

“e-駆動系”として e-Axle と e-LSD を俯瞰する

An Overview of e-Axles and e-LSDs as Drivetrain Devices Prefixed “e”

技術オフィス・村上（正）*村上 靖宏

Yasuhiro Murakami*

*Murakami’s Office of Tribology Technologies

1. はじめに

今後とも二桁の CAGR（Compound Average Growth Rate：各年成長率）が予想される e-Axle と e-LSD を展望し、その市場動向を考察するとともにトライボロジーの課題を整理する。前者は、インバータ(Inverter)、モータ(Electric Motor)と減速機(Gearbox)を一体化した機構と説明されるが、ここでは BEV(Battery Electric Vehicle)、PHEV(Plug-In Hybrid Vehicle)と EREV(Extended Range Electric Vehicle)に搭載されるものを対象に議論する。

2. 市場動向

2.1 e-Axle : Highly-Integrated Electric Drive Unit

多くの報告が CAGR を 10%半ばから約 40%の間で予測しており、2031 年には USD140Bilion に達するという言及がある¹⁾。一方、近年、BEV 販売台数の伸びは鈍化しており、その CAGR は PHEV、EREV の伸長に依存していると言っている²⁾。その傾向は、BEV、PHEV と EREV の販売台数で世界市場の 70%を占める中国においても顕著に表れている³⁾。また、それらの AWD(All Wheel Drive)化にあたっては Rear e-Axle(e-Axle で後輪を駆動)の採用が e-Axle 市場の拡大に寄与している。

2.2 e-LSD : Electronic-Limited Slip Differential

LSD は雪道などの路面状況に応じて車両の駆動力を配分してスリップや空転によるスタック(Stuck)を抑え車両走行安定性を向上させる。従来の LSD には機械式多板クラッチ型、はすば歯車(ヘリカル)型のトルク感应式と、ビスカスカップリングの回転感应型があり、AWD(または 4WD)とともに交通安全意識の高まりを背景に市場を拡大してきた。しかしながら、LSD には旋回時の初期回頭性においてオープンデフより劣るという課題があり、それを改善した e-LSD が FWD(Front Wheel Drive)車両に搭載されて商品化されると初期回答性と旋回トラクションの両立による高い操縦安定性が評価された³⁾。BEV、PHEV と EREV を中心に多くの PV(Passenger Vehicle)が FWD であること、また、AWD を基本とする SUV(Sport Utility Vehicle)販売の増加も e-LSD の市場拡大に寄与すると見込まれ、多くの報告が 10%を超える CAGR を予測している⁴⁾。

3. トライボロジーの課題

3.1 e-Axle

3.1.1 小型化にともなう高回転への対応

e-Axle の搭載性向上のため、インバータ、モータと減速機で各々の小型化が図られる。インバータの小型化では SiC パワー半導体による冷却、放熱システムの簡略化が期待されている。モータの小型化のためには高回転化が図られるが、減速機減速比の増大、歯車と軸受においては①遠心力に起因する応力の発生、②接触機会の増加による損傷と熱の発生、③振動の増幅という課題が生じる。e-Axle の小型化について、34,000rpm の高回転化で 40%の小型軽量化を可能とした実証結果が報告されたが⁵⁾、近年、60%小型化した各社の商品計画が散見される⁶⁾。

a) 歯車の課題

駆動系の歯車については、使用油の低粘度化等、近年の使用環境に応じて歯面の摩耗と焼付きの防止、疲労寿命の向上が図られてきた。しかしながら、e-Axle における回転数の大幅な増加は、それらに加えて Table 1 に示す歯元強度の向上をあらためて設計課題とした。前記の実証⁵⁾に先立って小野式回転曲げ疲労試験を用いて疲労強度を向上した鋼材の開発報告があり⁷⁾、同様の開発意図を持った報告が続いている⁸⁾。一方、歯面の疲労寿命向上について水素フリー-DLC の適用例が報告され、その技術にも新展開があった⁹⁾。

Table 1 Design challenges in tooth root strength under high rotational speed

Factors	Influences on tooth root strength design	
	Development of bending and tensile stresses	Stress concentration
Centrifugal force	Development of bending and tensile stresses	Stress concentration
	Tooth profile deformation (Decline in gear meshing accuracy)	Increase in localized contact stress on tooth surface
Meshing cycles	Fatigue fracture caused by stress concentration (Propagation of microcracks)	
Vibration	Fatigue destruction	
Heat generation	Decrease in material strength (Tempering softening)	

b) 軸受の課題

モータの軸受には摩擦損失が少ないことと組み立て性を理由に深溝玉軸受が用いられる。高回転時の潤滑性において、グリース潤滑は油による潤滑より劣るが、空冷モータの場合には前者が用いられる。歯車と同様に回転速度の 2 乗

に比例する遠心力によって、①保持器の変形がもたらす外輪との接触、②潤滑不足による玉と内輪軌道面の滑り摩擦が生じる。これらは発熱による軸受温度の上昇を招いて焼付き等の破損の原因となるため、軸受の高回転化対応は、主に剛性の向上と発熱の抑制を図る保持器の改良、玉と内輪軌道面間の潤滑性確保の点から行われている¹⁰⁾。

3.1.2 専用油の標準化作業

e-Axle には既販の AT フルード等が流用されているが、加えてその油には電気絶縁性、冷却性、銅(巻線)腐食防止性の向上が要求されており、多くの調査と研究報告がある。特に、銅(巻線)の腐食防止性については、既存の ASTM D130 では新たな要求性能の規定が困難であることから、CDT(Conductive Deposit Test)と CWCRT(Copper Wire Corrosion Resistance Test)が開発され、前者は ASTM D8544 に規格化され、後者も同じく標準化が提案されている¹¹⁾。一方、市場および開発現場では、低粘度化の限界を引火点から導いた専用油がデファクトスタンダード(de facto standard)として認知されているが、Table 2 に示すように、各国で e-Axle 専用油の性能規格や評価試験法の標準化に関する議論が進んでいる。専用油の規格制定では中国が先行しているが、その国際的な影響力が注視されている。

3.2 e-LSD

車両が旋回する際、外輪>内輪となる回転差が生じる。オープンデフでは両輪に等しくトルクが伝わるが、LSD の場合、作動するとデフロック(両輪回転数が同じ)状態に導くため、伝わるトルクは内輪>外輪となる。すなわち、旋回方向である内輪のトルクが LSD>オープンデフとなるため、LSD では初期回頭性(曲がりやすさ)に制約を受ける。一方、遠心力を生じる旋回において、LSD では外輪のトルクが LSD>オープンデフとなるため旋回性は優る。e-LSD は初期回頭性を改善して旋回性との両立を図るもので、両輪に伝わるトルクは湿式クラッチによって電子的に制御される。このため、従来の LSD 油性能に加えて湿式クラッチとの締結と解放の応答性や μ -V 特性が専用油に求められる。

Table 2 Standardization efforts for dedicated e-Axle fluids

Organization/consortium		Specifications and test methods	
IFC	Electrical Vehicle Specifications	TBD	
US	SAE TC3 Electric Drive Fluid Task Force	SAE J3200_202210 : 2022	Fluid for Automotive Electrified Drivetrains
	ASTM	D130-19	Standard Test Method for Corrosiveness to Copper from Petroleum Products by Copper Strip Test
		D8544-24	Standard Test Method for Determination of Conductive Deposits of Electrical and Mechanical Components from Fluids in Liquid and Vapor States within an Electrically Charged System
	AFEV(SwRI)	TBD	
	Savant Laboratory (Lubrizol, Ford, APL)	Round-robin stage in ASTM	Copper Wire Corrosion Resistance Test
		ASTM D8544-24	Conductive Deposit Test
EU	GFC(France)	TBD	
	FVA(Germany)	TBD	
China	Professional Standard of the People's Republic of China	NB/SH/T6042-2021	Lubricant Oil for Electric Vehicle Reducer
Japan	PAJ・JAMA Electric Powertrain Fluid Task Force	To be JASO	

4. まとめ

多くの報告が e-Axle と e-LSD 市場拡大を予測している。BEV、PHEV と EREV 販売台数の増加は凡そ Front e-Axle(e-Axle で前輪を駆動)の拡大となり、安全志向による AWD と LSD の需要は Rear e-Axle と e-LSD の搭載機会を増やすことになる。また、SUV 販売の増加は Rear e-Axle と e-LSD 拡大に追い風となることが示唆されている。

e-Axle の小型化には高回転化への対応が求められ、主なトライボロジー課題が、歯車、玉軸受に加えて専用油に収束する。近年、専用油の必要性を背景に e-Axle 油の性能規定および評価試験方法については標準化が進んでいる。一方、e-LSD 油には従来のデフ油に加えて、使用される湿式クラッチとの締結と解放の応答性や μ -V 特性の要求から専用油が設定された。両者の小型化がさらに進むと、e-Axle と e-LSD 一体化開発の実現性が高まると予想される。

文献

1) 例えば、Verified Market Research: Global E-Axle Market, <https://www.verifiedmarketresearch.com/product/e-axle-market/>.
2) IEA : Global EV Outlook 2025 (2025)19, <https://iea.blob.core.windows.net/assets/c3f7fb7b-4205-4fd6-a20e-afe14a9aa252/GlobalEVOutlook2025.pdf>.
3) GKN : 新電子制御式 LSD「ETM2」と 4WD 車向け駆動力伝達機構「EMCD」説明会(2016 年 10 月 26 日), https://car.watch.impress.co.jp/docs/news/1027514.html#32_s.png.
4) 例えば、<https://www.marketreportanalytics.com/reports/electronic-limited-slip-differential-145469>.
5) AICHI STEEL NEWS Release, 世界初の 34,000 回転で 40%小型軽量化を実現する E V 向け電動アクスルを開発(2021 年 1 月 7 日), https://www.aichi-steel.co.jp/news_item/20210107_news.pdf.
6) 例えば、超小型 e-Axle のモデルユニット開発, 明電時報, 通巻 386 号, No.1 号(2025)19.
7) 宮西 他 : マイルド浸炭用鋼 MSB20 の開発, 新日鉄住金技報, 第 406 号(2016)56-57.
8) 例えば、面疲労/曲げ疲労強度に優れた浸炭浸窒用鋼. 電気製鋼, 第 96 巻, 第 1 号(2025)62.
9) 大城 他 : 転がり滑り環境下における水素フリーDLC の摺動特性, 住友電工テクニカルレビュー, 第 204 号(2024 年 1 月)68.
10) 例えば、奥村 : 自動車の電動化に伴う軸受の技術動向と展望, JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No.1019(2022)66.
11) F&L Asia Magazine: Global drive for standardisation in EV fluids and technologies, <https://www.fuelsandlubes.com/fli-article/global-drive-for-standardisation-in-ev-fluids-and-technologies/>.