

For New Technology Network

NTN®

TECHNICAL REVIEW

No.

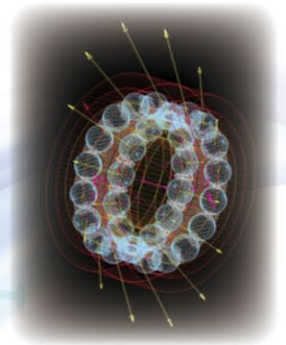
87

特集

自動車向け商品

電動化、自動運転化、低燃費化対応

November 2019



CAE 開発研究所の紹介

2018年10月、NTNグループ会社の研究技術、ものづくりなど各部門の業務（設計、開発、試作、実験、製造など）を高度化、高効率化する目的で、既存のCAE技術部の体制を変更し、CAE開発研究所を新設しました。

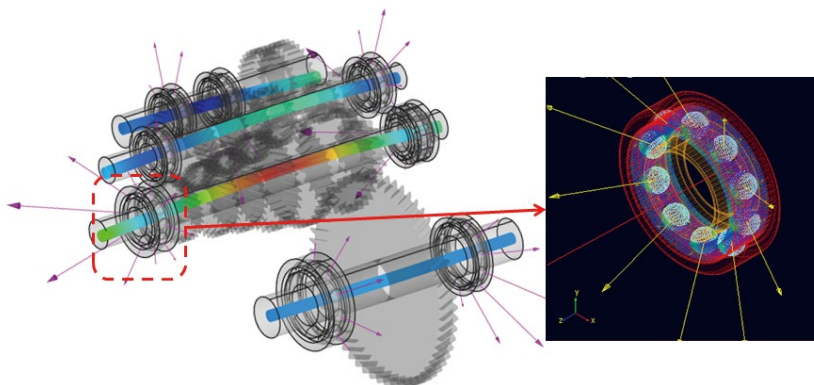
CAE (Computer Aided Engineering) は、製品・周辺構造案が要求性能を満たすことを、コンピュータ上でシミュレーションすることにより検証する技術です。これにより、製品の設計検証が困難であった箇所的设计精度が更に向上し、製品とその周辺部材を含めた設計の安全率を検討することも可能となります。また、試作品の製造、及び試作品による実験・評価を事前にシミュレーションすることで、試作や実験の回数を削減し、設計・実験の業務効率の向上、コストの削減を図ることができます。

昨今、CAE技術の進化は目覚ましく、あらゆる産業分野においてCAE技術の導入、更なる高度化が進んでいます。大阪大学NTN次世代協働研究所の研究テーマにもCAEを取り入れ、次世代技術の確立、製品への適用のスピードアップ化を進めています。

CAE技術により研究開発工数の削減が可能となり、研究技術者は、より付加価値の高い業務に専念することができます。更に、開発期間も短縮可能となり、競争力のある商品を早期に市場投入することができます。NTNでは、単品からモジュール、システム商品の開発へと事業形態を変革させていくなかで、より複雑な機構、あるいは異素材との複合体のシミュレーションなどにも活用を開始しています。

CAEシミュレーション技術の例として、自動車における動力伝達装置であるトランスミッション部を支える軸受内で、転動体から保持器に作用する力の計算例を以下に示します。CAEシミュレーション技術により以下が可能となります。

- ・ 運転中の軸受内の各転動体に作用する荷重の計算
 - ・ 上記の転動体から保持器に作用する力及び発生応力の計算
- ⇒ 保持器に必要な強度の見極めにより転動体数・転動体径を最適化し、軸受負荷容量の向上を実現



トランスミッション部軸受の保持器に作用する力及び発生応力のシミュレーション

NTN TECHNICAL REVIEW No.87

自動車向け商品 電動化、自動運転化、低燃費化対応 特集号 目次

巻頭言	「自動車向け商品 電動化、自動運転化、低燃費化対応」特集号に寄せて 代表執行役専務 兼 CTO (最高技術責任者) 寺阪至徳	1
寄稿文	CASE 時代に向けた先進自動車技術の展望 神奈川工科大学 創造工学部 自動車システム開発工学科 教授 井上秀雄	2
展望	CASE に対する取組みについて 執行役 自動車事業本部 副本部長 電動モジュール商品事業部 事業部長 亀高晃司	13

自動車向け電動化・自動運転化モジュール商品 小特集

商品紹介	ステアリング補助機能付ハブベアリング (sHUB®) 商品開発研究所 宇都宮聡/石原教雄/大畑佑介/伊東貴志	18
解説	モータ・ジェネレータ機能付ハブベアリング (eHUB®) 商品開発研究所 西川健太郎/川村光生/藪田浩希/伊東貴志	24
解説	電動モジュール商品の制御プラットフォーム開発 電動モジュール商品事業部 井上達司/青嶋一浩/杉本優一/本窪慧冴	30
商品紹介	自動車の電動化・自動運転化に対応するセンサモジュール商品の紹介 商品開発研究所 福島靖之/袴田博之 NTN-SNR Christophe DURET	37
解説	インホイールモータを用いた車両運動制御 EV モジュール事業部 平田淳一/鈴木雄大	44

自動車向け低燃費対応商品

概説 (1)	低燃費化を目指した自動車用軸受の開発の歴史 自動車軸受技術部 安西隆	50
概説 (2)	低燃費化を目指したアクスル用軸受の開発の歴史 自動車ユニット技術部 関誠	55
概説 (3)	低燃費化を目指した等速ジョイントの開発の歴史 CVJ 開発部 杉山達朗	59
商品紹介	低フリクションハブベアリングⅢ 自動車ユニット技術部 関誠	63
商品紹介	低燃費対応小型チェーンテンショナ 自動車ユニット技術部 鬼丸好一 機能実験部 阿形郁身	68
商品紹介	超高角高効率固定式等速ジョイント CFJ-W CVJ 開発部 船橋雅司/小原美香	74
商品紹介	プロペラシャフト用小型しゅう動式等速ジョイント HEDJ-P CVJ 開発部 小林正純	80
解説	自動車の低燃費化に寄与する転がり軸受の新しい技術 先端技術研究所 川村隆之/藤原宏樹/大平晃也	85
解説	流体解析による低トルクシールリングのトルク低減の検証 複合材料商品事業部 石井卓哉 先端技術研究所 小畑智彦	92
解説	モーメント負荷下のハブベアリングの動特性解析 CAE 開発研究所 坂口智也/澁谷直人	97

受賞案件の紹介

2018年“超”モノづくり部品大賞 モビリティ関連部品賞受賞 トランスミッション用超低フリクションシール付玉軸受	自動車軸受技術部 佐々木克明/和久田貴裕 先端技術研究所 水貝智洋	104
第28回 日経地球環境技術賞 優秀賞受賞 マイクロ水車	自然エネルギー商品事業部 水谷政敏/松浦文彦/川合智哉/向井浩氣/伊藤隆志 後藤知美/金村泰成/木村寛太/立石康司	105

新商品紹介

ポータブル異常検知装置		106
コンテナ収納移動型独立電源 N ³ エヌキューブ		107

NTN TECHNICAL REVIEW No.87

CONTENTS

Preface	For Automotive Products for Electric, Autonomous and Low Fuel Consumption Yoshinori TERASAKA	1
Contribution	Perspective for Advanced Vehicle Technology into CASE Era Hideo INOUE <small>Professor, Faculty of Creative Engineering, Chair of Department of Vehicle System Engineering, Kanagawa Institute of Technology</small>	2
Perspective	NTN's Approach and Effort for CASE Koji KAMETAKA	13
Special Issue for Modular Products for Electric and Autonomous for Automobiles		
	Hub Bearing Module with Steering Adjust Function Satoshi UTSUNOMIYA, Norio ISHIHARA, Yuusuke OOHATA, Atsushi ITO	18
	Hub Bearing Module with Motor and Generator Function Kentaro NISHIKAWA, Mitsuo KAWAMURA, Hiroki YABUTA, Atsushi ITO	24
	Development of Control Platform for Electric Module Tatsuji INOUE, Kazuhiro AOSHIMA, Yuichi SUGIMOTO, Keigo MOTOKUBO	30
	Introduction of Sensor Modular Products and Technologies for Autonomous Driving and Electrification of Automobiles Yasuyuki FUKUSHIMA, Hiroyuki HAKAMATA, Christophe DURET	37
	Vehicle Motion Control with In-Wheel-Motors Junichi HIRATA, Yuta SUZUKI	44
Automotive Products for Low Fuel Consumption		
	History of Development of Bearings for Automobiles Aiming at Low Fuel Consumption Takashi YASUNISHI	50
	History of Development of Axle Bearing Aiming at Low Fuel Consumption Makoto SEKI	55
	History of Development of Constant Velocity Joint Aiming at Low Fuel Consumption Tatsuro SUGIYAMA	59
	Low Friction Hub Bearing Ⅲ Makoto SEKI	63
	Fuel-efficient Compact Chain Tensioner Kouichi ONIMARU, Ikumi AGATA	68
	Fixed Constant Velocity Joint with Ultra High Angle and High Efficiency "CFJ-W" Masashi FUNAHASHI, Mika KOHARA	74
	Compact Plunging CVJ for Propeller Shaft "HEDJ-P" Masazumi KOBAYASHI	80
	New Technology of Rolling Bearings contributing to Low Fuel Consumption of Automobiles Takayuki KAWAMURA, Hiroki FUJIIWARA, Kouya OOHIRA	85
	Verification of Torque Reduction for Low Torque Seal Ring by Fluid Analysis Takuya ISHII, Tomohiko OBATA	92
	Analysis of Dynamics of Hub Bearings under Moment Loads Tomoya SAKAGUCHI, Naoto SHIBUTANI	97
Award Winning Products		
	2018 "CHO" MONODZUKURI Component Award, Mobility Components Award, Ultra-low Friction Sealed Ball Bearing for Transmission Katsuaki SASAKI, Takahiro WAKUDA, Tomohiro SUGAI	104
	The 28th Nikkei Global Environmental Technology Awards, Award for Excellence, Micro Hydro Turbine Masatoshi MIZUTANI, Fumihiko MATSUURA, Tomoya KAWAI, Hiroki MUKAI, Takashi ITOU, Tomomi GOTOU, Yasunari KANAMURA, Kanta KIMURA, Kouji TATEISHI	105
Our Line of New Product		
	Handy Type Failure Detection Device	106
	N ³ N-CUBE, Container Type Transportable Independent Power Supply	107

「自動車向け商品 電動化、自動運転化、低燃費化対応」 特集号に寄せて



代表執行役専務 兼 CTO (最高技術責任者)
寺坂 至徳

自動車業界は大きな変換期を迎えています。COP21 パリ協定での世界平均気温抑制の合意、地球温暖化に対する燃費向上目的の電動化、安全性の向上の自動運転化、シェアリングの思考などのCASEに代表される市場トレンドに席捲され、自動車に関わるグローバルの全企業で技術提案競争、性能競争、価格競争などが激化しています。

当社は創業100年の歴史を持つ軸受メーカーですが、更なる「持続的成長」、あるいは次世代へ「生き抜く企業」を目標に市場トレンドの先回り開発を進めてきました。その開発起点はトライボロジー技術を代表とするコアコンピタンスとし、開発思考は独自開発から第三者との連携への変革も実施しています。

トライボロジー技術を代表とするコアコンピタンスが当社の基盤です。コアコンピタンスは継続的に強化させるべきもので、新商品に転写していくことが、企業価値向上に繋がると考えています。当社は要素技術を先端技術研究所、新商品開発を商品開発研究所、ものづくりを生産技術研究所が担当しています。2017年に設立した大阪大学NTN次世代協働研究所は、将来拡大していく新技術AI、IoTなどの次世代技術の研究、さらには新規コアコンピタンスとしての取込み、当社研究者の人材育成を目的としたものです。さらに、2018年10月「CAE開発研究所」を新たに設立しました。これまで培ってきたシミュレーション技術を進化させ、全グループの技術課題の対応、開発および改善のスピードアップ、精度向上などを目的にしています。このシミュレーション技術は今後も活発に研究開発されていく領域のため、次世代協働研究所で研究するとともに、当社開発への適応性を高め、短期間での社内使用を進めています。

また、自動運転あるいは電動化などを実現し、当社の存在価値を高めるモジュール、システム商品の先回り開発をしてきました。代表的なものはIWM(インホイールモータシステム)であり、オイルポンプ、ウォーターポンプ、バキュームポンプなどの電動補機装置に活用いただける電動モジュール商品です。さらに、主力商品のアクスル軸受にモーターと制御装置を取付け、多機能化させたeHUB、sHUBなどがあります。その他に、特殊センサを用いた「軸受のセンサ化」の開発、さらに、その出力をAIアルゴリズムによる最新プログラムで状態監視、未然予防強化、サービスソリューションへの業態変革も視野に入れていきます。

100年に1度と言われる自動車業界の変革に備えて、研究技術開発からものづくり体制の整備をしてきました。これまでの技術、技能を活用して、如何にスピードアップして他社優位性の商品実現をするかが、「持続的成長」、あるいは「生き抜く企業」への課題と考えます。その土台作りが2015年からの中期経営計画「NTN100」です。2018年からの「DRIVE NTN 100」では、あらたな商品実現を推進する計画です。

それが産業界全体の更なる発展に貢献できれば幸甚です。

CASE 時代に向けた先進自動車技術の展望

- 人・クルマ・交通社会におけるエコシステムの進化について -

Perspective for Advanced Vehicle Technology into CASE Era



井上 秀雄 Hideo INOUE

神奈川工科大学 創造工学部 自動車システム開発工学科 教授

CASE(Connected, Autonomous, Shared & Services, Electric)¹⁾ 時代とは？ 情報とモビリティの融合が、人・クルマ・交通社会のエコシステムを大きく変革させるパラダイム変革が始まり、シリコンバレーの勇者、欧州自動車大国、新規参入者、新興国とボーダーレスの競争と協調時代とも言える。自動車技術の歴史を振り返り、エコシステムの基盤となる、安全の進化、運転の深化、モビリティ都市システムの事例をもとに、この展望について皆様と一緒に考えてみたい。

What is the CASE (Connected, Autonomous, Shared & Services, Electric)era? The integration of information and mobility has begun a paradigm change that will drastically change the ecosystem of people, cars, and transportation society, and it can be said that it is a borderless competition and collaborative era of Silicon Valley players, European car manufactures, new comers, and developing countries. Looking back on the history of automotive technology, I would like to discuss this perspective with you based on the examples of the evolution of safety, deepening driving, and mobility city systems that are the foundation of the eco-system.

1. はじめに

自動車は、19世紀の末から21世紀初期の現在にかけて人や物の、自由にして安全な移動の能力を拡張し、産業や文化の発展に貢献してきた。1885年に、ドイツのカール・ベンツは、新発明のガソリンエンジンを搭載した3輪車を公道走行させることに成功した。栄光の初の自動車の名前は、ベンツ パテント モートルヴァーゲン (Benz Patent Motorwagen)、現代のクルマの原型を産み出した。1908年には、自動車王ヘンリー・フォードが、「汽車のように速く、馬のようにどこへでも走れる乗り物がほしい」と、量産大衆車「T型フォード」を世に送り出し「自動車革命」を起こした。

そして現代、電動化によるパワートレインの多様化、自動運転が世界中で競争となり「クルマの知能化・IoT化」の加速、「シェアリングサービスの台頭」の例にみる「クルマの所有や使い方」の変革など、自動車産業を取り巻く環境は、大きなパラダイム変化の前兆期にある。

世界の産業競争の観点からも、エネルギー産業、IT産業、自動車産業など、お互いに競争しつつも、イノベーションを創出し新たなビジネス領域獲得のために、国境を越えて、盛んな提携合戦も繰り広げている。しかし、このような中でも、Teslaの急成長は、単にEVだけではなく、電動化により、従来の内燃機関パワートレインではまねのできないクルマのプラットフォームを構築し、大変高い基本性能をもつ、楽しく快適で、魅力的なクルマづくりを達成し、シリコンバレー発で消費者を

魅了し、瞬間に自動車産業への参入を果たした点も見逃せない。

また、ドイツを筆頭とする欧州の自動車産業も、運転支援やツナガルなどの先進技術を取り入れながら、環境にやさしい・快適で運転しやすい・賢いクルマへの進化に余念がなく、産学官が連携し国をあげて開発を進めている。さらに、これらの新しい潮流は、中国、インド、東南アジアなど新興国の自動車市場に瞬間に広がる可能性がある。日本の自動車産業も、グローバルな競争とIT産業など他業界との競争の両面でのパラダイム変化に勝ち残るべく、競争力をつけていかねばならない。

このような世界規模の潮流は、地球温暖化、渋滞・交通事故、少子高齢化など、切実な社会問題を解決し、豊かで快適なモビリティ社会を実現するために起っている現象とも言え、クルマのイノベーション、つまり、もっと良い・賢いクルマ造りが、社会、そして、生活者を豊かにする「原単位」「原動力」になる(図1)。

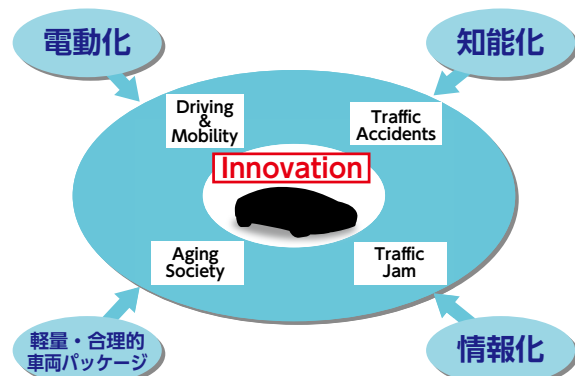


図1 クルマのイノベーションの方向性

「クルマのイノベーションはこれからが本番！」である。「先進と基礎の融合」での「クルマ作り」と「ヒト作り」が、その雌雄を決すると言っても過言ではない。

さて、タイトルに挙げた点を、これまでの ITS (Intelligent Transport Systems: 高度道路交通システム) の活動を振り返り、紐解いてみよう。CASE (Connected, Autonomous, Shared & Services, Electric) とは現在起こりつつある自動車産業、IT 産業などのパラダイム変化を良く表現した言葉であるが、長年の「持続可能なモビリティ社会を目指して ITS の活動で培われてきたものと大きく変わるものではない。大きな変化点は、電動化や自動運転などにより、GAFA²⁾ など、シリコンバレーの IT 産業、エネルギー産業、新規産業が本格的に参入できる時代になり、自動車産業が大きな変革を迫られるようになったことにある。しかし、これも ITS 活動において、自動車産業が、人・クルマ・交通社会を一つのエコシステム (生態系) と捉え、交通事故の低減、渋滞、エネルギー・環境問題、そして、高齢社会への対応などの社会課題を解決 (最小化) し、豊かで快適なモビリティ社会を築こう (最大化) と ICT (Information and Communication Technology: 情報通信技術) の重要性も表現してきた^{3) 4)}。では、何が本当の変化点なのか？

- ・電動化や自動運転、情報通信技術の進化により夢のモビリティ社会が現実の物として期待できるようになったこと
- ・自動車産業の従来の構造だけでは対応できず、産業的にも社会システムの的にも、新しいエコシステムを構築する必要があることが解ってきたこと
- ・ユビキタス時代を迎え、インターネットを通じグローバルなボーダーレス化により新しいアイデアを持つプレーヤーがモビリティに参入しやすくなったこと
- ・このためには自動車自身の設計構造にも革新をもたらす必要があること

などが自動車産業の歴史から見た変化点なのではないだろうか。これは、従来の構造・仕組みの物造りが時代のニーズに応えるには限界にきており、限界突破の新たな S 曲線を造るべく、いわば、時代の要請とも言える。IT 産業、エネルギー産業、新規産業の脅威もあるが、決して、これらの競争を全面的背景とするものではないと考える。課題は、快適で豊かなモビリティ社会を目指し、

- ・自動車産業自らが変革できるか？
 - ・自動車産業が他の産業界との連携と競争を繰り返しながらも、リーダーシップを取っていけるか？
- が課題と考えている。リーダーシップをとるには、自分

たちのコア技術も必要である。

このように、CASE で取り挙げられるエコシステムは、サイバーフィジカルシステムとしても表現できる (図 2)⁵⁾。

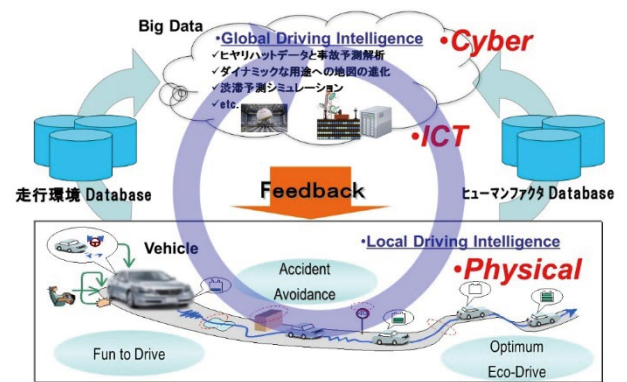


図 2 サイバーフィジカルシステムの例

サイバーフィジカルシステムとは、サイバー空間 (仮想空間) とフィジカル空間 (現実空間) を、ICT により高度に融合したシステムである。

私は、自動車産業が自ら変革し、モビリティが人 (生活者) を中心におきながら、他の産業界のリーダーシップを取っていくことを切に望んでいる (図 3)。

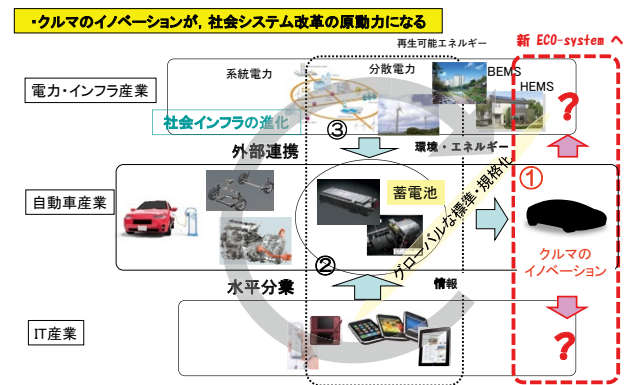


図 3 各産業界の関係

本稿では、CASE の時代に、このモビリティにおけるエコシステム、サイバーフィジカルシステムが、どのように変化していくか、「運転」、「モビリティ」の視点で事例を紹介しながら、皆様と一緒に、21 世紀のモビリティ社会を考えてみたい。

2. 自動運転；「人馬一体」と 「更なる安全をめざす運転知能」

2.1 「自動運転」と「運転知能」とは？

自動運転技術の情報発信は、留まる所を知らず、世界中のメディア、産業界、国家レベルを通じて行われている。やや過剰な期待感もあるが、自動運転技術がモビリティ社会に大きな夢を抱かせ、自動車自身、交通システム、さらには情報サービスまで、イノベーションを予感させるものになっていることは間違いない。

自動運転の歴史をたどってみよう。レオナルド・ダ・ヴィンチは機械仕掛けの自動車を考えた時代から自動運転車を夢見てきた。また、1960～1970年代には、月面調査のために最初のスマートカー「Stanford Craft」が構想された。ビデオカメラと遠隔操作のための長いケーブルが取り付けられ、その後の更なる開発の結果、障害物回避技術の搭載やイメージ処理能力の向上などが実現した。しかし、何と言っても、自動車産業界や社会に、大きなインパクトを与えたのは、2回にわたる DARPA(Defense Advance Research Program Agency)Challenge での各大学 & 産業界の自動運転車と、その後の Google の自動運転車であろう。Google は 2010 年から公道での走行実験を続けており、2014 年 4 月までに 70 万マイル（約 113 万 km）を公道走行している。また、欧州でも、産学官の連携で HAVEit などの国家レベルのプロジェクトが進展した⁶⁾。2013 年には、ダイムラーが、ドイツ国内の一般公道 100km 以上を自動運転で走破したことを明らかにし、2020 年までに自動運転車を市場投入すると発表している。さらに最近では、欧州プロジェクトの PEGASUS が、走行シナリオの体系化をベースとして、その開発・評価のプロセスのフレームワークを構築し提案している。また、別の業界では、最近、米国発祥のカーシェアリング Uber 社でも自動運転タクシーの実現に研究センター設立の発表や、Google などもオンディマンド型の自動運転カーサービスを計画しているとも報じられている。このように、自動車産業各社、IT 業界、そして、カーシェアサービス産業、物流業界なども加わり、エンジニアリング & ビジネスがセットとなり、研究・開発競争が世界中で激化し 2020 年前後に向け実用化が報道されている。さらに、社会課題の解決から自動運転技術の利点・価値を考えると、

- ①交通流の改善（渋滞の低減・CO₂の低減）
- ②ヒューマンエラーによる事故の低減
（不注意・漫然・居眠り運転）

③健康障害・意識喪失による事故の低減

④視界不良時の安全運転

（夜間時、雨天・降雪時など）

⑤高齢ドライバーの交通事故低減・移動手段の確保

（身体の衰えによる運転能力の低下）

⑥運転負荷低減による快適性の向上

などが期待される。しかし、いきなり、「自動運転」イコール「安全」と考えるのは、少々乱暴であり、「自動運転」にも「うまい運転」「へたな運転」があると思う。現代の技術をもってすれば、自動でクルマを動かすことはそれほど難しいことではないと思うが、「うまい運転」となるとやや意味が違ってくる。熟練ドライバーをイメージした運転は、周りの環境を見ながらも、知識や経験に基づき、何が起るか予測し、また、自車の動き・運動の特性も把握し予測しながら「運転」する。こうすることで、自由に安全に気持ち良く移動の価値を享受しているわけで、これを機械が人間にとって代わることはそう簡単ではない。周辺を認識する技術だけでは不十分で「運転する知能（以下、運転知能）」が必要である。また、人間、機械のどちらも 100% の安全・信頼はない。それぞれの長所を活かし短所を補い合うことで成長（互いに学習）する能力をもち、様々な走行条件の中で「Better」「Safer」と、より良い走行状況を作り出し続けることでそのクオリティを向上させてきた。人間、機械のどちらが運転するにしても、安全な運転技術は共通基盤であり、クルマ側にも、もっと「運転知能」を取り入れ、これを具体的に進化させていくことが最重要課題であると思う。また、人類の歴史の中でも、機械と人間の関わりは普遍的な面でもある。モビリティが馬からクルマに代わっていった時に、進化したものも多いが、馬にできて現在のクルマにはできない点もいくつかある。「仮に乗り手が指示しても崖からは飛降りない安全本能と、共に気持ちよく走ること」「運転したい時もあれば、したくない時もある人間に、乗り手と馬の双方の意志の文脈が分かるように対応する能力」「乗馬者同士のコミュニケーションで孤立しないこと」などのいわゆる「人馬一体」の価値を、自動車は、まだまだやり切れていないように思う。

CASE の表現の中では、この「運転」に関する技術は大きくとりあげられていない。さらに、人・クルマ・交通環境の中で、自動車の発展と共に、人（ドライバー）、交通環境（インフラ）の発展も見逃せない。繰返しになるが、熟練ドライバーの運転技量は、様々な走行環境で磨かれ知識・経験として長年培われた学習情報による。ま

た、熟練ドライバは、運転操作に対するダイナミックなクルマの運動状態も体にしみ込ませており、フィジカルなモデルとしても「運転知能」として持っている。このように、熟練ドライバの運転技量は、いわば「経験知識・情報モデル」「クルマの運動としてのフィジカルモデル」を融合して産み出した、サイバーフィジカルシステムとも言える。この「運転知能」こそが、自動運転技術が変化点をもたらすべき重要なものではないだろうか。

このような課題認識のもと「自動運転」の総論的言葉に留まらず、クルマの本能とも言える「運転知能」による「安全運転技術」と「人馬一体の自動運転 (Shared control)」の進化について触れてみたい。

なお、以下は「(独) 科学技術振興機構 (JST) 戦略的イノベーション創出推進プログラム (S イノベ)」の採択テーマ「高齢者の自立を支援し安全安心社会を実現する自律運転知能システム」⁷⁾ で産学連携のもと 2011 年より進めてきた研究・開発と私見をベースに記述する。

2.2 更なる安全をめざす運転知能

2.2.1 運転支援システムと自動運転技術

クルマの安全技術は、衝突安全から予防安全へと進化してきたことは言うまでもない。最近では、通常の運転フェーズから衝突の前後、そして救命救急に至るまで安全フェーズ全体を俯瞰して対応する「統合安全 (Integrated Safety)」⁸⁾ の考え方は「安全に妥協はない」ことを示すものとして重要である。この中で、カメラやレーダなどのセンサを用いて、走行周辺環境や障害物を認識する運転支援システムは、急速に採用拡大が進んだ。衝突被害軽減・防止自動ブレーキなどは、その分かりやすさからも多くの製品に展開され、最近では軽車両にまでも AEB (Automated Emergency Brake) として採用拡大されている。こうして追突などの、衝突前 1 秒強での事故回避能力は大幅に進化した。一方で、ACC (Adaptive Cruise Control)、LKA (Lane Keeping Assist)、LDW (Lane Departure Warning (& Prevention)) の路外逸脱警報・防止システムなど、通常運転時の運転負荷の軽減を狙ったものが展開されてきた。安全から見た運転フェーズには、リスクが少なくスムーズに走れる「通常運転」のフェーズ、ぶつかるかもしれない数秒前の「緊急回避」のフェーズ、そして、その中間に、潜在・顕在的リスクが増大してくるフェーズがある。このフェーズに対し、自動車教習所などで指導される「かもしれない運転」のような危なさを予測しながらリスクを減らす運転が必要である (図 4)。こ

れまで、運転支援システムは「通常運転」や「緊急回避」のフェーズで効果を発揮してきた。自動運転技術への進化の流れの中で、リスク増大フェーズに対応する「先読み運転」のような技術を見逃してはならない。また、先にも述べたように、交通事故の約 90% がヒューマンエラーと言われており、高齢者、注意力低下、体調急変、サブタスク、渋滞など、その原因は様々で、この対応にも、運転支援システムの進化が期待される。しかし、個別システムの積上げでは、もはや対応は難しく、自動運転・知能化の構造によりドライバエラーを補うことが適切と考えられる。

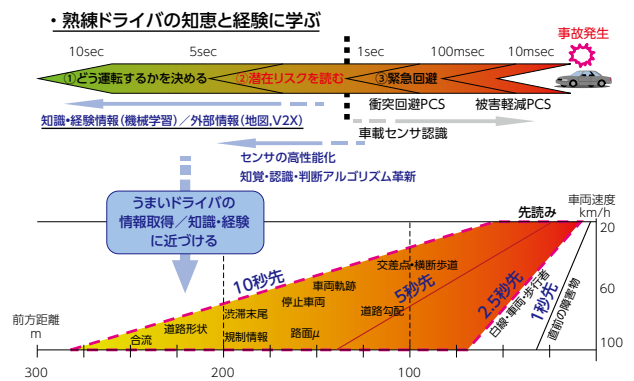


図 4 予防安全のリスクフェーズの考え方 (S イノベ)⁹⁾

2.2.2 危険予知能力をもつ運転知能

さて、運転知能を具体的にどのように捉えたら良いだろうか。まず、走行周辺環境を「よく見る」、つまり、センシングによる「知覚・認識」の能力向上は大基本であるが、これだけでなく、この知覚情報から目標経路を生成したり¹⁰⁾、停止車両をよけたりする基本的な運転計画能力を形成する必要がある。そして、この基本的な運転計画の上に危険予知能力とでもいふべき、先読みを行い、リスクを予測する知能が重要となる (図 5)。

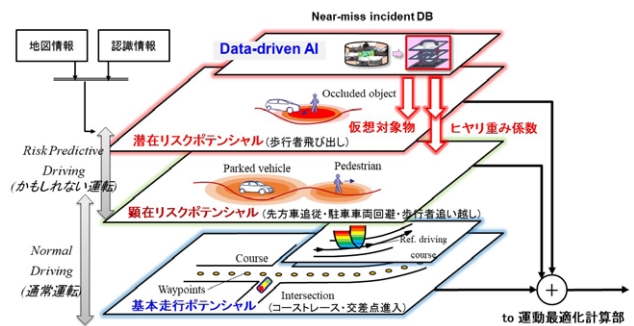


図 5 リスク予測制御の階層構造 (S イノベ)¹¹⁾

リスクには、自転車や歩行者など見えている物(顕在)から、次の瞬間、自車の前に行動変化してくる「かもしれない」と、停車車両の見えない陰から飛び出してくる歩行者など、潜在リスクの「かもしれない」がある。これをリスク予測として技術にしていくには、2つの重要なポイントがある。一つ目は、走行の数秒先のぶつかる可能性を定義し、現在のリスク余裕を物理表現するモデルである。ポテンシャルフィールドなど、いくつかやり方はあるが、リスクの少ない最適走行経路を生成し、走行スピードを制御する上で大事なモデル表現である。二つ目は、経験走行情報に基づき学習されていく点である。今見えている状況からその危なさを決定していくには、多くの情報をもとにしたオントロジック的アプローチも必要になる。このように、物理モデルと情報モデルを融合し予測モデルを形成することは、自動車産業の新たなチャレンジでもある。この情報ソースとして、現在、東京農工大に蓄積された「ヒヤリハットデータ」^{12) 13)}は大変重宝である。これは、「事故にはならなかったが急ブレーキをかけた」ような危険イベントを判断した情報ソースであるため、このデータを学習していけば危険予知になり得る。以上のように、人間が見ている状況から「なんとなく危ない」と感じてスピードを緩めるような知的行動を、クルマとしての機械に植付けていくことが、安全の進化、そして自動運転と叫ばれる技術チャレンジに欠かせない。

SイノベプロジェクトでのPotential FieldとしてRiskを表現した物理モデル(以下、Risk Potential)を、**図6**に示す。各種周辺監視センサで認識された空間情報を、このRisk Potentialとすることで、駐車車両などの走行環境のリスクイメージを連続的に物理表現することができる。さらに、このポテンシャル場により、目標コースやスピードを最適化できるため、走行制御とつなげることがやりやすい(詳細な説明は割愛するが、詳細は参考文献を参照願いたい)¹⁴⁾。

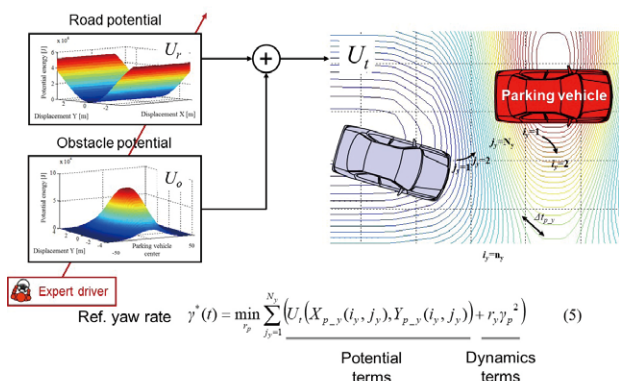


図6 リスクポテンシャルによる目標軌跡の最適化

2.3 ヒヤリハットデータベースと情報リスクモデル

Sイノベプロジェクトでは、ヒヤリハットデータから多くのことを学んだ¹⁵⁾。物理モデルとしてのRisk Potentialだけではなく、ヒヤリハットの経験データから、これから起こるリスクの可能性を予測する「データ駆動型リスク予測モデル」の構築も進めてきた。**図7**に、このプロジェクトで構築したリスク予測制御につなげるフレームワークを示す¹⁶⁾。

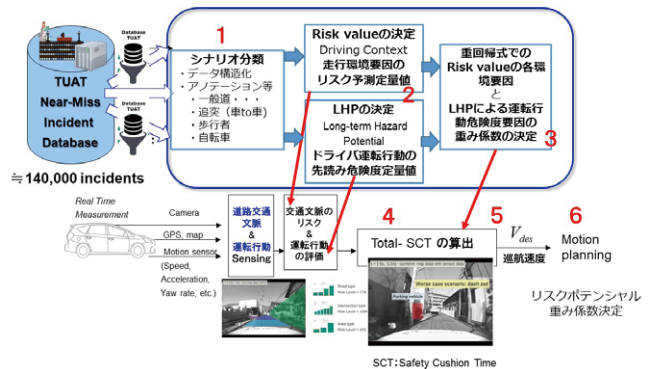


図7 データ駆動型リスク予測制御のフレームワーク

「ドライバ運転行動要因」「走行環境の各要因」とヒヤリハットイベントに至った因果関係(Cause and Effect)を、それぞれ、LHP(Long-term Hazard Potential), Rv (Risk value)という定量指標で表現した。危険イベントが発生する以前の約10秒前から約3秒前の間のデータをもとに、この2つのリスク定量値が決定される。運転における2大非定常要素としての「人間ドライバ」「走行環境」を、LHP, Rvという、それぞれ、あまり複雑すぎない定量指標で示せた値は大変大きい。

さらに、これらをヴァーチャルな運転・交通シミュレーションに組み込み、ヒヤリハット～事故の発生予測のフレームワークとし、「かもしれない運転」のような「リスク予測制御」による確率的な効果予測が可能となった。一例としての結果を**図8**に示す¹⁶⁾。

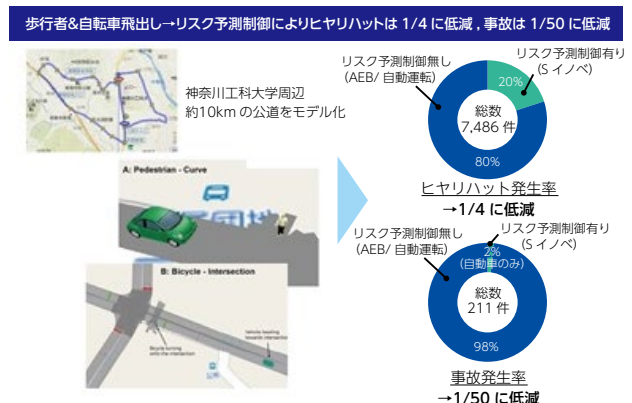


図8 運転・交通シミュレーションによるリスク予測制御の効果予測

神奈川工科大学周辺の約 10km の公道で、交差点、歩行者、自転車の飛出しを模擬し、さらには、LHP, Rv 指標を考慮して、ヴァーチャルモデルを構築した。この動的シミュレーションの結果、リスク予測制御（かもしれない減速）により、ヒヤリハットの発生率が約 1/4（総ヒヤリハット発生件数 7,486 件）、事故発生率が約 1/50 に低減される結果が算出されている。この結果は、「見えて（認識して）からブレーキを掛ける自動運転」と「見えている環境から飛出し物を先読みし減速する運転知能」の差とも言うことができる。このようなシミュレーションでの効果予測は、天気予報の歴史のように、まだまだ信憑性が十分ではないが、「情報モデル」と「物理モデル」の融合により、システム制御技術としても、また、デジタルツインのヴァーチャルでのバリデーション技術としても、リスク予測技術の方向性を示すことができている。今回、そのフレームワークが構築できたことは重宝だが、実際に注意すべき点は、人間が慣れている地域でうまく走れるのと同様に、交通環境の異なる地域、国では、このデータベースが有効とは限らないことである。今後、そのコミュニティ単位のヒヤリハットデータベースの構築や、その構造化などが課題である。

2.4 人馬一体の自動運転 (Shared control) ^{17) - 19)}

機械は信頼されて初めて人間に使われる。また、先にも述べたように、人間は運転したい時もあれば、疲れた時や単調な走行状況で、運転したくない時もある。高齢者の場合、身体の衰えを自覚し運転に不安を感じている。彼らが安心して運転し目的地まで移動できるようにしてあげることが知的機械の役割だろう。決して、高齢者から運転を取りあげることではない。自動車の良い所は、自由な移動ができることはもちろんのこと、運転行為自体にも魅力がある。人間が機械を使うという普遍的な点は、人間が機械を通じて刺激を受け、活性やモチベーションの向上などにも繋がる本能的部分がある。最近では、スマホにより「情報を使う」魅力が大幅に広がった。情報が「知れる」価値なら、それと対峙する「モノ」には、「見て、触って、感じる」価値がある。どちらが良いとの議論ではなく、どちらにも共通する重要なポイントは、機械が考える文脈を、それを使う人間が解るか？（または、解りやすいか？）という点である。これが、いきなり HMI(Human Machine Interface) やドライバモニタの議論になるのではなく、使う人間の期待通り、または、期待以上の結果（成績）ができるかをチェックする必要がある（これが信頼のもと）。機械は、その結果（成

績）を予測し、その行為の文脈を人間に示し、分かってもらわなければならない。この点でスマホは一步先を行っている。クルマは、まだまだこの点が弱い。機械が最適と判断する走路や認識状況をできるだけ合理的に伝え、触って感じるハンドル、アクセル、ブレーキなどと、見れば解る前方視界でも表現できて、ようやく、馬に近づけられる。新たなインターフェイスを追加して運転負荷を増大させることにはならない。運転の文脈をしっかりと把握し、人間に伝えられるか？ これも、自動運転の知能（つまり、運転知能）に求められるものである。

S イノベプロジェクトでの研究成果の例を示す。図 9 は、Haptic Steering Shared Control の概念図を示したものである ¹¹⁾。熟練ドライバをモデル化した操舵モデルと、実際の人間ドライバのハンドル操作量の差を、操舵トルク反力に反映して、より良いコーストレースに誘導してあげようとする効果を狙っている。この制御により、規範経路の追従性、運転の滑らかさともに向上することがわかる (図 10) ^{14) 20) 21)}。

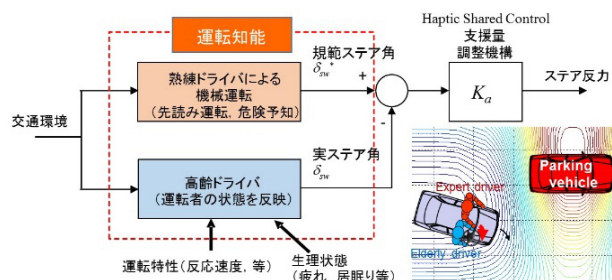


図 9 Haptic Steering Shared Control

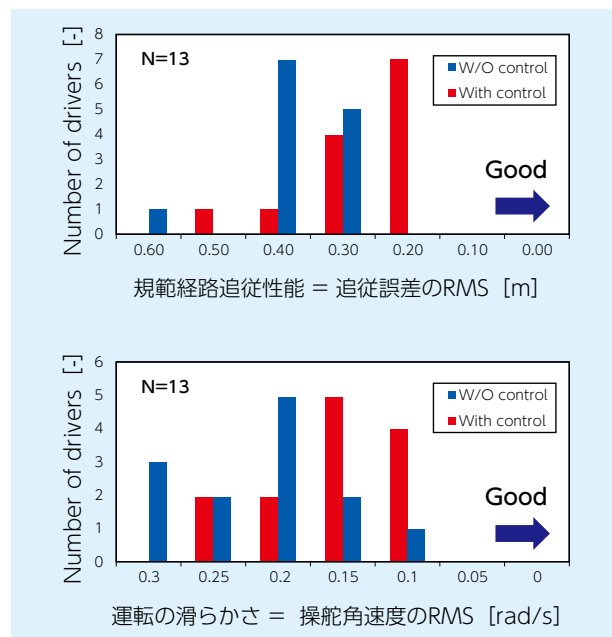


図 10 Effectiveness of Haptic Steering Shared Control

自動運転技術の動向における「更なる安全をめざす運転知能」「人馬一体の自動運転」の2点について、私の期待として綴った。共感頂ける方の参加は大歓迎である。

3. コネクティッド； 情報でつながるモビリティ・エコシステム

3.1 概要

次は、交通システムなどの、人、クルマ・交通環境のエコシステムとしての変革を考えてみよう。MaaS (Mobility as a Service) である。情報とモビリティが融合したサイバーフィジカルネットワークでのサービス・ビジネスの可能性は無限にあると言っても過言ではない。複数の交通手段を統合的に利用できるサービスは世界の各地域で始まっており、市場拡大が期待されている。フィンランドやシンガポールでは、国主導で交通情報を集め、ダイナミックに情報を発信するデータベースを構築している。ITS での取組みを振り返ってみると、これらに、モビリティデバインドの問題の解消、つまり、交通弱者にも目線をおき、高齢者と身体障害者の安全な移動と生活活性化支援、町おこしと市民 QOL (Quality of Life) の向上などの目的も含まれており、「誰にでも平等なモビリティの提供」の概念も重要である。

以上は、情報・ソフト面にクローズアップした例だが、情報とモビリティの融合の中で、IoT、フィジカルを含む基盤となるエコシステムの構築も重要である。交通システムの変革からのモビリティの進化として、シンガポールの研究開発プロジェクト「TUMCREATE」を紹介する。

3.2 TUMCREATE

シンガポールの国家研究ファンド (National Research Foundation) の CREATE (Campus for Research Excellence and Technological Enterprise) program に採択されたミュンヘン工科大学プロジェクトである TUMCREATE (TUM: Technical University of Munich) は、新しいモビリティ社会を示した研究の好事例である。

このプロジェクトは、TUM と共に、シンガポールの NTU (Nanyang Technological University) も加わり、若いアジアのエンジニアの育成にも貢献している。第1期は2010年～2016年に「The Center for Electromobility in Megacity」をテーマに実施され、第2期は2016年～2021年に「Towards the Ultimate Public Transport System」のテーマで実施中である。このプロジェクトには、両大学から100名以上の

エンジニア、研究者が参画しており、ミュンヘン工科大学からの教授陣もシンガポールに常駐し、約5年間の研究に没入している。

第1期では、単にEVを造るだけでなく、自動車工学の基礎として、パッケージ設計など、クルマとしてのアーキテクチャもNTUのエンジニアが習得している。さらに、電池パックの設計・テストベッドなど、電動システムの基礎も消化し、EVAという東南アジアのメガシティにマッチしたタクシーEVの研究車両を製作した(図11)。



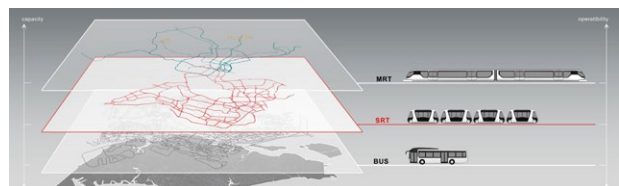
(TUMCREATE website より引用)

図11 TUMCREATE EVA - Tropical taxi EV²²⁾

さらに、車両の中でのバッテリーマネジメントだけでなく、シンガポールの交通状態をシミュレートし、走行や充電などの最適化を図るデータマネジメントシステムまでも構築している。

第2期では、シンガポールの交通渋滞、エネルギー、セキュリティなど、まさにITS活動で提案したような新しいエコシステムによるメガシティとしての課題解決を目的にしたモビリティ研究テーマとなっている。

まず、SRT (Semi Rapid Transit) System という最大約30名のキャパシティの原単位に自由に隊列自動走行するモビリティを企画している。これは、都市交通をもっと効率化するために、高速大容量だが乗車がまばらなMRT (Mass Rapid Transit) System と、遅く低容量のバスサービスの間のモビリティ能力を狙ったものである(図12)。



(TUMCREATE website より引用)

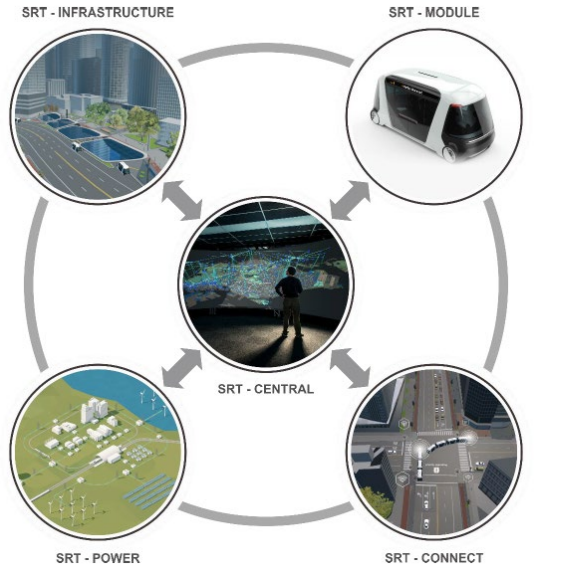
図12 Semi Rapid Transit System²²⁾

当然これは、第1期で培われた技術を使った電動車両である。複数の交通手段をシームレスに利用できるサービス（モビリティX）は勿論のこと、以下の点をSRT Systemの特長としている。

- ・モジュールとしての自動運転による多用途機能
- ・電動車によるクリーンな都市環境
- ・ピーク時間帯に対応し最大10台隊列（300名）までのダイナミックかつフレキシブルな乗員輸送能力
- ・デマンドに迅速にตอบสนองし、時間浪費を削減
- ・SRT 停留所での迅速な乗降

次に、このエコシステムは、SRT-MODULE だけでなく、SRT-CENTRAL, SRT-INFRASTRUCTURE, SRT-CONNECT, SRT-POWER の統合的な構成となっている（図13, 図14）。

SRT vehicle の原単位は、人にとって優しく設計されており、乗降時に空調を逃がさないエアーカーテンや、小回りや停留場所への並列駐車のために4輪独立操舵機構（図15）、低床は勿論、乗降のための路面描写による人の誘導技術など、大変斬新なアイデアが多く取入れられている。



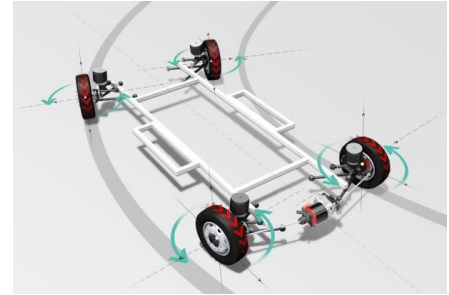
(TUMCREATE website より引用)

図13 Semi-Rapid Transit(SRT) System²²⁾



(TUMCREATE website より引用)

図14 SRT-MODULE²²⁾

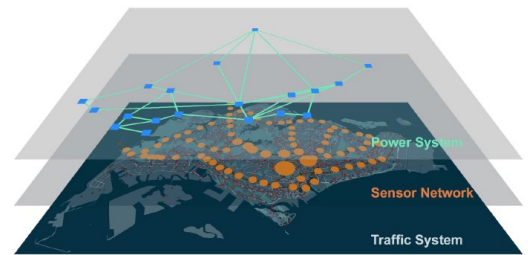


(TUMCREATE website より引用)

図15 All wheel steering system²²⁾

また、これらは、VR (Virtual Reality) を使い、仮想空間上で評価・設計ができる。さらに、圧巻は、CityMoS というシンガポール都市全体のダイナミックなシミュレーションモデルを構築している点である（図16）。

これは、都市全体の Power System, Sensor Network, Traffic System の階層で構成され、それぞれが Virtual なシミュレーションだけでなく、リアルワールドのデータセンシングも構成され、まさに、サイバーフィジカルなシステムとして構築されている。いわば、シンガポールが「電脳都市」として、国、都市自体が、知能化したシステムとなっている。



(TUMCREATE website より引用)

図16 SRT - CENTRAL (CityMoS)²²⁾

私は、このプロジェクトのアドバイザーを務めているが、更に感心させられることは、TUM, NTU の若いエンジニアが目撃させ、夢と自信をもってそれぞれの研究開発に取り組んでいる点である。ポスドク、ドクター、教授陣、そして国際連携として、特に NTU のエンジニアたちが、自動車自身の設計工学や物造りを通じて自分の能力を高め、そして、サイバーフィジカルシステムとして、高度な技術をそれぞれ自分の物にしている。このような研究開発は、大企業の第一線の研究開発に優るとも劣らない。さすがに、実際の物造りには、いくつか企業が参画してきているようだが、基本設計は、ほとんど、このプロジェクトが決めている。若いエンジニアの育成の点でも、圧倒されるパワーを感じている。

3.3 災害に強いレジリエントな日本版エコシステム

この章では、海外の良い所ばかりを挙げてきたが、日本発祥の世界に通用する概念も（私見であるが）最後に綴っておきたい。

平成の時代は、日本が多くの災害に見舞われ、たくさんの方が痛ましい経験をされた時代であった。しかし、日本文化は、これを乗り越える大きな強さを発揮した時代でもあった。この教訓をもとに、令和の時代は、平常時は活性に富み、災害時にも強いレジリエントな日本版エコシステムを構築する必要がある。

2011年3月11日の東日本大震災では、多くの方が亡くなり日本中が悲しんだ。改めて亡くなられた方にお悔みを申し上げるとともに、その後を背負って生活されている方々にも励ましの言葉を送りたい。

さて、私事で恐縮であるが、私も3月11日に仙台で講演をしていてこの震災を経験した。その時に、身をもってインフラリスクを体験した。情報が全く入ってこない、電気、ガソリンなどエネルギーリスク、交通手段の寸断、食料・水など、社会インフラが全く途絶えた時の経験である。この時に、モビリティ産業で働いていた自分が生活者の一人として書き連ねた教訓と、その時に仲間たちとまとめ、非公式ではあるが国や財界へ提案した内容を下記に列記する。

3.3.1 インフラリスク体験の教訓

- ・ 基地局が機能不全に陥り、携帯電話が全く繋がらなくなった。
 - インターネットやWiFiスポットは有効。加えてアドホック的な分散最適型の基地局形成がほしい。
- ・ プリウスの発電が12V出力として使えなかったのは残念。（そのすぐ後でトヨタ自動車に対応）
 - 電動化は、電池適正容量は必要だが、発電機をもつことも重要。しかも多燃料対応型の発電機。
- ・ 公共交通と自動車、他のモビリティがどう連動し合えるか、リアルタイムなモビリティ連結情報がほしい。
- ・ グリッド電力のような全体指摘だけでなく、自律分散型電力マネージメントシステムも必要
- ・ 「見知らぬ人とのコミュニケーション能力」「心細くなくても行動してみる」「自分のリスク感覚を信じること」などが重要

3.3.2 レジリエントなシステムの提案

- ・ 分散型・エネルギー地産地消コミュニティ
 - 一定型電池など地域のエネルギー情報管理に基づく省エネと有効活用によって、地域内電力を自律化。平常時は、ダイナミックプライシングにより系統電力との需要と供給のバランスをコントロール。
- ・ 自律分散型移動体無線通信網の構築
 - WiFi通信機能を利用し、災害時や過疎地において、車両を暫定的な無線中継局としてアドホック通信網を構築し、非常時の限定的な通信として利用。
- ・ 多燃料レンジエクステンダ
 - 平常時、災害時どちらも有効。
- ・ 遠隔運転、自律運転共に可能な自動運転システム
 - セキュリティの問題は解決が必要だが、災害時には遠隔運転は効果的。SUVなどの走破性の良いクルマも効果的。

以上、現在では、かなり進んでいるものもあるが、全体最適システムだけでなく、自律分散システムも併せ持ち、サイバーフィジカルなエコシステムを構築しておくことは、災害の多い日本型エコシステムに特に重要な点と思う。

4. まとめ

最後は取り留めもない話になってしまったが、CASEの時代に向けての先進自動車技術の進化、そして、人・クルマ・交通環境のエコシステムの進化について述べてきた。多分に私見が入り、時代の動向を客観的に見据えたものではないと思うが、このような見方もあるということをご理解頂き、ご容赦願いたい。確かに100年に一度のパラダイム変化が始まっており、グローバルの競争が激化していることに危機感をもつことは必要だが、これは時代の要請とも言え、モビリティ社会、自動車技術への要求において、日本文化や歴史に基づく考え方やアイデアで独自性をもつことも重要である。これらは、やがて世界に通用するものになると筆者は確信している。

参考文献

- 1) <https://mb-live.jp/mercedes-benz/case/>
- 2) <https://ja.wikipedia.org/wiki/GAFA>
- 3) Okazaki Teruo, Watanabe Hiroyuki, Oohata Akira, Inoue Hideo, Amano Kaoru, Chapter 9. Technology Diffusion and Development, Climate Change Mitigation - A Balanced Approach to Climate Change -, Yamaguchi Mitsutsune(Ed.), Springer,(2012), 179-221.
- 4) 岡崎照夫, 渡邊浩之, 大畠明, 井上秀雄, 天野馨, 実現可能な気候変動対策 – 政策・経済・エネルギーのバランス – 山口光恒監訳, 9章 技術普及・開発, 丸善出版, (2013), 213-238.
- 5) 井上秀雄, et al, 超成熟社会に向けたクルマの知能化, 自動車技術会シンポジウム (No.06-14)「自動運転への最新技術革新」講演, (2014年5月).
- 6) Bauer, E. et al., “PRORETA3 : An Integrated Approach to Collision Avoidance and Vehicle Automation” , Automatisierungstechnik, Vol. 60, No.12, (2012), 755-765.
- 7) Hideo Inoue, Masao Nagai, et.al, Driving Intelligence System to Enhance Safe and Secured Traffic Society for Elderly Drivers, 2014 JSAE Annual Congress(Spring), Yokohama Japan, (May 22 2014).
- 8) トヨタ自動車 (株) ニュースリリース, 「安全な車両開発への取り組みを強化 - 「統合安全コンセプト」 および新安全技術を発表」, (2006年8月). <https://global.toyota/jp/detail/1532213>
- 9) 井上秀雄, et al, 高齢社会に向けたクルマの知能化, JST 戦略的イノベーション創出推進プログラム (Sイノベーション) 中間報告シンポジウム, 講演資料, (2015年1月).
- 10) Kim, W., Kim, D., Yi, K and Kim, H. J., “Development of a Path-Tracking Control System Based on Model Predictive Control Using Infrastructure Sensors” , Vehicle System Dynamics, Vol.50, No.6, (2012), 100-1023.
- 11) 井上秀雄, et al, 高齢者の自立を支援し安全安心社会を実現する自律運転知能システム, JST 戦略的イノベーション創出推進プログラム Sイノベシンポジウム, 講演資料, (2016年9月).
- 12) Hideo Inoue, Research into ADAS with Driving Intelligence for Future Innovation, 26th IEEE International Electron Device Meeting 2014, Keynote Speech, (15 December 2014), 1.3.1-1.3.7.
- 13) Pongsathorn Raksincharoensak, Drive Recorder Database for Accident/Incident Study and Its Potential for Active Safety Development, FOT-NET Workshop Tokyo Japan, (October 13 2013).
- 14) Hideo Inoue, et al, “Intelligent Driving System for Safer Automobiles” , Journal of Information Processing, Vol.25, (November 2016).
- 15) Wongwaiwit, P., Raksincharoensak, P., Michitsuji, Y., “Analysis on Pedestrian and Bicycle Behavior in Unsignalized Intersection Based on Near-Miss Incident Database” , Proceedings of 20th JSME Transportation and Logistics Conference, (2011), 19-22.
- 16) Hideo Inoue, Mohanad El-Haji, Thomas Freudenmann, Haipeng Zhang, Pongsathorn Raksincharoensak, Yuichi Saito, “Validation Methodology to Establish Safe Autonomous Driving Algorithms with a High Driver Acceptance Using a Virtual Environment” , FAST-zero, (September 2019).
- 17) Abbink, D. A., Mulder, M. and Boer, E. “Haptic Shared Control: smoothly shifting control authority” , Cognitive Technology Work, Vol.14, (2012), 19/28.
- 18) Diomidis Katzourakis, Claes Olsson, Nenad Lazic and Mathias Lidberg, “Driver Steering Override Strategies for Steering Based Active Safety Systems” , Proceedings of 2nd International Symposium on Future Active Safety Technology Towards Zero-Traffic Accidents (FAST-zero '13) , Paper no. 20134591, (2013), 1-7.
- 19) Ryota Nishimura, Takahiro Wada, and Seiji Sugiyama, “Haptic Shared Control in Steering Operation Based on Cooperative Status Between a Driver and a Driver Assistance System” , Journal of Human-Robot Interaction, Vol.4, No.3, (2015), 19-37.

- 20) 井上慎太郎, 井上秀雄, 相川弘幸, ポンサトールラクシンチャラーンサク, DYC と操舵支援による人間機械協調運転支援システムに関する研究 (第 2 報), 自動車技術会論文集, Vol.48, No.1, 20174062, (2017 年 1 月), 111-118.
- 21) 井上慎太郎, 平野豊, 井上秀雄, 小澤拓巳, ポンサトールラクシンチャラーンサク, DYC と操舵支援による人間機械協調運転支援システムに関する研究 - 経路追従走行における高齢ドライバーへの支援効果 -, 自動車技術会論文集, Vol.47, No.3, 20164339, (2016 年 5 月), 734-737.
- 22) <https://www.tum-create.edu.sg/>

〈 著 者 紹 介 〉

井上 秀雄 (いのうえ ひでお)

神奈川工科大学 創造工学部 自動車システム開発工学科 教授

- 1978 年 早稲田大学理工学部機械工学科 卒業
 1978 年 トヨタ自動車株式会社 入社
 1997 年 BR-Vehicle Control 室 室長
 1998 年 第 2 車両技術部 車両制御開発室 室長
 2004 年 統合システム開発部 部長
 2008 年 先端先行技術戦略室 室長 (部長級)
 2013 年 FP 部 先進自動車研究 主査 (部長級)
- 2016 年 神奈川工科大学 創造工学部 自動車システム開発工学科 教授
 2017 年 同 先進自動車研究所 所長, 自動車工学センター長
 2018 年 同 学科長
- 2011 年～現在 (独) 科学技術振興機構 (JST) 戦略的イノベーション創出推進プログラム (S イノベ) 採択テーマ「高齢者の自立を支援し安全安心社会を実現する自律運転知能システム」プロジェクトマネージャー
- 2013 年～現在 東京農工大学 大学院工学府 機械システム工学専攻 客員教授
 2013 年～現在 ドイツ & シンガポール国際連携プロジェクト TUMCREATE Advisory Committee Member
- 2018 年～現在 「戦略的イノベーション創出プログラム (SIP) 第 2 期 自動運転 (システムとサービスの拡張)」のうち, 採択事業「仮想空間での自動走行評価環境整備手法の開発」プロジェクトリーダー

【専門分野】

車両運動制御, 運転支援・自動運転, 先進安全・予防安全, 車両統合制御 など

【学会活動】

- 2017 年～ 自動車技術会 論文査読委員, アクティブセーフティ部門委員会 委員
 2018 年～ 自動車技術会 代議員, 論文編集委員

【受賞】

- 1992 年 FISITA Paper Award, Development of Vehicle Integrated Control System
 1998 年 31 回機械振興協会 通産産業大臣賞「横滑り防止 車両安定性制御システムの開発」
 2009 年 The US Government Award from NHTSA, 予防安全・先進安全技術の開発とその普及への先駆者的貢献
 2016 年 日本機械学会 交通・物流部門 業績賞

CASE に対する取組みについて NTN's Approach and Effort for CASE

亀高 晃司* Koji KAMETAKA

現在、自動車は 100 年に 1 度の変革期にきていると言われていいる。その代表的な開発トレンドのひとつが CASE である。CASE は、Connected (コネクテッド)、Autonomous (自動運転)、Shared & Services (カーシェアリングとサービス / シェアリングのみを指す場合もある)、Electric (電気自動車) の頭文字をとった総称である。2016 年のパリモーターショーにおいて、当時のダイムラー AG・CEO でメルセデス・ベンツの会長を務めるディエター・チェツェ氏の発言が起点になっている。この大きな流れは、当社の商品開発にも大きく影響しており、それらを本稿で紹介する。

Currently, it is said that automotive industry enters a phase of major change which comes "once in a century".
One of the representative development trends is CASE.
"CASE" consists from initials of Connected (External connection), Autonomous (Autonomous driving), Shared & Services (Car sharing and service or Car sharing only) and Electric (Electrical vehicles).
CASE is advocated by Dr. Dieter Zetsche (ex-CEO of Daimler AG) at Paris Motor Show 2016.
This paper introduces our developing activities with this major trend which we are greatly concerned with.

1. はじめに

自動車は便利な移動手段であるが、昨今の環境問題から、否応なく電動化が進められている。安全対策や交通システムの効率向上を目的に自動運転の研究も進められている。また、この場合の自動運転は、自動車単独の制御から、様々な情報を取り込み、安全かつ効率の高い自動運転システムの開発が進められている。これは、特に高齢化社会となった日本において、事故防止の効果も期待できる。

加えて、都市部においては、自動車を所有するのではなく、必要な時だけ使用するシェアリングというシステムも拡大しつつある。

このように、自動車は 100 年に 1 度と呼ばれる変革期にあり、開発費用負担の軽減を目的とした自動車メーカー同士の連携が進んでいる。自動運転に関しては、自動車メーカー以外の通信ビジネス会社の参入もあり、将来、自動車産業の動向の決定者が消費者から誰になるのか混沌とした状況になっている。

当社においても、上記のような大きな流れが商品開発に与える影響は大きく、電動化モジュール商品の開発を進めてきた。更に、既存商品でも更なる省エネルギー化開発を実施した。

本稿では、**図 1** に示す CASE に対応する新たな電動化モジュール商品への取組み状況を紹介するとともに、

既存商品についても、従来の小型軽量化、低フリクション化に加えて、更なる高速化、高信頼性、高静粛性、高耐久性などに関わる開発商品の概要を述べる。

C つながる Connected	<ul style="list-style-type: none"> IoT 社会、スマートフォンなどとの連携 車内でのエンタテインメントなど様々なサービスの提供
A 自動運転 Autonomous	<ul style="list-style-type: none"> 交通事故ゼロ社会の実現 IoT/AI 技術の活用 センシング技術の進化
S シェアリング Shared/Services	<ul style="list-style-type: none"> 所有からシェアへ シェアサービス事業へのビジネスモデルの変化
E 電動化 Electric	<ul style="list-style-type: none"> 環境性向上への政策要求 EV/HEV/PHEV の普及



図 1 自動車 CASE の概略

* 執行役員 自動車事業本部 副本部長 電動モジュール商品事業部 事業部長

2. CASE に対する取組み

2.1 電動アクチュエータの開発と適用事例

自動車の駆動・制御において普及が見込まれるバイワイヤ制御に不可欠な「電動モータ・アクチュエータ」をシリーズ開発した。

近年、自動車分野は自動運転化や更なる低燃費化が求められており、駆動・制御をサポートする様々なシステムの普及拡大に伴うバイワイヤ制御を中心とした電動化が進められている。

こうした市場の動向を踏まえ、NTN は、コア技術である軸受やボールねじの製品技術とモータの設計技術、車両制御のための電子制御技術とを組み合わせ、表 1、図 2 に示す「電動モータ・アクチュエータ」としてシリーズ開発をした。構成部品や諸元を共用化し、形式やサイズにバリエーションを持たせたラインナップにより個別設計が不要となり、開発期間の短縮が可能となる。

開発した商品は、さまざまな車載アプリケーションに適用が可能であるが、将来的には自動車だけでなく幅広い分野への適用を目指している。NTN では、まずは本シリーズの早期量産を目指し、車載用途としてグローバルで販売活動を進めるとともに、アクチュエータを活用したその他機器への適用の拡大を図っていく。

表 1 電動モータ・アクチュエータのタイプ

	タイプ	特長
1	平行軸タイプ B II	<ul style="list-style-type: none"> 樹脂製ハウジング採用による軽量化 パーキングブレーキなどに対応可能な、逆入力回転防止ユニットの搭載可能 大推力に対応可能なアドオン減速機ユニット 非接触リニアポジションセンサ内蔵
2	同軸中空タイプ B III (図 2)	<ul style="list-style-type: none"> 同軸配置によるコンパクト設計 マグネットとコアの重合構造により、サイズ、トルクと出力を最適化 モータの主要構成部品であるマグネット、コイルを共用化 非接触リニアポジションセンサ内蔵

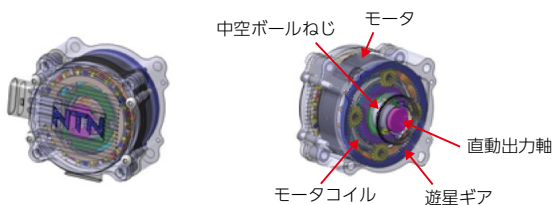


図 2 同軸中空タイプ B III の外観と構成

2.1.1 トランスミッション用電動オイルポンプ

開発例としてアイドリングストップ用電動オイルポンプが挙げられる。アイドリングストップは燃費向上の

1つの方法であるが、電動オイルポンプの更なる軽量コンパクト化、高効率、省エネルギーが要求され、NTN「電動モータ・アクチュエータ」を活用したポンプとして適用されている。

また、米国や中国などでの ZEV（ゼロエミッションビークル）規制により、HEV や PHEV に対して、約 50km 以上の EV モード走行を義務づけており、これを実現するため、アイドリングストップよりも更に大きな出力の EV 走行用電動オイルポンプが必要とされる。

2.2 アクスル軸受への機能付加モジュール商品

2.2.1 モータ・ジェネレータ機能付ハブベアリング「eHUB」

タイヤの回転を支えるハブベアリングにモータ・ジェネレータを組み合わせた開発商品「eHUB (図 3)」がある。燃費向上や CO₂ 排出規制の強化が進むなか、発進時や加速時にエンジンの駆動力を補助して燃費を改善する「48V マイルドハイブリッドシステム」(以下、「48V MHEV」)の普及が拡大している。

「48V MHEV」は、エンジンを主要動力源として使用し、発進時や加速時などエンジン駆動時に小型のモータで駆動アシストするシステムである。また、減速時に発生するエネルギーを電力に変換(回生)することで、より燃費効率を向上させることも可能である。

「eHUB」は、前輪駆動車の場合は後輪(非駆動輪)に搭載し、モータで駆動アシストしてエンジン負荷を軽減し、減速時には発電機としてエネルギーを電力に回生する。本開発品を、スタータジェネレータなど既に実用化された「48V MHEV」と組み合わせることで、従来のエンジンのみの自動車と比較して最大 25% の燃費向上が期待されている。また、EV クリープ走行や、すべりやすい路面(低ミュー路)での車両姿勢の安定制御に活用することも可能である。

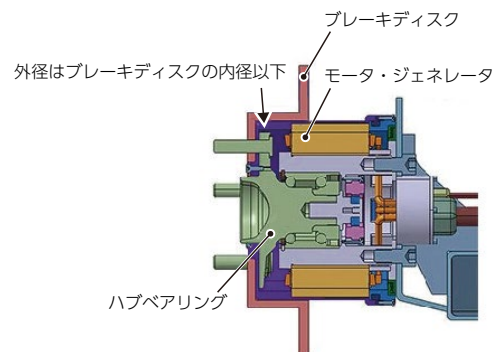


図 3 モータ・ジェネレータ機能付ハブベアリングの断面図

2.2.2 ステアリング補助機能付ハブベアリング [sHUB]

ハブベアリングにタイヤの転舵角度を調整する機構を組み合わせ、前輪に搭載可能なステアリング補助機能付ハブベアリング「sHUB」がある。世界シェア No.1 を誇る当社のハブベアリングで長年培った設計・製造技術に、モータ及びその制御技術を組み合わせた。

一般的な車両では、前輪部に配置されるステアリング装置と左右のタイヤが機械的に接続されているため、ハンドル操舵角に対する左右のタイヤの転舵角度は一意に決まることから、走行しながら直進やコーナリングなどの走行条件に合わせて適切に変更することができなかった。

図4に示す「sHUB」は、既存のステアリング装置を変更することなく車両の前輪転舵・懸架装置に取り付け可能で、左右各輪の転舵角度を個別に補正することができるモジュール商品である。運転時のハンドルの操舵角度と車速のデータをもとにタイヤの転舵角度を最適に補正することで、車両のコーナリング性能や高速直進時の安定性を向上させるほか、スリップなど非常時の車両姿勢の安定化を図るとともに、燃費改善にも貢献する。

本開発品は、今後の進展が予想されている完全自動運転においても、より安全な危険回避動作を可能にするシステムとして期待できる。

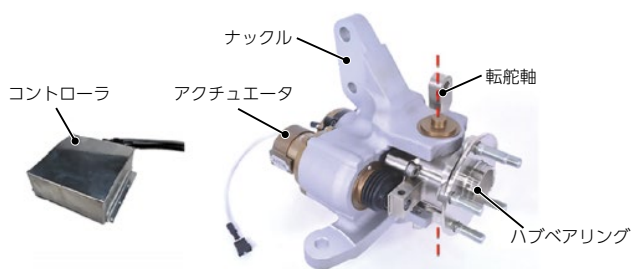


図4 ステアリング補助機能付ハブベアリングの概略構成

3. 既存商品の軽量小型化，低フリクション化

3.1 トランスミッション用

「超低フリクションシール付玉軸受」

独自形状の超低フリクションシールを採用することで、従来の接触タイプシールより回転トルクを80%低減したトランスミッション用「超低フリクションシール付玉軸受」を開発した。

自動車の省燃費化に伴い、トランスミッション用軸受には、長寿命に加え、更なる低トルク化が求められている。また、トランスミッション内に発生するギアの摩耗粉など、硬質異物の軸受侵入による軸受寿命の低下を抑制するため、従来は接触タイプシールの適用が標準的であったが、シール部が軸受内輪に接触することで、回転時に引き摺りトルクが発生する課題があった。さらに、近年のEVやHEVといった高速回転が必要とされる用途においては、シール部の周速限界の制約により、接触タイプシールの適用は困難であった。

「超低フリクションシール付玉軸受」は、図5に示すようにシールリップのすべり接触部に円弧状（半円筒状）の微小突起を等間隔に設けた新開発の接触タイプシールを採用することで、回転トルクを従来品比で80%低減し、非接触タイプシールに匹敵する低トルク効果を実現した。回転時には、微小突起によるくさび膜効果によって、シールと内輪のしゅう動面の間に油膜が形成され、接触タイプシールでありながら、シールの引き摺りトルクを大幅に低減している。さらに、シールリップの突起は微小なため、潤滑油を通して軸受に有害な硬質異物の侵入は防ぐことができ、軸受寿命も確保している。

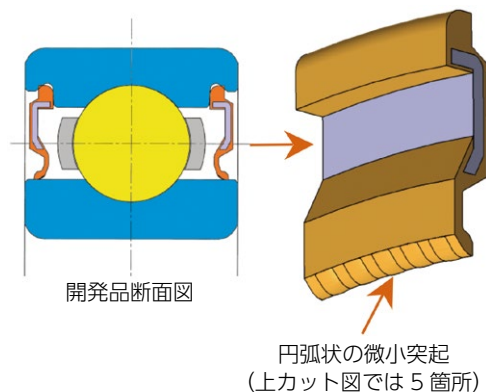


図5 超低フリクションシール付玉軸受の概略構造

3.2 自動車用 ULTAGE 円すいころ軸受

軸受内部設計の最適化により、世界最高水準の高負荷容量と高速回転性能を実現した「自動車用 ULTAGE(アルテージ)円すいころ軸受 (図6)」を紹介する。

自動車用の円すいころ軸受は、トランスミッションやデファレンシャルの動力伝達部などに使用され、自動車の高出力化に伴う負荷の増加や、軽量化されたハウジングの剛性低下に伴う偏荷重の増加など、近年過酷さを増す使用条件に対応できる高い荷重負荷能力が求められている。また、省燃費化と高効率化のための低トルク、低昇温による高速回転性能も必要とされている。

「自動車用 ULTAGE 円すいころ軸受」は、大形円すいころ軸受で採用した、転がり疲労寿命を最大化する円すいころ形状の最適設計技術を、新たに小形シリーズ向けに改良適用することで、高負荷や偏荷重が作用する場合においても、転動体(ころ)と軌道輪(内外輪)の接触面圧を均一に形成でき、軸受の潜在寿命を最大限まで引き出すことを可能にした。

本開発品は、従来品と比べ 1.3 倍の高負荷容量を実現し、軸受定格寿命は 2.5 倍以上に向上させた。また、ころと内輪及び保持器とのすべり接触部の形状を最適化することで許容回転速度が約 10% 向上し、世界最高水準の高負荷容量と高速回転性能を実現した。



図6 自動車用 ULTAGE 円すいころ軸受

3.3 回転フリクションを 62% 低減する 「低フリクションハブベアリング III」

回転フリクションを従来品比で 62% 低減した「低フリクションハブベアリング III」を紹介する。

タイヤの回転を支えるハブベアリングには、基本性能である寿命や強度を満たした上で、更なる回転フリクション(摩擦)の低減が求められている。

NTN は、これまで長年にわたり、ハブベアリングの軽量化や長寿命化、高効率化などを追求し、研究・開発を重ねてきた。ベアリングと周辺部品とのユニット化(GEN1 ~ GEN3)を進め、小型・軽量化による低燃費

化や組付性の向上に貢献してきたほか、材料やグリース、シールなどの改良を重ねることで、長寿命化と低フリクション化を実現した商品を市場展開し、現在ではハブベアリングで世界シェアトップを誇っている。

「低フリクションハブベアリング III」では、図7に示すように低フリクション化を追求したグリースを開発することにより、回転フリクションを従来品比 62% 低減し、車両燃費を約 0.53% 改善した。新たに開発したグリースは、低温環境下におけるフレットング摩耗を改善、寿命なども向上させている。さらに、ハブベアリング内部の予圧を最適化することで、軸受の性能を維持したまま、軸受自体の回転フリクションを低減した。

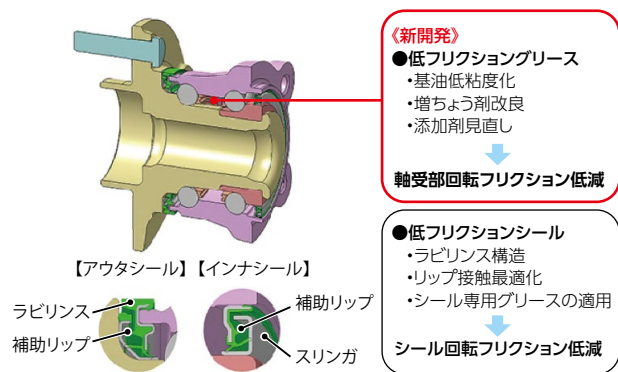


図7 低フリクションハブベアリング III

3.4 プロペラシャフト用

小型しゅう動式等速ジョイント「HEDJ-P」

従来品比で質量 17% 低減、外輪外径 6% 低減となる世界最高水準の小型・軽量化を実現したプロペラシャフト用しゅう動式等速ジョイント「HEDJ-P (図8)」を紹介する。

プロペラシャフトは 4WD 車などに使用され、図9に示すようにトランスミッションの回転を車両の前後方向に伝達する役割を担う。また、プロペラシャフト用等速ジョイントは NVH(騒音, 振動, 乗り心地) を重視する近年の高級乗用車, SUV(多目的スポーツ車)への適用が増加している。

今回、開発のベースとした従来品 HEDJ は、NVH 特性のバランスが優れているメリットのほか、車両設計の自由度を高めるためのスライド量と作動角が大きく取れることから、車両搭載性の面でも優位であり、使用角度が大きい SUV に適している。

NTN はこれまでに HEDJ を量産展開し、販売開始以来、国内外を問わず幅広いユーザに数多く採用いただいている。「HEDJ-P」は、従来品 HEDJ をプロペラシャ

フト専用として再設計し,更なる外輪の小径化や内輪の薄肉化などを追求したもので,その結果,HEDJに対して同等性能を確保しながら17%の軽量化,6%の外径コンパクト化を達成した.



図8 プロペラシャフト用小型しゅう動式等速ジョイント HEDJ-P

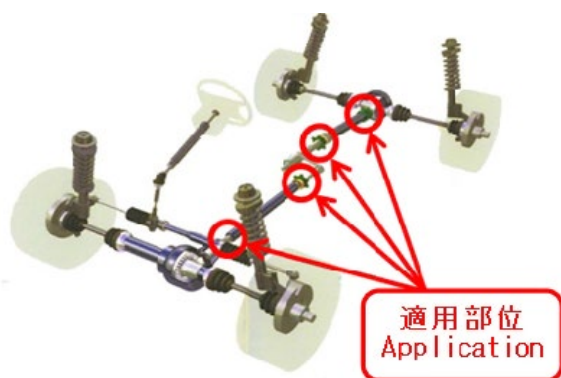


図9 プロペラシャフト用小型しゅう動式等速ジョイント HEDJ-P の適用部位

4. おわりに

100年に1度の変革期とも言われる自動車業界の代表的な開発トレンドのひとつであるCASEのConnected(コネクテッド),Autonomous(自動運転),Shared & Services(シェアリング/サービス),Electric(電気自動車)に対する当社の開発方針,あるいは開発商品を紹介した.

新たな電動化モジュール商品の取組み状況を紹介したほか,既存商品の小型軽量化,低フリクション化に加え,更なる高速化,高信頼性,高静粛性,高耐久性などに関わる開発の概要を述べた.

多くの開発はスピードアップと領域の拡大を視野にNTNのコアコンピタンスであるトライボロジー技術,精密加工技術,精密測定技術,及びシミュレーションなどの解析技術を基盤とし,外部機関などとの連携も活用している.

当社の技術,商品がグローバルな自動車業界の更なる発展に寄与し,社会貢献ができれば,幸甚と考える.

執筆者近影



亀高 晃司

執行役
自動車事業本部 副本部長
電動モジュール商品事業部
事業部長

ステアリング補助機能付ハブベアリング (sHUB[®]) Hub Bearing Module with Steering Adjust Function

宇都宮 聡* Satoshi UTSUNOMIYA
大畑 佑介* Yuusuke OOHATA

石原 教雄* Norio ISHIHARA
伊東 貴志* Atsushi ITO



ハブベアリングと転舵角度制御機構を複合化したステアリング補助機能付ハブベアリング (sHUB[®]) を開発した。本開発品は、車両の走行状況とドライバー操作に応じて、左右の車輪を独立に補正制御し、車両の運動性能を大幅に向上させる。

We have developed a hub bearing module, 'sHUB' with steering adjust function incorporating the steering angle adjustment mechanism in the hub bearing. We demonstrated that the prototype successfully modified the steering angles of the left and right wheel independently according to the driving situation of the vehicle and the operation of the driver. The developed hub bearing module will hence make a significant contribution to the dynamic performance improvement of the vehicle.

1. はじめに

一般的な車両では、前輪部に配置されるステアリング装置と左右のタイヤが機械的に接続されているため、ハンドル操舵角に対する左右のタイヤの転舵角度は一意に決まる。低速で大きく旋回する場合には、左右輪でそれぞれ通る旋回半径が大きく異なるため、スムーズに旋回するためには左右輪をアッカーマンジオメトリ（内輪側を大きく、外輪側を小さく設定）とする必要がある。一方、中高速での旋回性能を向上させるにはパラレルから逆アッカーマンジオメトリ傾向が良いとされている。

アッカーマン特性はステアリング装置の幾何学的な構成で決まるため、量産車両ではそれぞれの車両のコンセプトに合わせて、低速での取り回し性、もしくは、高速での旋回性を重視するかを選択している。

また、中高速走行時の旋回時に大きな荷重を支持する外輪のトー角を、サスペンションのブッシュのつぶれ特性等でパッシブにコントロールしているが、本来は旋回半径と旋回加速度によって最適なステアリングジオメトリをアクティブに制御することが望ましい。

NTN はハブベアリングの世界 No.1 シェアメーカーとして、上記トレードオフを解決し、ステアリングジオメトリを状況に応じてアクティブに制御することを目的として、ハブベアリングと転舵角度制御機構を複合化した全く新しい『ステアリング補助機能付ハブベアリング』(以下、sHUB[®])¹⁾を開発した。

sHUB は、車両の走行条件に合わせて、左右輪をそれぞれ独立して理想的な角度に制御することにより、安心

で快適な走行を実現する。直進安定性やコーナリング時の走行安定性向上、もしくは低 μ 路走行などで片輪がスリップした場合など非常時の危険回避に寄与するモジュールシステムであり、通常の旋回走行時にはコーナリングドラッグを抑えた省エネルギー走行も可能である。また、将来の自動運転技術では回避動作などへの適用も期待できる。

図1 に sHUB の車両への搭載イメージを示す。既存のステアリング装置と組み合わせ、懸架装置を大きく改造することなくそのまま取り付けることが可能である。sHUB のコントローラでは、車速や操舵角度などの車両情報をもとに左右の sHUB の目標角度を算出し個別に制御する。

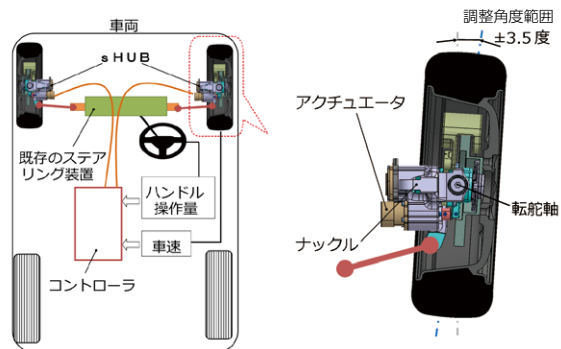


図1 sHUB 搭載の車両イメージ (前輪搭載時)

2. コンセプト

sHUB は、車両の運動性能を高め、安心して快適な走行を実現することを目的として、以下をコンセプトとした。

- ①左右輪に搭載し、転舵角を左右独立設定
- ②各輪を走行条件に合わせて理想的な角度に制御

* 商品開発研究所

- ・コーナリングドラッグを抑えた省エネルギー走行
 - ・危険回避などの非常時にも、車両の姿勢を安定
- ③ステアリング装置・懸架装置の種類によらず既存車両の従動輪（前輪または後輪）に大きな改造なく搭載可能
- ④最適な内部設計により、小型・軽量化を実現

図 2 に前輪のストラット式サスペンションとの組合せを想定した試作品（右輪用）の外観を示す。図 3 のように、サスペンションなどの周辺構造を変更することなく、車両の前輪の左右それぞれに取付けが可能なサイズを実現した。

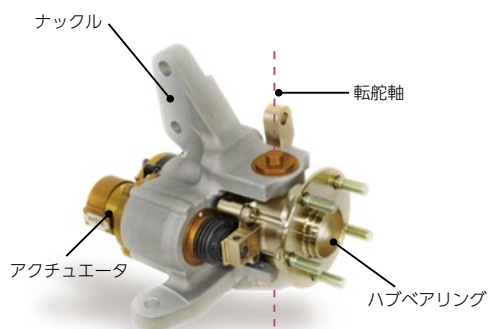


図 2 sHUB の試作品

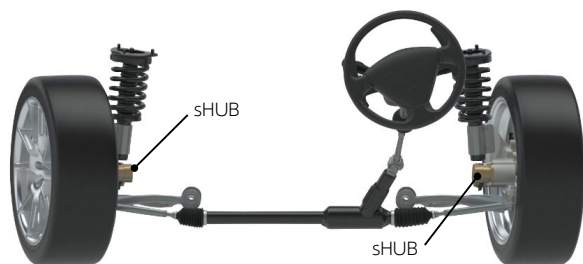


図 3 前輪への搭載イメージ

前輪に取り付けた場合の sHUB の基本設計を図 4 に示す。通常の操舵においてタイヤの操舵中心軸となるキングピン軸と sHUB の転舵軸は異なる軸であり、2 軸が地面で交わるように設計した。本構造により、sHUB の補助転舵によりすべり量を抑制し、安全性を確保した。

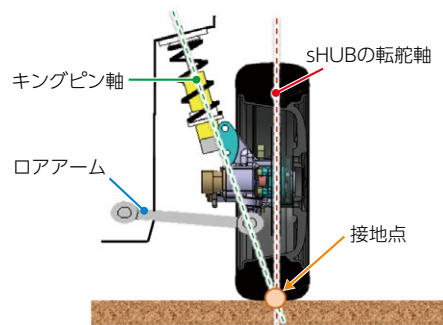


図 4 前輪への搭載時の基本設計

図 5 に sHUB を後輪に搭載した例を示す。前輪用と同じく、ナックル部の変更のみで搭載可能な設計とした。

この事例では、足回り構造は一般的なリジッドアクスル（トーションビーム）である。トーションビームのハブベアリング取付け面に sHUB を取り付けるだけで、容易に後輪操舵を可能とした。

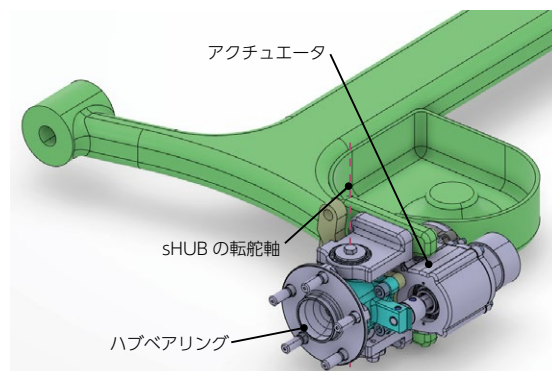


図 5 後輪への搭載イメージ

3. 構成と仕様

3.1 構成要素

図 6 に sHUB の構成要素を示す。sHUB はアクチュエータ部、ハブベアリング部、ナックル部の 3 要素で構成される。それぞれの役割について次に示す。

- ・アクチュエータ部
ナックル部に固定され、ハブベアリング部を転舵駆動
- ・ハブベアリング部
タイヤを回転支持、ナックルに対し sHUB の転舵軸回りの回転を支持
- ・ナックル部
車両の懸架装置との連結

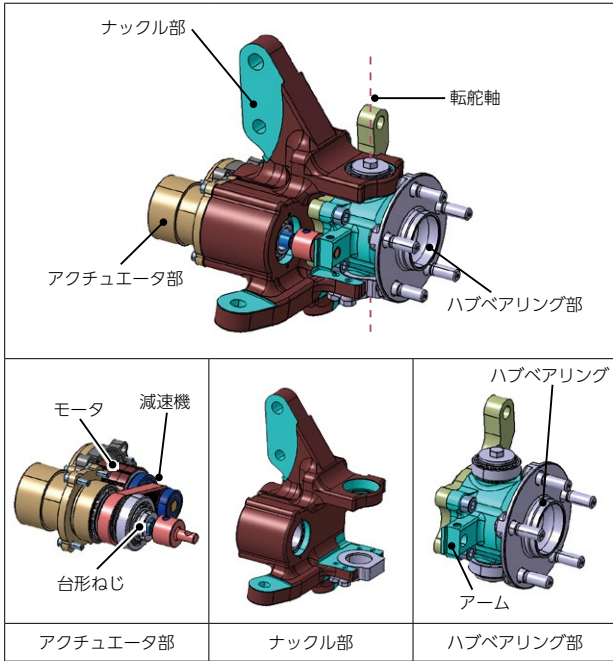


図6 sHUBの構成要素

アクチュエータ部のモータは、車速やハンドル角などを入力して、適切なタイヤ角度を実現するようにコントローラで制御する。モータの回転運動は減速機を介して台形ねじで直進運動に変換され、ねじ部がハブベアリング部に設けたアームの端部を押し引きすることで、ハブベアリングが転舵軸を中心に転舵される。

また、地面からの反力によるタイヤからの逆入力も、台形ねじのセルフロック機能により遮断される。このため、モータの消費電力を削減することができる。

3.2 仕様

後輪駆動のCセグメント車両の前輪に搭載することを想定した試作品の仕様を表1に示す。質量は原型車両の標準品（ナックルとハブベアリング）に対して+5 kg以下の13.8 kgとした。

表1 試作品の仕様

項目	数値
最大転舵トルク	350 Nm
電源電圧	24 V
最大転舵角	± 3.5 deg
最大転舵角速度	16 deg/s
質量	13.8 kg

4. 基本性能試験

試験車両ではCセグメントの後輪駆動車を選び、前輪に3.2項に示したsHUBを搭載した。

4.1 周波数応答特性試験

sHUB搭載車両の前輪をターンテーブルに乗せて、静止状態で周波数応答特性試験を実施した。正弦波（振幅:0.5 deg, 周波数:1,2,4,6,8 Hz）の角度指令をsHUBに与え、実角度を確認した。

試験結果を図7に示す。破線は指令角度、実線はsHUBの現在角度を示す。周波数が増加するほど、指令角度に対する現在角度の遅れが増したが、実用上の最大周波数は5 Hz以下であり、この範囲では現在角度と指令角度の遅れは0.025秒以下と十分小さい値を示した。

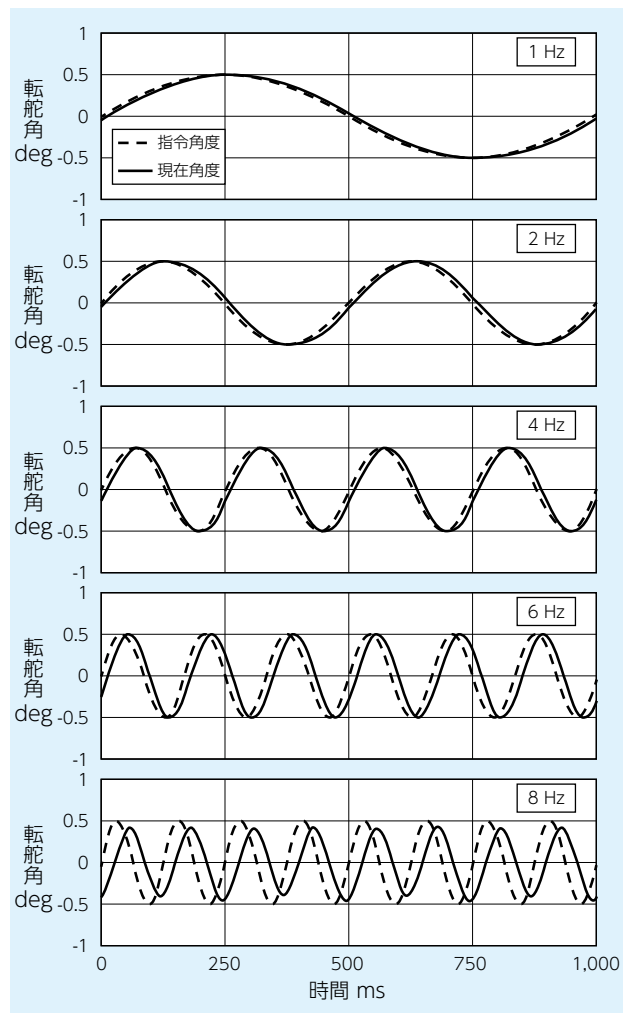


図7 周波数応答特性

4.2 転舵応答速度試験

ハブベアリングにステアリングトルクを負荷した状態で sHUB を転舵させ、応答速度を求めた。図 8 に示す指令値（破線）をコントローラに与え sHUB の転舵応答速度を求めた。転舵応答速度は、実測値（実線）の傾きとした。

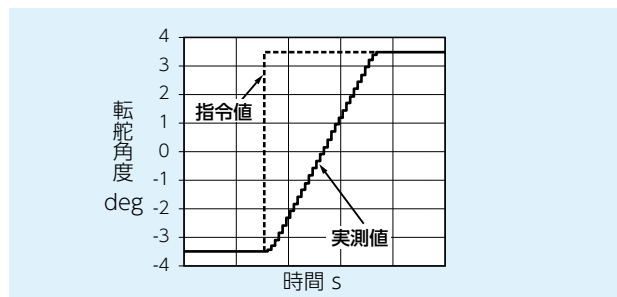


図 8 転舵角度の指令値と実測値

図 9 に負荷トルクに対する sHUB の転舵応答速度を示す。負荷トルクが増加するほど転舵応答速度は減少するが、負荷トルク全域で目標の応答速度である 10 deg/s 以上を満足した。

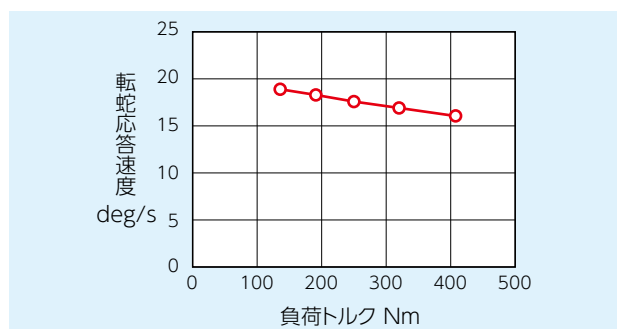


図 9 負荷トルクと転舵応答速度の関係

4.3 剛性試験

車両旋回時にタイヤに作用するモーメント荷重に対する車軸支持剛性を確認した。図 10 に同一車格の標準的なハブベアリングと sHUB のモーメント剛性を比較するために、フランジの傾き角を比較した結果を示す。

sHUB の構成部品であるハブベアリングの内部諸元、転舵軸支持軸受、ならびに軸受予圧の最適化を行った結果、標準的なハブベアリングに対して、高負荷域で傾き角が 5 % 増加した。

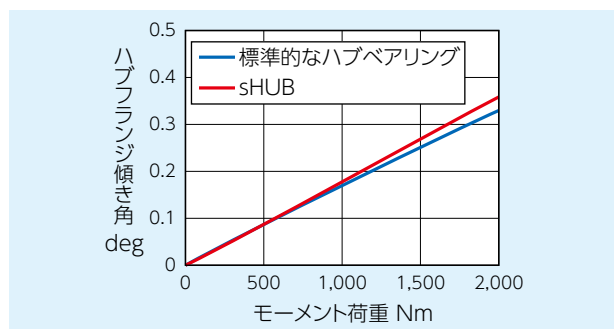


図 10 フランジ角度

5. 前輪操舵による車両運動制御

神奈川工科大学の山門・狩野研究室と、sHUB の有効な制御方法の検証について共同開発を実施した。

過渡状態における車両応答を向上させる“過渡応答向上制御”と、定常旋回時にタイヤの横すべり角を最適化する“旋回特性改善制御”を考案し、試験車両による走行試験で効果を確認した。

5.1 過渡応答向上制御²⁾³⁾

本制御は、車両運動性能の改善を目的として、sHUB の修正転舵動作によって、車速と操舵に対する横すべり角、ヨーレート、横加速度の 3 つの応答の時定数を調整するものである。

本制御則による車両の応答性の向上効果を確認するため、sHUB を搭載した試験車両を用いて「自動車規格 乗用車の操だ過渡応答試験方法 (JASO Z110:2003)」の“パルス操舵入力”試験を実施した⁴⁾。試験条件は車速 80 km/h、ドライバーのハンドル操作はパルス幅 0.5 s の三角波とした。

ハンドル角に対するヨーレートと横加速度の周波数応答特性の結果を図 11 に示す。

本制御を用いることで、ヨーレート、横加速度のいずれにおいても、通常走行に相当するハンドル角の周波数域 (0.5 ~ 2.0 Hz) でピーク値の増加と位相遅れの改善傾向が見られ、ハンドル操作に対する車両の応答性が向上することがわかった。

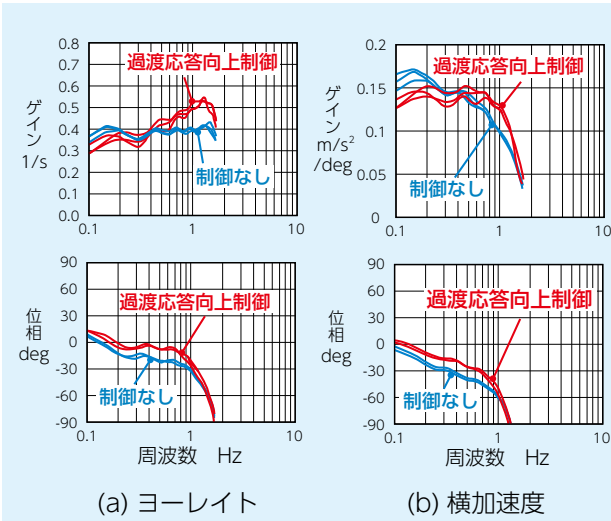


図 11 周波数応答特性の実験結果

次に、図 12 に示すアスファルト路コースにおいて、車速 80 km/h でシングルレーンチェンジを行い、本制御の有無による車両挙動の変化を実車で評価した。図 13 に試験時のヨーレイトと横加速度的変化を示す。本制御により、ステアリング操作量が減少するとともに、ヨーレイト、横加速度的の応答が向上することがわかった。

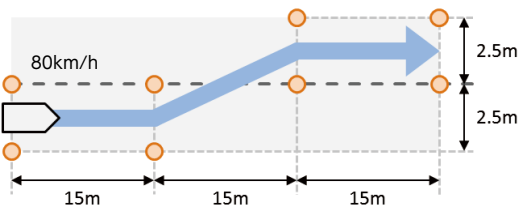


図 12 実車試験コース (シングルレーンチェンジ)

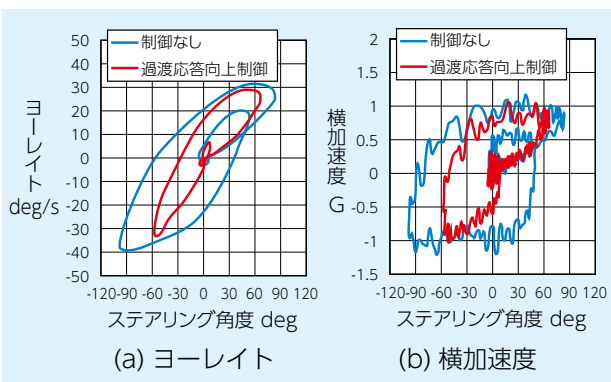


図 13 試験結果 (ヨーレイト, 横加速度)

5.2 旋回特性改善制御 (SAHS)⁵⁾

極低速域から、左右輪の荷重移動が大きくなる中高速域までの全速度領域において、旋回時の荷重移動に応じて、タイヤの性能を効率よく最大限に利用できるようにするための制御則について以下に示す。本制御則を SAHS (Super Ackermann Hub Steer) と呼んでいる。

走行中の車両が旋回する場合、左右輪で荷重移動および横すべりが生じる。旋回内輪、旋回外輪の荷重をそれぞれ W_i, W_o 、横すべり角を β_n (内輪: β_i , 外輪: β_o) とすると、コーナリングフォースと横すべり角の関係は荷重の変化に対して相似であり、図 14 のように示される。

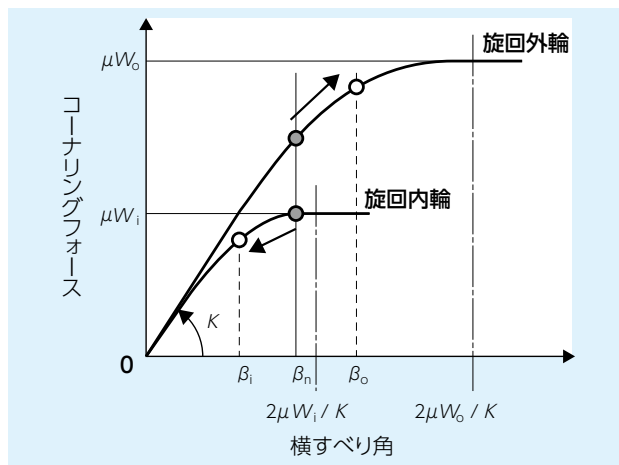


図 14 横すべり角とコーナリングフォースの関係

SAHS 制御では、荷重に対して左右輪の負担状態が等しく ($\beta_i/W_i = \beta_o/W_o$) なるように、sHUB で旋回内輪の横すべり角を減少させながら、同時に旋回外輪の横すべり角を増加させる (図 14 中の直線矢印の方向)。この制御により、左右輪の平均舵角を変えずにコーナリングフォースの総和を増加させることができ、旋回時に左右のタイヤを有効に使うことができる。すなわち、横加速度 (荷重移動) が無視できる極低速では、理想的なアッカermanジオメトリを実現し、横加速度が増加する中高速域では、逆アッカermanジオメトリとなるように制御する。

SAHS の効果を検証するため、sHUB 搭載車両による評価試験を実施した。試験コースのイメージを図 15 に示す。車速 50 km/h の直進状態から、A 地点でステアリング角度を 130 deg まで 0.5 s で変化させるランプ状の操舵を入力し、本制御の有無による車両挙動の変化を評価した。なお、制御パラメータは、走行時の感応評価に基づいて決定した。

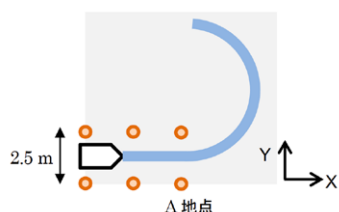


図 15 Jターン試験コースレイアウト

図 16 に試験結果を示す。制御なしの場合は、タイヤ荷重に対する横すべり角の割合 (= タイヤの負担状態) は、内外輪で大きく異なっている。一方、制御ありの場合は内外輪で同等となり、これにより左右のタイヤの力が効率的に路面に伝達される。その結果、図 17 に示すように旋回半径が減少した。

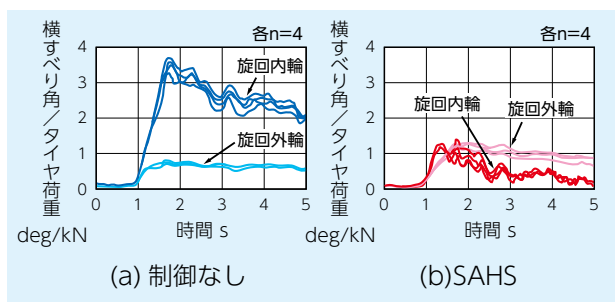


図 16 試験結果 (タイヤ負担状態)

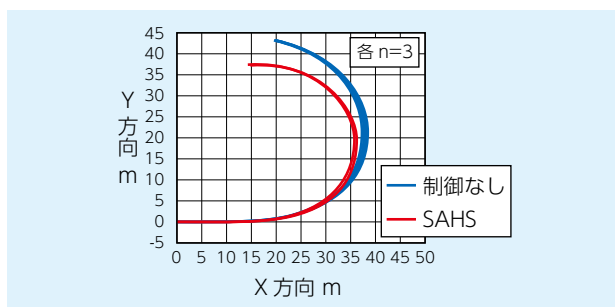


図 17 試験結果 (走行軌跡)

6. おわりに

『ステアリング補助機能付ハブベアリング (sHUB[®])』の構成、仕様および、基本性能について紹介した。

また、車両運動性能の向上を目的とし、sHUB を実際に C セグメント車両に実装して、2 つの制御方法 (過渡応答向上制御、旋回特性改善制御 (SAHS)) について走行試験で検証し、ドライバーのハンドル操作に対して左右輪を適切に修正転舵することで、車両の特性を大きく改善できることを確認した。現在、これら 2 つの制御を組み合わせ、統合的な制御の構築に取り組んでいる。

今後は、より sHUB を効果的に使用できる制御方法

を検討するとともに、駆動輪への展開も検討を進め、多くの車両への適用を目指していく。また、将来技術として期待されているステアバイワイヤシステムにおいても、sHUB によってタイヤの接地点から最も近い位置で修正制御をすることで、応答性をより高めるなど、走行の自由度向上の可能性があると考える。

参考文献

- 1) NTN ホームページ
https://www.ntn.co.jp/japan/news/new_products/news201800050.html
- 2) 石原教雄, 石橋満憲, 大場浩量, 伊東貴志, 山門誠, 狩野芳郎, 安部正人: 車両運動性能を向上させる前輪アクティブ操舵機能付ハブベアリング, 自動車技術会学術講演会予稿集, (2018) 20185263.
- 3) 石原教雄, 大場浩量, 伊東貴志, 石橋満憲, 山門誠, 狩野芳郎, 安部正人: 車両運動性能を向上させるステアリング補助機能付ハブベアリング, NTN TECHNICAL REVIEW, No 86, (2018) 84-90.
- 4) JASO Z110:2003 「自動車規格 乗用車の操だ過渡応答試験方法」.
- 5) 石原教雄, 石橋満憲, 大場浩量, 伊東貴志, 山門誠, 狩野芳郎, 安部正人: 車両運動性能を向上させる前輪アクティブ操舵機能付ハブベアリング【第 2 報】, 自動車技術会学術講演会予稿集, (2019) 20191269.

執筆者近影



宇都宮 聡
商品開発研究所



石原 教雄
商品開発研究所



大畑 佑介
商品開発研究所



伊東 貴志
商品開発研究所

モータ・ジェネレータ機能付ハブベアリング (eHUB[®]) Hub Bearing Module with Motor and Generator Function

西川 健太郎* Kentaro NISHIKAWA 川村 光生* Mitsuo KAWAMURA
 藪田 浩希* Hiroki YABUTA 伊東 貴志* Atsushi ITO



ハブベアリングとモータ・ジェネレータとを複合化したハブベアリングモジュール (eHUB) を開発した。既存の車両の従動輪に容易に搭載可能で、48V マイルドハイブリッドシステムと組み合わせることで、燃費改善や車両運動性能向上に貢献する。本稿では車両運動性能の向上効果について紹介する。

NTN has developed the hub bearing module combined with a motor generator, 'eHUB'. This module is mounted on an existing vehicle with less modification of the chassis. It will make a contribution to the improvement of the fuel efficiency and vehicle dynamics practically when it is applied to a 48V mild hybrid vehicle. This article focuses on the improvement of the vehicle dynamics.

1. はじめに

世界的に環境規制が強化される中、自動車では二酸化炭素排出量の削減に関して各国が厳しい規制を設けている。それに伴い、自動車の電動化が加速しており、プラグインを含むハイブリッド自動車、バッテリー電気自動車、燃料電池自動車など環境負荷の小さい電動化車両が普及に向けて開発されている。全世界の乗用車生産台数予測を図 1 に示す。48V マイルドハイブリッド車 (以下、48V MHEV と略記) は電気的な取扱いが容易で、かつ低コストで導入できるため、2025 年には生産される車両の 25 % を占めると見込まれる。しかしながら、燃費に対する費用対効果は大きいものの、燃費改善率は最大でも 15 % 程度と言われている。電気自動車やプラグインハイブリッド車など優れた低燃費車両はインフラ整備、バッテリー供給、コストの面から、普及には時間を要すると考えられるため、当面の燃費規制強化に対応するには普及率の高い 48V MHEV の燃費改善率の向上が求められる。

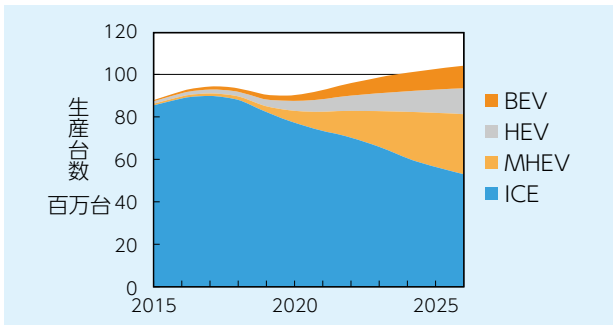


図 1 全世界 乗用車生産台数予測
(IHS Markit のデータをベースに自社で分析, 予測)

そこで、当社は一昨年、前輪駆動の 48V MHEV の従動輪である後輪に搭載する、モータ・ジェネレータ機能付ハブベアリング (以下、eHUB) を開発した¹⁾。eHUB の開発コンセプトを以下に示す。

- ① 48V MHEV との組み合わせによる燃費改善
- ② 車両運動性能の向上
- ③ 既存の足回りに搭載可能

前報では上記①に関して、前輪駆動の内燃機関車 (ICE 車) の後輪に eHUB を搭載し、WLTC モードで 3.2 % の燃費改善を達成したことを報告した¹⁾。一方、eHUB は車輪にダイレクトにトルクを伝達することから、応答性よく左右独立で駆動、回生トルクを制御できる。この特長を活かし、走行安定性や乗り心地改善が期待できる。本稿では上記②に主眼を置き、eHUB の左右独立制御による車両運動性能の向上について紹介する。

2. 基本構成

2.1 構造と仕様

eHUB は、既存の足回りに搭載することを目標に、外径寸法を以下とした。

- ・ブレーキディスクの内径に収まる外径寸法
- ・従来のハブベアリングと同等の軸方向長さ

限られた空間内でより多くの出力を得るために、モータには三相ブラシレス DC モータを採用した。評価に用いた eHUB の仕様を表 1 に示す。供試品の eHUB は目標サイズ (幅寸法) よりも大きく、車体側の改造が必要である。現在、同等出力で小型化に取り組んでおり、構造の用途は立っている。

* 商品開発研究所

表 1 eHUB の仕様

項目	目標値	供試品
外観		
外径 mm	φ 160	φ 159
幅寸法 mm (ハブボルト部は含まず)	80	126
質量 kg	10	14
駆動電圧 V	48	48
最大出力 kW	5.0	4.5
最大トルク Nm	60.0	59.2
最大回転速度 min ⁻¹ (車速換算 km/h)	1,700 (200)	1,200 (130)

2.2 試験車両

Bセグメントの前輪駆動車に eHUB を搭載し、車両運動性能の向上について検討した。試験には前報でモード走行燃費を計測した車両を使用し、パワートレイン構成を図 2 に、車両諸元を表 2 に示す。市販の内燃機関 (ICE) 車を改造し、後輪に eHUB を搭載した。図 3 に示したように、トーションビームを改造して、eHUB と既存の油圧ブレーキを設置した。コントローラユニットとバッテリーは車両後部座席および荷室空間に搭載した (図 4)。eHUB は既存の車両システムとは独立した制御システムとして構築し、車両から操舵角、アクセル開度、車速などの情報を取得した。48V バッテリーおよびコントローラユニットは市販品を利用し、シミュレーション環境で作成した制御モデルをそのまま実車にて評価可能な環境を構築した。

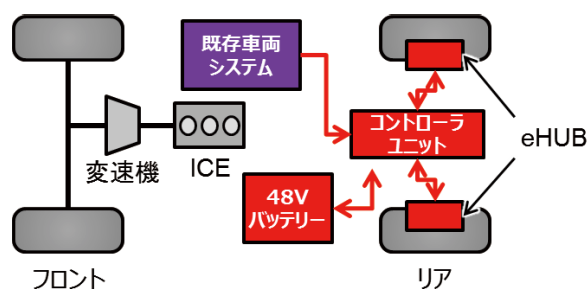


図 2 試験車両のパワートレイン構成

表 2 試験車両諸元

項目	諸元	備考
駆動方式	前輪駆動	
主駆動源	ICE	
T/M 方式	MT	
乗車人数 名	2	後輪シートを取り外し
タイヤサイズ	195/45/R17	
車重 kg	1,207	空車時
ABS 装置	OFF	
横滑り防止装置	OFF	
eHUB	供試品	表 1 参照
eHUB 搭載位置	後輪 (左右)	トーションビーム改造

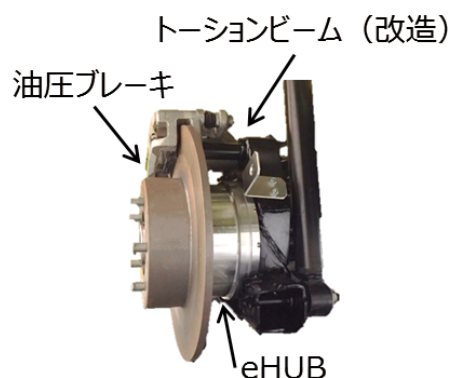


図 3 eHUB 搭載状態

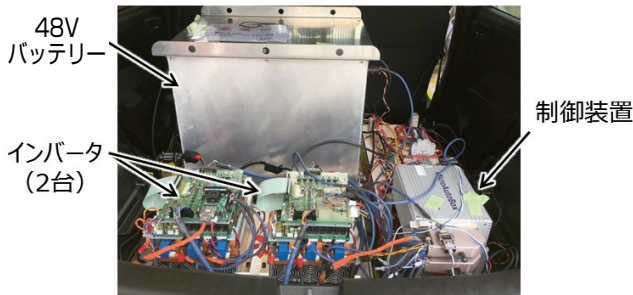


図4 コントローラユニットとバッテリー

3. ダイレクトヨーモーメントコントロール (DYC)

左右輪を独立して駆動，回生する eHUB の特長を活かし，車両運動制御に取り組んだ．車両の速度や操舵角等の車両情報に応じて eHUB を適切に動作させることで，車両の挙動を変化させ，車両運動性能を向上させることができる．

左右輪の駆動力差を積極的に発生させ，車両のヨーモーメントを直接制御する手法をダイレクトヨーモーメントコントロール (以下，DYC) という²⁾³⁾．DYC によって操舵に対するヨーレイトの応答改善や圧雪路や凍結路などの滑りやすい路面での操作性向上が期待できる．

ヨーレイトの応答を改善する DYC として，目標ヨーレイトと車両ヨーレイトの差分を補うように，左右輪の駆動力差によるヨーモーメントを発生させる手法が知られている．従来の DYC では，目標ヨーレイト r_t は式 (1) で表される．

$$r_t(s) = G_\delta^r(0) \frac{1 + T_r s}{1 + \frac{2\beta\zeta}{\alpha\omega} s + \frac{1}{(\alpha\omega)^2} s^2} \delta(s) \quad (1)$$

ここで，

- r_t : 目標ヨーレイト [rad/s]
- δ : 操舵角度 [rad]
- ω : ヨーレイト応答の固有振動数
- ζ : ヨーレイト応答の減衰率
- T_r : ヨーレイト応答の時定数 [s]
- $G_\delta^r(0)$: ヨーレイト応答の定常ゲイン
- α : 固有振動数の制御パラメータ
- β : 減衰率の制御パラメータ

式 (1) から，制御パラメータ α ， β を任意に設定することで，操舵に対するヨーレイト応答の固有振動数と減衰率を変更できる．この目標ヨーレイトを実現するために必要なヨーモーメント M_Z は，式 (2) で表される．

$$M_Z(s) = \frac{G_\delta^r(0)}{G_m^r(0)} \frac{1 + T_r s}{1 + T_m s} \left(\frac{1 + 2\frac{\zeta}{\omega} s + \frac{1}{\omega^2} s^2}{1 + 2\frac{\beta\zeta}{\alpha\omega} s + \frac{1}{(\alpha\omega)^2} s^2} - 1 \right) \delta(s) \quad (2)$$

ここで，

- T_m : ヨーモーメント応答の時定数 [s]
- $G_m^r(0)$: ヨーモーメント応答の定常ゲイン
- M_Z : 要求ヨーモーメント [Nm]

式 (2) より，従来の DYC では，操舵の角速度および角加速度に依存してヨーモーメントが決定する．DYC の効果が大きくなるように α や β を調整すると，操舵角速度に依存する項によりヨーモーメントが大きくなり，左右輪に要求されるトルクは片輪当たり最大で数百 Nm となる．したがって，従来の DYC を最大トルクが数十 Nm である eHUB に適用するのは難しい．

そこで，我々は滑りやすい路面での操舵性向上に着目し，操舵開始時のヨーレイトの応答性を向上させるように制御パラメータを調整した．式 (1) において $\beta = \alpha$ とすれば，目標ヨーレイトは式 (3)，要求ヨーモーメントは式 (4) でそれぞれ表され，操舵の角加速度に対するトルクの応答性が向上する．これにより，比較的低いトルクでも操舵初期の応答を改善することが可能になる．

$$r_t(s) = G_\delta^r(0) \frac{1 + T_r s}{1 + \frac{2\zeta}{\omega} s + \frac{1}{(\alpha\omega)^2} s^2} \delta(s) \quad (3)$$

$$M_Z(s) = \frac{G_\delta^r(0)}{G_m^r(0)} \frac{1 + T_r s}{1 + T_m s} \left(\frac{1 + 2\frac{\zeta}{\omega} s + \frac{1}{\omega^2} s^2}{1 + 2\frac{\zeta}{\omega} s + \frac{1}{(\alpha\omega)^2} s^2} - 1 \right) \delta(s) \quad (4)$$

$\alpha > 1$ の場合は操舵開始時のヨー運動が促進され， $\alpha < 1$ の場合は抑制される．式 (4) のヨーモーメントを実現する eHUB のトルクは，式 (5) となる．

$$T_L = -\frac{R}{D} M_Z, \quad T_R = +\frac{R}{D} M_Z \quad (5)$$

ここで，

- D : 後輪トレッド [m]
- R : タイヤの動的有効半径 [m]
- T_L, T_R : eHUB のトルク (左, 右) [Nm]

操舵角に対する要求トルクのシミュレーション結果を図 5 に示す．一般的な DYC の場合，操舵角速度，操舵角加速度の変化に応じてトルクが決定される．これに対して eHUB 用 DYC では，操舵角加速度の変化にトルクは応答するため，一般的な DYC と比較してトルク

の立ち上がり早くなる。このパラメータ設定方法を用いて、低 μ 路シングルレーンチェンジ走行試験を実施した。図6に示すように、速度調整区間で時速30 kmに調整し、決められた位置からアクセルを離して惰行状態でレーンチェンジを行う。車両走行軌跡を図7に示す。なお、同図は各条件で3回走行した平均値を示している。制御なしおよびDYC($\alpha=0.8$)の場合は、レーンチェンジ時の操舵の切戻し時(図中20~30 m付近)に車両が横方向へ膨らむのに対して、DYC($\alpha=1.2$)を適用することによって、滑らかで安定した車両の軌跡となった。操舵角に対するヨーレートの変化を図8に示す。DYC($\alpha=1.2$)を適用することによって、操舵角へのヨーレートの追従性が向上し、操舵量が制御なしに比べて大幅に減少している。つまり操舵に対して車両の挙動が変化しやすく、曲がりやすくなる。一方、DYC($\alpha=0.8$)の場合は、制御なしとほぼ同じ操舵量だがグラフ上に投影された面積は大きくなっている。つまり、操舵に対してヨーレートの反応が遅れることによって、操舵に対して車両の挙動が変化しにくく、曲がりにくくなる。このようにeHUBのような小さなトルクでも、左右を駆動/回生させることで車両の挙動が変化することを確認した。

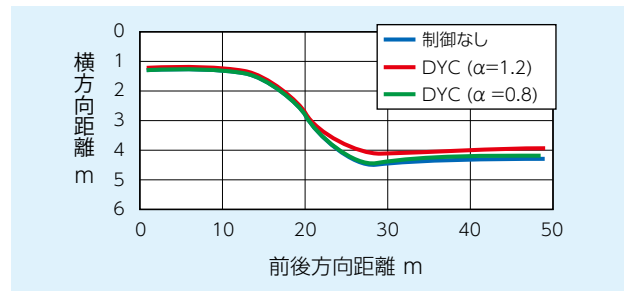


図7 車両走行軌跡

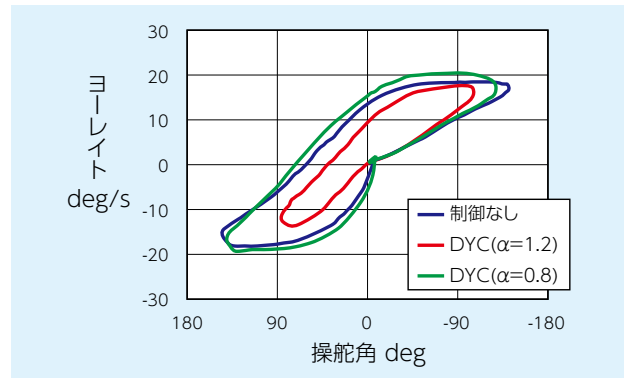


図8 操舵角に対するヨーレートの変化

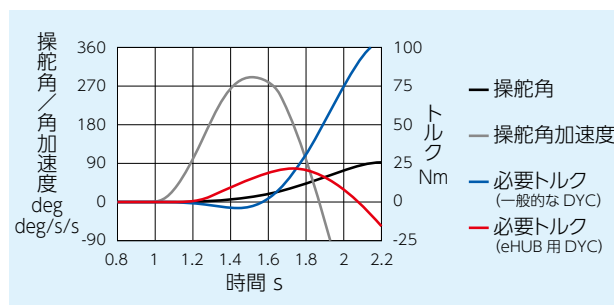


図5 操舵に対するeHUBのトルク

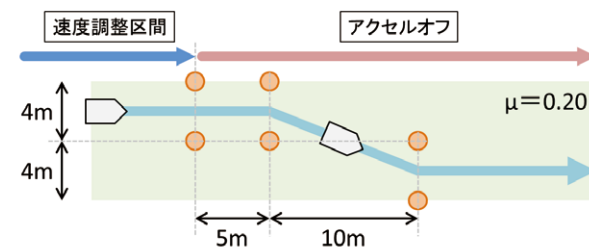


図6 走行条件

4. 横加加速度に応じた前後加速度制御

前章のDYCは、タイヤと路面間の摩擦係数が低い状況で効果を発揮する。しかし、この走行状況は限定的で、より多くの走行条件に適合する制御方法として、車両の横加加速度に応じて前後加速度を付与し、前後左右加速度を統合的に制御する手法が提案されている⁴⁾。

通常の走行における一般ドライバーと熟練ドライバーの旋回時の前後左右加速度イメージを図9に示す。一般ドライバーは旋回前に減速して、旋回中は操舵のみになりがちである。したがって、同図(a)のように、減速加速度の後、急激に横加加速度が変化する。このとき乗員が感じる慣性力の変化は大きく、車酔いや乗り心地悪化の原因となる。一方、熟練ドライバーは操舵に応じて加減速量を調整するため、前後加速度と横加加速度の合成加速度が弧を描くように推移する。したがって、乗員が感じる慣性力は滑らかに変化するため、乗り心地は改善する⁵⁾。

熟練ドライバーの運転は、横加加速度に応じて前後加速度を付与することで実現でき、定式化すると式(6)となる。これを実現するためのeHUBのトルクは左右で等しく、式(7)で表される。

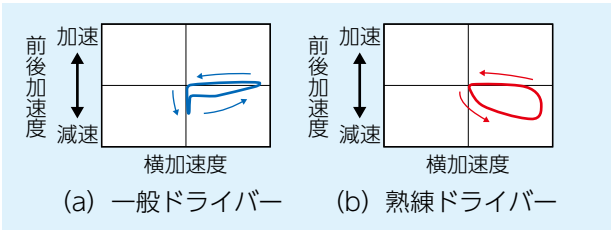


図9 旋回時の左右前後加速度 (イメージ図)

$$G_x = -\text{sgn}(G_y \cdot \dot{G}_y) \frac{\alpha_x}{1 + T_x s} |\dot{G}_y| \quad (6)$$

$$T_L = T_R = \frac{1}{2} RmG_x \quad (7)$$

ここで、

- G_y : 車両の横加速度 [m/s²]
- \dot{G}_y : 車両の横加速度 (G_y の微分値) [m/s³]
- G_x : 車両の目標前後加速度 [m/s²]
- T_x : 1次遅れ時定数 [s]
- m : 車両質量 [kg]
- α_x : 前後加速度の制御パラメータ

前後加速度制御のイメージを図10に示す。横加加速度に応じたeHUBのトルクにより、車両の前後加速度を制御する。カーブ進入時は減速度が付与され、後輪から前輪への荷重移動が生じ、旋回をアシストするヨーモーメントが発生する。一方、カーブ脱出時は、加速度が付与され、前輪から後輪への荷重移動が生じ、車両姿勢を復元させるヨーモーメントが発生する。

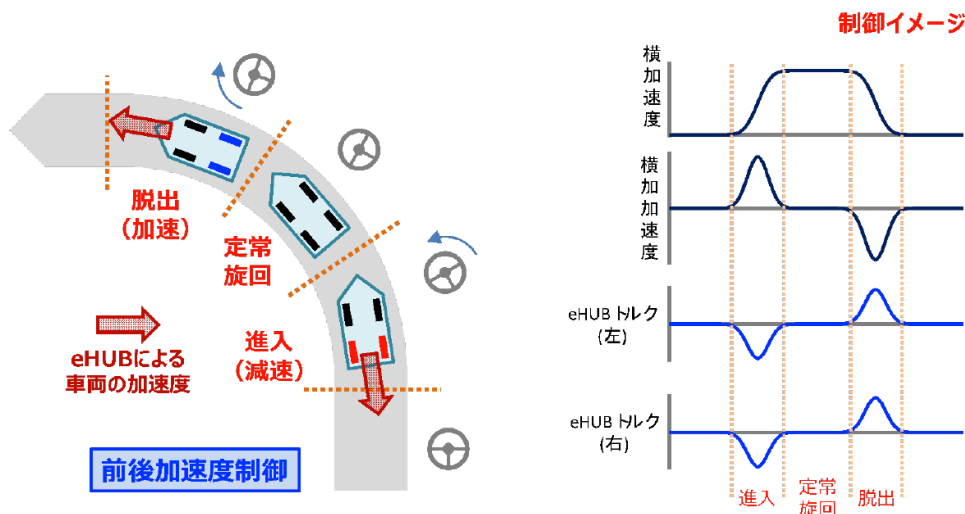


図10 前後加速度制御イメージ

eHUBの駆動、回生制動による前後加速度制御の効果を確認するため、3章と同様の実車走行試験を実施した結果を図11に示す。制御条件は、制御なし、前後加速度制御の2条件である。なお、結果はDYCでの試験と同様に、3回走行した平均値を示している。前後左右加速度は、前後加速度制御を適用することによって弧を描くように滑らかに推移した。

これらの結果から、eHUBのような出力の小さいモータ・ジェネレータでも、適切に動作させることで車両運動性能を向上できる可能性を示した。今後は、DYC、前後加速度制御、燃費最適化ロジックなどを組み合わせた統合的な制御を構築する。

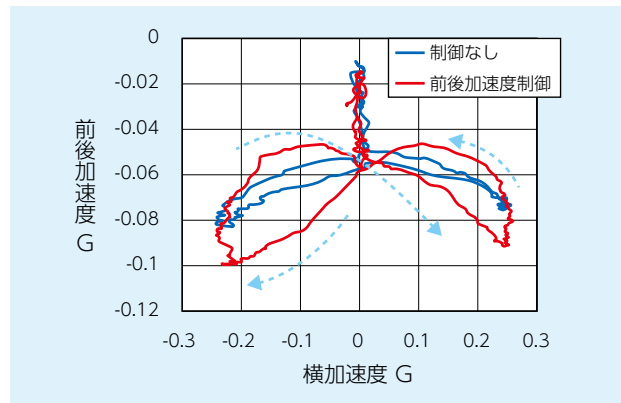


図11 前後加速度制御走行結果

5. おわりに

本稿では、車両に大きな変更を伴わず、48V MHEVの燃費および走行性能を向上させる eHUB について、車両運動制御の効果を検証し、以下の結果を得た。

① ダイレクトヨーモーメントコントロール

操舵角加速度に対する感度を高めた DYC を搭載した結果、低 μ 路シングルレーンチェンジにおいて、走行軌跡が安定し、操舵量も低減することを確認した。

② 横加加速度に連成した前後加速度制御

乗り心地改善に有効とされる前後加速度制御を適用した結果、操舵時における横加加速度と前後加速度の合成加加速度が滑らかに変化し、乗り心地の改善に寄与することを確認した。

今後は、燃費改善効果を向上させるために、eHUBの更なる高出力化、高効率化を目指すとともに、より実用的な車両運動制御の向上に取り組む。

参考文献

- 1) 西川健太郎, 矢田雄司, 藤田康之, 川村光生, 藪田浩希, モータ・ジェネレータ機能付 HUB モジュールの開発, NTN TECHNICAL REVIEW, No.85, (2017) 26-32.
- 2) 安部正人, 自動車の運動と制御, 第2版, 東京電機大学出版局, (2012) 236-247.
- 3) 雪島良, 牧野佑介, 柄澤秀範, 神田剛志, 妙木愛子, 水貝智洋, 佐藤勝則, 2モータオンボード駆動システム, NTN TECHNICAL REVIEW, No.83, (2015) 20-25.
- 4) 鈴木雄大, 程達鵬, 小坂秀一, 車体運動が G-Vectoring 制御に及ぼす影響, NTN TECHNICAL REVIEW, No.85, (2017) 33-39.
- 5) 山門誠, 高橋絢也, 齋藤真二郎, 安部正人, 安全走行を支援する新しい車両運動制御技術, 日立評論, (2009) 46-49.

執筆者近影



西川 健太郎
商品開発研究所



川村 光生
商品開発研究所



藪田 浩希
商品開発研究所



伊東 貴志
商品開発研究所

電動モジュール商品の制御プラットフォーム開発 Development of Control Platform for Electric Module



井上 達司* Tatsuji INOUE
杉本 優一* Yuichi SUGIMOTO

青嶋 一浩* Kazuhiro AOSHIMA
本窪 慧冴* Keigo MOTOKUBO

自動車業界ではCASE（つながる、自動運転、シェアリング、電動化）に向けて開発が進められている。自動運転、電動化では多くのカメラ、センサ、アクチュエータ、モータなどが使われており、それらを制御するソフトウェアのコード量は年々増大する傾向にある。また、機能安全規格ISO26262が制定され、安全を担保するための開発が進められているが、ISO26262に準拠した開発を進めるには、従来開発（IATF16949）と比較して多くの人員、コストとスキルが必要である。NTNでも電動化、パイ・ワイヤ化に貢献する電動モータ・アクチュエータとコントローラを開発している。本稿では、NTNの電動モータ・アクチュエータの制御プラットフォーム開発について紹介する。

In the automotive industry, the development of CASE (Connected, Autonomous, Shared & services, Electric) has proceeded. Many devices (such as cameras, sensors, actuators, motors, etc.) are used for autonomous driving and electrification. And the software for controlling those devices increase year by year. The functional safety standard ISO 26262 has been established and development to ensure safety is proceeding. However the development which is based on ISO 26262 requires larger number of people, costs, and much more skills than conventional development which is based on IATF 16949. NTN is developing electric motors, actuators, and controllers that contribute to electrification and By-wire-system. In this article, we introduce the development of control platform for NTN electric motors and actuators.

1. はじめに

自動車CASEへの取組みの中で、自動運転、電動化については、交通事故の削減、安心安全な移動の自由、利用者の利便性、環境対策を目的に各社で開発が進められている。NTNではこのような状況においてコア技術である軸受やボールねじの製品技術、モータの設計技術、車両制御技術（研究領域）を生かし、「Autonomous: 自動運転」、「Electric: 電動化」に貢献すべく、汎用的なモータ、アクチュエータの電動モジュールシリーズを開発した。開発した代表的なシリーズと、その提案事例について説明する。

したコンパクトな電動アクチュエータ
・コンポーネントに直接取り付け用途を想定



図1 B IIシリーズの外観 (B II 00)

1) 電動モジュールシリーズの概要

① B IIシリーズ (図1)

- ・モータの回転を平行軸歯車で減速しボールねじで直動変換する電動アクチュエータ
- ・モータと平行軸歯車の間に遊星減速機ユニットを付加し駆動力アップや、位置保持を行うための逆入力防止ユニットのオプション装着が可能

② B IIIシリーズ (図2)

- ・中空構造の高出力ブラシレスDCモータとボールねじを組み合わせ、モータの中空部に直動機構を配置



図2 B IIIシリーズの外観 (B III N)

* 自動車事業本部 電動モジュール商品事業部 事業推進部

③ SP シリーズ (図 3)

- ・ ブラシレス DC モータシリーズ
- ・ B III シリーズのモータ部をベースとした中空モータ構造で、中空部に減速機を組込むことで、薄型で高トルクの回転アクチュエータとして適用可能



図 3 SP シリーズの外観

2) 電動モジュールシリーズ提案例

① トランスミッション, 電動シフトセレクト (B II シリーズ)

AT や CVT では、シフトレバーが変速機にメカニカルワイヤなどで接続され、シフトセレクトを行う。本部位に B II シリーズを適用することで、シフトセレクトを電動化

② 電動油圧ブレーキ (B III シリーズ)

同軸タイプで内部にボールねじを組込んだ B III シリーズをマスターシリンダ軸に適用することで、電動油圧ブレーキシステムのコンパクト化に貢献

③ 電動可変バルブタイミングコントロール (SP シリーズ)

SP シリーズをカムシャフトに組込むことで、よりスペース効率のよい電動可変バルブタイミング機構を実現

④ 電動オイルポンプ (SP シリーズ)

薄型で高効率な SP モータを組込み、コントローラと一体化することで、電動オイルポンプのコンパクト化に貢献

シリーズ開発を進めていくと、シリーズ、アプリケーション毎にソフトウェアを開発する必要があり、従来の開発では開発工数や保守性の問題が出てきた。

また、電子システムの複雑化による不具合率の増加に加え、新技術の適用に伴い新たな故障モードを発生させるリスクが増加した。このような背景から、自動

車の機能安全規格 ISO26262 が発行された。電動モジュールシリーズ開発では、さまざまなアプリケーションに応じてソフトウェアも個々に対応する必要があり、ISO26262 対応に加えて効率的なソフトウェア開発を行うための開発プロセス構築が急務になった。

2. 制御プラットフォーム開発の背景

開発した電動モジュールシリーズは、アプリケーション仕様に合致するシリーズを選定し、シャシ・エンジン・トランスミッションなどのアプリケーションに対応できる商品ラインナップとなっている。さまざまなアプリケーションに対応するソフトウェアを、従来の資産を流用して開発してきたが以下の問題が発生した。

- ・ 流用を重ね、機能追加やコードの複製による複雑化
- ・ ソフトウェアの変更により、従来機能の低下や不具合が発生

このような従来の流用開発における問題点の解決と、ISO26262 への対応を進めるため、現状分析を行い 2 つの開発手法を取り入れることにした。

1) ソフトウェアプロダクトライン開発

シリーズ商品の外部可変性 (システムを外から見た特性・価値)、内部可変性 (システムを構成する要素) で特性を定義し依存関係の分析、商品シリーズ毎のシステム、ソフトウェアの差分分析を行った。この結果、ソフトウェアのコア資産化による工数削減や、繰り返しコア資産を使用することによる品質向上の効果があるソフトウェアプロダクトラインを導入することとした。本内容は 3.2 項で詳説する。

2) モデルベース開発

一般的に要求検討時や設計段階で、シミュレーションによる妥当性確認を行うことで、テスト工程での工数が削減され手戻りも少なくなるとされている (図 4)。

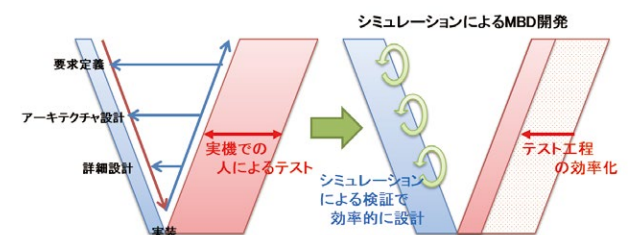


図 4 開発の設計工程へのシフト

従来、応答性などのシミュレーションを表計算ソフトで行ってきたが限界がある。よりシミュレーション精度を向上させ、設計段階でモータの基本特性などを知るため、モータ設計に JMAG*1 を使用している。

さらにシステムとしてコントローラ（モータ制御部）、プラント（JMAG から作成した JMAG-RT*2 モデル）を含めたシミュレーションを行うことも必要になってきた。

また、ISO26262 でもシミュレーションによる検証が推奨されており、モデル上で意図的に故障状態を発生させ、実機を利用して検証するよりも短期間に安価で容易に故障注入試験*3 を行うことができる。また要求検討段階でも、シミュレーションによる妥当性確認を行うことができる。これらに対応するためにモデルベース開発を活用することにした。

この2つの開発手法を活用し、制御プラットフォームの開発を進めており、次章でその状況について解説する。

*1:JMAG：電気機器設計開発のための JSOL 社製シミュレーションソフトウェア
 *2:JMAG-RT：FEA モデルから生成したシステムレベルシミュレーションのための高速高精度のプラントモデル
 *3: 故障注入試験：意図的に故障を発生させ、システムが設計通りの安全状態になるかの検証

に沿った社内プロセスをベースに、ISO26262 と親和性が高い Automotive SPICE（車載用システム開発プロセスモデル）を加えた（図5）。以下に特長を示す。

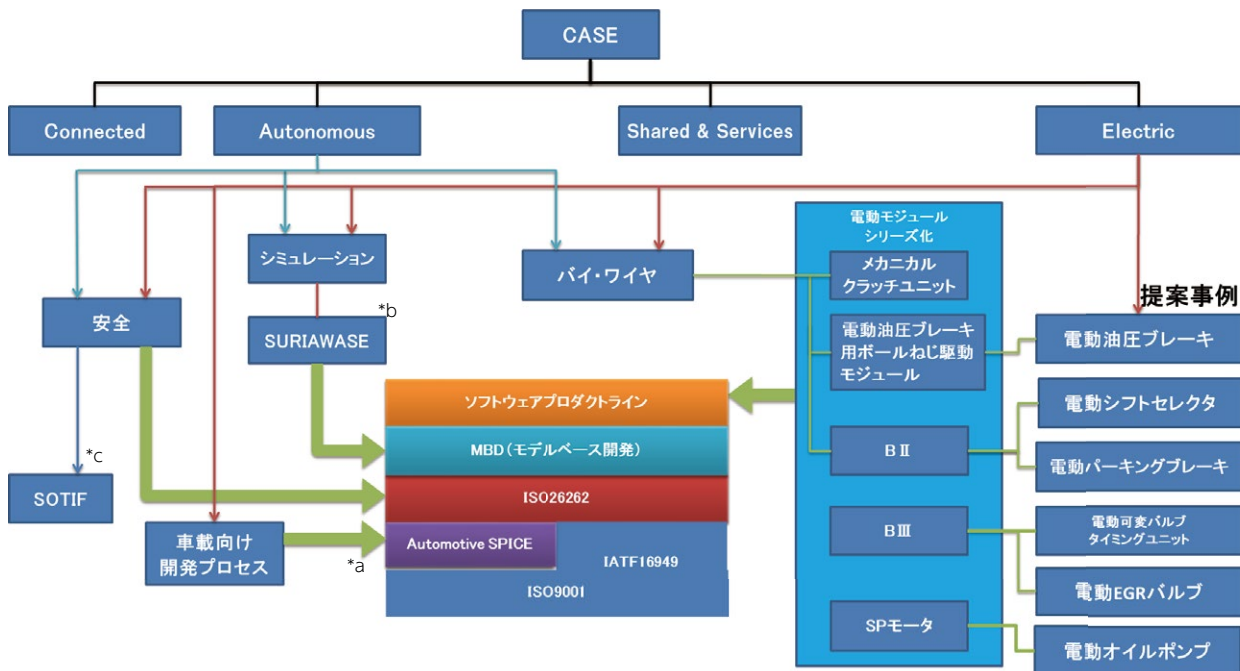
- ・Automotive SPICE ではフレームワークだけが定義されているため、ISO26262 で求められている手法や安全に関する要求をプロセスに入れて規格に対応できるようにした。
- ・プロセス定義（業務の流れを定めるもの）は EPF Composer（開発プロセスを定義し、HTML に変換するツール）を用い、イントラネットにてソフトウェア開発者が常に情報共有できるようにした（図6）。
- ・ソフトウェアを効率よく開発するため導入したプロダクトラインに合わせて、ソフトウェア工程をコア資産開発と新規商品開発に分けて定義した（3.2 項）。
- ・モデルベース開発では、主にモータ制御の妥当性確認のため、以下を取り入れた（3.3 項）。

- システム要求検討時 MILS*4
- ソフトウェア設計工程 MILS, RCP*5
- *4:MILS：Model In the Loop Simulation モデルで記述した制御仕様を、プラントモデルと結合して動作させるシミュレーション
- *5:RCP：Raid Control Prototype 汎用コントローラにモデルで記述した制御仕様を入れた制御対象の実機動作検証

3. 制御プラットフォーム開発

3.1 プロセス概要

プロセス全体としては、機能安全規格 ISO26262 への準拠は品質マネジメントが前提になっており、IATF16949



*a Automotive SPICE：車載システム開発向けのプロセス改善モデル
 *b SURIAWASE：経済産業省がまとめた実機を用いずバーチャル・シミュレーションで開発を行う手法（MBD）により高度化する戦略
 *c SOTIF：意図された機能の安全性

図5 開発プロセスの基盤

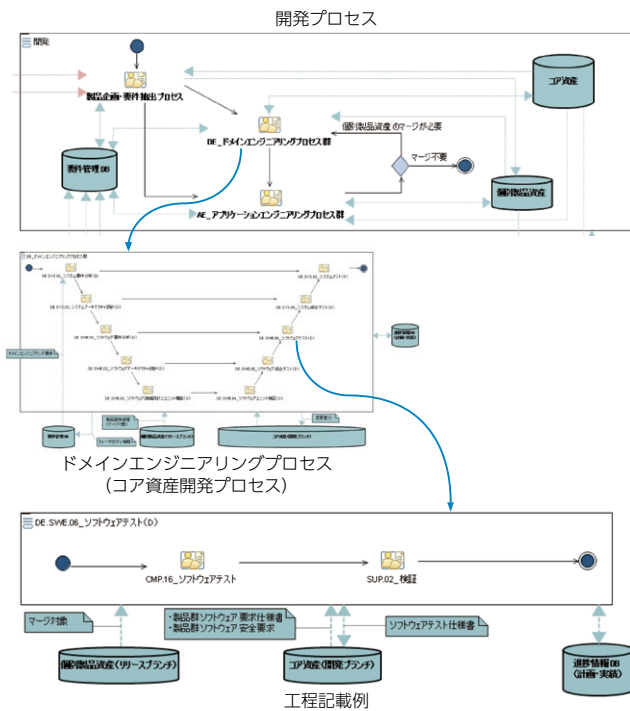


図6 EPFで作成したプロセス定義

3.2 ソフトウェアプロダクトライン

ソフトウェアプロダクトラインとは、対象とする商品群の共通部と商品固有部を把握して、共通部は資産として再利用し、商品固有部を効率的に開発する手法である。開発工数削減、開発期間短縮、品質向上の効果がある。ソフトウェアプロダクトラインを適用するにあたり、スコープ(商品群を構成する仕様の範囲)を既存モータシリーズ商品とした。成果物はソフトウェアの要求仕様書、アーキテクチャ、詳細設計書、Simulink^{®6}モデル、Hand実装コード、テスト仕様書とした。以下にソフトウェアプロダクトラインの流れを図7に従い説明する。

*6:Simulink[®]: MathWorks社のモデルベースデザインのためのブロック線図環境

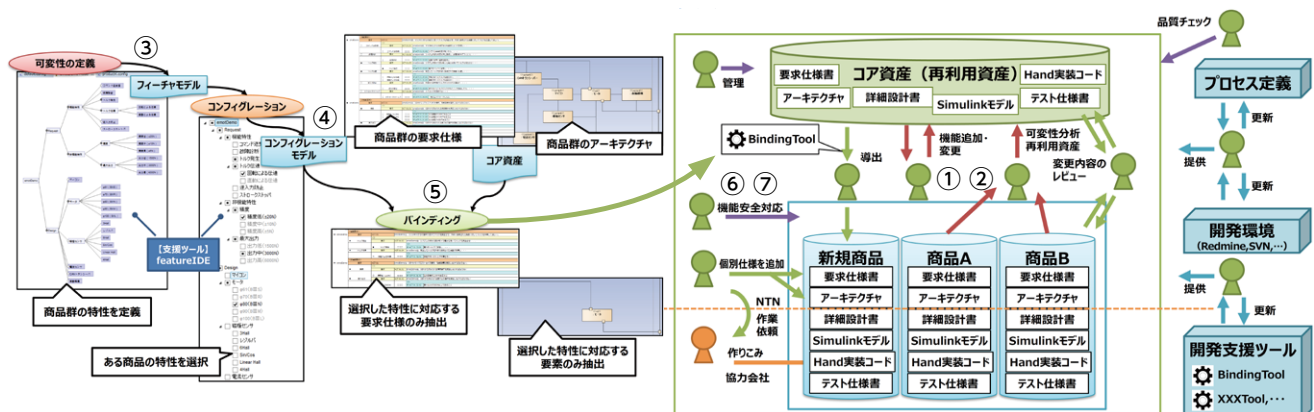


図7 ソフトウェアプロダクトラインの全体像

1) コア資産の開発

- ①商品群の共通部・可変部(図8)を機能や特徴の可変性(共通部・可変部)を定義したフィーチャモデルで作成し、コンフィグレーションモデル(商品の特性を選択するためのモデル)のベースを生成
- ②商品群の共通部・可変部のフィーチャモデルから、成果物(要求仕様書,アーキテクチャ, Simulink[®]モデル,コード)をまとめた再利用資産を開発

2) 新規商品開発

- ③新規商品の要求仕様を『共通部・可変部』と『商品固有部』に分割
- ④新規商品の要求仕様の共通部・可変部をコンフィグレーションモデルから選択
- ⑤コア資産開発の②で作成した再利用資産から④で作成したコンフィグレーションモデルをBindingTool(必要な資産を組み合わせるツール)に読み込ませバインディング(結合)し、新規商品の要求仕様に応じた成果物(要求仕様書,アーキテクチャ, Simulink[®]モデル,コード)を抽出
- ⑥商品固有部の成果物は新規で作成
- ⑦コア資産から抽出した成果物⑤と新規作成した商品固有部の成果物⑥を合わせることで、新規商品の要求に応じた成果物を作成

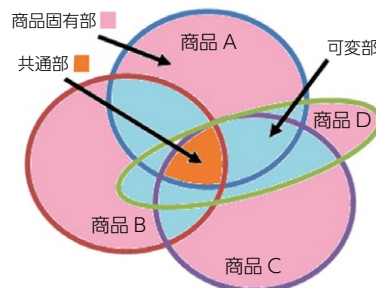


図8 共通部と可変部

フィーチャモデル，コンフィグレーションモデルを作成するツールはオープンソースの FeatureIDE を使用，BindingTool は内製することで，コストをかけず短期間に準備することができた。

サンプルのコア資産にて⑤バインディングを行い，必要な成果物が抽出されることを確認でき，仕組みづくりが一通り完了した。

現在，既存商品の要求仕様書，アーキテクチャの部品化を行っている。部品化にあたっては，差異（可変性）を考慮して設計・実装する必要があるため，一部は修正し部品化している段階である。

プロダクトラインでは，商品群に存在する可変性を特定・管理することが重要なため，今後は開発中の機能安全対応ソフトウェアプラットフォームの差異（可変性）を十分に分析し，再利用しやすい設計とする予定である。

3.3 モデルベース開発

モータ制御アルゴリズムや制御対象をプラントモデル化し，コントローラモデルのシミュレーションを行なうシステムを検証するため，モデルベース開発を適用した。

プロセス定義では，システムでの要求検討工程，ソフトウェアでのアーキテクチャ設計，詳細設計工程にてシミュレーション (MILS, RCP) を行うプロセスとした (図9)。

3.3.1 シミュレーションの成果と今後

シミュレーションの目標として，MILS, JMAG, RCP において，モータの基本特性とされる N-T, I-T 特性の比較誤差を $\pm 10\%$ に設定した。

まず，既存 C ソースコードからモータ制御（ベクトル制御）アルゴリズムをリバースでモデル化し，Simulink[®] でコントローラモデルを作成した。次にモータモデル (JMAG-RT) と結合し MILS を行い，MILS で作成したモデルを汎用コントローラに入れ，評価用インバータ，実モータと接続し RCP を行った。MILS, RCP で N-T, I-T 特性の比較をした結果 (図 10)，I-T 特性はほぼ一致し，N-T 特性は無負荷回転数では $\pm 10\%$ 以内に入っているが，電流の増加に伴い N-T 特性に差異が生じ $\pm 10\%$ を超えている。電源電圧 12V に対しモータ相電圧が 1.73V 電圧降下しているため，RCP で使用するインバータの内部抵抗や配線抵抗による電圧降下が考えられる (図 11)。今後，内部抵抗などによる電圧降下の理論計算値と実機測定値の比較により誤差の要因を調査しモデルを改良していく予定である。

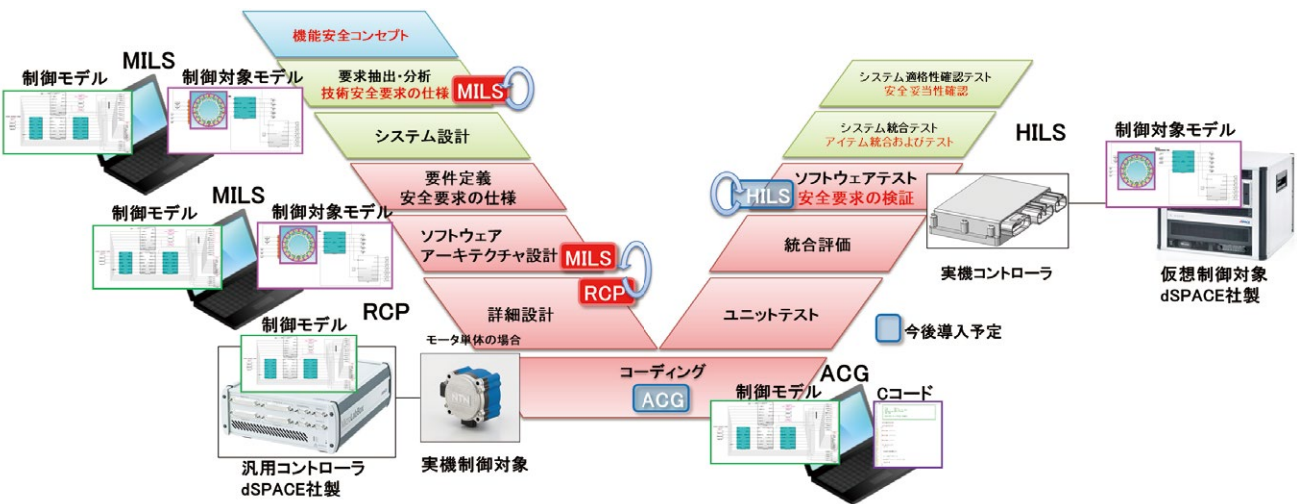


図9 開発のV字モデル

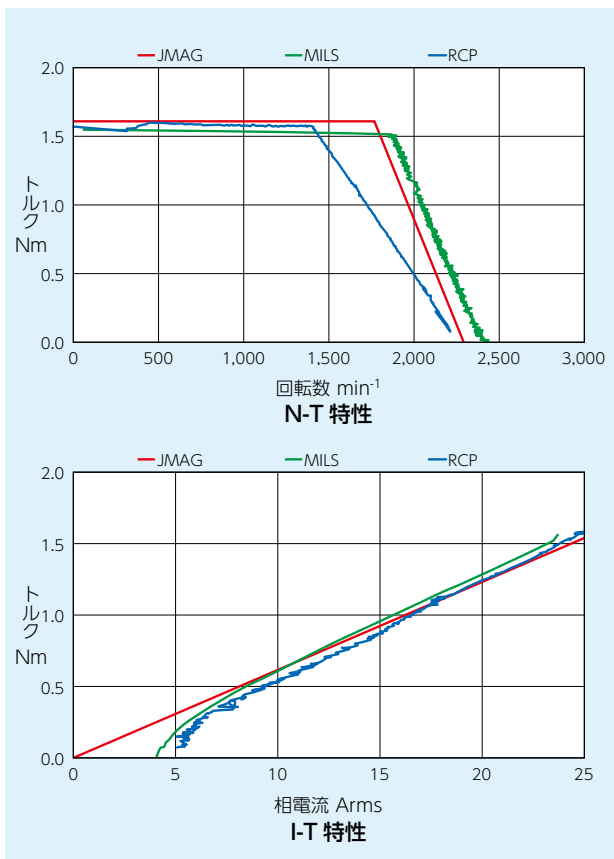


図 10 シミュレーション結果 (N-T, I-T 特性)

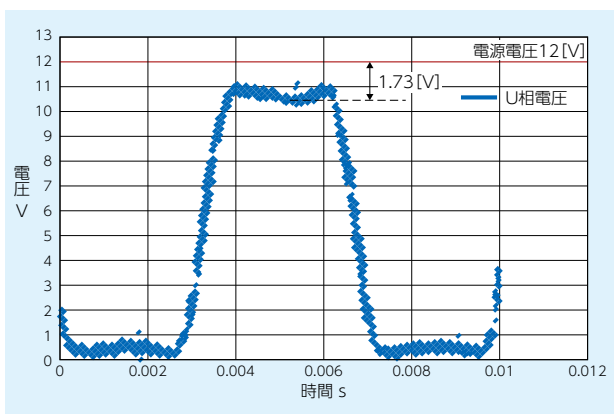


図 11 相電流実効値 25Arms 時のU相電圧

3.3.2 コントローラモデルの成果と今後

コントローラモデルでは、今後のオートコードを想定し、プロダクトラインでのコア資産（再利用資産）を進めている。1つのサブシステムが、複数の要求を実現しているため、要求仕様書の要求単位でサブシステムを再作成した。

次に、要求「あり/なし」によるサブシステムの切替を3パターンで実現できるようにした。3つのパターンは、サブシステム毎に可変性を「いつ」実現するかによってバインディングタイムを決定する (図 12)。

- 1) Matlab スクリプトによって必要なモデル要素を編集 (追加・削除)
 - 2) Variant SubSystem, Configurable SubSystem で必要なモデルを選択
 - 3) If/Switch Case SubSystem, Switch ブロックで動的に処理を切り分け
- 1) は設計時, 2) はコード生成時やコンパイル時, 3) はソフトウェア実行時に切替

サブシステム単位で出力結果の正しさを検証するため、モデル単体テストをプロセスに定義した。

サブシステム単位でシミュレーションテストをすることにより、不具合をオートコードで実装する前に除去することができる。モデルベースでは、テストツールが充実しているが、人によるテスト品質のバラツキを除去する目的とテストの効率化のために、ツールを連携し自動でテストを実行するツールを作成した。テスト仕様書、シミュレーション用モデル、テスト結果などの自動生成が可能になり、再テストが容易で、エビデンスを残すことができる (図 13)。

今後、オートコードを商品へ適用するため、ISO26262で要求されているモデルとコードの一致性検証 (Back to Back テスト) を行う環境整備 (SILS, PILS) 及び、プロセス整備を推進する。

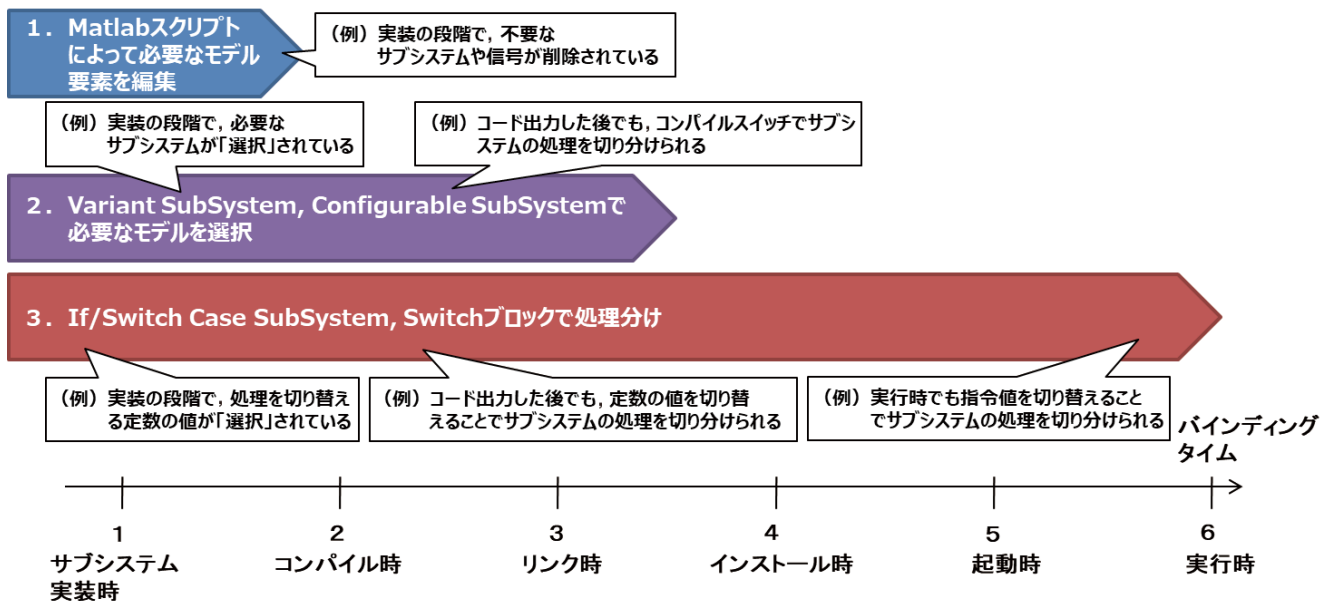


図 12 バインディングタイムと、Simulink® サブシステムの差替手段の関係

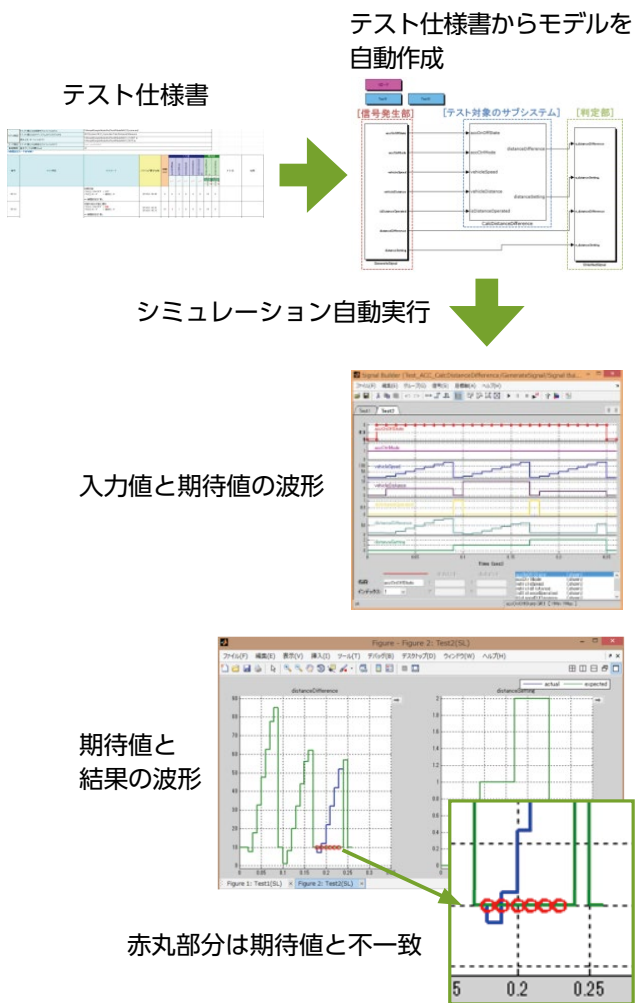


図 13 自動モデル単体テストツールの流れ

4. おわりに

NTN ではこれからも基礎技術を生かし、さまざまなアプリケーションに適用できる電動モジュール商品を効率よく開発し、自動車業界で進展する自動運転化や電動化に貢献していく。

執筆者近影



井上 達司

自動車事業本部
 電動モジュール商品事業部
 事業推進部

青嶋 一浩

自動車事業本部
 電動モジュール商品事業部
 事業推進部



杉本 優一

自動車事業本部
 電動モジュール商品事業部
 事業推進部

本窪 慧冴

自動車事業本部
 電動モジュール商品事業部
 事業推進部

自動車の電動化・自動運転化に対応するセンサモジュール商品の紹介

Introduction of Sensor Modular Products and Technologies for Autonomous Driving and Electrification of Automobiles



福島 靖之* Yasuyuki FUKUSHIMA 袴田 博之* Hiroyuki HAKAMATA
Christophe DURET**

CASE (Connected, Autonomous, Shared & Services, Electric) に代表される自動車の新たな変化に対し、NTN は、車軸軸受 (ハブベアリング) など自動車向け軸受 / モジュール商品にどのように取り組むべきか、開発や商品化が完了したセンサ技術を切り口として CASE に向けた新たな要求への提案とともに、それら技術 / 商品の概要を紹介する。

This article describes what NTN is challenging to meet the emerging requirements on automobiles, 'CASE', focusing on newly developed sensor modular products and technologies applied to the existing automotive bearings.

1. 自動車市場トレンドと NTN の取組み

自動車業界は 100 年に一度の大変革期に直面しているといわれている。従来求められていた「走る」「曲がる」「止まる」といった車両性能の向上に加え、「CASE」への新たな対応を求められている。CASE とは「Connected」「Autonomous」「Shared & Services」「Electric」の 4 つのキーワードの頭文字である^{1) - 3)}。

・ Connected

例えば自動車と、道路、住宅、ディーラ、あるいは自動車同士などとあらゆるものが 5G などのワイヤレスネットワークを介して繋がり、相互に情報を交換し合うコネクティッド化

・ Autonomous

車両運転支援や無人タクシーなどに代表される車両の自動運転化

・ Shared & Services

MaaS (Mobility as a Service) も含めたシェアリング化 / サービス化

・ Electric

電気自動車 (EV) など車両駆動の電動化はもちろんのこと、車両のあらゆる可動部の電動化の流れ

NTN は車軸軸受 (ハブベアリング) や CVJ (ドライブシャフト) に代表される車両向け商品、及びそれらを組込んだモジュール商品を提供している。ハブベアリングは車輪の回転を支える重要な部品であり、多くの車両

には各車輪の回転 (速度) を検出するための ABS センサ (車輪回転速センサ) が設けられている。NTN-SNR は 1990 年代より図 1 に示すハブベアリングのシールにゴム磁石を一体化する技術 (ASB[®]:Active Sensor Bearing) を開発し、世界標準技術として車輪速アクティブセンシングをリードしてきた⁴⁾。本稿では、これをさらに発展させて CASE の新たな市場要求に対応する NTN のセンサ商品 / 技術を紹介する。

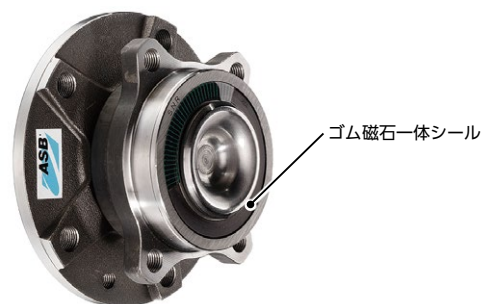


図 1 ASB[®] (Active Sensor Bearing) ハブベアリング

2. 高分解能回転センサ付ハブベアリング

NTN では高分解能回転センサ (MPS40S)⁵⁾ を使用して、ハブベアリングの仕様を変えずに、最大 40 倍の高分解能化が可能な車輪速センサ技術を搭載した「高分解能回転センサ付ハブベアリング」を開発⁶⁾ し、高分解能化した車輪速信号により、タイヤや路面状態を推定する取組みを進めてきた。高分解能回転センサ付ハブベアリングの外観を図 2 に示す。ここでは自動運転への

* 商品開発研究所

** NTN-SNR ROULEMENTS Research & Innovation Mechatronics

適用を切り口に、高分解能回転センサ付ハブベアリングの概要、及びこれまでの取組みを述べる。



図2 高分解能回転センサ付ハブベアリング

2.1 高分解能回転センサ付ハブベアリングの概要

高分解能回転センサ (MPS40S) を搭載した高分解能回転センサ付ハブベアリングの概略図を図3に示す。検出部である高分解能回転センサを固定用芯金と一体となるよう樹脂でモールドし、固定輪 (外輪) に圧入固定している。被検出部は、N極とS極が48極対交互に着磁された磁気リングを回転輪 (内輪) に圧入固定している。高分解能回転センサ (MPS40S) は、磁気リングの1極対の長さを電氣的に内挿 (通倍) することで出力信号を高分解能化する。通倍数は最大40通倍まで設定でき、1,920パルス/回転が出力可能である。

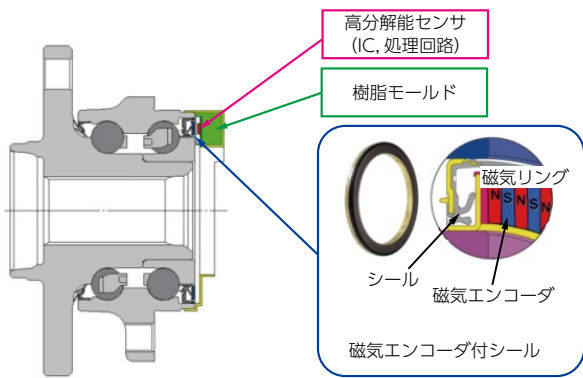


図3 高分解能回転センサ付ハブベアリング概略図

2.2 タイヤ・路面状態推定への適用

走行中の車輪回転信号から回転速度に変化が生じたときの情報、つまり回転速度変動を高分解能回転センサ付ハブベアリングで抽出・分析することで、タイヤや路面状態を推定する取組みを進めてきた。回転速度変動には、図4に示すように、路面・タイヤの変動、車両の駆動状態の情報が含まれる。回転速度変動を得るための信号処理例を図5に示す。タイヤ1回転分の回転

速度変動を抽出して得られるパターンを分析することで、タイヤや路面状態を推定する。高精度な情報を得るために、走行速度を一定に保った条件でデータを抽出する。さらに、走行中の路面から入力されるランダムノイズを低減するために、複数回転の回転信号より回転速度変動パターンを作成する。このようにして作成した回転速度変動パターンは、トレッドパターンによって特徴的な波形が観測される。これはトレッドが路面と接する、または離れる瞬間に生じるトレッドの変形に起因する回転速度変動と考えられる。高速走行ではタイヤ固有の振動モードが支配的になり、トレッドの変形をとらえることが難しくなるため、低速走行でデータを取得することで検出精度を高める。また、従来のABSセンサ (回転速センサ) は、1回転当たりのパルス数が少ないので、十分な分解能で回転速度変動情報を抽出することは難しい。そこで、高分解能回転センサ信号を利用することで、タイヤや路面状態推定の精度を高めることができる。2.2.1項から2.2.5項にタイヤの異物噛み込み、種類、摩耗、空気圧、路面状態の違いによる検証結果を紹介する。このときの高分解能回転センサの通倍数は10倍 (1回転あたりAB相から480パルス出力) に設定した。

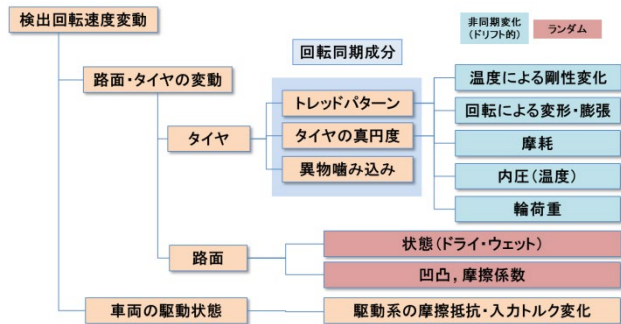


図4 回転速度変動成分に含まれる情報

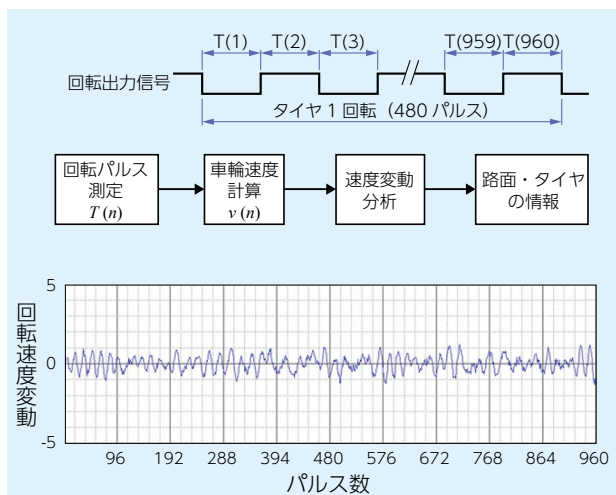


図5 回転パルス信号の処理例

2.2.1 タイヤの異物噛み込み検出

タイヤに異物が噛み込んだ状態を再現するため、パンクしないようにタイヤトレッドの溝を利用してねじを固定した(図6)。ねじの有無で回転速度変動パターンを比較した結果を図7に示す。トレッドに異物があることで、回転速度変動パターンの一部で大きく波形が異なり、異物の有無による回転速度変動パターンの違いを確認した。



図6 トレッドにねじを固定した様子

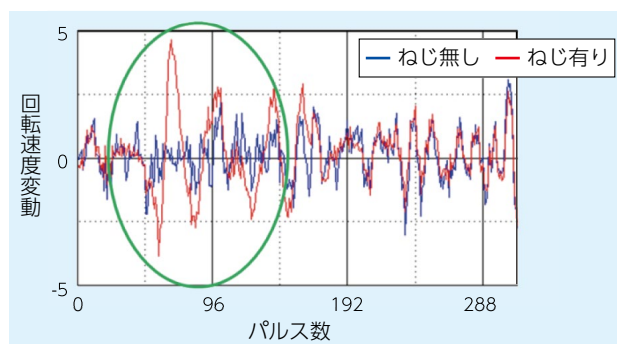


図7 ねじ有無の違いによる回転速度変動パターンの比較

2.2.2 タイヤの種類判別

タイヤの種類判別により、その特性に応じた駆動/制動力の制御をすることで安全性や燃費の向上が期待できる。トレッドパターンが異なる2種類のタイヤA、Bを用意した。タイヤA、Bの回転速度変動パターンを取得し、さらにトレッドパターンの特徴を観測しやすくするため、各回転速度変動パターンの位相をずらしながら自己相関値(信号の周期性)を算出し、そのパターンを比較した(図8)。各タイヤで自己相関パターンが明確に異なることから、タイヤの種類が判別できることを確認した。

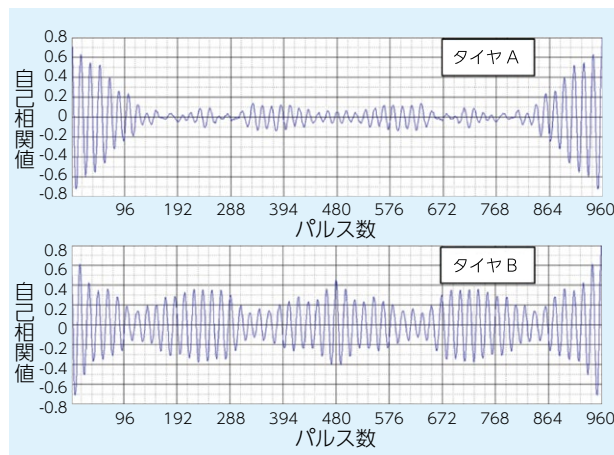


図8 2種類のトレッドパターンの自己相関パターンの比較

2.2.3 タイヤ摩耗検出

トレッドパターンが同一で、トレッド溝深さ8mm、2mmと異なる2セットのタイヤを用いて、回転速度変動パターンを比較した結果を図9に示す。各回転速度変動パターンの振幅のレベルがトレッド溝深さによって異なることを確認した。

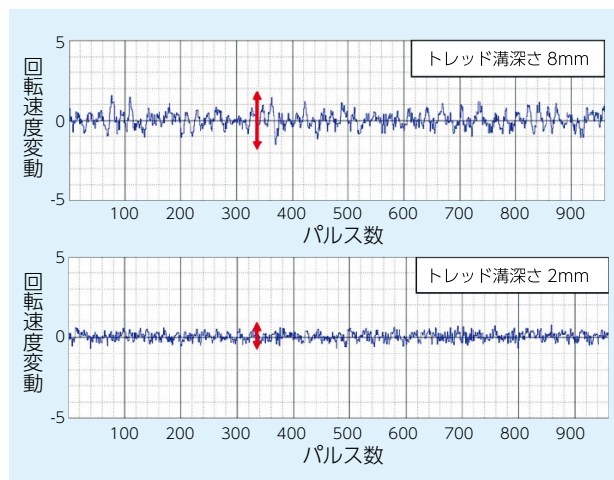


図9 トレッド溝深さの違いによる回転速度変動パターン

2.2.4 タイヤ空気圧検出

空気圧を8水準(0.14, 0.15, 0.16, 0.17, 0.18, 0.2, 0.23, 0.26MPa, 標準は0.23MPa)に調整したタイヤを準備し、四輪(FL:Front Left, FR:Front Right, RL:Rear Left, RR:Rear Right)の回転速度変動パターンを取得した。空気圧のレベルによる違いを検証するため、空気圧が0.23MPaのときの回転速度変動パターンを基準として、他の空気圧の回転速度変動パターンとの相互相関値(信号の類似性)を算出し、プロットしたグラフを図10に示す。空気圧の変化に応じてトレッドと

路面の接触位置が変化し、回転速度変動パターンが変化するため、相互相関値が減少する。本試験結果より、回転速度変動パターンの相対的な変化から、空気圧の変化を検出できることを確認した。

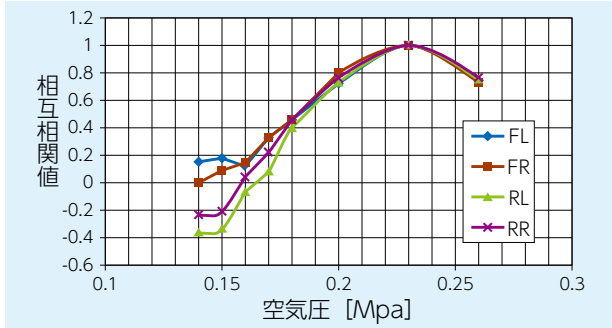


図 10 空気圧の違いによる相関値比較

2.2.5 路面状態推定

アスファルト舗装路で取得した、四輪の回転速度変動パターンを基準として、基準と異なるアスファルト舗装路、圧雪路面で取得した回転速度変動パターンとの相互相関値を算出した結果を図 11 に示す。タイヤと路面の摩擦係数が低くなると相互相関値も低くなることから、路面の変化を検出できる可能性を確認した。

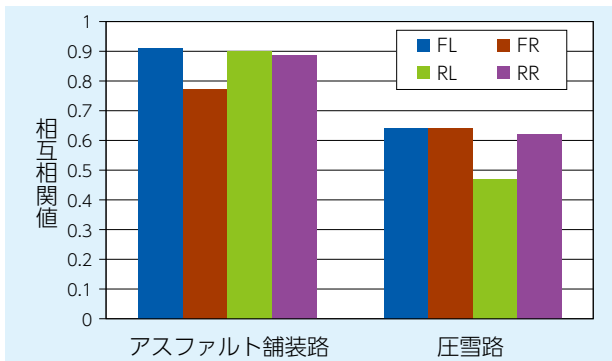


図 11 路面状態の違いによる相関値比較

2.3 自動運転 (Autonomous) や

シェアリング (Shared & Services) への適用

自動運転でも特に自動駐車などの所望の位置への移動に際しては、車輪の回転検出により車両の移動量を精度よく知る必要がある。現在多用されている車輪速センサは、車輪が約 4cm 回転移動しないと回転パルスが出力されない、つまりセンチメートル単位の移動量が十分認識できない。車輪回転に伴う自車位置の検出誤差によって、障害物と接触する可能性がある。高分解能回転センサ技術を適用すると、回転信号周波数も従来の車輪回転速センサの場合と比べ、40 倍 (最大約 1.4kHz) になり、車輪が約 1mm 回転移動することで回転パルス

が得られる。これにより自動運転時を含め乗り心地や操安性の改善に貢献する可能性があり、自動運転の要求に対応する技術として期待している。

また、自ら車両を運転しない自動運転車や、不特定多数の運転者が短時間運転するシェアリング車では、タイヤの摩耗や空気圧の低下などが走行安全性に大きな影響を及ぼす車両状態にもかかわらず、利用者自らがその状態変化に関心が及びにくいという問題がある。上述したように、本技術では、タイヤ-路面間の状態変化に伴って生じる回転速度変動に基づきその変動の様子を捉え、利用者や管理者に状態情報を提供することができる。これにより事故を未然に防止するとともに、計画的なメンテナンスが可能となり、自動運転車やシェアリング車の安全性の担保、さらには車両稼働率の向上も期待できる。

3. 高分解能回転センサ技術の適用

NTN では軸受に回転センサ技術を一体化した回転センサ付軸受⁷⁾を商品化している。ハブベアリングと同様に軸受に高分解能化した回転センサ技術を組み合わせた高分解能回転センサ付軸受を開発するとともに、回転センサ高精度化の鍵となる着磁リングや実装性が高い高分解能センサを部材として提供することで、CASE への提案を進めている。

3.1 高分解能回転センサ付軸受

自動運転では車両周囲の環境をできるだけ精度よく把握する必要があり、現状では表 1 に示すカメラ、LiDAR、ミリ波レーダのセンサの特徴を考慮しながら複数を組み合わせて用いている⁷⁾。

表 1 周囲環境把握センサ

センサ種類	測定距離	長所	短所
カメラ	300m	分解能 色識別	耐環境性
LiDAR	200 ~ 300m	測距性能	耐環境性
ミリ波レーダ	200 ~ 300m	速度計測 耐環境性	分解能

参考文献7) を基に作表

LiDARは光源となる近赤外レーザー光を2次元的に走査(スキャン)し、反射光が戻ってくるまでの時間を計測することで距離情報を取得する。現在、レーザー光の走査方式として、回転ミラーを用いる方式が実用化されている。一方、LiDARの小型軽量化、信頼性向上のためには回転ミラーなど機械的な可動部、回転部材を用いない光走査方式(メカレス方式)の開発が期待されているが、走査角度の広角化や安定性などの課題がある。

回転ミラー走査方式では、走査面の空間情報をより細分化するために回転ミラーの回転角度を高分解能かつ高精度で検出する必要があり、信頼性が高い高分解能回転センサが求められている。使用される環境やコストを考慮した量産自動車向け技術として、現在は磁気式の回転角度センサが適用され始めている。

高分解能回転センサ(MPS40S)は、2項でも述べたように回転検出能力を最大40倍に高めるとともに、原点位置信号出力を可能にしている。NTNではこのセンサと軸受を一体にした「高分解能回転センサ付軸受」を提案している⁸⁾。図12に高分解能回転センサ付軸受の外観を示す。高分解能回転センサ(MPS40S)は自動車向けの電子部品信頼性試験AECQ100認定を取得済みであり、高い環境性能を有する。また、コンパクトな構造で、従来の軸受と同様に取付けができるため、既存の軸受と置き換えることで、高精度な回転、角度情報を得ることができる。例えば、回転ミラー走査方式LiDARのように、小型軽量かつ高い角度検出精度が必要とされる用途に適用可能である。今後、車両の電動化へ寄与する技術として広く展開したい。



図12 高分解能回転センサ付軸受

3.2 チューブ型高分解能回転センサ

3.1項で紹介した高分解能回転センサ付軸受はホール素子で磁気検出するが、泥水環境や油中で用いる場合は磁気検出素子などを防水/防油構造で保護する必要がある。NTNでは素子や周辺回路をチューブ状の薄板密封構造で保護したチューブ型高分解能回転センサ(図13)の提案を欧州で開始し、自動運転で運用される農業用トラクターや小型バスなどへの適用が始まっている。本センサによりNS磁極対の磁極幅(標準は5mm)を4通倍から最大200通倍まで高分解能化したパルス信号を得ることが可能である。主な仕様を表2に示す。通倍数や磁極幅、センサのサイズや固定方法などを選択できるため、多彩な用途への適用を可能としている。



図13 チューブ型高分解能回転センサ

表2 チューブ型高分解能回転センサの主な仕様

サイズ(配線除く)	φ15.2 × L73mm
出力	2相方形波(A相、B相)
入力電圧範囲	8 ~ 32V
磁極幅	5mm(1, 2.5mm対応可)
エアギャップ	3mm以下
防水構造	IP67

3.3 複列磁気リング⁹⁾

次に、複列磁気リング(図14)のカーシェアリングへの対応について言及する。カーシェアリングで車両を利用する運転者は、シートポジションやバックミラーの角度を各人の体格や嗜好に合わせ都度調整する必要がある。電動シートなどの電動調整機構とその位置情報を利用すれば、運転者ごとに固有のシートポジションなどに応じて、車両側が自動で調整する機能を実現できる。シェアリングシステムでの車両利用の際に、運転者

のシート位置設定情報をクラウドに保存しておけば、次回利用時にその情報に基づき電動機能を用いて調整位置が再現できる。その際、調整用の電動アクチュエータの回転角度を都度再現する必要があり、角度センサが必要となる。運転者はシートポジションが少しでも異なると快適性が損なわれると感じることが多い。高い分解能と精度を有する高分解能回転センサ付軸受や、初期化不要で絶対角度が得られる複列磁気リングを用いた角度検出システムは、このような場面でも活用が期待できる。

複列磁気リングは、極対数の異なる2列の磁気トラックを持ち、専用の磁気センサにより極対数の差を利用して高精度（±0.1°）、高分解能かつ、初期化処理をしなくても絶対角度検出が可能である。外周方向着磁のラジアルタイプと軸方向着磁のアキシャルタイプや極対数がシリーズ化されており、用途やレイアウトなどに応じて使い分けが可能である。

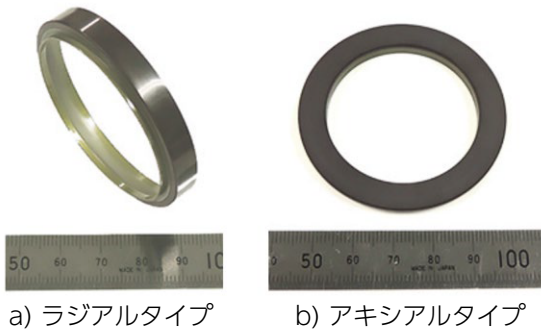


図14 複列磁気リング

3.4 レゾルバ代替回転角センサ

ハイブリッド車（HEV）や電気自動車（EV）などの車両駆動の電動化は、法規制を伴う地球環境保護の動きに加え、バッテリーの高性能化と価格低減を実現する技術革新により今後の拡大が期待されている。これらの電動化の潮流に伴い、従来、内燃機関の動力を利用してきたエアコンなどの補機類や、原動機負圧と油圧を利用するブレーキについても、電動化が進められている。

一方、電動化の動きと並行して車両の機能安全に関して、国際規格ISO26262への対応が求められる。この規格はリスクの重大性を考慮したASIL（Automotive Safety Integrity Level）のレベルに応じて、システムやハードウェア、ソフトウェアに対する対策が必要になっている。暴露の確率及びコントローラビリティ、シビアリティによりA～Dのランクに分けられ、EPS（Electric Power Steering）のような人命に直接係わる最上位の安全が要求されるアイテムにはASIL-Dの対

策が義務付けられる。例えばモータでは、その回転角を検出し制御するが、検出を誤った場合、重大な機能損失になる可能性がある。そこで、検出部を複数配して冗長化することで機能失陥を未然に防止する。冗長化に際しては、同種の検出器を複数実装した場合、同一の要因により同時に故障する可能性が残るため、検出原理が異なる検出器を複数実装することがより安全側の選択になる。

モータの回転角検出用センサとしては、現在はレゾルバが多用されているが、コストを含めた同等の機能を別の原理で実現する手段として、磁気式の回転角センサが注目されている。

レゾルバは駆動系のモータ制御用として広く普及し、量産効果と信号処理ハードウェア付き処理回路の普及により、安価かつ確実な検出手段になっている。一方、自動車向けの磁気式回転角センサは、車輪速センサやクランク角センサとして既に広く普及しているものの、高精度な絶対角度検出機能については、価格的にレゾルバに対抗することが難しかった。

NTNグループでは、特殊な着磁技術を利用した磁気リングと、安価な磁気センサを組合せた新しい回転・角度センサ技術を開発した。回転角度に応じて正弦波/余弦波の信号が出力されるため、絶対角度を算出可能であり、独自の着磁技術と信号処理により、高精度な角度情報を得ることができる。図15に開発した回転角センサ付軸受の外観写真を示す。

今後、機能安全要求による回転角検出の冗長化を、低コストかつ高精度の回転角センサ技術で実現することが期待されている。



図15 回転角センサ付軸受

4. まとめ

100年に一度の大変革期といわれるほど、自動車を取り巻くビジネス構造を大きく変え得るCASEの新たな要求に対して、NTNの軸受/軸受モジュール商品/技術の取組みについて紹介した。これらをまとめると表3のようになる。これらの商品/技術は日本をはじめグローバル市場でも必要とされる技術であり、NTNグループとして開発を継続していく。

表3 CASEに対応するNTN センサ関連商品まとめ

	高分解能 回転センサ付 ハブベアリング	高分解能 回転センサ付 軸受	チューブ型 高分解能 回転センサ	複列磁気 リング	レンズレバ代替 回転角センサ
Connected	○	○	○	○	
Autonomous	○	○	○	○	○
Shared & Services	○		○	○	
Electric				○	○

参考文献

- 1) 自動車技術 Vol73. No.7 (2019) .
- 2) CASE 革命 2030年の自動車産業 日本経済新聞出版社 (2018) .
- 3) CASE 時代 新たなモビリティの道を探る 時評社 (2018) .
- 4) ASB Technology
https://www.ntn-snr.com/sites/default/files/2017-03/technologie_asb_en.pdf.
- 5) NTN TECHNICAL REVIEW No.75 (2007) 36-41.
- 6) NTN TECHNICAL REVIEW No.81 (2013) 52-57.
- 7) 車載センサー三国志, 日経エレクトロニクス 2018年3月号 (2018) .
- 8) NTN TECHNICAL REVIEW No.78 (2010) 70-76.
- 9) NTN TECHNICAL REVIEW No.86 (2018) 45-49.

執筆者近影



福島 靖之
商品開発研究所



袴田 博之
商品開発研究所

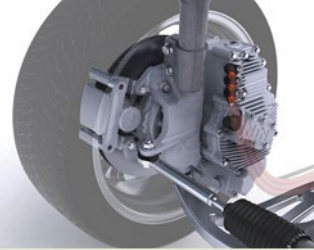


Christophe
DURET
NTN-SNR ROULEMENTS
Research & Innovation
Mechatronics

インホイールモータを用いた車両運動制御

Vehicle Motion Control with In-Wheel-Motors

平田 淳一* Junichi HIRATA
鈴木 雄大* Yuta SUZUKI



インホイールモータを搭載した車両では、左右輪の制動力と駆動力を独立に制御することが可能になる。NTNは、車両の走行状態に合わせてインホイールモータの制駆動力を調節して旋回性能向上と姿勢安定化を両立する車両運動制御技術を開発した。本稿では、開発した車両運動制御技術から主にヨーモーメント制御の効果について実車試験による検証結果を紹介する。

A vehicle equipped with In-Wheel-Motors can control the braking / driving force independently in the left and right wheels. NTN has developed a vehicle motion control that balances turning performance and attitude stability by adjusting the braking / driving force of the In-Wheel-Motors according to the driving attitude of the vehicle. This paper mainly introduces, among the developed vehicle motion control, the effect of yaw moment control that we verified by the actual vehicle test.

1. はじめに

近年、地球温暖化や大気汚染などの環境問題の対策として、電気自動車（以下、EV）の普及に向けた施策が世界各地で講じられている¹⁾。EV化で駆動源が従来の内燃機関からモータに置き換わることになるが、これにより駆動力だけでなく回生ブレーキを積極的に活用できるようになる^{2) 3)}。

モータを車両の駆動源に用いる方式として、モータを車体側に配置しドライブシャフトを介してタイヤに動力を伝達するオンボード方式⁴⁾と、ホイールの内径側にモータを配置しドライブシャフトを介することなく直接タイヤに動力を伝達するインホイールモータ方式⁵⁾がある。インホイールモータ方式を採用すれば、必然的に左右輪の制駆動力を独立に制御可能になるとともに、ドライブシャフトを介さないため制駆動力を応答性良く緻密に制御することも可能になる。

NTNは、車両の走行状況に合わせてインホイールモータ（以下、IWM）の制駆動力を調節して旋回性能向上と姿勢安定化を両立する車両運動制御技術を開発した。本稿では、開発した車両運動制御技術から主にヨーモーメント制御の効果を中心に紹介する。

2. 車両運動制御

開発した車両運動制御である統合制御のブロック図を図1に示す。統合制御は4つの機能ブロックで構成される。 μ 推定は路面摩擦係数を推定するブロックであ

り、スリップ制御はタイヤがスリップした場合にIWMへ指令するトルクの大きさを低減しスリップを抑制するブロックである。旋回性能向上制御および姿勢安定化制御は、車両のヨーモーメントを制御するブロックである。

ヨーモーメント制御の動作概念を図2に示す。図2の車両は3章で紹介する試験車両と同じく、前輪にIWMを搭載している。左右前輪の制駆動力に差を与えることで、車両にヨーモーメントを発生させる（図2の橙色矢印）。車両の旋回方向と同じ向きにヨーモーメントを発生させれば、旋回をアシストできる（図2(a)）。また旋回方向と逆向きにヨーモーメントを発生させれば、スピンのような過度の旋回を抑制できる（図2(b)）。

図1に示す統合制御は、これら4つの機能ブロックがシームレスに動作するよう統合化されている。

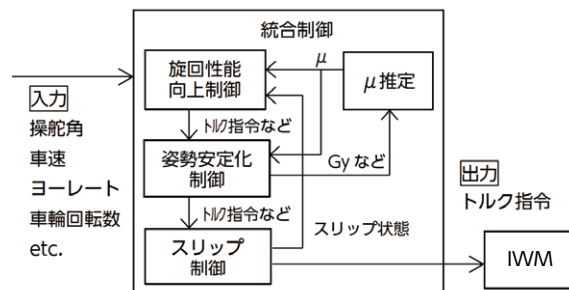
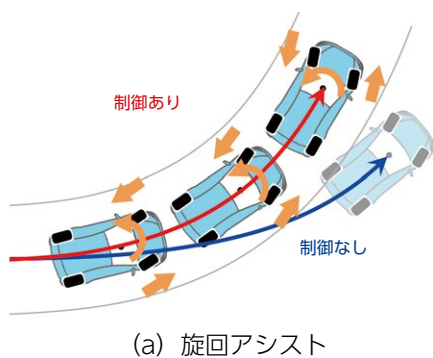
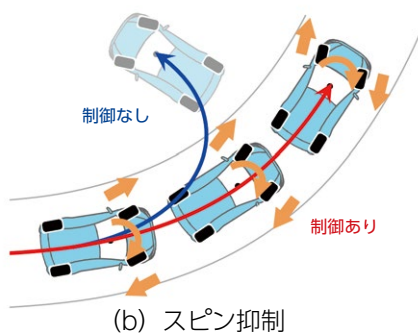


図1 統合制御ブロック図

* EV モジュール事業部 技術部



(a) 旋回アシスト



(b) スピン抑制

図2 ヨーモーメント制御の動作

3. 実車試験

この章では、開発した制御の効果について実車試験による検証結果を紹介する。

3.1 試験車両

試験に使用した車両を図3に示す。スズキスプラッシュ（前輪駆動）の前輪にIWM（図4）を搭載しEV化した。車両諸元を表1に示す。



図3 試験車両

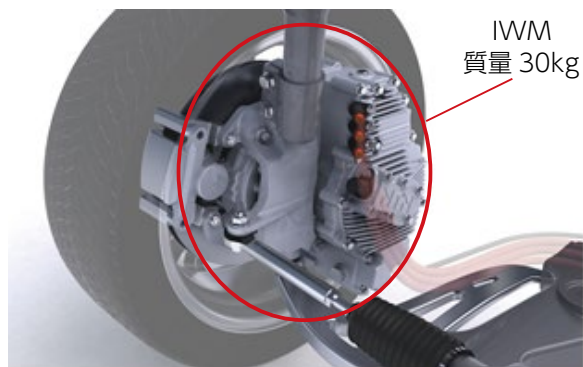


図4 インホイールモータ (IWM)

表1 車両諸元

全長	3.775m
全幅	1.69m
ホイールベース	2.36m
トレッド 前/後	1.46m / 1.47m
車両重量	約 1,200kg
駆動方式	前輪 IWM
最大出力	60kW (30kW × 2 輪)
バッテリー種類	リチウムイオン電池

3.2 旋回性能向上制御の効果検証

図5に示すスラロームコースを車速50km/hで走行し、旋回性能向上制御による旋回アシストの効果を検証した。図6に示すように、制御を適用することで操舵から車両のヨーレート発生までの遅れが75msから60msに減少し、操舵角の振幅も300degから270degに減少している。この結果から、制御により旋回性能が向上していることが確認できる。

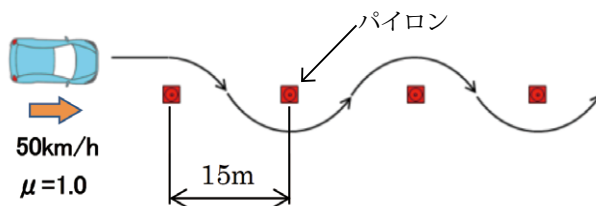


図5 スラロームコース

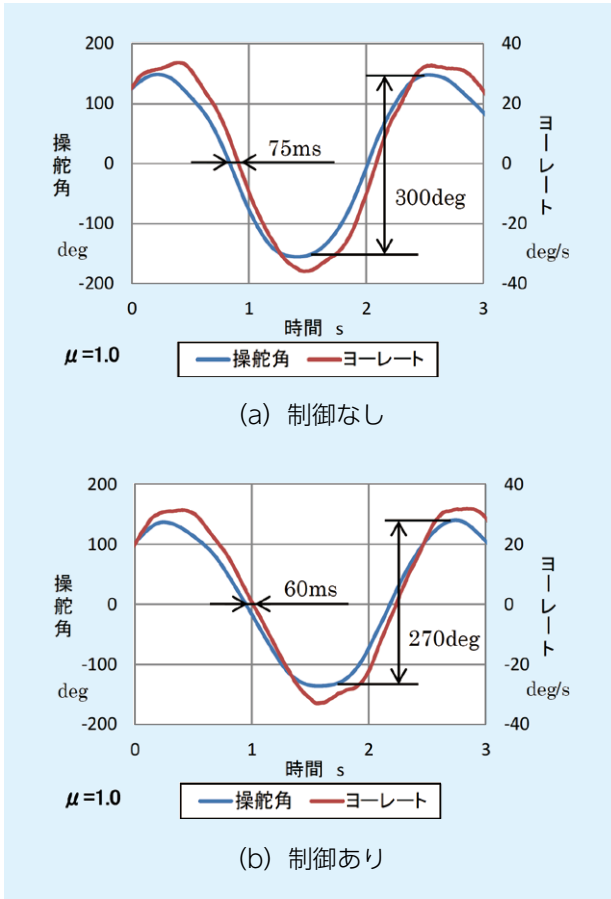


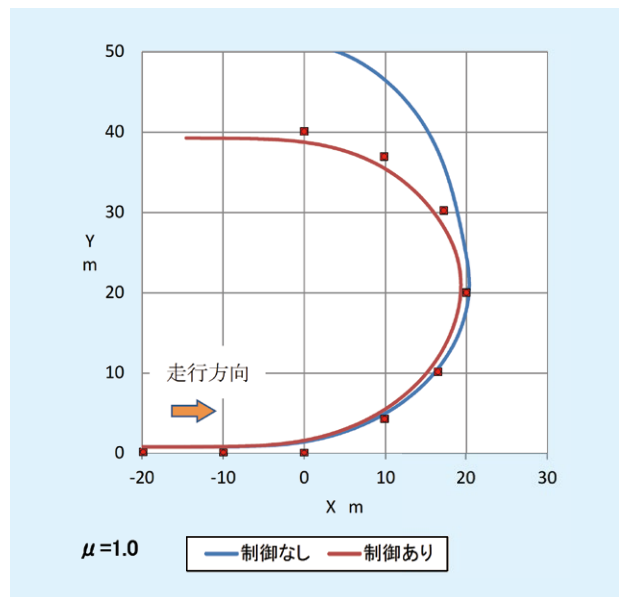
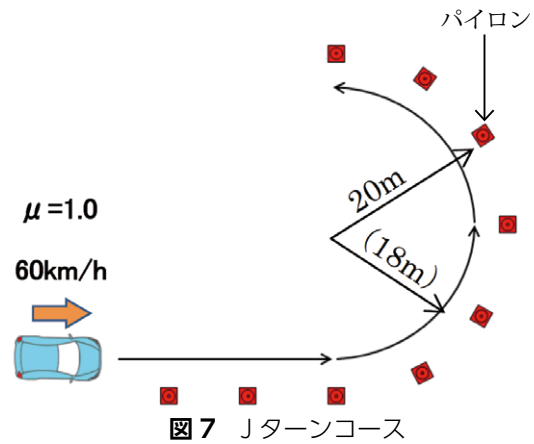
図6 スラローム試験結果

3.3 姿勢安定化制御の効果検証

旋回時の不安定な車両状態として、曲がり切れずにコースの外側に膨らむプラウ（ドリフトアウト）と、旋回内側に車両を巻き込む挙動になるスピンがある。これらの状態を抑制するための姿勢安定化制御を開発し、試験車両で効果を検証した。

3.3.1 プラウの抑制

図7のJターンコースを走行し、姿勢安定化制御によるプラウの抑制効果を検証した。Jターンの目標旋回半径を18mにするため、パイロンを半径20mの位置に設置した。コース進入速度は約60km/hである。図8に走行試験の様子を、図9に走行軌跡を示す。図9から、制御なしはコースを大きく逸脱しているが、制御ありは設定したコース上を走行できており、制御によってプラウが抑制されていることが確認できる。



3.3.2スピンの抑制

姿勢安定化制御によるスピン状態の抑制効果を検証するため、車速60km/hでスピン状態を誘発する操舵を行い、制御有無によるヨーレートと走行軌跡を比較した。図10に試験結果を示す。制御なしは、2秒後半から操舵角を減少させているにもかかわらずヨーレートは増加し続けており、スピン状態になっている。また走行軌跡においても急激に旋回半径が小さくなっており、ス

ピンが発生していることが分かる。一方で制御ありは、3秒以降に操舵角をゼロに戻したのに合わせてヨーレートもゼロになり、スピンを生じることなくドライバの操舵通りに車両がコントロールされている。走行軌跡からも、制御ありではふらつきも無く安定した走行をしていることが分かる。

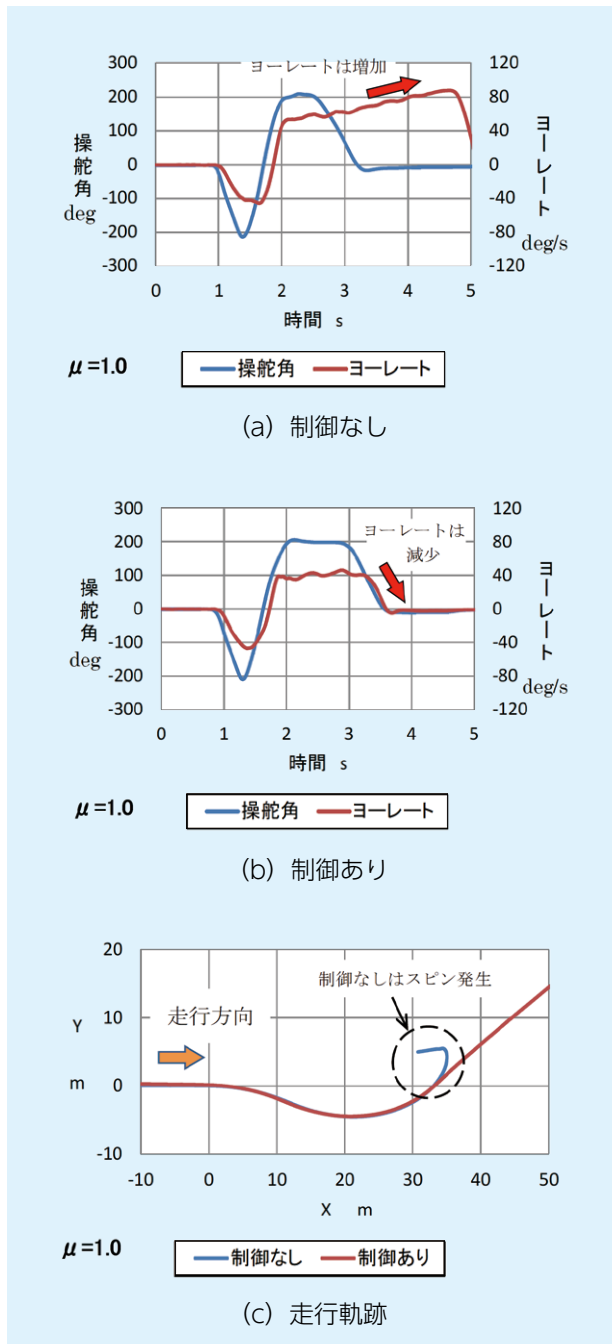


図 10 安定性評価試験結果

3.4 スリップ制御

ヨーモーメント制御の効果を発揮するためには、前輪の制駆動力 (IWM の制駆動トルク) を確実に路面へ伝えることが重要である。そのため、駆動時のタイヤの空転や制動時のタイヤのロックを防止するスリップ制御を適用している (図 1)。スリップ制御の効果を検証するため、凍結路相当の路面 (摩擦係数 $\mu = 0.2$: コース設計値) で発進加速試験を行った。IWM に大きな制駆動トルクを指令した場合、スリップ制御を適用しないと駆動輪がホイールスピンし車両は上手く加速できない。

図 11 に発進時の左右前輪の車輪速、GNSS (Global Navigation Satellite System) で計測した車速、および車両の前後加速度を示す。スリップ制御により駆動輪は大きくスリップすることなく GNSS の車速より僅かに高い速度で安定的に回転し (一定のスリップ率を維持し)、車両には路面摩擦係数 μ のコース設計値 0.2 ($\approx 2\text{m/s}^2$) 相当の加速度が生じている。このことから、スリップ制御によって駆動力が確実に路面に伝わっていることが確認できる。

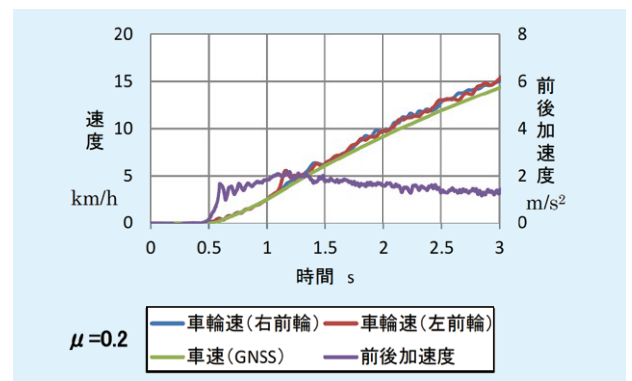


図 11 低 μ 路発進テスト結果

3.5 統合制御

統合制御は、前節までに紹介した全ての制御がシームレスに動作するように統合化されている。統合制御について、高 μ 路および低 μ 路における効果を紹介する。

3.5.1 高 μ 路 (乾燥アスファルト路面)

図 12 に示すダブルレーンチェンジコースで、高 μ 路における統合制御の効果を検証した。コース進入速度は 60km/h である。試験結果を図 13 に示す。

図 13 から、コース進入直後の最初の操舵 (1 秒前後) において旋回性能向上制御の効果により操舵角の大きさが減少するとともに、ヨーレートの遅れも抑えられている。またコース後半 (2 秒以降) において、姿勢安定化制御の効果によりヨーレートが操舵に追従しスピンの発生が抑制されている。走行軌跡からも、制御なしは

コースを大きく逸脱しているが、制御ありはコースに追従できていることが確認できる。図 14 はコース脱出時の車両姿勢を示している。制御なしはスピン挙動を示しておりコースに対して車両が横を向いてしまっているが、制御ありは安定した車両姿勢となっており、制御の効果が確認できる。

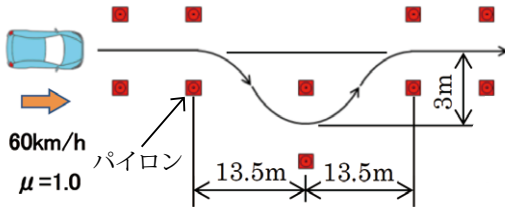
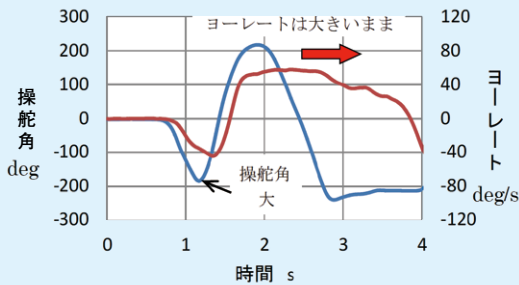
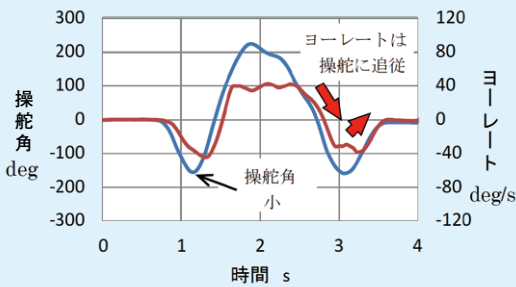


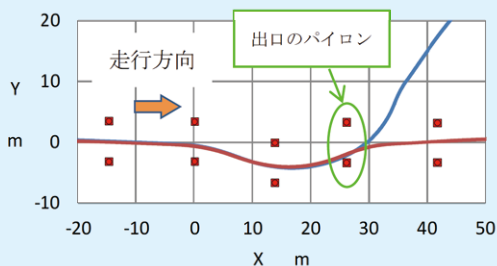
図 12 ダブルレーンチェンジコース



(a) 制御なし

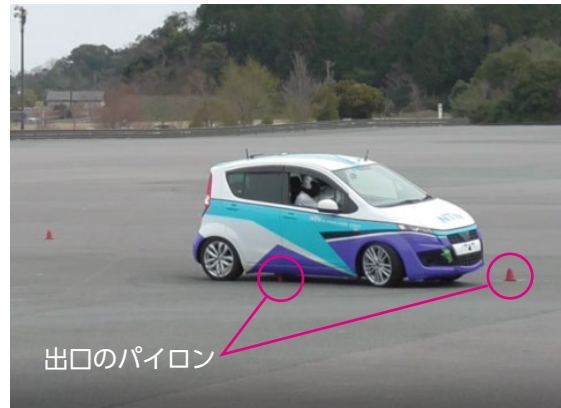


(b) 制御あり



(c) 走行軌跡

図 13 ダブルレーンチェンジ試験結果



(a) 制御なし



(b) 制御あり

図 14 ダブルレーンチェンジ時の車両姿勢

3.5.2 低μ路 (凍結路相当: $\mu = 0.2$)

統合制御は路面 μ を推定する機能を有しており (図 1), 車両挙動等の情報から路面 μ の変化を検知して各パラメータを自動調整することで, 高 μ 路面だけでなく低 μ 路面にも対応可能である. 低 μ 路での効果について, 凍結路相当の路面 ($\mu = 0.2$) に図 15 のシングルレーンチェンジコースを設けて検証した. コース進入速度は 40km/h とした.

図 16 に走行軌跡を示す. コース進入直後の操舵において制御の有無による車両軌跡の違いは無いが, コース後半において高 μ 路と同様に制御なしはスピン挙動となりコースを大きく逸脱している. 一方の制御ありはスピン挙動が抑制されており, コースに沿った走行ができている. この結果から, 開発した統合制御は, 路面摩擦係数の低下に即座に対応し高 μ 路と同様に効果を発揮できることが分かる.

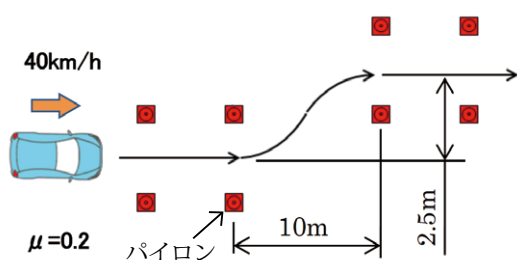


図 15 シングルレーンチェンジコース

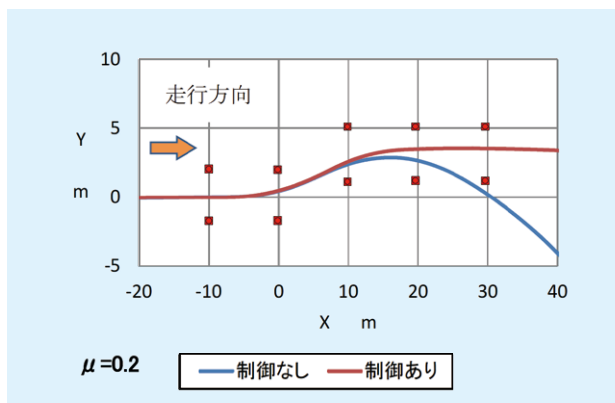


図 16 シングルレーンチェンジ試験結果

4. おわりに

NTN で開発した車両運動制御技術から、ヨーモーメント制御の効果を中心に紹介した。今後も IWM を活用した車両運動制御の開発を進め、IWM による制御の可能性を探求していく。

参 考 文 献

- 1) 環境省・経済産業省・国土交通省, 次世代自動車ガイドブック 2017-2018, (2018) .
- 2) 木村ほか, 新世代ハイブリッドパワートレイン” e-POWER” の開発, 日産技報, No.80, (2017) 6-14.
- 3) 本田智一, SPORT HYBRID SH-AWD 駆動力配分システムによる車両運動制御, 自動車技術会学術講演会前刷集. No.102-14, (2014) 25-28.
- 4) 雪島ほか: 2 モータオンボード駆動システム, NTN TECHNICAL REVIEW, No.83, (2015) 20-25.
- 5) 伊藤ほか, インホイールモータシステム, NTN TECHNICAL REVIEW, No.79, (2011) 9-16.

執筆者近影



平田 淳一

EV モジュール事業部
技術部



鈴木 雄大

EV モジュール事業部
技術部

低燃費化を目指した自動車用軸受の開発の歴史

History of Development of Bearings for Automobiles Aiming at Low Fuel Consumption

安西 隆* Takashi YASUNISHI



次世代自動車の代表格であるハイブリッド自動車／電気自動車（HEV／EV）は今後の拡大が予想される一方、アジア・アフリカなど新興国では人口増加を背景にグローバルでは従来車（エンジン車）も依然高い需要がある。また、環境規制の強化により、各自動車メーカーでは環境への負荷が低い自動車開発に力を入れている。自動車に求められる“低燃費化”について自動車用軸受の開発の歴史を紹介する。

Hybrid vehicle/Electric vehicles (HEV/EV) that represent the next-generation vehicles, future expansion are expected.

On the other hand, in emerging countries such as Asia and Africa, there is still high demand for conventional vehicles (engine type) on a global basis due to population growth. In addition, from the point of environmental regulation, each automotive manufacturer is focusing on the development of vehicles with low environmental impact. We will introduce the history of the development as a bearing for automobiles, about "Low Fuel Consumption" required for automobiles.

1. はじめに

自動車用軸受は構造がシンプルなため、外観では仕様の変化が分り難い商品である。しかし、1980年代から現在まで軸受仕様の歴史をみると、市場ニーズを先回りして基本的性能を高め続けてきた。ここでは自動車用軸受（深溝玉軸受、円すいころ軸受）において、最新仕様までの技術の変遷を低燃費化（低トルク化）の観点で紹介する。

2. 自動車用軸受の開発の歴史

2.1 深溝玉軸受

主にトランスミッション用途に用いられる深溝玉軸受は、近年多段ATやCVTの高効率化などの市場動向により低トルクのほか、高速化対応など機能面の向上を図ってきた。電動車の駆動モータ用軸受でも、要求特性は同傾向であるが、さらに長寿命化、小型・軽量化などの要望がある。

低トルク化への対応は、材料・熱処理による小型・軽量化および、軸受内部諸元の設計変更のほか、シール、保持器、グリースなど構成部品の改善により実現している（図1）。

表1に深溝玉軸受用シールにおける、各仕様の構造や性能についての特徴を示し、図2に1980年以降の技術の変遷を回転トルクの比較で示す。

トランスミッション用途に使用される深溝玉軸受は、シールドやシールがない開放型タイプが一般的であっ

たが、油中に混在する硬質の異物侵入による寿命低下を防ぐため、接触形シール（L Uシール・L Hシール）が採用されている。

しかし、接触形シール付き軸受はシールのしゅう動により開放型に比べるとトルクが大きいという課題がある。低トルクを重視する場合は開放型が使用されるが、異物侵入環境下でも短寿命とならないよう、材料・熱処理による改善がされてきた。

最新の開発仕様（L Eシール）は、シール材質とシールリップ部の形状を工夫し、シール性能を維持した上で低トルク性能を実現し、オイル潤滑下では非接触形シールと同等の低トルクを実現した。

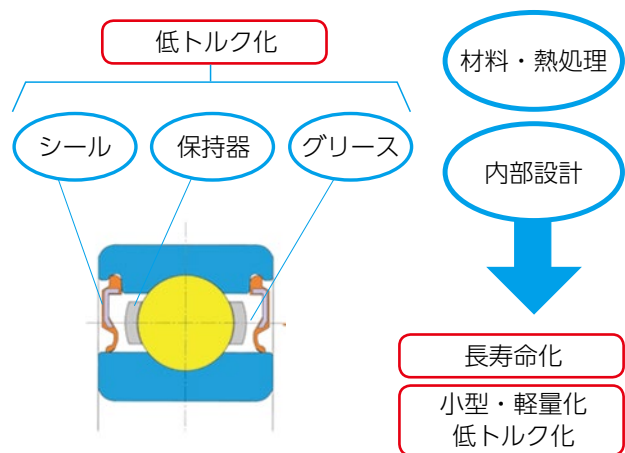
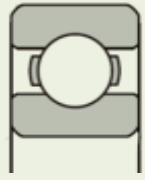
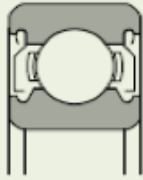
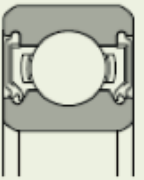
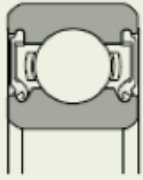
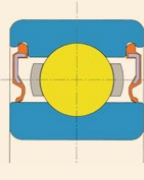


図1 深溝玉軸受と特性

* 自動車事業本部 自動車軸受技術部

表1 深溝玉軸受用シールの特徴¹⁾

形式及び記号		標準仕様			開発仕様	
		開放型	シールド形 非接触形 ZZ	シール形 接触形 LU 低トルク形 LH		シール形 低トルク形 LE
構造						
		軸受を密封するシールド、シールがない	金属のシールドを外輪に固定し、内輪のシール溝とラビリンスシールを形成	鋼板に合成ゴムを加硫接着したシールを外輪に固定し、シール先端部は内輪のシール溝面に接触し密封	基本構造はLUと同じであるがシール先端部の軽接触化を図り、吸着防止のスリットを設けることで低トルクを実現	シール先端部しゅう動面に半円弧状の微小突起を複数設け、油潤滑環境下で流体のくさび膜効果を生じさせることで、非接触となり低トルクを実現
性能比較	低トルク	☆☆☆	☆☆☆	☆	☆☆	☆☆☆
	防塵性	—	☆	☆☆☆	☆☆☆	☆☆☆
	高速性	☆☆☆	☆☆☆	☆	☆☆	☆☆☆

優劣の順位：優☆☆☆ > ☆☆☆ > ☆☆ > ☆劣

深溝玉軸受

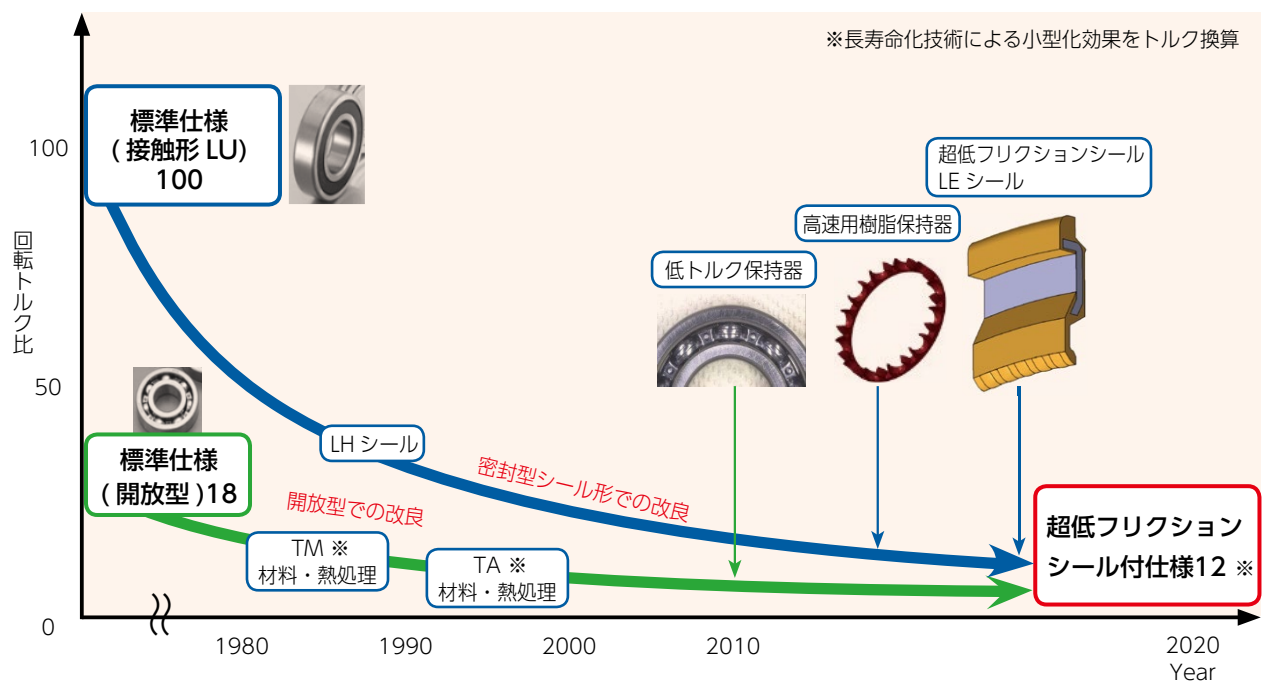


図2 深溝玉軸受 開発の変遷²⁾

2.2 円すいころ軸受

トランスミッションやデフレンシャル用途に用いられる円すいころ軸受は、深溝玉軸受と比較すると軸受設計因子が多いため、設計パラメータが及ぼす各種特性を追究し、低トルク化と共に、材料・熱処理も改善し長寿命化も実現してきた (図 3)。

低トルク化の変遷について、内部設計と、材料・熱処理の改良を説明する。内部設計の改良では、主に内輪つば部の特殊形状・加工により、ころとのすべりによるトルクを低減させた S T 仕様を確立した。材料・熱処理の改良では、軌道面表層部への残留オーステナイト量が多く長寿命化が得られる浸炭鋼ベースに特殊熱処理を施した。(小型化によるトルク算出結果を図 4 に示す)

その後、ECO-Top 仕様にて内輪・外輪軌道面の微小曲率形状 (クラウニング) などの改良を行い、材料・熱処理の技術も融合した商品を開発した。さらに、鉄板保持器の設計変更で油の攪拌抵抗を大幅に低減した。最新仕様ではクラウニング改良設計と量産加工技術の確立により自動車用 U L T A G E (アルテージ) *1 円すいころ軸受を完成させた。近年の HEV/EV 用途における小型・軽量化ニーズにも対応している。

また、グローバル調達が可能なた軸受鋼をベースとした長寿命熱処理「FA 処理」を開発した。U L T A G E 円すいころ軸受では後述の接触面圧分布最適化などの改良により飛躍的な長寿命効果を得ており、標準仕様との比較では大幅なトルク軽減を実現した (図 4)。

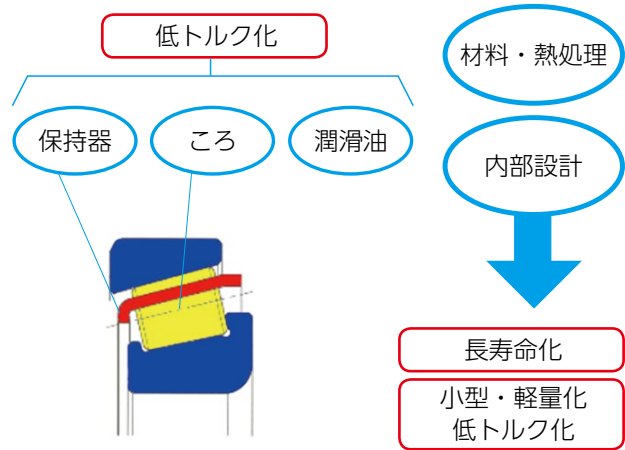


図 3 円すいころ軸受と特性

*1 ULTAGE® (アルテージ) とは、究極を意味する【Ultimate】とあらゆる場面での活躍を意味する【Stage】を組合せた造語で、世界最高水準の NTN 新世代軸受のシリーズ総称である。

円すいころ軸受

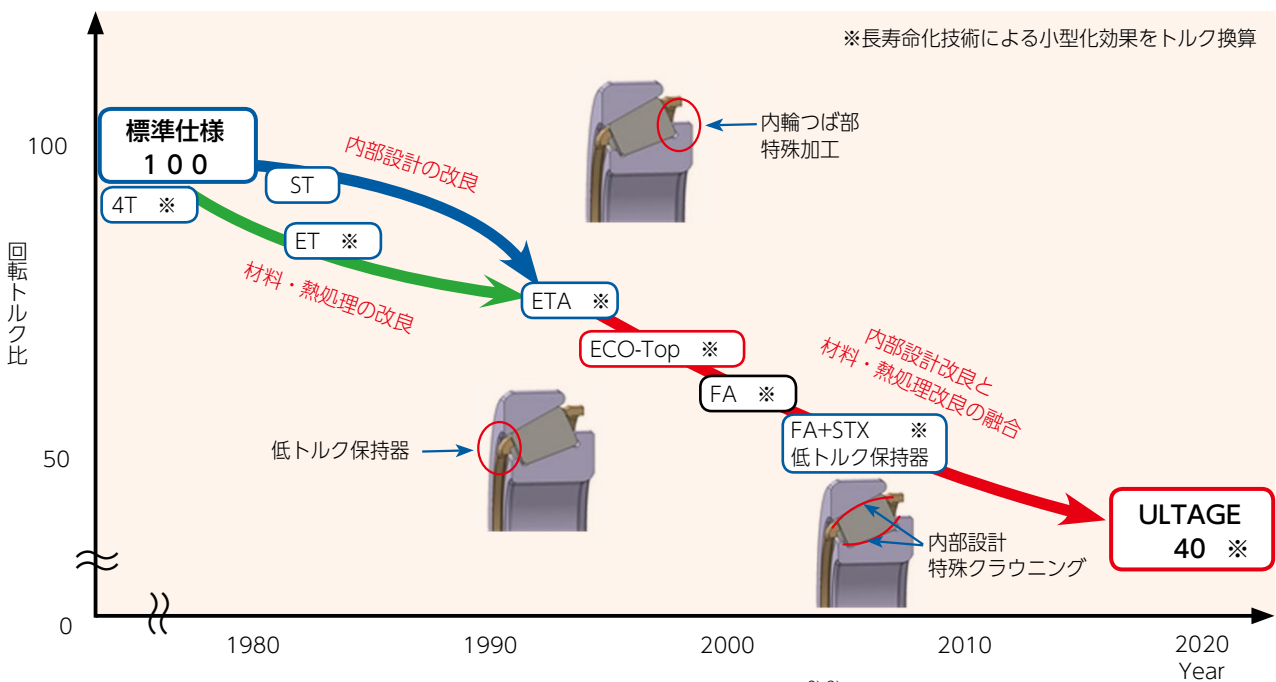


図 4 円すいころ軸受 開発の変遷 ^{2) 3)}

3. 次世代の自動車用軸受の紹介

“低燃費化”に向け次世代の自動車用深溝玉軸受、および円すいころ軸受の最新の開発品について以下に紹介する。

3.1 超低フリクションシール付玉軸受⁴⁾

トランスミッション内の潤滑オイル中に、ギア摩耗粉などの硬質異物が浮遊する過酷な軸受使用環境下での寿命低下を抑えるため、従来は接触シールを採用し、耐異物性を高めた。しかし、接触シール付軸受はシールのしゅう動抵抗が大きくトルクが増加する。本開発は接触シールのシール性を保ちつつ、低トルクの実現のためシールの形状と材質を見直し、最適設計とした。本シール（LEシール）は、シールリップのすべり接触部に円弧状（半円筒状）の微小突起（図5）によりくさび膜効果を生じさせ、シールリップと軸受内輪しゅう動面との間に潤滑油の油膜形成を促進し、流体潤滑状態となることで回転トルクを低減し周速限界の引き上げに成功した（表2、図6）。

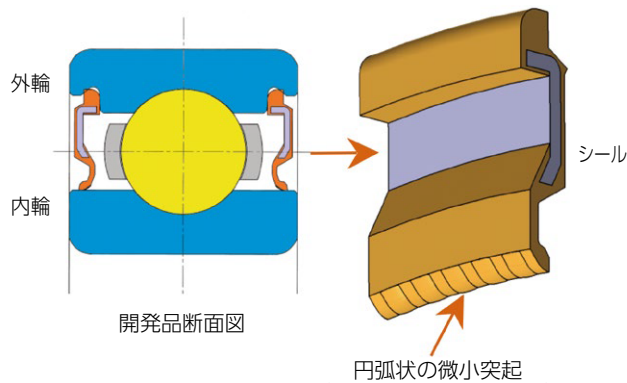


図5 超低フリクションシール付玉軸受の特徴

開発品の特長

- ①回転トルク 80%低減（接触形シール比）
- ②高周速への対応 50m/s 以上
- ③有害な異物侵入防止

表2 試験条件

項目	条件
ラジアル荷重	0.05C (C: 動定格荷重)
回転速度 min ⁻¹	1,500
潤滑油	CVT フルード
軸受温度 °C	35 ~ 120

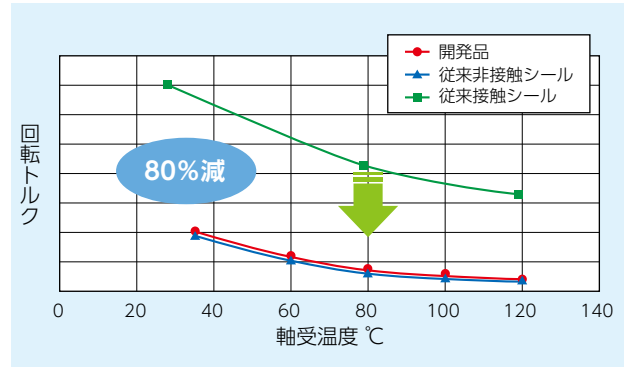


図6 軸受温度と回転トルクの関係

3.2 自動車用ULTAGE円すいころ軸受⁵⁾

トランスミッションやデファレンシャルの動力伝達部などに使用される円すいころ軸受には小型・軽量化、長寿命化、低トルクが求められる。

ロバスト性の高い転動疲労寿命を最大化するクラウニング最適化技術を用いた自動車用円すいころ軸受として、世界最高水準の高負荷容量と高速回転性能を実現した自動車用ULTAGE（アルテージ）円すいころ軸受を紹介する（図7）。

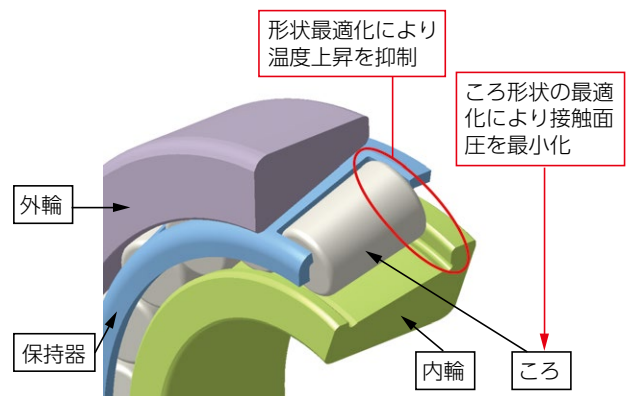


図7 自動車用ULTAGE円すいころ軸受の構造

開発品の特長

- ①世界最高水準の高負荷容量
 - ・基本動定格荷重 1.3 倍*
- ②長寿命（基本定格寿命比）
 - ・標準タイプ（軸受鋼、標準焼入れ） 2.5 倍以上*
 - ・高機能タイプ（FA 処理） 3.8 倍以上*
- ③世界最高水準の高速回転性能
 - ・許容回転速度 約 10% 向上*
- ④許容傾き角（ミスアライメント量）
 - ・許容傾き角 最大で 4 倍*

※カタログ標準比較

円すいころ軸受の転がり接触部における接触面圧を最小化し、かつ、接触領域端部の過大な圧力（エッジロード）の発生を抑制する特殊なクラウニング形状をころに適用した。軌道面軸方向断面での接触面圧分布の計算例を図8に示す。自動車用 ULTAGE 円すいころ軸受では、特殊クラウニングの適用により、接触領域端部のエッジロードを抑え、接触面圧分布全体が均一化されることから、軸受寿命の向上に繋がる。

また、接触面圧の均一化による長寿命効果から、同一寿命下では軸受の小型・軽量化設計が可能となる。標準軸受に対し、寿命・面圧制約を満足し小型・軽量化設計により軸受回転トルクは60%低減された（図9）。

さらに、図7に示したつば部及びころ端面の形状最適化により図10で示した昇温試験では、標準軸受より1/3の低昇温特性で、優れた耐焼付き性を確認した。

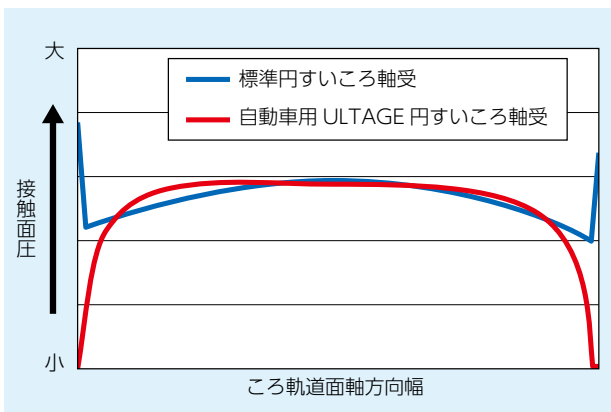


図8 軌道面に生じる接触面圧分布

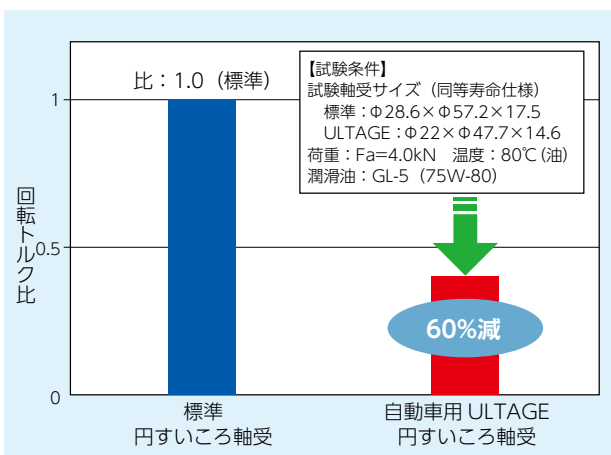


図9 軸受回転トルク比

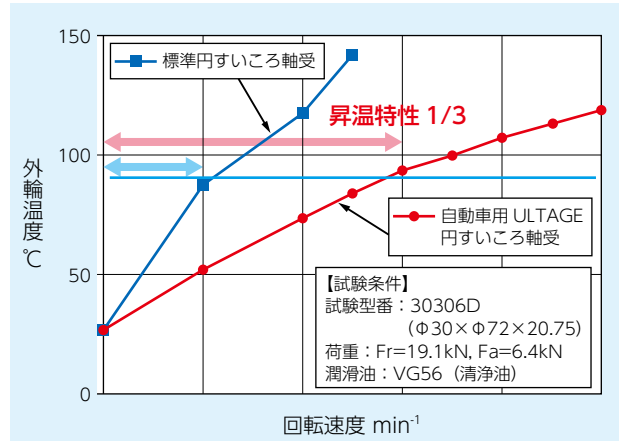


図10 耐焼付き性確認試験（昇温試験）

4. おわりに

自動車用軸受における開発の変遷を低トルク化の観点で振り返った。市場ニーズを先回りした、諸技術開発により商品を市場に提案しているが、今後、更に変化が速く厳しくなる要望に対応していきたい。より環境に優しく、より快適で利便性を追求する次世代の車両開発になくてはならない存在であり続けられるよう、引き続き社会に貢献していきたい。

参考文献

- 1) NTN カタログ CAT. No.3015- IV, P2
- 2) 中島碩一, ころがり軸受の材料・熱処理技術の動向, NTN TECHNICAL REVIEW, No.76(2008), 10-16.
- 3) 大木力, 結晶粒微細化強化を施した高性能軸受の開発, NTN TECHNICAL REVIEW, No.78(2010), 128.
- 4) 佐々木克明, 和久田貴裕, 水貝智洋, トランスミッション用超低フリクションシール付玉軸受, NTN TECHNICAL REVIEW, No.85(2017), 62-66.
- 5) 藤掛泰人, 石川貴則, 宮入進, 自動車用アルティメット円すいころ軸受, NTN TECHNICAL REVIEW, No. 85(2017), 51-55.

執筆者近影



安西 隆

自動車事業本部
自動車軸受技術部

低燃費化を目指したアクスル用軸受の開発の歴史

History of Development of Axle Bearing Aiming at Low Fuel Consumption

関 誠* Makoto SEKI



アクスル用軸受は周辺部品を取り込むことでユニット化が進み、市場のニーズに合致させるべく、軽量コンパクト化・信頼性の向上・高剛性化・低トルク化の目的で高機能化への道を歩んできた。その軸受形式と世代の変遷、および最近の NTN 技術について紹介する。

Axle bearing has been innovated by integrating the surrounding components. This article introduces the transition of axle bearing type and the latest NTN's technology.

1. はじめに

一般の転がり軸受は、ISO や JIS などの規格に沿って標準化されているが、自動車の車輪支持用に使用されている転がり軸受（以後、アクスル用軸受と呼ぶ）については、過去から現在にわたり、その形式・材料や設計仕様について大きな変遷があった。

また、近年は自動車産業全体を取り巻く問題への対応として、自動車構成部品の小型・軽量化、低燃費化や環境保全への貢献が強く求められており¹⁾、アクスル用軸受は進化を続けることで要求に対応してきた。本稿では、アクスル用軸受の軽量化、低燃費（低トルク）化に絞って開発の歴史を振り返る。

2. アクスル用軸受への市場ニーズ概要

アクスル用軸受は、自動車メーカーのニーズ（取付け方法、許容スペースと軸受サイズ、軸受負荷容量、低トルク性能、耐泥水性能、剛性、強度など）により様々な設計仕様求められる。過去から現在までのアクスル用軸受に対する要求は、概略次のとおり分類されてきた。

- a) 軸受の組立性
- b) 軸受すきま調整作業の簡略化または省略化
- c) 小型・軽量でかつ大きな軸受負荷容量の確保
- d) 定期メンテナンスの不要化
 - 特にシール付き軸受としてグリース交換作業や外部シールの省略化
- e) 部品点数の削減
- f) 軸受単体及び周辺部品や作業工賃を含めたトータルコストの低減化

以上の要求に対し、NTN は約 40 年にわたり順次第 1 世代、第 2 世代、第 3 世代（GEN1、GEN2、GEN3）を量産化開発し、市場に投入してきた²⁾。

また、各国で環境規制が導入され、継続的に規制値が厳しくなっていることにより、CO₂ 排出量の低減を目的に燃費向上が強く求められている。そのため、前記の要求項目に追加して、アクスル用軸受の軽量化・低トルク化が強く求められている。

3. アクスル用軸受 開発の歴史

3.1 軸受形式の歴史

アクスル用軸受は、1970 年代までは単列軸受を 2 個配列する方式が主流であった。しかし、単列軸受の活用だけでは軽量化や小型化に限界があり、その後、車両への組立性が良く、小型・軽量化要求に応えられるユニット化へと進化していった。

第一弾として GEN1 と呼ばれるシール付き複列アンギュラ玉軸受（アンギュラユニット）及びシール付き複列円すいころ軸受（テーパユニット）が 1970 年代後半に実用化が始まり、1980 年代に入ると軸受の周辺部品であった軸（ハブ）やハウジング（ナックル）とユニット化することで、部品点数の削減と軽量化を図った結果、GEN2 への進化に繋がった。

その後、ユニット化をさらに推し進めて、アクスル用軸受の車両組立てラインでの組立て容易性を向上させた GEN3 へと進化を遂げた。

表 1 に、ユニット化以前の単列軸受 2 個使用の時代を含めた、NTN の世代別アクスル用軸受の変遷と特徴を示す。

世代が進化する毎に、周辺部品を取り込んでユニット化が進んだことで、部品点数を削減しコンパクトな

* 自動車事業本部 自動車ユニット技術部

設計が可能となり、その結果アクスル構造全体の質量が軽減された。また、同様に世代が進化しユニット化が進んだことで、内輪外輪の周辺部品への圧入の省略、従動輪では加締め加工により内輪を固定することで、軸受の予圧管理が容易となり、ばらつきを大幅に低減することができた。これにより、予圧の最適化が進められ、回転トルクの低減を実現している。

3.2 次世代ハブジョイントの開発

GEN3の量産化開発後に、GEN4として更に等速ジョイント（以下、CVJ）との統合化を図った次世代アクスル用軸受を開発完了させた。しかし、自動車メーカー側の車両組立てライン構成の大幅な変更を伴うことから採用には至っていない。

NTNでは、その課題を解決するためにCVJとアクスル用軸受の新しい締結方法を開発し、自動車メーカーの組立てラインを変更することなく組立て可能で、かつ大幅な軽量化を達成したプレスコネクトハブジョイント（以下、PCS-H/J）について紹介する（図1）。

従来は、CVJとアクスル用軸受の双方をスプラインで結合し、ナットで締結させる構造であり、スプラインはすきま嵌めでねじれ角を付けてガタをなくす構造が一般的で、スプライン嵌合部を長く設計する必要がある。新締結方式のプレスコネクト方式では、アクスル用軸受内径にCVJステムスプラインより歯幅の小さいスプラインを予め成形することで、スプラインはす

きまがない嵌合状態でボルト締結により組み立てることが可能であり、スプライン全域でトルクを受けることができるため、嵌合長さを大幅に短くすることができる。

プレスコネクト方式を採用したPCS-H/Jにより、CVJステム長さを約65%短縮、ハブ輪内径部の肉抜き及びナットのボルト化などにより、最大で12%の質量軽減とスプライン嵌合ガタ“ゼロ”が実現できる³⁾。

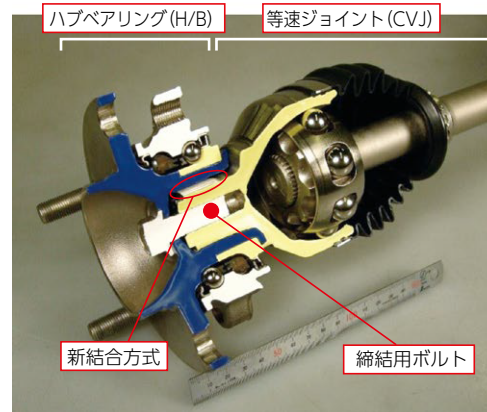


図1 PCS-H/Jの構造

3.3 軽量化の開発

前述したように、アクスル用軸受のユニット化を進めることで世代の進化毎にアクスル構造全体のコンパクト化・軽量化が進められた。しかし、GEN3が主流になってからはシステムとして更なる軽量化が難しくなり、ハブベアリング単体での軽量化が求められるようになった。

表1 NTN 世代別アクスル用軸受の変遷と特徴

世代	コンベンショナル	GEN1	GEN2	GEN3
量産開始時期	～1970年代	1970年代終盤～	1983年～	1980年代中盤～
構造	駆動輪			
	従動輪			
特徴	・2個の単列軸受を使用	・2個の単列軸受を一体化	・相手部品との取り付け用フランジを外輪と一体化	・相手部品との取り付け用フランジを外輪、内輪と一体化 ・相手部品への軸受圧入が不要
車両への組立性	☆	☆☆	☆☆☆	☆☆☆☆
コンパクト度	☆	☆☆	☆☆☆	☆☆☆☆
剛性	☆	☆☆	☆☆☆	☆☆☆☆
予圧管理	☆	☆☆	☆☆☆	☆☆☆☆
回転トルク	☆	☆☆	☆☆☆	☆☆☆☆

優劣の順位：優 ☆☆☆☆ > ☆☆☆ > ☆☆☆ > ☆☆☆ > ☆ 劣

GEN3 アクスル用軸受においては、ハブ輪の強度、外輪の強度、全体の軸受剛性といった軸受単体とは異なる強度部材としての要求があり、その中で軽量化を実現することが必要となった。特に、GEN3では、ハブ輪と外輪の質量が全体の半分以上を占めるため、これら部品の最適設計が軽量化を実現する上で非常に重要となる。

NTNでは、FEM解析により要求機能を満足する強度・剛性を備えた上で軽量化を図っている。過去にトポロジー最適化による形状の最適化開発⁴⁾も実施しており、**図2**に示すような超軽量のハブベアリング形状の開発を実施している。このように、過去からの技術の蓄積により要求されるスペックを達成した上で、最適な軽量化形状を提供する。

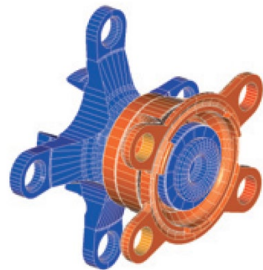


図2 トポロジー最適化 開発品形状

3.4 低トルク化の開発

過去より、自動車の燃費向上を目的にアクスル用軸受に対してもトルクの低減は常に求められてきているが、特に各国で環境規制が導入されたことから要求が厳しくなってきた。それら市場要求に対応できるように、NTNでは各種低トルクアイテムを開発し、ハブベアリングへの適用を進めている。低トルク化への進化の変遷を**図3**に示す。

アクスル用軸受のトルクは、軸受部分が回転し、ボールが転がることによって発生する転がり抵抗、及び軸受内を密閉するために設けているシールの滑り抵抗に分けられ、それぞれが全体の50%程度であり、これらを低減することでトルクを低減することが一般的な手法となる。

3.4.1 グリース開発の歴史

軸受部分の転がり抵抗は、軸受設計、軸受内部グリースにより決まり、軸受設計は顧客要求を満足するように最適設計している。軸受内部グリースに関しては、過去より市場および顧客ニーズに合わせて開発を進めてきた。

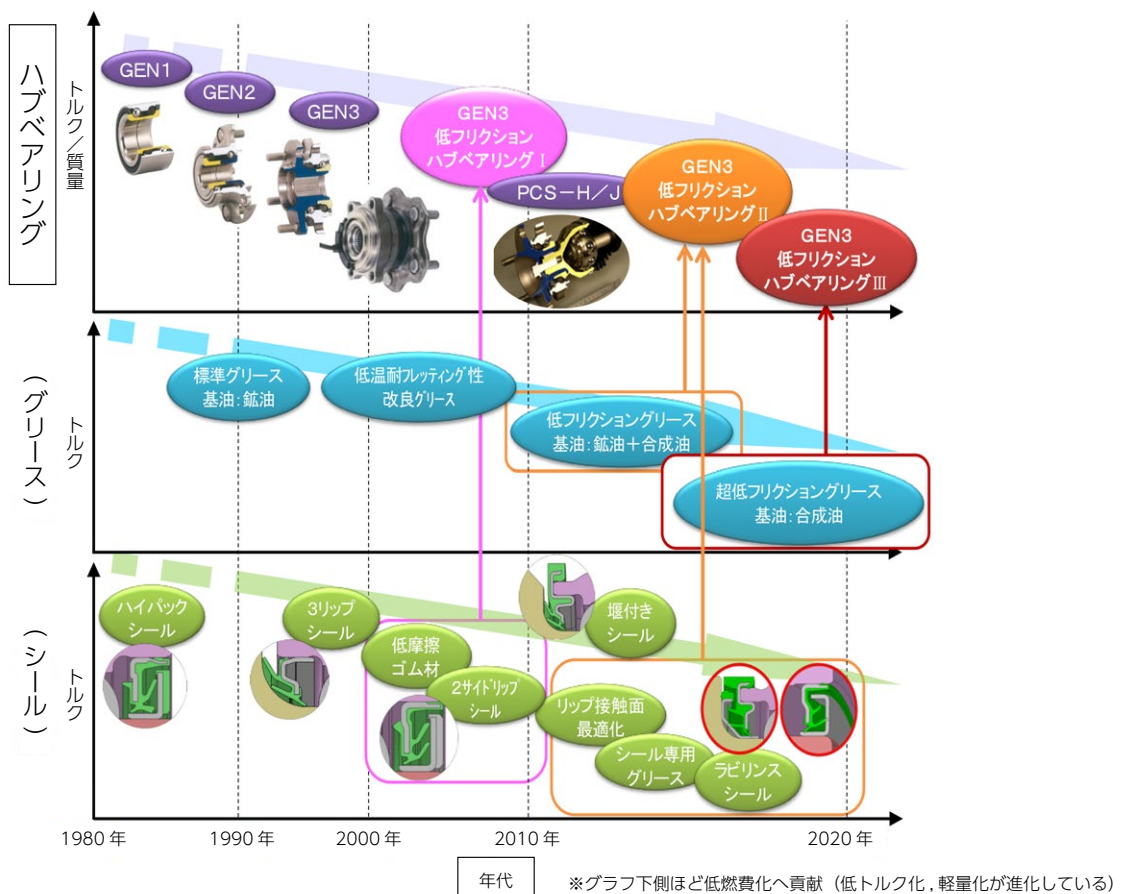


図3 ハブベアリング 開発の変遷

内部封入グリースは GEN1 量産初期より使用していたグリースに対して防錆性能を改良したグリースを標準として量産適用している。2010 年代中盤に低フリクショングリースを開発⁵⁾し、低トルク化が求められる車種に量産採用されているが、2019 年に更にトルクを低減した超低フリクショングリースを開発した。これらグリースは基油を変更しており、標準グリースは鉱油、低フリクショングリースは鉱油と合成油の混合、超低フリクショングリースは合成油を使用している。粘度指数に優れる基油を採用することにより、低温から中温領域での粘性抵抗を低減し、トルク低減が実現できる。また、基油だけでなく、グリースを構成する増ちょう剤、添加剤の最適化も行っており、トルク特性だけでなく、それ以外のグリース特性も向上している。

3.4.2 シール開発の歴史

シールの滑り抵抗に対しては、シール設計構造の最適化、ゴム材の改良、リップ接触面の最適化、リップ剛性など様々な要素で、シール特性を低下させることなく開発され、市場投入してきた。シールトルクはこれらの要素を盛り込むことで、過去から大幅に低減している。

次の段階として、接触しているリップの数を削減することで、更なるトルク低減が実現できるが、シール性能が低下してしまう。ラビリンス構造を採用することでシール性能を確保しつつ接触リップ枚数が削減でき、低トルクとなるシールを開発した⁵⁾。

従動輪に関しては、CVJ を内径部に挿入する必要がないため、**図 4**に示すようにインナ側（車体側）をキャップで密封し、シールを廃止した仕様も開発されており、従来 2 つのシールで密封しているところを 1 つに削減することで大幅にトルクを低減できる。

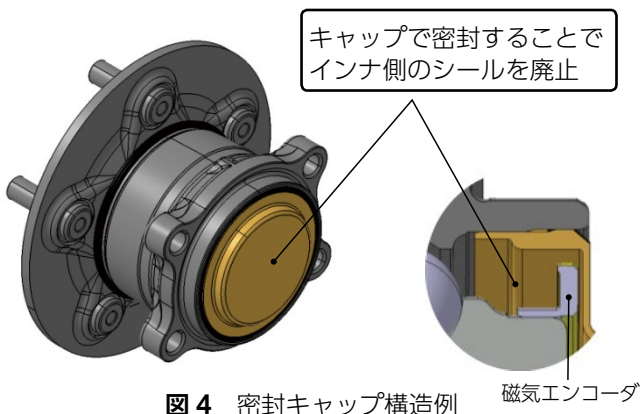


図 4 密封キャップ構造例

4. まとめ

約 40 年にわたり、アクスル用軸受を進化、発展させてきた。また、2008 年に NTN-SNR との統合による市場拡大を経て、現在その市場シェアは世界一になった。市場ニーズに合致した開発を進めてきたことで、過去の商品に比べて信頼性を確保しつつ軽量・低トルクな商品を現在市場投入しているが、今後も更なる進化、発展を目的として、開発を進めていく。更なる新たなアイデアを持って次世代の開発を進め、軽量化・低トルク化を進めていく所存である。

本稿は、軽量化・低トルク化に焦点を当てアクスル用軸受の開発の歴史を振り返ったが、これまでの発展はアクスル用軸受のユニット化開発に取り組んできた先人たちの苦勞の賜物であり、大変誇りに思うとともに、今後もこの開発精神を絶やさず、より高機能で快適な車両の実現に向け、引き続き開発業務に邁進していきたい。

参考文献

- 1) 船橋英治, NTN TECHNICAL REVIEW, No.70, (2002) 52-57.
- 2) 加藤正雄, 森下比呂志, 日比建治, 乙竹邦茂, NTN TECHNICAL REVIEW, No.52, (1986) 40-53.
- 3) 乗松孝幸, 永田勉, NTN TECHNICAL REVIEW, No.81, (2013) 58-63.
- 4) 長谷陽夫, 丹羽健, NTN TECHNICAL REVIEW, No.73, (2005) 14-19.
- 5) 関誠, NTN TECHNICAL REVIEW, No.85, (2017) 67-71.

執筆者近影



関 誠

自動車事業本部
自動車ユニット技術部

低燃費化を目指した等速ジョイントの開発の歴史

History of Development of Constant Velocity Joint Aiming at Low Fuel Consumption

杉山 達朗* Tatsuro SUGIYAMA



1963年にNTNが日本で初めて等速ジョイントを商品化し、その後、進化する自動車のニーズに合わせて、軽量・コンパクト・高効率化に取り組んできた。本稿では、NTNの等速ジョイントが自動車の低燃費化に貢献してきた歴史を振り返る。

NTN commercialized the constant velocity joint for the first time in Japan in 1963, and after that, worked on lightweight, compact and high efficiency to meet the evolving needs of automobiles. This article looks back on the history of NTN's constant velocity joints contributing to lower fuel consumption in automobiles.

1. はじめに

近年、世界的に、地球温暖化に代表される環境問題がクローズアップされている。温暖化の主要因である二酸化炭素の排出量削減について、自動車メーカーは低燃費化を目指したさまざまな取組みを行っている。

このような状況下、自動車の動力を伝達する駆動部品である等速ジョイント（Constant Velocity Joint 以下 CVJ）には、低燃費化を目的に軽量化やトルク伝達効率の向上が求められている。

自動車のエンジンからの動力は、変速機、差動装置（以下デフ）、駆動軸であるドライブシャフトを経てタイヤに伝達される。このドライブシャフトの入力軸と出力軸が任意の作動角で回転する際、常に同じ回転速度で滑らかなトルク伝達を行うために CVJ が適用される。図 1 に示すように、ドライブシャフトのデフ側には軸方向にスライド可能な「しゅう動式 CVJ」、タイヤ側には作動角が大きくとれる「固定式 CVJ」が使用されている。

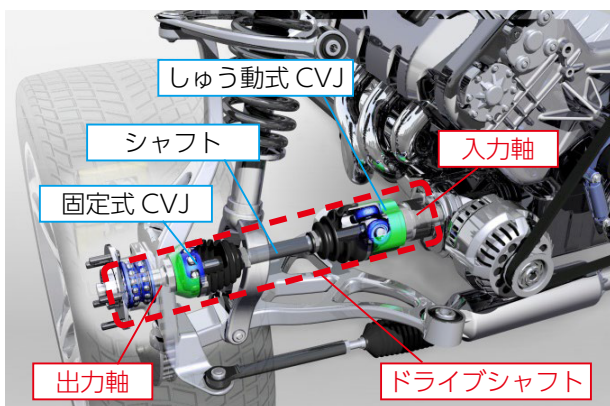


図 1 ドライブシャフトの配置

* 自動車事業本部 CVJ 開発部

2. 市場トレンド / ニーズ

自動車に要求される課題は、安全性環境対応、低燃費化、乗り心地などであり、CVJ はそれらの課題改善に貢献してきた。

歴史的に、固定式 CVJ は、当初から軽量・コンパクト化が求められ、その後、高効率化要求に対応してきた。また、しゅう動式 CVJ は、当初は低振動化が求められ、その後、軽量・コンパクト化と更なる低振動化要求に対応してきた。

CVJ 潤滑剤のグリース改良やシャフトの高強度化、E シリーズ等の軽量化開発は、上記 CVJ の開発要求に大きく寄与し、あわせて高効率化への取り組みが自動車の低燃費化に貢献した。

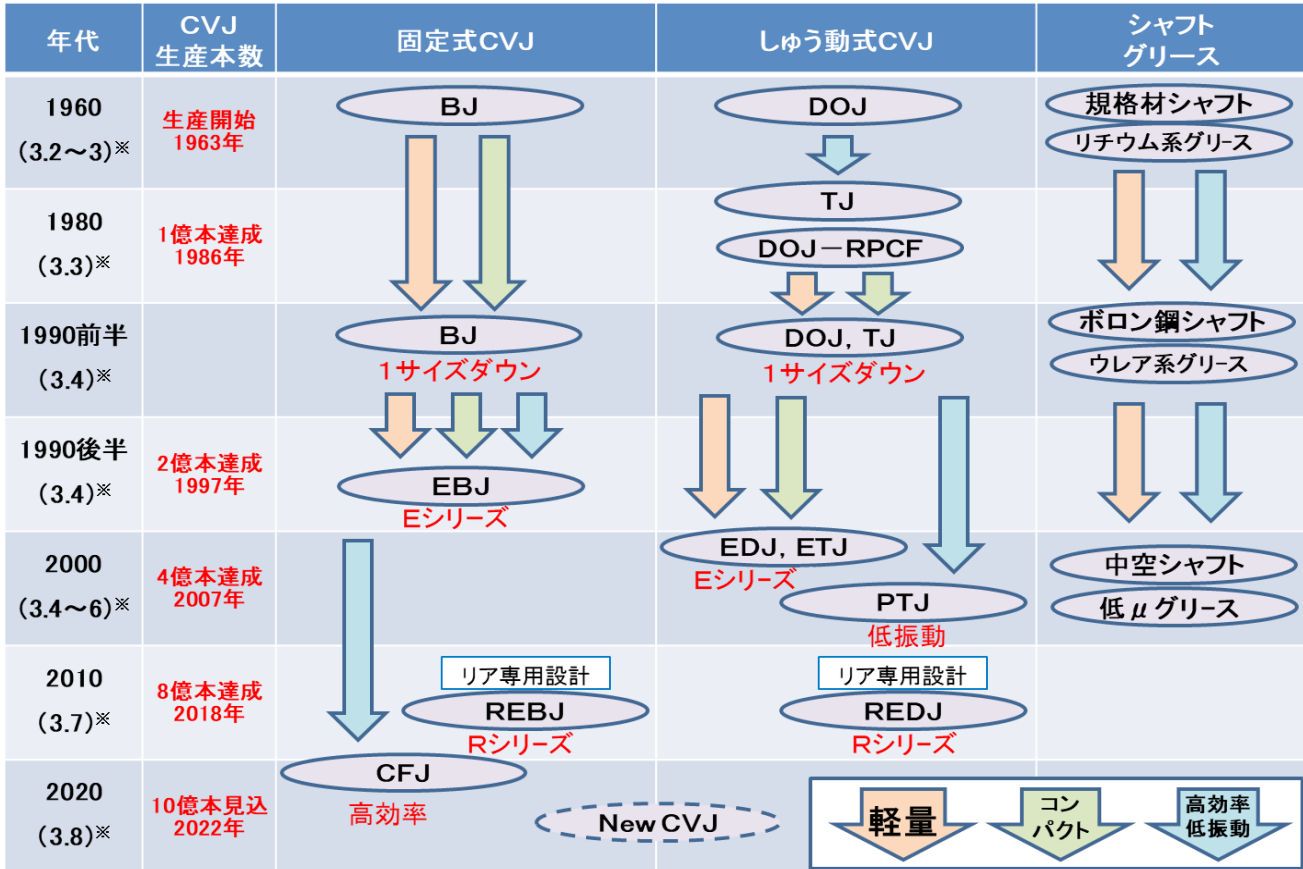
3. CVJ 開発の歴史¹⁾⁻³⁾

3.1 CVJ の開発以前

1960 年代以前の自動車は、後輪駆動（FR）車が主流であり、動力は後輪にリジッドアックスルで伝達され、CVJ は必要でなかった。また、前輪についても、ハンドル操作による転舵のみで動力を伝達していないため、CVJ は必要でなかった。

3.2 自動車への CVJ 採用（1960 年代）

前輪駆動（FF）車、四輪駆動（4WD）車では、動力が前輪に伝達されるため、等速で転舵と駆動をするドライブシャフトが必要となった。当初は、ドライブシャフトにクロスジョイント（カルダンジョイント）が使われたが、不等速ジョイントであるため、作動角が大きくなると走行時に振動や騒音が発生し、カーブでの操縦安定性が悪かった。



*年代の()内は本文の段落を示す

図2 軽量、コンパクト、高効率CVJ開発の歴史

その対策としてワイスジョイントやダブルカルダンジョイントなどの疑似的な等速ジョイントが開発されたが、自動車用には不十分な性能であった。

その後、ハーディスパイサー社（イギリス）で現在の自動車用CVJにつながる固定式のバーフィールドジョイント(BJ)が開発され、NTNはその技術を導入した。また、当時軸方向のしゅう動は、シャフトにスライドスプラインを設けて吸収していたが、NTNが独自に開発したしゅう動式ダブルオフセットジョイント(DOJ)により、滑らかなしゅう動を可能とした。これらのCVJは性能・信頼性に優れており、操縦安定性も飛躍的に向上し、FF車の発展に貢献した。

図2にNTNの軽量、コンパクト、高効率CVJ開発の歴史を示す。

3.3 FF車への適用(1963年~)

自動車メーカー各社が、本格的にFF車の開発を始めた頃、1963年にスズライト(スズキ)向けにBJを開発し、国内で初めてCVJの量産化に成功した。その後1965年には、現在のドライブシャフトのスタイルであるBJ+DOJがスバル1000に初めて採用された。

1970年代に自動車メーカー各社からFF車が市場投入

されるようになり、1978年の第2次石油危機を契機に自動車のFF車化の流れが加速度的に拡大され、NTNのCVJも拡大した。また、FR車の乗り心地改善のためリジッドアクスルを独立懸架方式にした車の拡大や4WD車の開発・発展にもNTNのCVJは大きく貢献することになった。

3.4 軽量・コンパクト化(1990年~)、Eシリーズ

CVJの外輪は材料を浸炭鋼から、中炭素鋼を用いて高周波焼入れする製造方法に変更することで強度の向上を図り、シャフトは中炭素ボロン鋼を開発し1サイズ分の強度向上を達成した。潤滑剤はウレア系グリースを開発し長寿命とした。これらのアイテムにより、1992年頃、従来品より1サイズ軽量・コンパクトなドライブシャフトの供給を開始した。

さらに1995年頃から固定式/しゅう動式の次なる軽量・コンパクト化開発を行い、1998年からEシリーズCVJの市場展開を開始した。EシリーズCVJは、BJと同等の負荷容量を維持したままコンパクト化を図るため、ボールサイズを小さくしてボール数をこれまでの6個から8個に増やした固定式CVJ「EBJ」を開発し、それに合わせてしゅう動式CVJもボール数を6個から8個に増やした「EDJ」を開発した。

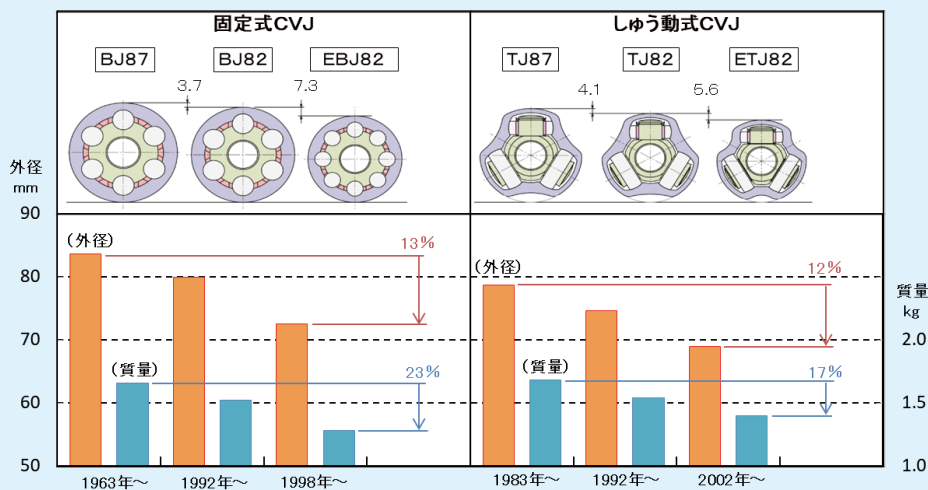


図3 CVJの外径・質量の変遷（初期87サイズの一例）

ローラタイプのしゅう動式 TJ も同時期に改良し、ボールタイプより長寿命である利点を活かし強度を落とさずコンパクト化を成立させる内部設計により「ETJ」を開発した。

上記の軽量・コンパクト化の変遷について #87 サイズ固定式 BJ としゅう動式 TJ を基準とした比較結果を示す (図3)。#87 サイズは、長寿命グリース、高強度シャフトの適用により #82 サイズにサイズダウンされ、さらに E シリーズ化により 2 サイズ相当のコンパクト化が図られている。量産開始当初に比べると現在の CVJ は、固定式 BJ で、13%のコンパクト化・23%の軽量化、しゅう動式 TJ で、12%のコンパクト化・17%の軽量化を達成した。

3.5 ドライブシャフトの低振動化

自動車の発展に伴い、快適性、静粛性のニーズは高まり、乗り心地を改善するために、しゅう動式 CVJ の低振動化ニーズが高まっていった。

しゅう動式 CVJ として最初に開発されたボールタイプの DOJ は、しゅう動抵抗が大きいという課題を抱えていた。1984 年、ボールの軸方向転がりを少しだけ許容した *RPCF ケージ採用で微振幅の振動を吸収する構造により、しゅう動抵抗を減らすことに成功した。

一方で全く新しい構造のローラタイプのしゅう動式 CVJ であるトリポードジョイント (TJ) が 1983 年に開発された。ローラが転がるタイプの構造のため DOJ に比べ大きくしゅう動抵抗を下げる事ができ、アイドリング振動に課題のあった FF の AT 車に採用され拡大した。

その後 TJ も改良され、2002 年に更なる低振動化、低しゅう動抵抗化に対応するため、トラニオンのジャーナル形状の楕円化とローラカセットを組み合わせ、高作動角領域でもローラが滑らかに転がる低振動しゅう動式

CVJ「PTJ」を開発した (図4)。しゅう動式 CVJ の開発の歴史は、しゅう動抵抗低減の軌跡であり、時代を通して自動車の低振動化と低燃費化に貢献してきた。

*RPCF ケージ・・・ケージと内輪間に軸方向すきまを設け互いに移動が可能で、かつ、ケージ窓とボール間をすきまにしてボールが転がる構成としたケージ



図4 PTJの構造

3.6 シャフトの軽量化 (中空シャフト)

シャフトは、固定式 CVJ としゅう動式 CVJ をつないで駆動力を伝達する部品である。中実シャフトの材料変更による強度向上で軽量化を実現した後、さらに高剛性と軽量化を両立させた中空シャフトを開発し、2000 年代から量産を開始した。

図5に示す中空パイプ素材に塑性加工を行ない、両端部を絞り CVJ の内輪に嵌合させる形状に成形した中空シャフトを適用することで、同じ振り剛性を持つ従来型の中実シャフトに比べ 20 ~ 30% 程度の軽量化を達成した。

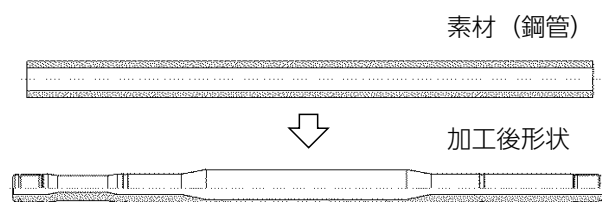


図5 中空シャフトの構造図

3.7 リア用 CVJ の軽量・コンパクト化 (R シリーズ)⁴⁾

これまでは、FR 車のリア用ドライブシャフトに FF 車のフロント用と共通設計の CVJ を適用してきた。しかし、FR 車のリア用ドライブシャフトでは高作動角が不要であることに注目し、**図 6** に示すリア専用に軽量・コンパクトな R シリーズ CVJ を開発した。あわせて中空シャフトとグリース封入量を削減したコンパクトブーツも採用し、R シリーズは従来品に比べ約 30% の軽量化を達成した。

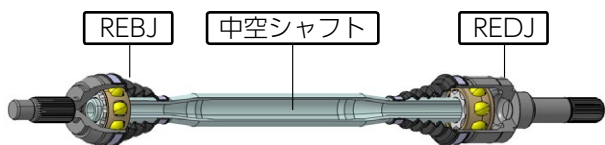


図 6 R シリーズの構造図

3.8 高効率固定式 CVJ の開発 (CFJ)⁵⁾

固定式 CVJ が高角度になるほど内部の部品間の摩擦損失が大きくなり、伝達効率を下げていたが、その滑り抵抗を減らす構造を 2013 年に開発した。**図 7** に示す「CFJ」は、隣り合う円弧状トラックを鏡面对称に配置し、ボールがケージを押す力の向きを外輪開口側と奥側の交互に振り分けることができる。その力は同じ大きさで、かつ逆向きであるため互いに相殺され、ケージの軸方向変位が抑制され、ケージと外輪および内輪間に発生する球面部接触力を大幅に低減することができる。その結果、EBJ に対してトルク損失率が 50% 程度（作動角 9deg）改善し、世界最高水準の高効率を達成することで、低燃費化に寄与することができる。

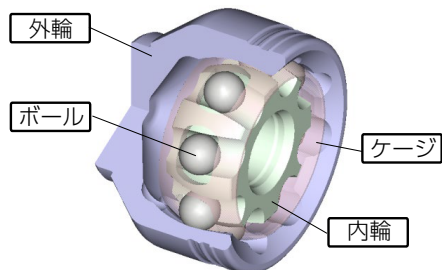


図 7 CFJ の構造図

4. 今後の展望

世界的に電気自動車 (EV) の普及拡大の機運が高まってきたが、駆動方式が変わってもドライブシャフトの必要性は変わらないことから、自動車の将来動向、ニーズを捉え、適用箇所、用途、車両特性に合わせた、最適な強度、耐久性を備え、軽量・コンパクトで高効率、静粛性に優れた CVJ を継続して開発していく。

5. まとめ

本稿ではドライブシャフト用 CVJ の低燃費化を目指した等速ジョイントの開発の歴史を紹介した。自動車の性能は日々進歩している。この自動車の性能に等速ジョイントの機能向上が直接的・間接的に影響を及ぼしており、NTN は今後も自動車の発展に貢献し、地球環境に優しい CVJ を今後も開発・供給していく。

参考文献

- 1) 池田 武, 自動車用等速ジョイントの変遷と最近の技術, NTN TECHNICAL REVIEW, No.70, (2002) 8-17.
- 2) 友上真, 等速ジョイントの技術動向と開発商品, NTN TECHNICAL REVIEW, No.75, (2007) 10-15.
- 3) 高部真一, 等速ジョイントの歴史, NTN TECHNICAL REVIEW, No.85, (2017) 40-45.
- 4) 小林智茂, リア用軽量ドライブシャフト (R シリーズ), NTN TECHNICAL REVIEW, No.85, (2017) 78-83.
- 5) 藤尾輝明, 次世代高効率固定式等速ジョイント (CFJ), NTN TECHNICAL REVIEW, No.81, (2013) 64-67.

執筆者近影



杉山 達朗

自動車事業本部
CVJ 開発部

低フリクションハブベアリングⅢ Low Friction Hub Bearing Ⅲ

関 誠* Makoto SEKI



燃費規制の強化に伴い、世界市場では低燃費化が大きな要求となっている。NTNでは、この要求に応えるため、ハブベアリングの低トルク化開発に取り組んでいる。本稿では、従来品に対し約60%のトルク低減を達成した、「低フリクションハブベアリングⅢ」を紹介する。

The Fuel efficiency regulations have been strengthening, therefore the good fuel efficiency is one of the important requirements from the field. Based on this background, NTN has been developing the low friction Hub Bearing continuously.

The Low Friction Hub bearing Ⅲ applicable to such around 60% low torque requirement is introduced in this report.

1. はじめに

近年、グローバルで自動車の燃費規制やCO₂排出規制の強化が進み、車両走行時の消費エネルギーの削減がますます重要になっている。燃費や電費をより低減するため、タイヤの回転を支えるハブベアリングには基本性能である寿命や強度を満たした上で、更なる回転トルクの低減が求められている。

乗用車用ハブベアリングで高いシェアを持つ当社は、これまで長年にわたり、ハブベアリングの低燃費化技術の研究・開発を重ね、種々そのための技術を提案している^{1)~3)}。

本稿では、既存のグリースよりも更に低トルク化を追求したグリースを開発し、既存アイテムと組み合わせることで回転トルクを従来品比62%低減した低フリクションハブベアリングⅢを紹介する。

2. ハブベアリングの低トルク化

2.1 ハブベアリングの構造及びトルクの影響因子

3世代ハブベアリングの構造例を図1に示す。

ハブベアリングにおけるトルクは、軸受部における転がり抵抗とシール部（アウトシール及びインナシール）の滑り抵抗に大きく分けられ、それぞれの比率は約50%である。図2に示す影響因子に対して過去より様々な低減技術を開発しており、転がり抵抗では軸受諸元の最適化、軸受内部グリースの改良に取り組み、滑り抵抗では、シールゴムの材質変更改良、シール構造・締め代の変更改良などが挙げられる。

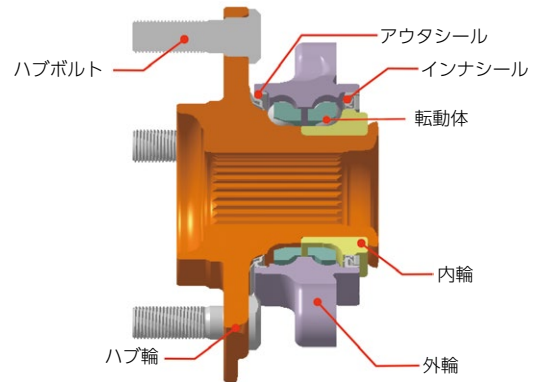


図1 3世代ハブベアリングの構造例

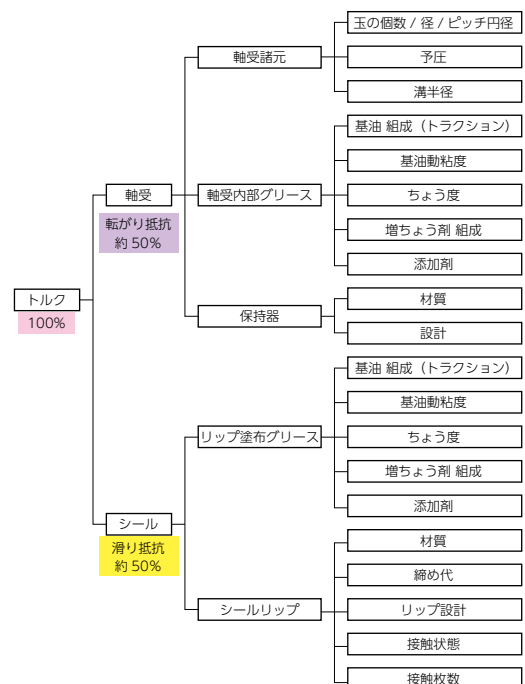


図2 軸受トルクの影響因子（概要）

* 自動車事業本部 自動車ユニット技術部

2.2 低フリクションハブベアリングの変遷

NTN ではトルクを低減するための設計仕様を過去から開発、提案を行っている。それら設計仕様の適用により、低フリクションハブベアリングⅠ、Ⅱ、Ⅲと進化させている。

進化の概要を表1に、従来品に対するトルク低下率を図3に示す。低フリクションハブベアリングⅠでは主に設計最適化を、低フリクションハブベアリングⅡ

では封入グリースの改良及びシールの低摩擦化を行い、大幅な低減を実現した。

本稿で示す新開発の低フリクションハブベアリングⅢは、過去の開発仕様と低フリクションハブベアリングⅡで適用した軸受内部グリースを改良した新開発グリースを適用することで、更にトルクを低減し、従来品比較では62%の低トルク化を達成した。

表1 低フリクションハブベアリングの変遷

低トルク化技術適用因子		低フリクションハブベアリング		
		Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ
軸受	軸受諸元	○	←	◎ ※更なる改良
	軸受内部グリース		○	◎ ※更なる改良
シール	リップ塗布グリース		○	←
	リップ設計	○	←	←
	リップ接触状態		○	←
	リップ接触枚数		○	←

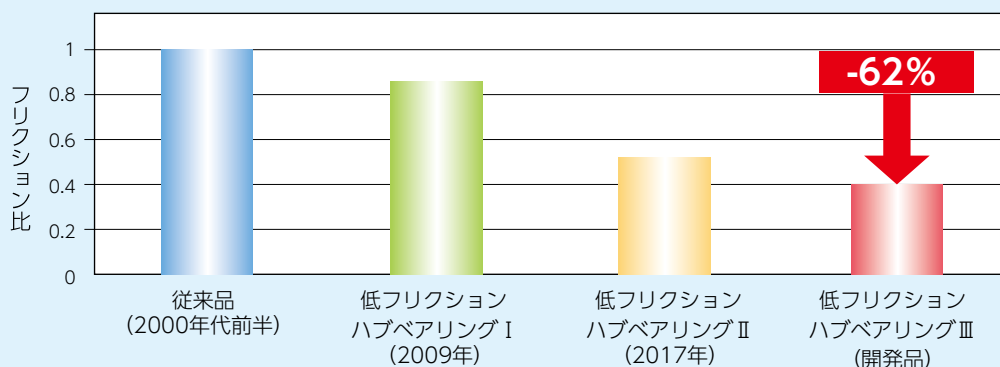


図3 低トルク化の変遷

3. 新開発グリース（転がり抵抗の低減）

3.1 要求機能と開発グリースの仕様

ハブベアリングの内部グリースには摩擦低減に加え、次の機能が求められる。

- (1) ハブベアリングの荷重，温度，速度条件下において，油膜切れや焼付きを起こさずに長寿命であること
- (2) 低温での耐フレッチング性に優れること
- (3) 十分な防錆性と耐漏洩性を持つこと

上記の要求機能を踏まえ，今回の開発グリースの仕様を以下のように決定した。また，最終的な開発グリースのコンセプトを表2に示す。

3.1.1 軸受寿命を確保した摩擦低減

玉と溝の転がり接触部を微視的に捉えると滑りを伴っており，この部分の摩擦を低減するため，基油の動粘度だけでなくトラクション係数も低いグリースを適用した。

グリースの基油動粘度を低くすれば，背反事項として油膜切れによる軌道面損傷の懸念が高まる。特に，高負荷状態では軸受が高温になり，さらにグリースの基油動粘度が低くなるため，注意が必要である。そこで，基油の低トラクション化により局所的な発熱を抑制することで油膜厚さを確保するとともに，高粘度指数及び耐蒸発性，耐酸化性の向上により，高負荷領域での長期的な潤滑性を確保し，従来品と同等以上の寿命を確保した。

3.1.2 低温耐フレッチング性

完成車両の貨車による長距離輸送時の揺れにより，**図4**の赤矢印で示すように，ハブベアリングの軌道面と転動体間に微小振動が生じる。これにより軌道面と転動体間にあるグリースが排出され，金属接触が発生し，フレッチング摩耗が生じる。特に低温環境下では，グリースが硬くなり流動性が低下するため，フレッチング摩耗の発生が顕著になる。この状態で車両が走行すると，異音が発生する場合がある。

そこで，低温での流動性を確保できるような低流動点基油の適用，グリース介入性に優れる増ちょう剤及び添加剤の最適化を行い，低温時のフレッチング性能を向上させた。

表2 開発グリース コンセプト

グリース性状	従来品との比較
基油	<ul style="list-style-type: none"> ・高粘度指数 ・耐蒸発性，耐酸化性が良好 ・低流動点 ・低トラクション
基油動粘度	<ul style="list-style-type: none"> ・低温から常温：低減 ・高温：従来品同等狙い
増ちょう剤	<ul style="list-style-type: none"> ・低摩擦な組成に改良
添加剤	<ul style="list-style-type: none"> ・基油変更によるデメリットを補填する添加剤の選定

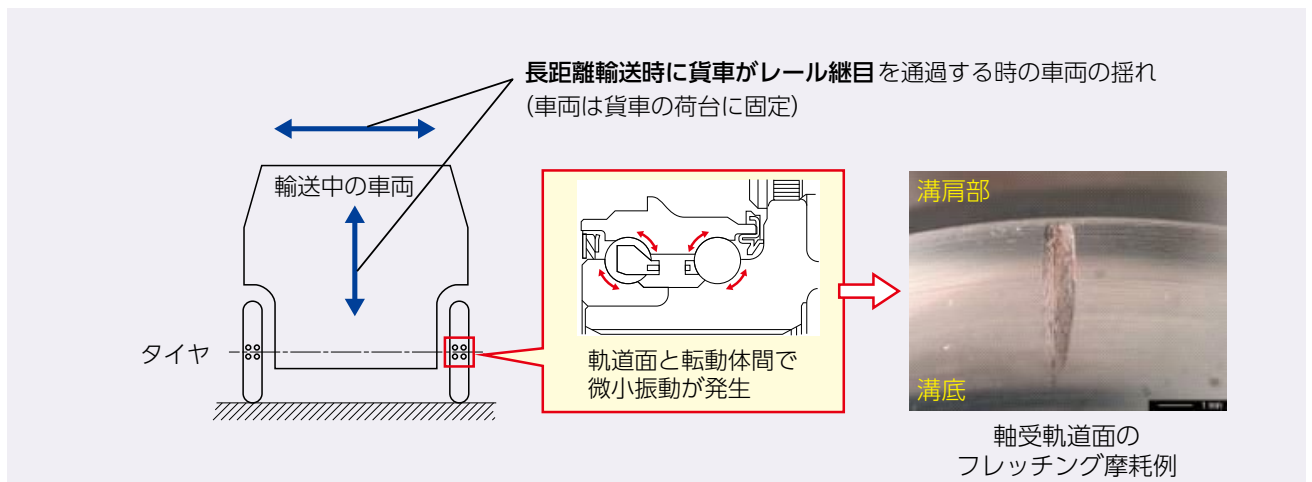


図4 フレッチング摩耗発生メカニズム

3.2 評価試験

開発グリスを封入したハブベアリングで、シールのゴムリップを取り外し回転トルク試験を実施した。

結果を図5に示す。従来品(初期3世代ハブベアリング)に対するトルク低減率は56%となり、軸受内部グリスの改良による転がり抵抗の低減効果を確認した。

また、要求機能を確認するため、表3に示す信頼性評価試験を実施した。開発グリスを適用した軸受は、全ての試験項目で開発目標を達成し、軸受内部グリスに要求される機能を満足する結果となった。

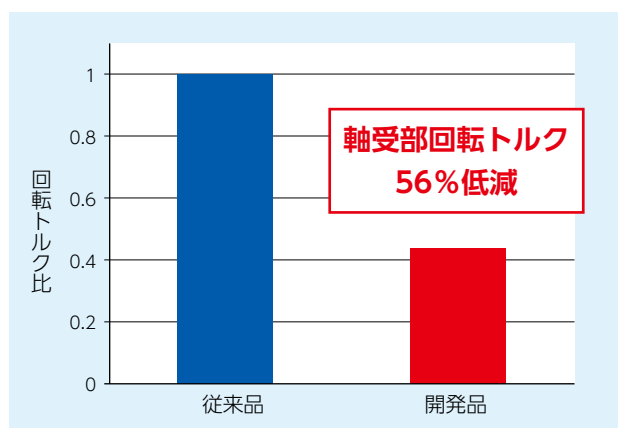


図5 回転トルク試験 (室温)

表3 軸受内部グリス信頼性評価試験

試験項目	結果
車両旋回時の軸受寿命*1	定格寿命に対し3倍以上
高速回転時の焼付き性*2	軸受軌道面に焼付き無し
低温フレッチング*3	摩耗量 従来品グリス比80%減

*1 旋回荷重：0.6G 負荷条件

*2 車速 200km/h の回転速度条件

*3 -20℃環境下での微動摩耗試験

4. 低フリクションシール (滑り抵抗の低減)

初期3世代ハブベアリングに採用しているアウトシール、インナシール(従来シール)と低フリクションシールの構造比較を図6に示す。

シールリップは必要な耐泥水性を確保するため、リップを3枚接触させる構造が一般的であるが、更に摩擦を低減するために、低フリクションシールは接触枚数を削減している。リップ削減による耐泥水性の低下は、ラビリンス構造を設けると共にそのシール形状を工夫することで防止している。

また、構造以外にも低摩擦係数を持つゴム材質の適用、リップ接触面の最適設計及びリップ塗布専用グリスの適用によっても摩擦低減をしており、図7に示すようにシールトルクを従来品比で70%低減している。

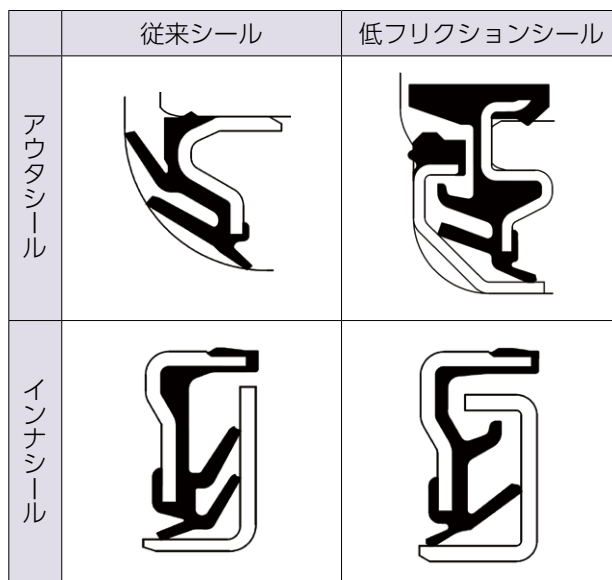


図6 従来シール及び低フリクションシール構造

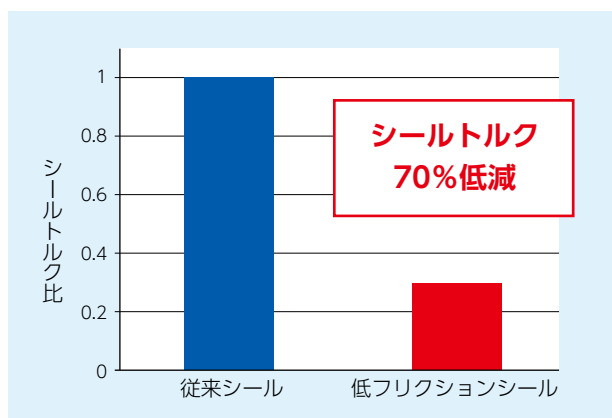


図7 シールトルク試験 (室温)

5. 低フリクションハブベアリングⅢ

新たに開発した軸受内部グリース及び既存の低フリクションシールを組み合わせた。また、本軸受の回転トルク比を図8に示す。転がり抵抗、及びアウト、インナシールそれぞれの滑り抵抗を低減したことによって、ハブベアリング全体で62%のトルク低減効果が得られた。

また、主なハブベアリングへの要求機能項目について、性能評価チャートを図9に示す。

全ての要求項目について、従来品同等以上の性能を確保した。特に、低温における耐フレッチング性が向上していることから、より過酷な環境下における使用も可能と考える。また、低フリクションハブベアリングⅢでは、予圧範囲を狭めることで予圧上限を低下させ、回転トルクの低減及び安定化を図っている。

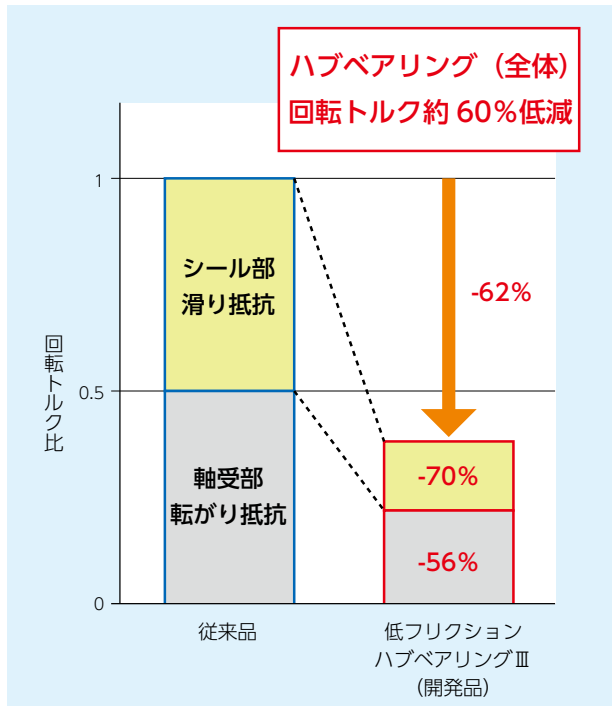


図8 ハブベアリングの回転トルク比 (一例)

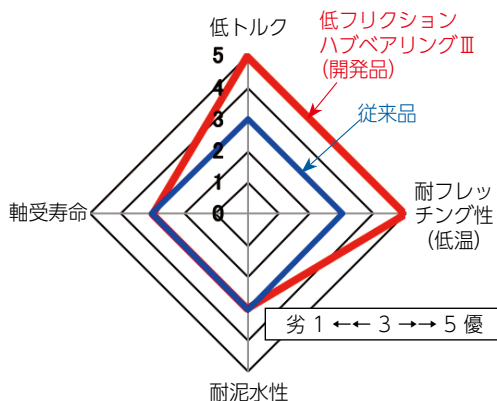


図9 性能評価チャート

6. あとがき

低燃費化への要求に対応するため、新たに軸受内部グリースを開発し、既存技術と組み合わせることでトルクを低減するとともに、従来品と同等以上の信頼性を有する低フリクションハブベアリングⅢを商品化した。開発品に適用している技術の一部は、すでに自動車メーカーで採用されている。

今後、更なる低トルク化及び信頼性向上を継続し、グローバルニーズに対応した商品開発によって社会貢献に取り組む所存である。

参考文献

- 1) 長谷陽夫, 丹羽健, ハブベアリング軽量化開発への形状最適化手法の適用, NTN TECHNICAL REVIEW, No.73, (2005) 14-19.
- 2) 柴田清武, 乗松孝幸, アクスルベアリングの技術動向と開発商品, NTN TECHNICAL REVIEW, No.75, (2007) 29-35.
- 3) 関誠, 低フリクションハブベアリング, NTN TECHNICAL REVIEW, No.85, (2017) 67-71.

執筆者近影



関 誠

自動車事業本部
自動車ユニット技術部

低燃費対応小型チェーンテンショナ Fuel-efficient Compact Chain Tensioner

鬼丸 好一* Kouichi ONIMARU
阿形 郁身** Ikumi AGATA



燃費規制の強化に伴い、自動車業界では電動化技術の開発が行われる一方、エンジンの低燃費化についても継続して取り組まれている。本稿では、タイミングチェーンの張力を維持する油圧式チェーンテンショナにおいて、これら低燃費化に貢献するため、小型化とチェーンテンショナの作動に必要なオイル量の大幅な削減を達成した「低燃費対応小型チェーンテンショナ」を紹介する。

The fuel efficiency regulations have been forwarded, therefore the automotive industry is developing electrical technology. On the other hand, efforts are being made to reduce engine fuel consumption. Based on this background, The "Fuel-efficient compact chain tensioner" that achieves downsizing and a significant reduction of oil supply for a hydraulic chain tensioner that adjusts the tension of the timing chain is introduced in this report.

1. はじめに

近年、地球環境への影響を考慮して、自動車に対する燃費や排出ガスに関する規制は厳しさを増し、今後世界的に更なる規制強化が計画されている。

このため、自動車業界では、ハイブリッド技術に代表される車両の電動化技術の開発が活発に行われているが、一方でこれらのシステムに使用される内燃機関の低燃費化についても引き続き取り組んでいる。

NTNは、内燃機関（以下エンジン）のクランクシャフトの回転をカムシャフトに同期して伝えるタイミングベルトシステムやタイミングチェーンシステム、補機類を駆動するための補機ベルトシステムに使用されるオートテンショナの開発、生産を行っている。¹⁾

オートテンショナの役割は、ベルトやチェーンの張力を常に適正に保つことで、システムの騒音低減や寿命向上への貢献である。さらに、エンジンに合わせてオートテンショナの仕様を最適化し、システムのフリクションを低減することで、エンジンの低燃費化にも貢献してきた。

今回 NTN では、多くの自動車用エンジンで採用されているタイミングチェーンシステム（図1）に使用されるオートテンショナ（以下チェーンテンショナ）に関して、更なる燃費向上に貢献するためのアイテムとして「低燃費対応小型チェーンテンショナ」を開発した。

一般的に自動車エンジンに採用されているチェーンテンショナはエンジンから供給されるエンジンオイルを利用した減衰機構を採用している。チェーンテンショナの機能を達成するために必要なエンジンオイルの使用量を大幅に削減することで、エンジン全体にエンジンオイルを供給しているオイルポンプの負荷を軽減し、エネルギーロスの削減・低燃費化に繋げることが開発の狙いである。

また、今回の開発ではテンショナ自体の内部構造の簡易化や小型・軽量化にも取り組み、市場からの低コスト要求に対して更に応えることができる商品にすることもコンセプトに加え商品化を行った。本稿では、開発品の構造並びに特長について紹介する。

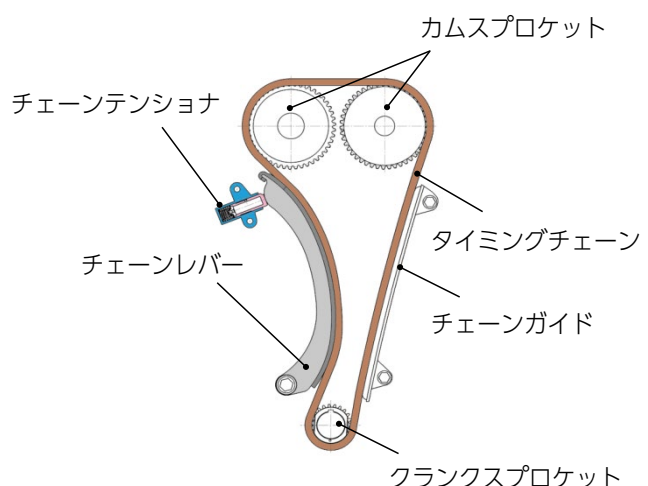


図1 チェーンシステムレイアウト例

* 自動車事業本部 自動車ユニット技術部
** 自動車事業本部 機能実験部

2. 構造

開発品および従来品の概略構造を図2, 3に示す。開発品では「3. 特長」で後述するオイルの循環構造と貯留構造を新たに採用している。貯留構造の採用で図3に示したノーバック機構を廃止し構造の簡素化を図るとともに、チェーンに張力を付与するため、プランジャを突出させるリターンズプリングを円錐ばね形状とすることで、全長を抑え小型化を可能とした。適用機種によりプランジャの推力が不足する場合は、図中に示すアシストスプリングを追加することで補うことも可能である。

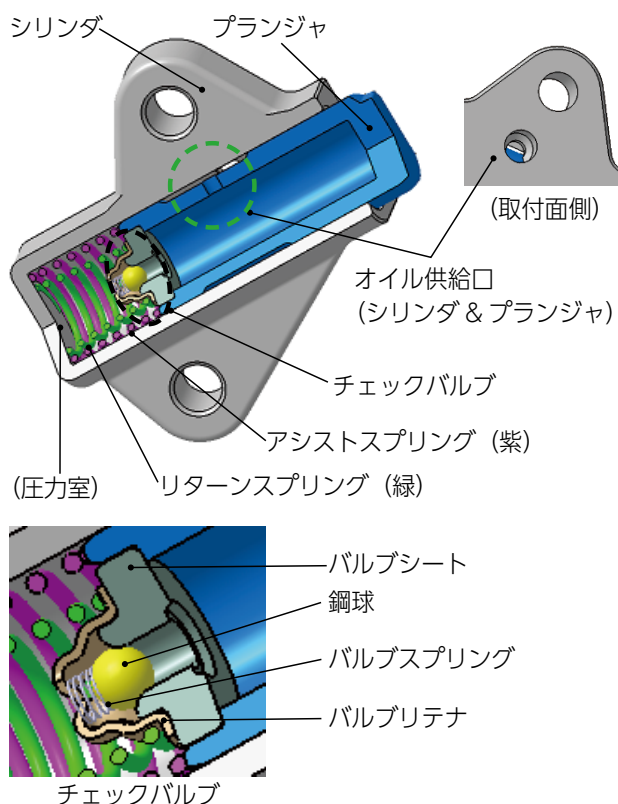


図2 低燃費対応小型チェーンテンショナの構造

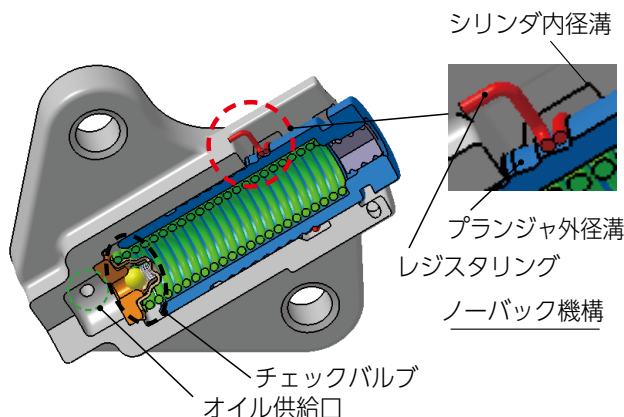


図3 従来型チェーンテンショナの構造

3. 特長

従来の当社チェーンテンショナとの比較による特長を以下に示す。

- (1) オイル循環構造によるオイル使用量の削減
：当社従来比 1/10 以下
- (2) オイル貯留構造により始動初期から減衰力を発生
：ノーバック機構の廃止
- (3) 内部構造の見直しによる小型化 (図4)
：18%の全長短縮, 10%以上の軽量化

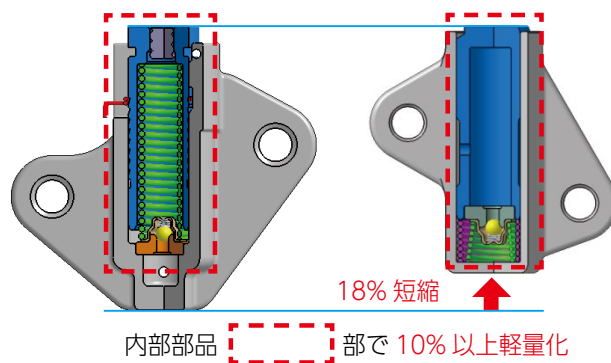


図4 小型・軽量化構造

3.1 オイル循環構造による低燃費化への貢献

従来チェーンテンショナへ供給されたオイルは、減衰力発生時にプランジャ外径とシリンダ内径のすきま (=リークすきま) よりテンショナ外部へ排出されていた。排出されたオイルはエンジン下部のオイルパンに溜まり、再度オイルポンプによりエンジン内の各部に供給されるが、オイルポンプとしては、テンショナで排出されるオイルも含めた供給能力が必要となる。

これに対し、開発品では減衰力発生時にリークすきまを通過したオイルを、プランジャ外周に設けた横穴から再びプランジャ内部に戻すことで、テンショナ外部へ排出されるオイル量 (=オイル使用量) を大幅に削減することができる (図5)。従来と同様に高い信頼性・耐久性を維持しながら、必要な供給オイル量の大幅な削減を可能にした。オイル使用量を削減することでオイルポンプの小型化が可能となり、ポンプ駆動に要する負荷を減らし、エンジンの低燃費化に貢献する。

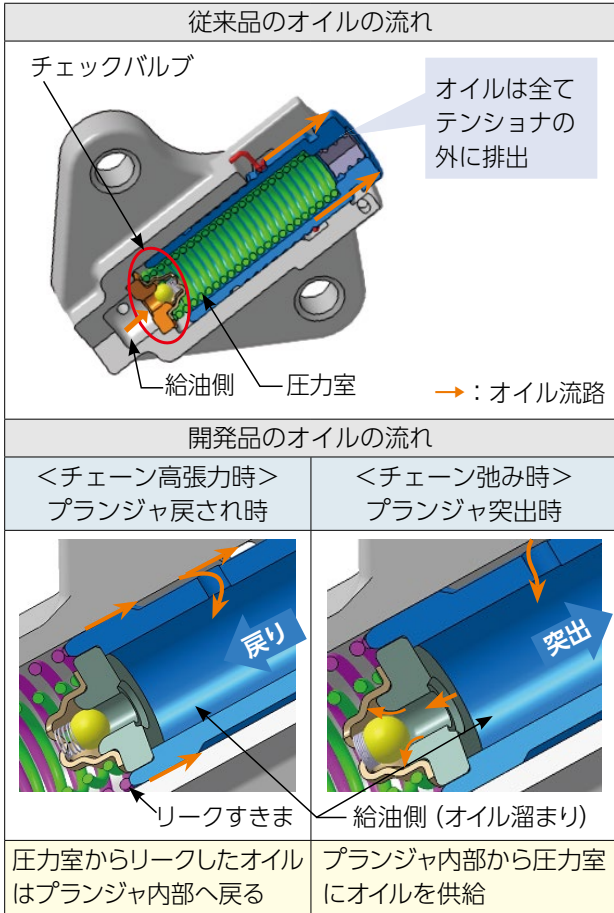


図5 オイル循環構造

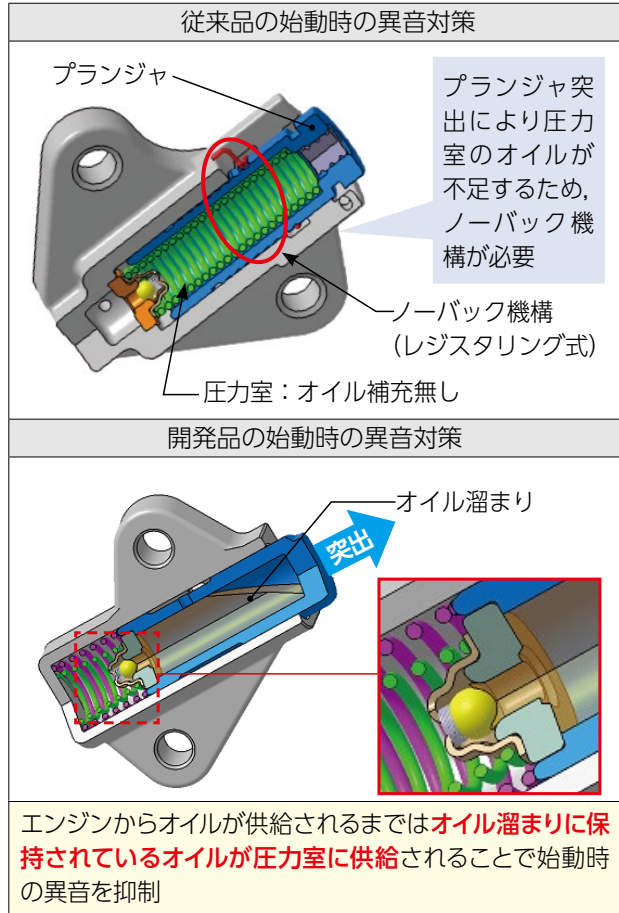


図6 オイル貯留構造

3.2 オイル貯留構造による構造の簡素化

油圧式のチェーンテンショナの場合、オイルポンプから供給されるオイルを用いてチェーンの張力調整に必要な減衰力を発生する。しかし、後述の通り、エンジン停止時にはオイルポンプの駆動が止まりオイルの供給も停止するため、始動時に再びチェーンテンショナへオイルが供給されるまでに遅れが生じる。従来のチェーンテンショナでは、上記背景からエンジン始動直後に数秒間チェーンの張力不足により発生する異音を抑制するため、機械的なノーバック機構を必要としていた。

開発品ではプランジャ内部にオイルを貯留する構造を採用することでノーバック機構を廃止した。本構造の採用により、エンジン始動時にはチェーンテンショナにオイルが供給されるまでの間、貯留したオイルを利用することでオイルポンプからの供給遅れを補い、始動直後から適正な減衰力を発生させることができる(図6)。従って、ノーバック機構を廃止しても異音の抑制が可能となる。

3.3 小型・軽量化設計

開発品では、内部仕様の見直しや構造の簡素化により従来品に対して全長の短縮やシリンダの小型・軽量化が可能となり、従来品比で軸方向長さ 18% 短縮、質量 10% 以上の軽量化を実現した。以下に採用例を示す。

1) 内部スプリングの短縮 (図7)

メインに円錐状のリターンズスプリングを採用することで全長を短縮した。また、外周側にアシストスプリングを設けることで幅広い推力設定を可能とした。

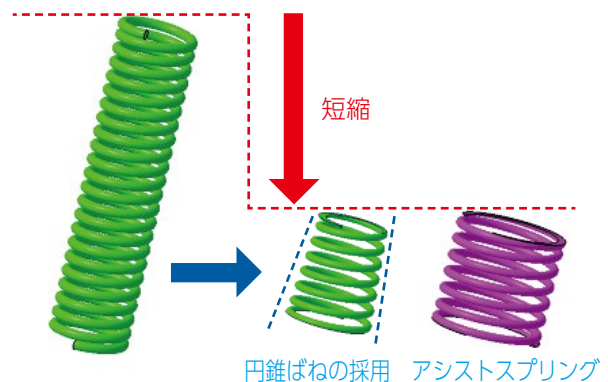


図7 スプリング形状

2) シリンダのスリム化

ノーバック機構を廃止したことで、レジスタリングやプランジャ外径に設けられた複数の溝が不要となった。シリンダ内径のレジスタリングを収容する溝も不要となり、シリンダの外径部は小径化が可能となった。

(補足)

①ノーバック機構 [従来品]

エンジン始動直後でチェーンテンショナへの給油がなく、油圧による減衰力が働かない状態においてもチェーンの振幅を抑えるための機構であり、NTNではねじの摩擦力を利用したバックラッシュ量が小さく静粛性に優れた鋸歯ねじ式と、リングと有段の溝による簡易構造のレジスタリング式の2つの機構をラインナップしている^{1) 2)}。

②チェックバルブの役割 (図8)

- ・チェーンが張りプランジャが押し戻され、圧力室内の圧力(a)がオイル供給圧(b)よりも高圧になると、チェックバルブが閉じて減衰力を発生する
- ・チェーンが弛みプランジャが突出し、圧力室内の圧力(a)がオイル供給圧(b)よりも低下すると鋼球が移動しオイルが圧力室内に流入する

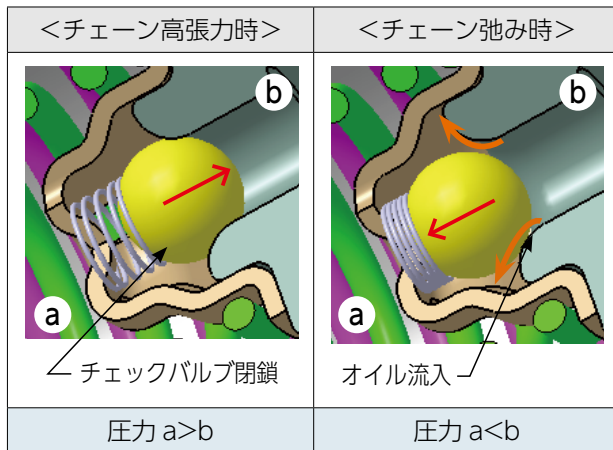


図8 チェックバルブの役割

③エンジン始動時のオイル供給の遅れ (図9)

通常、チェーンテンショナへのオイル供給は、エンジン下部のオイルパンのオイルをオイルポンプにより圧送されることで行われる。オイルポンプの回転はエンジンの回転と連動していることが多く、エンジン停止時はオイルの供給は行われない。そのため、停止後にしばらく放置されると、エンジン内部の配管中のオイ

ルはオイルパンまで落ち、再びエンジンが始動される際にはオイルは再度配管を通過してチェーンテンショナへ供給されるため、チェーンテンショナへのオイル供給に遅れが生じる。

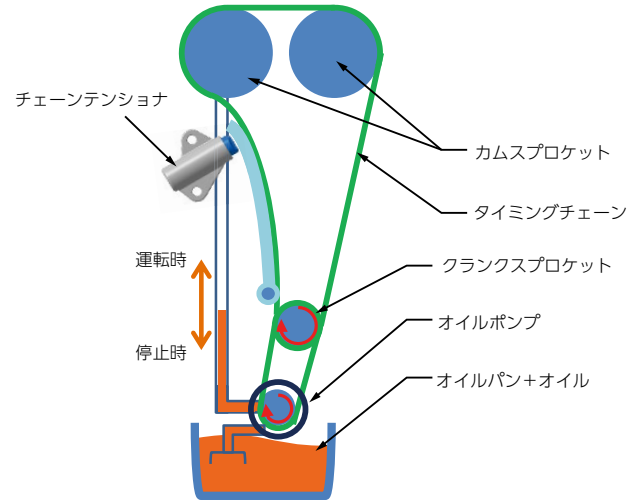


図9 オイル供給イメージ

4. 機能評価

4.1 オイル使用量の比較

開発品の特長であるオイル循環構造の評価として、実機での使用状況を模擬し、加振中のチェーンテンショナから排出されるオイル量 (= オイル使用量) を測定し従来品と比較した。なお、チェーンテンショナへの給油は行い、サンプルの姿勢は水平としている (図10)。以下に評価条件例と評価結果を示す。なお、それぞれのサンプルは同程度の減衰能力 (加振時の発生荷重) を有する仕様で比較した。

<評価条件例>

- ・加振振幅 : $\pm 0.2\text{mm}$
- ・加振周波数 : 100Hz
- ・給油圧 : 0.2MPa
- ・油種 : SAE 10W-30
- ・油温 : 35°C , 100°C
- ・オイル量測定 : 30s

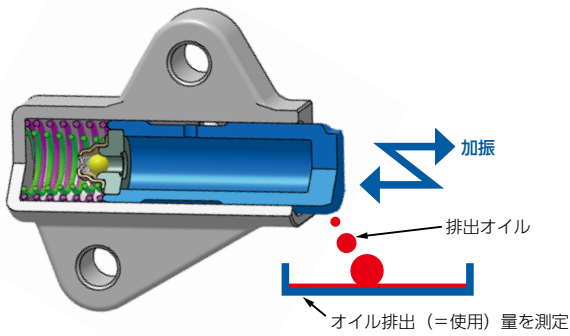


図 10 オイル使用量測定方法

同程度の減衰能力を有する従来品に対し、開発品ではオイル使用量を 1/10 以下に抑制できた (図 11)。

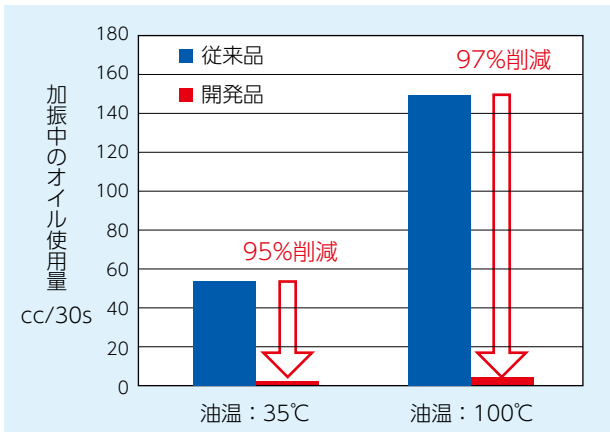


図 11 オイル使用量測定結果

4.2 エンジン始動時の評価

ノーバック機構廃止による影響およびオイル貯留構造の機能確認のため、実機エンジンを使用し始動時を模擬した挙動確認を実施した。本評価でプランジャの変位と入力荷重を確認することで、前述した始動時のオイル供給の遅れに対する可否を判断した。以下に評価結果例を示す。

エンジンの始動によりプランジャが急突出した状態 (図 12, ①⇒②の状態) でエンジンからのオイル供給がない状況においても、内部に貯留したオイルにより早期に油圧減衰力が発生し、チェーンに適切な張力を与えることでチェーンのバタつき (=プランジャ変位の幅) を抑制していることが確認できる。この結果より、ノーバック機構が廃止可能であることを確認できた。

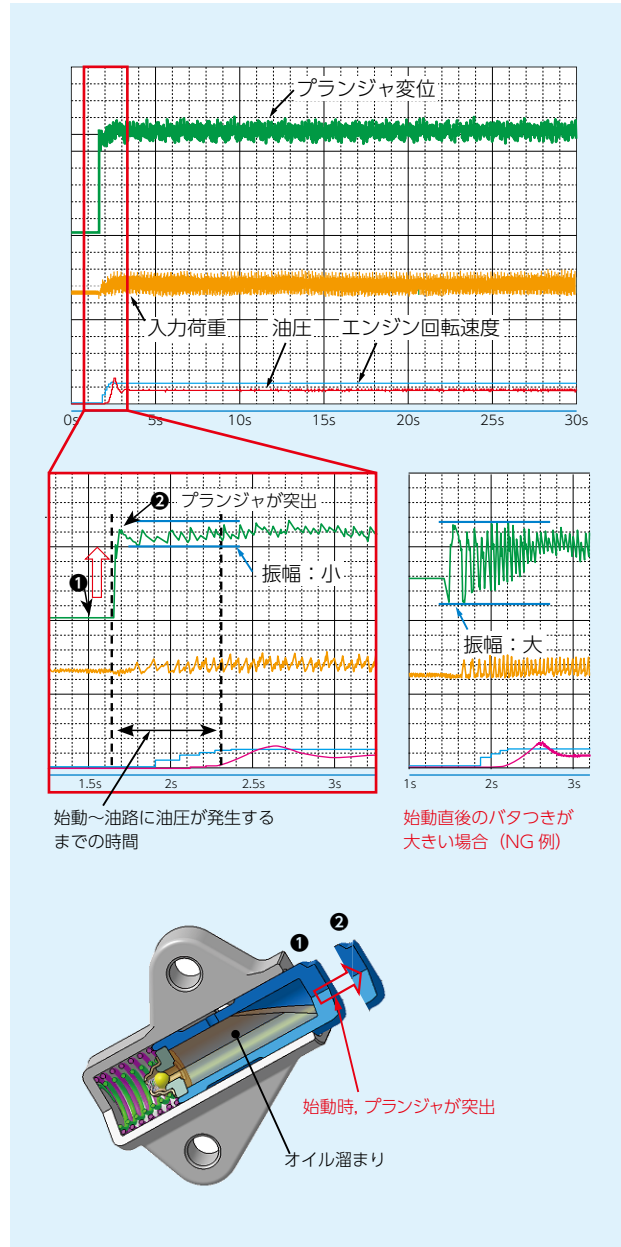


図 12 エンジン始動時の挙動確認結果

4.3 油圧減衰力特性

油圧式チェーンテンショナにおける基本的な減衰力の評価指標として、加振時のチェーンテンショナの動的な発生反力を評価する動特性評価を行った。動特性評価では、チェーンテンショナにオイルを供給し加振振幅を与えることで発生する荷重を確認するため、チェーンテンショナの内部諸元であるリークすきま、チェックバルブ、スプリング荷重などの各種パラメータの影響を確認することができる。また、エンジンでの使用状況を模擬した評価を台で行えることから、チェーンテンショナの開発評価として適している。以下に評価条件の一例を示す。

<評価条件>

- ・加振振幅 : ± 0.2mm
- ・加振周波数 : ~ 200Hz
- ・給油圧 : 0.3MPa
- ・油種 : SAE 10W-30
- ・油温 : 35℃

従来品との比較評価結果を図13に示す。開発品は従来品と同様に高周波域まで荷重が発生しており、追従性に問題はなく基本的な減衰能力に問題がないことも確認できた。なお、図13に示すMax値及びMin値は、各周波数におけるリサージュ図形（図14 振幅 - 発生荷重）よりMaxおよびMin値を求めた結果である。

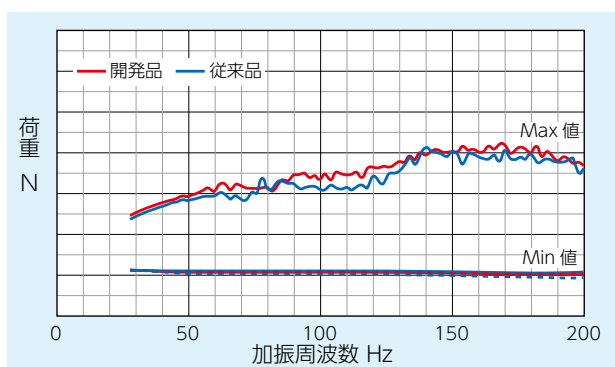


図13 動特性評価結果

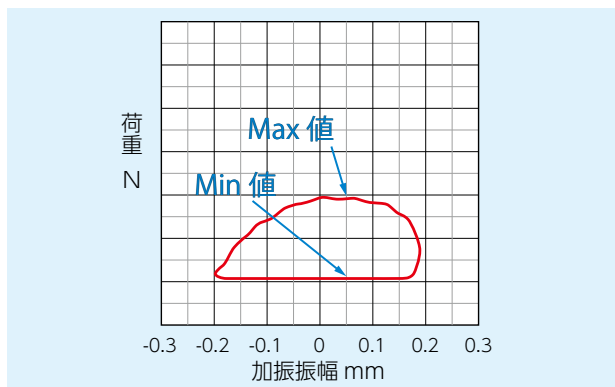


図14 リサージュ図形（開発品）

執筆者近影



鬼丸 好一
自動車事業本部
自動車ユニット技術部



阿形 郁身
自動車事業本部
機能実験部

5. おわりに

本稿では低燃費対応小型チェーンテンショナを紹介した。開発品はオイルをテンショナ内部で循環させる構造を新たに採用したことで、従来の機能を保持したまま、従来品に対しテンショナでのオイル使用量を1/10以下に削減でき、オイルポンプの負荷軽減によるエンジンの低燃費化に貢献するとともに、テンショナ自体の構造の簡素化や小型化による18%の全長短縮および10%の軽量化も両立することができた。

今後、更なる開発を進め、高機能化に対応した商品開発を推進する。

参 考 文 献

- 1) 佐藤誠二, オートテンショナの技術動向, NTN TECHNICAL REVIEW, No.79, (2011) 83-89.
- 2) 鬼丸好一, 中・大型二輪車エンジン向けチェーンテンショナ, NTN TECHNICAL REVIEW, No.85, (2017) 72-77.

超高角高效率固定式等速ジョイント CFJ - W

Fixed Constant Velocity Joint with Ultra High Angle and High Efficiency “CFJ-W”

船橋 雅司* Masashi FUNAHASHI
小原 美香* Mika KOHARA



今後、自動車部品のエネルギー効率向上や、自動車の付加価値向上の要求がますます高まる。NTN独自の技術を適用し、世界最高の最大作動角と高效率の両立を実現した固定式等速ジョイント『CFJ-W』を開発した。

In the future, it is increasingly required to improve the energy efficiency of automotive parts and the added value of automobiles. So, by applying NTN's proprietary technology, we have developed the fixed constant velocity joint "CFJ-W" with the highest maximum operating angle and high efficiency in the world.

1. はじめに

2015年のパリ協定において、世界各国は人為的起源の温室効果ガス排出によって引き起こされる世界平均気温の上昇を2℃未満に抑制することで合意した。自動車はエネルギー起源のCO₂排出のうち約18%を占めており、自動車部品のエネルギー効率の向上は急務となっている¹⁾。

一方で、近年自動車の居住空間拡大のため、ホイールベースの延長や、走行安定性向上のため、大径サイズのタイヤがトレンドとなっている。これらトレンドは、自動車の最小旋回半径に影響を与え、従来と同等以上の車両の小回り性を維持するには、タイヤの切れ角を大きくすることで対応している。

タイヤの切れ角は、車両設計上の制約や、タイヤ側に設置される固定式等速ジョイント（以下、固定式CVJ）の最大折り曲げ角度（以下、最大作動角）によって決まる。

そこで、本稿は自動車のCO₂排出量低減や居住空間拡大、走行安定性向上に貢献できる、世界最高水準の高效率と最大作動角を両立した固定式CVJ『CFJ-W』の特長と性能を紹介する。

2. ドライブシャフトについて

ドライブシャフトとは、エンジンからの出力（回転、トルク）をタイヤに伝えるための動力伝達部品であり、入力軸（デファレンシャルギア軸）と出力軸（タイヤ軸）が角度を付けて回転しても、常に等速で滑らかにトルク伝達をする駆動軸のことである。一般的に作動角は大きくとれるが軸方向にスライドしない固定式CVJと、作動角は小さいがスライド可能なしゅう動式CVJをシャフトで連結して構成する（図1）。

NTNは、1997年には、軽量・コンパクトで高效率な『EBJ（最大作動角47度²⁾』をいち早く開発し、2012年には、高角固定式CVJとして、軽量・コンパクトな『VUJ（最大作動角50度）』を量産開始、また、同年、NTN独自設計によりEBJに対しトルク損失率を半減した『CFJ（最大作動角47度³⁾』を発表し、固定式CVJの高效率化と高角化に取り組んできた。

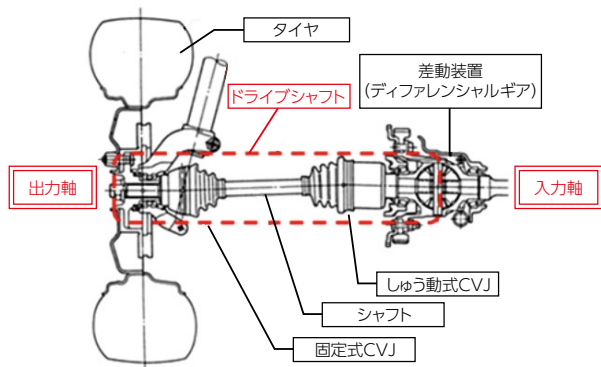


図1 ドライブシャフトの配置

3. CFJ-Wの構造と特長

3.1 構造

CFJ-Wは、基本的には既に開発済みのCFJの構造を踏襲しており、ボールの軌道溝（以下、トラック）を備えた内輪・外輪、回転トルクを伝達する8個のボール、及びボールを保持するケージ、最大作動角55度に追従できるブーツで構成される（図2）。

*自動車事業本部 CVJ開発部

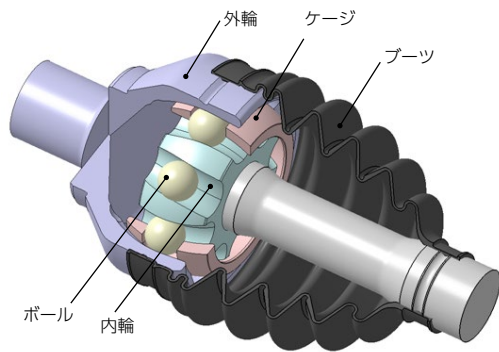
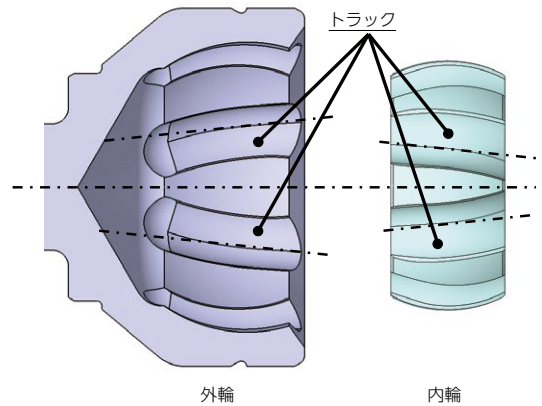


図2 CFJ-Wの構造

3.2 特長

NTN 独自技術のスフェリカル・クロスグループ構造 (図3) を採用することで、トルク負荷時に CVJ 内部に発生する力 (内部力) を低減することができるとともに、負荷容量を向上できる。それによって、厳しい使用条件下においても内部部品をなめらかに作動でき、従来の高角固定式 CVJ である VUJ と外径、質量が同等レベルのまま、世界最高水準の最大作動角、伝達効率を実現している (表1, 図4)。

併せて、最大作動角拡大に伴い、付属部品であるブーツの形状を工夫することで、ブーツ外径を従来品と同等に維持しながら、高角に耐える品質を確保した。



特長1: 内輪と外輪の円弧状トラックを軸方向に傾斜させ、隣合うトラックを鏡面対称に配置
 特長2: 内輪トラックと外輪トラックの傾斜を互いに交差させ、交点にボールを配置

図3 スフェリカル・クロスグループ構造

表1 VUJとCFJ-Wの比較

項目	従来品 VUJ92	開発品 CFJ92W
最大作動角度	50	55
外輪外径 mm	φ 87.8	φ 88
ボール個数 個	6	8
ボール径 mm	φ 17.462	φ 15.081
質量 kg	1.64	1.60
トルク損失	—	従来品に対して 50%以上低減

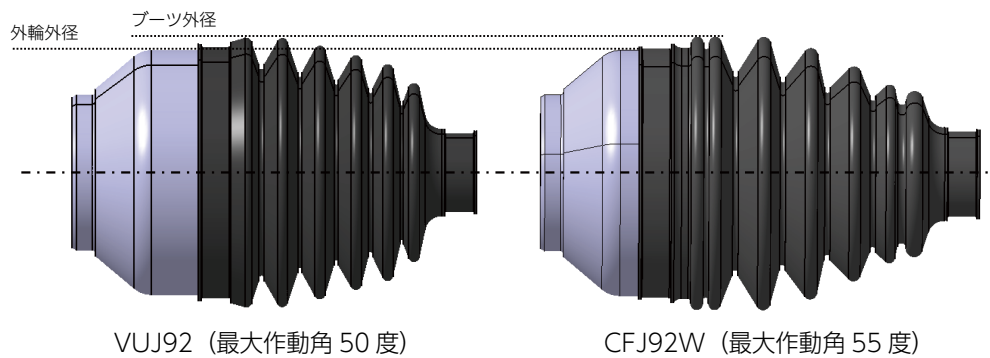


図4 VUJとCFJ-Wの外観比較

3.3 50度を超える最大作動角と高效率の両立

従来品の EBJ や VUJ の構造は、**図 5** のように、内輪・外輪のトラックを円弧状に形成し、それら円弧の中心をジョイント中心より互いに反対方向にオフセットさせている。一方、開発品は、**図 6** のように、内輪と外輪の円弧状トラック中心をジョイント中心とオフセットさせず軸方向に傾斜させ、隣り合うトラックを鏡対称に配置し、内輪と外輪トラックの傾斜を互いに交差させている。これにより、等速ジョイントの機能を確保するとともに、50度を超える最大作動角と高效率の両立に大きく貢献している。

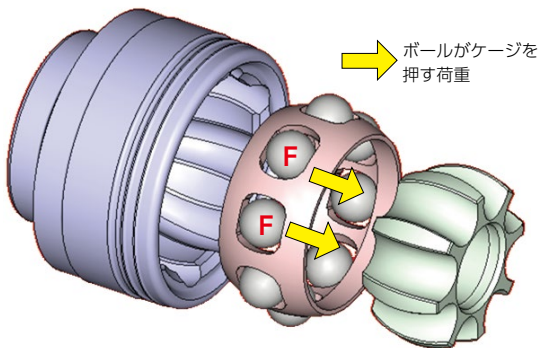


図 5 EBJ(従来品)の構造,内部力

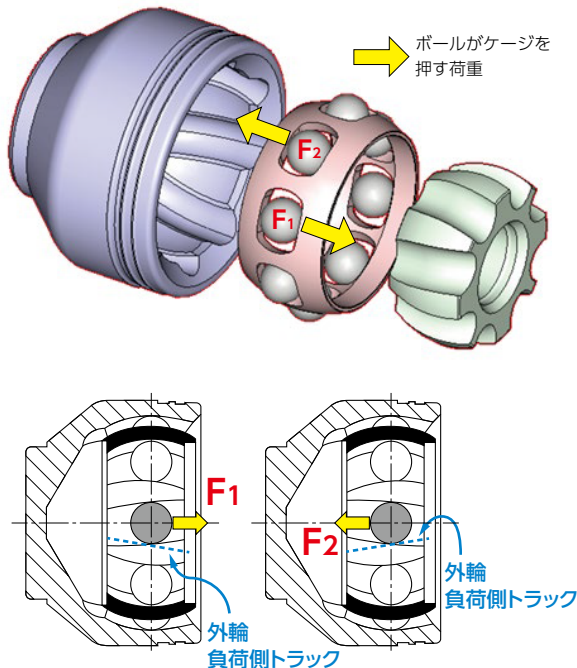


図 6 CFJ, CFJ-W の構造,内部力

1) CVJ 内部に発生する力 (内部力)

上述したように開発品は隣り合う軸方向に傾斜した円弧状トラックを鏡対称に配置している。その効果によって隣り合うボールがケージを押す荷重方向が逆向きとなるため、互いに相殺され、ケージの軸方向変位が抑制される (**図 6**)。この効果により、ケージと外輪、およびケージと内輪間に発生する球面部の接触力が大幅に低減し、トルク損失率を大幅に改善することができる。

また、CVJ の作動角を大きくした場合、同じトルクが入力されても、内部に発生する荷重が大きくなること⁴⁾が知られている。その荷重の増加に伴い、内部部品への負荷が大きくなり、発熱量増加や強度低下が発生する。開発品は、高作動角域においても、スフェリカル・クロスグループ構造により内部に発生する接触力を低減することができるため、**図 7** の球面部接触力の解析結果が示すように、開発品は常用域ではほぼ接触力が発生しない。最大作動角付近の高角域でも開発品は従来品に対し接触力が低減し、50度を超える領域の機能確保に貢献している。

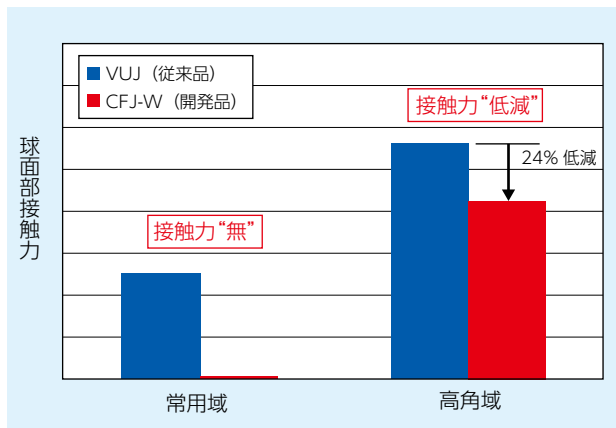
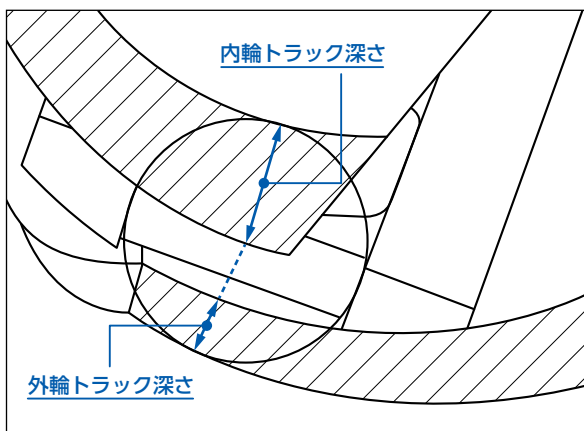
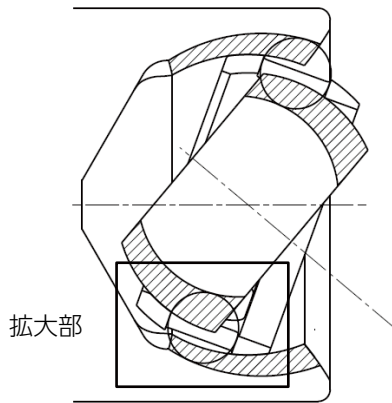


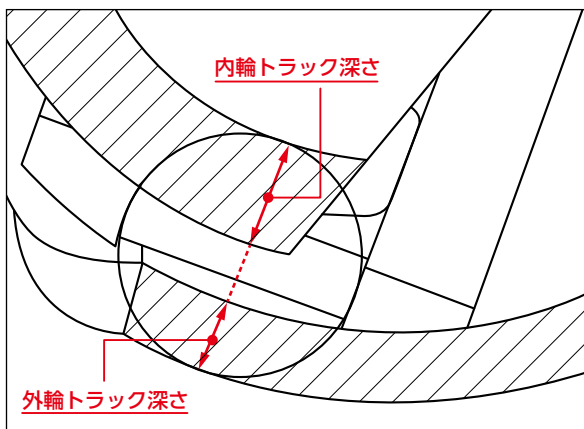
図 7 球面部接触力の解析結果

2) 負荷容量

50度を超える領域の最大作動角を実現するためには、内部部品の変形抑制が重要となる。内部部品の変形は、主に高作動角及び高トルク入力時にボールとトラックの接触により発生するため、高作動角域でのトラック深さを確保することが必要となる。開発品はスフェリカル・クロスグループ構造により、従来品と異なり内輪と外輪の円弧状トラック中心をジョイント中心と一致させることができる。そのため従来品では高作動角域で機能的にネックとなる外輪のトラック深さ減少に対し、開発品はどの領域においてもトラックの深さを一様に確保することができ (**図 8**, ハッチング部)、高作動角域の負荷容量が向上する。



EBJ(従来品) 拡大部



開発品 拡大部

図8 トラック深さの比較

3) グリース

NTNでは、これまで様々な高性能グリースの開発に取り組んでおり、CVJの種類や用途により使い分けている。開発品の50度を超える最大作動角と高効率を実現するためには、内部力低減だけでなく、潤滑性の改善も必要となる。

開発品に適用したグリースは、グリース流動性に優れる増ちょう剤や、低摩擦を狙った添加剤の最適化により、**図9**に示すように、SRV（振動摩擦摩耗）試験において従来グリースに対し、大幅に摩擦係数が低減する。従来品EBJによるトルク損失試験結果（**図9**）においても、汎用グリースに対し22%改善することができ、開発品に本グリースを適用することで、更にトルク損失と発熱を改善することができる。

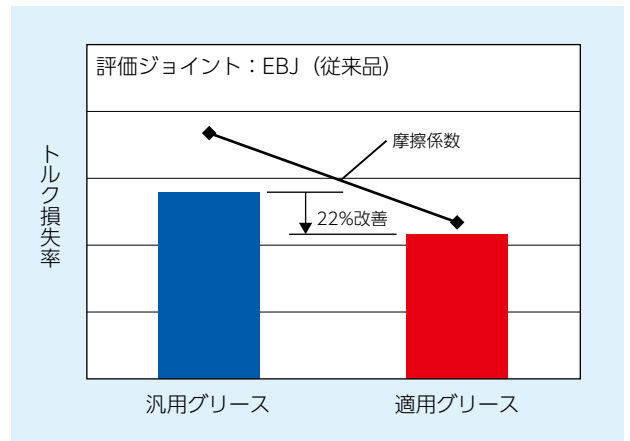


図9 グリースによるトルク損失率比較

4) 機能評価

開発品CFJ-Wと従来品VUJの動的高角振り強度評価結果を**図10**、伝達効率（トルク損失率）評価結果を**図11**、温度上昇特性（ジョイント表面温度）を**図12**に示す。

動的高角振り強度評価では、最大作動角付近の高角条件にて同等強度である。伝達効率評価では、高効率固定式CVJであるCFJと同等レベルであることが確認され、現行高角固定式CVJであるVUJに対し、どの角度領域においても50%以上トルク損失率を低減できる。温度上昇特性においても、VUJに対しジョイント表面温度を55%低減することができる。

これらの結果から、常用域で世界最高水準の高効率、低発熱性と、作動角50度を超える厳しい使用条件下で十分な強度を持つことがわかる。

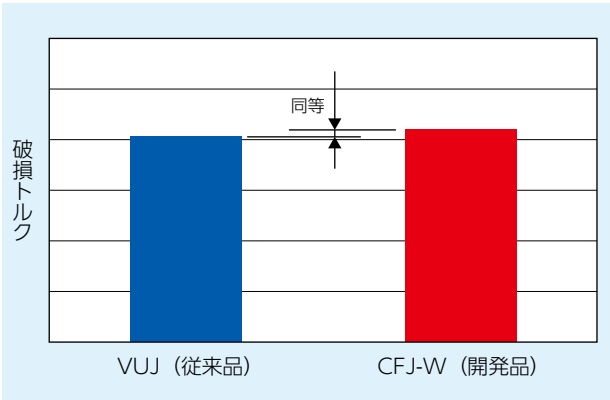


図 10 動的 high 角 振り 強度 の 比較

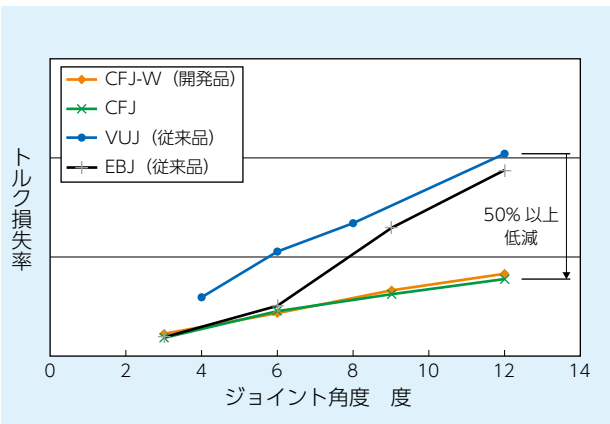


図 11 トルク損失率比較

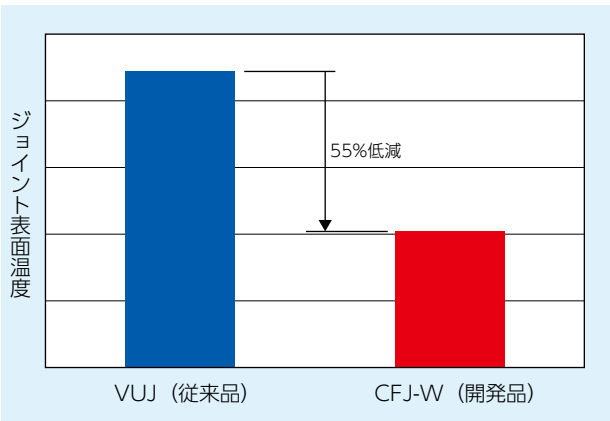


図 12 ジョイント表面温度の比較

4. CFJ-W 専用樹脂ブーツの開発

本ジョイントは、自動車の前輪用ドライブシャフトとして世界最大の作動角 55 度を達成したため、適用するブーツもその作動角に対応する必要がある。従来の高作動角対応ブーツ（50 度仕様）より更に高角の作動角を要求される本ブーツは、その形状に様々な改良を施している。

超高作動角を達成した CFJ-W であるが、そのブーツに要求される必要機能及び性能は他の固定式用ブーツと同様であり、下記①～③項である。

- ①耐久性、シール性 : 従来品と同等
- ②コンパクト化 : 従来品と同等
- ③バンドとの干渉抑制 : 最大角を取ってもバンドと干渉しない

4.1 耐久性

耐久性の確保には適正なブーツ膜長が必要である。膜長を確保する手段としては、山谷数を増やす、山径を大きく谷径を小さくするなどが挙げられる。しかし、その背反として、車両取付け時のブーツ占有スペースの増大やブーツ成形性への影響、蛇腹部山同士の摩擦増大、谷部とシャフトの干渉、蛇腹折り畳み時のバンドへの軸方向荷重の増大などがある。本ブーツは、従来と同様の大きさの山谷を設定するとともに、複数の小型山谷を小径側と大径側に配置して（図 13 丸印部）、上記問題点を解決した。また、高作動角を取るにより蛇腹の山同士の接触面圧が増加するため、摩擦の防止を考慮した材料選定を行った。結果として、本ブーツは従来ブーツと遜色のない耐久性を達成した。

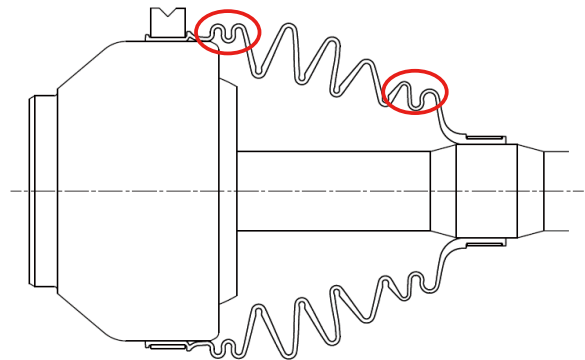


図 13 ブーツ断面図（作動角 0 度）

4.2 コンパクト化及びバンドとの干渉抑制

等速ジョイント用ブーツは、高作動角が取れる屈曲性と同時に、ジョイント及びその周辺部品との干渉を考慮した設計が必要である。本ブーツは蛇腹部の山谷比の最適設計を行い、高作動角下においても省スペース化を達成している。また、外輪外径上に小型山谷を含んだ蛇腹部がバンドの加締め部に干渉することなく折り畳む設計としたことで、バンドによるブーツ損傷を防止している（図 14）。

加締め部

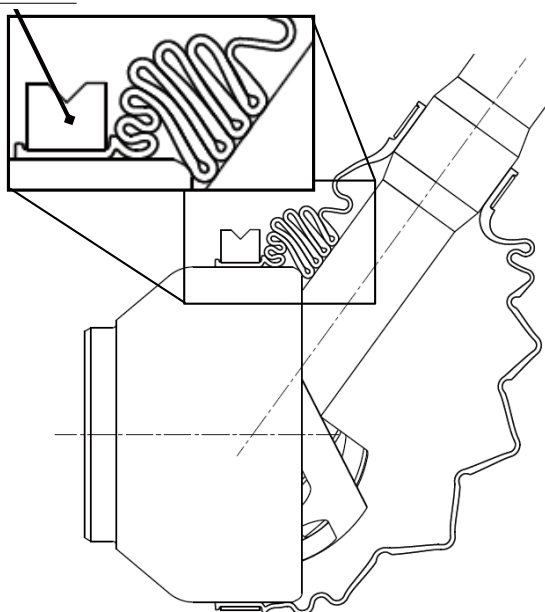


図 14 ブーツ断面図（作動角 55 度）

参 考 文 献

- 1) IEA, CO₂ emissions from fuel combustion, (2018) .
- 2) 曾根啓助, 穂積和彦, 高性能コンパクト固定式等速ジョイント (EBJ), NTN TECHNICAL REVIEW, No.66, (1997) 28-31.
- 3) 藤尾輝明, 次世代高効率固定式等速ジョイント (CFJ), NTN TECHNICAL REVIEW, No.81, (2013) 64-67.
- 4) 葉山佳彦, 等速ジョイントの動的内部力解析, NTN TECHNICAL REVIEW, No.70, (2002) 36-43.

5. おわりに

本稿では、2012年に発表したNTN独自商品「CFJ」をベースに、各 부품の負荷容量向上、潤滑性改善を行うことで、「世界最高の最大作動角 55 度」と「従来品 (VUJ) 比でトルク損失率約 50% 低減」の両立を実現した「CFJ-W」の特長と性能について紹介した。

本開発品は、例えば後輪駆動ベースの4輪駆動車の前輪に適用することで、後輪駆動車と同等の最小回転半径を実現することができるとともに、車両重量増加に伴う燃費への悪影響を低減できる機能を備えている。

今後、ますます要求が高まる自動車の高機能化とCO₂排出量低減を両立させる世界最高水準の固定式CVJとしてグローバルに市場展開していきたい。

執筆者近影



船橋 雅司

自動車事業本部
CVJ 開発部



小原 美香

自動車事業本部
CVJ 開発部

プロペラシャフト用小型しゅう動式等速ジョイント HEDJ - P

Compact Plunging CVJ for Propeller Shaft “HEDJ-P”

小林 正純* Masazumi KOBAYASHI



プロペラシャフト用等速ジョイント (Constant Velocity Joint, 以下CVJと記す) は、古くは1970年代より4WD車や後輪駆動 (FR) 車へ適用されているが、更なる小型・軽量化のニーズに応えるべく、プロペラシャフト専用の小型しゅう動式CVJ「HEDJ-P」を開発した。本稿では、その特長と性能について紹介する。

Constant velocity joints for propeller shaft have been applied to 4WD and FR vehicles since the 1970s. And further small size and light weight are desired to CVJ for propeller shaft.
This article introduces the new product “HEDJ-P” for propeller shaft.

1. はじめに

プロペラシャフトは4WD車などに使用され、トランスミッションの回転を車両の前・後駆動軸に伝達する役割を果たし、その適用例を図1に示す。また、プロペラシャフト用CVJは、NVH(騒音、振動、乗り心地)を重視する近年の高級乗用車やSUV(Sport Utility Vehicle)への適用が増加しており、車両設計の自由度向上や低燃費化のために更なる小型・軽量化のニーズがある。

NTNでは、小型・軽量のプロペラシャフト用しゅう動式CVJ「HEDJ」を量産しているが、更なる小型・軽量化のニーズに応えるべく、プロペラシャフト専用設計とした「HEDJ-P」を開発した。HEDJ-Pは、世界最高水準の小型・軽量化を達成しており、以下にその特長と性能について紹介する。

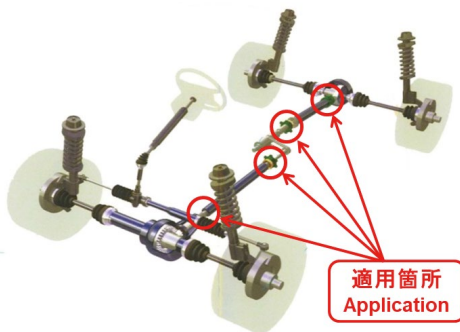


図1 プロペラシャフト用CVJの適用箇所

2. プロペラシャフト用CVJの特長¹⁾⁻³⁾

NTNのCVJが、自動車のプロペラシャフトに初めて採用されたのは、1970年代の前半である。その後しばらく需要停滞期もあったが、1980年代の後半を境に、自動車の高機能化、多様化などのニーズの高まりに伴い、需要が大き

く拡大してきた。とりわけ駆動系が複雑化する4WD車の静粛性、快適性向上を目的に、従来のカルダンジョイント(十字軸を使った不等速ジョイント)に代わって採用されてきた。NTNのプロペラシャフト用CVJの製造年表を図2に示す。

CVJの主要な使用条件は、回転数、負荷トルク、作動角の3つである。プロペラシャフトは、トランスミッションとディファレンシャルの間の動力伝達を行い、ドライブシャフトは、ディファレンシャルとホイールの間の動力伝達を行う部品である。プロペラシャフトは、大きく減速されるディファレンシャルの手前に配置されるため、ディファレンシャルの後方に配置されるドライブシャフトに比べて、回転数は高く、負荷トルクは小さくなる。また、プロペラシャフトのレイアウトや要求機能の違いから、ドライブシャフトほど大きな作動角を必要としないのが一般的である。

NTNでは、多様化するプロペラシャフト構造、自動車の要求性能に基づき、対応できるプロペラシャフト用CVJの種類とサイズのラインナップを取り揃えている。当初は、ドライブシャフト用CVJ(BJ/DOJ/TJ/LJ)と共通設計としながらも、高速回転の市場要求に対し、ジョイント内部すきまの変更や表面処理を施したCVJをプロペラシャフト用として提供してきた(従来シリーズ)。近年では、小型・軽量化要求に対応するため、ベースとなるドライブシャフト用CVJを、小型・軽量タイプのEシリーズ(EBJ/EDJ/ETJ)に変更し、ハイスピード対応のHシリーズも充実させ、あらゆる車両への対応を可能とした(図3)。

また、しゅう動式CVJは要求されるしゅう動量、外径サイズ、特性、使用条件に応じて使い分けを行う。Hシリーズしゅう動式CVJの主な基本性能、特性比較を表1に示す。

*自動車事業本部 CVJ開発部

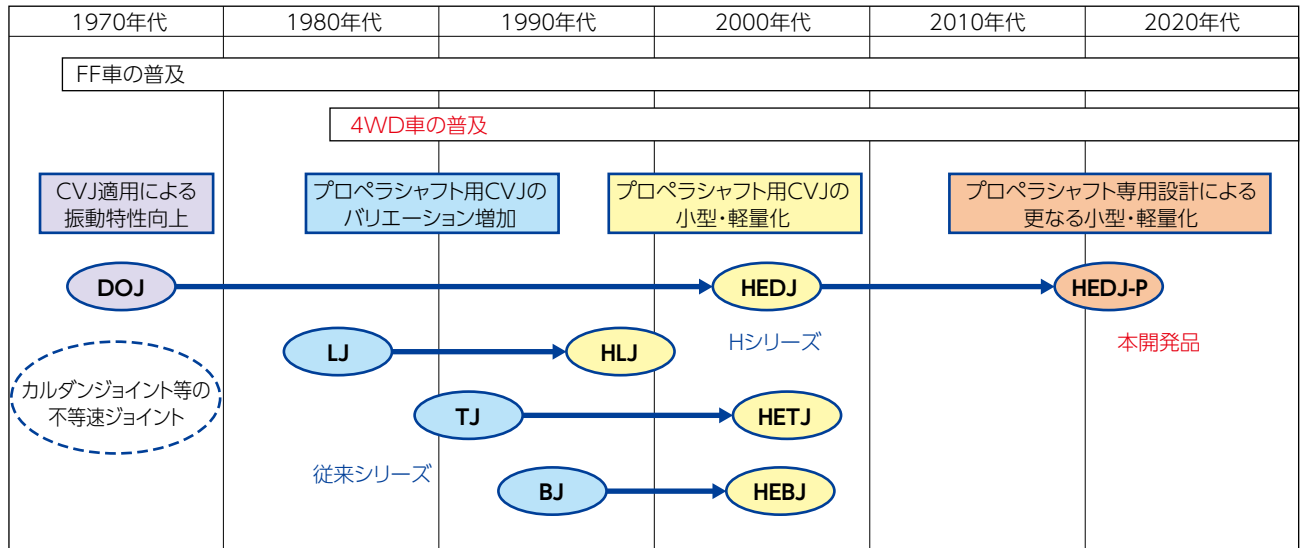


図2 プロペラシャフト用CVJの製造年表

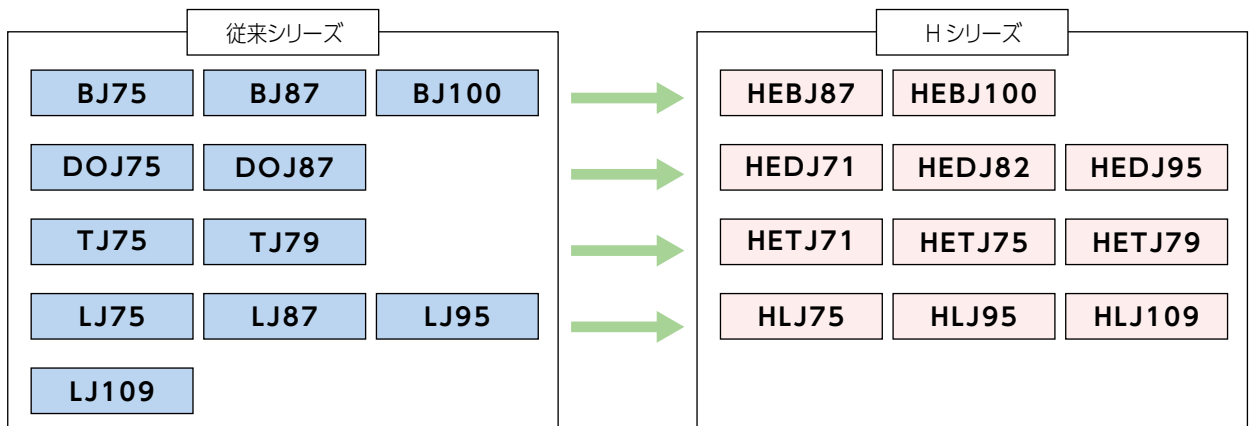
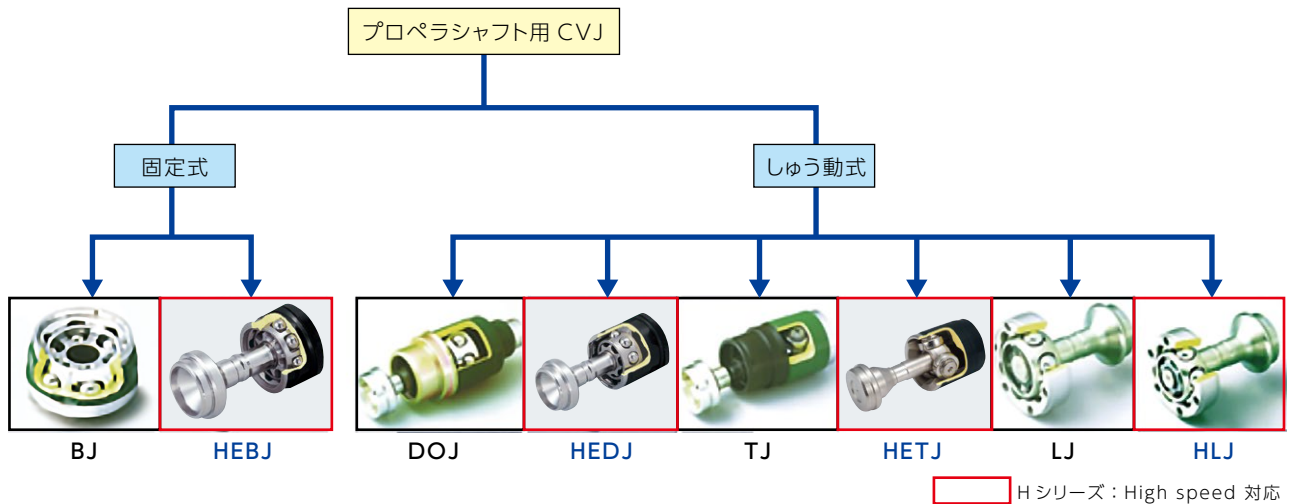





図3 プロペラシャフト用CVJのタイプとサイズ

表1 各種しゅう動式 CVJ の特性比較

		しゅう動式		
		HEDJ	HETJ	HLJ
				
しゅう動量		+++	+++	++
許容角		+++	+	++
高速運転		++	+	+++
発熱量		++	+++	+
NVH 特性	しゅう動抵抗	++	+++	+
	誘起力	8次	3次	6次・3次
ガタ	径方向	++	+	+++
	回転方向	++	+	+++

+++：優れる ++：やや優れる +：普通

3. 開発品の構造と特長

今回開発した HEDJ-P は、従来品 HEDJ をベースにプロペラシャフト専用として内部仕様を再設計し、更なる外輪の小径化や内輪の薄肉化などを追求した。

HEDJ は、表 1 に示すように NVH 特性のバランスが比較的優れており、またしゅう動量と許容角が大きいことから車両設計の自由度を高めることができ、車両搭載性の面でも優位である。そのため、特に使用角度が大きい SUV に適しており、多くの車種で採用されていることから、開発ベースに選定した。

3.1 構造

ジョイント本体は、図 4 に示すように従来品 HEDJ と同じく、内輪、外輪、ケージと 8 個の鋼球で構成される。

また、ケージは、車両の微振動を吸収できるように、従来品と同様に RPCF ケージを採用している。RPCF ケージの構造を図 5 に示す。RPCF ケージは、鋼球とケージポケット間にすきまを設け、かつ、内輪とケージが軸方向に相対移動ができるように、ケージ内径部に円筒部分を設けている。

これにより、車両の微振動をジョイント内部で吸収することができ、振動を遮断できる特長がある。

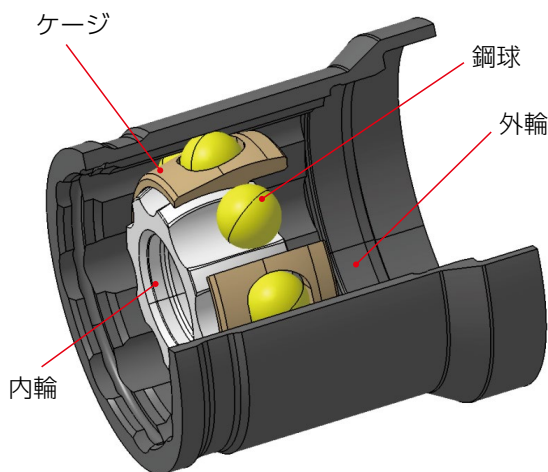


図 4 開発品の構造

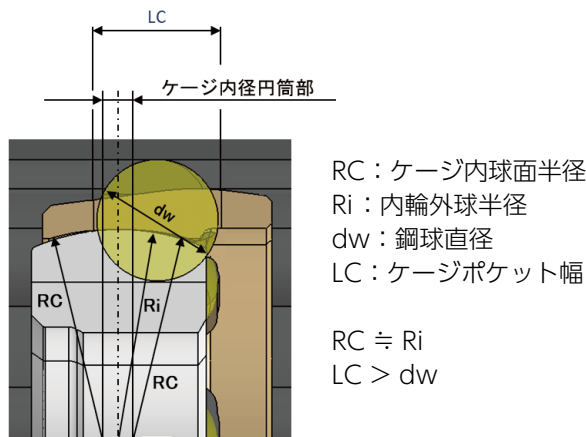


図 5 RPCF ケージの構造

3.2 小型・軽量化

従来品 HEDJ は、内輪およびケージをドライブシャフト用の EDJ と共用としているため、ジョイント単体（ブーツを取り付けない状態）で 25 度の最大作動角となる。

一般的にプロペラシャフト用 CVJ は、ブーツを取り付けたプロペラシャフトアセンブリの状態では、最大作動角は 10 度程度であり、ジョイント単体としても最大作動角は 15 度程度取れば十分である。

そこで、開発品はプロペラシャフトに必要な機能に特化させ、最大作動角を 15 度に限定することにより、外輪外径・PCD（ボールピッチ円直径）の小径化、内輪の薄肉化、内輪・ケージの幅短縮化を図り、その結果、HEDJ に対して使用領域内で同等性能を確保しながら 6% の外径コンパクト化、17% の軽量化を達成した。

従来品 HEDJ との比較を図 6 に、外径比較を図 7 に、質量比較を図 8 に示す。

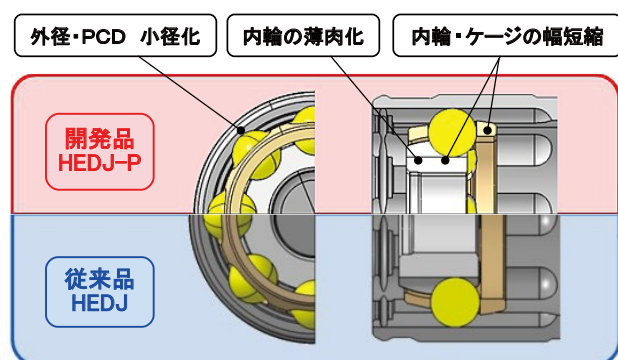


図 6 開発品と従来品の比較

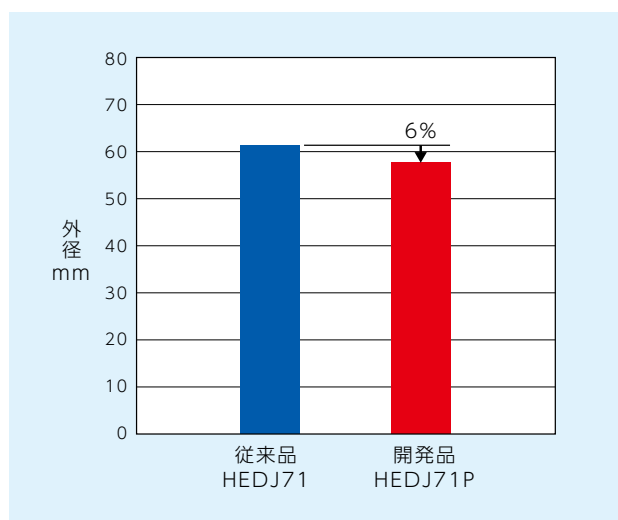


図 7 外径比較

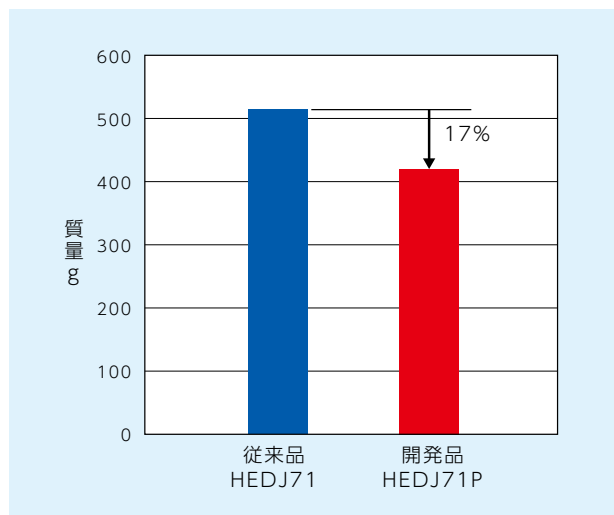


図 8 質量比較

3.3 機能評価

開発品 HEDJ71P の静振り強度試験結果を図 9 に示す。

HEDJ71P は、開発目標値に対して十分な静振り強度を有している。

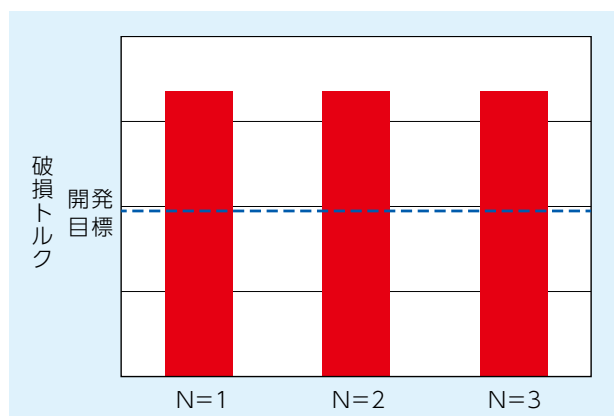


図 9 静振り強度試験結果（取付角 15 度）

耐久試験結果の一例を図 10 に示す。

HEDJ71P は、従来品に対して十分な耐久性を有している。

CVJ タイプ	運転時間
開発品 HEDJ71P	○ ○ ○
従来品 HEDJ71	○ ○ △

○：異常なし △：不具合小

図 10 高速回転耐久試験結果

次に、高速性能の指標として用いられる温度上昇特性を図 11 に示す。

HEDJ71P は、従来品と比較して 30% 程度、温度上昇量が小さくなっており、高速性能に優れることがわかる。

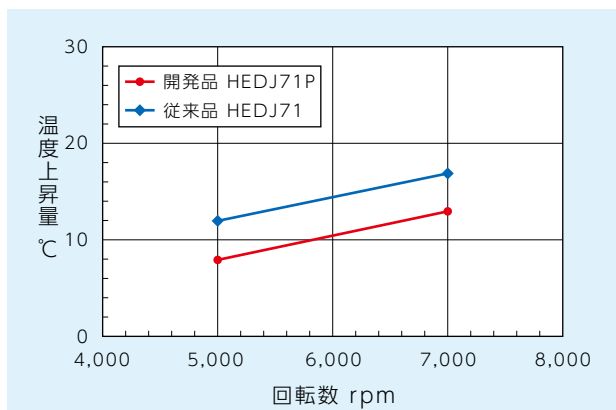


図 11 温度上昇特性結果 (内輪駆動時)

その他の性能評価結果を表 2 に示す。全項目において従来品と同等の性能を有している。

表 2 その他の性能

評価項目	開発品
しゅう動抵抗	HEDJ と同等
誘起力	HEDJ と同等
回転方向ガタ	HEDJ と同等
径方向ガタ	HEDJ と同等
折曲げトルク	HEDJ と同等

3.4 伝達効率解析結果

世界最高水準の小型・軽量化を達成した HEDJ の更なる改良という厳しい開発課題に対して、設計段階より機構解析による内部設計の最適化を行ったので紹介する。

プロペラシャフト用 CVJ は、高速回転で使用されるため、ジョイントの発熱を抑制することが重要課題となる。ジョイントの発熱対策としては、内部部品の表面処理や抑温グリースの適用などが行われるが、ジョイントの最適設計化で抑温対策ができれば、プロペラシャフトのより一層の高性能化が実現する。

ジョイント内部の温度上昇は、内部部品間の摩擦力に起因するため、機構解析を使ってジョイント内部のトルク損失の解析を実施した。その結果を図 12 に示す。

開発品は、従来品よりもトルク損失率が約 45% 小さくなっていることがわかる。一方、図 11 に示した実際の温度上昇試験においても、温度上昇が小さい結果が得られていることと定性的に一致する。

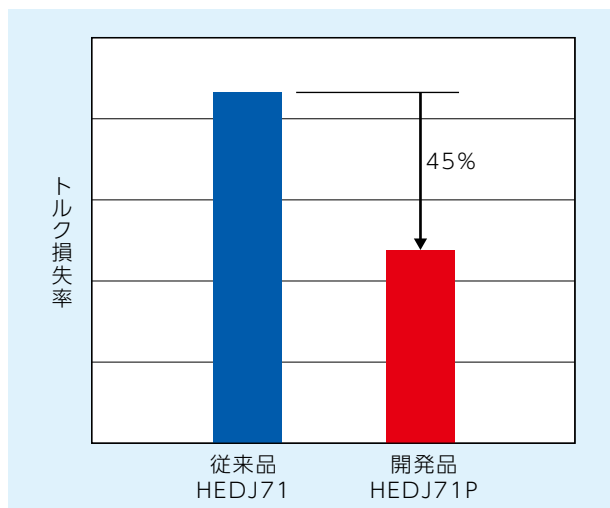


図 12 トルク損失率の計算結果 (内輪駆動時)

4. おわりに

本稿では、プロペラシャフト用小型しゅう動式 CVJ [HEDJ-P] の構造、特長、性能について紹介した。

近年の SUV や 4WD 車の人気に伴い、プロペラシャフト用 CVJ の需要は引き続き増加傾向にあり、世界最高水準の小型・軽量化を実現した本開発品は、車両設計の自由度向上や低燃費化、高速化に貢献でき、今後グローバルに採用されていくものと期待する。

参考文献

- 坂口明夫, 潮田佳雅, 宮田真秀, 他
プロペラシャフト用各種等速ジョイント
NTN TECHNICAL REVIEW No.66, (1997) 37-44.
- 小林智茂, 藤尾輝明
プロペラシャフト用 E シリーズ等速ジョイント
NTN TECHNICAL REVIEW No.73, (2005) 88-91.
- 高部真一
等速ジョイントの歴史
NTN TECHNICAL REVIEW No.85, (2017) 40-45.

執筆者近影

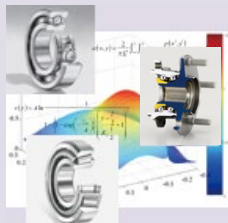


小林 正純

自動車事業本部
CVJ 開発部

自動車の低燃費化に寄与する転がり軸受の新しい技術

New Technology of Rolling Bearings Contributing to Low Fuel Consumption of Automobiles



川村 隆之* Takayuki KAWAMURA
大平 晃也* Kouya OOHIRA

藤原 宏樹* Hiroki FUJIWARA

自動車の低燃費化に対し、転がり軸受には低トルク化および小型軽量化が求められる。また、電動化が進む中で、高速化、電食回避なども重要である。
本稿では、これらに対する具体的な新しい対応技術について、潤滑、数値解析、材料の観点から解説する。

To reduce the fuel consumption of automobiles, rolling bearings are required to be lighter, smaller and have lower torque. Additionally, for electric automobiles, the rolling bearings that are used at high speed rotation and prevent electrolytic corrosion are also required.
In this paper, the technologies for these requirements are explained from the viewpoints of lubrication, numerical analysis, and materials.

1. はじめに

近年、自動車はエンジンが動力源である従来車両から、エンジンとモータとを組み合わせたハイブリッド自動車 (HEV, PHEV) や、水素燃料電池自動車 (FCV)、モータだけで駆動する電気自動車 (BEV) へと開発の対象が大きく変化している。その背景には大気汚染や地球温暖化などの環境問題に端を発した全世界的な燃費規制の強化がある。車両走行時の排出 CO₂ 削減に対する重視は依然と続き、2021 年に向けて、日米欧中などでは厳しい燃費規制が施行される。そのため、自動車メーカーや自動車部品メーカーが日々競って次々と新しい技術をグローバル市場に投入している。一方、HEV や PHEV ではエンジンが使われるため、燃費・電費向上も重要な課題である。

上記の現状を踏まえ、本稿ではこのような動向を支える技術として、転がり軸受における“自動車低燃費化に寄与する新しい技術”について紹介する。

2. 低燃費化に対する転がり軸受の課題

自動車 1 台あたりに使用される軸受の数は、約 100 個から 150 個で、転がり軸受は安全で快適な運転に欠かせない部品のひとつである。転がり軸受の使用部位は、エンジン周辺部、トランスミッション、補機類の各種モータ、駆動系アクスルユニットなど、多岐にわたっている。エンジンが動力源である従来車両の低燃費化に対し、転がり軸受に求められる特性は 2 つに大別できる。ひとつは低トルク化であり、もうひとつは車両重量を減らすための小型軽量化である。

また、電動化が進む動向の中で、転がり軸受に求めら

れる技術対応としては、モータの高速回転に追従できる転がり軸受の高速化技術と、通電経路が複雑化する中での転がり軸受の電食回避があげられる。

その他、HEV や PHEV、ならびに FCV や BEV 固有の技術課題はそれぞれにあると考えられるが、大きな課題としては、上記の①低トルク化対応、②小型化・軽量化対応と、電動化普及に伴う③高速回転対応、④電食回避対応である。

以下、それぞれの課題に対して述べる本稿の要旨である。

- ①低トルク化対応：自動車にはグリース潤滑転がり軸受が多用される中、グリース技術向上による低トルク化への寄与が大きいので、ここではその事例を解説する。
- ②小型化・軽量化対応：材料・熱処理の改善がもたらす軽薄短小化への貢献は既報¹⁾で述べた技術が使用実績を積んでいるので、本報では数値解析による軸受負荷能力の向上について解説する。
- ③高速回転対応：高速化対応は主に玉軸受で行なわれており、高速回転時の保持器変形を正確に把握することが必要である。ここでは数値解析による事例を解説する。
- ④電食回避対応：軌道輪の外径に絶縁被膜を設ける手法もあるが、本報では絶縁に対する信頼性の高さと同時に、軽量化への貢献という面から大きな効果が見込まれるセラミック球軸受について解説する。

3. 低トルク化対応

省エネルギーや省資源の観点から、グリース潤滑転がり軸受の低トルク化が求められている。グリース基油の低粘度化により低トルク化できるが、単なる低粘度化で

* 先端技術研究所

は油膜形成が悪化し、軸受寿命が低下するリスクがあるために有効とはいえない。グリースのレオロジー特性に着眼した低トルク化技術²⁾を紹介する。

3.1 玉軸受内グリースの存在状態と軸受トルクとの関係

玉軸受内のグリースの存在状態は、グリース攪拌が継続し高トルクを示すチャーニング状態、および転動部から大部分のグリースが押し出され低トルクを示すチャネリング状態に大別される。この違いを観察するために、グリース挙動の観察技術として定着しつつあるX線CTを用いて軸受内部のグリース付着状態を調べた例を示す。

観察用の軸受には、X線が透過できるように内外輪、玉、保持器およびシールは樹脂製を用いた。グリースと部材間にコントラストが付きやすいように、グリースにトレーサとしてタングステンを5重量%添加した。図1に示すように、グリース潤滑軸受をトルク測定しながら運転し、初期(5h)に停止したチャーニング品(トルク13Nmm)、および長時間(23h)でチャネリング状態に達したと判断されるチャネリング品(トルク5Nmm)の玉と保持器ポケット間のグリースの存在状態を観察した。図2のように、2者には玉と保持器ポケット面間のグリース量に大きな違いがあることがわかった。

<樹脂軸受トルク測定条件>
6204, 25℃,
Fa=19.6 N, 3,600 min⁻¹

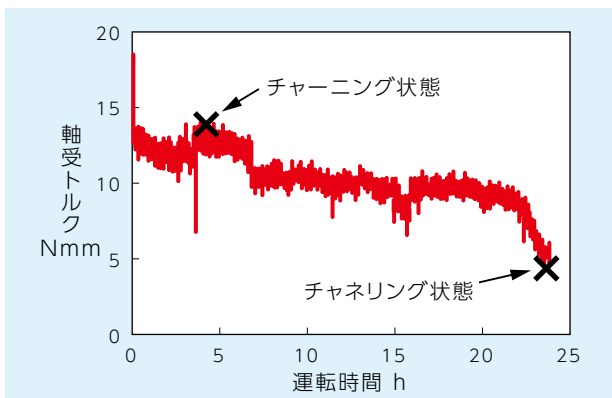
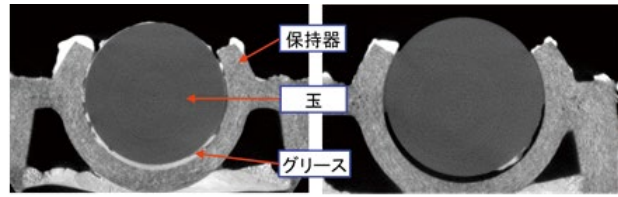


図1 樹脂製軸受の軸受トルク経時変化



チャーニング品 (トルク 13Nmm) チャネリング品 (トルク 5Nmm)

図2 樹脂製軸受でのグリース付着状態 (玉と保持器ポケット面間)

3.2 グリースによる低トルク化の基本的な考え方

X線CTによる観察結果から、グリース潤滑での低トルク化には玉と保持器ポケット面間に介在するグリースのせん断応力を低減する必要があることがわかる。つまり、1) グリース粘度の低減と2) チャネリング状態への移行の迅速化の2点が有効と考えられる。表1に示す4種類(Grease A~D)の代表的な転がり軸受用グリースを用いて、これらの効果を確認した例を示す。

表1 供試グリース

		Grease A	Grease B	Grease C	Grease D
増ちょう剤		リチウム石けん	ウレア	ウレア	ウレア
基油	種類	合成油	合成油	合成油	鉱油
	動粘度 mm ² /s(40℃)	25	40	23	95
ちょう度		250	250	280	290

1) グリース粘度の低減

グリース粘度はグリースのせん断速度の関数であるため、転がり軸受が使用される条件下の玉と保持器ポケット面間のせん断速度域で低粘度化する必要がある。玉が保持器ポケット部中心に位置すると仮定し、玉軸受(6204)を1,800~10,000 min⁻¹で内輪回転させた場合、保持器ポケット部のグリースせん断速度は24,000~130,000 s⁻¹となる。

レオメータで実測したグリース粘度にせん断速度を乗じて得られる保持器ポケット部のせん断応力と、実測した運転初期の軸受トルクとの関係を図3に示す。Grease Dの1,800 min⁻¹以外のいずれの条件(グリース種、回転速度違い)でも、せん断応力が増すほど軸受トルクも大きくなった。保持器ポケット部に相当するせん断速度でのグリース粘度を小さくし、玉と保持器ポケット面間のせん断応力を低減することが低トルク化に有効である。

2) チャネリング状態への移行の迅速化

グリース潤滑では、チャーニング状態とチャネリング状態の違いが軸受トルクに大きく影響する。低トルク化には玉と保持器ポケット面に介在するグリースがでる限り速やかに排除されるチャネリング状態が望ましい。図3中のGrease Dの1,800 min⁻¹はチャネリング状態、その他の条件はいずれもチャーニング状態と考えられる。

レオメータで揺動角を変化させて、グリースの固体的な性質を表す貯蔵弾性率 G' と液体的な性質を表す損失弾性率 G'' を実測し、その比 ($\tan \delta = G'' / G'$) が1となるせん断応力値を降伏応力として求めた (図4)。図5に示すように、降伏応力が高いグリース (Grease C,D) は、運転時間 120 min 内にチャーニング状態 (高トルク) からチャネリング状態 (低トルク) に移行するのにに対し、降伏応力が低いグリース (Grease A,B) は、チャネリング状態 (低トルク) に移行しないことを確認している。

内輪回転される軸受のグリースは、遠心力により軌道面から外輪内径面に移動し、そこに塊として堆積する。堆積したグリースあるいはその分離油が軌道面に還流され、軸受が潤滑されると考えられる³⁾。図6に示すように、外輪内径面に堆積したグリースの降伏応力が高い方が、振動や昇温などを駆動力とするグリースの軌道面への移動を妨げ、安定なチャネリング状態を維持しやすいと考えられる。

<軸受トルク測定条件>

6204, 25 °C, Fa=19.6 N, 1,800 ~ 10,000 min⁻¹

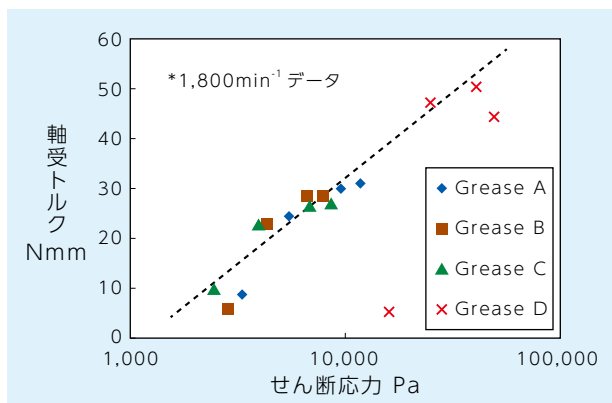


図3 軸受トルクと保持器ポケット部せん断応力の関係

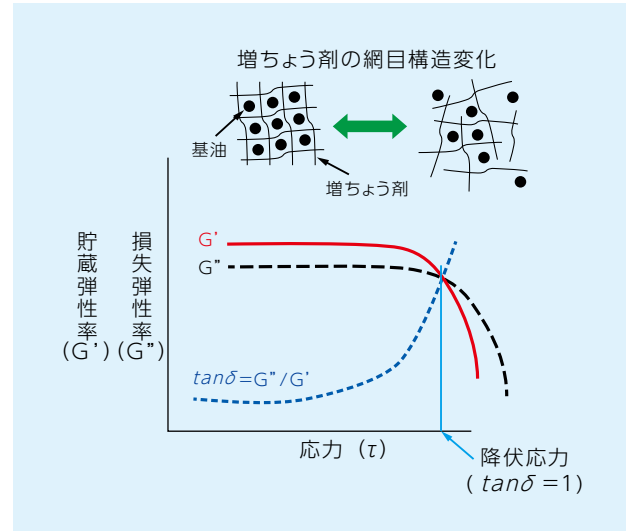


図4 レオメータでの降伏応力の測定例

<軸受トルク測定条件>

6204, 25 °C, Fa=19.6 N, 1,800 min⁻¹

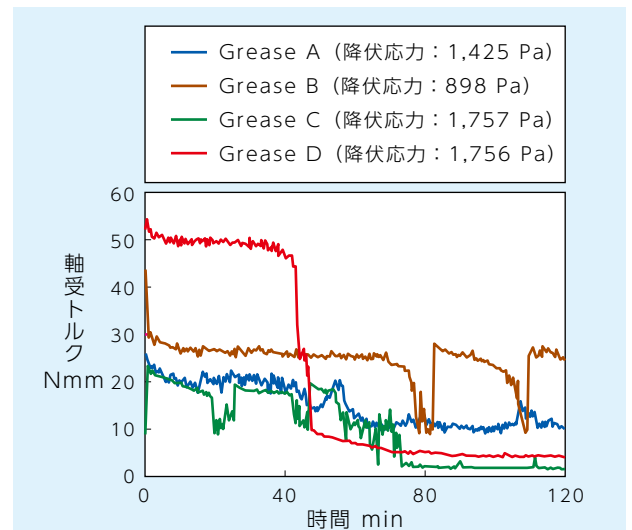


図5 グリース降伏応力と軸受トルクの関係

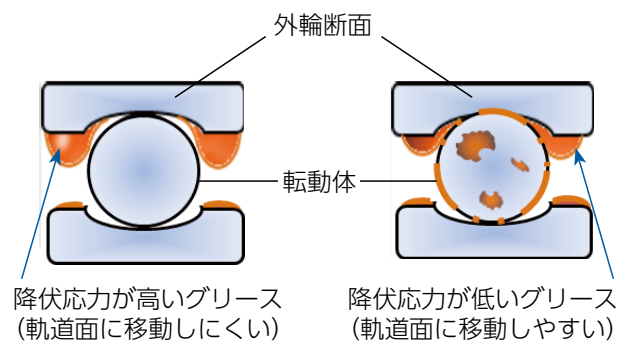


図6 外輪内径面に堆積したグリースの流動模式図

3.3 ハブベアリング用グリースへの適用

NTNでは、3.2項で述べたグリースによる低トルク化技術に基づき、各種アプリケーション向けのグリース開発を行っている。一例として、自動車の中でも特に低トルク化要求の高いハブベアリング用グリースに応用した事例⁴⁾を紹介する。

この開発品では、玉と保持器ポケット面間のグリースせん断応力の低減に加えて、軌道輪と転動体間のグリースせん断応力を低減する工夫もしている。

① 玉と保持器ポケット面間のグリースせん断応力の低減

従来品と開発品のグリース粘度と降伏応力を比較した結果を図7, 8に示す。グリース組成の工夫により開発品は従来品よりも、ハブベアリングで重要な $2,000\text{ s}^{-1}$ 以上のせん断速度域で低粘度であり、かつ、高い降伏応力値を示す。これらの物性制御により、玉と保持器ポケット面間のグリースせん断応力を低減し、低トルク化を実現した。

<グリース粘度測定条件>

コーンプレート型レオメータ, $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $1 \Rightarrow 8,000\text{ s}^{-1}$, 定常流

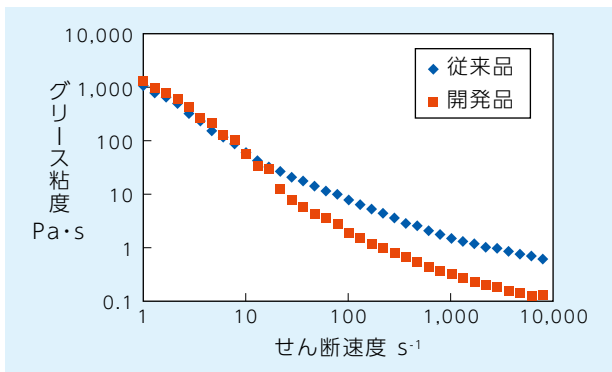


図7 せん断速度とグリース粘度の関係

<降伏応力測定条件>

パラレルプレート型レオメータ, $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, 1 Hz , $10 \Rightarrow 3,000\text{ Pa}$

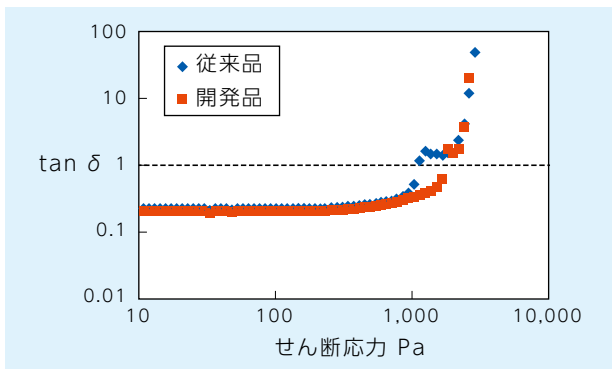


図8 降伏応力の測定結果

② 軌道輪と転動体間のグリースせん断応力の低減

玉軸受では、差動すべり、スピンといわれる軌道輪と転動体間の微小すべりが生じ、摩擦（トラクション）になることが知られている⁵⁾。グリース成分の分子構造がトラクションに与える影響を調べた結果を図9に示す。基油の分子構造において、環状/分岐構造を少なくし、直鎖構造を主体にするとトラクションを低減できることがわかる。開発品では、グリースのレオロジー特性に加えて分子構造も改善して低トルク化した。

<トラクション測定条件>

$25\text{ }^{\circ}\text{C}$, 0.65 GPa , $0.2 \Rightarrow 1.0\text{ m/s}$ (3% すべり)

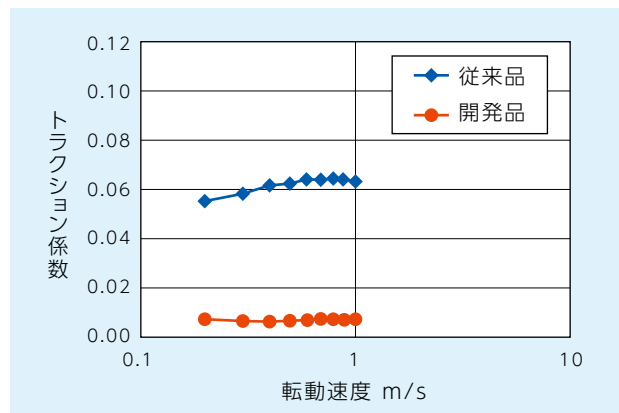
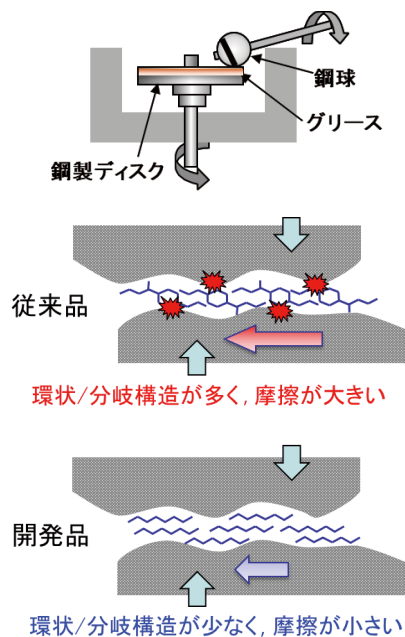


図9 グリース成分の分子構造とトラクションとの関係

4. 小型化・軽量化対応技術

低燃費化のためには自動車を構成する個々の部品的小型化、軽量化が求められる。転がり軸受の場合、単に小型化すると寿命が低下するため、従来より主に材料の改良によって必要とされる寿命を確保した上で小型化を図ってきた¹⁾。ここでは、視点を変え、小型化に寄与するための軸受内部の形状設計による長寿命化技術を紹介する。

ころと軌道輪の接触は円筒同士の線接触であるが、単純な円筒の場合、接触部の両端でエッジロードと呼ばれる過大な応力集中が発生する。これを防止するため、ころや軌道輪には両端近傍で数 μm 程度半径を減少させるクラウニングという加工が施されている。大きなクラウニングを施せばミスアライメント条件下でもエッジロードを防止できるものの、ころ中央付近での最大応力が大きくなり寿命が低下する。エッジロードを抑制しつつ最大応力を最小化する形状は理論的には対数曲線であることが知られていたが、理想的な形状は加工できない、実際には必ず発生するミスアライメントの影響を考慮していないなどの課題があった。そこで、NTNは設計自由度を向上させた独自のクラウニング用対数関数式を開発し、数理最適化手法を用いて自動設計する手法を開発した⁶⁾。

図10に応力の分布図を示す。従来のクラウニングと比較し、対数クラウニングはエッジ部での加工量が同程度であるにもかかわらずエッジ応力が低減できるため、長寿命化できる。本技術を採用することによって、従来品に対して同等の寿命を確保しながら小径化・軽量化が可能となり、低トルク化・低燃費化に寄与する。

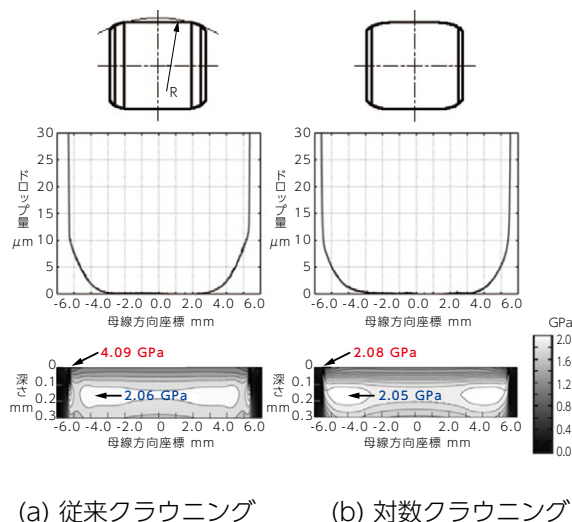


図10 クラウニング形状とMisesの相当応力分布⁷⁾

5. 高速回転対応技術

EVの駆動源であるモータは低速、高トルクの仕様で設計すると大型化するため、モータは高速、低トルク仕様として小型化し、減速して必要なトルクを発生させる。したがって、EV用モータに使用される転がり軸受は高速回転性能の向上が必須となる。

高速化に適した軸受形式は玉軸受であり、摩擦損失を低減するために自己潤滑性に優れた樹脂製保持器を採用することが多い。一般的な樹脂製保持器は図11の冠形保持器と呼ばれる軸方向に非対称な形状である。ポケットは軸方向の一端が開口しており、スナップのように玉をはめ込む。高速回転させると、ポケット開口側の爪は遠心力により図12のように外径側に広がり花びら状の変形を生じる。爪先端にこのような変形が生じると玉や外輪と干渉し、摩擦損失の増大や摩耗の原因となる。



図11 樹脂製冠形保持器

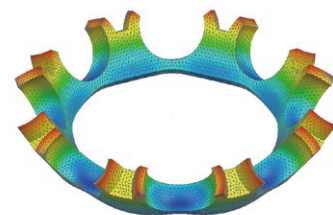


図12 樹脂製冠形保持器の変形解析例

そこで、爪部に肉抜きを施して軽量化し、反開口側のリング部の剛性を下げてリング部も外径方向に変形する構造を採用して、この影響を低減した。図13に従来構造の保持器と開発品の高速回転時の変形形状を示す。冠形保持器の場合、高速回転限界は保持器の強度ではなく爪部の局所的な変形に起因することに着目し、高剛性化して変形を抑制するのではなく、逆に全体を柔構造にすることで課題を解決した。例えば、油潤滑の6206の許容回転速度は $13,000\text{ min}^{-1}$ であるが、本技術を採用することで、 $17,000\text{ min}^{-1}$ での正常運転を実現している。

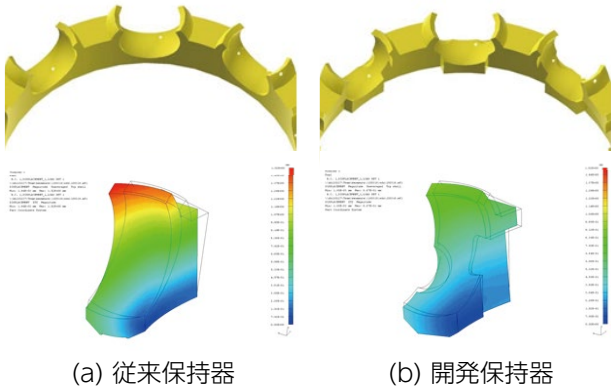


図 13 保持器形状と遠心力による変形の解析例

さらに高速化が必要な場合は、軸方向に分割した部品をスナップで一体化することでポケット周辺の変形を抑制した保持器⁸⁾も採用できる。

6. 電食回避対応技術

転がり軸受の電食防止には軌道輪の外径に樹脂やセラミックスなどの絶縁被膜を設ける手法があるが、本報では絶縁に対する信頼性の高さ、同時に軽量化への貢献という面から大きな効果が見込まれるセラミック球について紹介する。

電動機や発電機のモータに使用される軸受の損傷モードのひとつに電食がある。電食は軸受周辺から電流が軸受内部へ流れ込み、転がり接触部にスパークが発生して転動面が損傷する事象である。転がり接触部に生じたスパークで転動面の金属組織が劣化し、振動、異音、はく離などの原因となる。

モータを使用する機器ではこの電食を発生させないために、軸アースとしてカーボンブラシの使用、軸絶縁として絶縁体で軸受との通電を遮断する手法などがとられる。しかしながら、カーボンブラシは使用中の摩耗、樹脂系絶縁物で通電を遮断する場合は樹脂の熱劣化など、それぞれ耐久性に課題がある。これらの課題を解決する手法として、軌道輪に鋼、転動体に窒化ケイ素製セラミック球を組み込んだハイブリッド軸受が有効である。

窒化ケイ素製セラミック球を組み込んだハイブリッド軸受の絶縁性を示すため、一例として直流電源を用いた通電環境下での軸受はく離寿命試験を実施した。試験機の概略を図 14 に示す。この試験機は供試軸受と支持軸受で回転軸を支持している。絶縁材を挟んでハウジングを 2 分割しており、端子 A-B 間を通電することで、端子 A → 供試軸受 → 回転軸 → 支持軸受 → 端子 B の経路で電気が流れる構造。表 2 に試験条件を示す。実験は内輪回転の急加速条件下で一定電流 (0.5A) を負荷した状

態で実施した (窒化ケイ素製セラミック球組込み軸受の場合、印加電圧 30V に設定)。試験結果を表 3 に示す。

表 3 に示すように、窒化ケイ素製セラミックスは絶縁体のため、鋼球と比べて電食による転動体表面のはく離発生を抑えることが可能である。従って、絶縁性を有する窒化ケイ素製セラミック球は HEV, PHEV, EV など普及が拡大する次世代自動車に使用する各種モータ用軸受への適用が期待できる。

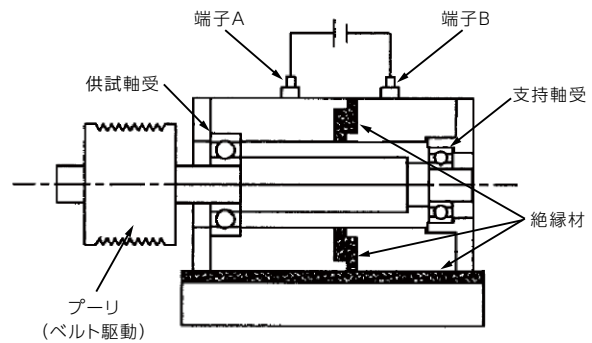


図 14 通電はく離寿命試験機

表 2 試験条件

供試軸受	深溝玉軸受 (6203)	
転動体	鋼球	セラミック球
グリース	非導電性グリース	
グリース封入量 (g)	0.86	
回転速度 (min ⁻¹)	0 から 20,000 の急加減速	
雰囲気	室温	
プーリ荷重 (N)	1,617	
軸受荷重 (N)	2,332	
電流 (A)	0.5	—
停止条件	振動が初期の 10 倍	

表 3 はく離寿命試験結果

	寿命, h	はく離部位
鋼球	19.6	球
セラミック球	> 200	無

電食回避対応の解決策のほかに、セラミック球のもう一つの効用として軽量化が挙げられる。窒化ケイ素製セラミックスの比重は、軸受鋼の約 40% であり、転動体に窒化ケイ素製セラミック球を適用することで、軌道輪および転動体が全て軸受鋼 (SUJ2) 製の一般軸受より軽量化が可能である。また、転動体の軽量化は軸受回転時の転動体に働く遠心力低減にも寄与することから、HEV, PHEV, EV など、年々高まっているモータの更なる高速化への対応が期待できる。

深溝玉軸受 6206 の場合，転動体に窒化ケイ素製セラミックスを適用してハイブリッド化することで，軌道輪および転動体が全て軸受鋼（SUJ2）製の一般軸受よりも約 10% 軽量化が可能である．**図 15** に示すようにハブベアリングに窒化ケイ素製セラミック球を適用した場合，ハブベアリング重量を約 13% 軽量化しており，自動車の低燃費化に貢献できる．



図 15 第 1 世代ハブベアリング（セラミック球使用）

そのほか，窒化ケイ素製セラミックスは化学的に安定な素材であり，例えば，転動体を軸受鋼から窒化ケイ素製セラミックスに置き替えることで，軸受鋼製軌道輪と窒化ケイ素製セラミック転動体の接触部で進行する潤滑剤の酸化劣化の抑制や凝着抑制による耐焼付き性の向上が期待できる．

4 球式摩擦試験機を用いて鋼球（SUJ2）と窒化ケイ素製セラミック球（Si3N4）の組合せで耐焼付き性を評価した．試験条件を**表 4**，試験結果を**図 16** に示す．4 球式摩擦試験機は 3 個の固定球上を 1 個の回転球が回転する形式である．一定荷重で 1 分間運転し，摩擦係数の上昇がなければ荷重を増加させながら耐焼付き性を評価した．摩擦係数が初期の 5 倍を超えた場合，焼付き発生と判断し，試験を中止した．**図 16** に示す通り，鋼球と窒化ケイ素製セラミック球の組合せの場合，焼付きが最も発生し難いことがわかる．

内輪 / 外輪に鋼，転動体に窒化ケイ素製セラミックスを適用した場合，耐焼付き性が向上することから，潤滑剤の使用量低減，すなわち低トルク化効果により，自動車の低燃費化が期待できる．

表 4 試験条件

試験機	4 球式摩擦試験機
試験球材質	鋼球 (SUJ2), セラミック球 (Si3N4)
球サイズ (インチ)	3/4
潤滑油	タービンオイル グレード 68
潤滑状態	浸漬
雰囲気	室温
すべり速度 (m/s)	0.86
停止条件	摩擦係数が初期の 5 倍を超えた場合

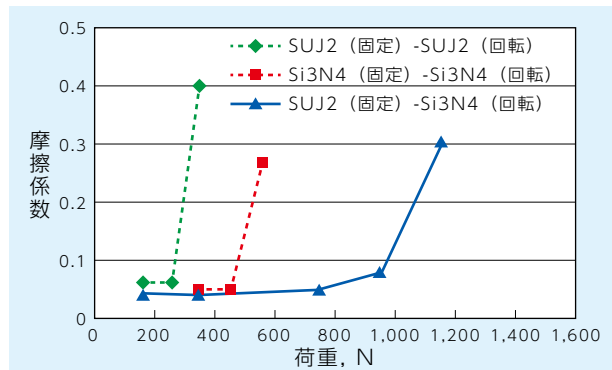


図 16 耐焼付き性試験結果

7. あとがき

自動車の低燃費化に寄与する新しい技術として，転がり軸受における数値解析による設計技術，軽量化技術，低トルク化技術を述べた．これら新しい技術が，地球温暖化などの環境問題や全世界的な燃料のコスト上昇に対する対策の下支えになれば幸甚である．

参考文献

- 1) 中島：ころがり軸受の材料・熱処理技術の動向，NTN TECHNICAL REVIEW, No.76(2008) 10.
- 2) 近藤，川村：軸受トルクにおよぼすグリースレオロジー特性の影響，トライボロジー会議 2017 春東京 予稿集，F17.
- 3) 川村：高速軸受用グリースの潤滑機構の研究，NTN TECHNICAL REVIEW, No.76(2008) 39.
- 4) 関：低フリクションハブベアリングⅢ，NTN TECHNICAL REVIEW, No.87(2019) 63-67.
- 5) 村木：図解 トライボロジー 摩擦の科学と潤滑技術，日刊工業新聞社，221.
- 6) 藤原，川瀬：ころ軸受の対数クラウニングとその最適化手法，機論 C, 72(2006), 3022.
- 7) 藤原，山内：円筒ころ軸受における部分円弧クラウニングと対数クラウニングの実験的比較，機論 C, 74(2008), 2308.
- 8) 片桐，内藤：高速サーボモータ用次世代型深溝玉軸受，NTN TECHNICAL REVIEW, No.72(2004) 45.

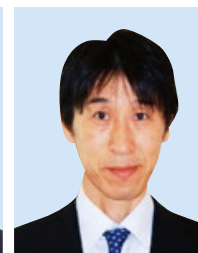
執筆者近影



川村 隆之
先端技術研究所



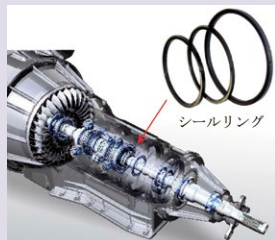
藤原 宏樹
先端技術研究所



大平 晃也
先端技術研究所

流体解析による低トルクシールリングのトルク低減の検証

Verification of Torque Reduction for Low Torque Seal Ring by Fluid Analysis



自動車の燃費基準は益々厳しくなるため、トランスミッションのシールリングには、更なる低トルク、低オイルリークが求められている。NTNでは、V字状潤滑溝を設けることで、従来品と比較し、トルクを60%低減した「低トルクシールリング」を開発し、量産を開始している。

本稿では、「低トルクシールリング」のV字状潤滑溝によるトルク低減に関する流体解析結果を紹介する。

石井 卓哉* Takuya ISHII
小畑 智彦** Tomohiko OBATA

In order to achieve demands of fuel consumption standard, seal rings for automotive transmission are required to further reduce torque and oil leak. NTN developed "Low Torque Seal Ring" and started mass production. It has V-shaped lubrication grooves, which reduces torque by 60% in comparison with conventional products. This article introduces fluid analysis results of torque reduction by V-shaped lubrication grooves in "Low Torque Seal Ring".

1. はじめに

自動車のトランスミッション（AT、CVT など）には、外径 15 ～ 60mm の樹脂製シールリングが複数個使用されている。自動車の低燃費化のために、シールリングには低トルク、低オイルリークが求められている。この要求に応えるために、NTN では、V 字状潤滑溝を設けたポリエーテルエーテルケトン（PEEK）樹脂製の「低トルクシールリング」^{1) 2)}を開発し、量産を開始している（図 1）。

V 字状潤滑溝の個数、形状を流体解析と実験から最適化し、更に低トルクシールリングのトルク低減を図った。本稿では、低トルクシールリングのトルク低減に関して、流体解析による検証結果を紹介する。

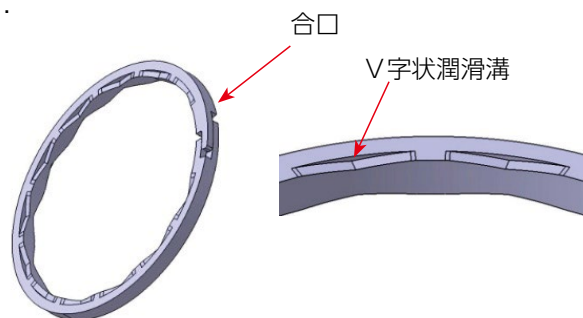


図 1 低トルクシールリング

2. シールリングの役割と作動状態

シールリングはしゅう動しながらオイルを密封する運動用シールである。トランスミッションの油圧回路内で相対運動する軸とハウジング間に組み付けられる。油圧によりハウジング内周面と軸溝側面の両方に押し付けられ、しゅう動しながらオイルを密封し、油圧回路内の圧力を保持する。

シールリングへの要求性能は低トルク、低オイルリーク、低摩擦特性である。トルクを低減すると、トランスミッションの効率が向上し省エネルギーとなる。また、オイルリークを抑えると、油圧ポンプの高効率化、小型化を図ることが可能となり、省エネルギーにつながる。低トルク、低オイルリークを長期間維持し、長寿命とするためには、シールリングの摩擦が小さいこと、しゅう動する相手部品を摩擦損傷させないことが必要となる。

断面形状が長方形の NTN 従来品の作動状態を図 2 に示す。シールリングと軸溝側面の接触面積はハウジング内周面との接触面積よりも小さいため、軸またはハウジングが回転すると、しゅう動抵抗がより小さい軸溝側面とシールリング側面間がしゅう動する。シールリング側面は軸溝側面と面接触しているため、オイルリークは小さい。

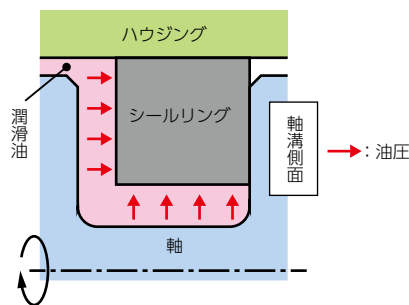


図 2 シールリングの作動状態

* 複合材料商品事業部 精密樹脂技術部
** 先端技術研究所

3. 低トルクシールリング

3.1 特長

低トルクシールリングは、軸溝側面としゅう動するシールリング側面にV字状潤滑溝を設けることで、低トルクと低オイルリークを両立した。材料はPEEK樹脂に特殊充填剤を配合したベアラーPK5301である。射出成形により側面にV字状潤滑溝を設けるとともに、合口は複雑形状にしている。複雑形状にすることで、合口からのオイルリークを低減している。

低トルクシールリングは、NTN従来品と比較して以下の特長がある。

(特長)

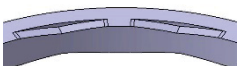
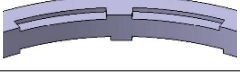
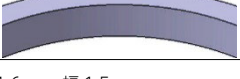
- ① トルク 60% 低減
- ② 摩耗量 1/10
- ③ 同等の低オイルリーク特性

3.2 潤滑溝形状の比較

3.2.1 トルク測定結果

表1に示す潤滑溝の有無、形状が異なる3種類のシールリングについて、トルクを比較した。試験装置の概略を図3に示す。軸溝に取り付けた2本のシールリングの間に油を循環させながら加圧し、ハウジングを回転させた状態でトルクを測定した。

表1 試験シールリング

試験シールリング	側面の潤滑溝の形状
V字状潤滑溝 (片面12個)	
角状潤滑溝 (片面12個)	
溝なし	

シールリング寸法：外径50mm、肉厚1.6mm、幅1.5mm

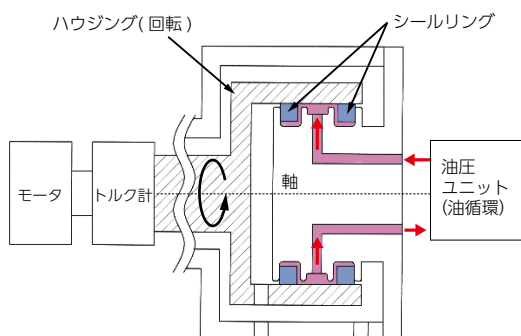


図3 試験装置の概略図

油圧とトルクの関係を図4に示す。トルクはシールリング2本の測定値を半分にして1本分とした。いずれの油圧においても、V字状潤滑溝付きシールリングのトルクは溝なし（NTN従来品）に対して60～70%、角状潤滑溝に対して20%程度低い。

【試験条件】

油圧 0.5～2MPa 回転数 4,000min⁻¹ ATF(110℃)
S45Cハウジング・軸

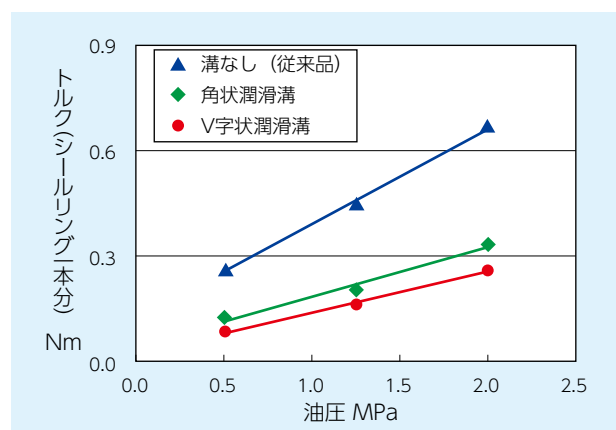


図4 油圧とトルクの関係

3.2.2 流体解析結果

V字状潤滑溝を付けることで、シールリング側面と軸溝側面との接触面積が小さくなり、かつ、しゅう動面の潤滑状態が良くなりトルクが低減したと考える。溝形状によるトルクの差は潤滑状態の違いと推測され、流体解析によりトルク低減を検証した。

潤滑溝1個分の流体領域を抽出してモデル化した解析結果を図5に示す。V字状潤滑溝では、動圧効果により溝の端部の油膜圧力が高くなっている。この圧力による軸方向力は、油圧によりシールリングが軸溝側面に押し付けられる力と反対向きであるので、押し付け力を低下させる。また、圧力差により潤滑溝の端部から潤滑溝間のしゅう動面に油が流れ込むため、低トルクになったと考える。一方、角状潤滑溝ではV字状潤滑溝のような高圧は発生していない。

【解析条件】

油膜厚さ $5\mu\text{m}$ 油圧 2MPa 回転数 $4,000\text{min}^{-1}$ ATF (20°C)

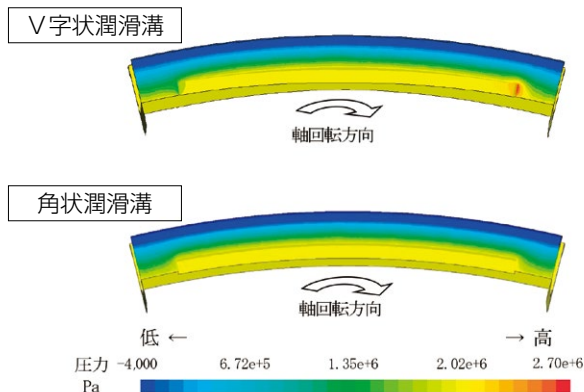


図5 しゅう動面の油膜圧力分布

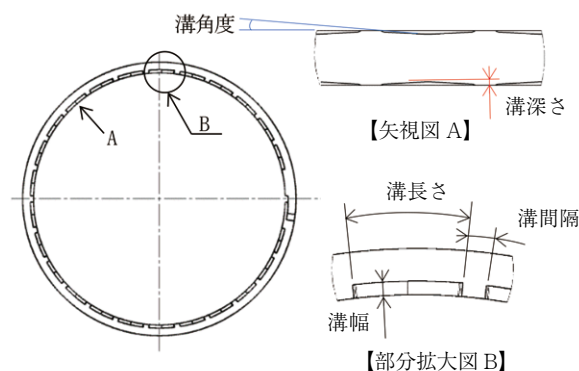


図6 解析シールリング (溝個数 24 個)

4. V字状潤滑溝の最適化によるトルク低減の検証

4.1 流体解析条件

トルク測定結果としゅう動面の油膜圧力分布から、V字状潤滑溝の端部に発生する油膜圧力による押し付け力と反対向きの力（油膜反力）がトルク低減に寄与していることが分かった。この油膜反力が大きいほど低トルクになるので、V字状潤滑溝の個数は多いほど、溝幅は大きいほど油膜反力が大きくなると考えられる。そこで、これを流体解析で検証した。

解析時のシールリングにおけるV字状潤滑溝の長さ、幅、深さ、角度及び溝間隔の定義を図6に示す。寸法は外径 44mm 、肉厚 2mm 、幅 2.3mm とした。シールリングのV字状潤滑溝1個分の流体領域をモデル化して流体解析し、動圧効果により発生する油膜圧力の積分値を溝1個あたりの油膜反力とした。そして、この力と溝個数の積をシールリング1本に発生する油膜反力とし比較した。なお、シールリング側面と軸溝側面の接触部に発生する油膜圧力は、V字状潤滑溝部と比較して非常に小さいため無視した。本解析では計算を簡素化するために、しゅう動面の油膜厚さは $5\mu\text{m}$ 一定とし、運転条件はATFの圧力 0.6MPa 、温度 20°C 、回転数 $10,000\text{min}^{-1}$ とした。

4.2 流体解析結果

4.2.1 V字状潤滑溝の個数

V字状潤滑溝が片面12個と24個のシールリングについて、流体解析によりシールリング1本の油膜反力を求めた。V字状潤滑溝の溝間隔を同一とし、12個と24個では溝長さを変えている。また、溝角度を同一としたので、溝深さは12個と24個で異なる。

V字状潤滑溝が12個と24個のときの油膜反力を図7に示す。推測した通り、溝個数が多いほど油膜反力は大きいことが検証できた。従って、トルクを低減するためには、溝個数が多い方が良いことになる。

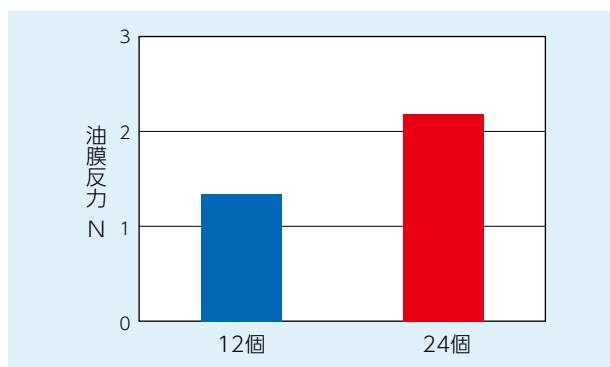


図7 溝個数と油膜反力

ところが、溝個数を多くすると、溝と溝の間の部分の個数も多くなるので、シールリング側面と軸溝側面の接触面積が増加し、逆にトルクが高くなる作用もある。従って、トルクが最小となる溝個数が存在すると考えられる。これを確認するために、溝個数が異なるシールリングのトルクを測定した。シールリングの寸法は外径 51mm 、肉厚 2.4mm 、幅 2.3mm 、溝個数は片面12～30個である。溝間隔、溝幅及び溝角度は同一としたので、溝長さおよび溝深さは溝個数毎で異なる。測定条件はATFの圧力 1MPa 、温度 80°C 、回転数 $2,000\text{min}^{-1}$ である。

溝個数とトルクの関係を図8に示す。トルクは溝個数が24個までは低下したが30個では増加した。上記の考えに合致した測定結果が得られ、溝個数に最適値があることを確認した。溝個数は、設計上および製造上の理由でシールリングの外径によって制約を受けるため、低トルクシールリングでは外径毎にV字状潤滑溝を最適個数で設定している。

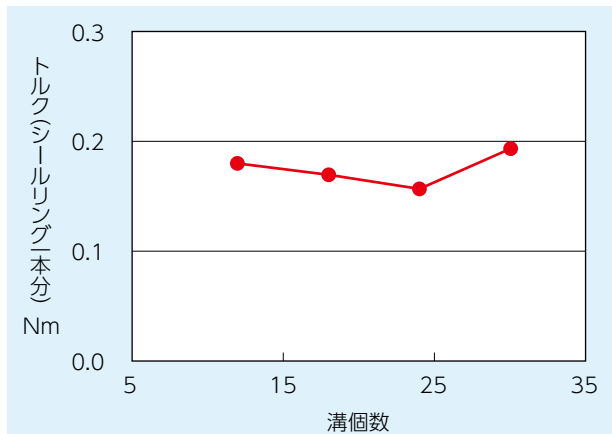


図8 溝個数とトルクの関係

4.2.2 V字状潤滑溝の幅

V字状潤滑溝の幅が0.2～0.7mmのシールリングについて、流体解析により油膜反力を求めた。溝個数は片面24個とし溝幅以外はすべて同一とした。

溝幅と油膜反力の関係を図9に示す。溝幅が大きいほど油膜反力は大きくなり、推測通りの検証結果が得られた。ただし、溝幅を大きくし過ぎるとオイルリークが大きくなるため、溝幅はハウジングおよび軸の寸法、偏芯量、シールリングおよびハウジングの摩耗量などを考慮して都度決定する。

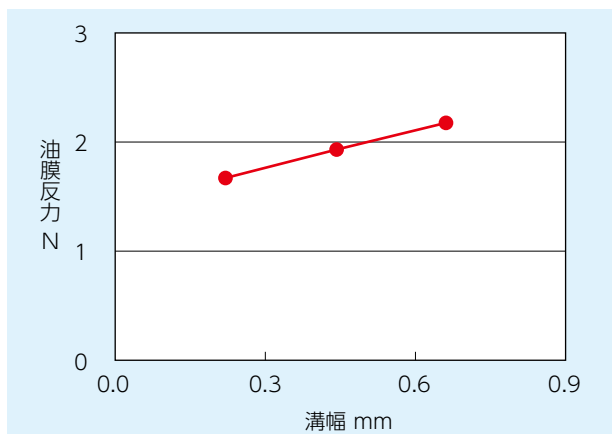


図9 溝幅と油膜反力の関係

4.2.3 V字状潤滑溝の角度

4.2.1項の溝個数が片面24個のシールリングを基準に、V字状潤滑溝の角度を増減させて流体解析し油膜反力を求めた。溝間隔、溝の長さと同様としたので、角度を変えたことにより溝深さは異なる。

溝角度と油膜反力の関係を図10に示す。横軸は基準角度に対する角度比とした。この範囲内であれば、溝角度による油膜反力の変化はほとんどなく、同様に溝深さの影響もない。このことから、V字状潤滑溝の設計において、適正な範囲内であれば溝角度と深さを考慮する必要はなく、溝個数を優先すれば良い。

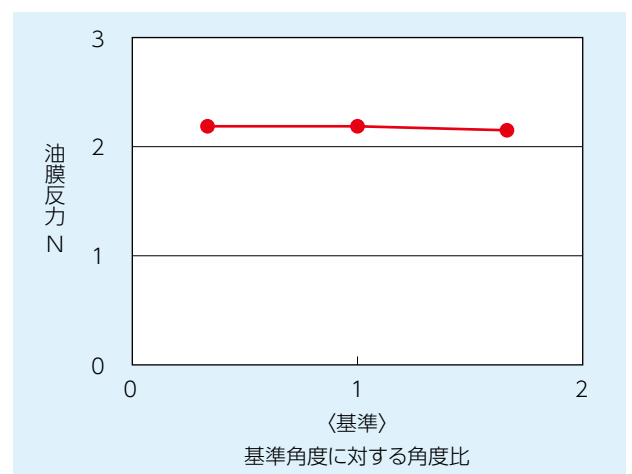


図10 溝角度と油膜反力の関係

4.3 最適なV字状潤滑溝でのトルク測定結果

上記の流体解析にてV字状潤滑溝の個数、形状を最適化した。3.2項のV字状潤滑溝12個のシールリングと、最適設計したV字状潤滑溝24個のシールリングのトルク比較を図11に示す。シールリングの寸法は外径45mm、肉厚2mm、幅2.4mmである。最適設計した24個溝シールリングは、12個溝シールリングに対して10～15%トルクが低い³⁾⁴⁾。

【試験条件】

油圧 0.4 ~ 1.2MPa 回転数 2,000min⁻¹ ATF (80℃)
鉄系ハウジング・軸

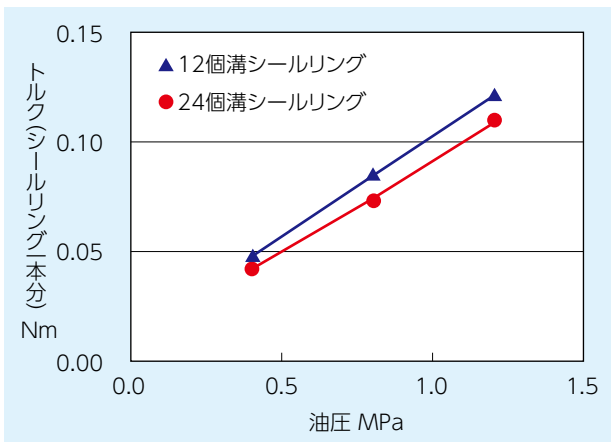


図 11 油圧とトルクの関係

参考文献

- 1) 笈幸三, 近藤巧, 石井卓哉, 吉野真人:
自動車の変速機用低トルクシールリングの開発,
NTN TECHNICAL REVIEW No.81 (2013) 68.
- 2) 石井卓哉: 自動車の変速機用シールリングの低トルク化, 自動車技術 Vol.71, No.9 (2017) 81.
- 3) 石井卓哉: トランスミッション用シールリングの低トルク化, 車載テクノロジー Vol.6, No.1 (2018) 69.
- 4) 堺香代, 山下智典, 浅田一, 石井卓哉: 自動車の低燃費化, 高性能化に貢献する複合材料商品の紹介, NTN TECHNICAL REVIEW No.85 (2017) 97.

5. まとめ

低トルクシールリングに関して, 流体解析によるトルク低減の検証結果を紹介した. 流体解析と実験の併用により V 字状潤滑溝の個数, 形状を最適化し, 更にトルクを低減することができた. 低トルクシールリングは自動車の低燃費化の要求に応えることができ, 採用が進んでいる. 今後も更なる低トルク化を図っていく.

様々な分野で省エネルギー化の要求が高まっている. 流体解析等の解析手法を取り入れ, 樹脂しゅう動部品の高性能化, 開発スピードアップを図っていく.

執筆者近影



石井 卓哉

複合材料商品事業部
精密樹脂技術部

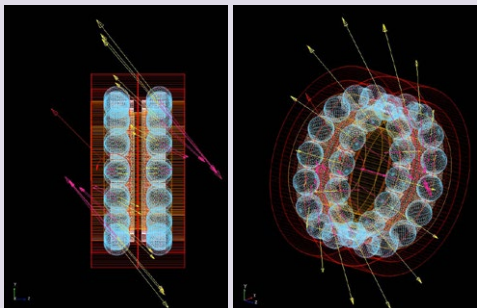
小畑 智彦

先端技術研究所

モーメント負荷下のハブベアリングの動特性解析

Analysis of Dynamics of Hub Bearings under Moment Loads

坂口 智也* Tomoya SAKAGUCHI
 澁谷 直人* Naoto SHIBUTANI



ハブベアリングの剛性は自動車の操縦安定性に影響する重要な特性の一つである。これまでの剛性の解析及び測定は内輪が静止した状態で行われており、内輪が回転する場合は未検討であった。そこで、本報では、転がり軸受の動力学解析システム“IBDAS”を用いて、回転中のハブベアリングの剛性を検討した。その結果、回転中の剛性は静止中と変わらない一方で、モーメントに対する内輪の傾き角の波形にはヒステリシスすなわち応答遅れが存在することを確認した。

Stiffness of hub bearings is an important factor for vehicle handling stability. Analysis and measurements for the hub bearing stiffness have been done only under non-rotating inner ring conditions but not done under rotating inner ring conditions. Hence, the authors have examined the rotating hub bearing stiffness by using a bearing dynamic analysis system “IBDAS”. This examination shows that rotating hub bearing stiffness coincides with the nonrotating one and hysteresis, that is response delay, exists in displacement curves of inner ring alignment angle against varying moment.

1. はじめに

自動車の自動運転技術が発展して、コンピュータが操舵まで制御するようになったとしても、車両の操縦安定性は引き続き重要な特性である。コンピュータがどんなに高性能であっても、操舵信号に対する車両の反応が遅すぎると狙った軌跡を走行させることが難しいためである。一方、車両のタイヤを支えるハブベアリングの曲げ剛性は、車両の操縦安定性に影響する要因に挙げられる¹⁾²⁾。そのため、ハブベアリングの曲げ剛性を適切に設計することは、重要な課題である。

一般的にハブベアリングの曲げ剛性の測定は、軸を回転させない状態で行っている²⁾。軸が回転した場合の曲げ剛性は、静止した場合と比べ、大きな変化はないと予想されるものの明らかになっていない。

そこで、これまでにNTNで開発してきた転がり軸受の統合動力学解析システム“IBDAS”³⁾を用いて、軸の回転速度とハブベアリングの曲げ剛性の関係の動解析を試みた⁴⁾。本報では、これらの動解析によって得られた結果を報告する。

2. 解析対象

ハブベアリングは図1に示すように2列の玉と保持器のセットからなる。インボード側の内輪はハブ輪に固定され、一定のアキシャル予圧が玉に負荷される。そこで、本報では、表1に示す複列アンギュラ玉軸受で構成

した回転系を計算することとした。軸受の運転条件は表2、荷重作用位置及び解析の座標系は図2に示すとおりである。蛇行しながら一定速度で走行する車両のハブベアリングを想定した条件であり、モーメント、アキシャル荷重及びラジアル荷重が周期的に変動する。

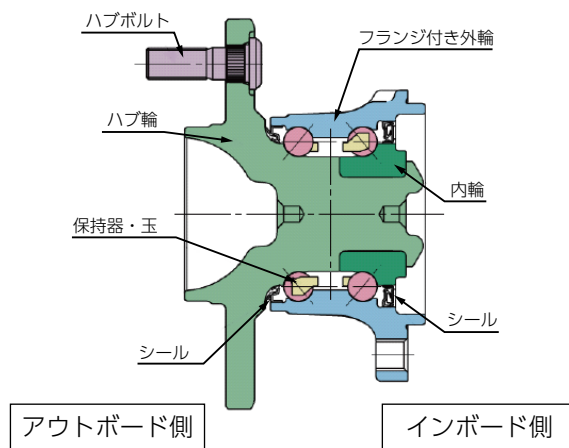


図1 ハブベアリングの一例⁵⁾

表1 軸受諸元

玉直径 mm	11.1
玉数 個	16
玉セットのピッチ径 mm	61
接触角 度	35
玉列間距離 mm	18.2
予圧 N	5,400

*CAE 開発研究所

表2 運転条件

車速 km/h	10, 50, 100
モーメント N mm	$-600 \times 10^3 \sim 600 \times 10^3$
アキシャル荷重 F_a N	$-1,890 \sim 1,890$
ラジアル荷重 F_r N	1,820 ~ 3,750
荷重作用位置 mm	10.4
荷重変動周波数 Hz	1, 10, 50

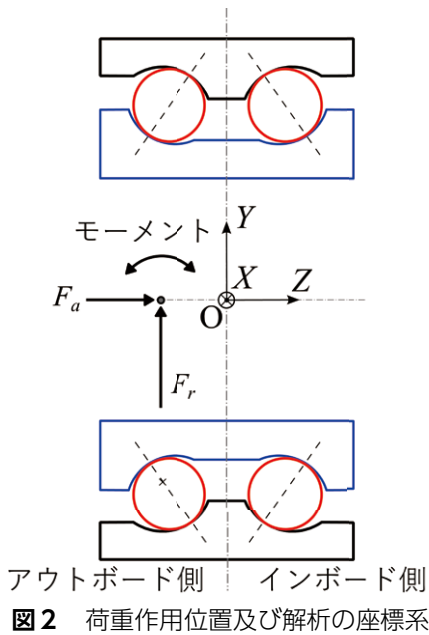


図2 荷重作用位置及び解析の座標系

3. 解析方法

運転中のモーメント負荷下のハブベアリングの傾き角の時間波形を、NTNで独自に開発した転がり軸受の統合動力学解析システム“IBDAS”³⁾を用いて計算した。

解析モデルに設定した運動の自由度及び拘束条件は表3のとおりである。軸受の外輪は空間内で固定され、内輪は自転を除いた運動の自由度を持つ。内輪にはハブ輪の質量及び慣性モーメントを付与した。また、玉及び保持器は3並進と3回転の自由度を持つ。IBDASはモード合成法により保持器の弾性変形を考慮でき、本解析では計56個の変形モードを各保持器に与えた。

表3 解析モデル内の運動の自由度及び拘束条件

外輪	自由度：無し（固定）
内輪	自由度：3並進，2回転 拘束：一定速度での自転
玉	自由度：3並進，3回転
保持器	自由度：3並進，3回転 弾性変形：モード数56

上記の自由度を有する玉軸受系の運動を動解析するためには、玉/軌道間及び玉/保持器間の接触部の垂直方向及び接線方向の力を適切に計算する必要がある。以下に、それぞれの計算方法を記す。なお、各種の力によって生じる玉のモーメントも、適宜、計算している。

3.1 玉/軌道間の接触部

接触圧力はヘルツ理論に従うと仮定して垂直方向の力を求める。そして、接線方向の力の計算では、3次元の玉の運動を適切に表現するために、接触楕円内の長軸方向の接触圧力及びすべり速度の分布を図3のように考慮する⁶⁾。具体的な計算方法を以下に示す。

ヘルツ圧下の接触楕円を長軸方向に対して n 個に分割したスライス片の垂直方向の荷重は、短軸方向に接触圧力を積分した後に長軸方向のスライス片領域で積分することで得られ、次式のように書き表すことができる。

$$F_{Nj} = \frac{3F_N}{2n} \left[1 - \frac{12 \{j - 0.5(n-1)\}^2 + 1}{3n^2} \right] \quad (1)$$

F_{Nj} は j 番のスライスに作用する垂直力、 F_N は接触部全体の垂直力、 j はスライス番号 ($0 \sim n-1$) である。

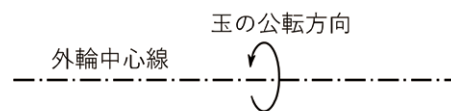
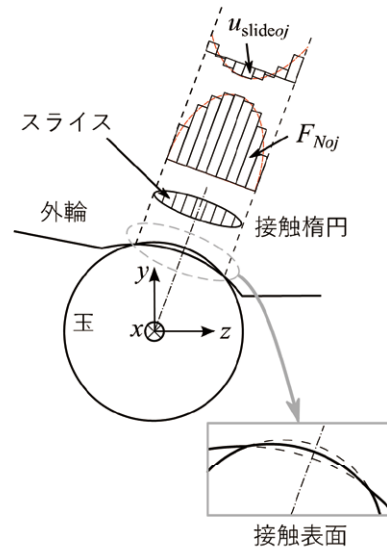


図3 玉と外輪の接触部の計算モデル (F_{Nj} は外輪から玉の j 番のスライスに作用する垂直力、 u_{slidej} は外輪に対する玉の j 番のスライスのすべり速度)⁶⁾

接線方向の力には、油潤滑下の接触部で想定される以下の3種の力要素を考慮している。

1. トラクション*¹
2. 転がり粘性抵抗力*²
3. 転がり方向の油膜力*³

ハブベアリングはグリース潤滑であるので、本報では、グリースの基油のみで上記の3種の力要素が決まると仮定した。以下に各力要素の計算方法の概要を記す。

各スライスに作用するトラクションは、軌道面に対する玉表面のすべり速度ベクトル \vec{u}_{slidej} の逆方向に作用すると仮定し次式で求めた。

$$\vec{F}_{Tj} = -\phi_j F_{Nj} \frac{\vec{u}_{slidej}}{|\vec{u}_{slidej}|} \quad (2)$$

ここで、 F_{Tj} は玉に作用するトラクション、 ϕ_j はトラクション係数、下付き添え字の j は j 番のスライスに関することを表す。上付きの矢印はベクトルを意味する。 ϕ_j は、流体潤滑下では潤滑油の特性を考慮した計算方法⁷⁾で、境界潤滑下ではすべり率*⁴のみによる関数で求め、混合潤滑下では両者のトラクション係数から膜厚比で補間して求めた⁸⁾。流体潤滑下でも、トラクション係数は、**図4**の計算例のように、すべり率に大きく依存する。

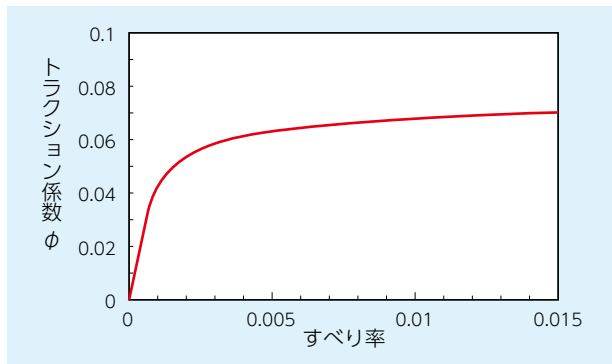


図4 トラクション係数の一例

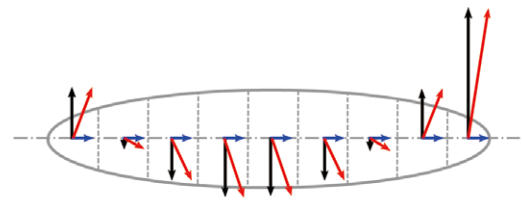
軌道面に対する玉表面のすべり速度ベクトル \vec{u}_{slidej} は次式で求める。

$$\vec{u}_{slidej} = \vec{v}_b + \vec{\omega}_b \times \vec{r}_{bcj} - (\vec{v}_{race} + \vec{\omega}_{race} \times \vec{r}_{racecj}) \quad (3)$$

- *1 転がり/すべり接触する2物体において、高速側では転がり方向と逆方向、低速側では転がり方向に作用する接線方向の力である。
- *2 油潤滑下で転がり接触する2物体の回転を妨げる方向に作用する、油膜のせん断力による力である。
- *3 油潤滑下で転がり接触する2物体に作用する油膜圧力によって、転がり方向に作用する力である。油膜圧力の中心が上流側へ移動するために生じる。
- *4 接触表面のすべり速度を接触表面の平均速度で除した値。

ここで、 \vec{v}_b は玉中心の並進速度ベクトル、 $\vec{\omega}_b$ は玉の角速度ベクトル、 \vec{r}_{bcj} は玉中心から j 番のスライス表面への位置ベクトル、 \vec{v}_{race} は軌道中心の並進速度ベクトル、 $\vec{\omega}_{race}$ は軌道の角速度ベクトル、 \vec{r}_{racecj} は軌道中心から j 番のスライス表面への位置ベクトルである。接触楕円内のスライス表面の位置の求め方は Jones の方法⁹⁾に基づく。

玉表面のスライスのすべり速度ベクトル \vec{u}_{slidej} は、**図5**に示すように、転がり方向だけでなく、軸方向の成分も有する。そのため、トラクションも、接触楕円の長軸方向に作用する成分を有する。



- 黒：すべり速度の転がり方向成分
- 青：すべり速度の軸方向成分
- 赤：すべり速度ベクトル u_{slidej}

図5 玉表面のすべり速度ベクトルの例

転がり粘性抵抗力は、玉及び軌道面に対して、転がり方向の逆向きに作用する。潤滑膜により生じる力であるため、潤滑膜が形成される流体潤滑下でのみ生じると仮定する。そして、転がり粘性抵抗力の大きさ F_R は、次式のように、高圧粘度弾性体領域 (PE) 及び高圧粘度剛体領域 (PR) の場合ならびに等圧粘度剛体領域 (IR) の場合に用いられる2つの式^{10) 11)}を、領域判定結果に応じて選択して求めた¹²⁾。

$$F_{Rj} = \begin{cases} \frac{C_l 29.2 R_j^* (G U_j)^{0.648} W_j^{0.246}}{\alpha_0} w & \text{for PE, PR} \\ 1.70 E^* R_j^* U_j \left(\frac{W_{Pmax}}{U_{Pmax}} \right)^{0.509} w & \text{for IR} \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 C_l は熱修正係数、 R_j^* は等価半径、 G は材料パラメータ、 U_j は速度パラメータ、 W_j は荷重パラメータ、 w はスライスの幅、 E^* は等価弾性係数であり、下付き添え字 $Pmax$ は接触圧力が最大になるスライスに関することを表す。

転がり方向の油膜力 F_{Pj} は、次式¹⁰⁾を用いて転がり粘性抵抗力から求めた¹²⁾。

$$F_{Pj} = \frac{2 R_j^* F_{Rj}}{R_{bj}} \quad (5)$$

ここで、 R_{bj} は玉の自転軸から接触部の j 番のスライスまでの半径である。

このように、接触楕円内の力の分布及びこの力を3

次元的に考慮していることから、IBDAS で求めた玉の自転及び公転速度の計算値は、Jones 理論⁹⁾による計算値とよく一致する⁶⁾。

3.2 玉 / 保持器間の接触部

保持器の表面を有限要素で分割した際の節点が玉に幾何学的に干渉する場合、この干渉量 δ_C に応じた垂直力 F_{NC} がヘルツ理論に従って生じると仮定した。

$$F_{NC} = k_{\text{Hertz}C} \delta_C^{1.5} \quad (6)$$

ここで、 $k_{\text{Hertz}C}$ はヘルツ理論の非線形ばね定数である。

接線方向の力の計算に関して、玉と保持器の間では純すべりになることから、すべり摩擦による力のみを考慮することとした。すべり摩擦力は次式で求めた。

$$\vec{F}_{TC} = -\mu_s F_{NC} \frac{\vec{u}_C}{|\vec{u}_C|} \quad (7)$$

ここで、 μ_s は摩擦係数、 \vec{u}_C は保持器ポケットに対する玉表面のすべり速度ベクトルである。本計算での μ_s は 0.06 とした。

4. 計算結果

各車速において、負荷したモーメントに対する内輪の傾き角の計算結果を図 6 に示す。荷重の変動周波数は 50 Hz である。モーメントに対する内輪の傾き角の波形にはヒステリシスがあることがわかる。そして、ヒステリシスを有するものの各車速の線群の傾き（コンプライアンス）は互いに等しいことがわかる。このことから、コンプライアンスの逆数であるハブベアリングの剛性も、車速に依存せず、互いに等しいことがわかる。

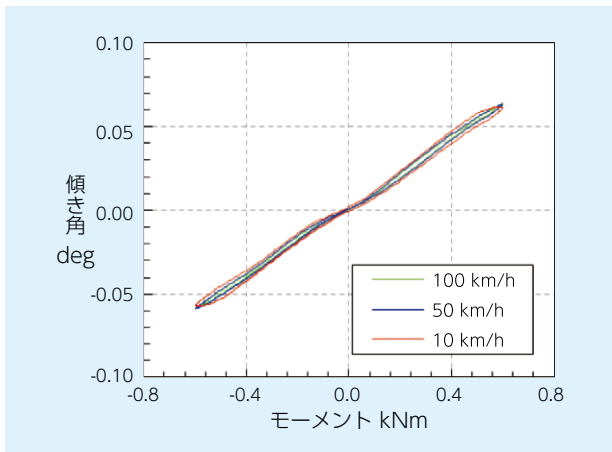


図 6 各車速におけるモーメントに対する内輪の傾き角の計算結果（荷重変動周波数 50 Hz）

次に、車速 10 km/h で荷重変動周波数を 3 水準に変化させた場合の、負荷したモーメントに対する内輪の傾き角の計算結果を図 7 に示す。モーメントに対する内輪の傾き角の線群の傾きは変わらず、ハブベアリングの剛性は荷重変動周波数に依存しないことがわかる。

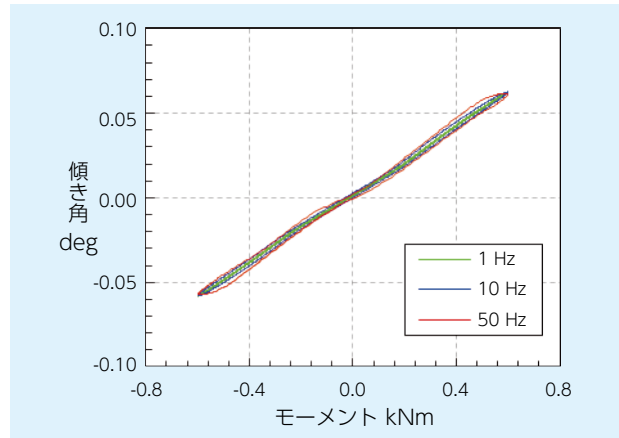


図 7 各荷重変動周波数におけるモーメントに対する内輪の傾き角の計算結果（車速 10 km/h）

一方、図 7 の線群にもヒステリシスの存在が確認できる。モーメントに対する内輪の傾き角のヒステリシスの存在は、地面から入力されたタイヤの横力に対し、ボディの横方向変位の増加が少し遅れて現れることにつながる。操舵に対するボディの横方向の変位で考えれば、横方向変位のピークがやや遅れて現れることを意味する。これは、車両の操縦安定性を低下させることになる。

そこで、ヒステリシスの大きさに及ぼす運転条件の影響を整理するために、図 8 に示すように、モーメント 0.3 kNm での傾き角の差を変動幅 W_H と定義して整理した。

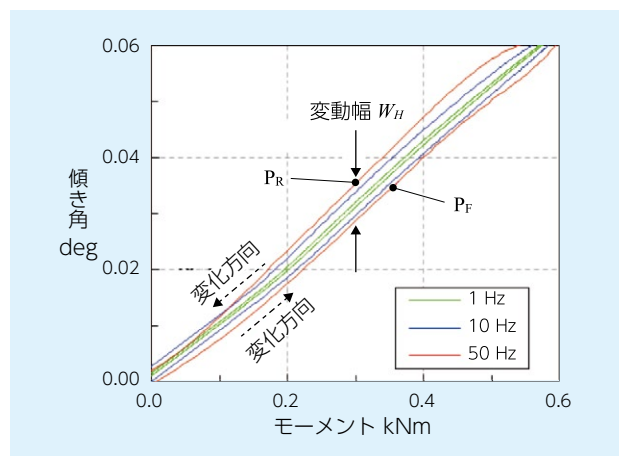


図 8 モーメントに対する内輪の傾き角のヒステリシスの大きさを表す変動幅 W_H の定義 (P_F および P_R 点は 5 章で使用)

車速及び荷重変動周波数をそれぞれ変えた場合の内輪の傾き角の変動幅 W_H を図 9 に示す。図 9 のように、車速が低下し、荷重変動周波数が上昇するほど、変動幅 W_H が大きくなるのがわかる。

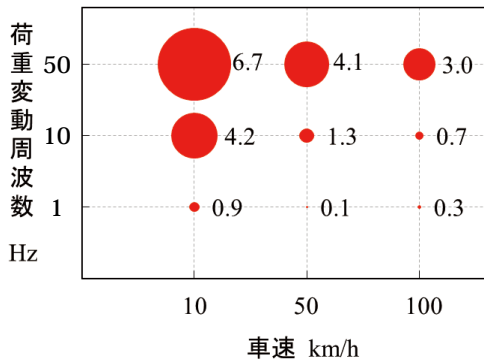


図 9 車速及び荷重変動周波数を変えた場合のモーメントに対する内輪の傾き角の変動幅 W_H の計算結果 (バブルの直径が変動幅に比例。バブル横の数字は変動幅 W_H deg/10³)

5. 考察

モーメントに対する内輪の傾き角の波形に変動幅 W_H が生じるメカニズムについて、以下に述べる。

変動幅 W_H が生じる理由は、図 10 に示すように、玉と軌道面の間で生じる接触楕円の長軸方向のトラクションが玉のラジアル平面内の移動を阻害するためである。図 10 において、右上の玉に作用する力に着目してこのメカニズムを以下に記す。

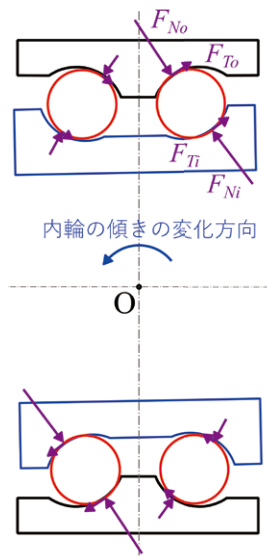


図 10 反時計回りに内輪が傾く最中に軌道から玉に作用する垂直力及びトラクションの全体イメージ

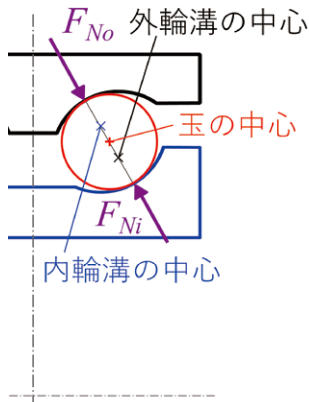
図 10 内の右上の玉に作用する力の代表的な状態を図 11 に表す。まず、図 11a) は内輪の傾き角が一定のまま、内輪が回転し続けている状態である。この場合、内輪の傾き角が不変のまま内輪が回転しているため、玉の中心は内外輪の溝中心点を結ぶ線上に位置し、内・外輪から玉に作用する垂直力 F_{Ni} 及び F_{No} は同一線上に並び、互いに釣り合う (ここでは、説明の簡略化のため、遠心力を無視している)。そして、内・外軌道から玉に作用するトラクションは転がり方向にのみ作用し、図の面内成分を持たない。

図 11b) は内輪の傾き角が反時計回り方向に増した直後で、まだ玉の移動が十分でない状態である。この場合、内輪からの垂直力 F_{Ni} は図のように向きを変える (ここでは、説明の簡略化のため、内輪から玉に作用するトラクション F_{Ti} はないものとした)。そして、軌道から玉に作用する力の合力は図の左上方向になる。

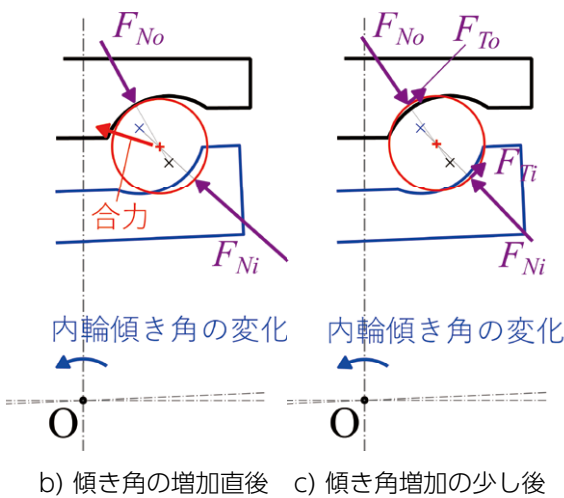
この図 11b) の直後に玉がこのラジアル面内で移動し、玉に作用する力とモーメントが釣り合った状態が図 11c) である。玉の移動により F_{Ni} 及び F_{No} の大きさと向きが変化するとともに、内・外輪から玉に作用するトラクション F_{Ti} 及び F_{To} が接触楕円長軸方向に生じ始め、図の右上の方向に働く。これらのトラクションのため、玉の中心は内・外軌道溝の中心点を結ぶ線上までは移動できず、図 11a) のようにはならない。

次に、内輪の傾き角は図 11c) と同じであるが、モーメントが減少途上で、内輪の傾き角が時計回り方向に変化していく場合を考える。すなわち、先の図 11c) が図 8 の P_F 点として、 P_R 点の場合を考えることとする。 P_R 点において玉に作用する力は、図 12 のように描ける。内・外輪から玉に作用するトラクションは図の左下方向に作用するため、玉は内・外軌道溝の中心点を結ぶ線よりも図中の左下に位置し、さらに F_{Ni} の角度も小さくなる。その結果、玉が内輪に与えるモーメントの大きさは図 11c) よりも減少し、図 8 の P_R 点のモーメントが P_F 点よりも低下していることにつながる。

以上のように、トラクションが接触楕円長軸方向に作用することにより、内輪の傾き角が変化している最中の玉の中心位置は、内輪の傾き角が一定の場合の玉の位置に到達できない。そして、このトラクションが内輪傾き角の変動幅 W_H を生じさせているといえる。



a) 傾き角一定で内輪が回転中



b) 傾き角の増加直後 c) 傾き角増加の少し後

図 11 反時計回りに内輪が傾く最中に軌道から玉に作用する垂直力及びトラクション

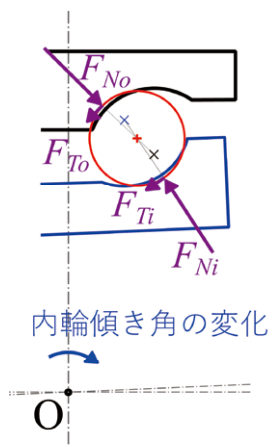


図 12 時計回りに内輪が傾く最中に軌道から玉に作用する垂直力及びトラクション

次に、変動幅 W_H が車速及び荷重の変動周波数に応じて変化した理由について述べる。

変動幅 W_H は、上述のように玉に作用する接触楕円長軸方向のトラクションの大きさに相関する。このトラクションの大きさは、図 4 に示したように、すべり率に大きく依存する。玉表面のすべり率 s_j は、接触部の転がり速度 $|\vec{u}_{rollj}|$ に対する玉表面のすべり速度 $|\vec{u}_{slidej}|$ の比であり、次式で与えている。

$$s_j = \frac{|\vec{u}_{slidej}|}{|\vec{u}_{rollj}|} \quad (8)$$

簡略化のために、玉と軌道の接触部内の（転がり方向のすべりのない）純転がり位置におけるすべり率について考える。この場合、すべり速度は荷重の変動周波数 f_{load} 、転がり速度は車速 u_v に、それぞれおおよそ比例する。そのため、すべり率 s_j は以下のように書き表すことができる。

$$s_j \propto \frac{f_{load}}{u_v} \quad (9)$$

よって、 f_{load} の増加及び u_v の低下は、すべり率 s_j の増加、トラクション係数 ϕ_j の増加、トラクションの増加、そして変動幅 W_H の増加につながると説明でき、図 9 の傾向ともよく一致する。

上記は転がり接触部内の純転がり位置での議論であったが、転がり方向にすべり速度がある位置では、式 (8) の分子に転がり方向すべり速度成分があるため s_j に及ぼす f_{load} の影響はやや低下する。しかしながら、長軸方向のすべり速度成分は増すため、やはり長軸方向のトラクションは増すといえる。

6. おわりに

動力学解析システム IBIDAS を用いて、内輪が回転している場合のハブベアリングの剛性を解析した。その結果、ハブベアリングの剛性は内輪の回転速度及びモーメントの変動周波数には依存しないことを確認した。さらに、変動させたモーメントに対する内輪の傾き角の波形にヒステリシスが存在することを確認した。このヒステリシスが生じる理由は、玉と軌道の接触楕円の長軸方向に働くトラクションのためである。荷重の変動周波数の増加及び車速すなわち軸の回転速度の低下は、この接触楕円長軸方向のトラクションを増加させるため、ヒステリシスの幅も大きくなる。

上記のヒステリシスは、モーメントに対するハブベアリングの角変位の応答遅れとして捉えることもできる。車両の操縦安定性を高めるためにはこの遅れは小さ

い方が好ましい。ヒステリシスを軽減したハブベアリングの開発に向け、CAE 技術を駆使して、さらなる要因分析を進めていく。

参 考 文 献

- 1) 船橋英治, ハブベアリングの変遷と最近の技術, NTN TECHNICAL REVIEW, No.70, (2002) 52.
- 2) 田窪孝康, ハブベアリングの台上評価試験, NTN TECHNICAL REVIEW, No.70, (2002) 74.
- 3) 関谷麻理子, 転がり軸受の統合動力学解析システム IBDAS の 紹 介, NTN TECHNICAL REVIEW, No.79, (2011) 119.
- 4) N. Shibutani, D. Imada, T. Sakaguchi, Dynamic Characteristic of Moment Stiffness of Hub Bearing, Proceedings of the 8th Asian Conference on Multibody Dynamics, (2016).
- 5) NTN 株式会社, ハブベアリング カタログ, CAT. No. 4601/J.
- 6) 坂口智也, 和泉麻理子, 中村智也, 木村俊哉, 内海政春, 液体水素からの力を考慮したターボポンプ用玉軸受の動力学解析, 第 68 回 ターボ機械協会沖縄地方講演会, (2012) 203.
- 7) 村木正芳, 木村好次, 潤滑油のトラクション特性に関する研究 (第 2 報), 潤滑, 28, (1983) 753.
- 8) T. Sakaguchi, K. Harada, Dynamic Analysis of Cage Behavior in a Tapered Roller Bearing, J. Tribol, 128, (2006) 604.
- 9) A. B. Jones, A General Theory for Elastically Constrained Ball and Radial Roller Bearings Under Arbitrary Load and Speed Conditions, Trans. ASME, J. Basic Engineering, 82, (1960) 309.
- 10) R. S. Zhou, M. R. Hoeprich, Torque of Tapered Roller Bearings, J. Tribol., 113, (1991) 590.
- 11) L. Houpert, Piezoviscous-Rigid Rolling and Sliding Traction Forces, Application: The Rolling Element-Cage Pocket Contact, J. Tribol., 109, (1987) 363.
- 12) 坂口智也, ころ軸受内の力および保持器応力の計算方法, 学位論文, 長岡技術科学大学 学術情報リポジトリ (2018) .

執筆者近影



坂口 智也

CAE 開発研究所

澁谷 直人

CAE 開発研究所

トランスミッション用超低フリクションシール付玉軸受 Ultra Low Friction Sealed Ball Bearing for Transmission

佐々木 克明
Katsuaki SASAKI

和久田 貴裕
Takahiro WAKUDA

水貝 智洋
Tomohiro SUGAI

1. はじめに

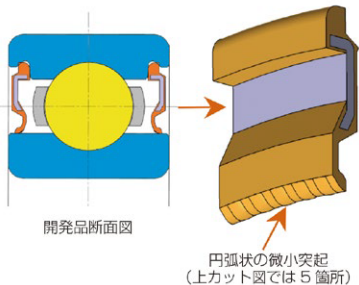
シールリップ形状の新規設計により世界初の流体潤滑領域での適用を実現した「トランスミッション用超低フリクションシール付玉軸受」を開発した。

本商品は、モノづくり日本会議・日刊工業新聞社主催の2018年“超”モノづくり部品大賞モビリティー関連部品賞を受賞した。

これまでにない独創的なシール思想により、理論と実験による検証で低トルクと長寿命を両立した画期的な発想が評価された。

2. 構造

超低フリクションシール付玉軸受の概略構造を以下に示す。



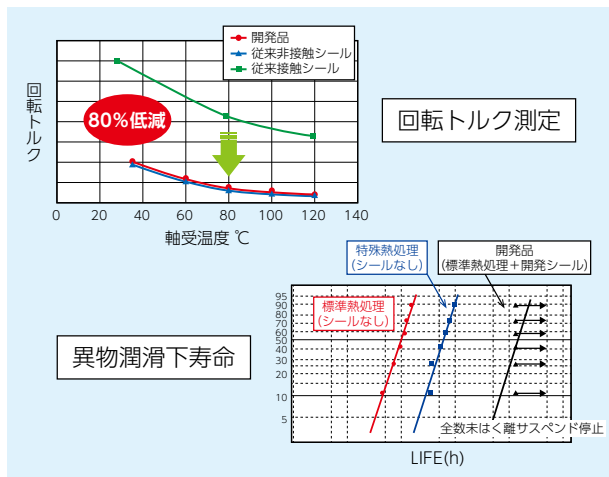
3. 特長

開発品の特長を以下に示す。

- (1) 世界初の流体潤滑シール（オープン品同等）
回転トルク 80% 低減（接触シール比）
- (2) 特殊熱処理品以上の長寿命
軸受寿命 5 倍以上（オープン品比）
- (3) 世界 No.1 のシール周速性能
シール周速 50m/s 以上
- (4) 従来接触シール同等のシール性
有害な異物侵入の抑制

注) オープン品 = シールなしの開放形軸受の呼称

非接触シール付軸受と同等の低トルクと共に、有害異物の軸受内への侵入を抑制する最適シール形状を解析と実験から検証した。特殊熱処理品と比較して 5 倍以上の長寿命軸受である。



4. まとめ

シールリップ部にくさび膜効果が発生する新機構設計を採用することで、非接触シール付軸受と同等の低トルクと特殊熱処理軸受以上の長寿命を実現した。高周速条件でもシールの耐久性は確保されており、EV・HEV などの高速回転用途にも対応できる接触タイプシールである。特殊熱処理軸受よりも安価であり、今後、積極的に市場展開していく。

参考文献

- 1) 水貝智洋, トランスミッション向け玉軸受用低フリクションシールの潤滑メカニズム, NTN TECHNICAL REVIEW 86, (2018)78-83.
- 2) 藤田工, 転動疲労寿命試験の計画と寿命データの解釈, NTN TECHNICAL REVIEW 84, (2016)74-79.

執筆者近影



佐々木 克明
自動車事業本部
自動車軸受技術部



和久田 貴裕
自動車事業本部
自動車軸受技術部



水貝 智洋
先端技術研究所

マイクロ水車 Micro Hydro Turbine

水谷 政敏*
Masatoshi MIZUTANI

松浦 文彦*
Fumihiko MATSUURA

川合 智哉**
Tomoya KAWAI

向井 浩氣*
Hiroki MUKAI

伊藤 隆志*
Takashi ITOU

後藤 知美*
Tomomi GOTOU

金村 泰成*
Yasunari KANAMURA

木村 寛太*
Kanta KIMURA

立石 康司*
Kouji TATEISHI

1. はじめに

マイクロ水車 (図 1) が日本経済新聞社主催の 2018 年 (第 28 回) 日経地球環境技術賞優秀賞を受賞した。既存の水路にそのまま設置するだけで発電し、地球環境に極めて優しく、グローバルに SDGs にも貢献できる。水のエネルギーを逃がさない高効率な翼形状と、同一水路に複数台を直列・並列配置することで発電電力を高めることが可能な点が技術的にも評価された。



図 1 マイクロ水車

2. 構成

製品構成を図 2 に示す。高効率翼と発電機を連結し、水路に固定するための梁で構成される。発電電力制御を行うコントローラは、バッテリーに充電する独立電源用と、売電を可能にする系統連系用の 2 種類があり、市場の多様な発電電力の活用方法への対応を可能にしている。

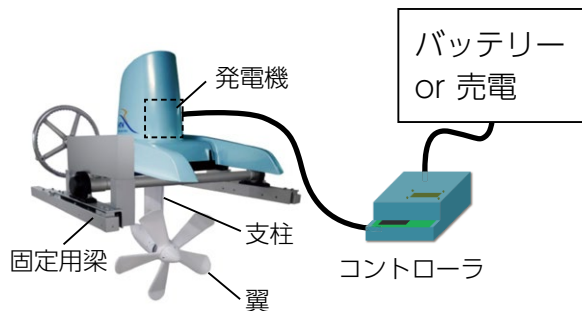


図 2 マイクロ水車の構成

* 自然エネルギー商品事業部技術部

** 自然エネルギー商品事業部事業推進部

3. 代表機種の製品諸元

翼径 90 cm 機は、流速 2 m/秒で 1 kW の定格出力を達成している (表 1)。

表 1 代表機種の製品諸元

水車方式	流水式プロペラ水車
発電方式	永久磁石同期発電機
翼径	60cm, 90cm, 130cm
定格出力	1kW (90cmモデル / 流速 2m/秒)
推奨水路	幅 100cm以上, 水深 100cm以上
寸法, 質量	H190cm × W230cm* × D170cm, 170kg

※設置する水路幅によって変わります。

4. まとめ

市場にある他社製小水力発電は水位の落差を作るための大掛かりな落差工事が必要で、その費用、あるいは自然環境を損なうことが課題であった。水路の幅に合わせた梁を水路に固定するだけで設置が可能なマイクロ水車は、これらの課題を解決し、農業用水、工業用水など再生エネルギーの地産地消を可能にすることで、幅広い分野での活用が期待される。

参考文献

- 1) 川合 智哉, 他: マイクロ水車, NTN TECHNICAL REVIEW No.84, (2016) 28-33.
- 2) 伊藤 隆志, 他: 系統連系用 NTN マイクロ水車, NTN TECHNICAL REVIEW No.86, (2018) 102-107.

執筆者近影 (代表者)



立石 康司*

ポータブル異常検知装置

小型軽量センサユニットにより様々な箇所での振動測定が可能



特長

①軽量・コンパクト

センサ, 電源, WiFi 無線ユニットを一体化 (幅 41mm × 奥行 36mm × 高さ 87mm, 145g)

②簡単測定

iOS 対応スマートデバイスで振動測定が可能

③異常判定機能

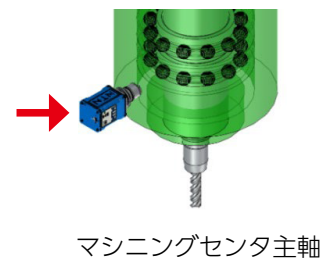
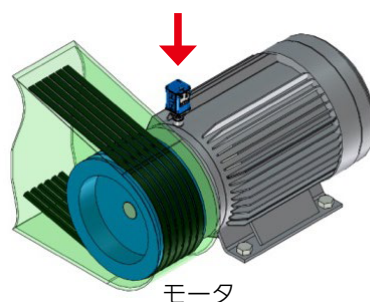
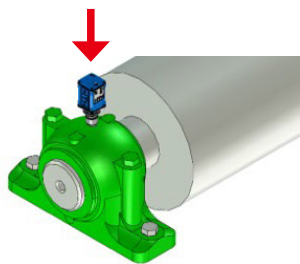
専用アプリにてO.A値, FFT分析による軸受の正常・異常判定, 異常時の損傷部位の推定が可能
また, スマートデバイス内に保管した測定履歴のグラフ表示により, 設備状況の継続監視も可能

④防塵性, 防水性

IP65対応

用途

・軸受の異常検知, 振動測定, 分析, 傾向管理

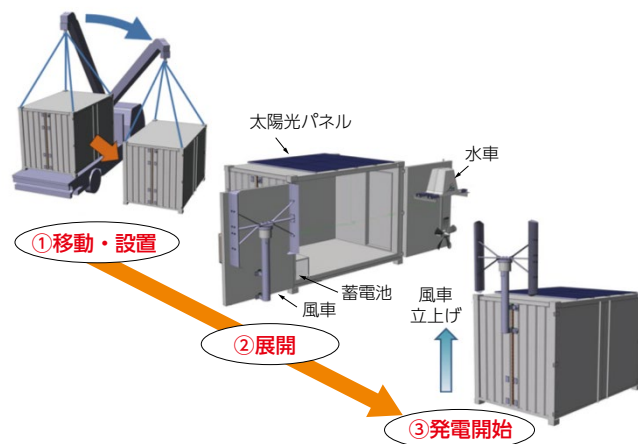


コンテナ収納移動型独立電源 N³ エヌキューブ

数時間で設置可能な自然エネルギー（風・水・光）発電 / 蓄電装置



コンセプトモデル



設置から発電開始までの流れ

特長

- ① 自然災害など緊急時対応 防災備蓄庫, 居住スペースに活用可能
- ② 風力, 水力, 太陽光による発電・蓄電装置を備えた移動型独立電源
- ③ 装置一式をコンパクトに収納
- ④ 数時間で設置でき, 速やかに発電・給電を開始

標準仕様

商品タイプ	12 フィートコンテナ (長さ 3.7m × 幅 2.4m × 高さ 2.5m)
輸送手段	トラック, 貨物船, ヘリコプター
発電装置	風車: 0.5kW, 水車: 1.0kW, 太陽光: 0.9kW, 蓄電池: 8.6kWh
施工工数	2 名 × 1 時間
耐久性	風車・太陽光: 30m/s * ¹ , 水車: 2m/s * ²

*1 極値風速 *2 最大流速

用途

