

新型 3 輪フォークリフトとその低損失高効率化技術

High Efficiency Technology for 3-wheeled Battery Forklift

相模原製作所 高橋 啓 輔*¹ 佐 藤 明*²
 中 北 治*³
 技 術 本 部 森 本 雅 之*⁴ 小 林 真 一*⁵

当社ではこの度、海外向け 3 輪バッテリーフォークリフトのフルモデルチェンジ開発を実施した。開発に際し、スタイリング一新・コストダウンのほか、作業性能の大幅向上と、電力消費の低減に取組み、以下の技術開発を行った。① 直流他励式の走行モータを日本メーカとして初めて採用した。② コントローラ主回路を低損失 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) で構成し、チョッパの高効率化と無騒音化を達成した。③ 他励式モータの界磁制御によりモータの高効率駆動法を実現した。④ 潤滑油を改善し効率を向上させた。定積時最高登坂能力 19 % の力強さと、定積時最高車速 14 km/h の高速性能を実現、さらに電力消費を従来比で 3 % 低減を達成した。

High efficiency in a 3-wheeled battery forklift truck was studied. The new, egg-shaped 3-wheeled battery forklift features power (gradability 19% loaded) and speed-14km/h loaded-with no extra energy consumption. To achieve these features, energy consumption was studied and traction found to be the main factor, occupying 75%. A separately excited motor was used instead of series winding. Individual control was used for armature and field currents to achieve a high-efficiency drive. A trench IGBT module made the chopper quiet and effective. Low viscous coefficient oil applied to the drive train reduced viscous friction loss. These features will be applied to other forklifts.

1. ま え が き

バッテリーフォークリフトは音が静かで排気ガスのない環境に優しい特徴を持ち、今後フォークリフトにおける顧客ニーズの割合が増加する傾向にある。3 輪式バッテリーフォークリフトは、海外市場においてはバッテリーフォークリフト全体の約 4 分の 1 を占める製品である。当社と米国キャタピラー社の合弁企業である MCFE (Mitsubishi Caterpillar Forklift Europe B. V.) と MCFA (Mitsubishi Caterpillar Forklift America) では、主力製品として製造販売している。

今回、そのフルモデルチェンジでは、外観、荷役性能、走行性能、居住性の改善と、バッテリーフォークリフトを構成する各要素すなわち、電気系、制御系、荷役系、走行系のすべての分野においてバッテリー消費低減に取り組んだ。

本報では、新型の 3 輪バッテリーフォークリフトの特徴を紹介するとともに、3 輪バッテリーフォークリフトに適用された、バッテリーフォークリフト性能向上の研究について述べる。

2. 新型 3 輪バッテリーフォークリフトの特徴

3 輪式バッテリーフォークリフトは、2 つの前輪 (駆動輪) と 1 つの後輪 (操舵輪) から構成される。

4 輪バッテリーフォークリフトと異なり、左右の前輪がそれぞれ独立に駆動される。

これにより、旋回時には左右車輪の速度が変化し、機械的なデファレンシャルギヤが不要となっている。

さらに、左右車輪を互いに逆転させることにより、その場旋回 (車輪間の中点を軸とする回転) が可能になるなど機動性の高いフォークリフトである。

新型 3 輪バッテリーフォークリフトの外観を図 1 に示す。その特徴等を以下に説明する。

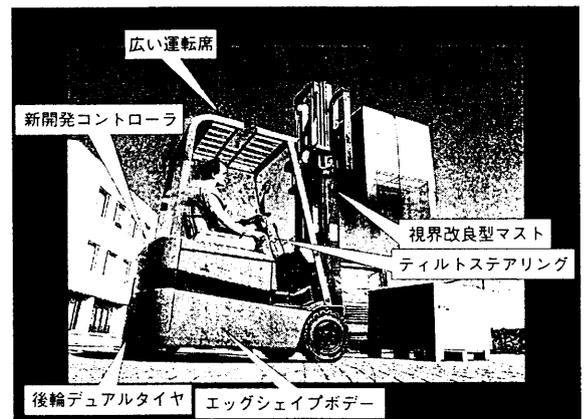


図 1 3 輪バッテリーフォークリフトの外観
 Outline of 3-wheeled battery forklift with notification

(1) スタイリング

● エッグシェイプボデー

曲線を多用し洗練された車体外観の実現

● ディスプレイモニタ

大型バックライト液晶の採用により視認性の向上

(2) 作業性

● 視界改良型マスト

マストの形状と配置を改良し、前方視界の向上

● 後輪デュアルタイヤ

操舵時のタイヤへの負担が軽減し、安定性の向上

● 荷役モータ

大出力モータを採用し、リフトスピードの向上

(3) 操作性、居住性

● 新カウンタウエイト

カウンタウエイトをボデーシャシの一部とすることに

*1 フォークリフト技術部主管

*4 エレクトロニクス技術部エレクトロニクス技術開発センター主務 工博

三菱重工技報 Vol. 36 No. 4 (1999 7)

*2 フォークリフト技術部開発設計課

*3 エレクトロニクス技術部エレクトロニクス技術開発センター

*3 車両・電子技術部電子機器課

より、コンパクトな車体と、広い運転席の両立

●ティルトステアリング

無段階方式採用により、簡単に快適な運転姿勢の実現性能面でのカタログ諸元を他社データと比較したものを、表1に示す。1.6tクラスについて、他社と比較している。定格積載時の最高車速を示す定積時最高速度は、14 km/hと業界トップの高速性能を実現している。4.5 kWの大容量走行モータの採用により定積時最高速度だけでなく、定格積載時の最大登坂能力は19%とクラス最高の性能を実現している。定格積載時荷役速度は400 mm/sと高速である。車両のホイールベースは1.31 mとコンパクトにまとめられており、レイアウトの工夫とも相まって、旋回半径1.52 mの小回り性能を実現している。

以上のように、新型3輪バッテリーフォークリフトの特徴をまとめると、小型で機動性能が良く力強いフォークリフトになっており、クラストップの性能であることが分かる。

エネルギー効率について、旧モデルと比較した結果を表2に示す。これは30 m法と呼ばれるバッテリー電力消費試験を行った結果を示したものである。30 m法とは30 m離れた地点間での積卸し作業を繰返して行い、1サイクル当りの時間と、バッテリー消費電流量を測定するものである。ほかに50 m法というものがあ、距離を50 mとして、比較的長い距離を運搬する場合を想定している。

評価としては、1時間当りのサイクル数と、1サイクル当りの消費電流量の形で比較する。サイクル数が多く、電流消費量の少ないものがバランスのとれた、エネルギー効率の高いバッテリーフォークリフトといえる。

表2は、走行モードをスタンダードモードにした場合を100%としている。表2から分かるように、新型3輪フォークリフトは旧モデルに比べてスタンダードモード、パワーモード共サイクル数が多い。さらに、バッテリー消費電流量は、旧モデルより多くの仕事をしているため多く見えるが、同一の仕事当りの消費率で比較すると、改善されていることが分かる。したがって、従来と同容量のバッテリーを用いても、同じ作業条件で従来以上の時間稼働を維持することができる。

表1 性能諸元比較
Comparison of specification

メーカー	当社	A社	B社	C社
最大荷重 (kg)	1 600	1 600	1 600	1 500
荷揚げ速度 (mm/s)	400	380	410	280
定積時最高速度 (km/h)	14.0	12.8	14.0	11.0
定積時登坂能力 (%)	19	14.8	—	17
ホイールベース (m)	1.31	1.37	1.39	1.29
最小旋回半径 (m)	1.52	1.55	1.4	1.50
走行モータ (kW)	4.5×2	4.0×2	3.6×2	3.3×2

表2 エネルギー効率の比較
Comparison of energy consumption performance

	当社新型 パワーモード	当社新型 スタンダード モード	当社旧モデル
1時間当りサイクル数 (%)	107.4	100	91.3
1サイクル当り消費電流量 (%)	108.5	100	94.6
仕事当り消費率 (%)	101	100	103.6

注) スタンダードモードを100%としたときの指数表示で表す。

3. モータ損失低減

本章では、まずバッテリーフォークリフトにおけるエネルギー消費の主要因を明確にし、次いで走行用モータの損失低減制御法とその効果について述べる。

3.1 エネルギー消費量の分析

バッテリーフォークリフトのエネルギー消費負荷には大別すると走行用モータと荷役用モータがある。30 m法及び50 m法での実測結果から走行時と荷役時のエネルギー消費を分離した結果を、図2に示す。30 m法では走行時に約75%のエネルギーが消費されている。したがって、走行用モータを高効率にすることで、エネルギー消費の低減の効果が大きいことが分かる。

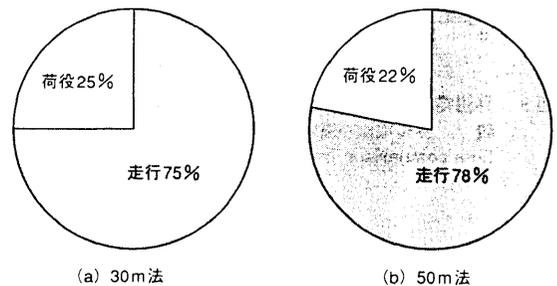


図2 バッテリーフォークリフトのエネルギー消費 当社におけるバッテリー電流消費試験結果を示す。
Energy consumption of battery forklift

3.2 直流他励モータの採用

従来、バッテリーフォークリフト用のモータは直流直巻モータが採用されてきた。今回のモデルチェンジでは直流他励モータを国内で初めて採用した。ここでは採用した他励モータの高効率制御法について述べる。

モータ損失は大きく分けると銅損、鉄損、機械損に分けられる。このうち銅損の占める割合が比較的大きい。そこで銅損を低減することによりエネルギー消費の低減を図る。直流他励モータは界磁コイルと電機子コイルが独立して巻かれているため、それぞれのコイルに流れる界磁電流、電機子電流はそれぞれ独立に制御可能である。直流他励モータの発生トルク τ (Nm)、銅損 W_c (W)は式(1)、(2)で表される。

$$\tau = \rho_M i_r i_a \tag{1}$$

$$W_c = R_a i_a^2 + V_b i_a + R_f i_r^2 \tag{2}$$

ここで、

ρ_M : 直流機定数 (Nm/A²)

i_r : 界磁電流 (A)

i_a : 電機子電流 (A)

R_a : 電機子抵抗 (Ω)

V_b : ブラシ電圧 (V)

R_f : 界磁抵抗 (Ω)

式(1)はモータの発生トルクは界磁電流と電機子電流の積で決定することを表している。また、式(2)は発生する銅損を表す。したがって、他励モータでは必要なトルクに対し界磁電流と電機子電流の積を一定にすれば、界磁電流と電機子電流はそれぞれ任意に選ぶことが可能である。式(2)で示す銅損を最小にするように界磁電流を制御する方法を採用した。銅損を最小化するように界磁電流と電機子電流を制御した場合と界磁電流を一定に制御した場合の銅損計算値を図3に示す。このように損失低下制御の採用によ

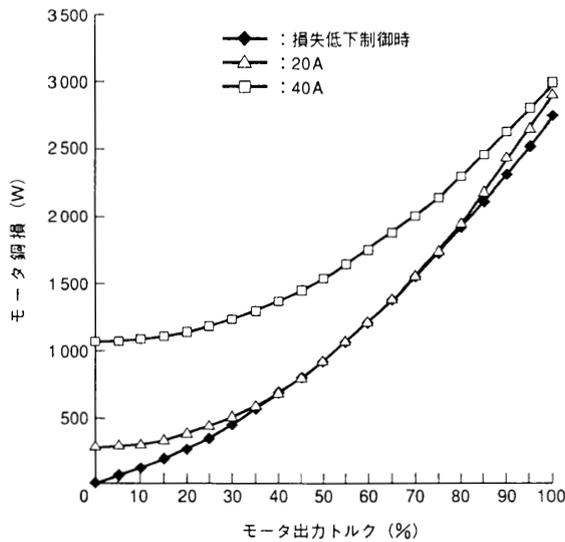


図3 界磁電流一定制御時と銅損低減制御時のモータ銅損比較 界磁電流の違いによる損失の変化の計算値を示す。 Loss comparison by field current

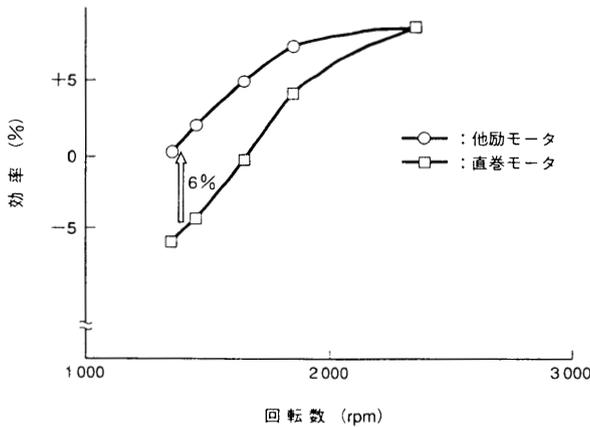


図4 他励モータと直巻モータの効率比較 モータ種別の違いによる効率の変化を示す。 Efficiency comparison between shunt and separate excite motor

り低トルク時から大トルク時の全領域で銅損が低減している。

実機の制御では銅損低減ばかりでなく乗心地、電源電圧の制約等を考えて界磁電流と電機子電流の配分を決定している。

他励モータを採用し、さらに損失低下制御法を採用することにより約6%も効率が改善された。

損失低減制御を行った他励モータと従来の直巻モータの実測効率の比較を図4に示す。

4. コントローラ主回路の高効率無騒音化の検討

4.1 主回路素子での損失

コントローラ主回路素子で発生する電力損失はスイッチング損失とオン損失に分けられる。

スイッチング損失 P_{sw} は主回路素子がオン又はオフするとき生じる損失で以下の式(3)にて求めることができる。

$$P_{sw} = \left[\int_0^{T_{on}} v i dt + \int_0^{T_{off}} v i dt \right] f_c = \frac{1}{6} V_{off} I_{on} (T_{on} + T_{off}) f_c \quad (3)$$

ここで、

- v : 素子両端電圧
- i : 素子電流
- T_{on} : オン時間
- T_{off} : オフ時間
- f_c : スwitching周波数
- V_{off} : オフ時素子両端電圧
- I_{on} : オン時素子電流

スイッチング損失は電圧・電流が一定ならスイッチング周波数に比例して増加する。

オン損失 P_{on} は主回路素子がオンしている期間に生じる損失で、以下の式(4)で求めることができる。

$$P_{on} = V_{on} I_{on} \alpha \quad (4)$$

ここで、

- V_{on} : オン時素子両端電圧
- I_{on} : オン時素子電流
- α : オン・オフのデューティ比

オン損失は電圧が一定なら電流及びデューティ比に比例する。

4.2 スwitching音の無音化

スイッチングに伴い電流が変化するため、スイッチング周波数での電磁音が発生する。このスイッチング音を低減するために、新型3輪バッテリーフォークリフトでは15kHzとして無音化した。

4.3 主な主回路素子の特徴

損失の点で代表的な素子の特徴を述べる。BJT (Bipolar Junction Transistor) は電流制御形の素子でありスイッチング速度をあまり上げることができず、スイッチング損失は他素子と比較して大きくなる。一方他素子と比べて低 V_{on} 特性を持つため、低オン損失となる。

MOS-FET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) はBJTと比較すると(1)スイッチング速度が一けた以上速い。(2)ゲートが絶縁された電圧駆動形素子のため、駆動電力が小さいといった特性を持つ。スイッチング損失はスイッチング速度が速いため、同じキャリア周波数ではBJTより少ない。一方オン損失に関してはオン時のドレインソース間電圧が抵抗特性を持つため、損失は素子電流の二乗に比例して増加する。電流の大きい領域ではオン損失の面で不利となる。

IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) はMOS-FETの高速スイッチングとBJTの低 V_{on} 特性を兼ね備えた素子であり最近のパワー回路素子の主流となっている。電圧駆動形の素子のため駆動電力は少なく済む。特に最近では素子構造の工夫によりオン電圧をBJT並みに低くしたトレンチ構造IGBTが出現し、オン損失の低減をねらうことができる。

4.4 コントローラ主回路素子選定

素子特性を考慮して、開発したバッテリーフォークリフトコントローラ主回路では以下のように素子を選定し高効率化、無騒音化を図った。

4.4.1 電機子用主回路

- 電機子回路用素子の選定は以下の点を考慮して行った。
- (1) 電機子には最大数百A以上の電流が流れる。またモータの電機子インダクタンスが小さいため、電流リプルを少なくするためにはスイッチング周波数を上げる必要がある。そこでスイッチング素子には、大電流・高速スイッチングが可能なトレンチ構造のIGBTを採用した。
- (2) スwitching周波数は可聴域を超えた15kHzとし、無音化した。

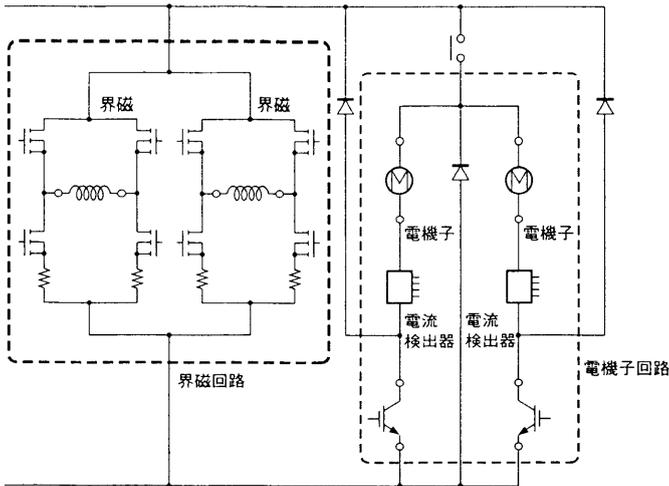


図5 電機子回路・界磁回路図 新型3輪バッテリーフォークリフトの走行モータコントローラ主回路を示す。
Circuit diagram of controller

表3 電機子回路・界磁回路仕様
Specification of armature and field circuit

項目	電機子回路	界磁回路
主回路電流	～数 100 A	～数 10 A
巻線インダクタンス	小	大
主回路素子	トレンチ IGBT	MOS-FET
スイッチング周波数	15 kHz	2 kHz

4.4.2 界磁用主回路

界磁回路用素子の選定は以下の点を考慮して行った。

- (1) 界磁巻線の電流は数 10 A と小さいことから、スイッチング素子には MOS-FET を採用した。
- (2) スwitching 周波数は界磁インダクタンスが大きいこと、電流が小さいためスイッチング音が少ないことから、スイッチング損失の低減をねらい 2 kHz とした。

電機子回路、界磁回路を図5に、仕様を表3に示す。

5. 走行系における効率向上の検討

走行系の動力損失の主要因は減速機などの機械部品の回転抵抗損失とタイヤの転がり抵抗損失であるが、ここでは減速機の効率向上についての検討結果について述べる。

図6に実機減速機を用いた単体試験装置の外観を示す。試験装置は減速機の駆動側である入力軸と走行輪を取付ける出力軸にトルクメータを設けて、入力軸/出力軸のトルクを測定し、動力差を減速機の損失動力とした。なお、減速機のデファレンシャルギヤは作動しないように改造し、負荷は出力軸回転を増速して水動力計により付与した。

図7は粘度の異なる2つの潤滑油（実機稼働状態での粘度 200 cSt と粘度 40 cSt）について損失動力を測定した結果である。油面レベル、出力軸負荷等の条件は同一とした。横軸は減速機の入力軸回転数を表し、縦軸は損失動力（入力/出力軸の動力差）を表す。図中に示す低減割合は実機稼働状態での粘度 200 cSt の潤滑油を基準とした値である。

図7に示すように損失動力は、潤滑油種（粘度）及び減速機回転数により変化する。潤滑油の低粘度化（粘度 200 cSt → 40 cSt

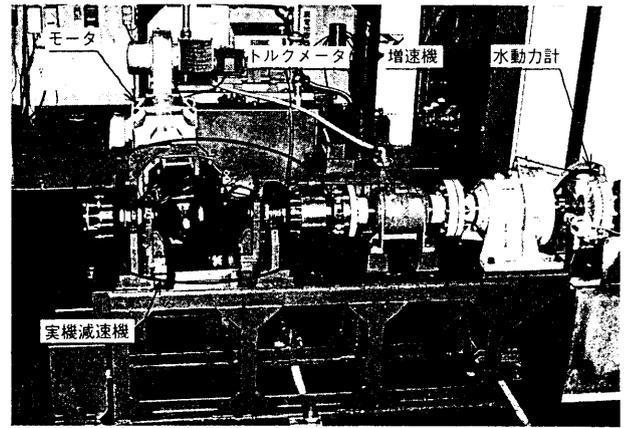


図6 装置外観 実機のメカニカルロス測定する装置の外観を示す。
Test equipment

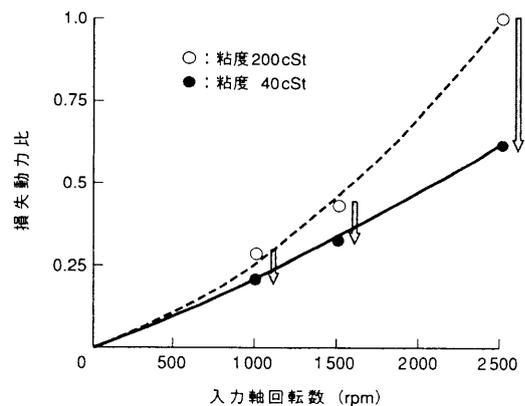


図7 粘度による低減比較 粘度によるメカニカルロスの変化を示す。
Comparison by viscosity

に変更)による損失動力の低減は、減速機単体で約 30 %、フォークリフト全体では約 4 % となることが分かった。なお、効果の算定については 30 m 法の走行パターンでの減速機の回転数頻度を考慮した。また、粘性低下時の耐久性等についても、別途信頼性試験により問題ないことを確認している。

6. む す び

本報では、新型3輪バッテリーフォークリフトの開発に適用した高効率化技術を解説した。新型3輪フォークリフトにおいて、次の改善を行った。(1)外観、(2)居住性、(3)作業性能、(4)バッテリー消費電流量低減。

具体的な高効率化技術を述べると以下のようなになる。

直流他励式のモータを日本メーカーとして初めて採用し、界磁の独立制御により高効率な駆動法を実現した。また、コントローラ主回路を低損失 IGBT で構成し、高効率と無騒音化を実現した。さらに潤滑油の低粘度化によりメカニカルロスを改善した。

バッテリーフォークリフトでは、作業性能やバッテリー電力消費のほかに、操作フィーリングや乗心地なども考慮し、更なる高効率化技術を開発していく必要がある。

今回は、海外市場向けの3輪バッテリーフォークリフトへの適用を中心に述べたが、今後他機種にも同様な技術アプローチを適用していく予定である。