求められる。

筆者の所属するクラッチメーカーにおいても、次世代自動車において駆動系部品が不要になり、クラッチが用いられなくなる可能性を考慮しなければならない。その可能性を視野に入れたうえで、将来的に競争力を持ち続けるための手段の 1 つとして、クラッチ以外の分野における新しい技術および新しい事業を創出していくことが必要になると考えられる。

そのような、本研究における結果を発展させた将来的な競争力獲得のための考え方を表 7-2-1 にまとめた。

表 7-2-1 将来的な競争力獲得のための考え方

		(現業) クラッチシェア向上	(将来) 競争力の獲得
新技術	求められること	クラッチの新技術開発	クラッチ以外の領域での新技術開発
	手段	レーザー加工、etc	他の技術とのコラボレーションの推進 オープンイノベーション等
開発手法	求められること	開発の効率化	継続的な知識の活用および創造
	手段	暗黙知の発掘	手法の構築

本研究と同様に、新技術開発と開発手法の構築に分けて考えると、現業のクラッチ事業における目標はクラッチシェア向上と設定され、技術面で求められることはクラッチ（摩擦材）の新技術であり、開発手法の面で求められることは、開発の効率、スピードということができる。それに対する対応手段としては、技術面ではレーザーを用いた摩擦材加工技術であり、手法の面では、プロダクト・ジェネアロジーを用いた過去の開発からの暗黙知の発掘が有効であることが本研究により示されている。

そして、さらに将来における競争力を獲得すること为目标とした場合には、本研究における知見を発展させた考え方を実践していくことが有効であると考ええる。

技術面においては、クラッチ以外の分野での技術開発が求められる。そのためにはペーパー摩擦材に対する光（レーザー）技術のように、広く他分野の技術を取り入れ、自社の技術とのコラボレーションを推進することで、新しい技術に対するブレイクスルーの起点を創っていくことが有効と考えられる。例えば、大学や公的な研究機関との共同研究や、オープンイノベーション[1]のような手法を用いた外部の技術の導入、あるいは、自社の社員を大学や研究機関に派遣し新たな知識や技術を習得させるとともに、異なる分野、業種の立場の人間と積極的に交流しネットワークを形成することなどが、具体的な手段として効果的であると考えられる。

開発の効率化手法の面では、前節で述べたように現在進行形で暗黙知を蓄積、活用していくことが求められる。過去の暗黙知の発掘手法を応用し、1つの開発テーマが完了するタイミングでそのテーマの中の暗黙知を発掘し、蓄積、共有することを習慣化することが効果的であると考えられる。また、それらの手法を活用し、具体的な実行を通して新たな知識創造につなげるためのシステムを構築することが重要である。さらには3Mの「15%ルール」[2]やホンダの「ワイガヤ」[3]などのような、新たな知識創造を促進する独自の組織文化を育むことによって、競争力を獲得するための継続的な技術開発につなげることが期待できる。

以上のように、本研究における結果を発展させた、情勢の変化に対応し、継続的に競争力を持ちうる技術開発を行っていくための考え方を提示した。今後はこの考え方をもとに技術開発、知識創造システムの構築を実践することで、競争力を持った新事業の開発を推進していく。

第7章 参考文献

1. Henry Chesbrough, 「OPEN INNOVATION」 大前 恵一郎(訳), 産業能率大学出版, 2004
2. Nonaka, Ikujiro, Takeuchi, Hirotaka (1995), 「The Knowledge-Creating Company」 梅本 勝博訳『知識創造企業』東洋経済新報社, 1996
3. 小林 三郎, 「ホンダ イノベーションの神髄」 日経 BP 社, 2012

第8章 結論

8.1 本論文のまとめ

本論文では、クラッチメーカーにおける自動車用クラッチ市場におけるシェア拡大、および将来に対する競争力を獲得することを目標とした取り組みについて論じている。

初めに自動車およびトランスミッションの世界規模での市場について調査し、クラッチの市場動向の推移およびクラッチの市場に存在する課題および、完成車メーカーの生産、調達、販売戦略の変化が、サプライヤーである部品メーカーに及ぼす影響と、求められる事を抽出した。また、自動車部品サプライヤーであるクラッチメーカーが直面する課題を抽出し、大きな世界シェアを有する自動車（AT）用クラッチにおける市場シェア拡大、および将来に対する競争力を獲得するための、今後の戦略および対応手法として、下記の2つの目的を設定し、研究を実施した。

目的(1)：自動車向け湿式クラッチ用ペーパー摩擦材の新技术の開発

目的(2)：技術開発の効率向上のための手法の構築

2つの目的に対する研究結果より、以下の知見が得られた。

目的(1)に対する研究においては、特に大きな市場を有する自動変速機（AT）用クラッチとして使用されている、湿式クラッチの摺動部材であるペーパー摩擦材について、光技術を用いた摩擦材へのテクスチャ形成による摩擦特性の向上を試みた。ペーパー摩擦材は湿式クラッチの性能を左右する最も重要な要素であると同時に、求められる性能は多岐にわたり、それら各性能間のバランスをとる技術を開発することが、新しいペーパー摩擦材を開発するためには非常に重要になる。

本研究では、レーザー加工技術によって湿式ペーパー摩擦材の表面を加工することで、これまでにないペーパー摩擦材の表面性状を実現した。加工条件を変更することでペーパー摩擦材の表面に溝巾 100 μm 以下、深さ 100 μm 以上の、従来の手法では作れなかった微細かつアスペクト比の高い溝をペーパー摩擦材にダメージを与えることなく形成することができた。種々の配合のペーパー摩擦材表面に対して最適なレーザー種類及

び加工条件を設定することにより、任意の形状の表面テクスチャを形成することが可能となった。

また、フリクションディスク上のペーパー摩擦材表面にレーザー加工によってマイクロメートルオーダーの微細な溝形状のテクスチャを形成し、摩擦特性への影響を評価した。溝巾約 20 μm 、溝深さ最大 150 μm の規則的な溝形状のテクスチャを形成することにより、摩擦材の動摩擦係数が変化した。また、摩擦材の単位体積当たり存在する溝形状のテクスチャの体積によりペーパー摩擦材表面のオイル浸透時間 (OPT) を制御でき、それによって摩擦材の動摩擦係数を制御できることが示された。すなわち、マイクロメートルオーダーの微細なテクスチャの形状 (深さおよびピッチ) を変更することにより、ペーパー摩擦材の動摩擦係数を高い自由度で制御できることが明らかになった。

本研究で明らかになった技術を応用することで、これまで使用できなかった低気孔率の材料を用いることができるようになり、高摩擦係数かつ良好な μ - V 特性を有した新たなペーパー摩擦材が実現可能となる。また、複雑かつ微細な 3 次元構造を形成することも可能になる。さらには、新たな特性を持ったペーパー摩擦材により、クラッチ性能の向上が実現可能となることで、クラッチ市場における競争力の獲得につながり、シェア拡大に寄与することが期待できる。

目的(2)においては、プロダクト・ジェネアロジ (製品系譜学) を用いて湿式クラッチ用摺動部材 (摩擦材) の開発の中の暗黙知の発掘を試みた。

グループインタビューにより摩擦材の開発系譜図を作成し、系譜図を基にしたナラティブ・インタビューにより、開発者の過去の経験 (記憶) が整理されやすくなり、効率的に精度の高い情報の収集が可能になることが明らかになった。

さらに、「周辺技術との連携」が過去の摩擦材の発展に大きく寄与し、技術的なブレークスルーの起点となったことが明らかになり、環境の変化に対して、先を見据えた「コンセプト提案」とともに今後の開発にとって重要になることが示された。

摩擦材の技術面での形式化されていない知識、例えば配合の狙いや変遷、製造技術に関するノウハウなどが多く抽出され、系譜図を用いることで系統的に整理することができた。

以上のように、プロダクト・ジェネアロジの手法を利用した、暗黙知の発掘手法が構築され、過去の開発の中に埋没した知識の発掘におけるこれらの手法の有効性が示唆

された。暗黙知となっていた過去の知識を発掘し、活用することで、今後の開発の効率化につながることを期待できる。

これらの研究により、本論文の背景にある、自動車用クラッチ市場におけるシェア拡大、および将来に対する競争力の獲得に対して一定の成果が得られたと考えられる。以上の知見を基に、将来に向けて継続的に競争力を持ちうる技術開発を行っていくための考え方を提示した。

次世代自動車において駆動系部品が不要になり、クラッチが用いられなくなる可能性を視野に入れたうえで、クラッチメーカーには将来的に競争力を持ち続けるための取り組みが求められる。そのための手段の1つとして、クラッチ以外の分野における新しい技術および新しい事業を創出していくことが挙げられ、本研究における知見を発展させた考え方を実践していくことが有効であると示した。

技術面においては、ペーパー摩擦材に対する光（レーザー）技術のように、広く他分野の技術を取り入れ、自社の技術とのコラボレーションを推進することで、新しい技術に対するブレイクスルーの起点を創っていくことが有効と考えられる。大学や公的な研究機関との共同研究や、オープンイノベーションなどが、具体的な手段として効果的であると考えた。

開発の効率化手法の面では、現在進行形で暗黙知を蓄積、活用していくことが求められる。過去の暗黙知の発掘手法を応用し、1つの開発テーマが完了するタイミングでそのテーマの中の暗黙知を発掘し、蓄積、共有することを習慣化することが効果的であると考えられる。さらには、それらの手法を活用し、具体的な実行を通して新たな知識創造につなげるためのシステムを構築すると同時に、それを促進する独自の組織文化を育むことによって、競争力を獲得するための継続的な技術開発につながると考えた。

以上のように、情勢の変化に対応し、継続的に競争力を持ちうる技術開発を行っていくための本研究における結果を発展させた考え方を提示した。今後はこの考え方をもとに技術開発、知識創造システムの構築を実践することで、競争力を持った新事業の開発を推進していく。

8.2 今後の事業開発の方向性

本研究における取り組みから、自動車向け湿式クラッチ用ペーパー摩擦材の新技術の開発、技術開発の効率向上のための手法の構築が達成され、それらを基に自動車用クラッチ市場におけるシェア拡大、および将来に対する競争力の獲得という目標に対する考え方を提示することができた。

今後は、その考え方を利用して新事業を創成し、目標を実現していく活動を推進していくことが求められる。そのための具体的な推進案として3項目を提案する。

1 つ目としては本研究で開発したペーパー摩擦材への溝加工手法の量産展開がある。本研究においてペーパー摩擦材表面へ微細溝の形成による摩擦特性への効果が確認された。しかしながら本手法は加工にかかる時間が比較的長く、そのままでは量産への適用が難しい。そこで、量産に適用可能な微細溝の形成手法の開発を行っていくことが必要になる。微細溝の形成手法に関してはレーザー以外の方法（例えば金型など）も考慮する。また、それと並行してレーザーを用いた微細溝の形状の最適化、新規配合材や3次元構造などの新たな特性を持った摩擦材の開発を進め、更なる競争力の獲得を目指す。

2 つ目は過去の暗黙知の発掘手法の社内展開である。本研究では自動車向湿式クラッチ用ペーパー摩擦材を対象としたが、そのほかの開発部品に対しても同様に暗黙知の発掘を展開する。7章にて記述した手順を基に他部門に対し提案し、各部門の開発に携わる者をインタビュアーとして、系譜図の作成、ナラティブ・インタビューを実施していく。また、開発部門のみではなく、製造部門、生産技術部門にも同様に展開していきたい。さらに、インタビュアーとなった開発者、担当者が集まり、意見交換を行うことで、新たな知識創造につなげるためのシステムの構築、また、それを促進する独自の組織文化を育むことにつなげていきたいと考える。

3 つ目は光技術のその他用途への活用を推進することである。光技術は今後のさらなる発展が期待でき、新しい技術開発に有効であると考えられる。光技術は本研究で利用したレーザー加工以外にも、その用途は多岐にわたっており、対象としてもペーパー摩擦材に限らず、金属部品等の様々な部品に応用することが可能である。

以上のように、光技術を積極的に取り入れ、競争力を持った新事業を開発し、今後の自動車部品産業の発展に寄与していくことで、光産業創成に貢献する。

謝辞

本論文は、光産業創成大学院大学、沖原伸一郎 講師のご指導の下まとめられたものであり、終始親切丁寧なるご指導をいただきましたことに心から感謝いたします。

また、増田靖 教授には本論文を構成するに当たり非常に大きなご助言をいただきました。また、学会発表においても多大なるご指導をいただきました。ここに、深く感謝申し上げます。

論文をまとめるにあたり、坪井昭彦 教授、花山良平 講師、楠本利行 助教には、指導教官として、多大なご指導をいただきました。深く感謝いたします。また、新事業開発の場をご提供いただきました、光産業創成大学院大学、加藤義章 学長には、お忙しい中、研究活動への多くの助言をいただきましたことに感謝いたします。本研究を進めるに当たり、本学の先生方、事務局の皆様、学生の皆様には多くのご指導、助言とサポートをいただきましたことを深く感謝いたします。また、北原正 客員教授には、入学当初の研究テーマの定まらない中で、分野ゼミなどを通してご指導、アドバイスをいただきましたことに感謝いたします。試験を行うに際して、内山文宏氏（9 期生）、株式会社レーザックス 池田剛司氏には、多くのご協力とご助言をいただきました、ありがとうございました。

光産業創成大学院大学へ入学し、研究を行う機会を与えていただきました、株式会社エフ・シー・シー 山本佳英 相談役、松田年真 代表取締役社長、糸永和広 常務取締役、野村明史 執行役員技術研究所長に深く感謝いたします。また、入学の手続きや、日々の事務処理など、多大なご協力をいただきました、株式会社エフ・シー・シー 総務部 増田和代 主査ならびに総務部の皆様、技術研究所 管理ブロックの皆様には感謝いたします。

研究活動を進めるに当たり、株式会社エフ・シー・シー技術研究所研究ブロック 松下浩 ブロックリーダー、長谷川裕昭 技師には業務の調整など、自分が研究に集中できるようご尽力いただいたことに深く感謝いたします。また、研究に対する多くのアドバイスをいただいた、研究ブロック 片山信行 技師補、鈴鹿工場 長谷川智浩 技師補、自分の不在の間、業務のサポートをしていただいた研究ブロックの皆様方、ありがとうございました。

最後に、いつも自分を支え、励ましてくれた、妻 里美と、心の支えとなり、応援し続けてくれた、長男 晴矢、二男 碧斗、三男 陽向に深く感謝します。

業績目録

1. 論文

Shintaro Yagi, Nobuyuki Katayama, Hiroaki, Hasegawa, Hiroshi Matsushita, Shin-ichiro Okihara, Toshiyuki Kusumoto and Akihiko Tsuboi:

Effects of microscale texture on the tribological behavior of paper-based friction materials for a wet clutch: Tribology Online Vol. 10 (2015) No. 5. 390-396. December 31. 2015 (査読有)

2. 抄録

八木慎太郎, 沖原伸一郎, 楠本利行, 増田靖 :

「プロダクト・ジェネアロジー（製品系譜学）を用いた暗黙知の発掘」
一般社団法人経営情報学会 2015 年秋季全国研究発表大会抄録集 2015

3. 学会発表

八木慎太郎, 沖原伸一郎, 楠本利行, 増田靖 :

「プロダクト・ジェネアロジー（製品系譜学）を用いた暗黙知の発掘」
一般社団法人経営情報学会 2015 年秋季全国研究発表大会抄録集 2015
(沖縄コンベンションセンター, 2015 年 11 月 29 日)