

電気自動車用リチウムイオン電池の効率的な利用法

濱 田 耕 治

Effective Usage of Lithium Ion Batteries for Electric Vehicles

HAMADA Koji

Abstract

Pure Electric Vehicles (PEV's) are promising when seen in relation to global environment. However, there is the need to solve a number of problems before PEV's become viable alternatives of transportation. For example, reduction of battery charge time, improvement of battery performance, and reduction in vehicle cost. A way to improve battery performance is to use lithium ion batteries.

One problem with lithium ion batteries is with charging (recharging). It is difficult to provide a constant voltage evenly distributed to cells connected in a series. As a result, the expected full battery capacity is not attained. The cause is in the method used to charge lithium ion batteries.

This article suggests a way to charge lithium ion batteries, and attain even distribution of voltage, and charge batteries to full capacity. Evaluation of the method is provided.

Key words : Lithium ion battery, Electric vehicle, Battery capacity, Environmental conservation
リチウムイオン電池, 電気自動車, 電池容量, 環境保全

1. はじめに

わが国において、ガソリン自動車 1 km 走行あたりの有害排出ガス（一酸化炭素、炭化水素、窒素酸化物）排出量を道路運送車両法で規制した昭和50年（1975年）は、日本の自動車業界が本格的に地球環境保全に向けて第一歩を踏み出した時といえる。

その後石油危機による自動車燃料の石油依存からの脱却が唱えられ、内燃機関に替わる動力を用いた自動車の開発が進められてきたが、現在においても主流はやはり石油を燃料

とする自動車であることは否定できない。しかし有害排出ガスの削減に関しては技術の進歩もあり、自動車先進国と呼ばれるアメリカ、日本および一部のEU諸国などでは効果を挙げてきた。しかしながら発展途上国においては、まだ有害排出ガス対策は充分とはいえない。

さらにここ十数年、地球温暖化ガスによる地球温暖化が、有害排出ガスによる大気汚染とあわせて地球環境問題として取り上げられるようになり、1997年、京都で開催された国連気候変動枠組条約第3回締約国会議（COP3）で京都議定書が採択され、地球温暖化ガスの削減目標が定められたことをきっかけに、人々の地球温暖化防止に対する関心も高くなって来た。それに伴い、今まであまり問題視されていなかった地球温暖化ガスの一つである二酸化炭素排出量削減が大きく叫ばれるようになってきた。

2004年の国内における二酸化炭素全排出量のうち、運輸部門が20.4%⁽¹⁾と発表されており、その中88%⁽²⁾が自動車からの排出であるといわれている。(2006年の排出量は若干減少⁽³⁾)したがって自動車からの二酸化炭素の排出量を削減すること、すなわち化石燃料を直接燃料として使用しない自動車は地球環境保全に大きく貢献できることから、バイオ燃料自動車、水素と酸素を燃料とする燃料電池自動車や電気自動車が世界的に注目されるようになって来た。

大阪産業大学では、将来の地球環境保全から見た場合、自動車の主たる動力源として使用されると考えられる、電気をエネルギーとする純電気自動車（Pure Electric vehicle；以後EVという）に着目し車両開発を行ってきた。その性能評価の場として、四国EVラリーに参加することで競技において結果を出すと同時に、実験走行を兼ねることで実用化に向けた問題点の抽出、EVの経済的な走行方法の提案⁽⁴⁾を行い、EVの普及の妨げとなる問題点の解決に努めると同時に、より実用的な走行を目指した車両改造を行ってきた。しかし2005年の改造で動力用電池を鉛蓄電池⁽⁵⁾からリチウムイオン電池⁽⁴⁾へ変更後、個体電池の品質のばらつきによる電池の破損の発生、特にEVのエネルギー供給源となる電池の個体電圧が均一でない⁽⁶⁾ことから発生する定格の電池容量が得られないという問題が明らかになった。この問題点は将来EVが普及する上で大きな問題となるものである。しかし充電方法を工夫することでこの問題点は解消できると考えられる。

本論文はEVにおいては最も重要となる電池を安定した状態で定格電池容量まで使用するための充電方法について検証実験を行い、その有効性を確認するものである。

2. 研究の目的

本論文においてEVとは、走行後、電池に充電を行うことで次の走行が可能となる自動車である。現在、全地球規模での早急な環境保全が必要であることから運輸関係、特に自動車業界ではハイブリッド自動車、燃料電池自動車、EV、バイオディーゼル自動車、バイオエタノール自動車といった様々な低公害自動車の実用化を目指した取り組みがなされている。この中でEVは早くから市販はされていたが、広く普及するには至っていなかった。その理由としては電池容量の制約から長距離走行ができないことや、長い充電時間、高い電池コストと言った課題が解決されないまま残されているからである。これらの課題を克服することがEVの普及につながることになり、その結果、現在の軽自動車に代わる利便性を有し、環境に配慮したコンピューターカーとしてのEVの実用化が可能となる。

さらに今後普及が有望視されている燃料電池自動車、現在需要が拡大しているハイブリッド自動車も基本システムはEVと共通であるため、本研究の成果はそれらの研究開発にもつなげていくことを目的としている。

3. EVの課題と研究のアプローチ

3.1 実用上の課題

最初にEVが作られたのは1873年と言われており⁽⁷⁾、ガソリン自動車に比べると12年早く、戦争などで石油が不足した時期、EVの普及傾向は見られたが、現在に至るまでガソリンなどの化石燃料をエネルギー源とする内燃機関自動車が主流である。EVの普及を妨げる要因としてはエネルギー源となる電池の総合的な性能（電池の寿命を含む）が化石燃料を使用した場合に比べ劣ることが挙げられる。

さらに充電作業時間の長さも課題として挙げられる。走行後に要する充電時間は内燃機関自動車の給油時間（5～10分）と比べると電池容量にもよるが、数時間と比較にならないほど長時間になる。航続距離も化石燃料を使用する乗用車の場合は概ね400～500kmであるが、従来主流であった鉛蓄電池を使用したEVの場合には100km程度が限界である。EVの場合一充電での走行可能距離は単電池の容量に大きく係っており、電池容量は並列接続することで大きくできるが、電池の個数が増加することで車両重量が増し、電力消費の増大につながる。また電池が高コストであると共に耐用年数が短いことがEVの普及を妨げる大きな要因となっている。

3.2 技術上の課題

現在の実験車両⁽⁸⁾は1999年にトヨタカーリーナ（1800ccガソリンエンジン車）をベースとして、EVに改造したものである。2004年までは車両走行用電池は鉛蓄電池を用いていたが単電池のエネルギー密度が35Wh/kgと小さく長距離走行するためには電池数を増やすか、頻繁に充電を行う必要があった。その対策として競技会出場時には充電時間を短縮するためにハイブリッド充電法⁽⁴⁾で大電流による短時間での充電を行なったが、車両搭載電池と同数の電池を別途必要とするため実用向きではなかった。さらに2005年10月にシルクロード横断プロジェクトが決定し、中国で充電場所を確保するには一充電当たりの走行距離が少なくとも210km程度必要となり、鉛蓄電池では要求を満たすことができないことが判明した。そのためエネルギー密度も大きく軽量である表1に示すリチウムイオン電池を使用することとなった。

この電池のエネルギー密度は表1に示すように、鉛電池の約3倍あり、軽量化にともなう並列接続での電池容量増大が可能となる。車両重量は約200kg軽量でき、走行性能の向上に反映させることができた。実験車両には図1に示す電池を図2のように2並列×6直列を1ユニットとして13ユニット（計156個）を直列接続することで理論上は最大電圧約330V（単電池電圧4.25Vとして）、定格の電池容量は110Ahとなる。

表1 中国 Blue-sky バッテリー社製電池諸元

型式	ICR50/380(リチウムイオン電池)
定格容量	55Ah
定格電圧	3.7V
重量	1.8kg
体積	φ51mm×380mm
パワー密度	300W/kg
エネルギー密度	110Wh/kg～130Wh/kg
連続最大放電電流	110A
放電終止電圧	3.0V
セル電池サイクル寿命	800回以上

実走行には定電流で長時間の充電を実施したが、全電池を一括充電するため各電池電圧の均一化が困難で、110Ah消費した場合の過放電状態を防ぐため、10%以上余裕を見て100Ah以下の消費を限度として走行する必要があった。これは走行可能距離にして20～30kmのロスとなる。さらに充電地点の確保上やむを得ず限度を超えて走行した場合、放電終止電圧を下回った個体では回復が不可能となり予備電池と交換の必要が生じた。

以下に通常の充電方法を示す。



図1 電池外観



図2 電池ユニット



図3 APLとの接続ケーブル



図4 APL 本体

充電は図3、4のようにマイウエイ技研社製大容量電源・電子負荷装置Active Power Load（以後APL）（型式MWBFP-1040）を接続し一括充電する方法を採った。走行試験時の充電は定電流方式とした。

手順

- ① APLを車載電池に接続。
- ② 充電電流設定値20A（電源によって変わり最大25A）とする。
- ③ いずれかの単電池の電圧が4.25Vになるまで充電する。
- ④ 充電電流値を10A、5A、2A、1Aと段階的に下げる。（単電池の最大電圧は4.25Vとする。）

上記手順で充電したときの電圧はシルクロード横断時の場合、全電池の平均電圧は4.20V⁽⁶⁾となっていた。またこの場合の単電池中の最大電圧は4.24V、最小電圧は4.15Vとなっていた。この差が定格の容量を得ることができない要因であった。所要充電時間は約10時間である。

3.3 研究のアプローチ

シルクロード走行時の電池電圧データから充電時、放電時とも個々の電圧にばらつきが確認されていた。このばらつきが電池容量の差となる大きな要因であることは先に述べたが、これは使用開始時点でばらつきのある電池を一括で充電することに起因している。しかし充電時のばらつきは学外での長距離走行時では携行する充電機器の関係で全電池の一括充電方式を採らざるを得ないため避けることができない。よって長距離走行実施前に全電池の個別充電を行うことで充電後の電圧を均一化し、さらに強制放電を個別に行い放電後の電圧も均一にする工程を繰り返すことで電池電圧および電池容量の均一化が図れると考えられることから今回の検証実験を実施するに至った。

4. 実験と実験結果

4.1 実験目的

EV用電池では充電終了時の単電池電圧と単電池容量をできるだけ均一化することが重要である。本実験では一括充放電を実施する電池ユニットと個別充放電する電池ユニットに分け充放電を実施することで放電容量と単電池電圧を比較し、個別充放電の効果と充放電の必要繰り返し回数を確認し電池の性能評価をする。さらに個別充放電を繰り返した後に一括充放電を行った場合、単電池がどの程度均一化した性能が保たれるかを検証、評価するものである。なおここで実施する放電とは、実走行時の電力消費にあたる。

4.2 実験装置

図4のAPLに図5で示すように1ユニットにリチウムイオン電池（中国Blue-skyバ

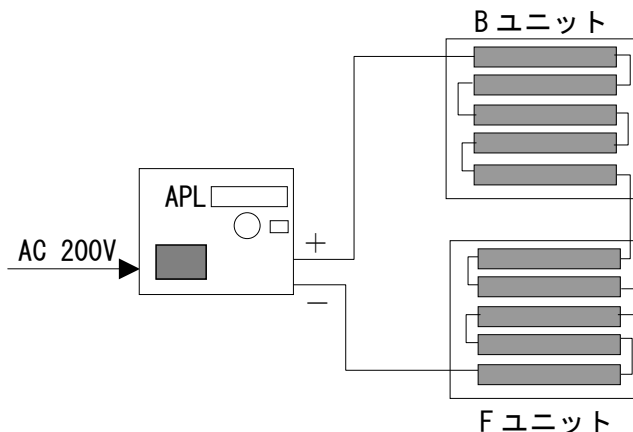


図5 実験装置概略図

ッテリ社製）10本を直列接続したユニットを2セット準備し、個別充放電を行うユニット（以後Bユニット）と一括充放電のみのユニット（以後Fユニット）を接続し充放電を行うものである。

今回実験用電池として採用したものは実験車両に搭載していた電池からランダムに選んだ20本である。

4.3 実験方法

4.2実験装置に示すように電池を接続し以下の図6～図9のフローチャートに示す手順で一括充電、個別充電、一括放電、個別放電の順で充放電を行う。以下に手順を述べる。

4.3.1 一括充電

図6の設定電流値は20Aから順次15A,13A,10A,7.5A,5A,3A,2A,1Aと下げていく。

電流値を順次下げる手法を採用した理由は、従来からの充電方法を用いる過程でも高い電流値のみで充電を行った場合、一時間程度放置後電圧を測定すると、規定の電圧を大きく下まわることが既に確認できており、その対策として電流値を段階的に下げて充電することによって、最終的な電圧の降下を抑えることが可能であると確認できていたからである。

4.3.2 個別充電

図7はBユニットのみで行う個別充電の手順であり、充電は10本の電池すべてが4.25Vになるまで、先の一括充電後に続けて行う。

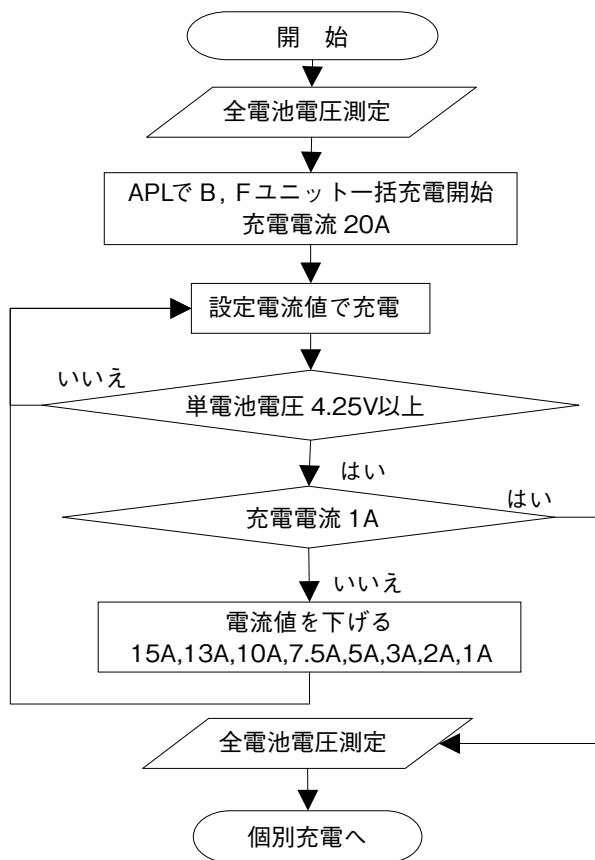


図6 一括充電手順

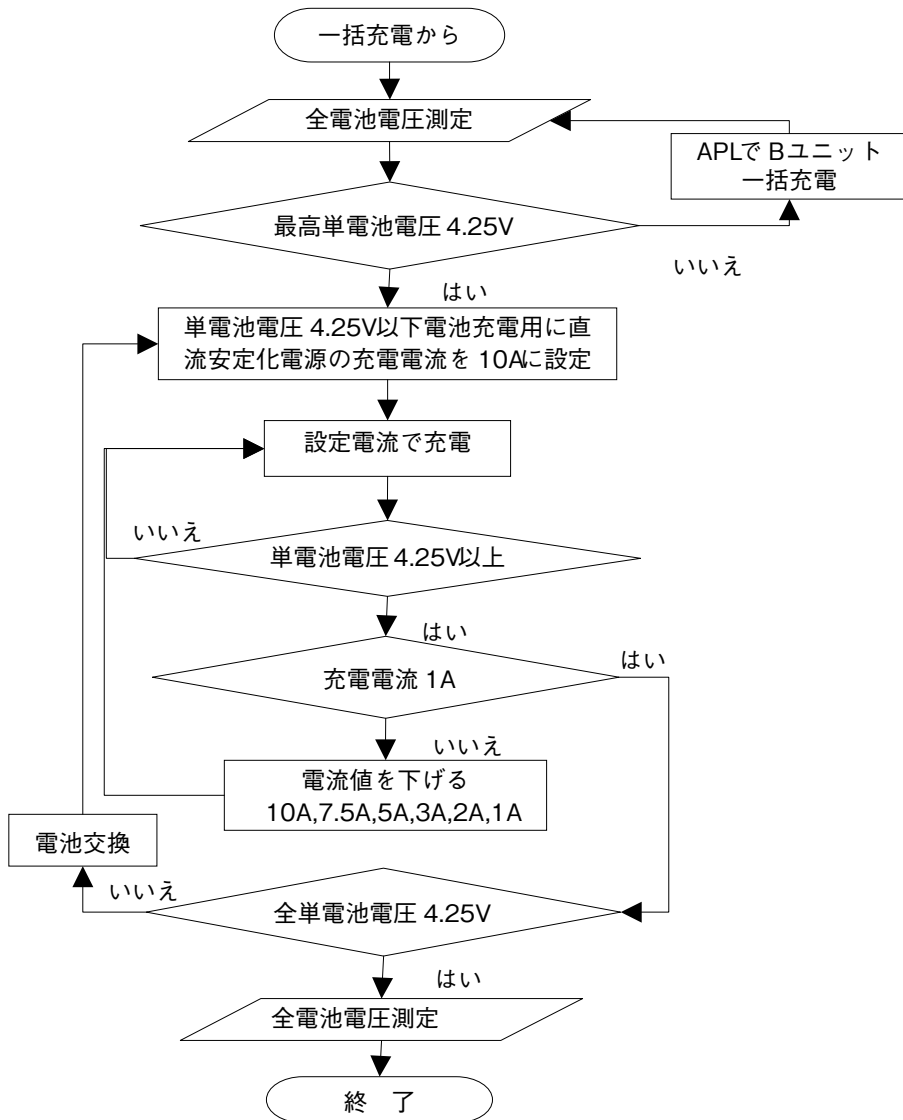


図7 個別充電手順

4.3.3 一括放電と個別放電

個別充電後、最低1時間放置し全電池の電圧を測定した後、B、F両ユニットを直列接続しAPLの回生機能（放電機能）を用いて図8の手順で放電を行う。その後図9の手順で個別放電を実施する。

- ・一括放電ではFユニットのいずれかの単電池が3.0Vになれば充電時と同じ要領で放電電流値を変え放電を行い、-1Aでいずれかの単電池が3.0Vになれば終了する。
- ・一括放電終了後のBユニット個別放電は放バッテリー（浜松コンピューティング社製）と

ねるごとに減少していることが分かる。

図11はFユニットの一括充放電終了時の電圧を表したもので、この図から実験開始時の電圧差は充放電を繰り返しても回復していないことが分かる。

表 2, 3 は各充放電時での各ユニット中の最大電圧と最小電圧およびその差である（放電容量は参考データ）。放電時は両ユニットとも電圧に差がある。

これは単電池の内部抵抗にばらつきがあることに起因していると考えられるが、今回は内部抵抗に関しての個々のデータがないため断定はできない。また容量に関しては参考値ではあるが、表 2 および表 3 から単電池の電圧を揃えることで増加していることがわかる。

電池容量は最大で10Ah以上の差が出ており、長距離走行を行う場合一充電での航続距離を延長するための事前準備としては有効である。なお自動車用電池は一定電流で放電する⁽⁴⁾ことで容量表示されており、今回の実験のように放電電流を段階的に変える手法は

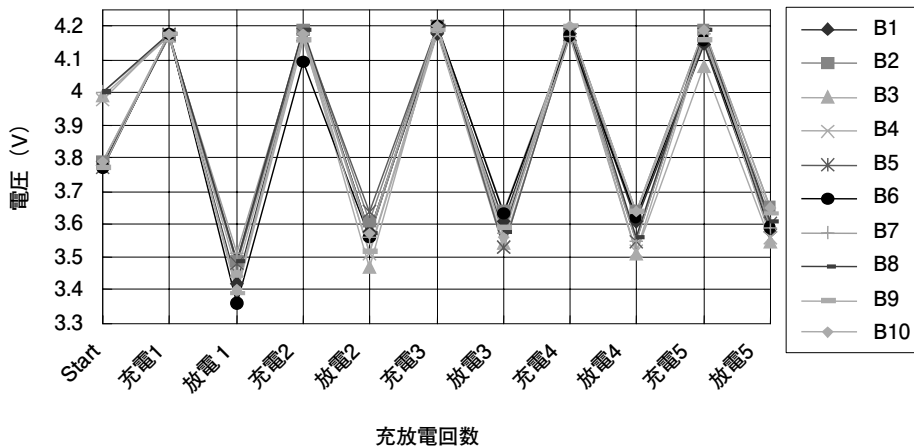


図10 Bユニット電池電圧

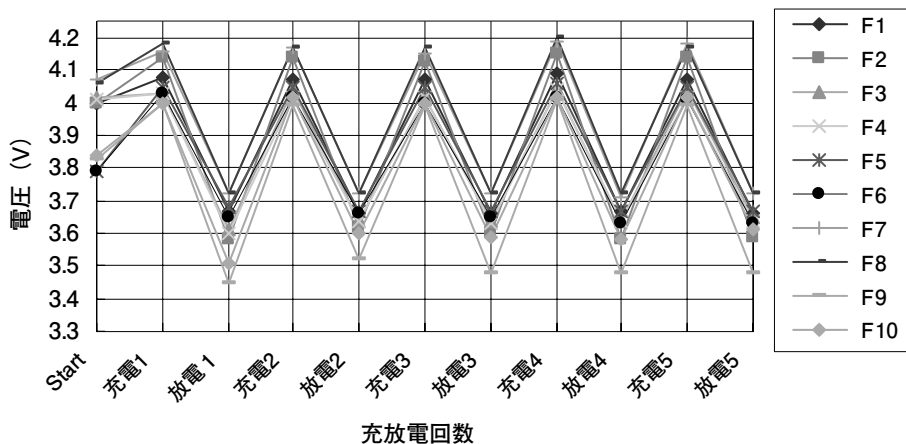


図11 Fユニット電池電圧

とっていない。しかし実際の走行では電流値は道路状況により変動するため、今回の実験データはより実走行に近い放電方法といえる。

また今回5回の個別充放電を行ったが3回目から電圧および容量がほぼ均一化してきていることから、回数を2～3回に減らすことは可能である。1回の充放電に要した平均時間は約14時間（充電は個別充電を含め約8時間、放電は個別放電を含め約6時間）であった。

表2 Bユニット充放電時電圧 (V)

	充電1	充電2	充電3	充電4	充電5	放電1	放電2	放電3	放電4	放電5
最大	4.18	4.19	4.20	4.20	4.19	3.49	3.64	3.64	3.64	3.65
最小	4.17	4.16	4.18	4.17	4.15	3.39	3.47	3.53	3.51	3.55
電圧差	0.01	0.03	0.02	0.03	0.04	0.1	0.17	0.11	0.13	0.1
放電容量Ah						53.78	59.15	59.7	59.88	60.02

平均放電時電圧差 0.12V

表3 Fユニット充放電時電圧 (V)

	充電1	充電2	充電3	充電4	充電5	放電1	放電2	放電3	放電4	放電5
最大	4.18	4.17	4.17	4.20	4.17	3.72	3.72	3.72	3.72	3.72
最小	4.00	3.99	3.99	4.01	3.99	3.45	3.52	3.48	3.48	3.48
電圧差	0.18	0.18	0.18	0.19	0.18	0.27	0.2	0.24	0.24	0.24
放電容量Ah						49.15	49.65	47.92	50.31	48.47

平均放電時電圧差 0.24V

4.4.2 個別充放電の効果確認結果と検討

図12および表4はBユニットの5回の個別充放電実験後、効果確認実験を実施した結果である。4.3実験方法のFユニットと同様の一括充放電をすることで確認した。

図12から充放電終了後の電圧のばらつきは図11のFユニット充放電後の電圧と比較した場合明らかに減少していることが分かる。

放電時の電圧差はBユニットの個別充電時と比較した場合0.04V程度増加しているがFユニットと比較した場合は0.08V減少している。

また容量に関してはBユニットの個別充放電と比較した場合4回目の放電時で1.18Ahの減少となっている。

Fユニットと比較した場合最終の放電時で10.37Ah増加しており、実車の場合2並列で使用しており平均燃費を2.52km/Ah⁽⁴⁾とすると

$$10.37\text{Ah} \times 2 \times 2.52\text{km/Ah} = 52.26\text{km}$$

となり約52km走行距離の延長が可能となる。

実験時の平均充電時間は約 4 時間となっている。先の B, F 一括充電時に比べ0.5時間短縮されているが、これは電池が10本となっていることが影響している。実車の場合は電池容量が 2 倍になるため約 2 倍（8 時間）の充電時間が必要となる。

以上のことから、前もって個別充放電を行うことで充電終了時および放電終了時の電圧を均一化しておくことは、電池の持つ容量の有効利用に効果的あることが確認できた。

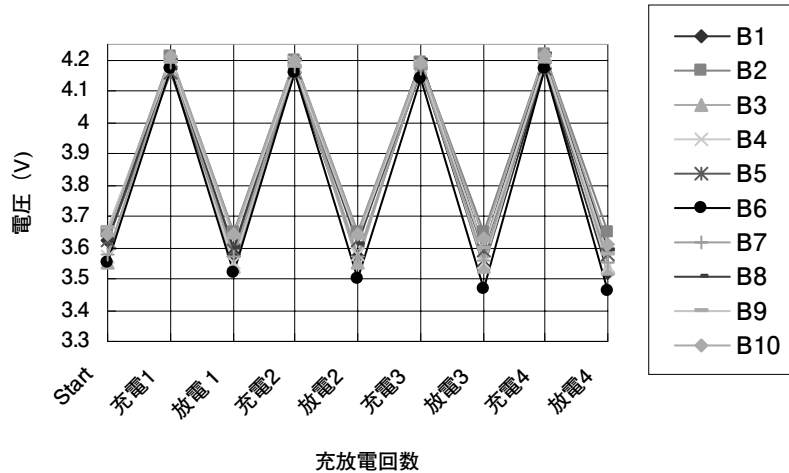


図12 Bユニット電池電圧(確認実験)

表 4 Bユニット充放電時電圧 (確認実験) (V)

	充電 1	充電 2	充電 3	充電 4	放電 1	放電 2	放電 3	放電 4
最大	4.21	4.20	4.20	4.22	3.65	3.65	3.65	3.65
最小	4.16	4.16	4.16	4.17	3.52	3.50	3.47	3.46
電圧差	0.05	0.04	0.04	0.05	0.13	0.15	0.18	0.19
放電容量Ah					58.67	56.9	57.64	58.84

平均放電時電圧差 0.16V

5. まとめ

E Vが普及するための現時点での障害は、電池容量の制約から長距離走行ができないことや、長い充電時間、高い電池コストといった課題が解決されないまま残されていることである。

今回の検証実験はE V普及に向けた課題の一つである、限られた容量の電池を効率よく

利用し長距離走行を可能とする充電方法を検証したものである。

5.1 結論

今回の実験における検証結果は以下のとおりであった。

- ① 長距離走行（1,000km前後）の場合，前もって個別充放電を行い電池の電圧を均一にすることは車両搭載状態での電池容量増加にもつながり，1回の充電での走行距離を延長することができる。この場合の充放電回数は2回程度で充分である。
- ② 個別充放電後は一括充放電を4回行った結果，電池電圧，容量に大きな変化は見られなかった。このことは長距離走行途中の充電作業を一括充電のみで済ませることについて問題はない。よって一充電につき2時間の時間短縮が可能となり，走行後の充電作業の簡素化に繋がる。

検証実験では当初想定した電池電圧および電池容量の均一化できることを確認できた。

この手法は電池の品質が高まることによって省くことのできる作業であり，また電池の電圧や充電を自動的に監視，制御するコンピュータであるBMS（Battery Management System）を搭載することで解決できる問題であるが，実験車両のような手作りのEVではコスト面から容易に採用できない場合には効果的な方法であると言える。また前準備としての2回の充放電作業に必要となる28時間（1回の充電8時間，放電6時間）は実験過程としては無駄な時間ではないと考えている。

2007年9月には中国，四国への走行試験を実施し，今回の手法で前準備を行った結果，特に大きな問題もなく走行ができたことから効果は立証された。

5.2 今後の課題

今回の実験では電池電圧の均一化を確実にするため5回の充放電を実施したが，この回数が妥当であるかの確認を行うには至っていない。したがって今後は個別充放電の必要最低回数と充放電後の一括充放電での使用可能限界回数の確認が必要である。さらに内部抵抗が均一な電池を用い同様の実験を行った場合の結果との比較検討と，品質が均一であるといわれている国産の小容量電池を組み合わせた場合の比較実験を実施する必要がある。

5.3 今後の展望

今後のEV普及に向けての展望であるが，以前から言われている課題⁽⁹⁾である「とにかく普及させるための車両開発」，「電池」，「インフラ整備」は現在においても解決されたとはいえない。2005年には一部の国内自動車メーカーが再びEVの開発を始め，2010年には

市販されると言われており、環境保全が叫ばれる中、人々の意識もEVに向けられるであろう。

電池に関しては自動車用リチウムイオン電池の性能が安定することで2004年3月末から2005年3月末時点のEVの増加台数400台（保有台数約8500台⁽¹⁰⁾）を上回る普及が望める。それに伴いインフラ整備も進んで行く可能性が考えられる。しかし本研究の目的は普通乗用車のEV化ではなく、一般家電と同じような感覚で利用できるコンピューターカーとしてのEVの位置付けと、EV普及に伴う有害排出ガスと地球温暖化ガスの二酸化炭素の排出量削減である。今回はEVの持つ課題の一つである航続距離を延ばす一手法の効果が確認できたことは今後の研究への弾みとなる。

また実験車両における二酸化炭素排出量を使用電力量（石油による火力発電）から算出した結果と、ハイブリッド車トヨタプリウスの燃費（カタログデータ使用）から算出した結果と比較した場合、約50%の削減（詳細については現在まとめている）が確認されており、EV普及による地球温暖化抑止効果の再確認もできている。国内メーカーにおいても実用化を目指した開発は進んでいるが、しばらくはEV用として画期的な性能を持つ電池が開発されるまではEVの急速な普及は望めない。よって内燃機関自動車とは用途による棲み分けを考える必要がある。

6. おわりに

今回の検証結果から、走行準備段階に前もって行う充放電によって、現在EVの一つの課題となっている一充電での航続距離の延長が可能となった。これはEVの行動範囲を広げることに直接つながることとなる。その結果、現在本学で行っているEVを教材とした環境教育活動において、今までは近隣の小学校に対しての活動であったものが、今回の成果により活動範囲が拡大し、2007年9月には学生の企画により広島県の小学校までEVを自走し、子供たちにEVを通して地球環境保全の必要性を訴える活動を実施することが可能となった。

なお、本研究の成果から、現在、本来の目的であるコンピューターカーとしての実用化を目指した小型EVの開発が進められている。

参考文献

- (1) 環境省, [2006], 『環境白書平成18年版』, 株式会社ぎょうせい
- (2) <http://www.mlit.go.jp/singikai/koutusin/rikujou/jidosha/bus/07/images/04.pdf>, [2007.2.28].
- (3) http://www.env.go.jp/press/file_view.php?serial=10412&hou_id=9002 [2008.3.18]
- (4) Y. Nakahira, A. Saihara, K. Hamada, [2005], “Technical Report on the Shikoku EV Rally and Ekiden 2003 in Tokushima”, Journal of Asian Electric Vehicles, vol.3, pp721-732.
- (5) David Linden, [1999], 『最新電池ハンドブック』, 朝倉書店
- (6) 才原篤・中平保雄・藤田久和・浜田耕治, [2006], 「電気自動車に関する研究」, 『自動車整備技術に関する研究報告誌』, No.35, pp.5-8.
- (7) 電気学会電気自動車駆動システム調査専門委員会, [2001], 『電気自動車の最新技術』, オーム社
- (8) 中平保雄・才原篤, [2000], 「学生たちによるコンバートEVの製作」, 『自動車整備技術に関する研究報告誌』, No.29, pp.26-28.
- (9) 堀洋一, [1997], 電気自動車の技術動向, 平成9年電気学会全国大会, No.S.14-1.
- (10) 島村和樹・井関英治・山野井俊行, [2006], 「ハイブリッド車・燃料電池車・電気自動車」, 『自動車技術』, Vol.60, No.8, pp.86-91.