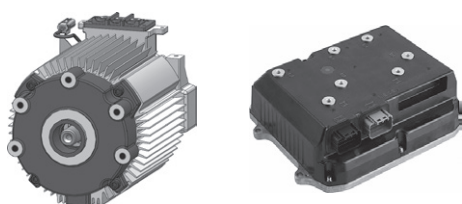


# 産業車両電動化による カーボンニュートラルへの貢献

狩野博之 Hiroyuki Kano  
藤原侍士 Hitoshi Fujihara  
出井尚武 Shobu Idei

キーワード 産業車両の電動化、カーボンニュートラル、高効率

## 概要



産業車両用モータ（左）とインバータ（右）

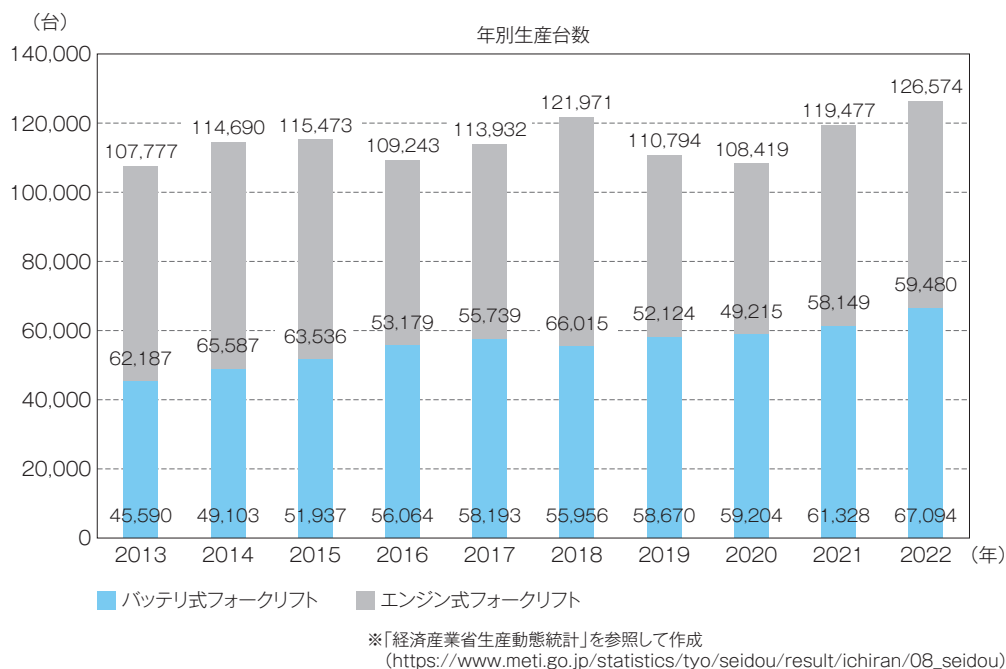
環境意識の高まりから産業車両の電動化が進んでいる。当社は、50年以上にわたりフォークリフト業界に製品を提供し、国内のトップサプライヤとしてフォークリフト業界を支える一端を担っている。バッテリー式フォークリフト向けモータの開発は直流モータから始まり、インバータの制御技術の向上によって交流モータに置き換わっている。近年では省エネルギーの要求から永久磁石同期電動機（PMモータ）を納入することが増えている。今後はフォークリフトだけではなく、建設機械や農業機械への適用など、当社の電動化技術の活用が様々な分野で期待されている。産業車両向け適用技術だけではなく、電気自動車（EV）向け適用技術を用いた新製品を提供し、お客様の要求に対応したモータ及びインバータの開発を進めている。

## 1 まえがき

フォークリフト市場では、環境への意識の高まりからバッテリー式フォークリフトの生産台数が伸びている。第1図にフォークリフト生産台数の推移を示す。経済産業省生産動態の統計によると2022年の国内フォークリフト生産台数は126,574台（昨年比105.9%）と2年連続の増加となった。動力別ではバッテリー式が67,094台（109.4%）と4年連続で増加している。バッテリー式フォークリフトは、一般的にエンジン式フォークリフトに比べ車両価格が高いとされているが、メンテナンスを含めたランニングコストを抑えることができる。

現在、当社がフォークリフト市場に納入している主な製品は、バッテリーからの電圧を変換・制御するインバータ、車両の電装品に電力を供給する電源コントローラ、荷役の油圧ポンプ用モータ、走行用

モータである。当社は1965年にバッテリー式フォークリフト用直流モータを開発し、以降50年以上にわたり製品を提供している。インバータの制御技術の向上によって、2000年代に長年主流であった直流モータから交流モータに置き換わった。近年は省エネルギーの要求が高まり、永久磁石同期電動機（PMモータ）を納入することが増えている。最近ではフォークリフトだけではなく、そのほかの産業車両用モータ・インバータの開発にも注力している。昨今、建機市場でもカーボンニュートラルが掲げられ、電動化が進んでいる。当社が長年培ってきたフォークリフト用コンポーネント技術を応用し、建設機械向けにいち早く製品納入した実績がある。従来のエンジン車は、作業現場の環境改善や騒音対策を必要としていたが、動力源をエンジンからモータに置き換えることで、排ガスゼロ・排熱削減による環境負荷低減のみならず、お客様に低騒音のメリッ



第1図 フォークリフト生産台数の推移

2016年以降バッテリー式フォークリフトの生産割合が5割を超えている。微小ではあるが年々バッテリー式フォークリフトの生産台数が増えている。

トを提供する。建設機械の容量展開や、さらには農業機械への適用など、当社電動化技術の活用が幅広い分野で期待されている。産業車両向け適用技術だけではなく、電気自動車（EV）向け適用技術を用いた新製品を提供することで、世界のカーボンニュートラルを推進していく。本稿では、産業車両の電動化技術を紹介する。

## 2 フォークリフト用モータ

フォークリフト用モータは、EVと同様にバッテリー消費を抑えるために高効率なモータが求められる。PMモータが誘導機よりも小形・高効率であることは周知であるが、PMモータが普及した現在でもフォークリフト用途で採用されるモータは誘導機が主流である。これは、双方の車両がモータに求める製品質量及び保護構造の仕様が大きく異なるためである。

### 2.1 保護構造

フォークリフト用モータに求められる保護構造は、大きく分けて二つある。一つは、モータ外被に

通風孔を設けた「開放形」と呼ばれるもので、自らの回転運動で起こした回転子の両端に設けた羽根による風でステータコイルを直接冷やす構造である。屋外を走行する自動車とは異なり、工場や舗装された敷地内での走行を想定するフォークリフトでは、フレームレスモータをはじめとするこの開放形モータが広く採用されている。

もう一つは、モータ外被に開口部を設けず、水やじんあいからの有害な影響を受けにくい「全閉形」と呼ばれるものである。内部の熱を外被に熱伝導させて、その熱を外被から放熱する自冷構造のモータがこれに相当し、使用環境を考慮することで選択される。

一方、EVでは車両に搭載されている油冷・水冷システムを生かした強制冷却構造のモータが多く採用されている。開放形よりも冷却能力に優れ、なおかつ全閉形以上の保護等級を有する構造となっている。一見して、仕様が全く異なりフォークリフト用とは共通要素が見当たらないように見えるが、モータ内部構造に着目すると、固定子・回転子のサイズが近似していることが分かる。

## 2.2 EV用モータの技術転用の利点

モータの外観構造は、その用途によって都度、専用設計が必要とされるが、モータ内部構造の固定子・回転子は設計共通化できる。EV用モータでは、より高い出力密度が必要とされているため、PMモータの主要構成部品である電磁鋼板及び永久磁石は高グレードの材料が選定されている。高グレードの材料は高価で、性能とコストを両立させることは極めて困難であるが、EV用モータは購入量の多さによってそれを実現している。この材料の採用は新規モータの開発で、あらゆる面で有利になると考え、新規産業車両用モータの設計方針に当社EV用モータ設計の技術応用を掲げた。

EV用モータは産業用途としては有数の生産量を誇り、1機種のみを生産するためにほぼ全ての工程が専用設備で構成されている。専用設備であるがゆえに、僅かな設計の差異も許容されないという設備制約があり、この設備を使用するために設計の自由度が下がる。本開発では自由度を確保しつつ、EV用モータで培った量産化技術を生かす設計とし、産業車両に適用させた。

## 2.3 モータ運転範囲の比較

フォークリフト用モータと比較して、EV用モータの運転領域の方が広域で使用されている。前述のとおり、EV用モータは車両の強制冷却機構を前提とした仕様で設計されているのに対して、フォークリフト用モータでは、車両からの冷却アシストを受けない自冷構造の仕様で設計されている。本開発事例では、EV用モータの冷却能力に応じた出力密度を把握することで、冷却仕様が異なる多用途への技術応用を実現させた。

## 2.4 バッテリ電圧

EVのバッテリーは高電圧化が進み、現在ではDC800Vまで対応が進んでいる。これに対して、小形バッテリー式フォークリフトでは、高電圧仕様でもDC80V程度が主流であり、その差は10倍にも及ぶ。フォークリフト用モータはその低電圧仕様のメリットを生かし、コストを抑えた簡易な絶縁構成で設計

されている。EV用モータは通常の何倍もの絶縁耐力をもつが、前述のとおり、EV用モータの材料は性能とコストの両立が図られている。さらに、EV用途で長期信頼性評価が完了している絶縁構成を採用することは、価格・品質だけではなくモータの開発期間の短縮にも大きな効果をもたらす。産業車両に搭載されるバッテリーは、今後、高電圧化に進んでいくことが想定される。よって、高電圧仕様の産業車両用途を視野に入れたモータ開発を進めていく所存である。

## 2.5 PMモータ

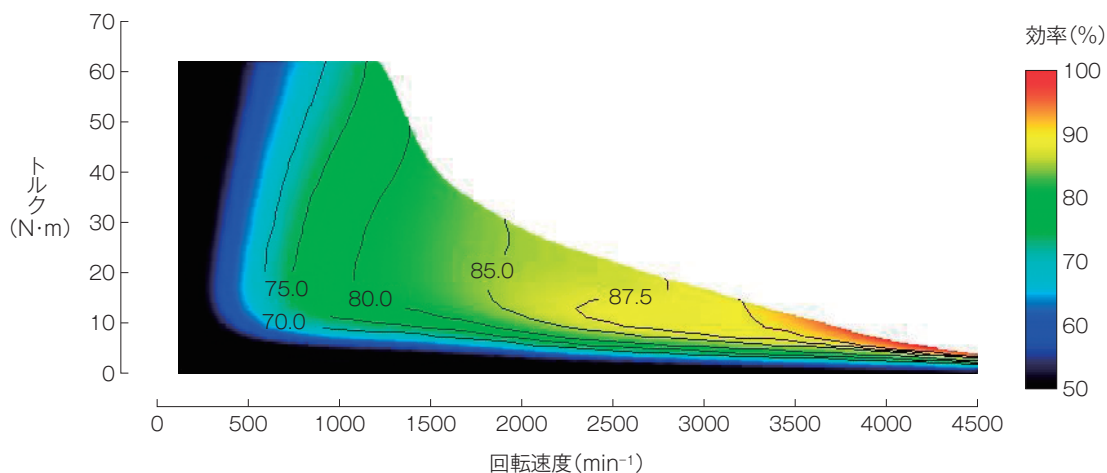
フォークリフト1t車の走行モータを模擬した回転速度-トルク特性を例に、EV用モータ採用における効率改善事例を紹介する。第2図に誘導機、第3図はEV用モータ技術を転用したPMモータの効率MAPを示す。PMモータの優位性とEV用モータの高効率技術が掛け合わさることで、1000～1500min<sup>-1</sup>の領域では10%程度の改善が見られ、この新規PMモータの効率性能であれば、車両の電力消費低減に大きく貢献できると考える。

## 3 フォークリフト用コントローラ

当社のバッテリー式フォークリフト用インバータAC400シリーズは、現在までにバッテリー電圧36/48V及び72/80Vに対応して開発し量産してきた。バッテリー式フォークリフトは、エンジン式に比べてパワー不足が課題になっている。エンジン式に匹敵する車速と登坂力を実現するために、バッテリー電圧108/120Vに高電圧化した車両の要望があり、それに対応するインバータを開発した。また、同車両へ搭載する各電装品へ電力を供給する電源コントローラも開発した。

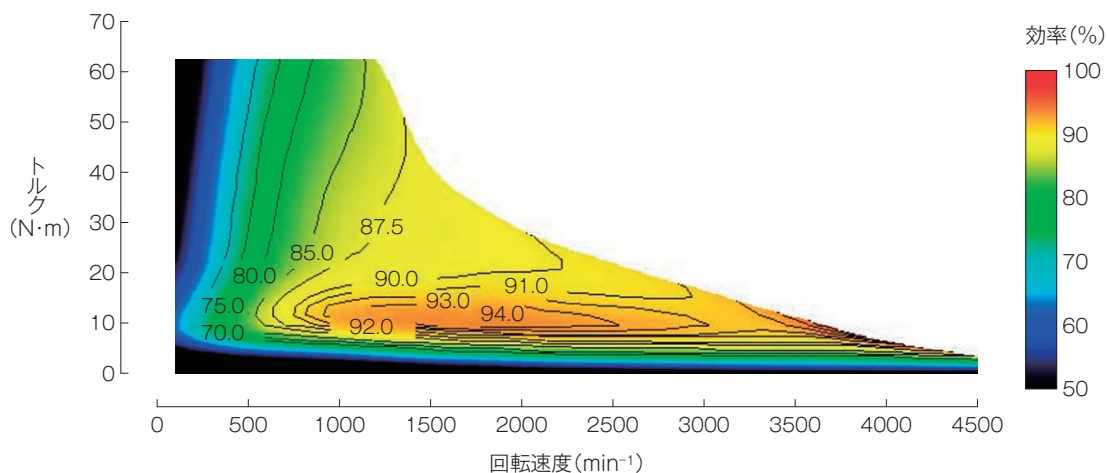
### 3.1 バッテリ電圧108/120V対応インバータ

主回路素子のMOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) は高耐圧品を選定し、その関係でオン抵抗が増加するため定常損失が増加する。全体の損失を低減するためス



第2図 誘導機効率MAP

フォークリフト用モータの運転特性における誘導機のモータ単体効率MAPを示す。横軸はモータ回転速度を表し、縦軸はトルク、コンターは効率を表す。



第3図 PMモータ効率MAP

フォークリフト用モータの運転特性におけるPMモータのモータ単体効率MAPを示す。横軸はモータ回転速度を表し、縦軸はトルク、コンターは効率を表す。

イッチングスピードを高速化して、スイッチング損失を低減した。その結果、インバータ出力は従来機に比べ20%近くまで増加しているが、インバータ効率は従来機と同等程度を維持した。また、より厳しい環境下での使用を考慮し、保護構造を見直した。樹脂カバーとベースの隙間から水圧による水の浸入を防止するため、従来のパッキンの材質を見直すことで保護等級を従来のIP54レベルからIP55レベルへ向上させた。用途によって大容量のLタイプと小容量のSタイプを選択することができる。第1表にインバータの仕様を示す。

第1表 バッテリー電圧108/120V対応インバータ仕様

大容量Lタイプと小容量Sタイプの仕様を示す。



項目	インバータL	インバータS
入力電圧 (V)	108/120	
最大電流 (Arms)	330	160
寸法 (mm)	W292 × H80 × D229	W250 × H80 × D132
投影面積 (mm <sup>2</sup> )	66.722	33.000
質量 (kg)	4.1	2.4
保護等級	IP55	
周囲温度 (°C)	(動作) -40 ~ +65 (保存) -40 ~ +85	

第 2 表 電源コントローラ仕様

電源コントローラの仕様を示す。



項目	電源コントローラ
入力電圧 (V)	108/120
出力系統	24Vなど
寸法 (mm)	W292×H104×D231 (ケーブル除く)
投影面積 (mm <sup>2</sup> )	66,722
質量 (kg)	5.9
保護等級	IP55
周囲温度 (°C)	(動作) -40～+65 (保存) -40～+85

### 3.2 電源コントローラ

バッテリー式フォークリフトでは、インバータのみならず各種コンポーネントやファン・前照灯などの補器類へ電力を供給する必要がある。従来はバッテリーから降圧して出力するDC/DCコンバータが搭載されており、今回当社がDC/DCコンバータの機能を有する電源コントローラを開発した。当該コントローラのDC/DCコンバータとしてのスペックは、バッテリー電圧108/120Vから24Vなどを出力する。また、バッテリーを稼働及び充電するために必要な監視機能を有し、バッテリーのマネジメントなどを行う。従来機では、それらの機能を当社製充電コントローラが担い、充電コントローラとDC/DCコンバータを個別に搭載していた。電源コントローラに統合することで、よりコンパクトに車両へ搭載できる。また、保護等級はインバータと同等のIP55レベルを有し、過酷な環境下でも問題なく動作できる。第 2 表に電源コントローラの仕様を示す。

### 3.3 電動ミニショベルへの適用

近年、カーボンニュートラル実現に向けてフォークリフトのみならず、各種エンジン式機械の電動化が進んでいる。その中で当社製インバータと電源コントローラを電動ミニショベルへ搭載する要望があった。ミニショベルの規格はフォークリフトとは



第 4 図 電動ミニショベル

当社インバータと電源コントローラを搭載した電動ミニショベルを示す。2023年に市場へ投入した。

異なり、試験基準が厳しくなる項目もある。特に電磁両立性 (EMC) は、欧州のEN13309規格に適合する必要がある。フォークリフトのEN12895規格と比べて、イミュニティ試験では与える電界強度が20V/mから100V/mに増加する。またエミッション試験では、従来のフォークリフトと同様に広帯域での測定に加えて、狭帯域での測定も加わる。当社製品を搭載したミニショベルは、EMCのみならず全ての要件に適合し、2023年に市場へ投入した。第 4 図に電動ミニショベルを示す。本開発への取り組みから得られた電動化建機に関する知見を生かし、より競争力のある製品の開発につなげていく。

## 4 むすび

当社は、50年以上にわたりバッテリー式フォークリフトの動力源となるモータ・インバータを提供し、国内のトップサプライヤとして製品の開発を進めている。さらに産業車両の電動化によって、カーボンニュートラルへ貢献していく。

今回紹介したPMモータは、同出力帯の誘導機に比べて小形・軽量・高効率を実現した。小形の産業車両用途では、空冷式のPMモータを採用することで水冷システムが不要となり、車体の小形化に寄与する。EV向け適用技術の活用によって、更なる性能向上を図っていく。

今後は、更にライフサイクルアセスメントを考慮

して設計し，部材の調達から製品使用・廃棄に至るまでの全ライフサイクルで低炭素な環境配慮型製品を拡充していく所存である。

- ・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。

#### 《執筆者紹介》

---



**狩野 博之**  
Hiroyuki Kano  
開発部搬送開発部  
産業車両用コントローラ開発全般の統括に従事

---



**藤原 侍士**  
Hitoshi Fujihara  
開発部回転機開発部  
産業車両用モータ開発全般の統括に従事

---



**出井 尚武**  
Shobu Idei  
電動力技術部  
産業車両用モータ・コントローラの営業技術に従事

---