

2009 年度 卒業論文

宇宙線望遠鏡実験で使用しているバッテリーの
耐久試験およびバッテリー寿命に関する解析

指導教員

本田 建 教授

2010 年 3 月

山梨大学 工学部
機械システム工学科

T06MI051 山口 隆二

目次

第1章 緒論	4
1-1 宇宙線	4
1-2 超高エネルギー宇宙線	5
1-3 宇宙線望遠鏡 (Telescope Array) 実験	6
1-4 大気蛍光望遠鏡 (FD)	9
1-5 地表検出器 (SD)	11
1-6 SD の消費電力	15
1-7 研究目的	16
第2章 本研究室でのバッテリー実験	17
2-1 実験装置	17
2-1-1 実験装置概要	17
2-1-2 バッテリー	18
2-2 実験概要	20
2-3 実験データ	21
2-4 バッテリーの耐久実験	23
2-4-1 解析方法	23
2-4-2 解析結果	24
2-5 バッテリーの温度特性実験	28
2-5-1 温度別の電圧と電力量の関係	30
2-5-2 直線部における温度別傾きの変化	31
2-5-3 特定の電圧における温度別電力量の違い	32
2-5-4 各温度特性実験での電力量比較	33
第3章 SD に搭載されているバッテリーの解析	35
3-1 バッテリーの電圧値の推移	36
3-2 温度補正をかけた電圧値の推移	38
3-2-1 温度と電圧値の関係と温度補正方法	38
3-2-2 温度補正後の結果	40
3-3 月別の電圧値の推移	42
3-4 次の冬季の電圧値予測	44
3-5 予測された電圧値の場所別表示	46

第4章 結論	48
4-1 結論	48
4-1-1 バッテリー耐久実験	48
4-1-2 バッテリー温度特性実験	48
4-1-3 SD に搭載されているバッテリーの解析結果	49
4-2 今後の課題	50
4-2-1 本研究室のバッテリー実験	50
4-2-2 SD に搭載されているバッテリーの解析	50
参考文献	51
謝辞	52

第 1 章 諸論

1-1 宇宙線

宇宙空間に存在する高エネルギー放射線は宇宙線と呼ばれ、1912年にオーストリアの物理学者 V.S.Hess によって発見された。宇宙線の構成物質は水素の原子核である陽子(90%)で、それ以外にはヘリウムの原子核(9%)や鉄の原子核などである。

宇宙線のエネルギーは、eV(エレクトロン・ボルト)という単位を用いる。1eVとは1V(ボルト)の電位差で、電子が加速されて得られたエネルギーの大きさをいう。

宇宙線は地球が誕生する以前から存在し、人類は自然の現象として宇宙線を浴びている。宇宙線のエネルギーが 10^9 eV以下の太陽宇宙線と呼ばれるものは太陽の活動で創られているという事がわかっている。それ以上のエネルギーを持つものはほとんどが銀河系の中で創られている。しかし銀河系の磁場の大きさから、 10^{19} eVを超えるエネルギーの宇宙線は銀河系外の天体、または宇宙空間で創られていると考えられている。

高いエネルギーをもつ宇宙線が地球大気に入射すると、空気中の酸素や窒素の原子核と衝突を繰り返し、その結果2次、3次粒子を放出し、はじめは1個だった宇宙線が膨大な粒子の数となって地上に到達する。この現象を「空気シャワー」といい、その概念を図1-1に示す。

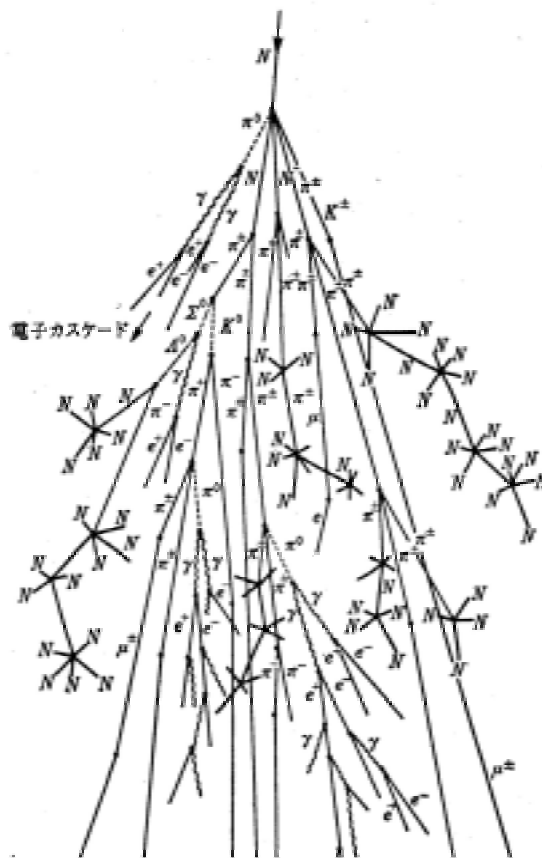


図 1-1 空気シャワーの様子

1-2 超高エネルギー宇宙線

山梨県北巨摩郡明野村（現 山梨県北杜市明野町）にて行われた明野広域空気シャワーアレイ（AGASA：Akeno Giant Air Shower Array）実験というものがある。AGASA 実験は最高エネルギーの宇宙線が 10^{20}eV （16J）を越えて存在するかどうかを研究するのが目的である。超高エネルギー宇宙線の観測を通して、それらがどこでどのようにして生成され、地球までどのようにしてやってきたのかを調べ、宇宙で最も活動的な現象について研究していた。

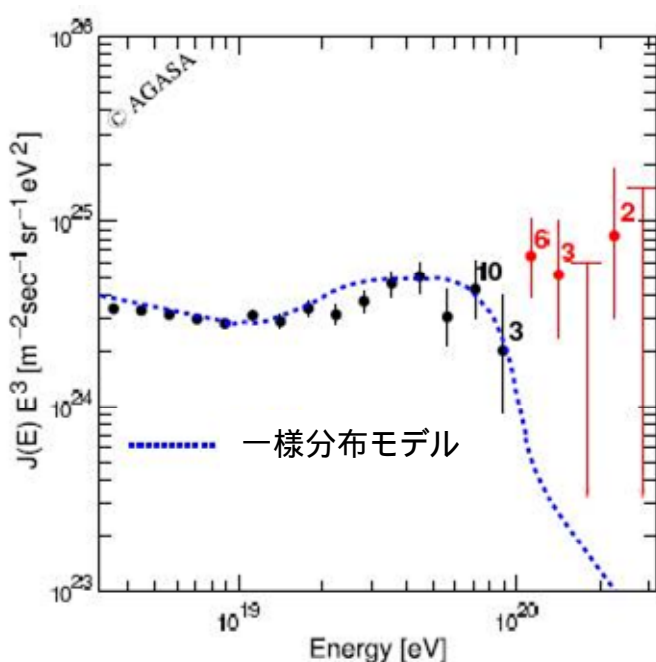


図 1-2 AGASA で観測された超高エネルギー宇宙線のエネルギー分布
（青線が理論予想、赤点が理論予想を超える領域のデータを示す）

これまで地球で観測される宇宙線のエネルギーには限界があり、 10^{20}eV を超えるエネルギーの宇宙線は観測できないとされていた。しかし日本の AGASA 空気シャワー観測装置がこの限界（GZK 限界）を超える宇宙線を 13 例観測し、その一部が同一方向の点から到来していることを示唆した。

そこで、AGASA が発見した GZK 限界を超える宇宙線の存在を確認するとともに、その発生起源や宇宙空間での伝播機構を解明することを目的とした実験が宇宙線望遠鏡（Telescope Array）実験である。

1-3 宇宙線望遠鏡（Telescope Array）実験

宇宙線望遠鏡（Telescope Array）実験とは、AGASA 実験と同様に空気シャワー中の粒子を測定する実験である。AGASA の約 7 倍の面積をもつ高信頼度の地表粒子検出器アレイと大気蛍光望遠鏡を設置し、観測精度、有効検出面積を格段に向上させ超高エネルギーの宇宙線の存在を確認する。

図 1-3 のように地面に置いた粒子検出器（プラスチックシンチレーター検出器，SD：Surface Detector）で地表面での空気シャワー中の粒子数を測定して、口径 3 メートルの反射望遠鏡（FD：Fluorescence Detector）で空気シャワー粒子が発生する微弱な大気蛍光を捕える。大気蛍光望遠鏡を用いた観測は月の出ていない暗夜のみ可能で、観測時間効率は 10～12%程度であるが、宇宙線の到来方向やエネルギーを精度良く観測できる。一方、地上粒子検出器（SD）による観測はエネルギー・到来方向の決定精度は若干低下するが、観測効率がよく、より多くの超高エネルギー宇宙線（AGASA の 7 倍）を捕まえることができる。これら SD、FD の両方を同時に稼働させ、効率の良い宇宙線観測を行なうことが TA 実験の目的である。

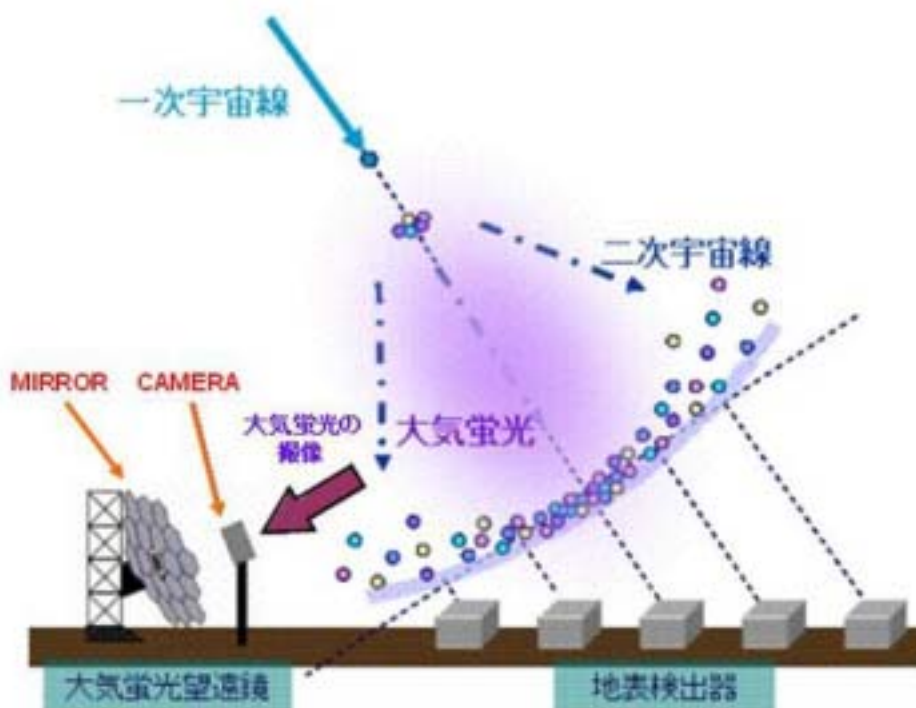


図 1-3 大気蛍光望遠鏡（FD）と地表検出器（SD）

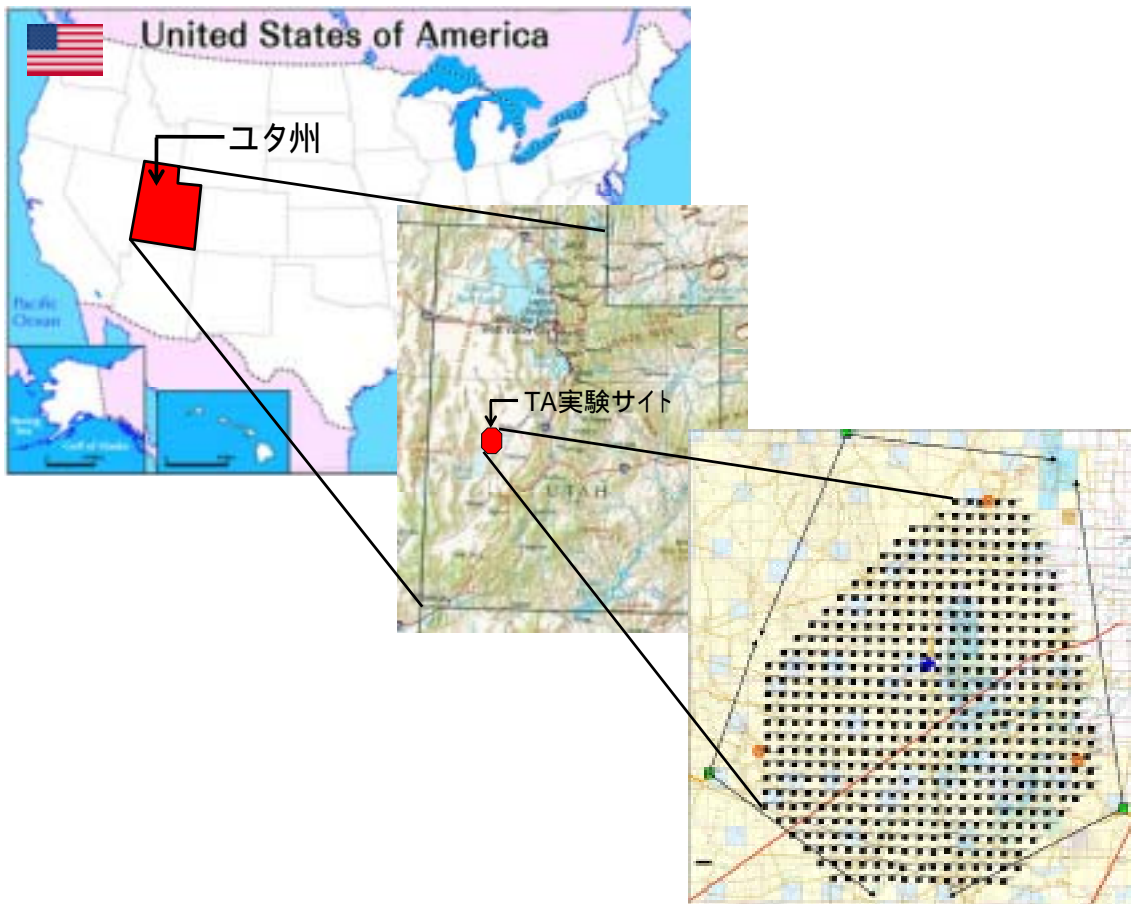


図 1-4 TA 実験サイトの位置

図 1-4 にあるように観測装置はアメリカのユタ州ミラード郡デルタ市郊外の標高 1400 メートルの砂漠地帯に設置されている。この地帯の気は乾燥していて、人工光が少なく、透明度と晴天率が高いため観測に適している。図 1-4 の右下の図は観測装置の配置図である。観測装置に関する詳しい説明は図 1-4 の右下の図を拡大した図 1-5 を用いて説明する。

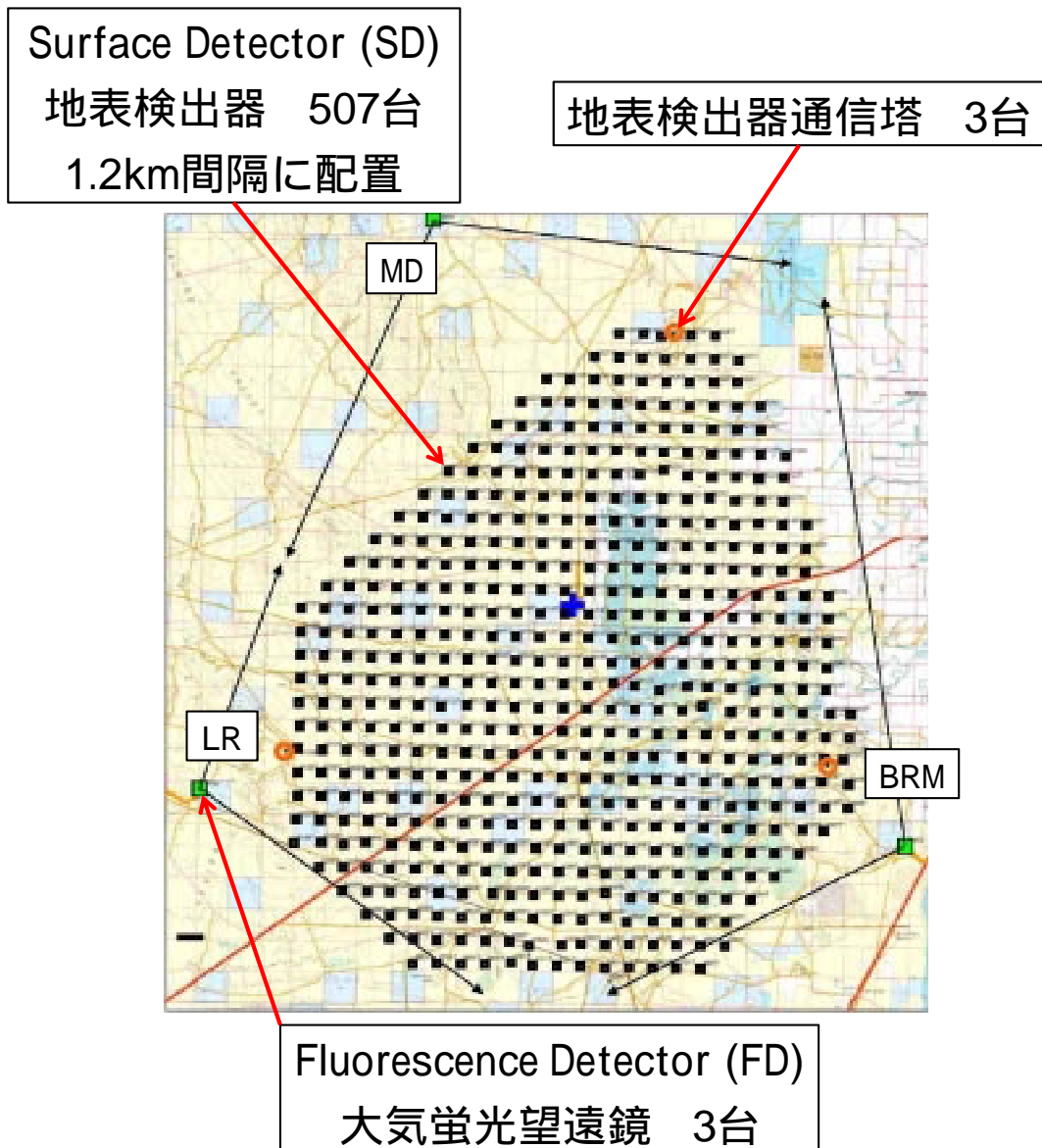


図 1-5 TA 実験サイトの配置図

図 1-5 に多数見られる黒色の点は、空気シャワー粒子を検出するプラスチックシンチレーターからなる地表検出器 (SD) で、約 680km² の地表に 1.2km 間隔で現在は 507 台が碁盤の目状に配置されている。またオレンジ色の丸印は地表検出器の通信塔を示している。通信等は全部で 3 ヶ所設置され、地表検出器で観測されたデータを中継して中央基地に伝送する。図 1-5 の黄緑色の四角形は大気蛍光観測のための反射望遠鏡ステーションであるが、ここは地表で発生する霧などの影響を避けるために周囲より 100 ~ 200m 高い小丘の頂上や中腹に設置されている。3 ヶ所の間隔は約 40km 程である。そして黒い矢印で囲まれた範囲が各大気蛍光望遠鏡の観測範囲で約 108 度となっている。

1-4 大気蛍光望遠鏡 (FD)

FD は空気シャワーにより生じる大気蛍光を集光し、捕らえる観測装置である。図 1-5 に示すように TA 実験では FD のある FD ステーションは SD アレイを囲むよう 3 ヶ所に設置されている。図 1-5 の右下の FD ステーションがある Black Rock Mesa (BRM) サイト、左下の Long Ridge (LR) サイトの FD ステーションの外観を図 1-6 に示し、図 1-5 の上部にある Middle Drum (MD) サイトの FD ステーションの外観を図 1-7 に示す。



図 1-6 FD ステーションの外観 (BRM,LR)



図 1-7 FD ステーションの外観 (MD)

FDステーションには望遠鏡が上下に6セットずつ計12台設置されている。図1-8に上下2台のFDの外観を示す。FD1台の視野は仰角15.5度、方位角18度であり、各ステーションの視野は仰角3~34度、方位角108度となっている。(図1-5のFDから出ている黒い矢印の範囲)

FDは球面鏡とカメラで構成されている。球面鏡は曲率半径6.067m、口径3.3mで18枚の部分鏡からなり、カメラには16×16に配置した光電子増倍管(Photo Multiplier Tube: 以後PMTと略す)計256本が図1-9のように使用されている。図1-10のように各PMTの光電面にはBG3フィルター(Scott社製)が取り付けられており、観測対象となる波長域300~400nmの大気蛍光だけを通し、これ以外の波長域の光をカットする。



図1-8 大気蛍光望遠鏡



図1-9 カメラ

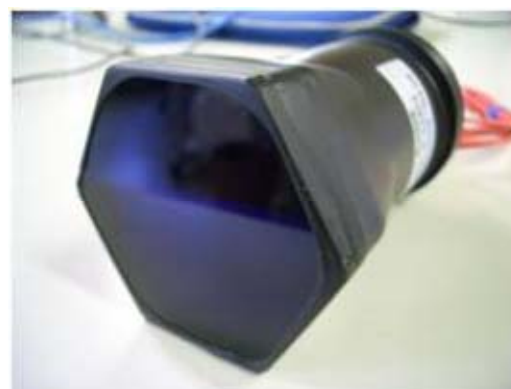


図1-10 BG3フィルター付きPMT

1-5 地表検出器 (SD)

ここではSDの構造、仕組みについて述べる。

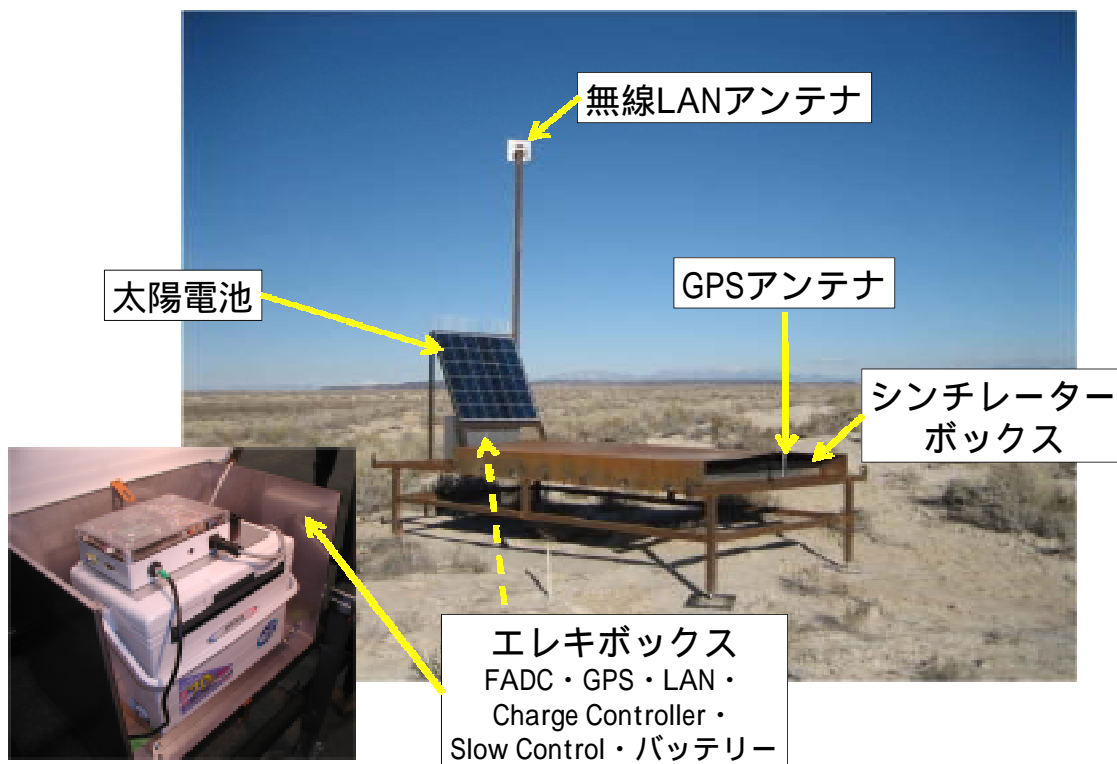


図 1-11 地表検出器外観

図 1-11 は TA 実験で実際に使われている SD である。ステンレス製の平たい箱 (シンチレーターボックス) の中には、宇宙線が通過すると微弱な紫外線を発光するプラスチックシンチレーター、シンチレーターより得られた光信号を伝達するための光ファイバー、伝達された光信号を電気信号に変換増幅する光電子増倍管 (PMT) などが組み込まれている。

またソーラーパネルの下にはエレキボックスと呼ばれるものがあり、中には電源供給用バッテリー、システム制御用の電子部品、回路が収納されている。バッテリーに関しては温度に依存して充放電性能が変化するので、クーラーボックス内に収納し温度変化を抑えている。しかし実際には、バッテリーの温度変化は年間で 50~60 ほどあるのが現状である。

シンチレーターボックス 1 つのサイズは、 $230 \times 170 \times 10$ [cm³]で、架台やパネルなど含めた総重量は約 190kg であり、設置にはヘリコプターを利用した。

ここではシンチレーターボックスとプラスチックシンチレーターについて述べる。

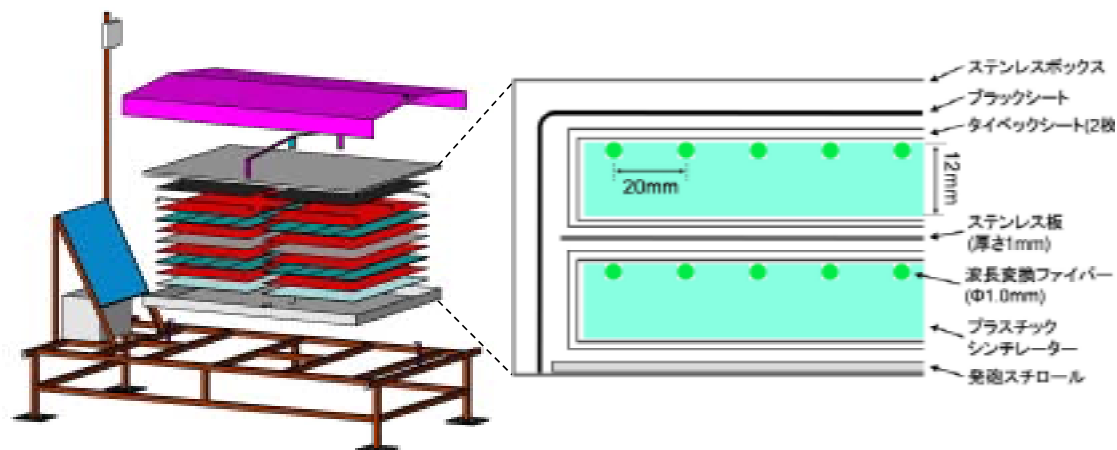


図 1-12 シンチレーターボックスの内部構造

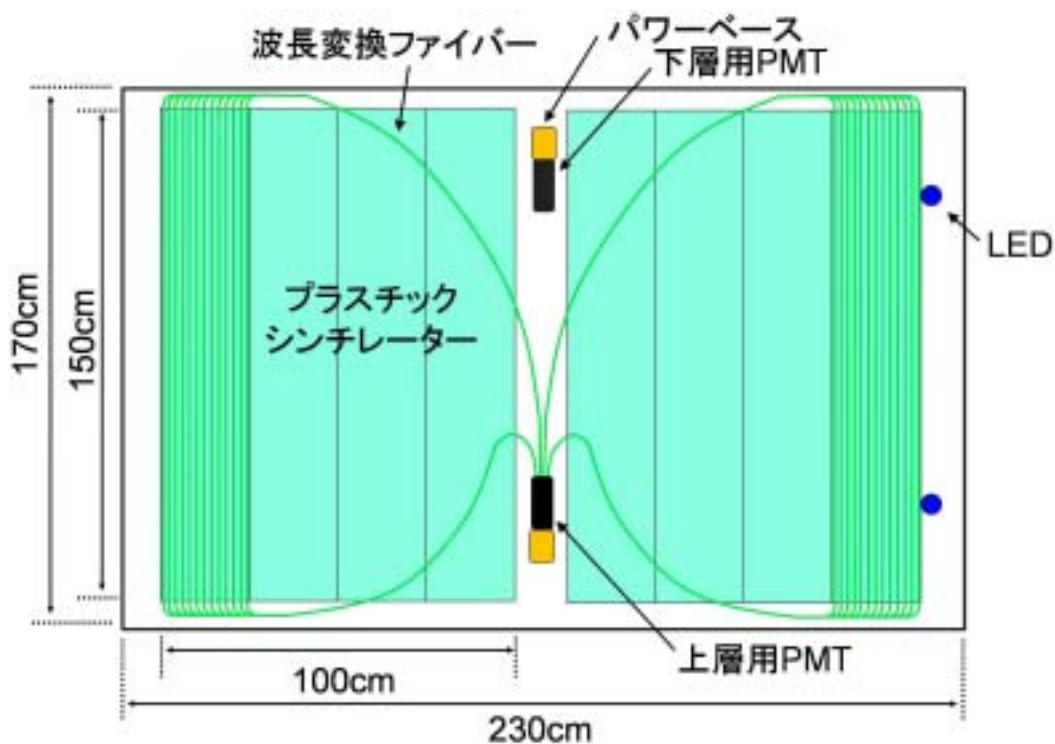


図 1-13 プラスチックシンチレーターの平面図

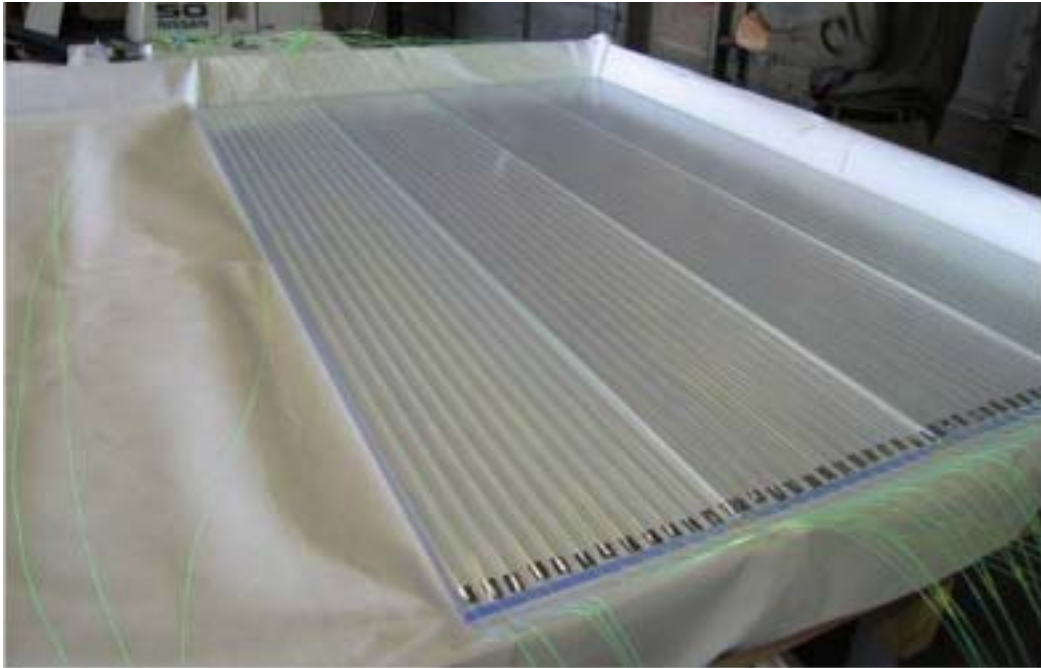


図 1-14 使用したプラスチックシンチレーターの写真

図 1-12 はシンチレーターボックスの内部を示した図であり、図 1-13 はプラスチックシンチレーターの平面図である。プラスチックシンチレーターの中には蛍光物質が含まれており、荷電粒子が通過すると蛍光する。厚さ 12mm のプラスチックシンチレーター1 枚 (1.5m×0.25m) には 1mm 程の溝が 2cm 間隔で 13 本作られており、その溝に光ファイバーを張っている。図 1-12 に示すようにプラスチックシンチレーターを二層に重ねたものが 8 枚並べられている。そして、上段側と下段側で得た光信号は、それぞれが別々の光電子増倍管 (PMT) に集められる。つまり SD1 台につき、プラスチックシンチレーター16 枚、光電子増倍管 2 つが内蔵されている。実際に使われている半透明のプラスチックシンチレーター板の写真を図 1-14 に示す。

SD が宇宙線を観測する工程

シンチレーターボックスの中に入っているプラスチックシンチレーターを空気シャワーの荷電粒子が通過すると、荷電粒子が通過した長さに比例する電離損失エネルギーによりシンチレーターが発光する。

によって得られた光を光ファイバーで拾い、光電子増倍管まで伝搬する。

により伝搬されてきた光信号を、光電子増倍管により電気信号に変換増幅する。

によって得られた電気信号 (宇宙線データ) を無線により集計基地まで飛ばす。

以上のような工程を経て宇宙線が観測されるわけであるが、問題は電力供給である。実験地は何もない広大な荒野（砂漠）であるため発電システム自体の設置が必要なのだが、1ヶ所で発電し、ケーブルで 507 台すべてに電力を送り込むのはコストの面からも不向きである。そこで各検出器に独自の発電システムを構築するのが望ましい。ただ、長時間の稼働により途中で燃料の補給や定期的なメンテナンスが必要な発電システムは避けたい。

これらの条件に見合った発電システムで採用されたのが、ソーラーパネルとバッテリーによる電力供給システムである。当然夜間は発電できないのでバッテリーに昼間の間に充電しておき、夜間に稼働させる。検出器 1 台の消費電力は小さいので太陽光発電でなら十分にまかなえる。太陽光発電には以下に記すように多くの利点がある。

太陽光発電の利点

エネルギー源は太陽なので無限に存在する。

実験地は国立公園内にあり、環境に良い。

ソーラーパネルは故障のしにくさから安定稼働に関する信頼性が高い。

各検出器が独立した発電システムなので、停電等によって検出器全体が停止する可能性が低い。

ソーラーパネルとバッテリーによる電力供給システムで各 SD は独立稼働することができ、バッテリーの寿命が来るまでは昼夜を問わず稼働し続けることが可能となった。

1-6 SD の消費電力

地表検出器の各装置における消費電力を表 1-1 に示す。

表 1-1 各装置の消費電力

名称	用途	消費電力
光電子増倍管 (PMT)	光を電気信号に変える	0.48W
FADC (LAN を含む)	宇宙線のアナログ信号 をデジタル信号に変え る	4W
GPS	宇宙線の到来時刻を 決定する	0.5W
Slow Control	電圧の調整を行なう	0.1W
Charge Controller	過充電や過放電や 夜間の電流逆流を防ぐ	0.1W
合 計		5.18W

この表からわかるように SD は最低でも 5.18W の電力が必要であり、多く見積もって 6W の電力を必要とする。

観測対象の宇宙線はいつ到来してくるかわからないため、実験期間中は常に 6W の電力を供給し続けなければならない。

1-7 研究目的

TA 実験では自立発電型の検出器すべてを実験が終了するまで連続稼働させる必要がある。昼間はソーラーパネルによる発電によって電力をまかなうことができるが、夜間に関しては太陽が出ている時間のうちにソーラーパネルによって充電されたバッテリーで電力を供給する必要がある。

現地で使用される検出器の消費電力は先ほど述べたように 6W であり、バッテリーの出力電圧値が 11.5V を切ったら自動停止する様にエレキボックス内のチャージコントローラーによって設定されているため、実際に 11.5V を下回ってしまう前にバッテリーを交換する必要がある。しかし SD に搭載しているバッテリーは 33.6kg と非常に重く、SD の分布範囲も非常に広大なため、バッテリーを交換するというのは容易なことではなく、非常に手間がかかる。そのため今現在は 1 週間に 2 回の点検でバッテリーを交換するべきか否かを判断しているのだが、事前に交換するべきバッテリーを検討し、提案することであらかじめバッテリーの購入台数を決めることが可能になり、一度に多数のバッテリーを交換することも可能になる。

そのため本論文では SD に搭載しているバッテリーの今後の電圧値の変動を予測することで各 SD のバッテリーの交換時期について検討した。バッテリーの電圧値を予測するにあたり、本研究室では SD に搭載しているバッテリーと疑似的な環境を作り、バッテリーの充放電を繰り返す加速実験からバッテリーの耐久特性と外部の温度変化によって受ける影響を検証した。次に実際に SD に搭載されているバッテリーの解析を行ない、データの測定開始からこれまでの電圧値の変動を表示して劣化の度合い、速さを検証し、最後に既存のデータから今後の電圧値の動きを予測することでバッテリーの交換時期を検討した。

これらの目的、工程をまとめると以下の様になる。

研究目的

全 SD バッテリーの今後の電圧値の動きを予測し、バッテリーの交換時期を検討する。

研究のプロセス

- ・ 本研究室で行なっているバッテリー実験から
 - バッテリーの耐久特性について検証する。
 - バッテリーが外部の温度変化によって受ける影響を検証する。
- ・ SD に搭載されているバッテリーの解析から
 - 全 SD バッテリーにおいて、これまでの電圧値の変動を検証する。
 - 既存のデータから今後の電圧値の動きを予測し、バッテリーの交換時期を検討する。

第2章 本研究室でのバッテリー実験結果

2-1 実験装置

2-1-1 実験装置概要

図 2-1 に本実験で使用したシステムの概要を示す。バッテリーに充電器を接続し充電を行ない、バッテリーの電圧と流れ込む電流を分圧器と分流器によりそれぞれ測定する。バッテリーの温度は熱電対温度計で測定している。バッテリーの充電が完了すると、PC 上のプログラムによりリレーが切り替わり電球（12V-60W）に通電し、バッテリー電圧、流れ出す電流、バッテリーの温度を測定する。なお測定は 1 分間隔のサンプリング計測である。

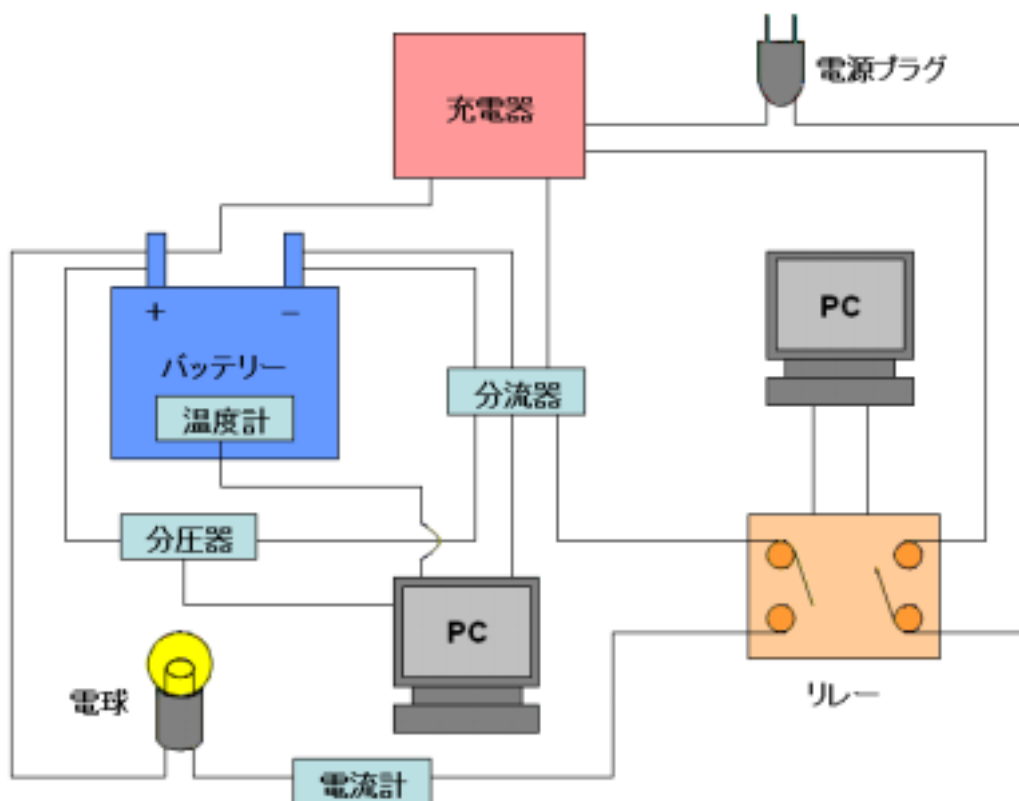


図 2-1 バッテリー試験システム概要

2-1-2 バッテリー

第1章でも述べたが、地表検出器は消費電力の分だけ発電すれば稼働できるが、天候に依存する太陽光という安定した発電が望めない環境にあるため、天候不順が続き、十分に発電できない場合でも対応できるように、バッテリーの容量を多めにとっている。

また、充電式のバッテリーは充放電の繰り返しで中の電解液が減っていき、放電容量が減少してしまう。これが「開放型」という種類で、途中で電解液の補充が必要となる。開放型に対して電解液の補充が必要ない、いわゆるメンテナンスフリーのものは「密閉型」と呼ばれる。

また、気象条件によって数日間充電されずにバッテリーからの電力のみで検出器が稼働した場合、バッテリーが完全に放電してしまうことも考えられる。このような使用条件に適しているのが「ディープサイクルバッテリー」であり、通常使用するバッテリーに比べて過度の充放電ができるように作られている。従って地表検出器に適したバッテリーは「密閉型のディープサイクルバッテリー」となる。図2-2がSDに搭載しているバッテリーであり、本研究室で行なったバッテリー実験で使用した密閉型のディープサイクルバッテリーである。表2-1にこのバッテリーの仕様を示す。



図 2-2 実験で使用したバッテリー

表 2-1 バッテリー仕様

メーカー	DYNASTY 社
型式	DCS-100L
電解物	希硫酸 (H ₂ SO ₄)
最大放電電流	800Amps
稼働温度範囲	- 40 ~ 71 (放電時) - 23 ~ 60 (充電時)
適正温度範囲	23 ~ 27
浮動充電電圧	13.5V ~ 13.8V (25)
重量	33.6 [kg]
寸法 (mm)	172.7 × 340.9 × 213.1
容量	5 時間率 : 84Ah 20 時間率 : 100Ah

バッテリーは充放電すると、水の電気分解によって水素と酸素が発生する。普通のバッテリーはこのガスの大部分を外へ逃がしているが、密閉型のバッテリーは充電された負極活物質（海綿状鉛）が酸素を吸収する密閉反応（負極吸収反応）を利用して、吸収された酸素は負極から発生する水素と化合して水に戻るため補水の必要がなく密閉できるのである。

しかし、密閉型は過充電によって発生する水素ガスの容量が水に還元する容量を超えてしまい内圧が上昇して危険である。従って、密閉型はケースの強度が高く設計されている。さらに、ガスを外に逃がす排気弁の付いたタイプもあるが今回使用するバッテリーには付いていない。

ディープサイクルバッテリーは使用深度を深くとれるバッテリーである。普通のバッテリーは一度深度 100%まで使ってしまうと電極にサルフェーションが付着して劣化してしまうが、ディープサイクル型は構造上の違いから劣化しにくい。

バッテリーの容量は、Ah（アンペア時）で表される。1Ah とは 1A の電流を 1 時間にわたって供給できる能力のことを示す。従って、例えば 1Ah で電圧が 12V のバッテリーは、

$$12 (V) \times 1 (A) = 12 (W)$$

の電力を 1 時間出力できることになる。

今回使用したバッテリーの容量は 100Ah である。例えば 5 時間率容量は 5 時間率電流（84Ah/5h=16.8A）と放電終止電圧 10.5V までの放電持続時間との積である。つまり 5A の電流なら 20 時間放電可能だが、16.8A なら 5 時間で空になってしまうことを意味している。

2-2 実験概要

TA 実験の SD に搭載しているバッテリーでは 1 日のうち、太陽が隠れている時間帯は太陽光発電が不可能なためバッテリーの放電によって電力が供給される。そのため SD のバッテリーで使われているバッテリーは 1 日に 1 回の充放電が行われるのだが、本研究室では SD のバッテリーの消費電力よりも高い電力を消費する電球を使ってバッテリーの加速実験を行ない、SD のバッテリーの数年に渡る使用環境を疑似的に構築した。

第 1 章の 1-6 で述べたように、実際の TA 実験では SD の各装置を稼働させ続けるために 5.18W の電力を必要とするため、丸 1 日装置を動かすために必要な電力は、消費電力を 6W と多く見積もると

$$6 \text{ (W)} \times 24 \text{ (h)} = 144 \text{ (Wh)}$$

となる。本実験室のバッテリー実験で使う電球は 12V - 60W であり、SD に搭載しているバッテリーの電力量と同じだけバッテリー実験で仕事をさせる必要があるためバッテリー実験でも 144Wh だけ仕事をさせる必要がある。

そのため放電時間は

$$144 \text{ (Wh)} / 60 \text{ (W)} = 2.4 \text{ (h)}$$
$$2.4 \text{ (h)} = 144 \text{ (min)}$$

となり、本研究室で行なうバッテリー実験は放電時間を 144 分間とした。

充電時間に関しては 144 分間の放電に対して満充電できるように余裕を持って 240 分間に設定した。

2-3 実験データ

バッテリー実験においてPCに取り込んでいるデータは、日付・時刻・電圧・電流・温度である。図 2-1 に時間とバッテリー電圧の関係、図 2-2 に時間と電流の関係、図 2-3 に時間と温度の関係のサンプルグラフを示す。この3つのグラフは同じ日付を表している。

図 2-1 の、 は充電中の様子を表している。 で充電が開始され、バッテリーが容量の約 80%まで充電されると充電電圧を一定にして充電するようになり、十分な時間をかけて満充電させる。 で充電から放電に切り替える。そして で放電が開始され、放電時間が経つにつれて電圧値は低下していき、 で放電が止め、再び充電に切り替える。

図 2-1 と図 2-2 を見比べてわかるように充電は交流を整形した半正弦波で行なうので、サンプリングで行なう電流測定はほとんど 0A になっている。一方、放電中は直流電流であるので先ほども述べたように 5A の電流が測定されている。このバッテリーに関しては常に冷蔵庫（実験中は 10℃ 設定）の中に入れており、出し入れすることはないためバッテリーの外部温度は基本的に 10~15℃ である。

各データは 1 分間隔のサンプリングでとっている。また、充電時間、放電時間は PC のプログラムにより自由に設定が可能である。

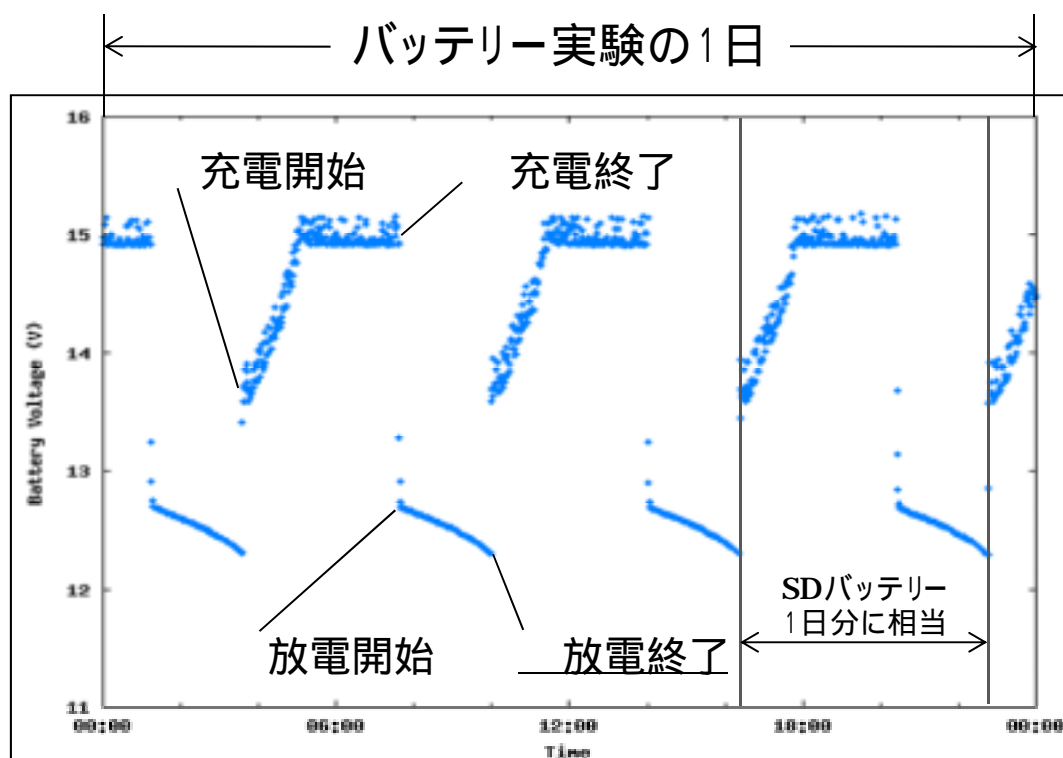


図 2-1 時間と電圧値の関係

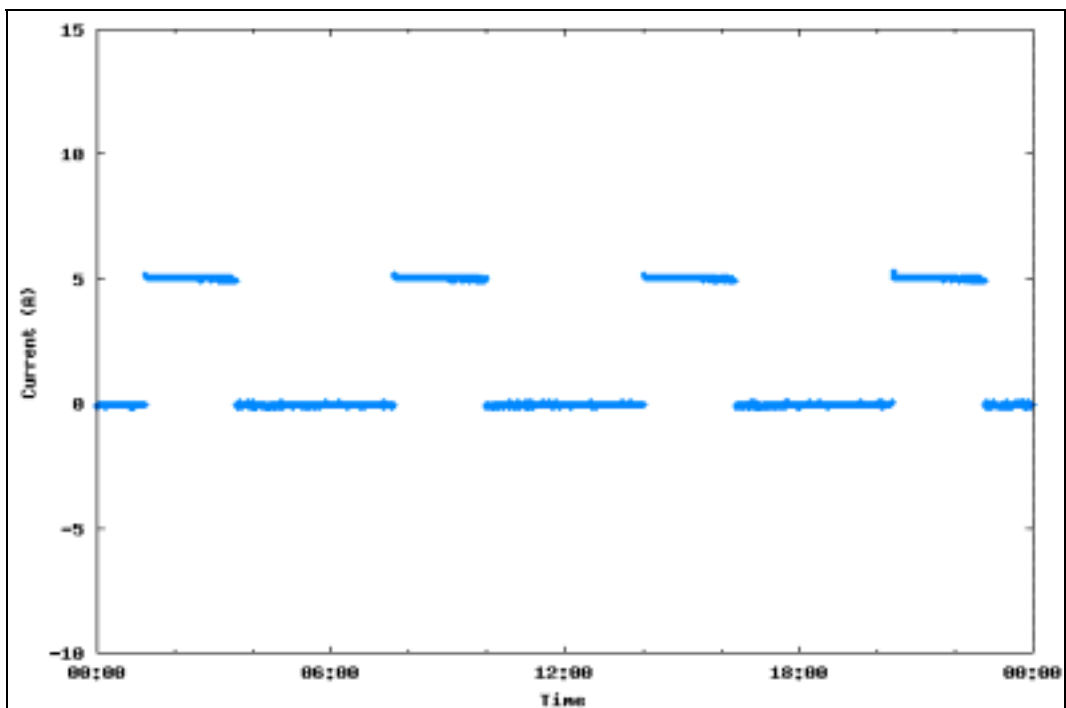


図 2-2 時間と電流の関係

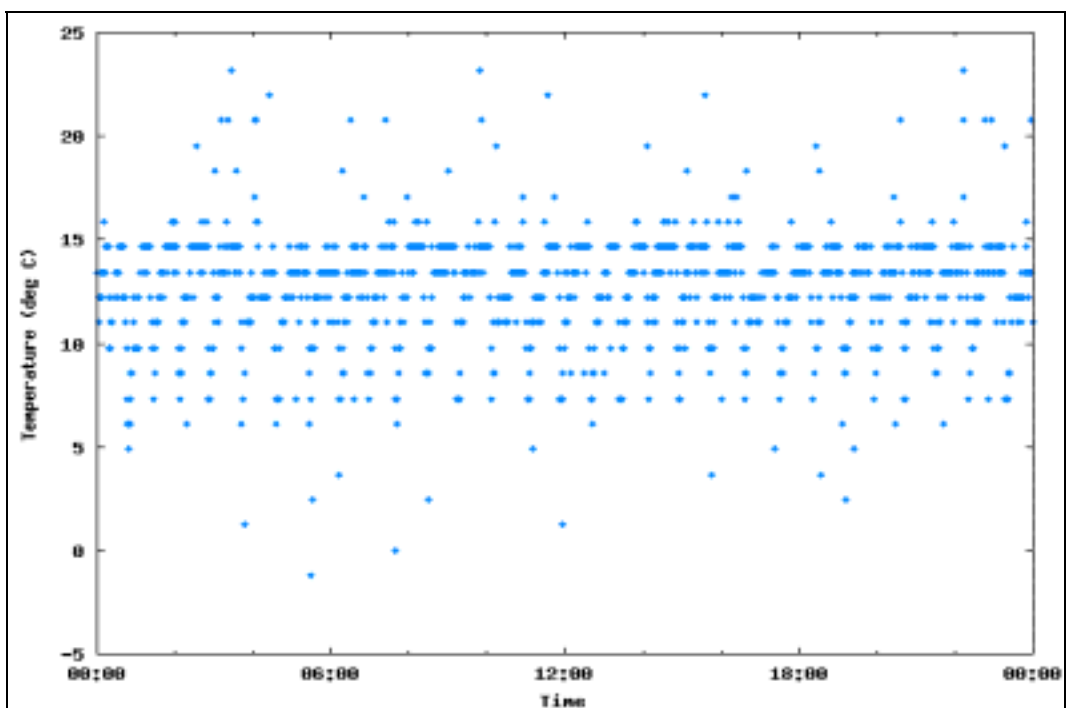


図 2-3 時間と温度の関係

2-4 バッテリーの耐久実験

バッテリーは消耗品である。それは充電可能な二次電池も例外ではなく、充放電を繰り返すことで、放電持続時間の短縮や、電圧の低下が起き、やがてバッテリーの寿命が来る。したがって、連日稼働しなければならないSDにとってバッテリーの消耗は回避不能な障害であるため、SDを稼働させ続けるのに必要な電力を供給できなくなる前にバッテリーを交換する必要がある。

そこでバッテリーの劣化の特性を知ることがを目的に実際にSDに搭載されているバッテリーと疑似的な環境の中でバッテリー実験を行ない、バッテリーの耐久特性を検証した。

2-4-1 解析方法

バッテリーの放電中の電圧値は図2-1のように徐々に低下する。バッテリーの劣化具合を検証するためには毎回同じ条件で電圧値を取得し、解析する必要がある。このバッテリー実験では各バッテリーとも放電時間は基本的には144分間としているが、144分間以外に設定されているときもあるため、今回の解析では放電開始から140分後の電圧値を用いてバッテリーの劣化具合を検証することとする。

横軸に放電回数、縦軸に放電開始から140分後の電圧値として3つのバッテリーの実験結果を表示する。

2-4-2 解析結果

バッテリーNo.1 の耐久特性実験結果

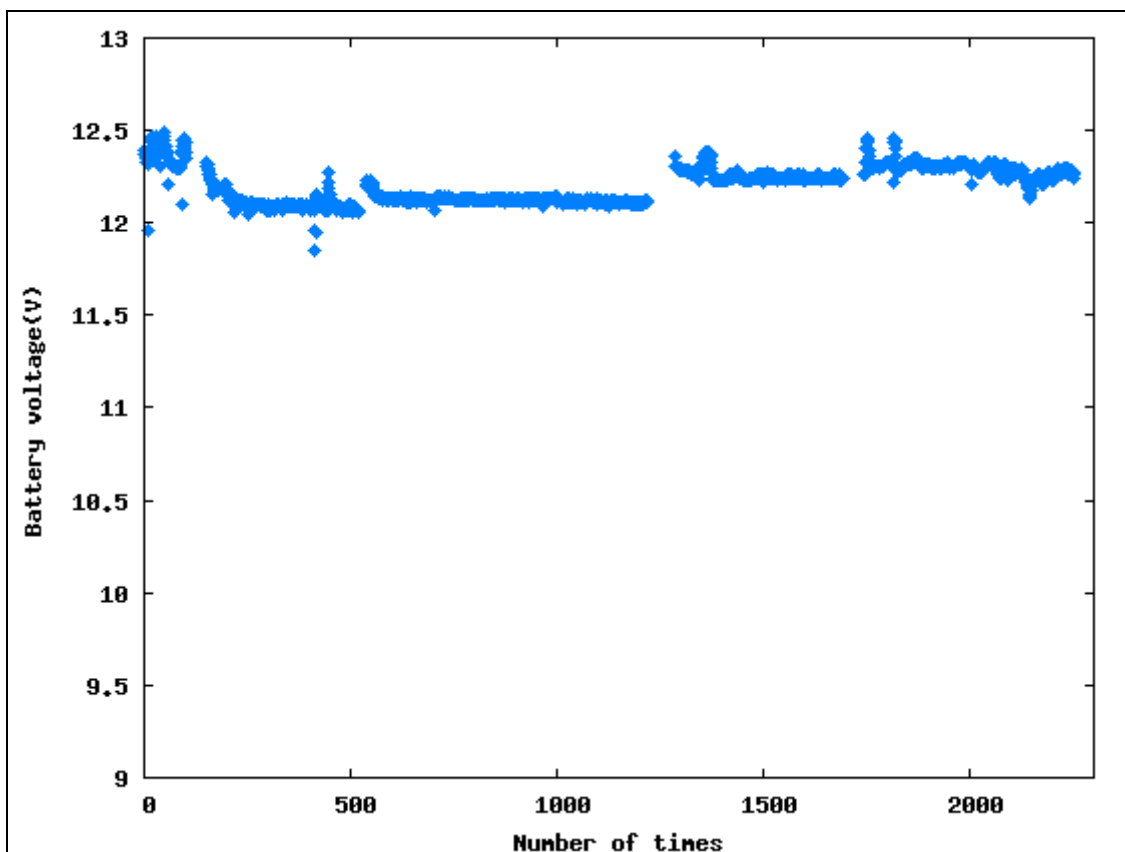


図 2-4 バッテリーNo.1 の耐久特性実験結果

バッテリーNo.1 は 2005 年 3 月 14 日から今日まで稼働しているが、正式な計測は 2007 年 1 月 27 日から行なっているため、そこを 1 回目として表示してある。

全体的に見て実験を開始してから放電回数 2200 回を超える今日に至るまで大きな劣化というものは見られていない。しかし開始から約 300 回目までは少しではあるが劣化しているように見えるが、これはバッテリーを室内にそのまま置いていたので気温による影響を思われる。このバッテリーからは劣化の様子を見ることができなかった。

ちなみに数ヶ所に見られるグラフに切れ目に関してはこの後の 2-5 で説明する温度特性実験を行なっている期間であり、その部分に関しては表示しないようにしている。

バッテリーNo.2 の耐久特性実験結果

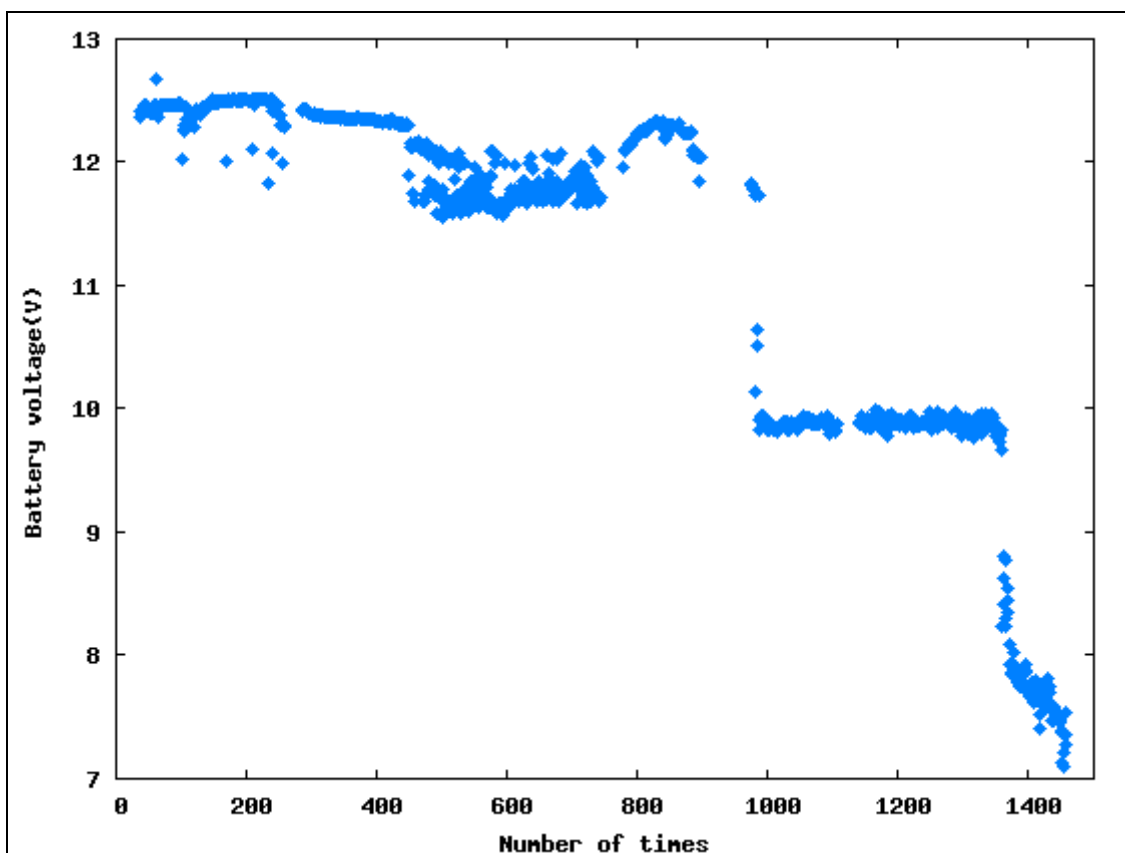


図 2-5 バッテリーNo.2 の耐久特性実験結果

バッテリーNo.2 は 2005 年 8 月 30 日から 2008 年 5 月 15 日までの 2 年 9 ヶ月ほど稼働していたバッテリーである。

全体的に見て、最初は 12V 以上あった電圧値も実験を終了する頃には約 7V にまで低下している。測定開始から 463 回目までは徐々に電圧値は低下していくものの安定していたが、そこで実験を一時中断し、約 3 ヶ月後に再開したところ電圧値は少し低下し、ばらつきが出始めた。このばらつきは測定システムを 1ch から 2ch へ変更したときのシステムの問題から発生したものである。その後は 1000 回目付近に急激に低下しており、その後安定するも 1370 回目頃からまた急激に電圧値が低下し始め、測定を止めるまで低下し続けている。このバッテリーの 2V の電圧値低下は急激なものであり、放電回数が数回行われるうちに 2V 低下しているのがわかる。

この実験で使っているバッテリーは2Vのセル6つから構成されている。セルとは、バッテリーに内蔵された小型のバッテリーのことであり、複数のセルが接続されることで、1つの大きなバッテリーとして機能している。1000回目付近と1370回目付近ではそれぞれ2Vずつ電圧値が低下しているため、そこでセルが1つずつ壊れたということが考えられる。

バッテリーNo.3の耐久特性実験結果

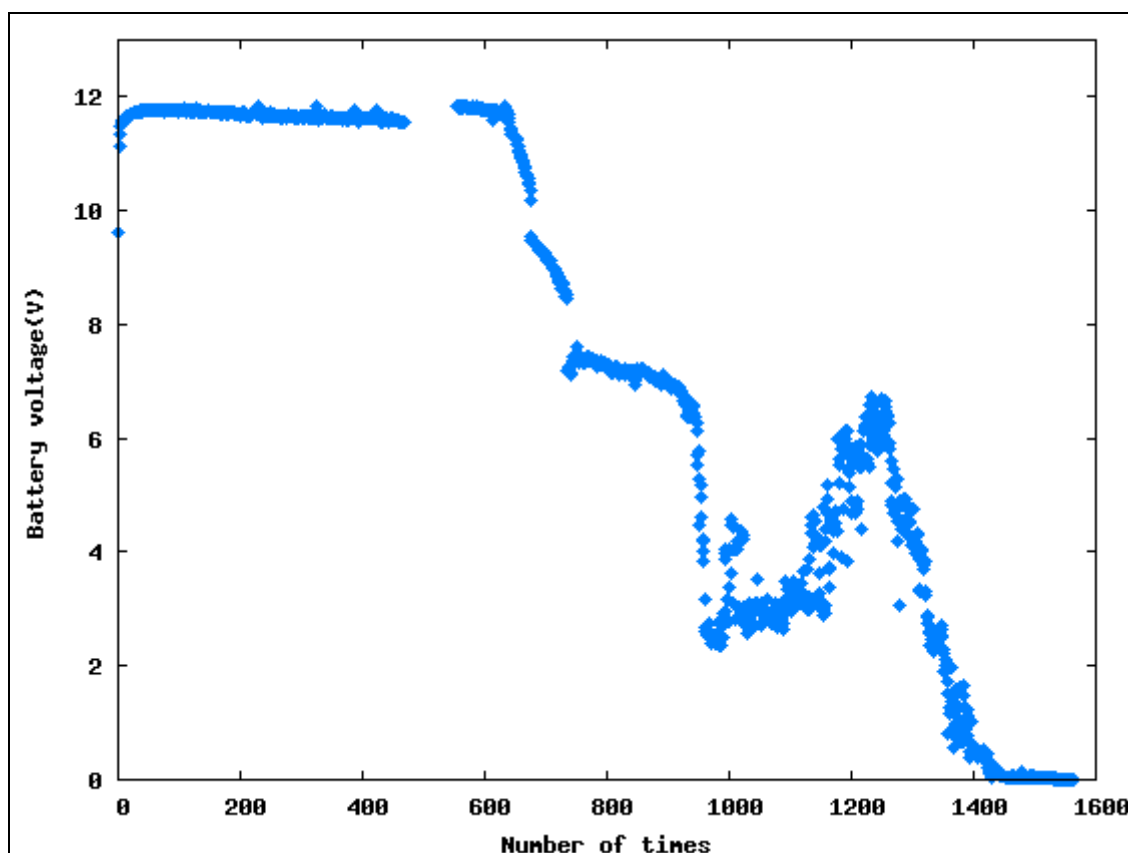


図 2-6 バッテリーNo.3の耐久特性実験結果

バッテリーNo.3は2008年5月15日から今日まで稼働しているバッテリーである。

全体的に見て、始めは12V弱あった電圧値も今現在では0V近くにまで低下している。このバッテリーは以前に使用歴のあるバッテリーで、実験前までしばらく放置されていたものであるため開始当初は性能の低下により電圧値が低かったが、しばらく使っていくことで本来の性能に戻った。そしてその後は630回目頃まで一定の速度で劣化していった。

るのがわかる。しかしそこから急激に電圧値は低下し始め、低下する早さは変わるものの約 1000 回目付近まで低下し続けている。その後電圧値は回を追うごとに上昇するものの約 1250 回目からは再び低下し始め、最終的には 0V ほどにまで下がった。このバッテリーの 2V の電圧値低下は先ほどのバッテリー No.2 の 2V の電圧値低下に比べて緩やかな低下であり、2V 低下するのに平均して 50 回ほどの放電を行なっている。

バッテリー No.2 同様、640、680、920、950 回目付近ではそれぞれ約 2V ずつ電圧値が低下しているため、そこでセルが 1 つずつ壊れていると考えられる。1000 回目付近から電圧値が上昇した原因に関してはわからないが、破損していたセルが復活したと考えられる。

この実験結果から得られたこと

- ・ 11.5V まで徐々に劣化していくわけではなく、セルの破損によって突然 2V 低下する。
- ・ それぞれのバッテリーで 2V の劣化が始まる時期、2V 劣化の際の劣化速さなどに大きな個体差がある。

セルの破損による 2V の劣化が起きたら間違いなく必要電圧である 11.5V を下回ってしまう。そのため 2V の電圧値低下が起きる前に交換する必要があるのだが、セルの破損はいつ起きるかわからないため、目安として SD のバッテリーは電圧値が 11.8V を下回ったら交換するようにする。

2-5 バッテリーの温度特性実験

バッテリーの性能は外部温度が変わることで大きく影響を受ける。SD に搭載しているバッテリーがある TA 実験の実験地は年間で約 40 ~ -20 まで気温が変化する環境であるため、外部温度の変化によってバッテリーにどれほどの影響があるかを知る必要がある。

本研究室で行なっている実験ではバッテリーを冷凍庫に入れているため常に一定温度で実験が行われている。しかし温度特性実験では 5 つの温度環境においての実験結果を検証するために冷凍庫の設定温度を変えて -20、-10、0、10、20 という外部温度環境を作って実験を行なった。冷凍庫には 2 つの温度調節つまみがあり、それぞれ「冷凍 氷温 冷蔵」、「弱 中 強」となっている。この 2 つのつまみを組み合わせて温度を表 2-2 のように設定した。

表 2-2 冷凍庫の温度設定

温度	冷凍庫設定	
	つまみ 1	つまみ 2
-20	冷凍	強
-10	冷凍	弱
0	氷温	中
10	冷蔵	弱
20	室温	

ちなみに 20 の「室温」というのは冷凍庫の設定ではなく、バッテリーを冷凍庫から取り出し、空調管理により行なったものである。そのため季節と時間によって温度は変わり、冷凍庫に比べると温度のばらつきが大きくなる。

なお、実験は各温度において 4~6 回行なった。

温度特性実験は表 2-3 に示す期間で合計 8 回行なった。

表 2-3 各バッテリーの温度特性実験の実験期間

バッテリー	実験回数	実験期間
バッテリーNo.1	1 回目	2007/06/16 ~ 2007/07/19
	2 回目	2008/01/21 ~ 2008/02/11
	3 回目	2008/11/14 ~ 2008/12/25
	4 回目	2009/07/14 ~ 2009/08/06
バッテリーNo.2	1 回目	2006/06/16 ~ 2006/07/18
	2 回目	2007/09/25 ~ 2007/11/02
	3 回目	2007/12/19 ~ 2008/01/04
バッテリーNo.3	1 回目	2008/11/14 ~ 2008/12/25

その中でもここではバッテリーNo.2 の 1 回目の温度特性実験の解析結果を表示する。

なおバッテリーの外部温度は放電時の電圧値の低下速度に影響を与えるため、どの温度のときにでも電圧値が 11.5V を下回るまでの放電時間を考えて設定し、充電時間に関しては放電時間が一番長い時でも満充電できるようにどの温度のときも 18 時間に設定した。

バッテリーNo.2 の 1 回目の温度特性実験の各温度における充電時間および放電時間は表 2-4 の通りである。

表 2-4 バッテリーNo.2 の 1 回目の温度特性実験の充電時間および放電時間

温度	充電時間	放電時間
- 20	18 時間	10 時間
- 10	18 時間	12 時間
0	18 時間	14 時間
10	18 時間	16 時間
20	18 時間	18 時間

2-5-1 温度別の電圧と電力量の関係

ここではバッテリーの外部温度が変わることによって 1 回の放電で取り出せる電力量がどのように変わるかを温度別の電圧と電力量の関係のグラフを用いて表示する。電力量とはバッテリーが放電中にする仕事量のこと、これを温度別で検証することによってそれぞれの温度でバッテリーはどれほどの量の仕事ができるかということがわかる。

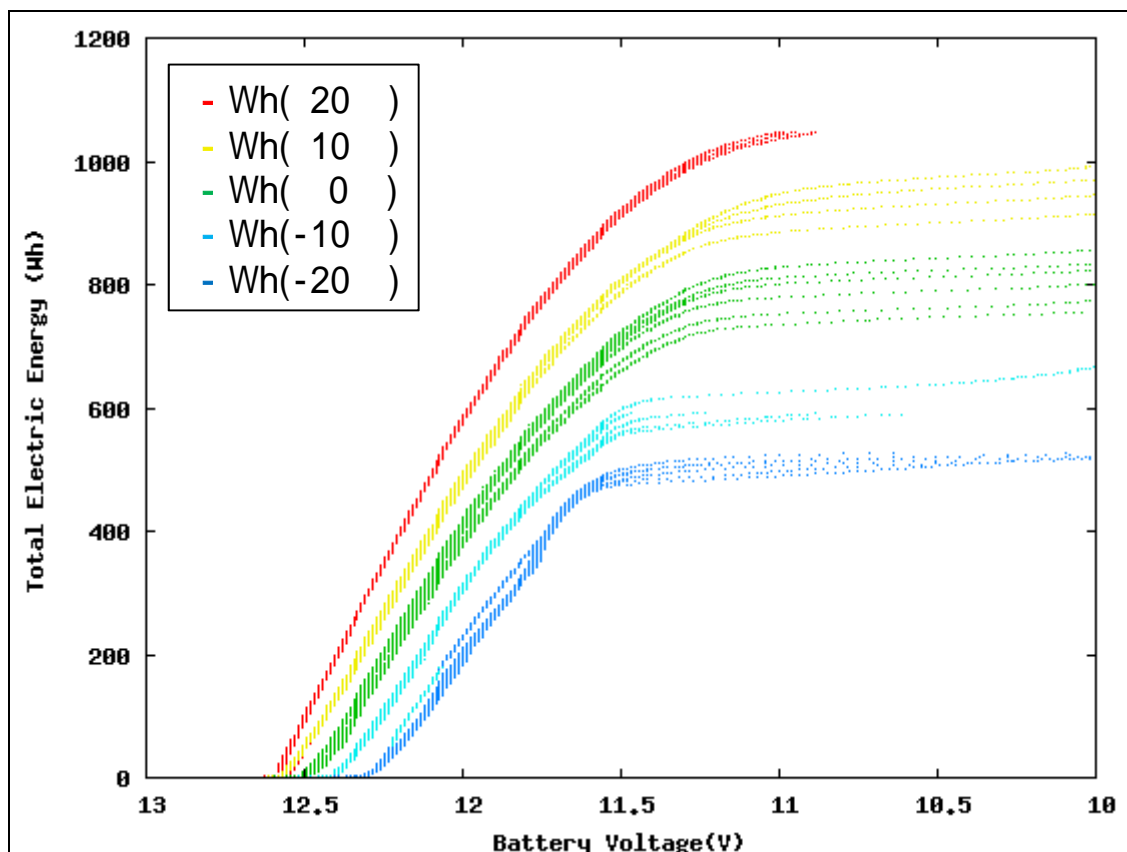


図 2-7 温度別の電圧と電力量の関係

横軸にバッテリーの電圧値、縦軸に放電中に得られる電力と時間の積を積算して電力量 (Wh:ワット時) で表した。

このグラフから、いずれの温度の場合においても、電圧値が約 11.8V ~ 12.3V の間はほぼ直線であり、バッテリー電圧と電力量は比例関係をとることが読み取れる。しかし 12.3V 以上と 11.8V 以下において傾きは小さくなる。このことから、取り出せる電力量はある電圧値を境に小さくなることがわかる。これを温度別に見ていくと、直線部分の傾きは温度が高いほど大きい。そのため放電開始後から徐々に取り出した電力量に差が出てゆく。

バッテリーの外部温度が 20 の場合は 1 回の放電で可能な仕事量は約 1000Wh となっているが、- 20 の場合はその半分の約 500Wh で飽和状態になっている。このことから外部温度が 40 変わることでバッテリーができる仕事量が半分にまで低下してしまうということがわかった。

2-5-2 直線部における温度別傾きの変化

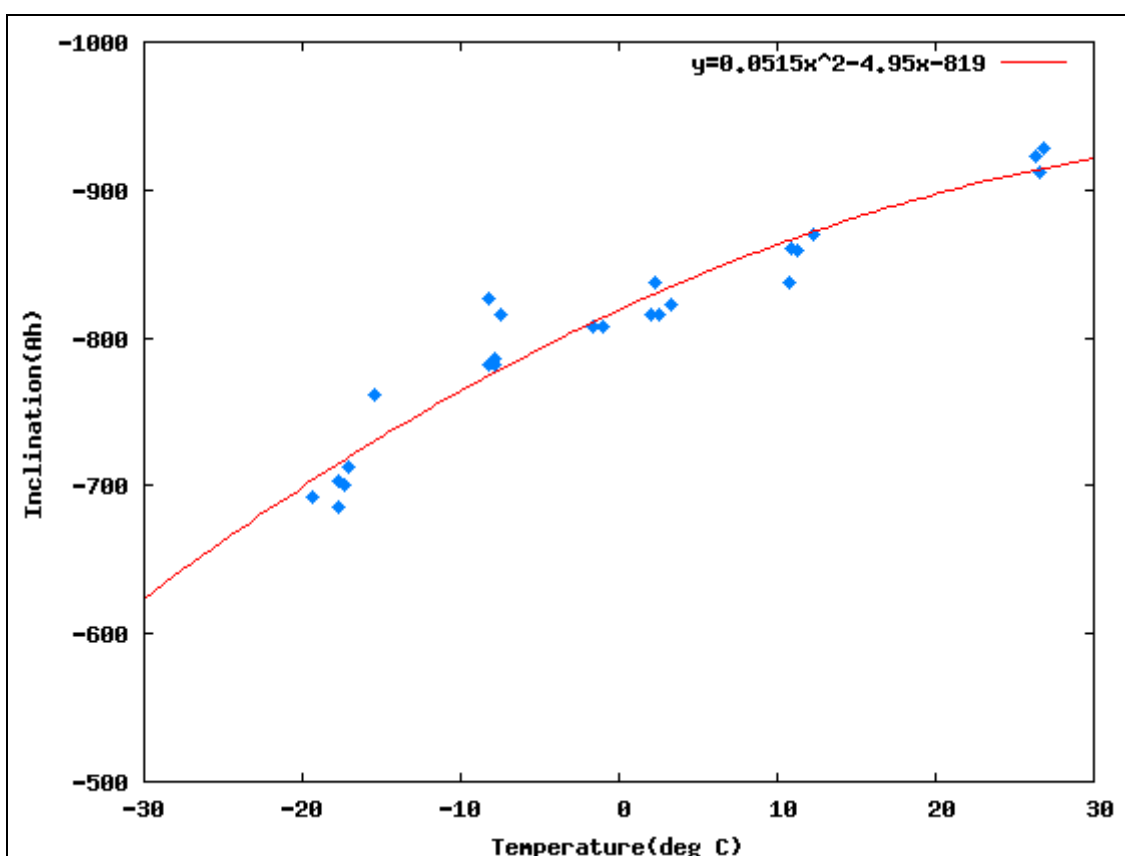


図 2-8 直線部における温度別傾きの変化

図 2-7 において、最も直線に近い 11.8V から 12.3V までの範囲を抜粋し、その傾きと温度との関係を表したものが図 2-8 である。さらに出力結果を二次曲線で近似している。このグラフでは傾きが大きいほど取り出せる電力量は大きくなるということになる。

このグラフから図 2-7 の直線部は温度の低下に伴い、傾きの減少が見られ、- 20 の場合に関しては他に比べて大きく減少している。

2-5-3 特定の電圧における温度別電力量の違い

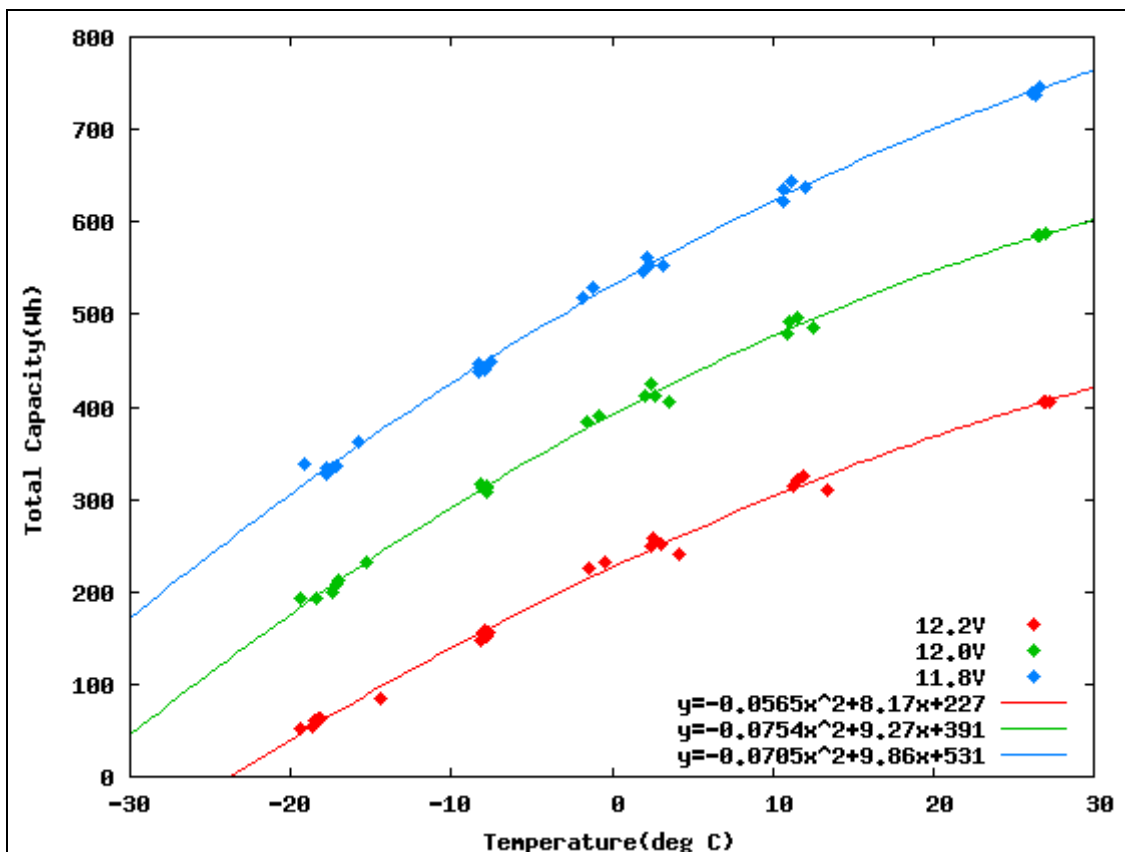


図 2-9 特定の電圧における温度別電力量の違い

図 2-9 はバッテリー電圧 11.8V、12.0V、12.2V において取り出した電力量を温度別に出
力したものである。さらに各電圧値において二次曲線で近似した。

温度ごとに見ると、温度が下がるにつれて取り出せる電力量も減少しており、また各電
圧値における減少量はほぼ同一であるといえる。

バッテリーができる仕事量は外部温度の影響をここまで大きく受けているということが
わかった。そのため年間温度差が 50～60 もある TA 実験の SD に搭載されているバッテ
リーは外部温度の影響を大きく受け、特に温度が下がる冬場は電力量の低下が考えられる
ため注意する必要がある。

2-5-4 各温度特性実験での電力量比較

バッテリーNo.1 の温度特性結果の比較

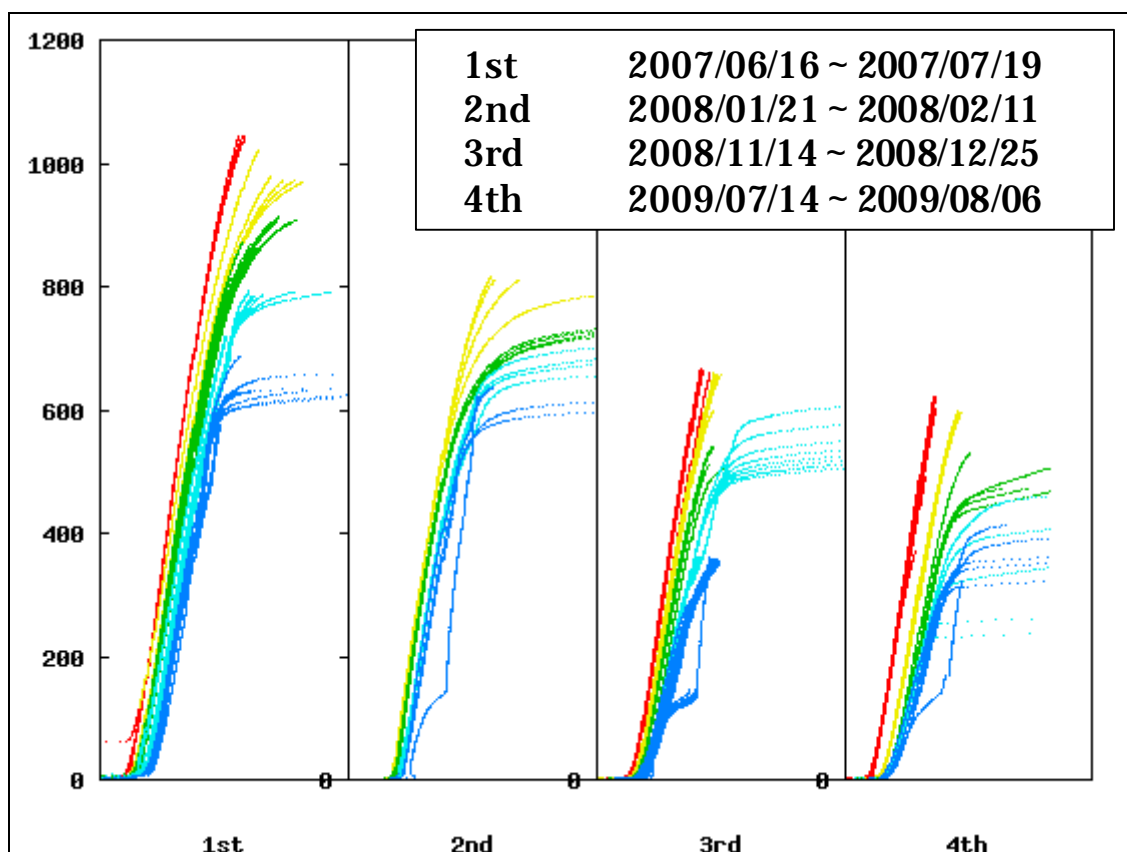


図 2-10 バッテリーNo.1 の温度特性実験結果の比較

過去に行なった温度特性実験の全 8 回のうちここではバッテリーNo.1 で行なった 4 回の温度特性実験結果を表示する。ここでは温度による違いではなく、充放電回数の増加による取り出せる電力量の変化を知ることが目的としている。

バッテリーNo.1 に関しては先ほどの耐久実験の結果から電圧値の低下は見られなかったが、電力量を見てみると 4 回の温度特性実験の結果を見る限り低下していることは明確である。たとえ電圧値が下がらずに 11.5V 以上を保ち続けていても取り出せる電力量が低下し続けて、十分な放電時間を確保できないようになってしまったらバッテリーを交換せざるを得なくなるため、電力量についても注意する必要がある。

バッテリーNo.2 の温度特性結果の比較

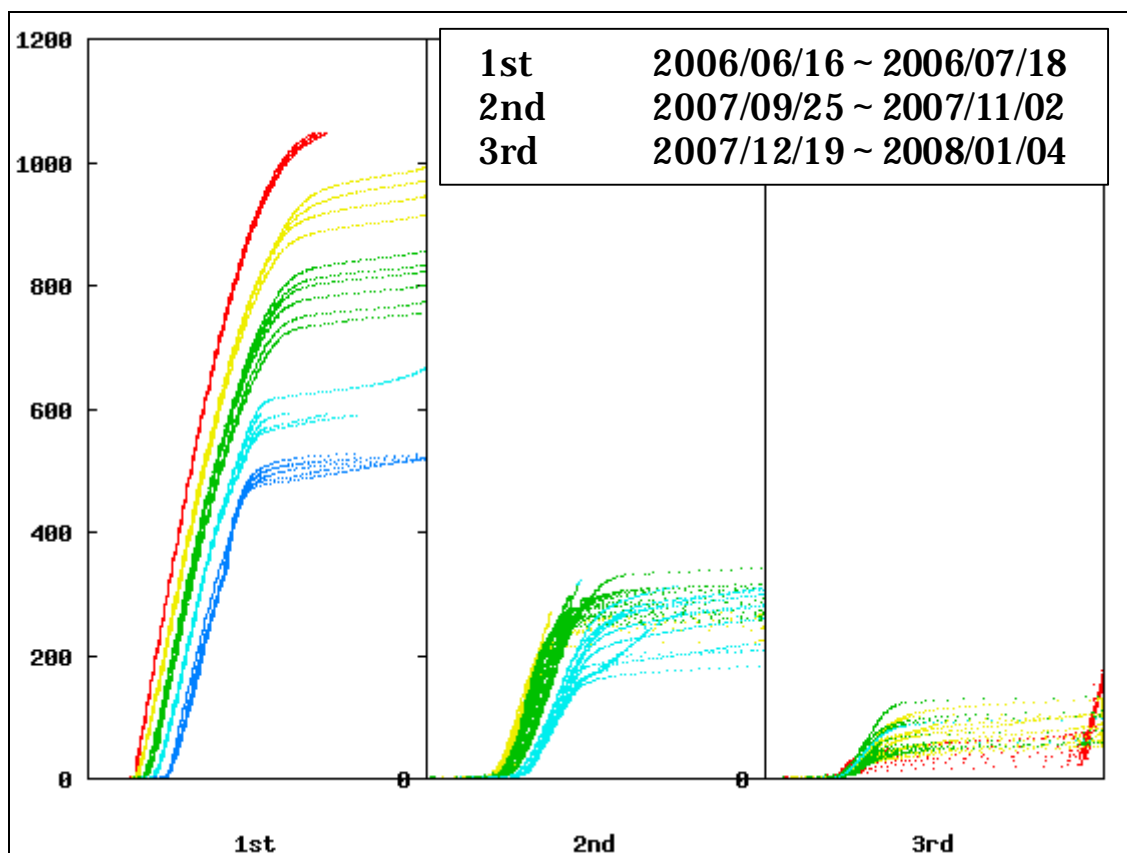


図 2-11 バッテリーNo.2 の温度特性実験結果の比較

上の図はバッテリーNo.2 で行なった 3 回の実験結果を比較したものである。

バッテリーNo.2 は 2-4 のバッテリーの耐久実験の結果を見てわかるように、充放電回数の増加につれて電圧値が下がっており、大きく劣化していることがわかってきた。そしてこの図を見てもわかるようにバッテリーNo.2 は電力量も大きく下がっている。1 回目の温度特性実験から 3 回目を行なうまでの約 1 年半の間で電力量は 10 分の 1 ほどにまで低下している。

バッテリーはたとえ放電電圧値が変わらなかったとしても電力量はここまで大きく低下することがわかった。電力量が大きく低下した分、バッテリーができる仕事量は大きく減っている。

第3章 SD に搭載されているバッテリーの解析

第2章では本研究室で行なっている3つのバッテリーの耐久実験、温度特性実験の結果を表示した。この章では本研究室で行なったバッテリー実験からわかったことを踏まえて実際にSDに搭載している507台のバッテリーの交換時期を決定することを目的に解析を行なったので、その解析結果を表示していく。

主に以下の二つの視点からバッテリーの劣化・耐久性を検証し、解析を行なった。

・同じ条件下においたときのバッテリー電圧値の経年変化を検証する

季節によって外気温やバッテリーの放電時間が異なってくるため、それに合わせてバッテリーの電圧値も変動する。しかし季節による影響を受けた結果で電圧値の変動を見ても夏季は電圧値が高くなり、冬季は低くなることが明確であり、それでは劣化の度合いを見ることはできないため、全てのデータを同じ温度条件にした結果から劣化の度合い、速さを検証した。

・今までに測定された電圧値データから今後の電圧値を予測する

SDに搭載されているバッテリーは電圧値が11.5Vを下回ると自動停止するように設定されており、第2章のバッテリーの耐久試験の結果から11.8Vを下回ったら交換すると決めたため、今までに測定されたバッテリーの電圧値から今後の電圧値の動きを推測し、SD毎に電圧値が11.8Vを下回る時期を推定することで、バッテリーの交換時期について検討する。

第1章で述べたようにSDは今現在全部で507個稼働している。そのうち、9割以上のバッテリーは多少劣化しているものの現段階では大きな劣化というものはまだ見られていない。しかし中には数個ほどではあるが大きな劣化が見られるバッテリーもある。そのためここでは大きな劣化の見られない正常なSDのバッテリーの例(SD No.0407)と大きな劣化が見られるSDのバッテリーの例(SD No.1025)の両方を表示していく。

3-1 バッテリーの電圧値の推移

バッテリーの放電は太陽が出ていない時間帯に行なわれるため放電時間は季節によって変動し、1回の放電時間は年間で約12～18時間もの差が出る。そして第2章の図2-1を見てわかるように、バッテリーの放電中の電圧値は時間が経つにつれて減少していく。そのためここでは放電開始から10時間後の電圧値の変動をグラフにしたものを表示する。

さらに冬場は日が短く、日によっては太陽の出ている時間が短く、十分な充電ができない日もあるため、満充電されないまま放電に切り替わったときのデータに関してはグラフに表示しないようにした。満充電されないまま放電すると電圧値が著しく低くなるため同じ条件で電圧値の変動を検証することができなくなるためである。

正常なバッテリーの例 (SD No.0407)

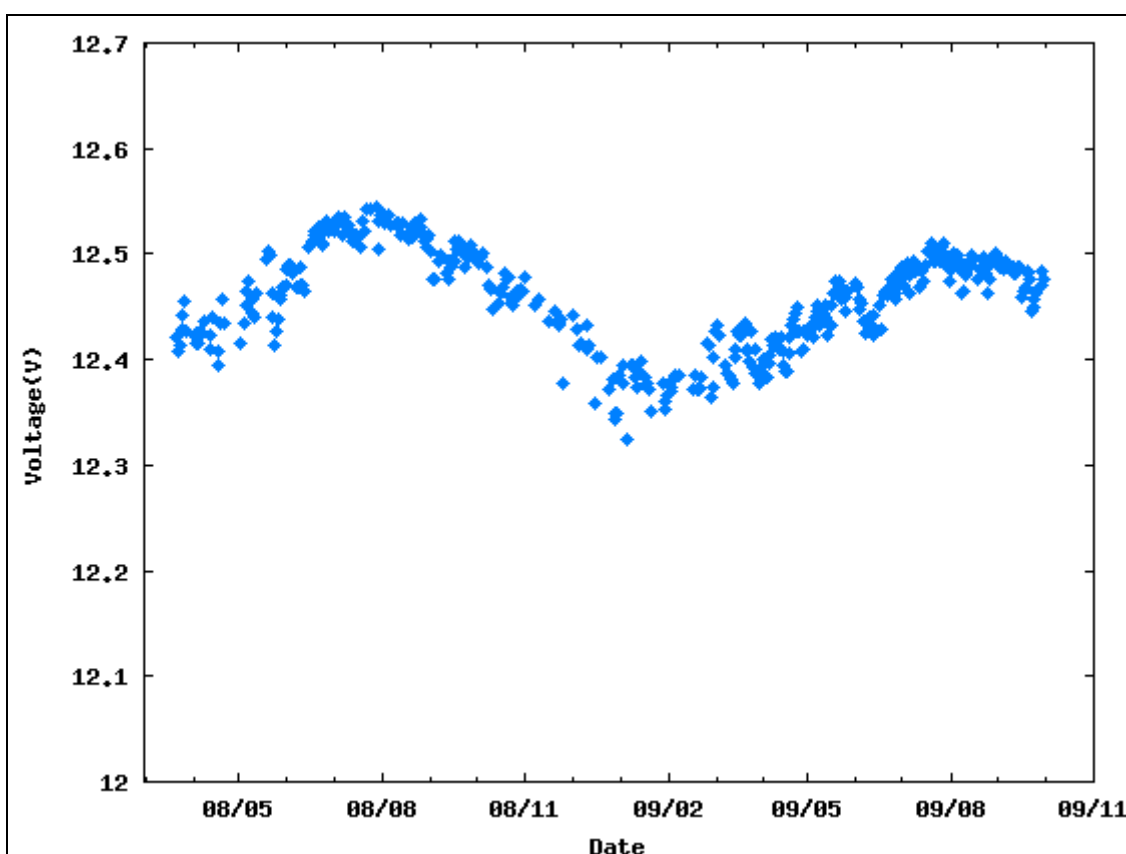


図 3-1 放電開始 10 時間後の電圧値の経年変化 (正常なバッテリーの例)

グラフを見ると電圧値と温度との間には相関が顕著に読み取れる。先ほども述べたように温度による影響を受けているこの図ではバッテリーの劣化の度合いを検証することができないため 3-2 では同じ温度状況で計算し直した電圧値の推移のグラフを表示する。

劣化が見られるバッテリーの例 (SD No.1025)

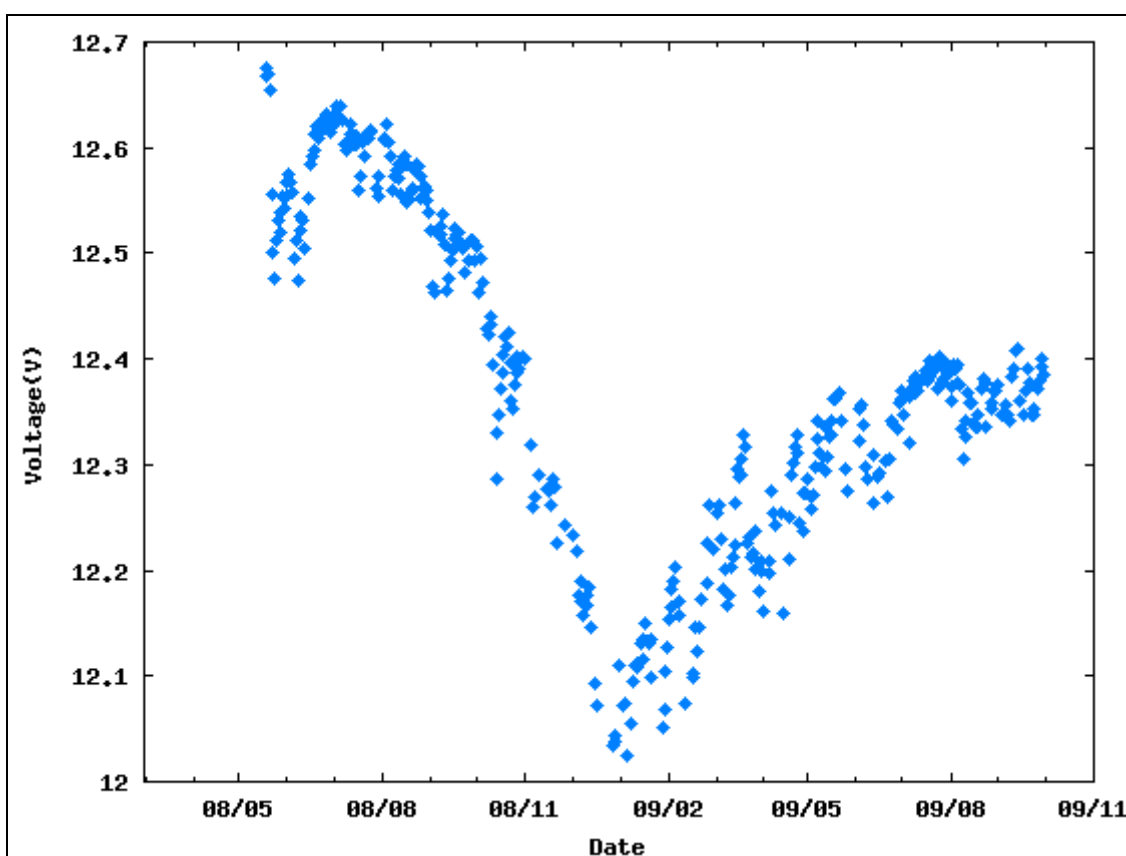


図 3-2 放電開始 10 時間後の電圧値の経年変化 (劣化が見られるバッテリーの例)

このバッテリーに関しては先ほどのバッテリーの結果とは異なり、2008 年の冬に約 12V にまで電圧値は低下している。さらに 2008 年の夏と 2009 年の夏とで電圧値が大きく下がっていることから劣化しているということは明確である。

このグラフについても同じ温度状況で計算し直した電圧値の推移のグラフをこの後で表示する。

3-2 温度補正をかけた電圧値の推移

3-2-1 温度と電圧値の関係と温度補正方法

先ほどの放電開始 10 時間後の電圧値の経年変化のグラフに温度補正をかけたグラフを表示する前に、まずはバッテリーの電圧値が外部温度の影響をどれほど受けるのかというのを図 3-3 を用いて説明する。

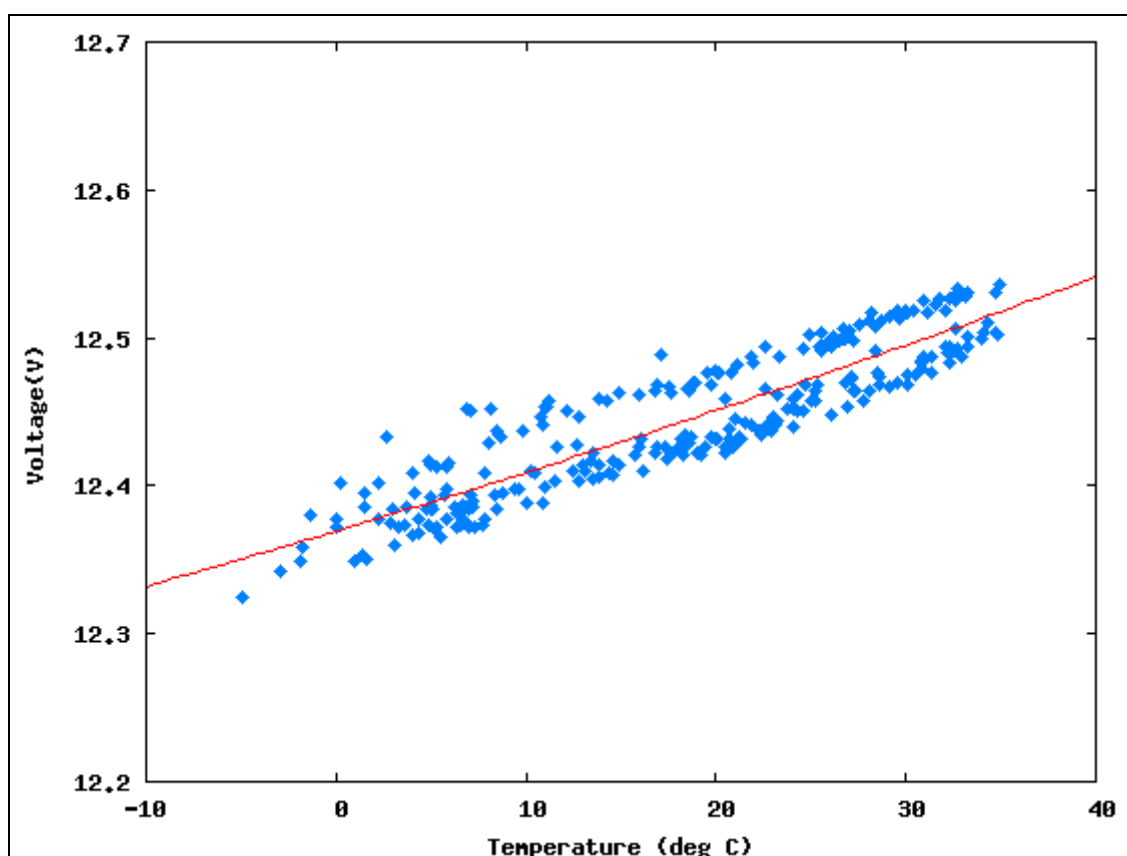


図 3-3 温度と電圧値の関係 (SD No.0407)

このグラフはある 1 つのバッテリーの 2008 年 8 月 1 日から 2009 年 7 月 31 日までの 1 年間の放電開始から 10 時間後までのバッテリーの平均温度と放電開始 10 時間後の電圧値との関係を表したグラフである。

この結果を二次曲線で近似したがほぼ直線になった。このことから温度とバッテリーの電圧値とはほぼ比例関係にあることがわかる。

次に温度補正方法を説明する。

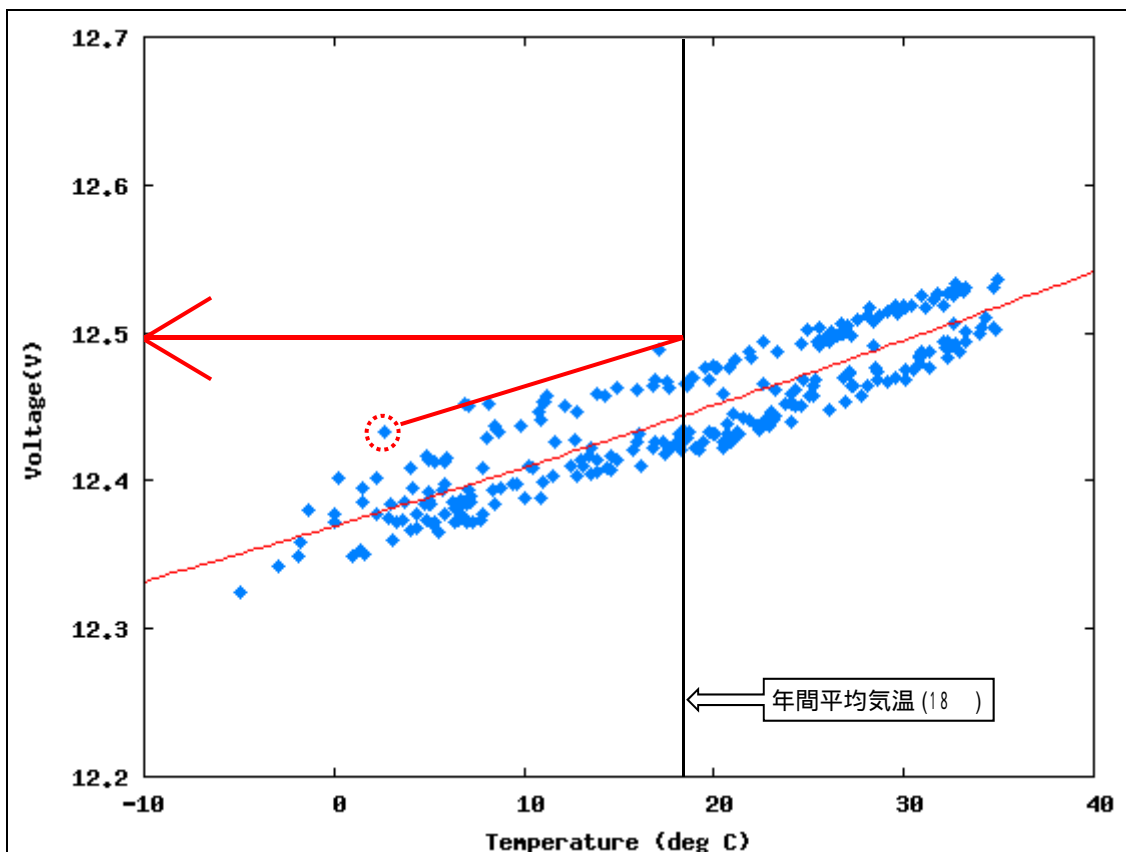


図 3-4 温度補正方法の説明図

図 3-4 の赤い二次曲線 $y = ax^2 + bx + c$ (a, b, c は各 SD によって異なる) を用いて、各データ点と同じ温度での二次曲線上の電圧値と実際の電圧値の差を出して、年間平均気温である 18 のときの二次曲線上の電圧値との差分を出せば、全てのデータ点において 18 に補正した結果を算出することができ、式で書くとこのようになる。

$$V_{revision} = (18^2 a + 18b + c) - \{(at^2 + bt + c) - V\}$$

- $V_{revision}$: 補正後の電圧値
- V : 補正前の電圧値
- t : バッテリー温度

3-2-2 温度補正後の結果

正常なバッテリーの例 (SD No.0407)

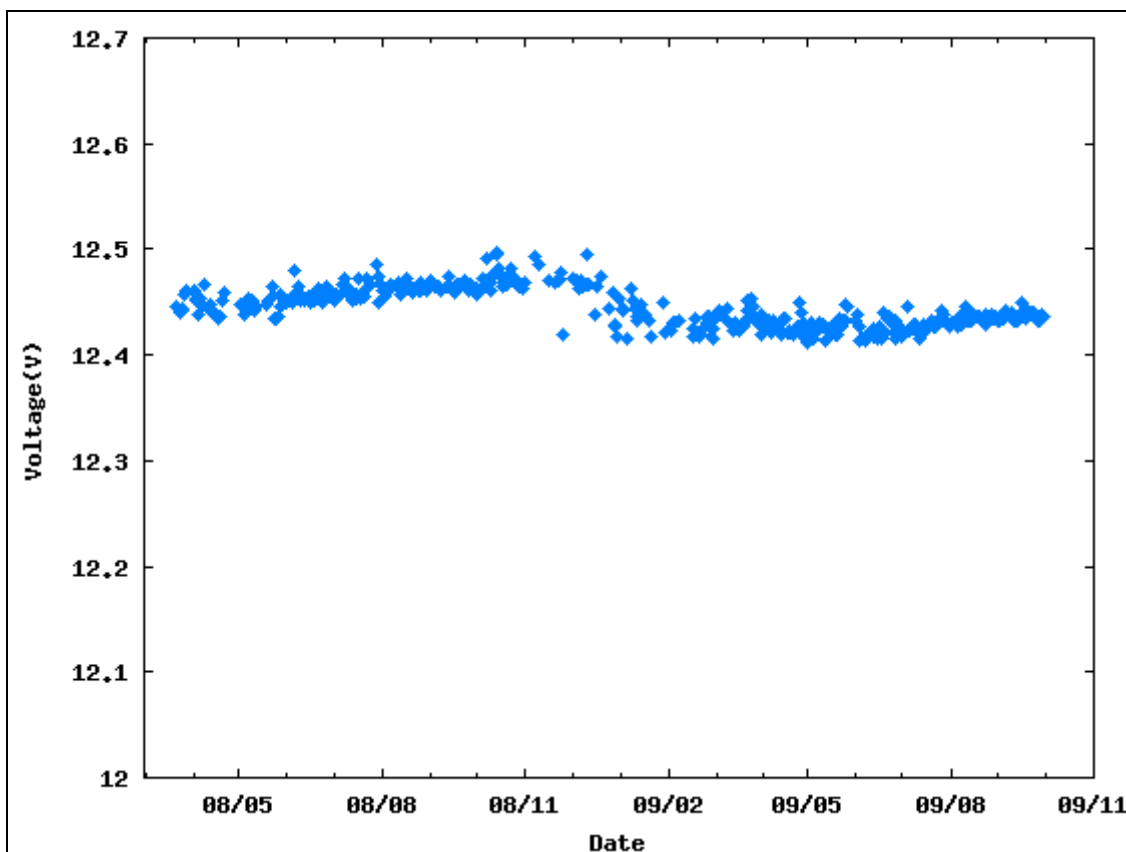


図 3-5 温度補正をかけた電圧値の推移 (正常なバッテリーの例)

先ほど説明した方法で全データを同じ温度条件 (18) にした結果、この SD のバッテリーに関してはこれまでに大きな劣化というのは見られなかった。ただ冬を迎える前と後では約 0.05V ほど低下しているのがわかる。

大きな劣化が見られていない大半のバッテリーはこのような結果であり、これまでの 2 年間弱で劣化の兆候はなかった。

温度補正には 1 年間分の温度と電圧値の関係の図を用いたが、図 3-3 からわかるようにその 1 年間の測定の間にもバッテリーの劣化により電圧値が低下しているため、この解析で行なった温度補正には劣化による影響も含まれている。そのためこの解析から正確な補正結果を出すことはできないが、劣化の度合い、速さを検証することはできる。

劣化が見られるバッテリーの例 (SD No.1025)

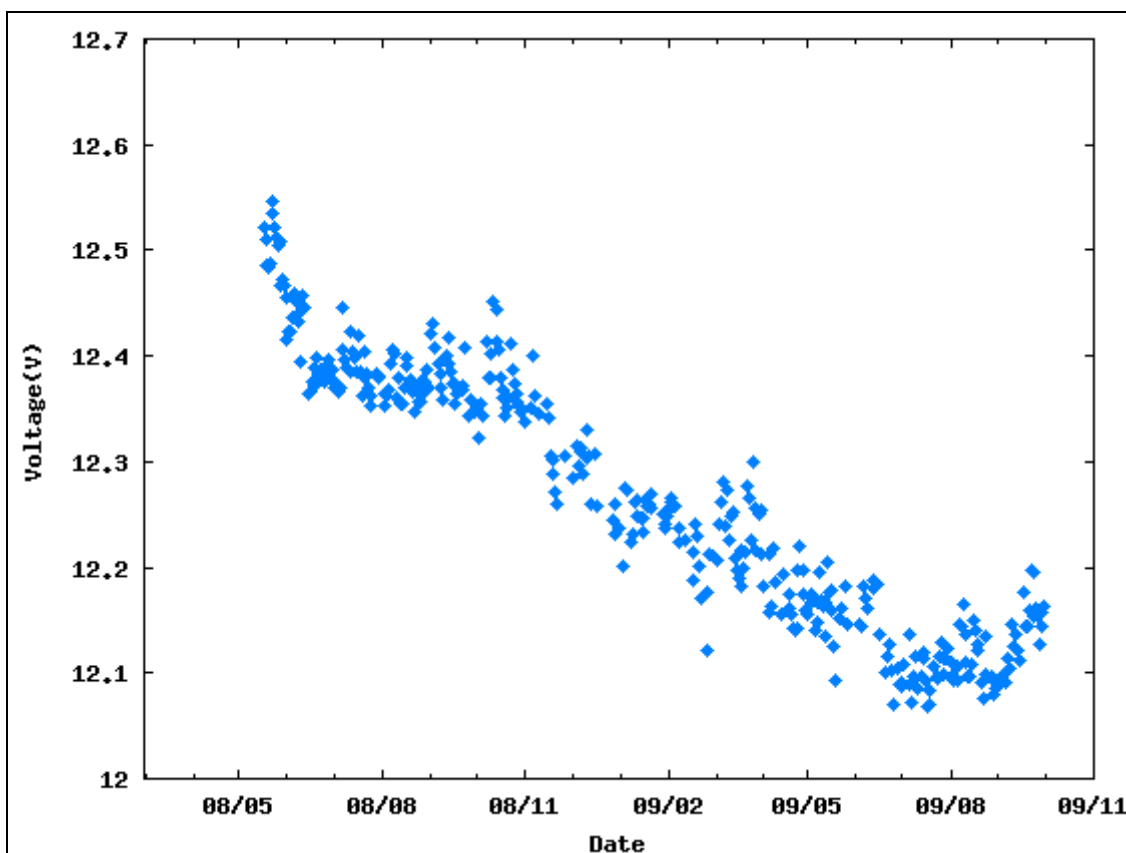


図 3-6 温度補正をかけた電圧値の推移 (劣化が見られるバッテリーの例)

このバッテリーの電圧値は先ほどのバッテリーに比べて大きく低下している。測定を開始してから今までで約 0.5V も電圧値が低下している。このようなバッテリーに関しては他のバッテリーに比べて寿命が近いと考えられるため注意して監視していく必要がある。

今回の解析ではSDのデータの更新が遅れていたため2009年9月分までしかなかったが、SDのデータは不定期ではあるが1~2カ月に1回更新され、そのたびにこの解析を行っている。そしてこの解析によってバッテリーの電圧値の変動を実測データ、温度補正をかけた結果の両方から検証することができるため、データ更新のたびにバッテリーの電圧値の動きを見て、電圧値に大きな変動があった際にはこの解析結果から電圧値の変動を知ることができる。

3-3 月別の電圧値の推移

3-1の結果から冬場の寒い時期に電圧値が最も低くなり、バッテリーを交換する目安の電圧である11.8Vを下回るのは間違いなく冬に差し掛かる時であるということがわかった。

そのためここからは現時点でわかっている電圧値データを用いて次の冬のバッテリー電圧値を予測し、バッテリーが11.8Vを下回ることなく冬を越すことができるかということを検証した結果を表示する。

次の冬の電圧値を予測するにあたり、今回は先ほどとはデータ選定の方法が違い、1日のうちで最も電圧値が低くなる放電終了時の電圧値を毎日選択し、それを月ごとに表示した。さらにそれぞれの月ごとでの標準偏差も出した。その結果を図3-7、図3-8に表示する。

正常なバッテリーの例 (SD No.0407)

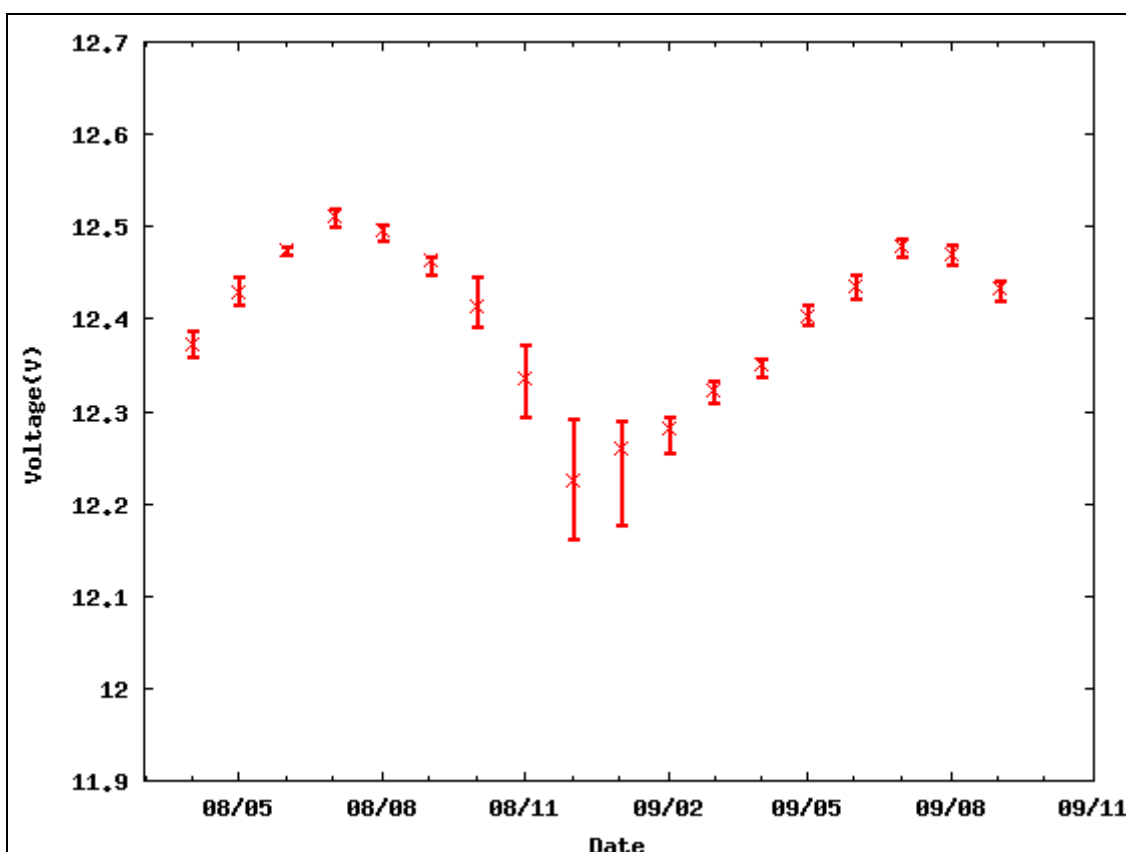


図 3-7 月別の電圧値の推移 (正常なバッテリーの例)

このグラフを見ると夏季に比べて冬季のほうが電圧値のばらつきが大きいというのが明確にわかる。その原因は先ほども述べたが、日が短い冬場は満充電されないまま放電に切り替わるときがあり、満充電から放電されるときに比べて電圧値が低くなってしまいう日があるためである。さらにどのSDのバッテリーを見ても12月の電圧値が一番低いため次の冬の電圧値を予測というのは次の12月の電圧値の予測を行なうことにする。

劣化が見られるバッテリーの例 (SD No.1025)

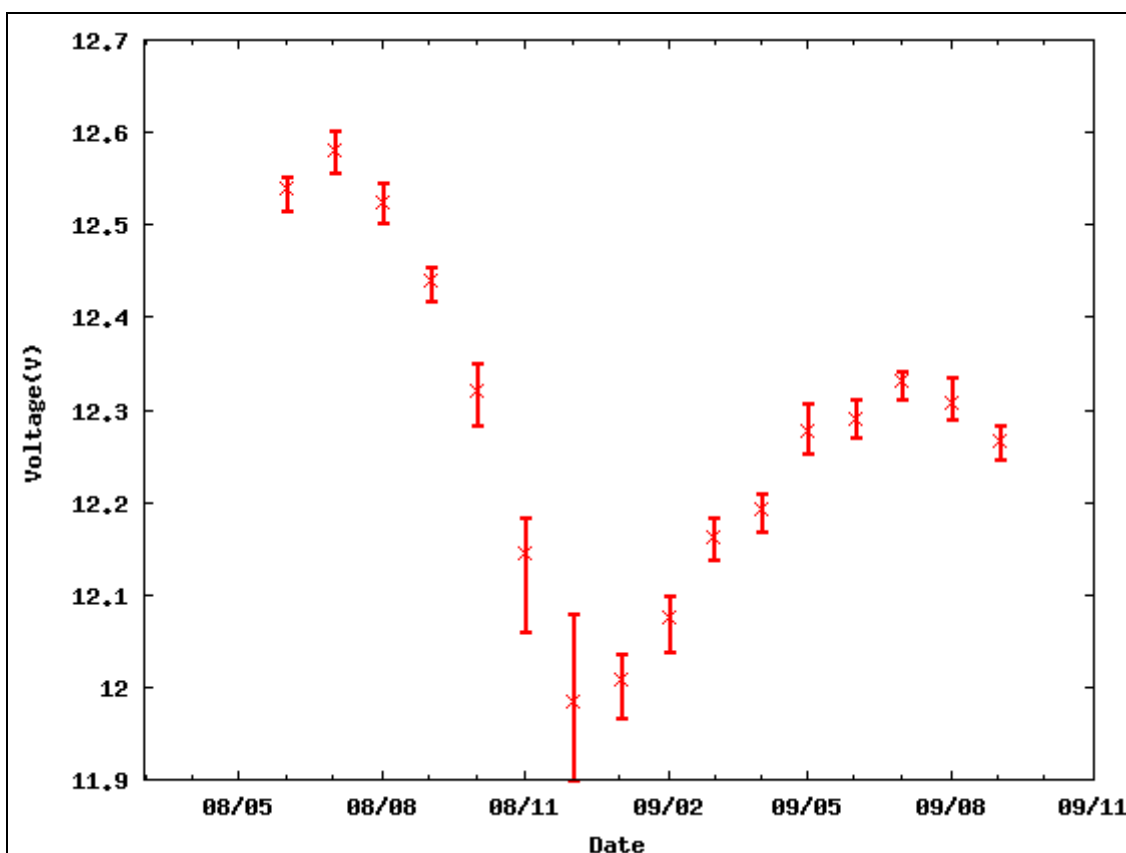


図 3-8 月別の電圧値の推移 (劣化が見られるバッテリーの例)

図 3-6 のグラフと比べて 2008 年の夏から冬にかけて低下する電圧値の幅が大きく 2008 年の夏と 2009 年の夏の電圧値の差も大きい。

これらの結果の 7 月～12 月の電圧値データを用いて次の 12 月 (今回の解析では 2010 年 12 月) の電圧値を予測する。

3-4 翌12月の電圧値予測

正常なバッテリーの例 (SD No.0407)

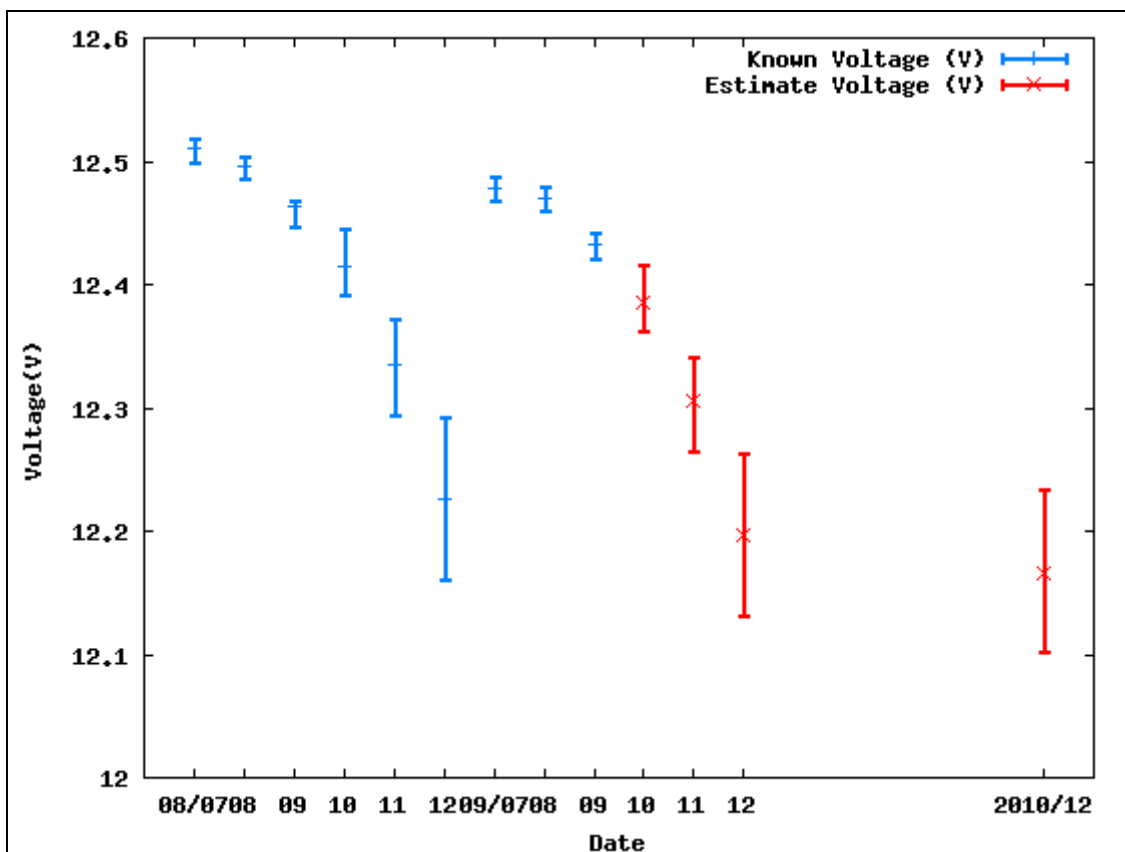


図 3-9 翌12月の電圧値予測 (正常なバッテリーの例)

図 3-9 は既に測定された電圧値から 2010 年 12 月の電圧値を予測した結果である。水色の部分が既に測定された電圧値で、赤い部分が既存のデータから予測された電圧値である。

このグラフでは 2010 年 12 月の電圧値データに注目し、この値が 11.8V を下回るようであればそれより前にバッテリーを交換する必要がある。

このバッテリーに関しては 2010 年 12 月の電圧値は 12.1V までしか下がらないためバッテリーを交換する必要はないと考えられる。

この解析からわかる 2010 年 12 月の結果に関しては予測であるため正確な結果ではないが、目安としてはバッテリーの交換時期を推測することができる。

劣化が見られるバッテリーの例 (SD No.1025)

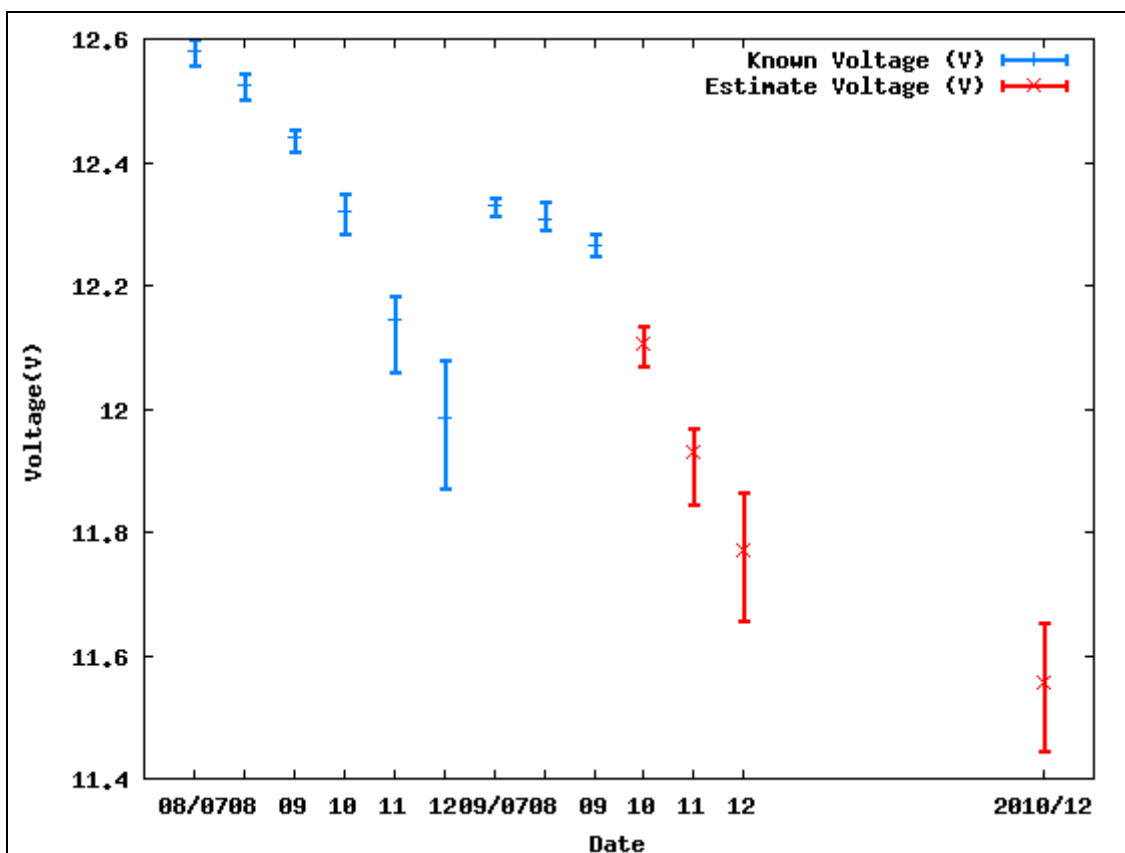


図 3-10 翌 12 月の電圧値予測 (劣化が見られるバッテリーの例)

この図は先ほどの図 3-9 とは縦軸の目盛が異なり、一番下が 11.4V となっている。このバッテリーは 2010 年 12 月には 11.45V にまで低下している。そのため 2010 年 12 月を迎える前にバッテリーを交換する必要があると考えられる。

ちなみにここで行なってきた電圧値の予測というのは既存の 1 年半分のデータを使用しており、各月で 1 年後の電圧値の低下の度合いを出し、その平均値を用いて 2010 年 12 月の電圧値を計算している。今回の場合は 2008 年の 7、8、9 月から 2009 年の 7、8、9 月まで低下している電圧の傾きを各月で出し、それを平均したものを 1 年間での電圧値の低下分と定義し、2008 年の 10、11、12 月からその分を引くことで 2009 年の 10、11、12 月の電圧値を予測し、さらに予測された 2009 年 12 月から直線的に低下すると仮定したうえで 2010 年 12 月の電圧値を予測した。この予測方法が正しいか否かは 2009 年 10 月～12 月の実際のデータと比較すればわかる。

3-5 予測された電圧値の場所別表示

3-4 で行なった電圧値の予測を現在稼働している全てのSDで行ない、それぞれのSDのバッテリーの2010年12月の予測した電圧値を場所別に色を変えて表示する。

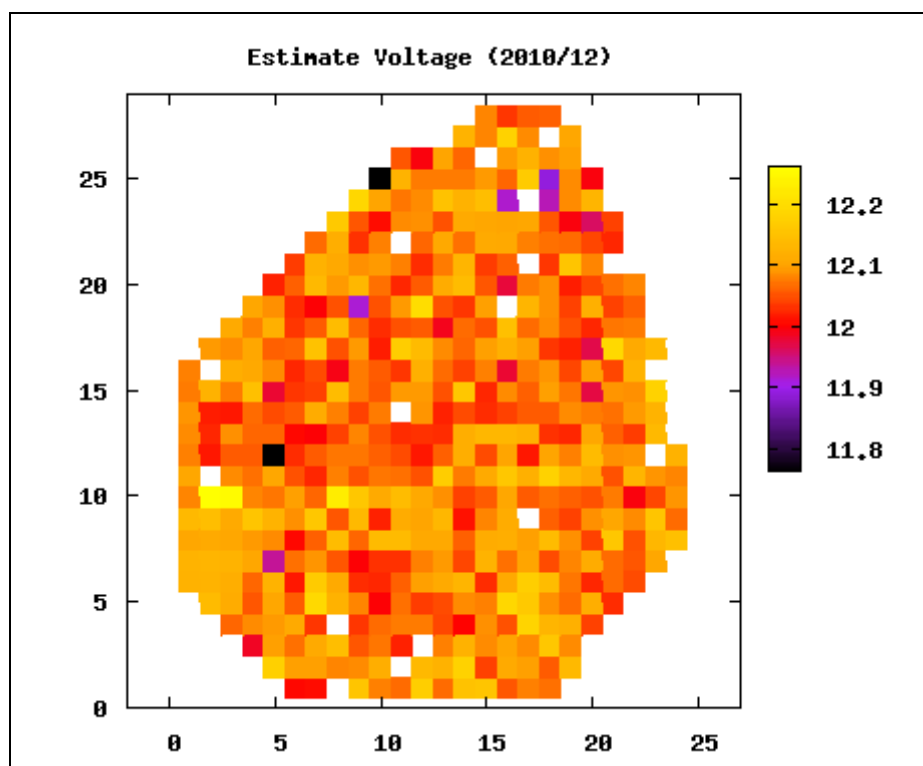


図 3-11 2010 年 12 月の場所別電圧値表示

表 3-1 図 3-11 の各 SD バッテリーの色と予測された電圧値

色	電圧値	備考
黄色	最大値	注意する必要はない
橙色	12.1V	
赤色	12.0V	
紫色	11.9V	危険度は低いですが注意して監視する必要がある
黒色	最小値	2010年の冬を迎える前に交換する必要がある

それぞれの色に関しては表 3-1 のように設定した。全体的に橙色(オレンジ色)の部分が多く、電圧値でいうと 12V~12.2V のものが多い。SD No.0512 と No.1025 のバッテリーは黒であるが、SD No.1025 は予測結果が約 11.44V と他に比べて極端に低いため最小値を SD No.0512 の約 11.76V として表示した。これらに関しては 2010 年 12 月には 11.8V を下回ると考えられるため、2010 年の冬を迎える前に交換する必要があると考えられる。

他には紫色の場所にある SD のバッテリーは 2010 年 12 月に 11.8V を下回る可能性が他に比べて高いため注意して監視する必要がある。

なお、白い点は既に過去にバッテリーの交換を行なっているために今までのデータから電圧値を予測することができなかったか、あるいは電圧値データに異常があり、電圧値の予測をすることができなかったものかのいずれかである。過去に行なったバッテリーの交換というのは劣化によるものではなく、バッテリーの充放電を制御するチャージコントローラーの故障によって過充電をしてしまい、バッテリーが故障したというのが原因である。

2010 年 12 月までに交換、注意が必要なバッテリーを 2010 年 12 月に電圧値が低くなる順番で並べたものと過去に交換歴のあるバッテリーおよびデータに異常のあるバッテリーを搭載している SD の SD Number を以下にまとめる。

表 3-2 交換、注意が必要なバッテリー

SD Number	電圧値 (V)
1025	11.44
0512	11.76
1825	11.89
0919	11.91
1624	11.91
1824	11.92
0507	11.93

表 3-3 交換歴、異常のあるバッテリー

交換歴あり		異常あり
0211	1526	0216
0801	1619	1203
0804	1709	1827
1102	1721	
1114	1724	
1122	2121	
1327	2312	
1428	2316	

第4章 結論

4-1 結論

4-1-1 バッテリー耐久実験

各バッテリーにおいて結果は異なり、バッテリーNo.1は充放電回数が2200回を越えた今でも劣化が見られず、バッテリーNo.2は1000、1370回目付近で急激に2Vの劣化をしており、バッテリーNo.3は640、680、920、950回目付近でバッテリーNo.2に比べると緩やかであるが2Vの劣化が見られた。これに関してはセルの破損が原因であるという結論が出た。

今回の実験で使用したバッテリーはセルの破損による劣化が見られたため、2V単位で急激に下がる。

しかし、それがいつ起こるかというのは不定期であるため全く予想がつかない。それぞれのバッテリーで2Vの劣化が始まる時期、2V劣化の際の劣化速さなどに大きな個体差がある。

セルの破損が起きると間違いなく必要電圧である11.5Vを下回ってしまうため目安としてSDのバッテリーは電圧値が11.8Vを下回ったら交換するようにする。

4-1-2 バッテリー温度特性実験

電圧値が約11.8V～12.3Vの間では電圧値と電力量との間にはほぼ比例関係にあるが、約11.8V以下においては傾きが小さくなった。さらにバッテリーの外部温度が20の場合と-20の場合とではバッテリーができる仕事量が半分にまで低下してしまう。

充放電回数の増加による取り出せる電力量の変化に関しては、たとえ電圧値が下がらずに稼働し続けていても、電力量は低下し続けていることがわかった。

取り出せる電力量は温度の低下に伴って小さくなり、20の時に比べて-20の時はできる仕事量が半分にもなってしまう。

電圧値の低下度合いも温度の低下に伴って大きくなる。

長期間実験をしていく中で、たとえ電圧値が変わらなくても、電力量は回を追うごとに減少していく。

4-1-3 SD に搭載されているバッテリーの解析結果

電圧値の推移を表示した結果、電圧値と温度との間には相関が顕著に読み取れ、夏は電圧値が高く、冬は低くなった。そして最も電圧値の下がるのが1年のうちで12月であることがわかったため、翌12月の電圧値予測をした結果、全SDのバッテリーのうち、2010年12月までに交換する必要があると考えられるバッテリーが2つあったため、そのバッテリーに関しては冬を迎える前に交換する必要があることがわかった。

SD に搭載されているバッテリーは研究室のバッテリーとは異なり、年間で外部気温が約 50～60 も変化するため電圧値も季節によって大きく変化する。

そのため冬場、特に12月に最も電圧値が下がるため、12月の電圧値が11.8Vを下回る前にバッテリーを交換する必要がある。

2010年12月の時点で11.8Vを下回ることが考えられるバッテリーが2つあるため、そのバッテリーに関しては今年の冬を迎える前に交換する必要がある。

4-2 今後の課題

4-2-1 本研究室のバッテリー実験

バッテリーNo.1は未だに劣化が見られないが、バッテリーNo.2、No.3で2Vのセル単位で急激に劣化することやバッテリーによって個体差があることがわかり、8回の温度特性実験によってバッテリーの外部温度による影響もわかった。

4-2-2 SDに搭載されているバッテリーの解析

2010年12月までに交換すべきバッテリーは2つあったが、その次の12月になるとさらにいくつかのバッテリーを交換しなくてはならないと考えられる。そのため今後も毎年次の12月の電圧値を予測してバッテリーの交換を検討、提案していく。

さらにここで行ってきた電圧値の予測というのは1年半分のデータで行なっているため3年目に電圧値がどのように動くかということが不確定であった。そのため今回は電圧値の低下は直線的だと仮定して3年目の電圧値の予測をしたが、実際には直線的に劣化するとは限らない。そのため3年目のデータが出たら、翌12月(2011年12月)の電圧値を予測する解析をし直して、さらに精度の高い解析をすることで今回の結果以上に正確にバッテリーの電圧値を予測することができることが考えられるため、それによってよりの確にバッテリーの交換時期を指摘することが今後の課題となってくる。

参考文献

- | | |
|----------------------------|-------|
| [1] バッテリー耐久試験システム | 大石 泰也 |
| [2] バッテリーの温度特性および耐久試験 | 小林 雅史 |
| [3] バッテリーの温度特性および耐久試験用システム | 露口 勇輔 |
| [4] バッテリーの温度特性および耐久試験(2) | 望月 靖仁 |
| [5] バッテリーの温度特性および経年変化 | 矢口 貴紀 |

謝辞

担当教員である本田建教授をはじめ多くの方々の御世話になり、御協力頂いた多くの方にこの場を借りて感謝の意を示させていただきます。

本田建教授、富田孝幸さん、鵜飼久さん、相田龍太さん、西盛裕平さん、奥大介さん、柴田文哉さん、丸尾将寛さん、池田誠さん、新聞健司さん、末木聖さん、李万鵬さん

皆様の御指導や御協力が無ければ本論文の完成はありませんでした。深く感謝しております。ありがとうございました。