使用環境を想定した電動車椅子用蓄電池の
低温特性評価と積雪期走行実験*但野 茂^{*1}, 塚田 敦史^{*2}, 林 大輔^{*3}
高橋 裕人^{*4}, 岩崎 睦^{*5}, 鶴飼 隆好^{*1}

Low Temperature Property of Battery for Electric Wheelchair

Shigeru TADANO, Atsushi TSUKADA, Daisuke HAYASHI,
Hiroto TAKAHASHI, Mutsumi IWASAKI and Takayoshi UKAI

Not only handicapped people, but also elderly people living in Hokkaido, the northern most island in Japan, desire to participate in outdoor activities during a winter season that is characterized by heavy snow and low temperatures. A wheelchair is generally used for outdoor transport. There are, however, many problems with using wheelchair during the winter; roads covered with snow and ice are very slippery, casters are easily buried in snow, and handrims are too cold to handle. In winter use of a electric wheelchair, it is much important problem that the discharge capacity of battery extremely drops for low temperatures. In this work, batteries for the electric wheelchair were examined on charging and discharging under constant lower temperature. Batteries covered with foamed polyethylene were also tested at the same condition. In addition, we carried out driving tests of electric wheelchair to investigate discharging ability on fresh snowed road and compact snowed road in winter, and normal road in summer. As a result, in 0.2 C discharge rate, the discharge capacity at outer temperature of -20°C dropped 34% in comparison with that at 30°C . When a battery was covered with foamed polyethylene, the discharge capacity was 17% down. From driving test, the discharge capacity was affected by not only the outer temperature but also the road condition.

Key Words: Measurement and Control, Design Engineering, Human Interface, Rehabilitation Engineering, Electric Wheelchair, Battery, Winter Season

1. 緒 言

脊髄損傷者をはじめとする歩行障害者にとって、車椅子は有効な移動手段の一つである。近年、福祉医療技術の発達や福祉政策の充実等により、車椅子利用者のQOL (Quality of Life) も次第に改善され、積極的に屋外活動する機会も増えた。しかしながら、積雪寒冷地域においては、歩行障害者が冬期間に外出することには、かなりの困難を伴う。降雪と低温により、路面は圧雪、アイスバーン状態を繰り返す。その間、通常車椅子による屋外移動は不可能に近い。そのため著者らは、北海道の冬期間における歩行障害者の屋外移動の支援を目標に、雪路でも走行可能な電動車椅子

の開発を目指している。これまで、市販の後輪駆動型電動車椅子を前輪駆動に改良した車椅子を用いて、冬期路面の走行性能評価を行った⁽¹⁾。そして、前輪駆動型電動車椅子の走行性能が、圧雪路、凍結路において後輪駆動型電動車椅子より向上していることを確認した。また電動車椅子の走行性能を計算機上でシミュレーションする手法を提案した⁽¹⁾。これらの成果から、より実用性の高い電動車椅子の開発を行っていく予定である。

電動車椅子の動力源には、一般に鉛蓄電池が用いられている。低温環境下で鉛蓄電池を使用すると、その電力量(放電容量)が低下してしまう。特に北海道では、日中でも氷点下となる日が続く、厳寒期には最高気温が -10°C 以下となる日もある。低温による鉛蓄電池の放電容量の低下は、電動車椅子の使用を極端に制限する。低温対策として、定格容量の大きな鉛蓄電池を用いる方法もある。しかし、現状の電動車椅子の重量は約75kgと重く、そのうち鉛蓄電池重量が全体の約40%を占める。電動車椅子の利便性や操作性を考えると、定格容量増加に伴う鉛蓄電池重量の増加は望ま

* 原稿受付 1998年7月6日。

^{*1} 正員、北海道大学大学院工学研究科 (☎060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)。^{*2} 准員、北海道大学大学院。^{*3} 神戸製鋼(株) (☎675-0137 加古川市金沢町1)。^{*4} 正員、北海道電力(株)総合研究所 (☎067-0033 江別市対雁2-1)。^{*5} 北海道電力(株)旭川支店 (☎070-8678 旭川市4条通12丁目)。

E-mail: tadano@eng.hokudai.ac.jp

くない。また鉛蓄電池は技術的に完成域にあり、現状以上のエネルギー密度の向上や著しい軽量化は難しい。コスト面も考慮すると、しばらくの間は、電動車椅子の動力源として鉛蓄電池が一般的に用いられると予想される。したがって、寒冷地における電動車椅子の使用を考えた場合、低温環境下における鉛蓄電池の特性を明らかにしておくことは非常に重要である。

そのため本報告では、電動車椅子用鉛蓄電池の低温環境下における特性試験方法を検討し、一定環境温度下における放電容量測定実験を行った。また、鉛蓄電池への簡便な防寒対策を検討した。さらに、積雪期間の実車走行試験を行い、実際の使用環境における評価も行った。

2. 蓄電池低温特性実験

2.1 車椅子用蓄電池 通常の車椅子には、鉛蓄電池が用いられている。鉛蓄電池は、負極活物質に鉛(Pb)、正極活物質に二酸化鉛(PbO₂)、電解液に硫酸(H₂SO₄)の水溶液からなる。一対の負極活物質と正極活物質を配置した単電池セルが、6個直列に接続され、合成樹脂製の電槽に収納されている⁽²⁾。本実験で使用した蓄電池は、電動車椅子用に市販されているEV-35型(YUASA製)である。この蓄電池の外観を図1に、仕様を表1に示す。

蓄電池の特性は、一般に放電容量と放電率で表される^(2, 3)。放電容量は、放電電流と放電時間の積で表さ

れる。その単位は[Ah]である。また、放電率は、全容量に対する1時間当たりの放電容量を示す。n時間で放電終了する場合の放電率は、 $1/nC$ と記述する。ここでCはCapacityを意味する添字である。例えば、35Ahの蓄電池が5時間で放電終了すると、放電率は0.2Cとなる。この場合 $35[Ah] \times 0.2[1/h] = 7[A]$ なので、7[A]の電流で5時間放電可能なことを示す。後で示す実験条件の0.4Cは、同一蓄電池が2.5時間で放電終了することを示す。

放電容量は電気化学反応によるので、環境温度、充電条件、放電率、充放電サイクルや履歴等の影響を大きく受ける。このため、蓄電池の放電容量をあらかじめ正確に予測することは難しい。本実験では、特に環境温度、放電率の影響に着目し、低温下における蓄電池の放電容量を測定した。

2.2 実験方法 本実験には、充放電制御装置(BTS VER1.60, (株)東京アールアンドデー)と恒温装置(田尻機械工業(株))を用いた。実験装置の概略を図2に示す。この充放電装置は、測定対象の電池に定電力、定電流、定電圧など様々な充放電負荷条件が設定可能である。本実験では、充放電中、蓄電池の内部温度、電流、電圧と環境温度を測定した。内部温度は、蓄電池のプラス(+)端子から3番目のセルの電解液上部を熱電対で測定した。

充電条件は、定電流7Aのもとで6時間の一定とした^(3, 4)。この場合、EV-35型蓄電池の定格容量が35Ahなので、定格容量の120%充電となる。この理由は、電池内部抵抗等による充電時の電力損失を見込んだためである。通常電動車椅子の充電が家庭の玄関等の室温環境で行われる。そのため充電時環境温度は10℃および20℃とした。

Fig. 1 EV-35 Type Battery

Table 1 Specification of battery for wheelchair

Type	EV-35
Voltage	12 V
Discharge Capacity	35 Ah
Weight	13.5 kgf
Box Size	228 mm×120 mm×200 mm
Specific Gravity of Electrolytic Solution	$1.280 \pm 0.01 \text{ g/cm}^3$
Volume of Electrolytic Solution	3.2 ℓ

Fig. 2 Battery test system

放電条件は、定電力放電とし、定格容量を基準に放電率0.2C、0.4Cを選んだ^(3, 4)。環境温度は、 -20°C 、 -10°C 、 0°C の三条件を設定した。比較のため、常温の基準温度である 30°C の試験も行った⁽³⁾。車椅子は屋内で充電し、そして屋外で利用されることを想定し、充電終了後、即放電実験を開始した。放電中は、ほぼ一定電圧であるが、放電容量が少なくなると、急激な電圧降下が生じる。そこで本実験では電圧降下直後の8Vとなった時を放電終了とした。

放電試験終了後、環境温度を 30°C に設定して内部温度の回復を図り、0.2Cの定電力放電を再度行った。この時測定される値が残留放電容量となる。低温環境下の放電では、放電終了後も未放電分の容量が残存してしまい、次の充放電試験に影響を及ぼす可能性がある。このため残留容量の放電を行った。図3に放電容量(Discharge capacity : DCC)と残留放電容量の測定結果の一例を示す。同図は、環境温度 10°C で充電した蓄電池の0.2C放電結果である。これより、残留放電容量は低温ほど大きいことがわかる。また、放電容量と残留放電容量の和は、環境温度が低温ほど小さくなり、定格容量の一定値とはならない。図4は、充電実験の一例として、環境温度が 10°C のもとでの電流、電圧、内部温度、環境温度の変化を示す。ここで電流が負の値を示すのは、充電中であることを意味する。また、放電実験の一例を図5に示す。本実験では、環境温度を -20°C で放電し、放電終了後約1時間放置した。そして環境温度を 30°C まで上げ、電池内部温度が十分高くなったところで、残留放電実験を行った。以上の充電～放電～残留放電の実験は、一条件につき約1日を要した。再現性の確認のため、同一条件につき2回の実験を行った。全実験条件を表2に示す。

Fig. 3 Relationship between discharge capacity and outer temperature at 0.2C rate

2.3 防寒実験 蓄電池に防寒対策を試みた。防寒のため、保温材として発泡ポリエチレンシートを用いて蓄電池を覆った。これは、屋内における充電中の電池内部温度が、低温時走行中に低下することを防ぐためである。保温材は、厚いほど保温効果が期待できる。しかし現状の電動車椅子を改良しないで蓄電池に保温材を装着するために、その厚さは8mmとした。保温材の効果を放電容量の測定により評価した。実験は、低温特性実験とすべて同一の条件で行った。

2.4 低温特性実験結果 放電実験によって得られた放電容量と環境温度の関係を図6に示す。図より0.2C放電、0.4C放電とも、放電環境温度が低いほど

Fig. 4 Measured values during charge

Fig. 5 Measured values during discharge at 0.2C rate

Table 2 Experimental conditions

	Condition	Outer temperature
Charge	7A	10°C
		20°C
Discharge	0.2C	30°C
		0°C
	0.4C	-10°C
		-20°C

放電容量が減少した。放電環境温度 -20°C の放電容量は、定格容量 35Ah の $68\sim 75\%$ であった。充電環境温度

Fig. 6 Relationship between outer temperature and discharge capacity

Fig. 7 Discharge capacity of batteries covered with or without foamed polyethylene after charged at 10°C

Fig. 8 Inner temperature during discharge of batteries covered with or without foamed polyethylene after charged at 10°C

の影響については、 0.2C 、 0.4C 放電のどちらも、 10°C より 20°C 充電の方が放電容量が大きかった。また充電環境温度にかかわらず、 -10°C 以上の放電環境温度では、 0.2C 放電の方が 0.4C 放電よりも放電容量が大きかった。しかしながら -20°C の場合、逆に 0.4C 放電が大きくなった。低温により、放電率がどのように影響されているかは、放電容量が電気化学反応による複雑な面を持つので、本実験の結果からのみでは明らかではない。

保温材装着の有無についての放電容量と環境温度の関係を図7に示す。保温材装着時では 0.2C 、 0.4C 放電ともに放電容量の増加が見られた。その増加は低温放電ほど顕著であった。放電環境温度 -20°C でも、定

Fig. 9 Relationship between discharge period and then inner temperature

Fig. 10 Relationship between discharge period and then discharge capacity

格容量35Ahの80%以上の放電容量が維持された。逆に0℃では、保温材有無による放電容量の差は小さく、特に放電時間の短い0.4C放電ではほとんど差が見られなかった。放電中の内部温度変化を図8に示す。時間経過にともない、保温材装着による温度低下が小さく、低温放電ほど保温効果が大きいことがわかる。

2.5 考察 以上のことにより、低温放電ほど保温材の効果が認められた。放電率0.2C、0.4Cそれぞれについて、放電終了時間とその時の内部温度との関係を図9に示す。同図より、放電率が一定の場合、放電終了時の内部温度が低いほど放電時間が短いことがわかる。その関係に保温材の有無や充電環境温度は影響しないが、放電率には大きく影響を受ける。0.2C、0.4C放電時それぞれの放電終了時間 t [h]は、終了時の内部温度 T [℃]によって、次式で近似される。

$$t_{0.2C} = 0.03T_{0.2C} + 4.33 \quad (R = 0.79) \quad (1)$$

$$t_{0.4C} = 0.01T_{0.4C} + 1.96 \quad (R = 0.88) \quad (2)$$

上式中の t 、 T の添字は放電率を表す。以上の結果から、保温材装着により内部温度の低下を防げば、放電

Fig. 11 FEM Model of 1/4 battery structure

Table 3 Material properties

	Density [kg/m ³]	Specific Heat [kJ/kg K]	Thermal conductivity [W/m K]
Resin of Polyethylene	920	2.3	0.34
Lead Plate	11330	0.130	35.2
Water	998.2	4.183	0.602
Air	1.161	1.00	0.0256
Foamed Polyethylene	15.9	2.8	0.042

時間が増加することになる。図10に放電終了時間と放電容量の関係を示す。放電率が一定の場合、保温材の有無や充電環境温度に関係なく、放電終了時間が短いほど放電容量が小さい。この特性も放電率に大きく影響を受ける。0.2C、0.4C放電時それぞれの放電容量 Q [Ah]は、放電終了時間 t [h]によって次式で近似される。

$$Q_{0.2C} = 6.58 t_{0.2C} + 2.28 \quad (R = 0.98) \quad (3)$$

$$Q_{0.4C} = 14.26 t_{0.4C} + 0.27 \quad (R = 0.98) \quad (4)$$

Q 、 t の添字は放電率を表す。これより一定の放電率で放電した場合の放電容量は、放電終了時間のみで表される。

Fig. 12 Inner temperature from computational results and experimental results at 0.2C rate

Fig. 13 Computational results on inner temperature in batteries

3. 蓄電池内部温度解析

3・1 解析方法 低温特性実験から、蓄電池の放電容量と放電時間は、その内部温度に大きな影響を受けることがわかった。また防寒対策を施すことで、放電容量の低下を防ぐことができた。しかしながら、各種の防寒対策を考えると、実験にはかなりの時間を要する。そのため、各種保温材の効果を予測する手法を検討するため、有限要素法で蓄電池の内部温度解析を行った。有限要素モデルは実際の蓄電池寸法から、図11に示す1/4モデルを作成した。各構成要素の材質は、電槽がポリエチレン樹脂、極板が鉛、電解液が水、空間部が空気とした。表3に各材料の密度、比熱、熱伝導率を示す。これらの値は、本解析の温度範囲がそれほど広くないことから温度に依存しない一定値とした。電解液および電槽内空気の対流は無視した。蓄電池周囲環境の熱伝達率は、空気の自然対流時の値から $10\text{ W/m}^2\text{K}$ とした。蓄電池の解析は、低温特性実験とほぼ同じ状態を想定し、初期内部温度 10°C 、 20°C から環境温度 0°C 、 -10°C 、 -20°C に放置した場合を行った。内部温度は実験と同様に、3番目のセル上部を評価した。保温材装着モデルの解析では、保温材の厚さを実験と同様に 8 mm とした。

3・2 解析結果と考察 環境温度 10°C で充電した蓄電池について、 0.2 C 放電時の内部温度の測定結果と解析結果を図12に示す。初期値には差が見られるが、1時間経過以降の解析値は実験値とほぼ同様な温度低下が見られた。

図13は、保温材有無による内部温度変化の解析結果である。図中の一点鎖線は、実験結果から得られた 0.2 C 放電終了時の内部温度と放電終了時間の関係式(1)である。この関係式と解析で得られた内部温度の値から、放電終了時間を推定し、そして放電容量を予測することができる。例えば、保温材で覆った蓄電

池を環境温度 -20°C のもとで 0.2 C 放電した場合、放電時間は解析結果と式(1)から 4.29 時間となる。これは、 0.2 C の定格放電時間である 5 時間と比べると 14% 短い。実験結果から放電終了時間が短いほど放電容量も減少する。すなわち、 4.29 時間の値を式(3)に代入すると放電容量は 30.5 Ah となった。同一条件の実験値は 30.9 Ah であった。表4に、内部温度の解析結果から求めた放電容量と、実験から得られた放電容量(平均値)を示す。表より計算値は、ほぼ実験値を予測していることがわかる。以上より、各環境温度における内部温度を解析することによって、放電終了時間と放電容量を推定することが可能となった。これは今後、車椅子用蓄電池に対する各種保温材の設計に利用できる。

4. 実車走行試験

4・1 実験方法 福祉機器は、実際の生活を想定した評価が非常に重要である。車椅子の場合、利用者が屋内で充電し、外出することを考えると、走行中の放電環境温度は当然のことながら一定ではない。また、交差点などで停止したりする場合も多く、定電力放電

Fig. 14 Experimental set-up of wheelchair for discharge

Fig. 15 A scene at driving test in winter

Table 4 Discharge capacity from calculation and experimental results on 0.2 C rate

Condition	Outer temp. ($^\circ\text{C}$)	Discharge capacity (Ah)	
		Estimated	Measured
Normal	-20	29.0	24.1
	-10	30.1	30.1
	0	31.4	31.8
Covered F.P.	-20	30.5	30.9
	-10	31.2	31.3
	0	32.0	33.3

とはならない。このことから、冬期間に走行した時の蓄電池性能を把握するため、実車走行試験を行った。車椅子は、前輪駆動型電動車椅子を使用した⁽¹⁾。図14に測定装置を示す。蓄電池端子電圧、電流、内部温度、車輪回転数を走行中に測定するため、小型のデータコンバータを車椅子後部に取り付けた。端子電圧と電流測定には絶縁変換器（それぞれ、WGP-DS-99P-3, WGP-DS-17P-3, (株)渡辺電機工業）、内部温度測定には熱温度変換器（WGP-FTC-99P-3, (株)渡辺電機工業）、車輪回転数の測定には周波数変換器（WGP-FV-14P-3, (株)渡辺電機工業）を使用した。データコンバータからの測定データをA/Dカード（AXP-AD01, (株)アドテックシステムサイエンス）を介してノート型パソコンに取り込んだ。

蓄電池の充電は、車椅子付属の自動充電器で行った。まず、充電器の充電性能を確認するため、この充電器で充電した蓄電池の容量を測定した。この時の充電は約15℃の室内で行った。その結果、定格容量の35Ahが充電されていることを確認した。

走行試験は、冬期間に圧雪時と積雪時の一般道路、そして夏期の乾燥路面でそれぞれ数回行った。冬期走行試験の様子を図15に示す。この日は外気温が -3.7°C ～ $+1.6^{\circ}\text{C}$ で、やや湿った雪が降っていた。歩道上の雪は人の往来によって粉細状になった所があり、操舵が難しい時もあった。圧雪走行では保温材装着の有無についても調べた。積雪路面は、降雪後の積雪が、車椅子最低地上高9cmよりやや高い約10cmの時を選んだ。走行路面は、車道部とのすり付け勾配以外の連続的な勾配路は少なく、ほぼ平坦路であった。走行時の気温は冬期が $-5\sim-2^{\circ}\text{C}$ 、夏期が $14\sim18^{\circ}\text{C}$ であった。実験は、コントロールスティックを倒し続けて連続走行で行った。但し、横断歩道を渡る時には、必要に応じて停止した。コントロールスティックを倒しても進まなくなった時点で実験を終了した。

4.2 実験結果 走行時間と電力値の関係の一例を図16, 17に示す。図の電力値は車椅子に搭載されている蓄電池2個の総和である。図16は冬期間、図17は夏期の場合である。両図から明らかなように、走行中の電力値は大きく変動する。夏期乾燥路面の平均走行可能時間は約250分、冬期圧雪路面では約170分であった。しかし冬期積雪路面ではわずか約80分であった。走行時の平均電力値は、夏期乾燥路面走行時で約190W、圧雪路面走行時で約200Wに対し、積雪路面走行時が約350Wとかなり大きかった。これらの平均電力値から放電容量を求めると、夏期乾燥路面走行時が35Ahとほぼ定格容量となっていた。それに対し、圧雪路面走行時が25Ah、積雪路面走行時が22Ahであった。

また平均放電率を計算すると、夏期乾燥路面走行時が0.24C、圧雪路面走行時が0.26Cを示した。そして積雪路面走行時が0.47Cとかなり大きい放電率であった。

Fig. 16 Electric power of batteries at driving on winter road

Fig. 17 Electric power of batteries at driving on summer road

Fig. 18 Inner temperature of battery at driving on compact snowed road

4.3 考察 これらの実験結果をまとめると、圧雪路面走行時では、夏期乾燥路面走行時より走行可能時間が約80分短くなった。この場合、平均電力値と平均放電率がほぼ同じであったが、圧雪路面走行時の放電容量が大きく減少した。このことは、低温による影響が大きいためである。積雪走行時と圧雪走行時を比較する。ほぼ同じ外気温度なのににもかかわらず、積雪走行時の方は走行可能時間が90分程短く、平均電力値と平均放電率がかなり大きくなった。このことから、路面の走行抵抗と蓄電池の放電率には密接な関係があることを確認した。圧雪走行時における保温材装着の有無による蓄電池内部温度変化を図18に表す。どちらも氷点下になることはなかった。保温材を装着した蓄電池では、内部温度の低下はほとんど見られなかった。走行可能時間は、圧雪路面走行時で未装着と比較して約15分程長くなった。

以上のことにより、蓄電池の放電性能は、外気温度のみではなく路面状態にも大きく影響されることがわかった。また、実車走行時における負荷電力の変動が大きいことを考えると、低温特性実験で得られた関係式(1)～(4)のみから蓄電池の実車走行時の放電容量を定量的に推定することは難しい。そのため、電動車椅子の寒冷地使用を考えると蓄電池の実車走行実験は非常に重要である。今後、実験室レベルで実車走行を想定した蓄電池の特性実験を行うためには、自動車の燃費予測に用いられる走行モード負荷実験と同様な実験手法を電動車椅子に開発する必要がある。

5. 結 言

本研究では、電動車椅子用蓄電池の低温特性実験を行い、環境温度と放電容量の関係を明らかにした。その結果、以下の結論が得られた。

- (1) 低温による放電容量の低下が著しく、 -20°C での0.2C放電容量は 30°C 時と比べ34%低下した。
- (2) 保温材を覆うことにより、現状の蓄電池でも0.2C放電で17%放電容量の低下が押さえられた。
- (3) 放電容量および放電時間は、放電率と蓄電池の内部温度に大きく依存することを確認した。
- (4) 蓄電池内部温度を有限要素法で求めることにより、蓄電池放電容量が推定できた。
- (5) 実車走行試験では、夏期走行時と冬期走行時ともに負荷電力は大きく変動することを確認した。
- (6) 夏期走行時よりも冬期走行時で走行可能時間が短くなり、外部環境温度の影響が見られた。しかし同程度の外部環境温度下でも圧雪路面と積雪路面では、走行可能時間に大きな差異が見られた。したがって、冬期間の蓄電池放電特性は、外部環境温度だけでなく、路面状態によっても大きく影響を受けることがわかった。

今後、様々な路面状態と蓄電池放電性能との関係等を評価し、冬期走行に対して最適な蓄電池構造を持つ車椅子の検討を行っていく予定である。

本研究の一部は、文部省科学研究費補助金(No. 09555050)によった。

文 献

- (1) 但野茂・塚田敦史・柴野純一・鵜飼隆好・綿貫幸広, 電動車椅子の雪路走行性能評価と走行シミュレーション, 機論, 63-607, C(1997), 707-714.
- (2) 高村・佐藤, ユーザーのための電池読本, (1988), 104-173.
- (3) JEVES D 701(日本電動車車両協会規格), 日本電動車車両協会技術研究委員会, (1994), 1-4.
- (4) 岩崎睦・高橋裕人・西山和夫, 寒冷地向け電気自動車適応に関する研究, 北電研究年報, 29(1998), 17-28.