

特集：新型ロードスター

30

新型ロードスターの軽量ワイヤハーネス開発 ～電線導体のアルミ化～

Development of New Roadster Light Weight Wiring Harness ～Replacement of Wire Conductor Material into Aluminum～

三好 俊充*¹ 下河内 次生*²
Toshimitsu Miyoshi Tsuguo Shimokouchi

要 約

新型ロードスターは、初代ロードスターから受け継ぐ人馬一体を追求し、全社一丸となり、飽くなき軽量化へのこだわりを持ち、開発に取り組んだ。電装部品を「つなぐ」役割を担うワイヤハーネスでは、従来は“システム統合により電線本数を削減する省線化”や“電線径を細くする細線化”，“電装部品間を最短で接続する短線化”により、その重量を軽減してきた。今回、軽量化の新技术である“電線導体のアルミ化”をこのクルマをターゲットとし、減速エネルギー回生システム「i-ELOOP」ハーネスで実現した。このハーネスをアルミニウムに置換することにより、クルマ1台に使われるハーネス総重量の約3%にあたる500gの軽量化を達成した。その開発経緯と実現手段を紹介する。

Summary

The New Roadster pursues the “Jinba-Ittai” concept inherited from its original model, and Mazda developed it with an insatiable determination for weight reduction. In wiring harness taking a role “to connect” all electric equipment parts, the weight reduction is conventionally done by reducing wire number through system integration, by thinning wire diameter and by shortening wire length through the shortest connection of electric equipment parts. Now Mazda have achieved to reduce the wiring harness weight for the regeneration system “i-ELOOP” by using new technology of “wire material replacement to Aluminum”. Mazda achieved weight reduction of 500g equal to approximately 3% of wiring harness total weight used for one car by replacing wire material to Aluminum. This article describes the details of development and the technique.

1. はじめに

新型ロードスターは、初代ロードスターから一貫して追求し続けている「人馬一体」と「Lot of Fun」を継承し進化させながら、全社一丸となり飽くなき軽量化へのこだわりを持ち、開発に取り組んだ。

電装部品を「つなぐ」役割を担うワイヤハーネスは、クルマ1台あたり約15～20kgの重量がある。さまざまな部品で構成されるワイヤハーネスは、電線重量の占める割合が最も高く、全体の約70%を占めるため、軽量化の鍵を握るのは電線重量の軽減である（Fig. 1）。従来、電線重量の軽減実現手段として、次の3つが挙げられる。

- (1) 省線化；システム統合により電線本数を削減する
- (2) 細線化；電線径を細くする
- (3) 短線化；電装部品間を最短で接続する

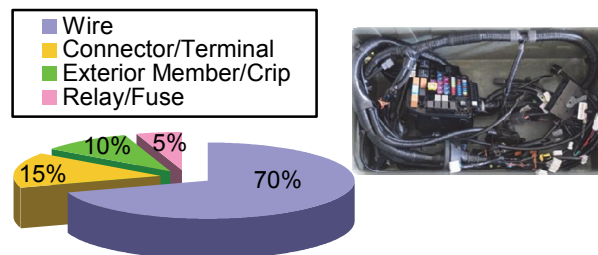


Fig. 1 Weight Ratio of Wiring Harness Components

*1, 2 電子開発部
Electrical & Electronics Development Dept.

新型ロードスターでは、軽量化の新技术である“電線の導体材料を従来の銅から軽量のアルミニウムに置き換える材料置換”により、電線そのものを軽量化した（Fig. 2）。本稿ではこの軽量化の開発経緯と実現手段を紹介する。

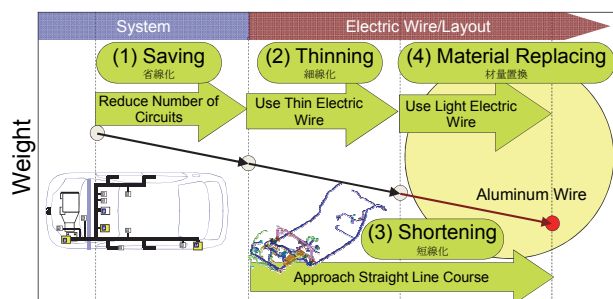


Fig. 2 Approach of Wire Weight Reduction

2. アルミ電線の搭載部位

ワイヤハーネスに使用する電線は、通電電流の大きさにより、適切な電線径を選定している。大電流回路に使用する大径の太物電線は、小電流回路の細物電線に比べ、導体である金属を多く使用するため、電線重量は重くなる（Fig. 3）。太物電線の重量を軽減することが軽量化にとって効果的だといえる。

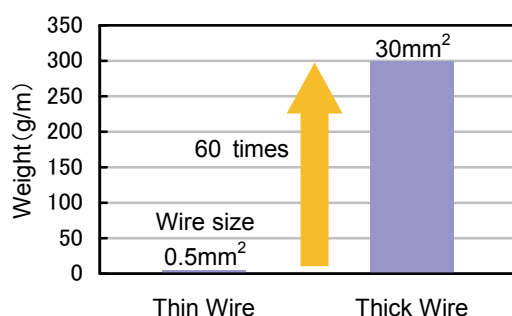


Fig. 3 Weight of Copper Wire

新型ロードスターは、燃費向上を目的として減速エネルギー回生システム「i-ELOOP」を搭載する。このシステムは、クルマの減速時に発生するエネルギーを電気として回収し、クルマが必要とする電気エネルギーとして再利用する。可変電圧式オルタネータで発電し、キャパシタへ充電を行う。DC-DCコンバータにて最大24Vのキャパシタ電圧を12Vへ降圧し、各電装品へ電力を供給する。このオルタネータ、キャパシタ、DC-DCコンバータ、バッテリーは太物電線によって接続される（Fig. 4）。アテンザ、アクセラはこの太物電線の導体に銅を使用している。新型ロードスターではこの導体をアルミニウムに置き換えることで、軽量化により人馬一体/Lot of Fun/低燃費化に貢献できると考えた。

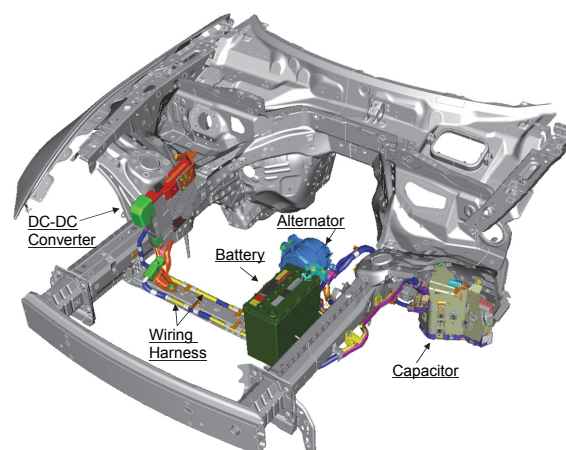


Fig. 4 i-ELOOP Layout of New Roadster

i-ELOOPハーネスのアルミ化は、キャパシタとDC-DCコンバータの接続区間及び、DC-DCコンバータとバッテリーの接続区間とした（Fig. 5）。

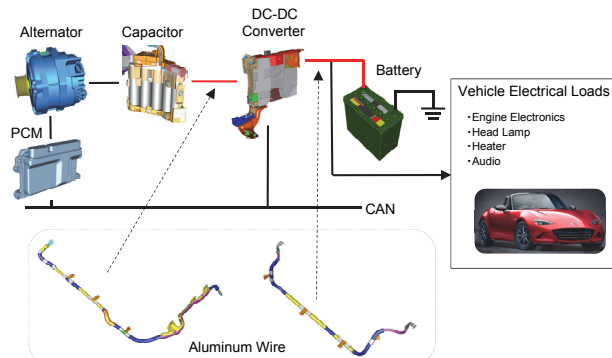


Fig. 5 System Diagram⁽¹⁾

この2本の電線導体を銅からアルミニウムに置き換えることで、約66%低減となる500gの軽量化が見込める（Fig. 6）。

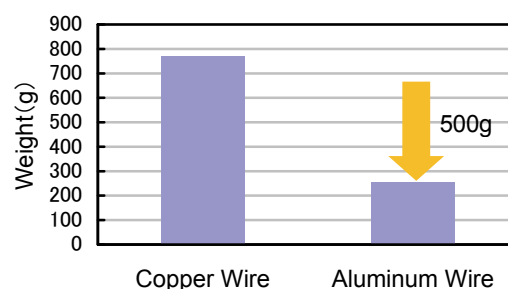


Fig. 6 Weight Comparison

3. アルミ電線採用に向けた検証

車載における課題を明らかにするためFMEA/DRBFMを実施し、以下3点の故障モードを抽出した。

- (1) アルミニウム表面の酸化皮膜が強固なため、電線と端子の接続間で接触不良が発生する
- (2) 電線（アルミニウム）と端子（銅）間で異種金属接触腐食による導通不良が発生する
- (3) 導体をアルミニウムに変更することで、電線の発煙及び電線の熱劣化が発生する

(1) の酸化皮膜による接触不良について、アルミ電線の酸化皮膜を除去した上で端子と接続する技術が必要となる。アルミ電線の端子接続技術を調査し、圧着部の耐久性評価を行った（3.1節にて説明）。

次に (2) の異種金属接触腐食による導通不良について、どのような条件下で腐食が発生するのか、腐食耐力はどの程度あるのか、腐食耐久評価と車両腐食環境の把握を行った（3.2節にて説明）。

最後に (3) の導体材料変更による電線の発煙と電線の熱劣化の発生について、アルミ電線の実績値を反映した電線発煙のヒューズによる回路保護及び、電線熱劣化寿命の検証を行った（3.3節にて説明）。

アルミ電線採用の際に想定される3つの課題についての具体的検討内容を次に詳述する。

3.1 アルミ電線端子接続技術

電線と端子の接続において、安定した電気的特性を得るには、電線と端子間及び、電線を構成する素線間の電気的接続が必要となる。アルミ電線の導体表面を覆う酸化皮膜は、銅電線の酸化被膜より強固で抵抗値が高い（Table 1）。端子圧着時、導体外周部に位置する素線の酸化皮膜は、端子セレーション（溝）により破壊することで電線と端子間の接続は可能となるが、導体中央部の素線は端子に触れる割合が少なく（Fig. 7）、また素線間の導通も乏しいため、電気的特性が安定しない。

Table 1 Oxide Film Properties of Aluminum Wire⁽²⁾

Oxide Film	Hardness [HV]	Resistivity [$\Omega \cdot \text{cm}$]
Al_2O_3	700~1900	$10^{12} \sim 10^{14}$
CuO	about 130	$10^2 \sim 10^3$

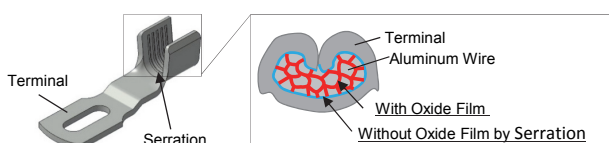


Fig. 7 Cross Section of Crimp Department

端子接続作業時にアルミニウム表面の酸化皮膜を除去し生成させない端子接続技術として、超音波半田や超音波溶接などの工法がある。

(1) 超音波半田による接続

超音波振動によるキャビテーション効果により、素線表面を覆っている酸化皮膜を破壊することで、半田をアルミ素線間に浸透させる。その後、圧着することで電線中央部の素線は、半田を介して端子と接続される（Fig. 8）。

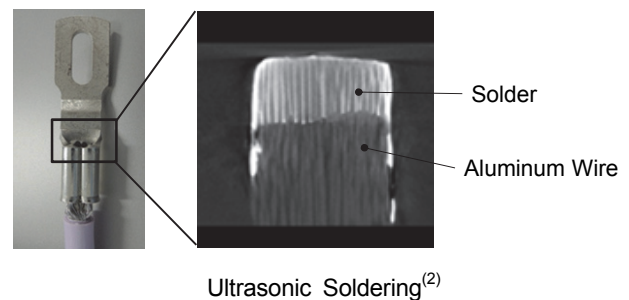


Fig. 8 Flow of Electricity (Ultrasonic Soldering)

(2) 超音波溶接による接続

超音波振動を加えることにより素線の酸化皮膜を破壊しながら加圧することで、素線間の接続及び端子との接続を同時に行う（Fig. 9）。

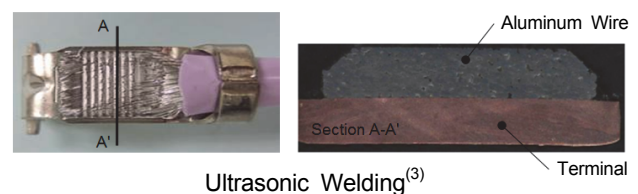


Fig. 9 Flow of Electricity (Ultrasonic Welding)

これら2種類の接続技術を用いて、車載環境を想定した各種耐久評価を行い、銅電線と同等の接続信頼性を確保できていることを確認した。

3.2 腐食耐久評価と車両腐食環境の把握

一般的に電位の異なる金属を電解液中で接触すると異種金属接触腐食が発生する。電線（アルミニウム）と端子（銅）間で異種金属接触腐食が発生するメカニズムを以下に記載する。

(1) 異種金属接触の腐食メカニズム

端子圧着部に塩水などの電解液が付着するとアルミニウムが溶出される。これは、標準電極電位が高い銅と低いアルミニウム（Table 2）が接触した部位に電解液が付着すると、銅がカソード、アルミニウムがアノードとなり、アルミニウムが溶出する（Fig. 10）。以下の3つがそい、腐食電流が流れるルートができると腐食が進行する。

- ① 異種金属の接触
- ② 電解液（塩水）
- ③ 溶存酸素

Table 2 Ionization Tendency

Aluminum Wire - Copper Terminal									
Element	AL	Zn	Fe	Ni	Sn	Pb	(H)	Cu	
Standard Electrode Potential [V]	-1.66	-0.76	-0.45	-0.26	-0.14	-0.13	0	0.342	

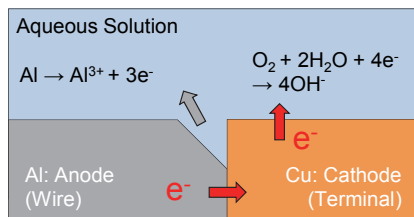


Fig. 10 Schematic View of Different Kind Metal Contact Corrosion

(2) 試作品による塩水噴霧試験

自動車の腐食環境は、沿岸地域や冬季の融雪剤散布地域での塩害による影響が大きい。アルミ電線の端子圧着部に塩水が付着した場合の腐食進行状況を確認するため塩水噴霧試験を行った。アルミ電線を銅端子に圧着した試作品を製作し、圧着部に5%の塩水を長時間噴霧し高温高湿放置した後に、端子圧着部の電圧降下と圧着強度の測定を行った。また、比較対象として以下の電線サンプルを準備した。

＜サンプル仕様＞

サンプル1；アルミ電線

サンプル2；アルミ電線+圧着部の防食処理（Fig. 11）

サンプル3；銅電線

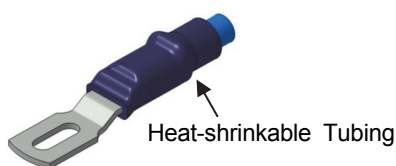


Fig. 11 Corrosion Protection

電圧降下について、銅電線及び防食処理したアルミ電線は変動が見られないが、アルミ電線は徐々に上昇している（Fig. 12）。また電線を端子に圧着させている部分の圧着強度についても、アルミ電線は低下している（Fig. 13）。銅電線と防食処理したアルミ電線は、顕著な変動は見られなかった。

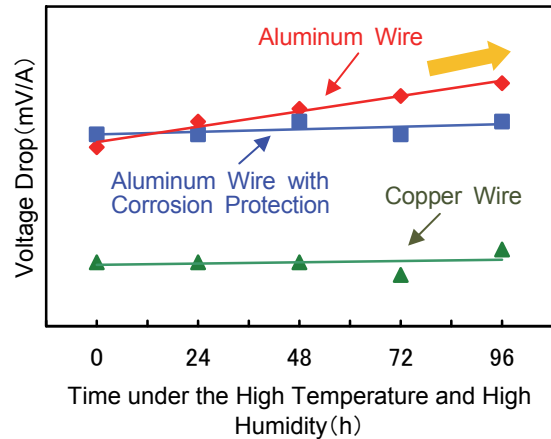


Fig. 12 Voltage Drop after Salt Spray Test⁽³⁾

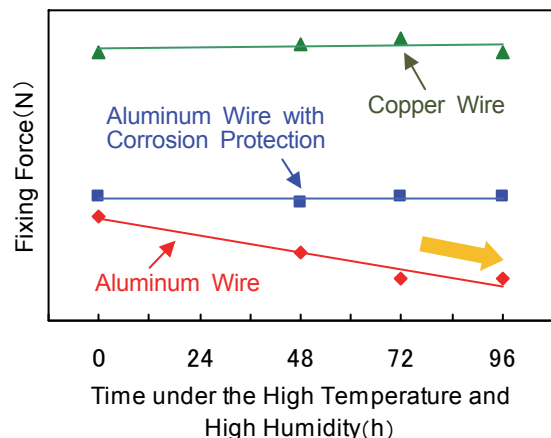


Fig. 13 Fixing Force after Salt Spray Test⁽³⁾

これらの評価結果から、塩水が多量にかかる環境下でアルミ電線を使用すると、異種金属接触腐食により端子との接続間のアルミニウムが溶出し（Fig. 14）、接触抵抗の上昇や圧着強度が低下することが分かった。またこれを防ぐには、圧着部に塩水が掛からないように熱収縮チューブ等により防水する手法が有効であることが分かった。

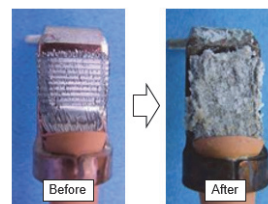


Fig. 14 Corrosion of Aluminum Wire

(3) 試作車両による促進腐食耐久評価

車両での腐食環境を確認するため、促進腐食耐久評価を行った。端子圧着したアルミ電線の試作品を試作車両に搭載し、塩水路走行及び湿潤温暖室での暴露を繰り返し行った。アルミ電線の腐食状態を経過観察できるようにサイクル数を変え（サイクル数；0，市場1年相当，3年相当，6年相当），各耐久後に端子圧着部の電圧降下を測定した。評価結果、キャパシタ部においては、電圧降下が徐々に上昇しているが（Fig. 15），DC-DCコンバータ及びバッテリー部では、初期と比較しても顕著な増加は見られず、腐食の様子も観察されなかった。また圧着強度についても、キャパシタ部のみ低下が見られた。

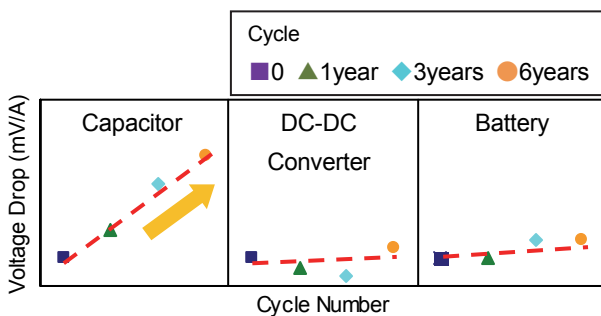


Fig. 15 Voltage Drop after Corrosion Durability Vehicle Evaluation⁽³⁾

このような差が出たのは、車両搭載部位により塩水の被水量が異なり、アルミニウム溶出量の差が出たと考え、被水状況を確認した。タイヤ付近にレイアウトしているキャパシタ部は、大量の水が掛かる様子が観察された（Fig. 16）。車両上部にあるDC-DCコンバータとバッテリー周辺は、多少の水しぶきは飛散しているが、端子圧着部は絶縁カバーで覆われており（Fig. 17），被水することはなかった。




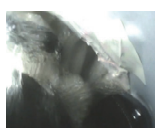


	Capacitor	DC-DC Converter	Battery
Before			
Pour Water			
	Flood	Little Spray	Little Spray

Fig. 16 Situation of Pour Water

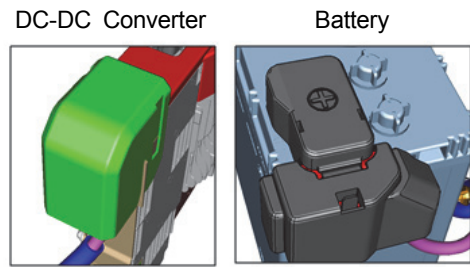


Fig. 17 Insulation Cover of Crimp Terminal

これらの評価結果から、キャパシタ部のアルミ電線端子圧着部には、熱収縮チューブを取り付けることで、塩水が掛からないよう防食処理を施した（Fig. 11）。防食処理をしたアルミ電線を試作車両に搭載し、促進腐食耐久評価を行い、電圧降下及び、圧着強度の変動がないことを確認した。また、熱収縮チューブの各種耐久評価を行った後、防水性試験を行い、防水性に問題ないことを確認した。

DC-DCコンバータ及びバッテリー部については、実車検証の結果から、腐食環境にないことを確認できたため、防食処理は不要とした。

3.3 電線発煙のヒューズ保護と電線熱劣化寿命の検証

(1) 電線発煙のヒューズによる回路保護

電線がショートし、許容電流を超える過剰な電流（ショート電流）が流れた際に、電線が発煙し車両火災を発生させないために、回路上にヒューズを設定している。ショート時には、このヒューズがジュール熱により溶断し、電線が発煙する前に通電を遮断し、回路保護を行うよう回路設計している。導体をアルミ化すると、電線抵抗／熱容量／抵抗温度係数などの電線特性が変わり、通電時の電線の自己発熱による電線温度上昇値が従来の銅電線から変わる。このため、アルミ電線の特性値を反映した温度上昇値⁽⁴⁾を算出する必要がある。この値を用いて、電線の発煙時間 T_1 とヒューズ溶断時間 T_2 を比較し、ショート時にヒューズが先に溶断することを確認した（Fig. 18）。

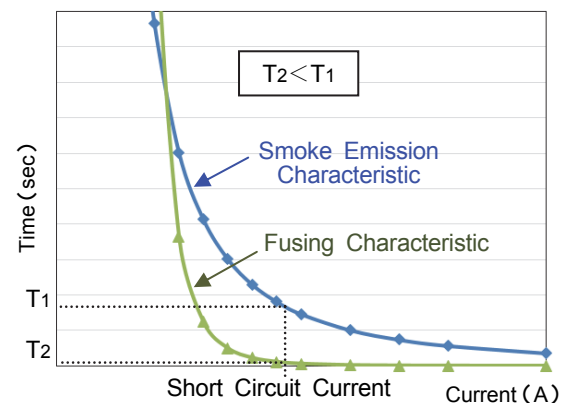


Fig. 18 Fusing Characteristic and Smoke Emission Characteristic

(2) 電線熱劣化寿命検証

電線は、高温環境下で長時間使用していると、電線の絶縁体が硬化し、絶縁機能が損なわれ、断線やショートが発生する懸念がある。この状況を防ぐために、雰囲気温度の高いエンジンルーム等の高温環境下では電線熱劣化寿命検証を実施している。絶縁体の伸び率100%⁽⁴⁾を電線寿命とし、その範囲内で電線を使用するよう設計している。エンジンルーム内の雰囲気温度とアルミ電線の特性値を反映した通電時の電線温度上昇値を加味した電線熱劣化寿命検証を行い、基準内であることを確認した (Fig. 19)。

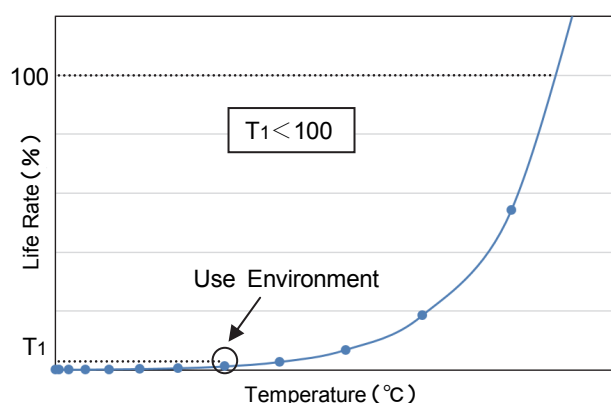


Fig. 19 Characteristics of Heat Life

4. おわりに

アルミ電線を車両に搭載するためには、3つの課題があった。新たにアルミ電線接続技術を導入し、車両搭載技術の開発及び、アルミ電線特性値を用いた電線検証の実施により、これらの課題を解決し、新型ロードスターにアルミ電線を搭載することに成功した。減速エネルギー回生システム「i-ELOOP」ハーネスをアルミニウムに置換することにより、クルマ1台に使われるハーネス総重量の約3%にあたる500gの軽量化を達成した。

アルミ電線の車両搭載技術は、軽量化にとって重要な技術であり、今後更に搭載量を拡大していく。今後もお客様に、より良い商品を提供できるよう努力する所存である。最後に、この開発にあたり多大なご指導とご協力をいただいた住友電装(株)、(株)オートネットワーク技術研究所、古河AS(株)の皆様に感謝の意を表する。

参考文献

- (1) 高橋正好ほか：減速エネルギー回生システム
「i-ELOOP」の開発、マツダ技報, No.30, pp.37-42 (2012)
- (2) 古河AS(株) 提供資料
- (3) 住友電装(株)、(株)オートネットワーク技術研究所 提供資料
- (4) 日本自動車技術会規格 JASO D 609

■ 著 者 ■



三好 俊充



下河内 次生