

第6章 リチウムイオン蓄電池の実証実験

第1節 実験の目的

電気火災データより、近年特に多い発火源について調査したところ、最も多かったものはカーボンヒータで、次いでリチウムイオン電池であった。

リチウムイオン電池は、腕時計用などの充電できない一次電池から普及が始まり、現在では、充電して繰り返し使用できる二次電池（リチウムイオン蓄電池）として、携帯電話をはじめ、デジタルカメラ、ビデオカメラなどに使用されており、日常生活で使用する様々な製品に組み込まれている。

東京消防庁管内では、近年、リチウムイオン蓄電池を発火源とした火災により塵芥車や圧壊機が焼損する火災が発生している。また、携帯電話の電池としてリチウムイオン蓄電池が使用されるが、スマートフォンは従来の携帯電話と比べ電池の消耗度合いが大きく、使用者は携帯型のリチウムイオン蓄電池が組み込まれたポータブル蓄電装置（以下、「ポータブル蓄電装置」という。）を所持し、使用することが多くなっている実態がある。そこで、急速に普及しているポータブル蓄電装置により、塵芥車が火災に至るメカニズムを解明することを目的として実験を行う。

第2節 実験の方法等

1 実験に用いるリチウムイオン蓄電池

最も普及が見込まれるポータブル蓄電装置を実験のサンプルとするため、大手家電量販店における平成27年11月4日～11月10日までの週間売上を参考とし、電池容量を選定した。販売数で上位にあるものが3000mAhクラス及び5000mAhクラスの製品であった。

スマートフォンやモバイル機器に充電を行うために使用するポータブル蓄電装置として、表6-1の2メーカー各2種類（3000mAhクラス、5000mAh）のサンプルを用いた。一般的に、3000mAhの容量でスマートフォン1回の充電、5000mAhで2回の充電が可能とされている。

表6-1 実験に用いるポータブル蓄電装置

	サンプルA	サンプルB	サンプルC	サンプルD
入力	DC5V, 1A	DC5V, 0.7A	DC5V, 1A	DC5V, 1A
出力	DC5V, 1.5A	DC5V, 1A	DC5V, 1.5A	DC5V, 2A
蓄電池容量	3.8V, 3400mAh	3.8V, 3100mAh	3.7V, 5000mAh	3.8V, 5200mAh

2 実験方法

(1) 圧壊実験

ポータブル蓄電装置が、建物内に設置された圧壊機や塵芥車に投棄され、内蔵電池が圧壊された場合の火災性状を確認する。

実験は、ポータブル蓄電装置を充電し、内蔵電池（複数の単セルを内蔵しているときは、任意の一つ）取り出し、内蔵電池（単セル）の厚みが約半分になるまで圧壊する。圧

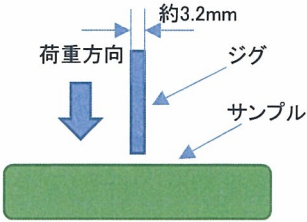
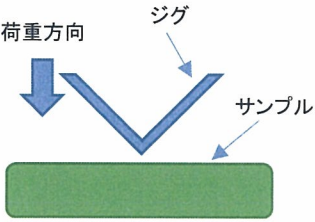
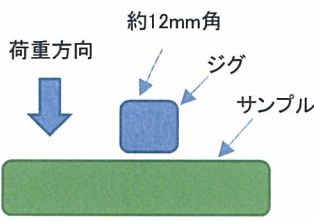
壊後、圧力を解放したうえで1時間放置し経過を観察する。なお、発火や発煙等、最も火災の危険につながる状況が生じたジグを用いて、サンプルの外殻ごと押しつぶす実験を追加で行う。

① 単セルの圧壊実験

a. 実験の手順

出力 5V の USB 充電器を用い、メーカー指定の方法でポータブル蓄電装置の充電を完了させる（以下、「通常の状態での満充電」という。）。充電が完了したポータブル蓄電装置から内蔵電池（単セル）を取り出しサンプルとする。塵芥車や圧壊機で、一般ゴミの雑多な塵芥の中で圧縮された際に圧力が加えられることを想定し、表 6-2 のジグを用い、約 2 トンの荷重にてサンプルの厚みが半分程度になるまで圧壊する。

表 6-2 圧壊実験に用いるジグ

ジグA（金属板）	ジグB（V字）	ジグC（角棒）
厚さ約 3.2mm の鉄板を垂直にセットし、単セルの中央で押しつぶして圧壊させる。	鉄製L字アングルの角が単セルに垂直に当たるようセットし、セルの中央で押しつぶして圧壊させる。	鉄製角棒（約 12mm 角）の平面が単セルに当たるようセルの中央で押しつぶして圧壊させる。
		

b. 測定及び観察

実験中、以下の測定及び観察を行う。

- (a) ビデオカメラ（3 台）で圧壊の状況及びその後 1 時間の経過を記録する。
- (b) サーモビューワで、各部の温度を観察する。
- (c) 図 6-1 のとおりサンプルの筐体（ボックス）に熱電対を取付け、発熱状況を記録する。
- (d) 図 6-1 のとおり出力電圧を観察する。



圧壊実験室内写真

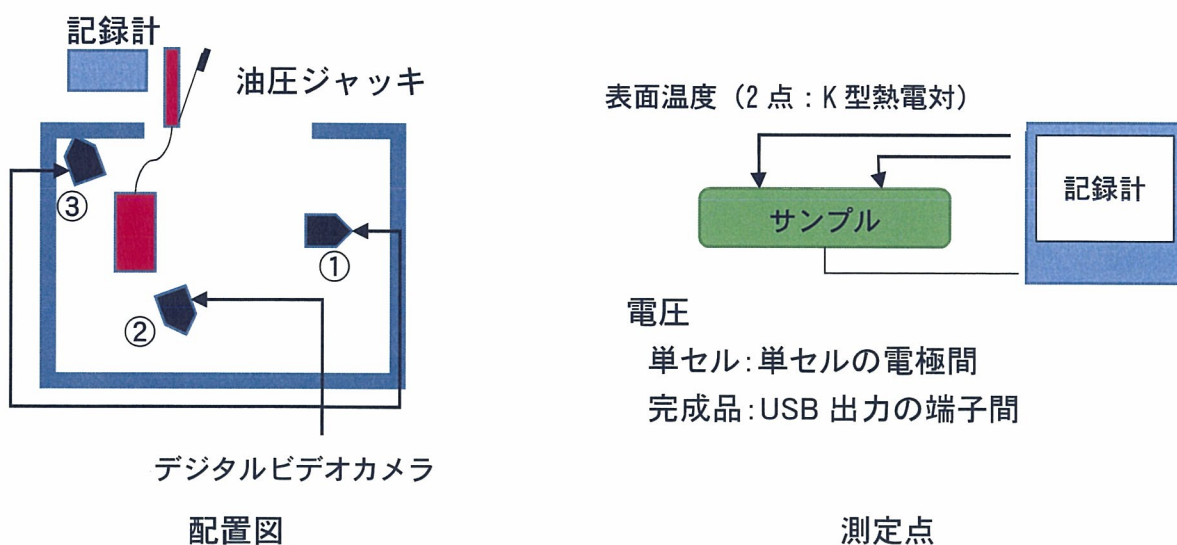


図6-1 圧壊実験の概要

② 完成品の圧壊実験

単セルの圧壊実験において、発火や発煙等、火災の危険につながるような事象が最も顕著に観察されたジグとサンプルの組み合わせについて、完成品の圧壊実験を実施する。完成品を通常の状態でも充電し、単セルの圧壊実験と同一の条件にて実施し、定常状態になるまで経過を観察する。

(2) 短絡実験

ポータブル蓄電池装置が、建物内に設置された圧壊機や塵芥車に投棄され、周囲にある導体によりポータブル蓄電池装置が短絡した場合の火災性状を確認する。外殻が保持された状態で短絡する外部短絡実験と、外殻が破損し内蔵電池が短絡する単セル短絡実験を実施する。

① 外部短絡実験

ポータブル蓄電装置を通常の状態ですべて充電にする。その後、出力側 USB 端子部分で短絡し(図6-2)、1時間経過を観察する。実験中、以下の条件での測定及び観察を行う。

- a. ビデオカメラ(1台)で状況及びその後の経過を記録する。
- b. サンプルの外殻に熱電対を取付け、発熱状況を記録する。

② 単セルの短絡実験

ポータブル蓄電装置を通常の状態ですべて充電にする。その後、内蔵電池を取り出し、単セルの端子部分で短絡し(図6-3)、1時間経過を観察する。実験中の測定及び観察は、外部短絡実験と同様とする。

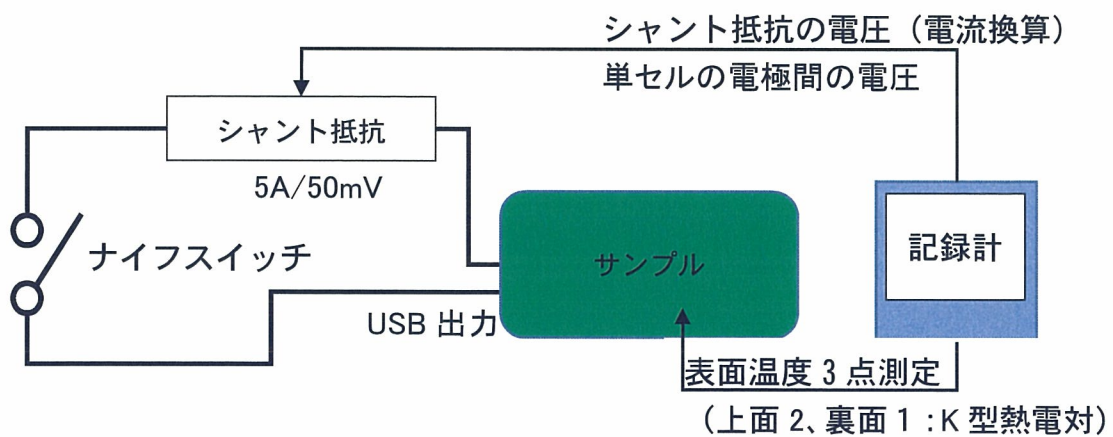
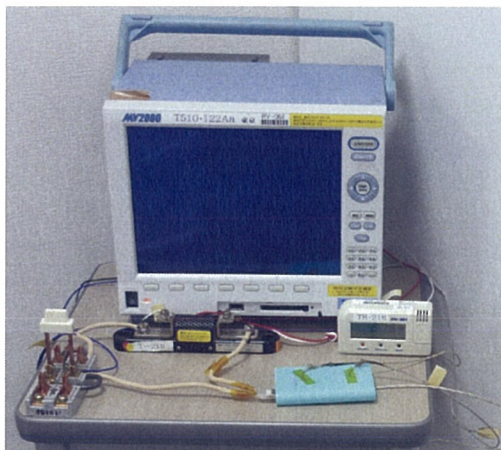


図6-2 外部短絡実験の測定回路

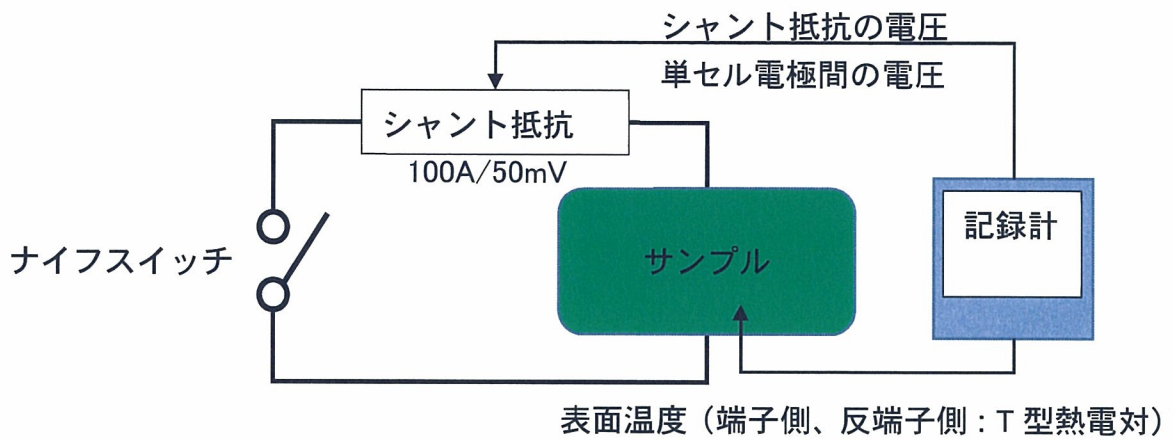
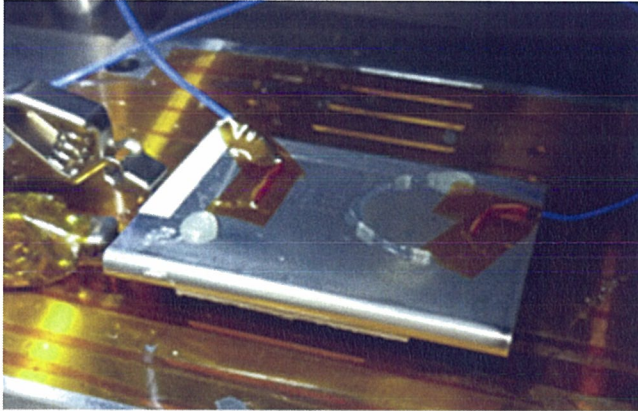


図6-3 単セルの短絡実験の回路図

第3節 実験結果

1 圧壊実験

圧壊実験の結果は、表6-3のとおり。押しつぶしを行う全ての先端形状で、発煙発火又は温度上昇のいずれかの現象が観察された。また、サンプルA～Cは、いずれかの先端形状でも発煙が認められたが、サンプルDは、発火はしなかった。

表6-3 圧壊実験結果

対象	サンプル	金属板	金属角部 (V字)	金属面 (角棒)
単セル	A	状態：発火 最高温度：784℃	状態：温度上昇 最高温度：82.0℃	状態：温度上昇 最高温度：123℃
	B	状態：温度上昇 最高温度：85.0℃	状態：温度上昇 最高温度：74.0℃	状態：発火 最高温度：351℃
	C	状態：発煙 最高温度：112℃	状態：発火 最高温度：462℃	状態：発火 最高温度：572℃
	D	状態：温度上昇 最高温度：120℃	状態：温度上昇 最高温度：108℃	状態：発煙 最高温度：187℃
完成品	A	状態：発煙 最高温度：294℃	—	—
	C	—	状態：温度上昇 最高温度：41.0℃	状態：発煙 最高温度：123℃

※完成品の実験は、単セルの実験で発火、発煙の程度が大きいサンプルについてのみ行った。

※状態の定義は、以下のとおり。

発火：サンプルからの発火をビデオカメラの動画にて確認できたものについて発火とした。発火には、発煙、温度上昇が発生したものも含み、火花の発生は発火には含めない。

発煙：発火には至らないもののうち、発煙がビデオカメラの動画にて確認できたものについて発煙とした。発煙には、温度上昇が発生したものも含む。

温度上昇：周囲温度よりも温度が上昇したものを温度上昇とした。

最も表面温度が高かった条件の実験条件は以下のとおり。

(1) 単セルの圧壊実験

サンプルAを金属板で圧壊した条件が、最も表面温度が高い結果となった。表面温度と出力電圧は図6-4のとおり。出力電圧が急激に低下すると同時に、サンプルの表面温度が急激に上昇し、最高温度は784℃に達した。その後、温度が低下し定常状態になった。

実験状況及び発火後のサーモグラフィーは図6-5及び図6-6のとおり。ジグで圧壊している部分の温度が上昇していることが確認された。また、圧壊部分であるサンプルの中央を中心に膨張していることが確認された。

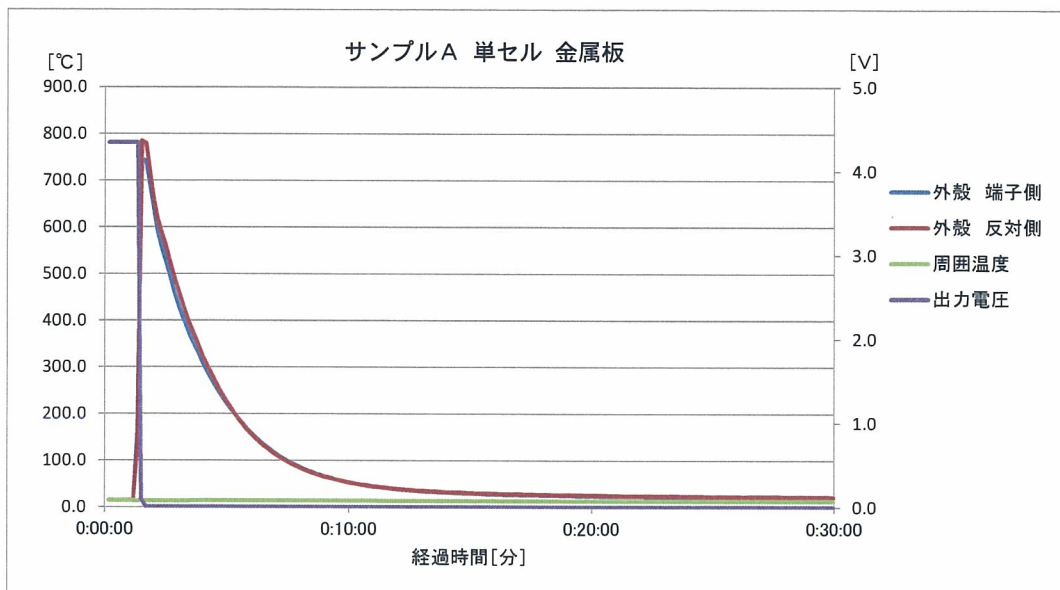
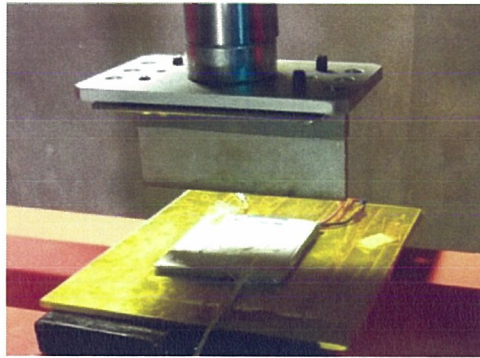


図6-4 サンプルA単セル金属板条件の表面温度と出力電圧



(1) 実験前



(2) 実験中 1



(3) 実験中 2



(4) 実験後

図 6 - 5 サンプルA単セル金属板条件の実験状況

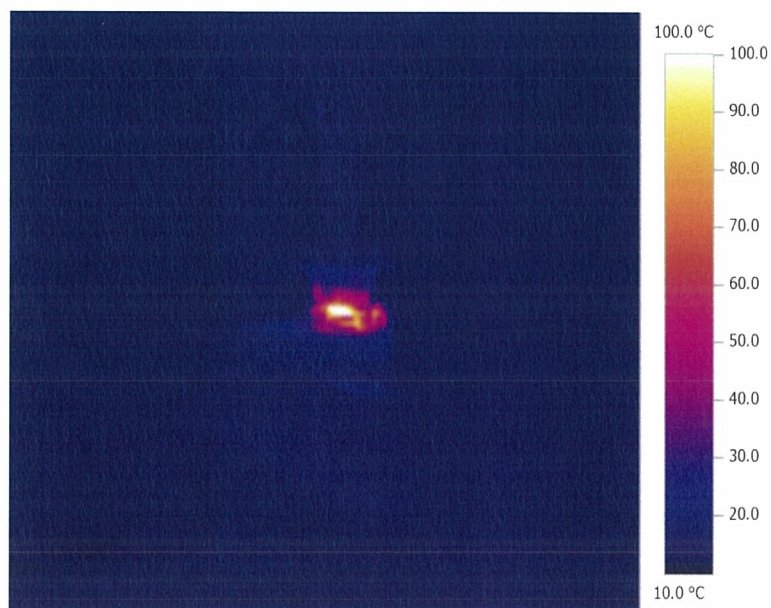


図 6 - 6 サンプルA単セル金属板の条件発火後のサーモグラフィー

(2) 完成品の圧壊実験

単セルの圧壊実験と同様に、サンプルAを金属板で圧壊した条件が、最も表面温度が高い結果となった。表面温度と出力電圧は図 6 - 7 のとおり。出力電圧が低下すると同時に、サンプルの表面温度が上昇し、最高温度は 294℃に達した。出力電圧の低下及び

表面温度の上昇は、単セルの実験と比較すると緩やかだった。その後、温度が低下し定常状態になった。

実験状況及び発火後のサーモグラフィーは図6-8及び図6-9のとおり。ジグで圧壊している部分の温度が上昇していることが確認された。また、外殻の溶融が確認された。

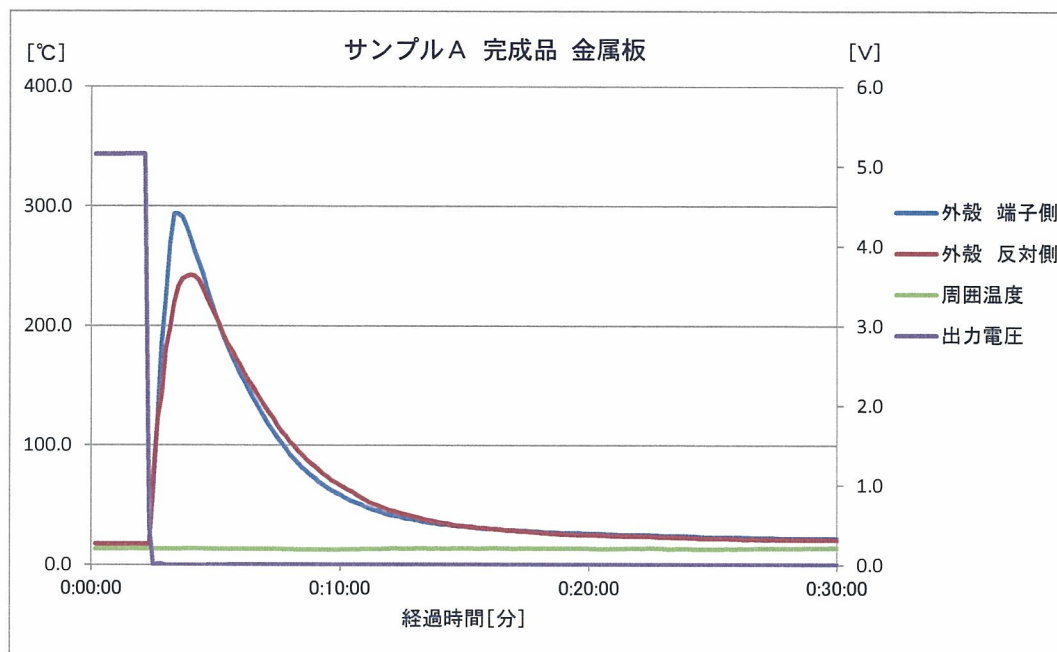
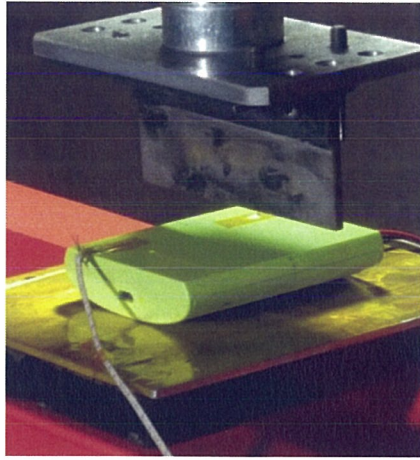


図6-7 サンプルA完成品金属板条件の表面温度と出力電圧



(1) 実験前



(2) 実験後



(3) 実験中

図6-8 サンプルA完成品金属板条件の実験状況

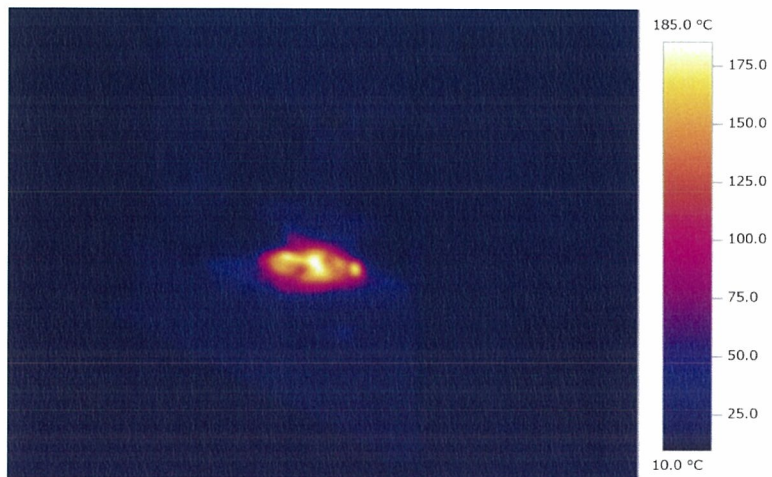


図6-9 サンプルA単セル金属板の条件発火後のサーモグラフィー

2 短絡実験

(1) 外部短絡実験

外部短絡実験の結果は、表6-4のとおり。どのサンプルも瞬時に出力が停止し、室温以上の有意な温度上昇は見られなかった。例として、サンプルAの結果を図6-10に示す。

表6-4 短絡実験結果

対象	サンプル	状態
完成品	A	状態：瞬時に出力停止 温度上昇なし（周囲温度と同じ）
	B	状態：瞬時に出力停止 温度上昇なし（周囲温度と同じ）
	C	状態：瞬時に出力停止 温度上昇なし（周囲温度と同じ）
	D	状態：瞬時に出力停止 温度上昇なし（周囲温度と同じ）

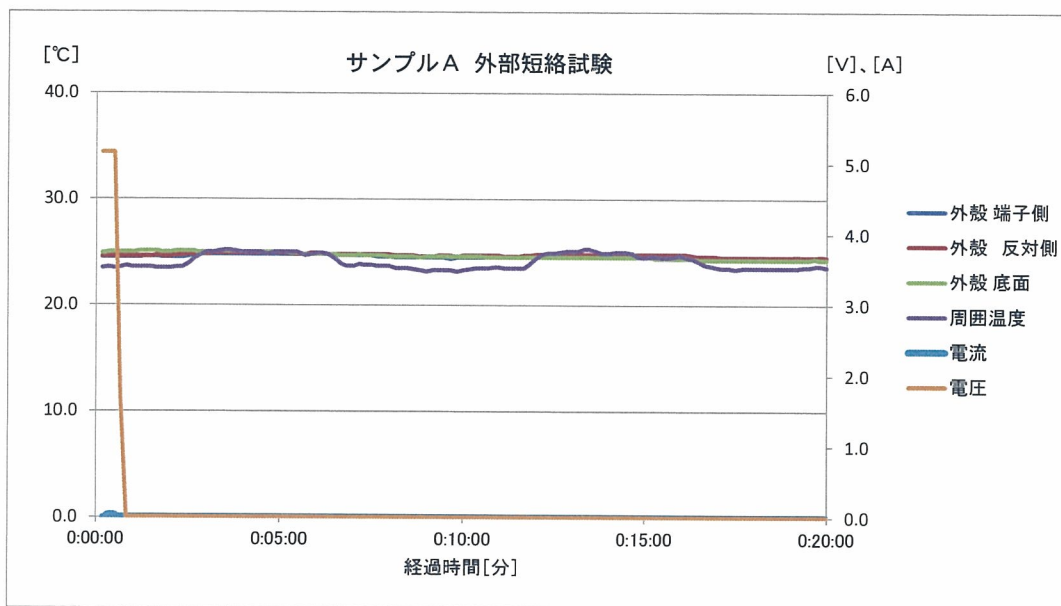


図6-10 外部短絡試験サンプルA

(2) 単セルの短絡実験

単セルの短絡実験の結果は、表6-5のとおり。どのサンプルも微かな発煙が生じたほか、膨脹が観察された。最高温度は100°Cを超えたが、一時的なものであり、30分以内には全て室温に近づく傾向であった。

表6-5 単セルの短絡実験結果

対象	サンプル	状態
単セル	A	状態：発煙後、膨脹

		最高温度：131℃、最大短絡電流：47A
	B	状態：発煙後、膨脹 最高温度：115℃、最大短絡電流：50A
	C	状態：発煙後、膨脹 最高温度：137℃、最大短絡電流：55A
	D	状態：発煙後、膨脹 最高温度：124℃、最大短絡電流：59A

サンプルの表面温度が最も高くなったのは、サンプルCであった。表面温度、出力電圧及び電流は図6-11のとおり。出力電圧が低下すると同時に、サンプルの表面温度が上昇し、最高温度は137℃に達した。電流は、短絡と同時に約45A流れはじめ、その後低下する。電流が流れなくなると同時に、温度が低下しはじめた。

実験状況は図6-12のとおり。実験後にサンプルが膨張していることが確認された。

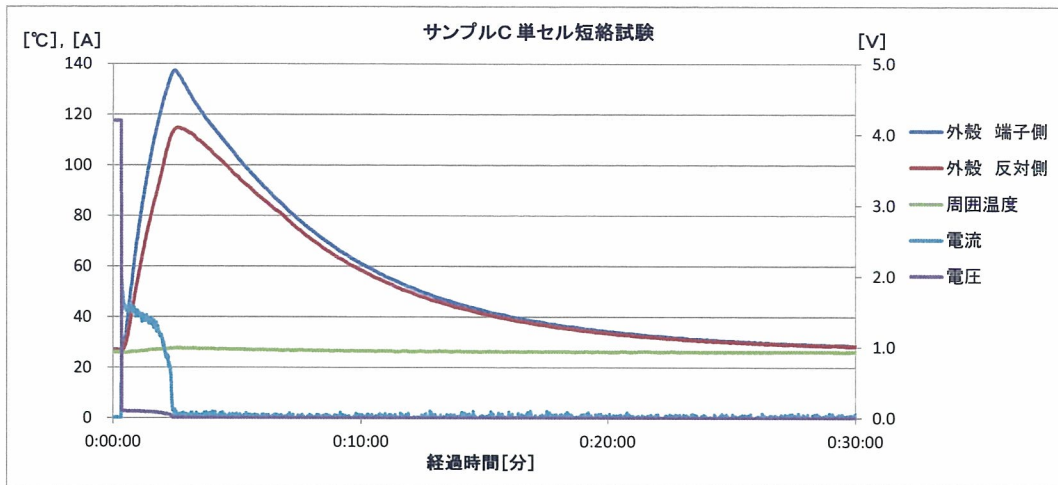
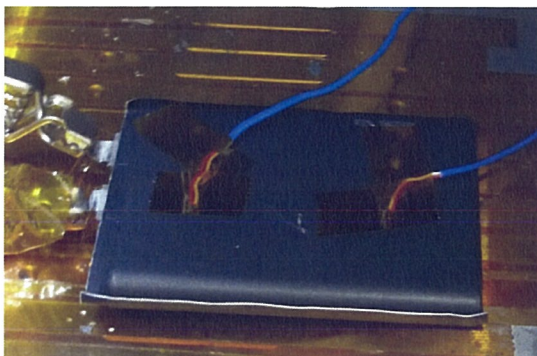
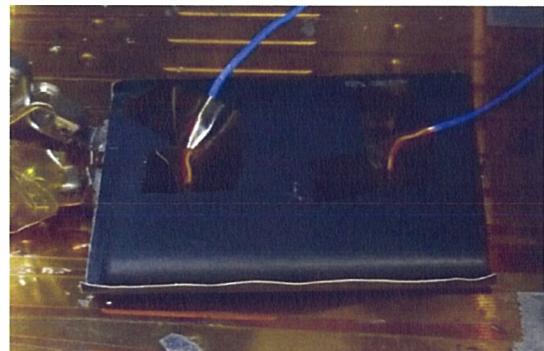


図 6 - 1 1 サンプルC 単セル短絡条件の表面温度、電流、電圧



(1) 実験前



(2) 実験後

図 6 - 1 2 サンプルC 単セル短絡条件の実験状況

第 4 節 考察

1 リチウムイオン蓄電装置の構造

サンプルの構造は公表されていないが、リチウムイオン蓄電装置は、一般に単セルの電圧（一般的には 3.6V~4.2V 程度の範囲）を USB 出力の 5V に変換する電圧変換回路及び単セルを保護するための BMU（バッテリーマネジメントユニット）と単セルで構成されている。また、単セルの温度を検出するための素子が搭載されていることと、筐体がポリカーボネート製であることが、サンプル全てに共通していた。概念図を図 6 - 1 3 に示す。



図 6 - 1 3 ポータブル蓄電装置の概念図

単セルの一般的な構造例は、図6-14のとおりであり、正極板と負極板の間には、リチウムイオンが移動できる多孔質の絶縁物（セパレータ）が介在している。それを金属缶やラミネートのパッケージに沿う形状に積層し、電解質とともに封入して単セルを構成する。単セルでの安全機能の代表例は、次のようなものがある。

- (1) 短絡等により過熱が生じたとき、電池としての機能を停止させるため、過熱が生じたときリチウムイオンの移動を阻害するよう、イオンが通過する細孔を閉塞するシャットダウン機能を持ったセパレータの採用
- (2) 電解質などの分解により発生したガスを放出するためのガス排出弁や、設計上設けられた弱い部分からのガス排出機能

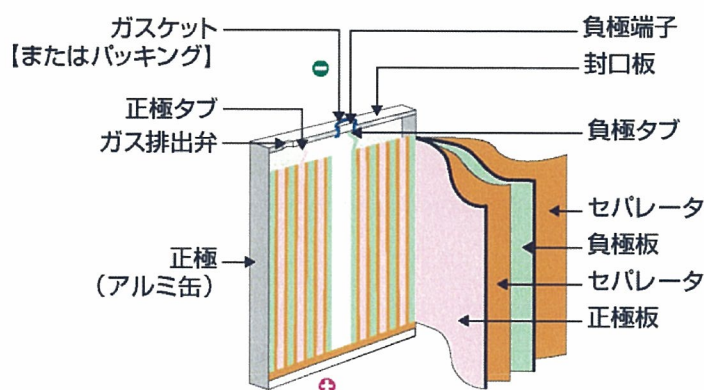


図6-14 単セルの構造例*11

2 圧壊実験

(1) 単セルの構造から金属ジグで外殻に圧力をかけることにより、内部では以下のような状態が生じることが想定される。

- ① ジグにより押しつぶされた金属外殻が、内部を短絡する。
- ② 外殻を突き破ったジグが、内部を短絡する。
- ③ ジグの圧力によりセパレータが破れ、正極と負極が活物質を介して接触し内部が短絡される。
- ④ 外殻を突き破ったジグによる短絡が瞬間的に生じるが、ジグの圧力で単セルが破断し、それ以上の変化が生じない。

(2) 実験では、出力電圧の低下と同時にサンプルの表面温度が上昇する結果となった。このことから、単セルの内部短絡した部分に過電流が流れて熱が発生し、以下のような現象が引き起こされている可能性がある。

- ① 熱により電解質（一般的にジメチルカーボネート (DMC)、ジエチルカーボネート (DEC) 等の引火性有機溶媒が使用される。）が分解されて可燃性ガス（水素、エチレン、メタン、エタン等）が発生する。
- ② 過熱が進み内部の圧力が上昇し、次の現象が発生する。
 - a. ジグにより破壊された部分や、外殻の強度が低い部分（設計上設けられたガス排出弁や構造的に弱く作った部分）から可燃性ガスが放出される。

- b. 外殻に強度が低い部分がない場合、外殻が膨張や破裂する。
- ③ 発生した熱により可燃性ガスが着火する。外殻に可燃性ガスが封じ込まれて圧力が高まった状態では、爆発的な現象を引き起こす可能性がある。

上記は、単セルの代表的な構造から推定したものであり、サンプル特有の現象ではない。今回の圧壊実験は油圧ジャッキ（概ね 2 t）で、鋭利な形状を含めた先端形状にて加圧した。電気用品安全法の適用を受けるリチウムイオン蓄電池の圧壊実験での加圧は、13kN（約 1.3t）までであり、先端形状は平板である。本実験は、より過酷な条件での実験である。

なお、リチウムイオン蓄電池が圧壊により発煙（燃焼）に至る例について、別紙 6-1 のとおり一般社団法人電池工業会より提供された。

3 短絡実験

(1) 外部短絡実験

サンプルの表面温度には大きな変化は見られなかった。また、ガスの放出やサンプルの膨張は見受けられないことから、USB 端子部分を短絡しても、電圧変換回路や BMU 等で異常状態を検出し、出力を制御しているものと考えられる。このため、単セルの異常発熱は、通常は発生しないと考えられる。

(2) 単セルの短絡実験

単セルの短絡は、圧壊実験と類似する状態になると想定されるが、今回のサンプルでは過熱が生じた後に、穏やかに収束に向かっている。リチウムイオン蓄電池が組み込まれたポータブル蓄電装置内部では、次のような現象が起きたものと考えられる。

- ① 端子部分の短絡によって、電池内部から大電流が発生して発熱が生じる。
- ② 熱により電解質が分解されて可燃性ガスが発生する。ガスは、以下のいずれかの現象を引き起こす。
 - a. 外殻の強度が低い部分（設計上設けられたガス排出弁や構造的に弱く作った部分）からガスが放出される
 - b. 外殻に強度が低い部分がない場合、外殻が膨らむ

最終的に、①エネルギーが全て放出される、②セパレータがシャットダウンの機能を持っていて電池としての機能を停止する、③電解液や活物質が損傷して電池としての機能を喪失する等の現象が生じて、発熱が停止するものとする。

第5節 まとめ

1 圧壊実験

単セル圧壊実験の最高表面温度はサンプル A 金属板で 784℃、完成品圧壊実験の最高表面温度はサンプル A 金属板で 294℃であった。単セル圧壊実験では、全てのサンプル及び先端形状で発火したことから、特別な条件がそろわなくても圧壊が生じれば火災の危険があり、火災が発生しなくても、過熱により周囲の可燃物が着火する可能性が非常に高いと考えられ

る。

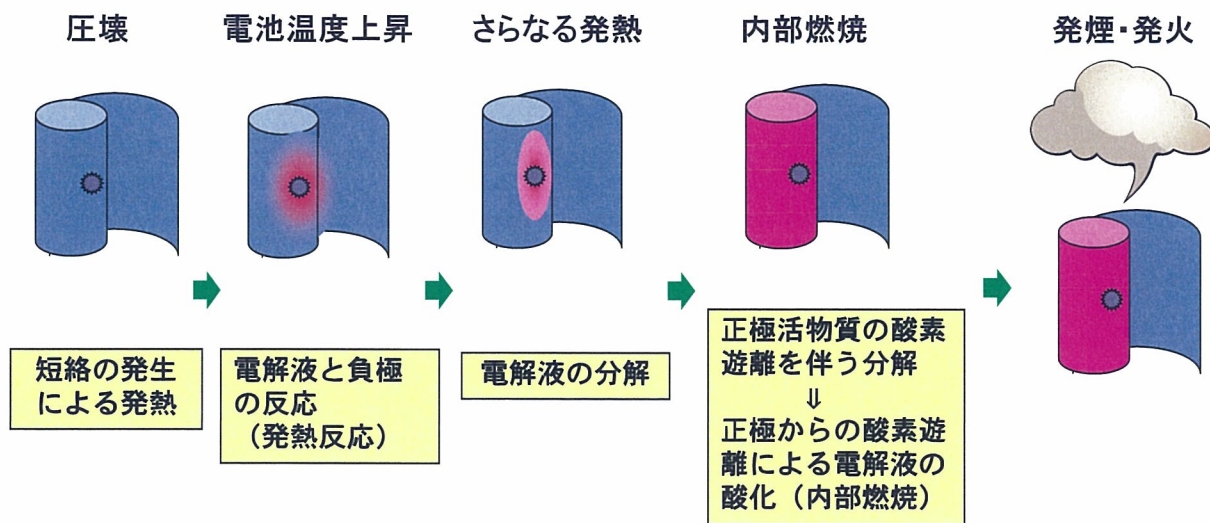
2 外部短絡実験

サンプル表面の温度変化はなかった。外部短絡では安全機能が働き、異常発熱は発生しないと考えられる。

3 単セルの短絡実験

サンプルの表面温度が最も高くなったのは、サンプルCで 137℃であった。電流が流れなくなると同時に温度が低下した。本実験の範囲内では、単セルの短絡により火災が発生する可能性は低いと考えられる。

リチウムイオン蓄電池が圧壊により発煙（燃焼）に至る例



燃焼の3要素としては・・・

- 可燃物 → 電解液
- 酸素供給源 → 正極の分解による酸素発生
- 点火源 → 圧壊により発生した短絡点、もしくは分解反応による高熱