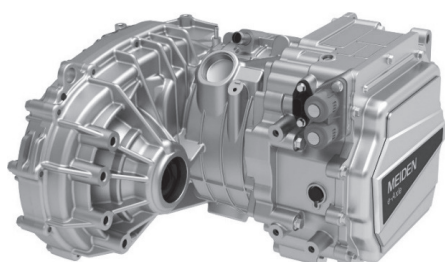


メイデンイーアクスル 水冷形 MEIDEN e-Axle の開発

上村 清 Kiyoshi Uemura
塩満栄一 Eiichi Shiomitsu

キーワード 統合化, 高出力密度, 高効率, e-Axle

概要



MEIDEN e-Axle

e-Axleとは、電気自動車をはじめとするxEV^(注1)車両における主要部品の一つで、モータ・インバータ・ギヤを一体化することで小形・軽量化を実現した電動パワートレインである。

当社は、2020年に当時トップクラスの低背と高出力密度、自己循環式油冷モータを特長とした150kW メイデンイーアクスル MEIDEN e-Axleを発表した。

その後、電動車両の普及に伴い、e-Axle市場も急速に拡大を続けていることから、更なる性能改善とコスト低減を織り込んだ水冷形150kW機を開発した。

油冷用部品の削減、筐体の一体化による部品削減、及びインバータ変調率拡大による磁気回路の小形化などによって、出力密度を10%以上改善した。

1 まえがき

e-Axleとは、電動車両の駆動で必要とされるモータ・インバータ・ギヤ（減速機・デフ）など、従来個別にレイアウトされていたものを一体化したものである。一体化することで小形・軽量化を実現し、スペース効率の向上・電費（電気自動車〈EV〉の燃費）改善に貢献する。

当社は、2020年に三位一体形駆動ユニット メイデンイーアクスル MEIDEN e-Axle（明電時報367号、2020年/No.2, pp.32-37参照）を発表した。今回、更に改良を加え、小形・低コスト化を実現した水冷形MEIDEN e-Axleを開発した。本稿では、この水冷形MEIDEN e-Axleの特長と今後の開発動向を紹介する。

2 MEIDEN e-Axleの仕様と特長⁽¹⁾

2020年に発表したMEIDEN e-AxleはCセグメント車（ミディアムカー）を想定し、最高出力150kW、最大トルク3026N・mのスペックを持つ駆動ユニットである。第1表に性能・仕様を示す。主な特長に(1)低背（低重心）、(2)高出力密度、(3)高連続定格出力があり、詳細は以下のとおりである。

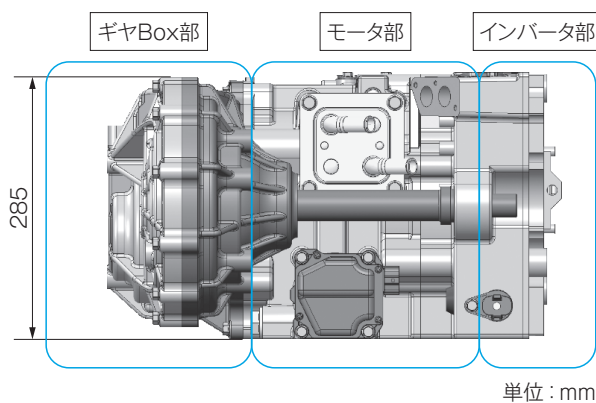
(1) 低背（低重心） 第1図に各コンポーネントの仕様を示す。モータ・インバータ・ギヤをアキシャル方向に配置することで、クラス最薄形（高さ285mm）を実現した。これにより、自動車構造上狭いとされるリアフロア下にも搭載できる。第2図に車両搭載図を示す。

(2) 高出力密度 当時の市場トップにあたる出力密度を達成するために、モータ・インバータ・ギヤの各コンポーネントの構成を最適化している。

第1表 MEIDEN e-Axle油冷モデル性能・仕様

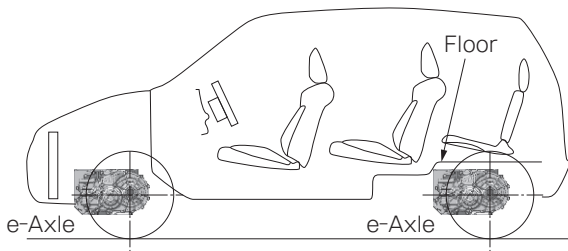
2020年に発表したMEIDEN e-Axleの性能・仕様を示す。

項目	MEIDEN e-Axle 油冷モデル
最大出力 ※30s定格	150kW
最大トルク（モータ）※30s定格	3026（260）N・m
連続定格出力	100kW
連続定格トルク（モータ）	1164（100）N・m
最高回転速度（モータ）	1333（16,000）min ⁻¹
減速比	12.0
質量	76kg
サイズ	W486×H285×L460mm



第1図 各コンポーネントの配置

ギヤBox・モータ・インバータの配置構成を示す。



第2図 車両搭載図

車両側面から見た搭載イメージを示す。製品が低背のため、3列シート車のリア側にも搭載できる。

第2表に各コンポーネントの仕様を示す。モータは永久磁石同期電動機（PMモータ）とし、以下(a)～(c)を採用し小形化を図っている。

- (a) 高回転化と高い減速比を採用することで必要トルクを低減
- (b) 平角線を採用することで占積率を向上
- (c) 磁石2重V字化による高回転化と高効率化の両立

第2表 各コンポーネントの仕様

2020年に発表したMEIDEN e-Axleのモータ・インバータ・ギヤBoxの主な仕様を示す。

項目	仕様
モータタイプ	IPM方式 角線ステータ 磁石2重V字
モータ冷却方式	自己完結式油冷
インバータ電力変換素子	Si-IGBT
ギヤタイプ	平行3軸方式

インバータは、従来品に対し容積を45%低減した新形Si-IGBT（Silicon Insulated Gate Bipolar Transistor）、ギヤも単体でもクラストップの軽量となる平行3軸方式のギヤBoxを採用している。

(3) 高連続定格出力 クラストップとなる100kWの高い連続定格性能を有し、そのためにモータ内部を冷却油で直接冷却する油冷方式を採用している。車両側のレイアウトの自由度を高めるため、オイルポンプ・クーラーなどの循環システムはe-Axleに内蔵している（車両側から冷却油の供給不要）。

3 出力密度改善モデルの開発

2020年に発表した150kW油冷形MEIDEN e-Axleは、当初の開発目標であるクラストップの出力密度2.0kW/kgを達成した。しかし、2022年の中国市場でのe-Axleの搭載台数は、毎年前年比100%以上増加しており、急速な市場拡大が進んでいる。これに伴い、2021年末に出力密度の更なる改良、及びモータ水冷化による大幅なコスト低減を計画した。

第3図に150kWクラスe-Axle出力密度トレンドを示す。出力密度目標は、市場競争力を維持するため油冷モデルを基準に中国汽车工程学会のロードマップ相当の改善を適用した場合の2024年時点の値に設定した⁽²⁾。

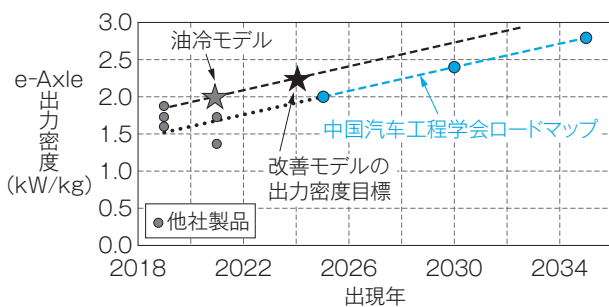
3.1 モータ仕様の見直し

市場のスピードに合わせて短期間での出力密度改善を目標としたため、新規材料の検討などは除外

して考える必要があった。そこで、二つのモータ設計条件の緩和を検討した。

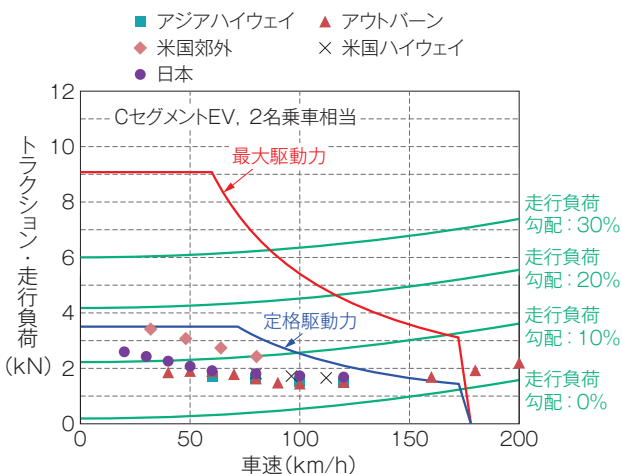
一つ目は、余裕の大きかった連続定格出力の見直しによる油冷方式から水冷方式への変更である。水冷化によってオイルポンプ・オイルクーラーなど専用の部品を削減し、機構の簡素化・コスト低減を図った。連続定格は100kWから70kWに変更したが、100km/h・10%勾配の連続走行ができ、実用上は十分な性能があると判断した。最大トルクは、油冷方式と同等レベルを確保することを目標とした。第4図に水冷モデルの駆動トルク・走行負荷曲線を示す。

二つ目は、インバータ電力変換における電圧利用率の拡大である。これにより、性能を維持しつつ



第3図 150kWクラスe-Axle出力密度トレンド

2021年時点でMEIDEN e-Axle油冷モデルの出力密度は業界トップクラスである。さらに、そこから中国汽车工程学会のロードマップ相当の改善を計画した。



第4図 駆動トルク・走行負荷曲線

車軸連続定格トルク・勾配ごとの走行負荷曲線・ドットは、各国に存在する道路の制限速度と走行負荷を示す。モータトルク曲線の中側(左下側)は走行でき、外側は走行できない。

モータ磁気回路の小形化を図った。

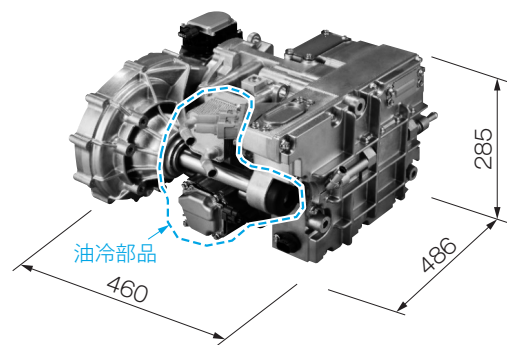
3.2 ユニット構造の見直し

第3表に出力密度改善のための構造上の変更点一覧を、第5図に改善前後の外形寸法・質量・容積を示す。構造は、インバータアキシヤル配置による低背化のコンセプトを踏襲した。水冷化に伴

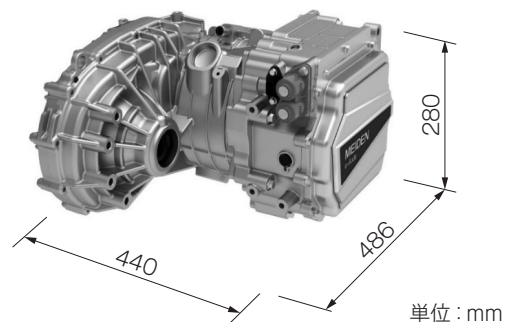
第3表 出力密度改善のための構造上の変更点

モータ・インバータ・ギヤBox各コンポーネントでの出力密度改善アイテムを示す。

項目	内容
モータ冷却方式	油冷→水冷化 油冷冷却部品廃止
モータ磁気回路	軸長10%短縮
インバータ出力電圧	5% UP
DCリンクコンデンサ	静電容量38% Down
中間シャフト	廃止(オプション化)
筐体構造	ギヤケース・モータフレーム一体化



(a) ベースモデル 質量76kg 容積64L

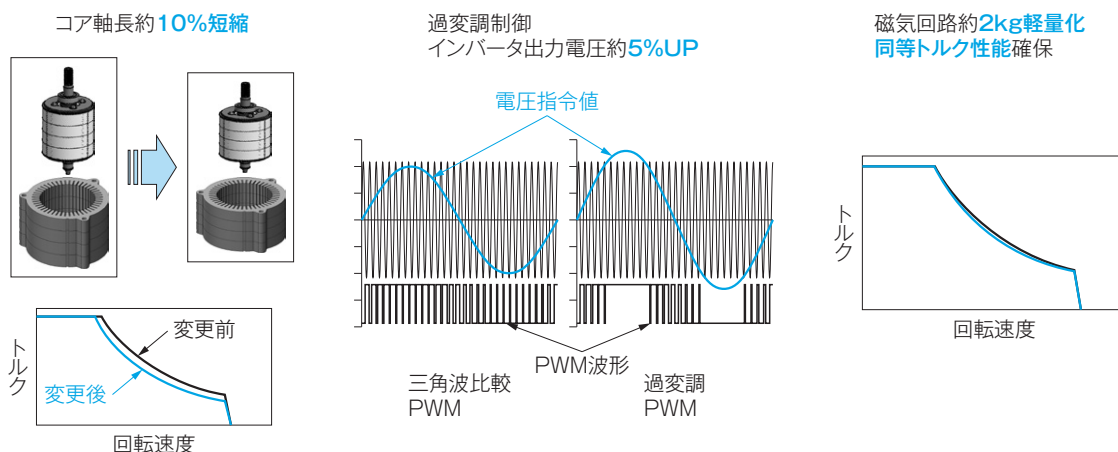


(b) 改良モデル目標 質量69kg 容積60L

注: 容積は車両搭載上必要となるWLH寸法から計算

第5図 e-Axle外形寸法・質量・容積

ベースモデルとなる油冷形と今回開発した水冷形e-Axleの外観を示す。開発品は、製品高さ・幅(軸方向)をベースモデルより小形化した。



第6図 モータ磁気回路小形化検討結果

軸長と発生トルクの関係、電圧使用率向上方法、及び改善品の磁気回路軽量化効果とモータトルク性能を示す。

い、オイルポンプ・クーラーなど油冷部品の削減を図った。

また、ギヤとモータの筐体一体化による質量・体格の低減、締結用ボルトの削減も合わせて行った。その結果、78kgあった質量を69kgまでに軽量化した。

3.3 磁気回路・電気回路小形化

第6図にモータ磁気回路小形化検討結果を示す。小形・軽量化のため、コア軸長を約10%短縮する仕様とした。単に軸長を短くするとトルクの低下を伴うため、インバータ電力変換における電圧利用率を向上させた。これにより、コア軸長短縮前と同等のトルク性能を確保した上で、磁気回路部分を約2kg軽量化した。

さらに連続定格出力仕様を緩和することで、直流(DC) リンクコンデンサのリプル電流を低減させた。これにより、コンデンサ容量を約35%低減し、インバータ部の小形・軽量化を図った。

4 性能評価結果

出力密度改善モデルの性能評価結果を、ベースとなる油冷モデルとの比較も交えて述べる。

4.1 効率

第4表にe-Axle総合効率評価結果を示す。設計

第4表 e-Axle総合効率評価結果

2020年に発表したMEIDEN e-Axle及び本開発品でのモータ・インバータ効率、e-Axle総合効率を示す。

項目	2020発表モデル	設計目標	評価結果
モータ効率	97.0%	≥97.0%	97.3%
インバータ効率	98.0%	≥98.5%	98.5%
e-Axle総合効率	92.8%	≥93.5%*1	93.5%

注: ※1. 中国汽⻋工程学会:「省エネ・新エネルギー車技術ロードマップ2.0」2025年目標値

目標は、前述した中国汽⻋工程学会のロードマップ値を参考にしている。ベースモデルに対し、インバータの電圧使用率向上に伴いモータ電流を低減したことから、モータ・インバータの最高効率を改善した。ギヤは内部レイアウトを変更し、冷却油かくはん抵抗を低減させることで、効率を改善している。

その結果、e-Axle総合効率でベースモデルより0.7%改善し、中国汽⻋工程学会2025年目標をクリアしている。

4.2 出力密度

第5表に軽量化がもたらす電力消費量改善結果を示す。ベンチマークとして21年時点での市場平均値も記載した。油冷モデルから約1割の軽量化を行い、質量69kg、出力密度2.2kW/kgを達成した。

電力消費量は、エネルギー変換効率を同一とし、e-Axleの出力密度改善による効果を算出したものである。出力密度を向上させ車両を軽量化すること

第5表 軽量化がもたらす電力消費量改善結果

油冷モデル・水冷モデルの定格出力・製品質量・出力密度、及び想定車両での電力消費量改善結果を示す。

	ベンチマーク 2021年時点 市場平均	油冷 モデル	水冷 開発機	
最高出力 (kW)	150	150	150	
連続定格出力 (kW)	—	100	70	
モータ	—	油冷	水冷	
	—	平角線	平角線	
e-Axle質量 (kg)	100	76	69	
e-Axle出力密度 (kW/kg)	1.5	2.0	2.2	
車両質量 (軽量分) (kg)	1880	1832 (-48 ^{*1})	1818 (-62 ^{*1})	
電力消費量 ^{*1}	(kWh)	3.41	3.37	3.36
	改善率 (%)	—	1.2%	1.6%

注. ^{*1}. Cセグ SUV 2名乗車, e-Axle前後2台搭載想定, CLTC-P走行モード 駆動側電力消費量

で、走行時に必要な駆動トルクを抑制し、電費の改善、航続距離拡大に貢献できる。

4.3 モータ冷却方式

今回、連続定格の緩和を引き換えに、モータを水冷化することで油冷コンポーネントの削減による低コスト・軽量化を行った。その結果、車両が要求する定格出力に応じ油冷・水冷の使い分けが有用であることを把握できた。MEIDEN e-Axleでは、車両要求出力に応じて異なるモータ冷却方式を提案する。

5 当社の今後の開発方向性

昨今では電気自動車へのe-Axle搭載が進み、主流となりつつある。今後は電気自動車の普及とともに、OEM (Original Equipment Manufacturer) やセグメントごとに多様な要求が増え、e-Axleに対しても小形・軽量化、高効率化、高出力化など多様な要求に対応していくことが求められる。

当社では、今後このような多様な要求に対応するため、設計の柔軟性と高出力・高トルク密度をコン

セプトとした、D、Eセグメント車両（アッパーミディアム、フルサイズカー）や小形トラックへの搭載を想定とした800V系高出力e-Axle、及びA、Bセグメント車両（軽・コンパクトカー）を対象とした超小形低出力e-Axleの開発に取り組んでいく。

6 むすび

水冷形MEIDEN e-Axleの開発を通して、以下の成果を得た。

- (1) 油冷モデルに対し、同等以上の効率を実現
- (2) 仕様・構造の見直しによる大幅なコストダウン
- (3) トップクラスのe-Axle出力密度の実現

今後は、市場の多様な要求を満足する製品の更なるラインアップの拡充を進めていく。

・本論文に記載されている会社名・製品名などは、それぞれの会社の商標又は登録商標である。

(注記)

注1. xEVは、電気自動車・ハイブリッド車を含めた電動車の総称

《参考文献》

- (1) 上村 清・吉田 裕明・青木 淳一・足利 正・中野 義則：「Development of e-Axle with High-Power-Density PM Motor」, EVTeC2021, 2021, pp.1-8
- (2) 中国汽车工程学会：「节能与新能源汽车技术路线图2.0」, 2020, p.345

《執筆者紹介》



上村 清
Kiyoshi Uemura
EV 営業・技術本部開発第一部
EV用モータ・インバータ・e-Axleの開発に従事



塩満 栄一
Eiichi Shiomitsu
EV 営業・技術本部営業部
EV用モータ・インバータ・e-Axleの営業技術に従事