

2010 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寿命推定

指導教員

本田 建 教授

2011 年 3 月

山梨大学 工学部  
機械システム工学科

T07MI004 池田 誠

# 目次

## 第1章 諸論

1-1 宇宙線	1
1-2 超高エネルギー宇宙線	2
1-3 宇宙線望遠鏡実験	3
1-4 地表検出器 (SD)	6
1-5 研究目的	13

## 第2章 SD バッテリーの解析

2-1 SD のモニターデータ	14
2-2 1日のバッテリーの電圧値の推移	15
2-3 夏季と冬季のバッテリー電圧値の推移	16
2-4 電圧値と温度の相関	17
2-5 2010年冬季の推定電圧値と評価	21
2-5-1 推定方法	21
2-5-2 バッテリー推定電圧値の例	23
2-5-3 SD 全台の推定電圧値とその評価	24
2-6 2011年冬季の電圧値推定	27
2-6-1 推定法	27
2-6-2 閾値の決定	28
2-6-3 推定電圧値の例	29
2-6-4 推定された電圧値の場所別表示	30

## 第3章 結論

3-1 結論	34
3-2 今後の課題	37

参考文献	38
------	----

謝辞	39
----	----

## 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(電子・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  $10^9\text{eV}$  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、 $10^{19}\text{eV}$  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。

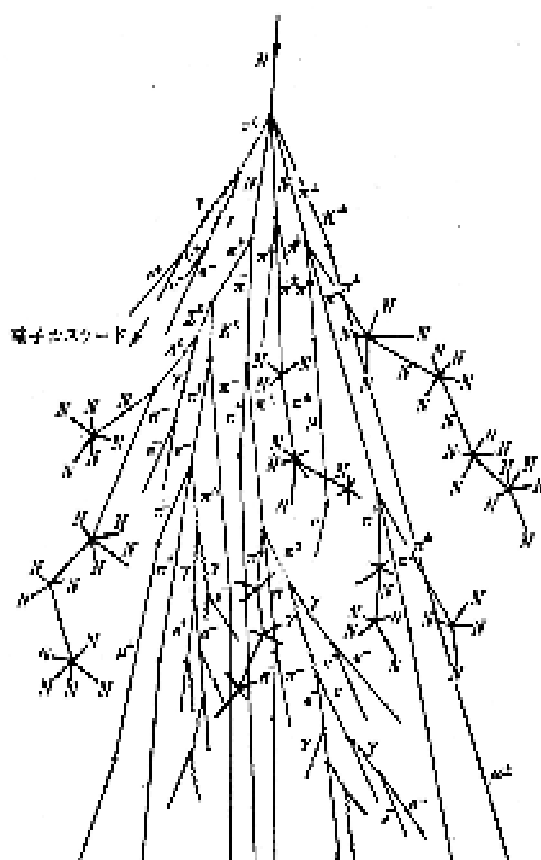


図1-1 空気シャワーの様子

## 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  $10^{20}\text{eV}$ (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。

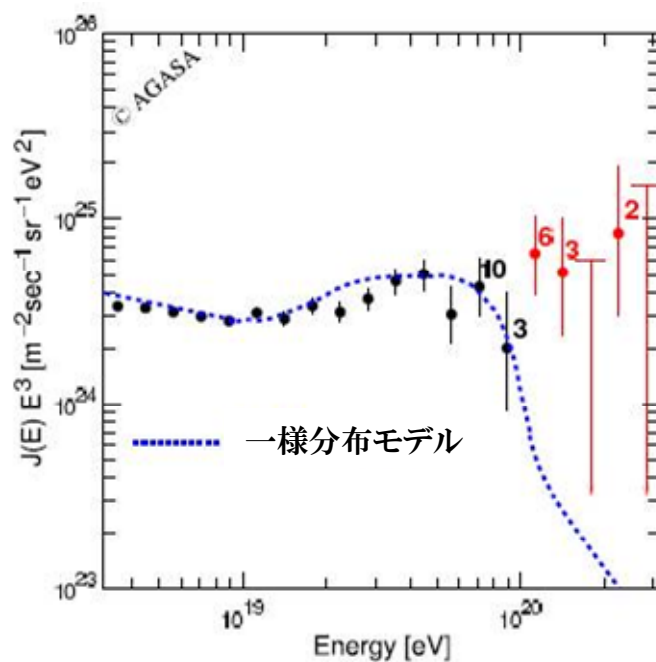


図 1-2 AGASA で観測された超高エネルギー宇宙線のエネルギー分布  
(青線が理論予想、赤点が理論予想を超える領域のデータを示す)

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、 $10^{20}\text{eV}$  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 11 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しようとするものである。

図 1-3 のように地面に置いた地表検出器(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る暗夜のみ可能で、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、地表検出器(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。

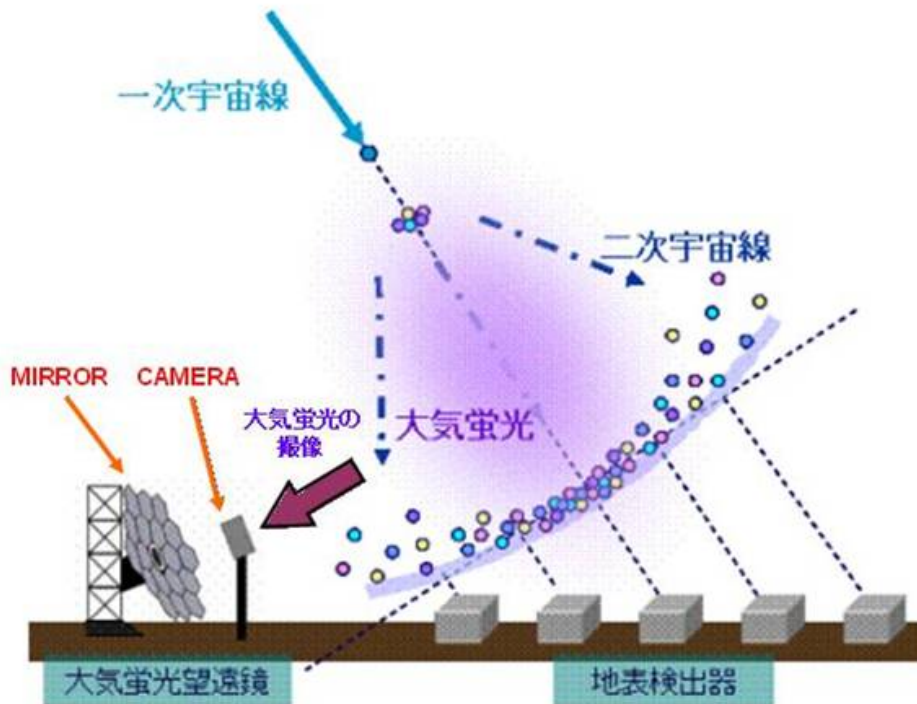


図 1-3 大気蛍光望遠鏡(FD)と地表検出器(SD)

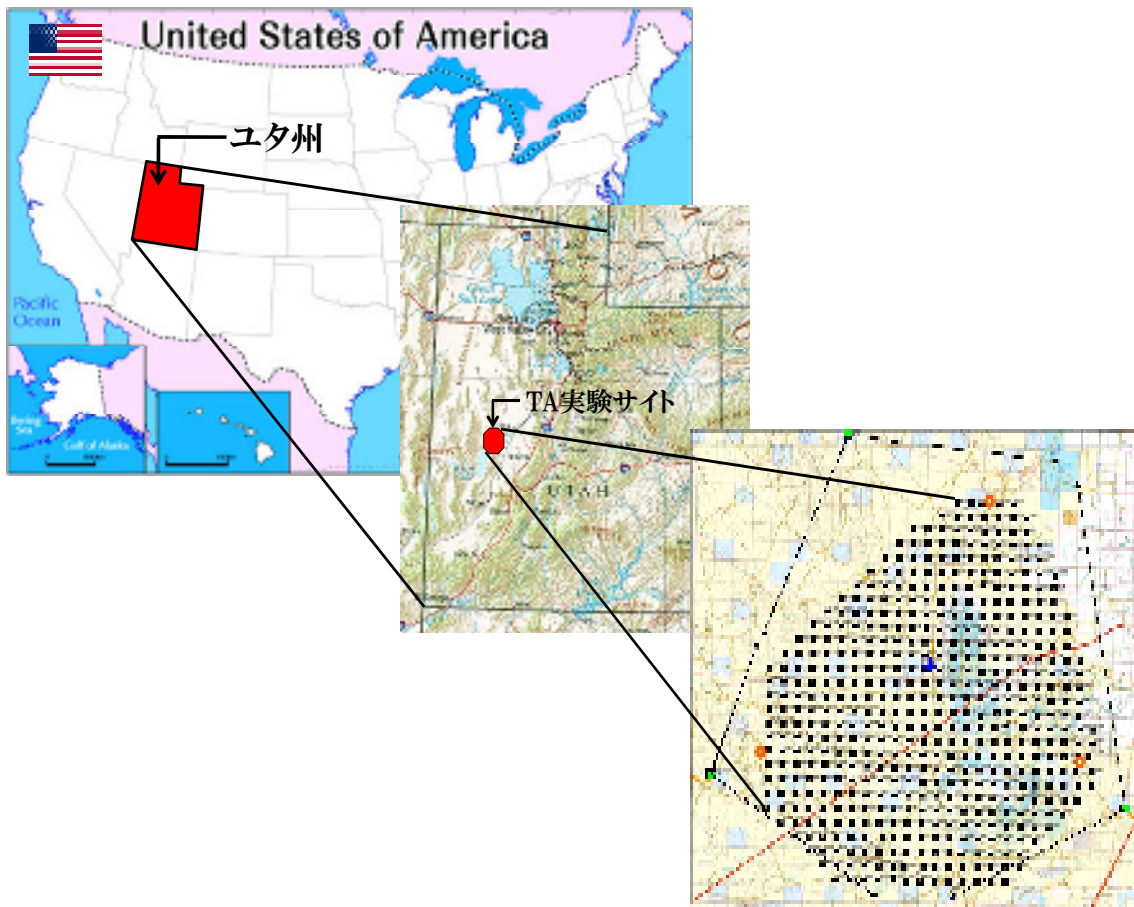


図 1-4 TA 実験サイトの位置

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。

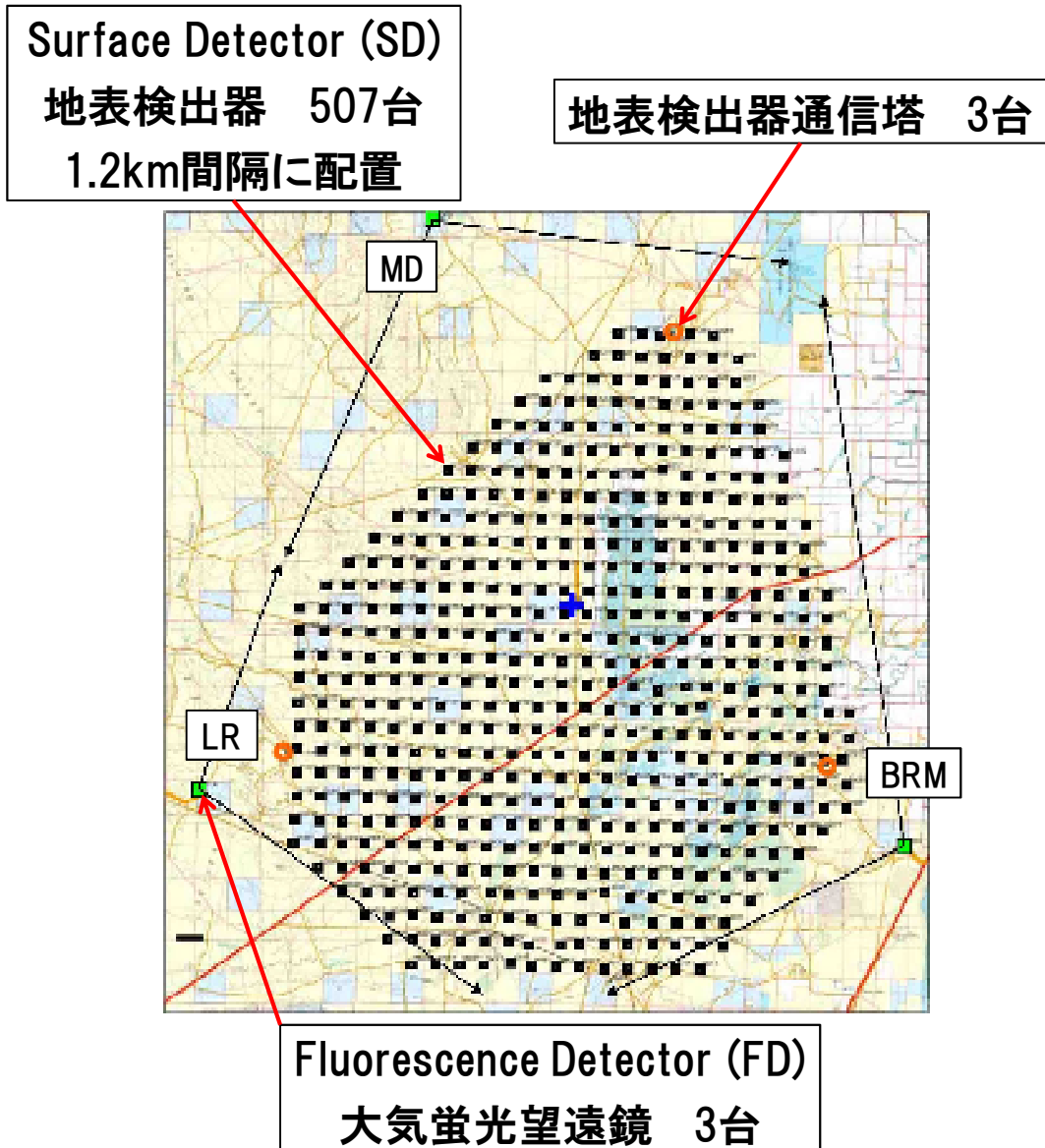


図 1-5 TA 実験サイトの配置図

図 1-5 に多数見られる黒色の四角形は、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からなる地表検出器(SD)で、約 680km<sup>2</sup>の地表に 1.2km 間隔で現在は 507 台が基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 地表検出器 (SD)

SD の構造、仕組みについて述べる。

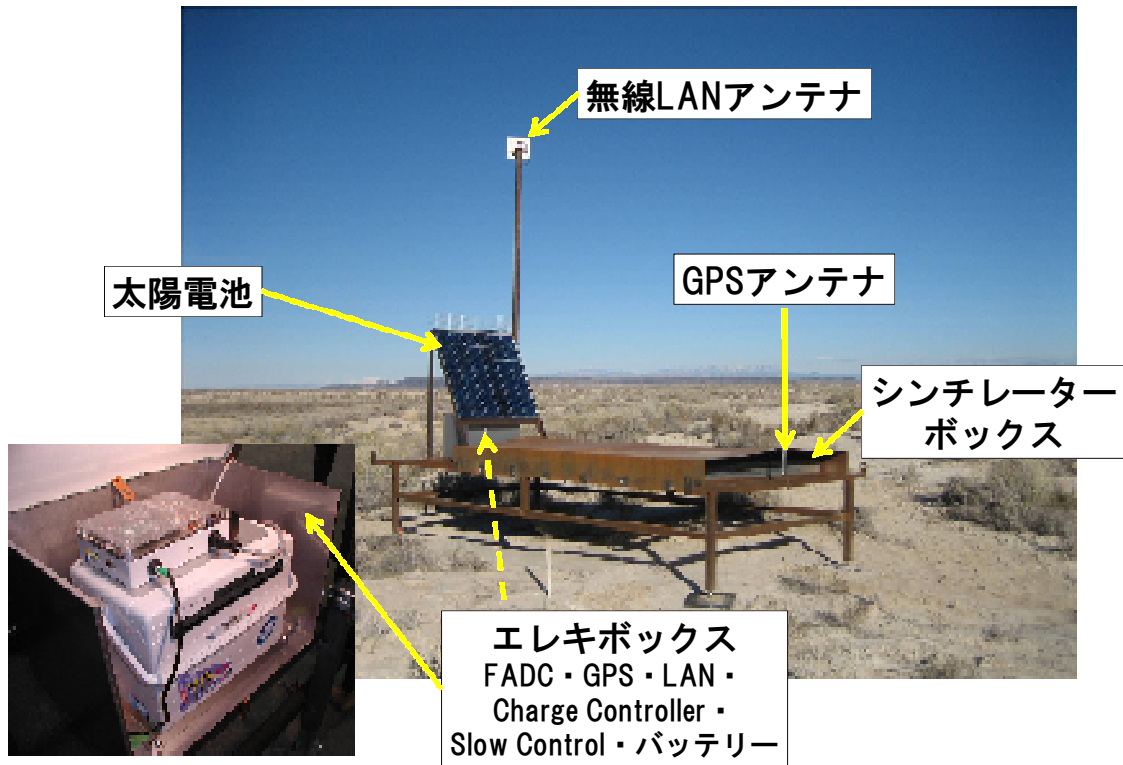


図 1-6 地表検出器外観

図 1-6 は TA 実験で実際に使われている SD の外観である。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、230×170×10 [cm<sup>3</sup>]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。

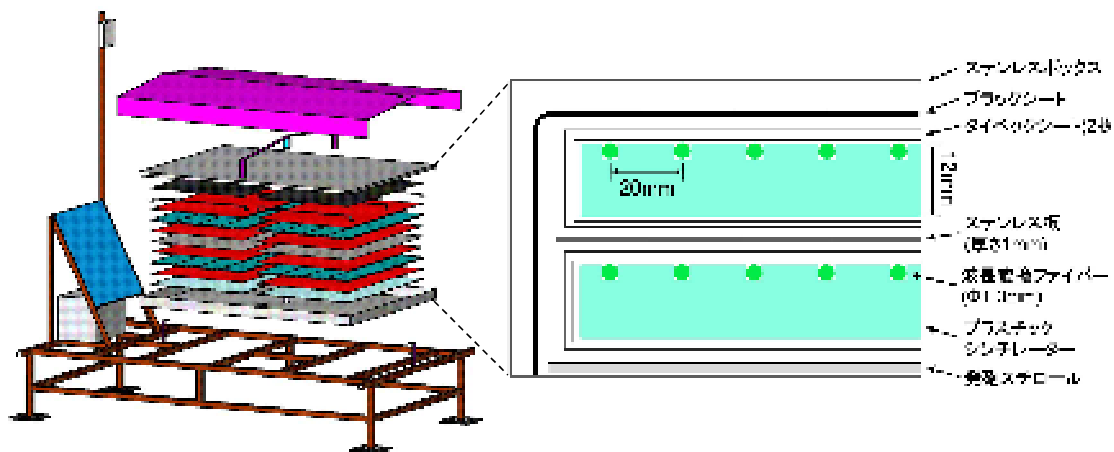


図 1-7 シンチレーターボックスの内部構造

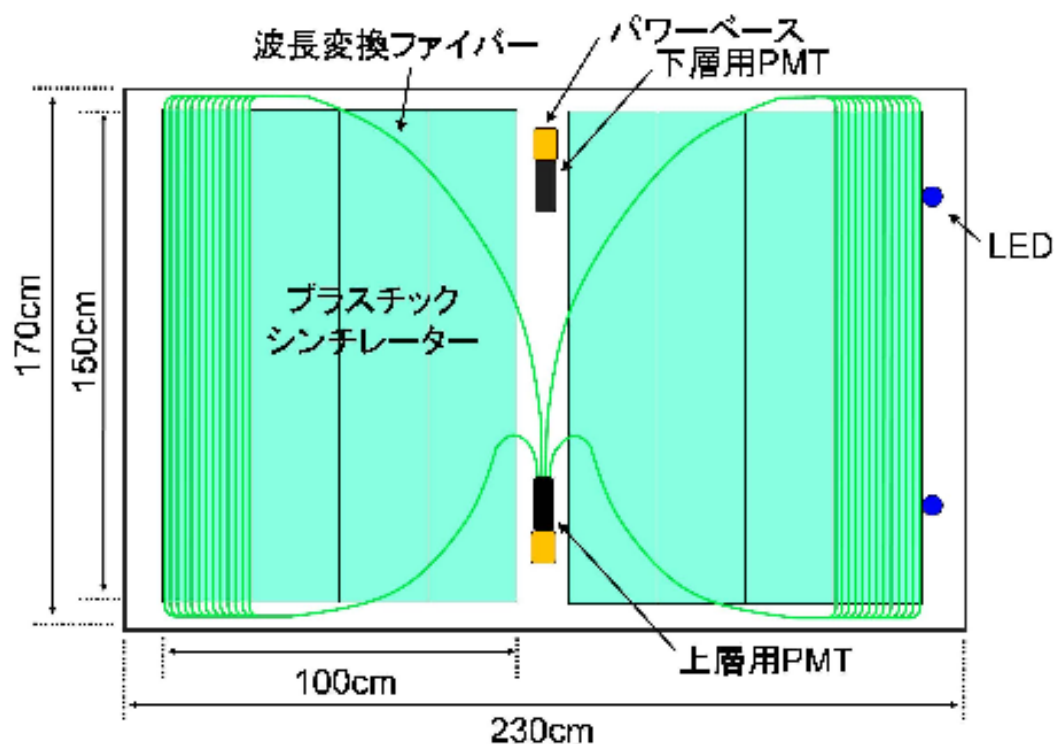


図 1-8 プラスチックシンチレーターの平面図

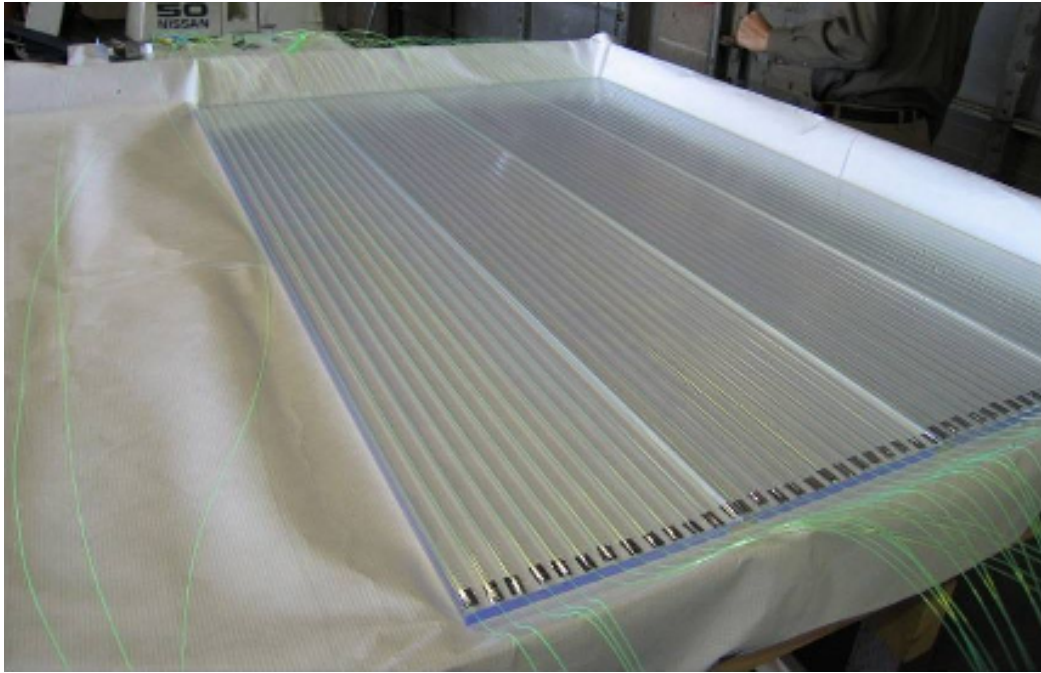


図 1-9 使用したプラスチックシンチレーターの写真

図 1-7 はシンチレーターボックスの内部を示した図であり、図 1-8 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 1-8 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 1-9 に示す。

#### SD が宇宙線を観測する工程

- ① 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。
- ② ①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。
- ③ ②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。
- ④ ③によって得られた電気信号を Digital 化して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

- ① エネルギー源は太陽なので無限に存在する。
- ② 実験地は国立公園内にあり、環境が良い。
- ③ 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。
- ④ 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。

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 1-10 が SD に搭載しているバッテリーである。表 1-1 にこのバッテリーの仕様を示す。



図 1-10 SD に搭載しているバッテリー

表 1-1 バッテリー仕様

メーカー	DYNASTY 社
型式	DCS-100L
電解物	希硫酸 (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )
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、

$$12 \text{ (V)} \times 1 \text{ (A)} = 12 \text{ (W)}$$

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。

SD の各装置における消費電力を表 1-2 に示す。

表 1-2 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。

## 1-5 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で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、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。

現在、バッテリー電圧、クーラーボックス内の温度が 10 分毎に SD モニターデータの中に記録されている。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を推定することで各 SD バッテリーの交換時期について検討した。

### 研究目的

全 SD バッテリーの今後の電圧値を推定し、バッテリーの交換台数、時期を検討することである。

### 研究のプロセス

SD に搭載されているバッテリーのモニターデータの解析

- ① 全 SD のバッテリーについて、1 日の最低電圧とクーラーボックス内の温度をモニターデータから抽出する。
- ② バッテリーの電圧値と温度の関係を明らかにする。
- ③ 2008 年、2009 年のデータから 2010 年の電圧値を推定し、2010 年の実際得られたデータと比較して、推定方法を評価する。
- ④ 2011 年の電圧値を推定し、交換が必要な SD を明らかにする。

## 第2章 SD バッテリーの解析

### 2-1 SD のモニターデータ

SD が取得するデータは空気シャワーイベントのデータだけでなく、稼働に必要なバッテリーやソーラーパネルの電圧値や温度、適切なデータ収集のために必要なシグナルや GPS のデータをモニターデータとして取得している。このモニターデータは 1 分毎のデータと 10 分毎のデータの 2 つがある。

この論文では 10 分毎のモニターデータを取り扱っている。

10 分毎の各種温度・湿度のデータは、10 分毎のバッテリーの充電電圧・電流と 10 分毎のソーラーパネルの充電電圧のデータと同期されている。

表 2-1 モニターデータのフォーマット

年月日	時分秒	SD Number	以降 各種値
090101	000000	1301	
090101	000000	1302	
：	：	：	
：	：	：	
090101	000000	2412	
090101	001000	1301	
090101	001000	1302	
：	：	：	
：	：	：	
090101	235000	2412	
090102	000000	1301	

各種値はシンチレータボックス温度、エレクトロニクス温度、バッテリー温度、チャージコントローラー温度、シンチレータボックス湿度、バッテリー電圧、バッテリー電流、ソーラーパネル電圧である。

それぞれの値はスペースで区切られている。



## 2-2 1日のバッテリーの電圧値の推移

例として、ある1台のSDバッテリーの2008年7月1日の電圧値の推移を図2-1に示す。図2-1は横軸に時間(UT)、縦軸にバッテリー電圧を表している。現地のLocal Time(MST)の冬時間(12~2月)はUTから7時間遅らせたもので、夏時間(3~11月)では6時間遅らせたものになる。図2-1では、7月のデータを使用しているため、UT12:00はMST6:00、UT0:00はMST18:00となる。

SDバッテリーは1日のうち、太陽が隠れている時間帯はソーラーパネルによる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ている。そのため、1日に1回の充放電を行っている。

図2-1の①は充電開始を、②は充電終了を示しており、②で充電から放電に切り替わる。そして、③で放電開始となり放電時間が経つにつれて電圧値は低下していき、④で放電終了となる。図2-1からわかるように1日のうちで最も電圧値が低くなるのは、④の放電終了時である。

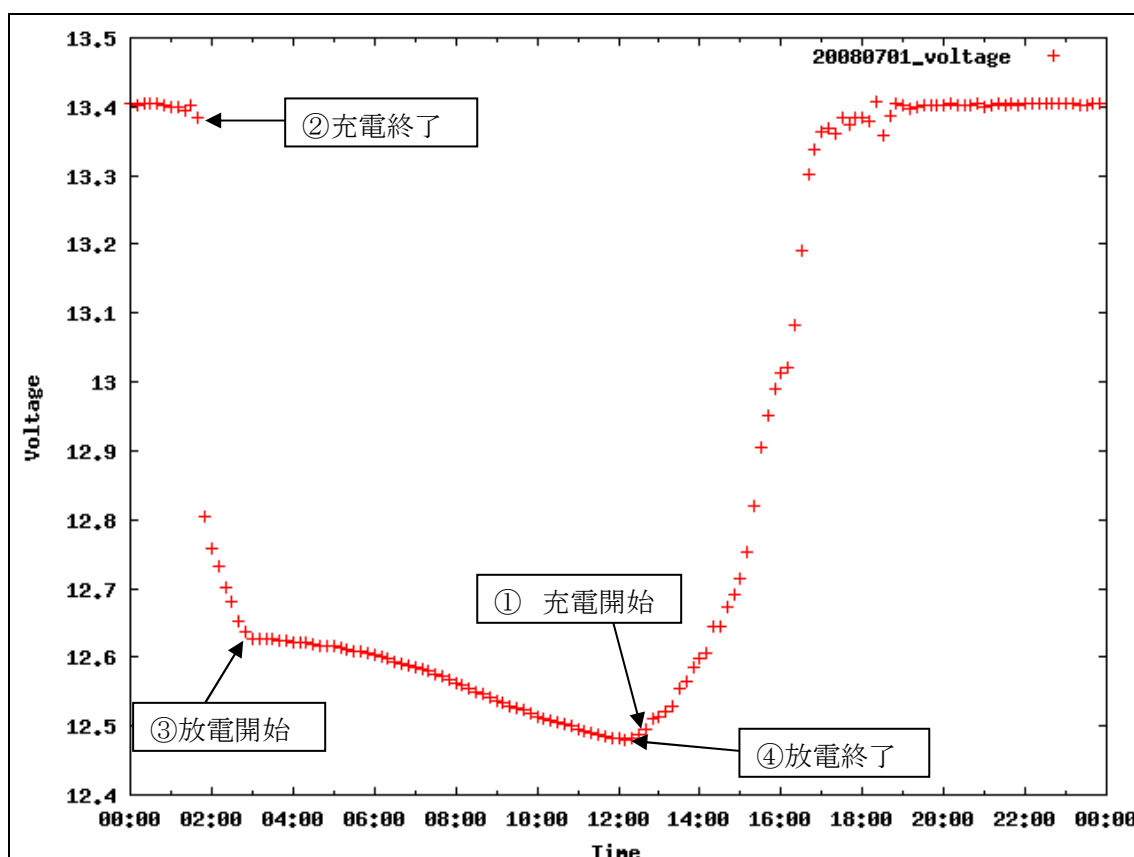


図 2-1 ある1日の電圧値の推移(No.0106)

### 2-3 夏季と冬季のバッテリー電圧値の推移

図 2-2 に夏季と冬季のある 1 台のバッテリー電圧値の推移を示す。赤線は 7 月の放電終了電圧値を毎日取りだしたものの、青線は 1 月の放電終了電圧値を毎日取りだしたものを表している。

バッテリーの放電時間は太陽が出ていない時間帯に行われるため、季節によって変動する。冬季は太陽が出ている時間が短く、十分な充電ができないまま放電に切り替わる日がある。また、冬季は気温の低下に伴いバッテリー温度も低下し電力量の低下が起こるため、図 2-2 のように冬季は夏季に比べて電圧値が低下しているのがわかる。つまり、1 年間のうち最も電圧が低下するのは冬季の放電終了電圧である。

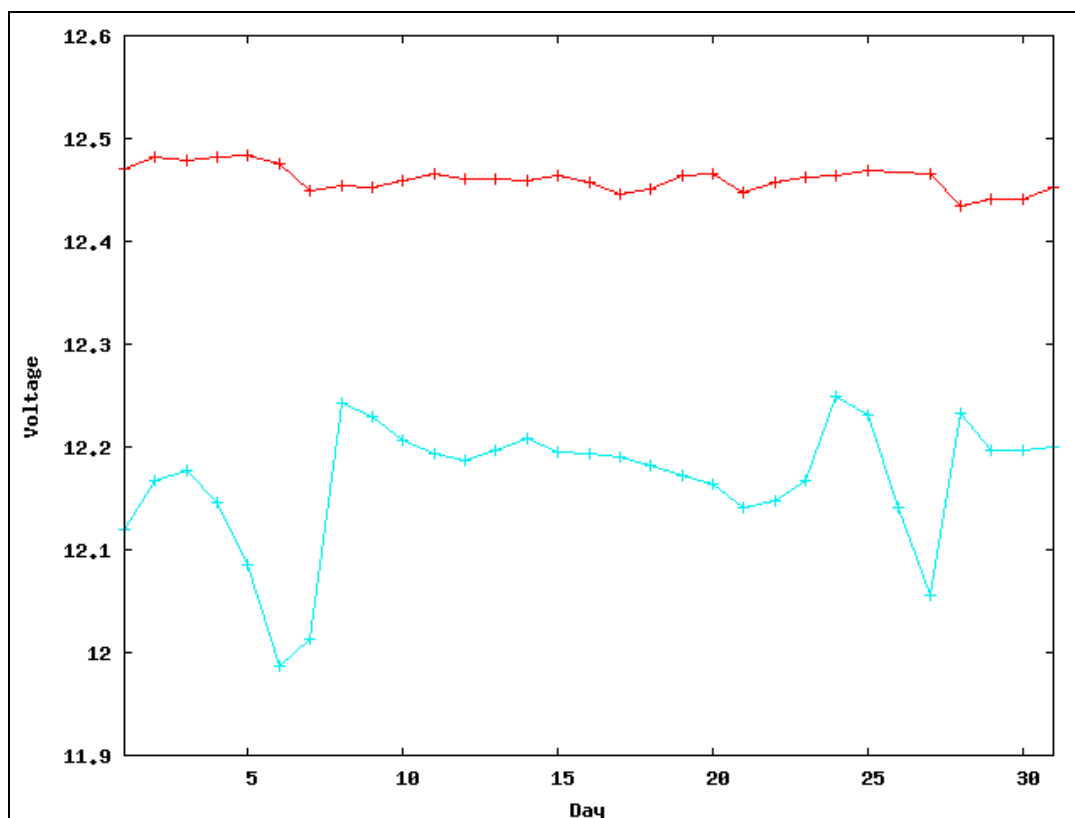


図 2-2 夏季と冬季の電圧値推移( No.0520)

## 2-4 電圧値と温度の相関

毎日のバッテリーの放電終了電圧とその時のバッテリー温度(正確にはクーラーボックス内の温度)が、どのような関係にあるのかを図 2-3 を用いて説明する。

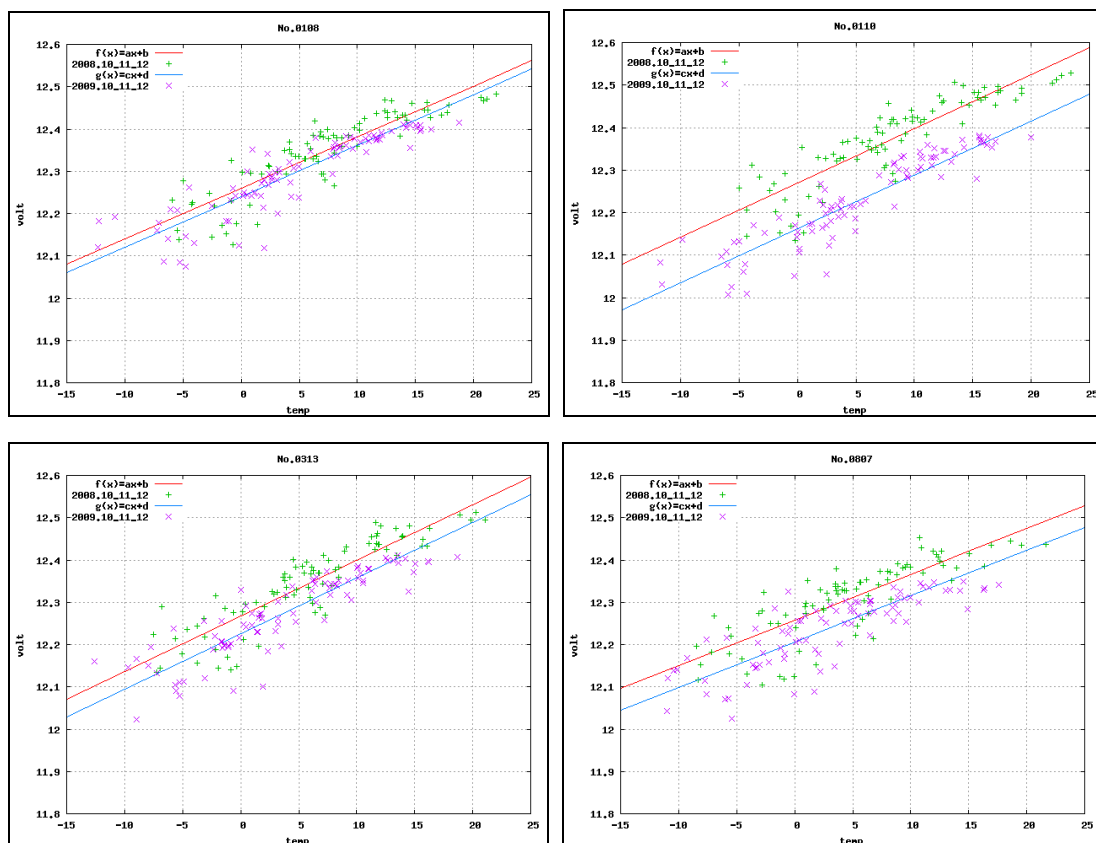


図 2-3 電圧と温度の相関(左上:No.0108 右上:No.0110 左下:No.0313 右下:No.0807)

この図の緑のデータ点は、2008年10月～12月の毎日の放電終了電圧とその時のバッテリー温度である。一方、紫のデータ点は2009年10月～12月の毎日の放電終了電圧とその時のバッテリー温度である。赤い線は緑のデータ点に対して最小二乗法を用いて求めた回帰直線であり、青い線は赤い線の傾きをそのまま使用し、切片は紫のデータ点に対して最小二乗法を用いて求めた値を使用している。

この赤と青の2線を見てわかるように電圧と温度には、相関がみられ比例関係にあるといえる。また、2線は傾きを同じにしているため切片の差をみることで1年での劣化がわかる。図 2-3 (左上) の No.0108 では2008年と2009年の差は約 0.03V で、この SD については1年で約 0.03V の劣化があった。同様にして右上の No.0110 は約 0.1V、左下の No.0313

は約 0.05V、右下の No.0807 は約 0.06V の劣化があったといえる。

図 2-4 に 2008 年から 2009 年での 1 年での劣化を SD480 台のヒストグラムで示す。横軸は 1 年で劣化した電圧値、縦軸は台数である。

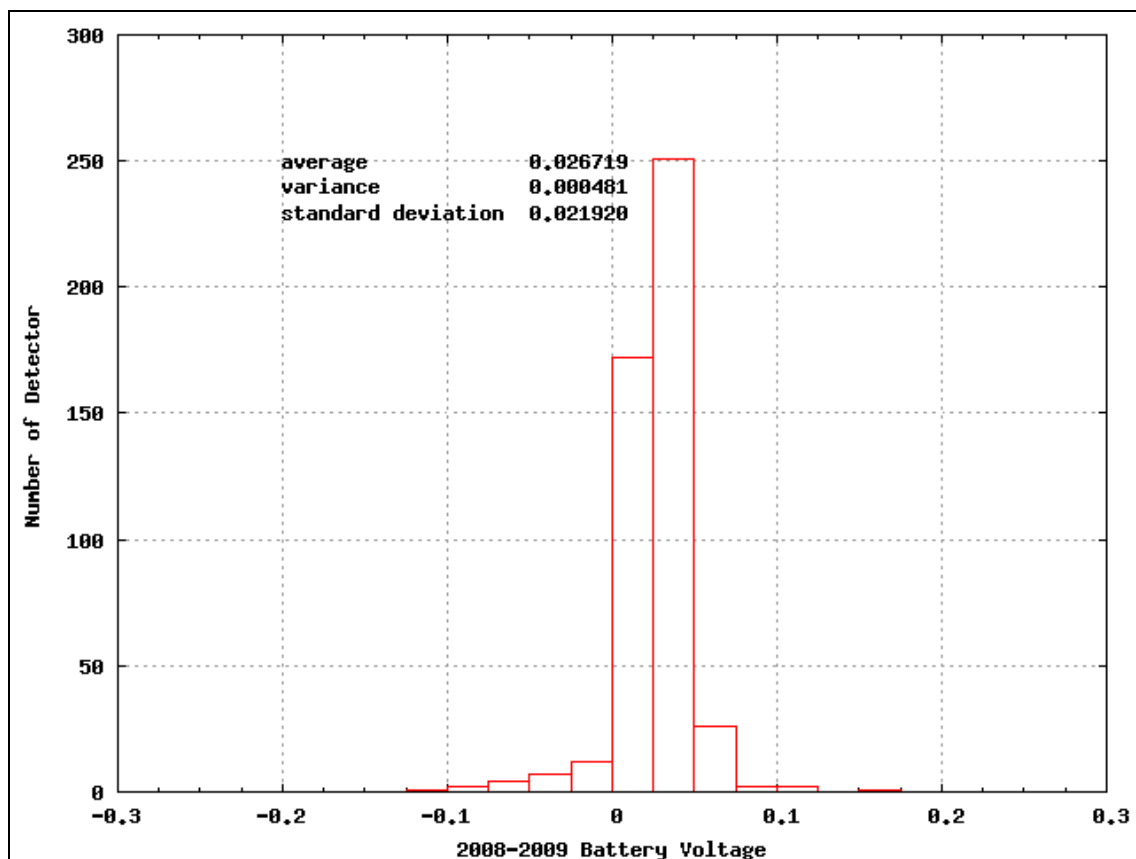


図 2-4 2008 年から 2009 年での劣化

図 2-4 より SD480 台の 2008 年から 2009 年の 1 年でのバッテリー劣化は平均 0.026 である。

同様の方法で 2009 年と 2010 年でも行った。こちらも 1 年での劣化を図 2-5 に示す。

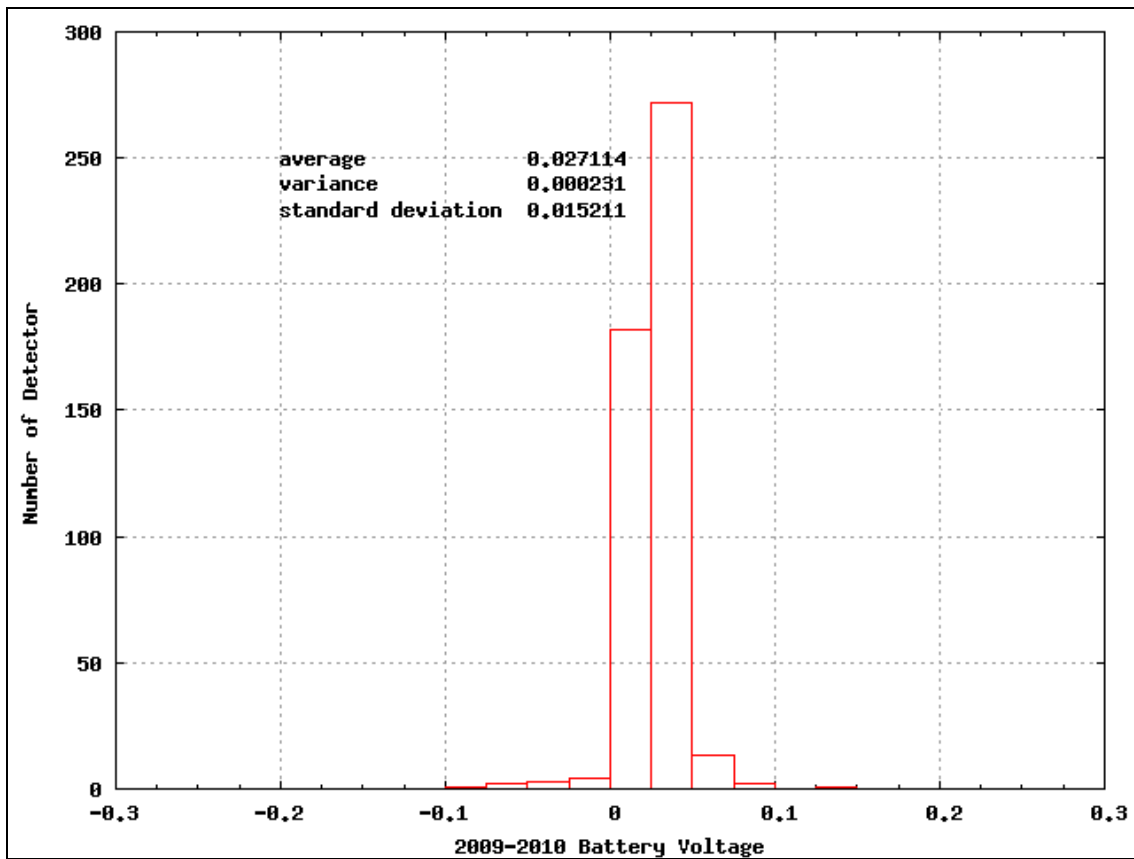


図 2-5 2009 年から 2010 年での劣化

図 2-5 より SD480 台の 2009 年から 2010 年の 1 年でのバッテリー劣化は平均 0.027 である。

2008 年から 2009 年の 1 年での劣化と、2009 年から 2010 年の 1 年での劣化の比を図 2-6 に示す。横軸は比、縦軸は台数である。

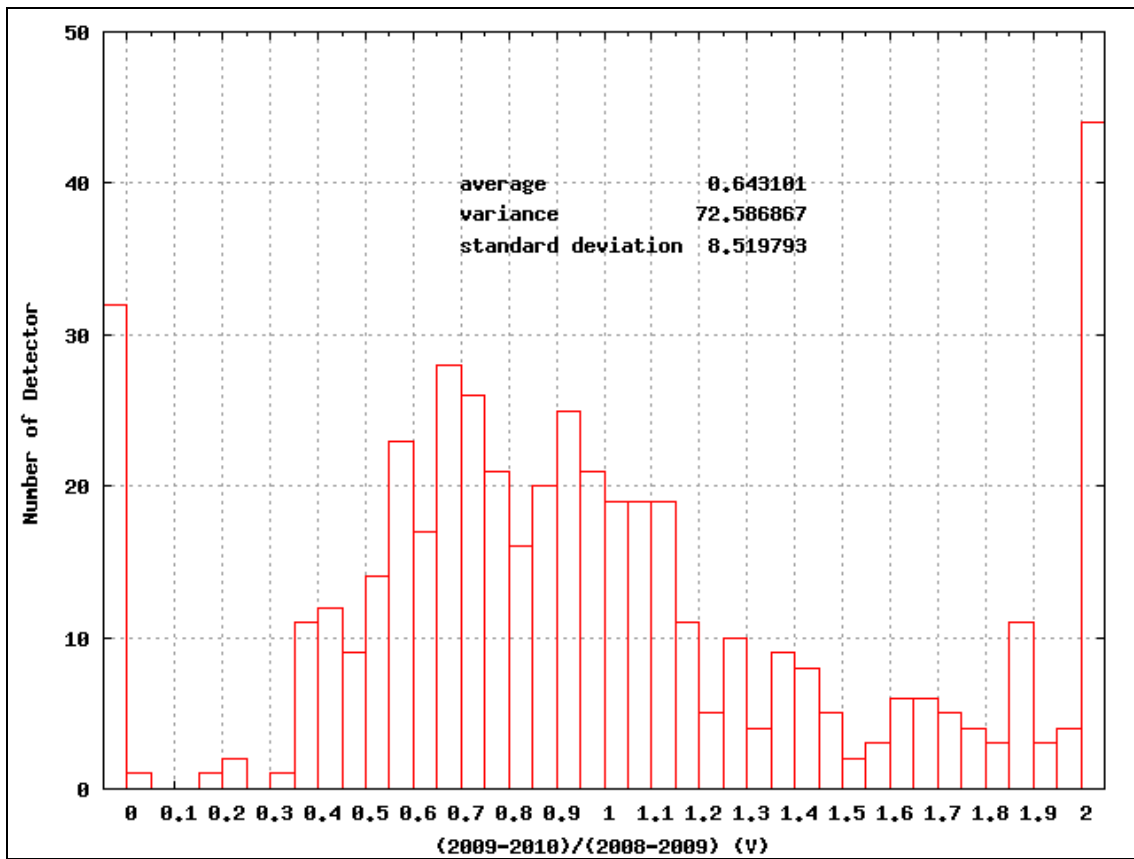


図 2-6 比のヒストグラム

横軸の範囲を 0 から 2 としているが、実際はそれ以下の SD、またはそれ以上の SD もある。それらの SD は左端または右端の台数に含まれている。比が 1 に近い値ならば 2008 年から 2009 年の劣化と 2009 年から 2010 年の劣化が直線的に劣化しているといえる。1 から大きく外れている SD は、2008 年から 2009 年ではほとんど劣化せず（赤線と青線が重なっている）2009 年から 2010 年にかけて大きく劣化したものである。0 以下のマイナスの値をとったものは、青線が赤線よりも高い切片をとったものである。

## 2-5 2010年冬季の推定電圧値とその評価

2008年、2009年のデータをもとに2010年冬季の電圧値を推定する。推定結果と2010年の実データの電圧値を評価する。

推定を行うSDは交換歴のないもの、そしてデータを正常に取得できている480台である。

### 2-5-1 推定・評価方法

2008年冬季、2009年冬季の電圧と温度の回帰直線をそれぞれ求める。2008年から2009年のある一定温度における電圧値の低下を、2009年の電圧値から引いたものを2010年の推定電圧値とする。

推定に使用するデータ

- ・2008年10月、11月、12月、2009年1月の放電終了電圧とその時のバッテリー温度
- ・2009年10月、11月、12月\*、2010年1月の放電終了電圧とその時のバッテリー温度

ただし、図2-7に示されたように2009年12月10～14日のデータは気温が $-20^{\circ}\text{C}$ 近くになり、バッテリーが低温になったため、温度との相関からずれると判断したため使用しないことにした。

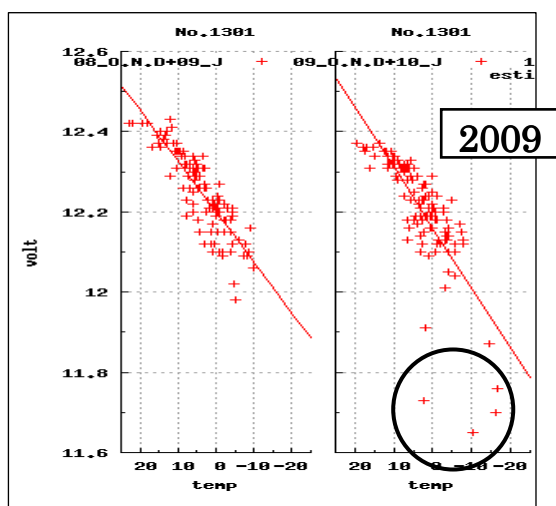


図2-7 使用しないデータを含んだ場合

2010年冬季の実データから電圧と温度の回帰直線を求め、2010年の推定電圧値との差を10℃、0℃、-10℃、-20℃においてそれぞれ求めて比較して評価する。

評価に使用するデータ

- ・2010年10月、11月、12月\*、2011年1月の放電終了電圧とその時のバッテリー温度

ただし、図2-8にしめされたように2010年12月18～23日、26～31日のデータは悪天候により十分な充電がされていないため、劣化による電圧値の低下と判断できないため使用しないことにした。

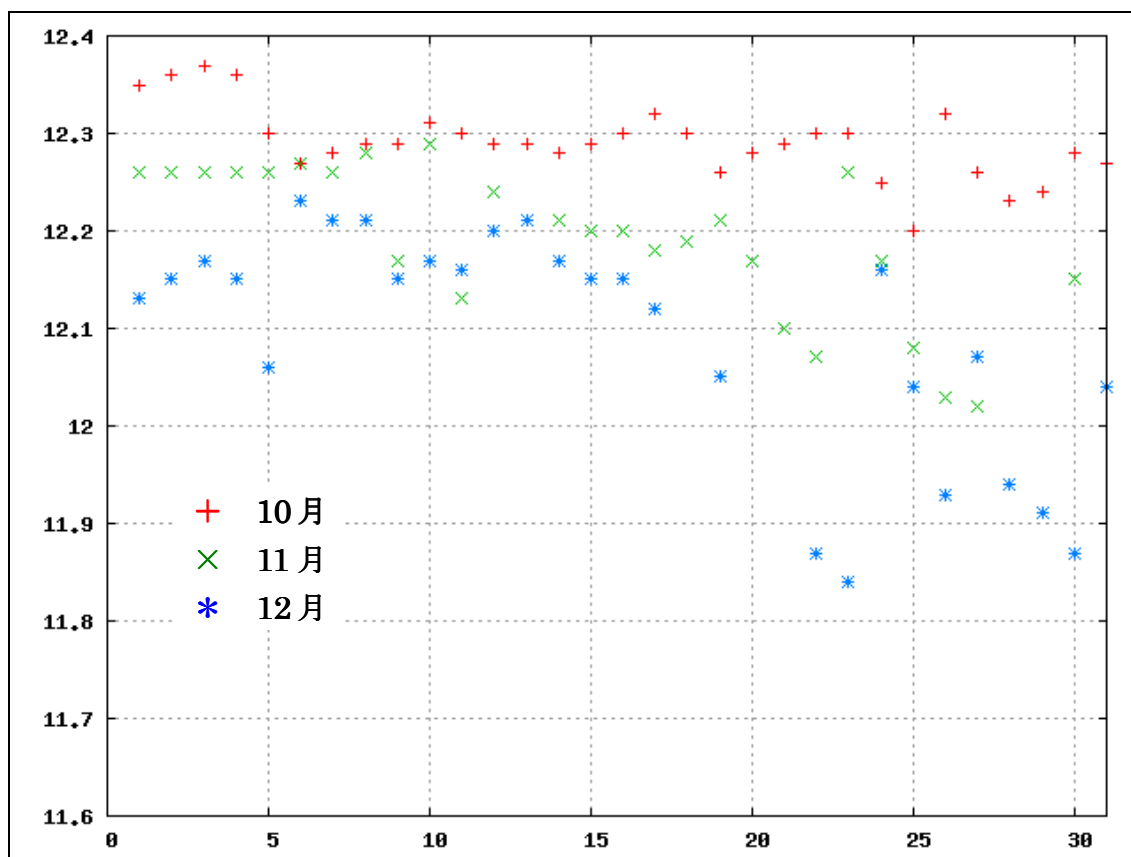


図2-8 2010年10～12月の毎日の放電終了電圧推移  
(横軸：日付、縦軸：電圧値)



天候の判断は、表 2-2 に示された米国海洋大気庁の米国気候データセンターの記録を参考にしたものである。

表 2-2 2010 年 12 月 18～31 日の天候

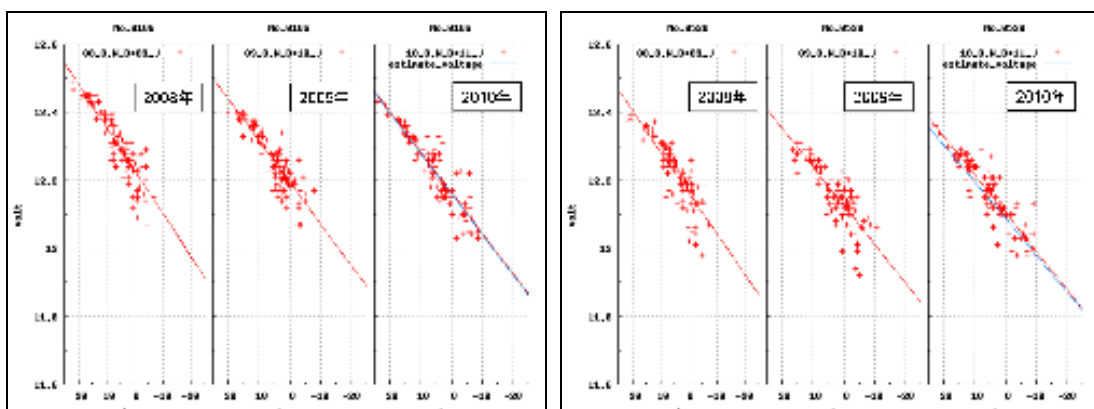
日付	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
天候	雪	晴	雪	雪	雨	雨	晴	晴	雨	雨	雨	晴	雪	晴

### 2-5-2 バッテリー推定電圧値の例

図 2-9 に 2-5-1 の推定法による SD 4 台の例を示す。

縦軸に電圧値[V]、横軸に温度[°C]を表している。図の左から順に 2008 年冬季、2009 年冬季、2010 年冬季を表している。赤いデータ点は毎日の放電終了電圧とその時のバッテリー温度であり、赤い直線はそれをもとに求めた回帰直線である。2010 年冬季のグラフにある、青い直線は 2008 年と 2009 年から推定された回帰直線である。推定結果の評価は 10°C、0°C、-10°C、-20°C における赤線と青線の差で行った。両線の差が 0 に近いほど正しい推定が出来ていえるといえる。

図 2-9 (左上) の No.0106 の SD の結果では、10°C、0°C、-10°C、-20°C でも赤線と青線の差はなく、正しい推定ができていえるといえる。



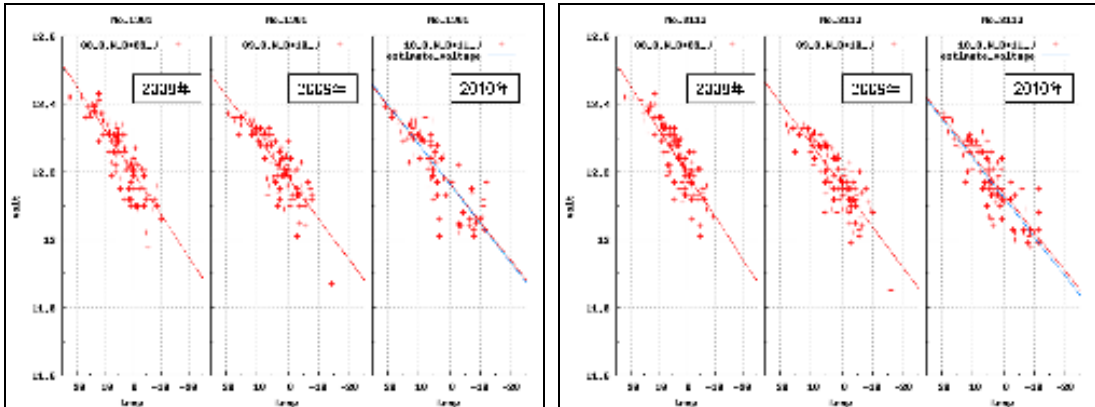


図 2-9 2010 年冬季の電圧と推定

2010 年の青線は 2008 年と 2009 年のデータから推定したもので、  
赤線は実際のデータから最小二乗法で求めたものである。  
(左上:No.0106 右上:No.0520 左下:No.1301 右下:No.2113)

### 2-5-3 SD 全台の推定電圧値とその評価

2-5-1 の推定方法を用いて SD480 台に対して 2010 年冬季の推定を行った。2010 年冬季の推定結果と実データから求めた電圧値との差を 10℃、0℃、-10℃、-20℃の一定温度でどれだけ差があるかで評価した。

図 2-10～図 2-13 に 10℃、0℃、-10℃、-20℃の各温度における差をヒストグラムで順番に表している。

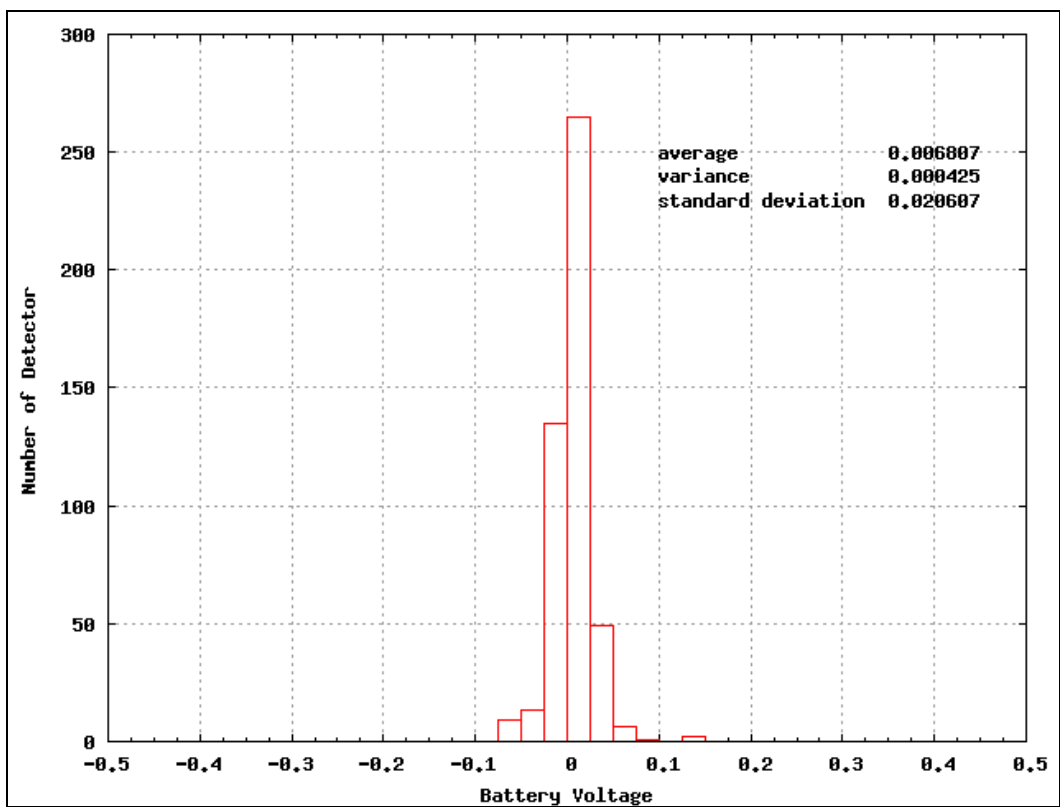


図 2-10 10°Cにおける推定値の評価

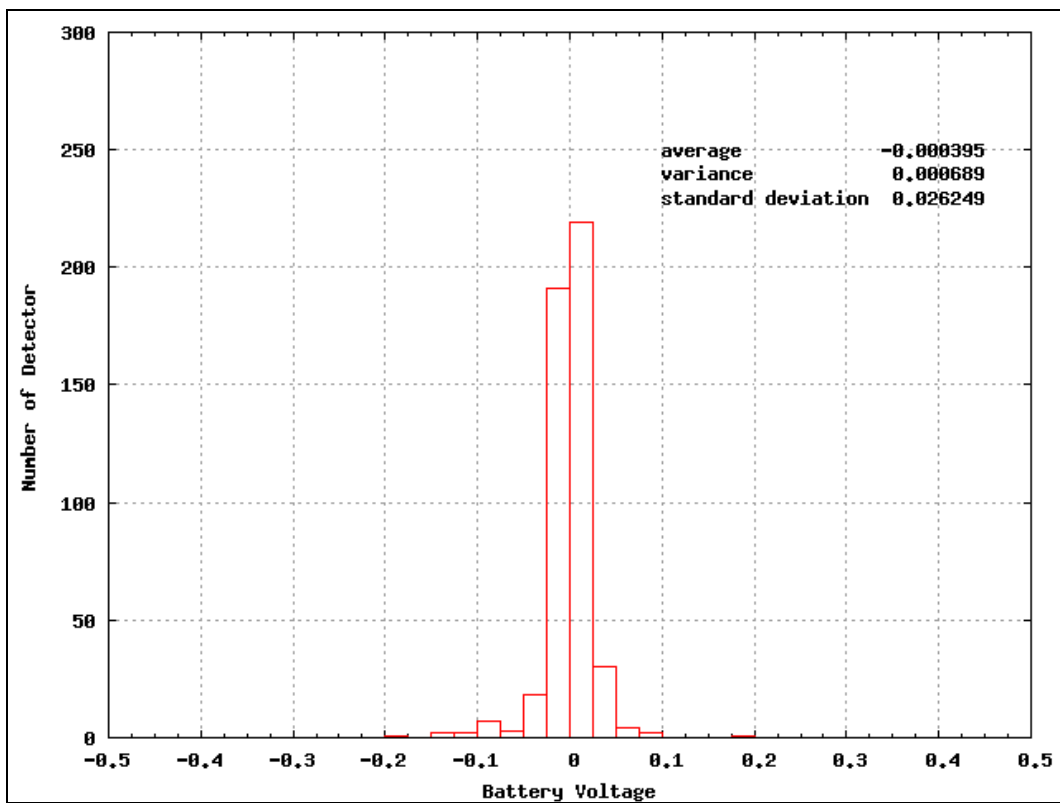


図 2-11 0°Cにおける推定値の評価

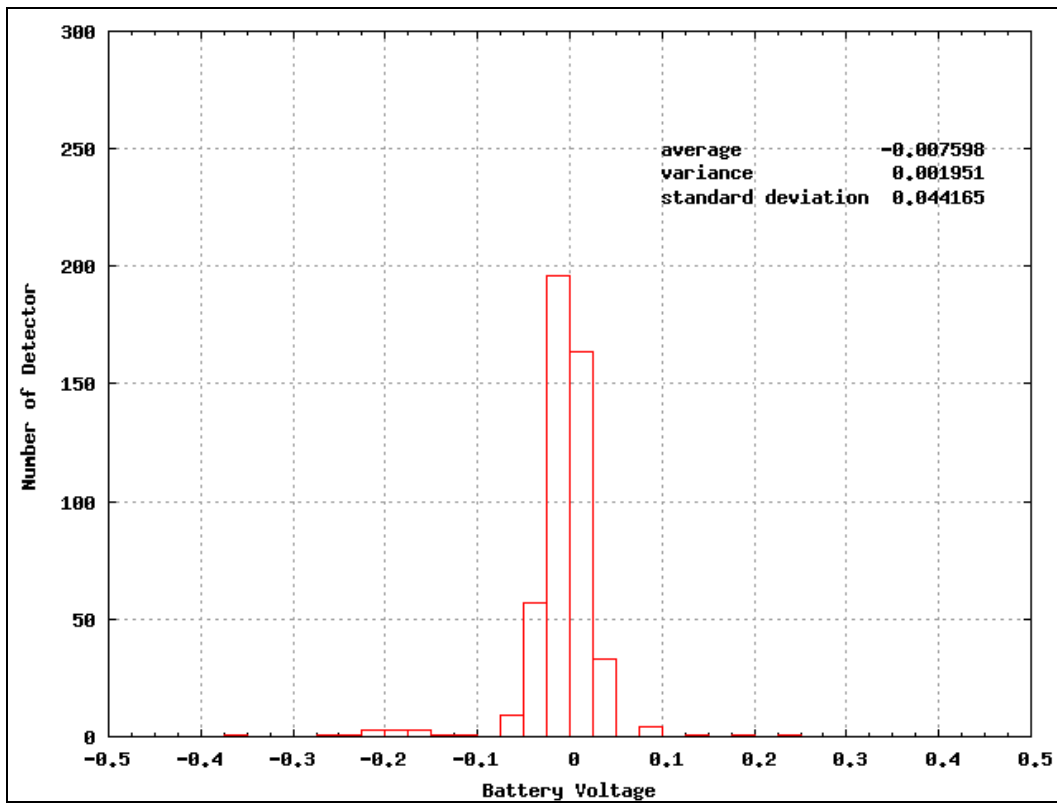


図 2-12 -10°Cにおける推定値の評価

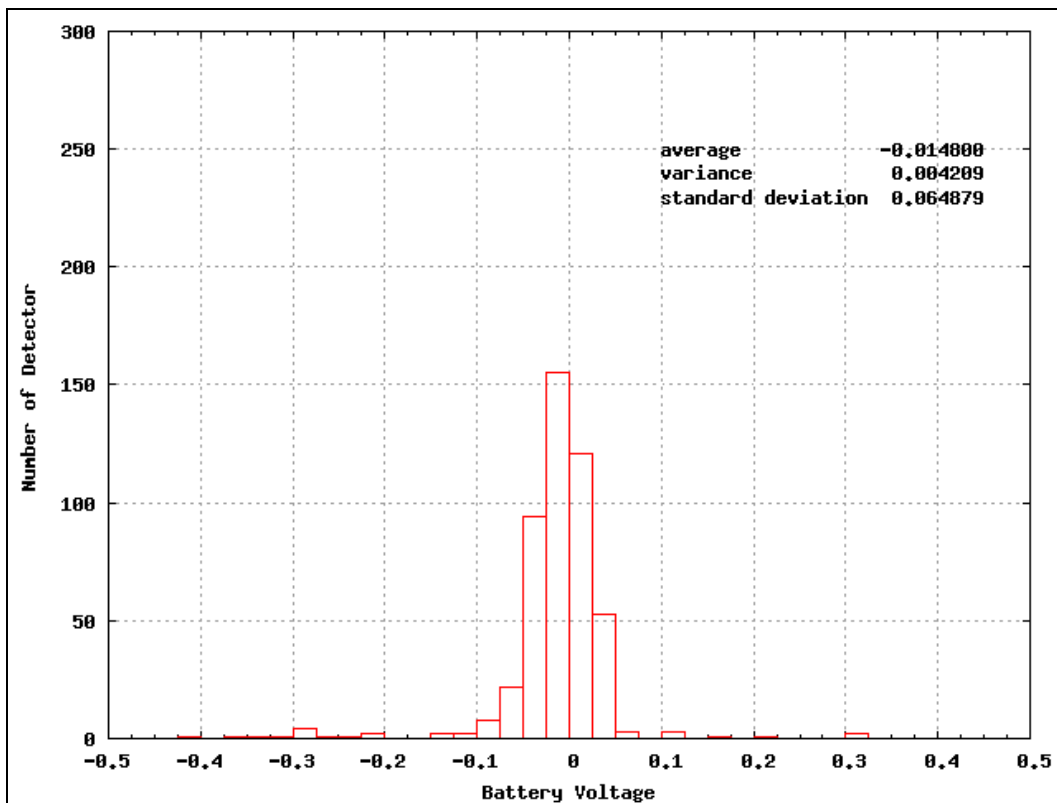


図 2-13 -20°Cにおける推定値の評価

どの温度においても、推定値と実データとの差は平均で 0.01V 程度であり、良い推定が出来ているといえる。評価の方法は（実データ）－（推定電圧値）であるため、プラスは実際の方が高かったということである。

推定値と実際の電圧値の差が大きくとも、プラスになっている分には問題ない。しかし、推定電圧値より実際のデータが低くなっているとき、具体的には図 2-12 の-10℃のとき約 -0.4V 実際の電圧値が推定値より下がっているものがあった。-10℃の電圧値をほぼ 12.0V と考えると電圧値は 11.6V となりチャージコントローラが停止する 11.5V に近くなる。

## 2-6 2011 年冬季の電圧値推定

2008 年、2009 年、2010 年のデータをもとに 2011 年冬季の電圧値を推定した。加えて推定結果をもとに 2011 年冬季を迎える前に交換が必要な SD の総数とリストを作成した。推定を行う SD は交換歴のないもの、そしてデータを正常に取得できている 480 台である。

### 2-6-1 推定方法

2008 年冬季、2009 年冬季、2010 年冬季の電圧と温度の回帰直線をそれぞれ求める。2008 年から 2009 年のある一定温度での電圧値の低下と 2009 年から 2010 年のある一定温度での電圧値の低下を平均した値を、2010 年の電圧値から引いたものを 2011 年の電圧値とした。これまで、研究室で行ってきたバッテリーの温度特性は、バッテリーが劣化してもそれ程変化していないことがわかっているので、この仮定はそれほど問題ではないと思われる。

推定に使用するデータ

- ・ 2008年10月、11月、12月、2009年1月の放電終了電圧とその時のバッテリー温度
- ・ 2009年10月、11月、12月\*1、2010年1月の放電終了電圧とその時のバッテリー温度
- ・ 2010年10月、11月、12月\*2、2011年1月の放電終了電圧とその時のバッテリー温度

\*1 12月10～14日のデータは気温が-20℃近くになり、バッテリーが低温になったため、温度との相関からずれると判断したため使用しないことにした。

\*2 12月18～23日、26～31日のデータは悪天候により十分な充電がされていないため、劣化による電圧値の低下と判断できないため使用しないことにした。

天候の判断は米国海洋大気庁の米国気候データセンターの記録を参考にしたものである。

## 2-6-2 閾値の決定

ここでは、推定されたSDが何Vを下回ったら交換する必要があると判断するか、閾値を決定する。図2-14に推定では使用しない2009年12月10～14日のデータを含めた図を示す。2009年冬季のグラフにおいて、0℃から-10℃付近で急激に電圧値が低下しているのがわかる。これは一度、-20℃まで低下したバッテリーがクーラーボックス内の温度が上昇してもバッテリーは低温状態のままになっていたため、電圧と温度の相関にずれが生じていると考えられる。

これらのデータは通常の劣化に比べ、その時の気温により急に約0.35V低下している。さらに、2-5-1で述べたように2010年12月18～23日、26～31日のように悪天候が続くと約0.3V、平均より低下していたことが分かる。そこで、閾値を稼働停止の11.5Vとするのではなく、11.85Vとする。

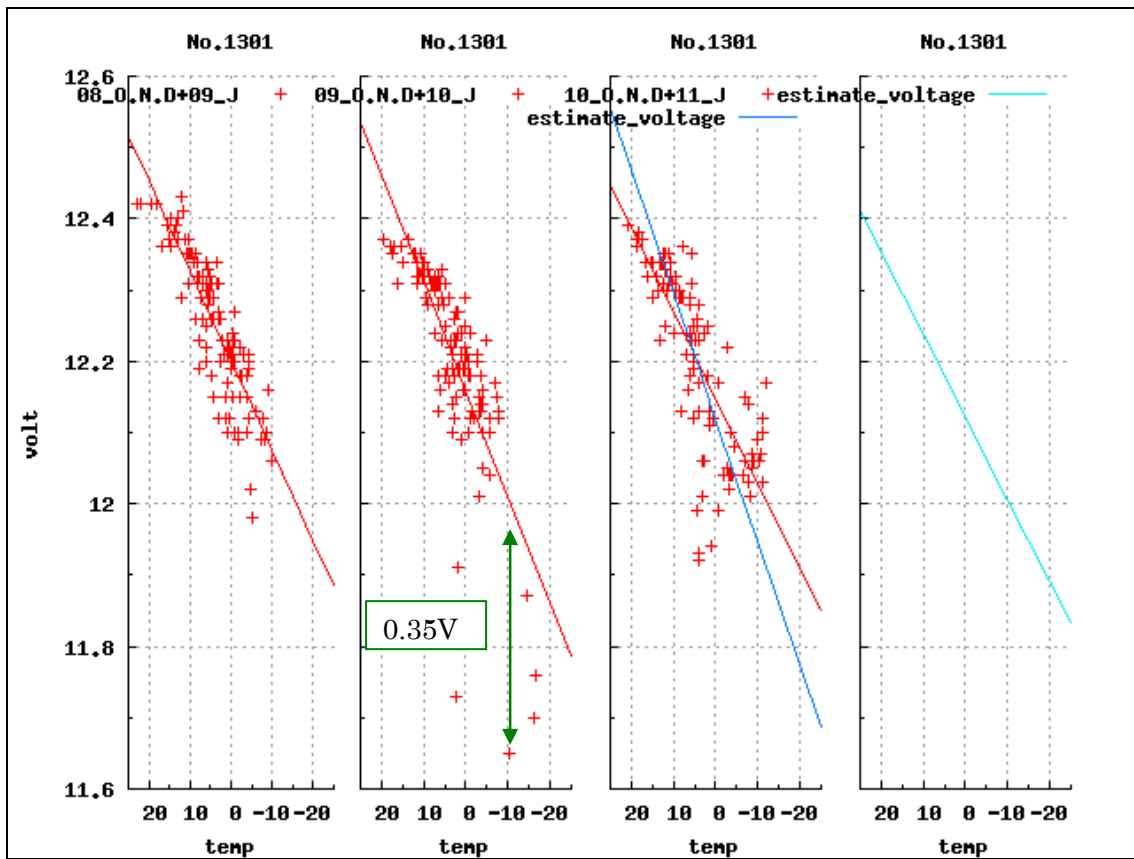


図 2-14 電圧と温度の相関にずれが生じている場合(No.1301)

### 2-6-3 推定電圧値の例

図 2-15 に 2-6-1 の推定法による SD の例を示す。

縦軸に電圧値、横軸に温度。図の左から順に 2008 年冬季、2009 年冬季、2010 年冬季、2011 年冬季を表している。赤いデータ点は毎日の放電終了電圧とその時のバッテリー温度であり、赤い直線はそれをもとに求めた回帰直線である。2011 年冬季のグラフにある、水色の直線は推定された回帰直線である。

この図をもとに 2011 年冬季に、ある一定の温度で何 V になるのかが推定できる。例として図 2-15 (左上) の No.0106 の SD においては、 $-20^{\circ}\text{C}$  で約 11.89V であるので、交換の必要があるといえる。

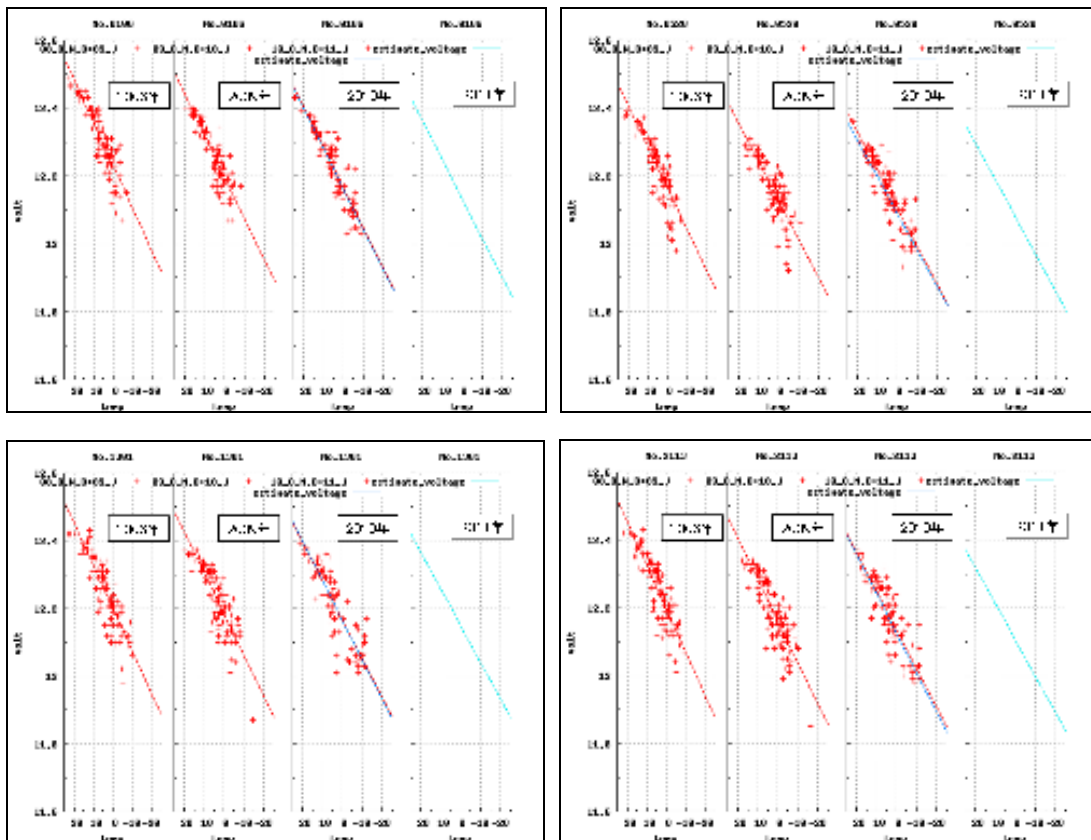


図 2-15 2011 年冬季の推定電圧値  
 2011 年の水色の線が推定電圧値である。  
 (左上:No.0106 右上:No.0520 左下:No.1301 右下:No.2113)

### 2-6-3 推定された電圧値の場所別表示

2-6-1 の推定法で SD480 台の 2011 年冬季の電圧値を推定した。図 2-16 には-10℃での推定電圧値の分布図を示し、図 2-17 には-15℃での推定電圧値の分布を示した。これまで 3 年分のデータから冬季においては、-20℃が最低温度であると判断し、この時に最も電圧が低下するので-20℃での推定電圧値を交換の目安の電圧値とする。その結果を図 2-18 に示す。それぞれの SD の推定した電圧値を場所別に色を変えて表示した。



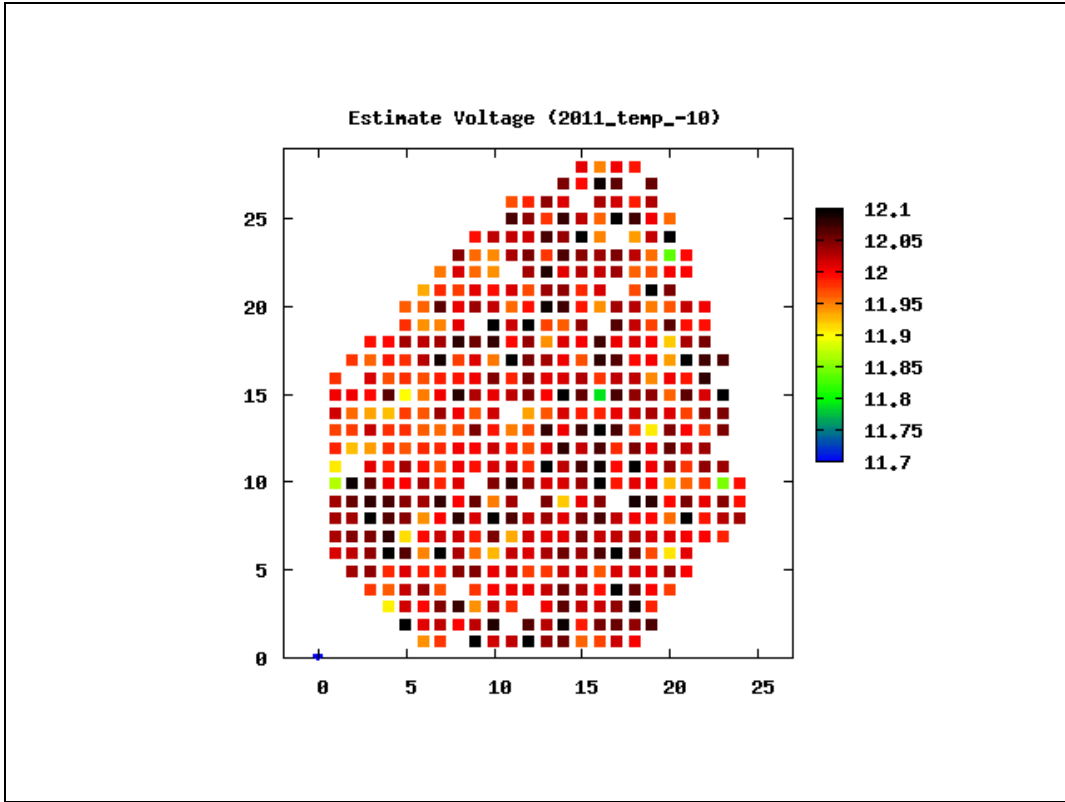


図 2-16 2011 年冬季の-10°Cでの推定電圧値マップ

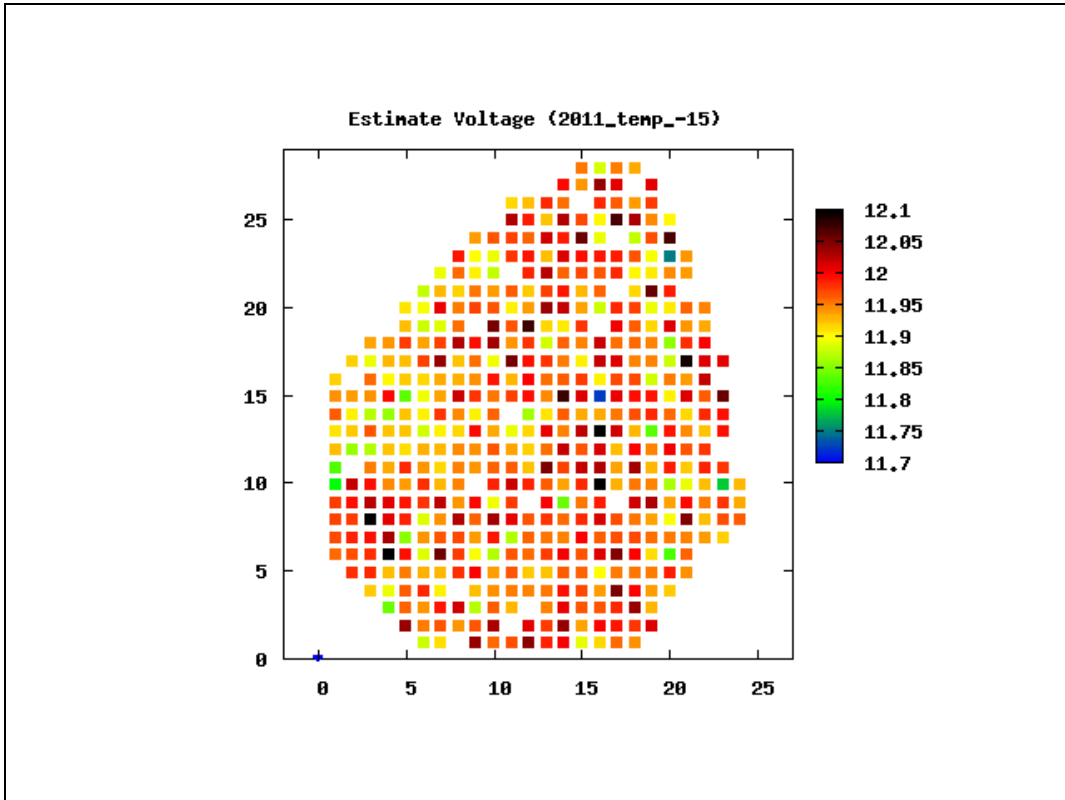


図 2-17 2011 年冬季の-15°Cでの推定電圧値マップ

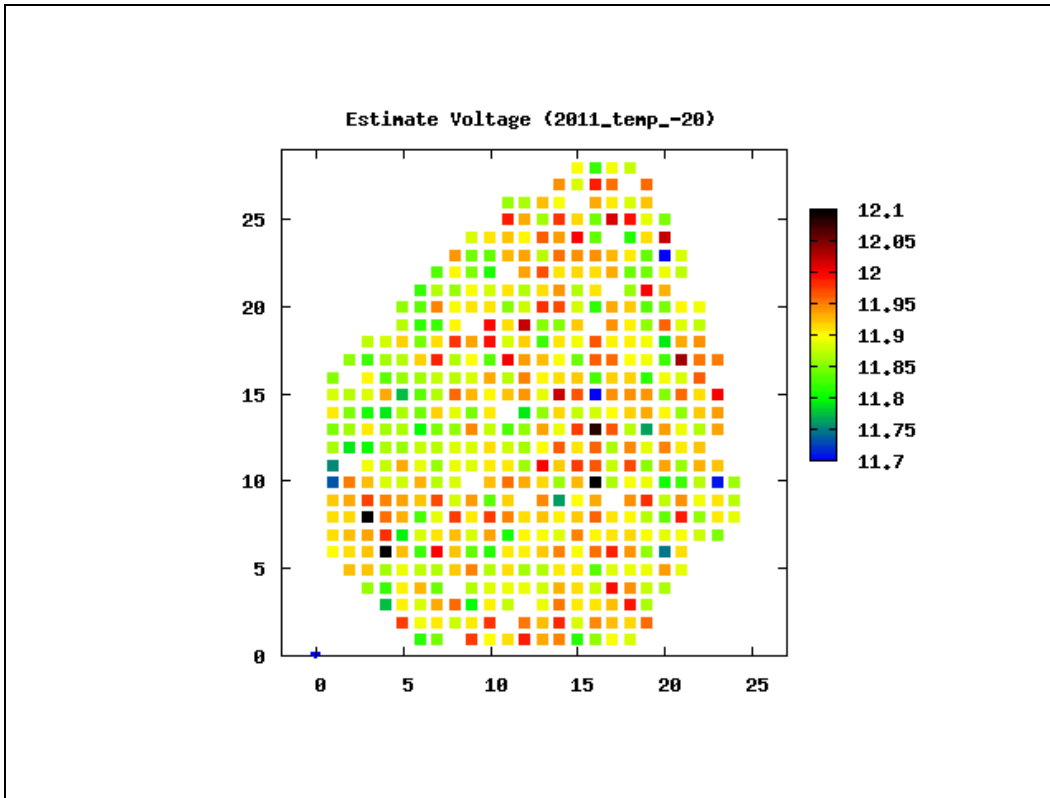


図 2-18 2011 年冬季の-20℃での推定電圧値マップ

表 2-3 カラーバーの意味

色	電圧値	備考
黒色	12.1V	交換の必要なし
赤色	12.0V	
黄色	11.9V	注意する必要がある
緑色	11.8V	2011 年冬季を迎える前に交換する必要あり
青色	11.7V	

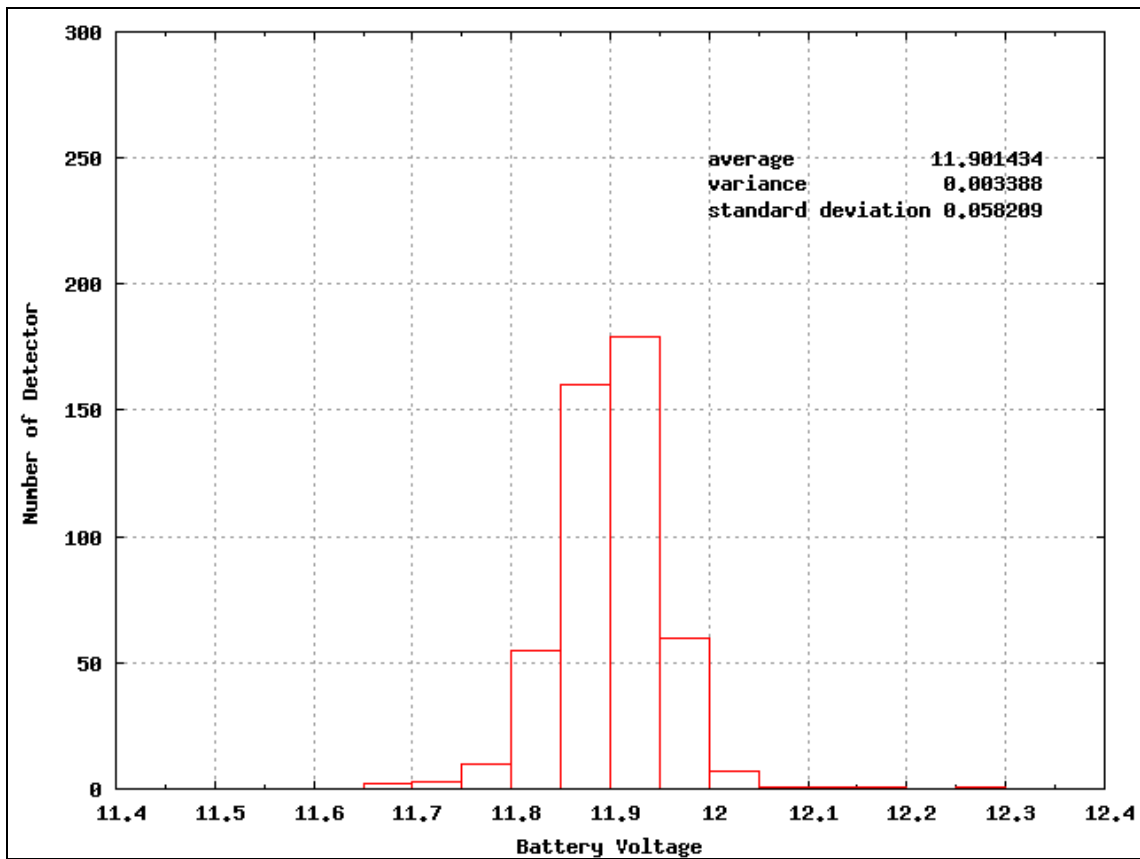


図 2-19 2011 年冬季の-20℃での推定電圧値とその台数

図 2-19 には推定した SD が何 V で何台あるのかを横軸に電圧、縦軸に台数をとって表した。

図 2-18 の分布図をみると、全体的に黄色から緑色が多い。閾値の 11.85V を下回った SD は 480 台中 70 台である。これらの SD に関しては、2011 年の冬季を迎える前に交換する必要があると考えられる。

## 第3章 結論

### 3-1 結論

- 一日のうち最も電圧が低下するのは、放電終了時である。
- 電圧と温度には相関がみられ、温度が低くなると電圧も低下する。
- 一年で最も電圧が低下するのは、冬季の放電終了時である。

#### 2010年の冬季の推定電圧値とその評価

推定した電圧値と実際の電圧値とを一定の温度において比較した。10°C、0°C、-10°C、-20°Cの4点で比較したところ、どの温度においてもその差の平均は0.01V程度であり、この程度の差なら問題ないといえる。しかし、推定には悪天候のデータを使用しておらず、また直線的にバッテリーが劣化していくと仮定した場合のみこの結果がいえるといえる。

#### 2011年冬季の推定電圧値

2011年冬季の電圧値を推定した結果、冬季を迎える前に交換が必要なSDは70台である。また、注意が必要なSDは160台である。

2011年の推定結果から、2012年冬季を迎える前には全SDを交換する必要があると考えられる。今回、この推定結果をもとに70台のSDを交換したとして、来年残りの約400台を一気に交換するのは予算や人手、時間の問題から非常に困難であると思われる。そこで、最終的に全台交換するのであれば、注意が必要であると判断した160台のSDを多く含むエリアを今回交換することを提案する。

一度の作業で230台のSDを交換することは不可能であるため、マップの青色のSDから優先的に作業していくことを提案する。

- 2011年冬季を迎える前に交換するSDは230台位が望ましい。

図3-1に閾値を下回り、絶対に交換が必要な70台のSD分布を示す。図3-2には交換すると決めた230台の分布を示す。表3-1にそれらのSD Numberをまとめる。

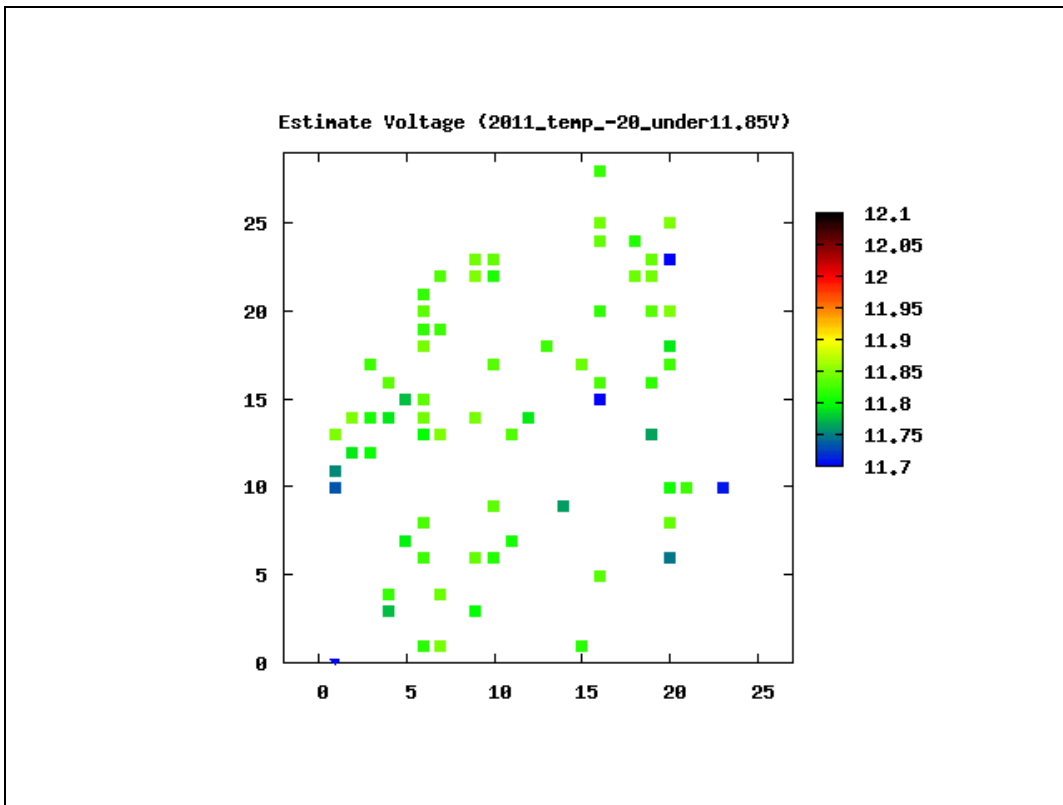


図 3-1 閾値を下回った絶対に交換が必要な 70 台の SD 分布

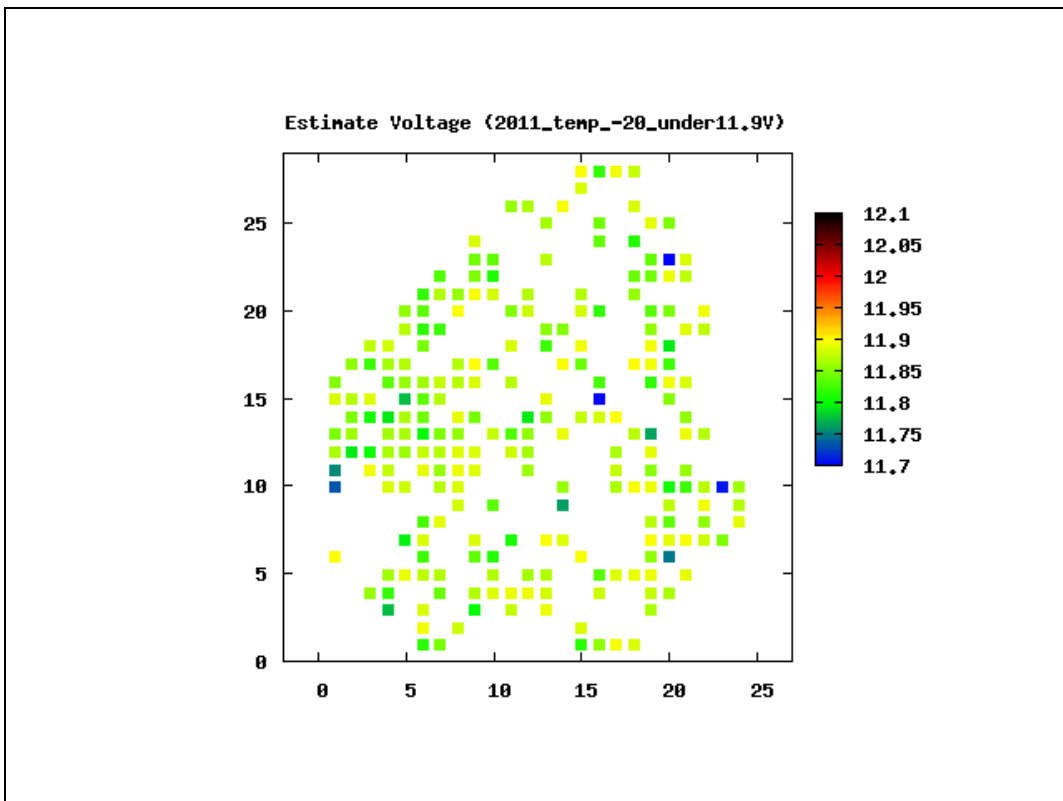


図 3-2 交換が必要な 230 台の SD 分布

表 3-1 交換が必要な SD Number

1615	1824	0620	2020	1821	1305	2122	0809	0315	0311
2023	1501	0416	2307	0711	0705	0318	1304	2119	2220
2310	0601	0615	2015	2111	1521	2219	0603	0611	1918
0110	1620	0906	1120	0516	0817	2009	2116	0814	2209
2006	0619	2008	0116	0616	2213	1103	1118	1925	1917
0111	1916	1624	1419	0213	0904	1711	0115	2105	1518
1409	1628	1023	1911	2410	0715	0716	0916	0708	2016
1913	0621	1923	1319	1211	0517	1013	1826	1315	1728
0403	0404	1822	1906	0405	1005	0411	1527	2007	1417
0515	2110	0704	1919	1205	0721	1828	1502	2408	2107
2018	0606	1517	0520	1325	1221	1514	0607	1912	1810
0212	2017	1922	1314	0413	0519	0612	0924	0505	1907
0414	1318	0923	2114	1212	0215	1904	0912	1303	0820
1214	0719	1625	0813	0417	1323	1112	0410	2022	1528
0507	0317	0614	1601	0513	0710	0802	0810	1805	1426
0613	0608	0701	0217	0412	2409	1220	2123	2113	1506
0903	1616	0618	1213	2004	0816	2207	0907	1910	0921
0312	0722	0914	2208	1226	1116	0510	1801	0811	1701
2010	1113	0922	1410	0112	1813	1604	0812	1204	1307
1107	1017	2025	1126	1710	2210	1520	0911	1413	1817
0314	1920	0214	0512	1712	0712	1614	1407	1905	1714
1022	1605	0113	0304	1903	1908	1021	1004	1104	0106
1006	1009	0713	0821	0514	0605	0418	1705	0602	0917

青い線で囲ってあるところは、図 3-1 に示した 11.85V を下回った 70 台の SD Number。

### 3-2 今後の課題

- ・推定の誤差をつける。
- ・過去における悪天候の日が続いたときの例をまとめる。
- ・効率のよい交換作業を検討する。

## 参考文献

山梨大学 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寿命に関する解析」

山口 隆二

「宇宙線望遠鏡計画における地表検出器の温度環境」

西盛 裕平



## 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。SDの解析においてご指導いた、東京大学宇宙線研究所の野中敏幸様に深く感謝いたします。

また同大学の本田建教授、富田孝幸さん、奥大介さん、柴田文哉さん、新聞健司さん、末木聖さん、利藤万鵬さん、秋山優太さん、町田和広さん、向井啓兒郎さん

本当に、ありがとうございます。