

沖縄都市モノレールにおける 回生電力貯蔵装置の導入に伴う効果の検証試験

Verification of Effects Obtained by Introduction of Traction Energy Storage System on Okinawa Urban Monorail Line

伊藤 房男 野木 雅之 角谷 彰彦

■ ITO Fusao ■ NOGI Masayuki ■ SUMIYA Akihiko

電気鉄道は、エネルギー効率が良い乗り物の代名詞であるが、電車が減速する際に発生する回生エネルギーを利用することで、更なる省エネ効果が期待できる。特にモノレールでは、ブレーキシューの摩耗防止の観点から回生ブレーキが使用されており、この回生により生じる余剰電力の有効利用は大きな省エネ効果を生む可能性がある。一方運用面に目を向けると、モノレール固有の軌道形状から、停電時における乗客の避難誘導も大きな課題である。

そこで東芝は、省エネ化と停電時の列車走行を目的に、回生電力貯蔵装置を用いた検証試験を沖縄都市モノレールで実施した。その結果、停電時の列車走行を可能にし、隣接変電所を含めた受電電力量の低減に大きな効果が得られることを確認した。

Electric railway systems, which are generally regarded as energy-efficient transportation systems, can be expected to achieve further improvement in energy-saving performance through the effective utilization of regenerative energy during deceleration. Particularly in monorail systems, in which regenerative braking is used in order to reduce brake shoe abrasion, there is a potential for high levels of energy saving by effectively utilizing the surplus energy thus generated. From the perspective of operation, the difficulty of safely evacuating passengers due to the unique characteristics of a monorail track is also an important issue in the event of a power failure.

In cooperation with Okinawa Urban Monorail, Inc., Toshiba has conducted verification tests using a traction energy storage system on the Okinawa Urban Monorail line with the aim of realizing energy saving and supplying emergency power in the event of a power failure. From the results obtained, we have confirmed that the traction energy storage system achieves a significant reduction in the power consumption of each substation, as well as stable operation even in the event of a power failure.

1 まえがき

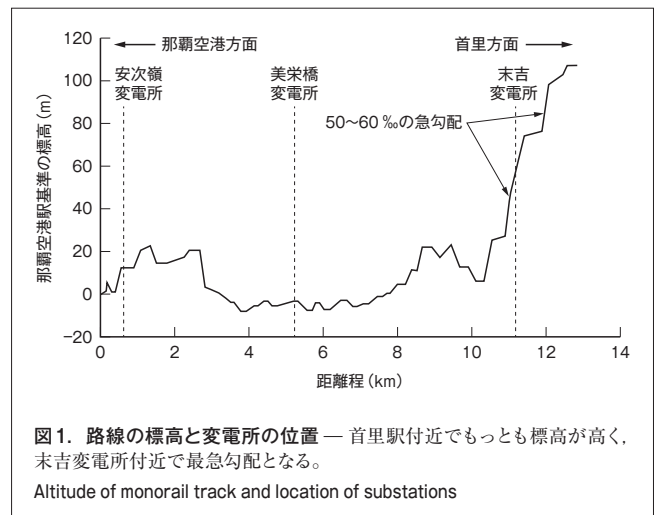
沖縄都市モノレールは、那覇空港駅から首里駅間15駅を結ぶ全長12.9 kmのモノレール路線である。路線の高低差は、**図1**に示すとおり首里駅付近で勾配が大きくなる特徴があり、最急勾配は60%に達する。一方、運行形態は平日ラッシュ時間帯(7:00～8:00)で6分間隔、閑散時間帯及び休日ラッシュ時間帯で10分間隔のダイヤで、車両はいずれも2両編成で運行されている。また2019年に、沖縄都市モノレールは首里駅から、てだこ浦西駅(新設)までの4.1 kmを延伸開業する予定である。

き電回路は、直流(DC)1,500 Vの上下方面別構成で、安次嶺、美栄橋、及び末吉の三つの変電所から構成されており、各変電所には回生失効防止を目的とした回生抵抗装置が設置されている。

東芝は、これまでの回生失効防止の他に、回生電力の有効利用を目的として、回生電力貯蔵装置⁽¹⁾を用いたフィールド試験を2015年7月から9月の間で実施した。

フィールド試験は、従来回生抵抗装置で吸収し熱として放出していた余剰電力の有効利用を目的とし、以下の2点についてその効果を評価した。

(1) 回生電力吸収に伴う省エネ効果の評価



(2) 停電時における非常走行の実証

ここで、(1)の回生電力吸収に伴う省エネ効果の評価は、外気温による影響を少なくする目的から、回生電力貯蔵装置を隔日運転させ、き電電力量と回生電力貯蔵装置の稼働状態の相関を明らかにすることを試みた。また、(2)の非常走行に関しては、全変電所の給電を停止し、那覇空港駅から首里駅間の全線を各駅停車で往復走行させる試験を実施した。ここでは、これらの詳細について述べる。

2 回生電力貯蔵装置の設置場所と設備容量

今回のフィールド試験では、回生電力貯蔵装置の設置場所を既存の変電所に限定し、3変電所の中から選択した。いずれの変電所でも、機器は塩害対策を理由に建屋内に設置されているため、設置スペースを考慮すると安次嶺変電所と末吉変電所に候補が絞られ、更に将来の延伸を考慮すると末吉変電所に設置する必要があると考え、事前の評価試験を実施した。

2.1 設置場所の選定

事前の評価試験として、2015年2月に実車走行試験を実施し、電力量の路線分布を調査した。

事前の実車走行試験は、不測の事態における営業運行への影響を避けるため、終車後の深夜時間帯での1編成による往復走行とし、以下の試験環境で実施した。

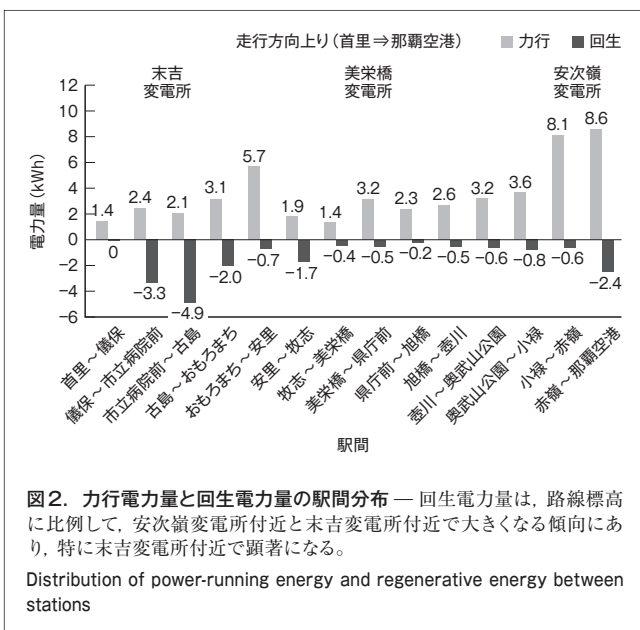
- (1) き電回路は末吉変電所からの片送りとし、他2変電所は停止扱いとする。
- (2) 列車は通常走行に加えて速度制限を設ける。

試験の結果、下り走行（首里方面への走行）では古島駅から首里駅にかけて力行電力量（列車の走行に必要な電力量）が大きくなる傾向にあり、上り走行（那覇空港方面への走行）では、同じ首里駅から古島駅間で回生電力量が大きくなる傾向であることがわかった（図2）。モノレールはゴムタイヤでの走行であるため、急な勾配を下る際に位置エネルギーによる大きな回生電力が生じたものと推測される。

これらの結果から、当該区間近傍の末吉変電所に回生電力貯蔵装置を設置することで、効果的な充放電が行われると判断した。

2.2 設備容量

2.1節で述べた事前の走行試験では、末吉変電所の整流器



を仮想の回生電力貯蔵装置（放電用）と想定して、非常走行に必要な設備容量のデータ収集も行った。必要最小限の設備容量を求める目的から、列車に30 km/h以下の速度制限を設けて測定した結果、最大消費電力は451 kWとなった。この結果から、30 km/h以下の速度制限を設けることで、非常走行は500 kWの設備容量で対応可能と判断した。また、定員乗車（100%乗車）時の動作推定については、今回の測定結果を用いてシミュレーションし、問題ないことを確認した。

3 試験方法

フィールド試験は、事前の評価試験結果に基づき、末吉変電所に定格出力500 kW-バッテリー容量194 kWhの回生電力貯蔵装置（表1）を設置し、図3に示すき電回路で実施した。

末吉変電所への回生電力貯蔵装置の設置に際しては、既存の回生抵抗装置との協調を考慮し、回生抵抗装置よりも回生電力貯蔵装置が優先動作するように、1,590～1,650 Vの間で充電する制御特性を設定した。

4 試験結果

4.1 省エネ効果評価試験結果

省エネ効果評価試験は、通常の営業ダイヤにおける実測評価のため、真夏の外気温に伴う空調消費電力の変動や曜日ごとの乗車率の変化に伴う負荷の偏りが生じないように、以下に示す二つの運転パターンを隔日で交互に運転し、比較評価することにした。

- (1) 回生電力貯蔵装置と回生抵抗装置を終日併用運転
- (2) 回生抵抗装置だけ終日運転

ここで、(1)の運転パターンでは回生電力貯蔵装置を優先運転させる設定とし、回生抵抗装置の稼働を抑えた運用とした。

4.1.1 整流器き電電力量の省エネ効果 回生電力貯蔵装置の稼働日（(1)の運転パターン）と停止日（(2)の運転パターン）における、き電電力量の測定結果を図3に示す。

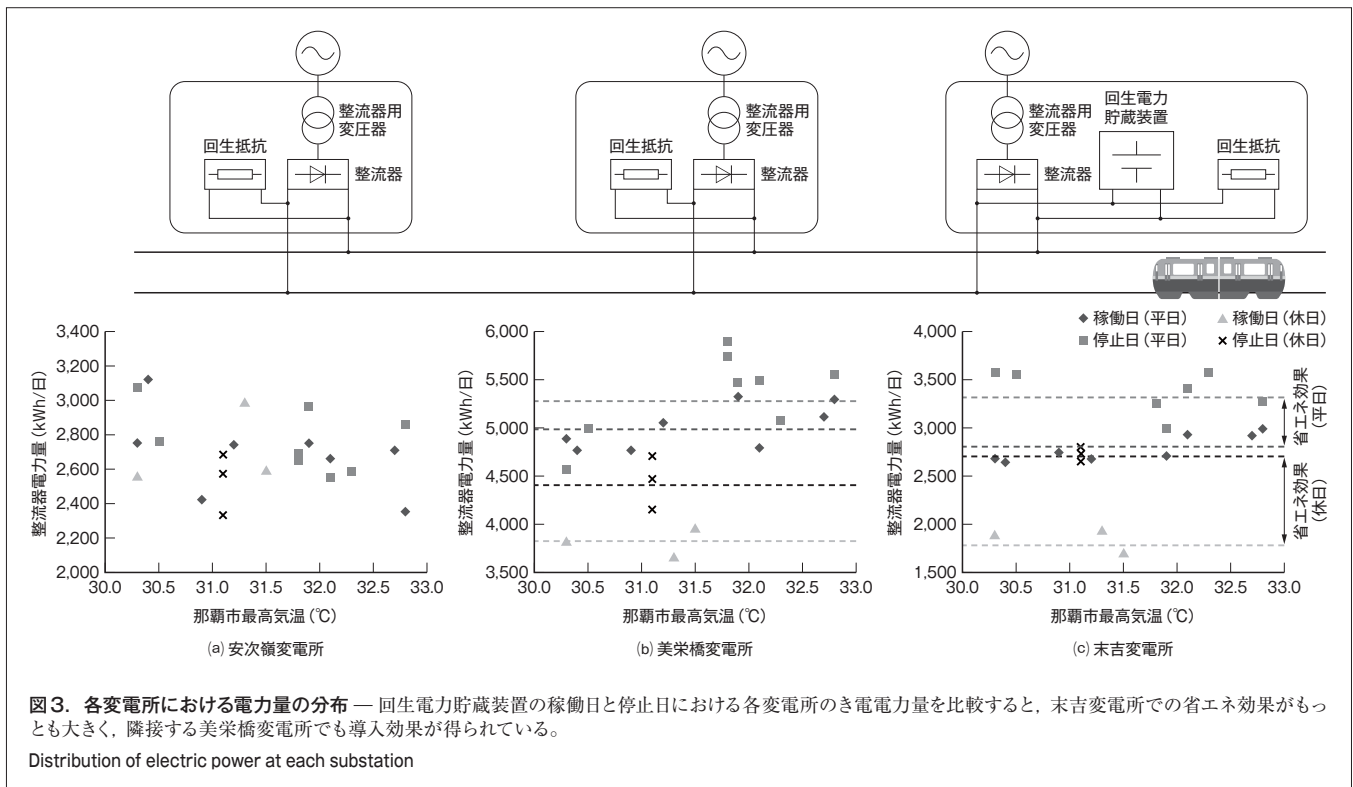
末吉変電所においては、平日平均575 kWh/日、休日平均

表1. 回生電力貯蔵装置
Traction energy storage system

項目	定格、仕様
定格出力 (kW)	500
バッテリー容量 (kWh)	194
き電側定格電圧 (V)	1,500 (950～2,000)
電池側定格電圧 (V)	607 (500～713)
最大負荷パターン (き電側電流)	1 p.u. (1分) - 0.5 p.u. (4分) の充放電繰返し 又は0.5 p.u.連続

p.u. : per unit (基準値に対する正規化値)



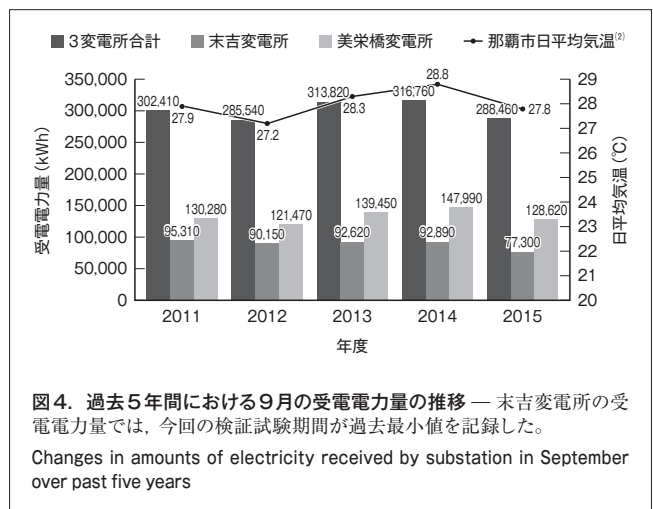


883 kWh/日の省エネ効果を得ることができた。また隣接する美栄橋変電所においても平日平均346 kWh/日、休日平均627 kWh/日の省エネ効果を得ることができた。休日は列車ダイヤ密度が低いため、回生電力が列車間で融通される率が低くなり、より多くの省エネ効果が生み出されたものと考えられる。一方、安次嶺変電所については、測定データに明確な変化が見られなかったことから、回生電力貯蔵装置導入に伴う直接の影響は少なかったと言える。

4.1.2 受電電力量のピークカット効果 沖縄都市モノレールは、3変電所一括受電契約となっており、通常運用時における最大受電電力量の推移を電力日報及び月報から調べた結果、平日（水曜日前後）のラッシュ時間帯（午前8時前後）に最大受電電力量が記録される傾向を確認した。このことから、この時間帯における最大受電電力量を比較評価すると、末吉変電所では最大10%の抑制となり、3変電所全体では最大3.6%のピークカット効果が得られた。

また、測定期間中の9月における3変電所の合計受電電力量は、前年同月比で約9%の節電につながり、末吉変電所に至っては、前年同月比で約16%低減し、過去最小値が得られた（図4）。

4.1.3 変電所空調消費電力量の省エネ効果 沖縄都市モノレールの変電所では、変電設備が全て建屋内に設置されているため、放熱による建屋内の温度上昇抑制を目的に空調設備が設けられている。この空調用低圧電力の負荷に対する省エネ効果についても比較評価した。



末吉変電所では、回生電力貯蔵装置を優先動作させることで、既設回生抵抗装置の動作責務が減り、変電所構内の空調消費電力量において、約200 kWh/日（約40%）の低減効果が得られた（図5）。

4.2 非常走行試験結果

非常走行試験は、那覇空港駅から首里駅間の往復25.8 km、最急勾配60%の路線で実施した。

このときの、地上側の給電条件は、

- (1) 全変電所の整流器設備を停止
 - (2) 末吉変電所設置の回生電力貯蔵装置だけを運転
- であり、車両側の走行条件は、以下のとおりである。

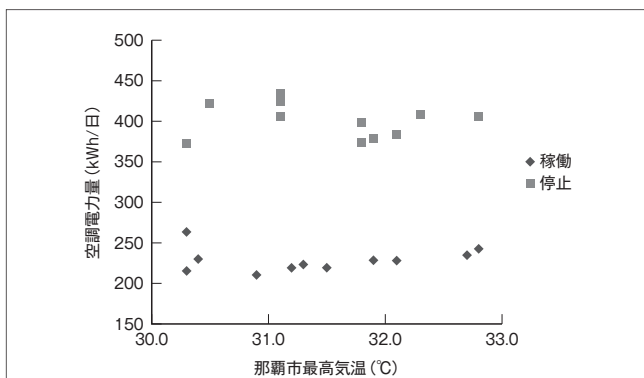


図5. 空調電源の省エネ効果 — 末吉変電所の空調電源は、回生電力貯蔵装置を稼働させることで約40%の省エネ効果を実現した。

Energy-saving effect on air conditioner power supply with and without traction energy storage system

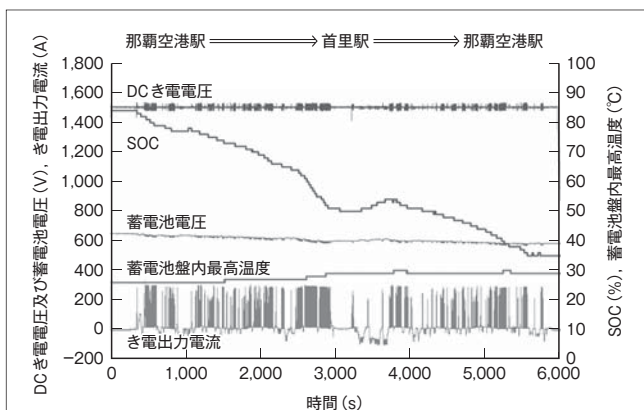


図6. 非常走行試験の結果 — 速度制限25 km/h以下、車内空調ありの走行条件で各駅に停車させて試験を実施した結果、SOCは約50%減少したものの往復25.8 kmを完走した。また、蓄電池盤内の温度も30℃以下で最適温度内を維持した。

Results of emergency running test using electric power supplied by traction energy storage system

- (1) 速度制限25 km/h以下で、車内空調ありの走行
- (2) 速度制限30 km/h以下で、車内空調なしの走行
- (3) 全線各駅停車扱いで運行

試験の結果、車内空調の有無にかかわらず、末吉変電所に設置した回生電力貯蔵装置だけで、全線往復を走破することができた(図6)。

この結果から、設備容量500 kWの回生電力貯蔵装置を採用することで、仮に各駅間に1列車が停止している状況においても、1列車ごとにリレー方式で走行させることにより、全ての列車を最寄りの駅まで走行させることが可能であることが実証できた。

一方、電池容量については、使用したリチウムイオン二次電池 SCiB™の充電状態(SOC: State of Charge)の推移を見ると、往復走行で50%が消費されていることから、2019年の路線延伸を考慮すると、更なる電池容量の追加が必要であるこ

とがわかり、精度の高い容量算出ができた。

5 あとがき

これまででは、回生失効防止の観点から回生エネルギーを熱として放出し、更にこの熱による建屋内温度の上昇を抑えるために電力を消費していた。今回のフィールド試験の結果から、回生電力貯蔵装置を導入することにより、回生電力の有効活用はもとより、変電所内の空調消費電力の低減も図ることができた。その結果、3変電所全体の受電電力量は、月平均に換算すると約36 MWh/月の省エネ効果を得ることができた。

また、非常走行では、設備容量500 kWの回生電力貯蔵装置だけで、往復25.8 km、最急勾配60%の区間を完全走破することができた。軌道桁上を走行するモノレールでは、不測の事態における乗客の避難誘導は大きな課題であり、特に高齢者に対する避難誘導では、脱出用シュータの活用にも限界がある。今回の検証では、確実に最寄りの駅まで走行でき、公共機関の使命である“安心”、“安全”に対しても十分貢献できることが確認できた。

今後も製品の改良を図り、鉄道分野における利用者への信頼性向上と更なる省エネ化に取り組んでいく。

謝辞

今回の検証試験に際し、営業路線をご提供いただいた沖縄都市モノレール(株)の関係各位に深く感謝の意を表します。

文献

- (1) 佐竹信彦 他. 鉄道向け回生電力蓄電システム. 東芝レビュー. 69, 8, 2014, p.52 - 55.
- (2) 気象庁. “各種データ・資料”. 気象庁 Japan Meteorological Agency. <<http://www.jma.go.jp/jma/menu/menureport.html>>. (参照 2015-10-13).



伊藤 房男 ITO Fusao

東芝トランスポートエンジニアリング(株) エンジニアリング第一部 鉄道電力・ソリューションシステム技術担当主務。鉄道用電力システムのエンジニアリング業務に従事。Toshiba Transport Engineering Inc.



野木 雅之 NOGI Masayuki

エネルギーシステムソリューション社 電力・社会システム技術開発センター 電機電池応用・パワエレシステム開発部。パワーエレクトロニクス機器の研究・開発に従事。電気学会会員。Power and Industrial Systems Research and Development Center



角谷 彰彦 SUMIYA Akihiko

インフラシステムソリューション社 鉄道システム事業部 鉄道電力システム技術部グループ長。鉄道用電力システムのエンジニアリング業務に従事。電気学会会員。Railway Systems Div.